

HPIS

圧力機器の高温亀裂状欠陥評価方法

Assessment Procedure for Crack-Like Flaws
in Pressure Equipment at Elevated Temperature

HPIS Z 103:2026

2026年XX月XX日制定

一般社団法人日本高圧力技術協会

High Pressure Institute of Japan

一般社団法人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)	朝田 誠治	三菱重工業(株)
(副委員長)	熊谷 知久	(一財)電力中央研究所
(委 員)	早川 正夫	(国研)物質・材料研究機構
	加藤 久志	高圧ガス保安協会
	高木 愛夫	(一財)日本規格協会
	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)
	猪狩 玄樹	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)
	西田 正平	(一社)日本ガス協会
	関口 優	東京ガス(株)
	中川 祐一	三井化学(株)
	小山 聰	住友化学(株)
	脇 祥之	千代田化工建設(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
	井上 謙	東洋エンジニアリング(株)
	長谷川 忠之	(一財)発電設備技術検査協会
	三谷 幸寛	(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：2026年XX月XX日

原案作成者：圧力容器規格委員会 (委員長 熊谷 克彦)

圧力設備維持規格分科会 (主査 弥富 政享)

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般社団法人日本高圧力技術協会が制定した。

一般社団法人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。

一般社団法人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。この規格の使用者は、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使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。

まえがき

この規格は、一般社団法人日本高圧力技術協会に設置された圧力容器規格委員会 圧力設備維持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の実施を経て、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。

2026/1/23 Draft

目次

	ページ
序文	1
1 適用範囲	1
1.1 一般	1
1.2 適用対象設備	1
1.3 適用期間	2
1.4 評価対象欠陥	2
2 引用規格	2
3 用語および記号の定義	2
3.1 用語	2
3.2 記号	2
4 評価に必要なデータ	3
5 評価方法と結果の判定	3
5.1 亀裂状欠陥評価の基本事項	3
5.2 評価方法	3
5.3 結果の判定	5
6 評価後の対応	7
6.1 継続使用をしてもよいと評価された場合	7
6.2 継続使用をしてはならないと評価された場合	7
7 解析要員などの要件	7
附属書 A (規定) 用語の定義	8
附属書 B (参考) 材料特性	20
附属書 C (規定) 欠陥形状のモデル化	25
附属書 D (規定) 応力分類, 参照応力, 応力拡大係数	38
附属書 E (規定) 疲労 J 積分範囲およびクリープ J 積分算出式	90
附属書 F (参考) 例題	97
圧力機器の高温亀裂状欠陥評価方法 解説	解 1
原案作成委員会 構成表	解 45

日本高圧力技術協会規格
圧力機器の高温亀裂状欠陥評価方法
Assessment Procedure for Crack-Like Flaws
in Pressure Equipment at Elevated Temperature

序文

この規格は、クリープが懸念される温度域で運転される一般産業用設備（発電用原子力設備を除く）の圧力機器において供用中検査で検出された亀裂状欠陥に対して疲労及びクリープ疲労の定量的評価方法を与えることを目的とする。なお、クリープの影響を無視してもよい温度域における亀裂状欠陥の評価方法は、**HPIS Z 101-1:2008「圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第1段階評価¹⁾**および**HPIS Z 101-2:2011「圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第2段階評価²⁾**に規定されている。

1 適用範囲

1.1 一般

この規格は、圧力機器の高温亀裂状欠陥評価方法について規定する。

1.2 適用対象設備

この規格は、以下に示す法規、規格で設計製作された設備に対して適用する。

設計製作法規

高压ガス保安法
ガス事業法
労働安全衛生法
電気事業法
消防法

設計製作規格

JIS B 8243⁽¹⁾ 圧力容器の構造
JIS B 8249 多管円筒形熱交換器
JIS B 8265 圧力容器の構造－一般事項
JIS B 8267 圧力容器の設計
JIS B 8270⁽¹⁾ 圧力容器（基盤規格）
JIS B 8501 鋼製石油貯槽の構造（全溶接製）
JPI-7S-77 石油工業用プラントの配管基準

注⁽¹⁾ これらの規格は現在廃止されている規格である。

注記 ただし、ここに記載されていない法規、規格であっても同等と判断される法規、規格で設計製作された設備に対しての適用を妨げるものではない。

1.3 適用期間

この規格の適用時期は、設備の供用期間中とする。

1.4 評価対象欠陥

この規格の評価対象欠陥は、亀裂状欠陥（運転前から存在する欠陥および運転後に生じた欠陥）のうち、クリープが懸念される温度域にさらされる欠陥とする。

2 引用規格

次に掲げる引用規格は、この規格に引用されることによって、その一部又は全部がこの規格の要求事項を構成している。これらの引用規格は、記載の年の版を適用し、その後の改正版（追補を含む）は適用しない。

HPIS Z 101-2 : 2011 圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第2段階評価

3 用語および記号の定義

3.1 用語

この規格で用いる主な用語の定義は、**附属書A**による。

3.2 記号

a	：亀裂深さ
a_0	：初期欠陥深さ
C_1	：疲労亀裂進展則の定数
C_2	：クリープ亀裂進展速度則の定数
da/dt	：クリープ亀裂進展速度
da/dN_{creep}	：クリープ疲労1サイクル中のクリープ亀裂進展量
$da/dN_{fatigue}$	：クリープ疲労1サイクル中の疲労亀裂進展量
J^*	：クリープJ積分
m_1	：疲労亀裂進展則の指数
m_2	：クリープ亀裂進展速度則の指数
N	：想定するサイクル数
t	：経過時間
t_{CD}	：クリープ余寿命
t_{CF}	：クリープ疲労余寿命
t_i	： i 回目のクリープ疲労亀裂進展量評価を行った経過時間
t_r	：クリープ破断寿命
t_s	：評価期間
Δa_{creep}	：クリープ亀裂進展量
$\Delta a_{fatigue}$	：クリープ亀裂進展量
ΔJ_f	：疲労J積分範囲
$\tilde{\epsilon}_f$	：クリープ破断延性値

σ_{b^p}	: 弹性解析による一次曲げ応力
σ_{b^s}	: 弹性解析による二次曲げ応力
σ_{m^p}	: 弹性解析による一次膜応力
σ_{m^s}	: 弹性解析による二次膜応力
σ_{ref^p}	: 一次応力に対する参照応力
τ_0	: クリープ疲労評価の 1 サイクルにおける保持開始時間
τ_1	: クリープ疲労評価の 1 サイクルにおける保持終了時間

4 評価に必要なデータ

評価に必要となるデータは以下のとおりである。

- a) 製造時の設計データ
- b) 運転経歴および保全履歴
- c) 予想される将来の条件(運転条件等)
- d) 欠陥の位置、形状および寸法
- e) 欠陥箇所での欠陥の存在を考慮しない応力状態
- f) 欠陥を有する部材の材質
- g) その他、5 の評価方法の中で必要とされる特定のデータ

5 評価方法と結果の判定

5.1 亀裂状欠陥評価の基本事項

この規格では疲労およびクリープ疲労について評価する。評価の流れを図 5.1 に示す。評価の方法は 5.2 に、評価結果の判定は 5.3 による。

本評価において安全係数を規定していない部分については、使用者が評価対象に応じて適切に安全係数を定めることとする。

5.2 評価方法

5.2.1 欠陥形状のモデル化

非破壊検査で検出された有意なきずの指示に対して欠陥形状をモデル化する。モデル化の方法は附属書 C による。

5.2.2 荷重履歴の定義

運転に伴う荷重の履歴を定義する。評価時点までの履歴および評価時点の後に想定される履歴を考慮する。

5.2.3 評価に必要な応力成分の決定

評価部位に作用する荷重に応じ、以下に示す亀裂に垂直な応力成分を決定する。その設定法は附属書 D による。

- a) 弹性解析による一次膜応力 σ_m^p
- b) 弹性解析による一次曲げ応力 σ_b^p
- c) 弹性解析による二次膜応力 σ_m^s
- d) 弹性解析による二次曲げ応力 σ_b^s

5.2.4 初期欠陥の安定性評価

初期欠陥の安定性評価は **HPIS Z 101-2:2011** に従う。評価点が許容域にある場合、初期欠陥は安定であり、**5.2.5** 以降の評価を行う。評価点が許容域にない場合、初期欠陥は安定ではなく、**6.2** に従い補修あるいは再定格を行う。

5.2.5 評価期間 t_s の設定

評価期間 t_s を設定する。次回定期検査までの継続運転の可否を評価する場合は t_s を次回定期検査までの運転時間とする。長期継続運転した場合の余寿命を評価する場合は t_s を十分に大きな値（ただし **5.2.6** で算出する t_{CD} よりは小さな値）とする。経過時間 $t = 0$ とする。

5.2.6 クリープ破断時間の評価

初期欠陥深さ a_0 に対するクリープ余寿命（亀裂材に対する破断寿命） t_{CD} を算出する。

$$t_{CD} = t_r[\sigma_{ref}^p(a_0)] \quad \text{--- (5.1)}$$

t_r は単軸クリープ試験から得られる破断寿命、また σ_{ref}^p は σ_m^p および σ_b^p に対する参照応力であり、**附属書 D** に示す参照応力解を基に計算する。

評価期間内におけるクリープ破断の有無を評価する。 $t_{CD} > t_s$ であればクリープ破断は起こらず、**5.2.7** 以降の評価を行う。 $t_{CD} \leq t_s$ であればクリープ破断が起こると判断され、**6.2** に従い補修あるいは再定格を行う。

5.2.7 亀裂進展パラメータの算出

亀裂進展を支配する破壊力学パラメータを算出する。疲労亀裂進展の支配パラメータとして疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を、クリープ亀裂進展の支配パラメータとしてクリープ J 積分 J^* を算出する。評価には σ_m^p 、 σ_b^p 、 σ_m^s 、 σ_b^s を用いる。評価の詳細は**附属書 E** による。

連続する複数のサイクルにわたり亀裂の進展が支配パラメータの変化に及ぼす影響が無視してもよい場合、この間の亀裂進展に応じた支配パラメータの再計算を行うことなく進展評価を継続してもよい。

5.2.8 クリープ疲労 1 サイクル中の亀裂進展量の評価

疲労亀裂進展速度（1 サイクル当たりの疲労亀裂進展量） $da/dN_{fatigue}$ を次式により評価する。

$$da/dN_{fatigue} = C_1(\Delta J_f)^{m_1} \quad \text{--- (5.2)}$$

係数 C_1 および m_1 は材料定数であり、対象材料、使用温度、環境などの条件に応じて適切な値を使用する。**附属書 B** を参照してもよい。

クリープ亀裂進展速度 da/dt を次式により評価する。

$$da/dt = C_2(J^*)^{m_2} \quad \text{--- (5.3)}$$

ここで、 C_2 および m_2 は以下に示すクリープ亀裂進展速度を表す材料定数であり、対象材料、使用温度、評価時点までのクリープ損傷などの条件に応じて適切な値を使用する。**附属書 B** を参照してもよい。

304 ステンレス鋼に対しては、上式に代えて次式を用いてよい。

$$da/dt = \frac{c_2}{\tilde{\varepsilon}_f} (J^*)^{m_2} \quad \dots \quad (5.4)$$

ここで、 $\tilde{\varepsilon}_f$ はクリープ破断延性値である。

1サイクル当たりのクリープ亀裂進展量 da/dN_{creep} は次式で与えられる。

$$da/dN_{\text{creep}} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} C_2(J^*)^{m_2} dt \quad \dots \quad (5.5)$$

τ_0 および τ_1 はクリープ疲労1サイクル中の保持開始および終了時間である。

5.2.9 亀裂進展量の評価

亀裂進展量を次式により算出する。

$$\Delta a = \Delta a_{\text{fatigue}} + \Delta a_{\text{creep}} \quad \text{--- (5.6)}$$

$\Delta a_{\text{fatigue}}$ は疲労亀裂進展量であり、5.2.8 で評価した疲労亀裂進展速度に想定するサイクル数 N を乗じた値に等しい。

$$\Delta a_{\text{fatigue}} = da/dN_{\text{fatigue}} \times N \quad \text{--- (5.7)}$$

Δa_{creep} はクリープ亀裂進展量であり、5.2.8で評価した1サイクル当たりのクリープ亀裂進展量に想定するサイクル数 N を乗じた値に等しい。

$$\Delta a_{\text{creep}} = da/dN_{\text{creep}} \times N \quad \dots \quad (5.8)$$

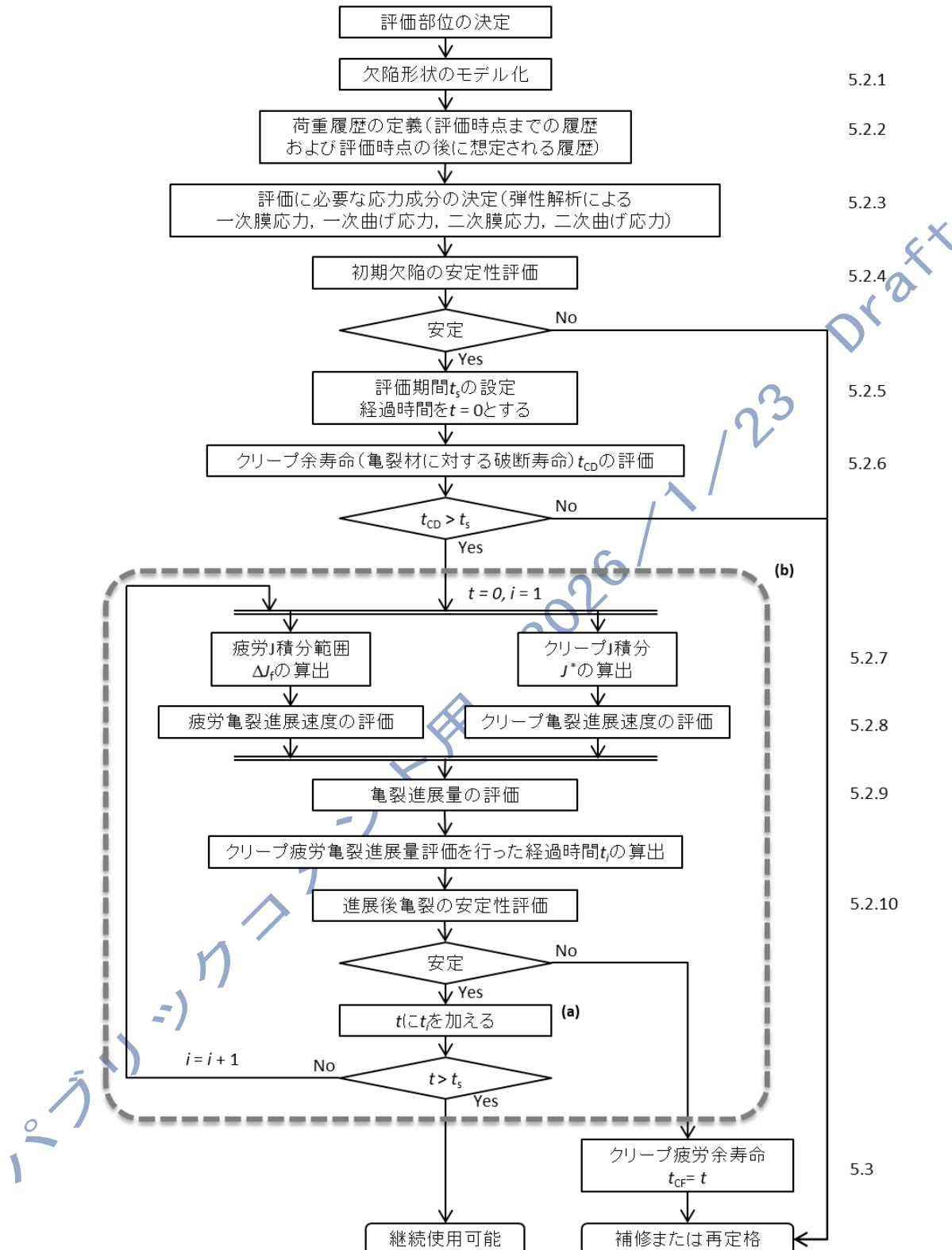
クリープ疲労亀裂進展量評価を行った経過時間 t_i (1回目のクリープ疲労亀裂進展量を計算している場合は $i = 1$) を求める。

5.2.10 進展後亀裂の安定性評価

進展後の亀裂の安定性評価は **HPIS Z 101-2:2011** に従う。評価点が許容域にある場合、進展後の亀裂は安定であり、 t に t_i を加え、**5.3** の判定を行う。評価点が許容域にない場合、進展後の亀裂は安定ではなく、当該時点の t をクリープ疲労余寿命 t_{CF} として、**6.2** に示す対応をとる。

5.3 結果の判定

t と t_s を比較する。 $t > t_s$ であれば評価期間内で継続運転をしてもよく、6.1 に従う。 $t > t_s$ が満たされない場合、 $i = i + 1$ として 5.2.7 に戻り、更新された亀裂寸法に対し評価を継続する。



注(a) クリープ疲労1サイクルに対応する経過時間を基本とする。

注(b) 1サイクル中の進展量が小さく、き裂の進展が ΔJ_f および J^* に及ぼす影響が無視できる場合、連続する複数のクリープ疲労サイクルに対し経過時間を定めてもよい。

図 5.1 評価の流れ

6 評価後の対応

6.1 継続使用をしてもよいと評価された場合

継続使用をしてもよいと評価された場合には、次回開放検査時期までの当該評価期間中、その亀裂状欠陥は許容される。

6.2 継続使用をしてはならないと評価された場合

継続使用をしてはならないと評価された場合には、継続使用するためには、**6.2.1** に示す補修により欠陥の除去を行うか、あるいは**6.2.2** に示す再定格を行って**5** に示す許容基準を満たすことが要求される。

6.2.1 補修

供用不適と判断された欠陥を補修することで、設備を供用してもよい状態にすることが可能である。欠陥の補修に当たっては、各種の規定を参照することが要求される。溶接補修を行う場合は、設備の関連法規に適合した補修方法を採用することが必要である。溶接補修に関する規格としては、**プラント圧力設備溶接補修指針**³⁾、**API 510**⁴⁾、**API 570**⁵⁾、**API 653**⁶⁾等がある。

6.2.2 再定格

再定格 (Rerating) とは、設計時に定めた機器の設計温度あるいは設計圧力を変更することをいう。この処置によって、継続使用することが可能となる場合がある。

7 解析要員などの要件

検査成績に基づいて解析・評価を行う要員は、対象機器の設計、材料、製作、試験・検査のほかに、腐食、経年劣化および破壊力学などの幅広い知識を有していなければならない。HPI 圧力設備診断技術者認証のレベル 2 がこれに相当する。

参考文献

- 1) 日本高圧力技術協会規格, **HPIS Z 101-1:2008** 圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第1段階評価.
- 2) 日本高圧力技術協会規格, **HPIS Z 101-2:2011** 圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第2段階評価.
- 3) 日本溶接協会 化学機械溶接研究委員会, **プラント圧力設備溶接補修指針**, (2009).
- 4) American Petroleum Institute, **Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration** , **API 510**, (2023).
- 5) American Petroleum Institute, **Piping Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems**, **API 570**, (2024).
- 6) American Petroleum Institute, **Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction**”, **API STD 653**, (2023).

附属書 A (規定) 用語の定義

この附属書では、この規格で使われる用語の定義を示す。

表 A.1 用語の定義

(あいうえお順)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A1	アコースティック・エミッション試験	あこーすて いっく・えみっしょん試験	亀裂が進展するときに弾性波(音)が発するのを利用して、亀裂の存在と位置を非破壊的に検出する方法	Acoustic Emission Testing, AET
A2	アスペクト比(a/ℓ)	あすべくとひ	欠陥の深さ(a)と欠陥長さ(ℓ)の比	Aspect Ratio
A3	安全係数	あんぜんけいすう	設計規格又は維持規格において許容応力を決める場合に用いる基準強度に対する安全裕度	Design Factor
A4	一次応力	いちじおうりょく	外部荷重、外部モーメントにより部材に生じる垂直応力、又はせん断応力 注釈 1 垂直応力は膜応力と曲げ応力に分類される。また、一次膜応力は、一般膜応力と局部膜応力に分類される。 注釈 2 一次応力は、降伏強さ以下に制限される。	Primary Stress
A5	応力拡大係数	おうりょくかくだい けいすう	亀裂がある部材に応力が作用すると亀裂先端には大きな応力集中が生じ、この亀裂の先端近傍における応力場の強さの尺度 注釈 1 作用応力×(亀裂深さ) $^{1/2}$ に比例する。	Stress Intensity Factor

表 A.1 用語の定義用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A6	応力腐食割れ	おうりょくふしきよくわれ	材料・環境・応力の3つの要因が揃い腐食環境で割れる現象 注釈1 炭素鋼とステンレス鋼の苛性割れ、オーステナイト系ステンレス鋼の湿性塩化物環境の割れなどが典型例である。 注釈2 割れ径路としては、粒内が割れる場合と粒界が割れる場合があり、割れは一般に分岐することが多い。	Stress Corrosion Cracking, SCC
A7	加工硬化	かこうこうか	降伏強さを超えてから、ひずみの増大に伴い材料が硬化する現象 注釈1 ひずみ硬化ともいう。	Strain Hardening
A8	規定降伏強さ(σ_{ys})	きていこうふくつよさ	JISなどの材料規格で規定されている降伏強さ	Specified Yield Strength
A9	規定引張強さ(σ_{uts})	きていひっぱりつよさ	JISなどの材料規格で規定されている引張強さ	Specified Tensile Strength
A10	供用適性評価	きょうようつけいひょうか	設備の供用中の健全性を評価することであり、供用中の検査と評価及び補修又は取替えによって継続運転することが可能か否かを評価する手法	Fitness-for-Service, FFS, Evaluation
A11	局部構造不連続	きょくぶこうぞうぶれんぞく	小さい隅肉半径の溶接取付け部のように構造全体には大きな影響を与えない程度の応力(ひずみ)集中箇所	Local Structural Discontinuity
A12	亀裂状欠陥	きれつじょうけつかん	体積を持たない欠陥で、先端で大きな応力集中が生じる亀裂としての特徴を有する欠陥	Crack-Like Flaw

表 A.1 用語の定義用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A13	クリープ	くりーぷ	高温において一定応力(引張または圧縮)のもとで、非弾性ひずみが時間に伴い累積する現象 注釈1 クリープにより生じる非弾性ひずみをクリープひずみという。	Creep
A14	クリープ破壊	くりーぷ はかい	クリープ変形が局所的に拘束される場合に、亀裂が発生、進展して、十分に変形せずに破壊する現象 注釈1 ミクロな視点では、結晶粒同士の変形の拘束により、粒界が割れる。マクロな視点では、熱応力クリープ、クリープ疲労、溶接継手のクリープ割れ(タイプI, II, III, IV)などが、クリープ破壊の例である。	Creep Fracture
A15	クリープ破断	くりーぷ はだん	引張荷重下でクリープ変形により断面が収縮して破断する現象	Creep Rupture
A16	クリープ変形	くりーぷ へんけい	クリープひずみの累積に伴う変形 注釈1 高温の定義は、絶対温度で表示した材料の融点の約1/2を超える温度である。クリープ変形の主なメカニズムは、原子空孔の拡散による結晶粒の変形とこれを補完する粒界すべりである。 注釈2 クリープ試験の結果は、クリープひずみと時間の関係を、応力と温度をパラメータとし、クリープ曲線として表示する。クリープ曲線には、遷移、定常、加速の3つの領域がある。定常領域では、クリープひずみ速度は一定であり、これをクリープ寿命の予測に用いる。クリープ破断において引張試験における破断延性と同様に、クリープ破断延性を定義する。	Creep Deformation,

表 A.1 用語の定義用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A17	クリープ領域	くりーぷり よういき	高温における許容引張応力の温度領域において、許容引張応力が高温強度(耐力、引張強さ)ではなく、クリープ変形、クリープ破断によって設定されている温度領域	creep range, creep regime
A18	クリープ J 積分(J^*)	くりーぷじ えいせきぶ ん	亀裂先端近傍の応力と変位速度に非線形性を考慮したクリープ亀裂進展の支配パラメータ	Creep J- integral
A19	グローバルな曲げ応力	ぐろーばる なまげおう りょく	外力により円筒などの全体の変形を伴う曲げ応力	Global Bending Stress
A20	経年劣化	けいねんれ つか	時間の経過に伴い引張強さ、破壊韌性などの材料特性が低下していく現象	Aged Deterioration
A21	欠陥	けっかん	局部腐食によるくぼみ(立体欠陥)、亀裂(面状欠陥)などの形狀的な不連続領域	Flaw
A22	降伏強さ	こうふくつ よさ	「降伏点又は耐力」の代わりに用いられている慣用語 注釈1 「降伏点又は耐力」という用語が正式名称であるが、長いので、代わりに「降伏強さ」、「降伏強度」、「降伏応力」という用語が慣用されている。	Yield Strength

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A23	降伏点又は耐力	こうふくてんまたはたいりょく	<p>材料の引張試験の応力-ひずみ線図において、降伏現象を示す応力</p> <p>注釈1 降伏現象には上下の降伏点と、下降伏点に続くプラトーがある。この場合の下降伏点を、材料の降伏点と定義する。</p> <p>注釈2 明瞭な降伏現象を示さない場合には、降伏点に代えて、耐力を用いる。応力-ひずみ線図の弾性直線を横軸の0.2%ひずみまで平行移動し、塑性曲線との交点における縦軸の応力を耐力と定義している。材料の種類と使用目的によって、0.2%以外のひずみが用いられることがある。</p> <p>注釈3 降伏点又は耐力の定義は、材料の引張試験の結果により択一的な選択となる。降伏点の適用と耐力の適用に際して、両者の間に特別な区別はない。</p>	Yield Point or Proof Stress
A24	再定格	さいていいかく	<p>設計時に定めた機器の設計温度又は設計圧力を変更すること</p> <p>注釈1 FFS評価で不適となり継続運転をしてはならない場合に、機器の設計温度又は設計圧力の変更を実施して継続運転をしてもよい状態にする場合がある。</p>	Rerating
A25	最高使用温度	さいこうしょうおんど	規格の許容引張応力表に数値の記載がある材料(母材)の最高使用金属温度	Maximum Working Metal Temperature

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A26	最低使用温度	さいていし ようおんど	材料及び溶接継手の最低使用(金属)温度 注釈1 規格の材料の許容引張応力表に数值の記載がある場合に、材料(母材)の最低使用温度となることがある。 注釈2 規格の衝撃試験の規定によって、材料及び溶接継手の最低使用温度を得てもよい。	Minimum Working Metal Temperature
A27	最低設計金属温度	さいていせ っけいきん ぞくおんど	圧力容器又は耐圧部分の最低設計金属温度 注釈1 規格の衝撃温度の規定によって得られる複数の材料及び溶接継手の使用し得る最低の金属温度のうちで、最も高い温度。	Minimum Design Metal Temperature
A28	参考応力 (σ_{ref})	さんしょう おうりょく	構造体に作用する荷重に対する変形を単軸試験結果の応力-ひずみ関係で表すことが可能である代表的な応力 注釈1 [(構造体に作用する荷重) / (塑性崩壊荷重)] × 降伏強さで表されることが多い。	Reference Stress
A29	残留応力	ざんりゆう おうりょく	拘束によって発生する二次応力(自己平衡応力)の一種 注釈1 材料を局所的に塑性変形させると、引張塑性変形の場合に圧縮、圧縮塑性変形の場合に引張り、その周囲は逆の残留応力が発生する。熱処理を行うと、熱応力が塑性変形を伴う場合に、残留応力が発生する。溶接を行う場合も同様である。溶接継手の残留応力は、表面で引張りとなるので、注意する必要がある。	Residual Stresses

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A30	磁粉探傷試験	じふんたん しょうしけん	表面及び表面近傍のきずによる指示を検出するために、漏洩磁界と適切な試験媒体を用いる非破壊試験(JIS Z 2300 参照)	Magnetic Particle Testing, MT
A31	主要構造不連続	しゅようこ うぞうふれ んぞく	鏡と胴、法兰ジと胴、ノズルと胴の接合部のように構造全体の応力(ひずみ)分布に大きな影響を与える箇所	Major Structural Discontinuity
A32	衝撃吸収エネルギー	しょうげき きゅうしゅ うえねるぎ ー	シャルピー衝撃試験において切欠き試験片の破断に要するエネルギー 注釈 1 切欠き靭性ともいう。この値が高いほど破壊に対する抵抗力が大きい。	Charpy Absorbed Energy
A33	浸透探傷試験	しんとうた んしようし けん	浸透処理、余剰浸透液の除去処理、及び現像処理によって表面に開口したきずを、指示模様として検出する非破壊試験(JIS Z 2300 参照)	Penetrant Testing, PT
A34	靭性	じんせい	亀裂又は切欠きがある場合の破壊に対する抵抗力 注釈 1 抵抗力の大きい材料は、破壊までの塑性変形に大きなエネルギーを要し、靭性が高いという。一般に、強度が高い材料ほど靭性は低くなる傾向をもつ。	Toughness
A35	設計圧力	せつけいあ つりょく	圧力容器を使用し得る最高圧力(大気圧以下の場合には、最低圧力) 注釈 1 ただし、圧力容器の中に隔壁で仕切られた複数の圧力室がある場合には、設計圧力は差圧を基準とする。	Design Pressure
A36	設計温度	せつけいお んど	圧力容器を使用し得る最高及び最低の温度として、起動時、運転時、停止時、異常時、環境などを考慮して設定する温度	Design Temperature

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A37	遷移温度, 延性 - 脆性遷移温度	せんいおんど, えんせい-ぜいせいいせんいおんど	鉄鋼に代表される材料の韌性は、強い温度依存性を示す。高温では延性破壊して韌性が高く(上部棚領域), 低温では脆性破壊して韌性が低い(下部棚領域)。その中間の温度領域で韌性が急激に減少する。この挙動を延性-脆性遷移といい、その挙動を示す温度 注釈1 遷移温度は、シャルピー衝撃試験の結果によって定まる。設計では、材料の使用温度を、遷移温度領域以上の上部棚領域に制限する。	Transition Temperature, Ductile to Brittle Transition Temperature
A38	線形応力分布近似	せんけいおうりょくぶんぷきんじ	応力解析の結果は、すべて非線形応力分布であるが、その非線形応力分布を線形に近似した応力分布 注釈1 線形応力分布を膜応力成分と曲げ応力成分に分離し、非線形応力分布の線形応力分布近似からの差分をピーク応力とする。	Linear Stress Distribution Approximation
A39	塑性崩壊, 全断面降伏	そせいほうかい, ぜんだんめんこうふく	荷重を受けている部材の全断面の応力が、降伏強さを超える状態 注釈1 この状態になると全断面が塑性変形し、部材が大きく変形して崩壊する。	Plastic Collapse
A40	損傷機構	そんじょうきこう	破壊に至る以前の状態を損傷といい、その損傷を表す機構 注釈1 損傷は時間に伴い非可逆的に進行する。具体的には、減肉、割れ、劣化の3種類がある。それぞれの損傷の代表的な機構が、腐食、疲労、温度脆化である。	Damage Mechanism
A41	体積を持つ欠陥	たいせきをもつけっかん	欠陥のうち、亀裂は体積を持たないが、局部減肉、へこみなどの体積を持ち、形状的に3次元的な形状をもつ欠陥	Volumetric Flaw

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A42	弾性追従	だんせいつ いじゅう	変形特性の異なる部材の組合せに変位制御が負荷される場合、他の部材の変形が減少する影響で、非弾性変形が生じる部材の変形が増加する現象 注釈 1 ひずみ制御の場合よりも保持中の応力とひずみが増大するので、評価に注意が必要である。	Elastic Follow-up
A43	超音波探傷試験	ちょうおん ぱたんしょ うしけん	超音波を試験体中に伝搬させ、試験体の示す音響的性質を利用して、試験体のきず、材質などを調べる非破壊試験(JIS G 0202 参照)	Ultrasonic Testing, UT
A44	内部欠陥	ないぶけつ かん	材料の内部に埋没して、表面に開口していない欠陥	Embedded Flaw
A45	二次応力	にじおうり ょく	一次応力に対比して用いられる応力であり、熱応力のように変形の拘束によって生じる垂直応力、又はせん断応力 注釈 1 非弾性変形が生じて拘束が小さくなれば、応力は緩和されて応力の再配分が生じる。	Secondary Stress
A46	熱影響部	ねつえいき ようぶ	溶接、切断などの熱で組織、冶金的性質、機械的性質などに変化を生じた、溶融していない母材の部分(JIS Z 3001 参照)	Heat Affected Zone, HAZ
A47	熱応力	ねつおうり ょく	熱膨張の拘束によって発生する応力 注釈 1 温度勾配なしの部材の外部拘束の場合の熱応力は一次応力、温度勾配ありの部材の内部拘束の場合の熱応力は二次応力(自己平衡応力)である。	Thermal Stress

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A48	引張強さ	ひっぱりつよさ	<p>材料の引張試験の応力ーひずみ線図において、ひずみ硬化を示す場合の荷重(公称応力)が最大値を示す点の公称応力</p> <p>注釈1 この点で延性不安定となり、負荷の増大なしで局所的な塑性変形(絞り)が進行する。</p> <p>注釈2 引張強さは変形特性で、破壊特性ではないが、強度評価への応力ーひずみ線図の適用に際して、実質的な打切り条件として使用される。</p>	Tensile Strength
A49	非破壊検査	ひはかいけんさ	非破壊試験の結果から、規格などによる基準に従って合否を判定する行為(JIS Z 2305 参照)。	Non-Destructive Inspection, NDI
A50	非破壊試験	ひはかいしけん	<p>試験体を破壊することなく、試験体に存在しているきずを検出する試験</p> <p>注釈1 浸透探傷試験(PT), 磁粉探傷試験(MT), 放射線透過試験(RT), 超音波探傷試験(UT), アコースティック・エミッション試験(AET), 湍流探傷試験(ET)などがある。</p>	Non-Destructive Testing, NDT
A51	表面欠陥	ひょうめんけっかん	材料の表面に現れている欠陥	Surface Flaw
A52	疲労	ひろう	応力が繰り返されると亀裂が発生し、進展して破壊する現象	Fatigue
A53	疲労 <i>J</i> 積分範囲(ΔJ_f)	ひろうじえいせきぶんはんい	亀裂先端近傍の応力と変位速度に非線形性を考慮した疲労亀裂進展の支配パラメータ	Fatigue <i>J</i> -integral range
A54	放射線透過試験	ほうしやせんとうかしけん	<p>放射線を試験体に照射し、透過した放射線の強さの変化から、きずの状態、組立品の内部構造などを調べる非破壊試験</p> <p>注釈1 線源としてX線、γ線又は中性子線を用いる(JIS G 0202 参照)。</p>	Radiographic Testing, RT

表 A.1 用語の定義(続き)

番号	用語	読み方	定義	対応英語 (参照)
A55	補修	ほしゅう	設備、部材が損傷を受けた場合に、その損傷を除くために用いられる応急的又は恒久的な対策 注釈 1 溶接補修、部分更新、グラインダーによる欠陥除去の方法がある。不適切な溶接補修は、溶接に伴い新たな損傷の発生と将来における重大な損傷の原因となりうるので、十分留意して実施することが要求される。補修なしの取替えの選択もある。	Repair
A56	膜応力	まくおうり よく	対象とする断面における線形応力近似の垂直応力(引張応力、圧縮応力)の等応力成分	Membrane Stress
A57	曲げ応力	まげおうり よく	対象とする断面の線形応力分布近似において、厚さに沿って直線的に変化する応力成分 注釈 1 曲げ応力成分の断面端部での最大値を、公称曲げ応力という。	Bending Stress
A58	溶接後熱処理	ようせつご ねつしょり	溶接継手の溶接後に、靱性の回復及び残留応力の除去のために行う熱処理(JIS Z 3001-1 参照) 注釈 1 応力除去焼きなましは、溶接後熱処理の一種である。	Postweld Heat Treatment, PWHT
A59	溶接止端	ようせつし たん	溶接継手において、母材の表面と溶接ビードの表面が交わる点	Toe of Weld
A60	溶接ボンド部	ようせつぼ んどぶ	溶接継手の溶融部分(溶接金属)と未溶融母材の境界の部分(JIS Z 3001-1 参照)	Weld Interface, Weld Junction
A61	リガメント厚さ	りがめんと あつさ	亀裂状欠陥又は減肉状欠陥が存在する断面において、断面の厚さから欠陥深さを減じた残存厚さ	Ligament Thickness

表 A.1 用語の定義(続き)

A62	流動応力	りゅうどう おうりょく	ひずみ硬化弾塑性体を弾完全塑性体に置き換える場合の有効降伏強さ 注釈1 一般には、降伏強さと引張強さの平均値で与えられる。	Flow Stress
A63	ローカルな曲げ応力	ろーかるなまげおうりょく	外力により円筒などの局所の変形を伴う曲げ応力 注釈1 管台、支持構造物から受ける曲げモーメントによる曲げ応力が典型例である。	Local Bending Stress

Draft

2026/1/23
一括り書きコナイト用

附属書 B (参考) 材料特性

この附属書では、圧力機器の亀裂状欠陥評価に必要とされる材料特性を参考に示す。

B.1 材料特性

亀裂状欠陥の評価を行うには、評価する装置の当該材料の特性を用いることが望ましい。しかしながら、当該材料の特性を用いることが現実的ではない場合には、**表 B.1** に例示した規格値と公開されたデータから推定することが可能である。また、FFS 評価で用いる材料特性においては、長期間運転による時効効果と使用環境によって生じる材質変化または劣化に対し十分留意すべきである。

2026/1/23
一級圧力容器用
DRAFT

表 B.1 代表的な圧力機器材料の特性データ

材質	標準成分	伝熱特性		引張特性			変形特性		クリープ特性			亀裂進展速度		破壊 靭性	
		比熱	熱伝導率	縦弾性係数	ポアソン比	降伏強さ	引張強さ	単調応力-ひずみ関係	繰返し応力-ひずみ関係	クリープ破断力-ひずみ関係	クリープ破断延性値	クリープひずみ式	疲労 C_1, m_1	クリープ C_2, m_2	
低合金鋼	C-0.5Mo	1)	2)	3), 4)	7)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17)		9), 23)	9)	23)	29)		42)
	1Cr-0.5Mo	1)	2)	3), 4)	7)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17)	20), 22)	9)	9)	9)		32)	42)
	1.25Cr-0.5Mo	1)	2)	3), 4)	7)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17)	22)	9), 24), 28)	9)	9), 23)	28)	28)	42)
	2.25Cr-1Mo	1)	2)	3), 4), 5)	7), 8)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17), 18)	20), 21), 22)	9), 24), 28)	9)	9), 23)	26), 28), 30), 31)	26), 28), 32), 34)- 37), 39)	42)
	3Cr-1Mo	1)	2)	3), 4)	7)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17)							42)
	2.25Cr-1Mo-V	1)	2)	3), 4)	7)	9), 14), 15)	9), 15), 16)	17)		23)		23)			42)
高 Cr 鋼	5Cr-0.5Mo	1)	2)	3), 4)	7)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17)		9), 23)	9)	23)			42)
	9Cr-1Mo	1)	2)	3), 4)	7)	9), 10), 14), 15)	9), 15), 16)	17)	20)	9), 23)	9)	23)			42)
	9Cr-1Mo-V	1)	2)	3), 4), 5)	7), 8)	9), 14), 15)	9), 15), 16)	17), 18)	21), 22)	9), 23)	9)	9), 23)	26)	26), 32), 33)	42)
ステンレス鋼	18Cr-8Ni (Type 304)	1)	2)	3), 4), 5), 6)	6), 7), 8)	9), 11), 12), 14), 15)	9), 15), 16)	17), 18), 19)	20), 21), 22)	9), 23)	9)	9), 23), 24)	26), 27), 29), 31)	26), 27), 32), 33)	42)
	25Cr-20Ni (Type 310)	1)	2)	3), 4)	7)	9), 11), 12), 14), 15)	9), 15), 16)	17)	20), 22)	9)	9)				42)
	18Cr-8Ni-2Mo (Type 316)	1)	2)	3), 4), 5), 6)	6), 7), 8)	9), 11), 12), 14), 15)	9), 15), 16)	17), 18), 19)	21), 22)	9), 23)	9)	9), 23), 24)	27), 29), 31)	26), 27), 32)	42)
	18Cr-10Ni-Ti (Type 321)	1)	2)	3), 4), 5)	7), 8)	9), 11), 12), 14), 15)	9), 15), 16)	17), 18)	20), 21)	9), 23)	9)	9), 23)	31)	32)	42)
	18Cr-10Ni-Nb (Type 347)	1)	2)	3), 4)	7)	9), 11), 12), 14), 15)	9), 15), 16)	17)		9), 23)	9)	23)			42)
	33Ni-21Cr- 42Fe	1)	2)	3), 4)	7)	9), 13), 14), 15)	9), 15), 16)	17)	20)	9), 23)	9)	9), 23)		32)	42)

参考文献

- 1) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table TCD, "Nominal Coefficients of Thermal Conductivity (TC) and Thermal Diffusivity (TD)", General Note (a).
- 2) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table TCD, "Nominal Coefficients of Thermal Conductivity (TC) and Thermal Diffusivity (TD)".
- 3) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.1, "材料の各温度における縦弾性係数" (JIS B 8266 付表 4.1, JIS B 8267 表 D.1).
- 4) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table TM-1, "Moduli of Elasticity E of Ferrous Materials for Given Temperatures".
- 5) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", JSME S NC2 (2015), 表 添付 13-I-15.
- 6) 電力中央研究所, "平成 12 年度 発電用新型炉技術確証試験 (高速増殖炉技術確証試験) 報告書 別冊 高温構造健全性評価指針 (案)" 表 A1.1.
- 7) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table PRD, "Poisson's Ratio and Density of Materials".
- 8) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", JSME S NC2 (2015), 表 添付 13-I-16.
- 9) 物質・材料研究機構, 物質材料データベース : クリープデータシート (<https://metallicmaterials.nims.go.jp/>) .
- 10) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.3, "炭素鋼及び低合金鋼の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.1, JIS B 8267 表 D.3).
- 11) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.4, "ステンレス鋼の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.2, JIS B 8267 表 D.4).
- 12) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.5, "ステンレス鉄鋼の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.3, JIS B 8267 表 D.5).
- 13) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.6, "ニッケルクロム鉄合金の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.4, JIS B 8267 表 D.6).
- 14) ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table Y-1, "Yield Strength Values Sy for Ferrous and Nonferrous Materials".
- 15) Osage, D.A., et al., "Compendium of Temperature-Dependent Physical Properties for Pressure Vessels, Piping and Tankage Materials", WRC Bulletin 503 (2019).
- 16) ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table U, "Tensile Strength Values Su for Ferrous and Nonferrous Materials".
- 17) JIS ハンドブック, 鉄鋼 I (2017) , 参考 9, "硬さ換算表 (SEA J 417)" .
- 18) 日本高圧力技術協会規格, "高圧容器規格", HPIS C 106 (2023), 付属書 D, "2 静的 (単調負荷) 真応力-真ひずみ曲線".
- 19) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", JSME S NC2 (2015), 図 添付 13-A-1.1~7.12 等時応力ひずみ線図.
- 20) 電力中央研究所, "平成 12 年度 発電用新型炉技術確証試験 (高速増殖炉技術確証試験) 報告書 別冊 高温構造健全性評価指針 (案)" 表 A1.1.

書 別冊 高温構造健全性評価指針(案)", 表 A2.1 および A2.2.

- 21) 日本高圧力技術協会規格, "高圧容器規格", **HPIS C 106** (2023), 付属書 D, "3 繰り返し応力－ひずみ曲線".
- 22) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", **JSME S NC2** (2015), 表 添付 13-I-12～14 許容ひずみ範囲.
- 23) 物質・材料研究機構, 物質材料データベース : 疲労データシート
(<https://metallicmaterials.nims.go.jp/>) .
- 24) M. Prager, D.A. Osage, C.H. Panzarella, "Evaluation of Material Strength Data for Use in API Std 530 - 2nd Edition", **WRC Bulletin 541** (2015).
- 25) 電力中央研究所, "平成 12 年度 発電用新型炉技術確証試験 (高速増殖炉技術確証試験) 報告書 別冊 高温構造健全性評価指針(案)", 表 A3.1 および A3.2.
- 26) 動力炉・核燃料開発事業団, "高速炉用構造材料の高温き裂進展特性", **PNC SN9410 90-105** (1990).
- 27) 電力中央研究所, "平成 12 年度 発電用新型炉技術確証試験 (高速増殖炉技術確証試験) 報告書 別冊 高温構造健全性評価指針(案)", 第 2 部 : 欠陥評価, "3. 評価手法".
- 28) A. Saxena, K.B. Yoon, "Creep Crack Growth: Assessment of Defects in High Temperature Components", **WRC Bulletin 438** (2003).
- 29) 日本材料学会, "金属材料疲労き裂進展抵抗データ集" (1983).
- 30) N.E. Dowling, "Geometry Effects and the J-integral approach to elastic-plastic fatigue crack growth", ASTM STP 601, pp.19-32 (1976).
- 31) R. Ohtani, T. Kitamura, A. Nitta and K. Kuwabara, "High-temperature low cycle fatigue crack propagation and life laws of smooth specimens derived from the crack propagation laws", ASTM STP 942, pp.1163-1180 (1988).
- 32) BSI Standard, "Guide of Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures", **BS 7910** (2013), Annex S, Equation S.2.
- 33) K. Sadananda and P. Shahinian, "Review of the fracture mechanics approach to creep crack growth in structural alloys", Engineering Fracture Mechanics, Vol.15, Issues 3-4, pp.327-342 (1981).
- 34) K. M. Nikbin, D. J. Smith and G. A. Webster, "An engineering approach to the prediction of creep crack growth", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.108, Issue 2, pp.186-191 (1986).
- 35) 富士彰夫, 山谷 勇, 北川正樹, 大友 瞳, 2.25Cr-1Mo 鋼のトンネル化したクリープき裂に対する電気ポテンシャル法の適用, 鉄と鋼, 1987 年 73 卷 14 号 1754-1761.
- 36) 富士彰夫, 山谷 勇, 染野 功, 北川正樹, 経年劣化した 2 1/4 Cr-1Mo 鋳鋼のクリープき裂進展特性の評価, 鉄と鋼, 1992 年 78 卷 11 号 p. 1729-1736.
- 37) Fuji Akio, Kitagawa Masaki, A. Toshimitsu Yokobori, Jr., An experimental study of behavior of low alloy steels in the initial growth stage of creep cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol.45, No.1(1993) pp.39-50.

- 38) "高速炉構造材料のクリープ疲労き裂伝播に関する試験研究", 日本溶接協会 FCC 小委員会
昭和 61 年度成果報告書, PNC SJ 2534 87-002(1), **JWES-AE-8705** (1987).
- 39) I.A. Shibli and N. Le Mat Hamata, "Creep crack growth in P22 and P91 welds - overview
from SOTA and HIDA projects", International Journal of Pressure Vessels and Piping,
Vol.78, Issues 11-12, pp.785-793 (2001).
- 40) M. Tabuchi, A.T. Yokobori Jr., R. Sugiura, M. Yatomi, A. Fuji and K. Kobayashi, "Results
of a Japanese round robin program for creep crack growth using Gr.92 steel welds",
Engineering Fracture Mechanics, Vol.77, Issue 15, pp.3066-3076 (2010).
- 41) M. Tabuchi, H. Hongo, R. Sugiura, A.T. Yokobori, Jr., M. Yatomi and K. Kobayashi,
Evaluation of Damage and Fracture of High Cr Steel Welds at Elevated Temperatures,
Strength, Fracture and Complexity, Vol.9, Issue 1 (2015) pp.31-41.
- 42) 日本高圧力技術協会規格, **HPIS Z101-1:2008** 圧力機器のき裂状欠陥評価方法 – 第 1 段階評
価, 付属書 2, 4. 破壊非性の推定", (2008).

2026/1/23

HPIS Z 103:2026
用
ノコヤン

附属書 C (規定) 欠陥形状のモデル化

この附属書では、非破壊検査で検出された有意なきずの指示に対して、欠陥形状をモデル化する方法を規定する。

C. 1 対象とする欠陥形状

対象とする欠陥は面状欠陥（線状欠陥⁽¹⁾も含む）とし、体積を持つ欠陥は対象外とする。

対象とする欠陥は面状欠陥に平行な面と機器の表面とのなす角度 θ が 10° を超えるものとする。
 10° 以内のラミネーション欠陥は設計・建設規格の合格基準によらなければならない。

注 ⁽¹⁾ 線状欠陥とは、染色浸透深傷試験（PT）や磁粉探傷試験（MT）などの非破壊試験で検出される線状の指示模様のことをいい、この附属書によるモデル化を行うに当たっては超音波試験（UT）等により深さ方向の定量的寸法が求められる。

C. 2 記号の定義 ⁽²⁾

a_i	：欠陥深さ（モデル化の結果）
d, d_i	：欠陥の深さ方向の寸法（実測）
H	：平行平面間の垂直距離
ℓ	：欠陥長さ（モデル化の結果）
ℓ', ℓ_i'	：最大主応力方向に対して直交した面に投影した欠陥の長さ方向の寸法（実測）
S, S_i	：欠陥から表面までの深さ（実測）、 または近接する複数欠陥の相互の間隔寸法（実測）

注 ⁽²⁾ 記号中の添字 $i = 1, 2, 3, \dots$

C. 3 欠陥形状のモデル化の基本的流れ¹⁾

欠陥形状のモデル化は、以下にしたがって单一欠陥および複数欠陥それぞれについて行わなければならない。

- C. 4. 1 にしたがって面状欠陥を直交する二つの平面に投影し、その投影像を平面欠陥とする。
- C. 4. 2 にしたがって平面欠陥の位置を決定する。
- C. 4. 3 にしたがって单一の平面欠陥の寸法、形状を決定する。
- C. 4. 4 にしたがって複数の平面欠陥の近接の影響を考慮して寸法、形状を決定する。

C. 4 面状欠陥のモデル化^{1), 2), 3)}

C. 4. 1 欠陥の投影

表 C. 1 のステップ 1 にしたがって面状欠陥を平面上に投影する。

C. 4. 2 欠陥の位置の決定およびクラッドの扱い

表 C. 1 のステップ 2 および 3 にしたがって平面欠陥の位置を決定する。

C. 4. 3 欠陥の寸法・形状の決定

- 表 C. 1 のステップ 4~6 にしたがって平面欠陥の欠陥深さ a および欠陥長さ ℓ を決定する。

- b) a/ℓ をアスペクト比として定義する。

C. 4.4 複数欠陥の扱い

複数の平面欠陥について、本規定にしたがって合体の取り扱いを行った場合には、单一欠陥として寸法、形状を決定する。

C. 4.4.1 欠陥形状のモデル化における合体の取り扱い

- a) 複数の近接した平面欠陥は、**表 C.1** のステップ 7 および 8 にしたがって合体を取り扱う。
- b) a)における、複数の近接した平面欠陥の合体の取り扱いは、欠陥深さ d , d_i および欠陥長さ ℓ , ℓ_i が決定された個々の平面欠陥に対し適用するものとし、一旦 a)の合体の取り扱いを行った欠陥形状に繰り返し行わない。

C. 4.4.2 亀裂進展評価における合体の取り扱い

- a) 疲労またはクリープの亀裂進展評価において、複数の近接した平面欠陥は、**表 C.2** における欠陥の合体条件を満足するまでは、それぞれ単独の欠陥として取り扱う。
- b) 疲労またはクリープの亀裂進展評価において、複数の近接した平面欠陥は、**表 C.2** における合体条件を満足した後は、合体した単一の欠陥として取り扱う。

参考文献

- 1) 日本高圧力技術協会規格、**HPIS Z 101-1:2008** “圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第1段階評価”, (2008).
- 2) Konosu, S., Tahara, T., and Kobayashi, H., “Japanese Code Assessment Procedure for Crack-Like Flaws in Pressure Equipment”, ASME PVP2002-1238, pp. 221-227, (2002).
- 3) Konosu, S., “Assessment Procedure for Multiple Crack-Like Flaws in Fracture Assessment Diagram (FAD)”, ASME PVP2008-61515, pp. 1041-1064, (2008).

表 C.1 欠陥の方向、位置および寸法決定の手順¹⁾

ステップ	モデル化項目	内 容	記号	欠陥寸法決定の参考図	モデル化するときの取り扱い
ステップ 1	欠陥の方向および欠陥の投影	欠陥の輪郭形状が最も長い方向を特定し、欠陥の方向として記録する。 容器または管で検出された欠陥を、周方向、軸方向に垂直な平面にそれぞれ投影する。 ステップ 2 以降は、それぞれ投影した欠陥形状（平面欠陥）に対して実施するものとする。（ただし、主応力方向と周方向または軸方向とが相違する場合には、主応力方向に垂直な平面および主応力方向と直角方向に垂直な平面に投影する。）	—	表面欠陥の場合：図 C.1 内部欠陥の場合：図 C.2	表面欠陥の場合は図 C.1、内部欠陥の場合は図 C.2 にしたがってそれぞれ投影する。なお、ここで対象とする面状欠陥とは、欠陥に平行な面と機器の表面がなす角度 θ に対して 10° を超えるものである。 欠陥が曲率を有し、欠陥に平行な面の定義によって 10° 以上となる欠陥は評価対象とする。
ステップ 2	欠陥の位置（表面への投影）	溶接線の中心軸または溶接金属と母材との境界から、投影された欠陥の輪郭までの最小寸法。この寸法は厚さ方向に直角な平面に投影して記録する。	—	—	この寸法は、欠陥が母材にあるか溶接部にあるかの判定に用いる。
ステップ 3	欠陥の位置（軸方向に垂直な平面上および周方向に垂直な平面上への投影）	内部にある欠陥について、軸方向に垂直な平面および周方向に垂直な平面に投影した欠陥の輪郭の外表面に最も近い点（欠陥頂点という）から外表面までの距離、および投影した欠陥の輪郭の内表面に最も近い点（欠陥底点という）から内表面までの距離。	S	S は図 C.4、図 C.5、および図 C.6 で S と記載された寸法。	表面から欠陥までの深さ S は (1) 内部にある欠陥について、個々の欠陥ごとに内外両表面に対して S を算出する。 (2) クラッドがある場合には、クラッドを母材とみなす。クラッドの寸法は、製作図面に示される公称値を用いてよい。 (3) 複数の内部にある欠陥の取り扱いについては、ステップ 7 および 8 による。

表 C.1 欠陥の方向, 位置および寸法決定の手順¹⁾ (続き)

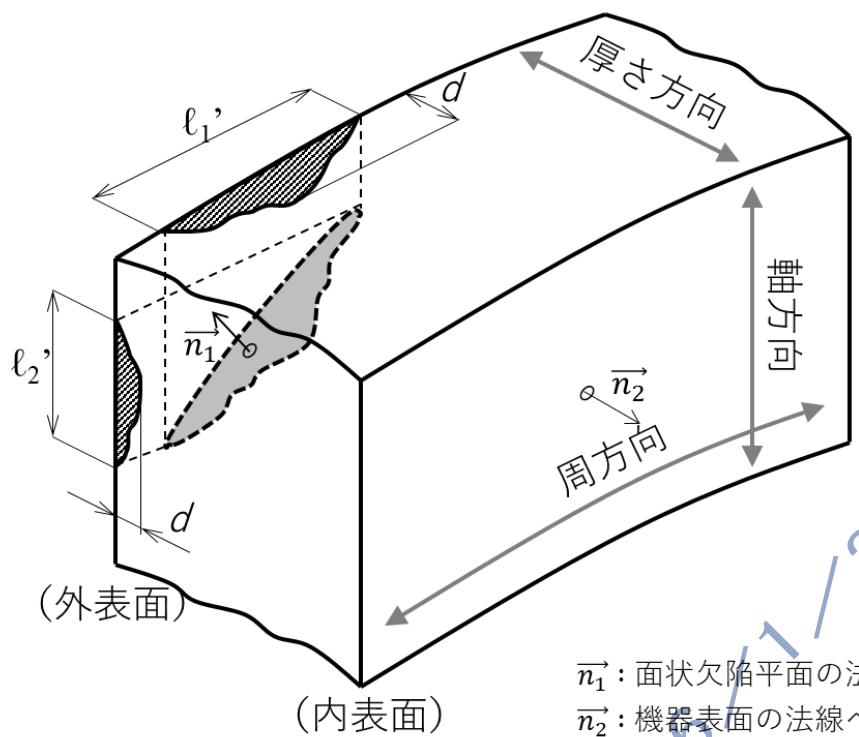
ステップ	モデル化項目	内 容	記号	欠陥寸法決定の参照図	モデル化するときの取り扱い
ステップ 4	欠陥の深さ方向の寸法および「欠陥深さ」	(1) 外表面にある欠陥については、最大主応力方向に垂直な平面に投影した欠陥底点から外表面までの距離。同じく、内表面にある欠陥については、欠陥頂点から内表面までの距離。 (2) 内部にある欠陥については、軸最大主応力方向に垂直な平面に投影した欠陥の輪郭の欠陥頂点から欠陥底点までの距離の半分。	<i>d</i>	<i>d</i> は、図 C.3, 図 C.4 で <i>d</i> と記載された寸法、および図 C.5, 図 C.6, 図 C.7 で <i>d</i> ₁ , <i>d</i> ₂ , <i>d</i> ₃ , <i>d</i> ₄ と記載された寸法。	欠陥深さ <i>a</i> は以下に従い決定する。 (1) 単一表面欠陥については <i>a</i> = <i>d</i> とする。 (2) 単一内部欠陥について、 <i>S</i> > <i>Y</i> * <i>d</i> の場合は <i>a</i> = <i>d</i> とする。 <i>S</i> ≤ <i>Y</i> * <i>d</i> の場合は <i>a</i> = 2 <i>d</i> + <i>S</i> として表面欠陥に置き換える。 <i>Y</i> *は次式により計算する。 $Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/\ell'}$ (3) 複数の欠陥のある場合の取り扱いは、ステップ 7 に従う。
		欠陥深さ	<i>a</i>		
ステップ 5	欠陥の長さ方向の寸法および「欠陥長さ」	ステップ 1 で投影した欠陥の輪郭の各方向の長さ。	<i>ℓ'</i>	<i>ℓ'</i> は、図 C.3, 図 C.4 で <i>ℓ'</i> と記載された寸法、および図 C.5, 図 C.6, 図 C.7 で <i>ℓ</i> _{1'} , <i>ℓ</i> _{2'} , <i>ℓ</i> _{3'} , <i>ℓ</i> _{4'} と記載された寸法。	欠陥長さ <i>ℓ</i> は以下に従い決定する。 (1) 単一表面欠陥について、 <i>ℓ'</i> ≥ 2 <i>d</i> の場合は <i>ℓ</i> = <i>ℓ'</i> とし、 <i>ℓ'</i> < 2 <i>d</i> の場合は <i>ℓ</i> = 2 <i>d</i> とする。 (2) 単一内部欠陥について、 <i>ℓ'</i> ≥ 2 <i>d</i> かつ <i>S</i> > <i>Y</i> * <i>d</i> の場合は <i>ℓ</i> = <i>ℓ'</i> とする。 <i>ℓ'</i> ≥ 2 <i>d</i> かつ <i>S</i> ≤ <i>Y</i> * <i>d</i> の場合は <i>ℓ</i> = <i>ℓ'</i> + 2 <i>S</i> として表面欠陥に置き換える。 <i>ℓ'</i> < 2 <i>d</i> かつ <i>S</i> > <i>Y</i> * <i>d</i> の場合は <i>ℓ</i> = 2 <i>d</i> とする。 <i>ℓ'</i> < 2 <i>d</i> かつ <i>S</i> ≤ <i>Y</i> * <i>d</i> の場合は <i>ℓ</i> = 2 <i>d</i> + 2 <i>S</i> として表面欠陥に置き換える。 <i>Y</i> *は次式により計算する。 $Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/\ell'}$ (3) 複数の欠陥のある場合の取り扱いは、ステップ 7 に従う。
		欠陥長さ	<i>ℓ</i>		

表 C.1 欠陥の方向, 位置および寸法決定の手順¹⁾ (続き)

ステップ	モデル化項目	内 容	記号	欠陥寸法決定の参照図	モデル化するときの取り扱い
ステップ 6	欠陥の形状	(1) 表面欠陥については、「欠陥深さ (a)」および「欠陥長さ (ℓ)」の矩形に内接する半楕円または半円。 (2) 内部欠陥については、「欠陥深さ (a)」および「欠陥長さ (ℓ)」の矩形に内接する楕円または円。	—	—	a および ℓ は、ステップ 4 および 5 に従い決定する。
ステップ 7	近接する複数の欠陥の間隔寸法	複数個の欠陥を検出した場合の、ステップ 1 で投影した各欠陥の輪郭間の寸法。	S_i	S_i は、図 C.5 および図 C.6 で S_i と記載された寸法。 S_i は、図 C.7 で S_i と記載された寸法。	(1) 同一平面上にある複数の欠陥は、図 C.5 および図 C.6 の実測寸法からの評価寸法の求め方の表のうち「合体のための前提条件」に示す条件を満足する場合、合体した欠陥として取り扱う。 (2) 平行平面上にある複数の欠陥は、面積が最大となる欠陥の面上に他の欠陥を投影し、同一平面上の欠陥として上記 (1) に従い取り扱う。
ステップ 8	近接する複数の欠陥の「欠陥の深さ」および「欠陥の長さ」	投影した複数の欠陥の深さおよび長さ。	a ℓ	a および ℓ は、図 C.5、図 C.6、図 C.7 でそれぞれ a および ℓ と記載された寸法。	合体を考慮する複数の欠陥を最大主応力方向に直交する矩形面で取り囲み、両辺の長さを a (内部にある場合は $2a$) および ℓ とする。モデル化する形状は、ステップ 6 に従い決定する。

表 C.2 亀裂進展陥評価における複数欠陥のモデル化の手順¹⁾

ステップ	モデル化項目	内 容	記号	欠陥寸法決定の参照図	モデル化するときの取り扱い
ステップ 1 近接する複数の欠陥の間隔寸法	欠陥進展評価において複数個の欠陥をモデル化する場合の、各欠陥の輪郭間の寸法。		S_i	S_i は、図 C.5 および図 C.6 で S_i と記載された寸法。	(1) 同一平面上にある複数の欠陥は、図 C.5 および図 C.6 の実測寸法からの評価寸法の求め方の表のうち「合体のための前提条件」に示す条件を満足する場合、合体した欠陥として取り扱う。
			S_i	S_i は、図 C.7 で S_i と記載された寸法。	(2) 平行平面上にある複数の欠陥は、面積が最大となる欠陥の面上に他の欠陥を投影し、同一平面上の欠陥として上記 (1) に従い取り扱う。
			S, H	S, H は、図 C.8 でそれぞれ S, H と記載された寸法。	(3) 平行平面上であって、かつ部材の表面と平行でない平面上に位置する複数欠陥は、複数欠陥のうち最も大きな欠陥を含む平面上に投影した場合の欠陥の内側先端間の距離 S および平行平面間の垂直距離 H が以下の式, $S \leq 5 \text{ mm} \text{ ならば } H \leq 10 \text{ mm}$ $S > 5 \text{ mm} \text{ ならば } H < 2S$ を満足する場合、同一平面上の複数欠陥として取り扱い、上記 (1) に従い取り扱う。同式を満足しない場合は、それぞれ単独の欠陥として取り扱う。



\vec{n}_1 : 面状欠陥平面の法線ベクトル
 \vec{n}_2 : 機器表面の法線ベクトル
 θ : 欠陥平面と機器表面がなす角度
 $\cos\theta = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1||\vec{n}_2|}$

図 C.1 欠陥の投影方法（表面欠陥の場合）

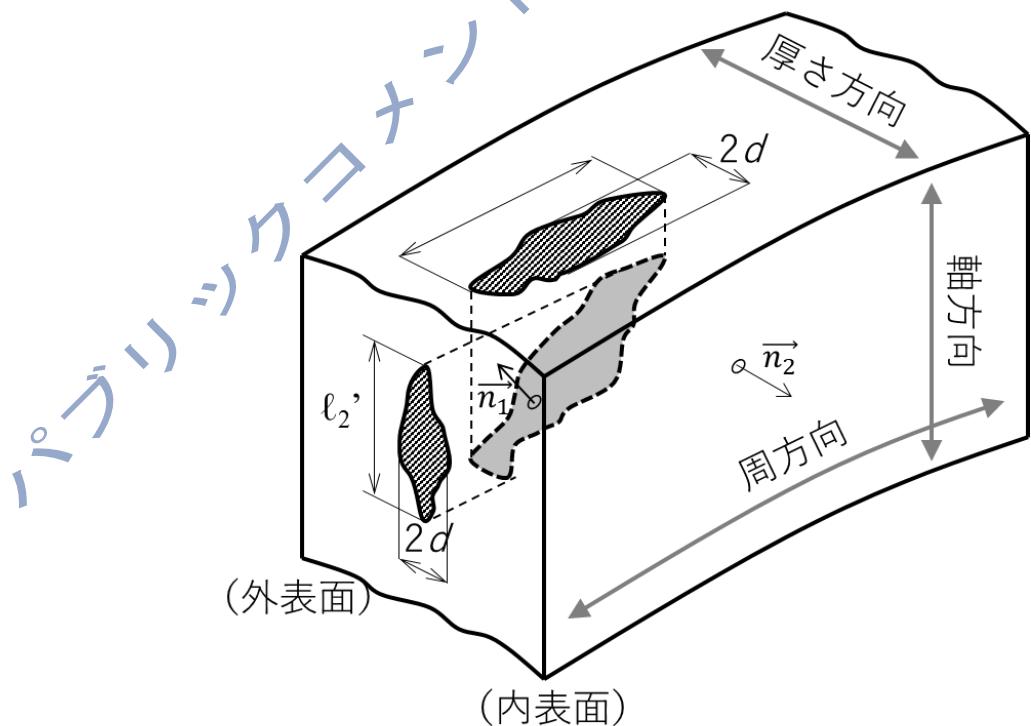
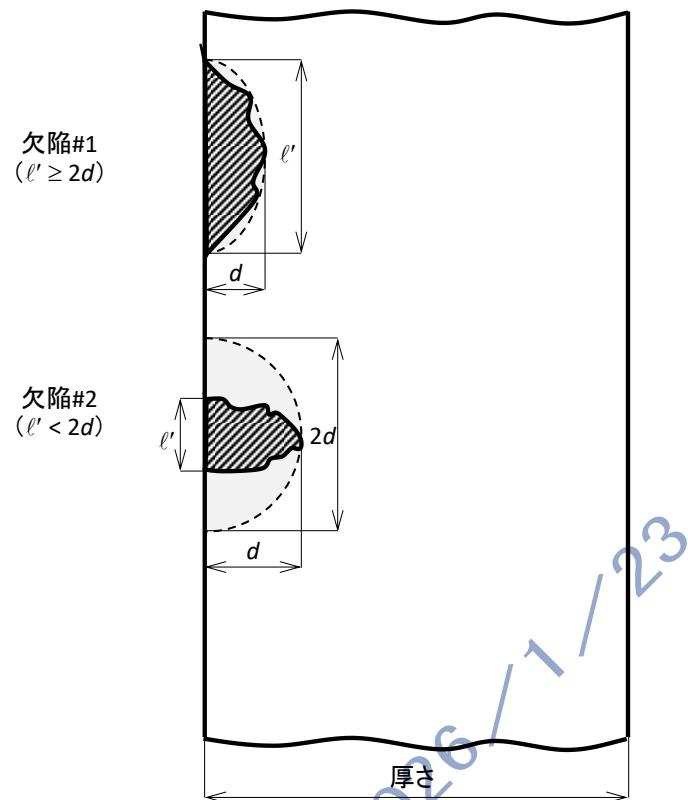


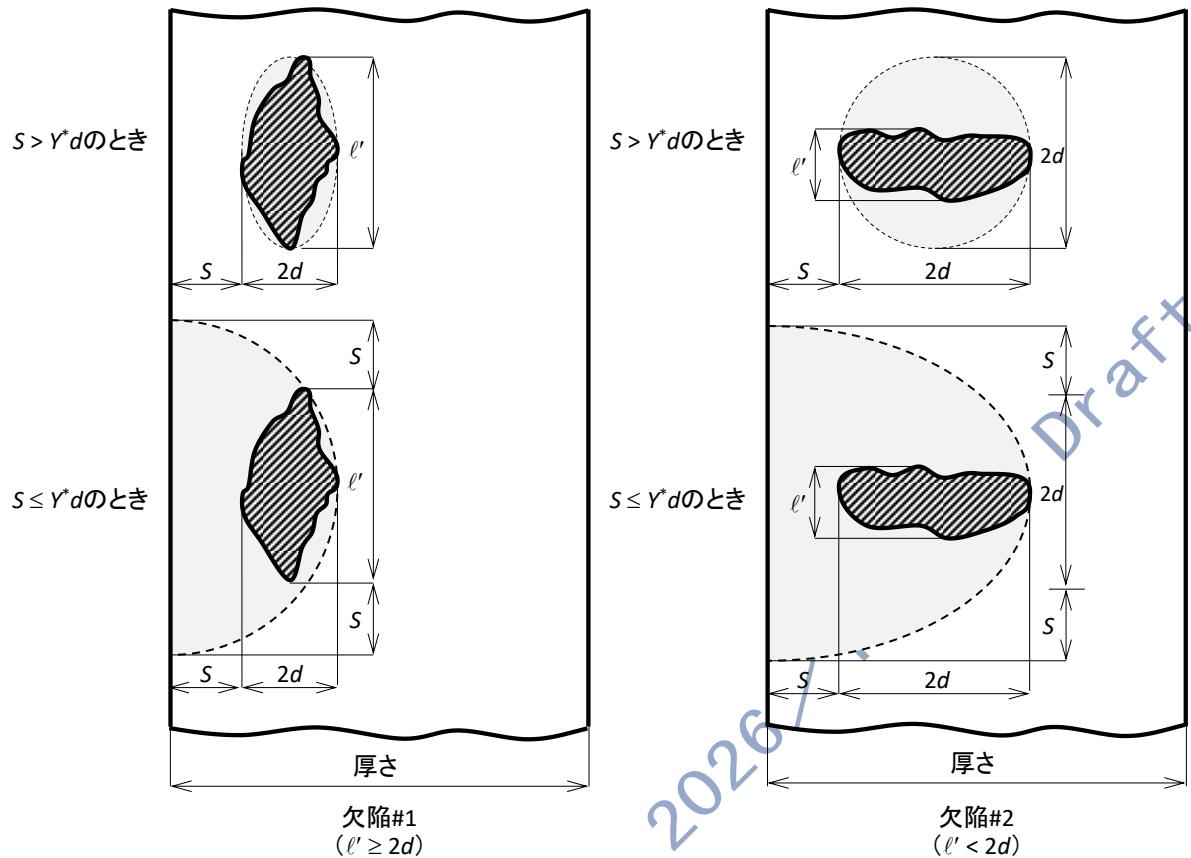
図 C.2 欠陥の投影方法（内部欠陥の場合）



実測寸法からの評価寸法の求め方

欠陥No.	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (ℓ)
#1	$a = d$	$\ell = \ell'$
#2	$a = d$	$\ell = 2d$

図 C.3 表面欠陥の取り扱い（破線はモデル化された欠陥を示す）



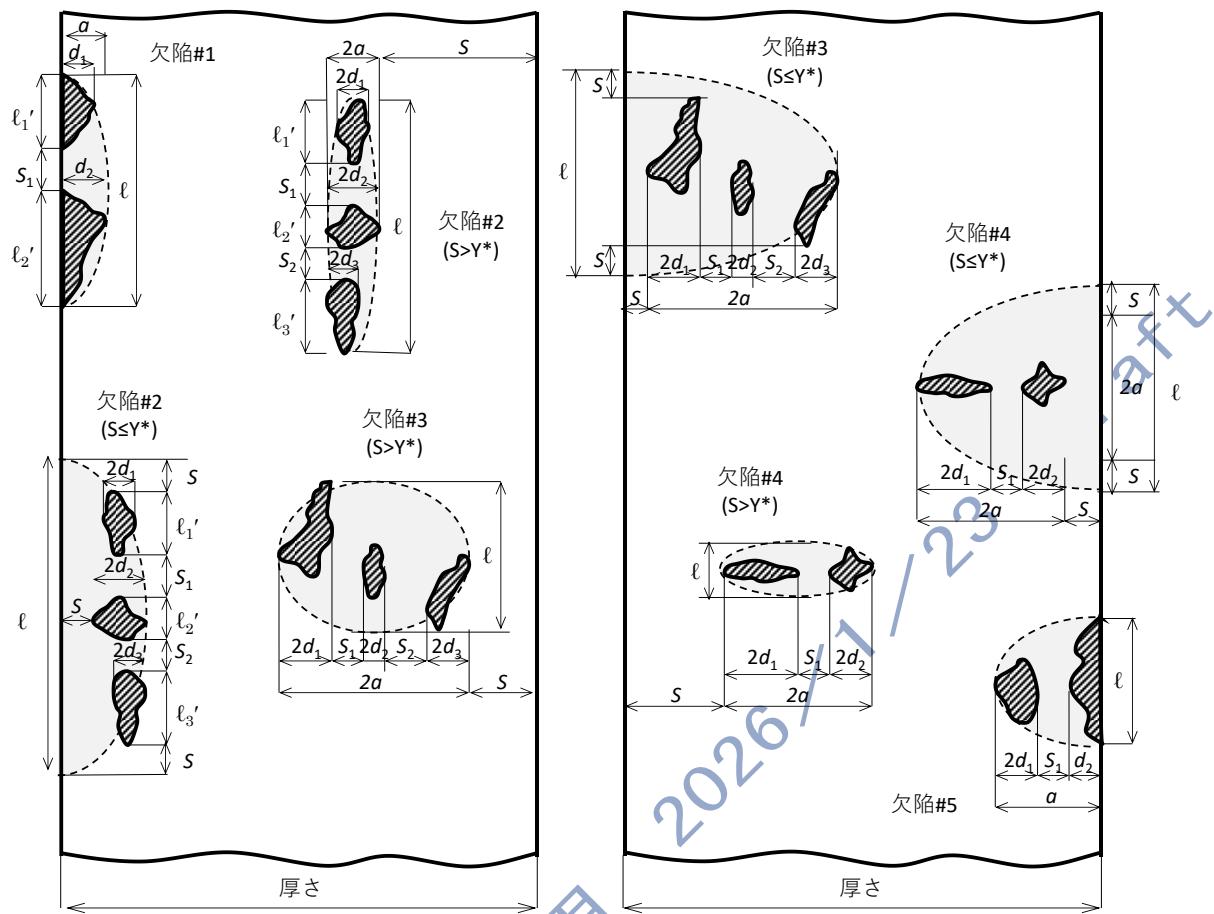
実測寸法からの評価寸法の求め方

欠陥No.	表面欠陥への置き換えの判定条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (l)
#1	$S > Y^* d$	$a = d$	$l = l'$
	$S \leq Y^* d$	$a = 2d + S$	$l = l' + 2S$
#2	$S > Y^* d$	$a = d$	$l = 2d$
	$S \leq Y^* d$	$a = 2d + S$	$l = 2d + 2S$

網掛け部は内部欠陥から表面欠陥への置き換えを表す

$$Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/l'}$$

図 C.4 内部欠陥の取り扱い（破線はモデル化された欠陥を示す）



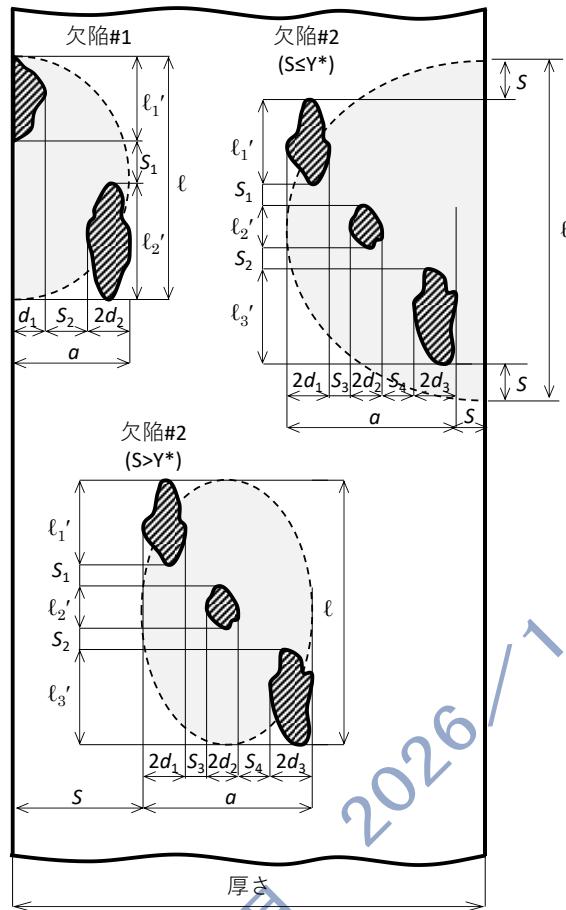
実測寸法からの評価寸法の求め方

欠陥No.	合体のための前提条件	表面欠陥への置き換えの判定条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (ℓ)
#1	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2$	-	$a = \max(d_1, d_2)$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2$
#2	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq (\ell_2 + \ell_3)/2$	$S > Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$	$a = \max(d_1, d_2, d_3)$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2 + S_2 + \ell_3$
		$S \leq Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$	$a = \max(2d_1, 2d_2, 2d_3) + S$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2 + S_2 + \ell_3 + 2S$
#3	$S_1 \leq d_1 + d_2, S_2 \leq d_2 + d_3$	$S > Y^* d_1$	$a = d_1 + S_1/2 + d_2 + S_2/2 + d_3$	図中の ℓ
		$S \leq Y^* d_1$	$a = 2d_1 + S_1 + 2d_2 + S_2 + 2d_3 + S$	$\ell = (\text{図中の}\ell) + 2S$
#4	$S_1 \leq d_1 + d_2$	$S > Y^* d_1$	$a = d_1 + S_1/2 + d_2$	$\ell = 2d_1 + S_1 + 2d_2$
		$S \leq Y^* d_1$	$a = 2d_1 + S_1 + 2d_2 + S$	$\ell = 2d_1 + S_1 + 2d_2 + 2S$
#5	$S_3 \leq d_1 + d_2$	-	$a = 2d_1 + S_1 + d_2$	図中の ℓ

網掛け部は内部欠陥から表面欠陥への置き換えを表す

$$Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/\ell'}$$

図 C.5 同一平面上にある並列な複数欠陥の取り扱い (破線はモデル化された欠陥を示す)



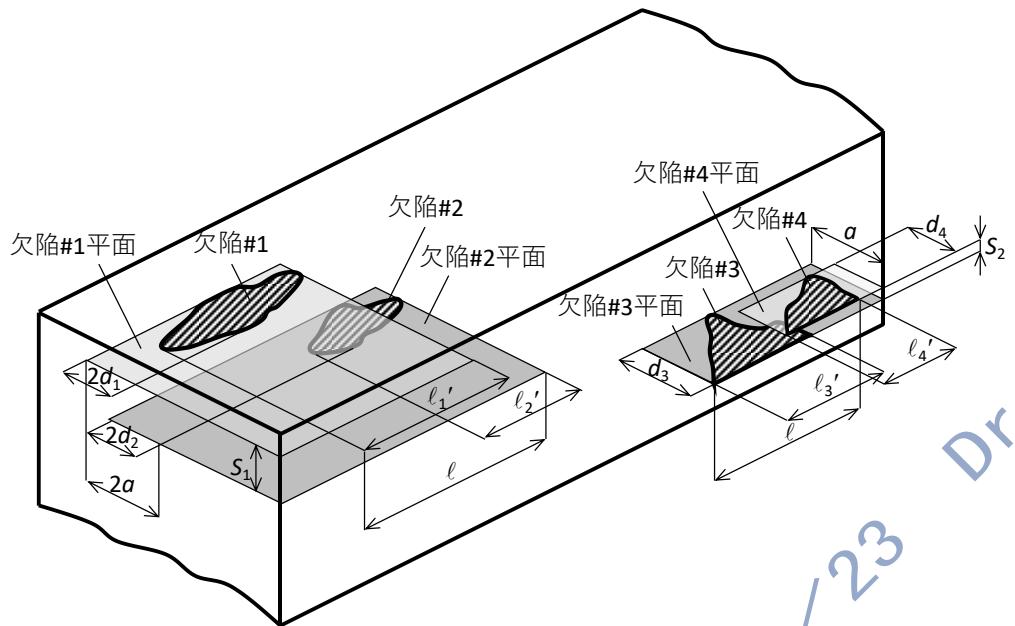
実測寸法からの評価寸法の求め方

欠陥No.	合体のための前提条件	表面欠陥への置き換えの判定条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (l)
#1	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq d_1 + d_2$	-	$a = d_1 + S_2 + 2d_2$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2$
#2	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq (\ell_2 + \ell_3)/2$ $S_3 \leq d_1 + d_2, S_4 \leq d_2 + d_3$	$S > Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$ $S \leq Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$	$a = d_1 + S_3/2 + d_2 + S_4/2 + d_3$ $a = 2d_1 + S_3 + 2d_2 + S_4 + 2d_3 + S$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2 + S_2 + \ell_3$ $\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2 + S_2 + \ell_3 + 2S$

網掛け部は内部欠陥から表面欠陥への置き換えを表す

$$Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/\ell'}$$

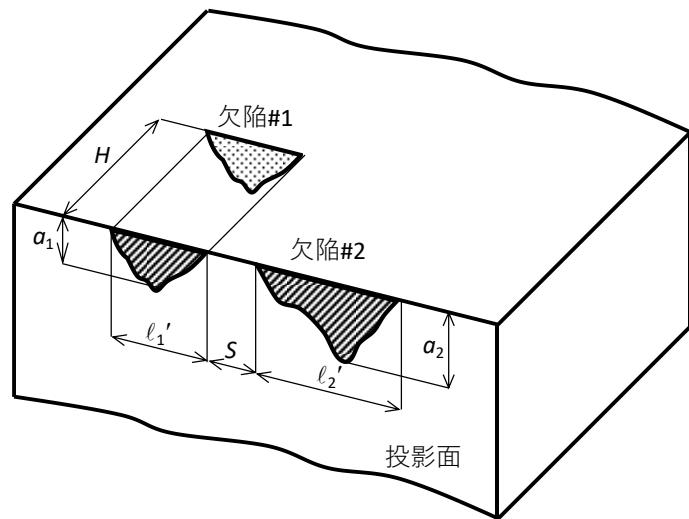
図 C.6 同一平面上にある非並列な複数欠陥の取り扱い（破線はモデル化された欠陥を示す）



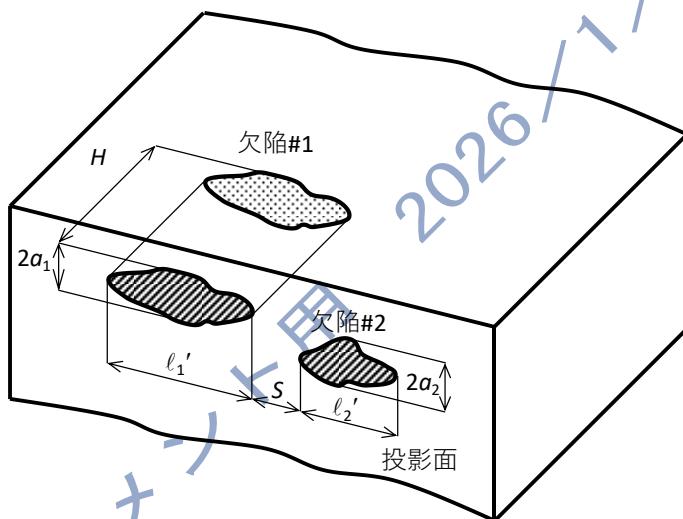
実測寸法からの評価寸法の求め方

欠陥No.	同一平面上の欠陥として取り扱うための条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (l)
#1, #2	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2$	図中の a	図中の l
#3, #4	$S_1 \leq (\ell_3 + \ell_4)/2$	$a = \max(d_3, d_4)$	図中の l

図 C.7 平行平面上にある近接する複数欠陥の取り扱い



(a) 複数表面欠陥



(b) 複数内部欠陥

図 C.8 平行平面上の複数欠陥の取り扱い

附属書 D (規定) 応力分類, 参照応力, 応力拡大係数

この附属書では, 応力分類, 参照応力および応力拡大係数について規定する。

D. 1 一般

この附属書は, 圧力機器部材にある亀裂状欠陥 (表面欠陥および内部欠陥) を対象とする。この附属書に規定されていない参考応力や応力拡大係数が場合について, 部材形状や欠陥形状, 荷重条件に応じて, 文献等における適切な解析結果を利用してもよい。適切な解析結果がない場合は, 有限要素法のような数値解析によって参考応力や応力拡大係数を算出してもよい。なお, 部材にクラッドが施工されている場合, クラッドが負荷荷重を受け持つとするか否かは使用者の責において決めるものとする。

D. 2 記号の定義

a	: 欠陥深さ
c	: 欠陥長さの 1/2
d	: 平板中の内部欠陥の有効リガメント
d_1	: 内部欠陥に近い側の平板表面から内部欠陥中央までの距離 または円筒内表面から内部欠陥中央までの距離
d_2	: 内部欠陥に遠い側の平板表面から内部欠陥中央までの距離 または円筒外表面から内部欠陥中央までの距離
F	: 軸力
G_0, G_1, G_2, G_3	: 多項式応力分布に対する応力拡大係数の補正係数
h	: 形状補正係数
K_I	: 応力拡大係数
M	: 曲げモーメント
M_b	: 曲げ応力に対する応力拡大係数の補正係数
M_m	: 膜応力に対する応力拡大係数の補正係数
M_s	: 表面欠陥に対するバルジングファクター
M_t	: 貫通欠陥に対するバルジングファクター
p	: 内圧
Q	: 形状係数
R_i	: 円筒および球殻の内半径
R_o	: 円筒および球殻の外半径
s	: 円筒中の内部欠陥の有効リガメント
t	: 肉厚
W	: 平板の板幅の 1/2
x	: 亀裂表面 (または亀裂に近い側の表面) からの距離

α	：欠陥深さ比に関するパラメータ
λ	：貫通欠陥に対するシェルパラメータ
λ_a	：表面欠陥に対するシェルパラメータ
$\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	：肉厚方向の応力分布を多項式で近似したときの係数
σ_m	：膜応力
σ_b	：ローカルな曲げ応力
σ_{gb}	：グローバルな曲げ応力
σ_{ref}	：参照応力

D. 3 応力成分の決定

この附属書では、評価に必要な応力として一次応力と二次応力を考える。

一次応力は、外部および内部の力とモーメントの平衡条件を満たすように生じる荷重によって生じる応力である。一次応力は、内圧による応力、外力によるグローバルな曲げ応力、地震力、風荷重や積雪荷重による応力などを含む。亀裂状欠陥が構造不連続部から離れた位置にあれば、設計温度における許容応力と同じ大きさの膜応力として一次応力を仮定してもよい。

二次応力は、隣接部の拘束あるいは構造物自身の拘束によって生じる応力である。温度分布による荷重、接続配管または附属部品の熱膨張、熱収縮による力などを含む。応力が一次応力か二次応力か不確かな場合には一次応力として扱う。二次応力であっても亀裂状欠陥の断面で塑性崩壊がもたらされると想定される場合には一次応力として扱う。

一次応力、二次応力はそれぞれ膜応力成分と曲げ応力成分に分類される。各構造形状に対して参考応力を算出するための膜応力、曲げ応力の求め方は D. 5.1.1, D. 5.2.1, D. 5.3.1, および D. 5.4.1 に示すとおりである。

D. 4 欠陥形状

この附属書で取り扱う欠陥形状を表 D. 1 に示す。同表には、それぞれの欠陥形状の模式図を表す図番、参考応力の算出方法を規定する箇条番号、および応力拡大係数の算出方法を規定する箇条番号を示している。

D. 5 参照応力

D. 5.1 平板の欠陥に対する参考応力

D. 5.1.1 計算に用いる応力成分

肉厚が t 、板半幅が W であるような平板に軸力 F と曲げモーメント M が作用する場合、D. 5.1.2 から D. 5.1.5 の計算に用いられる膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b はそれぞれ、次式により算出される。

$$\sigma_m = \frac{F}{2tW} \quad \text{----- (1)}$$

$$\sigma_b = \frac{3M}{t^2W} \quad \text{----- (2)}$$

D. 5.1.2 平板の貫通欠陥（図 D. 1 参照）^{1), 2)}

平板の貫通欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の参考応力 σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 9\sigma_m^2}}{3(1-\alpha)} \quad \text{--- (3)}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{c}{c+t} & , \text{ for } W \geq c+t \\ \frac{c}{W} & , \text{ for } W < c+t \end{cases} \quad \text{--- (4)}$$

D. 5.1.3 平板の片側欠陥 (図 D. 2 参照)

平板の片側欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sigma_b + 3\alpha\sigma_m + \sqrt{(\sigma_b + 3\alpha\sigma_m)^2 + 9(1-\alpha)^2\sigma_m^2}}{3(1-\alpha)^2} \quad \text{--- (5)}$$

$$\alpha = \frac{a}{t} \quad \text{--- (6)}$$

D. 5.1.4 平板の半だ円表面欠陥 (図 D. 3 参照) 2), 3)

平板の半だ円表面欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、曲げ拘束がある場合、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{g\sigma_b + \sqrt{(g\sigma_b)^2 + 9(1-\alpha)^2\sigma_m^2}}{3(1-\alpha)^2} \quad \text{--- (7)}$$

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad \text{--- (8)}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\pi ac}{t(\pi c + 4t)} & , \text{ for } W \geq \frac{\pi}{4}c + t \\ \frac{\pi ac}{4tW} & , \text{ for } W < \frac{\pi}{4}c + t \end{cases} \quad \text{--- (9)}$$

曲げ拘束がない場合、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sigma_b + 3\alpha\sigma_m + \sqrt{(\sigma_b + 3\alpha\sigma_m)^2 + 9(1-\alpha)^2\sigma_m^2}}{3(1-\alpha)^2} \quad \text{--- (10)}$$

α は式 (9) により算出される。

D. 5.1.5 平板のだ円内部欠陥 (図 D. 4 参照) 1), 2)

平板のだ円内部欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sigma_b + 3\alpha\sigma_m + \sqrt{(\sigma_b + 3\alpha\sigma_m)^2 + 9[(1-\alpha)^2 + \alpha^{\frac{4d}{t}}]\sigma_m^2}}{3[(1-\alpha)^2 + \alpha^{\frac{4d}{t}}]} \quad \text{--- (11)}$$

$$d = d_1 - a \quad \text{--- (12)}$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{2\pi ac}{t(\pi c + 4t)} & , \text{ for } W \geq \frac{\pi}{4}c + t \\ \frac{\pi ac}{2tW} & , \text{ for } W < \frac{\pi}{4}c + t \end{cases} \quad \text{--- (13)}$$

D. 5.2 円筒の軸方向欠陥に対する参照応力

D. 5.2.1 計算に用いる応力成分

肉厚が t 、内半径、外半径がそれぞれ R_i 、 R_o であるような円筒に内圧 p が作用する場合、D. 5.2.2 から D. 5.2.5 の計算に用いられる膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b はそれぞれ、次式により算出される。

$$\sigma_m = \frac{R_o^2 + 3R_i^2}{2(R_o^2 - R_i^2)} p \quad \text{--- (14)}$$

$$\sigma_b = \pm \frac{p R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \left\{ \frac{t}{R_i} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{R_i} \right)^3 \right\} \cong \pm \frac{p}{2} \quad \text{----- (15)}$$

σ_b は内面で正、外面で負の符号をとるが、一般には小さく無視してもよい。

D. 5.2.2 円筒の軸方向貫通欠陥 (図 D.5 参照)

円筒の軸方向貫通欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の参考応力 σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 9(1-\alpha)^2 M_t^2 \sigma_m^2}}{3(1-\alpha)^2} \quad \text{-----} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{c}{c+t} \quad \text{-----} \quad (17)$$

$$M_t = \sqrt{1 + 0.317\lambda^2} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

$$\lambda = 1.818 \frac{c/t}{\sqrt{R_i/t}} \quad \text{-----} \quad (19)$$

D. 5. 2. 3 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥 (図 D. 6 参照) 4), 5), 6), 7)

円筒内面の軸方向半径と円表面欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{g\sigma_b + 3\alpha\frac{p}{\sigma_0}M_s\sigma_m + \sqrt{\left(g\sigma_b + 3\alpha\frac{p}{\sigma_0}M_s\sigma_m\right)^2 + 9\left\{(1-\alpha)^2 - \alpha^2\left(\frac{p}{\sigma_0}\right)^2\right\}M_s^2\sigma_m^2}}{3\left\{(1-\alpha)^2 - \alpha^2\left(\frac{p}{\sigma_0}\right)^2\right\}} \quad \dots (20)$$

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad \text{--- (21)}$$

$$\alpha = \frac{\pi ac}{t(\pi c + 2k_p t)} \quad \text{--- (22)}$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{tM_s}} \quad \text{--- (23)}$$

$$M_t = \sqrt{1 + 0.317\lambda_a^2} \quad \text{---} \quad (24)$$

$$\lambda_a = \frac{1.428c}{\sqrt{R_i a}} \quad \text{--- (25)}$$

$$k_p = \min \left\{ -156.4 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + 456.3 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 450.0 \frac{a}{t} + 148.3 + f \left(\frac{t}{R_o} \right) \left(1 - \frac{a}{t} \right) \right\} \quad \dots \quad (26)$$

$$f\left(\frac{t}{R_o}\right) = \frac{\left(0.78 - 4.15 \frac{t}{R_o}\right)^2}{\frac{t}{R_o}} \quad \text{----- (27)}$$

D.5.2.4 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥 (図 D.7 参照) ⁴⁾

円筒外面の軸方向半径円表面欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{g\sigma_b + \sqrt{(g\sigma_b)^2 + 9(1-\alpha)^2 M_s^2 \sigma_m^2}}{3(1-\alpha)^2} \quad \text{----- (28)}$$

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a}{z_c} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad \dots \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{\pi ac}{t(\pi c + 2k_n t)} \quad \text{----- (30)}$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{tM_t}} \quad \dots \dots \dots \quad (31)$$

$$M_t = \sqrt{1 + 0.317\lambda_a^2} \quad \text{----- (32)}$$

$$\lambda_a = \frac{1.428c}{\sqrt{R_i a}} \quad \text{-----} \quad (33)$$

$$k_p = \min \left\{ -156.4 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + 456.3 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 450.0 \frac{a}{t} + 148.3 + f \left(\frac{t}{R_o} \right) \left(1 - \frac{a}{t} \right) \right\} \quad \dots \quad (34)$$

$$f\left(\frac{t}{R_o}\right) = \frac{\left(0.78 - 4.15 \frac{t}{R_o}\right)^2}{\frac{t}{R_o}} \quad \text{----- (35)}$$

D. 5. 2. 5 円筒の軸方向だ円内部欠陥 (図 D. 8 参照)

円筒の軸方向だ円内部欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sigma_b + 3\alpha M_s \sigma_m + \sqrt{(\sigma_b + 3\alpha M_s \sigma_m)^2 + 9\left\{(1-\alpha)^2 + \alpha \frac{4s}{t}\right\} M_s^2 \sigma_m^2}}{3\left\{(1-\alpha)^2 + \alpha \frac{4s}{t}\right\}} \quad (36)$$

$$s = \min\{d_1 - a, d_2 - a\} \quad \text{--- (37)}$$

$$\alpha = \frac{2\pi ac}{t(\pi c + 2k_p t)} \quad \text{---} \quad (38)$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{2a}{t} + \frac{2a}{tM_t}} \quad \text{--- (39)}$$

$$M_t = \sqrt{1 + 0.317\lambda_a^2} \quad \text{---} \quad (40)$$

$$\lambda_a = \frac{1.428c}{\sqrt{2R_i a}} \quad \text{--- (41)}$$

$$k_p = \min \left\{ -156.4 \left(\frac{2a}{t} \right)^3 + 456.3 \left(\frac{2a}{t} \right)^2 - 450.0 \left(\frac{2a}{t} \right) + 148.3 + f \left(\frac{t}{R_o} \right) \left(1 - \frac{2a}{t} \right) \right\} \quad \dots \quad (42)$$

$$f\left(\frac{t}{R_o}\right) = \frac{\left(0.78 - 4.15 \frac{t}{R_o}\right)^2}{\frac{t}{R_o}} \quad \text{--- (43)}$$

D. 5.3 円筒の周方向欠陥に対する参照応力

D. 5. 3. 1 計算に用いる応力成分

肉厚が t , 内半径, 外半径がそれぞれ R_i , R_o であるような円筒に内圧 p , 軸力 F , および曲げモーメント M が作用する場合, **D. 5.3.2** から **D. 5.3.5** の計算に用いられる膜応力 σ_m とグローバルな曲げ応力 σ_{gb} はそれぞれ, 次式により算出される。

$$\sigma_m = \frac{p R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad \text{----- (44)}$$

$$\sigma_{\text{gb}} = \frac{M}{\frac{\pi R_o^4 - R_i^4}{4 R_o}} \quad \text{----- (45)}$$

D. 5.3.2 円筒の周方向貫通欠陥 (図 D.9 参照) 4), 5), 8)

円筒の周方向貫通欠陥が σ_m と σ_{gb} を受ける場合の参考応力 σ_{ref} は、次式により算出される。

$$A_{m-t} = \frac{\pi}{2\psi_m - \theta} \quad \text{---(47)}$$

$$A_{gb-t} = \frac{2\hbar}{2\cos\psi_b - \sin\theta} \quad \text{---(48)}$$

$$\psi_m = \cos^{-1} \left[\frac{1}{2} \sin \theta \right] \quad \text{---(49)}$$

$$\psi_b = \frac{\theta}{2} \quad \text{---(50)}$$

$$\theta = \frac{c}{R_i} \quad \text{---(51)}$$

$$\hbar = \frac{\pi}{4} \quad \text{---(52)}$$

D. 5.3.3 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥 (図 D. 10 参照) 4), 5), 8), 9)

円筒内面の周方向半だ円表面欠陥が σ_m , σ_b , および σ_{gb} を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{ref} = A_{m-i}\sigma_m + A_{b-i}\sigma_b + A_{gb-i}\sigma_{gb} \quad \text{---(53)}$$

$$A_{m-i} = \left\{ \frac{(k_m+1)\psi_m}{\pi} - \frac{a\theta}{t\pi} \left(1 + \frac{p}{\sigma_0} \right) \frac{2-2\left(\frac{t}{R_o}\right)+\left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)}{2-\left(\frac{t}{R_o}\right)} + (k_m-1) \left(\frac{1}{2} - \frac{\theta}{\pi} \right) \right\}^{-1} \quad \text{---(54)}$$

$$A_{b-i} = \frac{-0.877\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 0.421\left(\frac{a}{t}\right) + 1}{3\left[-0.402\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.597\left(\frac{a}{t}\right) + 0.544\right]\left(1-\frac{a}{t}\right)^2} \quad \text{---(55)}$$

$$A_{gb-i} = \frac{2\left\{1-\left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3\right\}\hbar}{(k_m+1)\left\{1-\left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3\right\}\cos\psi_b + \left\{k_m\left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3 - \left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right) + \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)\right\}^3 - (k_m-1)\sin\theta} \quad \text{---(56)}$$

$$\psi_m = \begin{cases} \cos^{-1} \left[\frac{-k_m\left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3 + \left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right) + \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right) + (k_m-1)}{(k_m+1)\left\{1-\left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3\right\}} \sin\theta \right] & , \text{ for } \psi_m \geq \theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2} & , \text{ for } \psi_m < \theta - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{---(57)}$$

$$\psi_b = \begin{cases} \left(\frac{a}{t}\right)\theta \left(1 + \frac{p}{\sigma_0}\right) \frac{2-2\left(\frac{t}{R_o}\right)+\left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)}{2-\left(\frac{t}{R_o}\right)} - \frac{k_m-1}{k_m+1} \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) & , \text{ for } \psi_b \geq \theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2} & , \text{ for } \psi_b < \theta - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{---(58)}$$

$$k_m = \min \left\{ 1, 1.74 \left(\frac{a}{t} - 1 \right)^2 + g(\theta) \right\} \quad \text{---(59)}$$

$$g(\theta) = \sin \left\{ 1.57 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 - 3.43 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right) + 0.3 \right\} + 1 \quad \text{---(60)}$$

$$\theta = \frac{\left(1-\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)\pi c}{2\left(2-2\left(\frac{t}{R_o}\right)+\left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)R_i} \quad \text{---(61)}$$

$$h = \frac{3\pi}{16} \frac{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^4}{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3} \quad \text{--- (62)}$$

D. 5.3.4 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥 (図 D.11 参照) ④, ⑧, ⑨

円筒外面の周方向半だ円表面欠陥が σ_m , σ_b , および σ_{gb} を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{ref} = A_{m_o} \sigma_m + A_{b_o} \sigma_b + A_{gb_o} \sigma_{gb} \quad \text{--- (63)}$$

$$A_{m_o} = \left\{ \frac{(k_m+1)\psi_m}{\pi} - \frac{a}{t} \frac{\theta}{\pi} \frac{2 - \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)}{2 - \left(\frac{t}{R_o}\right)} + (k_m - 1) \left(\frac{1}{2} - \frac{\theta}{\pi}\right) \right\}^{-1} \quad \text{--- (64)}$$

$$A_{b_o} = \frac{-0.877\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 0.421\left(\frac{a}{t}\right) + 1}{3\left[-0.402\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.597\left(\frac{a}{t}\right) + 0.544\right]\left(1 - \frac{a}{t}\right)^2} \quad \text{--- (65)}$$

$$A_{gb_o} = \frac{2\left\{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3\right\}^h}{(k_m+1)\left\{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3\right\} \cos \psi_b + \left\{(k_m-1)\left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3 + \left(1 - \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3 - k_m\right\} \sin \theta} \quad \text{--- (66)}$$

$$\psi_m = \begin{cases} \cos^{-1} \left[\frac{-(k_m-1)\left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3 - \left(1 - \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3 + k_m}{(k_m+1)\left\{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3\right\}} \sin \theta \right], & \text{for } \psi_m \geq \theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2}, & \text{for } \psi_m < \theta - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{--- (67)}$$

$$\psi_b = \begin{cases} \frac{(a/t)\theta}{(k_m+1)} \frac{2 - \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)}{2 - \left(\frac{t}{R_o}\right)} - \frac{k_m-1}{k_m+1} \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), & \text{for } \psi_b \geq \theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2}, & \text{for } \psi_b < \theta - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{--- (68)}$$

$$k_m = \min \left\{ 1, 1.74\left(\frac{a}{t} - 1\right)^2 + g(\theta) \right\} \quad \text{--- (69)}$$

$$g(\theta) = \sin \left\{ 1.57 \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2 - 3.43 \left(\frac{2\theta}{\pi}\right) + 0.3 \right\} + 1 \quad \text{--- (70)}$$

$$\theta = \frac{\left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)\pi c}{2\left(2 - 2\left(\frac{t}{R_o}\right) + \left(\frac{a}{t}\right)\left(\frac{t}{R_o}\right)\right)R_i} \quad \text{--- (71)}$$

$$h = \frac{3\pi}{16} \frac{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^4}{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o}\right)\right)^3} \quad \text{--- (72)}$$

D. 5.3.5 円筒の周方向だ円内部欠陥 (図 D.12 参照)

円筒の周方向だ円内部欠陥が σ_m と σ_{gb} を受ける場合の σ_{ref} は、次式により算出される。

$$\sigma_{ref} = A_{m_e} \sigma_m + A_{b_e} \sigma_{gb} \quad \text{--- (73)}$$

$$A_{m_e} = \left\{ \frac{(k_m+1)\psi_m}{\pi} - \frac{4a}{t} \frac{\theta}{\pi} \frac{1 - e_2\left(\frac{t}{R_o}\right)}{2 - \left(\frac{t}{R_o}\right)} + (k_m - 1) \left(\frac{1}{2} - \frac{\theta}{\pi}\right) \right\}^{-1} \quad \text{--- (74)}$$

$$A_{b-e} = \frac{2 \left\{ 1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^3 \right\} h}{(k_m + 1) \left\{ 1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^3 \right\} \cos \psi_b + \left\{ \left(1 - e_2 \left(\frac{t}{R_o} \right) - \left(\frac{a}{t} \right) \left(\frac{t}{R_o} \right) \right)^3 - \left(1 - e_2 \left(\frac{t}{R_o} \right) + \left(\frac{a}{t} \right) \left(\frac{t}{R_o} \right) \right)^3 - (k_m - 1) \left\{ 1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^3 \right\} \right\} \sin \theta} \quad \dots \dots \dots (75)$$

$$\psi_m = \begin{cases} \cos^{-1} \left[\frac{\left(1 - e_2 \left(\frac{t}{R_o} \right) - \left(\frac{a}{t} \right) \left(\frac{t}{R_o} \right) \right)^3 - \left(1 - e_2 \left(\frac{t}{R_o} \right) + \left(\frac{a}{t} \right) \left(\frac{t}{R_o} \right) \right)^3 + (k_m - 1) \left\{ 1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^3 \right\}}{(k_m + 1) \left\{ 1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^3 \right\}} \sin \theta} \right] & , \text{ for } \psi_m \geq \theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2} & , \text{ for } \psi_m < \theta - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \dots \dots \dots (76)$$

$$\psi_b = \begin{cases} \frac{4 \left(\frac{a}{t} \right) \theta}{k_m + 1} \frac{1 - e_2 \left(\frac{t}{R_o} \right)}{2 - \left(\frac{t}{R_o} \right)} - \frac{k_m - 1}{k_m + 1} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) & , \text{ for } \psi_b \geq \theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2} & , \text{ for } \psi_b < \theta - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \dots \dots \dots (77)$$

$$k_m = \min \left\{ 1, 1.74 \left(\frac{a}{t} - 1 \right)^2 + g(\theta) \right\} \quad \dots \dots \dots (78)$$

$$g(\theta) = \sin \left\{ 1.57 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^2 - 3.43 \left(\frac{2\theta}{\pi} \right) + 0.3 \right\} + 1 \quad \dots \dots \dots (79)$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4(R_i + d_1)} \quad \dots \dots \dots (80)$$

$$h = \frac{3\pi}{16} \frac{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^4}{1 - \left(1 - \left(\frac{t}{R_o} \right)^3 \right)^3} \quad \dots \dots \dots (81)$$

$$e_2 = \frac{d_2}{t} \quad \dots \dots \dots (82)$$

D. 5.4 球殻の欠陥に対する参照応力

D. 5.4.1 計算に用いる応力成分

肉厚が t , 内半径, 外半径がそれぞれ R_i , R_o であるような球殻に内圧 p が作用する場合, D. 5.4.2 から D. 5.4.5 の計算に用いられる膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b はそれぞれ, 次式により算出される。

$$\sigma_m = \frac{p R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad \dots \dots \dots (83)$$

$$\sigma_b = \pm \frac{p R_o^3}{R_o^3 - R_i^3} \left\{ \frac{3}{4} \left(\frac{t}{R_i} \right) - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{4} \left(\frac{t}{R_i} \right)^3 \right\} \cong \pm \frac{p}{4} \quad \dots \dots \dots (84)$$

σ_b は内面で正, 外面で負の符号をとるが, 一般には小さく無視してもよい。

D. 5.4.2 球殻の貫通欠陥 (図 D. 13 参照)

球殻の貫通欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の参照応力 σ_{ref} は, D. 5.2.2 により評価して差し支えなさい。

D. 5.4.3 球殻内面の半だ円表面欠陥 (図 D.14 参照)

球殻内面の半だ円表面欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、D.5.2.3 により評価して差し支えない。

D. 5.4.4 球殻外面の半だ円表面欠陥 (図 D.15 参照)

球殻外面の半だ円表面欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、D.5.2.4 により評価して差し支えない。

D. 5.4.5 球殻のだ円内部欠陥 (図 D.16 参照)

球殻のだ円内部欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の σ_{ref} は、D.5.2.5 により評価して差し支えない。

D. 6 応力拡大係数

D. 6.1 平板の欠陥に対する応力拡大係数

D. 6.1.1 計算に用いる応力成分

肉厚が t 、板半幅が W であるような平板に軸力 F と曲げモーメント M が作用する場合、D.6.1.2 の計算に用いられる膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b はそれぞれ式(1)、式(2)により与えられる。

肉厚方向の応力分布を多項式で近似する場合、D.6.1.3 から D.6.1.5 の計算に用いられる応力分布 $\sigma(x)$ は、次式により与えられる。

$$\sigma(x) = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + \dots \quad (85)$$

または、

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= A'_0 + A'_1 \left(\frac{x}{t}\right) + A'_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + A'_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \dots \\ A'_0 &= A'_0, \quad A'_1 = A'_1 \frac{a}{t}, \quad A'_2 = A'_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2, \quad A'_3 = A'_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3, \quad \dots \end{aligned} \quad (86)$$

D. 6.1.2 平板の貫通欠陥 (図 D.1 参照)¹⁰⁾

平板の貫通欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の応力拡大係数 K_I は、次式により算出される。

$$K_I = (\sigma_m M_m + \sigma_b M_b) \sqrt{\pi c} \quad (87)$$

このときの係数 M_m および M_b は表 D.2 により与えられる。

D. 6.1.3 平板の片側欠陥 (図 D.2 参照)¹⁰⁾

平板の片側欠陥が $\sigma(x)$ および亀裂内に圧力 p を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = [(A_0 + p)G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3] \sqrt{\pi a} \quad (88)$$

このときの係数 G_0 、 G_1 、 G_2 、および G_3 は表 D.3 により与えられる。

D. 6.1.4 平板の半だ円表面欠陥 (図 D.3 参照)¹⁰⁾

平板の半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$ および亀裂内に圧力 p を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = [(A_0 + p)G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3] \sqrt{\pi a} \quad (89)$$

このときの係数 G_0 、 G_1 、 G_2 、および G_3 は表 D.4 により与えられる。

D. 6.1.5 平板のだ円内部欠陥 (図 D. 4 参照)¹¹⁾

平板のだ円内部欠陥が $\sigma(x)$ を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = [A'_0 G_0 + A'_1 G_1 + A'_2 G_2 + A'_3 G_3 + A'_4 G_4] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \text{-----(90)}$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad \text{-----(91)}$$

このときのポイント 1, ポイント 2, およびポイント 3 のそれぞれにおける係数 G_0, G_1, G_2, G_3 は表 D. 5 により与えられる。

D. 6.2 円筒の軸方向欠陥に対する応力拡大係数

D. 6.2.1 計算に用いる応力分布

肉厚が t , 内半径, 外半径がそれぞれ R_i, R_o であるような円筒に内圧 p が作用する場合、D. 6.2.2 の計算に用いられる膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b はそれぞれ式(14), 式(15)により与えられる。

肉厚方向の応力分布を多項式で近似する場合、D. 6.2.3 から D. 6.2.5 の計算に用いられる応力分布 $\sigma(x)$ は、次式により与えられる。

$$\sigma(x) = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a} \right) + A_2 \left(\frac{x}{a} \right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a} \right)^3 + \dots \quad \text{-----(92)}$$

または、

$$\sigma(x) = A'_0 + A'_1 \left(\frac{x}{t} \right) + A'_2 \left(\frac{x}{t} \right)^2 + A'_3 \left(\frac{x}{t} \right)^3 + \dots$$

$$A_0 = A'_0, \quad A_1 = A'_1 \frac{a}{t}, \quad A_2 = A'_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2, \quad A_3 = A'_3 \left(\frac{a}{t} \right)^3, \quad \dots \quad \text{-----(93)}$$

D. 6.2.2 円筒の軸方向貫通欠陥 (図 D. 5 参照)¹⁰⁾

円筒の軸方向貫通欠陥が σ_m と σ_b を受ける場合の応力拡大係数 K_I は、次式により算出される。

$$K_I = (\sigma_m M_m + \sigma_b M_b) \sqrt{\pi c} \quad \text{-----(94)}$$

このときの係数 M_m および M_b は表 D. 6 により与えられる。

D. 6.2.3 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥 (図 D. 6 参照)¹²⁾

円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$ および p を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = ((A_0 + p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a} \quad \text{-----(95)}$$

このときの係数 G_0, G_1, G_2, G_3 は表 D. 7 により与えられる。

D. 6.2.4 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥 (図 D. 7 参照)¹²⁾

円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$ を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a} \quad \text{-----(96)}$$

このときの係数 G_0, G_1, G_2, G_3 は表 D. 8 により与えられる。

D. 6.2.5 円筒の軸方向だ円内部欠陥 (図 D. 8 参照)

円筒の軸方向だ円内部欠陥が $\sigma(x)$ を受ける場合の K_I は、6. 1.5 により評価して差し支えない。

D. 6.3 円筒の周方向欠陥に対する応力拡大係数

D. 6.3.1 計算に用いる応力分布

肉厚が t , 内半径, 外半径がそれぞれ R_i, R_o であるような円筒に内圧 p , 軸力 F , および曲げモ

ーメント M が作用する場合、**6.3.2** の計算に用いられる膜応力 σ_m は式(44)により、**D.6.3.2** から **D.6.3.4** の計算に用いられるグローバルな曲げ応力 σ_{gb} は式(45)により与えられる。

肉厚方向の応力分布を多項式で近似する場合、**D.6.3.3** から **D.6.3.5** の計算に用いられる応力分布 $\sigma(x)$ は、次式により与えられる。

$$\sigma(x) = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + \dots \quad \text{----- (97)}$$

または、

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= A'_0 + A'_1 \left(\frac{x}{t}\right) + A'_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + A'_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \dots \\ A_0 &= A'_0, \quad A_1 = A'_1 \frac{a}{t}, \quad A_2 = A'_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2, \quad A_3 = A'_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3, \quad \dots \end{aligned} \quad \text{----- (98)}$$

D.6.3.2 円筒の周方向貫通欠陥 (図 D.9 参照)¹⁰⁾

円筒の周方向貫通欠陥が σ_m と σ_{gb} を受ける場合の応力拡大係数 K_I は、次式により算出される。

$$K_I = (\sigma_m M_m + \sigma_{gb} M_{gb}) \sqrt{\pi c} \quad \text{----- (99)}$$

このときの係数 M_m および M_{gb} は表 D.9 により与えられる。

D.6.3.3 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥 (図 D.10 参照)¹²⁾

円筒内面の周方向半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$, p , および σ_{gb} を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = \left((A_0 + p) G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + \sigma_{bg} G_{bg} \right) \sqrt{\pi a} \quad \text{----- (100)}$$

このときの係数 G_0 , G_1 , G_2 , G_3 , および G_{bg} は表 D.10 により与えられる。

D.6.3.4 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥 (図 D.11 参照)¹²⁾

円筒外面の周方向半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$ および σ_{gb} を受ける場合の K_I は、次式により算出される。

$$K_I = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + \sigma_{bg} G_{bg}) \sqrt{\pi a} \quad \text{----- (101)}$$

このときの係数 G_0 , G_1 , G_2 , G_3 , および G_{bg} は表 D.11 により与えられる。

D.6.3.5 円筒の周方向だ円内部欠陥 (図 D.12 参照)

円筒の周方向だ円内部欠陥が $\sigma(x)$ を受ける場合の K_I は、**D.6.1.5** により評価して差し支えない。

D.6.4 球殻の欠陥に対する応力拡大係数

D.6.4.1 計算に用いる応力分布

肉厚が t , 内半径, 外半径がそれぞれ R_i , R_o であるような円筒に内圧 p が作用する場合、**D.6.4.2** の計算に用いられる膜応力 σ_m は式(83)により与えられる。

肉厚方向の応力分布を多項式で近似する場合、**D.6.4.3** から **D.6.4.5** の計算に用いられる応力分布 $\sigma(x)$ は、次式で与えられる。

$$\sigma(x) = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + \dots \quad \text{----- (102)}$$

または、

$$\sigma(x) = A_0' + A_1' \left(\frac{x}{t}\right) + A_2' \left(\frac{x}{t}\right)^2 + A_3' \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \dots$$

$$A_0 = A_0', \quad A_1 = A_1' \frac{a}{t}, \quad A_2 = A_2' \left(\frac{a}{t}\right)^2, \quad A_3 = A_3' \left(\frac{a}{t}\right)^3, \quad \dots \quad \text{-----} (103)$$

D. 6.4.2 球殻の貫通欠陥 (図 D. 13 参照) ¹³⁾

球殻の貫通欠陥が σ_m および σ_a を受ける場合の応力拡大係数 K_I は、次式により算出される。

$$K_I = (\sigma_m G_1 + \sigma_b (G_1 - 2G_2))\sqrt{\pi c_m}, \quad c_m = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{t}{R_I}\right) c \quad \dots \quad (104)$$

このときの係数 G_1 および G_2 は $\lambda = 1.818 c_m / \sqrt{R_i t}$ の関数として表 D. 12 により与えられる。

D. 6.4.3 球殼内面の半だ円表面欠陥 (図 D. 14 参照)

球殻内面の半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$ を受ける場合の K_I は、D. 6. 2. 3により評価して差し支えない。

D. 6.4.4 球殻外面の半だ円表面欠陥 (図 D.15 参照)

球殻外面の半だ円表面欠陥が $\sigma(x)$ を受ける場合の K_I は、D. 6. 2. 4により評価して差し支えない。

D. 6.4.5 球殻のだ円内部欠陥 (図 D. 16 参照)

球殻の内側に円形の欠陥がある場合の K_I は、D. 6. 1. 5 により評価して差し支えない。

参考文献

- 1) Willoughby, A. A., and Davey, T. G., "Plastic Collapse in Part-Wall Flaws in Plate", ASTM STP 1020, pp. 390-409, (1989).
 - 2) American Petroleum Institute and American Society of Mechanical Engineers, "Fitness-For-Service", **API 579-1/ASME FFS-1**, (2016).
 - 3) Sattari-Far, I., "Finite Element Analysis of Limit Loads for Surface Crack in Plates", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 57, pp. 237-243, (1994).
 - 4) Konosu, S., and Mukaimachi, N., "Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessel with Local Thin Area Simultaneously Subjected to Internal Pressure and External Bending Moment", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 130, p. 011207, (2008).
 - 5) Konosu, S., and Oyamada, K., "Development of Simplified Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessel with Internal Surface Flaw", ASME PVP2007-26437, pp. 589-597, (2007).
 - 6) Folias, E. S., "Failure Correlation between Cylindrical Pressurized Vessels and Flat Plates", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, pp. 803-811, (1999).
 - 7) Chell, G. G., "Application of the CEGB Failure Assessment Procedure, **R6**, to Surface Flaws", ASTM STP 1074, pp. 525-544, (1990).
 - 8) Konosu, S., and Miyata, H., "Assessment of Overlapped Internal and External Volumetric Flaws in p-M Diagram", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 133, p. 031208, (2011).
 - 9) 電力中央研究所, "平成 12 年度発電用新型炉技術確証試験 (高速増殖炉技術確証試験) 調査報

告書別冊 高温構造健全性評価指針（案）”, (2001)

- 10) Marie, S., Chapuliot, S., Kayser, Y., Lacire, M. H., Drubay, B., Barthelet, B., Le Delliou, P., Rougier, V., Naudin, C., Gilles, P., and Triay, M., “French RSE-M and RCC-MR Code Appendices for Flaw Analysis: Presentation of the Fracture Parameters Calculation, Part II: Cracked Plates”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 84, pp. 601-613, (2007).
- 11) Shiratori, M., Yoshikawa, N., Iwamatsu, F., Matsushita, H., Omata, S., Matsuda, H., and Miyoshi, T., “Prediction of Fatigue Crack Propagation of Sub-Surface Cracks by SCAN”, ASME PVP, Vol. 472, pp. 237-243, (2004).
- 12) Marie, S., Chapuliot, S., Kayser, Y., Lacire, M. H., Drubay, B., Barthelet, B., Le Delliou, P., Rougier, V., Naudin, C., Gilles, P., and Triay, M., “French RSE-M and RCC-MR Code Appendices for Flaw Analysis: Presentation of the Fracture Parameters Calculation, Part III: Cracked Pipes”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 84, pp. 614-658, (2007).
- 13) British Standards Institution, “Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures”, **BS 7910**, (2013).

表 D.1 この附属書で取り扱う欠陥形状

欠陥形状	図番	参照応力の 算出方法を規定する 箇条番号	応力拡大係数の 算出方法を規定する 箇条番号
平板の 貫通欠陥	図D.1	5.1.2	6.1.2
平板の 片側欠陥	図D.2	5.1.3	6.1.3
平板の 半だ円表面欠陥	図D.3	5.1.4	6.1.4
平板の だ円内部欠陥	図D.4	5.1.5	6.1.5
円筒の 軸方向貫通欠陥	図D.5	5.2.2	6.2.2
円筒内面の 軸方向半だ円表面欠陥	図D.6	5.2.3	6.2.3
円筒外面の 軸方向半だ円表面欠陥	図D.7	5.2.4	6.2.4
円筒の 軸方向だ円内部欠陥	図D.8	5.2.5	6.2.5
円筒の 周方向貫通欠陥	図D.9	5.3.2	6.3.2
円筒内面の 周方向半だ円表面欠陥	図D.10	5.3.3	6.3.3
円筒外面の 周方向半だ円表面欠陥	図D.11	5.3.4	6.3.4
円筒の 周方向だ円内部欠陥	図D.12	5.3.5	6.3.5
球殻の 貫通欠陥	図D.13	5.4.2	6.4.2
球殻内面の 半だ円表面欠陥	図D.14	5.4.3	6.4.3
球殻外面の 半だ円表面欠陥	図D.15	5.4.4	6.4.4
球殻の だ円内部欠陥	図D.16	5.4.5	6.4.5

表 D.2 平板の貫通欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

c/W	M_m	M_b			
		$W/t = 5$	$W/t = 20$	$W/t = 50$	$W/t = 500$
0.000	1.000				
0.056	1.000	0.889	0.739	0.684	0.630
0.111	1.003	0.814	0.698	0.664	0.630
0.167	1.015	0.779	0.686	0.659	0.633
0.222	1.031	0.763	0.684	0.661	0.638
0.278	1.053	0.759	0.687	0.667	0.645
0.333	1.081	0.763	0.694	0.676	0.655
0.389	1.111	0.773	0.706	0.688	0.668
0.444	1.149	0.789	0.722	0.705	0.684
0.500	1.198	0.813	0.744	0.725	0.705
0.556	1.257	0.844	0.771	0.752	0.730
0.611	1.327	0.887	0.807	0.786	0.762
0.667	1.422	0.944	0.855	0.831	0.804
0.722	1.547	1.024	0.920	0.891	0.860
0.778	1.722	1.142	1.013	0.977	0.939
0.833	1.986	1.329	1.159	1.109	1.058
0.889	2.440	1.677	1.422	1.343	1.264
0.944	3.468	2.458	1.725	1.531	1.383

表 D.3 平板の片側欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

a/t	G_0	G_1	G_2	G_3
0.0	1.122	0.683	0.526	0.441
0.1	1.185	0.706	0.537	0.447
0.2	1.364	0.777	0.578	0.475
0.4	2.109	1.061	0.736	0.584
0.6	4.030	1.764	1.115	0.822
0.8	11.949	4.546	2.573	1.734

表 D.4 平板の半だ円表面欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(a) 最深点

a/t	a/c					
	0	0.0625	0.125	0.25	0.5	1
G_0	0.0	1.122	1.105	1.088	1.022	0.883
	0.1	1.185	1.129	1.095	1.027	0.884
	0.2	1.364	1.243	1.172	1.066	0.898
	0.4	2.109	1.693	1.482	1.234	0.962
	0.6	4.030	2.470	1.943	1.452	1.038
	0.8	11.949	3.331	2.300	1.573	1.070
G_1	0.0	0.683	0.673	0.664	0.632	0.569
	0.1	0.706	0.680	0.664	0.632	0.567
	0.2	0.777	0.722	0.692	0.645	0.572
	0.4	1.061	0.885	0.801	0.703	0.593
	0.6	1.764	1.157	0.960	0.778	0.620
	0.8	4.546	1.458	1.098	0.840	0.649
G_2	0.0	0.526	0.518	0.512	0.491	0.451
	0.1	0.537	0.520	0.510	0.489	0.449
	0.2	0.578	0.543	0.524	0.496	0.451
	0.4	0.736	0.629	0.580	0.525	0.461
	0.6	1.115	0.770	0.663	0.563	0.476
	0.8	2.573	0.927	0.741	0.604	0.498
G_3	0.0	0.441	0.435	0.431	0.415	0.386
	0.1	0.447	0.435	0.427	0.412	0.383
	0.2	0.475	0.449	0.436	0.416	0.384
	0.4	0.584	0.503	0.470	0.433	0.390
	0.6	0.822	0.591	0.521	0.457	0.399
	0.8	1.734	0.689	0.573	0.487	0.416

(b) 表面点

a/t	a/c					
	0	0.0625	0.125	0.25	0.5	1
G_0	0.0	0.000	0.282	0.432	0.568	0.704
	0.1	0.000	0.336	0.445	0.585	0.712
	0.2	0.000	0.353	0.469	0.608	0.726
	0.4	0.000	0.410	0.559	0.714	0.806
	0.6	0.000	0.515	0.725	0.900	0.947
	0.8	0.000	0.729	1.006	1.167	1.117
G_1	0.0	0.000	2.02E-02	3.93E-02	7.37E-02	0.119
	0.1	0.000	1.77E-02	3.70E-02	7.31E-02	0.113
	0.2	0.000	2.26E-02	4.48E-02	8.11E-02	0.118
	0.4	0.000	3.88E-02	7.39E-02	0.116	0.144
	0.6	0.000	6.94E-02	0.122	0.173	0.188
	0.8	0.000	0.131	0.202	0.244	0.231
G_2	0.0	0.000	2.77E-03	8.08E-03	2.15E-02	4.06E-02
	0.1	0.000	3.19E-03	8.63E-03	2.19E-02	4.05E-02
	0.2	0.000	5.52E-03	1.25E-02	2.60E-02	4.30E-02
	0.4	0.000	1.28E-02	2.59E-02	4.31E-02	5.60E-02
	0.6	0.000	2.66E-02	4.87E-02	6.99E-02	7.63E-02
	0.8	0.000	5.37E-02	8.39E-02	0.102	9.48E-02
G_3	0.0	0.000	7.13E-04	2.91E-03	9.56E-03	2.04E-02
	0.1	0.000	1.24E-03	3.47E-03	9.97E-03	2.05E-02
	0.2	0.000	2.58E-03	5.75E-03	1.24E-02	2.21E-02
	0.4	0.000	6.61E-03	1.35E-02	2.26E-02	2.98E-02
	0.6	0.000	1.43E-02	2.63E-02	3.78E-02	4.13E-02
	0.8	0.000	2.91E-02	4.54E-02	5.49E-02	5.07E-02

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(a) ポイント1 (その1)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.9871	0.1974	0.0395	0.0079	0.0016	
	0.3	0.9871	0.2961	0.0888	0.0267	0.0080	
	0.4	0.9871	0.3948	0.1579	0.0632	0.0253	
	0.5	0.9871	0.4935	0.2468	0.1234	0.0617	
0.1	0.2	0.9886	0.1876	0.0357	0.0068	0.0013	
	0.3	0.9886	0.2814	0.0804	0.0230	0.0066	
	0.4	0.9662	0.3670	0.1398	0.0534	0.0205	
	0.5	0.9900	0.4697	0.2235	0.1067	0.0511	
0.2	0.2	1.0012	0.1800	0.0328	0.0061	0.0011	
	0.3	1.0031	0.2706	0.0740	0.0205	0.0058	
	0.4	1.0036	0.3610	0.1316	0.0486	0.0182	
	0.5	1.0067	0.4529	0.2064	0.0954	0.0448	
0.0	0.2	1.0674	0.1727	0.0298	0.0055	0.0011	
	0.3	1.0781	0.2621	0.0680	0.0189	0.0056	
	0.4	1.0812	0.3505	0.1214	0.0449	0.0177	
	0.5	1.0901	0.4428	0.1921	0.0891	0.0440	
0.6	0.2	1.2207	0.1809	0.0319	0.0065	0.0015	
	0.3	1.2559	0.2809	0.0747	0.0228	0.0077	
	0.4	1.2640	0.3767	0.1333	0.0542	0.0244	
	0.5	1.2766	0.4772	0.2117	0.1080	0.0609	
0.8	0.2	1.6155	0.2273	0.0441	0.0103	0.0027	
	0.3	1.7332	0.3710	0.1086	0.0379	0.0147	
	0.4	1.7643	0.5001	0.1933	0.0892	0.0456	
	0.5	1.7729	0.6260	0.3009	0.1727	0.1099	
0.0 <	0.2	0.9871	0.1974	0.0395	0.0079	0.0016	
	0.3	0.9871	0.2961	0.0888	0.0267	0.0080	
	0.4	0.9871	0.3948	0.1579	0.0632	0.0253	
	0.5	0.9871	0.4936	0.2468	0.1234	0.0617	
0.1	0.2	0.9820	0.1861	0.0354	0.0067	0.0013	
	0.3	0.9821	0.2823	0.0824	0.0245	0.0074	
	0.4	0.9823	0.3747	0.1443	0.0561	0.0220	
	0.5	0.9826	0.4656	0.2212	0.1054	0.0504	
0.2	0.2	0.9869	0.1768	0.0322	0.0060	0.0011	
	0.3	0.9875	0.2683	0.0750	0.0216	0.0064	
	0.4	0.9884	0.3565	0.1315	0.0496	0.0191	
	0.5	0.9905	0.4438	0.2021	0.0935	0.0440	
0.4	0.2	1.0206	0.1627	0.0277	0.0050	0.0010	
	0.3	1.0247	0.2480	0.0650	0.0184	0.0057	
	0.4	1.0289	0.3308	0.1144	0.0425	0.0169	
	0.5	1.0373	0.4151	0.1775	0.0811	0.0395	
0.6	0.2	1.1108	0.1585	0.0270	0.0053	0.0012	
	0.3	1.1260	0.2448	0.0644	0.0199	0.0069	
	0.4	1.1384	0.3294	0.1145	0.0463	0.0209	
	0.5	1.1559	0.4177	0.1800	0.0896	0.0494	
0.8	0.2	1.3438	0.1754	0.0323	0.0072	0.0018	
	0.3	1.3905	0.2792	0.0796	0.0279	0.0110	
	0.4	1.4237	0.3810	0.1431	0.0654	0.0334	
	0.5	1.4502	0.4833	0.2238	0.1250	0.0776	

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(a) ポイント1 (その2)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.9842	0.1968	0.0394	0.0079	0.0016	
	0.3	0.9842	0.2953	0.0886	0.0266	0.0080	
	0.4	0.9842	0.3937	0.1575	0.0630	0.0252	
	0.5	0.9842	0.4921	0.2461	0.1230	0.0615	
0.1	0.2	0.9881	0.1864	0.0353	0.0067	0.0013	
	0.3	0.9881	0.2827	0.0822	0.0243	0.0073	
	0.4	0.9883	0.3753	0.1438	0.0556	0.0217	
	0.5	0.9885	0.4662	0.2205	0.1045	0.0497	
0.2	0.2	0.9913	0.1759	0.0317	0.0058	0.0011	
	0.3	0.9917	0.2669	0.0738	0.0210	0.0062	
	0.4	0.9922	0.3544	0.1293	0.0482	0.0184	
	0.5	0.9934	0.4407	0.1985	0.0908	0.0422	
0.4	0.2	1.0139	0.1578	0.0261	0.0046	0.0009	
	0.3	1.0161	0.2401	0.0611	0.0169	0.0050	
	0.4	1.0186	0.3196	0.1074	0.0388	0.0150	
	0.5	1.0239	0.3996	0.1660	0.0736	0.0348	
0.6	0.2	1.0842	0.1480	0.0241	0.0046	0.0010	
	0.3	1.0929	0.2270	0.0569	0.0168	0.0057	
	0.4	1.1005	0.3040	0.1007	0.0390	0.0170	
	0.5	1.1119	0.3831	0.1572	0.0750	0.0400	
0.8	0.2	1.2626	0.1534	0.0267	0.0057	0.0014	
	0.3	1.2883	0.2397	0.0645	0.0217	0.0084	
	0.4	1.3079	0.3243	0.1150	0.0505	0.0251	
	0.5	1.3246	0.4088	0.1787	0.0960	0.0580	
0.0 <	0.2	0.9879	0.1976	0.0395	0.0079	0.0016	
	0.3	0.9879	0.2964	0.0889	0.0267	0.0080	
	0.4	0.9879	0.3952	0.1581	0.0632	0.0253	
	0.5	0.9879	0.4940	0.2470	0.1235	0.0617	
0.1	0.2	0.9923	0.1864	0.0351	0.0066	0.0013	
	0.3	0.9924	0.2827	0.0818	0.0241	0.0072	
	0.4	0.9924	0.3752	0.1431	0.0551	0.0214	
	0.5	0.9926	0.4661	0.2194	0.1035	0.0490	
0.2	0.2	0.9947	0.1748	0.0312	0.0056	0.0010	
	0.3	0.9950	0.2652	0.0726	0.0205	0.0060	
	0.4	0.9953	0.3520	0.1271	0.0469	0.0177	
	0.5	0.9961	0.4376	0.1951	0.0883	0.0405	
0.4	0.2	1.0109	0.1537	0.0248	0.0043	0.0008	
	0.3	1.0124	0.2336	0.0580	0.0156	0.0045	
	0.4	1.0140	0.3107	0.1017	0.0357	0.0135	
	0.5	1.0176	0.3877	0.1569	0.0677	0.0311	
0.6	0.2	1.0662	0.1393	0.0217	0.0040	0.0008	
	0.3	1.0720	0.2131	0.0511	0.0146	0.0048	
	0.4	1.0771	0.2846	0.0901	0.0336	0.0143	
	0.5	1.0847	0.3570	0.1400	0.0642	0.0333	
0.8	0.2	1.2119	0.1372	0.0227	0.0047	0.0011	
	0.3	1.2290	0.2128	0.0543	0.0177	0.0067	
	0.4	1.2419	0.2862	0.0962	0.0410	0.0200	
	0.5	1.2515	0.3584	0.1483	0.0771	0.0456	

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(a) ポイント1 (その3)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.9947	0.1989	0.0398	0.0080	0.0016	
	0.3	0.9947	0.2984	0.0895	0.0269	0.0081	
	0.4	0.9947	0.3979	0.1592	0.0637	0.0255	
	0.5	0.9947	0.4974	0.2487	0.1243	0.0622	
0.1	0.2	0.9964	0.1864	0.0349	0.0066	0.0012	
	0.3	0.9965	0.2827	0.0814	0.0238	0.0071	
	0.4	0.9965	0.3753	0.1425	0.0546	0.0211	
	0.5	0.9966	0.4661	0.2185	0.1026	0.0483	
0.2	0.2	0.9980	0.1738	0.0307	0.0055	0.0010	
	0.3	0.9981	0.2637	0.0715	0.0200	0.0057	
	0.4	0.9984	0.3501	0.1252	0.0457	0.0170	
	0.5	0.9988	0.4350	0.1921	0.0860	0.0391	
0.8	0.2	1.0102	0.1504	0.0237	0.0040	0.0007	
	0.3	1.0112	0.2284	0.0553	0.0144	0.0041	
	0.4	1.0123	0.3036	0.0969	0.0331	0.0122	
	0.5	1.0148	0.3784	0.1493	0.0627	0.0280	
0.6	0.2	1.0548	0.1325	0.0197	0.0035	0.0007	
	0.3	1.0590	0.2021	0.0464	0.0127	0.0040	
	0.4	1.0626	0.2695	0.0816	0.0293	0.0121	
	0.5	1.0677	0.3370	0.1263	0.0557	0.0280	
0.8	0.2	1.1754	0.1245	0.0195	0.0039	0.0009	
	0.3	1.1880	0.1922	0.0464	0.0146	0.0054	
	0.4	1.1970	0.2575	0.0819	0.0336	0.0160	
	0.5	1.2023	0.3206	0.1252	0.0626	0.0361	
0.0 <	0.2	1.0014	0.2003	0.0401	0.0080	0.0016	
	0.3	1.0014	0.3004	0.0901	0.0270	0.0081	
	0.4	1.0014	0.4006	0.1602	0.0641	0.0256	
	0.5	1.0014	0.5007	0.2504	0.1252	0.0626	
0.1	0.2	1.0005	0.1864	0.0348	0.0065	0.0012	
	0.3	1.0006	0.2828	0.0811	0.0236	0.0070	
	0.4	1.0006	0.3753	0.1419	0.0541	0.0208	
	0.5	1.0006	0.4661	0.2175	0.1017	0.0477	
0.2	0.2	1.0012	0.1729	0.0302	0.0054	0.0010	
	0.3	1.0013	0.2622	0.0705	0.0195	0.0055	
	0.4	1.0015	0.3481	0.1233	0.0446	0.0164	
	0.5	1.0016	0.4324	0.1891	0.0838	0.0376	
0.4	0.2	1.0095	0.1471	0.0226	0.0037	0.0006	
	0.3	1.0099	0.2232	0.0526	0.0133	0.0037	
	0.4	1.0106	0.2965	0.0922	0.0306	0.0108	
	0.5	1.0120	0.3690	0.1417	0.0577	0.0250	
0.6	0.2	1.0435	0.1256	0.0178	0.0030	0.0006	
	0.3	1.0460	0.1912	0.0417	0.0109	0.0033	
	0.4	1.0481	0.2544	0.0732	0.0249	0.0098	
	0.5	1.0506	0.3171	0.1127	0.0471	0.0226	
0.8	0.2	1.1389	0.1117	0.0163	0.0031	0.0007	
	0.3	1.1470	0.1715	0.0385	0.0115	0.0041	
	0.4	1.1521	0.2287	0.0675	0.0263	0.0121	
	0.5	1.1530	0.2828	0.1021	0.0482	0.0267	

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(b) ポイント2(その1)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.0	0.2	0.9871	0.1974	0.0395	0.0079	0.0016
		0.3	0.9871	0.2961	0.0888	0.0267	0.0080
		0.4	0.9871	0.3948	0.1579	0.0632	0.0253
		0.5	0.9871	0.4935	0.2468	0.1234	0.0617
0.1	0.1	0.2	0.9884	0.2078	0.0438	0.0092	0.0020
		0.3	0.9884	0.3117	0.0985	0.0312	0.0099
		0.4	0.9659	0.4058	0.1709	0.0722	0.0305
		0.5	0.9900	0.5202	0.2740	0.1447	0.0765
0.2	0.2	0.2	0.9987	0.2199	0.0489	0.0109	0.0025
		0.3	1.0006	0.3305	0.1101	0.0370	0.0125
		0.4	1.0010	0.4408	0.1958	0.0877	0.0395
		0.5	1.0067	0.5539	0.3074	0.1720	0.0969
0.0	0.4	0.2	1.0412	0.2484	0.0611	0.0154	0.0040
		0.3	1.0472	0.3745	0.1381	0.0522	0.0201
		0.4	1.0522	0.5016	0.2466	0.1242	0.0636
		0.5	1.0901	0.6473	0.3966	0.2489	0.1591
0.6	0.6	0.2	1.1216	0.2841	0.0767	0.0216	0.0063
		0.3	1.1309	0.4288	0.1735	0.0732	0.0318
		0.4	1.1451	0.5792	0.3124	0.1757	0.1016
		0.5	1.2766	0.7994	0.5339	0.3722	0.2670
0.8	0.8	0.2	1.2606	0.3295	0.0965	0.0300	0.0097
		0.3	1.2826	0.5006	0.2193	0.1022	0.0494
		0.4	1.3132	0.6872	0.4016	0.2493	0.1604
		0.5	1.7729	1.1469	0.8218	0.6249	0.4934
0.0 <	0.0	0.2	0.9871	0.1974	0.0395	0.0079	0.0016
		0.3	0.9871	0.2961	0.0888	0.0267	0.0080
		0.4	0.9871	0.3948	0.1579	0.0632	0.0253
		0.5	0.9871	0.4936	0.2468	0.1234	0.0617
0.1	0.1	0.2	0.9781	0.2059	0.0435	0.0092	0.0019
		0.3	0.9811	0.3133	0.1016	0.0335	0.0112
		0.4	0.9820	0.4161	0.1779	0.0767	0.0333
		0.5	0.9826	0.5171	0.2728	0.1442	0.0764
0.2	0.2	0.2	0.9837	0.2174	0.0485	0.0109	0.0025
		0.3	0.9852	0.3302	0.1133	0.0398	0.0143
		0.4	0.9866	0.4387	0.1984	0.0912	0.0425
		0.5	0.9905	0.5469	0.3051	0.1719	0.0977
0.4	0.4	0.2	1.0052	0.2423	0.0601	0.0153	0.0039
		0.3	1.0082	0.3685	0.1405	0.0556	0.0227
		0.4	1.0146	0.4918	0.2470	0.1277	0.0676
		0.5	1.0372	0.6225	0.3849	0.2436	0.1570
0.6	0.6	0.2	1.0423	0.2701	0.0741	0.0211	0.0062
		0.3	1.0512	0.4126	0.1738	0.0771	0.0357
		0.4	1.0720	0.5571	0.3088	0.1790	0.1072
		0.5	1.1558	0.7389	0.5012	0.3539	0.2569
0.8	0.8	0.2	1.0989	0.3009	0.0904	0.0286	0.0093
		0.3	1.1223	0.4645	0.2139	0.1053	0.0543
		0.4	1.1709	0.6411	0.3879	0.2489	0.1659
		0.5	1.4502	0.9683	0.7089	0.5480	0.4385

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(b) ポイント2(その2)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.9842	0.1968	0.0394	0.0079	0.0016	
	0.3	0.9842	0.2953	0.0886	0.0266	0.0080	
	0.4	0.9842	0.3937	0.1575	0.0630	0.0252	
	0.5	0.9842	0.4921	0.2461	0.1230	0.0615	
0.1	0.2	0.9850	0.2082	0.0441	0.0094	0.0020	
	0.3	0.9842	0.3156	0.1027	0.0340	0.0114	
	0.4	0.9877	0.4202	0.1803	0.0780	0.0340	
	0.5	0.9885	0.5223	0.2765	0.1467	0.0780	
0.2	0.2	0.9890	0.2202	0.0495	0.0112	0.0026	
	0.3	0.9890	0.3340	0.1153	0.0408	0.0148	
	0.4	0.9908	0.4440	0.2021	0.0934	0.0438	
	0.5	0.9934	0.5527	0.3105	0.1760	0.1006	
0.4	0.2	1.0022	0.2452	0.0616	0.0158	0.0041	
	0.3	1.0039	0.3725	0.1436	0.0573	0.0236	
	0.4	1.0081	0.4961	0.2522	0.1316	0.0702	
	0.5	1.0239	0.6245	0.3909	0.2498	0.1621	
0.6	0.2	1.0271	0.2724	0.0759	0.0219	0.0064	
	0.3	1.0323	0.4149	0.1775	0.0797	0.0371	
	0.4	1.0471	0.5575	0.3141	0.1841	0.1111	
	0.5	1.1119	0.7290	0.5032	0.3597	0.2634	
0.8	0.2	1.0671	0.3022	0.0926	0.0296	0.0098	
	0.3	1.0784	0.4623	0.2173	0.1083	0.0564	
	0.4	1.1167	0.6332	0.3910	0.2542	0.1710	
	0.5	1.3246	0.9161	0.6860	0.5387	0.4361	
0.0 <	0.2	0.9879	0.1976	0.0395	0.0079	0.0016	
	0.3	0.9879	0.2964	0.0889	0.0267	0.0080	
	0.4	0.9879	0.3952	0.1581	0.0632	0.0253	
	0.5	0.9879	0.4940	0.2470	0.1235	0.0617	
0.1	0.2	0.9911	0.2102	0.0447	0.0095	0.0020	
	0.3	0.9905	0.3187	0.1041	0.0345	0.0117	
	0.4	0.9917	0.4234	0.1823	0.0791	0.0346	
	0.5	0.9926	0.5264	0.2796	0.1488	0.0793	
0.2	0.2	0.9934	0.2227	0.0504	0.0115	0.0026	
	0.3	0.9934	0.3378	0.1174	0.0417	0.0152	
	0.4	0.9942	0.4487	0.2056	0.0956	0.0451	
	0.5	0.9961	0.5582	0.3156	0.1799	0.1034	
0.4	0.2	1.0017	0.2484	0.0630	0.0163	0.0043	
	0.3	1.0028	0.3772	0.1470	0.0591	0.0245	
	0.4	1.0057	0.5018	0.2578	0.1357	0.0728	
	0.5	1.0176	0.6295	0.3985	0.2569	0.1679	
0.6	0.2	1.0195	0.2759	0.0780	0.0227	0.0067	
	0.3	1.0229	0.4197	0.1821	0.0825	0.0388	
	0.4	1.0340	0.5622	0.3213	0.1902	0.1157	
	0.5	1.0847	0.7271	0.5098	0.3685	0.2721	
0.8	0.2	1.0478	0.3052	0.0951	0.0308	0.0102	
	0.3	1.0554	0.4657	0.2227	0.1123	0.0589	
	0.4	1.0847	0.6333	0.3982	0.2619	0.1776	
	0.5	1.2515	0.8922	0.6815	0.5426	0.4438	

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(b) ポイント2 (その3)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.9947	0.1989	0.0398	0.0080	0.0016	
	0.3	0.9947	0.2984	0.0895	0.0269	0.0081	
	0.4	0.9947	0.3979	0.1592	0.0637	0.0255	
	0.5	0.9947	0.4974	0.2487	0.1243	0.0622	
0.1	0.2	0.9949	0.2118	0.0452	0.0096	0.0021	
	0.3	0.9951	0.3213	0.1053	0.0350	0.0119	
	0.4	0.9960	0.4268	0.1844	0.0803	0.0352	
	0.5	0.9966	0.5304	0.2828	0.1510	0.0807	
0.2	0.2	0.9969	0.2251	0.0513	0.0118	0.0027	
	0.3	0.9970	0.3415	0.1195	0.0427	0.0156	
	0.4	0.9976	0.4535	0.2091	0.0978	0.0463	
	0.5	0.9988	0.5638	0.3209	0.1840	0.1063	
0.8	0.2	1.0026	0.2520	0.0646	0.0168	0.0044	
	0.3	1.0033	0.3825	0.1507	0.0611	0.0255	
	0.4	1.0054	0.5085	0.2641	0.1401	0.0757	
	0.5	1.0148	0.6365	0.4074	0.2649	0.1744	
0.6	0.2	1.0160	0.2803	0.0803	0.0236	0.0070	
	0.3	1.0184	0.4260	0.1874	0.0858	0.0406	
	0.4	1.0270	0.5695	0.3300	0.1974	0.1209	
	0.5	1.0677	0.7307	0.5200	0.3800	0.2829	
0.8	0.2	1.0369	0.3100	0.0981	0.0321	0.0107	
	0.3	1.0424	0.4722	0.2295	0.1170	0.0618	
	0.4	1.0653	0.6388	0.4085	0.2717	0.1856	
	0.5	1.2023	0.8817	0.6863	0.5535	0.4569	
0.0 <	0.2	1.0014	0.2003	0.0401	0.0080	0.0016	
	0.3	1.0014	0.3004	0.0901	0.0270	0.0081	
	0.4	1.0014	0.4006	0.1602	0.0641	0.0256	
	0.5	1.0014	0.5007	0.2504	0.1252	0.0626	
0.1	0.2	0.9986	0.2134	0.0457	0.0098	0.0021	
	0.3	0.9996	0.3240	0.1065	0.0356	0.0121	
	0.4	1.0002	0.4302	0.1865	0.0814	0.0358	
	0.5	1.0006	0.5345	0.2859	0.1532	0.0821	
0.2	0.2	1.0003	0.2275	0.0521	0.0120	0.0028	
	0.3	1.0006	0.3452	0.1215	0.0437	0.0161	
	0.4	1.0011	0.4582	0.2127	0.1000	0.0476	
	0.5	1.0016	0.5694	0.3261	0.1881	0.1092	
0.4	0.2	1.0035	0.2556	0.0662	0.0174	0.0046	
	0.3	1.0039	0.3878	0.1543	0.0631	0.0265	
	0.4	1.0052	0.5152	0.2703	0.1446	0.0787	
	0.5	1.0120	0.6435	0.4163	0.2730	0.1809	
0.6	0.2	1.0124	0.2847	0.0826	0.0245	0.0074	
	0.3	1.0139	0.4324	0.1927	0.0890	0.0424	
	0.4	1.0200	0.5768	0.3388	0.2045	0.1261	
	0.5	1.0506	0.7343	0.5302	0.3914	0.2936	
0.8	0.2	1.0261	0.3147	0.1012	0.0334	0.0112	
	0.3	1.0294	0.4786	0.2363	0.1216	0.0647	
	0.4	1.0460	0.6443	0.4187	0.2814	0.1937	
	0.5	1.1531	0.8712	0.6911	0.5644	0.4700	

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(c) ポイント3 (その1)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.2	0.4277	0.0855	0.0171	0.0034	0.0007
		0.3	0.4277	0.1283	0.0385	0.0115	0.0035
		0.4	0.4277	0.1711	0.0684	0.0274	0.0109
		0.5	0.4277	0.2139	0.1069	0.0535	0.0267
0.1	0.3	0.2	0.4399	0.0879	0.0176	0.0035	0.0007
		0.3	0.4401	0.1333	0.0409	0.0127	0.0040
		0.4	0.4404	0.1770	0.0717	0.0292	0.0120
		0.5	0.4412	0.2203	0.1101	0.0550	0.0275
0.2	0.2	0.2	0.4389	0.0876	0.0175	0.0035	0.0007
		0.3	0.4392	0.1329	0.0408	0.0127	0.0040
		0.4	0.4396	0.1765	0.0714	0.0291	0.0120
		0.5	0.4406	0.2197	0.1097	0.0549	0.0275
	0.4	0.2	0.4441	0.0884	0.0177	0.0036	0.0007
		0.3	0.4452	0.1344	0.0413	0.0129	0.0041
		0.4	0.4463	0.1787	0.0725	0.0297	0.0123
		0.5	0.4489	0.2233	0.1118	0.0563	0.0285
0.6	0.6	0.2	0.4545	0.0902	0.0181	0.0037	0.0008
		0.3	0.4574	0.1376	0.0425	0.0135	0.0044
		0.4	0.4597	0.1835	0.0748	0.0311	0.0132
		0.5	0.4654	0.2310	0.1164	0.0595	0.0308
0.8	0.8	0.2	0.4694	0.0927	0.0188	0.0039	0.0008
		0.3	0.4754	0.1424	0.0444	0.0144	0.0049
		0.4	0.4792	0.1905	0.0785	0.0334	0.0147
		0.5	0.4906	0.2431	0.1242	0.0653	0.0353

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(c) ポイント3 (その2)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.0	0.2	0.6180	0.1236	0.0247	0.0049	0.0010
		0.3	0.6180	0.1854	0.0556	0.0167	0.0050
		0.4	0.6180	0.2472	0.0989	0.0396	0.0158
		0.5	0.6180	0.3090	0.1545	0.0773	0.0386
0.1	0.1	0.2	0.6293	0.1258	0.0252	0.0050	0.0010
		0.3	0.6293	0.1909	0.0587	0.0183	0.0058
		0.4	0.6294	0.2534	0.1027	0.0419	0.0172
		0.5	0.6300	0.3150	0.1576	0.0788	0.0395
0.2	0.2	0.2	0.6300	0.1260	0.0252	0.0051	0.0010
		0.3	0.6301	0.1911	0.0588	0.0184	0.0059
		0.4	0.6305	0.2538	0.1030	0.0422	0.0174
		0.5	0.6315	0.3157	0.1582	0.0794	0.0400
0.4	0.4	0.2	0.6366	0.1273	0.0256	0.0052	0.0011
		0.3	0.6376	0.1933	0.0599	0.0190	0.0061
		0.4	0.6391	0.2572	0.1050	0.0435	0.0183
		0.5	0.6432	0.3215	0.1621	0.0824	0.0422
0.6	0.6	0.2	0.6529	0.1304	0.0265	0.0055	0.0012
		0.3	0.6562	0.1987	0.0622	0.0201	0.0067
		0.4	0.6601	0.2653	0.1095	0.0464	0.0201
		0.5	0.6704	0.3351	0.1710	0.0890	0.0473
0.8	0.8	0.2	0.6757	0.1345	0.0278	0.0059	0.0013
		0.3	0.6831	0.2062	0.0655	0.0218	0.0077
		0.4	0.6911	0.2770	0.1162	0.0508	0.0231
		0.5	0.7129	0.3563	0.1856	0.1004	0.0563
0.0 <	0.0	0.2	0.7582	0.1516	0.0303	0.0061	0.0012
		0.3	0.7582	0.2275	0.0682	0.0205	0.0061
		0.4	0.7582	0.3033	0.1213	0.0485	0.0194
		0.5	0.7582	0.3791	0.1896	0.0948	0.0474
0.1	0.1	0.2	0.7664	0.1533	0.0307	0.0061	0.0012
		0.3	0.7667	0.2325	0.0715	0.0223	0.0071
		0.4	0.7665	0.3086	0.1251	0.0511	0.0210
		0.5	0.7669	0.3834	0.1918	0.0960	0.0481
0.2	0.2	0.2	0.7664	0.1533	0.0307	0.0062	0.0012
		0.3	0.7666	0.2325	0.0716	0.0224	0.0072
		0.4	0.7668	0.3087	0.1254	0.0514	0.0212
		0.5	0.7677	0.3838	0.1924	0.0967	0.0487
0.4	0.4	0.2	0.7735	0.1546	0.0312	0.0064	0.0013
		0.3	0.7743	0.2348	0.0728	0.0231	0.0075
		0.4	0.7757	0.3122	0.1277	0.0531	0.0224
		0.5	0.7798	0.3898	0.1968	0.1004	0.0517
0.6	0.6	0.2	0.7894	0.1576	0.0322	0.0067	0.0014
		0.3	0.7923	0.2400	0.0753	0.0245	0.0083
		0.4	0.7963	0.3201	0.1326	0.0565	0.0247
		0.5	0.8076	0.4037	0.2067	0.1082	0.0580
0.8	0.8	0.2	0.8147	0.1622	0.0337	0.0073	0.0016
		0.3	0.8214	0.2479	0.0792	0.0266	0.0094
		0.4	0.8300	0.3327	0.1404	0.0619	0.0286
		0.5	0.8547	0.4272	0.2237	0.1220	0.0693

表 D.5 平板の円内部欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

(c) ポイント3 (その3)

a/c	a/d_1	d_1/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.0 <	0.2	0.8780	0.1756	0.0351	0.0070	0.0014	
	0.3	0.8780	0.2634	0.0790	0.0237	0.0071	
	0.4	0.8780	0.3512	0.1405	0.0562	0.0225	
	0.5	0.8780	0.4390	0.2195	0.1098	0.0549	
0.1	0.2	0.8835	0.1767	0.0354	0.0071	0.0014	
	0.3	0.8837	0.2681	0.0824	0.0257	0.0082	
	0.4	0.8837	0.3558	0.1442	0.0589	0.0242	
	0.5	0.8840	0.4420	0.2211	0.1107	0.0555	
0.2	0.2	0.8837	0.1767	0.0354	0.0071	0.0014	
	0.3	0.8839	0.2681	0.0826	0.0259	0.0083	
	0.4	0.8841	0.3559	0.1446	0.0593	0.0245	
	0.5	0.8846	0.4423	0.2218	0.1115	0.0562	
0.8	0.2	0.8893	0.1778	0.0359	0.0073	0.0015	
	0.3	0.8899	0.2699	0.0838	0.0266	0.0087	
	0.4	0.8910	0.3586	0.1468	0.0611	0.0258	
	0.5	0.8948	0.4474	0.2261	0.1154	0.0595	
0.6	0.2	0.9046	0.1807	0.0370	0.0077	0.0017	
	0.3	0.9069	0.2747	0.0864	0.0282	0.0095	
	0.4	0.9105	0.3662	0.1519	0.0649	0.0285	
	0.5	0.9216	0.4608	0.2362	0.1240	0.0666	
0.8	0.2	0.9296	0.1851	0.0385	0.0083	0.0019	
	0.3	0.9353	0.2824	0.0904	0.0305	0.0109	
	0.4	0.9434	0.3783	0.1599	0.0708	0.0328	
	0.5	0.9678	0.4839	0.2538	0.1388	0.0790	
0.0 <	0.2	0.9978	0.1996	0.0399	0.0080	0.0016	
	0.3	0.9978	0.2993	0.0898	0.0269	0.0081	
	0.4	0.9978	0.3991	0.1596	0.0639	0.0255	
	0.5	0.9978	0.4989	0.2495	0.1247	0.0624	
0.1	0.2	1.0005	0.2001	0.0400	0.0080	0.0016	
	0.3	1.0008	0.3036	0.0933	0.0291	0.0092	
	0.4	1.0010	0.4030	0.1634	0.0667	0.0274	
	0.5	1.0011	0.5005	0.2504	0.1254	0.0628	
0.2	0.2	1.0010	0.2002	0.0402	0.0081	0.0016	
	0.3	1.0012	0.3037	0.0936	0.0293	0.0094	
	0.4	1.0013	0.4031	0.1638	0.0672	0.0278	
	0.5	1.0016	0.5008	0.2512	0.1263	0.0637	
1.0	0.2	1.0051	0.2010	0.0406	0.0083	0.0017	
	0.3	1.0055	0.3050	0.0947	0.0302	0.0099	
	0.4	1.0064	0.4051	0.1659	0.0691	0.0293	
	0.5	1.0097	0.5049	0.2553	0.1305	0.0674	
0.6	0.2	1.0198	0.2037	0.0417	0.0088	0.0019	
	0.3	1.0216	0.3095	0.0974	0.0318	0.0108	
	0.4	1.0248	0.4122	0.1712	0.0732	0.0323	
	0.5	1.0355	0.5178	0.2658	0.1397	0.0752	
0.8	0.2	1.0446	0.2080	0.0434	0.0094	0.0021	
	0.3	1.0493	0.3169	0.1016	0.0344	0.0123	
	0.4	1.0567	0.4239	0.1794	0.0796	0.0370	
	0.5	1.0809	0.5405	0.2839	0.1555	0.0888	

表 D.6 円筒の軸方向貫通欠陥に対する応力拡大係数の補正係数

$c / \sqrt{R_m t}$	M_m	M_b
0.2	1.039	0.992
0.4	1.119	0.980
0.6	1.231	0.965
0.8	1.369	0.948
1.0	1.524	0.930
1.2	1.692	0.912
1.4	1.868	0.893
1.6	2.049	0.875
1.8	2.231	0.858
2.0	2.413	0.841
2.2	2.593	0.826
2.4	2.772	0.811
2.6	2.947	0.797
2.8	3.120	0.784
3.0	3.291	0.771
3.2	3.461	0.759
3.4	3.629	0.747
3.6	3.798	0.736
3.8	3.966	0.725
4.0	4.136	0.713
4.2	4.307	0.702
4.4	4.480	0.691
4.6	4.653	0.680
4.8	4.825	0.670
5.0	4.995	0.661

2026/1/23 Draft

本規格の著作権は日本機械学会にあります。

表 D.7 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その1)

a/c	a/t	t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
1	0.0	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657
1	0.1	0.640	0.648	0.653	0.655	0.656	0.656	0.657
1	0.2	0.633	0.644	0.653	0.656	0.658	0.659	0.660
1	0.4	0.637	0.650	0.662	0.668	0.671	0.673	0.674
1	0.6	0.666	0.671	0.677	0.681	0.684	0.686	0.687
1	0.8	0.752	0.730	0.709	0.701	0.698	0.696	0.697
1/2	0.0	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
1/2	0.1	0.843	0.862	0.875	0.879	0.882	0.883	0.883
1/2	0.2	0.831	0.858	0.880	0.888	0.893	0.895	0.897
1/2	0.4	0.863	0.895	0.924	0.939	0.948	0.954	0.957
1/2	0.6	0.964	0.984	0.999	1.009	1.017	1.023	1.027
1/2	0.8	1.189	1.162	1.108	1.083	1.070	1.065	1.070
1/4	0.0	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022
1/4	0.1	0.966	0.994	1.013	1.020	1.024	1.025	1.026
1/4	0.2	0.965	1.005	1.036	1.050	1.057	1.060	1.062
1/4	0.4	1.066	1.126	1.171	1.194	1.208	1.217	1.222
1/4	0.6	1.269	1.353	1.393	1.406	1.414	1.423	1.430
1/4	0.8	1.633	1.727	1.695	1.643	1.595	1.570	1.573
G_0	1/8	0.0	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088
G_0	1/8	0.1	1.029	1.060	1.081	1.089	1.093	1.095
G_0	1/8	0.2	1.056	1.105	1.139	1.153	1.161	1.165
G_0	1/8	0.4	1.225	1.338	1.407	1.436	1.450	1.460
G_0	1/8	0.6	1.466	1.702	1.850	1.887	1.900	1.902
G_0	1/8	0.8	1.861	2.220	2.462	2.473	2.417	2.353
G_0	1/16	0.0	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105
G_0	1/16	0.1	1.062	1.094	1.114	1.122	1.125	1.128
G_0	1/16	0.2	1.116	1.175	1.211	1.225	1.232	1.237
G_0	1/16	0.4	1.293	1.479	1.601	1.638	1.657	1.669
G_0	1/16	0.6	1.527	1.908	2.260	2.375	2.421	2.433
G_0	1/16	0.8	1.912	2.455	3.163	3.436	3.526	3.501
G_1	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
G_1	0	0.1	1.103	1.141	1.167	1.176	1.181	1.183
G_1	0	0.2	1.155	1.243	1.312	1.338	1.351	1.358
G_1	0	0.4	1.322	1.567	1.835	1.959	2.029	2.069
G_1	0	0.6	1.549	1.999	2.733	3.222	3.565	3.784
G_1	0	0.8	1.933	2.529	3.943	5.535	7.324	9.032
G_1	0	0.0	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664
G_1	0	0.1	0.638	0.651	0.659	0.662	0.664	0.665
G_1	0	0.2	0.648	0.666	0.679	0.685	0.688	0.690
G_1	0	0.4	0.644	0.665	0.680	0.688	0.693	0.699
G_1	0	0.6	0.723	0.748	0.758	0.762	0.764	0.767
G_1	0	0.8	0.893	0.914	0.892	0.870	0.851	0.841
G_1	1/8	0.0	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664
G_1	1/8	0.1	0.638	0.651	0.659	0.662	0.664	0.665
G_1	1/8	0.2	0.648	0.666	0.679	0.685	0.688	0.690
G_1	1/8	0.4	0.711	0.749	0.773	0.784	0.789	0.793
G_1	1/8	0.6	0.807	0.884	0.930	0.940	0.944	0.946
G_1	1/8	0.8	0.995	1.106	1.173	1.169	1.144	1.120
G_1	1/16	0.0	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673
G_1	1/16	0.1	0.653	0.666	0.674	0.677	0.679	0.680
G_1	1/16	0.2	0.674	0.696	0.710	0.716	0.718	0.720
G_1	1/16	0.4	0.743	0.809	0.852	0.865	0.872	0.876
G_1	1/16	0.6	0.839	0.970	1.088	1.125	1.139	1.142
G_1	1/16	0.8	1.023	1.205	1.431	1.515	1.537	1.523
0	0.0	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683
0	0.1	0.674	0.689	0.699	0.702	0.704	0.705	0.706
0	0.2	0.695	0.730	0.757	0.767	0.772	0.775	0.776
0	0.4	0.761	0.854	0.956	1.004	1.031	1.046	1.054
0	0.6	0.854	1.018	1.287	1.467	1.593	1.673	1.717
0	0.8	1.036	1.245	1.739	2.297	2.925	3.523	3.957

表 D.7 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
1	0.0	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	
1	0.1	0.379	0.381	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	
1	0.2	0.378	0.380	0.382	0.382	0.383	0.383	0.383	0.383	
1	0.4	0.379	0.381	0.383	0.384	0.384	0.384	0.385	0.385	
1	0.6	0.385	0.385	0.386	0.386	0.386	0.386	0.387	0.389	
1	0.8	0.417	0.411	0.405	0.403	0.402	0.401	0.401	0.400	
1/2	0.0	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	
1/2	0.1	0.441	0.444	0.447	0.448	0.448	0.448	0.448	0.449	
1/2	0.2	0.438	0.444	0.448	0.449	0.450	0.450	0.451	0.451	
1/2	0.4	0.444	0.449	0.455	0.457	0.459	0.460	0.460	0.461	
1/2	0.6	0.466	0.467	0.468	0.469	0.470	0.471	0.472	0.476	
1/2	0.8	0.534	0.524	0.510	0.503	0.500	0.498	0.497	0.498	
1/4	0.0	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	
1/4	0.1	0.476	0.482	0.486	0.488	0.488	0.489	0.489	0.489	
1/4	0.2	0.476	0.484	0.490	0.493	0.494	0.495	0.495	0.496	
1/4	0.4	0.494	0.505	0.513	0.517	0.520	0.521	0.522	0.525	
1/4	0.6	0.538	0.549	0.553	0.554	0.555	0.557	0.558	0.563	
1/4	0.8	0.643	0.650	0.635	0.621	0.611	0.605	0.603	0.604	
G_2	1/8	0.0	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	
	1/8	0.1	0.496	0.503	0.507	0.509	0.510	0.510	0.510	
	1/8	0.2	0.500	0.510	0.517	0.521	0.522	0.523	0.524	
	1/8	0.4	0.534	0.554	0.566	0.572	0.574	0.576	0.578	
	1/8	0.6	0.589	0.626	0.647	0.652	0.653	0.653	0.663	
	1/8	0.8	0.707	0.759	0.787	0.781	0.767	0.753	0.743	
	1/16	0.0	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	
	1/16	0.1	0.505	0.512	0.517	0.519	0.520	0.520	0.520	
	1/16	0.2	0.516	0.528	0.536	0.539	0.541	0.542	0.543	
	1/16	0.4	0.555	0.589	0.611	0.618	0.622	0.624	0.629	
	1/16	0.6	0.610	0.677	0.736	0.754	0.760	0.761	0.770	
	1/16	0.8	0.727	0.818	0.927	0.965	0.973	0.963	0.947	
	0	0.0	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	
	0	0.1	0.519	0.527	0.533	0.535	0.536	0.537	0.537	
	0	0.2	0.532	0.551	0.566	0.572	0.575	0.576	0.578	
	0	0.4	0.569	0.621	0.678	0.704	0.719	0.727	0.732	
	0	0.6	0.623	0.712	0.857	0.955	1.023	1.066	1.090	
	0	0.8	0.738	0.847	1.105	1.397	1.725	2.038	2.265	
G_3	a/c	a/t	t/R_i							
	1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0		
	1	0.0	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338
	1	0.1	0.333	0.334	0.334	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335
	1	0.2	0.332	0.334	0.334	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335
	1	0.4	0.332	0.333	0.335	0.335	0.335	0.335	0.336	0.336
	1	0.6	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	0.339
	1	0.8	0.360	0.356	0.352	0.350	0.349	0.349	0.348	0.348
	1/2	0.0	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386
	1/2	0.1	0.378	0.380	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.383
	1/2	0.2	0.376	0.380	0.382	0.383	0.383	0.384	0.384	0.384
	1/2	0.4	0.380	0.383	0.386	0.387	0.388	0.389	0.389	0.390
	1/2	0.6	0.393	0.394	0.394	0.394	0.395	0.395	0.396	0.399
	1/2	0.8	0.442	0.435	0.425	0.420	0.418	0.417	0.416	0.416
	1/4	0.0	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415
	1/4	0.1	0.403	0.407	0.410	0.411	0.411	0.411	0.411	0.412
	1/4	0.2	0.403	0.408	0.412	0.414	0.415	0.415	0.415	0.416
	1/4	0.4	0.414	0.421	0.425	0.428	0.430	0.431	0.431	0.433
	1/4	0.6	0.442	0.448	0.450	0.450	0.451	0.452	0.452	0.457
	1/4	0.8	0.517	0.518	0.507	0.498	0.491	0.487	0.486	0.487
	1/8	0.0	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431
	1/8	0.1	0.418	0.422	0.425	0.426	0.427	0.427	0.427	0.427
	1/8	0.2	0.420	0.427	0.432	0.434	0.435	0.435	0.436	0.436
	1/8	0.4	0.441	0.453	0.461	0.464	0.466	0.467	0.468	0.470
	1/8	0.6	0.477	0.499	0.511	0.513	0.514	0.514	0.514	0.521
	1/8	0.8	0.562	0.592	0.605	0.600	0.590	0.581	0.575	0.573
	1/16	0.0	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435
	1/16	0.1	0.425	0.430	0.433	0.434	0.434	0.435	0.435	0.435
	1/16	0.2	0.432	0.440	0.445	0.447	0.448	0.448	0.449	0.449
	1/16	0.4	0.457	0.478	0.492	0.496	0.498	0.500	0.500	0.503
	1/16	0.6	0.494	0.535	0.569	0.580	0.583	0.583	0.584	0.591
	1/16	0.8	0.578	0.632	0.695	0.716	0.719	0.712	0.701	0.689
	0	0.0	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441
	0	0.1	0.436	0.441	0.445	0.446	0.447	0.447	0.447	0.447
	0	0.2	0.445	0.457	0.467	0.471	0.473	0.474	0.474	0.475
	0	0.4	0.470	0.503	0.540	0.558	0.567	0.573	0.576	0.584
	0	0.6	0.506	0.563	0.656	0.719	0.762	0.790	0.806	0.822
	0	0.8	0.587	0.655	0.817	0.999	1.204	1.400	1.542	1.734

表 D.7 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 1)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
G_0	1	0.0	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	
	1	0.1	0.717	0.732	0.742	0.745	0.746	0.747	0.748	
	1	0.2	0.699	0.724	0.741	0.747	0.750	0.752	0.753	
	1	0.4	0.701	0.736	0.764	0.775	0.781	0.785	0.789	
	1	0.6	0.737	0.779	0.813	0.828	0.838	0.843	0.846	
	1	0.8	0.802	0.846	0.878	0.895	0.905	0.912	0.927	
	1/2	0.0	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	
	1/2	0.1	0.681	0.696	0.705	0.708	0.710	0.711	0.712	
	1/2	0.2	0.675	0.698	0.714	0.719	0.722	0.724	0.725	
	1/2	0.4	0.719	0.754	0.778	0.789	0.795	0.799	0.801	
G_1	1/2	0.6	0.806	0.865	0.898	0.912	0.921	0.927	0.931	
	1/2	0.8	0.922	1.022	1.062	1.073	1.080	1.087	1.093	
	1/4	0.0	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	
	1/4	0.1	0.567	0.576	0.581	0.583	0.584	0.584	0.585	
	1/4	0.2	0.581	0.593	0.601	0.604	0.605	0.606	0.607	
	1/4	0.4	0.644	0.681	0.697	0.702	0.704	0.706	0.708	
	1/4	0.6	0.724	0.820	0.870	0.879	0.880	0.881	0.884	
	1/4	0.8	0.808	1.006	1.124	1.154	1.146	1.139	1.138	
	1/8	0.0	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	
	1/8	0.1	0.442	0.445	0.446	0.447	0.447	0.447	0.445	
G_2	1/8	0.2	0.460	0.467	0.468	0.468	0.468	0.468	0.469	
	1/8	0.4	0.500	0.537	0.555	0.558	0.557	0.555	0.559	
	1/8	0.6	0.538	0.634	0.705	0.723	0.730	0.726	0.725	
	1/8	0.8	0.561	0.735	0.934	0.992	1.020	1.022	1.006	
	1/16	0.0	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	
	1/16	0.1	0.339	0.338	0.338	0.337	0.337	0.337	0.336	
	1/16	0.2	0.350	0.354	0.354	0.354	0.353	0.352	0.353	
	1/16	0.4	0.368	0.391	0.409	0.411	0.412	0.412	0.410	
	1/16	0.6	0.384	0.429	0.496	0.513	0.522	0.525	0.515	
	1/16	0.8	0.389	0.457	0.618	0.687	0.721	0.742	0.729	
G_3	a/c	a/t	t/R_i							
	1	0.0	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129
	1	0.1	0.118	0.122	0.124	0.125	0.126	0.126	0.126	0.126
	1	0.2	0.114	0.120	0.124	0.126	0.127	0.127	0.128	0.128
	1	0.4	0.117	0.126	0.132	0.135	0.137	0.138	0.138	0.139
	1	0.6	0.131	0.140	0.147	0.151	0.153	0.155	0.156	0.158
	1	0.8	0.154	0.160	0.165	0.168	0.170	0.172	0.173	0.176
	1/2	0.0	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119
	1/2	0.1	0.105	0.109	0.111	0.112	0.113	0.113	0.113	0.113
	1/2	0.2	0.105	0.111	0.115	0.116	0.117	0.117	0.118	0.118
G_4	1/2	0.4	0.123	0.131	0.137	0.139	0.141	0.142	0.143	0.144
	1/2	0.6	0.154	0.168	0.174	0.177	0.179	0.181	0.182	0.188
	1/2	0.8	0.193	0.217	0.223	0.223	0.223	0.225	0.226	0.231
	1/4	0.0	7.37E-02							
	1/4	0.1	6.96E-02	7.13E-02	7.23E-02	7.27E-02	7.29E-02	7.29E-02	7.30E-02	7.31E-02
	1/4	0.2	7.63E-02	7.84E-02	7.96E-02	8.01E-02	8.04E-02	8.06E-02	8.07E-02	8.11E-02
	1/4	0.4	0.100	0.109	0.112	0.113	0.113	0.113	0.114	0.116
	1/4	0.6	0.126	0.154	0.166	0.168	0.167	0.167	0.168	0.173
	1/4	0.8	0.149	0.208	0.241	0.248	0.243	0.240	0.239	0.244
	1/8	0.0	3.93E-02							
G_5	1/8	0.1	3.72E-02	3.74E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.70E-02
	1/8	0.2	4.45E-02	4.54E-02	4.51E-02	4.48E-02	4.46E-02	4.46E-02	4.46E-02	4.48E-02
	1/8	0.4	5.82E-02	6.91E-02	7.36E-02	7.42E-02	7.33E-02	7.27E-02	7.26E-02	7.39E-02
	1/8	0.6	6.74E-02	9.68E-02	0.119	0.124	0.126	0.124	0.123	0.122
	1/8	0.8	6.85E-02	0.121	0.183	0.201	0.209	0.209	0.202	0.202
	1/16	0.0	2.02E-02							
	1/16	0.1	1.83E-02	1.82E-02	1.79E-02	1.77E-02	1.77E-02	1.76E-02	1.76E-02	1.77E-02
	1/16	0.2	2.17E-02	2.30E-02	2.31E-02	2.29E-02	2.26E-02	2.25E-02	2.24E-02	2.26E-02
	1/16	0.4	2.49E-02	3.21E-02	3.83E-02	3.92E-02	3.96E-02	3.95E-02	3.88E-02	3.88E-02
	1/16	0.6	2.67E-02	3.98E-02	6.18E-02	6.76E-02	7.06E-02	7.20E-02	7.20E-02	6.94E-02
	1/16	0.8	2.72E-02	4.48E-02	9.57E-02	0.118	0.129	0.135	0.138	0.131

表 D.7 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
G_2	1	0.0	4.78E-02							
	1	0.1	4.35E-02	4.51E-02	4.62E-02	4.66E-02	4.68E-02	4.68E-02	4.69E-02	
	1	0.2	4.19E-02	4.45E-02	4.64E-02	4.71E-02	4.75E-02	4.77E-02	4.78E-02	
	1	0.4	4.41E-02	4.75E-02	5.03E-02	5.16E-02	5.24E-02	5.28E-02	5.30E-02	
	1	0.6	5.13E-02	5.43E-02	5.71E-02	5.87E-02	5.97E-02	6.04E-02	6.08E-02	
	1	0.8	6.23E-02	6.36E-02	6.43E-02	6.52E-02	6.60E-02	6.66E-02	6.71E-02	
	1/2	0.0	4.06E-02							
	1/2	0.1	3.71E-02	3.87E-02	3.97E-02	4.01E-02	4.03E-02	4.04E-02	4.04E-02	
	1/2	0.2	3.77E-02	4.00E-02	4.16E-02	4.22E-02	4.26E-02	4.28E-02	4.29E-02	
	1/2	0.4	4.73E-02	5.04E-02	5.26E-02	5.38E-02	5.45E-02	5.50E-02	5.52E-02	
	1/2	0.6	6.27E-02	6.83E-02	7.05E-02	7.16E-02	7.24E-02	7.32E-02	7.37E-02	
	1/2	0.8	8.17E-02	9.13E-02	9.22E-02	9.14E-02	9.10E-02	9.13E-02	9.19E-02	
G_3	1/4	0.0	2.15E-02							
	1/4	0.1	2.07E-02	2.13E-02	2.16E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.19E-02	2.19E-02	
	1/4	0.2	2.45E-02	2.52E-02	2.54E-02	2.56E-02	2.57E-02	2.58E-02	2.60E-02	
	1/4	0.4	3.69E-02	4.08E-02	4.17E-02	4.17E-02	4.18E-02	4.19E-02	4.21E-02	
	1/4	0.6	4.89E-02	6.19E-02	6.75E-02	6.77E-02	6.72E-02	6.70E-02	6.73E-02	
	1/4	0.8	5.92E-02	8.71E-02	1.02E-01	1.04E-01	1.01E-01	9.91E-02	9.84E-02	
	1/8	0.0	8.08E-03							
	1/8	0.1	8.93E-03	8.85E-03	8.73E-03	8.69E-03	8.67E-03	8.67E-03	8.63E-03	
	1/8	0.2	1.28E-02	1.30E-02	1.27E-02	1.25E-02	1.24E-02	1.23E-02	1.25E-02	
	1/8	0.4	1.85E-02	2.39E-02	2.61E-02	2.62E-02	2.57E-02	2.54E-02	2.53E-02	
	1/8	0.6	2.11E-02	3.56E-02	4.66E-02	4.91E-02	4.98E-02	4.88E-02	4.80E-02	
	1/8	0.8	2.11E-02	4.61E-02	7.59E-02	8.45E-02	8.82E-02	8.78E-02	8.46E-02	
G_3	1/16	0.0	2.77E-03							
	1/16	0.1	3.54E-03	3.47E-03	3.30E-03	3.22E-03	3.18E-03	3.17E-03	3.16E-03	
	1/16	0.2	5.00E-03	5.71E-03	5.81E-03	5.71E-03	5.55E-03	5.46E-03	5.42E-03	
	1/16	0.4	5.63E-03	9.29E-03	1.25E-02	1.30E-02	1.32E-02	1.32E-02	1.28E-02	
	1/16	0.6	5.51E-03	1.14E-02	2.24E-02	2.54E-02	2.70E-02	2.77E-02	2.77E-02	
	1/16	0.8	5.21E-03	1.24E-02	3.69E-02	4.75E-02	5.31E-02	5.64E-02	5.75E-02	
	a/c	a/t	t/R_i							
			1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
	1	0.0	2.47E-02							
	1	0.1	2.25E-02	2.34E-02	2.40E-02	2.42E-02	2.43E-02	2.43E-02	2.43E-02	2.44E-02
	1	0.2	2.17E-02	2.31E-02	2.41E-02	2.45E-02	2.47E-02	2.48E-02	2.49E-02	2.50E-02
	1	0.4	2.32E-02	2.49E-02	2.64E-02	2.72E-02	2.76E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.82E-02
	1	0.6	2.75E-02	2.89E-02	3.03E-02	3.11E-02	3.16E-02	3.20E-02	3.22E-02	3.29E-02
	1	0.8	3.39E-02	3.39E-02	3.38E-02	3.40E-02	3.44E-02	3.47E-02	3.49E-02	3.57E-02
	1/2	0.0	2.04E-02							
	1/2	0.1	1.87E-02	1.95E-02	2.01E-02	2.03E-02	2.04E-02	2.04E-02	2.05E-02	2.05E-02
	1/2	0.2	1.92E-02	2.04E-02	2.12E-02	2.16E-02	2.18E-02	2.19E-02	2.20E-02	2.21E-02
	1/2	0.4	2.52E-02	2.68E-02	2.79E-02	2.85E-02	2.89E-02	2.91E-02	2.93E-02	2.98E-02
	1/2	0.6	3.44E-02	3.72E-02	3.81E-02	3.86E-02	3.90E-02	3.94E-02	3.98E-02	4.13E-02
	1/2	0.8	4.54E-02	5.03E-02	5.00E-02	4.91E-02	4.87E-02	4.88E-02	4.90E-02	5.07E-02
	1/4	0.0	9.56E-03							
	1/4	0.1	9.41E-03	9.68E-03	9.83E-03	9.90E-03	9.93E-03	9.94E-03	9.95E-03	9.97E-03
	1/4	0.2	1.19E-02	1.21E-02	1.22E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.24E-02
	1/4	0.4	1.94E-02	2.15E-02	2.19E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.19E-02	2.20E-02	2.26E-02
	1/4	0.6	2.61E-02	3.36E-02	3.67E-02	3.67E-02	3.63E-02	3.61E-02	3.62E-02	3.78E-02
	1/4	0.8	3.15E-02	4.76E-02	5.59E-02	5.68E-02	5.49E-02	5.35E-02	5.29E-02	5.49E-02
	1/8	0.0	2.91E-03							
	1/8	0.1	3.71E-03	3.62E-03	3.52E-03	3.49E-03	3.48E-03	3.47E-03	3.47E-03	3.47E-03
	1/8	0.2	6.02E-03	6.15E-03	5.92E-03	5.77E-03	5.70E-03	5.67E-03	5.67E-03	5.75E-03
	1/8	0.4	9.07E-03	1.23E-02	1.36E-02	1.37E-02	1.34E-02	1.32E-02	1.31E-02	1.35E-02
	1/8	0.6	9.81E-03	1.84E-02	2.50E-02	2.66E-02	2.70E-02	2.63E-02	2.58E-02	2.63E-02
	1/8	0.8	9.28E-03	2.37E-02	4.12E-02	4.62E-02	4.83E-02	4.80E-02	4.60E-02	4.54E-02
	1/16	0.0	7.13E-04							
	1/16	0.1	1.46E-03	1.41E-03	1.31E-03	1.26E-03	1.23E-03	1.22E-03	1.22E-03	1.24E-03
	1/16	0.2	2.20E-03	2.67E-03	2.75E-03	2.69E-03	2.60E-03	2.54E-03	2.51E-03	2.58E-03
	1/16	0.4	2.20E-03	4.40E-03	6.42E-03	6.75E-03	6.90E-03	6.86E-03	6.64E-03	6.61E-03
	1/16	0.6	1.83E-03	5.11E-03	1.17E-02	1.35E-02	1.45E-02	1.50E-02	1.49E-02	1.43E-02
	1/16	0.8	1.50E-03	5.10E-03	1.93E-02	2.55E-02	2.88E-02	3.09E-02	3.15E-02	2.91E-02

表 D.8 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その1)

a/c	a/t	t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
	1	0.0	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657
	1	0.1	0.666	0.663	0.660	0.658	0.657	0.657
	1	0.2	0.679	0.673	0.666	0.663	0.662	0.661
	1	0.4	0.717	0.704	0.690	0.684	0.680	0.678
	1	0.6	0.771	0.746	0.719	0.706	0.699	0.694
	1	0.8	0.843	0.792	0.743	0.722	0.710	0.703
	1/2	0.0	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
	1/2	0.1	0.908	0.900	0.892	0.888	0.886	0.885
	1/2	0.2	0.945	0.930	0.914	0.907	0.903	0.901
	1/2	0.4	1.066	1.039	1.005	0.988	0.976	0.969
	1/2	0.6	1.254	1.209	1.139	1.099	1.072	1.055
	1/2	0.8	1.540	1.429	1.275	1.190	1.136	1.105
	1/4	0.0	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022
	1/4	0.1	1.062	1.051	1.039	1.034	1.031	1.029
	1/4	0.2	1.129	1.110	1.090	1.080	1.073	1.069
	1/4	0.4	1.353	1.342	1.310	1.285	1.265	1.251
	1/4	0.6	1.705	1.728	1.681	1.617	1.557	1.514
	1/4	0.8	2.272	2.291	2.157	1.990	1.834	1.725
G_0	1/8	0.0	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088
G_0	1/8	0.1	1.134	1.123	1.111	1.105	1.102	1.100
G_0	1/8	0.2	1.223	1.213	1.198	1.190	1.182	1.178
G_0	1/8	0.4	1.504	1.547	1.567	1.559	1.538	1.519
G_0	1/8	0.6	1.924	2.084	2.213	2.214	2.165	2.096
G_0	1/8	0.8	2.626	2.890	3.175	3.172	3.014	2.804
	1/16	0.0	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105
	1/16	0.1	1.160	1.152	1.142	1.138	1.134	1.133
	1/16	0.2	1.259	1.263	1.263	1.261	1.256	1.252
	1/16	0.4	1.548	1.633	1.718	1.747	1.753	1.744
	1/16	0.6	1.992	2.234	2.546	2.679	2.728	2.711
	1/16	0.8	2.727	3.116	3.829	4.232	4.401	4.349
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.182	1.180	1.182	1.183	1.184	1.185
	0	0.2	1.282	1.301	1.329	1.344	1.353	1.359
	0	0.4	1.580	1.695	1.867	1.967	2.030	2.068
	0	0.6	2.028	2.319	2.864	3.270	3.578	3.785
	0	0.8	2.779	3.220	4.408	5.825	7.473	9.088
								10.286
								11.949
a/c	a/t	1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	0
	1	0.0	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
	1	0.1	0.466	0.465	0.464	0.464	0.463	0.463
	1	0.2	0.471	0.469	0.466	0.465	0.464	0.464
	1	0.4	0.484	0.479	0.474	0.472	0.470	0.469
	1	0.6	0.501	0.493	0.484	0.479	0.477	0.475
	1	0.8	0.533	0.517	0.502	0.496	0.493	0.490
	1/2	0.0	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569
	1/2	0.1	0.576	0.573	0.570	0.569	0.568	0.568
	1/2	0.2	0.589	0.584	0.578	0.576	0.574	0.573
	1/2	0.4	0.631	0.621	0.609	0.602	0.598	0.596
	1/2	0.6	0.696	0.679	0.654	0.640	0.630	0.625
	1/2	0.8	0.806	0.768	0.715	0.687	0.670	0.660
	1/4	0.0	0.632	0.632	0.632	0.632	0.632	0.632
	1/4	0.1	0.645	0.641	0.637	0.635	0.633	0.632
	1/4	0.2	0.670	0.662	0.655	0.651	0.648	0.647
	1/4	0.4	0.750	0.744	0.731	0.721	0.714	0.709
	1/4	0.6	0.877	0.880	0.859	0.835	0.813	0.798
	1/4	0.8	1.097	1.095	1.040	0.980	0.926	0.889
G_1	1/8	0.0	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664
G_1	1/8	0.1	0.680	0.675	0.670	0.668	0.667	0.666
G_1	1/8	0.2	0.713	0.709	0.702	0.699	0.696	0.694
G_1	1/8	0.4	0.818	0.831	0.835	0.830	0.822	0.814
G_1	1/8	0.6	0.974	1.027	1.064	1.059	1.038	1.012
G_1	1/8	0.8	1.252	1.338	1.419	1.405	1.343	1.268
	1/16	0.0	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673
	1/16	0.1	0.693	0.689	0.685	0.684	0.682	0.681
	1/16	0.2	0.731	0.732	0.731	0.730	0.728	0.726
	1/16	0.4	0.841	0.871	0.900	0.909	0.909	0.898
	1/16	0.6	1.007	1.093	1.199	1.242	1.254	1.244
	1/16	0.8	1.299	1.434	1.672	1.799	1.844	1.814
	0	0.0	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683
	0	0.1	0.704	0.704	0.705	0.705	0.706	0.706
	0	0.2	0.744	0.752	0.763	0.769	0.773	0.775
	0	0.4	0.859	0.903	0.969	1.007	1.031	1.046
	0	0.6	1.028	1.135	1.335	1.485	1.598	1.674
	0	0.8	1.324	1.483	1.901	2.399	2.976	3.543

表 D.8 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
1	0.0	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
1	0.1	0.384	0.384	0.383	0.383	0.383	0.382	0.382	0.382
1	0.2	0.386	0.385	0.384	0.384	0.383	0.383	0.383	0.383
1	0.4	0.392	0.390	0.388	0.386	0.386	0.385	0.385	0.385
1	0.6	0.401	0.397	0.392	0.390	0.388	0.388	0.387	0.389
1	0.8	0.420	0.413	0.406	0.404	0.402	0.401	0.401	0.400
1/2	0.0	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451
1/2	0.1	0.453	0.451	0.450	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449
1/2	0.2	0.460	0.457	0.454	0.453	0.452	0.451	0.451	0.451
1/2	0.4	0.481	0.476	0.469	0.466	0.464	0.462	0.462	0.461
1/2	0.6	0.514	0.505	0.492	0.484	0.479	0.477	0.475	0.476
1/2	0.8	0.576	0.556	0.530	0.516	0.507	0.503	0.500	0.498
1/4	0.0	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491
1/4	0.1	0.496	0.494	0.491	0.490	0.490	0.489	0.489	0.489
1/4	0.2	0.509	0.505	0.501	0.499	0.497	0.497	0.496	0.496
1/4	0.4	0.551	0.548	0.540	0.535	0.530	0.528	0.526	0.525
1/4	0.6	0.618	0.618	0.605	0.591	0.580	0.572	0.567	0.563
1/4	0.8	0.741	0.737	0.705	0.674	0.646	0.628	0.617	0.604
G_2	1/8	0.0	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512
	1/8	0.1	0.519	0.516	0.513	0.512	0.511	0.511	0.510
	1/8	0.2	0.537	0.534	0.530	0.528	0.527	0.526	0.524
	1/8	0.4	0.594	0.600	0.600	0.597	0.592	0.588	0.585
	1/8	0.6	0.678	0.703	0.719	0.714	0.702	0.688	0.677
	1/8	0.8	0.837	0.878	0.912	0.900	0.865	0.826	0.793
	1/16	0.0	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518
	1/16	0.1	0.528	0.526	0.523	0.522	0.521	0.521	0.520
	1/16	0.2	0.549	0.549	0.548	0.547	0.546	0.545	0.543
	1/16	0.4	0.610	0.625	0.640	0.643	0.643	0.640	0.636
	1/16	0.6	0.700	0.745	0.799	0.819	0.823	0.815	0.804
	1/16	0.8	0.868	0.938	1.055	1.116	1.132	1.112	1.070
	0	0.0	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526
	0	0.1	0.536	0.536	0.536	0.537	0.537	0.537	0.537
	0	0.2	0.559	0.563	0.570	0.573	0.575	0.577	0.578
	0	0.4	0.623	0.648	0.684	0.706	0.719	0.727	0.732
	0	0.6	0.717	0.775	0.883	0.964	1.025	1.067	1.090
	0	0.8	0.886	0.970	1.189	1.450	1.752	2.048	2.268
	0	0.0	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526
	0	0.1	0.536	0.536	0.536	0.537	0.537	0.537	0.537
	0	0.2	0.559	0.563	0.570	0.573	0.575	0.577	0.578
	0	0.4	0.623	0.648	0.684	0.706	0.719	0.727	0.736
	0	0.6	0.717	0.775	0.883	0.964	1.025	1.067	1.115
	0	0.8	0.886	0.970	1.189	1.450	1.752	2.048	2.268
	0	0.0	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526
G_3	1/2	0.0	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386
	1/2	0.1	0.385	0.384	0.383	0.383	0.383	0.383	0.383
	1/2	0.2	0.390	0.388	0.386	0.385	0.385	0.384	0.384
	1/2	0.4	0.402	0.399	0.395	0.393	0.391	0.390	0.390
	1/2	0.6	0.422	0.416	0.408	0.403	0.400	0.398	0.397
	1/2	0.8	0.463	0.451	0.435	0.427	0.422	0.419	0.418
	1/4	0.0	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415
	1/4	0.1	0.416	0.415	0.413	0.412	0.412	0.412	0.412
	1/4	0.2	0.424	0.422	0.419	0.418	0.417	0.416	0.416
	1/4	0.4	0.450	0.448	0.442	0.439	0.436	0.435	0.434
	1/4	0.6	0.492	0.491	0.481	0.473	0.466	0.461	0.458
	1/4	0.8	0.573	0.569	0.548	0.528	0.511	0.500	0.494
	1/8	0.0	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431
	1/8	0.1	0.433	0.431	0.429	0.429	0.428	0.428	0.427
	1/8	0.2	0.445	0.443	0.440	0.439	0.438	0.437	0.436
	1/8	0.4	0.481	0.484	0.483	0.481	0.477	0.475	0.473
	1/8	0.6	0.534	0.549	0.556	0.552	0.544	0.535	0.528
	1/8	0.8	0.641	0.665	0.681	0.671	0.649	0.624	0.604
	1/16	0.0	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435
	1/16	0.1	0.440	0.438	0.437	0.436	0.436	0.435	0.435
	1/16	0.2	0.454	0.454	0.453	0.452	0.451	0.450	0.449
	1/16	0.4	0.493	0.503	0.511	0.513	0.512	0.510	0.507
	1/16	0.6	0.551	0.579	0.611	0.622	0.623	0.618	0.610
	1/16	0.8	0.664	0.707	0.777	0.811	0.817	0.802	0.775
	0	0.0	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441
	0	0.1	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447
	0	0.2	0.462	0.465	0.470	0.472	0.473	0.474	0.474
	0	0.4	0.505	0.521	0.545	0.559	0.567	0.573	0.576
	0	0.6	0.566	0.603	0.673	0.725	0.764	0.791	0.805
	0	0.8	0.678	0.732	0.869	1.032	1.221	1.406	1.544
	0	0.0	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441

表 D.8 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 1)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
G_0	1	0.0	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	
	1	0.1	0.764	0.759	0.753	0.751	0.750	0.749	0.748	
	1	0.2	0.785	0.774	0.764	0.759	0.757	0.755	0.754	
	1	0.4	0.847	0.830	0.811	0.802	0.796	0.793	0.789	
	1	0.6	0.939	0.921	0.893	0.878	0.867	0.860	0.856	
	1	0.8	1.062	1.042	1.001	0.975	0.955	0.942	0.934	
	1/2	0.0	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	
	1/2	0.1	0.727	0.722	0.717	0.715	0.713	0.712	0.712	
	1/2	0.2	0.752	0.744	0.736	0.732	0.729	0.728	0.727	
	1/2	0.4	0.835	0.835	0.827	0.820	0.815	0.810	0.808	
G_1	1/2	0.6	0.959	0.987	0.992	0.982	0.968	0.957	0.950	
	1/2	0.8	1.129	1.206	1.233	1.211	1.179	1.153	1.134	
	1/4	0.0	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	
	1/4	0.1	0.592	0.590	0.588	0.586	0.586	0.585	0.585	
	1/4	0.2	0.612	0.612	0.612	0.611	0.610	0.609	0.608	
	1/4	0.4	0.669	0.693	0.715	0.720	0.720	0.717	0.714	
	1/4	0.6	0.742	0.816	0.898	0.924	0.927	0.920	0.912	
	1/4	0.8	0.834	0.990	1.189	1.267	1.270	1.244	1.216	
	1/8	0.0	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	
	1/8	0.1	0.447	0.447	0.448	0.447	0.447	0.447	0.445	
G_2	1/8	0.2	0.456	0.462	0.467	0.469	0.469	0.469	0.469	
	1/8	0.4	0.482	0.504	0.534	0.551	0.559	0.561	0.559	
	1/8	0.6	0.513	0.565	0.647	0.697	0.732	0.744	0.725	
	1/8	0.8	0.536	0.630	0.816	0.939	1.038	1.085	1.006	
	1/16	0.0	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	
	1/16	0.1	0.334	0.335	0.336	0.337	0.337	0.337	0.336	
	1/16	0.2	0.338	0.342	0.347	0.350	0.352	0.352	0.353	
	1/16	0.4	0.349	0.362	0.382	0.392	0.401	0.408	0.410	
	1/16	0.6	0.361	0.385	0.435	0.462	0.485	0.506	0.521	
	1/16	0.8	0.364	0.402	0.506	0.577	0.634	0.691	0.740	
G_3	a/c	a/t	t/R_i							
	1	0.0	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129
	1	0.1	0.130	0.129	0.127	0.127	0.126	0.126	0.126	0.126
	1	0.2	0.136	0.134	0.131	0.129	0.129	0.128	0.128	0.128
	1	0.4	0.155	0.150	0.145	0.143	0.141	0.140	0.140	0.139
	1	0.6	0.182	0.177	0.170	0.165	0.162	0.160	0.158	0.158
	1	0.8	0.218	0.212	0.199	0.191	0.185	0.181	0.178	0.176
	1/2	0.0	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119
	1/2	0.1	0.117	0.116	0.114	0.114	0.113	0.113	0.113	0.113
	1/2	0.2	0.124	0.123	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118	0.118
G_4	1/2	0.4	0.150	0.151	0.150	0.149	0.147	0.146	0.145	0.144
	1/2	0.6	0.187	0.198	0.202	0.198	0.194	0.191	0.188	0.188
	1/2	0.8	0.237	0.263	0.272	0.264	0.254	0.245	0.239	0.231
	1/4	0.0	7.37E-02							
	1/4	0.1	7.42E-02	7.40E-02	7.36E-02	7.34E-02	7.32E-02	7.32E-02	7.31E-02	7.31E-02
	1/4	0.2	7.97E-02	8.09E-02	8.15E-02	8.16E-02	8.14E-02	8.12E-02	8.11E-02	8.11E-02
	1/4	0.4	9.50E-02	0.106	0.115	0.117	0.118	0.117	0.116	0.116
	1/4	0.6	0.114	0.141	0.171	0.181	0.182	0.179	0.177	0.173
	1/4	0.8	0.135	0.188	0.255	0.280	0.281	0.273	0.263	0.244
	1/8	0.0	3.93E-02							
G_5	1/8	0.1	3.64E-02	3.68E-02	3.72E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.70E-02	3.70E-02
	1/8	0.2	3.86E-02	4.10E-02	4.35E-02	4.44E-02	4.48E-02	4.49E-02	4.48E-02	4.48E-02
	1/8	0.4	4.44E-02	5.28E-02	6.40E-02	7.03E-02	7.33E-02	7.44E-02	7.44E-02	7.39E-02
	1/8	0.6	5.02E-02	6.76E-02	9.50E-02	0.113	0.125	0.130	0.130	0.122
	1/8	0.8	5.15E-02	8.00E-02	0.138	0.179	0.212	0.228	0.226	0.202
	1/16	0.0	2.02E-02							
	1/16	0.1	1.62E-02	1.67E-02	1.73E-02	1.75E-02	1.76E-02	1.76E-02	1.77E-02	1.77E-02
	1/16	0.2	1.68E-02	1.84E-02	2.04E-02	2.15E-02	2.22E-02	2.24E-02	2.25E-02	2.26E-02
	1/16	0.4	1.80E-02	2.21E-02	2.85E-02	3.20E-02	3.53E-02	3.77E-02	3.88E-02	3.88E-02
	1/16	0.6	1.93E-02	2.60E-02	4.13E-02	4.96E-02	5.71E-02	6.44E-02	6.99E-02	6.94E-02
	1/16	0.8	1.96E-02	2.91E-02	5.96E-02	8.10E-02	9.84E-02	0.117	0.134	0.131

表 D.8 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
G_2	1	0.0	4.78E-02						
	1	0.1	4.89E-02	4.83E-02	4.76E-02	4.73E-02	4.71E-02	4.70E-02	4.70E-02
	1	0.2	5.17E-02	5.05E-02	4.92E-02	4.86E-02	4.83E-02	4.81E-02	4.80E-02
	1	0.4	6.03E-02	5.85E-02	5.63E-02	5.51E-02	5.44E-02	5.39E-02	5.36E-02
	1	0.6	7.30E-02	7.10E-02	6.75E-02	6.53E-02	6.37E-02	6.27E-02	6.21E-02
	1	0.8	8.95E-02	8.64E-02	7.99E-02	7.57E-02	7.26E-02	7.06E-02	6.94E-02
	1/2	0.0	4.06E-02						
	1/2	0.1	4.22E-02	4.17E-02	4.11E-02	4.08E-02	4.07E-02	4.06E-02	4.05E-02
	1/2	0.2	4.57E-02	4.50E-02	4.41E-02	4.37E-02	4.34E-02	4.32E-02	4.31E-02
	1/2	0.4	5.78E-02	5.89E-02	5.87E-02	5.80E-02	5.72E-02	5.66E-02	5.62E-02
	1/2	0.6	7.53E-02	8.13E-02	8.31E-02	8.16E-02	7.95E-02	7.78E-02	7.66E-02
	1/2	0.8	9.83E-02	1.11E-01	1.15E-01	1.11E-01	1.05E-01	1.01E-01	9.81E-02
	1/4	0.0	2.15E-02						
	1/4	0.1	2.22E-02	2.22E-02	2.21E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.19E-02
	1/4	0.2	2.47E-02	2.55E-02	2.61E-02	2.62E-02	2.61E-02	2.61E-02	2.60E-02
	1/4	0.4	3.18E-02	3.73E-02	4.23E-02	4.37E-02	4.39E-02	4.36E-02	4.33E-02
	1/4	0.6	3.94E-02	5.33E-02	6.86E-02	7.36E-02	7.42E-02	7.31E-02	7.17E-02
	1/4	0.8	4.77E-02	7.36E-02	0.107	0.119	0.119	0.115	0.110
	1/8	0.0	8.08E-03						
	1/8	0.1	8.03E-03	8.32E-03	8.56E-03	8.65E-03	8.68E-03	8.69E-03	8.68E-03
	1/8	0.2	8.95E-03	1.03E-02	1.17E-02	1.22E-02	1.24E-02	1.25E-02	1.25E-02
	1/8	0.4	1.06E-02	1.49E-02	2.07E-02	2.40E-02	2.56E-02	2.62E-02	2.59E-02
	1/8	0.6	1.20E-02	2.02E-02	3.38E-02	4.27E-02	4.91E-02	5.14E-02	5.16E-02
	1/8	0.8	1.27E-02	2.51E-02	5.28E-02	7.27E-02	8.90E-02	9.67E-02	9.61E-02
	1/16	0.0	2.77E-03						
	1/16	0.1	2.37E-03	2.65E-03	2.96E-03	3.09E-03	3.15E-03	3.17E-03	3.19E-03
	1/16	0.2	2.56E-03	3.32E-03	4.33E-03	4.94E-03	5.28E-03	5.43E-03	5.48E-03
	1/16	0.4	2.77E-03	4.59E-03	7.56E-03	9.26E-03	1.09E-02	1.22E-02	1.27E-02
	1/16	0.6	2.88E-03	5.66E-03	1.26E-02	1.63E-02	2.00E-02	2.37E-02	2.65E-02
	1/16	0.8	2.95E-03	6.55E-03	2.01E-02	2.97E-02	3.77E-02	4.70E-02	5.52E-02
G_3	a/c	a/t	t/R_i						
			1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
	1	0.0	2.47E-02						
	1	0.1	2.55E-02	2.51E-02	2.47E-02	2.46E-02	2.45E-02	2.44E-02	2.44E-02
	1	0.2	2.71E-02	2.64E-02	2.57E-02	2.54E-02	2.52E-02	2.51E-02	2.50E-02
	1	0.4	3.21E-02	3.11E-02	2.98E-02	2.92E-02	2.87E-02	2.85E-02	2.82E-02
	1	0.6	3.93E-02	3.82E-02	3.61E-02	3.48E-02	3.39E-02	3.33E-02	3.30E-02
	1	0.8	4.85E-02	4.65E-02	4.25E-02	4.00E-02	3.81E-02	3.70E-02	3.63E-02
	1/2	0.0	2.04E-02						
	1/2	0.1	2.15E-02	2.12E-02	2.08E-02	2.07E-02	2.06E-02	2.06E-02	2.05E-02
	1/2	0.2	2.35E-02	2.31E-02	2.27E-02	2.24E-02	2.23E-02	2.22E-02	2.21E-02
	1/2	0.4	3.05E-02	3.13E-02	3.13E-02	3.09E-02	3.05E-02	3.01E-02	2.99E-02
	1/2	0.6	4.06E-02	4.42E-02	4.54E-02	4.44E-02	4.32E-02	4.22E-02	4.14E-02
	1/2	0.8	5.35E-02	6.09E-02	6.28E-02	6.02E-02	5.70E-02	5.43E-02	5.26E-02
	1/4	0.0	9.56E-03						
	1/4	0.1	1.01E-02	1.01E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	9.99E-03	9.98E-03
	1/4	0.2	1.15E-02	1.20E-02	1.24E-02	1.25E-02	1.25E-02	1.25E-02	1.24E-02
	1/4	0.4	1.54E-02	1.89E-02	2.20E-02	2.29E-02	2.30E-02	2.29E-02	2.27E-02
	1/4	0.6	1.93E-02	2.77E-02	3.70E-02	4.00E-02	4.04E-02	3.97E-02	3.89E-02
	1/4	0.8	2.32E-02	3.84E-02	5.80E-02	6.53E-02	6.53E-02	6.26E-02	5.98E-02
	1/8	0.0	2.91E-03						
	1/8	0.1	3.04E-03	3.23E-03	3.39E-03	3.45E-03	3.47E-03	3.48E-03	3.47E-03
	1/8	0.2	3.53E-03	4.36E-03	5.23E-03	5.57E-03	5.71E-03	5.74E-03	5.75E-03
	1/8	0.4	4.19E-03	6.69E-03	1.02E-02	1.23E-02	1.33E-02	1.36E-02	1.35E-02
	1/8	0.6	4.58E-03	9.12E-03	1.71E-02	2.25E-02	2.64E-02	2.78E-02	2.79E-02
	1/8	0.8	4.80E-03	1.14E-02	2.71E-02	3.88E-02	4.85E-02	5.30E-02	5.27E-02
	1/16	0.0	7.13E-04						
	1/16	0.1	7.32E-04	9.04E-04	1.09E-03	1.17E-03	1.21E-03	1.22E-03	1.23E-03
	1/16	0.2	8.02E-04	1.24E-03	1.85E-03	2.22E-03	2.43E-03	2.52E-03	2.55E-03
	1/16	0.4	8.40E-04	1.82E-03	3.47E-03	4.44E-03	5.46E-03	6.25E-03	6.59E-03
	1/16	0.6	8.22E-04	2.23E-03	6.03E-03	8.06E-03	1.02E-02	1.24E-02	1.42E-02
	1/16	0.8	8.03E-04	2.52E-03	9.92E-03	1.51E-02	1.96E-02	2.50E-02	2.99E-02

表 D.9 円筒の周方向貫通欠陥の補正係数

c/R_m	t/R_i						
	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.025	0.0125
M_m	0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.056	1.00	1.02	1.03	1.06	1.09	1.17
	0.111	1.09	1.10	1.15	1.22	1.33	1.51
	0.167	1.20	1.22	1.31	1.43	1.62	1.87
	0.222	1.34	1.38	1.51	1.68	1.92	2.25
	0.278	1.54	1.60	1.76	1.97	2.28	2.68
	0.333	1.80	1.88	2.08	2.34	2.71	3.19
	0.389	2.14	2.24	2.49	2.80	3.25	3.84
	0.444	2.54	2.73	3.04	3.41	3.95	4.67
	0.500	3.11	3.38	3.78	4.23	4.89	5.77
M_{gb}	0.556	3.78	4.27	4.86	5.45	6.21	7.29
	0.611	4.72	5.47	6.41	7.20	8.13	9.50
	0.000	0.75	0.83	0.92	0.95	0.98	0.99
	0.056	0.79	0.86	0.95	1.01	1.06	1.15
	0.111	0.83	0.92	1.03	1.14	1.27	1.46
	0.167	0.89	0.98	1.13	1.29	1.49	1.75
	0.222	0.97	1.06	1.25	1.45	1.71	2.03
	0.278	1.04	1.16	1.39	1.63	1.94	2.32
	0.333	1.14	1.29	1.56	1.84	2.19	2.63
	0.389	1.27	1.45	1.76	2.08	2.48	2.99
M_{gb}	0.444	1.43	1.65	2.02	2.38	2.84	3.43
	0.500	1.65	1.93	2.37	2.77	3.32	3.99
	0.556	1.91	2.29	2.87	3.38	3.96	4.75
	0.611	2.19	2.77	3.57	4.20	4.89	5.83
	0.000	0.75	0.83	0.92	0.95	0.98	0.99
	0.056	0.79	0.86	0.95	1.01	1.06	1.15
	0.111	0.83	0.92	1.03	1.14	1.27	1.46
	0.167	0.89	0.98	1.13	1.29	1.49	1.75
	0.222	0.97	1.06	1.25	1.45	1.71	2.03
	0.278	1.04	1.16	1.39	1.63	1.94	2.32
	0.333	1.14	1.29	1.56	1.84	2.19	2.63
	0.389	1.27	1.45	1.76	2.08	2.48	2.99
	0.444	1.43	1.65	2.02	2.38	2.84	3.43
	0.500	1.65	1.93	2.37	2.77	3.32	3.99
	0.556	1.91	2.29	2.87	3.38	3.96	4.75
	0.611	2.19	2.77	3.57	4.20	4.89	5.83

表 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 1)

a/c	a/t	t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
1	0.0	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657
1	0.1	0.661	0.659	0.658	0.657	0.657	0.657	0.657
1	0.2	0.667	0.664	0.662	0.661	0.661	0.660	0.660
1	0.4	0.685	0.681	0.677	0.676	0.675	0.675	0.675
1	0.6	0.723	0.707	0.697	0.693	0.691	0.690	0.688
1	0.8	0.831	0.769	0.727	0.712	0.703	0.699	0.696
1/2	0.0	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
1/2	0.1	0.863	0.874	0.880	0.882	0.883	0.884	0.884
1/2	0.2	0.855	0.874	0.888	0.893	0.895	0.896	0.898
1/2	0.4	0.866	0.900	0.930	0.943	0.951	0.954	0.955
1/2	0.6	0.932	0.956	0.988	1.005	1.016	1.022	1.023
1/2	0.8	1.166	1.102	1.069	1.061	1.059	1.059	1.058
1/4	0.0	1.022	1.022	1.002	1.022	1.022	1.022	1.022
1/4	0.1	0.982	1.004	1.018	1.002	1.025	1.026	1.023
1/4	0.2	0.966	1.008	1.039	1.051	1.057	1.061	1.066
1/4	0.4	0.992	1.062	1.139	1.176	1.200	1.212	1.216
1/4	0.6	1.106	1.179	1.274	1.333	1.376	1.403	1.415
1/4	0.8	-	1.484	1.479	1.487	1.505	1.523	1.573
G_0	1/8	0.0	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088
G_0	1/8	0.1	1.035	1.064	1.083	1.090	1.094	1.095
G_0	1/8	0.2	1.021	1.077	1.126	1.146	1.157	1.163
G_0	1/8	0.4	-	1.163	1.291	1.361	1.410	1.439
G_0	1/8	0.6	-	1.353	1.522	1.640	1.737	1.809
G_0	1/8	0.8	-	-	1.921	1.984	2.043	2.106
G_0	1/16	0.0	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105
G_0	1/16	0.1	1.054	1.086	1.111	1.120	1.125	1.127
G_0	1/16	0.2	-	1.108	1.173	1.202	1.220	1.231
G_0	1/16	0.4	-	-	1.377	1.479	1.556	1.609
G_0	1/16	0.6	-	-	1.690	1.881	2.042	2.175
G_0	1/16	0.8	-	-	2.193	2.446	2.627	2.776
G_0	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
G_0	0	0.1	1.067	1.107	1.140	1.155	1.165	1.171
G_0	0	0.2	1.050	1.130	1.211	1.255	1.287	1.310
G_0	0	0.4	1.079	1.234	1.440	1.583	1.706	1.807
G_0	0	0.6	1.200	1.421	1.768	2.060	2.362	2.660
G_0	0	0.8	1.549	1.829	2.281	2.700	3.212	3.834
		t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
G_1		1	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465
G_1		1	0.468	0.466	0.464	0.464	0.463	0.463
G_1		1	0.473	0.469	0.466	0.465	0.465	0.464
G_1		1	0.485	0.478	0.472	0.470	0.469	0.468
G_1		1	0.505	0.492	0.482	0.479	0.477	0.476
G_1		1	0.565	0.530	0.507	0.498	0.493	0.488
G_1		1/2	0.0	0.569	0.569	0.569	0.569	0.569
G_1		1/2	0.1	0.562	0.565	0.566	0.567	0.567
G_1		1/2	0.2	0.561	0.566	0.569	0.571	0.572
G_1		1/2	0.4	0.567	0.576	0.584	0.588	0.590
G_1		1/2	0.6	0.599	0.601	0.607	0.611	0.614
G_1		1/2	0.8	0.715	0.677	0.656	0.650	0.648
G_1		1/4	0.0	0.632	0.632	0.632	0.632	0.632
G_1		1/4	0.1	0.617	0.624	0.629	0.630	0.631
G_1		1/4	0.2	0.612	0.626	0.636	0.640	0.643
G_1		1/4	0.4	0.624	0.646	0.671	0.684	0.691
G_1		1/4	0.6	0.676	0.695	0.723	0.740	0.754
G_1		1/4	0.8	-	0.837	0.821	0.819	0.821
G_1		1/8	0.0	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664
G_1		1/8	0.1	0.643	0.653	0.660	0.663	0.664
G_1		1/8	0.2	0.638	0.658	0.676	0.683	0.687
G_1		1/8	0.4	-	0.692	0.736	0.760	0.776
G_1		1/8	0.6	-	0.771	0.824	0.861	0.893
G_1		1/8	0.8	-	-	0.996	1.008	1.022
G_1		1/16	0.0	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673
G_1		1/16	0.1	0.653	0.665	0.674	0.677	0.679
G_1		1/16	0.2	-	0.674	0.697	0.708	0.714
G_1		1/16	0.4	-	-	0.774	0.810	0.837
G_1		1/16	0.6	-	-	0.896	0.959	1.013
G_1		1/16	0.8	-	-	1.113	1.188	1.240
		0	0.0	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683
		0	0.1	0.660	0.676	0.688	0.694	0.699
		0	0.2	0.656	0.686	0.718	0.735	0.747
		0	0.4	0.672	0.730	0.808	0.861	0.908
		0	0.6	0.730	0.811	0.937	1.046	1.153
		0	0.8	0.904	1.003	1.161	1.307	1.485

表 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
1	0.0	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
1	0.1	0.387	0.385	0.383	0.383	0.383	0.383	0.382	0.382
1	0.2	0.391	0.387	0.385	0.384	0.383	0.383	0.383	0.383
1	0.4	0.399	0.393	0.388	0.387	0.386	0.385	0.385	0.385
1	0.6	0.413	0.403	0.395	0.392	0.390	0.390	0.389	0.389
1	0.8	0.453	0.430	0.413	0.407	0.403	0.402	0.400	0.400
1/2	0.0	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451
1/2	0.1	0.447	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.449
1/2	0.2	0.447	0.449	0.450	0.450	0.451	0.451	0.451	0.451
1/2	0.4	0.451	0.454	0.457	0.459	0.459	0.460	0.460	0.461
1/2	0.6	0.471	0.470	0.471	0.472	0.473	0.473	0.473	0.476
1/2	0.8	0.545	0.519	0.505	0.500	0.498	0.497	0.496	0.498
1/4	0.0	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491
1/4	0.1	0.482	0.485	0.487	0.488	0.489	0.489	0.489	0.489
1/4	0.2	0.479	0.486	0.491	0.493	0.494	0.495	0.495	0.496
1/4	0.4	0.486	0.497	0.509	0.515	0.519	0.521	0.521	0.525
1/4	0.6	0.518	0.525	0.538	0.546	0.552	0.556	0.558	0.563
1/4	0.8	-	0.613	0.600	0.597	0.597	0.598	0.599	0.604
G_2	1/8	0.0	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512
	1/8	0.1	0.499	0.504	0.508	0.509	0.510	0.510	0.510
	1/8	0.2	0.497	0.507	0.516	0.520	0.522	0.523	0.524
	1/8	0.4	-	0.525	0.547	0.560	0.568	0.573	0.575
	1/8	0.6	-	0.572	0.596	0.615	0.630	0.641	0.648
	1/8	0.8	-	-	0.699	0.701	0.706	0.714	0.720
	1/16	0.0	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518
	1/16	0.1	0.505	0.512	0.517	0.519	0.520	0.520	0.520
	1/16	0.2	-	0.517	0.530	0.535	0.539	0.541	0.543
	1/16	0.4	-	-	0.572	0.590	0.604	0.614	0.620
G_3	1/16	0.6	-	-	0.639	0.671	0.698	0.721	0.737
	1/16	0.8	-	-	0.769	0.802	0.826	0.845	0.864
	0	0.0	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526
	0	0.1	0.511	0.520	0.527	0.530	0.532	0.534	0.537
	0	0.2	0.510	0.527	0.544	0.554	0.561	0.566	0.578
	0	0.4	0.520	0.553	0.595	0.625	0.651	0.672	0.688
	0	0.6	0.557	0.601	0.669	0.726	0.785	0.844	0.898
	0	0.8	0.669	0.721	0.804	0.880	0.973	1.086	1.221
	0	-	-	-	-	-	-	-	2.573
	0	-	-	-	-	-	-	-	-
a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
1	0.0	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338
1	0.1	0.339	0.337	0.336	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335
1	0.2	0.342	0.339	0.337	0.336	0.335	0.335	0.335	0.335
1	0.4	0.348	0.343	0.339	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
1	0.6	0.359	0.350	0.344	0.341	0.340	0.339	0.339	0.339
1	0.8	0.388	0.371	0.358	0.353	0.350	0.349	0.348	0.348
1/2	0.0	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386
1/2	0.1	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.383
1/2	0.2	0.382	0.383	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1/2	0.4	0.385	0.387	0.388	0.388	0.389	0.389	0.389	0.390
1/2	0.6	0.400	0.398	0.397	0.397	0.398	0.398	0.398	0.399
1/2	0.8	0.452	0.434	0.422	0.419	0.417	0.416	0.416	0.416
1/4	0.0	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415
1/4	0.1	0.407	0.409	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.412
1/4	0.2	0.406	0.410	0.413	0.414	0.415	0.415	0.415	0.416
1/4	0.4	0.410	0.416	0.424	0.427	0.429	0.430	0.431	0.433
1/4	0.6	0.432	0.436	0.442	0.447	0.450	0.453	0.453	0.457
1/4	0.8	-	0.498	0.487	0.484	0.483	0.484	0.484	0.487
1/8	0.0	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431
1/8	0.1	0.420	0.424	0.426	0.427	0.427	0.427	0.427	0.427
1/8	0.2	0.419	0.425	0.431	0.433	0.434	0.435	0.435	0.436
1/8	0.4	-	0.436	0.450	0.458	0.463	0.466	0.467	0.470
1/8	0.6	-	0.468	0.482	0.493	0.502	0.509	0.513	0.521
1/8	0.8	-	-	0.552	0.552	0.554	0.558	0.561	0.573
1/16	0.0	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435
1/16	0.1	0.425	0.430	0.433	0.434	0.434	0.435	0.435	0.435
1/16	0.2	-	0.433	0.441	0.444	0.447	0.448	0.448	0.449
1/16	0.4	-	-	0.467	0.479	0.488	0.494	0.497	0.503
1/16	0.6	-	-	0.512	0.531	0.547	0.561	0.571	0.591
1/16	0.8	-	-	0.601	0.619	0.630	0.641	0.652	0.689
0	0.0	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441
0	0.1	0.431	0.436	0.441	0.443	0.444	0.445	0.446	0.447
0	0.2	0.430	0.441	0.453	0.459	0.464	0.467	0.469	0.475
0	0.4	0.438	0.459	0.487	0.506	0.523	0.537	0.547	0.584
0	0.6	0.464	0.492	0.535	0.572	0.610	0.647	0.682	0.822
0	0.8	0.545	0.577	0.629	0.676	0.734	0.805	0.889	1.734

表 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 3)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
1	0.0	0.329	0.438	0.548	0.597	0.626	0.641	0.649	0.657	
1	0.1	0.354	0.456	0.556	0.602	0.628	0.642	0.649	0.657	
1	0.2	0.381	0.475	0.567	0.610	0.634	0.647	0.653	0.660	
1	0.4	0.438	0.517	0.596	0.632	0.652	0.663	0.668	0.675	
1	0.6	0.506	0.567	0.627	0.656	0.672	0.680	0.683	0.691	
1	0.8	0.629	0.651	0.671	0.683	0.689	0.692	0.692	0.697	
1/2	0.0	0.442	0.589	0.736	0.803	0.841	0.861	0.872	0.883	
1/2	0.1	0.460	0.602	0.743	0.807	0.844	0.864	0.874	0.884	
1/2	0.2	0.482	0.621	0.759	0.822	0.858	0.878	0.887	0.898	
1/2	0.4	0.538	0.674	0.814	0.878	0.917	0.937	0.946	0.962	
1/2	0.6	0.624	0.753	0.882	0.946	0.985	1.006	1.015	1.038	
1/2	0.8	0.804	0.896	0.972	1.010	1.033	1.046	1.052	1.070	
1/4	0.0	0.511	0.681	0.852	0.929	0.973	0.997	1.009	1.022	
1/4	0.1	0.521	0.691	0.859	0.935	0.979	1.003	1.015	1.027	
1/4	0.2	0.539	0.712	0.885	0.966	1.013	1.038	1.050	1.066	
1/4	0.4	0.594	0.784	0.989	1.094	1.156	1.190	1.205	1.234	
1/4	0.6	0.678	0.892	1.124	1.248	1.332	1.380	1.404	1.452	
1/4	0.8	-	1.125	1.314	1.402	1.464	1.501	1.523	1.573	
G_{bg}	1/8	0.0	0.544	0.725	0.907	0.989	1.036	1.061	1.075	1.088
	1/8	0.1	0.547	0.731	0.912	0.996	1.045	1.071	1.084	1.095
	1/8	0.2	0.563	0.758	0.958	1.054	1.109	1.139	1.153	1.172
	1/8	0.4	-	0.840	1.112	1.258	1.357	1.412	1.440	1.482
	1/8	0.6	-	0.966	1.323	1.522	1.678	1.778	1.838	1.943
	1/8	0.8	-	-	1.653	1.844	1.979	2.073	2.142	2.300
	1/16	0.0	0.553	0.737	0.921	1.005	1.052	1.078	1.091	1.105
1/16	1/16	0.1	0.555	0.746	0.937	1.025	1.075	1.102	1.115	1.129
	1/16	0.2	-	0.778	0.996	1.102	1.169	1.204	1.222	1.243
	1/16	0.4	-	-	1.181	1.361	1.496	1.577	1.625	1.693
	1/16	0.6	-	-	1.428	1.734	1.966	2.135	2.255	2.470
	1/16	0.8	-	-	1.809	2.226	2.571	2.726	2.888	3.331
	0	0.0	0.561	0.748	0.935	1.020	1.069	1.095	1.108	1.122
0	0.1	0.555	0.751	0.954	1.049	1.106	1.138	1.155	1.185	
0	0.2	0.564	0.777	1.019	1.144	1.224	1.273	1.303	1.364	
0	0.4	0.594	0.853	1.207	1.436	1.614	1.746	1.842	2.109	
0	0.6	0.675	0.973	1.462	1.848	2.217	2.551	2.844	4.030	
0	0.8	0.892	1.247	1.867	2.410	3.015	3.695	4.460	11.949	

表 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 1)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
G_0	1	0.0	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	
	1	0.1	0.740	0.744	0.746	0.747	0.747	0.747	0.748	
	1	0.2	0.738	0.746	0.750	0.751	0.752	0.752	0.754	
	1	0.4	0.747	0.765	0.777	0.782	0.784	0.786	0.789	
	1	0.6	0.773	0.801	0.824	0.834	0.841	0.844	0.853	
	1	0.8	0.824	0.851	0.881	0.897	0.907	0.913	0.927	
	1/2	0.0	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	
	1/2	0.1	0.697	0.705	0.709	0.710	0.711	0.711	0.712	
	1/2	0.2	0.692	0.708	0.718	0.722	0.724	0.724	0.726	
	1/2	0.4	0.699	0.738	0.771	0.785	0.794	0.798	0.806	
G_1	1/2	0.6	0.729	0.790	0.854	0.887	0.908	0.921	0.925	
	1/2	0.8	0.811	0.872	0.956	1.008	1.045	1.069	1.078	
	1/4	0.0	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	
	1/4	0.1	0.570	0.577	0.582	0.583	0.584	0.584	0.585	
	1/4	0.2	0.565	0.583	0.596	0.601	0.604	0.605	0.608	
	1/4	0.4	0.572	0.609	0.653	0.676	0.690	0.699	0.702	
	1/4	0.6	0.590	0.654	0.735	0.788	0.827	0.853	0.868	
	1/4	0.8	-	0.730	0.854	0.936	1.006	1.060	1.094	
	1/8	0.0	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	
	1/8	0.1	0.435	0.440	0.444	0.445	0.446	0.446	0.445	
G_2	1/8	0.2	0.432	0.444	0.456	0.461	0.464	0.466	0.467	
	1/8	0.4	-	0.459	0.492	0.513	0.529	0.540	0.547	
	1/8	0.6	-	0.486	0.548	0.593	0.633	0.665	0.689	
	1/8	0.8	-	-	0.618	0.703	0.776	0.841	0.896	
	1/16	0.0	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	
	1/16	0.1	0.328	0.331	0.334	0.335	0.335	0.336	0.336	
	1/16	0.2	-	0.333	0.340	0.344	0.347	0.349	0.351	
	1/16	0.4	-	-	0.359	0.371	0.382	0.391	0.398	
	1/16	0.6	-	-	0.381	0.408	0.434	0.457	0.477	
	1/16	0.8	-	-	0.396	0.445	0.504	0.555	0.600	
G_3	a/c	a/t	t/R_i							
	1	0.0	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	
	1	0.1	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	
	1	0.2	0.126	0.127	0.127	0.128	0.128	0.128	0.128	
	1	0.4	0.133	0.135	0.137	0.138	0.138	0.138	0.139	
	1	0.6	0.145	0.148	0.152	0.154	0.155	0.156	0.158	
	1	0.8	0.168	0.166	0.168	0.170	0.171	0.172	0.176	
	1/2	0.0	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	
	1/2	0.1	0.110	0.111	0.112	0.113	0.113	0.113	0.113	
	1/2	0.2	0.109	0.113	0.116	0.117	0.117	0.118	0.118	
G_4	1/2	0.4	0.115	0.125	0.134	0.138	0.140	0.142	0.144	
	1/2	0.6	0.128	0.143	0.160	0.170	0.176	0.179	0.181	
	1/2	0.8	0.160	0.174	0.191	0.204	0.213	0.219	0.231	
	1/4	0.0	7.37E-02							
	1/4	0.1	6.94E-02	7.11E-02	7.22E-02	7.26E-02	7.28E-02	7.29E-02	7.31E-02	
	1/4	0.2	6.91E-02	7.38E-02	7.75E-02	7.90E-02	7.98E-02	8.03E-02	8.11E-02	
	1/4	0.4	7.35E-02	8.35E-02	9.66E-02	0.104	0.108	0.111	0.112	
	1/4	0.6	8.15E-02	9.94E-02	0.122	0.138	0.150	0.158	0.163	
	1/4	0.8	-	0.126	0.159	0.180	0.200	0.215	0.244	
	1/8	0.0	3.93E-02							
G_5	1/8	0.1	3.44E-02	3.56E-02	3.65E-02	3.69E-02	3.71E-02	3.72E-02	3.70E-02	
	1/8	0.2	3.45E-02	3.73E-02	4.06E-02	4.23E-02	4.33E-02	4.39E-02	4.42E-02	
	1/8	0.4	-	4.31E-02	5.25E-02	5.90E-02	6.41E-02	6.78E-02	7.01E-02	
	1/8	0.6	-	5.13E-02	6.92E-02	8.24E-02	9.44E-02	0.105	0.112	
	1/8	0.8	-	-	8.77E-02	0.112	0.133	0.152	0.168	
	1/16	0.0	2.02E-02							
	1/16	0.1	1.55E-02	1.61E-02	1.68E-02	1.72E-02	1.74E-02	1.75E-02	1.77E-02	
	1/16	0.2	-	1.69E-02	1.87E-02	2.00E-02	2.09E-02	2.16E-02	2.20E-02	
	1/16	0.4	-	-	2.28E-02	2.64E-02	2.98E-02	3.26E-02	3.50E-02	
	1/16	0.6	-	-	2.75E-02	3.53E-02	4.30E-02	4.98E-02	5.59E-02	
	1/16	0.8	-	-	3.07E-02	4.48E-02	6.25E-02	7.75E-02	9.06E-02	

表 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
G_2	1	0.0	4.78E-02						
	1	0.1	4.71E-02	4.70E-02	4.70E-02	4.70E-02	4.69E-02	4.69E-02	4.70E-02
	1	0.2	4.78E-02	4.78E-02	4.79E-02	4.79E-02	4.79E-02	4.78E-02	4.79E-02
	1	0.4	5.16E-02	5.21E-02	5.26E-02	5.28E-02	5.30E-02	5.31E-02	5.34E-02
	1	0.6	5.86E-02	5.87E-02	5.95E-02	6.01E-02	6.05E-02	6.08E-02	6.07E-02
	1	0.8	7.16E-02	6.75E-02	6.62E-02	6.64E-02	6.68E-02	6.70E-02	6.67E-02
	1/2	0.0	4.06E-02						
	1/2	0.1	3.91E-02	3.98E-02	4.02E-02	4.03E-02	4.04E-02	4.04E-02	4.05E-02
	1/2	0.2	3.91E-02	4.08E-02	4.20E-02	4.25E-02	4.27E-02	4.28E-02	4.30E-02
	1/2	0.4	4.22E-02	4.70E-02	5.11E-02	5.30E-02	5.42E-02	5.47E-02	5.48E-02
	1/2	0.6	5.00E-02	5.64E-02	6.38E-02	6.79E-02	7.06E-02	7.23E-02	7.29E-02
	1/2	0.8	6.85E-02	7.22E-02	7.79E-02	8.26E-02	8.64E-02	8.90E-02	9.01E-02
	1/4	0.0	2.15E-02						
	1/4	0.1	2.03E-02	2.10E-02	2.15E-02	2.17E-02	2.18E-02	2.18E-02	2.19E-02
	1/4	0.2	2.04E-02	2.25E-02	2.43E-02	2.50E-02	2.54E-02	2.56E-02	2.60E-02
	1/4	0.4	2.29E-02	2.75E-02	3.37E-02	3.71E-02	3.94E-02	4.07E-02	4.13E-02
	1/4	0.6	2.72E-02	3.55E-02	4.60E-02	5.31E-02	5.87E-02	6.26E-02	6.48E-02
	1/4	0.8	-	4.94E-02	6.36E-02	7.25E-02	8.08E-02	8.76E-02	9.21E-02
	1/8	0.0	8.08E-03						
	1/8	0.1	7.34E-03	7.90E-03	8.31E-03	8.48E-03	8.57E-03	8.61E-03	8.61E-03
	1/8	0.2	7.55E-03	8.79E-03	1.04E-02	1.12E-02	1.17E-02	1.20E-02	1.21E-02
	1/8	0.4	-	1.11E-02	1.54E-02	1.86E-02	2.11E-02	2.29E-02	2.40E-02
	1/8	0.6	-	1.43E-02	2.26E-02	2.87E-02	3.43E-02	3.91E-02	4.28E-02
	1/8	0.8	-	-	3.23E-02	4.33E-02	5.24E-02	6.08E-02	6.82E-02
	1/16	0.0	2.77E-03						
	1/16	0.1	2.18E-03	2.44E-03	2.77E-03	2.93E-03	3.03E-03	3.09E-03	3.12E-03
	1/16	0.2	-	2.73E-03	3.57E-03	4.18E-03	4.66E-03	4.99E-03	5.21E-03
	1/16	0.4	-	-	5.13E-03	6.76E-03	8.32E-03	9.72E-03	1.09E-02
	1/16	0.6	-	-	6.61E-03	1.02E-02	1.37E-02	1.68E-02	1.98E-02
	1/16	0.8	-	-	7.54E-03	1.41E-02	2.23E-02	2.91E-02	3.50E-02
a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
G_3	1	0.0	2.47E-02						
	1	0.1	2.46E-02	2.45E-02	2.44E-02	2.44E-02	2.44E-02	2.44E-02	2.44E-02
	1	0.2	2.51E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.49E-02	2.49E-02	2.50E-02
	1	0.4	2.76E-02	2.76E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.80E-02	2.80E-02	2.82E-02
	1	0.6	3.21E-02	3.16E-02	3.17E-02	3.19E-02	3.21E-02	3.22E-02	3.21E-02
	1	0.8	4.05E-02	3.68E-02	3.51E-02	3.49E-02	3.49E-02	3.50E-02	3.57E-02
	1/2	0.0	2.04E-02						
	1/2	0.1	1.97E-02	2.01E-02	2.03E-02	2.04E-02	2.05E-02	2.05E-02	2.05E-02
	1/2	0.2	1.98E-02	2.08E-02	2.15E-02	2.17E-02	2.19E-02	2.19E-02	2.21E-02
	1/2	0.4	2.18E-02	2.45E-02	2.69E-02	2.80E-02	2.87E-02	2.90E-02	2.98E-02
	1/2	0.6	2.68E-02	3.02E-02	3.42E-02	3.65E-02	3.80E-02	3.89E-02	3.93E-02
	1/2	0.8	3.89E-02	3.99E-02	4.21E-02	4.42E-02	4.62E-02	4.75E-02	4.81E-02
	1/4	0.0	9.56E-03						
	1/4	0.1	9.05E-03	9.48E-03	9.75E-03	9.85E-03	9.90E-03	9.93E-03	9.97E-03
	1/4	0.2	9.16E-03	1.04E-02	1.14E-02	1.19E-02	1.21E-02	1.22E-02	1.24E-02
	1/4	0.4	1.08E-02	1.34E-02	1.70E-02	1.90E-02	2.04E-02	2.12E-02	2.15E-02
	1/4	0.6	1.34E-02	1.82E-02	2.41E-02	2.81E-02	3.13E-02	3.35E-02	3.48E-02
	1/4	0.8	-	2.68E-02	3.43E-02	3.88E-02	4.32E-02	4.69E-02	4.93E-02
	1/8	0.0	2.91E-03						
	1/8	0.1	2.71E-03	3.03E-03	3.26E-03	3.36E-03	3.41E-03	3.44E-03	3.47E-03
	1/8	0.2	2.87E-03	3.56E-03	4.50E-03	4.98E-03	5.29E-03	5.47E-03	5.55E-03
	1/8	0.4	-	4.81E-03	7.27E-03	9.09E-03	1.06E-02	1.16E-02	1.24E-02
	1/8	0.6	-	6.44E-03	1.12E-02	1.46E-02	1.78E-02	2.06E-02	2.27E-02
	1/8	0.8	-	-	1.68E-02	2.30E-02	2.78E-02	3.24E-02	3.65E-02
	1/16	0.0	7.13E-04						
	1/16	0.1	6.45E-04	7.89E-04	9.84E-04	1.08E-03	1.14E-03	1.18E-03	1.20E-03
	1/16	0.2	-	9.31E-04	1.41E-03	1.77E-03	2.05E-03	2.25E-03	2.39E-03
	1/16	0.4	-	-	2.16E-03	3.07E-03	3.96E-03	4.79E-03	5.48E-03
	1/16	0.6	-	-	2.80E-03	4.83E-03	6.79E-03	8.55E-03	1.02E-02
	1/16	0.8	-	-	3.03E-03	6.77E-03	1.15E-02	1.52E-02	1.85E-02

表 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 3)

a/c	a/t	t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
1	0.0	0.372	0.496	0.620	0.676	0.709	0.726	0.735
	0.1	0.376	0.501	0.624	0.680	0.712	0.730	0.739
	0.2	0.378	0.505	0.629	0.685	0.718	0.735	0.744
	0.4	0.383	0.523	0.656	0.715	0.750	0.768	0.776
	0.6	0.390	0.551	0.699	0.765	0.805	0.826	0.835
	0.8	0.405	0.587	0.752	0.825	0.871	0.894	0.903
1/2	0.0	0.352	0.469	0.587	0.640	0.670	0.687	0.695
	0.1	0.350	0.473	0.593	0.647	0.678	0.694	0.703
	0.2	0.338	0.474	0.601	0.658	0.690	0.707	0.716
	0.4	0.296	0.483	0.647	0.717	0.758	0.780	0.789
	0.6	0.238	0.495	0.714	0.813	0.870	0.901	0.915
	0.8	0.173	0.516	0.797	0.924	1.002	1.047	1.067
G_{bg}	0.0	0.284	0.379	0.473	0.516	0.541	0.554	0.561
	0.1	0.270	0.382	0.485	0.531	0.556	0.570	0.577
	0.2	0.218	0.369	0.493	0.546	0.576	0.591	0.598
	0.4	4.74E-02	0.319	0.529	0.612	0.658	0.683	0.694
	0.6	-0.140	0.238	0.577	0.708	0.789	0.834	0.858
	0.8	-	0.143	0.643	0.835	0.959	1.037	1.082
1/4	0.0	0.216	0.288	0.360	0.393	0.411	0.421	0.427
	0.1	0.158	0.274	0.365	0.404	0.425	0.436	0.441
	0.2	1.05E-02	0.217	0.363	0.415	0.441	0.455	0.461
	0.4	-	2.31E-02	0.347	0.448	0.500	0.527	0.541
	0.6	-	-0.186	0.305	0.496	0.593	0.648	0.681
	0.8	-	-	0.239	0.557	0.719	0.817	0.885
1/8	0.0	0.141	0.188	0.235	0.256	0.269	0.275	0.279
	0.1	3.21E-04	0.156	0.265	0.301	0.319	0.328	0.332
	0.2	-	2.38E-03	0.233	0.298	0.327	0.340	0.346
	0.4	-	-	9.90E-02	0.278	0.348	0.378	0.393
	0.6	-	-	-8.23E-02	0.232	0.374	0.436	0.469
	0.8	-	-	0.245	0.158	0.407	0.523	0.588
1/16	0.0	0.141	0.188	0.235	0.256	0.269	0.275	0.279
	0.1	3.21E-04	0.156	0.265	0.301	0.319	0.328	0.332
	0.2	-	2.38E-03	0.233	0.298	0.327	0.340	0.346
	0.4	-	-	9.90E-02	0.278	0.348	0.378	0.393
	0.6	-	-	-8.23E-02	0.232	0.374	0.436	0.469
	0.8	-	-	0.245	0.158	0.407	0.523	0.588

表 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 1)

a/c	a/t	t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
G_0	1/2	0.0	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657
	1/2	0.1	0.653	0.654	0.656	0.656	0.657	0.657
	1/2	0.2	0.651	0.654	0.657	0.659	0.659	0.660
	1/2	0.4	0.653	0.661	0.669	0.672	0.674	0.674
	1/2	0.6	0.656	0.670	0.681	0.686	0.688	0.688
	1/2	0.8	0.655	0.676	0.690	0.694	0.696	0.695
	1/4	0.0	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
	1/4	0.1	0.893	0.890	0.887	0.886	0.885	0.884
	1/4	0.2	0.914	0.908	0.903	0.901	0.900	0.898
	1/4	0.4	0.993	0.979	0.970	0.966	0.964	0.962
G_1	1/4	0.6	1.120	1.082	1.060	1.050	1.044	1.039
	1/4	0.8	1.309	1.208	1.142	1.111	1.092	1.080
	1/8	0.0	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022
	1/8	0.1	1.048	1.041	1.034	1.031	1.029	1.028
	1/8	0.2	1.101	1.088	1.076	1.071	1.068	1.066
	1/8	0.4	1.308	1.271	1.252	1.244	1.239	1.235
	1/8	0.6	1.674	1.560	1.510	1.490	1.476	1.465
	1/8	0.8	2.358	2.001	1.812	1.722	1.663	1.624
	1/16	0.0	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088
	1/16	0.1	1.123	1.114	1.106	1.102	1.100	1.099
G_2	1/16	0.2	1.210	1.194	1.183	1.179	1.176	1.173
	1/16	0.4	1.514	1.479	1.482	1.487	1.489	1.488
	1/16	0.6	2.007	1.897	1.925	1.951	1.965	1.965
	1/16	0.8	-	2.627	2.545	2.515	2.479	2.433
	1/32	0.0	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105
	1/32	0.1	1.154	1.145	1.138	1.135	1.133	1.131
	1/32	0.2	1.256	1.248	1.246	1.246	1.245	1.243
	1/32	0.4	-	1.519	1.592	1.639	1.671	1.686
	1/32	0.6	-	-	2.073	2.240	2.369	2.445
	1/32	0.8	-	-	2.758	3.037	3.276	3.420
G_3	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
G_4	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
G_5	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
G_6	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
G_7	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
G_8	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
G_9	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
G_{10}	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
G_{11}	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.905
	0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
	0	0.1	1.163	1.163	1.165	1.168	1.172	1.175
	0	0.2	1.230	1.240	1.264	1.284	1.302	1.318
	0	0.4	1.427	1.461	1.558	1.651	1.744	1.827
	0	0.6	1.778	1.800	1.971	2.182	2.434	2.701
	0	0.8	2.591	2.480	2.614	2.899	3.330	3.9

表 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
1/2	0.0	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385
1/2	0.1	0.380	0.381	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382	0.382
1/2	0.2	0.377	0.379	0.381	0.382	0.382	0.383	0.383	0.383
1/2	0.4	0.371	0.376	0.381	0.383	0.384	0.384	0.384	0.385
1/2	0.6	0.364	0.373	0.381	0.384	0.385	0.386	0.386	0.389
1/2	0.8	0.362	0.378	0.391	0.396	0.398	0.399	0.399	0.400
1/4	0.0	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451
1/4	0.1	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.449	0.448	0.449
1/4	0.2	0.452	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451	0.451
1/4	0.4	0.462	0.461	0.461	0.461	0.461	0.461	0.460	0.461
1/4	0.6	0.479	0.476	0.475	0.474	0.474	0.473	0.473	0.476
1/4	0.8	0.514	0.507	0.503	0.501	0.499	0.498	0.497	0.498
1/8	0.0	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491
1/8	0.1	0.492	0.491	0.490	0.490	0.489	0.489	0.489	0.489
1/8	0.2	0.502	0.499	0.498	0.497	0.496	0.496	0.496	0.496
1/8	0.4	0.536	0.530	0.527	0.526	0.525	0.525	0.523	0.525
1/8	0.6	0.598	0.579	0.571	0.568	0.565	0.563	0.561	0.563
1/8	0.8	0.726	0.670	0.641	0.626	0.617	0.611	0.607	0.604
G_2	1/16	0.0	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512
	1/16	0.1	0.515	0.514	0.512	0.511	0.511	0.511	0.510
	1/16	0.2	0.532	0.529	0.527	0.526	0.525	0.525	0.524
	1/16	0.4	0.590	0.582	0.581	0.582	0.582	0.582	0.580
	1/16	0.6	0.691	0.662	0.662	0.664	0.665	0.664	0.663
	1/16	0.8	-	0.822	0.796	0.784	0.774	0.764	0.755
	1/32	0.0	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518	0.518
	1/32	0.1	0.525	0.524	0.522	0.521	0.521	0.521	0.520
	1/32	0.2	0.547	0.545	0.544	0.544	0.544	0.543	0.543
	1/32	0.4	-	0.603	0.614	0.622	0.628	0.629	0.629
G_3	1/32	0.6	-	-	0.713	0.737	0.756	0.766	0.770
	1/32	0.8	-	-	0.878	0.911	0.939	0.954	0.955
	0	0.0	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526
	0	0.1	0.531	0.531	0.532	0.533	0.534	0.535	0.537
	0	0.2	0.546	0.549	0.555	0.559	0.564	0.567	0.578
	0	0.4	0.589	0.596	0.617	0.637	0.657	0.675	0.690
	0	0.6	0.664	0.668	0.703	0.746	0.797	0.850	0.902
	0	0.8	0.851	0.831	0.856	0.910	0.990	1.096	1.226
	0	-	-	-	-	-	-	-	2.573
	0	-	-	-	-	-	-	-	-
a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
1/2	0.0	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338
1/2	0.1	0.332	0.333	0.334	0.334	0.334	0.335	0.335	0.335
1/2	0.2	0.330	0.332	0.333	0.334	0.335	0.335	0.335	0.335
1/2	0.4	0.324	0.329	0.332	0.334	0.335	0.335	0.335	0.336
1/2	0.6	0.318	0.325	0.332	0.334	0.335	0.336	0.336	0.339
1/2	0.8	0.315	0.330	0.340	0.344	0.346	0.347	0.347	0.348
1/4	0.0	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386	0.386
1/4	0.1	0.383	0.383	0.383	0.383	0.383	0.383	0.382	0.383
1/4	0.2	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
1/4	0.4	0.389	0.389	0.389	0.389	0.389	0.389	0.389	0.390
1/4	0.6	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.399
1/4	0.8	0.420	0.419	0.418	0.417	0.417	0.416	0.416	0.416
1/8	0.0	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415	0.415
1/8	0.1	0.414	0.413	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412	0.412
1/8	0.2	0.419	0.418	0.417	0.416	0.416	0.416	0.415	0.416
1/8	0.4	0.439	0.436	0.434	0.433	0.433	0.433	0.432	0.433
1/8	0.6	0.476	0.465	0.460	0.458	0.457	0.456	0.454	0.457
1/8	0.8	0.557	0.525	0.508	0.499	0.494	0.490	0.488	0.487
1/16	0.0	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431
1/16	0.1	0.431	0.430	0.429	0.428	0.428	0.428	0.428	0.427
1/16	0.2	0.441	0.439	0.437	0.437	0.437	0.436	0.436	0.436
1/16	0.4	0.476	0.471	0.471	0.471	0.471	0.471	0.470	0.470
1/16	0.6	0.541	0.521	0.520	0.521	0.521	0.521	0.519	0.521
1/16	0.8	-	0.627	0.609	0.600	0.593	0.587	0.581	0.573
1/32	0.0	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435
1/32	0.1	0.438	0.437	0.436	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435
1/32	0.2	0.452	0.451	0.450	0.450	0.450	0.449	0.449	0.449
1/32	0.4	-	0.489	0.495	0.499	0.501	0.503	0.503	0.503
1/32	0.6	-	-	0.558	0.571	0.582	0.587	0.589	0.591
1/32	0.8	-	-	0.670	0.686	0.700	0.707	0.706	0.689
0	0.0	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441
0	0.1	0.443	0.444	0.444	0.445	0.445	0.446	0.446	0.447
0	0.2	0.454	0.456	0.459	0.463	0.465	0.468	0.470	0.475
0	0.4	0.482	0.486	0.500	0.514	0.527	0.539	0.549	0.584
0	0.6	0.532	0.534	0.557	0.584	0.617	0.651	0.684	0.822
0	0.8	0.657	0.644	0.660	0.694	0.744	0.810	0.892	1.734

表 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(a) 最深点 (その 3)

a/c	a/t	t/R_j							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
1/2	0.0	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657	0.657
1/2	0.1	0.629	0.639	0.648	0.649	0.655	0.655	0.656	0.657
1/2	0.2	0.602	0.624	0.642	0.647	0.656	0.657	0.658	0.660
1/2	0.4	0.562	0.600	0.638	0.651	0.666	0.670	0.671	0.675
1/2	0.6	0.521	0.577	0.635	0.660	0.675	0.681	0.684	0.691
1/2	0.8	0.480	0.551	0.626	0.659	0.678	0.686	0.690	0.697
1/4	0.0	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
1/4	0.1	0.864	0.871	0.878	0.876	0.883	0.883	0.883	0.884
1/4	0.2	0.855	0.869	0.884	0.886	0.895	0.896	0.896	0.898
1/4	0.4	0.871	0.897	0.930	0.945	0.954	0.956	0.956	0.962
1/4	0.6	0.912	0.949	0.996	1.016	1.027	1.030	1.029	1.038
1/4	0.8	0.987	1.011	1.049	1.062	1.068	1.067	1.065	1.070
1/8	0.0	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022	1.022
1/8	0.1	1.015	1.019	1.023	1.020	1.028	1.027	1.026	1.027
1/8	0.2	1.031	1.042	1.054	1.059	1.064	1.063	1.062	1.066
1/8	0.4	1.137	1.164	1.201	1.217	1.228	1.228	1.225	1.234
1/8	0.6	1.332	1.361	1.421	1.444	1.456	1.454	1.448	1.452
1/8	0.8	1.676	1.646	1.668	1.651	1.630	1.607	1.588	1.573
G_{bg}	1/16	0.0	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088	1.088
	1/16	0.1	1.085	1.091	1.094	1.096	1.099	1.097	1.097
	1/16	0.2	1.128	1.143	1.159	1.165	1.171	1.170	1.168
	1/16	0.4	1.287	1.340	1.419	1.454	1.475	1.479	1.478
	1/16	0.6	1.595	1.615	1.796	1.886	1.937	1.950	1.947
	1/16	0.8	-	2.069	2.297	2.398	2.426	2.408	2.372
1/32	0.0	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105	1.105
1/32	0.1	1.115	1.121	1.126	1.128	1.132	1.130	1.129	1.129
1/32	0.2	1.169	1.190	1.219	1.232	1.241	1.241	1.241	1.243
1/32	0.4	-	1.394	1.519	1.600	1.651	1.677	1.686	1.693
1/32	0.6	-	-	1.943	2.151	2.327	2.424	2.465	2.470
1/32	0.8	-	-	2.573	2.875	3.190	3.380	3.445	3.331
0	0.0	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122	1.122
0	0.1	1.138	1.141	1.150	1.156	1.162	1.166	1.169	1.185
0	0.2	1.210	1.216	1.242	1.267	1.289	1.306	1.319	1.364
0	0.4	1.472	1.456	1.533	1.623	1.716	1.800	1.869	2.109
0	0.6	1.994	1.873	1.968	2.154	2.392	2.649	2.896	4.030
0	0.8	3.230	2.737	2.689	2.924	3.329	3.884	4.571	11.949

表 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 1)

a/c	a/t	t/R_i								
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0	
G_0	1/2	0.0	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	
	0.1	0.750	0.749	0.748	0.748	0.748	0.748	0.747	0.748	
	0.2	0.755	0.755	0.754	0.753	0.753	0.753	0.753	0.754	
	0.4	0.784	0.785	0.787	0.788	0.788	0.788	0.786	0.789	
	0.6	0.832	0.836	0.844	0.848	0.849	0.849	0.847	0.853	
	0.8	0.898	0.904	0.917	0.922	0.924	0.924	0.919	0.927	
	1/4	0.0	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	
	0.1	0.717	0.715	0.713	0.712	0.712	0.712	0.712	0.712	
	0.2	0.732	0.730	0.728	0.727	0.726	0.726	0.725	0.726	
	0.4	0.797	0.798	0.802	0.804	0.804	0.804	0.802	0.806	
G_1	0.6	0.901	0.907	0.926	0.935	0.939	0.939	0.936	0.947	
	0.8	1.043	1.048	1.086	1.103	1.110	1.111	1.103	1.117	
	1/8	0.0	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	
	0.1	0.588	0.587	0.586	0.585	0.585	0.585	0.585	0.585	
	0.2	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608	0.607	0.607	0.608	
	0.4	0.667	0.678	0.696	0.704	0.708	0.710	0.709	0.714	
	0.6	0.717	0.758	0.826	0.860	0.880	0.890	0.891	0.900	
	0.8	0.732	0.837	0.996	1.080	1.130	1.152	1.156	1.167	
	1/16	0.0	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	
	0.1	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.445	
G_2	0.2	0.458	0.461	0.465	0.467	0.468	0.468	0.468	0.469	
	0.4	0.454	0.478	0.513	0.533	0.545	0.552	0.555	0.559	
	0.6	0.378	0.467	0.553	0.620	0.670	0.701	0.717	0.725	
	0.8	-	0.415	0.555	0.710	0.843	0.932	0.979	1.006	
	1/32	0.0	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	
	0.1	0.334	0.335	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	
	0.2	0.333	0.338	0.344	0.348	0.350	0.351	0.352	0.353	
	0.4	-	0.331	0.350	0.369	0.385	0.396	0.403	0.410	
	0.6	-	-	0.342	0.374	0.418	0.459	0.489	0.515	
	0.8	-	-	0.330	0.350	0.426	0.530	0.622	0.729	
G_3	a/c	a/t	1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
	1/2	0.0	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129	0.129
	0.1	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126
	0.2	0.127	0.127	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128
	0.4	0.134	0.136	0.137	0.138	0.139	0.139	0.138	0.139	0.139
	0.6	0.146	0.149	0.154	0.155	0.156	0.157	0.156	0.158	0.158
	0.8	0.162	0.166	0.172	0.174	0.175	0.175	0.173	0.176	0.176
	1/4	0.0	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119
	0.1	0.114	0.114	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
	0.2	0.119	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118
G_4	0.4	0.138	0.140	0.142	0.143	0.144	0.144	0.143	0.144	0.144
	0.6	0.169	0.172	0.180	0.183	0.184	0.185	0.184	0.188	0.188
	0.8	0.210	0.213	0.225	0.230	0.232	0.232	0.229	0.231	0.231
	1/8	0.0	7.37E-02							
	0.1	7.37E-02	7.35E-02	7.33E-02	7.32E-02	7.31E-02	7.31E-02	7.30E-02	7.31E-02	7.31E-02
	0.2	7.98E-02	8.01E-02	8.06E-02	8.08E-02	8.09E-02	8.09E-02	8.06E-02	8.11E-02	8.11E-02
	0.4	9.79E-02	0.102	0.109	0.112	0.114	0.114	0.114	0.116	0.116
	0.6	0.111	0.125	0.148	0.160	0.166	0.169	0.170	0.173	0.173
	0.8	0.112	0.146	0.196	0.222	0.237	0.243	0.244	0.244	0.244
	1/16	0.0	3.93E-02							
G_5	0.1	3.70E-02	3.71E-02	3.72E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.73E-02	3.70E-02	3.70E-02
	0.2	4.01E-02	4.15E-02	4.32E-02	4.40E-02	4.44E-02	4.46E-02	4.46E-02	4.48E-02	4.48E-02
	0.4	3.60E-02	4.50E-02	5.76E-02	6.45E-02	6.89E-02	7.14E-02	7.25E-02	7.39E-02	7.39E-02
	0.6	2.05E-03	3.59E-02	6.58E-02	8.88E-02	0.106	0.116	0.121	0.122	0.122
	0.8	-	1.08E-02	5.77E-02	0.109	0.152	0.180	0.194	0.202	0.202
	1/32	0.0	2.02E-02							
	0.1	1.66E-02	1.69E-02	1.73E-02	1.75E-02	1.76E-02	1.76E-02	1.76E-02	1.77E-02	1.77E-02
	0.2	1.50E-02	1.69E-02	1.94E-02	2.08E-02	2.16E-02	2.21E-02	2.23E-02	2.26E-02	2.26E-02
	0.4	-	1.13E-02	1.75E-02	2.42E-02	3.00E-02	3.40E-02	3.66E-02	3.88E-02	3.88E-02
	0.6	-	-	9.72E-03	2.04E-02	3.55E-02	4.95E-02	5.96E-02	6.94E-02	6.94E-02
	0.8	-	-	3.31E-03	7.63E-03	3.25E-02	6.69E-02	9.68E-02	0.131	0.131

表 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 2)

a/c	a/t	t/R_i							
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80	0
G_2	1/2	0.0	4.78E-02	4.78E-02	4.78E-02	4.78E-02	4.78E-02	4.78E-02	4.78E-02
	0.1	4.67E-02	4.68E-02	4.69E-02	4.69E-02	4.69E-02	4.69E-02	4.69E-02	4.70E-02
	0.2	4.71E-02	4.74E-02	4.76E-02	4.78E-02	4.78E-02	4.79E-02	4.78E-02	4.79E-02
	0.4	5.01E-02	5.11E-02	5.23E-02	5.28E-02	5.31E-02	5.31E-02	5.30E-02	5.34E-02
	0.6	5.51E-02	5.70E-02	5.94E-02	6.04E-02	6.10E-02	6.11E-02	6.09E-02	6.19E-02
	0.8	6.12E-02	6.33E-02	6.63E-02	6.74E-02	6.79E-02	6.79E-02	6.73E-02	6.84E-02
	1/4	0.0	4.06E-02	4.06E-02	4.06E-02	4.06E-02	4.06E-02	4.06E-02	4.06E-02
	0.1	4.09E-02	4.07E-02	4.06E-02	4.06E-02	4.05E-02	4.05E-02	4.05E-02	4.05E-02
	0.2	4.30E-02	4.30E-02	4.30E-02	4.30E-02	4.30E-02	4.30E-02	4.29E-02	4.30E-02
	0.4	5.25E-02	5.33E-02	5.47E-02	5.53E-02	5.56E-02	5.56E-02	5.53E-02	5.60E-02
	0.6	6.69E-02	6.85E-02	7.22E-02	7.39E-02	7.47E-02	7.49E-02	7.44E-02	7.63E-02
	0.8	8.57E-02	8.66E-02	9.20E-02	9.40E-02	9.48E-02	9.46E-02	9.35E-02	9.48E-02
G_3	1/8	0.0	2.15E-02	2.15E-02	2.15E-02	2.15E-02	2.15E-02	2.15E-02	2.15E-02
	0.1	2.21E-02	2.21E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.19E-02	2.19E-02	2.19E-02	2.19E-02
	0.2	2.51E-02	2.53E-02	2.57E-02	2.58E-02	2.59E-02	2.59E-02	2.58E-02	2.60E-02
	0.4	3.38E-02	3.60E-02	3.95E-02	4.11E-02	4.20E-02	4.24E-02	4.23E-02	4.31E-02
	0.6	3.96E-02	4.65E-02	5.78E-02	6.34E-02	6.67E-02	6.81E-02	6.84E-02	6.99E-02
	0.8	3.91E-02	5.59E-02	7.97E-02	9.16E-02	9.82E-02	0.101	0.101	0.102
	1/16	0.0	8.08E-03	8.08E-03	8.08E-03	8.08E-03	8.08E-03	8.08E-03	8.08E-03
	0.1	8.41E-03	8.51E-03	8.61E-03	8.65E-03	8.67E-03	8.67E-03	8.64E-03	8.63E-03
	0.2	9.86E-03	1.06E-02	1.16E-02	1.20E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.25E-02
	0.4	6.41E-03	1.11E-02	1.76E-02	2.11E-02	2.34E-02	2.47E-02	2.53E-02	2.59E-02
	0.6	-1.50E-02	4.45E-03	1.97E-02	3.12E-02	3.95E-02	4.46E-02	4.72E-02	4.87E-02
	0.8	-	-8.74E-03	1.47E-02	4.00E-02	6.07E-02	7.39E-02	8.08E-02	8.39E-02
G_3	1/32	0.0	2.77E-03	2.77E-03	2.77E-03	2.77E-03	2.77E-03	2.77E-03	2.77E-03
	0.1	2.59E-03	2.78E-03	2.98E-03	3.08E-03	3.13E-03	3.15E-03	3.15E-03	3.19E-03
	0.2	1.53E-03	2.53E-03	3.85E-03	4.54E-03	4.98E-03	5.24E-03	5.38E-03	5.52E-03
	0.4	-	1.15E-03	1.84E-03	5.32E-03	8.28E-03	1.04E-02	1.17E-02	1.28E-02
	0.6	-	-	-3.52E-03	1.76E-03	9.36E-03	1.64E-02	2.15E-02	2.66E-02
	0.8	-	-	-7.39E-03	-6.17E-03	6.11E-03	2.31E-02	3.76E-02	5.37E-02
	1/4	0.0	2.04E-02	2.04E-02	2.04E-02	2.04E-02	2.04E-02	2.04E-02	2.04E-02
	0.1	2.07E-02	2.06E-02	2.06E-02	2.05E-02	2.05E-02	2.05E-02	2.05E-02	2.05E-02
	0.2	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.19E-02	2.21E-02
	0.4	2.75E-02	2.80E-02	2.89E-02	2.93E-02	2.95E-02	2.95E-02	2.93E-02	2.98E-02
	0.6	3.57E-02	3.67E-02	3.89E-02	3.98E-02	4.03E-02	4.04E-02	4.02E-02	4.13E-02
	0.8	4.63E-02	4.67E-02	4.95E-02	5.05E-02	5.08E-02	5.06E-02	5.00E-02	5.07E-02
G_3	1/8	0.0	9.56E-03	9.56E-03	9.56E-03	9.56E-03	9.56E-03	9.56E-03	9.56E-03
	0.1	1.01E-02	1.00E-02	1.00E-02	9.99E-03	9.98E-03	9.97E-03	9.94E-03	9.97E-03
	0.2	1.18E-02	1.20E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.24E-02	1.24E-02	1.23E-02	1.24E-02
	0.4	1.69E-02	1.83E-02	2.04E-02	2.14E-02	2.19E-02	2.22E-02	2.21E-02	2.26E-02
	0.6	2.00E-02	2.41E-02	3.07E-02	3.40E-02	3.59E-02	3.68E-02	3.69E-02	3.78E-02
	0.8	1.95E-02	2.93E-02	4.29E-02	4.95E-02	5.31E-02	5.46E-02	5.46E-02	5.49E-02
	1/16	0.0	2.91E-03	2.91E-03	2.91E-03	2.91E-03	2.91E-03	2.91E-03	2.91E-03
	0.1	3.29E-03	3.35E-03	3.43E-03	3.45E-03	3.47E-03	3.47E-03	3.46E-03	3.47E-03
	0.2	4.12E-03	4.60E-03	5.18E-03	5.44E-03	5.59E-03	5.66E-03	5.67E-03	5.75E-03
	0.4	1.60E-03	4.44E-03	8.41E-03	1.06E-02	1.19E-02	1.27E-02	1.31E-02	1.35E-02
	0.6	-1.28E-02	-2.91E-04	8.94E-03	1.58E-02	2.08E-02	2.38E-02	2.53E-02	2.63E-02
	0.8	-	-8.75E-03	5.30E-03	2.03E-02	3.24E-02	4.00E-02	4.38E-02	4.54E-02
G_3	1/32	0.0	7.13E-04	7.13E-04	7.13E-04	7.13E-04	7.13E-04	7.13E-04	7.13E-04
	0.1	8.62E-04	9.79E-04	1.11E-03	1.17E-03	1.20E-03	1.21E-03	1.22E-03	1.24E-03
	0.2	1.14E-04	7.32E-04	1.54E-03	1.97E-03	2.25E-03	2.40E-03	2.50E-03	2.58E-03
	0.4	-	-1.79E-03	5.64E-05	2.06E-03	3.87E-03	5.14E-03	5.93E-03	6.61E-03
	0.6	-	-	-3.75E-03	-6.37E-04	3.94E-03	8.17E-03	1.12E-02	1.43E-02
	0.8	-	-	-6.29E-03	-6.00E-03	1.28E-03	1.13E-02	1.99E-02	2.91E-02

表 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥の補正係数

(b) 表面点 (その 3)

σ/c	σ/t	t/R_i						
		1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/40	1/80
1/2	0.0	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744	0.744
	0.1	0.742	0.744	0.746	0.743	0.748	0.747	0.748
	0.2	0.736	0.745	0.749	0.747	0.753	0.752	0.754
	0.4	0.748	0.763	0.776	0.778	0.786	0.785	0.789
	0.6	0.769	0.798	0.826	0.838	0.846	0.847	0.866
	0.8	0.803	0.843	0.890	0.908	0.919	0.920	0.927
1/4	0.0	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704	0.704
	0.1	0.708	0.710	0.711	0.708	0.712	0.711	0.712
	0.2	0.710	0.717	0.723	0.721	0.726	0.725	0.726
	0.4	0.734	0.761	0.788	0.797	0.803	0.802	0.806
	0.6	0.762	0.832	0.898	0.921	0.934	0.936	0.935
	0.8	0.797	0.916	1.036	1.080	1.102	1.105	1.117
G_{bg}	0.0	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568	0.568
	0.1	0.575	0.580	0.584	0.581	0.585	0.584	0.585
	0.2	0.563	0.585	0.601	0.605	0.608	0.607	0.606
	0.4	0.499	0.596	0.671	0.694	0.706	0.708	0.714
	0.6	0.360	0.578	0.770	0.839	0.874	0.886	0.889
	0.8	0.141	0.516	0.890	1.039	1.115	1.145	1.153
1/16	0.0	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432
	0.1	0.413	0.431	0.443	0.445	0.447	0.446	0.445
	0.2	0.330	0.402	0.449	0.462	0.467	0.468	0.469
	0.4	1.15E-02	0.253	0.450	0.512	0.539	0.550	0.554
	0.6	-0.428	1.65E-02	0.408	0.572	0.656	0.696	0.715
	0.8	-	-0.308	0.296	0.619	0.813	0.922	0.975
1/32	0.0	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282
	0.1	0.236	0.290	0.324	0.332	0.336	0.336	0.336
	0.2	2.13E-03	0.168	0.298	0.333	0.346	0.350	0.351
	0.4	-	-0.187	0.172	0.311	0.368	0.392	0.402
	0.6	-	-	-3.10E-02	0.242	0.378	0.448	0.485
	0.8	-	-	0.241	0.117	0.353	0.509	0.616

表 D. 12 球殻の貫通欠陥の補正係数

(a) 内表面				(b) 外表面			
t/R_i	λ	G_1	G_2	t/R_i	λ	G_1	G_2
1/3	0	0.866	0	1/3	0.000	1	1
1/3	0.1319	0.8311	0.0289	1/3	0.132	0.9668	0.9917
1/3	0.2638	0.8286	0.0552	1/3	0.264	1.0252	1.0073
1/3	0.6595	0.8658	0.1426	1/3	0.660	1.2103	1.041
1/3	1.319	1.0651	0.3208	1/3	1.319	1.4947	1.1316
1/3	2.638	1.9643	0.885	1/3	2.638	2.0147	1.3351
1/3	3.957	3.4719	1.7249	1/3	3.957	2.3612	1.4597
1/3	5.276	5.6092	2.8922	1/3	5.276	2.3817	1.4431
1/3	6.595	7.3505	3.8201	1/3	6.595	2.114	1.2689
1/3	7.914	12.484	6.5391	1/3	7.914	1.0258	0.6687
1/3	9.233	18.011	-	1/3	9.233	-0.726	-
1/5	0	0.9219	0	1/5	0.000	1	1
1/5	0.1533	0.879	0.0494	1/5	0.153	0.986	1.001
1/5	0.4598	0.88902	0.1236	1/5	0.460	1.1423	1.0141
1/5	0.9195	0.9827	0.234	1/5	0.920	1.3589	1.0702
1/5	1.5325	1.2668	0.426	1/5	1.533	1.6676	1.1725
1/5	3.0651	2.5645	1.1979	1/5	3.065	2.2866	1.4312
1/5	4.5976	4.7357	2.3624	1/5	4.598	2.6496	1.5636
1/5	6.1301	7.5237	3.8362	1/5	6.130	2.5507	1.4863
1/5	7.6627	10.797	5.538	1/5	7.663	2.0452	1.1951
1/5	8.9434	16.504	8.5003	1/5	8.943	0.706	0.4871
1/5	10.728	25.473	13.144	1/5	10.728	-2.021	-0.97
1/10	0	0.9535	0	1/10	0.000	1	1
1/10	0.1987	0.9207	-	1/10	0.199	1.0278	-
1/10	0.3973	0.9311	-	1/10	0.397	1.1355	-
1/10	0.9934	1.0597	0.2774	1/10	0.9934	1.4309	1.0791
1/10	1.9867	1.6426	0.6438	1/10	1.9867	1.9542	1.274
1/10	3.9734	3.9284	1.8983	1/10	3.9734	2.7421	1.6067
1/10	5.9602	7.6833	3.8426	1/10	5.9602	2.9743	1.6759
1/10	7.9469	13.05	6.5945	1/10	7.9469	2.4068	1.3626
1/10	9.9336	20.604	10.439	1/10	9.9336	0.7949	0.5148
1/10	11.92	30.455	15.45	1/10	11.92	-1.844	-0.861
1/10	13.907	43.35	22.019	1/10	13.907	-4.735	-2.383
1/20	0	0.9759	0	1/20	0	1	1
1/20	0.1341	0.948	-	1/20	0.1341	1.0066	-
1/20	0.2682	0.9537	0.1282	1/20	0.2682	1.0882	0.977
1/20	0.4023	0.9599	0.1559	1/20	0.4023	1.154	0.9818
1/20	0.8046	1.0304	0.2402	1/20	0.8046	1.3586	1.0406
1/20	1.341	1.2505	0.399	1/20	1.341	1.6526	1.1497
1/20	2.6819	2.323	1.0168	1/20	2.6819	2.3614	1.4345
1/20	5.3639	6.482	3.1908	1/20	5.3639	3.194	1.7855
1/20	8.0458	13.238	6.6131	1/20	8.0458	2.8701	1.5788
1/20	10.728	23.215	11.648	1/20	10.728	1.1225	0.6756
1/60	0	0.9918	0	1/60	0	1	1
1/60	0.1583	0.9775	0.128	1/60	0.1583	1.0542	0.9586
1/60	0.2249	0.977	0.1442	1/60	0.2249	1.0872	0.9516
1/60	0.4694	0.99	0.1837	1/60	0.4694	1.2066	0.9711
1/60	1.3493	1.2792	0.4039	1/60	1.3493	1.7021	1.1522
1/60	2.2489	1.9307	0.7869	1/60	2.2489	2.2162	1.3635
1/60	4.4978	4.8203	2.3019	1/60	4.4978	3.1796	1.7722
1/60	8.9956	15.929	7.878	1/60	8.9956	3.0272	1.6319
1/60	13.493	34.004	16.863	1/60	13.493	-0.32	-0.069
1/100	0	0.995	0	1/100	0	1	1
1/100	0.1731	0.9823	0.1423	1/100	0.1731	1.0703	0.9434
1/100	0.5769	1.0092	0.2046	1/100	0.5769	1.2674	0.9814
1/100	1.7306	1.5229	0.5432	1/100	1.7306	1.9457	1.2397
1/100	2.8843	2.5855	1.1275	1/100	2.8843	2.5822	1.5053
1/100	5.7685	7.2025	3.4794	1/100	5.7685	3.4931	1.8922
1/100	11.537	24.958	12.283	1/100	11.537	1.7936	0.9893
1/100	17.306	53.643	26.45	1/100	17.306	-4.219	-2.03

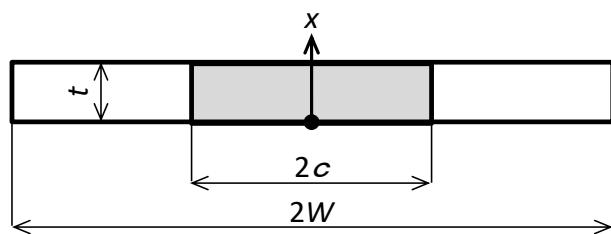


図 D.1 平板の貫通欠陥

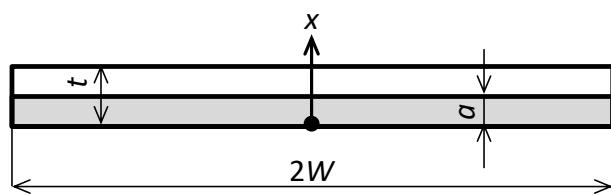


図 D.2 平板の片側欠陥

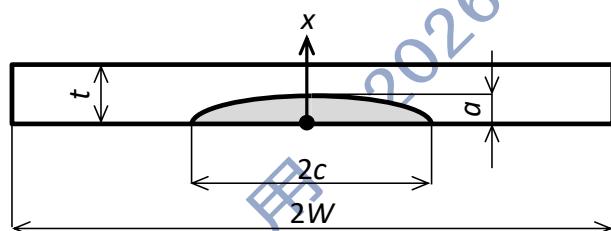


図 D.3 平板の半だ円表面欠陥

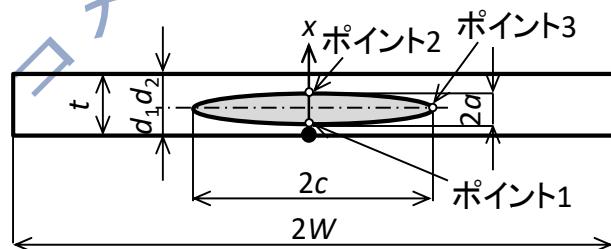


図 D.4 平板のだ円内部欠陥

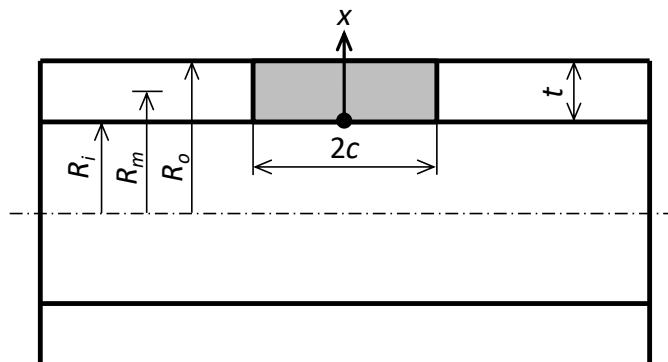


図 D.5 円筒の軸方向貫通欠陥

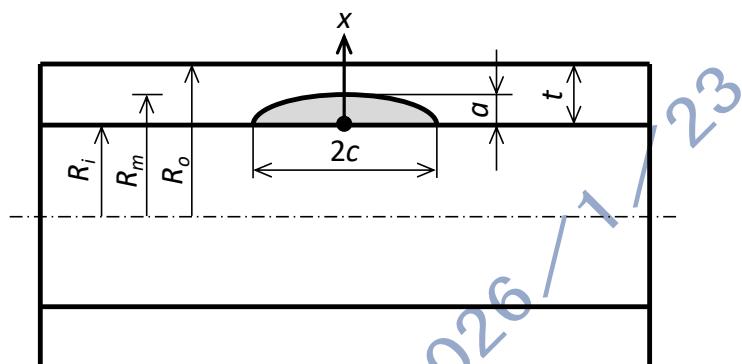


図 D.6 円筒内面の軸方向半だ円表面欠陥

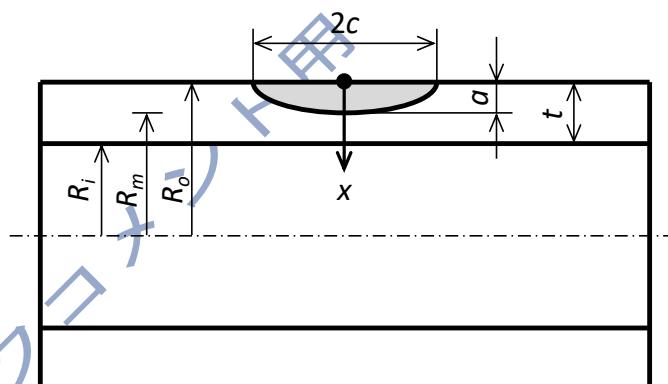


図 D.7 円筒外面の軸方向半だ円表面欠陥

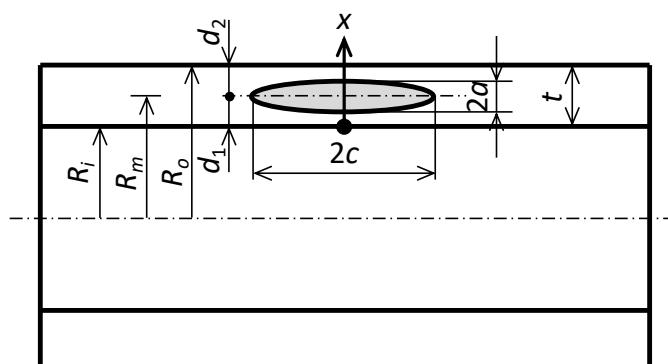


図 D.8 円筒の軸方向だ円内部欠陥

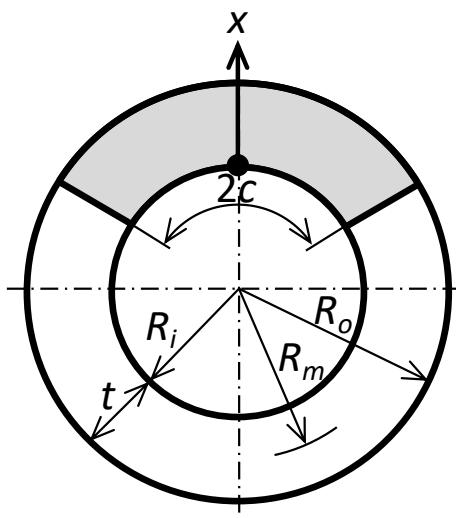


図 D.9 円筒の周方向貫通欠陥

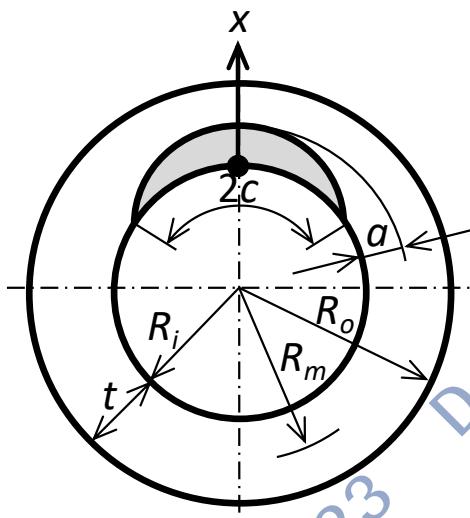


図 D.10 円筒内面の周方向半だ円表面欠陥

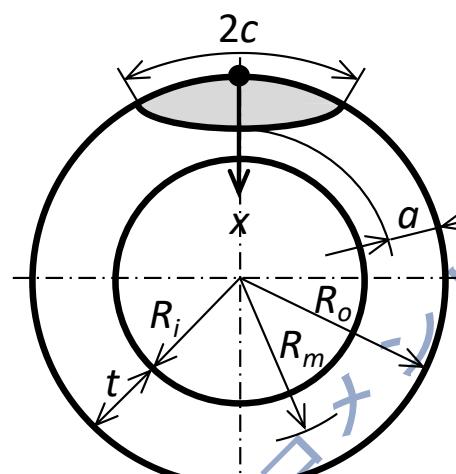


図 D.11 円筒外面の周方向半だ円表面欠陥

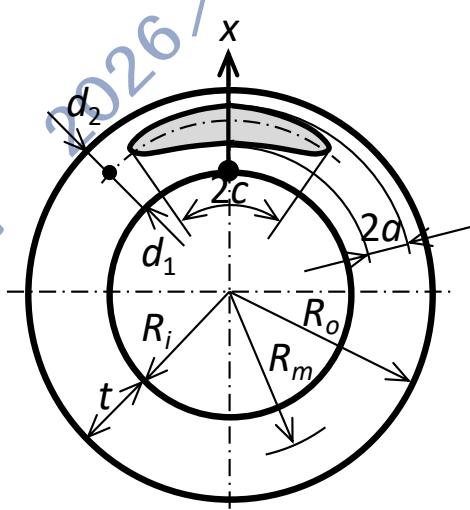


図 D.12 円筒の周方向だ円内部欠陥

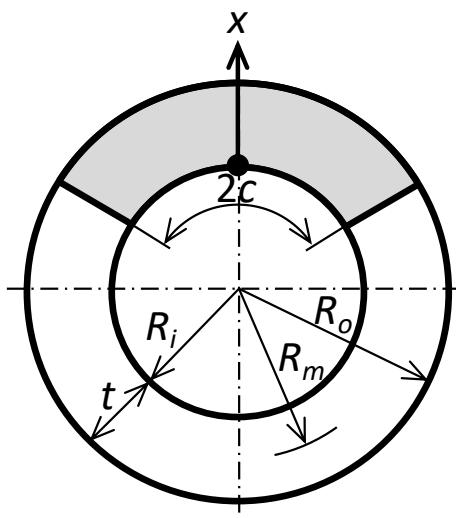


図 D.13 球殼の貫通欠陥

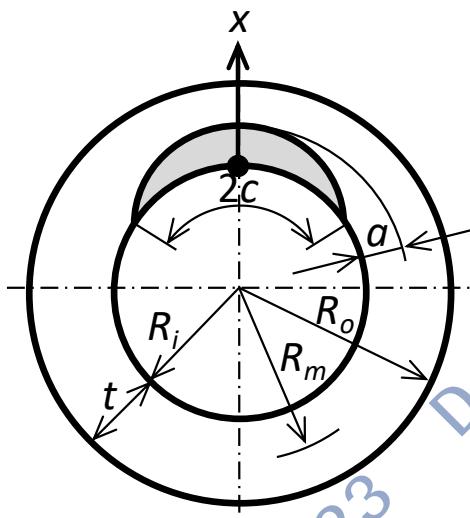


図 D.14 球殼内面の半だ円表面欠陥

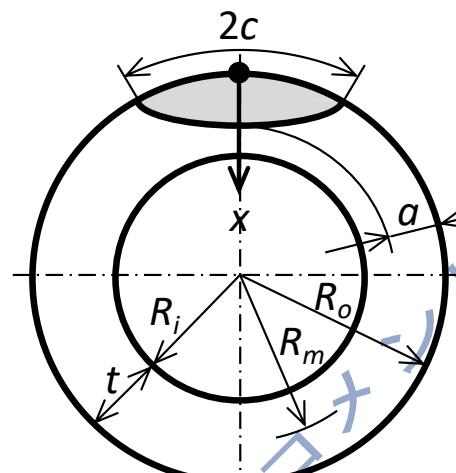


図 D.15 球殼外面の半だ円表面欠陥

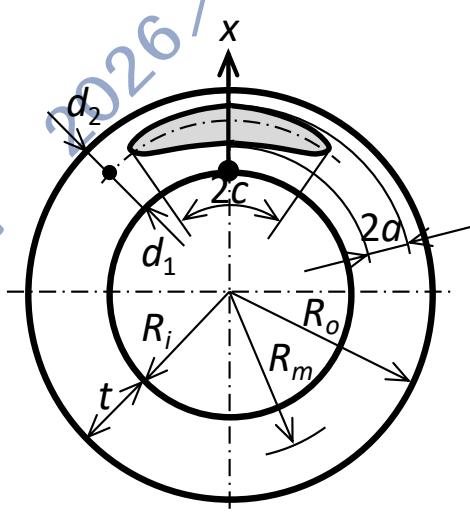


図 D.16 球殼のだ円内部欠陥

附属書 E (規定) 疲労 J 積分範囲およびクリープ J 積分算出式

E. 1 一般

この附属書では、疲労亀裂進展の支配パラメータである疲労 J 積分範囲 ΔJ_f およびクリープ亀裂進展の支配パラメータであるクリープ J 積分 J^* を算出する方法を規定する。 ΔJ_f の算出の流れを図 E. 1 に、 J^* の算出の流れを図 E. 2 にそれぞれ示す。

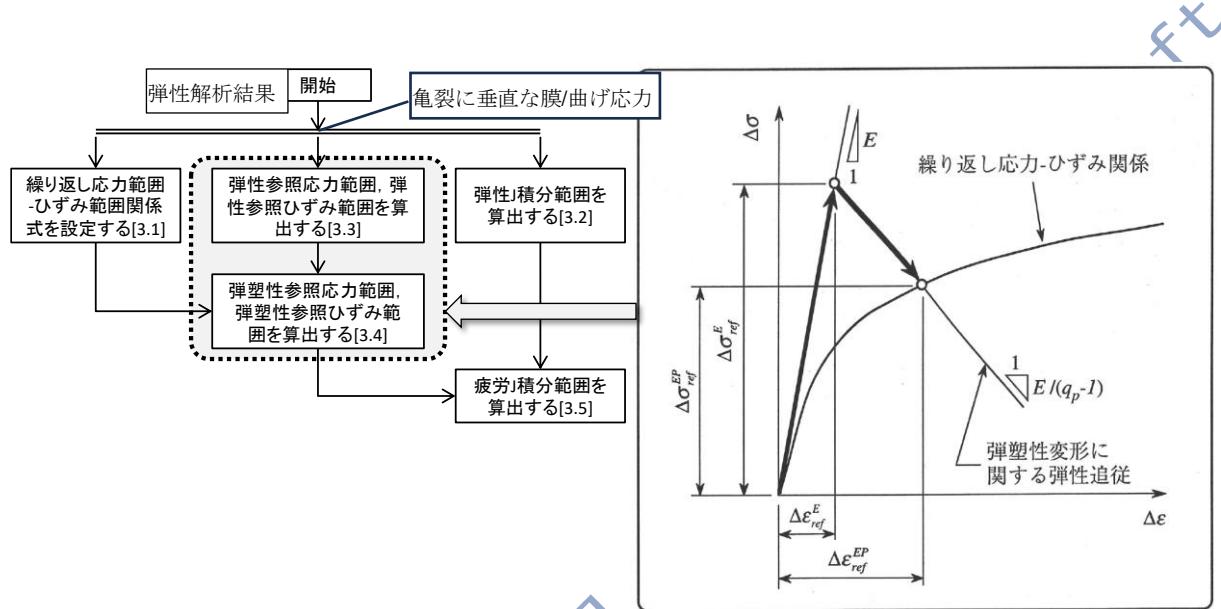


図 E. 1 疲労 J 積分範囲の算出の流れ

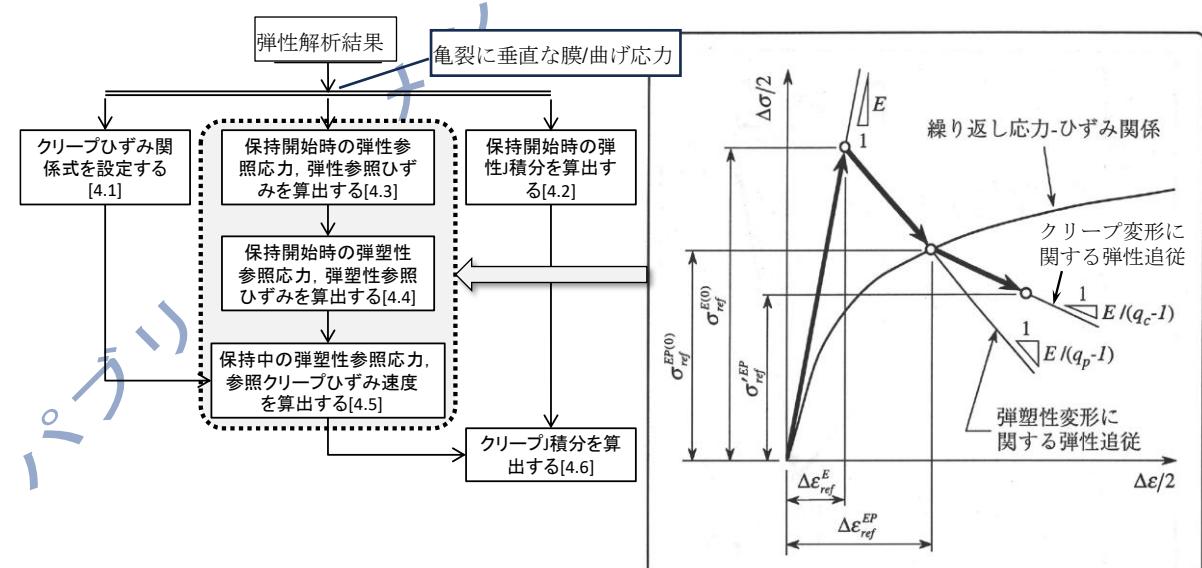


図 E. 2 クリープ J 積分の算出の流れ

E.2 記号の定義

B	: Norton 近似式の材料定数
E	: ヤング率
E'	: 平面ひずみ状態を考慮したヤング率
$f_{\Delta\varepsilon}$: 繰り返し応力範囲・ひずみ範囲関係式
$f_{\varepsilon c}$: クリープひずみ関係式
$f_{\sigma \text{ref}}$: 参照応力算出式
J^*	: クリープ J 積分
$J_e^{(0)}$: 保持開始時の弾性 J 積分
$K_I^{(\max)}$: 当該サイクル中の応力拡大係数の最大値
$K_I^{(\min)}$: 当該サイクル中の応力拡大係数の最小値
m	: Norton 近似式のクリープ指数
n	: Ramberg-Osgood 近似式の加工硬化指数
P_{ref}	: 当該サイクル中の一次弾性参照応力の最大値
q_c	: クリープ変形に関する弾性追従係数
q_p	: 弹塑性変形に関する弾性追従係数
T	: 温度
t	: 時間
\bar{t}	: ひずみ硬化則により求められる等価時間
t_h	: 保持開始からの経過時間
ΔJ_e	: 弹性 J 積分範囲
ΔJ_f	: 疲労 J 積分範囲
ΔK_I	: 応力拡大係数範囲
$\Delta \varepsilon$: ひずみ範囲
$\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E$: 弹性参照ひずみ範囲
$\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}$: 弹塑性参照ひずみ範囲
$\Delta \sigma$: 応力範囲
$\Delta \sigma_b$: 当該サイクル中の曲げ応力の最大値と最小値の差
$\Delta \sigma_m$: 当該サイクル中の膜応力の最大値と最小値の差
$\Delta \sigma_{\text{ref}}^E$: 弹性参照応力範囲
$\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$: 弹塑性参照応力範囲
ε_0	: Ramberg-Osgood 近似式の基準ひずみ
ε_c	: クリープひずみ
$\dot{\varepsilon}_c$: クリープひずみ速度
$\varepsilon_{\text{ref}}^C$: 保持中の参照クリープひずみ
$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^C$: 保持中の参照クリープひずみ速度
$\varepsilon_{\text{ref}}^{E(0)}$: 保持開始時の弾性参照ひずみ
$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$: 保持開始時の弾塑性参照ひずみ

κ	: Ramberg-Osgood 近似式の材料定数
ν	: ポアソン比
σ	: 応力
σ_0	: Ramberg-Osgood 近似式の基準応力
$\dot{\sigma}_{\text{ref}}^C$: 保持中の参考応力緩和速度
$\sigma_{\text{ref}}^{E(0)}$: 保持開始時の弹性参考応力
$\sigma_{\text{ref}}^{E(\text{max})}$: 当該サイクル中の弹性参考応力の最大値
$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$: 保持開始時の弹塑性参考応力
$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$: 保持中の弹塑性参考応力
σ_{ref}^P	: 一次応力により算出した参考応力

E.3 疲労 J 積分範囲の算出

疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を以下の手順に従い算出する。

E.3.1 繰り返し応力範囲-ひずみ範囲関係式の設定

繰り返し応力範囲-ひずみ範囲関係 ($\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係) 式を設定する。

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = f_{\Delta\varepsilon}\left(T, \frac{\Delta\sigma}{2}\right) \quad \text{--- (1)}$$

たとえば以下の Ramberg-Osgood 近似式を用いる場合がある。

$$\frac{\Delta\varepsilon/2}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta\sigma/2}{\sigma_0} + \kappa \left(\frac{\Delta\sigma/2}{\sigma_0} \right)^n \quad \text{--- (2)}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \quad \text{--- (3)}$$

Ramberg-Osgood 近似式の基準応力 σ_0 , 基準ひずみ ε_0 , 材料定数 κ , および加工硬化指数 n は **附属書 B** を参照してもよい。

E.3.2 弹性 J 積分範囲の算出

弾性 J 積分範囲 ΔJ_e を次式により算出する。

$$\Delta J_e = \frac{\Delta K_I^2}{E'} \quad \text{--- (4)}$$

$$\Delta K_I = K_I^{(\text{max})} - K_I^{(\text{min})} \quad \text{--- (5)}$$

$$E' = \begin{cases} E & , \text{ 平面応力および三次元亀裂表面点} \\ E/(1-\nu^2) & , \text{ 上記以外} \end{cases} \quad \text{--- (6)}$$

当該サイクル中の応力拡大係数の最大値 $K_I^{(\text{max})}$ および最小値 $K_I^{(\text{min})}$ は評価対象の構造と亀裂の形状, 寸法に応じて **附属書 D** を用いることを推奨する。ヤング率 E およびポアソン比 ν は **附属書 B** を参照してもよい。

E.3.3 弹性参考応力範囲および弹性参考ひずみ範囲の算出

弹性参考応力範囲 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^E$ および弹性参考ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E$ を次式により算出する。

$$\Delta\sigma_{\text{ref}}^E = f_{\text{oref}}(\Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) \quad \text{--- (7)}$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E = \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^E}{E} \quad \text{--- (8)}$$

参照応力算出式 $f_{\sigma_{\text{ref}}}$ は**附属書 D** を用いることを推奨する。

E. 3.4 弹塑性参照応力範囲および弾塑性参照ひずみ範囲の算出

E. 3.3 で算出された $\Delta\sigma_{\text{ref}}^E$ および $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E$, E. 3.1 で設定された繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係式から、弾塑性参照応力範囲 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および弾塑性参照ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ を次式により算出する。

$$\frac{E}{q_p-1} = \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^E - \Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}} - \Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E} \quad \text{--- (9)}$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}} = f_{\Delta\varepsilon}(T, \Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) \quad \text{--- (10)}$$

繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係 $f_{\Delta\varepsilon}$ は**附属書 B** を参照してもよい。

繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係式が Ramberg-Osgood 近似式で表されるとき、 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は次式を満たす解として算出することが可能である。

$$q_p(\Delta\sigma_{\text{ref}}^E - \Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2\kappa\sigma_0 \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right)^n \quad \text{--- (11)}$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{E} + \frac{2\kappa\sigma_0}{E} \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right)^n \quad \text{--- (12)}$$

弾塑性変形に関する弾性追従係数は $q_p = 4$ とする。他の適切な方法により q_p を算出することができる場合にはその値を用いてもよい。

E. 3.5 疲労 J 積分範囲の算出

疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を次式により算出する。

$$\Delta J_f = \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} \Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{\Delta\sigma_{\text{ref}}^E \Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E} \Delta J_e \quad \text{--- (13)}$$

E. 4 クリープ J 積分の算出

クリープ J 積分 J^* を以下の手順に従い算出する。

E. 4.1 クリープひずみ関係式の設定

クリープひずみ関係式 (クリープひずみ ε_c あるいはクリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_c$ を与える式) を設定する。

$$\varepsilon_c = f_{\varepsilon c}(T, \sigma, t), \quad \dot{\varepsilon}_c = \frac{\partial f_{\varepsilon c}(T, \sigma, t)}{\partial t} \quad \text{--- (14)}$$

たとえば以下の Norton 近似式を用いる場合がある。

$$\dot{\varepsilon}_c = B\sigma^m \quad \text{--- (15)}$$

Norton 近似式の材料定数 B およびクリープ指数 m は**附属書 B** を参照してもよい。

E. 4.2 保持開始時の弾性 J 積分の算出

保持開始時の弾性 J 積分 $J_e^{(0)}$ を次式により算出する。

$$J_e^{(0)} = \text{Max} \left\{ \frac{K_1^{(\text{max})^2}}{E'}, \frac{(\Delta K_1/2)^2}{E'} \right\} \quad \text{--- (16)}$$

E. 4.3 保持開始時の弾性参照応力および弾性参照ひずみの算出

保持開始時の弾性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{E(0)}$ および弾性参照ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{E(0)}$ を次式により算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{E(0)} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{E(\text{max})}, \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^E}{2} \right\} \quad \text{--- (17)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{E(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{E(0)}}{E} \quad \text{---(18)}$$

当該サイクル中の弾性参照応力の最大値 $\sigma_{\text{ref}}^{E(\max)}$ は**附属書 D** を用いることを推奨する。

E. 4.4 保持開始時の弾塑性参照応力および弾塑性参照ひずみの算出

E. 4.3 で算出された $\sigma_{\text{ref}}^{E(0)}$ および $\varepsilon_{\text{ref}}^{E(0)}$, **E. 3.1** で設定された繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係式から, 保持開始時の弾塑性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参照ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を次式により算出する。

$$\frac{E}{q_p-1} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{E(0)} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} - \varepsilon_{\text{ref}}^{E(0)}} \quad \text{---(19)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{1}{2} f_{4\varepsilon}(T, 2\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}) \quad \text{---(20)}$$

繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係 $f_{4\varepsilon}$ は**附属書 B** を参照してもよい。

繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係式が Ramberg-Osgood 近似式で設定されるとき, $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は次式を満たす解として算出してもよい。

$$q_p \left(\sigma_{\text{ref}}^{E(0)} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = \kappa \sigma_0 \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n \quad \text{---(21)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \frac{\kappa \sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n \quad \text{---(22)}$$

弾塑性変形に関する弾性追従係数 q_p は **E. 3.4** による。

E. 4.5 保持中の弾塑性参照応力および参考クリープひずみ速度の算出

E. 4.4 で算出された $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$, **E. 4.1** で設定されたクリープひずみ関係式から, 以下を満たす保持中の弾塑性応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c$ を保持開始からの経過時間 t_h の関数として算出する。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} + \int_0^{t_h} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c dt, \sigma_{\text{ref}}^P \right) \quad \text{---(23)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c = -\frac{E}{q_c} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c \quad \text{---(24)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c = \frac{\partial f_{\varepsilon_c}(T, \sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}, \bar{t})}{\partial t} \quad \text{---(25)}$$

当該サイクル中の一次応力により算出される参照応力 σ_{ref}^P は**附属書 D** を用いることを推奨する。クリープ変形に関する弾性追従係数は $q_c=4$ とする。他の適切な方法により q_c を算出することができる場合にはその値を用いてよい。

なお, クリープひずみ関係式が Norton 近似式で表されるとき, $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は次式により算出してもよい。

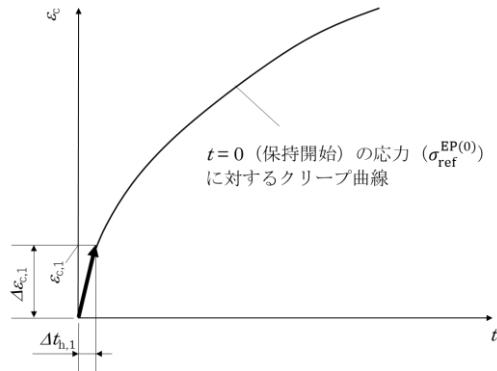
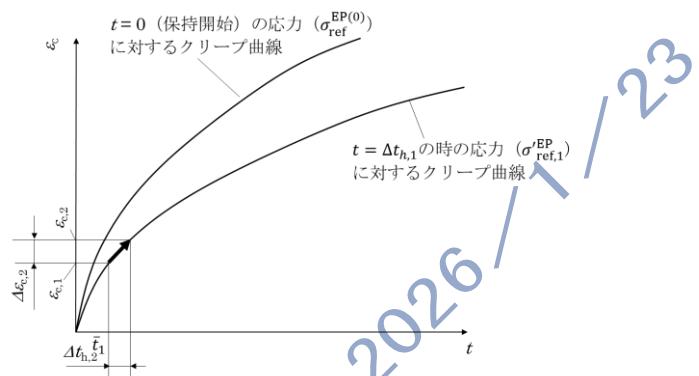
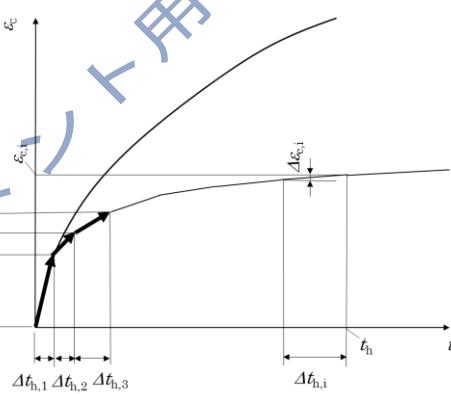
$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + (\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}})^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}, \sigma_{\text{ref}}^P \right\} \quad \text{---(26)}$$

一方, 一次クリープを考慮するような場合には**式(26)** のように簡易な計算式で算出することはできず, ひずみ硬化則をもちいて逐次計算する必要がある。そのために**式(25)** の $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c$ の計算に用いる \bar{t} はひずみ硬化則により求められる等価時間を表し, 保持開始後 t_h 経過時間後の $\varepsilon_{\text{ref}}^c$, $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$, T よ

りクリープひずみ関係式を用いて求められる仮想的な時間である。図 E.3 に一次クリープを考慮した場合の $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{c}}$ 算出方法を模式的に示す。まず、保持開始時の応力 ($\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$) に対するクリープ曲線を求める。 $t = 0$ における $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$, $\dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ を求め、 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ に微小時間 $\Delta t_{h,1}$ を乗じて同区間のクリープひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{c,1}$ を算出する。ここで $\Delta t_{h,1}$ は $\Delta\varepsilon_{c,1}$ が 0.0025% を上回らないよう十分小さな値に設定する。この時点の累積クリープひずみ $\varepsilon_{c,1}$ は $\Delta\varepsilon_{c,1}$ と等しい (図 E.3 (a))。また、 $t = \Delta t_{h,1}$ における応力は $\sigma'_{\text{ref},1}^{\text{EP}} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} + \dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{c}} \Delta t_{h,1}$ となる。次に、 $t = \Delta t_{h,1}$ の時の応力 ($\sigma'_{\text{ref},1}^{\text{EP}}$) に対するクリープ曲線が、点 $(\bar{t}_1, \varepsilon_{c,1})$ を通るような等価時間 \bar{t}_1 を繰返し計算により算出する。 $t = \bar{t}_1$ における $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$, $\dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ を算出し、 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ に微小時間 $\Delta t_{h,2}$ を乗じて同区間のクリープひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{c,2}$ を算出する。この時点の累積クリープひずみを $\varepsilon_{c,2}$ とする (図 E.3 (b))。以上を $\Delta t_{h,1} + \Delta t_{h,2} + \Delta t_{h,3} + \dots + \Delta t_{h,i} = t_h$ となるまで繰り返す。この時のクリープひずみ $\varepsilon_{c,i}$ は $\Delta\varepsilon_{c,1} + \Delta\varepsilon_{c,2} + \Delta\varepsilon_{c,3} + \dots + \Delta\varepsilon_{c,i}$ で与えられる。 (図 E.3 (c))。

2026/1/23

1. ポジショニングコマント用

(a) $t = 0$ におけるクリープ曲線とクリープひずみ増分 $\Delta\epsilon_c,1$ の算出(b) $t = \Delta t_{h,1}$ におけるクリープ曲線と等価時間 \bar{t}_1 クリープひずみ増分 $\Delta\epsilon_c,2$ の算出(c) $t = t_h$ まで繰り返し計算を行い $\epsilon_{c,i}$ を算出図 E.3 参照クリープひずみ ϵ_{ref}^c の評価の流れ

E.4.6 クリープ J 積分の算出

クリープ J 積分 J^* を次式により算出する。

$$J^* = \frac{\sigma_{ref}^{EP} \dot{\epsilon}_{ref}^c}{\sigma_{ref}^{E(0)} \epsilon_{ref}^{E(0)}} J_e^{(0)} \quad \dots \quad (27)$$

附属書 F (参考) 例題

F. 1 一般

この附属書は、F. 2 では欠陥のモデル化に関する実施例を、F. 3 では評価方法の参考になるよう簡易な中央貫通亀裂平板モデルに対するクリープ亀裂進展評価の実施例を取り上げる。F. 3. 1～F. 3. 4 では Norton 則や Blackburn 則など構成式の違い、温度条件による違いについて検討する。F. 3. 5 では、クリープと疲労との相互作用を考えた例題を取り上げる。

F. 2 欠陥のモデル化

図 F. 1 に示す配管に表面欠陥が確認され、追加で検査を行ったところ表面欠陥近傍に内部欠陥も確認された。この配管の供用適用性評価を行うため、欠陥のモデル化を行う。

表面欠陥の形状は、 $\ell'_1 = 8 \text{ mm}$, $d_1 = 2 \text{ mm}$ であった。

内部欠陥の形状は、 $\ell'_2 = 6 \text{ mm}$, $2d_2 = 2 \text{ mm}$, $S = 1 \text{ mm}$ であった。

表面欠陥と内部欠陥の距離はそれぞれ、 $S_1 = 3 \text{ mm}$ であり、 $S_2 = 1 \text{ mm}$ と求まる。

次に、この複数欠陥を单一欠陥とみなすべきか否かを検討する。図 F. 2 に評価方法を模式的に示す。

$$S_1 = 3 \text{ mm} < (\ell'_1 + \ell'_2)/2 = 7 \text{ mm}$$

$$S_2 = 1 \text{ mm} < d_1 + d_2 = 2 \text{ mm}$$

であることより、合体条件を満足する結果となり、单一欠陥とみなすこととなる。

よって、合体後の表面亀裂として

亀裂深さ $a = d_1 + S_2 + 2d_2 = 3 \text{ mm}$

亀裂長さ $\ell = \ell'_1 + S_1 + \ell'_2 = 17 \text{ mm}$

となる。

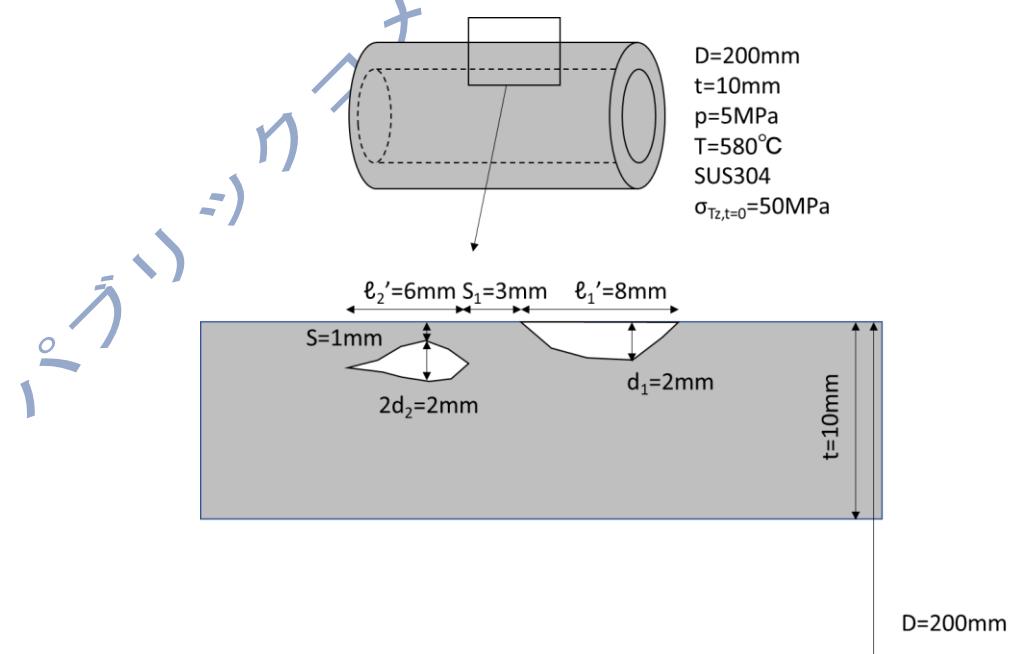


図 F. 1 検出された欠陥

複数欠陥を单一の欠陥とみなすか否かの判定

実測寸法からの評価寸法の求め方

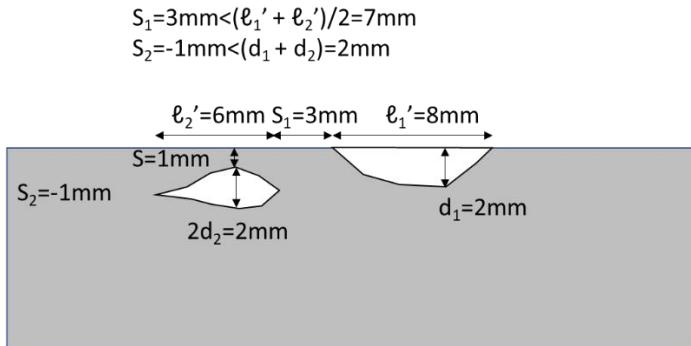
欠陥No.	合体のための前提条件	表面欠陥への置き換えの判定条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (ℓ)
#1	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq d_1 + d_2$	-	$a = d_1 + S_2 + 2d_2$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2$
#2	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq (\ell_2 + d_3)/2$ $S_3 \leq d_1 + d_2, S_4 \leq d_2 + d_3$	$S > Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$ $S \leq Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$	$a = d_1 + S_3/2 + d_2 + S_4/2 + d_3$ $a = 2d_1 + S_3 + 2d_2 + S_4 + 2d_3 + S$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2 + S_3 + \ell_3$ $\ell = \ell_1 + S_3 + \ell_2 + S_4 + \ell_3 + 2S$

複数欠陥は单一の欠陥とみなす

網掛け部は内部欠陥から表面欠陥への置き換えを表す

Y* = 0.75 - 0.64sqrt(d/l')

図 C.6 同一平面上にある非並列な複数欠陥の取り扱い（破線はモデル化された欠陥を示す）



(a) 合体条件の検討

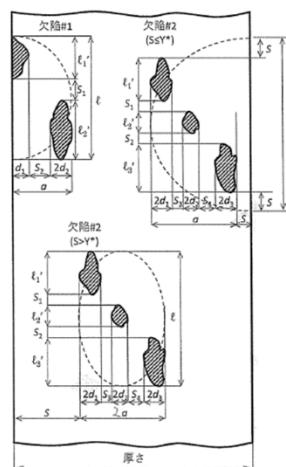
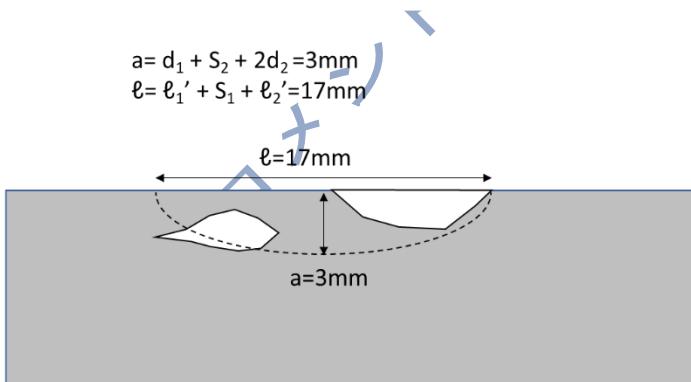
欠陥No.	合体のための前提条件	表面欠陥への置き換えの判定条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (ℓ)
#1	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq d_1 + d_2$	-	$a = d_1 + S_2 + 2d_2$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2$
#2	$S_1 \leq (\ell_1 + \ell_2)/2, S_2 \leq (\ell_2 + d_3)/2$ $S_3 \leq d_1 + d_2, S_4 \leq d_2 + d_3$	$S > Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$ $S \leq Y^* \max(d_1, d_2, d_3)$	$a = d_1 + S_3/2 + d_2 + S_4/2 + d_3$ $a = 2d_1 + S_3 + 2d_2 + S_4 + 2d_3 + S$	$\ell = \ell_1 + S_1 + \ell_2 + S_3 + \ell_3$ $\ell = \ell_1 + S_3 + \ell_2 + S_4 + \ell_3 + 2S$

複数欠陥は单一の欠陥とみなす

網掛け部は内部欠陥から表面欠陥への置き換えを表す

Y* = 0.75 - 0.64sqrt(d/l')

図 C.6 同一平面上にある非並列な複数欠陥の取り扱い（破線はモデル化された欠陥を示す）



(b) 合体後の寸法

図 F.2 複数欠陥の評価

なお、内部欠陥単独で見つかった場合（図 F.1 の内部欠陥単独の場合）の、評価方法も併せて示す（図 F.3 参照）。

内部欠陥の形状は、 $\ell'_2 = 6 \text{ mm}$, $2d_2 = 2 \text{ mm}$, $S = 1 \text{ mm}$ である。これより、

$$Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/\ell'_2} = 0.49$$

と求まり、

$$S = 1\text{mm} > Y^*d_2 = 0.49$$

であることから内部欠陥は表面欠陥とみなさない。

実測寸法からの評価寸法の求め方			
欠陥No.	表面欠陥への置き換えの判定条件	欠陥深さ (a)	欠陥長さ (l)
#1	$S > Y^*d$	$a = d$	$l = l'$
	$S \leq Y^*d$	$a = 2d + 5$	$l = l' + 25$
#2	$S > Y^*d$	$a = d$	$l = 2d$
	$S \leq Y^*d$	$a = 2d + 5$	$l = 2d + 25$

横掛け筋は内部欠陥から表面欠陥への置き換えを表す
 $Y^* = 0.75 - 0.64\sqrt{d/l'}$

図 C.4 内部欠陥の取り扱い (破線はモデル化された欠陥を示す)

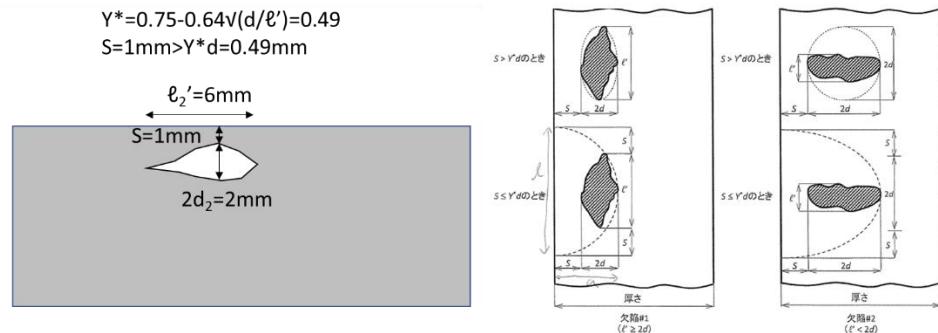


図 F.3 内部欠陥の取り扱い

F.3 クリープ亀裂進展の評価

F.3.1 例題 1：中央貫通亀裂平板モデルによる例題 (Norton 則)

例題 1 の目的は次の 2 項目である。

- 単純な例として 2 次クリープのみを考慮した Norton 則によるクリープ亀裂進展量の計算例を示す。
- 亀裂進展 step 時間増分の影響についても検討する。

a) 評価モデル 図 F.4 に示す中央貫通亀裂平板モデルにより検討する。

材料	SUS304
板半幅	$W = 10\text{ mm}$
亀裂半長	$c = 5\text{ mm}$
肉厚	$t = 8\text{ mm}$
アスペクト比	$d/W = 0.5$

荷重負荷条件は、初期応力として σ_m で示す一様分布の二次応力のみが作用している。

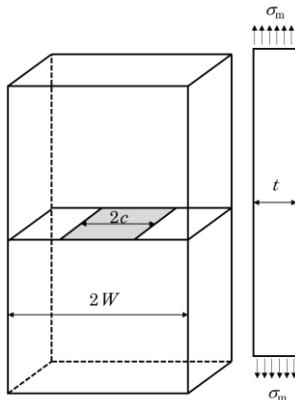


図 F.4 貫通亀裂平板モデル

b) **評価条件および材料物性** 例題 1 における評価温度は 550°C とし, 荷重条件は $\sigma_m = 127.5 \text{ MPa}$ が二次応力として作用する。

高温構造設計指針¹⁾によると, SUS304 の 550°Cにおいて, 以下の材料定数を与えて

弹性率: $E = 1.54 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

ボアソン比: $\nu = 0.306$

繰り返し応力範囲-ひずみ範囲関係式は, **附属書 E 式(2)** に示す Ramberg-Osgood 近似式を与えており, 材料定数は以下のようになる。

基準応力: $\sigma_0 = 92.1 \text{ N/mm}^2$

基準ひずみ: $\varepsilon_0 = 6.01 \times 10^{-4}$

Ramberg-Osgood 定数: $\kappa = 0.0976, n = 3.68$

$$\frac{\Delta \varepsilon / 2}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta \sigma / 2}{\sigma_0} + \kappa \left(\frac{\Delta \sigma / 2}{\sigma_0} \right)^n$$

また, クリープひずみ関係式は **附属書 E 式(15)** に示す Norton 則を用いて以下の式で表すことが可能である。

$$\dot{\varepsilon}_c = B \sigma^m$$

ここで, 550°Cにおける SUS304 の Norton 則の材料定数は, 以下のようになる。

$$B = 2.71 \times 10^{-27}$$

$$m = 9.77$$

次にクリープ亀裂進展速度は **本体式(5.3)** を用いて表すことが可能である。

$$\frac{da}{dt} = C_2 (J^*)^{m_2}$$

ここで, 550°Cにおける SUS304 の材料定数として以下を用いる。ただし, クリープ亀裂進展速度 da/dt の単位は [mm/hr], クリープ J 積分 J^* の単位は [N/mm/hr] である。

$$C_2 = 0.0175$$

$$m_2 = 1.0$$

c) 評価手順

STEP1 応力拡大係数範囲の算出

応力拡大係数 K_I^{\max} は **附属書 D 式(87)** より算出する。

$$K_I^{\max} = \sigma_{\max} M_m \sqrt{\pi c} = 127.5 \times 1.198 \sqrt{\pi \times 5 \times 10^{-3}} = 19.1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 保持開始時の 弹性 J 積分の算出

保持開始時の弾性 J 積分 $J_e^{(0)}$ は **附属書 E 式(16)** より算出する。

$$\begin{aligned} J_e^{(0)} &= (K_I^{\max})^2/E' = (19.1 \times 10^6)^2 / \{1.54 \times 10^5 \times 10^6 / (1 - 0.306^2)\} \\ &= 2.16 \times 10^3 \text{ (N/m)} = 2.16 \text{ (N/mm)} \end{aligned}$$

STEP3 保持開始時の弾性参考応力 および弾性参考ひずみの算出

保持開始時の弾性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は **附属書 E 式(17)** より算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}, \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}}}{2} \right\}$$

において、はじめに当該サイクル中の弾性参考応力の最大値 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}}$ を **附属書 D 式(3)** および **式(4)** により算出する。**附属書 D 式(4)**において、亀裂半長 $c = 5 \text{ mm}$, 板半幅 $W = 10 \text{ mm}$, 肉厚 $t = 8 \text{ mm}$ に対し $W < c+t$ であるから、

$$\alpha = \frac{c}{W} = \frac{5 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0.5$$

附属書 D 式(3)において σ_{ref} を $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}}$ に読み替えて、膜応力は $\sigma_m = 127.5 \text{ MPa}$, ローカルな曲げ応力は $\sigma_b = 0 \text{ MPa}$ であるから、

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}} = \frac{\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 9\Delta\sigma_m^2}}{3(1 - \alpha)} = \frac{0 + \sqrt{0^2 + 9 \times 127.5^2}}{3(1 - 0.5)} = 255 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}} = 255 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は **附属書 E 式(18)** より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} / E = 255 / 1.54 \times 10^5 = 0.00166$$

STEP4 保持開始時の弾塑性参考応力および弾塑性参考ひずみの算出

保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を **E. 4. 4** に基づき算出する。一般的な場合には **附属書 E 式(19)** および **式(20)** より算出するが、ここでは繰り返し $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon$ 関係式が Ramberg-Osgood 近似式で設定されていることから、**附属書 E 式(21)** および **式(22)** を満たす解として算出する。

$$q_p \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = k \sigma_0 \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \frac{k \sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n$$

ここで、

弾性追従係数 $q_p = 4$

$$4 \times (209 - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}) = 0.0976 \times 92.1 \times [\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} / 92.1]^{3.68}$$

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 209 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は **附属書 E 式(22)** より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \left(\frac{k\sigma_0}{E} \right) \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n$$

$$= 0.00255$$

STEP 5.1 保持中の弾塑性参考応力および参考クリープひずみ速度の算出

保持中の弾塑性参考応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$ を **E. 4.5** に基づき算出する。一般の場合には **附属書 E 式(23)～式(25)** より算出するが、ここではクリープひずみ関係式が Norton 近似式で表されることから、 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は **附属書 E 式(26)** により算出することが可能である。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right)^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}, \sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} \right\}$$

において、クリープ変形に関する弾性追従係数は **E. 4.5** より $q_p = 4$ とする。Norton 近似式の材料定数は $B = 2.71 \times 10^{-27}$ 、Norton 近似式のクリープ指数は $m = 9.77$ であり、ここで考える作用応力は二次応力のみであるから、当該サイクル中の一次弾性参考応力の最大値は $\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} = 0 \text{ MPa}$ である。したがって保持中の弾塑性参考応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は当該サイクルの保持時間 t_h の関数として次式により算出される。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right)^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}$$

保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$ については、**附属書 E 式(25)** に代わり Norton 近似式が直接適用できて、以下により算出することが可能である。

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}} = B (\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}})^m$$

STEP 5.2 クリープ J 積分の算出

クリープ J 積分 J^* を **附属書 E 式(27)** に基づき算出する。

$$J^* = \frac{\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}} J_{\text{e}}^{(0)}$$

において、保持開始時の弾性 J 積分は $J_{\text{e}}^{(0)} = 2.16 \text{ N/mm}$ 、保持開始時の弾塑性参考応力は、 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 209 \text{ MPa}$ 、保持開始時の弾塑性参考ひずみは $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 2.55 \times 10^{-3}$ である。保持中の弾塑性参考応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$ はいずれも保持時間 t_h の関数として求められた値を用いる。

STEP 6 保持中のクリープ亀裂進展速度および進展量の算出

各 Case における保持中の応力緩和、クリープ挙動、クリープ J 積分およびクリープ亀裂進展

挙動を示す。クリープ亀裂進展特性は**本体式(5.3)**で表すことが可能である。また、クリープ亀裂進展量を**本体式(5.5)**に基づいて算出する。クリープ亀裂進展量 Δa_{creep} は1サイクルあたりのクリープ亀裂進展量として次式、

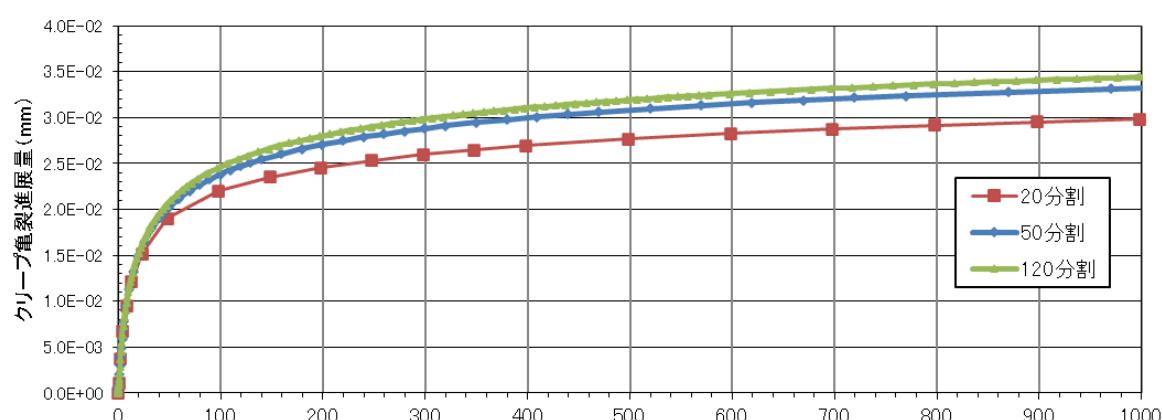
$$\Delta a_{creep} = da / dN_{creep}$$

で与えられる。

$$\Delta a_{creep} = \int_0^{\tau_1} (da/dt) dt$$

保持開始時からの経過時間は $\tau_1 = 1,000$ hr である。

図F.5についてはクリープ亀裂進展量 Δa_{creep} における時間の分割数を20, 50および120と変えた場合の、Step時間増分の影響を調べた。分割数の時刻歴に20分割では有意な差があるよう見えるが、50分割と細分化すると影響は小さくなっている。



図F.5 クリープ亀裂進展量 Δa_{creep} の時刻歴

F.3.2 例題2：中央貫通亀裂平板モデルによる例題（1次クリープの影響）

例題2の目的は、クリープひずみに1次クリープを考慮した場合（Blackburn式）のクリープ亀裂進展量の計算例を示すとともに、2次クリープ（Norton近似式）のみを考慮した場合のクリープ亀裂進展量との比較を示す。

a) **評価モデル** 評価モデルは、例題1と同様で**図F.4**に示す。

b) **評価条件および材料物性** **F.3.1**同様に評価温度は550°Cとし、荷重条件も一様応力 $\sigma_m = 127.5$ MPaが二次応力として作用するものとする。

弾性率、ポアソン比、繰り返し応力範囲-ひずみ範囲関係式であるRamberg-Osgood近似式の材料定数は**F.3.1**と同様の値を用いる。

一方、クリープひずみに一次クリープを考慮する場合の代表的な関係式としてBlackburn式があり、一次クリープと2次クリープを重ね合わせた以下の式¹⁰で表すことが可能である。

$$\varepsilon_c = C_1 \cdot \{1 - \exp(-r_1 \cdot t)\} + C_2 \cdot \{1 - \exp(-r_2 \cdot t)\} + \dot{\varepsilon}_m \cdot t \quad \dots \quad (1)$$

ここで、

$$T(\text{°C}) : \text{温度}, \quad 425 \leq T \leq 650$$

$$\sigma(\text{MPa}) : \text{応力}, \quad 1 \leq \sigma$$

$t_r(h)$: 破断時間

ε_c : クリープひずみ

$\varepsilon_m(/h)$: 定常クリープ速度

$t(h)$: 時間

$$\log_{10}(t_r) = -17.543 + \frac{31188.2}{T+273.15} + \frac{-5262.0}{T+273.15} \log_{10}(\sigma) - \frac{425.0}{T+273.15} \{(\log_{10} \sigma)\}^2$$

$$\dot{\varepsilon}_m = 62.416 \cdot \exp \left[-\frac{40812}{8.31 \cdot (T+273.15)} \right] \cdot t_r^{-1.1335}$$

$$C_1 = 1.2962 \cdot \dot{\varepsilon}_m^{0.74491} / r_1 \quad r_1 = 103.37 \cdot t_r^{-0.72607}$$

$$C_2 = 0.48449 \cdot \dot{\varepsilon}_m^{0.81155} / r_2 \quad r_2 = 17.255 \cdot t_r^{-0.86775}$$

クリープ亀裂進展速度は**本体式(5.3)**で表すことができ、**F.3.1**と同様の材料定数を用いる。

c) 評価手順

STEP1 応力拡大係数の算出

3.1 同様に、応力拡大係数 K_I^{\max} は**附属書 D 式(87)**より算出する。

$$K_I^{\max} = \sigma_{\max} M_m \sqrt{\pi c} = 127.5 \times 1.198 \sqrt{\pi \times 5 \times 10^{-3}} = 19.1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 保持開始時の 弹性 J 積分の算出

3.1 同様に、保持開始時の弾性 J 積分 $J_e^{(0)}$ は**附属書 E 式(16)**より算出する。

$$\begin{aligned} J_e^{(0)} &= (K_I^{\max})^2 / E = (19.1 \times 10^6)^2 / \{1.54 \times 10^5 \times 10^6 / (1 - 0.306^2)\} \\ &= 2.16 \times 10^3 \text{ (N/m)} = 2.16 \text{ (N/mm)} \end{aligned}$$

STEP3 保持開始時の弾性参考応力 および弾性参考ひずみ の算出

3.1 同様に、保持開始時の弾性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は**附属書 E 式(17)**より算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}, \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}}}{2} \right\} = 255 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は**附属書 E 式(18)**より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} / E = 255 / 1.54 \times 10^5 = 0.00166$$

STEP4 保持開始時の弾塑性参考応力 および弾塑性参考ひずみの算出

3.1 同様に、保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を**E.4.4**に基づき求め以下を得る。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 209 \text{ (MPa)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 0.00255$$

STEP 5.1 Blackburn 式を用いた保持中の弾塑性参考応力 および 参照クリープひずみ速度の算出

STEP 4 で算出された保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ 、クリープひずみ関係式から、**E.4.5**に基づき算出する。**附属書 E 式(23)～式(25)**を満たすように、保持中の弾塑性参考応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^c$ を保持開始からの経過時間 τ_h の関数として算出する。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} + \int_0^{\tau_h} \dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{C}} dt, \sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} \right\}$$

$$\dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{C}} = -\frac{E}{q_c} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}} = \frac{\partial f_{\varepsilon_c}(T, \sigma'_{\text{ref}}, t)}{\partial t}$$

ここで考える作用応力は二次応力のみであるから、当該サイクル中の一次弾性参照応力の最大値は $\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} = 0 \text{ MPa}$ である。

STEP 5.2 クリープ J 積分の算出

クリープ J 積分 J^* を **附属書 E 式(27)** に基づき算出する。

$$J^* = \frac{\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}} J_{\text{e}}^{(0)}$$

において、保持開始時の弾性 J 積分は $J_{\text{e}}^{(0)} = 2.16 \text{ N/mm}$ 、保持開始時の弾塑性参照応力は、 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 209 \text{ MPa}$ 、保持開始時の弾塑性参照ひずみは $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 2.55 \times 10^{-3}$ である。保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参照クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$ はいずれも保持時間 t_h の関数として求められた値を用いる。

STEP6 Blackburn 式より Norton 近似式における材料定数の算出

Norton 式ではクリープによる弾塑性参照応力緩和時刻歴は以下の式で示される。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right)^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}, \sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} \right\}$$

ここで、 B, m は **附属書 E 式(15)** で表される Norton 近似式における材料定数、一次弾性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} = 0 \text{ MPa}$ である。

例題 2 では Norton 近似式の材料定数算出に関して以下の 4 ケースを検討した。図 F.6 に考え方の概略を示す。

Case0 : Blackburn 式の最小クリープ速度式によって求められる Norton 式

Case1 : Blackburn 式を用いて荷重制御、平滑単軸クリープ曲線において $t = 1\text{h}$ で得られるクリープひずみと同一となるひずみ速度によって得られる Norton 式

Case2 : Blackburn 式を用いて荷重制御、平滑単軸クリープ曲線において $t = 1000\text{h}$ で得られるクリープひずみと同一となるひずみ速度によって得られる Norton 式

Case3 : Blackburn 式を用いて荷重制御、平滑単軸クリープ曲線において $t = 10^5\text{h}$ で得られるクリープひずみと同一となるひずみ速度によって得られる Norton 式

なお、Case1～Case3 において Norton 近似式回帰における応力範囲は 50MPa～2000MPa とした。

図 F.7 に Case0 から Case3 の Norton 近似式の回帰結果を、回帰結果から求まる Norton 近似の材料定数を **表 F.1** に示す。

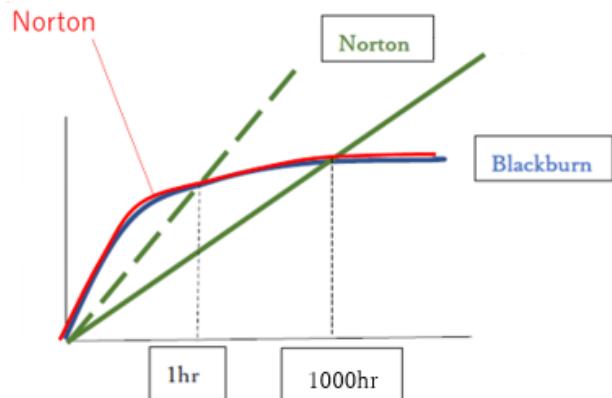


図 F. 6 Norton 式を用いた簡易法の考え方概略図

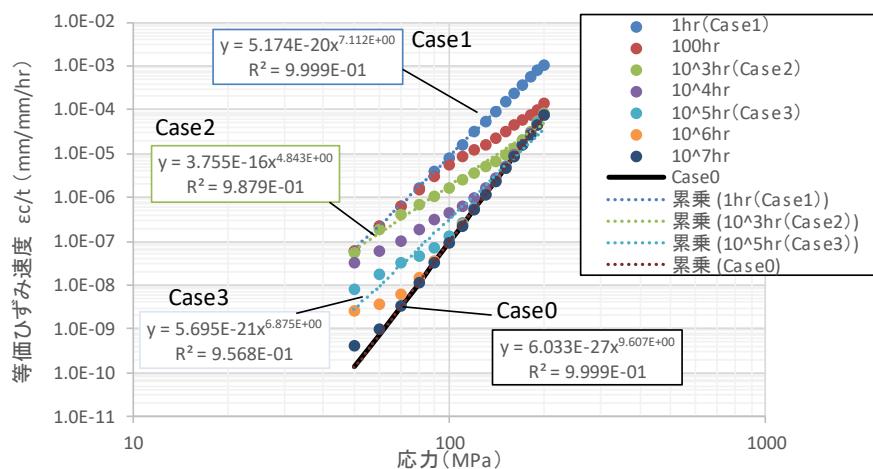


図 F. 7 Case0～Case4 の Norton 近似式

表 F. 1 Case0～Case4 の Norton 近似式材料定数 (σ : MPa, ε_c : /h)

	B	m
Case0	2.71×10^{-27}	9.77
Case1	5.17×10^{-20}	7.11
Case2	3.75×10^{-16}	4.84
Case3	5.69×10^{-21}	6.87

STEP7 保持中のクリープ亀裂進展速度および進展量の算出

各 Case における保持中の応力緩和, クリープ挙動, クリープ J 積分およびクリープ亀裂進展挙動を図 F.8 及び図 F.9 に示す。ここで, クリープ亀裂進展特性として, F.3.1 例題 1 同様に式(3)で表される関係式および材料定数を用いた。

Norton 近似式を用いた Case0~3 においては, F.3.1 と同様の算出方法を用いて計算を行った。一方, Blackburn 式を用いる場合には, Norton 近似式のような簡易な計算式で算出することはできず, ひずみ硬化側をもちいて逐次計算する必要がある。そこで, 図 E.3 に示すように一次クリープを考慮した場合の $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ を逐次算出する必要がある。この例題では, $t=0$ (h)において, 微小時間 $\Delta t_{h,1}=0.01$ (h) として計算を行った。この時, 式(1)を用いて, $t=\Delta t_{h,1}=0.01$ (h) の時点でのクリープひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{c,1}=2.09 \times 10^{-5}$ と求まり, クリープひずみ速度は, $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}=2.09 \times 10^{-3}$ (h) となる。なお, この時点の累積クリープひずみ $\varepsilon_{c,1}$ は $\Delta \varepsilon_{c,1}$ と等しい。附属書 E 式(24)より $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}=-8.05 \times 10^{-1}$ となる。これより, $\sigma'_{\text{ref},1}^{\text{EP}}=\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}+\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}\Delta t_{h,1}$ を用いて, $\sigma'_{\text{ref},1}^{\text{EP}}=208.3$ (MPa) となる。次に, $t=\Delta t_{h,1}=0.01$ (h) の時の応力 ($\sigma'_{\text{ref},1}^{\text{EP}}=208.3$ (MPa)) に対するクリープ曲線が, 点 $(\bar{t}_1, \varepsilon_{c,1}=2.09 \times 10^{-5})$ を通るような等価時間 \bar{t}_1 を繰返し計算により算出すると, $\bar{t}_1=1.034 \times 10^{-2}$ (h) と求まる。また, この期間のクリープ亀裂進展は, 本体式(5.3)を用いて算出すると, $\Delta a_1=3.75 \times 10^{-4}$ (mm) となる。

次に, $t=\bar{t}_1=1.034 \times 10^{-2}$ (h) における $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$, $\dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ を同様に求め, $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ に微小時間 $\Delta t_{h,2}$ を乗じて同区間のクリープひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{c,2}$ を求めていけばよい。このように逐次微小計算を行うことにより Blackburn 式を用いた場合でも応力緩和およびクリープ J 積分を算出することが可能である。

図 F.8 に各 Blackburn 式を用いた場合と Norton 近似式の各 Case における応力緩和及びクリープひずみと時間の関係, クリープひずみ速度と時間の関係を示す。図 F.9 にそれより算出したクリープ J 積分およびクリープ亀裂進展挙動を示す。Case0 と Blackburn 式との比較が最小クリープひずみ速度 (F.3.1) と一次クリープを考慮した場合の比較となる。当然のことであるが, 一次クリープを考慮したほうが, 応力緩和は早くクリープひずみの増分も大きいことがわかる。一方, Norton 近似式の算出方法によっては, 一次クリープを考慮した場合よりも応力緩和が早くなり, その結果クリープ亀裂進展が遅くなる場合もあり, 注意が必要である。

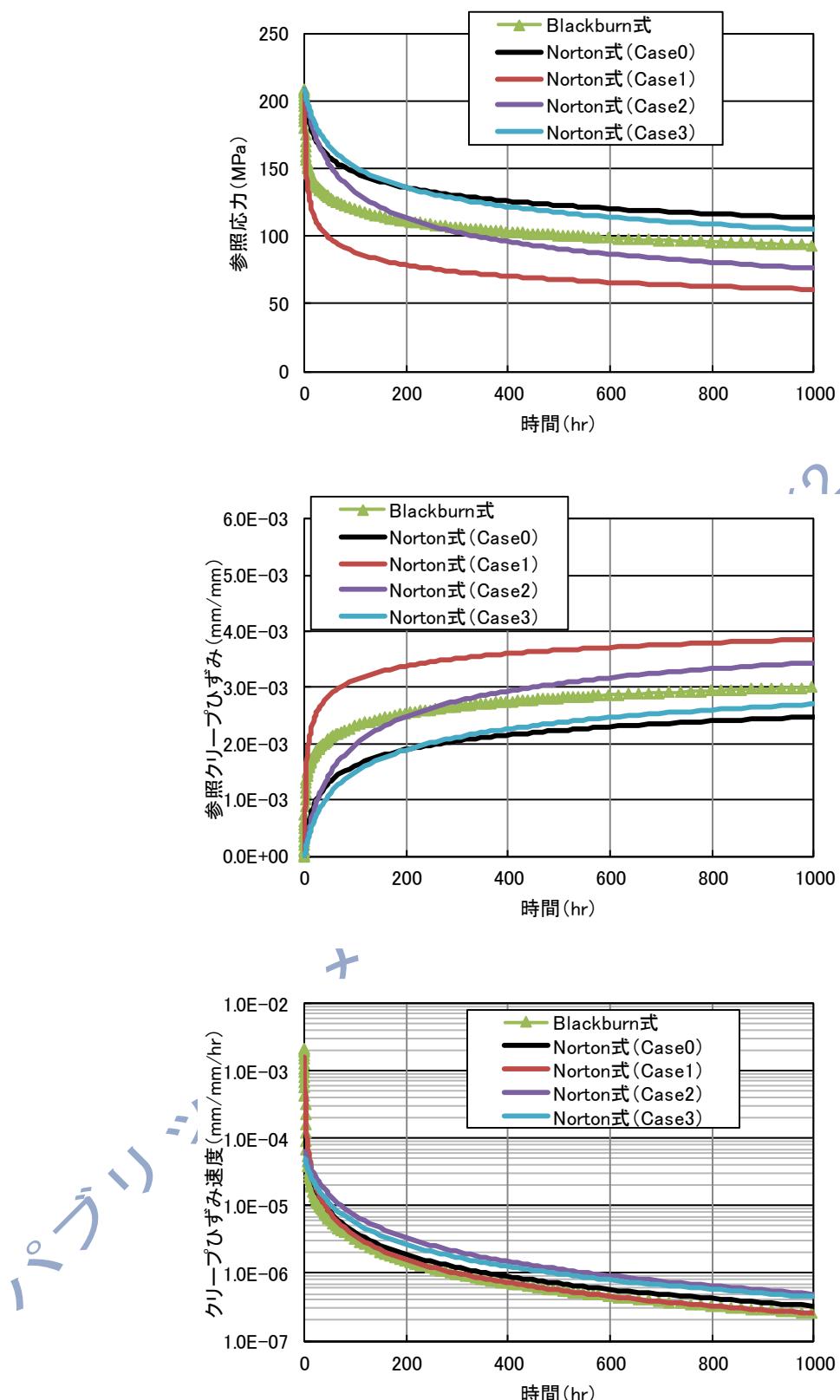


図 F.8 保持中のクリープ挙動

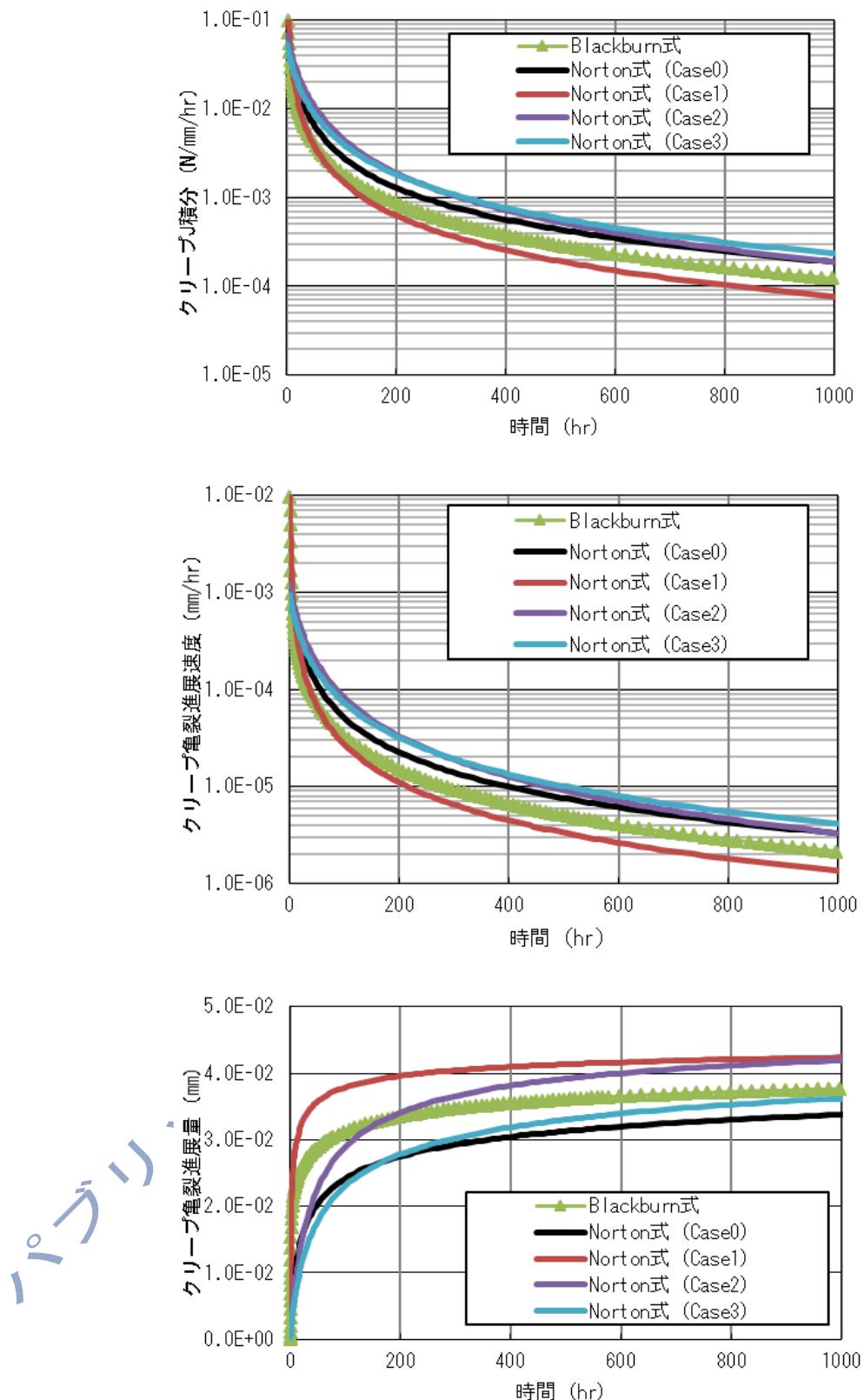


図 F.9 保持中のクリープ亀裂進展挙動

F.3.3 例題3：中央貫通亀裂平板モデルによる例題（評価温度の影響）

例題3の目的は、クリープ式を Blackburn 式とした場合と Norton 近似式とした場合において各温度（550 °C, 580°C, 600°C）で保持中の応力緩和、クリープ挙動、クリープ J 積分およびクリープ亀裂進展挙動を比較検証する。

a) **評価モデル** 評価モデルは、F.3.1 と同様で図 F.4 に示す。

b) **評価条件および材料物性** 荷重条件は F.3.1 と同様に一様応力 $\sigma_m = 127.5$ MPa が二次応力として作用するものとする。評価温度は、T = 550 °C, 580°C, 600°C の 3 条件で評価する。

高温構造設計評価指針¹⁾より SUS304 の 550 °C, 580 °C, 600 °C におけるヤング率 E : 1.540 × 10⁵ N/mm², 1.522 × 10⁵ N/mm², 1.510 × 10⁵ N/mm², ポアソン比 ν : 0.306 を採用した。

繰返し応力-ひずみの関係は Ramberg-Osgood 式定数を用いて、温度に対して線形補間した下記の結果を使用した。

$$\frac{\Delta \varepsilon/2}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta \sigma/2}{\sigma_0} + \kappa \left(\frac{\Delta \sigma/2}{\sigma_0} \right)^n, \quad \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E}$$

基準応力 : $\sigma_0 = 241.1$ MPa (550 °C), 230.7 MPa (580 °C), 223.7 MPa (600 °C)

基準ひずみ : $\varepsilon_0 = 1.55 \times 10^{-3}$ (550 °C), 1.51 × 10⁻³ (580 °C), 1.48 × 10⁻³ (600 °C)

Ramberg-Osgood 式定数 : $\kappa = 1.2941$ (550 °C), 1.3276 (580 °C), 1.3500 (600 °C)

Ramberg-Osgood 式指数 : $n = 3.69$ (550 °C), 3.91 (580 °C), 4.06 (600 °C)

クリープ-ひずみ関係式は、F.3.2 で用いた**附属書 E 式 (2)** で表される Blackburn 式および**附属書 E 式 (15)** で表される Norton 近似式を使用した。Blackburn 式についてここに再掲する。

$$\varepsilon_c = C_1 \{1 - \exp(-r_1 \cdot t)\} + C_2 \{1 - \exp(-r_2 \cdot t)\} + \dot{\varepsilon}_m \cdot t$$

ここで、

T : 温度, °C, 425 ≤ T ≤ 650

σ : 応力, MPa, 1 ≤ σ

t_r : 破断時間 h

ε_c : クリープひずみ

$\dot{\varepsilon}_m$: 定常クリープひずみ速度 /h

t : 時間 h

$$\log_{10}(t_r) = -17.543 + \frac{31188.2}{T+273.15} + \frac{-5262.0}{T+273.15} \log_{10}(\sigma) - \frac{425.0}{T+273.15} \{\log_{10}(\sigma)\}^2$$

$$\dot{\varepsilon}_m = 62.416 \cdot \exp \left[-\frac{40812}{8.31 \cdot (T+273.15)} \right] \cdot t_r^{-1.1335}$$

$$C_1 = 1.2962 \cdot \frac{\dot{\varepsilon}_m^{0.74491}}{r_1}$$

$$r_1 = 103.37 \cdot t_r^{-0.72607}$$

$$C_2 = 0.48449 \cdot \frac{\dot{\varepsilon}_m^{0.81155}}{r_2}$$

$$r_2 = 17.255 \cdot t_r^{-0.86775}$$

また、Norton近似式における 材料定数Bとクリープ指数mを表F.2に示す。これは、Blackburn 式より 550 °C, 580 °C, 600 °C におけるクリープひずみの計算結果からもとめた。

クリープ亀裂進展特性として**本体式(5.3)**を用いた。本例題においては、温度による影響はないものと仮定し、クリープ亀裂進展速度則の定数、 $C_2 = 0.0175$ 、クリープ亀裂進展速度則の指数、 $m_2 = 1.0$ を用いた。

上記の材料物性値を用いた、Blackburn 式の定常クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_m$ および Norton 式のクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ より、初期応力が 2 次応力として 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa 加わる場合において、580 °C と 600 °C における経過時間 t_h が 1,000 時間の場合の応力緩和によるクリープひずみの変化は、それぞれ**図 F. 10** と **図 F. 11** のように求められる。参考として、今回の計算には、 t_h ($\leq 1000 \text{ h}$) 中の時間刻み Δt を次のように設定して計算した。

- $\Delta t = 0.1 \text{ h}$ for $0 \text{ h} \leq t_h \leq 9.9 \text{ h}$
- $\Delta t = 1 \text{ h}$ for $10 \text{ h} \leq t_h \leq 49 \text{ h}$
- $\Delta t = 2 \text{ h}$ for $50 \text{ h} \leq t_h \leq 198 \text{ h}$
- $\Delta t = 5 \text{ h}$ for $200 \text{ h} \leq t_h \leq 495 \text{ h}$
- $\Delta t = 10 \text{ h}$ for $500 \text{ h} \leq t_h \leq 1000 \text{ h}$

表 F. 2 550°C, 580°C, 600°CにおけるNorton近似式材料定数(σ : MPa, ϵ_0 : /h)

	B	m
550°C	2.71×10^{-27}	9.77
580°C	1.35×10^{-25}	9.42
600°C	1.57×10^{-24}	9.21

定常クリープひずみ :

$$\varepsilon_m = \sum_{k=1}^M (\dot{\varepsilon}_{m,k-1} \cdot \Delta t_{k-1})$$

$$\text{where, } t_h = \sum_{k=1}^M \Delta t_{k-1} = 1000$$

— Blackburn式_580°C&100MPa
 —— Blackburn式_580°C&150MPa
 - - - Blackburn式_580°C&200MPa
 - - - Norton式_580°C&100MPa
 - - - Norton式_580°C&150MPa
 - - - - Norton式_580°C&200MPa

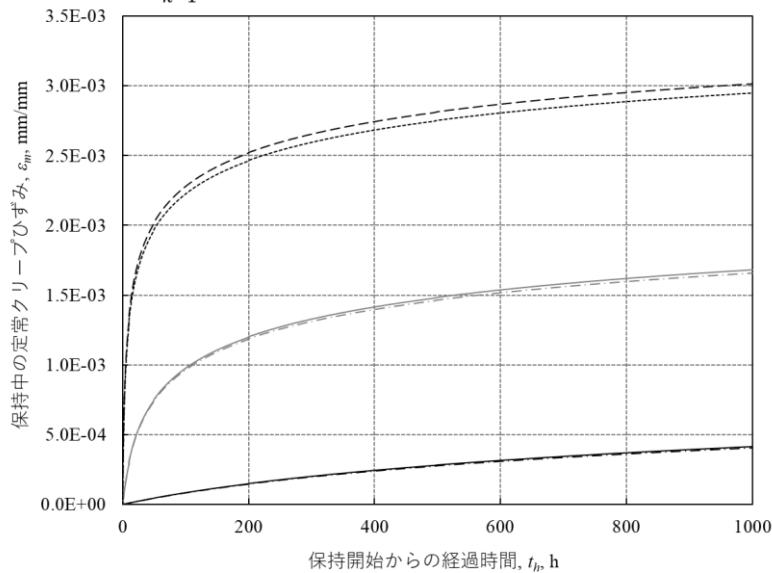


図 F. 10 Blackburn 式と Norton 式による 1,000 時間までのクリープひずみの変化 (580°C)

定常クリープひずみ :

$$\varepsilon_m = \sum_{k=1}^M (\dot{\varepsilon}_{m,k-1} \cdot \Delta t_{k-1})$$

$$\text{where, } t_h = \sum_{k=1}^M \Delta t_{k-1} = 1000$$

— Blackburn式_600°C&100MPa
 —— Blackburn式_600°C&150MPa
 - - - Blackburn式_600°C&200MPa
 - - - Norton式_600°C&100MPa
 - - - Norton式_600°C&150MPa
 - - - - Norton式_600°C&200MPa

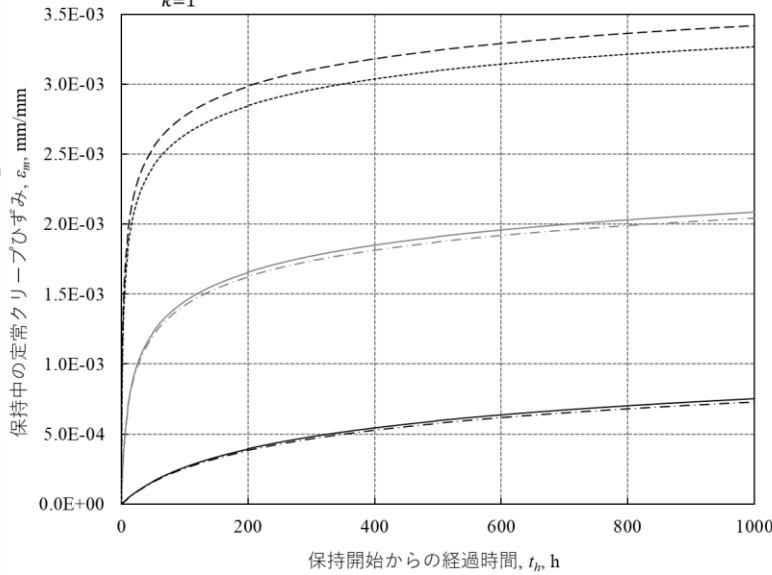


図 F. 11 Blackburn 式と Norton 式による 1,000 時間までのクリープひずみの変化 (600°C)

c) 評価手順

STEP1 応力拡大係数範囲の算出

応力拡大係数 K_I^{\max} は**附属書 D 式(85)**より算出する。

$$K_I^{\max} = \sigma_{\max} \cdot M_m \sqrt{\pi c} = 127.5 \times 1.19 \times (\pi \times 2 \times 10^{-3})^{0.5} = 19.14 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 保持開始時の弾性 J 積分範囲の算出

保持開始時の弾性J積分 $J_e^{(0)}$ は**附属書 E 式(16)**より算出する。

$$J_e^{(0)} = \frac{(K_I^{\max})^2}{E'} =$$

$$= (19.14)^2 / (1.540 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)) = 2.16 \text{ (N/mm at 550°C)}$$

$$= (19.14)^2 / (1.522 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)) = 2.18 \text{ (N/mm at 580°C)}$$

$$= (19.14)^2 / (1.510 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)) = 2.20 \text{ (N/mm at 600°C)}$$

ここで、平面ひずみ状態を考慮したヤング率 E' は**附属書 E 式(6)**より $E' = E / (1 - \nu^2)$ である。

STEP3 保持開始時の弾性参考応力および弾性参考ひずみの算出

例題 1 同様に、保持開始時の弾性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は**附属書 E 式(17)**より算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}, \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}}}{2} \right\} = 255 \text{ (MPa)}$$

弾性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は**附属書 E 式(18)**より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} / E = 255 / (1.540 \times 10^5) = 1.66 \times 10^{-3} \text{ (550°C)}$$

$$= 255 / (1.522 \times 10^5) = 1.68 \times 10^{-3} \text{ (580°C)}$$

$$= 255 / (1.510 \times 10^5) = 1.69 \times 10^{-3} \text{ (600°C)}$$

STEP4 保持開始時の弾塑性参考応力および弾塑性参考ひずみの算出

同様に、保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を**E 4.4**に基づき求め以下を得る。

550 °C の場合 :

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 209 \text{ (MPa)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 2.55 \times 10^{-3}$$

580 °C の場合

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 206 \text{ (MPa)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 2.64 \times 10^{-3}$$

600 °C の場合

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 204 \text{ (MPa)}$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 2.711 \times 10^{-3}$$

STEP 5 Blackburn 式を用いた保持中の弾塑性参考応力および参考クリープひずみ速度の算出

STEP 4 で算出された保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参考ひ

ずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ 、クリープひずみ関係式から、**附属書E式(23)～式(25)**を満たすように、保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ を保持開始からの経過時間 t_h の関数として算出する。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} + \int_0^{t_h} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}} dt, \sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} \right\}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}} = -\frac{E}{q_c} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}} = \frac{\partial f_{\varepsilon_{\text{c}}} (T, \sigma'_{\text{ref}}, \dot{\varepsilon})}{\partial t}$$

ここで考える作用応力は二次応力のみであるから、当該サイクル中の一次弾性参照応力の最大値は $\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} = 0 \text{ MPa}$ である。

Norton近似式ではクリープによる弾塑性参照応力緩和時刻歴は**附属書E式(26)**で示される。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + (\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}})^{1-m} \right]^{\frac{1}{m-1}}, \sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} \right\}$$

ここで、弾性追従係数は $q_c = 4$ 、一次弾性参照応力は $\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} = 0 \text{ MPa}$ 、 B および m は**F.3.3 b)**項に示した550 °C, 580 °C, 600 °Cの材料定数 B およびクリープ指数 m を適用した。

一方、Blackburn式では、Norton近似式のような簡易な計算式で算出することはできず、**F.3.2**同様にひずみ硬化側をもちいて逐次計算を行った。

STEP6 保持中のクリープ亀裂進展速度および進展量の算出

Blackburn式を用いた場合とNorton式を用いた場合において550 °C, 580 °C, 600 °Cで保持中の応力緩和、クリープ挙動、クリープJ積分およびクリープ亀裂進展挙動を計算した。

クリープJ積分 J^* を**附属書E.4.6の式(27)**に基づき求めた。

$$J^* = \frac{\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}} J_{\text{e}}^{(0)}$$

d) 評価結果 550 °C, 580 °C, 600 °CにおけるBlackburn式とNorton式による保持中の弾塑性参照応力、参照クリープひずみ速度、参照クリープひずみ、クリープJ積分およびクリープ亀裂進展速度の比較を**図F.12**から**図F.17**にそれぞれ示す。550 °C, 580 °C, 600 °Cのいずれの温度においても保持開始後 t_h 経過における時間ステップ Δt を小さくとる($\Delta t \approx 0.1 \text{ h}$)ことで、保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ がBlackburn式とNorton式で一致するようになり、これに伴い保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ 、クリープJ積分 J^* およびクリープ亀裂進展速度 da/dt も互いに漸近する結果となった。一方、保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{c}}$ およびクリープ亀裂進展量 a は、高温ほどBlackburn式とNorton式での計算結果に誤差が生じる傾向を示した。ただし、いずれもBlackburn式のほうがNorton式よりも安全側の結果となった。

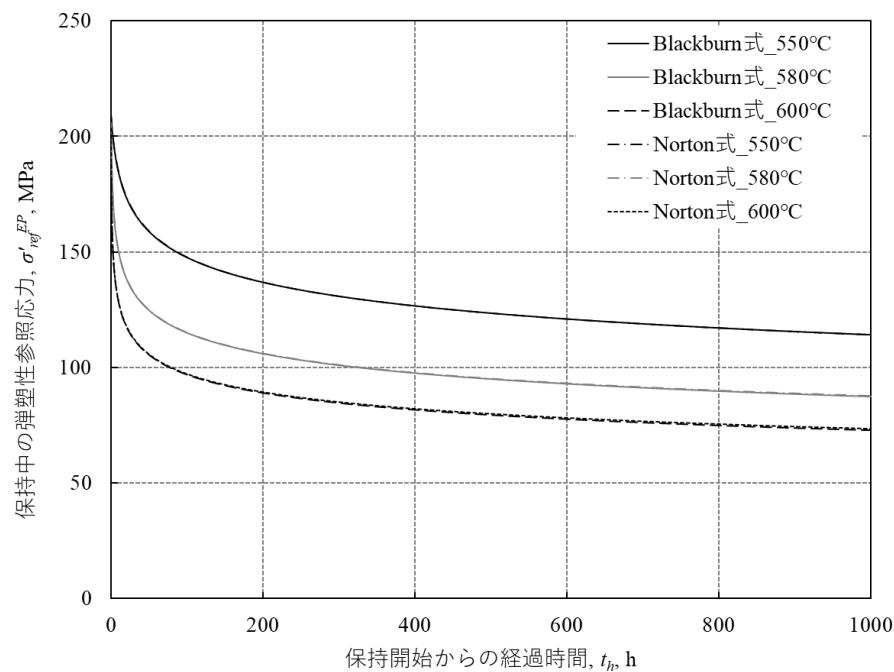


図 F.12 Blackburn 式と Norton 式による保持中の弾塑性参照応力の比較

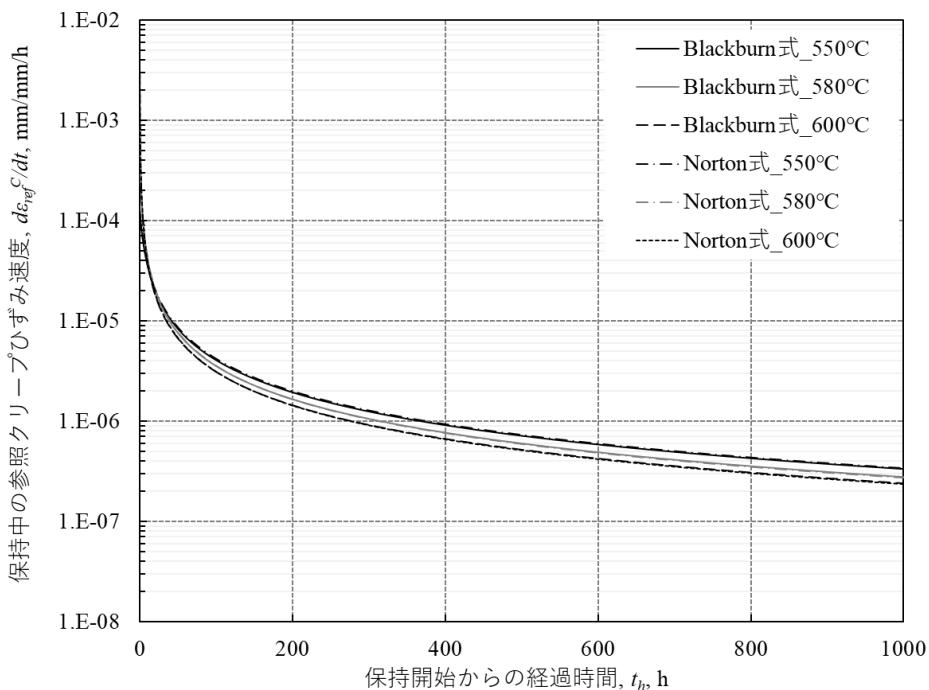


図 F.13 Blackburn 式と Norton 式による保持中の参考クリープひずみ速度の比較

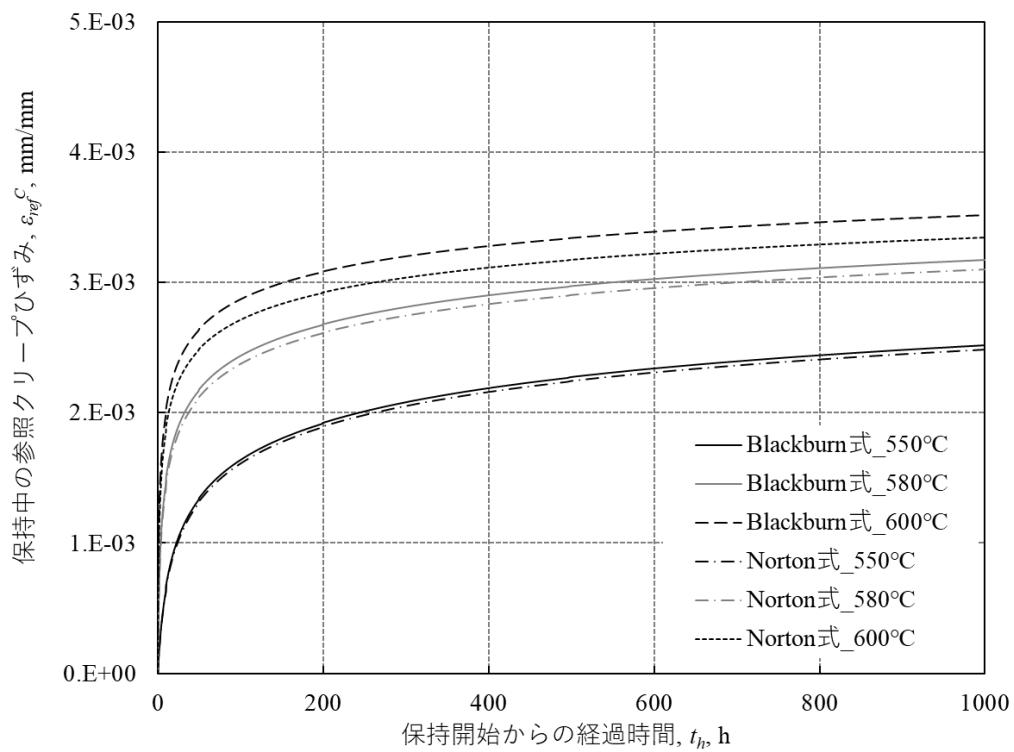


図 F.14 Blackburn 式と Norton 式による保持中の参考クリープひずみの比較

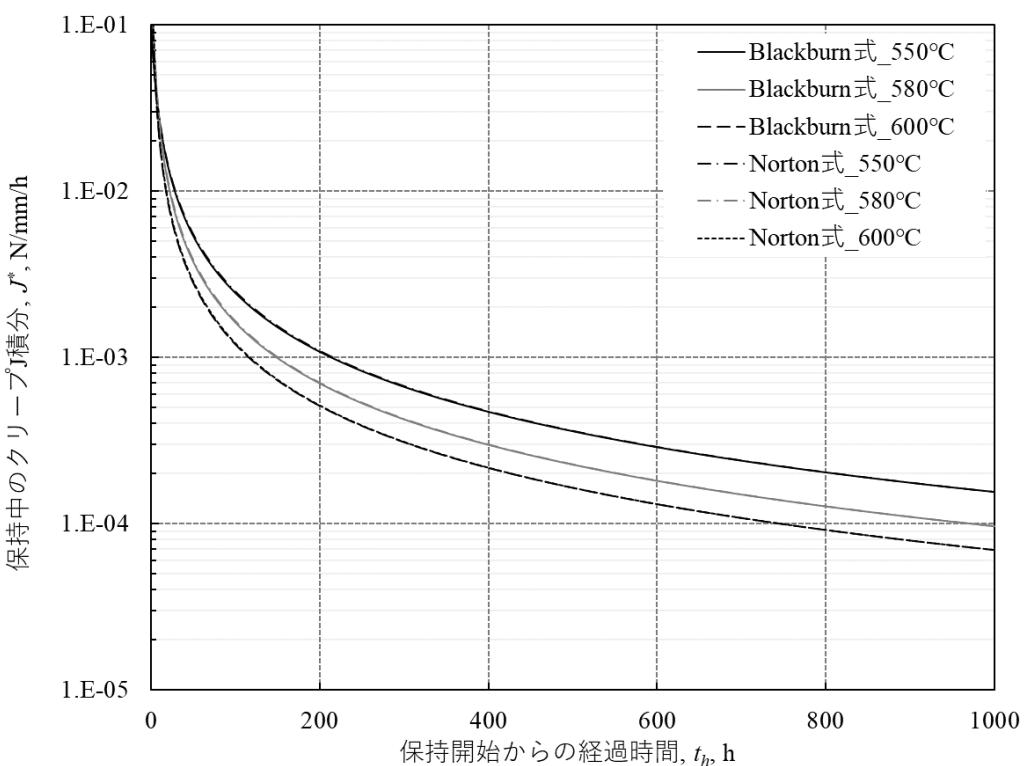


図 F.15 Blackburn 式と Norton 式による保持中のクリープ J 積分の比較

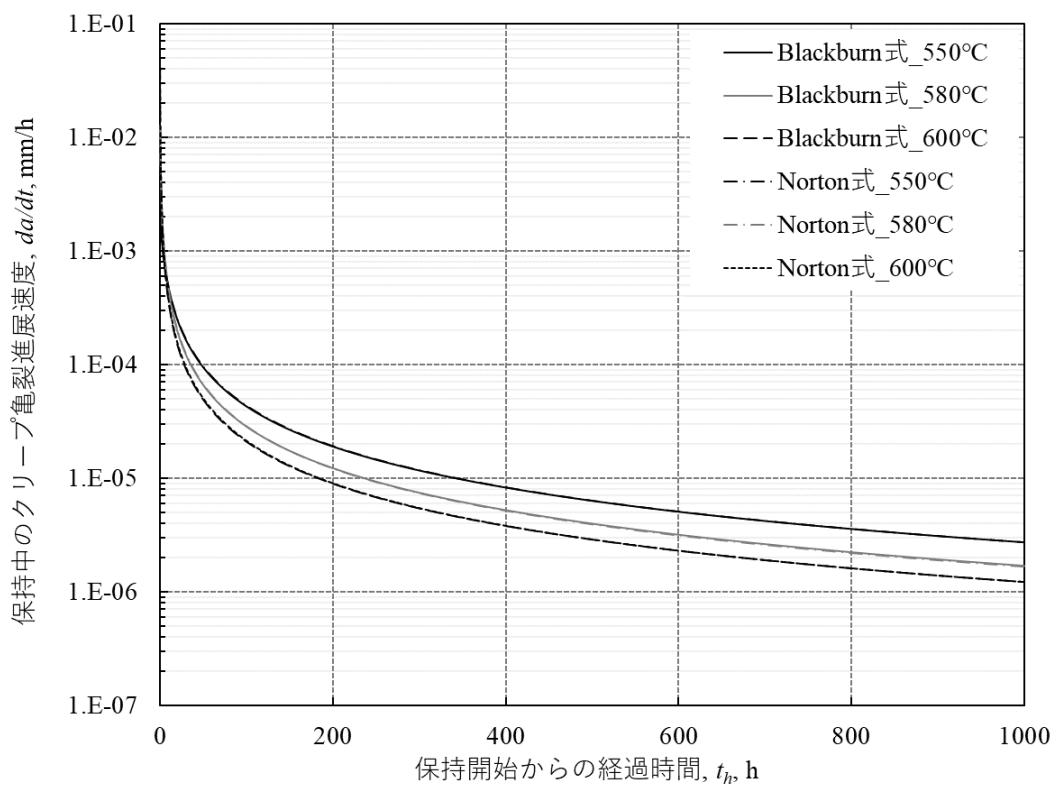


図 F.16 Blackburn 式と Norton 式による保持中のクリープ亀裂進展速度の比較

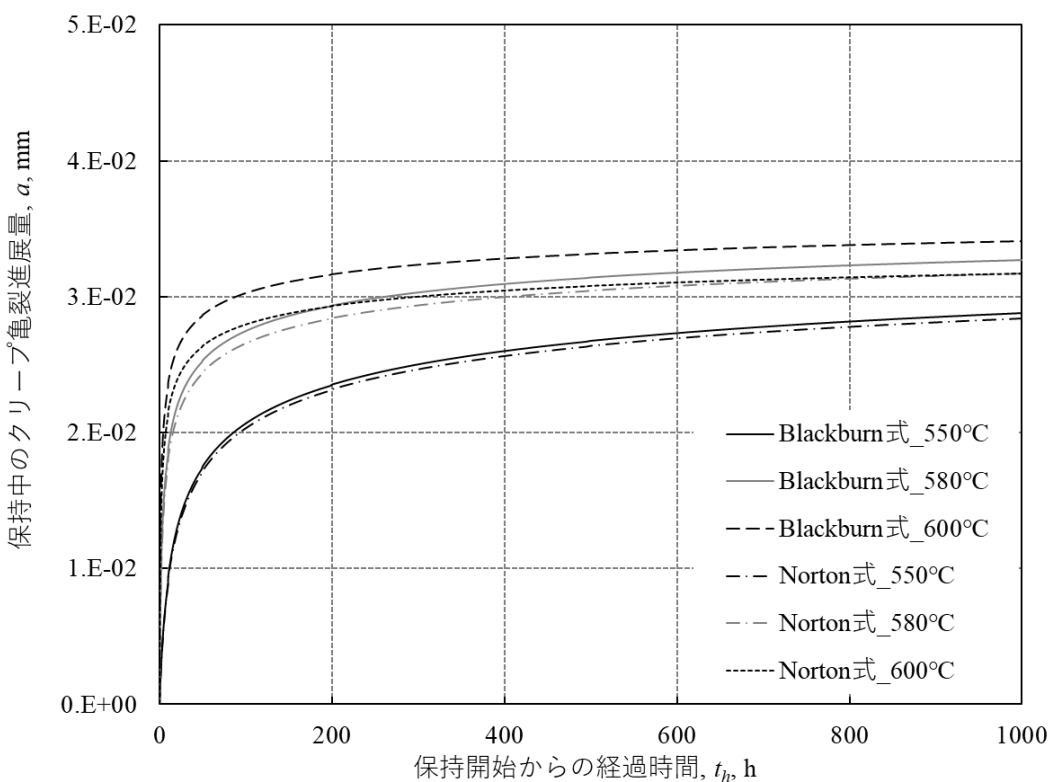


図 F.17 Blackburn 式と Norton 式による保持中のクリープ亀裂進展量の比較

F.3.4 例題4：中央貫通亀裂平板モデルによる例題（クリープ疲労亀裂進展）

例題4の目的は、クリープ疲労亀裂進展の計算方法を示すことである。単純な例として2次クリープのみを考慮したNorton則を用いる。また、クリープ疲労亀裂進展においてサイクル毎に亀裂が成長し、参照応力や疲労およびクリープJ積分が増加するため、1サイクル毎に各パラメータを更新して、計算することが望ましい。しかし、1サイクル毎の亀裂成長が小さい場合、各パラメータの変化は微小となり、各サイクルの亀裂成長量の総和で求めた計算結果は、あるサイクルでの亀裂成長量の倍数（グルーピング）で求めた計算結果と比較した誤差は許容可能であることもある。そのため、本検討では表F.3に示すケースでクリープ疲労亀裂進展計算を行い、その結果を比較した。

表F.3 クリープ疲労亀裂進展計算におけるグルーピングと計算回数

ケース番号	グルーピングサイクル数	計算回数	計算サイクル数
Case 1	100	1	100
Case 2	50	2	100
Case 3	20	5	100
Case 4	10	10	100
Case 5	1	100	100

a) 評価モデル F.3.1同様で図F.4に示す材料はSUS304の中央貫通亀裂平板モデルにより検討する。荷重負荷条件は、図F.18に示す両振りの変位制御試験をモデル化した。

荷重条件：変異制御

両振りの板厚内一様初期応力： $\sigma_m = \pm 127.5$ (MPa)

曲げ応力： $\sigma_b = 0$ (MPa)

保持時間：20 (h)

算サイクル数：100回

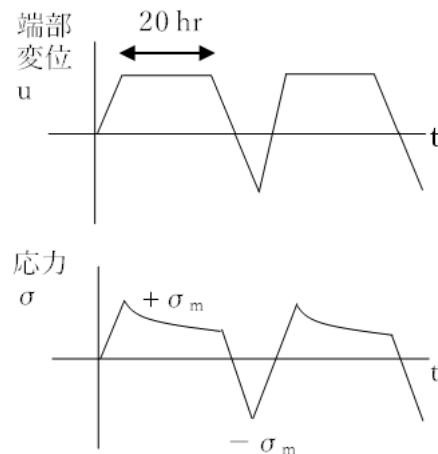


図 F.18 荷重負荷条件の模式図

b) 評価条件および材料物性 F.3.1 同様に評価温度は 550°C とする。高温構造設計指針¹⁾によると、SUS304 の 550°Cにおいて、以下の材料定数を与えている。

弾性率: $E = 1.54 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

ボアソン比: $\nu = 0.306$

繰り返し応力範囲・ひずみ範囲関係式は、**附属書 E 式(2)**の Ramberg-Osgood 近似式を与えており、材料定数は以下のようになる。

基準応力: $\sigma_0 = 92.1 \text{ N/mm}^2$

基準ひずみ: $\epsilon_0 = 6.01 \times 10^{-4}$

Ramberg-Osgood 定数: $\kappa = 0.0976, n = 3.68$

また、クリープひずみ関係式は**附属書 E 式(15)**で表される Norton 近似式を用い、550°Cにおける SUS304 の Norton 則の材料定数は、以下のようになる。

$B = 2.71 \times 10^{-27}$

$m = 9.77$

次にクリープ亀裂進展速度は**本体式(5.3)**で表すことができ、550°Cにおける SUS304 の材料定数として以下を用いる。ただし、クリープ亀裂進展速度 da/dt の単位は [mm/hr]、クリープ J 積分 J_f の単位は [N/mm/hr] である。

$C_2 = 0.0175$

$m_2 = 1.0$

一方、550°Cにおける SUS304 の疲労亀裂進展速度 (mm/cycle) は**本体式(5.2)**を用いて表すことが可能である。疲労 J 積分範囲 ΔJ_f の単位は、[N/mm] である。

$$(da/dN)_{\text{fatigue}} = 5 \times 10^{-5} \times \Delta J_f$$

c) 評価手順

1) 疲労亀裂進展量の算出 (1サイクル目を数値として記載)

STEP1 応力拡大係数範囲の算出

応力拡大係数 ΔK_I は **附属書 D 式(87)** より算出する。

$$\Delta K_I = \Delta\sigma_m \cdot M_m \sqrt{\pi c} = 38.3 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 弹性 J 積分範囲の算出

弾性 J 積分範囲 ΔJ_e は **附属書 E 式(4)** より算出する。

$$\Delta J_e = (\Delta K_I)^2 / E'$$

$$= 8.63 \times 10^3 \text{ (N/m)} = 8.63 \text{ (N/mm)}$$

STEP3 弹性参照応力範囲および弾性参照ひずみ範囲の算出

弾性参照応力範囲 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^E$ は **附属書 E 式(7)** より算出する。

$$\Delta\sigma_{\text{ref}}^E = f_{\text{ref}}(\Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b)$$

において、はじめに当該サイクル中の弾性参照応力 σ_{ref}^E を **附属書 D 式(3)**, **(4)** より算出する。 **附属書 D 式(3)**において σ_{ref} を $\Delta\sigma_{\text{ref}}^E$ に読み替えて、膜応力 $\sigma_m = 127.5 \text{ MPa}$, ローカルな曲げ応力は $\sigma_b = 0 \text{ MPa}$ であるから、

$$\sigma_{\text{ref}}^E = \frac{\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 9\sigma_m^2}}{3(1-\alpha)} = \frac{0 + \sqrt{0^2 + 9 \times 127.5^2}}{3(1-0.5)} = 255 \text{ (MPa)}$$

$$\Delta\sigma_{\text{ref}}^E = \sigma_{\text{ref}}^E \times 2 = 255 \times 2 = 510 \text{ (MPa)}$$

弾性参照ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E$ は **附属書 E 式(8)** より算出する。

$$\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E = \Delta\sigma_{\text{ref}}^E / E = 510 / 1.54 \times 10^5 = 0.00331$$

STEP4 弹塑性参照応力範囲および弾塑性参照ひずみ範囲の算出

弾塑性参照応力範囲 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および弾塑性参照ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ を **E.3.4** に基づき算出する。一般的な場合には **附属書 E 式(9)**, **(10)** より算出するが、ここでは繰り返し $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 関係式が Ramberg-Osgood 近似式で設定されていることから、**附属書 E 式(11)**, **(12)** を満たす解として以下のように求まる。 **附属書 E 式(11)** より、

$$q_p(\Delta\sigma_{\text{ref}}^E - \Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2\kappa\sigma_0 \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right)^n$$

ここで、弾性追従係数 $q_p=4$ であることから

$$4 \times (510 - \Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2 \times 0.0976 \times 92.1 \times [\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} / 2 \times 92.1]^{3.68}$$

$$\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} \approx 418 \text{ (MPa)}$$

弾塑性参照ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は **附属書 E 式(12)** より以下のように求まる。

$$\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{E} + \left(\frac{2\kappa\sigma_0}{E} \right) \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right)^n$$

$$= 0.0051 \text{ (mm/mm)}$$

STEP5 弹塑性疲労 J 積分の算出

弾性積分範囲 ΔJ_e , STEP3 で算出した弾性参考応力範囲 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^E$ と弾性参考ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E$, STEP4 で算出した弾塑性参考応力範囲 $\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および弾塑性参考ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ から, 弹塑性参考ひずみ範囲 ΔJ_f を**附属書 E 式(13)**より算出する。

$$\Delta J_f = \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} \Delta\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{\Delta\sigma_{\text{ref}}^E \Delta\varepsilon_{\text{ref}}^E} \Delta J_e$$

$$= 10.9 \text{ (N/mm)}$$

STEP6 疲労亀裂進展速度の算出

以下に再度示す疲労亀裂進展を表す**本体式(5.2)**を用いて, 各 Case における疲労亀裂進展を算出する。

$$(da/dN)_{\text{fatigue}} = 5 \times 10^{-5} \times \Delta J_f$$

2) クリープ亀裂進展量の算出 (1 サイクル目を数値として記載)

STEP1 応力拡大係数の算出

応力拡大係数 K_I^{max} は**附属書 D 式(87)**より算出する。

$$K_I^{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} \cdot M_m \sqrt{\pi c} = 19.1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 保持開始時の 弹性 J 積分の算出

保持開始時の弾性 J 積分 $J_e^{(0)}$ は**附属書 E 式(16)**より算出する。

$$J_e^{(0)} = (K_I^{\text{max}})^2 / E' = 2.16 \times 10^3 \text{ (N/m)} = 2.16 \text{ (N/mm)}$$

STEP3 保持開始時の弾性参考応力および弾性参考ひずみの算出

保持開始時の弾性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は**附属書 E 式(17)**より算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \text{Max} \left\{ \sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}}, \frac{\Delta\sigma_{\text{ref}}^E}{2} \right\}$$

において, はじめに当該サイクル中の弾性参考応力の最大値 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}}$ を**附属書 D 式(3)**, (4)により算出する。よって,

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}} = \frac{\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 9\sigma_m^2}}{3(1-\alpha)} = \frac{0 + \sqrt{0^2 + 9 \times 127.5^2}}{3(1-0.5)} = 255 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}} = 255 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は**附属書 E 式(18)**より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} / E = 255 / 1.54 \times 10^5 = 0.00166$$

STEP4 保持開始時の弾塑性参考応力および弾塑性参考ひずみの算出

保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を**E. 4.4**に基づき算出する。一般の場合には**附属書 E 式(19)**, (20)より算出するが, ここでは繰り返し σ - ε 関係式が Ramberg-Osgood 近似式で設定されていることから, **附属書 E 式(21)**, (22)を満たす解として算出する。

$$q_p \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = \kappa \sigma_0 \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n$$

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \frac{\kappa \sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n$$

ここで、

弾性追従係数 $q_p = 4$

$$4 \times (209 - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}) = 0.0976 \times 92.1 \times [\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} / 92.1]^{3.68}$$

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 209 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾塑性参照ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は **附属書 E 式(22)** より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \frac{\kappa \sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right)^n$$

$$= 0.00255$$

Draft

1/23

STEP 5.1 保持中の弾塑性参照応力および参考クリープひずみ速度の算出

保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参考クリープひずみ速度 $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{C}}$ を **E. 4. 5** に基づき算出する。一般の場合には **附属書 E 式(23)～(25)** より算出するが、ここではクリープひずみ関係式が Norton 近似式で表されることから、 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は **附属書 E 式(26)** により算出する。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \text{Max} \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right)^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}, \sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} \right\}$$

上式において、クリープ変形に関する弾性追従係数は **E. 4. 5** より $q_c = 4$ とする。Norton 近似式の材料定数は $B = 2.71 \times 10^{-27}$ 、クリープ指数は $m = 9.77$ である。ここで考える作用応力は二次応力のみであるから、当該サイクル中の一次弾性参照応力の最大値は $\sigma_{\text{ref}}^{\text{P}} = 0$ MPa である。したがって保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は当該サイクルの保持時間 t_h の関数として次式により算出される。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right)^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}}$$

保持中の参考クリープひずみ速度 $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{C}}$ については、**附属書 E 式(25)** に代わり Norton 近似式が直接適用できて、

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{C}} = B \left(\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} \right)^m$$

により算出してよい。

STEP 5.2 クリープ J 積分の算出

クリープ J 積分 J^* を **附属書 E 式(27)** に基づき算出する。

$$J^* = \frac{\sigma'_{\text{ref}} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^C}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}} J_{\text{e}}^{(0)}$$

上式において、保持開始時の弾性 J 積分は $J_{\text{e}}^{(0)} = 2.16 \text{ N/mm}$ 、保持開始時の弾塑性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = 209 \text{ MPa}$ 、保持開始時の弾塑性参照ひずみは $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 2.55 \times 10^{-3}$ である。保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ および保持中の参考クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^C$ はいずれも保持時間 t_h の関数として求められた値を用いる。

STEP6 保持中のクリープ亀裂進展速度の算出

各 Case におけるクリープ亀裂進展速度は下に示す**本体式 (5.3)**を用いた。

$$da/dt = C_2 (J^*)^{m^2} = 0.0175 J^*$$

クリープ亀裂進展速度 da/dt の単位は [mm/hr]、クリープ J 積分 J^* の単位は [N/mm/hr] である。

3) クリープ疲労亀裂進展量の算出

各ケースにおいて以下の式を用いてクリープ疲労亀裂進展量を算出した。

$$\Delta a_{\text{case},i} = [\Delta a_{\text{fatigue},i} + \Delta a_{\text{creep},i}] \times N_{\text{case}}$$

$$c_{i+1} = c_i + \Delta a_{\text{case},i}$$

ここで、

$\Delta a_{\text{case},i}$: 各 Case のグルーピングにおいて i 番目の計算におけるクリープ疲労亀裂進展量

$\Delta a_{\text{fatigue},i}$: 各 Case のグルーピングにおいて i 番目の計算における疲労亀裂進展量

$\Delta a_{\text{creep},i}$: 各 Case のグルーピングにおいて i 番目の計算におけるクリープ亀裂進展量

N_{case} : 各 Case のグルーピングサイクル数

c_i : 各 Case のグルーピングにおいて i 番目の計算における亀裂半長

Case2～Case5 では c_{i+1} を新たな亀裂半長 c として、Total の繰り返し数が 100 サイクルとなるまで計算を繰り返した。

d) **評価結果** クリープ疲労亀裂進展結果として、各 Case の亀裂半長を **図 F.19** に示す。また、クリープ亀裂進展量および疲労亀裂進展量の計算結果をそれぞれ **図 F.20** および **図 F.21** に示す。

図 F.19 に示す通り、Case1 と Case5 では 100 サイクル経過後の亀裂半長が約 2.2 mm の差となり、亀裂進展量としては約 2 倍の差となった。また、Case4 と Case5 では 100 サイクル経過後の亀裂半長が約 0.4 mm の差となり、亀裂進展量としては約 10%の差となった。このことから、パラメータ感度分析には Case1, 2, より詳細な検討では Case3, 4, 5 で実施するなど、計算負荷と目的を考慮して計算を進めることが推奨される。

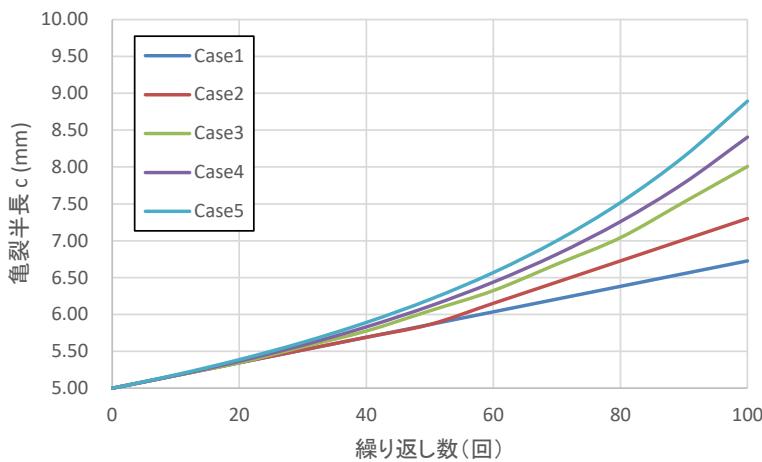


図 F.19 クリープ疲労亀裂進展計算結果（亀裂半長）

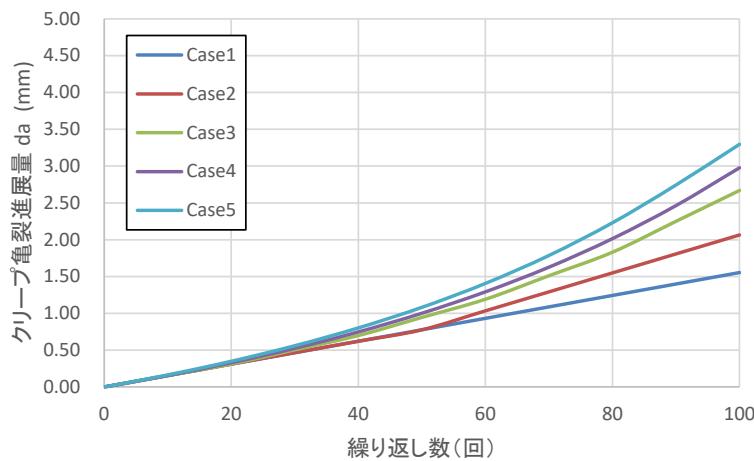


図 F.20 クリープ亀裂進展量

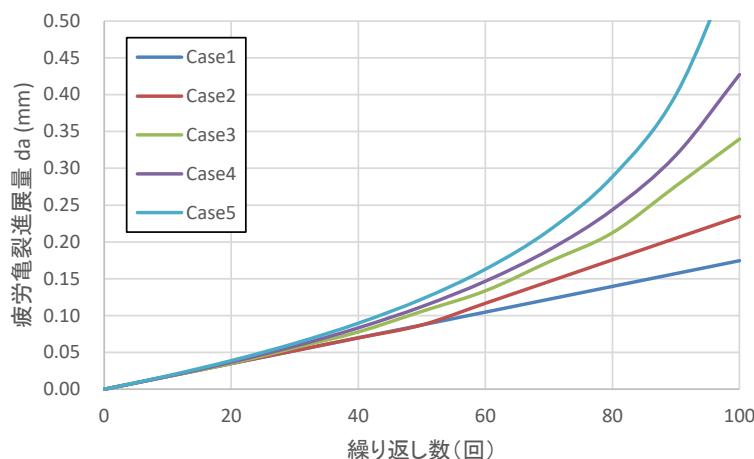


図 F.21 疲労亀裂進展量

F.3.5 例題5：配管モデルにおけるクリープ疲労亀裂進展の例題

この例題の目的は、より実機に近い形として配管モデルを用い、内外面温度差を有する配管に生じた周方向外面亀裂のクリープ疲労下における亀裂進展量の計算例を示す。

a) 評価モデルおよび負荷 図F.22に示す断面形状を有する配管に周方向外面亀裂が認められた。

配管は以下のような内外面温度差を有するので、設計圧力および内外面の温度差による熱応力を考慮する。

当設備は次回停止検査までの5週間に、毎週1回の起動停止がある。このため、図F.23のような温度、圧力の変化を受ける。保持時間は168 h×5となり、起動停止による繰り返し回数は5回とする。

材料：SUS304

亀裂深さ a ：10 mm

亀裂半長 c ：20 mm

アスペクト比： $a/c = 1/2$

配管板厚 t ：25 mm

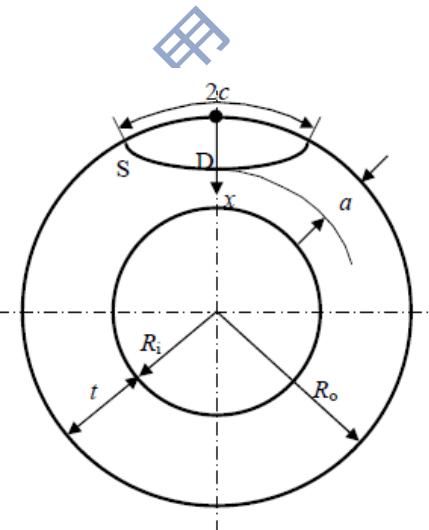
配管外半径 R_o ：525 mm

外面温度：430°C

内面温度：550°C

設計圧力：3.5 MPa

評価温度：550°C



図F.22 外面亀裂を有するSUS304製配管

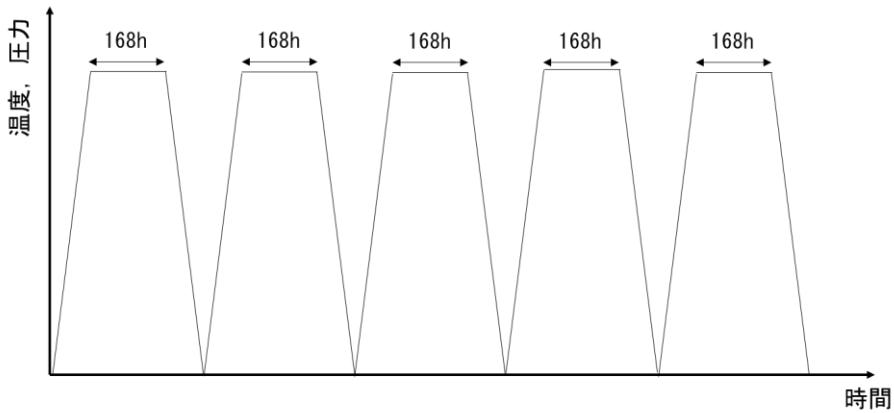


図 F.23 運転履歴

b) 材料物性および評価条件 SUS304 鋼の材料物性として以下の値を使用する。

線膨張係数: $\alpha = 20.3 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^{\circ}\text{C}$

弾性率: $E = 1.54 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

ポアソン比: $\nu = 0.306$

繰り返し応力範囲・ひずみ範囲関係式は、**附属書 E 式(2)**のRamberg-Osgood 近似式を与えており、材料定数は以下のようになる。

基準応力: $\sigma_0 = 92.1 \text{ N/mm}^2$

基準ひずみ: $\varepsilon_0 = 6.01 \times 10^{-4}$

Ramberg-Osgood 定数: $\kappa = 0.0976, n = 3.68$

また、クリープひずみ関係式は**附属書 E 式(15)**で表される Norton 近似式を用い、 550°C における SUS304 の Norton 則の材料定数は、以下で与えられる。

$$B = 2.71 \times 10^{-27}$$

$$m = 9.77$$

また、内圧による一次軸方向応力は以下の式により求まる。

$$P_m = PD/4t = (3.5 \times 1000) / (4 \times 25) = 35 \text{ MPa}$$

一方、配管の内外面の温度差により生じる熱応力は2次応力成分として以下の式で求まる。

$$Q_b = E\alpha\Delta t/2(1-\nu) = 1.54 \times 10^5 \times 20.3 \times 10^{-6} \times 120/2/(1-0.306) = 270 \text{ MPa}$$

c) 評価手順

1) クリープ亀裂進展の計算

膜応力と曲げ応力は

保持膜応力 σ_m : 35 MPa

保持曲げ応力 σ_b : 270 MPa

応力分布式は $\sigma = 302.216 (x/a)$

1. 1) 深さ方向のクリープ亀裂進展の計算

STEP1 応力拡大係数の算出

応力拡大係数 K_I は**附属書 D 式 (101)** より算出する。

$$K_l^{(\max)} = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a} = (316 \times 0.674 - 216 \times 0.467) \times \sqrt{3.1416 \times 0.01} \\ = 18.2 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 保持開始時の弾性 J 積分の算出

保持開始時の弾性 J 積分 $J_e^{(0)}$ は **附属書 E 式 (16)** より算出する。

$$J_e^{(0)} = \frac{(K_l^{(\max)})^2}{E'} = \frac{(18.2)^2}{1.54 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)} = 1.95 \text{ (N/mm)}$$

STEP3 保持開始時の弾性参照応力および弾性参照ひずみの算出

保持開始時の弾性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は **附属書 E 式 (17)**, **付属書 D 式 (63)** より算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(\max)} = 271 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾性参照ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は **附属書 E 式 (18)** より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}}{E} = \frac{271}{1.54 \times 10^5} = 1.76 \times 10^{-3}$$

STEP4 保持開始時の弾塑性参照応力および弾塑性参照ひずみの算出

繰返し応力・ひずみ関係式は Ramberg-Osgood 近似式で表しているため、保持開始時の弾塑性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は **附属書 E 式 (21)** に満たす解として算出する。

$$q_p \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = k \sigma_0 \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right]^n$$

ここで、弾性追従係数 $q_p = 4$ より

$$4 \times \left(271 - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = 0.0976 \times 92.1 \times \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{92.1} \right]^{3.68}$$

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 218 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾塑性参照ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は **附属書 E 式 (22)** より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \frac{k \sigma_0}{E} \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right]^n \\ = \frac{218}{154000} + \frac{0.0976 \times 92.1}{154000} \left[\frac{218}{92.1} \right]^{3.68} = 2.80 \times 10^{-3}$$

STEP5 Norton 式を用いた保持中の弾塑性参照応力、参照クリープひずみ速度及びクリープ J 積分の算出

STEP4 で算出された保持開始時の弾塑性参照応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性参照ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を用いて、保持中の弾塑性参照応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は **附属書 E 式 (26)** より算出する。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + (\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}})^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}} \right\} = 139 \text{ (MPa)}$$

附属書 E 式 (27), (28) を満たすように、参照クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^C$ を保持開始からの経過時間 t_h の関数として求める。クリープ J 積分 J^* は **附属書 E 式 (29)** より算出する。

$$\dot{\sigma}_{\text{ref}}^{\text{C}} = -\frac{E}{q_c} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}} = \frac{\partial f_{\text{ec}}(T, \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}, t)}{\partial t}$$

$$J^* = \frac{\sigma'_{\text{ref}} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}} J_{\text{e}}^{(0)}$$

STEP6 保持中のクリープ亀裂進展速度および進展量の算出

保持中の応力緩和、クリープ J 積分およびクリープ亀裂進展挙動を示す。ここで、クリープ亀裂進展特性として、**本体式(5.3)**における SUS304 の 550°C でのクリープ亀裂進展速度の定数用いる。

$$da/dt = 0.0175 \times J^*$$

図 F. 24 に保持中の応力緩和、図 F. 25 にクリープ J 積分、図 F. 26 にクリープ亀裂進展速度とクリープ亀裂進展量の時間変化を示す。深さ方向へのクリープ亀裂進展量は、168 時間(1 週間) 経過した時点で、 $\Delta a_{1c} = 0.025(\text{mm})$ となる(図 F. 26)。

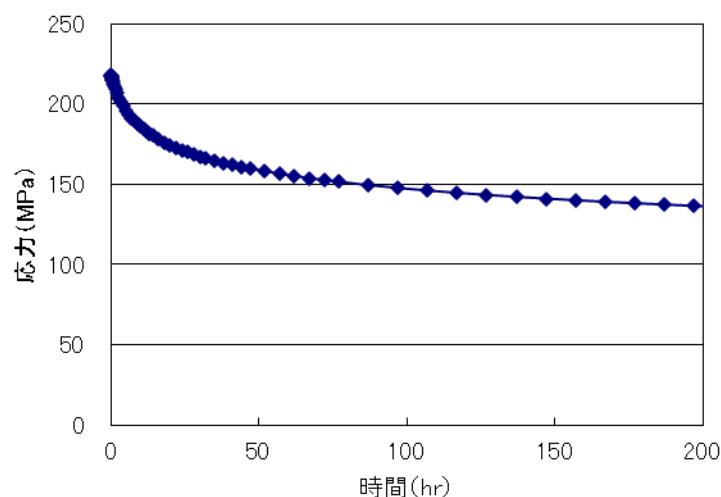


図 F. 24 保持中の応力緩和

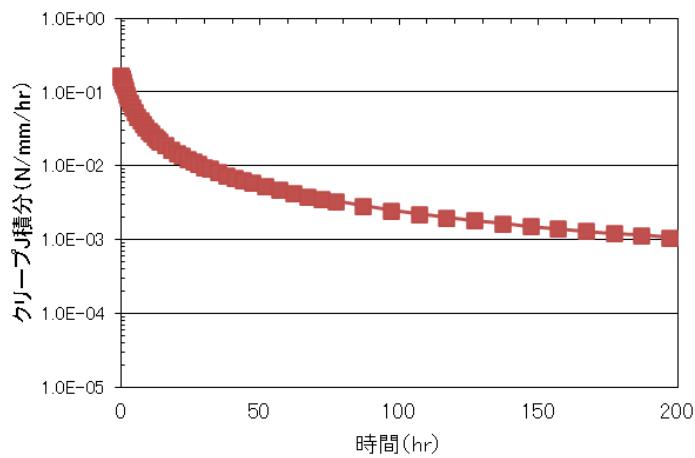


図 F.25 クリープJ積分

, 23

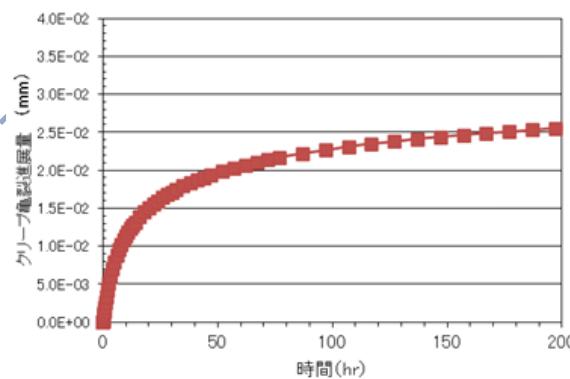
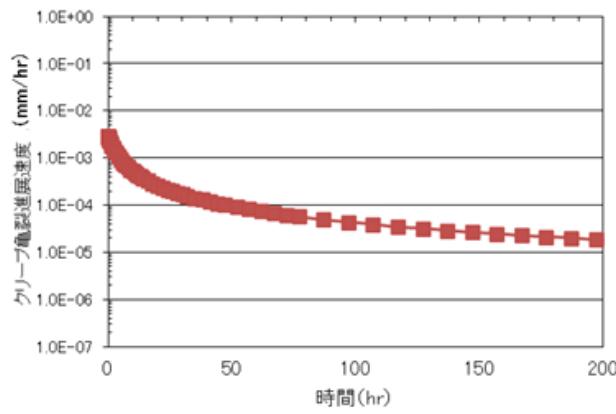


図 F.26 クリープ亀裂進展挙動

1.2) 表面方向のクリープ亀裂進展の計算

STEP1 応力拡大係数の算出

応力拡大係数 K_I は**附属書D式(101)**より算出する。

$$K_I^{(\max)} = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a} = (302 \times 0.788 - 216 \times 0.139) \times \sqrt{3.1416 \times 0.01} \\ = 36.9 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 保持開始時の弾性 J 積分の算出

保持開始時の弾性 J 積分 $J_e^{(0)}$ は **附属書 E 式 (16)** より算出する。

$$J_e^{(0)} = \frac{(K_l^{\max})^2}{E'} = \frac{(36.9)^2}{1.54 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)} = 7.99 \text{ (N/mm)}$$

STEP3 保持開始時の弾性参考応力および弾性参考ひずみの算出

保持開始時の弾性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は **附属書 E 式 (17)** より算出する。

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(\max)} = 271 \text{ (MPa)}$$

保持開始時の弾性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}$ は **附属書 E 式 (18)** より算出する。

$$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}}{E} = \frac{271}{1.54 \times 10^5} = 1.76 \times 10^{-3}$$

STEP4 保持開始時の弾塑性参考応力および弾塑性参考ひずみの算出

繰返し応力-ひずみ関係式は Ramberg-Osgood 近似式で表しているため、保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は **附属書 E 式 (21)** に満たす解として算出する。

$$q_p \left(\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = k \sigma_0 \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right]^n$$

ここで、弾性追従係数 $q_p = 4$ であるから、

$$4 \times \left(271 - \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} \right) = 0.0976 \times 92.1 \times \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{92.1} \right]^{3.68} \quad \text{となり,}$$

$$\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} = 218 \text{ (MPa)} \quad \text{と求まる。}$$

保持開始時の弾塑性参考ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は **附属書 E 式 (22)** より算出する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)} &= \frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{E} + \frac{k \sigma_0}{E} \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}}{\sigma_0} \right]^n \\ &= \frac{218}{154000} + \frac{0.0976 \times 92.1}{154000} \left[\frac{218}{92.1} \right]^{3.68} = 2.80 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

STEP5 Norton 式を用いた保持中の弾塑性参考応力、参考クリープひずみ速度及びクリープ J 積分の算出

STEP4 で算出された保持開始時の弾塑性参考応力 $\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ および保持開始時の弾塑性ひずみ $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ を用いて、保持中の弾塑性参考応力 $\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は **附属書 E 式 (26)** より算出する。

$$\sigma'_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \left\{ \left[\frac{EB}{q_c} (m-1) t_h + (\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}})^{1-m} \right]^{\frac{1}{1-m}} \right\}$$

参照クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$ を保持開始からの経過時間 t_h の関数として求める。クリープ J 積分 J^* は **附属書 E 式 (27)** より算出する。

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}} = -\frac{E}{q_c} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}} = \frac{\partial f_{\text{ec}}(T, \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}, t)}{\partial t}$$

$$J^* = \frac{\sigma'_{\text{ref}} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{C}}}{\sigma_{\text{ref}}^{\text{E}(0)} \dot{\varepsilon}_{\text{ref}}^{\text{E}(0)}} J_{\text{e}}^{(0)}$$

STEP6 保持中のクリープ亀裂進展速度および進展量の算出

保持中の応力緩和、クリープ J 積分およびクリープ亀裂進展挙動を示す。ここで、クリープ亀裂進展特性として、以下を用いた

$$da/dt = 0.0175 \times J^*$$

図 F.27 に保持中の応力緩和、図 F.28 にクリープ J 積分、図 F.29 にクリープ亀裂進展速度とクリープ亀裂進展量の時間変化を示す。表面方向へのクリープ亀裂進展量は、168 時間（1 週間）経過した時点で、 $\Delta c_{1c} = 0.103\text{mm}$ である（図 F.29）。

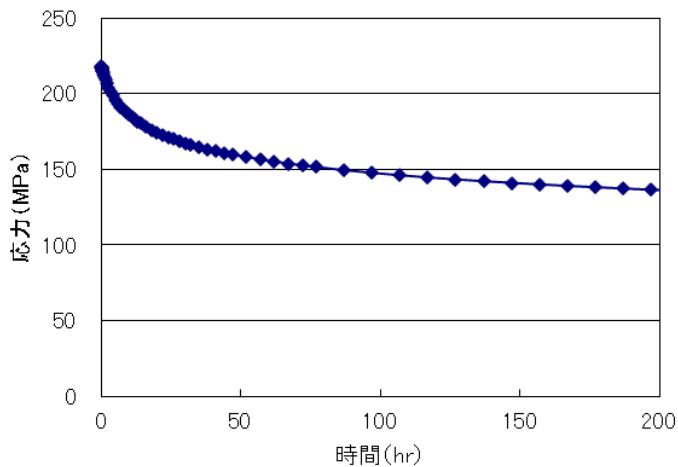


図 F.27 保持中の応力緩和

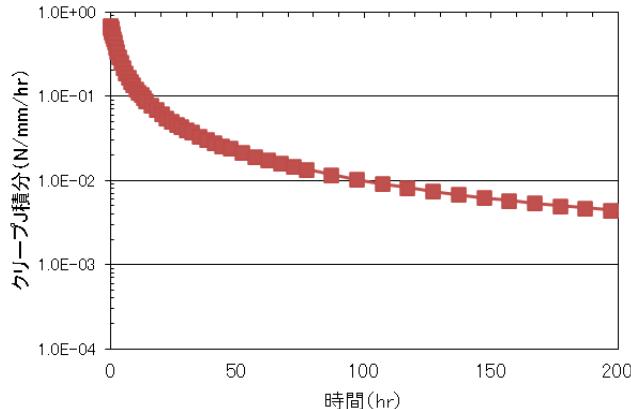


図 F.28 クリープ J 積分

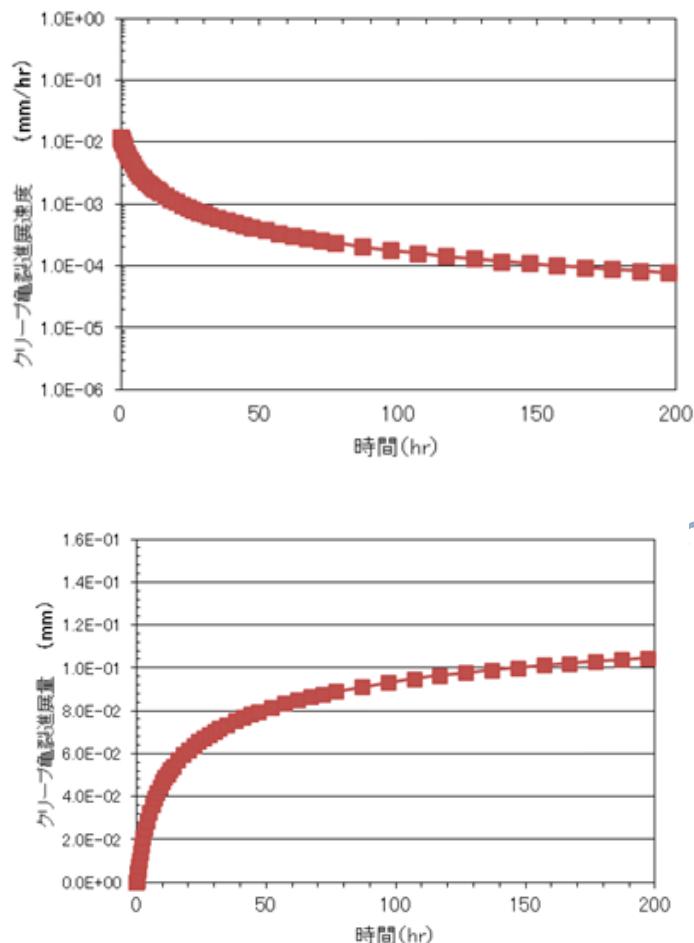


図 F.29 クリープ亀裂進展挙動

2) **疲労亀裂進展の計算** 疲労亀裂進展計算は、クリープ亀裂進展計算と独立して行う。よって初期条件として、以下のようになる。

亀裂深さ $a = 10 \text{ mm}$

亀裂半長 $c = 20 \text{ mm}$

繰り返し膜応力 $\sigma_m : 35 \text{ MPa}$

繰り返し曲げ応力 $\sigma_b : 270 \text{ MPa}$

応力分布式 $\sigma = 302 - 216 \left(\frac{x}{a} \right)$

2.1) 深さ方向の疲労亀裂進展の計算

STEP1 応力拡大係数範囲の算出

応力拡大係数範囲 ΔK_I は **附属書D式(101)** より算出する。

$$K_I^{(\max)} = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a} (302 \times 0.674 - 216 \times 0.467) \times \sqrt{3.1416 \times 0.01} \\ = 6.58 \left(\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \right)$$

$$\Delta K_I = K_I^{(\max)} - K_I^{(\min)} = 18.2 - 0 = 18.2 \left(\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \right)$$

STEP2 弹性 J 積分範囲の算出

弹性 J 積分範囲 ΔJ_e は **附属書 E 式 (4) ~ (6)** より算出する。

$$\Delta J_e = \frac{(\Delta K_I)^2}{E'} = \frac{(18.2)^2}{1.54 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)} = 1.95 \text{ (N/mm)}$$

STEP3 弹性参照応力範囲および弹性参照ひずみ範囲の算出

弹性参照応力範囲 $\Delta \sigma_{\text{ref}}^E$ は **附属書 E 式 (7)** より算出する。

$$\Delta \sigma_{\text{ref}}^E = \sigma_{\text{ref}}^{\text{E(max)}} - \sigma_{\text{ref}}^{\text{E(min)}} = 272 - 0 = 272 \text{ (MPa)}$$

弹性参照ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E$ は **附属書 E 式 (8)** より算出する。

$$\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E = \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^E}{E} = \frac{272}{1.54 \times 10^5} = 1.76 \times 10^{-3}$$

STEP4 弹塑性参照応力範囲および弹塑性参照ひずみ範囲の算出

繰返し応力・ひずみ関係式は Ramberg-Osgood 近似式で表しているため、STEP3 で算出された $\Delta \sigma_{\text{ref}}^E$ および $\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E$ を用いて、弹塑性参照応力範囲 $\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は **附属書 E 式 (11)** に満たす解として算出する。

$$q_p (\Delta \sigma_{\text{ref}}^E - \Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2k\sigma_0 \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right]^n$$

ここで、弹性追従係数 $q_p = 4$ より、

$$4 \times (272 - \Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2 \times 0.0976 \times 92.1 \times \left[\frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2 \times 92.1} \right]^{3.68}$$

$$\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} = 218 \text{ (MPa)}$$

弹塑性参照ひずみ範囲 $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP(0)}}$ は **附属書 E 式 (12)** より算出する。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}} &= \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{E} + \frac{2k\sigma_0}{E} \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right]^n \\ &= \frac{218}{154000} + \frac{2 \times 0.0976 \times 92.1}{154000} \left[\frac{218}{2 \times 92.1} \right]^{3.68} = 2.80 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

STEP5 疲労 J 積分範囲の算出

疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を **附属書 E 式 (13)** により算出する。

$$\Delta J_f = \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} \Delta \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{\Delta \sigma_{\text{ref}}^E \Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E} \Delta J_e = \frac{218 \times 2.80 \times 10^{-3}}{272 \times 1.76 \times 10^{-3}} \times 1.95 = 2.49 \text{ (N/mm)}$$

STEP6 疲労亀裂進展速度および進展量の算出

疲労亀裂進展特性として、**本体式 (5.2)** を用いた。

$$da/dN_{\text{fatigue}} = 6.3424 \times 10^{-5} (\Delta J_f)^{1.3742} = 1.96 \times 10^{-4} \text{ (mm/cycle)}$$

疲労亀裂の深さ方向への進展の計算結果：1回の起動停止で、疲労亀裂は深さ方向へ $\Delta a_{1f} = 1.96 \times 10^{-4}$ (mm) 進展する。

2. 2) 表面方向の疲労亀裂進展の計算

STEP1 応力拡大係数範囲の算出

応力拡大係数範囲 ΔK_I は**附属書D式(101)**より算出する。

$$K_I^{(\max)} = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a} = (302 * 0.788 - 216 * 0.139) \times \sqrt{3.1416 \times 0.01} \\ = 36.9 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

$$\text{よって, } \Delta K_I = K_I^{(\max)} - K_I^{(\min)} = 36.9 - 0 = 36.9 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}\text{)}$$

STEP2 弹性J積分範囲の算出

弾性J積分範囲 ΔJ_e は**附属書E式(4)～(6)**より算出する。

$$\Delta J_e = \frac{(\Delta K_I)^2}{E'} = \frac{(36.9)^2}{1.54 \times 10^5 / (1 - 0.306^2)} = 7.99 \text{ (N/mm)}$$

STEP3 弹性参照応力範囲および弾性参照ひずみ範囲の算出

弾性参照応力範囲 $\Delta \sigma_{\text{ref}}^E$ は**附属書E式(7)**より算出する。

$$\Delta \sigma_{\text{ref}}^E = \sigma_{\text{ref}}^{E(\max)} - \sigma_{\text{ref}}^{E(\min)} = 271 - 0 = 271 \text{ (MPa)}$$

弾性参照ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E$ は**附属書E式(8)**より算出する。

$$\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E = \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^E}{E} = \frac{271}{1.54 \times 10^5} = 1.76 \times 10^{-3}$$

STEP4 弹塑性参照応力範囲および弾塑性参照ひずみ範囲の算出

繰返し応力-ひずみ関係式はRamberg-Osgood近似式で表しているため、STEP3で算出された $\Delta \sigma_{\text{ref}}^E$ および $\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^E$ を用いて、弾塑性参照応力範囲 $\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}$ は**附属書E式(11)**に満たす解として以下のように求まる。

$$q_p (\Delta \sigma_{\text{ref}}^E - \Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2k\sigma_0 \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right]^n$$

ここで、弹性追従係数 $q_p = 4$ であることから、

$$4 \times (271 - \Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}) = 2 \times 0.0976 \times 92.1 \times \left[\frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2 \times 92.1} \right]^{3.68} \text{ となり}$$

$$\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}} = 218 \text{ (MPa)}$$

弾塑性参照ひずみ範囲 $\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}(0)}$ は**附属書E式(12)**より算出する。

$$\Delta \varepsilon_{\text{ref}}^{\text{EP}} = \frac{\Delta \sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{E} + \frac{2k\sigma_0}{E} \left[\frac{\sigma_{\text{ref}}^{\text{EP}}}{2\sigma_0} \right]^n$$

$$= \frac{218}{154000} + \frac{2 \times 0.0976 \times 92.1}{154000} \left[\frac{218}{2 \times 92.1} \right]^{3.68} = 2.80 \times 10^{-3}$$

STEP5 疲労J積分範囲の算出

疲労J積分範囲 ΔJ_f を**附属書E式(13)**により算出する。

$$\Delta J_f = \frac{\Delta \sigma_{ref}^{EP} \Delta \varepsilon_{ref}^{EP}}{\Delta \sigma_{ref}^E \Delta \varepsilon_{ref}^E} \Delta J_e = \frac{218 \times 2.80 \times 10^{-3}}{271 \times 1.76 \times 10^{-3}} \times 7.99 = 10.2 \text{ (N/mm)}$$

STEP6 疲労亀裂進展速度および進展量の算出

疲労亀裂進展特性として、**本体式(5.2)**を用いた。

$$da/dN_{fatigue} = 6.3424 \times 10^{-5} (\Delta J_f)^{1.3742} = 1.63 \times 10^{-3} (\text{mm/cycle})$$

疲労亀裂表面方向進展の計算結果：1回の起動停止で、疲労亀裂は表面方向～ $\Delta c_{1f} = 1.63 \times 10^{-3} (\text{mm})$ を進展する。

- 3) **クリープ疲労亀裂進展** 1)より一回の起動停止によりクリープによる亀裂進展は、深さ方向、表面長さ方向にそれぞれ、 $\Delta a_{1c} = 0.025 (\text{mm})$ 、 $\Delta c_{1c} = 0.103 (\text{mm})$ と求まった。
C.2)より一回の起動停止により疲労による亀裂進展は、深さ方向、表面長さ方向にそれぞれ、 $\Delta a_{1f} = 1.96 \times 10^{-4} (\text{mm})$ 、 $\Delta c_{1f} = 1.63 \times 10^{-3} (\text{mm})$ と求まった。
よって、一回の起動停止によるクリープ疲労亀裂進展は、深さ方向、表面長さ方向にそれぞれ、以下のようになる。
 $\Delta a_1 = \Delta a_{1c} + \Delta a_{1f} = 0.025 + 1.96 \times 10^{-4} \approx 0.025 (\text{mm})$
 $\Delta c_1 = \Delta c_{1c} + \Delta c_{1f} = 0.103 + 1.63 \times 10^{-3} \approx 0.105 (\text{mm})$

STEP7 残り4週間の亀裂進展計算

2週間目から5週間目の亀裂進展計算は、その前に1週間運転した後の亀裂深さおよび亀裂半長の計算結果を初期亀裂として実施する。

以上に示すように、残りの4週間（168時間×4、繰り返し4回）のクリープ亀裂進展計算および疲労亀裂進展計算を行った結果、亀裂深さ 10.125mm、亀裂長さ 20.525mmに達した。計算の詳細を**表F.4**に示す。

表F.4 亀裂深さおよび亀裂長さの計算結果

経過時間 [hrs]	0	168	336	504	672	840
亀裂深さa [mm]	10	10.025	10.05	10.075	10.1	10.125
亀裂半長c [mm]	20	20.105	20.21	20.315	20.42	20.525
亀裂長さ2c [mm]	40	40.21	40.42	40.63	40.84	41.05

参考文献

- 1) 電力中央研究所、"平成12年度 発電用新型炉技術確証試験（高速増殖炉技術確証試験）報告書 別冊 高温構造健全性評価指針（案）"

高温下での圧力機器の亀裂状欠陥評価方法 解説

この解説は、本体及び附属書に規定した事項、およびこれらに関連した事項を説明するもので、規格の一部ではない。

1 制定の趣旨及び経緯

化学工業、石油産業や都市ガスなどの一般産業用として使用される圧力容器、配管、貯槽といった機器においては、設計時に有害な欠陥のないことを前提として強度設計がなされている。しかし、製造時の欠陥や供用期間中に種々の要因によって生じる欠陥が供用期間中の検査で検出される場合があり、また長期間の運転による経年変化が健全性に影響を及ぼすことが懸念される。このため、機器の経年変化を正確に把握し、供用中の設備が有する強度、および同設備の供用可能な期間を精度よく評価する、いわゆる供用適性評価を行うことが重要である。一般社団法人日本高圧力技術協会では **HPIS Z 101-1 : 2008 圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第1段階評価¹⁾** および **HPIS Z 101-2:2011 圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第2段階評価²⁾** を制定、刊行している。前者ではモデル化された欠陥寸法と評価不要欠陥寸法との比較に基づく安全かつ簡易な欠陥評価の方法を定め、後者では破壊力学に基づくより詳細かつ正確な欠陥評価の仕方を規定している。しかしながら、これらの規格はクリープによる損傷、クリープ域での亀裂進展評価や寿命評価などを対象外としている。また、設計規格において、クリープ変形、クリープ破壊に基づいて許容応力が設定されている温度領域があり、クリープ破壊の考慮はされている。一方、この温度域で設計されたとしても、クリープ変形が局所的に拘束されクリープ亀裂が発生進展する場合がある。クリープ破壊の例として、熱応力クリープ、クリープ-疲労、溶接継手のクリープ割れ（タイプI, II, III, IV）などがあげられる。このようなクリープ破壊は、高温下で運転される一般産業用機器において考慮すべき劣化の主たる要因であることが少なくなく、規格化を通じた供用適性評価法を整備することの意義は大きい。以上の状況を踏まえ、先行して制定された規格^{1,2)}と整合のとれた、高温下での圧力機器の亀裂状欠陥評価方法に関する規格を制定することとなった設計と維持の間には解説図1に示すような補完関係があり、設計想定条件からの逸脱や技術進歩に対処するために損傷の兆候を検査で発見し、その損傷の冗長性を力学的に評価し、次の定期点検までの安全性が確認不可能な場合には補修を行うために維持規格が適用される。

2 本体の各項の解説

1 適用範囲

a) **1.4 評価対象欠陥 本体 1.4**においてクリープが懸念される温度域とは、部材に持続的な応力が作用することにより時間依存型の変形（クリープ変形）が現れる可能性の温度域のことを指す。

高温で使用される機器では、クリープを考慮した損傷モードが構造健全性を判断する上での

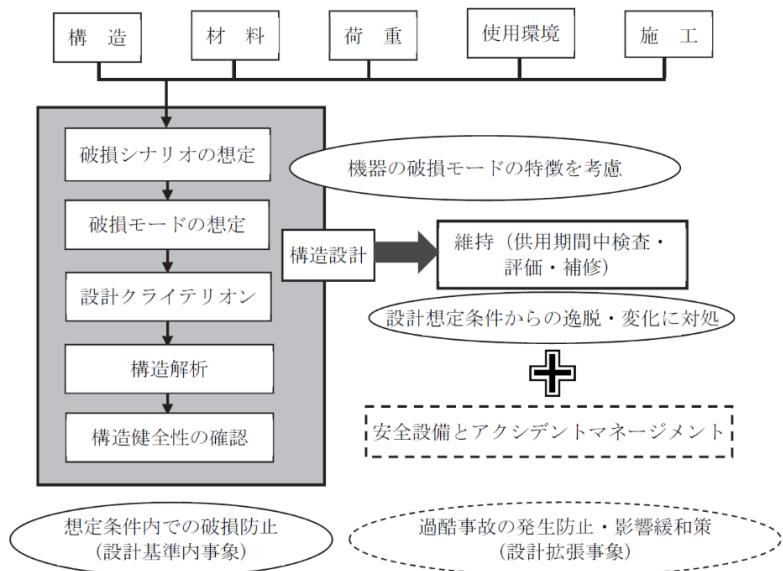
重要な要素となる。クリープを考慮すべき温度領域としては、高温使用時間や負荷応力に関わらず ASME や JSME で以下のように一律に規定されていた。

- ・フェライト鋼 : 375 °C (ASME では 700 °F = 371 °C)
- ・オーステナイト鋼 : 425 °C (ASME では 800 °F = 427 °C)

一方、近年では設計の簡易化の観点より、高温使用時間に応じてクリープ損傷を考慮すべき温度のしきい値を定めるべきであるという「Negligible Creep」の概念が導入されてきた。このような経緯の下、既往の規格では設計限界応力（例えば $1.5S_m$, S_m は設計応力強さ）が作用したと仮定してもクリープを考慮する必要のない「クリープ除外規定」が導入されている。

R5³⁾では、Type 304, Type 316 オーステナイト鋼および Alloy 800 合金についてクリープが顕著ではないと判断してよい温度が規定され、たとえば高温使用時間が 200,000 時間のとき、クリープを除外してよい温度は Type 304 オーステナイト鋼で約 450 °C 以下、Type 316 オーステナイト鋼で約 475 °C 以下である。**BS7910⁴⁾**では、クリープを除外してよい温度がフェライト鋼 (CrMoV, CrMo, 2-1/4Cr-1Mo, 9Cr1Mo, 12CrMoV(W)) で 400 °C 以下とされている。**API 579-1/ASME FFS-1⁵⁾**では、クリープ温度域の下限が材料ごとに表の形で整理されている。これらの温度は、流動応力（0.2%耐力と引張強さの平均）あるいは $1.5S_m$ を負荷したときに高温使用時間に対するクリープひずみが 0.2%以下となるような温度の上限値として定められたものである。こうして決められた温度は、従来の規格で一律に規定されていた、いわゆる「クリープ温度（フェライト鋼で 371 °C, オーステナイト鋼で 427 °C）」よりも高い温度となっているために、設計ではクリープ評価を実施すべき対象が少なくなるというメリットをもたらしている。

クリープの除外規定導入の目的は、あくまで評価の簡易化であり、そのしきい値は無欠陥材の設計を想定して定められており、負荷される応力の最大値が設計で規定されていることが拠り所となっている。一方、亀裂状欠陥評価を行う場合には、参考応力で規定するにしてもその上限を制限する拠り所がなく、また設計基準のクリープ除外規定を準用するにしても無欠陥に対するクリープ除外温度よりも相対的に低い温度領域でクリープの影響を受ける可能性がある。以上のことから、この規格においては評価の簡易化のためのクリープ除外規定を設けないこととし、クリープが懸念される温度域については使用者が適切に定める必要がある。



解説図1 圧力設備の構造健全性確保の考え方

日本溶接協会、 “原子力構造機器の材料、 設計、 施工、 検査、 維持に関する講習会” テキスト⁶⁾を一部改訂して作成

4 評価に必要なデータ

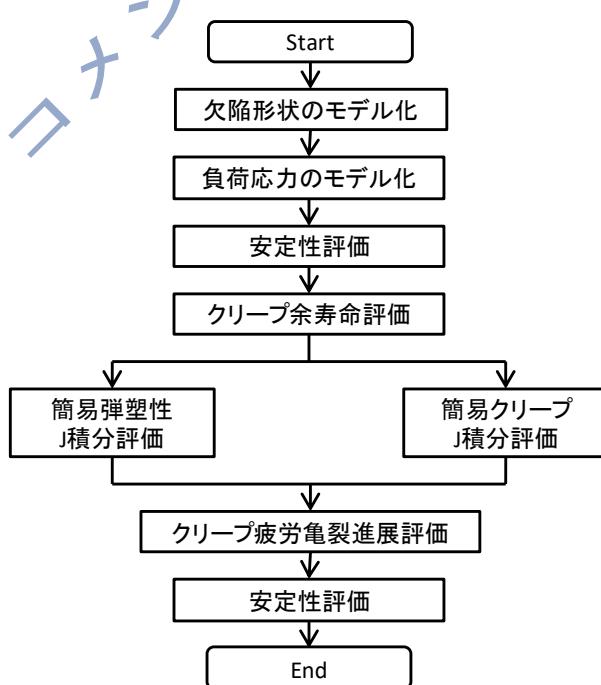
維持の位置付けから、 維持における材料特性データも設計との整合性を有することが望ましい。

解説表1に設計時ならびに維持評価時に使用されるデータの比較を示す。設計時のデータとしては「規格計算に基づく設計 (Design by Rule)」と「解析に基づく設計 (Design by Analysis)」の両者について示している。「規格計算に基づく設計 (Design by Rule)」の場合は、 耐圧性能を確保するための必要最小板厚 (TSR : Thickness Shell Requirement) の計算が要求され、 必要となる材料特性データも降伏強さ、 引張強さ、 ならびに 10^5 hr 後のクリープ破断強さに限定される。一方、 設計で「解析に基づく設計 (Design by Analysis)」が適用された場合には想定される破損モードに対する設計クライテリオンが用いられているために、 この規格でも想定されている延性破壊やクリープ疲労を評価するための材料特性データは設計時にも使用される。

本評価で必要となる材料特性データは、「解析に基づく設計 (Design by Analysis)」で必要となるデータに、 疲労亀裂進展速度式、 クリープ亀裂進展速度式ならびに破壊靱性値を加えたものとなる。**解説表1**に掲げられた維持時の評価フローの各項目のおおよそのつながりを**解説図2**に示す。

解説表 1 設計時ならびに維持評価時に使用されるデータの比較

データ		設計時		維持時	
		Design by Rule	Design by Analysis	評価フロー	必要データ
欠陥	検査記録	×	×	欠陥形状のモデル化	○
	評価部位の形状、寸法	○	○		○
荷重条件	運転履歴および保全履歴	×	○		○
	評価部位の温度、環境	○	○		○
	評価部位の荷重(圧力、自重、地震)	○	○	負荷応力のモデル化	○
	温度過渡条件	×	○		○
	流量過渡条件(熱伝達率)	×	○		○
	設計寿命(回数、高温保持時間)	×	○		×
材料物性値	評価後の運転予定	×	×		○
	比熱	×	○	負荷応力のモデル化	○
	熱伝導率	×	○		○
	継弾性係数	×	○		○
	ポアソン比	×	○	安定性評価	○
	降伏強さ	○	○		○
	引張強さ	○	○		○
	単調応力-ひずみ関係(式)	×	○	簡易弾塑性	○
	繰返し応力-ひずみ関係(式)	×	○	J 積分評価	○
	疲労曲線	×	○		×
	クリープ破断カーブ	△	○	クリープ 余寿命評価	○
	10 ⁵ hr 強度				
	クリープ破断延性値	×	△	簡易クリープ	○
	クリープひずみ式	×	○	J 積分評価	○
	疲労亀裂進展速度式	×	×	クリープ疲労	○
	クリープ亀裂進展速度式	×	×	亀裂進展評価	○
	破壊韌性値	×	○	安定性評価	○



解説図 2 維持時の評価フローの各項目のつながり

5 評価方法と結果の判定

クリープが懸念される温度域における欠陥評価法の規格基準類として、R5³⁾、BS 7910⁴⁾、API 579-1/ASME FFS-1⁵⁾、高温構造健全性評価指針（案）⁷⁾などがある。

R5³⁾には、クリープおよびクリープ疲労を引き起こす荷重下での欠陥評価法として、「Vol. 4/5, Procedure for Assessing Defects under Creep and Creep Fatigue Loading」が規定されている。その大まかな評価手順は次のとおりである。

- ・割れの原因を特定し、初期欠陥を想定する。
- ・運転条件（荷重履歴）を定義する。
- ・必要な材料データを収集する。
- ・基本的な応力解析（無亀裂部材に対する弾性解析）を実施する。
- ・時間非依存荷重に対する安定性を確認する。
- ・クリープおよび疲労が有意であるか否かを確認する。
- ・初期欠陥寸法に対するクリープ破断時間を計算する。
- ・亀裂潜伏時間を計算する。
- ・進展後の亀裂寸法を計算する。
- ・進展後の欠陥の破断時間を再計算する。
- ・進展後の欠陥の時間非依存荷重に対する安定性を確認する。
- ・評価結果を解釈する。
- ・報告事項をまとめる。

R5 では、疲労が有意でない場合（クリープが支配的な場合）と疲労が有意な場合（クリープと疲労の重畠を考える場合）とに応じて細かな評価手順が用意されている。

BS 7910⁴⁾には、クリープ条件下での欠陥評価法として、「Sec. 9, Assessment of Flaws under Creep Conditions」が規定されている。評価の流れは R5 のそれとほぼ同じである。

API 579-1/ASME FFS-1⁵⁾には、レベルの異なる三種類の評価が用意されている。レベル 1 評価は時間-温度-応力のスクリーニング曲線からクリープ損傷を求めて許容の可否を判定する簡易評価である。レベル 2 評価は破壊力学的評価に基づきクリープ破断時間を求めて許容の可否を判定する、いわゆる欠陥評価に相当する。レベル 3 評価は応力解析に基づきクリープ損傷、クリープ亀裂進展、クリープ座屈などを予測する詳細評価である。基本的な評価の考え方は R5、BS 7910 と大差ない。

高温構造健全性評価指針（案）⁷⁾は高速増殖炉構造機器の健全性評価を目的として策定されたものであり、その一部としてクリープおよびクリープ疲労条件下での亀裂進展評価法が規定されている。オーステナイトステンレス鋼を対象として、クリープ疲労亀裂進展速度の評価、進展速度則の支配パラメータとその算出手順などが用意されている。

これら評価法の特徴を比較した結果を解説表 2 に示す。クリープ除外規定の考え方や初期欠陥に対するクリープ破損寿命の評価の有無には規格ごとの違いが現れている。疲労亀裂進展の支配パラメータとしては応力拡大係数範囲 ΔK を採用したものと疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を用いるものがあるが、これは弾性状態、弾塑性状態のいずれを想定するかの違いによるものである。疲労亀裂進展則はいずれも支配パラメータを用いたべき乗則で表される。クリープ亀裂進展の支配パラメ

ータとしては定常クリープ J 積分である J^* (ASTM 規格では C^* と呼ばれている) を用いたものと非定常クリープ J 積分 C_t を用いたものとがある。クリープ亀裂進展則はいずれも支配パラメータを用いたべき乗則で表される。細部においては表現の仕方や考え方には若干の違いがあるものの、基本的な流れはいずれの規格も似通っている。

解説表 2 評価法の特徴の比較の例

評価項目	R5	BS 7910	API 579-1/ASME FFS-1	高温構造健全性評価指針(案)
クリープ除外規定	クリープの重要度をスクリーニング	クリープの重要度をスクリーニング	レベル1による評価がこれに相当	最高使用温度による制限
初期欠陥に対するクリープ破損寿命	参照応力に基づく評価	規定なし	規定なし	規定なし
初期欠陥の潜伏期間	C^* による評価	参照応力、応力拡大係数による評価	クリープ疲労損傷による評価	クリープ疲労損傷による評価
疲労亀裂進展の支配パラメータ	応力拡大係数範囲 ΔK	応力拡大係数範囲 ΔK	応力拡大係数範囲 ΔK	疲労 J 積分範囲 ΔJ_f
疲労亀裂進展則	Paris則	Paris則	Paris則	ΔJ_f によるべき乗則の数値積分
クリープ亀裂進展の支配パラメータ	参照応力、参照ひずみ速度より C^* を評価	参照応力、クリープ損傷より C^* を評価	参照応力、クリープ損傷より C_t を評価	参照応力、参照ひずみ速度より C^* を評価
クリープ亀裂進展則	C^* によるべき乗則の数値積分	C^* によるべき乗則の数値積分	C_t によるべき乗則	C^* によるべき乗則の数値積分
材料データ	規定なし	炭素鋼 低合金鋼 高クロム鋼	炭素鋼 低合金鋼	オーステナイト ステンレス鋼

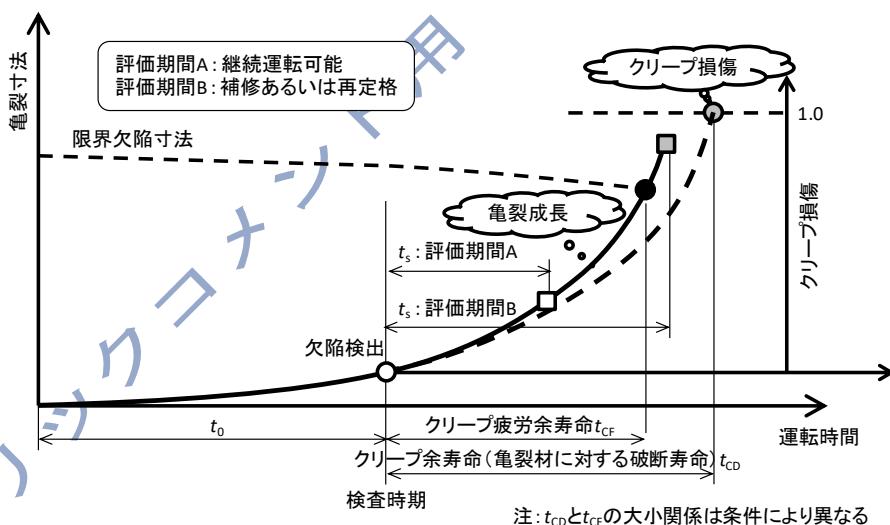
(注) C^* は二次クリープを対象とした定常クリープ J 積分、
 C_t は一次クリープを考慮に入れた非定常クリープ J 積分、
定義は異なるものの評価結果は特別な場合を除きほぼ同一となる

a) 5.1 亀裂状欠陥評価の基本事項 高温で使用されるプラントの亀裂進展には、繰り返し負荷による疲労亀裂進展と高温下でのひずみまたは荷重保持によるクリープ亀裂進展の二種類がある。それらの進展挙動や重畳の影響についてはこれまでに多くの研究がなされている。英国では現 EDF Energy を中心に、高温下での破壊力学評価法が R5³⁾としてまとめられ、またこれに準拠して BS7910⁴⁾が発行されている。我が国では高速増殖炉の高温構造設計法の検討を通じた体系的な研究が実施され、その評価法は高温構造健全性評価指針(案)⁷⁾として策定されている。この規格では、評価の流れについて BS7910⁴⁾を参考とし、また評価手法としては主として高温構造健全性評価指針(案)に準拠した。

運転時間の経過に伴う亀裂寸法の変化を模式的に解説図 3 に示す。機器の運転開始から時間が経過した時点で欠陥が検出されたとする。この欠陥に対しクリープ余寿命(亀裂材に対する破断寿命) t_{CD} を評価し、評価者が決定する評価期間 t_s と比較する。 t_{CD} が t_s よりも大きければ評価期間内にクリープ損傷による破壊には至らないものと判断される。 t_{CD} が t_s 以下であれば評価期間中にクリープ寿命に達することから、補修あるいは再定格を行う。亀裂進展評価では、評価期間内に破壊に至るか否かを評価する。 t_s が図中の評価期間 A に対応する場合、進展後の亀裂は評価期間の末期まで安定であり、継続運転が可能である。一方、 t_s が図中の評価期間 B に対応する場合、評価期間内に亀裂は安定ではなくなり、補修あるいは再定格を行う。 t_s

として十分大きな値（ただし t_{CD} よりは小さな値）をとることによって、評価期間によらず亀裂が安定でなくなるまでに要する時間を評価することが可能である。これがすなわちクリープ疲労余寿命 t_{CF} である。

欠陥評価において安全係数は一般的に評価条件の不確定性や材料特性のばらつきを保守側に包絡するために適用される。前者に関しては、欠陥形状のモデル化の際に欠陥指示を包絡する半だ円またはだ円に置き換えること、評価に用いる荷重条件（繰り返し荷重の振幅、繰り返し数、保持荷重、保持時間など）や温度条件について、その不確定性を考慮して安全側に見積もることで安全係数が潜在的に考慮される。後者に関しては、亀裂進展評価や安定性評価に用いる材料特性として、そのばらつきを考慮した下限を用いることによって安全係数が潜在的に考慮される。しかしながら、これらの安全係数に加えてどの程度の安全性が要求されるかは個々の評価事例によって異なり、その値を一律に定めることは不可能なことから、本評価では具体的な安全係数を規定せず、使用者が評価対象に応じて適切に定めることとした。適切な安全係数を設定するためには、評価条件の変動が評価結果に及ぼす影響をパラメータ解析により定量的に把握する方法が挙げられる。なお、**HPIS Z 101-2:2011²⁾**においては破壊評価線図（FAD）による欠陥の許容性の評価において、荷重比 L_r および韌性比 K_r にそれぞれ安全係数 1.5 を見込んでいる。同規格との整合性を勘案して、本体の **5.2.4** および本体の **5.2.10** においては **HPIS Z 101-2:2011²⁾** を引用した。



解説図3 運転時間の経過に伴う亀裂寸法の変化

- b) 5.2.1 欠陥形状のモデル化 検出された種々の欠陥は、非破壊検査方法に応じた検出性から、面状欠陥、線状欠陥、ラミネーション欠陥に分類される。⁸⁾これは、斜角法UTで検出される面状、空洞状、塊状等の欠陥については、欠陥の形状を主応力方向に垂直の面に投影した面状欠陥（深さと長さ）として扱い、PT検査やMT検査等の表面検査で検出される欠陥は、表面の指示模様から線状欠陥として扱い、また、垂直法UTで検出される層状欠陥は、ラミネーション欠陥として扱うことに基づいている。なお、非破壊検査方法に対する要求事項は本規格

の範囲外であり、使用者の責で非破壊検査が適切に行われ検出された欠陥として取り扱う。

本欠陥評価法において斜角法 UT で検出される欠陥を主応力方向に垂直な面に投影するのは、欠陥面に垂直な荷重形態であるモード I の破壊を考慮していることに基づいている。投影された欠陥は、評価上すべて応力特異場が生じる鋭い亀裂として扱われる所以、評価は安全側となる。

ラミネーション欠陥は機器表面に平行な欠陥であり、この面に垂直な破壊に寄与する荷重は存在せず、発生も製造時と考えられることから、建設段階の構造材料等の基準を欠陥評価においてそのまま用いることとしている（ラミネーション欠陥とほかの欠陥は検査方法が異なるため同時に検出されることはなく、各検査手法で確認された各々の欠陥が位置的に連結している欠陥であっても、主応力方向に垂直な面に投影する段階では両者は別々に評価される）。

この結果、実際に評価を行う欠陥は面状欠陥と線状欠陥になる。破壊評価を行う場合、線状欠陥はさらに深さを仮定して面状欠陥に置き換えられる。

c) 5.2.3 評価に必要な応力成分の決定 評価では、外部からの負荷、拘束、内圧、自重などによる一次応力と、熱応力や溶接残留応力などによる二次応力を考える。一次、二次応力のそれぞれについて、膜応力、曲げ応力、および構造不連続などに伴うピーク応力に分類する。このうちピーク応力については弾塑性変形の繰り返しあるいは保持負荷初期のクリープ変形によって緩和されるため、亀裂進展では無視してよいと考えられる。応力の算出に用いる応力成分としては、応力多軸性を考慮した等価応力（ミーゼス応力、トレスカ応力など）が用いられることがあるが、クリープ疲労亀裂進展においては、亀裂の進展に伴いモード I 型の亀裂進展に移行することから、この規格では亀裂面に垂直な応力成分のみを考えることとした。

応力の算出は亀裂無し構造の線形弾性計算による。塑性変形およびクリープに伴う非線形変形については、参照応力の算出の際に別途考慮されることから、応力成分の決定に際してこれらの影響を考慮する必要はない。

亀裂を有する構造物が高温で供用される場合、溶接残留応力が亀裂前方の応力場に影響を及ぼす。しかし、溶接残留応力は供用開始直後のクリープひずみの増大に伴って急速に緩和し、クリープ亀裂進展には有意な影響を及ぼさないと考えられることから、この規格では溶接残留応力を考慮しない。

d) 5.2.4 初期欠陥の安定性評価 初期欠陥の安定性を評価する際に想定すべき破壊形態は塑性崩壊、弾塑性破壊、および線形弾性破壊の三つに分類することが可能である⁹⁾が、この規格では、これらを一括して考慮することが可能である、破壊評価線図（FAD）を用いた評価を採用した。同法は関連する HPIS Z 101-1:2008¹⁰⁾および HPIS Z 101-2:2011¹¹⁾において用いられているものと同じである。FAD の横軸は荷重比 L_r であり、塑性崩壊に対する裕度の指標を意味する。FAD の縦軸は韌性比 K_r であり、線形弾性破壊に対する裕度の指標に相当する。このとき、弾塑性破壊の発生限界は L_r と K_r の関係式、

$$K_r = L_r \left\{ \frac{8}{\pi^2} \ln \left(\sec \frac{\pi}{2} L_r \right) \right\}^{-1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

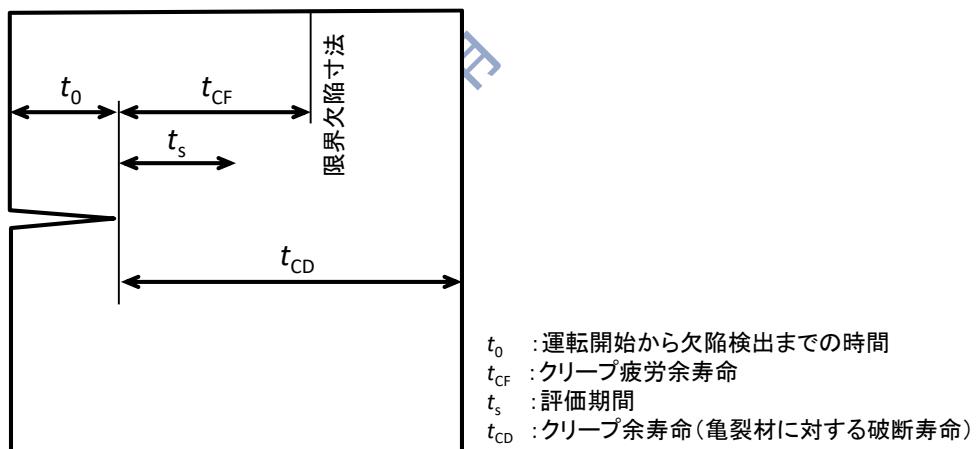
により記述され、これを破壊評価曲線（FAC）と称する。評価時点における評価点 (L_r, K_r) が許容域 (FAC の内側) にあれば初期欠陥は安定であり、非許容域 (FAC 上あるいはその外側) に

あれば安定ではない。

e) **5.2.5 評価期間 t_s の設定** 評価期間 t_s は、評価対象において欠陥が検出されてから評価時点までの運転期間、および当該時点から後に想定される供用期間を合算して設定する。例えば、次回定期検査までの継続運転の可否を評価する場合には、評価期間を次回定期検査までの運転時間とする。

一般に初期欠陥からクリープ亀裂が進展開始するまでにはある程度の時間を要することが知られており、これを亀裂潜伏期間 (Incubation Time) と称する。この規格では、供用中検査などで欠陥が見つかった場合、亀裂潜伏期間に相当する時間は既に経過したものと見なし、改めて亀裂潜伏期間を計算することはしないものとした。仮に亀裂潜伏期間が存在するにしても、欠陥が見つかった時点でそれがどの程度消費されているかを判断する方法はない以上、亀裂潜伏期間を考慮しないことで安全側の評価を行うこととした。

解説図4は亀裂の進展とそれに対応する評価期間の関係を模式的に示したものである。評価開始時点 t_0 で検出された欠陥を初期亀裂として評価を始めるが、この初期亀裂に至るまでには亀裂潜伏期間の消費と当該時点までの亀裂進展が含まれていると考える。 t_{CD} は亀裂の特異性を考慮しない、初期のリガメントに対するクリープ余寿命である。評価期間 t_s に相当する亀裂進展量を計算した結果がクリープ疲労余寿命に相当する限界欠陥寸法より大きいか小さいかにより、その期間の亀裂の安定性が評価される。



解説図4 亀裂進展と評価期間の関係

f) 5.2.6 クリープ破断時間の評価 一次の荷重が作用する場合には、クリープ損傷が構造物中を進展し破損に至る時間 t_{CD} は以下のように表される。

$$t_{\text{CD}} = t_r[\sigma_{\text{ref}}^p(a)] \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 t_{CD} は連続損傷による構造物の破損時間、 σ_{ref}^P は一次参考応力、 $t_r(\sigma)$ は応力 σ での単軸クリープ試験データから得られるクリープ破断時間である。

ここでは、CT 試験片と環状切欠き試験片を用いて行ったクリープ亀裂進展試験の試験時間と、式(2)によって算出される t_{CD} との比較を行った。なお、クリープ亀裂進展試験では破断直前に試験を停止している。対象とした材料は、1Cr-Mo-V 鋼、SUS316 鋼、9Cr 鋼 (Mod.9Cr-

1Mo 鋼) の三種類である。まず解説表 3(a)～(c) にこれらの単軸クリープ試験データ (応力, 破断時間, 破断伸び, 破断絞り) を示す。

表のデータから、単軸クリープ破断時間と応力の関係 $t_r(\sigma)$ として以下の回帰式を導出した。これら回帰式は解説図 5(a)～(c) にも示した。

・ 1Cr-Mo-V 鋼

$$538^{\circ}\text{C} : t_r = 4.203 \times 10^{35} \sigma^{-13.27} \quad \text{---(3)}$$

$$594^{\circ}\text{C} : t_r = 5.060 \times 10^{17} \sigma^{-6.52}$$

・ SUS316 鋼

$$550^{\circ}\text{C} : t_r = 1.407 \times 10^{26} \sigma^{-9.11} \quad \text{---(4)}$$

$$650^{\circ}\text{C} : t_r = 4.954 \times 10^{20} \sigma^{-7.97}$$

$$750^{\circ}\text{C} : t_r = 7.653 \times 10^{14} \sigma^{-6.34}$$

・ 9Cr 鋼 (Mod.9Cr-1Mo 鋼)

$$550^{\circ}\text{C} : t_r = 5.018 \times 10^{44} \sigma^{-17.70} \quad \text{---(5)}$$

$$600^{\circ}\text{C} : t_r = 8.269 \times 10^{22} \sigma^{-9.12}$$

$$650^{\circ}\text{C} : t_r = 1.194 \times 10^{20} \sigma^{-8.75}$$

ここで、 σ および t_r の単位はそれぞれ [MPa], [h] である。

Draft

2026/1/23

解10
著作権法により無断での複製、転載等は禁止されております。

解説表 3 単軸クリープ試験データ

(a) 1Cr-Mo-V 鋼

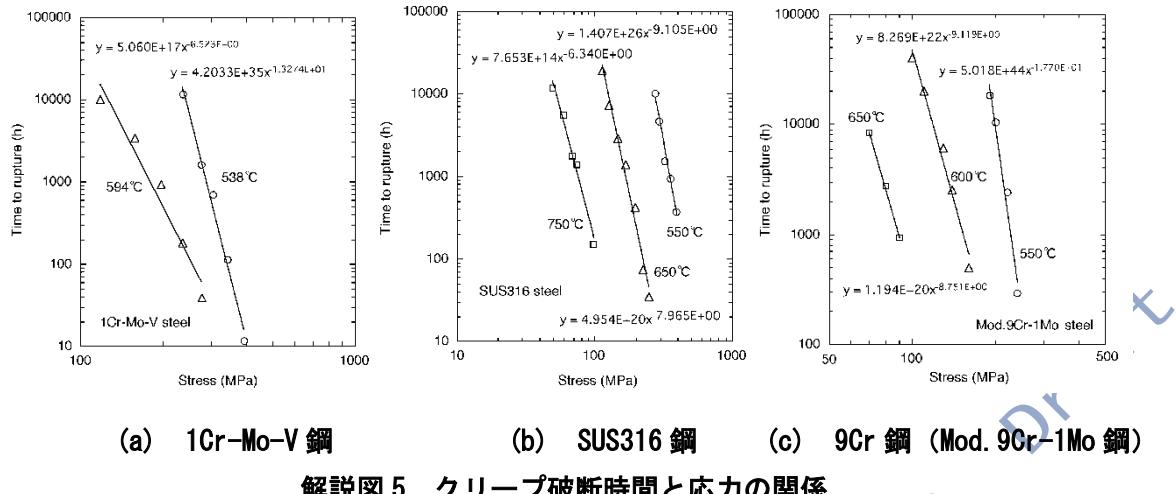
Temp (degree C)	Stress (MPa)	Creep rupture time (h)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
538	392	11.5	24.4	84.1
538	343	112.9	26.2	83.3
538	304	695.0	29.0	82.6
538	275	1602.3	16.2	74.3
538	235	11648.4	21.7	76.0
594	275	39.0	34.2	89.7
594	235	183.4	27.4	88.7
594	196	934.7	31.2	88.2
594	157	3373.9	26.5	79.2
594	118	9989.3	27.7	84.1

(b) SUS316 鋼

Temp (degree C)	Stress (MPa)	Creep rupture time (h)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
550	392.0	373.9	19.8	23.8
550	352.8	938.6	15.4	18.7
550	323.4	1543.0	14.0	20.6
550	294.0	4580.5	34.5	42.7
550	274.4	10173.1	38.3	54.6
650	245.0	34.8	62.4	67.5
650	225.4	74.0	59.9	72.2
650	196.0	416.7	50.8	76.7
650	166.6	1383.1	58.3	79.5
650	147.0	2869.7	55.8	78.2
650	127.4	7161.0	48.2	67.7
650	112.7	19119.8	37.3	45.4
750	98.0	151.8	90.6	75.7
750	73.5	1381.5	50.5	57.9
750	68.6	1785.0	53.1	57.9
750	58.8	5546.5	53.4	54.2
750	49.0	11683.0	48.3	53.1

(c) 9Cr 鋼 (Mod. 9Cr-1Mo 鋼)

Temp (degree C)	Stress (MPa)	Creep rupture time (h)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
550	240	290.7	31.0	88.0
550	220	2392.5	28.6	88.1
550	200	10432.9	26.4	86.2
550	190	18514.7	27.2	82.9
600	160	501.4	34.9	89.3
600	140	2550.2	32.1	89.0
600	130	6036.8	30.7	83.0
600	110	19907.0	29.5	78.8
600	100	40307.4	21.1	79.7
650	90	928.0	32.2	87.9
650	80	2726.1	34.6	80.7
650	70	8385.6	32.8	81.6



解説図 5 クリープ破断時間と応力の関係

CT 試験片の参照応力 (平面応力, 平面ひずみ) は, 次式により算出される。¹⁰⁾

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{P}{P_{\text{LC}}} \sigma_y = \frac{P}{BWm}, \quad m = \frac{P_{\text{LC}}}{BW\sigma_y} \quad \text{--- (6)}$$

$$m = -\left(1 + \gamma \frac{a}{W}\right) + \sqrt{\left(1 + \gamma\right)\left\{1 + \gamma \left(\frac{a}{W}\right)^2\right\}}, \quad \gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad \text{(平面応力)} \quad \text{--- (7)}$$

$$m = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[-\left(1 + \gamma \frac{a}{W}\right) + \sqrt{\left(1 + \gamma\right)\left\{1 + \gamma \left(\frac{a}{W}\right)^2\right\}} \right], \quad \gamma = 1.702 \quad \text{(平面ひずみ)} \quad \text{--- (8)}$$

環状切欠付き丸棒試験片の参照応力は次のように求められる。深さ c の切欠きを有する直径 $2R$ の丸棒試験片 (解説図 6) に引張荷重 N が作用するとき, 無次元化限界荷重 n_L は,

$$n_L = N_L / (\pi R^2 \sigma_y), \quad \beta = c/R \quad \text{--- (9)}$$

$$n_L = 1 - 0.0077\beta - 1.5287\beta^2 \quad (0 \leq \beta \leq 0.65) \quad \text{--- (10)}$$

$$n_L = 2.85(1 - \beta)^2 \quad (0.65 < \beta < 1) \quad \text{--- (11)}$$

上記の n_L に対し, 参照応力 σ_{ref} の定義より,

$$\sigma_{\text{ref}} / \sigma_y = N / N_L \quad \text{--- (12)}$$

力のつり合いから,

$$\sigma = N / (\pi R^2) \quad \text{--- (13)}$$

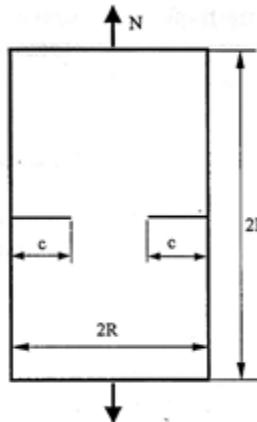
以上より, 参照応力 σ_{ref} は以下のように与えられる。

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{N}{N_L} \sigma_y = \frac{\sigma}{n_L} \quad \text{--- (14)}$$

解説表 4 に 1Cr-Mo-V 鋼の CT 試験片を用いたクリープ亀裂進展試験の試験条件と試験時間 を示す。ここで, W は板幅, B は板厚, B_N はサイドグループ底の板厚 ($B_N = 0.75B$), a_0 は初期亀裂長さ, P は荷重, $K(a_0)$ は初期応力拡大係数である。1Cr-Mo-V 鋼については, 538°C で標準試験片 (板幅 50.8 mm) および大型試験片 (板幅 254.0 mm) について, 板厚を変えた試験片を用いてクリープ亀裂成長試験を実施した。また 594°C でも試験を実施した。^{11), 12)}

解説表 4 の条件について, 参照応力を求め, CT 試験片の破損時間 t_{CD} を計算した。平面応力の場合は式 (7) から, 平面ひずみの場合は式 (8) からそれぞれ m が求まり, 式 (6) から参照応力が求められる。この参照応力を単軸クリープの応力と破断時間の関係式 (2) の応力に代入することで, CT 試験片の破損時間 t_{CD} が算出される。平面応力および平面ひずみに対する計算結果をそれぞれ

解説表 5(a) および (b) に示す。また実験の試験時間と計算された破損時間 t_{CD} を比較した関係を解説図 7 に示す。図中の白抜きのプロットは平面応力の t_{CD} を、塗りつぶしのプロットが平面ひずみの t_{CD} をそれぞれ示している。



解説図 6 環状切欠き試験片

解説表 4 1Cr-Mo-V 鋼 (CT 試験片) の試験条件と試験時間

Temp degree C	W mm	B mm	B_N mm	a_0 mm	Load P kN	$K(a_0)$ MPa \sqrt{m}	Test time h
538	50.8	6.35	4.76	26.10	6.63	55.0	52
538	50.8	6.35	4.76	26.17	5.50	45.0	330
538	50.8	6.35	6.35	25.26	8.20	55.0	135
538	50.8	12.7	9.53	26.03	15.62	63.0	197
538	50.8	12.7	9.53	25.98	13.90	55.0	430
538	50.8	12.7	9.53	26.18	11.00	45.0	1090
538	50.8	25.4	19.05	24.48	29.30	55.0	280
538	50.8	25.4	19.05	25.74	24.49	45.0	315
538	254.0	12.7	9.53	129.50	65.52	117.7	911
538	254.0	12.7	9.53	128.68	56.05	100.8	2111
538	254.0	63.5	47.63	127.98	308.23	108.7	190
538	254.0	63.5	47.63	129.50	262.03	94.2	1312
538	254.0	63.5	47.63	129.25	195.56	70.0	7370
538	254.0	63.5	63.5	129.30	303.80	94.3	4250
594	50.8	6.35	4.76	25.42	2.46	20.0	620
594	50.8	25.4	19.05	26.32	15.26	30.0	175
594	50.8	25.4	19.05	26.28	11.12	20.0	945

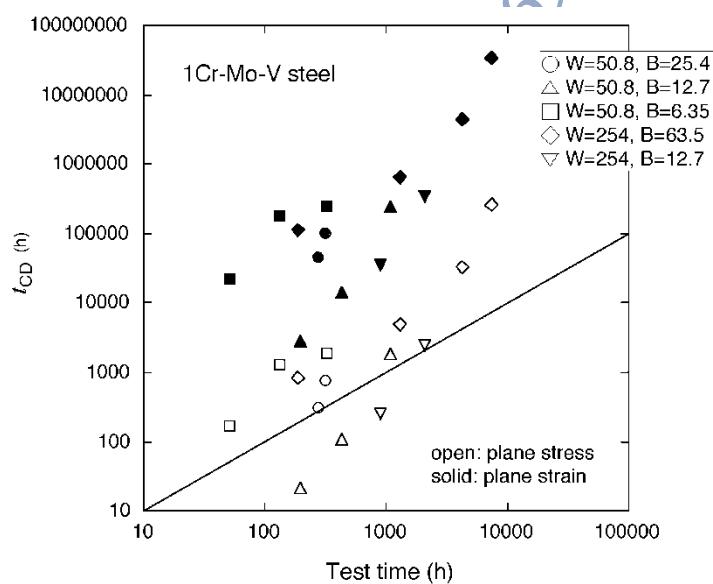
解説表 5 1Cr-Mo-V 鋼の CT 試験片の破損寿命 t_{CD}

(a) 平面応力

a/W	γ (p.stress)	m (p.stress)	σ_{ref} (p.stress)	t_{CD} (p.stress)	
				MPa	h
0.5138	1.1547	0.08348	328.44	169.9	
0.5152	1.1547	0.08294	274.23	1860.8	
0.4972	1.1547	0.09012	282.05	1281.3	
0.5124	1.1547	0.08402	384.00	21.4	
0.5114	1.1547	0.08441	340.14	106.8	
0.5154	1.1547	0.08286	274.20	1863.8	
0.4819	1.1547	0.09658	313.49	315.2	
0.5067	1.1547	0.08629	293.27	763.6	
0.5098	1.1547	0.08503	318.31	257.5	
0.5066	1.1547	0.08632	268.24	2494.4	
0.5039	1.1547	0.08743	291.41	831.0	
0.5098	1.1547	0.08503	254.71	4958.9	
0.5089	1.1547	0.08543	189.22	255894.8	
0.5091	1.1547	0.08535	220.69	33224.2	
0.5004	1.1547	0.08884	114.52	19065.8	
0.5181	1.1547	0.08179	192.79	638.9	
0.5173	1.1547	0.08210	139.96	5154.0	

(b) 平面ひずみ

a/W	γ (p.strain)	m (p.strain)	σ_{ref} (p.strain)	t_{CD} (p.strain)	
				MPa	h
0.5138	1.702	0.12058	227.40	22338.0	
0.5152	1.702	0.11977	189.91	243914.2	
0.4972	1.702	0.13053	194.74	174735.4	
0.5124	1.702	0.12139	265.80	2816.4	
0.5114	1.702	0.12197	235.41	14110.3	
0.5154	1.702	0.11965	189.89	244205.0	
0.4819	1.702	0.14024	215.89	44493.9	
0.5067	1.702	0.12478	202.81	101977.9	
0.5098	1.702	0.12290	220.24	34143.7	
0.5066	1.702	0.12483	185.50	333164.0	
0.5039	1.702	0.12649	201.43	111675.5	
0.5098	1.702	0.12290	176.23	657637.5	
0.5089	1.702	0.12348	130.90	34010036.7	
0.5091	1.702	0.12337	152.68	4413786.7	
0.5004	1.702	0.12859	79.11	212627.9	
0.5181	1.702	0.11805	133.57	6989.6	
0.5173	1.702	0.11851	96.96	56434.8	

解説図 7 1Cr-Mo-V 鋼, CT 試験片の試験時間と t_{CD} の関係

同様に、解説表 6 には、SUS316 鋼の CT 試験片 ($B_N = 0.8B$) を用いたクリープ亀裂進展試験の試験条件と試験時間を示す。^{13), 14)} 解説表 7(a) および(b) には計算された CT 試験片の破損時間 t_{CD} を示し、実験の試験時間と t_{CD} を比較した関係を解説図 8 に示した。

解説表 8 には、9Cr 鋼 (Mod.9Cr-1Mo 鋼) の CT 試験片 ($B_N = 0.75B$) を用いたクリープ亀裂進展試験の試験条件と試験時間を示す。¹⁵⁾ 解説表 9(a) および(b) には計算された CT 試験片の破損時間 t_{CD} を示し、実験の試験時間と t_{CD} を比較した関係を解説図 9 に示した。

解説表 6 SUS316 鋼, CT 試験片の試験条件と試験時間

Temp degree C	W mm	B mm	B_N mm	a_0 mm	Load kN	$K(a_0)$ MPa \sqrt{m}	Test time h
550	50.8	12.7	10.16	27.92	9.37	41.5	470
550	50.8	12.7	10.16	27.71	8.48	37.1	906
650	50.8	12.7	10.16	27.46	7.76	33.3	9
650	50.8	12.7	10.16	27.43	7.12	30.5	24
650	50.8	12.7	10.16	27.52	6.27	27.1	1632
650	50.8	12.7	10.16	27.52	5.89	25.4	2030
650	50.8	12.7	10.16	27.15	5.22	22.0	11064
750	50.8	12.7	10.16	27.47	4.19	18.0	72
750	50.8	12.7	10.16	27.35	3.59	15.3	164
750	50.8	12.7	10.16	27.46	2.97	12.8	696
750	50.8	12.7	10.16	27.46	2.27	9.8	2147
750	50.8	12.7	10.16	27.50	1.88	7.9	15400

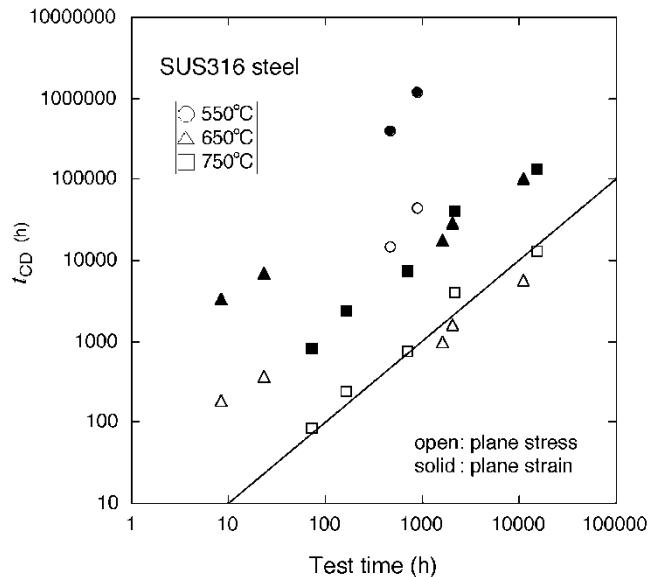
解説表 7 SUS316 鋼の CT 試験片の破損寿命 t_{CD}

(a) 平面応力

(b) 平面ひずみ

a/W	γ (p.stress)	m (p.stress)	σ_{ref} (p.stress)	t_{CD} (p.stress)	
				MPa	h
0.5496	1.1547	0.07016	258.77	14678.2	
0.5454	1.1547	0.07162	229.39	43995.4	
0.5405	1.1547	0.07339	204.87	187.3	
0.5399	1.1547	0.07360	187.43	380.6	
0.5417	1.1547	0.07295	166.52	976.9	
0.5418	1.1547	0.07293	156.47	1604.2	
0.5344	1.1547	0.07562	133.67	5630.0	
0.5408	1.1547	0.07329	110.76	83.6	
0.5383	1.1547	0.07420	93.74	240.9	
0.5405	1.1547	0.07342	78.38	749.1	
0.5406	1.1547	0.07337	59.94	4102.2	
0.5414	1.1547	0.07307	49.85	13198.9	

a/W	γ (p.strain)	m (p.strain)	σ_{ref} (p.strain)	t_{CD} (p.strain)	
				MPa	h
0.5496	1.702	0.10074	180.20	396525.3	
0.5454	1.702	0.10292	159.64	1195704.5	
0.5405	1.702	0.10554	142.46	3387.7	
0.5399	1.702	0.10585	130.32	6890.7	
0.5417	1.702	0.10489	115.82	17646.7	
0.5418	1.702	0.10486	108.83	28974.9	
0.5344	1.702	0.10885	92.86	102658.5	
0.5408	1.702	0.10540	77.02	836.8	
0.5383	1.702	0.10675	65.16	2416.6	
0.5405	1.702	0.10558	54.50	7496.9	
0.5406	1.702	0.10551	41.68	41048.2	
0.5414	1.702	0.10506	34.67	131959.4	

解説図 8 SUS316 鋼, CT 試験片の試験時間と t_{CD} の関係

解説表 8 9Cr 鋼 (Mod. 9Cr-1Mo 鋼) の CT 試験片の試験条件と試験時間

Temp	W	B	B_N	a_0	Load	$K(a_0)$	Test time
degree C	mm	mm	mm	mm	kN	MPa \sqrt{m}	h
650	50.8	12.7	9.53	25.80	4.57	18.2	435
650	50.8	12.7	9.53	25.31	4.08	15.8	724

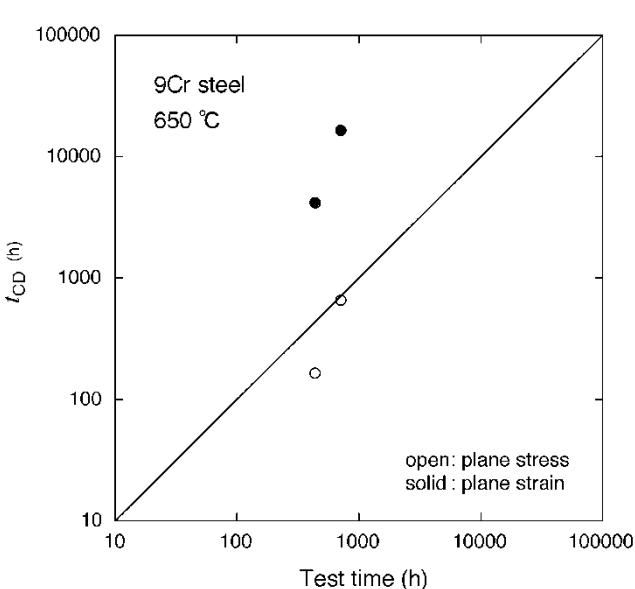
解説表 9 9Cr 鋼の CT 試験片の破損寿命 t_{CD}

(a) 平面応力

a/W	γ (p.stress)	m (p.stress)	σ_{ref} (p.stress)	t_{CD} (p.stress)
			MPa	h
0.5079	1.1547	0.08582	110.06	163.3
0.4982	1.1547	0.08973	93.90	654.7

(b) 平面ひずみ

a/W	γ (p.strain)	m (p.strain)	σ_{ref} (p.strain)	t_{CD} (p.strain)
			MPa	h
0.5079	1.702	0.12407	76.12	4109.3
0.4982	1.702	0.12994	64.85	16712.1

解説図 9 9Cr 鋼 (Mod. 9Cr-1Mo 鋼), CT 試験片の試験時間と t_{CD} の関係

1Cr-Mo-V 鋼については環状切欠き試験片を用いたクリープ亀裂進展試験を実施した。解説表 10 には、環状切欠き試験片の試験条件と試験時間を示す。ここで、 $2R$ は試験片直径、 c は初期切欠き深さ、 N は荷重、 K は初期応力拡大係数である (解説図 6 参照)。1Cr-Mo-V 鋼の環状切欠き試験片について、538°C と 594°C でクリープ亀裂進展試験を実施した。¹⁶⁾

解説表 10 の条件について、参考応力を求め、環状切欠き試験片の破損時間 t_{CD} を算出した。 β ($= c/R$) から式 (9) により m_L を、式 (12) から σ を計算し、式 (13) により参考応力を得た。この参考応力を単軸クリープの応力と破断時間の関係式 (2) の応力に代入することで、環状切欠き試験片の破損時間 t_{CD} が算出される。 t_{CD} の計算結果を解説表 11 に、実験の試験時間と t_{CD} を比較した関係を、解説図 10 に示した。

以上、解説図 7 から解説図 10 において、亀裂材 (切欠き材) の試験時間 (実験値) と計算値 (t_{CD}) には、ある程度の相関関係があることがわかる。CT 試験片では、平面応力の計算値は、三鋼種とも実験値と比較的よく一致した。環状切欠き試験片の結果でも、実験値と計算値は比較

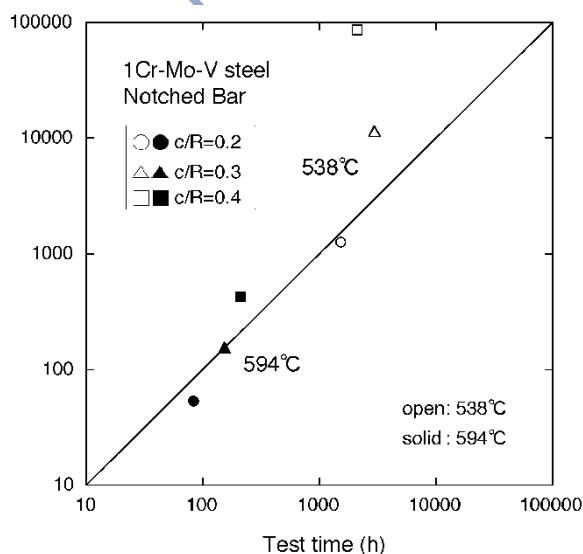
的よく一致した。解説図7 (1Cr-Mo-V鋼, CT試験片) の一部のデータが過度に安全側 (短時間側) の計算結果を与えていることを除けば, t_{CD} はクリープ損傷が構造物中を進展し破損に至る時間のおおよその目安となると考えられた。本体図5.1の評価の流れにあるように, $t_{CD} > t_s$ の条件を満たさない場合には補修または再定格を行うとすることは妥当である。

解説表 10 1Cr-Mo-V鋼, 環状切欠き試験片の試験条件と試験時間

Temp degree C	2R mm	c mm	Load N kN	K MPa \sqrt{m}	Test time h
538	10.0	1.0	20.81	20.0	1540
538	10.0	1.5	16.17	20.0	3000
538	10.0	2.0	12.13	20.0	2120
594	10.0	1.0	20.81	20.0	85
594	10.0	1.5	16.17	20.0	156
594	10.0	2.0	12.13	20.0	214

解説表 11 1Cr-Mo-V鋼, 環状切欠き試験片の破損寿命 t_{CD}

$\beta=c/R$	n_L	$\sigma=N/\pi R^2$ MPa	σ_{ref} MPa	t_{CD} h
0.2	0.937	265.0	282.7	1244.1
0.3	0.860	205.9	239.4	11306.9
0.4	0.752	154.4	205.3	86797.4
0.2	0.937	265.0	282.7	52.7
0.3	0.860	205.9	239.4	155.8
0.4	0.752	154.4	205.3	424.2

解説図 10 1Cr-Mo-V鋼, 環状切欠き試験片の試験時間と t_{CD} の関係

g) 5.2.7 亀裂進展パラメータの算出

1) 疲労亀裂進展パラメータの妥当性に関する検討 解説表2に記載したように, 疲労亀裂進展支配パラメータとして応力拡大係数範囲 ΔK および疲労J積分範囲 ΔJ_f が他の維持規格で

採用されており、この規格では ΔJ_f が採用されている。 ΔK では、リガメント全体にわたって塑性変形を生じる大規模降伏状態のような領域では亀裂進展速度を適切に評価不可能であるが、 ΔJ_f では小規模降伏から大規模降伏状態まで評価可能であることが確認されている。

¹⁷⁾ 二次応力によってリガメントが大規模降伏状態となる条件にも適用する可能性があることを考慮して、この規格では疲労亀裂進展パラメータとして疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を採用した。

任意の亀裂形状、負荷条件に対して ΔJ_f を求めるには有限要素解析に代表される詳細数値解析によるのが一般的であるが、多大な計算時間と労力を必要とすることから、参照応力を用いた簡易評価法が提案されている。¹⁸⁾ 厚肉円筒モデルに対して、機械荷重および熱荷重とともに参照応力法を用いた評価法が有限要素解析による詳細評価と同等であり、良好な予測を行えることが確認されている。¹⁹⁾ このため、この規格では J 積分の算出方法として参照応力を用いた簡易評価法を採用した。

磯部 ²⁰⁾ は高温疲労亀裂進展試験結果と参照応力法を用いた簡易評価法による亀裂進展評価結果の比較を行い、試験結果に対して簡易評価法は進展速度を二倍以上保守的に評価することを確認している。疲労サイクルにおいて、圧縮荷重が大きく、亀裂が閉じるような領域は亀裂進展に寄与しないことが明らかとなっており、これを考慮するためのパラメータとして開口比 U が定義されている。参照応力法を用いた簡易評価法に試験結果で得られた U を考慮することにより、予測精度が改善することも確認されている。²⁰⁾ U は応力範囲、応力比、負荷履歴などに依存し、0 から 1 の値をとるが、実構造物での小規模降伏から全面降伏に至る領域における U の変化に関しては十分な知見が得られていない。この規格では、 $U=1$ とすることで損傷寿命を保守的に評価可能であることが確認されたため、参照応力法を用いた疲労 J 積分範囲 ΔJ_f による疲労亀裂進展評価法を採用した。

h) 5.2.8 亀裂進展速度の評価

- 1) **クリープ亀裂進展パラメータの妥当性に関する検討** クリープ亀裂進展速度を評価する力学パラメータに関して多くの研究がなされてきた。1974 年に、Rice らの J 積分 ²¹⁾をクリープ問題へ応用した、クリープ J 積分 J^* ²²⁾ が提案された。これは、J 積分の変位・ひずみをクリープ変位速度・ひずみ速度で置き換えたものとして定義される。その後、 J^* を亀裂開口変位速度から簡便に計算する方法が提案され ²³⁾、1970 年代後半から 1980 年代前半にかけて、各種耐熱材料について、片側切欠き、中央切欠き、両端切欠き、環状切欠き、C(T) 試験片等の種々の試験片を用いた、多くのクリープ亀裂進展の評価に関する研究が行われた。^{24), 25), 26), 27, 28), 29), 30), 31), 32)} それ以来、 J^* は延性材料の大規模クリープ状態（亀裂先端のクリープ域が大きくなった状態）においては、試験片形状、寸法、試験荷重によらず、クリープ亀裂進展速度を評価可能であるパラメータとして一般的に利用されている。高温亀裂進展（高温破壊力学試験法）は、VAMAS 国際共同研究の課題の一つに取り上げられ、そこで行われた国際標準化活動（ラウンドロビン試験）の成果に基づき、1992 年に **ASTM E1457** 規格が作成され、その後改訂が行われている。³³⁾ ASTM 規格においても、クリープ亀裂進展速度の評価には、 J^* (ASTM 規格では C^* と呼ばれている) を用いることが推奨されている。この規格においてもクリープ亀裂進展速度の評価にはクリープ J 積分を用いることとした。 J^* を用いれば、クリープ亀裂進展速度 da/dt は温度、負荷応力、試験片形状、寸法、材料等

にあまり依存せず、

$$da/dt = C_2(J^*)^{m_2} \quad \dots \quad (14)$$

によって整理可能である。ここで、 C_2 および m_2 は定数である。**附属書 B** には、式(14)でクリープ亀裂進展速度を整理した例、および定数 C_2 、 m_2 を示している。

クリープ J 積分は、数値的方法、実験的方法、簡便式による方法によって求めることが可能である。数値的方法では、有限要素法を用いたクリープ解析により算出される応力、クリープ変位速度、クリープひずみ速度を用いた経路積分によりクリープ J 積分を算出することが可能である。実験的方法では、ポテンシャルエネルギーと J 積分の関係を用いて、荷重-変位速度の関係からクリープ J 積分を求めることが可能である。さらに、代表的な試験片については、実験で得られる荷重点変位速度（または亀裂開口変位速度）と正味断面応力から J^* を求める簡便式が提案されており、よく使用されている。

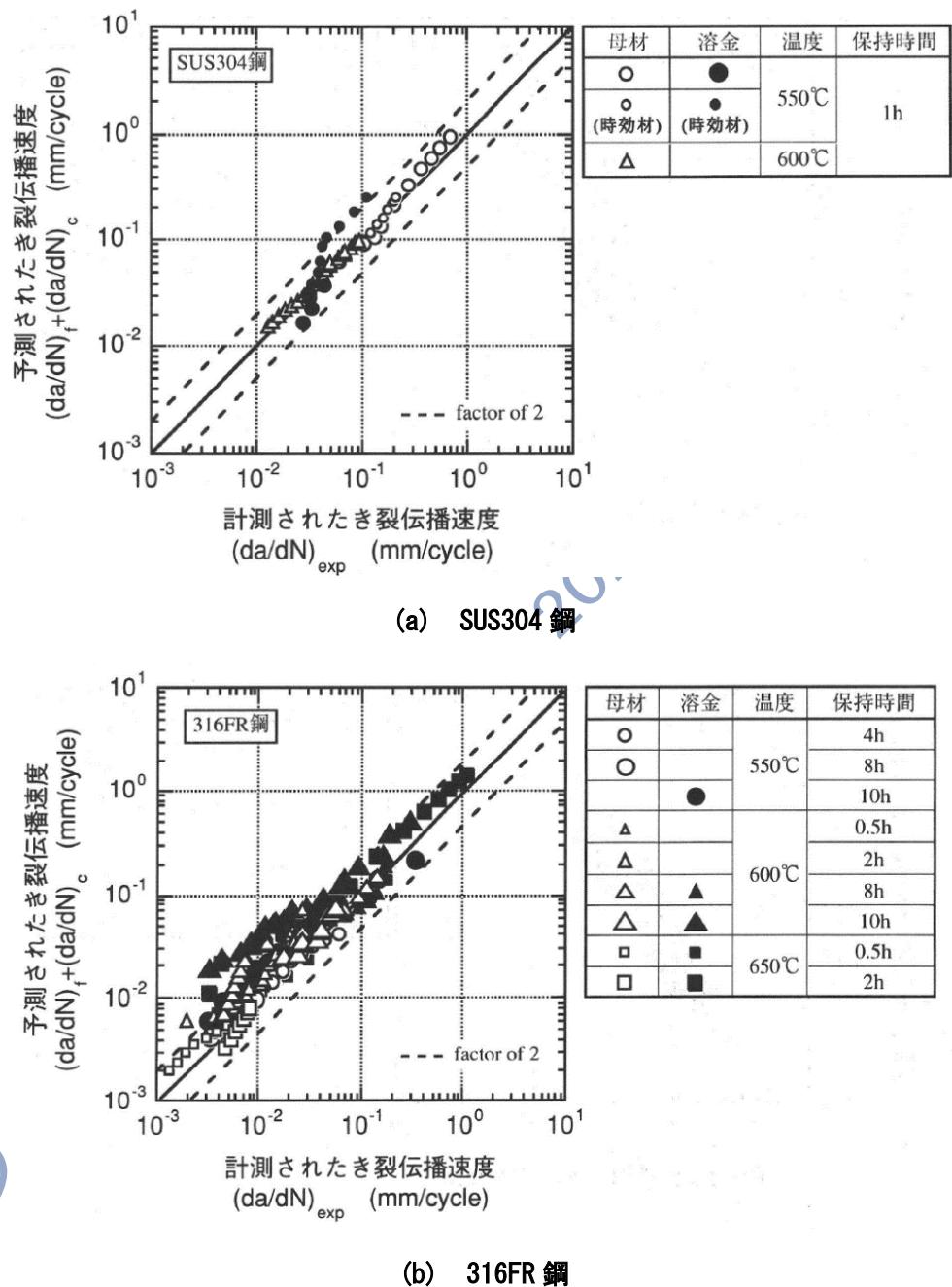
複雑形状の構造部材に亀裂が生じた場合、数値的方法では、有限要素法の計算モデル作成や積分経路の設定が困難であり、クリープ J 積分の計算にも多大な時間を要する。また、実機部材では、荷重線変位速度を計測することによってクリープ J 積分を求めることが困難である。このため、簡易評価法が提案されている。簡易評価法には、GE/EPRI による全断面塑性解を用いる方法^{34, 35, 36, 37)}と参照応力法がある。参照応力法は、構造部材のクリープ変形を簡易的に推定することを提案したものであるが^{38, 39)}、 J 積分やクリープ J 積分の評価に参照応力を用いることが提案されている。^{40, 41)} この規格では、クリープ J 積分の算出方法として参照応力を用いた簡易評価法を採用した。円筒の外表面に生じた軸方向亀裂について、参照応力法によって求めたクリープ J 積分と、有限要素法を用いた経路積分によって求めたクリープ J 積分を比較した結果が報告されている。⁴²⁾ R6 の global solution と API 579 の net section solution の参照応力式を用いて求めたクリープ J 積分値は、経路積分により求めた値と良く一致している。同様の比較は様々な種類の温度勾配に起因する熱応力を受ける周方向亀裂付き円筒に対しても行われており^{43, 44, 45)}、参照応力法に基づくクリープ J 積分は亀裂形状、亀裂位置や温度勾配の種類の違いによらず有限要素法によるそれと良く一致していることが確かめられている。

2) **連続する複数のクリープ疲労サイクルに関する取り扱い** 疲労亀裂進展の支配パラメータである疲労 J 積分範囲 ΔJ_f およびクリープ亀裂進展の支配パラメータであるクリープ J 積分 J^* はいずれも亀裂の進展とともに逐次変化する。したがってこれらパラメータの計算はクリープ疲労の 1 サイクルに対し経過時間を設定することが基本である。ただし、連続する複数のサイクルにわたり亀裂の進展が支配パラメータの変化に及ぼす影響が無視可能であることが自明な場合、連続する複数のクリープ疲労サイクルに対し評価者が経過時間を定め、この間の亀裂進展に応じた支配パラメータの再計算を行うことなく進展評価を継続して行ってもよい。

i) 5.2.9 亀裂進展量の評価

1) **クリープ疲労亀裂進展のクライテリオン** クリープ疲労亀裂進展のクライテリオンとしては二つの考え方が提案されている。一つは、クリープ疲労亀裂進展挙動を時間依存型と繰り返し数依存型とに分類し、それぞれクリープ亀裂進展則、疲労亀裂進展則で記述するというも

のである。もう一つは、クリープ亀裂進展則ならびに疲労亀裂進展則から独立に求まる亀裂進展速度を線形加算するという考え方である。この規格では、以下の判断より後者を採用することとした。



解説図 11 線形加算則によるクリープ疲労亀裂進展（伝播）速度の予測

両評価クライテリオンの差異は亀裂進展速度にして二倍以内の差であり、データのばらつきの範囲からいずれの考え方が妥当であるかを判定することは困難である。すなわち、クリープ疲労重疊下の亀裂進展速度の推定に際して、評価クライテリオンの妥当性を議論することはさほど重要ではなく、規格としての整合性や分かり易さに主眼を置く方が重要であると考えられ

る。分類型のクライテリオンを採用した場合、時間依存型と繰り返し数依存型の境界を規定する必要があるが、現状そのためのコンセンサスは得られておらず、境界近傍での亀裂進展速度に不連続を生じるおそれがある。一方、線形加算則は亀裂発生を防止する設計基準に採用された実績があり、考え方の一貫性がある。

SUS304 鋼および316FR 鋼のクリープ疲労亀裂進展データに対し、線形加算則を適用した例を解説図 11(a) および(b) に示す。各種の試験条件において線形加算則による予測が妥当な評価を与えることがわかる。

- j) **5.2.10 進展後亀裂の安定性評価** 進展後の亀裂の安定性評価は、**本体 5.2.4 初期欠陥の安定性評価**と同様に破壊評価線図 (FAD) を用いた評価による。同法はクリープあるいはクリープ疲労により進展した亀裂に対する安定性評価にも適用することが可能である。

進展後亀裂の安定性評価はクリープ疲労の 1 サイクルにごとに行うことが基本であるが、連続する複数のサイクルにわたり亀裂の進展が支配パラメータの変化に及ぼす影響が無視可能である場合、連続する複数のクリープ疲労サイクルに対し安定性評価を行ってもよい。

7 解析要員などの要件

本規格における評価は、評価対象設備の材料のクリープ損傷について十分な知見がある他、クリープ疲労亀裂進展を評価するために必要な知見（弾性追従、高温構造設計など）を十分に有しているなければならない。HPI 壓力設備診断技術者証のレベル 2 がそれに相当する。

附属書 B (参考) 材料特性

1 材料特性

1.1 一般

評価に使用する材料特性は、評価する装置の当該材料から直接サンプリングして標準的な試験手順により求めることが望ましい。しかしながら、試験による測定が現実的ではない場合には、規格値や公開された文献データから推定することが可能である。

1.2 伝熱特性

評価に必要な各種の圧力機器材料の伝熱特性として比熱や熱伝導率があり、実際に使用されている材料の伝熱特性が不明な場合、市販の材料便覧やハンドブックに記載されているデータや公開された文献データから推定することが可能である。例えば、米国機械学会 ASME の圧力容器規格に炭素鋼から高合金鋼までの各種金属材料の熱伝導率および熱拡散率が与えられており⁴⁶⁾、熱伝導率、熱拡散率と材料密度との関係式から当該材料の比熱を求めることが可能である。⁴⁷⁾

1.3 縦弾性係数、ポアソン比

縦弾性係数についても、JIS 規格⁴⁸⁾や ASME 規格⁴⁹⁾に炭素鋼のほか、成分系でグループ分類された各種の合金鋼について温度毎の値が規定されている。

ポアソン比については、ASME の圧力容器規格に各種材料の値が例示されている。⁵⁰⁾ また、特定材料（一部のステンレス鋼や Cr-Mo 鋼）については、高速増殖炉に関する日本機械学会の設計・建設規格^{51, 52)}や電力中央研究所の調査報告書⁷⁾に 650°C までの縦弾性係数とポアソン比が記載されている。

1.4 降伏強さ、引張強さ

試験的に求めた材料の降伏強さや引張強さなどの材料特性としては、国立研究開発法人 物質・材料研究機構（以下、NIMS という）により鉄鋼材料を中心に各種材料のデータが公開されている。⁵³⁾

降伏強さについては、圧力容器の構造や設計に関する JIS 規格^{54), 55), 56), 57)} や ASME の圧力容器規格⁵⁸⁾ に温度毎の最小値が規定されている。上記のデータベースや規格に記載されていない材料については、米国の溶接研究評議会 WRC の報告書に各種材料の降伏強さと室温における最小降伏強さおよび温度との関係を表す近似式が与えられている。⁵⁹⁾ この式と材料毎に与えられた係数値を用いて、評価温度における最小降伏強さを推定することが可能である。

また、圧力容器用材料の引張強さとしては、ASME の圧力容器規格に各種材料について温度毎の平均的な引張強さが規定されている。⁶⁰⁾

その他、硬さ試験結果から引張強さを硬さ換算表（JIS 鉄鋼 I⁶¹⁾）を用いて推定することが可能である。ただし、この換算表は、焼鈍材、焼準、焼入焼戻しの炭素鋼、合金鋼に対して適用可能であるが、冷間加工材、オーストナイト系ステンレス鋼、非鉄材料に対しては適用不可能である。

1.5 単調応力一ひずみ関係

高圧力技術協会の高圧容器規格に各種材料の応力一ひずみ関係式と材料特性値が与えられており⁶²⁾、当該温度での縦弾性係数と降伏強さ、引張強さを用いて応力一ひずみ関係を求めることが可能である。

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E_y} + \gamma_1 + \gamma_2 \quad \text{---(15)}$$

ここで、

$$\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2} \{1.0 - \tanh(H)\}, \quad \gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{2} \{1.0 + \tanh(H)\}$$

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\sigma_t}{A_1} \right)^{\frac{1}{m_1}}, \quad A_1 = \frac{\sigma_{ys}(1+\varepsilon_{ys})}{\{\ln(1+\varepsilon_{ys})\}^{m_1}}, \quad m_1 = \frac{\ln(R) + (\varepsilon_p - \varepsilon_{ys})}{\ln\left\{\frac{\ln(1+\varepsilon_p)}{\ln(1+\varepsilon_{ys})}\right\}}$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\sigma_t}{A_2} \right)^{\frac{1}{m_2}}, \quad A_2 = \frac{\sigma_{uts} e^{m_2}}{m_2 m_2}, \quad H = \frac{2[\sigma_t - \{\sigma_{ys} + K(\sigma_{uts} - \sigma_{ys})\}]}{K(\sigma_{uts} - \sigma_{ys})}$$

$$R = \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}}, \quad \varepsilon_{ys} = 0.002, \quad K = 1.5R^{1.5} - 0.5R^{2.5} - R^{3.5}$$

ε_t は真ひずみ、 σ_t は真応力 (MPa)、 E_y は当該温度における縦弾性係数 (MPa)、 σ_{ys} は当該温度における降伏点又は 0.2%耐力 (MPa)、 σ_{uts} は当該温度における引張強さ (MPa) である。 m_2 、 ε_p は材料物性値であり解説表 12 に示す。

クリープ領域における応力一ひずみ関係としては、特定材料 (SUS304 鋼、SUS316 鋼、SUS321 鋼、2.25Cr-1Mo 鋼など) について、高速増殖炉に関する日本機械学会の設計・建設規格⁶³⁾ に報告されている。また、電力中央研究所の調査報告書⁷⁾ には、SUS304 鋼、SUS316 鋼について、650°C までの弾性係数、ポアソン比と応力一ひずみ関係が与えられている。

解説表 12 静的（単調負荷）真応力—真ひずみ曲線の材料特性⁶²⁾

材料	最高温度 (°C)	m_2	ε_p
フェライト鋼	480	0.60 (1.00 - R)	2.0×10^{-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)	2.0×10^{-5}
二相ステンレス鋼	480	0.70 (0.95 - R)	2.0×10^{-5}
析出硬化型ステンレス鋼	540	1.90 (0.93 - R)	2.0×10^{-5}

1.6 繰り返し応力—ひずみ関係

高圧力技術協会の高圧容器規格には各種材料の応力振幅とひずみの関係式および材料特性値が与えられており、当該温度での縦弾性係数を用いて応力—ひずみ関係を推定することが可能である。⁶⁴⁾

$$\varepsilon_{ta} = \frac{\sigma_a}{E_y} + \left(\frac{\sigma_a}{K_{CSS}} \right)^{\frac{1}{n_{CSS}}} \quad \text{---(16)}$$

ここで、 ε_{ta} は全ひずみ振幅、 σ_a は応力振幅(MPa)、 E_y は当該温度における縦弾性係数(MPa)である。 n_{CSS} 、 K_{CSS} は材料特性値であり、解説表 13 に示す。

解説表 13 繰返し応力—ひずみ曲線の材料特性⁶³⁾

材料	温度 (°C)	n_{CSS}	K_{CSS} (MPa)
1Cr-0.5Mo 鋼 (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 鋼 (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 鋼 (厚さ 50 mm, 母材)	20	0.105	638
	200	0.133	684
	300	0.086	607
	400	0.079	577

特定材料（一部のステンレス鋼や Cr-Mo 鋼）については、高速増殖炉に関する日本機械学会の設計・建設規格に応力—ひずみ関係が与えられている。⁶⁵⁾

また、NIMS のデータベースには鉄鋼材料を中心に各種材料の疲労試験データが公開されており、利用することが可能である。⁶⁶⁾

1.7 クリープ破断カーブおよびクリープ破断延性値

クリープ破断カーブやクリープ破断延性値については、各種文献にて圧力容器に使用される材料の試験データが報告されているほか、NIMS による評価試験結果がクリープデータシート(CDS)として公開されており利用可能である。⁵³⁾

同データシートにない材料については、米国の溶接研究評議会 WRC の報告書にクリープ寿命と応力および温度の関係を表す近似式と材料毎の定数が与えられており、クリープ寿命を推定することが可能である。⁶⁷⁾

1.8 クリープひずみ式

NIMS のクリープデータシート (CDS) には、主要な耐熱材料の複数ヒートについて、約 100,000 時間までのクリープ破断データが掲載されている。⁵³⁾ 大部分のヒートについては、マルチ式クリープ破断試験機を用いたひずみを計測しない試験が実施されているが、一部のヒートについては、単式クリープ試験機を用いてクリープひずみが計測されている。

同データシートにない材料については、前述の WRC の報告書にクリープひずみ式と材料毎のパラメータ値が与えられている。⁶⁷⁾

また、SUS304 鋼については、高速増殖炉に関する電力中央研究所の調査報告書に解説表 14 に示すクリープひずみ式とパラメータ値が与えられている。⁷⁾

解説表 14 SUS304 鋼クリープひずみ式 ⁷⁾

(a) 応力が 1.0N/mm^2 以上のとき		(b) 応力が 1.0N/mm^2 未満のとき	
$\varepsilon_c = C_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + C_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t$		$\varepsilon_c = \sigma \left[C_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + C_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\varepsilon}_m t \right]$	
T : 温度 (°C)、 $425 \leq T \leq 650$		T : 温度 (°C)、 $425 \leq T \leq 650$	
σ : 応力 (N/mm ²)、 $\sigma \geq 1.0$		σ : 応力 (N/mm ²)、 $\sigma \leq 1.0$	
t_r : 破断時間 (h)		t_r : 破断時間 (h)	
ε_c : クリープひずみ (mm/mm)		ε_c : クリープひずみ (mm/mm)	
$\dot{\varepsilon}_m$: 定常クリープ速度 (mm/mm/h)		$\dot{\varepsilon}_m$: 定常クリープ速度 (mm/mm/h)	
t : 時間 (h)		t : 時間 (h)	
t_r	$\log_{10}(\alpha_c t_r) = -17.543 + \frac{31882}{T + 273.15} - \frac{5262.0}{T + 273.15} \log_{10}(\sigma)$ $- \frac{425.00}{T + 273.15} \{\log_{10}(\sigma)\}^2$ $\alpha_c = 1.0$	$\log_{10}(\alpha_c t_r) = -17.543 + \frac{31882}{T + 273.15} - \frac{5262.0}{T + 273.15} \log_{10}(1.0)$ $- \frac{425.00}{T + 273.15} \{\log_{10}(1.0)\}^2$ $\alpha_c = 1.0$	$\dot{\varepsilon}_m$
$\dot{\varepsilon}_m$	$62.416 \exp \left\{ -40812 / 8.31(T + 273.15) \right\} t_r^{-1.1335}$	$62.416 \exp \left\{ -40812 / 8.31(T + 273.15) \right\} t_r^{-1.1335}$	C_1
C_1	$(1.269 \dot{\varepsilon}_m^{0.745}) / r_1$	r_1	$103.37 t_r^{-0.726}$
C_2	$(0.484 \dot{\varepsilon}_m^{0.812}) / r_2$	r_2	$17.255 t_r^{-0.868}$

1.9 疲勞龜裂進展速度

疲労亀裂進展速度について、米国の溶接研究評議会 WRC の報告書に 1.25Cr-0.5Mo 鋼および 2.25Cr-1Mo 鋼の疲労亀裂進展速度の測定結果が報告されている。⁶⁸⁾

また、SUS304 鋼については、高速増殖炉に関する電力中央研究所の調査報告書に以下のクリープ疲労亀裂伝播速度式と必要な材料データが与えられている。⁷⁾

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_1 \cdot \Delta J_f^{m_1} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

ここで、 C_1 、 m_1 は繰り返し負荷に対する亀裂伝播速度を与える材料定数であり、 ΔJ_f は疲労 J 積分範囲を表す。

また、SUS304 鋼や SUS316 鋼、2.25Cr-1Mo 鋼、改良 9Cr-1Mo 鋼については、動力炉・核燃

料開発事業団や日本材料学会による疲労亀裂進展速度の評価結果が報告されている。^{69), 70)} ここでは、SUS304 鋼について、動力炉・核燃料開発事業団の報告例を解説図 12 に示す。

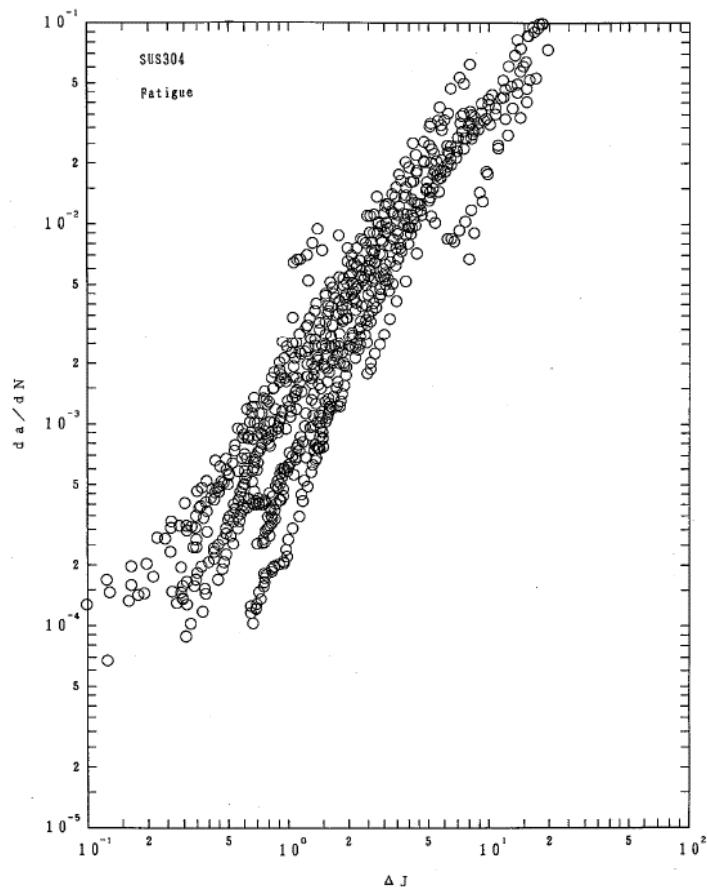


Fig. 1. Relationship between da/dN and ΔJ for SUS304

解説図 12 SUS304 の疲労亀裂進展速度 ⁶⁹⁾

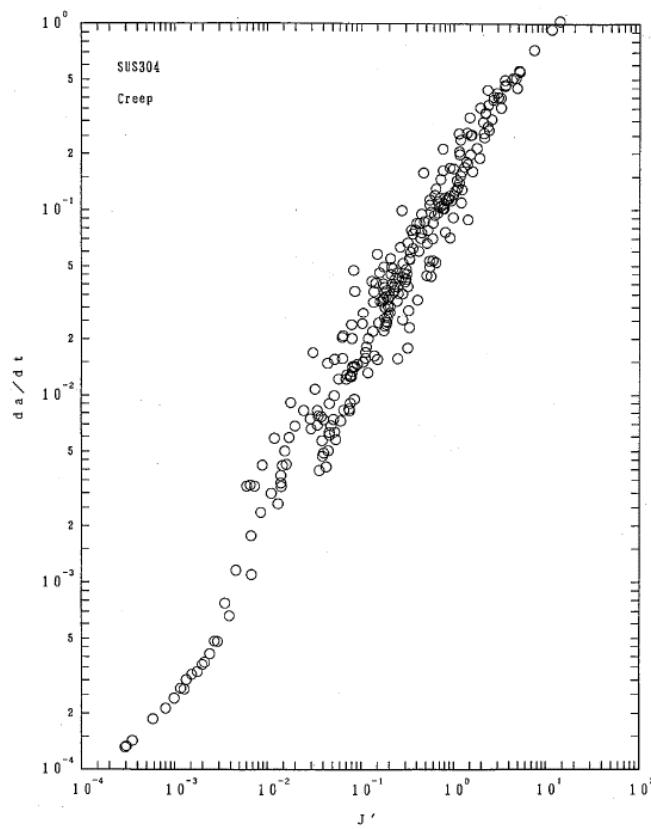
1.10 クリープ亀裂進展速度

疲労亀裂進展速度について、米国の溶接研究評議会 WRC の報告書に 1.25Cr-0.5Mo 鋼および 2.25Cr-1Mo 鋼のクリープおよびクリープ疲労亀裂進展速度の測定結果が報告されている。⁶⁸⁾

英國規格 BS 7910 には、クリープ亀裂進展速度式と各種材料について定数が与えられており⁴⁾、クリープ亀裂進展速度を推定することが可能である。

また、SUS304 鋼については、高速増殖炉に関する電力中央研究所の調査報告書に保持負荷に対する亀裂伝播速度式と必要な材料データが与えられており⁷⁾、亀裂伝播速度を推定することが可能である。

また、SUS304 鋼、2.25Cr-1Mo 鋼および改良 9Cr-1Mo 鋼については、動力炉・核燃料開発事業団によるクリープ亀裂進展速度の評価結果が報告されている。⁶⁹⁾ いずれの鋼種においても、クリープ亀裂進展速度は修正 J 積分をパラメータとして指数則により定式化されている。SUS304 鋼について、動力炉・核燃料開発事業団の報告例を解説図 13 に示す。

Fig. 7 Relationship between da/dt and J' for SUS304解説図 13 SUS304 のクリープ亀裂進展速度⁶⁹⁾

附属書 C (規定) 欠陥形状のモデル化

1 表面欠陥と内部欠陥

欠陥評価では、表面に開口している表面欠陥と、内部にある内部欠陥の二つのモデル化がある。ここで表面近傍の内部に位置する欠陥の破壊荷重は、表面の影響を受けて表面に開口している欠陥の破壊荷重に近づく。また、同様なことは欠陥の進展についても言える。したがって、表面にある程度近づいた内部欠陥は、表面欠陥とみなすようにしている。これらから、表面までの近接度に応じ、ある点よりも内部側にある欠陥を内部欠陥として、また反対にその点から表面側にある欠陥を表面に開口した表面欠陥として分類している。

2 内部欠陥の表面欠陥への置き換え

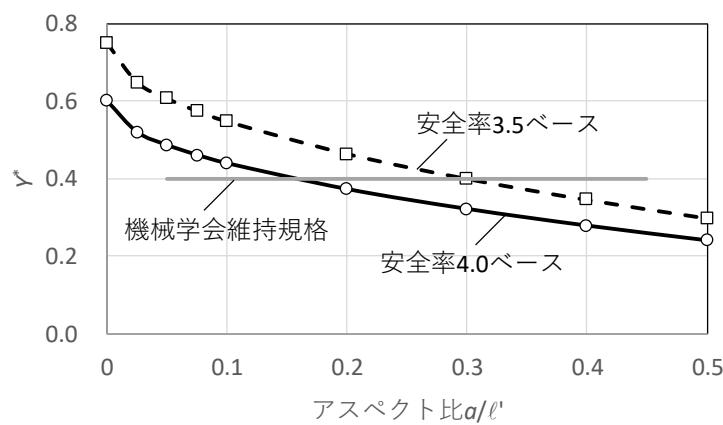
この規格の**附属書 C**において、表面に近接した内部欠陥を表面欠陥に置き換えるときの規準が定められている。欠陥から表面までの深さを S 、欠陥深さを d とするとき、 $S \leq Y^*d$ の場合は欠陥深さが $a = 2d + S$ であるような表面欠陥に置き換えることとしている。ここで、 Y^* はもともと欠陥のアスペクト比 d/ℓ' (ℓ' は欠陥長さ) の関数として次のように与えられている。¹⁰⁾

$$Y^* = \begin{cases} 0.60 - 0.51\sqrt{d/\ell'} & \text{安全率 4.0 設計} \\ 0.75 - 0.64\sqrt{d/\ell'} & \text{安全率 3.5 設計} \end{cases} \quad \text{----- (18)}$$

ここで注意すべきなのは、設計時に用いた安全率が 4.0 であるか 3.5 であるかによって表面欠陥への置き換えのタイミングが異なるということである。安全率が異なるということは同一の負荷応力に対する耐性を変えていることを意味しており、その違いに応じて Y^* を使い分けることは合理性があるものの、評価対象とする機器の設計で用いられた安全率をその都度確認するのは手間を要する。

異なる安全率に対し、アスペクト比の変化に伴う Y^* の推移を解説図 14 に示す。アスペクト比が大きくなる（偏平な亀裂から丸い亀裂に移行する）につれて Y^* は低下している。安全率 3.5 ベースの Y^* は安全率 4.0 のそれに比べて常に高い。ちなみに日本機械学会維持規格⁸⁾では $Y^* = 0.4$ の一定値が採用されており、これを基準とすると、偏平な亀裂では置き換えがされにくく、丸い亀裂では置き換えがされやすい。

安全率 4.0 ベース、3.5 ベースの Y^* の違いが FFS 評価に及ぼす影響の程度を知るには詳細な検討が必要ではあるものの、FFS 評価法としての取り扱いの簡便さを生かすことを主眼とし、この規格では保守的な結果を与える安全率 3.5 ベースの Y^* を採用することとした。



解説図 14 アスペクト比の変化に伴う Y^* の推移

3 複数の欠陥の取り扱い

複数の欠陥が存在する場合の欠陥の進展は、それぞれ独立に進展を計算する方が評価上妥当であることが実験で確認されている。複数の欠陥が存在する場合の破壊には、欠陥が近接している場合、それらが個々に存在するよりも小さな荷重で破壊することとなる。隣接する欠陥の影響を受けて応力拡大係数が大きく増加し始める距離よりも近い範囲内に複数の欠陥が存在する場合には、保守的に合体した形状の单一欠陥とみなして評価することとしている。

4 複数亀裂の相互干渉を考えないことの理由

他の維持規格^{4), 5), 7), 78)}では、亀裂状欠陥の評価においてクリープの影響を考慮した複数亀裂の相互作用および合体条件は規定されておらず、弾性解である応力拡大係数および疲労亀裂進展速度則に基づき複数亀裂の合体条件が規定されている。近年では Si ら⁷⁹⁾や Xu ら⁸⁰⁾によって数値解析によりクリープ亀裂進展における複数亀裂の相互作用の影響が検討され、弾性解に基づく複

数亀裂相互作用と比較して大きいと指摘がなされており、相互作用をモデル化した式も提案されている。一方で高橋⁸¹⁾はSUS316FR鋼を用いてクリープ疲労亀裂進展試験を実施し、合体に至るまで隣接亀裂による干渉効果を無視しても、参照応力法に基づくJ積分評価によってクリープ疲労亀裂進展予測が可能であることを確認している。

クリープと疲労では損傷メカニズムが異なるため、複数亀裂の相互作用および合体条件も異なる可能性が高いが、非弾性挙動が卓越したクリープではパラメータが多く定式化が困難であり、クリープ疲労での取り扱い多くの条件では明確になっていない。このためこの規格においても、クリープに対する複数亀裂の相互作用および合体条件は考慮しないこととし、弾性解に基づく複数亀裂の合体条件を規定した。

5 弾性解に基づく複数亀裂合体および亀裂形態遷移クライテリアの根拠について

Lacroix⁸²⁾は二つの表面亀裂が存在するモデルにおいて複数亀裂の相互作用を考慮した進展を実現させながら亀裂が合体していく現象を再現可能なX-FEMと、各維持規格で採用されている合体条件を用いた進展計算結果の比較を行っている。その結果、この規格で採用されている $S = 0.5 (\ell_1 + \ell_2)$ ではX-FEMを用いた詳細進展計算よりも保守的な評価が可能であることが確認されている。このため、HPIS Z 101-1:2008¹⁾と同様にこの規格でもこの合体条件を採用した。

安藤⁸³⁾による段違い複数亀裂付き試験体を用いた疲労亀裂進展試験結果から、投影面上の亀裂の内側先端間距離 S および亀裂を含む平面間の垂直距離 H に対して、段違い複数亀裂は以下の条件で合体する可能性があることを確認している。

$$S \leq 5 \text{ mm} \text{ ならば } H \leq 10 \text{ mm}, \quad S > 5 \text{ mm} \text{ ならば } H < 2S$$

この結果から、HPIS Z 101-1:2008¹⁾と同様にこの規格でも上式を採用した。

この規格では内部欠陥から表面欠陥への遷移条件¹⁾として上記と同様にHPIS Z 101-1:2008¹⁾の合体条件を踏襲することとした。

6 主応力方向の変化に対する考え方

応力およびひずみが構造物内で複雑に分布する場合、亀裂の進展に応じて亀裂前方の主応力方向が変化することがある。このとき、亀裂の進展方向が主応力に垂直な方向から一時的にずれるが、その後の進展は速やかに亀裂前方の主応力に垂直な方向へ回帰すると考えられる。主応力方向が大きく変化する場合、詳細な有限要素解析等による考慮が必要である。

附属書D（規定）応力分類、参照応力、応力拡大係数

1 クラッドの取り扱い

クラッド鋼管の強度設計では合わせ材強度を考慮せずに、母材厚さ・母材強度のみを強度設計に用いることが多いが、弾性域内ではクラッド鋼が強度部材として有効に働くことが実証されており⁸⁴⁾、近年では一般産業機器を対象としてJIS B 8265等においてクラッド鋼の合わせ材を強度設計に算入してよいようになっている。⁸⁵⁾また、設計時では合わせ材減肉代の不確定性から母材のみを強度評価に用いていた場合でも、維持の段階で合わせ材の肉厚を評価することができれば、本評価においてクラッド鋼を強度部材として取り扱うことは可能である。

2 参照応力解の整備

この規格の**附属書 D**に採録されている参照応力の解には、**HPIS Z 101-2:2011²⁾**の**附属書 B**に採録されている解が流用されている。これらは、適切な理論的根拠に基づき導出されたもの^{86), 87), 88)}で、その妥当性が検証されている。⁸⁹⁾

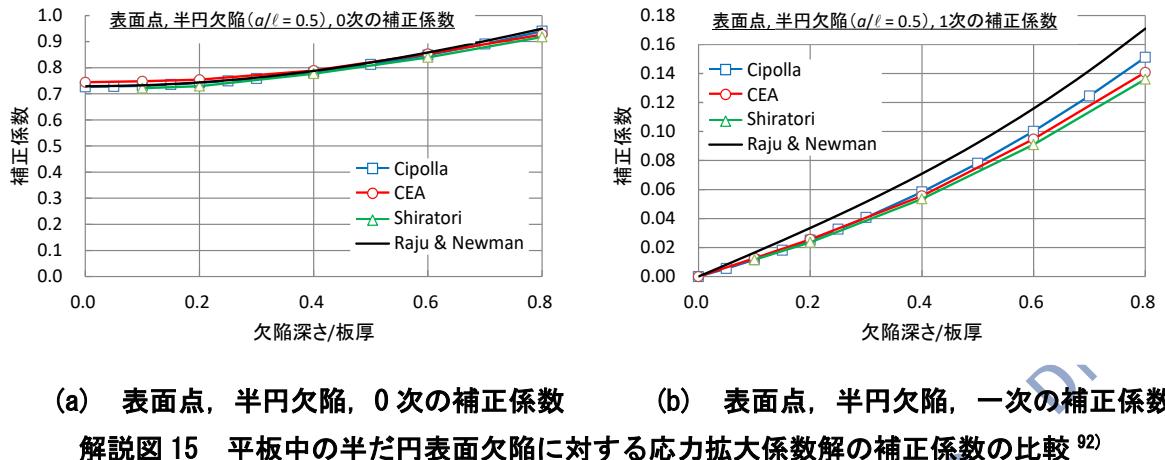
この規格は供用適性評価を目的とするものであるから、圧力機器のバウンダリ機能の喪失につながる貫通欠陥はその適用対象となることはない。しかしながら、圧力バウンダリを構成しない機器や一時的な漏洩が許容される機器に対しては貫通欠陥を想定することが考えられ、また圧力バウンダリであってもその安全性評価を行うのに際して貫通欠陥に対する供用適性評価が求められるケースもあると考えられることから、基本的な欠陥構造として、円筒の軸方向貫通欠陥、円筒の周方向貫通欠陥、および球殻の貫通欠陥について、参照応力解の追加で採録した。これらの解としては、表面欠陥に対する、**HPIS Z 101-2:2011²⁾**の解を貫通欠陥に拡張した解を採用することとした。その妥当性については、比較対照し得る既存の解との比較を通じて確認されている。⁹⁰⁾

上記に加えて、基本的な構造形状でありながら、**HPIS Z 101-2:2011²⁾**に採録されていない解として、平板中の板幅方向に伸びた片側欠陥に対する解を採録した。

3 Raju-Newman の解の適用について

平板の半だ円表面欠陥が膜応力、曲げ応力、および内圧を受ける場合の応力拡大係数解として Raju-Newman の解⁹¹⁾が用いられることがある。**HPIS Z 101-1:2008¹⁾**および**HPIS Z 101-2:2011²⁾**においてもその使用が認められている。

しかしながら、Raju-Newman の解は数値解析の能力がはるかに限定期であった時代に提唱されたものであり、後年になって開発された解との乖離が報告されている。⁹²⁾平板の半だ円表面欠陥の表面点において、欠陥深さ比の変化に伴う 0 次および一次の補正係数の推移を比較した結果の例を**解説図 15** に示す。比較対照とした解は、Raju-Newman の解のほか、日本機械学会発電用原子力設備規格 維持規格に採用されている Cipolla の解⁹³⁾および CEA の解⁹⁴⁾、それらとの同等性が広い範囲で確かめられている Shiratori の解⁹⁵⁾である。0 次の補正係数については、いずれの解においてもほぼ同等であるが、一次の補正係数については、Raju-Newman の解だけが他の解よりも有意に高い値を示している。応力拡大係数の計算に Raju-Newman の解を用いるにあたっては、使用者がその責を負わなければならない。



4 線形応力分布の取り扱い

附属書 D に示す応力拡大係数の計算に用いる応力成分として, 平板の欠陥 (附属書 D の 6.1), 円筒の軸方向欠陥 (附属書 D の 6.2), 円筒の周方向欠陥 (附属書 D の 6.3), および球殻の欠陥 (附属書 D の 6.4) に対し, 肉厚方向の応力分布の多項式近似 $\sigma(x)$ が用いられている。

$$\sigma(x) = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 + \dots \quad (19)$$

または,

$$\sigma(x) = A'_0 + A'_1 \left(\frac{x}{t}\right) + A'_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + A'_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \dots$$

$$A_0 = A'_0, \quad A_1 = A'_1 \frac{a}{t}, \quad A_2 = A'_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2, \quad A_3 = A'_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3, \quad \dots \quad (20)$$

ここで, $x (0 \leq x \leq t)$ は表面欠陥に対し亀裂表面からの距離, a は欠陥深さ, t は肉厚であり, また $A_i (i = 0, 1, 2, 3, \dots)$ は応力分布の i 次の項の成分である。このような応力分布を受ける欠陥形状の応力拡大係数 K_I は, 一般に次式により算出される。

$$K_I = [A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3 + \dots] \sqrt{\pi a} \quad (21)$$

このときの係数 $G_i (i = 0, 1, 2, 3, \dots)$ は欠陥形状に応じて表の型式で用意されている応力拡大係数の補正係数である。

多項式応力分布に対する応力拡大係数解を膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b からなる線形応力に適用する場合は次の手順による。 σ_m と σ_b からなる線形応力分布は, 表面で $\sigma_m + \sigma_b$, 裏面で $\sigma_m - \sigma_b$ となることから,

$$\sigma(x) = (\sigma_m + \sigma_b) - 2\sigma_b \left(\frac{x}{t}\right) = (\sigma_m + \sigma_b) - 2\sigma_b \left(\frac{a}{t}\right) \left(\frac{x}{a}\right) \quad (22)$$

と表すことが可能である。 K_I が次式,

$$K_I = (\sigma_m M_m + \sigma_b M_b) \sqrt{\pi a} \quad (23)$$

により与えられるものとすると, 補正係数 M_m および M_b は,

$$M_m = G_0, \quad M_b = G_0 - 2 \left(\frac{a}{t} \right) G_1 \quad \dots \quad (24)$$

となる。

5 球殻の表面欠陥に対する応力拡大係数

HPIS Z 101-2:2011 の附属書 B²⁾によれば、球殻の表面欠陥の応力拡大係数には円筒の周方向表面欠陥に対する応力拡大係数解を用いてもよいとしている。一方、同附属書に規定された参照応力に関しては、球殻の表面欠陥の参照応力に円筒の軸方向表面欠陥に対する参照応力解を用いてもよいとしている。流用する解の構造形状については一貫性があるべきであること、参照応力については軸方向表面欠陥への置き換えが妥当なことが別途確認されていること、周方向欠陥で考慮されるグローバルな曲げ応力は球殻にそぐわないこと、軸方向表面欠陥への置き換えの事例が他の規格（例えば **API 579-1/ASME FFS-1⁵⁾**）にもあることを勘案すると、球殻の表面欠陥の応力拡大係数には円筒の軸方向表面欠陥に対する応力拡大係数解を用いるとする方が好ましいと考えられる。

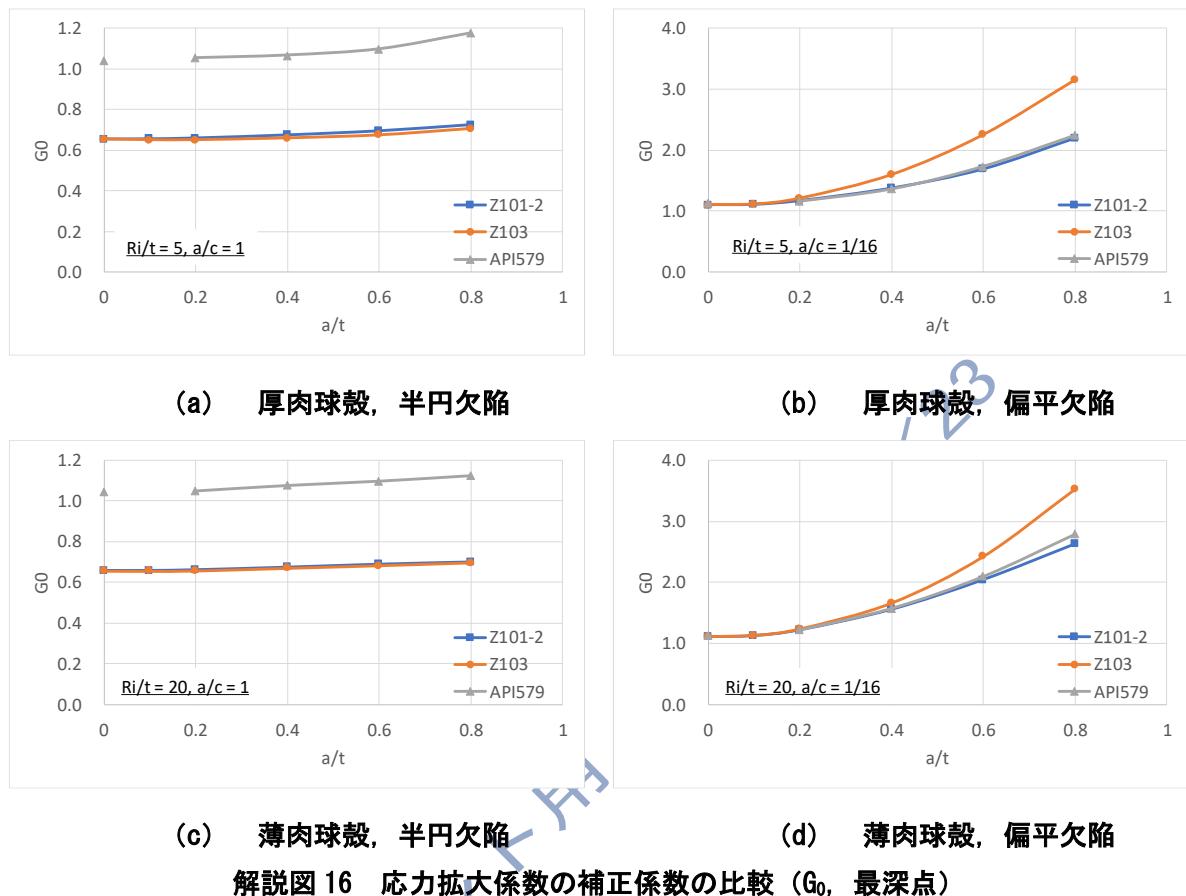
HPIS Z 101-2:2011²⁾の解（円筒内面の周方向表面欠陥の解の流用），この規格の解（円筒内面の軸方向表面欠陥の解の流用），およびAPI 579-1/ASME FFS-1⁵⁾の解により算出される応力拡大係数を比較した。欠陥形状として半円欠陥 ($a/c = 1$) および偏平欠陥 ($a/c = 1/16$) の二種類，球殻形状として厚肉球殻 ($R/t = 5$) および薄肉球殻 ($R/t = 20$) の二種類をそれぞれ想定し，欠陥深さ比 a/t の変化に伴う補正係数 G_0 および G_1 の推移を比較した（記号の定義については**附属書 D**を参照のこと）。 G_0 は膜応力に対する応力拡大係数を規格化したものに相当し，また G_1 は (G_0 の寄与を込みにした) 曲げ応力に対する応力拡大係数を規格化したものに相当する。

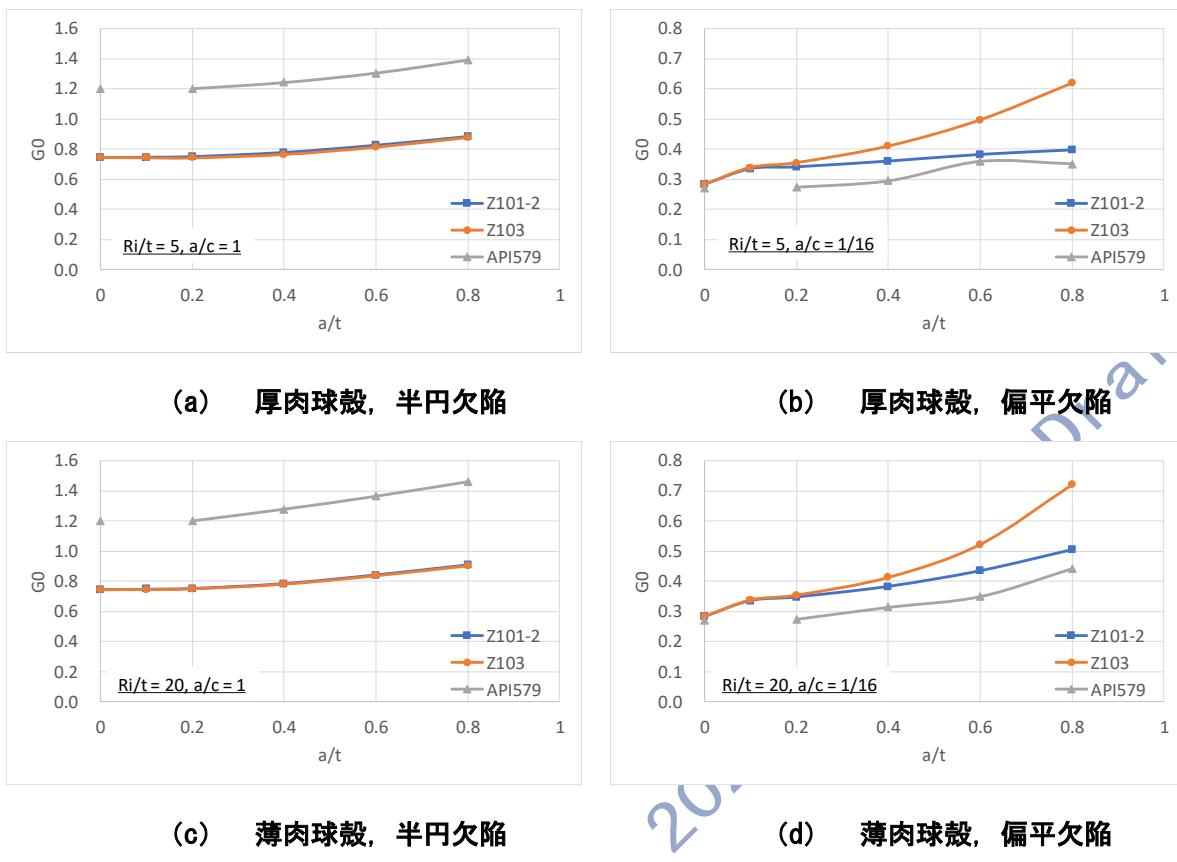
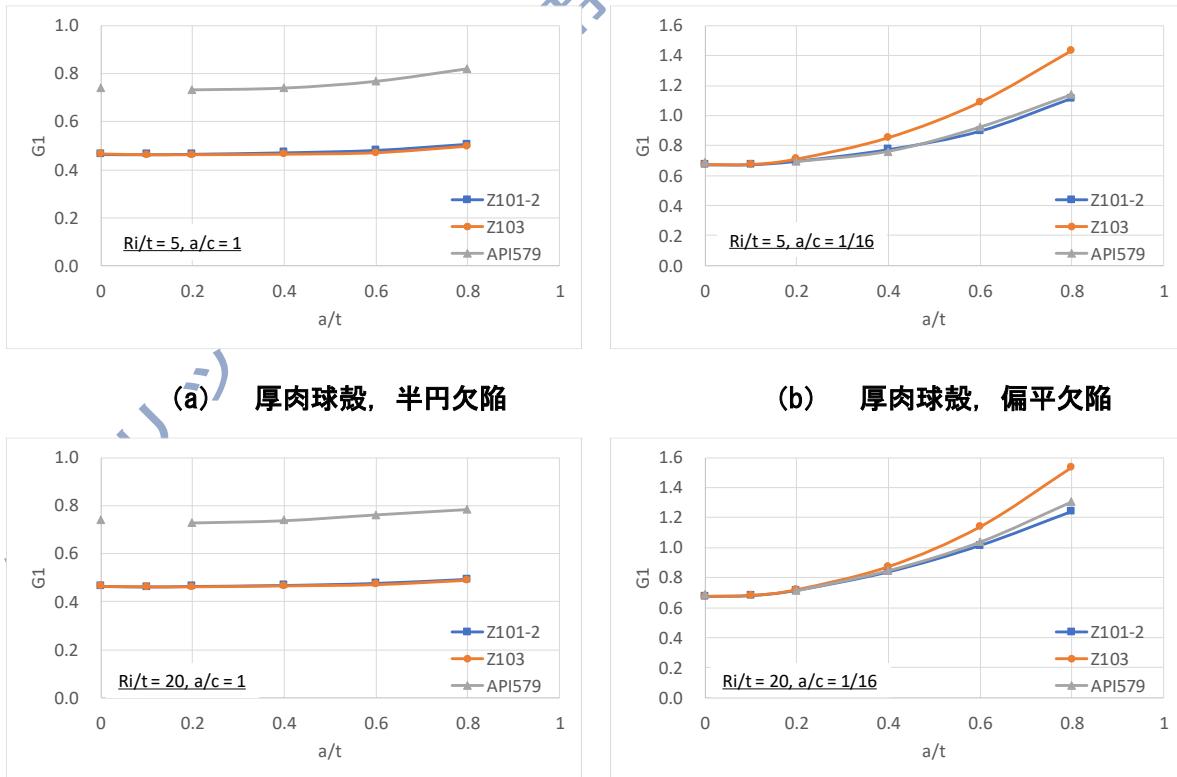
各条件における最深点での G_0 の比較結果を **解説図 16** に示す。相対的に小さい半円欠陥においては **HPIS Z 101-2:2011** の解とこの規格の解とで大差がないのに対し、**API579** の解では欠陥深さによらずこれらより常に 6 割ほど大きな G_0 となっていて、その傾向は薄肉か厚肉かによらない。相対的に大きい偏平な欠陥では **HPIS Z 101-2:2011** の解と **API579** の解とで比較的よく一致していて、この規格の解がそれらより大きい。その傾向は薄肉か厚肉かによらない。

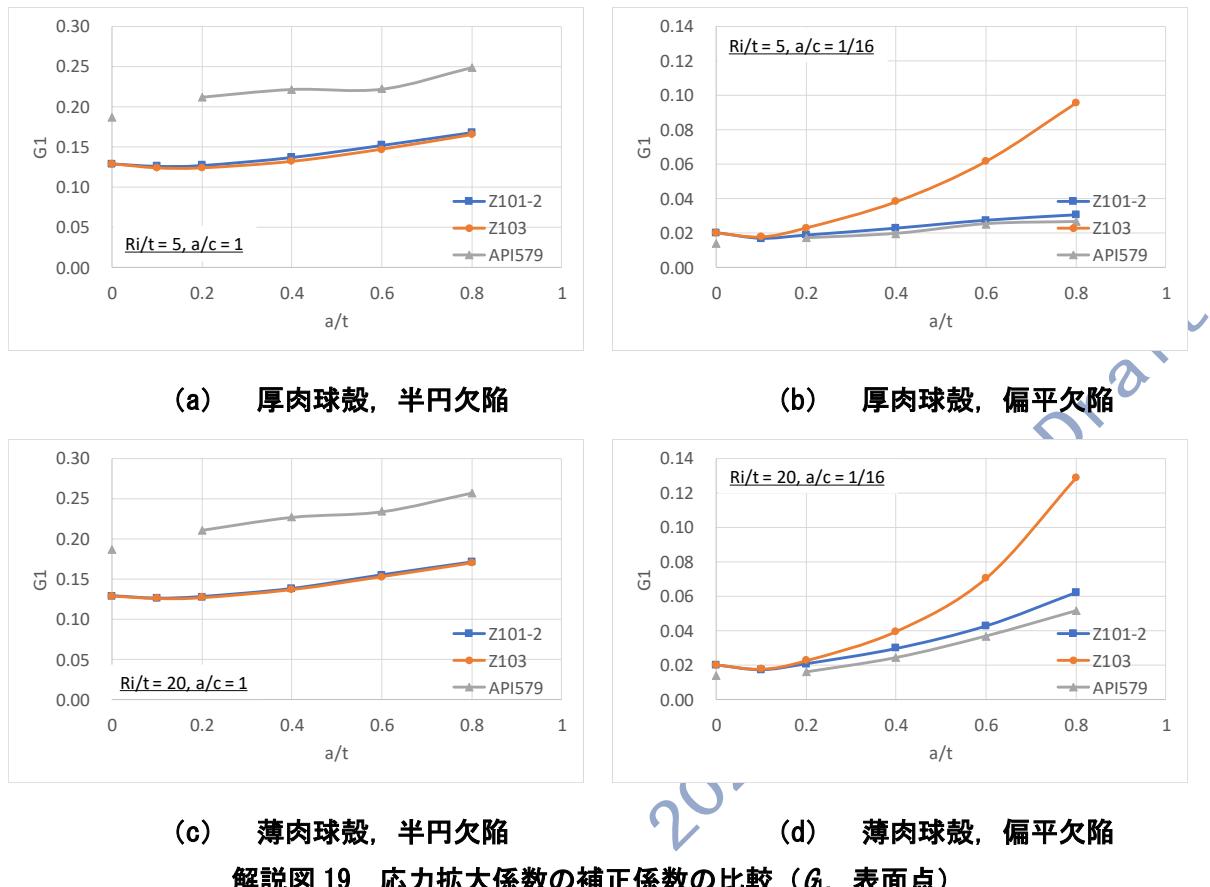
各条件における表面点での G_0 の比較結果を **解説図 17** に示す。相対的に小さい半円欠陥においては **HPIS Z 101-2:2011** の解とこの規格の解とで大差がないのに対し、**API579** の解では欠陥深さによらずこれらより常に 6 割ほど大きな G_0 となっている。これは最深点での G_0 とよく似た挙動である。相対的に大きい偏平な欠陥では欠陥深さ比によらずこの規格の解、**HPIS Z 101-2:2011** の解、**API579** の解の順に G_0 が大きい。 a/t が 0.4 以下の領域ではこの規格の解と **HPIS Z 101-2:2011** の解の差は小さい。

各条件における最深点での G_1 の比較結果を **解説図 18** に、表面点での G_1 の比較結果を **解説図 19** にそれぞれ示す。相対的な関係と各種因子の効き方は G_0 のそれと定性的に同じようである。アスペクト比の大小によって各種解の大小関係が変わる（ただし欠陥深さ比、厚さ比の影響の仕方はすべてに共通である）ことから、この規格の解と **HPIS Z 101-2:2011** の解との間で優劣を議論するのに **API 579** の解を基準とすることには疑義が残るもの、いかなる条件においてもこの規格の解と **HPIS Z 101-2:2011** の解と同等かそれ以上の応力拡大係数を与える、ということは言え

る。以上のことから、この規格では球殻の表面欠陥の応力拡大係数に円筒の軸方向表面欠陥に対する応力拡大係数解を用いることとした。



解説図 17 応力拡大係数の補正係数の比較 (G_0 , 表面点)解説図 18 応力拡大係数の補正係数の比較 (G_1 , 最深点)

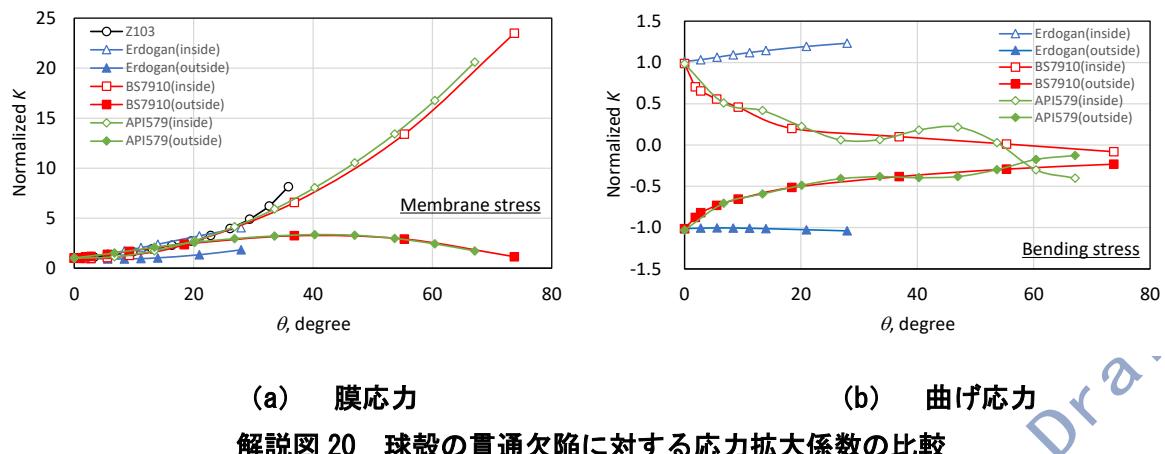
解説図 19 応力拡大係数の補正係数の比較 (G_1 , 表面点)

6 球殼の貫通欠陥に対する応力拡大係数

HPIS Z 101-2:2011 の附属書 B²⁾には採録されていない球殼の貫通欠陥の応力拡大係数解を新たに採録するにあたり、既存の解の比較検討を行った。比較には、円筒の周方向貫通欠陥の解²⁾, Erdogan-Kibler の解⁹⁶⁾, BS7910 の解⁴⁾, および API579 の解⁵⁾を用いた。

各解による膜応力 σ_m および曲げ応力 σ_b に対する応力拡大係数と亀裂半角 θ の関係を解説図 20 に示す。応力拡大係数は作用応力 $\times (\pi R_b \theta)$ で無次元化し、管厚比 R_b/t は 20 とした。球殼の貫通欠陥においては内表面点、外表面点で応力拡大係数が異なり、評価点に応じた解が用意されているという特徴がある。円筒の周方向貫通欠陥の解を流用する場合には評価点による違いが考慮されていない。 σ_m に対する解に関しては、BS7910 の解と API579 の解は内外表面点のいずれにおいてもよく一致している。円筒の周方向貫通欠陥の解はそれらの内表面点における値に近い。Erdogan の解は内表面点ではそれなりに近いが外表面では乖離している。 σ_b に対する解に関しては、BS7910 の解と API579 の解は内外表面点のいずれにおいても全体的な傾向としては一致している。ただ、API579 の解は θ の変化に対する推移が波打っていて不自然である。また、Erdogan の解は他の解と異なる挙動を示している。

以上のとおり、球殼の貫通欠陥に対する応力拡大係数は内外表面点で異なり、平板（または円筒）の解を流用するだけでは不十分であり、調査した解のうちでは BS7910 の解が最も好ましい特徴を備えていることから、同解を採録することとした。

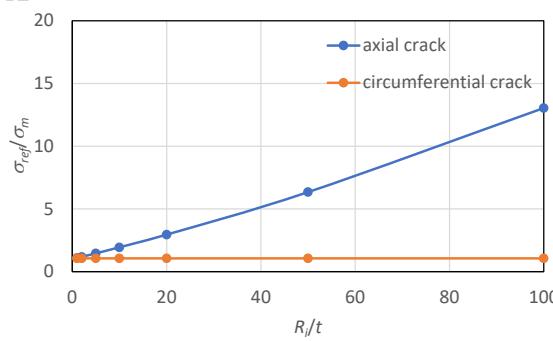


解説図 20 球殼の貫通欠陥に対する応力拡大係数の比較

7 球殼の貫通欠陥に対する参照応力

HPIS Z 101-2:2011 の附属書 B²⁾によれば、球殼の貫通欠陥の参照応力として円筒の軸方向貫通欠陥、周方向貫通欠陥のいずれかの参照応力解を用いることが考えられる。球殼の表面欠陥に対しては円筒の軸方向表面欠陥の参照応力解を流用することとしていることから、前者が一貫性のある取り扱いであると考えられる。

膜応力 σ_m に対する円筒の軸方向貫通欠陥および周方向貫通欠陥の参照応力 σ_{ref} と管厚比 R_i/t の関係を解説図 21 に示す。 σ_{ref} は σ_m で無次元化し、亀裂半角 θ は 5° とした。周方向欠陥では管厚比によらず無次元化参照応力が一定であるのに対し、軸方向欠陥では管が薄肉になるにつれて無次元化参照応力が増大している。これは、前者が幾何学関係のみにより参照応力が決まる一方、後者ではバルジングファクターが陽に考慮されているという違いによるものである。このことにより、球殼の貫通欠陥に対する参照応力として円筒の軸方向貫通欠陥に対する参照応力の解を流用することで保守側の評価が可能であることがわかる。



解説図 21 円筒の軸方向貫通欠陥、周方向貫通欠陥に対する参照応力の比較

附属書 E (規定) 疲労 J 積分範囲およびクリープ J 積分算出式

1 算出式の特徴

附属書 E は、クリープ疲労亀裂進展評価において必要となる疲労 J 積分範囲 ΔJ_f およびクリープ J 積分 J^* の算出式を与えるものである。その評価法は通商産業省（現経済産業省）資源エネル

ギー庁の事業「発電用新型炉技術確証試験（高速増殖炉技術確証試験に関するもの）」の「高温構造健全性評価技術確証試験」において取りまとめられた「高速炉の高温構造健全性評価手法に関する指針（案）」⁷⁾を基にしている。亀裂のないモデルに対する弾性応力解析結果を用い、参照応力法^{97), 98)}により亀裂の影響を考慮し、さらに弾性追従の概念を導入することによって、 ΔJ_f および J^* を簡易に算出可能である手法が提案されている。指針では、一次応力、二次応力と弾性追従係数から参照応力を求め、この参照応力から応力拡大係数と材料非線形の修正項を算出するといった評価手順がとられている。しかし、一旦参照応力を求め、さらにその参照応力から応力拡大係数を算出するのは、形状効果を重複して考慮することになる。よって本規格で採用した評価法では、無亀裂モデルの弾性応力（範囲）から応力拡大係数（範囲）および弾性参照応力（範囲）を算出することとし、弾性 J 積分（範囲）のベースとなる応力拡大係数（範囲）の算出において形状効果を重複して考慮することのないよう配慮がなされている。

2 参照応力の算出法

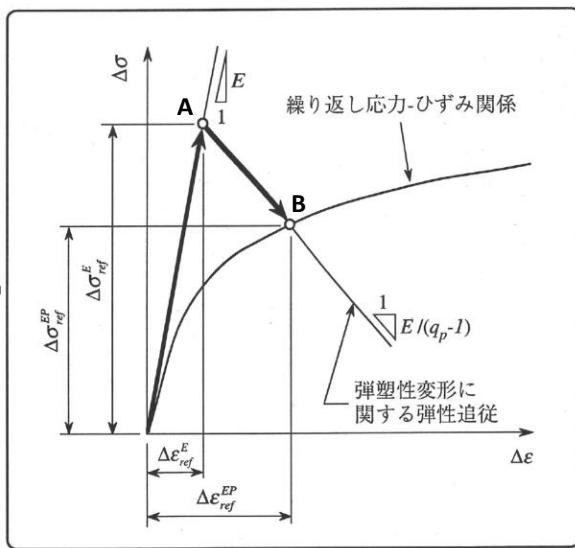
ΔJ_f の導出に用いる参照応力の算出法を解説図22に示す。はじめに繰り返しサイクルにおける弹性応力範囲成分(当該サイクル中の膜応力 σ_m の最大値と最小値の差 $\Delta\sigma_m$ および曲げ応力 σ_b の最大値と最小値の差 $\Delta\sigma_b$)に対応する弹性参考応力範囲 $\Delta\sigma_{ref}^E$ と弹性参考ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{ref}^E$ を附属書Dにより算出する。これにより定まる図中の点Aを通り、その勾配が $-E/(q_p-1)$ であるような直線が繰り返し応力範囲・ひずみ範囲関係と交わる点Bを求めるこことにより、弹塑性参考応力範囲 $\Delta\sigma_{ref}^{EP}$ および弹塑性参考ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{ref}^{EP}$ を算出することが可能である。

J^* の導出に用いる参照応力の算出法を解説図 23 に示す。繰り返しサイクル中の各時刻での σ_m と σ_b を用いて算出される弾性参照応力の最大値 $\sigma_{ref}^{E(max)}$ 、および $\Delta\sigma_{ref}^E$ の $1/2$ の大きい方の値をもって、保持開始時の弾性参照応力 $\sigma_{ref}^{E(0)}$ および弾性参照ひずみ $\varepsilon_{ref}^{E(0)}$ を算出する。これにより定まる図中の点 C を通り、その勾配が $-E/(q_p-1)$ であるような直線が繰り返し応力範囲・ひずみ範囲関係と交わる点 D により、保持開始時の弾塑性参照応力 $\sigma_{ref}^{EP(0)}$ および弾塑性参照ひずみ $\varepsilon_{ref}^{EP(0)}$ が定まる。保持中の弾塑性参照応力 σ_{ref}^{EP} および対応する参照ひずみ ε_{ref}^C は図中の点 D を出発点として、勾配が $-E/(q_c-1)$ であるような直線の上を移動していく。

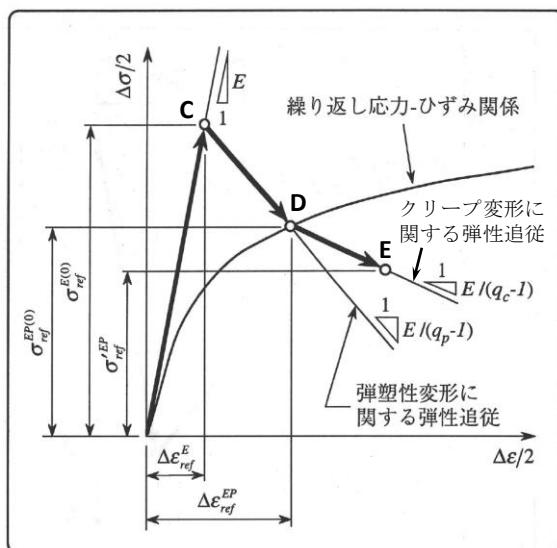
3 弹性追従係数

*n*乗硬化則に基づく片持梁の固定端付け根部での弾塑性変形に関する弾性追従係数 q は次式で与えられることが知られている。⁹⁹⁾

$$q = \frac{n+2}{3} \quad \text{---(25)}$$



解説図 22 ΔJ の導出に
用いる参考応力の算出法



解説図 23 J^* の導出に
用いる参考応力の算出法

上式において保守性を見込んで $n = 10$ とし、 $q_p = 4$ とおくことで妥当な評価が可能であることが、亀裂付き円筒の熱応力有限要素解析により検証されている。⁷⁾ また、クリープ変形に対する弾性追従係数についても、熱応力有限要素解析において q_p と大きな差が認められないことが確認されていることから、 $q_c = 4$ としている。なお、周方向亀裂を有する円筒に対し、亀裂深さ比 a/t の関数として q_p および q_c の評価式が提案されている。⁷⁾

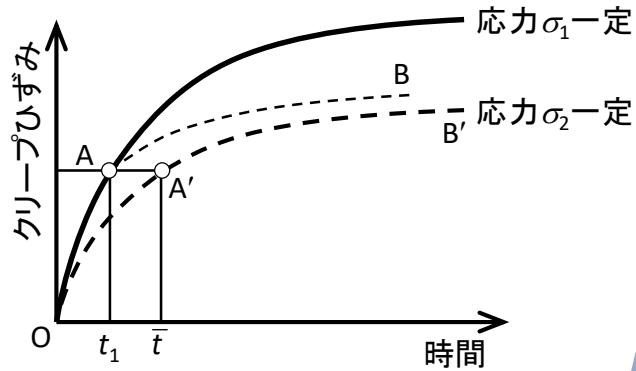
$$q_p = q_c = 2.68 \exp \left[-2.96 \left(\frac{a}{t} - 0.5 \right)^2 \right] \quad \text{---(26)}$$

4 保持中の応力変化の考慮

ひずみ硬化則は、クリープ変形に伴う転位構造の変化などによって、蓄積されたクリープひずみに応じて材料が硬化するという考えに基づく。クリープ変形の後にクリープ変形と逆方向の塑性変形が生じる場合には、クリープ変形による硬化は回復する。^{100), 101)} クリープと疲労の重畠下では繰り返しサイクルごとに硬化が回復した状態からクリープが開始されることから、一次クリープが現れる。

保持中の応力はクリープひずみの増大に伴って変化し、またひずみ硬化則にしたがってクリープひずみ速度が変動することから、保持中の参考応力と保持中の参考クリープひずみ速度は逐次評価される必要がある。参考クリープひずみ速度を算出する際には実時間 t_h とは異なる等価時間 \bar{t} を用いる。 \bar{t} の設定方法を模式的に解説図 24 に示す。時刻 t_1 において応力が σ_1 から σ_2 に変化したとすると、クリープ曲線は OA から AB に遷移する。曲線 AB は応力が σ_2 で一定の時のクリープ曲線 A'B' を時間軸に沿って点 A を通るように平行移動させたものであり、このときの点 A' に対応する時間が \bar{t} に相当する。参考クリープひずみ速度をクリープひずみ速度が相対的に高い保持初期においては保持開始からの経過時間 t_h を十分小さい値とし、繰り返し計算の際の t_h の増分 Δt_h も小さくする必要がある。逐次の計算におけるクリープひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{c,1}$ が 0.0025% を超えないよ

うにすれば、逐次の応力変化分も 1MPa 程度に抑えられる。そこで、この規格では、 $\Delta\varepsilon_{c,1}$ が 0.0025% を上回らないように小さな Δt_h を設定することを求めた。時間の経過にしたがって Δt_h を次第に大きくすることで逐次計算回数を減らすことが可能である。



解説図 24 \bar{t} の設定方法の模式図

5 弾性解析結果の活用

弾性 J 積分範囲 ΔJ_e は本来弾塑性応力範囲 $\Delta\sigma_{app}^{EP}$ に対する応力拡大係数範囲 ΔK_I^{EP} から計算されるべきものであるが、この規格では弾性応力範囲 $\Delta\sigma_{app}^E$ に対する応力拡大係数範囲 ΔK_I^E を評価の出発点としている。このことを明示的に表すと、

$$\Delta J_e = \frac{(\Delta K_I^{EP})^2}{E'} = \left(\frac{\Delta\sigma_{app}^{EP}}{\Delta\sigma_{app}^E} \right)^2 \frac{(\Delta K_I^E)^2}{E'} \quad (27)$$

となり、弾塑性/弾性応力範囲の比に応じた補正が必要となる。ここで、弾性参照応力範囲 $\Delta\sigma_{ref}^E$ の弾性負荷応力範囲 $\Delta\sigma_{app}^E$ に対する比は弾塑性参考応力範囲 $\Delta\sigma_{ref}^{EP}$ の弾塑性負荷応力範囲 $\Delta\sigma_{app}^{EP}$ に対する比と常に等しいことから、

$$\frac{\Delta\sigma_{ref}^E}{\Delta\sigma_{app}^E} = \frac{\Delta\sigma_{ref}^{EP}}{\Delta\sigma_{app}^{EP}} \quad (28)$$

上式を解説式 (27) に代入、整理して、

$$\Delta J_e = \left(\frac{\Delta\sigma_{ref}^{EP}}{\Delta\sigma_{ref}^E} \right)^2 \frac{(\Delta K_I^E)^2}{E'} \quad (29)$$

となる。参考応力の考え方によれば、疲労 J 積分範囲 ΔJ_f は ΔJ_e に塑性修正係数 $F = E\Delta\varepsilon_{ref}^{EP}/\Delta\varepsilon_{ref}^E$ (E はヤング率、 $\Delta\varepsilon_{ref}^{EP}$ は弾塑性参考ひずみ範囲) を乗じることで得られ、

$$\Delta J_f = \frac{E\Delta\varepsilon_{ref}^{EP}}{\Delta\sigma_{ref}^E} \Delta J_e = \frac{E\Delta\varepsilon_{ref}^{EP}}{\Delta\sigma_{ref}^E} \left(\frac{\Delta\sigma_{ref}^{EP}}{\Delta\sigma_{ref}^E} \right)^2 \frac{(\Delta K_I^E)^2}{E'} = \frac{\Delta\sigma_{ref}^{EP} \Delta\varepsilon_{ref}^{EP} (\Delta K_I^E)^2}{\Delta\sigma_{ref}^E \Delta\varepsilon_{ref}^E E'} \quad (30)$$

同式がすなわち **附属書 E の 3.5 疲労 J 積分範囲** の算出に規定された疲労 J 積分範囲 ΔJ_f の算出式にほかならない。なお、**附属書 E の 4.6 クリープ J 積分** の算出に規定されたクリープ J 積分 J^* の導出も同様の考え方で示す。

参考文献

- 1) 日本高圧力技術協会規格, **HPIS Z 101-1:2008** “圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第1段階評価”
- 2) 日本高圧力技術協会規格, **HPIS Z 101-2:2011** “圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第2段階評価”
- 3) British Energy, “Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures”, **R5** Issue 3, (2003).
- 4) British Standards Institution, “Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures”, **BS 7910**, (2013).
- 5) American Petroleum Institute and American Society of Mechanical Engineers, “Fitness-For-Service”, **API 579-1/ASME FFS-1**, (2016).
- 6) 日本溶接協会, “原子力構造機器の材料, 設計, 施工, 検査, 維持に関する講習会テキスト”, (2013).
- 7) 電力中央研究所, “平成12年度発電用新型炉技術確証試験(高速増殖炉技術確証試験)調査報告書 別冊 高温構造健全性評価指針(案)”, (2001).
- 8) 日本機械学会, “発電用原子力設備規格 維持規格”, **JSME S NA1-2016** (2016).
- 9) 小林他, “構造健全性評価ハンドブック”, 共立出版, (2005).
- 10) Miller, A. G., “Review of Limit Loads of Structures Containing Defects”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32, pp. 197-327, (1988).
- 11) Tabuchi, M., Kubo, K., and Yagi, K., “Effect of Specimen Size on Creep Crack Growth Rate Using Ultra-Large CT Specimens for 1Cr-Mo-V Steel”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 40, pp. 311-321, (1991).
- 12) 田淵, 久保, 八木, “1Cr-Mo-V 鋼のクリープき裂成長特性に及ぼす試験片板厚の影響”, 材料, Vol. 46, pp. 53-57, (1997).
- 13) Tabuchi, M., Yagi, K., and Ohba, T., “Characterization of Creep Crack Growth Behaviour of 316 Stainless Steel in Terms of Microscopical Fracture Mechanism”, ISIJ International, Vol. 30, pp. 847-853, (1990).
- 14) 田淵, 久保, 八木, “316 ステンレス鋼の長時間クリープき裂成長挙動”, 材料, Vol. 41, pp. 1255-1260, (1992).
- 15) Tabuchi, M., Hongo, H., Sugiura, R., Yokobori, A. T., Yatomi, M., and Kobayashi, K., “Evaluation of Damage and Fracture of High Cr Steel Welds at Elevated Temperatures”, Strength, Fracture and Complexity, Vol. 9 pp. 31-41, (2015).
- 16) Tabuchi, M., Adachi, T., Yokobori, A. T., Fuji, A., Ha, J., and Yokobori, T., “Evaluation of Creep Crack Growth Properties Using Circular Notched Specimens”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 417-425, (2003).
- 17) 北村, “高温疲労き裂伝ばに関する破壊力学的研究”, 京都大学博士論文, (1986).
- 18) 三浦, 島川, 中山, 高橋, “高温下における欠陥評価のためのJ積分簡易解析法の体系化”, 材料,

- Vol. 49, No. 8, pp. 845-850, (2000).
- 19) 島川, 三浦, 中山, 高橋, “高温下における欠陥評価のための J 積分簡易解析法の適用性検証”, 材料, Vol. 49, No. 8, pp. 851-856, (2000).
- 20) Isobe, N., Sakurai, S., Imou, K., Yorikawa, M., and Takahashi, Y., “Crack Growth Behavior in 316FR Stainless Steel Plate under Tensile-Bending Loading and Its Simplified Evaluation”, Materials at High Temperatures, Vol. 15, pp. 81-86, (1998).
- 21) Rice, J.R., “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks”, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379-386, (1968).
- 22) 大路, 小倉, 久保, “クリープき裂問題における J 積分の応用”, 日本機械学会講演論文集, No. 740-11, pp. 207-210, (1974).
- 23) 大路, 小倉, 久保, “全断面塑性における J 積分の簡便式とそのクリープき裂問題への応用”, 日本機械学会論文集, Vol. 44, pp. 1831-1838, (1978).
- 24) Koterazawa, R., and Mori, T., “Applicability of Fracture Mechanics Parameters to Crack Propagation under Creep Condition”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 99, pp. 298-305, (1977).
- 25) 大路, 小倉, 片田, 竹本, 中島, “引張りおよび曲げ形両系列試験片によるクリープき裂成長挙動の支配力学因子に関する検討”, 材料, Vol. 27, pp. 1089-1095, (1978).
- 26) 大路, 小倉, 久保, 片田, 斎藤, “1 Cr-1 1/4 Mo-1/4 V 鋼のクリープき裂成長速度の支配力学因子の検討”, 材料, Vol. 27, pp. 1165-1170, (1978).
- 27) 大路, 小倉, 久保, 片田, “クリープき裂成長問題に対する非線形破壊力学の適用 (修正 J 積分による実験結果の評価)”, 日本機械学会講演論文集, No. 780-9, pp. 123-128, (1978).
- 28) 大谷, 北村, 平, “高温におけるクリープおよび疲労き裂伝ばに対する J 積分の適用”, 日本機械学会講演論文集, No. 780-9, pp. 135-140, (1978).
- 29) 大路, 小倉, 久保, 片田, 勝原, 岩永, “相似系列の深いき裂試験片および浅いき裂試験片によるクリープき裂成長速度の支配力学因子の検討”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 45, pp. 550-558, (1979).
- 30) Taira, S., Ohtani, R., and Kitamura, K., “Application of J-Integral to High-Temperature Crack Propagation: Part I-Creep Crack Propagation”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 101, pp. 154-161, (1979).
- 31) 平, 大谷, 清水, 北村, 柏木, “板幅の広い薄鋼板中央き裂材によるクリープき裂伝ば支配力学量の検討”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 46, pp. 468-476, (1980).
- 32) Sadananda, K., and Shahinian, P., “Review of the Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth in Structural Alloys”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 327-342, (1981).
- 33) ASTM E1457-15, “Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Times in Metals”, (2015).
- 34) Kumar, V., German, M.D., and Shih, C.F., “An Engineering Approach for Elastic-Plastic

- Fracture Analysis", EPRI NP-1931, (1981).
- 35) Kumar, V., German, M.D., Wilkening, W.W., Andrews, W.R., deLorenzi, H.G., and Mowbray, D.F., "Advances in Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI NP-3607, (1984).
- 36) Kumar, V., and German, M.D., "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders", EPRI NP-5596, (1988).
- 37) Zahoor, A., "Ductile Fracture Handbook, Volume 1: Circumferential Throughwall Cracks", EPRI NP-6301-D, (1989).
- 38) Mackenzie, A.C., "On the Use of a Single Uniaxial Test to Estimate Deformation Rates in Some Structures Undergoing Creep", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 10, pp. 441-453, (1968).
- 39) Penny, R.K., and Marriott, D.L., "Design for Creep", McGRAW-HILL Book Company (UK) Limited, pp. 122-133, (1971).
- 40) Ainsworth, R.A., "Some Observations on Creep Crack Growth", International Journal of Fracture, Vol. 20, pp. 147-159, (1982).
- 41) Ainsworth, R.A., "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Material", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, pp. 633-642, (1984).
- 42) Yatomi, M., "Comparison among Estimation Methods of C* Parameter for Axially Oriented External Surface Crack in Cylinders", Materials at High Temperatures, Vol. 32, pp. 468-474, (2015).
- 43) 三浦, 島川, 中山, 高橋, "高温下における欠陥評価のための J 積分簡易解析法の体系化", 材料, Vol. 49, pp. 845-850, (2000).
- 44) 島川, 三浦, 中山, 高橋, "高温下における欠陥評価のための J 積分簡易解析法の適用性検証", 材料, Vol. 49, pp. 851-856, (2000).
- 45) Shimakawa, T., Ogawa, H., Nakayama, Y., Miura, N., and Takahashi, Y., "Simplified J-Evaluation Method for Flaw Evaluation at High Temperature- Part II: Verification of Evaluation Method", ASME PVP-Vol. 410-1, pp. 119-126, (2000).
- 46) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table TCD, "Nominal Coefficients of Thermal Conductivity (TC) and Thermal Diffusivity (TD)".
- 47) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table TCD, "Nominal Coefficients of Thermal Conductivity (TC) and Thermal Diffusivity (TD)", General Note (a).
- 48) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.1, "材料の各温度における縦弾性係数" (JIS B 8266 付表 4.1, JIS B 8267 表 D.1).
- 49) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table TM-1, "Moduli of Elasticity E of Ferrous Materials for Given Temperatures".
- 50) ASME Section II, Part D, Subpart 2, Table PRD, "Poisson's Ratio and Density of Materials".
- 51) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", JSME S NC2 (2015), 表 添付 13-I-15.
- 52) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規

- 格>", JSME S NC2 (2015), 表 添付 13-I-16.
- 53) 物質・材料研究機構, 物質材料データベース : クリープデータシート (<https://metallicmaterials.nims.go.jp/>) .
- 54) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.3, "炭素鋼及び低合金鋼の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.1, JIS B 8267 表 D.3).
- 55) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.4, "ステンレス鋼の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.2, JIS B 8267 表 D.4).
- 56) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.5, "ステンレス鉄鋼の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.3, JIS B 8267 表 D.5).
- 57) JIS B 8265 付属書 D, 表 D.6, "ニッケルクロム鉄合金の降伏点又は 0.2%耐力" (JIS B 8266 付表 5.4, JIS B 8267 表 D.6).
- 58) ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table Y-1, "Yield Strength Values, S_y , for Ferrous and Nonferrous Materials".
- 59) Osage, D.A., et al., "Compendium of Temperature-Dependent Physical Properties for Pressure Vessels, Piping and Tankage Materials", WRC Bulletin 503 (2023).
- 60) ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table U, "Tensile Strength Values, S_u , for Ferrous and Nonferrous Materials".
- 61) 日本規格協会, JIS ハンドブック, 鉄鋼 I (2017), 参考 9, "硬さ換算表 (SEA J 417)".
- 62) 日本高圧力技術協会規格, "高圧容器規格", HPIS C 106:2023, 付属書 D, "2 静的 (単調負荷) 真応力-真ひずみ曲線".
- 63) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", JSME S NC2 (2015), 図 添付 13-A-1.1~7.12 等時応力ひずみ線図.
- 64) 日本高圧力技術協会規格, "高圧容器規格", HPIS C 106:2023, 付属書 D, "3 繰り返し応力-ひずみ曲線".
- 65) 日本機械学会, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2015 年追補) <第 II 編 高速炉規格>", JSME S NC2 (2015), 表 添付 13-I-12~14 許容ひずみ範囲.
- 66) 物質・材料研究機構, 物質材料データベース : 疲労データシート (<https://metallicmaterials.nims.go.jp/>) .
- 67) M. Prager, D.A. Osage, C.H. Panzarella, "Evaluation of Material Strength Data for Use in API Std 530 - 2nd Edition", WRC Bulletin 541 (2015).
- 68) A. Saxena, K.B. Yoon, "Creep Crack Growth: Assessment of Defects in High Temperature Components", WRC Bulletin 483 (2003).
- 69) 動力炉・核燃料開発事業団, "高速炉用構造材料の高温き裂進展特性", PNC SN9410 90-105 (1990).
- 70) 日本材料学会, "金属材料疲労き裂進展抵抗データ集" (1983).
- 71) JIS Z 2242, "金属材料のシャルピー衝撃試験方法" (2023) .
- 72) ASTM E23-24, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials" (2024).

- 73) ASTM A370-24, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products"(2024).
- 74) Barsom J. M. and Rolfe S. T. , "Correlation Between KIC and Charpy V-Notch Test Results in the Transition-Temperature Range" Impact Testing of Metals, ASTM STP 466,(1970), pp.281-302.
- 75) Roberts, R. and Newton, C. (1981) Interpretative Report on Small-scale Test Correlations with KIC-data. Welding Research Council Bulletin 265. Welding Research Council, New York.
- 76) Bruscato R.M., Welding J., 49 (1970) p.148.
- 77) 宮野, 壓力技術, 12-3, 23-29 (1974).
- 78) EDF Energy, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", R6 Revision 4, (2015).
- 79) Si, J., Xuan, F., and Tu, S., "Creep Crack Interaction of High Temperature Structure with Multiple Cracks", Key Engineering Materials, Vol. 324-325, pp. 105-108, (2006).
- 80) Xu, L., Zhao, L., Jing, H., and Han, Y., "Evaluation of Multiple Cracks Interaction Effect Subjected to Biaxial Tension under Creep Regime", International Journal of Mechanical Science, Vol .122, pp. 203-214, (2017).
- 81) 高橋, "複数表面欠陥からのクリープ疲労き裂進展評価", 日本材料学会 学術講演会講演論文集, Vol. 46, pp. 233-234, (1997).
- 82) Lacroix, V., "Assessment and Improvement of Flaw Characterization Rules in Fitness-for-Service Codes Using Extended Finite Element Method", 横浜国立大学学位論文, (2016).
- 83) 安藤, 平田, 飯田, "複数欠陥からの疲労き裂伝ば寿命評価 第 2 報 : 並列配置複数き裂問題", 日本造船学会論文集, Vol. 153, pp. 352-363, (1983).
- 84) 近藤丈, et al. クラッド鋼管の強度設計手法に関する研究 (第 2 報). 壓力技術, 1993, 31.5: 264-269.
- 85) JIS B 8265:2017 壓力容器の構造— 一般事項
- 86) Konosu, S., and Oyamada, K., "Development of Simplified Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessel with Internal Surface Flaw", ASME PVP2007-26437, (2007).
- 87) Konosu, S., and Mukaimachi, N., "Plastic Collapse Assessment Procedure for Vessel with Local Thin Area Simultaneously Subjected to Internal Pressure and External Bending Moment", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 130, 011207, (2008).
- 88) Konosu, S., Kano, M., Mukaimachi, N., Komura, H., and Takada, H., "Plastic Collapse Load for Vessel with External Flaw Simultaneously Subjected to Internal Pressure and External Bending Moment – Experimental and FEA Results", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 131, 021206, (2009).
- 89) 三浦, 小山田, "円筒中の表面欠陥に対する参照応力解の比較", 壓力技術, Vol. 55, pp. 158-166, (2017).

- 90) 三浦, 小山田, “き裂状欠陥に対する FFS 評価のための参照応力解の充足性の検討”, 圧力技術, Vol. 58, pp. 81-92 (2020)
- 91) Newman, J. C. Jr., Raju, I. S., “Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads”, NASA Technical Memorandum 85793, (1984).
- 92) 三浦, 永井, 高橋, “欠陥評価に用いる応力拡大係数解の適用性検討”, 電力中央研究所報告, Q13002, (2014).
- 93) 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).
- 94) Chapuliot, S., “Formulaire de K_I pour les tubes comportant un défaut de surface semi-elliptique longitudinal ou circonferentiel, interne ou externe”, Rapport CEA-R-5900, (2000).
- 95) 白鳥, “影響関数法による応力拡大係数の解析”, 日本機械学会講習会教材, 表面き裂-その解析と評価-, No. 900-2, pp. 1-15, (1990).
- 96) Erdogan, F., Kibler, J.J. “Cylindrical and Spherical Shells with Cracks”, International Journal of Fracture, Vol. 5, pp. 229-237 (1969).
- 97) Milne, I., Ainsworth, R.A., Dowling, A.R., and Stewart, A.T., “Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32, pp. 3-104, (1988).
- 98) Roche, R.L., “Modes of Failure—Primary and Secondary Stresses”, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, pp. 234-239, (1988).
- 99) Iida, K., Asada, Y., Okabayashi, K., and Nagata, T., “Simplified Analysis and Design for Elevated Temperature Components of Monju”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 98, pp. 305-317, (1987).
- 100) Corum, J.M., Greenstreet, W.L., Liu, K.C., Pugh, C.E., and Swindeman, R.W., “Interim Guidelines for Detailed Inelastic Analysis of High-Temperature Reactor System Components”, ORNL-5014, (1974).
- 101) 村上, 大野, “回復可能なクリープ硬化範囲を規定した多軸変動応力クリープ構成式”, 日本機械学会論文集 (A 編) , Vol. 48, pp. 431-439, (1982).

**(一社)日本高圧力技術協会 圧力機器の高温亀裂状欠陥評価方法
原案作成委員会 構成表**

	氏名	所属
(主査)	弥富 政享	(株)IHI
(幹事)	宇野 義明	日揮グローバル(株)
(幹事)	田淵 正明	(国研)物質・材料研究機構
(委員)	伊藤 充明	(株)IHI
	小山田 賢治	高圧ガス保安協会
	亀山 達也	三菱重工業(株)
	周 潤澤	千代田化工建設(株)
	中西 智明	(株)神戸製鋼所
	安富 章忠	日本製鋼所 M&E(株)
(オブザーバー)	小林 英男	東京工業大学名誉教授
	島川 貴司	川崎重工業(株)
	三浦 直樹	(一財)電力中央研究所
	森田 聰	関西電力(株)
(事務局)	田中 夕香子	(一社)日本高圧力技術協会

HPIS Z 103:2026
2026/1/23 Draft

- * この規格についての意見又は質問は、(一社)日本高圧力技術協会にご連絡ください。
- * HPIS, HPI TR 規格票のご注文は、(一社)日本高圧力技術協会へお申込みください。
お申込みは FAX, E-MAIL 等、書面でお願い申し上げます。
- * HPIS, HPI TR 規格票の正誤票が発行された場合は、(一社)日本高圧力技術協会のホームページ (<http://www.hpij.org/>) に掲載致しますので、複写の上ご利用ください。

2026/1/23

HPIS Z 103:2026
圧力機器の高温亀裂状欠陥評価方法

2026年XX月XX日 第1刷発行
編集発行 (一社)日本高圧力技術協会
〒103-0023 東京都中央区日本橋本町4-7-1
三恵日本橋ビル7F
TEL(03)3516-2270
FAX(03)3516-2271
E-MAIL : hpi@hpij.org
<http://www.hpij.org/>