

# HPIS

## 高圧容器規格

Rules for Construction of High Pressure Vessels

HPIS C 106:20XX

20XX 年 XX 月 XX 日

一般社団法人日本高圧力技術協会  
High Pressure Institute of Japan

## (一社)日本高圧力技術協会 圧力設備規格審議委員会 構成表

	氏名	所属
(委員長)	高木 愛夫	(一社)火力原子力発電技術協会
(副委員長)	朝田 誠治	三菱重工業(株)
(委員)	木村 一弘	(国研)物質・材料研究機構
	加藤 久志	高圧ガス保安協会
	熊谷 知久	(一財)電力中央研究所
	佐々木 哲也	(独)労働安全衛生総合研究所
	小川 武史	青山学院大学
	吉川 暢宏	東京大学
	佐々木 駿介	東芝エネルギーシステムズ(株)
	児玉 正行	日本製鉄(株)
	石毛 健吾	(株)IHI
	宮崎 克雅	(株)日立製作所
	寺田 進	(株)神戸製鋼所
	石崎 陽一	出光興産(株)
	木附 登	(一社)日本ガス協会
	関口 優	東京ガス(株)
	小森 一夫	三井化学(株)
	小山 聡	住友化学(株)
	片岡 俊二	日揮グローバル(株)
	松田 宏康	(株)ベストマテリア
	土井 寛之	東洋エンジニアリング(株)
	佐藤 長光	(一財)発電設備技術検査協会
	高梨 正祐	(株)IHI 検査計測
(事務局)	丸尾 紀昭	(一社)日本高圧力技術協会
	田中 夕香子	(一社)日本高圧力技術協会

制定：2005年7月1日 改正：202X年XX月XX日

原案作成者：圧力容器規格委員会(委員長 弥富 政享)  
 高圧容器規格分科会(主査 寺田 進)

## 日本高圧力技術協会規格免責条項

この規格は、特定の専門、業種、所属に偏ることなく広く各界から参加した専門知識と関心を持つ委員による審議を経て(一社)日本高圧力技術協会が制定した。

(一社)日本高圧力技術協会は、この規格内容について説明する責任を持つが、この規格に従って行われた活動及び製造についてまでは保証しない。

(一社)日本高圧力技術協会は、この規格の利用の結果発生する第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任を負わない。この規格の利用者は、この規格に関連した活動の結果発生する第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任は利用者にあることを認識して、この規格を使用する責任を持つ。

なお、この規格の審議、制定に関係官庁、産業界の関係者が参加したことをもって、この規格が関係官庁及び産業界によって承認されたと考えてはならない。

## アメリカ機械学会との著作権に関する同意事項

The High Pressure Institute of Japan has translated portions of the ASME BPVC Section VIII, Division 3 - 2021 by The American Society of Mechanical Engineers, with the prior written consent of the ASME Codes & Standards Department at third issue in 2023.

No additional translation or reproduction may be made of this material without the prior written consent of ASME.

(一社)日本高圧力技術協会は、2023年版発行時にアメリカ機械学会(ASME)が著作権(c2021)を保有する ASME ボイラ及び圧力容器規格、ASME CODE Section VIII Division 3:2021 の一部を ASME 基準規格部の事前の文書による同意を得て翻訳した。ASME の事前の書面による同意なしに、ASME CODE Section VIII Division 3 より引用した部分の追加の翻訳又は複写を行ってはならない。

なお、この規格で†の印を施している箇所は、ASME CODE Section VIII Division 3 の翻訳又は複写を示している。

## 高圧ガス保安協会との著作権に関する同意事項

(一社)日本高圧力技術協会は、2023年版発行時に高圧ガス保安協会が著作権を保有する超高压ガス設備に関する基準 KHKS 0220(2004)及び KHKS 0220(2020)の下記の図及び規定内容を高圧ガス保安協会の事前の文書による同意を得て転載した。高圧ガス保安協会の事前の書面による同意なしに、超高压ガス設備に関する基準より転載した部分の翻訳又は複写を行ってはならない。

HPIS C 106:20XX	KHKS 0220(2004)	KHKS 0220(2020)
P.22 及び P. 23, 5.4 f) SUS304 及び SUS316 冷間加工材の 強度低下係数 式(5.4.2), 式(5.4.3), 式(5.4.6), 式(5.4.7)	—	P.61 及び P.62, 附属書 B 図 B.2, 図 B.3
P.61 及び P.62, 6.3.6 10 <sup>8</sup> 回に対する許容応力振幅	P.14 及び P.15, 4.4.7 (6)	—
P.64, 図 6.3.2 高強度低合金鋼の設計疲労曲線	P.17, 図 2	—
P.68, 図 6.3.6 SUS630 系ステンレス鋼の設計疲労 曲線	P.21, 図 6	—
P.69, 図 6.3.7 インコネル 718 の設計疲労曲線	P.22, 図 7	—
P.70, 図 6.3.8 2-1/4Cr-1Mo-1/4V 鋼の設計疲労曲 線	P.23, 図 8	—
P.72, 図 6.3.10 表面粗さによる影響係数 $K_r$	—	P.46, 図 10
P.121~P.123, 6.13.5 材料の水素適合性	—	P.72~P.77, 附属書 E E.3.1~E.3.3, E.3.4.2
P.125, 6.13.8 水素誘起割れに対する下限界応力拵 大係数 $K_{IH}$ 決定の試験方法	—	P.79~P.80, 附属書 E E.5.2
P.125, 6.13.9 疲労亀裂進展試験	—	P.80~P.81, 附属書 E E.6.2

HPIS C 106:20XX	KHKS 0220(2004)	KHKS 0220(2020)
P.解 25, 解説図 6.3.3 KHK と表記した設計疲労曲線	P.17, 図 2 (実線の設計疲労曲線)	—
P.解 26, 解説図 6.3.4(a)及び(b) KHK と表記した設計疲労曲線	P.17, 図 2 (実線の設計疲労曲線)	—
P.解 31, 解説図 6.3.10 及び 6.3.11 KHK と表記した設計疲労曲線	P.17, 図 2 (実線の設計疲労曲線)	—
P.解 33 及び P.解 34, 6 q) 6.3.5 b) 4) 設計許容繰返し回数の決定	P.158 及び P.159, 4.4.7 b) 1.7)	—
P.解 36~P.解 38, 解説表 6.3.2 高強度低合金鋼, SUS630 系ステン レス鋼, インコネル 718 及び 2-1/4Cr -1Mo-1/4V 鋼の設計疲労曲線の繰返 し回数と応力振幅値	P.156 及び P.157, 表 設計疲労曲 線のデータ 図 2, 図 6, 図 7 及び図 8 の設計 疲労曲線の繰返し回数と応力振幅 値	—

## まえがき

この規格は、一般社団法人日本高圧力技術協会の圧力容器規格委員会、高圧容器規格分科会が原案を作成し、圧力設備規格審議委員会の審議及びパブリックコメントを経て、理事会により承認された日本高圧力技術協会規格である。

これによって、**HPIS C 106 : 2013** は改正され、この規格 **HPIS C 106 : 20XX** に置き換えられた。



# 目次

	ページ
序文 .....	1
1 一般要求 .....	2
1.1 適用範囲 .....	2
1.2 適用条件の明確化と品質マネジメントシステム .....	3
2 この規格の構成 .....	5
2.1 この規格の本体 .....	5
2.2 附属書 .....	5
3 引用規格 .....	5
4 用語の定義 .....	8
5 材料 .....	8
5.1 材料一般 .....	8
5.2 材料の機械試験 .....	9
5.3 ボルトの追加規定 .....	19
5.4 材料設計データ .....	20
6 設計 .....	46
6.1 設計一般 .....	46
6.2 基本的な設計要求 .....	48
6.3 疲労評価 .....	58
6.4 破壊力学評価 .....	74
6.5 自緊を用いた設計 .....	78
6.6 穴、ふた板、鏡板、ねじ継手、シールの設計 .....	82
6.7 アタッチメント、サポート、外部ヒーティング/クーリングジャケットの設計 .....	86
6.8 多層容器の追加規定 .....	89
6.9 線巻き容器と線巻きフレームの追加規定 .....	102
6.10 溶接容器の設計要求 .....	107
6.11 実験的設計検証 .....	114
6.12 フランジ継手 .....	121
6.13 水素容器の特別要求 .....	121
7 製作 .....	128
7.1 製作一般 .....	128
7.2 溶接による製作に関する追加規定 .....	130
7.3 耐食クラッド、耐食肉盛溶接又は耐食ライニングに対する製作上の要求 .....	134
7.4 溶接部の熱処理 .....	136
7.5 自緊容器に対する製作上の追加規定 .....	158
7.6 焼入焼戻鋼に対する製作上の追加規定 .....	158
7.7 溶接制限のある材料の追加規定 .....	162

7.8	多層容器の特別製作規定	162
7.9	線巻き容器とフレームの特別製作規定	172
7.10	アルミニウム合金製容器の特別製作規定	172
7.11	時効硬化ステンレス鋼を溶接する場合の追加製作規定	172
8	過圧防止安全装置	173
8.1	過圧防止安全装置一般	173
8.2	破裂板	173
8.3	ばね安全弁	173
8.4	表示	174
9	非破壊試験	174
9.1	試験手順, 試験技術者の認定	174
9.2	耐圧部材の試験と材料補修	174
9.3	溶接部の試験と合格判定基準	182
9.4	圧力容器の最終試験	206
10	試験	206
10.1	試験一般	206
10.2	溶接された容器の衝撃試験	208
10.3	耐圧試験	209
11	表示	212
附属書 A(規定)	品質マネジメントシステム	214
附属書 B(規定)	用語及び記号の定義	216
附属書 C(規定)	破壊力学計算	231
附属書 D(規定)	応力-ひずみ曲線	250
附属書 E(規定)	穴補強	256
附属書 F(規定)	交差穴の応力集中係数	261
附属書 G(規定)	円筒胴の平鏡板	264
附属書 H(規定)	クランプ継手の設計	270
附属書 I(規定)	溶接部の放射線透過試験の円形状指示模様合格基準	282
附属書 J(規定)	弾性解析を用いた評価方法	285
附属書 K(規定)	アルミニウム合金の切欠き引張試験方法	293
附属書 L(規定)	応力分類のための応力分布の線形化	306

**日本高圧力技術協会規格**  
**高圧容器規格**  
**Rules for Construction of High Pressure Vessels**

**序文**

近年、超高压容器が冷間等方加圧(CIP)／熱間等方加圧(HIP)加工、石油化学、産業廃棄物処理などの工業分野で数多く建設、運転されている。このような容器は、設計条件が超高压、高温、繰返し運転など厳しい環境にあり、従来の **ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 2** (以下、**ASME Sec. VIII Div. 2** と表記)より合理的な設計、製作、品質保証が可能な新しい超高压容器を対象とした規格の必要性が叫ばれてきた。このような産業界の要求に応じて、1997年5月に **ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 3** (以下、**ASME Sec. VIII Div. 3** と表記)が発行された。日本においても、日本高圧力技術協会 圧力容器規格委員会 高圧容器規格分科会を1997年10月より立ち上げ、**ASME Sec. VIII Div. 3** のバックグラウンドの調査などを行いながら、2005年に同様の規格を発行した。これまでに **ASME Sec. VIII Div. 3** の改正を担当している Sub Group on High Pressure Vessel Committee の Member に **ASME** より囑託され、当分科会からもいくつかの改正提案を行い、**ASME Sec. VIII Div. 3** 改正版として正式に発行されている。この規格は2005年に初版、2013年に第2版を発行した。その後 **ASME Sec. VIII Div. 3** も2年ごとに改正されており、その内容も含めて2023年に第3版を発行した。

この規格は **ASME Sec. VIII Div. 3 2021 年版**をベースとしているが、大きく異なっているのは次の2点である。

- a) 本体 **6.3** の疲労評価については分科会で検討した結果、**ASME Sec. VIII Div. 3** より高圧ガス保安協会の **KHKS 0220 (2004) 超高压ガス設備に関する基準**の評価手法を一部見直し、採用している。
- b) 適用材料については **ASME Sec. VIII Div. 3** で認められている材料に加えて、**JIS** 材料や **ASME Sec. VIII Div. 2** で認められている材料も適用可能とした。

**ASME Sec. VIII Div. 3 2021 年版**では、当分科会から提案した弾性解析の評価応力をトレスカ理論による応力強さからミーゼス理論による相当応力への変更が採用され、この変更も今回の改正に含めた。

この規格は円筒状圧力容器胴体部の肉厚と構造を決定する方法を示した **HPIS C-103-1989 超高压容器の設計指針**(この **HPIS** は2009年に廃番となった)とは異なり、**ASME Sec. VIII Div. 3** をベースとした高圧容器の設計、製作、試験、検査を規定した。胴部の肉厚計算式も **HPIS C-103-1989** は **Faupel** の破壊圧力に対して安全係数 **2.5** であるが、この規格では流動応力の破裂圧力に対して安全係数 **1.732** の違いがあり、全ての材料に対してこの規格の方が肉厚は薄くなる。

## 1 一般要求

### 1.1 適用範囲

#### 1.1.1 適用する圧力容器

この規格は、設計温度が原則として材料のクリープ温度未満で、一般に設計圧力が 70 MPa を超える圧力を保有する容器の設計、製作、試験、検査及び過圧防止に適用する。ただし、直火を受ける圧力容器は含まない。また、設計圧力が 70 MPa 以下の圧力容器に対しても適用を制限しない。圧力の発生源は次の **a)～d)** とする。

- a) 外部機器からの圧力
- b) 直接加熱／間接加熱によって発生する圧力
- c) 反応熱によって発生する圧力
- d) 上記 **a)**、**b)**、**c)** の組合せ

1.2.1 で要求される使用者設計仕様書により、圧力容器の供用期間中の運転及び保守管理が維持できるようにしたうえで、固定された位置に据え付けられる圧力容器を対象とする。

#### 1.1.2 圧力容器とする範囲

圧力容器とする範囲は、圧力容器本体(胴、鏡板、これに直結するノズルなど)及び次の **a)～f)** の部分とする。

- a) **外部配管とジャケット** 外部配管が圧力容器に接続される場合の範囲は、次の **1)～5)** とする。
  - 1) ねじ継手に対しては、最初のねじ継手まで
  - 2) ボルト締めフランジ継手に対しては、最初のフランジ継手まで
  - 3) フィティング継手に対しては、最初のシール部表面まで
  - 4) 溶接継手に対しては、最初の周継手まで
  - 5) ジャケット取付け部に対しては、取付け溶接継手まで
- b) 内部圧力配管(ただし、その破損が圧力容器の健全性に影響する場合)
- c) 圧力容器の内表面又は外表面に直接溶接される非耐圧部品
- d) 圧力を保持するふた又はふた板
- e) この規格が適用されないゲージや計測器のような小物の付属品については、最初のシール部表面
- f) 過圧防止装置

#### 1.1.3 この規格の適用範囲外の機器

次の **a)**、**b)** に示す圧力を保持する機器は、この規格の適用範囲外とする。ただし、次の機器もこの規格を準用してもよい。その場合には、使用者設計仕様書にその旨を明記する。

- a) 他の規格の適用範囲に該当する機器
- b) 次の **1)～7)** に示す回転式又は往復動式の機械装置と一体型又はそれを構成する圧力を保持する機器
  - 1) ポンプ
  - 2) 圧縮機
  - 3) タービン
  - 4) 発電機

- 5) エンジン
- 6) 水圧又は気圧シリンダー
- 7) 本来の機能が流体の移送である構造物(配管)

## 1.2 適用条件の明確化と品質マネジメントシステム

### 1.2.1 適用条件の明確化

次の a)～d)により、この規格の適用条件を明確にする。

- a) **一般** この規格を適用するに当たっては、圧力容器の使用目的、環境及び設計条件を明確にし、製品の品質を保証するために、次の b)の規定によって、圧力容器の使用者(使用者から委託された代理者を含む)は、品質管理要求事項を含む使用者設計仕様書を作成しなければならない。また、次の c)及び d)の想定によって、圧力容器の製作者は、使用者設計仕様書を満足していることを証明する製作者設計報告書及び製作者製作記録を作成しなければならない。
- b) **使用者設計仕様書** 使用者設計仕様書には、次の 1)～14)の事項を含める。
  - 1) 圧力容器の識別(機器番号、名称、機能、用途、使用流体)
  - 2) 圧力容器の形状(形状、縦置き又は横置き、呼びサイズ又は内容積、支持方法と場所、必要であれば基礎タイプと許容荷重、機器の機能とこの規格の適用範囲、製作者によって供給される機器、使用者によって供給される機器)
  - 3) 寸法[概略図、開口、接続部、閉止部(各々の数量、形式とサイズ、目的、位置、高さ、方位)]
  - 4) 設計条件(設計圧力、設計温度、設計圧力と温度の組合せ、最低設計金属温度、容器断面における温度勾配)
  - 5) 運転条件(異常状態も含めた運転温度に対応した運転圧力、異常状態も含めた加熱、冷却方法の提示、繰返し運転のデータ及び状態)
  - 6) 内部流体データ[相(液体、気体、混相)、比重、特殊な熱物性、入口/出口流体温度、流量、衝突流れ、有害性、危険性、可燃性の有無]
  - 7) 材料選択(環境要因による腐食割れを含めて、プロセス腐食に耐える適切な材料、腐食/侵食代、環境に晒されることによる選択された構造材料の起こりうる劣化に関する情報)
  - 8) 荷重(荷重条件のあらゆる組合せを明記しなければならない。この荷重データは計算、実験、類似条件での実測、解析、公表されたデータによって決定してもよい。荷重データのソースを明記する。)
  - 9) 繰返し運転条件
  - 10) 疲労解析[使用者は 6.3、6.4 の疲労評価、破壊力学評価に必要な情報を提供する責任がある。文書化された同様な設計、サイズ、材料特性、運転状態による経験を基に破裂前漏洩(LBB: Leak Before Burst)が確認できる場合、又は 6.1.14 により破裂前漏洩が確認できる場合は、使用者はこれを明示する。破裂前漏洩が確認できない場合は 6.4 により設計許容繰返し数を計算しなければならない。保護ライナーやプレストレスされた内部層のある圧力容器に関して、使用者は破壊モードとして板厚を貫通する漏洩が許容できるか否かを明示しなければならない。

- 11) 過圧防止(使用者は 8 に従って容器の過圧防止システムの設計、製作、設置をする責任がある。使用者設計仕様書に容器への接続部も含めてこのシステムを明記する。)
  - 12) 追加要求事項[使用者は容器の運転に対して、どのような追加要求事項があるかを使用者設計仕様書に明記しなければならない。非破壊試験、化学成分の制限、熱処理などの追加要求事項やこの規格の非強制や任意要求事項でもこの容器の設計には必須と考えられる事項、マーキングの特別要求やその位置、ふた又はふた板へのシールやボルトの要求事項、耐圧試験に関する追加要求事項(流体と温度の範囲、容器の姿勢、場所、清掃と乾燥)などである。]
  - 13) 据え付け場所(場所、管轄機関、検査代行機関、環境状態)
  - 14) 品質マネジメント要求事項(圧力容器の使用者は、品質マネジメントに関する日本工業規格の **JIS Q 9001** を用いて、発注形態に応じて品質マネジメント要求事項を作成し、使用者設計仕様書に含める。)
- c) **製作者設計報告書** 製作者は責任の一部として製作者設計報告書を作成し、圧力容器の使用者に提出しなければならない。これには次の 1)～5) を含めなければならない。
- 1) 完成状態までの変更を含め、図面に示される設計を確認する設計計算や解析。これらは使用者設計仕様書で明示された設計条件に対するこの規格の要求事項に適合させなければならない。
  - 2) 最終図又は完成図
  - 3) 製造中における加熱、熱処理の影響の考察資料。同時に、設計上で物性やプレストレスが影響を受けないような最高金属温度
  - 4) 製作者が取付けるふた板、ふた及び接続配管などが無い開口部
  - 5) 容器断面における温度勾配の制限値
- d) **製作者製作記録** 製作者は製作者設計報告書への適合を示すために、製作進捗に合わせた製作記録と非破壊試験報告書、補修、図面からの逸脱に関する文書を準備、収集、保持しなければならない。製作記録ファイルの索引は最新状態を反映させなければならない。

### 1.2.2 圧力容器の製作者の内部品質マネジメントシステム

圧力容器の製作者は、**JIS Q 9001** 及び**附属書 A** を参考にして内部の品質保証と品質管理を目的とした品質マネジメントシステムを確立し、文書化し、実施しなければならない。

この品質マネジメントシステムは、他社に製作を委託する圧力容器の部分、部品及び成形、非破壊試験、熱処理などの作業を含めて、圧力容器がこの規格の規定に従って製作されたことを証明できるシステムでなければならない。

### 1.2.3 圧力容器の製作者の品質保証

圧力容器の製作者は、1.2.2 による内部品質マネジメントシステムによって、1.2.1 b) 14) に規定する圧力容器の使用者の品質マネジメント要求事項を満足する品質管理を行わなければならない。圧力容器の完成後、品質記録も含めて、圧力容器がこの規格に従って製作されたことを証明する製作者製作記録を作成し、圧力容器の使用者に提出しなければならない(**附属書 A** の 2.11 を参照)。

## 2 この規格の構成

### 2.1 この規格の本体

この規格の本体は、次の 11 の章から成り立っている。

序文

- 1 一般要求
- 2 この規格の構成
- 3 引用規格
- 4 用語の定義
- 5 材料
- 6 設計
- 7 製作
- 8 過圧防止安全装置
- 9 非破壊試験
- 10 試験
- 11 表示

### 2.2 附属書

**附属書 A~L** は規格の主体となる事項であって、規格の構成上、特に取り出して本体に準じてまとめた強制規定である。

## 3 引用規格

次に示す規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格はこの規格の発行時の最新版(追補を含む)を適用する。次に示す規格が引用している規格に引用されている規格についても同様とする。

- JIS B 0190** 圧力容器の構造に関する共通用語
- JIS B 0209-1** 一般用メートルねじ — 公差 — 第1部：原則及び基礎データ
- JIS B 0209-2** 一般用メートルねじ — 公差 — 第2部：一般用おねじ及びめねじの許容限界寸法—中（はめあい区分）
- JIS B 0209-3** 一般用メートルねじ — 公差 — 第3部：構造体用ねじの寸法許容差
- JIS B 0210** ユニファイ並目ねじの許容限界寸法及び公差
- JIS B 0212** ユニファイ細目ねじの許容限界寸法及び公差
- JIS B 1181** 六角ナット
- JIS B 1251** ばね座金
- JIS B 1256** 平座金
- JIS B 7721** 引張試験機・圧縮試験機 — 力計測系の校正方法及び検証方法
- JIS B 8210** 安全弁
- JIS B 8225** 安全弁—吹出し係数測定方法
- JIS B 8226-1** 破裂板式安全装置—第1部：一般

- JIS B 8226-2 破裂板式安全装置－第2部：安全弁との組合せ
- JIS B 8226-3 破裂板式安全装置－第3部：適用，選定及び取付け
- JIS B 8265 圧力容器の構造－一般事項
- JIS B 8266 圧力容器の構造－特定規格
- JIS B 8267 圧力容器の設計
- JIS B 8285 圧力容器の溶接施工方法の確認試験
- JIS G 0582 鋼管の自動超音波探傷検査方法
- JIS G 0584 アーク溶接鋼管の超音波探傷検査方法
- JIS G 0587 炭素鋼鍛鋼品及び低合金鋼鍛鋼品の超音波探傷試験方法
- JIS G 0801 圧力容器用鋼板の超音波探傷試験方法
- JIS G 0802 ステンレス鋼板の超音波探傷検査方法
- JIS G 0803 溶接鋼管溶接部のフィルム式放射線透過検査方法
- JIS G 0804 溶接鋼管溶接部のデジタル式放射線透過検査方法
- JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材
- JIS G 3115 圧力容器用鋼板
- JIS G 3120 圧力容器用調質型マンガンモリブデン鋼及びマンガンモリブデンニッケル鋼鋼板
- JIS G 3127 低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板
- JIS G 3203 高温圧力容器用合金鋼鍛鋼品
- JIS G 3204 圧力容器用調質型合金鋼鍛鋼品
- JIS G 3206 高温圧力容器用高強度クロムモリブデン鋼鍛鋼品
- JIS G 3221 クロムモリブデン鋼鍛鋼品
- JIS G 3222 ニッケルクロムモリブデン鋼鍛鋼品
- JIS G 3460 低温配管用鋼管
- JIS G 4051 機械構造用炭素鋼鋼材
- JIS G 4053 機械構造用合金鋼鋼材
- JIS G 4107 高温用合金鋼ボルト材
- JIS G 4108 特殊用途合金鋼ボルト用棒鋼
- JIS G 4110 高温圧力容器用高強度クロムモリブデン鋼及びクロムモリブデンバナジウム鋼鋼板
- JIS G 4303 ステンレス鋼棒
- JIS G 4901 耐食耐熱超合金棒
- JIS G 4902 耐食耐熱超合金，ニッケル及びニッケル合金－板及び帯
- JIS H 4100 アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材
- JIS Q 9000 品質マネジメントシステム－基本及び用語
- JIS Q 9001 品質マネジメントシステム－要求事項
- JIS Z 2241 金属材料引張試験方法
- JIS Z 2242 金属材料のシャルピー衝撃試験方法

- JIS Z 2243-1 ブリネル硬さ試験－第1部：試験方法
- JIS Z 2243-2 ブリネル硬さ試験－第2部：硬さ値表
- JIS Z 2316-1 非破壊試験－渦電流試験－第1部：一般通則
- JIS Z 2316-2 非破壊試験－渦電流試験－第2部：渦電流試験器の特性及び検証
- JIS Z 2316-3 非破壊試験－渦電流試験－第3部：プローブの特性及び検証
- JIS Z 2316-4 非破壊試験－渦電流試験－第4部：システムの特性及び検証
- JIS Z 2320-1 非破壊試験－磁粉探傷試験－第1部：一般通則
- JIS Z 2320-2 非破壊試験－磁粉探傷試験－第2部：検出媒体
- JIS Z 2320-3 非破壊試験－磁粉探傷試験－第3部：装置
- JIS Z 2343-1 非破壊試験－浸透探傷試験－第1部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様のカテゴリ
- JIS Z 2343-2 非破壊試験－浸透探傷試験－第2部：浸透探傷剤の試験
- JIS Z 2343-3 非破壊試験－浸透探傷試験－第3部：対比試験片
- JIS Z 2343-4 非破壊試験－浸透探傷試験－第4部：装置
- JIS Z 2343-5 非破壊試験－浸透探傷試験－第5部：50℃を超える温度での浸透探傷試験
- JIS Z 2343-6 非破壊試験－浸透探傷試験－第6部：10℃より低い温度での浸透探傷試験
- JIS Z 3060 鋼溶接部の超音波探傷試験方法
- JIS Z 3070 鋼溶接部の超音波自動探傷方法
- JIS Z 3080 アルミニウムの突合せ溶接部の超音波斜角探傷試験方法
- JIS Z 3081 アルミニウム管溶接部の超音波斜角探傷試験方法
- JIS Z 3104 鋼溶接継手の放射線透過試験方法
- JIS Z 3105 アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法
- JIS Z 3106 ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法
- JIS Z 3801 手溶接技術検定における試験方法及び判定基準
- JIS Z 3811 アルミニウム溶接技術検定における試験方法及び判定基準
- JIS Z 3821 ステンレス鋼溶接技術検定における試験方法及び判定基準
- JIS Z 3841 半自動溶接技術検定における試験方法及び判定基準
- JSME S001 弾塑性破壊靱性 $J_{IC}$ 試験方法(増補第1版)
- KHKS 0220 超高压ガス設備に関する基準
- API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service
- API RP 941 Steel for Hydrogen Service at Elevated Temperature and Pressure in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. II, Part A, B, C, D
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. VIII Division 1
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. VIII Division 2
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. VIII Division 3
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. IX
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI

ASME B1.1	Unified Inch Screw Threads
ASME B16.5	Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS 1/2 through NPS 24 Metric/Inch Standard
ASME B18.2.2	Nuts for General Applications
ASME B31.3	Process Piping
ASME B46.1	Surface Texture(Surface Roughness, Waviness, and Lay)
ASTM A213	Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater and Heat Exchanger Tubes
ASTM A276	Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes
ASTM A564	Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Age-Hardening Stainless Steel Bars and Shapes
ASTM A1033	Standard Practice for Quantitative Measurement and Reporting of Hypoeutectoid Carbon and Low-Alloy Steel Phase Transformations
ASTM E399	Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials
ASTM E647	Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates
ASTM E1290	Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement
ASTM E1820	Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness
ASTM G142	Standard Test Method for Determination of Susceptibility of Metals to Embrittlement in Hydrogen Containing Environments at High Pressure, High Temperature, or Both
BS 7910	Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures

#### 4 用語の定義

この規格に使用する用語の定義は、JIS B 0190 によるほか、附属書 B による。

#### 5 材料

##### 5.1 材料一般

##### 5.1.1 耐圧部に用いる材料

この規格に基づく圧力容器の耐圧部に用いる材料は、次の a) ~d) による。

- a) この規格に定める規格材料は、表 5.4.1 と表 5.4.2 に示された材料とする。特に、異材の組合せの場合は、使用者は容器の用途に対する腐食速度や運転寿命への悪い影響のないよう考慮しなければならない。
- b) 材料規格の規定する寸法、厚さの制限を超える材料は、材料規格にある最も近いサイズ又は厚さの化学成分、機械的性質を満足する場合は使用してもよい。また、他の規格で、化学成分、機械的性質が 5.4 に示す材料規定と同等であることを示せば、同等材として使用しても

よい。

- c) この規格では、材料の疲労特性を設計段階で考慮するため、設計規定により疲労評価不要と判定される場合を除いて、**5.4** で設計疲労曲線が与えられている材料を使用する。使用する材料が **5.4** で与えられ、当該材料の設計疲労曲線が**表 5.4.1** に与えられていない場合には、その材料の疲労データより設計疲労曲線を得ることができれば、その材料を使用してもよい。
- d) この規格で許容される材料以外は、国際規格又は公的機関による認定規定により承認を受けなければならない(例えば、**ASME Sec. VIII Div. 3** 対象容器の **Code Case** など)。

### 5.1.2 製作者における材料試験及び熱処理の反復

**5.2** 及び材料規格で与えられる規定による。**7** で規定する焼入焼戻鋼以外は、熱処理の反復は必要ない。

### 5.1.3 材料製造者による証明

材料製造者は、使用材料が適用材料規格及び**5** に示す規定に従って製造されたことを証明しなければならない。材料製造者は全ての必要な試験結果の報告書を作成し、補修を含めた必要な試験、検査などが材料規格とこの規格の**5** と **7** の材料に関する規定に従って行われたことを記述した材料証明書を発行しなければならない。材料製造者は全ての材料規格及びこの規格の規定に対して、矛盾がある場合は、その旨記述し、補修など、その処置は**7** の規定を満足させなければならない。

### 5.1.4 半製作品及び成形品

付属品を除いて、完成容器の製作者以外から支給された耐圧部材の半製作品及び成形品においても、この規格の完成容器に係わる全ての要求規定を満足しなければならない。

### 5.1.5 標準耐圧部品

管、継手、フランジ、ノズル、溶接ネック、溶接キャップ、マンホールカバーなどの鍛造、転造、型鍛造により全体成形される標準耐圧部品は、**5.2** の規定により材料証明を行えばよい。この規格に示す **JIS** 又は **ASME** などの標準規格材料及び材料製造者の標準部品は、部品製造者の商標刻印及び規格に要求される表示をしなければならない。この表示で、製造者の証明及び材料規定への準拠を示すことになる。また、指定の圧力-温度のレーティングへの適合を示すことになる。ただし、**6.3** の疲労評価を満足する場合に限る。

### 5.1.6 標準外の耐圧部品

胴、鏡、取外し可能なドア、管コイルのような鍛造、転造、型鍛造により全体成形された標準外の部材は基本的に使用してもよい。これらの部材は、この規格で許された材料から製作されなければならない。これらの部材の製作者は、**5.1.3** の規定に従って材料証明書を準備しなければならない。これらの部材に対して、製作者名又は商標、及び材料証明書との照合ができる表示を行わなければならない。完成容器の製作者は、完成容器として規定される設計条件に対して、これら部材がこの規格の規定を満足していることを確認しなければならない。

## 5.2 材料の機械試験

**5.1** の規定に従って製作された材料は、材料規格及び次の機械試験規定を満足すれば、この規格に示す圧力容器に使用してもよい。

### 5.2.1 厚さの定義

厚さは、次の a)～c)に示す熱処理時の厚さ  $T$  とする。

- a) **板材** 短い断面方向の寸法とする。
- b) **鍛造品** 鍛造品の熱処理時の厚さは、次の 1)～5)による。
  - 1) **軸方向長さが半径方向厚さよりも大きい中空鍛造品** 最小内表面と最大外表面間の距離(半径方向厚さ)を厚さとする。ただし、フランジ(押し出し成形)で、その厚さが円筒部の厚さより小さい場合を除く。
  - 2) **軸方向長さが外径以下の円盤状鍛造品** 軸方向長さを厚さとする。
  - 3) **最大の軸方向長さが半径方向厚さよりも小さいリング鍛造品** 最大の軸方向長さを厚さとする。
  - 4) **矩形の中実鍛造品** 最小の矩形寸法を厚さとする。
  - 5) **円形、六角、八角の中実鍛造品** 直径又は対辺の距離を厚さとする。
- c) **棒及びボルト材** 棒及びボルト材の厚さは、円形棒は直径、矩形棒は断面寸法の短い方、六角形棒は平面間距離又は棒の長さの小さい方とする。

### 5.2.2 試験材及び試験片の採取方法

試験材及び試験片は、次の a)～d)に従って採取しなければならない。ただし、オーステナイトステンレス鋼及び非鉄合金に対しては、試験材、試験片の採取方法は適用する材料規格による。

- a) **板材** 板材の試験片採取方法は、次の 1)～3)による。
  - 1) **厚さ 50 mm 未満の場合** 試験片は当該材料の材料規格により採取する。
  - 2) **厚さ 50 mm 以上の場合** 試験片は当該材料の材料規格によるが、熱処理端面から  $T$  以上、板表面から  $T/4$  以上離す。
  - 3) **容器材料代表として別試験材とする場合** 試験片採取位置の冷却速度が製品の端面から  $T$  以上でかつ、表面からの距離が  $T/4$  以上の材料の冷却速度を代表できるに十分なサイズとする。ロット又は製品に適用する冷却速度が 5.2.5 により熱処理される場合以外は、試験材寸法は、 $3T \times 3T \times T$  以上とする。
- b) **鍛造品** 試験点(引張試験片ゲージ長さの中間又は衝撃試験片のノッチ下の部分)の位置は、次の 1)～5)による。また、焼入焼戻鋼の場合の試験点の位置は、焼入れ面に最も近い面からの距離と、受圧面又は高応力部のいずれかの焼入れ表面からの距離とが、同じかより離れたところとする。設計者は、鍛造品に関する本規定の範囲内で、試験点の位置を定義しなければならない。
  - 1) **最大焼入れ厚さ 100 mm 以下の場合** 鍛造品又は試験鍛造材の肉厚中心でかつ、焼入れ端面又は直近面から少なくとも  $2T/3$  の位置とする。
  - 2) **最大焼入れ厚さ 100 mm を超える場合** 焼入れ面に最も近い面から  $T/4$ 、かつ焼入れ端面又は直近面から  $2T/3$  の位置とする。
 

ただし、空中冷却をする時効硬化鋼及び析出硬化鋼(例えば、SA-564M Type 630, SA-453M Gr. 660, SA-638M Gr. 660, SA-705M Type 630, SA-564M Type XM-12 など)については、熱処理を受けた端部から直径又は厚さ方向に対して  $T/4$  の位置としてよい。
  - 3) **型鍛造又は熱処理前に、最終製品形状程度に機械加工される極厚又は複雑形状の鍛造品**

試験片は、製品材料の余長から主鍛造方向に平行に採取する。製作者が作成した図面に、最終製品が供用中に高い引張応力をうける表面を示す。試験片の採取位置は、この面とそれに最も近接した熱処理面との距離のうちで最大の距離以上、熱処理面から離れた位置で、かつ、第二の熱処理面から上記距離の 2 倍以上離れた位置とする。ただし、試験片の採取位置は、熱処理面から 19 mm 以上、第二の熱処理面から 38 mm 以上離れていなければならない。

- 4) 製作者の事前承認をもって、試験片は別鍛造材から次の 4. 1)～4. 3)により採取する。
    4. 1) 代表する製品材と同一溶鋼で、実質的に同程度の鍛造比及び加工を受ける。
    4. 2) 製品材と同一熱処理炉で、同一条件で熱処理する。
    4. 3) 製品材と同じ公称厚さである。
  - 5) **大型鍛造部品の場合** 試験材及び試験片の採取方法は上記 1)～4)による。必要な試験片の数は、5. 2. 6 a)及び 5. 2. 6 b)に従って鍛造部品の両端から採取する。ただし、その端部のいずれかは、鍛造部品全体の肉厚寸法を代表しなければならない。
- c) **棒材及びボルト材** 棒材及びボルト材の試験片の採取方法は、次の 1)、2)による。
- 1) **直径又は厚さが 50 mm 未満の場合** 適用材料仕様書の規定により試験片を採取する。
  - 2) **直径又は厚さが 50 mm 以上の場合** 試験点(引張試験片ゲージ長さの中間又は衝撃試験片のノッチ下の部分)の位置は、外側圧延面から最小  $T/4$  の所で、熱処理を受けた端部から  $2T/3$  以上離れていなければならない。ただし、空中冷却をする時効硬化鋼及び析出硬化鋼(例えば、SA-564M Type 630, SA-453M Gr. 660, SA-638M Gr. 660, SA-705M Type 630, SA-564M Type XM-12 など)については、熱処理を受けた端部から直径又は厚さ方向に対して  $T/4$  の位置としてよい。ここで、 $T$  は棒材及びボルト材の熱処理時の最大厚さである。
- d) **配管材** 配管材の試験片採取方法は、次の 1)、2)による。
- 1) **厚さが 50 mm 未満の場合** 適用材料仕様書の規定により試験片を採取する。
  - 2) **厚さが 50 mm 以上の場合** 適用材料仕様書の規定により試験片を採取する。試験片は、いずれの熱処理面からも配管最大板厚の  $1/4$  以上離し、かつ試験片端面は配管材の熱処理端から配管最大板厚以上離す。試験片は、全ての熱処理及び成形作業の完了後配管材の余長部から採取する。

### 5. 2. 3 シャルピー衝撃試験片

シャルピー衝撃試験片の採取方法は、次の a)～c)による。

- a) **ボルト材** ボルト材のシャルピー衝撃試験片の採取方法は、次の 1)～3)による。
  - 1) 10 mm×10 mm 標準試験片とし、ボルト材の軸方向に採取する。
  - 2) 1)が適用できない場合には、サブサイズ試験片を適用する。
  - 3) 1)と 2)が適用できない場合には、衝撃試験は必要ない。
- b) **溶接部を含まないボルト材以外の耐圧部材** 溶接部を含まないボルト材以外の耐圧部材のシャルピー衝撃試験片の採取方法は、次の 1)～4)による。
  - 1) 10 mm×10 mm 標準試験片とし、試験片の主軸が圧延時の最大伸び方向又は鍛造時の主加工方向に直角になるように採取する。ノッチ方向は、最大伸び方向又は主加工方向に

平行とする。10 mm×10 mm 標準試験片のノッチを確保するために、**図 5.2.1 (b-2)** に示す方法を用いてもよい。

- 2) 材料寸法又は形状により、材料から **1)** に示す標準試験片が採取できない場合は、試験片の主軸が最大伸び方向又は主加工方向に平行になるように採取してもよい。**図 5.2.1 (b-3)** に、その方法を示す。
  - 3) **1)** と **2)** が適用できない場合には、サブサイズ試験片を適用する。
  - 4) 最大採取可能なサブサイズ圧延方向試験片が試験片の幅 2.5 mm 未満である場合には、衝撃試験は必要ない。
- c) 溶接部を含む耐圧部材** 溶接部を含む耐圧部材のシャルピー衝撃試験片の採取方法は、次の **1)～3)** による。
- 1) シャルピー衝撃試験片の試験材は、その主軸が溶接継手に直角になるよう採取する。ノッチ方向は、溶接継手に平行とする。10 mm×10 mm 標準試験片のノッチを確保するために、**図 5.2.1** に示す方法を用いてもよい。
  - 2) **1)** が適用できない場合には、サブサイズ試験片を適用する。
  - 3) 最大試験片サイズが試験片の幅で 2.5 mm 未満である場合には、衝撃試験は必要ない。

#### 5.2.4 破壊靱性試験片

破壊靱性試験片の採取方法は、次の **a)～c)** による。耐圧部材の追加靱性規定は、**5.2.9** による。

- a) ボルト材** 予亀裂面はボルト軸に直角とする。
- b) ボルト材以外の溶接部を含まない耐圧部材** 予亀裂面は、圧延時の最大伸び方向又は鍛造時の最大加工方向に平行とする。
- c) 溶接部を含む耐圧部材** 予亀裂面は溶接継手方向に平行とする。

#### 5.2.5 別取り試験片の熱処理手順

熱処理された金属製品の代表試験片が熱処理前に切り出される場合、その代表試験片の熱処理時の冷却速度は製品の本体と同等か、又は早くならないようにする。この規定は、試験片を直接製品から切り出す場合にも適用する。次の **a)～d)** に示す一般的方法が全ての製品形状、試験片又は製品を代表する試験材に適用する。

- a)** 表面から材料の熱処理時の厚さ( $T$ )の  $T/4$  部位であり、かつ熱処理端面から  $T$  に等しい距離以上接近しない部位の試験片に、製品本体の熱処理時の冷却速度と合致する冷却速度を与えることが実証できれば、如何なる熱処理要領でもよい。試験片の熱処理時の冷却速度は、実際の部分のそれに対して如何なる場合も、温度差 15℃以内でなければならない。また、熱処理温度からの冷却後の全ての温度において、実体と試験片の時間差が 20 秒以内でなければならない。熱処理時の冷却速度は製造者と使用者の合意により、如何なる方法で行うか決定する。その方法は限定しないが、理論的計算、実験的方法、試験鍛造品の複製又はそれらの組合せを含める。
- b)** 製品端の早い熱処理時の冷却速度は、次の **1)～3)** により補償する。
  - 1) 試験片を焼入れ端から  $T$  以上離す。
  - 2) 試験片が採取される製品端に、最小  $T$  の幅の類似合金材を取付ける。
  - 3) 試験片を採取する製品端に、サーマルバリア又は保温材を使用する。

- c) 試験片の冷却速度コントロール装置が用意でき、a)の規定が合致するならば、試験片は製品を代表する冷却速度データにより熱処理を行う。
- d) 製作者は、材料を熱処理前にクラッド又は溶接オーバーレイする場合は、このような熱処理前にクラッド又はオーバーレイをしなければならない。

### 5.2.6 機械試験規定

引張及びシャルピーV ノッチ(CVN)衝撃試験は、圧力容器の構造に使用される全ての材料の代表試験材について行う。ただし、次に示す部材の衝撃試験については、5.2.7 で規定される衝撃試験によらず、その部材の材料規格に規定される衝撃試験による。

- ・ ナット、座金
- ・ 保護用ライニング
- ・ 耐圧部材の一体とならない部材

必要な試験片の数、引張試験方法及び衝撃試験方法は、それぞれ次の a)～c)による。

- a) **必要な試験片の数** 必要な試験片の数は次の 1)～3)による。
- 1) **熱処理重量が 454 kg 以下の部材又は材料** ヒート、チャージごとに、引張試験片 1 本と CVN 衝撃試験片一組(3 本)を採取する。
  - 2) **熱処理重量が 454～2, 270 kg の部材又は材料** 部材、板材、鍛造品ごとに、引張試験片 1 本と CVN 衝撃試験片一組(3 本)を採取する。ただし、試験用余長を除く長さが 2,030 mm を超える場合には、部材と鍛造品では、両端において 180°離れた位置で一組ずつ(計二組)の試験片を採取する。板材では、両端において対角位置から一組ずつ(計二組)の試験片を採取する。
  - 3) **熱処理重量が 2, 270 kg を超える部材又は材料** 部材、板材、鍛造品ごとに、引張試験片 2 本と CVN 衝撃試験片二組(各 3 本)を採取する。部材と鍛造品では、両端において 180°離れた位置で一組ずつ(計二組)の試験片を採取する。板材では、両端において対角位置から一組ずつ(計二組)の試験片を採取する。ただし、試験用余長を除く長さが 2,030 mm を超える場合には、両端において二組ずつ(計四組)、すなわち、部材と鍛造品では一端で 0°と 180°位置、もう一端で 90°と 270°位置から、板材では四隅位置から試験片を採取する。
- b) **引張試験方法** JIS Z 2241 による。
- c) **衝撃試験方法** 5.2.3 で許される場合を除いて、JIS Z 2242 に示す 10 mm×10 mm 標準試験片を用い、JIS Z 2243 により試験を実施する。

### 5.2.7 シャルピーV ノッチ (CVN) 衝撃試験規定

シャルピーV ノッチ(CVN)衝撃試験規定は、次の a)～c)による。

- a) **衝撃試験温度** 衝撃試験温度は、次の 1)、2)による。
- 1) 衝撃試験温度は、21℃及び最低設計金属温度(MDMT)の両方から、表 5.2.1 に掲げる試験片の幅に応じて同表の掲げる低減温度の値を減じた温度のいずれか低い方の温度を超えてはならない。
  - 2) 5.2.3 a) 3)、5.2.3 b) 4)及び 5.2.3 c) 3)で衝撃試験免除となる耐圧部材については、最低設計金属温度をオーステナイト鋼に対して-200℃、その他の材料に対しては-45℃より低くしてはならない。

- b) **吸収エネルギー値の合格基準** 吸収エネルギー値の合格基準は、次の 1)、2)による。
- 1) ボルト材以外の耐圧部材は、6.1 で除外される場合以外は、表 5.2.2 に規定する最小 CVN 衝撃値を満足しなければならない。
  - 2) ボルト材は、表 5.2.3 に規定する最小衝撃値を満足しなければならない。
- c) **横膨出及び延性破面率報告規定** 全ての衝撃試験に対して横膨出と延性破面率を測定し、その結果を試験報告に含めなければならない。

### 5.2.8 製作された部材の熱処理証明及び実証試験

材料及び圧力容器に施工する全ての熱処理(焼入れ、焼戻し、溶体化焼ならし、時効及びその他の材料特性に影響する副次的熱処理)により、必要とする特性が得られることを次の a)～c)の試験により証明しなければならない。証明のための試験が熱処理された断面を代表する試験片からなされる場合、試験材の位置及び取付け方法は、当該材料の材料規格の試験規定によりサイズ及び形状を考慮に入れて、全体を代表するようにしなければならない。

- a) **材料認定試験手順** 材料認定試験手順は、次の 1)、2)による。
- 1) 次の c)に合致するように、十分な数の試験材を各容器の材料のロットごとに準備しなければならない。これらは、容器又は容器部材と共に熱処理する。もし、各ロット材が熱処理前に焼入れされる部分と同じか、異なるロットの材料に溶接される場合、試験材は引張及び衝撃試験片が熱処理される部材に使用される板材の当該材料の材料規格に規定する厚さに対応した同じ位置から採取しなければならない。できれば、この距離の影響は適当なサーマルバッファの取付けにより得られるようにするとよい。このバッファの効果は、試験により実証する。
  - 2) 熱処理される部分に試験材が取付けられていない場合、それが代表する部分と同じ条件の元で、同熱処理チャージで焼入れする。試験片が上記 1)の位置から採取する。
- b) **焼戻し** 試験材の焼戻しは、次の 1)、2)による。
- 1) **取付け試験材** 試験材は、焼戻し熱処理中、容器又は容器部材に取付けたままにする。ただし、サーマルバッファは焼入れ後取外す。焼戻し工程後及び部材から取外した後、試験材に容器又は容器部材が受けるであろうと同じ熱的処理をする。指定の温度における保持時間は、容器又は容器部材が受ける以上(各温度での合計時間を一つの熱サイクルでかける場合を除いて)とし、冷却速度は早くてはいけない。
  - 2) **個別試験材** 上記 a) 2)に示すように、個別に焼入れされる試験材は、代表する容器又は部材と同等の焼戻しを行う。試験材がその後の熱的処理を受ける条件は、上記 1)による。
- c) **試験の数** 熱処理される各容器又は容器部材の材料の各ロットを代表する試験材から、次の 1)と 2)に示した引張試験片を 1 本、衝撃試験片を一組とする。ロットとは、同じヒートの部材又は同時に熱処理された材料で、材料の熱処理厚さの $\pm 20\%$ 又は 13 mm のいずれか小さい方の範囲の厚さを持つものと定義する。
- 1) 溶接を含まない試験片は、当該材料の材料規格の引張規定及びこの項の衝撃規定を満足しなければならない。
  - 2) 溶接金属を含む試験片は溶接を横断して採取し、当該材料の材料規格の必要な機械的性質を満足しなければならない。更に、溶接金属にノッチを入れた試験片で最小衝撃規定

を満足しなければならない。

引張試験片形状と寸法は、JIS Z 2241 による。衝撃試験は、10.2 による。

### 5.2.9 耐圧部材の追加靱性規定

6.4 により破壊力学評価を行う場合、解析に  $K_{IC}$  値が必要となる。設計者は、必要な  $K_{IC}$  値の最小値、施工する試験の数を規定しなければならない。更に、次の a)～d) のいずれかにより、材料がこの値を満足することを証明しなければならない。全ての試験片に対して、亀裂の進展方向は、6.4 による破壊力学評価で予測される亀裂進展方向と同じでなければならない。

- a) **CVN 衝撃試験** 設計者は、耐圧部材が必要とする最小  $K_{IC}$  値を満足させるために、5.2.7 b) に規定された値よりも高い最小シャルピー衝撃値を満足することを要求してもよい。追加の衝撃試験がなされるならば、この規格で規定される衝撃試験温度を超えない温度で、衝撃試験規定に従って行わなければならない。適切な  $K_{IC}$  - CVN 相関式を決定するのは設計者の責任であり、この式により  $K_{IC}$  値を求める(附属書 C を参照)。
- b) **CTOD(き裂先端開口変位)破壊靱性試験** 設計者は、CTOD 破壊靱性試験で CTOD 値を直接求めてもよい。CTOD 破壊靱性試験が必要な場合は、ASTM E1290 により行う。試験は 5.2.7 a) に規定された衝撃試験温度以下の温度で行い、表 5.2.1 の低減温度は適用しない。適切な  $K_{IC}$  - CTOD 換算式を決定するのは設計者の責任であり、この式により  $K_{IC}$  値を求める(附属書 C を参照)。
- c)  **$J_{IC}$  破壊靱性試験** 設計者は、 $J_{IC}$  破壊靱性試験で  $J_{IC}$  値を直接求めてもよい。 $J_{IC}$  破壊靱性試験が必要な場合は、ASTM E1820 又は日本機械学会基準の JSME S001 により行う。試験は 5.2.7 a) に規定された衝撃試験温度以下の温度で行い、表 5.2.1 の低減温度は適用しない。適切な  $K_{IC}$  -  $J_{IC}$  換算式を決定するのは設計者の責任であり、この式により  $K_{IC}$  値を求める(附属書 C を参照)。
- d)  **$K_{IC}$  破壊靱性試験** 設計者は、 $K_{IC}$  破壊靱性試験で  $K_{IC}$  値を直接求めてもよい。 $K_{IC}$  破壊靱性試験が必要な場合は、ASTM E399 により行う。試験は 5.2.7 a) に規定された衝撃試験温度以下の温度で行い、表 5.2.1 の低減温度は適用しない。

### 5.2.10 再試験

再試験は次の a), b) による。

- a) **一般再試験規定** 次の 1)～4) が引張、CTOD、 $J_{IC}$  及び  $K_{IC}$  破壊靱性試験に適用される。
  - 1) いずれの機械的理由、例えば、試験装置の故障、不適切な試験片の加工により適用合格基準に合致しなければ、結果を破棄して他の代表試験片による再試験を行ってもよい。
  - 2) いずれの試験片も非機械的な理由により適用合格基準に合致しない場合、最初の試験片の採取位置にできるだけ近い場所からの二つの代表試験片を取り、再熱処理をせずに、再試験を行ってもよい。
  - 3) 材料が再試験に不合格となった場合は、必要に応じて再焼戻し又は再熱処理を行い、一度だけの再試験が許される。
  - 4) 再試験の合格基準は、最初の試験の合格基準と同一とする。
- b) **CVN 衝撃再試験規定** 次の 1)～4) が CVN 衝撃試験に適用される。
  - 1) いずれの機械的理由、例えば、試験装置の故障、不適切な試験片の加工により適用合格

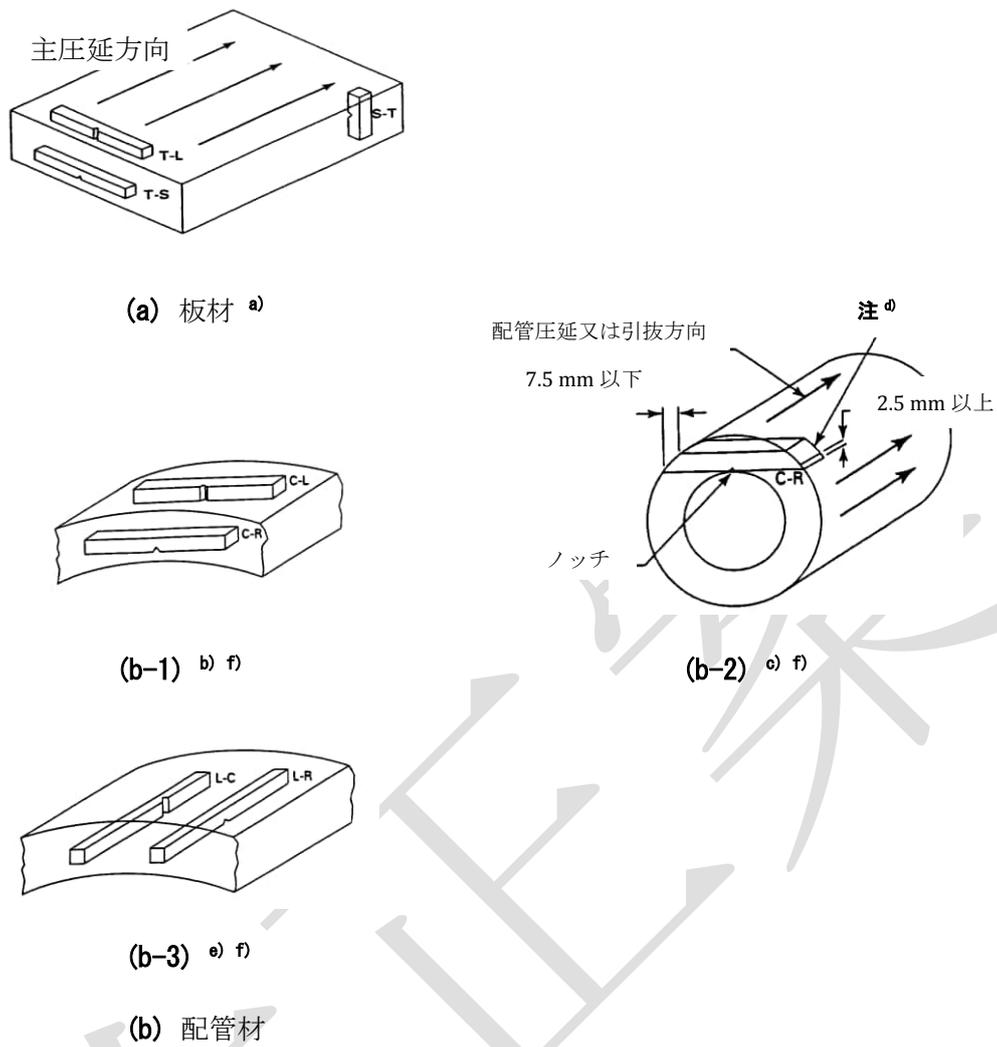
基準に合致しなければ、結果を破棄して他の代表試験片による再試験を行ってもよい。

- 2) CVN 衝撃試験の再試験は平均吸収エネルギー値が適用合格基準を満足し、1本の試験片の値が単独の試験片の規定最小値以下の場合に許される。再試験は最初の試験片の位置の両側のいずれかで可能な限り近い位置から採取した二つの代表試験片により行う。それぞれの再試験片の吸収エネルギー値は最小平均値以上でなければならない。
- 3) 材料が再試験に不合格となった場合は、必要に応じて再焼戻し又は再熱処理を行い、一度だけの再試験が許される。
- 4) 再試験の合格基準は、最初の試験の合格基準と同一とする。

#### 5.2.11 切欠き引張試験手順と許容基準

アルミニウム合金 UNS No. A96061 調質 T6 又は T651 は、引張試験及び切欠き引張試験を実施しなければならない。衝撃試験を実施する必要はない。ただし、破壊力学評価においては **6.4**、疲労評価においては **6.3.3** で与えられる材料特性及び設計データを用いる。切欠き引張試験と材料の認定は、次の **a)～d)** による。

- a) **附属書 K** の試験方法により、切欠き引張強さと降伏強さ(ここでは、平滑試験片で得られた降伏点又は 0.2%耐力)の比を決定する。試験片を製品容器から切断する。単一ヒートの材料を認定するために、製品容器から採取した切欠き付引張試験片と平滑試験片の各 2 本を用いて試験を実施する。全ての成形と熱処理を施工した後に、製品容器からサンプルを採取する。
- b) 試験片形状は、**附属書 K** の **図 K.3** 又は **図 K.5** の寸法要求を満足しなければならない。製品容器の長手方向の軸が試験片の長軸に平行となるように、試験片を切断する。**図 K.3** 又は **図 K.5** の寸法要求に対して、次の **1)** 又は **2)** の免除規定を適用してもよい。
  - 1) **図 K.3** の試験片に対して、50 mm 未満の試験断面幅を使用してもよいが、切欠き深さと試験片断面リガメント幅の比は 0.25 以上とする。試験片断面における厚さの制限を満足する必要はない。
  - 2) **図 K.5** の試験片に対して、12.5 mm 未満の試験断面径を使用してもよいが、切欠き深さと試験片断面リガメント径の比は 0.25 以上とする。
- c) 平滑試験片を用いて引張試験を行い、降伏点又は 0.2%耐力を求める [**a)** を参照]。
- d) 切欠き引張強さと降伏強さの比は 0.9 以上とする。切欠き引張強さと降伏強さの比を求めるときに使用する各試験片の結果は、切欠き付引張試験の結果においては、切欠き引張強さの小さい値を用いる。平滑試験片による引張試験においては、降伏強さの大きい値を用いる。



- 注<sup>a)</sup> 厚さ55 mm以上の板材については、S-T方向の衝撃試験片を採取してもよい。
- 注<sup>b)</sup> ノッチ方向は、C-L又はC-Rのいずれでもよい。
- 注<sup>c)</sup> 本図は、標準試験片の長さが採取できない円筒形小構成部材からの試験片の横方向採取の例を示す。
- 注<sup>d)</sup> シャルピー衝撃試験片の隅部は、図に示す寸法内で部材の輪郭に合わせてもよい。
- 注<sup>e)</sup> ノッチ方向は、L-C又はL-Rいずれでもよい。
- 注<sup>f)</sup> (b-1)に示すように、衝撃試験片採取ができない場合は、(b-2)による。  
(b-2)に示すように、衝撃試験片採取ができない場合は、(b-3)による。

図 5. 2. 1 CVN 衝撃試験片の採取例†

表 5.2.1 最低設計金属温度 (MDMT) からの衝撃試験低減温度<sup>†</sup>

衝撃試験片の幅 (mm)	低減温度 (°C)
10.00 (フルサイズ標準棒)	0
9.00	0
8.00	0
7.50 (3/4 サイズ棒)	3
7.00	4
6.67 (2/3 サイズ棒)	6
6.00	8
5.00 (1/2 サイズ棒)	11
4.00	17
3.33 (1/3 サイズ棒)	19
3.00	22
2.50 (1/4 サイズ棒)	28

注記 表示の値の中間値は比例計算によって求める。

表 5.2.2 耐圧部材に対する必要最小 CVN 衝撃値<sup>†</sup>

試験片方向	規定最小降伏点又は 0.2%耐力 $S_y$ に対する最小 CVN 衝撃値 (J)		
		$S_y \leq 930$ MPa	$S_y > 930$ MPa
主圧延方向に 直角な方向	3個の試験片の平均値	41	47
	個々の試験片の最小値	33	38
主圧延方向	3個の試験片の平均値	68	81
	個々の試験片の最小値	54	65

注記1 試験片方向の主圧延方向は、圧延時の最大伸び方向又は鍛造時の主加工方向である(5.2.3を参照)。

注記2 衝撃値は、10 mm×10 mm 標準試験片に対する値である。  
サブサイズ試験片の場合には、10 mm×10 mm 標準試験片の衝撃値に、  
(実試験片の幅)/(10 mm×10 mm 標準試験片の幅)の比を掛けた値とする。

注記3 全ての溶接金属及び熱影響部の衝撃試験片は、主圧延方向に直角な方向から採取した試験片とする。

注記4 溶接部を含む部材以外は、5.2.3による部材の形状又は寸法の制約から主圧延方向に直角な方向から試験片を採取できない場合には、主圧延方向から採取した試験片を使用してもよい。

注記5 再試験については、5.2.10による。

表 5.2.3 ボルト材に対する必要最小 CVN 衝撃値†

材料規格	試験片方向	公称ボルト寸法	規定最小降伏点又は 0.2%耐力 $S_y$ に対する 最小 CVN 衝撃値 (J)		
				$S_y \leq 930$ MPa	$S_y > 930$ MPa
ASME SA-320M	主圧延方向	50 mm以下	注記3	注記3	適用しない
その他	主圧延方向に 直角な方向	全寸法	3個の試験片の平均値	41	47
			個々の試験片の最小値	33	38

**注記1** 試験片方向の主圧延方向は、ボルトの軸方向である。

**注記2** 衝撃値は、10 mm×10 mm 標準試験片に対する値である。

サブサイズ試験片の場合には、10 mm×10 mm 標準試験片の衝撃値に、  
(実試験片の幅)/(10 mm×10 mm 標準試験片の幅)の比を掛けた値とする。

**注記3** ASME SA-320Mの場合は、衝撃試験温度の要求も含めて材料規格による。

**注記4** 再試験については、5.2.10による。

### 5.3 ボルトの追加規定

#### 5.3.1 適用範囲

この項は、ボルト、植込みボルト、ナット、座金などの金属製締結用部品材料について規定する。

#### 5.3.2 材料規格と降伏点又は 0.2 %耐力

ボルト、植込みボルトに使用する材料は、5.4 a) の規定による。各温度における降伏点又は 0.2% 耐力は、5.4 b) 2) の規定による。

#### 5.3.3 ボルト、植込みボルト、ナットの試験

ボルト、植込みボルト、ナットの試験は、9.2.8 を適用する。

#### 5.3.4 植込みボルトの形状

植込みボルトの形状については、6.6 を適用する。

#### 5.3.5 座金の使用

座金の使用は任意である。ただし、使用する場合、座金の材料は圧延材又は鍛造材を用いる。

#### 5.3.6 ナットと座金の材料

ナットの材料は、ASME Sec. II, Part A の SA-194M 又は次の JIS 材料を使用する。

JIS G 3101 SS400

JIS G 4051 S20C(N), S25C(N), S45C(N)

JIS G 4303 SUS304, SUS316, SUS321, SUS347

座金の材料は、ASME Sec. II, Part A の SA-194M 又は JIS B 1256 平座金、JIS B 1251 ばね座金の適用範囲記載の材料(鋼及びステンレス鋼)に準拠する。

#### 5.3.7 ボルトに対する要求

ボルトは、一旦仕上げて面取りを行った後、最終仕上げを行う。ボルトねじ公差は、次の基準

による。

**JIS B 0209-1** 一般用メートルねじー公差ー第 1 部 原則及び基礎データ  
おねじ外径の公差，有効径の公差 公差グレード 6 又は 4  
公差域クラス はめあい区分精又は中で N 又は S

**JIS B 0210** ユニファイ並目ねじの許容限界寸法及び公差 Class 2B 又は Class 3B

**JIS B 0212** ユニファイ細目ねじの許容限界寸法及び公差 Class 2B 又は Class 3B

**ASME B1.1** Screw Thread Classes Class 2B 又は Class 3B

### 5.3.8 ナットに対する要求

ナットに対する要求は，次の a)～e)による。

a) ナットは，一旦仕上げて面取りを行った後，最終仕上げを行う。ナットねじ公差は次による。

**JIS B 0209-1** 一般用メートルねじー公差ー第 1 部 原則及び基礎データ  
めねじ内径の公差，有効径の公差 公差グレード 6, 5 又は 4  
公差域クラス はめあい区分精又は中で N 又は S

**JIS B 0210** ユニファイ並目ねじの許容限界寸法及び公差 Class 2B 又は Class 3B

**JIS B 0212** ユニファイ細目ねじの許容限界寸法及び公差 Class 2B 又は Class 3B

**ASME B1.1** Screw Thread Classes Class 2B 又は Class 3B

b) **フランジとの使用** フランジと使用する場合，ナット寸法は次による。ユニファイねじのナット寸法は，**ASME B18.2.2** の heavy hex. nut とする。ただし，六角ボルト用ナットのねじの呼びが 3/4-10 UNC 以上の場合は，hex. nut を用いてもよい。メートルねじのナット寸法は，**JIS B 1181** のスタイル 2(ねじの呼びが M36 を超える場合は，ナットの高さは呼び径に等しい寸法とし，その他の各部の寸法はスタイル 1 の寸法とする)による。ただし，六角ボルト用ナットのねじの呼びが M20 以上の場合は，スタイル 1 を用いてもよい。

c) **他の連結物との使用** 6 に従って設計された連結物と使用する場合，ナットは上記 a) の寸法に準拠する。又は，ナットの静的強度及び疲労強度が連結の完全さを保つのに十分であれば，他の寸法でもよい。ただし，ボルト穴とのすきまや荷重負荷面積，ねじ形状，密着度合い，ねじのせん断力，ねじ山から半径方向の推力に対する考慮が必要である。

d) **かみ合い長さ** ナットの全ねじ山が十分かみ合うことが必要である。

e) **特殊な形状の設計** 特殊形状ナットは，その強度が上記 c) に適合する場合に限り使用可能である。

### 5.4 材料設計データ

材料設計データは，次の a)～f)による。

a) この規格では，特に断らない限り，**表 5.4.1** と **表 5.4.2** に示される次の出典の材料及びその相当材料を使用する。**表 5.4.1** と **表 5.4.2** の注記は，**表 5.4.2** の後にまとめて示す。

**ASME Sec. VIII Div. 3, KM-400, Table KM-400-1M** (炭素鋼，低合金鋼)

**ASME Sec. VIII Div. 3, KM-400, Table KM-400-2M** (高合金鋼)

**ASME Sec. VIII Div. 3, KM-400, Table KM-400-3M** (ニッケル及びニッケル合金)

**ASME Sec. VIII Div. 3, KM-400, Table KM-400-4M** (アルミニウム合金)

**JIS B 8266 付表 2.1, 付表 3.1**[**表 5.4.1** 及び **表 5.4.2** の注記 s)を参照]

ASME Sec. II, Part D, Table Y-1 など[表 5.4.1 及び表 5.4.2 の注記 t) を参照]

ASTM A213 (炭素鋼, 低合金鋼, オーステナイト合金, シームレスチューブ)

ASTM A276 (ステンレス鋼, 棒)

ASTM A564 (熱間圧延, 冷間加工ステンレス鋼, 棒)

- b) この規格で用いられる材料の引張強さと降伏点又は 0.2%耐力は, 次の表に示される。

引張強さ  $S_u$  ASME Sec. II, Part D, Subpart 1, Table U 及び Table U-2

降伏点又は 0.2%耐力  $S_y$  JIS B 8266 付表 5.1 及び付表 5.2

ASME Sec. II, Part D, Subpart 1, Table Y-1

- c) この規格で用いられる材料の線膨張係数と縦弾性係数は, 次の表に示される。

線膨張係数 JIS B 8266 付表 4.2

ASME Sec. II, Part D, Subpart 2, Table TE-1, TE-2  
及び Table TE-4

縦弾性係数 JIS B 8266 付表 4.1

ASME Sec. II, Part D, Subpart 2, Table TM-1, TM-2  
及び Table TM-4

- d) この規格で用いられる材料の熱伝導率と熱拡散係数は, 次の表に示される。

熱伝導率と熱拡散係数 ASME Sec. II, Part D, Subpart 2, Table TCD

- e) 表 5.4.1 と表 5.4.2 には適用上限温度を示しているが, クリープ温度域の許容応力を設定できる材料の場合には, 附属書 J による一次一般膜相当応力の許容値( $S_y/1.5$ )がクリープ温度域の許容応力と等しくなる  $S_y$  の値の温度を上限温度としてもよい。また, 一次一般膜相当応力の許容値( $S_y/1.5$ )がクリープ温度域の許容応力と等しくなるように, 次に示すクリープ温度域の膜応力補正係数  $k_c$  を導入することにより, 上限温度を高くしてもよい。この場合, 附属書 J の応力制限値にも  $k_c$  を適用する。また, 6.2.3 に従った弾塑性解析を行う場合, 及び 6.2.2 により設計圧力を計算する場合には, 降伏強さ及び引張強さとして  $k_c S_y$  を用いなければならない。

$$S_c \geq (S_y/1.5)/2 \text{ のとき, } k_c = 1$$

$$S_c < (S_y/1.5)/2 \text{ のとき, } k_c = S_c/(S_y/1.5)$$

ここで,

- $S_c$  : クリープ温度域の許容応力で, 次の三つの値の最小値
- ・ 0.01% / 1,000 h のクリープ速度を生じる応力の平均値
  - ・ 100,000 h クリープ破断応力の平均値の 67%
  - ・ 100,000 h クリープ破断応力の最小値の 80%

$S_y$  : 当該設計温度における降伏点又は 0.2%耐力

- f) 表 5.4.1 に示される材料で表中に, 降伏点又は 0.2%耐力  $S_y$  と引張強さ  $S_u$  の強度低下係数の適用式が示された材料は, 次式による。ただし, 強度低下係数が 1 以上となり,  $S_y > S_{y20^\circ\text{C}}$  又は  $S_u > S_{u20^\circ\text{C}}$  となる場合は, 強度低下係数を 1 とし,  $S_y = S_{y20^\circ\text{C}}$  又は  $S_u = S_{u20^\circ\text{C}}$  とする。

1) 降伏点又は0.2%耐力  $S_y$ 

高強度低合金鋼

$$S_y = (-3.324 \times 10^{-7} T^2 - 5.763 \times 10^{-4} T + 1.012) S_{y20^\circ\text{C}}^{1)} \dots\dots\dots(5.4.1)$$

SUS304 冷間加工材(冷間加工度 30~50%) (冷間加工度は断面積の減少率を示す。)

$$S_y = (4.551 \times 10^{-6} T^2 - 2.119 \times 10^{-3} T + 1.041) S_{y20^\circ\text{C}}^{2)} \dots\dots\dots(5.4.2)$$

SUS316 冷間加工材(冷間加工度 20~50%)

$$S_y = (3.495 \times 10^{-6} T^2 - 1.520 \times 10^{-3} T + 1.030) S_{y20^\circ\text{C}}^{2)} \dots\dots\dots(5.4.3)$$

SUS630

$$S_y = (6.868 \times 10^{-7} T^2 - 9.033 \times 10^{-4} T + 1.023) S_{y20^\circ\text{C}}^{3)} \dots\dots\dots(5.4.4)$$

ここで、

 $S_{y20^\circ\text{C}}$  : 規定最小降伏点又は0.2%耐力, 又は20°Cにおける  $S_y$ (MPa) $T$  : 温度(°C)2) 引張強さ  $S_u$ 

高強度低合金鋼

$$S_u = (-1.096 \times 10^{-6} T^2 - 5.414 \times 10^{-5} T + 1.003) S_{u20^\circ\text{C}}^{1)} \dots\dots\dots(5.4.5)$$

SUS304 冷間加工材(冷間加工度 30~50%) (冷間加工度は断面積の減少率を示す。)

$$S_u = (1.549 \times 10^{-6} T^2 - 1.074 \times 10^{-3} T + 1.021) S_{u20^\circ\text{C}}^{2)} \dots\dots\dots(5.4.6)$$

SUS316 冷間加工材(冷間加工度 20~50%)

$$S_u = (1.873 \times 10^{-6} T^2 - 1.159 \times 10^{-3} T + 1.021) S_{u20^\circ\text{C}}^{2)} \dots\dots\dots(5.4.7)$$

SUS630

$$S_u = (6.455 \times 10^{-7} T^2 - 7.720 \times 10^{-4} T + 1.019) S_{u20^\circ\text{C}}^{3)} \dots\dots\dots(5.4.8)$$

ここで、

 $S_{u20^\circ\text{C}}$  : 規定最小引張強さ又は20°Cにおける  $S_u$ (MPa) $T$  : 温度(°C)

表5.4.1 高压容器適用材料

<b>JIS B 8266</b> (压力容器の構造—特定規格)他 <sup>e)</sup> $S_y \geq 400$ MPa又は表5.4.1に記載のASME規格材と同等の材料								
材料規格番号	規定 $S_y$ 値 MPa	$S_y$ -温度データ <sup>a)</sup>	常温降伏 比 <sup>af)</sup>	$S_u$ -温度データ <sup>a)</sup>	疲労曲線 <sup>ae)</sup>	上限 温度 °C	P No.	Gr. No.
<b>JIS G 3103</b> SB450M	255	( <b>JIS G 8266</b> 付表5.1, 40°C~538°C 0.2%耐力)	0.567	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-204M Gr. A) <sup>u)</sup>	図6.3.1	371	3	1
<b>JIS G 3103</b> SB480M	275	( <b>JIS G 8266</b> 付表5.1, 40°C~538°C 0.2%耐力)	0.573	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-204M Gr. B) <sup>u)</sup>	図6.3.1	371	3	2
<b>JIS G 3115</b> SPV450	450 ( $t \leq 50$ mm) 430 ( $50 < t \leq 100$ mm) 410 ( $100 < t \leq 200$ mm)	( <b>JIS B 8266</b> 付表5.1, 40°C~350°C 0.2%耐力)	0.789 0.754 0.754	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-724M Gr. A) <sup>u)</sup>	図6.3.1	371	1	3
<b>JIS G 3115</b> SPV490	490 ( $t \leq 50$ mm) 470 ( $50 < t \leq 100$ mm) 450 ( $100 < t \leq 200$ mm)	( <b>JIS B 8266</b> 付表5.1, 40°C~350°C 0.2%耐力)	0.803 0.770 0.738	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-724M Gr. A) <sup>u)</sup>	図6.3.1	371	1	3
<b>JIS G 3120</b> SQV1B	480	( <b>JIS B 8266</b> 付表5.1, 40°C~425°C 0.2%耐力)	0.774	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-533M Type A Cl. 2) <sup>u)</sup>	図6.3.1	350	3	3
<b>JIS G 3120</b> SQV2B	480	( <b>JIS B 8266</b> 付表5.1, 40°C~425°C 0.2%耐力)	0.774	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-533M Type B Cl. 2) <sup>u)</sup>	図6.3.1	350	3	3
<b>JIS G 3120</b> SQV3B	480	( <b>JIS B 8266</b> 付表5.1, 40°C~425°C 0.2%耐力)	0.774	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-533M Type C Cl. 2) <sup>u)</sup>	図6.3.1	350	3	3
<b>JIS G 3127</b> SL3N440	440	<b>ASME</b> $S_y$ -温度データ近似 (SA-203M Gr. F) <sup>u)</sup>	0.815	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-203M Gr. F) <sup>u)</sup>	図6.3.1	40	9B	—
<b>JIS G 3127</b> SL9N520	520	<b>ASME</b> $S_y$ -温度データ近似 (SA-353M) <sup>u)</sup>	0.754	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-353M) <sup>u)</sup>	図6.3.1	125	11A	—
<b>JIS G 3127</b> SL9N590	590	<b>ASME</b> $S_y$ -温度データ近似 (SA-553M Type I) <sup>u)</sup>	0.855	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-553M Type I) <sup>u)</sup>	図6.3.1	125	11A	—
<b>JIS G 3201</b> SF490A	245	( <b>JIS G 8266</b> 付表5.1, 40°C~538°C 0.2%耐力)	0.500	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-181M Cl. 70) <sup>u)</sup>	図6.3.1	350	1	2
<b>JIS G 3203</b> SFVAF1	275	( <b>JIS G 8266</b> 付表5.1, 40°C~538°C 0.2%耐力)	0.573	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F1) <sup>u)</sup>	図6.3.1	371	3	2
<b>JIS G 3203</b> SFVAF12	275	( <b>JIS G 8266</b> 付表5.1, 40°C~538°C 0.2%耐力)	0.573	<b>ASME</b> Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F12 Cl. 2) <sup>u)</sup>	図6.3.1	371	4	1

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
JIS G 3203 SFVAF11A	275	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.573	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F11 Cl. 2) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 3203 SFVAF22A	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F22 Cl. 1) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 3203 SFVAF22B	315	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.606	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F22 Cl. 3) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 3203 SFVAF5B	275	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.573	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F5) u)	図6.3.1	350	5	2
JIS G 3203 SFVAF5D	450	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.726	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F5a) u)	図6.3.1	371	5	2
JIS G 3204 SFVQ1B	450	ASME Sy-温度データ近似 (SA-541M Gr. 3 Cl. 2) u)	0.726	ASME Su-温度データ近似 (SA-541M Gr. 3 Cl. 2) u)	図6.3.1	350	3	3
JIS G 3204 SFVQ2B	450	ASME Sy-温度データ近似 (SA-541M Gr. 2 Cl. 2) u)	0.726	ASME Su-温度データ近似 (SA-541M Gr. 2 Cl. 2) u)	図6.3.1	350	3	3
JIS G 3204 SFVQ3	490	ASME Sy-温度データ近似 (SA-508M Gr. 4N Cl. 3) u)	0.790	ASME Su-温度データ近似 (SA-508M Gr. 4N Cl. 3) u)	図6.3.1	350	3	3
JIS G 3205 SFL1	225	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.511	ASME Su-温度データ近似 (SA-350M Gr. LF1) u)	図6.3.1	350	1	1
JIS G 3205 SFL2	245	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-350M Gr. LF2) u)	図6.3.1	350	1	2
JIS G 3206 SFVCM F22V	415	式(5.4.1)	0.716	式(5.4.5)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 3206 SFVCM F3V	415	式(5.4.1)	0.716	式(5.4.5)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 3214 SUSF316	205	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.394	ASME Su-温度データ近似 (SA-965M Gr. F316) u)	図6.3.4 図6.3.5	371	8A	—
	205		0.427					
JIS G 3214 SUSF316H	205	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.394	ASME Su-温度データ近似 (SA-965M Gr. F316H) u)	図6.3.4 図6.3.5	371	8A	—
	205		0.427					
JIS G 3214 SUSF316L	175	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.365	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F316L) u)	図6.3.4 図6.3.5	371	8A	—
	175		0.389					
JIS G 3214 SUSF321	205	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.394	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F321) u)	図6.3.4 図6.3.5	371	8A	—
	205		0.427					
JIS G 3214 SUSF321H	205	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.394	ASME Su-温度データ近似 (SA-182M Gr. F321H) u)	図6.3.4 図6.3.5	371	8A	—
	205		0.427					

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 a)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
JIS G 3455 STS370	215	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～350℃ 0.2%耐力)	0.581	ASME Su-温度データ近似 (SA-106M Gr. A) u)	図6.3.1	350	1	1
JIS G 3455 STS410	245	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～350℃ 0.2%耐力)	0.598	ASME Su-温度データ近似 (SA-106M Gr. B) u)	図6.3.1	350	1	1
JIS G 3455 STS480	275	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～350℃ 0.2%耐力)	0.573	ASME Su-温度データ近似 (SA-106M Gr. C) u)	図6.3.1	350	1	2
JIS G 3456 STPT370	215	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.581	ASME Su-温度データ近似 (SA-106M Gr. A) u)	図6.3.1	371	1	1
JIS G 3456 STPT410	245	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.598	ASME Su-温度データ近似 (SA-106M Gr. B) u)	図6.3.1	371	1	1
JIS G 3456 STPT480	275	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～450℃ 0.2%耐力)	0.573	ASME Su-温度データ近似 (SA-106M Gr. C) u)	図6.3.1	371	1	2
JIS G 3458 STPA12	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.539	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P1) u)	図6.3.1	350	3	1
JIS G 3458 STPA20	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P2) u)	図6.3.1	350	3	1
JIS G 3458 STPA22	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P12) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 3458 STPA23	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P11) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 3458 STPA24	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P22) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 3458 STPA25	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P5) u)	図6.3.1	350	5	2
JIS G 3458 STPA26	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-335M Gr. P9) u)	図6.3.1	350	5	2
JIS G 3459 SUS316TP	205	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.394	ASME Su-温度データ近似 (SA-312M Gr. TP316) u)	図6.3.4 図6.3.5	350	8A	—
JIS G 3459 SUS316HTP	205	(JIS G 8266 付表5.2, ステンレス 鋼の降伏点又は 0.2%耐力)	0.394	ASME Su-温度データ近似 (SA-312M Gr. TP316H) u)	図6.3.4 図6.3.5	350	8A	—
JIS G 3460 STPL690	520	ASME Sy-温度データ近似 (SA-333M Gr. 8) u)	0.754	ASME Su-温度データ近似 (SA-333M Gr. 8) u)	図6.3.1	100	11A	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
JIS G 4109 SCM2-1	225	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.592	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 12 Cl. 1) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 4109 SCM2-2	275	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～500℃ 0.2%耐力)	0.611	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 12 Cl. 2) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 4109 SCM3-1	235	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.573	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 11 Cl. 1) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 4109 SCM3-2	315	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～500℃ 0.2%耐力)	0.606	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 11 Cl. 2) u)	図6.3.1	371	4	1
JIS G 4109 SCM4-1	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～650℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 22 Cl. 1) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 4109 SCM4-2	315	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.606	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 22 Cl. 2) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 4109 SCM5-1	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 21 Cl. 1) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 4109 SCM5-2	315	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.606	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 21 Cl. 2) u)	図6.3.1	371	5	1
JIS G 4109 SCM6-1	205	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.500	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 5 Cl. 1) u)	図6.3.1	350	5	2
JIS G 4109 SCM6-2	315	(JIS G 8266 付表5.1, 40℃～538℃ 0.2%耐力)	0.606	ASME Su-温度データ近似 (SA-387M Gr. 5 Cl. 2) u)	図6.3.1	350	5	2
JIS G 4901 NCF600B	245	式(5.4.1)	0.445	式(5.4.5)	図6.3.2	371	43	—
JIS G 4901 NCF750B Cond. H1	615	式(5.4.1)	0.641	式(5.4.5)	図6.3.2	371	43	—
JIS G 4901 NCF750B Cond. H2	795	式(5.4.1)	0.679	式(5.4.5)	図6.3.2	371	43	—
JIS G 4901 NCF800B	205	式(5.4.1)	0.394	式(5.4.5)	図6.3.2	371	45	—
JIS G 4902 NCF750P Cond. H1	615	式(5.4.1)	0.641	式(5.4.5)	図6.3.2	371	43	—
JIS G 4902 NCF750P Cond. H2	795	式(5.4.1)	0.679	式(5.4.5)	図6.3.2	371	43	—
JIS G 4902 NCF800P	205	式(5.4.1)	0.394	式(5.4.5)	図6.3.2	371	45	—
JIS G 4903 NCF800TP Cond. CW Ann.	205	式(5.4.1)	0.394	式(5.4.5)	図6.3.2	371	45	—
JIS G 3222 SFNCM 690	490 ai)	式(5.4.1)	0.710	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 740	540 ai)	式(5.4.1)	0.730	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 780	590 ai)	式(5.4.1)	0.756	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 830	635 ai)	式(5.4.1)	0.765	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 880	685 ai)	式(5.4.1)	0.778	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 930	735 ai)	式(5.4.1)	0.790	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
JIS G 3222 SFNCM 980	785 ai)	式(5.4.1)	0.801	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 1030	835 ai)	式(5.4.1)	0.811	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 3222 SFNCM 1080	885 ai)	式(5.4.1)	0.819	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 640	410 ai)	式(5.4.1)	0.641	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 690	460 ai)	式(5.4.1)	0.667	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 740	510 ai)	式(5.4.1)	0.689	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 780	560 ai)	式(5.4.1)	0.718	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 830	610 ai)	式(5.4.1)	0.735	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 880	655 ai)	式(5.4.1)	0.744	式(5.4.5)	図6.3.1	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 930	705 ai)	式(5.4.1)	0.758	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 3221 SFCM 980	755 ai)	式(5.4.1)	0.770	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 4053 SNCM 439	885	式(5.4.1)	0.903	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 4053 SNCM 630	885	式(5.4.1)	0.819	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 4053 SCM 440	835	式(5.4.1)	0.852	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
JIS G 4303 SUS 630 H900	1175	式(5.4.4)	0.897	式(5.4.8)	図6.3.6	288	6	—
JIS G 4303 SUS 630 H1025	1000	式(5.4.4)	0.935	式(5.4.8)	図6.3.6	288	6	—
JIS G 4303 SUS 630 H1075	860	式(5.4.4)	0.860	式(5.4.8)	図6.3.6	288	6	—
JIS G 4303 SUS 630 H1150	725	式(5.4.4)	0.780	式(5.4.8)	図6.3.6	288	6	—
AISI 4340H(又はSAE 440H)	885	式(5.4.1)	0.903	式(5.4.5)	図6.3.2	300	—	—
ASTM A564 Type 630 Cond.H900	1175	式(5.4.4)	0.897	式(5.4.8)	図6.3.6	288	—	—
ASTM A564 Type 630 Cond.H925	1070	式(5.4.4)	0.915	式(5.4.8)	図6.3.6	288	—	—
ASTM A564 Type 630 Cond.H1025	1000	式(5.4.4)	0.935	式(5.4.8)	図6.3.6	288	—	—
ASTM A564 Type 630 Cond.H1075	860	式(5.4.4)	0.860	式(5.4.8)	図6.3.6	288	—	—
ASTM A564 Type 630 Cond.H1100	795	式(5.4.4)	0.824	式(5.4.8)	図6.3.6	288	—	—
ASTM A564 Type 630 Cond.H1150	725	式(5.4.4)	0.780	式(5.4.8)	図6.3.6	288	—	—
ASTM A276 Type 316	690	式(5.4.3)	0.802	式(5.4.7)	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
ASTM A213 Type 304, Type 316 相当	メーカー毎	式(5.4.2) 式(5.4.3)	メーカー毎	式(5.4.6) 式(5.4.7)	図6.3.4 図6.3.5	300	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

ASME Sec.VIII Div.3								
材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>Carbon steel</b>								
SA-106M Gr. A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.621	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-516M Gr. 60	220	Sec. II D Y-1(M)	0.530	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-106M Gr. B	240	Sec. II D Y-1(M)	0.578	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-333M Gr. 6	240	Sec. II D Y-1(M)	0.578	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-516M Gr. 65	240	Sec. II D Y-1(M)	0.533	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-350M Gr. LF2	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-105M	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-516M Gr. 70	260	Sec. II D Y-1(M)	0.536	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-106M Gr. C	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-738M Gr. B	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-724M Gr. A	485	Sec. II D Y-1(M)	0.782	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	4
SA-724M Gr. C	485	Sec. II D Y-1(M)	0.782	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	4
SA-724M Gr. B	515	Sec. II D Y-1(M)	0.786	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	4
SA-905 Cl. 2 (t=1.5mm) b).c)	1450	Sec. II D Y-1(M)	0.855	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	38	—	—
SA-905 Cl. 2 (t=1.3mm) b).c)	1475	Sec. II D Y-1(M)	0.855	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	38	—	—
SA-905 Cl. 2 (t=1.02mm) b).c)	1525	Sec. II D Y-1(M)	0.864	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	38	—	—
SA-905 Cl. 2 (t=0.76mm) b).c)	1560	Sec. II D Y-1(M)	0.864	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	38	—	—
SA-905 Cl. 2 (t=0.51mm) b).c)	1600	Sec. II D Y-1(M)	0.865	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	38	—	—
SA-905 Cl. 1 (t=1.5mm) b).c)	1650	Sec. II D Y-1(M)	0.871	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	93	—	—
SA-905 Cl. 1 (t=1.3mm) b).c)	1675	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	93	—	—
SA-905 Cl. 1 (t=1.02mm) b).c)	1725	Sec. II D Y-1(M)	0.878	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	93	—	—
SA-905 Cl. 1 (t=0.76mm) b).c)	1760	Sec. II D Y-1(M)	0.880	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	93	—	—
SA-905 Cl. 1 (t=0.51mm) b).c)	1795	Sec. II D Y-1(M)	0.880	Sec. II A(SA-905)	6.11に従う	93	—	—
SA-841M Gr. A Cl. 1 aa)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.719	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	1	2
SA-841M Gr. B Cl. 2 aa)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.755	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	1	3
<b>C-1/2Mo</b>								
SA-335M Gr. P1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.539	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	1
<b>1/2Cr-1/5Mo-V</b>								
SA-517M Gr. B d)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	4
<b>1/2Cr-1/4Mo-Si</b>								
SA-517M Gr. A d)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	1
<b>1Cr-1/5Mo</b>								
SA-372M Gr. E Cl. 70 ab).ac)	485	Sec. II D Y-1(M)	0.588	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	—	—
SA-372M Gr. F Cl. 70 ab).ac).ad)	485	Sec. II D Y-1(M)	0.588	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	—	—
SA-372M Gr. J Cl. 70 ab).ac).ad)	485	Sec. II D Y-1(M)	0.588	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	—	—
SA-372M Gr. J Cl. 110 ab).ac).ad)	760	Sec. II D Y-1(M)	0.817	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>1Cr-1/4Si-V</b>								
SA-231M (t=0.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=0.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.55mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=0.60mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.60mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=0.65mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.65mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=0.70mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.70mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=0.80mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.80mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=0.90mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=0.90mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=1.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=1.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=1.10mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=1.10mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=1.20mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=1.20mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=1.40mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=1.40mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=1.60mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=1.60mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=1.80mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=1.80mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=2.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=2.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=2.20mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=2.20mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=2.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=2.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=2.80mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=2.80mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=3.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=3.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=3.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=3.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=4.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=4.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=4.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=4.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=5.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=5.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=5.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=5.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=6.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=6.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
SA-231M (t=6.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=6.50mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=7.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=7.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=8.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=8.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=9.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=9.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=10.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=10.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=11.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=11.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-231M (t=12.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
SA-232M (t=12.00mm) x)	—	—	—	Sec. II D U-2(M)	6.11に従う	38	—	—
<b>1/4Cr-1/2Mo-Si</b>								
SA-335M Gr. P11	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
<b>1 3/4Cr-1/2Mo-Ti</b>								
SA-517M Gr. E (65 < t ≤ 150mm) f)	620	Sec. II D Y-1(M)	0.855	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	2
SA-517M Gr. E (t ≤ 65mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	2
<b>2 1/4Cr-1Mo</b>								
SA-335M Gr. P22	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-336M Gr. F22 Cl. 3	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-387M Gr. 22 Cl. 2	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-508M Gr. 22 Cl. 3	380	Sec. II D Y-1(M)	0.650	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5C	1
<b>2 1/4Cr-1Mo-V</b>								
SA-336M Gr. F22V q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-182M Gr. F22V q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-541M Gr. 22V q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-542M Type D Cl. 4a q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-832M Gr. 22V q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
<b>3Cr-1Mo-1/4V-Ti-B</b>								
SA-336M Gr. F3V q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5	3
SA-832M Gr. 21V q)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	3
<b>Mn-1/2Mo-1/4Ni</b>								
SA-533M Type D Cl. 3	570	Sec. II D Y-1(M)	0.826	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11A	4
<b>Mn-1/2Mo-1/2Ni</b>								
SA-533M Type B Cl. 3	570	Sec. II D Y-1(M)	0.826	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11A	4

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>Mn-1/2Mo-3/4Ni</b>								
SA-533M Type C Cl. 2	485	Sec. II D Y-1(M)	0.782	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	3
<b>Mn-1/2Ni-V</b>								
SA-225M Gr. C h)	485	Sec. II D Y-1(M)	0.669	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	10A	1
<b>3/4Ni-1/2Cr-1/2Mo-V</b>								
SA-517M Gr. F (t ≤ 65mm) 1)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	3
<b>3/4Ni-1/2Mo-1/3Cr-V</b>								
SA-508M Gr. 2 Cl. 1	345	Sec. II D Y-1(M)	0.627	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	3
<b>3/4Ni-1/2Mo-Cr-V</b>								
SA-508M Gr. 3 Cl. 1	345	Sec. II D Y-1(M)	0.627	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	3
<b>3/4Ni-1Cu-3/4Cr</b>								
SA-736M Gr. A Cl. 3 (t ≤ 50mm)	515	Sec. II D Y-1(M)	0.880	—	図6.3.1	343	—	—
SA-736M Gr. A Cl. 3 (50 < t ≤ 100mm)	450	Sec. II D Y-1(M)	0.874	—	図6.3.1	343	—	—
<b>1 1/4Ni-1Cr-1/2Mo</b>								
SA-517M Gr. P (65 < t ≤ 100mm) f)	620	Sec. II D Y-1(M)	0.855	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	8
SA-517M Gr. P (t ≤ 65mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11B	8
<b>2Ni-1 1/2Cr-1/4Mo-V</b>								
SA-723M Gr. 1 Cl. 1 j), n), v)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	427	—	—
SA-723M Gr. 1 Cl. 2 j), n), v)	825	Sec. II D Y-1(M)	0.887	Sec. II D U(M)	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 1 Cl. 2a j), n), v)	895	Sec. II D Y-1(M)	0.895	—	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 1 Cl. 3 j), n), v), w)	965	Sec. II D Y-1(M)	0.902	Sec. II D U(M)	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 1 Cl. 4 j), g)	1105	Sec. II D Y-1(M)	0.917	Sec. II D U(M)	—	371	—	—
SA-723M Gr. 1 Cl. 5 j), g)	1240	Sec. II D Y-1(M)	0.947	Sec. II D U(M)	—	371	—	—
<b>2 3/4Ni-1 1/2Cr-1/2Mo</b>								
SA-543M Type C Cl. 1	585	Sec. II D Y-1(M)	0.807	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	11A	5
SA-543M Type C Cl. 2	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	11B	10
<b>2 3/4Ni- 1 1/2Cr-1/2Mo-V</b>								
SA-723M Gr. 2 Cl. 1 j), n), v)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	427	—	—
SA-723M Gr. 2 Cl. 2 j), n), v)	825	Sec. II D Y-1(M)	0.887	Sec. II D U(M)	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 2 Cl. 2a j), n), v)	895	Sec. II D Y-1(M)	0.895	—	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 2 Cl. 3 j), n), v), w)	965	Sec. II D Y-1(M)	0.902	Sec. II D U(M)	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 2 Cl. 4 j), g)	1105	Sec. II D Y-1(M)	0.917	Sec. II D U(M)	—	371	—	—
SA-723M Gr. 2 Cl. 5 j), g)	1240	Sec. II D Y-1(M)	0.947	Sec. II D U(M)	—	371	—	—
<b>3Ni-1 3/4Cr-1/2Mo</b>								
SA-543M Type B Cl. 1	585	Sec. II D Y-1(M)	0.807	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	11A	5
SA-543M Type B Cl. 2	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	11B	10

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>3 1/2Ni-1 3/4Cr-1/2Mo</b>								
SA-508M Gr. 4N Cl. 3	485	Sec. II D Y-1(M)	0.782	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	3
SA-508M Gr. 4N Cl. 1	585	Sec. II D Y-1(M)	0.807	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	11A	5
SA-508M Gr. 4N Cl. 2	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	343	11A	5
<b>3 1/2Ni- 1 3/4Cr-1/2Mo-V</b>								
SA-541M Gr. 4N Cl. 3	485	Sec. II D Y-1(M)	0.782	—	図6.3.1	371	—	—
SA-541M Gr. 5 Cl. 1	585	Sec. II D Y-1(M)	0.807	—	図6.3.1	371	—	—
SA-541M Gr. 4N Cl. 2	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	—	図6.3.1	371	—	—
SA-541M Gr. 5 Cl. 2	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	—	図6.3.1	371	—	—
<b>4Ni-1 1/2Cr-1/2Mo-V</b>								
SA-723M Gr. 3 Cl. 1 j).n).v)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.1	427	—	—
SA-723M Gr. 3 Cl. 2 j).n).v)	825	Sec. II D Y-1(M)	0.887	Sec. II D U(M)	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 3 Cl. 2a j).n).v)	895	Sec. II D Y-1(M)	0.895	—	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 3 Cl. 3 j).n).v).w)	965	Sec. II D Y-1(M)	0.902	Sec. II D U(M)	図6.3.2	427	—	—
SA-723M Gr. 3 Cl. 4 j).g)	1105	Sec. II D Y-1(M)	0.917	Sec. II D U(M)	—	371	—	—
SA-723M Gr. 3 Cl. 5 j).g)	1240	Sec. II D Y-1(M)	0.947	Sec. II D U(M)	—	371	—	—
<b>12Cr-9Ni-2Cu-1Ti</b>								
SA-564M Type XM-16 Cond. H1000 g)	1275	Sec. II D Y-1(M)	0.901	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-16 Cond. H1000 g)	1275	Sec. II D Y-1(M)	0.901	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-16 Cond. H950 g)	1415	Sec. II D Y-1(M)	0.934	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-16 Cond. H950 g)	1415	Sec. II D Y-1(M)	0.934	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-16 Cond. H900 g)	1515	Sec. II D Y-1(M)	0.935	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-16 Cond. H900 g)	1515	Sec. II D Y-1(M)	0.935	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
<b>13Cr-8Ni-2Mo</b>								
SA-564M Type XM-13 Cond. H1150M	585	Sec. II D Y-1(M)	0.680	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H1150M	585	Sec. II D Y-1(M)	0.680	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-13 Cond. H1150	620	Sec. II D Y-1(M)	0.667	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H1150	620	Sec. II D Y-1(M)	0.667	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-13 Cond. H1100	930	Sec. II D Y-1(M)	0.899	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H1100	930	Sec. II D Y-1(M)	0.899	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-13 Cond. H1050 g)	1140	Sec. II D Y-1(M)	0.946	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H1050 g)	1140	Sec. II D Y-1(M)	0.946	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-13 Cond. H1025 g)	1205	Sec. II D Y-1(M)	0.945	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H1025 g)	1205	Sec. II D Y-1(M)	0.945	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-13 Cond. H1000 g)	1310	Sec. II D Y-1(M)	0.926	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H1000 g)	1310	Sec. II D Y-1(M)	0.926	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-13 Cond. H950 g)	1415	Sec. II D Y-1(M)	0.934	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-13 Cond. H950 g)	1415	Sec. II D Y-1(M)	0.934	Sec. II D U(M)	—	38	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>15Cr-5Ni-3Cu</b>								
SA-564M Type XM-12 Cond. H1150M	515	Sec. II D Y-1(M)	0.648	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H1150M	515	Sec. II D Y-1(M)	0.648	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-564M Type XM-12 Cond. H1150	725	Sec. II D Y-1(M)	0.780	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H1150	725	Sec. II D Y-1(M)	0.780	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-564M Type XM-12 Cond. H1100	795	Sec. II D Y-1(M)	0.824	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H1100 p)	795	Sec. II D Y-1(M)	0.824	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-564M Type XM-12 Cond. H1075	860	Sec. II D Y-1(M)	0.860	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H1075	860	Sec. II D Y-1(M)	0.860	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-564M Type XM-12 Cond. H1025	1000	Sec. II D Y-1(M)	0.935	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H1025	1000	Sec. II D Y-1(M)	0.935	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-564M Type XM-12 Cond. H925 g)	1070	Sec. II D Y-1(M)	0.915	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H925 g)	1070	Sec. II D Y-1(M)	0.915	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-564M Type XM-12 Cond. H900 g)	1170	Sec. II D Y-1(M)	0.893	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
SA-705M Type XM-12 Cond. H900 g)	1170	Sec. II D Y-1(M)	0.893	Sec. II D U(M)	図6.3.6	38	—	—
<b>15Cr-6Ni-Cu-Mo</b>								
SA-564M Type XM-25 Cond. H1150	515	Sec. II D Y-1(M)	0.599	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H1150	515	Sec. II D Y-1(M)	0.599	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-25 Cond. H1100	725	Sec. II D Y-1(M)	0.810	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H1100	725	Sec. II D Y-1(M)	0.810	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-25 Cond. H1050	930	Sec. II D Y-1(M)	0.930	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H1050	930	Sec. II D Y-1(M)	0.930	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-25 Cond. H1025	965	Sec. II D Y-1(M)	0.932	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H1025	965	Sec. II D Y-1(M)	0.932	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-25 Cond. H1000 g)	1035	Sec. II D Y-1(M)	0.937	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H1000 g)	1035	Sec. II D Y-1(M)	0.937	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-25 Cond. H950 g)	1105	Sec. II D Y-1(M)	0.944	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H950 g)	1105	Sec. II D Y-1(M)	0.944	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-564M Type XM-25 Cond. H900 g)	1170	Sec. II D Y-1(M)	0.944	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type XM-25 Cond. H900 g)	1170	Sec. II D Y-1(M)	0.944	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
<b>17Cr-4Ni-4Cu</b>								
SA-564M Type 630 Cond. H1150M o)	515	Sec. II D Y-1(M)	0.648	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H1150M o)	515	Sec. II D Y-1(M)	0.648	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-564M Type 630 Cond. H1150 o)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.780	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H1150 o)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.780	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-564M Type 630 Cond. H1100 o)	795	Sec. II D Y-1(M)	0.824	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H1100 o)	795	Sec. II D Y-1(M)	0.824	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-564M Type 630 Cond. H1075 o)	860	Sec. II D Y-1(M)	0.860	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H1075 o)	860	Sec. II D Y-1(M)	0.860	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-564M Type 630 Cond. H1025 o)	1000	Sec. II D Y-1(M)	0.935	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H1025 o)	1000	Sec. II D Y-1(M)	0.935	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H925 g)	1070	Sec. II D Y-1(M)	0.915	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
SA-705M Type 630 Cond. H900 g)	1170	Sec. II D Y-1(M)	0.893	Sec. II D U(M)	図6.3.6	288	—	—
<b>17Cr-7Ni-1Al</b>								
SA-705M Type 631 Cond. TH1050 g)	965	Sec. II D Y-1(M)	0.825	Sec. II D U(M)	—	38	—	—
SA-705M Type 631 Cond. RH950 g)	1035	Sec. II D Y-1(M)	0.812	Sec. II D U(M)	—	38	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>25Ni-15Cr-2Ti</b>								
SA-638M Gr. 660 Cl. 1	585	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.654	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	482	—	—
SA-638M Gr. 660 Cl. 2	585	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.654	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	482	—	—
<b>16Cr-12Ni-2Mo</b>								
SA-965M Gr. F316	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.423	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.4 図6.3.5	427	8	1
SA-965M Gr. F316H	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.423	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.4 図6.3.5	427	8	1
SA-312M Gr. TP316 r)	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.398	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.4 図6.3.5	427	8	1
SA-312M Gr. TP316H r)	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.398	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.4 図6.3.5	427	8	1
SA-479M Type 316 k), l)	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.398	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.4 図6.3.5	427	8	1
SA-479M Type 316H k)	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.398	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.4 図6.3.5	427	8	1
SA-276 Type 316 Cond. S j) (65 < t ≤ 75mm)	380	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.691	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. S j) (50 < t ≤ 65mm)	450	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.726	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. S j) (t ≤ 50mm)	515	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.786	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. B j) (38 < t ≤ 44mm)	310	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.473	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. B j) (32 < t ≤ 38mm)	345	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.500	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. B j) (25 < t ≤ 32mm)	450	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.621	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. B j) (19 < t ≤ 25mm)	550	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.692	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
SA-276 Type 316 Cond. B j) (t ≤ 19mm)	690	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.802	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.4 図6.3.5	316	—	—
<b>67Ni-30Cu</b>								
SB-164 UNS N04400 Cond. Ann.	170	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.351	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-165 UNS N04400 Cond. Ann. (O. D. > 125mm)	170	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.351	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-564M UNS N04400	170	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.351	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	42	—
SB-165 UNS N04400 Cond. Ann. (O. D. ≤ 125mm)	195	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.402	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-164 UNS N04400 Cond. HW (300 < t ≤ 350mm)	275	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.534	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-164 UNS N04400 Cond. HW (t ≤ 300mm)	275	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.500	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-164 UNS N04400 Cond. CW & SR (t < 13mm)	345	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.595	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-164 UNS N04400 Cond. CW & SR (89 < t ≤ 100mm)	380	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.655	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-165 UNS N04400 Cond. SR	380	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.650	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-164 UNS N04400 Cond. CW & SR (13 < t ≤ 89mm)	415	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.692	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—
SB-164 UNS N04400 Cond. CW (t < 13mm)	585	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.770	<b>Sec. II D U</b>	—	427	42	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>72Ni-15Cr-8Fe</b>								
SB-167 UNS N06600 Cond. CW Ann. (O. D > 125mm)	205	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.373	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
SB-166 UNS N06600 Cond. Ann.	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.436	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
SB-167 UNS N06600 Cond. Ann. (O. D. ≤ 125mm)	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.436	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
SB-564M UNS N06600 Cond. Ann.	240	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.436	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	43	—
SB-166 UNS N06600 Cond. HW (t > 75mm)	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.410	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
SB-166 UNS N06600 Cond. HW (13 < t ≤ 75mm)	275	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.444	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
SB-166 UNS N06600 Cond. HW (6 < t ≤ 13mm)	310	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.473	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
<b>60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb</b>								
SB-446M Gr. 1 UNS N06625 Cond. Ann. (100 < t ≤ 250mm)	345	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.454	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	43	—
SB-564M Gr. 1 UNS N06625 Cond. Ann. (100 < t ≤ 250mm)	345	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.454	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	43	—
SB-444 Gr. 1 UNS N06625 Cond. Ann.	415	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.503	<b>Sec. II D U</b>	—	427	43	—
SB-446M Gr. 1 UNS N06625 Cond. Ann. (t ≤ 100mm)	415	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.503	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	43	—
SB-564M Gr. 1 UNS N06625 Cond. Ann. (t ≤ 100mm)	415	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.503	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	43	—
<b>42Fe-33Ni-21Cr</b>								
SB-408 UNS N08800 Cond. Ann.	205	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.398	<b>Sec. II D U</b>	—	427	45	—
SB-409 UNS N08800 Cond. Ann.	205	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.398	<b>Sec. II D U</b>	—	427	45	—
SB-564M UNS N08800 Cond. Ann.	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.398	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	45	—
SB-407 UNS N08800 Cond. CW Ann.	205	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.398	<b>Sec. II D U</b>	—	427	45	—
SB-408 UNS N08810 Cond. Ann.	170	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.378	<b>Sec. II D U</b>	—	427	45	—
SB-409 UNS N08810 Cond. Ann.	170	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.378	<b>Sec. II D U</b>	—	427	45	—
SB-564M UNS N08810 Cond. Ann.	170	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.378	<b>Sec. II D U(M)</b>	—	427	45	—
<b>54Ni-16Cr-16Mo-5.5Fe</b>								
SB-574 UNS N10276 Cond. Ann.	285	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.413	<b>Sec. II D U</b>	—	427	44	—
<b>Al-Mg-Si-Cu</b>								
SB-209 UNS A96061 Temp. T6 (1.30 ≤ t ≤ 6.32mm) <b>ag), ah)</b>	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.828	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.9	107	—	—
SB-209 UNS A96061 Temp. T651 (6.35 ≤ t ≤ 75.0mm) <b>ag), ah)</b>	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.828	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.9	107	—	—
SB-210 UNS A96061 Temp. T6 (0.64 ≤ t ≤ 12.7mm) <b>ag), ah)</b>	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.828	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.9	107	—	—
SB-221 UNS A96061 Temp. T6 <b>ag), ah)</b>	240	<b>Sec. II D Y-1</b>	0.923	<b>Sec. II D U</b>	図6.3.9	107	—	—
SB-241M UNS A96061 Temp. T6 <b>ag), ah)</b>	240	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.923	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.9	107	—	—
SB-308M UNS A96061 Temp. T6 <b>ag), ah)</b>	240	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.923	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.9	107	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

ASME Sec.VIII Div.2 <sup>t)</sup>								
材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ <sup>a)</sup>	常温降伏 比 <sup>af)</sup>	Su-温度データ <sup>a)</sup>	疲労曲線 <sup>ae)</sup>	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>Carbon steel</b>								
SA-181M Cl. 60	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-181M Cl. 70	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-234M Gr. WPB	240	Sec. II D Y-1(M)	0.578	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-234M Gr. WPC	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-266M Gr. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-266M Gr. 2	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-266M Gr. 3	260	Sec. II D Y-1(M)	0.505	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-266M Gr. 4	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-350M Gr. LF1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	1
SA-350M Gr. LF2	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-508M Gr. 1	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-508M Gr. 1A	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-537M Cl. 1 (t ≤ 65mm)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.711	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-537M Cl. 1 (65 < t ≤ 100mm)	310	Sec. II D Y-1(M)	0.689	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-537M Cl. 2 (t ≤ 65mm)	415	Sec. II D Y-1(M)	0.755	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-537M Cl. 2 (65 < t ≤ 100mm)	380	Sec. II D Y-1(M)	0.738	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-537M Cl. 2 (100 < t ≤ 150mm)	315	Sec. II D Y-1(M)	0.649	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-537M Cl. 3 (t ≤ 65mm)	380	Sec. II D Y-1(M)	0.691	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-537M Cl. 3 (65 < t ≤ 100mm)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.670	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-537M Cl. 3 (100 < t ≤ 150mm)	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	3
SA-541M Gr. 1	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
SA-541M Gr. 1A	250	Sec. II D Y-1(M)	0.515	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	1	2
<b>C-1/2Mo</b>								
SA-182M Gr. F1	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	2
SA-204M Gr. A	255	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	1
SA-204M Gr. B	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	2
SA-204M Gr. C	295	Sec. II D Y-1(M)	0.573	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	2
SA-234M Gr. WP1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.539	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	1
SA-336M Gr. F1	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	2
SA-369M Gr. FP1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.539	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	3	1
<b>1Cr-1/2Mo</b>								
SA-182M Gr. F12 Cl. 1	220	Sec. II D Y-1(M)	0.530	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-182M Gr. F12 Cl. 2	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-234M Gr. WP12 Cl. 1	220	Sec. II D Y-1(M)	0.530	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-335M Gr. P12	220	Sec. II D Y-1(M)	0.530	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-336M Gr. F12	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-369M Gr. FP12	220	Sec. II D Y-1(M)	0.530	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-387M Gr. 12 Cl. 1	230	Sec. II D Y-1(M)	0.605	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-387M Gr. 12 Cl. 2	275	Sec. II D Y-1(M)	0.611	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>1 1/4Cr-1/2Mo-Si</b>								
SA-182M Gr. F11 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-182M Gr. F11 Cl. 2	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-234M Gr. WP11 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-336M Gr. F11 Cl. 2	275	Sec. II D Y-1(M)	0.567	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-336M Gr. F11 Cl. 3	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-369M Gr. FP11	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-387M Gr. 11 Cl. 1	240	Sec. II D Y-1(M)	0.578	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
SA-387M Gr. 11 Cl. 2	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	4	1
<b>2 1/4Cr-1Mo</b>								
SA-182M Gr. F22 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	—	図6.3.1	NP	5A	1
SA-182M Gr. F22 Cl. 3	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-234M Gr. WP22 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-336M Gr. F22 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-369M Gr. FP22	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-387M Gr. 22 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-541M Gr. 22 Cl. 3	380	Sec. II D Y-1(M)	0.650	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5C	1
SA-541M Gr. 22 Cl. 4	585	Sec. II D Y-1(M)	0.807	—	図6.3.1	371	5C	4
SA-542M Type B Cl. 4	380	Sec. II D Y-1(M)	0.650	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5C	1
<b>3Cr-1Mo</b>								
SA-182M Gr. F21	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-335M Gr. P21	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-336M Gr. F21 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-336M Gr. F21 Cl. 3	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-369M Gr. FP21	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-387M Gr. 21 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.494	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
SA-387M Gr. 21 Cl. 2	310	Sec. II D Y-1(M)	0.602	Sec. II D U(M)	図6.3.1	371	5A	1
<b>3Cr-1Mo-1/4V-Ti-B</b>								
SA-182M Gr. F3V	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-508M Gr. 3V	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-541M Gr. 3V	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
SA-542M Type C Cl. 4a	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	5C	1
<b>3Cr-1Mo-1/4V-Cb-Ca</b>								
SA-182M Gr. F3VCb	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	—	—
SA-336M Gr. F3VCb	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	—	—
SA-508M Gr. 3VCb	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	—	—
SA-541M Gr. 3VCb	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	—	—
SA-542M Type E Cl. 4a	415	Sec. II D Y-1(M)	0.709	Sec. II D U(M)	図6.3.1 図6.3.8	371	—	—

表5.4.1 高圧容器適用材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>5Cr-1/2Mo</b>								
SA-182M Gr. F5	275	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.567	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-182M Gr. F5a	450	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.726	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-234M Gr. WP5	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.494	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-335M Gr. P5	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.494	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-336M Gr. F5	250	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.602	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-336M Gr. F5A	345	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.627	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-369M Gr. FP5	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.494	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-387M Gr. 5 Cl. 1	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.494	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
SA-387M Gr. 5 Cl. 2	310	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.602	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1
<b>5Cr-1/2Mo-Ti</b>								
SA-335M Gr. P5c	205	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.494	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.1	371	5B	1

注記 表 5.4.2 の後にまとめて示す。

表5.4.2 高圧容器適用ボルト材料

JIS B 8266 (圧力容器の構造-特定規格) <sup>a)</sup> Sy ≥ 400 MPaの材料								
材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ <sup>a)</sup>	常温降伏 比 <sup>af)</sup>	Su-温度データ <sup>a)</sup>	疲労曲線 <sup>ae)</sup>	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
JIS G 4107 2種 SNB7	725 (φ ≤ 63mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-193M Gr. B7) <sup>u)</sup>	0.843	ASME Su-温度データ近似 (SA-193M Gr. B16) <sup>u)</sup>	図6.3.3	343	-	-
	655 (63 < φ ≤ 100mm)		0.819					
	520 (100 < φ ≤ 120mm)		0.754					
JIS G 4107 3種 SNB16	725 (φ ≤ 63mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-193M Gr. B16) <sup>u)</sup>	0.843	ASME Su-温度データ近似 (SA-193M Gr. B16) <sup>u)</sup>	図6.3.3	371	-	-
	655 (63 < φ ≤ 100mm)		0.862					
	590 (100 < φ ≤ 180mm)		0.855					
JIS G 4108 1種1号 SNB21-1	1030 (φ ≤ 100mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	0.904	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	図6.3.3	300	-	-
JIS G 4108 1種2号 SNB21-2	960 (φ ≤ 100mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	0.897	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
JIS G 4108 1種3号 SNB21-3	890 (φ ≤ 150mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	0.890	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
JIS G 4108 1種4号 SNB21-4	825 (φ ≤ 150mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	0.887	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
JIS G 4108 1種5号 SNB21-5	715 (φ ≤ 50mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	0.872	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B21) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
	685 (50 < φ ≤ 200mm)		0.867					
JIS G 4108 2種1号 SNB22-1	1030 (φ ≤ 38mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	0.904	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	図6.3.3	300	-	-
JIS G 4108 2種2号 SNB22-2	960 (φ ≤ 75mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	0.897	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
JIS G 4108 2種3号 SNB22-3	890 (φ ≤ 100mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	0.890	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
JIS G 4108 2種4号 SNB22-4	825 (φ ≤ 100mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	0.887	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
JIS G 4108 1種5号 SNB22-5	715 (φ ≤ 50mm)	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	0.872	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B22) <sup>u)</sup>	図6.3.3	350	-	-
	685 (50 < φ ≤ 100mm)		0.867					

表5.4.2 高圧容器適用ボルト材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
JIS G 4108 3種1号 SNB23-1	1030 ( $\phi \leq 200\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	0.904	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	図6.3.3	300	—	—
JIS G 4108 3種2号 SNB23-2	960 ( $\phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	0.897	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 3種3号 SNB23-3	890 ( $\phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	0.890	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 3種4号 SNB23-4	825 ( $\phi \leq 100\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	0.887	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 3種5号 SNB23-5	715 ( $\phi \leq 150\text{mm}$ ) 685 ( $150 < \phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	0.872 0.867	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B23) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 4種1号 SNB24-1	1030 ( $\phi \leq 200\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	0.904	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	図6.3.3	300	—	—
JIS G 4108 4種2号 SNB24-2	960 ( $\phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	0.897	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 4種3号 SNB24-3	890 ( $\phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	0.890	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 4種4号 SNB24-4	825 ( $\phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	0.887	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	図6.3.3	350	—	—
JIS G 4108 4種5号 SNB24-5	715 ( $\phi \leq 150\text{mm}$ ) 685 ( $150 < \phi \leq 240\text{mm}$ )	ASME Sy-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	0.872 0.867	ASME Su-温度データ近似 (SA-540M Gr. B24) u)	図6.3.3	350	—	—

表5.4.2 高圧容器適用ボルト材料（続き）

ASME Sec.VIII Div.3								
材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
<b>C-1/4Mo</b>								
SA-320M Gr. L7A (t ≤ 65mm)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.843	Sec. II D U(M)	図6.3.3	38	—	—
<b>1Cr-1/5Mo</b>								
SA-193M Gr. B7 (100 < t ≤ 180mm)	515	Sec. II D Y-1(M)	0.746	Sec. II D U(M)	図6.3.3	343	—	—
SA-320M Gr. L7M (t ≤ 65mm) e)	550	Sec. II D Y-1(M)	0.797	Sec. II D U(M)	図6.3.3	38	—	—
SA-193M Gr. B7 (65 < t ≤ 100mm)	655	Sec. II D Y-1(M)	0.824	Sec. II D U(M)	図6.3.3	343	—	—
SA-193M Gr. B7 (t ≤ 65mm)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.843	Sec. II D U(M)	図6.3.3	343	—	—
SA-320M Gr. L7 (t ≤ 65mm) e)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.843	Sec. II D U(M)	図6.3.3	343	—	—
<b>1Cr-1/2Mo-V</b>								
SA-193M Gr. B16 (100 < t ≤ 200mm)	585	Sec. II D Y-1(M)	0.848	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-193M Gr. B16 (65 < t ≤ 100mm)	655	Sec. II D Y-1(M)	0.862	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-193M Gr. B16 (t ≤ 65mm)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.843	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
<b>1 3/4Ni-3/4Cr-1/4Mo</b>								
SA-320M Gr. L43 (t ≤ 100mm)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.843	—	図6.3.3	371	—	—
<b>2Ni-3/4Cr-1/4Mo</b>								
SA-540M Gr. B23 Cl. 5 (150 < t ≤ 240mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.868	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B23 Cl. 5 (t ≤ 150mm)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.879	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B23 Cl. 4 (t ≤ 240mm)	825	Sec. II D Y-1(M)	0.887	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B23 Cl. 3 (t ≤ 240mm)	895	Sec. II D Y-1(M)	0.895	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
<b>2Ni-3/4Cr-1/3Mo</b>								
SA-540M Gr. B24 Cl. 5 (150 < t ≤ 240mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.860	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B24 Cl. 5 (t ≤ 150mm)	725	Sec. II D Y-1(M)	0.879	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B24 Cl. 4 (t ≤ 240mm)	825	Sec. II D Y-1(M)	0.887	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B24 Cl. 3 (t ≤ 240mm)	895	Sec. II D Y-1(M)	0.895	Sec. II D U(M)	図6.3.3	371	—	—
<b>25Ni-15Cr-2Ti</b>								
SA-453M Gr. 660 Cl. A	585	Sec. II D Y-1(M)	0.654	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	482	—	—
SA-453M Gr. 660 Cl. B	585	Sec. II D Y-1(M)	0.654	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	482	—	—
<b>16Cr-12Ni-2Mo</b>								
SA-320M Gr. B8M Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8MA Cl. 1A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8M Cl. 2 m) (32 < t ≤ 40mm)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.556	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8M Cl. 2 m) (20 < t ≤ 25mm)	550	Sec. II D Y-1(M)	0.797	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—

表5.4.2 高圧容器適用ボルト材料（続き）

材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ a)	常温降伏 比 af)	Su-温度データ a)	疲労曲線 ae)	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
SA-320M Gr. B8M Cl. 2 <sup>m)</sup> (25 < t ≤ 32mm)	450	Sec. II D Y-1(M)	0.687	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8M Cl. 2 <sup>m)</sup> (t ≤ 20mm)	655	Sec. II D Y-1(M)	0.862	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
<b>18Cr-8Ni</b>								
SA-320M Gr. B8 Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8A Cl. 1A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8 Cl. 2 <sup>m)</sup> (32 < t ≤ 40mm)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.500	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8 Cl. 2 <sup>m)</sup> (25 < t ≤ 32mm)	450	Sec. II D Y-1(M)	0.621	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8 Cl. 2 <sup>m)</sup> (20 < t ≤ 25mm)	550	Sec. II D Y-1(M)	0.692	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
<b>18Cr-8Ni</b>								
SA-320M Gr. B8 Cl. 2 <sup>m)</sup> (t ≤ 20mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.802	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
<b>18Cr-8Ni UNS S30300</b>								
SA-320M Gr. B8F Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8FA Cl. 1A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
<b>18Cr-8Ni UNS S30323</b>								
SA-320M Gr. B8F Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8FA Cl. 1A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
<b>18Cr-10Ni-Cb</b>								
SA-320M Gr. B8C Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8CA Cl. 1A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8C Cl. 2 <sup>m)</sup> (32 < t ≤ 38mm)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.500	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8C Cl. 2 <sup>m)</sup> (25 < t ≤ 32mm)	450	Sec. II D Y-1(M)	0.621	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8C Cl. 2 <sup>m)</sup> (19 < t ≤ 25mm)	550	Sec. II D Y-1(M)	0.692	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8C Cl. 2 <sup>m)</sup> (t ≤ 19mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.802	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
<b>18Cr-10Ni-Ti</b>								
SA-320M Gr. B8T Cl. 1	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8TA Cl. 1A	205	Sec. II D Y-1(M)	0.398	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	427	—	—
SA-320M Gr. B8T Cl. 2 <sup>m)</sup> (32 < t ≤ 38mm)	345	Sec. II D Y-1(M)	0.500	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8T Cl. 2 <sup>m)</sup> (25 < t ≤ 32mm)	450	Sec. II D Y-1(M)	0.621	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8T Cl. 2 <sup>m)</sup> (19 < t ≤ 25mm)	550	Sec. II D Y-1(M)	0.692	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—
SA-320M Gr. B8T Cl. 2 <sup>m)</sup> (t ≤ 19mm)	690	Sec. II D Y-1(M)	0.802	Sec. II D U(M)	図6.3.4 図6.3.5	38	—	—

表5.4.2 高圧容器適用ボルト材料（続き）

ASME Sec.VIII Div.2 <sup>t)</sup>								
材料規格番号	規定Sy値 MPa	Sy-温度データ <sup>a)</sup>	常温降伏 比 <sup>af)</sup>	Su-温度データ <sup>a)</sup>	疲労曲線 <sup>ae)</sup>	上限 温度 ℃	P No.	Gr. No.
SA-540M Gr. B21 Cl. 1	1035 ( $\phi \leq 100\text{mm}$ )	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.908	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B21 Cl. 2	965 ( $\phi \leq 100\text{mm}$ )	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.902	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B21 Cl. 3	895 ( $\phi \leq 150\text{mm}$ )	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.895	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B21 Cl. 4	825 ( $\phi \leq 150\text{mm}$ )	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.887	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B21 Cl. 5	725 ( $\phi \leq 50\text{mm}$ ) 690 ( $50 < \phi \leq 200\text{mm}$ )	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.879  0.868	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B23 Cl. 1	1035	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.908	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B23 Cl. 2	965	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.902	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B24 Cl. 1	1035	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.908	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—
SA-540M Gr. B24 Cl. 2	965	<b>Sec. II D Y-1(M)</b>	0.902	<b>Sec. II D U(M)</b>	図6.3.3	371	—	—

## 表 5.4.1 及び表 5.4.2 の注記

- a) 降伏点又は 0.2%耐力の値は、この規格で要求される設計計算に用いる値である。高温の降伏点又は 0.2%耐力の値は、室温の降伏点又は 0.2%耐力に合わせた強度低下曲線による。データの統計処理による平均値又は最小値に対し、高温の降伏点又は 0.2%耐力の値は必ずしも一致しない。高温の降伏点又は 0.2%耐力の測定試験は必要ない。高温の降伏点又は 0.2%耐力の測定試験を行った場合でも、測定結果と同表による値を比較して、材料の合否判定を行う訳ではない。引張強さの値も、降伏点又は 0.2%耐力と同様である。
- b) SA-905 Cl.1, Cl.2 は、6.9 で述べられる線巻容器及び線巻フレームに使用されるワイヤ形状に限って認められる。
- c) SA-905 Cl.1, Cl.2 の中間厚さにおける材料強度は、同表から補間してもよい。
- d) SA-517M Gr. A, B の最大公称板厚は、32 mm 以下とする。
- e) SA-320M Gr.L7, L7M の焼戻温度は、425℃以上とする。
- f) SA-564M, SA-705M Type XM-12, XM-25, 630 Cond.H1025, SA-517M Gr.E の最大公称板厚は 150mm 以下、Gr.P の最大公称板厚は 100mm 以下とする。
- g) SA-564M Type XM-12, XM-25, 630 Cond.H1025, SA-705M Type 630 Cond.H1025, H900, H925, SA-705M Type 631 Cond.RH950, SA-705M Type XM-12 Cond.H1025, H900, H925, SA-705M Type XM-13 Cond.H950, H1000, H1025, H1050, SA-705M Type XM-25 Cond.H900, H950, H1000, H1025, SA-723M Gr.1, 2, 3 Cl.4, 5 の材料は、6.1.14 の破裂前漏洩モード条件を満足する設計容器内層に限り使用可能である。
- h) SA-225M Gr. C の最大公称板厚は、15 mm 以下とする。

- i) SA-517M Gr. F の最大公称板厚は、65mm 以下とする。
- j) SA-276 Type 316 Cond.S, B, SA-723M Gr.1, 2, 3 Cl.1, 2, 2a, 3, 4, 5 の材料は、溶接不可である。
- k) SA-479M Type 316H, SA-479M Type 316 の押出加工材は最小引張強さ 485 MPa としてよい。
- l) SA-479M Type 316 の規定  $S_y$  値は、焼なまし状態での値である。
- m) SA-320M Gr.B8, B8C, B8M, B8T Cl.2 の材料のねじ根元の最大硬さは、あらゆる設計温度で 35 HRC である。硬度測定はねじを除去した幅 3 mm 以上の平坦部で行う。平坦部を準備する際、必要以上に材料を削らない。硬度測定は引張試験と同じ回数実施する。
- n) SA-723M Gr.1, 2, 3 Cl.1, 2, 2a, 3 の材料を 375°C 超で使用する場合は、非常に注意を要する。この材料は 375°C を超えて使用すると、焼戻し脆化と応力緩和が生じるため、設計者は压力容器に対するこれらの効果・影響を考慮する必要がある。
- o) SA-705M, SA-564M Type 630 Cond.H1025, H1075, H1100, H1150, H1150M の材料は、高温曝露すると室温での靱性が低下する。脆化温度は組成及び熱処理の時間と温度で決まり、脆化最低温度は約 288°C である。ASME Sec. II, Part D, Appendix A, A-360 を参照する。
- p) SA-705M Type XM-12 Cond.H1100 の材料を 275°C～300°C で使用する場合は、非常に注意を要する。275°C～300°C で長時間曝露すると、靱性が低下する。ASME Sec. II, Part D, Appendix A, A-360 を参照する。
- q) SA-182M Gr.F22V, SA-336M Gr.F22V, F3V, SA-541M Gr.22V, SA-542M Type D, SA-832M Gr.21V, 22V の材料を溶接構造物に使用する場合、次の追加要求がある。
  - q.1) 10.1 及び 10.2 の要求事項を満たす場合には、当該溶接後熱処理温度における最短時間と最長時間の両方で熱処理を行った試験片で引張試験を行わなければならない。また、当該溶接後熱処理温度における最短時間で熱処理を行った試験片で衝撃試験を行わなければならない。引張試験結果は、材料規格を満足しなければならない。衝撃試験結果は、5.2.7 の要求事項を満足しなければならない。
  - q.2) 溶接施工方法確認試験の強度試験結果は、当該材料の材料規格に定める引張強さの最小値及び引張強さの最大値の要求を満足しなければならない。
  - q.3) 消耗品である溶接棒の各ヒート又は各ロット、フラックス入り溶接ワイヤの各ヒート又は各ロットは上記 q.1) の要求に合致するように試験を行う。
- r) SA-312M Gr.TP316, TP316H は、継目なし管に限り使用が認められる。
- s) JIS にある材料については、設計応力強さ表(JIS B 8266 付表 2.1, 付表 3.1)の注記を参照する。
- t) ASME Sec. VIII Div. 2 の規格にある材料については、設計応力強さ表(ASME Sec. II, Part D, Table 2A, Table 3)の注記を参照する。
- u) ASME の温度データから常温と使用温度との  $S_y$  又は  $S_u$  の比を求め、JIS の規定値に掛けることにより使用温度の  $S_y$  又は  $S_u$  を求める。
- v) 降伏点又は 0.2%耐力の実測値は、規定最小値よりも 172 MPa 以上大きくなってはならない。
- w) 運転時に水や水環境に触れるような使用法をしてはならない。水の濃度が ppm レベルかそれ

以下の場合、応力腐食や腐食疲労が生じる可能性がある。

- w.1) 水又は水環境に触れない場合にのみ使用が許される。
  - w.2) この制限は、いかなる負荷状態においても静水圧縮下にある部品については適用されない。静水圧縮は、部品の中のあらゆる場所で、三つの主応力の和が負(圧縮)である場合に存在すると考えられる。
  - w.3) この制限は、破裂前漏洩となる容器のインナーレイヤには適用されない。
- x) SA-231M, SA-232M は降伏点又は 0.2%耐力のデータを取得することが不可能であり、6.6 に従って設計される特殊な蓋部品に対してのみ適用する。この材料は締結部、ワイヤ巻き容器、ワイヤ巻きフレームなど他の圧力保持部材の製造に使用してはならない。また、これらの材料の  $t$  の値はワイヤの直径を表す。ワイヤは、材料の引張強さに悪影響を与えない方法で円以外の断面形状へ成形して使用してよい。
  - y) SA-231M, SA-232M は、最大引張応力に関する要求がある。ASME Sec. II, Part A, SA-231 又は ASME Sec. II, Part A, SA-232 を参照する。
  - aa) SA-841M Gr.A, B のエレクトロスラグ溶接及びエレクトロガス溶接は許されない。また、部分的な切断や溶接のための加熱を除き、650°C以上での加熱は許されない。
  - ab) SA-372M Gr.E, F, J の ASME Sec. II, Part D, Yable Y-1 に掲載されている降伏点又は 0.2% 耐力は、液体焼入れ及び焼戻した材料にのみ適用してよい。
  - ac) SA-372M Gr.E, F, J は、ASME Sec. IX, QW-250, QW-404.12, QW-406.3, QW-407.2, QW-409.1 が Part KF に従って適用されなければならない。
  - ad) SA-372M Gr.F, J は、ASME Sec. VIII Div. 3, KF-7 で認められている場合を除き、C を 0.35% 以上含んでいる場合は、溶接してはならない。
  - ae) 該当する設計疲労曲線がない場合は、当該材料のひずみ制御型引張圧縮疲労試験データを用いて、ひずみ範囲に縦弾性係数を掛けて応力振幅に換算した最適疲労曲線に対して、応力振幅で 2、寿命で 20 の設計係数を用いて設計疲労曲線を作成する。最適疲労曲線を作成する際、塑性ひずみが発生しない場合には、荷重制御型引張圧縮疲労試験データを用いてもよい。
  - af) 常温の降伏比は、常温の規定最小降伏点又は 0.2%耐力と規定最小引張強さの比である。
  - ag) 溶接及び熱切断は許されない。
  - ah) 最大公称板厚は 75mm 以下とする。
  - ai) JIS G 3222 及び G 3221 は、規定される  $S_y$  値が熱処理時供試部厚さによって区分される。また、製品形状[軸(S), リング(R), ディスク(D)]によっても規定  $S_y$  値が異なる。JIS G 3222 及び G 3221 により、規定  $S_y$  値を決定する。

## 参考文献

- 1) ASTM, "Report on Elevated Temperature Properties of Wrought Medium Carbon Alloy Steels", ASTM STP47618S, (1957)
- 2) 高圧ガス保安協会, KHKS 0220(2020) 超高圧ガス設備に関する基準, (2020)
- 3) MIL HANDBOOK 5G, Fig.2.6.8.2.1 及び Fig.2.6.8.1, (1994)

## 6 設計

### 6.1 設計一般

#### 6.1.1 一般事項

この章では、高压容器に関する一般事項を規定している。容器の全ての構造部品については、疲労評価、破壊力学評価を **6.3** 及び **6.4** に従って行う。使用者設計仕様書に規定されている全ての荷重や製作工程、自緊、温度勾配によって生じる全ての応力は考慮する。

#### 6.1.2 基本的な設計要求

**6.2** では、全ての圧力容器の基本設計及び溶接を伴わない圧力容器の設計基準を規定している。穴、ふた板、その他の構造については、**6.6**、**6.8**、**6.9**、**6.10** などで補完されている。

#### 6.1.3 保護用ライニング

保護用ライニングとは、圧力容器の最内層で、化学的及び機械的損傷に対して強度部材表面を保護する耐食クラッド、耐食肉盛溶接、耐食ライニングである。保護用ライニングは、静的強度、一次応力の計算に考慮してはならないが、二次応力、繰返し荷重計算には考慮する。使用材料は、**5** に記載されている必要はない。

#### 6.1.4 設計荷重

設計に当たっては、次の荷重を考慮する。

- a) 内圧力及び外圧力
- b) 熱的応力を生じる温度条件
- c) 機器重量及び内容物重量
- d) 他の機器、配管、運転用装置など当該機器に負荷される重量
- e) 風荷重、地震荷重
- f) 機器支持の反力
- g) 衝撃荷重
- h) 接続される配管などの伸縮による荷重
- i) 製作中に生じる残留応力
- j) 内容物供給中の影響

#### 6.1.5 設計温度

運転中に機器の長手軸方向に関して、明らかに異なる金属温度が発生することが予想される場合、その異なる温度の領域は、それぞれの温度で設計する。安定運転状態で金属温度は、厚さ方向に変化を生じるかもしれないが、そのときの設計温度は厚さ方向の平均温度以上とする。しかしながら、**6.1.7** を除きいかなる位置においても **5.4** で与えられている材料表の上限温度以下とする。破壊力学評価に使用される破壊靱性値を決定するためには、最低設計金属温度(MDMT)を使用する。

#### 6.1.6 突発的な運転変化

突発的な運転変化によって金属表面に局所的な温度増減をもたらすことがある。その際、材料表の上限温度を超える肉厚の部分を静的圧力設計に含めない。突然の降温によって生じる金属表面温度は、破壊力学評価に考慮する。

#### 6.1.7 環境による影響

設計者は、使用者設計仕様書[1.2.1 b)]に基づいて腐食、摩耗、応力腐食割れなどの環境の影響を考慮して肉厚、疲労、破壊挙動を検討しなければならない。

### 6.1.8 設計基準

各設計条件下で想定される損傷モードに対して、十分な設計係数を有するために、次のデータに基づく計算を行う。

- a) 引張強さ  $S_u$  (5.4)
- b) 降伏強さ  $S_y$  (5.4)
- c) 破壊靱性値  $K_{IC}$  (附属書 C)
- d) 疲労亀裂進展速度係数  $C$ ,  $m$  (6.4)
- e) 許容応力振幅  $S_a$  (6.3)
- f) 材料肉厚のマイナス公差
- g) 腐れ代、摩耗代

### 6.1.9 損傷モード

想定損傷モードとして、次の損傷がある。

- a) 塑性崩壊
- b) 全断面降伏
- c) 過度な変形や構造の他の部分が許容しない荷重伝達又は漏洩を生じる可能性がある大きさの局部降伏
- d) 厚さ方向の安定的な亀裂進展による漏洩(破裂前漏洩)
- e) 不安定亀裂進展
- f) 座屈

### 6.1.10 降伏理論

弾性解析に基づく一次応力評価、一次+二次応力評価及び疲労評価については、せん断ひずみエネルギー説(ミーゼス理論)に従って強度評価を行う。弾塑性解析は、せん断ひずみエネルギー説(ミーゼス理論)に従って解析を行う。

### 6.1.11 残留応力

残留応力は静的解析には考慮しないが、6.3 又は 6.4 による設計繰返し回数には考慮する。

### 6.1.12 穴、ふた板

6.6 に穴、ふた板の設計方法を規定している。

### 6.1.13 疲労評価

損傷モードが、破裂前漏洩となる圧力容器については、6.3 又は 6.4 のいずれかによって設計繰返し回数を決める。破裂前漏洩が証明できない場合、6.4 に従う。

### 6.1.14 破裂前漏洩

破裂前漏洩の評価は、次の a) ~ e) による。

- a) 次の両方の条件が満たされる場合、破裂前漏洩と想定する。
  - 1) 肉厚  $t$  の 0.8 倍の亀裂深さで、 $K_I < K_{IC}$
  - 2) 肉厚  $t$  の 0.2 倍の残存リガメント  $< (K_{IC}/S_y)^2$

上記により破裂前漏洩を評価するが、API 579-1/ASME FFS-1 の破壊評価線図(FAD)による評

価を適用してもよい。

- b) 端部ふたねじや平鏡のコーナー部から半径方向に成長する亀裂の様な接線 - 半径方向の亀裂による破壊においては、破裂前漏洩の破壊を想定しない。この様な場合には、設計繰返し回数は、**6.4**によって計算する。
- c) 焼ばめ方式多層容器の破裂前漏洩については、**6.8.4 a) 6)**を参照する。線巻き容器の破裂前漏洩については、**6.9.2**を参照する。
- d) 類似の設計、サイズ、材料特性、運転状態の容器での経験を基に使用者が、破裂前漏洩を使用者設計仕様書に記載する(**1.2.1**を参照)。
- e) 有毒物質又は致命的な物質を保有する容器は、破裂前漏洩で評価しない。

## 6.2 基本的な設計要求

### 6.2.1 適用範囲

この項では、この規格に従って製作される圧力容器に関する基本設計ルールや定義を規定している。疲労や特別な構造に関する追加規定は、後の項に記載している。弾塑性解析(**6.2.3**)を実施しない場合、全ての容器は**6.2.2**の要求事項を満足しなければならない。

全ての内外径比の円筒胴と球形胴について、弾塑性解析(**6.2.3**)を実施してもよい。この場合、弾性解析(附属書 J)の要求を満足する必要はない。

内外径比 1.25 以上の円筒胴と球形胴については、弾塑性解析(**6.2.3**)を実施する。内外径比 1.25 未満の円筒胴と球形胴については、弾性解析(附属書 J)を実施してもよい。この場合、弾塑性解析(**6.2.3**)の要求を満足する必要はない。

構造詳細が、この規格に含まれている各種の形状に合致していない、又は適用される計算式がない場合、詳細応力解析によって設計する。

**6.2.2**の設計式や**6.2.3**の弾塑性解析を用いて設計した場合には、耐圧試験や自緊中の塑性ひずみにより寸法変化する可能性があり、設計者は漏れや機能上問題がないか考慮しなければならない。

### 6.2.2 円筒胴及び球形胴の設計圧力

円筒胴及び球形胴の設計圧力の計算式を、次の **a)**, **b)**に示す。これらの計算式で計算すれば、崩壊に対して充分安全性が確保される。これらの計算式は、構造不連続部から離れた内圧を受ける円筒胴及び球形胴に対してのみ適用する。

低降伏比の材料を使用し、次に示す計算式を用いて設計を行った場合、耐圧試験時の永久ひずみによって寸法の変化を生じるかもしれない。その寸法変化による漏洩や機能不全を引き起こす場合、設計者はその影響を考慮する。ここに示した設計圧力の式は、耐圧試験圧力が設計圧力の 1.25 倍としている。したがって、耐圧試験圧力が設計圧力の 1.25 倍を超える場合には、**10.3.2 b)**を考慮しなければならない。

- a) **内圧による胴** 内圧による胴の設計圧力は、次の **1)~5)**による。**式(6.2.1)~式(6.2.6)**の耐圧試験圧力に関連した第 1 項は、設計圧力に対する耐圧試験圧力の比が 1.25 倍の場合に、全断面降伏及び過度な変形を防止するためである。クリープ温度域における許容応力を設定できる場合には、**表 5.4.1** 及び**表 5.4.2**に示す上限温度を超える温度を設計温度としてもよい[**5.4 e)**を参照]。この場合には、クリープ温度域の膜応力補正係数  $k_c$  を用いて、これら

の式における  $S_y$  と  $S_u$  を共に  $k_c S_y$  に置き換える。

1) 単肉円筒胴

開放端 ( $Y \leq 2.85$ )

$$P_D = \min\{2.986 K_{ut} S_y (Y^{0.268} - 1), 1.0773(S_y + S_u)(Y^{0.268} - 1)\} \dots\dots\dots(6.2.1)$$

開放端 ( $Y > 2.85$ ) 及び閉止端

$$P_D = \min\left\{0.924 K_{ut} S_y \ln(Y), \frac{1}{3}(S_y + S_u)\ln(Y)\right\} \dots\dots\dots(6.2.2)$$

ここで、

$Y$  : 内外径比 ( $D_o/D_i$ )

$S_y$  : 設計温度における降伏強さ (MPa)

$S_u$  : 設計温度における引張強さ、引張強さが規定されていない場合には降伏強さを用いてもよい。(MPa)

$K_{ut}$  : 耐圧試験の上限圧力に関する係数[10.3.2 b)を参照]

2) 多層円筒胴

開放端 ( $Y \leq 2.85$ )

$$P_D = \min\left\{\sum_{j=1}^n 2.986 K_{utj} S_{yj}(Y_j^{0.268} - 1), \sum_{j=1}^n 1.0773(S_{yj} + S_{uj})(Y_j^{0.268} - 1)\right\} \dots\dots\dots(6.2.3)$$

開放端 ( $Y > 2.85$ ) 及び閉止端

$$P_D = \min\left\{\sum_{j=1}^n 0.924 K_{utj} S_{yj} \ln(Y_j), \sum_{j=1}^n \frac{1}{3}(S_{yj} + S_{uj})\ln(Y_j)\right\} \dots\dots\dots(6.2.4)$$

ここで、

$Y_j$  : 各層の内外径比 ( $D_{oj}/D_{ij}$ )

$S_{yj}$  : 設計温度における各層の降伏強さ (MPa)

$S_{uj}$  : 設計温度における各層の引張強さ、引張強さが規定されていない場合には降伏強さを用いてもよい。(MPa)

$K_{utj}$  : 各層の耐圧試験の上限圧力に関する係数[10.3.2 b)を参照]

内層材の設計温度における降伏強さが層成材の設計温度における平均降伏強さの 1/2 未満の場合には、内層材は強度部材とみなせない。層成材の設計温度における降伏強さの差は 20%以内としなければならない。この規定を満足しない最外層(カバーシエル)は強度部材とみなせない。

3) 単肉球形胴

$$P_D = \min\left\{1.6 K_{ut} S_y \ln(Y), \frac{1}{\sqrt{3}}(S_y + S_u)\ln(Y)\right\} \dots\dots\dots(6.2.5)$$

## 4) 多層球形胴

$$P_D = \min \left\{ \sum_{j=1}^n 1.6 K_{utj} S_{yj} \ln(Y_j), \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{3}} (S_{yj} + S_{uj}) \ln(Y_j) \right\} \dots\dots\dots(6.2.6)$$

内層材の設計温度における降伏強さが層成材の設計温度における平均降伏強さの 1/2 未満の場合には、内層材は強度部材とみなせない。層成材の設計温度における降伏強さの差は 20%以内としなければならない。この規定を満足しない最外層(カバーシェル)は強度部材とみなせない。

5) 付加的な荷重 胴に内圧以外の付加的な荷重が作用する場合には、付加的な荷重を考慮したときの崩壊圧力が設計圧力の 1.732 倍以上でなければならない。

b) 外圧による胴 全ての荷重が考慮され、長手方向応力が中間主応力であれば、上記 a) で与えられている同じ計算式を使う。ただし、座屈によるチェックを行う。単肉胴の場合は次式を使用し、上記 a) で得られる  $P_D$  値以下とする。

$$P_D = \frac{E (Y - 1)^3}{40 (1 - \nu^2) Y^3} \dots\dots\dots(6.2.7)$$

## 6.2.3 弾塑性解析

弾塑性解析が、表 6.2.1、表 6.2.2 の荷重条件で有限要素法、差分法などの数値解析法によって実施される場合、6.2.2 に示す円筒及び球形胴の計算式を使用する必要はない。弾塑性解析は、次の a) ~ f) による。

a) 弾塑性解析法 塑性崩壊に対する評価は、荷重抵抗係数を考慮した組合せ荷重を用いて弾塑性解析を行い部品の塑性崩壊組合せ荷重を決定することによって評価される。弾塑性解析は、部品の塑性変形と変形特性の結果として生じる応力の再配分を考慮することによって、実際の挙動を近似する。弾塑性解析は、次の 1) ~ 4) による。

1) 弾塑性数値解析 塑性崩壊荷重は、弾塑性材料モデルを反映した数値解析手法(有限要素法など)によって求める。非線形の効果は、この解析で考慮する。塑性崩壊荷重は、構造全体の不安定状態をもたらす荷重であり、塑性崩壊状態では荷重を微増させても均衡解が得られない。

2) 弾塑性許容クライテリア 弾塑性解析による部品の許容値は、次による。

2.1) 全体的崩壊 全体的塑性崩壊荷重は、規定された荷重条件に従った弾塑性解析を実施することによって決まる。その塑性崩壊荷重は、構造全体の不安定をもたらす荷重である。荷重抵抗係数設計(LRFD)の概念は、塑性崩壊荷重の厳密計算への代案として使用される。この手順において、表 6.2.3 に示した荷重抵抗係数を考慮した組合せ荷重とその組合せ荷重に対する部品の抵抗値は、弾塑性解析によって求められる。

2.2) 機能に対する制限 機能制限は、設計荷重が負荷された状態で全ての部品で満足しなければならない。例えば、機能制限とは、フランジの回転による漏洩を防ぐための制限や蒸留塔のたわみ制限などである。

2.3) 局所損傷の条件 次の b) による。

2.4) **耐圧試験時** 全ての部品は、次の f) の耐圧試験時の評価を満足しなければならない。容器の安定性と健全性は、設計者によって評価され、その結果は製作者設計報告書に含めなければならない。

3) **弾塑性評価手順** 弾塑性評価手順は、次の 3.1)～3.5)による。

- 3.1) 部品の全ての幾何学的特徴を含む数値解析モデルを作成する。解析モデルは、部品形状、境界条件及び作用荷重を正確に表現できるモデルとする。応力集中及びひずみ集中が発生するような領域は細分割を行う。
- 3.2) 全ての関連する荷重と適用すべき荷重ケースを特定する。設計に考慮すべき荷重には、表 6.2.1 を最低限含める。
- 3.3) 解析では、弾塑性材料モデルを用いる。塑性域の発生が予想される場合、ミーゼスの降伏理論と関連流動則を適用する。ひずみ硬化、ひずみ軟化又は弾完全塑性の材料モデルを適用する。温度依存のひずみ硬化挙動を含む真応力-真ひずみ曲線は、次の a) 4) による。解析では、幾何学的非線形の影響を考慮する。
- 3.4) 解析に使用する荷重組合せを表 6.2.3 に従って、3.2) の情報を用いて決定する。3.2) による荷重ケースごとに、荷重組合せを評価する。
- 3.5) 部品がその荷重ケースの作用荷重以上の崩壊荷重(収束解が得られる最大荷重)が得られれば、その作用荷重に対して健全であると評価する。崩壊荷重が荷重ケースの作用荷重よりも低い場合には、部品の形状(すなわち、厚さ)を変更するか、又は荷重を減少させて解析を行う。

4) **弾塑性応力-ひずみ曲線 附属書 D** の真応力-真ひずみ曲線を使用する。該当する曲線がない場合には、弾完全塑性体とする。

b) **局所損傷に対する評価** 6.2.3 a) に追加して、局所損傷を評価する。

1) **弾塑性評価手順** 弾塑性評価手順は、次の 1.1)～1.9)による。

- 1.1) 表 6.2.3 の局所損傷条件の荷重組合せを元に、弾塑性解析を行う。
- 1.2) 主応力を決定し、次式でミーゼスの相当応力を算出する。

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}^{0.5} \dots\dots\dots(6.2.8)$$

1.3) 次式を使用し、k 番目の荷重ステップにおける多軸ひずみ制限値  $\epsilon_{L,k}$  を決める。

$$\epsilon_{L,k} = \epsilon_{Lu} \left\{ e^{\frac{-m_3}{1+m_2} \left( \frac{\sigma_{1,k} + \sigma_{2,k} + \sigma_{3,k}}{3\sigma_{e,k}} - \frac{1}{3} \right)} \right\} \dots\dots\dots(6.2.9)$$

ここで、

- $\Delta\epsilon_{peq,k}$  : k 番目の荷重増加での相当塑性ひずみ範囲
- $El$  : 最小規定伸び(%)
- $\epsilon_{L,k}$  : k 番目の荷重増加での最大許容相当塑性ひずみ
- $\epsilon_{Lu}$  :  $m_2, m_3, m_4$  の最大値
- $m_2$  : 表 6.2.4 を参照
- $m_3$  : 表 6.2.4 を参照

- $m_4$  : 表 6.2.4 を参照
- $m_5$  : 表 6.2.4 を参照
- $R$  : 降伏比  $S_y/S_u$
- $RA$  : 最小規定絞り (%)
- $\sigma_{1,k}$  :  $k$  番目の荷重増加での 1 方向の主応力
- $\sigma_{2,k}$  :  $k$  番目の荷重増加での 2 方向の主応力
- $\sigma_{3,k}$  :  $k$  番目の荷重増加での 3 方向の主応力
- $\sigma_{e,k}$  : ミーゼスの相当応力
- $S_y$  : 解析温度における降伏強さ(表 5.4.1, 表 5.4.2 を参照)
- $S_u$  : 解析温度における引張強さ(表 5.4.1, 表 5.4.2 を参照)

1.4) 次式を使用し、 $k$  番目の荷重ステップで発生する局部ひずみ損傷を計算する。

$$D_{\varepsilon,k} = \Delta\varepsilon_{peq,k} / \varepsilon_{L,k} \dots\dots\dots(6.2.10)$$

1.5) 累積損傷  $D_\varepsilon$  を求めるために、 $k$  番目の荷重ステップで発生する局部ひずみ損傷  $D_{\varepsilon,k}$  をその前の荷重ステップで発生した局部ひずみ損傷の合計に加える。

1.6) 全ての荷重ステップについて、1.2)～1.5)を繰り返す。

1.7) 部品が冷間加工(その後の熱処理なし)した場合、次式を使用して加工による損傷  $D_{\varepsilon form}$  を算出する。

$$D_{\varepsilon form} = \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_{Lu} e^{[-0.33 \{m_5 / (1 + m_2)\}]}} \dots\dots\dots(6.2.11)$$

ここで、 $\varepsilon_{cf}$  : 加工ひずみ

1.8) 合計累積損傷  $D_{\varepsilon t}$  を求めるために、加工による損傷を加える。

$$D_{\varepsilon t} = D_{\varepsilon form} + \sum_{k=1}^n D_{\varepsilon,k} \equiv D_{\varepsilon form} + D_\varepsilon \dots\dots\dots(6.2.12)$$

1.9) 合計累積損傷  $D_{\varepsilon t}$  は、表 6.2.3 の局所損傷に示されている全ての荷重を考慮して計算しなければならない。計算された  $D_{\varepsilon t}$  は 1.0 を超えてはならない。

c) **座屈崩壊に対する評価** 圧縮応力下で部品の座屈を防ぐために、表 6.2.3 に示す荷重抵抗係数を考慮した組合せ荷重を用いて構造安定評価を行わなければならない。弾塑性解析により座屈崩壊解析を行う場合には、初期不整を解析モデルに考慮しなければならない。

d) **ラチェット評価** 弾塑性解析によるラチェット評価手順は、次の 1)～5)による。

- 1) 部品の全ての幾何学的特徴を含む数値解析モデルを作成する。解析モデルは、部品形状、境界条件及び作用荷重を正確に表現できるモデルとする。
- 2) 全ての関連する荷重と適用すべき荷重ケースを特定する(表 6.2.1 を参照)。
- 3) 解析では、ひずみ硬化がない弾完全塑性の材料モデルを用い、ミーゼスの降伏理論と関連流動則を適用する。降伏強さは、5.4 の設計温度における規定最小降伏強さを用いる。解析では、幾何学的非線形の影響を考慮する。

- 4) 2)で特定した荷重ケースについて、一つの荷重事象を複数回繰返し作用させた弾塑性解析を行う。なお、荷重事象が複数ある場合には、ラチェットの可能性が最も高くなる二つの荷重事象を複数回繰返し作用させた弾塑性解析を行う。
- 5) ラチェット評価は、耐圧試験の後、少なくとも3回の荷重繰返しを行った後に行う。十分に安定した弾塑性挙動が得られない場合には、追加の荷重繰返しに対する解析を行う必要がある。次の5.1)~5.3)のいずれかに適合すれば、ラチェット基準を満たす。この基準を満たさない場合には、部品の形状(すなわち、厚さ)を変更するか、又は荷重を減少させて解析を行う。
- 5.1) 部品に塑性挙動がない(塑性ひずみの発生がない)。
- 5.2) 部品の主要荷重支持部に弾性コアがある。
- 5.3) 部品の全体的な寸法に永久変形がない。これは、関連する部品の寸法を、最後のサイクルと最後の次のサイクルの間の時間に対してプロットすることで実証してもよい。
- e) **弾塑性解析に関する追加要求** 弾塑性解析に関する追加要求は、次の1)、2)による。
- 1) 疲労評価を6.3に、破壊力学評価を6.4に従って行う(どちらか適用する)。
- 2) 設計者は、適用される設計、耐圧試験、自緊状態での変位が圧力容器部品やシール材の性能に与える影響を考慮する。
- f) **耐圧試験時の評価** 弾完全塑性挙動(加工硬化なし)を示す材料で、試験温度における降伏強さを使用して表6.2.3に示す荷重の組合せを用いて弾塑性解析を実施しなければならない。崩壊荷重は、表6.2.3に与えられる荷重ファクターを下回ってはならない。有限要素法モデルの結果を安定させるために必要であれば、多少の加工硬化を与えてもよい。その場合、線形な応力とひずみの関係は保ち、強度の上昇は20%の塑性ひずみ時で5%を超えてはならない。耐圧試験時の評価は、表6.2.5に示した耐圧試験圧力と設計圧力の比と設計温度における材料の降伏比の関係を満足する場合には免除する。
- g) **船上に設置される機器の荷重条件** 船上プラントなど機器が船の上に設置される場合は、運転時の荷重条件として、船体の揺動による荷重を考慮する必要がある。荷重条件は表6.2.1及び表6.2.2に加えて、波による船体応答の周波数応答関数(RAO)などを考慮して使用者が決定する。

表 6.2.1 設計に考慮すべき荷重と荷重条件<sup>†</sup>

荷重条件	設計荷重
耐圧試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本体, 保温, 耐火被覆, 内部品, 踊り場, その他機器本体から支持部品の重量</li> <li>・ 組立時の荷重</li> <li>・ 配管荷重</li> <li>・ 活荷重(振動やメンテナンス時の荷重は除く)</li> <li>・ 圧力と試験用流体(水)荷重</li> <li>・ 風荷重</li> </ul>
通常運転	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本体, 保温, リフラクトリー, 耐火被覆, 内部品, 触媒, 踊り場, その他機器本体から支持部品の重量</li> <li>・ 組立時の荷重</li> <li>・ 配管荷重</li> <li>・ 活荷重</li> <li>・ 圧力と流体荷重</li> <li>・ 熱による荷重</li> <li>・ 支持構造物の加速度による荷重</li> </ul>
通常運転+偶発的荷重 <sup>a)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本体, 保温, リフラクトリー, 耐火被覆, 内部品, 触媒, 踊り場, その他機器本体から支持部品の重量</li> <li>・ 組立時の荷重</li> <li>・ 配管荷重</li> <li>・ 活荷重</li> <li>・ 圧力と流体荷重</li> <li>・ 熱による荷重</li> <li>・ 風, 地震その他の偶発的荷重</li> <li>・ 内容物の波動による荷重</li> <li>・ 支持構造物の加速度による荷重</li> </ul>
異常運転又はスタートアップ+偶発的荷重 <sup>a)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本体, 保温, リフラクトリー, 耐火被覆, 内部品, 触媒, 踊り場, その他機器本体から支持部品の重量</li> <li>・ 組立時の荷重</li> <li>・ 配管荷重</li> <li>・ 活荷重</li> <li>・ 圧力と流体荷重</li> <li>・ 熱による荷重</li> <li>・ 風荷重</li> </ul>

注<sup>a)</sup> 風と地震及び雪や着氷などの荷重も考慮する。

表 6.2.2 荷重の説明†

設計荷重	説明
$P_D$	設計内圧力と外圧力
$P_O$	運転内圧力と外圧力
$P_S$	液体又は粉体による静圧
$P_t$	耐圧試験圧力
$D$	自重, 次の荷重を含む <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機器本体, 内部品, サポート, その他付属品</li> <li>・ 運転時及び試験時の容器内容物</li> <li>・ 保温, リフラクトリー</li> <li>・ 接続される他の機器及び部品からの静的荷重</li> </ul>
$L$	活荷重(流体による慣性力含む)
$L_A$	6.2.3 g) で規定される船体の揺動運動による加速度荷重
$E$	地震荷重
$W$	風荷重
$W_{pt}$	耐圧試験時の風荷重
$W_A$	組立時の荷重 (例えば, 焼ばめ, 冷ばめ, 線巻き, シールのための予荷重など)
$S_S$	積雪荷重
$T$	自己制御型荷重(熱伸びによる荷重) <sup>a)</sup>

注<sup>a)</sup> この荷重は, 一般的に崩壊荷重に影響しない。しかし, 十分な応力緩和や荷重の再配分が起こらない弾性追従を引き起こす場合には, 考慮しなければならない。

表 6.2.3 弾塑性解析用荷重の組合せ†

条件	荷重の組合せ
設計条件	
全体的崩壊	1) $1.80 (P_D + P_S + D)$ 2) $1.58 (P_D + P_S + D + T) + 2.03 L + 2.03 L_A + 0.65 S_S$ 3) $1.58 (P_D + P_S + D) + 2.03 S_S + \max(1.28 L + 1.28 L_A, 0.65 W)$ 4) $1.58 (P_D + P_S + D) + 1.28 W + 1.28 L + 1.28 L_A + 0.65 S_S$ 5) $1.58 (P_D + P_S + D) + 1.28 E + 1.28 L + 1.28 L_A + 0.65 S_S$
局所損傷	$1.28 (P_D + P_S + D) + 1.00 W_A$
機能に対する制限	使用者設計仕様書による
耐圧試験時	
全体的崩壊	$(1/K_{ut}) P_t + P_S + D + W_{pt}$ [6.2.3 f)を参照]
機能に対する制限	使用者設計仕様書による

**注記 1** 荷重の組合せ欄のパラメータは、表 6.2.2 に定義される。

**注記 2** 全体的崩壊と機能に対する制限は、6.2.3 a) 2) を参照する。

**注記 3** 多層容器の場合には、係数  $K_{ut}$  の代わりに次式の等価係数  $K_{uteq}$  を用いる。

$$K_{uteq} = \frac{\sum_{j=1}^n (K_{utj} t_j)}{\sum_{j=1}^n t_j}$$

ここで、

$K_{ut}$  : 耐圧試験の上限圧力に関する係数 [10.3.2 b)を参照]

$K_{utj}$  : 各層の耐圧試験の上限圧力に関する係数

$K_{uteq}$  : 多層容器に対する耐圧試験の上限圧力に関する等価係数

$t_j$  : 各層の厚さ(mm)

表 6.2.4 係数( $m_2, m_3, m_4, m_5$ )<sup>†</sup>

材料	最高温度 (°C)	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$
フェライト鋼 <sup>a)</sup>	480	0.60 (1.00 - R)	$2 \ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	2.2
オーステナイト系 ステンレス鋼, ニッケル合金鋼	480	0.75 (1.00 - R)	$3 \ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	0.6
二相ステンレス鋼	480	0.70 (0.95 - R)	$2 \ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	2.2
析出硬化型 ニッケル基合金	540	1.09 (0.93 - R)	$\ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	2.2
アルミニウム合金	120	0.52 (0.98 - R)	$1.3 \ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	2.2
銅合金	65	0.50 (1.00 - R)	$2 \ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	2.2
チタン合金 ジルコニウム合金	260	0.50 (0.98 - R)	$1.3 \ln\{1 + (El/100)\}$	$\ln\{100/(100 - RA)\}$	2.2

注<sup>a)</sup> 炭素鋼, 低合金鋼, フェライト系ステンレス鋼, マルテンサイト系ステンレス鋼, 鉄ベース時効硬化ステンレス鋼を含む。

表 6.2.5 耐圧試験時評価の免除条件<sup>†</sup>

$P_t/P_{dt}$ <sup>a)</sup>	$S_y/S_u$
1.25	$\geq 0.612$
1.30	$\geq 0.653$
1.35	$\geq 0.696$
1.40	$\geq 0.806$
1.43	$\geq 0.911$

注<sup>a)</sup>  $P_{dt}$  は 6.2.2 a) の設計圧力計算式における第 1 項の耐圧試験基準による圧力で, 耐圧試験圧力が支配的な場合の設計圧力である。

## 6.3 疲労評価

### 6.3.1 適用範囲

6.1.13に従って、破裂前漏洩が示される場合には、設計許容繰返し回数は6.3又は6.4のいずれかによって計算してよい。破裂前漏洩が示されない場合には、設計許容繰返し回数は6.4によって計算する。破裂前漏洩の判定については、6.1.14を参照する。

### 6.3.2 一般要求

一般要求は、次のa)～c)による。

- a) 疲労評価着目点の(一次+二次)応力の変動範囲は、シェークダウンする範囲になければならない。ただし、弾性計算ベースでこの条件が満たされない場合でも、塑性計算ベースにより当該部がシェークダウンすることが示されれば許容される。
- b) 6.3の代わりに、実体を用いた疲労試験により設計許容繰返し回数を求めてもよい。その場合には6.11 実験的設計検証による。
- c) 内圧負荷時の交差穴のピーク応力は**附属書F**の交差穴の応力集中係数を用いるか、応力解析によって求める。

### 6.3.3 設計疲労曲線の使用

設計疲労曲線の使用は、次のa)～g)による。

- a) **図 6.3.1**～**図 6.3.9**の設計疲労曲線は、厳しい腐食環境では適用してはならない。
- b) **図 6.3.1**、**図 6.3.4**、**図 6.3.5**及び**図 6.3.8**の設計疲労曲線は、非溶接構造及び溶接継手を有する圧力容器に用いる。溶接継手に対しては、適切な応力集中係数又は疲労強度減少係数を適用する。ただし、平坦に仕上げた突合せ溶接継手に対する疲労強度減少係数は1.0としてよい。
- c) **図 6.3.2**、**図 6.3.3**、**図 6.3.6**、**図 6.3.7**及び**図 6.3.9**の設計疲労曲線は、非溶接構造のみに対して適用する。
- d) **図 6.3.3**に適用できる材料は、**JIS G 4107**のSNB7とSNB16、又はその同等材料で、いずれも熱処理を施した材料とする。ボルトの疲労解析に用いる設計応力強さ $S_m$ の値は、**JIS B 8266 附属書9**の3.1による。**図 6.3.3**の使用に際しては、**JIS B 8266 附属書8**の3.5 b)及びc)による。
- e) **図 6.3.6**の適用範囲は次による。
  - 1) H900, H925, H1025 は保護用ライニング又は破裂前漏洩であることが確認されている圧力容器の圧縮応力を受ける内層材に適用する。
  - 2) この線図は次の範囲で適用する。
    - ・機械的荷重によるピーク相当ひずみ範囲 < 1%
    - ・機械的荷重+熱荷重によるピーク相当ひずみ範囲 < 2%
- f) **図 6.3.8**は運転温度が400°C～500°Cの範囲にある場合に適用する。400°C, 450°C, 500°Cの中間の温度については、補間法により応力振幅を求めてよい。
- g) 設計疲労曲線に示す上限の繰返し回数を超える範囲での設計疲労曲線の使用法については、6.3.6による。

### 6.3.4 残留応力の取り扱い

残留応力の取り扱い、次の a)～e)による。

- a) 成形加工で生じた引張残留応力の値が明らかでない場合には、これらの引張残留応力は材料の規定最小降伏強さに相当したピーク値を持つと見なす。
- b) 溶接、熱処理、成形、自緊、焼ばめ及び線巻きなどの製作法は残留応力を生じ、次の 1)～5)を考慮する。
  - 1) 引張残留応力は平均応力の計算に含める。
  - 2) 塑性変形を伴わずに弾性的に導入された初期圧縮残留応力は平均応力に算入してもよい。
  - 3) 塑性変形を伴って導入された圧縮残留応力は、繰返し荷重下での挙動が検証されている場合には平均応力に算入してもよい。
  - 4) 自緊による残留応力を計算する時にはバウシinger効果の影響を考慮する(6.5を参照)。バウシinger効果を考慮して求めた自緊圧縮残留応力(6.5.5を参照)は、6.5.6に示す条件を満たす機器に対しては、上記3)に拘わらず平均応力に算入してもよい。
  - 5) 高い応力集中部(例えば、鋭いノッチ部など)には、自緊圧縮残留応力の効果を適用してはならない。ただし、交差穴がある場合、胴内面の交差穴部の自緊圧縮残留応力値として、6.5.5に示す円筒胴内面の自緊圧縮残留応力値を使用してもよい。
- c) 運転時又は耐圧試験時の荷重の組合せによって降伏を生じる時には、残留応力の変化を考慮する。
- d) 溶接構造の場合には、溶着金属又は熱影響部において、残留応力を有利に効かせてはならない。
- e) オーステナイト系ステンレス鋼製の構造物においては、残留応力を有利に効かせてはならない。

### 6.3.5 疲労評価の手順

疲労評価は次の a)と b)による。

#### a) 一般

- 1) ミーゼス相当応力(以下、相当応力と表示)の振幅及び平均応力は、設計仕様書に規定された全ての荷重条件に対して計算する。
- 2) 繰返し荷重による相当応力の範囲及び関連する平均応力(残留応力+運転応力)は、弾性的挙動を仮定して求める。
- 3) 応力集中係数は、解析的手法又は実験的手法によって決定する。
- 4) 溶接継手に考慮する疲労強度減少係数は、6.11.8に定める疲労試験により決定するか、JIS B 8266 附属書 8 の 3.3 f)及び 3.4により決定する。

#### b) 疲労評価手順

##### 1) 相当応力振幅

相当応力振幅は次の 1.1)～1.5)による。

- 1.1) 評価点の 1 サイクル中における 6 個の応力成分  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$  の時間変化を求める。
- 1.2) サイクル中、それらが極値(代数的に最大又は最小)の 1 つを生じる時点を選び出し、この時点の応力成分を  $\sigma_{xi}$ ,  $\sigma_{yi}$  のように添字  $i$  を付けて表す。

大抵の場合には、サイクル中、条件がこのような極値となることが既知である時点を手少くとも1つは選り出してよい。場合によっては、繰返し相当応力の最大応力範囲発生時点を見出すために、数個の時点を調べる。

- 1.3) この  $i$  時点における 6 個の応力成分  $\sigma_{xi}$ ,  $\sigma_{yi}$  などをサイクル中の各時点における対応応力成分  $\sigma_{xj}$ ,  $\sigma_{yj}$  などから差し引き、変動成分を  $\Delta\sigma_{xij}$ ,  $\Delta\sigma_{yij}$  などと表す。
- 1.4) これらの変動応力  $\Delta\sigma_{xij}$ ,  $\Delta\sigma_{yij}$  などから次式により相当応力範囲の時間的变化を求める。

$$\Delta S_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \Delta\sigma_{xij}^2 + \Delta\sigma_{yij}^2 + \Delta\sigma_{zij}^2 + 6(\Delta\tau_{xyij}^2 + \Delta\tau_{xzij}^2 + \Delta\tau_{zyij}^2) \}^{0.5} \dots\dots\dots(6.3.1)$$

- 1.5)  $\Delta S_{ij}$  の 1 サイクル分の変化のうち、値が大きい数個の相当応力範囲に対して応力振幅  $S_{altij}$  を求める。

$$S_{altij} = 0.5 \Delta S_{ij} \dots\dots\dots(6.3.2)$$

2) 関連する平均応力

各  $S_{altij}$  に対して平均応力を次の 2.1) ~ 2.3) により求める。

- 2.1) 図 6.3.1, 図 6.3.3, 図 6.3.4, 図 6.3.5 の曲線 B, 図 6.3.8 及び図 6.3.9 の最大平均応力の曲線を使用する場合、これらの曲線には平均応力の補正がすでになされているため、平均応力を求める必要はない。図 6.3.9 の平均応力が 0 の曲線は、平均応力が圧縮又は 0 の場合に使用する。
- 2.2)  $S_{altij}$  を決めた時点  $i$  及び  $j$  より、代数的な最大値を最大応力  $S_{maxij}$ , 最小値を  $S_{minij}$  とする。絶対値が大きい応力成分のヒステリシスループにおける符号の変化を考慮して相当応力に符号をつける。
- 2.3) 図 6.3.2, 図 6.3.5 の曲線 A, 図 6.3.6 及び図 6.3.7 を使用する場合、 $S_{altij}$  に対して、関連する平均応力  $S_{mij}$  は次による。

- 2.3.1)  $S_{maxij}$  及び  $S_{minij}$  の絶対値が  $S_y/\alpha$  未満の場合

$$S_{mij} = 0.5 |S_{maxij} + S_{minij}| \dots\dots\dots(6.3.3)$$

- 2.3.2)  $S_{maxij}$  又は  $S_{minij}$  の絶対値が  $S_y/\alpha$  以上で、かつ、 $S_{altij} < (S_y/\alpha)$  の場合

$$S_{mij} = S_y/\alpha - S_{altij} \dots\dots\dots(6.3.4)$$

- 2.3.3)  $S_{altij} \geq (S_y/\alpha)$  の場合

$$S_{mij} = 0 \dots\dots\dots(6.3.5)$$

ここで、 $S_y$  は運転サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における降伏強さ、 $\alpha = 2$  とする。

ただし、明らかに圧縮応力支配の場合には、2.3.1) 及び 2.3.2) の  $S_{mij}$  の値を負にしてもよい。

弾塑性解析を行う場合には、2.3.1) ~ 2.3.3) を適用せずに、弾塑性解析で得られた応力値より、平均応力を  $S_{mij} = 0.5 (S_{ijmax} + S_{ijmin})$  で求める。ここで、 $S_{ijmax}$  と  $S_{ijmin}$

は、絶対値が大きい応力成分のヒステリシスループにおける符号の変化を考慮して符号をつけた相当応力の最大値と最小値である。弾塑性解析に使用する繰返し応力-ひずみ曲線は材料試験で求めてもよいし、**附属書D**の特定材料と温度における繰返し応力-ひずみ曲線を用いてもよい。

### 3) 等価相当応力振幅

等価相当応力の振幅は次の**3.1)～3.4)**により求める。

**3.1)** **図 6.3.1**, **図 6.3.3**, **図 6.3.4**, **図 6.3.5**の曲線 B, **図 6.3.8** 及び**図 6.3.9**の最大平均応力の曲線には平均応力による設計許容繰返し回数の低減がすでに考慮済みのため,  $S_{eqij} = S_{altij}$ である。**図 6.3.9**の平均応力が 0 の曲線は平均応力が圧縮又は 0 の場合,  $S_{eqij} = S_{altij}$ とする。

**3.2)** 相当応力の振幅  $S_{altij}$  と関連する平均応力  $S_{mij}$  の組合せに対して、疲労損傷上、等価な影響を有する相当応力の振幅  $S_{eqij}$  を次式によって計算する。

**3.2.1)** **図6.3.2**及び**図6.3.6**の場合

$$S_{eqij} = 7 S_{altij} / \left[ 8 - \{ 1 + S_{mij} / (S_u / \alpha) \}^3 \right] \dots\dots\dots(6.3.6)$$

**3.2.2)** **図6.3.5**の曲線A(振幅  $S_{eqij} < 151.7$  MPa)の場合

$$S_{eqij} = S_{altij} / \{ 1 - S_{mij} / (S_y / \alpha) \} \dots\dots\dots(6.3.7)$$

**3.2.3)** **図6.3.7**の場合

$$S_{eqij} = S_{altij} + 0.4 S_{mij} \dots\dots\dots(6.3.8)$$

ここで、 $S_u$  は、運転サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における引張強さである。

**3.3)**  $S_{altij}$  が最大の場合が  $S_{eqij}$  が最大となるとは限らないため、いくつかの  $S_{altij}$  と  $S_{mij}$  の組合せから  $S_{eqij}$  の最大値を求める必要がある。

**3.4)** 設計許容繰返し回数は、設計疲労曲線と最大の  $S_{eq}$  を使って求める。等価相当応力の振幅  $S_{eq}$  には係数  $K_e$  及び縦弾性係数の比  $E/E_a$  を乗じ、**図 6.3.2**, **図 6.3.6** 及び**図 6.3.7** から設計許容繰返し回数  $N_f$  を求める時には、**図 6.3.10** に示す表面粗さの影響係数  $K_r$  を更に乗ずる。

一次+二次相当応力範囲が**附属書 J 1 g)** を満足する場合は、係数  $K_e=1.0$  である。一次+二次応力相当応力範囲が**附属書 J 1 g)** を満足しない場合は、係数  $K_e$  は**附属書 J 1 h)** により算定する。

ここで、 $E$  は設計疲労曲線に示された縦弾性係数、 $E_a$  は解析に用いた運転温度における縦弾性係数である。

**4) 設計許容繰返し回数の決定** 考えている運転サイクルが重要な変動応力を生じる唯一のサイクルの場合には、設計許容繰返し回数  $N_f$  は次のように決定する。

**4.1)** 設計疲労曲線の縦軸上に、 $S_a = K_e K_r (E/E_a) S_{eq}$  をとる(**図 6.3.2**, **図 6.3.6** 及び**図 6.3.7** 以外は  $K_r = 1.0$  である)。

4. 2) 横軸上に対応する繰返し回数を読みとる。これが、設計許容繰返し回数  $N_f$  である。

**注記1**  $S_a$  が 6. 3. 6 の  $10^8$  回に対する許容応力振幅の 1/2 以下の場合には、許容繰返し回数は無限大であるとしてよい。

**注記2** 図 6. 3. 7 においては、 $S_a$  が設計疲労曲線の  $10^6$  回に対する許容応力振幅値を下回る場合でも、対応する許容繰返し回数は  $10^6$  回とする。

**注記3** 冷間加工されたオーステナイトステンレス鋼の場合、 $S_a$  が 図 6. 3. 5 の  $10^{11}$  回に対する許容応力振幅値に冷間加工後の引張強さに対する冷間加工前の引張強さの比 (= 冷間加工後の引張強さ / 冷間加工前の引張強さ) を乗じた値の 1/2 以下の場合には、許容繰返し回数は無限大としてよい。

**注記4** アルミニウム合金の場合、 $S_a$  が 図 6. 3. 9 の  $10^9$  回に対する許容応力振幅値の 1/2 以下の場合には、許容繰返し回数は無限大としてよい。

5) **累積使用係数** 重要な変動応力を生じる応力サイクルが 2 種類以上ある場合、相当応力の振幅及び関連する平均応力は各応力サイクルに対して計算する。応力サイクルの累積的な影響は次により評価する。

- 5. 1) 各応力サイクルに対応する設計寿命中の繰返し回数を  $n_1, n_2, n_3$  など、一般的に  $n_i$  とする。
- 5. 2) 各応力サイクルに対して、上記 4) 及び 5) に示す手順によって  $S_a$  を決定する。これらの量  $S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}$  など、一般的に  $S_{ai}$  とする。
- 5. 3) 各  $S_{ai}$  に対して、該当する設計疲労曲線から設計許容繰返し回数  $N_i$  を決定する。これらを、 $N_1, N_2, N_3$  など、一般的に  $N_i$  とする。
- 5. 4) 各応力サイクルに対して、使用係数  $U_i = n_i / N_i$  を求める。
- 5. 5) 累積使用係数を次により求める。

$$U = \sum U_i \dots\dots\dots (6.3.9)$$

累積使用係数  $U$  は 1.0 を超えてはならない。

6. 3. 6  $10^8$  回に対する許容応力振幅 <sup>1)</sup>

$10^8$  回に対する許容応力振幅は、次の a) と b) による。

a)  $10^8$  回に対する許容応力振幅は、次の 1) ~ 5) による。ただし、 $S_{mij}$  は 6. 3. 5 a) 3) 3. 2) に示す平均応力、 $S_u$  は運転サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における材料の引張強さである。

1) 図 6. 3. 1 において、 $10^8$  回に対する許容応力振幅  $S_a$  は次による。ただし、この値が 図 6. 3. 1 の  $10^6$  回に対する許容応力振幅値を超える場合は、 $10^6$  回に対する許容応力振幅値に等しくとる。

$$S_a = 0.25 S_u (1 - S_{mij} / S_u) \dots\dots\dots (6.3.10)$$

2) 図 6. 3. 2 において、 $10^8$  回に対する許容応力振幅  $S_a$  は次による。ただし、この値が 図 6. 3. 2 の  $10^7$  回に対する許容応力振幅値を超える場合は、 $10^7$  回に対する許容応力振幅値に等しくとる。

$$S_a = 0.25 S_u \dots\dots\dots(6.3.11)$$

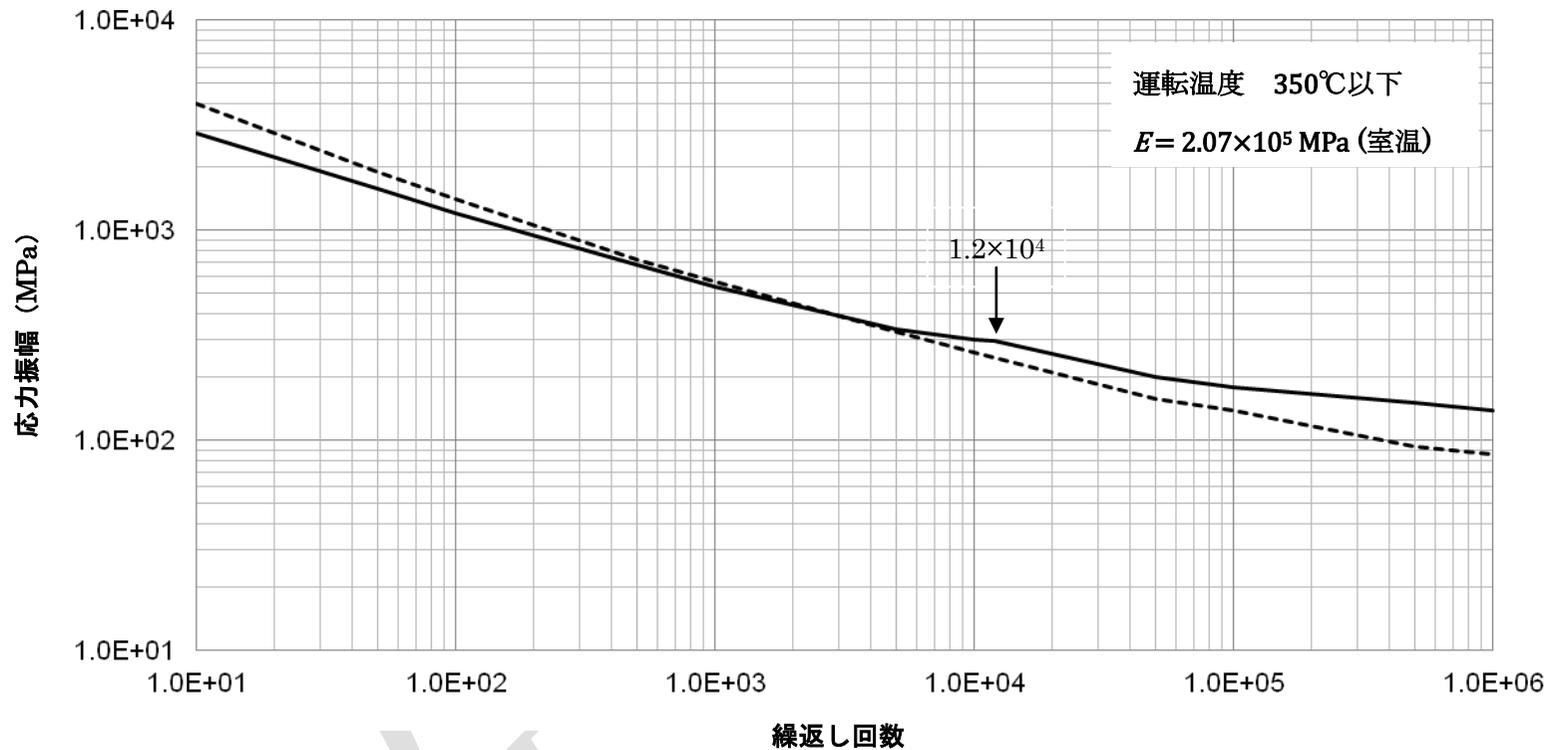
- 3) 図 6.3.3 において、 $10^8$  回に対する許容応力振幅  $S_a$  は次による。ただし、この値が図 6.3.3 の  $10^6$  回に対する許容応力振幅値を超える場合は、 $10^6$  回に対する許容応力振幅値に等しくとる。

$$S_a = 0.33 S_u \{8 - (1 + S_{mij}/S_u)^3\}/7 \dots\dots\dots(6.3.12)$$

- 4) 図 6.3.6 において、 $10^8$  回に対する許容応力振幅  $S_a$  は次による。ただし、この値が図 6.3.6 の  $10^7$  回に対する許容応力振幅値を超える場合は、 $10^7$  回に対する許容応力振幅値に等しくとる。

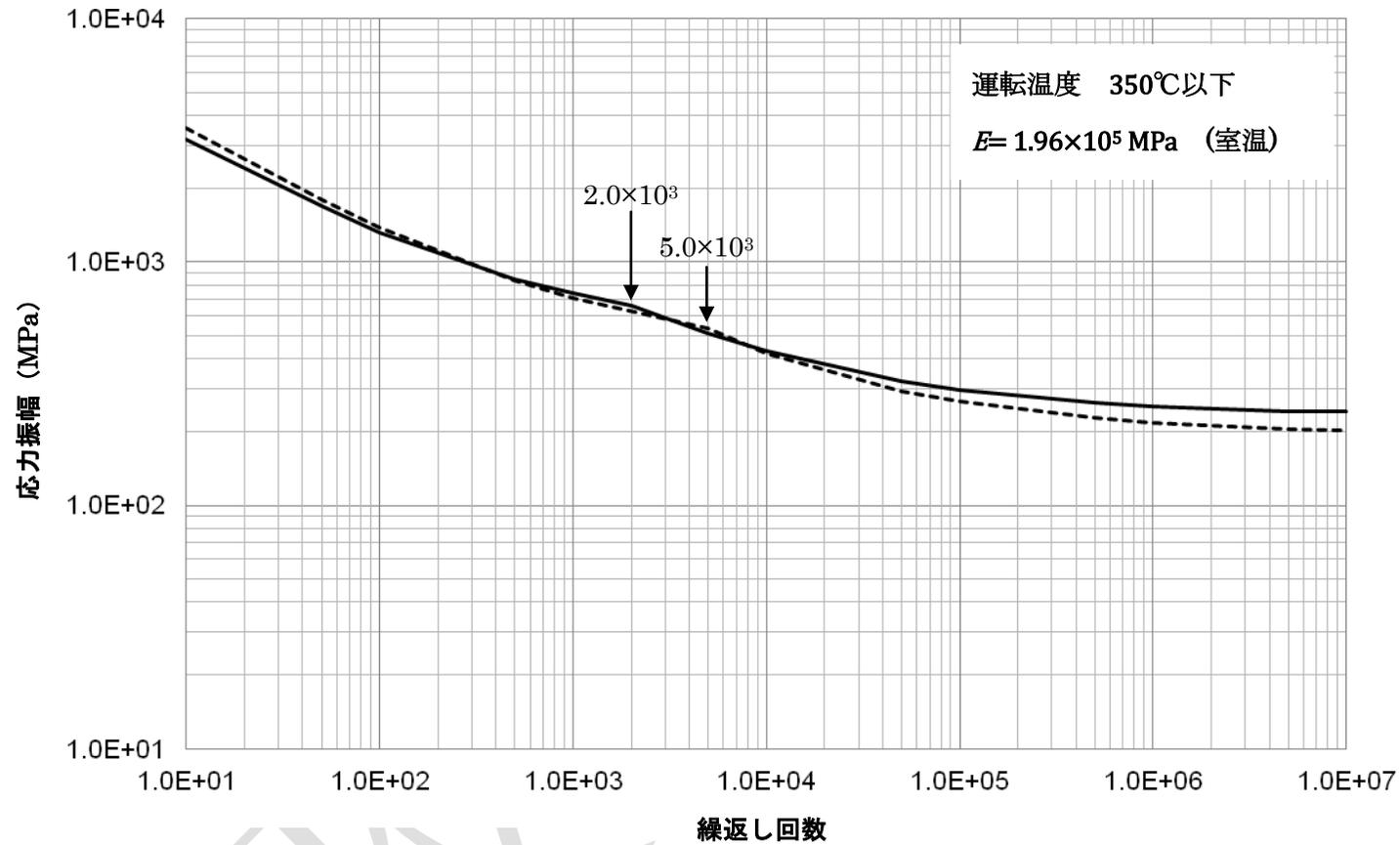
$$S_a = 0.20 S_u \dots\dots\dots(6.3.13)$$

- 5) 図 6.3.8 において、 $10^8$  回に対する許容応力振幅  $S_a$  は、図から直接読み取る。
- b) 図 6.3.1～図 6.3.3 及び図 6.3.6 において、図が与える上限の繰返し回数である  $10^6$  回又は  $10^7$  回を超え  $10^8$  回以下の繰返し回数は、両対数で表示した設計疲労曲線において、上限の繰返し回数に対する許容応力振幅を与える点と  $10^8$  回に対する許容応力振幅を与える点を直線補間して求めてもよい。



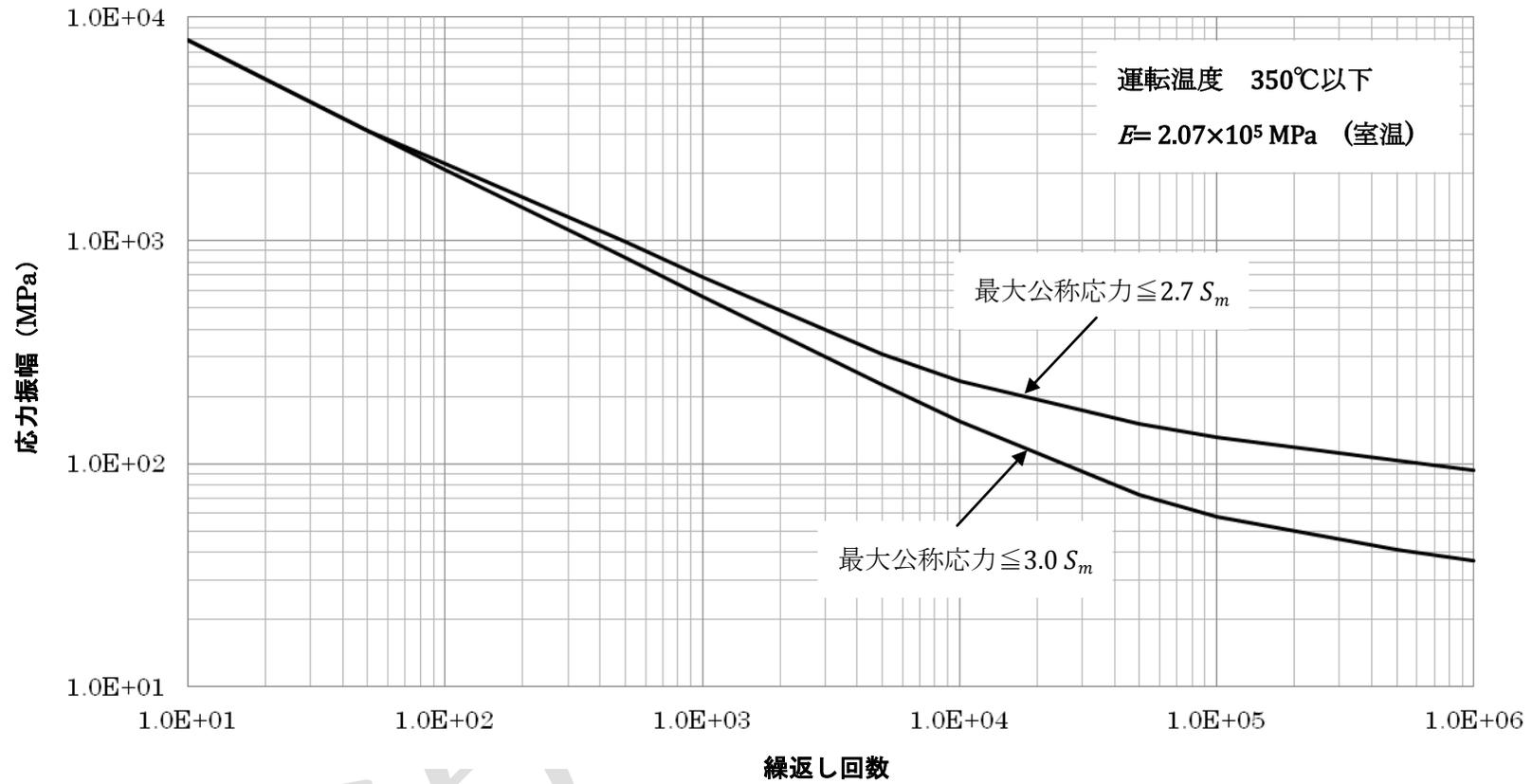
- 注記 1 点線は、材料の最小引張強さが 550 MPa 以下の場合に使用する。
- 注記 2 実線は、材料の最小引張強さが 790 MPa 以上、895 MPa 未満の場合に使用する。
- 注記 3 最小引張強さが 550 MPa を超え、790 MPa 未満の場合には、内挿によって求めた値を使用する。
- 注記 4 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこみ済み

**図 6.3.1 炭素鋼、低合金鋼及びフェライト系ステンレス鋼の設計疲労曲線**  
 (材料の規定最小引張強さが 895 MPa 未満の場合)



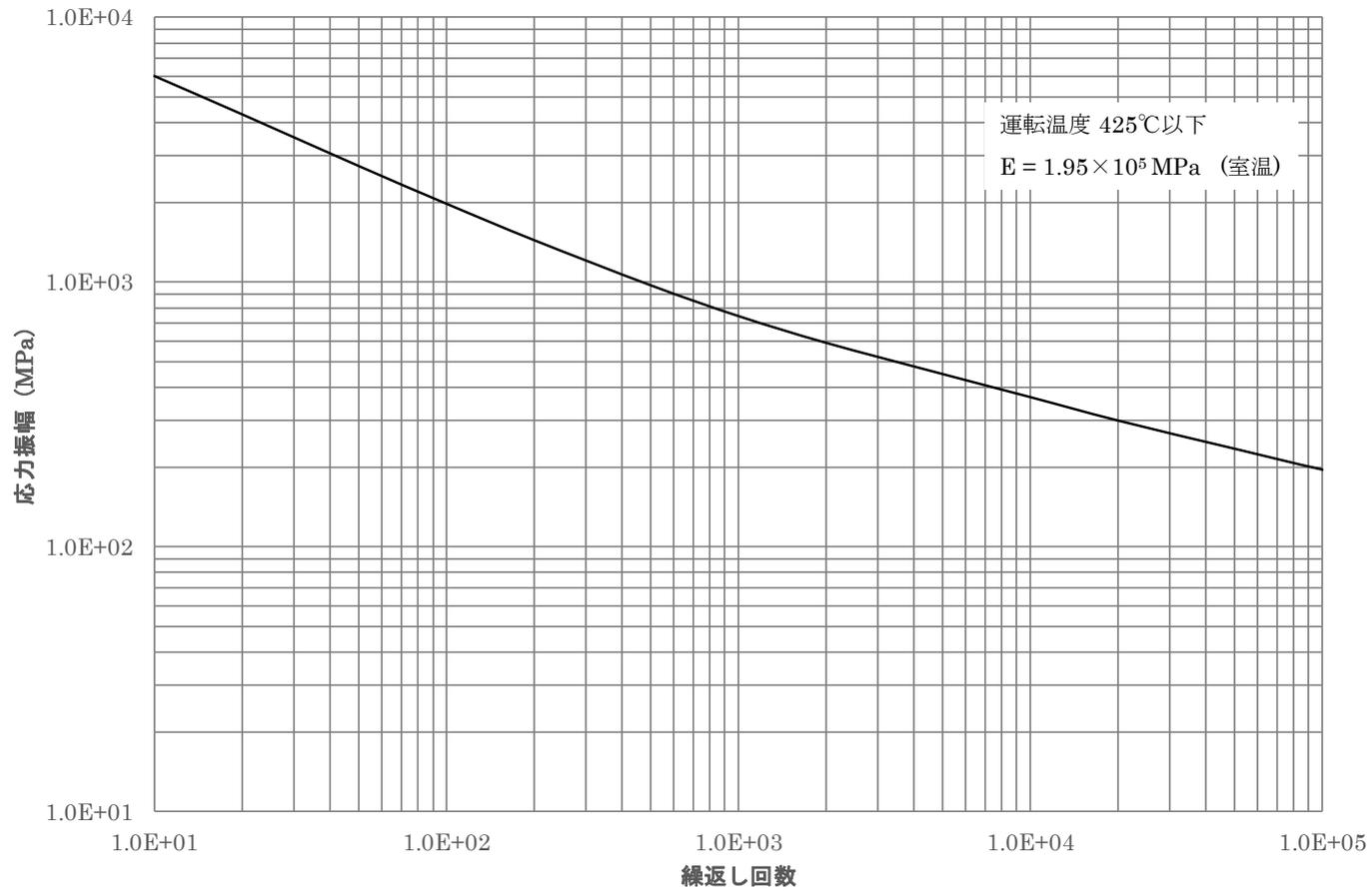
- 注記 1 点線は、材料の最小引張強さが 895 MPa 以上、980 MPa 未満の場合に使用する。
- 注記 2 実線は、材料の最小引張強さが 980 MPa 以上、1,180 MPa 未満の場合に使用する。
- 注記 3 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこんでいない。

図 6.3.2 高強度低合金鋼の設計疲労曲線<sup>1)</sup>



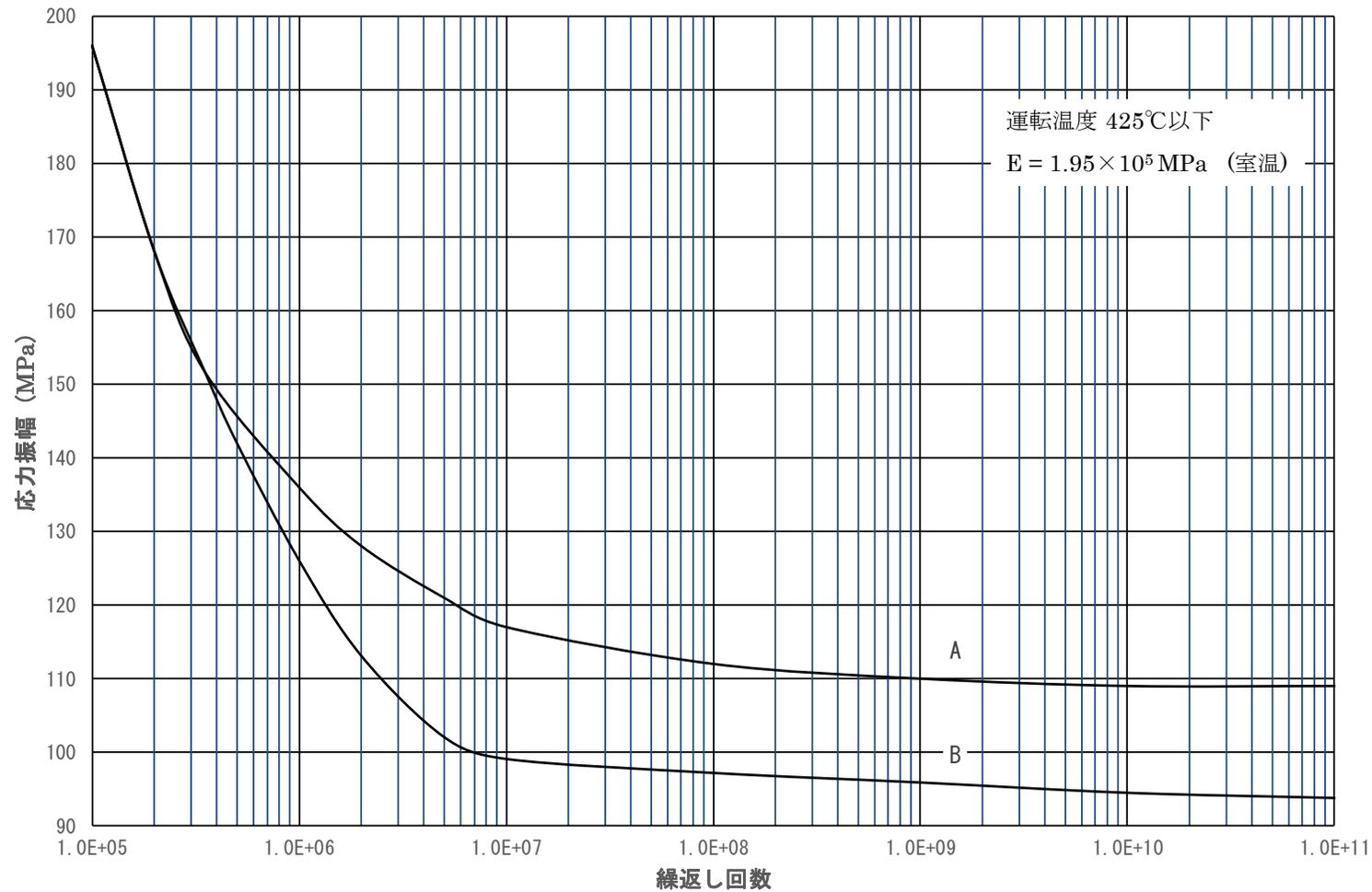
注記 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこみ済み

図 6.3.3 高強度鋼ボルトの設計疲労曲線



**注記** 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこみ済み

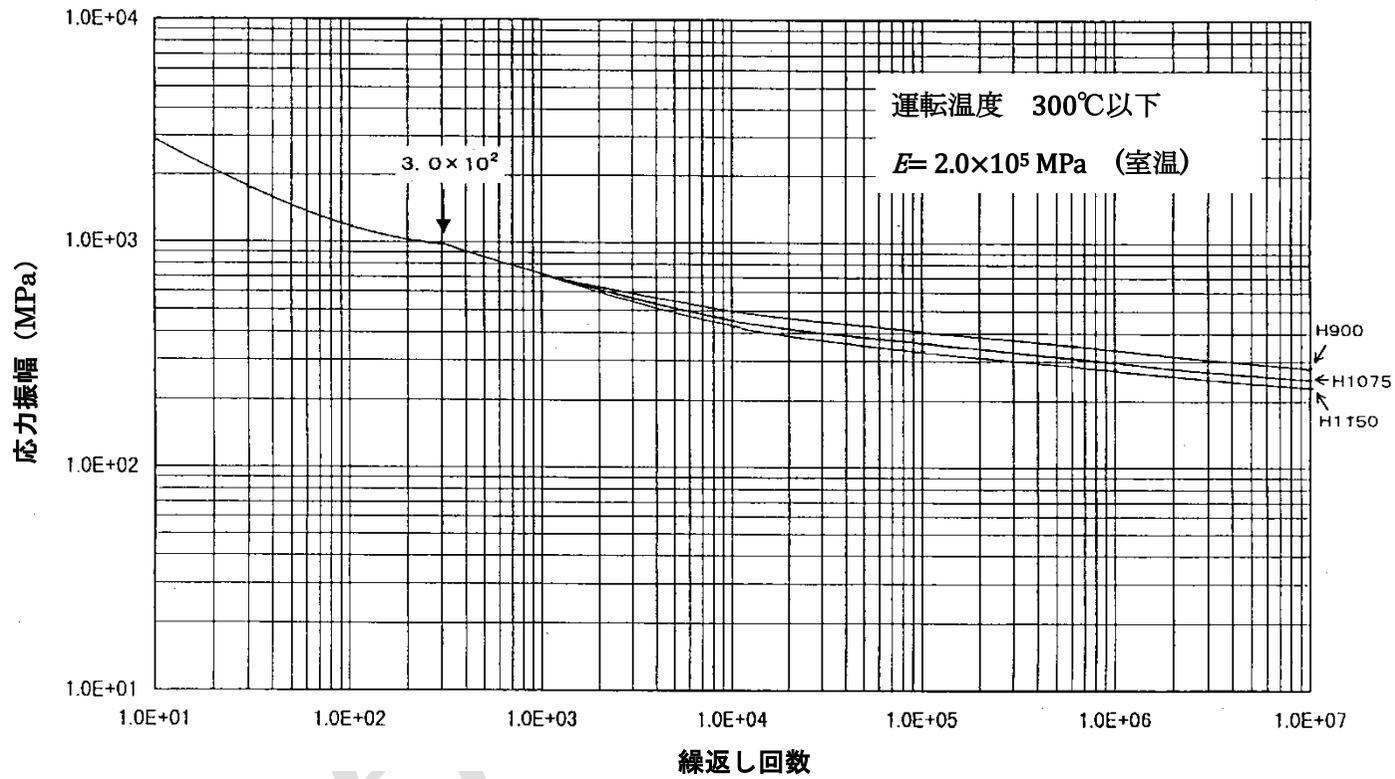
**図 6.3.4 オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労曲線**  
(繰返し回数が  $10^6$  回未満の場合)



注記 1 曲線 A 等価応力強さの振幅を使う場合

注記 2 曲線 B 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこみ済み

図 6.3.5 オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労曲線  
(繰返し回数が 10<sup>6</sup> 回 ~ 10<sup>11</sup> 回で、応力振幅が 195 MPa 以下の場合)



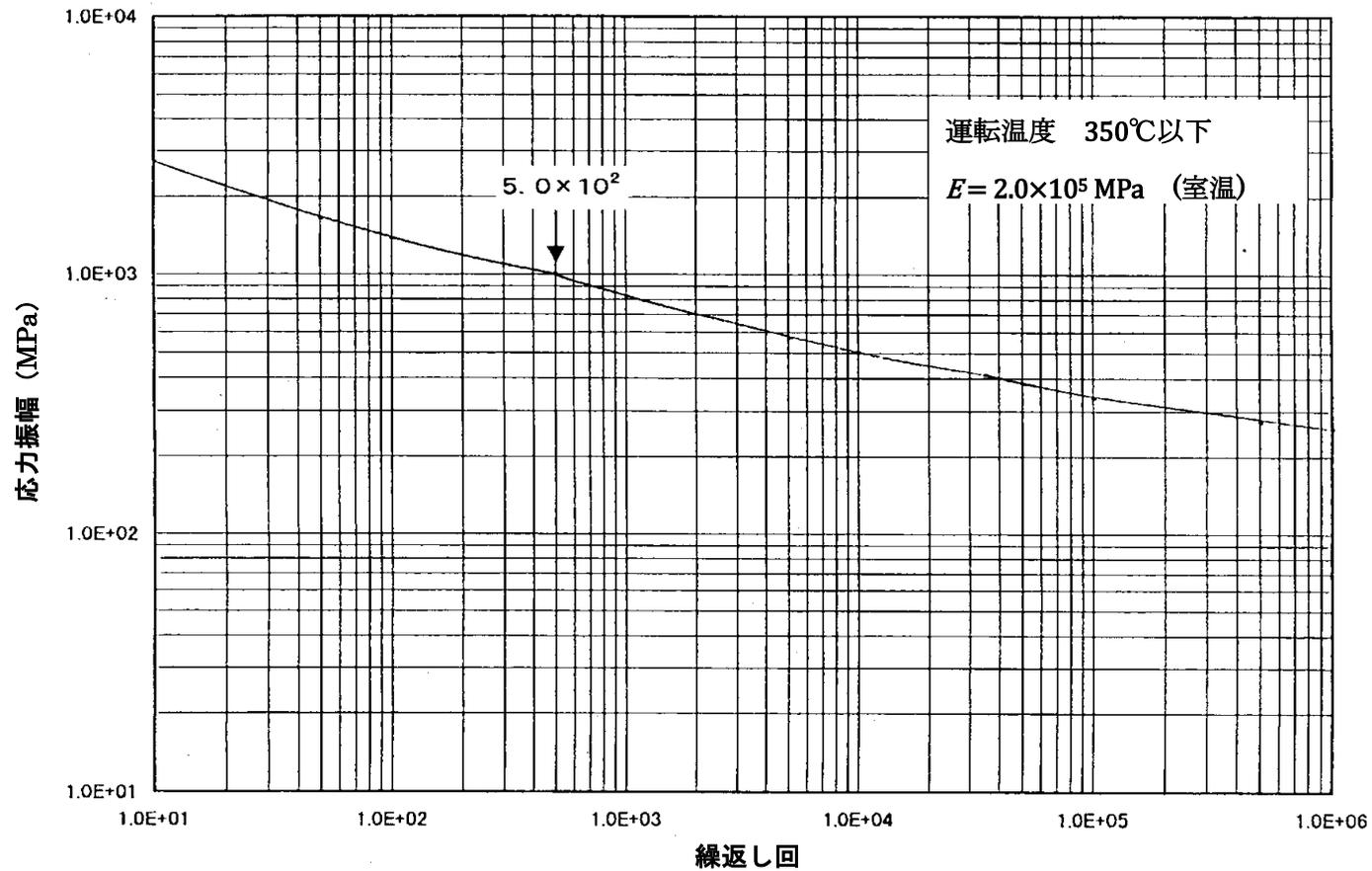
**注記1** H925, H1025及びH1100については引張強さに応じて補間して求めてよい。

図のH900, H1075及びH1150の引張強さの基準値は次による。

H900 : 1,310 MPa, H1075 : 1,000 MPa, H1150 : 930 MPa

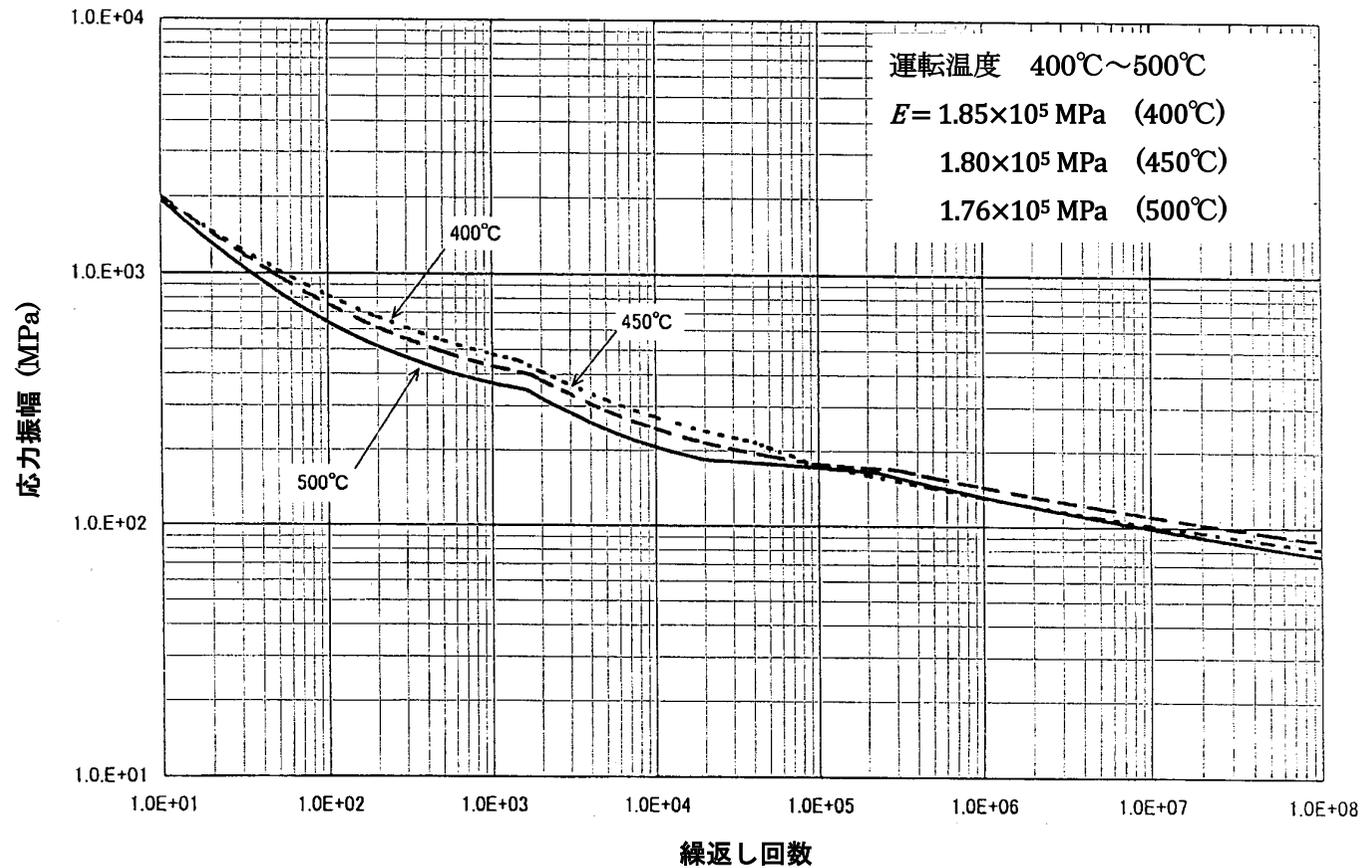
**注記2** 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこんでいない。

図 6.3.6 SUS630 系ステンレス鋼の設計疲労曲線<sup>1)</sup>



注記 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこんでいない。

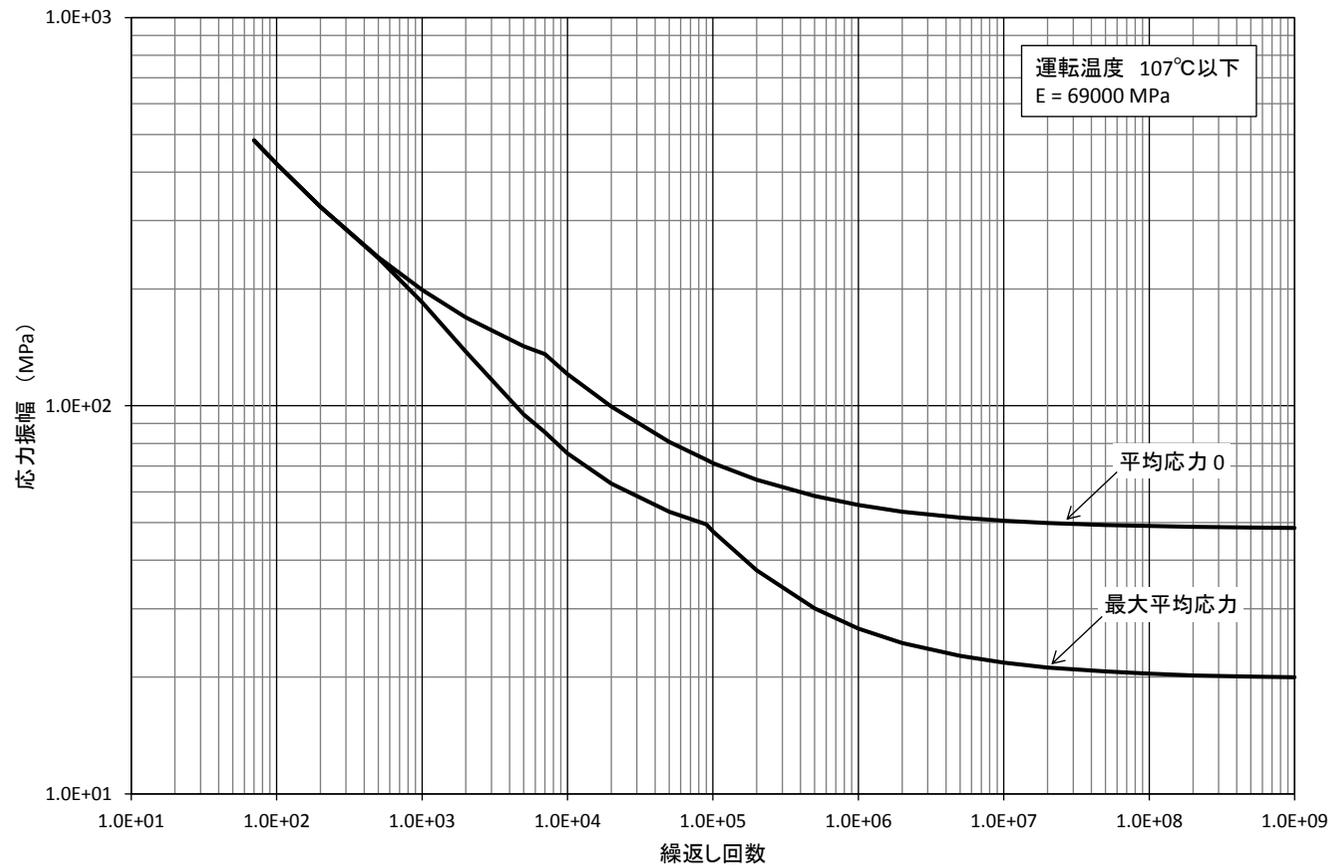
図 6.3.7 インコネル 718 の設計疲労曲線<sup>1)</sup>  
(棒材で引張強さが 1,370 MPa の場合)



注記1 3Cr-1Mo-1/4V鋼にも適用が可能

注記2 平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこみ済み

図 6.3.8 2-1/4Cr-1Mo-1/4V 鋼の設計疲労曲線<sup>1)</sup>



**注記1** 高压水素環境下で適用が可能

**注記2** 最大平均応力の曲線は平均応力による設計許容繰返し回数の低減をおりこみ済み

**注記3** 平均応力0の曲線は圧縮平均応力又は平均応力0の場合に適用が可能

**図 6.3.9 アルミニウム合金 (A6061-T6 及び A6061-T651) の設計疲労曲線**

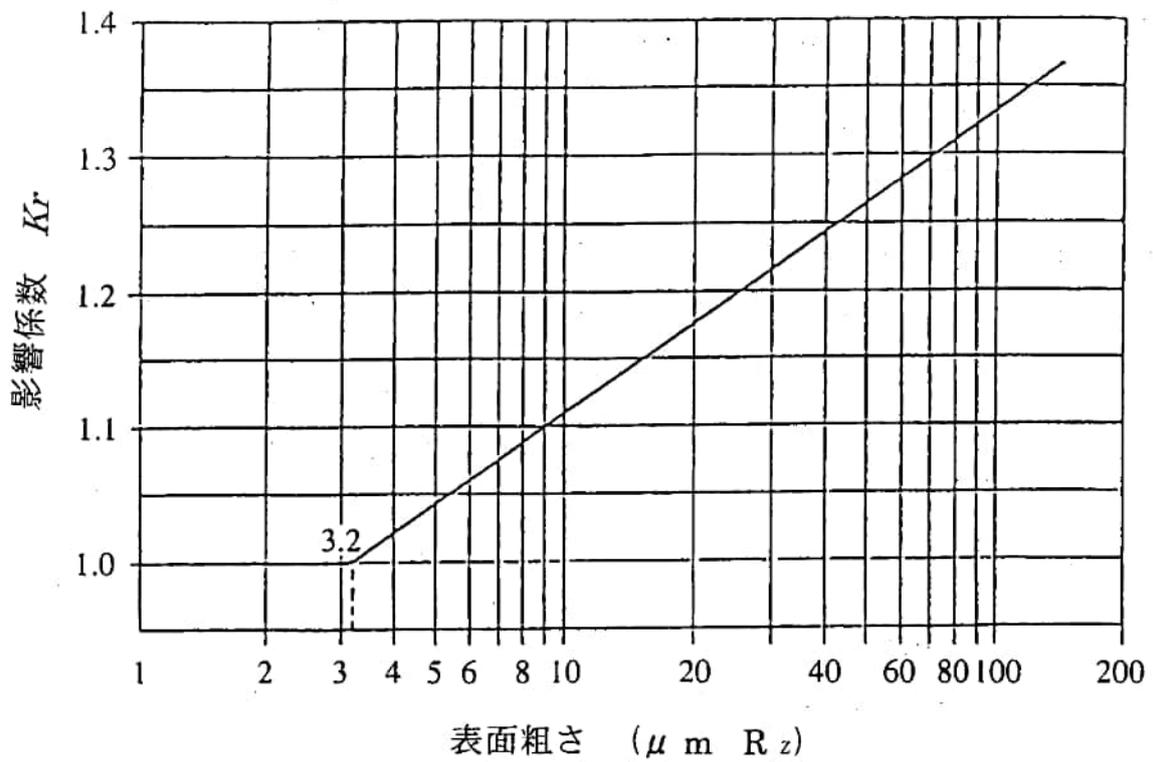


図 6.3.10 表面粗さによる影響係数  $K_r$  <sup>2)</sup>

#### 参考文献

- 1) 高圧ガス保安協会, KHKS 0220(2004) 超高压ガス設備に関する基準, (2004)
- 2) 高圧ガス保安協会, KHKS 0220(2020) 超高压ガス設備に関する基準, (2020)

## 6.4 破壊力学評価

### 6.4.1 記号

- $N_p$  : 設計許容繰返し回数  
 $K_{Imin}^*$  : 残留応力を除く繰返し応力負荷による応力拡大係数の最小値(MPa $\sqrt{m}$ )  
 $K_{Imax}^*$  : 残留応力を除く繰返し応力負荷による応力拡大係数の最大値(MPa $\sqrt{m}$ )  
 $K_{Ires}$  : 残留応力による応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ )  
 $da/dN$  : 亀裂の最深点における疲労亀裂進展速度(mm/cycle)  
 $dl/dN$  : 亀裂の表面点における疲労亀裂進展速度(mm/cycle)  
 $\Delta K_I$  : 応力拡大係数範囲(MPa $\sqrt{m}$ )  
 $\Delta K_{th}$  : 疲労亀裂進展の下限界値(MPa $\sqrt{m}$ )  
 $R_K$  : 応力拡大係数比

### 6.4.2 適用範囲

破壊力学に基づく設計手法について規定する。容器が破裂前漏洩するような破壊モードとなることが明らかな場合には、**6.1.13**に従って、**6.3**又は**6.4**を適用することによって設計許容繰返し回数を求める。破裂前漏洩が証明できない場合には、設計許容繰返し回数は**6.4**によって求める。

### 6.4.3 一般要求

一般要求は、次の**a)～d)**による。

- a) 先端の曲率半径が鋭く、深さと長さで特徴付けられるきずを亀裂と定義し、亀裂は压力容器の高応力領域に存在すると想定する。線形破壊力学を用いて、限界亀裂深さ又は最大許容深さまで亀裂が進展するのに要する設計許容繰返し回数を求める。線形破壊力学に基づく具体的な計算手順については、**附属書 C**を参照する。
- b) 溶接、熱処理、成形、自緊、焼ばめ、線巻きでは、製作施工にともない残留応力が生じるため、繰返し負荷を受けて亀裂が進展する時はこのような残留応力が存在する領域を進展する。設計許容繰返し回数を求める際に、残留応力を考慮する方法は**6.4.5**で与えられる。
- c) 与えられた荷重条件に対する限界亀裂深さは、亀裂の応力拡大係数が平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  に等しくなる亀裂深さで与えられる。限界亀裂深さは、考えられる荷重条件の中で、最も過酷な荷重条件の組合せに対して**附属書 C**により計算する。限界亀裂深さを計算する時は、応力拡大係数の計算に適切な塑性域補正を行う。この補正の方法は、**附属書 C**にいくつかの亀裂形状に対して与えられている。なお、限界亀裂深さは、**附属書 C**に代わり、最も過酷な荷重条件の組合せに対して **API 579-1/ASME FFS-1** の破壊評価線図(Failure Assessment Diagram)を用いて求めてもよい。限界亀裂深さが容器の厚さより小さくなるような場合には、破裂前漏洩として取扱わない。なお、**6.1.14**を参照する。
- d) **表 5.4.1** に示すアルミニウム合金の平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  は、25 MPa $\sqrt{m}$  とする。ただし、破壊靱性試験を行えば、その値を用いてもよい。

### 6.4.4 亀裂寸法の評価基準

亀裂寸法の評価基準は、次の**a)**、**b)**による。

- a) **想定初期亀裂寸法** 設計許容繰返し回数を求める時に用いる初期亀裂寸法は、使用する非破

壊試験方法に基づいて決める。使用する非破壊試験方法で指示模様の長さとし深さの両方が決定できない場合には、想定初期亀裂はアスペクト比が  $a/l = 1/3$  ( $a$  は亀裂深さ、 $l$  は亀裂長さ)の半楕円表面形状とする。想定初期亀裂寸法は、次の 1)、2)による。

- 1) 応力集中部がない表面亀裂は、半楕円形状を想定する。1.2.1 b)の使用者設計仕様書で特に亀裂長さが規定されていない場合は、想定する亀裂長さは 9 で規定される非破壊試験における最大許容指示模様よりも小さな値としない。この値よりも小さい亀裂長さを想定する場合には、使用する非破壊試験法で、その寸法の指示模様を確実に検出できることを示す必要がある。
  - 2) ねじ山底又は環状溝においては、亀裂形状は環状又は半楕円表面形状を想定する。
- b) **許容最終亀裂深さ** 亀裂進展計算により設計許容繰返し回数  $N_p$  を求めるためには、許容最終亀裂深さを決定する必要がある。許容最終亀裂深さは API 579-1/ASME FFS-1 の破壊評価線図(Failure Assessment Diagram)を用いて求めてもよい。設計許容繰返し回数は亀裂が想定初期亀裂寸法から許容最終亀裂深さまで進展するのに要する繰返し回数であり、次の 1)と 2)の方法から求められる繰返し回数の小さい方の値とする。
- 1) 想定初期亀裂寸法から、6.4.3 c)で計算される限界亀裂深さまで進展するのに要する繰返し回数の半分の値
  - 2) 想定初期亀裂寸法から 次の 2.1)又は 2.2)で規定される許容最終亀裂深さまで進展するのに要する繰返し回数
    - 2.1) **単肉容器** 単肉容器に対する許容最終亀裂深さは、次の 2.1.1)と 2.1.2)の小さい方の値とする。
      - 2.1.1) 当該位置における容器厚さの 25%
      - 2.1.2) 6.4.4 a)で定義される想定初期亀裂深さに、6.4.3 c)で計算される限界亀裂深さと想定初期亀裂深さの寸法差の 25%を加えた値
    - 2.2) **二層以上からなる多層容器**
      - 2.2.1) 最内層における許容最終亀裂深さは、最内層の厚さとする。ただし、最内層より外側の層の理論崩壊圧力[6.2.2 a) 2)で計算される値の 1.732 倍]が、きずのない容器の設計圧力より少なくとも 20%超となっている必要がある。この条件が満たされない場合には、許容最終亀裂深さは最内層の厚さの 25%以下とする。最内層より外側の層の理論崩壊圧力は、最内層より外側の層が圧力を受けると想定して、圧力を受ける層の内径を用いて計算する。
      - 2.2.2) 最内層と最外層以外の層における許容最終亀裂深さは、層厚さの 25%以下とする。
      - 2.2.3) 最外層における許容最終亀裂深さは、6.4.4 a)で定義される想定初期亀裂深さに、6.4.3 c)で計算される限界亀裂深さと想定初期亀裂深さの寸法差の 25%を加えた値以下とする。

#### 6.4.5 応力拡大係数 $K_I$ の計算

応力拡大係数  $K_I$  の計算は、次の a)～c)による。

- a) 有限長さの亀裂は部材の表面と深さ方向に進展するため、式(6.4.1)及び式(6.4.2)により亀

裂進展計算を行い、亀裂の進展とともに亀裂のアスペクト比( $a/l$ )の値を更新していく必要がある。典型的な高圧力容器における亀裂に対して応力拡大係数を計算する方法は、**附属書 C**で与える。なお、**附属書 C**に代わり、**API 579-1/ASME FFS-1**の計算式を用いてもよい。**API 579-1/ASME FFS-1**により応力拡大係数を計算する場合には、部分安全係数は1.0とする。

- b) 応力拡大係数を計算する際には、内圧によって生じる応力、熱応力、不連続部での応力、残留応力などの全ての負荷を考慮する必要がある。また、亀裂面に流体圧力が作用する場合には、この圧力による影響も考慮しなければならない。これらを考慮する方法は、**附属書 C**で与える。溶接残留応力は、**API 579-1/ASME FFS-1**、**BS 7910**、有限要素法解析又はその他の適切な方法で推定する。
- c) 残留応力以外の全ての応力負荷に対する応力拡大係数は、最小値と最大値及びその時系列変化を考慮して評価する。これらの応力負荷の影響は、応力拡大係数の最小値  $K_{Imin}^*$  及び最大値  $K_{Imax}^*$  として計算する。自緊、焼ばめ、溶接又は線巻きのような残留応力の影響は、残留応力による正又は負の応力拡大係数  $K_{Ires}$  を計算することによって個別に評価する。**6.4.6**に、疲労亀裂進展則を積分して設計許容繰返し回数を求めるときに、疲労亀裂進展則に  $K_{Imin}^*$ 、 $K_{Imax}^*$  及び  $K_{Ires}$  を取り込む方法について規定する。

**6.4.6 疲労亀裂進展の計算**

疲労亀裂進展計算は、次の **a)~d)** による。

- a) 亀裂の最深点における疲労亀裂進展速度  $da/dN$  は、応力拡大係数範囲  $\Delta K_I$  と応力拡大係数比  $R_K$  の関数として次式で仮定する。

$$\frac{da}{dN} = C \{ f(R_K) \} (\Delta K_I)^m \dots\dots\dots(6.4.1)$$

ここで、

$$\Delta K_I = K_{Imax}^* - K_{Imin}^*$$

$$R_K = \frac{K_{Imin}^* + K_{Ires}}{K_{Imax}^* + K_{Ires}}$$

亀裂長さ  $l$  の半楕円表面亀裂では、亀裂の表面点における疲労亀裂進展速度を次式とする。

$$\frac{dl}{dN} = 2 C \{ f(R_K) \} (\Delta K_I)^m \dots\dots\dots(6.4.2)$$

疲労亀裂進展計算では、応力拡大係数に対する塑性域補正項を0とする(**附属書 C**を参照)。また、 $(K_{Imax}^* + K_{Ires}) \leq 0$  の場合には、 $da/dN = 0$  及び  $dl/dN = 0$  とする。

材料定数  $C$  と  $m$  の値は、 $f(R_K) = 1$  の場合に対して、**表 6.4.1** に与えられる。 $R_K = 0$  のときに  $f(R_K) = 1$  であり、関数  $f(R_K)$  は**附属書 C** に与えられる。

- b) **式(6.4.1)** 及び**式(6.4.2)** の  $\Delta K_I$  の値が**式(6.4.3)~式(6.4.5)** に与えられる  $\Delta K_{th}$  の値より小さい場合には、 $da/dN = 0$  及び  $dl/dN = 0$  とする。

なお、 $(K_{Imax}^* + K_{Ires}) \leq 0$  の場合には、 $\Delta K_I = 0$  とする。 $R_K < 0$ 、即ち  $(K_{Imin}^* + K_{Ires}) < 0$  の場合には、 $\Delta K_I = K_{Imax}^* + K_{Ires}$  とする。

炭素鋼及び低合金鋼( $S_y \leq 620$  MPa)

$$\Delta K_{th} = \min\{G(1 - H R_K), I\} \geq 2.0 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}) \dots\dots\dots(6.4.3)$$

高強度低合金鋼( $S_y > 620$  MPa)及びマルテンサイト系析出硬化鋼

$$\Delta K_{th} = \min\{G(1 - H R_K), I\} \geq 2.2 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}) \dots\dots\dots(6.4.4)$$

アルミニウム合金

$$\Delta K_{th} = \min\{G(1 - H R_K), I\} \geq 0.7 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}) \dots\dots\dots(6.4.5)$$

ここで、 $G$ 、 $H$ 及び $I$ の値は、**表6.4.1**に与えられる。

- c) 腐食環境中の疲労では、疲労亀裂進展速度は著しく増加する。疲労亀裂進展の計算を行う場合には、荷重の繰返しとともに環境の影響を考慮しなければならない。
- d) 設計温度が室温よりも高い場合には、**式(6.4.1)**及び**式(6.4.2)**の材料定数 $C$ を次式で補正する。

$$C = C_0 \left(\frac{E_0}{E}\right)^m \dots\dots\dots(6.4.6)$$

ここで、

$C_0$  : **表 6.4.1** に与えられる  $C$  の値 [mm(MPa $\sqrt{\text{m}}$ )<sup>-m</sup>/cycle]

$m$  : **表 6.4.1** に与えられる  $m$  の値

$E_0$  : 室温における縦弾性係数 (MPa)

$E$  : 設計温度における縦弾性係数 (MPa)

#### 6.4.7 設計許容繰返し回数

亀裂の進展量は繰返し応力と亀裂寸法(深さ、長さ)の両方に依存するため、設計許容繰返し回数 $N_p$ は荷重履歴に大きく依存する。全ての荷重の履歴と大きさから、荷重履歴の各ポイントで亀裂進展計算を行わなければならない。製作者設計報告書に、全ての荷重の履歴と大きさを記録しなければならない。

設計許容繰返し回数は、**式(6.4.1)**及び**式(6.4.2)**の疲労亀裂進展則を数値的に積分することによって計算する。亀裂深さ $a$ に比べて十分小さい微小亀裂進展量 $\Delta a$ の進展範囲内では、 $\Delta K_I$ の値は一定と仮定する。ただし、その微小亀裂進展量を十分に小さくとり、得られた設計許容繰返し回数が、仮定した微小亀裂進展量に依存していないことを確認する必要がある。

表 6.4.1 疲労亀裂進展則における材料定数<sup>†</sup>

材料	$C$ $\left\{ \frac{\text{mm}}{\text{cycle}} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^{-m} \right\}$	$m$	$G$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )	$H$	$I$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )
炭素鋼及び低合金鋼 ( $S_y \leq 620 \text{ MPa}$ )	3.80E-9	3.07	5.5	0.80	5.5
高強度低合金鋼 ( $S_y > 620 \text{ MPa}$ )	3.64E-9	3.26	7.0	0.85	6.0
マルテンサイト系 析出硬化鋼	4.49E-9	3.15	7.0	0.85	6.0
オーステナイト系 ステンレス鋼	2.05E-9	3.30	a)	a)	a)
アルミニウム合金	4.46E-7	3.00	1.8	1.22	1.8

**注記** 表に示す材料定数の値は、非腐食環境下においてのみ使用する。特定の腐食環境下における材料定数は、考慮すべき方法を含めて使用者設計仕様書に記載しなければならない。

**注<sup>a)</sup>** オーステナイト系ステンレス鋼の疲労亀裂進展の下限界値は未確定である。

## 6.5 自緊を用いた設計

### 6.5.1 適用範囲

この項では、クロスボアなどの構造不連続部のない単肉円筒について、自緊後の残留応力の計算方法を規定する。複雑な構造形状の場合には、弾塑性解析などの数値解析的手法又は実験的手法を用いる。

自緊は厚肉容器の内面に圧縮の残留応力分布を生じさせる方法の一つであり、単独又は焼ばめなど他の方法と組合せて用いてもよい。残留応力の組合せに関する規定を **6.8** に示す。

自緊による残留応力を考慮した疲労設計法は、**6.3** と **6.4** に規定する。自緊処理を行う場合の追加規定を **7.5** に示す。

### 6.5.2 理論

自緊の理論は、次の **a)** 及び **b)** である。

- a)** 自緊理論は、内圧を受ける厚肉円筒の内面における応力が外面の応力よりも高いことに基づいている。内圧の増加とともに、内面で初期降伏し、塑性崩壊に至るまで弾塑性境界は外面方向へと移動する。この過程で圧力を除荷すると、内面には圧縮の周方向残留応力が、外面には引張の周方向残留応力が生ずる。
- b)** この周方向の圧縮残留応力は、次の **1)~3)** のような効果をもたらす。
- 1) 圧力再負荷時の見かけ上の降伏応力を上昇させる。
  - 2) 疲労評価における平均応力の減少に伴う等価応力振幅の減少とそれによる疲労寿命を増加させる。
  - 3) 破壊力学評価における応力拡大係数比の減少に伴う亀裂進展速度の減少とそれによる疲

劣又は応力腐食による亀裂進展を遅延させる。

### 6.5.3 記号

$A_{CS}$	: 長手軸方向に垂直な断面における容器部の断面積 (mm <sup>2</sup> )
$D$	: 任意半径方向位置の円筒胴の直径 (mm)
$D_I$	: 内表面における直径 (mm)
$D_O$	: 外表面における直径 (mm)
$D_P$	: 自緊圧力開放前の弾塑性境界直径 (mm)
$D_Z$	: $\sigma_{tRA} = \sigma_{rRA}$ となる直径 (mm)
$E$	: 縦弾性係数 (MPa)
$F_b$	: $D_Z \leq D \leq D_P$ におけるバウシンガー効果に対する補正係数
$F_l$	: 最大自緊圧力時における円筒の軸方向荷重, ふた板に作用する荷重がフレームのような外部機器によって支持される場合には $F_l = 0$ (N)
$M$	: 塑性化率 $(D_P - D_I)/(D_O - D_I)$
$P_A$	: 最大自緊圧力 (MPa)
$S_y$	: 自緊温度における降伏強さの測定値 (MPa)
$Y$	: 内外径比 $(D_O/D_I)$
$\varepsilon_m$	: 最大自緊圧力 $P_A$ 時に, 3点以上の長手軸方向外面位置で計測した周方向最大ひずみの平均値
$\varepsilon_p$	: 自緊圧力開放後に, 3点以上の長手軸方向内面位置で計測した周方向残留ひずみの平均値
$\sigma_{AD}$	: 内面( $D = D_I$ )における $\sigma_{tRA}$ の値 (MPa)
$\sigma_{CD}$	: 内面( $D = D_I$ )におけるバウシンガー効果に対して補正した周方向残留応力 (MPa)
$\sigma_{rR}$	: バウシンガー効果に対して補正した半径方向残留応力 (MPa)
$\sigma_{rRA}$	: $D_I \leq D \leq D_P$ における自緊後の第1近似半径方向残留応力 (MPa)
$\sigma_{tR}$	: バウシンガー効果に対して補正した周方向残留応力 (MPa)
$\sigma_{tRA}$	: $D_I \leq D \leq D_P$ における自緊後の第1近似周方向残留応力 (MPa)
$\nu$	: ポアソン比

### 6.5.4 自緊圧力の制限

自緊圧力に上限はないが, 自緊による内面の周方向残留ひずみは 2%を超えてはならない。

### 6.5.5 残留応力の計算

自緊によって生じる残留応力は, 次の **a) ~ c)** に示す方法により計算する。ただし, より精度良く安全側な方法があれば, 他の方法を使用してもよい。残留応力の計算では, 次のことに留意する必要がある。

- ・自緊後に機械仕上げを行ってもよい。この場合には,  $D_P$  は機械仕上げ後も変化しないという仮定と容器の最終寸法を用いて塑性化率を計算する。ただし, 機械加工によるいかなる引張の残留応力も考慮する必要がある。
- ・腐食前の状態の容器寸法を使用して残留応力を計算する。
- ・**a) ~ c)** の計算式は, 最大せん断応力説に基づき, 長手軸方向応力を中間主応力であると仮定

しているため、長手軸方向の残留応力を求められない。

a) **弾塑性境界直径  $D_p$  の計算**  $D_p$  の計算では  $\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $P_A$  の内一つ以上を計測し、それぞれ次の計算式により  $D_p$  を決定する。ただし、 $P_A$  を用いる場合は、 $M < 0.4$  に限定される。

1) **外面ひずみ  $\varepsilon_m$  が既知の場合**  $\varepsilon_m$  が計測される場合には、次式で  $D_p/D_o$  を計算する。

1.1) **閉端の条件(端部荷重が支持される条件)で自緊する場合**

$$(D_p/D_o)^2 = \left\{ E \varepsilon_m + \nu \left( \frac{P_A D_I^2}{D_o^2 - D_I^2} \right) \right\} / (1.15 S_y) \dots\dots\dots(6.5.1)$$

1.2) **他の条件の場合**

$$(D_p/D_o)^2 = \{ E \varepsilon_m + \nu (F_I/A_{CS}) \} / (1.15 S_y) \dots\dots\dots(6.5.2)$$

2) **残留内面ひずみ  $\varepsilon_p$  が既知の場合**  $\varepsilon_p$  が測定される場合、次式で  $D_p$  を変化させて、反復法による数値計算により  $D_p$  を計算する。

$$\frac{2 E \varepsilon_p}{1.15 S_y} = (1 - 2\nu) \{ \ln(D_I^2/D_p^2) - 1 \} + (2 - \nu)(D_p/D_I)^2 + (1 - \nu)(D_p/D_o)^2 \dots\dots\dots(6.5.3)$$

$$\frac{\{ \ln(D_p^2/D_I^2) + (D_o^2 - D_p^2)/D_o^2 \} \{ 1 - \nu + (1 + \nu)Y^2 \}}{Y^2 - 1}$$

3) **最大自緊圧力  $P_A$  が既知の場合**  $P_A$  が測定され、 $M < 0.4$  の条件を満足する場合には、次式で  $D_p$  を変化させて、反復法による数値計算により  $D_p$  を計算する。

$$P_A = 1.15 S_y \{ \ln(D_p/D_I) + (D_o^2 - D_p^2)/(2 D_o^2) \} \dots\dots\dots(6.5.4)$$

b) **塑性領域 ( $D_I \leq D \leq D_p$ ) における残留応力** 内圧の負荷、徐荷の単一サイクルに対する自緊による残留応力の計算式を示す。

1) **除荷時に再降伏しない場合**  $D_I \leq D \leq D_p$  における残留応力  $\sigma_{tRA}$  及び  $\sigma_{rRA}$  を、式(6.5.5)及び式(6.5.6)により計算する。

$$\frac{\sigma_{tRA}}{S_y} = \frac{D_p^2 + D_o^2}{2 D_o^2} + \ln\left(\frac{D}{D_p}\right) - \left(\frac{D_I^2}{D_o^2 - D_I^2}\right) \left\{ \frac{D_o^2 - D_p^2}{2 D_o^2} + \ln\left(\frac{D_p}{D_I}\right) \right\} \left(1 + \frac{D_o^2}{D^2}\right) \dots\dots\dots(6.5.5)$$

$$\frac{\sigma_{rRA}}{S_y} = \frac{D_p^2 - D_o^2}{2 D_o^2} + \ln\left(\frac{D}{D_p}\right) - \left(\frac{D_I^2}{D_o^2 - D_I^2}\right) \left\{ \frac{D_o^2 - D_p^2}{2 D_o^2} + \ln\left(\frac{D_p}{D_I}\right) \right\} \left(1 - \frac{D_o^2}{D^2}\right) \dots\dots\dots(6.5.6)$$

2) **除荷時に再降伏する場合のバウシinger効果に対する補正** 引張の塑性変形の結果として圧縮の降伏応力の絶対値が小さくなり、自緊圧力を開放した時に圧縮側で再降伏することがあるため、残留応力の補正が必要となる。この現象はバウシinger効果として知られており、残留応力の補正は次のように行う。

2.1) 式(6.5.5)と式(6.5.6)より、反復計算により  $(\sigma_{tRA} - \sigma_{rRA}) = 0$  となる直径  $D$  を求め、これを  $D_z$  とする。

2.2) 式(6.5.5)より内面  $D = D_I$  における  $\sigma_{tRA}$  を計算し、これを  $\sigma_{AD}$  とする。式(6.5.7)と式(6.5.8)又は式(6.5.9)より、内面  $D = D_I$  におけるバウシinger効果に対して補正

した周方向残留応力  $\sigma_{CD}$  を求める。

$$\sigma_{CD}/\sigma_{AD} = 1.6695 - 0.1651 Y - 1.8871 M + 1.9837 M^2 - 0.7296 M^3 \dots\dots\dots(6.5.7)$$

開端の場合には

$$\sigma_{CD}/\sigma_{AD} = -0.5484 + 1.8141 Y - 0.6502 Y^2 + 0.0791 Y^3 \dots\dots\dots(6.5.8)$$

閉端の場合には

$$\sigma_{CD}/\sigma_{AD} = 1.15 \dots\dots\dots(6.5.9)$$

**式(6.5.7)と式(6.5.8)又は式(6.5.9)に対して、負で小さい方の値を $\sigma_{CD}$ とする。**

**2.3)**  $\sigma_{CD}/S_y < -0.7$  の場合には、 $\sigma_{CD}/S_y = -0.7$  (下限値)とする。

**2.4)**  $D_I < D < D_Z$  の領域では、**式(6.5.10)及び式(6.5.11)**より残留応力を求める。

$$\frac{\sigma_{tR}}{\sigma_{CD}} = \frac{D_Z \{ \ln(D/D_I) + 1 \} + D_I - 2D}{D_Z - D_I} \dots\dots\dots(6.5.10)$$

$$\frac{\sigma_{rR}}{\sigma_{CD}} = \frac{D_Z \ln(D/D_I) + D_I - D}{D_Z - D_I} \dots\dots\dots(6.5.11)$$

**2.5)**  $D_Z \leq D \leq D_P$  の領域では、連続条件と平衡条件を満足するように、残留応力を補正する必要がある。この補正は、次のように補正係数  $F_b$  を計算することにより行う。

- ・ **式(6.5.11)**より、 $D = D_Z$ における  $\sigma_{rR}$  を求める。
- ・ **式(6.5.6)**より、 $D = D_Z$ における  $\sigma_{rRA}$  を求める。
- ・ これらの比を、 $F_b = \sigma_{rR}/\sigma_{rRA}$  とする。
- ・ **式(6.5.5)及び式(6.5.6)**に、 $F_b$  を乗じて残留応力を求める。

**c) 弾性領域 ( $D_P \leq D \leq D_O$ )における残留応力** **式(6.5.12)及び式(6.5.13)**より残留応力を求める。ただし、 $F_b$ は **b) 2.5)**による。

$$\frac{\sigma_{tR}}{S_y} = F_b \left( 1 + \frac{D_O^2}{D^2} \right) \left[ \frac{D_P^2}{2 D_O^2} + \left( \frac{D_I^2}{D_O^2 - D_I^2} \right) \left\{ \frac{D_P^2 - D_O^2}{2 D_O^2} - \ln \left( \frac{D_P}{D_I} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots(6.5.12)$$

$$\frac{\sigma_{rR}}{S_y} = F_b \left( 1 - \frac{D_O^2}{D^2} \right) \left[ \frac{D_P^2}{2 D_O^2} + \left( \frac{D_I^2}{D_O^2 - D_I^2} \right) \left\{ \frac{D_P^2 - D_O^2}{2 D_O^2} - \ln \left( \frac{D_P}{D_I} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots(6.5.13)$$

**6.5.6 残留応力の疲労設計への適用**

この項で求めた残留応力を、**6.3**及び**6.4**に適用する。ただし、圧縮残留応力値の適用は、次の二つの条件を満たす場合に限定する。

- ・ 高強度低合金鋼を使用した機器
- ・ 応力振幅が材料の繰返し降伏強さ(繰返し応力-ひずみ曲線における0.2%耐力)よりも小さい機器

## 6.6 穴、ふた板、鏡板、ねじ継手、シールの設計

### 6.6.1 適用範囲

この項での要求は、穴、ふた板、鏡板、ねじ継手及びシールの設計に適用する。これらの要求は、6.2、6.3、6.4の追加要求である。

### 6.6.2 一般要求

一般要求は、次のa)～h)による。

- a) ふた板、鏡板、ねじ継手及びシールは、使用される圧力容器と同じ耐圧性能を有する。
- b) 交差穴、その他の穴について静的強度に対する影響を考慮しなければならない。
- c) 耐圧とシール性能に関係する全ての構成部品について完全な応力解析が必要となる。
- d) 繰返し荷重を受ける用途では、シールを除く全ての部品に対して、6.3の疲労評価又は6.4の破壊力学評価を実施する。
- e) 全ての荷重条件で継手が分離するのを防ぐ対策が整っていないなければならない。
- f) 静解析及び疲労評価には、総荷重、ねじ山の数、ねじ形状、相手方の剛性及び摩擦を考慮しなければならない。
- g) 指定のシール面の外側にある二次シール部(例えば、ねじ部)における偶発的、付随的な圧力上昇を防ぐためにベントロを設ける。
- h) 管の接続でフレア付き、フレア無し及び圧縮式の継手は認められない。

### 6.6.3 ねじ継手

- a) **一般要求** ねじ継手は、次の1)～4)による。
  - 1) ねじ継手には、ボルト、スタッド、タイロッドも含まれる。
  - 2) 平行ねじは使用してもよいが、管用テーパねじは使用してはならない。  
**注記** 細目ねじは、熱膨張や荷重の拡大によって、組付けの問題やねじの欠損の恐れがあることを留意する。
  - 3) 耐圧部にタップ穴を設ける場合は穴の影響(例: 応力増加、材料欠損)を考慮する。
  - 4) c)で要求される疲労解析に、ねじ荷重分布を考慮する。
- b) **弾塑性解析** ねじ継手の解析はd)に代わり、6.2.3の弾塑性解析によってもよい。
  - 1) 設計に考慮すべき荷重と荷重条件は、表6.2.1と表6.2.2による。
  - 2) 表6.2.3の荷重抵抗係数を考慮した組合せ荷重条件で、崩壊しない。
- c) **疲労及び破壊力学評価** 疲労及び破壊力学評価は、次の1)～4)による。
  - 1) 次の4)で免除される場合を除き、6.3の疲労評価又は6.4の破壊力学評価を、全てのねじ継手について実施する。
  - 2) ねじ継手の疲労評価は、繰返し荷重を受ける他の構造物と同じ方法で行う。
  - 3) 予期される条件について解析する。解析又は試験によってより低い疲労強度減少係数が妥当であると証明されない限り、疲労強度減少係数は4.0以上とする。
  - 4) この規格で許容された材料で製作されたJIS及びASME B18.2.2ナットには、疲労評価又は破壊力学評価の要求はない。スタッドやボルトに用いるめねじには、ボルト荷重に対する疲労評価の要求はない。しかし、めねじを有する部材の一次+二次応力については、めねじ深さの影響を考慮する。

d) **弾性解析** 弾性解析による強度評価は、次の 1)～11)による。

- 1) 一次荷重に必要なボルト本数、断面積を決める。降伏強さは 5 のボルト材料の値を使用する。
- 2) **附属書 J**による平均一次相当応力は谷径で決定し、次式による。

$$S = \frac{1}{1.8} S_y \dots\dots\dots(6.6.1)$$

- 3) ただし、ねじ底径の 0.9 倍未満のくびれ軸部を有するボルトについては、実軸径を使用する条件とし、次式による。

$$S = \frac{1}{1.5} S_y \dots\dots\dots(6.6.2)$$

- 4) ボルトの一次+二次膜相当応力は、 $0.75 S_y$  を超えてはならない。一次+二次膜相当応力+二次曲げ相当応力は設計荷重と予荷重の両方に対して  $S_y$  以下とする。応力集中の影響は上記の解析には考慮しなくてよい。
- 5) 5 の材料仕様を満足する規格ボルト、ナットの組合せをフランジなどの温度-圧力レーティングに従って使用し、両者の材料が同質の場合は、ねじ部のせん断及び支圧の確認は必要ない。
- 6) ねじ部の平均せん断応力(=設計荷重/有効ねじせん断断面積)は、設計温度で  $0.25 S_y$  以下とする。ねじ荷重分布を考慮した計算では、ねじ部のせん断応力は、 $0.4 S_y$  を超えない。
- 7) 最大設計荷重に対するねじ部の支圧応力は、設計温度における  $S_y$  の 75%以下とする。
- 8) 運転圧力及び熱荷重の組合せによるねじ部の半径方向の相対移動量は、最小ひっかかりの高さの 10%以下とする。
- 9) ねじ込み長さは、図面公差の下限值で、不完全ねじ部を除いた最小値とする。
- 10) タップ穴のねじに荷重のかかる継手は、次の 11)の要求に従う。ねじ継手を取付ける容器又は溶接肉盛り面は、機械加工で平滑にする。
- 11) タップ穴を設ける場合は穴の全長にわたってねじを切る。植込みボルトのねじ込み深さは、 $d_s$  又は次式のいずれか大きい方以上とする。

$$0.75 d_s \frac{\text{植込みボルト材の設計温度における } S_y}{\text{タップ穴の付いている母材の設計温度における } S_y} \dots\dots\dots(6.6.3)$$

ここに、 $d_s$  は植え込みボルトの谷径(mm)

e) **植込みボルトのねじ加工, 機械加工** 植込みボルトは全長にねじを設けるか、又はねじのない部分は谷径まで機械加工する。ねじ部長さは、b)～d)の解析によって証明されていない限り、呼び径の 1.5 倍以上とする。V 形状のねじは、ねじの谷の丸み  $r$  がピッチの 0.032 倍以上で、最低 0.1mm 以上とする。長さがボルト径の 8 倍以上の植込みボルトは、次の 1)～3)の条件のもとで呼び径でねじのない部分を有してもよい。

- 1) 植込みボルトは、ねじ部からボルト径の 0.5 倍以上の範囲で谷径まで機械加工される。
- 2) 谷径までの加工部分は、隣接のねじ部に適切に移行していく。

3) 首下の丸み半径は、軸径の 0.06 倍以上とする。

- f) **特殊ねじ継手, その他の継手** 規格品以外の機械継手は、次の条件を満たせば使用してもよい。継手の安全性を決めるために、同一材料、同一形状の継手を用いて **6.11.7 b) 3)** に従った試験荷重で性能試験を行う。振動、疲労、繰返し条件、低温、熱膨張及び水撃が予想される場合、性能試験にはそれらの想定される荷重を含める。

#### 6.6.4 穴

交差穴、その他の穴の容器の静的強度に対する影響は**付属書 E** によるか応力解析を行い、**6.2** に従った強度評価を行う。

#### 6.6.5 ねじ込みふたを有する荷重伝達機能を持つ胴

ねじ込みふたを有する荷重伝達機能を持つ胴の設計は、次の **a)** と **b)** による。ふたの静解析及び疲労評価には、総荷重、ねじ山の数、ねじ形状、相手方の剛性及び摩擦を考慮する。ねじ荷重分布を考慮した計算では、ねじ部のせん断応力は  $0.4 S_y$  を超えてはならない。ねじの荷重を均等に分布するために、最初のねじ山の前方にアンダーカットを設けてもよい。

a) **ねじ部での容器の応力** ねじ部の相当応力の計算には、次の **1) ~ 6)** によりねじ荷重、ねじ形状による応力集中係数(特に、ねじの谷の丸み)、ねじの曲げ応力及び容器のねじ部での膜、曲げ応力を考慮する。

- 1) **長手方向曲げ応力** 解析又は試験によってより低い応力が妥当であると証明されない限り、容器の一番目のねじ部での容器の一次長手方向曲げ応力は、一次長手方向膜応力の 3.0 倍とする。
- 2) **周方向応力** 周方向応力は圧力シールまでの距離によりかなり影響される。解析又は試験によってより低い応力が妥当であると証明されない限り、一番目のねじ部での容器の周方向応力は、**付属書 J 式(16)** の円筒胴の周方向応力と同一とする。更に、ねじ山にかかる集中荷重の半径方向成分により生じる周方向応力も考慮に入れる。
- 3) **ねじ荷重分布** 一般的に、ねじは軸荷重を一様に伝達しない。ねじ荷重分布は**付属書 G** を用いて求めるか、妥当性が示せれば他の方法によってもよい。
- 4) **破壊力学評価** 破壊力学評価は **6.4** に従って行う。この評価には、少なくともねじの曲げ及び胴の膜及び曲げ応力の効果を含める。
- 5) **ひずみの進行** 雌ねじキャップ、雄ねじプラグは非一体型継手の例であり、変形の進行により破壊しやすい。この様な継手は、徐々に緩んでラチェットを引き起こす場合もあることを考慮しなければならない。
- 6) **断続ねじ** 断続ねじを使用したふたは、合成応力に、連続ねじの周方向長さと同断続ねじの周方向長さの比を掛ければ、連続ねじのふたとして解析してもよい。

b) **特殊ふた及び材料** 次の **1), 2)** 及び **3)** の条件を満足すれば、規格以外のねじふたを使用してもよい。

- 1) 使用者設計仕様書に記載されている全運転条件で、ふたの離脱防止設計がなされている。
- 2) ふたの解析は **6.2, 6.3** 及び **6.4** に従う。又は、同一材料、同一形状により **6.11** に従ってすでに評価されている。
- 3) 最終加工状態で降伏点の計測が不可能又は非現実的な部品については、最終加工が引張

強さに悪影響を及ぼさない限り、設計圧力での最大許容引張応力は、設計温度における引張強さの 1/3 とする。

#### 6.6.6 一体型平鏡板

一体型平鏡板は 6.2.3 又は**附属書 J** に従って設計する。ただし荷重条件が内圧のみの場合、

6.2.3 又は**附属書 J** に代えて**附属書 G** の 1 又は 2 に従って設計してもよい。

#### 6.6.7 急速開閉ふた

急速開閉ふたは、次の a) ~ e) による。

- a) **一般要求** 急速開閉ふたは、外から見て保持機構が良好な状態にあり、閉じた時の固締機構が正しい位置にかみ合うことが分かるように設計し、据付けをする。
- b) **特定の設計要求** 急速開閉ふたで確実な固締装置で規定位置に保持され、ふた板又は固締装置を部分回転するか、又はある範囲だけ動かすだけで完全に開くことのできるもの、及び自動開閉ふたは、次の 1) ~ 3) の条件を満足しなければならない。
  - 1) ふた及び保持装置は、容器に圧力が負荷される前に完全に所定位置にかみ合わされている。
  - 2) ふたを開こうとする容器の圧力は、固締装置を緩める前に抜く。
  - 3) 設計における摩擦係数は 0.02 以下とする。
- c) **手動操作のふたに対して許容し得る設計変更** 手動の必要な固締装置又は機構により規定位置に保持されているもので、固締装置を外して開く前に内容物が漏出するようになっている急速開閉ふたに対しては、上記 1) と 2) を満足させる必要はない。ただし、ふた板及び保持機構が完全に規定位置で閉じる前に加圧する操作、及び圧を逃す前に固締機構又は装置を動かそうとする操作を防止するために、ふたには作業者に対し、音又は目でわかるような警報を出す装置を付けなければならない。
- d) ヨーク及びフレームは、この規格の要求事項を満足しなければならない。
- e) **必要な圧力指示装置** 急速開閉ふたを装備する全ての圧力容器は、操作位置から見える圧力指示装置を設ける。

#### 6.6.8 ふた及びシールの要求事項

高圧容器用ふたでは密封シールの要求が最も大切である。この理由は、シール面からの微少な漏洩でも損傷原因となり、急速に危険状態に進展する恐れがあるためである。ふた及びシールの要求事項は、次の a), b) による。

- a) **ふたの要求事項** ふたの要求事項は、次の 1) ~ 5) による。
  - 1) シールふたは、容器と同等の破壊に対する信頼性で圧力を保持できるようにする。
  - 2) ふたの設計には、シール部が破損した場合の適切なベントを設ける。
  - 3) 予期されるあらゆる温度、圧力条件下において、膨張、ひずみによってシール要求を超える隙間が生じてはならない。
  - 4) ふたの強度及びシール性に関わる部材について、完全な応力解析を行う。
  - 5) 繰返し荷重が作用する場合は、シール材を除いて全ての部材は 6.3 又は 6.4 の要求事項を満足しなければならない。
- b) **シール材の要求事項** シール材は、使用者設計仕様書で指定された圧力、温度、腐食、溶解、

化学反応などのプロセス及び環境条件に適合しなければならない。シール材の要求事項は、次の 1), 2) による。

- 1) **シール内包材** 一般に、5 にはシール材は規定されていない。使用者設計仕様書はシール材を指示するか、又は設計者が材料選定できるような条件を提示する。
- 2) **金属製シール材** シール材自体が圧力保持に必要な強度を有する場合(例：コーン継手、重ね継手など)、シール材はこの規格の要求事項を満足しなければならない。

## 6.7 アタッチメント、サポート、外部ヒーティング/クーリングジャケットの設計

### 6.7.1 一般要求

この項では、サポート、外部ヒーティング/クーリングジャケット、その他のアタッチメントについて 6.2, 6.3, 6.4 への追加要求を規定する。一般要求は、次の a) ~d) による。

- a) サポート、ラグ、ブラケット、強め輪、その他の取付物は、容器壁に溶接又はボルトで取付ける。取付物は 6.3, 6.4 に従った疲労評価又は破壊力学評価により耐圧部への影響を確認する。
- b) 取付物は、取付ける耐圧部の曲面に合うように成形する。
- c) 取付物は、6.7.3 で許容される溶接の場合には、次の 1) ~3) を満たす条件で容器に溶接で取付けてもよい。
  - 1) 抵抗溶接によるスタッド、クリップなどは使用しない。
  - 2) 許容される溶接の形状は、図 6.7.1 による。
  - 3) 非耐圧部材を耐圧部に取付ける溶接は、全て連続完全溶込み溶接とする。7.2.3 も参照する。
- d) 取付物は、溶接肉盛クラッドに直接溶接してよい。クラッド、ライニングなどの複合材に対する取付け溶接は次による。
  - 1) クラッド構造の場合、取付け溶接部に生じる一次相当応力が、取付物又は合せ材の制限値のいずれか小さい方の 10% を超えないときには、直接合せ材に取付物を取付けてよい。この応力が 10% を超えるときには、荷重に対して十分に強度をもった溶接で、母材に直接溶接するか又は肉盛クラッドに溶接する。単なるつなぎ溶接又は漏れ止め溶接のような強度を必要としない溶接は、合せ材に直接溶接してよい。
  - 2) ライニング構造の場合は、取付物は母材又は肉盛クラッドに直接取付けなければならない。ただし、事前に解析と試験を行えば、ライニングに直接取付けてもよい。この場合、比較可能な使用条件下にある同様なライニング構造に対して十分満足できる実績があれば、これを事前解析と試験の代用としてもよい。

### 6.7.2 耐圧部に取付ける取付物の材料

耐圧部に取付ける取付物の材料は、次の a), b) による。

- a) **耐圧部に取付ける主要取付物の材料** 耐圧部に直接溶接される取付物は、5 に規定する材料とする。取付部の材料及び取付け溶接部の溶接金属は、耐圧部の材料に適合しなければならない。設計者は設計温度での取付物の材料と耐圧部の材料の膨張係数、縦弾性係数、降伏強さの違いの影響を考慮する。
- b) **耐圧部に取付ける小物取付物の材料** 耐圧部に取付ける小物取付物とは、小物部品(厚さ 10

mm 以下でかつ、体積 80,000 mm<sup>3</sup> 以下のもの)で、銘板、保温サポートラグ、位置決めラグなどの荷重を受けないか、又は設計者が荷重に対する計算が不要と判断できる小荷重しか受けないものをさす。5 及び 7 により溶接が禁止されている材料を除き、次の 1)～3) の条件を満足する材料であれば、この規格に記載されていない材料でもよく、また、耐圧部に直接溶接してもよい。

- 1) 化学成分及び機械的性質が確認でき、溶接に適した材料である。
- 2) 溶接に関しては、その材料が取付けられる耐圧部の材料に適合する材料である。
- 3) 7 によって溶接後熱処理が要求される材料に対しては、溶接部を溶接後熱処理する。

### 6.7.3 耐圧部材への非耐圧部材の取付け溶接

6.7.2 a) に定義される耐圧部に取付ける主要取付物は、次の a)～d) を適用する。6.7.2 b) に定義される耐圧部に取付ける小物取付物は、次の b) を適用する。

- a) **取付物の位置の制限** 耐圧部材に非耐圧部材を取付ける溶接は、総体的構造不連続部から  $\sqrt{R_m t_s}$  以上離さなければならない。

ここで、

$R_m$  : 不連続部における胴の厚さ中心部の半径(mm)

$t_s$  : 胴の厚さ(mm)

- b) **取付け溶接継手の種類** 耐圧部材に非耐圧部材を取付ける溶接継手の種類は、次の 1)、2) による。

- 1) **完全溶込み溶接** 完全溶込み溶接は、図 6.7.1(c) を参照する。
- 2) **完全溶込み溶接と片側又は両側すみ肉溶接の併用** 完全溶込み溶接と片側又は両側すみ肉溶接の併用は、図 6.7.1(a) 及び(b) を参照する。

- c) **取付物の溶接強さ** 取付物の溶接強さは、最小溶接面積と溶接される二つの材料の、弱い方の材料の 5.4 に規定する降伏強さと引張強さ及び 6.2 の規定に従う。

- d) **取付け溶接の疲労評価** 6.3 の疲労評価又は 6.4 の破壊力学評価を適用する。

### 6.7.4 取付物の設計

外部及び内部の配管も含めて取付物が容器に及ぼす影響は、この規格の他の要求に合うように考慮して設計しなければならない。

### 6.7.5 支持構造物の設計

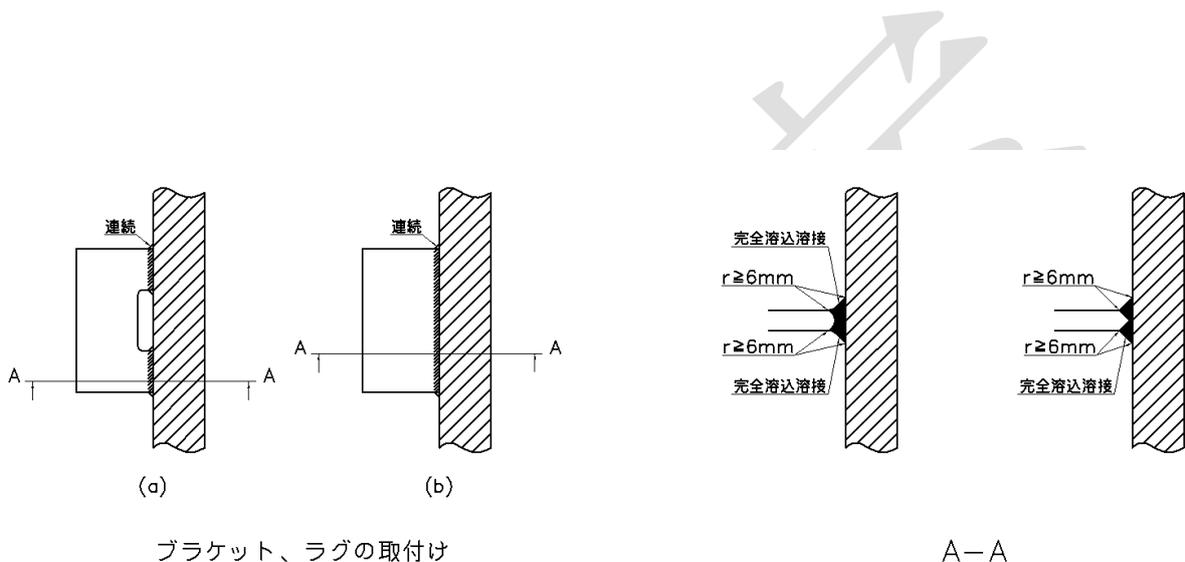
支持構造物の設計は、次の a)～c) による。

- a) 容器の支持方法、支持部材の配置及び容器への取付方法は、最大荷重を考慮して決める。考慮すべき荷重には、圧力、容器の自重、内容物の重量、機器及び配管の荷重、風及び地震による荷重が含まれる(6.2 を参照)。なお、風及び地震による荷重は、同時に考える必要はない。
- b) この規格で取り扱う範囲に含まれる支持構造物の膜応力は、表 6.2.6 に示す制限値を超えてはならない。
- c) 着脱式の底ふたが設けられた縦置き容器の支持構造は、底ふたが運転、検査のために定期的に取り外せる設計とする。

### 6.7.6 ジャケット

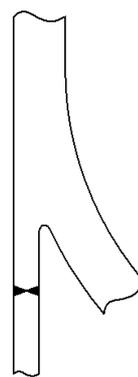
圧力容器の外側に溶接によって取付ける圧力室をジャケットといい、この規格で製作される容器が、加熱冷却用のジャケット付きである場合、ジャケットは次の **a)**、**b)** による。

- a)** この規格で製作される容器に直接溶接で取付けられるジャケットは、**5** 及び **7** で規定する直接取付物の溶接(取付け溶接及び取付物の材料)に適合しなければならない。取付部以外のジャケット部分は、使用者設計仕様書に従って、この規格又は他の規格の設計規定による。
- b)** 直接溶接で取付ける以外の方法で容器に取付けるジャケットは、この規格、又は他の規格による。スペーサー及びジャケット閉止部は、ジャケット本体と同じ規格の規定による。



ブラケット、ラグの取付け

A-A



(c)

支持スカート取付け

図 6.7.1 取付け溶接形状

## 6.8 多層容器の追加規定

### 6.8.1 適用範囲

この規格で取り扱う多層容器とは、円筒胴を次の **a)**～**c)** に示すいずれかの方法で製作された多層容器である。

- a) 図 6.8.1 (a) に示すように、鍛造により円筒を作り、表面を機械加工したうえで焼ばめにより多層とした容器
- b) 図 6.8.1 (a) に示すように、板材から溶接により円筒を作り、表面を機械加工したうえで焼ばめにより多層とした容器
- c) 図 6.8.1 (b) に示すように、板材を曲げ加工し、溶接により円筒にする過程で溶接収縮を利用して多層とした容器。多層部及び内層は強度部材と考えてもよいが、ライニングは強度部材とは考えてはならない。

### 6.8.2 設計上の制限事項

設計上の制限事項は、次の **a)**～**d)** による。

- a) 層間の隙間が 6.8.4 又は 6.8.5 の規定を満足する場合には、6.1、6.2 に従って強度計算を行ってよい。
- b) この項の規定で与えられた式は、弾性解析に基づいている。もし、追加的な予応力が自緊により生じる場合には、局所的な塑性変形からの残留応力分布を 6.5 の規定に従って計算しなければならない。自緊されたライニングを使用した最終残留応力分布を決定する時には、非線形のバウシinger効果を考慮しなければならない。
- c) 6.8.1 a) の方法により製作された多層容器の残留応力は、6.8.4 の規定により計算しなければならない。6.8.1 b) の方法により製作された多層容器の残留応力の効果は、疲労評価と破壊力学的評価に限って考慮してもよい。ただし、溶接部と溶接熱影響部を除く。
- d) 6.8.1 c) の方法による多層円筒は、原則として単肉円筒胴として取り扱う。ただし、6.8.5 で規定する層間ギャップの効果の補正を考えた応力を使用しなければならない。なお、疲労評価に圧縮残留応力の効果を考慮してはいけない。

### 6.8.3 記号

- $D$  : 任意の半径方向位置の直径(mm)
- $D_I$  : 最内層の内径(mm)
- $D_{if}$  : 層間直径(mm)
- $D_n$  : 第  $n$  層の外径(mm)
- $D_o$  : 最外層の外径(mm)
- $E$  : 縦弾性係数(MPa)
- $E_I$  : 最内層の縦弾性係数(MPa)
- $E_n$  : 第  $n$  層の縦弾性係数(MPa)
- $E_o$  : 最外層の縦弾性係数(MPa)
- $F_c$  : 許容層間ギャップでの円周方向の伸び係数
- $g_o$  : ハブ先端の厚さ(mm)
- $k$  : 層の番号 ただし、 $D$  で示した直径に対し、 $D_k > D > D_{k-1}$  とする。

- $l$  : テーパ部の必要とする厚さ(mm)  
 $N$  : 全層数  
 $P$  : 内圧力(MPa)  
 $P_{if}$  : 焼ばめ層の層間圧力(MPa)  
 $P_n$  : 第  $n$  層と第  $n + 1$  層の間の層間圧力(MPa)  
 $P_t$  : 耐圧試験圧力(MPa)  
 $Q_c$  : 層間隙間係数, 単胴と仮定した時の理論周長伸びに対する耐圧試験圧力での周長伸びの実測値との比  
 $Y$  : 内外径比( $D_o/D_i$ )  
       溶接オフセット, 片面側における厚さの差(mm)  
 $Y_i$  : 焼ばめ方式 2 層容器における内層の内外径比( $D_{if}/D_i$ )  
 $Y_o$  : 焼ばめ方式 2 層容器における外層の内外径比( $D_o/D_{if}$ )  
 $e_m$  : 耐圧試験時に実測する周長伸び(mm)  
 $e_{th}$  : 単胴と仮定した場合の耐圧試験圧力での理論周長伸び(mm)  
 $n$  : 応力を計算する層数  
 $t$  : 層成胴の合計厚さ(mm)  
 $t_H$  : 継手部の鏡板の厚さ(mm)  
 $t_L$  : 層成材 1 枚の厚さ(mm)  
 $t_n$  : ノズルネックの厚さ(mm)  
 $t_S$  : 層成胴の厚さ(mm)  
 $\delta$  : 焼ばめ容器で 2 層の場合の, 焼ばめ前後での内層の外径変化(mm)  
 $\delta_k$  :  $k + 1$  層を焼ばめした時の, 焼ばめ前後での  $k$  層の外径変化(mm)  
 $\nu$  : ポアソン比  
 $\nu_i$  : 内層材料のポアソン比  
 $\nu_o$  : 外層材料のポアソン比  
 $\sigma_r$  : 半径  $r$  における半径方向応力(MPa)  
 $\sigma_{rr}$  : 半径  $r$  における半径方向残留応力(MPa)  
 $\sigma_t$  : 半径  $r$  における周方向応力(MPa)  
 $\sigma_{tr}$  : 半径  $r$  における周方向残留応力(MPa)

#### 6.8.4 焼ばめ式多層容器

焼ばめ式多層容器は, 次の a) ~ c) による。

- a) **制限事項** 焼ばめ式多層容器の設計については, 次の 1) ~ 6) の条件を満足しなければならない。
- 1) 層間応力分布が  $\pm 10\%$  以内で決定できるように, 各層円筒の製作や組立てができなければならない。製作や組立ての過程は報告書にまとめ, 実際の容器の応力分布を検証する。
  - 2) 最終残留応力は, 自緊されたライニングを除く全ての層について材料の降伏強さを超えない。
  - 3) 最終残留応力は, 製造方法も考慮して, 全ての残留応力を足しあわせて評価する。6.2.3

に従った弾塑性解析を使用してもよい。

- 4) 残留応力は、製造時の温度上昇による降伏強さの減少や応力緩和の効果を考慮して評価する。
- 5) 2層容器の規定は **b)** に、3層以上の多層容器の規定は **c)** に従わなければならない。
- 6) 有毒物質又は致命的な物質を保有する容器を除く 2層以上の焼ばめ式多層容器に関して、次の条件に合致すれば、破裂前漏洩と想定する。
  - ・内層の急激な破壊が生じて、部品や破片が噴出せず、外層が健全のままである。
  - ・閉止板が健全で保持している。
  - ・残りの健全層の計算崩壊圧力が、容器の設計圧力の120%を超えている。

急激な破壊が生じると想定される内層の材料は、材料規格に要求されているシャルピーVノッチ衝撃値を満足しなくてはならないが、**5.2.7 b)** の吸収エネルギー値の合格基準を満足する必要はない。健全と想定される外層の材料は、**5.2.7 b)** の吸収エネルギー値の合格基準を満足しなければならない。

**b) 2層容器** 2層容器の層間圧力と残留応力の計算は次による。

- 1) **層間圧力** 2層容器の層間圧力は次式で計算する。ただし、層間に軸方向の力が働かないと仮定できる場合に限る。軸方向応力が発生する場合には、ポアソン比効果により境界層の層間圧力は影響を受ける。その場合には残留応力を決定するために、より詳細な解析が必要である。

$$P_{if} = \frac{\delta}{D_{if} A} \dots\dots\dots(6.8.1)$$

ここで、

$$A = \frac{1}{E_I} \left( \frac{D_I^2 + D_{if}^2}{D_{if}^2 - D_I^2} - \nu_i \right) + \frac{1}{E_O} \left( \frac{D_{if}^2 + D_O^2}{D_O^2 - D_{if}^2} + \nu_o \right) \dots\dots\dots(6.8.2)$$

- 2) **残留応力** 不連続部から離れた内層( $D_I \leq D \leq D_{if}$ )における残留応力は、次式で計算する。

$$\sigma_{tr} = -\frac{P_{if} Y_i^2}{Y_i^2 - 1} \left( 1 + \frac{D_I^2}{D^2} \right) \dots\dots\dots(6.8.3)$$

$$\sigma_{rr} = -\frac{P_{if} Y_i^2}{Y_i^2 - 1} \left( 1 - \frac{D_I^2}{D^2} \right) \dots\dots\dots(6.8.4)$$

外層( $D_{if} \leq D \leq D_O$ )における残留応力は、次式で計算する。

$$\sigma_{tr} = \frac{P_{if}}{Y_o^2 - 1} \left( 1 + \frac{D_O^2}{D^2} \right) \dots\dots\dots(6.8.5)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{P_{if}}{Y_o^2 - 1} \left( 1 - \frac{D_O^2}{D^2} \right) \dots\dots\dots(6.8.6)$$

組み立て前に自緊による残留応力が導入された場合には、最終的な残留応力は、**式(6.8.3)～式(6.8.6)**と自緊による残留応力を組合せなければならない。

c) **3層以上の多層容器** 図 6.8.1 に示した 3 層以上の多層容器の円筒胴の層間圧力、周方向応力及び半径方向応力の計算は次による。なお、最初の 2 層を組み立て、残留応力を b) 2) により計算する。次に最初の 2 層の組立てを 1 層と仮定して 3 層との層間圧力を計算する。もし、最初の 2 層の縦弾性係数が異なる場合には 2 層の等価な縦弾性係数を用いる。この手順を繰返して 3 層以上の残留応力を次の 1)～3) により求める。

1) **層間圧力** 第  $k$  層の外面上における層間圧力は、次式で計算する。

$$P_k = \frac{\delta_k E}{2 D_k^3} \frac{(D_k^2 - D_l^2)(D_{k+1}^2 - D_k^2)}{D_{k+1}^2 - D_l^2} \dots\dots\dots(6.8.7)$$

2) **周方向応力** 全層数を  $N$  層として、第  $k$  層 ( $D > D_l$ ,  $k > 1$ ) における周方向応力は、次式で計算する。

$$\sigma_{tr} = \frac{P_{k-1} D_{k-1}^2}{D_k^2 - D_{k-1}^2} \left( \frac{D_k^2}{D^2} + 1 \right) - \left( 1 + \frac{D_l^2}{D^2} \right) \sum_{n=k}^N \frac{P_n D_n^2}{D_n^2 - D_l^2} \dots\dots\dots(6.8.8)$$

ただし、 $k = 1$  の場合は、右辺の第 1 項は 0 である。

3) **半径方向応力** 全層数を  $N$  層として、第  $k$  層 ( $D > D_l$ ,  $k > 1$ ) における半径方向応力は、次式で計算する。

$$\sigma_{rr} = -\frac{P_{k-1} D_{k-1}^2}{D_k^2 - D_{k-1}^2} \left( \frac{D_k^2}{D^2} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{D_l^2}{D^2} \right) \sum_{n=k}^N \frac{P_n D_n^2}{D_n^2 - D_l^2} \dots\dots\dots(6.8.9)$$

ただし、 $k = 1$  の場合は、右辺の第 1 項は 0 である。

**6.8.5 溶接巻き多層容器**

図 6.8.2 に示した溶接巻き多層容器は、次の a)～c) による。

a) **制限事項** 溶接巻き多層容器の設計については、次の 1)～5) の条件を満足しなければならない。

- 1) 全ての層について、内外径比が 1.10 を超えない。
- 2) 全ての層は、6 mm を超える厚さをもつ。
- 3) 全ての層の設計温度での縦弾性係数とポアソン比は、同一である。
- 4) 疲労設計にあたっては、残留応力の有利な効果を考慮しない。
- 5) 応力解析の際、層間隙間の効果を考える。

b) **層間隙間係数** 溶接巻き円筒の耐圧試験圧力での理論周長伸び  $e_{th}$  を次式で計算する。

$$e_{th} = \frac{P_t (2 - \nu) \pi D_o}{E (Y^2 - 1)} \dots\dots\dots(6.8.10)$$

耐圧試験時に、実測によって得られる周長伸びを  $e_m$  として、層間隙間係数  $Q_c$  は次式で与えられる。

$$Q_c = \frac{e_m}{e_{th}} \dots\dots\dots(6.8.11)$$

ここで、 $Q_c$  は 0.5 から 1.0 の範囲になければならない。

- c) **応力** 応力の算定にあたっては、まず 0.5 から 1.0 の間で層間係数  $Q_c$  を仮定し、応力の算定を行う。耐圧試験時に実測された  $Q_c$  を使って、設計を見直す。隙間補正係数  $F_c$  は次式で計算する。

$$F_c = 2 \frac{P}{Y^2 - 1} (1 - Q_c) \dots\dots\dots (6.8.12)$$

周方向応力  $\sigma_t$ 、半径方向応力  $\sigma_r$  及び軸方向応力  $\sigma_l$  は、次式で計算する。

$$\sigma_t = \frac{P}{Y^2 - 1} \left\{ 1 + \left( \frac{D_o}{D} \right)^2 \right\} + F_c \frac{D_o + D_I - 2D}{D_o - D_I} \dots\dots\dots (6.8.13)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{Y^2 - 1} \left\{ 1 - \left( \frac{D_o}{D} \right)^2 \right\} + \frac{F_c}{Y - 1} (D_o - D) \left( \frac{1}{D_I} - \frac{1}{D} \right) \dots\dots\dots (6.8.14)$$

$$\sigma_l = \frac{P}{Y^2 - 1} \dots\dots\dots (6.8.15)$$

### 6.8.6 溶接

溶接は、次の a) ~ c) による。

- a) 焼ばめ式多層円筒の層を溶接によって製作する場合は、**6.10** の要求に従った Type No.1 突合せ継手とする。これらの溶接部は全ての層間でスムーズな連続した表面が得られるように面一に削る。
- b) 溶接巻き多層円筒の第 1 層は、Type No.1 突合せ継手による。第 2 層目以降は、Type No.2 突合せ継手とする。上記 a) に加えて、追加要求事項が **7.8** に与えられている。
- c) 許容される溶接継手の例を、**図 6.8.3** ~ **図 6.8.7** に示す。

### 6.8.7 開口の補強

開口の補強は、一体補強型のノズルによる他、ノズル取付け部の胴全周にわたって新たな層を設けることにより行ってもよい。当板方式の補強は認められない。穴補強の計算は**附属書 E**によるか応力解析を行い、**附属書 J**に従った強度評価を行う。

### 6.8.8 容器の支持

許容される容器の支持方法を、**図 6.8.8** に示す。容器全体に直接溶接されるサポートの溶接は、完全溶込みの隅肉溶接としなければならない。サポートによって最外層に負荷される局部荷重を考慮しなければならない。

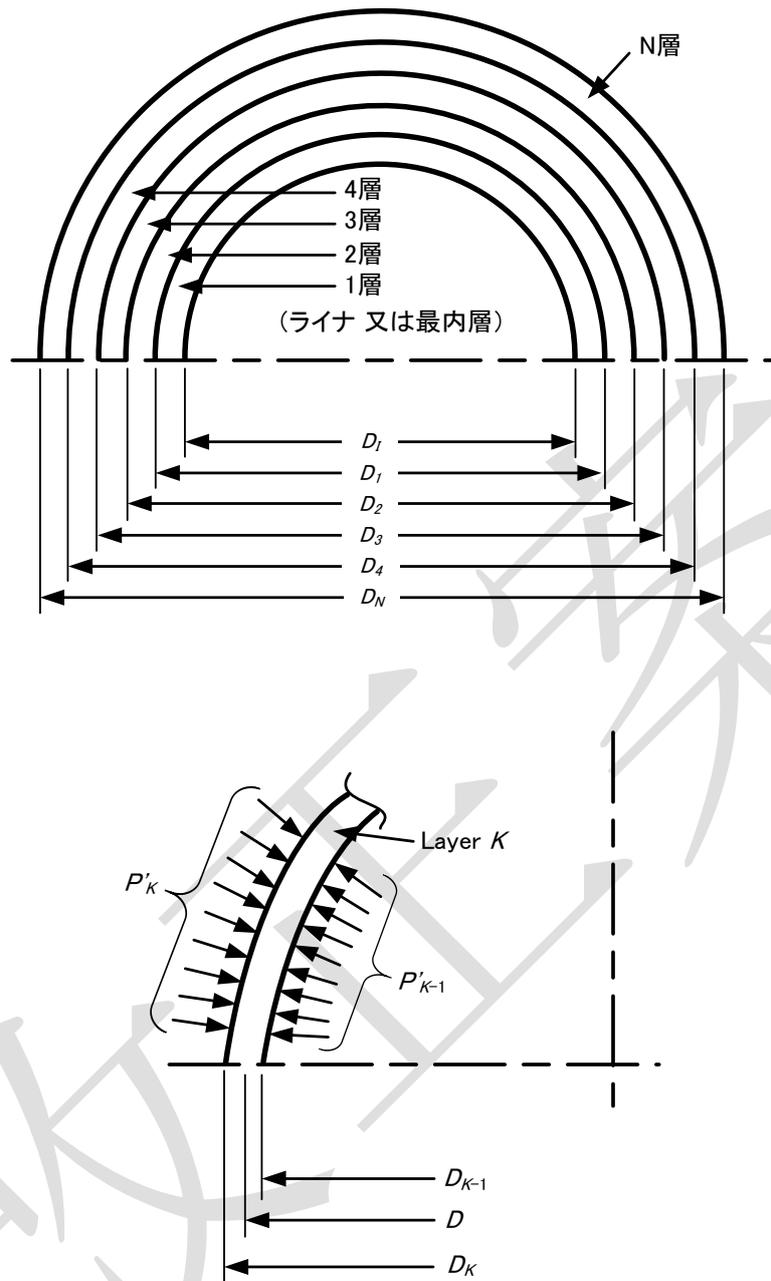
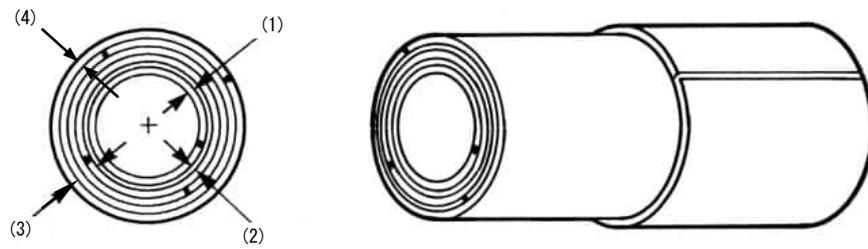
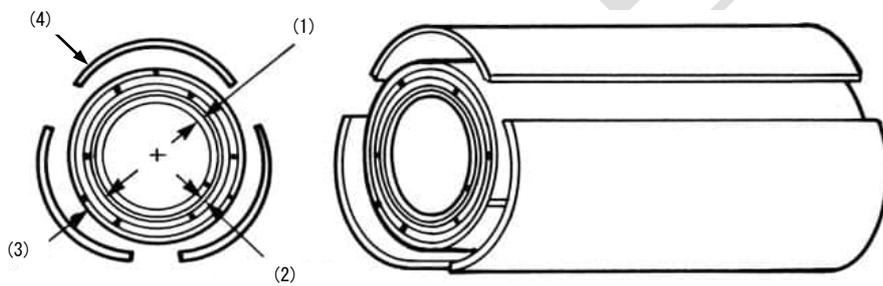


図 6.8.1 3層以上の焼ばめ式多層円筒胴容器



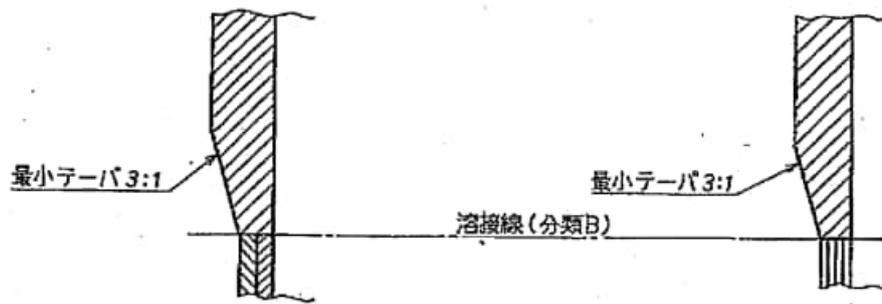
(a) 焼ばめ方式



(b) 溶接巻き方式

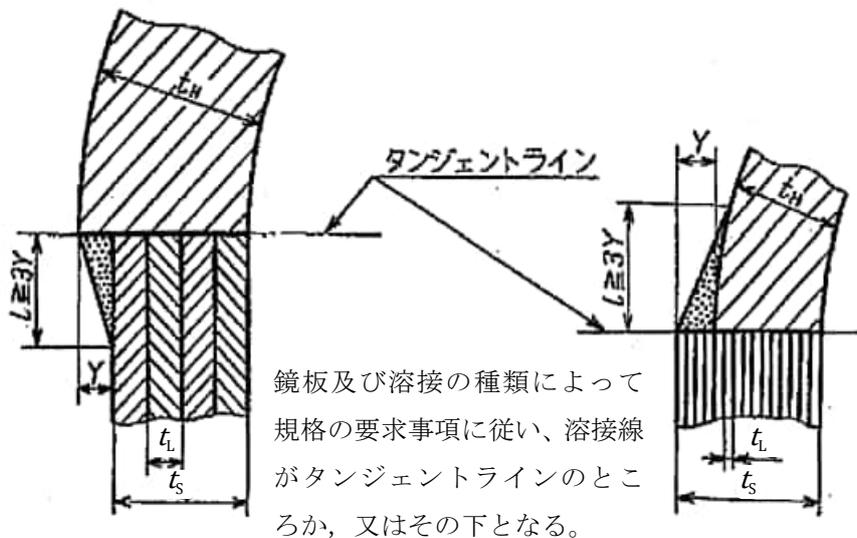
- 注記**
- (1) 内側シェル
  - (2) ダミー層(必要な場合)
  - (3) 層
  - (4) カバーシェル(必要な場合)

図 6.8.2 層成胴の種類



(a) 層成材の厚さ16 mmを超える場合

(b) 層成材の厚さ16 mm以下の場合



鏡板及び溶接の種類によって規格の要求事項に従い、溶接線がタンジェントラインのところか、又はその下となる。

(c) 層成材の厚さ16 mm以下の場合

(d) 任意の厚さの層成材

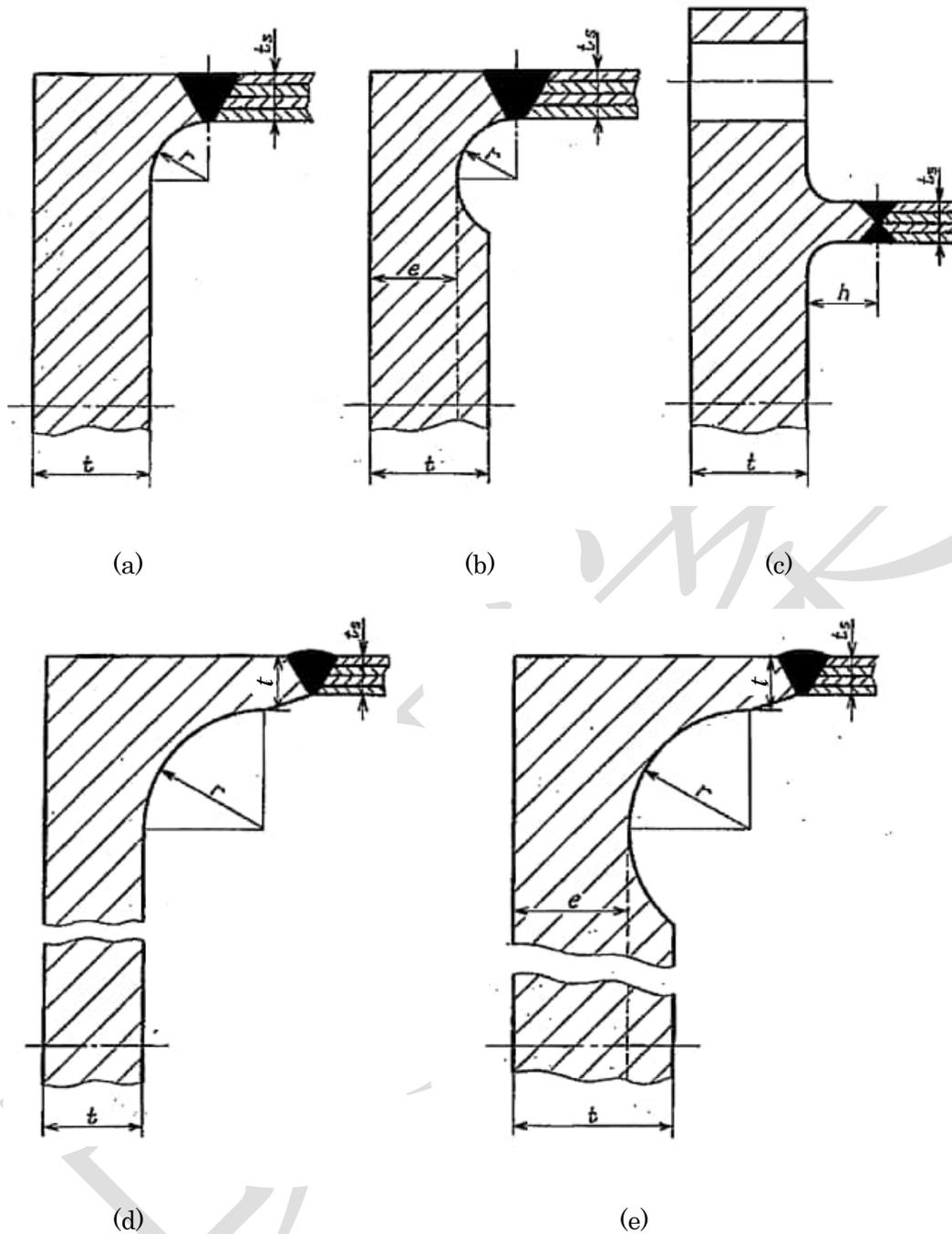
- 注記1**
- $l$  : テーパ長さ(mm)
  - $t_S$  : 層成材の厚さ(mm)
  - $t_L$  : 層成材1枚の厚さ(mm)
  - $t_H$  : 継手部の鏡板の厚さ(mm)
  - $Y$  : 溶接オフセット(mm)

**注記2** 溶接部の実際の厚さは、鏡板の計算厚さ以上になるようにする。

**注記3** (c)では  $Y \leq t_L$ , (d)では  $Y \leq t_S/2$

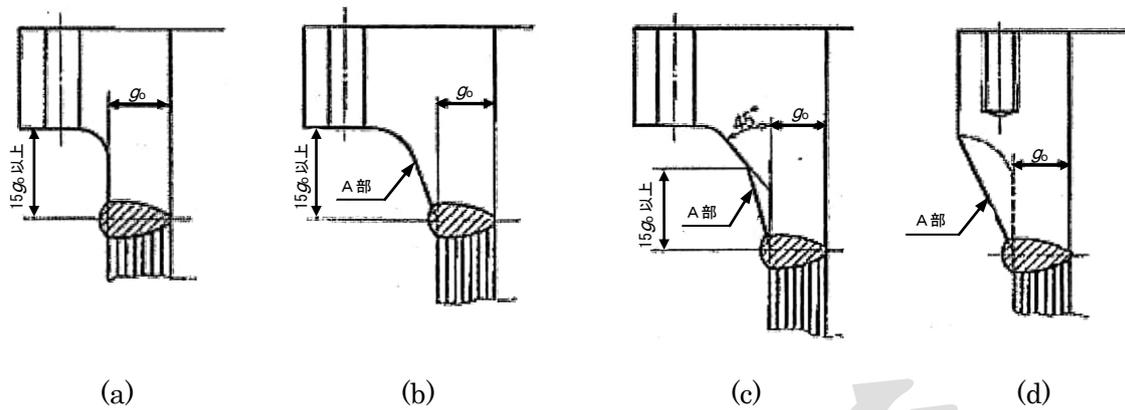
全ての場合について  $l \geq 3Y$ , 胴の中心線は鏡板の中心線からいずれの側にも  $(t_S - t_H)/2$  以内にする。溶接部の実際の厚さは、鏡板の計算厚さ以上になるようにする。必要なテーパ長の中に溶接幅を含んでもよい。また、片側又は両側で断面を変えてもよい。

図 6.8.3 多層胴と単肉部の溶接



- 注記**  $t_s$  : 層成胴の厚さ(mm)  
 $t$  : 平鏡板又は管板の厚さ(mm)  
 $r$  : 平鏡板又は管板のすみの丸みの半径(mm)  
 $e, h, t_f$  : 図に示す寸法(mm)

図 6.8.4 層成胴と平鏡板又は管板の取付け

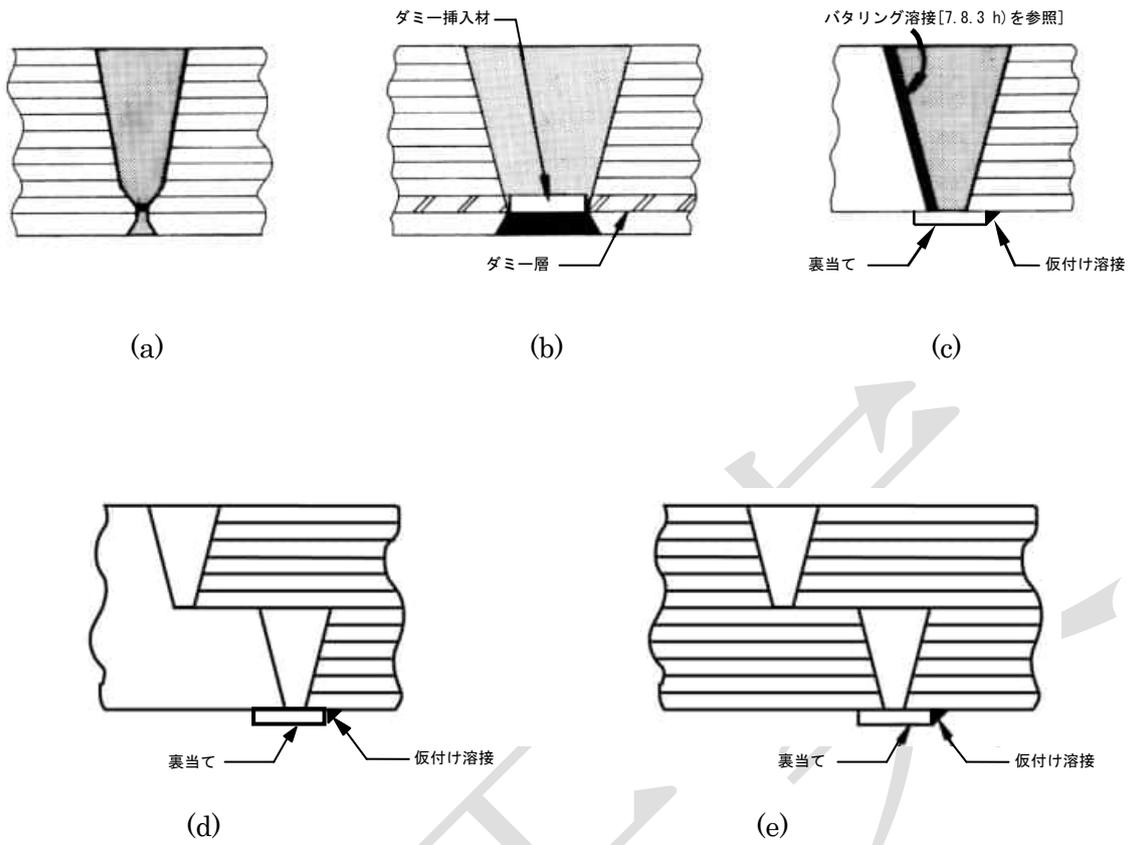


注記 1  $g_0$  : ハブ先端の厚さ (mm)

注記 2 A部のテーパは、 $1/3$ 以下とする( $\frac{1}{3}$ 以下)。

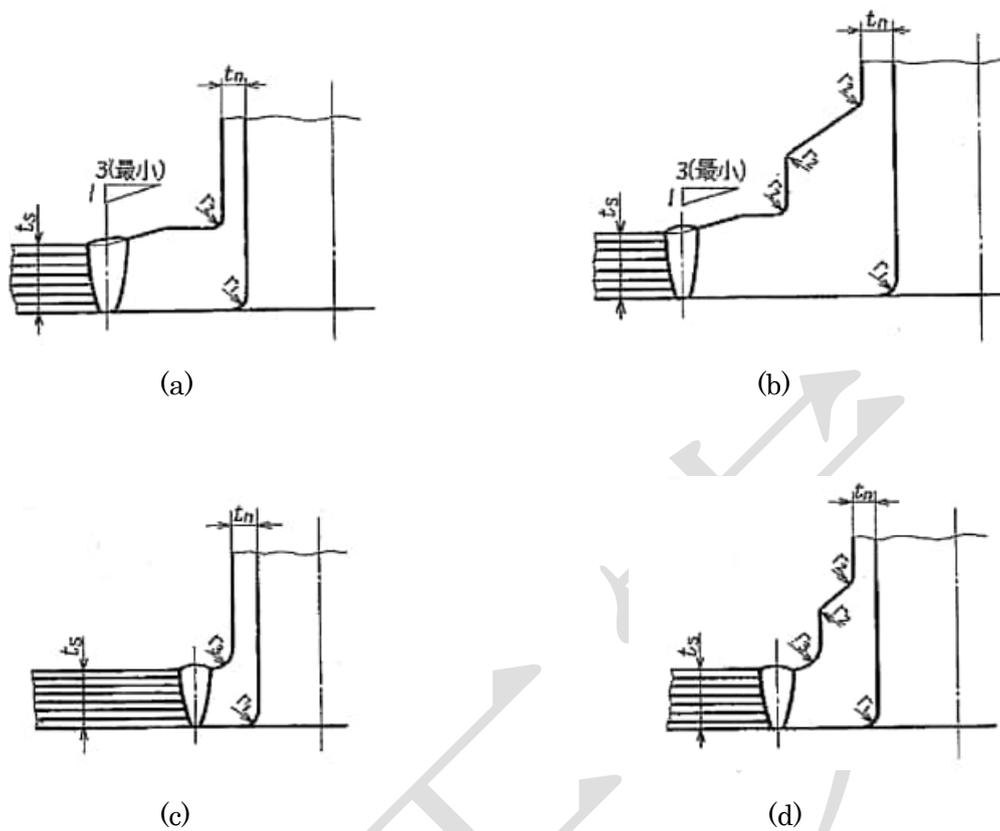
注記 3 いずれの形式においても、多層側を肉盛り溶接した後に開先をとって溶接する。

図 6.8.5 層成胴と胴フランジの取付け



**注記** 裏当ては溶接後除去しなければならない。

**図 6.8.6 層成胴と層成胴及び層成胴と単肉部の溶接継手**



- 注記  $t_s$  : 層成胴の厚さ(mm)  
 $t_n$  : ノズルネックの厚さ(mm)  
 $r_1$  :  $t_s/4$  (最大 19 mm)  
 $r_2$  : 6 mm 以上  
 $r_3$  :  $r_1$  と同じ

図 6.8.7 ノズルの形状及び取付け

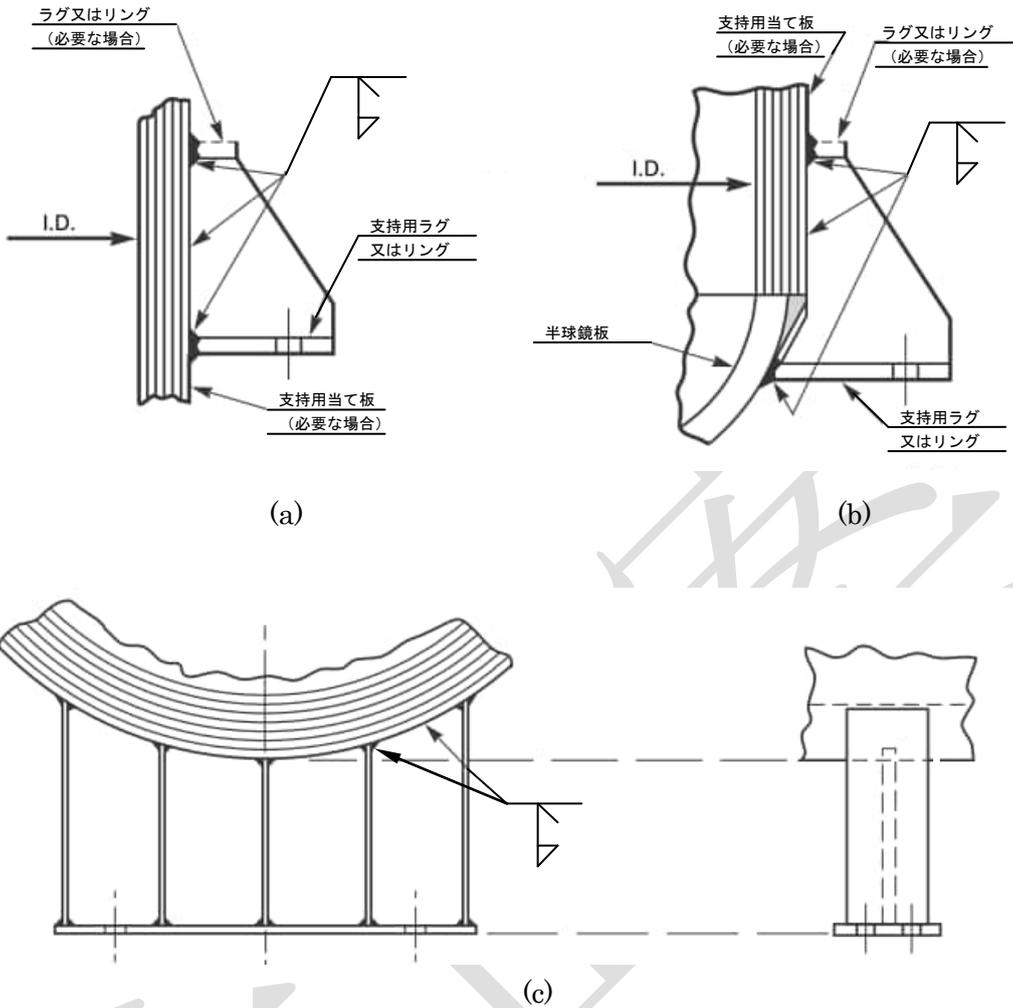


図 6.8.8 支持構造

## 6.9 線巻き容器と線巻きフレームの追加規定

### 6.9.1 適用範囲

この項は、内筒の外表面を 10 層以上の長方形断面の平ワイヤを巻き上げることによって製作される線巻き容器を対象とする。軸方向のエンドフォースは内筒及び線巻き部にはかからない。6.9 の要求はふた板からの荷重を受け持つ線巻きフレームにも適用される。この項の特別要求は、6.2、6.3、6.4 に与えられた一般要求の追加要求である。

### 6.9.2 応力計算

応力計算は、次の a)～c) による。

- a) 線巻き円筒の線巻きによる変形及び残留応力の計算は、各線巻き層で使われるワイヤ予張力を規定した線巻き手順書に基づかなければならない(7.9 参照)。この計算の詳細は 6.9.3 による。
- b) 内圧による応力は、6.1、6.2、附属書 J による。
- c) 線巻きフレームの対応する線巻き手順と応力計算は、フレームの参照寸法の減少と残留応力を与えなければならない。

### 6.9.3 線巻き円筒の残留応力と変位

式(6.9.1)～式(6.9.5)は、ワイヤが矩形断面で端から端まで巻き付けられた場合に適用する。他の断面形状の場合には妥当な補正係数を適用しなければならない。また、次の a)～c) の条件を満足する必要がある。

- a) ワイヤのねじれ角度が、1°未満である
- b) 容器の長手方向の最大のワイヤ間の隙間が、ワイヤ幅の 5%又は 0.25 mm のいずれか小さい値未満である。
- c) 内筒もワイヤも降伏しない。ただし、次の 1)～5) の要件が満たされる場合には、内筒の降伏が許容される。
  - 1) 降伏は、線巻き工程の間の圧縮においてのみ許容される。
  - 2) 大気圧から設計圧力までのいかなる圧力においても、対応する温度との組合せにおいて、降伏しない。また、大気圧から試験温度での試験圧力までのいかなる圧力の値でも降伏しない。
  - 3) 内筒は、6.2.3 b) に示す局所損傷に対する評価を含み、6.2.3 に示す弾塑性解析の要求を満たす。
  - 4) ワイヤの応力は、6.2.3 又は 6.9.3 により求める。
  - 5) 内筒の変形は 6.9.3 により求める。

内筒の周方向応力  $\sigma_t(x_1)$ 、半径方向応力  $\sigma_r(x_1)$  及び半径方向変位  $\delta$  は、次式で計算する。

$$\sigma_t(x_1) = - \left\{ 1 + \left( \frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right\} \int_{D_{if}}^{D_w} \left( \frac{x}{x^2 - D_I^2} S_w(x) \right) dx \quad \dots\dots\dots(6.9.1)$$

$$\sigma_r(x_1) = - \left\{ 1 - \left( \frac{D_I}{x_1} \right)^2 \right\} \int_{D_{if}}^{D_W} \left( \frac{x}{x^2 - D_I^2} S_W(x) \right) dx \quad \dots\dots\dots(6.9.2)$$

$$\delta = - \frac{2 D_I}{E} \int_{D_{if}}^{D_W} \left( \frac{x}{x^2 - D_I^2} S_W(x) \right) dx \quad \dots\dots\dots(6.9.3)$$

線巻き部の周方向応力  $\sigma_t(x_2)$  及び半径方向応力  $\sigma_r(x_2)$  は、次式で計算する。

$$\sigma_t(x_2) = S_W(x_2) - \left\{ 1 + \left( \frac{D_I}{x_2} \right)^2 \right\} \int_{x_2}^{D_W} \left( \frac{x}{x^2 - D_I^2} S_W(x) \right) dx \quad \dots\dots\dots(6.9.4)$$

$$\sigma_r(x_2) = - \left\{ 1 - \left( \frac{D_I}{x_2} \right)^2 \right\} \int_{x_2}^{D_W} \left( \frac{x}{x^2 - D_I^2} S_W(x) \right) dx \quad \dots\dots\dots(6.9.5)$$

ここで、

- $D_I$  : 内筒の内径(mm)
- $D_{if}$  : 内筒とワイヤ境界部の直径(mm)
- $D_O$  : 線巻き部分の線巻き終了時の外径(mm)
- $D_W$  : 線巻き上げ途中の線巻き上げ部分の外径(mm)
- $E$  : 縦弾性係数(MPa)
- $x_1$  : 内筒の厚さ部の任意の位置での径(mm)
- $x_2$  : 線巻き部の任意の位置での径(mm)
- $S_W(x)$  : ワイヤ張力(N)
- $S_W(x_2)$  : 線巻き部の任意の径でのワイヤ張力(N)

寸法の記号の説明を図6.9.1に示す。

#### 6.9.4 線巻きによるフレームの残留応力

線巻きによるフレームの残留応力は6.2又は附属書J、6.3、6.4の要求を満足しなければならない。

#### 6.9.5 応力制限

線巻き円筒の応力制限は、次のa)～c)による。

- a) **容器の内外径比** 矩形断面の平ワイヤを用いる場合には、線巻き部を含めた内外径比は、6.2.2の式(6.2.3)及び式(6.2.4)より計算される値より大きくしなければならない。他のワイヤ形状の場合には、補正が必要である。
- b) **内筒とワイヤの相当応力制限** 設計条件と試験条件での各ワイヤに働く断面平均の応力は  $S_y$  を超えない。ワイヤの溶接部の断面平均応力は  $S_y$  の2/3を超えない。なお、 $S_y$  はワイヤの降伏強さとする。内筒の一次+二次相当応力範囲は、大気圧から設計圧力までのいかなる圧力においても、対応する温度との組合せにおいて、 $S_y$  を超えない。また、大気圧から試験

温度での試験圧力までのいかなる圧力の値でも  $S_y$  を超えない。

- c) **コラム-ヨークタイプのフレームの最小プレストレスレベル** 一体型でないコラム-ヨークタイプのフレームは、耐圧試験の 105%の圧力が容器にかかった時でもコラムとフレームが密着するように、プレストレスをかけなければならない。この要求事項は計算によって確認し、製作者製作記録に残さなければならない。

#### 6.9.6 疲労評価

線巻き容器及び線巻きフレームは疲労評価を行わなければならない。疲労評価は、次の a)～d) による。

- a) ワイヤの設計疲労寿命は、6.9.7～6.9.11 による。
- b) ワイヤ以外の部材についての疲労評価は、6.3 による。
- c) ワイヤ以外の部材についての破壊力学評価は、6.4 による。
- d) 有毒物質又は致命的な物質を保有する容器を除く線巻き容器に関して、内層の急激な破壊において、次の条件に合致すれば、破裂前漏洩と想定する。
- ・部品や破片が噴出せず、外層が健全のままである。
  - ・ふた板が健全で保持している。
  - ・残りの健全層の計算崩壊圧力が、容器の設計圧力の 120%を超えている。
  - ・急激な破壊が生じると想定される内層の材料は、材料規格に要求されているシャルピーVノッチ衝撃値を満足しなくてはならないが、5.2.7b)の吸収エネルギー値の合格基準を満足する必要はない。内層以外の全ての耐圧部品の材料は、5.2.7b)の吸収エネルギー値の合格基準を満足しなければならない。

#### 6.9.7 ワイヤの設計疲労曲線の導き方

ワイヤの設計疲労寿命  $N_D$  は、ワイヤに発生する疲労亀裂の平均間隔が 2,000m になる確率が 10%となる繰返し回数とし、6.9.8～6.9.11 による。

#### 6.9.8 ワイヤの疲労曲線

ワイヤの疲労曲線の引き方は、次の a)～e) による。

- a) 細長比が 30 以上の試験片で疲労試験を行う。疲労試験に使用する材料は、実機に使用する材料と同一製造者、同一鋼種、同一製造方法とする。
- b) 試験片が座屈しないような平均相当応力  $S_m$  を決める。疲労試験は、同一の平均相当応力  $S_m$  において相当応力振幅  $S_a$  を変えて行う。 $S_m$ 、 $S_a$  は次による。

$$S_m = 0.5 (S_{\max} + S_{\min}) \cdots \cdots \cdots (6.9.6)$$

$$S_a = 0.5 (S_{\max} - S_{\min}) \cdots \cdots \cdots (6.9.7)$$

ここで、

$S_a$  : 疲労試験中の疲労強度評価部における相当応力振幅(ワイヤの場合は軸方向応力振幅)

$S_{\max}$  :  $S_a$  を与えるサイクル中の相当応力(軸方向応力)の最大値

$S_{\min}$  :  $S_a$  を与えるサイクル中の相当応力(軸方向応力)の最小値

- c) 少なくとも 4 種のレベルの応力振幅  $S_a$  で、最低でも 1 レベル 6 回の試験を行い、疲労破断

回数  $N_f$  を決める。

- d)  $S_a$  と  $N_f$  をグラフ化し、最適疲労曲線  $S_f = f(\log N_f)$  を決める。
- e) 式(6.9.8)により、平均応力が 0 のときの疲労曲線  $S_f' = f(\log N_f)$  を求め、これをワイヤの疲労曲線とする。

$$S_f' = \frac{7 S_f}{8 - \left(1 + \frac{S_m'}{S_u}\right)^3} \dots\dots\dots(6.9.8)$$

ここで、

$S_u$  : ワイヤの設計温度における引張強さ(MPa)

$S_m'$  : 修正平均応力で、次による。(MPa)

$$\begin{aligned} S_a + S_m \leq S_y \text{ のとき,} & \quad S_m' = S_m \\ S_a + S_m > S_y \text{ かつ } S_a < S_y \text{ のとき,} & \quad S_m' = S_y - S_a \\ S_a \geq S_y \text{ のとき,} & \quad S_m' = 0 \end{aligned}$$

$S_y$  : ワイヤの設計温度における降伏強さ(MPa)

**6.9.9 設計疲労曲線**

ワイヤの設計疲労曲線は、6.9.8 で求めたワイヤの疲労曲線と 6.9.10 で求める  $K_S$ ,  $K_N$  を用いて、次の a)~c) により求める。ここで、 $K_S$  は疲労設計応力補正係数、 $K_N$  は疲労設計繰返し回数補正係数である。

- a)  $S_f'$  を  $K_S$  で割って、曲線  $S_a' = S_f' / K_S = f_2(\log N_D)$  を求める。
- b)  $N_f$  を  $K_N$  で割って、曲線  $S_a'' = f_3\{\log(N_f / K_N)\} = f_3(\log N_D)$  を求める。
- c) 設計疲労曲線  $S_a = f(\log N_D)$  は、 $S_a'$  又は  $S_a''$  の低い方にとって作成する。

**6.9.10 疲労設計補正係数  $K_S$ ,  $K_N$**

$K_S$  は、長さの効果と疲労強度のばらつき効果を掛け合わせることににより、次式で求める。ただし、 $K_S < 2$  のときは、 $K_S = 2$  とする。

$$K_S = K_{SL} K_{SS} \dots\dots\dots(6.9.9)$$

$$K_{SL} = (L_W / L_T)^{1/30} \dots\dots\dots(6.9.10)$$

$$K_{SS} = \frac{1}{1 - 1.3 \Delta s} \dots\dots\dots(6.9.11)$$

ここで、

$L_W = 2,000$  (m)

$L_T$  : 試験片の長さ(m)であり、 $L_T$  が 0.200 m の場合には  $K_{SL} = 1.35$  となる。

$\Delta s$  : 疲労試験で求まる疲労寿命の平均相対標準偏差

1.3 : 疲労亀裂が 10%の確率で発生する場合の係数

$\Delta s$  は、次の a)~c) で求める。

- a) 実験で得られた値を元に、最適疲労曲線を描く。

b) 各応力レベルで、実験結果から得られた破断繰返し回数( $N_1, N_2, \dots, N_n$ )と最適疲労曲線から求まる破断繰返し回数  $N_{0,i}$  から、次式で標準偏差  $d$  を計算する。

$$d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{N_{0,i}} - 1\right)^2} \dots\dots\dots(6.9.12)$$

c) 実験した全ての応力レベルについて  $d$  を計算し、その平均値を求める。これを  $\Delta s$  とする。

$K_N$  は、次式による。ただし、 $K_N < 20$  のときは、 $K_N = 20$  とする。

$$K_N = (K_S)^{4.3} \dots\dots\dots(6.9.13)$$

**6.9.11 ワイヤの設計疲労寿命の計算**

ワイヤの設計疲労寿命は、6.9.9 で作成した設計疲労曲線を使い、6.3 の方法で計算する。

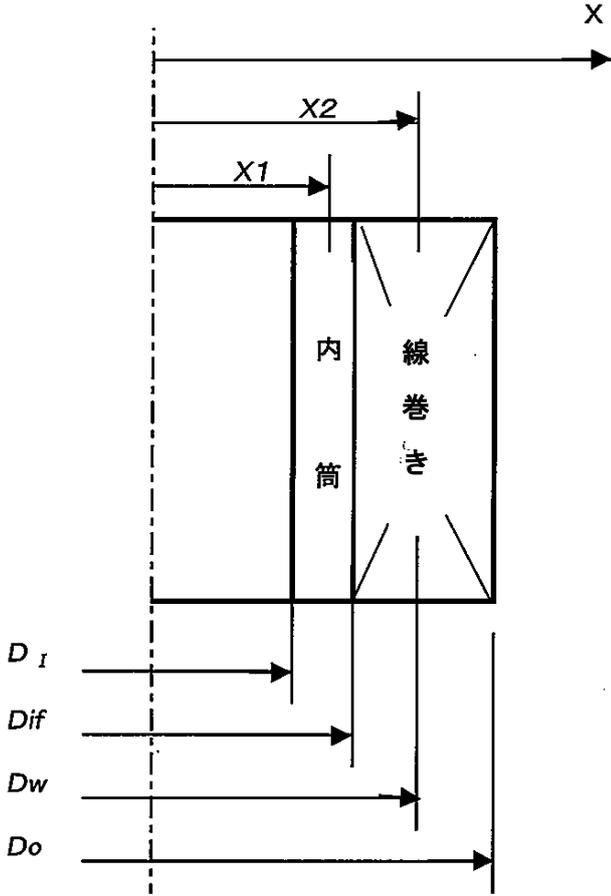


図 6.9.1 記号の説明

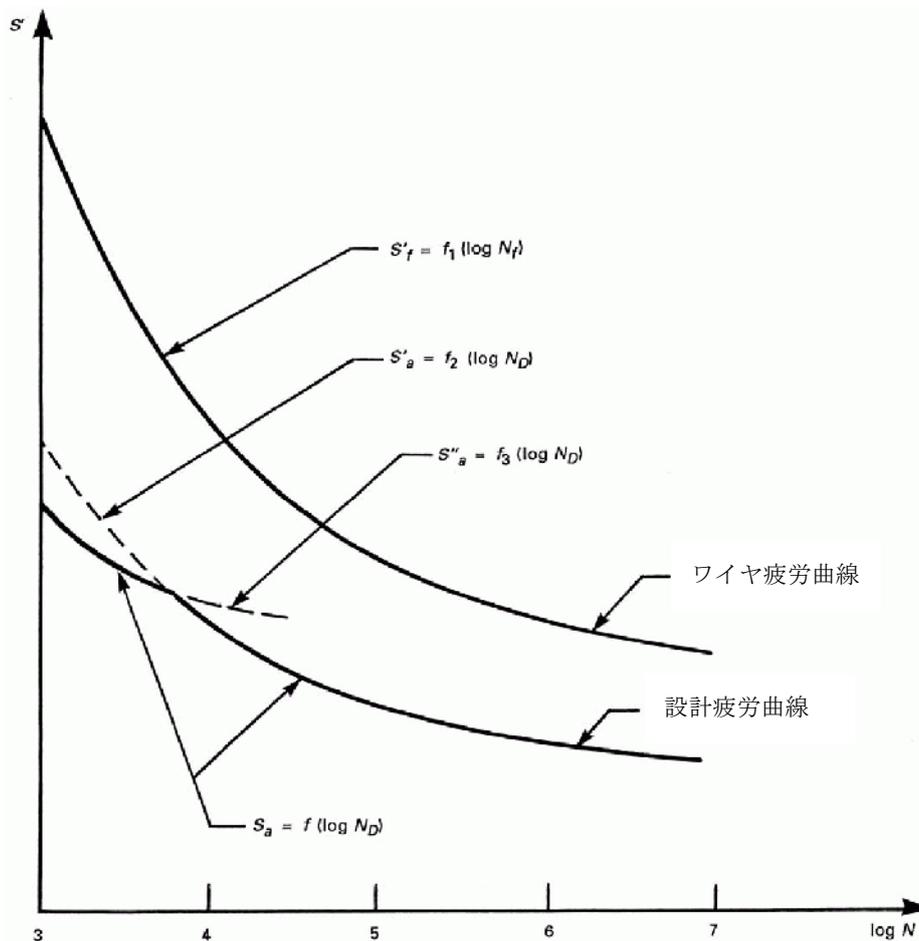


図 6.9.2 設計疲労曲線の求め方<sup>†</sup>

## 6.10 溶接容器の設計要求

### 6.10.1 適用範囲

この項では、溶接容器の設計方法について 6.2, 6.3, 6.4 への追加要求を規定する。

### 6.10.2 溶接容器の一般要求

溶接容器は、鍛造リングほか圧延鋼板などの鍛圧材料から、次の a)～d) により製作する。

- この規格の溶接規定、JIS B 8266 及び JIS B 8285 による。
- 全ての溶接は、7 及び 9 の規定を満足しなければならない。
- この規格の溶接容器は、溶接継手効率 100%を要求される。
- 全ての製作及び熱処理終了後に、溶接金属及び溶接熱影響部の機械的特性は、5 に規定する材料特性を満足しなければならない。

### 6.10.3 許容される継手のタイプ

全ての継手(6.7 及び 6.8 の一部を除く)は、Type No.1 突合せ継手とする。

### 6.10.4 突合せ継手の接続方法

突合せ継手の接続方法は、次の a)～e) による。

- a) 円筒胴との周突合せ傾斜継手は Type No.1 突合せ継手として、円筒軸から 30°以内の傾きとする。
- b) 胴、鏡又は他の耐圧部材と突合せ溶接で接続するハブ付き平鏡板のハブは、平板から機械加工で製作してはならない。
- c) ハブは Type No.1 突合せ溶接ができるように、**図 6.10.1** に示すように鍛造する。
- d) 胴に溶接される鍛造リップの機械的特性は、胴部と同じ規定を適用する。引張試験片はハブの軸に平行な方向で、できるだけハブに近い箇所から採取して確認する。幾つかの鍛造品の一群に対して、同一設計、同一溶解のもので、かつ同じ鍛造方法の代表試験片は一個でよい。
- e) ハブの長さは、ハブが溶接接合される耐圧部材の厚さの 1.5 倍又は 19 mm のいずれか大きい方の値以上とするが、50 mm を超える必要はない。

#### 6.10.5 コーナー溶接継手

完全溶け込みグループ溶接とすみ肉溶接の組み合わせによるコーナー継手は、胴と鏡板、フランジなどの継手に使用してはならない。

#### 6.10.6 厚さの違う部材の継手形状

厚さの違う部材の継手形状は、次の a), b) による。ただし、突合せ溶接フランジのハブの部分にこの規定を適用してはならない。

- a) **胴と鏡板の継手** 胴と鏡板の継手は、次の 1)～3) による。
  - 1) 基本的な設計要求、疲労評価、破壊力学評価又は実験的設計検証(6.2, 6.3, 6.4 又は 6.11)により妥当性を示さない限り、鏡板と胴との接合部で、鏡板と胴との厚さの差が薄い方の厚さの 1/4 又は 3.2 mm のいずれか小さい方の値を超える場合は、**図 6.10.2** に示すようにテーパを付ける。
  - 2) 接続部は均一なテーパが得られれば、どのような方法で形成してもよい。継手溶接端面から延長して、追加の肉盛り溶接を用いて接続部のテーパを形成する場合は、追加の溶接肉盛りは、この規格の溶接・製作及び JIS B 8266 及び JIS B 8285 の規定を満足しなければならない。
  - 3) 突合せ溶接は、**図 6.10.2** に示すように、部分的又は全体をテーパとしてよい。基本的な設計要求、疲労評価、破壊力学評価又は実験的設計検証(6.2, 6.3, 6.4 又は 6.11)により妥当性を示さない限り、次の追加規定が更に適用される。
    - 3.1) テーパの長さは、隣接表面の食違いの 3 倍以上とする。突合せ溶接取付けのために、成形鏡板にテーパが必要な場合は、タンジェントラインをテーパに要する長さを超えないようにスカート部の長さをとる。
    - 3.2) 同じ内径の円筒よりも厚い楕円及び半球形鏡板は、同径の胴に必要な厚さを満足すれば、余肉を円筒外径に合わせて機械加工してもよい。
- b) **ノズルネックと配管の継手** ノズルネックと配管との溶接で、配管の厚さがノズルネックの厚さよりも薄い場合は、配管の厚さがこの規定によるより薄いものであっても、ノズルの溶接端からテーパを付けてパイプ厚さに合わせる。このテーパ部は、**図 6.10.3** による。

#### 6.10.7 ノズルの取付け継手

6.10.8 の特例を除いて、全てのノズルの取付け溶接は、Type No.1 突合せ継手とする(**図 6.10.4**

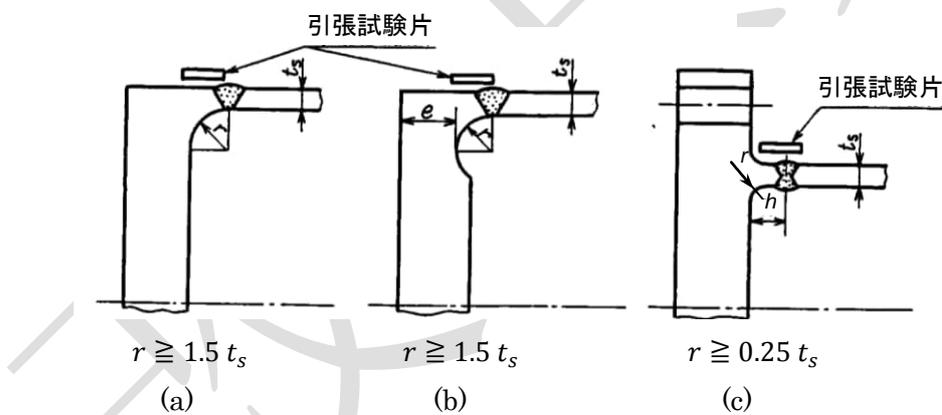
を参照)。

### 6.10.8 容器表面へのノズルの取付け

連続的な流路を確保するために容器外表面に取付けるノズルは、完全溶込みグループ溶接とする(図 6.10.5 を参照)。

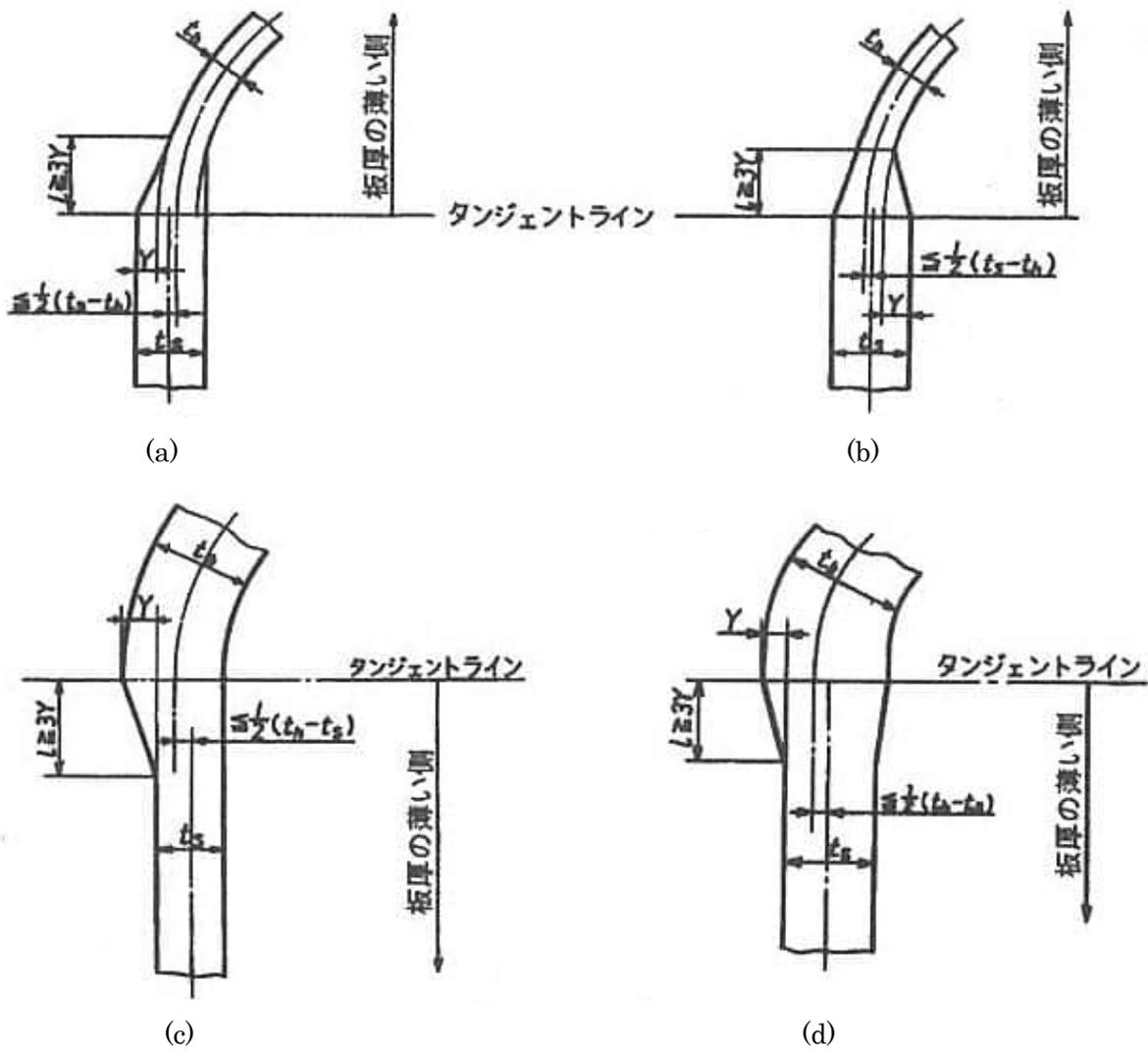
### 6.10.9 ノズル補強

一体でないノズル補強は許されない。全てのノズル補強は、ノズル、胴又はその両方と一体型とする。附属書 E に追加の規定を示す。



**注記** 引張試験片の採取位置は、ハブの内面又は外面

図 6.10.1 突合せ溶接するハブ付鍛造耐圧部材



注記 1 テーパーの必要とする長さ  $l$  のうちに溶接部を含めてもよい。

注記 2 図中の記号は、次による。

$t_s$  : 胴の呼び厚さ(mm)

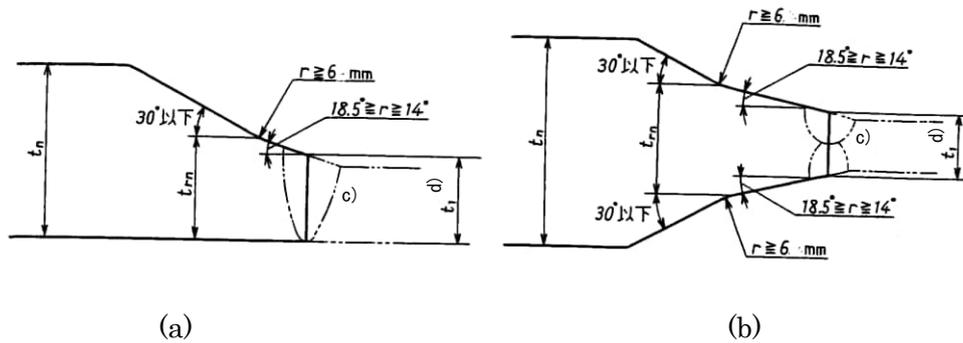
$t_h$  : 鏡板の呼び厚さ(mm)

$l$  : テーパー部を必要とする長さ(mm)

$Y$  : 片側表面における厚さの差(mm)

注記 3 (c)及び(d)のテーパーは、外面又は内面のいずれでもよい。

図 6.10.2 鏡板と胴の継手



注記 1 図中の記号は、次による。

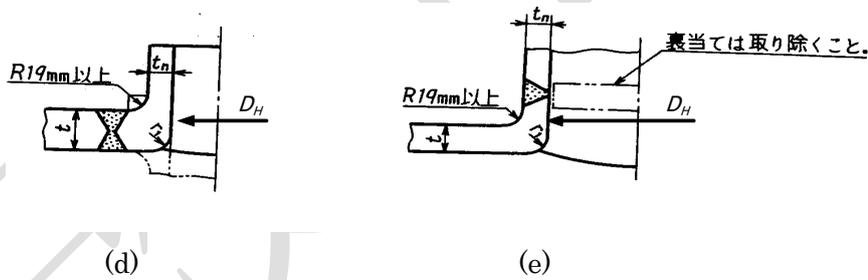
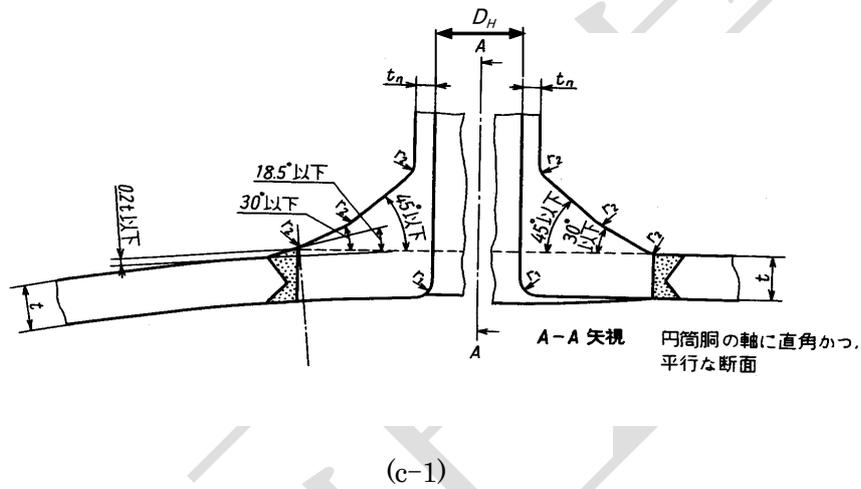
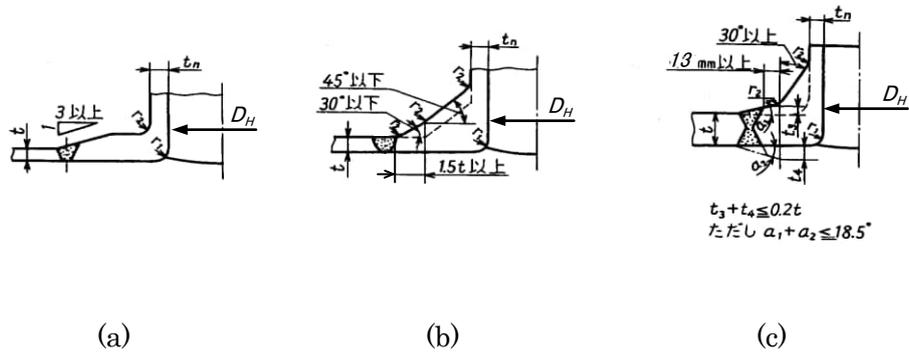
$t_n$  : ノズルネックの呼び厚さ(mm)

$t_{rn}$  : ノズルの設計厚さ(mm)

注<sup>o</sup>) 溶接開先は例として示したにすぎない。

注<sup>d</sup>)  $t_l$  は  $0.8 t_n$  又は外部配管の最小厚さのうち、いずれか大きい方の値とする。

図 6.10.3 厚さの薄い外部配管とノズルネックの継手



注記 1 図中の記号は、次による。

$D_H$  : 胴又は鏡板の穴の径(mm)

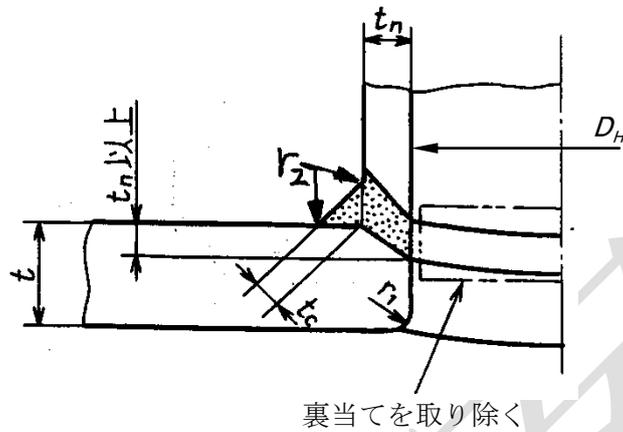
$t$  : 胴又は鏡板の呼び厚さ(mm)

$t_n$  : ノズルネックの呼び厚さ(mm)

注記 2  $r_1$ は、 $0.25t$ 又は $3$  mm のいずれか小さい方の値以上とする。

注記 3  $r_2$ は、 $0.25t_n$ 又は $19$  mm のいずれか小さい方の値以上とする。

図 6.10.4 突合せ溶接によるノズルの取付け



**注記 1** 図中の記号は、次による。

$D_H$  : 胴又は鏡板の穴の径(mm)

$t$  : 胴又は鏡板の呼び厚さ(mm)

$t_n$  : ノズルネックの呼び厚さ(mm)

$t_c$  : すみ肉溶接ののど厚(mm)で、 $0.7 t_n$  又は  $6 \text{ mm}$  のいずれか小さい方の値以上とする。

**注記 2**  $r_1$  は、 $0.25 t$  又は  $3 \text{ mm}$  のいずれか小さい方の値以上とする。

**注記 3**  $r_2 \geq 6 \text{ mm}$

**図 6.10.5 完全溶込み溶接によるノズル取付け**

## 6.11 実験的設計検証

### 6.11.1 一般要求

一般要求は、次の a)～d) による。

- a) **実験的応力解析の適用** 理論的応力解析が不適当か、又は設計値が得られない部分における決定的又は支配的な応力は、実験的応力解析によって実証する。
- b) **過去の結果の利用** この項の要求事項に合致した、詳細な実験結果があるような形状のものは再評価を必要としない。
- c) **腐れ代などの取扱い** 試験方法や結果の解釈においては、腐れ代又はその他の付加された材料がその部分の強度を負担すると考えてはならず、従って、それによる効果も考えてはならない。
- d) **報告** 製作者設計報告書には、試験方法及び得られた結果の詳細な報告書を含まなければならない。

### 6.11.2 実験の種類

実験の種類は、次の a)～c) である。実験は、支配的な応力及び崩壊荷重、繰返し荷重に対する適応をみるために行う。支配的な応力及び崩壊荷重の決定は、通常一回の実験で十分である。

- a) **支配的な応力を決定するための実験** 支配的な応力を決定するために許される実験は、ひずみ測定による実験と光弾性試験による実験である。応力塗膜による実験は、6.11.5 a) に述べられている目的の場合に限定する。変位測定試験又は破壊試験の結果から支配的な応力を決定してはならない。
- b) **崩壊荷重を決定するための実験** 崩壊荷重を決定するのに、ひずみ測定による実験を用いてよい。変形測定試験の設定及び使用計器が測定物の形状に対して有効な結果を得ることを明示できるならば、その変形測定試験を崩壊荷重の決定に用いてよい。応力塗膜による実験及び破壊試験から崩壊荷重を決定してはならない。
- c) **疲労試験** 繰返し荷重を受ける部分の強度を評価するのに、6.11.7 の疲労試験を用いてよい。

### 6.11.3 ひずみ測定による実験

ひずみ測定による実験は、次の a), b) による。

- a) **ひずみゲージ** 0.00005 mm/mm(0.005%)又はそれ以上の精度でひずみを測定できるものであれば、どの様な種類のひずみゲージを使用してもよい。原則として、ゲージ長さ内において、最大ひずみが平均ひずみの 110%を超えないようなゲージ長さを選ばなければならない。測定装置はそれぞれのゲージ位置において、その材料の弾性域における二つの主応力が測定できるようなものでなくてはならない。弾性域を超える部分のゲージのはり付位置におけるゲージの枚数と方向は、弾性域におけるのと同様にする。使用するひずみゲージと接着剤はその部分の表面仕上げ及び形状に対し、予想されるひずみ値の 1.5 倍以上のひずみ値まで信頼できるものでなければならない。
- b) **ひずみ又は変位測定模型** 崩壊荷重決定のための実験を除いて、ひずみ測定は実際の容器又は上記 a) のゲージ長さの規定を満足する任意の尺度の模型を用いてもよい。模型材料は必ずしも実際の容器材料と同一である必要はないが、縦弾性係数が既知のものか、又は試験条件において測定できるものでなければならない。模型の寸法は、実際の容器と相似性がなけれ

ばならない。崩壊荷重試験の場合、使用する比例法則の妥当性を証明することができない場合には、実寸模型を使用しなければならない。崩壊荷重を決定するのに用いる試験容器又は部位は、実際の容器と同じタイプ、グレード、クラスの材料で作られなければならない。

#### 6.11.4 光弾性試験による実験

荷重の構造的効果を表すことができる模型であるならば、二次元又は三次元のいずれの模型を用いてもよい。

#### 6.11.5 実験方法

実験方法は、次の a)～c)による。

a) **ひずみゲージの貼り付位置** ひずみゲージの貼り付位置は、次の 1)、2)による。

- 1) 支配的な応力を決定するための試験では、最も厳しい条件のところを測定できるようにゲージの適切な貼り付位置をあらかじめ調査しなければならない。ひずみゲージの最適な貼り付位置及び方向を決めるために、応力塗膜試験を行ってもよい。
- 2) 崩壊荷重を測定する試験では、最小崩壊荷重を示す可能性をもつ全ての範囲が含まれるように十分な数の位置を測定しなければならない。測定の目的は、主荷重による容器内の変形を記録することであることに注意する。二次又はピークによる応力集中部を測定しないように注意しなければならない。崩壊荷重の決定にひずみゲージを使う時には、測定するひずみ(膜ひずみ、曲げひずみ又はこれらの組合せ)は、構造物の耐荷重能力を実際に表さなければならない。変形測定用器具を使う時は、構造物の崩壊の傾向を表す直径又は長さの変化、梁又は板のたわみのような重要な寸法及び変位の変化を測定しなければならない。

b) **圧力計及び変換器** 圧力計及び変換器は、10.3の要求事項による。

c) **圧力や荷重の負荷法** 圧力荷重の負荷法は、次の 1)～4)による。

- 1) 支配的な応力の決定のための試験においては、荷重に対するひずみの変化をプロットすることによって、弾性領域での応力と荷重の関係を求めることができるような、内圧又は、機械的荷重の増分を決定しなければならない。最初に荷重を加えた時、ひずみが荷重に直線的に比例していない場合には、直線的な比例関係が得られるまで除荷、再負荷を繰返してもよい。
- 2) 応力凍結光弾性試験を行う場合には、試験結果を無意味にするほどの変形を生じないように荷重の大きさを決定しなければならない。
- 3) 崩壊荷重を決定するための試験においては、線形な弾性領域で全てのゲージから統計的解析に十分な数のデータが得られるように、十分小さい増分で荷重を負荷しなければならない。なお、線形な弾性領域以上での全てのゲージの特性を調べておく。弾性領域で最適な直線を得るために最小二乗法(回帰法)による解析を行い、信頼区間と設定値を比較することによって、ひずみゲージ又はその他の測定装置の採否を判定しなければならない。不採用となった測定装置は取り換え、取り換えたものについては再試験しなければならない。
- 4) 試験は全ての測定装置が使用可能となってから、ひずみ制御又は変位制御で行うのが望ましい。荷重の増減は、各荷重での材料の流動が完了するよう適当な時間をもって行わ

なければならない。

### 6.11.6 結果の評価

結果の評価は、次の a)～d) による。

- a) **応力の算定** ひずみの測定値から設計荷重に対応する応力を計算する時には、材料が弾性であると仮定する。このとき使用する縦弾性係数は、試験材料の試験温度における値でなければならない。
- b) **応力解析の範囲** 実験的応力解析は、6.11.1 a) に述べられているように、設計値を得ることができない場合に対して、支配的な応力を決定するのに十分な範囲で行わなければならない。一次、二次及びピーク応力に分類し、それぞれの応力強さの許容値を適用できるように、解析的方法と実験的方法を可能な限り併用しなければならない。
- c) **崩壊荷重決定法** 崩壊荷重の決定手順を、次の 1)～3) に示す。
- 1) 変形測定試験の場合には、荷重を縦軸に、測定した変形を横軸にとる。ひずみ測定試験の場合には、荷重を縦軸に、表面での最大主ひずみを横軸にとる。試験崩壊荷重は、最大 2% までのひずみを生じる荷重として得られる。このひずみ限界は、主荷重による試験容器の実際のひずみを元にしなければならない。このため、ひずみゲージ又は変形測定装置は主荷重による結果が得られて、二次又はピークによる影響を避けられる場所に設置しなければならない[6.11.5 a) を参照]。
  - 2) 崩壊荷重が決定する前に容器が破壊するか圧力限界を保持できなくなった場合、容器を再設計し再試験しなければならない。崩壊荷重を得るのに十分な圧力に容器が耐えるまで、これは前述の方法で繰り返される。
  - 3) 設計又は評価の目的に使用する崩壊荷重は、この試験崩壊荷重に使用材料の設計温度での降伏強さと試験材料の試験温度における降伏強さの比を乗じることによって求める。設計圧力が崩壊荷重試験に基づく場合、次の d) によって最高設計圧力を決定しなければならない。試験模型で得られた崩壊荷重と設計の実物構造物に対する崩壊荷重を関連づけるには、組立てた試験模型の実寸法に適切な考慮を払うように注意する。
- d) **室温での最大設計圧力の決定** この項で述べられているような崩壊荷重試験に基づく場合、最大設計圧力  $P$  は、実際の材料降伏強さを用いて、次式のうちのひとつで計算しなければならない。

#### 1) 実際の測定降伏強さが材料規格で要求される試験のみで決定される場合

$$P = \frac{0.8}{1.732} CP \left( \frac{S_y}{S_{yms}} \right) \dots\dots\dots(6.11.1)$$

ここで、

- $CP$  : 崩壊荷重(MPa)
- $S_y$  : 室温での規定最小降伏強さ(MPa)
- $S_{yms}$  : 材料規格で要求される試験に基づいて得られた実際の降伏強さ(MPa)  
ただし、 $S_y$  以上

#### 2) 実際の降伏強さが次の 3) に規定された試験によって決定される場合

$$P = \frac{1}{1.732} CP \left( \frac{S_y}{S_{yact}} \right) \dots\dots\dots(6.11.2)$$

ここで、

$S_{yact}$  : 室温で試験片から得られた実際の平均降伏強さ(MPa)  
ただし、 $S_y$  以上

- 3) 試験される部分の材料の降伏強さは、材料規格による要求と次の追加要求事項によらなければならない。
- 3.1) 求められる降伏強さ  $S_{yact}$  は試験完了後の試験部材から切り出した、少なくとも3本の試験片の平均値でなければならない。試験片は、試験中の応力が降伏強さを超えていないところから採取する。試験片は、ガス切断又はその他の材料の強度に影響を及ぼすような熱を用いる方法で試験片を切出してはならない。
- 3.2) 同時に製鋼された材料の余剰材料で、圧力保持部と同一熱処理を受けたものがある場合は、試験片をこの余剰材から切り出してもよい。試験片は、ガス切断又はその他の試験片に影響を及ぼすような熱を用いる方法で切り出してはならない。

#### 6.11.7 設計許容繰返し回数の実験的決定

6.3 の要求事項の代わりに、実験的手法によって容器又はその構成部の設計許容繰返し回数を決めてもよい。この手法は、破裂前漏洩が確認されている容器又はその構成部にのみ用いてよい。設計許容繰返し回数の実験的決定は次の a)、b) による。

- a) **試験の記述** 疲労試験によって、繰返し荷重をうける容器構成部品又はその部位の妥当性を証明する場合、製作者は設計報告書にその試験について記述する。この記述は、ここに述べられている要求事項に沿っていることを示す詳細な内容でなければならない。
- b) **試験方法** 試験方法は、次の 1)～6) による。
- 1) **試験片** 試験部材又はその一部は、実際に使用する部材と同じ化学成分の材料でなければならない。また、同等の機械的性質を得るために同じ機械加工及び熱処理を行わなければならない。繰返し荷重に抵抗する部分及びその部分の応力に影響を与える隣接部分については、幾何学的相似性を保たなければならない。
- 2) 試験材又はその部分は、破壊が起きるまでに次の 3) に示す繰返し数に耐えなければならない。ここでいう破壊とは、耐圧材に測定可能なほどの漏れが生じるくらい、全厚さにわたり割れの入った状態をいう。
- 3) **試験部材の最小繰返し回数及び試験荷重** 試験部材が耐えなければならない最小繰返し回数  $N_T$  及び試験荷重  $P_T$  は、設計繰返し回数  $N_D$  に規定の係数  $K_{TN}$  を乗じた値及び設計運転荷重  $P_D$  に  $K_{TS}$  を乗じた値から求める。値は試験パラメータ線図(図 6.11.1)を用いて次の手順で求める。
- 3.1) 6.3 の相当する設計疲労曲線において、横軸上の設計繰返し回数  $N_D$  から垂線を引き、曲線との交点 D を求める。この垂線上に、D 点の応力振幅  $S_{aD}$  に  $K_S$  を乗じた縦座標値の点 A をとる。
- 3.2) D を通る水平線を引き、その長さが D 点の設計繰返し回数  $N_D$  に  $K_N$  を乗じた横座標

値の点 B をとる。

- 3.3) A と B を結ぶ。AB は許容される全ての  $K_{TS}$  と  $K_{TN}$  の組合せを含んでおり、この線分上で任意に点 C を選定する[加速疲労試験については 4) を参照]。係数  $K_{TS}$  と  $K_{TN}$  の定義を次に示す。

$$K_{TS} = \frac{\text{C点の縦座標値}}{\text{D点の縦座標値}} \dots\dots\dots(6.11.3)$$

$$K_{TN} = \frac{\text{C点の横座標値}}{\text{D点の横座標値}} \dots\dots\dots(6.11.4)$$

- 3.4) 試験荷重  $P_T$  及び最小繰返し回数  $N_T$  を次式によって定める。

$$P_T = K_{TS} P_D \dots\dots\dots(6.11.5)$$

$$N_T = K_{TN} N_D \dots\dots\dots(6.11.6)$$

なお、試験部材が原寸でなく、幾何学的に相似な模型で、また、荷重が圧力以外の場合には、 $P_T$  の値を構造強度に関する相似法則によって補正しなければならない。

- 4) **加速疲労試験** 設計繰返し回数  $N_D$  が  $10^4$  より大きく、かつ、試験条件が次の手順で決定される場合には、次の手順によって加速疲労試験(この場合、最小繰返し回数  $N_{DT}$  は設計繰返し回数  $N_D$  以下となる)を行ってもよい。

- 4.1) 図 6.11.2 上に、点 A, B 及び D を上記 3) に従って求める。加速疲労試験における最小繰返し回数  $N_{Tmin}$  を次式によって求める。

$$N_{Tmin} = 10^2 \sqrt{N_D} \dots\dots\dots(6.11.7)$$

設計疲労曲線の横軸上の  $N_{Tmin}$  から垂線を引く。

- 4.2) 点 A を通り、設計疲労曲線上の各  $S_a$  値に  $K_S$  を乗じた点を結ぶ曲線を作成する。  
 $N_{Tmin}$  からの垂線とこの曲線の交点を A' とする。  
 4.3) 曲線 A'AB 上の任意の点 C が許容される  $K_{TS}$  と  $K_{TN}$  の組合せである。 $K_{TS}$  と  $K_{TN}$  は上記 3) と同様にして求める。  
 4.4) 許容繰返し回数  $N_T$  及び試験荷重  $P_T$  を、上記 3.4) によって定める。

- 5) **試験荷重又は試験繰返し回数的一方だけを増す試験方法** 試験荷重と繰返し回数の両方ではなく、いずれか一方だけを増して試験をするのが望ましい(又は可能な)場合がある。

- 5.1) **繰返し回数だけに係数を適用する場合**  $K_{TS} = 1$  とし、 $K_{TN}$  は次式とする。

$$K_{TN} = \frac{\text{B点の横座標値}}{\text{D点の横座標値}} \dots\dots\dots(6.11.8)$$

設計荷重を受ける試験部材は、次式の繰返し回数に耐えなければならない。なお、模型を使用する場合は、必要に応じて試験荷重を補正する。

$$N_T = K_{TN} N_D \dots\dots\dots(6.11.9)$$

- 5.2) **荷重だけに係数を適用する場合**  $K_{TN} = 1$  とし、 $K_{TS}$  は次式とする。

$$K_{TS} = \frac{\text{A点の縦座標値}}{\text{D点の縦座標値}} \dots\dots\dots(6.11.10)$$

試験荷重  $P_T$  を受ける試験部材は、少なくとも設計繰返し回数に耐えなければならない。なお、模型を使用する場合は、必要に応じて試験荷重を補正する。

$$P_T = K_{TS} P_D \dots\dots\dots(6.11.11)$$

6)  $K_S$  及び  $K_n$  の値  $K_S$  及び  $K_n$  の値は次による。

$$K_S = K_{sa} K_{sf} K_{sc} K_{st} K_{ss} \quad (\text{ただし, 最小 } 1.25) \dots\dots\dots(6.11.12)$$

$$K_n = (K_S)^{4.3} \quad (\text{ただし, 最小 } 2.6) \dots\dots\dots(6.11.13)$$

ここで、

$K_{sa}$  : 疲労寿命に及ぼす高応力表面部の寸法効果の係数は次式による。

$$K_{sa} = (A_P/A_T)^{1/30} \quad (\text{ただし, 最小 } 1.0) \dots\dots\dots(6.11.14)$$

ここで、 $A_P/A_T$  : 実機の高応力部表面積/模型の高応力部表面積

$K_{sc}$  : 温度によって設計疲労曲線が異なることに対する修正係数は次式による。

$$K_{sc} = \frac{(\text{温度 } T_c \text{ での } S_{aN})(\text{温度 } T_t \text{ での } S_{az})}{(\text{温度 } T_D \text{ での } S_{aN})(\text{温度 } T_c \text{ での } S_{az})} \quad (\text{ただし, 最小 } 1.0) \dots\dots\dots(6.11.15)$$

$S_{aN}$  : 設計疲労曲線上で繰返し回数  $N$  のときの  $S_a$  値(MPa)

$S_{az}$  : 設計疲労曲線上の右端における  $S_a$  値(MPa)

$T_c$  : =370°C (炭素鋼及び低合金鋼の場合)

=425°C (オーステナイト系ステンレス鋼及びニッケルクロム鉄合金の場合)

$T_D$  : 設計温度(°C)

$T_t$  : 試験温度(°C)

$K_{sf}$  : 表面仕上げの影響係数は次式による。

$$K_{sf} = K_r(P)/K_r(T) \quad (\text{ただし, 最小 } 1.0) \dots\dots\dots(6.11.16)$$

$K_r(P)$  : 図6.3.10から求まる実機の表面粗さ係数

$K_r(T)$  : 図6.3.10から求まる模型の表面粗さ係数

$K_{ss}$  : 試験結果の統計的偏差に対する影響係数は次式による。

$$K_{ss} = 1.470 - (0.044 \times \text{試験回数}) \quad (\text{ただし, 最小 } 1.0) \dots\dots\dots(6.11.17)$$

$K_{st}$  : 試験温度の影響係数は次式による。

$$K_{st} = (\text{温度 } T_t \text{ での } S_{aN})/(\text{温度 } T_D \text{ での } S_{aN}) \quad (\text{ただし, 最小 } 1.0) \dots\dots\dots(6.11.18)$$

### 6.11.8 疲労強度減少係数の決定のための疲労試験

疲労強度減少係数の実験的決定方法は、次の a)～c) による。

a) 試験片 試験片は、次の 1)～3) による。

1) 試験部材は実際に使用する部材と同一の化学成分、機械特性を有し、同一の熱処理を行

わなければならない。

- 2) 試験片に生じる一次+二次相当応力は、表 J.2 の許容限界を超えてはならない。また、1,000 サイクルより小さい繰返し回数で破損が生じないようなものでなければならない。
  - 3) 試験片の形状、表面仕上げ及び応力状態は、実際の構造部材に予想されるものに極く類似しなければならない。特に、応力こう配は、実際の構造部材で予想される状態よりも急であってはならない。
- b) **繰返し速度** 試験片に感知できるような加熱が生じる繰返し速度であってはならない。
- c) **疲労強度減少係数の決定** 疲労強度減少係数は、切欠付試験片と平滑試験片で試験し、同一破損回数に対する切欠付試験片の応力に対する平滑試験片の応力の比として計算しなければならない。

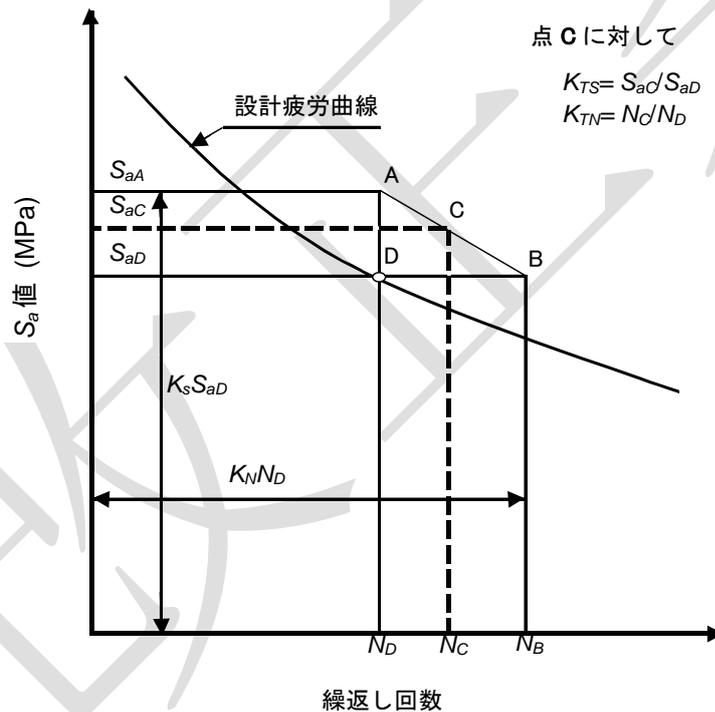


図 6.11.1 試験パラメータ線図の作成

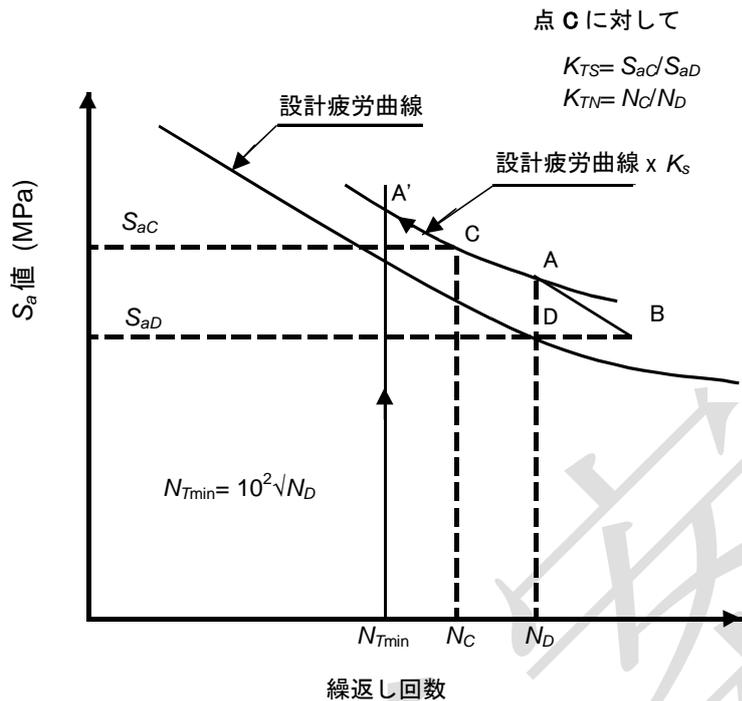


図 6.11.2 加速疲労試験における試験パラメータ線図の作成

6.12 フランジ継手

本体胴又は高圧配管と一体のフランジの応力計算は、JIS B 8266 附属書 3、この規格の附属書 H に規定する算式又は有限要素法などの適切な方法によらなければならない。ただし、クランプ継手の設計を附属書 H による場合、フランジ部の内外径比は 1.5 以下とする。ねじ込み式のフランジの計算厚さは、JIS B 8266 附属書 3 においてルーズフランジとみなす。

6.13 水素容器の特別要求

6.13.1 適用範囲

この項の要求は、次の a)～d) の水素容器に適用する。水素容器は、6.3 の疲労評価とこの項の破壊靱性要求に従う。a) 及び b) の容器にはこの項の要求は必須である。これらの要求は、この規格の他の要求事項への追加要求である。

a) 95°C未満で運転する非溶接容器

- 1) 水素分圧が 41 MPa を超える容器
- 2) 機械試験から得られる引張強さ(5.2.6, 5.2.8 を参照)が 945 MPa を超える材料で構成され、水素分圧が 5.2 MPa を超える容器

b) 95°C未満で運転する溶接容器

- 1) 水素分圧が 17 MPa を超える容器
- 2) 機械試験から得られる引張強さ(5.2.6, 5.2.8 を参照)が 620 MPa を超える材料で構成され、水素分圧が 5.2 MPa を超える容器

c) 95°Cを超えて運転する容器 運転温度が 95°Cを超える容器にはこの項の要求は必須ではな

い。しかしながら、もし容器が起動停止時を除いて 95°Cより高い温度の水素に晒された後に、引き続き 95°C未満の温度に晒されるような運転であるならば、この項の要求に従う。起動停止時の破壊モードとして脆性破壊を考慮する。

d) この項の要求は、表 5.4.1 の材料に適用する。

### 6.13.2 制限事項

最高設計温度は、次の a)～d)による。

- a) API RP 941 の図 1 に含まれ、表 5.4.1 に示される炭素鋼及び低合金鋼に対する最高設計温度は、運転限界を示した API RP 941 の図 1 の該当する曲線以下とする。水素分圧が 90 MPa を超え、100 MPa 以下の場合には、水素分圧 90 MPa における API RP 941 の図 1 の該当する曲線を用いてもよい。100 MPa を超える圧力では、温度は 65°Cを超えてはならない。
- b) オーステナイト系ステンレス鋼の最高設計温度は、表 5.4.1 の上限温度以下とする。
- c) アルミニウム合金の最高設計温度は、表 5.4.1 の上限温度以下とする。
- d) 上記以外の材料の最高設計温度は、205°C以下とする。

### 6.13.3 記号

- $a$  : 亀裂の主平面寸法, 亀裂深さ(mm)
- $HAC$  : 水素誘起割れ
- $K_{Ic}$  : 平面ひずみ破壊靱性値(MPa $\sqrt{m}$ )
- $K_{I_{max}}^*$  : 残留応力を除く繰返し応力負荷による応力拡大係数の最大値(MPa $\sqrt{m}$ )
- $K_{I_{min}}^*$  : 残留応力を除く繰返し応力負荷による応力拡大係数の最小値(MPa $\sqrt{m}$ )
- $K_{I_{res}}$  : 残留応力による応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ )
- $K_{IH}$  : 水素誘起割れに対する下限界応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ )
- $LT$  : 試験片の破断面が、板の場合には長手方向に垂直な方向、管の場合には長手方向に垂直な方向にあり、亀裂の進展方向が、板の場合には主圧延方向を横断又は板幅方向、管の場合には周方向になることを表す。
- $TL$  : 試験片の破断面が、板の場合には板幅に垂直な方向、管の場合には周方向に垂直な方向、亀裂の進展方向が、板の場合には主圧延方向又は板の長手方向、管の場合には長手方向になることを表す。

### 6.13.4 使用者設計仕様書

この規格に従って製作される水素容器に対して、この項の特別要求が適用されるときには、使用者はこれを使用者設計仕様書に明記する(1.2.1を参照)。

### 6.13.5 材料の水素適合性<sup>1)</sup>

水素容器に使用する材料は、次の a)により水素適合性を判定する。ただし、Type 316 と Type 316L オーステナイト系ステンレス鋼は、次の b)により水素適合性を判定してもよい。

a) SSRT(Slow Strain Rate Tensile Test)の試験結果による判定 次の 1)～6)による。

- 1) 試験片 最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体の内面近傍から、設備の形状が円筒(管又は胴)の場合は、試験片の軸方向が円筒の周方向と一致するように、平滑円形断面試験片又は平滑矩形断面試験片を採取する。平滑円形断面試験片を使用する場合は、試験片の直径を 4 mm 以下とする。低合金鋼の場合は 6 mm としてもよい。平滑矩形断面

を使用する場合は、試験片の断面積／外周長さは 1 mm 以下とする

- 2) **試験方法** 水素環境及び不活性ガス環境(又は大気環境)で、**ASTM G142** に従って 3) の条件を用いて試験を行う。試験片の数はそれぞれ 3 個とする。
- 3) **試験条件** 両環境中の試験で、試験温度は同一とする。試験圧力は水素環境及び不活性ガス環境は設計圧力、大気環境は大気圧とする。試験温度は最低設計金属温度とする。水素分圧が 40 MPa 未満の場合は、水素圧力は 40 MPa 以上とする。水素純度は 99.9999%以上とする、又は 99.999%以上とし、 $O_2 < 1 \text{ ppm}$ 、 $CO_2 < 1 \text{ ppm}$ 、 $CO < 1 \text{ ppm}$ 、 $H_2O < 3 \text{ ppm}$  とする。変位速度は 0.002 mm/s 以下とする。
- 4) **相対比の計算** 試験結果から、SSRT の引張特性の相対比を求める。

$$RYS = \frac{\text{水素環境の降伏強さ}}{\text{不活性ガス環境の降伏強さ}} \dots\dots\dots(6.13.1)$$

$$RTS = \frac{\text{水素環境の引張強さ}}{\text{不活性ガス環境の引張強さ}} \dots\dots\dots(6.13.2)$$

$$REL = \frac{\text{水素環境の伸び}}{\text{不活性ガス環境の伸び}} \dots\dots\dots(6.13.3)$$

$$RRA = \frac{\text{水素環境の絞り}}{\text{不活性ガス環境の絞り}} \dots\dots\dots(6.13.4)$$

ここで、

- $RYS$  : 相対降伏強さ
- $RTS$  : 相対引張強さ
- $REL$  : 相対伸び
- $RRA$  : 相対絞り

5) **材料の選定**

5.1) 次の 2 項目が成立することを確認する。

- ・不活性ガス環境の SSRT の荷重－伸び曲線が、最大荷重点で延性不安定破壊を開始する形状を示す。
- ・水素環境の降伏強さが不活性ガス環境の降伏強さと同じで、 $RYS = 1$  とみなせる。

5.2) 5.1) を確認した後、次の項目が成立すれば、6) により水素適合性を判定する。

- ・水素環境の SSRT の荷重－伸び曲線が、不活性ガス環境の SSRT の最大荷重点に達する前の荷重又は伸びで、破断によって打ち切られない( $RTS = 1$ 、 $RTS > REL$ 、 $RTS > RRA$ とみなせる)。

6) **水素適合性の判定** 次の式が成立する場合に、材料は水素への適合性を持つ。

$$\text{絞り(実測値)} \times RRA \geq \text{絞り(規格値)} \dots\dots\dots(6.13.5)$$

材料規格に絞りが規定されていない場合、絞りに代えて伸びによる次の式で判定をする。

$$\text{伸び(実測値)} \times REL \geq \text{伸び(規格値)} \dots\dots\dots(6.13.6)$$

冷間加工材に式(6.13.6)を適用する場合は、伸び(実測値)に冷間加工度による伸びを加算する。

b) **Ni 当量による判定** a)によるRRA及びRELの算出に代えて、次の式により値を求めて水素適合性の判定を行ってもよい。

1) **温度が室温(20°C以上)の場合**

$$RRA = 0.7 + 0.3 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 25.73}{1.512}\right) \dots\dots\dots(6.13.7)$$

$$REL = 0.7 + 0.3 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 24.49}{1.830}\right) \dots\dots\dots(6.13.8)$$

$$Ni_{eq} = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo \dots\dots\dots(6.13.9)$$

ここで、

$Ni_{eq}$  : Ni当量(質量%)

2) **温度が低温(-123°C以上~20°C未満)の場合**

$$RRA = 0.6 + 0.4 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 27.76}{1.339}\right) \dots\dots\dots(6.13.10)$$

$$REL = 0.6 + 0.4 \tanh\left(\frac{Ni_{eq} - 26.51}{1.490}\right) \dots\dots\dots(6.13.11)$$

$$Ni_{eq} = 12.6C + 0.35Si + 1.05Mn + Ni + 0.65Cr + 0.98Mo \dots\dots\dots(6.13.12)$$

### 6.13.6 破壊力学を用いた設計許容繰返し回数の評価

設計許容繰返し回数は、次のa)とb)の要求を除いては、6.4に従った破壊力学評価を用いて決定する。水素環境では、水素容器の寿命は脆性破壊又は塑性崩壊による容器の破壊及び水素誘起割れによる破壊を防ぐために評価される。

アルミニウム合金で製作される容器は、この項の要求事項を満足しなければならない。ただし、アルミニウム合金 A6061-T6 及び A6061-T651 は、6.13.8 及び 6.13.9 で要求される疲労亀裂進展特性に及ぼす水素の環境影響を考慮する必要はない。

a) 限界亀裂寸法は6.4.3c)に従って6.13.7a)で求める破壊靱性値  $K_{IC}$  を用いて決定する。限界亀裂寸法は、設計荷重下で亀裂先端における残留応力を考慮した応力拡大係数の最大値 ( $K_{I_{max}}^* + K_{I_{res}}$ ) が水素誘起割れに対する下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  を下回るように制限する[6.13.7b)を参照]。

b) 表6.4.1の疲労亀裂進展速度の材料特性値を6.13.7c)によって決まる材料特性値に置き換えることを除いて、疲労亀裂進展速度と設計許容繰返し回数は6.4に従う。 $K_{I_{max}}^* + K_{I_{res}} \leq 0$  の場合、疲労亀裂進展速度は0と見なせる。 $K_{I_{max}}^* + K_{I_{res}} \leq 0$  の場合、水素誘起割れに対する下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  と水素環境における疲労亀裂進展速度  $da/dN$  を決定する必要はない。

### 6.13.7 破壊力学特性値

破壊力学評価で使用する材料特性値は、次の a)～c) に従って求める。

- a) **平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$**  平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  は、次の 1)～3) による。
- 1) 平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  は容器に使用される材料の各ヒートについて、最大板厚部で求める。試験片は容器製作における最終熱処理条件とする。試験片は母材、溶接金属、溶接継手の熱影響部の各採取位置で 3 本からなるセットで試験を行う。溶接継手(溶接金属と熱影響部)の試験は、容器製作に用いる全ての溶接施工要領で行い、試験片は  $TL$  方向で採取する。 $TL$  方向の試験片が溶接金属や熱影響部から採取できない場合には、 $LT$  方向でもよい。試験は最小設計金属温度(MDMT)で **ASTM E399** 又は **E1820** に従って行い、得られた  $K_{IC}$  の最小値を破壊力学評価で使用する。
  - 2) **表 5.4.1** の鉄鋼材料は、1) の代わりに、平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  を**附属書 C** の **6** における破壊靱性値との相関を用いた他の試験方法から求めてもよい。母材、溶接金属、溶接の熱影響部の試験から得られた最小値を破壊力学評価で使用する(**5.2** を参照)。
  - 3) **表 5.4.1** のアルミニウム合金には、平面ひずみ破壊靱性値の下限值を確認するために、**5.2.11** による切欠き引張試験を行う。破壊力学評価では、 $K_{IC}$  として  $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  の値を使用する。ただし、1) による破壊靱性試験を行えば、その値を用いてもよい。
- b) **水素誘起割れに対する下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  の認定試験**  $K_{IH}$  の認定試験は次の 1), 2) による。
- 1) 下限界応力拡大係数  $K_{IH}$  は材料の各ヒートと熱処理ごとに最大板厚部から求める。試験片は、容器製作における最終熱処理条件とする。母材、溶接金属、溶接継手の熱影響部の各々に対して **6.13.8 b)4)** の必要本数からなる試験片のセットで試験を行う。溶接は容器製作に用いる溶接施工要領に従って溶接する。溶接施工要領を変更した場合には、溶接継手(溶接金属と熱影響部)の再試験を行う。試験片は  $TL$  方向で採取する。 $TL$  方向の試験片を溶接金属や熱影響部から採取できない場合には、 $LT$  方向の試験片を用いてよい。 $K_{IH}$  の値は **6.13.8** の試験方法で求め、最小値の  $K_{IH}$  を破壊力学評価で使用する。
  - 2) 引張強さと降伏強さが、認定試験で使用された材料の値の 5% を超えなければ、1) で求めた値を、同じ公称化学成分と熱処理状態からなる、同一か類似の材料仕様又はグレードの材料で製作される他の容器に使用してもよい。溶接継手は、材料の認定に用いた溶接施工要領に合致させなければならない。
- c) **疲労亀裂進展速度  $da/dN$**  疲労亀裂進展速度  $da/dN$  は次の 1), 2) による。ただし、SA-372M 及び SA-723M の場合は、1), 2) の代わりに 3) で疲労亀裂進展速度  $da/dN$  を求めてもよい。
- 1) 疲労亀裂進展則  $da/dN = C (\Delta K)^m$  は、**6.13.9** の試験方法で求める。 $da/dN$  は材料の各ヒートと各熱処理から求める。試験片は容器製作の最終熱処理条件とする。母材及び溶接継手の溶接金属と熱影響部の各々に対して **6.13.9 a)2)** の必要本数からなる試験を行う。溶接継手(溶接金属と熱影響部)の試験は、容器製作に使用する各溶接施工要領のデータを含めなければならない。試験片は  $TL$  方向で採取する。 $TL$  方向の試験片が溶接金属や熱影響部から採取できない場合は、 $LT$  方向の試験片を用いてよい。上限値を破壊力学評価で使用する。

- 2) 引張強さと降伏強さが認定試験で使用された材料の値の 5%を超えなければ、1) で求めた値を、同じ公称化学成分と熱処理状態からなる、同一か類似の材料仕様又はグレードの材料で製作される他の容器に使用してもよい。溶接継手は、材料の認定に用いた溶接施工要領に合致させなければならない。
- 3) SA-372M 及び SA-723M の場合は、6.13.10 に規定する疲労亀裂進展速度を適用してもよい。

#### 6.13.8 水素誘起割れに対する下限界応力拡大係数 $K_{IH}$ 決定の試験方法<sup>1)</sup>

##### a) 一般 $K_{IH}$ は、次の 1)～3) による。

- 1) 試験はライジングロード試験とし、ASTM E1820 及びこの規格の追加要求に従う。
- 2) 試験は大気環境及び水素ガス環境で行い、それぞれから得られる荷重－亀裂開口変位曲線を比較して水素誘起割れの進展開始荷重を決定する。
- 3) 水素誘起割れの進展開始荷重と測定した亀裂長さから  $K_{IH}$  を算出する。

##### b) 試験片形状と試験片本数 試験片の形状と本数は、次の 1)～4) による。

- 1) 試験片の形状は、ASTM E1820 Fig. A2.1 に規定するコンパクト試験片とする。試験片には大気中で  $a_0/W$  (亀裂深さ/試験片幅) =  $0.5 \pm 0.05$  の範囲の疲労予亀裂を導入する。
- 2) 試験片は、圧縮水素用の設備の最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体の内面近傍から採取する。円筒形状の試験体から採取する試験片の採取方向は、ASTM E399 に示すように TL 方向とする。TL 方向の試験片を溶接金属や熱影響部から採取できない場合には、LT 方向の試験片を用いてよい。溶接金属の試験では、材料表面に対して垂直に、切欠きを溶接部の幅の中央に機械で加工する。熱影響部の試験では、切欠きは材料表面に対してほぼ垂直に機械で加工し、破断部が熱影響部となるように予亀裂を位置させる。
- 3) 試験片には、亀裂開口変位を測定するために溝を設け、クリップゲージを装着する。
- 4) 試験片の数は、大気環境が 1 本、水素ガス環境が 3 本とする。

##### c) 試験要領 試験要領は、次の 1)～5) による。

- 1) 水素圧力及び水素純度は、6.13.5 a) 3) の SSRT 試験の設計圧力と水素純度を適用する。
- 2) 室温で、大気環境及び水素ガス環境の試験を行う。
- 3) 試験は、単調増加荷重(ライジングロード)を変位制御で負荷する。試験は、最終破断以前に除荷し、途中で終了してもよい。
- 4) 荷重は亀裂開口変位速度が 0.0003 mm/s 以下となるように制御して負荷する。試験中に、荷重－亀裂開口変位曲線を記録する。
- 5) 大気環境及び水素ガス環境で得られる荷重－亀裂開口変位曲線を比較し、水素誘起割れの進展開始荷重を決定する。

##### d) $K_{IH}$ の算出 水素誘起割れの進展開始荷重と疲労予亀裂長さから、水素誘起割れの下限界応力拡大係数 $K_{IH}$ を求める。応力拡大係数の式は ASTM E1820 による。

#### 6.13.9 疲労亀裂進展試験<sup>1)</sup>

この試験方法は、設計圧力の水素ガス環境中における疲労亀裂進展速度を  $da/dN = C (\Delta K)^m$  の形式で計測する方法を示す。試験は室温で、容器の設計圧力以上の圧力の水素で、ASTM E647 に従って実施する。SA-372M 及び SA-723M の場合は、6.13.10 に規定する疲労亀裂進展速度を

適用してもよい。

- a) **試験片形状と試験片本数** 試験片の形状と本数は、次の 1)、2)による。
- 1) 試験片は、圧縮水素用の設備の最終形状又は最終形状と同等の形状の試験体の内面近傍から採取する。ASTM E399 に示されるように、試験片の採取方向は TL 方向とする。TL 方向の試験片が溶接金属や熱影響部から採取できない場合は、LT 方向の試験片を用いてよい。溶接金属の試験の場合には、材料表面に垂直となるように切欠きを溶接幅の中央に機械で加工する。熱影響部の試験の場合には、切欠きは材料表面に対してほぼ垂直に機械で加工し、破断部が熱影響部となるように予亀裂を位置させる。
  - 2) 試験片の数は、大気環境が 1 本、水素ガス環境が 3 本とする。
- b) **試験条件** 試験条件及び試験環境は、6.13.8 c) 1)及び2)のライジングロード試験の試験条件及び試験環境を適用する。
- c) **試験周波数** 試験周波数は運転状態を考慮して使用者が設定するが、0.1 Hz 以下とする。
- d) **応力比** 応力比  $R$  は、容器設計に用いる値を下回らない。
- e) **亀裂進展速度データ  $da/dN$**  破壊力学評価に用いる  $\Delta K$  の全範囲について、 $da/dN = C (\Delta K)^m$  のデータを取得する。
- f) **記録** ASTM E647 の 10 に従って報告書を作成する。

#### 6.13.10 SA-372M 及び SA-723M の疲労亀裂進展速度

SA-372M 及び SA-723M の室温における水素ガス環境の疲労亀裂進展速度は、次の a)～c)による。

- a) 疲労亀裂進展速度は、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  と応力拡大係数比  $R_k$  の関数として次式による。

$$\frac{da}{dN} = C \{f(R_k)\} (\Delta K)^m \dots\dots\dots(6.13.13)$$

$$f(R_k) = \frac{1 + C_H R_k}{1 - R_k} \dots\dots\dots(6.13.14)$$

$$\Delta K = K_{I \max} - K_{I \min} \dots\dots\dots(6.13.15)$$

$$R_k = K_{I \min} / K_{I \max} \dots\dots\dots(6.13.16)$$

ここで、

$K_{I \max}$  : 最大応力拡大係数,  $K_{I \max} = K_{I \max}^* + K_{I \text{res}}$  (MPa $\sqrt{m}$ )  
 $K_{I \max}$  は、40 MPa $\sqrt{m}$  未満とする。

$K_{I \min}$  : 最小応力拡大係数,  $K_{I \min} = K_{I \min}^* + K_{I \text{res}}$  (MPa $\sqrt{m}$ )  
 $K_{I \min} < 0$  の場合,  $K_{I \min} = 0$  とする。

$C, m, C_H$  : 表6.13.1に示す材料特性

- b) 運転圧力は 103 MPa 以下とする。
- c) 引張強さの実測値は 915 MPa 未満とする。

---

#### 参考文献

- 1) 高圧ガス保安協会, KHKS 0220(2020) 超高压ガス設備に関する基準, (2020)

表 6.13.1 疲労亀裂進展速度の材料特性<sup>†</sup>

材料	材料特性	$\Delta K < \Delta K_c$ の場合 <sup>a)</sup>	$\Delta K \geq \Delta K_c$ の場合 <sup>a)</sup>
SA-372M	$C$ $\left\{ \frac{\text{mm}}{\text{cycle}} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^{-m} \right\}$	3.5 E-11	1.5 E-8
SA-723M	$m$	6.5	3.66
	$C_H$	0.43	2.0

注<sup>a)</sup>  $\Delta K_c = 8.475 + 4.062R_k - 1.696R_k^2$

## 7 製作

### 7.1 製作一般

#### 7.1.1 一般事項

この項では、製作に関する一般事項を規定している。製作に際しては、設計で考慮した残留応力分布が安全側になるよう管理する。また、容器及び容器部品に使用される材料特性や想定される材料欠陥が、設計の前提を満足しなければならない。

#### 7.1.2 材料

材料は、次の **a) ~ c)** による。

- a) 材料試験及び証明書** 溶接材も含め全ての材料に関し、**5** の要求事項を遵守している証明書を必要とする。更に、全ての材料は **9** に従って検査を行う。これらの試験及び検査結果は、製作者製作記録に文書化する。
- b) 材料確認** 材料確認は、次の **1) ~ 3)** による。
- 1) 容器完成時、可能な限り材料の初期マーキングを明確に見ることができるように、耐圧部材を配置する。初期マーキングが消去されるか、又は材料を二つ以上の部材に分割する場合には、切断前に製作者は完成した容器にてマーキングを見ることができるようにマーキングを移し替える。代替として、製作中の各材料及び完成した容器が特定できるようなコードマーキングを使用する。
  - 2) 他の場所で完成された部品は、その部品製作者名及び部品が特定できるようにマーキングする。製造時に消去されるマーキングや小さな部品については、他の方法を用いる。
  - 3) マーキングの移し替えについては次の **3.1) ~ 3.3)** による。
    - 3.1) 使用条件において材料に対してダイスタンプが禁止され、使用者によって規定されている場合、材料製作者及び製作者は、材料に必要なデータをマーキングしなければならない。マーキングは、完成した容器における位置が分かるように記録される。分割される材料におけるマーキングの移し替えは、上記 **1)** による。
    - 3.2) 材料が製作者以外によって加工され、材料規格による初期マーキングが消去される場合、又は部材を二つ以上に分割する場合には、製作者は次のいずれかを行う。
      - 3.2.1) 初期マーキングを別の場所に移し替える。

- 3.2.2) 完成した圧力容器の製作者の品質マネジメントシステムに記載されているマーキング方法を使用して、初期マーキングが追跡可能となるコードを使用する。
- 3.3) 材料証明書で追跡可能であり、各材料の位置が特定できるように、完成図又は材料一覧表を作成する。
- c) **欠陥材の補修** 9.2 の制限を超える欠陥が製作の過程で見つけられた材料は使用しない。ただし、使用者設計仕様書や 5 で禁止されていなければ、欠陥を除去し、材料を補修する。全ての補修は 9.2 の規定に従って行い、製作者製作記録に記録する。

### 7.1.3 材料の成形

材料の成形は、次の a) ~c) による。胴、鏡に使用される材料は、設計の前提となる強度特性を下まわらない方法で成形する。

a) **材料検査** 材料検査は、次の 1), 2) による。

- 1) 圧力容器に使用される全ての材料は、9.2 の合格基準を超える欠陥を検知する目的で、成形、製作前までに検査する。製作中に切断される全ての端面(開口部の端面を含む)は、9.3.4 に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験によって検査し、9.3.4 の判定基準を超える欠陥は記録に残し補修しなければならない。
  - 2) 38 mm を超える母材の切断面は、9.2.5 d) に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験により検査する。この検査は、直径 76 mm 以下の開口部の切断面には要求されない。ただし、その開口部周辺については、開口面積以上の範囲において 9.2.5 c) に従って超音波探傷試験を実施する。9.2.5 c) の合格基準を超える指示模様が検出された場合は、9.2 に従って補修しなければならない。板又は鍛造品の非層状不連続部と層状不連続部は、別々に取扱う。圧力をシールするねじ継手は、いかなる指示模様も認めない。
- b) **材料の切断** 材料の切断は、機械的方法又は熱的方法にて行う。熱的切断を実施した後は、その後の製作や使用の前に全てのスラグや有害な変色部を機械的に除去する。熱的切断を実施した場合、材料の強度特性への影響を考慮する。溶接される端面は、均一で滑らかとする。
- c) **ノズル内側端部の仕上げ** ノズルネックの内側端面が胴内面に面一の場合、図 6.10.4、図 6.10.5 で示されている以外のノズルの内側端部は、 $t/4$  又は 3 mm のいずれか小さい方の値以上でアール取りをする。ノズルネックが胴内面から突き出している場合は、ノズルネック端部の内側と外側に  $t_n/4$  又は 10 mm のいずれか小さい方の値以上でアール取りをする。

### 7.1.4 円筒胴、球形胴及び成形鏡の公差

設計計算が行われ、使用者との合意がない限り、円筒胴、球形胴及び成形鏡の公差は、次の a), b) の規定を逸脱してはならない。

- a) **円筒胴** 円筒胴の軸に垂直ないかなる断面においても、最大内径と最小内径の差が公称内径の 1%以下とする。測定は容器の内径でも外径でもよい。外径で測定する場合、内径は該当する断面における材料の最小厚さに対して補正しなければならない。
- b) **球形胴と成形鏡** 球形胴と成形鏡は、次の 1) ~3) による。
- 1) 内表面の規定された形状からの変位量は、公称内径の外側に 1.25%、内側に 0.625%以下とする。形状に対して垂直に測定し、なだらかな変位量としなければならない。
  - 2) 測定は、溶接部ではなく、母材表面から行う。

- 3) ストレートフランジ部、成形鏡部の円筒状端部、又は球形胴の端部は、上記 a) に規定される公差以内とする。

## 7.2 溶接による製作に関する追加規定

### 7.2.1 全ての溶接に関する一般事項

全ての溶接に関する一般事項は、次の a)～f) による。

- a) **溶接施工方法** 容器の製作に使用できる溶接施工方法は、次とする。
- ・被覆アーク溶接
  - ・サブマージアーク溶接
  - ・溶極式ガスシールドアーク溶接
  - ・ティグ溶接
  - ・帯状エレクトロスラグ肉盛溶接
- b) **炭素含有量に基づく制限** 溶鋼分析において材料の炭素含有量が 0.35% を超える場合、附属品取付けも含め、溶接による製作を行わない。ただし、線巻きの線材の溶接はこの規定の対象外である。補修溶接は、7.7 の規定に従って実施する。
- c) **溶接開先面の検査** 肉厚 38 mm 以上の溶接開先面は、9.3.4 に従って検査する。欠陥は、9.2 に従って補修する。
- d) **最終溶接部の仕上げ** 最終溶接部は、グラインダー又は機械仕上げにて表面を滑らかにする。
- e) **溶接棒及びその他の溶接材料の表示、取扱い、保管** 容器の製作に使われる溶接棒及びその他の溶接材料を適切に管理する。低水素系溶接棒とフラックスは水分の吸収を最小限に抑える予防措置を取る。
- f) **溶接中の許容できる環境** 溶接部から 76 mm 以内の金属表面温度が 16℃ より低い場合、いかなる溶接も実施してはいけない。溶接表面が濡れているか凍っている場合、雨か雪が降っている場合、又は適切な保護がされていない時の強風時の溶接は実施してはいけない。

### 7.2.2 溶接施工方法確認試験及び記録

溶接施工方法確認試験及び記録は、次の a)～f) による。

- a) **製作者の責任** 製作者は、JIS B 8285 に従って溶接施工方法の確認試験を行う。製作者は、この規格の追加要求及び溶接士の技能についても責任を有する。
- b) **溶接施工方法確認試験の制限** 全ての試験片の溶接は、製作者によって実施され、その試験は製作者が責任を有する。
- c) **溶接施工方法確認前の製品溶接** 溶接施工方法が確認されるまで、実製品の溶接は実施してはいけない。
- d) **溶接施工方法確認試験** 耐圧部品の溶接及び非耐圧部品の耐圧部品への溶接に使われる溶接施工方法は、JIS B 8285 に従って溶接施工方法の確認試験を行う。引張試験が、JIS B 8285 で要求される場合、降伏点又は 0.2% 耐力も測定する。更に、衝撃試験も 10.2 に従って実施する。突合せ溶接の試験片を作成する場合、溶接部に負荷されるあらゆる方向の拘束の影響を考慮する。
- e) **溶接士の試験** 耐圧部品の溶接及び非耐圧部品の耐圧部品への溶接に携わる溶接士は、JIS Z 3801, JIS Z 3811, JIS Z 3821 及び JIS Z 3841 に従って格付けする。機械試験が全ての技

能試験に要求され、非破壊検査による技能試験は認めない。自動溶接士に対する技能試験は、**ASME Sec. IX QW-360**に従って、別の試験片又は最初の実機ピースで実施する。

- f) **溶接施工方法確認記録及び製品記録の保持** 試験結果、データ及び各溶接士の識別を含む溶接施工方法確認記録、及び溶接士の記録を保管する。

### 7.2.3 許容される溶接継手とそれらの検査

許容される溶接継手とそれらの検査は、次の **a)～g)**による。

- a) 次の **1)～4)**に記載されていることを除き、全ての溶接継手は **b)**の **Type No.1** 突合せ継手とする。完全溶込み溶接と組合せて使用していない部分溶込み溶接(すみ肉溶接など)は、耐圧部に使用しない。
- 1) 完全溶込み溶接は、ノズル取付けに使用する。次の **c)**を参照する。
  - 2) 溶接多層容器の最も内側の胴を除き、層同士の接合には、**Type No.2** 片側グループ溶接を使用する。次の **d)**を参照する。
  - 3) ヒーティング/クーリングジャケット取付け溶接及びサポートクリップ取付け溶接については、**6.7** 及び次の **e)**に従う。要求される溶接検査は、全ての溶接後熱処理後に **9.3**に従って実施する。
  - 4) 次の **4.1)～4.4)**を満足する条件に限り、溶接面にアクセスできないか、表面処理方法が実用的ではない場合に、**7.2.1 d)**で要求されるグラインダー又は機械仕上げを行わなくてもよい。
    - 4.1) 溶接部に凹みや厚さの減少がない。
    - 4.2) **6.4**に従って疲労解析が行われている。
    - 4.3) 表面を考慮して破壊力学的評価を行う場合に、全厚さに対して有限要素法解析により応力分布状態が得られている。
    - 4.4) 有限要素法解析では、この規格で許容されている最大の溶接目違い、ピーキング、溶接補強のプロファイルを組込む。又は、最大の溶接目違い、ピーキング、溶接補強について製作者設計報告書に文書化されて検査報告書で検証されている場合。
- b) **Type No.1 突合せ溶接** **Type No.1** 突合せ溶接は、両側溶接、又は、両側溶接と同等の品質を生み出す他の方法によって実施する。残ってしまう裏当て金を使う溶接は、**Type No.1** 突合せ溶接とは見なされない。**Type No.1** 突合せ溶接は、完全に熔融、溶込みし、接合される部品同士でグラインダー又は機械加工にて面一とする。全ての **Type No.1** 突合せ溶接は、全長を **9.3**に従って検査を行う。
- c) **ノズル取付け用完全溶込みグループ溶接** ノズル取付けは、**6.10**を参照する。通常は、**6.10.7**による **Type No.1** 突合せ溶接であるが、**6.10.8**の規定による完全溶込みグループ溶接を使用してもよい。溶接施工方法と溶接検査は、次の **1), 2)**による。
- 1) **溶接施工方法** 通常、この溶接は片側溶接となる。ノズル内面側の高品質溶接を生み出すために GTAW のような溶接方法を考慮する。
  - 2) **溶接検査** **9.3**に要求される溶接部の試験に追加して、中間段階での検査(湿式磁粉探傷試験など)を実施する。
- d) **Type No.2 突合せ溶接** **Type No.2** 突合せ溶接は、多層溶接容器における各層の内筒への溶

接のみに使用する。設計及び製作に関する規定は、6.8及び7.8を参照する。

- e) **完全溶込みグループ溶接と組合せて使用するすみ肉溶接の品質と検査** すみ肉溶接が完全溶込みグループ溶接と組合せて使用される場合、グループ溶接部分は、すみ肉溶接が施工される前に上記c)の規定により施工する。すみ肉溶接は、次の1)、2)による。
- 1) すみ肉溶接のルート部でその近傍表面の肉厚減少が0.8 mm以下とする。又は、近傍の材料のいかなる所でも設計最小必要肉厚以上とする。
  - 2) 表面は、7.2.1 d)、9.3.6 d)に従って仕上げて検査する。
- f) **浸透探傷試験** オーステナイト-クロム-ニッケル合金、オーステナイト-フェライト二相合金、ニッケル合金の突合せ溶接及びすみ肉溶接は、浸透探傷試験を実施する[9.3.6 d)を参照]。熱処理が必要な場合、検査は熱処理後に実施する。全ての欠陥は、7.2.5に従って補修し、記録に残す。補修した範囲は、浸透探傷試験を再度実施する。
- g) **表面溶接肉盛り** 6.10.6, 7.2.4 d)のテーパ部の要求に従うために、母材の肉厚を修復するか、溶接継手の形状を修正する目的で溶着金属を母材表面に盛る場合には、次の要求事項に従う。
- 1) 実機溶接の前に、肉盛りする溶着金属の厚さに対応する溶接施工方法確認試験に合格する。
  - 2) 全ての溶接肉盛りは、全表面に対し9.3.6 d)に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を実施する。
  - 3) 10 mm厚さを超える全ての溶接肉盛りは、全溶着金属に対し9.1に従って放射線透過試験又は超音波探傷試験を実施する。
  - 4) 溶接肉盛りが容量的検査を必要とする継手に使用される場合、溶接肉盛りについても同様の検査をする。

#### 7.2.4 溶接中の要求事項

溶接される部品は、溶接作業中、クリーンであり、適正な位置に設置、保持する。溶接中の要求事項は、次のa)~h)による。

- a) **両側溶接における反対側の開先面の準備** 反対側の面を溶接する前にその開先面は、ルート部で良好な金属を確保するためにチップング、グラインディング又はエアアークガウジングにより処理する。その開先面を溶接開始する前に、9.2.5 d)に従って検査する。
- b) **溶接される面の清掃** 溶接される部品の表面は、クリーンで、スケール、さび、油、グリース、その他の有害異物が無い状態とする。全ての材料に関し、有害な酸化物は、溶接継手から少なくとも50 mmは除去する。溶接金属が前の溶接金属表面上に盛られる場合、溶接金属中に不純物の巻込みを防ぐために、全てのスラグは取除かなければならない。
- c) **溶接中のアライメント** バー、ジャッキ、クランプ、タック溶接又は他の適正な方法により、溶接される開先の位置関係を調整する。タック溶接は、完全に取り除かれるか、最終溶接の一部として溶融させる。
- d) **突合せ溶接される開先面の公差** 突合せ溶接される開先面の公差は、最大目違いが表7.2.1で許容されている値以下とする。全てのずれは、3:1のテーパか溶着金属の追加により整形する。肉厚の異なる継手については、6.10.6を参照する。

表 7.2.1 溶接継手の面の最大許容目違い†

板の厚さ ( $t$ )	円筒胴の継手方向	
	長手方向	周方向
24 mm 以下	$t/5$ と 2.4 mm の小さい方の値	$t/5$
24 mm を超え 38 mm 以下	2.4 mm	4.8 mm
38 mm 超え	2.4 mm	$t/8$ (最大 6 mm)

- e) **溶接が再スタートされる時の注意事項** 溶接がなんらかの理由により停止する場合、再スタートする際、必要な溶解、溶込みを得るために特に注意する。
- f) **仮治具とアークストライクの除去** 仮治具が取り除かれた範囲やアークストライクの発生した範囲は、グラインダーにて滑らかに仕上げ、**9.2.5 d)**に従って磁粉探傷法か液体浸透探傷法により検査する。欠陥除去後は、欠陥が取り除かれたことを確認するために再検査する。
- g) **ピーニング** 管理されたピーニングは、ひずみ減少のために実施してもよい。ピーニングは、後熱処理されなければ、ルート初層にも最終層にも実施しない。
- h) **溶接士の登録マーキングと記録** 溶接士の登録マーキングと記録は、次の**1)～3)**による。
- 1) 各溶接士は、製作者によって与えられた登録番号、文字、シンボルを溶接線(6 mm 以上の肉厚)に沿って 0.9 m ごとに示す。又は、溶接士によってなされた各溶接継手の記録を製作者が保持する。
  - 2) 複数の非耐圧部材取付け溶接が容器になされる場合、次のいずれかの条件を満たせば、各継手を溶接した溶接士を特定する必要はない。
    - ・それらの溶接を実施した溶接士が全て有資格者であることを証明できるように、溶接士を特定する要領を製作者の品質管理システムが含んでいる場合
    - ・各種の溶接が、全て同じタイプ、形状であり、同じ溶接施工要領で溶接されている場合
  - 3) 製作者の品質管理システムでタック溶接が有資格の溶接士によってなされたことを証明できれば、最終耐圧溶接の一部となるタック溶接を施工する溶接士を最終的に記録に残す必要はない。

### 7.2.5 溶接欠陥の補修

溶接欠陥の補修は、次の**a)～e)**による。

- a) **欠陥の除去** **9.3**による検査や耐圧試験により検出された欠陥は、機械的方法やエアアークガウジングにより除去する。もし、エアアークガウジングが使われるならば、製作者は、その手順が材料に有害でないことを確認する。
- b) **補修部分の再溶接** 補修すべき範囲は、確認試験に合格した溶接施工方法を使用し、有資格者により再溶接する(**7.2.2**を参照)。
- c) **補修溶接の検査** 補修溶接は本溶接の検査方法により再検査する。その検査にて満足な結果が得られなければ、その補修溶接は不合格となる。
- d) **補修溶接の後熱処理** **7.4**の溶接後熱処理の要求事項は、全ての補修溶接にも適用する。
- e) **補修の記録** 全ての溶接補修は、製作者製作記録に残す。

### 7.3 耐食クラッド，耐食肉盛溶接又は耐食ライニングに対する製作上の要求

#### 7.3.1 適用範囲

この規定は，耐食クラッド，耐食肉盛溶接又は耐食ライニングに適用する。強度向上の目的で胴の一部と見なされる初期応力を有するライニングは 7.8 による。適用範囲は，次の a)， b) による。

- a) **許容される継手形状** 耐食金属と母材の溶融により作られる脆性的な成分を最小限に押えるような継手形状と溶接施工方法を用いる。
- b) **溶接金属の成分** 圧力容器の内容物による腐食作用を受ける溶接金属は，合せ材又はライニング材と同等の耐食性を有する必要がある。このため，原則として同一材料の溶接金属を使用するが，機械的性質と耐食性が使用条件に対して十分な特性を有する場合には，他の成分の溶接金属でもよい。コロンビウムで安定化したオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属のコロンビウム含有量は，1.00%を超えてはならない。ただし，溶接される材料によって，高いコロンビウム含有量が許容されている場合を除く。母材に溶接する場合には，400 系合金の溶加材は使用しない。

#### 7.3.2 溶接施工方法の確認

ステンレスクラッド鋼の溶接施工は JIS B 8266 附属書 13 の 3.4 に従って行い，溶接施工方法は，次の a)， b) に従って詳細に記録する。

- a) **ライニングの取付け** ライニング材を母材に取付ける溶接は，溶接施工方法ごとに実際の製作に用いる方法と同一要領とし，母材，ライニング及び溶接金属にそれぞれ用いる材料の化学成分がいずれも実際の製作に用いる材料の範囲内のものを用いて，ライニング取付け溶接に対する溶接施工方法の確認試験を行う。これは実際の製作に用いる溶接姿勢ごとに行い，圧力容器の溶接施工方法の確認試験ごとに試験片 1 個を採取し，切断，研磨，エッチングし，溶接部と母材との境界がはっきり分かるようにする。溶接施工方法を確認するに当っては，試験片を，拡大鏡を使用せずに肉眼で見て，溶着が完全であり，溶着部及び熱影響部に割れがないことを示す。
- b) **クラッド又は肉盛溶接に対する要求事項** クラッド又は肉盛溶接に対する要求事項は，次の 1)～3) による。
  - 1) **母材の開先溶接の確認** 開先溶接は JIS B 8285 附属書 D の D.2 又は D.3 に従って確認試験を行う。
  - 2) **確認試験の実施** 溶接施工方法の確認試験は JIS B 8285 附属書 D の D.2 又は D.3，及び 7.3.2 b) 3) に従って行う。
  - 3) **試験片板** 母材と同じ P 番号を持つクラッド又は肉盛溶接から，試験材料を準備する。クラッド又は肉盛溶接の試験で使用する溶接材料は，実際の製作時に使用される溶接材料と同じ F 番号とする。クラッド又は肉盛溶接の試験で使用する溶接材料が JIS B 8266 附属書 13 表 1 に記載されていない場合には，圧力容器で使用されるものと同じ等級の材料で確認を行う。熱処理をする必要はないが，製作時に熱処理されるのであれば，熱処理を行ってもよい。なお，次の 3.1) と 3.2) の条件も満たす必要がある。
    - 3.1) 溶接方向に対し垂直に切断した試験片断面で，3.2 mm 以上の融合不良がない。

3.2) 非溶融のクラッドの全長が、溶接方向に垂直な試験片の長さの10%を超えない。

### 7.3.3 クラッド

クラッドの場合には、せん断試験でせん断強さが140 MPa以上あることを示す必要がある。

### 7.3.4 溶接後熱処理

溶接後熱処理は、次のa)～c)による。

- a) **母材の溶接後熱処理** 母材の溶接後熱処理が要求される場合には、クラッド、肉盛溶接又はライニングで製作された圧力容器又は容器の部分は、溶接後熱処理を行う。溶接後熱処理条件を決める厚さは、母材の厚さを用いる。
- b) **クロム系ステンレス鋼の場合** クラッド、肉盛溶接又はライニング材としてクロム系ステンレス鋼を使用した圧力容器又は容器の部分は厚さにかかわらず、全て溶接後熱処理を行う。ただし、SUS 405 又は SUS 410S の合せ材又はライニングで、オーステナイト系溶接棒又は空冷非硬化型のニッケル、クロム、鉄合金の溶接棒で溶接したものは、上記 a) の規定によって必要な場合を除き、溶接後熱処理を行わない。
- c) **応力の再配分に影響を及ぼす熱処理** 圧力容器又は容器の部分へのいかなる熱処理も、6.5, 6.8, 6.9 で要求される応力分布に有害な影響を及ぼさないようにしなければならない。更に、多層容器又は自緊容器では、7.8.3 h) 又は 7.5.5 b) の熱処理要求事項を満たす必要がある。

### 7.3.5 検査要求事項

検査要求事項は、次のa), b)による。

- a) **肉盛溶接で保護された母材の検査** 9.3 で要求される検査は、耐食層を含め、継手が完成した後に行う。ただし、次の1)～3)を満たせば、肉盛溶接を行う前に母材の溶接部で検査を行ってもよい。
  - 1) 溶接継手部の母材厚さが、設計厚さ(6.2.2 の計算式で、容器の設計圧力を代入して求められる厚さ)よりも厚い。
  - 2) 耐食合金の肉盛溶接が、空冷非硬化型溶接である。
  - 3) 完成した肉盛溶接が、9.2.4 に従って割れを検出できる方法で検査される。
- b) **クロム系ステンレス鋼の合せ材又はライニングの溶接部の検査** クロム系ステンレス鋼の合せ材又はライニングをつなぐ合金材溶接継手は、次の1)又は2)に従って割れの有無を検査する。
  - 1) **ストレートクロム系ステンレス鋼の溶加材** 割れの検査は、次の1.1)及び1.2)による。
    - 1.1) ストレートクロム系ステンレス鋼の溶加材を用いた溶接継手は、全線にわたり割れの検査をする。クロム系ステンレス鋼の溶接が母材の溶接部と連続して接触している場合は、9.3 に従って割れの検査をする。
    - 1.2) 母材に取付けたライニングの溶接部は、9.3.5 e)に従って割れの検査をする。
  - 2) **オーステナイト系クロムニッケル鋼の溶加材** オーステナイト系クロムニッケル鋼の溶加材又は空冷非硬化型のニッケル、クロム、鉄合金の溶加材で溶接した継手は、9.3.5 d)に従って全線にわたって浸透探傷試験により検査し、9.3 に従って全線の10%で断続的に超音波探傷をする。

### 7.3.6 検査と試験

検査と試験は、次の a), b) による。

- a) **一般要求** 次の b) は、9 の検査と試験に対する一般要求とともに適用する。
- b) **ライニングの密封度** ライニングについては、使用条件に適しているかどうかの漏洩試験を行う。ただし、試験の詳細については、使用者と製作者間の合意に基づかなければならない。試験では、荷重を受け持っている母材に損傷を与えないようにする。圧力容器の内容物との接触により、母材に急速な腐食が起こることが予想される場合には、特に精度の高い漏洩試験を行う必要がある。

### 7.3.7 記録

記録に関する規定は、クラッド、肉盛溶接又はライニングで製作される容器に対しても適用され、製作者設計報告書に型式とその仕様を含める。

## 7.4 溶接部の熱処理

### 7.4.1 熱処理要求

溶接部の熱処理要求は、次の a), b) による。焼入焼戻鋼に対する追加の要求事項は、7.6 を参照する。

- a) **予熱に対する要求** JIS B 8285 の溶接施工方法確認試験に従って、必要最小限の予熱要求事項を規定する。予熱の必要性和予熱温度は、化学成分、継手部での部材の拘束度、高温での機械的特性、材料の厚さのような多くの因子に依存する。
- b) **溶接後熱処理に対する要求** 詳細な要求事項と免除事項を適用する前に、次の 1) ~ 4) の溶接後熱処理条件と制限事項を含み、JIS B 8285 に従って溶接施工方法の確認試験を行う。
  - 1) 材料の溶接後熱処理に対する要求を、次の 1.1) ~ 1.4) に示す。
    - 1.1) 高強度の焼入焼戻鋼に対する溶接後熱処理は、7.6.4 による。
    - 1.2) **2.25Cr-1Mo-0.25V 鋼及び 3Cr-1Mo-0.25V-B 鋼** 最終溶接後熱処理は、P 番号 5C の材料に対する要求事項に従って行う。
    - 1.3) **2.25Cr-1Mo 鋼** 最終溶接後熱処理は、P 番号 5A の材料に対する要求事項に従って行う。ただし、表 7.4.1 に示す材料は、最低保持温度を 650°C とし、次の 4) で規定する公称厚さが 125 mm 以下では保持時間を  $t_n/25$  h、125 mm を超える場合には保持時間を  $5 + (t_n - 125)/100$  h とする。ここで、 $t_n$  は公称厚さである。
    - 1.4) その他の材料の溶接後熱処理は、P 番号に対して表 7.4.2 ~ 表 7.4.18 の要求事項に従って行う。表には ASME Sec. II, Part D による P 番号を示すが、JIS による P 番号との対応は JIS B 8267 附属書 A を参照する。これらの表に記載された事項を除いて、全ての溶接された圧力容器又は部材は、腐れ代を含めた溶接継手の公称厚さに基づいて、表で規定された温度以上で溶接後熱処理を行う。なお、10.2 の要求事項により、追加の溶接後熱処理が要求されることもある。
  - 2) **保持温度及び保持時間を超える場合** 1) の制限事項を除いて、保持温度又は保持時間は表 7.4.2 ~ 表 7.4.18 に示す最低の値を超えてもよい。その場合の試験板の熱処理は、表 7.4.1 に示す材料に対しては 10.1.2 d), その他の材料に対しては 10.1.2 c) を参照する。中間の溶接後熱処理は、1) に準拠する必要はない。溶接後熱処理の時間-温度の全ての記録は保管する。これらの表に規定された温度における保持時間は連続した時間の必要

はなく、多段の溶接後熱処理サイクルの累積時間でよい。

- 3) **異なる P 番号グループの材料及び非耐圧部材が取付けられる耐圧部材の熱処理** 二つの異なる P 番号グループの耐圧部材を溶接する場合、溶接後熱処理は表 7.4.2～表 7.4.18 において、より高温の溶接後熱処理温度が要求される材料での規定を適用する。非耐圧部材を耐圧部材に溶接する場合には、耐圧部材の溶接後熱処理温度の方を管理する。
- 4) **溶接後熱処理を決める公称厚さの定義** 表 7.4.2～表 7.4.18 及び表 7.6.1 の公称厚さは、次の 4.1)～4.6) で定義される溶接継手の厚さである。炉内で溶接後熱処理される压力容器又は部材に対しては、以前に溶接後熱処理されなかった容器又は部材中の最大の溶接部厚さである。
- 4.1) 同一厚さの完全溶込み突合せ溶接継手では、公称厚さは溶接余盛を除いた全溶接深さである。
- 4.2) 完全溶込み溶接(グループ溶接)の場合には、公称厚さはグループ深さである。
- 4.3) 隅肉溶接の場合には、公称厚さはのど厚である。隅肉溶接と完全溶込み溶接(グループ溶接)を併用した場合には、公称厚さはグループ深さ又はのど厚のどちらか大きい方である。
- 4.4) スタッド溶接の場合には、公称厚さはスタッドの直径である。
- 4.5) 厚さの異なる溶接継手の場合には、公称厚さは次による。
- ・鏡とシェルの溶接部を含め、二つの隣接する突合せ溶接部材の薄い方
  - ・管板、平鏡、蓋、フランジ又は同種の部材とシェルの溶接部では、シェルの厚さ
  - ・図 6.7.1, 図 6.10.1, 図 6.10.2, 図 6.10.3, 図 6.10.4, 図 6.10.5 において、ノズル根元、シェル、鏡の溶接部及び取付物の隅肉溶接部の場合は厚さの大きい方
  - ・ノズルとフランジの溶接部では、ノズル根元の厚さ
  - ・非耐圧部材が耐圧部材に溶接される場合には、取付け位置における溶接部の厚さ
  - ・管と管板の接合部では、溶接部の厚さ
- 4.6) 補修に対しては、公称厚さは補修溶接の深さである。

#### 7.4.2 溶接後熱処理における加熱手順

溶接後熱処理における加熱手順は、次の a)～c)による。

- a) **加熱方法** 溶接後熱処理は、次の 1)～7) の手順の一つに従って行う。加熱バンドは、表 7.4.2～表 7.4.18 の最低溶接後熱処理温度を満足する金属の体積として定義する。加熱バンドには、最低限、溶接部、熱影響部及び熱処理される溶接部に隣接した母材を含める。加熱バンドの最小幅は、溶接部の各端部又は終端で、溶接部の最も広い幅 +  $t$  又は 50 mm のどちらか小さい値とする。なお、 $t$  は、7.4.1 b) 4) で定義される公称厚さである。
- 1) **容器全体の加熱** 閉鎖した炉内で容器全体を加熱することが好ましく、できればこの方法をとる。
- 2) **容器の部分的加熱** 加熱する部分を少なくとも 1.5 m 以上オーバーラップさせれば、炉内で一回以上の加熱をしてもよい。この場合、温度勾配が有害にならないように、炉の外側の部分は保温する(次の b)を参照)。なお、ノズルなどの構造不連続部をまたがって、炉から突き出してはならない。

- 3) **加熱部材と周方向溶接** 加熱部材と周方向溶接は、次の 3. 1)～3. 3)による。
3. 1) 長手溶接継手又は複雑な溶接部の溶接後熱処理に対しては、容器を完全に接合する前に、シェル部、鏡及び他の容器部材を加熱してもよい。前もって溶接後熱処理しなかった周方向溶接継手は、加熱バンドで継手部を含んで周方向を帯状に加熱することにより、局部的に溶接後熱処理をしてもよい。
3. 2) 局部的に熱処理する方法は、パイプ、チューブ又はノズル取付部の周方向溶接継手の局部熱処理に適用してもよい。ノズル取付部では、有害な温度勾配が生じないように十分な長さを取る必要がある。これが適用できなければ、次の a) 5)を参照する。
3. 3) 加熱バンドの幅は溶接部を含み、更に溶接端から両側にそれぞれ公称厚さの 2 倍以上の幅を取る。加熱バンドの外側は、有害な温度勾配にならないように保温する。局部加熱では、加熱バンドは全周にわたり、加熱バンドの外側は有害な温度勾配が生じないように保温する。この方法は、補修後の容器の溶接後熱処理に適用してもよい。
- 4) **容器の内側からの加熱** 容器壁で一様な温度分布を管理、維持できるような温度指示計及び記録装置が利用できる場合には、適切な手段で内側から容器を加熱してもよい。次の c)の温度要求事項が満足されるように、加熱に先立って、容器を十分に断熱しておく必要がある。
- 5) **ノズル及び外部取付物の局部的加熱** ノズル及び外部取付物の局部的加熱は、次の 5. 1)～5. 3)による。
5. 1) 溶接後熱処理が要求されるノズル又は他の溶接取付物を含む周方向加熱は、帯状に一様に要求温度[次の c)を参照]に加熱し、規定時間保持する。5. 2)の修正事項を除いて、加熱バンドはノズル及び溶接取付物を含まなければならない。加熱バンドの外側の容器部は、有害な温度勾配が生じないように保温する。
5. 2) 5. 1)の方法は、パイプ、チューブ又はノズル取付部の周方向継手の局部熱処理に適用してもよい。ノズル取付部では、熱拘束による有害な温度勾配が生じないように十分な長さを取っておくか、又はノズルを含んでシェルの全周にわたって加熱する。加熱バンドの幅は、ノズル又は溶接取付物周りを要求温度に加熱し、規定時間保持できるように、ノズル又は溶接取付物の形状に応じて変えてもよい。また、ノズル又は溶接取付物周りの加熱バンドを要求温度に加熱し、規定時間保持し、加熱-冷却のサイクル中に有害な温度勾配が生じないならば、ノズル又は溶接取付物から周方向に離れた加熱バンド内の温度は変化してもよいし、要求温度になる必要はない。加熱バンドの外側の容器部は、有害な温度勾配が生じないように保温する。
5. 3) 5. 1)は、補修後の容器の溶接後熱処理に適用してもよい。
- 6) **二重曲率を有する鏡又はシェルの局部領域の加熱** 二重曲率を有する鏡の大径部又は球殻、半球形鏡に溶接されるノズル又は溶接取付物周りの局部加熱は、一様に要求温度[次の c)を参照]に加熱し、規定時間保持する。加熱バンドは、ノズル又は溶接取付物を含まなければならない。加熱バンドは、溶接端部から全ての方向に、公称厚さ又は 50 mm のどちらか小さい距離だけ広がっていなければならない。加熱バンドの外側の容器部は、有害な温度勾配にならないように保温する。

- 7) **他の形状の加熱** 上記 1)～6)で規定されていない他の形状に対しても、温度勾配、全ての重要な構造不連続部(ノズル、取付物、鏡とシェルの接合部)、溶接後熱処理中に生じる可能性のある機械的荷重の影響を考慮した手段が取られるならば、局部加熱を行ってもよい。加熱バンドの外側の容器部は、有害な温度勾配にならないように保温する。
- b) **容器の残留応力分布に影響を及ぼす熱処理** いかなる熱処理も、6.5、6.8 及び 6.9 で求められた残留応力分布に悪影響を及ぼさないようにしなければならない。更に、7.8.3 h)又は7.5.5 b)の熱処理の要求事項を満足しなければならない。
- c) **加熱及び冷却速度** 溶接後熱処理は次の 1)～5)に従って、上記 a)の一つで行う。
- 1) 容器又は部材を炉内に置いている間、炉内温度は 425°Cを超えてはならない。
  - 2) 425°Cより上の加熱速度は、シェル又は鏡の厚さ 25 mm 当たり 220°C/h 以下とする。ただし、55°C/h 以下にする必要はない。加熱時間中、4.6 m 間隔の範囲内で加熱される容器部で 140°C以上の温度変動があってはならない。
  - 3) 容器又は部材は、規定された時間中、表 7.4.2～表 7.4.18 の温度以上に保持する。保持時間中、これらの表の制限事項を除いて、加熱される容器部で最高温度と最低温度で 55°C以上の温度差があってはならない。
  - 4) 加熱及び保持時間中、容器表面における過度な酸化を避けるように、炉内大気を管理する。炉は、火炎が直接容器に当たらないような構造に設計する。
  - 5) 7.6 による変更がなければ、425°Cまでの冷却は、閉鎖した炉内又は冷却チャンバー内で、シェル又は鏡の厚さ 25 mm 当たり 280°C/h 以下の速度で行う。ただし、55°C/h 以下にする必要はない。425°Cからは、大気中で空冷してもよい。

#### 7.4.3 補修後の溶接後熱処理

7.4.1 の要求事項に従って溶接後熱処理された容器又は部材は、溶接後熱処理が要求される補修溶接がなされたならば、補修後に、再度、溶接後熱処理を行う。製作者は、いかなる付加的な熱処理も、容器の材料特性に悪影響を及ぼさないことを保証しなければならない。補修後の溶接後熱処理に関する追加規定を、次の a)、b)に示す。

- a) P 番号 1 と P 番号 3 の材料及びこれらの材料による継手の溶接金属に対する補修溶接は、最終の溶接後熱処理の後に行ってもよい。しかし、次の 1)～8)の全てを満たすならば、補修溶接は追加の溶接後熱処理を行うことなく、最終の水圧試験の前に行ってもよい。ただし、製作用固定具の取外し後の補修のように材料表面の軽微な修復には、これらの要求は適用されない。
- 1) 使用者によって、溶接後熱処理が要求されていない。
  - 2) 衝撃試験が要求されない材料である。
  - 3) 製作者は、補修溶接について事前に使用者又は指定代理人に通知し、補修は許可が得られるまで行わない。補修内容は、製作者製作記録に記載する。
  - 4) 補修溶接の全深さは、P 番号 1 の材料では 38 mm、P 番号 3 の材料では 16 mm を超えない。補修溶接の全深さは、両側から行った補修溶接による深さの合計値とする。
  - 5) 欠陥の除去後に、9 に従った磁粉探傷試験又は浸透探傷試験で開先の検査を行う。
  - 6) 7.2 の要求事項に加えて、次の 6.1)～6.3)の要求を適用する。

- 6.1) 補修溶接は低水素溶接材料を使用した手動の被覆アーク溶接で行い、最大ビード幅は溶接棒の直径の4倍とする。
  - 6.2) P番号1の材料の場合、補修領域を最低95℃で予熱し、溶接の間、保持する。
  - 6.3) P番号3の材料の場合、溶接方法は、サブマージアーク溶接によるハーフビード補修溶接とテンパービード補強法に限定する。補修領域を最低175℃で予熱し、溶接の間、保持する。パス間温度の最高温度は230℃とする。初層は最大直径3mmの溶接棒を使用して全領域に亘って盛り、初層厚さの約半分は次の層を盛る前に研削によって除去する。その後の層は、前の溶接ビードと熱影響部が確実に焼戻しされるように、最大直径4mmの溶接棒を使用して盛り。最終的に、溶接ビードを母材に接触せずに補修面上まで盛るが、母材熱影響部が確実に焼戻しされるように、下地の溶接ビード端部に十分に接近させる。補修溶接が完了した後に、補修領域を205℃～260℃で、最低でも4時間保持する。最終のテンパービード補強層は、母材表面と同一平面になるように除去する。
- 7) 大気温度になった後に、9に従って補修溶接の磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。磁粉探傷試験は、交流ヨーク型のみでよい。P番号3の材料の場合には、遅れ割れの可能性を判断するために、48時間以上、大気温度に放置した後に探傷試験を行う。更に、深さが10mmを超える補修溶接及び9による放射線透過試験が要求される溶接の補修は、放射線透過試験を行う。
  - 8) 補修溶接を行った後に、容器の水圧試験を行う。
- b) 溶接のための出力が最大125 W-secに制限され、表7.4.2～表7.4.18の要求事項が適用できるならば、裸線熱電対の取付けにコンデンサ放電又は電気抵抗溶接が使用でき、溶接後熱処理は不要である。溶接手順仕様書を作成し、その内容には最小限、コンデンサ放電装置、接合する材料の組合せ及び適用技術を含める。溶接手順の認定は不要である。

表 7.4.1 クロムモリブデン鋼の材料仕様

化学成分	材料規格番号	形態
2.25Cr-1Mo	SA-508M      Grade 22 Cl.3	鍛造
	SA-541M      Grade 22 Cl.3	鍛造
	SA-542M      Type B Cl.4	板
2.25Cr-1Mo-0.25V	SA-182M      Grade F22V <sup>a)</sup>	鍛造
	SA-336M      Grade F22V	鍛造
	SA-541M      Grade 22V	鍛造
	SA-542M      Type D Cl.4a <sup>b)</sup>	板
	SA-832M      Grade 22V	板
3Cr-1Mo-0.25V-Ti-B	SA-182M      Grade F3V <sup>c)</sup>	鍛造
	SA-336M      Grade F3V	鍛造
	SA-508M      Grade 3V	鍛造
	SA-541M      Grade 3V	鍛造
	SA-542M      Type C Cl.4a <sup>d)</sup>	板
	SA-832M      Grade 21V	板

注記 JIS の相当材に対しても適用する。

注 <sup>a)</sup> 相当材は、JIS G 3206 SFVCM F22V (鍛鋼品) である。

注 <sup>b)</sup> 相当材は、JIS G 4110 SCM4 4V (鋼板) である。

注 <sup>c)</sup> 相当材は、JIS G 3206 SFVCM F3V (鍛鋼品) である。

注 <sup>d)</sup> 相当材は、JIS G 4110 SCM4 5V (鋼板) である。

表 7.4.2 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 1 グループ番号 1, 2 及び 3 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1)～3) の場合に、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>1) 公称厚さが 38 mm を超える溶接継手</p> <p>2) 95°C 以上で予熱しない公称厚さ 32 mm～38 mm の溶接継手 ただし、SA-841M, Grade A 及び B の板材は、炭素含有量と炭素当量がそれぞれ 0.14 %と 0.40 %以下の場合には予熱の必要はない。ここで、炭素当量(CE)は次式による。</p> $CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$ <p>3) 直火を受ける耐圧部材の公称厚さが 16 mm を超える溶接継手 ただし、次の 3.1) ～3.5) を除く。</p> <p>3.1) 仕上げ内径が 50 mm 以下のノズルを取付ける場合、ノズルを取付けるために胴又は鏡板の厚さを増やす必要がなく、95°C 以上で予熱するならば、溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接</p> <p>3.2) 直径 50 mm 以下の管を管板に取付ける場合、管板材料の炭素含有量が 0.22 %を超え、95°C 以上で予熱するならば、溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接</p> <p>3.3) 耐圧部材に非耐圧部材を取付ける場合、耐圧部材の厚さが 32 mm を超えるときに 95°C 以上で予熱した溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接</p> <p>3.4) 耐圧部材の厚さが 32 mm を超える場合、95°C 以上で予熱する耐圧部材のスタッド溶接</p> <p>3.5) 耐圧部材の厚さが 32 mm を超える場合、初層の溶接で 95°C 以上の温度が保持される耐食肉盛溶接又は耐食ライニング溶接</p> <p>b) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には、より低い保持温度で、表 7.4.18 に示す保持時間で溶接後熱処理を行ってもよい。</p>	<p><math>t_n \leq 50 \text{ mm}</math> 595°C</p> <p><math>\frac{t_n}{25} \text{ h}</math> 最小 0.25 h</p> <p><math>50 &lt; t_n \leq 125 \text{ mm}</math> 595°C</p> <p><math>2 + \frac{t_n - 50}{100} \text{ h}</math></p> <p><math>t_n &gt; 125 \text{ mm}</math> 595°C</p> <p><math>2 + \frac{t_n - 50}{100} \text{ h}</math></p>

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.3 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 3 グループ番号 1, 2 及び 3 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
a) グループ番号 3 の材料は、全ての厚さで溶接後熱処理が必要である。	$t_n \leq 50 \text{ mm}$
b) 次の c) を除いて、次の 1) 及び 2) の場合に溶接後熱処理が必要である。	595°C
1) 公称厚さが 16 mm を超えるグループ番号 1 及び 2 の材料 これらの材料は、製作時の溶接と同じ厚さ以上で 7.2.2 の溶接施工方法の確認が行われなければ、公称厚さが 16 mm 以上で溶接後熱処理が必要である。	$\frac{t_n}{25} \text{ h}$ 最小 0.25 h
2) 直火を受ける耐圧部材	$50 < t_n \leq 125 \text{ mm}$
c) グループ番号 3 の材料を除いて、耐圧部材への取付けに対して次の 1) ~ 5) の場合には溶接後熱処理の必要はない。	595°C
1) 95°C 以上で予熱するならば、規定炭素含有量が 0.25 % 以下の耐圧部材への取付物、又は溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接される非耐圧部材への取付物	$2 + \frac{t_n - 50}{100} \text{ h}$
2) 公称厚さが 13 mm 以下で、規定炭素含有量が 0.25 % 以下のパイプ又は管の周方向突合せ溶接	$t_n > 125 \text{ mm}$ 595°C
3) 95°C 以上で予熱するならば、規定炭素含有量が 0.25 % 以下の耐圧部材のスタッド溶接	$2 + \frac{t_n - 50}{100} \text{ h}$
4) 初層の溶接で 95°C 以上の温度が保持されるならば、規定炭素含有量が 0.25 % 以下の耐圧部材に溶接される耐食肉盛溶接又は耐食ライニング溶接	
5) のど厚が 10 mm 以下のシール溶接で、部材の厚さが 16 mm を超える場合に 95°C 以上で予熱するならば、拡張やねじなどの機械的手段とシール溶接で固定された管、圧力保持ハンドホールと検査プラグ又はフィッティング	
d) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。	
e) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には、より低い保持温度で、表 7.4.18 に示す保持時間で溶接後熱処理を行ってもよい。保持温度を低減する場合には、10.2 で要求される製作用試験板も同じ熱処理にしなければならない。	

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) で規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.4 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 4 グループ番号 1 及び 2 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1) 及び 2) の場合には、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>1) 直火を受ける全ての厚さの耐圧部材</p> <p>2) その他の全てのグループ番号 1 及び 2 の材料</p>	<p><math>t_n \leq 50 \text{ mm}</math></p> <p>650°C</p> <p><math>\frac{t_n}{25} \text{ h}</math></p>
<p>b) 次の 1) ~ 5) の場合には、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) 次の 1.1) ~ 1.3) の全ての要件を満たすパイプ又は管の周方向突合せ溶接</p> <p>1.1) 公称厚さが 16 mm 以下である。</p> <p>1.2) 規定炭素含有量が 0.15 % 以下である。</p> <p>1.3) 予熱温度が 120°C 以上である。</p> <p>2) 次の 2.1) 及び 2.2) の要件を満たすならば、非耐圧の取付物が隅肉溶接された a) 1) 及び a) 2) のパイプ又は管</p> <p>2.1) のど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接である。</p> <p>2.2) 予熱温度が 120°C 以上である。</p> <p>3) 120°C 以上で予熱するならば、スタッド溶接された a) 1) 及び a) 2) のパイプ又は管</p> <p>4) 次の 4.1) 及び 4.2) の要件を満たすならば、熱吸収フィンが電気抵抗溶接された a) 1) 及び a) 2) のパイプ又は管</p> <p>4.1) フィンの厚さが 3 mm 以下である。</p> <p>4.2) 溶接手順を用いる前に、製作者は熱影響部がパイプ又は管の最小厚さまで入り込まないことを示さなければならない。</p> <p>5) のど厚が 10 mm 以下のシール溶接で、部材の厚さが 16 mm を超える場合に 120°C 以上で予熱するならば、拡管やねじなどの機械的手段とシール溶接で固定された管、圧力保持ハンドホールと検査プラグ又はフィッティング</p>	<p>最小 1 h</p> <p><math>50 &lt; t_n \leq 125 \text{ mm}</math></p> <p>650°C</p> <p><math>\frac{t_n}{25} \text{ h}</math></p> <p><math>t_n &gt; 125 \text{ mm}</math></p> <p>650°C</p> <p><math>5 + \frac{t_n - 125}{100} \text{ h}</math></p>
<p>c) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p>	

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.5 溶接後熱処理の温度及び時間

(P 番号 5A グループ番号 1, P 番号 5B グループ番号 1 及び P 番号 5C グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1)～5)を除いて、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>1) 次の 1.1)～1.4)の全ての要件を満たすパイプ又は管の周方向突合せ溶接</p> <p>1.1) 規定クロム含有量が 3.0%以下である。</p> <p>1.2) 公称厚さが 16 mm 以下である。</p> <p>1.3) 規定炭素含有量が 0.15%以下である。</p> <p>1.4) 予熱温度が 150°C 以上である。</p> <p>2) 次の 2.1)及び 2.2)の要件を満たすならば、非耐圧の取付物が隅肉溶接された 1.1)～1.3) 満足するパイプ又は管</p> <p>2.1) のど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接である。</p> <p>2.2) 予熱温度が 150°C 以上である。</p> <p>3) 150°C 以上で予熱するならば、スタッド溶接された 1.1)～1.3)を満足するパイプ又は管</p> <p>4) 次の 4.1)及び 4.2)の要件を満たすならば、熱吸収フィンが電気抵抗溶接された 1.1)～1.3)を満足するパイプ又は管</p> <p>4.1) フィンの厚さが 3 mm 以下である。</p> <p>4.2) 溶接を行う前に、製作者は熱影響部がパイプ又は管の最小厚さまで入り込まないことを示さなければならない。</p> <p>5) のど厚が 10 mm 以下のシール溶接で、部材の厚さが 16 mm を超える場合に 150°C 以上で予熱するならば、拡張やねじなどの機械的手段とシール溶接で固定された規定クロム含有量が 6%以下の P 番号 5A の材料の管、圧力保持ハンドホールと検査プラグ又はフィッティング</p>	<p><math>t_n \leq 50 \text{ mm}</math></p> <p>675°C</p> <p><math>\frac{t_n}{25} \text{ h}</math></p> <p>最小 1 h</p> <p><math>50 &lt; t_n \leq 125 \text{ mm}</math></p> <p>675°C</p> <p><math>\frac{t_n}{25} \text{ h}</math></p> <p><math>t_n &gt; 125 \text{ mm}</math></p> <p>675°C</p> <p><math>5 + \frac{t_n - 125}{100} \text{ h}</math></p>
<p>b) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が表 7.4.1 に示す材料に対しては 10.1.2 d), その他の材料に対しては 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p>	
<p>c) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には、最低保持温度を 650°C とし、公称厚さが 50 mm 以下の場合には保持時間を 4 h 又は <math>0.16 t_n \text{ h}</math> の長い方、公称厚さが 50 mm を超える場合にはその保持時間の 4 倍にする。保持温度を低減する場合には、10.1.2 a) を満足しなければならない。</p>	

表 7.4.5 溶接後熱処理の温度及び時間（続き）

(P 番号 5A グループ番号 1, P 番号 5B グループ番号 1 及び P 番号 5C グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>d) 次の 1)～3)の要件を満たすならば、裸線熱電対をコンデンサ放電溶接又は電気抵抗溶接で取付ける場合には溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) 7.4.3 b)の要件を満たす。</p> <p>2) 母材の炭素含有量が 0.15 %以下である。</p> <p>3) 容器の厚さが 5.0 mm 以上である。</p>	

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4)に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.6 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 6 グループ番号 1, 2 及び 3 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 炭素含有量が 0.08 %以下で、オーステナイト系 Cr-Ni 溶着金属又は非空気硬化 Ni-Cr-Fe 溶着金属を生成する溶接材料で溶接された SUS 410 の容器は、公称厚さが 10 mm 以下の場合及び公称厚さ 10 mm～38 mm では溶接中に 230°C の温度が保持され 100 %放射線透過試験を行うならば、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>b) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c)の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p>	<p><math>t_n \leq 50</math> mm 760°C <math>\frac{t_n}{25}</math> h 最小 1 h</p> <p><math>50 &lt; t_n \leq 125</math> mm 760°C <math>2 + \frac{t_n - 50}{100}</math> h</p> <p><math>t_n &gt; 125</math> mm 760°C <math>2 + \frac{t_n - 50}{100}</math> h</p>

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4)に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.7 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 7 グループ番号 1 及び 2 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 650°C を超える温度における最大冷却速度は 55°C/h とし、その後、脆化を防止するために十分に速い速度で冷却しなければならない。炭素含有量が 0.08 %以下で、オーステナイト系 Cr-Ni 溶着金属又は非空気硬化 Ni-Cr-Fe 溶着金属を生成する溶接材料で溶接された SUS 405 及び SUS410S の容器は、公称厚さが 3 mm 以下の場合及び公称厚さ 3 mm~38 mm では溶接中に 230°C の温度が保持され 100%放射線透過試験を行うならば、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>b) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p>	$t_n \leq 50 \text{ mm}$ 730°C $\frac{t_n}{25} \text{ h}$ 最小 1 h
	$50 < t_n \leq 125 \text{ mm}$ 730°C $2 + \frac{t_n - 50}{100} \text{ h}$
	$t_n > 125 \text{ mm}$ 730°C $2 + \frac{t_n - 50}{100} \text{ h}$

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.8 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 8 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 溶接後熱処理を行う必要はないが、行ってもよい。</p> <p>b) 溶接後熱処理を行う場合には、製作者は材料の脆化、鋭敏化及びシグマ相など有害な相の析出を防止するために必要な措置をしなければならない(ASME Sec. II, Appendix A, A-207~A-210 を参照)。</p>	

表 7.4.9 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 9A グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1)～3) の場合に、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>1) 使用者設計仕様書で要求される全ての厚さの材料</p> <p>2) 公称厚さが 16 mm を超える材料 16 mm 以下の材料は、製作時の溶接以上の厚さで 7.2.2 の溶接施工方法の確認がなされていなければ、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>3) 直火を受ける耐圧部材</p> <p>b) 次の 1)～5) の場合に、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) 次の 1.1)～1.4) の要件を満たすパイプ又は管の周方向突合せ溶接</p> <p>1.1) 公称外径が 100 mm 以下である。</p> <p>1.2) 公称厚さが 13 mm 以下である。</p> <p>1.3) 規定炭素含有量が 0.15 % 以下である。</p> <p>1.4) 予熱温度が 120°C 以上である。</p> <p>2) 次の 2.1) 及び 2.2) の要件を満たす 1.1)～1.3) のパイプ又は管</p> <p>2.1) のど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接</p> <p>2.2) 120°C 以上で予熱された材料 健全な溶接継手を製作するために特別な手順が用いられる場合、より低い予熱温度にしてもよい。このような手順には次の 2.2.1)～2.2.3) があるが、これらに限定されない。</p> <p>2.2.1) のど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接である。</p> <p>2.2.2) 連続長さが 100 mm 以下の隅肉溶接である。</p> <p>2.2.3) 7.2.2 の溶接施工方法の確認に用いる試験板の厚さが溶接する材料よりも厚い。</p> <p>3) 予熱温度が 95°C 以上で、溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接による耐圧部材への非耐圧部材の取付け</p> <p>4) 予熱温度が 95°C 以上の耐圧部材のスタッド溶接</p> <p>5) 初層の溶接で、95°C 以上の予熱温度が保持される耐食肉盛溶接又は耐食ライニング溶接</p> <p>c) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p>	<p>595°C</p> $1 + \frac{t_n - 25}{100} \text{ h}$ <p>最小 1 h</p>

表 7.4.9 溶接後熱処理の温度及び時間（続き）  
 (P 番号 9A グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>d) 425°C～保持温度間の加熱速度が 30°C/h 以下の場合，保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。更に，製作者が全厚さにわたって最低温度を保持できることを示すことができれば，保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。</p> <p>e) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には，最低保持温度を 540°C とし，表 7.4.18 に示す保持時間で溶接後熱処理を行ってもよい。保持温度を低減する場合には，10.2 で要求される製作用試験板も同じ熱処理にしなければならない。</p>	

注記  $t_n$  は，7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.10 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 9B グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1) 及び 2) の場合、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>1) 公称厚さが 16 mm を超える材料 16 mm 以下の材料は、製作時の溶接以上の厚さで 7.2.2 の溶接施工方法の確認がなされていなければ、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>2) 直火を受ける耐圧部材</p> <p>b) 次の 1) ~ 3) の場合、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) 予熱温度が 95°C 以上で、溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接による耐圧部材への非耐圧部材の取付け</p> <p>2) 予熱温度が 95°C 以上の耐圧部材のスタッド溶接</p> <p>3) 初層の溶接で、95°C 以上の予熱温度が保持される耐食肉盛溶接又は耐食ライニング溶接</p> <p>c) 溶接後熱処理の保持温度は 635°C 以下とする。</p> <p>d) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p> <p>e) 425°C ~ 保持温度間の加熱速度が 30°C/h 以下の場合、保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。更に、製作者が全厚さにわたって最低温度を保持できることを示すことができれば、保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。</p> <p>f) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には、最低保持温度を 540°C とし、表 7.4.18 に示す保持時間で溶接後熱処理を行ってもよい。保持温度を低減する場合には、10.2 で要求される製作用試験板も同じ熱処理にしなければならない。</p>	<p>595°C</p> $1 + \frac{t_n - 25}{100} \text{ h}$ <p>最小 1 h</p>

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.11 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 10A グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1)～3) の場合、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>1) SA-487M Cl. 1A と Cl. 1B の全ての厚さの材料</p> <p>2) 公称厚さが 16 mm を超えるその他の P 番号 10A の材料 16 mm 以下の材料は、製作時の溶接以上の厚さで 7.2.2 の溶接施工方法の確認がなされていなければ、溶接後熱処理が必要である。</p> <p>3) 直火を受ける耐圧部材</p> <p>b) 次の 1)～4) の場合、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) 95°C 以上で予熱するならば、規定炭素含有量が 0.25 % 以下の耐圧部材への取付物、又は溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接される非耐圧部材への取付物</p> <p>2) 公称厚さが 13 mm 以下で、規定炭素含有量が 0.25 % 以下のパイプ又は管の周方向突合せ溶接</p> <p>3) 95°C 以上で予熱するならば、規定炭素含有量が 0.25 % 以下の耐圧部材のスタッド溶接</p> <p>4) 初層の溶接で 95°C 以上の温度が保持されるならば、規定炭素含有量が 0.25 % 以下の耐圧部材に溶接される耐食肉盛溶接又は耐食ライニング溶接</p> <p>c) 溶接後熱処理を最低保持温度及び保持時間を長くしてより低い温度で行う場合、0.15 % までのバナジウムを含む材料は脆化の可能性を考慮しなければならない。</p> <p>d) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p> <p>e) 425°C～保持温度間の加熱速度が 30°C/h 以下の場合、保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。更に、製作者が全厚さにわたって最低温度を保持できることを示すことができれば、保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。</p> <p>f) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には、より低い保持温度で、表 7.4.18 に示す保持時間で溶接後熱処理を行ってもよい。保持温度を低減する場合には、10.2 で要求される製作用試験板も同じ熱処理にしなければならない。</p>	<p>595°C</p> <p><math>1 + \frac{t_n - 25}{100}</math> h</p> <p>最小 1 h</p> <p>SA/NF A36-215 Grade P440 NJ4 の場合には、 530°C～560°C <math>t_n &lt; 20</math> mm で 0.5 h</p>

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.12 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 10C グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 次の 1)～3) の場合，溶接後熱処理が必要である。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 公称厚さが 38 mm を超える溶接継手</li> <li>2) 95°C 以上で予熱をしない公称厚さが 32 mm～38 mm の溶接継手</li> <li>3) 直火を受ける耐圧部材</li> </ol> <p>b) 次の 1)～4) の場合，溶接後熱処理の必要はない。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 仕上げ内径が 50 mm 以下のノズルを取付ける場合，ノズルを取付けるために胴又は鏡板の厚さを増やす必要がなく，95°C 以上で予熱するならば，溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接</li> <li>2) 耐圧部材に非耐圧部材を取付ける場合，耐圧部材の厚さが 32 mm を超えるときに 95°C 以上で予熱した溶接深さが 13 mm 以下の開先溶接又はのど厚が 13 mm 以下の隅肉溶接</li> <li>3) 耐圧部材の厚さが 32 mm を超えるときに 95°C 以上で予熱した耐圧部材のスタッド溶接</li> <li>4) 耐圧部材の厚さが 13 mm 超える場合，初層の溶接で 95°C 以上の予熱温度が保持される耐食肉盛溶接又は耐食ライニング溶接</li> </ol> <p>c) 425°C～保持温度間の加熱速度が 30°C/h 以下の場合，保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。更に，製作者が全厚さにわたって最低温度を保持できることを示すことができれば，保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。</p> <p>d) 規定の保持温度で溶接後熱処理ができない場合には，より低い保持温度で，表 7.4.18 に示す保持時間で溶接後熱処理を行ってもよい。保持温度を低減する場合には，10.2 で要求される製作用試験板も同じ熱処理にしなければならない。</p>	<p>540°C</p> $1 + \frac{t_n - 25}{100} \text{ h}$ <p>最小 1 h</p>

注記  $t_n$  は，7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.13 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 10H グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間																												
<p>次に示すオーステナイト-フェライト系の鍛造又は鋳造の二相ステンレス鋼は溶接後熱処理の必要はないが、行ってもよい。</p> <p>溶接後熱処理を行う場合には次の保持温度で行い、その後、液体焼入れ又は他の方法による急速冷却を行わなければならない。</p>																													
<table> <thead> <tr> <th>合金(UNS 番号)</th> <th>保持温度(°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>J93345</td> <td>最低 1,120</td> </tr> <tr> <td>S31200</td> <td>最低 1,040</td> </tr> <tr> <td>S31260</td> <td>1,020 ~ 1,100</td> </tr> <tr> <td>S31500</td> <td>975 ~ 1,025</td> </tr> <tr> <td>S31803, S32205</td> <td>最低 1,040</td> </tr> <tr> <td>S32202</td> <td>980 ~ 1,080</td> </tr> <tr> <td>S32304</td> <td>最低 980</td> </tr> <tr> <td>S32550</td> <td>最低 1,040</td> </tr> <tr> <td>S32750</td> <td>1,025 ~ 1,125</td> </tr> <tr> <td>S32760</td> <td>1,100 ~ 1,140</td> </tr> <tr> <td>S32900 (0.08 max. C)</td> <td>940 ~ 970</td> </tr> <tr> <td>S32950</td> <td>995 ~ 1,025</td> </tr> <tr> <td>S39274</td> <td>1,050 ~ 1,150</td> </tr> </tbody> </table>	合金(UNS 番号)	保持温度(°C)	J93345	最低 1,120	S31200	最低 1,040	S31260	1,020 ~ 1,100	S31500	975 ~ 1,025	S31803, S32205	最低 1,040	S32202	980 ~ 1,080	S32304	最低 980	S32550	最低 1,040	S32750	1,025 ~ 1,125	S32760	1,100 ~ 1,140	S32900 (0.08 max. C)	940 ~ 970	S32950	995 ~ 1,025	S39274	1,050 ~ 1,150	
合金(UNS 番号)	保持温度(°C)																												
J93345	最低 1,120																												
S31200	最低 1,040																												
S31260	1,020 ~ 1,100																												
S31500	975 ~ 1,025																												
S31803, S32205	最低 1,040																												
S32202	980 ~ 1,080																												
S32304	最低 980																												
S32550	最低 1,040																												
S32750	1,025 ~ 1,125																												
S32760	1,100 ~ 1,140																												
S32900 (0.08 max. C)	940 ~ 970																												
S32950	995 ~ 1,025																												
S39274	1,050 ~ 1,150																												

表 7.4.14 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 10I グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 650°C を超える温度における最大冷却速度は 55°C/h 以下とし、その後、脆化を防止するために十分に速い速度で冷却しなければならない。</p> <p>b) 公称厚さが 13 mm 以下の材料では溶接後熱処理の必要はないが、行ってもよい。</p> <p>c) UNS 番号 S44635 の材料は溶接後熱処理の必要はないが、行う場合にはフェライト系ステンレス鋼(P 番号 7 の材料)の条件とする。成形加工又は溶接後に熱処理する場合には 1,010°C 以上とし、その後、425°C まで急速冷却をする。</p> <p>d) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p> <p>e) 425°C～保持温度間の加熱速度が 30°C/h 以下の場合、保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。更に、製作者が全厚さにわたって最低温度を保持できることを示すことができれば、保持時間に <math>(t_n - 25)/100</math> h を加算する必要はない。</p>	<p>730°C</p> $1 + \frac{t_n - 25}{100} \text{ h}$ <p>最小 1 h</p>

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.15 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 10K グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) UNS 番号 S44660 の材料は溶接後熱処理の必要はないが、行う場合にはフェライト系ステンレス鋼(P 番号 7 の材料)の条件とする。成形加工又は溶接後に熱処理する場合には、815°C～1,065°C の温度で保持時間を 10 分以内とし、その後、急速冷却しなければならない。</p> <p>b) 溶接後熱処理の保持期間中に、容器部材の最大保持時間又は温度が 10.1.2 c) の規定を超える場合には、追加の試験材を作製して試験しなければならない。</p>	

表 7.4.16 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 15E グループ番号 1 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>a) 公称厚さ 13 mm 以下の場合、最低保持温度を 675°C とする。</p> <p>b) 溶加材の Cr 含有量が 3.0 %未満又は溶加材がニッケル系又はオーステナイト系の場合には、異材溶接(例えば、P 番号 15E グループ番号 1 と低クロム鋼、オーステナイト鋼又はニッケル鋼との溶接)の最低保持温度は 705°C とする。</p> <p>c) Grade 91 溶加材(例えば、AWS A.5.5 E90xx-B91, ISO EN CrMo91)で製作された溶接継手の場合、最高保持温度は次の 1)~4)により決定する。</p> <p>1) 溶加材の Ni + Mn 含有量が 1.0 %以下の場合には、最高保持温度は 790°C とする。</p> <p>2) 溶加材の Ni + Mn 含有量が 1.0 %を超えて 1.2 %以下の場合には、最高保持温度は 780°C とする。</p> <p>3) 溶加材の Ni + Mn 含有量が 1.2 %を超える場合には、最高保持温度は、ASTM A1033 に従って比熱に対する温度の測定によって決定される低変態点(Ac1)温度よりも少なくとも 10°C 低くする。このような場合、更に次の 3.1) 及び 3.2) の制限がある。</p> <p>3.1) ASTM A1033 に従って測定された溶加材の Ac1 温度を、製作者製作記録に記載しなければならない。</p> <p>3.2) Ni + Mn 含有量が 1.2 %を超える溶加材を使用して製作した容器の最高運転温度は、525°C とする。</p> <p>4) 耐圧部分又は圧力容器において、Grade 91 溶加材を使用して製作した複数の溶接継手を同時に溶接後熱処理する場合には、最高保持温度は最も高い Ni + Mn 含有量に基づいて決定する。</p>	<p><math>t_n \leq 125 \text{ mm}</math> 最低 705°C</p> <p><math>\frac{t_n}{25} \text{ h}</math> 最小 0.5 h</p> <p><math>t_n &gt; 125 \text{ mm}</math> 最低 705°C</p> <p><math>5 + \frac{t_n - 125}{100} \text{ h}</math></p>

表 7.4.16 溶接後熱処理の温度及び時間 (続き)  
(P 番号 15E グループ番号 1)

要求事項	保持温度と保持時間
<p>d) 機器の一部が最高保持温度を超えて加熱された場合には、次の 1)～4) の一つを行わなければならない。</p> <p>1) 機器全体の再焼きなましと焼戻しを行う。</p> <p>2) c) の最高保持温度を超えるが、800°C を超えない場合には、溶接金属を除去して取替える。</p> <p>3) 加熱領域の各片側 75 mm 以上の範囲が 800°C を超えて過熱された機器の一部は、除去して再焼きなましと焼戻しを行うか又は取替える。</p> <p>4) 最高保持温度を超えて加熱された機器の一部が規定温度内で再加熱処理されるならば、設計温度における許容応力は、Grade 9 の材料(SA-213M Gr.T9, SA-335M Gr.P9 又は同等品)と同じ値とする。</p> <p>e) 次の 1)～4) の要件を満たす場合、熱吸収フィンをパイプ及び管に取付ける電気抵抗溶接は、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) パイプ又は管の寸法が 100 DN(NPS 4)以下である。</p> <p>2) 規定炭素含有量が 0.15 %以下である。</p> <p>3) 厚さが 3 mm 以下である。</p> <p>4) 溶接を行う前に、製作者は熱影響部がパイプ又は管の最小厚さまで入り込まないことを示さなければならない。</p> <p>f) 次の 1)～3) の要件を満たす場合、裸線熱電対を取付けるコンデンサ放電溶接又は電気抵抗溶接は、溶接後熱処理の必要はない。</p> <p>1) 7.4.3 b) の要件を満たす。</p> <p>2) 母材の炭素含有量が 0.15 %以下である。</p> <p>3) 容器の厚さが 5.0 mm 以上である。</p>	

注記  $t_n$  は、7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さ(mm)である。

表 7.4.17 溶接後熱処理の温度及び時間  
(P 番号 42, P 番号 43, P 番号 44 及び P 番号 45 の材料)

要求事項	保持温度と保持時間				
<p>a) P 番号 42, 43, 44 又は 45 の各オーステナイト系ステンレス鋼同士の溶接継手又はこれらのオーステナイト系ステンレス鋼を組合せた溶接継手に対しては溶接後熱処理の必要はないが、行ってもよい。</p> <p>b) UNS 番号 S31226 の材料の溶接後熱処理温度は次による。冷却は、液体焼入れ又は他の手段による急速冷却とする。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>合金(UNS 番号)</th> <th>保持温度(°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S31226</td> <td>1,140 ~ 1,170</td> </tr> </tbody> </table> <p>c) 溶接後熱処理を行う場合には、製作者は材料の脆化、鋭敏化及びシグマ相など有害な相の析出を防止するために必要な措置をしなければならない(ASME Sec. II, Appendix A, A-207~A-210 を参照)。</p>	合金(UNS 番号)	保持温度(°C)	S31226	1,140 ~ 1,170	
合金(UNS 番号)	保持温度(°C)				
S31226	1,140 ~ 1,170				

表 7.4.18 保持温度の低減に対する最小保持時間

規定の保持温度から低減する温度 (°C)	最小保持時間 (h) <sup>a)</sup>
30	2
55	4
85 <sup>b)</sup>	10
110 <sup>b)</sup>	20

注記 この表は、表 7.4.2~表 7.4.17 で許容される場合のみ適用する。

注 <sup>a)</sup> 7.4.1 b) 4) に規定する公称厚さが 25 mm 以下の場合の保持時間である。公称厚さが 25 mm を超える場合には、 $(t_n - 25)/100$  h を加算する。ここで、 $t_n$  は公称厚さである。

注 <sup>b)</sup> これらの低減温度は、P 番号 1 グループ番号 1 及び 2 の材料にのみ適用する。

## 7.5 自緊容器に対する製作上の追加規定

### 7.5.1 適用範囲

この規格は自緊式容器の製作に適用し、7.1 と共に用いる。

### 7.5.2 検査と補修

検査と補修は、次の a)～c) による。

- a) 母材は、9.2.4 b) に従って超音波探傷試験を受ける。
- b) 溶接補修に当たっては、製作者設計報告書を認証する者の同意を得る。
- c) 全ての補修は材料メーカ又は製作者によって 9.2 に従って行い、9.2.3 d) に従って材料証明書に記録する。

### 7.5.3 自緊の実施方法

製作者は詳細な手順書を用意する。手順書には最低限、次の事項を含む。

- ・自緊の実施方法
- ・自緊範囲の制御方法
- ・自緊中の時間、温度及び圧力の記録方法
- ・自緊の到達範囲の測定方法及び許容範囲内であることの確認方法(6.5 を参照)
- ・自緊後の機械加工の記録

**注記** 加圧回数の記録：設計圧力の1.25倍を超える自緊前の複数回の負荷・除荷が亀裂発生及び最終疲労寿命に及ぼす影響について考慮する。製作者はそのような行為について文書を作成し、製作者設計報告書を認証する者に提出し承認を得る。

### 7.5.4 自緊後の検査

自緊によって塑性変形を受ける箇所のうち、9.4 による最終表面試験の際に接近できない表面については、9.2.5 に示す方法のうち、適切な方法で検査する。

### 7.5.5 自緊後の欠陥の補修

自緊後の欠陥の補修は、次の a), b) による。

- a) 欠陥は製作者が除去し、7.5.2 に従って補修してもよい。
- b) 溶接補修した場合には、補修部分に対して自緊による好ましい効果を 6.3 及び 6.4 において考慮してはならない。溶接補修は 9.2 に従って行う。溶接後熱処理が必要な場合は、残留応力分布に及ぼす影響を製作者製作記録に文書化する。

## 7.6 焼入焼戻鋼に対する製作上の追加規定

### 7.6.1 一般要求

一般要求は、次の a)～c) による。

- a) **適用範囲** この規定は、焼入焼戻しによって強度を高めた、溶接容器に適した鋼に適用する。5.2.8 の規定はこの材料にも適用する。
- b) **成形後の熱処理** 成形後の熱処理は、次の 1), 2) による。
  - 1) 焼入焼戻し後の成形が最終焼戻温度未満で行われた部品で、成形による最外縁の繊維伸びが 5% を超える場合には、表 7.6.1 に従って熱処理する。最外縁の繊維伸びは、次の式 (7.6.1) 又は式 (7.6.2) によって計算する。

複曲面の場合(例：鏡板)

$$\text{最外縁の繊維伸び(\%)} = \frac{75 t}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o}\right) \dots\dots\dots(7.6.1)$$

単曲面の場合(例：円筒胴)

$$\text{最外縁の繊維伸び(\%)} = \frac{50 t}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o}\right) \dots\dots\dots(7.6.2)$$

ここで、

$t$  : 厚さ(mm)

$R_f$  : 成形後の成形される板の中央面の半径(mm)

$R_o$  : 成形前の成形される板の中央面の半径(平板の場合は無限大)(mm)

- 2) 最初の焼戻温度以上で成形した部品は、溶接する前か後のいずれかの時期に、材料の仕様に従って再度、焼入焼戻しする。

- c) **成形後の最小厚さ** 耐圧部の成形後の最小厚さは 6 mm とする。

#### 7.6.2 溶接

溶接は、次の a)～f)による。

- a) **溶接施工方法及び溶接士の確認** JIS B 8285 及びこの規格の追加要求に従う。
- b) **溶加材** 0.08%を超えるバナジウムを含む溶加材は、溶接後熱処理をする溶接部に使ってはならない。
- c) **母材の準備** 板の端部の加工、溶接開先、面取り及び金属の除去を含む同様な操作は、機械加工、チップング、研削又は次の d) に示すガス切断又はエアアークガウジングによる。
- d) **ガス切断又はガウジング** 金属をガス切断又はエアアークガウジングなどの熱的方法で取り除く場合には、処理後、機械的方法によって少なくとも 1.6 mm を取り除き、その後 9.2.5 d) に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験をする。
- e) **溶接部の仕上げ** 全ての溶着金属の表面は、母材に対して滑らかでなければならない。
- f) **溶接部の靱性** 溶接部が焼入焼戻しされない場合で、溶着金属及び熱影響部を 10.2 に従って試験する時は、5.2.7 に示す衝撃値を満たさなければならない。溶接部が焼入焼戻しされる場合には、5.2 によって衝撃試験する。

#### 7.6.3 仮付溶接

仮付溶接は、次の a), b)による。

- a) 合わせ用の一時的ラグと同様に、当て板、吊上げラグ及びその他の非耐圧部品に対する仮付溶接は認証された溶接士並びに 7.2.2 に従った施工法で行う。
- b) 仮付溶接部は除去し、金属表面は滑らかな輪郭に戻す。表面は 9.2.5 d) に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験する。溶接補修が必要な時には、製作者の製作記録に残す。仮付溶接及び溶接補修に対し、認証された溶接士・施工法及び熱処理に対する要求は、他の溶接部と全く同じである。

#### 7.6.4 溶接後熱処理

溶接後熱処理は、次の a)～e)による。

- a) 焼入焼戻鋼製の容器，又はその部品に対する溶接後熱処理の要否及び方法は，**表 7.6.1** による。**表 7.6.1** で，クラッド，肉盛溶接容器又は容器部品に対して溶接後熱処理が必要な板厚を決定する時には，母材の全厚さを用いる。
- b) **表 7.6.1** の要求により溶接後熱処理を修正する場合には，**7.4** に従って行う。いかなる場合も，溶接後熱処理の温度は焼戻温度を超えてはならない。溶接後熱処理と焼戻しは，同時に行ってもよい。材料仕様により焼戻温度からの加速冷却が要求される場合には，全く同一の最小冷却速度を溶接後熱処理に適用する。
- c) 鏡又は胴へ取付けるアタッチメントの溶接部は，**表 7.6.1** の溶接後熱処理が必要な厚さとして取付け位置における厚さを用いて，溶接後熱処理の要否と方法を定める(**7.4.1** を参照)。
- d) 炉は自動温度記録装置を有していなければならない。容器及び容器部品の金属温度は，保持期間中は溶接後熱処理温度の $\pm 14^{\circ}\text{C}$ 以内に保持する。
- e) 部品又は容器全体の焼戻し脆化が問題になる場合には，スプレー又は浸漬によって溶接後熱処理をした後，急速冷却してもよい。熱処理の証明規定については**5.2.8**を参照する。

#### 7.6.5 検査及び試験

検査及び試験は，次の **a)**， **b)** による。

- a) **熱処理後の検査** 最終熱処理後，胴及び鏡の外面对して，また，可能な場合には内面对して亀裂が存在しないか検査する。この検査は**9.2.5 d)**に従って行う。
- b) **硬さ試験による熱処理の確認** 最終熱処理後，焼入焼戻鋼はブリネル硬さ試験をしなければならない。記録は少なくとも 3 ヶ所，すなわち，部品の中央と端部を代表する箇所で行う。各位置間の軸方向の間隔は 1.5 m を超えてはならない。これらの位置では円周方向に等間隔に 4 ヶ所の記録が必要である。硬さを測定した位置におけるブリネル硬さは平均値で 40 HB 以上変化してはならない。

表 7.6.1 焼入焼戻鋼に対する溶接後熱処理規定<sup>a)</sup>

材料規格番号	P 番号	溶接後熱処理が 必要な公称厚さ(mm)	溶接後熱処理温度 (°C)	保持時間(h)	
				(時間/25mm)	最小
SA-517M Grade A	11B Gr.1 <sup>o)</sup>	> 15	540 ~ 595	1	1/4
SA-517M Grade B	11B Gr.4 <sup>o)</sup>	> 15	540 ~ 595	1	1/4
SA-517M Grade E	11B Gr.2 <sup>o)</sup>	> 15	540 ~ 595	1	1/4
SA-517M Grade F	11B Gr.6 <sup>o)</sup>	> 15	540 ~ 595	1	1/4
SA-517M Grade P	11B Gr.8 <sup>o)</sup>	> 15	540 ~ 595	1	1/4
SA-533M Type B & D Cl.3	11A Gr.4	> 15	540 ~ 565	1/2	1/2
SA-543M Type B & C Cl.1	11A Gr.5	全て <sup>b)</sup>	540 ~ 565	1	1
SA-543M Type B & C Cl.2	11B Gr.10	全て <sup>b)</sup>	540 ~ 565	1	1
SA-724M Grade A & B	1 Gr.4	溶接後熱処理をしてはならない。			
SA-724M Grade C	1 Gr.4	> 38	565 ~ 620	1	1/2
SA-372M Grade E Cl.70	—	ASME Sec.II, Part A, SA-372M の熱処理規定による。			
SA-372M Grade F Cl.70	—	ASME Sec.II, Part A, SA-372M の熱処理規定による。			
SA-372M Grade J Cl.110	—	ASME Sec.II, Part A, SA-372M の熱処理規定による。			
SA-508M Grade 4N Cl.1	11A Gr.5	全て <sup>b)</sup>	540 ~ 565	1	1
SA-508M Grade 4N Cl.2	11B Gr.10	全て <sup>b)</sup>	540 ~ 565	1	1
SA-508M Grade 4N Cl.3	3 Gr.3	全て <sup>b)</sup>	540 ~ 565	1	1

注<sup>a)</sup> JIS材料であって溶接される焼入焼戻鋼の溶接後熱処理は、相当するASME規格材と同等でなければならない。

なお、相当するASME規格材がない場合には、JIS B 8266 附属書12の5.1を適用する。

注<sup>b)</sup> 溶接後熱処理をしてもしなくてもよい。焼戻し脆化の可能性を検討しなければならない。溶接後熱処理をする場合には、溶接後熱処理後の冷却速度が空冷(静止した空気による)よりも遅くならないようにする。

注<sup>o)</sup> 15 mm < t ≤ 32 mm に対しては、次の条件を満足すれば溶接後熱処理をしなくてもよい。

- ・ 95°C以上の予熱及びパス間温度 205°C以下
- ・ 溶接後 205°C以上に 4時間以上保時

## 7.7 溶接制限のある材料の追加規定

### 7.7.1 適用範囲

この項は溶接制限のある材料を使用して製作される鍛鋼容器とその部品に対しての追加要求について適用する。

### 7.7.2 欠陥の補修

欠陥の補修は、次の a), b) による。

- a) **表面欠陥の補修** 表面欠陥は、9.2.3 の制限された条件においてグラインダーで除去する。
- b) **溶接による欠陥の補修** 5.4, 表 5.4.1 及び表 5.4.2 の注によって溶接構造物に適用できない材料であっても、次の 1)～8) の条件を全て満足するならば、溶接による補修を行ってもよい。
  - 1) 溶鋼分析値で、炭素含有量が 0.40% 以下の鉄鋼材料である。
  - 2) 補修溶接が材料規格によって禁止されていない。
  - 3) 使用者と材料供給者又は製造者の間で補修溶接が合意されている。
  - 4) 認定された溶接要領書と溶接士により補修溶接が施工される。認定された自動溶接施工要領書により補修溶接を行う場合は、認定された自動溶接士により施工する。
  - 5) 補修用の溶接施工方法確認試験に使用されている溶接材料と溶接手順(予熱と溶接後熱処理を含む)は、補修する材料と同じ適用規格に合致した材料を用い、溶接姿勢、厚さの区分、機械試験項目が適用規格に合致する。特に溶接施工方法確認試験の機械試験に用いる試験片の材料は溶接前に実製品と同じ条件の熱処理を行い、溶接後に製品に実施する熱処理と同等の熱処理を施工する。更に、引張試験及び曲げ試験片は適用規格に規定された形状とし、適用規格による試験を行う。曲げ試験に用いるマンドレル曲率は適用規格による。
  - 6) 補修可能な深さは 9.2 を適用する。
  - 7) 補修溶接終了後は、溶接後熱処理又は適用される材料仕様書で要求される熱処理を行わなければならない。補修溶接は最終熱処理前に実施する。ただし、最終熱処理工程の前又は後に、施工されるねじ部開口部のシール溶接を除く。
  - 8) 補修溶接後の溶接部は、溶接後熱処理施工後に 9.3 に従って検査を行う。

### 7.7.3 鍛鋼鏡板の成形方法

6.6.6 に示される一体成形鏡板を除き、鏡板は別々の鍛鋼品として製作されるか、又は最終成形工程前の中空洞で末端が閉じた鍛鋼品として製作しなければならない。

## 7.8 多層容器の特別製作規定

### 7.8.1 適用範囲

この項で取り扱う多層容器とは、円筒の容器で 6.8 に示した焼ばめ式又は溶接巻きで設計された多層容器である。

### 7.8.2 焼ばめ式多層容器

焼ばめ式多層容器は、次の a)～d) による。

- a) **層の製作** 各層ごとに必要な熱処理を施したうえで、この規格で定められた単体の胴としての検査を行う。焼ばめの前に自緊される層が有る場合には、その層に対しては 7.5 を適用す

る。溶接で層を製作する場合には、各層に対して **7.2**, **7.4** を適用する。非破壊試験は、**9** に従って実施する。

- b) **焼ばめ温度** 焼ばめ温度は、材料の焼戻温度を超えてはならない。製作者は、加熱により材料の機械的性質が低下しないことを確認する。
- c) **組立て手順及び報告書** 設計残留応力分布を作り出すために使われる製作要領書を準備しなければならない。要領書には、少なくとも次のことを記述する。
  - 1) 応力再分布の達成方法を、必要な製作管理とともに記述する。
  - 2) 設計残留応力分布を実現するために管理されるパラメータ、十分管理されていることを確信するためのパラメータの値及び範囲も記述する。
  - 3) 残留応力を測定する方法及び精度を記述する。ひずみゲージを使用する場合には、最低 4 個のひずみゲージが必要である。
  - 4) 上記の全ての測定値を製作者設計報告書に記述する。
- d) **3 層以上の多層容器** 3 層以上の多層容器製造にあたっては、一層重ねるごとに、**7.8.2 a)** で規定された非破壊試験に加えて、**9.2** に従って次層で覆われる面全体に磁粉探傷試験を行わなければならない。

### 7.8.3 溶接巻き多層容器

溶接巻き多層容器は、次の **a)～h)** による。

- a) **溶接に対する規定** 溶接に対する規定は、次の **1)～7)** による。
  - 1) 内筒はシームレスか **Type No.1** 突合せ溶接を用いる。内筒と内筒の鏡をつなぐ溶接は **Type No.1** 突合せ溶接とする。取り外さない裏当て金は使用してはならない。
  - 2) 2 層目以降の胴は **Type No.2** 溶接を行う。このとき、溶接位置は層ごとに変える。**Type No.2** 溶接を行う際、充分溶け込むように開先部が分離しないよう注意を払う。
  - 3) 溶接部はグラインダーで平滑にする。
  - 4) 各層の分類 A 継手は、その中心を互いに厚さの 5 倍以上離す。
  - 5) 多層部とソリッド部をつなぐ分類 A, B, C 及び D 継手は **Type No.1** でなければならない (**図 6.8.5** と **図 6.8.6** を参照)。
  - 6) 多層部同士をつなぐ分類 B 継手は **Type No.1** 突合せ溶接を用いる。層ごとに溶接する場合は、各層の分類 A 継手が厚さの 5 倍以上離す。
  - 7) 溶接継手分類は、**9.3.5 a)** による。
- b) **溶接施工方法確認試験** 溶接施工方法確認試験は **7.2** に従って行うが、層の溶接にかかわる溶接試験方法は次の **1)～5)** のように変更しなければならない。
  - 1) 分類 A 継手については、最内層を除いた層のうち最大厚さの層について手順試験を行えばよい。
  - 2) 分類 B 継手については、試験板の厚さは **76 mm** を超える必要はない。ただし、**50 mm** 以下であってはいけない。また、少なくとも 2 層以上の積層状態で試験する。
  - 3) 分類 B 継手で、一層ごとに溶接を行う方法で取付けが行われる場合で、少なくとも板の厚さ分シームの位置がずれるように配置されている時は、分類 A 継手の試験結果を流用してよい。

- 4) 内筒とそれ以降の層の長手方向継手はP番号が同じ場合は同一の試験で兼用してもよい。22 mm 以下の長手方向継手の溶接施工方法確認試験に使われる溶接ギャップは最小幅とする。
  - 5) 多層部同士、多層部と単胴の周方向溶接は、**図 7.8.1** に従って製作した部材を使って溶接施工方法確認試験用の試験片を作成する。試験片は**図 7.8.2** に従って作成する。なお、**図 7.8.1** に示した継手引張試験片以外の試験片の取り扱いは、試験を行うかどうかも含めて、発注者と製作者の間で協議の上で決定する。
- c) **空気穴** 空気穴は、次の 1), 2) による。
- 1) 周溶接で区切られた多層胴の各層について、それを構成する全ての板に 2 個以上の空気穴を設ける。空気穴は直径 6 mm 以上で、複数の層に対し同じ位置でも異なってもかまわない。
  - 2) 空気穴は詰まらせてはいけない。モニタリングシステムをつける場合には層間に圧力がかからないようにモニターの設定圧力を調整する。
- d) **溶接継手の非破壊試験** 溶接継手の非破壊試験は、次の 1)~7) による。
- 1) 内筒の分類 A 継手と分類 B 継手は、全長にわたり **9.3** に従って非破壊試験を行う。
  - 2) 層の分類 A 継手は、厚さが 6 mm から 8 mm のときは以降の層が巻かれる前に全長にわたり磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。厚さが 8 mm を越える時は、以降の層が巻かれる前に全長にわたり磁粉探傷試験又は浸透探傷試験に加えて超音波探傷試験を行う。超音波探傷試験では溶接厚さの下部 10% に対しては距離振幅特性曲線又は基準レベルを 6 dB 高める。
  - 3) 層の分類 B 継手で、層ごとに溶接を行う場合は、厚さが 6 mm から 8 mm のときは 10% 以上の長さを磁粉探傷試験又は浸透探傷試験で検査する。部分試験は **e)** による。厚さが 8 mm を越え 22 mm 以下のときは、全長にわたり磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行い、10% 以上の超音波探傷試験検査を行う。部分試験は **e)** による。厚さが 22 mm を越える場合は、全長にわたり磁粉探傷試験又は浸透探傷試験、及び超音波探傷試験を行う。
  - 4) 分類 B 継手及び分類 D 継手の単肉と多層及び多層と多層の全厚さでの突合せ溶接は、**9** に従って検査する。この場合、層端部のレイヤーウォッシュや許容される隙間が判定に影響する場合は **図 7.8.3** の溶接形状を考慮して判断する。又は、**図 7.8.4** に従って端部の溶込み部分を検知して、判断基準にしてもよい
  - 5) 平鏡・チューブシートと多層部をつなぐ分類 C 継手は、**9** に従って分類 B 継手として非破壊試験を行う。
  - 6) サポート、ラグ、ブラケット、スティフナーなどの非耐圧部材を耐圧部に取付ける時は、全ての溶接部を磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。
  - 7) 単胴と多層部の溶接で厚さ変化分を溶接肉盛によってスムーズにする場合には、溶接肉盛部分は 100% 磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。溶接肉盛が放射線透過試験又は超音波探傷試験を必要とする継手に使われている時は、溶接肉盛部分も同じ試験の対象としなければならない。
- e) **部分試験と溶接の補修** 部分試験と溶接の補修は、次の 1)~4) による。

- 1) 試験比率が 100%でない場合には、試験箇所は検査員が指定し、一箇所の最小長さは 150 mm とする。
- 2) 選択した場所が不合格になった時は最初に選択した場所から離れた他の 2 箇所をランダムに選ぶ。
- 3) この 2 箇所のうちどちらかが不合格のときは、その溶接線全体を不合格とする。この場合、溶接を全てやり直すか、全線検査を行い欠陥部だけを補修する。
- 4) 補修溶接は溶接手順試験で合格した方法で行う。補修溶接箇所は再度 1)～3) に述べた試験を行う。

f) **層間の隙間** 層間の隙間は、次の 1), 2) による。

- 1) 周溶接の前に層間の隙間を測る。0.25 mm 未満の隙間は無視する。面積は図 7.8.5 に従って計算する。
- 2) 許容される隙間の最大値は、次の 2.1)～2.5) により決定する。

2.1) 隙間の最大値は、変動応力の繰返し回数によって下記のように評価する。その最大値は 5mm 以下とする。

多層胴の内圧及び層間の最大隙間による応力を計算する。

$$\sigma_l = \frac{1}{2} \left( \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) P + \frac{1.812Eh}{R_g} \dots\dots\dots(7.8.1)$$

$$\sigma_r = -P \quad (\text{最内層以外は } \sigma_r = 0 \text{ とする。}) \dots\dots\dots(7.8.2)$$

$$\sigma_t = \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} P \dots\dots\dots(7.8.3)$$

応力成分より一次+二次相当応力範囲を計算する。

$$\Delta S_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_l - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_l)^2 \}^{0.5} \dots\dots\dots(7.8.4)$$

層間の隙間位置での一次+二次+ピーク相当応力振幅  $S_{ag}$  を計算する。

$$S_{ag} = \frac{K_e \Delta S_n}{2} \dots\dots\dots(7.8.5)$$

$S_{ag}$  は、設計許容繰返し回数に相当する許容応力振幅以下とする。

$$S_{ag} \leq S_{a al} \dots\dots\dots(7.8.6)$$

ここで、

- $E$  : 縦弾性係数(MPa)
- $h$  : 層間の半径方向最大隙間(mm)
- $K_e$  : 簡易弾塑性解析による一次+二次+ピーク相当応力範囲を求める係数 [附属書 J 1 h) を参照]
- $P$  : 設計圧力(MPa)

- $R_g$  : 隙間を評価している層の外半径(mm)
- $R_I$  : 容器の内半径(mm)
- $R_o$  : 容器の外半径(mm)
- $S_{a\,al}$  : 設計許容繰返し回数に相当する許容一次+二次+ピーク相当応力振幅(MPa)
- $S_{ag}$  : 層間の最大隙間がある層の一次+二次+ピーク相当応力振幅(MPa)
- $\Delta S_n$  : 層間の最大隙間がある層の一次+二次相当応力範囲(MPa)
- $\sigma_l$  : 最大の層間隙間がある層の軸方向応力(MPa)
- $\sigma_r$  : 最大の層間隙間がある層の半径方向応力(MPa)
- $\sigma_t$  : 最大の層間隙間がある層の周方向応力(MPa)

2.2) 隙間ごとに次式で  $F$  を計算し、全ての隙間について足し合わせた合計は、次式で計算される  $F_T$  を超えてはならない。

$$F = 0.109 \frac{b h}{R_g^2} \quad (\text{図 7.8.5 を参照}) \dots\dots\dots(7.8.7)$$

$$F_T = \frac{1 - \nu^2}{E} \left( 1.67 S_y - \frac{2 P R_o^2}{R_o^2 - R_I^2} \right) \dots\dots\dots(7.8.8)$$

ここで、

- $b$  : 層間の隙間長さ(mm)
- $F$  : 各隙間の評価値
- $F_T$  : 各隙間の評価値合計の許容値
- $S_y$  : 降伏強さ(MPa)
- $\nu$  : ポアソン比

2.3) 図 7.8.5 に示した二つの隣り合った層の隙間の面積  $A_g$  の値は、いずれか薄い方の層の厚さの値を超えてはならない。

2.4) 一つの隙間の長さは、容器の内径を超えてはならない。二つの隣り合った層に存在する隙間の長さの合計は、容器の内径を越えてはならない。

2.5) 2.1)～2.4)の結果は、検査記録に残す。

g) **耐圧試験中の周長の測定** 耐圧試験中の周長の測定は、次の 1)～4) による。

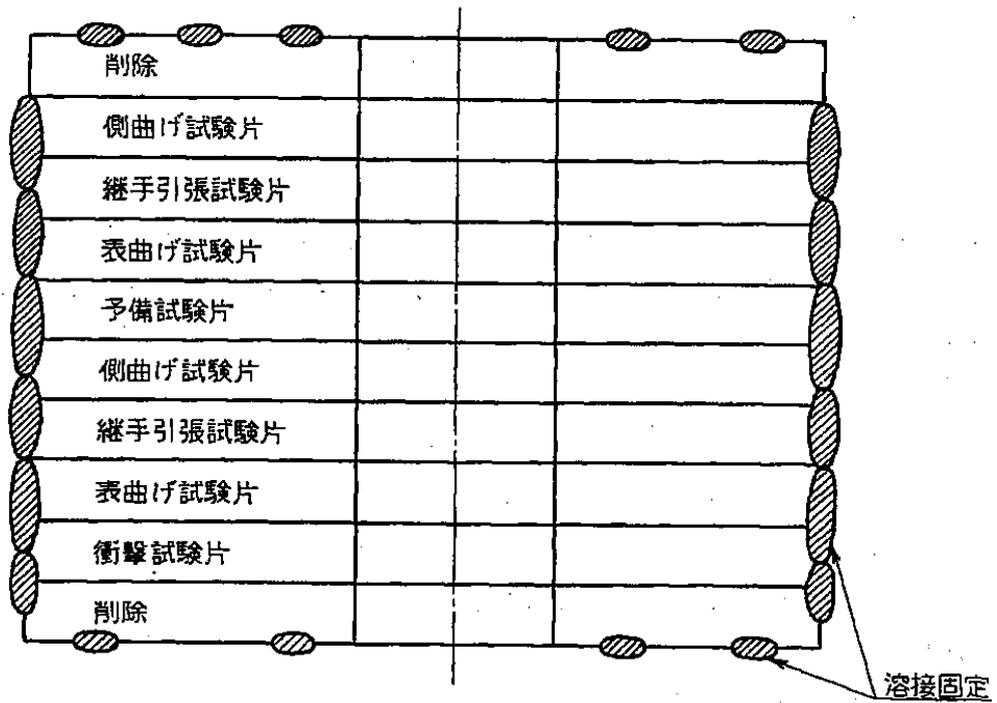
- 1) 耐圧前と耐圧試験圧力に達してから 5 分以上保持した後に 2 回周長を測定し、周長の増加を求める。測定は周溶接線と周溶接線の中央、又は周溶接線とノズル溶接線の中央とする。周長の測定は周溶接線で仕切られた胴ごとに行い、その平均値を  $e_m$  とする。
- 2) 理論周長伸び  $e_{th}$  を 6.8 に従って計算する。
- 3) 層間隙間係数  $Q_C = e_m/e_{th}$  は、6.8 に規定する範囲になければならない。
- 4) 全ての測定値は検査記録に残す。

h) **溶接部の熱処理** 溶接部の熱処理は、次の 1)、2)による。

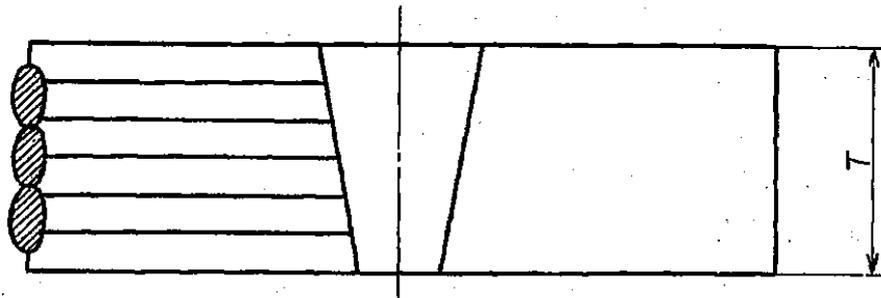
- 1) 溶接後熱処理を行った場合には、残留応力分布が変化することを設計に反映する。

- 2) 次の条件を全て満たした場合には、溶接後熱処理を行う必要はない。
- 2.1) 一層の厚さが、材料ごとに **7.4**, **7.6** に規定される厚さを越えない。
  - 2.2) 単肉の鏡やノズルを溶接後熱処理の必要のない材料で、最小 6 mm の厚さでバタリ  
ング溶接し、部品状態で溶接後熱処理を行う。ただし、単肉の鏡やノズルが P 番号 1  
の場合には溶接肉盛をしなくてもよい。
  - 2.3) マルチパス溶接を用いて 6 mm 以下の溶接層で肉盛する。ただし、**7.6** に当てはまる  
材料の場合には、最終層をテンパービード法によらなければならない。
  - 2.4) 溶接補修を行う場合は、**7.4** により溶接後熱処理を行う。

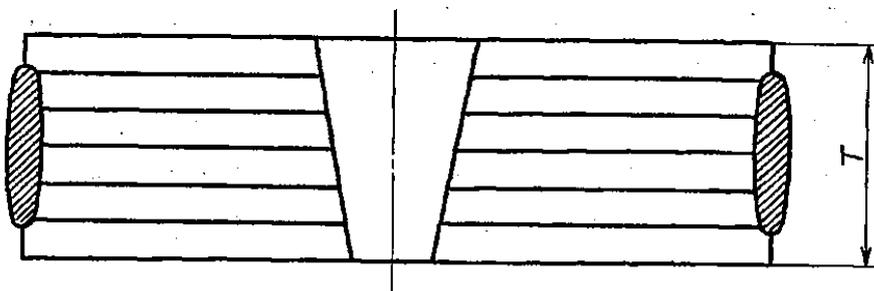




層成胴と単肉部



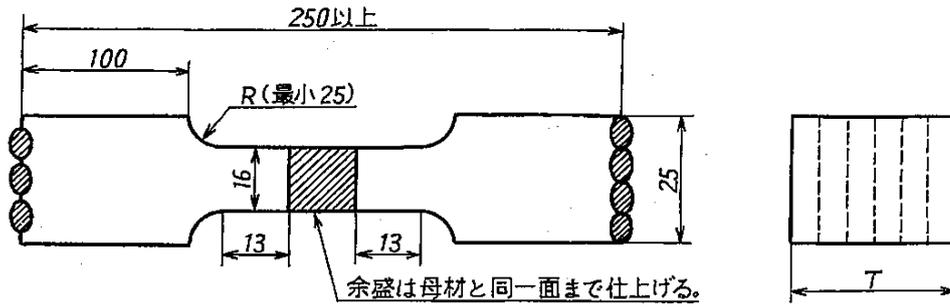
層成胴と層成胴



注記 層成胴は開先加工面を除き，試験板の端面を溶接により固定する。

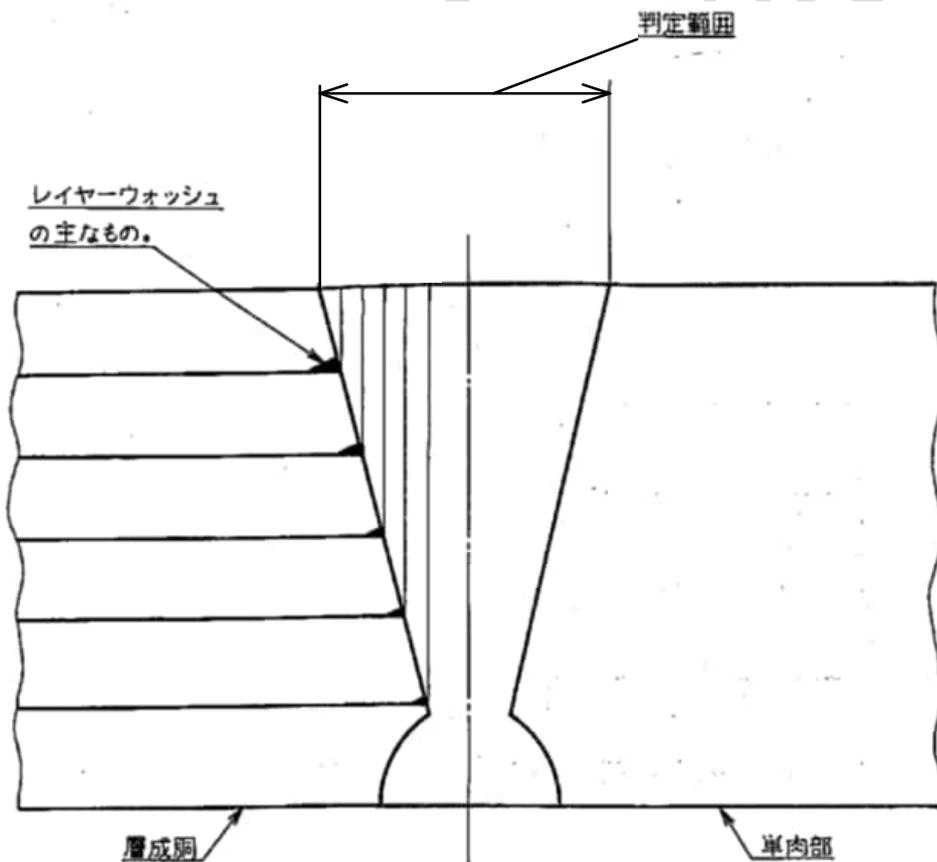
図 7.8.1 突合せ両側溶接の場合の試験材の取付け及び試験片の採取要領

単位 mm



注記 T : 試験片の厚さで、多層試験片母材の厚さとする。

図 7.8.2 継手引張試験片の形状及び寸法



注記 層成胴の合わせ面以外の指示は、9.3.6に従って判定する。

図 7.8.3 レイヤーウォッシュと溶接の位置関係

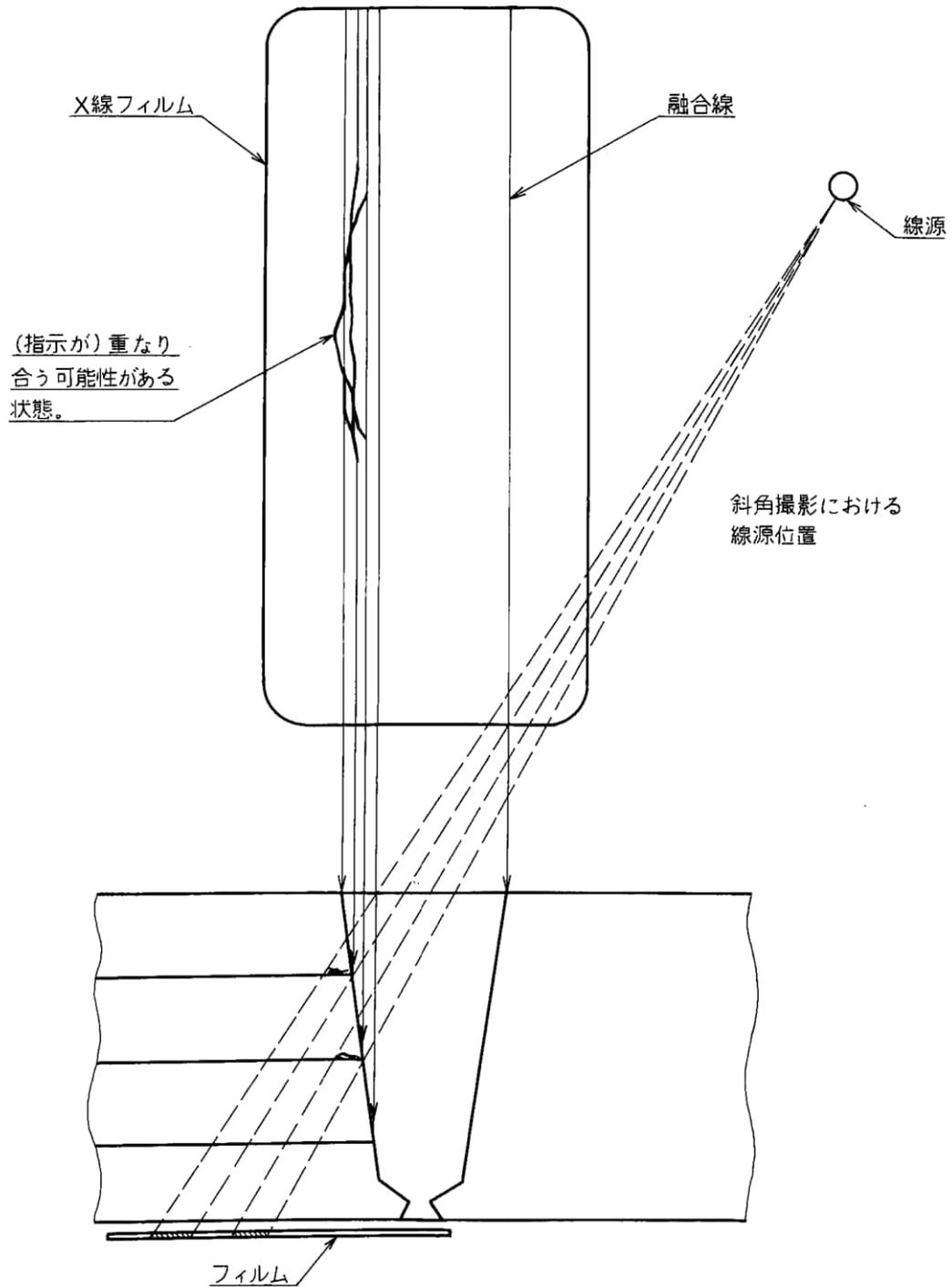
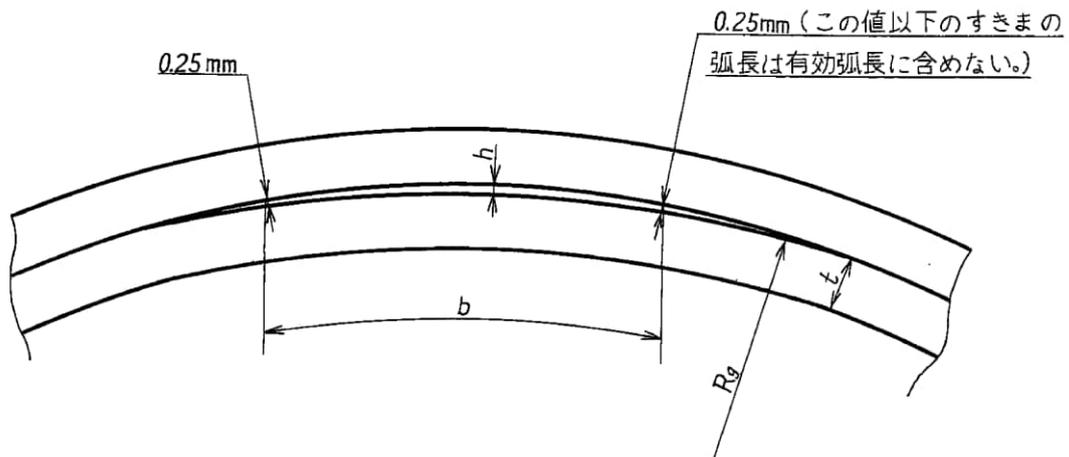


図 7.8.4 レイヤーウォッシュを見つけるための斜角放射線法



- 注記1  $h$  : 層間の半径方向最大隙間(mm)
- 注記2  $b$  : 弧長(円に沿って測定した値)(mm)
- 注記3  $R_g$  : 半径(mm)
- 注記4  $t$  : 厚さ(mm)
- 注記5  $A_g$  : 隙間面積 =  $2 h b / 3$  (mm<sup>2</sup>)

図 7.8.5 層間隙間

## 7.9 線巻き容器とフレームの特別製作規定

### 7.9.1 適用範囲

この項の規定は、線巻き容器とフレームに対して適用する。この項は 7.1～7.7 の規定に対する追加要求を規定しており、内容が矛盾している場合はこの項の規定を優先させる。

### 7.9.2 製作要求

7.1, 7.6, 7.7, 7.8 の一般と特別規定は、線巻き容器とフレームの製作についても適用する。7.2～7.8 に示す溶接製作規定は、次の a)～c) に置き換える。

- a) **溶接に関する製作要求** 線巻きにより残留応力が与えられ、かつ圧力荷重を受ける部分には溶接は許されない。ただし、ワイヤ繋ぎ溶接を除く。
- b) **ワイヤ繋ぎ溶接** 必要な場合には、ワイヤは突合せ溶接する。溶接間の距離は 2,000m 以上とし、平均溶接間距離は 3,700m 以上とする。最外周に巻くワイヤには溶接があってはいけない。溶接部は平滑化する。溶接手順試験により、溶接後のワイヤ継手強度を測定しておかなければならない。ワイヤ溶接継手の前後最低 2 巻きはワイヤ張力を低くする。溶接後、線巻きの開始前に、ワイヤに少なくとも材料の規定引張強さの 2/3 の張力をかけ、もしワイヤ溶接部が破損したら溶接をやり直し、再度同じ手順を繰り返す。
- c) **線巻き手順の要求事項** 線巻き手順書をつくる。手順書には少なくとも次を記述する。
  - 1) 線巻き用の機械の仕様と調整記録。なお、装置は 6 ヶ月ごとに調整する。
  - 2) ワイヤに張力を与える方法
  - 3) ワイヤ張力を測定する方法
  - 4) ワイヤの張力を調整する方法
  - 5) ワイヤの張力を記録する方法
  - 6) 計算上必要な張力
  - 7) 製造時、適切なインターバルごとに必要な張力と測定値を比較した結果。なお、製造途中で最終圧縮力が足りなくなると計算されたら、以降の張力は 10%以内で調整してよい。最終圧縮力と計算値は 5%以内に納める。ワイヤの最終端は適切に留め、ほどけないようにする。

## 7.10 アルミニウム合金製容器の特別製作規定

6.13 の水素容器などに用いられるアルミニウム合金製容器に対する製作要求は、次の a)～c) による。

- a) **表 5.4.1** の仕様に一致する製品形体、薄板、板、棒、引抜き継目なし管、継目なし押し管から容器や構成部材を製造してもよい。完成した容器及び構成部材は、**表 5.4.1** に示される仕様要求に従って熱処理を施工し、T6 又は T651 のいずれかの調質に対して指定された機械的特性を満足しなければならない。
- b) 溶接施工及び熱的切断施工を行ってはならない。
- c) **5.2.11** に従って切欠き引張試験を実施しなければならない。

## 7.11 時効硬化ステンレス鋼を溶接する場合の追加製作規定

### 7.11.1 適用範囲

この項の規定は、SA564, SA705 及び SUS630 鋼の時効硬化ステンレス鋼が溶接される場合

に適用する。

### 7.11.2 溶接に関する製作要求

溶接に関する製作要求は、次の a)～d)による。

- a) 溶接施工方法の確認と溶接士の格付けは、この項と 7.2.2 に従う。
- b) 溶接試験片は 10.2 の衝撃試験を行い、表 5.2.2 の衝撃値を満足しなければならない。
- c) 衝撃試験片は、溶接部と熱影響部の両方から採取する。
- d) 溶加材は、母材と同等成分のものを使用する。

### 7.11.3 母材の熱処理条件

全ての材料について、溶接前に材料仕様書に従った熱処理条件で固溶化熱処理を行うか、又は降伏強さが 725 MPa 以下でなければならない。

### 7.11.4 溶接が禁止されていない材料への仮付溶接

仮付け溶接は、7.6.3 に従う。

### 7.11.5 溶接後熱処理

容器と部品について、全ての溶接後に材料仕様書に従った熱処理条件で固溶化熱処理と時効硬化処理を行う。

### 7.11.6 圧力容器製作用の溶接部試験

圧力容器製作用の溶接部試験は、次の a)～d)による。

- a) 圧力容器製作用の試験片サンプルは、実溶接部と同様の形状と熱処理条件で、最低 150×150 mm 以上とする。
- b) 同一の熱処理条件と溶接手順の製品ごとに、最小個数の試験片を用意する。
- c) 試験片は、圧力容器や部品と同じ条件で同時に熱処理しなければならない。
- d) 試験片は、7.11.2 により衝撃試験を実施する。

### 7.11.7 検査と試験

容器と部品の最終熱処理後、検査可能な全ての溶接部の内面と外面は、9.2.5 d)に従って磁粉探傷試験と 9.3 の試験を実施する。

### 7.11.8 溶接補修

溶接補修は、9.2.3 に従う。

### 7.11.9 溶接補修後の溶接後熱処理

最終熱処理後に溶接補修をした場合は、再度固溶化熱処理と時効硬化処理を実施する。

## 8 過圧防止安全装置

### 8.1 過圧防止安全装置一般

この規格の範囲に含まれる全ての圧力容器は、この章の規定による過圧防止安全装置を備えていなければならない。適用法規により規定される場合は、その法規に従わなければならない。

### 8.2 破裂板

破裂板は、JIS B 8226 に規定する破裂板又はこれと性能及び構造が同等以上でなければならない。

### 8.3 ばね安全弁

安全弁は直接ばね式のもので、**JIS B 8210**に規定する安全弁又はこれと性能及び構造が同等以上でなければならない。なお、ばね安全弁は、**JIS B 8225**によって吹出し係数を確認することが望ましい。

#### 8.4 表示

破裂板は**JIS B 8266**の規定に従い、ばね安全弁は**JIS B 8210**の規定に従って表示を行わなければならない。

### 9 非破壊試験

#### 9.1 試験手順、試験技術者の認定

##### 9.1.1 試験手順一般事項

この規格で要求される非破壊試験は、次の **a)～d)**に示す **JIS** に従って実施する。**ASME** 規格材などの **JIS** 材料以外の場合には、該当する規格で認められた超音波探傷法による試験を行ってもよい。全ての非破壊試験は、実績やモックアップ試験にて裏付けされた詳細な要領書に従って実施する。非破壊試験後は、検査を行った部材を清掃する。

- a) 放射線透過試験は、鋼種や形状により、**JIS G 0803**、**JIS G 0804**、**JIS Z 3104**、**JIS Z 3105**、**JIS Z 3106**のいずれかに従って検査を行う。
- b) 超音波探傷試験は、鋼種や形状により、**JIS G 0582**、**JIS G 0584**、**JIS G 0587**、**JIS G 0801**、**JIS G 0802**、**JIS Z 3060**、**JIS Z 3070**、**JIS Z 3080**、**JIS Z 3081**のいずれかに従って検査を行う。
- c) 磁粉探傷試験及び浸透探傷試験は、**JIS Z 2320-1～JIS Z 2320-3**(磁粉探傷試験)又は **JIS Z 2343-1～JIS Z 2343-6**(浸透探傷試験)に従って検査を行う。
- d) 渦流探傷試験は、**JIS Z 2316**に従って検査を行う。

##### 9.1.2 非破壊試験技術者の認定

非破壊試験技術者の認定は、次の **a)～c)**による。

- a) 非破壊試験技術者は、権威ある機関の技量検定に合格し、その技量について格付けされた資格のある者とする。
- b) 目視試験技術者は、高压容器の材料、製作方法、発生する傷などに関する必要な知識をもち、**9**の内容に習熟し、経験のある者とする。
- c) 非破壊試験技術者は、色覚が正常で遠方視力は0.7以上とする。

#### 9.2 耐圧部材の試験と材料補修

##### 9.2.1 一般要求

一般要求は、次の **a)～c)**による。

- a) 耐圧部材は、材料規格で規定される試験の他、この項に従って非破壊試験を実施しなければならない。
- b) 溶接補修に関するこの項の要求事項は、耐圧部材に適用する。
- c) この項の要求事項は、材料製造者と容器製作者の両方に適用する。

##### 9.2.2 焼入焼戻し後の試験

焼入焼戻しによって機械的特性を高めているフェライト系材料は、焼入焼戻し後の各製品形状

に対して、9.2で規定された方法による試験を実施しなければならない。

9.2.3 欠陥の補修に関する一般要求

欠陥の補修に関する一般要求は、次のa)～d)による。

a) 溶接補修の必要がない欠陥 溶接補修の必要がない欠陥は、次の1)、2)による。

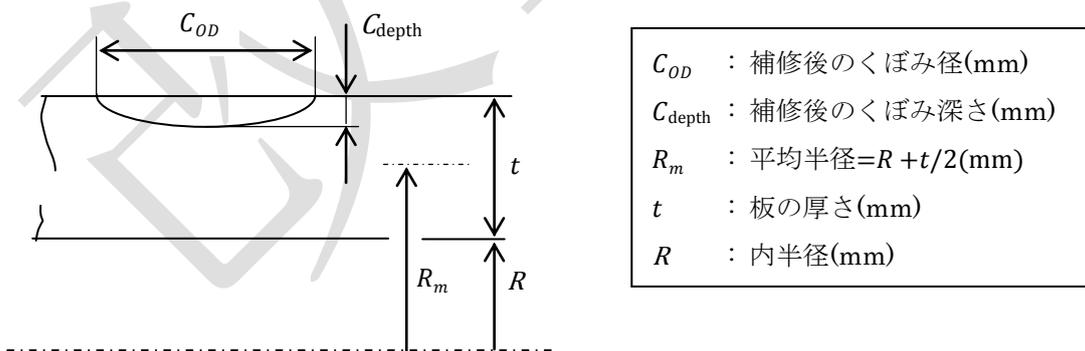
- 1) 9.2の判定基準を超える不完全部は欠陥とみなす。そのような欠陥は、完全に除去するか、合格となる不完全部サイズまで除去しなければならない。欠陥は、次の1.1)～1.4)の要求に合致すればグラインダーや機械加工により除去し、溶接補修を行わなくてもよい。
  - 1.1) 次の2)を除き、その部分の残存肉厚が6.2で与えられる式に設計圧力を代入して計算できる設計圧力時の必要厚さより減肉していない。
  - 1.2) 欠陥除去部が除去部周辺の面と滑らかにつなげて仕上げている。
  - 1.3) 欠陥除去後、9.2.5 d)に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験によって再試験を行い、不完全部が除去されている、又は合格サイズまで減少していることを確認する。
  - 1.4) 酸化スケールや機械的打痕を除去した範囲や適正な超音波探傷試験が実施できるように処理された範囲は、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を実施する必要はない。
- 2) グラインダーによる欠陥除去によって、6.2で与える式に、設計圧力を代入して計算できる設計圧力時の必要厚さより減肉する場合であっても、くぼみ径とくぼみ深さが次式の値以内であれば、溶接補修を行わなくてもよい。

2.1) 補修後のくぼみ径

$$C_{OD} \leq 0.2 \sqrt{R_m t} \dots\dots\dots(9.2.1)$$

2.2) 要求厚さ以下のくぼみ深さ

$$C_{depth} \leq 0.02 \sqrt{R_m t} \dots\dots\dots(9.2.2)$$



b) 溶接補修に関する一般的要求 溶接が5にて禁止、又は7.7にて制限されている材料を除き、材料製造者は欠陥除去後に次の1)～5)により材料を溶接補修する。補修するくぼみ深さの許容値は製品ごとに9.2.4～9.2.8で規定する。補修溶接前に容器製作者又は容器購入者の事前承認を得なければならない。

- 1) 欠陥除去 欠陥は、適切な機械加工、熱的切断又はガウジングにより除去する。熱的切

断後、全てのスラグと有害な変色部はグラインダーなどの機械加工により除去する。熱的切断を使用する場合、機械的性質の影響を考慮する。溶接補修される表面は、均一で滑らかな面にする。欠陥除去後のくぼみは、**9.2.5 d)**に従って浸透探傷試験又は磁粉探傷試験により検査する。

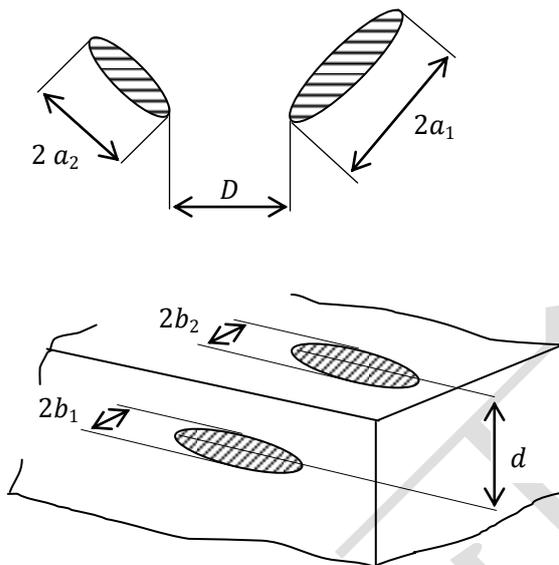
- 2) **溶接施工方法と溶接士の認定** 溶接施工方法と溶接士又は溶接機のオペレータは **7.2** の要求事項に従って認定されなければならない。
  - 3) **補修部分の表面仕上げ** 補修後、表面は補修面の周りと均一になるように仕上げる。
  - 4) **補修溶接部の試験** 各補修溶接部は、**9.2.5 d)**に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験により検査する。更に、欠陥除去後のくぼみ深さが 10 mm 又はその部分における厚さの 10%のどちらか小さい方の値を超える場合、溶接補修部は **9.1** に従って超音波探傷試験により検査し、判定基準は **9.3.6 c)**に従う。
  - 5) **溶接補修後の熱処理** 補修後は **7.4** の要求事項に従って熱処理を行う。
- c) **クラッド材の補修** 材料製造者がクラッド材の欠陥を補修する場合、次の **1)～3)**の要求に合致させる。
- 1) **7.2** によって認証された溶接施工方法、溶接士でなければならない。
  - 2) 欠陥除去後のくぼみは、**9.2.5 d)**に従って磁粉探傷試験や浸透探傷試験によって検査する。
  - 3) 溶接補修後は、**9.2.5 d)**に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験によって検査する。
- d) **材料証明書への補修記録の記述** 補修を行った場合、各補修内容を各部品の材料証明書に記述する。補修内容については補修部の位置、サイズ、深さを示し、補修に用いた溶接についての溶接材料証明書、溶接要領書、熱処理記録、そして検査結果を添付する。完成容器において補修を行った位置を確認できるように記録する。

#### 9.2.4 板材の試験と補修

板材の試験と補修は、次の **a)～c)**による。

- a) **要求される試験** 次の **1)～3)**に示す製作時期に検査を行う。
  - 1) 超音波探傷試験は、規定サイズに圧延施工した後の熱処理後(溶接後熱処理を除く)に行う。
  - 2) 補修溶接部に放射線透過試験の要求がある場合は、溶接後熱処理後に実施する。
  - 3) 補修溶接部の磁粉探傷試験又は浸透探傷試験は、最終熱処理後に実施する[**9.2.3 b)**を参照]。
- b) **超音波探傷試験** 全ての板材は **JIS G 0801** 又は **JIS G 0802** に準じた超音波探傷法による試験を行わなければならない。**ASME** 規格材などの **JIS** 材料以外の場合には、該当する規格で認められた超音波探傷法による試験を行ってもよい。ただし、試験範囲、判定基準は、次の **1)**、**2)**による。
  - 1) **試験範囲** 探傷試験範囲は 10%以上のオーバーラップを含み、板表面を 100%施工する。該当する **JIS** 又は **ASME** などの材料規格に従って、記録対象の指示模様は記録しておく。
  - 2) **判定基準** 検査する板材についての判定基準は、次の **2.1)～2.3)**に示す評価基準とする。
    - 2.1) **不合格となる欠陥サイズ** 直径 25 mm の円の中に収まらない連続した指示模様が同一平面上に存在する場合は不合格とする。

- 2.2) 複数存在するきずの評価** 上記 2.1) で合格と判定されたきずが同一平面内に 2 箇所隣接し、各きず間の距離  $D$  が下図に示される  $D_0$  (各きずを半楕円きずとしたとき、長軸の半長  $a$  の最大値) より小さい場合、2 箇所のきずが直径 25 mm の円の中に収まらなければ不合格とする。また、2 箇所のきずが定義された平面間に距離  $d$  離れて存在し、 $d$  が下図に示される  $d_0$  (各きずを半楕円きずとしたとき、短軸の半長  $b$  の最小値) より小さい場合は同一平面上に存在するきずとして判定する。また、距離  $d$  が  $d_0$  より大きい場合は、単独で存在するきずと判定する。



$D < D_0$  の場合は結合されたきずとして評価する。

ただし、 $D_0 = \max(a_1, a_2)$

$d < d_0$  の場合は同一平面上に存在するきずとして評価する。

ただし、 $d_0 = \min(b_1, b_2)$

- 2.3) きずの密集度、占積率に対する評価** 2.1), 2.2) で合格と判定されたきずが板材に密集して存在する場合、JIS G 0801 又は JIS G 0802 に準じたきずの密集度、占積率により判定する。

- c) **溶接補修** 補修するくぼみの深さは、板材の公称厚さの 1/3 を超えてはならない。補修を行う場合は 9.2.3 を適用する。

### 9.2.5 鍛造品・棒材の試験と補修

鍛造品・棒材の試験と補修は、次の a) ~ e) による。

- a) **要求される試験** 要求される試験は、次の 1) ~ 4) による。

- 1) 鍛造品と棒材は 9.2.5 c) に従って超音波探傷試験を実施しなければならない。超音波探傷試験が適用できない形状の場合は 9.1 の放射線透過試験を実施しなければならない。放射線透過試験の判定基準は、9.3.6 による。更に全ての外表面と試験可能な内表面は 9.2.5 d) に従って磁粉探傷試験、又は浸透探傷試験を実施しなければならない。
- 2) エルボ、ティー、カップリングなどの鍛造フランジ及び継手は、9.2.6 に従って検査する。
- 3) ボルトに使われる棒材は、9.2.8 に従って検査する。
- 4) 管や継手に製作される鍛造品、棒材は、加工後に 9.2.6 に従って検査する。

- b) **試験時期** 次の 1) ~ 4) に示す製作の時期に検査をする。

- 1) 超音波探傷試験は、鍛造後及び溶接後熱処理以外の最終熱処理後に可能な最大範囲で実

施する。

- 2) 補修溶接部に放射線透過試験が要求される場合、溶接後熱処理前に実施してもよい。
  - 3) 磁粉探傷試験又は浸透探傷試験は、最終形状で行わなければならない。
  - 4) 鍛造品又は棒材から管、継手を製造する場合は、中空加工後(ねじ加工を除く)に検査する。
- c) **超音波探傷試験** 超音波探傷試験は、次の 1)、2)による。
- 1) **試験要領** 超音波探傷試験は、JIS G 0587 に従うが、直接接触法、水浸法又は局部水浸法のどの方法も適用してよい。ASME 規格材などの JIS 材料以外の場合には、該当する規格で認められた超音波探傷法による試験を行ってもよい。適用に当たっては、次の 1.1)～1.4)が要求される。
    - 1.1) 全ての鍛鋼品及び棒材は、垂直探傷法を用いて検査する。
    - 1.2) リング状及び円筒状鍛鋼品は、上記 1.1)に加えて外周面から周 2 方向に斜角探傷法を用いて検査する。ただし、板厚及び形状により斜角探傷による検査が不可能な場合を除く。
    - 1.3) 上記 1.1)及び 1.2)に加え、リング状鍛鋼品が細粒溶融法で製造され容器の胴部に使用される場合は、軸 2 方向に斜角探傷法を用いて探傷する。
    - 1.4) 下記 2)に記載された内容と同等の合格基準である場合には、距離振幅補正を利用した超音波探傷試験により検査してよい。
  - 2) **判定基準** 垂直探傷においては JIS G 0587、第 2 類の等価きず直径以下を合格とし、斜角探傷においては JIS G 0587 の標準ノッチに対するエコー高さ以下を合格とする。ただし、使用状況、応力集中部など、判定基準を厳しくする必要のある場合は使用者と協議を行い決定する。また、JIS G 0587 に従って記録対象のきずは記録する。
- d) **磁粉探傷試験、浸透探傷試験** JIS Z 2320 に従って行う磁粉探傷試験、JIS Z 2343 に従って行う浸透探傷試験は、次の 1)、2)による。磁性材の表面試験は、湿式磁粉探傷を行わなければならない。ただし、磁粉探傷試験が適用できない場合には浸透探傷試験を行ってもよい。非磁性材の表面試験は浸透探傷試験を行わなければならない。
- 1) **指示模様の評価** 指示模様の評価は、次の 1.1)～1.3)による。
    - 1.1) 磁粉探傷試験を適用する場合、表面又は、表面直下の機械的な不連続部が試験媒体の滞留によって磁粉模様が示されるが、全ての磁粉模様が欠陥とは限らない。冶金的な不連続部や透磁率変化による、疑似指示が示されることもある。従って、次の 2)の判定基準により評価対象寸法を超える疑似指示は、同様方法による再試験、又は他の非破壊検査により欠陥であるかどうかを検査する。
    - 1.2) 浸透探傷試験を利用する場合、表面の機械的な不連続部は浸透液のしみ出しによって指示模様となる場合がある。しかしながら、機械加工による不完全部、表面の状態、又はクラッド材と母材との不完全結合などによる局所的な表面不完全部により疑似指示を示す場合がある。従って、次の 2)の判定基準により評価対象寸法を超える疑似指示は、同様方法による再試験、又は他の非破壊検査により欠陥であるかどうかを検査する。
    - 1.3) 線状指示模様は長さが幅の 3 倍以上の指示模様とする。円形状指示模様は、長さが幅

の3倍未満の指示模様とする。

2) **判定基準** 主要寸法が 1.6 mm を超える指示模様を評価対象とする。次の指示模様は、不合格とする。より厳しい評価基準が使用者設計仕様書で指示される場合もある。

- ・厚さ 16 mm 未満の材料について、長さ 1.6 mm を超える線状指示模様
- ・厚さ 16 mm 以上、50 mm 未満の材料について、長さ 3.2 mm を超える線状指示模様
- ・厚さ 50 mm 以上の材料について、長さ 4.8 mm を超える線状指示模様
- ・厚さ 16 mm 未満の材料について、直径 3.2 mm を超える円形状指示模様
- ・厚さ 16 mm 以上の材料について、直径 4.8 mm を超える円形状指示模様
- ・同一線上に 4 個以上の円形状指示模様が並び、端部間距離が 1.6 mm 以下の場合
- ・最も不利な条件にて 3,900 mm<sup>2</sup> 面積内に 10 個以上の円形状指示模様がある場合。ただし、面積の取り方は、その主要寸法が 150 mm 未満とする。

e) **溶接による補修** 5 及び製品仕様により溶接補修が禁止されていない場合、補修の深さは製品仕様による制限を除けば制限はない。ただし、9.2.3 には従わなければならない。

### 9.2.6 シームレス、溶接管と継手の試験と補修

シームレス、溶接管と継手の試験と補修は、次の a)～f) による。

a) **要求される試験** 要求される試験は、次の 1)～3) による。

1) シームレス、溶接管(溶加材なし)は、次の 1.1)、1.2) 又は 1.3) に従って材料全体について試験を行わなければならない。管製品は検査前に内外面の手入れを要求される場合がある。

1.1) 外径 64 mm 未満の管は、周 2 方向への超音波探傷試験[次の b)]、及び有意な結果が得られるようにサイズ、材料、厚さが制限されている条件で渦流探傷試験[次の d)] を実施しなければならない。各試験方法について、超音波探傷試験は次の b) 2.1) の軸方向のノッチ又は溝に合わせて校正し、渦流探傷試験は次の d) 2) の半径方向の孔と、周方向ノッチ又は溝に合わせて校正する。渦流探傷試験の代替として、又は渦流探傷試験により有意な結果が得られない場合は、次の b) 1.2) に従って軸 2 方向の超音波探傷試験を行う。

1.2) 外径 64 mm から 170 mm までの管は、次の b) 1.1) に従って周 2 方向と次の b) 1.2) に従った軸 2 方向への超音波探傷試験を実施しなければならない。

1.3) 外径 170 mm を超える管は、次の b) 1.3) に従って周 2 方向への超音波探傷試験又は、次の c) に従った放射線透過試験を実施しなければならない。代替案として、外径 170 mm を超える溶加材無しの溶接管に対しては曲げ加工の前に板を 9.2.4 に従って超音波探傷試験を行い、溶接部には次の c) に従った放射線透過試験を行う。補修溶接部を含む溶接部は最終圧延や成形後に放射線透過試験を行う。放射線透過試験は溶接後熱処理前に実施してもよい。

2) 鍛造品又は棒材から機械加工により製作する管フランジや継手を含む、シームレスや溶加材無し溶接管は、材料仕様による試験に加えて全ての外表面と試験可能な内表面に対して 9.2.5 d) に従った磁粉探傷試験、又は、浸透探傷試験を行わなければならない。

3) 容器のノズルに使われる管材は、次の b) に従った周 2 方向への超音波探傷試験、又は次

の c) に従った放射線透過試験を実施しなければならない。更に、全ての外表面と試験可能な内表面について 9.2.5 d) に従った磁粉探傷試験，又は浸透探傷試験を行わなければならない。

- b) **超音波探傷試験** 超音波探傷試験は、次の 1)～3) による。
- 1) **管材の試験要領** 管材は次の 1.1)～1.4) に従って、軸方向及び周方向の探傷を行う。探傷方法は JIS G 0582 に準じて行う。ASME 規格材などの JIS 材料以外の場合には、該当する規格で認められた超音波探傷法による試験を行ってもよい。
    - 1.1) **周方向－外径が 170 mm 以下の場合** 要領書は、この項の要求事項と 9.2.6 a) 1.1) 及び 1.2) 項にある要求事項は除き、JIS などの規格による。次の 2) の対比試験片に含まれる欠陥以上が検出できる感度でなければならない。
    - 1.2) **軸方向－外径が 170 mm 以下の場合** 上記 a) が適用される場合、管の超音波探傷試験は軸方向に斜角探傷を行う。
    - 1.3) **管の外径が 170 mm を超える場合** 管の外径が 170 mm を超える場合は、上記 a) 1.3) の要求事項を除き、JIS G 0582 に準じて行う。対比試験片は、次の 2) による。
    - 1.4) **判定基準** 製品で検出した指示模様が次の 2) の対比試験片によって示される指示模様を超える場合は不合格とする。
  - 2) **対比試験片** 対比試験片は検査を行う製品と同じ公称径、肉厚、同材質及び同熱処理条件でなければならない。対比試験片は、次の 2.1)～2.3) による。
    - 2.1) **周方向探傷の場合** 標準欠陥は対比試験片の内外面上に軸方向のノッチ又は溝を設ける。その長さは 25 mm 以下とする。角溝ノッチ又は U ノッチの場合には、幅は 1.6 mm を超えてはならない。V ノッチの場合には、幅は深さに比例する。深さは、0.1 mm 又は公称板厚の 3% の大きい方を超えてはならない。
    - 2.2) **軸方向探傷の場合** 標準欠陥は対比試験片の内外面上に周方向ノッチを設ける。周方向ノッチの寸法は、2.1) の軸方向ノッチの寸法を超えてはならない。対比試験片は検査する製品であってもよい。
    - 2.3) **対比試験片** 検査機器を用いて実製品を十分に模擬できる長さとする。二つ以上の標準欠陥を導入する場合は、欠陥は各欠陥の指示模様が分離でき、相互干渉や増幅の影響がないように配置する。標準欠陥近傍における全てのバリは取り除く。
  - 3) **試験機器の試験、校正** 検査機器の機能について充分確認し、検査機器を対比試験により校正する。校正は、次の 3.1)～3.4) の条件下で行う。検査中に検査機器が適切に機能していないと判断された場合は、最後の有効な校正を行った時以降の再検査を行う。
    - 3.1) 各製品の製作開始時、又はサイズと素材板厚の変更時に校正を行う。
    - 3.2) 各製品の検査中であっても 4 時間ごとに校正を行う。
    - 3.3) 各製品の製作終了後に校正(感度確認)を行う。
    - 3.4) 誤動作と考えられるときに校正を行う。
- c) **放射線透過試験** 放射線透過試験は、9.1 に従って行わなければならない。判定基準は、9.3.6 による。
- d) **渦流探傷試験** 渦流探傷試験の要求事項は、次の 1)～3) による。

- 1) **試験要領** 渦流探傷試験の感度は次の 2) の対比試験片による標準欠陥との比較により定め、標準欠陥からの信号が判定のために必要な大きさになるよう調整する。標準欠陥からの信号を超える指示模様を示す製品は、次の f) に従って欠陥を除去又は補修しない限り不合格とする。
- 2) **対比試験片** 対比試験片は、検査する製品と同じように製作されたものから作成する。標準欠陥は製品の内外面の円周方向又は接線方向のノッチ、又は溝とする。長さは、25 mm 以下、幅は 1.6 mm を超えてはならない。深さは、0.1 mm 又は板厚の 5% の大きい方の値を超えてはならない。半径方向の孔は 1.6 mm 以下とする。対比試験片のサイズは、上記 b) 2) による。
- 3) **試験機器の試験、校正** 検査機器の試験、校正は上記 b) 3) と同じ方法とする。
- e) **試験時期** 補修溶接も含め試験時期は、9.2.5 b) に従う。
- f) **溶接による補修** 5 や製品仕様により溶接補修が禁止されていない場合、補修の深さは製品による制限を除けば制限はないが、9.2.3 には従わなければならない。

### 9.2.7 溶加材使用溶接管・継手の試験と補修

溶加材使用溶接管・継手の試験と補修は、次の a) ~ c) による。

- a) **要求される試験** 要求される試験は、次の 1), 2) による。
  - 1) 全ての溶接部は、材料仕様に従った放射線透過試験と 9.2.5 d) に従った磁粉探傷試験、又は浸透探傷試験を行わなければならない。材料仕様に溶接部の放射線透過試験が規定されていない部分には、9.1 に従って放射線透過試験を実施する。判定基準は 9.3.6 による。放射線写真と放射線写真撮影位置を示す報告書は、材料証明書に添付しなければならない。
  - 2) 溶加材使用溶接管・継手に使用される板材は、9.2.4 b) に従った超音波探傷試験を行うか、又は最終製品で 9.2.6 b) に従った試験を実施しなければならない。
- b) **試験時期** 補修溶接も含め試験は、次の 1) ~ 3) に示された製作時期に行わなければならない。
  - 1) 板材の超音波探傷試験は、9.2.4 a) に示された時期、又は最終製品で試験を実施するのであれば、最終圧延、成形後とする。
  - 2) 補修溶接も含め、溶接部の放射線透過試験は、最終圧延、成形後とする。ただし、溶接後熱処理前でもよい。
  - 3) 補修溶接も含め溶接部の磁粉探傷試験、又は浸透探傷試験は最終熱処理後に行う。ただし、P 番号 1 の材料については溶接後熱処理前に行ってもよい。
- c) **溶接による補修** 5 や製品仕様により溶接補修が禁止されていない場合、補修の深さは製品仕様による制限を除けば制限がないが、9.2.3 には従わなければならない。

### 9.2.8 ボルト・ナット材の試験と補修

ボルト・ナット材の試験と補修は、次の a) ~ f) による。

- a) **要求される試験** 要求される試験は、次の 1) ~ 3) による。
  - 1) 全てのボルト材は、目視試験を行わなければならない。
  - 2) 公称サイズ 25 mm を超えるものは、磁粉探傷試験、又は浸透探傷試験を行わなければならない。

- 3) 公称サイズ 50 mm を超えるものは、次の **d)**、**e)** に従って超音波探傷試験を実施しなければならない。
- b) 目視試験** 最終機械加工後のネジ部、軸部、ヘッド部は、目視試験を行わなければならない。実際の使用に悪影響を与えるようなラップ、きず、割れなどの不連続部があるものについては不合格とする。
- c) 磁粉探傷試験又は浸透探傷試験** 公称サイズが 25 mm を超える全てのボルト、スタッドボルト及びナットは、ねじ加工後の最終形状のボルト又はヘッディング後でねじ加工前のほぼ最終径の材料に対して、**9.2.5 d)** に従って磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行わなければならない。指示模様があるものは、全て不合格とする。
- d) 公称サイズが 50 mm を超えるボルトとナットの超音波探傷試験** 公称サイズが 50 mm を超える全てのボルト、スタッドボルト及びナットは、次の **1)～4)** の要求事項に従ってねじ加工前に外周面から全面超音波探傷試験を実施する。
- 1) **超音波探傷試験** 検査は垂直探傷法により周方向に探傷する。
  - 2) **試験要領** 振動子の接触面積が 650 mm<sup>2</sup> を超えない探触子を用いて公称周波数 2.25 MHz によって検査する。
  - 3) **試験機器の校正** 感度の校正は最初の底面エコーが最大目盛り高さの 75%～90%になるように機器の調整を行う。
  - 4) **判定基準** 底面エコー高さの 20%を超える指示による不連続部、又は校正感度において底面エコー高さが 50%以下に減衰する不連続部は不合格となる。
- e) 公称サイズが 100 mm を超えるボルトとナットの超音波探傷試験** 上記 **d)** の追加要求事項として、公称サイズが 100 mm を超える全てのボルト、スタッドボルト及びナットは、次の **1)～4)** の要求事項に従ってねじ加工前又はねじ加工後に、端面から全面超音波探傷試験を行う。
- 1) **超音波探傷方法** 検査は垂直探傷法による長手方向の探傷にて実施する。
  - 2) **試験要領** 検査は振動子の接触面積が 320 mm<sup>2</sup> を超えない探触子を用い、公称周波数 2.25 MHz で実施する。
  - 3) **試験機器の校正** 試験機器の校正は、**JIS G 0587** に準じて、距離振幅補正曲線を作成する。必要に応じて、感度補正を実施し探傷する。
  - 4) **判定基準** **JIS G 0587** の 2 類を超える欠陥による指示模様は不合格とする。
- f) 溶接による補修** ボルト、スタッドボルト及びナットへの補修溶接は認められない。

### 9.3 溶接部の試験と合格判定基準

#### 9.3.1 溶接部及び溶接オーバーレイの試験

製作工程において、次の **a)～f)** の段階で溶接部及び溶接オーバーレイの試験を行う。

- a)** 厚さ 13 mm 以上の突合せ継手の超音波探傷試験は、全ての必要な熱処理を行った後に行う。超音波探傷試験で適確性確認試験体に埋め込まれたきずを検出できない場合、又は溶接継手、容器の形状から超音波探傷試験が適用できない場合には、放射線透過試験を行う。
- b)** 母材の溶接補修を含めた溶接部の磁粉探傷試験又は浸透探傷試験は、必要な溶接後熱処理後に行う。ただし、P 番号 1 の炭素鋼材は、溶接後熱処理の前後のいずれでもよい。溶接施工中の溶接部の磁粉探傷試験又は浸透探傷試験は、溶接後熱処理前に行ってよい。

- c) 溶接オーバーレイされる溶接表面の磁粉探傷試験又は浸透探傷試験は、オーバーレイ前に行う。溶接後熱処理後に検査できない溶接表面の磁粉探傷試験又は浸透探傷試験は、溶接後熱処理前に行ってもよい。
- d) 溶接オーバーレイは、全ての必要な熱処理後に、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。
- e) オーステナイト系ステンレス鋼及び非鉄材料の全ての継手に対して、最終溶接後熱処理後に、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。
- f) 焼入焼戻鋼の溶接継手に対する試験は、溶接オーバーレイを行い、全ての必要な溶接後熱処理を行った後に行う。

### 9.3.2 溶接部の超音波探傷試験に対する要求

溶接部の超音波探傷試験は、次の a) ~ i) による。

- a) 成形(圧延、絞り、鍛造、押出加工)材の溶接部に対しては、きずの高さ及び長さを精度よく求めることができる方法を用いる。超音波探傷試験の範囲は、溶接部と溶接部の両端 50 mm 以上の母材を含む。超音波探傷試験は、購入者と製作者が合意した要領に従って行う。
- b) 超音波探傷試験要領(探傷計画)には、溶接部の品質確認を行うために必要な標準化され、再現性ある探触子の配置、走査、探傷範囲を示さなければならない。探傷計画には、各溶接部に対して、超音波の角度、溶接部中心線に対する超音波の方向及び探傷する母材の範囲を含める。これらの文書は、購入者の要求があれば開示しなければならない。
- c) 超音波探傷試験は、文書化された要領に従って行う。探傷要領は、適格性確認試験体(Q ブロック)を用いて適格性が実証されていなければならない。適格性は、最大許容きずからのエコー及び検出が必要なきずからのエコーが評価レベルを超えることで実証される。エコー高さで評価を行わない検査手法では、最大許容きずを含む Q ブロックに内在する全てのきずの長さの測定結果が、実際のきず長さより長いことを示すことで適格性が実証される。
- d) 超音波探傷試験は、自動データ取得機能付きの探傷装置を使用して実施する。斜角探傷の妨げとなる母材部のきずを事前に特定するために、最初に母材部に対して垂直探傷を行わなければならない。
- e) 超音波探傷試験データはゲート設定、フィルタ処理、しきい値処理などを行わない未加工状態で記録する。
- f) 超音波探傷試験を行い、評価する検査員は、検査員の雇用者が定めた認定要領に従って資格付けされ、認定されなければならない。
- g) 超音波探傷試験を外部に委託する場合には、製作者は認定検査員の資格認定記録を承認しなければならない。資格認定記録は、検査員の雇用者によって維持されなければならない。
- h) 超音波探傷試験データを採取し、解析する検査員は、上記 d) の超音波探傷装置を使用して訓練され、上記 c) の適格性の実証試験に参加しなければならない。
- i) 超音波探傷試験データの解析と判定基準は次の 1) ~ 3) による。
  - 1) **超音波探傷試験データの解析基準** 次の 1.1) 又は 1.2) の制限を超える指示模様がきずに起因するか、又は次の i) 2) の幾何学的形状に起因かを調査する。反射体がきずと判定された場合は、9.3.6 c) に従って評価する。
    - 1.1) エコー高さにより評価を行う手法では、基準レベルの 20% を超える全ての反射体の

位置、エコー高さ、大きさを調査する。

1.2) エコー高さにより評価を行わない手法では、次の 1.2.1)、1.2.2) 又は 1.2.3) の制限値を超える長さを有する全ての指示模様を位置と大きさを調査する。

1.2.1) 溶接部における厚さが 38 mm 以下の溶接部では、長さが 3.8 mm を超える指示模様を調査する。

1.2.2) 溶接部における厚さが 38 mm を超え、100 mm 以下の溶接部では、長さが 5 mm を超える指示模様を調査する。

1.2.3) 溶接部における厚さが 100 mm を超える溶接部では、長さが  $0.05 t$  又は 19 mm のどちらか小さい方を超える指示模様を調査する。 $t$  は、溶接部に隣接した材料の公称厚さである。

2) **幾何学的形状** 幾何学的形状及び冶金的構造に起因する指示模様は、次の 2.1)～2.3) に分類する。

2.1) 余盛又はルート部のような表面形状に起因する指示模様、又はクラッドのような冶金的構造に起因する指示模様は幾何学的指示模様として分類し、次のように処置する。

2.1.1) 指示模様の特性を調査し、次の 3) に従って寸法測定を行う必要はない。

2.1.2) 表 9.3.2～表 9.3.27 に示す許容きず寸法と比較する必要はない。

2.1.3) 最大エコー高さ及び位置を記録する。例えば、内部取付け部、最大エコー高さ DAC(距離振幅特性曲線)の 200%、溶接中心線から 25 mm、内表面、 $90^\circ \sim 95^\circ$  など。

2.2) 次の手順に従って、指示模様を幾何学的形状に起因する指示模様と判定する。

2.2.1) 適用される超音波探傷試験要領書に従って、反射体が存在する領域を求める。

2.2.2) 反射体の位置及びルート部やボルト穴のような位置を断面図に描きながら、反射体が存在する領域を求める。

2.2.3) 製作図又は溶接開先図で確認する。

2.3) 指示模様を幾何学的形状に起因する指示模様と分類するために、他の角度の超音波探傷試験や放射線透過試験など、他の非破壊検査技術や手法を用いてもよい。

3) **きず寸法の測定** きず寸法の測定は、類似した材料深さで、類似したきずに対して適格性が実証された測定要領に従って行わなければならない。なお、9.3.2 c) に従って適格性が実証されている場合には、補足的に手探傷によりきず寸法を測定してもよい。きず寸法は次により、きずを内包する長方形として求める(図 9.3.2～図 9.3.6 を参照)。

3.1) きずの長さ( $l$ )は、内圧を受ける内表面に対して平行な長さである。

3.2) きずの高さは、内圧を受ける内表面に対して垂直な長さであり、表面きずの場合には  $a$ 、内部きずの場合には  $2a$  とする。

### 9.3.3 適格性確認試験体(Q ブロック)の要求事項

Q ブロックは、次の a)～e) の要求事項を満たさなければならない。

a) Q ブロックには、少なくとも 3 個の平面きずを含める。少なくとも 2 個の内部きずは、溶接開先角度の  $\pm 10^\circ$  以内で作成する。きずの 1 個は、外面側のきずを模擬して、Q ブロックの上部 1/3 の領域の中央付近に作成する。きずの 1 個は、Q ブロックの厚さの中央付近に作

成する。きずの1個は、内面側のきずを模擬して、Qブロックの下部1/3の領域の中央付近に作成する。

- b) Qブロックの材料は、JIS B 8285 付表1の実容器材料と同等のP番号とする。
- c) Qブロックの厚さは、圧力容器として検査される最も厚い溶接部の最終実測厚さの±25%以内とする。
- d) Qブロックに埋込まれる平面きず(開口きず)は、自然きず又は人工きずのいずれでもよいが、きずの位置、方向、反射面積が明確になっていなければならない。
- e) Qブロックに埋込むきず寸法は、9.3.6 c)に示す超音波探傷試験の対象厚さに対する判定基準の許容寸法を超えてはならない。

#### 9.3.4 溶接開先面の試験

厚さ50 mm以上の全ての溶接開先面は、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。開先面の補修溶接部もその面の検査ができる段階で、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。指示模様は、次のa)～c)の判定基準により評価する。全ての関連指示模様の位置を記録する。

- a) 主寸法が1.6 mmを超える指示模様は、関連指示模様とみなす。
- b) 長さが6 mmを超えなければ、ラミネーション型の模様は補修しなくてもよいが、6 mmを超える指示模様は、その範囲を超音波探傷試験で決定する。長さが6 mmを超える指示模様は、10 mm又はその深さの小さい方まで溶接補修する。ただし、製品形状に対する超音波探傷試験規定により、更に深い補修が必要な場合を除く。
- c) 他のラミネーション型に類しない指示模様は、次の1)～3)の場合、受け入れられない。
  - 1) 長さ4.8 mmを超える線状指示模様
  - 2) 4.8 mmを超える円形状指示模様
  - 3) 縁間隔1.6 mm以下の4個以上の円形状指示模様

#### 9.3.5 溶接部のタイプとそれらの試験

溶接部のタイプとそれらの試験は、次のa)～e)による。

- a) **溶接継手分類** 溶接継手の分類は容器内の継手の位置を定義しており、継手のタイプを定義していない。継手タイプに関する特殊規定及び溶接された耐圧継手に対する試験の程度を規定するために使用する。特殊規定が用途及び厚さに基づくため、どの継手にも適用されるのではなく、特殊規定が適用される継手のみがその分類に含まれる。分類は、次のように分類A, B, C, D, Eで示される。図9.3.1に、各分類に含まれる代表的継手位置を示す。
  - 1) **分類A** 円筒胴、連結圧力室、円すい胴又はノズル内の長手溶接継手。球体、成形又は平鏡板又は角型容器の側板(耐圧容器に一体に成形された平板の全て)にある全ての溶接継手。半球形鏡と円筒胴、円すい胴、ノズル又は連結圧力室に取付ける周溶接継手
  - 2) **分類B** 円筒胴、連結圧力室、ノズル、円すい胴の周継手で、円すい胴の大径端、小径端で円筒胴又はノズルネックを接合する溶接継手を含む。全半球形鏡板以外の成形鏡板を円筒胴、円すい胴、ノズル又は連結圧力室に取付ける周溶接継手
  - 3) **分類C** 接続フランジ、管板又は平鏡板を円筒胴、成形鏡板、円すい胴、ノズル又は連結圧力室に取付ける溶接継手。角型容器の側板と他の側板をつなぐ全ての溶接継手
  - 4) **分類D** 連結圧力室又はノズルと円筒胴、球形胴、円すい胴、鏡板又は角型容器の溶接継

手。円すい胴の小径端とノズル及びノズルと連結圧力室との接続継手

- 5) **分類 E** 非耐圧部に附属品を取付ける溶接継手
- b) **溶接継手** 全ての分類 A, B, C, D 及び E 溶接継手の全長は, **9.3.1** に従って超音波探傷試験を実施する。超音波探傷試験で適切な判定が得られなければ, 放射線透過試験を実施する。溶接部の両側各 13 mm の母材と溶接部の内外面は, 磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。
- c) **ノズル, 枝管, 配管継手の開口部の溶接肉盛** 溶接肉盛が表面になされる場合は, 溶接肉盛, 溶込み部, 肉盛近傍の母材の超音波探傷試験を行い, **9.3.6 c)** の判定基準を満足することを確認する。なお, 超音波探傷試験が困難な箇所は, 磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。
- d) **取付け溶接部** 耐圧部材への取付け溶接部は磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行い, **9.3.6 d)** の判定基準を満足することを確認する。
- e) **漏れ止溶接部** 漏れ止溶接部は, 磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行う。

### 9.3.6 判定基準

判定基準は, 次の a) ~ d) による。

- a) **一般規定** 受入規定は次による。溶接部又は溶接肉盛近傍の材料の判定基準は **9.2** による。
- b) **放射線透過試験** 次の 1) ~ 6) の不完全部は, 受け入れられない。
- 1) 割れ又は融合不良, 又は不完全溶込み部分の全てのタイプ
  - 2) 次の長さを超える線状指示模様
 

$t \leq 19 \text{ mm}$ の場合	6 mm ( $t$ : 溶接される厚さの薄い方)
$19 \text{ mm} < t \leq 57 \text{ mm}$ の場合	$t/3 \text{ mm}$
$t > 57 \text{ mm}$ の場合	19 mm
  - 3) 放射線フィルムに示す濃度変化が急変しなければ, 内部ルート溶接条件は受入られる。このような条件の両端でのフィルム上の線状指示模様は, 上記 2) に示す条件を満足しなければならない。
  - 4)  $12t$  の長さ中に,  $t$  を超える集合長さの一線上にある円形状指示模様。ただし, 集合長さを限定せず, 指示模様間の最小距離が  $6L$  ( $L$ : 最大指示模様長さ) を超えている場合は除く。
  - 5) **表 9.3.1** 及び **附属書 I** の判定基準を超える円形状指示模様
  - 6) 2) ~ 5) に代えて, 鋼の場合は **JIS Z 3104**, ステンレス鋼・耐食耐熱超合金及びその他これに類する指示模様は **JIS Z 3106** における透過写真によるきずの像の分類方法により, 判定基準を 1 類とする。
- c) **超音波探傷試験** **9.3.2 i) 1)** の超音波探傷試験データの解析基準に従って, これら全ての指示模様の形状, 特徴, 位置を調査し, 次の 1), 2) の要求とともに **2.1) ~ 2.3)** の判定基準に対して評価する。
- 1) 指示模様の高さ及び長さを, 判定基準として評価するきず高さ(表面きずの場合は  $a$ , 内部きずの場合は  $2a$ ) ( $a$ : mm) 及びきず長さ( $l$ : mm) に置き換える方法は次による。
    - 1.1) 単一指示模様の場合は, **図 9.3.2** による。
    - 1.2) 複数指示模様の場合は, **図 9.3.3 ~ 図 9.3.6** による。圧力を受ける面に垂直な同一平面上にある並列な複数個の平面きず間の距離  $S$  が合体の判定基準以下の場合には, 単

一の平面きずとする(図 9.3.3 を参照)。13 mm 以下の間隔の平行平面上にある接近する複数個の平面きずは、同一平面上の平面きずとする(図 9.3.4 を参照)。又、同一面上にある非並列な複数個の平面きずは、きず間距離  $S$  が合体の判定基準以下の場合には、単一の平面きずとする(図 9.3.5 を参照)。平面間の距離が 13 mm 以下の同一平面上にない並列な複数個の平面きずの取扱いは、図 9.3.6 による。

同一平面上に複数個の平面きずが存在する場合、個々のきずについて、元のきず高さを用いて表面及び隣接きずとの相互作用を評価する(図 9.3.3 及び図 9.3.5 を参照)。

最初に、個々のきずについて表面との近接性を決定する。表面との相互作用の判定基準( $S < 0.4 d$ )を満足する内部きずは、表面きずとして再分類する。ここで、 $S$  は表面又はクラッドと母材境界から内部きずまでの距離、 $d$  はきず高さの 1/2 である。

次に、個々のきずについて、元のきず高さを用いて隣接するきずとの近接性を評価する。隣接するきずとの合体の判定基準[ $S \leq \max(d_i, d_j)$ 、 $S$  は隣接するきず間の距離、 $d_i$  と  $d_j$  は隣接するきずのきず高さの 1/2]により、2 個以上のきずが合体すると判定された場合、更に、合体したきず高さに基づいて、隣接する他のいかなるきずとの合体又は表面との相互作用を考慮する必要はない。

2 個以上の平面きずが合体した単一の平面きずが内部きず又は表面きずかの判定は、合体した単一の平面きずに含まれる個々のきずの中で  $S_i/d_i$  が最小値のきずで行う。 $S_i/d_i$  が最小値のきずが内部きずの場合には合体した単一の平面きずを内部きず、表面きずの場合には合体した単一の平面きずを表面きずとする。表面きずと判定された場合には、きず高さに  $S_i$  の最小値を含める。ここで、 $S_i$  は個々のきずの表面又はクラッドと母材境界からの距離、 $d_i$  はきず高さの 1/2 である。

- 2) 超音波探傷試験データ解析で、表面きずに近接したきずと確認される場合には、表面きずとして評価する。この場合には、この規格に規定された磁粉探傷検査、浸透探傷検査又は渦流探傷試験を実施し、合格しなければ受け入れられない。内部きずの長さ( $l$ )は、厚さの 4 倍( $4t$ )以下でなければならない。

- 2.1) 溶接後熱処理を行う場合 表面きずの許容きず寸法は表 9.3.2～表 9.3.13 に、内部きずの許容きず寸法は表 9.3.14～表 9.3.25 による。表 9.3.14～表 9.3.25 において、 $X_a$  は式(9.3.1)に示す。

$$X_a = \cos \left\{ \frac{\pi}{2(1+Y_a)} \right\} \dots\dots\dots(9.3.1)$$

ここで、 $Y_a = S/a_e (\geq 0.4)$  とし、 $Y_a > 1$  の場合には  $Y_a = 1$  とする。複数の内部きずが合体した単一きずの  $Y_a$  は、次による。

- $Y_a$  : 合体した単一きずに含まれる個々の内部きずの  $S_i/d_i$  の最小値
- $S_i$  : 個々の内部きずの表面又はクラッドと母材境界からの距離(mm)
- $d_i$  : 個々の内部きずの高さの 1/2 (mm)

降伏強さ  $S_y > 690$  MPa の場合、又は内外径比  $Y < 1.2$  又は  $Y > 2.5$  の場合には、次の 2.3) により許容きず寸法を求める。

$Y < 1.2$  の場合には、 $Y = 1.2$  の許容きず寸法の方が安全側であるので、 $Y = 1.2$  の許容きず寸法を用いてもよい。

- 2.2) 溶接後熱処理を行わない場合** 表面きずの許容きず寸法は表 9.3.26 に、内部きずの許容きず寸法は表 9.3.27 による。表 9.3.27 において、 $X_a$  は式 (9.3.1) に示す。

降伏強さ  $S_y > 260$  MPa の場合、又は内外径比  $Y < 1.2$  又は  $Y > 2.5$  の場合には、次の 2.3) により許容きず寸法を求める。

$Y < 1.2$  の場合には、 $Y = 1.2$  の許容きず寸法の方が安全側であるので、 $Y = 1.2$  の許容きず寸法を用いてもよい。

- 2.3) 許容きず寸法の算出手順** 2.1) 又は 2.2) の許容きず寸法によらずに、別途、製作者は次の 2.3.1) ~ 2.3.5) の手順により許容きず寸法を設定する。なお、内部きずの許容きず寸法は、表面きずの許容きず寸法を用いて設定する。

- 2.3.1)** 構造不連続部から十分離れた位置で軸方向の表面きずを想定し、設計圧力  $P$  による周方向応力の他に、溶接残留応力  $\sigma_r$  を膜応力として考慮して、式 (9.3.2) により周方向応力  $\sigma_t$  を求める [附属書 J の 2 を参照]。

胴の周方向溶接部におけるきずのように、きずの位置ときずに垂直な方向が周方向と異なることが明確に判断できる場合には、判断の理由を示して式 (9.3.2) の内圧による周方向応力の代わりに、想定きずに垂直な方向の応力を用いる。この場合には、2.3.2) で周方向応力を想定きずに垂直な方向の応力に読み替え、2.3.4) で軸方向のきず寸法を想定した方向のきず寸法に読み替える。

$$\sigma_t = \frac{P}{Y^2 - 1} (1 + Z^2) + \sigma_r \dots\dots\dots (9.3.2)$$

ここで、

$\sigma_r$  : 溶接後熱処理を行う場合、 $\sigma_r = 0.15 S_y$

溶接後熱処理を行わない場合、 $\sigma_r = S_y$

$S_y$  : 室温における規定最小降伏強さ (MPa)

計測などにより類似溶接部の溶接残留応力が求められている場合には、その値を用いてもよい。

- 2.3.2)** 附属書 C の 4.1 により、溶接残留応力を考慮した周方向応力  $\sigma_t$  に対する応力拡大係数  $K_{IA}$  を算出する。

- 2.3.3)** 附属書 C の 6 a) により、シャルピー衝撃吸収エネルギーを用いて平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  を求める。ここで用いるシャルピー衝撃吸収エネルギーは、表 5.2.2 の横方向の 3 個の試験片の平均値、又は使用者設計仕様書で規定されたシャルピー衝撃吸収エネルギーを用いる。なお、使用者設計仕様書で平面ひずみ破壊靱性値を規定した場合には、その値を用いてもよい。

- 2.3.4)**  $K_{IA} \leq K_{IC}/1.3$  となる軸方向のきず寸法 ( $a_s$ ,  $l_s$ ,  $a_s/t$ ) を求め、それを表面きずの許容きず寸法とする。ここで、1.3 は設計係数である。

- 2.3.5)** 内部きずの許容きず高さ  $2a_e$  は、2.3.4) で求めた表面きずの許容きず高さ  $a_s$

を用いて式(9.3.3)で求める。なお、式(9.3.3)の関係は、表面きずのアスペクト比 $a_s/l_s$ の値によらず、一定とする。

$$a_e = 1.12^2 \cos \left\{ \frac{\pi}{2(1+Y_a)} \right\} a_s \dots\dots\dots(9.3.3)$$

ここで、 $Y_a = S/a_e (\geq 0.4)$ とし、 $Y_a > 1$ の場合には $Y_a = 1$ とする。複数の内部きずが合体した単一きずの $Y_a$ は、次による。

- $Y_a$  : 合体した単一きずに含まれる個々の内部きずの $S_i/d_i$ の最小値
- $S_i$  : 個々の内部きずの表面又はクラッドと母材境界からの距離(mm)
- $d_i$  : 個々の内部きずの高さの1/2 (mm)

d) **磁粉探傷試験及び浸透探傷試験** 磁粉探傷試験及び浸透探傷試験は 9.2.5 d)による。

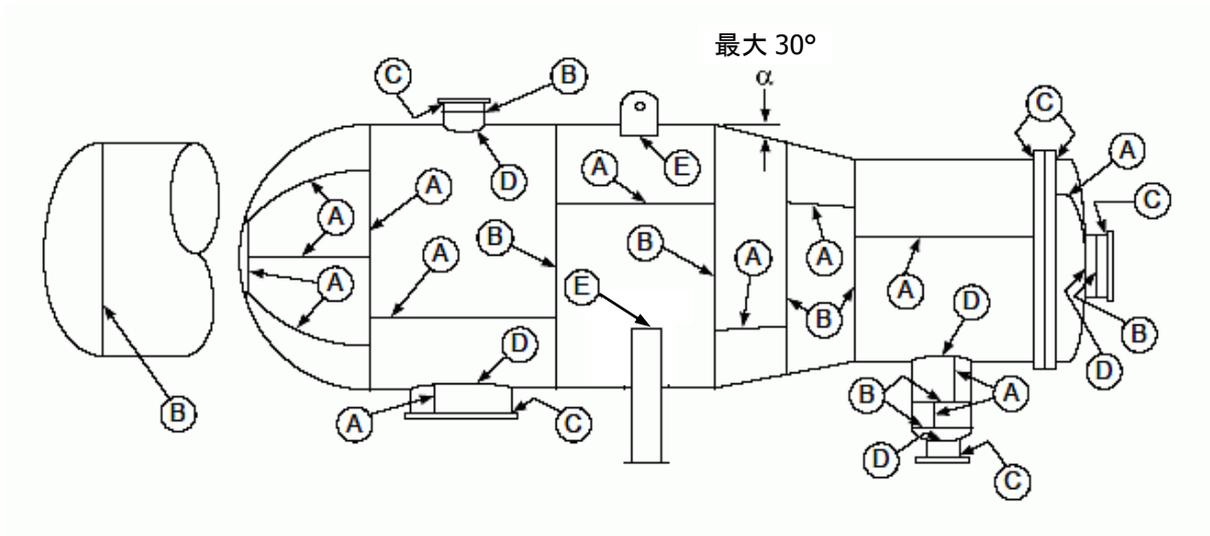
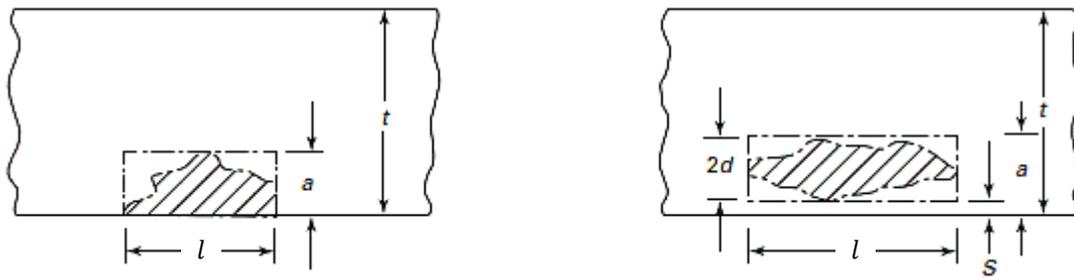


図 9.3.1 溶接継手の位置による分類†

表 9.3.1 放射線透過試験における許容円形状指示模様寸法

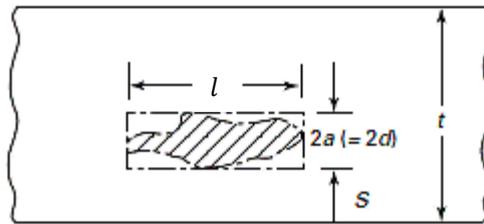
厚さ $t$ (mm)	最大許容円形状指示模様寸法 (mm)		評価対象外の円形状指示 模様の最大寸法 <sup>a)</sup> (mm)
	散在指示模様	独立指示模様	
3未満	$t/4$	$t/3$	$t/10$
3	0.8	1.1	0.4
5	1.2	1.6	
6	1.6	2.1	
8	2.0	2.6	
9.5	2.3	3.2	0.8
11	2.8	3.7	
13	3.2	4.3	
14	3.6	4.8	
16	4.0	5.3	
17.5	4.0	5.8	
19から50以下	4.0	6.4	1.6
50を超える場合	4.0	9.5	

注<sup>a)</sup> 附属書I 2 b)を参照



(a) 表面指示模様

$S < 0.4d$   
(b) 表面指示模様 ( $a = 2d + S$ )



$S \geq 0.4d$   
(c) 内部指示模様 ( $2a = 2d$ )

図 9.3.2 単一指示模様のきず分類

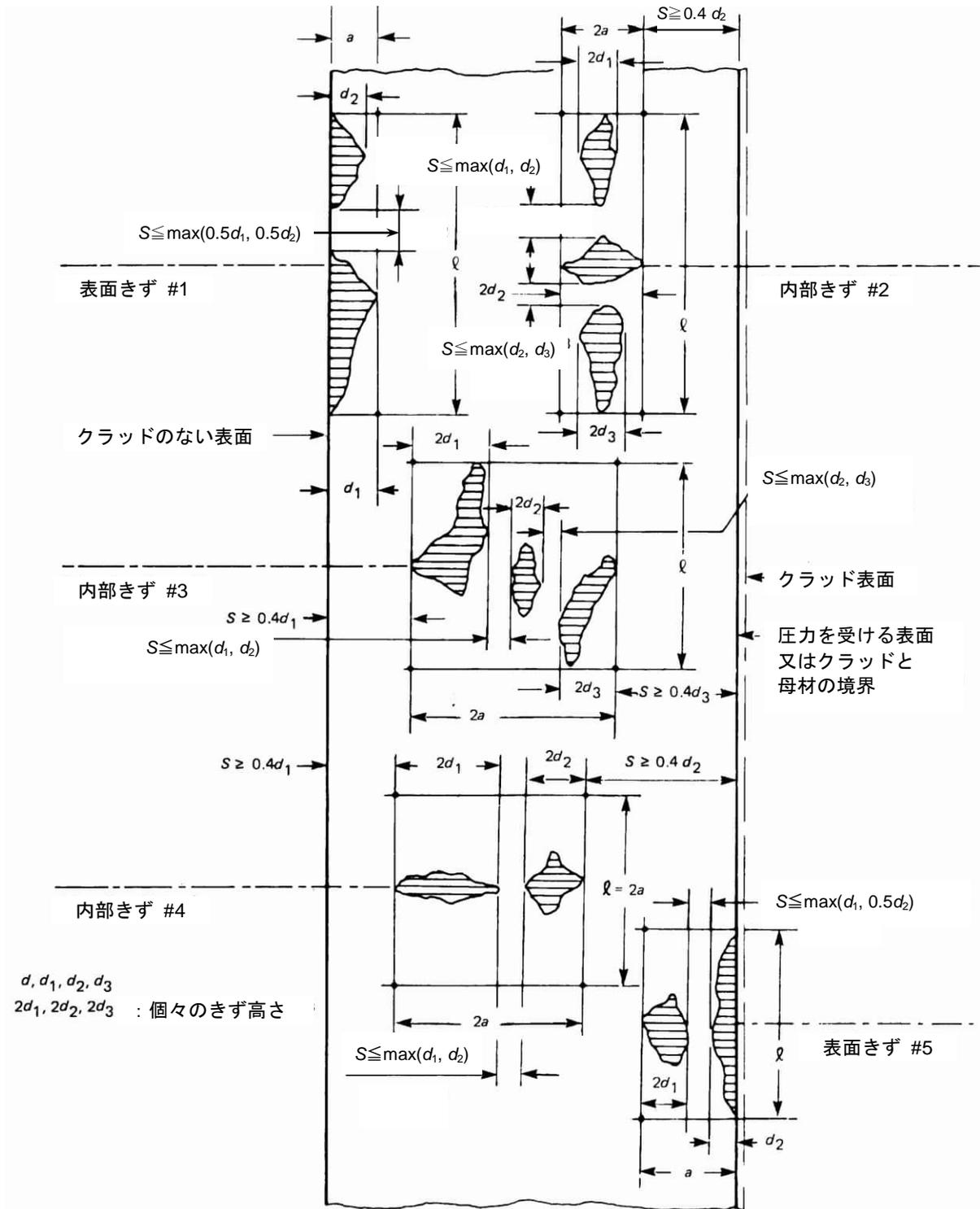


図 9.3.3 同一平面上にある並列な複数個の平面きずの取扱い†

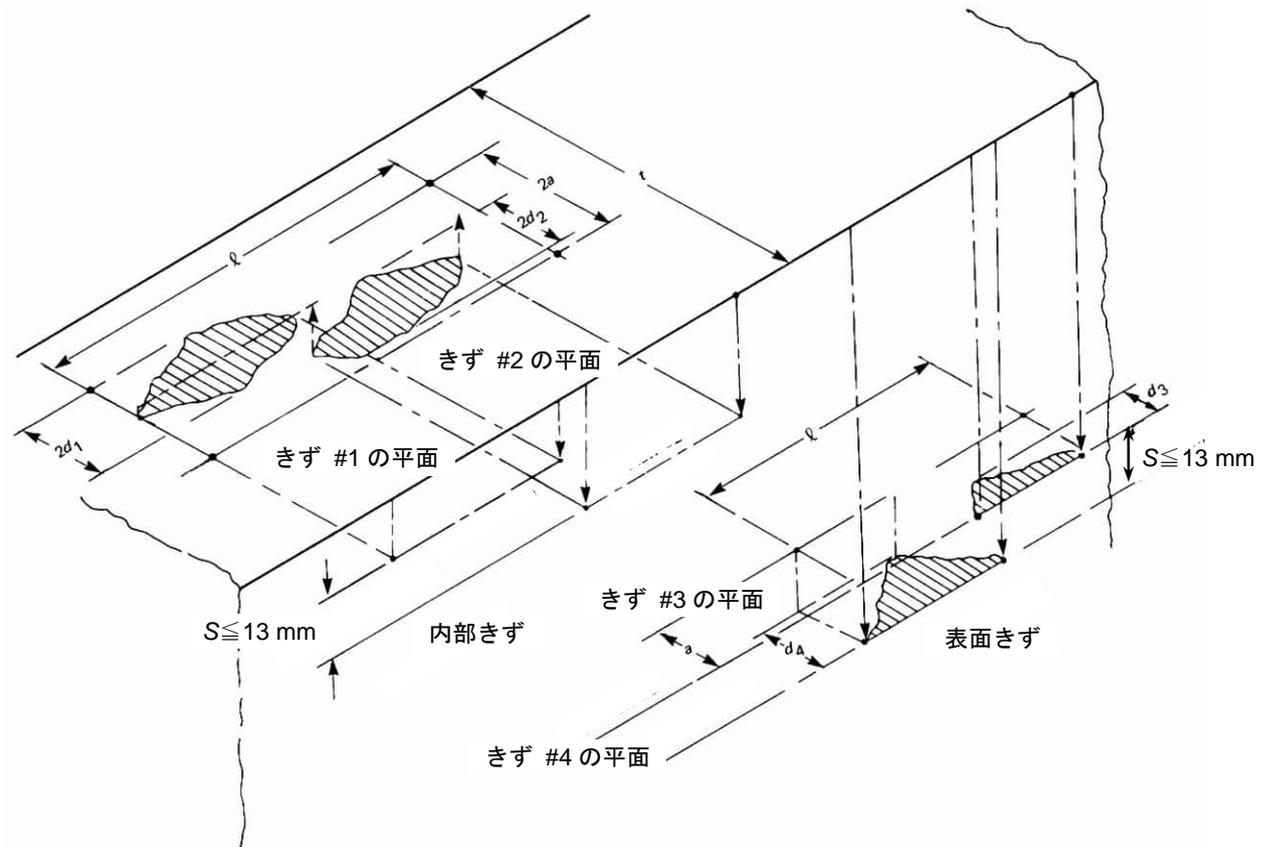
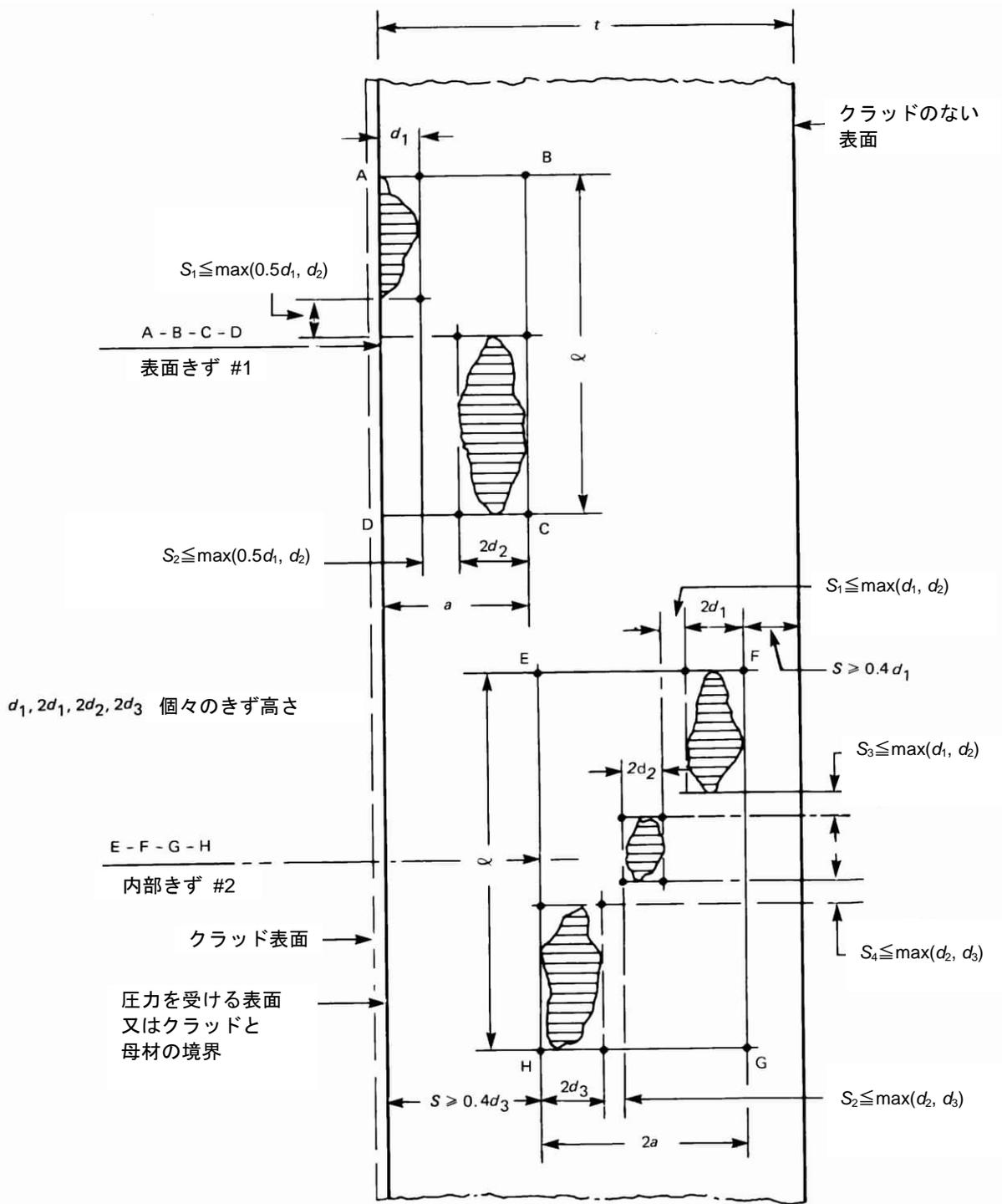


図 9.3.4 平行平面上にある接近する複数個の平面きずの取扱い†



注記 非並列とは、厚さ及びその直角方向に重ならないことを言う。

図 9.3.5 同一平面上にある非並列な複数個の平面きずの取扱い†

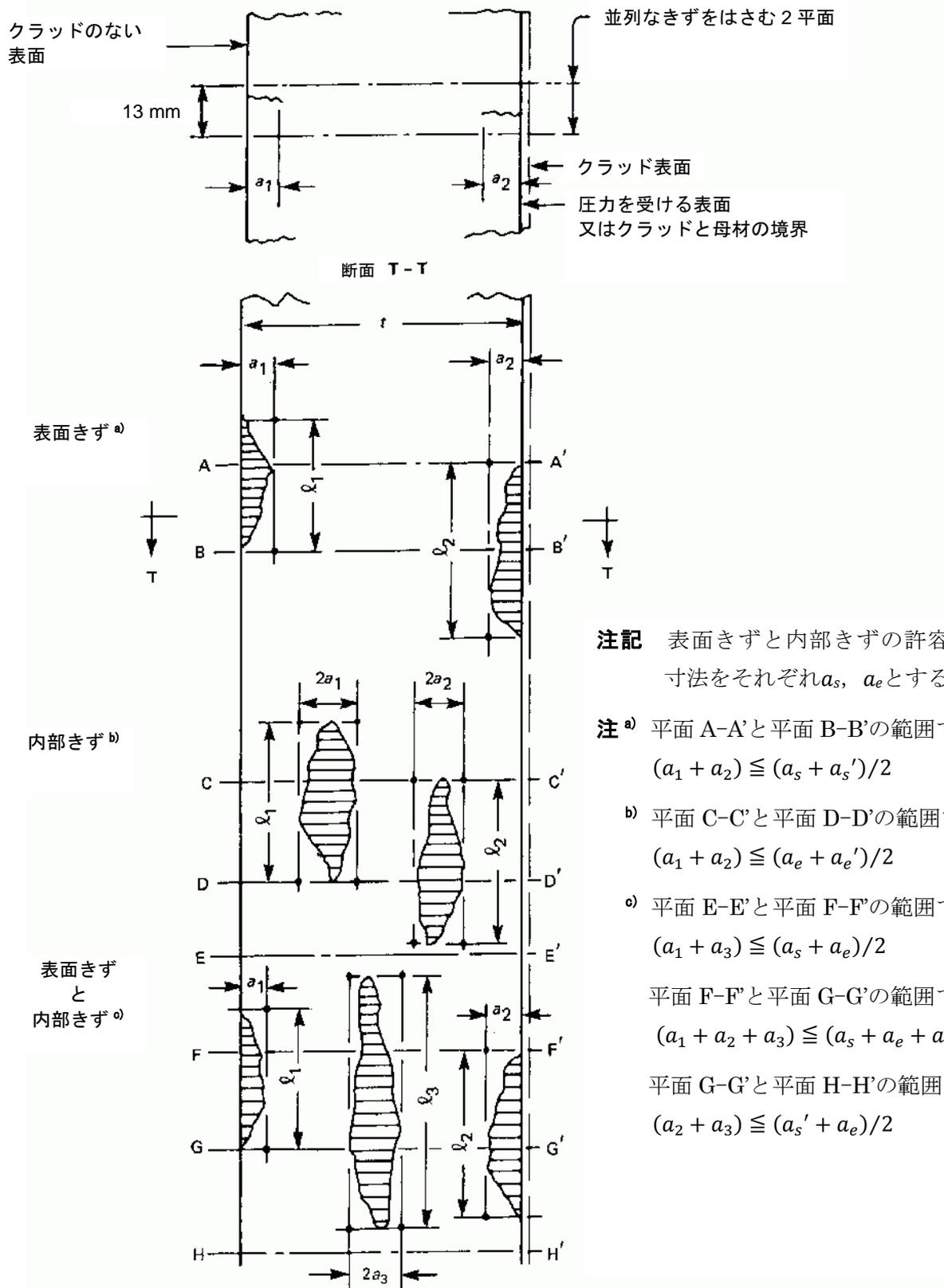


図 9.3.6 同一平面上にない並列な複数個の平面なきずの取扱い†

表 9.3.2 表面きずの許容きず寸法 (570 < S<sub>y</sub> ≤ 690 MPa, 溶接後熱処理あり)

13 ≤ t < 25 mm
a/t ≤ 0.087 及び l ≤ 6.4 mm

表 9.3.3 表面きずの許容きず寸法 (570 < S<sub>y</sub> ≤ 690 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	25 ≤ t ≤ 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a/t	a/t	a/t	a/t
0.0	2.81 t <sup>-0.947</sup>	2.36 t <sup>-0.997</sup>	1.54 t <sup>-1.04</sup>	0.915 t <sup>-1.07</sup>
0.1	2.97 t <sup>-0.934</sup>	2.54 t <sup>-0.985</sup>	1.77 t <sup>-1.03</sup>	1.13 t <sup>-1.06</sup>
0.2	4.35 t <sup>-0.959</sup>	3.75 t <sup>-1.01</sup>	2.65 t <sup>-1.05</sup>	1.83 t <sup>-1.08</sup>
0.3	6.15 t <sup>-0.972</sup>	5.45 t <sup>-1.02</sup>	4.07 t <sup>-1.07</sup>	3.04 t <sup>-1.10</sup>
0.4	5.89 t <sup>-0.917</sup>	5.21 t <sup>-0.963</sup>	4.02 t <sup>-1.00</sup>	3.07 t <sup>-1.03</sup>
0.5	6.22 t <sup>-0.918</sup>	5.41 t <sup>-0.962</sup>	4.08 t <sup>-0.999</sup>	3.03 t <sup>-1.02</sup>

注記 1 a/t の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の a/l の値に対して、及び 64 < t < 100 mm の場合には、線形補間により a/t を求める。

25 ≤ t ≤ 64 mm		100 ≤ t ≤ 300 mm	
a/l	a/t	a/l	a/t
0.0	0.031	0.0	0.019
0.1	0.036	0.1	0.022
0.2	0.047	0.2	0.028
0.3	0.064	0.3	0.038
0.4	0.083	0.4	0.050
0.5	0.087	0.5	0.052

注記 2 きず高さ a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a/t を求める。

表 9.3.4 表面きずの許容きず寸法 (570 < S<sub>y</sub> ≤ 690 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	t > 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a (mm)	a (mm)	a (mm)	a (mm)
0.0	3.81	2.40	1.21	a)
0.1	4.32	2.78	1.47	a)
0.2	5.51	3.62	1.97	1.18
0.3	7.22	4.82	2.69	1.69
0.4	9.48	6.45	3.93	2.66
0.5	9.93	6.74	4.11	2.76

注記 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a を求める。

注 a) 使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

表 9.3.5 表面きずの許容きず寸法 (415 < S<sub>y</sub> ≤ 570 MPa, 溶接後熱処理あり)

13 ≤ t < 25 mm
a/t ≤ 0.087 及び l ≤ 6.4 mm

表 9.3.6 表面きずの許容きず寸法 (415 < S<sub>y</sub> ≤ 570 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	25 ≤ t ≤ 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a/t	a/t	a/t	a/t
0.0	3.01 t <sup>-0.929</sup>	2.63 t <sup>-0.987</sup>	1.81 t <sup>-1.05</sup>	1.07 t <sup>-1.08</sup>
0.1	3.16 t <sup>-0.915</sup>	2.81 t <sup>-0.974</sup>	2.06 t <sup>-1.03</sup>	1.34 t <sup>-1.07</sup>
0.2	4.78 t <sup>-0.945</sup>	4.28 t <sup>-1.00</sup>	3.18 t <sup>-1.06</sup>	2.24 t <sup>-1.09</sup>
0.3	6.89 t <sup>-0.961</sup>	6.37 t <sup>-1.02</sup>	4.97 t <sup>-1.08</sup>	3.81 t <sup>-1.12</sup>
0.4	6.14 t <sup>-0.893</sup>	5.61 t <sup>-0.945</sup>	4.52 t <sup>-0.995</sup>	3.54 t <sup>-1.02</sup>
0.5	6.59 t <sup>-0.898</sup>	5.94 t <sup>-0.948</sup>	4.68 t <sup>-0.994</sup>	3.56 t <sup>-1.02</sup>

注記 1 a/t の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の a/l の値に対して、及び 64 < t < 100 mm の場合には、線形補間により a/t を求める。

25 ≤ t ≤ 64 mm		100 ≤ t ≤ 300 mm	
a/l	a/t	a/l	a/t
0.0	0.031	0.0	0.019
0.1	0.036	0.1	0.022
0.2	0.047	0.2	0.028
0.3	0.064	0.3	0.038
0.4	0.083	0.4	0.050
0.5	0.087	0.5	0.052

注記 2 きず高さ a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a/t を求める。

表 9.3.7 表面きずの許容きず寸法 (415 < S<sub>y</sub> ≤ 570 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	t > 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a (mm)	a (mm)	a (mm)	a (mm)
0.0	4.51	2.82	1.40	a)
0.1	5.12	3.27	1.70	a)
0.2	6.55	4.28	2.30	1.34
0.3	8.60	5.74	3.17	1.95
0.4	11.3	7.68	4.65	3.13
0.5	11.8	8.01	4.85	3.25

注記 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a を求める。

注 a) 使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

表 9.3.8 表面きずの許容きず寸法 (260 < S<sub>y</sub> ≤ 415 MPa, 溶接後熱処理あり)

13 ≤ t < 25 mm
a/t ≤ 0.087 及び l ≤ 6.4 mm

表 9.3.9 表面きずの許容きず寸法 (260 < S<sub>y</sub> ≤ 415 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	25 ≤ t ≤ 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a/t	a/t	a/t	a/t
0.0	3.14 t <sup>-0.905</sup>	2.84 t <sup>-0.975</sup>	2.01 t <sup>-1.05</sup>	1.08 t <sup>-1.10</sup>
0.1	3.28 t <sup>-0.890</sup>	3.04 t <sup>-0.960</sup>	2.31 t <sup>-1.04</sup>	1.43 t <sup>-1.09</sup>
0.2	5.20 t <sup>-0.926</sup>	4.83 t <sup>-0.991</sup>	3.76 t <sup>-1.06</sup>	2.63 t <sup>-1.11</sup>
0.3	7.15 t <sup>-0.933</sup>	7.09 t <sup>-1.00</sup>	6.06 t <sup>-1.09</sup>	4.78 t <sup>-1.14</sup>
0.4	6.25 t <sup>-0.861</sup>	5.94 t <sup>-0.921</sup>	5.01 t <sup>-0.983</sup>	4.02 t <sup>-1.02</sup>
0.5	6.86 t <sup>-0.869</sup>	6.45 t <sup>-0.929</sup>	5.30 t <sup>-0.986</sup>	4.13 t <sup>-1.02</sup>

注記 1 a/t の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の a/l の値に対して、及び 64 < t < 100 mm の場合には、線形補間により a/t を求める。

25 ≤ t ≤ 64 mm		100 ≤ t ≤ 300 mm	
a/l	a/t	a/l	a/t
0.0	0.031	0.0	0.019
0.1	0.036	0.1	0.022
0.2	0.047	0.2	0.028
0.3	0.064	0.3	0.038
0.4	0.083	0.4	0.050
0.5	0.087	0.5	0.052

注記 2 きず高さ a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a/t を求める。

表 9.3.10 表面きずの許容きず寸法 (260 < S<sub>y</sub> ≤ 415 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	t > 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a (mm)	a (mm)	a (mm)	a (mm)
0.0	5.39	3.27	1.49	a)
0.1	6.15	3.82	1.87	a)
0.2	7.93	5.08	2.62	1.41
0.3	10.5	6.90	3.72	2.16
0.4	13.9	9.32	5.53	3.63
0.5	14.5	9.70	5.76	3.78

注記 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a を求める。

注 a) 使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

表 9.3.11 表面きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理あり)

$13 \leq t < 25$ mm
$a/t \leq 0.087$ 及び $l \leq 6.4$ mm

表 9.3.12 表面きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理あり)

$a/l$	$25 \leq t \leq 300$ mm			
	$Y = 1.2$	$Y = 1.5$	$Y = 2.0$	$Y = 2.5$
	$a/t$	$a/t$	$a/t$	$a/t$
0.0	$3.21 t^{-0.858}$	$3.10 t^{-0.948}$	$2.38 t^{-1.06}$	$1.01 t^{-1.16}$
0.1	$3.34 t^{-0.841}$	$3.29 t^{-0.928}$	$2.75 t^{-1.04}$	$1.59 t^{-1.13}$
0.2	$5.78 t^{-0.891}$	$5.67 t^{-0.970}$	$4.90 t^{-1.07}$	$3.54 t^{-1.15}$
0.3	$7.30 t^{-0.881}$	$7.70 t^{-0.966}$	$7.53 t^{-1.07}$	$6.42 t^{-1.15}$
0.4	$6.12 t^{-0.800}$	$6.20 t^{-0.873}$	$5.69 t^{-0.954}$	$4.83 t^{-1.01}$
0.5	$6.97 t^{-0.815}$	$6.98 t^{-0.888}$	$6.26 t^{-0.965}$	$5.17 t^{-1.01}$

注記 1  $a/t$  の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の  $a/l$  の値に対して、及び  $64 < t < 100$  mm の場合には、線形補間により  $a/t$  を求める。

$25 \leq t \leq 64$ mm		$100 \leq t \leq 300$ mm	
$a/l$	$a/t$	$a/l$	$a/t$
0.0	0.031	0.0	0.019
0.1	0.036	0.1	0.022
0.2	0.047	0.2	0.028
0.3	0.064	0.3	0.038
0.4	0.083	0.4	0.050
0.5	0.087	0.5	0.052

注記 2 きず高さ  $a$  が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比  $Y$  の値及び  $a/l$  の値に対しては、線形補間により  $a/t$  を求める。

表 9.3.13 表面きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理あり)

$a/l$	$t > 300$ mm			
	$Y = 1.2$	$Y = 1.5$	$Y = 2.0$	$Y = 2.5$
	$a$ (mm)	$a$ (mm)	$a$ (mm)	$a$ (mm)
0.0	7.21	4.19	1.66	a)
0.1	8.28	4.96	2.21	a)
0.2	10.8	6.75	3.29	1.51
0.3	14.4	9.34	5.01	2.69
0.4	19.3	12.8	7.39	4.67
0.5	20.0	13.2	7.65	4.87

注記 中間の内外径比  $Y$  の値及び  $a/l$  の値に対しては、線形補間により  $a$  を求める。

注 a) 使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

表 9.3.14 内部きずの許容きず寸法 (570 < S<sub>y</sub> ≤ 690 MPa, 溶接後熱処理あり)

13 ≤ t < 25 mm
a/t ≤ 0.109 X <sub>a</sub> 及び l ≤ 6.4 mm

表 9.3.15 内部きずの許容きず寸法 (570 < S<sub>y</sub> ≤ 690 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	25 ≤ t ≤ 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a/t	a/t	a/t	a/t
0.0	3.53 t <sup>-0.947</sup> X <sub>a</sub>	2.96 t <sup>-0.997</sup> X <sub>a</sub>	1.94 t <sup>-1.04</sup> X <sub>a</sub>	1.15 t <sup>-1.07</sup> X <sub>a</sub>
0.1	3.72 t <sup>-0.934</sup> X <sub>a</sub>	3.19 t <sup>-0.985</sup> X <sub>a</sub>	2.22 t <sup>-1.03</sup> X <sub>a</sub>	1.42 t <sup>-1.06</sup> X <sub>a</sub>
0.2	5.46 t <sup>-0.959</sup> X <sub>a</sub>	4.71 t <sup>-1.01</sup> X <sub>a</sub>	3.33 t <sup>-1.05</sup> X <sub>a</sub>	2.30 t <sup>-1.08</sup> X <sub>a</sub>
0.3	7.71 t <sup>-0.972</sup> X <sub>a</sub>	6.84 t <sup>-1.02</sup> X <sub>a</sub>	5.11 t <sup>-1.07</sup> X <sub>a</sub>	3.81 t <sup>-1.10</sup> X <sub>a</sub>
0.4	7.39 t <sup>-0.917</sup> X <sub>a</sub>	6.53 t <sup>-0.963</sup> X <sub>a</sub>	5.04 t <sup>-1.00</sup> X <sub>a</sub>	3.85 t <sup>-1.03</sup> X <sub>a</sub>
0.5	7.80 t <sup>-0.918</sup> X <sub>a</sub>	6.79 t <sup>-0.962</sup> X <sub>a</sub>	5.12 t <sup>-0.999</sup> X <sub>a</sub>	3.80 t <sup>-1.02</sup> X <sub>a</sub>

注記 1 a/t の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の a/l の値に対して、及び 64 < t < 100 mm の場合には、線形補間により a/t を求める。

25 ≤ t ≤ 64 mm		100 ≤ t ≤ 300 mm	
a/l	a/t	a/l	a/t
0.0	0.039 X <sub>a</sub>	0.0	0.024 X <sub>a</sub>
0.1	0.045 X <sub>a</sub>	0.1	0.028 X <sub>a</sub>
0.2	0.059 X <sub>a</sub>	0.2	0.035 X <sub>a</sub>
0.3	0.080 X <sub>a</sub>	0.3	0.048 X <sub>a</sub>
0.4	0.104 X <sub>a</sub>	0.4	0.063 X <sub>a</sub>
0.5	0.109 X <sub>a</sub>	0.5	0.065 X <sub>a</sub>

注記 2 きず高さ 2a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a/t を求める。

表 9.3.16 内部きずの許容きず寸法 (570 < S<sub>y</sub> ≤ 690 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	t > 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a (mm)	a (mm)	a (mm)	a (mm)
0.0	4.77 X <sub>a</sub>	3.02 X <sub>a</sub>	1.52 X <sub>a</sub>	0.789 X <sub>a</sub>
0.1	5.42 X <sub>a</sub>	3.48 X <sub>a</sub>	1.84 X <sub>a</sub>	1.01 X <sub>a</sub>
0.2	6.91 X <sub>a</sub>	4.54 X <sub>a</sub>	2.47 X <sub>a</sub>	1.48 X <sub>a</sub>
0.3	9.06 X <sub>a</sub>	6.04 X <sub>a</sub>	3.38 X <sub>a</sub>	2.12 X <sub>a</sub>
0.4	11.9 X <sub>a</sub>	8.09 X <sub>a</sub>	4.93 X <sub>a</sub>	3.34 X <sub>a</sub>
0.5	12.5 X <sub>a</sub>	8.46 X <sub>a</sub>	5.15 X <sub>a</sub>	3.47 X <sub>a</sub>

注記 1 きず高さ 2a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 2 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a を求める。

表 9.3.17 内部きずの許容きず寸法 (415 < Sy ≤ 570 MPa, 溶接後熱処理あり)

$13 \leq t < 25 \text{ mm}$
$a/t \leq 0.109 X_a$ 及び $l \leq 6.4 \text{ mm}$

表 9.3.18 内部きずの許容きず寸法 (415 < Sy ≤ 570 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	25 ≤ t ≤ 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a/t	a/t	a/t	a/t
0.0	$3.77 t^{-0.929} X_a$	$3.29 t^{-0.987} X_a$	$2.27 t^{-1.05} X_a$	$1.34 t^{-1.08} X_a$
0.1	$3.96 t^{-0.915} X_a$	$3.53 t^{-0.974} X_a$	$2.59 t^{-1.03} X_a$	$1.68 t^{-1.07} X_a$
0.2	$5.99 t^{-0.945} X_a$	$5.36 t^{-1.00} X_a$	$3.99 t^{-1.06} X_a$	$2.81 t^{-1.09} X_a$
0.3	$8.65 t^{-0.961} X_a$	$7.99 t^{-1.02} X_a$	$6.24 t^{-1.08} X_a$	$4.78 t^{-1.12} X_a$
0.4	$7.70 t^{-0.893} X_a$	$7.04 t^{-0.945} X_a$	$5.66 t^{-0.995} X_a$	$4.44 t^{-1.02} X_a$
0.5	$8.26 t^{-0.898} X_a$	$7.46 t^{-0.948} X_a$	$5.87 t^{-0.994} X_a$	$4.47 t^{-1.02} X_a$

注記 1 a/t の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の a/l の値に対して、及び 64 < t < 100 mm の場合には、線形補間により a/t を求める。

25 ≤ t ≤ 64 mm		100 ≤ t ≤ 300 mm	
a/l	a/t	a/l	a/t
0.0	$0.039 X_a$	0.0	$0.024 X_a$
0.1	$0.045 X_a$	0.1	$0.028 X_a$
0.2	$0.059 X_a$	0.2	$0.035 X_a$
0.3	$0.080 X_a$	0.3	$0.048 X_a$
0.4	$0.104 X_a$	0.4	$0.063 X_a$
0.5	$0.109 X_a$	0.5	$0.065 X_a$

注記 2 きず高さ 2a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a/t を求める。

表 9.3.19 内部きずの許容きず寸法 (415 < Sy ≤ 570 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	t > 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a (mm)	a (mm)	a (mm)	a (mm)
0.0	$5.65 X_a$	$3.54 X_a$	$1.75 X_a$	$0.866 X_a$
0.1	$6.43 X_a$	$4.10 X_a$	$2.14 X_a$	$1.14 X_a$
0.2	$8.21 X_a$	$5.37 X_a$	$2.89 X_a$	$1.68 X_a$
0.3	$10.8 X_a$	$7.19 X_a$	$3.98 X_a$	$2.45 X_a$
0.4	$14.2 X_a$	$9.63 X_a$	$5.83 X_a$	$3.92 X_a$
0.5	$14.8 X_a$	$10.0 X_a$	$6.09 X_a$	$4.08 X_a$

注記 1 きず高さ 2a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 2 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a を求める。

表 9.3.20 内部きずの許容きず寸法 (260 < S<sub>y</sub> ≤ 415 MPa, 溶接後熱処理あり)

13 ≤ t < 25 mm
a/t ≤ 0.109 X <sub>a</sub> 及び l ≤ 6.4 mm

表 9.3.21 内部きずの許容きず寸法 (260 < S<sub>y</sub> ≤ 415 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	25 ≤ t ≤ 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a/t	a/t	a/t	a/t
0.0	3.93 t <sup>-0.905</sup> X <sub>a</sub>	3.56 t <sup>-0.975</sup> X <sub>a</sub>	2.52 t <sup>-1.05</sup> X <sub>a</sub>	1.35 t <sup>-1.10</sup> X <sub>a</sub>
0.1	4.12 t <sup>-0.890</sup> X <sub>a</sub>	3.81 t <sup>-0.960</sup> X <sub>a</sub>	2.90 t <sup>-1.04</sup> X <sub>a</sub>	1.79 t <sup>-1.09</sup> X <sub>a</sub>
0.2	6.52 t <sup>-0.926</sup> X <sub>a</sub>	6.06 t <sup>-0.991</sup> X <sub>a</sub>	4.72 t <sup>-1.06</sup> X <sub>a</sub>	3.30 t <sup>-1.11</sup> X <sub>a</sub>
0.3	8.97 t <sup>-0.933</sup> X <sub>a</sub>	8.90 t <sup>-1.00</sup> X <sub>a</sub>	7.60 t <sup>-1.09</sup> X <sub>a</sub>	5.99 t <sup>-1.14</sup> X <sub>a</sub>
0.4	7.84 t <sup>-0.861</sup> X <sub>a</sub>	7.45 t <sup>-0.921</sup> X <sub>a</sub>	6.29 t <sup>-0.983</sup> X <sub>a</sub>	5.04 t <sup>-1.02</sup> X <sub>a</sub>
0.5	8.60 t <sup>-0.869</sup> X <sub>a</sub>	8.09 t <sup>-0.929</sup> X <sub>a</sub>	6.65 t <sup>-0.986</sup> X <sub>a</sub>	5.18 t <sup>-1.02</sup> X <sub>a</sub>

注記 1 a/t の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の a/l の値に対して、及び 64 < t < 100 mm の場合には、線形補間により a/t を求める。

25 ≤ t ≤ 64 mm		100 ≤ t ≤ 300 mm	
a/l	a/t	a/l	a/t
0.0	0.039 X <sub>a</sub>	0.0	0.024 X <sub>a</sub>
0.1	0.045 X <sub>a</sub>	0.1	0.028 X <sub>a</sub>
0.2	0.059 X <sub>a</sub>	0.2	0.035 X <sub>a</sub>
0.3	0.080 X <sub>a</sub>	0.3	0.048 X <sub>a</sub>
0.4	0.104 X <sub>a</sub>	0.4	0.063 X <sub>a</sub>
0.5	0.109 X <sub>a</sub>	0.5	0.065 X <sub>a</sub>

注記 2 きず高さ 2a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 3 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a/t を求める。

表 9.3.22 内部きずの許容きず寸法 (260 < S<sub>y</sub> ≤ 415 MPa, 溶接後熱処理あり)

a/l	t > 300 mm			
	Y = 1.2	Y = 1.5	Y = 2.0	Y = 2.5
	a (mm)	a (mm)	a (mm)	a (mm)
0.0	6.76 X <sub>a</sub>	4.10 X <sub>a</sub>	1.87 X <sub>a</sub>	0.763 X <sub>a</sub>
0.1	7.72 X <sub>a</sub>	4.79 X <sub>a</sub>	2.35 X <sub>a</sub>	1.09 X <sub>a</sub>
0.2	9.94 X <sub>a</sub>	6.37 X <sub>a</sub>	3.29 X <sub>a</sub>	1.76 X <sub>a</sub>
0.3	13.2 X <sub>a</sub>	8.66 X <sub>a</sub>	4.67 X <sub>a</sub>	2.71 X <sub>a</sub>
0.4	17.4 X <sub>a</sub>	11.7 X <sub>a</sub>	6.94 X <sub>a</sub>	4.55 X <sub>a</sub>
0.5	18.2 X <sub>a</sub>	12.2 X <sub>a</sub>	7.22 X <sub>a</sub>	4.74 X <sub>a</sub>

注記 1 きず高さ 2a が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記 2 中間の内外径比 Y の値及び a/l の値に対しては、線形補間により a を求める。

**表 9.3.23 内部きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理あり)**

$13 \leq t < 25$ mm
$a/t \leq 0.109 X_a$ 及び $l \leq 6.4$ mm

**表 9.3.24 内部きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理あり)**

$a/l$	$25 \leq t \leq 300$ mm			
	$Y = 1.2$	$Y = 1.5$	$Y = 2.0$	$Y = 2.5$
	$a/t$	$a/t$	$a/t$	$a/t$
0.0	$4.02 t^{-0.858} X_a$	$3.89 t^{-0.948} X_a$	$2.99 t^{-1.06} X_a$	$1.27 t^{-1.16} X_a$
0.1	$4.19 t^{-0.841} X_a$	$4.12 t^{-0.928} X_a$	$3.45 t^{-1.04} X_a$	$1.99 t^{-1.13} X_a$
0.2	$7.25 t^{-0.891} X_a$	$7.11 t^{-0.970} X_a$	$6.15 t^{-1.07} X_a$	$4.45 t^{-1.15} X_a$
0.3	$9.16 t^{-0.881} X_a$	$9.66 t^{-0.966} X_a$	$9.44 t^{-1.07} X_a$	$8.06 t^{-1.15} X_a$
0.4	$7.68 t^{-0.800} X_a$	$7.78 t^{-0.873} X_a$	$7.14 t^{-0.954} X_a$	$6.05 t^{-1.01} X_a$
0.5	$8.74 t^{-0.815} X_a$	$8.76 t^{-0.888} X_a$	$7.86 t^{-0.965} X_a$	$6.49 t^{-1.01} X_a$

**注記 1**  $a/t$  の値は次の表の値を最大とする。なお、中間の  $a/l$  の値に対して、及び  $64 < t < 100$  mm の場合には、線形補間により  $a/t$  を求める。

$25 \leq t \leq 64$ mm		$100 \leq t \leq 300$ mm	
$a/l$	$a/t$	$a/l$	$a/t$
0.0	$0.039 X_a$	0.0	$0.024 X_a$
0.1	$0.045 X_a$	0.1	$0.028 X_a$
0.2	$0.059 X_a$	0.2	$0.035 X_a$
0.3	$0.080 X_a$	0.3	$0.048 X_a$
0.4	$0.104 X_a$	0.4	$0.063 X_a$
0.5	$0.109 X_a$	0.5	$0.065 X_a$

**注記 2** きず高さ  $2a$  が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

**注記 3** 中間の内外径比  $Y$  の値及び  $a/l$  の値に対しては、線形補間により  $a/t$  を求める。

**表 9.3.25 内部きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理あり)**

$a/l$	$t > 300$ mm			
	$Y = 1.2$	$Y = 1.5$	$Y = 2.0$	$Y = 2.5$
	$a$ (mm)	$a$ (mm)	$a$ (mm)	$a$ (mm)
0.0	$9.00 X_a$	$5.25 X_a$	$2.08 X_a$	$0.51 X_a$
0.1	$10.4 X_a$	$6.22 X_a$	$2.77 X_a$	$0.96 X_a$
0.2	$13.5 X_a$	$8.50 X_a$	$4.13 X_a$	$1.90 X_a$
0.3	$18.1 X_a$	$11.7 X_a$	$6.29 X_a$	$3.38 X_a$
0.4	$24.2 X_a$	$16.1 X_a$	$9.30 X_a$	$5.86 X_a$
0.5	$25.1 X_a$	$16.6 X_a$	$9.60 X_a$	$6.12 X_a$

**注記 1** きず高さ  $2a$  が 1 mm 未満になる場合で、使用者設計仕様書に表 5.2.2 よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3) により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

**注記 2** 中間の内外径比  $Y$  の値及び  $a/l$  の値に対しては、線形補間により  $a$  を求める。

表 9.3.26 表面きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理なし)

$a/l$	$13 \leq t \leq 30$ mm			
	$Y = 1.2$	$Y = 1.5$	$Y = 2.0$	$Y = 2.5$
	$a/t$	$a/t$	$a/t$	$a/t$
0.0	$0.591 t^{-1.02}$	a)	a)	a)
0.1	$0.793 t^{-0.958}$	a)	a)	a)
0.2	$1.51 t^{-0.955}$	$0.995 t^{-1.03}$	a)	a)
0.3	$2.52 t^{-0.949}$	$2.14 t^{-1.03}$	$1.23 t^{-1.15}$	a)
0.4	$2.87 t^{-0.863}$	$2.61 t^{-0.999}$	$1.74 t^{-0.973}$	$1.31 t^{-1.10}$
0.5	$2.98 t^{-0.862}$	$2.63 t^{-0.925}$	$1.88 t^{-0.993}$	$1.13 t^{-1.03}$

注記1  $a/t$ の値は次の表の値を最大とする。なお、 $25 \leq t \leq 30$  mmで、中間の $a/l$ の値に対しては線形補間により $a/t$ を求める。

$13 \leq t < 25$ mm	$25 \leq t \leq 30$ mm	
$a/t \leq 0.087$ 及び $l \leq 6.4$ mm	$a/l$	$a/t$
	0.0	0.031
	0.1	0.036
	0.2	0.047
	0.3	0.064
	0.4	0.083
	0.5	0.087

注記2 きず高さ $a$ が1 mm未満になる場合で、使用者設計仕様書に表5.2.2よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3)により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記3 中間の内外径比 $Y$ の値及び $a/l$ の値に対しては、線形補間により $a/t$ を求める。

注記4  $S_y > 260$  MPa又は $t > 30$  mmの場合には、9.3.6 c) 2) 2.3)により許容きず寸法を算出する。

注<sup>a)</sup> 使用者設計仕様書に表5.2.2よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3)により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

表9.3.27 内部きずの許容きず寸法 ( $S_y \leq 260$  MPa, 溶接後熱処理なし)

$a/l$	$13 \leq t \leq 30$ mm			
	$Y = 1.2$	$Y = 1.5$	$Y = 2.0$	$Y = 2.5$
	$a/t$	$a/t$	$a/t$	$a/t$
0.0	$0.741 t^{-1.02} X_a$	a)	a)	a)
0.1	$0.994 t^{-0.958} X_a$	a)	a)	a)
0.2	$1.90 t^{-0.955} X_a$	$1.25 t^{-1.03} X_a$	a)	a)
0.3	$3.16 t^{-0.949} X_a$	$2.69 t^{-1.03} X_a$	$1.55 t^{-1.15} X_a$	a)
0.4	$3.60 t^{-0.863} X_a$	$3.28 t^{-0.999} X_a$	$2.19 t^{-0.973} X_a$	$1.64 t^{-1.10} X_a$
0.5	$3.74 t^{-0.862} X_a$	$3.30 t^{-0.925} X_a$	$2.36 t^{-0.993} X_a$	$1.42 t^{-1.03} X_a$

注記1  $a/t$  の値は次の表の値を最大とする。なお、 $25 \leq t \leq 30$  mmで、中間の  $a/l$  の値に対しては線形補間により  $a/t$  を求める。

$13 \leq t < 25$ mm	$25 \leq t \leq 30$ mm	
$a/t \leq 0.109 X_a$ 及び $l \leq 6.4$ mm	$a/l$	$a/t$
	0.0	$0.039 X_a$
	0.1	$0.045 X_a$
	0.2	$0.059 X_a$
	0.3	$0.080 X_a$
	0.4	$0.104 X_a$
	0.5	$0.109 X_a$

注記2 きず高さ $2a$ が1 mm未満になる場合で、使用者設計仕様書に表5.2.2よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3)により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

注記3 中間の内外径比 $Y$ の値及び $a/l$ の値に対しては、線形補間により $a/t$ を求める。

注記4  $S_y > 260$  MPa又は $t > 30$  mmの場合には、9.3.6 c) 2) 2.3)により許容きず寸法を算出する。

注<sup>a)</sup> 使用者設計仕様書に表5.2.2よりも高い要求シャルピー衝撃吸収エネルギーが規定されている場合には、9.3.6 c) 2) 2.3)により製作者が許容きず寸法を算出してもよい。

## 9.4 圧力容器の最終試験

### 9.4.1 耐圧試験後の表面試験

耐圧試験又は自緊後、耐圧部材の全ての表面は内外面及び溶接部を含めて、9.2.5 d)に従って湿式磁粉探傷試験(磁性材)又は浸透探傷試験(非磁性材)を全表面にわたって行わなければならない。合格判定基準は9.2.5 d) 2)による。

### 9.4.2 ライニングされた容器の耐圧試験後の検査

保護用ライニングの裏に試験流体が漏れた場合、流体をそのまま残して容器を供用することは危険である。容器の運転温度が試験流体の沸点以上の場合、容器はライニングが損傷しないように十分時間をかけて加熱して、保護ライニング裏から全ての試験流体を追い出さなければならない。この加熱作業は、容器製造工場又は容器が設置されるプラントで行わなければならない。試験流体を追い出した後に、ライニングを補修しなければならない。

ライニングの補修後容器の試験、熱処理、又は耐圧試験の繰返しは必要ない。ただし、母材に溶け込むような補修溶接の欠陥があることが懸念される場合を除く。このような場合は、どの段階から試験を繰返すかを定めるべきである。

## 10 試験

### 10.1 試験一般

#### 10.1.1 適用範囲

この規格の範囲で製作される容器は、この項の規定に従って試験を行う。

#### 10.1.2 試験材に対する要求事項

試験材に対する要求事項は、次の a)～e)による。

- a) **試験材の採取** 製作中に材料が熱処理を受ける場合には、材料メーカで行われる熱処理も含めて、製作で使用する材料と同じように熱処理した試験材から試験片を採取する。試験は、材料メーカ又は製作者のどちらかが行う(5.2.5を参照)。
- b) **試験材の熱処理** 溶接後熱処理を含め、容器と同じように熱処理をした試験片は、容器又は部材に使用される材料を代表するものでなければならない。材料仕様書には、試験の種類、数及び試験結果に関して規定しておく必要がある。製作者は、材料が製作中に受ける温度、時間及び冷却速度を規定する。試験片として準備する材料は、製作者による実際の製作における許容範囲内の規定温度で熱処理を行う。熱処理の全時間は、製品における実際の熱処理全時間の80%以上とし、単一の熱サイクルで行ってもよい。溶接後熱処理のシミュレーションは、試験板で行ってもよい。火炎切断、アーク切断、予熱又は溶接のような局所的な加熱は、熱処理の一部として考えない。
- c) **試験材の熱処理手順** フェライト鋼製品をオーステナイト化温度から焼ならし又は加速冷却する場合、製品を代表する試験片は、特定の鍛造品の場合を除いて、製品本体と同じかそれよりも遅い速度で冷却しなければならない[5.2.2 b) 3)を参照]。この規定は、製品から直接採取した試験片及び製品を代表する試験材から採取した試験片に適用する。次の 1)～4)に示す一般的な手法は、全ての製品形態又は製品を代表する試験材に対して適用する。
  - 1) 試験片をオーステナイト化温度から冷却した後、全ての温度において 20 秒間で 14°C以

内の速度で冷却し、試験片の冷却速度が、厚さ中央と表面の中間領域( $t/4$ )で、熱処理端から  $t$  以上離れた位置における製品本体の冷却速度と一致することを示すことができれば、どのような手順で試験片の熱処理を行ってもよい。ここで、 $t$  は製品の公称厚さである。

- 2) 次の 2.1)～2.3)によって、製品端部における速い冷却速度を補償する。
    - 2.1) 熱処理端から  $t$  以上離れた位置で、試験片を採取する。ここで、 $t$  は製品の公称厚さである。
    - 2.2) 試験片を採取する製品端部に、部分溶込み溶接により幅  $t$  以上のスチールパッドを取付ける。
    - 2.3) 試験片を採取する製品端部に、サーマルバッファ又は断熱材を使用する。
  - 3) 製品の冷却速度データ及び試験片に対する冷却速度デバイス制御装置が利用可能であれば、1)を満足すれば、装置内で試験片を熱処理することにより製品を代表する。
  - 4) オーステナイト化温度からの焼ならし又は加速冷却を行う前のクラッド又は肉盛溶接された製品の場合、試験材もこのような熱処理を行う前の全厚さのクラッド又は肉盛溶接された試験材としなければならない。
- d) **クロムモリブデン鋼の熱処理に対する追加規定** 表 7.4.1 に示す材料に適用し、この追加規定を満足することを製作者製作記録に含める。引張試験片とシャルピー衝撃試験片の熱処理は、次の 1), 2)による。
- 1) 二組の引張試験片と一組のシャルピー衝撃試験片の試験を行う。一組の引張試験片には次の熱処理条件 A の熱処理を行い、もう一組の引張試験片とシャルピー衝撃試験片には熱処理条件 B の熱処理を行う。
    - 1.1) **熱処理条件 A** 熱処理温度は、実際に容器部分が曝される最高温度 $-14^{\circ}\text{C}$ 以上とする。保持時間は、実際に容器部分が熱処理される最大合計保持時間の 80%以上とする。
    - 1.2) **熱処理条件 B** 熱処理温度は、実際に容器部分が曝される最低温度 $+14^{\circ}\text{C}$ 以下とする。保持時間は、実際に容器部分が熱処理される最小合計保持時間の 120%以下とする。
  - 2) 試験片の熱処理条件を設定するための推奨手順を、次の 2.1)～2.3)に示す。
    - 2.1) 経験又は熱処理設備に基づいて、容器又は容器部分の熱処理に対する最高及び最低温度と保持時間を設定する。
    - 2.2) 試験片の熱処理条件 A 及び B を決定する。
    - 2.3) 容器又は容器部分の熱処理条件(熱処理温度と保持時間)と試験片の熱処理条件 A 及び B との関係を、図 10.1.1 に示す。
- e) **試験材に対する要求の例外事項** 試験材の要求事項に対する例外は、次の 1)～3)による。
- 1) **標準耐圧部品** 5.1.5 で規定される標準耐圧部品に対しては、10.1.2 a) 及び b) の要求を免除する。これらの標準耐圧部品は、容器と同じ熱処理条件を施した試験片がなくても、容器又は容器部品と一緒に溶接後熱処理を受けてもよい。ただし、特別に設計された鍛造継手は除く。
  - 2) 表 7.4.18 による溶接後熱処理を行った材料 表 7.4.2 又は表 7.4.3 の溶接後熱処理が要求される試験片で、10.1.2 a) 及び b) に従って認証された P 番号 1 グループ 3 及び P

番号 3 グループ 1 と 2 の材料は、表 7.4.18 による代替の溶接後熱処理をする場合、再度、試験片で認証を行う必要はない。

- 3) **再オーステナイト化熱処理を行った材料** オーステナイト化熱処理温度が少なくとも先行する熱処理のいずれかと同程度の高い温度であれば、材料を完全にオーステナイト化する熱処理に先行する全ての熱処理を、試験片の熱処理で実証する必要はない。

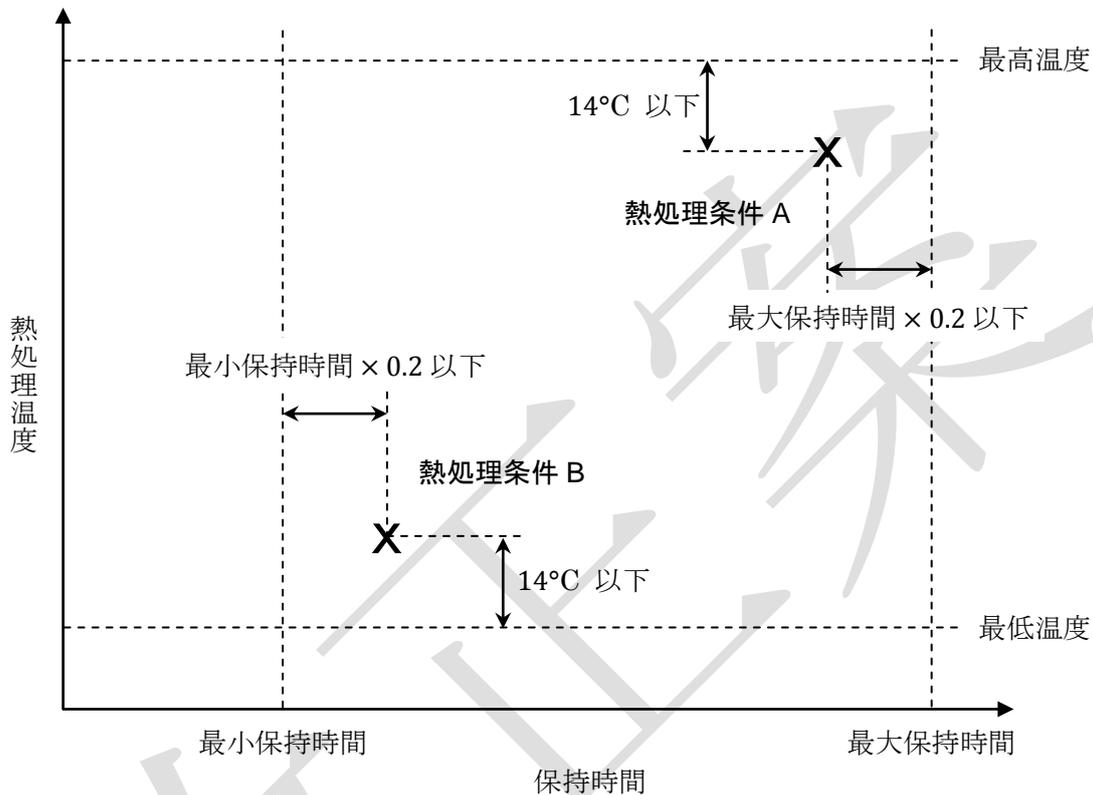


図 10.1.1 クロムモリブデン鋼の試験片に対する熱処理条件

## 10.2 溶接された容器の衝撃試験

### 10.2.1 衝撃試験

衝撃試験は、次の a)～d) による。

- 溶接で製作される容器に対しては、この項の要求事項により、溶接施工方法確認試験用試験板及び容器製作用試験板の溶接部と熱影響部の靱性を決定する。
- 試験板には、冷却速度と熱処理温度の総時間を含め、実際の製作で使用されるものと本質的に同じような熱処理を行う。熱処理の全時間は、製品における実際の熱処理全時間の 80% 以上とし、単一の熱サイクルで行ってもよい。
- 溶接部と熱影響部の試験温度は、母材の試験温度より高くてはいけない。
- 衝撃値は、母材に対して要求される値以上とする(表 5.2.2 を参照)。

### 10.2.2 試験片の採取位置と方向

溶接施工方法と製作試験における全ての溶接衝撃試験片は、次の a)、b) の要求事項に従う。

- 3 個の試験片を 1 組とし、溶接金属の衝撃試験片の 1 組は、溶接金属にノッチが位置するよ

うに溶接部を横切って採取する。各試験片は、ノッチが材料の表面に対して垂直で、試験片の一方の面が表面から 1.6 mm 以内となる位置で採取する。板厚が 38 mm を超える材料で試験を行う場合には、溶接部から二組の試験片を採取する。一組は材料の一方の表面から 1.6 mm 以内で、もう一組は、反対側の材料表面と板厚中心の真中付近で採取する。

- b) 3 個の試験片を 1 組とし、熱影響部の衝撃試験片の一組は、エッチングをした後、熱影響部にノッチが位置するように溶接部を横切って採取する。ノッチは、破壊のときに熱影響部の材料ができるだけ含まれるように、材料の表面にほぼ垂直となるように付ける。

### 10.2.3 溶接施工方法確認試験のための衝撃試験

溶接施工方法確認試験のために、全ての溶接施工方法について、溶接部及び熱影響部において次の a), b) により衝撃試験を行う。

- a) **衝撃試験での要求区分** JIS B 8285 を参照する。
- b) **確認される母材の厚さ** 確認される母材の厚さの区分及び試験材の厚さは JIS B 8285 による。ただし、A1 変態点温度を超える温度で溶接後熱処理される試験材に対しては、そのときの試験材の厚みを最大認定厚さとする。

### 10.2.4 製作用試験板の衝撃試験

各容器で使用される各々の溶接施工方法に対して、10.2.2 に従って、溶接部及び熱影響部の衝撃試験を行う。製作用試験板の母材は、次の a) ~ c) に従って、分類 A, B, C 又は D の溶接継手に対して容器製作で使用される材料の同一ヒート材から採取する。

- a) 製作用試験板は、実用的には製作溶接継手の端部に延長して溶接する。
- b) 又は、製作溶接と並行し、製作を開始する直前に製作用試験板の溶接を行う。ただし、次の 1) ~ 3) を満足しなければならない。
- 1) 継手製作時に使用する溶接材料と溶接施工方法を用いる。
  - 2) 溶接装置は、実際の製作時と同じ型の装置を用いる。
  - 3) 試験板溶接の位置は、製作溶接のすぐ隣とする。
- c) 次の 1) ~ 3) の要求事項を満足しなければならない。
- 1) 自動又は半自動溶接をする場合には、容器の溶接で使用される各々の姿勢で製作用試験板を作製する。
  - 2) 水平下向き姿勢のみで手溶接をする場合には、製作用試験板は水平下向き姿勢で作製する。他の姿勢での溶接施工方法を確認するためには、溶接層の大部分が縦向き上進姿勢で盛られた試験板を使用する。縦向き上進姿勢で溶接する製作用試験板は、全ての姿勢における手溶接を認定することになる。
  - 3) 製作用試験板の厚さが JIS B 8285 の要求事項を満足する場合にのみ、衝撃試験は有効となる。ただし、厚さが 16 mm より薄い場合には、試験材料の厚さを最小認定厚さとする。

### 10.2.5 再試験

製作用試験板が衝撃値要求を満足しなかった場合には、その試験板で代表される溶接線は受け入れられない。なお、5 に従った再熱処理と再試験を行う。

## 10.3 耐圧試験

### 10.3.1 適用範囲

圧力容器は完成後、耐圧試験及びこれに引き続いて行う漏洩試験を受ける。このとき容器の各部位の圧力は **10.3.2** の規定範囲内に収めなければならない。真空用に設計された容器への、外圧による追加耐圧試験は要求しない。多層容器、非鉄ライニング付き容器及び自緊容器の耐圧試験は、次の **a)～c)** による。

- a) 多層容器** **7.8, 7.9** で規定する多層容器、線巻き容器の耐圧試験の耐圧試験及び漏洩試験への追加要求を参照する。
- b) 非鉄ライニング付き容器** 非鉄のライニング付き容器は、ライニング施工前に耐圧試験及び漏洩試験を行う。
- c) 自緊容器** 自緊容器は、**10.3.5** を満足する場合には耐圧試験を行わなくてもよい。

**10.3.2 耐圧試験圧力**

耐圧試験圧力は、次の **a), b)** による。

- a) 耐圧試験圧力** 耐圧試験圧力は、次の算式によって求める。

$$P_t = 1.25 P \left( \frac{S_{yt}}{S_{yd}} \right) \dots\dots\dots(10.3.1)$$

ここで、

- $P$  : 設計圧力(MPa)
- $P_t$  : 耐圧試験圧力(MPa)
- $S_{yd}$  : 設計温度における降伏強さ(MPa)
- $S_{yt}$  : 耐圧試験温度における降伏強さ(MPa)
- $S_{yt}/S_{yd}$  は、各材料間で比べて、最も小さい値を用いる。

- b) 圧力の制限** **4)** の規定を除き、耐圧試験圧力は **1)～3)** の制限値を越えない。**6.2.2 a)** で設定した設計圧力と耐圧試験圧力の比が **1.25** を超える場合、耐圧試験により全断面降伏や過大な変形を生じる可能性があるので注意を払わなければならない。設計者は非円形胴及び閉止板、その他の耐圧部分に対して耐圧試験を実施することによって、その健全性が損なわれないように注意を払わなければならない。

**1) 単肉胴**

開放端円筒胴( $Y \leq 2.85$ )

$$P_t = 3.732K_{ut} S_y (Y^{0.268} - 1) \dots\dots\dots(10.3.2)$$

開放端円筒胴( $Y > 2.85$ )及び閉止端円筒胴

$$P_t = 1.155K_{ut} S_y \ln(Y) \dots\dots\dots(10.3.3)$$

球形胴

$$P_t = 2K_{ut} S_y \ln(Y) \dots\dots\dots(10.3.4)$$

ここで、

- $S_y$  : 試験温度における降伏強さ(MPa)
- $S_u$  : 試験温度における引張強さ(MPa)
- $Y$  : 内外径比 ( $D_o/D_i$ )

$D_o$  : 外径(mm)

$D_i$  : 内径(mm)

$K_{ut}$  : 耐圧試験の上限圧力に関する係数

$$S_y/S_u \leq 0.7 \text{ のとき, } K_{ut} = 0.95$$

$$0.7 < S_y/S_u \leq 0.9 \text{ のとき, } K_{ut} = 1.244 - 0.42(S_y/S_u)$$

$$S_y/S_u > 0.9 \text{ のとき, } K_{ut} = 0.866$$

**2) 多層胴**

開放端円筒胴( $Y \leq 2.85$ )

$$P_t = \sum_{j=1}^n 3.732 K_{utj} S_{yj} (Y_j^{0.268} - 1) \dots\dots\dots(10.3.5)$$

開放端円筒胴( $Y > 2.85$ )及び閉止端円筒胴

$$P_t = \sum_{j=1}^n 1.155 K_{utj} S_{yj} \ln(Y_j) \dots\dots\dots(10.3.6)$$

球形胴

$$P_t = \sum_{j=1}^n 2 K_{utj} S_{yj} \ln(Y_j) \dots\dots\dots(10.3.7)$$

ここで,

$S_{yj}$  : 試験温度における各層の降伏強さ(MPa)

$S_{uj}$  : 試験温度における各層の引張強さ(MPa)

$Y_j$  : 各層の内外径比

$K_{utj}$  : 各層の耐圧試験の上限圧力に関する係数

**3) 非円形胴, 閉止板及びその他の耐圧部分** 弾性解析又は弾塑性解析により, 耐圧試験の上限圧力を検証しなければならない。

**3.1) 弾性解析の場合**

$$P_m \leq K_{ut} S_y$$

$$P_m \leq 0.67 S_y \text{ のとき, } P_m + P_b \leq 1.5 K_{ut} S_y$$

$$0.67 S_y < P_m \leq K_{ut} S_y \text{ のとき, } P_m + P_b \leq (1.5 K_{ut} + 1) S_y - 1.5 P_m$$

**3.2) 弾塑性解析の場合** 弾塑性解析は 6.2.3 に従って実施する。

**4) 規格の制限を越える圧力** 耐圧試験圧力が 1)~3) の値を超える場合は, 設計者はその適合性や健全性を評価し, 製作者設計報告書にその結果を含めなければならない。

**10.3.3 試験媒体**

使用する流体は試験温度, 圧力において液体であり, 腐食性があるてはならない。また, 製作者は圧力による流体粘度の上昇についても考慮しなければならない。脆性破壊を防ぐために, 耐圧試験は材料の衝撃試験温度より 17°C以上高い温度で行わなければならない。ただし, 試験媒体の沸点未満とする。容器と試験媒体の温度差が 5.6°C以内になるまで加圧してはならない。

**注記** 耐圧試験時の容器の内容積を減少させるために, 容器に入れ子を入れてもよい。試験場

所、流体特性、試験時の圧力エネルギーに従い、安全に注意する。

#### 10.3.4 試験要領

試験要領は、次の a)、b)による。

- a) **耐圧試験** 耐圧試験圧力の 20%以内の増分ずつ昇圧する。その都度、ポンプの寄与なしで圧力を維持、安定させる。最低 5 分間ポンプの寄与なく試験圧力が維持され、圧力を 0 に除荷した時に耐圧試験によって圧力容器に局所的な膨らみ、伸びなどの異常が生じていないことが確認された場合、試験は合格とする。5%を越える圧力降下が生じた場合は、安全なレベルまで圧力を下げ、続けて漏洩検査を b)に示す部位に対して実施する。検査は安全なレベルまで圧力を下げた直後に行う。漏洩箇所の判定、修正後に、容器はこの要求事項に従って再試験を受ける。
- b) **漏洩試験** 耐圧試験で最低 5 分間、ポンプの寄与なく試験圧力が維持された後、設計圧力まで降圧し、全ての継手、接続部、鏡板のすみの丸み部、穴の周辺及び板厚が変化する部分など高応力が作用する領域に対して漏洩検査を行う。容器自体からの漏洩が無い場合、試験は合格とする。

**注記** 漏洩があっても、それが容器自体とは別の付着物やフィッティングからの場合は、試験は合格とする。

#### 10.3.5 自緊容器への除外規定

次の a)～d)の全てに合致するならば、自緊容器は耐圧試験を実施しなくてもよい。

- a) 最終組立状態時に自緊された容器
- b) 自緊後に、いかなるアクセスポート及びノズルを切断したり取付けたりしていない。
- c) 鏡及び閉止蓋、シールキャリアー、その他のシール構成材などの完成容器に必要なでないものが、自緊中のシール構成材として用いられる。
- d) 自緊圧力が 10.3.2 a)の要求値以上、10.3.2 b)の要求値以下の場合

#### 10.3.6 圧力計とトランスデューサー

圧力計とトランスデューサーは、次の a)～c)による。

- a) **圧力計又はトランスデューサーの種類と数** 少なくとも 2 個の圧力計又はトランスデューサーを用いる。圧力を制御する操作者が圧力計又はトランスデューサーの表示値を容易に見られるようにする。
- b) **圧力計とトランスデューサーの圧力範囲** 試験に使用するダイヤル指示型圧力計の最大目盛りは、試験圧力の 1.5 倍以上、4 倍以下とする。試験に使用するトランスデューサーの最大圧力は、試験圧力の 1.5 倍以上、4 倍以下とする。
- c) **圧力計とトランスデューサーの校正** 全ての圧力計及びトランスデューサーは、重錘式圧力基準器又は標準ゲージに対して少なくとも 6 ヶ月ごと、及び精度に疑問が生じた場合に校正する。

## 11 表示

圧力容器には適切な箇所に、断熱措置を施した場合も見やすいようにして、次の事項を表示した銘板を取り付けなければならない。

- a) 製作者名
- b) 圧力容器名称又は機器番号
- c) 規格
- d) 設計圧力(MPa) 二つ以上の室のあるものは、それぞれの室名とともに明示する。
- e) 設計温度(°C) 二つ以上の室があるものは、それぞれの室名とともに明示する。
- f) 最低設計金属温度(°C) 二つ以上の室があるものは、それぞれの室名とともに明示する。
- g) 内容積(m<sup>3</sup>) 二つ以上の室があるものは、それぞれの室名とともに明示する。
- h) 耐圧試験圧力(MPa) 二つ以上の室があるものは、それぞれの室名とともに明示する。
- i) 放射線検査の有無
- j) 溶接後熱処理施工の有無
- k) 完成質量(Kg)
- l) 製作年月日 製造番号に含まれる場合には、省略してもよい。
- m) 製作番号又は製作記号

## 附属書 A(規定) 品質マネジメントシステム

### 序文

この附属書は、製作者の品質マネジメントシステムについて規定する。

### 1 一般要求

製作者は、材料、設計、製作、試験、及び検査を含む全ての規格要求事項を満足するために、品質マネジメントシステムを確立し、文章化し、実施し、維持しなければならない。規格要求事項を適切に認識した上、次の事項を含めてもよい。

- ・圧力容器の使用者の品質マネジメント要求事項(本体の 1.2.1 b) 14)を参照)
- ・規格の最小要求事項を超えるような製作者の要求事項
- ・規格に関係のない作業の品質管理事項
- ・製作者の工程に関連した工業所有権類についての情報

### 2 品質マネジメントシステムに含まれるべき要素の概要

#### 2.1 権限と責任

品質マネジメントシステムを担当する者の責任と権限を明確に規定しなければならない。品質管理機能を果たす者は、品質管理上の問題点を識別し、解決方法を立案、推奨し、かつ、解決を図るための十分かつ明確な責任、権限及び組織上の独立性を有していなければならない。

#### 2.2 組織

経営陣と技術、調達、製作、現地での建造、検査及び品質管理の各部門との関係を示す組織図は、現実の組織を反映しなければならない。

#### 2.3 図面、設計計算書及び仕様書の管理

製作者の品質マネジメントシステムには、規格で要求される図面、設計計算書、仕様書及び指示書などの最新の適用版がその承認済の変更も含めて正しく使用されていることを確認するための要領を規定しなければならない。

#### 2.4 材料管理

受領した材料が規格の要求事項を満足していることを材料証明書、試験成績書などの文書によって確認できる受入れ管理システムを規定しなければならない。

#### 2.5 製作工程管理

試験、検査工程を含む製作工程を記述した製作手順指示書を作成、承認及び管理システムを規定しなければならない。

#### 2.6 不適合の是正処置

不適合の是正処置の手順を規定しなければならない。不適合とは、この規格の該当要求に適合していない状態をいう。不適合は、完成部品が規格要求を満足したものと見なされる以前に、何らかの方法により是正されるか、除去されなければならない。

#### 2.7 溶接管理

溶接が規格要求事項に適合してなされていることを検証できる方法を規定しなければならない。

## 2.8 非破壊試験

規格要求事項を満足するために適用する非破壊試験の要領を規定しなければならない。

## 2.9 熱処理

規格で要求される熱処理が正しく実施されていることを検証するための方法を規定しなければならない。その方法として、熱処理時間－温度記録の確認、又はその他の適切な方法を採用してもよい。

## 2.10 計測器及び試験機の校正

規格要求事項を満足させるために使用する試験装置、測定器、検査装置を校正するための要領を規定しなければならない。

## 2.11 製作者製作記録の保管

規格で要求される製作者製作記録を保管するための要領を規定しなければならない。製作者製作記録には、少なくとも次に掲げる項目を含める。

- ・ 容器に使用された材料の材料証明書(含 非破壊試験記録, 寸法記録)
- ・ 機械試験記録
- ・ 鏡板, 胴板など部材の寸法測定記録
- ・ 溶接要領書
- ・ 溶接施工方法確認試験記録
- ・ 溶接士リストと認定記録
- ・ 開先合わせ記録
- ・ 溶接記録
- ・ 溶接補修記録
- ・ 熱処理記録
- ・ 線巻き手順書
- ・ 非破壊試験要領書
- ・ 非破壊試験検査員リストと認定記録
- ・ 非破壊試験記録
- ・ 不適合記録
- ・ 耐圧試験記録

## 3 完成図書の提出及び保管

製作者は圧力容器の完成後次の a)～c) の完成図書を、圧力容器の使用者に提出するとともに保管しなければならない。

- a) **使用者設計仕様書**(本体の 1.2.1 b) を参照)
- b) **製作者設計報告書**(本体の 1.2.1 c) を参照)
- c) **製作者製作記録**(本体の 1.2.1 d) を参照)

## 附属書 B(規定) 用語及び記号の定義

### 序文

この附属書は、この規格に使用する用語及び記号の定義で、JIS B 0190 にない事項を規定する。

### 1 用語の定義

- a) **きず** 非破壊試験の結果から判断される不完全部又は不連続部であって、合格になるきずと不合格になるきずがある。
- b) **亀裂又は割れ** 先端の曲率半径が鋭く、深さと長さで特徴付けられるきずである。割れは、溶接割れのように、材料や溶接部の局所的な破断によって生ずる隙間又は不完全部である。
- c) **欠陥** 集計された大きさ、形状、方向性、位置又は特性が、規定された合格基準を満足しない一つ以上のきずを指し、不合格とみなされる。
- d) **指示模様** 非破壊検査において、装置上に出現した画像、数値又は試験体上に出現された模様で、評価対象と疑似指示のような評価対象外に判別される。評価対象は判定され、合格か不合格が決定される。磁粉探傷試験の指示模様は、磁粉模様という。
- e) **円形状指示模様** 最大長さが幅の3倍以下の指示模様を円形状指示模様と定義する。この指示模様は、円形、だ円形、円すい形又は不規則な形状をしており、尾がある場合もある。指示模様の寸法を評価する場合は、尾も含めなければならない。この指示模様は、ポロシティー、スラグ巻込み、タングステン巻込みなど、種々の原因から生じる。
- f) **線状指示模様** 最大長さが幅の3倍を超える指示模様を線状指示模様と定義する。
- g) **内外径比( $D_o/D_i$ )**  $D_i$  は円筒胴の内径(多層容器では、内筒の内径)、 $D_o$  は円筒胴の外径(多層容器では、最外層の外径)である。
- h) **最低設計金属温度(MDMT)** 一次応力の合計が40 MPaを超える容器各部位の最低温度の最も低い温度で、環境条件や突発的な運転変化を含む運転時における最低運転温度を考慮して決定される。
- i) **自緊** 厚肉容器の胴の局所に塑性変形を生じさせる圧力を与え、内面に圧縮の残留応力を生じさせる方法である。
- j) **設計疲労曲線** 最適疲労曲線を基準に、応力振幅に対し2、繰返し数に対し20(高強度ボルト材にあつては、応力振幅に対して1.5、繰返し回数に対して5.7)の安全率を適用して定めたS-N曲線。なお、最適疲労曲線は、ひずみ制御又は荷重制御疲労試験の結果に最も適合するように最小二乗法などによって定めたS-N曲線で、縦軸はひずみ振幅に縦弾性係数を乗じた見掛けの応力振幅を示し、横軸は破断までの繰返し数を示す。
- k) **並んだ指示模様** 4個以上の連なった模様が、最も外側の2個の指示模様の中心を通り、溶接線に平行に引いた線に接する場合は、並んだ指示模様とする。
- l) **破裂前漏洩(LBB)** 亀裂が進展していく場合において、不安定破壊を生じる前に亀裂が耐圧壁を貫通し、内部流体が漏洩する。
- m) **線巻き容器** 単層又は多層の内筒の外面を10層以上の長方形断面のワイヤを巻き上げることによって製作され、端部力はフレームによって支えられ、内筒及び内筒に巻かれた線材に

よって受け持たない容器である。フレームは強度部材である。

## 2 記号の定義

容器又は容器部品の内径は、各項で特に規定されない限り、腐れ代考慮後の寸法である。

- $A$  : 層間圧力係数(mm<sup>2</sup>/N) (6.8.4)  
 : 外圧チャート横軸のひずみ (附属書D 4.2)  
 : 穴の補強に必要な最小断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書E 4, 附属書E 5)
- $A_B$  : 容器軸に沿っためねじ部材の横断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書G 5)
- $A_b$  : 実際に使用されるクランプラグ毎のボルトの合計断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_C$  : 容器軸に沿ったおねじ部材の横断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書G 5)
- $A_c$  : クランプの合計断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{c1}, A_{c2}, A_{c3}$  : クランプの部分断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{CS}$  : 長手方向に垂直な断面における容器部の断面積(mm<sup>2</sup>) (6.5.3)
- $A_g$  : 隙間面積(mm<sup>2</sup>) (図7.8.5)
- $A_m$  : クランプラグ毎のボルトの所要総有効断面積で、 $A_{m1}$ と $A_{m2}$ のうち大きい方の値(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{m1}$  : 運転条件でのクランプラグ毎のボルトの所要総有効断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{m2}$  : 締付条件でのクランプラグ毎のボルトの所要総有効断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_o$  : ハブリップの外径(mm) (附属書H 3)
- $A_p$  : 亀裂面に作用する容器の内圧力(MPa) (附属書C 4.1)
- $A_{or}$  : クランプリップとハブ肩部との接触面の外径(mm) (附属書H 3)
- $A_0 \sim A_5$  : 亀裂面に対して垂直方向に作用する応力分布の多項式近似の係数 (附属書C 4.1, 4.3, 4.4)
- $A_0' \sim A_5'$  : 亀裂面に対して垂直方向に作用する応力分布の多項式近似の係数 (附属書C 4.1)
- $A_1$  : 応力-ひずみ曲線の弾性域における係数(MPa) (附属書D 2)
- $A_2$  : 応力-ひずみ曲線の塑性域における係数(MPa) (附属書D 2)
- $A_3$  : ハブの長手方向せん断断面積で、 $A_{3a}$ と $A_{3b}$ の小さい方の値(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{3a}$  : クランプとハブとの接触面におけるハブの長手方向せん断断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{3b}$  : 45°円すい面におけるハブの長手方向せん断断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_5$  : 半径一周方向面における最小クランプ断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{5b}$  : 半径一周方向面におけるクランプボルト穴の総断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{5i}$  : 半径一周方向面における個々のボルト穴の断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_6$  : 半径-長手方向面の最小クランプ断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{6b}$  : 半径-長手方向面におけるクランプボルト穴の総断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{6i}$  : 半径-長手方向面における個々のボルト穴の断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_7$  : クランプリップの長手方向せん断断面積で、 $A_{7a}$ と $A_{7b}$ の小さい方の値(mm<sup>2</sup>) (附

### 属書H 3)

- $A_{7a}$  : 周一長手方向面における直せん断面のクランプリップの長手方向せん断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $A_{7b}$  : 45°円すい面におけるクランプリップの長手方向せん断面積(mm<sup>2</sup>) (附属書H 3)
- $a$  : 亀裂深さ(m) (附属書C 3, 附属書C 4, 6.13.3)  
: 表面きずのきず高さ又は内部きずではきず高さの1/2(mm) (9.3.6)
- $a_e$  : 内部きずの許容きず高さの1/2 (mm) (9.3.6)
- $a_s$  : 表面きずの許容きず高さ(mm) (9.3.6)
- $B$  : 外圧チャート縦軸の応力(MPa) (附属書D 4.2)  
: ハブの内径(mm) (附属書H 3)
- $B_c$  : 軸中心からボルト中心までの距離(mm) (附属書H 3)
- $b$  : 層間の隙間長さ(mm) (7.8.3, 図7.8.5)  
: ガasket座の有効幅(mm) (附属書H 3)
- $C$  : 設計温度における疲労亀裂進展速度定数[mm(MPa√m)<sup>-m</sup>/cycle] (6.4.6, 附属書C 5)  
: 一体型平鏡板の形状に基づく係数 (附属書G 2)  
: 有効クランプ-ハブ接触円の直径(mm) (附属書H 3)
- $C_o$  : 室温における疲労亀裂進展速度定数[mm(MPa√m)<sup>-m</sup>/cycle] (6.4.6, 表6.4.1)
- $C_{depth}$  : 補修後のくぼみ深さ(mm) (9.2.3)
- $C_g$  : 有効クランプ間隙(mm) (附属書H 3)
- $C_i$  : クランプの支圧部内径(mm) (附属書H 3)
- $C_{ir}$  : クランプリップとハブ肩部との接触面の内径(mm) (附属書H 3)
- $C_n$  : クランプネックの内径(mm) (附属書H 3)
- $C_T$  : ねじ部のたわみ係数(1/mm) (附属書G 5)
- $C_t$  : 有効クランプ厚さ(mm) (附属書H 3)
- $C_w$  : クランプ幅(mm) (附属書H 3)
- $C_6$  : 周方向曲げ応力モーメントのアーム長さ(mm) (附属書H 3)
- $C_M$  : ふた板と容器の相乗たわみ係数(1/mm) (附属書G 5)
- $C_{OD}$  : 補修後のくぼみ径(mm) (9.2.3)
- $CP$  : 崩壊荷重(MPa) (6.11.6)
- $CTOD$  : 亀裂先端開口変位(m) (5.2.9, 附属書C 6)
- $CVN$  : シャルピーVノッチ衝撃値(J) (5.2.9)  
: 上部棚領域におけるシャルピーVノッチ衝撃値(J) (附属書C 6)
- $D$  : 自重(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)  
: 任意の半径方向位置における円筒胴の直径(mm) (6.5.3, 6.8.3, 附属書J 2)
- $D_C$  : コーナー部の直径(mm) (附属書G 図G.1)
- $D_{\varepsilon,k}$  :  $k$ 番目の荷重ステップで発生する局部ひずみ損傷 (6.2.3)
- $D_\varepsilon$  : 累積損傷 (6.2.3)

- $D_{\text{form}}$  : 加工による損傷 (6.2.3)  
 $D_{\text{et}}$  : 合計累積損傷 (6.2.3)  
 $D_H$  : 副穴の内径(容器の胴の穴の内径)(mm) (附属書F 2, 図6.10.4)  
 $D_I$  : 円筒の内径(mm) (6.5, 6.8.3, 6.8.4, 6.9.4, 附属書J 2)  
           : 主穴の内径(容器の胴の内径)(mm) (附属書F 2)  
 $D_i$  : 容器胴の内径(mm) (附属書E 3)  
 $D_{if}$  : 層間直径(mm) (6.8.3, 6.9.4)  
 $D_n$  : 第  $n$  層の外径(mm) (6.8.4)  
 $D_O$  : 円筒の外径(mm) (6.5, 附属書G 4, 附属書J 2, 6.9.4)  
           : 最外層の外径(mm) (6.8.3, 6.9.4)  
           : 円筒形状の場合は外形, 長方形ブロックの場合は短い辺の幅(mm) (附属書F 2)  
 $D_{op}$  : 一体型平鏡板の穴の径(mm) (附属書G 図G.1)  
 $D_p$  : 自緊圧力開放前の弾塑性境界直径(mm) (6.5.3)  
 $D_{pp}$  : ねじ部のピッチ径(mm) (附属書G 4)  
 $D_w$  : 線巻き上げ部分の外径(mm) ((6.9.4)  
 $D_Z$  :  $\sigma_{tRA} = \sigma_{rRA}$ となる直径(mm) (6.5.3, 6.5.5)  
 $D_1 \sim D_4$  : 真応力-真ひずみ曲線の接線係数で使用する材料特性値 (附属書D 4.1)  
 $d$  : 補強が必要な穴の内径(mm) (附属書E 4)  
 $d_S$  : 植込みボルトの谷径(mm) (6.6.3)  
 $d, d_1 \sim d_4$  : 表面きずのきず高さ又は内部きずではきず高さの1/2(mm) (図9.3.2~図9.3.6)  
 $da/dN$  : 亀裂最深点の疲労亀裂進展速度(mm/cycle) (6.4.6, 附属書C 5)  
 $dl/dN$  : 亀裂表面の疲労亀裂進展速度(mm/cycle) (6.4.6)  
 $E$  : 設計温度における縦弾性係数(MPa) (6.2.2, 6.4.6)  
           : 地震荷重(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)  
           : 縦弾性係数(MPa) (6.3.5, 6.8.3, 6.5, 7.8.3, 附属書C 6)  
           : 温度サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における縦弾性係数(MPa) (附属書J 1)  
 $E_a$  : 運転温度における縦弾性係数(MPa) (6.3.5)  
 $El$  : 最小規定伸び(%) (6.2.3, 表6.2.4)  
 $E_I$  : 最内層の縦弾性係数(MPa) (6.8.3)  
 $E_n$  : 第  $n$  層の縦弾性係数(MPa) (6.8.3)  
 $E_O$  : 最外層の縦弾性係数(MPa) (6.8.3)  
           : 室温における縦弾性係数(MPa) (6.4.6)  
 $E_t$  : 真応力-真ひずみ曲線の接線係数(MPa) (附属書D 4.1)  
 $E_y$  : 当該温度における縦弾性係数(MPa) (附属書D 2, 3, 4)  
 $e$  : 2.718(自然対数の底) (附属書D 2)  
 $e_b$  : ボルトからクランプ中心までの半径方向距離(mm) (附属書H 3)

- $e_m$  : 耐圧試験時に実測する周長伸び(mm) (6. 8. 3, 6. 8. 5, 7. 8. 3)  
 $e_{th}$  : 単胴と仮定した場合の耐圧試験圧力での理論周長伸び(mm) (6. 8. 3, 6. 8. 5, 7. 8. 3)  
 $F$  : ピーク応力(MPa) (附属書J 1)  
: 各隙間の評価値(mm) (7. 8. 3)  
: 環状亀裂の補正係数 (附属書C 4. 3)  
: 軸の傾き角の補強面積減少係数 (附属書E 図E. 1)  
 $F_b$  :  $D_z \leq D \leq D_p$ におけるバウシinger効果の補正係数 (6. 5. 3, 6. 5. 5)  
 $F_c$  : 許容層間ギャップでの円周方向の伸び係数 (6. 8. 3)  
 $F_l$  : 自緊時の軸方向荷重(N) (6. 5. 3, 6. 5. 5)  
 $F_n$  : 最終ねじ山にかかる荷重(N) (附属書G 4)  
 $F_T$  : 全ねじ山の総荷重(N) (附属書G 4)  
: 各隙間の評価値合計の許容値(mm) (7. 8. 3)  
 $F_1, F_2, F_i$  : 1山目, 2山目,  $i$ 山目のねじ山にかかる荷重(N) (附属書G 4)  
 $F_1, F_2, F_3, F_4$  : 環状亀裂の応力拡大係数に対する補正係数 (附属書C 4. 3)  
 $f$  : ハブ応力修正係数 (附属書H 3)  
 $f(R_K)$  : 応力拡大係数比が疲労亀裂進展速度に及ぼす影響関数 (6. 4. 6, 附属書C 5)  
 $G$  : 下限界応力拡大係数範囲を決める材料定数(MPa $\sqrt{m}$ ) (6. 4. 6, 表6. 4. 1)  
: ガasket反力円の直径(mm) (附属書H 3)  
 $\bar{g}$  : ハブ内径 $B$ からハブ肩部リングの中心までの半径方向距離(mm) (附属書H 3)  
 $g_0$  : ハブ先端の厚さ(mm) (図6. 8. 5)  
: 小径でのハブの厚さ(mm) (附属書H 3)  
 $g_1$  : ネックでのハブの厚さ(mm) (附属書H 3)  
 $g_2$  : ハブ肩部の高さ(mm) (附属書H 3)  
 $G_0 \sim G_5$  : 表面亀裂の自由表面補正係数 (附属書C 4. 1)  
 $H$  : 下限界応力拡大係数範囲を決める材料定数 (6. 4. 6, 表6. 4. 1)  
: 真応力-真ひずみ曲線の回帰曲線における係数 (附属書D 2)  
: 運転条件又は締付条件に必要な長手方向荷重(N) (附属書H 3)  
 $HAC$  : 水素誘起割れ (6. 13. 3)  
 $H_D$  : 内圧によってハブ内径面に作用する荷重(N) (附属書H 3)  
 $H_e$  : 内圧によって作用する全荷重(N) (附属書H 3)  
 $H_G$  : ガasket荷重(N) (附属書H 3)  
 $H_m$  : ガasket締付要求値(N) (附属書H 3)  
 $H_p$  : 継手接触面圧荷重(N) (附属書H 3)  
 $H_T$  : 長手方向荷重とハブ内径面に作用する荷重との差(N) (附属書H 3)  
 $\bar{h}$  : ハブ面からハブ肩部リング中心までの長手方向距離(mm) (附属書H 3)  
 $h$  : ハブのテーパ長さ(mm) (附属書H 3)  
: 二つの層間の隙間, 半径方向隙間幅(mm) (7. 8. 3, 図7. 8. 5)  
 $h_D$  :  $C$  と  $H_D$  が作用する位置の半径方向距離(mm) (附属書H 3)

- $h_G$  :  $C$  と  $H_G$  が作用する位置の半径方向距離(mm) (附属書H 3)  
 $h_n$  : ハブのネック長さ(mm) (附属書H 3)  
 $h_T$  :  $C$  と  $H_T$  が作用する位置の半径方向距離(mm) (附属書H 3)  
 $h_2$  : ハブ肩部の平均厚さ(mm) (附属書H 3)  
 $h(x, a)$  : 重み関数 (附属書C 4.5)  
 $I$  : 下限界応力拡大係数範囲を決める材料定数(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.6, 表6.4.1)  
 $I_c$  : クランプ中立軸の断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>) (附属書H 3)  
 $I_h$  : ハブ肩部中立軸の断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>) (附属書H 3)  
 $I_5$  : 任意の半径一周方向面におけるクランプ断面二次モーメントの最小値(mm<sup>4</sup>) (附属書H 3)  
 $I_{5b}$  : ボルト穴による任意の半径一周方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最大値(mm<sup>4</sup>) (附属書H 3)  
 $I_6$  : 任意の周-長手方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最小値(mm<sup>4</sup>) (附属書H 3)  
 $I_{6b}$  : 任意の周-長手方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最大値(mm<sup>4</sup>) (附属書H 3)  
 $J_{IC}$  : 限界J積分値(MJ/m<sup>2</sup>) (5.2.9, 附属書C 6)  
 $K$  : コーナー半径  $r_2$  の0.73倍(mm) (附属書E 6.2)  
 $K$  : 真応力-真ひずみ曲線の回帰曲線における係数 (附属書D 2)  
 $K$  : 一次+二次+ピーク相当応力範囲と一次+二次相当応力範囲の比 (附属書J 1)  
 $K_{CSS}$  : 繰返し応力-ひずみ曲線の材料特性値(MPa) (附属書D 3)  
 $K_e$  : 簡易弾塑性解析に用いる係数(6.3.5, 7.8.3, 附属書J 1)  
 $K_f$  : 疲労強度減少係数 (附属書L 3)  
 $K_I$  : 亀裂の応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4, 附属書C 4.1)  
 $K_{IA}$  : 設計圧力による周方向応力に対する亀裂の応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ ) (9.3.6)  
 $K_{IH}$  : 水素誘起割れに対する下限界応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.13.3)  
 $K_{Icorr,n}$  : 領域 $n$ における応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ ) (附属書C 4.3)  
 $K_{I\max}^*$  : 残留応力を除く繰返し応力負荷による応力拡大係数の最大値(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.5, 6.4.6)  
 $K_{I\min}^*$  : 残留応力を除く繰返し応力負荷による応力拡大係数の最小値(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.5, 6.4.6)  
 $K_{Ires}$  : 残留応力による応力拡大係数(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.5, 6.4.6)  
 $K_{IC}$  : 平面ひずみ破壊靱性値(MPa $\sqrt{m}$ ) (5.2.9, 6.4.3, 6.13.3, 9.3.6, 附属書C 6.4.3)  
 $K_N$  : ワイヤ疲労設計回数補正係数 (6.9.11)  
 $K_n$  : 2.6 又は  $(K_s)^{4.3}$  のいずれか大きい方の値 (6.11.7)  
 $K_r$  : 表面粗さ影響係数 (6.3.5, 図6.3.10)  
 $K_r(P)$  : 図6.3.10から求まる実機の表面粗さ係数 (6.11.7)  
 $K_r(T)$  : 図6.3.10から求まる模型の表面粗さ係数 (6.11.7)

- $K_S$  : ワイヤ疲労設計応力補正係数  $K_S = K_{SL} K_{SS}$  (6.9.11)  
 $K_{SL}$  : 負荷されたワイヤの長さに関する設計係数 (6.9.11)  
 $K_{SS}$  : ワイヤの疲労強度の統計的偏差に関する設計係数 (6.9.11)  
 $K_S$  : 1.25 又は  $K_{Sa} K_{Sf} K_{Sc} K_{St} K_{SS}$  のいずれか大きい方の値 (6.11.7)  
 $K_{Sa}$  : 疲労寿命に及ぼす高応力表面部の寸法効果の係数 (6.11.7)  
 $K_{Sc}$  : 温度によって疲労曲線が異なることに対する修正係数 (6.11.7)  
 $K_{Sf}$  : 表面仕上げの影響係数 (6.11.7)  
 $K_{SS}$  : 試験結果の統計的偏差に対する影響係数 (6.11.7)  
 $K_{St}$  : 疲労試験温度の影響係数 (6.11.7)  
 $\Delta K_I$  : 応力拡大係数範囲(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.6)  
 $\Delta K_{th}$  : 下限界応力拡大係数範囲(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.6)  
 $K_t$  : 周方向応力集中係数 (附属書F 2)  
 $K_t(r)$  : 交差穴の応力集中係数 (附属書C 図C.1)  
 $K_{TN}$  : 試験寿命比 (6.11.7)  
 $K_{TS}$  : 試験応力比 (6.11.7)  
 $K_{ut}$  : 耐圧試験の上限圧力に関する係数 (6.2.2, 表6.2.3, 10.3.2)  
 $K_{utj}$  : 多層容器各層の耐圧試験の上限圧力に関する係数 (6.2.2, 表6.2.3, 10.3.2)  
 $K_{uteq}$  : 多層容器に対する耐圧試験の上限圧力に関する等価係数 (表6.2.3)  
 $k$  : 層の番号 (6.8.3)  
 $k_c$  : クリープ温度域の膜応力補正係数 (5.4, 6.2.2, 附属書J 1)  
 $k_{C1}$  : 一次応力の許容限界に対する設計補正係数 (附属書J 1)  
 $L$  : 活荷重(流体による慣性力含む)(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)  
: 最大指示模様長さ(mm) (9.3.6)  
:  $t_n$  の厚さの部分とテーパ部の合計長さ(mm) (附属書E 6.2)  
 $LT$  : 板の場合には、長手方向に垂直な方向 (6.13.3)  
 $L_A$  : 船体の揺動運動による加速度荷重(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)  
 $L_a$  : クランプボルト中心径からクランプラグジョイント体までの距離(mm) (附属書H 3)  
 $L_h$  : クランプラグの高さ(mm) (附属書H 3)  
 $L_T$  : 疲労試験におけるワイヤの長さ(m) (6.9.10)  
 $L_W$  : 継ぎ目無しワイヤの平均長さ(m) (6.9.11)  
 $L_w$  : クランプラグの幅(mm) (附属書H 3)  
 $l$  : 必要テーパの長さ(mm) (図6.8.2, 6.8.3, 図6.10.2)  
: きず長さ(mm) (9.3.6)  
: 亀裂の表面長さ(m) (附属書C 4, 図C.1)  
 $l_c$  : 有効クランプリップ長さ(mm) (附属書H 3)  
: ノズル中心軸の周方向成分の内面側表面に沿ったノズル中心間距離(mm) (附属書E 2)

- $l_l$  : ノズル中心軸の長手方向成分の内面側表面に沿ったノズル中心間距離(mm) (附属書E 2)
- $l_m$  : 有効クランプリップモーメントアーム(mm) (附属書H 3)
- $l, l_1, l_2, l_3$  : きずの長さ(mm) (図9.3.2~図9.3.6)
- $l_s$  : 許容きず長さ(mm) (9.3.6)
- $M$  : 塑性化率 (6.5)
- $M_D$  :  $H_D$  によるモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_F$  : オフセットモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_G$  :  $H_G$  によるモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_H$  : ハブネックに作用するモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_o$  : ハブに対する合計回転モーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_p$  : 圧力モーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_R$  : 半径方向クランプ平衡モーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_T$  :  $H_T$  によるモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_5$  : クランプ長手方向応力による曲げモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $M_6$  : クランプ周方向応力による曲げモーメント(Nmm) (附属書H 3)
- $m$  : 亀裂進展速度指数 (6.4.6, 表6.4.1, 附属書C 5)  
: ガスケット係数 (附属書H 3)
- $m_1$  : 真応力-真ひずみ曲線における材料特性値 (附属書D 2)
- $m_2$  : 真応力-真ひずみ曲線における材料特性値 (6.2.3, 表6.2.4, 附属書D 2)
- $m_3, m_4, m_5$  : 弾塑性解析における材料特性値 (6.2.3, 表6.2.4)
- $N$  : 全層数 (6.8.3)
- $N_D$  : 設計繰返し回数 (6.9.10, 6.11.67)
- $N_f$  : 設計許容繰返し回数 (6.3.5)
- $N_H$  : ハブネックの外径(mm) (附属書H 3)
- $N_i$  :  $i$  応力サイクルの設計許容繰返し回数 (6.3.5)
- $N_{ieq}$  : Ni当量(質量%) (6.13.5)
- $N_p$  : 設計許容繰返し回数 (6.4.4, 6.4.6)
- $N_T$  : 試験の繰返し回数 (6.11.67)
- $N_{Tmin}$  : 最小試験繰返し回数 (6.11.67)
- $n$  : 応力を計算すべき層数 (6.8.3)  
: ねじ山の総数 (附属書G 5)
- $n_{CSS}$  : 繰返し応力-ひずみ曲線の材料特性値 (附属書D 3)
- $n_i$  :  $i$  応力サイクルの数 (6.3.5)
- $P$  : 設計圧力(MPa) (6.8.3, 9.3.6, 10.3.2, 附属書C 4, 附属書H 3, 附属書G, 附属書J 2)
- $PBS$  : 曲げ応力率 (附属書K 2.4)
- $P_A$  : 最大自緊圧力(MPa) (6.5)

- $P_b$  : 一次曲げ応力(MPa) (附属書J 1)  
 $P_D$  : 許容される最大設計圧力(MPa) (6. 2. 2, 附属書J 1)  
 : 設計内圧力と外圧力(MPa) (表6. 2. 2)  
 $P_{Dt}$  : 耐圧試験圧力基準に基づく設計圧力(MPa) (表6. 2. 5)  
 $P_{if}$  : 焼ばめ層の層間圧力(MPa) (6. 8. 3, 6. 8. 4)  
 $P_k$  : 第  $k$  層の外側における層間圧力(MPa) (6. 8. 4)  
 $P_L$  : 一次局部膜応力(MPa) (附属書J 1)  
 $P_m$  : 一次一般膜応力(MPa) (附属書J 1)  
 $P_n$  : 第  $k$  層の外側における層間圧力(MPa) (6. 8. 4)  
 $P_o$  : 運転内圧力と外圧力(MPa) (表6. 2. 2)  
 $P_s$  : 液体又は粉体による静圧(MPa) (表6. 2. 2, 附属書J 表J. 1)  
 $P_T$  : 繰返し試験荷重(MPa) (6. 11. 7)  
 : ねじのピッチ(mm) (附属書G 4)  
 $P_t$  : 耐圧試験圧力(MPa) (表6. 2. 2, 表6. 2. 5, 6. 8. 3, 10. 3. 1)  
 $Q$  : 二次応力(MPa) (附属書J 1)  
 : 塑性域補正を行った亀裂形状パラメータ (附属書C 4. 1)  
 : ハブネックに作用するせん断力(N) (附属書H 3)  
 $Q'$  : 塑性域補正を行わない亀裂形状パラメータ (附属書C 4. 1. 2)  
 $Q_c$  : 層間隙間係数(単胴と仮定したときの理論周長伸びに対する耐圧試験圧力での周長伸びの実測値との比) (6. 8. 3, 6. 8. 5)  
 $q_y$  : 塑性域補正項 (附属書C 4. 1)  
 $R$  : 降伏比 (6. 2. 3, 表6. 2. 4, 附属書D 2)  
 : 内半径(mm) (9. 2. 3)  
 $RA$  : 最小規定絞り(%) (6. 2. 3, 表6. 2. 4)  
 $REL$  : 相対伸び (6. 13. 5)  
 $RRA$  : 相対絞り (6. 13. 5)  
 $RTS$  : 相対引張強さ (6. 13. 5)  
 $RYS$  : 相対降伏強度 (6. 13. 5)  
 $R_c$  : コーナー半径(mm) (附属書G 図G. 1)  
 $R_f$  : 成形後の成形される板の中央面の半径(mm) (7. 6. 1)  
 $R_g$  : 隙間を評価している層の外半径(mm) (7. 8. 3, 図7. 8. 5)  
 $R_l$  : 容器の内半径(mm) (7. 8. 3, 附属書C 図 C. 1)  
 $R_K$  : 応力拡大係数比 (6. 4. 6, 附属書C 5)  
 $R_m$  : 鏡又は胴の厚さ中心部の半径(mm) (6. 7. 3, 附属書J 1)  
 : ノズルの厚さ中心部の半径(mm) (附属書E 6)  
 : 平均半径(mm) (9. 2. 3)  
 $R_o$  : 容器の外半径(mm) (7. 8. 3, 附属書C 図 C. 1)  
 $R_o$  : 成形前の成形される板の中央面の半径(mm) (7. 6. 1)

- $r$  : 管板又は平鏡のすみの丸みの半径(mm) (図6.8.3, 図6.10.1)  
 : クランプとハブ断面のコーナー半径(mm) (附属書H 3)  
 : ノズルの内半径(mm) (附属書E 図E.2)
- $r_c$  : クランプ内側コーナー半径(mm) (附属書H 3)
- $r_h$  : ハブ外側コーナー半径(mm) (附属書H 3)
- $r_m$  : ノズルの平均径(mm) (附属書E 図E.2)
- $r_2$  : ノズルと容器の外表面との接続半径(mm) (附属書E 図E.2)
- $S$  : 平均一次相当応力(MPa) (6.6.3, 附属書J 2)  
 : ミーゼスの相当応力(MPa) (附属書J 1, 附属書J 2)  
 : コーナー部の応力強さ(MPa) (附属書G 2.1)  
 : 1ピッチの荷重を受け持つ断続ねじの分割数 (附属書G 4)  
 : 部材表面から内部きずまでの距離(mm) (9.3.6, 図9.3.2, 図9.3.3, 図9.3.5)  
 : 同一平面上にある並列な複数指示模様の隣接間距離(mm) (9.3.6, 図9.3.3, 9.3.4)
- $S_1 \sim S_4$  : 同一平面上にある並列な複数指示模様の隣接間距離(mm) (図9.3.5)
- $SCL$  : 応力評価ライン(附属書L 1)
- $SCP$  : 応力評価断面(附属書L 1)
- $S_a$  : 平均応力補正, 表面粗さ補正及び縦弾性係数補正を考慮した相当応力振幅 (MPa) (6.3.5)  
 : 許容応力振幅(MPa) (6.3.6)  
 : 室温における許容ボルト応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_{aN}$  : 設計疲労曲線上で繰返し回数 $N$ のとき  $S_a$  値(MPa) (6.11.7)
- $S_{aD}$  : 許容設計応力(MPa) (図6.11.1)
- $S_{az}$  : 設計疲労曲線上の右端における $S_a$ 値(MPa) (6.11.7)
- $S_{ai}$  :  $i$  応力サイクルの相当応力の振幅(MPa) (6.3.5)
- $S_{alt}$  : 相当応力の振幅(MPa) (6.3.5)
- $S_{a,alt}$  : 設計許容繰返し回数に相当する一次+二次+ピーク相当応力範囲(MPa) (7.8.3)
- $S_{ag}$  : 層間の最大隙間がある層の一次+二次+ピーク相当応力範囲(MPa) (7.8.3)
- $S_{altij}$  : 三つの主応力差より求めた応力強さ振幅(MPa) (6.3.5)
- $S_i$  : 断続ねじ荷重(N) (附属書G 4)
- $S_b$  : 設計温度における許容ボルト応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_C$  : クリープ温度域の許容応力(MPa) (5.4)
- $S_{eq}$  : 等価相当応力の振幅(MPa) (6.3.5)
- $S_{eqij}$  : 三つの主応力より求めた等価応力強さ振幅(MPa) (6.3.5)
- $S_{Qmb}$  : 熱応力による二次膜+曲げ相当応力範囲の許容値(MPa) (附属書J 1)
- $S_{Qm}$  : 熱応力による二次膜相当応力範囲の許容値(MPa) (附属書J 1)
- $S_s$  : 積雪荷重(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)
- $S_T$  : ねじのたわみ係数(1/mm) (附属書G 4)
- $S_u$  : 運転サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における引張強さ(MPa)

## (6.3.5)

- ： 設計温度における引張強さ(MPa) (5.4, 6.2.2, 表6.2.5)
- ： 解析温度における引張強さ(MPa) (6.2.3)
- ： 試験温度における引張強さ(MPa) (10.3.2)
- ： 室温における引張強さ(MPa) (附属書J 1)
- $S_{uj}$  : 設計温度における多層容器各層の引張強さ(MPa) (6.2.2)
- ： 試験温度における多層容器各層の引張強さ(MPa) (10.3.2)
- $S_{u20^{\circ}\text{C}}$  : 規定最小引張強さ又は 20 °C における  $S_u$ (MPa) (5.4)
- $S_w(x)$  : 任意の径(x)におけるワイヤの張力(N) (6.9.4)
- $S_w(x_2)$  : 線巻き部の任意の径( $x_2$ )におけるワイヤの張力(N) (6.9.4)
- $S_y$  : 室温における規定最小降伏強さ(MPa) (6.11.6, 9.3.6, 附属書J 1)
- ： 設計温度における降伏強さ(MPa) (5.4, 6.2.2, 表6.2.5, 7.8.3, 附属書J 1)
- ： 解析温度における降伏強さ(MPa) (6.2.3)
- ： 自緊温度における降伏強さの測定値(MPa) (6.5.3)
- ： 試験温度における降伏強さ(MPa) (10.3.1)
- ： 5.2.7 a) の衝撃試験温度における降伏強さ(MPa) (附属書C 6)
- ： 運転サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における降伏強さ(MPa) (附属書J 1)
- $S_{yd}$  : 設計温度における降伏強さ(MPa) (10.3.2)
- $S_{yj}$  : 設計温度における多層容器各層の降伏強さ(MPa) (6.2.2)
- $S_{y20^{\circ}\text{C}}$  : 規定最小降伏点又は0.2%耐力, 又は20°Cにおける  $S_y$ (MPa) (5.4)
- $S_{yt}$  : 試験温度における降伏強さ(MPa) (10.3.2)
- $S_{yact}$  : 室温における実際の平均降伏強さ(MPa) (6.11.6)
- $S_{yms}$  : 実際の降伏強さ(MPa) (6.11.6)
- $S_M$  : ねじ込みふたとねじ加工を有する胴部の相乗たわみ係数(1/mm) (附属書G 4)
- $S_m$  : 設計応力強さ(MPa) (6.3.3)
- $S_{mij}$  :  $S_{altij}$ と関連する平均応力(MPa) (6.3.5)
- $S_{YAC}$  : 室温(ガスケット締付条件)におけるクランプ材料の降伏強さ(MPa) (附属書H 3)
- $S_{YAH}$  : 室温(ガスケット締付条件)におけるハブ材料の降伏強さ(MPa) (附属書H 3)
- $S_{YOC}$  : 設計温度(運転条件)におけるクランプ材料の降伏強さ(MPa) (附属書H 3)
- $S_{YOH}$  : 設計温度(運転条件)におけるハブ材料の降伏強さ(MPa) (附属書H 3)
- $S_1$  : ハブネック外側における長手方向応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_2$  : ハブ内面におけるLámeの最大周方向応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_3$  : ハブ長手方向せん断応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_4$  : ハブネックにおけるハブ半径方向せん断応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_5$  : クランプボディ内径におけるクランプ長手方向応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_6$  : クランプボディ外径におけるクランプ周方向応力(MPa) (附属書H 3)
- $S_7$  : クランプリップにおける最大せん断応力(MPa) (附属書H 3)

- $S_8$  : クランプリップの曲げ応力(MPa) (附属書H 3)  
 $S_9$  : クランプラグ曲げ応力(MPa) (附属書H 3)  
 $S_{10}$  : クランプラグの最大せん断応力(MPa) (附属書H 3)  
 $S_{11}$  : クランプとハブ間の有効支圧応力(MPa) (附属書H 3)  
 $T$  : 材料の熱処理時の厚さ(mm) (5.2.1, 5.2.2, 5.2.5)  
: 鍛造材の熱処理時の最大厚さ(mm) (5.2.2)  
: 温度(°C) (5.4)  
: 自己制御型荷重(熱伸びによる荷重)(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)  
: ハブ肩部の厚さ(mm) (附属書H 3)  
 $TL$  : 板の場合には、板幅に垂直な方向 (6.13.2)  
 $T_c$  : 設計疲労曲線の上限温度(°C) (6.11.7)  
: ハブの外側角部下のクランプリップの厚さ(mm) (附属書H 3)  
 $T_D$  : 設計温度(°C) (6.11.7)  
 $T_h$  : クランプの内側角部下のハブ肩部厚さ(mm) (附属書H 3)  
 $T_t$  : 試験温度(°C) (6.11.7)  
 $t$  : 層成胴の合計厚さ、公称容器厚さ(mm) (6.8.3, 7.6.1, 附属書E 図E.2)  
: 公称厚さ(mm) (7.4, 10.1.2)  
: 部材の厚さ(mm) (9.2.3, 9.3.65, 表9.3.1, 図9.3.2~図9.3.6, 附属書C 4.1, 附属書L 3)  
: ねじ底部における容器暑さ(mm) (附属書C 4.3)  
 $t_b$  : 一体型平鏡板の厚さ(mm) (附属書G 図G.2)  
 $t_c$  : すみ肉溶接ののど厚さ(mm) (図6.10.5)  
: コーナー部の板厚(mm) (附属書G 図G.1)  
 $t_H$  : 継手での鏡の厚さ(mm) (6.8.6 図6.8.2)  
 $t_j$  : 多層容器各層の厚さ(mm) (表6.2.3)  
 $t_L$  : 層成材1枚の厚さ(mm) (6.8.6 図6.8.2)  
 $t_n$  : 層成胴の $n$ 層目の厚さ(mm) (6.8.3)  
: 腐れ代を除くノズルの公称厚さ(mm) (図6.8.7)  
: ノズルの厚さ(mm) (図6.10.4)  
: 公称厚さ(mm) (7.4)  
 $t_p$  : 取付けパイプの厚さ(mm) (附属書E 図E.2)  
 $t_R$  : 補強巻きの層成材の厚さ(mm) (6.8.3)  
 $t_r$  : 穴がない場合の最小厚さ(mm) (附属書E 4.5)  
 $t_{rn}$  : ノズルの設計厚さ(mm) (図6.10.3)  
 $t_S$  : 層成胴の厚さ(mm) (6.8.6 図6.8.2, 図6.8.3)  
 $t_w$  : 胴の厚さ(mm) (附属書G 図G.1)  
 $U$  : 累積使用係数 (6.3.5)  
 $W$  : 風荷重(N) (表6.2.2, 附属書J 表J.1)

- ：適用する運転条件又はガスケット締付条件に必要な設計ボルト荷重(N) (附属書H 3)
- $W_A$  : 組立時の風荷重(N) (表6. 2. 2)
- $W_c$  : 一つのリップに対する合計有効クランプ締付荷重(N) (附属書H 3)
- $W_{m1}$  : 運転条件に必要な最小ボルト荷重(N) (附属書H 3)
- $W_{m2}$  : ガスケット締付条件に必要な最小ボルト荷重(N) (附属書H 3)
- $W_{pt}$  : 耐圧試験時の風荷重(N) (表6. 2. 2, 附属書J 表J. 1)
- $X$  : 一次膜相当応力と降伏強さとの比 (附属書J 1)
- $X_a$  : 式(9. 3. 1)に示す値(mm) (9. 3. 6)
- $X_b$  : クランプボディのボルト穴を除く長手一半径方向面における中立軸から $C_n$ で示されるクランプネックの内径までの基本クランプ寸法(mm) (附属書H 3)
- $X_i$  : ボルト穴部からの半径方向平均距離(mm) (附属書H 3)
- $X_5$  : 中立軸までの修正クランプ寸法(mm) (附属書H 3)
- $X_6$  : 中立軸までの修正クランプ寸法(mm) (附属書H 3)
- $x$  : 任意の点での径(mm) (6. 9. 4)  
: 亀裂位置における表面からの厚さ方向距離(m) (附属書C 4. 1)  
: 交差穴コーナー亀裂における45°方向と直行する座標軸 (附属書C 図C. 2)
- $x_i$  : 内筒厚さ部の任意の位置での径(mm) (6. 9. 4)
- $x_2$  : 線巻き部の任意の位置での径(mm) (6. 9. 4)
- $x_L$  : SCLの局所座標系におけるSCLに沿った端部からの距離(mm) (附属書L 3)
- $Y$  : 胴の内外径比( $D_o/D_i$ ) (6. 2. 2, 6. 5. 3, 6. 8. 3, 9. 3. 6, 附属書G 1, 附属書J 2)  
: 溶接オフセット(mm) (図6. 8. 2)  
: 片面側における厚さの差(mm) (6. 8. 3, 図6. 10. 2)
- $Y_a$  : 内部きずまでの距離と内部きず高さの比 (9. 3. 6)
- $Y_i$  : 焼ばめ方式2層容器における内層の内外径比 (6. 8. 3)
- $Y_j$  : 多層容器各層の内外径比 (6. 2. 2, 10. 3. 2)
- $Y_o$  : 焼ばめ方式2層容器における外層の内外径比 (6. 8. 3)
- $y$  : 交差穴のコーナー亀裂における45°方向の座標軸 (附属書C 図C. 1)
- $Z$  :  $D_o/D$  (9. 3. 6, 附属書J 2)  
: クランプとハブのテーパ部の角度(度) (附属書H 3)
- $\alpha$  : 形状係数 (附属書J 表J. 1)  
: 角度(度) (図9. 3. 1)  
: 傾斜角度(度) (附属書G 図G. 1)
- $\alpha_r$  : 補強金属の設計温度での平均線膨張係数 (mm/mm°C) (附属書E 7)
- $\alpha_v$  : 容器金属の設計温度での平均線膨張係数 (mm/mm°C) (附属書E 7)
- $\gamma_1$  : 応力-ひずみ曲線の微小ひずみ領域の真ひずみ (附属書D 2)
- $\gamma_2$  : 応力-ひずみ曲線のマクロひずみ領域の真ひずみ (附属書D 2)
- $\Delta a$  : 亀裂深さの微小進展量(mm) (附属書C 5)

- $\Delta K_I$  : 応力拡大係数範囲(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.1, 附属書C 5)  
 $\Delta K_{th}$  : 疲労亀裂進展の下限界値(MPa $\sqrt{m}$ ) (6.4.1)  
 $\Delta Q_m$  : 弾性解析での熱応力による二次膜相当応力範囲(MPa) (附属書J 1)  
 $\Delta Q_{mb}$  : 弾性解析での熱応力による二次膜+曲げ相当応力範囲(MPa) (附属書J 1)  
 $\Delta S_p$  : 一次+二次+ピーク相当応力範囲(MPa) (附属書J 1)  
 $\Delta S_n$  : 層間の最大隙間がある層の一次+二次相当応力範囲(MPa) (7.8.3)  
: 一次+二次相当応力範囲(MPa) (附属書J 1)  
 $\Delta s$  : 疲労寿命の平均相対標準偏差 (6.9.11)  
 $\Delta T$  : 21°C から運転温度までの温度差, 又は最低運転温度と最高運転温度との温度差  
のいずれか大きい方の値(°C) (附属書E 7)  
 $\Delta \varepsilon_{peq,k}$  :  $k$ 番目の荷重増加での相当塑性ひずみ範囲 (6.2.3)  
 $\delta$  : 焼ばめ容器で2層の場合の, 焼ばめ前後での内層の外径変化(mm) (6.8.3)  
 $\delta_n$  : 焼ばめ前後での $n$ 層の外径変化(mm) (6.8.3)  
 $\varepsilon_{cf}$  : 加工ひずみ (6.2.3)  
 $\varepsilon_e$  : 弾性解析により求めたときのひずみ (附属書J 1)  
 $\varepsilon_{ep}$  : 弾塑性解析により求めたときのひずみ (附属書J 1)  
 $\varepsilon_{L,k}$  :  $k$ 番目の荷重増加での最大許容相当塑性ひずみ (6.2.3)  
 $\varepsilon_{Lu}$  :  $m^2, m^3, m^4$  の最大値 (6.2.3)  
 $\varepsilon_m$  : 最大自緊圧力  $P_A$  時に, 3点以上の長手軸方向外面位置で計測した周方向最大ひ  
ずみの平均値 (6.5.3)  
 $\varepsilon_p$  : 自緊圧力開放後に, 3点以上の長手軸方向内面位置で計測した周方向残留ひずみ  
の平均値 (6.5.3)  
: 真応力-真ひずみ曲線における材料特性値 (附属書D 2)  
 $\bar{\varepsilon}_p$  : 弾塑性解析によるミーゼスの相当塑性ひずみ(附属書J 1)  
 $\varepsilon_t$  : 真ひずみ (附属書D 2)  
 $\varepsilon_{ta}$  : 全ひずみ振幅 (附属書D 3)  
 $\varepsilon_{tr}$  : 全ひずみ範囲 (附属書D 3)  
 $\varepsilon_{ys}$  : 当該温度における降伏ひずみ (附属書D 2)  
 $\varepsilon_1$  : 応力-ひずみ曲線の微小ひずみ領域の真塑性ひずみ (附属書D 2)  
 $\varepsilon_2$  : 応力-ひずみ曲線のマクロひずみ領域の真塑性ひずみ (附属書D 2)  
 $\mu$  : 摩擦角(度) (附属書H 3)  
 $\nu$  : ポアソン比 (6.2.2, 6.5.3, 6.8.3, 7.8.3, 附属書C 6)  
 $\nu_1$  : 内層材料のポアソン比 (6.8.3)  
 $\nu_0$  : 外層材料のポアソン比 (6.8.3)  
 $\sigma$  : 亀裂面に対して垂直方向に作用する応力(MPa) (附属書C 4.1)  
 $\sigma(x)$  : 亀裂面に対して垂直方向に作用する厚さ方向の応力分布(MPa) (附属書C 4.5)  
 $\bar{\sigma}$  : 弾塑性解析によるミーゼスの相当応力(MPa) (附属書J 1)  
 $\bar{\sigma}^*$  : 弾性解析によるミーゼスの相当応力(MPa) (附属書J 1)

- $\sigma_{AD}$  : 内面( $D = D_I$ )における  $\sigma_{tRA}$  の値(MPa) (6. 5. 3)  
 $\sigma_{CD}$  : 内面( $D = D_I$ )におけるバウシinger効果に対して補正した周方向残留応力 (MPa) (6. 5. 3)  
 $\sigma_a$  : 応力振幅(MPa) (附属書D 3)  
 $\sigma_e$  : ミーゼスの相当応力(MPa) (6. 2. 3)  
 $\sigma_{ek}$  :  $k$  番目の荷重増加でのミーゼスの相当応力(MPa) (6. 2. 3)  
 $\sigma_{ij,b}$  : 曲げ応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij,m}$  : 膜応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij}(x_L)$  : SCL上の評価点の応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij,F}$  : ピーク応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij,F}(x_L)|_{x_L=0}$  :  $x_L = 0$  におけるピーク応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij}(x_L)|_{x_L=0}$  :  $x_L = 0$  における応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij,F}(x_L)|_{x_L=t}$  :  $x_L = t$  におけるピーク応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij}(x_L)|_{x_L=t}$  :  $x_L = t$  における応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij,in}$  : SCL上の内面における応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_{ij,out}$  : SCL上の外面における応力テンソル(MPa) (附属書L 3)  
 $\sigma_l$  : 軸方向応力(MPa) (6. 8. 5, 7. 8. 3, 附属書C 図C. 1, 附属書J 2)  
 $\sigma_l(x)$  : 環状亀裂を含む平面に垂直な応力分布(MPa) (附属書C 4. 3)  
 $\sigma_r$  : 半径  $r$  における半径方向応力成分(MPa) (6. 8. 3, 7. 8. 3, 附属書J 2)  
: 溶接残留応力(MPa) (9. 3. 6)  
: 応力範囲(MPa) (附属書D 3)  
 $\sigma_{rR}$  : バウシinger効果に対して補正した半径方向残留応力(MPa) (6. 5. 3)  
 $\sigma_{rr}$  : 半径  $r$  における、半径方向残留応力(MPa) (6. 8. 3)  
 $\sigma_{rRA}$  :  $D_I \leq D \leq D_P$  における自緊後の第1近似半径方向残留応力(MPa) (6. 5. 3)  
 $\sigma_s$  : 切欠き引張強度強さ(MPa) (附属書K 2. 6)  
 $\sigma_t$  : 半径  $r$  における周方向応力成分(MPa) (6. 8. 3, 7. 8. 3, 附属書J 2)  
: 真応力(MPa) (附属書D 2)  
 $\sigma_{tR}$  : バウシinger効果に対して補正した周方向残留応力(MPa) (6. 5. 3)  
 $\sigma_{tr}$  : 半径  $r$  における、周方向残留応力(MPa) (6. 8. 3)  
 $\sigma_{uts}$  : 当該温度における引張強さ(MPa) (附属書D 2)  
 $\sigma_{uts,t}$  : 当該温度における真破断応力(MPa) (附属書D 2)  
 $\sigma_{ys}$  : 当該温度における降伏強さ(MPa) (附属書D 2)  
 $\sigma_{tRA}$  :  $D_I \leq D \leq D_P$  における自緊後の第1近似周方向残留応力(MPa) (6. 5. 3)  
 $\sigma_\theta$  : 周方向応力(MPa) (附属書C 図C. 1)  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 1, 2, 3方向の主応力(MPa) (6. 2. 3, 附属書J 1)  
 $\sigma_{1,k}, \sigma_{2,k}, \sigma_{3,k}$  :  $k$  番目の荷重増加での1, 2, 3方向の主応力(MPa) (6. 2. 3)  
 $\phi$  : クランプ肩角度(度) (附属書H 3)  
 $\theta$  : 周方向角度(度) (附属書C 図C. 1)

## 附属書 C(規定) 破壊力学計算

### 序文

この附属書は、疲労亀裂進展に対する破壊力学による計算手法を規定する。

### 1 適用範囲

この附属書では、厚肉容器において想定されるさまざまな形状の亀裂の応力拡大係数  $K_I$  の計算方法を与える。

### 2 亀裂位置

図 C.1 に、疲労によって圧力容器のさまざまな位置で亀裂が進展する様子を示す。

#### 2.1 円筒胴内面の軸方向亀裂

図 C.1 の A タイプ亀裂は、円筒の軸方向に進展する。この亀裂に作用する応力は、周方向応力と亀裂面に作用する圧力である。この亀裂は、疲労によってアスペクト比  $a/l$  ( $a$  は亀裂深さ、 $l$  は表面長さ) の半楕円形状で進展する傾向がある。

#### 2.2 円筒胴の交差穴内面の亀裂

図 C.1 の B タイプ亀裂は、容器と配管又は付属品との接合箇所における交差穴内面に生じる亀裂である。この亀裂は、疲労によって交差穴内面の両側から軸方向に進展する傾向があるが、これらの亀裂形状は対称でない場合が多い。開口部の応力計算は孔による応力集中のために複雑になり、亀裂面に作用する圧力を考慮する必要がある。

#### 2.3 ねじ込み部の周方向亀裂

図 C.1 の C タイプ亀裂は、高压容器のねじ込み部のねじ底に生じる亀裂である。この亀裂は、ねじ込み部の長手に沿った不均一な荷重分布とねじ底での応力集中によって、通常は最初に荷重を負担するねじ込み部のねじ底で発生し、周方向平面上を進展する。通常、高压流体はこの亀裂面に作用しない。長手(開口)方向の応力分布は、ねじ底における応力集中により非常に急勾配になる。

#### 2.4 閉端部コーナー内面の亀裂

図 C.1 の D タイプ亀裂は、閉端部コーナー内面の応力集中部から進展する亀裂である。

#### 2.5 円筒胴外面の亀裂

図 C.1 の E タイプ及び F タイプ亀裂は、円筒胴外面において、応力集中、引張残留応力又は環境の影響の組合せによって進展する亀裂である。

### 3 亀裂の方向と形状

容器の高応力部において、平面状の亀裂が進展すると仮定する。この平面は、応力解析によって決定する。亀裂は、通常は引張応力の最大変動範囲の方向に垂直な平面上を進展する。

半楕円形状の初期亀裂のアスペクト比  $a/l$  は、全て  $1/3$  とする。疲労亀裂進展計算では、亀裂進展中のアスペクト比の変化を考慮する。

疲労亀裂進展計算で用いる初期亀裂の方向と形状は、次の **a) ~ g)** のように考える。ただし、溶

接部に発生した亀裂には適用しない。

- a) Aタイプの表面亀裂は、半楕円形状と仮定する。
- b) Bタイプの交差穴内面における表面亀裂は、四半円又は半円形状と仮定する(図C.2を参照)
- c) Cタイプのねじ底における表面亀裂は、環状又は半楕円形状と仮定する。
- d) Aタイプ、Bタイプ及びCタイプの表面亀裂は、図C.1に示す平面上を進展すると仮定する。
- e) Dタイプの表面亀裂は、半楕円形状と仮定する。
- f) Eタイプの外表面亀裂は、半楕円形状と仮定する。
- g) Fタイプの外表面亀裂は、半楕円形状又は環状と仮定する。



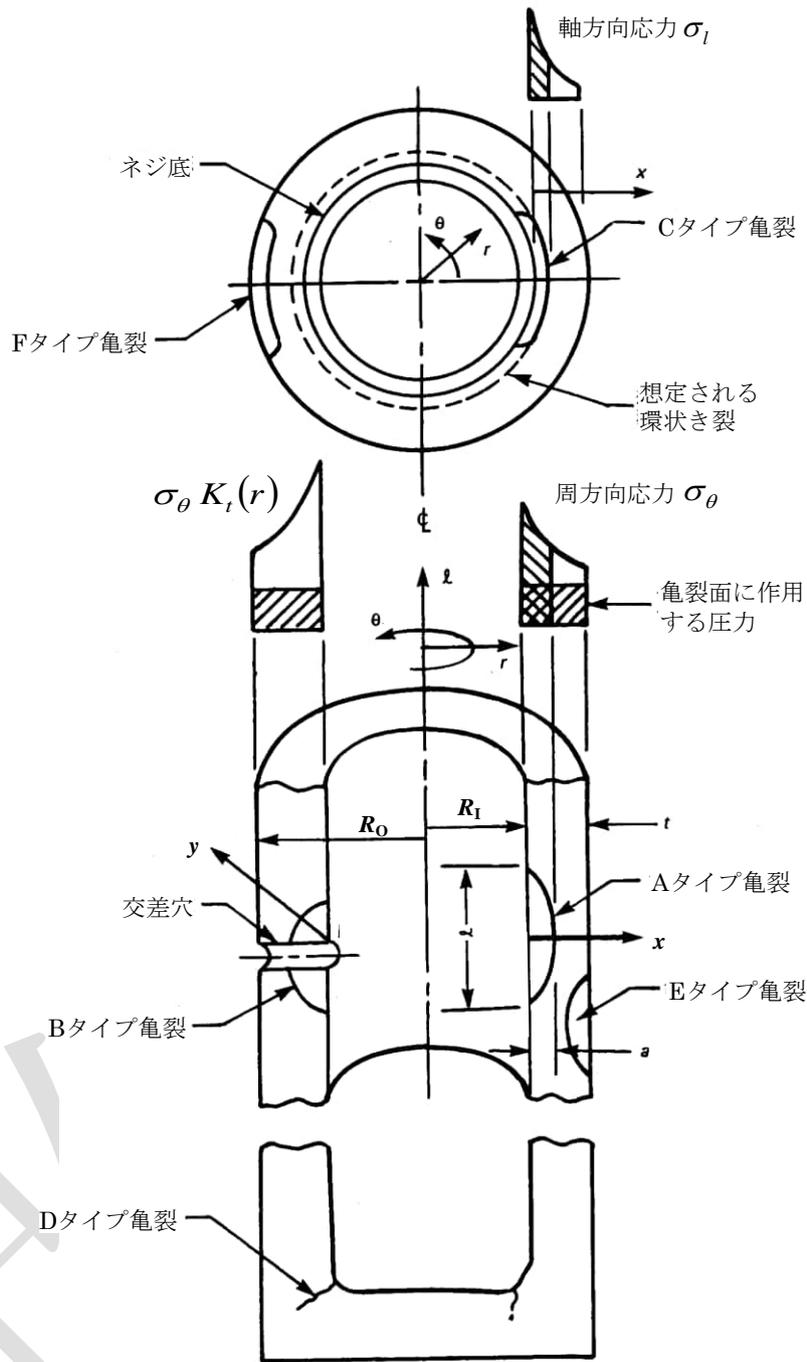
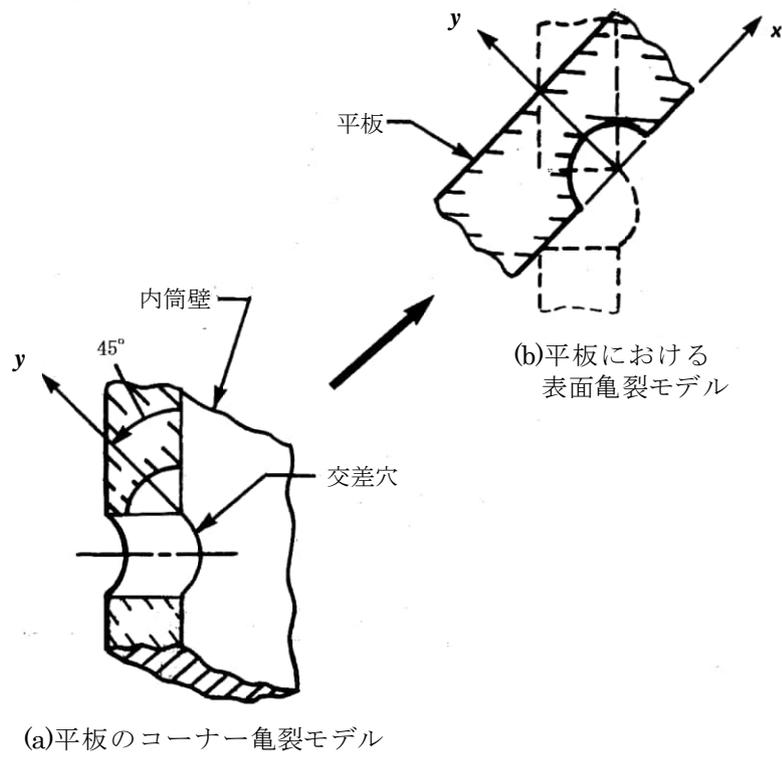


図 C.1 典型的な亀裂形状†



図C.2 交差穴のコーナー部から進展する亀裂のモデル化†

## 4 応力拡大係数の決定方法

応力拡大係数の決定方法は、次の a)～f)による。

- a) ASME Sec. XI, A-3000 に、亀裂が存在しない容器の応力解析から求めた応力分布を多項式近似して、応力拡大係数を決定する方法が与えられる<sup>1)</sup>。この方法は、応力勾配が急激なねじ底における C タイプ亀裂に対しては適していない。B タイプ、D タイプ、E タイプ及び F タイプ亀裂に対しては、局部応力集中による急激な応力勾配のために、亀裂深さ方向の応力分布の多項式近似を求めることが困難な場合には適していない。A タイプ亀裂に対しては、4.1 の手順に従えば、この方法が適している。4.1 の方法は、熱応力による応力拡大係数を決定する場合に適用してもよい。
- b) 交差穴内面における B タイプ亀裂に対する応力拡大係数の決定方法は、4.2 による。
- c) ねじ底における C タイプ亀裂に対する応力拡大係数の決定方法は、4.3 による。
- d) D タイプ、E タイプ及び F タイプ亀裂に対する応力拡大係数の決定方法は、4.4 による。
- e) 4.5 の重み関数法による応力拡大係数の決定方法は、全てのタイプの亀裂に対して適用してもよい。
- f) 応力拡大係数の決定は、別途、API 579-1/ASME FFS-1 により行ってもよい。

### 4.1 A タイプ亀裂

この方法は A タイプ亀裂の応力拡大係数を決定するのに適した方法であり、温度勾配や残留応力によって生じる応力拡大係数を決定する場合にも適している。

#### 4.1.1 3次多項式近似の応力分布を使用

この方法は ASME Sec. XI, A-3000 に基づいており、亀裂最深点と表面点における応力拡大係数を決定する。表面亀裂に対しては、亀裂を想定する位置で、亀裂面に対して垂直方向に作用する応力  $\sigma$  (MPa) を、亀裂深さ方向に次式で 3 次多項式近似する。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$A_0, A_1, A_2, A_3$  : 定数

$a$  : 亀裂深さ(m)

$x$  : 亀裂位置における表面からの厚さ方向距離,  $0 \leq x \leq a$  (m)

亀裂の任意深さ ( $0 \leq x/a \leq 1$ ) における応力分布を正確に記述できるように、 $A_0 \sim A_3$  の係数を決定する。この応力は、どのような種類の応力であれ、解析の対象とする。

3 次多項式近似した応力分布を用いて、次式で表面亀裂の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) を決定する。

$$K_I = \{ (A_0 + A_p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 \} \sqrt{\pi a/Q} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$A_0, A_1, A_2, A_3$  : 式(1)における定数であり、亀裂深さ方向の応力分布から決定される。

$K_I$  を亀裂深さの関数として計算する時には、各々の亀裂深さごとに定数  $A_0 \sim A_3$  を決定し、それらの値を用いて計算する。

$A_p$  : 亀裂面に圧力が作用する場合には容器の内圧  $P$  (MPa) に等しく、その他の場合には  $A_p = 0$  である。

$G_0, G_1, G_2, G_3$  : 表 C.1 及び表 C.2 で与えられる自由表面補正係数

$a$  : 亀裂深さ(m)

$Q$  : 次式に示す塑性域補正を行った亀裂形状パラメータ

$$Q = 1 + 4.593 (a/l)^{1.65} - q_y \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

$l$  : 亀裂の主軸長さ(m)

$a/l$  : 亀裂のアスペクト比( $0 \leq a/l \leq 0.5$ )

$q_y$  : 次式に示す塑性域補正項で, 疲労亀裂進展計算では  $q_y = 0$  とする。

$$q_y = [ \{ (A_0 + A_p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 \} / S_y ]^2 / 6 \dots\dots\dots (4)$$

a) 別法 次の 1) 及び 2) の方法で, 応力拡大係数を決定する。

1) 亀裂表面に垂直な応力分布が容器厚さの全領域にわたって正確に 3 次多項式近似できる場合には,  $K_I$  を決定するのに次の方法を用いてもよい。

応力分布を次式の 3 次多項式で近似する。

$$\sigma = A_0' + A_1'(x/t) + A_2'(x/t)^2 + A_3'(x/t)^3 \dots\dots\dots (5)$$

ここで,

$t$  : 容器の厚さ(m)

$x$  : 亀裂位置における表面からの厚さ方向距離,  $0 \leq x \leq t$  (m)

$a/t$  のそれぞれの値について, 次式によって  $A_i'$  の値を  $A_i$  の値に変換する。これらの  $A_i$  の値は, 式(2)により  $K_I$  を決定するために用いられる。

$$\begin{aligned} A_0 &= A_0' \\ A_1 &= A_1' (a/t) \\ A_2 &= A_2' (a/t)^2 \\ A_3 &= A_3' (a/t)^3 \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

2) 内外径比が 1.2~3.0 の円筒では, 不連続部の影響を受けない位置において, 内圧  $P$  による  $A_i'$  の値は次式から求める 2)。

$$\begin{aligned} A_0' / P &= (Y^2 + 1) / (Y^2 - 1) \\ A_1' / P &= 1.051 - 2.318 Y + 0.3036 Y^2 - 0.004417 Y^3 \\ A_2' / P &= -1.7678 + 0.9497 Y + 0.9399 Y^2 - 0.2056 Y^3 \\ A_3' / P &= -0.2798 + 1.3831 Y - 1.2603 Y^2 + 0.2138 Y^3 \end{aligned} \dots\dots\dots (7)$$

表 C.1 最深点( $\phi = \pi/2$ )における自由表面補正係数  $G_0 \sim G_3$  の値†

係数	$a/t$	亀裂のアスペクト比 $a/l$					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$G_0$	0.00	1.1208	1.0969	1.0856	1.0727	1.0564	1.0366
	0.05	1.1461	1.1000	1.0879	1.0740	1.0575	1.0373
	0.10	1.1945	1.1152	1.0947	1.0779	1.0609	1.0396
	0.15	1.2670	1.1402	1.1058	1.0842	1.0664	1.0432
	0.20	1.3654	1.1744	1.1210	1.0928	1.0739	1.0482
	0.25	1.4929	1.2170	1.1399	1.1035	1.0832	1.0543
	0.30	1.6539	1.2670	1.1621	1.1160	1.0960	1.0614
	0.40	2.1068	1.3840	1.2135	1.1448	1.1190	1.0772
	0.50	2.8254	1.5128	1.2693	1.1757	1.1457	1.0931
	0.60	4.0420	1.6372	1.3216	1.2039	1.1699	1.1058
	0.70	6.3743	1.7373	1.3610	1.2237	1.1868	1.1112
0.80	11.991	1.7899	1.3761	1.2285	1.1902	1.1045	
$G_1$	0.00	0.7622	0.6635	0.6826	0.7019	0.7214	0.7411
	0.05	0.7624	0.6651	0.6833	0.7022	0.7216	0.7413
	0.10	0.7732	0.6700	0.6855	0.7031	0.7221	0.7418
	0.15	0.7945	0.6780	0.6890	0.7046	0.7230	0.7426
	0.20	0.8267	0.6891	0.6939	0.7067	0.7243	0.7420
	0.25	0.8706	0.7029	0.7000	0.7094	0.7260	0.7451
	0.30	0.9276	0.7193	0.7073	0.7126	0.7282	0.7468
	0.40	1.0907	0.7584	0.7249	0.7209	0.7338	0.7511
	0.50	1.3501	0.8029	0.7454	0.7314	0.7417	0.7566
	0.60	1.7863	0.8488	0.7671	0.7441	0.7520	0.7631
	0.70	2.6125	0.8908	0.7882	0.7588	0.7653	0.7707
0.80	4.5727	0.9288	0.8063	0.7753	0.7822	0.7792	
$G_2$	0.00	0.6009	0.5078	0.5310	0.5556	0.5815	0.6084
	0.05	0.5969	0.5086	0.5313	0.5557	0.5815	0.6084
	0.10	0.5996	0.5109	0.5323	0.5560	0.5815	0.6085
	0.15	0.6088	0.5148	0.5340	0.5564	0.5815	0.6087
	0.20	0.6247	0.5202	0.5364	0.5571	0.5815	0.6089
	0.25	0.6475	0.5269	0.5394	0.5580	0.5817	0.6093
	0.30	0.6775	0.5350	0.5430	0.5592	0.5820	0.6099
	0.40	0.7651	0.5545	0.5520	0.5627	0.5835	0.6115
	0.50	0.9048	0.5776	0.5632	0.5680	0.5869	0.6144
	0.60	1.1382	0.6027	0.5762	0.5760	0.5931	0.6188
	0.70	1.5757	0.6281	0.5907	0.5874	0.6037	0.6255
0.80	2.5997	0.6513	0.6063	0.6031	0.6200	0.6351	
$G_3$	0.00	0.5060	0.4246	0.4480	0.4735	0.5006	0.5290
	0.05	0.5012	0.4250	0.4482	0.4736	0.5006	0.5290
	0.10	0.5012	0.4264	0.4488	0.4736	0.5004	0.5290
	0.15	0.5059	0.4286	0.4498	0.4737	0.5001	0.5289
	0.20	0.5152	0.4317	0.4511	0.4738	0.4998	0.5289
	0.25	0.5292	0.4357	0.4528	0.4741	0.4994	0.5289
	0.30	0.5483	0.4404	0.4550	0.4746	0.4992	0.5291
	0.40	0.6045	0.4522	0.4605	0.4763	0.4993	0.5298
	0.50	0.6943	0.4665	0.4678	0.4795	0.5010	0.5316
	0.60	0.8435	0.4829	0.4769	0.4853	0.5054	0.5349
	0.70	1.1207	0.5007	0.4880	0.4945	0.5141	0.5407
0.80	1.7614	0.5190	0.5013	0.5085	0.5286	0.5487	

注記 表に示す  $a/t$ ,  $a/l$  の値の間にある場合には内そうで求める。

表 C.2 表面点 ( $\phi = 0$ ) における自由表面補正係数  $G_0 \sim G_3$  の値†

係数	$a/t$	亀裂のアスペクト比 $a/l$					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$G_0$	0.00	—	0.5450	0.7492	0.9024	1.0297	1.1406
	0.05	—	0.5514	0.7549	0.9070	1.0330	1.1427
	0.10	—	0.5610	0.7636	0.9144	1.0391	1.1473
	0.15	—	0.5738	0.7756	0.9249	1.0479	1.1545
	0.20	—	0.5900	0.7908	0.9385	1.0596	1.1641
	0.25	—	0.6099	0.8095	0.9551	1.0740	1.1763
	0.30	—	0.6338	0.8318	0.9750	1.0913	1.1909
	0.40	—	0.6949	0.8881	1.0250	1.1347	1.2278
	0.50	—	0.7772	0.9619	1.0896	1.1902	1.2746
	0.60	—	0.8859	1.0560	1.1701	1.2585	1.3315
	0.70	—	1.0283	1.1740	1.2686	1.3401	1.3984
0.80	—	1.2144	1.3208	1.3871	1.4361	1.4753	
$G_1$	0.00	—	0.0725	0.1038	0.1280	0.1484	0.1665
	0.05	—	0.0744	0.1075	0.1331	0.1548	0.1740
	0.10	—	0.0771	0.1119	0.1387	0.1615	0.1816
	0.15	—	0.0807	0.1169	0.1449	0.1685	0.1893
	0.20	—	0.0852	0.1227	0.1515	0.1757	0.1971
	0.25	—	0.0907	0.1293	0.1587	0.1833	0.2049
	0.30	—	0.0973	0.1367	0.1664	0.1912	0.2128
	0.40	—	0.1141	0.1544	0.1839	0.2081	0.2289
	0.50	—	0.1373	0.1765	0.2042	0.2265	0.2453
	0.60	—	0.1689	0.2041	0.2280	0.2466	0.2620
	0.70	—	0.2121	0.2388	0.2558	0.2687	0.2791
0.80	—	0.2714	0.2824	0.2887	0.2931	0.2965	
$G_2$	0.00	—	0.0254	0.0344	0.0423	0.0495	0.0563
	0.05	—	0.0264	0.0367	0.0456	0.0538	0.0615
	0.10	—	0.0276	0.0392	0.0491	0.0582	0.0666
	0.15	—	0.0293	0.0419	0.0527	0.0625	0.0716
	0.20	—	0.0313	0.0450	0.0565	0.0669	0.0764
	0.25	—	0.0338	0.0484	0.0605	0.0713	0.0812
	0.30	—	0.0368	0.0521	0.0646	0.0757	0.0858
	0.40	—	0.0445	0.0607	0.0735	0.0846	0.0946
	0.50	—	0.0552	0.0712	0.0834	0.0938	0.1030
	0.60	—	0.0700	0.0842	0.0946	0.1033	0.1109
	0.70	—	0.0907	0.1005	0.1075	0.1132	0.1183
0.80	—	0.1197	0.1212	0.1225	0.1238	0.1252	
$G_3$	0.00	—	0.0125	0.0158	0.0192	0.0226	0.0261
	0.05	—	0.0131	0.0172	0.0214	0.0256	0.0297
	0.10	—	0.0138	0.0188	0.0237	0.0285	0.0332
	0.15	—	0.0147	0.0206	0.0261	0.0314	0.0365
	0.20	—	0.0159	0.0225	0.0285	0.0343	0.0398
	0.25	—	0.0173	0.0245	0.0310	0.0371	0.0429
	0.30	—	0.0190	0.0267	0.0336	0.0399	0.0459
	0.40	—	0.0234	0.0318	0.0390	0.0454	0.0515
	0.50	—	0.0295	0.0379	0.0448	0.0509	0.0565
	0.60	—	0.0380	0.0455	0.0513	0.0564	0.0611
	0.70	—	0.0501	0.0549	0.0587	0.0621	0.0652
0.80	—	0.0673	0.0670	0.0672	0.0679	0.0687	

注記 表に示す  $a/t$ ,  $a/l$  の値の間にある場合には内そうで求める。ただし,  $a/l = 0.0 \sim 0.1$  の間の内そうは行えない。

#### 4.1.2 5次多項式近似の応力分布を使用

亀裂が存在する位置で、亀裂面に対して垂直方向に作用する応力を、深さ方向に3次多項式では正確に近似できない場合には、次式の5次多項式で近似する。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 + A_4(x/a)^4 + A_5(x/a)^5 \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

$A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  : 定数

$a$  : 亀裂深さ(m)

$x$  : 亀裂位置における表面からの厚さ方向距離,  $0 \leq x \leq a$  (m)

亀裂の任意深さ( $0 \leq x/a \leq 1$ )における応力分布を正確に記述できるように、 $A_0 \sim A_5$ の係数を決定する。この応力は、どのような種類の応力であれ、解析の対象とする。

5次多項式近似した応力分布を用いて、次式で表面亀裂の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ )を決定する。

$$K_I = \{ (A_0 + A_p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + A_4 G_4 + A_5 G_5 \} \sqrt{\pi a/Q} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、

$A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  : **式(8)**における定数であり、亀裂深さ方向の応力分布から決定される。 $K_I$ を亀裂深さの関数として計算する時には、各々の亀裂深さごとに定数 $A_0 \sim A_5$ を決定し、その値を用いて計算する。

$A_p$  : 亀裂面に圧力が作用する場合には容器の内圧  $P$  (MPa) に等しく、その他の場合には  $A_p = 0$  である。

$G_0, G_1, G_2, G_3, G_4, G_5$  : 表面亀裂の最深点において**式(10)**、表面点において**式(11)**で与えられる自由表面補正係数

最深点において

$$\begin{aligned} G_0 &= \left( 2 + M_1 + \frac{2}{3}M_2 + \frac{1}{2}M_3 \right) \frac{\sqrt{2Q'}}{\pi} \\ G_1 &= \left( \frac{4}{3} + \frac{1}{2}M_1 + \frac{4}{15}M_2 + \frac{1}{6}M_3 \right) \frac{\sqrt{2Q'}}{\pi} \\ G_2 &= \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \frac{\sqrt{2Q'}}{\pi} \\ G_3 &= \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \frac{\sqrt{2Q'}}{\pi} \\ G_4 &= \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \frac{\sqrt{2Q'}}{\pi} \\ G_5 &= \left( \frac{512}{693} + \frac{1}{6}M_1 + \frac{512}{9009}M_2 + \frac{1}{42}M_3 \right) \frac{\sqrt{2Q'}}{\pi} \end{aligned} \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 $M_1 \sim M_3$  及び  $Q'$  は次式で与えられる<sup>3),4)</sup>。

$$M_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2Q'}} (4Y_0 - 6Y_1) - \frac{24}{5}$$

$$M_2 = 3$$

$$M_3 = 2 \left( \frac{\pi}{\sqrt{2Q'}} Y_0 - M_1 - 4 \right)$$

$$Q' = 1 + 4.593 (a/l)^{1.65}$$

ここで,

$$Y_0 = B_0 + B_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + B_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4$$

$$Y_1 = C_0 + C_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4$$

$$B_0 = 1.10190 - 0.039726 (a/l) - 0.174352 (a/l)^2$$

$$B_1 = 4.32489 - 29.8744 (a/l) + 77.7556 (a/l)^2 - 68.18544 (a/l)^3$$

$$B_2 = -3.03329 + 19.92166 (a/l) - 50.328 (a/l)^2 + 42.7696 (a/l)^3$$

$$C_0 = 0.456128 - 0.228412 (a/l) - 0.186092 (a/l)^2$$

$$C_1 = 3.022 - 21.7358 (a/l) + 59.76 (a/l)^2 - 54.8296 (a/l)^3$$

$$C_2 = -2.28655 + 15.77542 (a/l) - 44.27 (a/l)^2 + 41.30832 (a/l)^3$$

$t$  : 容器の厚さ(m)

$a$  : 亀裂深さ(m)

$l$  : 亀裂の主軸長さ(m)

$a/l$  : 亀裂のアスペクト比( $0 \leq a/l \leq 0.5$ )

表面点において

$$G_0 = \left( 4 + 2N_1 + \frac{4}{3}N_2 + N_3 \right) \frac{\sqrt{Q'}}{\pi}$$

$$G_1 = \left( \frac{4}{3} + N_1 + \frac{4}{5}N_2 + \frac{2}{3}N_3 \right) \frac{\sqrt{Q'}}{\pi}$$

$$G_2 = \left( \frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right) \frac{\sqrt{Q'}}{\pi} \dots\dots\dots(11)$$

$$G_3 = \left( \frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right) \frac{\sqrt{Q'}}{\pi}$$

$$G_4 = \left( \frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right) \frac{\sqrt{Q'}}{\pi}$$

$$G_5 = \left( \frac{4}{11} + \frac{1}{3}N_1 + \frac{4}{13}N_2 + \frac{2}{7}N_3 \right) \frac{\sqrt{Q'}}{\pi}$$

ここで、 $N_1 \sim N_3$  及び  $Q'$  は次式で与えられる<sup>3), 4)</sup>。

$$N_1 = \frac{\pi}{\sqrt{Q'}}(15F_1 - 9F_0) - 8$$

$$N_2 = \frac{\pi}{\sqrt{Q'}}(30F_0 - 45F_1) + 15$$

$$N_3 = -(1 + N_1 + N_2)$$

$$Q' = 1 + 4.593(a/l)^{1.65}$$

ここで、

$$F_0 = \alpha \left( \frac{2a}{l} \right)^\beta$$

$$F_1 = \gamma \left( \frac{2a}{l} \right)^\delta$$

$$\alpha = 1.14326 + 0.0175996 \left( \frac{a}{t} \right) + 0.501001 \left( \frac{a}{t} \right)^2$$

$$\beta = 0.458320 - 0.102985 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.398175 \left( \frac{a}{t} \right)^2$$

$$\gamma = 0.976770 - 0.131975 \left( \frac{a}{t} \right) + 0.484875 \left( \frac{a}{t} \right)^2$$

$$\delta = 0.448863 - 0.173295 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.267775 \left( \frac{a}{t} \right)^2$$

$Q$  : 次式に示す塑性域補正を行った亀裂形状パラメータ

$$Q = Q' - q_y = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} - q_y \dots\dots\dots(12)$$

ここで、

$q_y$  : 次式で計算される塑性域補正項で、疲労亀裂進展計算では  $q_y = 0$  とする。

$$q_y = \left[ \{ (A_0 + A_p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + A_4 G_4 + A_5 G_5 \} / S_y \right]^2 / 6 \dots\dots\dots(13)$$

**a) 別法** 亀裂表面に垂直な応力分布が容器厚さの全領域にわたって正確に5次多項式近似できる場合には、 $K_I$  を決定するのに次の方法を用いる。

応力分布を次式の5次多項式で近似する。

$$\sigma = A_0' + A_1'(x/t) + A_2'(x/t)^2 + A_3'(x/t)^3 + A_4'(x/t)^4 + A_5'(x/t)^5 \dots\dots\dots(14)$$

ここで、

$t$  : 容器の厚さ(m)

$x$  : 亀裂位置における表面からの厚さ方向距離,  $0 \leq x \leq t$  (m)

$a/t$ のそれぞれの値について、次式によって  $A_i'$ の値を  $A_i$ の値に変換する。これらの  $A_i$ の値は、式(9)により  $K_I$ を決定するために用いられる。

$$\begin{aligned} A_0 &= A_0' \\ A_1 &= A_1' (a/t) \\ A_2 &= A_2' (a/t)^2 \\ A_3 &= A_3' (a/t)^3 \dots\dots\dots(15) \\ A_4 &= A_4' (a/t)^4 \\ A_5 &= A_5' (a/t)^5 \end{aligned}$$

#### 4.2 Bタイプ亀裂

Bタイプ亀裂に対する応力拡大係数は、円筒と交差穴の交差するコーナー半径が交差穴径の1/4以上である場合には、4.1の方法を用いて決定する<sup>5)</sup>。4.1の式(1)又は式(8)で多項式近似をするために用いる応力値は、次のa)、b)のように決定する。

- a) 弾性解析により、亀裂が存在しないときの交差穴近傍の応力場を求める。この解析から仮想亀裂面に垂直に作用する応力分布を求める。図C.1におけるy軸に沿う応力分布から、多項式近似を求める。図C.2に示すように、交差穴のコーナー部の亀裂は、図C.2(b)のx-y平面上で、y軸を対称軸とする半円形状の亀裂( $a/l = 0.5$ )と仮定する。
- b) 主円筒の自緊などによる残留応力が存在する場合、残留応力による応力拡大係数は、主円筒の周方向残留応力分布がy軸に沿って作用すると仮定して多項式近似を行って決定する。

#### 4.3 Cタイプ亀裂

この方法は、本体の6.4.4b)の許容最終亀裂深さに対する制限を満たし、亀裂面に圧力が作用しない場合に適用する。Cタイプ亀裂は、通常はねじ込み部の最初のねじ底で発生する。これは、荷重分布の計算とねじ込み部の詳細な応力解析を行って確認しなければならない。ねじ底から周方向平面上を進展する亀裂の応力拡大係数を決定するために、亀裂が存在しないとした応力解析を行い、ねじ底から厚さ方向に亀裂面に垂直に作用する軸方向応力  $\sigma_l(x)$  を決定する。応力解析では、ねじは環状のみぞと考える。

本体の6.6.5 a) 6)の断続ねじが用いられるならば、Cタイプ亀裂は全て環状亀裂と仮定されるので、断続ねじの終端部における応力集中を考慮する必要はない。

- a) Buchalet-Bamford法<sup>6),7)</sup>では、環状亀裂を含む平面に垂直な応力分布を次式の3次多項式で近似する。

$$\sigma_l(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \dots\dots\dots(16)$$

ここで、

$A_0, A_1, A_2, A_3$  : 定数

$x$  : 亀裂位置における表面からの厚さ方向距離,  $0 \leq x \leq t$  (mm)

$t$  : ねじ底部における容器厚さ(mm)

弾性解析によって応力分布を求め、その分布形状に最も適合するように  $A_0 \sim A_3$  を決定する。**式(17)～式(19)**を用いて、種々の亀裂深さ  $a$  に対する応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) を決定する。

$$K_I = F \sqrt{\pi a} / \sqrt{1 - (F/S_y)^2/6} \dots\dots\dots(17)$$

ここで、

$$F = A_0 F_1 + \frac{2 a A_1 F_2}{\pi} + \frac{a^2 A_2 F_3}{2} + \frac{4 a^3 A_3 F_4}{3 \pi} \dots\dots\dots(18)$$

$a$  : 亀裂深さ(mm)

$S_y$  : 降伏強さ(MPa)

$(F/S_y)^2/6$  : 塑性域補正項であり、疲労亀裂進展計算では0とする。

$F_1, F_2, F_3, F_4$  : 幾何学形状に関する補正係数であり、亀裂深さの関数として次式で与えられる。

$$F_1 = 1.1259 + 0.2344 (a/t) + 2.2018 (a/t)^2 - 0.2083 (a/t)^3$$

$$F_2 = 1.0732 + 0.2677 (a/t) + 0.6661 (a/t)^2 + 0.6354 (a/t)^3$$

$$F_3 = 1.0528 + 0.1065 (a/t) + 0.4429 (a/t)^2 + 0.6042 (a/t)^3 \dots\dots\dots(19)$$

$$F_4 = 1.0387 - 0.0939 (a/t) + 0.6018 (a/t)^2 + 0.3750 (a/t)^3$$

b) 考えている領域の応力分布を**式(16)**の3次多項式で十分に近似できない場合には、幾つかの領域に分けて考える。**図C.3**に、二つの領域に分けた例を示す。この場合には、それぞれの領域の応力分布が定数の異なる多項式で近似され、各領域において**式(17)**で  $K_I$  を決定する。

c) 領域の境界で、応力拡大係数の値に不連続性が生じないようにする。**図C.4**に、領域境界における不連続な応力拡大係数の補正方法を示す。各領域において応力分布を3次多項式で近似したときの定数は異なるため、領域境界では応力拡大係数の値は異なる。

このため、例えば、領域2における応力拡大係数  $K_{Icorr,2}$  は、領域2の応力分布から求めた応力拡大係数  $K_{I,2}$  に、領域境界における応力拡大係数の差  $\Delta K_{1,2}(= K_{I,1} - K_{I,2})$  を加算して、 $K_{Icorr,2} = K_{I,2} + \Delta K_{1,2}$  として求め、不連続性を解消する。各領域境界でこのような補正を繰り返して、領域  $n$  における応力拡大係数  $K_{Icorr,n}$  を次式で決定する。

$$K_{Icorr,n} = K_{I,n} + \sum_{i=0}^{n-1} \Delta K_{i,i+1} = F \sqrt{\pi a} / \sqrt{1 - (F/S_y)^2/6} + \sum_{i=0}^{n-1} \Delta K_{i,i+1} \dots\dots\dots(20)$$

ここで、

$K_{I,n}$  : 領域  $n$  の応力分布の3次多項式近似より求めた応力拡大係数

$\sum_{i=0}^{n-1} \Delta K_{i,i+1}$  : 領域  $n$  より前の領域で生じる  $\Delta K_{i,i+1}$  の総和、ただし  $\Delta K_{0,1} = 0$

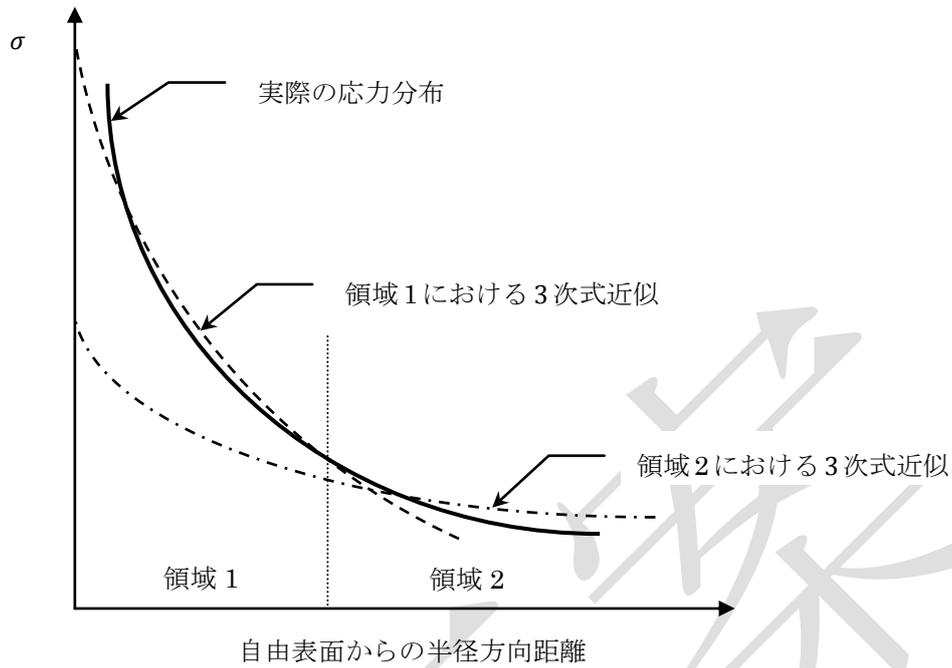


図 C.3 応力分布の多項式近似

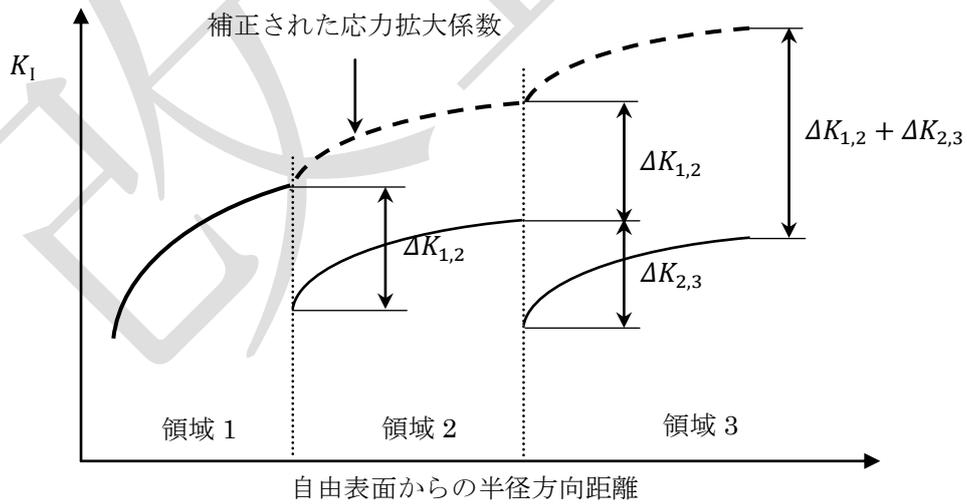


図 C.4 領域境界における不連続な応力拡大係数の補正

#### 4.4 Dタイプ, Eタイプ及びFタイプ亀裂

Dタイプ, Eタイプ及びFタイプ亀裂に対する応力拡大係数は, 次の a)~c)による。

- a) Dタイプ, Eタイプ及びFタイプ亀裂の応力拡大係数は, 4.1の方法を用いて決定する<sup>5)</sup>。  
Dタイプ亀裂のように, 局部応力集中による急激な応力勾配のために, 亀裂深さ方向の応力分布を単一の多項式で近似することが困難な場合には, Cタイプ亀裂の 4.3 b)及び 4.3 c)のように, 亀裂深さ方向を複数の領域で分割する方法を用いる。
- b) Dタイプ及びFタイプ亀裂では, 亀裂面に垂直な方向に作用する応力分布は, 容器に亀裂が存在しないとした有限要素法などの応力解析によって決定する。
- c) Eタイプ亀裂では, 内圧による応力拡大係数を決定するために, Láméの式による周方向応力を用いる。

#### 4.5 重み関数法による応力拡大係数の決定方法

半楕円表面亀裂の重み関数法による応力拡大係数は, 次式で与えられる<sup>3), 4)</sup>。

$$K_I = \int_0^a h(x, a) \sigma(x) dx \dots\dots\dots(21)$$

ここで,

- a : 亀裂深(m)
- x : 表面からの厚さ方向距離,  $0 \leq x \leq a$  (m)
- $h(x, a)$  : 重み関数
- $\sigma(x)$  : 亀裂面に対して垂直方向に作用する厚さ方向の応力分布(MPa)

$h(x, a)$ は, 最深点( $\varphi = \pi/2$ )及び表面点( $\varphi = 0$ )において, それぞれ次式で与えられる。

最深点において

$$h(x, a)_{\varphi=\pi/2} = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left\{ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \dots\dots\dots(22)$$

表面点において

$$h(x, a)_{\varphi=0} = \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \left\{ 1 + N_1 \left(\frac{x}{a}\right)^{1/2} + N_2 \left(\frac{x}{a}\right) + N_3 \left(\frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

ここで, 最深点における  $M_1 \sim M_3$  と表面点における  $N_1 \sim N_3$  は, それぞれ次式で与えられる。

最深点において

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \\ M_2 &= 3 \dots\dots\dots(24) \\ M_3 &= \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \end{aligned}$$

表面点において

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15 \dots\dots\dots(25)$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8$$

ここで、

$G_0$  : 亀裂面に一様な応力分布が作用する場合の自由表面補正係数

$G_1$  : 亀裂面に線形の応力分布が作用する場合の自由表面補正係数

$$Q = 1 + 4.593 (a/l)^{1.65}$$

重み関数法による応力拡大係数の決定方法は、次の **a) ~ g)** による。

- a)** 有限要素法などの数値解析により、深さ  $a$  の亀裂面に一様な応力分布  $\sigma(x) = A_0$  が作用する場合の応力拡大係数  $K_I$  を求め、次式により補正係数  $G_0$  を決定する。

$$G_0 = \frac{K_I}{A_0 \sqrt{\pi a/Q}} \dots\dots\dots(26)$$

- b)** 有限要素法などの数値解析により、深さ  $a$  の亀裂面に線形の応力分布  $\sigma(x) = A_1 (x/a)$  が作用する場合の応力拡大係数  $K_I$  を求め、次式により補正係数  $G_1$  を決定する。

$$G_1 = \frac{K_I}{A_1 \sqrt{\pi a/Q}} \dots\dots\dots(27)$$

- c)** 亀裂面に作用する任意形状の応力分布  $\sigma(x)$  を、多項式で近似する。次式に、応力分布を 5 次多項式で近似する場合の例を示す。

$$\sigma(x) = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 + A_4(x/a)^4 + A_5(x/a)^5 \dots\dots\dots(28)$$

- d)** 亀裂面に任意形状の応力分布  $\sigma(x)$  が作用する場合の応力拡大係数  $K_I$  を、応力分布を多項式近似した時の係数  $A_i$  と自由表面補正係数  $G_i$  ( $i \geq 0$ ) の関数として表示する。次式に、応力分布を 5 次多項式で近似する場合の例を示す。

$$K_I = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + A_4 G_4 + A_5 G_5) \sqrt{\pi a/Q} \dots\dots\dots(29)$$

- e)** 式 (21) に、式 (22) 又は式 (23) の重み関数  $h(x, a)$  と応力分布  $\sigma(x)$  の多項近似式を代入する。次式に、応力分布を 5 次多項式で近似する場合の例を示す。

最深点において

$$K_{I,\varphi=\pi/2} = \int_0^a \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left\{ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \times \dots\dots(30)$$

$$\left\{ A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + A_4 \left(\frac{x}{a}\right)^4 + A_5 \left(\frac{x}{a}\right)^5 \right\} dx$$

表面点において

$$K_{I,\varphi=0} = \int_0^a \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \left\{ 1 + N_1 \left(\frac{x}{a}\right)^{1/2} + N_2 \left(\frac{x}{a}\right) + N_3 \left(\frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \times \left\{ A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + A_4 \left(\frac{x}{a}\right)^4 + A_5 \left(\frac{x}{a}\right)^5 \right\} dx \quad \dots\dots(31)$$

- f) で求められた応力拡大係数の表示式を積分して、5次多項式の場合には**式(29)**の表示式と比較を行い、自由表面補正係数  $G_i$  ( $i \geq 2$ ) を求める。 $G_i$  の式に含まれる  $M_1 \sim M_3$  及び  $N_1 \sim N_3$  は、**a)**と**b)**で求められた  $G_0$  と  $G_1$  を用いて、**式(24)**及び**式(25)**で計算する。応力分布を5次多項式で近似する場合には、自由表面補正係数  $G_2 \sim G_5$  は**式(10)**及び**式(11)**になる。
- g) 応力分布を多項式近似した時の係数  $A_i$  と自由表面補正係数  $G_i$  ( $i \geq 0$ ) を用いて、5次多項式の場合には、**式(29)**で応力拡大係数を決定する。亀裂形状パラメータ  $Q$  は、**式(12)**及び**式(13)**の塑性域補正項を考慮する。

亀裂面に作用する任意形状の応力分布を3次多項式で近似する場合には、自由表面補正係数として、**式(10)**及び**式(11)**の  $G_2$  と  $G_3$  を、4次多項式で近似する場合には  $G_2 \sim G_4$  を用いる。

## 5 疲労亀裂進展の計算

疲労亀裂進展の計算は、次の**a)～e)**による。

- a) 本体の**6.4.6**より、疲労亀裂進展速度は次式で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = C \{f(R_K)\} (\Delta K_I)^m \quad \dots\dots\dots(32)$$

- b) 関数  $f(R_K)$  は応力拡大係数比  $R_K$  の正負と材料によって異なり、いくつかの材料に対する  $f(R_K)$  は**表C.3**で与えられる。
- c) 定数  $C$  と  $m$  の値は、本体の**表6.4.1**で与えられる。
- d) 標準的な疲労亀裂試験によって、適切な  $R_K$  で材料定数が求められている場合には、本体の**表6.4.1**及び**表C.3**で与えられる値以外の値を用いてもよい。標準的な疲労亀裂進展試験により、**表C.3**とは異なる  $f(R_K)$  の式がより適切であることが示されれば、その式を用いてもよい。
- e) 疲労亀裂が進展するのに要する繰返し回数は、適切な疲労亀裂進展則を用い、亀裂深さに比べて十分に小さい亀裂増分  $\Delta a$  の範囲内で  $\Delta K_I$  の値を一定と仮定して、数値的に積分することにより求める。亀裂増分  $\Delta a$  が十分に小さいことを保証するために、得られた設計許容繰返し回数が  $\Delta a$  の値にほとんど依存しなくなるまで、 $\Delta a$  を小さくした計算を繰返し行う必要がある。

表 C.3 疲労亀裂進展速度の  $R_K$  依存特性

材料	$f(R_K)$	
炭素鋼及び低合金鋼 ( $S_y \leq 620$ MPa)	$0 \leq R_K < 1$	$f(R_K) = \left(\frac{2.88}{2.88 - R_K}\right)^m$
	$R_K < 0$	$f(R_K) = \left(\frac{1.0}{1.0 - R_K}\right)^m$
高強度低合金鋼 ( $S_y > 620$ MPa)	$0 \leq R_K < 1$	$f(R_K) = 1.0 + 3.53 R_K$
	$R_K < 0$	$f(R_K) = \left(\frac{1.5}{1.5 - R_K}\right)^m$
マルテンサイト系 析出硬化鋼	$0.67 \leq R_K < 1$	$f(R_K) = 30.53 R_K - 17.0$
	$0 \leq R_K < 0.67$	$f(R_K) = 1.0 + 3.48 R_K$
	$R_K < 0$	$f(R_K) = \left(\frac{1.5}{1.5 - R_K}\right)^m$
オーステナイト系 ステンレス鋼	$0.79 < R_K < 1$	$f(R_K) = -43.35 + 57.97 R_K$
	$0 \leq R_K \leq 0.79$	$f(R_K) = 1.0 + 1.8 R_K$
	$R_K < 0$	$f(R_K) = 1.0$

## 6 破壊靱性値の相関関係

破壊靱性値の相関関係は、次の a), b) による。

- a) 本体の 6.4 では、破壊靱性値として平面ひずみ破壊靱性値  $K_{IC}$  を用いる。使用する材料に対して、本体の 5.2 で与える方法で  $K_{IC}$  が得られているときは、その値を用いてもよい。又は、最小設計金属温度(MDMT)が使用する材料の上部棚領域にあるならば、次式で、本体の 5.2 で与える衝撃吸収エネルギー(CVN)から  $K_{IC}$  を求める<sup>8), 9), 10)</sup>。

$$\left(K_{IC}/S_y\right)^2 = 0.64 (CVN/S_y - 0.01) \dots\dots\dots(33)$$

ここで、

- $S_y$  : 降伏強さ(MPa)
- $CVN$  : Vノッチシャルピー衝撃吸収エネルギー(J)
- $K_{IC}$  : 平面ひずみ破壊靱性値(MPa $\sqrt{m}$ )

- b) 平面ひずみ破壊靱性試験以外の破壊靱性試験から得られた値から  $K_{IC}$  への変換は、次式を用いる。

### 1) $K_{IC}$ と $J_{IC}$ の相関関係

$$K_{IC} = \sqrt{E J_{IC}} \quad (\text{平面応力}) \quad \dots\dots\dots(34)$$

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E J_{IC}}{1 - \nu^2}} \quad (\text{平面ひずみ}) \quad \dots\dots\dots(35)$$

## 2) 亀裂先端開口変位 (CTOD) と $K_{IC}$ の相関関係

$$K_{IC} = \sqrt{(CTOD) E S_y} \dots\dots\dots(36)$$

ここで,

- $J_{IC}$  : J 積分による弾塑性破壊靱性値(MJ/m<sup>2</sup> 又は MPa m)
- CTOD : 亀裂先端開口変位(m)
- E : 縦弾性係数(MPa)
- $S_y$  : 降伏強さ(MPa)
- $\nu$  : ポアソン比

---

### 参考文献

- 1) Cipolla, R. C., “Technical Basis for the Revised Stress Intensity Factor Equation for Surface Flaws in ASME Section XI, Appendix A”, ASME PVP, Vol.313-1, pp.105-121, (1995)
- 2) Kendall, D. P., “Application of the New Section XI, A-3000 Method for Stress Intensity Factor Calculation to Thick-Walled Pressure Vessels”, ASME PVP, Vol.335, pp.189-194, (1996)
- 3) Shen, G. and Glinka, G., “Weight Functions for a Surface Semi-Elliptical Crack in a Finite Thickness Plate”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 15, pp.247-255, (1991)
- 4) ASME, API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service, pp.C-43-C-48, (2007)
- 5) Chaaban, A. and Burns, D. J., “Design of High Pressure Vessels with Radial Crossbores”, Physica, B139 & 140, pp.766-772, (1986)
- 6) Buchalet, C. B. and Bamford, W. H., “Stress Intensity Factor Solutions for Continuous Surface Flaws in Reactor Pressure Vessels”, Mechanics for Crack Growth, ASTM STP, 590, pp.385-402, (1976)
- 7) Perez, E. H., Sloan, J. G., and Kelleher, K. J., “Application of Fatigue Crack Growth to an Isostatic Press”, ASME PVP, Vol.125, pp.53-61, (1987)
- 8) Barsom, J. M. and Rolfe, S. T., “Correlations between  $K_{IC}$  and Charpy V-Notch Test Results in the Transition Temperature Range”, ASTM STP, 466, pp.281-302, (1970)
- 9) Rolfe, S. T. and Novak, S. R., “Slow-Bend  $K_{IC}$  Testing of Medium-Strength High-Toughness Steels”, ASTM STP, 463, pp.124-159, (1970)
- 10) Kapp, J.A. and Underwood, J.H., “Correlation between Fracture Toughness, Charpy V-Notch Impact Energy, and Yield Strength for ASTM A 723 Steel”, ASME PVP, Vol.238, pp.219-222, (1992)

## 附属書 D(規定) 応力-ひずみ曲線

### 序文

この附属書は、弾塑性解析で使用する静的(単調負荷)真応力-真ひずみ曲線及び繰返し応力-ひずみ曲線について規定する。

### 1 材料の機械的性質

応力-ひずみ曲線で用いる降伏点又は 0.2%耐力、引張強さ及び縦弾性係数は、本体の 5.4 に示す値を使用する。

### 2 静的(単調負荷)真応力-真ひずみ曲線

弾塑性解析による延性崩壊荷重の決定には、式(1)に示す真応力-真ひずみ曲線を使用する。

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E_y} + \gamma_1 + \gamma_2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$$\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2} \{1.0 - \tanh(H)\}$$

$$\gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{2} \{1.0 + \tanh(H)\}$$

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\sigma_t}{A_1}\right)^{\frac{1}{m_1}}$$

$$A_1 = \frac{\sigma_{ys}(1 + \varepsilon_{ys})}{\{\ln(1 + \varepsilon_{ys})\}^{m_1}}$$

$$m_1 = \frac{\ln(R) + (\varepsilon_p - \varepsilon_{ys})}{\ln\left\{\frac{\ln(1 + \varepsilon_p)}{\ln(1 + \varepsilon_{ys})}\right\}}$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\sigma_t}{A_2}\right)^{\frac{1}{m_2}}$$

$$A_2 = \frac{\sigma_{uts} e^{m_2}}{m_2 m_2}$$

$$H = \frac{2 [\sigma_t - \{\sigma_{ys} + K (\sigma_{uts} - \sigma_{ys})\}]}{K (\sigma_{uts} - \sigma_{ys})}$$

$$R = \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}}$$

$$\varepsilon_{ys} = 0.002$$

$$K = 1.5 R^{1.5} - 0.5 R^{2.5} - R^{3.5}$$

$\varepsilon_t$  : 真ひずみ

$\sigma_t$  : 真応力(MPa)

$E_y$  : 当該温度における縦弾性係数(MPa)

$\sigma_{ys}$  : 当該温度における降伏点又は 0.2%耐力(MPa)

$\sigma_{uts}$  : 当該温度における引張強さ(MPa)

$m_2, \varepsilon_p$  : 材料特性値(表 D.1 を参照)

真応力-真ひずみ曲線は真破断応力を上限値とし、この応力を超える領域の真応力-真ひずみ曲線はひずみ硬化がない完全塑性とする。真破断応力は式(2)で与えられる。

$$\sigma_{uts,t} = \sigma_{uts} e^{m_2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$\sigma_{uts,t}$  : 当該温度における真破断応力(MPa)

### 3 繰返し応力-ひずみ曲線

弾塑性解析による一次+二次相当応力(膜応力+曲げ応力)及び疲労の評価には、**式(3)**に示す繰返し応力-ひずみ曲線を使用する。

$$\varepsilon_{ta} = \frac{\sigma_a}{E_y} + \left(\frac{\sigma_a}{K_{CSS}}\right)^{\frac{1}{n_{CSS}}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- $\varepsilon_{ta}$  : 全ひずみ振幅
- $\sigma_a$  : 応力振幅(MPa)
- $E_y$  : 当該温度における縦弾性係数(MPa)
- $n_{CSS}, K_{CSS}$  : 材料特性値(**表 D.2**を参照)

**表 D.2**に記載されていない材料、溶接金属及び熱量影響部については繰返し応力-ひずみ試験を行い、**式(3)**を変形して得られる**式(4)**に最小自乗法を適用して  $n_{CSS}, K_{CSS}$  を求めてもよい。

$$\ln(\sigma_a) = n_{CSS} \ln\left(\varepsilon_{ta} - \frac{\sigma_a}{E_y}\right) + \ln(K_{CSS}) \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、**式(5)**に最小自乗法を適用して  $a$  と  $b$  を求めて、 $n_{CSS}$  と  $K_{CSS}$  を求める。

$$Y = aX + b \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$Y = \ln(\sigma_a), \quad X = \ln\left(\varepsilon_{ta} - \frac{\sigma_a}{E_y}\right), \quad n_{CSS} = a, \quad K_{CSS} = e^b$$

材料のヒステリシスループの応力範囲-ひずみ範囲曲線は、**式(3)**の両辺を 2 倍することによって**式(6)**で得られる。なお、材料特性値は**表 D.2**と同様である。

$$\varepsilon_{tr} = \frac{\sigma_r}{E_y} + 2\left(\frac{\sigma_r}{2K_{CSS}}\right)^{\frac{1}{n_{CSS}}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

- $\varepsilon_{tr}$  : 全ひずみ範囲(=  $2\varepsilon_{ta}$ )
- $\sigma_r$  : 応力範囲(=  $2\sigma_a$ ) (MPa)

## 4 接線係数

### 4.1 静的(単調負荷)真応力-真ひずみ曲線に基づく接線係数

真応力-真ひずみ曲線の接線係数  $E_t$  (MPa)は、**式(1)**を微分することにより**式(7)**で与えられる。

$$E_t = \frac{\partial \sigma_t}{\partial \varepsilon_t} = \left(\frac{\partial \varepsilon_t}{\partial \sigma_t}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{E_y} + D_1 + D_2 + D_3 + D_4\right)^{-1} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$D_1 = \frac{\sigma_t \left(\frac{1}{m_1} - 1\right)}{2 m_1 A_1 \left(\frac{1}{m_1}\right)}$$

$$D_3 = \frac{\sigma_t \left(\frac{1}{m_2} - 1\right)}{2 m_2 A_2 \left(\frac{1}{m_2}\right)}$$

$$D_2 = -\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{A_1 \left(\frac{1}{m_1}\right)} \right\} \left[ \sigma_t \left(\frac{1}{m_1}\right) \left\{ \frac{2}{K (\sigma_{uts} - \sigma_{ys})} \right\} \{1 - \tanh^2(H)\} + \frac{1}{m_1} \sigma_t \left(\frac{1}{m_1} - 1\right) \tanh(H) \right]$$

$$D_4 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{A_2 \left(\frac{1}{m_2}\right)} \right\} \left[ \sigma_t \left(\frac{1}{m_2}\right) \left\{ \frac{2}{K (\sigma_{uts} - \sigma_{ys})} \right\} \{1 - \tanh^2(H)\} + \frac{1}{m_2} \sigma_t \left(\frac{1}{m_2} - 1\right) \tanh(H) \right]$$

#### 4.2 外圧チャートに基づく接線係数

接線係数を求める別な方法として、JIS B 8265、附属書 1 及び ASME Sec. II, Part D, Subpart 3 の外圧チャート(外圧を受ける円筒胴及び球形胴の計算に用いる材料曲線)を用いてもよい。外圧チャートは材料ごとに規定されており、接線係数  $E_t$  は  $2B/A$  で与えられる。ここで、 $A$  は外圧チャートの横軸のひずみ、 $B$  は縦軸の応力値である。

表 D.1 静的(単調負荷)真応力-真ひずみ曲線の材料特性

材 料	最高温度(°C)	$m_2$	$\epsilon_p$
フェライト鋼 <sup>a)</sup>	480	0.60 (1.00 - R)	2.0E - 5
オーステナイト系ステンレス鋼, ニッケル合金鋼	480	0.75 (1.00 - R)	2.0E - 5
二相ステンレス鋼	480	0.70 (0.95 - R)	2.0E - 5
析出硬化型ニッケル基合金	540	1.09 (0.93 - R)	2.0E - 5
アルミニウム合金	120	0.52 (0.98 - R)	5.0E - 6
銅合金	65	0.50 (1.00 - R)	5.0E - 6
チタン合金 ジルコニウム合金	260	0.50 (0.98 - R)	2.0E - 5

注<sup>a)</sup> 炭素鋼、低合金鋼、フェライト系ステンレス鋼、マルテンサイト系ステンレス鋼、鉄ベース時効硬化ステンレス鋼を含む。

表 D.2 繰返し応力-ひずみ曲線の材料特性

材 料	温度 (°C)	$n_{CSS}$	$K_{CSS}$ (MPa)
炭素鋼 (厚さ 20 mm, 母材)	20	0.128	757
	200	0.134	728
	300	0.093	741
	400	0.109	666
炭素鋼 (厚さ 20 mm, 溶接金属)	20	0.110	695
	200	0.118	687
	300	0.066	695
	400	0.067	549
炭素鋼 (厚さ 50 mm, 母材)	20	0.126	693
	200	0.113	636
	300	0.082	741
	400	0.101	643
炭素鋼 (厚さ 100 mm, 母材)	20	0.137	765
	200	0.156	798
	300	0.100	748
	400	0.112	668
1Cr-0.5Mo (厚さ 20 mm, 母材)	20	0.116	660
	200	0.126	656
	300	0.094	623
	400	0.087	626
1Cr-0.5Mo (厚さ 20 mm, 溶接金属)	20	0.088	668
	200	0.114	708
	300	0.085	683
	400	0.076	599
1Cr-0.5Mo (厚さ 50 mm, 母材)	20	0.105	638
	200	0.133	684
	300	0.086	607
	400	0.079	577

表 D.2 繰返し応力-ひずみ曲線の材料特性(続き)

材 料	温度 (°C)	$n_{CSS}$	$K_{CSS}$ (MPa)
1Cr-1Mo-0.25V	20	0.128	1,082
	400	0.128	912
	500	0.143	815
	550	0.133	693
	600	0.153	556
2.25Cr-1Mo	20	0.100	796
	300	0.109	741
	400	0.096	730
	500	0.105	652
	600	0.082	428
9Cr-1Mo	20	0.117	975
	500	0.132	693
	550	0.142	609
	600	0.121	443
	650	0.125	343
0.40C-1Cr (焼戻し 550 °C/60 min 水冷) a)	20	0.182	1,838
0.40C-1Cr (焼戻し 600 °C/60 min 水冷) a)	20	0.175	1,636
0.40C-1Cr (焼戻し 650 °C/60 min 水冷) a)	20	0.164	1,398
0.35C-1Cr-0.2Mo (焼戻し 550 °C/60 min 水冷) a)	20	0.187	1,970
0.35C-1Cr-0.2Mo (焼戻し 600 °C/60 min 水冷) a)	20	0.183	1,754
0.35C-1Cr-0.2Mo (焼戻し 650 °C/60 min 水冷) a)	20	0.150	1,345
0.39C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo (焼戻し 580 °C/60 min 水冷) b)	20	0.130	1,698
0.39C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo (焼戻し 630 °C/60 min 水冷) b)	20	0.139	1,541
0.39C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo (焼戻し 680 °C/60 min 水冷) b)	20	0.136	1,345
0.13C-1.2Mn-0.28Si (母材)	20	0.134	902
0.13C-1.2Mn-0.28Si (溶接金属)	20	0.107	874
0.13C-1.2Mn-0.28Si (熱影響部)	20	0.121	882

表 D.2 繰返し応力-ひずみ曲線の材料特性(続き)

材 料	温度 (°C)	$n_{CSS}$	$K_{CSS}$ (MPa)
SUS310S	20	0.087	634
	400	0.131	666
	600	0.101	615
	700	0.105	455
SUS304	20	0.171	1,227
	400	0.095	590
	500	0.085	550
	600	0.090	450
	700	0.094	306
SUS304 (アニール材)	20	0.334	2,275
21Cr-33Ni-42Fe (NCF800H)	20	0.070	631
	500	0.085	762
	600	0.088	729
	700	0.092	553
	800	0.080	315
アルミニウム合金 (Al-4.5Zn-0.6Mn)	20	0.058	453
アルミニウム合金 (Al-4.5Zn-1.5Mg)	20	0.047	511
アルミニウム合金 (1100-T6)	20	0.144	154
アルミニウム合金 (2014-T6)	20	0.132	963
アルミニウム合金 (5086)	20	0.139	662
アルミニウム合金 (6009-T4)	20	0.124	577
アルミニウム合金 (6009-T6)	20	0.128	633
銅合金	20	0.263	683

**注記** 中間の温度においては、線形補間により材料特性を求める。

**注 a)** 焼ならし 870 °C/30 min 空冷, 855 °C/30 min 油焼入れ

**b)** 焼ならし 870 °C/30 min 空冷, 845 °C/30 min 油焼入れ

## 附属書 E(規定) 穴補強

### 序文

この附属書は、穴補強の設計手法を規定する。

### 1 適用範囲

圧力荷重のみを受ける耐圧胴の穴に対して、その形状、補強とその分布をもとに穴補強設計する方法を規定する。本体の 6.2, 6.3, 6.4 に対しても満足しなければならない。ここではノズル又は胴に加わる配管荷重に対する規定は含まない。

### 2 穴の形状及び寸法

穴は円筒胴又は円筒容器との接合断面で、次の a)～d) の制限による円形又は楕円形状とする。

- a) 穴内径の長軸が短軸の 1.5 倍以内
- b) 穴の最大内径は胴部内径の 1/2 以下
- c) 内面で測った近接穴の中心間弧の距離は、次の 1)～3) による。
  - 1) 鏡板に穴がある場合 穴内半径の和の 3 倍以上
  - 2) 円筒胴に穴がある場合 容器の長手方向に対しては周方向に測った穴内半径の和の 2 倍以上
  - 3) 二つのノズルが長手でも周でもないラインにある場合  $\sqrt{(l_c/2)^2 + (l_l/3)^2}$  の距離が穴内半径の和以上

ここで、

$l_c, l_l$  : 周及び長手方向成分の内面側表面に沿ったノズル中心間距離(mm)

- d) 補強は穴端に、その中心を通る全ての面に対して面積規定及び分布規定を満足しなければならない。

### 3 補強を必要としない円形穴

次の a)～c) を満足する円形穴は、補強を必要としない。

- a) 単一穴  $D_i(0.077Y - 0.0725)$  以下の直径の穴
- b) 複数穴 直径  $0.887 D_i \sqrt{Y^2 - 1}$  の円内に位置し、補強しない穴の直径の和が  $D_i(0.09624Y - 0.0906)$  以下の複数穴

ここで、

$D_i$  : 穴の位置における容器胴の内径(mm)

$Y$  : 容器胴の内外径比(外径/内径)

- c) 穴の中心間距離が内面で測った距離でその直径の和の 1.5 倍以上の二つの穴 補強されない穴の中心から局部応力集中域との距離が  $0.887 D_i \sqrt{Y^2 - 1}$  以上の二つの穴  
局部応力集中域とは、一次局部膜応力が  $0.73 S_y$  を越える部分である。ただし、補強されない穴によって生じる一次局部膜応力部分はこの局部応力集中域とみなさない。

#### 4 胴及び鏡板の穴の補強に必要な面積

胴及び成形鏡板の穴の補強に必要な最小断面積は、次の a), b) による。

a) **内圧に対する設計** 穴の補強に必要な最小断面積は次式による。

$$A = d t_r F \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$A$  : 穴の補強に必要な最小断面積(mm<sup>2</sup>)

$d$  : 補強が必要な穴の内径(mm)

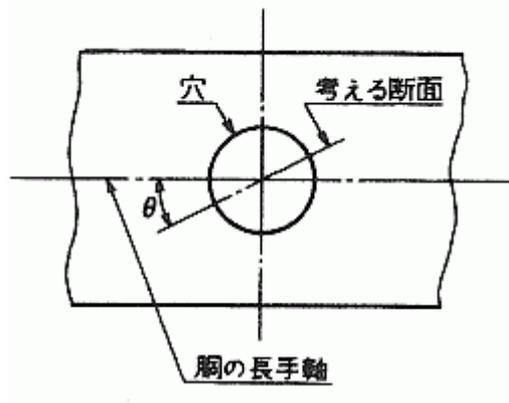
$t_r$  : 穴がない場合の最小厚さ(mm)

$F$  : 穴補強の計算に用いる修正係数であって、**図 E.1** に示すように、考える断面が円筒胴の長手軸となす角度  $\theta$  によって**表 E.1** の値を用いる。当該断面が鏡板の球部にある場合は、1.0 とする。

b) **外圧に対する設計** 上記 a) によって算出した最小断面積の 50% とする。

**表 E.1**  $F$  の値

$\theta$ (度)	$F$
0	1.000
10	0.985
20	0.942
30	0.875
40	0.794
45	0.750
50	0.707
60	0.625
70	0.559
80	0.515
90	0.500



**図 E.1** 穴の補強

**注記**  $F = (1 + \cos^2\theta)/2$

#### 5 平鏡板穴の補強

平鏡板の取付く円筒胴の内径の半分を超えない直径の穴をもつ平鏡板の補強に必要な最小断面積は、次式による。

$$A = 0.5 d t_r \dots\dots\dots(2)$$

#### 6 補強の条件

穴中心を含み、かつ、垂直な断面について、有効とみなされる補強の範囲は次の規定を満足しなければならない。ノズルの記号及び寸法は**図 E.2** による。

## 6.1 容器壁に沿った有効範囲

容器壁の公称肉厚の中心面に沿って測った補強の有効範囲は、次の **a)**、**b)** の条件を満足しなければならない。

- a)** 必要な補強の 100%が、穴の中心軸のそれぞれの側に対して、次のいずれか大きい方の距離以内になければならない。
- 1) 腐れ代を除いた穴の直径
  - 2) 腐れ代を除いた穴の半径、容器壁の厚さ及びノズルネックの厚さの合計
- b)** 必要な補強の 2/3 が穴の中心軸のそれぞれの側に対して、次のいずれか大きい方の距離以内になければならない。
- 1)  $r + 0.5 \sqrt{R_m t}$
  - 2) 腐れ代を除いた穴の半径、容器壁の計算に用いる厚さ及びノズルネックの計算に用いる厚さの合計

## 6.2 容器壁に垂直方向の有効範囲

容器壁に垂直方向に測った補強の有効範囲は、次の **a)**～**c)** による。

- a)** 図 E.2 a), b) に対しては、次のいずれか大きい方の値とする。

$$0.5 \sqrt{r_m t_n} + K \quad \text{又は} \quad 1.73 x + 2.5 t_p + K$$

ただし、この有効範囲は、 $2.5 t$  又は  $L + 2.5 t_p$  のいずれかを超えてはならない。

ここで、

$$K = 0.73 r_2$$

$$L = t_n + \text{テーパ部の長さ}$$

- b)** 図 E.2 c) に対しては、次の **1)**、**2)** による。
- 1)  $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  の場合、次のいずれか大きい方の値とする。

$$0.5 \sqrt{r_m t_n'} \quad \text{又は} \quad L' + 2.5 t_p \leq t$$

- 2)  $\theta < 30^\circ$  の場合、次のいずれか大きい方の値とする。

$$0.5 \sqrt{r_m t_n'} \quad \text{又は} \quad 1.73 x + 2.5 t_p \leq 2.5 t$$

ここで、

$$t_n' = t_p + 0.667 x$$

$$r_m = r + 0.5 t_n'$$

その他は、図 E.2 c) を参照

- c)** 図 E.2 d) に対しては、次のいずれか大きい方の値とする。

$$0.5 \sqrt{r_m t_n} + t_e \quad \text{又は} \quad 2.5 t_n + t_e \leq 2.5 t$$

ただし、 $t_e$  は、 $1.5 t$  又は  $1.73 W$  を超えてはならない。ここで、 $W$  は付加された強め材の幅である。

## 7 補強強め材として算入できる部分の面積

補強強め材として算入できる部分の面積は、次の a)～e) による。

- a) 厚さから本体の 6.2 に示す静的設計規定を満足する最小厚さを差し引いた腐れ代を除く部分
- b) ノズルネックの厚さから最小厚さを差し引いた腐れ代を除く部分、ただし、ノズルが容器と一体形又は完全とけ込み溶接で取り付けられた場合に限る。
- c) 容器壁、ノズル又はその両方と完全に連続した金属部分
- d) 上記 b), c) に規定される補強として考える金属は、次の制限を満足しなければならない。

$$|(\alpha_r - \alpha_v) \Delta T| \leq 0.0008 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

$\alpha_r$  : 補強金属の設計温度での平均線膨張係数(mm/mm°C)

$\alpha_v$  : 容器金属の設計温度での平均線膨張係数(mm/mm°C)

$\Delta T$  : 21°Cから運転温度までの温度差、又は最低運転温度と最高運転温度との温度差のいずれか大きい方の値

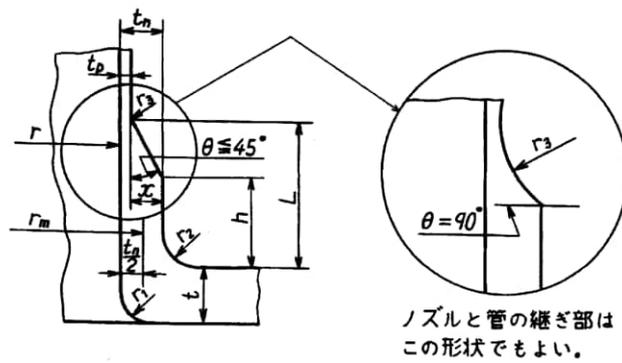
この制限を超える設計に対しては、ノズルの補強範囲内にある金属であっても、補強として扱ってはいけない。

**注記** d) の制限を超える場合は、疲労解析の結果も満足しないであろう。

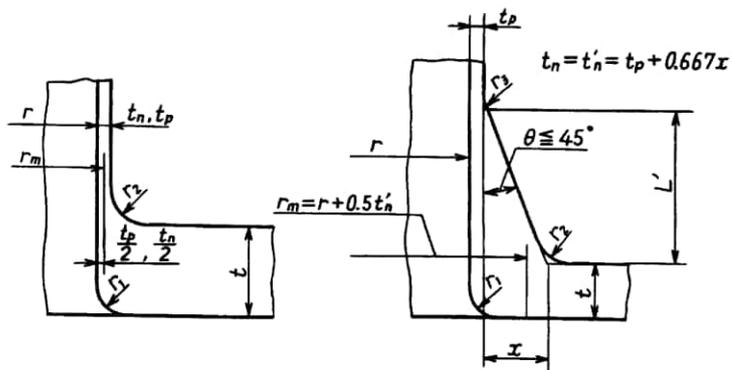
- e) 補強に適用される金属は、二つ以上の穴に共通して適用してはならない。

## 8 強め材の強度

ノズル材の設計温度での降伏強さは、容器壁の設計温度での降伏強さの 80%以上なければならない。低い降伏強さの材料を使う場合は、容器壁とノズルの降伏強さに比例して必要補強面積を増加させる。その逆の場合は、補強面積を減少させない。疲労解析には、当該箇所の材料強度を使用しなければならない。

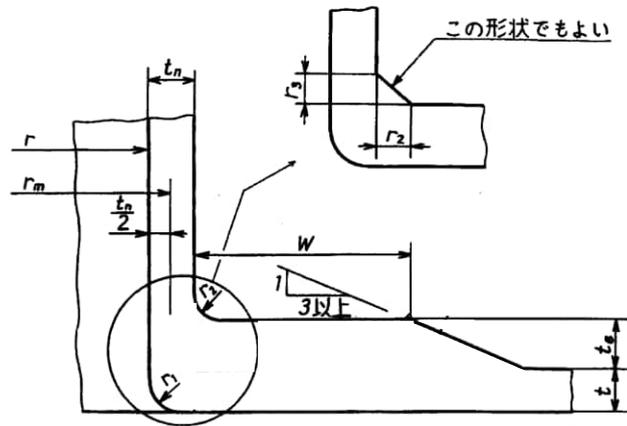


a)



b)

c)



d)

図 E.2 ノズルの記号及び寸法†

## 附属書 F(規定) 交差穴の応力集中係数

### 序文

この附属書は、交差穴の応力集中係数について規定する。

### 1 適用範囲

圧力荷重を受ける端部の閉じた円筒形状又はブロック形状の耐圧胴の穴に対して、交差部の応力集中係数を与える。この附属書では穴の補強は考慮しない。補強の必要性は**附属書 E**による。

### 2 交差穴応力集中係数

**図 F.1** に示すような、円筒形状又はブロック形状の耐圧胴の交差穴に対して、応力集中部の応力は、**附属書 J** の式 (16) に応力集中係数  $K_t$  を乗じることにより求められる。応力集中係数  $K_t$  は、**図 F.2**、**図 F.3** 及び**表 F.1**、**表 F.2** による。表に示す  $D_H/D_I$ 、 $Y(= D_O/D_I)$  の値の間にある場合は、内そうで求めてよい。

ここで、

$D_O$  : 円筒形状の場合は外径、ブロック形状の場合は**図 F.1 (b)** の寸法  
(長方形ブロックの場合は短い方の辺の幅)(mm)

$D_I$  : 主穴の内径(容器の胴の内径)(mm)

$D_H$  : 副穴の内径(容器の胴の穴の内径)(mm)

$K_t$  : 応力集中係数で、交差穴が無い胴の内面の周方向応力に対する、交差穴における最大応力の比

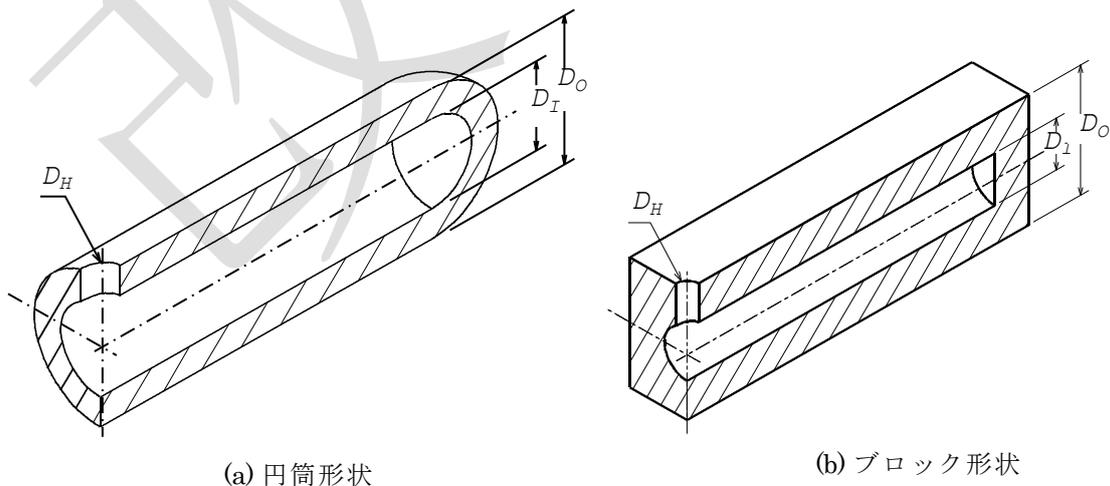


図 F.1 円筒及びブロック形状

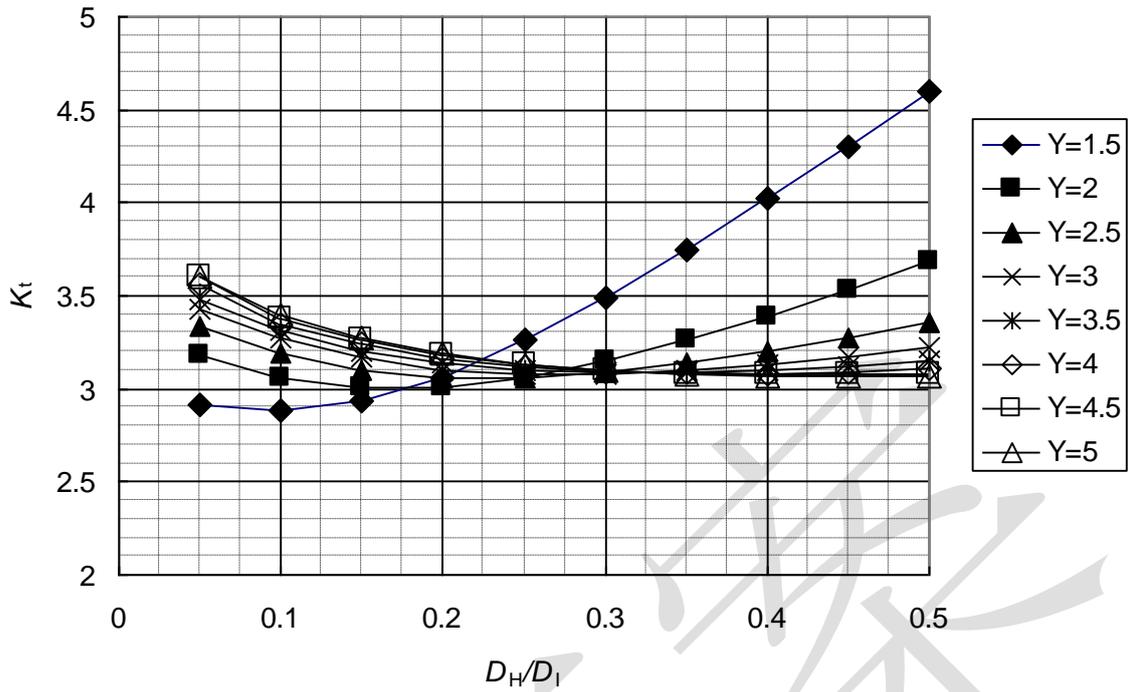


図 F.2 円筒形状の交差穴応力集中係数  $K_t$

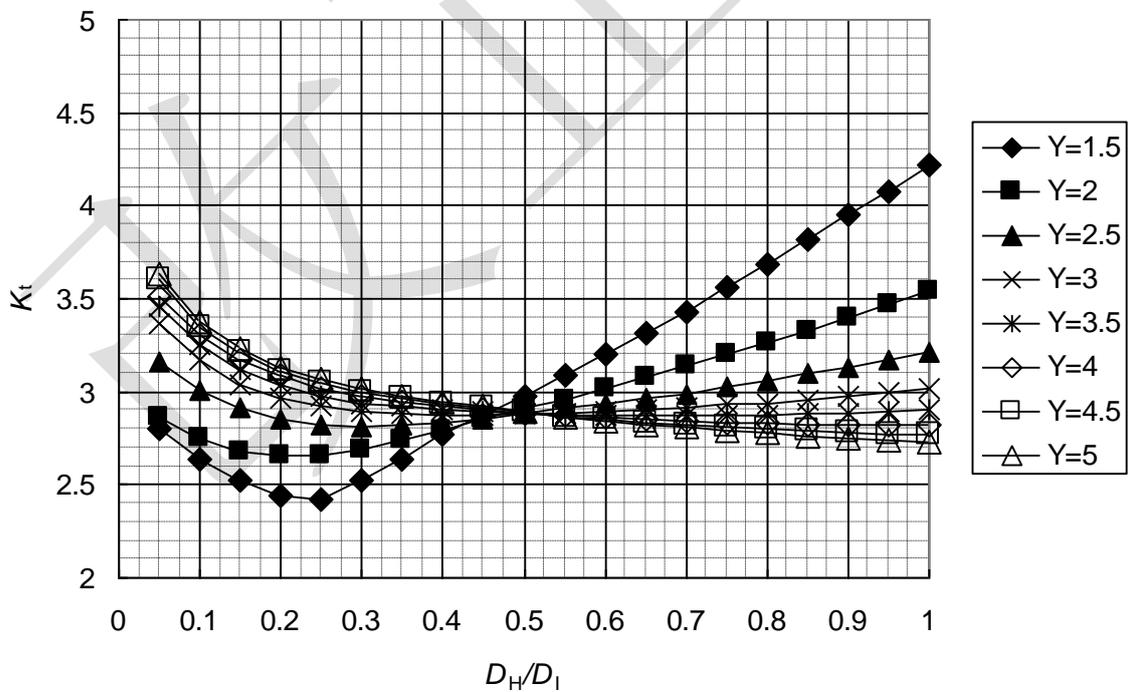


図 F.3 ブロック形状の交差穴応力集中係数  $K_t$

表 F.1 円筒形状の交差穴応力集中係数  $K_t$

$D_H/D_I$	$Y(=D_0/D_I)$							
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.05	2.91	3.18	3.34	3.43	3.48	3.56	3.60	3.60
0.10	2.88	3.06	3.19	3.27	3.32	3.35	3.38	3.40
0.15	2.93	3.01	3.10	3.17	3.20	3.24	3.26	3.27
0.20	3.06	3.01	3.06	3.10	3.14	3.16	3.18	3.19
0.25	3.26	3.06	3.06	3.08	3.10	3.12	3.13	3.13
0.30	3.49	3.15	3.09	3.08	3.09	3.09	3.10	3.10
0.35	3.75	3.26	3.14	3.10	3.09	3.09	3.08	3.08
0.40	4.02	3.39	3.20	3.13	3.10	3.08	3.08	3.07
0.45	4.30	3.53	3.27	3.17	3.12	3.09	3.08	3.07
0.50	4.60	3.68	3.36	3.22	3.15	3.11	3.08	3.07

表 F.2 ブロック形状の交差穴応力集中係数  $K_t$

$D_H/D_I$	$Y(=D_0/D_I)$							
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.05	2.80	2.86	3.16	3.37	3.46	3.51	3.60	3.63
0.10	2.64	2.75	3.01	3.17	3.25	3.30	3.35	3.38
0.15	2.52	2.68	2.91	3.04	3.12	3.17	3.21	3.23
0.20	2.44	2.66	2.85	2.97	3.04	3.09	3.11	3.13
0.25	2.42	2.66	2.82	2.92	2.98	3.02	3.05	3.07
0.30	2.52	2.69	2.81	2.89	2.94	2.98	3.00	3.02
0.35	2.64	2.74	2.82	2.88	2.92	2.95	2.97	2.98
0.40	2.77	2.79	2.83	2.87	2.90	2.92	2.93	2.95
0.45	2.87	2.85	2.85	2.87	2.89	2.90	2.91	2.92
0.50	2.98	2.91	2.88	2.88	2.88	2.88	2.89	2.89
0.55	3.09	2.96	2.91	2.88	2.87	2.87	2.86	2.86
0.60	3.20	3.02	2.94	2.89	2.87	2.86	2.85	2.84
0.65	3.31	3.08	2.97	2.90	2.87	2.85	2.83	2.82
0.70	3.43	3.14	2.99	2.91	2.87	2.84	2.82	2.81
0.75	3.56	3.20	3.03	2.93	2.87	2.83	2.81	2.79
0.80	3.69	3.26	3.06	2.94	2.87	2.83	2.80	2.78
0.85	3.82	3.33	3.10	2.96	2.88	2.82	2.79	2.76
0.90	3.95	3.40	3.13	2.98	2.88	2.82	2.78	2.75
0.95	4.08	3.47	3.17	3.00	2.89	2.82	2.77	2.74
1.00	4.22	3.54	3.21	3.02	2.90	2.82	2.77	2.73

## 附属書 G(規定) 円筒胴の平鏡板

### 序文

この附属書は、内圧荷重に対して円筒胴の一体型平鏡板の厚さと形状を規定する。ただし、弾塑性解析(6.2.3)や弾性解析(附属書 J)により設計した場合にはこの規定に従う必要はない。

### 1 厚肉容器(容器の内外径比 $D_o/D_i$ が 1.25 以上の場合)の一体型平鏡板

#### 1.1 制限

内圧荷重に対して本体の 6.2.3 又は附属書 J により設計を行わない場合、一体型平鏡板形状は、次の a)～e)の制限を受ける(図 G.1 を参照)。

- a) 最小内側コーナー半径  $R_c$  は、胴の厚さの 25%とする。
- b) 内側コーナーの接線からの一体型平鏡板の厚さ  $t_b$  は(図 G.1 による)、胴の厚さ以上とする。また、胴の厚さ  $t_w$  の 2 倍を超えてはならない。
- c) 一体型平鏡板の厚さは次式で計算する。

1.5  $\leq Y \leq 2.25$ , かつ  $R_c = 0.25 t_w$  のとき,

$$t_b = t_w(-1.0667 Y^3 + 6.80 Y^2 - 15.433 Y + 13.45) \dots\dots\dots(1)$$

$Y > 2.25$ , かつ  $R_c \geq 0.25 t_w$  のとき,

$$t_b = t_w \dots\dots\dots(2)$$

- d) 図 G.1 に示す角度  $\alpha$  は、最大  $10^\circ$ とする。
- e) 一体型平鏡板の穴の径  $D_{op}$  は容器内径の 15%を越えてはならない。また、穴は容器の中心線に設ける。

#### 1.2 疲労解析に用いる応力

本体の 6.3 により疲労評価されるコーナー部の主応力は、1.25  $\leq Y \leq 4.0$ , かつ、 $R_c = 0.25 t_w$  のときに次式で計算する。

$$\sigma_1 = P \left\{ 0.6322 - 1.516 Y + 4.5731 \frac{Y}{\ln(Y)} - 19.1428 \frac{1}{\sqrt{Y}} + 31.0567 \frac{\ln(Y)}{Y^2} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_2 = P \left\{ -0.5718 + 0.1141 Y + 1.0208 \frac{1}{\ln(Y)} + 1.6096 \frac{\ln(Y)}{Y^2} - 1.3667 \frac{1}{Y^2} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma_3 = -P \dots\dots\dots(5)$$

### 2 薄肉容器(容器の内外径比 $D_o/D_i$ が 1.25 未満の場合)の一体型平鏡板

#### 2.1 制限

一体型平鏡板形状は、次の a)～d)の制限を受ける。

- a) 一体型平鏡板の最小厚さは、次式による(図 G.2 を参照)。応力解析による評価は必要ない。

$$t_b = D_i(1.5 C P/S_y)^{0.5} \dots\dots\dots(6)$$

b) 疲労評価と破壊力学評価に用いるコーナー部の応力強さ  $S$  (MPa) は次式による。

$$S = 1.8 C P (D_I/t_b)^2 \dots\dots\dots (7)$$

c) 式(6)と式(7)で使われる  $C$  の値は、次による。

- 1) 内側コーナー半径が平鏡板の最小必要厚さの3倍以上の場合には、 $C = 0.22$  とする。
- 2) 内側コーナー半径が平鏡板の最小必要厚さの3倍未満の場合には、 $C = 0.44$  とする。ただし、内側コーナー半径は胴の厚さ  $t_w$  の25%以上とする。

d) 厚さの異なる円筒胴の場合、円筒胴長さについて特別な要求事項はない。両者の厚さが異なる場合には、3:1のテーパを設ける。

### 3 ねじ込みふたのねじの荷重分担

ねじ込みふたのねじの荷重分担は、次の a) ~ f) を満足する場合には、5に示した式を用いて計算する。

- a) ねじ部とねじ込みふた板についての要求事項は、本体の6.6で与えられる。
- b) ねじ1山は、全断面について360°を1回転分と考える。ねじ山数は20以下とするが、最小数は4山とする。
- c) ねじ山の螺旋角度は、2°を超えてはならない。
- d) めねじは、大きくアンダーカットを設ける。
- e) おねじのねじ部は、めねじのねじ部よりも最小1山ピッチ分長くする。
- f) ねじ部は軸荷重を一様に受けておらず、アンダーカット部に最も近いめねじのねじ山に最大荷重を受ける。なお、ねじ山の番号はアンダーカットから採番する。

### 4 記号(図 G. 3, 図 G. 4, 図 G. 5 を参照)

$A_B$  : 容器軸に沿っためねじ部材の横断面積(mm<sup>2</sup>)  
 $= \pi (D_o^2 - D_p^2)/4$

$A_C$  : 容器軸に沿ったおねじ部材の横断面積(mm<sup>2</sup>)  
 $= \pi D_p^2/4$

$C_M$  : ふた板と容器の相乗たわみ係数(1/mm)  
 $= \left( \frac{1}{A_B} + \frac{1}{A_C} \right) P_T$

$C_T$  : ねじ部のたわみ係数(1/mm)  
 $= 2/D_p$

$D_o$  : 容器の外径(mm)

$D_p$  : ねじ部のピッチ径(mm)

$F_1$  : 1山目のねじ山にかかる荷重(N)

$F_2$  : 2山目のねじ山にかかる荷重(N)

$F_i$  :  $i$ 山目のねじ山にかかる荷重(N)

$F_n$  : 最終ねじ山にかかる荷重(N)

- $F_T$  : 全ねじ山の総荷重(N)
- $P_T$  : ねじのピッチ(mm)
- $S$  : 1ピッチの荷重を受けもつ断続ねじの分割数
- $S_i$  : 断続ねじ荷重(N)
- $S_M$  : ねじ込みふたとねじ加工を有する胴部の相乗たわみ係数(1/mm)  
=  $C_M/S$
- $S_T$  : ねじ部のたわみ係数(1/mm)  
=  $2 C_T S$
- $n$  : ねじ山総数

## 5 ねじの分担荷重

### 5.1 連続ねじ部

ねじの分担荷重は次式による<sup>1)</sup>。

$$F_i = F_{i+1} + \frac{C_M}{C_T} F_{\text{sum}} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

$$F_{\text{sum}} = \sum_{j=i+1}^n F_j \dots\dots\dots(9)$$

最終ねじ山の荷重  $F_n$  から始め、その前のねじ山の  $F_{n-1}$ ,  $F_{n-2}$  の順に荷重を算出する。

### 5.2 断続ねじ部

連続したねじ部と同様の式で分担荷重は与えられる。

$$S_i = S_{i+1} + \frac{S_M}{S_T} S_{\text{sum}} \dots\dots\dots(10)$$

ここで、

$$S_{\text{sum}} = \sum_{j=i+1}^n S_j \dots\dots\dots(11)$$

### 5.3 例

a) **連続ねじ部の場合** 一体である最終ねじ部の荷重は、**表 G. 1** に示す値を用いると次のようになる。

- $D_o$  : 26
- $D_p$  : 13
- $P_T$  : 1
- $n$  : 10
- $A_B$  : 398.197
- $A_C$  : 132.732
- $C_M$  : 0.01
- $C_T$  : 0.154

b) 断続ねじ部の場合  $S = 4$  (1/8 回転で取り出せるタイプ)として, 表 G. 2 に示す値となる。

参考文献

1) Crum, A. S. D., High Pressure Technology, ASME PVP, Vol.148, pp.43-53, (1988)

表 G. 1 連続ねじの例<sup>†</sup>

ねじ山	$F_i$ <sup>a)</sup>	$F_{sum}$	$C_M/C_T \times F_{sum}$	$F_i$ %
10	1.000	1.000	0.065	4.1
9	1.065	2.065	0.135	4.3
8	1.200	3.265	0.213	4.9
7	1.413	4.679	0.305	5.7
6	1.719	6.398	0.418	7.0
5	2.137	8.534	0.557	8.7
4	2.694	11.228	0.733	10.9
3	3.427	14.655	0.957	13.9
2	4.384	19.039	1.243	17.8
1	5.627	24.666	1.611	22.8

注記 <sup>a)</sup>  $F_t = 24.666$  ( $F_i$  の合計)

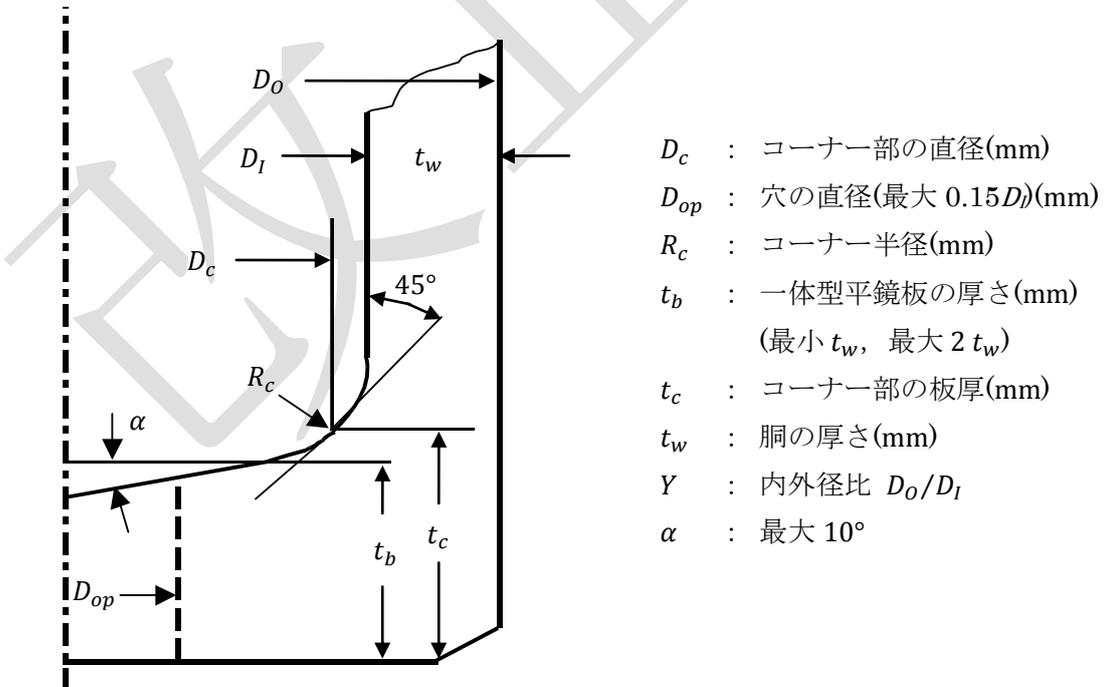


図 G. 1 厚肉容器の一体型平鏡板

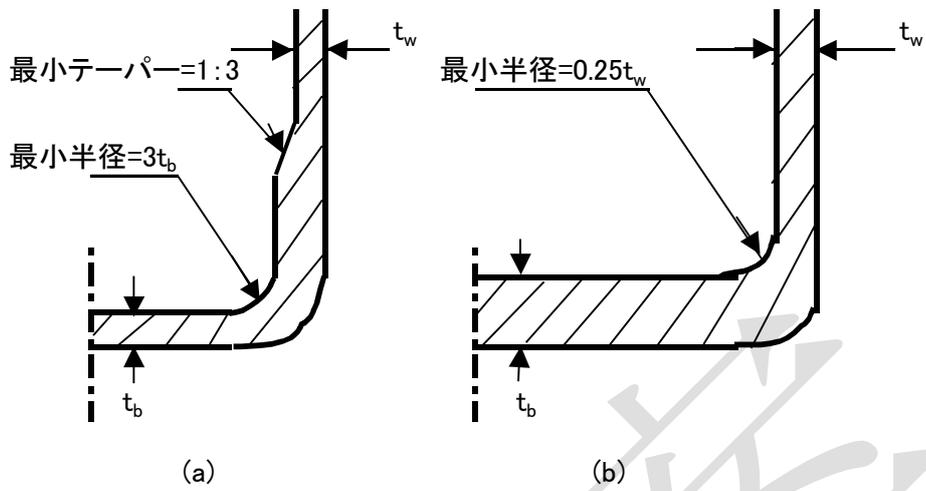


図 G.2 応力解析を必要としない薄肉容器の一体型平鏡板

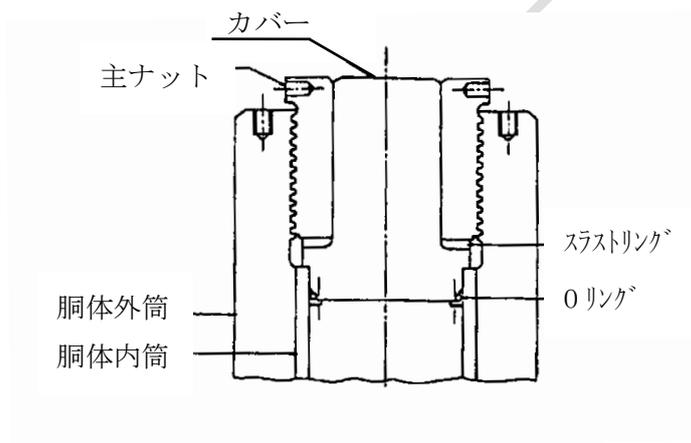


図 G.3 ねじを有するふた板

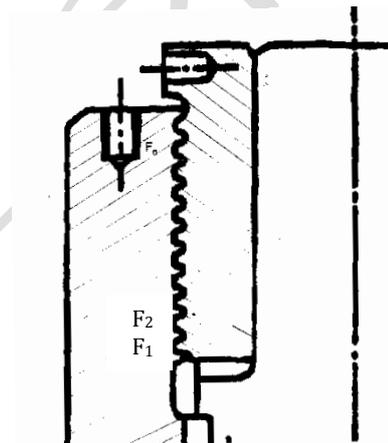


図 G.4 ねじの分担荷重

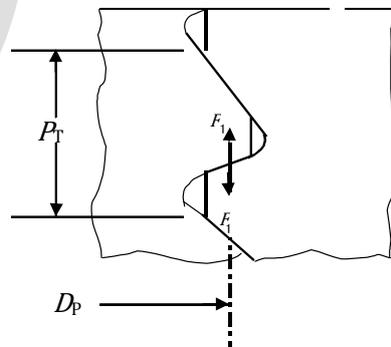


図 G.5 第1番目のねじ山詳細

表 G. 2 断続ねじの例†

ねじ山番号	分割番号	$S_i$	$S_{sum}$	$S_M/S_T \times S_{sum}$	$S_i\%$	ねじ山、%
10	40	1.000	1.000	0.002	1.52	6.12
10	39	1.002	2.002	0.004	1.53	...
10	38	1.006	3.008	0.006	1.53	...
10	37	1.012	4.020	0.008	1.54	...
9	36	1.020	5.041	0.010	1.56	6.33
9	35	1.031	6.072	0.012	1.57	...
9	34	1.043	7.115	0.015	1.59	...
9	33	1.058	8.172	0.017	1.61	...
8	32	1.074	9.247	0.019	1.64	6.74
8	31	1.093	10.340	0.021	1.67	...
8	30	1.114	11.454	0.023	1.70	...
8	29	1.138	12.592	0.026	1.74	...
7	28	1.163	13.755	0.028	1.77	7.36
7	27	1.191	14.947	0.030	1.82	...
7	26	1.222	16.169	0.033	1.86	...
7	25	1.255	17.424	0.036	1.91	...
6	24	1.290	18.714	0.038	1.97	8.24
6	23	1.329	20.043	0.041	2.03	...
6	22	1.370	21.412	0.044	2.09	...
6	21	1.413	22.826	0.047	2.15	...
5	20	1.460	24.285	0.050	2.23	9.38
5	19	1.509	25.795	0.053	2.30	...
5	18	1.562	27.357	0.056	2.38	...
5	17	1.618	28.975	0.059	2.47	...
4	16	1.677	30.652	0.063	2.56	10.82
4	15	1.739	32.391	0.066	2.65	...
4	14	1.806	34.197	0.070	2.75	...
4	13	1.875	36.072	0.074	2.86	...
3	12	1.949	38.021	0.078	2.97	12.62
3	11	2.027	40.047	0.082	3.09	...
3	10	2.108	42.156	0.086	3.21	...
3	9	2.194	44.350	0.090	3.35	...
2	8	2.285	46.635	0.095	3.48	14.83
2	7	2.380	49.015	0.100	3.63	...
2	6	2.480	51.495	0.105	3.78	...
2	5	2.585	54.080	0.110	3.94	...
1	4	2.695	56.775	0.116	4.11	17.54
1	3	2.811	59.586	0.122	4.29	...
1	2	2.933	62.519	0.128	4.47	...
1	1	3.060	65.579	0.134	4.67	...

## 附属書 H(規定) クランプ継手の設計

### 序文

この附属書は、圧力容器蓋部や配管の接続に使用される分割型クランプ継手の設計について規定する。設計荷重は本体の 6.1.4 に規定するように、内圧だけでなく、外力なども考慮する必要がある。その場合は、ASME Sec. VIII Div. 1 UG-44 又は有限要素法解析などで評価しなければならない。

### 1 一般要求

一般要求は、次の a)～d) による。

- a) ガasketは図 H.1 (a) に示すような、自緊型ガasketを使用することが推奨される。自緊型ガasket以外のものに対するのガasket係数  $m$  は、他の規格を用いてもよい。ガasket接触面の変形を考慮して、ハブ面はガasketシール側外面で金属接触するように設計することが望ましい。このためにハブ面にくぼみをつけるか、金属のスペーサを使用してもよい。この場合、運転と組立時の荷重でハブ面、又はスペーサに降伏が起きないように、接触面積を十分設けなければならない。
- b) クランプの内表面とハブ外表面と平行で、締付時のくさび効果を利用しないクランプを設計してもよいが、その場合はクランプ角  $10^\circ$  に対して設計したクランプ継手のクランプとハブの要求とボルト締め条件を満たさなければならない。
- c) この附属書によって設計したクランプは、分割部ごとに 2 本以上のボルトを設ける。
- d) ハブ面とクランプの設計は、ハブとクランプのオーバーストレスを防ぐため、ガasketからの漏れがあった場合、適切なサイズで圧力を逃すような通気孔と検知孔を設ける。

### 2 材料

クランプ継手の材料は次の a)、b) による。

- a) ハブ及びクランプに使用する材料は、この規格の要求事項に従わなければならない。また、板材から加工してはいけない。
- b) ボルトの最小径は 13mm として、スタッド、ナット及び座金は本体の 5.3 及び 6.5 による。

### 3 記号

クランプ継手の設計に使用される式には、次に示す記号を用いる。

$A_b$  : 実際に使用されるクランプラグ毎のボルトの合計断面積(mm<sup>2</sup>)

$A_c$  : クランプの合計断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= A_{c1} + A_{c2} + A_{c3}$$

$A_{c1}$  : クランプの部分断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= (C_w - 2 C_t) C_t$$

$A_{c2}$  : クランプの部分断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= 2 C_t^2 - \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) r^2$$

$A_{c3}$  : クランプの部分断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= (C_w - C_g) l_c$$

$A_m$  : クランプラグ毎のボルトの所要総有効断面積で、 $A_{m1}$ と $A_{m2}$ のうち大きい方の値(mm<sup>2</sup>)

$A_{m1}$  : 運転条件でのクランプラグ毎のボルトの所要総有効断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= W_{m1}/2S_b$$

$A_{m2}$  : 締付条件でのクランプラグ毎のボルトの所要総有効断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= W_{m2}/2S_a$$

$A_o$  : ハブリップの外径(mm)

$A_{or}$  : クランプリップとハブ肩部との接触面の外径(mm)

$$= A_o - 2 r_h$$

$A_3$  : ハブの長手方向せん断断面積で、 $A_{3a}$ と $A_{3b}$ の小さい値(mm<sup>2</sup>)

$A_{3a}$  : クランプとハブとの接触面におけるハブの周—長手方向面での長手方向せん断断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \pi C_{ir} T_h$$

$A_{3b}$  : 45°円すい面におけるハブの長手方向せん断断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \frac{\pi \sqrt{2}}{4} (A_o^2 - C_{ir}^2)$$

$A_5$  : 半径一周方向面における最小クランプ断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \pi (C_n + C_t) C_t - A_{5b}$$

$A_{5b}$  : 外付けラグが使用されずクランプ本体にボルトが植え込まれた時の、半径一周方向面におけるクランプボルト穴の総断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \sum A_{5i} \quad (\text{図H. 1(c)に示される外付けボルト用ラグの場合は, } A_{5b} = 0 \text{とする。})$$

$A_{5i}$  : 半径一周方向面における個々のボルト穴の断面積(mm<sup>2</sup>)

$A_6$  : 半径—長手方向面の最小クランプ断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= A_c - A_{6b}$$

$A_{6b}$  : クランプ本体にボルトが植え込まれた場合の半径—長手方向面におけるクランプボルト穴の総断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \sum A_{6i} \quad (\text{図H. 1(c)に示される外付けボルト用ラグの場合は, } A_{6b} = 0 \text{とする。})$$

$A_{6i}$  : 半径—長手方向面における個々のボルト穴の断面積(mm<sup>2</sup>)

$A_7$  : クランプリップの長手方向せん断断面積で、 $A_{7a}$ と $A_{7b}$ の小さい方の値(mm<sup>2</sup>)

$A_{7a}$  : 周—長手方向面における直せん断面のクランプリップの長手方向せん断断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \pi A_{or} T_c$$

$A_{7b}$  : 45°円すい面におけるクランプリップの長手方向せん断断面積(mm<sup>2</sup>)

$$= \frac{\pi \sqrt{2}}{4} (A_{or}^2 - C_i^2)$$

- $B$  : ハブの内径 (mm)
- $B_c$  : 軸中心からボルト中心間の距離(mm)
- $C$  : 有効クランプ-ハブ接触円の直径(mm)  
 $= (A_{or} + C_{ir})/2$
- $C_g$  : 有効クランプ間隙(mm)
- $C_i$  : クランプの支圧部内径(mm)
- $C_{ir}$  : クランプリップとハブ肩部との接触面の内径(mm)  
 $= C_i + 2 r_c$
- $C_n$  : クランプネック部の内径(mm)
- $C_t$  : 有効クランプ厚さ(mm) ( $C_t$  は  $r$  以上とする。)
- $C_w$  : クランプ幅(mm)
- $C_6$  : 周方向曲げモーメントのアーム長さ(mm)  
 $= C_t - X_6$  ( $e_b < 0$  の場合は、 $C_6 = X_6$  とする。)
- $G$  : ガスケット反力円の直径(mm) (図H.1(a)を参照)
- $H$  : 運転条件又は締付条件に必要な長手方向荷重(N)
- $H_D$  : 内圧によってハブ内径面に作用する荷重(N)  
 $= \pi B^2 P/4$
- $H_e$  : 内圧によって作用する全荷重(N)  
 $= \pi G^2 P/4$
- $H_G$  : ガスケット荷重で次の式による(N)  
 $= [\pi W / \{2 \tan(\phi + \mu)\}] - (H + H_p)$
- $H_m$  : ガスケット締付要求値(N)  
 $= \pi b G y$
- $H_p$  : 継手接触面圧荷重(N)  
 $= 2 \pi b G m P$  (自緊ガスケットでは  $H_p = 0$ , 又は実際の保持力とする。)
- $H_T$  : 長手方向荷重とハブ内径面に作用する荷重との差(N)  
 $= H - H_D$
- $I_c$  : クランプ中立軸の断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)  
 $= \frac{1}{3} \{ (A_{c1} + A_{c2}) C_t^2 + A_{c3} l_c^2 \} - A_c X_b^2$
- $I_h$  : ハブ肩部の中立軸の断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)  
 $= \frac{g_1 T^3}{3} + \frac{g_2 h_2^3}{3} - (g_2 h_2 + g_1 T) \bar{h}^2$
- $I_5$  : 任意の半径-周方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最小値(mm<sup>4</sup>)  
 $= \{ \pi (C_n + C_t) C_t^3 / 3 \} - I_{5b} - A_5 X_5^2$
- $I_{5b}$  : ボルト穴による任意の半径-周方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最大値

(mm<sup>4</sup>)

$$= \sum (A_{5i})(X_i)^2 + \sum (A_{5i} \text{の図心における局部断面二次モーメント})$$

(第2項は、通常は無視してもよい。)

(**図H. 1 (d)**に示されるような外付けボルトラグを使用したときは、 $I_{5b} = 0$ とする。)

$I_6$  : 任意の周—長手方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最小値(mm<sup>4</sup>)

$$= I_c - I_{6b} - A_6 X_6^2 + A_c X_b^2$$

$I_{6b}$  : 任意の周—長手方向面におけるクランプの断面二次モーメントの最大値(mm<sup>4</sup>)

$$= \sum (A_{6i})(X_i)^2 + \sum (A_{6i} \text{の図心における局部断面二次モーメント})$$

(第2項は、通常は無視してもよい。)

(**図H. 1 (d)**に示されるような外付けボルトラグを使用したときは、 $I_{6b} = 0$ とする。)

$L_a$  : クランプボルト中心径からクランプラグジョイント体までの距離(mm)

(**図H. 1 (c)**を参照)

$L_h$  : クランプラグ高さ(mm) (**図H. 1 (c)**を参照)

$L_w$  : クランプラグ幅(mm) (**図H. 1 (d)**を参照)

$M_D$  :  $H_D$ によるモーメント(Nmm)

$$= H_D h_D$$

$M_F$  : オフセットモーメント(Nmm)

$$= H_D (g_1 - g_0)/2$$

$M_G$  :  $H_G$ によるモーメント(Nmm)

$$= H_G h_G$$

$M_H$  : ハブネックに作用するモーメント(Nmm)

$$= \frac{M_O}{1 + \frac{1.818}{\sqrt{B} g_1} \left\{ T - \bar{h} + \frac{3.305 I_h}{g_1^2 (B/2 + \bar{g})} \right\}}$$

$M_O$  : ハブに対する合計回転モーメント(Nmm)

$M_P$  : 圧力モーメント(Nmm)

$$= \pi P B T (T/2 - \bar{h})$$

$M_R$  : 半径方向クランプ平衡モーメント(Nmm)

$$= (\pi W/2) [\bar{h} - T + \{(C - N_H) \tan \phi\}/2]$$

$M_T$  :  $H_T$ によるモーメント(Nmm)

$$= H_T h_T$$

$M_5$  : クランプの長手方向応力による曲げモーメント(Nmm)

$$= H (l_m + X_5) + (\pi W/2)(C_g/2)$$

$M_6$  : クランプの周方向応力による曲げモーメント(Nmm)

$$= |e_b| W/2$$

$N_H$  : ハブネックの外径(mm)

- $P$  : 設計圧力(MPa)  
 $Q$  : ハブネックに作用するせん断力(N)  

$$= \frac{1.818 M_H}{\sqrt{B g_1}}$$
 $S_a$  : 室温における許容ボルト応力(MPa)  
 $S_b$  : 設計温度における許容ボルト応力(MPa)  
 $S_{YAC}$  : 室温(ガスケット締付条件)におけるクランプ材料の降伏強さ(MPa)  
 $S_{YAH}$  : 室温(ガスケット締付条件)におけるハブ材料の降伏強さ(MPa)  
 $S_{YOC}$  : 設計温度(運転条件)におけるクランプ材料の降伏強さ(MPa)  
 $S_{YOH}$  : 設計温度(運転条件)におけるハブ材料の降伏強さ(MPa)  
 $S_1$  : ハブネック外側における長手方向応力(MPa)  
 $S_2$  : ハブ内面におけるLámeの最大周方向応力(MPa)  
 $S_3$  : ハブ長手方向せん断応力(MPa)  
 $S_4$  : ハブネックにおけるハブ半径方向せん断応力(MPa)  
 $S_5$  : クランプボディ内径におけるクランプ長手方向応力(MPa)  
 $S_6$  : クランプボディ外径におけるクランプ周方向応力(MPa)  
 $S_7$  : クランプリップにおける最大せん断応力(MPa)  
 $S_8$  : クランプリップの曲げ応力(MPa)  
 $S_9$  : クランプラグの曲げ応力(MPa)  
 $S_{10}$  : クランプラグの最大せん断応力(MPa)  
 $S_{11}$  : クランプとハブの間の有効支圧応力(MPa)  
 $T$  : ハブ肩部の厚さ(mm)  
 $T_c$  : ハブの外側角部下のクランプリップ厚さ(mm)  

$$= \frac{1}{2} \{ C_w - C_g + (A_{or} - C) \tan \phi \}$$
 $T_h$  : クランプの内側角部下のハブ肩部厚さ(mm)  

$$= T - \left( \frac{C_{ir} - A_o}{2} + g_2 \right) \tan \phi$$
 $W$  : 適用する運転条件又はガスケット締付条件に必要な合計設計ボルト荷重(N)  
 $W_c$  : 一つのリップに対する合計有効クランプ締付荷重(N)  

$$= \pi W / \{ 2 \tan(\phi + \mu) \}$$
 $W_{m1}$  : 運転条件に必要な最小必要ボルト荷重(N)  
 $W_{m2}$  : ガスケット締付条件に必要な最小ボルト荷重(N)  
 $X_b$  : クランプボディのボルト穴を除く長手-半径方向面における中立軸から  $C_n$  で示されるクランプネックの内径までの基本クランプ寸法(mm)  

$$= \frac{(A_{c1} + A_{c2}) C_t - A_{c3} l_c}{2 A_c}$$
 $X_i$  : ボルト穴部から  $C_n$  で示されるクランプネックの内径までの半径方向平均距離(mm)

- $X_5$  : 中立軸までの修正クランプ寸法(mm)  

$$= \frac{\pi(C_n + C_t)(C_t^2/2) - \sum A_{5i} X_i}{A_5}$$
(図H.1(d)に示される外付けボルトラグの場合は、 $X_5 = C_t/2$ とする。)
- $X_6$  : 中立軸までの修正クランプ寸法(mm)  

$$= \frac{X_b A_c - \sum A_{6i} X_i}{A_6}$$
(図H.1(d)に示される外付けボルトラグの場合は、 $X_6 = X_b$ とする。)
- $Z$  : クランプとハブのテーパ部の角度(度)  
(初期締付け条件の場合は $Z = \phi + \mu$ 、運転条件の場合は $Z = \phi - \mu$ とする。)
- $b$  : ガスケット座の有効幅(mm)
- $e_b$  : ボルトからクランプ中心までの半径方向の距離(mm)  

$$= B_c - (C_i/2) - l_c - X_6$$
- $f$  : ハブ応力修正係数 (図H.3による)
- $\bar{g}$  : ハブ内径  $B$  からハブ肩部リングの中心までの半径方向距離(mm)  

$$= \frac{Tg_1^2 + h_2 g_2 (2g_1 + g_2)}{2(Tg_1 + h_2 g_2)}$$
- $g_0$  : 小径でのハブの厚さ(mm)
- $g_1$  : ネックでのハブの厚さ(mm)
- $g_2$  : ハブ肩部の高さ(mm) ( $g_2 \leq T$ とする)
- $h$  : ハブのテーパ長さ(mm)
- $\bar{h}$  : ハブ面からハブ肩部リング中心までの長手方向距離(mm)  

$$= \frac{T^2 g_1 + h_2^2 g_2}{2(Tg_1 + h_2 g_2)}$$
- $h_D$  :  $C$  と  $H_D$  が作用する位置の半径方向距離(mm)  

$$= \{C - (B + g_1)\}/2$$
- $h_G$  :  $C$  と  $H_G$  が作用する位置の半径方向距離(mm)
- $h_n$  : ハブのネック長さ(mm) ( $h_n$ の最小長さは、 $0.5 g_1$  と  $6 \text{ mm}$ の大きい方とする。)
- $h_T$  :  $C$  と  $H_T$  が作用する位置の半径方向距離(mm)  

$$= \{C - (B + G)/2\}/2$$
- $h_0 = \sqrt{B g_0}$  (mm)
- $h_2$  : ハブ肩部の平均厚さ(mm)  

$$= T - (g_2 \tan \phi)/2$$
- $l_c$  : 有効クランプリップ長さ(mm)
- $l_m$  : 有効クランプリップモーメントアーム(mm)  

$$= l_c - (C - C_i)/2$$
- $m$  : ガスケット係数 (圧力自緊型の場合は  $m = 0$  とする。)
- $r$  : クランプとハブ断面のコーナー半径(mm) (最小は  $6 \text{ mm}$  で、最大は  $C_t$  とする。)

- $r_c$  : クランプ内側コーナー半径(mm)
- $r_h$  : ハブ外側コーナー半径(mm)
- $\mu$  : 摩擦角(度)
- $\phi$  : クランプ肩角度(度) (最大35°)

#### 4 ボルト荷重

ボルト荷重は、次の a), b) による。

a) **計算上必要なボルト荷重** 計算に必要なボルト荷重は、次の 1), 2) による。

1) **運転条件で必要なボルト荷重  $W_{m1}$**

$$W_{m1} = \frac{2}{\pi} (H_e + H_p) \tan(\phi - \mu) \dots\dots\dots (1)$$

( $\phi - \mu$ ) < 5° の場合は、5° とする。

2) **ガスケット締付条件で必要なボルト荷重  $W_{m2}$**

$$W_{m2} = \frac{2}{\pi} H_m \tan(\phi + \mu) \dots\dots\dots (2)$$

$\mu$  < 5° の場合は、5° とする。

必要なボルトの所要総有効断面積  $A_m$  は、運転条件の  $A_{m1}$  とガスケット締付条件の  $A_{m2}$  のいずれか大きい値とする。組立時のボルトの曲げは考慮しなければならない。実際に使用されるクランプ毎のボルトの合計断面積  $A_b$  は、 $A_m$  より常に大きくなるようにボルトを定めなければならない。

b) **クランプ継手の設計に用いるボルト荷重**

運転条件 :  $W = W_{m1} \dots\dots\dots (3)$

初期締付条件 :  $W = (A_m + A_b) S_a \dots\dots\dots (4)$

ボルトの締付トルクを制御できる場合は、式(4)に代えて式(5)を使用する。

$$W = 2A_m S_a \dots\dots\dots (5)$$

上記のボルト荷重は 2 分割のクランプの場合で、3 分割のクランプの場合は、各々の値の 1.5 倍とする。

#### 5 長手方向荷重

クランプ継手の設計における長手方向荷重  $H$  は、式(6)及び式(7)で求める値とする。

運転条件 :  $H = H_e + H_p \dots\dots\dots (6)$

初期締付条件 :  $H = \frac{\pi W}{2 \tan(\phi + \mu)} \dots\dots\dots (7)$

## 6 ハブのモーメント

ハブに作用する全モーメント $M_O$ は、**式(8)**及び**式(9)**で求める値とする。

$$\text{運転条件：} \quad M_O = M_D + M_G + M_T + M_F + M_P + M_R \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{初期締付条件：} \quad M_O = \frac{\pi W(C - G)}{4 \tan(\phi + \mu)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$W$  は運転条件の場合は**式(3)**とし、初期締付条件の場合は**式(4)**又は**式(5)**に示す値を使用する。

## 7 ハブの応力の計算

ハブの応力は、運転時と初期締付条件の両者によって決定され、次の**a)**、**b)**による。

- a)** ハブネックにおける反力モーメント $M_H$ と反力せん断力 $Q$ は、それぞれ**式(10)**及び**式(11)**で求める値とする。

$$M_H = \frac{M_O}{1 + \frac{1.818}{\sqrt{B} g_1} \left\{ T - \bar{h} + \frac{3.305 I_h}{g_1^2 (B/2 + g)} \right\}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$Q = \frac{1.818 M_H}{\sqrt{B} g_1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

- b)** ハブの応力は、**式(12)～式(15)**で求める値とする。

ハブネック外側における長手方向応力

$$S_1 = f \left\{ \frac{P B^2}{4 g_1 (B + g_1)} + \frac{6 M_H}{\pi g_1^2 (B + g_1)} \right\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ハブ内面におけるLameの最大周方向応力

$$S_2 = P \left( \frac{N_H^2 + B^2}{N_H^2 - B^2} \right) \quad \dots\dots\dots(13)$$

ハブ長手方向せん断応力

$$S_3 = \frac{1.5 H}{A_3} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ハブネックにおけるハブ半径方向せん断応力

$$S_4 = \frac{1.5 Q}{\pi g_1 (B + g_1)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

## 8 クランプの応力の計算

クランプの応力は、運転時と初期締付時の両者によって決定される。クランプの応力は、**式(16)～式(22)**で求める値とする。

クランプボディ内径におけるクランプ長手方向応力

$$S_5 = \frac{H}{A_5} + \frac{M_5 (C_t - X_5)}{I_5} \dots\dots\dots(16)$$

クランプボディ外径におけるクランプ周方向応力

$$S_6 = \frac{W}{2 A_6} + \frac{M_6 C_6}{I_6} \dots\dots\dots(17)$$

クランプリップにおける最大せん断応力

$$S_7 = \frac{1.5 H}{A_7} \dots\dots\dots(18)$$

クランプリップの曲げ応力

$$S_8 = \frac{6 H l_m}{\pi C \{(C_w - C_g)/2\}^2} \dots\dots\dots(19)$$

クランプラグの曲げ応力

$$S_9 = 3 W \frac{L_a}{L_w L_h^2} \dots\dots\dots(20)$$

クランプラグの最大せん断応力

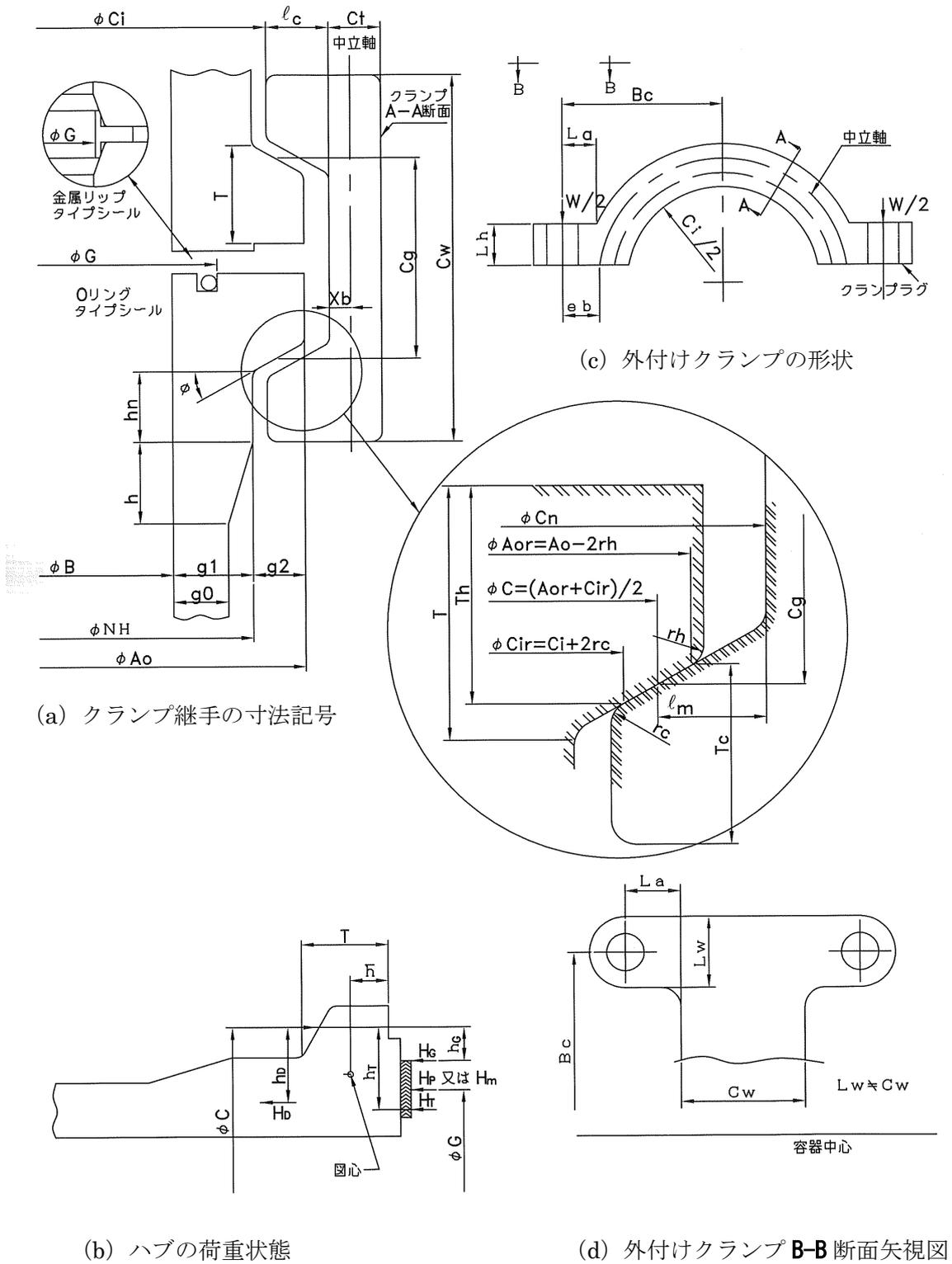
$$S_{10} = \frac{0.75 W}{L_w L_h} \dots\dots\dots(21)$$

クランプとハブの間の有効支圧応力

$$S_{11} = \frac{H}{\pi C (A_{or} - C_{ir})/2} \dots\dots\dots(22)$$

## 9 クランプ継手に対する許容設計応力

クランプ継手の寸法は運転時及び初期締付条件で、7 及び 8 により計算されるクランプとハブの応力が表 H. 1 で規定される許容応力を超えてはならない。



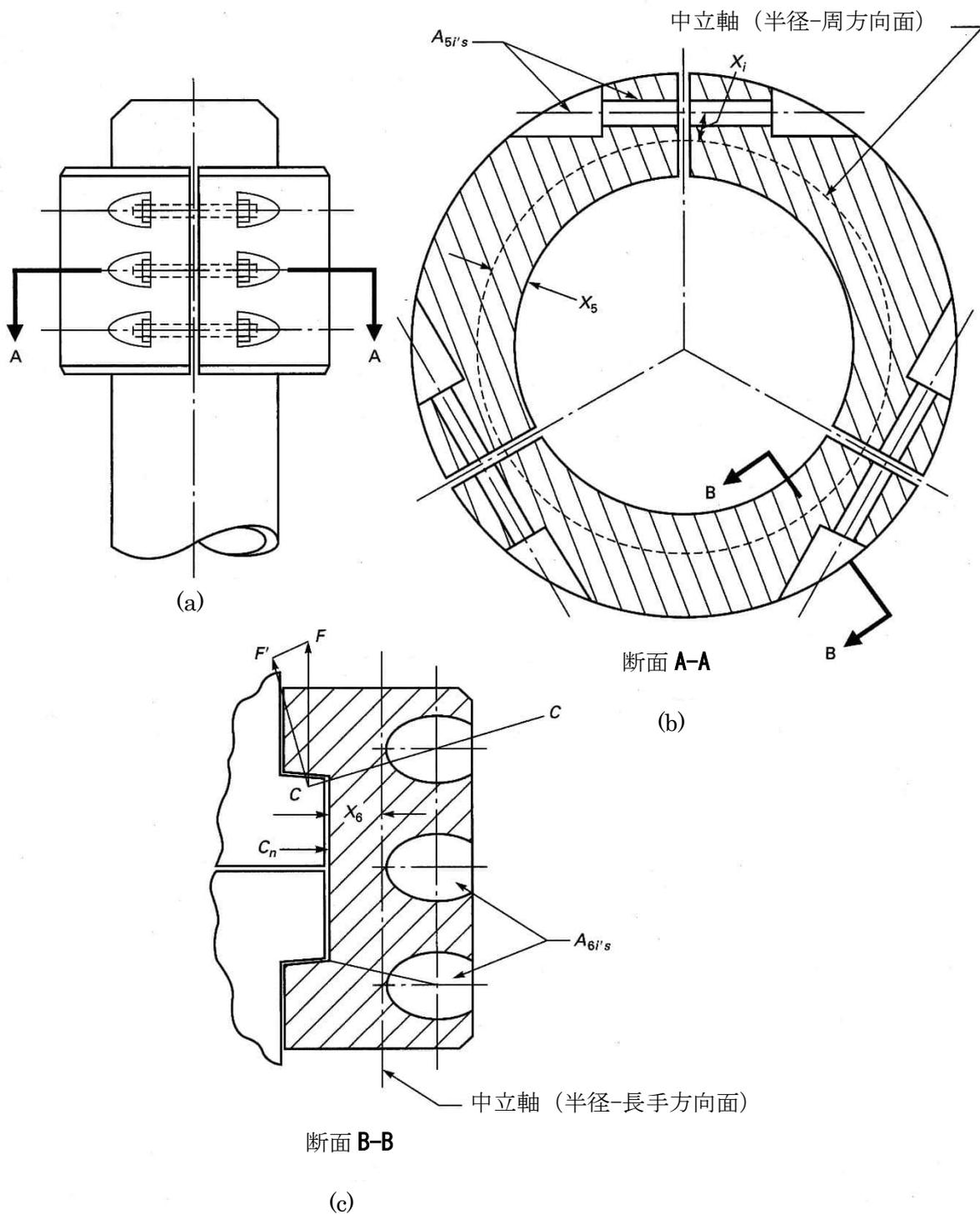
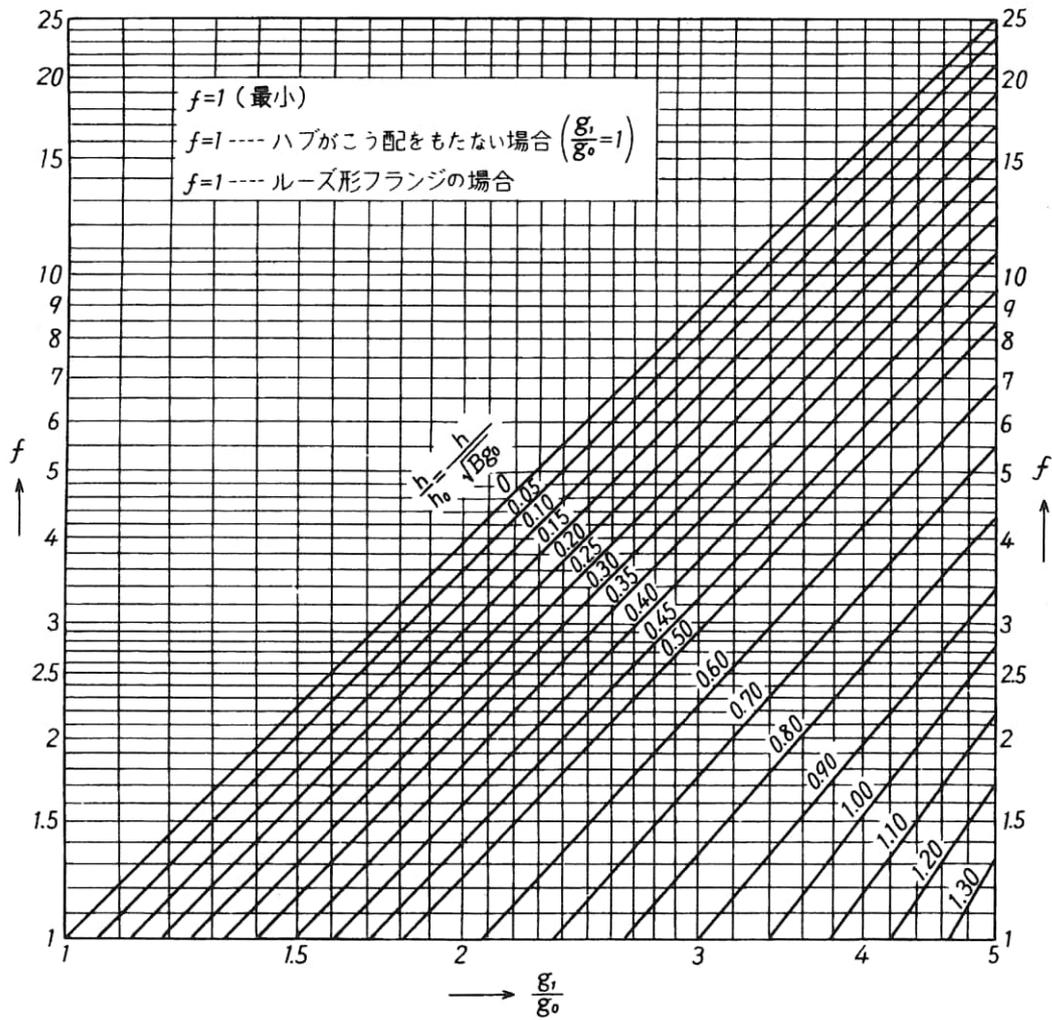


図 H.2 クランプ内にボルトがある例図†

表 H.1 クランプ継手の許容応力

応力の種類	運転条件の許容応力	初期締付条件の許容応力
$S_1$	$S_{YOH}$	$S_{YAH}$
$S_2$	$S_{YOH}/1.5$	—
$S_3$	$0.6 S_{YOH}$	$0.6 S_{YAH}$
$S_4$	$0.6 S_{YOH}$	$0.6 S_{YAH}$
$S_5$	$S_{YOC}$	$S_{YAC}$
$S_6$	$S_{YOC}$	$S_{YAC}$
$S_7$	$0.6 S_{YOC}$	$0.6 S_{YAC}$
$S_8$	$S_{YOC}/1.5$	$S_{YAC}/1.5$
$S_9$	$S_{YOC}/1.5$	$S_{YAC}/1.5$
$S_{10}$	$0.6 S_{YOC}$	$0.6 S_{YAC}$
$S_{11}$	$\min(S_{YOH}, S_{YAH}, S_{YOC}, S_{YAC})$	—



# 附属書 I(規定) 溶接部の放射線透過試験の円形状指示模様合格基準

## 序文

この附属書は、溶接部の放射線透過試験の円形状指示模様合格基準について規定する。

## 1 適用範囲

この規格は、フェライト系材料、オーステナイト系材料及び非鉄材料に適用する。

## 2 合格基準

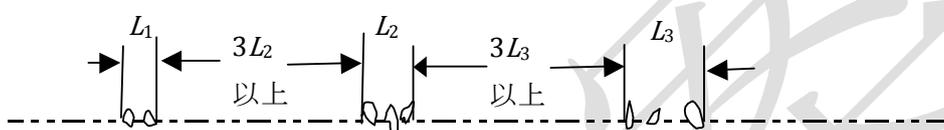
厚さ  $t$  は、余盛りを除いた溶接部の厚さである。厚さの異なる二つの部材を継ぐ場合、 $t$  は薄い方の厚さとする。すみ肉溶接を含む完全溶込み溶接の場合、すみ肉ののど厚を  $t$  に含めなければならない。合格基準は、次の a) ~ g) による。

- a) **像の濃度** 指示模様の像の濃度は一様ではなく、合否の基準ではない。
- b) **対象指示模様** 次の寸法を超える円形状指示模様だけを評価対象とする。次の対象指示模様で、25 mm 以上離れた場合は、独立した指示模様とする。また、隣接する指示模様の距離が大きい方の指示模様の長さの 1/2 未満の場合には、一つの群と見なさなければならない。
- |                              |             |
|------------------------------|-------------|
| ・ $t$ が 3 mm 未満の場合           | $t/10$ (mm) |
| ・ $t$ が 3 mm 以上 6 mm 以下の場合   | 0.4 mm      |
| ・ $t$ が 6 mm を超え 50 mm 以下の場合 | 0.8 mm      |
| ・ $t$ が 50 mm を超える場合         | 1.6 mm      |
- c) **円形状指示模様の最大寸法** 指示模様の最大許容寸法は、本体の表 9.3.1 による。
- d) **並んだ円形状指示模様** 並んだ円形状指示模様は、任意の  $12t$  の長さの範囲で各指示模様の長さの合計が  $t$  未満である場合に合格とする(図 I.1 を参照)。並んだ円形状指示模様の各群の長さと同群間の間隔は、図 I.1 に示す要求事項を満足しなければならない。
- e) **間隔** 隣接する円形状指示模様間の距離は、独立した指示模様又は並んだ指示模様の群に対して要求されている場合を除き、合否判定の条件とはならない。
- f) **円形状指示模様図** 放射線透過写真フィルムから観察される指示模様は、図 I.2 に示す許容基準を超えてはならない。図 I.2 の要求事項は、溶接厚さが 3 mm を超える場合について、許容される円形状指示模様の最大密度に対する要求事項である。図に示す分布状態は、必ずしも実際の放射線透過写真に観察される状況とは一致しないが、許容される指示模様の代表的な密集度と大きさを示している。
- g) **密集した指示模様** 図 I.2 に示した密集した指示模様の図は、散在する指示模様の図に示す局部領域にある指示模様の数の 4 倍多い指示模様を示す。密集した指示模様の許容される長さは、25 mm 又は  $2t$  のいずれか小さい方の値を超えてはならない。二つ以上の密集した指示模様がある場合、密集した指示模様の長さの合計は、任意の溶接線長さ 150 mm の範囲で、25 mm を超えてはならない。



**注記** 円形状指示模様が4個以上連なっており、各々の寸法が**2c)**に規定する寸法以下の指示模様(規定する寸法を超えるものは不合格)について、任意の $12t$ の長さの範囲における $B_1$ から $B_n$ の合計は、 $t$ 未満でなければならない。

(a) 並んだ円形状指示模様の場合



**注記1**  $L_2 > L_1$ ,  $L_3 > L_2$  の場合、任意の $12t$ の長さの範囲における各群の長さの合計は、 $t$ 未満でなければならない。

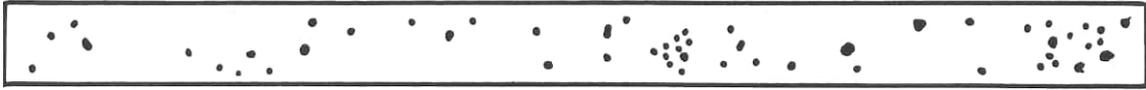
**注記2** 各群の最大長さは、次の値とする。

	各群の最大長さ
$t$ が 19 mm 未満の場合	$L=6$ mm
$t$ が 19 mm 以上 57 mm 以下の場合	$L=t/3$ (mm)
$t$ が 57 mm を超える場合	$L=19$ mm

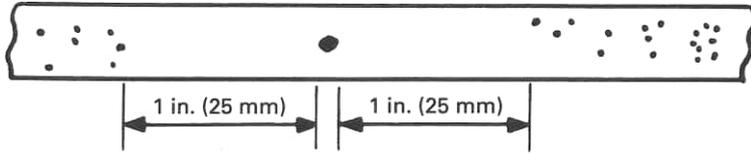
**注記3** 各群間の最小間隔は、隣接する群のうち大きい方の長さの3倍とする。

(b) 並んだ円形状指示模様群の場合

**図 I.1 並んだ円形状指示模様の要求事項**



散在する円形状指示模様<sup>a)</sup>



独立した指示模様



密集した指示模様

注<sup>a)</sup> 150mm の範囲における代表的な密度と許容される寸法

注記1 最大寸法は本体の表 9.3.1 による。

注記2  $t$  が 3 mm 以上 6 mm 以下の場合の例を示す。 $t$  が 6mm 超の場合は次による。

**ASME Sec. VIII Div. 3 Appendix 6**

溶接厚さ $t$	における許容される例
3 mm以上 6 mm以下	FIG. 6-3.1
6 mm超 10 mm以下	FIG. 6-3.2
10 mm超 19 mm以下	FIG. 6-3.3
19 mm超 50 mm以下	FIG. 6-3.4
50 mm超 100 mm以下	FIG. 6-3.5
100 mm超	FIG. 6-3.6

図 I.2 円形状指示模様図による要求事項

## 附属書 J(規定) 弾性解析を用いた評価方法

### 序文

この附属書は、弾性解析を用いた評価方法について規定する。

### 1 弾性解析による強度評価

弾性解析による強度評価は、次の a)～k)による。

- a) **荷重組合せ** 解析では、表 J.1 に示す荷重組合せを考慮する。荷重記号の説明は、本体の表 6.2.2 に示す。設計圧力  $P_D$  を含む荷重組合せによる解析で評価する場合には、圧力が 0 の場合の影響も考慮する。使用者設計仕様書に記載された荷重組合せに加えて、適用可能な荷重組合せについても考慮する。
- b) **相当応力の求め方** 相当応力の計算手順は、次の 1)～5)による。有限要素法を用いた解析を行った場合には、膜応力、曲げ応力及びピーク応力は附属書 L の線形化手法で求める。
- 1) 評価する部位で、周方向( $t$ )、軸方向( $l$ )及び半径方向( $r$ )のような直交座標系を選択する。この座標系における垂直応力成分を  $\sigma_t$ 、 $\sigma_l$  及び  $\sigma_r$ 、せん断応力成分を  $\tau_{tl}$ 、 $\tau_{lr}$  及び  $\tau_{rt}$  とする。
  - 2) その部位に生じる応力成分を計算し、次の応力分類に割り当てる。
    - ・一次一般膜応力  $P_m$
    - ・一次局部膜応力  $P_L$
    - ・一次曲げ応力  $P_b$
    - ・二次応力  $Q$
    - ・ピーク応力  $F$
  - 3) 表 J.2 の応力分類において、異なった形式の負荷から生じる各応力成分の代数和を計算し、それぞれの応力分類内に 6 個の応力成分の組を作る。
  - 4) 座標軸  $t$ 、 $l$  及び  $r$  方向の各応力成分を用いて、主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及び  $\sigma_3$  を計算する。
  - 5) 各主応力を用いて、式(1)でミーゼスの相当応力  $S$  を計算する。

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

- c) **応力制限** 最も厳しい荷重組合せと相当応力の制限値に関する要求事項を満足する設計でなければならない。円筒胴及び球形胴については、本体の 6.2.2 の設計圧力に対する制限を満足しなければならない。構造不連続部から離れた円筒胴及び球形胴を除く全ての部分について、要求事項を表 J.1、表 J.2 及び次の d)～k)に規定する。なお、円筒胴及び球形胴については、 $P_m$  の評価を満足する必要はない。設計では、設計条件と運転条件における荷重組合せとその許容限界を考慮しなければならない。

表 J.1 及び表 J.2 の許容限界に用いる  $S_y$  は、表 J.2 の注<sup>b)</sup>を除けば、設計温度における降伏強さである。 $k_c$  は、一次一般膜相当応力の許容限界に対するクリープ温度域の膜応力補正係数である[本体の 5.4 e)を参照]。 $k_{c1}$  は、式(2)に示す一次応力の許容限界に対する設計補

正係数であり、 $S_y$  と  $S_u$  はそれぞれ室温における降伏強さと引張強さである。

$$S_y/S_u \leq 0.76 \text{ の場合} \quad k_{c1} = 1.0$$

$$0.76 < S_y/S_u < 1.0 \text{ の場合} \quad k_{c1} = 0.433 \left( 1 + \frac{1}{S_y/S_u} \right) \dots\dots\dots(2)$$

d) **一次膜応力と一次曲げ応力** 次の 1)～3) の制限を満足する。

- 1) 一次一般膜相当応力  $P_m \leq k_c k_{c1} (S_y/1.5)$
- 2) 一次局部膜相当応力  $P_L \leq k_{c1} S_y$

局部とは、 $0.73 k_{c1} S_y$  を超える一次膜相当応力が生じる範囲が子午線方向に  $\sqrt{R_m t}$  以内の場合をいう。ここで、 $R_m$  は子午線面に垂直な法線方向で、一次局部膜相当応力が最も高くなる位置における胴又は鏡板の中央面における半径である。 $t$  は、当該部の胴又は鏡板の公称厚さである。

- 3) 一次局部膜相当応力  $P_L$  + 一次曲げ相当応力  $P_b \leq \alpha k_{c1} (S_y/1.5)$

ここで、 $\alpha$  は表 J. 2 の注<sup>9)</sup>による。

e) **純せん断応力** 次の 1) と 2) の制限を満足する。ねじ山については、本体の 6. 6 を参照する。

- 1) 平均せん断応力  $\leq 0.4 S_y$
- 2) 最大せん断応力  $\leq 0.57 S_y$

ただし、ねじりにおける中実円形断面の外周部での応力集中は除く。

f) **支圧応力** 次の 1)～4) の制限を満足する。

- 1) 平均支圧応力  $\leq S_y$
- 2) 平均せん断応力(一次)  $\leq 0.4 S_y$
- 3) 平均せん断応力(一次+二次)  $\leq 0.5 S_y$
- 4) ピンの支圧応力  $\leq S_y$

ただし、板の端からピンの直径以内の距離に支圧面がない場合には、 $1.5 S_y$  を用いてもよい。

g) **一次応力と二次応力の和** 次の制限を満足する。

一次+二次相当応力範囲  $\leq 2 S_y$

ただし、次の h) を満足する場合には、 $2 S_y$  を超えてもよい。

相当応力範囲は、本体の 6. 3. 5 b) 1) を参考にして、同様の方法で求める。

表 J.1 弾性解析に対する荷重組合せと許容限界

荷重組合せ <sup>a)</sup>	応力分類と許容限界 <sup>b)</sup>				
	一次応力			一次+二次 応力	一次+二次 +ピーク応力
	一般膜応力	局部膜応力	局部膜応力 +曲げ応力		
	$P_m$	$P_L$	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$	$P_L + P_b + Q + F$
設計条件 1) $P_D + P_S + D$ 2) $P_D + P_S + D + L + L_A$ 3) $P_D + P_S + D + L + L_A + T$ 4) $P_D + P_S + D + S_S$ 5) $0.6D + (0.6W \text{ 又は } 0.7E)$ <sup>c)</sup> 6) $P_O + P_S + D + (0.6W \text{ 又は } 0.7E)$ 7) $P_O + P_S + D + 0.75(L + L_A + T) + 0.75S_S$ 8) $P_O + P_S + D + 0.75(0.6W \text{ 又は } 0.7E) + 0.75(L + L_A) + 0.75S_S$ 9) 使用者設計仕様書に記載の他の荷重組合せ	$k_c k_{c1} \left(\frac{S_y}{1.5}\right)$	$k_{c1} S_y$	$\alpha k_{c1} \left(\frac{S_y}{1.5}\right)$	—	—
運転条件 最大の運転荷重に対して、設計条件と同じ荷重組合せを使用する。	—	—	—	$2 S_y$	$S_{eq}$
耐圧試験 10) $P_T + P_S + D + 0.6W_{pt}$	本体の 10.3.2 b) 3)	—	本体の 10.3.2 b) 3)	—	—

**注記** 容器に最も好ましくない影響を与える負荷として、この表に記載の荷重組合せで荷重を作用させる。各荷重組合せの中で、一つ以上の作用しない荷重(例えば、設計圧力 $P_D$ )の影響についても考慮しなければならない。

**注<sup>a)</sup>** 荷重記号の説明は、本体の表 6.2.2 を参照する。

**注<sup>b)</sup>** 表 J.2 に、応力分類と相当応力の許容限界に関する補足説明を示す。 $k_c$  はクリープ温度域の膜応力補正係数、 $k_{c1}$  は設計補正係数及び $\alpha$  は形状係数であり、表 J.2 の注<sup>a)</sup>及び注<sup>b)</sup>を参照する。

**注<sup>c)</sup>** この荷重組合せは、基礎の設計における転倒条件に対応する。基礎へのアンカーの設計には適用しない。

表 J.2 応力分類と相当応力の制限

応力分類	一次応力			二次応力	ピーク応力
	一般膜応力	局部膜応力	曲げ応力	膜応力+曲げ応力	
	断面における一次応力の平均値。構造不連続及び応力集中を除く。機械的荷重によって生じる応力のみをとる。	任意の断面における応力の平均値。構造不連続は考慮するが応力集中は除く。機械的荷重によって生じる応力のみをとる。	断面の図心からの距離に比例する一次応力の成分。構造不連続及び応力集中を除く。機械的荷重によって生じる応力のみをとる。	構造の連続性を保つために生じる自己平衡応力で構造不連続部に生じる。機械的荷重及び熱膨張差によって生じる応力を取り、局部的応力集中を除く。	1) 応力集中によって一次又は二次応力に付加される増加分(例えば、切欠きのような場合) 2) 疲労のおそれはあるが、容器のゆがみを生じるおそれがない熱応力。
記号	$P_m$	$P_L$	$P_b$	$Q$	$F$
応力成分の組合せと相当応力の許容限界	<p>             ——— 設計荷重を使用              - - - - - 運転荷重を使用         </p>				

**注記** 応力制限では、弾性解析による最大応力が降伏強度  $S_y$  を超えてもよい。一次+二次応力の許容限界  $2S_y$  は、局所的な構造不連続部又は局所的な熱応力の領域を除けば、数回の応力繰返し後に弾性挙動にシェークダウンすることを保証する制限である。除外する二つの要因は、疲労評価で考慮する。

**注<sup>a)</sup>** 分類  $Q$  の応力は、温度こう配や構造不連続などによる応力の合計から同じ位置の一次応力を除いた応力である。しかし、詳細解析による応力は、しばしば一次+二次応力を直接示すことがあり、その場合は、 $Q$  だけでなく  $P_L$  (又は  $P_m$ ) +  $P_b$  +  $Q$  の合計応力を表す。同様に、分類  $F$  の応力が応力集中による場合には、 $F$  は公称応力を超える付加応力を示す。例えば、評価位置の公称応力が  $S$  で応力集中係数が  $K$  である場合には、 $P_L = S$ ,  $P_b = 0$ ,  $Q = 0$ ,  $F = P_L(K - 1)$  となり、ピーク応力は  $P_L + P_b + Q + F = P_L + P_L(K - 1) = K P_L = K S$  となる。

**注<sup>b)</sup>** この制限は相当応力の全変動範囲に適用する。許容限界として用いる  $S_y$  は二次応力が温度変動によるときは変動する金属温度の最高と最低温度における  $S_y$  の平均値とし、二次応力の一部又は全部が機械的な荷重によるときは変動する金属温度の最高温度における  $S_y$  とする。

**注<sup>c)</sup>**  $\alpha$  は形状係数で、全断面塑性となる曲げモーメントと初期降伏を生じさせる曲げモーメントの比である。矩形断面では、 $\alpha = 1.5$  とする。

**注<sup>d)</sup>**  $S_{eq}$  は設計疲労曲線から得られる許容相当応力である。全変動範囲に対する許容相当応力は  $2S_{eq}$  である。本体の 6.3 の要求事項を満足しなければならない。

**注<sup>e)</sup>**  $k_c$  はクリープ温度域の膜応力補正係数で、設計温度が表 5.4.1 及び表 5.4.2 に示す上限温度以下の場合には  $k_c = 1$  とする[本体の 5.4 e)を参照]。 $k_{c1}$  は設計補正係数である[1 c)を参照]。なお、ボルト及びワイヤに対しては  $k_{c1} = 1$  とする[6.6.4 a)及び 6.9.6 を参照]。

h) **簡易弾塑性解析** 一次+二次相当応力範囲は、次の**1)～5)**の条件を満足する場合には、許容値の $2S_y$ を超えてもよい。

- 1) 熱応力を除いて求めた一次+二次相当応力範囲が、 $2S_y$ 以下である。
- 2) 弾性解析で求めた一次+二次+ピーク相当応力振幅に、次の**2.1)**又は**2.2)**による係数 $K_e$ を乗じた値を用いて本体の**6.3**により疲労評価を行う。

**2.1) 式(3)～式(6)**より、係数 $K_e$ を計算する<sup>1)</sup>。

$K < B_0$ の場合

$$\frac{\Delta S_n}{2 S_y} < \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 A_0 (q - 1)}}{2 A_0} \text{ のとき}$$

$$K_e = 1 + A_0 \left( \frac{\Delta S_n}{2 S_y} - \frac{1}{K} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\Delta S_n}{2 S_y} \geq \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4 A_0 (q - 1)}}{2 A_0} \text{ のとき}$$

$$K_e = 1 + (q - 1) \left( 1 - \frac{2 S_y}{\Delta S_n} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$K \geq B_0$ の場合

$$\frac{\Delta S_n}{2 S_y} < \frac{(q - 1) - \sqrt{A_0 \left(1 - \frac{1}{K}\right) (q - 1)}}{a} \text{ のとき}$$

$$K_e = a \frac{\Delta S_n}{2 S_y} + A_0 \left( 1 - \frac{1}{K} \right) + 1 - a \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\Delta S_n}{2 S_y} \geq \frac{(q - 1) - \sqrt{A_0 \left(1 - \frac{1}{K}\right) (q - 1)}}{a} \text{ のとき}$$

$$K_e = 1 + (q - 1) \left( 1 - \frac{2 S_y}{\Delta S_n} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$K = \frac{\Delta S_p}{\Delta S_n}$$

$$a = A_0 \left( 1 - \frac{1}{K} \right) + (q - 1) - 2 \sqrt{A_0 \left( 1 - \frac{1}{K} \right) (q - 1)}$$

$\Delta S_p$  : 一次+二次+ピーク相当応力範囲 ( $P_L + P_b + Q + F$ ) (MPa)

$\Delta S_n$  : 一次+二次相当応力範囲 ( $P_L + P_b + Q$ ) (MPa)

$S_y$  : 温度サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における降伏強さ (MPa)

$q, A_0, B_0$  : 材料の種類によって**表 J.3**で与えられる値

表 J.3 係数  $K_e$  の計算に用いる  $q$ ,  $A_0$  及び  $B_0$  の値

材料の種類	$q$	$A_0$	$B_0$	最高温度(°C)
炭素鋼	3.1	0.66	2.59	371
低合金鋼	3.1	1.0	1.25	371
マルテンサイト系ステンレス鋼	3.1	1.0	1.25	371
オーステナイト系ステンレス鋼	3.1	0.7	2.15	427
高ニッケル合金	3.1	0.7	2.15	427

2.2) 別法として、降伏強さ  $S_y$  の弾完全塑性体とした弾塑性解析を行い、式(7)により係数  $K_e$  を計算してもよい。

$$K_e = \frac{\varepsilon_{ep}}{\varepsilon_e} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

$\varepsilon_{ep}$  : 疲労評価を行う当該サイクルに対して、弾塑性解析により求めたときのひずみであり、次式により計算した値

$$\varepsilon_{ep} = \frac{\bar{\sigma}}{E} + \bar{\varepsilon}_p$$

$\bar{\sigma}$  : 弾塑性解析によるミーゼスの相当応力 (MPa)

$\bar{\varepsilon}_p$  : 弾塑性解析によるミーゼスの相当塑性ひずみ

$E$  : 温度サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における縦弾性係数 (MPa)

$\varepsilon_e$  : 疲労評価を行う当該サイクルに対して、弾性解析により求めたときのひずみであり、次式により計算した値

$$\varepsilon_e = \frac{\bar{\sigma}^*}{E}$$

$\bar{\sigma}^*$  : 弾性解析によるミーゼスの相当応力 (MPa)

係数  $K_e$  の計算には、疲労評価を行う当該サイクルよりも、応力範囲が大きくなるサイクルを使用してもよい。

- 3) 材料の規定最小降伏点又は0.2%耐力と、規定最小引張強さとの比が0.8以下である。
  - 4) 熱応力ラチェットに対する i) の要求を満足する。
  - 5) 温度が各材料について表 J.3 の最高温度を超えない。
- i) **熱応力ラチェット評価** 静的な一次一般又は局部膜応力を受ける容器が熱応力の繰返しを受ける場合、熱応力ラチェットを防止するための二次相当応力範囲の評価手順は次の 1) ~6) による。この手順は、容器厚さ方向の温度分布が直線形状又は放物線形状の場合に適用する。
- 1) 一次膜相当応力と温度サイクルの平均温度における降伏強さとの比  $X$  を次式で求める。

$$X = \frac{P_m}{S_y} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

$P_m$  : 一次膜相当応力(MPa)

$S_y$  : 温度サイクル中の最高温度と最低温度の平均温度における降伏強さ(MPa)

- 2) 弾性解析により、熱応力による二次膜相当応力範囲  $\Delta Q_m$  を求める。
- 3) 弾性解析により、熱応力による二次膜+曲げ相当応力範囲  $\Delta Q_{mb}$  を求める。
- 4) 熱応力による二次膜+曲げ相当応力範囲の許容値  $S_{Qmb}$  を、次の **4.1)** 又は **4.2)** により求める。

#### 4.1) 容器厚さ方向の温度分布が直線形状の場合

$$0 < X < 0.5 \text{ のとき, } S_{Qmb} = S_y \left( \frac{1}{X} \right) \dots\dots\dots(9)$$

$$0.5 \leq X \leq 1.0 \text{ のとき, } S_{Qmb} = 4.0 S_y (1 - X) \dots\dots\dots(10)$$

#### 4.2) 容器厚さ方向の温度分布が単調増加又は単調減少の放物線形状の場合

$$0 < X < 0.615 \text{ のとき, } S_{Qmb} = S_y \left( \frac{1}{0.1224 + 0.9944 X^2} \right) \dots\dots\dots(11)$$

$$0.615 \leq X \leq 1.0 \text{ のとき, } S_{Qmb} = 5.2 S_y (1 - X) \dots\dots\dots(12)$$

- 5) 熱応力による二次膜相当応力範囲の許容値  $S_{Qm}$  を次式で求める。

$$0 < X < 1.0 \text{ で, } S_{Qm} = 2.0 S_y (1 - X) \dots\dots\dots(13)$$

- 6) 熱応力ラチェットを防止するためには、次の二つの基準を満足しなければならない。

$$\Delta Q_m \leq S_{Qm} \dots\dots\dots(14)$$

$$\Delta Q_{mb} \leq S_{Qmb} \dots\dots\dots(15)$$

- j) **三軸応力** 次の制限を満足する。

三つの主応力(一次、二次及びピーク応力を含む)の代数和  $\leq 2.5 S_y$

- k) **耐圧試験の上限圧力** 非円形筒、閉止板及びその他の耐圧部分に対しては、弾性解析又は弾塑性解析により耐圧試験の上限圧力を検証しなければならない[**10.3.2 b) 3)**を参照]。

## 2 単肉圧力容器の主応力

中空の均一な肉厚円筒容器で、残留応力がない場合には、容器端や他の構造不連続部から離れた円筒胴の主応力は次式により算出する。

$$\sigma_t = \frac{P}{Y^2 - 1} (1 + Z^2) \dots\dots\dots(16)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{Y^2 - 1} (1 - Z^2) \dots\dots\dots(17)$$

円筒が閉止端の場合には、軸方向応力は次式により算出する。

$$\sigma_l = \frac{P}{Y^2 - 1} \dots\dots\dots(18)$$

ここで、

- $\sigma_t$  : 周方向応力(MPa)
- $\sigma_r$  : 半径方向応力(MPa)
- $\sigma_l$  : 軸方向応力(MPa)
- $P$  : 内圧力(MPa)
- $Y$  : 内外径比( $D_o/D_i$ )
- $Z$  : 直径比( $D_o/D$ )
- $D_i$  : 円筒の内径(mm)
- $D_o$  : 円筒の外径(mm)
- $D$  : 円筒の任意位置における直径(mm)

円筒が閉止端の場合には、式(16)～式(18)から計算される相当応力  $S$  は内面において最大となり、次式により計算する。

$$S = P \frac{\sqrt{3} Y^2}{Y^2 - 1} \dots\dots\dots(19)$$

円筒が開口端の場合には、 $\sigma_l = 0$  として計算される相当応力  $S$  は内面において最大となり、次式により計算する。

$$S = P \frac{\sqrt{1 + 3 Y^4}}{Y^2 - 1} \dots\dots\dots(20)$$

#### 参考文献

- 1) 日本機械学会，発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第I編 軽水炉規格，JSME S NC1-2020，(2020)

# 附属書 K(規定) アルミニウム合金の切欠き引張試験方法

## 序文

この附属書は、アルミニウム合金 UNS No. A96061 調質 T6 又は T651 の切欠き引張試験方法について規定する。

## 1 薄板による試験方法

### 1.1 適用範囲

本試験方法は薄板の応力集中又は亀裂を起点とする不安定破壊への抵抗性の比較測定を取扱う。特に連続的に増加する力による破壊に関連し、クリープ又は疲労を発生させる力を適用する条件は除外する。測定される物理量は特定の寸法を有する試験片の切欠き引張強さであり、この値は材料特性と同様に試験片寸法に依存する。また、切欠き引張強さと降伏強さ(この附属書では、平滑試験片の降伏点又は 0.2%耐力)の比も決まる。

本試験方法は一般的に、高強度材料[降伏強さと密度の比が  $176.4 \text{ MPa} / (\text{g}/\text{cm}^3)$  を超える材料]の評価に適する一つの試験片幅に限定される。切欠き引張強さが降伏強さを下回る場合には、不安定破壊の可能性がある。切欠き引張強さと降伏強さの比が減少すると共に、不安定破壊の可能性が増大する。

本試験方法は、厚さが 0.64 mm 以上 6 mm 未満の薄板に限定される。切欠き引張強さは薄板の厚さに依存するため、種々の材料条件の比較は同一の公称厚さを有する試験片による試験に基づかなければならない。

切欠き引張強さは、材料特性による一定の範囲内の温度に強く依存する。本試験方法は、任意の適切な温度における試験に適する。種々の材料条件の比較は、同一温度における試験に基づかなければならない。

### 1.2 試験装置

#### 1.2.1 一般

JIS B 7721 による等級 1 級以上の要求事項に従う引張試験機により行う。

#### 1.2.2 試験用治具

試験片に試験力を伝える装置は、試験片の主軸と試験力を負荷する軸が一致していなければならない。試験片端部の穴を通り、穴の直径よりわずかに小さい硬化ピンを有する試験用治具を組込む。適切な厚さのスペーシングワッシャーを使用して試験用治具内の試験片を中心軸上に位置させる。代表的な配置を図 K.1 に示す。

#### 1.2.3 温度制御

室温以外で行う試験において、試験片を加熱又は冷却し、切欠きを含む範囲の温度を均一に保つ適切な方法を用いてもよい。温度を均一に保つ装置の能力は、図 K.2 に示す試験片両面の位置における温度測定により立証しなければならない。温度測定は試験が実施される各温度レベル又は試験温度範囲にわたり 30°C 間隔の温度レベルで行う。試験温度は試験実施の間  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  以内に保持する。試験温度において、四つの熱電対のうち二つにおける指示温度の差は 3°C を超えてはならない。

## 1.2.4 温度測定

室温以外の試験中の試験片温度は、**図 K.2** に示す位置の 1 箇所、可能であれば 2 箇所以上の位置で測定する。熱電対の接点は試験片と熱的に接触していなければならない。熱電対及び測定器は校正し、異なる位置の測定温度の差が 3°C を超えてはならない。

## 1.3 試験片

### 1.3.1 寸法

標準的な幅 75 mm の切欠き付試験片を **図 K.3** に示す。切欠きはこの図に示す寸法とし、ピン荷重を使用する。標準試験片の長さは 300 mm とするが、材料の制約により長さ 200 mm の副標準試験片を使用してもよい。しかしながら、同一材料、同一試験条件では標準試験片と強度が異なる。この理由から、様々な材料条件の比較は、同一長さの試験片を用いて行われた試験に基づいていなければならない。平行部を持つ試験片は大半の材料において切欠き部で破断する。しかしながら、例外的に切欠き引張強さが降伏強さを超える場合、ヘッド補強板がない限りはピン穴で破断し得る。推奨する補強板を **図 K.4** に示す。1 枚の板を試験片ヘッドの両側に使用し、力は試験用治具内のスロット (**図 K.1** を参照) に入る長さである 3 本の硬化ピンによって板に伝達される。3 mm 厚さで、最小降伏強さ 1380 MPa の材料から作成された板をこの試験方法に用いてもよい。

### 1.3.2 切欠き

機械加工された切欠きの鋭さは **図 K.3** に示す試験片の特徴であり、特別な配慮がなされる。最終熱処理の前又は後のいずれかで切欠きの最終仕上げ加工を行ってもよい。各試験片は試験前に切欠き底半径及びピンホール中心に対する切欠き位置を測定する。**図 K.3** の要求事項を満足しない試験片は廃却又は再加工しなければならない。

## 1.4 手順

### 1.4.1 寸法

機械加工された切欠きの間で 3 点以上厚さを 0.013 mm 間隔で測定し、平均値を記録する。平均値に対する厚さの変化量が 2% を超える場合には測定結果を記録する。試験片の切欠き底部間の純断面幅の距離を 0.25 mm 間隔で測定し、切欠き半径を 0.006 mm 間隔で測定して記録する。

### 1.4.2 試験

通常の引張試験と同様の方法で試験を実施する。ただし、伸び計を用いる。引張試験機のアライメント用に試験機のヘッドにおける荷重ピン及び球面座に MoS<sub>2</sub> のような潤滑剤の使用を推奨する。使用される物質が切欠き引張強さの影響を受けないことを証明しない限り、低速度亀裂伸びを決定するために染色液は使用しない。試験の速度は、切欠き断面の公称応力の上昇率がどの段階においても 690 MPa/分を超えてはならない。推定し得る力の最小変化となる、試験中に到達する最大荷重を記録する。

## 1.5 計算

### 1.5.1 切欠き引張強さ

切欠き引張強さを次式で計算する。

$$\sigma_s = F/(B \times W) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- $F$  : 最大荷重(N)  
 $B$  : 試験片の厚さ(mm)  
 $W$  : 正味断面幅(mm)

### 1.5.2 切欠き引張強さと降伏強さの比

切欠き引張強さと降伏強さの比が重要である。材料の加工に係る曖昧さなしに比を決定するために同じストックの平滑引張試験片を準備し、切欠き付試験片と同加工する。平滑引張試験片の寸法は、**図 K.9** を満足しなければならない。

少なくとも二つの切欠き付試験片は制御変数(材料要因、厚さ、温度)の各個別の組の値によって試験を行う。室温以外で切欠き引張強さと降伏強さの比を計算するために、降伏強さは切欠き試験を実施した温度から 50°C 以内の範囲で補間してもよい。

### 1.6 記録

記録には、試験を行った各切欠き試験片について次の情報を記載する。

- a) 長さ
- b) 厚さ
- c) 幅
- d) 切欠き深さ
- e) 切欠き底半径
- f) 温度
- g) 最大荷重
- h) 切欠き引張強さ

切欠き引張試験で使用する制御変数の各組に対応する引張強さ及び降伏強さを、切欠き引張強さと降伏強さの比と共に記録する。

## 2 丸棒による試験方法

### 2.1 適用範囲

本試験方法は厚肉材料の応力集中又は亀裂を起点とする平面ひずみ条件下の破壊への抵抗性の比較測定を取扱う。測定される物理量は特定の寸法を有する試験片の切欠き引張強さであり、この値は材料特性と同様に試験片寸法に依存する。また、切欠き引張強さと降伏強さの比も決まる。

本試験方法は切欠き付試験片(切欠き先端半径が 0.018 mm 以下)に限定され、再現性よく機械加工でき得る切欠きを持つ材料としてアルミニウム合金に適用される。

本試験方法は**図 K.5** に示す 2 つの直径を持つ丸棒試験片に限定される。直径 27.0 mm 試験片は、直径 12.7 mm 試験片より靱性レベルが高いため、この試験方法の適用範囲が拡張される。

本試験方法は直径 12.7 mm 以上の材料に限定される。切欠き引張強さは一定の制限内で試験片直径及び長さ依存するため、種々の材料条件の比較は試験ヘッドと切欠きの応力場間の重大な相互作用を防ぐために十分な同じ公称直径及び試験部長さを持つ試験片による試験に基づかなければならない (**図 K.5** を参照)。

切欠き引張強さは、材料特性による一定の範囲内の温度に強く依存する。本試験方法は、任意の適切な温度における試験に適する。種々の材料条件の比較は、同一温度における試験に基づか

なければならない。

## 2.2 試験装置

### 2.2.1 一般

試験は JIS B 7721 による等級 1 級以上の要求事項に従う引張試験機により行う。

### 2.2.2 試験用治具

曲げ率が 2.4 の要求事項を満足している試験用治具を用いる。ねじ付き試験片用の軸調整試験用治具はこれらの要求事項を満足する設計となっている。迅速な操作特性を持つテーパ付きつかみは滑らかな試験片の試験用に提案されてきた。これらは切欠き付丸棒試験片にも用いられてきた。荷重ライナーが使用され、荷重伝達部材が一つの部材により引き起こされる曲げを他の部材によって相殺されるように配置される条件で、これらのつかみ部は 2.4 の曲げ要求事項を満足することを示している。

### 2.2.3 温度制御

室温以外で行う試験において、試験片を加熱又は冷却し、切欠きを含む範囲の温度を均一に保つ適切な方法を用いてもよい。温度を均一に保つ装置の能力は、試験片の切欠き範囲で直接温度を測定して立証しなければならない。温度測定は試験が実施される各温度レベル又は試験温度範囲にわたり 30°C 間隔の温度レベルで行う。試験温度は試験実施の間  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  以内に保持する。試験温度において、三つの熱電対における指示温度の差は 3°C を超えてはならない。温度はポテンシオメータとミリボルト計を併せて使用する校正された熱電対により測定する。

## 2.3 試験片

### 2.3.1 寸法

図 K.5 に 2 種類の推奨する切欠き付試験片を示す。直径 12.7 mm 試験片の試験部は最小長さ  $L = 25.4$  mm とする。直径 27.0 mm 試験片の試験部は最小長さ  $L = 55.0$  mm とする。

### 2.3.2 試験片ヘッド

切欠き試験部にはテーパヘッド、ねじ、その他 2.4 の最大曲げ要求事項を超えない試験用治具によって試験力を伝達してもよい。テーパヘッド及びねじヘッドの代表的な例を図 K.6 と図 K.7 にそれぞれ示す。

### 2.3.3 切欠き

機械加工された切欠きの鋭度は試験片の重要な特徴であり、試験片作成時に特別な配慮が要求される。とりわけ著しい残留応力の導入を避けるために最終加工は軽度で低速に行わなければならない。各試験片において切欠き底半径は試験前に測定し、図 K.5 の 0.018 mm 制限を満足しない試験片は廃棄又は再加工しなければならない(2.5 を参照)。

### 2.3.4 加工

試験中の曲げ応力を最小化することは重要なため、最小の振れで切欠き付試験片を加工するのに特別な注意が取られる。丸棒表面及び試験片ヘッドは、切欠きに対して 0.025 mm の偏芯量を超えないように機械加工を行う。通常、試験片は中心間で機械加工を行うことが可能であれば全ての機械加工は同じセットアップで行うべきである。不可能な場合には、最初の操作で使用した中心を保持し、汚れや損傷から守るように注意しなければならない。

### 2.3.5 試験の数

制御変数(材料要因, 厚さ, 温度)の値の各組において, 少なくとも 2 本の試験片の作成が推奨される。

## 2.4 検証

### 2.4.1 一般

検証手順の目的は 2.4.3 a) に規定された曲げ率の制限を一貫して満足するような方法で, 試験者によって試験用治具が使用されることの実証である。従って, 検証手順は切欠き付丸棒試験片の通常試験において使用されるセットアップ以上の注意は必要ない。例えば, アライナーを切欠き試験に使用する場合, これら装置は検証手順中に同じ方法で使用する。引張力が働いている状態の曲げ応力は, 図 K.8 に示す設計の検証試験片を使用して測定する。これらの測定は試験用治具が異なる引張試験機に取付けられているとき, 異なる試験者が切欠き試験を行うとき, 損傷が疑われるときに行う。全ての公差と同芯度の要求事項に注意して検証試験片は慎重に機械加工しなければならない。これらの要求事項を満足することを確認するために, 試験片はひずみゲージ取付け前にオプチカルコンパレータにより注意深く検査する。ゲージ取付け後は意味のある試験片の検査が不可能であるため, 取扱いと使用は慎重に行う。

### 2.4.2 ひずみゲージ

検証試験片は, 平行部の長手方向の中心に周方向に 90°間隔で 4 本の抵抗箔ひずみゲージを取付ける。ひずみ平均化を最小にするためにこれらゲージは可能な限り狭くする必要がある。幅 0.25 mm, 長さ約 2.5 mm のゲージが市販されており, これに適用されている。

### 2.4.3 検証手順

検証手順及びひずみゲージデータ減少の詳細を示す。測定を開始する前にこの情報を参照する。当座の目的は二つのケースを理解することである。

**ケース 1:** 試験用治具が低い曲げ応力を与える特別設計であり, 使用寿命中に特別な注意を払わずに満足な結果を得られることが予想される場合。

**ケース 2:** 試験用治具が正確性を求めずに設計され, 切欠き付丸棒試験片の試験に採用される場合。

- a) **ケース 1** 試験用治具の上部に検証試験片を取付け四つ全てのゲージでゼロ点を読む。下部試験用治具と荷重伝達全ての回転部材を共通の線で接続する。組立品に荷重を加え検証試験片の平行部に 205 MPa の応力を発生させて, 四つ全てのゲージ測定値を記録する。除荷した後, 任意に選択した荷重伝達部材(試験片は除く)を 90°回転させる。再び同荷重を加え四つ全てのゲージを記録する。この手順を繰返し, 最高曲げ率を与える回転位置を探すために 90°間隔で選択した部材を回転させる。同手順を残りの部材に対して行い, 一度に最高曲げ率を与える位置に保持する。曲げが常時 10%未満である場合, 同回転位置は維持するが異なるねじのかみ合いとなるように各荷重伝達部材を 360°回転して, ゲージ読みを繰返す。依然として曲げが 10%未満である場合は, 荷重伝達部材間の同じ関係を保ちつつ, 検証試験片の取外しと再取付を 3 回行う。最後の取付け後, 試験用治具の下部を取外して四つ全てのゲージのゼロ点読みを繰返す。これらは始めのゼロ点読みと 0.5 μm 以内で一致しなければならない。検証手順の全ての段階で曲げが 10%未満の場合, 試験用治具と引張試験機の組合せは荷重伝達部材の回転位置に注意を払わず切欠き付丸棒試験片の試験において満足できると仮定され

る。検証手順のいずれの段階でも曲げが 10%を超える場合、ひずみゲージデータを調査して種々の部材の位置ずれの影響を判断する。この試験で得られた情報に基づき、試験用治具は再加工を行うか、ケース 2 として取扱う。

- b) **ケース 2** 最小曲げを与える位置に荷重伝達部材を保持する事を除いてケース 1 のように進む。10%未満の曲げが得られない配置の場合、切欠き付丸棒試験片試験にその試験用治具は使用しない。10%未満の曲げ配置が見つかる場合、部材にこの位置を参照する共通線をマークする。各部材を 360°回転してひずみゲージ読みを繰り返す。最大曲げが依然として 10%未満の場合、検証試験片の取外しと再取付を 3 回行い、都度ひずみゲージ読みを繰り返す。そのまま曲げが 10%未満の場合、試験用治具はこの方法に従って切欠き付丸棒試験片の試験に使用してもよい。しかしながら、同じ回転位置で荷重伝達部材を常に保つよう注意し、荷重伝達部材を取外した場合には、曲げ率を再決定する。

#### 2.4.4 曲げ応力率

曲げ応力率  $PBS$  を次式で計算する。

$$PBS = (\Delta\sigma_m/\sigma_o) \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$\Delta\sigma_m$  : 試験片に発生する最大表面応力と  $\sigma_o$  の差(MPa)

$\sigma_o$  : 試験断面における平均応力(MPa)

曲げ応力率を計算する別法として、次式を用いてもよい。

$$PBS = \{(\Delta g_{1,3})^2 + (\Delta g_{4,2})^2\}^{1/2} \times 100/g_o \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

$$\Delta g_{1,3} = \{(g_1 - g_o) - (g_3 - g_o)\}/2 = (g_1 - g_3)/2$$

$$\Delta g_{4,2} = \{(g_4 - g_o) - (g_2 - g_o)\}/2 = (g_4 - g_2)/2$$

$$g_o = (g_1 + g_2 + g_3 + g_4)/4$$

$g_1, g_2, g_3, g_4$  : ひずみゲージの測定値で、圧縮ひずみは無視する。

ゲージ読みの信頼性は各 1 対のゲージの平均読みと比較してもよいが、1%以内で一致しなければならない。また、満足のいく試験のセットアップのために、曲げ応力率は 250 MPa 平均引張応力で 10%を超えてはならない。

### 2.5 手順

#### 2.5.1 寸法

中心間に試験片を取付けた状態で、胴部及びヘッドに沿った切欠き部の全振れを測定するために 50 倍以上のオプティカルコンパレータを使用する。試験片にねじ山がついている場合は、清掃してアセトン又は速乾性溶剤を使用した後、ねじ底径で振れ測定を行う。任意の部分の全振れが 0.05 mm を超える場合、試験片は不合格となる。切欠き底半径仕様への適合は、既知の半径の円に対して予想される切欠き外形の合わせによりコンパレータで決定する。試験片を回転した時に切欠き底半径が 0.018 mm を超えた場合、試験片は不合格となる。

切欠き底の外形が曖昧になるような汚れや液体を取り除くことが重要である。慎重な洗浄が必要であり、アセトン又は同類の溶剤で切削油及び異物を取り除く。この洗浄に続いて、乾燥圧縮空気、又は清潔なラクダの乾燥毛ブラシ、又は両方を用いて残存する異物を取り除く。切欠き直径  $d$  及び胴部の直径  $D$  をコンパレータで測定する。又は、チゼルが切欠き底に対して十分鋭く、切欠き底を傷つけないように注意する条件でチゼルマイクロメータにより切欠き直径を測定する。胴部直径は従来のマイクロメータで測定してもよい。図 K.5 に示す丸棒寸法公差を満足しない試験片は不合格とする。

## 2.5.2 試験

通常の引張試験と同様の方法で試験を実施する。ただし、伸び計を用いる。試験のどの段階でも切欠き断面の最大応力率が 690 MPa/分を超えないように試験速度を制御する。推定し得る力の最小変化となる、試験中に到達する最大荷重を記録する。

## 2.6 計算

### 2.6.1 切欠き引張強さ

切欠き引張強さを次式で計算する。

$$\sigma_s = 4F/(\pi d^2) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

$F$  : 最大荷重(N)

$d$  : 試験片の切欠き部の直径(mm)

### 2.6.2 切欠き引張強さと降伏強さの比

切欠き引張強さと降伏強さの比は平面ひずみ破壊靱性の比較指標として重要である。切欠き付丸棒試験片の作成に使用する同じストックから平滑引張試験片を準備する。主変形方向に関してこれら引張試験片の方向は切欠き試験片の方向と同一とし、ストックの引張試験片の位置は切欠き試験片と可能な限り近づける。熱処理が含まれる場合、プロセスは引張試験片と切欠き試験片は同一とする。平滑引張試験片の寸法は、図 K.10 を満足しなければならない。

室温以外で切欠き引張強さと降伏強さの比を計算するために、降伏強さは切欠き試験を実施した温度から 50°C 以内の範囲で補間してもよい。

## 2.7 記録

記録には、試験を行った各切欠き試験片について次の情報を記載する。

- a) 試験部長さ
- b) 主外径
- c) 元の切欠き底半径
- d) 温度
- e) 最大荷重
- f) 切欠き引張強さ

切欠き試験で使用する制御変数の各組合せに対応する引張強さ及び降伏強さを、切欠き引張強さと降伏強さの比と共に記録する。

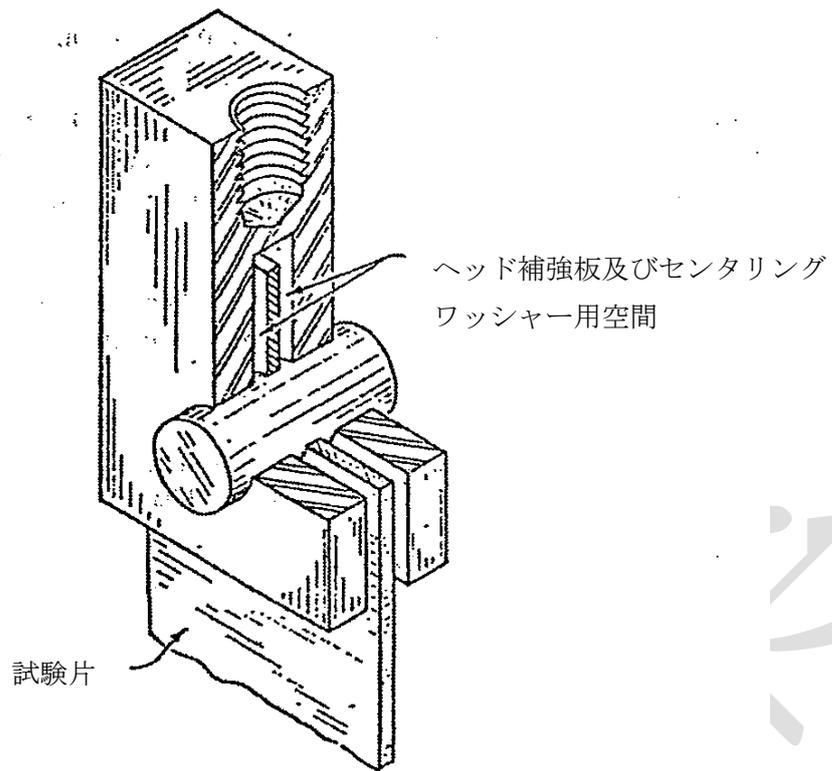
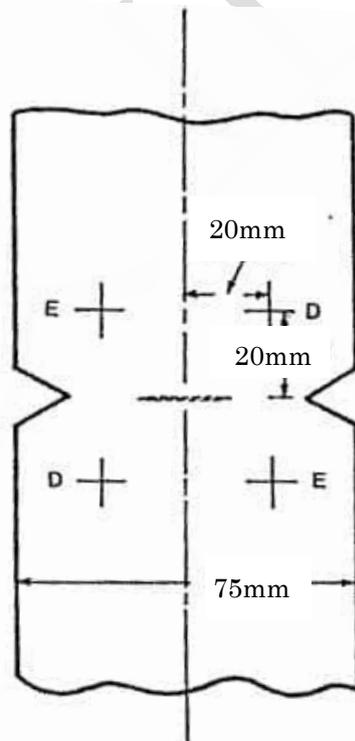
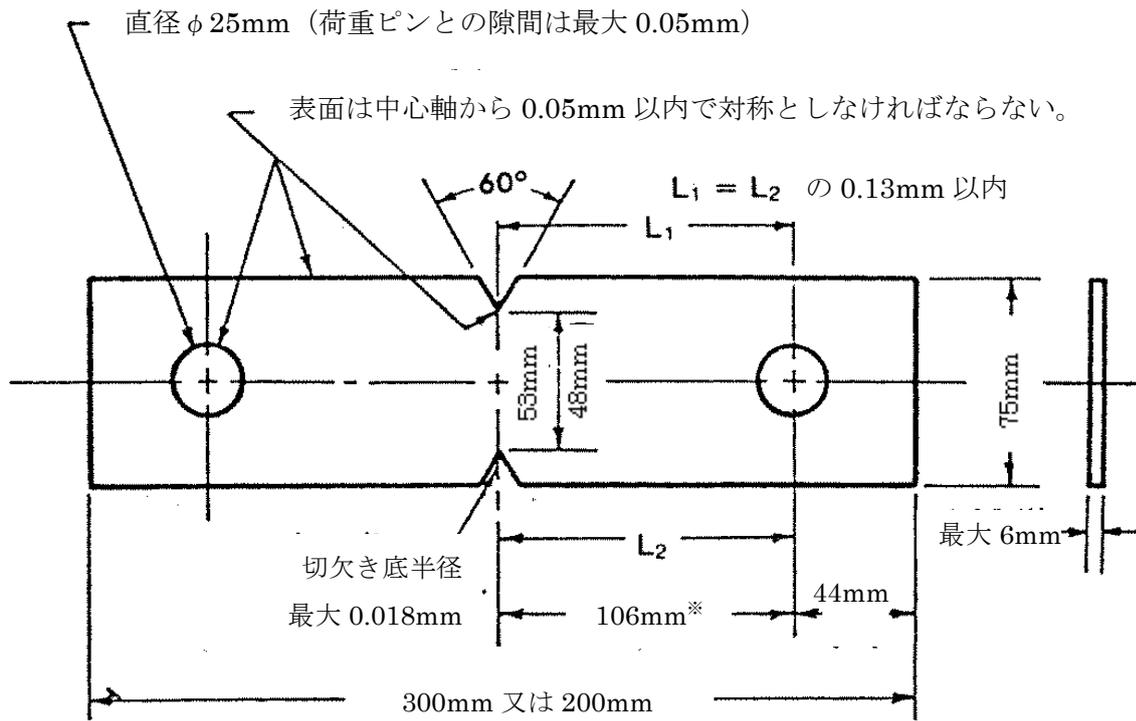


図 K.1 薄板試験片用治具



ポイント E は  
ポイント D の  
反対の面上とする。

図 K.2 熱電対測定位置



※副標準試験片の長さの場合 56mm

図 K.3 薄板による切欠き引張試験片

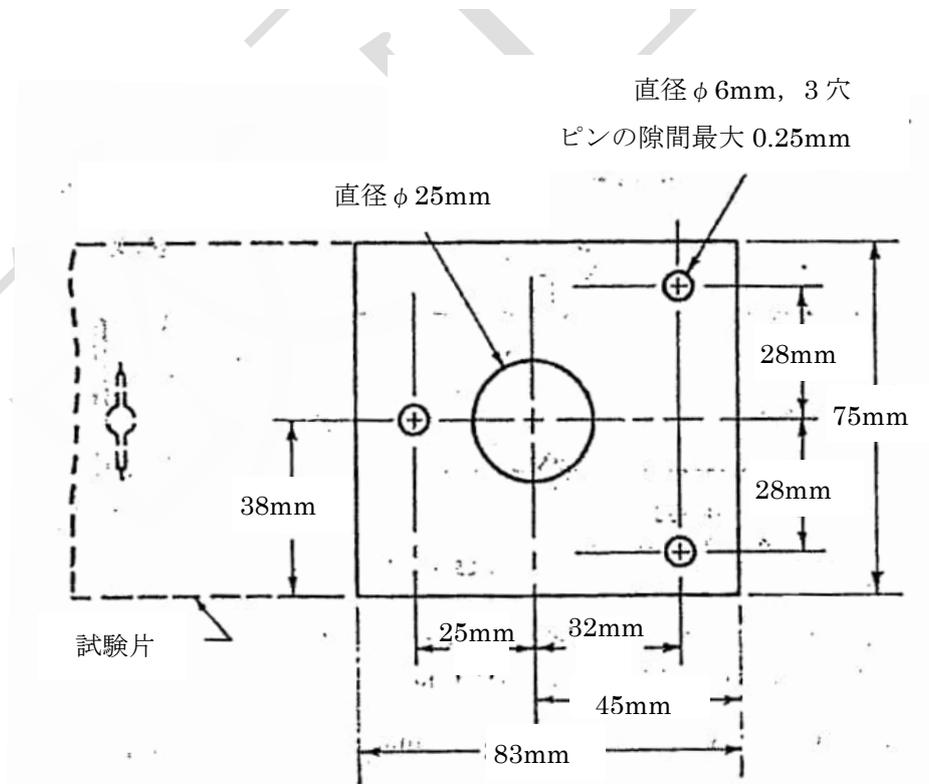


図 K.4 試験片ヘッド用補強板



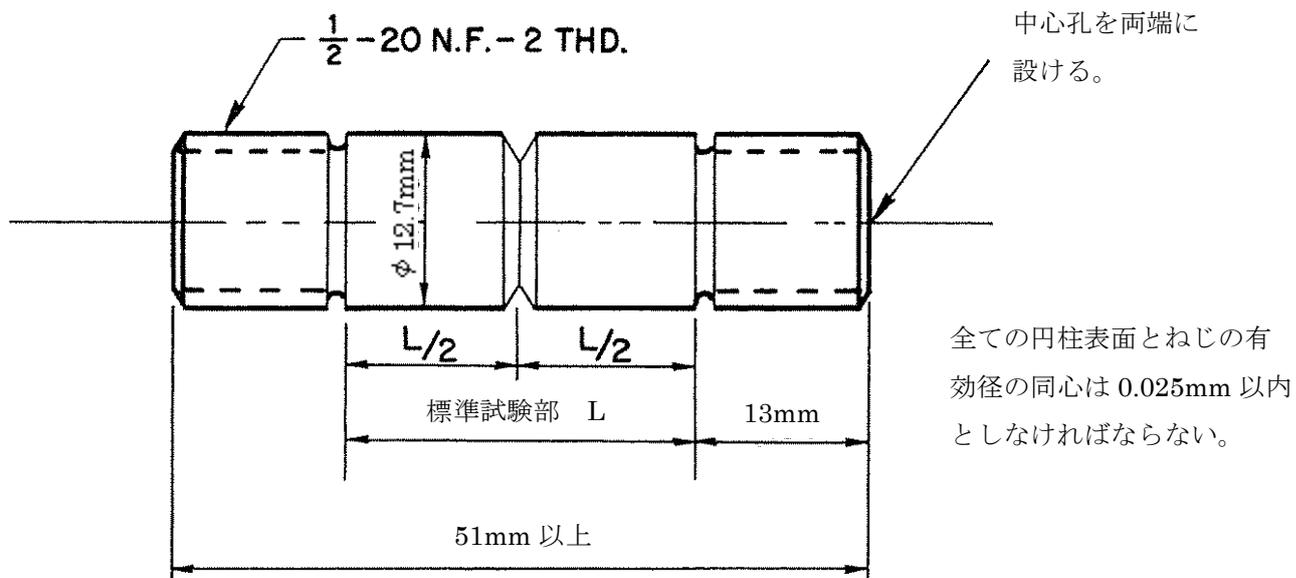
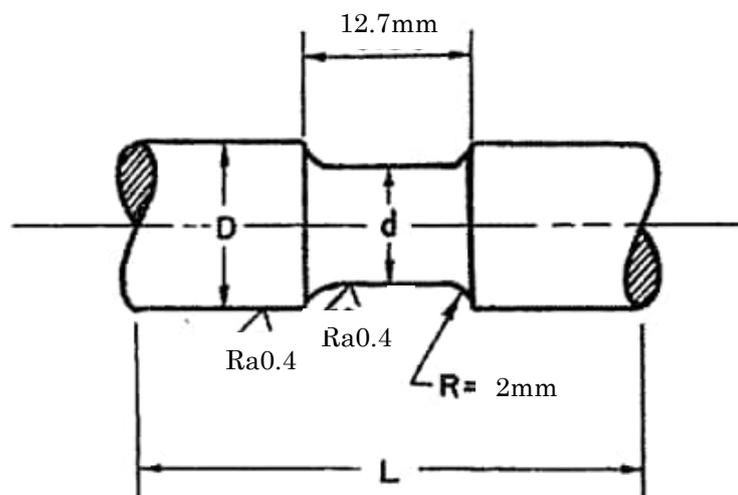


図 K.7 代表的なねじ込み式切欠き引張試験片

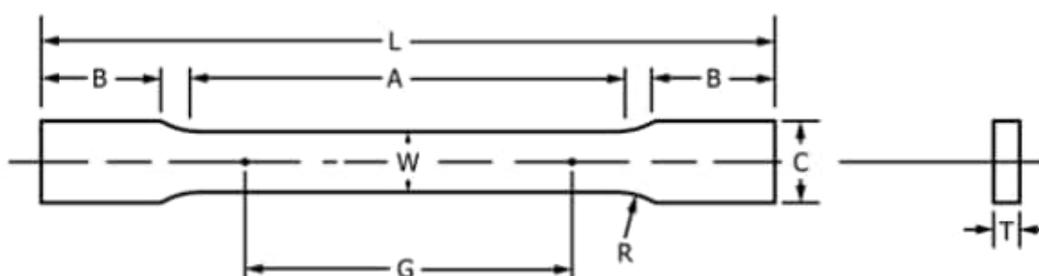


注記 1 d は D に対して同心を 0.025mm 以内としなければならない。

注記 2 合計試験片長さは一番短い切欠き試験片の長さを超えてはならない。

D	d	最大長さ L
12.7mm±0.13mm	8.96mm±0.13mm	38.1mm
26.9mm±0.13mm	19.0mm±0.13mm	66.8mm

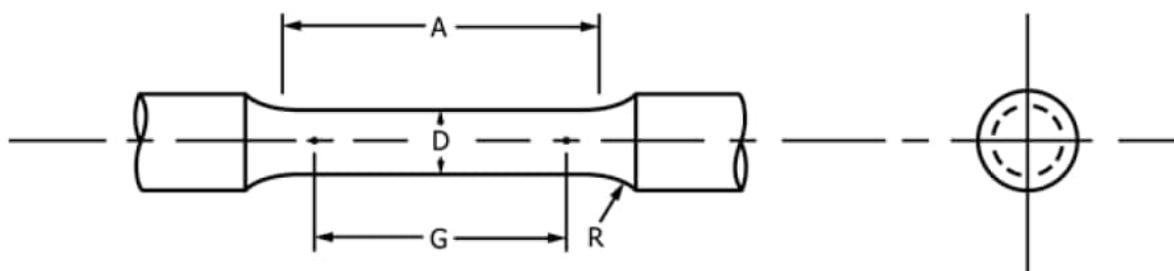
図 K.8 検証試験片



	寸法(mm)	
	標準試験片, 幅 12.5mm	サブサイズ試験片, 幅 12.5mm
G, 試験片の原標点距離	50.0±0.1	25.0±0.1
W, 幅	12.5±0.2	6.0±0.1
T, 厚さ	材料の厚さ	材料の厚さ
R, 肩部の最小半径	12.5	6
L, 試験片の最小長さ	200	100
A, 平行部の最小長さ	57	32
B, つかみ部の最小長さ	50	30
C, つかみ部の幅	20	10

- 注記 1** 平行部の両端の幅の差は、標準試験片の場合は 0.06mm 以下、サブサイズ試験片の 0.025mm 以下とし、平行部の両端の幅は、中央部の幅の 1%以下とする。
- 注記 2** 各試験片について、必要に応じてより狭い幅(W 及び C)を使用してもよい。このような場合、平行部の幅は、試験する材料の幅が許す限り大きくする必要がある。ただし、特に明記しない限り、これらの狭い試験片を使用する場合は、製品仕様の伸び要件は適用しない。材料の幅が W 未満の場合、側面は試験片の長さ全体にわたって平行でもよい。
- 注記 3** 寸法 T は、該当する材料仕様に記載されている試験片の厚さとする。標準試験片の最大公称厚さは 12.5mm とし、サブサイズ試験片の最大公称厚さは 6mm とする。
- 注記 4** サブサイズ試験片において試験中に軸方向荷重を得るために、全長 L は最大 200mm とし、可能な限り大きくする。
- 注記 5** 可能であれば、つかみ部の長さを十分に大きくして、試験片を試験機グリップ部の長さの 3分の2 以上まで伸ばすことが望ましい。標準試験片の厚さが 9mm を超える場合、つかみ部における破断を防ぐために、より長いつかみ部とそれに対応するより長いつかみ部断面が必要になる場合がある。
- 注記 6** つかみ部と平行部の芯は、標準試験片の場合は 0.2mm 以内とし、サブサイズ試験片の場合は 0.1mm 以内とする。

図 K.9 長方形平滑引張試験片



	寸法(mm)
G, 試験片の原標点距離	62.50±0.10
D, 直径	12.50±0.25
R, 肩部の最小半径	9
A, 平行部の最小長さ	75

**注記 1** 平行部の両端の幅は、中央部の幅の 1%以下とする。

**注記 2** 必要に応じて、現標点距離の伸び計に対応するために平行部の長さを伸ばしてもよい。ただし、伸び測定用の参照マークは示された原標点距離の間隔を空けなければならない。

**注記 3** 現標点距離及び肩部は図に示されるようにしなければならないが、両端は、荷重が軸方向となるような方法で試験機の治具に合うような形状としてもよい。両端がウェッジグリップで保持される場合、可能であればつかみ部の長さを十分に大きくして、試験片を試験機グリップ部の長さの 3 分の 2 以上まで伸ばすことが望ましい。

図 K. 10 丸棒平滑引張試験片

## 附属書 L(規定) 応力分類のための応力分布の線形化

### 序文

この附属書は、**附属書 J** の応力制限と比較するために、弾性有限要素法解析で得られた応力解析結果を処理する方法について規定する。

### 1 一般

応力解析結果の処理に関する一般的な事項を、次の **a) ~ d)** に示す。

- a) 連続体要素を用いた有限要素法解析では、全体的な応力分布が得られる。よって、各応力成分について線形化処理を行って膜応力と曲げ応力を求め、相当応力を計算する必要がある。シェル要素を用いた有限要素法解析では、解析結果より直接、膜応力と曲げ応力が得られる。
- b) 膜応力と曲げ応力は、部材の厚さ方向の断面で評価する。この断面が応力評価断面(以下、SCP と表記)である。平面形状においては、SCP の両端の長さを無限小にすることにより、応力評価ライン(以下、SCL と表記)となる。SCP は部材の断面を通る平面であり、SCL は部材の断面を通る直線である。軸対称又は平面形状では、SCL は面になる。SCP と SCL の例を、**図 L.1** と **図 L.2** に示す。
- c) 有限要素法による応力解析結果を線形化する方法は、次の **1) ~ 3)** による。
  - 1) **応力積分法** この方法は、連続体要素を用いて得られた応力解析結果を線形化する時に使用する<sup>1)</sup>。
  - 2) **節点力に基づく構造応力法** この方法は節点力の処理に基づいており、要素分割の依存性が小さく、溶接部の疲労強度データとの相関もよい<sup>2)</sup>。
  - 3) **応力積分に基づく構造応力法** この方法は **1)** の応力積分法を用いるが、積分に用いる要素は SCL 上の節点に関連する片側の要素群のみに限定する。
- d) 評価対象の部材及び荷重条件に対してより精度がよい他の方法がない場合には、応力積分に基づく構造応力法を推奨する。この方法は、要素分割の依存性が小さい節点力に基づく構造応力法の結果と一致する。この方法は、市販の有限要素解析ソフトウェアの後処理機能を利用してもよい。

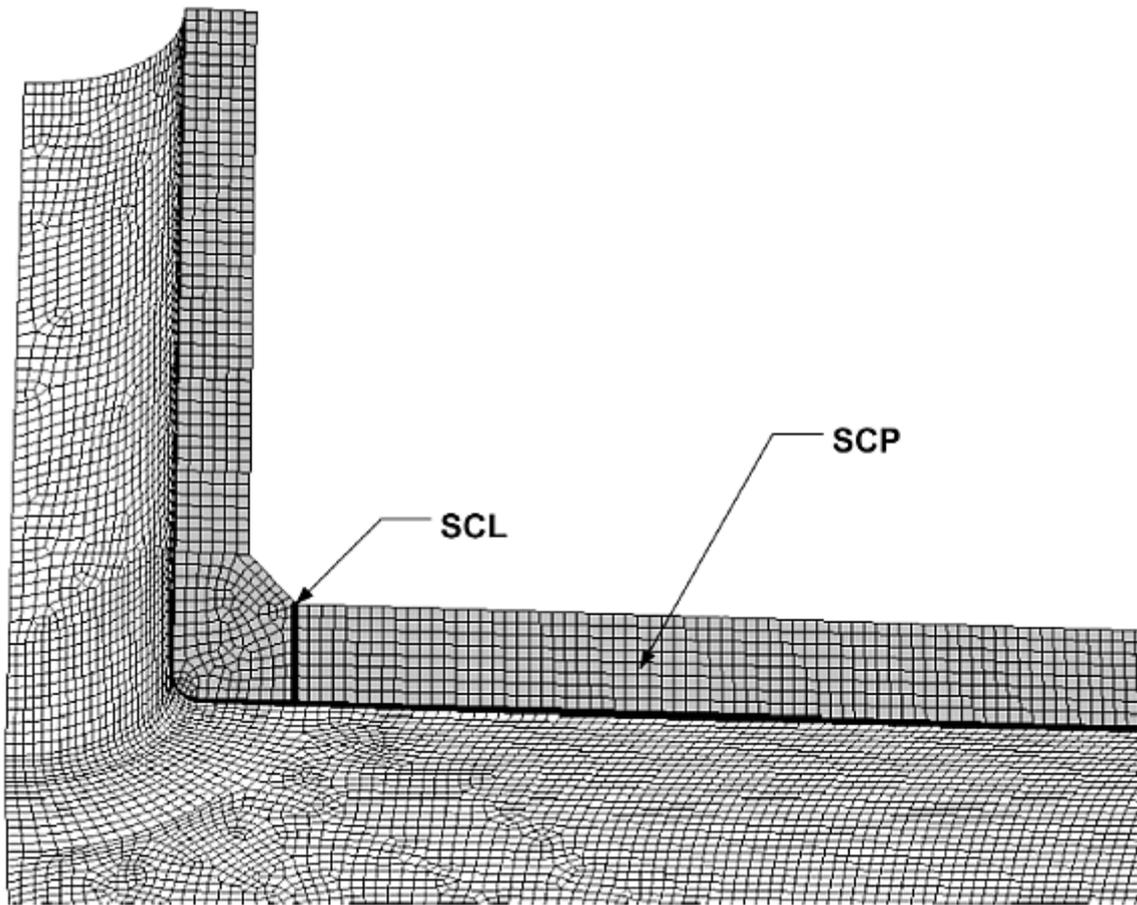
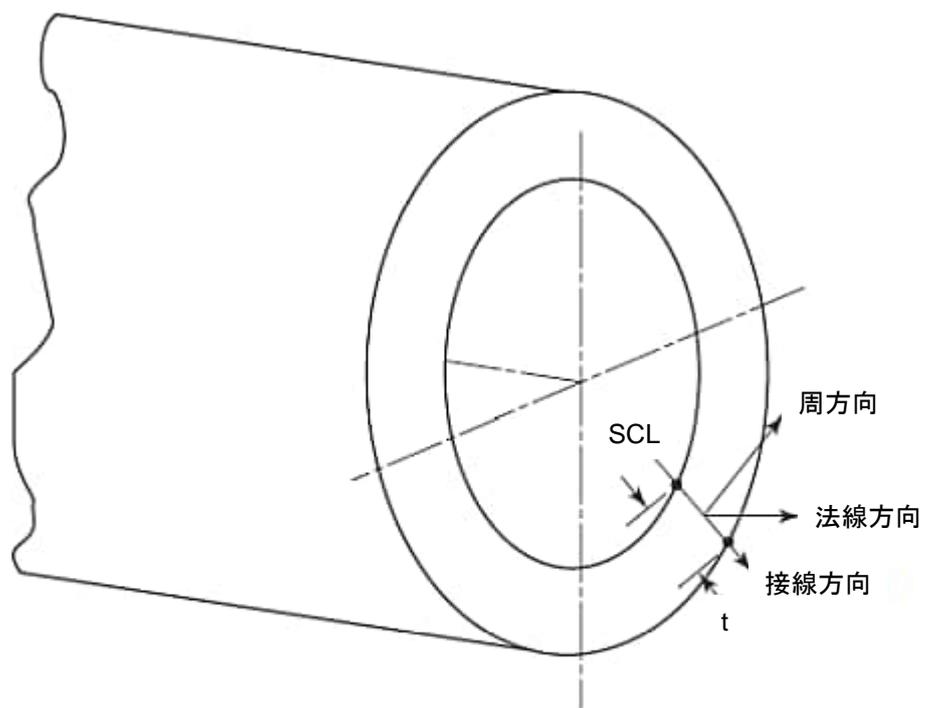
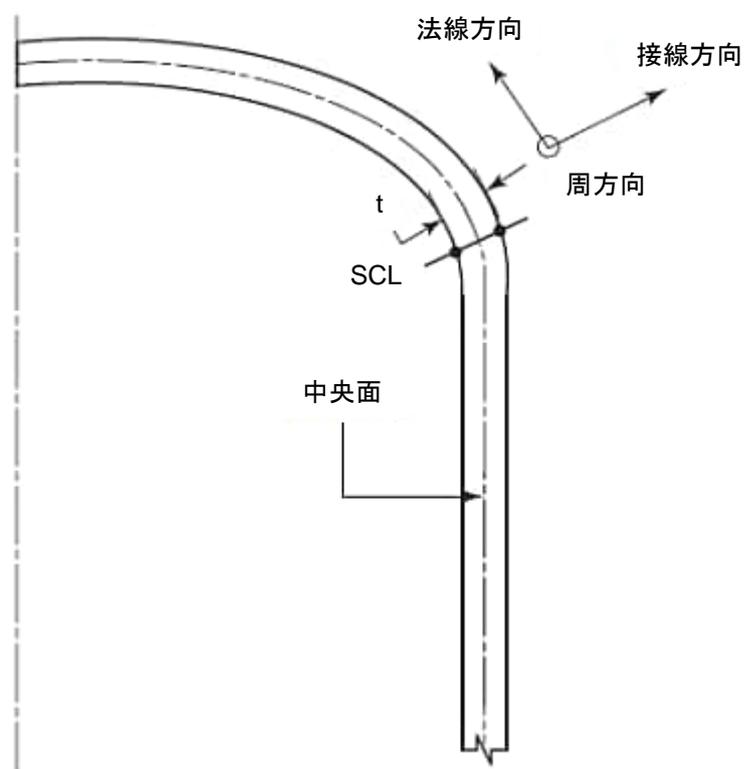


図 L.1 応力評価ライン(SCL)と応力評価断面(SCP) †



(a) 三次元モデルにおける応力評価ライン(SCL)の方向



(b) 二次元モデルにおける応力評価ライン(SCL)の方向

図 L.2 応力評価ライン(SCL) †

## 2 SCLの選定基準

SCLの選定基準は、次のa)～c)による。

- a) 圧力容器には、一般に形状、材料又は荷重の急激な変化が起こる構造不連続部がある。このような領域は、通常、部材中の高応力発生部位である。塑性崩壊及びラチェットの損傷モードを評価する場合には、SCLは総体的構造不連続部に設定する。局部損傷及び疲労を評価する場合には、SCLは局部構造不連続部に設定する。
- b) SCLがクラッド材と母材のように材料の不連続部を通る場合には、SCLに全ての材料と関連する荷重を考慮しなければならない。クラッド材のように材料の一つが強度計算から除外されている場合には、塑性崩壊を評価する断面に作用する線形化した力とモーメントから、母材の厚さのみを用いて膜応力と曲げ応力を計算する。
- c) 弾性応力制限と比較するための線形化された膜応力と曲げ応力をより正確に求めるための指針を、次の1)～5)及び図 L. 3 に示す。これらの指針は、SCLを選定するための定性的な手段として用いる。これらの基準のいずれかに適合しない場合には、膜応力又は曲げ応力を適切に評価していないことがある。この規格で弾塑性解析が要求される場合には、弾塑性解析結果を用いて、疲労評価のための膜応力及び曲げ応力を求めなければならない。
  - 1) SCLは最大応力成分の等高線に直交する方向に設定する。これが困難な場合には、SCLを断面の中央面に直交する方向に設定することにより同等の精度が得られる[図 L. 3(a)を参照]。
  - 2) SCL上の周方向と子午線方向成分の応力分布は、応力集中又はピーク熱応力の影響を除いて、単調増加又は単調減少しなければならない[図 L. 3(b)を参照]。
  - 3) 断面の厚さ方向成分の応力分布は、単調増加又は単調減少しなければならない。圧力荷重に対しては、厚さ方向の応力が圧力作用面で圧力に等しい圧縮応力となり、反対側の面でほぼゼロになるようにSCLを設定する[図 L. 3(c)を参照]。SCLが表面に垂直でない場合には、この限りではない。
  - 4) せん断応力分布は放物線形状となり、周方向及び子午線方向応力に比べて小さい。荷重の種類にも依存するが、せん断応力分布が断面の両表面でほぼゼロになるようにSCLを設定する[図 L. 3(d)を参照]。せん断応力分布に関する注意事項を4.1)と4.2)に示す。
    - 4.1) 内面と外面が平行でSCLが両表面と直交する場合にのみ、SCL上のせん断応力分布は近似的に放物線形状になる。両表面が平行でない場合又はSCLが両表面と直交しない場合には、適切なせん断応力分布は得られない。しかし、せん断応力の大きさが周方向又は子午線方向応力に比べて小さい場合には、この指針を免除する。
    - 4.2) ねじりによるせん断応力分布のように、ほぼ直線形状の場合には、せん断応力は重要である。
  - 5) 耐圧部材では、一般に周方向又は子午線方向応力が最大応力成分であり、応力評価で支配的な応力成分になる。SCLが内面、外面又は中立面に対して傾いている場合には、通常、周方向又は子午線方向応力はSCLに沿って単調増加又は単調減少しない。多くの圧力容器では、圧力による周方向又は子午線方向応力はほぼ直線分布になる。

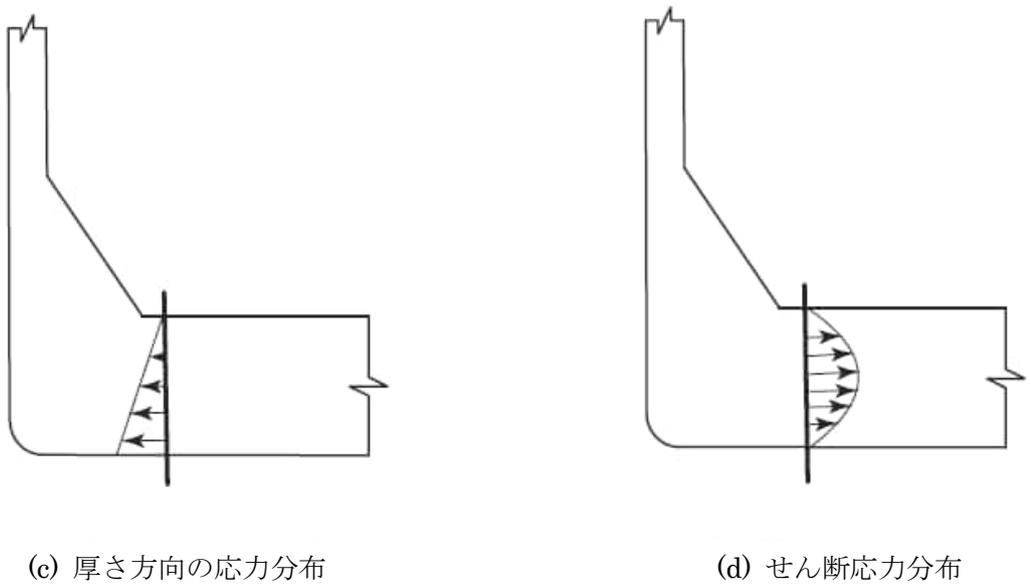
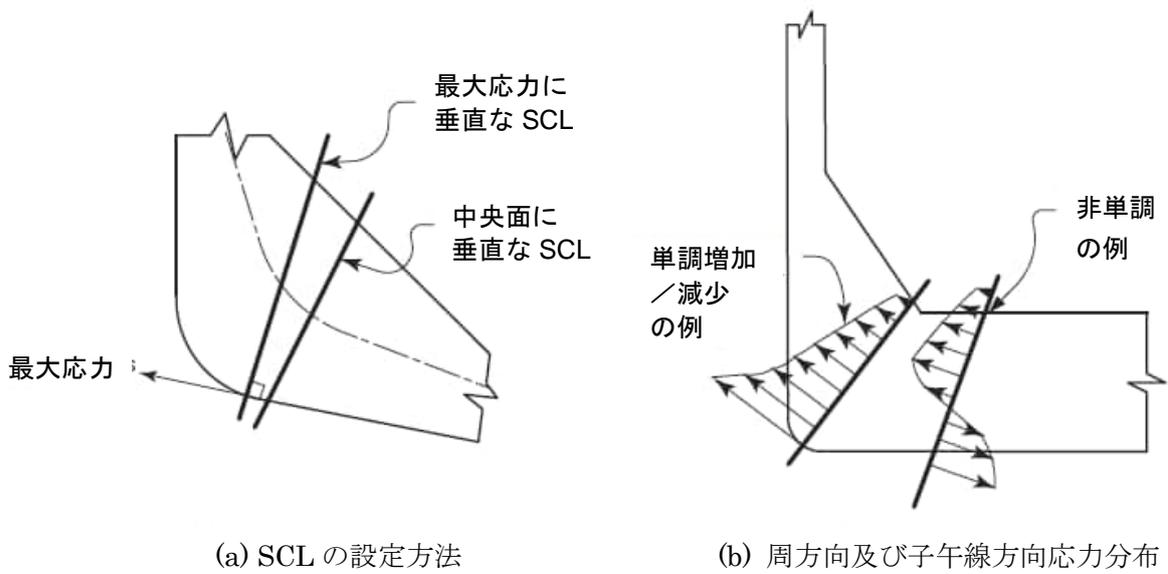


図 L.3 応力評価ライン(SCL)の方向と妥当性の指針†

### 3 応力積分法

#### 3.1 連続体要素

二次元又は三次元連続体要素を用いた有限要素法解析の結果は、応力積分法を用いて処理する。厚さ方向の SCL に沿って各応力成分を積分し、膜応力成分と曲げ応力成分を計算する。ピーク応力成分は、全応力分布から膜応力成分と曲げ応力成分を引き算することにより求める。

応力分布から膜応力、曲げ応力及びピーク応力成分を求める手順は、次の a)～e) 及び図 L.4 による。計算で用いる応力成分は、図 L.4 に示す SCL の方向で定義される局所座標系( $x_L, y_L, z_L$ )

における応力である。

- a) **膜応力テンソルの計算** 膜応力テンソルは SCL に沿った各応力成分の平均値から構成されるテンソルで、次式で求める。

$$\sigma_{ij,m} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_{ij}(x_L) dx_L \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- $\sigma_{ij,m}$  : 膜応力テンソル ( $i = x_L, y_L, z_L, j = x_L, y_L, z_L$ ) (MPa)
- $\sigma_{ij}(x_L)$  : SCL 上の評価点の応力テンソル ( $i = x_L, y_L, z_L, j = x_L, y_L, z_L$ ) (MPa)
- $x_L$  : SCL の局所座標系における SCL に沿った端部からの距離(mm)
- $t$  : 評価断面の厚さ(mm)

- b) **曲げ応力テンソルの計算** 曲げ応力テンソルの計算は、次の 1)～3)による。

- 1) 曲げ応力は SCL の局所座標系の周方向( $z_L$  軸)と子午線方向( $y_L$  軸)の垂直応力成分に対してのみ計算し、SCL に平行な応力成分( $x_L$  軸)又は面内せん断応力( $x_L - y_L$  面)に対しては計算しない。
- 2) SCL に対してねじりとなるせん断応力(周方向に垂直な面の面外せん断応力)分布に対してのみ、せん断応力の線形部分を考慮する(図 L. 2 を参照)。
- 3) 曲げ応力テンソルは SCL に沿った各応力成分の線形に変化する部分から構成されるテンソルで、次式で求める。

$$\sigma_{ij,b} = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma_{ij}(x_L) \left(\frac{t}{2} - x_L\right) dx_L \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- $\sigma_{ij,b}$  : 曲げ応力テンソル ( $i = y_L, z_L, j = y_L, z_L$ ) (MPa)

- c) **ピーク応力テンソルの計算** SCL の両端の  $x_L = 0$  と  $x_L = t$  におけるピーク応力テンソルを、それぞれ次式で求める。

$$\sigma_{ij,F}(x_L)|_{x_L=0} = \sigma_{ij}(x_L)|_{x_L=0} - (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{ij,F}(x_L)|_{x_L=t} = \sigma_{ij}(x_L)|_{x_L=t} - (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- $\sigma_{ij,F}(x_L)|_{x_L=0}$  :  $x_L = 0$  におけるピーク応力テンソル(MPa)
- $\sigma_{ij}(x_L)|_{x_L=0}$  :  $x_L = 0$  における応力テンソル(MPa)
- $\sigma_{ij,F}(x_L)|_{x_L=t}$  :  $x_L = t$  におけるピーク応力テンソル(MPa)
- $\sigma_{ij}(x_L)|_{x_L=t}$  :  $x_L = t$  における応力テンソル(MPa)

- d) 膜応力及び膜応力+曲げ応力テンソルより、SCL の両端で 3 主応力を計算する。
- e) 3 主応力より、**附属書 J**により SCL の両端で相当応力を計算する。

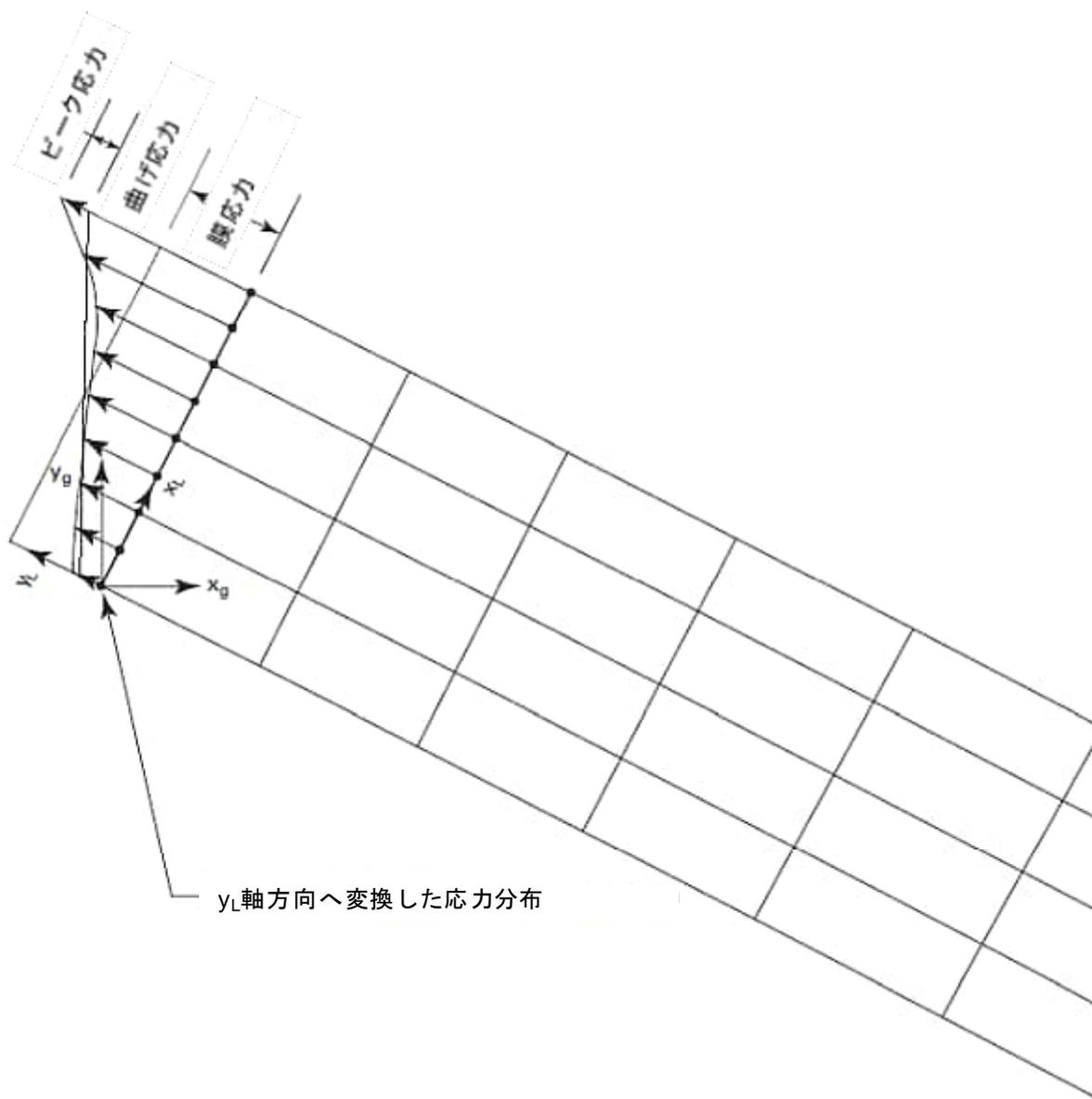


図 L.4 連続体要素の応力積分法による応力線形化†

### 3.2 シェル要素

二次元又は三次元シェル要素を用いた有限要素法解析では、解析結果から直接、膜応力と曲げ応力が得られる。応力分布から膜応力、曲げ応力及びピーク応力成分を求める手順は、次の a)～e)による。計算で用いる応力成分は、図 L.4 に示す SCL の方向で定義される局所座標系  $(x_L, y_L, z_L)$  における応力である。

a) **膜応力テンソルの計算** 膜応力テンソルは SCL に沿った各応力成分の平均値から構成されるテンソルで、次式で求める。

$$\sigma_{ij,m} = \frac{\sigma_{ij,in} + \sigma_{ij,out}}{2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- $\sigma_{ij,m}$  : 膜応力テンソル ( $i = y_L, z_L, j = y_L, z_L$ ) (MPa)
- $\sigma_{ij,in}$  : SCL 上の内面における応力テンソル ( $i = y_L, z_L, j = y_L, z_L$ ) (MPa)
- $\sigma_{ij,out}$  : SCL 上の外面における応力テンソル ( $i = y_L, z_L, j = y_L, z_L$ ) (MPa)

b) **曲げ応力テンソルの計算** 曲げ応力テンソルは SCL に沿った各応力成分の線形に変化する部分から構成されるテンソルで、次式で求める。

$$\sigma_{ij,b} = \frac{\sigma_{ij,in} - \sigma_{ij,out}}{2} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

- $\sigma_{ij,b}$  : 曲げ応力テンソル ( $i = y_L, z_L, j = y_L, z_L$ ) (MPa)

c) **ピーク応力テンソルの計算** ピーク応力テンソルを次式で求める。

$$\sigma_{ij,F} = (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b})(K_f - 1) \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

- $\sigma_{ij,F}$  : ピーク応力テンソル(MPa)
- $K_f$  : 疲労強度減少係数

- d) 膜応力及び膜応力+曲げ応力テンソルより、内面と外面において 2 主応力を計算する。
- e) 2 主応力又は内面においては圧力に等しい圧縮応力を含めた 3 主応力より、**附属書 J**により相当応力を計算する。

#### 4 節点力に基づく構造応力法

連続体要素又はシェル要素を用いた有限要素法解析の結果は、節点力に基づく構造応力法を用いて処理する。構造応力法は要素分割への依存性が低い膜応力と曲げ応力を求める方法であり、溶接接手の疲労設計に用いる。この方法では、溶接部に想定する仮想亀裂面に垂直な構造応力を評価する。一般に、圧力容器の溶接部で起こり得る亀裂の方向を予測することは簡単である(例えば、隅肉溶接の止端部)。連続体要素に対して構造応力を計算する方法には、節点力に基づく方法と応力積分に基づく方法がある。典型的な連続体の有限要素法モデルと SCL を **図 L.5** に示す。

##### 4.1 連続体要素

連続体要素に対する構造応力法による線形化手順は、次の **a) ~ c)** による。なお、ピーク応力テンソル及び相当応力の計算は、**3.1** による。

- a) 二次元又は三次元連続体要素を用いた有限要素法解析の結果は、節点力に基づく構造応力法を用いて処理する。**表 L.1** に示す式を用いて、節点力から膜応力と曲げ応力を計算する。この手順を **図 L.6** に示す。この方法は要素分割の依存性が小さいため、有限要素法解析で節点力が出力として得られる場合に推奨される。
- b) 三次元連続体要素の場合には、力は厚さ方向断面における各節点力( $NF_j$ )を合計し、モーメントは各節点力( $NF_j$ )に厚さ中央面からの距離( $s_j$ )を掛けて合計する(**図 L.6** を参照)。二次要素の場合には、**図 L.7** に示す厚さ方向断面の要素面に沿った 3 列の節点列( $i = 1, 2, 3$ )に対してこ

の処理を行う。

- c) 構造応力の変動範囲が対称な場合には、二つの溶接止端部から疲労亀裂が進展する可能性がある。そのため、構造応力の計算には、断面厚さの  $1/2$  に関して釣り合うような等価な膜応力及び曲げ応力成分を求めなければならない。対称な応力状態に対する等価な構造応力の計算手順を **図 L. 8** に示す。

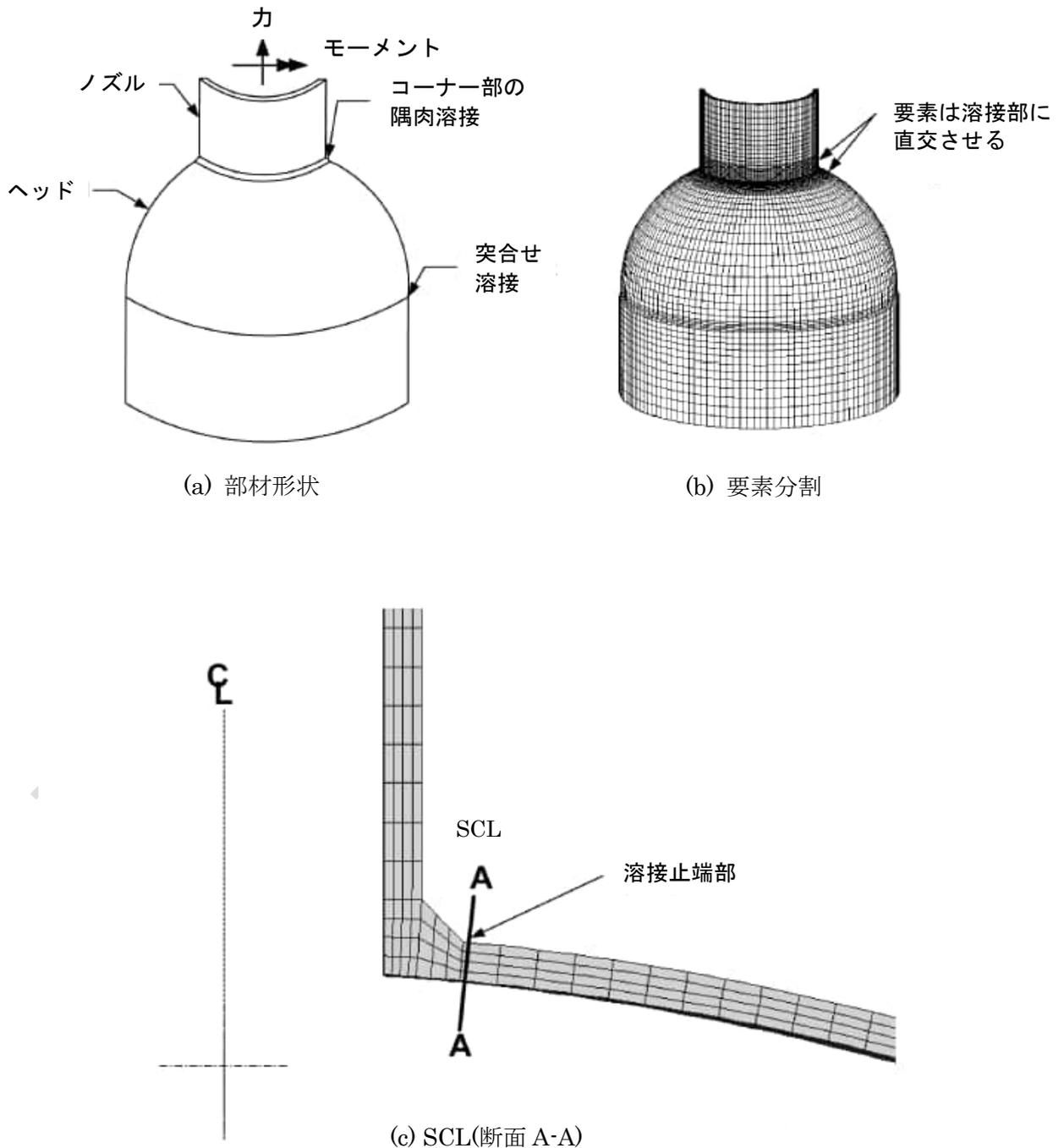


図 L. 5 構造応力法のための連続体要素モデルの応力評価ライン (SCL) †

表 L.1 連続体要素に対する構造応力の算出<sup>†</sup>

要素	膜応力	曲げ応力
二次元 軸対称二次 要素 (8 節点)	$\sigma_m = \frac{1}{t} \sum \frac{NF_j}{2\pi r_j}$ <p>ここで,  <math>j</math> : 厚さ方向の節点(<math>j = 1 \sim n</math>)  <math>n</math> : 厚さ方向の節点数  <math>NF_j</math> : SCL に垂直な節点 <math>j</math> の節点力(N) (図 L.6 を参照)  <math>t</math> : 断面の厚さ(mm)  <math>r_j</math> : 節点 <math>j</math> の半径(mm)</p>	$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \sum \frac{NF_j s_j}{2\pi r_j}$ <p>ここで,  <math>s_j</math> : SCL に沿って測った厚さ中央から節点 <math>j</math> までの距離(mm)  <b>(図 L.6 を参照)</b></p>
二次元 二次平面応力 又は 平面ひずみ 要素 (8 節点)	$\sigma_m = \frac{1}{t} \sum \frac{NF_j}{w}$ <p>ここで,  <math>w</math> : 要素の幅(mm)</p>	$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \sum \frac{NF_j s_j}{w}$
三次元 二次要素 (20 節点)	<p>要素幅方向の <math>i</math> 列の膜応力</p> $\sigma_{mi} = \frac{f_i}{t}$ <p>ここで,  <math>i = 1, 2, 3</math> (図 L.7 を参照)  <math>i</math> 列の単位要素幅当りの力</p> $f_1 = \frac{3(6F_1 + 2F_3 - F_2)}{2w}$ $f_2 = \frac{-3(2F_1 + 2F_3 - 3F_2)}{4w}$ $f_3 = \frac{3(2F_1 + 6F_3 - F_2)}{2w}$ <p><math>i</math> 列の節点力の合力</p> $F_1 = \sum NF_{1j}$ $F_2 = \sum NF_{2j}$ $F_3 = \sum NF_{3j}$ <p><math>NF_{ij}</math> : SCL に垂直な要素幅方向の <math>i</math> 列の節点 <math>j</math> における節点力(N)</p>	<p>要素幅方向の <math>i</math> 列の曲げ応力</p> $\sigma_{bi} = \frac{6 m_i}{t^2}$ <p>ここで,  <math>i = 1, 2, 3</math> (図 L.7 を参照)  <math>i</math> 列の単位要素幅当りのモーメント</p> $m_1 = \frac{3(6M_1 + 2M_3 - M_2)}{2w}$ $m_2 = \frac{-3(2M_1 + 2M_3 - 3M_2)}{4w}$ $m_3 = \frac{3(2M_1 + 6M_3 - M_2)}{2w}$ <p><math>i</math> 列の節点の合モーメント</p> $M_1 = \sum NF_{1j} s_j$ $M_2 = \sum NF_{2j} s_j$ $M_3 = \sum NF_{3j} s_j$

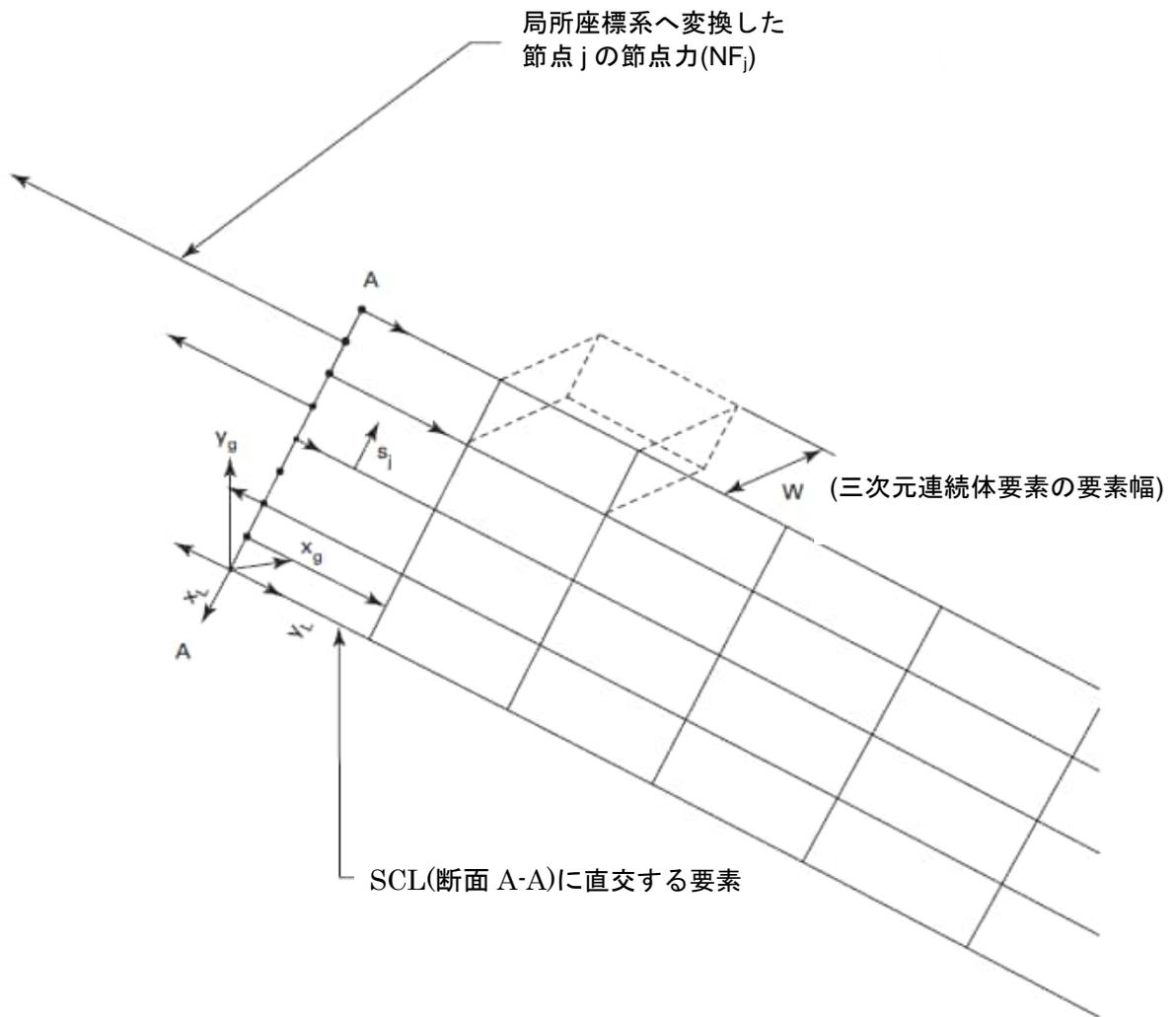


図 L.6 連続体要素に対する節点力に基づく構造応力法による応力線形化†

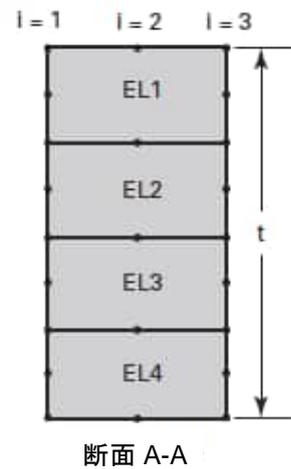
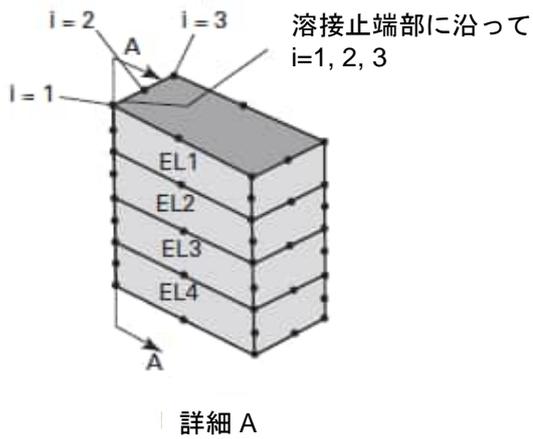
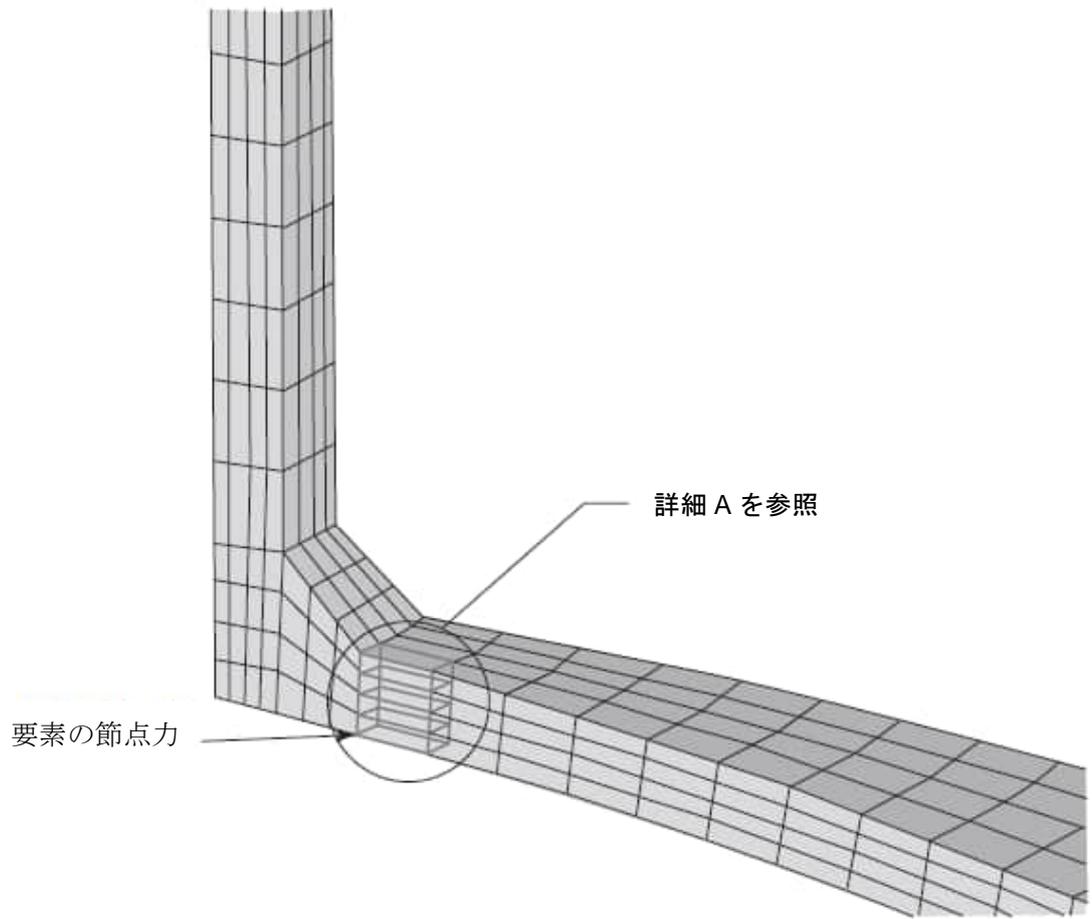
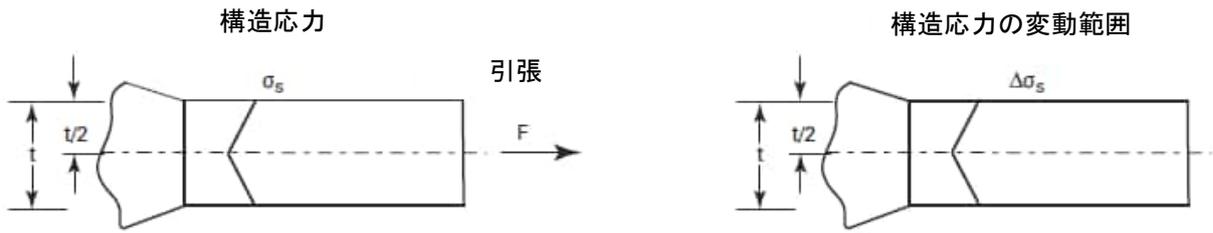
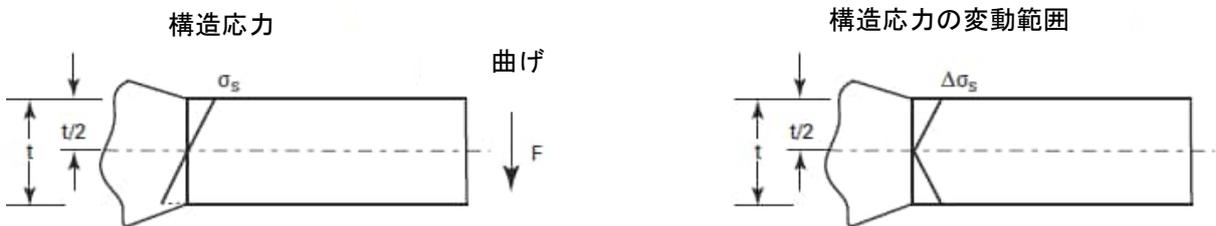


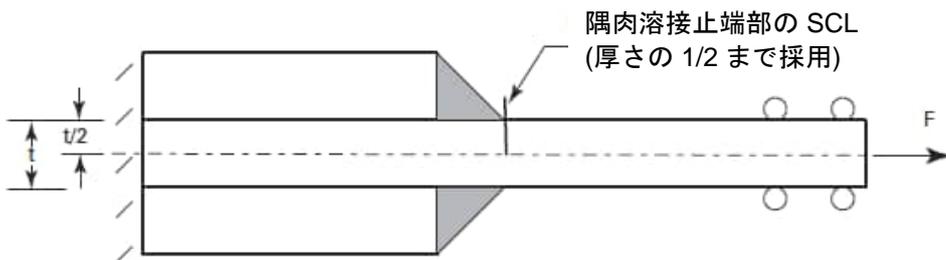
図 L.7 三次元二連続体要素に対する構造応力法による節点力の処理†



(a) 対称な構造応力(対称継手と対称負荷)



(b) 逆対称な構造応力(対称継手と逆対称負荷)



(c) 対称継手の例(重ね板継手の隅肉溶接)

図 L. 8 対称な構造応力の変動範囲に対する構造応力法による処理†

## 4.2 シェル要素

シェル要素に対する構造応力法による線形化手順は、次の **a)** と **b)** による。なお、ピーク応力テンソル及び相当応力の計算は、**3.2** による。

- a) シェル要素を用いた有限要素法解析の結果は、節点力に基づく構造応力法を用いて処理する。  
**表 L.2** に示す式を用いて、節点力から膜応力と曲げ応力を計算する。典型的なシェル要素を用いた有限要素法モデルを **図 L.9** に示す。
- b) 三次元シェル要素の場合には、評価断面において厚さ中央における力とモーメントを求める。この手順を **図 L.10** に示す。

## 5 応力積分に基づく構造応力法

節点力に基づく構造応力法の別法として、二次元又は三次元連続体要素を用いた有限要素法解析の結果は、応力積分に基づく構造応力法を用いて処理する。この方法は **3** の応力積分法を使用するが、処理する節点列に関連した片側の要素群のみを用いて計算する。SCL 上の評価点の応力テンソルに適用できる要素群を **図 L.11** に示す。

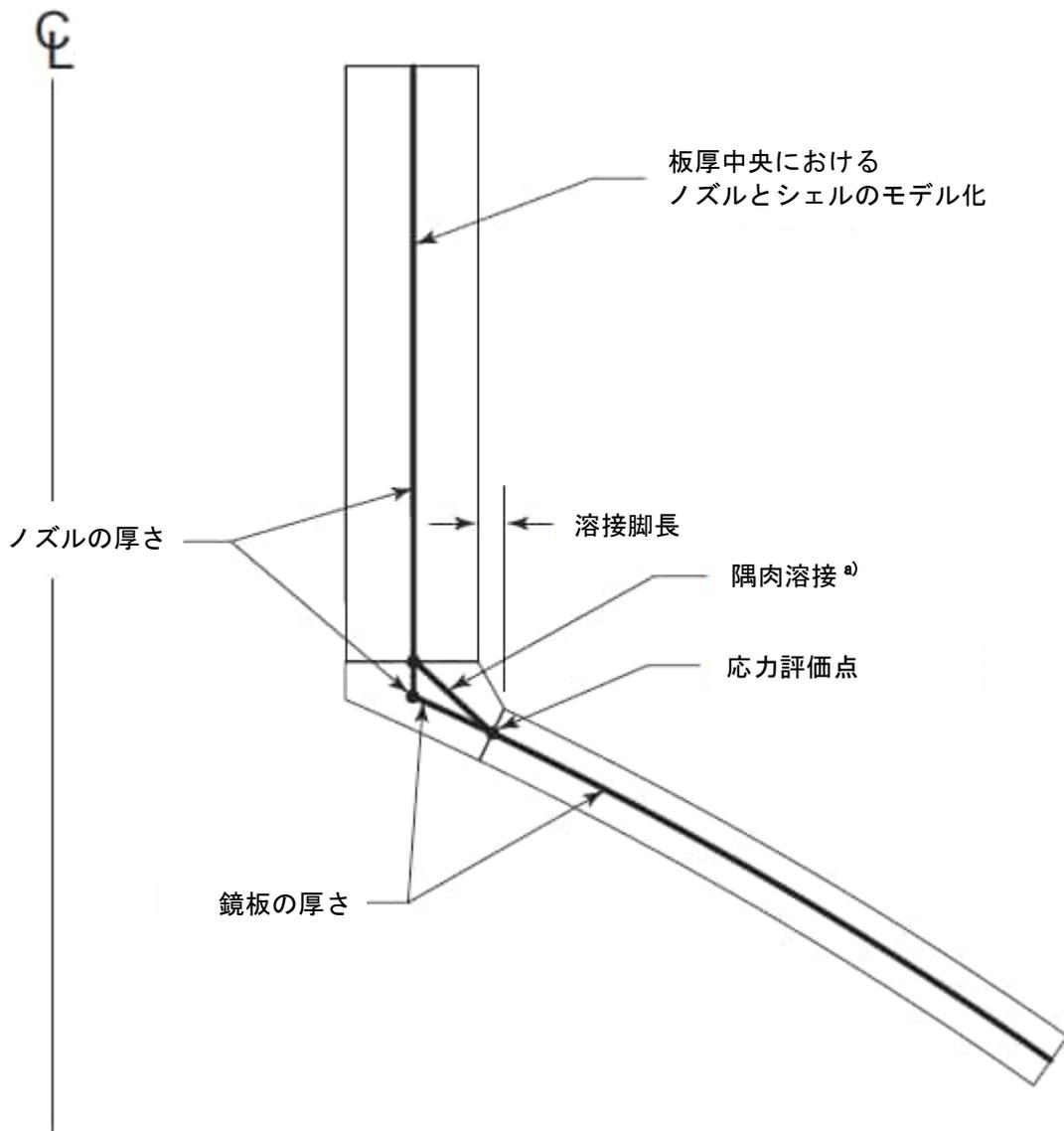
---

### 参考文献

- 1) WRC 429, 3D Stress Criteria Guidelines for Application, (1998)
- 2) WRC 474, Master S-N Curve Method for Fatigue Evaluation of Welded Components, (2002)

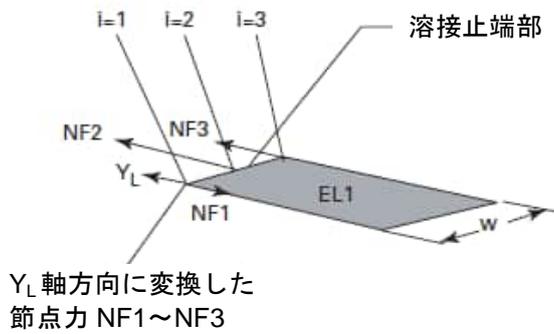
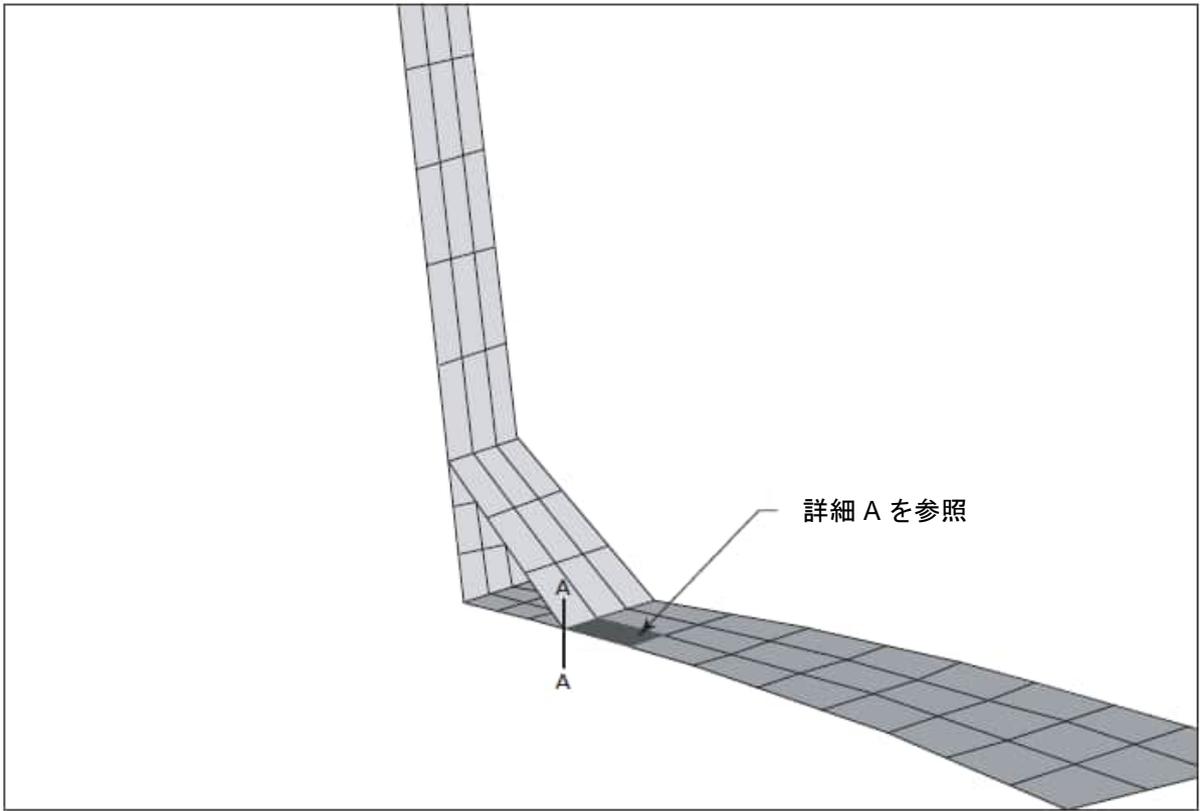
表 L.2 シェル要素に対する構造応力の算出†

要素	膜応力	曲げ応力
三次元 二次シェル 要素 (8 節点)	<p>要素幅方向の <math>i</math> 列の膜応力</p> $\sigma_{mi} = \frac{f_i}{t}$ <p>ここで,  <math>i = 1, 2, 3</math> (図 L.10 を参照)  <math>i</math> 列の単位要素幅当りの力</p> $f_1 = \frac{3(6NF_1 + 2NF_3 - NF_2)}{2w}$ $f_2 = \frac{-3(2NF_1 + 2NF_3 - 3NF_2)}{4w}$ $f_3 = \frac{3(2NF_1 + 6NF_3 - NF_2)}{2w}$ <p><math>NF_i</math> : SCL に垂直な要素幅方向の <math>i</math> 列の節点における節点力(N)  <math>t</math> : 評価断面の厚さ(mm)  <math>w</math> : 要素の幅(mm)</p>	<p>要素幅方向の <math>i</math> 列の曲げ応力</p> $\sigma_{bi} = \frac{6m_i}{t^2}$ <p>ここで,  <math>i = 1, 2, 3</math> (図 L.10 を参照)  <math>i</math> 列の単位要素幅当りのモーメント</p> $m_1 = \frac{3(6NM_1 + 2NM_3 - NM_2)}{2w}$ $m_2 = \frac{-3(2NM_1 + 2NM_3 - 3NM_2)}{4w}$ $m_3 = \frac{3(2NM_1 + 6NM_3 - NM_2)}{2w}$ <p><math>NM_i</math> : SCL に垂直な曲げ応力を生じさせる要素幅方向の <math>i</math> 列の節点におけるモーメント(Nmm)</p>
三次元 一次シェル 要素 (4 節点)	<p>要素幅方向の <math>i</math> 列の膜応力</p> $\sigma_{mi} = \frac{f_i}{t}$ <p>ここで,  <math>i = 1, 2</math> (図 L.10 の要素幅の両端)  <math>i</math> 列の単位要素幅当りの力</p> $f_1 = \frac{2(2NF_1 - NF_2)}{w}$ $f_2 = \frac{2(2NF_2 - NF_1)}{w}$	<p>要素幅方向の <math>i</math> 列の曲げ応力</p> $\sigma_{bi} = \frac{6m_i}{t^2}$ <p>ここで,  <math>i = 1, 2</math> (図 L.10 の要素幅の両端)  <math>i</math> 列の単位要素幅当りのモーメント</p> $m_1 = \frac{2(2NM_1 - NM_2)}{w}$ $m_2 = \frac{2(2NM_2 - NM_1)}{w}$
軸対称シェル 要素 (直線, 放物線)	$\sigma_m = \frac{NF_j}{2\pi r_j t}$ <p>ここで,  <math>NF_j</math> : 節点 <math>j</math> の節点力(N)  <math>r_j</math> : 節点 <math>j</math> の半径(mm)</p>	$\sigma_b = \frac{6NM_j}{2\pi r_j t^2}$ <p>ここで,  <math>NM_j</math> : 節点 <math>j</math> のモーメント(Nmm)</p>



注<sup>a)</sup> 隅肉溶接のモデルに用いるシェル要素の厚さと材料特性は、実際の隅肉溶接と等価な剛性となるようにする。

図 L.9 シェル要素に対する構造応力法による応力評価<sup>†</sup>



詳細 A

図 L. 10 三次元二次シェル要素に対する構造応力法による節点力の処理<sup>†</sup>

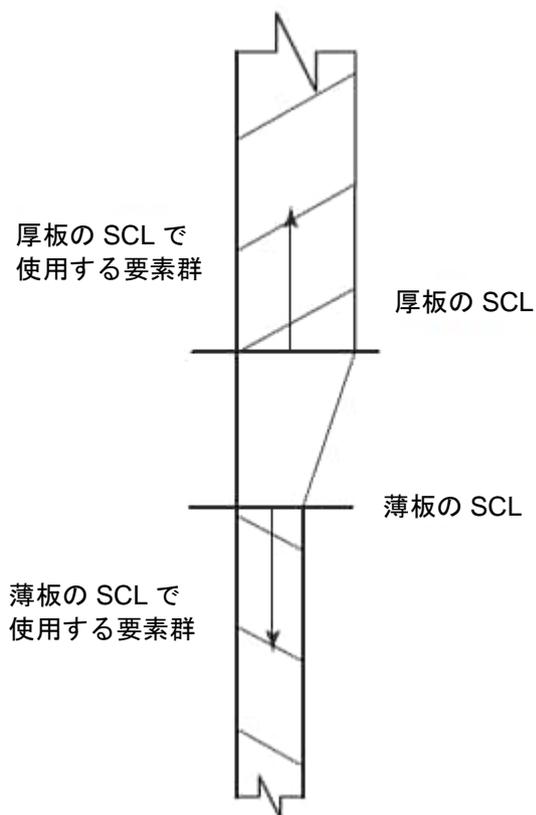
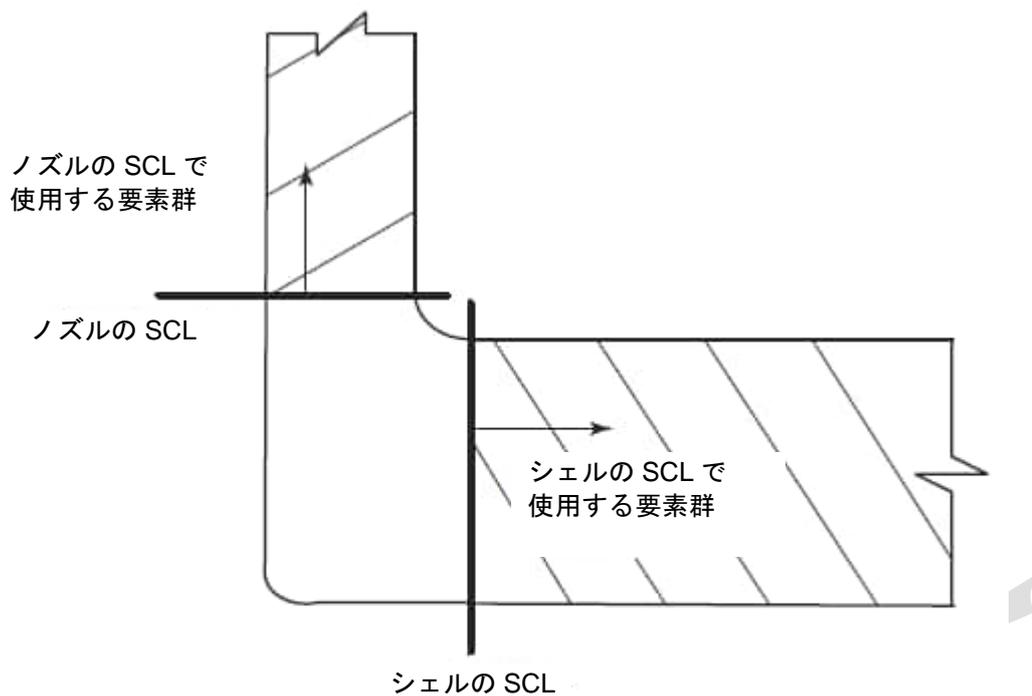


図 L.11 応力積分に基づく構造応力法における節点応力の処理のための要素選択†