

分置

# 簡易法き裂解析コード CANIS の開発改良

1994年4月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 簡易法き裂解析コードCANISの開発改良

報告者 古橋一郎\*  
実施責任者 若井隆純\*\*

### 要 旨

FBR構造物の破壊力学的評価のため、簡易法き裂解析コード体系CANISの開発改良を行った。同体系はCANIS-G, K, Iからなる。

クリープ疲労き裂進展評価コードCANIS-Gでは以下の改良を行った。

- 1.1 平板および内面き裂付きの円筒に加え、外面き裂付きの円筒も取り扱えるようにした。
- 1.2 円筒の軸曲げモーメント荷重も取り扱えるようにした。
- 1.3 熱過渡荷重等の変位制御型荷重を容易に取り扱えるようにした。
- 1.4 これらを容易にするため、正味断面形状関数と応力拡大係数解のライブラリを拡張整備した。
- 1.5 材料データライブラリを拡張整備した。PNCが取得した7鋼種の弾塑性応力ひずみ関係式、クリープひずみ式、クリープ破断式および疲労破損特性をライブラリ化した。
- 1.6 現在から過去に向かって時間積分し、過去のき裂形状を逆算する逆方向解析機能を追加した。

また新たに破壊力学パラメータ評価コードCANIS-Kとき裂発生確率評価コードCANIS-Iを開発した。CANIS-Kは以下を行う。

- 2.1 入力されたき裂形状に対して、応力拡大係数K、J積分値、クリープJ積分値等の破壊力学パラメータ計算結果の詳細（過渡事象内の時刻歴、最大値、最小値など）を出力する。
- 2.2 き裂進展速度、開口面積および漏洩量を計算出力する。

CANIS-Iは以下を行う。

- 3.1 き裂無し断面の時間依存の疲労損傷値およびクリープ損傷値を計算評価する。
- 3.2 疲労き裂発生に対応した疲労損傷値の統計分布関数およびクリープき裂発生に対応したクリープ損傷値の統計分布関数を参照し、時間依存のき裂発生確率を計算評価する。

これらCANIS-G, K, Iでは入力データフォーマットおよび使用サブルーチンの共通化が図られ、将来のコードの改定拡張が容易かつ統一的に行えるようにした。CANISは以下の領域で有力な計算コードであり、その利用が期待される。

- 4.1 き裂付き構造物の余寿命評価。き裂無し構造物のき裂発生時期の予測。
- 4.2 プラントの破壊力学的信頼性評価および最適構造設計。
- 4.3 プラントの最適運転計画および最適補修計画の立案。
- 4.4 各種破壊力学試験の試験条件および試験片形状の最適設計。
- 4.5 各種破損事故のシミュレーション。き裂発生時期あるいは負荷荷重の逆算推定。

本報告はCANISコードの数学力学モデル、使用マニュアルおよび解析例を記した。

\* (株)CRC総合研究所

\*\* 大洗工学センター、機器構造開発部、構造工学室

April, 1994

## Development and Revisions of Simplified Crack Analysis Code CANIS

Reporter I. Furuhashi\*  
Officer T. Wakai\*\*

## A B S T R A C T

Development and revisions of simplified crack analysis code CANIS-system were done for fracture mechanics evaluation of FBR structures. CANIS-system is composed of CANIS-G, K and -I. Following revisions were done on CANIS-G that evaluate creep fatigue crack growth history.

- 1.1 Outer crack of cylinder can be treated, addition to inner crack.
- 1.2 Axial bending load on cylinder can be treated.
- 1.3 Displacement controlled load such as thermal stresses can be easily treated.
- 1.4 Library of shape functions for net section stress and library of stress intensity factor solutions were expanded to support above subjects.
- 1.5 Material properties such as elasto-plastic stress-strain relation, creep strain relation, creep rupture time and fatigue failure life of 7 kinds of materials those have been gotten in PNC were added on libraries.
- 1.6 Backward analysis can be done to estimate past time crack shapes.

And now CANIS-K that evaluate fracture mechanics parameters and CANIS-I that evaluate crack initiation probability have been developed.

CANIS-K can be used in the following subjects.

- 2.1 Calculate and print details of fracture mechanics parameters such as stress intensity factor  $K$ ,  $J$ -integral and creep  $J$ -integral for given crack shapes, and maximum and minimum values and time histories of those parameters.
- 2.2 Calculate and print crack growth rates, crack opening area and leak rates.

CANIS-I can be used in the following subjects.

- 3.1 Evaluate time dependant fatigue damage and creep damage.
- 3.2 Evaluate time dependant crack initiation probability with reference of statistical crack initiation data that caused by fatigue damage or by creep damage.

Input data format and subroutine programs of these CANIS-G, -K and -I are commonly, so future expansions and revisions will be done easily and commonly.

CANIS is very powerful computational tool in the following regions and can be employed in many practical applications.

- 4.1 Remaining life predictions of cracked structures. Estimation of crack initiation time of non-cracked structures.
- 4.2 Fracture mechanics reliability assessment and best structural designs of plant.
- 4.3 Research of best operating schedules and best maintenance schedules of plant.



4.4 Best designs of test conditions and specimen's geometries in fracture tests.

4.5 Simulations of failure accidents. Estimations of crack initiation time and load conditions.

This report describes mathematical and mechanical models, user's manuals and analysis examples of CANIS code.

---

\* CRC Research Institute, Inc.

\*\* Structural Engineering Section, Systems and Component Division, OEC, PNC

## 目 次

1. 序論 .....	1
2. CANISにおける数学力学モデル .....	4
2.1 解析対象および負荷荷重 .....	4
2.2 簡易弾塑性解析 .....	7
2.3 簡易クリープ解析 .....	12
2.4 き裂断面の正味断面応力 .....	16
2.5 応力拡大係数 .....	17
2.6 疲労き裂進展モデル .....	18
2.7 クリープき裂進展モデル .....	20
2.8 き裂の不安定評価 .....	22
2.9 貫通き裂の開口面積と漏洩率 .....	25
2.10 き裂発生確率の評価 .....	28
3. CANISの使用マニュアル .....	44
3.1 CANISの入力データ .....	44
3.2 ユーザー定義のサブプログラム .....	66
3.3 ジョブコントロールカード .....	71
4. CANISの解析例 .....	72
4.1 解析例 1 .....	73
4.2 解析例 2 .....	76
4.3 解析例 3 .....	79
4.4 解析例 4 .....	82
4.5 解析例 5 .....	85
4.6 解析例 6 .....	88
4.7 解析例 7 .....	94
4.8 解析例 8 .....	99
4.9 解析例 9 .....	107
4.10 解析例10 .....	117
4.11 解析例11 .....	124
4.12 解析例12 .....	129
4.13 解析例13 .....	139
4.14 解析例14 .....	148
4.15 解析例15 .....	169
4.16 解析例16 .....	175
4.17 解析例17 .....	189
4.18 解析例18 .....	191
4.19 解析例19 .....	193

4.20	解析例20	195
4.21	解析例21	200
5.	まとめ	205
6.	参考文献	206
付録1	材料データライブラリ	207
付録2	正味断面形状関数のライブラリ	216
付録3	表面き裂K値解のライブラリ	226
付録4	片側き裂のK値解ライブラリ	270
付録5	貫通き裂K値解のライブラリ	291

## 本報告で使用する記号

- $t$  ; 板厚、または時間  
 $W$  ; 平板の板幅 / 2  
 $R$  ; 円筒の内半径  
 $R_m$  ; 円筒の平均半径  
 $R_o$  ; 円筒の外半径  
 $a$  ; き裂深さ  
 $b$  ; き裂長さ / 2  
 $A$  ; 対象断面の断面積  
 $Z$  ; 断面係数  
 $Z_p$  ; 塑性断面係数  
 $F$  ; 引張荷重  
 $M$  ; 曲げモーメント  
 添字  $M, B, P$  ; 膜、曲げ、ピーク  
 添字  $e, p, ep, c$  ; 弾性、塑性、弾塑性、クリープ  
 添字  $A, B$  ; き裂の深さ方向、長さ方向、あるいは表面き裂の最深部、表面部  
 $\varepsilon$  ; ひずみ  
 $\sigma$  ; 応力  
 ( $\varepsilon, \sigma$ ) ; 応力ひずみ平面上の点  
 ( $\varepsilon_0, \sigma_0$ ) ; 応力ひずみ平面上で応力ひずみ曲線の原点を表す点  
 $A, n, \sigma_0, \varepsilon_0$  ; Ramberg-Osgood型の弾塑性応力ひずみ関係式のパラメータ  
 $k, m, \sigma_p$  ; Ludwik型の弾塑性応力ひずみ関係式のパラメータ  
 $\sigma_E, \sigma_F$  ; 弾性限応力  
 $E$  ; ヤング率  
 $\sigma_Y$  ; 降伏応力 (0.2%耐力)  
 $\sigma_U$  ; 引張強さ  
 $\sigma_F$  ; 流動応力  
 $\sigma_{DW}$  ; 死荷重による応力  
 $\sigma_{pr}$  ; 内圧による応力  
 $\sigma_{LD}$  ; 荷重制御型の膜応力、 $\sigma_{LD} = \sigma_{DW} + \sigma_{pr}$   
 $\sigma_{OP}$  ; 通常運転時の膜応力  
 $P_{OP}$  ; 通常運転時の内圧  
 $S$  ; 応力データ、き裂無し構造物の弾性解析により計算された応力  
 $S_{TE}$  ; 熱膨張反力による応力  
 $S_{SM}, S_{SB}, S_{SP}$  ; 過渡荷重による (膜、曲げ、ピーク) 応力成分  
 $\Delta t, t_c$  ; 過渡荷重または基本荷重サイクルの周期  
 $n$  ; 過渡荷重または基本荷重サイクルのサイクル数  
 $F_{NS}$  ; 正味断面形状関数  
 $D_M, D_B$  ; 膜応力補正パラメータ、曲げ応力補正パラメータ  
 $\sigma_{NS}$  ; 正味断面応力

- $\sigma_R, \epsilon_R$  ; 参照応力、参照ひずみ、  $\sigma_R = \sigma_{NS}$   
 $\sigma_{RC}, \epsilon_{RC}, \dot{\epsilon}_{RC}$  ; クリープ参照応力、参照クリープひずみ、参照クリープひずみ速度  
 $\sigma_{MBP}$  ; (膜+曲げ+ピーク) 応力  
 $\sigma_{MB}$  ; (膜+曲げ) 応力  
 $t_R$  ; クリープ破断時間  
 $\Delta \epsilon$  ; ひずみ範囲  
 $\Delta \sigma$  ; 応力範囲  
 $q_{EP}$  ; 弾塑性パラメータ  
 $q_C$  ; クリープパラメータ  
 $A, n, m$  ; Norton型クリープ式のパラメータ  
 $\dot{\epsilon}_c$  ; クリープひずみ速度  
 $e_s$  ; ひずみ速度  
 $N_F$  ; 疲労破損繰返し数  
 $D_F, D_C$  ; 疲労損傷値、クリープ損傷値  
 $\Delta D_F, \Delta D_C$  ; 1サイクルあたりの疲労損傷値、クリープ損傷値  
 $K$  ; 応力拡大係数  
 $F_M, F_B, F_P$  ; (膜、曲げ、ピーク) 応力に対する無次元応力拡大係数  
 $\Delta K$  ; 応力拡大係数範囲  
 $R, n$  ; Walkerのき裂進展式のパラメータ (下の式を参照)  
 $\Delta K_{EF}$  ; 有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{EF} = K_{max} (1 - R)^n$ ,  $R = K_{min} / K_{max}$   
 $K_{Ic}$  ; 脆性破壊靱性値  
 $f_{ep}$  ; 弾塑性補正係数  
 $J, J_{ep}$  ; (弾性、弾塑性) J積分値  
 $\Delta J, \Delta J_{ep}$  ; (弾性、弾塑性) J積分範囲  
 $J_{Ic}$  ; 平面ひずみ破壊靱性値  
 $(dJ/da)_{max}$  ; き裂進展抵抗値  
 $J_c$  ; クリープJ積分値  
 $\Delta J_c$  ; クリープJ積分値範囲  
 $K_e, K_T$  ; (膜+曲げ) ひずみ集中係数、ピークひずみ集中係数  
 $da/dn, db/dn$  ; 1サイクルあたりのき裂進展量  
 $A, A_{ep}$  ; き裂の(弾性、弾塑性)開口面積  
 $Q$  ; 漏洩率  
 $\Delta P$  ; 圧力差  
 $v$  ; 流速  
 $\gamma$  ; 比重量  
 $g$  ; 重力加速度  
 $\zeta$  ; 圧力損失係数

## 1. 序 論

機器構造物は一般に「応力解析による強度設計」により設計される。負荷荷重による発生応力を許容値（材料強度）以下に制限する手法である。「設計どおりの構造材料を用い、設計どおりに製作された、欠陥の無い理想的な機器構造物に、設計どおりの荷重が設計運転期間中負荷される。」場合は、「機器構造物は設計運転期間中は破損しない。即ち構造健全性が保たれる。」とするものであり、「理想論」の立場に立っている。しかし現実の構造物では溶接欠陥および加工傷など製造施工時の初期欠陥も存在する。これらの初期欠陥を皆無にすることは不可能である。これらの初期欠陥を起点として、運転期間中の負荷荷重により、き裂が発生および進展し、機器の破損をもたらす場合がある。また設計で想定しなかった予想外の荷重が負荷される場合、あるいは材料強度が予想外に低い場合など、予想外の機器破損が生ずる場合がある。

現実に存在する様々な欠陥、予想外の荷重および材料強度などをすべて考慮して設計することは現実的に不可能である。そこで機器の構造健全性を实际的に保証する「現実論」の立場から、「構造設計」、「品質管理」、「欠陥（き裂）の検査」、「欠陥（き裂）の破壊力学評価」を総合的かつ有機的にシステム運用する「構造健全性保証システム」の概念が次第に応用されるようになった。特に航空機、船舶、原子力その他のプラントにおける大型機器構造物では、「破損事故による損害が大であること」および「建設コストが大であり、運転効率改善や寿命延長による利益が大きいこと」が主要因となり、「構造健全性保証システム」を積極的に活用して、「構造健全性を現実的に確保し、同時に経済性を高めること」が追求されるようになった。

先ず構造設計では、欠陥（き裂）が無いことを前提とした「応力基準による強度設計」を行う。品質管理により、材料欠陥、製造欠陥、製造寸法誤差および材料強度などに関して、「一定水準以上の品質」を保証する。設計した機器構造物に対し、ある一定の大きさの欠陥（き裂）の存在を想定し、これを想定欠陥と称する。想定欠陥の形状は、欠陥検査における欠陥検出能力を考慮して、設定される。想定欠陥に対して破壊力学評価を行い、一定期間の構造健全性を保証する。一定期間の構造健全性を保証できない場合は、構造設計の変更を行い、材料、形状および荷重条件の変更を行う。あるいは逆に、破壊力学評価により一定期間の構造健全性を保証できる範囲内で、想定欠陥の形状を適度に設定し、想定欠陥を高い確率（例えば99%）で検出できるような欠陥検出システムを採用することを考える。供用前の欠陥検査により「想定欠陥以上の欠陥が存在しないこと」を保証する。供用中の一定期間の検査間隔毎に該当部位の欠陥検査を行う。供用前および供用中の欠陥検査により、想定欠陥以上の有害な欠陥が検出された場合は、除去補修を行う。想定欠陥以下の無害の欠陥が検出された場合は、次回の欠陥検査まで許容しても良い。無害の欠陥を許容する場合、次回の欠陥検査までの成長を測定し、破壊力学による成長予測値と比較することにより、破壊力学評価手法の精度を高めることに利用できる。ここで検査期間は、全体の運転計画、該当各部位に特有の運転形態、荷重条件、環境および全体に占める重要度など、様々な条件に応じて、各機器および各部位毎に適切に設定すべきである。

システムの総合経済効率は、建設コスト、耐用年数、収入、運転効率、運転コスト、検査コスト、補修コストなどに支配される。構造設計の段階で、「構造健全性保証システム」を計算評価ツールとして積極的に活用し、パラメータ感度評価を行い、構造健全性を確保しつつ、システムの総合経済効率を最適化するように、運転計画および補修計画を立案し、各機器および各部位の構造設計を行うことが考えられる。あるいはシステムの運用段階で、「構造健全性保証システム」を計算評価ツールとして積極的に活用し、各機器および各部位の部分的な設計変更、あるいは運転計画および補修計画の

変更を行い、運転効率改善、耐用年数延長など、総合経済効率を追求することが考えられる。

このような現状を踏まえ、著者らは欠陥（き裂）の破壊力学評価手法の開発および整備を進めている（REF. 1. 1, 1. 2, 1. 3, 1. 4）。破壊力学の評価パラメータは、応力拡大係数（K値）、弾塑性J積分（J値）、クリープJ積分（クリープJ値）、正味断面応力 $\sigma_{net}$ 、き裂先端開口角度、き裂開口面積、き裂進展速度などである。破壊力学の材料特性は、脆性破壊靱性値 $K_{Ic}$ 、平面ひずみ破壊靱性値 $J_{Ic}$ 、弾塑性J積分抵抗特性値 $(dJ/da)_{max}$ 、降伏応力 $\sigma_y$ 、流動応力 $\sigma_f$ 、疲労き裂進展特性およびクリープき裂進展特性などである。航空機、船舶、軽水炉などの機器構造は、クリープ領域以下の温度で使用され、圧力荷重などの機械的荷重が主体であり、基本的に弾性領域の荷重設計である。機械的荷重の繰り返しによる疲労き裂進展および脆性破壊が主要な破壊力学評価対象であり、応力拡大係数を使用する（弾性解析ベースの）破壊力学評価手法が確立され、「構造健全性保証システム」が実用段階に達している。各種のき裂形状および荷重条件に対する応力拡大係数の解（K値解）が多数の文献に公表され、これらをデータベース化し、参照引用することにより、「弾性解析ベースの破壊力学評価手法および解析コード化」が実用化されている。

FBR機器構造では一般に高延性材料であるステンレス鋼が高温クリープ条件下で使用され、また内圧荷重などの機械的荷重が相対的に小さく、熱膨張による配管反力、熱過渡応力など変位制御型の荷重が主体であり、局所的な塑性ひずみおよびクリープひずみを許容する荷重設計である。従って弾塑性クリープ変形を伴うクリープ疲労き裂進展および延性破断が主要な破壊力学評価対象であり、弾塑性J積分、クリープJ積分、正味断面応力および弾塑性き裂開口面積など、弾塑性クリープ状態下の破壊力学パラメータの計算評価が必要とされる。弾塑性クリープ状態下の破壊力学パラメータを計算するには一般に大型計算機と汎用FEMコードが使用され、計算コストが多岐であり、計算効率も非常に悪い。例えば、特定の荷重条件下での半楕円状表面き裂のクリープ疲労き裂進展を評価する場合、き裂深さに関して数点、き裂のアスペクト比に関して数点の、合計して数10ケース程度の3次元き裂付き構造物のFEM弾塑性クリープ解析、およびポスト処理による破壊力学パラメータ算出が必要となり、その計算費用および労力は多岐である。さらに、この高価な計算結果が、荷重条件、基本形状（半径、板厚）および材料特性（弾塑性応力ひずみ関係、クリープひずみ式）などが変わった別のケースに対しては、もはや適用できないという欠点がある。すなわち計算結果の汎用性に乏しく、計算効率が非常に悪い。FBR機器構造物の「構造健全性保証システム」を、経済性、計算効率および汎用性を備えた「実用的なシステム」とするための主要な課題は「弾塑性クリープ状態下の破壊力学評価を効率良く行う計算体系を確立すること」であると考えられる。

以上の認識に基づき、著者らは「簡易法による、弾塑性クリープ状態下の、き裂評価手法の開発および解析コード化」を進めている。まず最初に、簡易法によるクリープ疲労き裂進展評価法の検討と数値実験を行い、原型版コードを作成し、各種破壊力学試験のシミュレーションおよびFEM解析結果との比較を行い、良好な結果を得た（REF. 1. 1）。原型版を改良しCANIS-G（Crack Analysis by Numerical Integral Scheme - Growth of crack）コードを開発した。CANIS-Gを各種の破壊力学試験のシミュレーションに供し、使用経験を積むと同時に、コードの改良整備を行っている（REF. 1. 2）。また材料データおよび初期き裂形状の統計的な分布を考慮し、モンテカルロ法を用いて、多数のサンプルデータを発生させ、個々のサンプルに対してクリープ疲労き裂進展計算および破損評価を行い、全サンプルの破損結果を集計して、対象部位の時間依存の破損確率を計算評価する、確率的破壊力学解析コードCANIS-P（- Probabilistic fracture mechanics）を開発し、コードの使用経験を積んでいる（REF. 1. 3, 1. 4）。

また新たにCANIS-KコードとCANIS-Iコードを開発した。CANIS-K ( - K and other fracture mechanics parameters ) は、き裂進展シミュレーション機能をCANIS-Gから取り除いて、K、J、クリープJ、開口面積、漏洩量、き裂進展速度などの計算評価結果を詳細出力するものであり、FEM解析あるいは破壊力学試験の細部項目について、簡易評価法と比較検討する目的で開発された。CANIS-I ( - Initiation of crack ) は、き裂無しの断面の時間依存の疲労損傷およびクリープ損傷を計算評価し、疲労き裂発生およびクリープき裂発生の統計データを参照し、時間依存のき裂発生確率を計算評価するものである。CANIS-G, K, Iでは入力データ仕様および使用サブルーチンの共通化が図られ、将来の改良拡張が統一的に行えるようにした。

本報告の内容は、CANIS-G, K, Iの数学力学モデル、使用マニュアル、解析例から成る。CANIS-Gは、開発当初からの多数の使用実績を踏まえて、多くの改良整備が行われた。最新の内容を本報告に記載し、ユーザーの便とするものである。

CANIS-Pの改良、および入力データと使用サブルーチンの共通仕様化については、次報で報告予定である。なおFEMコードFINASによる弾塑性クリープ解析結果をポスト処理して、K、J、クリープJなどを計算するCANIS-J ( - J calculation post processor ) は、本報告 ( 簡易法によるき裂解析 ) とは別系統であり、本報告では取り扱わない。



## 2. C A N I Sにおける数学力学モデル

### 2.1 解析対象および負荷荷重

#### 2.1.1 解析対象

対象構造は平板および円筒であり、対象構造に各種の荷重が負荷されるものとする。対象構造の対象断面に垂直に作用する応力により、各種の荷重を記述する。円筒については周方向断面と軸方向断面を取り扱うことができる。C A N I Sの解析対象を図2.1 に示す。

#### 2.1.2 負荷荷重

対象構造に負荷される荷重は、便宜的に原子力高温プラントの一般的な運転形態を想定し、死荷重、運転内圧、熱膨張反力および過渡荷重の記述表現を用いる。原則的には、対象断面に垂直に作用する応力を発生させるいかなる種類の荷重をも取り扱うことができる。解析対象に応じて、例えば次のように、自由に使い分けることができる。

プラント（本報告の記述）	試験片	機器一般設計	その他一般
死荷重による応力	荷重制御平均応力	長期一次応力	基準膜応力 1
運転内圧による応力			
熱膨張反力による応力	変位制御平均応力	長期二次応力	基準膜応力 2
過渡荷重による応力	変動応力	短期応力	過渡変動応力

#### 2.1.3 応力による荷重の表現

C A N I Sでは膜、曲げおよび放物線形ピーク（以下単にピークと記す）に分類された応力を用いて、荷重を表現する（図2.2 参照）。C A N I Sでは以下の応力を取り扱う。

- $\sigma_{DW}$  : 死荷重による荷重制御型膜応力。
- $\sigma_{Pr}$  : 運転内圧荷重による荷重制御型膜応力。
- $S_{TE}$  : 熱膨張反力荷重による膜応力。
- $S_{SM}$  : 過渡荷重による膜応力成分。
- $S_{SB}$  : 過渡荷重による曲げ応力成分。
- $S_{SP}$  : 過渡荷重によるピーク応力成分。

これら各種の応力が重畳して対象断面に繰り返し負荷されるものとする。C A N I Sで取り扱うこれらの応力は、き裂無しの対象構造物に弾性解析または弾塑性解析を適用して求められたものとし、対象断面に垂直に作用するものとする。ここで応力記号 $\sigma$ は基本的に荷重制御型とし、弾性解析による計算値と弾塑性解析による計算値が等しいものとする。応力記号 $S$ は変位制御型を含めた広範の荷重の入力応力データとして使用し、C A N I Sでは以下の2種類の取扱いができる。

- ・弾性解析による応力データ（標準デフォルト、 $KLOAD=0$ ）

入力応力データ $S$ はき裂無しの対象構造物に弾性解析を適用して計算されたものである。弾塑性応力ひずみ関係式が仮定された場合( $KEPSS > 0$ )、2.2 節の簡易弾塑性解析により弾塑性荷重に等価な応力 $\sigma$ と弾塑性ひずみ $\varepsilon$ が計算評価され、コード内で使用される。

・弾塑性解析による応力データ ( KLOAD > 0 )

入力応力データ S はき裂無しの対象構造物に弾塑性解析を適用して計算されたものである。入力応力データ S がそのまま使用される。弾塑性応力ひずみ関係式が仮定された場合 ( KBPSS > 0 )、弾塑性ひずみが  $\epsilon$  が計算評価され、S と共にコード内で使用される。

内面側のき裂または内面からのき裂発生を取り扱う場合は、曲げ応力の符号は内面側が引張応力の場合を正とする。外面側のき裂または外面からのき裂発生を取り扱う場合は、曲げ応力の符号は外面側が引張応力となる場合を正とする。

円筒の周方向断面を対象とする場合、厳密な意味での膜応力は軸方向引張荷重に対応し、引張荷重を F として次式で与えられる。

$$\sigma = F / A \quad , \quad A \text{ (断面積)} = \pi (R_o^2 - R^2) \quad (2.1)$$

CANIS では円筒ビームの軸曲げ荷重に対応する最大表皮応力を膜応力データとして取り扱うことができる。最大表皮応力は軸曲げモーメントを M として次式で与えられる。

$$\sigma = M / Z \quad , \quad Z \text{ (軸曲げの断面係数)} = \pi (R_o^4 - R^4) / (4 R_o) \quad (2.2)$$

薄肉円筒でき裂寸法が相対的に小さく、き裂が最大応力側に有る場合は膜応力と見なしても物理的に問題がないが、そのような場合は稀である。CANIS では応力拡大係数解 (K 値解) と正味断面形状関数のライブラリを、軸方向引張に対するものと軸曲げに対するものをそれぞれ用意し、それらを使い分ける事で対応する。即ち膜応力データが、軸方向引張による (2.1) 式であるか、または軸曲げによる (2.2) 式であるか、解析条件に応じて選択できる。

#### 2.1.4 基本荷重

CANIS では死荷重、内圧、熱膨張反力を基本荷重とする。死荷重応力  $\sigma_{DW}$  は荷重制御型とし常時負荷されるものとする。内圧応力  $\sigma_{Pr}$  は荷重制御型とし運転停止状態を除いて運転中は常時負荷されるものとする。運転内圧を  $P_{OP}$  として、CANIS では次の近似式により  $\sigma_{Pr}$  を与える。

$$\text{周方向断面 (軸方向応力)} \quad \sigma_{Pr} = P_{OP} R^2 / (2 R_m t) \quad (2.3)$$

$$\text{軸方向断面 (周方向応力)} \quad \sigma_{Pr} = P_{OP} R_m / t \quad (2.4)$$

軸方向断面が対象の場合、内圧による周方向応力は厳密には次式で与えられる。

$$\sigma(r) = P_{OP} R^2 (1 + R_o^2 / r^2) / (R_o^2 - R^2) \quad (2.5)$$

CANIS ではこれを (2.4) 式の一定値で近似して与えている。誤差が無視出来ない場合は (2.5) 式を放物線近似し、膜、曲げ、ピーク応力成分の和で表し、(2.4) 式との差を過渡荷重応力に上乗せして入力する。また内面き裂の場合はき裂面に内圧が作用するが、重ね合わせの原理によりき裂面の圧力荷重はき裂無し断面の応力と等価であるから、(2.3) 式に  $P_{OP}$  を加えたものを軸方向応力、(2.4) 式あるいは (2.5) 式に  $P_{OP}$  を加えたものを周方向応力と見なして良い。従ってき裂面の内圧作用を考慮する場合は、応力データ (死荷重応力、熱膨張応力または過渡荷重応力のいずれか) に  $P_{OP}$  を上乗せして入力する。

熱膨張応力  $S_{TE}$  は運転開始時 (低温 → 高温) に負荷され、運転停止時 (高温 → 低温) に除荷されるものとする。負荷時点の弾塑性特性は弾塑性パラメータ  $q_{EP, TE}$  を用いて考慮する (2.2 節参照)。  $q_{EP, TE} = 1$  の場合は完全な変位制御型となり、  $q_{EP, TE} = \infty$  の場合は完全な荷重制御型となる。

### 2.1.5 過渡荷重（2極値時点の応力）

原子力プラントでは運転開始および運転停止に伴う過渡事象、地震および地震時の緊急自動停止に伴う過渡事象、圧力変動、流力振動、出力変化に伴う熱過渡、温度ゆらぎ、風圧、プラント構成機器（圧力弁、サーモスタット、流量調整弁、各種コントローラーなど）の故障、運転者の誤操作など、様々な過渡事象が想定され、これらの事象に対応した過渡荷重が対象断面に負荷される。

CANISではこれらの過渡荷重を2種類の方法で取り扱う事ができる。第一の方法では、過渡事象で発生する応力変動範囲を2つの極値時点の応力値により定義する。各過渡荷重に対し、平均発生周期、極値時点1の応力、極値時点2の応力、弾塑性パラメータおよびクリープパラメータを定義する。過渡荷重の総数を $N_{LOAD}$ として $j = 1, N_{LOAD}$ に対して以下を定義する。

- $\Delta t_j$  : 過渡荷重  $j$  の平均発生周期
- $q_{EP, j}$  : 過渡荷重  $j$  の弾塑性パラメータ
- $q_{C, j}$  : 過渡荷重  $j$  のクリープパラメータ
- $S_{SM(k, j)}$  : 過渡荷重  $j$  の極値時点  $k$  の膜応力成分 ( $k = 1, 2$ )
- $S_{SB(k, j)}$  : 過渡荷重  $j$  の極値時点  $k$  の曲げ応力成分 ( $k = 1, 2$ )
- $S_{SP(k, j)}$  : 過渡荷重  $j$  の極値時点  $k$  のピーク応力成分 ( $k = 1, 2$ )

### 2.1.6 過渡荷重（基本サイクル内の応力時刻歴）

第2の方法は様々な過渡荷重をすべて含めて、基本サイクルの応力時刻歴を忠実に与える。同一の応力時刻歴の基本サイクルが繰り返されるものとする。即ち基本サイクルの周期、弾塑性パラメータおよびクリープパラメータを

- $\Delta t$  : 基本サイクルの周期
- $q_{EP}$  : 基本サイクルの弾塑性パラメータ
- $q_C$  : 基本サイクルのクリープパラメータ

とし、基本サイクルのステップ総数を $N_{STEP}$ として $k = 1, N_{STEP}$ に対して以下を定義する。

- $S_{SM(k)}$  : 基本サイクルのステップ  $k$  の膜応力成分
- $S_{SB(k)}$  : 基本サイクルのステップ  $k$  の曲げ応力成分
- $S_{SP(k)}$  : 基本サイクルのステップ  $k$  のピーク応力成分

## 2.2 簡易弾塑性解析

弾塑性応力ひずみ曲線を次式で表す。

$$\sigma = f(\varepsilon), \quad \varepsilon = f^{-1}(\sigma) \quad (2.6)$$

ここに $\sigma$ は応力、 $\varepsilon$ は弾塑性ひずみである。関数 $f(\varepsilon)$ は $\varepsilon \geq 0$ では上に凸な単調増加関数とし、その初期勾配 $f'(0)$ はヤング率 $E$ に等しい。また関数 $f$ は原点 $(0, 0)$ に関し対称とする。即ち次式を満たすものとする。

$$f'(\varepsilon) > 0 \text{ and } f''(\varepsilon) \leq 0 \text{ for } \varepsilon \geq 0 \quad (2.7)$$

$$f'(0) = E, \quad f(-\varepsilon) = -f(\varepsilon) \quad (2.8)$$

弾塑性ひずみ $\varepsilon$ は次式のように弾性ひずみ $\varepsilon^e$ と塑性ひずみ $\varepsilon^p$ の和で表される。

$$\varepsilon = f^{-1}(\sigma) = \varepsilon^e + \varepsilon^p, \quad \varepsilon^e = \sigma / E, \quad \varepsilon^p = \varepsilon - \varepsilon^e \quad (2.9)$$

また弾性限応力を $\sigma_E$ とし、弾性限応力以下では塑性ひずみを0とする。

$$\varepsilon = \varepsilon^e = \sigma / E \text{ and } \varepsilon^p = 0 \text{ for } -\sigma_E \leq \sigma \leq \sigma_E \quad (2.10)$$

CANISでは2.2.1小節以降の簡易弾塑性解析により、弾性解析をベースとした入力応力データを弾塑性応力に変換する。材料の弾塑性応力ひずみ関係は(1) KEPSS=1、Ludwik型の単調負荷応力ひずみ関係式、(2) KEPSS=2、Ludwik型の繰り返し負荷応力ひずみ関係式、(3) KEPSS=3、Ramberg-Osgood型の応力ひずみ関係式、(4) KEPSS=4、多直線応力ひずみ関係が使用できる。

(1)と(2)に関してはPNCが取得した7鋼種の材料データがライブラリ化されコードに組み込まれている。詳細は付録1を参照されたい。

## 2.2.1 弾塑性パラメータ

弾性解析によりき裂無しの断面に一様な応力 $\sigma_1$ を生ずるような荷重が負荷された場合を考える。弾性解析における応力ひずみ空間上の荷重点は図2.3の点1 $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ で与えられ、負荷荷重が荷重制御型であっても変位制御型であっても同一点となる。ひずみは次式で与えられる。

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E \quad (2.11)$$

負荷荷重が完全な荷重制御型の場合、弾塑性解析における応力ひずみ空間上の荷重点は図2.3の弾塑性応力ひずみ曲線上の点2 $(\varepsilon_2, \sigma_2)$ で与えられ、弾塑性ひずみおよび応力は次式で与えられる。

$$\varepsilon_2 = f^{-1}(\sigma_1), \quad \sigma_2 = \sigma_1 \quad (2.12)$$

負荷荷重が完全な変位制御型の場合、弾塑性解析における応力ひずみ空間上の荷重点は図2.3の弾塑性応力ひずみ曲線上の点3 $(\varepsilon_3, \sigma_3)$ で与えられ、弾塑性ひずみおよび応力は次式で与えられる。

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_1, \quad \sigma_3 = f(\varepsilon_1) \quad (2.13)$$

荷重制御型と変位制御型の間隔的な荷重の場合、弾塑性解析における応力ひずみ空間上の荷重点は図2.3の弾塑性応力ひずみ曲線上の点2と点3の間になり、例えば点4 $(\varepsilon_4, \sigma_4)$ で与えられる。とする。弾塑性パラメータ $q_{EP}$ を導入し、点1と点4の関係を次式で与える。

$$(q_{EP}-1)/E = (\varepsilon_4 - \varepsilon_1) / (\sigma_1 - \sigma_4) \quad (2.14)$$

$q_{EP}$ が1の場合は点4は点3に一致し完全な変位制御型となり、 $q_{EP}$ が $\infty$ の場合は点4は点2に一致し完全な荷重制御型となる。弾塑性パラメータ $q_{EP}$ を用いる簡易法により、荷重制御型から変位制御型までを含む広範囲の荷重を取り扱う事ができる。

## 2.2.2 膜応力の重ね合わせ

膜応力が負荷された状態に、新たに膜応力が重ね合わせ負荷される場合を考える。移動硬化則を仮定し、以下の記号を用いることにする。

$(\varepsilon_0, \sigma_0)$  ; 応力ひずみ曲線の原点。初期値は  $(0, 0)$  である。応力ひずみ曲線を次式で与える。

$$\sigma - \sigma_0 = f(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (2.15)$$

移動硬化則では降伏状態から弾性状態に復帰する際に、直前の応力ひずみ状態が新しい応力ひずみ曲線の弾性限となるように、応力ひずみ曲線が平行移動する。

$(\varepsilon_1, \sigma_1)$  ; 応力ひずみ空間上での現在の膜応力状態を表す点。応力ひずみ曲線上にある。

$$\sigma_1 - \sigma_0 = f(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \quad (2.16)$$

$S_M$  ; 新たに負荷される膜応力。弾性解析により算出された値とする。

$q_{EP}$  ;  $S_M$  負荷時の弾塑性パラメータ。

$(\varepsilon_M, \sigma_M)$  ; 応力ひずみ空間上での  $S_M$  重畳負荷後の膜応力状態を表す点。

(1) 次のケースでは応力ひずみ曲線は移動しない。

A. 初期弾性 --  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が弾性状態の場合

$$-\sigma_E \leq \sigma_1 - \sigma_0 \leq \sigma_E \quad (2.17)$$

B. 引張降伏継続 --  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が引張降伏状態で、 $S_M \geq 0$  の場合 (図2.4 参照)

$$\sigma_1 - \sigma_0 > \sigma_E \text{ and } S_M \geq 0 \quad (2.18)$$

C. 圧縮降伏継続 --  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が圧縮降伏状態で、 $S_M \leq 0$  の場合

$$\sigma_1 - \sigma_0 < -\sigma_E \text{ and } S_M \leq 0 \quad (2.19)$$

(2) 次のケースでは応力反転による弾性復帰が起こり、応力ひずみ曲線が平行移動する。

D.  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が引張降伏状態で、 $S_M < 0$  の場合 (図2.5 参照)

$$\sigma_1 - \sigma_0(\text{old}) > \sigma_E \text{ and } S_M < 0 \quad (2.20)$$

現在点  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が新しい応力ひずみ曲線の引張側の弾性限となる。

$$\left( \begin{array}{l} \sigma_1 - \sigma_0(\text{new}) = \sigma_E \quad \rightarrow \quad \sigma_0(\text{new}) = \sigma_1 - \sigma_E \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_0(\text{new}) = \sigma_E / E \quad \rightarrow \quad \varepsilon_0(\text{new}) = \varepsilon_1 - \sigma_E / E \end{array} \right) \quad (2.21)$$

E.  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が圧縮降伏状態で、 $S_M > 0$  の場合 (図2.6 参照)

$$\sigma_1 - \sigma_0(\text{old}) < -\sigma_E \text{ and } S_M > 0 \quad (2.22)$$

現在点  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  が新しい応力ひずみ曲線の圧縮側の弾性限となる。

$$\left( \begin{array}{l} \sigma_1 - \sigma_0(\text{new}) = -\sigma_E \quad \rightarrow \quad \sigma_0(\text{new}) = \sigma_1 + \sigma_E \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_0(\text{new}) = -\sigma_E / E \quad \rightarrow \quad \varepsilon_0(\text{new}) = \varepsilon_1 + \sigma_E / E \end{array} \right) \quad (2.23)$$

(3) 現在点  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  から勾配  $E$  の直線延長上に点2  $(\varepsilon_2, \sigma_2)$  をとる。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + S_M / E, \quad \sigma_2 = \sigma_1 + S_M \quad (2.24)$$

(4) 点2 から勾配  $-E / (q_{EP} - 1)$  の直線を引き、新しい応力ひずみ曲線との交点  $M(\varepsilon_M, \sigma_M)$  を求める (図2.4、2.5、2.6 参照)。即ち次の連立方程式の解を求める。

$$\left( \begin{array}{l} (q_{EP} - 1) / E = (\varepsilon_M - \varepsilon_2) / (\sigma_2 - \sigma_M) \\ \sigma_M - \sigma_0(\text{new}) = f\{\varepsilon_M - \varepsilon_0(\text{new})\} \end{array} \right) \quad (2.25)$$

## 2.2.3 曲げ応力の重ね合わせ

膜応力が負荷された状態で、曲げ応力  $S_B$  が重畳負荷される場合を考える。 $S_B$  は弾性解析により算出された値とする。 $S_B > 0$  の場合のみ考えることにする。 $S_B < 0$  の場合は  $-S_B > 0$  に対し算出された結果の逆符号をとるものとする。本2.2.3節および次の2.2.4節では計算上、応力ひずみ曲線の原点を  $(0, 0)$  にリセットした相対座標系を使用する。相対座標系における膜応力点を  $(\varepsilon_M, \sigma_M)$  とする。 $\sigma_M = f(\varepsilon_M)$  である。

(1) 対象表面 ( $+S_B$  側) の弾塑性状態  $(\varepsilon_{M+B}, \sigma_{M+B})$  を求める (図2.7 参照)。  
膜応力点  $(\varepsilon_M, \sigma_M)$  から勾配  $E$  の直線延長上に点  $P(\varepsilon_M + S_B/E, \sigma_M + S_B)$  をとり、点  $P$  から勾配  $-E/(q_{EP}-1)$  の直線を引き、応力ひずみ曲線との交点  $(\varepsilon_{M+B}, \sigma_{M+B})$  を求める。  
即ち次の連立方程式の解をもとめる。

$$\begin{aligned} (q_{EP}-1)/E &= (\varepsilon_{M+B} - \varepsilon_M - S_B/E) / (\sigma_M + S_B - \sigma_{M+B}), \\ \sigma_{M+B} &= f(\varepsilon_{M+B}) \end{aligned} \quad (2.26)$$

(2) 対象表面側の板厚半分の弾塑性モーメント (板厚が2の場合) を次式で簡易評価する。

$$M_{+B} = \int_0^1 [f\{\varepsilon_M + (\varepsilon_{M+B} - \varepsilon_M)x\} - \sigma_M] x dx \quad (2.27)$$

(3) 反対表面 ( $-S_B$  側) の弾塑性状態  $(\varepsilon_{M-B}, \sigma_{M-B})$  を求める (図2.7 参照)。  
膜応力点  $(\varepsilon_M, \sigma_M)$  から勾配  $E$  の直線延長上に点  $Q(\varepsilon_M - S_B/E, \sigma_M - S_B)$  をとり、点  $Q$  から勾配  $-E/(q_{EP}-1)$  の直線を引き、応力ひずみ曲線との交点  $(\varepsilon_{M-B}, \sigma_{M-B})$  を求める。  
即ち次の連立方程式の解をもとめる。

$$\begin{aligned} (q_{EP}-1)/E &= (\varepsilon_{M-B} - \varepsilon_M + S_B/E) / (\sigma_M - S_B - \sigma_{M-B}), \\ \sigma_{M-B} &= f(\varepsilon_{M-B}) \end{aligned} \quad (2.28)$$

(4) 反対表面側の板厚半分の弾塑性モーメント (板厚が2の場合) を次式で簡易評価する。

$$M_{-B} = \int_{-1}^0 [f\{\varepsilon_M + (\varepsilon_M - \varepsilon_{M-B})x\} - \sigma_M] x dx \quad (2.29)$$

(5) 弾塑性モーメント  $M_{EP}$  (板厚が2の場合) を次式で簡易評価する。

$$M_{EP} = \text{Min.} [(M_{+B} + M_{-B}), M_{MX}] \quad (2.30)$$

ここに  $M_{MX}$  は弾性解析から求まるモーメント (板厚が2の場合) であり、次式で与えられる。

$$M_{MX} = \int_{-1}^1 (S_B x) x dx = (2/3) S_B \quad (2.31)$$

(6) 弾塑性モーメント  $M_{EP}$  に等価な曲げ応力  $\sigma_B$  を次式で簡易評価する。

$$\sigma_B = (3/2) M_{EP} \quad (2.32)$$

(7) 弾塑性曲げひずみ  $\varepsilon_B$  を次式で簡易評価する。

$$\varepsilon_B = (\varepsilon_{M+B} - \varepsilon_{M-P}) / 2 \quad (2.33)$$

## 2.2.4 弾塑性ピーク応力

ピーク応力に関して、前2.2.3節と同様に板厚内の弾塑性応力分布を簡易評価し、弾塑性応力分布の非線形成分を弾塑性ピーク応力とした場合、以下の不具合が生ずる。

(1) CANISでは入力応力データは放物線応力分布を仮定している。従って入力ピーク応力は、両表面で等しい値を有し平均値が0となる放物線応力分布である。これを弾塑性応力分布に変換すると、例えば図2.8(a)に示すように、応力分布が放物線とは大きく異なったものとなり、非線形成分は両表面で大きく異なり、場合によっては符号の反転が生ずる。

CANISでは以下の仮定、解釈を採用する。

(2) ピーク応力は本来、局所的な形状不連続、板厚内の局所的な残留ひずみ、板厚内の非線形温度分布、等に起因する板厚内ひずみ分布の非線形成分を応力換算したものと解釈する。

(3) 引張力に対応する膜ひずみ、曲げモーメントに対応する曲げひずみに関しては、板断面の引張コンプライアンスと曲げコンプライアンスの隣接構造物との比に応じて、弾塑性ひずみ拡大が生ずる。コンプライアンスの比を弾塑性パラメータ  $q_{EP}$  で考慮する。

(4) 平均値（引張力） $\bar{D}$  および曲げモーメント  $\bar{M}$  のピーク応力は隣接構造物との力学的平衡を考慮する必要が無い。従って膜ひずみおよび曲げひずみの弾塑性拡大と、ピークひずみの弾塑性拡大は別個の取扱いをすべきである。

(5) 弾性解析ではひずみ分布と応力分布が比例し、表面ピークひずみ  $\varepsilon_P$  は次式で与えられる。

$$\varepsilon_P = S_P / E \quad (2.34)$$

(6) 弾性解析で表面ピーク応力（ひずみ）が正の場合、表面で引張ひずみが重なっていると解釈する。弾塑性応力分布が図2.8(a)のようになり非線形応力成分が表面で負になる場合であっても、弾塑性ひずみ分布は図2.8(b)のようになり非線形ひずみ成分は表面で正であり、表面に引張ひずみが重なっている分布形態は弾性解析と同じである。

(7) 弾塑性ピークひずみは(2.34)式の弾性ピークひずみに等しいとする。これは弾塑性ひずみ拡大が生じないとするに等しい。但し、クリープ疲労損傷評価の際には別途弾塑性ピークひずみ集中係数を乗じて、ひずみ拡大を考慮する。

(8) 弾塑性ピークひずみの表面値を応力換算したものを弾塑性ピーク応力と解釈する。応力換算方法に以下の4種類を設定し、解析対象および解析目的にあわせて選択使用する。

$$KPEAK = 0 \quad \sigma_P = E \varepsilon_P = S_P \quad (2.35)$$

$$KPEAK = 1 \quad \sigma_P = f'(\varepsilon_M) \varepsilon_P \quad (2.36)$$

$$KPEAK = 2 \quad \sigma_P = f'(\varepsilon_{M+B}) \varepsilon_P \quad (2.37)$$

$$KPEAK = 3 \quad \sigma_P = \{f'(\varepsilon_{M+H}) + f'(\varepsilon_{M+B})\} \varepsilon_P / 2 \quad (2.38)$$

き裂付き構造の破壊力学パラメータ評価およびき裂進展計算には  $KPEAK = 0$  が適切である。

き裂無し構造のクリープ疲労損傷およびき裂発生確率評価には  $KPEAK = 1, 2, 3$  が適切であり、

$KPEAK = 0$  は表面応力およびクリープ損傷を過大評価する可能性がある。

## 2.2.5 基本荷重の弾塑性ひずみと応力

基本荷重の弾塑性ひずみと応力を以下のように与える。

$(\epsilon_{DW}, \sigma_{DW})$  ; 死荷重膜応力状態。  $\epsilon_{DW} = f^{-1}(\sigma_{DW})$

$(\epsilon_{LD}, \sigma_{LD})$  ; 荷重制御膜応力状態。  $\sigma_{LD} = \sigma_{DW} + \sigma_{Pr}$  ,  $\epsilon_{LD} = f^{-1}(\sigma_{LD})$

$(\epsilon_{OP}, \sigma_{OP})$  ; 通常運転膜応力状態。  $(\epsilon_{LD}, \sigma_{LD})$  に  $S_{TE}$  が重畳した状態。

弾塑性パラメータ  $q_{EP, TE}$  を用い、2.2.2 小節の方法で求める。

これらは弾塑性応力ひずみ曲線上にある。

## 2.2.6 過渡荷重（2極値時点の応力）の弾塑性ひずみと応力

過渡荷重（2極値時点の応力）の弾塑性ひずみと応力を以下のように与える。

$(\epsilon_{M(k, j)}, \sigma_{M(k, j)})$  ; 過渡荷重  $j$  の極値時点  $k$  の膜応力状態。

$(\epsilon_{OP}, \sigma_{OP})$  に  $S_{SM(k, j)}$  が重畳した状態。弾塑性応力ひずみ曲線上にある。

弾塑性パラメータ  $q_{EP, j}$  を用い、2.2.2 小節の方法で求める。

$(\epsilon_{B(k, j)}, \sigma_{B(k, j)})$  ; 過渡荷重  $j$  の極値時点  $k$  の曲げひずみと曲げ応力。

$(\epsilon_{M(k, j)}, \sigma_{M(k, j)})$  に  $S_{SB(k, j)}$  が重畳した状態での曲げひずみと等価曲げ応力。

弾塑性パラメータ  $q_{EP, j}$  を用い、2.2.3 小節の方法で求める。

$(\epsilon_{P(k, j)}, \sigma_{P(k, j)})$  ; 過渡荷重  $j$  の極値時点  $k$  のピークひずみとピーク応力。

$(\epsilon_{M(k, j)}, \sigma_{M(k, j)})$  に  $S_{SB(k, j)}$  と  $S_{SP(k, j)}$  がセットで重畳した状態での

ピークひずみと等価ピーク応力。2.2.4 小節の方法で求める。

CANISでは過渡荷重データを以下のように選択定義できる。

- $LBASE = 0$  (デフォルト)  $S_{SM(k, j)}$  は通常運転応力（弾性解析で  $\sigma_{LD} + S_{TE}$ ）を含まない。
- $LBASE \geq 1$  入力  $S_{SM(k, j)}$  は通常運転応力を含む合計膜応力とする。過渡荷重のみによる正味の膜応力を次式で求め、以上の簡易弾塑性解析を適用する。

$$\text{正味の } S_{SM(k, j)} = \text{合計値入力 } S_{SM(k, j)} - (\sigma_{LD} + S_{TE}) \quad (2.39)$$

- $LBASE = 2$  特に過渡荷重1の極値時点2は運転停止状態とし、死荷重状態  $(\epsilon_{DW}, \sigma_{DW})$  にリセットする。

## 2.2.7 過渡荷重（基本サイクル内の応力時間変化）の弾塑性ひずみと応力

過渡荷重（基本サイクル内の応力時間変化）の弾塑性ひずみと応力を以下のように与える。

$(\epsilon_{M(k)}, \sigma_{M(k)})$  ; 基本サイクルのステップ  $k$  の膜応力状態。

$(\epsilon_{OP}, \sigma_{OP})$  に  $S_{SM(k)}$  が重畳した状態。弾塑性応力ひずみ曲線上にある。

弾塑性パラメータ  $q_{EP}$  を用い、2.2.2 小節の方法で求める。

$(\epsilon_{B(k)}, \sigma_{B(k)})$  ; 基本サイクルのステップ  $k$  の曲げひずみと曲げ応力。

$(\epsilon_{M(k)}, \sigma_{M(k)})$  に  $S_{SB(k)}$  が重畳した状態での曲げひずみと等価曲げ応力。

弾塑性パラメータ  $q_{EP}$  を用い、2.2.3 小節の方法で求める。

$(\epsilon_{P(k)}, \sigma_{P(k)})$  ; 基本サイクルのステップ  $k$  のピークひずみとピーク応力。

$(\epsilon_{M(k)}, \sigma_{M(k)})$  に  $S_{SB(k)}$  と  $S_{SP(k)}$  がセットで重畳した状態での

ピークひずみと等価ピーク応力。2.2.4 小節の方法で求める。



CANISでは過渡荷重データを以下のように選択定義できる。

- LBASE = 0 (デフォルト)  $S_{SM(k)}$  は通常運転応力 (弾性解析で  $\sigma_{LD} + S_{TE}$ ) を含まない。
- LBASE  $\geq 1$  入力  $S_{SM(k)}$  は通常運転応力を含む合計膜応力とする。過渡荷重のみによる正味の膜応力を次式で求め、以上の簡易弾塑性解析を適用する。

$$\text{正味の } S_{SM(k)} = \text{合計値入力 } S_{SM(k)} - (\sigma_{LD} + S_{TE}) \quad (2.40)$$

## 2.2.8 き裂無し断面の疲労損傷評価

簡易弾塑性解析の結果を用いて、過渡荷重  $j$  の 2 極値間 (あるいは過渡荷重の基本サイクル内) の弾塑性ひずみ範囲を求める。

$\Delta \varepsilon_N$  ; 公称ひずみ範囲、膜+曲げひずみ ( $\varepsilon_M + \varepsilon_B$ ) の変動範囲とする。

$\Delta \varepsilon_P$  ; ピークひずみ範囲、ピークひずみ ( $\varepsilon_P$ ) の変動範囲とする。

次式により全ひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_i$  を評価する。

$$\Delta \varepsilon_i = K_e \Delta \varepsilon_N + K_T \Delta \varepsilon_P \quad (2.41)$$

ここで  $K_e$  は膜+曲げひずみに対するひずみ集中係数であり、 $K_T$  は表面のピークひずみ成分に対するひずみ集中係数である。一般的には形状不連続等によるひずみの局所的な拡大を考慮するための係数である。本報告の  $K_e$  および  $K_T$  は、多軸ひずみ状態を等価単軸ひずみに換算するための係数をも含めた係数とする。即ち本報告の  $\Delta \varepsilon_N$  および  $\Delta \varepsilon_P$  は、解析対象断面に垂直に作用する主応力成分に対応したひずみ成分の範囲であり、単軸の繰り返し疲労破損データ (ひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_i$  と破損寿命  $N_f$  の関係) を適用するためには、等価単軸ひずみ範囲に換算する必要がある。

疲労破損データが次式で与えられるものとする。

$$N_f = F_f (\Delta \varepsilon_i, e_s, T) \quad (2.42)$$

ここに  $e_s$  はひずみ速度、 $T$  は温度とする。CANISでは過渡荷重  $j$  (あるいは基本サイクル) の周期を  $\Delta t$  (sec) とし、ひずみ速度は次式で与える。

$$e_s (\text{/sec}) = 2 \Delta \varepsilon_i / \Delta t \quad (2.43)$$

過渡荷重  $j$  (あるいは基本サイクル) の 1 サイクルあたりの疲労損傷  $\Delta D_f$  を次式で与える。

$$\Delta D_f (\text{/cycle}) = 1 / N_f \quad (2.44)$$

CANISにはPNCが取得した7鋼種の疲労破損データがライブラリ化され、引用できる。詳細は付録1を参照されたい。

## 2.3 簡易クリープ解析

応力  $\sigma$  を一定に保持した場合の時間  $t$  後の累積クリープひずみ  $\varepsilon_c$  が次式で表されるものとする。

$$\varepsilon_c = S (\sigma, t) \quad (2.45)$$

これを時間  $t$  について解くと、応力  $\sigma$  を一定に保持した場合に累積クリープひずみ  $\varepsilon_c$  を生ずる時間を与える関係式が得られ、次式で与えられるものとする。

$$t = T (\sigma, \varepsilon_c) \quad (2.46)$$

また(2.45)式を  $t$  で微分した関数は、応力  $\sigma$  を一定に保持した場合の時間  $t$  のクリープひずみ速度を表し、次式で与えられるものとする。

$$\dot{\varepsilon}_c = \partial S (\sigma, t) / \partial t = V (\sigma, t) \quad (2.47)$$

現実の事象では応力が一定に保持される場合は稀であり、応力が時間と共に変化するのが普通であ

る。時間  $t$  における応力  $\sigma$  と累積クリープひずみ  $\epsilon_c$  が与えられた場合のクリープひずみ速度を与えるのに次の2つの手法が良く用いられる。

### (1) 時間硬化則

現在までの累積クリープひずみに無関係に、現在の応力値  $\sigma$  が現在 ( $t$ ) まで保持された場合のクリープひずみ速度に等しいとする。即ち次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_c(\sigma, t, \epsilon_c) = V(\sigma, t) \quad (2.48)$$

微小時間区間  $[t, t + \Delta t]$  のクリープひずみ増分  $\Delta \epsilon_c$  が次式で与えられる。

$$\Delta \epsilon_c \approx \dot{\epsilon}_c \Delta t = V(\sigma, t) \Delta t = S(\sigma, t + \Delta t) - S(\sigma, t) \quad (2.49)$$

### (2) ひずみ硬化則

現在の応力値が最初から一定に保持された場合に、累積クリープひずみ  $\epsilon_c$  を生ずる時間 (等価時間  $t_{EQ}$  と呼ぶことにする) のクリープひずみ速度に等しいとする。即ち次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_c(\sigma, t, \epsilon_c) = V(\sigma, t_{EQ}) \quad (2.50)$$

$$t_{EQ}(\text{等価時間}) = T(\sigma, \epsilon_c) \quad (2.51)$$

微小時間区間  $[t, t + \Delta t]$  のクリープひずみ増分  $\Delta \epsilon_c$  が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_c &\approx \dot{\epsilon}_c \Delta t = V(\sigma, t_{EQ}) \Delta t \\ &= S(\sigma, t_{EQ} + \Delta t) - S(\sigma, t_{EQ}) \end{aligned} \quad (2.52)$$

CANISでは材料のクリープひずみ式として巾乗型 (Norton型) と指数型の2種類が使用でき、硬化則は時間硬化則とひずみ硬化則が選択使用できる。またPNCが取得した7鋼種の指数型のクリープひずみ式がライブラリ化され、引用できる。詳細は付録1を参照されたい。

## 2.3.1 弾性追従

2つの棒を直列に連結した系を考える (図2.9 参照)。断面積は1とする。棒1のヤング率と棒の長さを  $E_1, L_1$  とし、棒2のヤング率と長さを  $E_2, L_2$  とする。棒1はクリープ材質とし、棒2は非クリープ材質とする。棒1側の端部を固定し、棒2側の端部を力  $\sigma$  (断面積1だから応力でもある) で引っ張るものとする。棒1の弾性ひずみを  $\epsilon_{1E}$  とし、クリープひずみを  $\epsilon_{1C}$  とする。棒2の弾性ひずみを  $\epsilon_{2E}$  とする (クリープひずみは0)。棒1のひずみと伸びは次式で与えられる。

$$\epsilon_1 = \epsilon_{1E} + \epsilon_{1C}, \quad \epsilon_{1E} = \sigma / E_1 \quad (2.53)$$

$$l_1 = L_1 \epsilon_1 = L_1 \sigma / E_1 + L_1 \epsilon_{1C} \quad (2.54)$$

棒2のひずみと伸びは次式で与えられる。

$$\epsilon_2 = \epsilon_{2E} = \sigma / E_2 \quad (2.55)$$

$$l_2 = L_2 \epsilon_2 = L_2 \sigma / E_2 \quad (2.56)$$

棒1と棒2の合計伸びは次式で与えられる。

$$l_1 + l_2 = (L_1 / E_1 + L_2 / E_2) \sigma + L_1 \epsilon_{1C} \quad (2.57)$$

時間  $t = 0$  で  $\sigma = \sigma_0$ 、 $\epsilon_{1C} = 0$  とし、合計伸びを一定に保持した場合を考える。即ち

$$l_1 + l_2 = (l_1 + l_2)_{t=0} = (L_1 / E_1 + L_2 / E_2) \sigma_0 \quad (2.58)$$

である。(2.57)、(2.58)式より棒1のクリープひずみ  $\epsilon_{1C}$  は次式で与えられる。

$$\epsilon_{1C} = q_c (\sigma_0 - \sigma) / E_1 \quad (2.59)$$

$$q_c = 1 + (E_1 / E_2)(L_2 / L_1) \quad (2.60)$$

(2.59)式は任意時間の応力とクリープひずみの関係を表す。(2.59)式と(2.53)式から棒1のひずみは次式で与えられる。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1E} + \varepsilon_{1C} = \sigma / E_1 + q_c (\sigma_0 - \sigma) / E_1 \quad (2.61)$$

(2.61)式の両辺から初期ひずみ

$$\varepsilon_1(t=0) = \sigma_0 / E_1 \quad (2.62)$$

を引くと次式が得られる。

$$\varepsilon_1(t) - \varepsilon_1(t=0) = (q_c - 1) [\sigma(t=0) - \sigma(t)] / E_1 \quad (2.63)$$

(2.63)式はひずみの増加量が応力の減少量に比例する事を表す。即ち応力ひずみ平面上で時間と共に直線的に変化する事を表す。ひずみを横軸にとると初期状態  $\varepsilon_1(t=0)$ 、 $\sigma(t=0)$  は原点から勾配  $E_1$  の弾性直線上にあり、初期状態から任意時間状態に引いた直線は勾配が  $-E_1 / (q_c - 1)$  の右下がりの直線となる (図2.9 参照)。棒1に着目すると次の2つの極限状態が考えられる。

(1)  $(E_1/E_2)(L_2/L_1) \rightarrow 0$  の時、 $q \rightarrow 1$ 、 $-E_1 / (q_c - 1) \rightarrow -\infty$  となり、変形が増加せずに応力のみ減少する状態、即ち変位制御クリープに近づく。棒2の変形吸収能力 (即ちコンプライアンス  $L_2/E_2$ ) が棒1に比べ極端に小さい場合であり、自身のクリープ変形の大部分を自身が吸収し、即ち自身の弾性変形がクリープ変形として消費され、その結果として応力減少量が大きくなる。

(2)  $(E_1/E_2)(L_2/L_1) \rightarrow \infty$  の時、 $q \rightarrow \infty$ 、 $-E_1 / (q_c - 1) \rightarrow 0$  となり、応力が減少せずに変形のみ増加する状態、即ち荷重制御クリープに近づく。棒2の変形吸収能力が棒1に比べ極端に大きい場合であり、自身のクリープ変形の大部分が棒2に吸収され、即ち自身の弾性変形がクリープ変形として消費されず、その結果として応力減少量が小さくなる。

一般的にはこれらの両極限の中間にあり、変形の増加と共に応力が減少し、変形増加量と応力減少量の比は連結する弾性バネ (この場合は棒2) と自身の変形吸収能力との比により決定される。即ち自身のクリープ変形の一部を自身が吸収し残りを連結弾性バネが吸収する。この現象を一般に弾性追従と称し、定数  $q_c$  を弾性追従係数と称する。本報告では弾塑性パラメータ  $q_{EP}$  と対比させて、 $q_c$  をクリープパラメータと呼ぶことにする。

### 2.3.2 き裂無し断面のクリープひずみ

き裂無し断面の対象表面のクリープひずみについて考える。対象事象 (または基本サイクル) の膜応力を  $\sigma_M$ 、曲げ応力を  $\sigma_B$ 、ピーク応力を  $\sigma_P$  とする。 $\sigma_M$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_P$  は 2.2節の簡易弾塑性解析により求められた応力とし実際の荷重に対応した値とする。荷重制御膜応力を  $\sigma_{LD}$  とする。対象事象 (または基本サイクル) の周期を  $t_c$  とし、クリープパラメータを  $q_c$  とする。簡易評価法の概念を図2.10に示す。なお本小節で簡易評価されるき裂無し断面のクリープひずみは、それ自体は直接に使用されないが、時間に関する数値積分の過程で応力の時間変化が同時に評価され、応力の時間変化からクリープ損傷が評価される。き裂有り断面に対しては、き裂の存在による断面応力の補正をしたうえで、本小節と同様の手法でき裂部のクリープひずみが簡易評価され、それをを用いてクリープJ積分が簡易評価される。

(1) 初期応力は (膜+曲げ+ピーク) 応力および (膜+曲げ) 応力の対象事象 (基本サイクル) 内の最大値とする。

$$\sigma(t=0) = \sigma_{MBP} = \text{Max.} (|\sigma_M + \sigma_B + \sigma_P|, |\sigma_M + \sigma_B|) \quad (2.64)$$

(2) 第一段階で  $\sigma_{MBP}$  から (膜+曲げ) 応力  $\sigma_{MB}$  までの応力緩和が生じるものとする。

$$\sigma_{MB} = |\sigma_M + \sigma_B| \quad (2.65)$$

即ち表面ピーク応力の緩和消滅が最初に生ずるものとする。完全変位制御 ( $q_c = 1$ ) で初期クリープひずみを0とし数値積分 (増分計算) によるクリープ計算を行う。このピーク応力緩和過程で生ず

るクリープひずみ  $\varepsilon_{c1}$  をピーク応力緩和クリープひずみと呼ぶ事にする。

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_c \left[ \sigma_{MBP} \rightarrow \sigma_1 (\geq \sigma_{MB}), q_c = 1, 0 \rightarrow t_1 (\leq t_c), 0 \right] \quad (2.66)$$

$\uparrow$   
最終応力

$\uparrow$   
最終時間

$\uparrow$   
初期クリープひずみ

周期内に  $\sigma_{MB}$  まで応力緩和しない場合は  $\varepsilon_{c1}$  を 1 サイクルあたりのクリープひずみとし計算を終了する。

$$\sigma_1 = \sigma(t = t_1 = t_c) \geq \sigma_{MB} \rightarrow \text{計算終了}$$

$$\varepsilon_c (\text{/cycle}) = \varepsilon_{c1} \quad (2.67)$$

周期内に  $\sigma_{MB}$  に達した場合は次の第二段階（二次応力緩和過程）に移行する。

$$\sigma_1 = \sigma(t = t_1 < t_c) = \sigma_{MB} \rightarrow \text{第二段階（二次応力緩和過程）}$$

(3) 第二段階で  $\sigma_{MB}$  から  $\sigma_{LD}$  まで応力緩和する弾性追従が生じるものとする。対象事象（または基本サイクル）のクリープパラメータ  $q_c$  を用いて初期クリープひずみを  $\varepsilon_{c1}$  とし数値積分（増分計算）によるクリープ計算を行う。この過程で生じるクリープひずみ  $\varepsilon_{c2}$  を二次応力緩和クリープひずみと呼ぶ事にする。

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_c \left[ \sigma_{MB} \rightarrow \sigma_2 (\geq \sigma_{LD}), q_c, t_1 \rightarrow t_2 (\leq t_c), \varepsilon_{c1} \right] \quad (2.68)$$

周期内に  $\sigma_{LD}$  まで応力緩和しない場合は  $\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}$  を 1 サイクルあたりのクリープひずみとし計算を終了する。

$$\sigma_2 = \sigma(t = t_2 = t_c) \geq \sigma_{LD} \rightarrow \text{計算終了}$$

$$\varepsilon_c (\text{/cycle}) = \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2} \quad (2.69)$$

周期内に  $\sigma_{LD}$  に達した場合は次の第三段階（一次応力保持過程）に移行する。

$$\sigma_2 = \sigma(t = t_2 < t_c) = \sigma_{LD} \rightarrow \text{第三段階（一次応力保持過程）}$$

(4) 第三段階で  $\sigma_{LD}$  が保持されるものとする。初期クリープひずみを  $\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}$  とし応力  $\sigma_{LD}$  保持過程のクリープひずみを計算する。この過程で生じるクリープひずみ  $\varepsilon_{c3}$  を一次応力保持クリープひずみと呼ぶ事にする。

$$\varepsilon_{c3} = \varepsilon_c \left[ \sigma_{LD} \text{ 保持}, q_c = \infty, t_2 \rightarrow t_c, \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2} \right] \quad (2.70)$$

対象事象（または基本サイクル）1 サイクルあたりのクリープひずみを次式で評価する。

$$\varepsilon_c (\text{/cycle}) = \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{c3} \quad (2.71)$$

(5) 以上の計算では  $\sigma_{MBP} \geq \sigma_{MB} \geq \sigma_{LD}$  であると仮定している。CANISでは、

$$\sigma_{MB} < \sigma_{LD} \quad \text{の場合は} \quad \sigma_{MB} = \sigma_{LD} \quad \text{とし、さらに}$$

$$\sigma_{MBP} < \sigma_{MB} \quad \text{の場合は} \quad \sigma_{MBP} = \sigma_{MB} \quad \text{とする。}$$

### 2.3.3 き裂無し断面のクリープ損傷評価

対象事象（または基本サイクル）の最大応力時点からの応力時間変化  $\sigma(t)$  が前 2.3.2 小節の簡易クリープ解析により求まる。対象事象（または基本サイクル）の 1 サイクルあたりのき裂無し断面のクリープ損傷  $\Delta D_c$  を次式で簡易評価する。

$$\Delta D_c (\text{/cycle}) = \int_0^{t_c} \frac{dt}{t_R(\sigma(t))} \quad (2.72)$$

ここで  $t_R(\sigma)$  は応力  $\sigma$  に対応するクリープ破断時間を表す。CANISではPNCが取得した7鋼種のクリープ破断時間データがライブラリ化され、引用できる。詳細は付録1を参照されたい。

## 2.4 き裂断面の正味断面応力

き裂付きの構造物を対象とする。一般化された荷重 $L$ が負荷された場合を考える。き裂付き構造物の破壊荷重を $L_F$ とし、材料の破壊応力を $\sigma_F$ とする。負荷荷重 $L$ と破壊荷重 $L_F$ は同一タイプの荷重とする。正味断面クライテリアによるき裂断面の正味断面応力 $\sigma_{NS}$ は次式で定義される。

$$\sigma_{NS} = (L/L_F) \sigma_F \quad (2.73a)$$

$$\sigma_{NS}/\sigma_F = L/L_F \quad (2.73b)$$

即ち負荷荷重の破壊荷重に対する相対値を、破壊応力に対する相対的な応力値に換算したパラメータが $\sigma_{NS}$ である。正味断面クライテリアによる破壊条件は $\sigma_{NS} \geq \sigma_F$ で与えられ、これは $L \geq L_F$ に等価である。一般に破壊形式が塑性崩壊となる延性材料の薄肉構造物では $L_F$ として塑性崩壊荷重、 $\sigma_F$ として流動応力が使用される。本報告では、以後特に断らない限り、 $L_F$ は塑性崩壊荷重とし、 $\sigma_F$ は流動応力とする。代表的な延性材料であるステンレス鋼などでは実験から得られた次式の流動応力が一般的に使用される。

$$\sigma_F = 0.55 (\sigma_Y + \sigma_U) \quad (2.74)$$

ここで $\sigma_Y$ は工学的な降伏応力(0.2%耐力)、 $\sigma_U$ は引張強さ(破断応力)である。

CANISでは簡易法により $\sigma_{NS}$ を評価する。簡易法の背景および仮定を以下に記す。

①荷重 $L$ は応力値(膜応力 $\sigma_M$ 、曲げ応力 $\sigma_B$ 、ピーク応力 $\sigma_P$ )により記述される。応力値( $\sigma_M$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_P$ )は2.2節の簡易弾塑性解析により求められ、対象荷重 $L$ によりき裂無しの対象断面に生ずる弾塑性荷重に等価な応力である。即ち $\sigma_M$ は引張力に対応し、 $\sigma_B$ は板曲げモーメントに対応し、 $\sigma_P$ は表面ピークひずみに対応する。

②ピーク応力 $\sigma_P$ はクリープ疲労損傷およびき裂進展には寄与するが、塑性崩壊には寄与しないとす。従って正味断面応力を定義する(2.73)式の荷重 $L$ および $L_F$ は $\sigma_P$ を含まない。

③負荷荷重 $L$ は(き裂を除く)断面形状、 $\sigma_M$ 、 $\sigma_B$ およびその他の条件の関数である。変位制御型の荷重成分を含み、き裂形状に依存して $L$ が変化する場合は、 $L$ はさらにき裂形状の関数である。

④塑性崩壊荷重 $L_F$ は断面形状、き裂形状、 $\sigma_M$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_F$ およびその他の条件の関数である。

⑤正味断面応力は断面形状、き裂形状、 $\sigma_M$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_F$ およびその他の条件の関数である。

$$\sigma_{NS} = f(\text{断面形状、き裂形状、}\sigma_M、\sigma_B、\sigma_F、\text{その他の条件}) \quad (2.75)$$

⑥ $\sigma_M$ と $\sigma_B$ が重畳する場合、 $L$ および $L_F$ を数学的に正確に定義することは難しい。定義できたとしても(2.73)式中の割り算( $L/L_F$ )の定義方法が難しい。(A) $\sigma_M$ と $\sigma_B$ の一方が変位制御型で他方が荷重制御型の場合、(B) $\sigma_M$ と $\sigma_B$ の一方を定数とし他方を変数とする場合、(C) $\sigma_M$ と $\sigma_B$ の両方を一定比率を保つ変数とする場合、など様々な力学条件に応じて、あるいは定義者の物理的な解釈に応じて、様々な定義方法が考えられる。これらの事情に由来する様々なパラメータを総称し、③~⑤では「その他の条件」と記した。以上が簡易法の背景と仮定事項である。CANISでは具体的に正味断面応力を次の簡易式で与えている。

$$\sigma_{NS} = F_{NS} (p_M \sigma_M + p_B \sigma_B) \quad (2.76)$$

ここで $F_{NS}$ は、荷重タイプをパラメータとして、断面形状とき裂形状のみの関数であり、正味断面形状関数と呼ぶことにする。 $p_M$ を膜応力補正パラメータ、 $p_B$ を曲げ応力補正パラメータと呼ぶことにする。

CANISでは $\sigma_M$ 単独あるいは $\sigma_B$ 単独の代表的な荷重タイプに対して $F_{NS}$ を定義し、ライブラリ化されている。例えば次のような $F_{NS}$ を定義することができる。

・引張による $\sigma_M$ の場合

$$L = A \text{ (断面積)} \times \sigma_M, \quad L_F = \{A - A_c \text{ (き裂面積)}\} \times \sigma_F \quad \text{より}$$

$$F_{NS} = A / (A - A_c), \quad p_M = 1 \quad (2.77)$$

・板曲げによる $\sigma_B$ の場合

$$L = Z \text{ (き裂無し板の断面係数)} \times \sigma_B,$$

$$L_F = Z_P \text{ (き裂有り板の塑性断面係数)} \times \sigma_F \quad \text{より}$$

$$F_{NS} = Z / Z_P, \quad p_B = 1 \quad (2.78)$$

・円筒周方向断面の軸曲げによる $\sigma_M$ の場合

$$L = Z \text{ (き裂無し断面の軸曲げ断面係数)} \times \sigma_M,$$

$$L_F = Z_P \text{ (き裂有り断面の軸曲げ塑性断面係数)} \times \sigma_F \quad \text{より}$$

$$F_{NS} = Z / Z_P, \quad p_M = 1 \quad (2.79)$$

CANISでは主な荷重成分( $\sigma_M$ または $\sigma_B$ 、荷重制御または変位制御)に対する $F_{NS}$ ライブラリを選択使用する。 $p_M$ および $p_B$ を適度に調整設定し、その他の荷重成分の寄与を近似的に考慮する。CANISには13種類の正味断面形状関数ライブラリが内蔵され、選択使用できる。これらのライブラリ以外にユーザーが独自の $F_{NS}$ を定義し、使用することもできる。ライブラリの詳細は付録2を参照されたい。

## 2.5 応力拡大係数

### 2.5.1 半楕円表面き裂

き裂が無い場合の対象断面に膜応力 $\sigma_M$ 、曲げ応力 $\sigma_B$ およびピーク応力 $\sigma_P$ を生じるような荷重が、き裂付きの対象構造物に負荷されたものとする。き裂の形状は深さ $a$ 、表面長さ $2b$ の半楕円状表面き裂とする(図2.11参照)。き裂の最深部(図2.11のA点)と表面部(図2.11のB点)の応力拡大係数が次式で与えられるものとする。

$$\text{最深部 (A)} \quad K_A = (\sigma_M F_{M,A} + \sigma_B F_{B,A} + \sigma_P F_{P,A}) (\pi a)^{1/2} \quad (2.80a)$$

$$\text{表面部 (B)} \quad K_B = (\sigma_M F_{M,B} + \sigma_B F_{B,B} + \sigma_P F_{P,B}) (\pi a)^{1/2} \quad (2.80b)$$

ここに $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$ はそれぞれ膜応力、曲げ応力、ピーク応力に対する無次元応力拡大係数であり、2番目の添字A、Bはそれぞれ最深部、表面部での値を示すものとする。無次元応力拡大係数は形状パラメータ( $a/t$ 、 $a/b$ 、 $b/W$ 、円筒では更に $R/t$ 追加)の関数であり、解析解は得られていないが、有限要素法(FEM)あるいは境界要素法(BEM)による数値解が多数公表されている。そのなかでもNewman-Rajuの解(REF.2.1)はFEMによる数値解を整理して形状パラメータの関数形で与えており解析コードにサブルーチンとして組み込んで使用するのに便利である。CANISにはNewman-Rajuの解を含めて11種類の表面き裂K値解が内蔵されている。それらは公表されている解を再整理し、膜、曲げ、放物線形ピーク応力に対する無次元K値解を与える形式をとっている。一部の解では曲げ、あるいはピーク応力に対する解が得られていないが、その場合は、別の既知解により得られた修正係数(曲げ/膜、ピーク/膜)を用いて推定値を算出する。これらの表面き裂K値解を付録3に示す。

## 2.5.2 片側き裂

表面き裂が長さ方向に無限に進展した状態は、周方向き裂では環状き裂、軸方向き裂では無限長き裂、平板では片面き裂となるが、これらを総称してここでは全て片側き裂と呼ぶことにする。片側き裂の深さ方向の応力拡大係数が次式で与えられるものとする。

$$K_A = (\sigma_M F_M + \sigma_B F_B + \sigma_P F_P) (\pi a)^{1/2} \quad (2.81)$$

ここに  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  はそれぞれ膜応力、曲げ応力、ピーク応力に対する無次元応力拡大係数である。片側き裂付き平板の膜および曲げに対する無次元  $K$  値解としては次の簡易式が良く知られている (REF. 2.2、適用範囲  $a/t < 1$ )。

$$\theta = (\pi/2)(a/t) \text{ として、}$$

$$F_M = (\tan \theta / \theta)^{1/2} \{0.752 + 2.02(a/t) + 0.37(1 - \sin \theta)^3\} / \cos \theta \quad (2.82a)$$

$$F_B = (\tan \theta / \theta)^{1/2} \{0.923 + 0.199(1 - \sin \theta)^4\} / \cos \theta \quad (2.82b)$$

その他に多くの片側き裂  $K$  値解が公表されている。CANIS では公表されている多くの  $K$  値解を再整理し組み合わせた12セットの解を内蔵している。これらは膜、曲げおよびピーク応力に対する無次元  $K$  値解を与える形式をとっている。これらの片側き裂  $K$  値解を付録4に示す。

## 2.5.3 貫通き裂

貫通き裂については曲げおよびピーク応力の作用は無視できるものとする。長さ  $2b$  の貫通き裂の長さ方向の応力拡大係数が、無次元  $K$  値解  $F_M$  を用いて次式で与えられるものとする。

$$K_B = \sigma_M F_M (\pi b)^{1/2} \quad (2.83)$$

中央に貫通き裂を有する平板の  $K$  値解は次式が良く知られている (REF. 2.2)。

$$\xi = b/W \text{ として} \quad F_M = \{\sec(\pi \xi / 2)\}^{1/2} \quad (2.84)$$

適用範囲は  $\xi < 1$  である。CANIS には円筒を含めて合計4種類の貫通き裂  $K$  値解がライブラリ化され選択使用できる。これらの貫通き裂  $K$  値解を付録5に示す。

## 2.6 疲労き裂進展モデル

CANIS の疲労き裂進展モデルの使用パラメータは以下の3種類あり、ユーザーが選択する。

- (1) 有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  ---  $\Delta K$  指定 (KFATG=1) の場合
- (2) 弾性 J 積分範囲  $\Delta J$  ---  $\Delta J$  指定 (KFATG=2) で弾性材料が入力された場合
- (3) 弾塑性 J 積分範囲  $\Delta J_{ep}$  ---  $\Delta J$  指定 (KFATG=2) で弾塑性材料が入力された場合

半楕円表面き裂については深さ方向と長さ方向のそれぞれに対し計算する。貫通き裂に対しては長さ方向についてのみ計算する。片側き裂に対しては深さ方向のみ計算する。深さ方向を表す添字 A と長さ方向を表す添字 B は省略する。1 サイクル当たりのき裂進展量は深さ方向が  $da/dn$ 、長さ方向が  $db/dn$  であるが、ここでは両者を代表し  $da/dn$  と記述する。

### 2.6.1 有効応力拡大係数範囲

き裂を含む対象断面がある荷重サイクルを受けるものとする。応力拡大係数の最大値を  $K_{max}$ 、範囲を  $\Delta K$  とする。荷重サイクルに対応した  $K$  値の最小値/最大値で定義される応力比  $R$  を用い、有効

応力拡大係数範囲を次式で求める(RBF. 2.3)。

$$\Delta K_{eff} = K_{Max} (1-R)^{n_k} = K_{Max} (\Delta K_A / K_{Max})^{n_k} \quad (2.85)$$

1サイクルあたりの疲労き裂進展量da/dn と  $\Delta K_{eff}$  の関係が両対数グラフ上で単一直線または二直線で表されるものとする(図2.12参照)。

$$\text{単一直線} \left\{ \begin{array}{l} da/dn = C_{K1} (\Delta K_{eff})^{m_{K1}} \text{ for } \Delta K_{eff} > \Delta K_{L1} \\ da/dn = 0 \text{ for } \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{L1} \end{array} \right\} \quad (2.86a)$$

$$\text{二直線} \left\{ \begin{array}{l} da/dn = C_{K1} (\Delta K_{eff})^{m_{K1}} \text{ for } \Delta K_{eff} > \Delta K_{L1} \\ da/dn = C_{K2} (\Delta K_{eff})^{m_{K2}} \text{ for } \Delta K_{L2} < \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{L1} \\ da/dn = 0 \text{ for } \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{L2} \end{array} \right\} \quad (2.87a)$$

$$\quad (2.87b)$$

$$\quad (2.87c)$$

ここに $n_K$ 、 $C_{K1}$ 、 $m_{K1}$ 、 $\Delta K_{L1}$ 、 $C_{K2}$ 、 $m_{K2}$ 、 $\Delta K_{L2}$ は材料定数である。

## 2.6.2 弾性J積分範囲

平面応力場での弾性J積分の最大値および範囲は次式で与えられる。

$$\text{最大値 } J_{Max} = K_{Max}^2 / E \quad \text{範囲 } \Delta J = \Delta K^2 / E \quad (2.88)$$

平面ひずみ場では上式の $(1-\nu^2)$ 倍となるが、CANISでは常に平面応力場の式を用いてJ値を安全側に評価する。1サイクル当たりの疲労き裂進展量da/dn と  $\Delta J$  の関係が両対数グラフ上で単一直線または二直線で表されるものとする(図2.12参照)。

$$\text{単一直線} \left\{ \begin{array}{l} da/dn = C_{J1} (\Delta J)^{m_{J1}} \text{ for } \Delta J > \Delta J_{L1} \\ da/dn = 0 \text{ for } \Delta J \leq \Delta J_{L1} \end{array} \right\} \quad (2.89a)$$

$$\text{二直線} \left\{ \begin{array}{l} da/dn = C_{J1} (\Delta J)^{m_{J1}} \text{ for } \Delta J > \Delta J_{L1} \\ da/dn = C_{J2} (\Delta J)^{m_{J2}} \text{ for } \Delta J_{L2} < \Delta J \leq \Delta J_{L1} \\ da/dn = 0 \text{ for } \Delta J \leq \Delta J_{L2} \end{array} \right\} \quad (2.90a)$$

$$\quad (2.90b)$$

$$\quad (2.90c)$$

ここに $C_{J1}$ 、 $m_{J1}$ 、 $\Delta J_{L1}$ 、 $C_{J2}$ 、 $m_{J2}$ 、 $\Delta J_{L2}$ は材料定数である。

## 2.6.3 弾塑性J積分範囲

弾塑性J積分およびその範囲を次式で簡易評価し、それを用いて(2.89)式または(2.90)式により疲労き裂進展量を計算する。

$$J_{ep} = f_{ep} \cdot J \quad , \quad \Delta J_{ep} = f_{ep} \cdot \Delta J \quad (2.91)$$

ここに $f_{ep}$ は弾塑性補正係数であり、参照応力 $\sigma_R$ を用いて次式で簡易評価される。

$$f_{ep} = E \epsilon_R / \sigma_R + \{ \sigma_R^3 / (2 E \epsilon_R \sigma_y^2) \} \quad (2.92)$$

ここに $\sigma_y$ は降伏応力(0.2%耐力)である。参照応力 $\sigma_R$ として正味断面応力 $\sigma_{NS}$ を使用する。 $\epsilon_R$ は弾塑性応力ひずみ曲線上で $\sigma_R$ に対応する弾塑性ひずみである。

$$\sigma_R = \sigma_{NS} \quad , \quad \epsilon_R = f^{-1}(\sigma_R) \quad (2.93)$$

(2.92)式は英国CEGBの破壊力学的構造健全性評価法(RBF. 2.4、通常R6法と呼ばれる)のオプション2-FAD線図に採用され、その有効性は十分に検証されている。(2.92)式の右辺第一項は弾塑性ひずみ拡大効果を表し、第二項はき裂先端の塑性域補正を表す。小規模降伏( $\sigma_R < \sigma_y$ )では古典的なDagdaleモデルに一致し、大規模降伏( $\sigma_R > \sigma_y$ )では $\sigma_R$ が大きくなるほど第二項が相対的に小さくなり全断面塑性モデルに漸近し、両モデルを滑らかに連結する簡易式としてCEGBにより提案されたものである。



## 2.7 クリープき裂進展モデル

### 2.7.1 クリープJ積分の簡易評価法

CANISにおけるクリープき裂進展モデルはクリープJ積分範囲 $\Delta J_c$ を用いる。ユーザーが指定した過渡事象（あるいは基本サイクル）について、参照応力を用いた簡易法により計算され、他の事象の影響は無視出来るものとする。(2.92)式の右辺第二項を省略し(2.91)式を用いると弾塑性J積分値の全断面塑性近似式が次のように得られる。

$$J_{e,p} = (E \varepsilon_R / \sigma_R) J \quad (2.94)$$

(2.94)式の右辺の参照ひずみ $\varepsilon_R$ を参照クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{RC}$ で置き換え、クリープJ積分値 $J_c$ （例えば kgf/mm/hr）の簡易評価式が次のように得られる。

$$J_c(t) = \{ E \dot{\varepsilon}_{RC}(t) / \sigma_R \} J = K^2 \dot{\varepsilon}_{RC}(t) / \sigma_R \quad (2.95)$$

### 2.7.2 クリープJ積分範囲

当該事象（あるいは基本サイクル）の周期を $t_c$ として、1サイクル当たりのクリープJ積分範囲 $\Delta J_c$ （例えば kgf/mm/cycle）を評価するのに以下の2種類の手法が選択使用できる。

(1) 選択Key(KCRPG)=1、3の場合——クリープJ積分値 $J_c(t)$ を忠実に時間積分して評価する。

$$\Delta J_c = \int_0^{t_c} J_c(t) dt = \frac{K^2}{\sigma_R} \int_0^{t_c} \dot{\varepsilon}_{RC}(t) dt = \frac{K^2 \varepsilon_{RC}(t)}{\sigma_R} \quad (2.96)$$

ここに $\varepsilon_{RC}(t)$ は参照クリープひずみである。

(2) 選択Key(KCRPG)=2、4の場合——最終時刻 $t = t_c$ におけるクリープJ積分値 $J_c$ に周期 $t_c$ を乗じて評価する。

$$\Delta J_c = J_c(t_c) \times t_c = K^2 \dot{\varepsilon}_{RC}(t_c) t_c / \sigma_R \quad (2.97)$$

### 2.7.3 クリープき裂進展量

CANISではクリープき裂進展量を評価するのに以下の2種類の手法が選択使用できる。

(1) KCRPG = 1、2の場合——1サイクル当たりのクリープき裂進展量 $da/dn$ とクリープJ積分範囲 $\Delta J_c$ の関係が両対数グラフ上で単一直線または二直線で表されるものとする（図2.13参照）。

$$\left. \begin{array}{l} \text{単一直線} \left\{ \begin{array}{ll} da/dn = C_{c1} (\Delta J_c)^{m_{c1}} & \text{for } \Delta J_c > \Delta J_{cL1} \\ da/dn = 0 & \text{for } \Delta J_c \leq \Delta J_{cL1} \end{array} \right\} \end{array} \right) \quad (2.98a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{二直線} \left\{ \begin{array}{ll} da/dn = C_{c1} (\Delta J_c)^{m_{c1}} & \text{for } \Delta J_c > \Delta J_{cL1} \\ da/dn = C_{c2} (\Delta J_c)^{m_{c2}} & \text{for } \Delta J_{cL2} < \Delta J_c \leq \Delta J_{cL1} \\ da/dn = 0 & \text{for } \Delta J_c \leq \Delta J_{cL2} \end{array} \right\} \end{array} \right) \quad (2.99a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{ll} da/dn = C_{c1} (\Delta J_c)^{m_{c1}} & \text{for } \Delta J_c > \Delta J_{cL1} \\ da/dn = C_{c2} (\Delta J_c)^{m_{c2}} & \text{for } \Delta J_{cL2} < \Delta J_c \leq \Delta J_{cL1} \end{array} \right\} & (2.99b) \\ \left\{ \begin{array}{ll} da/dn = 0 & \text{for } \Delta J_c \leq \Delta J_{cL2} \end{array} \right\} & (2.99c) \end{array} \right)$$

ここに、 $C_{c1}$ 、 $m_{c1}$ 、 $\Delta J_{cL1}$ 、 $C_{c2}$ 、 $m_{c2}$ 、 $\Delta J_{cL2}$ は材料定数である。

(2) KCRPG = 3、4 の場合—単位時間当たりのクリープき裂進展速度  $da/dt$  と  $(\Delta J_c / t_c)$  の関係が両対数グラフ上で単一直線または二直線で表されるものとする (図2.13参照)。

$da/dt$  に  $t_c$  を乗じて1サイクル当たりのクリープき裂進展量  $da/dn$  を評価する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{単一直線} \\ \left. \begin{array}{l} da/dt = C_{c1} (\Delta J_c / t_c)^{m_{c1}} \quad \text{for } \Delta J_c / t_c > J_{c1.1} \\ da/dt = 0 \quad \text{for } \Delta J_c / t_c \leq J_{c1.1} \\ da/dn = (da/dt) \times t_c \end{array} \right\} \end{array} \right\} \begin{array}{l} (2.100a) \\ (2.100b) \\ (2.100c) \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{二直線} \\ \left. \begin{array}{l} da/dt = C_{c1} (\Delta J_c / t_c)^{m_{c1}} \quad \text{for } \Delta J_c / t_c > J_{c1.1} \\ da/dt = C_{c2} (\Delta J_c / t_c)^{m_{c2}} \quad \text{for } J_{c1.2} < \Delta J_c / t_c \leq J_{c1.1} \\ da/dt = 0 \quad \text{for } \Delta J_c / t_c \leq J_{c1.2} \\ da/dn = (da/dt) \times t_c \end{array} \right\} \end{array} \right\} \begin{array}{l} (2.101a) \\ (2.101b) \\ (2.101c) \\ (2.101d) \end{array}$$

ここに、 $C_{c1}$ 、 $m_{c1}$ 、 $J_{c1.1}$ 、 $C_{c2}$ 、 $m_{c2}$ 、 $J_{c1.2}$  は材料定数である。

#### 2.7.4 参照クリープひずみ速度および参照クリープひずみの評価

当該事象発生後の応力緩和特性がクリープパラメータ  $q_c$  により表されるものとする (2.3 節参照)。当該事象の周期を  $t_c$  とする。CANIS では以下の簡易クリープ解析により参照クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{RC}(t)$  および参照クリープひずみ  $\epsilon_{RC}(t)$  を評価する (図2.14参照)。

①弾塑性参照応力  $\sigma_R$  に対し次式によりクリープ初期参照応力  $\sigma_{RC}$  を求める。

$$P = P_{c1} + P_{c2} (a/t) \text{ として} \quad (2.102a)$$

$$\sigma_{RC} = \sigma_R (\sigma_y / \sigma_R)^P \quad \text{for } \sigma_R < \sigma_y \quad (2.102b)$$

$$\sigma_{RC} = \sigma_R \quad \text{for } \sigma_R \geq \sigma_y \quad (2.102c)$$

本式により小中規模降伏条件下 ( $\sigma_R < \sigma_y$ ) における断面内応力分布の強い非均一性によるクリープひずみ増加 (すなわち平均応力  $\sigma_R$  でのクリープひずみに対する増加) を考慮する。ここにパラメータ  $P_{c1}$ 、 $P_{c2}$  として  $P_{c1} = P_{c2} = 0.2$  が提案されている (RBF. 2.5)。

②荷重制御参照応力  $\sigma_{R,LD}$  を求める。

$$\sigma_{R,LD} = F_{NSPM} \sigma_{LD} \quad (2.103)$$

③ 2.3 節の方法により、初期応力  $\sigma_{RC}$ 、中間応力  $\sigma_R$ 、荷重制御応力成分  $\sigma_{R,LD}$ 、クリープパラメータ  $q_c$  およびクリープ時間  $t_c$  の簡易クリープ解析を行う。

④第一段階 (初期応力  $\sigma_{RC} \rightarrow$  中間応力  $\sigma_R$ ) では次式のクリープパラメータを使用する。

$$q_{c,0} = \text{Min} \{ (q_c)^{1/2}, 3.0 \} \quad (2.104)$$

即ち、当該事象のクリープ特性  $q_c$  よりも変位制御に近い初期クリープ過程により、応力分布の非均一性によるクリープひずみ増加を簡易評価する。

・時間  $t_1 < t_c$  で  $\sigma_R$  に達した場合は、次の第二段階に移行する。

・時間  $t_1 = t_c$  で  $\sigma_R$  に達しない場合は計算を終了する。

⑤第二段階 (中間応力  $\sigma_R \rightarrow \sigma_{R,LD}$ ) では  $q_c$  を使用し、時間  $t_1$  以後のクリープ解析を行う。

・時間  $t_2 < t_c$  で  $\sigma_{R,LD}$  に達した場合は、次の第三段階に移行する。

・時間  $t_2 = t_c$  で  $\sigma_{R,LD}$  に達しない場合は計算を終了する。

⑥第三段階 (荷重制御応力  $\sigma_{R,LD}$ ) では時間  $t_2$  以後  $t_c$  までの応力保持クリープ解析を行う。

⑦以上の④～⑥の過程で参照クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{RC}(t)$  および参照クリープひずみ  $\epsilon_{RC}(t)$  が求まる。なおクリープ解析における硬化則は時間硬化則とひずみ硬化則が選択使用できる。

## 2.8 き裂の不安定評価

CANISでは以下の5項目の不安定評価を取り扱う。

- ①表面き裂が深さ方向のみ不安定進展し、貫通き裂に発展する。
- ②表面き裂が長さ方向のみ不安定進展し、片側き裂に発展する。
- ③表面き裂が深さ方向と長さ方向に不安定進展し、き裂断面が破断する。
- ④片側き裂が深さ方向に不安定進展し、き裂断面が破断する。
- ⑤貫通き裂が長さ方向に不安定進展し、き裂断面が破断する。

### 2.8.1 形状条件による不安定評価

き裂進展計算によりき裂形状が更新される度に、以下の形状条件に基づき、不安定評価を行う。

表面き裂  $a/t \geq \alpha_{LIM}$  .AND.  $b/W < \xi_{LIM}$  で貫通き裂に発展 (2.105a)

表面き裂  $a/t < \alpha_{LIM}$  .AND.  $b/W \geq \xi_{LIM}$  で片側き裂に発展 (2.105b)

表面き裂  $a/t \geq \alpha_{LIM}$  .AND.  $b/W \geq \xi_{LIM}$  で破断 (2.105c)

片側き裂( $b/W = 1$ )  $a/t \geq \alpha_{LIM}$  で破断 (2.105d)

貫通き裂( $a/t = 1$ )  $b/W \geq \xi_{LIM}$  で破断 (2.105e)

即ち、き裂の相対深さ $a/t$  が限界値 $\alpha_{LIM}$  ( $< 1$ ) を越えたら、深さ方向に不安定進展するものと見なす。き裂の相対長さ $b/W$  が限界値 $\xi_{LIM}$  ( $< 1$ ) を越えたら、長さ方向に不安定進展するものと見なす。形状条件により不安定進展が生じない場合は、次の2.8.2節の力学条件による不安定評価が行われる。

### 2.8.2 力学条件による不安定評価

選択Key(KFAIL)により条件式を選択する。KFAIL = 0の場合は力学条件による不安定評価を行わない。以下の5種類の条件が選択使用できる。

#### (1) $K_{Ic}$ 条件 (KFAIL = 1)

応力拡大係数が脆性破壊靱性 $K_{Ic}$ を超えたら不安定進展するものと見なす。

表面き裂 [ $K_A \geq K_{Ic}$  .AND.  $K_B < K_{Ic}$ ] で貫通き裂に発展 (2.106a)

表面き裂 [ $K_A < K_{Ic}$  .AND.  $K_B \geq K_{Ic}$ ] で片側き裂に発展 (2.106b)

表面き裂 [ $K_A \geq K_{Ic}$  .AND.  $K_B \geq K_{Ic}$ ] で破断 (2.106c)

片側き裂 [ $K_A \geq K_{Ic}$ ] で破断 (2.106d)

貫通き裂 [ $K_B \geq K_{Ic}$ ] で破断 (2.106e)

本条件は脆性破壊材料に対して有効である。弾塑性破壊材料に本条件を使用する場合は $K_{Ic}$ データとしてき裂進展停止靱性値 $K_{Ia}$ など、より適切なデータを用いるべきである。

(2)  $K_{Ic}$ 条件 (KFAIL = 2)

応力拡大係数が脆性破壊靱性  $K_{Ic}$  を超えたら不安定進展するものと見なす。

表面き裂 [ $K_A \geq K_{Ic}$  .OR.  $K_B \geq K_{Ic}$ ] で破断 (2.107a)

片側き裂 [ $K_A \geq K_{Ic}$ ] で破断 (2.107b)

貫通き裂 [ $K_B \geq K_{Ic}$ ] で破断 (2.107c)

表面き裂の最深部 ( $K_A$ ) と表面部 ( $K_B$ ) の一方が  $K_{Ic}$  を超えた場合は全て破断とする。

(3)  $J_{Ic}$ 条件 (KFAIL = 3)

$J$  積分値が平面ひずみき裂進展開始  $J_{Ic}$  値を超えたら不安定進展するものと見なす。

表面き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$  .AND.  $J_B < J_{Ic}$ ] で貫通き裂に発展 (2.108a)

表面き裂 [ $J_A < J_{Ic}$  .AND.  $J_B \geq J_{Ic}$ ] で片側き裂に発展 (2.108b)

表面き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$  .AND.  $J_B \geq J_{Ic}$ ] で破断 (2.108c)

片側き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$ ] で破断 (2.108d)

貫通き裂 [ $J_B \geq J_{Ic}$ ] で破断 (2.108e)

本条件は小規模降伏および平面ひずみ条件下でのき裂進展および破壊が予測される材料に対して有効である。

(4)  $J_{Ic}$ 条件 (KFAIL = 4)

$J$  積分値が平面ひずみき裂進展開始  $J_{Ic}$  値を超えたら不安定進展するものと見なす。

表面き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$  .OR.  $J_B \geq J_{Ic}$ ] で破断 (2.109a)

片側き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$ ] で破断 (2.109b)

貫通き裂 [ $J_B \geq J_{Ic}$ ] で破断 (2.109c)

表面き裂の最深部 ( $J_A$ ) と表面部 ( $J_B$ ) の一方が  $J_{Ic}$  を超えた場合は全て破断とする。

## (5) 弾塑性破壊条件 (KFAIL = 5)

$J$  積分値が進展開始  $J_{Ic}$  を超え、さらにき裂進展量に対する  $J$  積分値の変化率  $\partial J_A / \partial a$  が材料特性  $(dJ/da)_{mat}$  を超えた場合に、不安定進展するものと見なす。

表面き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$  .AND.  $\partial J_A / \partial a \geq (dJ/da)_{mat}$ ] .AND.  
 [ $J_B < J_{Ic}$  .OR.  $\partial J_B / \partial b < (dJ/da)_{mat}$ ] で貫通き裂に発展 (2.110a)

表面き裂 [ $J_A < J_{Ic}$  .OR.  $\partial J_A / \partial a < (dJ/da)_{mat}$ ] .AND.  
 [ $J_B \geq J_{Ic}$  .AND.  $\partial J_B / \partial b \geq (dJ/da)_{mat}$ ] で片側き裂に発展 (2.110b)

表面き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$  .AND.  $\partial J_A / \partial a \geq (dJ/da)_{mat}$ ] .AND.  
 [ $J_B \geq J_{Ic}$  .AND.  $\partial J_B / \partial b \geq (dJ/da)_{mat}$ ] で破断 (2.110c)

片側き裂 [ $J_A \geq J_{Ic}$  .AND.  $\partial J_A / \partial a \geq (dJ/da)_{mat}$ ] で破断 (2.110d)

貫通き裂 [ $J_B \geq J_{Ic}$  .AND.  $\partial J_B / \partial b \geq (dJ/da)_{mat}$ ] で破断 (2.110e)

本条件は弾塑性破壊材料に有効である。 $J_{Ic}$  および  $(dJ/da)_{mat}$  は、平面ひずみ破壊力学材料試験により得られる  $J$  抵抗曲線から、進展開始  $J$  値および進展量に対する勾配として求められる。

## (6) 弾塑性破壊条件 (KFAIL = 6)

J 積分値が進展開始  $J_{ic}$  を超え、さらにき裂進展量に対する J 積分値の変化率  $\partial J_A / \partial a$  が材料特性  $(dJ/da)_{mat}$  を超えた場合に、不安定進展するものと見なす。

$$\text{表面き裂 } [J_A \geq J_{ic} \text{ .AND. } \partial J_A / \partial a \geq (dJ/da)_{mat}] \text{ .OR.} \\ [J_B \geq J_{ic} \text{ .AND. } \partial J_B / \partial b \geq (dJ/da)_{mat}] \text{ で破断} \quad (2.111a)$$

$$\text{片側き裂 } [J_A \geq J_{ic} \text{ .AND. } \partial J_A / \partial a \geq (dJ/da)_{mat}] \text{ で破断} \quad (2.111b)$$

$$\text{貫通き裂 } [J_B \geq J_{ic} \text{ .AND. } \partial J_B / \partial b \geq (dJ/da)_{mat}] \text{ で破断} \quad (2.111c)$$

表面き裂の最深部 ( $J_A$ ) と表面部 ( $J_B$ ) の一方が不安定条件を満たす場合は全て破断とする。

## (7) 正味応力条件 1 (KFAIL = 7)

参照応力  $\sigma_R$  はき裂断面の正味の平均応力と見なす事ができる。参照応力が降伏応力  $\sigma_y$  (0.2%耐力) に達したら貫通または破断するものとする。

$$\text{表面き裂} \quad \sigma_R \geq \sigma_y \text{ で貫通き裂に発展} \quad (2.112a)$$

$$\text{片側き裂と貫通き裂} \quad \sigma_R \geq \sigma_y \text{ で破断} \quad (2.112b)$$

本条件は弾完全塑性体に近い材料に対して有効である。表面き裂の参照応力として、き裂断面全体の平均応力ではなく、き裂近傍の局所部分断面の平均応力を定義した場合に有効である。

## (8) 正味応力条件 2 (KFAIL = 8)

参照応力が降伏応力  $\sigma_y$  (0.2%耐力) に達したら破断するものとする。

$$\text{全てのき裂に対して} \quad \sigma_R \geq \sigma_y \text{ で破断} \quad (2.113)$$

本条件は弾完全塑性体に近い材料に対して有効である。表面き裂の参照応力として、き裂断面全体の平均応力を定義した場合に有効である。

## (9) 正味応力条件 3 (KFAIL = 9)

参照応力  $\sigma_R$  が流動応力  $\sigma_f$  に達したら貫通または破断するものとする。

$$\text{表面き裂} \quad \sigma_R \geq \sigma_f \text{ で貫通き裂に発展} \quad (2.114a)$$

$$\text{片側き裂と貫通き裂} \quad \sigma_R \geq \sigma_f \text{ で破断} \quad (2.114b)$$

本条件は塑性崩壊が予測される高延性材料に対して有効である。表面き裂の参照応力として、き裂断面全体の平均応力ではなく、き裂近傍の局所部分断面の平均応力を定義した場合に有効である。

## (10) 正味応力条件 4 (KFAIL = 10)

参照応力  $\sigma_R$  が流動応力  $\sigma_f$  に達したら貫通または破断するものとする。

$$\text{全てのき裂に対して} \quad \sigma_R \geq \sigma_f \text{ で破断} \quad (2.115)$$

本条件は塑性崩壊が予測される高延性材料に対して有効である。表面き裂の参照応力として、き裂断面全体の平均応力を定義した場合に有効である。

## 2.9 貫通き裂の開口面積と漏洩率

CANISでは貫通き裂の開口面積および内部流体漏洩率を計算することができる。開口面積は弾性論におけるエネルギー法により求められ、弾塑性効果を簡易に考慮することができる。次の3種類の漏洩率計算モデルを使用することができる。

- ①簡易式1による漏洩率計算。
- ②簡易式2による漏洩率計算。
- ③開口面積とベルヌイの式による漏洩率計算。

### 2.9.1 引張荷重に対する開口面積

き裂無しの対象断面に膜応力 $\sigma$ を生ずるような引張荷重が、長さ $2b$ の貫通き裂を有する板シェル構造に負荷された場合とする。弾性論によれば、 $J=K^2/E$ はき裂先端部の単位板厚あたり、単位き裂進展長さあたりのひずみエネルギー解放率を表す。貫通き裂（長さ $2x$ ）の応力拡大係数の解を

$$K(x) = F(x) \sigma (\pi x)^{1/2} \quad (2.116)$$

とすると、き裂長さが0から $2b$ まで進展した時の単位板厚あたりのひずみエネルギーの解放量は次のエネルギー積分により与えられる。

$$I = 2 \int_0^b J(x) dx = 2 \int_0^b \frac{K^2(x)}{E} dx = \frac{2\pi\sigma^2}{E} \int_0^b F^2(x)x dx \quad (2.117)$$

エネルギー法によれば、 $I$ を応力 $\sigma$ で微分すると開口面積が得られる。

$$A = \frac{\partial I}{\partial \sigma} = \frac{4\pi\sigma}{E} \int_0^b F^2(x)x dx = \frac{2\pi\sigma b^2}{E} G(b) \quad (2.118)$$

ここに $G(b)$ は無次元開口面積を表し、次式で与えられる。

$$G(b) = \frac{2}{b^2} \int_0^b F^2(x)x dx \quad (2.119)$$

(2.118)式は重ね合わせの原理から導くこともできる。線形弾性体を仮定し、次の3つの荷重状態について考える。

(状態1) き裂付き構造物に外力荷重を負荷した状態。き裂面の開口変位分布を $u(x)$ とし、き裂面が開口するような荷重とする。即ち、き裂先端で $u=0$ 、その他で $u>0$ とする。き裂面は自由表面とし、き裂面を垂直に引っ張る表面力は0とする。(図2.15a 参照)

(状態2) き裂無しの構造物に同一の外力荷重を負荷した状態。仮想き裂面に生じる垂直応力分布を $\sigma(x) \geq 0$ とする。状態1の開いたき裂面を閉じ合わせるために、相対するき裂面に引張力 $\sigma(x)$ を負荷した状態と解釈できる。即ち本状態は、状態1に、き裂面の引張荷重 $\sigma(x)$ を重ね合わせた状態と解釈できる。(図2.15b 参照)

(状態3) き裂付き構造物のき裂面に(状態2)と逆符号の引張荷重 $-\sigma(x)$ を負荷した状態とし、外力荷重は0とする。即ち、き裂面に垂直圧力分布 $\sigma(x)$ を負荷した状態。(図2.15c 参照)

重ね合わせの原理は、(状態1)が(状態2)と(状態3)を重ね合わせたものに等しいことを述べたものである。状態2は応力拡大係数 $K$ および開口変位 $u$ が0である。従って $K$ および $u$ は、状態1と状態3とで等しくなる。

重ね合わせの原理を適用すると、き裂無し断面に一定膜応力 $\sigma$ を生ずる引張荷重をき裂付き構造物に負荷することは、き裂面に一定の垂直圧力 $\sigma$ を負荷することと、K値および開口面積に関して等価である。き裂面が閉じた状態（圧力0、開口面積0）から、き裂面が開いた状態（圧力 $\sigma$ 、開口面積A）まで圧力を単調増加させた時の、圧力が成した仕事量は $\sigma \times A / 2$ であり、これはひずみエネルギーの開放量Iに等しい。これから $A = 2 I / \sigma$ が得られる。2 I /  $\sigma$ は、Iが $\sigma^2$ に比例するので、Iを $\sigma$ で微分する(2.118)式に等しい。

CANISでは貫通き裂のK値解に対して数値積分により無次元開口面積 $G(b)$ を求め、b対 $G(b)$ のテーブルを作成し、(2.118)式により開口面積を計算する際に参照する。そのとき使用する応力 $\sigma$ はその時点の対象事象による最大膜応力 $\sigma_M$ である。

弾塑性状態での開口面積 $A_{ep}$ の簡易評価法として数種類のモデルが提案検討された(REF. 2.5)。その中で次式で表される最も単純なモデルを使用している。

$$A_{ep} / A = J_{ep} / J = f_{ep}(\sigma_R) \quad (2.120)$$

ここに $f_{ep}$ は(2.61)式で与えられる弾塑性補正係数である。き裂中央部の最大開口変位 $U_{COD}$ は楕円状の開口形状を仮定すると、開口面積を用い次式で求められる。

$$U_{COD} = 2 A_{ep} / (\pi b) \quad (2.121)$$

### 2.9.2 軸曲げモーメント荷重に対する開口面積

周方向貫通き裂を有する円筒に軸曲げモーメント荷重が負荷される場合は、き裂無しの対象断面に生ずる応力分布が一定でないので、前2.9.1節のエネルギー法が適用できない。Tada-Parisは、次の近似式を提案している(REF. 2.6)。

$$A(\text{軸曲げ、最大表皮応力}\sigma) = \{(3 + \cos\theta) / 4\} A(\text{引張、}\sigma) \quad (2.122)$$

ここに $\theta$ はき裂半角であり次式で与えられる。

$$\text{内面き裂 } \theta = b / (\pi R), \quad \text{外面き裂 } \theta = b / (\pi R_o) \quad (2.123)$$

CANISでは、円筒周方向き裂が解析対象であり、貫通き裂参照K値解として軸曲げに対するK値解(KPENT=21)が指定された場合は、膜応力データは軸曲げに対する最大表皮応力と見なす。また開口面積に関しては、引張に対するK値解(KPENT=20)を用いて計算した値に、(2.122)式の補正係数 $\{(3 + \cos\theta) / 4\}$ を乗じて、近似的に与えている。

### 2.9.3 簡易式1による漏洩率計算

漏洩率Qが開口面積に比例するものとし、次式で計算する。

$$Q = C \cdot A_{ep} \quad (2.124)$$

漏洩率Qは体積流量あるいは質量流量のいずれでも良く、Qの単位および比例定数Cをユーザーが任意に設定すれば良い。

### 2.9.3 簡易式2による漏洩率計算

LLNLではPWR運転条件下の一次冷却系配管の漏洩率についての実験および解析をまとめて次の簡易式を提案している(REF. 14)。

$$Q(\text{gpm}) = 0.294 b^2 \sigma / t - 3.5 \quad \sigma(\text{ksi}), b, t(\text{in}) \quad (2.125)$$

CANISでは上式を一般化した次式を使用することができる。

$$Q = C_1 b^2 \sigma / t - C_2 \quad (2.126)$$

ここで $C_1$ 、 $C_2$ は単位変換も含めた実験定数とし、 $Q$ の単位とともにユーザーが任意に設定する。応力 $\sigma$ は漏洩率計算時点の対象事象による最大膜応力 $\sigma_M$ が使用される。

#### 2.9.4 開口面積とベルヌイの式による漏洩率計算

$Q$ を単位時間あたりの体積流量とすると、開口面積と流出速度 $v$ の積となり次式が成立する。

$$Q \text{ (体積流量)} = A_{op} v \quad (2.127)$$

流出速度は一般に温度、圧力条件、内部流体の特性およびき裂形状等の関数となる。単層流の場合は圧力差を $\Delta P$ 、流体の比重量を $\gamma$ 、圧力損失係数を $\zeta$ として次のベルヌイの式が成立する。

$$\begin{aligned} \Delta P / \zeta &= \gamma v^2 / 2 \\ v &= \{ 2 \Delta P / (\zeta \cdot \gamma) \}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.128)$$

$\zeta \geq 1$ であり、圧力差ポテンシャルの $1/\zeta$ が運動エネルギーに変換され、残りが摩擦損失となる。

- ・ユーザーは $\gamma$ 、 $\zeta$ 、 $\Delta P$ を入力する。 $\Delta P$ の入力を省略した場合は運転圧力 $P_{op}$ が使用される。
- ・SI単位系では $\gamma$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\Delta P$  ( $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 / \text{m}^2 = \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$ ) を使用し $v$  ( $\text{m}/\text{s}$ )、 $A_{op}$  ( $\text{m}^2$ )、 $Q$  ( $\text{m}^3 / \text{s}$ ) が得られる。
- ・ $\Delta P$ として $\text{kgf}/\text{m}^2$ を使用する工学単位系の場合は重力加速度 $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ を用いて、

$$\Delta P \text{ (N}/\text{m}^2) = \Delta P \text{ (kgf}/\text{m}^2) \cdot g \text{ (m}/\text{s}^2)$$

であるから、

$$\begin{aligned} v \text{ (m}/\text{s}) &= \{ 2 \Delta P \cdot g / (\zeta \cdot \gamma) \}^{1/2} \\ &= \{ 2 \Delta P / (\zeta \cdot \gamma^*) \}^{1/2}、 \quad \gamma^* = \gamma / g \end{aligned} \quad (2.129)$$

となる。この場合は $\gamma$ の代わりに、

$$\gamma^* = \gamma \text{ (kg}/\text{m}^3) / g \text{ (m}/\text{s}^2) = \gamma \text{ (kg}/\text{m}^3) / 9.8 \quad (2.130)$$

を入力すれば $v$  ( $\text{m}/\text{s}$ )、 $A_{op}$  ( $\text{m}^2$ )、 $Q$  ( $\text{m}^3 / \text{s}$ ) が得られる。

- ・長さの単位が $\text{mm}$ であり、応力と $\Delta P$ の単位が $\text{kgf}/\text{mm}^2$ の場合は $\gamma$ の代わりに、

$$\gamma^* = \gamma \text{ (kg}/\text{mm}^3) / g \text{ (mm}/\text{s}^2) = \gamma \text{ (kg}/\text{mm}^3) / 9800 \quad (2.131)$$

を入力すれば $v$  ( $\text{mm}/\text{s}$ )、 $A_{op}$  ( $\text{mm}^2$ )、 $Q$  ( $\text{mm}^3 / \text{s}$ ) が得られる。

#### 2.9.5 漏洩検出

CANIS-G (き裂進展シミュレーション) では漏洩検出システムを簡単なモデルにより取り扱うことができる。即ち計算された漏洩率 $Q$ が漏洩検出限界 $Q_{DET}$ を超えた場合 ( $Q \geq Q_{DET}$ )、漏洩検出が作動し、運転が速やかに停止されたものとし、計算を終了する。



## 2.10 き裂発生確率の評価

過渡事象（あるいは基本サイクル）1サイクル当たりの疲労損傷評価値およびクリープ損傷評価値を時間  $t$  まで累積加算し、時間  $t$  の累積疲労損傷値  $D_F(t)$  および累積クリープ損傷値  $D_C(t)$  を評価する。疲労き裂発生に対応した疲労損傷値の累積分布関数  $P_F(\leq D_F)$  およびクリープき裂発生に対応したクリープ損傷値の累積分布関数  $P_C(\leq D_C)$  が与えられた場合を考える。ここで累積分布関数  $P_F(\leq D_F)$  は疲労損傷値が  $D_F$  以下でき裂が発生する累積確率を与える統計的な関数とし、 $P_C(\leq D_C)$  はクリープ損傷値が  $D_C$  以下でき裂が発生する累積確率を与える統計的な関数とする。

クリープ損傷の無い純粋な疲労損傷の場合、時間  $t$  までにき裂が発生する確率は  $P_F(\leq D_F(t))$  で与えられる。あるいは分布関数の変数を  $D_{F, PDF}$  とし、次式を満たす変数領域の累積確率として与えられる。

$$D_{F, PDF} \leq D_F(t) \quad \text{または} \quad D_F(t) / D_{F, PDF} \geq 1 \quad (2.132)$$

疲労損傷の無い純粋なクリープ損傷の場合、時間  $t$  までにき裂が発生する確率は  $P_C(\leq D_C(t))$  で与えられる。あるいは分布関数の変数を  $D_{C, PDF}$  とし、次式を満たす変数領域の累積確率として与えられる。

$$D_{C, PDF} \leq D_C(t) \quad \text{または} \quad D_C(t) / D_{C, PDF} \geq 1 \quad (2.133)$$

疲労損傷とクリープ損傷が重なる場合に対してCANIS-Iでは両者の線型加算則を仮定して、次式を満たす  $D_{F, PDF}$  および  $D_{C, PDF}$  の2変数領域の累積確率を計算し、時間  $t$  までにき裂が発生する確率とする。

$$D_F(t) / D_{F, PDF} + D_C(t) / D_{C, PDF} \geq D_{INIT} \quad (2.134)$$

ここで  $D_{INIT}$  は本来は1であるが、ユーザー入力なき裂発生判定値とし、自由度を持たせた。

CANIS-Iでは分布関数として正規分布、自然対数正規分布および常用対数正規分布の3種類が使用でき、数値積分により(2.134)式を満たす確率を計算する。

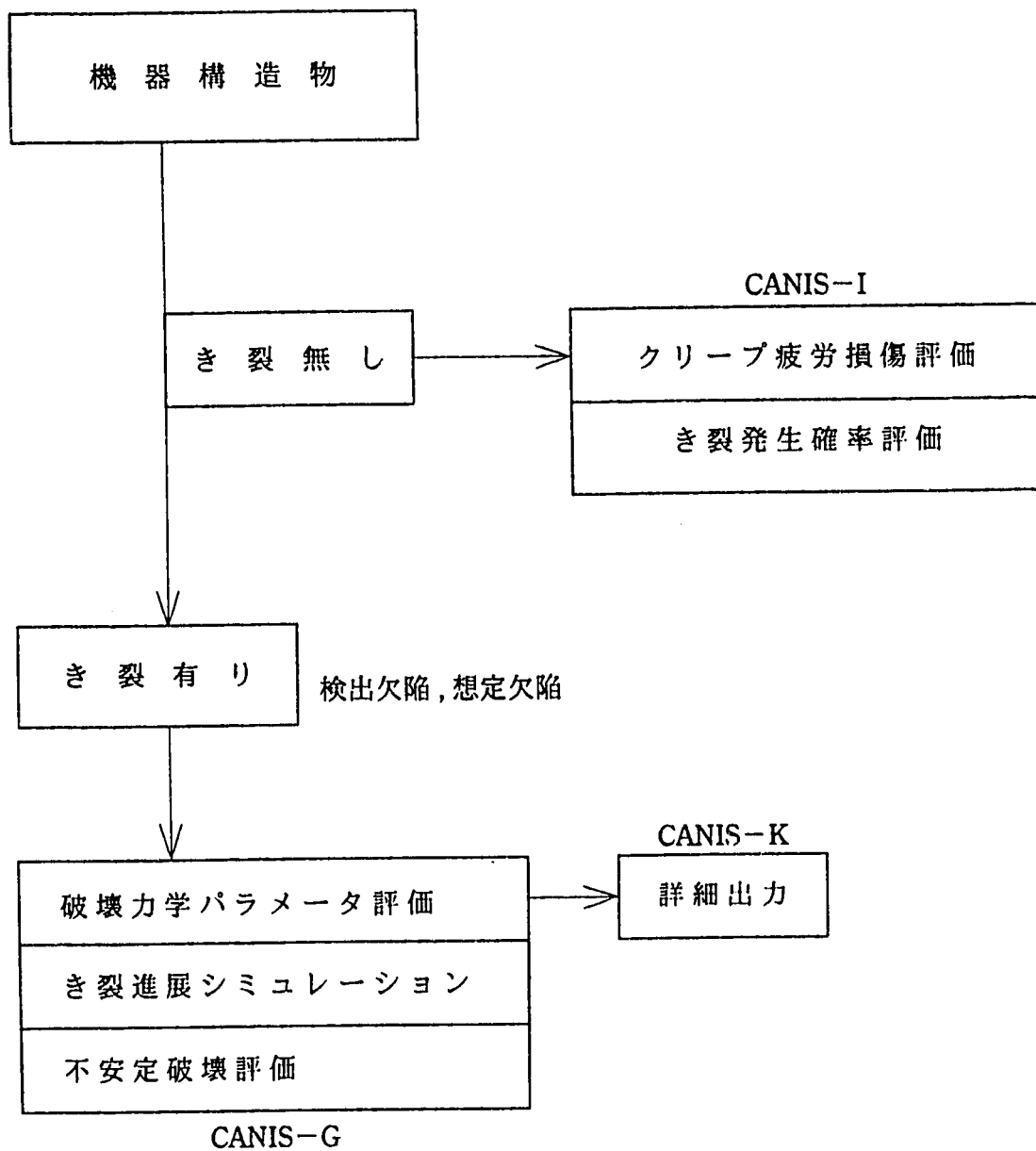


図 2.1 CANISコードの解析対象

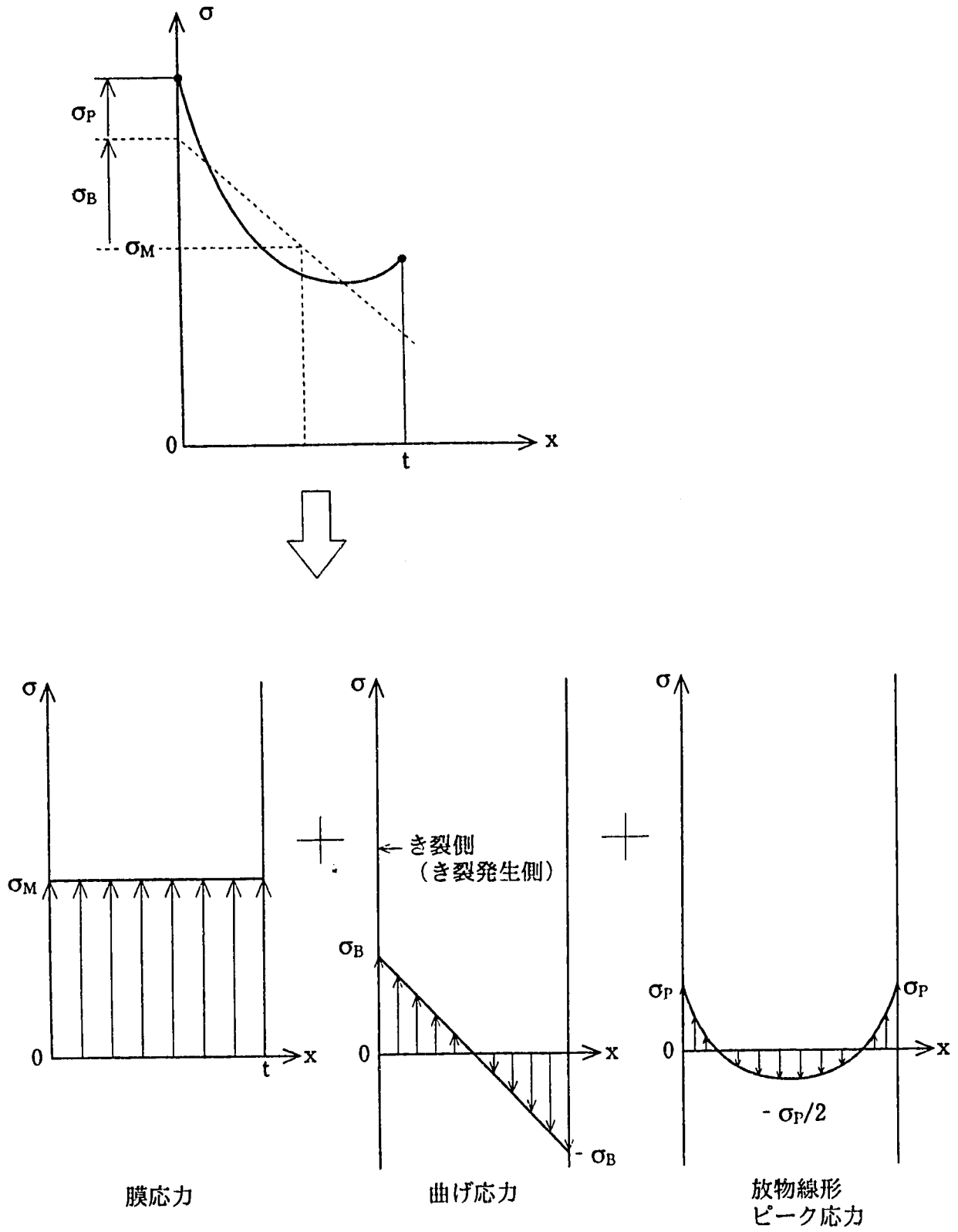


図 2.2 板厚内応力分布の放物線近似

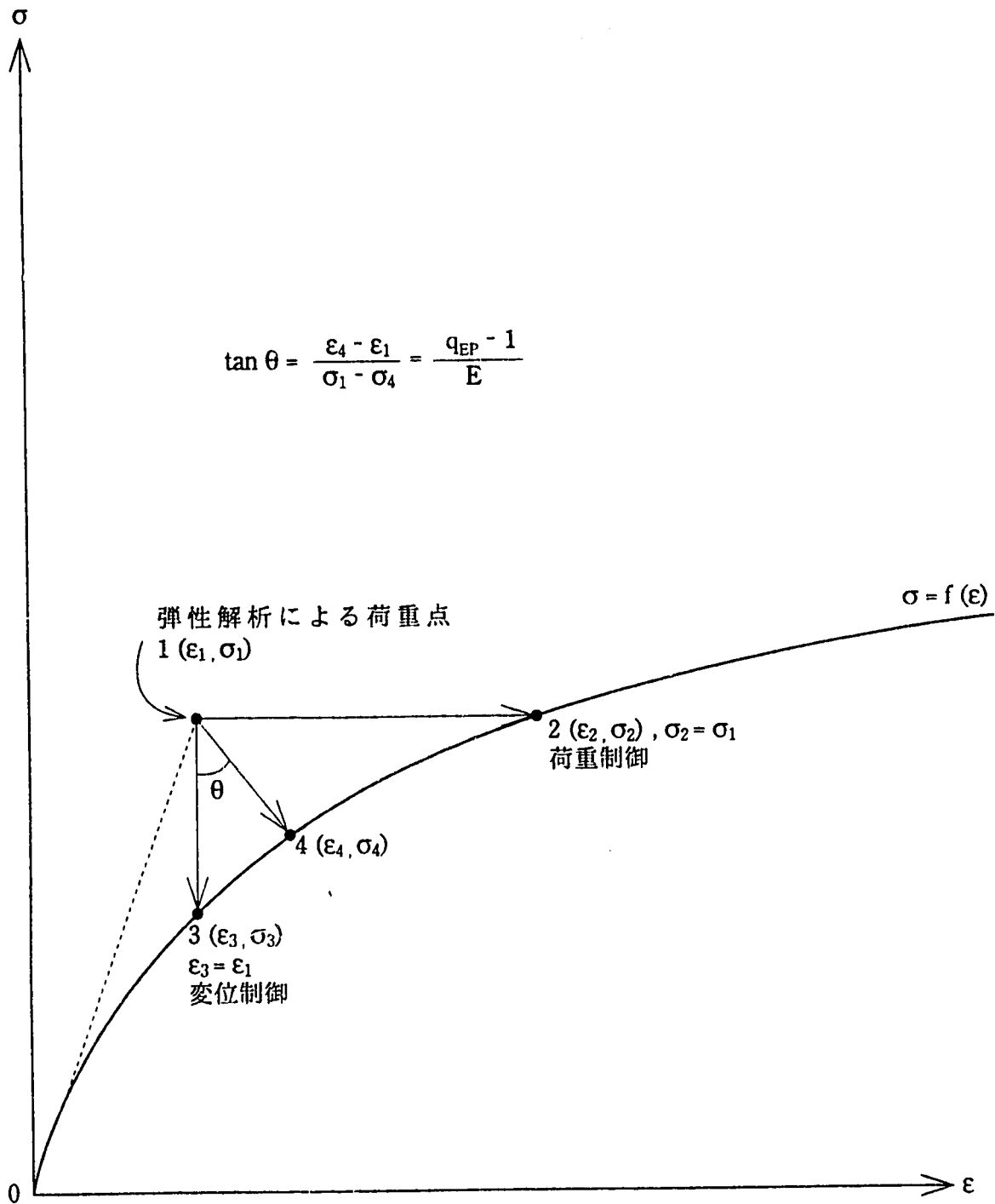


図 2.3 弾塑性パラメータ

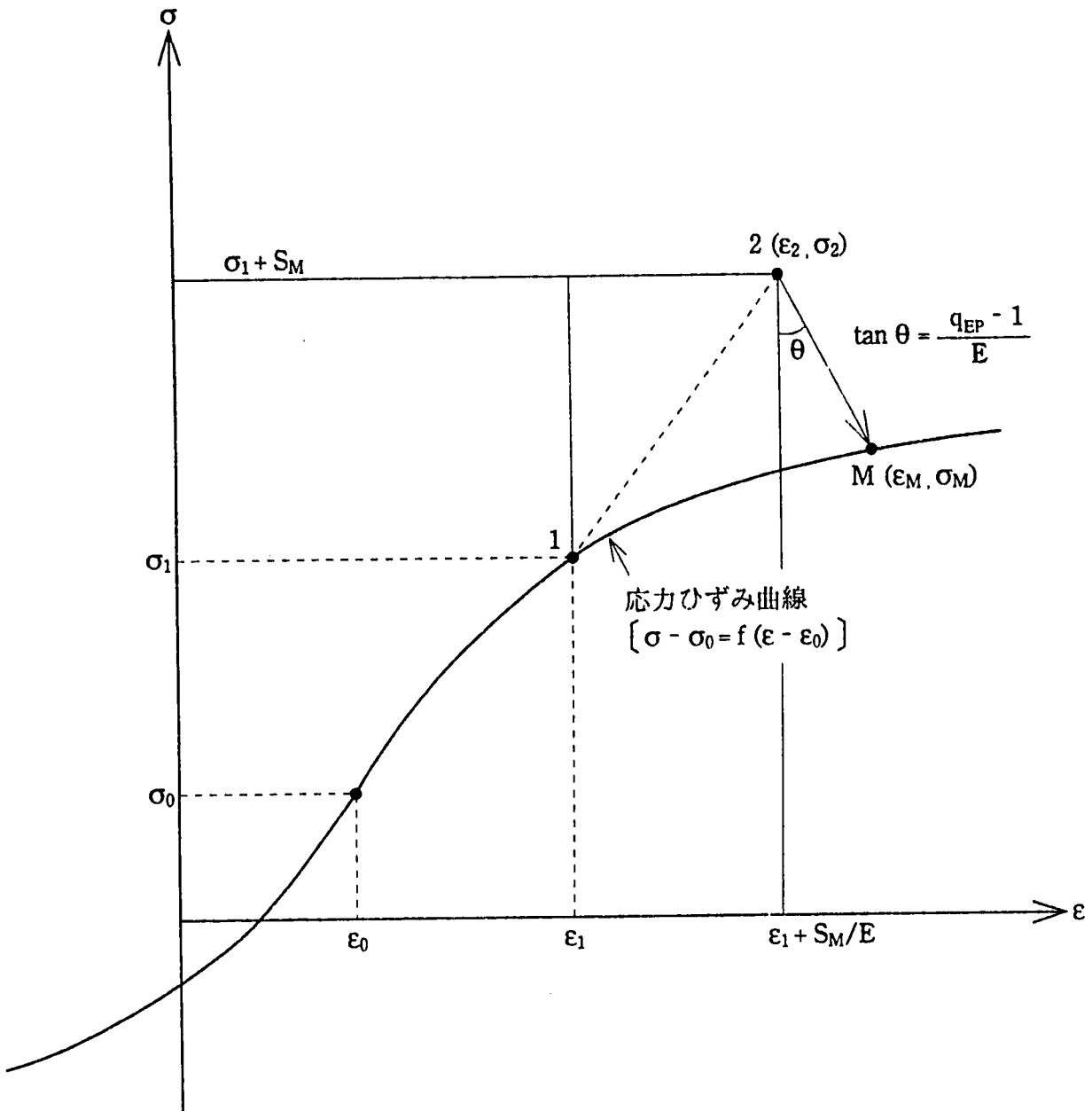
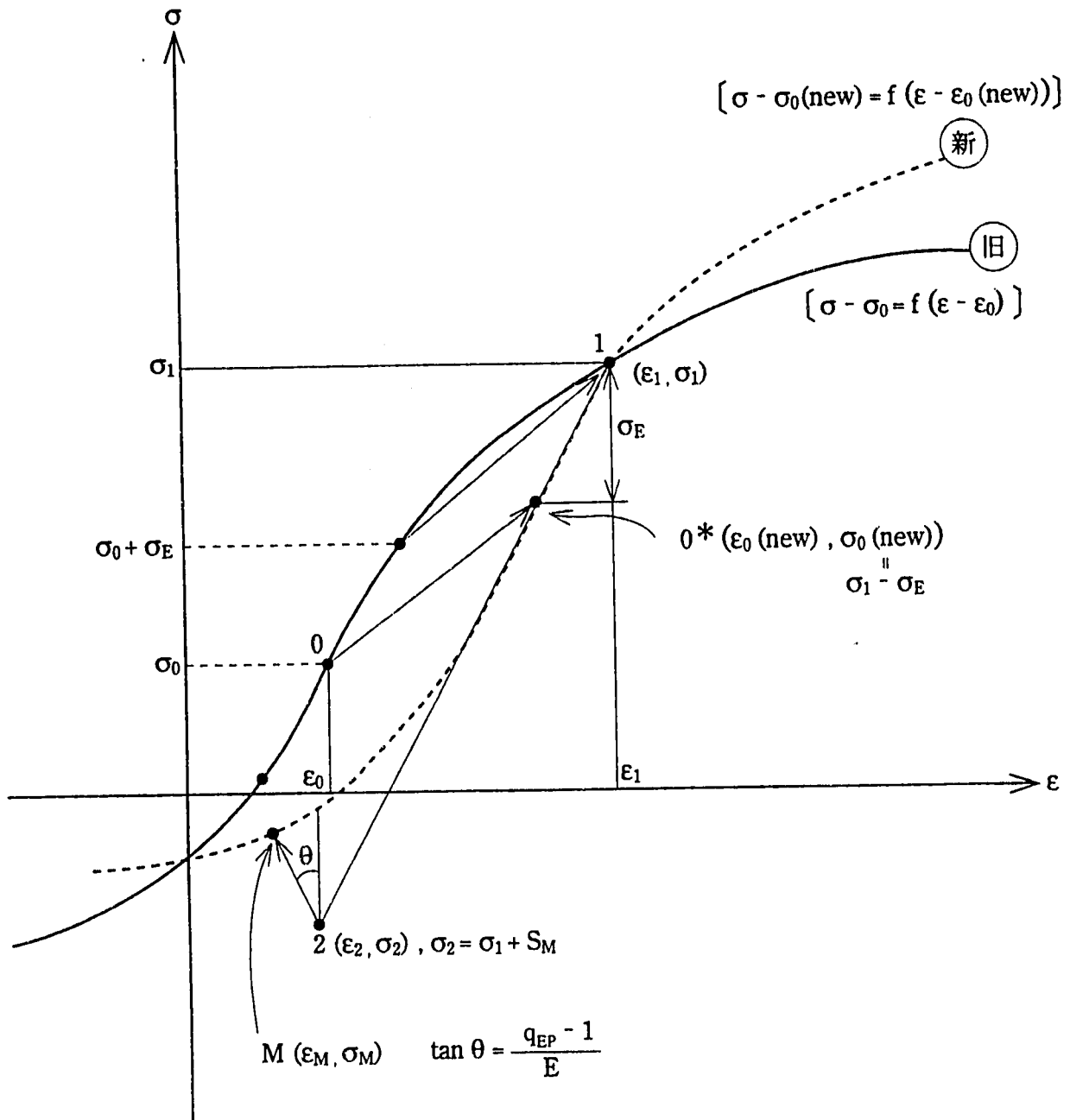
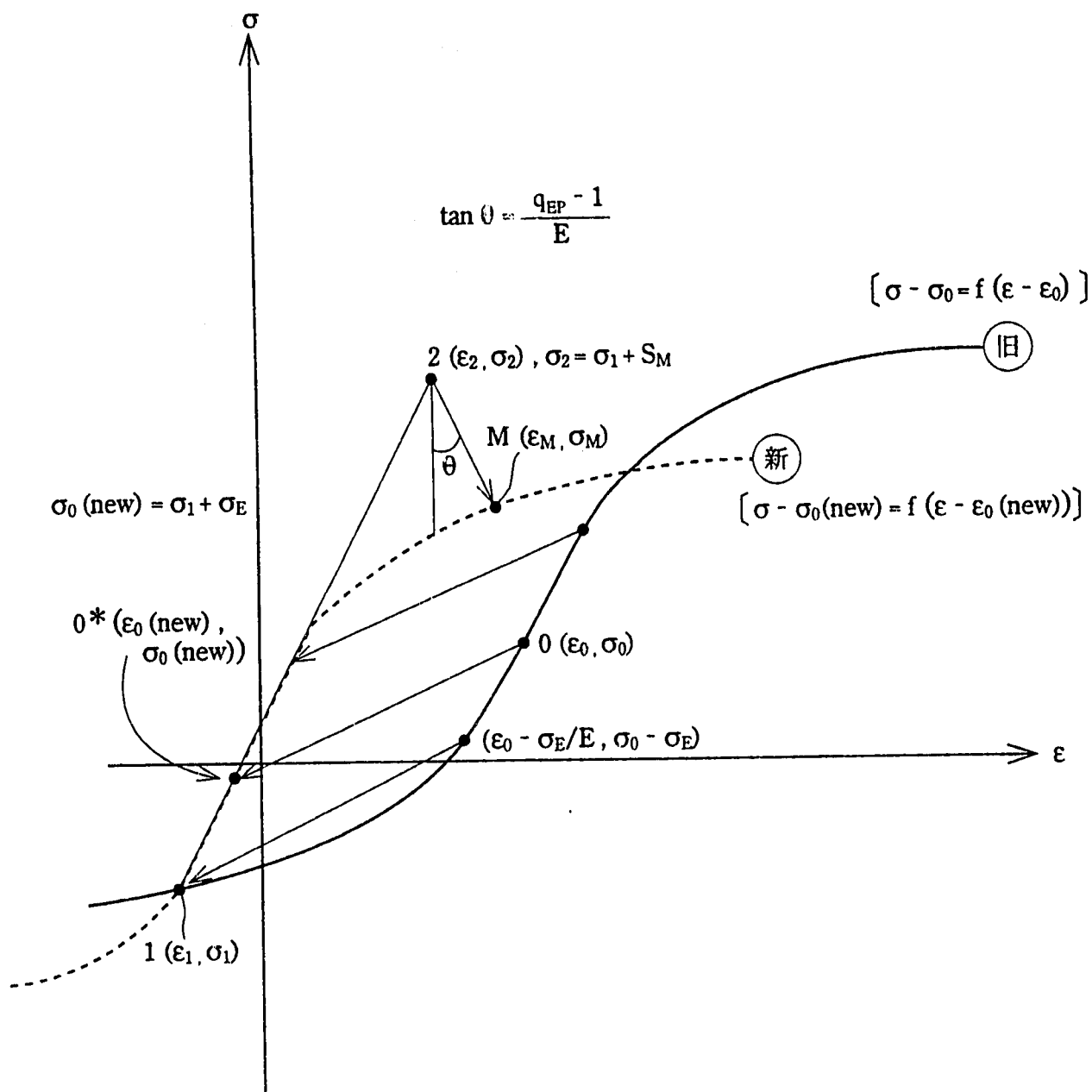


図 2.4 膜応力の重ね合わせ (引張降伏,  $S_M \geq 0$ )



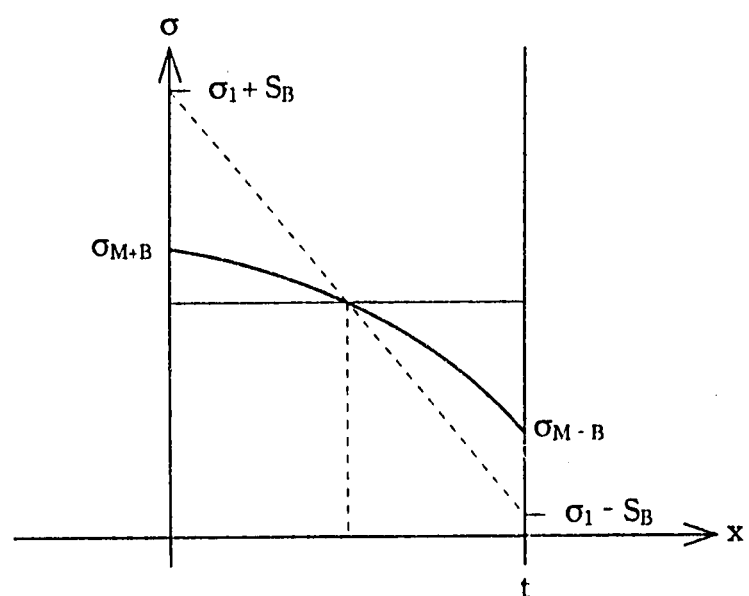
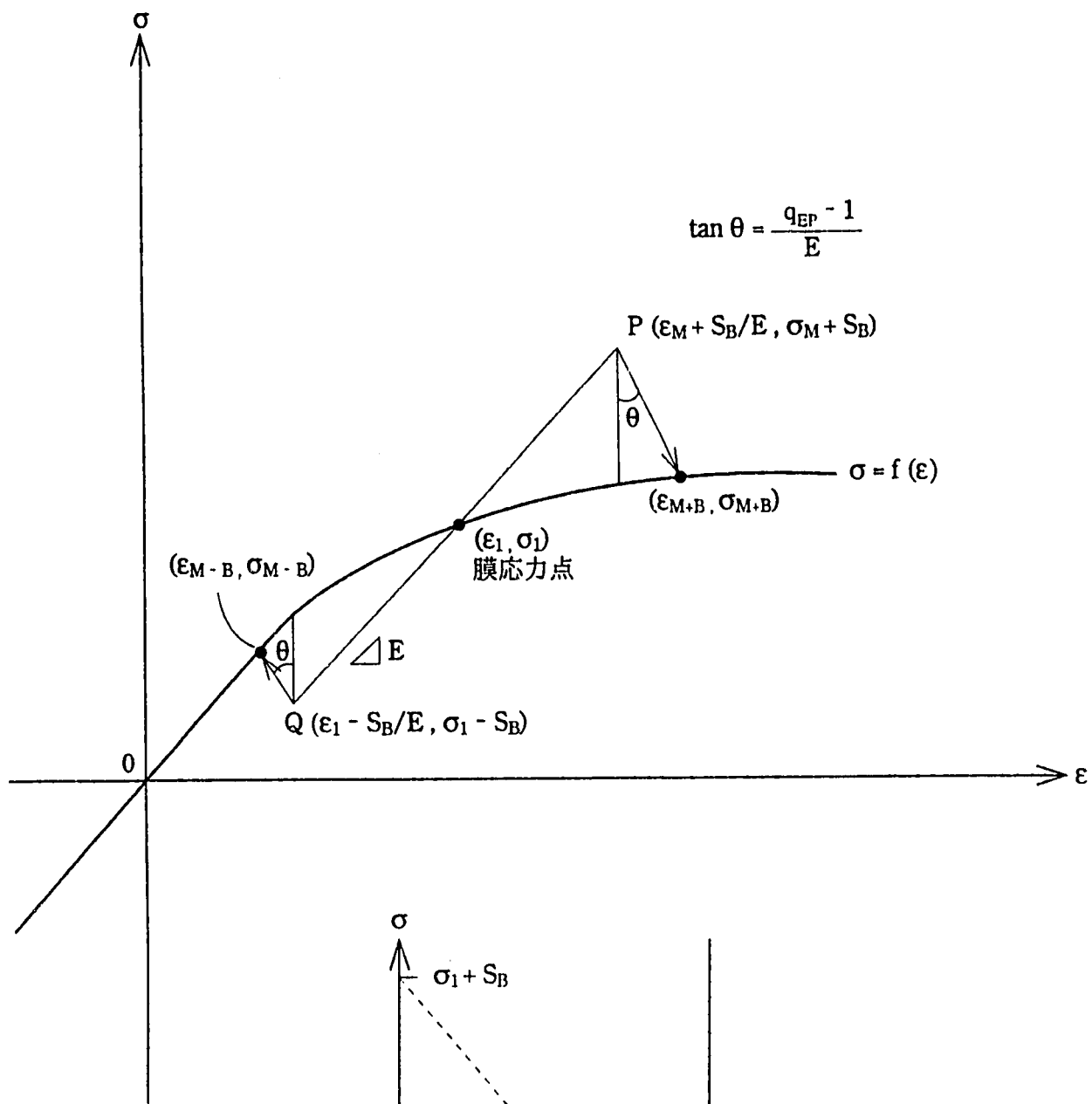
重畳前の  $(\epsilon_1, \sigma_1)$  が、引張側弾性限となるように  
 応力ひずみ曲線が平行移動する。

図 2.5 膜応力の重ね合わせ (引張降伏,  $S_M < 0$ )



重畳前の  $(\epsilon_1, \sigma_1)$  が、圧縮側弾性限となるように  
応力ひずみ曲線が平行移動する。

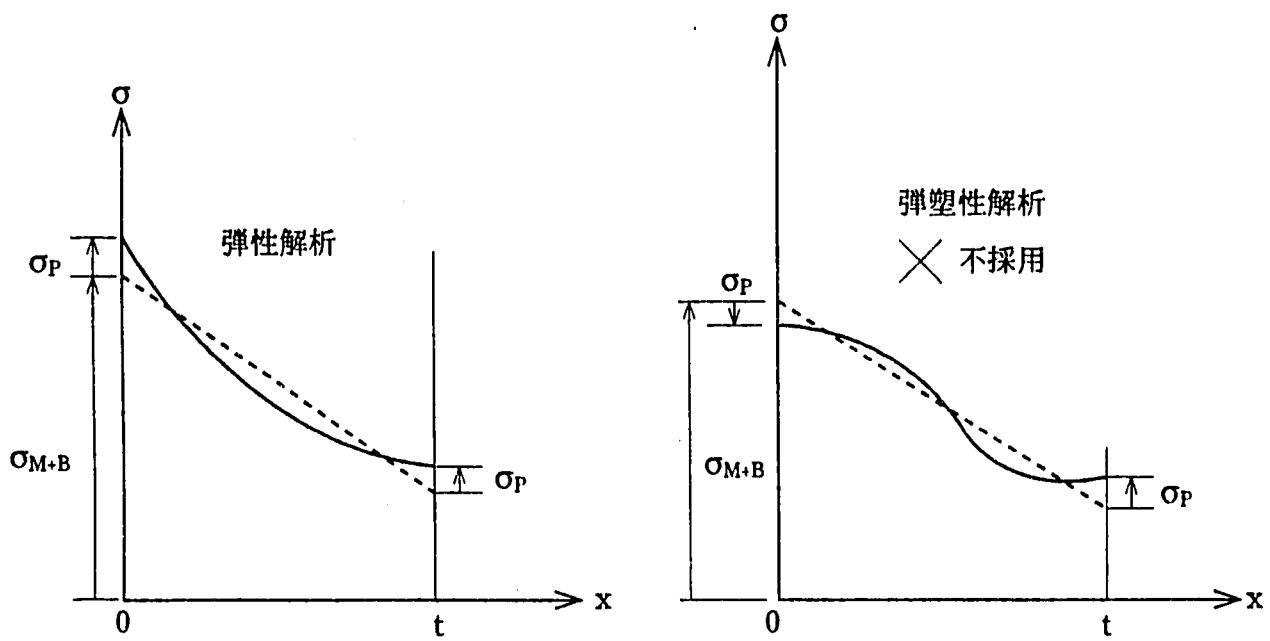
図 2.6 膜応力の重ね合わせ (圧縮降伏,  $S_M > 0$ )



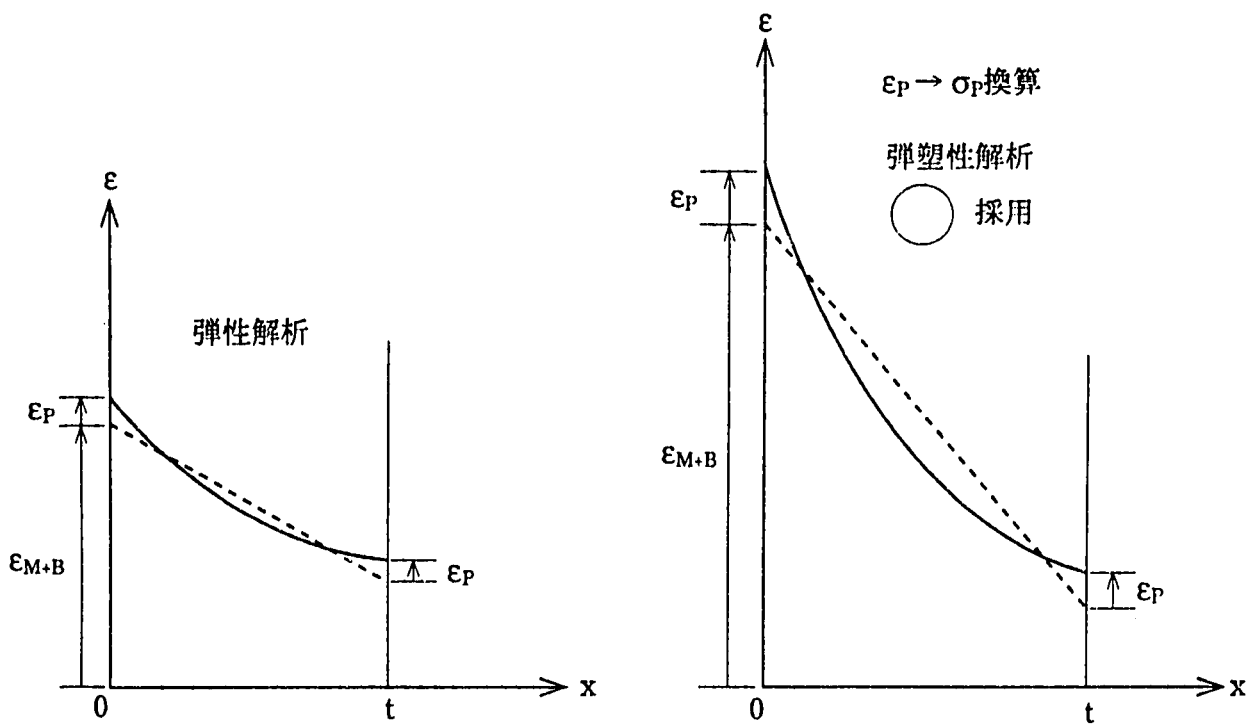
(b) 板厚内弾塑性応力分布

図 2.7 曲げ応力の重ね合わせ



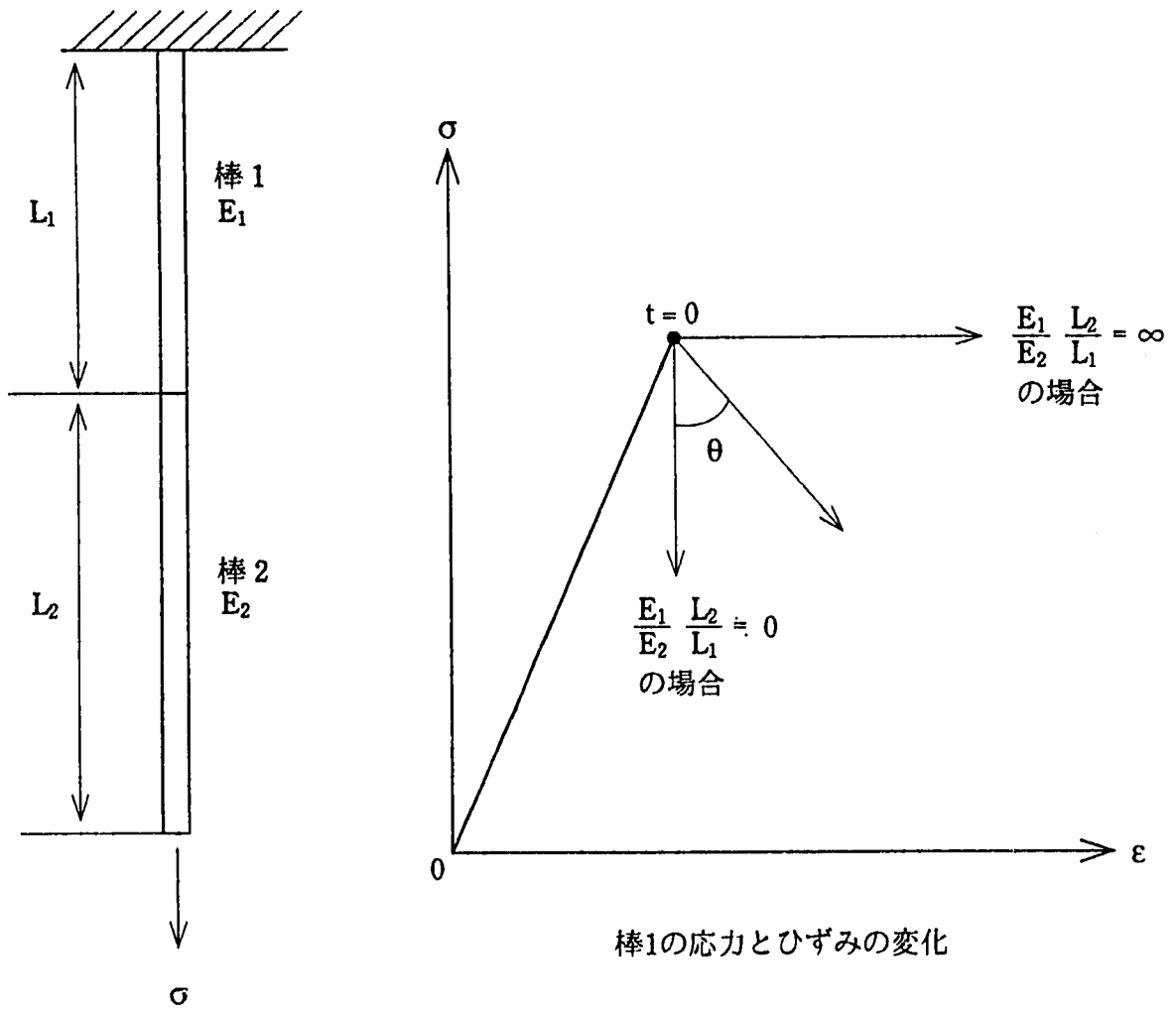


(a) 板厚内応力分布



(b) 板厚内ひずみ分布

図 2.8 弾塑性ピーク応力の簡易評価法



$$\tan \theta = \frac{q_c - 1}{E_1}$$

図 2.9 弾性追従

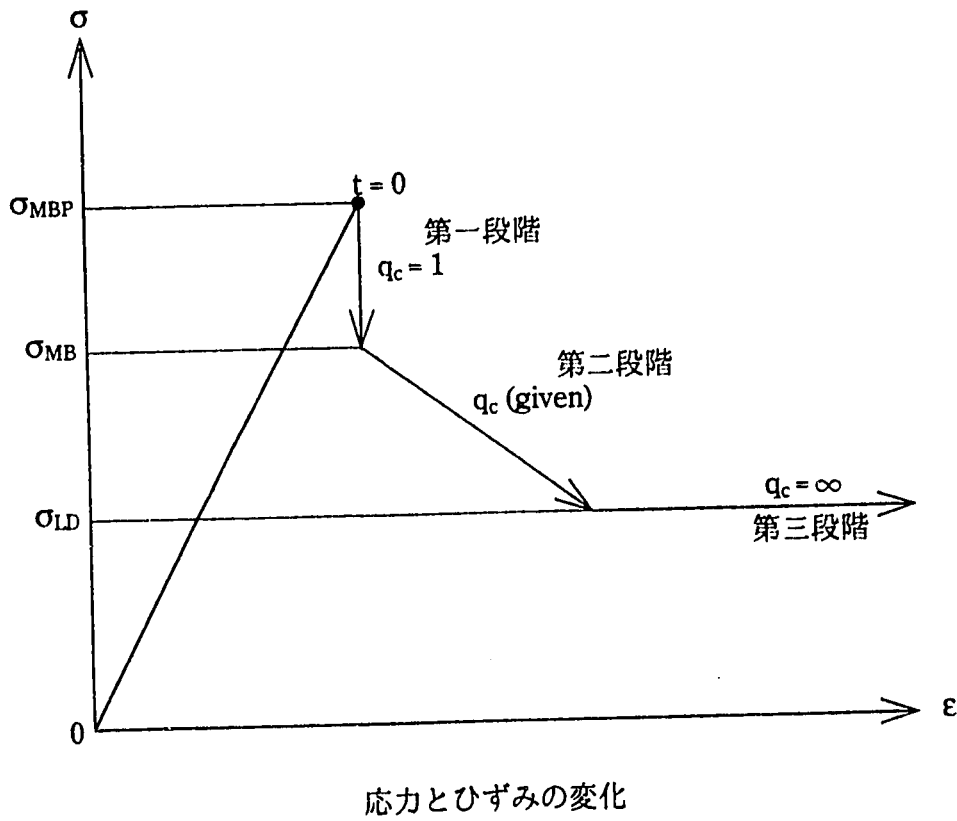
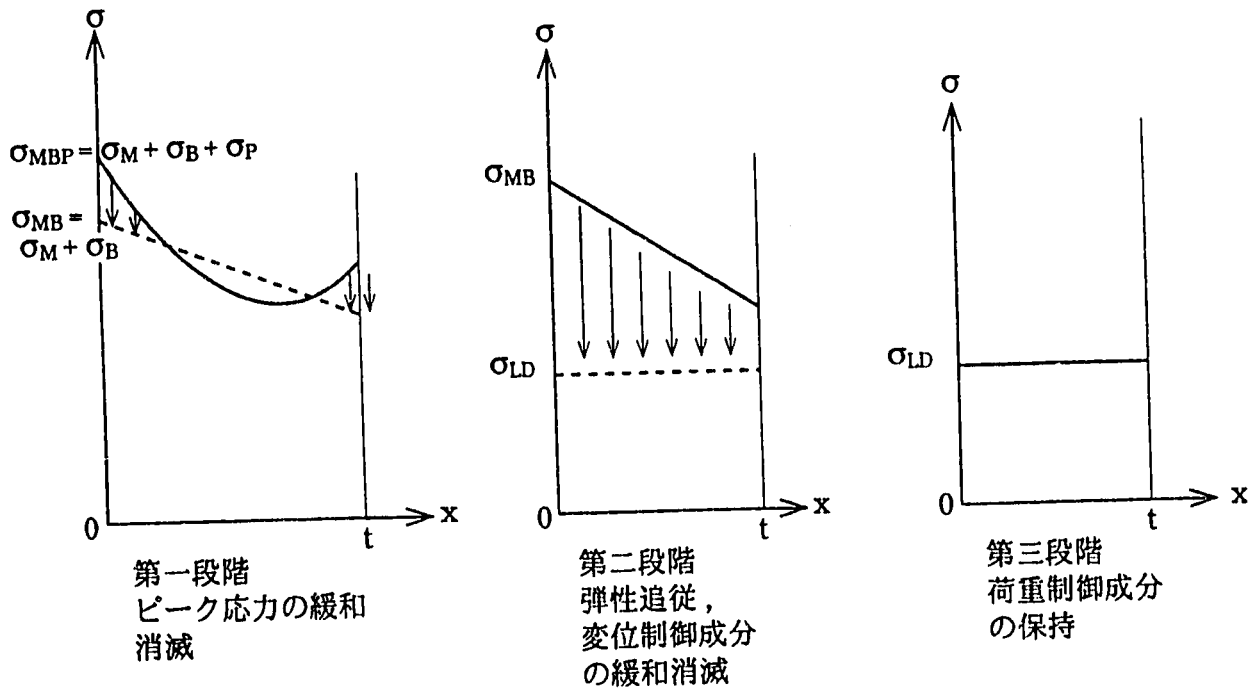


図 2.10 クリープひずみの簡易評価法

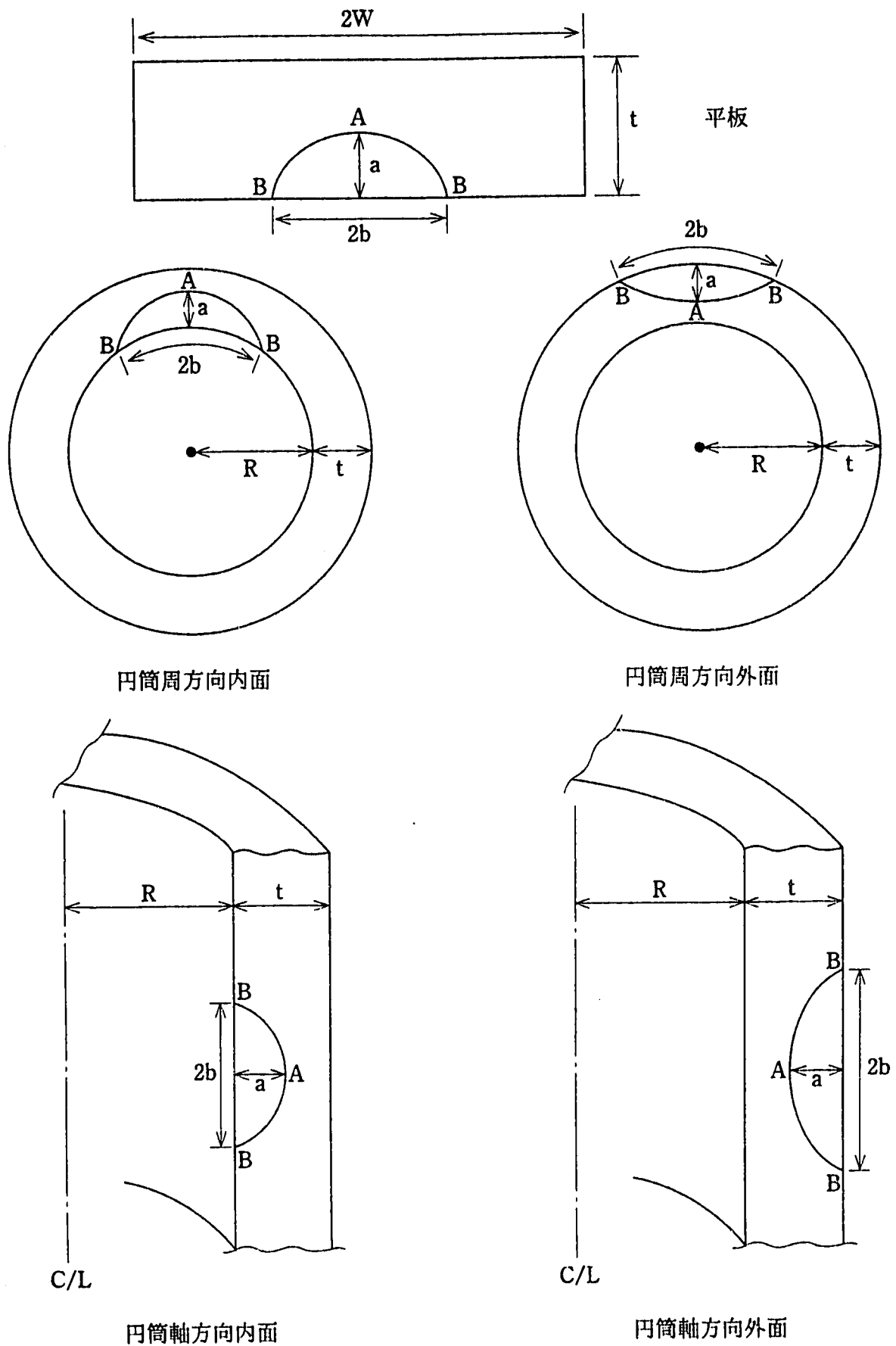
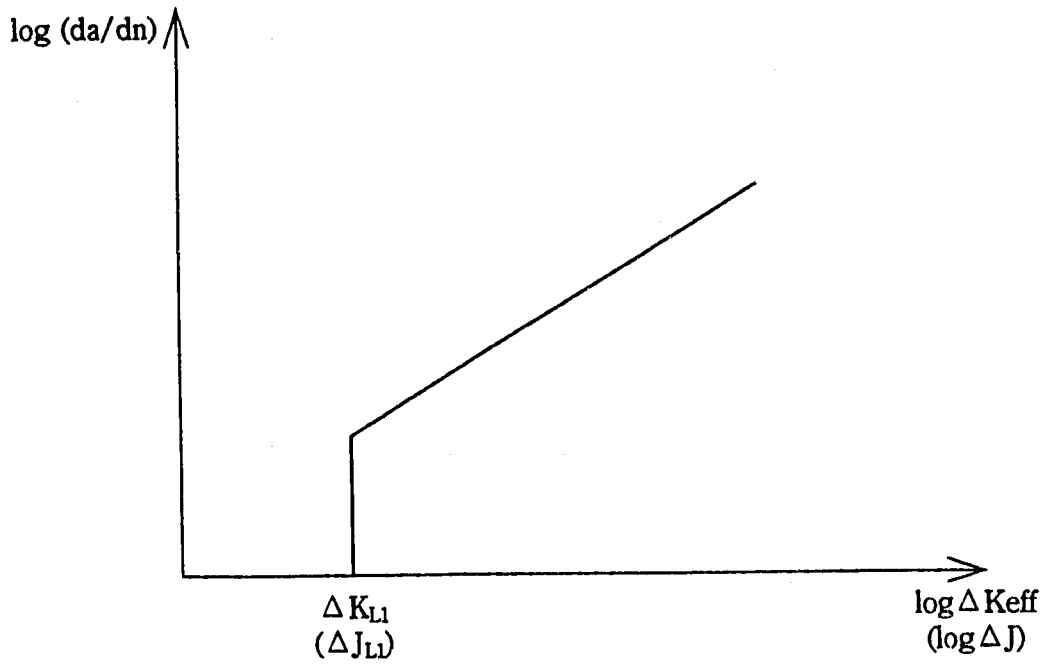
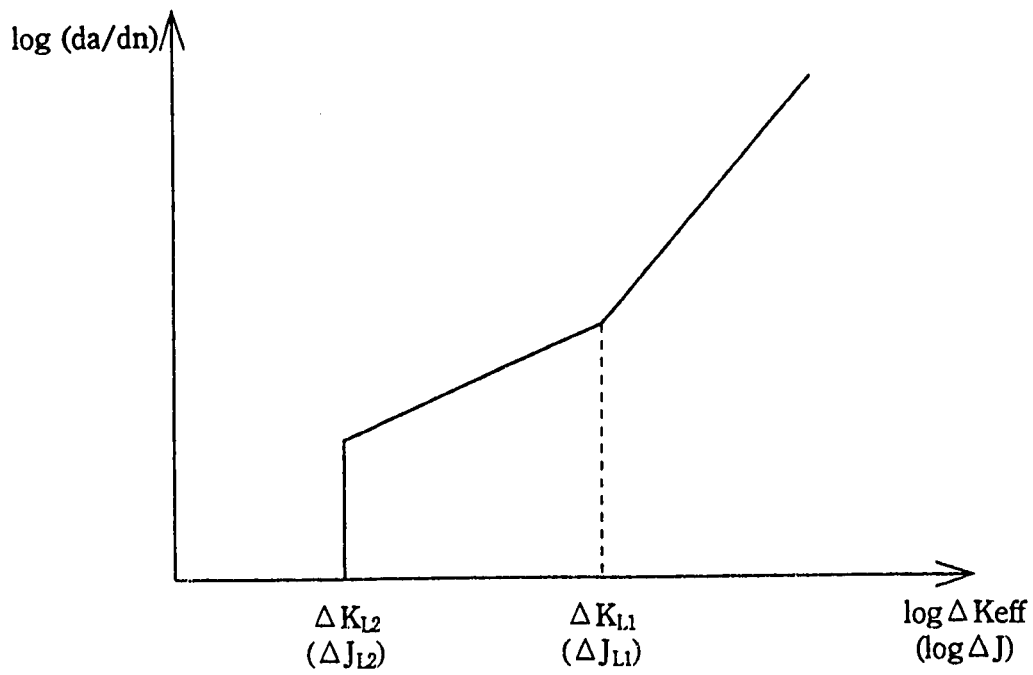


図 2.1 1 CANISで取り扱う半楕円表面き裂

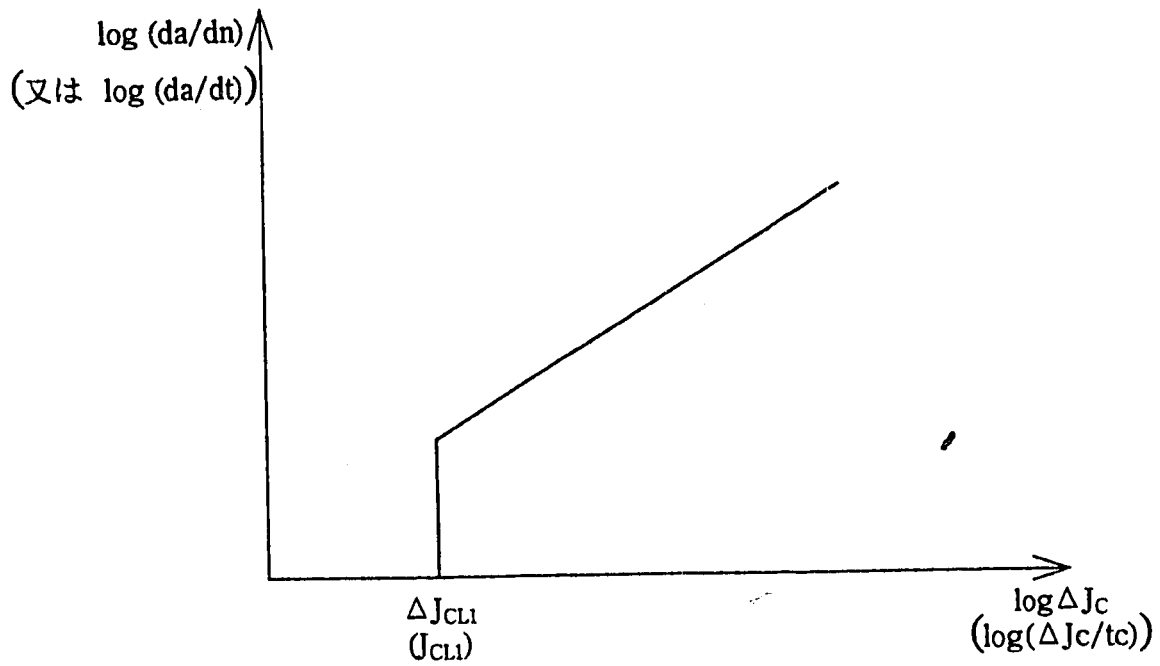


(a) 単一直線

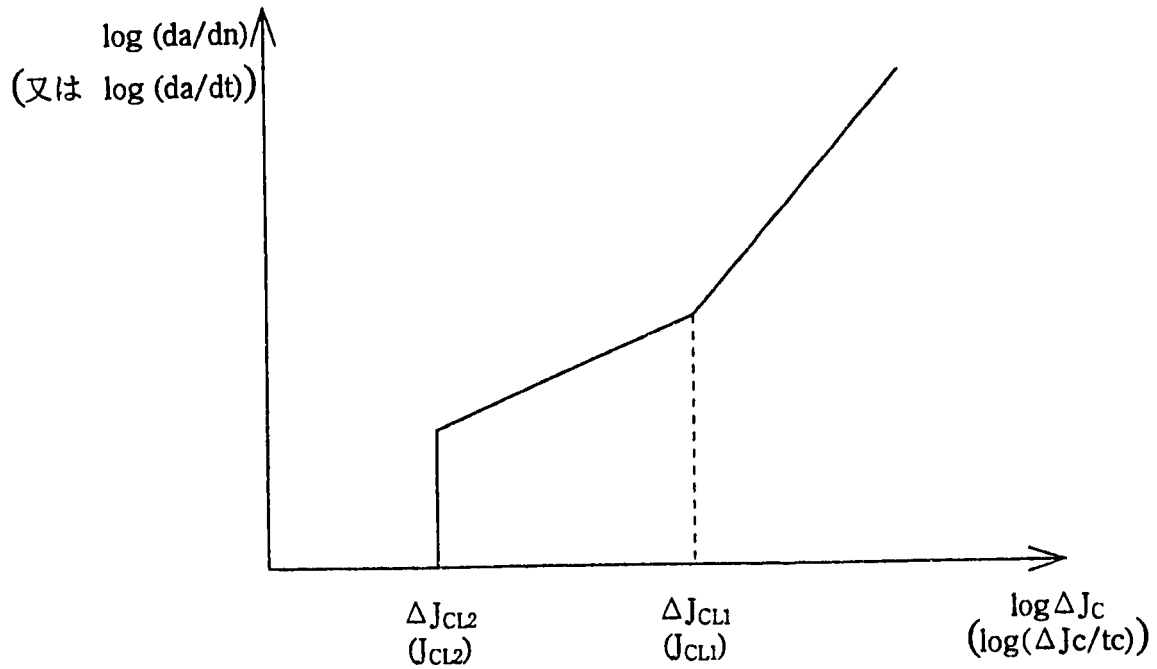


(b) 二直線

図 2.1 2 疲労き裂進展特性

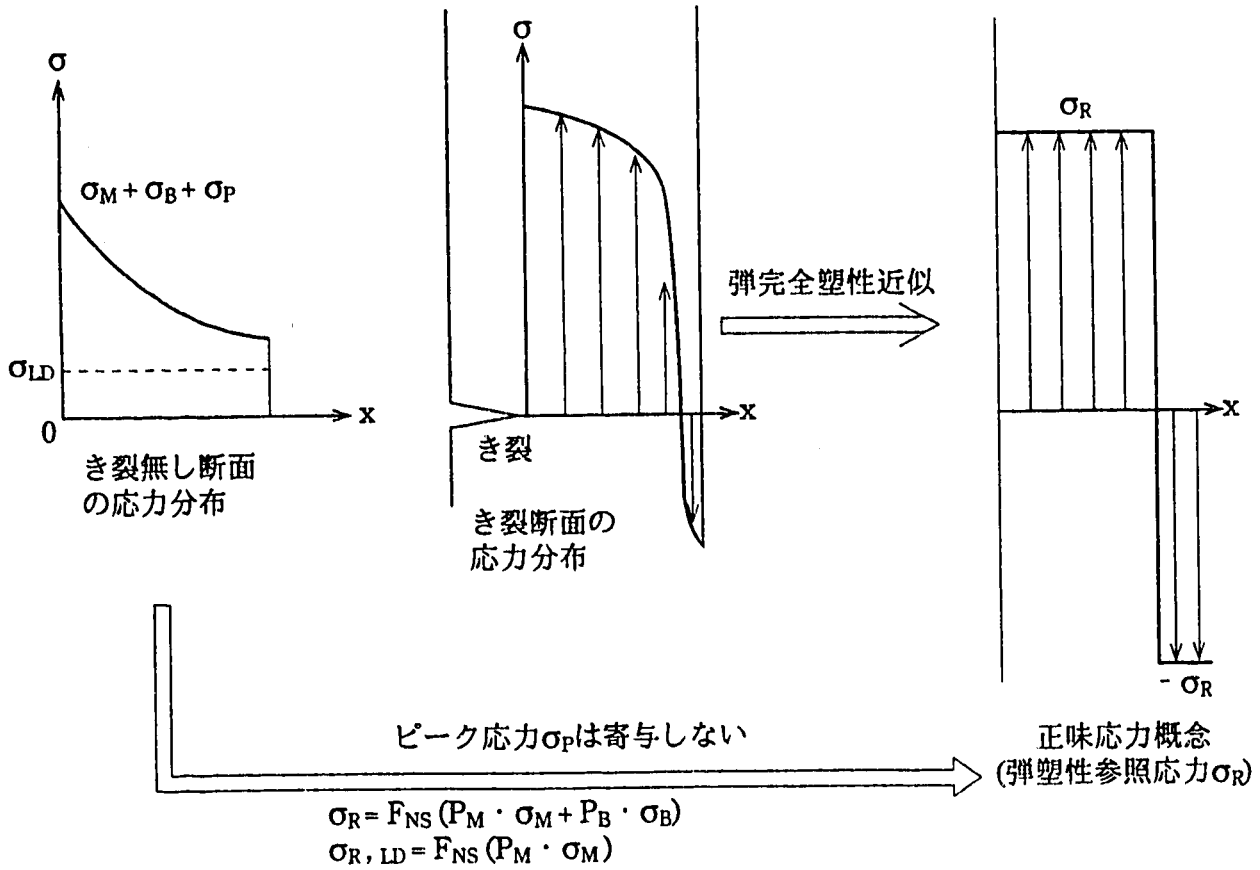


(a) 単一直線



(b) 二直線

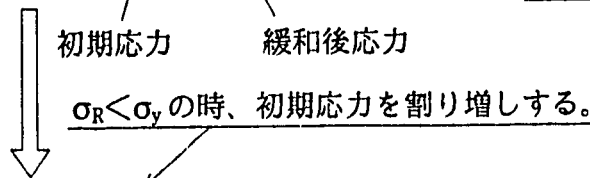
図 2.13 クリープき裂進展特性



き裂断面の参照クリープひずみ;  $\epsilon_{RC}$

$$\epsilon_{RC} = \epsilon_C (\sigma_R, q_C, \sigma_R, LD)$$

では 小規模降伏 ( $\sigma_R < \sigma_y$ ) で過小評価となる。  
(数値実験, REF. 2.5)



$$\epsilon_{RC} = \epsilon_C (\sigma_{RC}, \sqrt{q_C}, \sigma_R) + \epsilon_C (\sigma_R, q_C, \sigma_R, LD) \quad \text{が良い近似を与える。}$$

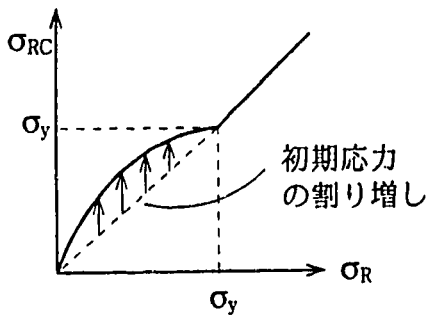


図 2.14 簡易クリープ解析の概念

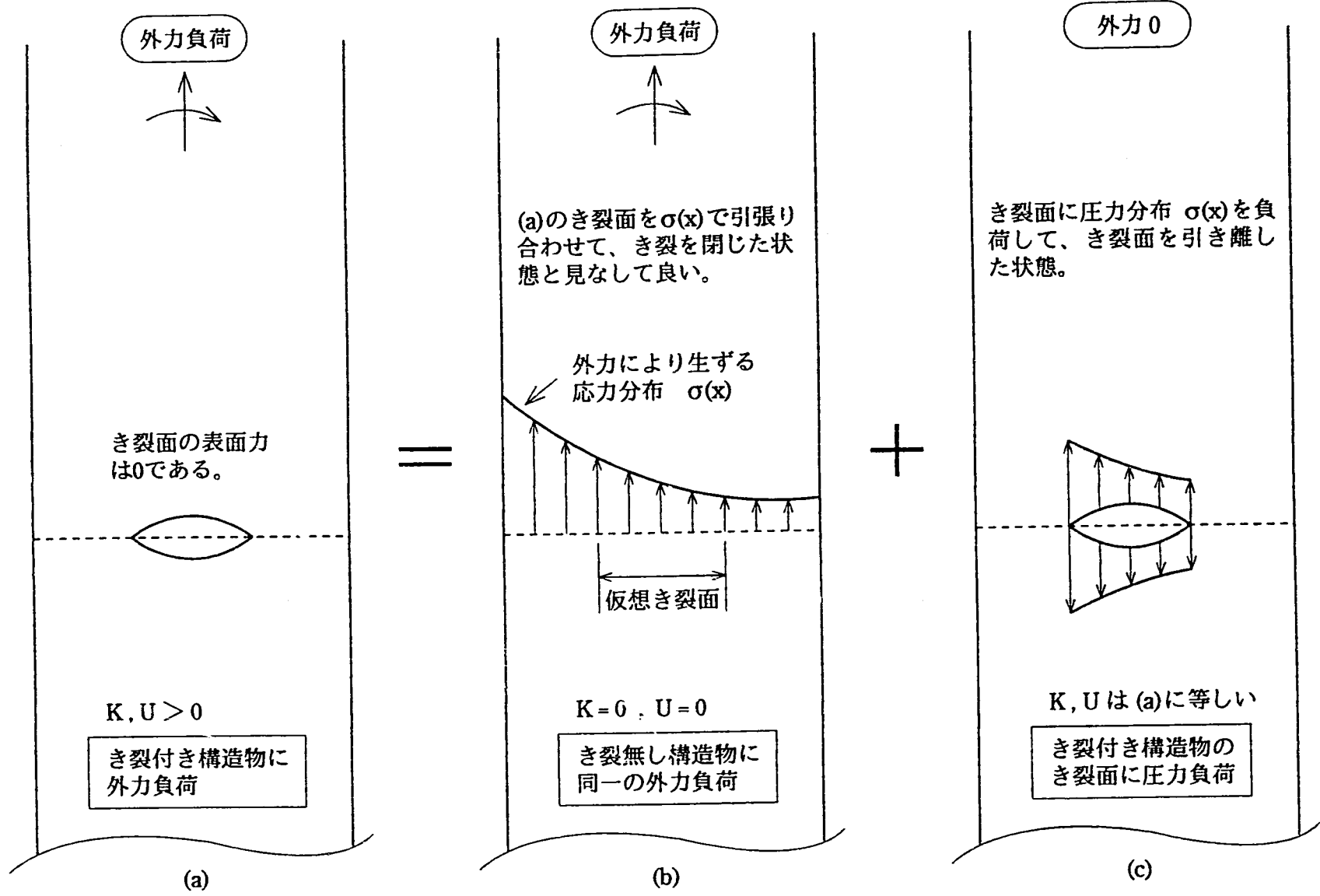


図 2.15 重ね合わせの原理の説明



## 3. CANISの使用マニュアル

## 3.1 CANISの入力データ

CANISの入力データは表3.1 に示す16種類のデータからなる。解析モデルに応じて必要なデータのみ入力すればよい。データの順番はENDデータが最後であること、またCONTデータを入力する場合はGEOMデータより前であること、それ以外はどのような順番であってもよい。各種種類のデータ群の前後には任意枚数のコメントカードが挿入できる。コメントカードは1カラムが空でなければならない。同一種類のデータ群の中間にコメントカードを挿入してはいけない。

CANISには表3.2 に示す7鋼種の材料特性（Ludwik型の単調負荷応力ひずみ関係式、Ludwik型の繰り返し応力ひずみ関係式、指数型のクリープひずみ式、疲労破損式、クリープ破断式）が温度依存で定義され、ライブラリ化されている。これらの材料データライブラリを使用する場合、鋼種番号と参照温度を入力すれば良い。各入力データの書式および内容を次節以下に示す。

表3.1 CANISの入力データの種類

種類	内 容	G	K	I
TITL	タイトルの記述	○	○	○
CONT	解析モデル、パラメータ	○	○	○
GEOM	形状データ	◎	◎	◎
EPSS	材料の応力ひずみ関係式データ	○	○	○
KVAL	材料のK値データ	○	○	
JVAL	材料のJ値データ	○		
CREP	材料のクリープひずみ式データ	○	○	○
RUPT	材料のクリープ破断式データ	○	○	○
FATG	材料の疲労き裂進展データ	○	○	
CRPG	材料のクリープき裂進展データ	○	○	
NFFC	材料の疲労破損式データ			○
FAIL	破損クライテリア選択データ	○		
LRAT	漏洩率計算のデータ	○	○	
EVEN	事象、荷重データ	◎	◎	◎
DCIA	き裂発生確率評価のデータ			◎
END	データの終わり	◎	◎	◎

(注) ◎は入力必須、○は入力有効、空欄は入力無効である。

表3.2 CANISの材料データライブラリの鋼種と鋼種指定番号

鋼 種	SUS304	SUS316	SUS321	2.25Cr-1Mo板	2.25Cr-1Mo管	9Cr-1Mo	改良SUS316
指定番号IMAT	304	316	321	2250	2251	91	3160

## 3.1.1 TITLデータ

	10	20	30	40	50	60	70
TITL		ITITL					

- ・タイトルを入力する。プリント出力の各ページに出力される。

カラム	変数名	タイプ	内 容
1~4		英字	識別ラベル (TITL) を入力する
11~70	ITITL	英数字	タイトルを記入 (60文字以内)

## 3.1.2 CONTデータ

	10	20	30	40	50	60	70						
A	CONT	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10		
B		P1		P2		P3		P4		P5		P6	

- ・解析モデルに関するオプションおよびパラメータを入力する。CONTデータを入力しない場合は  $K2=2$ 、 $K3=K4=K5=K6=20$ 、 $K7=0$ 、 $P1=P2=P3=1.0$ 、 $P4=P5=0.2$  が設定される。

- ・Aカード

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英字	識別ラベル (CONT) を入力する
6~10	K1	整数	現在未使用
11~15	K2 = KCRAC	整数	対象構造物 = 1 ; 平板、 = 2 ; 円筒 (周方向断面、内面)、= 3 ; 円筒 (軸方向断面、内面) = 4 ; 円筒 (周方向断面、外面)、= 5 ; 円筒 (軸方向断面、外面)
16~20	K3 = KFNS	整数	正味断面形状関数 = 1 ; 定数、 $\geq 2$ ; 形状関数ライブラリ (表3.3 参照) < 0 ; ユーザー定義の形状関数サブプログラム(XFNS)使用 ブランクの場合、KFNS = 10・KCRAC にデフォルト設定される。
21~25	K4 = KSCKV	整数	表面き裂K値解 $\geq 10$ ; 表面き裂K値解ライブラリ (表3.4 参照) < 0 ; ユーザー定義の表面き裂K値解サブプログラム(XSCKV) 使用 ブランクの場合、KSCKV = 10・KCRAC にデフォルト設定される。
26~30	K5 = KECKV	整数	片側き裂K値解 $\geq 10$ ; 片側き裂K値解ライブラリ (表3.5 参照) < 0 ; ユーザー定義の片側き裂K値解サブプログラム(XECKV) 使用 ブランクの場合、KECKV = 10・KCRAC にデフォルト設定される。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
31~35	K6 = KPCKV	整数	貫通き裂K値解 $\geq 10$ ; 貫通き裂K値解ライブラリ (表3.6 参照) $< 0$ ; ユーザー定義の貫通き裂K値解サブプログラム(XPCKV) 使用 ブランクの場合、 $KPCKV = 10 \cdot KCRAC$ にデフォルト設定される。
36~40	K7 = KPBAK	整数	弾塑性ピーク応力評価式 $= 0$ ; $\sigma_P = S_P$ (入力データ使用) $= 1$ ; $\sigma_P = S_P f'(\epsilon_M) / E$ $= 2$ ; $\sigma_P = S_P f'(\epsilon_M + \epsilon_B) / E$ $= 3$ ; $\sigma_P = S_P [f'(\epsilon_M + \epsilon_B) + f'(\epsilon_M - \epsilon_B)] / 2 E$
41~55	K8~10	整数	現在未使用

## ・ Bカード

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~20	P1	実数	KFNS=1の場合、形状関数 ( $F_{NS}$ ) = 定数を入力する。
21~30	P2	実数	膜応力補正パラメータ $p_M$ ; 参照応力 $\sigma_R$ は次式で計算される。 $\sigma_R = F_{NS} (p_M \cdot \sigma_M + p_B \cdot \sigma_B)$
31~40	P3	実数	曲げ応力補正パラメータ $p_B$ ; 上式参照
41~50	P4	実数	クリープ初期参照応力係数 $p_{C1}$ ; クリープ初期参照応力 $\sigma_{RC}$ は次式で 計算される。 $\sigma_R \geq \sigma_Y$ (0.2% 降伏応力) の時 $\sigma_{RC} = \sigma_R$ $\sigma_R < \sigma_Y$ の時 $\sigma_{RC} = \sigma_R \cdot (\sigma_Y / \sigma_R)^B$ ここに $B = p_{C1} + p_{C2} \cdot (a/t)$ である ( $a$ はき裂深さ、 $t$ は板厚)。
51~60	P5	実数	クリープ初期参照応力係数 $p_{C2}$ ; 上式参照
61~70	P6	実数	現在未使用

表3.3 形状関数ライブラリの内容

KFNS	P C <sub>i</sub> L <sub>i</sub> C <sub>o</sub> L <sub>o</sub>	対象荷重条件	注 意 事 項
2	◎ ○ ○ ○ ○	荷重制御膜応力	表面き裂は局所崩壊条件、薄肉円筒も適用可
3	◎ ○ ○ ○ ○	荷重制御板曲げ	表面き裂は局所崩壊条件、薄肉円筒も適用可
4	◎ ○ ○ ○ ○	変位制御板曲げ	表面き裂は局所崩壊条件、薄肉円筒も適用可
10	◎ ○ ○ ○ ○	荷重制御膜応力	き裂形状を矩形近似、薄肉円筒も適用可
11	◎ ○ ○ ○ ○	荷重制御板曲げ	き裂形状を矩形近似、薄肉円筒も適用可
20, 40	◎ <sub>20</sub> ◎ <sub>40</sub>	荷重制御膜応力	き裂形状を扇型近似、LLNLの式
21	◎	荷重制御軸曲げ	き裂形状を扇型近似した解
22, 42	◎ <sub>22</sub> ◎ <sub>42</sub>	変位制御軸曲げ	半径、板厚の関数、き裂形状に依存しない
23, 43	◎ <sub>23</sub> ◎ <sub>43</sub>	荷重制御軸曲げ	き裂形状を扇型近似した薄肉円筒の近似式
30, 50	◎ <sub>30</sub> ◎ <sub>50</sub>	荷重制御膜応力	BMI の式、表面き裂は局所崩壊条件
31, 51	◎ <sub>31</sub> ◎ <sub>51</sub>	荷重制御膜応力	BMI の改定式、表面き裂は局所崩壊条件
32, 52	◎ <sub>32</sub> ◎ <sub>52</sub>	荷重制御膜応力	Ewing, Millerの式
41	◎	荷重制御軸曲げ	き裂形状を扇型近似した解

(注) P (平板)、C (周方向)、L (軸方向)、添字 i (内面き裂)、添字 o (外面き裂)

表3.4 表面き裂K値解ライブラリの内容

KSCKV	P C <sub>i</sub> L <sub>i</sub> C <sub>o</sub> L <sub>o</sub>	内容 および 注意事項
10	◎ ○ ○ ○ ○	白鳥の解と三好の解、テーブル解、薄肉円筒にも適用可
11	◎ ○ ○ ○ ○	白鳥の解と三好の解、関数fitting、薄肉円筒にも適用可
12	◎ ○ ○ ○ ○	Newman-Raju の解、 $F_P / F_M$ は11の式、薄肉円筒にも適用可
20, 21	◎ 周方向内面	白鳥の解、 $F_M$ は引張(20)と軸曲げ(21)を選択、 $R/t=10\sim 1.67$
22	◎	LLNLの解、 $F_B / F_M$ は12の式、 $F_P / F_M$ は11の式、 $R/t=5$
30	◎軸方向内面	Raju-Newman の2き裂対の解、関数fitting、 $R/t=10, 4$
31	◎	白鳥の解( $R/t=10$ )と PNCの解( $R/t=2.5$ )、テーブル解
40, 41	周方向外面 ◎	白鳥の解、 $F_M$ は引張(40)と軸曲げ(41)を選択、 $R/t=10, 5, 2.5$
50	軸方向外面 ◎	Raju-Newman の2き裂対の解、関数fitting、 $R/t=10, 4$

(注) P (平板)、C (周方向)、L (軸方向)、添字 i (内面き裂)、添字 o (外面き裂)

表3.5 片側き裂K値解ライブラリの内容

KECKV	P C <sub>i</sub> L <sub>i</sub> C <sub>o</sub> L <sub>o</sub>	内容 および 注意事項
10, 11	◎ ○ ○ ○ ○	$F_M$ と $F_B$ は解析解、 $F_P$ は本報(10)とXeu-Ren Wu(11)を選択
20	◎ 周方向内面	Xeu-Ren Wuの解、 $R/t=9, 4, 2.33$
21, 22	◎	植田らの解、 $R/t=4.79, 2.58, 0.84$ 、テーブル(21)と関数(22)
23	◎	Labbens らの解、 $R/t=10$
30	◎軸方向内面	Xeu-Ren Wuの2き裂対の解、 $R/t=4, 2, 1.33, 1$
31	◎	Xeu-Ren Wuの単独き裂の解、 $R/t=4, 2, 1.33, 1$
32	◎	Labbens らの単独き裂の解、 $R/t=10$
40	周方向外面 ◎	Xeu-Ren Wuの解、 $R/t=9, 4, 2.33$
50	軸方向外面 ◎	Xeu-Ren Wuの2き裂対の解、 $R/t=4, 2, 1.33, 1$
51	◎	Xeu-Ren Wuの単独き裂の解、 $R/t=4, 3, 2, 1.33, 1$

(注) P (平板)、C (周方向)、L (軸方向)、添字 i (内面き裂)、添字 o (外面き裂)

表3.6 貫通き裂K値解ライブラリの内容

KPCKV	P C <sub>i</sub> L <sub>i</sub> C <sub>o</sub> L <sub>o</sub>	内容 および 注意事項
10	◎	中央き裂付き平板の解 (CCT)
20, 40	◎ <sub>20</sub> ◎ <sub>40</sub>	Sanders の引張りの解、Zahoorの fitting式、 $R_m / t = 5\sim 20$
21, 41	◎ <sub>21</sub> ◎ <sub>41</sub>	Sanders の軸曲げの解、Zahoorの fitting式、 $R_m / t = 5\sim 20$
30, 50	◎ <sub>30</sub> ◎ <sub>50</sub>	Tada-Parisの fitting式

(注) P (平板)、C (周方向)、L (軸方向)、添字 i (内面き裂)、添字 o (外面き裂)

## 3.1.3 GEOMデータ (入力必須データ)

	10	20	30	40	50	60	70	
A	GEOM	NCRAC	RADI	THIC	AACR	BBCR	ATLIM	BWLIM
B		AA(1)	BB(1)					
		AA(2)	BB(2)					
		↓	↓					
		AA(NCRAC)	BB(NCRAC)					

・形状に関するデータを入力する。GEOMデータは入力必須である。

・Aカード

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英字	識別ラベル (GEOM) を入力する
6~10	NCRAC	整数	破壊力学パラメータ計算 (CANIS-K) の場合 き裂形状の総数を入力する (1)。制限値は $NCRAC \leq 50$
11~20	RADI	実数	平板 ( $KCRAC = 1$ ) に対しては板幅 / 2 ( $w$ ) を入力する。 円筒 ( $KCRAC \geq 2$ ) に対しては内半径 ( $R$ ) を入力する。(注)
21~30	THIC	実数	板厚 $t$ を入力する。
31~40	AACR	実数	き裂進展計算 (CANIS-G) の場合、初期き裂深さ $a$ を入力する
41~50	BBCR	実数	き裂進展計算 (CANIS-G) の場合、初期き裂半長 $b$ を入力する
51~60	ATLIM	実数	相対深さ $a/t$ の限界値 $\alpha_{LIM}$ を入力する ( $0 < \alpha_{LIM} < 1$ )。ブランク 又は許容範囲外の値が入力された時は $\alpha_{LIM} = 0.9$ が設定される。
61~70	BWLIM	実数	相対長さ $b/W$ の限界値 $\xi_{LIM}$ を入力する ( $0 < \xi_{LIM} < 1$ )。ブランク 又は許容範囲外の値が入力された場合は、 $\xi_{LIM} = 0.55$ (円筒周方向 き裂) 又は $\xi_{LIM} = 0.9$ (平板、円筒軸方向き裂) が設定される。

(注) 円筒周方向き裂に対しては  $w = \pi R$  (内面き裂) または  $\pi R_o$  (外面き裂) が設定される。

円筒軸方向き裂に対しては  $w = 5 (R_m t)^{1/2}$  が設定される。

ここに  $R_o = R + t$  は外半径、 $R_m = R + t/2$  は平均半径である。

・Bカード

複数き裂形状の破壊力学パラメータ計算 (CANIS-K) の場合のみ入力する。

き裂形状  $a$ ,  $b$  のペアを NCRAC枚数だけ繰り返し入力する。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~20	AA(j)	実数	き裂形状番号 $j$ のき裂深さ ( $a$ ), ( $j=1, NCRAC$ )
21~30	BB(j)	実数	き裂形状番号 $j$ のき裂長さ / 2 ( $b$ ), ( $j=1, NCRAC$ )

## 3.1.4 EPSSデータ

	10	20	30	40	50	60	70		
A	EPSS	KEPSS	IMAT	IDUM	XEPSS1	XEPSS2	XEPSS3	XEPSS4	
B		XEPSS5	XEPSS6	XEPSS7	XEPSS8	XEPSS9	XEPSS10		
C		EP <sub>1</sub>	EP <sub>2</sub>	EP <sub>3</sub>	EP <sub>4</sub>	EP <sub>5</sub>	EP <sub>6</sub>		
		EP <sub>7</sub>	EP <sub>8</sub>	→		EP <sub>MULT</sub>			
D		SG <sub>1</sub>	SG <sub>2</sub>	SG <sub>3</sub>	SG <sub>4</sub>	SG <sub>5</sub>	SG <sub>6</sub>		
		SG <sub>7</sub>	SG <sub>8</sub>	→		SG <sub>MULT</sub>			

・材料の応力ひずみ関係のデータを入力する。CANISには7鋼種の材料データライブラリが内蔵され、これを使用することができる。EPSSデータを入力しない場合は、SUS304ライブラリの繰返し弾塑性応力ひずみ関係、参照温度 500℃、降伏応力補正係数  $\alpha_Y = 1.0$  が設定される。

## ・Aカード

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英字	識別ラベル (EPSS) を記入
6~10	KEPSS	整数	応力ひずみ関係の選択 <u>= 0</u> ; 弾性応力ひずみ関係 = 1 ; Ludwik型の単調負荷弾塑性応力ひずみ関係 (注1) (1)式 = 2 ; Ludwik型の繰返し負荷弾塑性応力ひずみ関係 (注2) (2)式 = 3 ; Ramberg-Osgood型の弾塑性応力ひずみ関係 (注3) (3)式 = 4 ; 多直線近似の弾塑性応力ひずみ関係
11~15	IMAT = MULT	整数	KEPSS=0, 1, 2 の時 ; 材料鋼種の選択 <u>(0)</u> 、(注4) KEPSS=3 の時 ; 未使用 KEPSS=4 の時 ; 多直線データのデータ点数 (制限値MULT ≤ 50)
16~20	IDUM	整数	現在未使用
21~30	XEPSS1	実数	ライブラリ使用 (KEPSS=0, 1, 2, IMAT > 0) の時 ; 参照温度 $T_R$ (°C) 制限値は付録1を参照 ライブラリ使用しない場合 ; ヤング率 E
31~40	XEPSS2	実数	ライブラリ使用 (KEPSS=0, 1, 2, IMAT > 0) の時 ; 降伏応力補正係数 $\alpha_Y$ 制限値は $0.7 \leq \alpha_Y \leq 1.5$ 、 <u>ブランク又は範囲外の値が入力された場合は <math>\alpha_Y = 1</math> がデフォルト設定される。(注5)</u> ライブラリ使用しない場合 ; 降伏応力 $\sigma_Y$ (0.2%耐力)
41~50	XEPSS3	実数	流動応力 (破壊応力) $\sigma_r$ ; <u>ブランク又は <math>\sigma_Y</math> 以下の値が入力された場合は <math>\sigma_r = 2 \sigma_Y</math> がデフォルト設定される。</u>
51~60	XEPSS4	実数	現在未使用

$$\left. \begin{array}{l} \text{(注1)} \quad \sigma \leq \sigma_p \text{ (弾性限) に対し} \quad \varepsilon = \varepsilon_p = \sigma / E \\ \sigma > \sigma_p \text{ に対し} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_p = \sigma / E + \{ (\sigma - \sigma_p) / k \}^{1/m} \end{array} \right\} \text{--- (1)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{(注2)} \quad \Delta \sigma \text{ (応力範囲)} \leq 2 \sigma_p \text{ に対し} \quad \Delta \varepsilon \text{ (ひずみ範囲)} = \Delta \sigma / E \\ \Delta \sigma > 2 \sigma_p \text{ に対し} \quad \Delta \varepsilon = \Delta \sigma / E + \{ (\Delta \sigma - 2 \sigma_p) / k \}^{1/m} \end{array} \right\} \text{--- (2)}$$

応力ひずみ関係  $\sigma = f(\varepsilon)$  として使用する時は  $\Delta \sigma = 2 \sigma$ 、 $\Delta \varepsilon = 2 \varepsilon$  とする。

$$\text{(注3)} \quad \varepsilon / \varepsilon_0 = \sigma / \sigma_0 + A (\sigma / \sigma_0)^n \quad \text{--- (3)}$$

(注4) CANISには表3.2の7鋼種の応力ひずみ関係が材料データライブラリとして内蔵されている。ヤング率E, (1)式のk, m,  $\sigma_p$ , (2)式のk, m,  $\sigma_p$ が参照温度の関数として定義されている。詳細は付録1を参照されたい。これを用いる場合、参照温度と降伏応力補正係数を入力する。降伏応力(0.2%耐力)のライブラリ値(平均特性)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{(1)式の場合} \quad \sigma_{Y, LIB} &= \sigma_p + k \cdot 0.002^m \\ \text{(2)式の場合} \quad \sigma_{Y, LIB} &= (2 \sigma_p + k \cdot 0.004^m) / 2 \end{aligned}$$

(注5)  $\sigma_Y = \sigma_{Y, LIB} / \alpha_Y$ が降伏応力として使用される。これによりライブラリ値(平均特性)と実際の材料特性とのバラツキを考慮する。使用 $\sigma_Y$ を用いて弾性限 $\sigma_p$ が次式で再設定される。

$$\begin{aligned} \text{(1)式の場合} \quad \sigma_p &= \sigma_Y - k \cdot 0.002^m \\ \text{(2)式の場合} \quad \sigma_p &= (2 \sigma_Y - k \cdot 0.004^m) / 2 \end{aligned}$$

#### ・ Bカード

KEPSS=1, IMAT $\leq$ 0 の場合 (1)式のパラメータを入力する (注6)。

KEPSS=2, IMAT $\leq$ 0 の場合 (2)式のパラメータを入力する (注7)。

KEPSS=3 の場合 (3)式のパラメータを入力する (注8)。

その他の場合はBカードを入力してはいけない。

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~20	XEPSS5	実数	KEPSS=1, IMAT $\leq$ 0 の場合; (1)式の $\sigma_p$ KEPSS=2, IMAT $\leq$ 0 の場合; (2)式の $\sigma_p$ KEPSS=3 の場合; (3)式の $\sigma_0$
21~30	XEPSS6	実数	KEPSS=1, IMAT $\leq$ 0 の場合; (1)式のm KEPSS=2, IMAT $\leq$ 0 の場合; (2)式のm KEPSS=3 の場合; (3)式の $\varepsilon_0$
31~40	XEPSS7	実数	KEPSS=1, IMAT $\leq$ 0 の場合; (1)式のk KEPSS=2, IMAT $\leq$ 0 の場合; (2)式のk KEPSS=3 の場合; (3)式のA
41~50	XEPSS8	実数	KEPSS=3 の場合のみ (3)式のn
51~70	XEPSSj	実数	現在未使用(j=9, 10)

(注6) Bカードで入力したパラメータを用いて、 $\sigma_y = \sigma_r + k \cdot 0.002^m$  が設定される。  
Aカードの XEPSS2( $\sigma_y$ ) は無視される。

(注7) Bカードで入力したパラメータを用いて、 $\sigma_y = (2\sigma_r + k \cdot 0.004^m) / 2$  が設定される。  
Aカードの XEPSS2( $\sigma_y$ ) は無視される。

(注8) Bカードで入力したパラメータを用いて、 $E = \sigma_0 / \epsilon_0$ 、 $\sigma_y = \sigma_0 [0.002 / (A \epsilon_0)]^{1/n}$  が設定される。  
Aカードの XBPSS1(E), XEPSS2( $\sigma_y$ ) は無視される。

#### ・ Cカード

KEPSS=4 の場合のみDカードとセットで入力する。その他の場合は入力してはいけない。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~70	EP <sub>j</sub>	実数	10カラム単位で塑性ひずみのデータEP <sub>j</sub> を入力する(j=1, MULT)。 データ数が6を超える場合は必要枚数続けて入力する。EP <sub>1</sub> = 0.0でなければならない(注9)。

#### ・ Dカード

KEPSS=4 の場合のみCカードとセットで入力する。その他の場合は入力してはいけない。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~70	SG <sub>j</sub>	実数	10カラム単位でCカードの塑性ひずみに対応する応力データSG <sub>j</sub> を入力する(j=1, MULT)。データ数が6を超える場合は必要枚数続けて入力する(注9)。

(注9) EP<sub>1</sub>= 0.0に対応するSG<sub>1</sub> は弾性限界と見なされる。塑性ひずみ0.2%に対応する応力値が計算され、 $\sigma_y$  として設定される。Aカードの XEPSS2( $\sigma_y$ ) は無視される。



## 3.1.5 KVALデータ

	10	20	30	40	50	60	70
KVAL		XKVAL1	XKVAL2	XKVAL3	XKVAL4	XKVAL5	XKVAL6

・応力拡大係数（K値）に関するデータを入力する。破損クライテリアに $K_{Ic}$ を使用する場合、あるいは疲労き裂進展に $\Delta K_{EF}$ を使用する場合、KVALデータを入力する必要がある。

カラム	変数名	タイプ	内 容（下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である）
1~4		英字	識別ラベル（KVAL）を入力する
11~20	XKVAL1	実数	材料の $K_{Ic}$ データを入力する <u>(0.0)</u>
21~30	XKVAL2	実数	Walkerの式のnを入力する <u>(0.0)</u> （注）
31~70	XKVALj	実数	現在未使用(j=3, 6)

（注）有効応力拡大係数範囲（ $\Delta K_{EF}$ ）を次式で与え、 $\Delta K_{EF}$ により疲労き裂進展を評価する。

$$\Delta K_{EF} = K_{max} (1-R)^n = K_{max} (\Delta K / K_{max})^n$$

ここに  $R = K_{min} / K_{max}$  は応力比、 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  は応力拡大係数範囲である。

## 3.1.6 JVALデータ

	10	20	30	40	50	60	70
JVAL		XJVAL1	XJVAL2	XJVAL3	XJVAL4	XJVAL5	XJVAL6

・J積分（J値）に関するデータを入力する。破損クライテリアに $J_{Ic}$ あるいは $(dJ/da)_{max}$ を使用する場合、JVALデータを入力する必要がある。

カラム	変数名	タイプ	内 容（下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である）
1~4		英字	識別ラベル（JVAL）を入力する
11~20	XJVAL1	実数	材料の $J_{Ic}$ データを入力する <u>(0.0)</u>
21~30	XJVAL2	実数	材料の $(dJ/da)_{max}$ データを入力する <u>(0.0)</u>
31~70	XJVALj	実数	現在未使用(j=3, 6)

## 3.1.7 CREPデータ

	10	20	30	40	50	60	70
A	CREP	KCREP	IMAT	ICHR	P1	P2	P3
B		XCREP1	XCREP2	XCREP3	XCREP4	XCREP5	XCREP6
		XCREP7	XCREP8	XCREP9	XCREP10		

・材料のクリープ式に関するデータを入力する。クリープ計算を行う場合、CREPデータで材料のクリープ式を定義する。CANISには表3.2の7鋼種の指数型クリープ式が材料データライブラリ化され、使用することができる。

・指数型クリープ式ではパラメータとして材料のクリープ破断時間特性を使用するので、RUPTデータで材料のクリープ破断時間特性を入力する必要がある。

・CREPデータを入力しない場合は、材料データライブラリのSUS304、参照温度 500℃、破断時間パラメータ補正係数  $\alpha_c = 1.0$  およびひずみ硬化則が設定される。

## ・Aカード

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部は空白の時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (CREP) を記入
6~10	KCREP	整数	クリープ式の選択 = 1 ; Norton型クリープ式 (注1) (1)式 = 2 ; 指数型クリープ式 (注2) (2)式
11~15	IMAT	整数	KCREP = 1 の時 ; 未使用 KCREP = 2 の時 ; 材料鋼種の選択 (0) (注3)
16~20	ICHR	整数	硬化則の選択 = 0 ; 時間硬化則 = 1 ; ひずみ硬化則
21~30	P1	実数	Norton型 (KCREP=1) の時 ; (1)式の A 指数型パラメータ入力 (KCREP=2, IMAT=0) の時 ; 未使用 指数型ライブラリ (KCREP=2, IMAT>0) の時 ; 参照温度 $T_{REF}$ (°C)
31~40	P2	実数	Norton型 (KCREP=1) の時 ; (1)式の n 指数型クリープ式 (KCREP=2) の時 ; 補正係数 $\alpha_c$ (1.0)
41~50	P3	実数	Norton型 (KCREP=1) の時 ; (1)式の m (1.0) 指数型クリープ式 (KCREP=2) の時 ; 未使用

(注1) Norton型クリープ式では応力  $\sigma$  一定保持の時間  $t$  後のクリープひずみを次式で与える。

$$\epsilon_c(\sigma, t) = A \sigma^n t^m \quad \text{--- (1)}$$

(注2) 指数型クリープ式では応力  $\sigma$  一定保持の時間  $t$  後のクリープひずみを次式で与える。

$$\epsilon_c(\sigma, t) = C_1 [1 - \exp(-r_1 t)] + C_2 [1 - \exp(-r_2 t)] + e_m t \quad \text{--- (2)}$$

CANISでは指数型クリープ式の各パラメータを以下の手順で与えている。

・応力  $\sigma$  に対する破断時間パラメータ  $t_R$  を次式で与える。

$$\log_{10}(\alpha_c t_R) = B_0 + B_1 \log_{10}(\sigma) + B_2 [\log_{10}(\sigma)]^2 \quad \text{--- (3)}$$

ここで  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  はクリープ破断時間特性データであり、 $\alpha_c$  はクリープひずみ特性のパラッキを間接的に考慮するための補正係数である。

- 破断時間パラメータ  $t_R$  を用いて (2) 式の各パラメータを以下のように与える。

$$\left. \begin{aligned} e_m &= F (t_R ** \lambda), \quad r_1 = s_1 (t_R ** \alpha_1), \quad r_2 = s_2 (t_R ** \alpha_2) \\ C_1 &= g_1 (e_m ** \beta_1) / r_1, \quad C_2 = g_2 (e_m ** \beta_2) / r_2 \end{aligned} \right\} \text{--- (4)}$$

ここで記号\*\*は巾乗の意味で使用した。

(注3) CANISのライブラリでは (4) 式の  $s_1, \alpha_1, s_2, \alpha_2, g_1, \beta_1, g_2, \beta_2, F, \lambda$  を参照温度  $T_{REF}$  (°C) の関数として与えている。

- ライブラリ使用の場合、Aカードで鋼種番号IMAT (表3.2 参照)、 $T_{REF}$  および補正係数  $\alpha_c$  を入力する。応力単位は(kgf/mm<sup>2</sup>) およびクリープ時間単位は (h) でなければならない。
- 指数型クリープ式をユーザー入力する場合、AカードでIMAT=0 (ブランク) とし、 $\alpha_c$  を入力し、Bカードで (4) 式の  $s_1, \alpha_1, s_2, \alpha_2, g_1, \beta_1, g_2, \beta_2, F, \lambda$  を入力する。

## ・ Bカード

指数型パラメータ入力(KCREP=2, IMAT=0)の場合のみ入力する。

### 1 枚目

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~20	XCREP1	実数	(4) 式の $s_1$
21~30	XCREP2	実数	(4) 式の $\alpha_1$
31~40	XCREP3	実数	(4) 式の $s_2$
41~50	XCREP4	実数	(4) 式の $\alpha_2$
51~60	XCREP5	実数	(4) 式の $g_1$
61~70	XCREP6	実数	(4) 式の $\beta_1$

### 2 枚目

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~20	XCREP7	実数	(4) 式の $g_2$
21~30	XCREP8	実数	(4) 式の $\beta_2$
31~40	XCREP9	実数	(4) 式の $F$
41~50	XCREP10	実数	(4) 式の $\lambda$

## 3.1.8 R U P Tデータ

	10	20	30	40	50	60	70
R U P T	I M A T	T R E F	A L P H R	T R O	T R 1	T R 2	

- ・材料のクリープ破断時間特性データを入力する。き裂無し断面のクリープ損傷計算を行う場合、R U P Tデータを入力する。き裂断面のクリープ計算で指数型のクリープ式を使用する場合は、パラメータとしてクリープ破断時間特性を使用するので、R U P Tデータを入力する必要がある。
- ・R U P Tデータを入力しない場合は、材料データライブラリのSUS304、参照温度 500℃、破断時間補正係数  $\alpha_R = 1.0$  が設定される。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はblankの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (R U P T) を記入
6~10	I M A T	整数	<u>= 0</u> ; ライブラリを使用しない > 0 ; ライブラリ使用 (表3.2 の鋼種番号を入力する、注1)
11~20	T R E F	実数	I M A T > 0 の時 ; 参照温度 $T_{REF}$ (°C)、 <u>I M A T = 0</u> の時 ; 未使用
21~30	A L P H R	実数	(1)式の補正係数 $\alpha_R$ ( <u>1.0</u> )
31~40	T R O	実数	I M A T = 0 の時 ; (1)式の定数 $B_0$ 、 <u>I M A T &gt; 0</u> の時 ; 未使用
41~50	T R 1	実数	I M A T = 0 の時 ; (1)式の定数 $B_1$ 、 <u>I M A T &gt; 0</u> の時 ; 未使用
51~60	T R 2	実数	I M A T = 0 の時 ; (1)式の定数 $B_2$ 、 <u>I M A T &gt; 0</u> の時 ; 未使用

(注1) C A N I Sには表3.2 の7鋼種のクリープ破断時間特性がライブラリ化されている。一定保持応力  $\sigma$  (kgf/mm<sup>2</sup>) に対する破断時間  $t_R$  (h) を両対数上の二次式で以下のように与えている。

$$\log_{10}(\alpha_R t_R) = B_0 + B_1 \log_{10}(\sigma) + B_2 [\log_{10}(\sigma)]^2 \quad \text{--- (1)}$$

ここで  $\alpha_R$  は破断時間のバラツキを考慮するための補正係数であり、 $\alpha_R = 1.0$  が平均特性を表す。ライブラリでは (1)式の係数  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  を参照温度  $T_{REF}$  (°C) の関数として与えている。

- ・ライブラリ使用の場合は鋼種番号 I M A T、 $T_{REF}$  および補正係数  $\alpha_R$  を入力する。
- ・ユーザー入力の場合は I M A T = 0 (blank) とし、補正係数  $\alpha_R$  と (1)式の係数  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  を入力する。

## 3.1.9 F A T Gデータ

	10	20	30	40	50	60	70
FATG	KFATG	XFATG1	XFATG2	XFATG3	XFATG4	XFATG5	XFATG6

・材料の疲労き裂進展に関するデータを入力する。疲労き裂進展を行う場合、F A T Gデータにより材料の疲労き裂進展特性を定義する。疲労き裂の破壊力学パラメータとして有効応力拡大係数範囲 ( $\Delta K_{EF}$ ) と J 積分範囲 ( $\Delta J$ ) が使用できる。き裂進展速度  $da/dn$  と  $\Delta K_{EF}$  (または  $\Delta J$ ) は両対数グラフ上で単一直線または 2 直線が仮定されている。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (F A T G) を記入
6~10	KFATG	整数	疲労き裂進展の選択 <u>      </u> = 0 ; 疲労き裂進展計算を行わない = 1 ; $\Delta K_{EF}$ 使用、 <u>      </u> = 2 ; $\Delta J$ 使用 (注 1、2、3)
11~20	XFATG1	実数	定数 1 ; (1) 式の $C_1$
21~30	XFATG2	実数	指数 1 ; (1) 式の $m_1$
31~40	XFATG3	実数	敷居値 1 ; (1) 式の $X_1$
41~50	XFATG4	実数	定数 2 ; (1) 式の $C_2$
51~60	XFATG5	実数	指数 2 ; (1) 式の $m_2$
61~70	XFATG6	実数	敷居値 2 ; (1) 式の $X_2$

(注 1)  $\Delta K_{EF}$  または  $\Delta J$  を  $X$  として 1 サイクル当たりの疲労き裂進展量を次式で計算する。

$$\left. \begin{array}{l} X \geq X_1 \text{ で } da/dn = C_1 X^{m_1} \\ X_1 > X \geq X_2 \text{ で } da/dn = C_2 X^{m_2} \\ X < X_2 \text{ で } da/dn = 0.0 \end{array} \right\} \text{--- (1)}$$

- ・  $C_2 \leq 0.0$  (ブランク) の時、両対数上の単一直線と見なされ、 $X_2 = X_1$  にセットされる。
- ・  $C_2, m_2 > 0.0$  の時、両対数上の 2 直線と見なされ、敷居値  $X_1$  は次式の解にセットされる。

$$da/dn = C_1 X^{m_1} = C_2 X^{m_2} \text{--- (2)}$$

## 3.1.10 CRPGデータ

	10	20	30	40	50	60	70
CRPG	KCRPG	XCRPG1	XCRPG2	XCRPG3	XCRPG4	XCRPG5	XCRPG6

・材料のクリープき裂進展に関するデータを入力する。クリープき裂進展計算を行う場合、CRPGデータにより材料のクリープき裂進展特性を定義する。破壊力学パラメータとしてクリープJ積分範囲 ( $\Delta J_c$ ) を使用する。き裂進展量  $da/dn$  と  $\Delta J_c$  (またはき裂進展速度  $da/dt$  と  $\Delta J_c / t_c$ ) の関係は、両対数グラフ上で単一直線または2直線が仮定されている。 $\Delta J_c$  の評価に2種類の計算式が選択使用できる。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (CRPG) を記入
6~10	KCRPG	整数	クリープき裂進展の選択 <u>= 0</u> ; クリープき裂進展計算を行わない = 1~4 ; クリープき裂進展計算を行う (注1、注2)
11~20	XCRPG1	実数	定数1 ; (3)式または(4)式の $C_1$ (注2)
21~30	XCRPG2	実数	指数1 ; (3)式または(4)式の $m_1$ (注2)
31~40	XCRPG3	実数	敷居値1 ; (3)式または(4)式の $X_1$ (注2)
41~50	XCRPG4	実数	定数2 ; (3)式または(4)式の $C_2$ (注2)
51~60	XCRPG5	実数	指数2 ; (3)式または(4)式の $m_2$ (注2)
61~70	XCRPG6	実数	敷居値2 ; (3)式または(4)式の $X_2$ (注2)

(注1)  $\Delta J_c$  の評価に以下の2種類の計算式が選択使用できる。

$$\text{KCRPG} = 1, 3 \text{ (積分値)} \quad \Delta J_c = \int_0^{t_c} J_c(t) dt \quad \text{--- (1)}$$

$$\text{KCRPG} = 2, 4 \text{ (最終値} \times \text{周期)} \quad \Delta J_c = J_c(t = t_c) \times t_c \quad \text{--- (2)}$$

(注2) クリープき裂進展量  $da/dn$  の評価に以下の2種類の計算式が選択使用できる。

$$\text{KCRPG} = 1, 2 \quad \left. \begin{array}{l} \Delta J_c \geq X_1 \text{ で } da/dn = C_1 \Delta J_c^{m_1} \\ X_1 > \Delta J_c \geq X_2 \text{ で } da/dn = C_2 \Delta J_c^{m_2} \\ \Delta J_c < X_2 \text{ で } da/dn = 0.0 \end{array} \right\} \text{--- (3)}$$

$$\text{KCRPG} = 3, 4 \quad \left. \begin{array}{l} \Delta J_c / t_c \geq X_1 \text{ で } da/dt = C_1 (\Delta J_c / t_c)^{m_1} \\ X_1 > \Delta J_c / t_c \geq X_2 \text{ で } da/dt = C_2 (\Delta J_c / t_c)^{m_2} \\ \Delta J_c / t_c < X_2 \text{ で } da/dt = 0.0 \\ da/dn = (da/dt) \times t_c \end{array} \right\} \text{--- (4)}$$

・  $C_2 \leq 0.0$  (ブランク) の時、両対数上の単一直線と見なされ、 $X_2 = X_1$  にセットされる。

・  $C_2, m_2 > 0.0$  の時、両対数上の2直線と見なされ、敷居値  $X_1$  は次式の解にセットされる。

$$da/dn \text{ (または } da/dt) = C_1 X^{m_1} = C_2 X^{m_2} \quad \text{--- (5)}$$

3.1.11 NFFCデータ

	10	20	30	40	50	60	70	
A	NFFC	IMAT	TRBF	ALPHF	XNFFC1	XNFFC2	XNFFC3	XNFFC4
B		XNFFC5	XNFFC6	XNFFC7	XNFFC8			

・材料の疲労破損特性データを入力する。き裂無し断面の疲労損傷計算を行う場合、NFFCデータを入力する。CANISには表3.2の7鋼種の疲労破損特性データがライブラリ化され、これを使用することができる。

・NFFCデータを入力しない場合は、材料データライブラリのSUS304、参照温度 500℃、破損サイクル補正係数  $\alpha_F = 1.0$  が設定される。

・Aカード

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部は空白の時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (NFFC) を記入
6~10	IMAT	整数	<u>= 0</u> ; ライブラリを使用しない > 0 ; ライブラリ使用 (表3.2の鋼種番号を入力する、注1)
11~20	TRBF	実数	IMAT > 0 の時 ; 参照温度 $T_{REF}$ (°C)、IMAT = 0 の時 ; 未使用
21~30	ALPHF	実数	(1)式の補正係数 $\alpha_F$ ( <u>1.0</u> )
31~40	XNFFC1	実数	IMAT = 0 の時 ; (2)式の定数 $a_{0T}$ 、IMAT > 0 の時 ; 未使用
41~50	XNFFC2	実数	IMAT = 0 の時 ; (2)式の定数 $a_{0R}$ 、IMAT > 0 の時 ; 未使用
51~60	XNFFC3	実数	IMAT = 0 の時 ; (2)式の定数 $a_{1T}$ 、IMAT > 0 の時 ; 未使用
61~70	XNFFC4	実数	IMAT = 0 の時 ; (2)式の定数 $a_{1R}$ 、IMAT > 0 の時 ; 未使用

・Bカード (IMAT=0、ユーザー入力の場合のみ)

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部は空白の時に設定されるデフォルト値である)
11~20	XNFFC5	実数	(2)式の定数 $a_{2T}$
21~30	XNFFC6	実数	(2)式の定数 $a_{2R}$
31~40	XNFFC7	実数	(2)式の定数 $a_{4T}$
41~50	XNFFC8	実数	(2)式の定数 $a_{4R}$

(注1) CANISには表3.2の7鋼種の疲労破損特性がライブラリ化されている。疲労ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_1$ 、ひずみ速度  $e_s$  (/sec)に対する破損サイクル数  $N_F$  を次式で与えている。

$$[\log_{10}(\alpha_F N_F)]^{-1/2} = A_0 + A_1 \log_{10}(\Delta \epsilon_1) + A_2 [\log_{10}(\Delta \epsilon_1)]^2 + A_4 [\log_{10}(\Delta \epsilon_1)]^4 \quad \text{--- (1)}$$

ここで  $\alpha_F$  は破損サイクル数のバラツキを考慮するための補正係数であり、 $\alpha_F = 1.0$  が平均特性を表す。(1)式の係数  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_4$  をひずみ速度  $e_s$  の関数として次式で与えている。

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= a_{0T} + a_{0R} \log_{10}(e_s), & A_1 &= a_{1T} + a_{1R} \log_{10}(e_s), \\ A_2 &= a_{2T} + a_{2R} \log_{10}(e_s), & A_4 &= a_{4T} + a_{4R} \log_{10}(e_s) \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (2)}$$

ライブラリでは (2) 式の係数  $a_{0T}$ 、 $a_{0R}$ 、 $a_{1T}$ 、 $a_{1R}$ 、 $a_{2T}$ 、 $a_{2R}$ 、 $a_{4T}$ 、 $a_{4R}$  を参照温度  $T_{REF}$  (°C) の関数として与えている。

- ・ライブラリ使用の場合、Aカードで鋼種番号IMAT、 $T_{REF}$  および補正係数  $\alpha_F$  を入力する。
- ・ユーザー入力の場合、AカードでIMAT=0 (ブランク) とし、補正係数  $\alpha_F$  と (2) 式の係数  $a_{0T}$ 、 $a_{0R}$ 、 $a_{1T}$ 、 $a_{1R}$  を入力し、更にBカードで  $a_{2T}$ 、 $a_{2R}$ 、 $a_{4T}$ 、 $a_{4R}$  を入力する。

### 3.1.12 FAILデータ

	10	20	30	40	50	60	70
FAIL	KFAIL	XFAIL1	XFAIL2	XFAIL3	XFAIL4	XFAIL5	XFAIL6

- ・力学条件による破損クライテリアを使用する場合、FAILデータで破損クライテリアの番号を入力する。なお基本形状条件は常に有効であり、FAILデータを入力しない場合は基本形状条件のみ使用される。

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (FAIL) を記入
6~10	KFAIL	整数	<u>= 0</u> ; 基本形状条件のみ使用する。(注1) > 0 ; 使用する破損クライテリアの番号を入力する。(注2)
11~70	XFAILj	実数	現在未使用 (j=1, 6)

(注1) 以下の基本形状条件は常に有効である。

- 表面き裂  $a/t \geq \alpha_{LIM}$  .AND.  $b/W < \beta_{LIM}$  で貫通き裂に移行
- 表面き裂  $a/t < \alpha_{LIM}$  .AND.  $b/W \geq \beta_{LIM}$  で片側き裂に移行
- 表面き裂  $a/t \geq \alpha_{LIM}$  .AND.  $b/W \geq \beta_{LIM}$  で破断
- 片側き裂  $a/t \geq \alpha_{LIM}$  で破断
- 貫通き裂  $b/W \geq \beta_{LIM}$  で破断

(注2) 以下の10種類の破損クライテリアが選択使用できる。

- KFAIL=1  $K_{Ic}$ 条件 (表面き裂の貫通き裂および片側き裂への移行条件を含む)
- KFAIL=2  $K_{Ic}$ 条件 (すべて破断として取り扱う)
- KFAIL=3  $J_{Ic}$ 条件 (表面き裂の貫通き裂および片側き裂への移行条件を含む)
- KFAIL=4  $J_{Ic}$ 条件 (すべて破断として取り扱う)
- KFAIL=5  $J_{Ic}$ および  $(dJ/da)$ 条件 (表面き裂の貫通き裂および片側き裂への移行条件を含む)
- KFAIL=6  $J_{Ic}$ および  $(dJ/da)$ 条件 (すべて破断として取り扱う)
- KFAIL=7  $\sigma_R \geq \sigma_Y$  条件 (表面き裂の貫通き裂への移行条件を含む)
- KFAIL=8  $\sigma_R \geq \sigma_Y$  条件 (すべて破断として取り扱う)
- KFAIL=9  $\sigma_R \geq \sigma_F$  条件 (表面き裂の貫通き裂への移行条件を含む)
- KFAIL=10  $\sigma_R \geq \sigma_F$  条件 (すべて破断として取り扱う)



## 3.1.13 L R A Tデータ

	10	20	30	40	50	60	70
LRAT	KLRAT	XLRAT1	XLRAT2	XLRAT3	XLRAT4	XLRAT5	XLRAT6

- ・漏洩率計算に関するデータを入力する。漏洩率計算を行う場合、L R A Tデータを入力する。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (L R A T) を記入
6~10	KLRAT	整数	漏洩率計算式の選択 (注1) <u>= 0</u> ; 漏洩率計算を行わない = 1 ; 漏洩率簡易式 1 (1)式 = 2 ; 漏洩率簡易式 2 (2)式 = 3 ; 弾塑性開口面積とベルヌイの式 (3)式
11~20	XLRAT1	実数	漏洩検出限界 $Q_{DET}$ (漏洩率 $Q \geq Q_{DET}$ でき裂検出、計算終了)
21~30	XLRAT2	実数	KLRAT= 1 ; (1)式の $C$ 、KLRAT= 2 ; (2)式の $C_1$ 、KLRAT= 3 ; (3)式の $\gamma$
31~40	XLRAT3	実数	KLRAT= 1 ; 未使用、KLRAT= 2 ; (2)式の $C_2$ 、KLRAT= 3 ; (3)式の $\zeta$
41~50	XLRAT4	実数	KLRAT= 1 ; 未使用、KLRAT= 2 ; 未使用、KLRAT= 3 ; (3)式の $\Delta P$
51~70	XLRATj	実数	現在未使用 (j=5, 6)

(注1) 以下の3種類の計算式が選択使用できる。

・漏洩率簡易式 1  $Q = C A_{EP}$  --- (1)

・漏洩率簡易式 2  $Q = C_1 b^2 \sigma_M / E - C_2$  --- (2)

・弾塑性開口面積とベルヌイの式  $Q = A_{EP} [2 \Delta P / (\gamma \zeta)]^{1/2}$  --- (3)

ここで  $A_{EP}$  は弾塑性開口面積、 $\sigma_M$  は最大膜応力、 $\Delta P$  は圧力差、 $\gamma$  は流体の比重量、 $\zeta$  は圧力損失係数 ( $\geq 1.0$ ) である。 $\Delta P = 0.0$  (ブランク) の場合、 $\Delta P$  として運転圧力 ( $P_{OP}$ ) が使用される。

3.1.14 E V E Nデータ (入力必須データ)

	10	20	30	40	50	60	70			
A	EVEN	KLOAD	LTYPE	NEVNT	LBASE	NTINT	TLIFE	DTINT	CTIME	
B		SIGDW	POPER	SIGTE	QBPT					

・複数の過渡事象の各々を2極値時点の応力で定義する場合(LTYPE=0)

C1		KEY	KDUM	DTAV(j)	QBP(j)	QC(j)	
C2		S1(j)	S2(j)	S3(j)	S4(j)	S5(j)	S6(j)

⇕ 複数の過渡事象の2極値時点の応力(LTYPE=0)の場合、 ⇕  
 ⇕ C1, C2 カードのペアを事象数(NEVNT)だけ入力する。(j=1, NEVNT) ⇕

・基本サイクルの応力履歴により過渡事象を定義する場合(LTYPE=1)

D1		KEY	KDUM	TCYCL	QBP	QC	
D2		S1(j)	S2(j)	S3(j)			

⇕ 基本サイクルの応力履歴(LTYPE=1)の場合、D1カードの後にD2カードを ⇕  
 ⇕ 基本サイクル内のステップ数(NSTEP=NEVNT)だけ入力する。(j=1, NSTEP) ⇕

・運転期間、基本荷重および過渡事象などのデータを入力する。EVENデータは入力必須である。

・Aカード

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (EVEN) を記入
6~10	KLOAD	整数	入力応力データの種別 <u>= 0</u> ; 弾性解析による計算値 = 1 ; 弾塑性解析による計算値
11~15	LTYPE	整数	過渡事象の定義方法 <u>= 0</u> ; 複数の過渡事象の2極値時点の応力 = 1 ; 基本サイクル内の応力履歴
16~20	NEVNT NSTEP	整数	LTYPE=0の場合 ; 過渡事象の総数 ( <u>1</u> 、最大値 ≤ 50) LTYPE=1の場合 ; 基本サイクルの総ステップ数 ( <u>1</u> 、最大値 ≤ 100)
21~25	LBASE	整数	過渡事象の応力値は基本荷重を含むか否か <u>= 0</u> ; 基本荷重を含まない、 = 1 ; 基本荷重を含む合計応力値 = 2 ; 基本荷重を含む(LTYPE=0の時、事象1の時点2はσ <sub>DW</sub> 状態)
26~30	NTINT	整数	計算結果を出力する時間インターバル ( <u>1</u> ) 時間間隔 NTINT・DTINT で計算結果を出力する。
31~40	TLIFE	実数	全運転期間 ( <u>100.0</u> ) (注1)
41~50	DTINT	実数	時間積分の刻み幅 (TLIFE/100) (注1)
51~60	CTIME	実数	クリープ時間換算係数 ( <u>1.0</u> ) (注2)

(注1) 運転期間(TLIFE)、時間積分の刻み幅(DTINT) は任意の時間単位(year, month, week, day, hr, min, secなど) あるいは時間を間接的に表す任意の単位 (荷重サイクル数、運転サイクル数など) が使用でき、これを実時間と称する。

(注2) クリープ時間を次式により設定する。クリープひずみ式およびクリープ破断時間特性はクリープ時間の時間単位を用いて定義する。

$$\text{クリープ時間} = \text{CTIME} \cdot \text{実時間} \quad \text{--- (1)}$$

・ Bカード (基本荷重データ)

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~20	SIGDW	実数	死荷重応力 $\sigma_{DW}$
21~30	POPER	実数	通常運転圧力 $P_{OP}$ (応力 $\sigma$ と同一の単位を使用すること)
31~40	SIGTE	実数	熱膨張応力 $\sigma_{TE}$
41~50	QEPTB	実数	熱膨張応力 $\sigma_{TE}$ の弾塑性パラメータ (1.0)

・ C1 カード [C2 カードとペア、複数の過渡事象の2極値応力(LTYPE=0)の場合]

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~15	KEY	整数	ペアとなるC2カードの応力値入力形式の選択 (注3) = 0 ; 膜、曲げ、ピーク応力値 $\neq 0$ ; 両表面と板厚中心の応力値
16~20	KDUM	整数	現在未使用
21~30	DTAV(j)	実数	事象 j の周期 (実時間)
31~40	QEP(j)	実数	事象 j の弾塑性パラメータ
41~50	QC(j)	実数	事象 j のクリープパラメータ

・ C2 カード [C1 カードとペア、複数の過渡事象の2極値応力(LTYPE=0)の場合]

カラム	変数名	タイプ	内 容	↓ KEY=0	↓ KEY≠0
11~20	S1(j)	実数	(事象 j の極値時点1の) 膜応力値		き裂側の表面応力値
21~30	S2(j)	実数	(事象 j の極値時点1の) 曲げ応力値		板厚中心の応力値
36~40	S3(j)	実数	(事象 j の極値時点1の) ピーク応力値		き裂反対側の表面応力値
41~50	S4(j)	実数	(事象 j の極値時点2の) 膜応力値		き裂側の表面応力値
51~60	S5(j)	実数	(事象 j の極値時点2の) 曲げ応力値		板厚中心の応力値
61~70	S6(j)	実数	(事象 j の極値時点2の) ピーク応力値		き裂反対側の表面応力値

(注3) 2種類の応力データ入力形式が可能である。1番目の方法(KEY=0)は対象断面の膜応力、曲げ応力(き裂表面側を+とする)、放物線形ピーク応力(膜、曲げ成分とも0)を入力する。  
2番目の方法(KEY≠0)はき裂側の表面応力、板厚中心の応力、き裂反対側の表面応力を入力する。

・ D1 カード〔基本サイクル内の応力履歴(LTYPE=1)の場合〕

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
11~15	KEY	整数	D2 カードの応力値入力形式の選択 (注3) = 0 ; 膜、曲げ、ピーク応力値    ≠ 0 ; 両表面と板厚中心の応力値
16~20	KDUM	整数	現在未使用
21~30	TCYCL	実数	基本サイクルの周期 (実時間)
31~40	QBP	実数	基本サイクルの弾塑性パラメータ
41~50	QC	実数	基本サイクルのクリープパラメータ

・ D2 カード〔基本サイクル内の応力履歴(LTYPE=1)の場合〕

カラム	変数名	タイプ	内 容	↓ KEY=0	↓ KEY≠0
11~20	S1(j)	実数	(ステップj)の膜応力値		き裂側の表面応力値
21~30	S2(j)	実数	(ステップj)の曲げ応力値		板厚中心の応力値
36~40	S3(j)	実数	(ステップj)のピーク応力値		き裂反対側の表面応力値

### 3.1.15 DCIAデータ

	10	20	30	40	50	60	70
A	DCIA	XKE	XKT	DINIT			
B		KDFD	NDFD	DFMEAN	DFMIN	DFMAX	DFDEV
C		KFDC	NFDC	DCMEAN	DCMIN	DCMAX	DCDEV

・ き裂発生確率の評価に関するデータを入力する。CANIS-Iを実行する場合は入力必須データである。

・ Aカード (ひずみ集中係数、き裂発生判定値を入力する。)

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (DCIA) を記入
11~20	XKE	実数	(膜+曲げ) ひずみ集中係数 $K$ 。 (1.0) (注1)
21~30	XKT	実数	ピークひずみ集中係数 $K_T$ (1.0) (注1)
31~40	DINIT	実数	き裂発生判定値 $D_{INIT}$ (1.0) (注2、3)

(注1) 過渡事象の繰り返し等価全ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_t$ 、およびひずみ速度  $e_s$  を次式で評価する。

$$\Delta \epsilon_t \text{ (mm/mm)} = K_e \Delta \epsilon_N + K_T \Delta \epsilon_P \quad \text{--- (1)}$$

$$e_s \text{ (mm/mm/sec)} = 2 \Delta \epsilon_t / \Delta t_s \text{ (sec)} \quad \text{--- (2)}$$

ここで  $\Delta \epsilon_N$  および  $\Delta \epsilon_P$  は過渡事象の (膜+曲げ) ひずみ範囲およびピークひずみ範囲である。

$\Delta t_s$  は過渡事象の周期(sec)であり、クリープ時間単位(hr)による周期を  $\Delta t_c$ 、実時間単位による周期を  $\Delta t_R$  として次式で与えられる。

$$\Delta t_s \text{ (sec)} = 3600 \times \Delta t_c \text{ (hr)} = 3600 \times \text{CTIME} \times \Delta t_R \quad \text{--- (3)}$$

$\Delta \epsilon$ , および  $e_s$  により過渡事象 1 サイクル当たりの疲労損傷値  $\Delta D_F$  (/cycle) を評価する。

- 全ての過渡事象による疲労損傷を時刻  $t$  まで積算し、時刻  $t$  の疲労損傷値  $D_F(t)$  が評価される。
- (注 2) 過渡事象の (膜+曲げ+ピーク) 応力  $\sigma_{MBP}$ 、(膜+曲げ) 応力  $\sigma_{MB}$ 、荷重制御の一次応力  $\sigma_{LD}$ 、周期  $\Delta t_c$  および弾性追従パラメータ  $q_c$  を考慮した簡易クリープ解析により、過渡事象 1 サイクル当たりのクリープ損傷値  $\Delta D_c$  (/cycle) を評価する。
- 全ての過渡事象によるクリープ損傷を時刻  $t$  まで積算し、時刻  $t$  のクリープ損傷値  $D_c(t)$  が評価される。

(注 3) 次式を満たす場合、時刻  $t$  までにき裂が発生するものと判定する。

$$\begin{aligned} \text{(時刻 } t \text{、損傷評価値)} &\Rightarrow \frac{D_F(t)}{D_F(P.D.F)} + \frac{D_c(t)}{D_c(P.D.F)} \geq D_{INIT} \quad \text{--- (4)} \\ \text{(き裂発生損傷、分布関数)} &\Rightarrow \end{aligned}$$

時刻  $t$  までにき裂が発生する確率は、(4) 式を満たす分母の 2 変数領域に対し、確率密度の積を積分することにより計算される。CANIS-I ではこれを数値積分により行う。

- Bカード (疲労損傷によるき裂発生データの分布関数を定義する。疲労損傷を考慮しない場合でも Bカードは必要であり、その場合はblankカードを入力する。)

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部はblankの時に設定されるデフォルト値である)
11~15	KDFD	整数	き裂発生 $D_F$ の分布関数形 (注 4) <u>0</u> ; 定数、 = 1; 正規分布、= 2; 自然対数正規分布、= 3; 常用対数正規分布
16~20	NDFD	整数	KDFD $\geq 1$ の時、 $D_F$ 数値積分の区間分割数 ( <u>100</u> ) (最大値 $\leq 200$ )
21~30	DFMEAN	実数	平均値 $D_{F, MEAN}$ ( <u>1.0</u> )
31~40	DFMIN	実数	最小値 $D_{F, MIN}$ ( <u><math>D_{F, MEAN}/10</math></u> )
41~50	DFMAX	実数	最大値 $D_{F, MAX}$ ( <u><math>D_{F, MEAN} \times 10</math></u> )
51~60	DFDEV	実数	標準偏差 $S_{DF}$ ( <u>1.0</u> ) $D_F$ 、 $\log_e D_F$ 、 $\log_{10} D_F$ の標準偏差

- Cカード (クリープ損傷によるき裂発生データの分布関数を定義する。クリープ損傷を考慮しない場合でも Cカードは必要であり、その場合はblankカードを入力する。)

カラム	変数名	タイプ	内容 (下線部はblankの時に設定されるデフォルト値である)
11~15	KFDC	整数	き裂発生 $D_c$ の分布関数形 (注 4) <u>0</u> ; 定数、 = 1; 正規分布、= 2; 自然対数正規分布、= 3; 常用対数正規分布
16~20	NFDC	整数	KFDC $\geq 1$ の時、 $D_c$ 数値積分の区間分割数 ( <u>100</u> ) (最大値 $\leq 200$ )
21~30	DCMEAN	実数	平均値 $D_{c, MEAN}$ ( <u>1.0</u> )
31~40	DCMIN	実数	最小値 $D_{c, MIN}$ ( <u><math>D_{c, MEAN}/10</math></u> )
41~50	DCMAX	実数	最大値 $D_{c, MAX}$ ( <u><math>D_{c, MEAN} \times 10</math></u> )
51~60	DCDEV	実数	標準偏差 $S_{DC}$ ( <u>1.0</u> ) $D_c$ 、 $\log_e D_c$ 、 $\log_{10} D_c$ の標準偏差

(注 4) 疲労 (クリープ) 損傷によるき裂発生データ  $D_F$  ( $D_c$ ) の分布関数として以下の 3 種類が使用できる。

- 正規分布 ---  $D_F$  ( $D_c$ ) が正規分布に従う
- 自然対数正規分布 ---  $\log_e D_F$  ( $\log_e D_c$ ) が正規分布に従う
- 常用対数正規分布 ---  $\log_{10} D_F$  ( $\log_{10} D_c$ ) が正規分布に従う

## 3.1.16 ENDデータ (入力必須データ)

	10	20	30	40	50	60	70
END							

- ・入力データの終了を表す。ENDデータは入力必須データである。

カラム	変数名	タイプ	内 容 (下線部はブランクの時に設定されるデフォルト値である)
1~4		英数字	識別ラベル (END) を記入

### 3.2 ユーザー定義のサブプログラム

CANISでは、ユーザーが独自にサブプログラムを定義し、それを用いて解析することができる。ユーザーが定義できるサブプログラムには次のものがある。

- ・XFNS 正味応力概念にもとづく形状関数を定義する。
- ・XSCKV 半楕円表面き裂の無次元K値解を定義する。
- ・XECKV 片側き裂の無次元K値解を定義する。
- ・XPCKV 貫通き裂の無次元K値解を定義する。

#### 3.2.1 サブプログラム XFSM

正味応力概念に基づき、き裂断面の形状関数を定義するサブプログラムである。CONTデータでKFNS < 0とした時、ユーザー定義のサブプログラムXFNSが使用される。形式および各パラメータの内容は以下のとおりである。

```
FUNCTION XFSM( A, B, R, T, BL, SA, LK )
  ↓
  ↓ ユーザーがコーディング
  ↓
RETURN
END
```

#### 入力パラメータ

A, B : き裂深さ (a) およびき裂長さ / 2 (b)

R, T : 円筒の内半径 (R) および板厚 (t)

BL : bの上限値 (W)。平板では板幅 / 2、円筒内面の周方向き裂では $W = \pi R$ 、円筒外面の周方向き裂では $W = \pi R_o$ 、円筒の軸方向き裂では $W = 5 (R_m t)^{1/2}$ とした。

SA : 全断面積。平板では $2 W t$ 、円筒の周方向き裂断面では $2 \pi R_m t$ 、円筒の軸方向き裂断面では $2 W t = 10 (R_m t)^{1/2} t$ とした。

LK : き裂形状を表す。LK=1 (表面き裂)、LK=2 (片側き裂)、LK=3 (貫通き裂)

#### 出力パラータ

XFNS : 形状関数  $F_{NS}$

サブプログラムXFNSの例を以下に示す。この例では平板の矩形近似式を定義している。

```
FUNCTION XFNS( A, B, R, T, BL, SA, LK )
  SCRAC = 2*A*B
  XFNS = SA / ( SA - SCRAC )
RETURN
END
```

## 3.2.2 サブプログラム XSCKV

半楕円表面き裂の無次元K値解を定義するサブプログラムである。CONTデータで KSURF < 0 とした時、ユーザー定義のサブプログラム XSCKVが使用される。形式および各パラメータの内容は以下のとおりである。

```
FUNCTION XSCKV( RT, AB, AT, BW, FBA, FPA, FMB, FBB, FPB )
```

```
  ↓
```

```
  ↓ ユーザーがコーディング
```

```
  ↓
```

```
RETURN
```

```
END
```

## 入力パラメータ

RT, AB, AT, BW : き裂の形状パラメータ R/t, a/b, a/t, b/W

## 出力パラメータ

XSCKV : き裂最深部の膜応力に対する無次元K値  $F_{M, A}$

FBA : き裂最深部の曲げ応力に対する無次元K値  $F_{B, A}$

FPA : き裂最深部のピーク応力に対する無次元K値  $F_{P, A}$

FMB : き裂表面部の膜応力に対する無次元K値  $F_{M, B}$

FBB : き裂表面部の曲げ応力に対する無次元K値  $F_{B, B}$

FPB : き裂表面部のピーク応力に対する無次元K値  $F_{P, B}$

サブプログラム XSCKVの例を以下に示す。この例では Newman-RajuのK値解（膜、曲げ）と白鳥の解から求めた補正係数（ピーク／膜）を用いている。



## サブプログラムXSCKVの例

```

C=====
C XSCKV USER DEFINED K-SOLUTION FOR SEMI-ELLIPTIC SURFACE CRACK
C EXAMPLE OF NEWMAN-RAJU'S SOLUTION(MEM,BEN) OF PLATE, AND
C KEY<0 FP(PEAK) IS ESTIMATED BY FITTING CURVE OF SHIRATORI'S SOLUTION
C RT:R/T, AB:A/B, AT:A/T, BW:B/W ARE GIVEN GEOMETRICAL PARAMETERS
C XSCKV,FBA,FPA : DEEPEST POINT F-VALUES(MEM.,BEN.,PEAK)
C FMV,FBB,FPB : SURFACE POINT F-VALUES(MEM.,BEN.,PEAK)
C=====
FUNCTION XSCKV( RT, AB, AT, BW, FBA, FPA, FMB, FBB, FPB )
C
C DATA PAI2 / 1.570796327E0 /
C----- FOR 0 <= A/B <= 1
IF( AB.LE.1.0 ) THEN
  ZQ = 1.0 + 1.464*(AB**1.65)
  ZM1 = 1.13 - 0.09*AB
  ZM2 = -0.54 + 0.89/(0.2+AB)
  ZM3 = 0.5 - 1.0/(0.65+AB) + 14.0*((1.0-AB)**24)
  ZG1 = -1.22 - 0.12*AB
  ZG2 = 0.55 - 1.05*(AB**0.75) + 0.47*(AB**1.5)
  ZCF = AB
  ZSF = 1.0
  ZP = 0.2 + AB + 0.6*AT
  ZH1 = 1.0 - 0.34*AT - 0.11*AB*AT
  ZH2 = 1.0 + ZG1*AT + ZG2*(AT**2)
  ZGF = 0.1 + 0.35*(AT**2)
C-- SHIRATORI'S FP/FM FITTED BY I.FURUHASHI
  PA1 = -2.788 - 2.164*AB + 0.800*AB**2
  PA2 = 1.944 + 2.079*AB - 0.679*AB**2
  PB1 = 0.054 - 2.594*SQRT(AB) + 1.541*AB
  PB2 = -0.702 + 1.457*SQRT(AB) - 0.464*AB**2
C----- FOR 1 < A/B <= 2
ELSE
  BA = 1.0 / AB
  ZQ = 1.0 + 1.464*(BA**1.65)
  ZM1 = (1.0 + 0.04*BA) * SQRT(BA)
  ZM2 = 0.2 *(BA**4)
  ZM3 = - 0.11*(BA**4)
  ZG11= -0.04 - 0.41*BA
  ZG12= 0.55 - 1.93*(BA**0.75) + 1.38*(BA**1.5)
  ZG21= -2.11 + 0.77*BA
  ZG22= 0.55 - 0.72*(BA**0.75) + 0.14*(BA**1.5)
  ZCF = 1.0
  ZSF = BA
  ZP = 0.2 + BA + 0.6*AT
  ZH1 = 1.0 + ZG11*AT + ZG12*(AT**2)
  ZH2 = 1.0 + ZG21*AT + ZG22*(AT**2)
  ZGF = 0.1 + 0.35*(AT**2)*BA
C-- SHIRATORI'S FP/FM FITTED BY I.FURUHASHI
  PA1 = -3.504 - 0.648*AB
  PA2 = 2.520 + 0.824*AB
  PB1 = -1.151 + 0.152*AB
  PB2 = 0.337 - 0.046*AB
ENDIF
C----- COMPUTE KVALUE AT POINT A , B
FWC = 1.0 / SQRT( COS( PAI2*BW*SQRT(AT) ) )
ZZZ = (ZM1+ZM2*(AT**2)+ZM3*(AT**4)) / SQRT(ZQ)
XSCKV = ZZZ * SQRT(ZSF) * FWC
FMB = ZZZ * SQRT(ZCF) * (1.0+ZGF) * FWC
FBA = XSCKV * ZH2
FBB = FMB * ZH1
FPA = XSCKV * ( 1.0 + PA1*AT + PA2*AT**2 )
FPB = FMB * ( 1.0 + PB1*AT + PB2*AT**2 )
C
RETURN
END

```

## 3.2.3 サブプログラム XECKV

片側き裂の無次元K値解を定義するサブプログラムである。CONTデータで KEDGE < 0 とした時、ユーザー定義のサブプログラム XECKVが使用される。形式および各パラメータの内容は以下のとおりである。

```
FUNCTION XECKV( RT, AT, FB, FP )
```

```
  ↓
```

```
  ↓ ユーザーがコーディング
```

```
  ↓
```

```
RETURN
```

```
END
```

## 入力パラメータ

RT, AT : き裂の形状パラメータ R/t, a/t

## 出力パラメータ

XECKV : 膜応力に対する無次元K値  $F_M$

FB : 曲げ応力に対する無次元K値  $F_B$

FP : ピーク応力に対する無次元K値  $F_P$

サブプログラム XECKVの例を以下に示す。この例では片側き裂付き平板 (SENP) の解 (膜、曲げ) とテール解 (ピーク) を用いている。

```
FUNCTION XECKV( RT, AT, FB, FP )
```

```
  DIMENSION ATX(10), FPX(10)
```

```
  DATA ATX / 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 /
```

```
  DATA FPX / 1.122, 0.799, 0.567, 0.396, 0.269, 0.180, 0.133, 0.147, 0.301, 1.132 /
```

```
  DATA PAI2/ 1.570796327E0 /
```

```
  IF( AT. LE. 0.01 ) THEN
```

```
    XECKV = 1.122
```

```
    FB    = 1.122
```

```
  ELSEIF( AT. GE. 0.99 ) THEN
```

```
    XECKV = 1121.0
```

```
    FB    = 376.0
```

```
  ELSE
```

```
    TH = PAI2 * AT
```

```
    CF = SQRT( TAN(TH) / TH ) / COS(TH)
```

```
    XECKV = CF * ( 0.752 + 2.02*AT + 0.37*( 1.0-SIN(TH) )**3 )
```

```
    FB    = CF * ( 0.923 + 0.199*( 1.0-SIN(TH) )**4 )
```

```
  ENDIF
```

```

DO 10 J = 2, 10
  IF( ATX(J). GE. AT ) GO TO 20
10 CONTINUE
  J = 10
20 J1 = J - 1
  FP = FPX(J1) + 10*( AT-ATX(J1) )*( FPX(J)-FPX(J1) )
RETURN
END

```

### 3.2.4 サブプログラム XPCKV

貫通き裂の無次元K値解を定義するサブプログラムである。CONTデータで KPENT < 0とした時、ユーザー定義のサブプログラム XPCKVが使用される。形式および各パラメータの内容は以下のとおりである。

```

FUNCTION XPCKV( B, R, T )
  ↓
  ↓ ユーザーがコーディング
  ↓
RETURN
END

```

#### 入力パラメータ

B, R, T : き裂の形状パラメータ b, R( 円筒では内半径、平板では板幅の1/2)および t

#### 出力パラメータ

XPCKV : 膜応力に対する無次元K値  $F_M$

サブプログラム XPCKVの例を以下に示す。この例では中央き裂付き平板(CCT)の解を定義している。

```

FUNCTION XPCKV( B, R, T )
DATA PAI2/ 1.570796327E0 /
  XPCKV = 1.0 / SQRT( COS(PAI2*B/R) )
RETURN
END

```

## 3.3 ジョブコントロールカード

PNCの大型計算機(FACOM)でCANISを実行する場合のJCLを以下に示す。FT05は入力データの論理機番、FT06はプリント出力の論理機番、FT10はポスト出力の論理機番である。FT05(入力データ)とFT10(ポストファイル)はレコード長80バイトのカードイメージデータである。下線部はユーザーが定義する。以下のJCLはCANIS-Gを実行する場合でありロードモジュールのメンバー名がCGS¥V3である。CANIS-Kを実行する場合はKJV¥V1に、CANIS-Iを実行する場合はCIA¥V1に、それぞれメンバー名を変える。

- 通常のJCL(CANISに内蔵される機能のみを用いる場合)

```
//POD2BA1G JOB ,MSGCLASS=X,NOTIFY=POD2BA1,CLASS=P,TIME=0001   ジョブ名、出力先、user-id
//GO  EXEC PGM=CGS¥V3,COND=(4,LT)          (注) G (CGS¥V3), K (KJV¥V1), I (CIA¥V1)
//STEPLIB DD DSN=POD2BA1.CANIS.LOAD,DISP=SHR
//FT05F001 DD DSN=POD2BA1.CANIS.DATA(SAMPLE),DISP=SHR   入力データファイル名
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT10F001 DD DSN=POD2BA1.CANIS.POST(SAMPLE),DISP=SHR   ポスト出力ファイル名
//
```

- ユーザー定義のサブプログラムを用いる場合のJCL

```
//POD2BA1G JOB ,MSGCLASS=X,NOTIFY=POD2BA1,CLASS=P,TIME=0001   ジョブ名、出力先、user-id
//CLG  EXEC FORT7CLG,
//      PARM.FORT='BYNAME,GOSTMT,ISN(D),NOSTATIS',
//      PARM.LKED='LET,LIST'
//FORT.SYSIN DD DSN=POD2BA1.USERPGM.FORT(SAMPLE),DISP=SHR   ユーザーサブプログラム
//LKED.OLDLM DD DSN=POD2BA1.CANIS.LOAD,DISP=SHR
//LKED.SYSIN DD *
      INCLUDE OLDFLM(CGS¥V3)          (注) G (CGS¥V3), K (KJV¥V1), I (CIA¥V1)
      ENTRY  MAIN
      NAME   MAIN(R)
/*
//GO.FT05F001 DD DSN=POD2BA1.CANIS.DATA(SAMPLE),DISP=SHR   入力データファイル名
//GO.FT06F001 DD SYSOUT=*
//GO.FT10F001 DD DSN=POD2BA1.CANIS.POST(SAMPLE),DISP=SHR   ポスト出力ファイル名
//
```

## 4. CANISの解析例

CANISの解析例を21ケース紹介する。解析対象、荷重、使用コード、解析内容および参考文献を下表に示す。

解析例一覧表

番号	解析対象	荷重	コード	解析内容	文献
1 2 3 4	表面き裂付き平板	荷重制御膜応力 荷重制御膜応力 荷重制御曲げ応力 変位制御曲げ応力	G	疲労き裂進展	4.1
5 6	表面き裂付き平板	荷重制御曲げ応力 荷重制御膜応力	G	クリープ疲労き裂進展	4.2
7	貫通き裂付き平板	荷重制御膜応力	G	疲労き裂進展	4.2
8	貫通き裂付き平板	荷重制御膜応力 変位制御膜応力	K	破壊力学パラメータ解析	4.4
9 10	(内面軸方向) 表面き裂付き円筒 (内面周方向)	熱過渡応力 (TTS)	K G	破壊力学パラメータ解析 クリープ疲労き裂進展	4.5
11	内面環状き裂付き の円筒	熱過渡応力 (ATTF)	K G	破壊力学パラメータ解析 疲労き裂進展	4.6
12	表面き裂付き平板 (PWR炉容器)	PWR設計運転荷 重(事象数19)	K G	破壊力学パラメータ解析 疲労き裂進展	4.7
13 14	表面き裂付き平板	変位制御曲げ応力	G K	クリープ疲労き裂進展 破壊力学パラメータ解析	4.8
15 16	外面周方向表面 き裂付き円筒	荷重制御の軸曲げ	G K	クリープ疲労き裂進展 破壊力学パラメータ解析	4.8
17 18	表面き裂付き平板	荷重制御膜応力 荷重制御曲げ応力	G	疲労き裂進展(2の逆方向解析) (3の逆方向解析)	4.1
19	外面周方向表面 き裂付き円筒	荷重制御の軸曲げ	G	クリープ疲労き裂進展 (15の逆方向解析)	4.8
20 21	き裂無し of 任意の 板構造の断面	荷重制御曲げ応力 荷重制御膜応力	I	クリープ疲労き裂発生確率評価	

## 4.1 解析例 1 (表面き裂付き平板、疲労き裂進展、荷重制御型膜応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304, 550°C,  $t=8.0$ ,  $W=12.5$ ,  $a=2.0$ ,  $b=2.5$ ,  $a/b=0.8$ ) に荷重制御型膜応力 ( $\pm 15 \text{kgf/mm}^2$ ) を繰り返し負荷した疲労き裂進展試験 (REF. 4.1) である。試験条件を表 4.1 に、試験片形状を図 4.1.1 に示す。CANIS-G によりシミュレーション解析を行った。

## (2) 解析条件

- ・表面き裂の K 値解 --- 標準デフォルト、白鳥らの解 (KSCKV=10)
- ・正味断面形状関数 --- 標準デフォルト、荷重制御型膜応力対応の矩形近似式 (KFNS=10、 $p_M=1.0$ )
- ・疲労き裂進展パラメータ --- 弾塑性  $\Delta J$
- ・弾塑性特性 --- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304, 550°C、 $\alpha_V=1.0$ )
- ・疲労き裂進展特性 --- 次式の PNC の材料試験データの平均値を使用した。

$$\text{上限値} \quad da/dn \text{ (mm/cycle)} = 4.0443 \times 10^{-3} [\Delta J \text{ (kgf/mm)}]^{1.4435} \quad (4.1a)$$

$$\text{平均値} \quad da/dn \text{ (mm/cycle)} = 1.2022 \times 10^{-3} [\Delta J \text{ (kgf/mm)}]^{1.4435} \quad (4.1b)$$

$$\text{下限値} \quad da/dn \text{ (mm/cycle)} = 3.5737 \times 10^{-4} [\Delta J \text{ (kgf/mm)}]^{1.4435} \quad (4.1c)$$

## (3) 解析結果

き裂深さおよびアスペクト比の変化を図 4.1.2 に示す。き裂進展の所要サイクル数およびアスペクト比の変化が良くシミュレートされている。CANIS-G の入力データをリスト 4.1 に示す。

表4.1 試験条件

Temperature	Wave pattern	Load level	Cycles	Beach mark pattern	TP No.
550°C	triangular wave	±15kgf/mm <sup>2</sup> (R=-1) 0.5 Hz	3925	15 0 kgf/mm <sup>2</sup> (R=0) 2 Hz	No.1
			3863		No.2
			3816		No.3
			4764		No.4

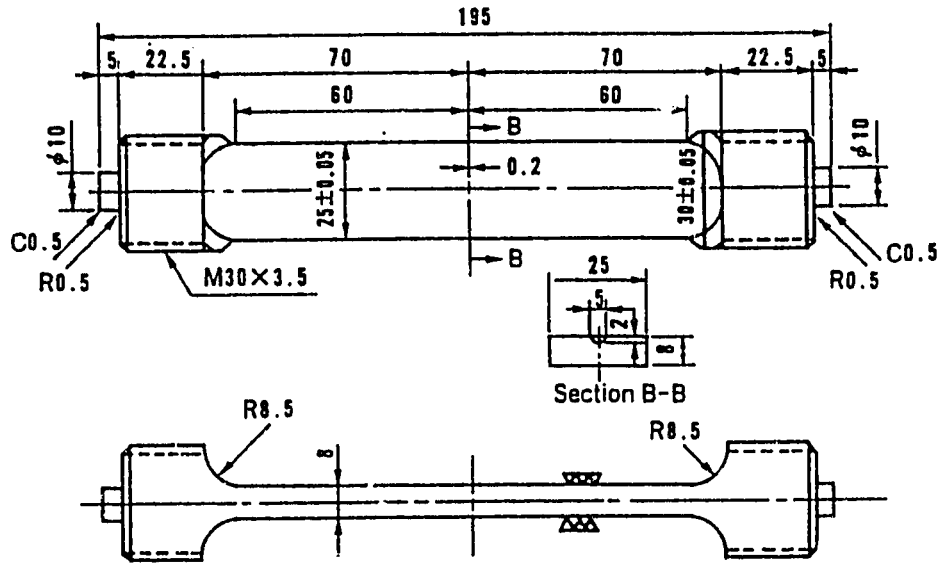


図4.1.1 試験片形状

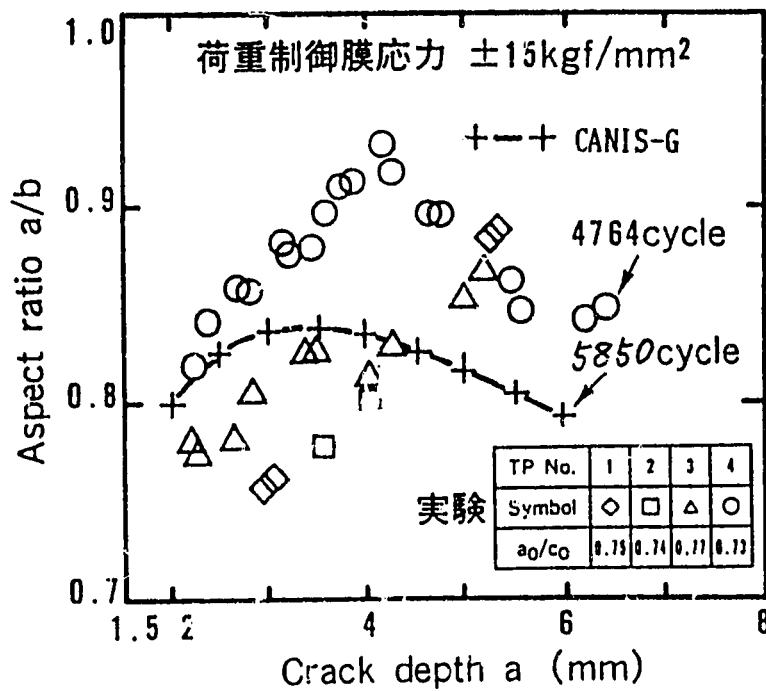


図4.1.2 き裂深さおよびアスペクト比の変化

リスト4.1 解析例 1 の入力データ

```

.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE-1, FCC2(1), NO-1,2,3,4, A/B=0.8, SIGM=+-15, 550DC
2  *CONT    DUM1 CRAC FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  *        C-FNS      P-SIGM P-SIGB P-C1  P-C2
4  *CONT    1
5
6  *GEOM    NCRA      RADI      THIC      AACR      BOCR      ATLM      BWLIM
7  *GEOM    12.5     8.0       2.0       2.5       2.5       0.9       0.9
8  *EPSS    KEPS     IMAT     IDUM     TREF      ALPHY     SIGF      50.0
9  *EPSS    2       304     M1       550.0    1.0
10 *FATG    KFAT     C1      M1       X1
11 *FATG    2       1.2022E-3  1.4435
12 *FAIL    KFAI
13 *FAIL    10
14 *LRAT    KLRA     Q-DET   GAMMA     ZETA      DELP      DTINT     QTIME
15 *LRAT    3       1.0     8.37E-11 2.0      0.1
16 *EVEN    LTYPE    NEVN    LBAS     PAPER     DTINT     QEPTE
17 *        SIGDW    KEY     KDUM     DTAV.J    QCEVN.J   SM(2,J)   SB(2,J)   SP(2,J)
18 *C1      SM(1,J)  0       1       0 100    10000.0   1.0
19 *C2      0.0     0.0     0.0     0.0      1.0
20 *EVEN    15.0    0.0     0.0     1.0OE4   1.0OE4   -15.0
21
22
23
24  END

```



## 4.2 解析例 2 (表面き裂付き平板、疲労き裂進展、荷重制御型膜応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304, 550°C,  $t=8.0$ ,  $W=12.5$ ,  $a=0.5$ ,  $b=2.5$ ,  $a/b=0.2$ ) に荷重制御型膜応力 ( $\pm 15\text{kgf/mm}^2$ ) を繰り返し負荷した疲労き裂進展試験 (REF. 4.1) である。試験条件を表 4.2 に示す。試験片形状および荷重条件は解析例 1 と共通であり、初期き裂形状が異なる。CANIS-G によりシミュレーション解析を行った。

## (2) 解析条件

解析例 1 と共通である。

## (3) 解析結果

き裂深さおよびアスペクト比の変化を図 4.2 に示す。き裂進展の所要サイクル数およびアスペクト比の変化が良くシミュレートされている。CANIS-G の入力データをリスト 4.2 に示す。

表4.2 試験条件

Temperature	Loading condition <sup>1)</sup>		$a_0/b_0$	Test cycles <sup>2)</sup>	Specimen No.
550°C	Triangular 0.5Hz R=-1	$\Delta\sigma_n=30.5\text{kg/mm}^2$	0.208	10,135	FCC-02
		$\Delta\sigma_n=30.4\text{kg/mm}^2$	0.237	10,830	FCC-03

1)  $\Delta\sigma_n=15\text{kg/mm}^2$  for Beach Mark  
 2) Without cycles for Beach Mark

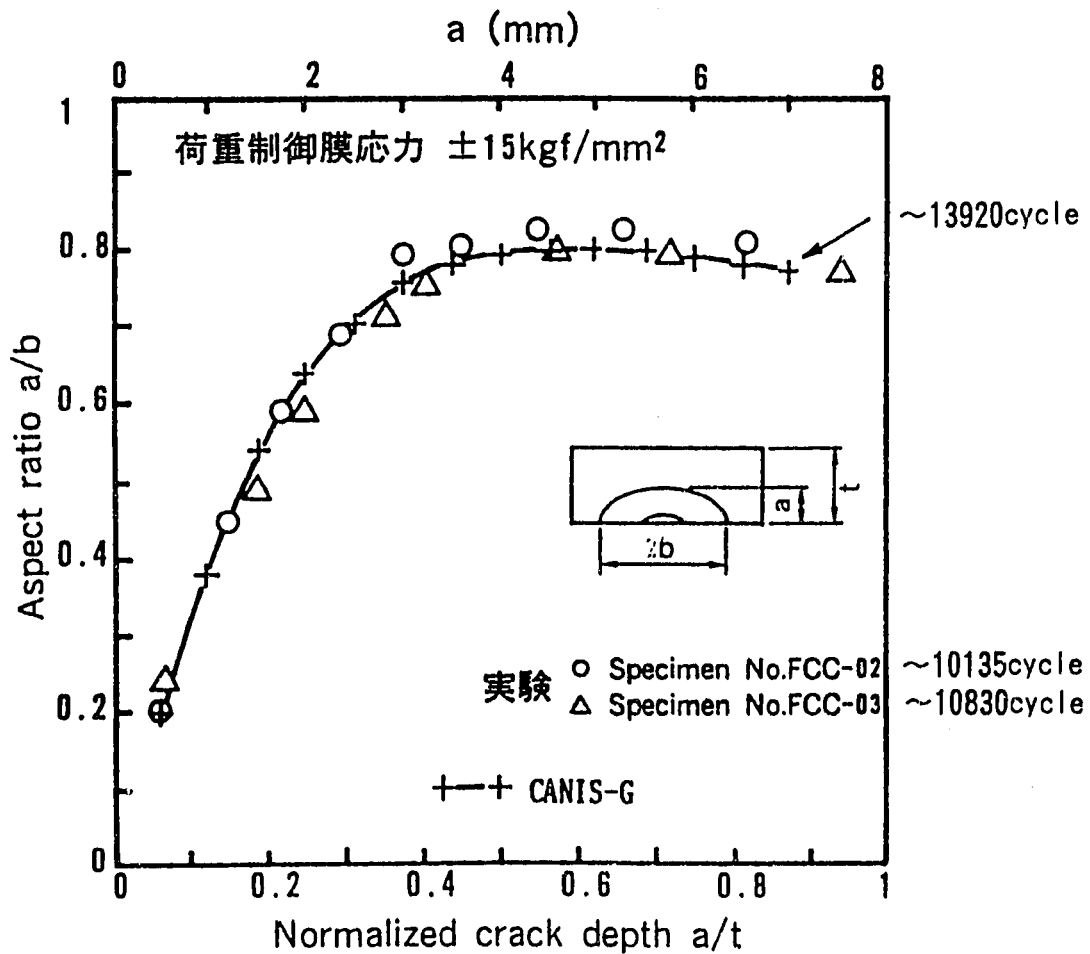


図4.2 き裂深さおよびアスペクト比の変化

リスト4.2 解析例 2 の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.2, FCC2(1), FCC-02, A/B=0.2, SIGM=+-15, 550DC
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS  P.SIGM  P.SIGB  P.C1  P.C2
4  CONT          1
5
6  ¥GEOM NCRA  RADI  THIC  AACR  BBCR  ATLIM  BWLIM
7  GEOM          12.5  8.0  0.5  2.5  0.9  0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT IDUM  TREF  ALPHY  SIGF
9  EPSS          2  304  550.0  1.0  50.0
10 ¥FATG KFAT  C1  M1  X1  C2  M2  X2
11 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
12 ¥FAIL KFAI
13 FAIL          10
14 ¥LRAT KLRA  Q.DET  GAMMA  ZETA  DELP
15 LRAT          3  1.0  8.37E-11  2.0  0.1
16 ¥EVEN      LTYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE  DTINT  CTIME
17 ¥          SIGDW  POPER  SIGTE  QEPT
18 ¥C1          KEY KDUM  DTAV.J  QEPEV.J  QCEVN.J
19 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)  SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
20 EVEN          0  1  0  100  20000.0  1.0
21              0.0  0.0  0.0  1.0
22              0  1.0  1.0E4  1.0E4
23              15.0  0.0  0.0  -15.0  0.0  0.0
24  END

```

## 4.3 解析例3 (表面き裂付き平板、疲労き裂進展、荷重制御型曲げ応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304、室温および 550°C、 $t=16.0$ ,  $W=40.0$ ,  $a=4.0$ ,  $b=4.0$ ,  $a/b=1.0$ ) に荷重制御型曲げ応力 ( $\pm 20\text{kgf/mm}^2$ ) を繰り返し負荷した疲労き裂進展試験 (REF. 4.1) である。試験条件を表4.3 に、試験片形状を図4.3.1 に示す。CANIS-Gによりシミュレーション解析を行った。

## (2) 解析条件

- ・表面き裂のK値解--- 標準デフォルト、白鳥らの解 (KSCKV=10)
- ・正味断面形状関数--- 荷重制御型曲げ応力対応の矩形近似式 (KFNS=11、 $p_B=1.0$ )
- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304, 550°C、 $\alpha_V=1.0$ )
- ・疲労き裂進展パラメータ--- 弾塑性  $\Delta J$
- ・疲労き裂進展特性--- PNCの平均値 (4.1b) 式

## (3) 解析結果

き裂深さおよびアスペクト比の変化を図4.3.2 に示す。き裂進展に伴うアスペクト比の変化が良くシミュレートされている。CANIS-Gの入力データをリスト4.3 に示す。

表4.3 試験条件

Temp. (°C)	Stress* (kgf/mm <sup>2</sup> )	Frequency (Hz)	Initial notch size	Measurment items	Specimen number
23	$\pm 20$ ↓ $\pm 25$	0.33	Semicircular $2b_0=8\text{mm}$ $a_0=4\text{mm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ a,b</li> <li>・ E<sub>1</sub>,E<sub>2</sub></li> </ul>	FCC704
	$\pm 25$			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ b</li> <li>・ E<sub>1</sub>,E<sub>2</sub></li> <li>・ COD</li> </ul>	FCC703
550	$\pm 20$			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ a,b</li> <li>・ E<sub>1</sub>,E<sub>2</sub></li> <li>・ COD</li> </ul>	FCC114

※Maximum bending stress

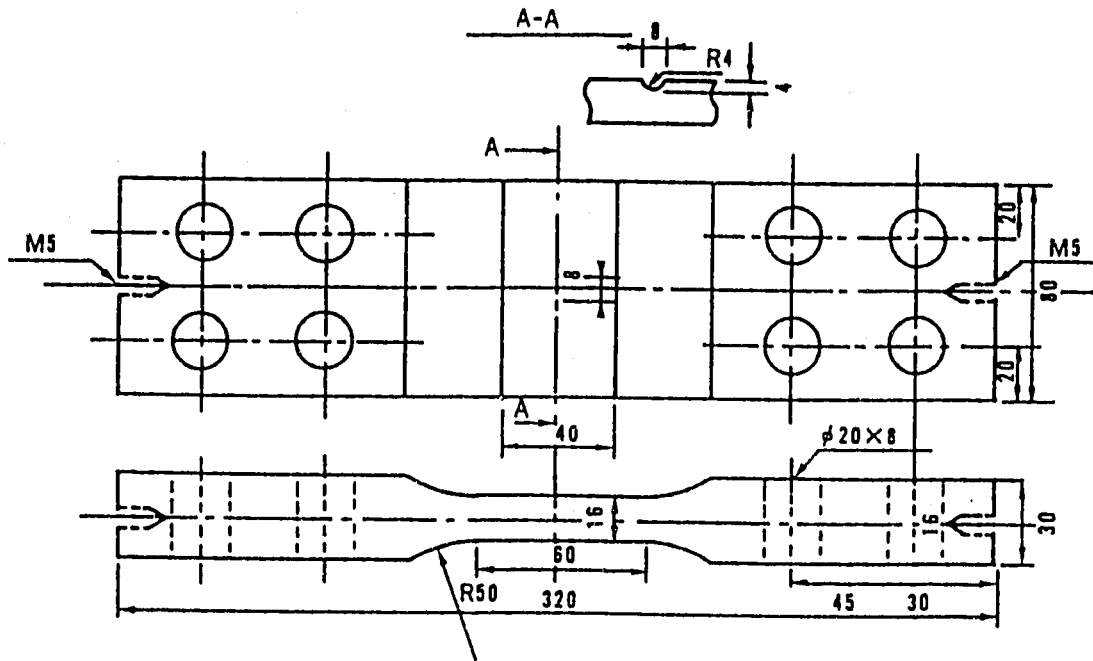


図4.3.1 試験片形状

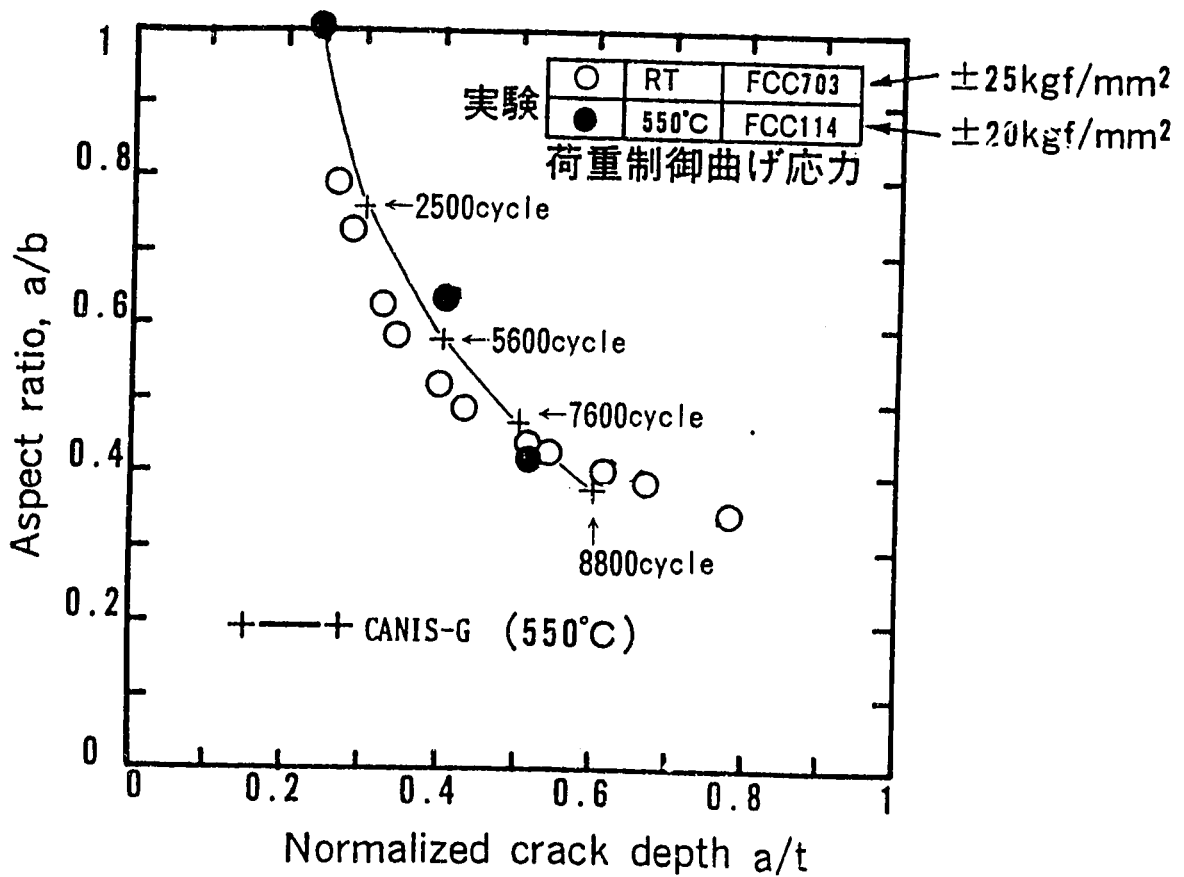


図4.3.2 き裂深さおよびアスペクト比の変化

## リスト4.3 解析例 3 の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.3, FCC2(1), FCC-114, A/B=1.0, SIGB=+-20, 550DC
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS   P.SIGM   P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT          1    11
5
6  ¥GEOM NCRA  RADI      THIC      AACR      BBCR      ATLM      BWLIM
7  GEOM          40.0    16.0      4.0      4.0      0.8      0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT  IDUM  TREF      ALPHY     SIGF
9  EPSS          2    304    550.0    1.0     50.0
10 ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
11 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
12 ¥FAIL KFAI
13 FAIL          10
14 ¥LRAT KLRA  Q.DET      GAMMA     ZETA      DELP
15 LRAT          3    1.0      8.37E-11  2.0      0.1
16 ¥EVEN          LTYPE NEVN  LBAS  NTIN  TLIFE     DTINT     CTIME
17 ¥          SIGDW  POPER     SIGTE     QEPE     QEPTE
18 ¥C1          KEY  KDUM  DTAV.J  QEPEV.J  QCEVN.J
19 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)  SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
20 EVEN          0    1    0  100  10000.0  1.0
21          0.0    0.0    0.0    1.0
22          0    1.0    1.0E4  1.0E4
23          0.0    20.0   0.0    0.0    -20.0   0.0
24  END

```

## 4.4 解析例4 (表面き裂付き平板、疲労き裂進展、変位制御型曲げ応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304、室温および 650°C、 $t=10.0$ ,  $W=25.0$ ,  $a=1.0$ ,  $b=2.0$ ,  $a/b=0.5$ ) に変位制御型曲げ応力を繰り返し負荷した疲労き裂進展試験(RBF. 4.1) である。試験条件を表4.4 に、試験片形状を図4.4.1 に示す。CANIS-Gによりシミュレーション解析を行った。

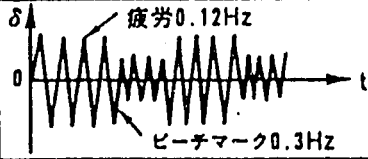
## (2) 解析条件

- 表面き裂のK値解--- 標準デフォルト、白鳥らの解 (KSCKV=10)
- 正味断面形状関数--- 変位制御型応力対応の一定値 (KFNS=1、 $F_{NS}=0.6667$ 、 $p_B=1.0$ )
- 弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304、650°C、 $\alpha_Y=1.0$ )
- 疲労き裂進展パラメータ--- 弾塑性  $\Delta J$
- 疲労き裂進展特性--- PNCの平均値 (4.1b) 式
- 荷重データ--- 弾性計算の曲げ応力  $\pm 40\text{kgf/mm}^2$  に相当する曲げひずみ荷重とした。

## (3) 解析結果

き裂深さおよびアスペクト比の変化を図4.4.2 に示す。き裂進展に伴うアスペクト比の変化が良くシミュレートされている。CANIS-Gの入力データをリスト4.4 に示す。

表4.4 試験条件

材質	試験温度	端子間距離 (mm)	変位量 $\Delta\delta$ (mm)	試験条件	繰返し数 (Cycles)	試験片No.
SUS304	RT(26°C)	3	12		1440	FCCII-1
	650°C	2	4.6		647	FCCII-2
					5976	FCCII-3

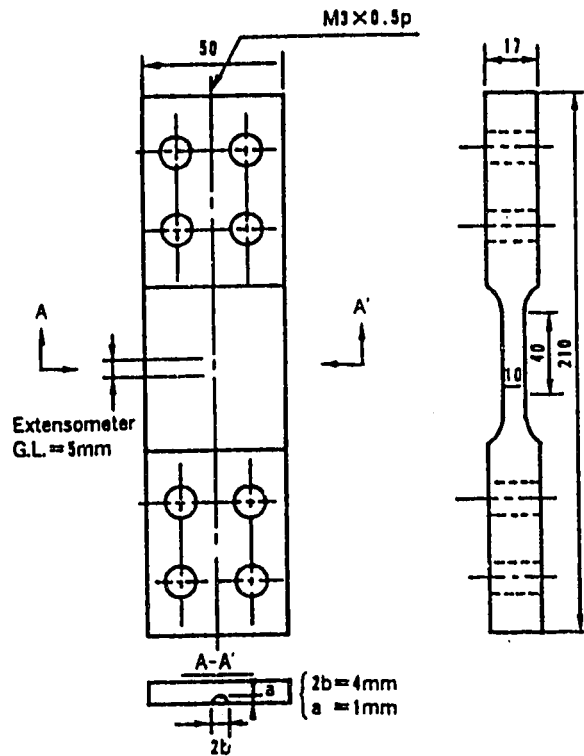


図4.4.1 試験片形状

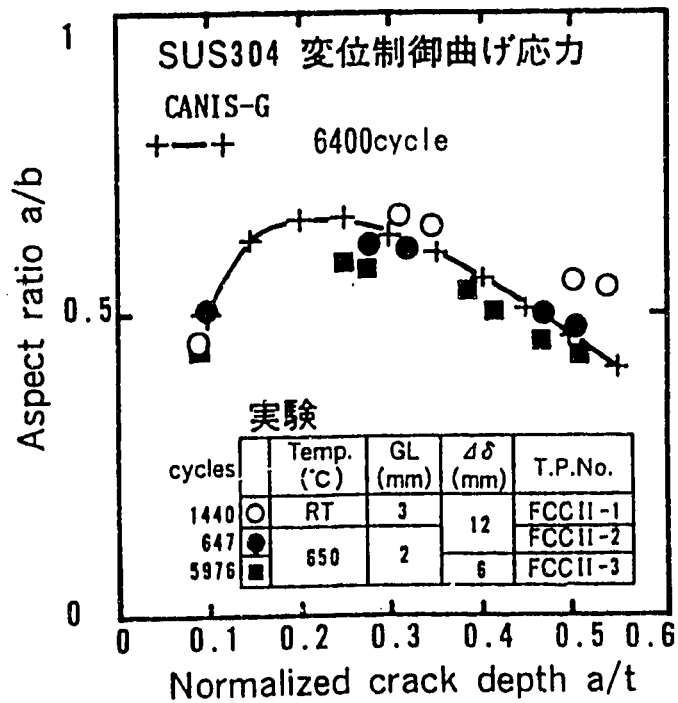


図4.4.2 き裂深さおよびアスペクト比の変化



## リスト4.4 解析例 4 の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.4, FCC2(1), FCC2-2,3, A/B=0.5, DISP.CONT.SIGB, 650DC
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS      P.SIGM      P.SIGB      P.C1      P.C2
4  CONT          1      1
5          0.6667      1.0      1.0      0.2      0.2
6  ¥GEOM NCRA  RADI  THIC      AACR      BBCR      ATLIM      BWLIM
7  GEOM          25.0      10.0      1.0      2.0      0.7      0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT IDUM  TREF      ALPHY      SIGF
9  EPSS          2      304      650.0      1.0      40.0
10 ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
11 FATG          2      1.2022E-3      1.4435
12 ¥FAIL KFAI
13 FAIL          10
14 ¥LRAT KLRA  Q.DET      GAMMA      ZETA      DELP
15 LRAT          3      1.0      8.37E-11      2.0      0.1
16 ¥EVEN      LTYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE      DTINT      CTIME
17 ¥          SIGDW      POPER      SIGTE      QEPTE
18 ¥C1          KEY KDUM  DTAV.J      QEPEV.J      QCEVN.J
19 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)      SP(1,J)      SM(2,J)      SB(2,J)      SP(2,J)
20 EVEN          0      1      0      100      10000.0      1.0
21          0.0      0.0      0.0      1.0
22          0      1.0      1.0      1.0
23          0.0      40.0      0.0      0.0      -40.0      0.0
24  END

```

## 4.5 解析例 5 (表面き裂付き平板、クリープ疲労き裂進展、荷重制御型曲げ応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304、室温および 650℃、 $t=12.0$ ,  $W=30.0$ ) に荷重制御型曲げ応力を繰り返し負荷したクリープ疲労き裂進展試験(REF. 4.2) である。試験条件を表4.5 に、試験片形状を図4.5.1 に示す。650℃における荷重保持無しの疲労き裂進展試験(FCC130,  $a=3.0$ ,  $b=3.0$ ,  $\pm 20\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) と荷重保持有りのクリープ疲労き裂進展試験(FCC134, 保持時間10min,  $a=5.0$ ,  $b=10.0$ ,  $+17\sim-20\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) についてCANIS-Gによりシミュレーション解析を行った。

## (2) 解析条件

- ・表面き裂のK値解--- 標準デフォルト、白鳥らの解 (K<sub>SCKV</sub>=10)
- ・正味断面形状関数--- 荷重制御型曲げ応力対応の矩形近似式 (K<sub>FNS</sub>=11、 $p_B=1.0$ )
- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304, 650℃、 $\alpha_Y=1.0$ )
- ・疲労き裂進展パラメータ--- 弾塑性  $\Delta J$
- ・疲労き裂進展特性--- PNCの平均値 (4.1b) 式
- ・クリープひずみ特性--- 材料データライブラリ (SUS304, 650℃、 $\alpha_C=1.0$ 、ひずみ硬化則)
- ・クリープ破断特性--- 材料データライブラリ (SUS304, 650℃)
- ・クリープき裂進展パラメータ  $\Delta J_c$  ---  $J_c(t)$  を  $t=0$  から  $t=10\text{min}$  まで数値積分。
- ・クリープ時間変換係数--- CTIME=0.1667とした。実時間にサイクル数を使用したので、1サイクル (10min) をクリープ時間 0.1667hr に変換してクリープ計算を行った。
- ・クリープき裂進展特性--- 次式のPNCの材料試験データの平均値を使用した。

$$\text{上限値} \quad da/dn \text{ (mm/cycle)} = 0.2671 \times [\Delta J_c \text{ (kgf/mm)}]^{0.877} \quad (4.2a)$$

$$\text{平均値} \quad da/dn \text{ (mm/cycle)} = 0.1274 \times [\Delta J_c \text{ (kgf/mm)}]^{0.877} \quad (4.2b)$$

$$\text{下限値} \quad da/dn \text{ (mm/cycle)} = 0.06072 \times [\Delta J_c \text{ (kgf/mm)}]^{0.877} \quad (4.2c)$$

## (3) 解析結果

き裂深さおよびアスペクト比の変化を図4.5.2 に示す。荷重保持無し(FCC130)の入力データをリスト4.5.1 に、荷重保持有り(FCC134)の入力データをリスト4.5.2 に示す。

表4.5 試験条件

Temp. (°C)	Load range (kgf)	Stress range※ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Stress ratio	Hold time (min)	Measurement items	Initial notch size	SP.No.
650	+256 ~ +285 -220 ~ -220	+17 ~ +17 -19.7 ~ -22	-1.16 ~ -1.29	10	・Crack length (a,b) ・Electrical potential (E <sub>1</sub> , E <sub>∞</sub> )	a <sub>0</sub> =5mm b <sub>0</sub> =10mm (semielliptical)	FCC134
	519	40	-1	0		a <sub>0</sub> =3mm b <sub>0</sub> =3mm (semicircular)	FCC130
RT	778	60					・COD (δ)

※Maximum bending stress calculated elastically.

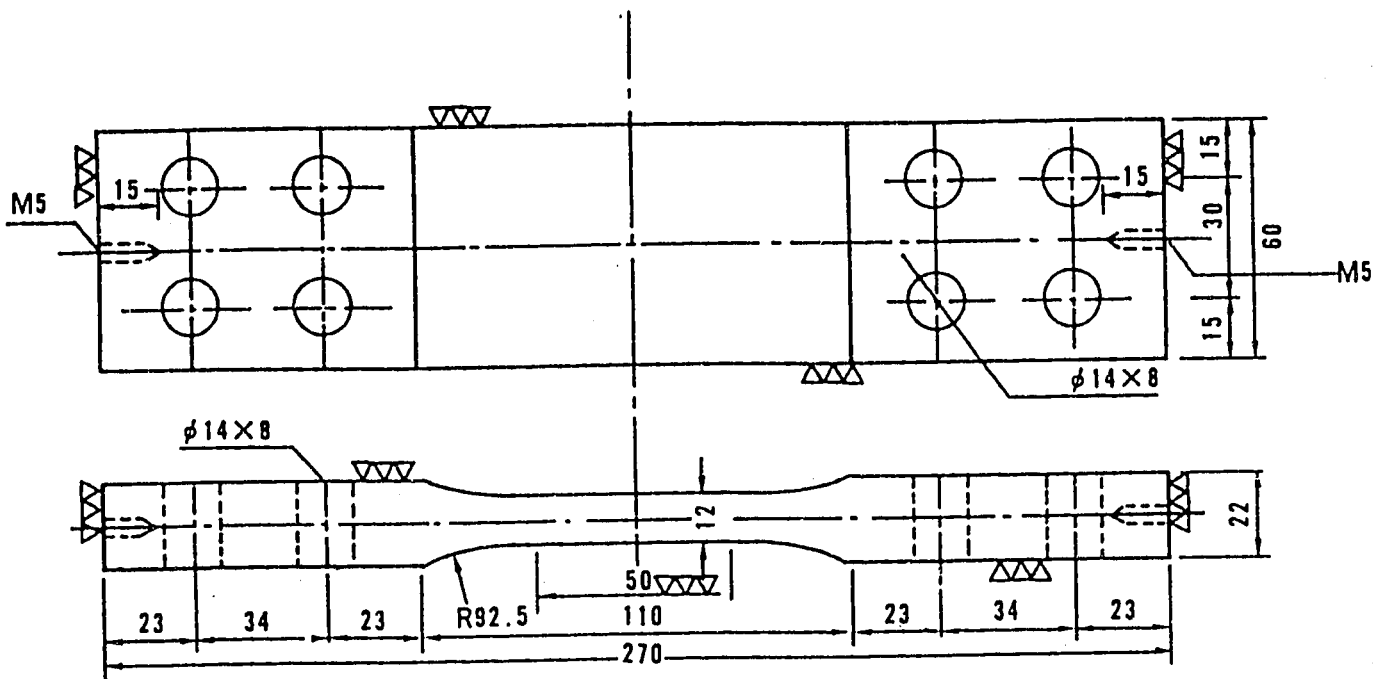


図4.5.1 試験片形状

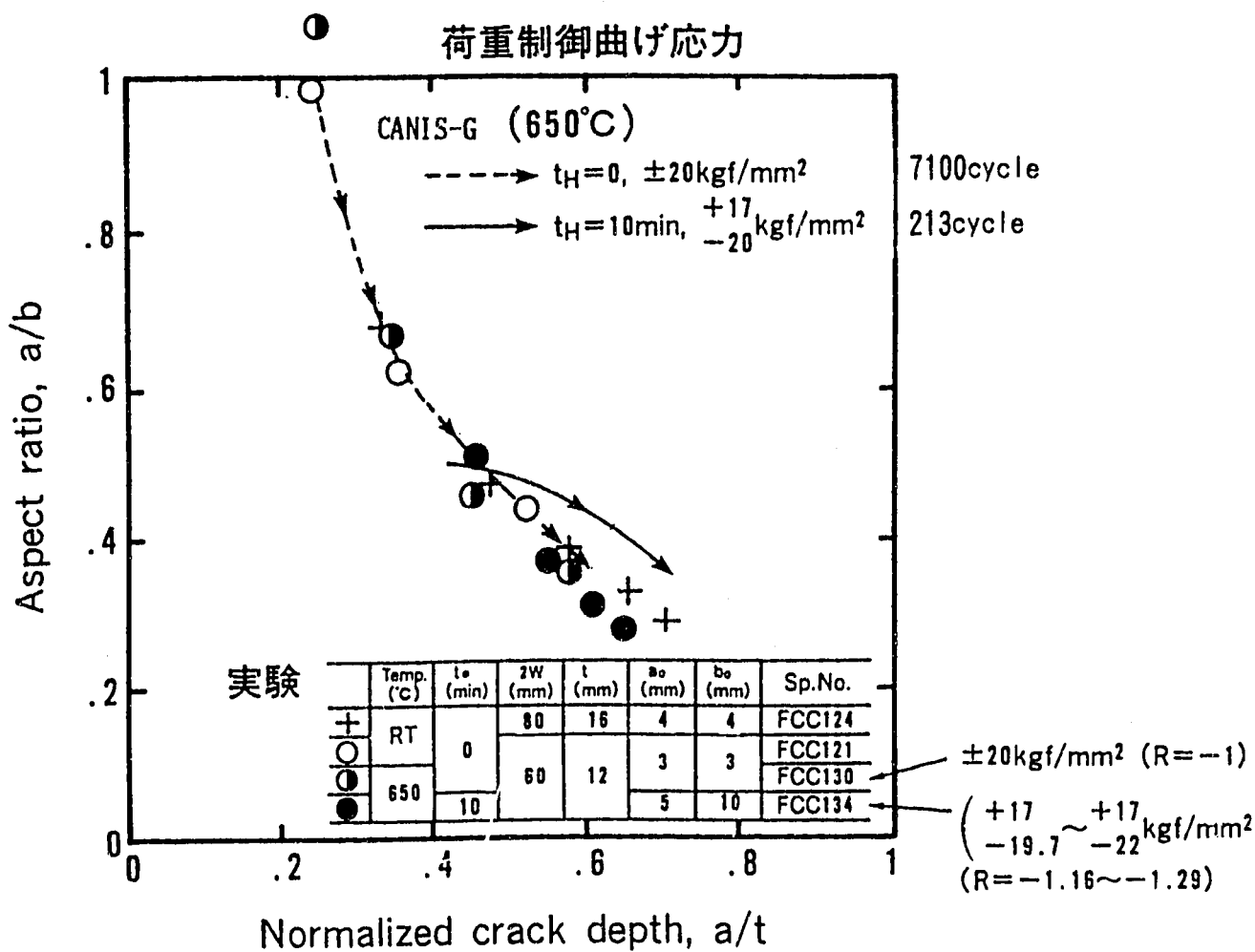


図4.5.2 き裂深さおよびアスペクト比の変化

リスト4.5.1 解析例5の入力データ (FCC130,  $t_H = 0$ )

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7
1  TITL      EXAMPLE.5, FCC130, LOAD.CONT.SIGB=+-20, 650DC, TH=0
2  ##### K DUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< K DUM2,3,4  >
3  $         < P.FNS  >< P.SIGM >< P.SIGB >< P.SRC1 >< P.SRC2 >
4  CONT      1    11
5           0.6667    1.0    1.0    0.2    0.2
6  ##### NCRAC< RAD I    >< THIC    >< AACR    >< BBCR    >< AT LIM    >< BW LIM    >
7  GEOM      30.0    12.0    3.0    3.0    0.7    0.9
8  ##### KEPSS<IMAT<IDUM< TREF    >< ALPHY    >< SIGF    > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS      2    304    650.0    1.0    40.0
10 ##### KFATG< C1    >< M1    >< X1    >< C2    >< M2    >< X2    >
11 FATG      2 1.2022E-3 1.4435
12 ##### KFAIL
13 FAIL      10
14 ##### KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE    >< DTINT    >< CTIME    > (LTYPE=0)
15 $         < SIGDW    >< POPER    >< SIGTE    >< QEPTE    >
16 %C1       < KEY<K DUM< DTAV(J)>< QEP(J)    >< QC(J)    > (FOR J=1,NEVNT)
17 %C2       < SM1(J)    >< SB1(J)    >< SP1(J)    >< SM2(J)    >< SB2(J)    >< SP2(J)    >
18 EVEN      0    1    0 100 10000.0 1.0    0.1667
19           0.0    0.0    0.0    1.0
20           0    1.0    1.0E4  1.0E4
21           0.0    20.0  0.0    0.0    -20.0  0.0
22  END

```

リスト4.5.2 解析例5の入力データ (FCC134,  $t_H = 10\text{min}$ )

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7
1  TITL      EXAMPLE.5, FCC134, LOAD.CONT.SIGB=+17,-20, 650DC, TH=10MIN.
2  ##### K DUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< K DUM2,3,4  >
3  $         < P.FNS  >< P.SIGM >< P.SIGB >< P.SRC1 >< P.SRC2 >
4  CONT      1    11
5           0.6667    1.0    1.0    0.2    0.2
6  ##### NCRAC< RAD I    >< THIC    >< AACR    >< BBCR    >< AT LIM    >< BW LIM    >
7  GEOM      30.0    12.0    5.0    10.0  0.7    0.9
8  ##### KEPSS<IMAT<IDUM< TREF    >< ALPHY    >< SIGF    > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS      2    304    650.0    1.0    40.0
10 ##### KCREP<IMAT<ICHR< TREF    >< ALPHC    >< DUMMY    > (KCREP=2,LIBRALY)
11 CREP      2    304    1 650.0  1.0
12 ##### <IMAT< TREF    >< ALPHR    >< B0    >< B1    >< B2    > (LIBRALY)
13 RUPT      304 650.0  1.0
14 ##### KFATG< C1    >< M1    >< X1    >< C2    >< M2    >< X2    >
15 FATG      2 1.2022E-3 1.4435
16 ##### KCRPG< C1    >< M1    >< X1    >< C2    >< M2    >< X2    >
17 CRPG      1 0.1274  0.877
18 ##### KFAIL
19 FAIL      10
20 ##### KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE    >< DTINT    >< CTIME    > (LTYPE=0)
21 $         < SIGDW    >< POPER    >< SIGTE    >< QEPTE    >
22 %C1       < KEY<K DUM< DTAV(J)>< QEP(J)    >< QC(J)    > (FOR J=1,NEVNT)
23 %C2       < SM1(J)    >< SB1(J)    >< SP1(J)    >< SM2(J)    >< SB2(J)    >< SP2(J)    >
24 EVEN      0    1    0 5 1000.0 1.0    0.1667
25           0.0    0.0    0.0    1.0
26           0    1.0    1.0E4  1.0E4
27           0.0    17.0  0.0    0.0    -20.0  0.0
28  END

```

## 4.6 解析例 6 (表面き裂付き平板、クリープ疲労き裂進展、荷重制御型膜応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304, 650°C,  $t=8.0$ ,  $W=12.5$ ,  $a=0.5$ ,  $b=2.5$ ,  $a/b=0.2$ ) に荷重制御型膜応力を繰り返し負荷したクリープ疲労き裂進展試験 (RBF. 4.2) である。試験条件を表 4.6 に、試験片形状を図 4.6.1 に示す。応力範囲  $\pm 13 \text{kgf/mm}^2$  の荷重保持無しの疲労き裂進展試験 (FCC-11) と荷重保持有りのクリープ疲労き裂進展試験 (FCC-12、保持時間 10min) について CANIS-G によりシミュレーション解析を行った。

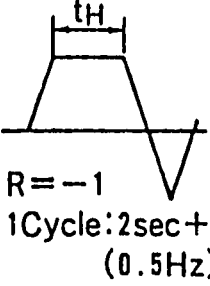
## (2) 解析条件

- ・表面き裂の K 値解 --- 標準デフォルト、白鳥らの解 (KSCKV=10)
- ・正味断面形状関数 --- 標準デフォルト、荷重制御型膜応力対応の矩形近似式 (KFNS=10,  $p_M=1.0$ )
- ・弾塑性特性 --- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304, 650°C,  $\alpha_Y=1.0$ )
- ・疲労き裂進展パラメータ --- 弾塑性  $\Delta J$
- ・疲労き裂進展特性 --- PNC の平均値 (4.1b) 式および上限値 (4.1a) 式を使用した。
- ・クリープひずみ特性 --- 材料データライブラリ (SUS304, 650°C,  $\alpha_C=1.0$ 、ひずみ硬化則)
- ・クリープ破断特性 --- 材料データライブラリ (SUS304, 650°C)
- ・クリープき裂進展パラメータ  $\Delta J_c$  ---  $J_c(t)$  を  $t=0$  から  $t=10\text{min}$  まで数値積分。
- ・クリープ時間変換係数 --- CTIME=0.1667 とした。サイクル数を実時間とし、1 サイクル (10min) をクリープ時間 0.1667hr に変換してクリープ計算を行った。
- ・クリープき裂進展特性 --- PNC の平均値 (4.2b) 式および下限値 (4.2c) 式を使用した。
- ・荷重保持有りの解析では、疲労き裂進展特性は平均値 (4.1b) 式とし、クリープき裂進展特性は平均値および下限値を使用した。

## (3) 解析結果

き裂寸法 (深さおよび長さ) の変化を図 4.6.2 に示す。き裂寸法とき裂進展速度の関係を図 4.6.3 に示す。き裂形状の変化を図 4.6.4 に示す。実験結果が CANIS-G により良くシミュレートされていることが分かる。荷重保持有りでクリープき裂進展特性に平均値を使用した解析の CANIS-G の入力データをリスト 4.6 に示す。

表4.6 試験条件

Temperature	Wave <sup>1)</sup>	$\Delta\sigma_n$	$t_H$	$a_0/c_0$	Test cycle <sup>2)</sup>	Specimen No.
650°C	 $R = -1$ 1 Cycle: 2sec + $t_H$ (0.5Hz)	26kg/mm <sup>2</sup>	0	0.224	6,400	FCC-11
			10min	0.240	702	FCC-12
		28kg/mm <sup>2</sup>	10min	0.230	345	FCC-13
			30kg/mm <sup>2</sup>	10min	0.200	425

1) For beach mark ; triangular,  $R = -1$ , 0.5Hz,  $1/2\Delta\sigma_n$   
 2) Cycles for beach mark are not included.

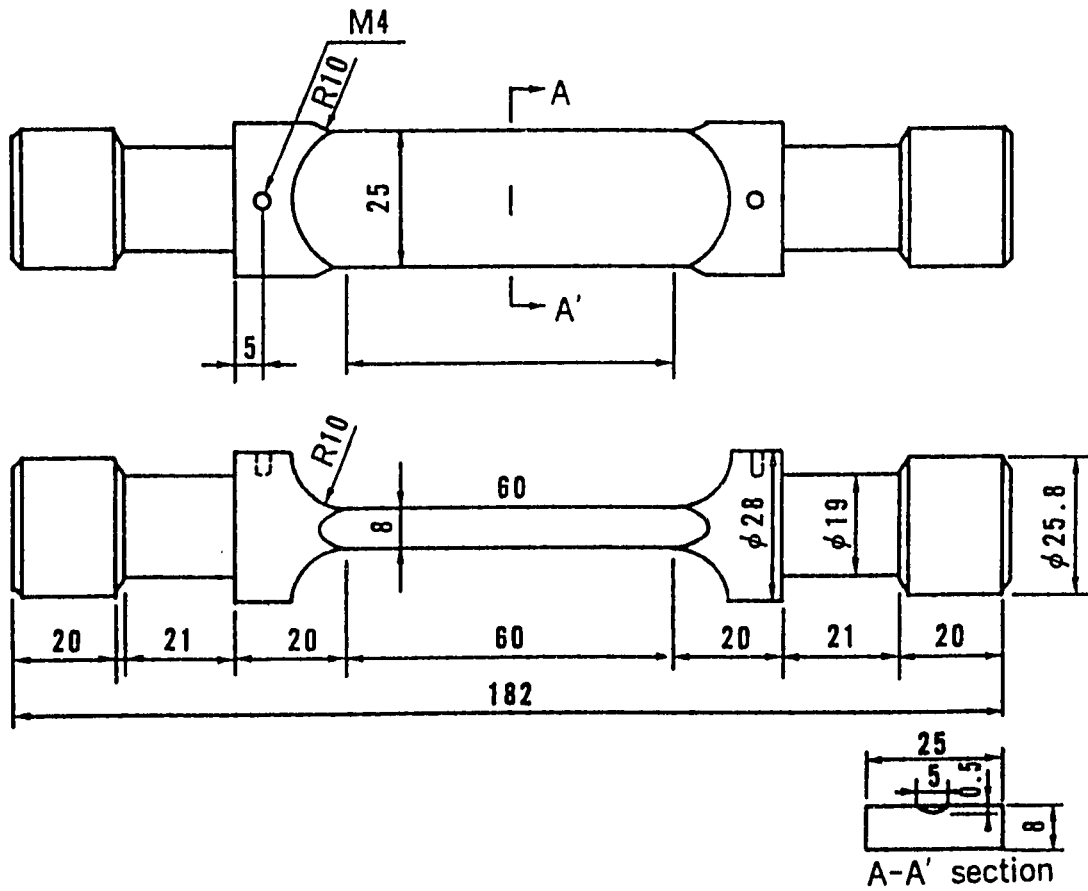


図4.6.1 試験片形状

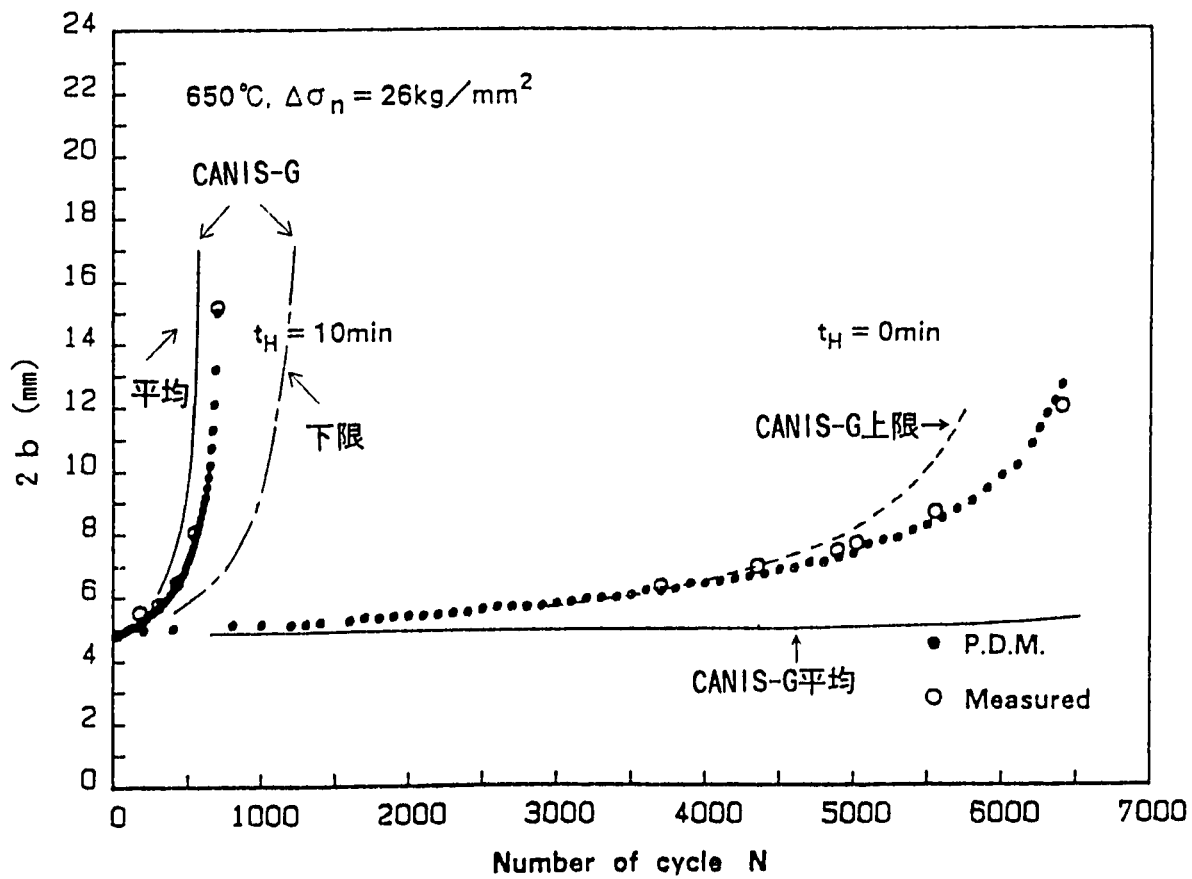
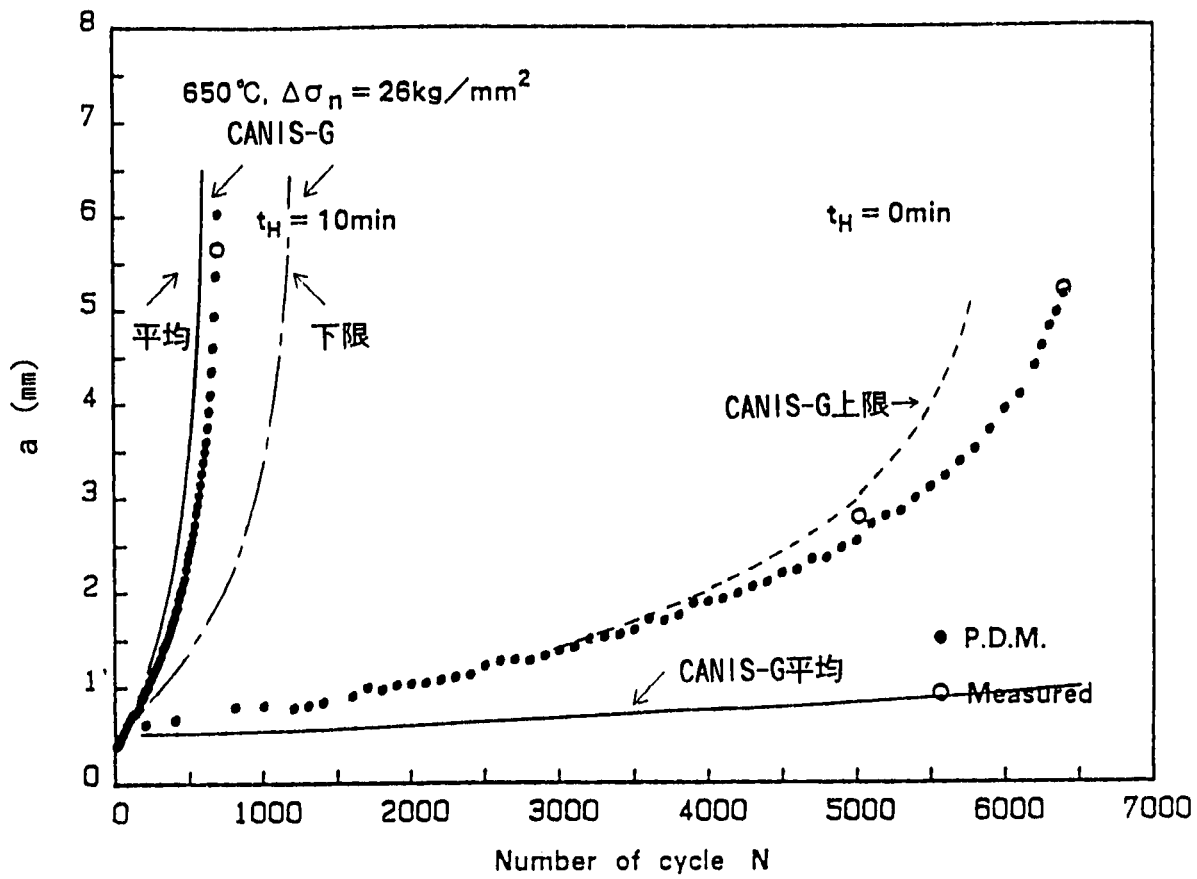


図4.6.2 き裂深さおよびき裂長さの変化

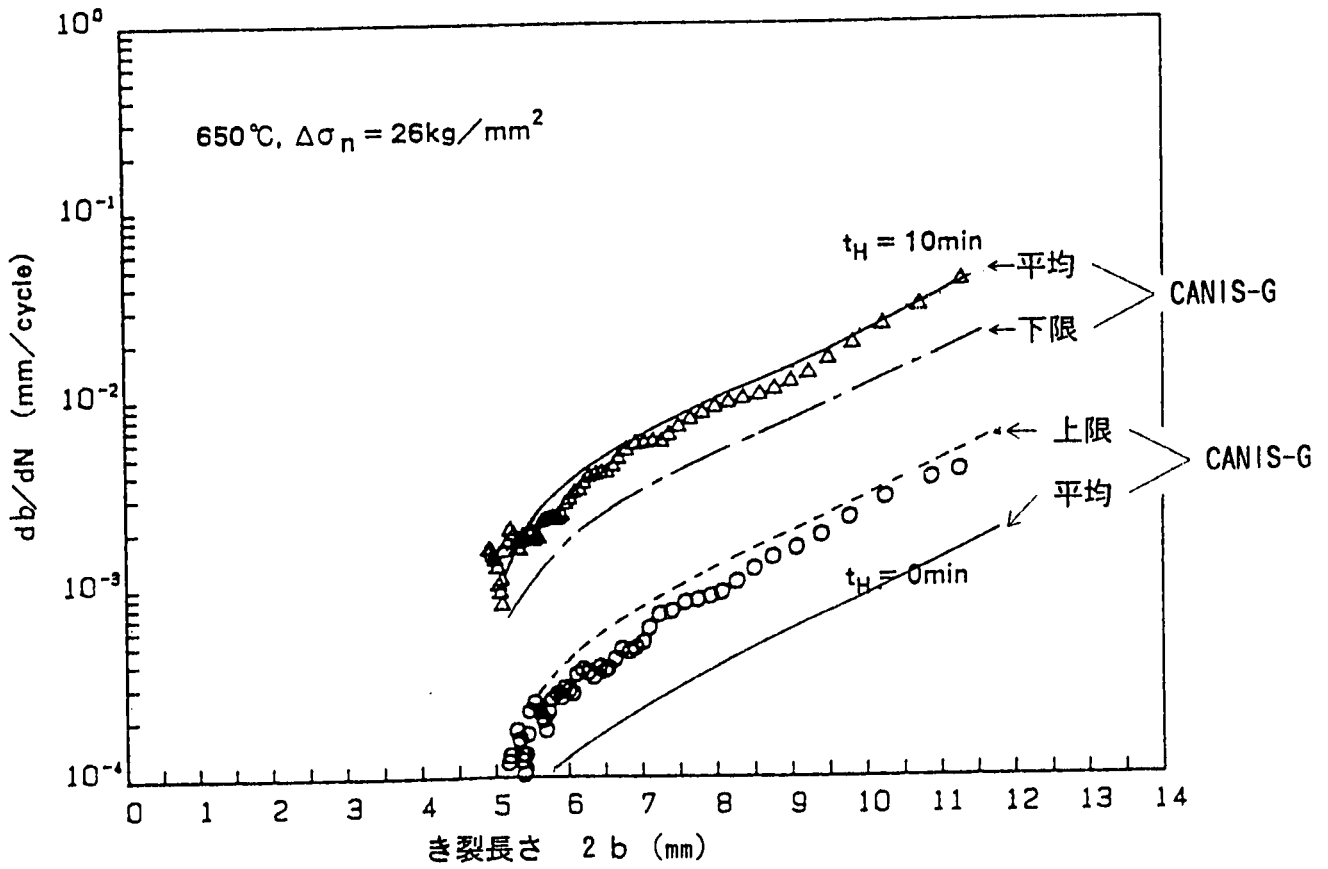
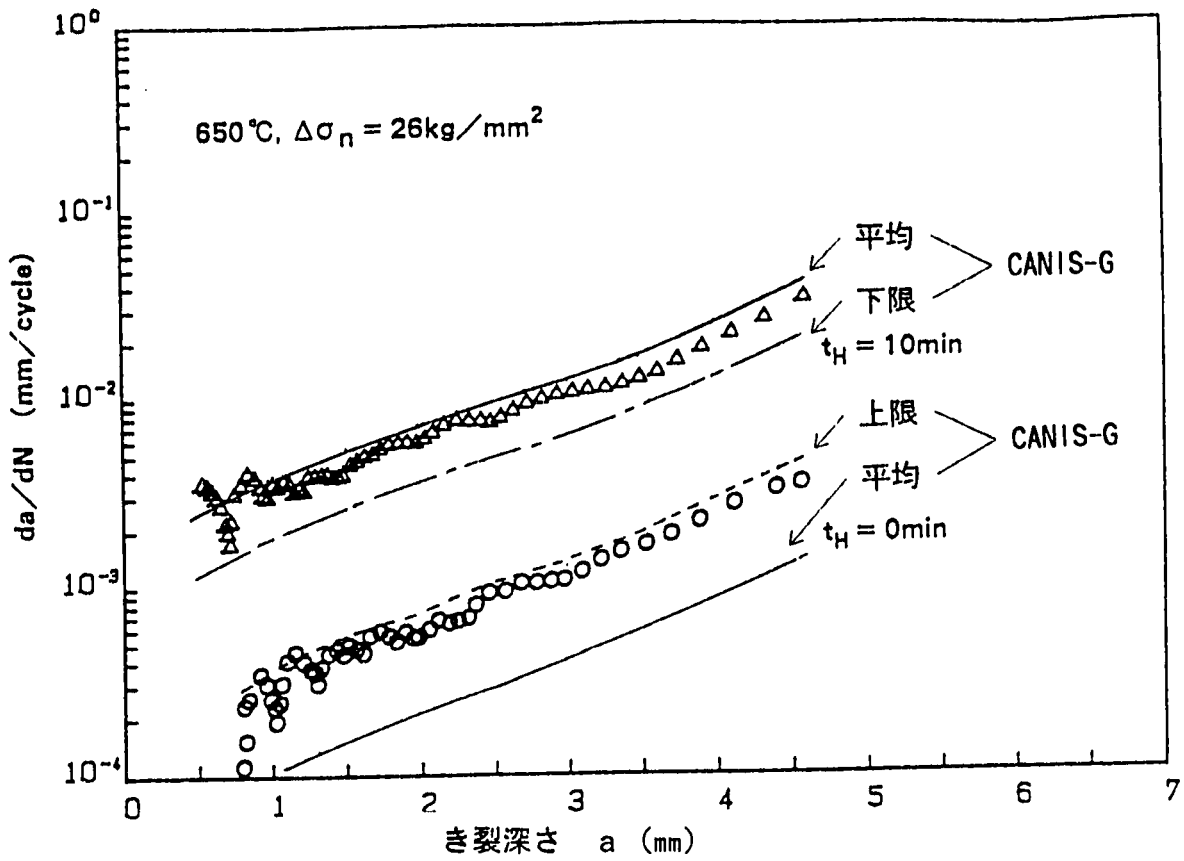


図4.6.3 き裂寸法とき裂進展速度の関係



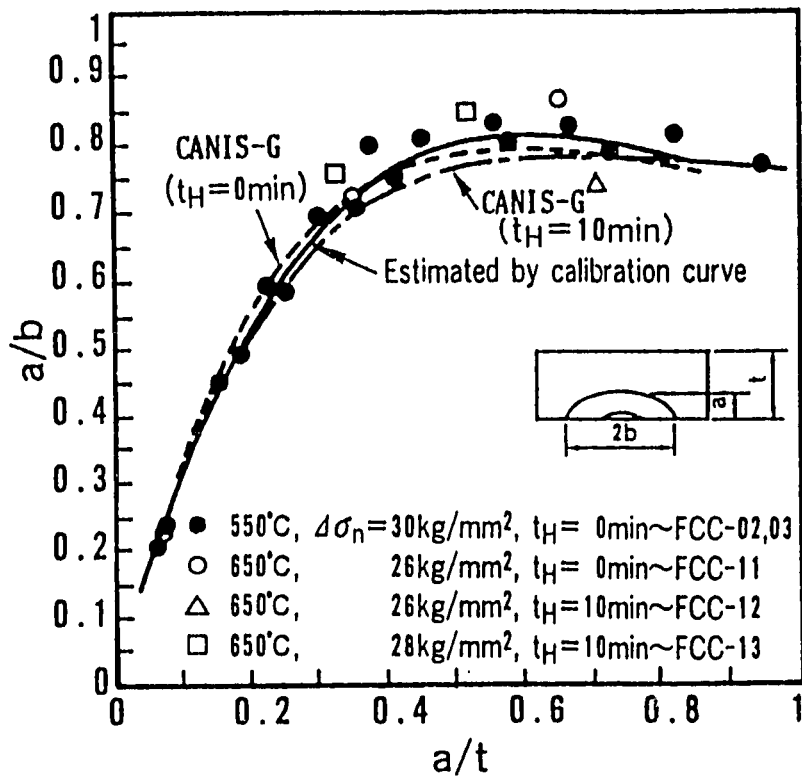


図4.6.4 き裂形状の変化

リスト4.6 解析例6の入力データ (FCC-12,  $t_H = 10\text{min}$ )

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.6, FCC-12, LOAD.CONT.SIGM=+-13, 650DC, TH=10MIN.
2  ¥¥¥¥ KDUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< KDUM2,3,4  >
3  ¥          < P.FNS  >< P.SIGM >< P.SIGB >< P.SRC1 >< P.SRC2 >
4  CONT          1
5          1.0          1.0          1.0          0.2          0.2
6  ¥¥¥¥ NCRAC< RADI  >< THIC  >< AACR  >< BBCR  >< AT LIM  >< BW LIM  >
7  GEOM          12.5          8.0          0.5          2.5          0.9          0.9
8  ¥¥¥¥ KEPSS<IMAT<IDUM< TREF  >< ALPHY  >< SIGF  > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS          2  304          650.0          1.0          40.0
10 ¥¥¥¥ KCREP<IMAT<ICHR< TREF  >< ALPHC  > (USE LIBRALY)
11 CREP          2  304          1  650.0          1.0
12 ¥¥¥¥ <IMAT< TREF  >< ALPHR  > (USE LIBRALY)
13 RUPT          304  650.0          1.0
14 ¥¥¥¥ KFATG< C1  >< M1  >< X1  >< C2  >< M2  >< X2  >
15 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
16 ¥¥¥¥ KCRPG< C1  >< M1  >< X1  >< C2  >< M2  >< X2  >
17 CRPG          1  0.1274          0.877
18 ¥¥¥¥ KFAIL
19 FAIL          10
20 ¥¥¥¥ KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  > (LTYPE=0)
21 ¥          < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
22 ¥C1          < KEY<KDUM< DTAV(J)>< QEP(J) >< QC(J)  > (FOR J=1,NEVNT)
23 ¥C2          < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
24 EVEN          0          1          0          10          2000.0          1.0          0.1667
25          0.0          0.0          0.0          1.0
26          0          1.0          1.0E4          1.0E4
27          13.0          0.0          0.0          -13.0          0.0          0.0
28 END

```

## 4.7 解析例7 (貫通き裂付き平板、疲労き裂進展、荷重制御型膜応力)

## (1) 解析対象

中央貫通き裂付き平板 (SUS304, 650°C,  $t=5.0$ ,  $W=15.0$ ) に荷重制御型膜応力 ( $\pm 8 \text{ kgf/mm}^2$ ) を繰り返し負荷した疲労き裂進展試験 (RBF. 4.2) である。試験片形状を図4.7.1 に示す。タイプAは2φの円孔の両側に深さ2mmの放電加工切り欠きを設けたもの ( $b=3\text{mm}$ ) であり、タイプCは、タイプA試験片に  $2b=9\text{mm}$  の予き裂を導入後、中央に  $8 \times 16\text{mm}$  の長円を設けて両側に深さ約0.5mmのき裂を残したものである。タイプA試験片について、CANIS-Gによりシミュレーションを行った。

## (2) 解析条件

- 貫通き裂K値解--- 標準デフォルト、CCTの解 ( $K_{PCKV}=10$ )
- 正味断面形状関数--- 標準デフォルト、荷重制御型膜応力対応の矩形近似式 ( $K_{FNS}=10$ ,  $p_M=1.0$ )
- 弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304, 650°C,  $\alpha_Y=1.0$ )
- 疲労き裂進展パラメータ--- 弾塑性  $\Delta J$
- 疲労き裂進展特性--- PNCの平均値(4.1b)式および上限値(4.1a)式

## (3) 解析結果

き裂長さの変化を図4.7.2 に示す。き裂長さとき裂進展速度の関係を図4.7.3 に示す。き裂長さとき裂開口変位の関係を図4.7.4 に示す。  $(\Delta J)_{ex}$  はき裂進展速度の実測値と次式のき裂進展特性データ (58 FCC, RBF. 4.3) から逆算推定したものである。

$$da/dn \text{ (mm/cycle)} = \begin{cases} 2.43 \times 10^{-3} (\Delta J)^{1.47} & \sim \text{上限} \\ 1.86 \times 10^{-3} (\Delta J)^{1.47} & \sim \text{平均} \\ 1.42 \times 10^{-3} (\Delta J)^{1.47} & \sim \text{下限} \end{cases} \quad (4.3)$$

$\Delta J_e$  は  $\Delta K^2/E$  により算出した弾性J積分範囲であり、タイプCに対しては長円の効果を考慮している。き裂長さとき裂開口変位の関係を図4.7.5 に示す。実験結果はゲージ長10mmの変位計による計測値であり、実際の開口変位に材料の弾塑性変形が加算されたものである。疲労き裂進展特性にPNCの平均値(4.1b)式を用いた解析の入力データをリスト4.7 に示す。

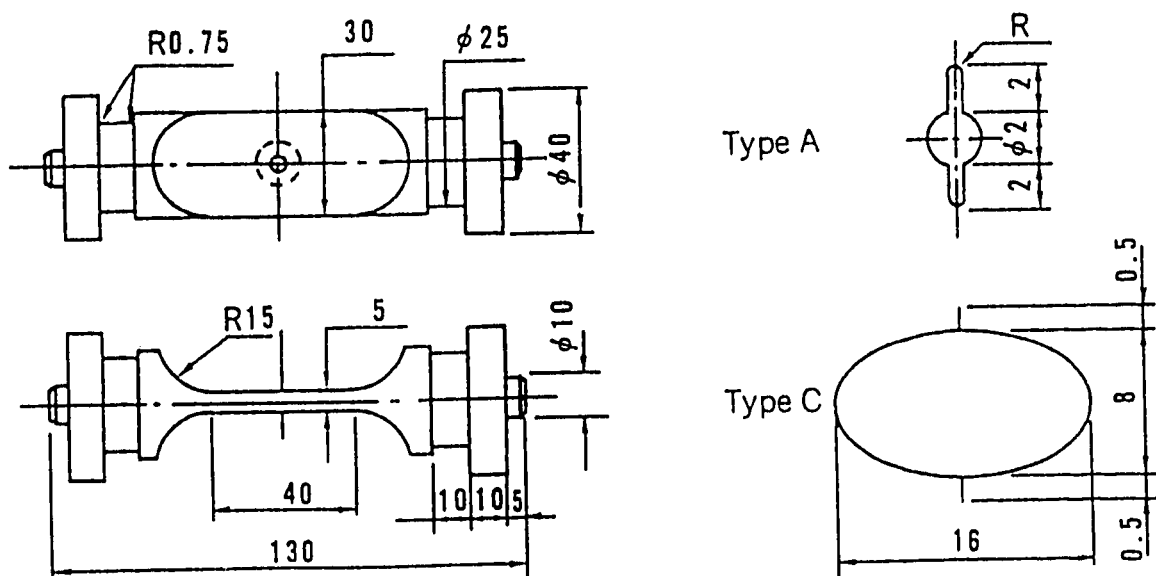


図4.7.1 試験片形状

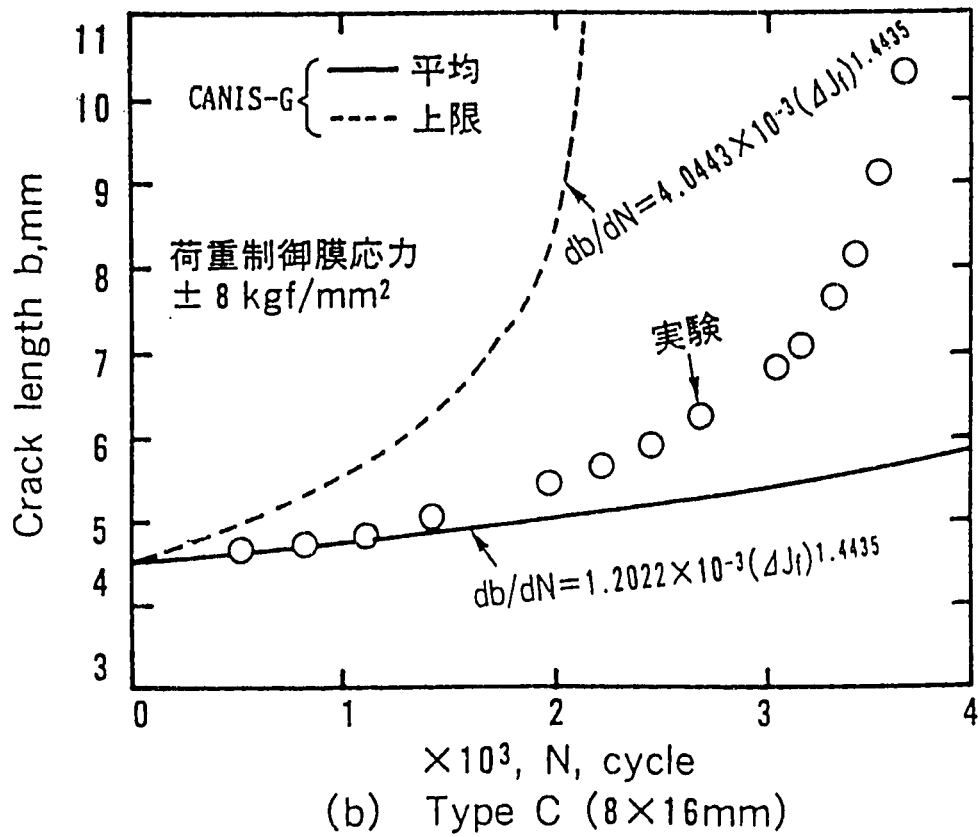
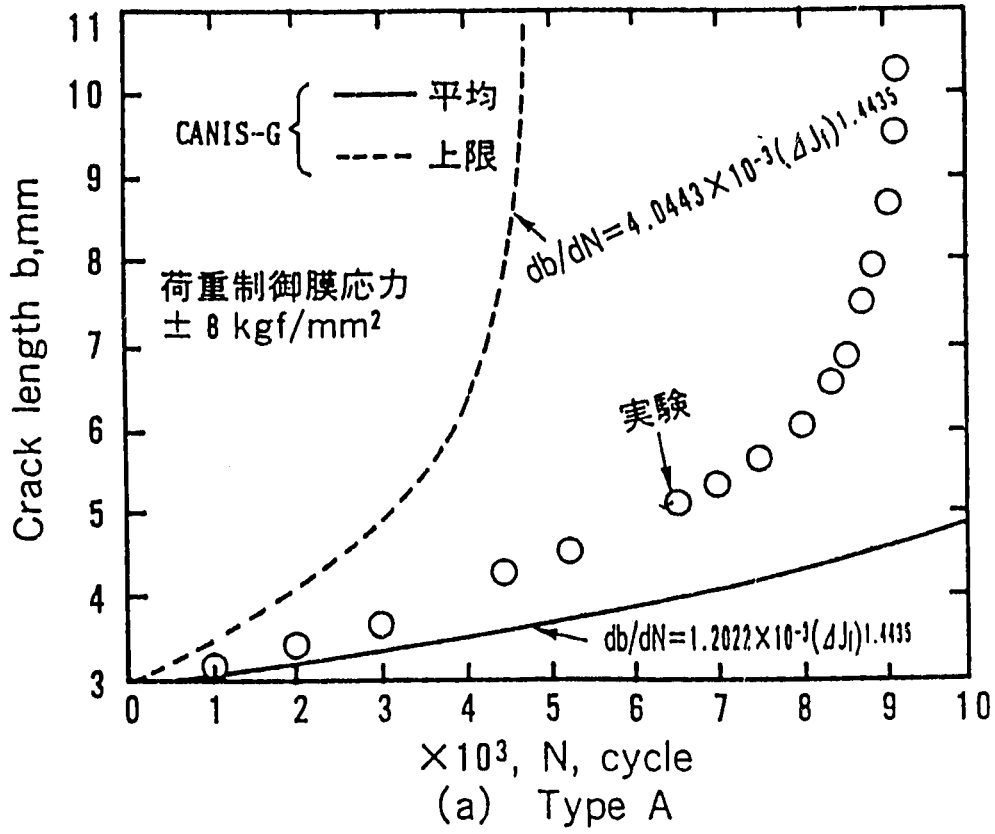


図4.7.2 き裂長さの変化

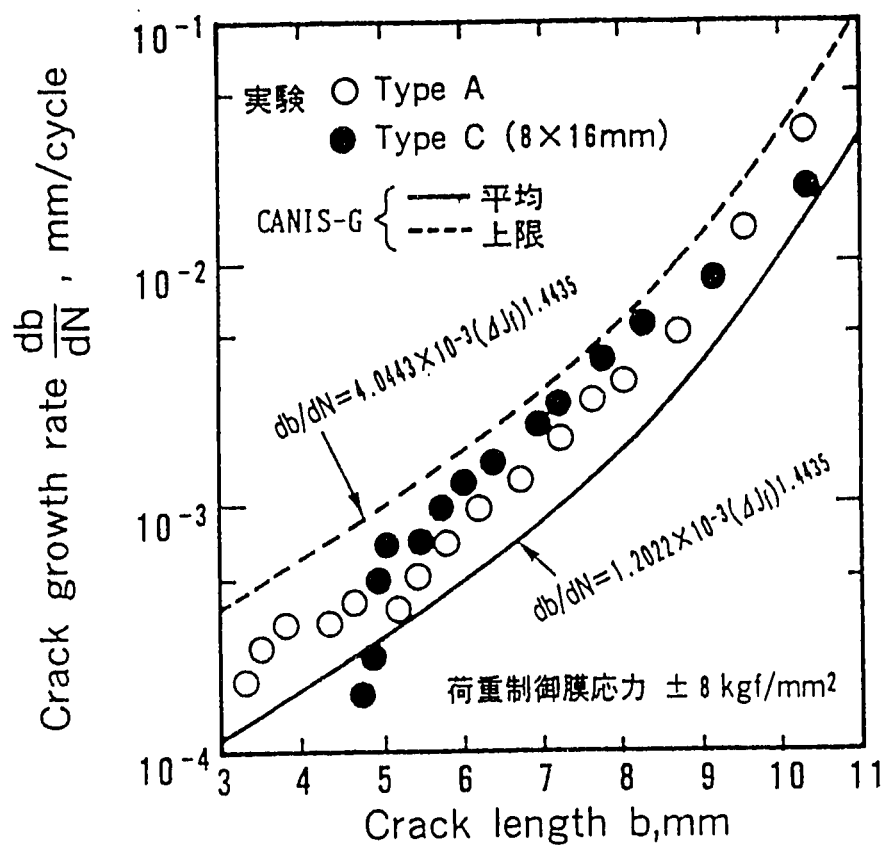
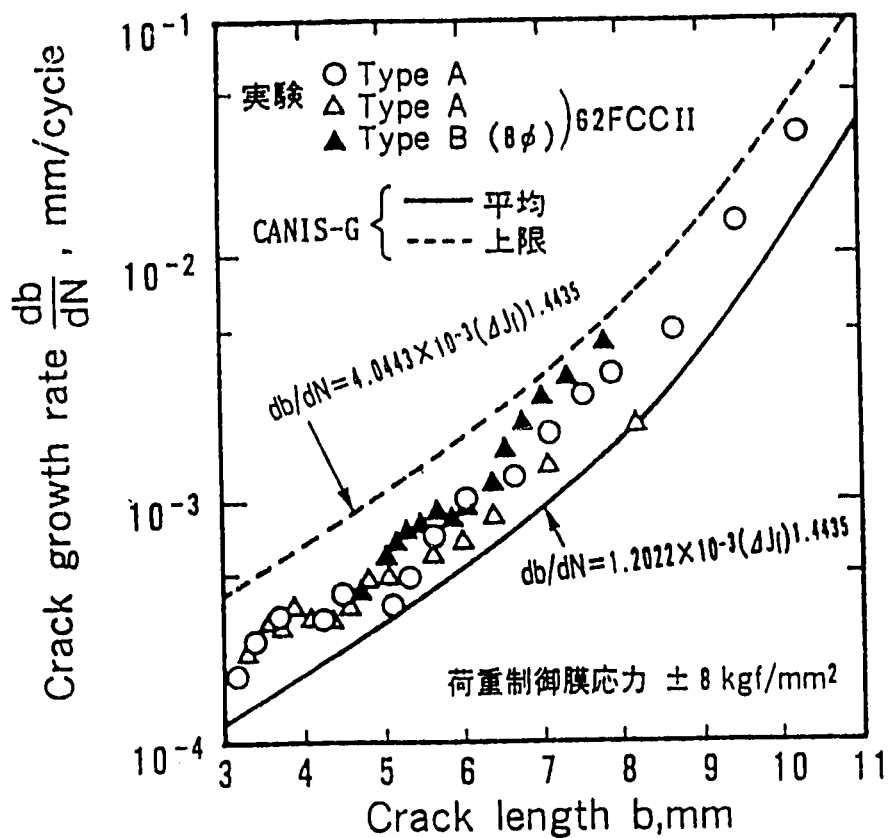


図4.7.3 き裂長さとき裂進展速度の関係

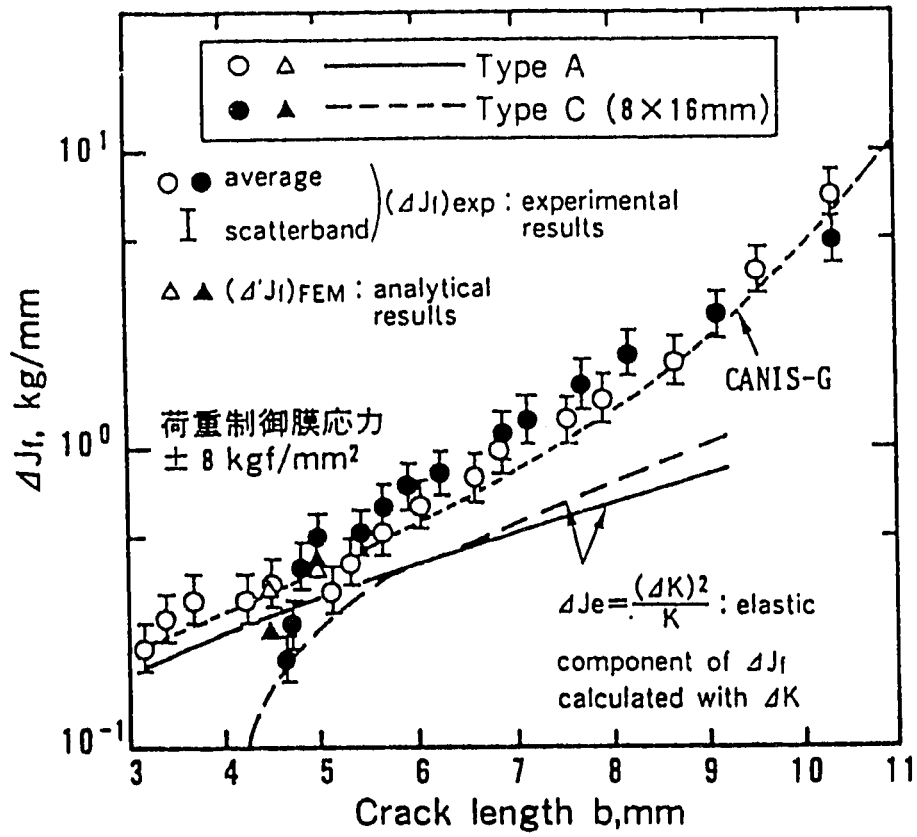


図4.7.4 き裂長さと $\Delta J$ の関係

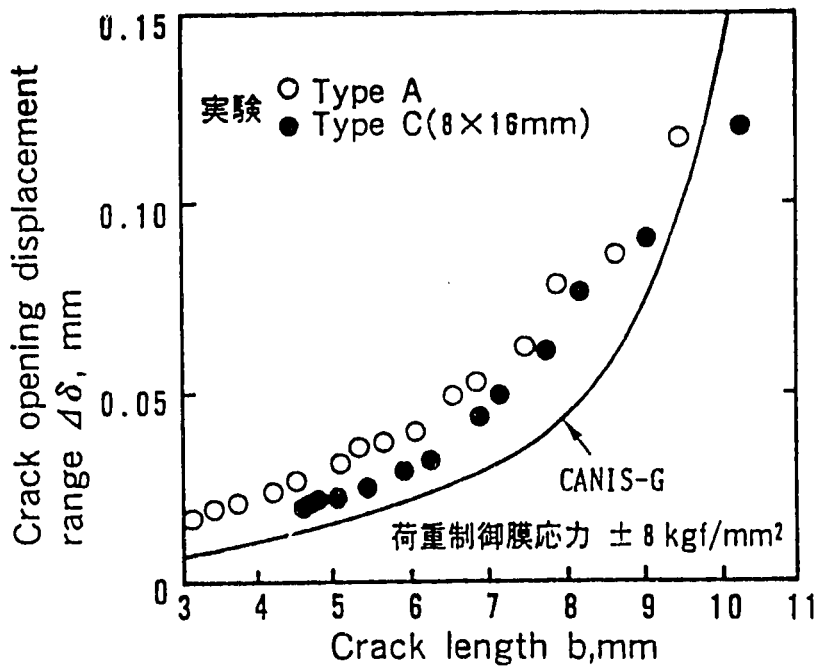


図4.7.5 き裂長さとき裂開口変位の関係

リスト4.7 解析例7の入力データ (疲労き裂進展速度平均値)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.7, FCC2(2), CCT-TYPE.A, SIGM=+-8, FATIGUE, C(MEAN)
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS  P.SIGM  P.SIGB  P.C1  P.C2
4  CONT          1
5          1.0      1.0      1.0      0.2      0.2
6  ¥GEOM NCRA  RADI  THIC  AACR  BBCR  AT LIM  BWLIM
7  GEOM          15.0    5.0      5.0      3.0      0.9      0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT  IDUM  TREF  ALPHY  SIGF
9  EPSS          2  304      650.0    1.0      40.0
10 ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
11 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
12 ¥ATG          2  4.0443E-3  1.4435
13 ¥FAIL KFAI
14 FAIL          10
15 ¥EVEN          LTYPE NEVN  LBAS  NTIN  TLIFE  DTINT  CTIME
16 ¥          SIGDW  POPER  SIGTE  QEPT E
17 ¥C1          KEY  KDUM  DTAV.J  QEPEV.J  GCEVN.J
18 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)  SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
19 EVEN          0      1      0      100  100000.0  1.0
20          0.0      0.0      0.0      1.0
21          0      1.0      1.0E4  1.0E4
22          8.0      0.0      0.0      -8.0  0.0      0.0
23  END

```

## 4.8 解析例 8 (貫通き裂付き平板、破壊力学パラメータ解析)

中央貫通き裂付き平板 (SUS304、550°Cおよび650°C、 $t=5.0$ ,  $W=10.0$ ,  $b=2.5$ )のFEMによる破壊力学パラメータ解析(REF. 4.4)を、CANIS-Kによる解析と比較した。解析対象の試験片形状を図4.8.1に示す。FEM解析モデルを図4.8.2に示す。FEM解析コードはMARCである。

(1) 550°Cで公称膜応力 $\sigma_n = 17\text{kgf/mm}^2$ まで荷重制御で単調負荷した場合。

- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ(繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304、550°C、 $\alpha_V = 1.0$ )
- ・CANIS-Kの解析--- 標準デフォルト。CANIS-Kの入力データをリスト4.8.1に示す。CANIS-Kでは $\sigma_n = 17\text{kgf/mm}^2$ を9ステップで単調負荷した。

荷重とJの関係を図4.8.3に、荷重と変位を図4.8.4に示す。FEM解析の変位はき裂中央のき裂面から2.5mmピッチで0~15mm離れた点の荷重方向変位である。

(2) 650°Cで公称膜ひずみ $\varepsilon_n = 0.25\%$ まで単調負荷し、変位制御で1hr保持した場合。

- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ(繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304、650°C、 $\alpha_V = 1.0$ )
- ・クリープひずみ特性--- 材料データライブラリ(SUS304、650°C、 $\alpha_C = 1.0$ )を保持時間1hrに対してNorton則近似した次式を時間硬化則で使用した。

$$650^\circ\text{C}、1\text{hr 保持} \quad d\varepsilon_c / dt = 8.1709 \times 10^{-10} \sigma^{5.8650} \quad (4.4)$$

- ・CANIS-Kの解析--- 正味断面形状関数に変位制御型荷重対応の一定値( $F_{NS}=1.0$ ,  $p_M=1.0$ )を用いた以外は標準デフォルトを使用した。(4.4)式のNorton則を用いた解析以外に、材料データライブラリ(PNCクリープ式)をひずみ硬化則で使用した解析も実施した。公称ひずみ $\varepsilon_n$ に相当する公称応力 $S_n = E(14700) \times \varepsilon_n = 36.75 \text{kgf/mm}^2$ を、変位制御( $q_{EF}=1.0$ ,  $q_c=1.0$ )で、10ステップで単調負荷した。CANIS-Kの入力データ(Norton則使用)をリスト4.8.2に示す。

クリープJ積分範囲 $\Delta J_c$ を表4.8.1に示す。ここに簡易評価法(P- $\delta$ ベース)は図4.8.5に示す面積 $S_{CR}$ を用いて次式で計算した値である。

$$\Delta J_c = \{(n-1)/n+1\} S_{CR} / \{2t(W-b)\} \quad (n=5.8650 \text{ はNorton則の指数}) \quad (4.5)$$

簡易評価法(K値ベース)は最大荷重時の $K_{max}$ と1hr保持後の $K_r$ を用いて次式で計算した値である。

$$\Delta J_c = (K_{max}^2 - K_r^2) / E \quad (4.6)$$

荷重負荷時の荷重とJの関係を図4.8.6に示す。

(3) 650°Cで公称膜応力 $\sigma_n = 13\text{kgf/mm}^2$ まで単調負荷し、荷重制御で10min保持した場合。

- ・クリープひずみ特性--- 材料データライブラリ(SUS304、650°C、 $\alpha_C = 1.0$ )を保持時間10minに対してNorton則近似した次式を時間硬化則で使用した。

$$650^\circ\text{C}、10\text{min 保持} \quad d\varepsilon_c / dt = 7.1122 \times 10^{-10} \sigma^{6.0504} \quad (4.7)$$

- ・CANIS-Kの解析--- 標準デフォルト。(4.9)式のNorton則を用いた解析以外に、材料データライブラリ(PNCクリープ式)をひずみ硬化則で使用した解析も実施した。 $\sigma_n = 13\text{kgf/mm}^2$ を7ステップで単調負荷した。CANIS-Kの入力データ(Norton則使用)をリスト4.8.3に示す。

クリープJ積分範囲 $\Delta J_c$ を表4.8.2に示す。



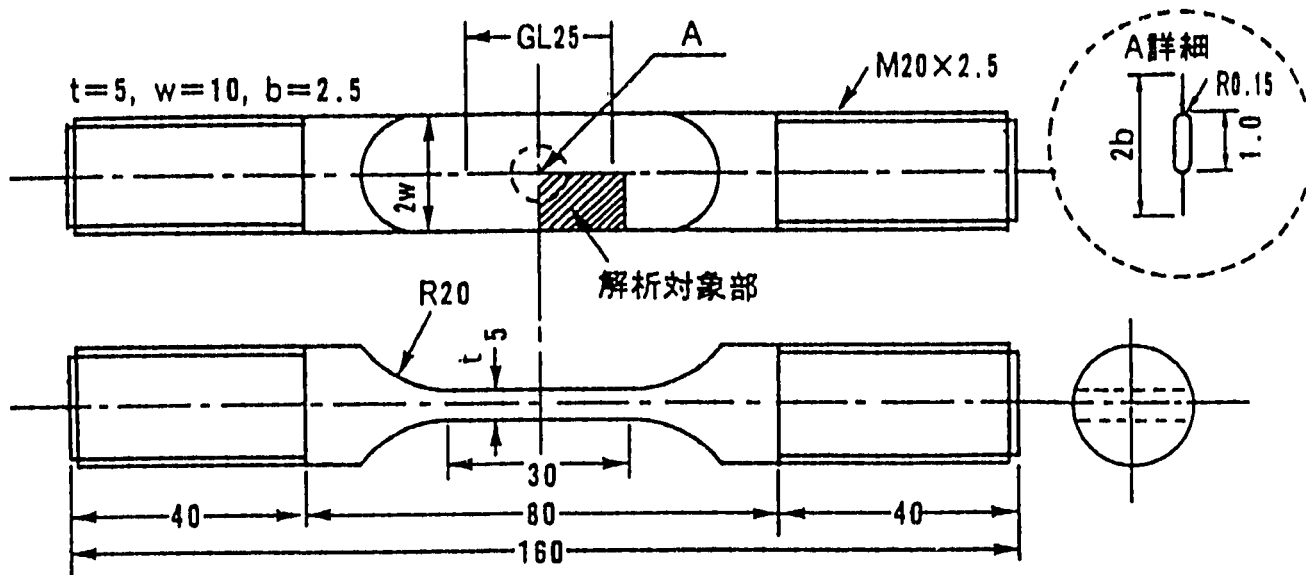


図4.8.1 試験片形状

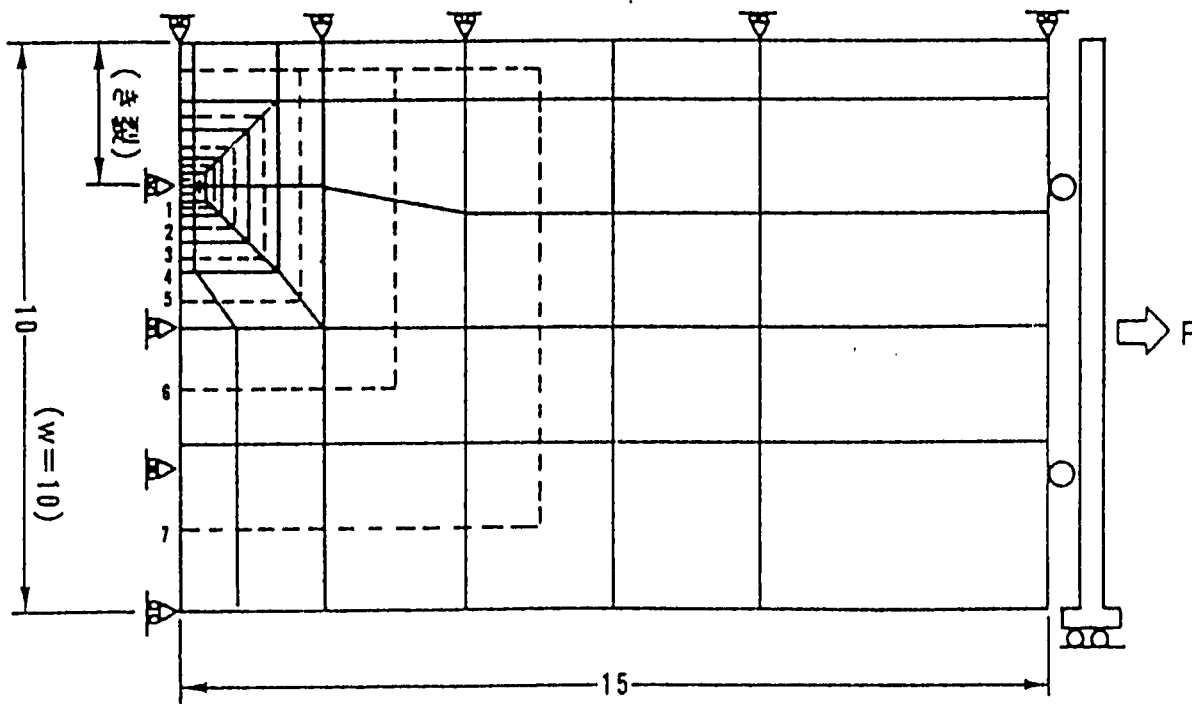


図4.8.2 FEM解析モデル

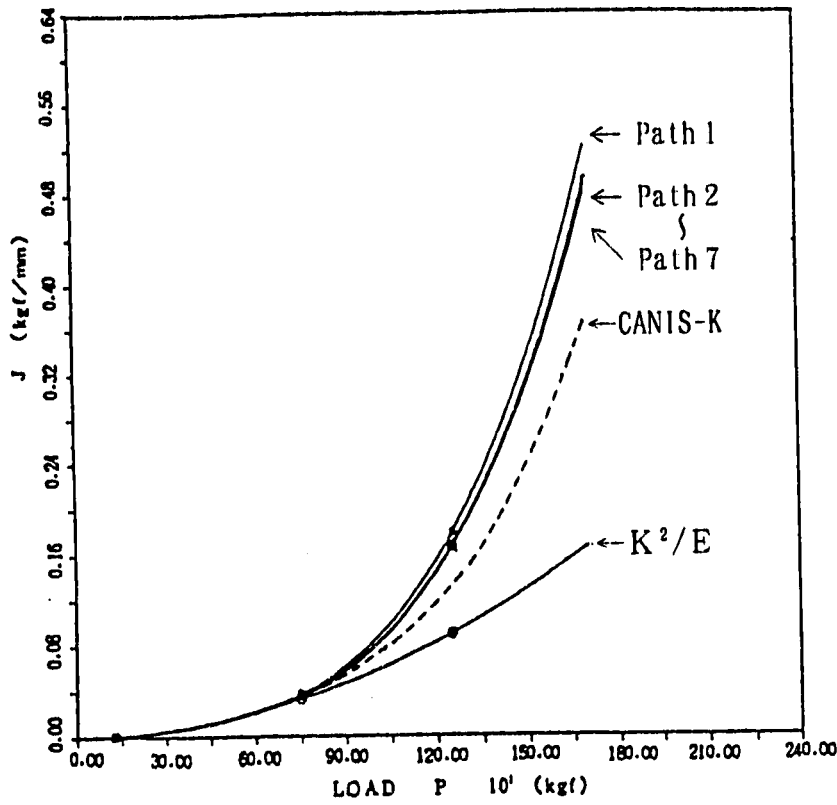


図4.8.3 荷重とJの関係 ( 550°C、 $\sigma_n = 17\text{kgf/mm}^2$  )

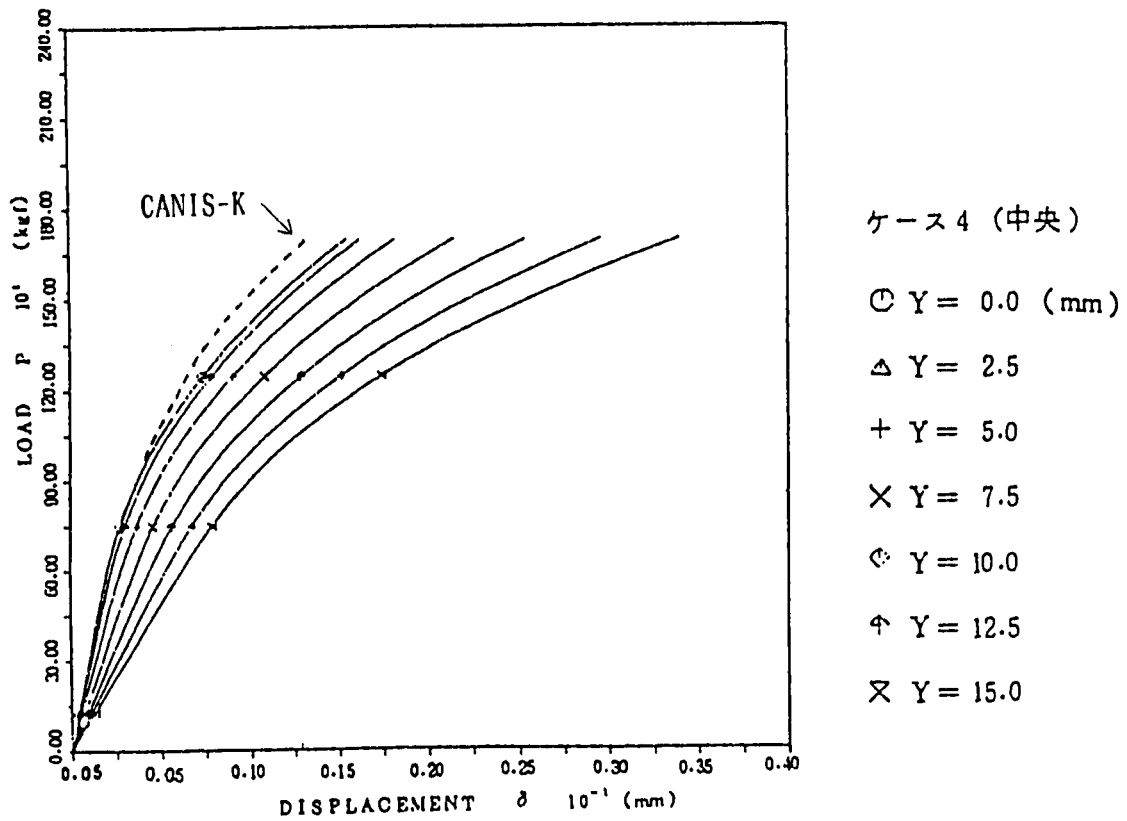


図4.8.4 荷重と変位の関係 ( 550°C、 $\sigma_n = 17\text{kgf/mm}^2$  )

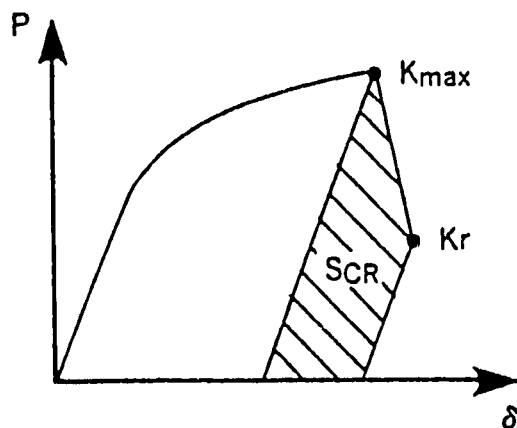


図4.8.5 クリープJ積分範囲の簡易評価法

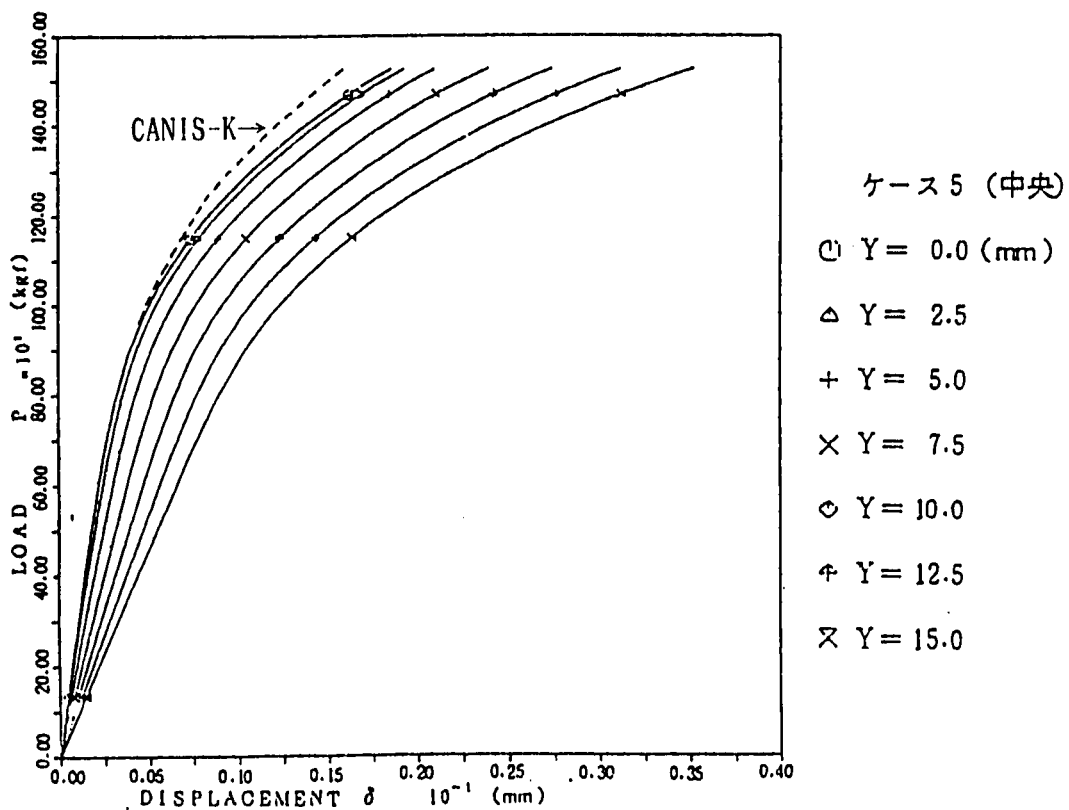


図4.8.6 荷重と変位の関係 ( 650°C、 $\epsilon_n = 0.25\%$ 、1 hr保持)

表4.8.1 クリープJ積分範囲 $\Delta J_c$  (650°C、 $\epsilon_n = 0.25\%$ 、1hr保持)

評 価 法		$\Delta J_{ckg/mm}$
経路積分法	経路 1	$8.37 \times 10^{-2}$
	経路 2	$8.69 \times 10^{-2}$
	経路 3	$8.69 \times 10^{-2}$
	経路 4	$9.32 \times 10^{-2}$
	経路 5	$9.78 \times 10^{-2}$
	経路 6	$1.09 \times 10^{-1}$
	経路 7	$1.14 \times 10^{-1}$
簡易評価法 (P- $\delta$ 曲線ベース)	Y=0.0	$1.38 \times 10^{-1}$
	Y=2.5	$1.40 \times 10^{-1}$
	Y=5.0	$1.44 \times 10^{-1}$
	Y=7.5	$1.54 \times 10^{-1}$
	Y=10.0	$1.66 \times 10^{-1}$
	Y=12.5	$1.79 \times 10^{-1}$
	Y=15.0	$1.95 \times 10^{-1}$
簡易評価法 (K値ベース)		$1.09 \times 10^{-1}$
CANIS-K (本報告書)	Norton則	$1.20 \times 10^{-1}$
	PNCクリープ式	$1.09 \times 10^{-1}$

表4.8.2 クリープJ積分範囲 $\Delta J_c$  (650°C、 $\sigma_n = 13\text{kgf/mm}^2$ 、10min 保持)

評 価 法		$\Delta J_c$ (kgf/mm)
経路積分法	経路 1	0.287
	経路 2	0.362
	経路 3	0.336
	経路 4	0.331
	経路 5	0.315
	経路 6	0.333
	経路 7	0.334
CANIS-K (本報告書)	Norton則	0.310
	PNC クリープ式	0.174

リスト4.8.1 解析例8の入力データ (550°C,  $\sigma_n=17\text{kgf/mm}^2$ )

.....\*.....1.....\*.....2.....\*.....3.....\*.....4.....\*.....5.....\*.....6.....\*.....7

```

1 TITL          EXAMPLE.8-1, FCC(60), CCT-FEM, SIGM=17, 550DC, CALC. J,COD
2 ¥CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3 ¥          C.FNS      P.SIGM      P.SIGB      P.C1      P.C2
4 CONT          1
5              1.0          1.0          1.0          0.2          0.2
6 ¥GEOM NCRA  RADI      THIC          AACR          BBCR          ATLIM          BWLIM
7 ¥          A(J)      B(J)          (FOR J=1,NCRA)
8 GEOM          1  10.0      5.0          0.9          0.9
9              5.0          2.5
10 ¥EPSS KEPS IMAT IDUM  TREF          ALPHY          SIGF
11 EPSS          2  304          550.0          1.0          40.0
12 ¥FATG KFAT  C1          M1          X1          C2          M2          X2
13 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
14 ¥LRAT KLRA  Q.DET      GAMMA          ZETA          DELP
15 LRAT          3  1.0          8.37E-11      2.0          0.1
16 ¥EVEN          LTYPE NSTE LBAS NTIN  TLIFE          DTINT          CTIME
17 ¥          SIGDW      POPER          SIGTE          QEPTE
18 ¥D1          KEY KDUM  TCYCL          QEP          QC
19 ¥D2          SM(J)      SB(J)          SP(J)          (FOR J=1,NSTEP)
20 EVEN          1      9      0
21              0.0          0.0          0.0          1.0
22              0          1.0          1.0E4          1.0E4
23              2.0          0.0          0.0
24              4.0          0.0          0.0
25              6.0          0.0          0.0
26              8.0          0.0          0.0
27              10.0         0.0          0.0
28              12.0         0.0          0.0
29              14.0         0.0          0.0
30              16.0         0.0          0.0
31              17.0         0.0          0.0
32 END

```

リスト4.8.2 解析例8の入力データ (650°C,  $\epsilon_r=0.25\%$ , 1hr保持, Norton則)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.8-2, FCC(60), CCT-FEM, EPS.M=0.25%, TH=1HR, 650DC
2  %CONT DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  %      C.FNS    P.SIGM   P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT          1      1
5              1.0      1.0      1.0      0.2      0.2
6  %GEOM NCRA  RADII    THIC     AACR     BBCR     AT LIM     BW LIM
7  %      A(J)    B(J)     (FOR J=1,NCRA)
8  GEOM          1  10.0    5.0      0.9      0.9
9              5.0      2.5
10 %EPSS KEPS  IMAT  IDUM  TREF      ALPHY     SIGF
11 EPSS          2  304     650.0    1.0      40.0
12 %CREP KCRE  IMAT  ICHR  A(NORTON) N(NORTON) M(NORTON)
13 CREP          1              8.1709E-10 5.8650    1.0
14 %FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
15 FATG          2  1.2022E-3 1.4435
16 %CRPG KCRP  C1      M1      X1      C2      M2      X2
17 CRPG          1  0.1274    0.877
18 %LRAT KLRA  Q.DET    GAMMA   ZETA     DELP
19 LRAT          3  1.0      8.37E-11 2.0      0.1
20 %EVEN      LTYPE NSTE  LBAS NTIN  TLIFE   DTINT    CTIME
21 %      SIGDW  POPER   SIGTE   QEPTE
22 %D1      KEY  KDUM  TCYCL   QEP
23 %D2      SM(J) SB(J)   SP(J)   (FOR J=1,NSTEP)
24 EVEN      1    10    0              1.0
25          0.0    0.0    0.0    1.0
26          0      1.0    1.0    1.0
27          3.675  0.0    0.0
28          7.35   0.0    0.0
29          11.025 0.0    0.0
30          14.7   0.0    0.0
31          18.375 0.0    0.0
32          22.05  0.0    0.0
33          25.725 0.0    0.0
34          29.4   0.0    0.0
35          33.075 0.0    0.0
36          36.75  0.0    0.0
37  END

```

リスト4.8.3 解析例8の入力データ (650°C,  $\sigma_n=13\text{kgf/mm}^2$ , 10min保持, Norton則)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.8-3, FCC(60), CCT-FEM, SIGM=13, TH=10MIN, 650DC
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥       C.FNS   P.SIGM  P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT      1
5           1.0     1.0     1.0     0.2     0.2
6  ¥GEOM NCRA  RAD1   THIC   AACR     BBCR     ATLIM     BWLIM
7  ¥       A(J)   B(J)   (FOR J=1,NCRAC)
8  GEOM      1  10.0   5.0     0.9     0.9
9           5.0     2.5
10 ¥EPSS KEPS  IMAT  IDUM  TREF     ALPHY     SIGF
11 EPSS      2  304    650.0   1.0     40.0
12 ¥CREP KCRE  IMAT  ICHR  A(NORTON) N(NORTON) M(NORTON)
13 CREP      1           7.1122E-10 6.0504   1.0
14 ¥FATG KFAT  C1     M1     X1     C2     M2     X2
15 FATG      2  1.2022E-3 1.4435
16 ¥CRPG KCRP  C1     M1     X1     C2     M2     X2
17 CRPG      1  0.1274  0.877
18 ¥LRAT KLRA  Q.DET  GAMMA  ZETA     DELP
19 LRAT      3  1.0     8.37E-11 2.0     0.1
20 ¥EVEN      LTYPE NSTE  LBAS NTIN  TLIFE  DTINT     CTIME
21 ¥       SIGDW  POPER  SIGTE  QEPTE
22 ¥D1       KEY  KDUM  TCYCL  QEP     QC
23 ¥D2       SM(J)  SB(J)  SP(J)  (FOR J=1,NSTEP)
24 EVEN      1     7     0           0.1667
25           0.0     0.0     0.0     1.0
26           0     1.0     1.0E4   1.0E4
27           2.0     0.0     0.0
28           4.0     0.0     0.0
29           6.0     0.0     0.0
30           8.0     0.0     0.0
31           10.0    0.0     0.0
32           12.0    0.0     0.0
33           13.0    0.0     0.0
34  END

```

## 4.9 解析例9 (TTS 出口配管の軸方向表面き裂、熱過渡クリープ疲労)

構造物強度確性試験装置 (TTS) では供試体に高温および低温ナトリウムを交互に流して熱過渡を与える熱クリープ疲労試験が実施されている。現在TTSでは供試体の熱過渡試験と並行して、供試体出口側ナトリウム配管の一部にき裂付き円筒試験体を設け、熱クリープ疲労き裂進展試験も行われている (RBF. 4.5)。円筒試験体 (SUS304, R=79.5, t=15) 内面には軸方向および周方向の半楕円表面き裂 ( $a=4.0, b=20.0, a/t=0.267, a/b=0.2$ ) が放電加工により設けられ、高温側600℃、低温側250℃の試験がすでに数百サイクル実施された。この試験条件に対しFINASによる熱弾性解析も実施され、その結果を用いてCANIS-Jにより $J_{hot}$  が計算されている。本4.9節では、軸方向き裂について、CANIS-KによるJ積分値計算およびCANIS-Gによるき裂進展シミュレーションを行った。周方向き裂については次の4.10節で取り扱う。

(1) FINASの熱弾性解析によるJ値および $\Delta J$ 

初期き裂形状A1( $a/t=0.7, a/b=0.2$ ) とA2( $a/t=0.4, a/b=0.3$ )、A3( $a/t=0.6, a/b=0.4$ )、A4( $a/t=0.8, a/b=0.4$ )およびA5( $a/t=0.6, a/b=0.2$ )の合計5種類のき裂形状についてFINASによる熱弾性解析が実施され、CANIS-Jによりポスト処理され $J_{hot}$  が計算されている。コールドショック極値時点の $J_c$ 、ホットショック極値時点の $J_H$  およびJ積分範囲 $\Delta J$ を表4.9.1に示す。ここでFINASによる $\Delta J$ は次式により評価した。

$$\Delta J = J_c + J_H + 2 (J_c J_H)^{1/2} \quad (\text{for } R < 0) \quad (4.8)$$

これは、両極値時点の応力分布が(大きさは異なるが)符号を逆にした関係にあり、K値で評価すると一方が正の時他方は負となること(応力比 $R < 0$ に相当)を考慮したものである。すなわち $J_c$ と $J_H$ に対応するK値を $K_c (> 0)$ と $K_H (< 0)$ として以下のように導いた。

$$K_c = (E J_c)^{1/2}, \quad K_H = - (E J_H)^{1/2} \quad (4.9)$$

$$\Delta J = \Delta K^2 / E = (K_c - K_H)^2 / E = J_c + J_H + 2 (J_c J_H)^{1/2} \quad (4.10)$$

同様に、両極値ともKが正の場合(応力比 $R > 0$ に相当)の $\Delta J$ 評価式として次式を導いた。

$$\Delta J = J_c + J_H - 2 (J_c J_H)^{1/2} \quad (\text{for } R > 0) \quad (4.11)$$

(4.8) または(4.11)式を用いることにより弾性(J,  $\Delta J$ )系と(K,  $\Delta K$ )系の相互変換

$$J = K^2 / E \quad \text{AND} \quad \Delta J = \Delta K^2 / E \quad (4.12)$$

が常に成立する。ここでは平面応力場の式を用いたが、平面ひずみ場ではこれら(4.9)～(4.12)式中のEを $E / (1 - \nu)^2$ で置き換えれば良い。

(2) CANIS-Kによる弾性J値および $\Delta J$ 

- ・表面き裂K値解--- 標準デフォルト (Raju-Newman の円筒軸方向き裂K値解、KSCKV=30)。
- ・弾性特性--- 材料データライブラリ (SUS304, 450℃)。両極値の平均温度に近い450℃の値。
- ・荷重データ--- FINASの熱弾性解析によるき裂無し断面の応力分布を入力応力データとした。コールドショック時(600⇒250℃)の内外面温度差が最大となる時点の弾性応力分布を図4.9.1に示す。これをステップ1の応力分布とした。ホットショック時(250⇒600℃)の内外面温度差が最大となる時点の弾性応力分布を図4.9.2に示す。これをステップ2の応力分布とした。本節の軸方向き裂に対しては、き裂断面に垂直に作用する周方向応力成分を用いた。次の4.10節の周方向き裂に対して



は軸方向応力成分を用いた。内面、板厚中心および外面の応力値を入力し、コード内で放物線近似により膜、曲げおよびピーク成分に変換し使用した。

入力データをリスト4.9.1に示す。CANIS-Kにより計算された $J_c$ 、 $J_H$ および $\Delta J$ を、FINASによる計算値と比較して、表4.9.1に示した。

### (3) FINASによる $\Delta J$ を用いた簡易き裂進展評価

初期き裂A1( $a/t=0.267$ ,  $a/b=0.2$ )  $\Rightarrow$  A2( $a/t=0.4$ ,  $a/b=0.3$ )  $\Rightarrow$  A5( $a/t=0.6$ ,  $a/b=0.2$ )の進展経路を仮定し、数値積分(台形近似)によりサイクル数とき裂深さの関係を $a/t=0.7$ までの範囲で計算した。疲労き裂進展特性はPNCの平均値(4.1b)式を使用した。 $0.6 \leq a/t \leq 0.7$ の範囲では $a/t=0.6$ でのき裂進展速度を用いた。計算結果を表4.9.2に示す。(4)のCANIS-Gによるシミュレーション結果から、この進展経路に大きな誤差はないものと考えた。表4.9.2にはCANIS-Gによる計算結果(ケース1、弾性 $\Delta J$ )も示した。A3, A4は進展経路から離れる事が予想されるので、使用しなかった。

### (4) CANIS-Gによるき裂進展シミュレーション

CANIS-Gにより次の5ケースのき裂進展シミュレーションを行った。

ケース1 --- 弾性 $\Delta J$ による疲労き裂進展

ケース2 --- 弾塑性 $\Delta J$ による疲労き裂進展

ケース3 --- 弾塑性 $\Delta J$ による疲労き裂進展+ $\Delta J_c$ によるクリープき裂進展(500°C)

ケース4 --- 弾塑性 $\Delta J$ による疲労き裂進展+ $\Delta J_c$ によるクリープき裂進展(550°C)

ケース5 --- 弾塑性 $\Delta J$ による疲労き裂進展+ $\Delta J_c$ によるクリープき裂進展(600°C)

・表面き裂K値解、ケース1の弾性特性、荷重データ--- (1)と同様。但し、荷重データは2極値時点の応力分布として定義した。変位制御型の熱応力であるので、 $q_{EP} = q_c = 1.0$ とした。

・正味断面形状関数--- 変位制御型荷重対応の一定値( $K_{FNS}=1$ ,  $F_{NS}=0.6667$ ,  $p_M=0.0$ ,  $p_B=1.0$ )

・弾塑性特性--- 材料データライブラリ(繰り返し応力ひずみ関係式、SUS304, 450°C、 $\alpha_Y=1.0$ )

・疲労き裂進展特性--- PNCの平均値(4.1b)式

・クリープひずみ特性およびクリープ破断特性--- 材料データライブラリのPNCのSUS304クリープ式を、破断時間補正係数 $\alpha_c=1.0$ およびひずみ硬化則で使用した。参照温度はケース3が500°C、ケース4が550°C、ケース5が600°Cとした。

・クリープ時間---  $CTIME=1.3333$ を乗じて、実時間1サイクル(高温側80min、低温側40min)をクリープ時間1.3333hrに換算した。

・クリープJ積分範囲 $\Delta J_c$  ---  $J_c(t)$ を時間 $t=0$ から $t=1.3333hr(80min)$ まで数値積分。

・クリープき裂進展特性--- PNCの平均値(4.2b)式

サイクル数とき裂深さの関係を図4.9.3に示す。き裂形状の変化を図4.9.4に示す。ケース1の入力データをリスト4.9.2に、ケース5の入力データをリスト4.9.3に示す。

表4.9.1 弾性J値および $\Delta J$ 値の比較

(単位 ; kgf/mm)

Crack Shape	$J_c$ at C. SHOCK		$J_{II}$ at H. SHOCK		$\Delta J$	
	FINAS	CANIS-K	FINAS	CANIS-K	FINAS	CANIS-K
A1 a/t=0.267 a/b=0.2	0.0790	0.1234	0.0252	0.0188	0.1934	0.2387
	0.1006	0.1558	0.0396	0.0233	0.2664	0.2997
A2 a/t=0.4 a/b=0.3	0.1647	0.2268	0.0535	0.0345	0.4059	0.4381
	0.0560	0.1081	0.0267	0.0154	0.1600	0.2050
A3 a/t=0.6 a/b=0.4	0.2600	0.3393	0.0911	0.0510	0.6589	0.6535
	0.0097	0.0259	0.0076	0.0025	0.0345	0.0445
A4 a/t=0.8 a/b=0.4	0.3419	0.4421	0.1273	0.0650	0.8864	0.8460
	0.0013	0.0002	0.0001	0.0006	0.0020	0.0001
A5 a/t=0.6 a/b=0.2	0.2138	0.3381	0.0728	0.0509	0.5361	0.6515
	0.0484	0.0968	0.0290	0.0114	0.1524	0.1745

⇐表面部

⇐最深部

↑  $J_{II}$  at 積分値 ↑

↑ (4.8) 式

表4.9.2 弾性 $\Delta J$ による深さ方向の簡易き裂進展評価

CRACK SHAPE	$\Delta J$ kgf/mm	da/dn mm/cycle	dn/da cycle/mm	FINAS		CANIS -G
				dn	n	
A1 a=4.0mm	0.2664	$1.7813 \cdot 10^{-3}$	5613.9	17333 36435 18857	0	0
A2 a=6.0mm	0.1600	$8.5334 \cdot 10^{-5}$	11718.6		17333	11200
A5 a=9.0mm	0.1524	$7.9545 \cdot 10^{-5}$	12571.4		53768	41500
a=10.5mm		$7.9545 \cdot 10^{-5}$	12571.4		72625	63600

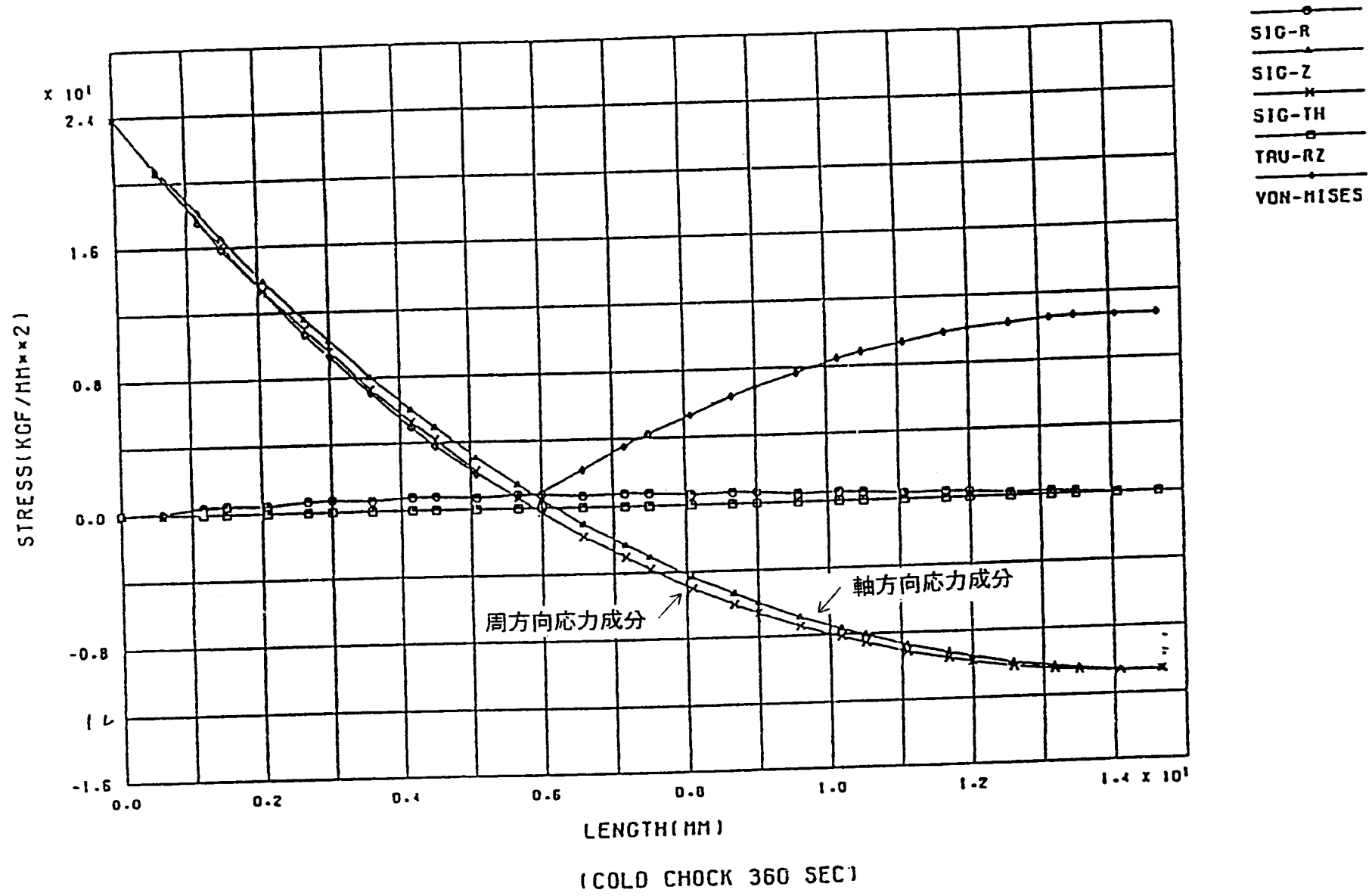


図4.9.1 コールドショック極値時点のき裂無し円筒の弾性応力分布 (FINAS)

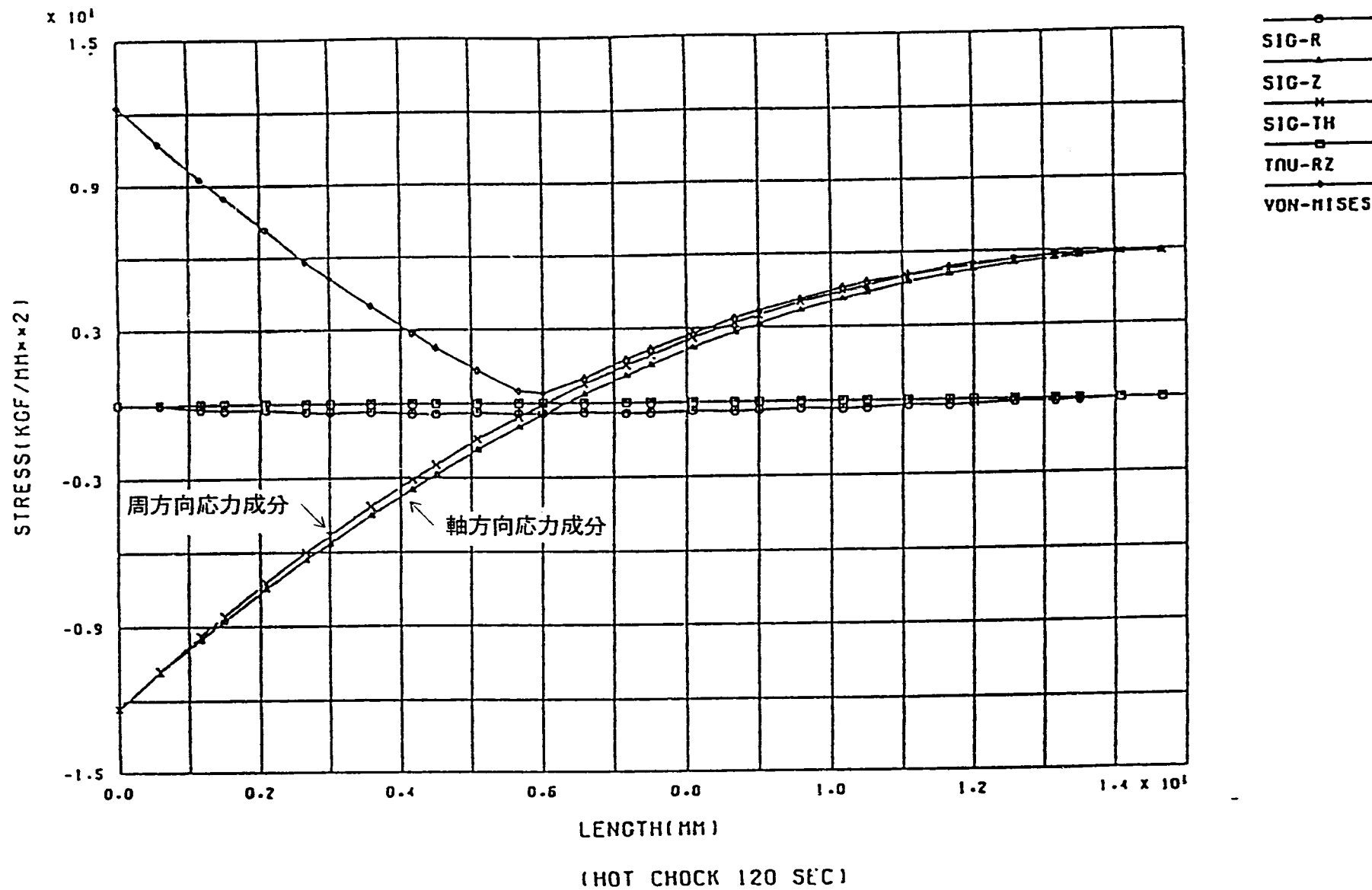


図4.9.2 ホットショック極値時点のき裂無し円筒の弾性応力分布 (FINAS)

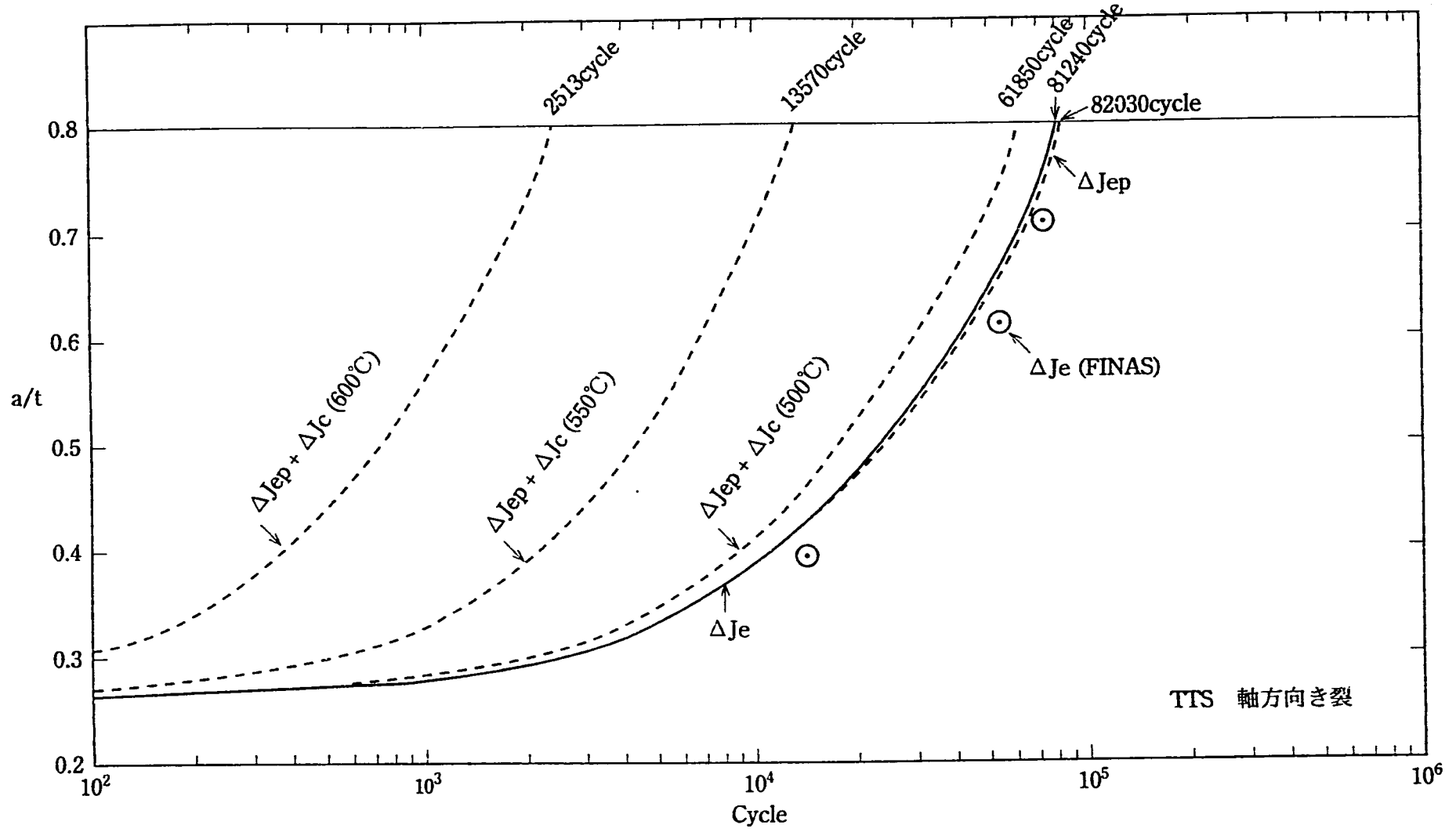


図4.9.3 サイクル数とき裂深さの関係

TTS 軸方向き裂

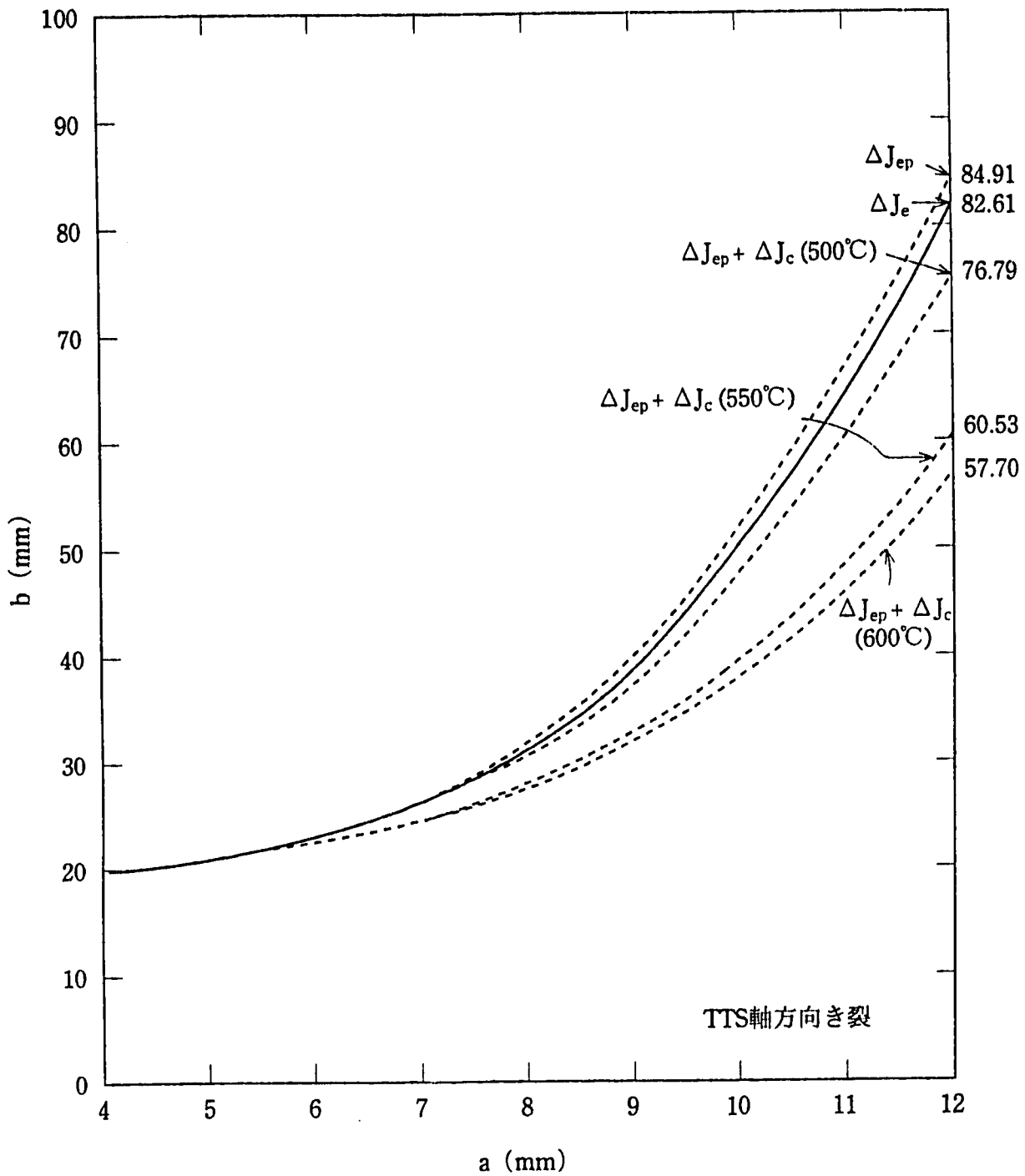


図4.9.4 き裂形状の変化

リスト4.9.1 解析例9の入力データ (CANIS-K)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.9-1, TTS, AXIAL CRACK, J-CALCULATION BY CANIS-K
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥      C.FNS      P.SIGM      P.SIGB      P.C1      P.C2
4  CONT      3      1
5  0.6667      0.0      1.0      0.2      0.2
6  ¥GEOM NCRA  RADi      THIC      AACR      BBCR      ATTIM      BWLIM
7  ¥      A(J)      B(J)      (FOR J=1,NCRA)
8  GEOM      5  79.5      15.0
9  4.0      20.0
10 6.0      20.0
11 9.0      22.5
12 12.0     30.0
13 9.0      45.0
14 ¥EPSS KEPS IMAT IDUM  TREF      ALPHY      SIGF
15 EPSS      0  304      450.0     1.0
16 ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
17 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
18 ¥EVEN      LTYPE NSTE LBAS NTIN  TLIFE      DTINT      CTIME
19 ¥      SIGDW  POPER  SIGTE      QEPTE
20 ¥D1      KEY KDUM  TCYCL  QEP
21 ¥D2      SM(J)  SB(J)  SP(J)      (FOR J=1,NSTEP)
22 EVEN      1      2      0
23 0.0      0.0      0.0      1.0
24 1      1.0      1.0      1.0
25 24.0     -3.85     -10.55
26 -9.38     1.95      5.95
27 END

```

## リスト4.9.2 解析例9の入力データ (CANIS-G, ケース1)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.9-2, TTS, AXIAL CRACK, GROWTH-CASE1(J.E, NO-CREEP)
2  ¥CONT DUM1 CRAC FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS   P.SIGM   P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT          3     1
5                0.6667   0.0     1.0     0.2     0.2
6  ¥GEOM NCRA  RAD1    THIC    AACR    BBCR    ATLIM    BWLIM
7  GEOM          79.5    15.0    4.0     20.0    0.8     0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT  IDUM  TREF    ALPHY   SIGF
9  EPSS          0    304    450.0   1.0     50.0
10 ¥CREP KCRE  IMAT  ICHR  TREF    ALPHC   DUMMY
11 CREP          2    304    500.0   1.0
12 ¥RUPT IMAT  TREF    ALPHR   B0      B1      B2
13 RUPT          304  500.0   1.0
14 ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
15 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
16 ¥CRPG KCRP  C1      M1      X1      C2      M2      X2
17 ¥RPG  1     0.1274  0.877
18 ¥LRAT KLRA  Q.DET   GAMMA   ZETA    DELP
19 LRAT          3     1.0     8.37E-11  2.0     0.1
20 ¥EVEN          LTYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE   DTINT   CTIME
21 ¥          SIGDW   POPER    SIGTE   QEPT
22 ¥C1          KEY KDUM  DTAV.J   QEPEV.J  QCEVN.J
23 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)  SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
24 EVEN          0     1     0     50  100000.0  10.0    1.3333
25                0.0     0.0     0.0     1.0
26                1     1.0     1.0     1.0
27                24.0    -3.85   -10.55  -9.38   1.95    5.95
28  END

```



リスト4.9.3 解析例9の入力データ (CANIS-G, ケース5)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.9-2, TTS, AXIAL CRACK, GROWTH-CASE5(J.EP+J.C(600DC))
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS   P.SIGM   P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT          3     1
5          0.6667   0.0       1.0       0.2       0.2
6  ¥GEOM NCRA  RAD1    THIC    AACR    BBCR    ATLIM    BWLIM
7  GEOM          79.5   15.0    4.0     20.0    0.8     0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT  IDUM  TREF    ALPHY   SIGF
9  EPSS          2     304    450.0   1.0     50.0
10 ¥CREP KCRE  IMAT  ICHR  TREF    ALPHC   DUMMY
11 CREP          2     304     1     600.0   1.0
12 ¥RUPT IMAT  TREF    ALPHR   B0      B1      B2
13 RUPT          304   600.0   1.0
14 ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
15 FATG          2     1.2022E-3  1.4435
16 ¥CRPG KCRP  C1      M1      X1      C2      M2      X2
17 CRPG          1     0.1274  0.877
18 ¥LRAT KLRA  Q.DET   GAMMA   ZETA    DELP
19 LRAT          3     1.0     8.37E-11  2.0    0.1
20 ¥EVEN          LTYPE NEVN  LBAS  NTIN  TLIFE   DTINT   CTIME
21 ¥          SIGDW  POPER  SIGTE  QEPTE
22 ¥C1          KEY  KDUM  DTAV.J  QEPEV.J  QCEVN.J
23 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)  SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
24 EVEN          0     1     0     50    10000.0  1.0     1.3333
25          0.0     0.0     0.0     1.0
26          1     1.0     1.0     1.0
27          24.0    -3.85   -10.55  -9.38   1.95    5.95
28  END

```

## 4.10 解析例10 (TTS出口配管の周方向表面き裂、熱過渡クリープ疲労、予備解析)

TTSき裂付き円筒試験体内表面の周方向表面き裂について、CANIS-KによるJ積分値計算を行い、FINASの熱弾性解析結果を用いてCANIS-Jにより計算された $J_{max}$ 積分値と比較した。またCANIS-Gによるき裂進展シミュレーションを行った。解析条件は以下の2点を除いて前4.9節と共通であり、詳細は前4.9節を参照されたい。

- ・荷重データ--- 周方向断面に垂直に作用する軸方向応力成分を用いた。図4.9.1 および図4.9.2の内面、板厚中心および外面での応力値を入力した。
- ・表面き裂K値解--- 標準デフォルト(KSCKV=20、白鳥らの円筒周方向き裂K値解)。

(1) FINASの熱弾性解析によるJ値および $\Delta J$ 

初期き裂形状B1( $a/t=0.267, a/b=0.2$ )とB2( $a/t=0.4, a/b=0.3$ )、B3( $a/t=0.6, a/b=0.4$ )、B4( $a/t=0.8, a/b=0.4$ )およびB5( $a/t=0.6, a/b=0.2$ )の合計5種類のき裂形状についてFINASによる熱弾性解析が実施され、CANIS-Jによりポスト処理され $J_{max}$ 積分値が計算されている。コールドショック極値時点の $J_c$ 、ホットショック極値時点の $J_H$ およびJ積分範囲 $\Delta J$ を表4.10.1に示す。ここでFINASによる $\Delta J$ は(4.8)式により評価した。

(2) CANIS-Kによる弾性J値および $\Delta J$ 

入力データをリスト4.10.1に示す。CANIS-Kにより計算された $J_c$ 、 $J_H$ および $\Delta J$ を、FINASによる計算値と比較して、表4.10.1に示した。

(3) FINASによる $\Delta J$ を用いた簡易き裂進展評価

初期き裂B1( $a/t=0.267, a/b=0.2$ ) $\Rightarrow$ B2( $a/t=0.4, a/b=0.3$ ) $\Rightarrow$ B5( $a/t=0.6, a/b=0.2$ )の進展経路を仮定し、数値積分(台形近似)によりサイクル数とき裂深さの関係を $a/t=0.7$ までの範囲で計算した。疲労き裂進展特性はPNCの平均値(4.1b)式を使用した。 $0.6 \leq a/t \leq 0.7$ の範囲では $a/t=0.6$ でのき裂進展速度を用いた。計算結果を表4.10.2に示す。(4)のCANIS-Gによるシミュレーション結果から、この進展経路に大きな誤差はないものと考えた。表4.10.2にはCANIS-Gによる計算結果(ケース1、弾性 $\Delta J$ )も示した。B3, B4は進展経路から離れる事が予想されるので、使用しなかった。

## (4) CANIS-Gによるき裂進展シミュレーション

前4.9節と同様の5ケースのき裂進展シミュレーションを行った。サイクル数とき裂深さの関係を図4.10.1に示す。き裂形状の変化を図4.10.2に示す。ケース1の入力データをリスト4.10.2に、ケース5の入力データをリスト4.10.3に示す。 $a/t \geq 0.5$ でのき裂進展速度の減少傾向が、前4.9節の軸方向き裂の場合より、さらに顕著になることが予想される。

表4.10.1 弾性J値および $\Delta J$ 値の比較

(単位 ; kgf/mm)

CRACK SHAPE	$J_c$ at C. SHOCK		$J_H$ at H. SHOCK		$\Delta J$		
	FINAS	CANIS-K	FINAS	CANIS-K	FINAS	CANIS-K	
B1 a/t=0.267 a/b=0.2	0.0548	0.1128	0.0191	0.0173	0.1386	0.2183	⇐表面部 ⇐最深部
	0.1035	0.1655	0.0407	0.0254	0.2740	0.3203	
B2 a/t=0.4 a/b=0.3	0.1109	0.2105	0.0364	0.0323	0.2744	0.4077	
	0.0577	0.1144	0.0275	0.0172	0.1650	0.2201	
B3 a/t=0.6 a/b=0.4	0.1786	0.3245	0.0601	0.0496	0.4459	0.6279	
	0.0092	0.0266	0.0075	0.0031	0.0333	0.0479	
B4 a/t=0.8 a/b=0.4	0.1940	0.3981	0.0678	0.0603	0.4912	0.7682	
	0.0016	0.0001	0.0001	0.0008	0.0025	0.0014	
B5 a/t=0.6 a/b=0.2	0.0857	0.2573	0.0281	0.0394	0.2119	0.4980	
	0.0289	0.0669	0.0191	0.0085	0.0950	0.1232	

↑  $J_{H,K}$  積分値 ↑

↑ (4.8) 式

表4.10.2 弾性 $\Delta J$ による深さ方向の簡易き裂進展評価

Crack Shape	$\Delta J$ kgf/mm	da/dn mm/cycle	dn/da cycle/mm	FINAS		CANIS -G
				dn	n	
B1 a=4.0mm	0.2740	$1.8551 \cdot 10^{-3}$	5390.5	16600	0	0
B2 a=6.0mm	0.1650	$8.9210 \cdot 10^{-5}$	11209.5		16600	10200
B5 a=9.0mm	0.0950	$4.0209 \cdot 10^{-5}$	24870.2	54120	70720	47500
a=10.5mm		$4.0209 \cdot 10^{-5}$	24870.2	37305	108025	92500

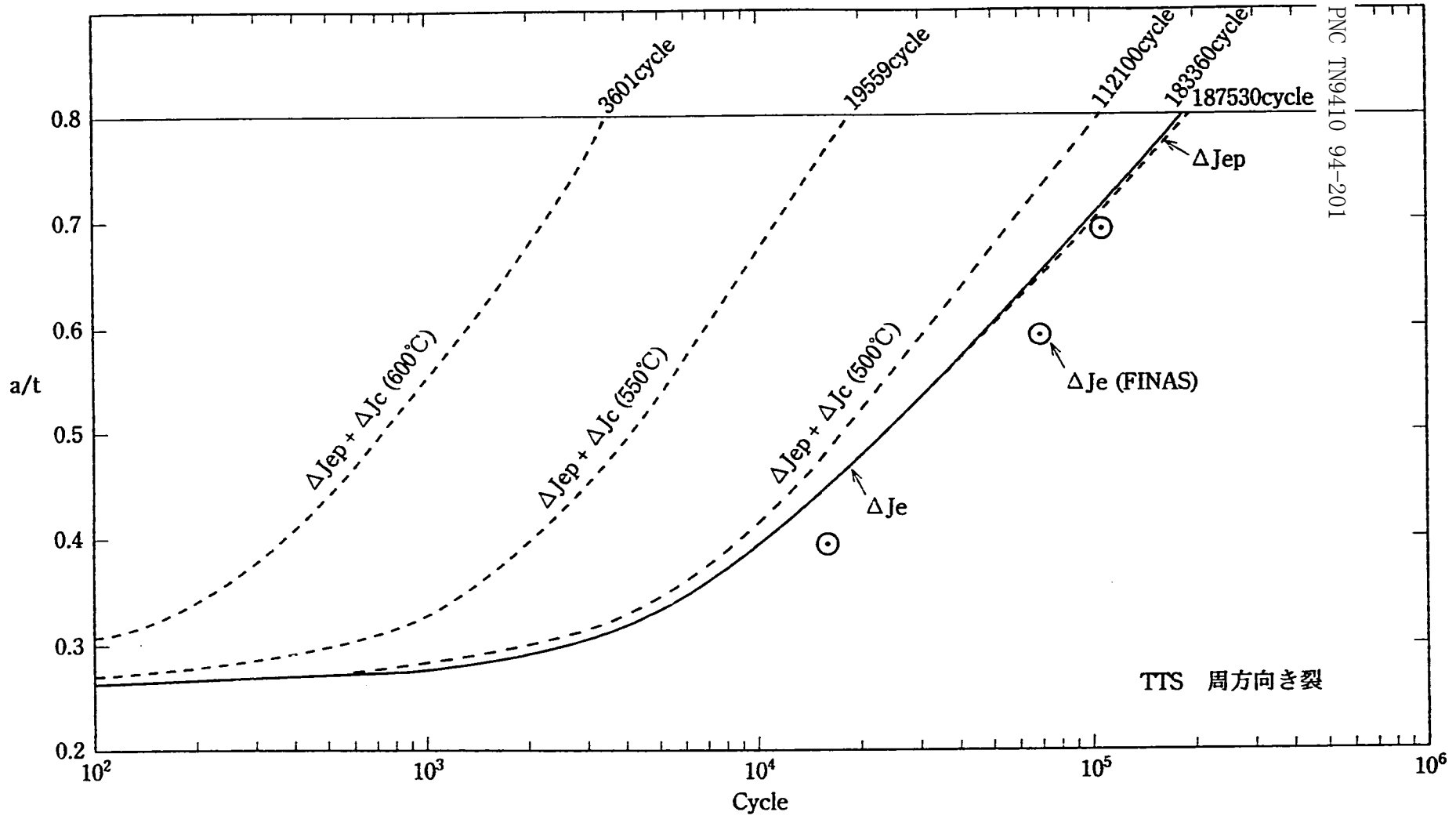


図4.10.1 サイクル数とき裂深さの関係

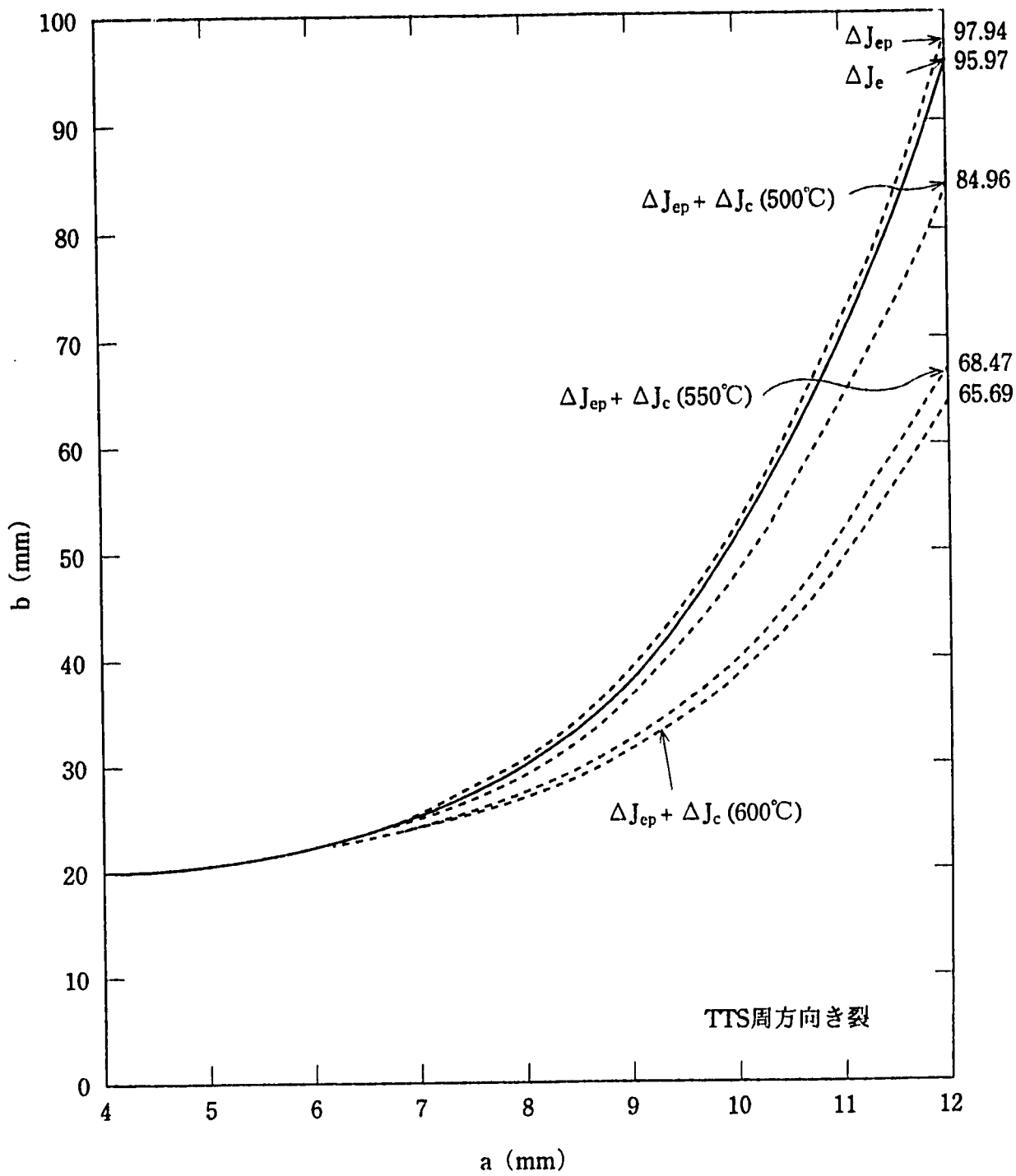


図4.10.2 き裂形状の変化

リスト4.10.1 解析例10の入力データ (CANIS-K)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.10-K, TTS, CIRCUM. CRACK, J-CALCULATION BY CANIS-K
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS  P.SIGM  P.SIGB  P.C1  P.C2
4  CONT          2      1
5          0.6667  0.0      1.0      0.2      0.2
6  ¥GEOM NCRA  RAD1  THIC  AACR  BBCR  AT LIM  BW LIM
7  ¥          A(J)  B(J)  (FOR J=1,NCRA)
8  GEOM          5  79.5  15.0      0.9      0.9
9          4.0      20.0
10         6.0      20.0
11         9.0      22.5
12        12.0      30.0
13         9.0      45.0
14  ¥EPSS KEPS  IMAT IDUM  TREF  ALPHY  SIGF
15  EPSS          0  304  450.0  1.0
16  ¥FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
17  FATG          2  1.2022E-3  1.4435
18  ¥EVEN          LTYPE NSTE  LBAS NTIN  TLIFE  DTINT  CTIME
19  ¥          SIGDW  POPER  SIGTE  QEPTE
20  ¥D1          KEY KDUM  TCYCL  QEP  QC
21  ¥D2          SM(J)  SB(J)  SP(J)  (FOR J=1,NSTEP)
22  EVEN          1      2      0      1 4 9 0 1 4 6 N F C N P
23          0.0      0.0      0.0      1.0
24          1      1.0      1.0      1.0
25          24.0      -3.05  -10.55
26          -9.38  1.50  5.95
27  END

```

リスト4.10.2 解析例10の入力データ (CANIS-G, ケース1)

.....1.....\*.....2.....\*.....3.....\*.....4.....\*.....5.....\*.....6.....\*.....7

1	TITL	EXAMPLE.10-G, TTS CIRCUM. CRACK, CASE1(J.E, NO-CREEP)										
2	¥CONT	DUM1	CRAC	FNS	SCKV	ECKV	PCKV	PEAK	DUM2	DUM3	DUM4	
3	¥		C.FNS		P.SIGM		P.SIGB		P.C1		P.C2	
4	CONT		2	1								
5			0.6667		0.0		1.0		0.2		0.2	
6	¥GEOM	NCRA	RADI		THIC		AACR		BBCR		ATLIM	BWLIM
7	GEOM		79.5		15.0		4.0		20.0		0.8	0.9
8	¥EPSS.	KEPS	IMAT	IDUM	TREF		ALPHY		SIGF			
9	EPSS	0	304		450.0		1.0		50.0			
10	¥CREP	KCRE	IMAT	ICHR	TREF		ALPHC		DUMMY			
11	CREP	2	304	1	500.0		1.0					
12	¥RUPT	IMAT	TREF		ALPHR		B0		B1		B2	
13	RUPT	304	500.0		1.0							
14	¥FATG	KFAT	C1		M1		X1		C2		M2	X2
15	FATG	2	1.2022E-3		1.4435							
16	¥CRPG	KCRP	C1		M1		X1		C2		M2	X2
17	¥RPG	1	0.1274		0.877							
18	¥LRAT	KLRA	Q.DET		GAMMA		ZETA		DELP			
19	LRAT	3	1.0		8.37E-11		2.0		0.1			
20	¥EVEN		LTYPE	NEVN	LBAS	NTIN	TLIFE		DTINT		CTIME	
21	¥		SIGDW		POPER		SIGTE		QEPT			
22	¥C1		KEY	KDUM	DTAV.J		QEPEV.J		QCEVN.J			
23	¥C2		SM(1,J)		SB(1,J)		SP(1,J)		SM(2,J)		SB(2,J)	SP(2,J)
24	EVEN		0	1	0	100	200000.0		10.0		1.3333	
25			0.0		0.0		0.0		1.0			
26			1		1.0		1.0		1.0			
27			24.0		-3.05		-10.55		-9.38		1.50	5.95
28	END											

リスト4.10.3 解析例10の入力データ (CANIS-G, ケース5)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.10-G, TTS CIRCUM. CRACK, CASE5(J.EP, 600DC-CREEP)
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS      P.SIGM      P.SIGB      P.C1      P.C2
4  CONT          2      1
5          0.6667      0.0          1.0          0.2          0.2
6  ¥GEOM NCRA  RAD1      THIC          AACR          BBCR          ATLIM          BWLIM
7  GEOM          79.5          15.0          4.0          20.0          0.8          0.9
8  ¥EPSS KEPS  IMAT IDUM  TREF          ALPHY          SIGF
9  EPSS          2      304          450.0          1.0          50.0
10 ¥CREP KCRE  IMAT ICHR  TREF          ALPHC          DUMMY
11 CREP          2      304      1      600.0          1.0
12 ¥RUPT IMAT  TREF          ALPHR          BO          B1          B2
13 RUPT          304      600.0          1.0
14 ¥FATG KFAT  C1          M1          X1          C2          M2          X2
15 FATG          2      1.2022E-3      1.4435
16 ¥CRPG KCRP  C1          M1          X1          C2          M2          X2
17 CRPG          1      0.1274          0.877
18 ¥LRAT KLRA  Q.DET          GAMMA          ZETA          DELP
19 LRAT          3      1.0          8.37E-11          2.0          0.1
20 ¥EVEN          LTYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE          DTINT          CTIME
21 ¥          SIGDW          POPER          SIGTE          QEPT
22 ¥C1          KEY KDUM  DTAV.J          QEPEV.J          QCEVN.J
23 ¥C2          SM(1,J)  SB(1,J)          SP(1,J)          SM(2,J)          SB(2,J)          SP(2,J)
24 EVEN          0      1      0      50      200000.0          1.0          1.3333
25          0.0          0.0          0.0          1.0
26          1          1.0          1.0          1.0
27          24.0          -3.05          -10.55          -9.38          1.50          5.95
28  END

```



## . 11 解析例11 (A T T F、環状き裂、熱過渡疲労き裂進展)

空気冷却熱過渡試験装置 (A T T F) では高温の供試体に空気を流しコールドショックを与える熱過渡クリープ疲労試験が実施される。現在 A T T F ではき裂付き円筒試験体を用いた熱過渡疲労き裂進展試験が行われている (REF. 4. 6)。円筒試験体 CPTT-101 (SUS304, R=35. 0mm, t=30mm) 内面には深さ 1 mm および 3 mm の環状初期き裂が放電加工により設けられ、高温側 650 °C の熱過渡疲労き裂進展試験がすでに数千サイクル実施された。この熱過渡を用いて、き裂深さ 1、5、9、15、20mm に対して、F I N A S による熱弾性解析および熱弾塑性解析が実施され、その結果を C A N I S - J を用いてポスト処理して、 $J_{h,1}$  積分値が計算されている。また F I N A S により計算された  $J_{h,1}$  積分値を用いたき裂進展計算も実施されている。本節では C A N I S - K による J 積分値計算を行い F I N A S の計算結果と比較する。さらに初期き裂深さ 1 mm のケースについて C A N I S - G によるき裂進展シミュレーションを行い、試験結果および F I N A S による J 値を用いたき裂進展計算と比較する。

## (1) F I N A S による J 値計算

F I N A S の熱弾性および熱弾塑性解析結果を C A N I S - J でポスト処理して計算された修正 J 積分値を表 4. 11. 1 に示す。これはコールドショック時 (650 ⇒ 300 °C) の内外面温度差が最大となる最大熱応力時点 (極値時点 1) の J 値である。コールドショック後はヒーターでゆっくり昇温され内外面温度差がほとんど生じないので弾性熱応力は 0 と見なせる。従って無応力状態がもう一方の極値時点 2 となり、表 4. 11. 1 に示した極値時点 1 の J 値は J 積分範囲  $\Delta J$  に等しい。

## (2) C A N I S - K による J 値計算

C A N I S - K による J 値計算結果を F I N A S の結果と比較して表 4. 11. 1 に示す。解析条件を以下に示す。

- ・環状き裂 K 値解 --- 植田らの解 (KECKV=21)。
- ・正味断面形状関数 --- 変位制御型曲げ応力対応 (KFNS=4、 $p_M=0.0$ 、 $p_B=1.0$ )。
- ・材料の弾塑性特性 --- 材料データライブラリ (SUS304) を、極値時点 1 の板厚平均温度に近い 450 °C で使用した。弾性 J 値の計算では弾性体 (KEPSS=0) とし、弾塑性 J 値の計算では繰り返し応力ひずみ関係式 (KEPSS=2) を  $\alpha_Y=1.0$  で使用した。
- ・荷重データ --- F I N A S の熱弾性解析によるき裂無し断面の軸方向応力成分  $\sigma_z$  の板厚内分布を入力応力データとした。コールドショック時 (650 ⇒ 300 °C) の内外面温度差が最大と PNC TN9410 94-201 の弾性応力分布を図 4. 11. 1 に示す。これを極値時点 1 の応力分布とした。無応力状態を極値時点 2 とした。内面、板厚中心および外面の応力値を入力し、コード内で膜、曲げおよびピーク応力成分に変換する。弾塑性 J 値の計算では変位制御型荷重 ( $q_{EP}=1.0$ ) とし、弾塑性の膜、曲げおよびピーク応力に変換する。弾塑性ピーク応力  $\sigma_P$  の簡易評価は、応力ひずみ曲線上で (膜+曲げ) ひずみ  $\epsilon_{MB}$  における接線係数  $f'(\epsilon_{MB})$  を用いた次式を使用した (KPEAK=2)。

$$\sigma_P = f'(\epsilon_{MB}) S_P (\text{弾性ピーク応力}) / E \quad (4.13)$$

弾塑性 J 値計算の入力データをリスト 4. 11. 1 に示す。繰り返し応力ひずみ関係式 (KEPSS=2) を弾性体 (KEPSS=0) に変更すると弾性 J 値計算の入力データとなる。

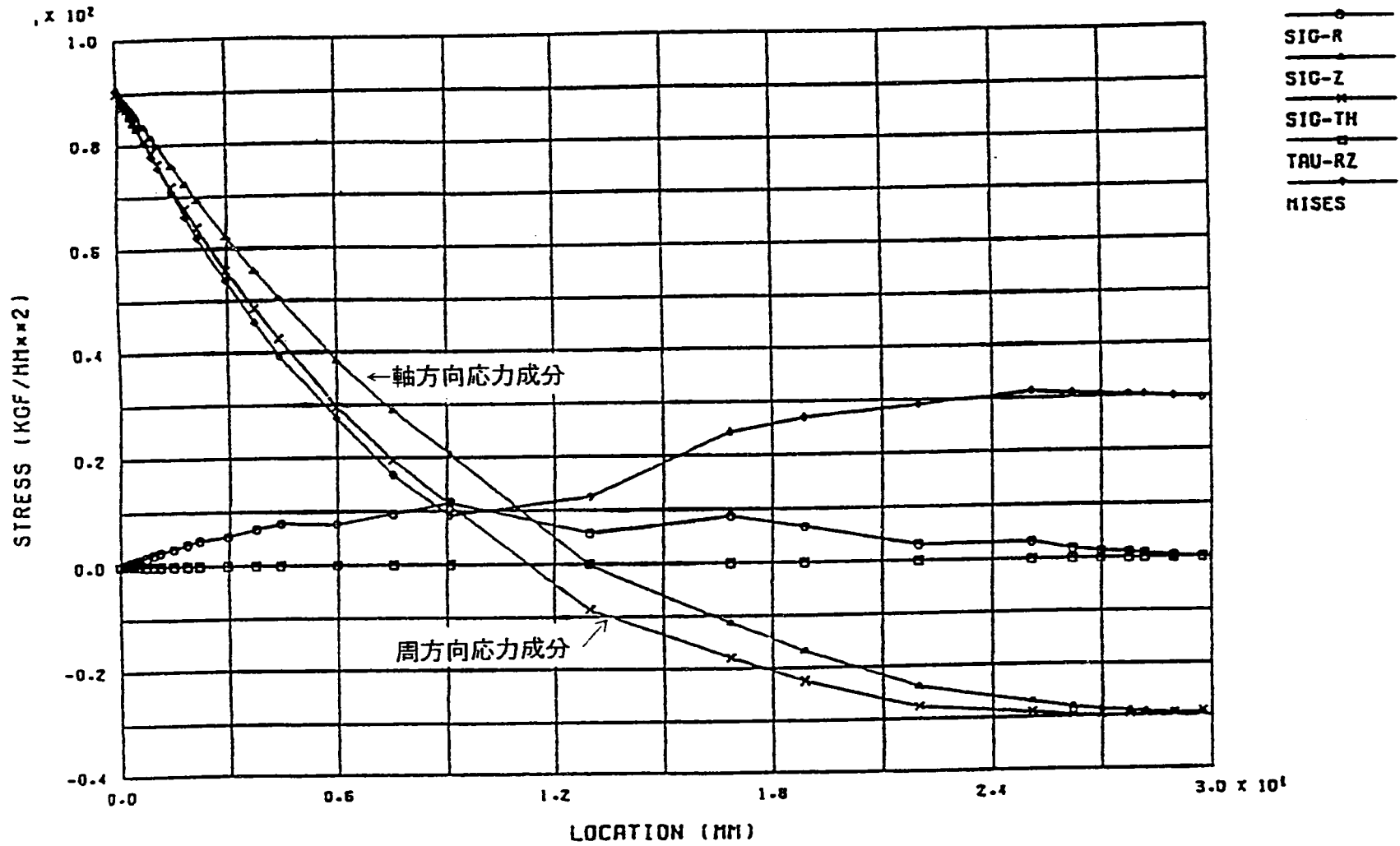
## (3) CANIS-Gによるき裂進展シミュレーション

初期き裂深さ1mmとしてCANIS-Gによるき裂進展シミュレーションを行った。疲労き裂進展パラメータは弾性 $\Delta J$ および弾塑性 $\Delta J$ とし、疲労き裂進展特性はPNCの平均値(4.1b)式と上限値(4.1a)式を使用した。その他の解析条件は(2)と共通である。サイクル数とき裂深さの関係を図4.11.2に示す。図には参考として実験値およびFINASによる $\Delta J$ 計算値(表4.11.1)を用いて台形数値積分により計算した結果も示す。弾塑性 $\Delta J$ および疲労き裂進展特性の平均値を使用した場合のCANIS-Gの入力データをリスト4.11.2に示す。繰り返し応力ひずみ関係式(KBPSS=2)を弾性体(KBPSS=0)に変更すると弾性 $\Delta J$ 使用の入力データとなる。

表 4.11.1 J 値の計算結果

き裂深さ a (mm)	1.0	5.0	9.0	15.0	20.0		
弾性解析	FINAS	2.3418	3.9503	3.7995	2.2998	1.1992	⇐ J <sub>h.a.t</sub> 積分値
	CANIS-K	1.689	4.397	4.068	2.400	1.170	
弾塑性解析	FINAS	0.6423	1.6831	2.3326	1.3631	0.6423	⇐ J <sub>h.a.t</sub> 積分値
	CANIS-K	0.6942	1.770	1.696	1.223	0.9013	

FINAS  
STEP NO. 57



ATTF (E) STRESS DIST. ALONG THICKNESS 60 SEC

図4.11.1 弾性解析によるき裂無し断面の応力分布 (FINAS)

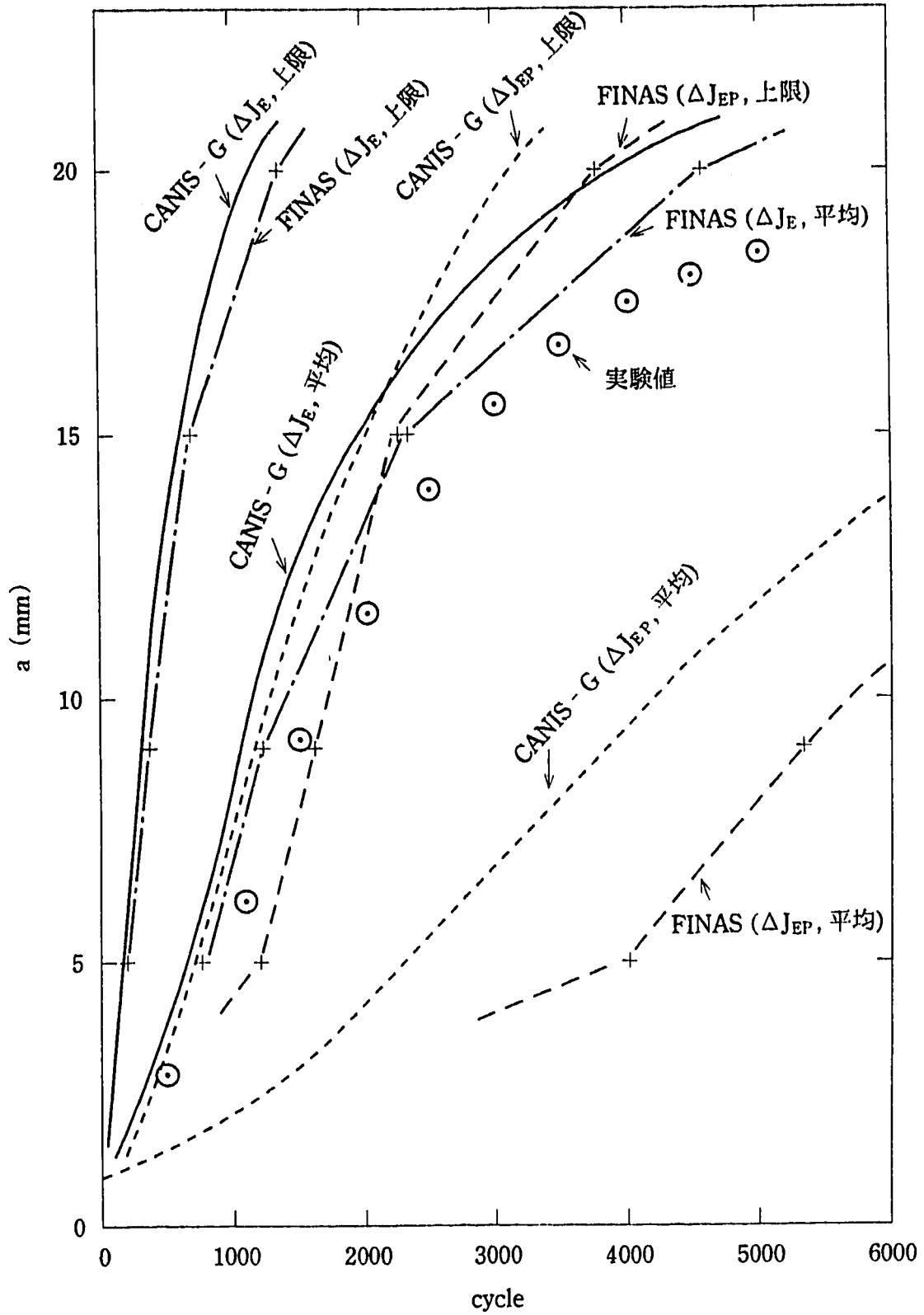


図 4.1 1.2 サイクル数とき裂深さの関係

## リスト4.11.1 解析例11の入力データ (CANIS-K)

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7
1  TITL      EXAMPLE.11-K, ATTF FULL CIRCUM. CRACK, J-CALC. BY CANIS-K
2  %CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  %      C.FNS   P.SIGM  P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT      2     4      21      2
5          0.6667   0.0     1.0     0.2     0.2
6  %GEOM NCRA  RADII  THIC    AACR    BBCR    ATLLIM  BWLIM
7  %      A(J)   B(J)    (FOR J=1,NCRAC)
8  GEOM      5    35.0   30.0    1.0     109.96  0.7     0.55
9          1.0     109.96
10         5.0     109.96
11         9.0     109.96
12        15.0    109.96
13        20.0    109.96
14 %EPSS KEPS  IMAT IDUM  TREF      ALPHY    SIGF
15 EPSS      2   304    450.0    1.0
16 %FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
17 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
18 %EVEN      LTYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE    DTINT    CTIME
19 %      SIGDW  POPER    SIGTE    QEPTTE
20 %C1      KEY KDUM  DTAV.J    QEPEV.J  QCEVN.J
21 %C2      SM(1,J)  SB(1,J)   SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
22 EVEN      0     1     0
23          0.0    0.0    0.0     1.0
24          1     1.0    1.0     1.0
25          91.0   -5.9   -29.3   0.0     0.0     0.0
26  END

```

## リスト4.11.2 解析例11の入力データ (CANIS-G)

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7
1  TITL      EXAMPLE.11-G, ATTF FULL CIRCUM. CRACK, GROWTH(MEAN) BY J.EP
2  %CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  %      C.FNS   P.SIGM  P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT      2     4      21      2
5          0.6667   0.0     1.0     0.2     0.2
6  %GEOM NCRA  RADII  THIC    AACR    BBCR    ATLLIM  BWLIM
7  %      A(J)   B(J)    (FOR J=1,NCRAC)
8  GEOM      5    35.0   30.0    1.0     109.96  0.7     0.55
9  %EPSS KEPS  IMAT IDUM  TREF      ALPHY    SIGF
10 EPSS      2   304    450.0    1.0
11 %FATG KFAT  C1      M1      X1      C2      M2      X2
12 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
13 %EVEN      LTYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE    DTINT    CTIME
14 %      SIGDW  POPER    SIGTE    QEPTTE
15 %C1      KEY KDUM  DTAV.J    QEPEV.J  QCEVN.J
16 %C2      SM(1,J)  SB(1,J)   SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
17 EVEN      0     1     0  100  20000.0  1.0
18          0.0    0.0    0.0     1.0
19          1     1.0    1.0     1.0
20          91.0   -5.9   -29.3   0.0     0.0     0.0
21  END

```

## 4.12 解析例12

PWR圧力容器 ( $R=2.0$  m,  $t=0.2$  m) に一個の軸方向半楕円表面初期き裂が存在する場合の破損確率を計算する確率論的破壊力学 (PFM) のベンチマーク解析が原研の委託を受け日本溶接協会で実施された。解析条件その他の詳細は文献(RBF. 4.7) を参照されたい。確率変数は初期き裂の相対深さ ( $a/t$ ) とアスペクト比 ( $b/a$ ) である。板幅  $2W=12.6$  mの平板でモデル化し、Newman-Raju の平板K値解が使用された。設計運転期間40年間に想定される荷重およびその頻度を表4.1 に示す。破損条件は次式が使用された。

$$\text{Max} \{K_A (\text{最深部}), K_B (\text{表面部})\} \geq K_{Ic} \text{ .OR. } b/W \geq 0.5 \text{ の時 BRBAK} \quad (4.14)$$

$$\text{BREAK しない場合で } a/t \geq 0.8 \text{ の時 LEAK} \quad (4.15)$$

$K_{Ic}=135\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  が標準ケースであり、感度解析として  $K_{Ic}$  がより大きい場合も解析された。疲労き裂進展則は応力比  $R$  の効果を包含した次式が使用された。

$$da/dn (\text{m/cycle}) = 5.3246 \times 10^{-9} \Delta K^{1.95} \quad (\text{for } \Delta K \geq 13.188 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (4.16a)$$

$$da/dn (\text{m/cycle}) = 1.7381 \times 10^{-13} \Delta K^{5.95} \quad (\text{for } \Delta K < 13.188 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (4.16b)$$

国および民間の研究期間が多数参加したこのPFMベンチマーク解析において、PNCはPFMコードCANIS-Pによる破損確率計算、CANIS-GおよびCANIS-Kコードによるパラメータ解析を実施した。本節ではパラメータ解析結果について紹介する。

## (1) き裂進展軌跡

初期き裂の相対深さが  $a/t=0.75, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2$  の時の、40年間の設計荷重サイクルに対する、き裂進展軌跡をCANIS-Gにより計算した。ベクトル表示した結果を図4.12.1に示す。任意の初期き裂 ( $a/t, a/b$ ) の進展軌跡が本図より概略推定できる。 $a/t=0.6, a/b=0.4$  の入力データをリスト4.12.1に示す。

## (2) BREAK 条件

運転開始時 ( $t=0$ ) の破断条件は荷重1 (heatup) によるK値とき裂形状に依存する。また運転開始後 ( $t>0$ ) の破断条件は、全荷重中で最大K値となる荷重15 (Loss of load) によるK値とき裂形状に依存する。そこで多数のき裂形状 ( $a/t, a/b$ ) に対して、荷重1および荷重15による最大K値

$$K_{max} = \text{Max} \{K_A (\text{最深部}), K_B (\text{表面部})\}$$

をCANIS-Kにより計算した。 $a/t=0.8$  の入力データをリスト4.12.2に示す。

荷重1による ( $a/t, a/b$ ) 平面上の  $K_{max}$  コンターを図4.12.2に示す。本図より運転開始時の初期BRBAK領域を求めることができる。

荷重15による ( $a/t, a/b$ ) 平面上の  $K_{max}$  コンターを図4.12.3に示す。本図と図4.12.1 (き裂進展軌跡) を用いて、運転開始後のBREAK領域概略を推定できる。

## (3) LEAK条件

LEAK領域はNON BREAK領域で  $a/t \geq 0.8$  となる領域として求まる。運転開始後にLEAKするか否かは図4.12.1 (き裂進展軌跡) から推定可能である。

## (4) 破損領域区分図

上記(1)～(3)の結果を用いて $K_{Ic}=135, 170, 200, 240\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の時の破損領域区分図を以下のように作成した。

図4.12.4 ( $K_{Ic}=135\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

図4.12.5 ( $K_{Ic}=170\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

図4.12.6 ( $K_{Ic}=200\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

図4.12.7 ( $K_{Ic}=240\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

- ・斜線領域( $1 \geq b/w \geq 0.5$ )は形状条件によるBRBAK領域である。
- ・Break at  $t=0$  (load.1)の実線より左側は荷重1による初期BREAK領域である。
- ・Leak at  $t=0$ の実線より上側は初期LEAK領域である。
- ・Break at  $t=0.5$ (load.15)の破線より左側は運転開始後の早期に荷重15によりBREAKする領域である。この破線が運転開始後の実質的なBRBAK限界を与える。
- ・Break at  $t=40$ (load.15)の破線より左側は、き裂進展により上記の実質的なBRBAK限界に達する領域、即ち時間依存BRBAK領域である。
- ・Leak at  $t=40$ の破線より上側は、き裂進展により $a/t=0.8$ に達する領域、即ち時間依存LEAK領域である。

これらの破損領域区分図を用いれば、PFM解析の層別サンプリングにおける効率の良いセル分割が可能である。すなわち、サンプル数が最小でよい領域、サンプル数を大きくすべき領域およびサンプル不要領域を決定できる。また純数学的な問題として、初期き裂形状の確率密度関数をこれらの破損領域区分図上で面積積分することにより、破損確率を算出することも可能である。

## (5) 各事象の全き裂進展量への寄与

LEAK直前のき裂形状( $a/t=0.8, a/b=1.0$ )およびBREAK直前のき裂形状( $a/t=0.75, a/b=0.6$ )について、全ての事象に対して、1サイクルあたりのき裂進展量をCANIS-Kにより計算した。CANIS-Kの入力データをリスト4.12.3に示す。設計運転期間中に想定される各事象の生起回数に乗じて各事象のき裂進展量を計算し、全き裂進展量に占める各事象の寄与分を計算した。LEAK直前のき裂形状に対する計算結果を表4.12.2に示す。BREAK直前のき裂形状に対する計算結果を表4.12.3に示す。これから以下のことが分かる。

- ・荷重1/2 (heatup/shutdown) が全き裂進展量の約80%を占める。
- ・上位の5荷重で全き裂進展量の約95%を占める。
- ・上位の10荷重で全き裂進展量の99%以上を占める。

この結果をCANIS-PによるPFM解析に反映して以下の成果を得た。

- ・上位10荷重以外を省略しても解析結果にほとんど差が生じない。
- ・上位10荷重以外を省略することで計算時間が大幅に節約できる。

表4.12.1 設計運転期間中の荷重サイクル

( 応力の単位 : MPa )

Load No.	Design Transient	Extreme. 1		Extreme. 2		Occurrence in 40 years
		$\sigma_M$	$\sigma_B$	$\sigma_M$	$\sigma_B$	
1/2	Heatup/shutdown	160.9	8.0	0.0	0.0	200
3	Unit load/unload	159.2	11.3	160.6	5.6	500
4/5	Plant loading/unloading	160.7	11.3	158.0	8.3	13200
6/7	Step load change	164.4	5.1	157.6	5.6	2000
8	Steam dump	167.5	4.7	150.5	6.4	200
9A	Steady state fluctuation. A	160.9	8.0	158.8	5.8	150000
9B	Steady state fluctuation. B	161.3	8.0	160.5	7.9	$3 \times 10^6$
10	Feedwater cycling at HS	154.9	16.4	162.9	1.2	2000
11/12	Loop out of service	167.6	6.2	160.4	6.1	80
15	Loss of load	187.7	5.7	131.7	-7.6	80
16	Loss of power	176.0	4.5	132.1	9.9	40
17	Partial loss of flow	164.7	6.0	138.2	4.7	80
18A	Reactor trip A	160.9	8.0	142.7	5.6	230
18B	Reactor trip B	160.9	8.0	114.5	17.1	160
18C	Reactor trip C	160.9	8.0	114.5	11.0	10
19	Inadvertent Depres.	160.9	8.0	9.3	52.6	20
20	Inadvertent start-up	167.5	10.3	142.1	8.3	10
21	Control rod drop	160.9	8.0	131.0	9.8	80
22	Inadvertent S <sub>i</sub>	164.0	13.1	143.7	4.6	60

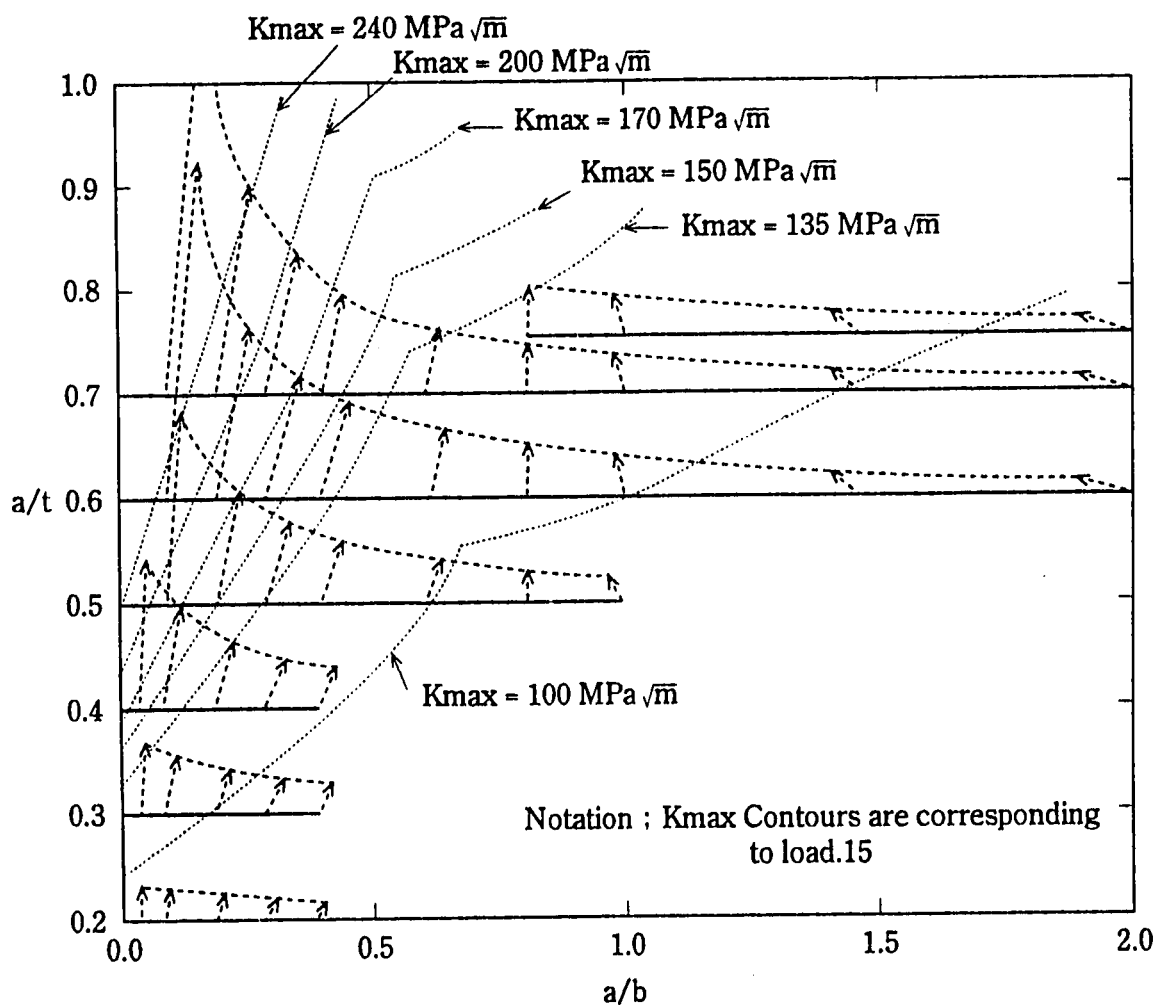


図4.12.1 き裂進展の軌跡



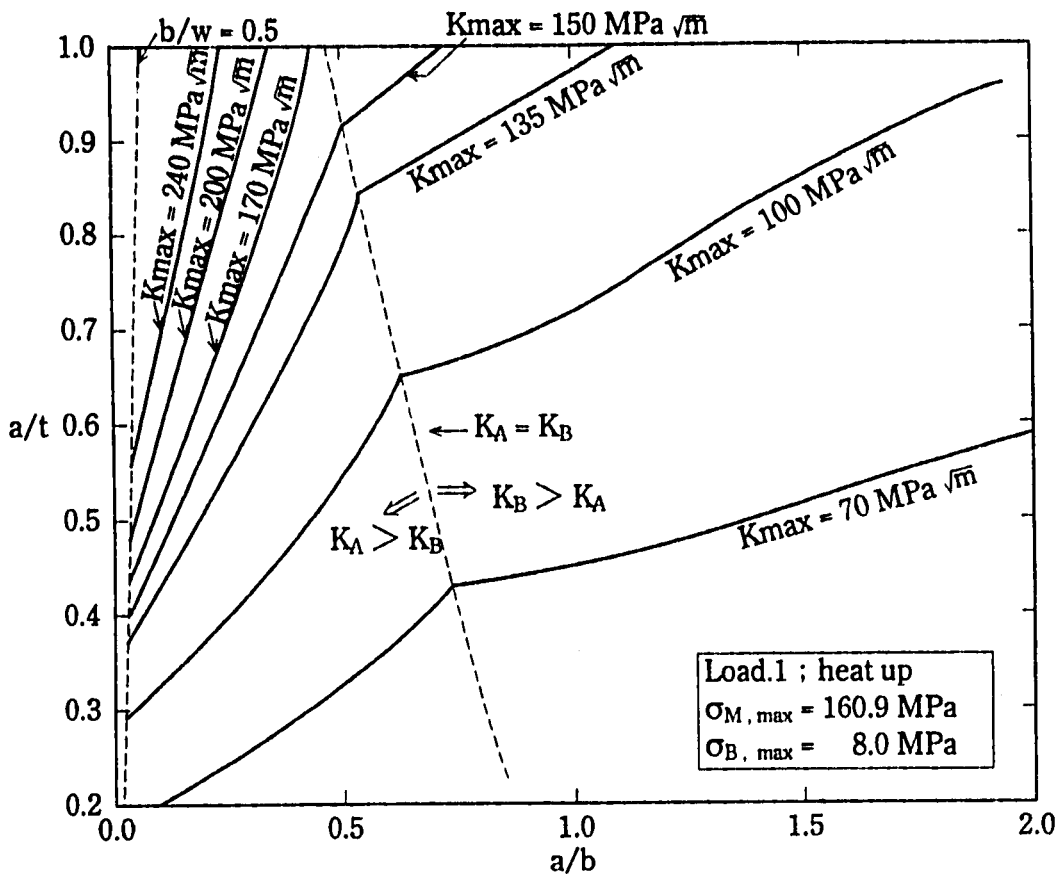


図 4.1 2.2 Load.1による  $K_{max}$  コンター

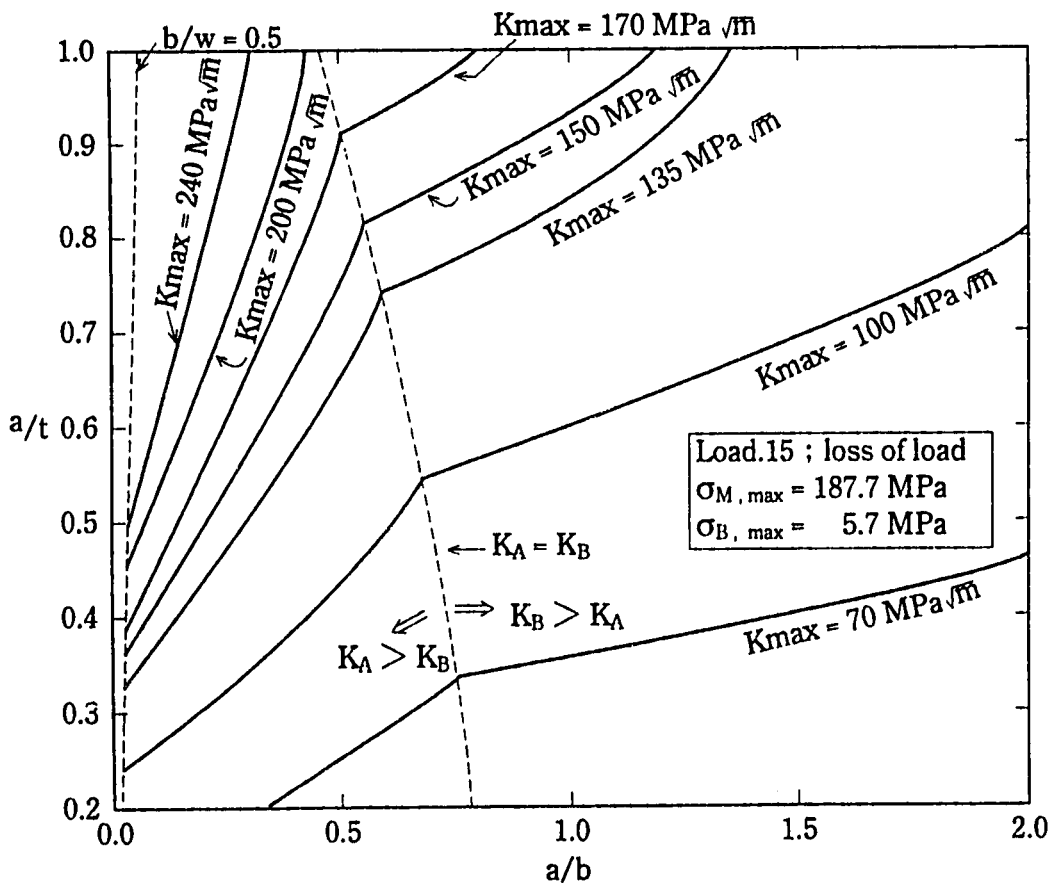


図 4.1 2.3 Load.15による  $K_{max}$  コンター

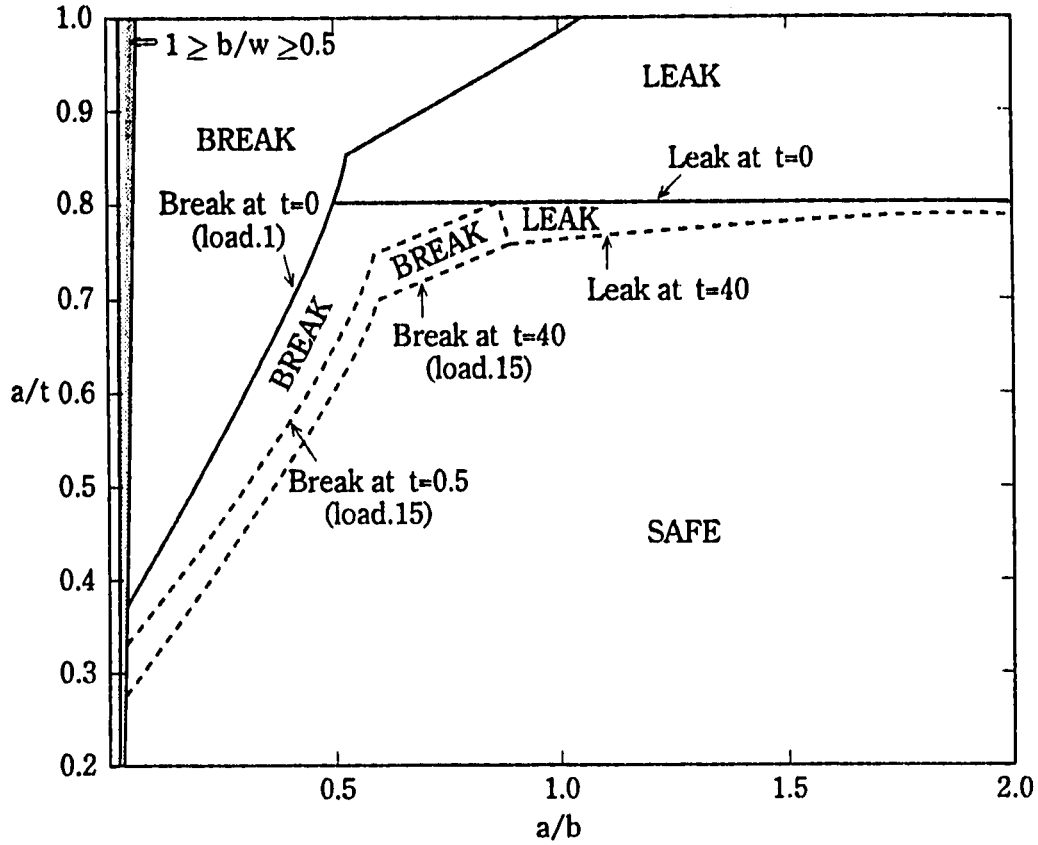


图 4.1 2.4 破损领域区分图 ( $K_{1C}=135\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

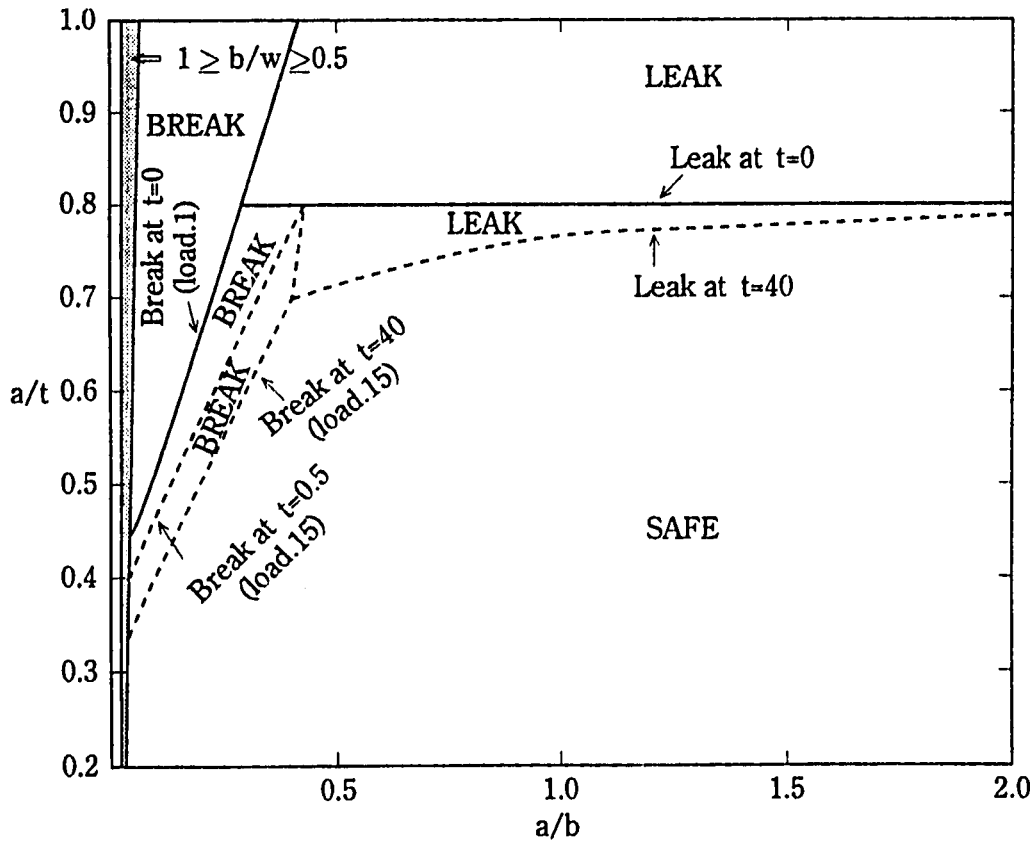


图 4.1 2.5 破损领域区分图 ( $K_{1C}=170\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

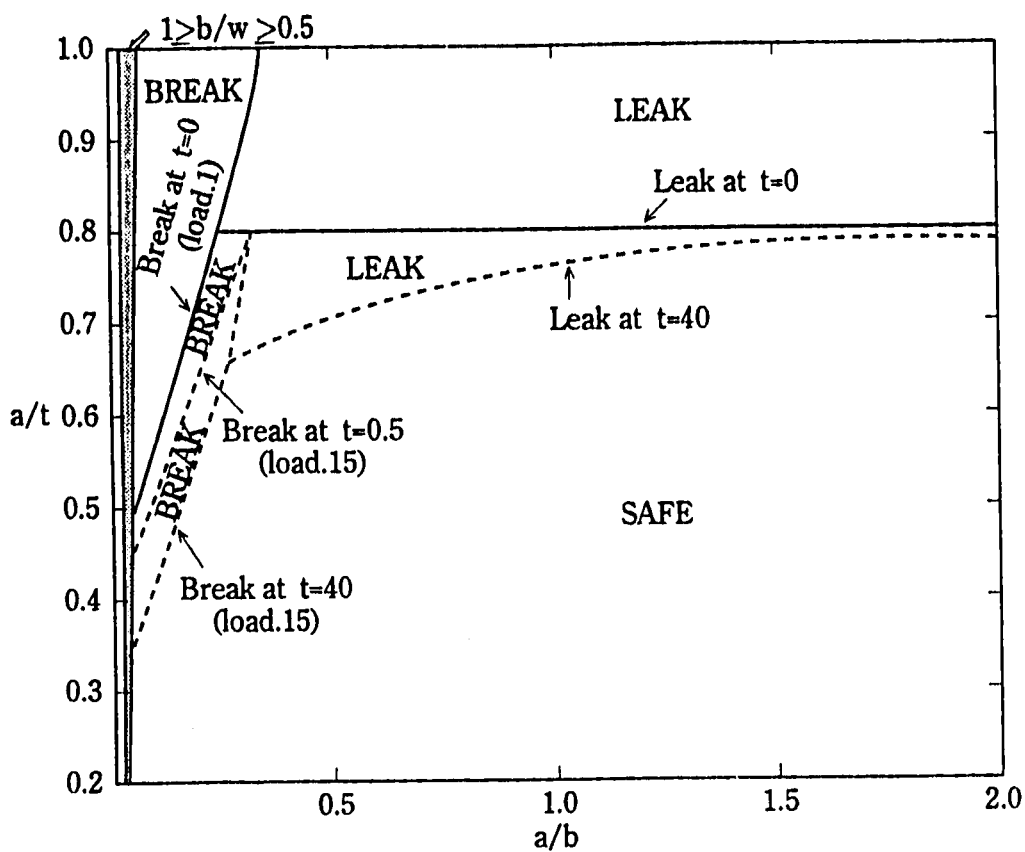


图 4.1 2.6 破损领域区分图 ( $K_{1C}=200\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

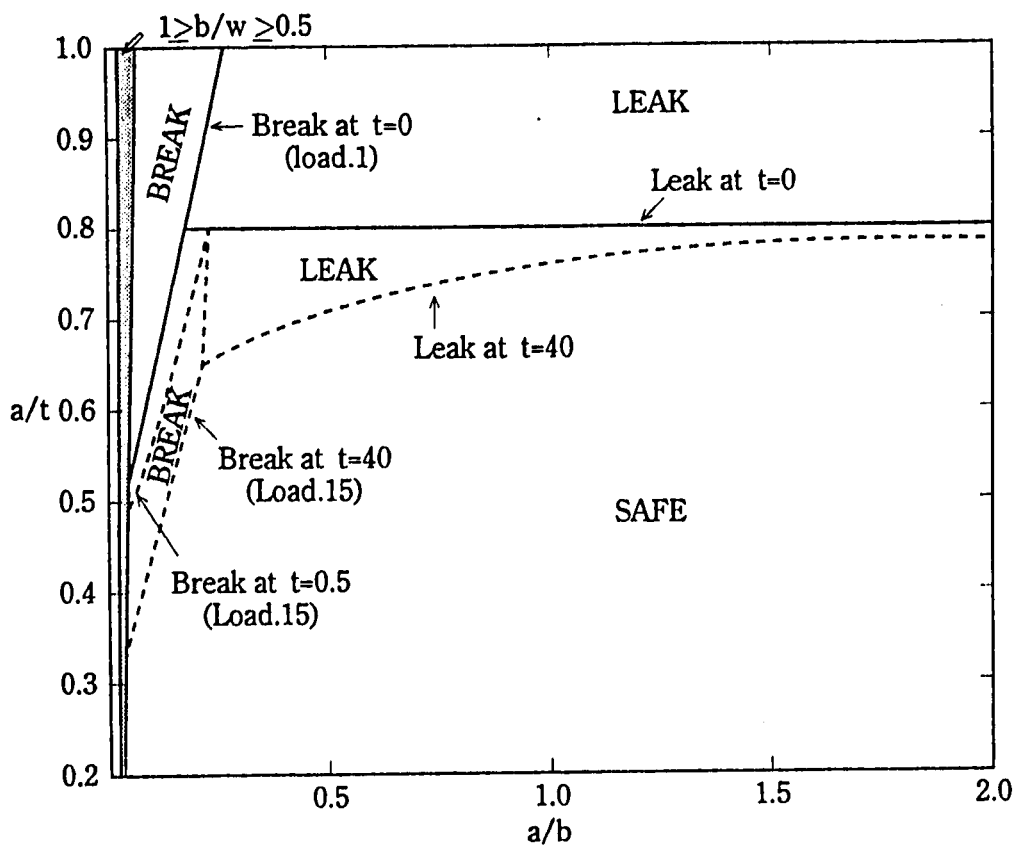


图 4.1 2.7 破损领域区分图 ( $K_{1C}=240\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

表4.12.2 貫通直前のき裂進展量 (  $a/t=0.8$  ,  $a/b=1.0$  )

Load No.	$K_A$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_B$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_A$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_B$ (MPa $\sqrt{m}$ )	A B	da/dn(db/dn) (m/cycle)	N (cycle)	da(db) (m)	% of growth	rank -ing
1/2	81.5	112	81.5	112	B	$5.26 \times 10^{-5}$	200	$1.05 \times 10^{-2}$	80.3	1
3	81.4	112	0.976	1.51	B	$2.05 \times 10^{-12}$	500	$1.03 \times 10^{-9}$	---	
4/5	81.2	113	1.23	3.11	B	$1.49 \times 10^{-10}$	13200	$1.97 \times 10^{-6}$	0.02	
6/7	83.4	113	3.48	4.36	B	$1.11 \times 10^{-9}$	2000	$2.22 \times 10^{-6}$	0.02	
8	85.0	115	8.72	10.7	B	$2.34 \times 10^{-7}$	200	$4.68 \times 10^{-5}$	0.35	10
9A	81.5	112	0.966	2.36	B	$2.89 \times 10^{-11}$	150000	$4.34 \times 10^{-6}$	0.03	
9B	81.7	112	0.402	0.582	B	$6.92 \times 10^{-15}$	$3 \times 10^6$	$2.08 \times 10^{-8}$	---	
10	82.8	111	4.77	1.16	A	$1.90 \times 10^{-9}$	2000	$3.80 \times 10^{-6}$	0.03	
11/12	84.9	116	3.66	4.89	B	$2.20 \times 10^{-9}$	80	$1.76 \times 10^{-7}$	---	
15	95.2	129	27.9	43.4	B	$8.32 \times 10^{-6}$	80	$6.66 \times 10^{-4}$	5.09	2
16	89.3	120	22.6	27.2	B	$3.35 \times 10^{-6}$	40	$1.34 \times 10^{-4}$	1.02	7
17	83.5	113	13.4	18.4	B	$1.56 \times 10^{-6}$	80	$1.25 \times 10^{-4}$	0.96	8
18A	81.5	112	9.14	13.3	B	$8.26 \times 10^{-7}$	230	$1.90 \times 10^{-4}$	1.45	5
18B	81.5	112	24.0	27.3	B	$3.37 \times 10^{-6}$	160	$5.39 \times 10^{-4}$	4.12	4
18C	81.5	112	23.7	30.0	B	$4.03 \times 10^{-6}$	10	$4.03 \times 10^{-5}$	0.31	
19	81.5	112	79.2	82.9	B	$2.93 \times 10^{-5}$	20	$5.86 \times 10^{-4}$	4.48	3
20	84.7	117	12.8	18.0	B	$1.49 \times 10^{-6}$	10	$1.49 \times 10^{-5}$	0.11	
21	81.5	112	15.3	19.4	B	$1.72 \times 10^{-6}$	80	$1.38 \times 10^{-4}$	1.06	6
22	82.8	116	9.93	17.3	B	$1.39 \times 10^{-6}$	60	$8.34 \times 10^{-5}$	0.64	9

95.44% growth by greater 5 loads, and 99.48% growth by greater 10 loads

表4.12.3 破断直前のき裂進展量 (  $a/t=0.75$  ,  $a/b=0.6$  )

Load No.	$K_A$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_B$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_A$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_B$ (MPa $\sqrt{m}$ )	A B	da/dn(db/dn) (m/cycle)	N (cycle)	da(db) (m)	% of growth	rank -ing
1/2	113	117	113	117	B	$5.77 \times 10^{-5}$	200	$1.15 \times 10^{-2}$	77.5	1
3	113	118	0.739	1.81	B	$5.86 \times 10^{-12}$	500	$2.93 \times 10^{-9}$	---	
4/5	113	119	2.02	3.37	B	$2.40 \times 10^{-10}$	13200	$3.17 \times 10^{-6}$	0.02	
6/7	115	118	4.75	4.54	A	$1.84 \times 10^{-9}$	2000	$3.68 \times 10^{-6}$	0.02	
8	118	120	11.8	11.1	A	$4.25 \times 10^{-7}$	200	$8.50 \times 10^{-5}$	0.57	10
9A	113	117	1.57	2.56	B	$4.63 \times 10^{-11}$	150000	$6.95 \times 10^{-6}$	0.05	
9B	113	118	0.565	0.612	B	$9.40 \times 10^{-15}$	$3 \times 10^6$	$2.82 \times 10^{-8}$	---	
10	114	117	4.96	1.81	A	$2.40 \times 10^{-9}$	2000	$4.80 \times 10^{-6}$	0.03	
11/12	118	121	5.05	5.12	B	$2.89 \times 10^{-9}$	80	$2.31 \times 10^{-7}$	---	
15	132	135	39.8	46.0	B	$9.29 \times 10^{-6}$	80	$7.43 \times 10^{-4}$	5.01	3
16	124	126	30.5	28.3	A	$4.19 \times 10^{-6}$	40	$1.68 \times 10^{-4}$	1.13	6
17	116	119	18.6	19.3	B	$1.71 \times 10^{-6}$	80	$1.37 \times 10^{-4}$	0.92	8
18A	113	117	12.9	14.0	B	$9.14 \times 10^{-7}$	230	$2.10 \times 10^{-4}$	1.42	5
18B	113	117	32.1	28.2	A	$4.63 \times 10^{-6}$	160	$7.41 \times 10^{-4}$	4.99	4
18C	113	117	32.4	31.2	A	$4.70 \times 10^{-6}$	10	$4.70 \times 10^{-5}$	0.32	
19	113	117	104	84.9	A	$4.60 \times 10^{-5}$	20	$9.20 \times 10^{-4}$	6.20	2
20	118	123	17.9	18.9	B	$1.64 \times 10^{-6}$	10	$1.64 \times 10^{-5}$	0.11	
21	113	117	20.9	20.2	A	$2.00 \times 10^{-6}$	80	$1.60 \times 10^{-4}$	1.08	7
22	116	122	14.6	18.5	B	$1.57 \times 10^{-6}$	60	$9.42 \times 10^{-5}$	0.63	9

95.12% growth by greater 5 loads, and 99.45% growth by greater 10 loads

リスト4.12.1 解析例12の入力データ (CANIS-G, き裂進展軌跡)

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7

1	TITL	EX.12-G, LE-PFM, LOCI OF CRACK SHAPE ( A/T=0.6, A/B=0.4 )									
2	#CONT	DUM1	CRAC	FNS	SCKV	ECKV	PCKV	PEAK	DUM2	DUM3	DUM4
3	#	C.FNS		P.SIGM		P.SIGB		P.C1		P.C2	
4	CONT	1		12							
5		1.0									
6	%GEOM	NCRA	RADI	THIC	AACR	BBCR	ATLIM	BWLIM			
7	GEOM	6.3		0.2	0.12	0.3	0.9	0.9			
8	%EPSS	KEPS	IMAT	IDUM	E	SIGY	SIGF				
9	EPSS	0		2.0E5							
10	%KVAL	K1C		N(WALKER)							
11	KVAL	135.0		1.0							
12	%FATG	KFAT	C1	M1	X1	C2	M2	X2			
13	FATG	1	5.3246E-9	1.95	13.188	1.7381E-13	5.95	0.1			
14	%EVEN	LTYPE	NEVN	LBAS	NTIN	TLIFE	DTINT	CTIME			
15	#	SIGDW		POPER		SIGTE		QEPTTE			
16	%C1	KEY	KDUM	DTAV.J	QEPEV.J	QCEVN.J					
17	%C2	SM(1,J)		SB(1,J)		SP(1,J)		SM(2,J)		SB(2,J) SP(2,J)	
18	EVEN	0	19	0	50	40.0	0.01				
19		0.0		0.0	0.0	0.0	1.0				
20		1/2		0.2							
21		160.9		8.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
22		3		0.08							
23		159.2		11.3	0.0	160.6	5.6	0.0			
24		4/5		3.03E-3							
25		160.7		11.3	0.0	158.0	8.3	0.0			
26		6/7		0.02							
27		164.4		5.1	0.0	157.6	5.6	0.0			
28		8		0.2							
29		167.5		4.7	0.0	150.5	6.4	0.0			
30		9A		2.667E-4							
31		160.9		8.0	0.0	158.8	5.8	0.0			
32		9B		1.333E-5							
33		161.3		8.0	0.0	160.5	7.9	0.0			
34		10		0.02							
35		154.9		16.4	0.0	162.9	1.2	0.0			
36		11/12		0.5							
37		167.6		6.2	0.0	160.4	6.1	0.0			
38		15		0.5							
39		187.7		5.7	0.0	131.7	-7.6	0.0			
40		16		1.0							
41		176.0		4.5	0.0	132.1	9.9	0.0			
42		17		0.5							
43		164.7		6.0	0.0	138.2	4.7	0.0			
44		18A		0.1739							
45		160.9		8.0	0.0	142.7	5.6	0.0			
46		18B		0.25							
47		160.9		8.0	0.0	114.5	17.1	0.0			
48		18C		4.0							
49		160.9		8.0	0.0	114.5	11.0	0.0			
50		19		2.0							
51		160.9		8.0	0.0	9.3	52.6	0.0			
52		20		4.0							
53		167.5		10.3	0.0	142.1	8.3	0.0			
54		21		0.5							
55		160.9		8.0	0.0	131.0	9.8	0.0			
56		22		0.6667							
57		164.0		13.1	0.0	143.7	4.6	0.0			
58	END										

リスト4.12.2 解析例12の入力データ (CANIS-K, 荷重1, 15のK値)

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EX.12-K1, LE-PFM, K-VALUE OF LOAD.1 AND LOAD.15, A/T=0.8
2  ¥CONT DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥          C.FNS  P.SIGM  P.SIGB  P.C1  P.C2
4  CONT          1          12
5
6  ¥GEOM NCRA  RADII  THIC  AACR  BBCR  ATLIM  BWLIM
7  GEOM      10  6.3    0.2    ACR  BBCR  0.9    0.9
8
9          0.16  1.6    A/B=0.1
10         0.16  0.8    A/B=0.2
11         0.16  0.5333  A/B=0.3
12         0.16  0.4    A/B=0.4
13         0.16  0.32   A/B=0.5
14         0.16  0.2667  A/B=0.6
15         0.16  0.2    A/B=0.8
16         0.16  0.16   A/B=1.0
17         0.16  0.1067  A/B=1.5
18         0.16  0.08   A/B=2.0
18 ¥EPSS KEPS  IMAT  IDUM  E  SIGY  SIGF
19 EPSS      0
20 ¥KVAL      K1C  N(WALKER)
21 KVAL      135.0  1.0
22 ¥FATG KFAT  C1  M1  X1  C2  M2  X2
23 FATG      1  5.3246E-9  1.95  13.188  1.7381E-13  5.95  0.1
24 ¥EVEN      LTYPE NEVN  LBAS  NTIN  TLIFE  DTINT  CTIME
25 ¥          SIGDW  POPER  SIGTE  QEPT
26 ¥C1        KEY  KDUM  DTAV.J  QEPEV.J  QCEVN.J
27 ¥C2        SM(1,J)  SB(1,J)  SP(1,J)  SM(2,J)  SB(2,J)  SP(2,J)
28 EVEN      0  2  0  50  40.0  0.01
29           0.0  0.0  0.0  1.0
30           1/2  0.2
31           160.9  8.0  0.0  0.0  0.0  0.0
32           15  0.5
33           187.7  5.7  0.0  131.7  -7.6  0.0
34  END

```

リスト4.12.3 解析例12の入力データ (CANIS-K, き裂進展量計算)

	.....1.....	.....2.....	.....3.....	.....4.....	.....5.....	.....6.....	.....7					
1	TITL	EX.12-K2, LE-PFM, CRACK EXTENSION RATE JUST LEAK OR BREAK										
2	%CONT	DUM1	CRAC	FNS	SCKV	ECKV	PCKV	PEAK	DUM2	DUM3	DUM4	
3	%		C.FNS		P.SIGM		P.SIGB		P.C1		P.C2	
4	CONT		1		12							
5			1.0									
6	%GEOM	NCRA	RADI		THIC		AACR		BBCR		ATLIM	BWLIM
7	GEOM	2	6.3		0.2						0.9	0.9
8			0.16		0.16							
9			0.15		0.25							
10	%EPSS	KEPS	IMAT	IDUM	E		SIGY		SIGF			
11	EPSS	0			2.0E5							
12	%KVAL		K1C		N(WALKER)							
13	KVAL		135.0		1.0							
14	%FATG	KFAT	C1		M1		X1		C2		M2	X2
15	FATG	1	5.3246E-9		1.95		13.188		1.7381E-13		5.95	0.1
16	%EVEN		LTYPE	NEVN	LBAS	NTIN	TLIFE		DTINT		CTIME	
17	%		SIGDW		POPER		SIGTE		QEPT			
18	%C1		KEY	KDUM	DTAV.J		QEPEV.J		QCEVN.J			
19	%C2		SM(1,J)		SB(1,J)		SP(1,J)		SM(2,J)		SB(2,J)	SP(2,J)
20	EVEN		0	19	0	50	40.0		0.01			
21			0.0		0.0		0.0		1.0			
22		1/2			0.2							
23			160.9		8.0		0.0		0.0		0.0	0.0
24		3			0.08							
25			159.2		11.3		0.0		160.6		5.6	0.0
26		4/5			3.03E-3							
27			160.7		11.3		0.0		158.0		8.3	0.0
28		6/7			0.02							
29			164.4		5.1		0.0		157.6		5.6	0.0
30		8			0.2							
31			167.5		4.7		0.0		150.5		6.4	0.0
32		9A			2.667E-4							
33			160.9		8.0		0.0		158.8		5.8	0.0
34		9B			1.333E-5							
35			161.3		8.0		0.0		160.5		7.9	0.0
36		10			0.02							
37			154.9		16.4		0.0		162.9		1.2	0.0
38		11/12			0.5							
39			167.6		6.2		0.0		160.4		6.1	0.0
40		15			0.5							
41			187.7		5.7		0.0		131.7		-7.6	0.0
42		16			1.0							
43			176.0		4.5		0.0		132.1		9.9	0.0
44		17			0.5							
45			164.7		6.0		0.0		138.2		4.7	0.0
46		18A			0.1739							
47			160.9		8.0		0.0		142.7		5.6	0.0
48		18B			0.25							
49			160.9		8.0		0.0		114.5		17.1	0.0
50		18C			4.0							
51			160.9		8.0		0.0		114.5		11.0	0.0
52		19			2.0							
53			160.9		8.0		0.0		9.3		52.6	0.0
54		20			4.0							
55			167.5		10.3		0.0		142.1		8.3	0.0
56		21			0.5							
57			160.9		8.0		0.0		131.0		9.8	0.0
58		22			0.6667							
59			164.0		13.1		0.0		143.7		4.6	0.0
60	END											

## 4.13 解析例13 (表面き裂付き平板、クリープ疲労き裂進展、変位制御型曲げ応力)

## (1) 解析対象

半楕円表面き裂付き平板 (SUS304, 550°C,  $t=8.0$ ,  $W=30.0$ ,  $a=1.0$ ,  $b=1.0$ ,  $a/b=1.0$ ) に完全両振りの変位制御型曲げ応力を繰り返し負荷したクリープ疲労き裂進展試験 (REF. 4.8) である。試験条件を表4.13に、試験片形状を図4.13.1に示す。公称曲げひずみ範囲  $\Delta \varepsilon = 0.8\%$  の試験について、CANIS-Gによるシミュレーションを行った。き裂面側が引張応力状態で 5hr保持したクリープ疲労試験 (試験片番号 FCCII-2) では、本試験前に  $\Delta a = 0.5\text{mm}$  程度の疲労予き裂が導入された。保持時間無し of 疲労試験 (試験片番号 FCCII-8) では予き裂が導入されていない。

## (2) 解析条件

保持時間 5hrの解析では約30サイクル後の実測値に近い  $a=2.0$ ,  $b=2.62$  を初期き裂形状とした。保持時間無し of 解析では  $a=1.0$ ,  $b=1.0$  を初期き裂形状とした。

- ・表面き裂K値解--- 標準デフォルト (KSCKV=10、白鳥らの解)
- ・正味断面形状関数--- 変位制御型対応の一定値 (KFNS=1,  $F_{NS}=0.6667$ ,  $p_M=0.0$ ,  $p_B=1.0$ )
- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係、SUS304, 550°C,  $\alpha_V=1.0$ )
- ・クリープ特性--- PNCのSUS304クリープ式を 550°C、5hr でNorton則近似した次式を使用した。

$$550^\circ\text{C}、5\text{hr 保持} \quad d\varepsilon_c / dt = 1.2527 \times 10^{-12} \sigma^{5.8128} \quad (4.17)$$

- ・疲労き裂進展特性--- PNCの平均値(4.1b)式
- ・クリープき裂進展特性--- PNCの平均値(4.2b)式と上限値(4.2a)式を使用した。
- ・荷重データ--- 公称曲げひずみ範囲  $\Delta \varepsilon$  に対応する曲げ応力範囲  $\Delta S = E \times \Delta \varepsilon$  を、完全両振り ( $S_B = \pm \Delta S / 2$ ) の変位制御型 ( $q_{EP}=q_C=1.0$ ) の曲げ応力として与えた。

$$S_B = \pm E \times \Delta \varepsilon / 2 = \pm 15680 \times 0.008 / 2 = \pm 62.72 \text{ kgf/mm}^2 \quad (4.18)$$

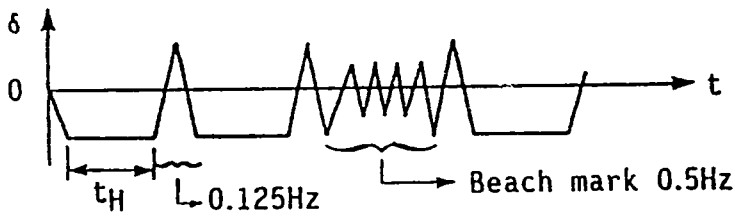
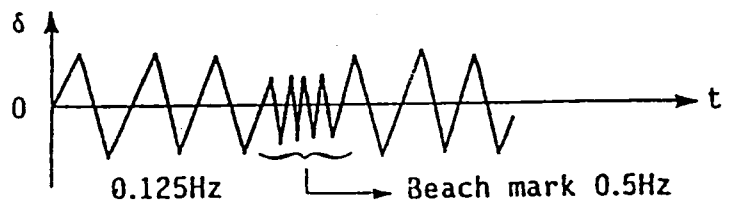
## (3) 解析結果

保持時間 5hrの場合の、き裂深さ  $a$  とサイクル数の関係を図4.13.2に、き裂半長  $b$  とサイクル数の関係を図4.13.3に示す。保持時間無しの場合も含めて、き裂深さ  $a$  とき裂進展速度  $da/dn$  の関係を図4.13.4に、き裂半長  $b$  とき裂進展速度  $db/dn$  の関係を図4.13.5に示す。き裂深さとアスペクト比  $a/b$  の関係を図4.13.6に示す。保持時間 5hrの入力データをリスト4.13に示す。弾性体を仮定した入力曲げ応力  $S_B = \pm 62.72\text{kgf/mm}^2$  が、CANIS-Gの簡易弾塑性解析により、(弾塑性モメントに等価な) 弾塑性曲げ応力  $\sigma_B = \pm 31.35\text{kgf/mm}^2$  に変換された。これは試験中にほぼ一定値を保った定常荷重の実測値から計算された  $\sigma_B = \pm 31 \text{ kgf/mm}^2$  と良く一致する。



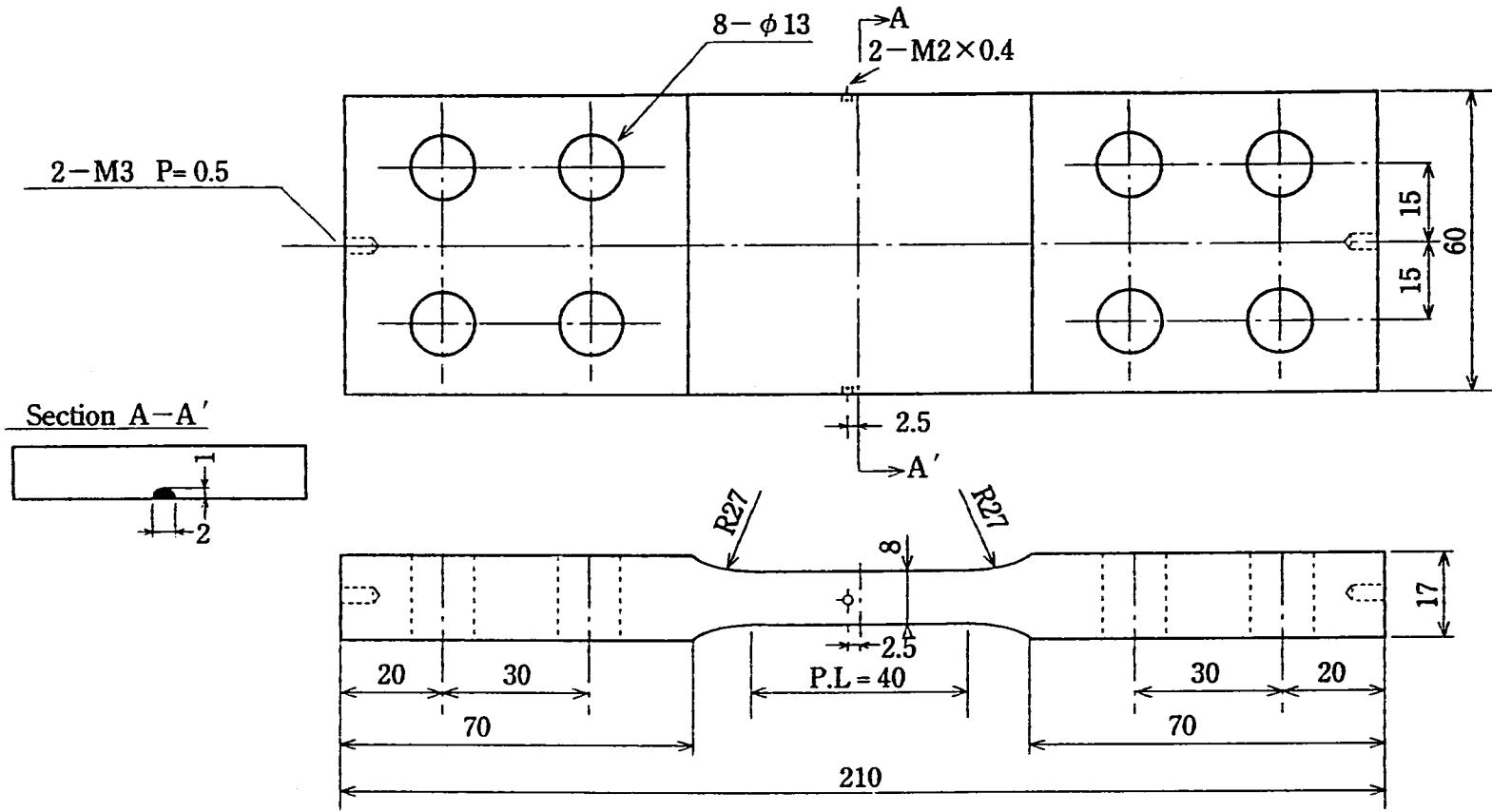
表4.13 試 験 条 件

Test condition

Material	Temperature (°C)	Stroke range $\Delta\delta$ (mm)	Hold time $t_H$ (h)	Wave pattern	TP. No.
SUS304	550	18.6 ( $\Delta\varepsilon=1.5\%$ )	5		FCCII-1
		10.3 ( $\Delta\varepsilon=0.8\%$ )			FCCII-2
		10.3 ( $\Delta\varepsilon=0.8\%$ )	0		FCCII-8
		7.1 ( $\Delta\varepsilon=0.53\%$ )			FCCII-7

Electrical potential GL = 2mm  
COD GL = 5mm

\*  $\delta < 0$  ; Crack opening direction



- 1 4 1 -

圖 4.1 3.1 試驗片形狀

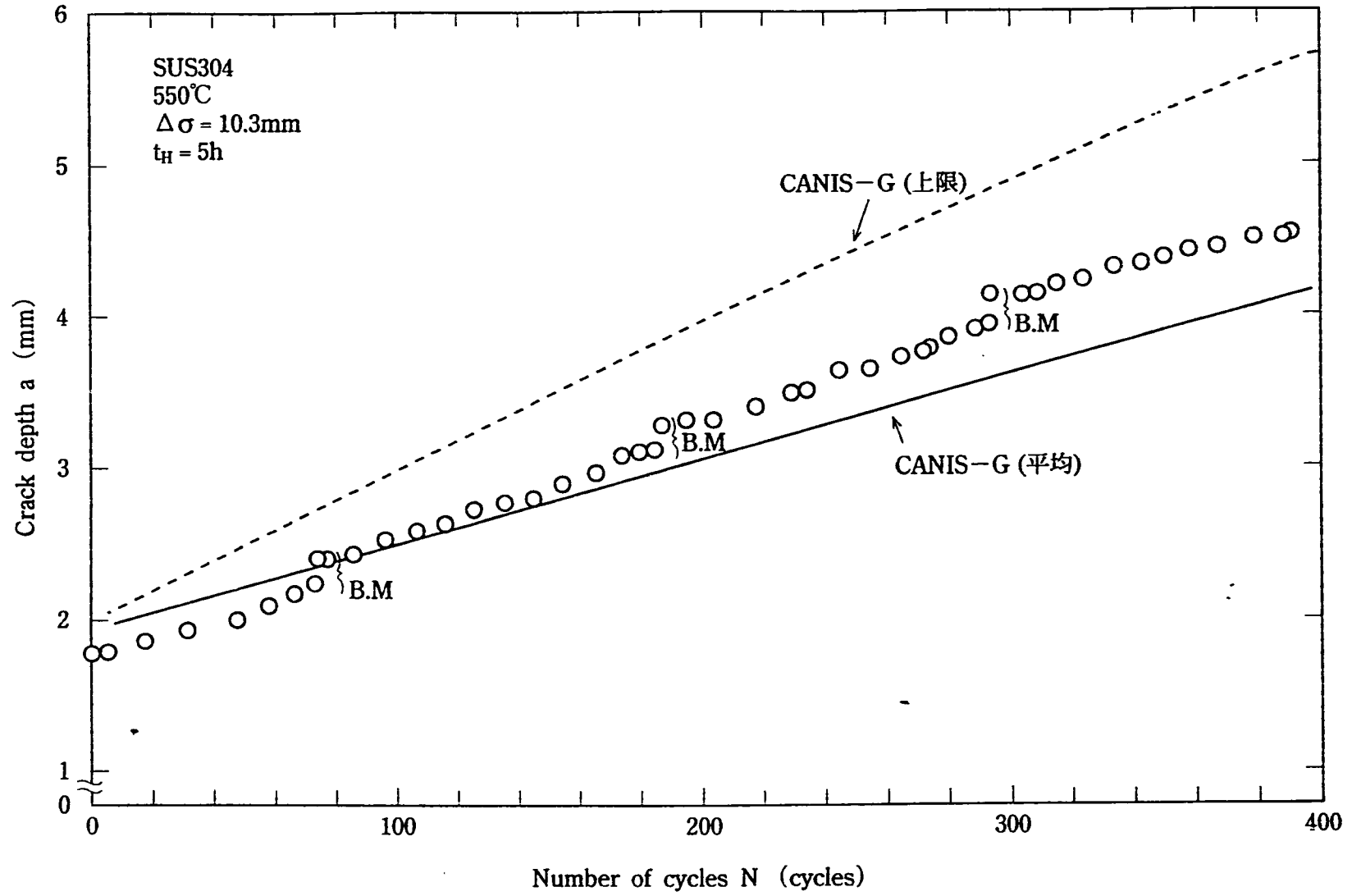


図4.13.2 き裂深さとサイクル数の関係

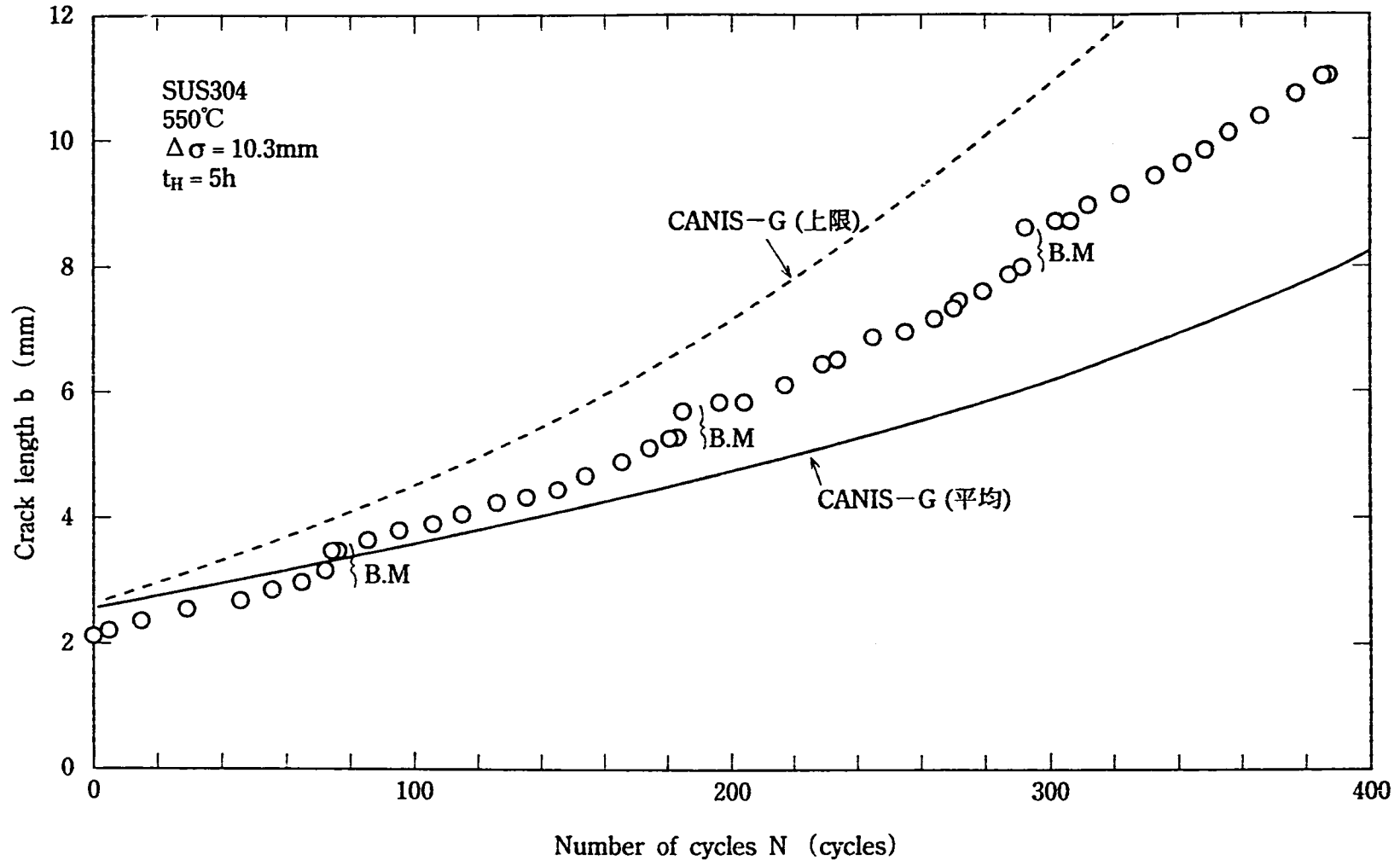


図 4.1 3.3 き裂半長とサイクル数の関係

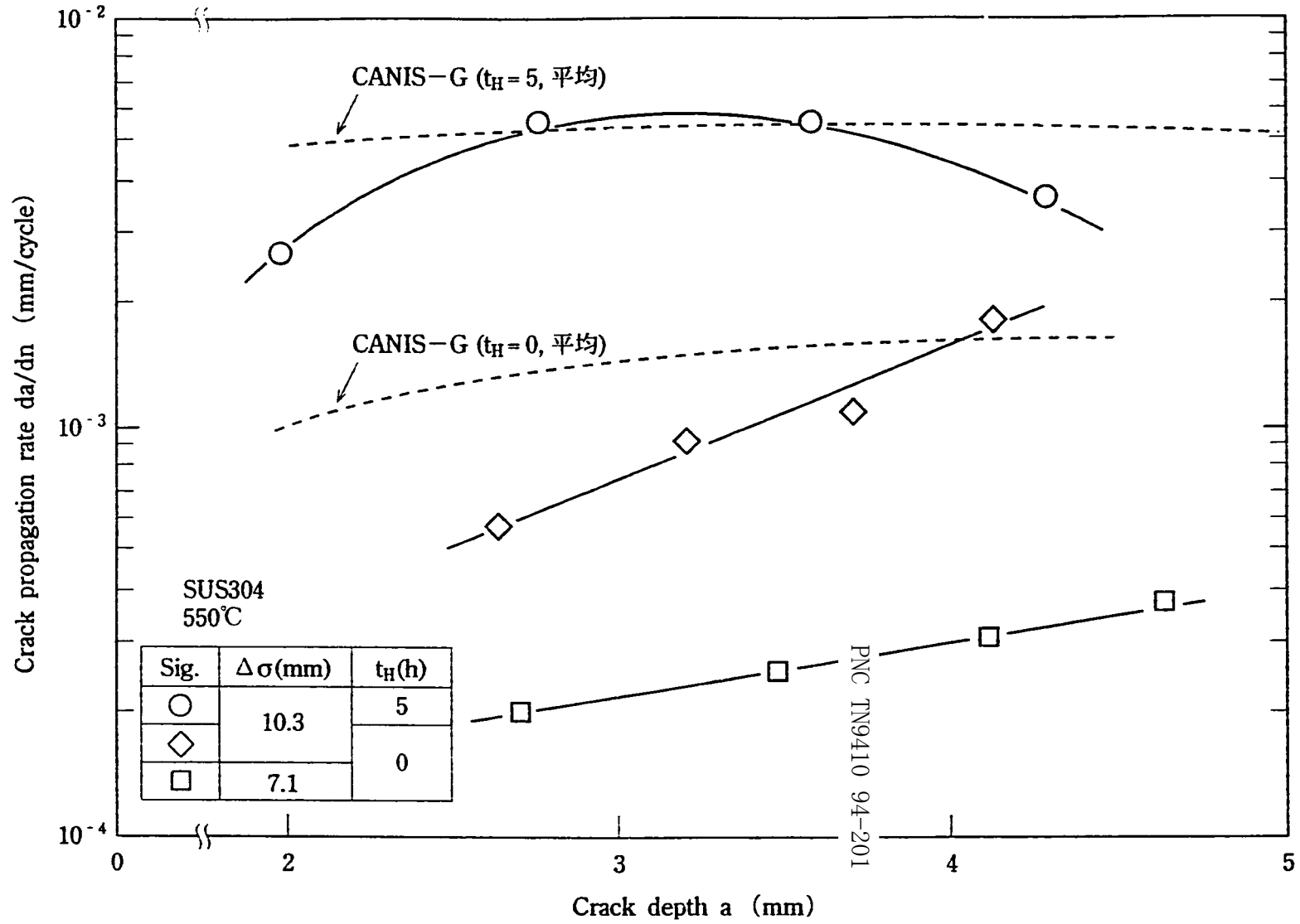


図4.13.4 き裂深さとき裂進展速度の関係

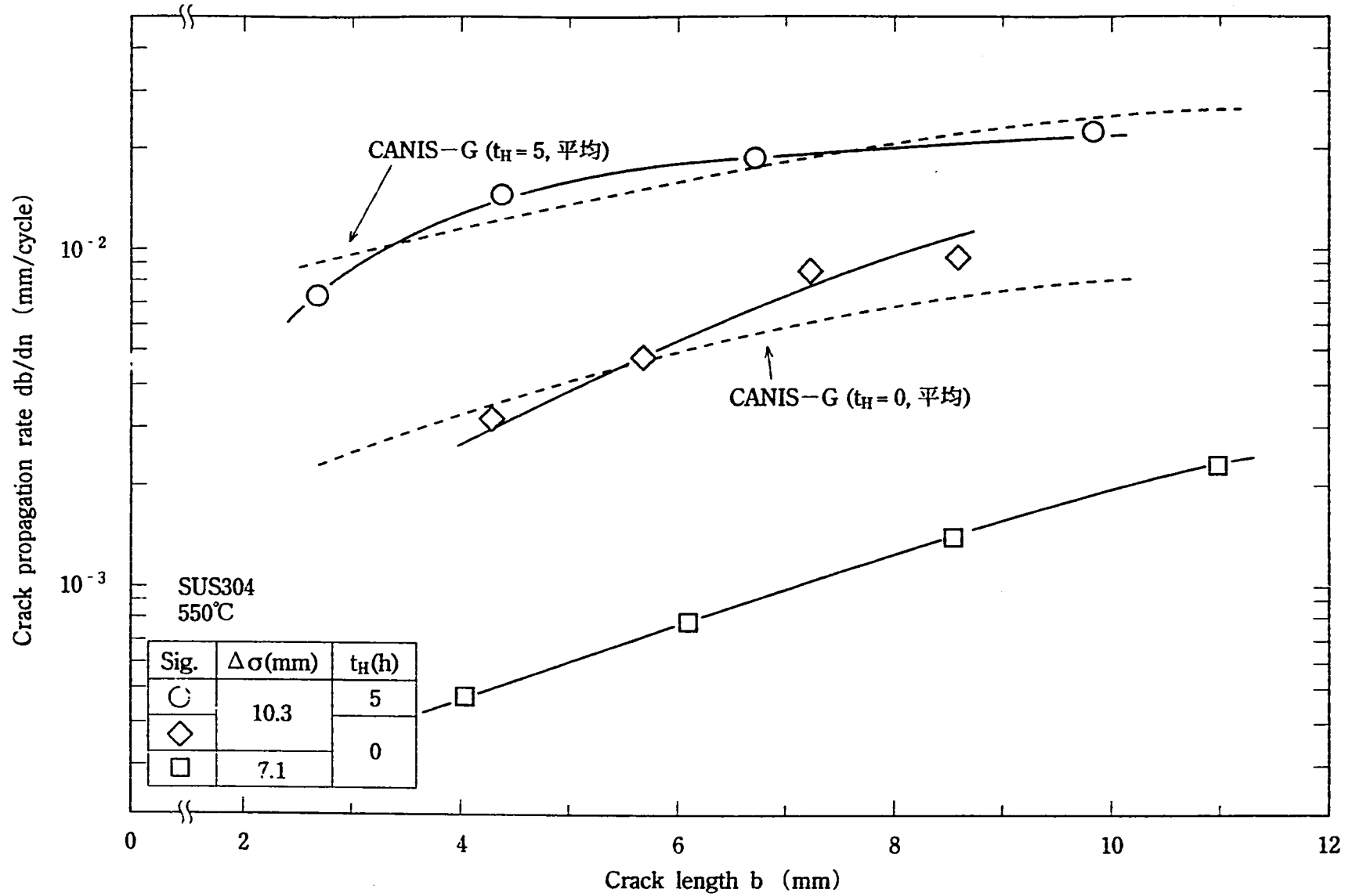


図4.13.5 き裂半長とき裂進展速度の関係

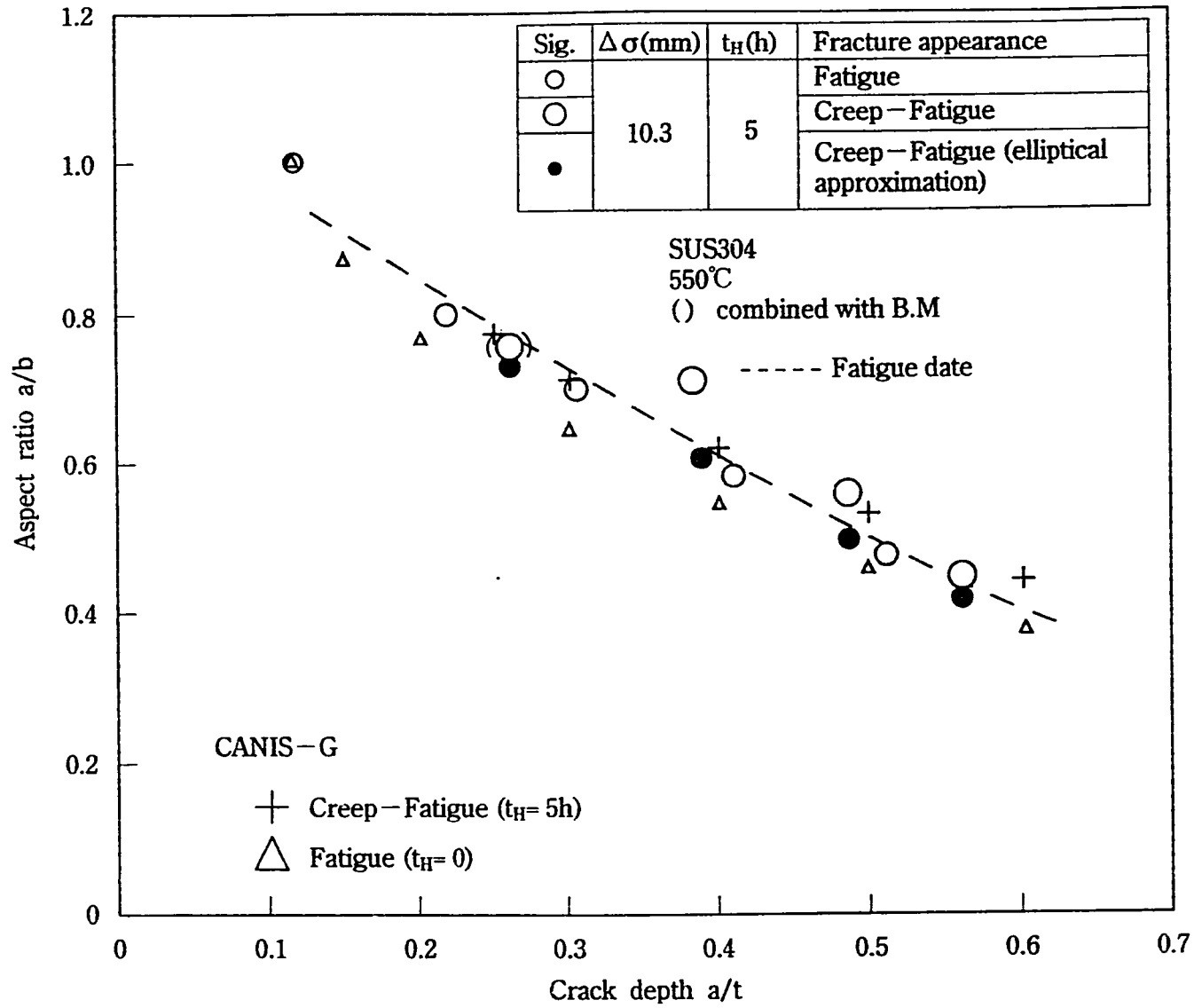


図4.13.6 き裂深さとアスペクト比の関係

## リスト4.13 解析例13の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.13-C, PLATE, DISP.CONT.BENDING, CREEP-FATIGUE, SHR
2  ¥ONT KDUMY<CRAC< FNS<SURF<EDGE<PENT<PEAK<  KDUMY      >
3  ¥        < PFNS  >< PSRM  >< PSRB  >< PC1   >< PC2   >
4  CONT      1      1
5           0.6667    0.0      1.0      0.2      0.2
6  ¥EOM NCRAC< RADI  >< THIC   >< AACR   >< BBCR   >< ATLIM  >< BWLIM  >
7  GEOM      30.0    8.0      2.0      2.62    0.9      0.9
8  ¥PSS KEPSS<IMAT<KDUM< TREF   >< ALPHY  >< SIGF   >(KEPSS=1,2, LIBRALY)
9  EPSS      2  304    550.0    1.0      40.0
10 ¥REP KCREP<IMAT<ICHR< A      >< N      >< M      > (KCREP=1, NORTON)
11 CREP      1           1.2527E-12  5.8128    1.0
12 ¥ATG KFATG< C1    >< M1     >< DTL1   >< C2     >< M2     >< DTL2   >
13 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
14 ¥RPG KCRPG< C1    >< M1     >< DTL1   >< C2     >< M2     >< DTL2   >
15 ¥RPG      1  0.1274    0.877
16 CRPG      1  0.2671    0.877
17 ¥VEN      LTYP>NEVN>LBAS>NTIN>< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  >
18 ¥        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
19 ¥C1      <KEY><KDUM< DTAV(J)>< QEP(J)  >< QC(J)   > (EVENT-J DATA)
20 ¥C2      < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
21 EVEN      0      1      0      1  1000.0    1.0      5.0
22           0.0      0.0      0.0      1.0
23           0      1.0      1.0      1.0
24           0.0      62.72    0.0      0.0      -62.72    0.0
25  END

```



## 4.14 解析例14 (解析例13の破壊力学パラメータ解析)

## (1) 解析対象

前節の保持時間 5hrのクリープ疲労き裂進展試験を対象とし、境界要素法 (BEM) および有限要素法 (FEM) コードによる弾塑性クリープ解析と破壊力学パラメータ評価が実施された (REF. 4.8)。解析ケースを表4.14.1に示す。BEMおよびFEM解析では、曲げひずみ+0.4%に相当する回転角を解析モデルの端部に単調増加で与え、端部を5hr保持した。回転角と曲げモメントの関係、回転角とJ積分値の関係、クリープJ積分値 $J_c$ の時間変化などが計算された。本節ではCANIS-Kによる破壊力学パラメータ計算を行い、BEMおよびFEMコードによる計算値と比較した。

## (2) CANIS-Kの解析条件

入力データをリスト4.14に示す。解析条件は前節と共通である。CANIS-Kでは、曲げひずみ+0.4%に相当する (弾性体仮定の) 曲げ応力 $S_B = 62.72\text{kgf/mm}^2$ を10ステップで単調増加で与えた後、11ステップ目に逆符号の $S_B = -62.72\text{kgf/mm}^2$ を与え、合計11ステップで1サイクルとした。1サイクルの周期を5hrとし、10ステップ目の最大応力時点で5hr保持されるとした。各ステップの弾塑性モメントに等価な曲げ応力 $\sigma_B$ が計算出力されるので、これを曲げモメントに換算し、BEMおよびFEMによる計算値と比較した。BEMおよびFEM解析結果のグラフにCANIS-Kの計算結果をオーバープロットしたが、原図の荷重パラメータである端部回転角はCANIS-Kの1~10ステップに等価である事に注意されたい。

表4.14.1 解析ケース

ケース番号	き裂深さ	き裂半長	担当機関	解析コード
1	2.0 mm	2.62 mm	BHK	BEM社内コード
2	3.0 mm	4.91 mm	IHI	MARC-K2
3	3.5 mm	6.38 mm	東芝	FINAS
4	4.0 mm	8.18 mm	三菱	MARC-K3
5	4.5 mm	10.55 mm	IHI	MARC-K2

## (3) ケース 1 解析結果

端部回転角と曲げモメントの関係を図4.14.1に示す。端部回転角と J 積分値の関係を図4.14.2に示す。クリープ J 積分値の時間変化を図4.14.3に示す。

## (4) ケース 2 解析結果

端部回転角と曲げモメントの関係を図4.14.4に示す。端部回転角と J 積分値の関係を、FEMの仮想き裂進展法 (VCE) による計算結果と比較して、図4.14.5に示す。端部回転角と J 積分値の関係を、FEMの経路積分法による計算結果と比較して、図4.14.6に示す。クリープ J 積分値の時間変化を図4.14.7に示す。

## (5) ケース 3 解析結果

端部回転角と曲げモメントの関係を図4.14.8に示す。端部回転角と J 積分値の関係を図4.14.9に示す。クリープ J 積分値の時間変化を図4.14.10 に示す。

## (6) ケース 4 解析結果

き裂フロントに沿った J 積分値の分布を図4.14.11 に示す。クリープ J 積分値の時間変化を図4.14.12 に示す。

## (7) ケース 5 解析結果

端部回転角と曲げモメントの関係を図4.14.13 に示す。端部回転角と J 積分値の関係を、FEMの仮想き裂進展法 (VCE) による計算結果と比較して、図4.14.14 に示す。端部回転角と J 積分値の関係を、FEMの経路積分法による計算結果と比較して、図4.14.15 に示す。クリープ J 積分値の時間変化を図4.14.16 に示す。

## (8) き裂進展速度の評価

最大荷重時点の J 値、5hr 保持後の  $J_c$  値を表4.14.2に示す。 $\Delta J$  値および  $\Delta J_c$  値を表4.14.3に示す。ここで BEM および FEM 解析結果では次式により  $\Delta J$  値および  $\Delta J_c$  値を評価した。

$$\Delta J = 4 \times J \quad (4.19)$$

$$\Delta J_c = J_c (\text{at } t = t_{II}) \times t_{II} \quad (\text{保持時間、5hr}) \quad (4.20)$$

CANIS-K の  $\Delta J_c$  値は、(4.20) 式による値および  $J_c$  を時間区間  $t = 0 \sim t_{II}$  で忠実に数値積分した値の両方を示した。

これらの  $\Delta J$  および  $\Delta J_c$  を用いて、PNC の平均疲労き裂進展特性 (4.1b) 式および平均クリープき裂進展特性 (4.2b) 式によりき裂進展速度を計算した。CANIS-K では時間区間  $t = 0 \sim t_{II}$  で忠実に数値積分した  $\Delta J_c$  値を使用した。き裂進展速度は疲労き裂進展速度とクリープき裂進展速度の線形和として求めた。き裂深さ  $a$  とき裂進展速度  $da/dn$  の関係を図4.14.17 に示す。き裂半長  $b$  とき裂進展速度  $db/dn$  の関係を図4.14.18 に示す。

## リスト4.14 解析例14の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.14, DISP.CONT.BENDING, CREEP-FATIGUE, SHR, CANIS-K
2  %ONT      KDUMY<CRAC< FNS<SURF<EDGE<PENT<PEAK< KDUMY      >
3  %        < PFNS    >< PSRM   >< PSRB   >< PC1    >< PC2    >
4  CONT      1      1
5           0.6667    0.0      1.0      0.2      0.2
6  %EOM      NCRAC< RADI   >< THIC   >< AACR   >< BBCR   >< ATLIM  >< BWLIM  >
7  %        A(J)     B(J)     (FOR J=1,NCRAC)
8  GEOM      5  30.0    8.0      0.9      0.9
9           2.0      2.62
10          3.0      4.91
11          3.5      6.38
12          4.0      8.18
13          4.5      10.55
14  %PSS      KEPSS<IMAT<KDUM< TREF   >< ALPHY   >< SIGF   >(KEPSS=1,2, LIBRALY)
15  EPSS      2  304    550.0    1.0      40.0
16  %REP      KCREP<IMAT<ICHR< A      >< N      >< M      >(KCREP=1, NORTON)
17  CREP      1      1.2527E-12  5.8128  1.0
18  %ATG      KFATG< C1    >< M1     >< DTL1   >< C2     >< M2     >< DTL2   >
19  FATG      2  1.2022E-3  1.4435
20  %RPG      KCRPG< C1    >< M1     >< DTL1   >< C2     >< M2     >< DTL2   >
21  CRPG      1  0.1274  0.877
22  %VEN      TYPE>STEP>BASE>NINT>< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  >
23  %        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
24  %D1      <KEY><KDUM< TCYCL  >< QEP    >< QC     >(ONLY 1-CARD)
25  %D2      < SM.J   >< SB.J   >< SP.J   >(FOR J=1,NSTEP)
26  EVEN      1      11      0      1  1000.0  1.0      1.0
27           0.0      0.0      0.0      1.0
28           0      5.0      1.0      1.0
29           0.0      6.272  0.0      STEP-1
30           0.0      12.544  0.0      STEP-2
31           0.0      18.816  0.0      STEP-3
32           0.0      25.088  0.0      STEP-4
33           0.0      31.360  0.0      STEP-5
34           0.0      37.632  0.0      STEP-6
35           0.0      43.904  0.0      STEP-7
36           0.0      50.176  0.0      STEP-8
37           0.0      56.448  0.0      STEP-9
38           0.0      62.720  0.0      STEP-10 TENSION-PEAK
39           0.0      -62.720  0.0      STEP-11 COMPRESSION
40  END

```

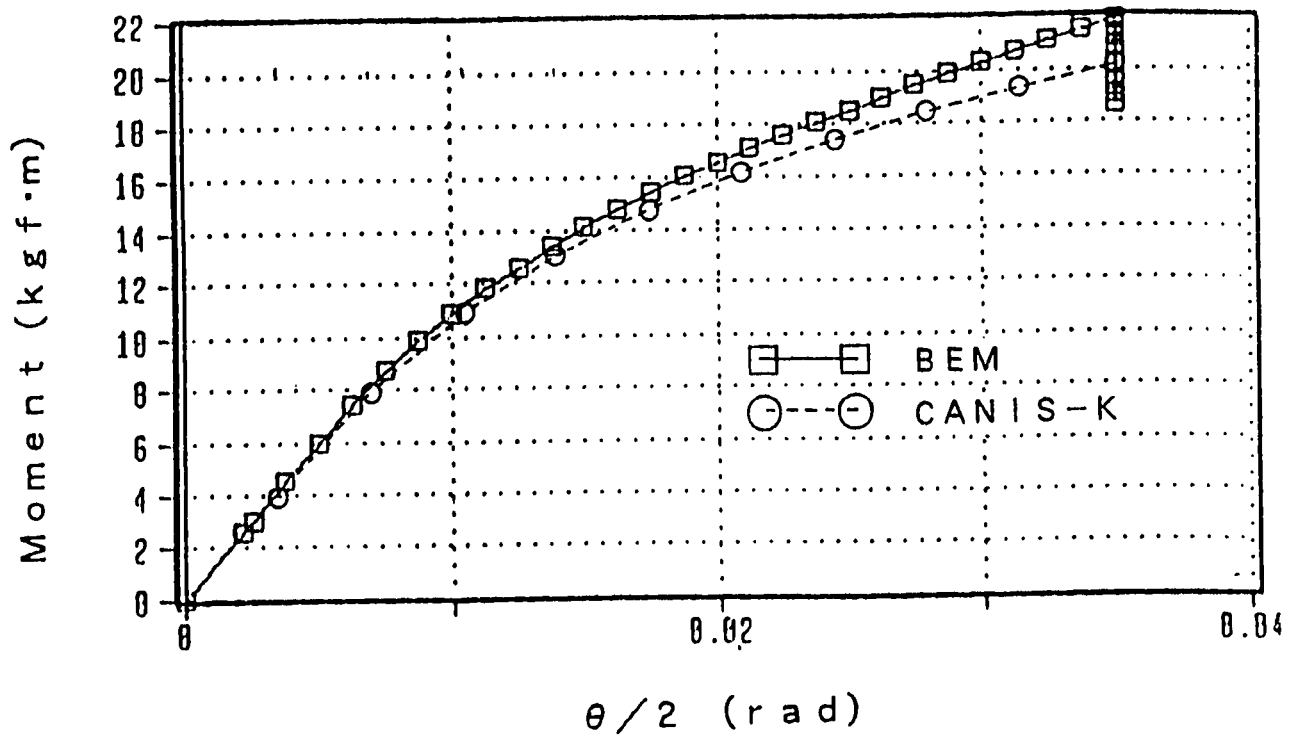
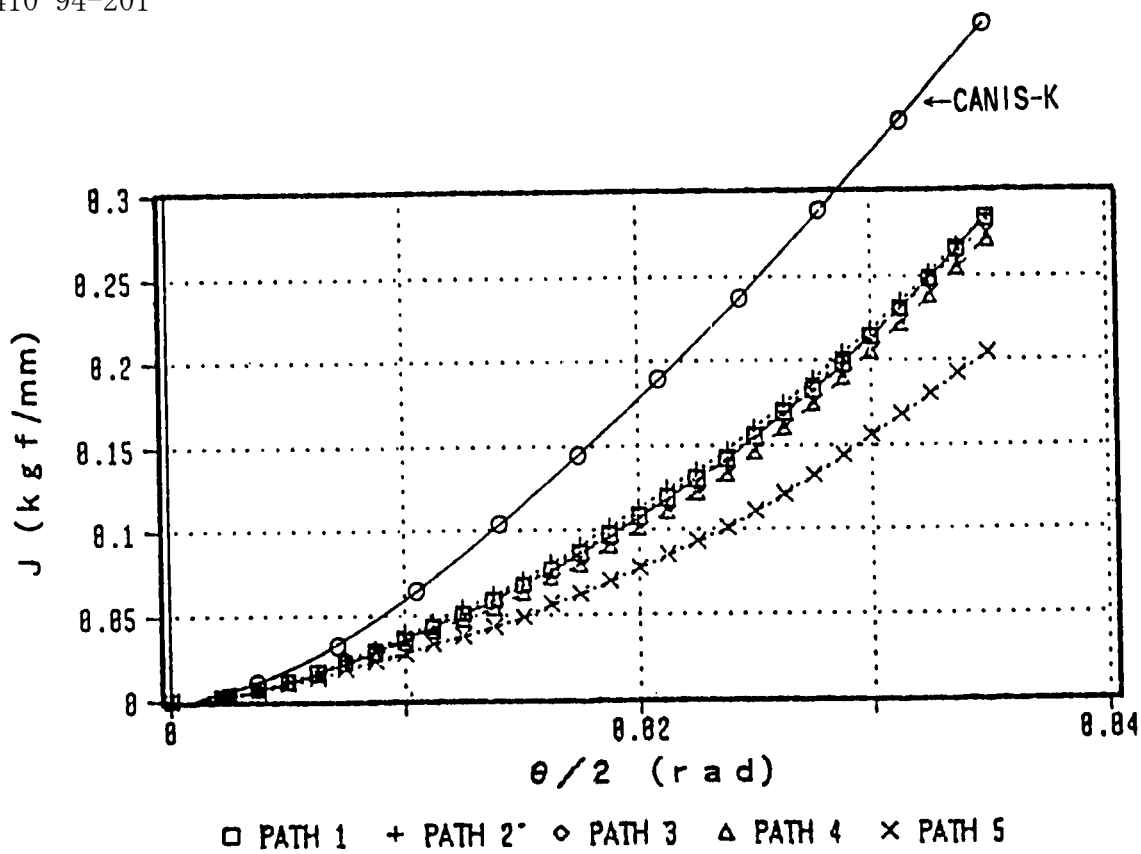
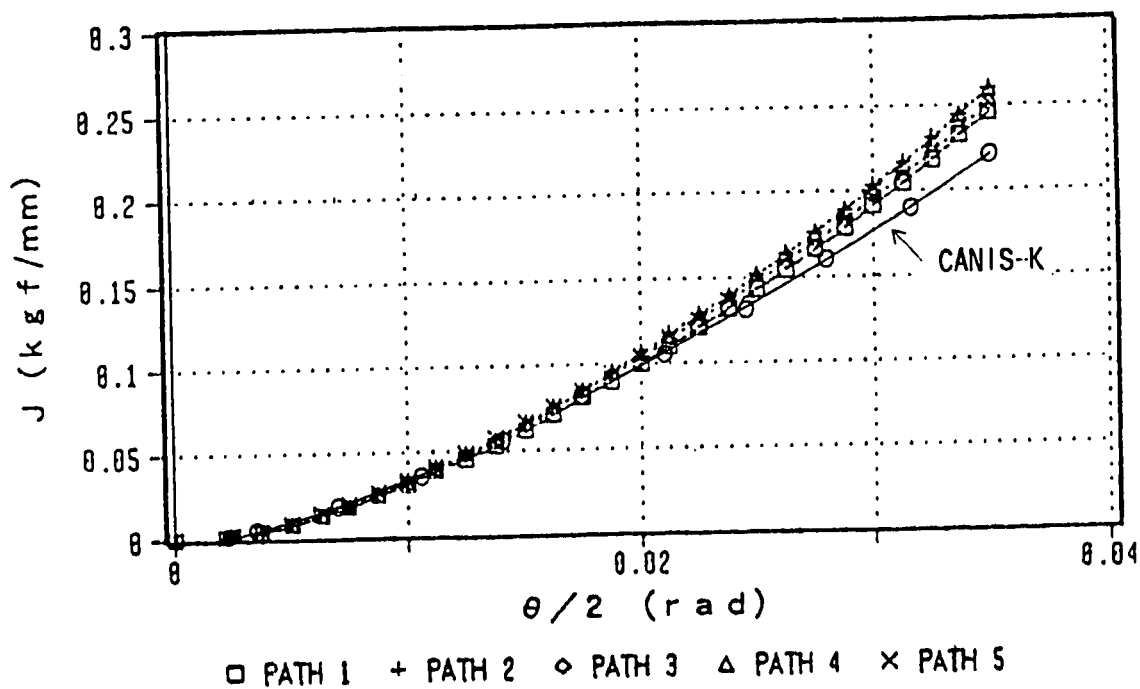


図4.14.1 端部回転角と曲げモメントの関係 (ケース1)

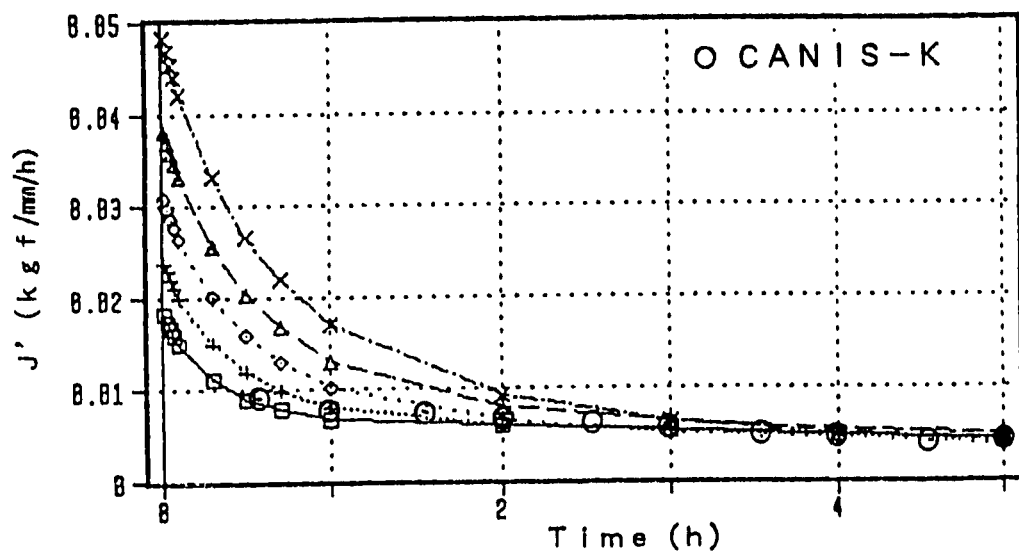


(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)



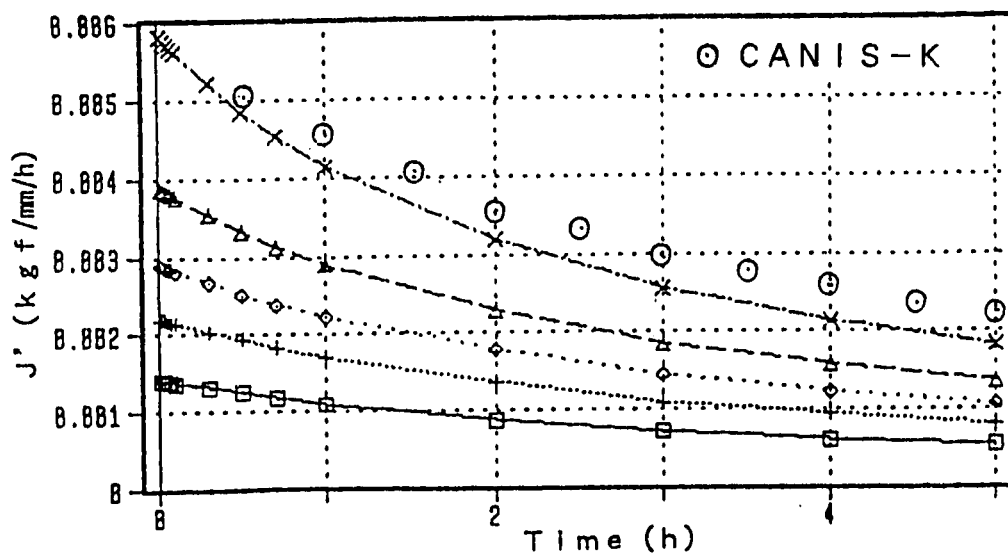
(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.2 端部回転角とJ値の関係 (ケース1)



□ PATH 1 + PATH 2 ◇ PATH 3 △ PATH 4 × PATH 5

(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)



□ PATH 1 + PATH 2 ◇ PATH 3 △ PATH 4 × PATH 5

(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.3  $J_c$  値の時間変化 (ケース1)

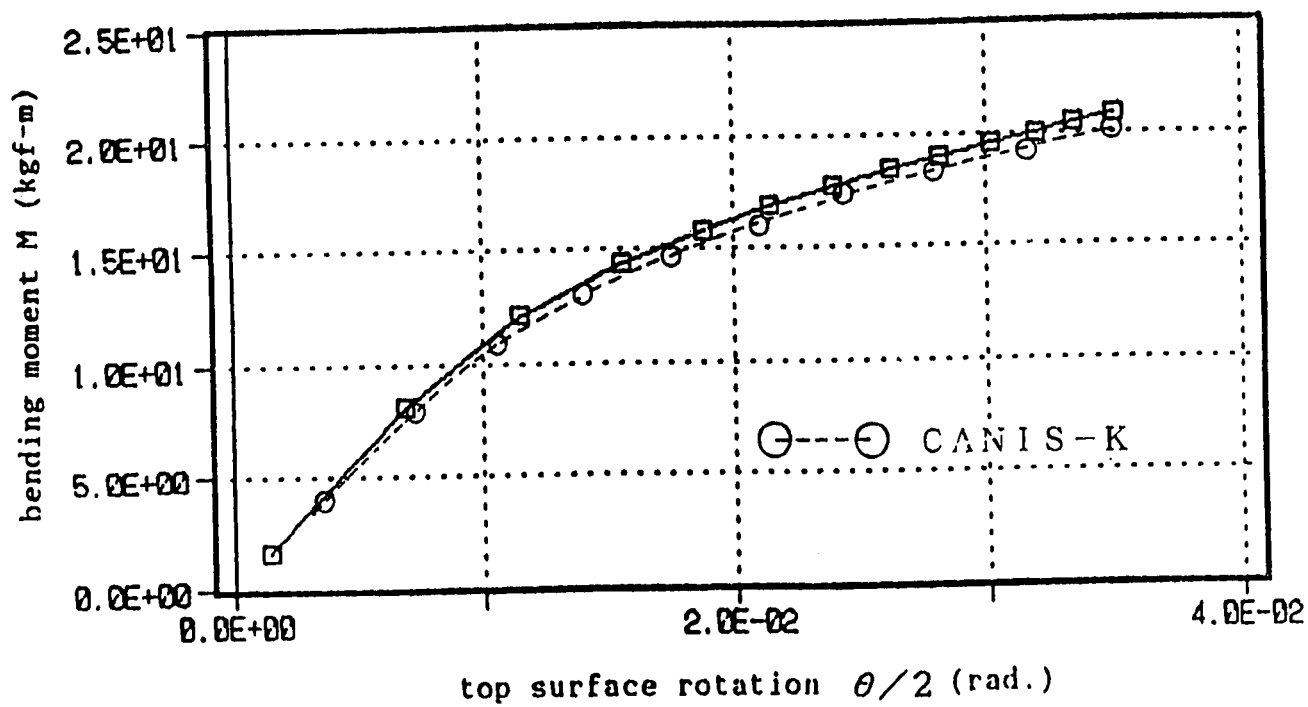
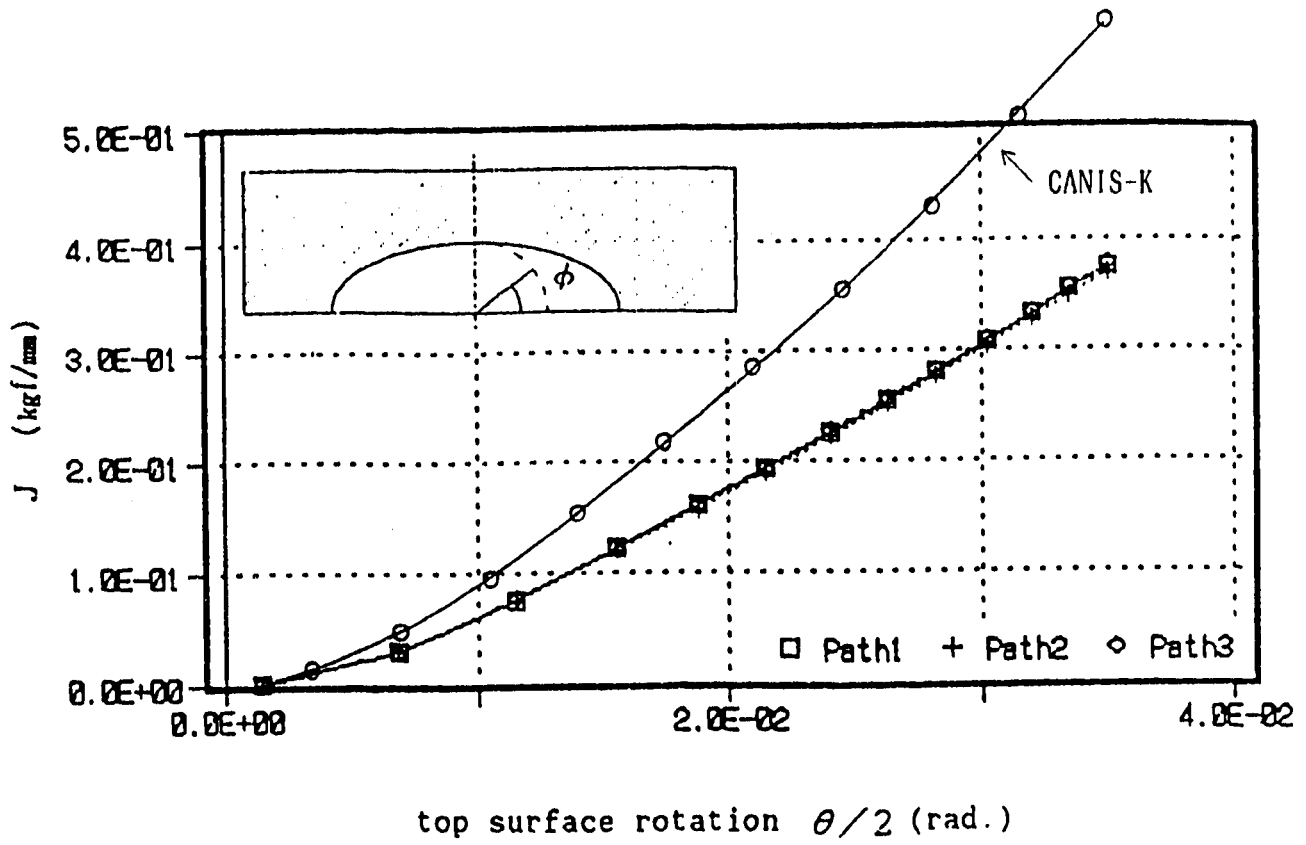
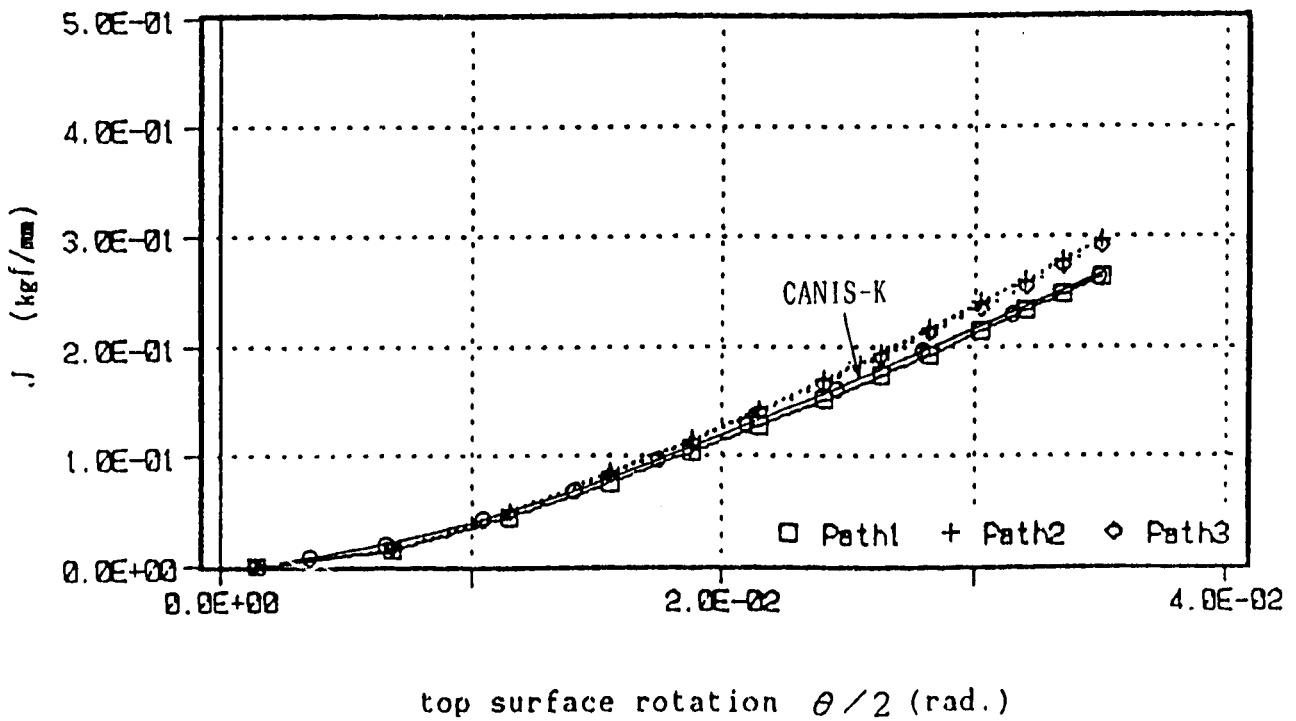


図4.14.4 端部回転角と曲げモメントの関係 (ケース2)



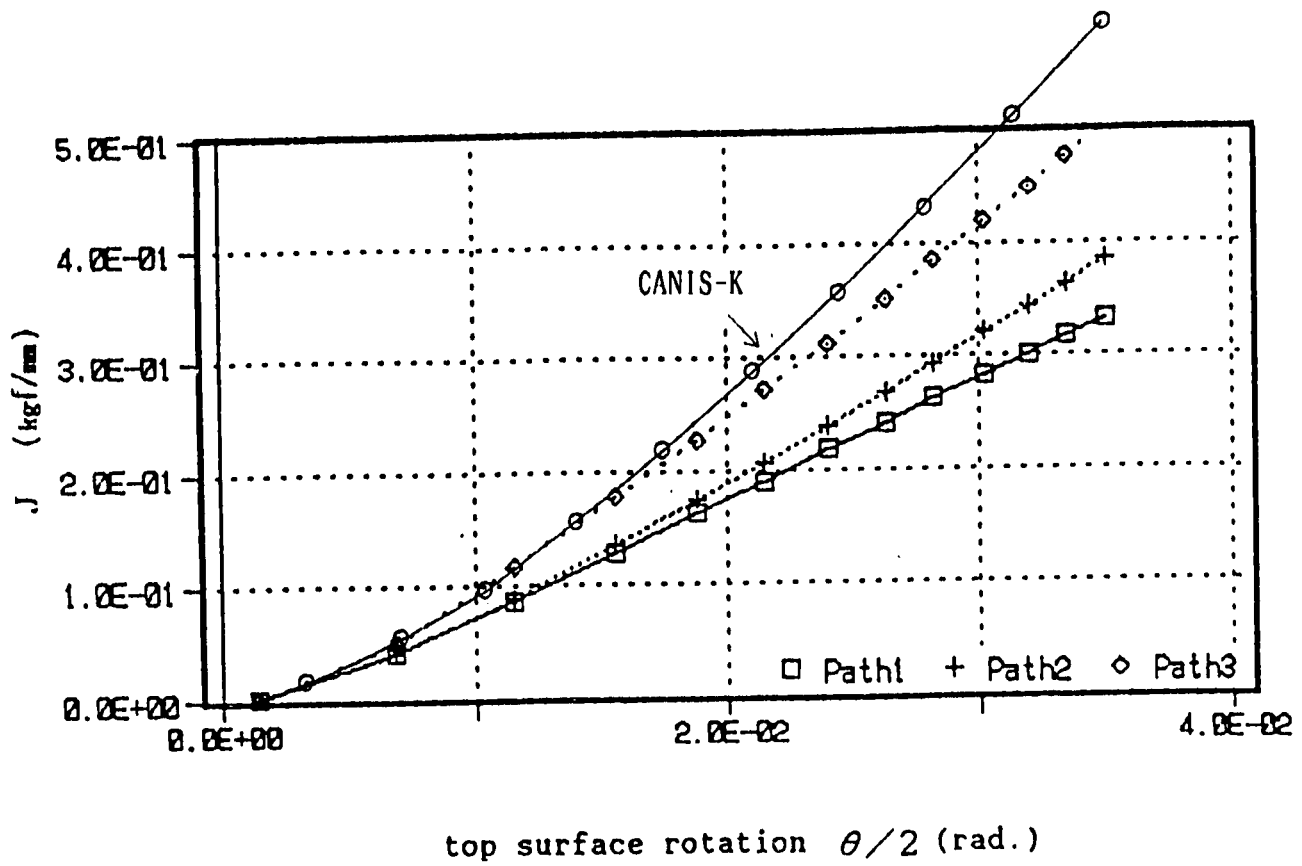
(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)



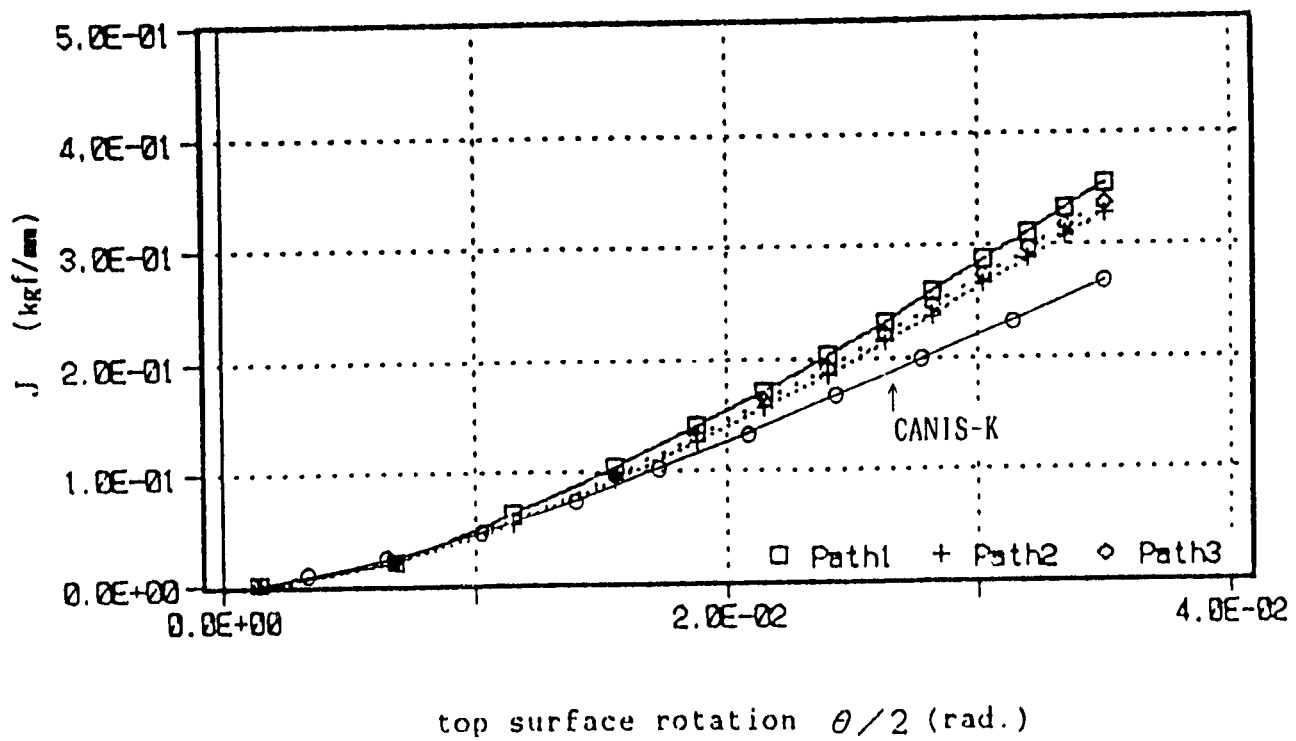
(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.5 端部回転角とJ値の関係(ケース2, VCE法)



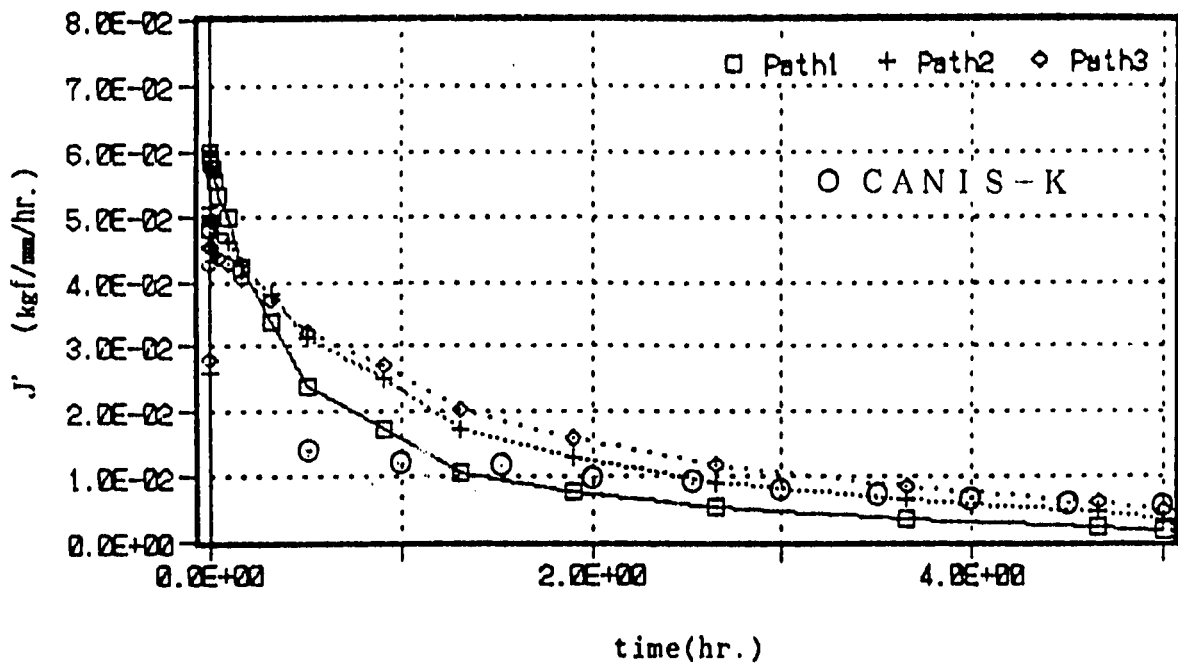


(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)

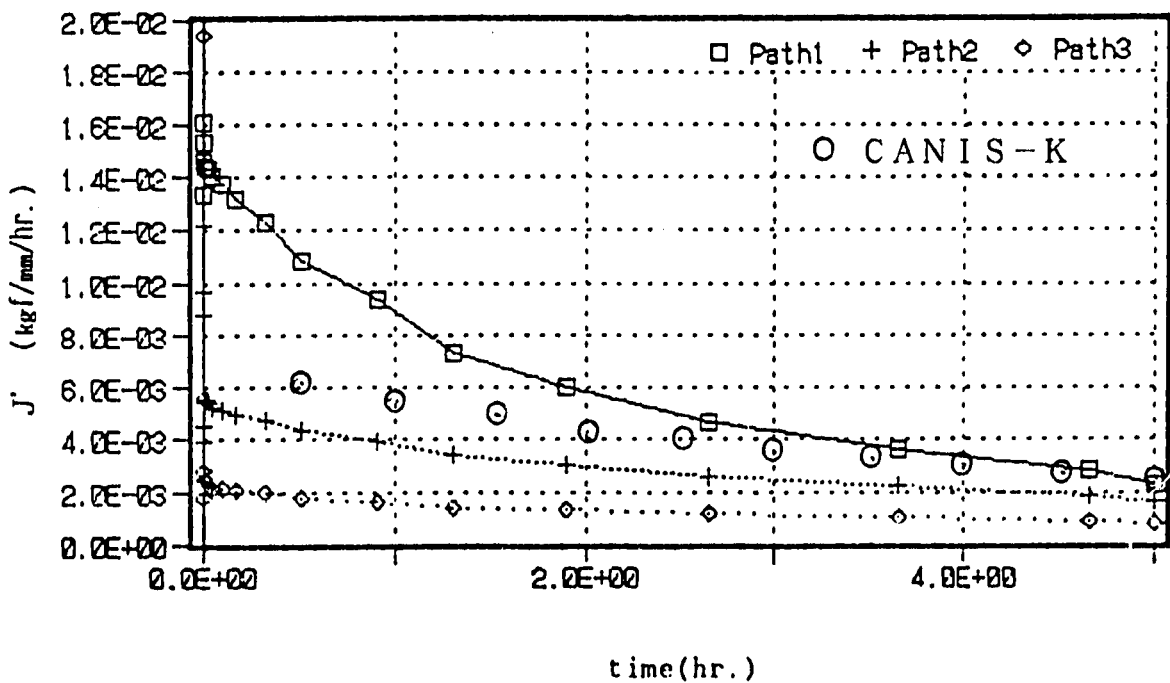


(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.6 端部回転角とJ値の関係 (ケース2, 経路積分法)



(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)



(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.7  $J_c$  値の時間変化 (ケース2)

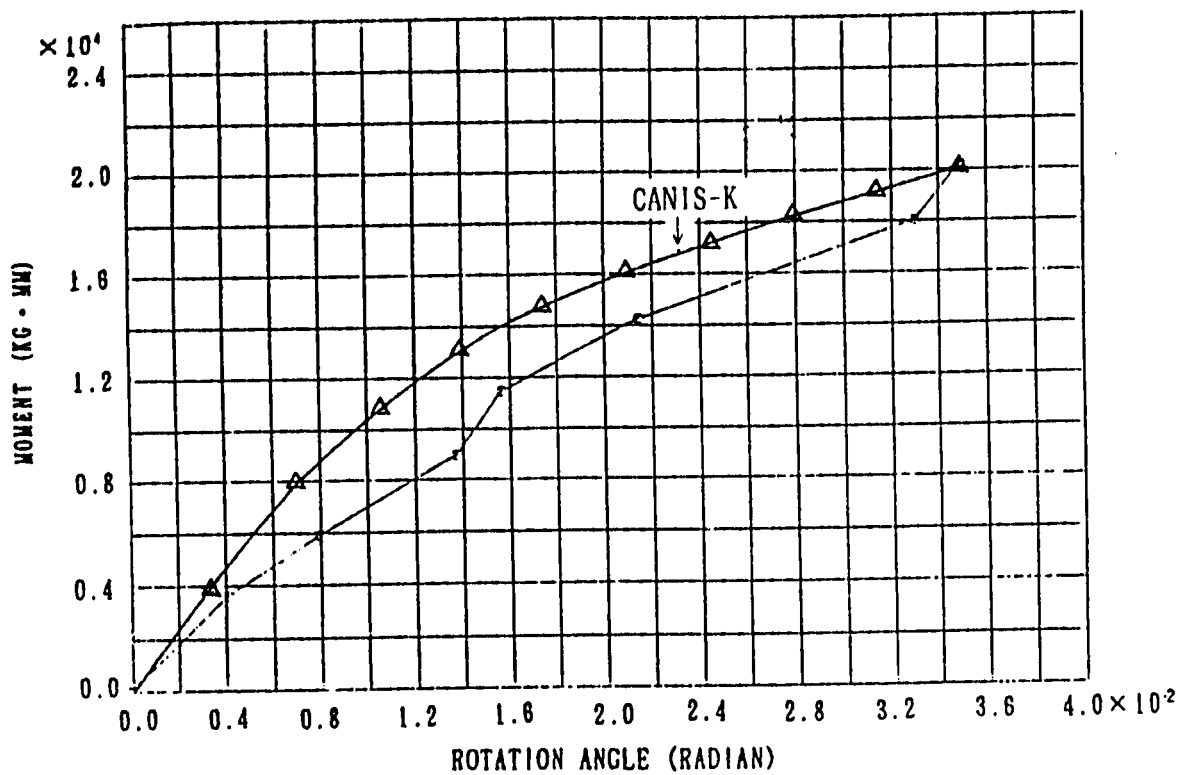
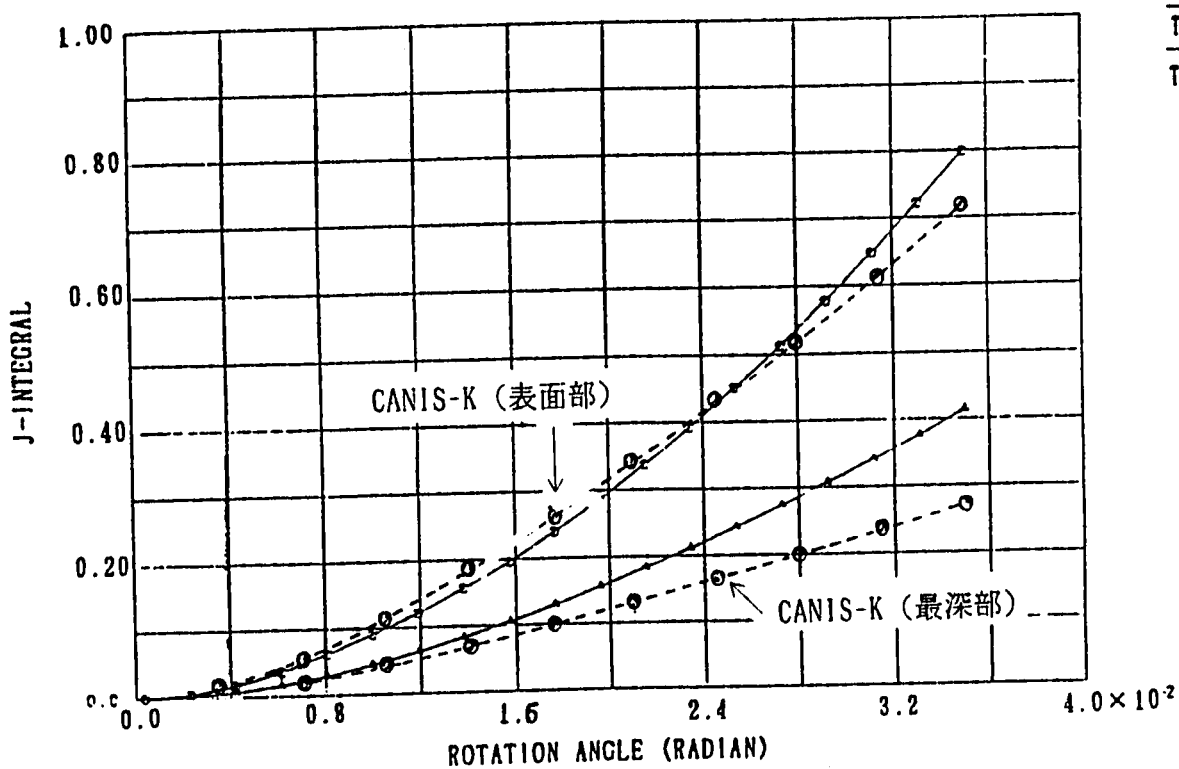
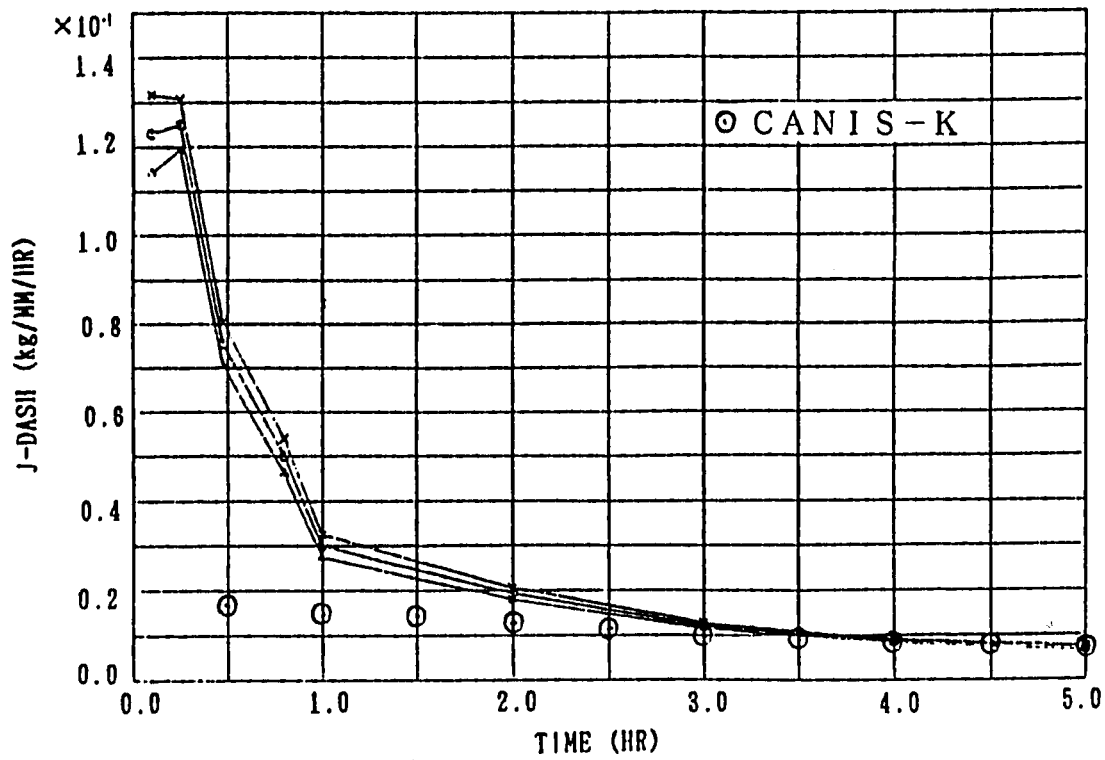


図4.14.8 端部回転角と曲げモメントの関係 (ケース3)



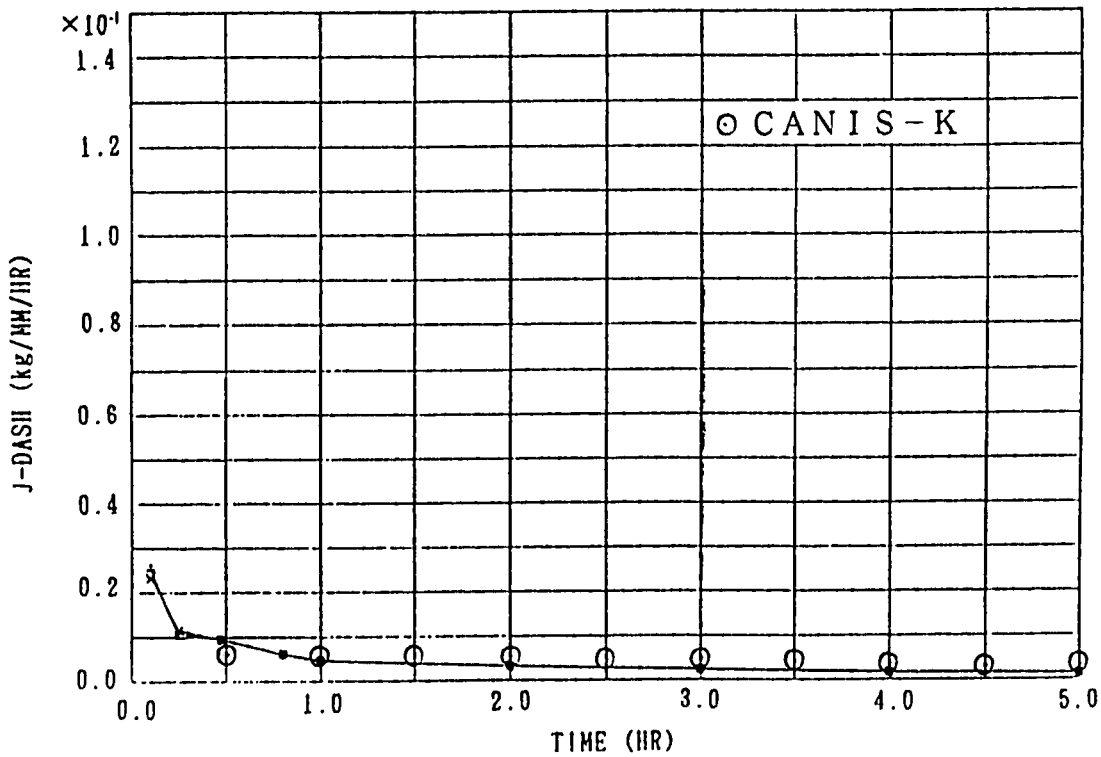
$\theta = 7.94$   
 $\theta = 86.86$

図4.14.9 端部回転角とJ値の関係 (ケース3)



a)  $\theta = 7.94$  (表面部)

AVERAGE  
PATH 1  
PATH 2



b)  $\theta = 86.86$  (最深部)

AVERAGE  
PATH 1  
PATH 2

図4.14.10 J<sub>c</sub> 値の時間変化 (ケース3)

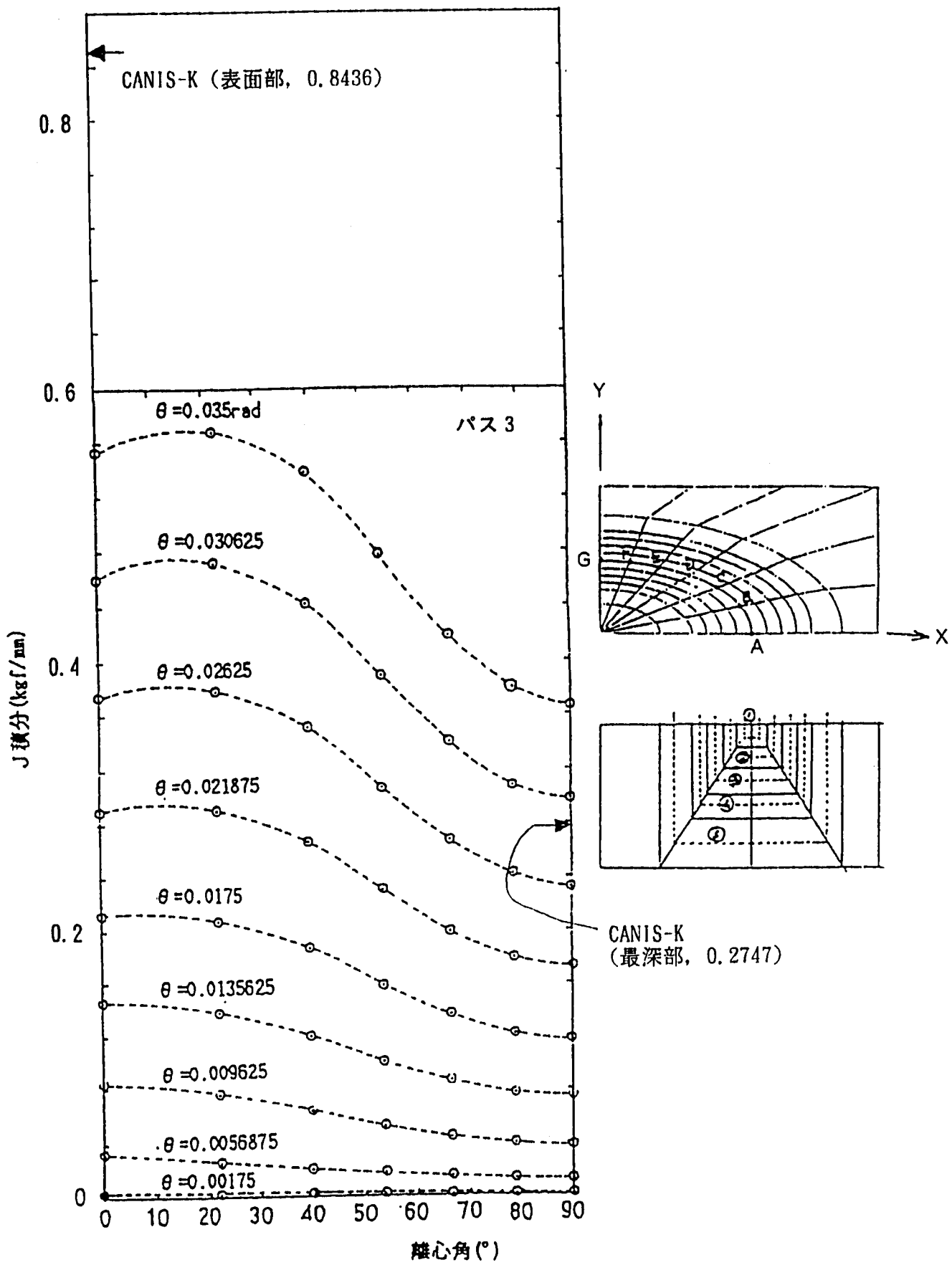
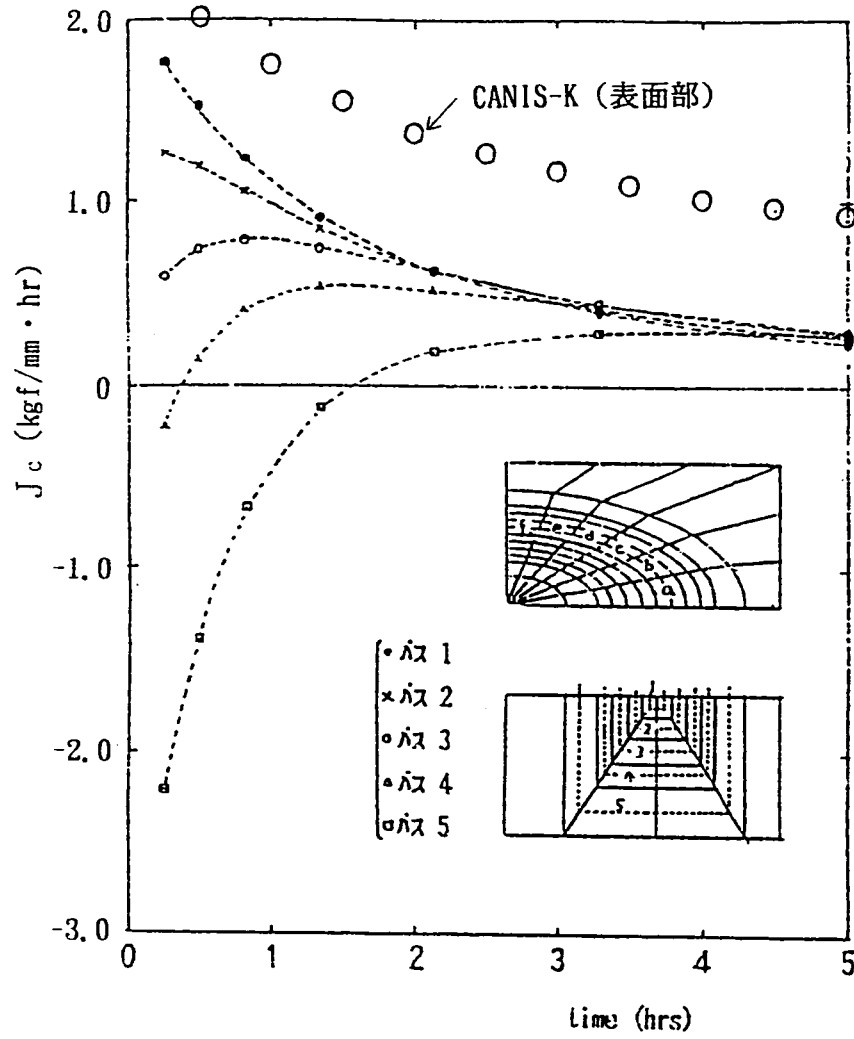
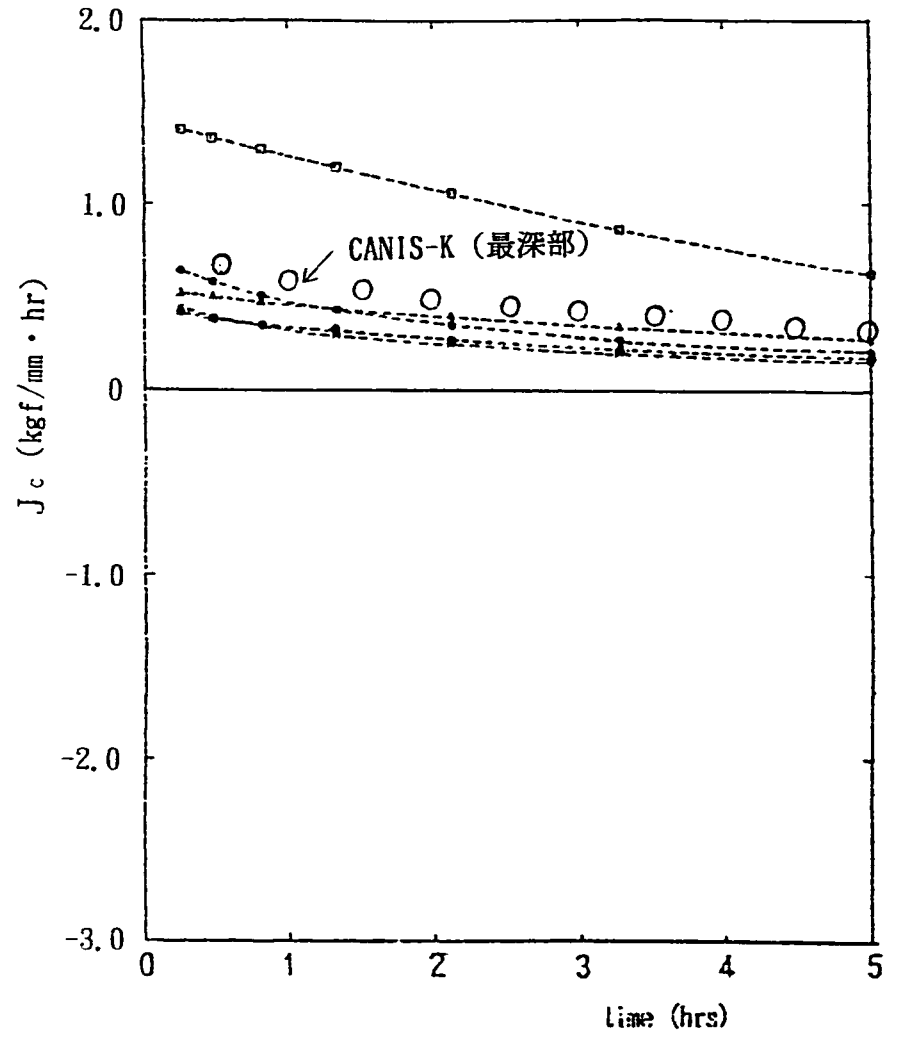


図4.14.11 き裂フロントに沿ったJ値の分布 (ケース4)



(a) at point a ( $\phi = 11.52^\circ$ )



(b) at point f ( $\phi = 84.24^\circ$ )

図4.14.12  $J_c$  値の時間変化 (ケース4)

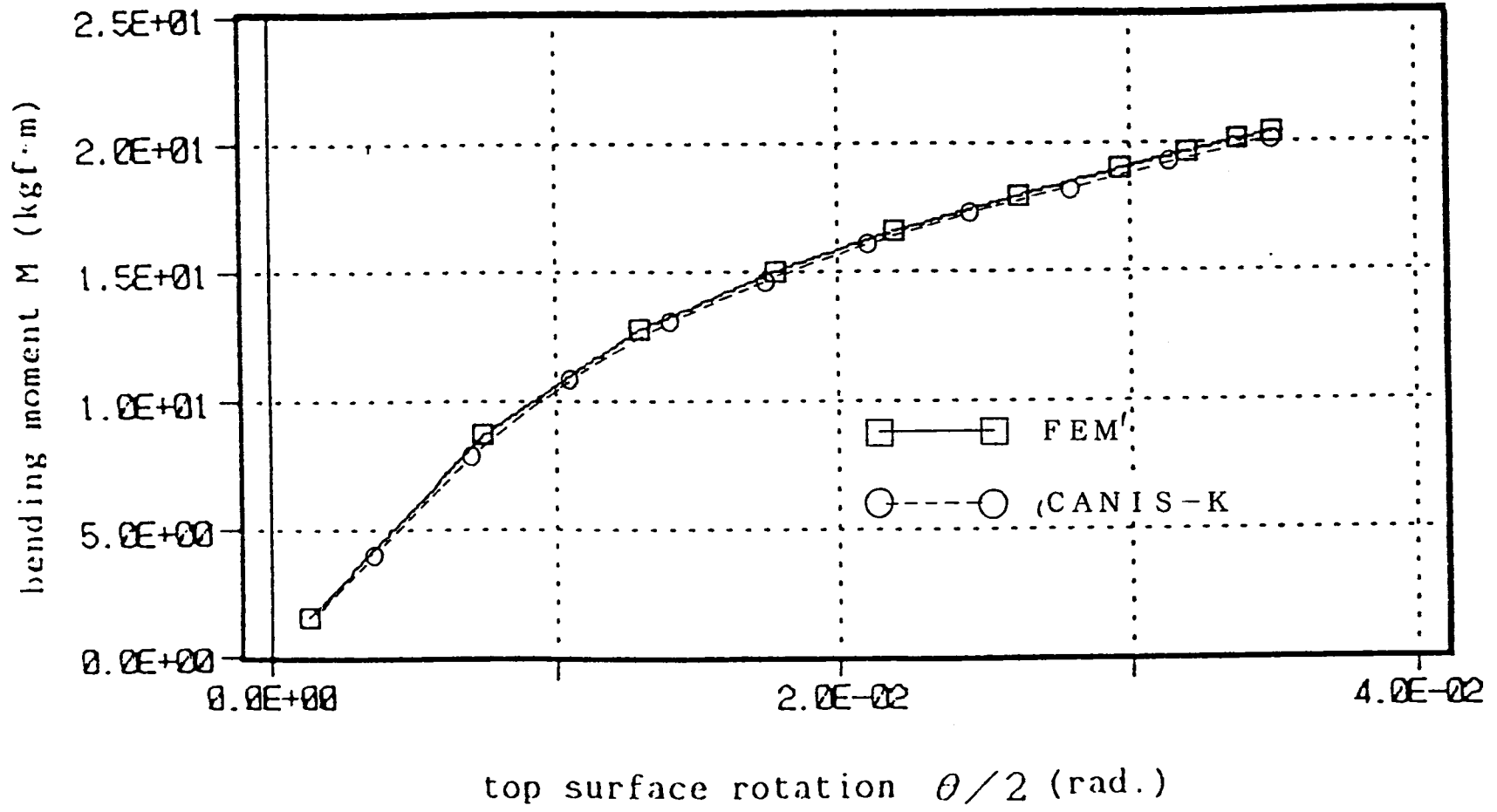
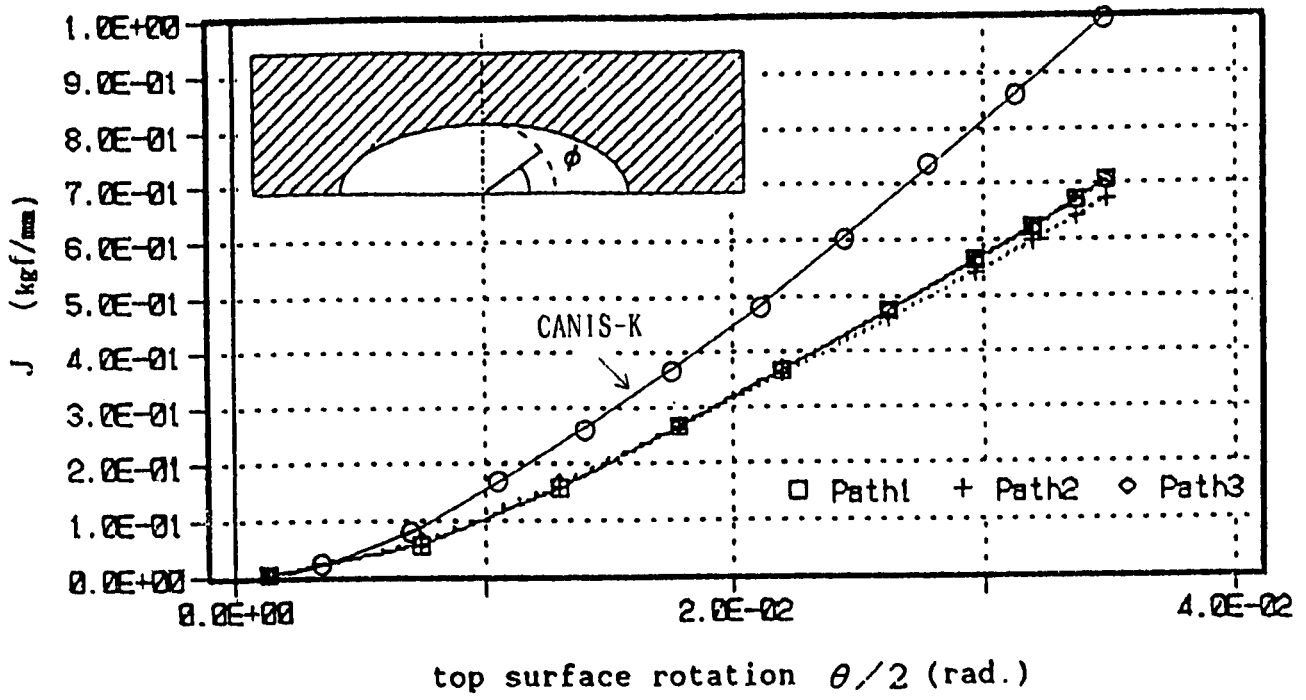
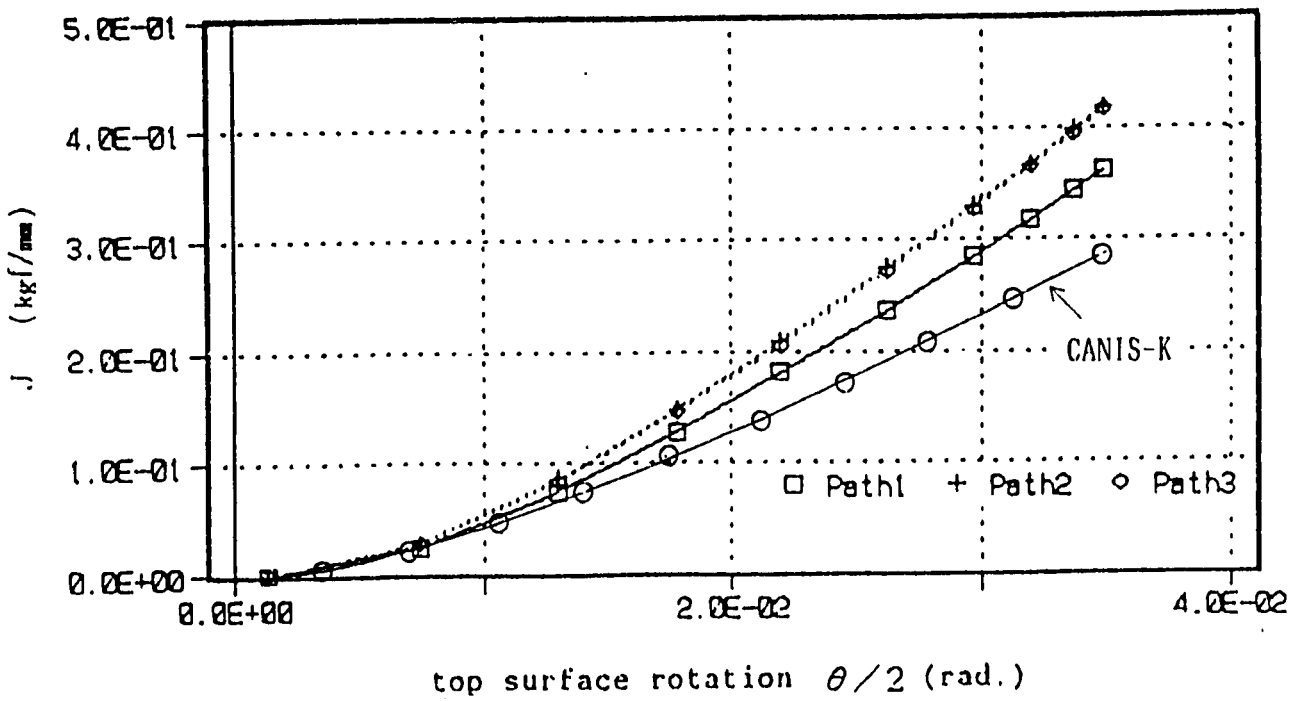


図4.14.13 端部回転角と曲げモメントの関係 (ケース5)



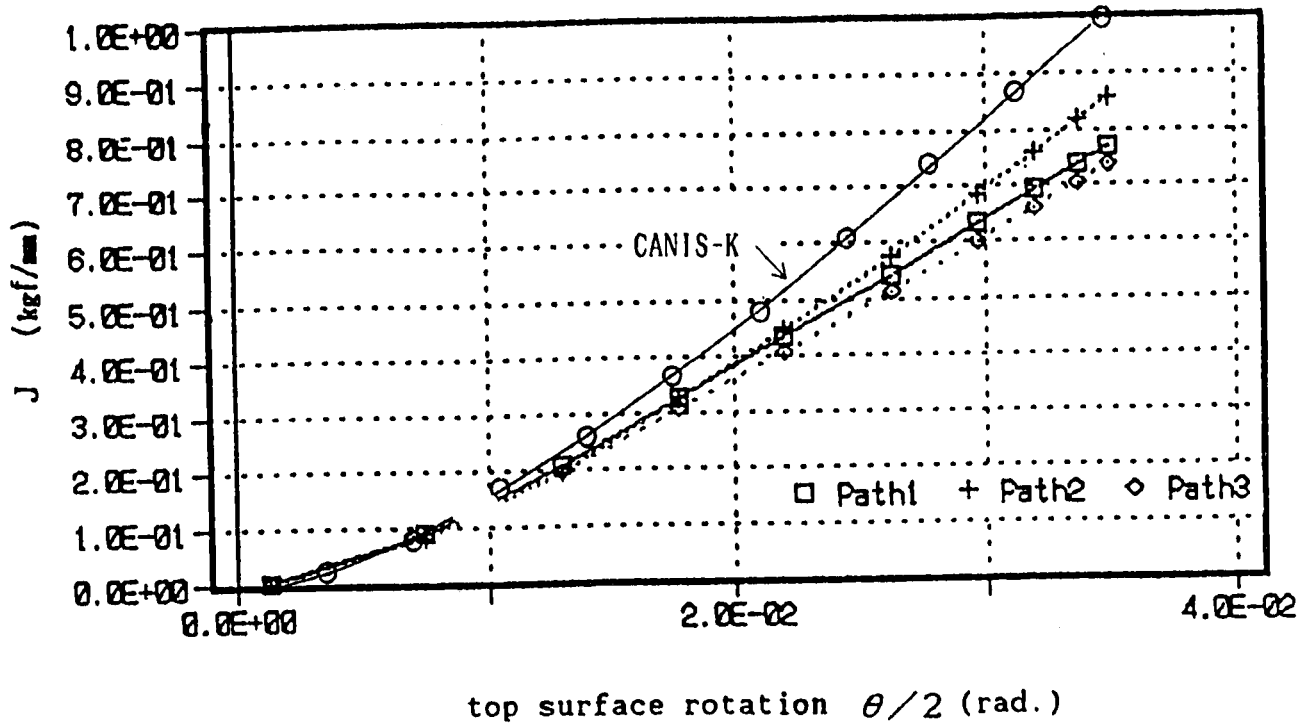
(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)



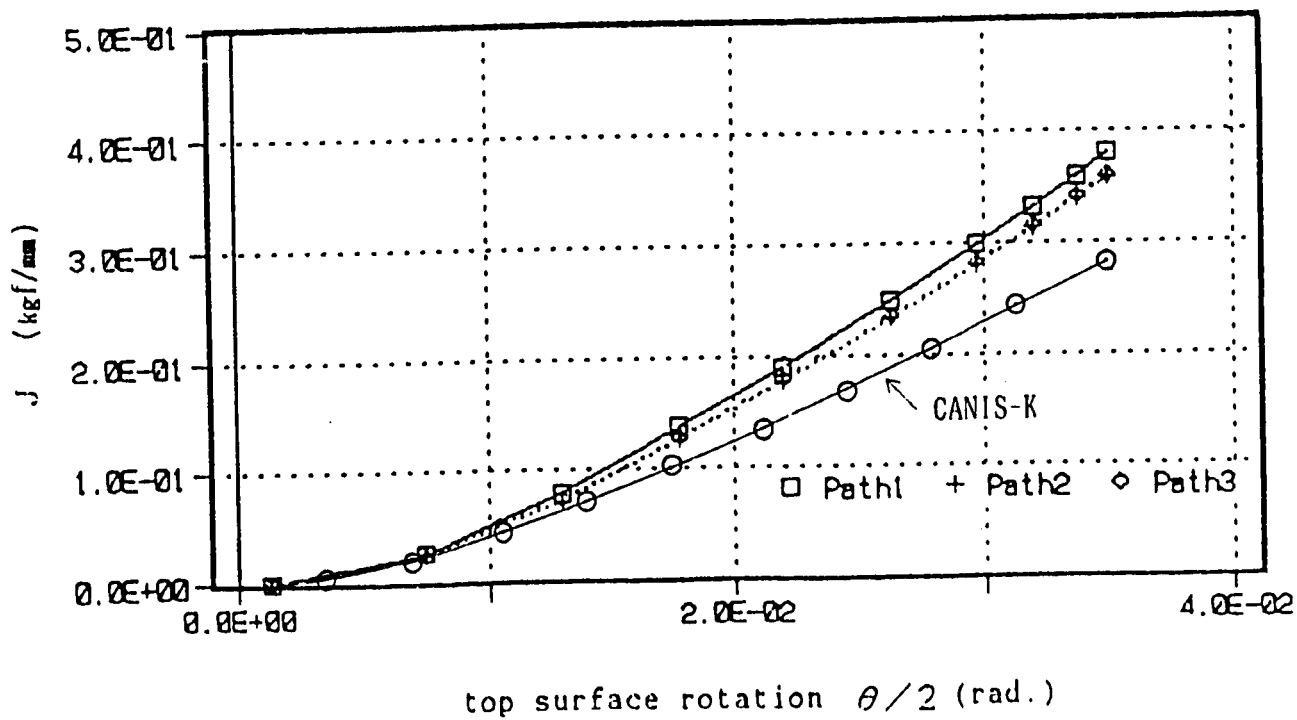
(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.14 端部回転角とJ値の関係 (ケース5, VCE法)



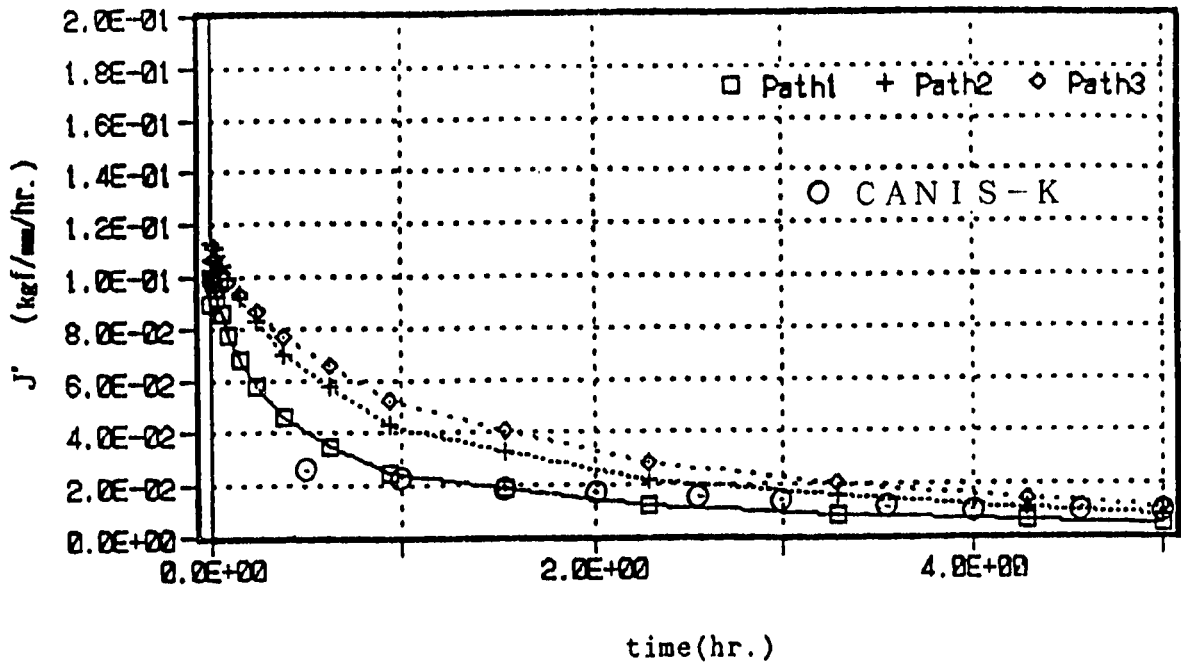


(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)

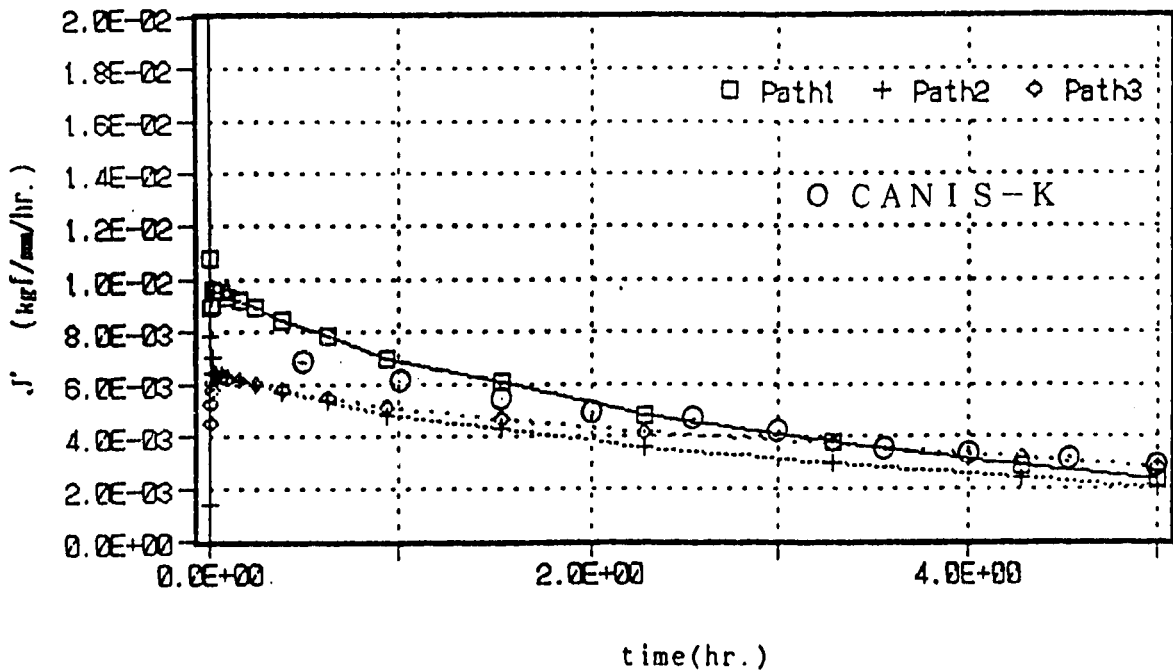


(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.15 端部回転角とJ値の関係 (ケース5, 経路積分法)



(a)  $\phi = 0^\circ$  (表面部)



(b)  $\phi = 90^\circ$  (最深部)

図4.14.16  $J_c$  値の時間変化 (ケース5)

表4.14.2 J 値および  $J_c$  値の比較

解析 ケー ス 番号	き裂 形状 a (mm) b (mm)	BEM or FEM		CANIS-K		注意事項
		J (kgf/mm)	$J_c$ (kgf/mm hr)	J (kgf/mm)	$J_c$ (kgf/mm hr)	
1	2.0	0.254	$1.17 \times 10^{-3} *$	0.2178	$2.192 \times 10^{-3}$	$J_c$ は経路積分値の最大値 と最小値の平均
	2.62	0.281	$4.27 \times 10^{-3} *$	0.3972	$3.996 \times 10^{-3}$	
2	3.0	0.284	$1.57 \times 10^{-3} *$	0.2614	$2.630 \times 10^{-3}$	$J_c$ は経路積分値の経路 1 ～経路 3 の平均値
	4.91	0.374	$3.45 \times 10^{-3} *$	0.5859	$5.895 \times 10^{-3}$	
3	3.5	0.413	$1.24 \times 10^{-3}$	0.2702	$2.718 \times 10^{-3}$	
	6.38	0.799	$3.79 \times 10^{-3}$	0.7060	$7.103 \times 10^{-3}$	
4	4.0	0.366	$2.20 \times 10^{-3} *$	0.2747	$2.930 \times 10^{-3}$	$J_c$ は経路積分値の最大値 と最小値を除く平均値
	8.18	0.548	$2.74 \times 10^{-3} *$	0.8436	$8.998 \times 10^{-3}$	
5	4.5	0.399	$2.40 \times 10^{-3} *$	0.2835	$2.852 \times 10^{-3}$	$J_c$ は経路積分値の経路 1 ～経路 3 の平均値
	10.55	0.695	$7.91 \times 10^{-3} *$	0.9903	$9.963 \times 10^{-3}$	

↑  $t = 5$  hr の値↑  $t = 5$  hr の値表4.14.3  $\Delta J$  値および  $\Delta J_c$  値の比較

解析 ケー ス 番号	き裂 形状 a (mm) b (mm)	BEM or FEM		CANIS-K		
		$\Delta J$ (kgf/mm)	$\Delta J_c$ (kgf/mm)	$\Delta J$ (kgf/mm)	$\Delta J_c$ (kgf/mm)	$\Delta J_c$ 積分値 (kgf/mm)
1	2.0	1.02	$5.85 \times 10^{-3}$	0.871	$1.096 \times 10^{-2}$	$1.767 \times 10^{-2}$
	2.62	1.12	$2.14 \times 10^{-2}$	1.589	$1.998 \times 10^{-2}$	$3.223 \times 10^{-2}$
2	3.0	1.14	$7.87 \times 10^{-3}$	1.046	$1.315 \times 10^{-2}$	$2.127 \times 10^{-2}$
	4.91	1.50	$1.73 \times 10^{-2}$	2.344	$2.948 \times 10^{-2}$	$4.766 \times 10^{-2}$
3	3.5	1.65	$6.20 \times 10^{-3}$	1.081	$1.359 \times 10^{-2}$	$2.201 \times 10^{-2}$
	6.38	3.20	$1.90 \times 10^{-2}$	2.824	$3.552 \times 10^{-2}$	$5.750 \times 10^{-2}$
4	4.0	1.46	$1.10 \times 10^{-2}$	1.099	$1.465 \times 10^{-2}$	$2.311 \times 10^{-2}$
	8.18	2.19	$1.37 \times 10^{-2}$	3.374	$4.499 \times 10^{-2}$	$7.098 \times 10^{-2}$
5	4.5	1.60	$1.20 \times 10^{-2}$	1.134	$1.426 \times 10^{-2}$	$2.389 \times 10^{-2}$
	10.55	2.78	$3.95 \times 10^{-2}$	3.961	$4.982 \times 10^{-2}$	$8.346 \times 10^{-2}$

↑ (2.19)式    ↑ (2.20)式

↑ (2.20)式

↑  $t = 0 \sim 5$  hr  
の数値積分

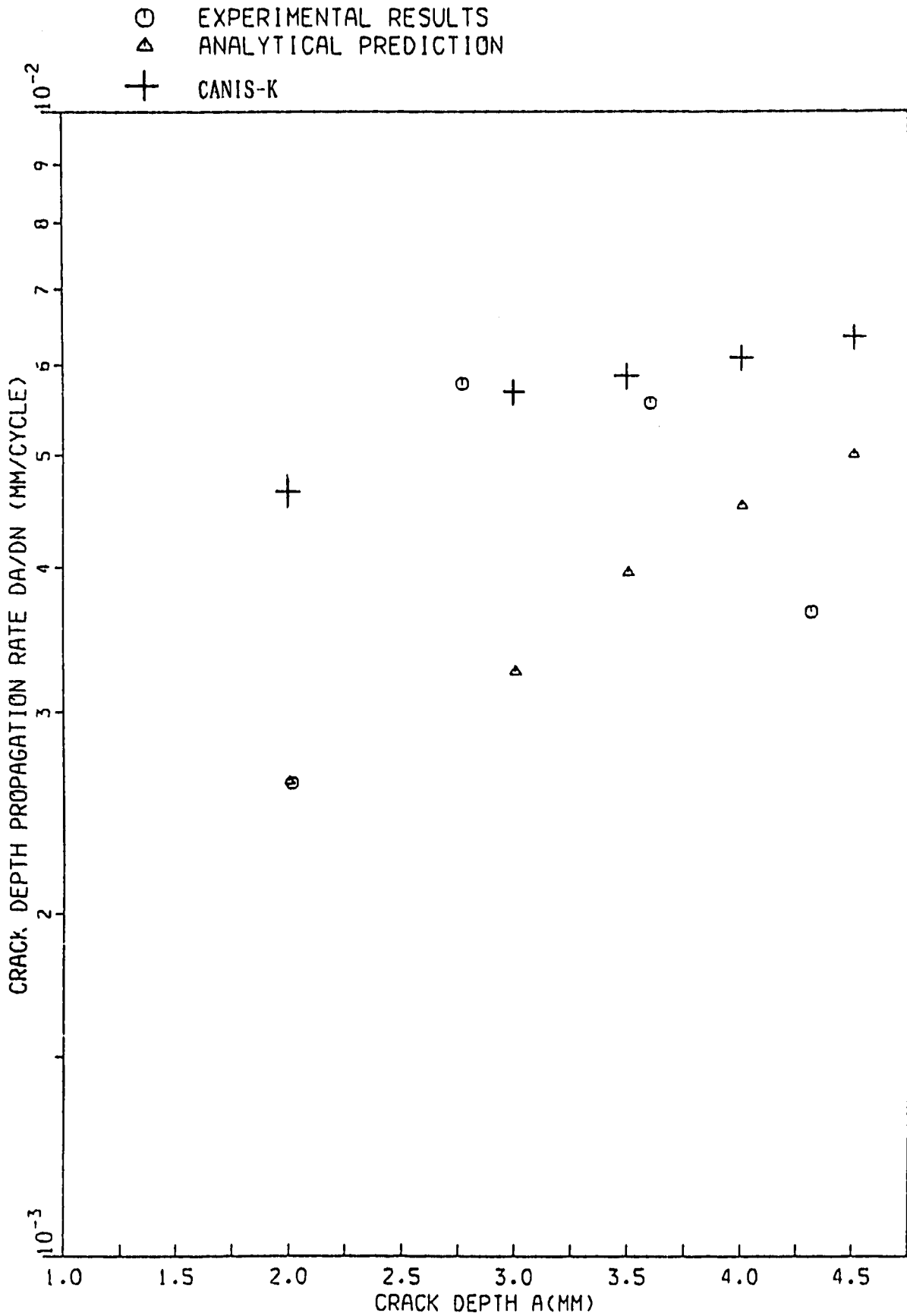


FIG. 4.7-2 CRACK PROPAGATION RATE VS. CRACK SIZE (DEPTH)

図4.14.17 き裂深さとき裂進展速度の関係

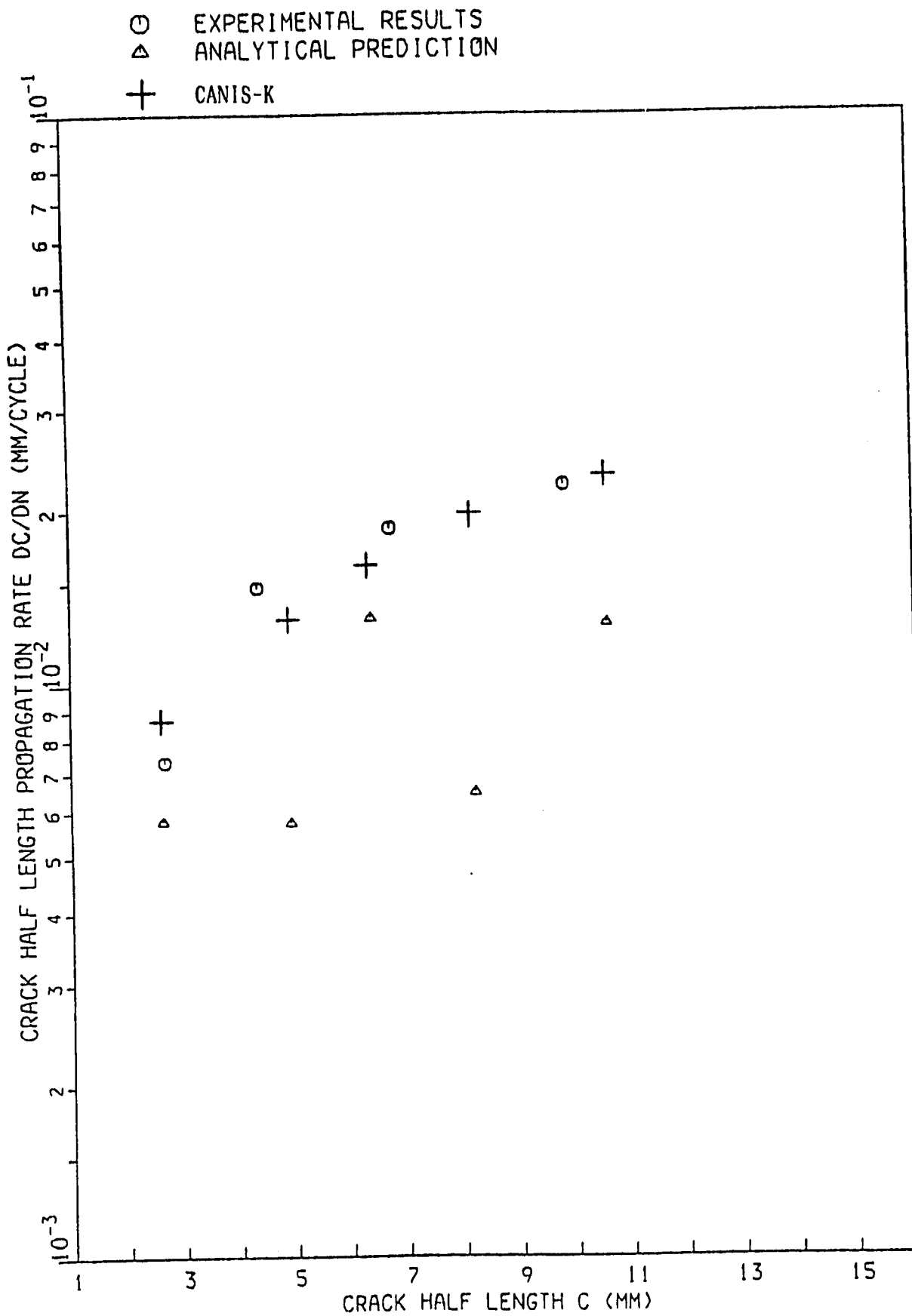


FIG. 4.7-3 CRACK PROPAGATION RATE VS. CRACK SIZE (HALF LENGTH)

図4.14.18 き裂半長とき裂進展速度の関係

## 4.15 解析例15 (外面周方向表面き裂付き円筒、クリープ疲労、荷重制御型の軸曲げ)

## (1) 解析対象

外面に周方向の表面き裂を有する円筒試験体(SUS304,  $R=71.6$ ,  $t=11.0$ )に完全両振り荷重制御型の4点曲げにより軸曲げ応力を繰り返し負荷したクリープ疲労き裂進展試験(REF. 4.8)である。試験条件を表4.15に、試験片形状を図4.15.1に示す。試験温度  $550^{\circ}\text{C}$ 、公称応力範囲  $\pm 17.0\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、き裂側引張応力状態での保持時間 5 hrのTP-3試験体についてCANIS-Gによるシミュレーションを行った。放電加工による初期き裂寸法は  $a=5.5\text{mm}$ ,  $b=11.0\text{mm}$  であるが、疲労予き裂を導入後にクリープ疲労き裂進展試験が実施された。疲労予き裂導入後の  $a=6.1\text{mm}$ ,  $b=11.0\text{mm}$  を初期き裂寸法とした。

## (2) 解析条件

- ・表面き裂K値解--- 外面周方向き裂の軸曲げ荷重対応のK値解 ( $K_{SCKV}=41$ 、白鳥らの解)
- ・正味断面形状関数--- 荷重制御型の軸曲げ荷重対応の式 ( $K_{FNS}=41$ ,  $p_M=1.0$ ,  $p_{B_i}=0.0$ )
- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係、SUS304,  $550^{\circ}\text{C}$ 、 $\alpha_V=1.0$ )
- ・クリープ特性--- PNCのSUS304クリープ式を  $550^{\circ}\text{C}$ 、5hr でNorton則近似した(4.17)式
- ・疲労き裂進展特性--- PNCの平均値(4.1b)式
- ・クリープき裂進展特性--- PNCの平均値(4.2b)式
- ・荷重データ--- 荷重制御型の膜応力  $\pm 17.0\text{kgf}/\text{mm}^2$  として入力した。K値解および正味断面形状関数を軸曲げ荷重対応の式を設定することで、軸曲げ荷重として取り扱われる。

CANIS-Gの入力データをリスト4.15に示す。

## (3) 解析結果

き裂寸法  $a$ 、 $b$  とサイクル数の関係を図4.15.2に示す。き裂深さ  $a$  とアスペクト比  $a/b$  の関係を図4.15.3に示す。き裂寸法  $a$ 、 $b$  とき裂進展速度  $da/dn$ 、 $db/dn$  の関係を図4.15.4に示す。

表4.15 試験条件

試験体番号	試験温度	応力範囲	保持時間
TP-1	650°C	$\pm 13\text{kgf}/\text{mm}^2$	0hr
TP-2			
TP-3	550°C	$\pm 17\text{kgf}/\text{mm}^2$	5hr

⇐解析対象

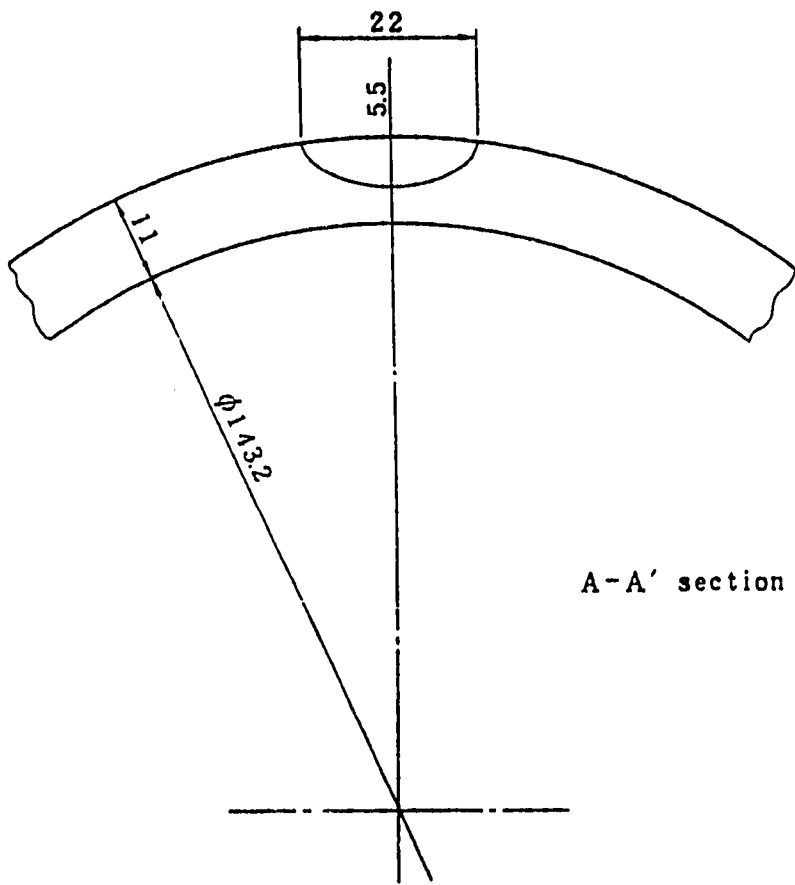
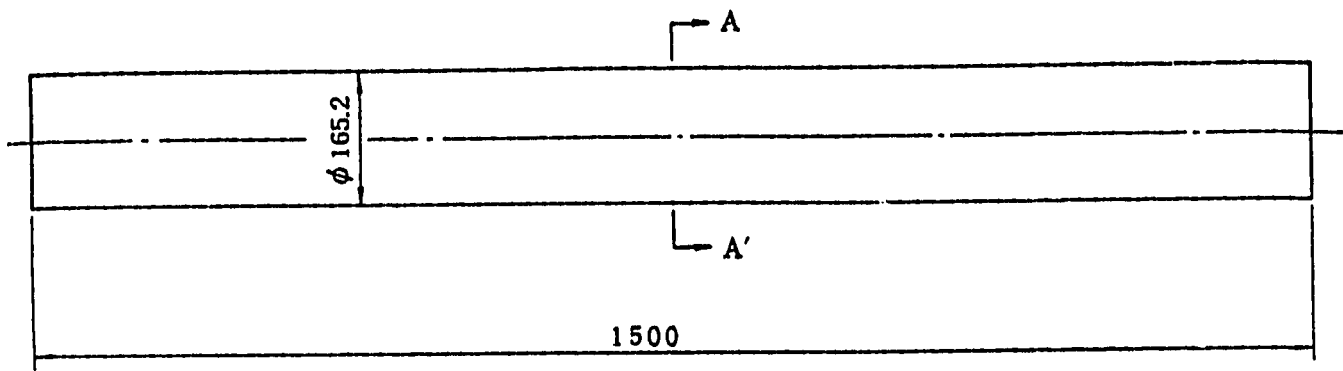


图4.15.1 試驗体形状

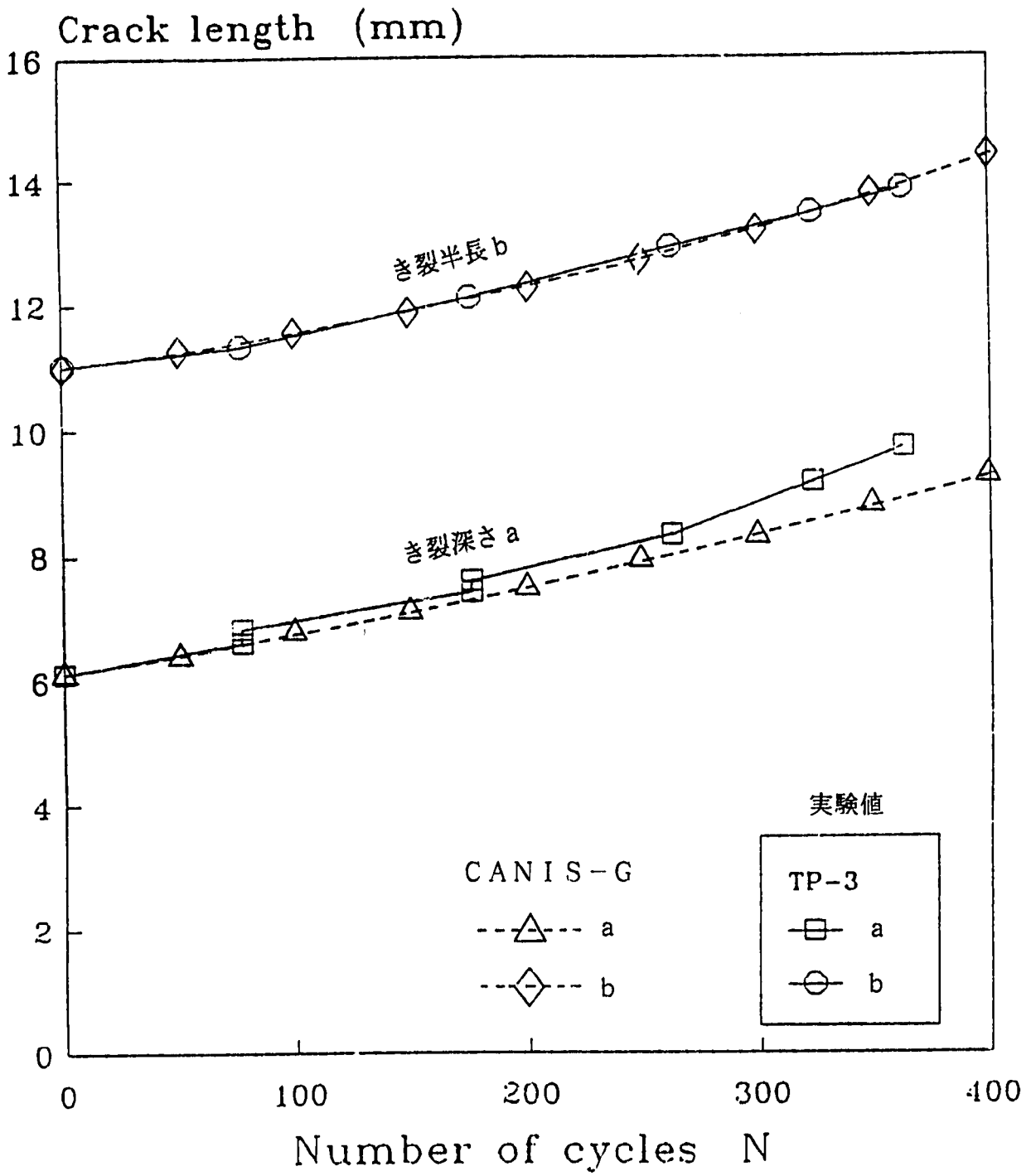
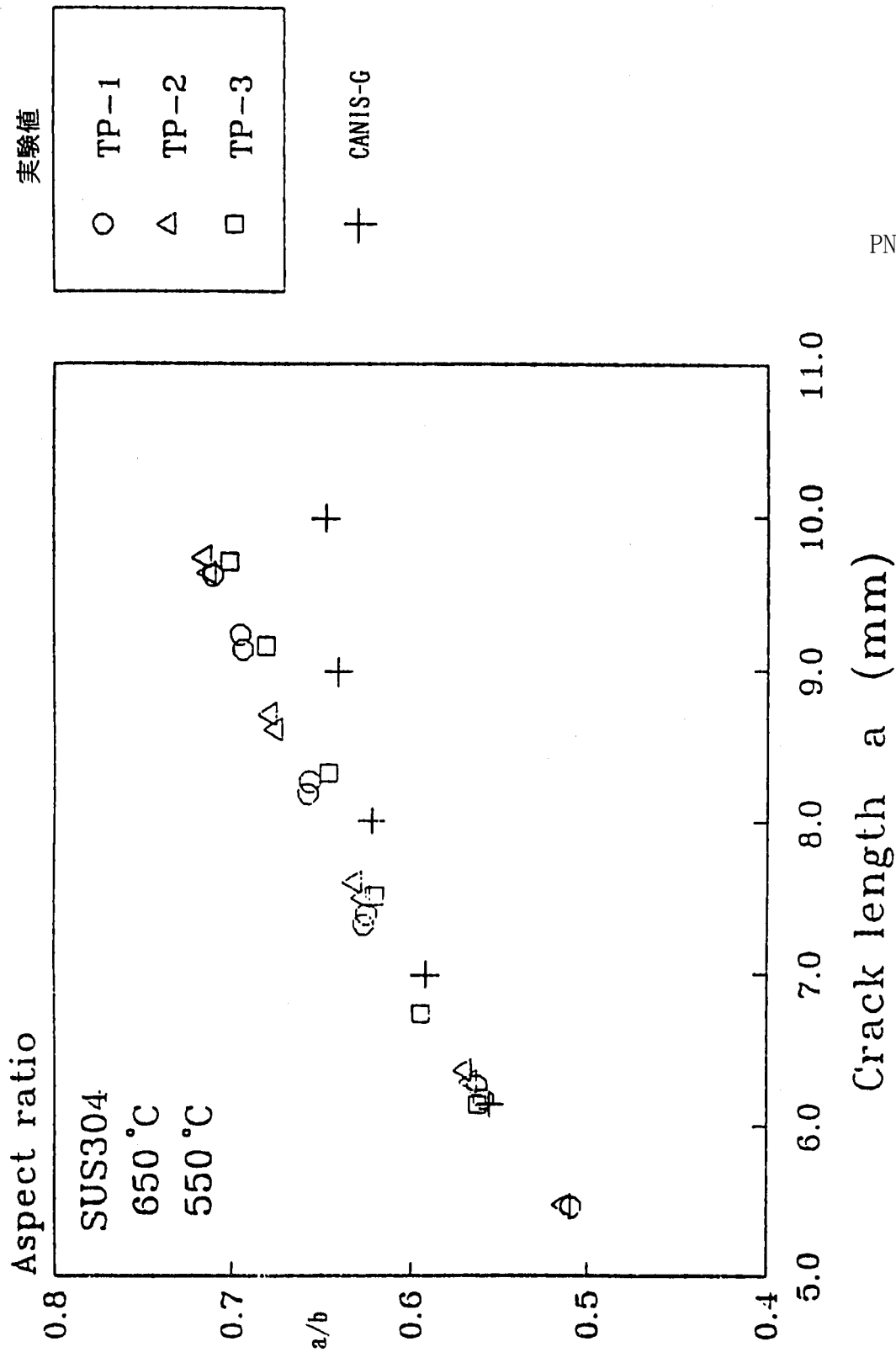


図4.15.2 き裂寸法とサイクル数の関係





PNC TN9410 94-201

図4.15.3 き裂深さとアスペクト比の関係

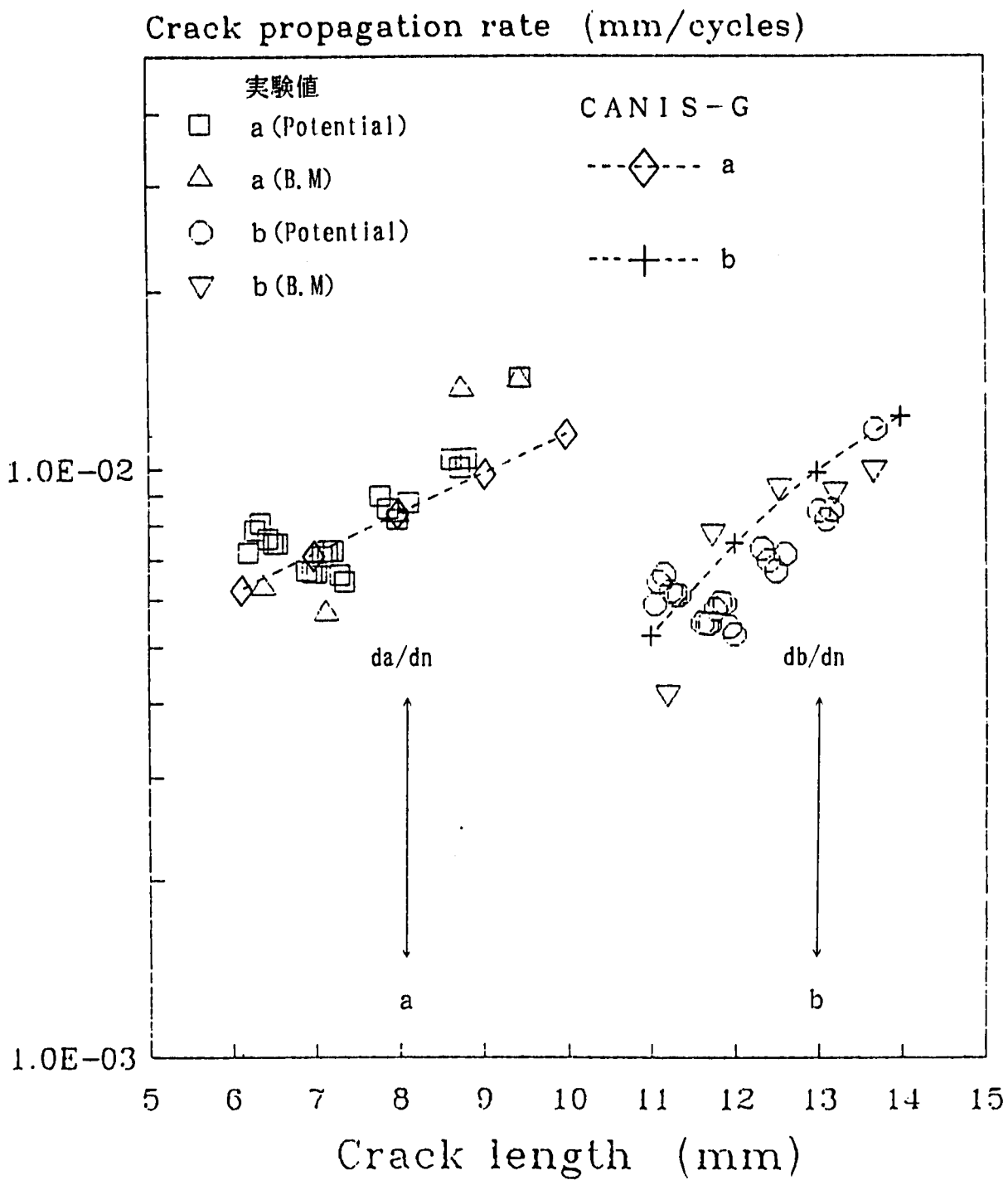


図4.15.4 き裂寸法とき裂進展速度の関係

リスト4.15 解析例15の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.15, PIPE BENDING, CREEP FATIGUE, 550DC, 5HR
2  ¥¥¥¥ KDUMY<CRAC< FNS<SURF<EDGE<PENT<PEAK< KDUMY      >
3  ¥           < PFNS   >< PSRM   >< PSRB   >< PSRC1 >< PSRC2 >
4  CONT          4    41    41
5                1.0      1.0      0.0      0.2      0.2
6  ¥¥¥¥ NCRAC< RADI   >< THIC   >< AACR   >< BBCR   >< ATLM   >< BWLIM  >
7  GEOM          0  71.6      11.0      6.1      11.0      0.99      0.55
8  ¥¥¥¥ KEPSS<IMAT<KDUM< TREF   >< ALPHY  >< SIGF   > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS          2  304      550.0      1.0      40.0
10 ¥¥¥¥ KCREP<IMAT<ICHR< A      >< N      >< M      > (KCREP=1,NORTON)
11 CREP          1          01.2527E-12  5.8128   1.0
12 ¥¥¥¥ KFATG<  C1    >< M1     >< DTL1   >< C2     >< M2     >< DTL2   >
13 FATG          2  1.2022E-3  1.4435
14 ¥¥¥¥ KCRPG<  C1    >< M1     >< DTL1   >< C2     >< M2     >< DTL2   >
15 CRPG          1  0.1274      0.877
16 ¥¥¥¥ KLOAD<LTYP<NEVN<LBAS<NINT< TLIFE   >< DTINT   >< CTIME   >
17 ¥           < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
18 ¥ C1-CARD <KEY><KDUM< DTAV(J)>< QEP(J) >< QC(J)   > (EVENT-J DATA)
19 ¥ C2-CARD < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
20 EVEN          0    1    0    10  400.0      1.0      5.0
21                0.0      0.0      0.0      1.0
22                0        1.0      1.0E4     1.0E4
23                17.0     0.0      0.0      -17.0     0.0      0.0
24  END

```

-174-

## 4.16 解析例16 (解析例15の破壊力学パラメータ解析)

## (1) 解析対象

前節の表面き裂付き円筒試験体の荷重制御4点曲げ試験を対象にFEMコードによる弾塑性クリープ解析および破壊力学パラメータ評価が実施された(REF. 4.8)。解析ケースを表4.16に示す。本節ではCANIS-Kによる破壊力学パラメータ計算を行い、FEMコードによる計算値と比較した。

## (2) CANIS-Kの解析条件

入力データをリスト4.16に示す。解析条件は前節と共通である。軸曲げ荷重を膜応力データとして入力した。 $+17 \text{ kgf/mm}^2$ を10ステップで単調増加で与えた後、11ステップ目に逆符号の $-17 \text{ kgf/mm}^2$ を与え、合計11ステップで1サイクルとした。1サイクルの周期を5hrとし、10ステップ目の最大応力時点で5hr保持されるとした。FEM解析結果のグラフにCANIS-Kの計算結果をオーバープロットした。原図の荷重変数の最大値(端部荷重11.1ton)がCANIS-Kの10ステップ(即ち $+17 \text{ kgf/mm}^2$ )に相当する事に注意されたい。

## (3) ケース1、3の解析結果

荷重と最深部のJ値の関係を図4.16.1(ケース1)と図4.16.2(ケース3)に示す。ケース1のき裂フロントに沿ったJ値の分布を図4.16.3(最大荷重の1/10)と図4.16.4(最大荷重)に示す。ケース3のき裂フロントに沿ったJ値の分布を図4.16.5(最大荷重の1/10)と図4.16.6(最大荷重)に示す。最深部のJ<sub>c</sub>値の時間変化を図4.16.7(ケース1)と図4.16.8(ケース3)に示す。

## (4) ケース2、4の解析結果

最大荷重時のき裂フロントに沿ったJ値の分布を図4.16.9に示す。最深部のJ<sub>c</sub>値の時間変化を図4.16.10に示す。

## (5) き裂進展速度の評価

最深部のき裂進展速度の比較を図4.16.11に示す。FEMの $\Delta J$ は(4.19)式、 $\Delta J_c$ は(4.20)式による。 $\Delta J_c$ は経路積分法による最大値と最小値を用いた。疲労き裂進展特性およびクリープき裂進展特性はPNCの(4.1)式および(4.2)式の上下限と平均を用い、その範囲を示した。CANIS-KではJ<sub>c</sub>値を0~5hr間で数値積分した $\Delta J_c$ を使用し、き裂進展特性は平均値のみ使用した。

最深部の $\Delta J_c / \Delta J$ を図4.16.12に示す。図中に示した破線はクリープ/疲労の遷移領域とされる $\Delta J_c / \Delta J = 0.015$ である。本解析例は遷移領域に近いことが分かる。

表4.16 解析ケース

ケース番号	き裂深さ	き裂半長	担当機関	解析コード
1	6.5 mm	11.3 mm	東芝	MARC
2	7.0 mm	11.7 mm	KHI	ABAQUS
3	8.0 mm	12.5 mm	東芝	MARC
4	9.0 mm	13.3 mm	KHI	ABAQUS

## リスト4.16 解析例16の入力データ

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7
1  **** < TITLE DESCRIPTION IN 11--70 COLLUMNS >
2  TITL  EXAMPLE.16, PIPE BENDING, CREEP FATIGUE, J-CALC. BY CANIS-K
3  **** KDUMY<CRAC< FNS<SURF<EDGE<PENT<PEAK< KDUMMY >
4  ¥ < PFNS >< PSRM >< PSRB >< PSRC1 >< PSRC2 >
5  CONT      4      41      41
6           1.0      1.0      0.0      0.2      0.2
7  **** NCRAC< RAD1 >< THIC >< AACR >< BBER >< ATLM >< BWLIM >
8  ¥ < A(J) >< B(J) > FOR J=1,NCRAC
9  GEOM      4  71.6      11.0      6.1      11.0      0.99      0.55
10         6.5      11.3
11         7.0      11.7
12         8.0      12.5
13         9.0      13.3
14  **** KEPSS<IMAT<KDUM< TREF >< ALPHY >< SIGF >>(KEPSS=1,2, LIBRALY)
15  EPSS      2  304      550.0      1.0      40.0
16  **** KCREP<IMAT<ICHR< A >< N >< M >>(KCREP=1, NORTON)
17  CREP      1      01.2527E-12  5.8128      1.0
18  **** KFATG< C1 >< M1 >< DTL1 >< C2 >< M2 >< DTL2 >
19  FATG      2  1.2022E-3  1.4435
20  **** KCRPG< C1 >< M1 >< DTL1 >< C2 >< M2 >< DTL2 >
21  CRPG      1  0.1274      0.877
22  ****      LTY>NSTE>LBAS>NTIN>< TLIFE >< DTINT >< CTIME >
23  ¥ < SIGDW >< POPER >< SIGTE >< QEPTE >
24  ¥ D1-CARD <KEY><KDUM< TCYCL >< QEP >< QC >> LTYPE=1
25  ¥ D2-CARD < SM(J) >< SB(J) >< SP(J) > FOR J=1,NSTEP
26  EVEN      1      11      0      5  500.0      1.0      1.0
27           0.0      0.0      0.0      1.0
28           0      5.0      1.0E4      1.0E4
29           1.7      0.0      0.0
30           3.4      0.0      0.0
31           5.1      0.0      0.0
32           6.8      0.0      0.0
33           8.5      0.0      0.0
34           10.2     0.0      0.0
35           11.9     0.0      0.0
36           13.6     0.0      0.0
37           15.3     0.0      0.0
38           17.0     0.0      0.0
39           -17.0    0.0      0.0
40  END

```

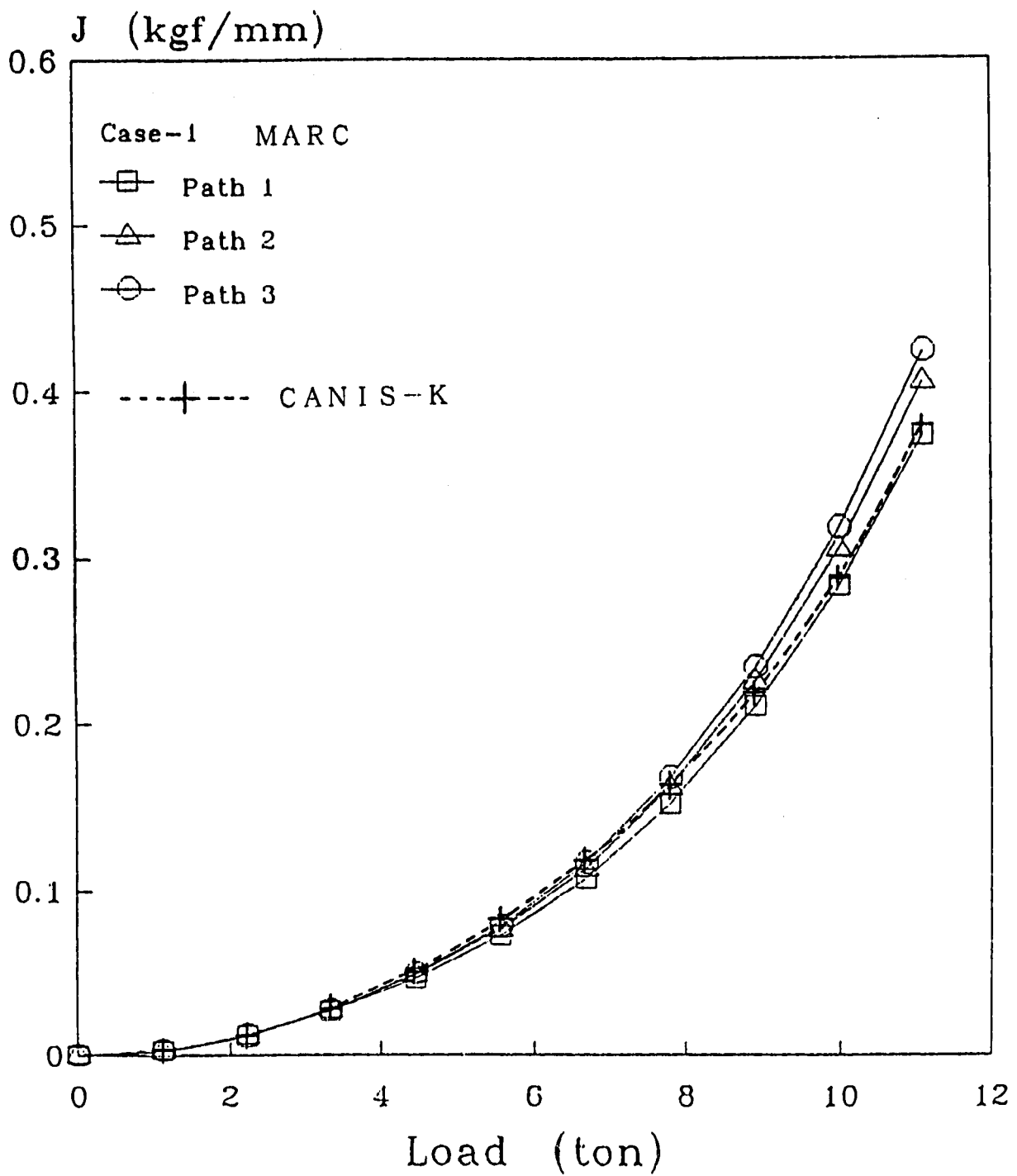


図4.16.1 荷重と最深部のJ値の関係 (ケース1)

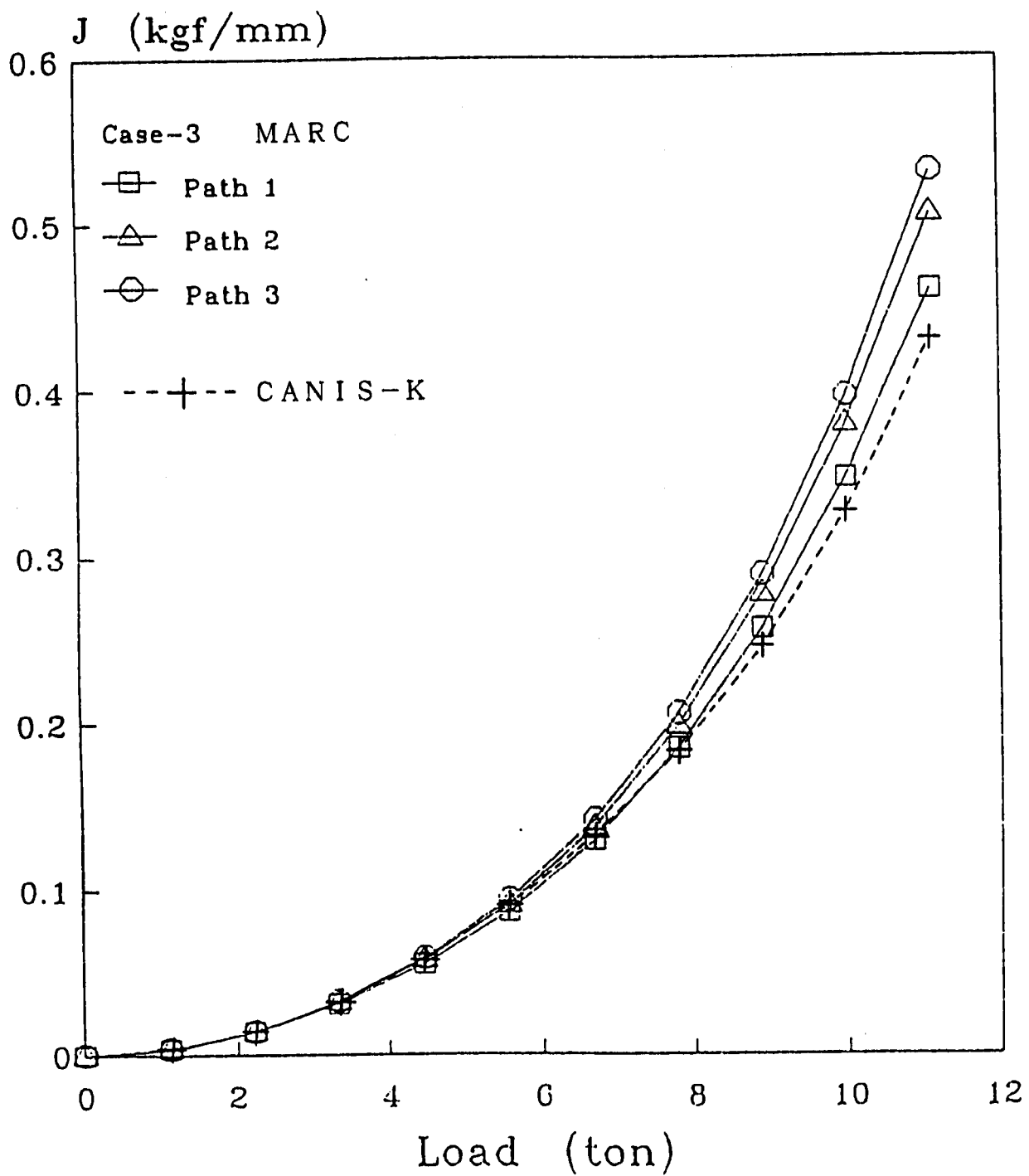


図4.16.2 荷重と最深部のJ値の関係(ケース3)

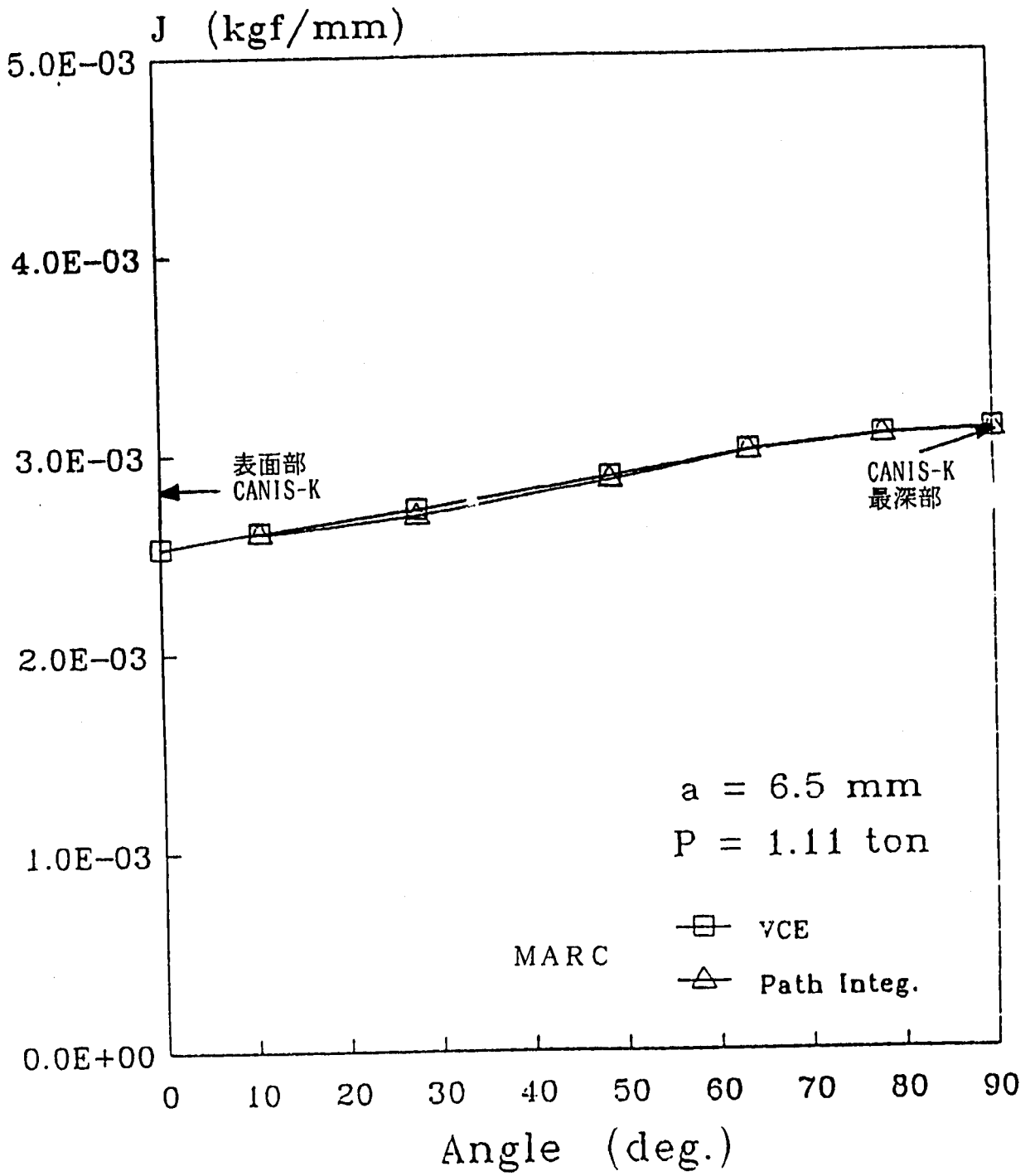


図4.16.3 き裂フロントに沿ったJ値の分布 (ケース1, 最大荷重の1/10)



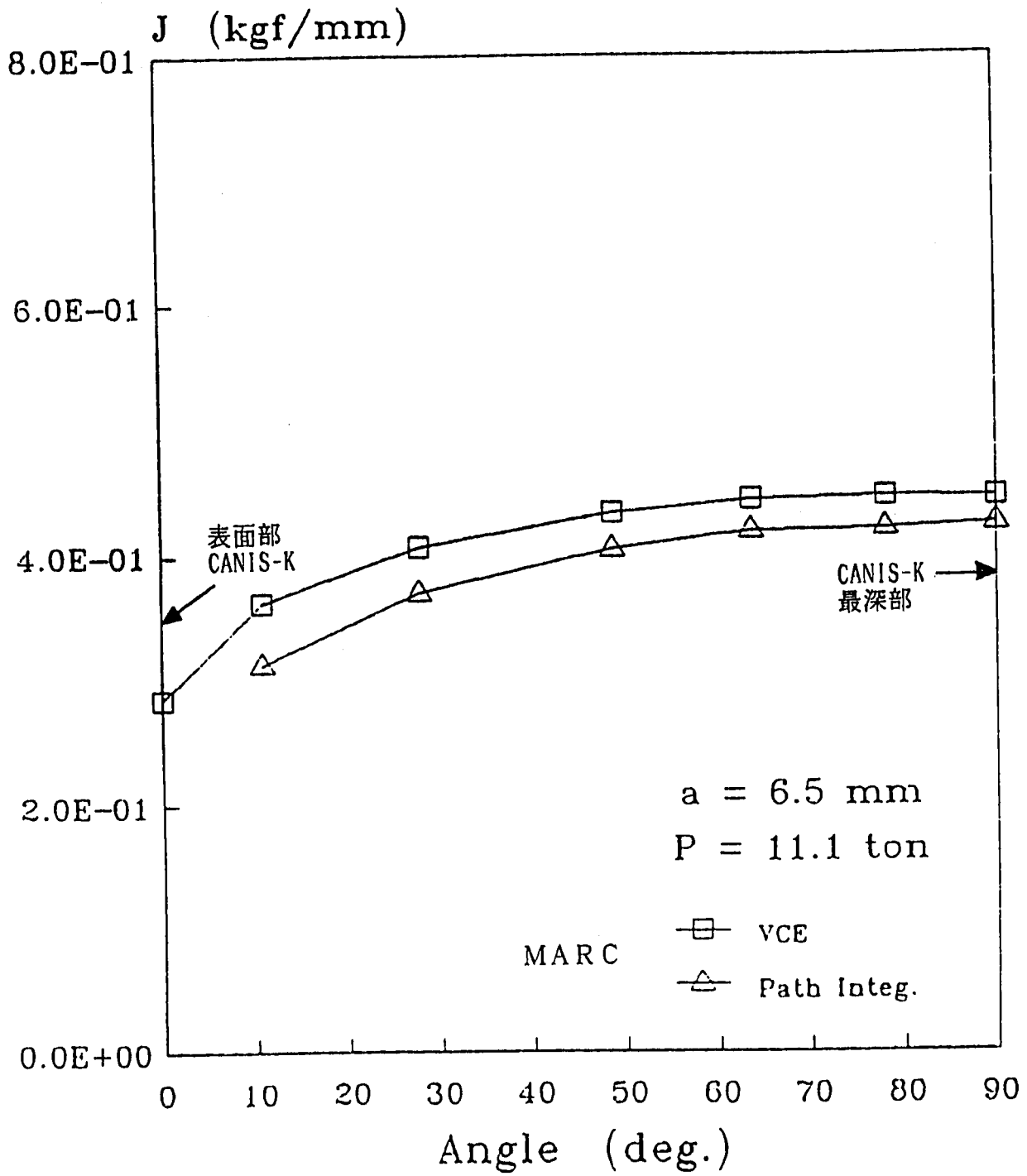


図4.16.4 き裂フロントに沿ったJ値の分布 (ケース1, 最大荷重)

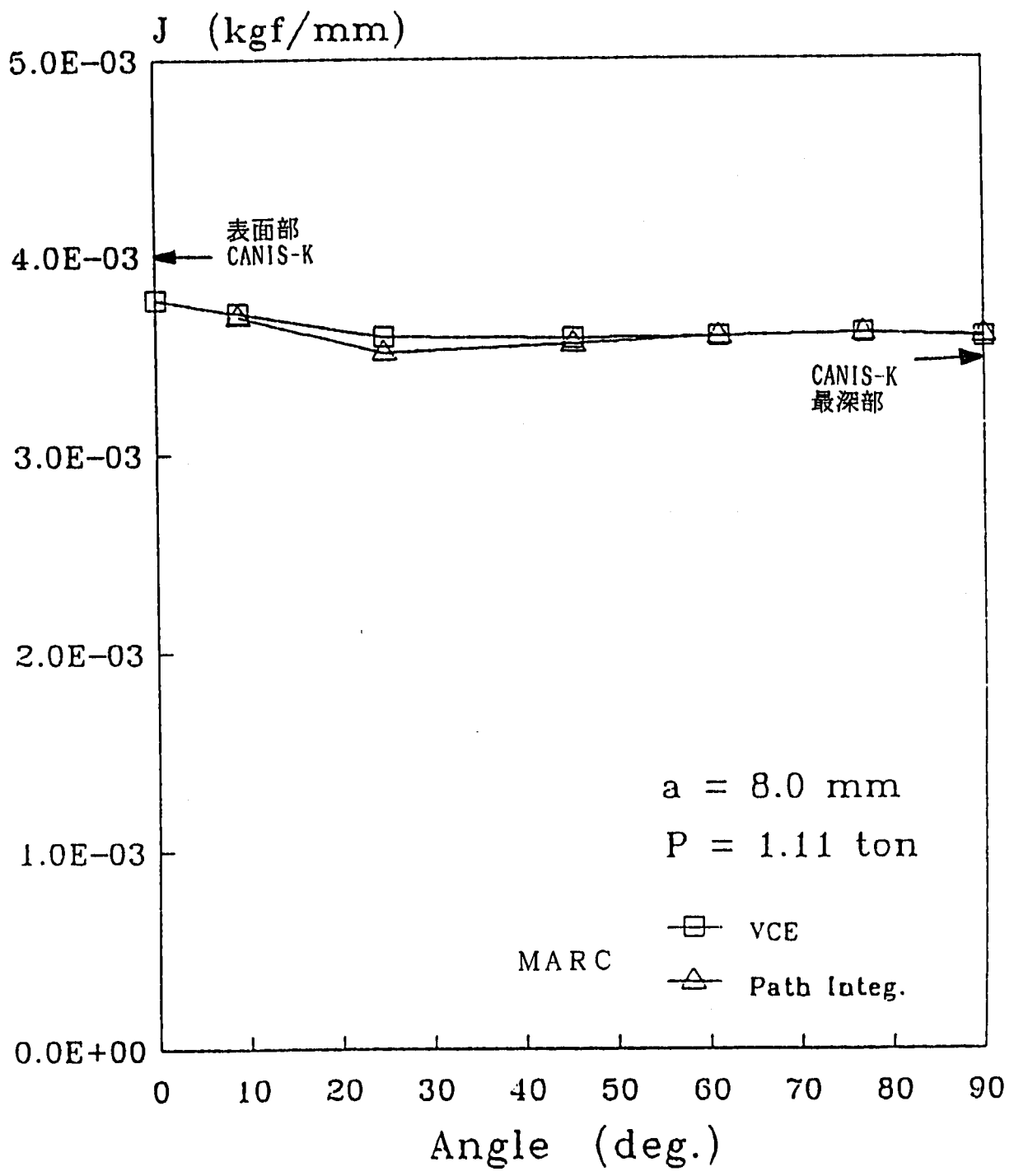


図4.16.5 き裂フロントに沿ったJ値の分布 (ケース3, 最大荷重の1/10)

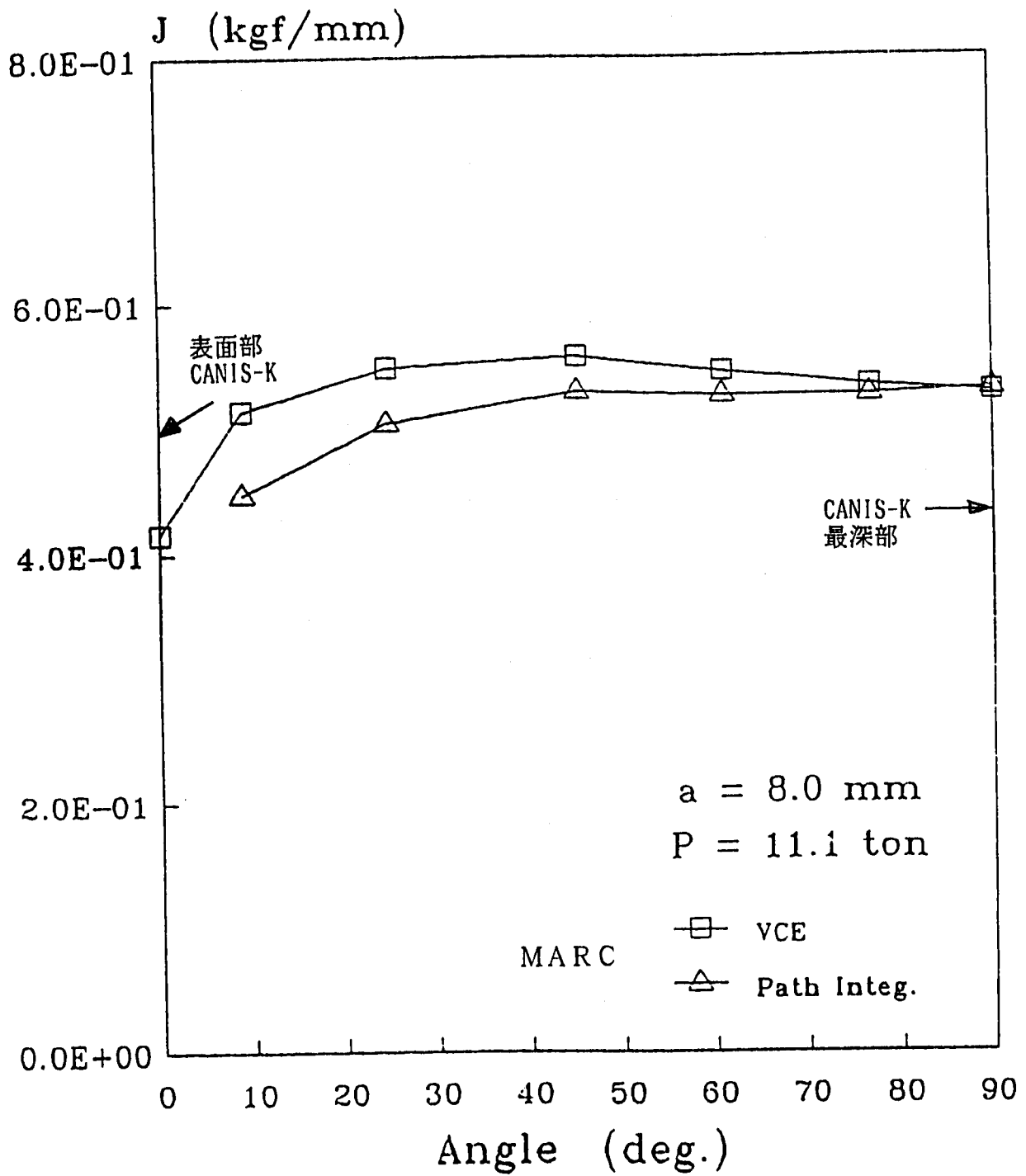


図4.16.6 き裂フロントに沿ったJ値の分布 (ケース3, 最大荷重)

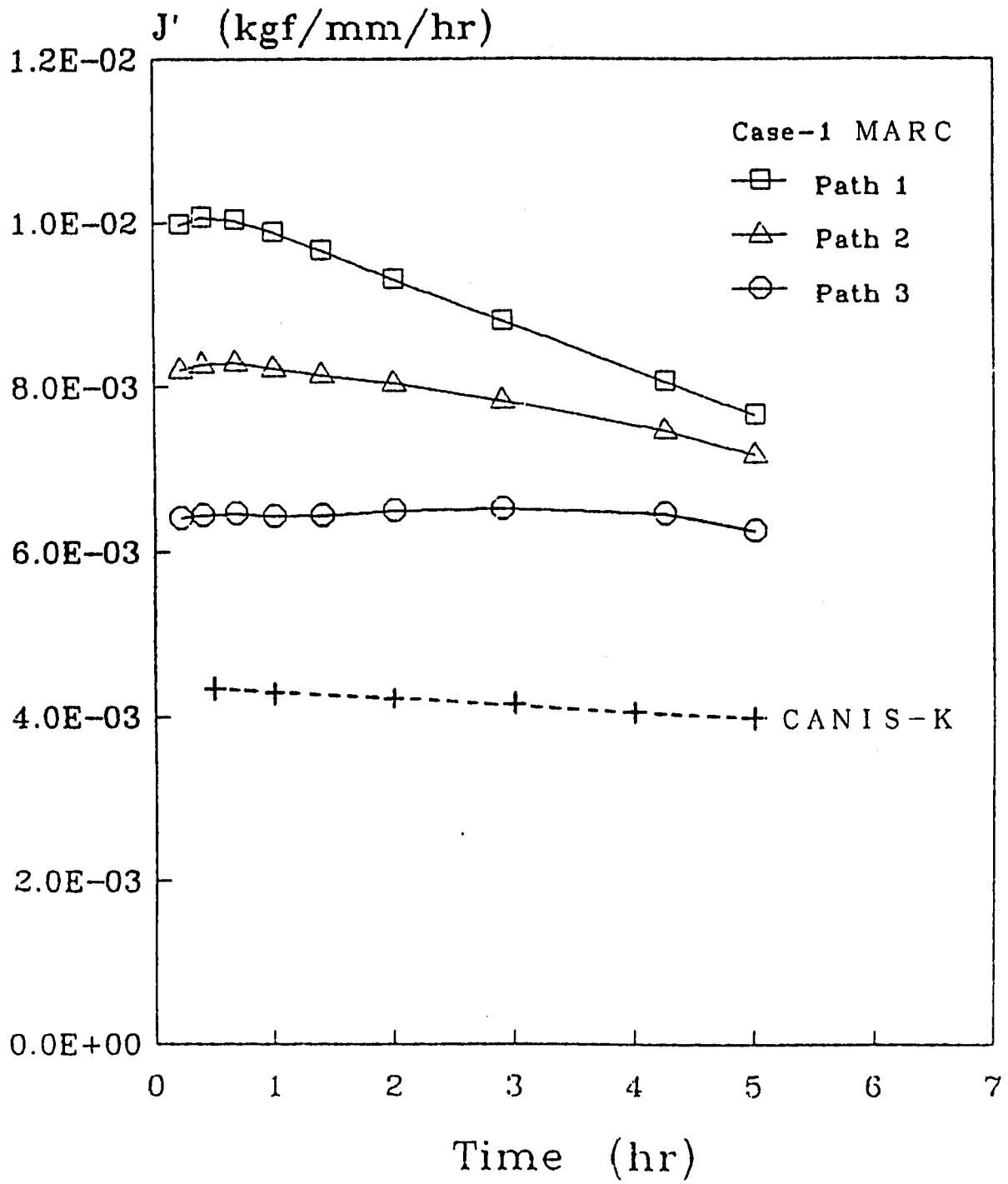


図4.16.7 最深部の  $J_c$  値の時間変化 (ケース1)

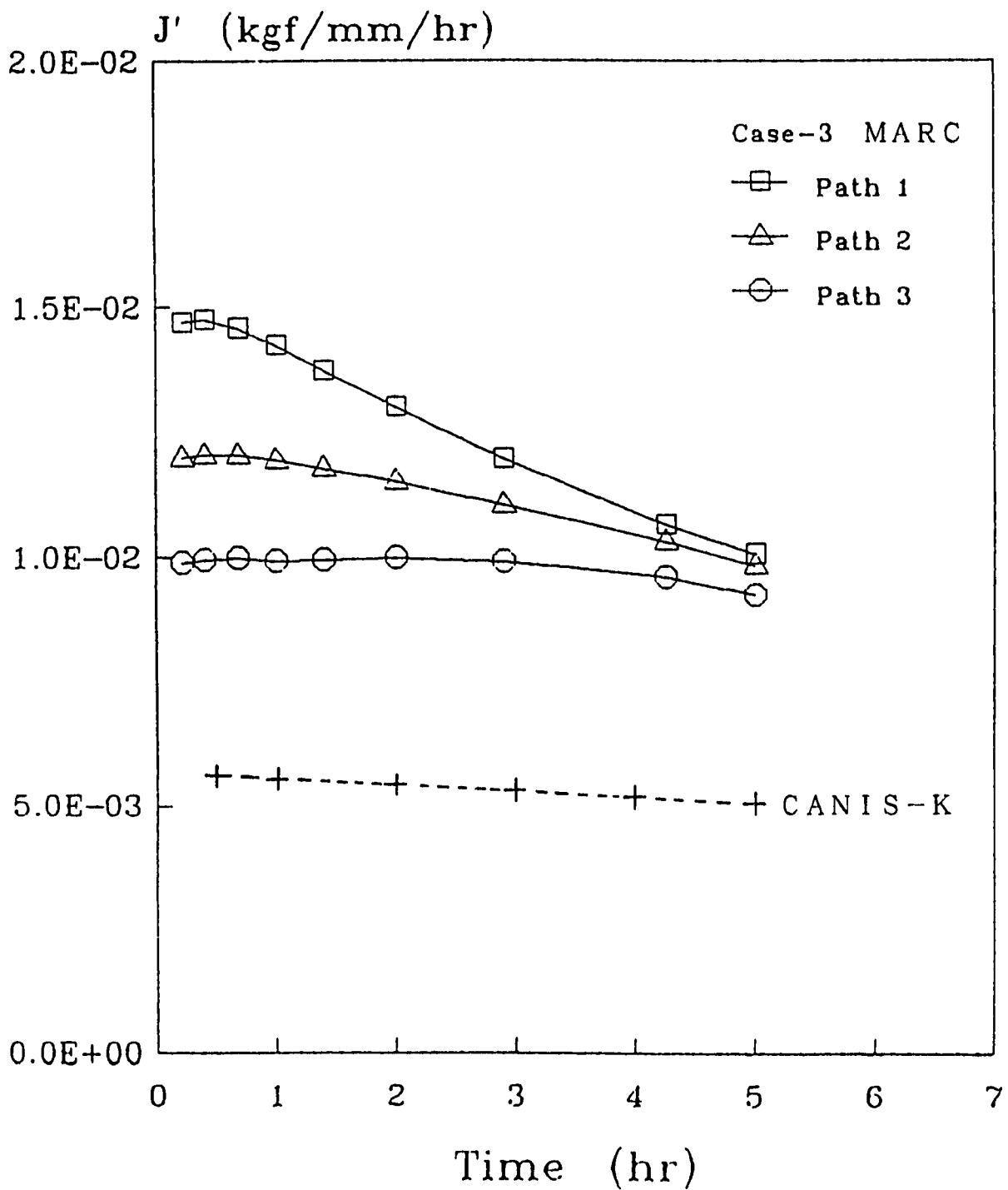


図4.16.8 最深部の  $J_c$  値の時間変化 (ケース3)

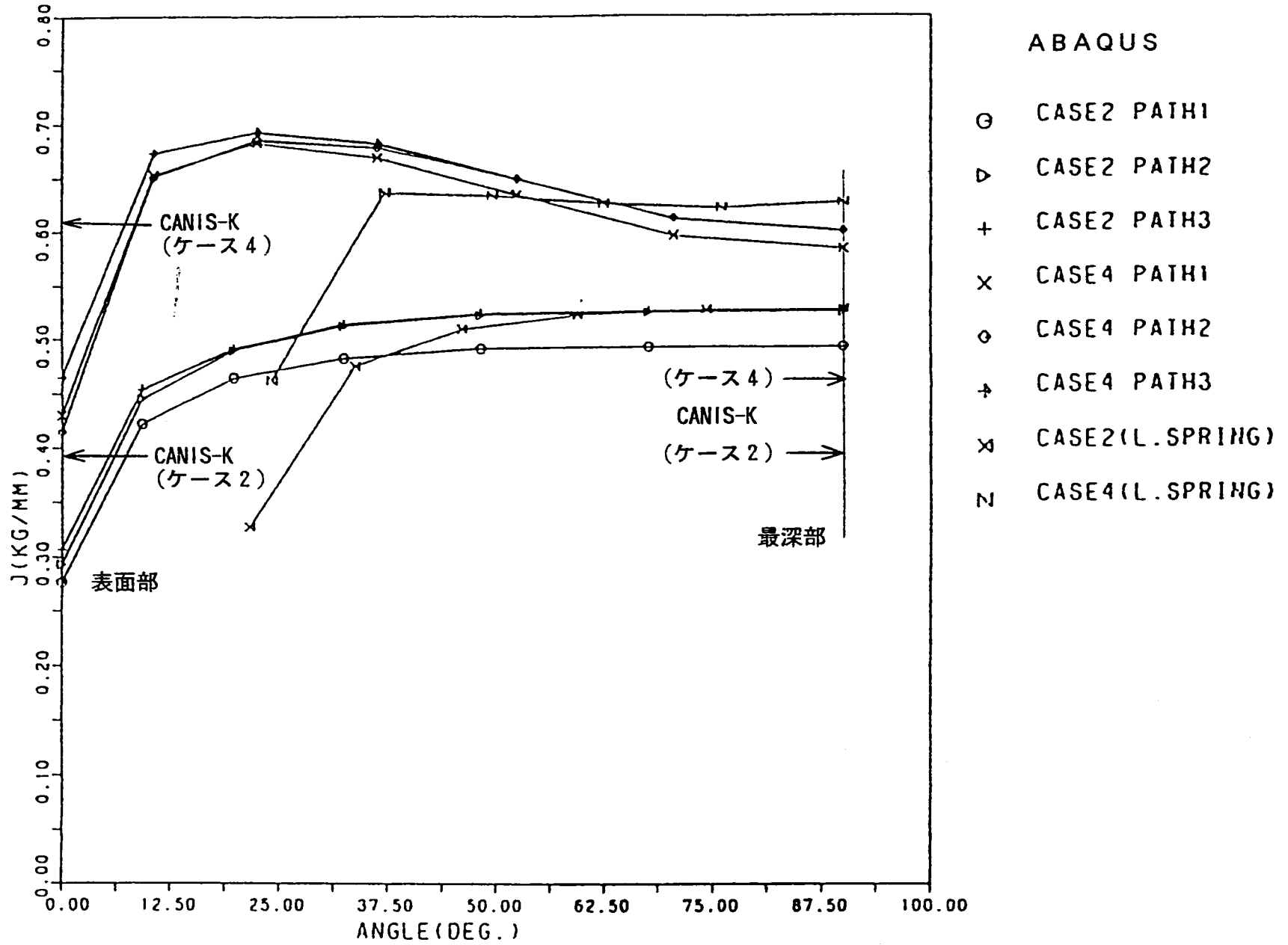


図4.16.9 最大荷重時のJ値のき裂フロントに沿った分布 (ケース2, 4)

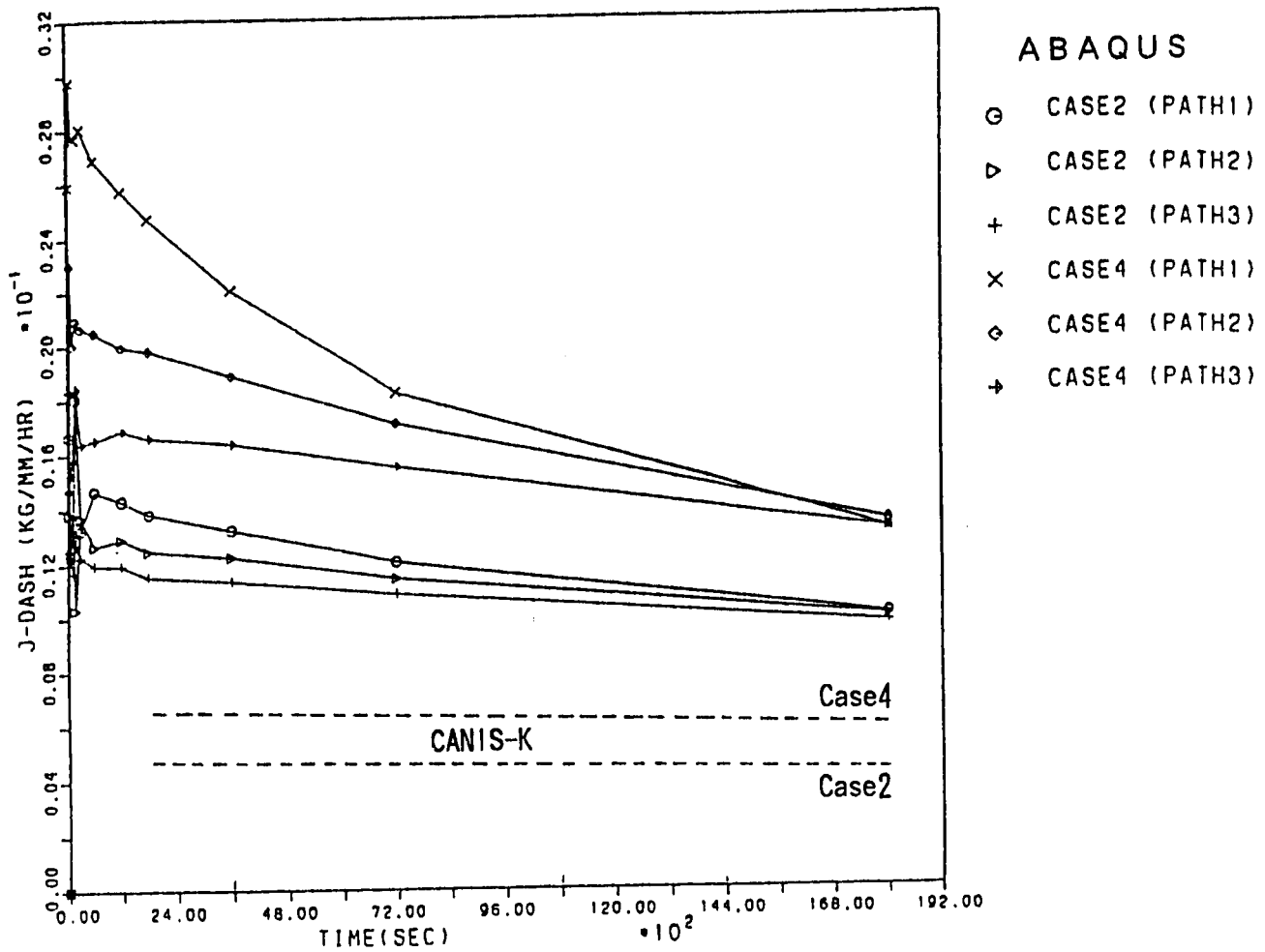


図4.16.10 最深部の  $J_c$  値の時間変化 (ケース 2, 4)

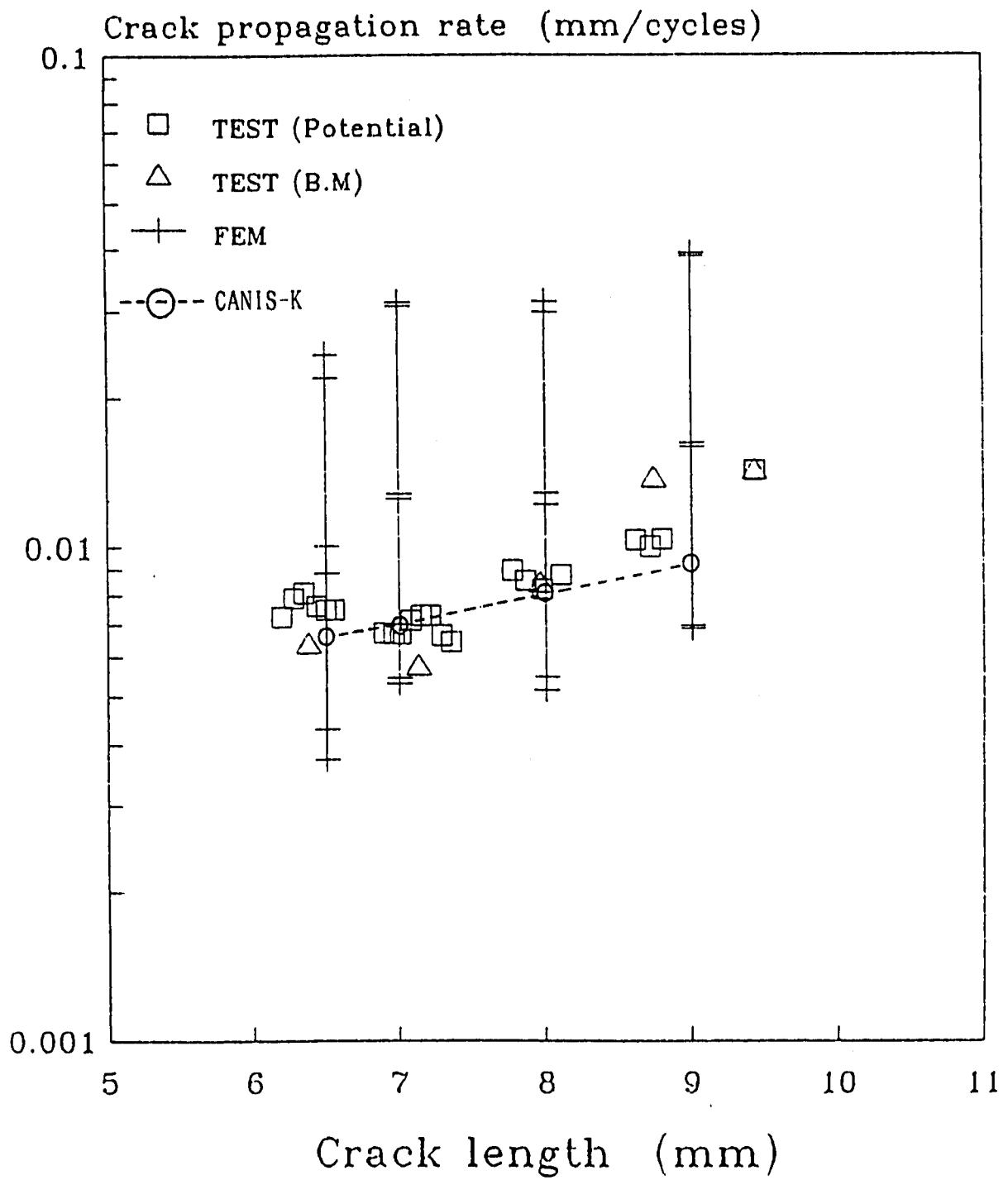


図4.16.11 最深部のき裂進展速度の比較



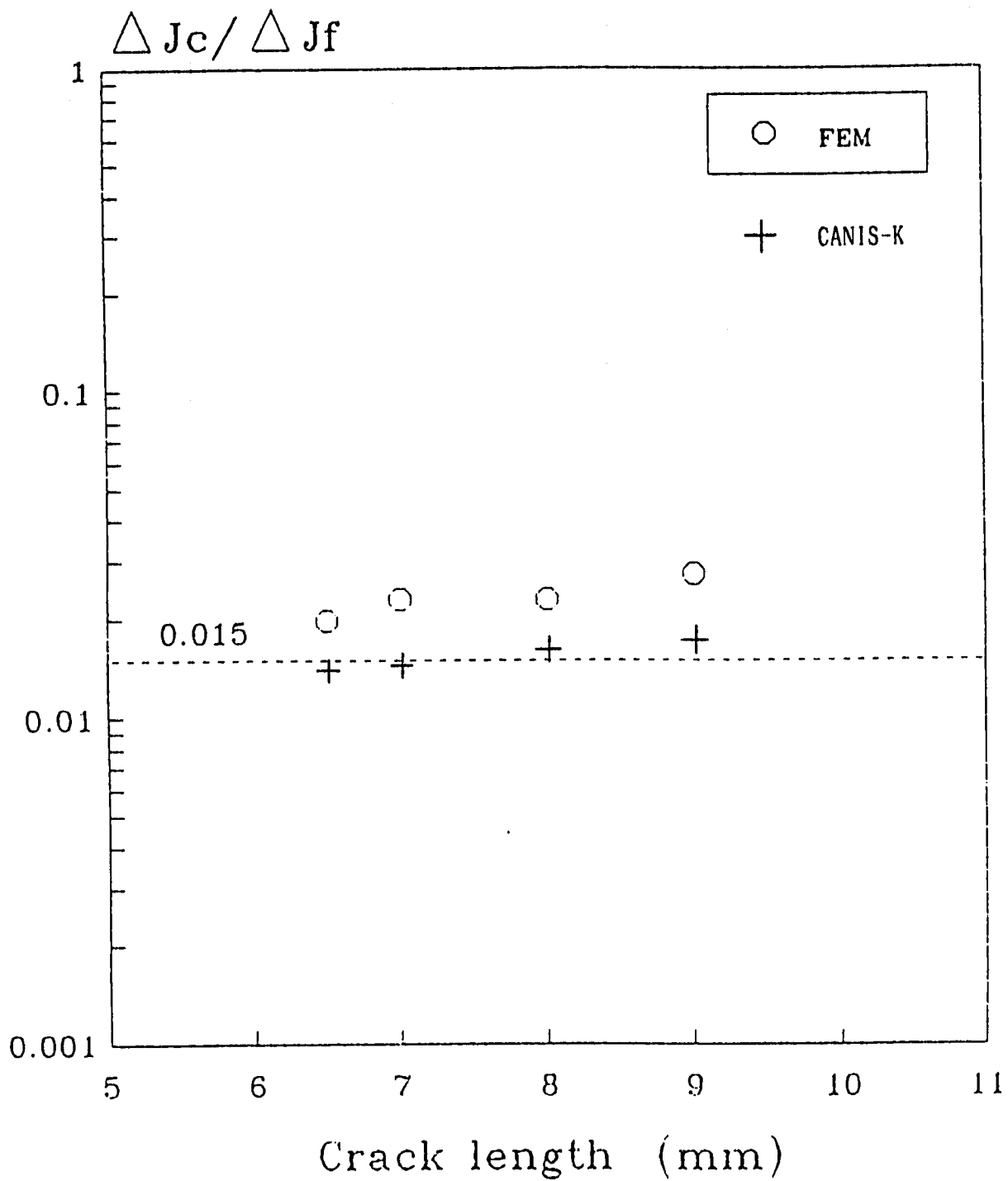


図4.16.12 最深部の $\Delta J_c / \Delta J_f$ の比較

## 4.17 解析例17 (解析例2の逆方向解析、表面き裂付き平板、荷重制御型膜応力)

CANIS-Gでは、現在のき裂形状を初期状態とし、現在から過去に向かって逆方向に時間積分し、過去のき裂形状を推定計算することができる。これを逆方向解析と呼ぶことにする。解析例2に対して逆方向解析をおこなった。解析例2では初期き裂形状 ( $a=0.5$ ,  $b=2.5$ ) に対して、時間増分+1.0 サイクルで正方向に時間積分し、13900 サイクル後のき裂形状 ( $a=6.368$ ,  $b=8.460$ ) を得た。これを正方向解析と呼ぶことにする。逆方向解析では初期き裂形状 ( $a=6.368$ ,  $b=8.460$ ) に対して、時間増分-1.0 サイクルで逆方向に時間積分し、-13900 サイクル後のき裂形状 ( $a=0.499$ ,  $b=2.487$ ) を得た。若干の誤差は生じたが、正方向解析の初期状態にほぼ戻ったと言える。入力データをリスト4.17に示す。初期き裂形状と時間増分値を変更した以外は解析例2と共通である。解析例2と本節の逆方向解析の各時点のき裂形状を比較して表4.17に示す。

表4.17 正方向解析と逆方向解析のき裂形状の比較

正方向解析 (解析例2)			逆方向解析		
Cycle	a (mm)	b (mm)	Cycle	a (mm)	b (mm)
start 0	0.5	2.5	↑ -13900	0.499	2.487
↓ 1000	0.576	2.508	↑ -12900	0.576	2.496
↓ 2000	0.667	2.521	↑ -11900	0.666	2.510
↓ 3000	0.775	2.542	↑ -10900	0.773	2.532
↓ 4000	0.902	2.576	↑ -9900	0.900	2.567
↓ 5000	1.049	2.627	↑ -8900	1.047	2.619
↓ 6000	1.221	2.702	↑ -7900	1.218	2.694
↓ 7000	1.420	2.803	↑ -6900	1.418	2.796
↓ 8000	1.652	2.938	↑ -5900	1.650	2.932
↓ 9000	1.924	3.121	↑ -4900	1.922	3.115
↓ 10000	2.249	3.368	↑ -3900	2.247	3.363
↓ 11000	2.652	3.713	↑ -2900	2.650	3.708
↓ 11500	2.897	3.938	↑ -2400	2.895	3.933
↓ 12000	3.185	4.216	↑ -1900	3.184	4.212
↓ 12500	3.538	4.579	↑ -1400	3.536	4.575
↓ 13000	4.001	5.099	↑ -900	3.998	5.094
↓ 13500	4.719	5.988	↑ -400	4.715	5.981
↓ 13900	6.368	8.460	start 0	6.368	8.460

## リスト4.17 解析例17の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL          EXAMPLE.17, FCC-02, LOAD.CONT.SIGM=+-15, BACKWARD ANALYSIS
2  ¥¥¥¥  DUM1 CRAC  FNS  SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥      C.FNS    P.SIGM   P.SIGB   P.C1    P.C2
4  CONT          1
5
6  ¥¥¥¥  NCRAC  RADI    THIC    AACR    BBCR    ATLIM    BWLIM
7  GEOM          12.5    8.0    6.368  8.460  0.9     0.9
8  ¥¥¥¥  KEPSS  IMAT IDUM  TREF    ALPHY   SIGF
9  EPSS         2  304    550.0  1.0    50.0
10 ¥¥¥¥  KFATG  C1      M1      X1      C2      M2      X2
11 FATG         2  1.2022E-3  1.4435
12 ¥¥¥¥  KLOAD  TYPE NEVN  LBAS NTIN  TLIFE   DTINT   CTIME
13 ¥      SIGDW  POPER   SIGTE   QEPTE
14 ¥C1      KEY KDUM  DTAV(J) QEP(J)  QC(J)   (FOR J=1,NEVNT)
15 ¥C2      SM1(J)  SB1(J)  SP1(J)  SM2(J)  SB2(J)  SP2(J)
16 EVEN     0      1      0  100  20000.0 -1.0
17          0.0    0.0    0.0    1.0
18          0      1.0    1.0E4  1.0E4
19          15.0   0.0    0.0    -15.0  0.0    0.0
20  END

```

## 4.18 解析例18 (解析例3の逆方向解析、表面き裂付き平板、荷重制御型曲げ応力)

解析例3に対して逆方向解析をおこなった。解析例3では初期き裂形状 ( $a=4.0$ ,  $b=4.0$ ) に対して、時間増分+1.0 サイクルで正方向に時間積分し、9000サイクル後のき裂形状 ( $a=10.332$ ,  $b=30.456$ ) を得た。逆方向解析では初期き裂形状 ( $a=10.332$ ,  $b=30.456$ ) に対し、時間増分-1.0 サイクルで逆方向に時間積分し、-9000サイクル後のき裂形状 ( $a=4.123$ ,  $b=3.866$ ) を得た。若干の誤差は生じたが、正方向解析の初期状態にほぼ戻ったと言える。入力データをリスト4.18に示す。初期き裂形状と時間増分値を変更した以外は解析例3と共通である。解析例3と本節の逆方向解析の各時点のき裂形状を比較して表4.18に示す。

表4.18 正方向解析と逆方向解析のき裂形状の比較

正方向解析 (解析例3)			逆方向解析		
Cycle	a (mm)	b (mm)	Cycle	a (mm)	b (mm)
start 0	4.0	4.0	↑ -9000	4.123	3.866
↓ 1000	4.261	4.883	↑ -8000	4.358	4.764
↓ 2000	4.598	5.914	↑ -7000	4.671	5.812
↓ 3000	5.010	7.113	↑ -6000	5.064	7.030
↓ 4000	5.493	8.519	↑ -5000	5.532	8.454
↓ 5000	6.046	10.184	↑ -4000	6.073	10.134
↓ 6000	6.681	12.250	↑ -3000	6.698	12.207
↓ 7000	7.431	15.026	↑ -2000	7.439	14.988
↓ 8000	8.382	19.170	↑ -1000	8.384	19.144
↓ 8500	9.033	22.470	↑ -500	9.033	22.449
↓ 9000	10.332	30.456	start 0	10.332	30.456

リスト4.18 解析例18の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.18, FCC-114, LOAD.CONT.SIGB=+-20, BACKWARD ANALYSIS
2  ¥¥¥¥    DUM1 CRAC  FNS SCKV ECKV PCKV PEAK DUM2 DUM3 DUM4
3  ¥        C.FNS    P.SIGM   P.SIGB   P.C1     P.C2
4  CONT          1    11
5
6  ¥¥¥¥    NCRAC  RAD1     THIC     AACR     BBCR     ATLIM     BWLIM
7  GEOM          40.0    16.0     10.332   30.456   0.8
8  ¥¥¥¥    KEPSS  IMAT  IDUM   TREF     ALPHY    SIGF
9  EPSS        2    304     550.0    1.0     50.0
10 ¥¥¥¥    KFATG  C1      M1      X1       C2       M2       X2
11 FATG        2    1.2022E-3  1.4435
12 ¥¥¥¥    KFAIL
13 FAIL        10
14 ¥¥¥¥    KLRAT  Q.DET   GAMMA   ZETA     DELP
15 LRAT        3    1.0     8.37E-11 2.0     0.1
16 ¥¥¥¥    KLOAD<TYPE<NEVN<LBAS<NINT< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  >
17 ¥        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
18 ¥C1       < KEY<KDUM< DTAV(J)>< QEP(J)  >< QC(J)  > (FOR J=1,NEVNT)
19 ¥C2       < SM(1,J)>< SB(1,J)>< SP(1,J)>< SM(2,J)>< SB(2,J)>< SP(2,J)>
20 EVEN          0    1    0  100  10000.0  -1.0
21             0.0    0.0    0.0    1.0
22             0    1.0    1.0E4    1.0E4
23             0.0    20.0    0.0    0.0    -20.0    0.0
24  END

```

## 4.19 解析例19（解析例15の逆方向解析、外面周方向表面き裂付き円筒、荷重制御型の軸曲げ）

解析例15に対して逆方向解析をおこなった。解析例15では初期き裂形状（ $a = 6.1$ ,  $b = 11.0$ ）に対して、時間増分+1.0 サイクルで正方向に時間積分し、400 サイクル後のき裂形状（ $a = 9.202$ ,  $b = 14.347$ ）を得た。逆方向解析では初期き裂形状（ $a = 9.202$ ,  $b = 14.347$ ）に対し、時間増分-1.0 サイクルで逆方向に時間積分し、-400 サイクル後のき裂形状（ $a = 6.097$ ,  $b = 10.994$ ）を得た。若干の誤差は生じたが、正方向解析の初期状態にほぼ戻ったと言える。入力データをリスト4.19に示す。初期き裂形状と時間増分値を変更した以外は解析例15と共通である。解析例15と本節の逆方向解析の各時点のき裂形状を比較して表4.19に示す。

表4.19 正方向解析と逆方向解析のき裂形状の比較

正方向解析（解析例15）			逆方向解析		
Cycle	a (mm)	b (mm)	Cycle	a (mm)	b (mm)
start 0	6.1	11.0	↑ -400	6.097	10.994
↓ 50	6.414	11.272	↑ -350	6.411	11.267
↓ 100	6.744	11.576	↑ -300	6.742	11.570
↓ 150	7.092	11.914	↑ -250	7.089	11.909
↓ 200	7.459	12.292	↑ -200	7.457	12.287
↓ 250	7.850	12.715	↑ -150	7.848	12.711
↓ 300	8.268	13.192	↑ -100	8.267	13.189
↓ 350	8.717	13.732	↑ - 50	8.716	13.730
↓ 400	9.202	14.347	start 0	9.202	14.347

リスト4.19 解析例19の入力データ

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.19, PIPE BENDING, CREEP FATIGUE, BACKWARD ANALYSIS
2  ##### KDUMY<CRAC< FNS<SURF<EDGE<PENT<PEAK< KDUMY      >
3  ¥        < PFNS    >< PSRM    >< PSRB    >< PSRC1 >< PSRC2 >
4  CONT      4      41      41
5           1.0      1.0      0.0      0.2      0.2
6  ##### NCRAC< RADI    >< THIC    >< AACR    >< BBCR    >< ATLIM  >< BWLIM  >
7  GEOM      0  71.6      11.0      9.202      14.347      0.99      0.55
8  ##### KEPSS<IMAT<KDUM< TREF    >< ALPHY   >< SIGF    > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS      2  304      550.0      1.0      40.0
10 ##### KCREP<IMAT<ICHR< A      >< N      >< M      > (KCREP=1,NORTON)
11 CREP      1           01.2527E-12  5.8128      1.0
12 ##### KFATG< C1      >< M1      >< DTL1   >< C2      >< M2      >< DTL2   >
13 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
14 ##### KCRPG< C1      >< M1      >< DTL1   >< C2      >< M2      >< DTL2   >
15 CRPG      1  0.1274      0.877
16 ##### KLOAD<LTYP<NEVN<LBAS<NINT< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  >
17 ¥        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
18 ¥ C1-CARD <KEY><KDUM< DTAV(J)< QEP(J) >< QC(J)  > (EVENT-J DATA)
19 ¥ C2-CARD < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
20 EVEN      0      1      0      10  400.0      -1.0      5.0
21           0.0      0.0      0.0      1.0
22           0      1.0      1.0E4      1.0E4
23           17.0      0.0      0.0      -17.0      0.0      0.0
24  END

```

## 4.20 解析例20 (き裂発生確率の評価、解析例5の荷重条件)

解析例5の荷重条件を仮定し、CANIS-Iによりき裂発生確率を評価した。荷重保持無しの疲労試験 (FCC130、 $\sigma_B = \pm 20 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $t_H = 0$ ) の入力データをリスト4.20.1に、計算結果をリスト4.20.2に示す。荷重保持有りのクリープ疲労試験 (FCC134、 $\sigma_B = +17 \sim -20 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $t_H = 10 \text{ min}$ ) の入力データをリスト4.20.3に、計算結果をリスト4.20.4に示す。解析例5のCANIS-Gの入力データに疲労損傷値計算のための疲労破損データ、クリープ損傷値計算のためのクリープ破断データ、疲労き裂発生に対応する疲労損傷値の統計分布関数およびクリープき裂発生に対応するクリープ損傷値の統計分布関数を追加した以外は、解析例5と基本的に共通である。

## (1) 解析条件

- ・弾塑性特性--- 材料データライブラリ (繰り返し応力ひずみ関係、SUS304、650 °C、 $\alpha_V = 1.0$ )
- ・クリープひずみ特性--- 材料データライブラリ (SUS304、650 °C、 $\alpha_C = 1.0$ 、ひずみ硬化則)
- ・クリープ破断特性--- 材料データライブラリ (SUS304、650 °C、 $\alpha_R = 1.0$ )
- ・疲労破損特性--- 材料データライブラリ (SUS304、650 °C、 $\alpha_F = 1.0$ )
- ・き裂発生疲労損傷値の分布関数(PDF)---常用対数正規分布 ( $D_{F, MEAN} = 0.1$ 、 $D_{F, MIN} = 0.01$ 、 $D_{F, MAX} = 2.0$ 、対数標準偏差  $S_{DF} = 0.5$ 、数値積分の区間分割数100)
- ・き裂発生クリープ損傷値の分布関数 ---常用対数正規分布 ( $D_{C, MEAN} = 0.1$ 、 $D_{C, MIN} = 0.01$ 、 $D_{C, MAX} = 2.0$ 、対数標準偏差  $S_{DC} = 0.5$ 、数値積分の区間分割数100)
- ・き裂発生判定値---  $D_{INIT} = 1.0$ 、次式が成立する時点なき裂発生時点とする。

$$D_F(t) / D_{F, PDF} + D_C(t) / D_{C, PDF} = D_{INIT} \quad (4.21)$$

- ・ひずみ集中係数---  $K_E$  (膜+曲げひずみ) = 1.2、 $K_T$  (ピークひずみ) = 1.0
- ・注意1 --- き裂発生疲労損傷値の分布関数とき裂発生クリープ損傷値の分布関数は両者とも常にセットで定義する必要がある。
- ・注意2 --- 荷重保持無しの評価ではクリープ計算を行わない。クリープひずみ特性およびクリープ破断特性のデータ入力を省略した場合は材料データライブラリのSUS304の500°Cのクリープ特性がデフォルト設定される。従ってクリープ計算を行わない場合は、クリープひずみ特性データを入力し、クリープ計算無しを指定する必要がある (CREPデータを入力し  $K_{CREP} = 0$  とする)。あるいはき裂発生クリープ損傷値の分布関数を定数とし  $D_{C, MEAN}$  に大きな値を入力し(4.21)式の左辺第二項が実質的に0となるようにする。
- ・注意3 --- 疲労き裂進展特性、クリープき裂進展特性、き裂形状、その他のデータでCANIS-G等の他コードには必要だがCANIS-Iには不要なデータはCANIS-Iでは無視される。従って、不要なデータをわざわざ消す必要がない。同様にCANIS-Iには必要だがCANIS-Gには不要なデータはCANIS-Gでは無視されるので、CANIS-Gを実行する際にわざわざ消す必要はない。

## (2) 解析結果

荷重保持無しでは疲労損傷の計算値  $D_F(t)$  が  $D_{F, MEAN} = 0.1$  にほぼ等しくなる  $t = 120$  サイクルでき裂発生確率が約50%に達する。荷重保持有りではクリープ損傷の占める割合が大きく、クリープ損傷の計算値  $D_C(t)$  が  $D_{C, MEAN} = 0.1$  に達する  $t = 20$  サイクルでき裂発生確率が約50%に達する。



リスト4.20.1 解析例20の入力データ (FCC130,  $t_H = 0$ )

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.20, LOAD.CONT.SIGB=+-20, 650DC, TH=0, CIA-ANALYSIS
2  **** KSUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< KDUM2,3,4  >
3  $        < P.FNS  >< P.SIGM >< P.SIGB >< P.SRC1 >< P.SRC2 >
4  CONT      1      11
5            0.6667      1.0      1.0      0.2      0.2
6  **** NCRAC< RADI  >< THIC  >< AACR  >< BBCR  >< ATLIM  >< BWLIM  >
7  GEOM      30.0      12.0      3.0      3.0      0.7      0.9
8  **** KEPSS<IMAT<IDUM< TREF  >< ALPHY >< SIGF  > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS      2  304      650.0      1.0      40.0
10 **** KFATG< C1      >< M1      >< X1      >< C2      >< M2      >< X2      >
11 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
12 **** KFAIL
13 FAIL      10
14 **** KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  >
15 $        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
16 $C1      < KEY<KDUM< DTAV(J)>< QEP(J) >< QC(J)  > (FOR J=1,NEVNT)
17 $C2      < SM(1,J)>< SB(1,J)>< SP(1,J)>< SM(2,J)>< SB(2,J)>< SP(2,J)>
18 EVEN      0      1      0      20  1000.0      1.0      0.0
19            0.0      0.0      0.0      1.0
20            0      1.0      1.0E4      1.0E4
21            0.0      20.0      0.0      0.0      -20.0      0.0
22 **** KCREP ( NO CREEP CALCULATION )
23 CREP      0
24 **** <IMAT< TREF  >< ALPHF  > (USE LIBRALY)
25 NFFC      304  650.0      1.0
26 **** < XKE      >< XKT      >< DINIT  >
27 $        <KSDF<NFDF< DF.MEAN>< DF.MIN  >< DF.MAX  >< DF.DEV  >
28 $        <KSDC<NFDC< DC.MEAN>< DC.MIN  >< DC.MAX  >< DC.DEV  >
29 DCIA      1.2      1.0
30            3  100  0.1      0.01      2.0      0.5
31            3  100  0.1      0.01      2.0      0.5
32  END

```

リスト4.20.2 解析例20の解析結果 (FCC130,  $t_H = 0$ )

\*\* RESULTS OF NUMERICAL INTEGRAL \*\* ND(DF)=100 ND(DC)=100

IEVL,	TIME,	DF,	DC,	DF+DC,	DELP,	P.SUM
1,	2.000E+01,	1.665E-02,	0.000E+00,	1.665E-02,	3.873E-02,	3.873E-02
2,	4.000E+01,	3.331E-02,	0.000E+00,	3.331E-02,	1.130E-01,	1.517E-01
3,	6.000E+01,	4.996E-02,	0.000E+00,	4.996E-02,	1.042E-01,	2.559E-01
4,	8.000E+01,	6.661E-02,	0.000E+00,	6.661E-02,	9.228E-02,	3.482E-01
5,	1.000E+02,	8.327E-02,	0.000E+00,	8.327E-02,	7.750E-02,	4.257E-01
6,	1.200E+02,	9.992E-02,	0.000E+00,	9.992E-02,	6.107E-02,	4.867E-01
7,	1.400E+02,	1.166E-01,	0.000E+00,	1.166E-01,	5.648E-02,	5.432E-01
8,	1.600E+02,	1.332E-01,	0.000E+00,	1.332E-01,	4.636E-02,	5.896E-01
9,	1.800E+02,	1.499E-01,	0.000E+00,	1.499E-01,	4.064E-02,	6.302E-01
10,	2.000E+02,	1.665E-01,	0.000E+00,	1.665E-01,	3.494E-02,	6.652E-01
11,	2.200E+02,	1.832E-01,	0.000E+00,	1.832E-01,	3.355E-02,	6.987E-01
12,	2.400E+02,	1.998E-01,	0.000E+00,	1.998E-01,	2.805E-02,	7.268E-01
13,	2.600E+02,	2.165E-01,	0.000E+00,	2.165E-01,	1.922E-02,	7.460E-01
14,	2.800E+02,	2.331E-01,	0.000E+00,	2.331E-01,	1.849E-02,	7.645E-01
15,	3.000E+02,	2.498E-01,	0.000E+00,	2.498E-01,	2.119E-02,	7.857E-01
16,	3.200E+02,	2.664E-01,	0.000E+00,	2.664E-01,	1.680E-02,	8.025E-01
17,	3.400E+02,	2.831E-01,	0.000E+00,	2.831E-01,	1.286E-02,	8.153E-01
18,	3.600E+02,	2.998E-01,	0.000E+00,	2.998E-01,	1.534E-02,	8.307E-01
19,	3.800E+02,	3.164E-01,	0.000E+00,	3.164E-01,	1.168E-02,	8.423E-01
20,	4.000E+02,	3.331E-01,	0.000E+00,	3.331E-01,	1.115E-02,	8.535E-01
21,	4.200E+02,	3.497E-01,	0.000E+00,	3.497E-01,	8.020E-03,	8.615E-01
22,	4.400E+02,	3.664E-01,	0.000E+00,	3.664E-01,	1.024E-02,	8.718E-01
23,	4.600E+02,	3.830E-01,	0.000E+00,	3.830E-01,	7.336E-03,	8.791E-01
24,	4.800E+02,	3.997E-01,	0.000E+00,	3.997E-01,	9.333E-03,	8.884E-01
25,	5.000E+02,	4.163E-01,	0.000E+00,	4.163E-01,	4.476E-03,	8.929E-01
26,	5.200E+02,	4.330E-01,	0.000E+00,	4.330E-01,	6.480E-03,	8.994E-01
27,	5.400E+02,	4.496E-01,	0.000E+00,	4.496E-01,	6.203E-03,	9.056E-01
28,	5.600E+02,	4.663E-01,	0.000E+00,	4.663E-01,	7.847E-03,	9.134E-01
29,	5.800E+02,	4.829E-01,	0.000E+00,	4.829E-01,	3.746E-03,	9.172E-01
30,	6.000E+02,	4.996E-01,	0.000E+00,	4.996E-01,	3.630E-03,	9.208E-01
31,	6.200E+02,	5.162E-01,	0.000E+00,	5.162E-01,	3.515E-03,	9.243E-01
32,	6.400E+02,	5.329E-01,	0.000E+00,	5.329E-01,	5.062E-03,	9.294E-01
33,	6.600E+02,	5.495E-01,	0.000E+00,	5.495E-01,	4.814E-03,	9.342E-01
34,	6.800E+02,	5.662E-01,	0.000E+00,	5.662E-01,	3.075E-03,	9.373E-01
35,	7.000E+02,	5.829E-01,	0.000E+00,	5.829E-01,	2.971E-03,	9.402E-01
36,	7.200E+02,	5.995E-01,	0.000E+00,	5.995E-01,	2.867E-03,	9.431E-01
37,	7.400E+02,	6.162E-01,	0.000E+00,	6.162E-01,	2.767E-03,	9.459E-01
38,	7.600E+02,	6.328E-01,	0.000E+00,	6.328E-01,	2.668E-03,	9.485E-01
39,	7.800E+02,	6.495E-01,	0.000E+00,	6.495E-01,	2.572E-03,	9.511E-01
40,	8.000E+02,	6.661E-01,	0.000E+00,	6.661E-01,	2.477E-03,	9.536E-01
41,	8.200E+02,	6.828E-01,	0.000E+00,	6.828E-01,	2.385E-03,	9.560E-01
42,	8.400E+02,	6.994E-01,	0.000E+00,	6.994E-01,	2.295E-03,	9.583E-01
43,	8.600E+02,	7.161E-01,	0.000E+00,	7.161E-01,	2.208E-03,	9.605E-01
44,	8.800E+02,	7.327E-01,	0.000E+00,	7.327E-01,	1.071E-03,	9.616E-01
45,	9.000E+02,	7.494E-01,	0.000E+00,	7.494E-01,	1.050E-03,	9.626E-01
46,	9.200E+02,	7.660E-01,	0.000E+00,	7.660E-01,	3.028E-03,	9.656E-01
47,	9.400E+02,	7.827E-01,	0.000E+00,	7.827E-01,	9.688E-04,	9.666E-01
48,	9.600E+02,	7.993E-01,	0.000E+00,	7.993E-01,	1.879E-03,	9.685E-01
49,	9.800E+02,	8.160E-01,	0.000E+00,	8.160E-01,	9.105E-04,	9.694E-01
50,	1.000E+03,	8.327E-01,	0.000E+00,	8.327E-01,	8.916E-04,	9.703E-01

リスト4.20.3 解析例20の入力データ (FCC134,  $t_H = 10\text{min}$ )

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.20, LOAD.CONF.SIGB=+17,-20, TH=10MIN., CIA-ANALYSIS
2  **** KDUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< KDUM2,3,4  >
3  ¥        < P.FNS  >< P.SIGM >< P.SIGB >< P.SRC1 >< P.SRC2 >
4  CONT      1      11
5           0.6667      1.0      1.0      0.2      0.2
6  **** NCRAC< RADI  >< THIC  >< AACR  >< BBCR  >< ATLM  >< BWLIM >
7  GEOM      30.0      12.0      5.0      10.0      0.7      0.9
8  **** KEPSS<IMAT<IDUM< TREF  >< ALPHY >< SIGF  > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS      2  304      650.0      1.0      40.0
10 **** KCREP<IMAT<ICHR< TREF  >< ALPHC  >< DUMMY  > (KCREP=2,LIBRALY)
11 CREP      2  304      1  650.0      1.0
12 **** <IMAT< TREF  >< ALPHR  > (USE LIBRALY)
13 RUPT      304  650.0      1.0
14 **** KFATG< C1      >< M1      >< X1      >< C2      >< M2      >< X2      >
15 FATG      2  1.2022E-3  1.4435
16 **** KCRPG< C1      >< M1      >< X1      >< C2      >< M2      >< X2      >
17 CRPG      1  0.1274      0.877
18 **** KFAIL
19 FAIL      10
20 **** KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  > (LTYPE=0)
21 ¥        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
22 ¥C1      < KEY<KDUM< DTAV(J)>< QEP(J) >< QC(J)  > (FOR J=1,NEVNT)
23 ¥C2      < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
24 EVEN      0      1      0      5  200.0      1.0      0.1667
25           0.0      0.0      0.0      1.0
26           0      1.0      1.0E4      1.0E4
27           0.0      17.0      0.0      0.0      -20.0      0.0
28 **** <IMAT< TREF  >< ALPHF  > (USE LIBRALY)
29 NFFC      304  650.0      1.0
30 **** < XKE      >< XKT      >< DINIT  >
31 ¥        <KSDF<NFDF< DF.MEAN>< DF.MIN  >< DF.MAX  >< DF.DEV  >
32 ¥        <KSDC<NFDC< DC.MEAN>< DC.MIN  >< DC.MAX  >< DC.DEV  >
33 DCIA      1.2      1.0      1.0
34           3  100  0.1      0.01      2.0      0.5
35           3  100  0.1      0.01      2.0      0.5
36 END

```

リスト4.20.4 解析例20の解析結果 (FCC134,  $t_{II} = 10\text{min}$ )

\*\* RESULTS OF NUMERICAL INTEGRAL \*\* ND(DF)=100 ND(DC)=100

IEVL,	TIME,	DF,	DC,	DF+DC,	DELP,	P.SUM
1,	5.000E+00,	1.661E-03,	2.588E-02,	2.754E-02,	1.051E-01,	1.051E-01
2,	1.000E+01,	3.322E-03,	5.176E-02,	5.508E-02,	1.807E-01,	2.858E-01
3,	1.500E+01,	4.982E-03,	7.764E-02,	8.262E-02,	1.464E-01,	4.322E-01
4,	2.000E+01,	6.643E-03,	1.035E-01,	1.102E-01,	1.135E-01,	5.457E-01
5,	2.500E+01,	8.304E-03,	1.294E-01,	1.377E-01,	8.813E-02,	6.338E-01
6,	3.000E+01,	9.965E-03,	1.553E-01,	1.652E-01,	6.830E-02,	7.021E-01
7,	3.500E+01,	1.163E-02,	1.812E-01,	1.928E-01,	5.334E-02,	7.555E-01
8,	4.000E+01,	1.329E-02,	2.070E-01,	2.203E-01,	4.213E-02,	7.976E-01
9,	4.500E+01,	1.495E-02,	2.329E-01,	2.479E-01,	3.355E-02,	8.311E-01
10,	5.000E+01,	1.661E-02,	2.588E-01,	2.754E-01,	2.697E-02,	8.581E-01
11,	5.500E+01,	1.827E-02,	2.847E-01,	3.029E-01,	2.203E-02,	8.801E-01
12,	6.000E+01,	1.993E-02,	3.106E-01,	3.305E-01,	1.795E-02,	8.981E-01
13,	6.500E+01,	2.159E-02,	3.364E-01,	3.580E-01,	1.489E-02,	9.130E-01
14,	7.000E+01,	2.325E-02,	3.623E-01,	3.856E-01,	1.226E-02,	9.252E-01
15,	7.500E+01,	2.491E-02,	3.882E-01,	4.131E-01,	1.033E-02,	9.356E-01
16,	8.000E+01,	2.657E-02,	4.141E-01,	4.406E-01,	8.638E-03,	9.442E-01
17,	8.500E+01,	2.823E-02,	4.400E-01,	4.682E-01,	7.421E-03,	9.516E-01
18,	9.000E+01,	2.989E-02,	4.658E-01,	4.957E-01,	6.261E-03,	9.579E-01
19,	9.500E+01,	3.156E-02,	4.917E-01,	5.233E-01,	5.353E-03,	9.633E-01
20,	1.000E+02,	3.322E-02,	5.176E-01,	5.508E-01,	4.572E-03,	9.678E-01
21,	1.050E+02,	3.488E-02,	5.435E-01,	5.783E-01,	3.952E-03,	9.718E-01
22,	1.100E+02,	3.654E-02,	5.693E-01,	6.059E-01,	3.383E-03,	9.752E-01
23,	1.150E+02,	3.820E-02,	5.952E-01,	6.334E-01,	3.018E-03,	9.782E-01
24,	1.200E+02,	3.986E-02,	6.211E-01,	6.610E-01,	2.550E-03,	9.807E-01
25,	1.250E+02,	4.152E-02,	6.470E-01,	6.885E-01,	2.244E-03,	9.830E-01
26,	1.300E+02,	4.318E-02,	6.729E-01,	7.160E-01,	1.969E-03,	9.849E-01
27,	1.350E+02,	4.484E-02,	6.987E-01,	7.436E-01,	1.758E-03,	9.867E-01
28,	1.400E+02,	4.650E-02,	7.246E-01,	7.711E-01,	1.500E-03,	9.882E-01
29,	1.450E+02,	4.816E-02,	7.505E-01,	7.987E-01,	1.341E-03,	9.895E-01
30,	1.500E+02,	4.982E-02,	7.764E-01,	8.262E-01,	1.196E-03,	9.907E-01
31,	1.550E+02,	5.149E-02,	8.023E-01,	8.537E-01,	1.027E-03,	9.918E-01
32,	1.600E+02,	5.315E-02,	8.281E-01,	8.813E-01,	9.403E-04,	9.927E-01
33,	1.650E+02,	5.481E-02,	8.540E-01,	9.088E-01,	8.165E-04,	9.935E-01
34,	1.700E+02,	5.647E-02,	8.799E-01,	9.364E-01,	7.192E-04,	9.942E-01
35,	1.750E+02,	5.813E-02,	9.058E-01,	9.639E-01,	6.493E-04,	9.949E-01
36,	1.800E+02,	5.979E-02,	9.317E-01,	9.914E-01,	5.828E-04,	9.955E-01
37,	1.850E+02,	6.145E-02,	9.575E-01,	1.019E+00,	5.120E-04,	9.960E-01
38,	1.900E+02,	6.311E-02,	9.834E-01,	1.047E+00,	4.563E-04,	9.964E-01
39,	1.950E+02,	6.477E-02,	1.009E+00,	1.074E+00,	4.026E-04,	9.968E-01
40,	2.000E+02,	6.643E-02,	1.035E+00,	1.102E+00,	3.688E-04,	9.972E-01

## 4.21 解析例21（き裂発生確率の評価、解析例6の荷重条件）

解析例6の荷重条件（荷重制御型の膜応力 $\sigma_M = \pm 13 \text{ kgf/mm}^2$ ）を仮定し、CANIS-Iによりき裂発生確率を評価した。荷重保持無しの労試験（FCC-11、 $t_H = 0$ ）の入力データをリスト4.21.1に、計算結果をリスト4.21.2に示す。荷重保持有りのクリープ疲労試験（FCC-12、 $t_H = 10\text{min}$ ）の入力データをリスト4.21.3に、計算結果をリスト4.21.4に示す。解析例6のCANIS-Gの入力データに疲労損傷値計算のための疲労破損データ、クリープ損傷値計算のためのクリープ破断データ、疲労き裂発生に対応する疲労損傷値の統計分布関数およびクリープき裂発生に対応するクリープ損傷値の統計分布関数を追加した以外は、解析例6と基本的に共通である。解析条件は荷重データを除いて前4.20節と共通であり省略する。

荷重保持無しでは疲労損傷の計算値 $D_F(t)$ が $D_{F,MEAN} = 0.1$ に達する $t = 9000$ サイクルでき裂発生確率が約50%に達する。荷重保持有りではクリープ損傷の占める割合が大きく、クリープ損傷の計算値 $D_C(t)$ が0.093となる $t = 500$ サイクルでき裂発生確率が約50%に達する。

リスト4.21.1 解析例21の入力データ (FCC-11,  $t_H = 0$ )

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  ¥ITL      EXAMPLE.21, LOAD.CONT.SIGM=+-13, 650DC, TH=10MIN., CIA-ANAL.
2  TITL      EXAMPLE.21, LOAD.CONT.SIGM=+-13, 650DC, TH=0. CIA-ANALYSIS
3  ¥¥¥¥ K DUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< K DUM2,3,4  >
4  ¥        < P.FNS  >< P.SIGM  >< P.SIGB  >< P.SRC1  >< P.SRC2  >
5  CONT      1
6           1.0      1.0      1.0      0.2      0.2
7  ¥¥¥¥ NCRAC< RAD I  >< THIC  >< AACR  >< BBCR  >< ATLIM  >< BWLIM  >
8  GEOM      12.5     8.0      0.5      2.5      0.9      0.9
9  ¥¥¥¥ KEPSS<IMAT<IDUM< TREF  >< ALPHY  >< SIGF  > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
10 EPSS      2 304     650.0     1.0      40.0
11 ¥¥¥¥ KCREP<IMAT<ICHR< TREF  >< ALPHC  > (USE LIBRALY)
12 ¥REP      2 304     1 650.0     1.0
13 CREP      0
14 ¥¥¥¥ <IMAT< TREF  >< ALPHR  > (USE LIBRALY)
15 RUPT      304 650.0  1.0
16 ¥¥¥¥ KFATG< C1  >< M1  >< X1  >< C2  >< M2  >< X2  >
17 FATG      2 1.2022E-3 1.4435
18 ¥¥¥¥ KCRPG< C1  >< M1  >< X1  >< C2  >< M2  >< X2  >
19 CRPG      1 0.1274  0.877
20 ¥¥¥¥ KFAIL
21 FAIL      10
22 ¥¥¥¥ KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  > (LTYPE=0)
23 ¥        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
24 ¥C1      < KEY<K DUM< DTAV(J)>< QEP(J) >< QC(J)  > (FOR J=1,NEVNT)
25 ¥C2      < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
26 EVEN      0 1 0 500 20000.0 1.0 0.1667
27           0.0      0.0      0.0      1.0
28           0 1.0 1.0E4 1.0E4
29           13.0     0.0      0.0     -13.0     0.0      0.0
30 ¥¥¥¥ <IMAT< TREF  >< ALPHF  > (USE LIBRALY)
31 NFFC      304 650.0  1.0
32 ¥¥¥¥      < XKE  >< XKT  >< DINIT  >
33 ¥        <KSDF<NFDF< DF.MEAN>< DF.MIN  >< DF.MAX  >< DF.DEV  >
34 ¥        <KSDC<NFDC< DC.MEAN>< DC.MIN  >< DC.MAX  >< DC.DEV  >
35 DCIA      1.2      1.0      1.0
36           3 100 0.1 0.01 2.0 0.5
37           3 100 0.1 0.01 2.0 0.5
38 END

```

リスト4.21.2 解析例21の解析結果 (FCC-11,  $t_H = 0$ )

\*\* RESULTS OF NUMERICAL INTEGRAL \*\* ND(DF)=100 ND(DC)=100

IEVL,	TIME,	DF,	DC,	DF+DC,	DELP,	P.SUM
1,	5.000E+02,	5.788E-03,	0.000E+00,	5.788E-03,	0.000E+00,	0.000E+00
2,	1.000E+03,	1.158E-02,	0.000E+00,	1.158E-02,	7.972E-03,	7.972E-03
3,	1.500E+03,	1.737E-02,	0.000E+00,	1.737E-02,	3.364E-02,	4.161E-02
4,	2.000E+03,	2.315E-02,	0.000E+00,	2.315E-02,	3.897E-02,	8.058E-02
5,	2.500E+03,	2.894E-02,	0.000E+00,	2.894E-02,	4.014E-02,	1.207E-01
6,	3.000E+03,	3.473E-02,	0.000E+00,	3.473E-02,	3.703E-02,	1.577E-01
7,	3.500E+03,	4.052E-02,	0.000E+00,	4.052E-02,	3.908E-02,	1.968E-01
8,	4.000E+03,	4.631E-02,	0.000E+00,	4.631E-02,	3.979E-02,	2.366E-01
9,	4.500E+03,	5.210E-02,	0.000E+00,	5.210E-02,	3.517E-02,	2.718E-01
10,	5.000E+03,	5.788E-02,	0.000E+00,	5.788E-02,	3.304E-02,	3.048E-01
11,	5.500E+03,	6.367E-02,	0.000E+00,	6.367E-02,	3.012E-02,	3.350E-01
12,	6.000E+03,	6.946E-02,	0.000E+00,	6.946E-02,	3.107E-02,	3.660E-01
13,	6.500E+03,	7.525E-02,	0.000E+00,	7.525E-02,	2.269E-02,	3.887E-01
14,	7.000E+03,	8.104E-02,	0.000E+00,	8.104E-02,	2.302E-02,	4.117E-01
15,	7.500E+03,	8.683E-02,	0.000E+00,	8.683E-02,	2.795E-02,	4.397E-01
16,	8.000E+03,	9.262E-02,	0.000E+00,	9.262E-02,	2.348E-02,	4.632E-01
17,	8.500E+03,	9.840E-02,	0.000E+00,	9.840E-02,	2.358E-02,	4.867E-01
18,	9.000E+03,	1.042E-01,	0.000E+00,	1.042E-01,	1.887E-02,	5.056E-01
19,	9.500E+03,	1.100E-01,	0.000E+00,	1.100E-01,	1.884E-02,	5.245E-01
20,	1.000E+04,	1.158E-01,	0.000E+00,	1.158E-01,	1.877E-02,	5.432E-01
21,	1.050E+04,	1.216E-01,	0.000E+00,	1.216E-01,	1.866E-02,	5.619E-01
22,	1.100E+04,	1.273E-01,	0.000E+00,	1.273E-01,	1.390E-02,	5.758E-01
23,	1.150E+04,	1.331E-01,	0.000E+00,	1.331E-01,	1.380E-02,	5.896E-01
24,	1.200E+04,	1.389E-01,	0.000E+00,	1.389E-01,	1.822E-02,	6.078E-01
25,	1.250E+04,	1.447E-01,	0.000E+00,	1.447E-01,	9.021E-03,	6.168E-01
26,	1.300E+04,	1.505E-01,	0.000E+00,	1.505E-01,	1.784E-02,	6.347E-01
27,	1.350E+04,	1.563E-01,	0.000E+00,	1.563E-01,	1.319E-02,	6.479E-01
28,	1.400E+04,	1.621E-01,	0.000E+00,	1.621E-01,	1.301E-02,	6.609E-01
29,	1.450E+04,	1.679E-01,	0.000E+00,	1.679E-01,	8.571E-03,	6.694E-01
30,	1.500E+04,	1.737E-01,	0.000E+00,	1.737E-01,	1.269E-02,	6.821E-01
31,	1.550E+04,	1.794E-01,	0.000E+00,	1.794E-01,	4.184E-03,	6.863E-01
32,	1.600E+04,	1.852E-01,	0.000E+00,	1.852E-01,	1.241E-02,	6.987E-01
33,	1.650E+04,	1.910E-01,	0.000E+00,	1.910E-01,	1.218E-02,	7.109E-01
34,	1.700E+04,	1.968E-01,	0.000E+00,	1.968E-01,	7.990E-03,	7.189E-01
35,	1.750E+04,	2.026E-01,	0.000E+00,	2.026E-01,	7.882E-03,	7.268E-01
36,	1.800E+04,	2.084E-01,	0.000E+00,	2.084E-01,	7.773E-03,	7.345E-01
37,	1.850E+04,	2.142E-01,	0.000E+00,	2.142E-01,	7.659E-03,	7.422E-01
38,	1.900E+04,	2.200E-01,	0.000E+00,	2.200E-01,	7.545E-03,	7.497E-01
39,	1.950E+04,	2.257E-01,	0.000E+00,	2.257E-01,	7.427E-03,	7.572E-01
40,	2.000E+04,	2.315E-01,	0.000E+00,	2.315E-01,	7.308E-03,	7.645E-01

リスト4.21.3 解析例21の入力データ (FCC-12,  $t_H = 10\text{min}$ )

```

.....*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7
1  TITL      EXAMPLE.21, LOAD.CONT.SIGM=+-13, 650DC, TH=10MIN., CIA-ANAL.
2  ##### K DUM1<CRAC<KFNS<SCKV<ECKV<PCKV<PEAK< K DUM2,3,4  >
3  ¥        < P.FNS  >< P.SIGM >< P.SIGB >< P.SRC1 >< P.SRC2 >
4  CONT      1
5           1.0      1.0      1.0      0.2      0.2
6  ##### NCRAC< RADI  >< THIC  >< AACR  >< BCCR  >< AT LIM  >< BW LIM  >
7  GEOM      12.5     8.0      0.5      2.5      0.9      0.9
8  ##### KEPSS<IMAT<IDUM< TREF  >< ALPHY >< SIGF  > (KEPSS=1,2,LIBRALY)
9  EPSS      2 304     650.0    1.0      40.0
10 ##### KCREP<IMAT<ICHR< TREF  >< ALPHC  > (USE LIBRALY)
11 CREP      2 304     1 650.0    1.0
12 ##### <IMAT< TREF  >< ALPHR  > (USE LIBRALY)
13 RUPT      304 650.0    1.0
14 ##### KFATG< C1  >< M1  >< X1  >< C2  >< M2  >< X2  >
15 FATG      2 1.2022E-3 1.4435
16 ##### KCRPG< C1  >< M1  >< X1  >< C2  >< M2  >< X2  >
17 CRPG      1 0.1274    0.877
18 ##### KFAIL
19 FAIL      10
20 ##### KLOAD<TYPE<NEVN<BASE<NTIN< TLIFE  >< DTINT  >< CTIME  > (LTYPE=0)
21 ¥        < SIGDW  >< POPER  >< SIGTE  >< QEPTE  >
22 ¥C1      < KEY<KDUM< DTAV(J)>< QEP(J) >< QC(J)  > (FOR J=1,NEVNT)
23 ¥C2      < SM1(J) >< SB1(J) >< SP1(J) >< SM2(J) >< SB2(J) >< SP2(J) >
24 EVEN      0 1 0 20 1000.0 1.0 0.1667
25           0.0      0.0      0.0      1.0
26           0 1.0      1.0E4    1.0E4
27           13.0     0.0      0.0      -13.0    0.0      0.0
28 ##### <IMAT< TREF  >< ALPHF  > (USE LIBRALY)
29 NFFC      304 650.0    1.0
30 ##### < XKE  >< XKT  >< DINIT  >
31 ¥        <KSDF<NFDF< DF.MEAN>< DF.MIN  >< DF.MAX  >< DF.DEV  >
32 ¥        <KSDC<NFDC< DC.MEAN>< DC.MIN  >< DC.MAX  >< DC.DEV  >
33 DCIA      1.2      1.0      1.0
34           3 100 0.1      0.01     2.0      0.5
35           3 100 0.1      0.01     2.0      0.5
36 END

```



リスト4.21.4 解析例21の入力データ (FCC-12,  $t_H = 10\text{min}$ )

\*\* RESULTS OF NUMERICAL INTEGRAL \*\* ND(DF)=100 ND(DC)=100

IEVL,	TIME,	DF,	DC,	DF+DC,	DELP,	P.SUM
1,	2.000E+01,	2.315E-04,	3.714E-03,	3.946E-03,	0.000E+00,	0.000E+00
2,	4.000E+01,	4.631E-04,	7.428E-03,	7.891E-03,	0.000E+00,	0.000E+00
3,	6.000E+01,	6.946E-04,	1.114E-02,	1.184E-02,	6.335E-03,	6.335E-03
4,	8.000E+01,	9.262E-04,	1.486E-02,	1.578E-02,	2.226E-02,	2.859E-02
5,	1.000E+02,	1.158E-03,	1.857E-02,	1.973E-02,	2.419E-02,	5.278E-02
6,	1.200E+02,	1.389E-03,	2.228E-02,	2.367E-02,	2.617E-02,	7.896E-02
7,	1.400E+02,	1.621E-03,	2.600E-02,	2.762E-02,	2.689E-02,	1.059E-01
8,	1.600E+02,	1.852E-03,	2.971E-02,	3.156E-02,	2.747E-02,	1.333E-01
9,	1.800E+02,	2.084E-03,	3.343E-02,	3.551E-02,	2.673E-02,	1.600E-01
10,	2.000E+02,	2.315E-03,	3.714E-02,	3.946E-02,	2.661E-02,	1.867E-01
11,	2.200E+02,	2.547E-03,	4.085E-02,	4.340E-02,	2.625E-02,	2.129E-01
12,	2.400E+02,	2.778E-03,	4.457E-02,	4.735E-02,	2.513E-02,	2.380E-01
13,	2.600E+02,	3.010E-03,	4.828E-02,	5.129E-02,	2.479E-02,	2.628E-01
14,	2.800E+02,	3.242E-03,	5.200E-02,	5.524E-02,	2.389E-02,	2.867E-01
15,	3.000E+02,	3.473E-03,	5.571E-02,	5.918E-02,	2.362E-02,	3.103E-01
16,	3.200E+02,	3.705E-03,	5.942E-02,	6.313E-02,	2.200E-02,	3.323E-01
17,	3.400E+02,	3.936E-03,	6.314E-02,	6.707E-02,	2.158E-02,	3.539E-01
18,	3.600E+02,	4.168E-03,	6.685E-02,	7.102E-02,	2.090E-02,	3.748E-01
19,	3.800E+02,	4.399E-03,	7.057E-02,	7.497E-02,	2.002E-02,	3.949E-01
20,	4.000E+02,	4.631E-03,	7.428E-02,	7.891E-02,	1.950E-02,	4.143E-01
21,	4.200E+02,	4.862E-03,	7.799E-02,	8.286E-02,	1.859E-02,	4.329E-01
22,	4.400E+02,	5.094E-03,	8.171E-02,	8.680E-02,	1.801E-02,	4.510E-01
23,	4.600E+02,	5.325E-03,	8.542E-02,	9.075E-02,	1.758E-02,	4.685E-01
24,	4.800E+02,	5.557E-03,	8.914E-02,	9.469E-02,	1.658E-02,	4.851E-01
25,	5.000E+02,	5.788E-03,	9.285E-02,	9.864E-02,	1.594E-02,	5.010E-01
26,	5.200E+02,	6.020E-03,	9.656E-02,	1.026E-01,	1.567E-02,	5.167E-01
27,	5.400E+02,	6.252E-03,	1.003E-01,	1.065E-01,	1.499E-02,	5.317E-01
28,	5.600E+02,	6.483E-03,	1.040E-01,	1.105E-01,	1.440E-02,	5.461E-01
29,	5.800E+02,	6.715E-03,	1.077E-01,	1.144E-01,	1.381E-02,	5.601E-01
30,	6.000E+02,	6.946E-03,	1.114E-01,	1.184E-01,	1.340E-02,	5.735E-01
31,	6.200E+02,	7.178E-03,	1.151E-01,	1.223E-01,	1.288E-02,	5.863E-01
32,	6.400E+02,	7.409E-03,	1.188E-01,	1.263E-01,	1.251E-02,	5.989E-01
33,	6.600E+02,	7.641E-03,	1.226E-01,	1.302E-01,	1.232E-02,	6.112E-01
34,	6.800E+02,	7.872E-03,	1.263E-01,	1.341E-01,	1.140E-02,	6.226E-01
35,	7.000E+02,	8.104E-03,	1.300E-01,	1.381E-01,	1.146E-02,	6.340E-01
36,	7.200E+02,	8.335E-03,	1.337E-01,	1.420E-01,	1.055E-02,	6.446E-01
37,	7.400E+02,	8.567E-03,	1.374E-01,	1.460E-01,	1.056E-02,	6.551E-01
38,	7.600E+02,	8.798E-03,	1.411E-01,	1.499E-01,	1.002E-02,	6.652E-01
39,	7.800E+02,	9.030E-03,	1.448E-01,	1.539E-01,	9.775E-03,	6.749E-01
40,	8.000E+02,	9.262E-03,	1.486E-01,	1.578E-01,	9.330E-03,	6.843E-01
41,	8.200E+02,	9.493E-03,	1.523E-01,	1.618E-01,	9.149E-03,	6.934E-01
42,	8.400E+02,	9.725E-03,	1.560E-01,	1.657E-01,	8.619E-03,	7.020E-01
43,	8.600E+02,	9.956E-03,	1.597E-01,	1.697E-01,	8.588E-03,	7.106E-01
44,	8.800E+02,	1.019E-02,	1.634E-01,	1.736E-01,	8.029E-03,	7.187E-01
45,	9.000E+02,	1.042E-02,	1.671E-01,	1.776E-01,	7.877E-03,	7.265E-01
46,	9.200E+02,	1.065E-02,	1.708E-01,	1.815E-01,	7.502E-03,	7.340E-01
47,	9.400E+02,	1.088E-02,	1.746E-01,	1.854E-01,	7.312E-03,	7.414E-01
48,	9.600E+02,	1.111E-02,	1.783E-01,	1.894E-01,	7.169E-03,	7.485E-01
49,	9.800E+02,	1.135E-02,	1.820E-01,	1.933E-01,	6.894E-03,	7.554E-01
50,	1.000E+03,	1.158E-02,	1.857E-01,	1.973E-01,	6.569E-03,	7.620E-01

## 5. まとめ

FBR等の大規模なプラントにおいては、機器構造物の構造健全性を確保しつつ、建設コスト低減や運転効率改善などによる総合経済効率を高めるために、「構造設計」、「品質管理」、「欠陥（き裂）の検査」および「欠陥（き裂）の破壊力学評価」を総合的かつ有機的にシステム運用する「構造健全性保証システム」が普及しつつある。

FBR機器構造物では高延性材料であるステンレス鋼が高温クリープ条件下で使用され、また内圧荷重等の機械的荷重が相対的に小さく、熱膨張による配管反力、過渡熱応力など変位制御型の荷重が相対的に大きく、局所的な塑性ひずみおよびクリープひずみを許容する荷重設計となる。従って弾塑性クリープ変形を伴うクリープ疲労き裂進展および延性破断が主要な破壊力学評価対象であり、弾塑性J積分、クリープJ積分、正味断面応力および弾塑性き裂開口面積などの、弾塑性クリープ状態下の破壊力学パラメータの計算評価が必要である。

弾塑性クリープ状態下の破壊力学パラメータ計算は、一般に大型計算機と汎用FEMコードが使用され、計算コストが多岐であり、計算効率が非常に悪い現状である。「構造健全性保証システム」を経済性、計算効率および汎用性を備えた「実用的なシステム」とするには「弾塑性クリープ状態下の破壊力学パラメータ評価を効率良く行う簡易手法体系を確立すること」が必要であると考えられる。

以上の認識に基づき、著者らは「簡易法による、弾塑性クリープ状態下の、き裂評価手法の開発および解析コード作成」を進めている。弾塑性クリープ破壊力学パラメータの簡易評価法についての検討を行い、検討結果を基に「簡易法によるクリープ疲労き裂進展計算コードの原型版」を作成し、試験結果およびFEM詳細解析結果をシミュレートした（文献 [1.1]）。その後、改定してCANIS-Gコードとし、使用経験を重ねている（文献 [1.2]、[4.5]、[4.6]）。また簡易法による確率論的破壊力学解析コードCANIS-Pを作成し使用経験を重ねている（文献 [1.3]、[1.4]）。また破壊力学パラメータ評価コードCANIS-Kとき裂発生確率評価コードCANIS-Iを作成した。CANIS-G, K, Iでは数学力学モデル、入力データおよび使用サブルーチンが共通化され、将来のコードの改定拡張が容易かつ統一的に行える。これらのコードの解析機能の拡張は今後継続して行っていく予定である。

## 6. 参考文献(References)

- [1.1] 古橋、渡士、高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅳ)－クリープ疲労き裂進展評価法の検討、PNC N9410 90-136, 1990年7月
- [1.2] K. Watashi et al., Crack Growth Behavior of a Circumferentially Slitted Cylinder Under Cyclic Cold Transients, 11th SMiRT, L11(G)/3, 1991.
- [1.3] 古橋、渡士、高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅳ)－確率論的破壊力学コードCANIS-P、PNC PN-9410 91-035, 1991年1月
- [1.4] K. Watashi, I. Furuhashi, Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code CANIS-P, 11th SMiRT, G30(M)/4, 1991.
- [2.1] J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju, Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads, NASA-TM-85793, 1984.
- [2.2] 例えば岡村弘之、線形破壊力学入門、培風館、1976.
- [2.3] K. Walker, The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum, ASTM STP 462, pp. 1-14, 1970.
- [2.4] I. Milne et al., Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Int. J. of PVP, Vol. 32, pp. 3-104, 1988.
- [2.5] 古橋、渡士、高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅳ)－クリープ疲労き裂進展評価法の検討、PNC SN9410 90-136, 1990年7月
- [2.6] P. Paris and H. Tada, The Effects of Shell Corrections on Stress Intensity Factors and the Crack Opening Area of a Circumferential and a Longitudinal Through-Crack in a Pipe, NUREG/CR-3464, Sec. II-1, 1983.
- [4.1] 日本溶接協会、高速炉の構造健全性に関する基礎的研究(Ⅰ)、PNC SJ2534 88-002, 1988年2月
- [4.2] 日本溶接協会、高速炉の構造健全性に関する基礎的研究(Ⅱ)、PNC SJ2534 89-001, 1989年2月
- [4.3] 日本溶接協会、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、PNC SJ225 84-01, 1984年
- [4.4] 日本溶接協会、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(Ⅲ)、PNC SJ225 86-03, 1986年2月
- [4.5] 渡士他、表面き裂付き円筒の熱クリープ疲労き裂進展－予備試験の中間報告、PNC N9410 90-183, 1990年7月
- [4.6] 渡士他、A T T F環状き裂の解析、PNC PN9410 91-034, 1991年1月
- [4.7] 日本溶接協会、原子炉構造材料の経年変化に関する基礎試験(Ⅲ)成果報告書、JWES-AE-9103, 1991年3月
- [4.8] 日本溶接協会、高速炉の構造健全性に関する基礎的研究(Ⅲ)、PNC SJ9534 90-002, 1990年9月

## 付録1 材料データライブラリ

CANISにはPNCが取得した7鋼種の材料データがサブプログラムとして組み込まれている。鋼種Key および温度T (°C) を指定して参照する事ができる。その内容は次の通りである。

・ 7 鋼種	鋼種名	引用文献	鋼種Key
	SUS304 鋼	文献(1)	304
	SUS316 鋼	文献(1)	316
	SUS321 鋼	文献(1)	321
	2¼Cr-1Mo鋼 (板、SCMV4 )	文献(1)	2250
	2¼Cr-1Mo鋼 (管、STBA24)	文献(1)	2251
	改良 9Cr-1Mo鋼	文献(2)	91
	改良 SUS316 鋼	文献(3)	3160

## ・ 材料特性 5 項目

- ① Ludwik 型の単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式 (A1. 1節)
- ② Ludwik 型の繰り返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式 (A1. 2節)
- ③ クリープ破断特性 (A1. 3節)
- ④ 指数型のクリープひずみ特性 (A1. 4節)
- ⑤ 繰り返しひずみ範囲による疲労破断特性 (A1. 5節)

文献(1) 解説「高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等」昭和59年11月  
科学技術庁原子力安全局

文献(2) PNC SN9410 88-105 高速炉設計基準材料強度基準等の高度化に関する検討報告 (I)

文献(3) PNC 社内報告書 高速炉構造用316の材料強度基準等 (案), PNC ZN9410 93-142

## A1.1 Ludwik 型の単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式

弾塑性ひずみ  $\varepsilon$  (mm/mm) と応力  $\sigma$  (kg/mm<sup>2</sup>) の関係を次式で表す。

$$\varepsilon \text{ (弾塑性ひずみ)} = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (\text{A1. 1a})$$

$$\varepsilon_e \text{ (弾性ひずみ)} = \sigma / E \text{ (縦弾性係数)} \quad (\text{A1. 1b})$$

$$\varepsilon_p \text{ (塑性ひずみ)} = 0 \quad \text{for } \sigma \leq \sigma_{p,m} \text{ (単調負荷の弾性限)} \quad (\text{A1. 1c})$$

$$\varepsilon_p = [(\sigma - \sigma_{p,m}) / k_m] ** (1 / m_m) \quad \text{for } \sigma > \sigma_{p,m} \quad (\text{A1. 1d})$$

ここで (A1. 1d) 式の右辺の \*\* は累乗の意味で使用した。以後、特に断らない限り、同様に使用するものとする。

弾性限  $\sigma_{p,m}$  は以下のように与える。

0.2%耐力の平均特性値を  $S_y$  とする。平均特性値からのばらつきを考慮するための補正係数を  $\alpha_y$  とし、対象材料の 0.2%耐力  $\sigma_y$  を次式で与える。

$$\sigma_y = S_y / \alpha_y \quad (\text{A1. 2a})$$

$\alpha_y = 1$  が平均特性を表す。  $\sigma_{p,m}$  を次式で与える。

$$\sigma_{p,m} = \sigma_y - k_m (0.002) ** m_m \quad (\text{A1. 2b})$$

PNCでは各鋼種に対して、 $E$ 、 $k_m$ 、 $m_m$ 、 $S_Y$  を温度 $T$  (°C) の関数として整理した。設計基準データとして用いる場合、 $\sigma_Y$  は 0.2%耐力の95%信頼下限値とし、 $\alpha_Y$  は95%信頼下限値を与えるための安全係数の意味で使用される。各鋼種および使用温度に対し適切な $\alpha_Y$  が設定されている。

CANISでは補正有効範囲を  $0.7 \leq \alpha_Y \leq 1.5$  とし、対象材料の $\sigma_Y$  を正確に与えるための純粋な補正係数の意味で使用する。

## A1.2 Ludwik 型の繰り返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式

弾塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon$  (mm/mm) と応力範囲 $\Delta \sigma$  (kg/mm<sup>2</sup>) の関係を次式で表す。

$$\Delta \epsilon \text{ (弾塑性ひずみ範囲)} = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p \quad (\text{A1.3a})$$

$$\Delta \epsilon_e \text{ (弾性ひずみ範囲)} = \Delta \sigma / E \quad (\text{A1.3b})$$

$$\Delta \epsilon_p \text{ (塑性ひずみ範囲)} = 0 \quad \text{for } \Delta \sigma \leq 2 \sigma_{P,C} \text{ (繰り返し負荷の弾性限)} \quad (\text{A1.3c})$$

$$\Delta \epsilon_p = [(\Delta \sigma - 2 \sigma_{P,C}) / k_C] ** (1 / m_C) \quad \text{for } \Delta \sigma > 2 \sigma_{P,C} \quad (\text{A1.3d})$$

(A1.3)式を弾塑性応力ひずみ関係式 ( $\epsilon$  と  $\sigma$  の関係) として用いる場合は、範囲を表す $\Delta$ を2で置き換える。PNCでは各鋼種に対して $k_C$ 、 $m_C$ 、 $\sigma_{P,C}$  を温度 $T$  (°C) の関数として整理した。繰り返し負荷の弾性限 $\sigma_{P,C}$ として、次式の単調負荷の弾性限の平均特性値 $S_P$ を与えている。

$$S_P = S_Y - k_m (0.002) ** m_m \quad (\text{A1.4a})$$

CANISでは 0.2%耐力の補正係数 $\alpha_Y$ を導入して、以下のように $\sigma_{P,C}$ を与える。

0.2%耐力範囲 (塑性ひずみ範囲 0.4%の応力範囲) の平均特性値 $\Delta S_Y$ を次式で求める。

$$\Delta S_Y = 2 S_P + k_C (0.004) ** m_C \quad (\text{A1.4b})$$

補正係数を $\alpha_Y$ を用い、対象材料の 0.2%耐力 $\sigma_Y$ を次式で与える。

$$2 \sigma_Y = \Delta S_Y / \alpha_Y \quad (\text{A1.4c})$$

$\alpha_Y = 1$ が平均特性を表すことになる。次式により $\sigma_{P,C}$ を与える。

$$2 \sigma_{P,C} = 2 \sigma_Y - k_C (0.004) ** m_C \quad (\text{A1.4d})$$

補正有効範囲は  $0.7 \leq \alpha_Y \leq 1.5$  とし、対象材料の $2 \sigma_Y$  (0.2%耐力範囲) を正確に与えるための補正係数の意味で $\alpha_Y$ を使用する。

## A1.3 クリープ破断特性

保持応力 $\sigma$  (kg/mm<sup>2</sup>) とクリープ破断時間 $t_R$  (hr) の関係を次式で表す。

$$\log_{10}(\alpha_R t_R) = B_0 + B_1 \log_{10}(\sigma) + B_2 [\log_{10}(\sigma)]^2 \quad (\text{A1.5})$$

ここで $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ はクリープ破断時間特性を表す材料データであり、温度 $T$  (°C) の関数として与えられる。 $\alpha_R$ は平均特性からのばらつきを考慮するための補正係数であり、 $\alpha_R = 1$ が平均特性を表すものとする。 $\alpha_R = 2$ は破断時間が平均特性の $1/2$ となる事を表す。クリープ破断時間特性はき裂無し対象断面のクリープ損傷計算に使用される。

PNCでは各鋼種に対して $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ を温度 $T$  (°C) の関数として整理した。設計基準に基づくクリープ損傷評価に使用する場合は、 $\alpha_R$ は安全係数の意味で使用され、評価目的に応じて適切な $\alpha_R$ が設定されている。

CANISでは対象材料の破断時間をより正確に与えるための補正係数の意味で $\alpha_R$ を使用し、補正有効範囲は  $0.1 \leq \alpha_R \leq 10.0$  とする。

## A1.4 指数型のクリープひずみ特性

保持応力  $\sigma$  (kg/mm<sup>2</sup>) および保持時間  $t$  (hr) とクリープひずみ  $\varepsilon_c$  (mm/mm) の関係を次式で表す。

$$\varepsilon_c = C_1 [1 - \exp(-r_1 t)] + C_2 [1 - \exp(-r_2 t)] + e_m t \quad (A1.6)$$

ここで  $e_m$ 、 $C_1$ 、 $r_1$ 、 $C_2$ 、 $r_2$  はクリープひずみ特性を表す材料データであり、保持応力  $\sigma$  に対応したクリープ破断時間  $t_R$  と温度  $T$  (°C) の関数で与えられる。クリープ破断時間  $t_R$  は(A1.5)式の補正係数を  $\alpha_c$  で置き換えた次式を使用する。

$$\log_{10}(\alpha_c t_R) = B_0 + B_1 \log_{10}(\sigma) + B_2 [\log_{10}(\sigma)]^2 \quad (A1.7)$$

即ち、クリープ損傷計算のためのクリープ破断時間(A1.5)式と、クリープひずみ特性のパラメータとしてのクリープ破断時間(A1.7)式を区別する。

PNCでは各鋼種に対して  $e_m$ 、 $C_1$ 、 $r_1$ 、 $C_2$ 、 $r_2$  を以下のように整理した。

$$e_m = F * (t_R ** \lambda) \quad (A1.8a)$$

$$r_1 = s_1 * (t_R ** \alpha_1) \quad (A1.8b)$$

$$r_2 = s_2 * (t_R ** \alpha_2) \quad (A1.8c)$$

$$C_1 = g_1 * (e_m ** \beta_1) \quad (A1.8d)$$

$$C_2 = g_2 * (e_m ** \beta_2) \quad (A1.8e)$$

ここで  $F$  は温度依存の定数であり、 $\lambda$ 、 $s_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $s_2$ 、 $\alpha_2$ 、 $g_1$ 、 $\beta_1$ 、 $g_2$ 、 $\beta_2$  は温度に依存しない定数である。設計基準に基づくクリープ解析に使用する場合は、 $\alpha_c$  は安全係数の意味で使用され、解析目的に応じて適切な  $\alpha_c$  が設定されている。

CANISでは対象材料のクリープひずみ特性をより正確に与えるための補正係数の意味で  $\alpha_c$  を使用し、補正有効範囲は  $0.1 \leq \alpha_c \leq 10.0$  とする。

## A1.5 繰り返しひずみ範囲による疲労破損特性

繰り返しひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_r$  (mm/mm) およびひずみ速度  $e_s$  (mm/mm/sec) と疲労寿命 ( $N_r$ 、疲労破損に到るまでの繰り返し数) との関係を次式で与える。

$$[\log_{10}(\alpha_r N_r)]^{-1/2} = A_0 + A_1 \log_{10}(\Delta \varepsilon_r) + A_2 [\log_{10}(\Delta \varepsilon_r)]^2 + A_3 [\log_{10}(\Delta \varepsilon_r)]^4 \quad (A1.9)$$

ここで  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  は疲労破損特性を表す材料データであり、温度  $T$  (°C) とひずみ速度  $e_s$  の関数として与えられる。 $\alpha_r$  は  $N_r$  のばらつきを考慮するための補正係数であり、 $\alpha_r = 1$  が平均特性を表すものとする。 $\alpha_r = 2$  は疲労寿命が平均特性の  $1/2$  となる事を表す。

PNCでは各鋼種に対して  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  を温度  $T$  (°C) およびひずみ速度  $e_s$  の関数として整理した。設計基準に基づく疲労損傷評価に使用する場合は、繰り返し数で  $1/20$  ( $\alpha_r = 20$ ) の安全率を考慮した  $N_r$ 、またはひずみ範囲で  $1/2$  の安全率を考慮した  $N_r$  (即ち(A1.9)式で  $\alpha_r = 1$ 、 $2 \Delta \varepsilon_r$  として得られる  $N_r$ ) の小さい方が使用される。

CANISでは対象材料の  $N_r$  をより正確に与えるための補正係数として  $\alpha_r$  を使用し、補正有効範囲は  $0.1 \leq \alpha_r \leq 10.0$  とする。

## A1.6 SUS304 鋼の材料データ

- 単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式( $315 \leq T \leq 650$ )

$$E = 21023.6 - 9.71895 * T \quad T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$S_Y = 25.5655 - 5.58937 * 10^{-2} * T + 1.04384 * 10^{-4} * T^2 - 7.42535 * 10^{-8} * T^3$$

$$k_m \text{ (kg/mm}^2\text{)} = 44.3068 - 1.78933 * 10^{-2} * T$$

$$m_m = 0.279395 + 7.749 * 10^{-5} * T$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,m}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.1節の(A1.2)式で与える。

- 繰り返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式( $425 \leq T \leq 650$ )

$$k_c = 10 * (0.9772725 + 6.44735 * 10^{-3} * T - 4.678257 * 10^{-6} * T^2 - 3.72179 * 10^{-9} * T^3)$$

$$m_c = 3.689759 - 1.847746 * 10^{-2} * T + 3.544464 * 10^{-5} * T^2 - 2.297527 * 10^{-8} * T^3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,c}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.2節の(A1.4)式で与える。

- クリープ破断特性( $425 \leq T \leq 825$ )

$$B_0 = -17.54301 + 26248.54 / T_k \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$B_1 = -6104.579 / T_k$$

$$B_2 = -425.0012 / T_k$$

クリープ破断時間  $t_R$  (hr) は補正係数  $\alpha_R$  を用いてA1.3節の(A1.5)式で与える。

- クリープひずみ特性( $425 \leq T \leq 650$ )

$$F = 62.416 * \exp \left[ -40812.0 / (8.31 * T_k) \right] \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$\lambda = -1.1335$$

$$s_1 = 103.37$$

$$\alpha_1 = -0.72607$$

$$s_2 = 17.255$$

$$\alpha_2 = -0.86775$$

$$g_1 = 1.2692$$

$$\beta_1 = 0.74491$$

$$g_2 = 0.48449$$

$$\beta_2 = 0.81155$$

- 疲労破損特性

$$A_0 = 1.621827 - 4.56785 * 10^{-8} * T^2 * \log_{10}(e_s)$$

$$A_1 = 1.131346 + 8.665061 * 10^{-9} * T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_4 = -1.374387 * 10^{-2} + 4.910723 * 10^{-5} * \log_{10}(e_s)$$

## A1.7 SUS316 鋼の材料データ

- ・単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式(315 ≤ T ≤ 650)

$$E = 21023.6 - 9.71895 * T \quad T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$S_Y = 26.8073 - 5.04547 * 10^{-2} * T + 8.03961 * 10^{-5} * T^2 - 5.11282 * 10^{-8} * T^3$$

$$k_m \text{ (kg/mm}^2\text{)} = 40.0909 - 9.6999 * 10^{-3} * T$$

$$m_m = 0.326245 + 6.13276 * 10^{-5} * T$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,m}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.1節の(A1.2)式で与える。

- ・繰返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式(425 ≤ T ≤ 650)

$$k_c = 10 * ( 4.139556 - 4.434273 * 10^{-3} * T + 1.354228 * 10^{-6} * T^2 + 1.593061 * 10^{-9} * T^3 )$$

$$m_c = 2.171727 - 7.045263 * 10^{-3} * T + 7.832692 * 10^{-6} * T^2 - 2.0836 * 10^{-9} * T^3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,c}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.2節の(A1.4)式で与える。

- ・クリーブ破断特性(425 ≤ T ≤ 825)

$$B_0 = -17.37762 + 22983.2 / T_k \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$B_1 = -798.521 / T_k$$

$$B_2 = -2163.93 / T_k$$

クリーブ破断時間  $t_R$  (hr) は補正係数  $\alpha_R$  を用いてA1.3節の(A1.5)式で与える。

- ・クリーブひずみ特性(425 ≤ T ≤ 650)

$$F = 59119.0 * \exp [ -93475.0 / (8.31 * T_k) ] \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$\lambda = -1.1126$$

$$s_1 = 103.37$$

$$\alpha_1 = -0.72607$$

$$s_2 = 17.255$$

$$\alpha_2 = -0.86775$$

$$g_1 = 1.2692$$

$$\beta_1 = 0.74491$$

$$g_2 = 0.48449$$

$$\beta_2 = 0.81155$$

- ・疲労破損特性

$$A_0 = 1.621827 - 4.56785 * 10^{-8} * T^2 * \log_{10}(e_s)$$

$$A_1 = 1.131346 + 8.665061 * 10^{-9} * T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_4 = -1.374387 * 10^{-2} + 4.910723 * 10^{-5} * \log_{10}(e_s)$$



## A1.8 SUS321 鋼の材料データ

- 単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式( $315 \leq T \leq 650$ )

$$E = 21023.6 - 9.71895 * T \quad T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$S_Y = 24.4905 - 3.80298 * 10^{-2} * T + 6.15139 * 10^{-5} * T^2 - 4.06897 * 10^{-8} * T^3$$

$$k_m = 59.517 - 2.6872 * 10^{-2} * T$$

$$m_m = 0.3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,m}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.1節の(A1.2)式で与える。

- 繰返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式( $425 \leq T \leq 600$ )

$$k_c = 10 * (39.77021 - 0.2107718 * T + 3.995122 * 10^{-4} * T^2 + 2.548977 * 10^{-7} * T^3)$$

$$m_c = 20.53651 - 0.1135368 * T + 2.139214 * 10^{-4} * T^2 - 1.355191 * 10^{-7} * T^3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,c}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.2節の(A1.4)式で与える。

- クリープ破断特性( $425 \leq T \leq 800$ )

$$B_0 = -16.46258 + 20089.0 / T_k \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$B_1 = 1953.03 / T_k$$

$$B_2 = -2954.61 / T_k$$

クリープ破断時間  $t_R$  (hr) は補正係数  $\alpha_R$  を用いてA1.3節の(A1.5)式で与える。

- クリープひずみ特性( $425 \leq T \leq 650$ )

$$F = 0.044758 * \exp[-4439.8 / (8.31 * T_k)] \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$\lambda = -1.1104$$

$$s_1 = 103.37$$

$$\alpha_1 = -0.72607$$

$$s_2 = 17.255$$

$$\alpha_2 = -0.86775$$

$$g_1 = 1.2692$$

$$\beta_1 = 0.74491$$

$$g_2 = 0.48449$$

$$\beta_2 = 0.81155$$

- 疲労破損特性

$$A_0 = 1.621827 - 4.56785 * 10^{-8} * T^2 * \log_{10}(e_s)$$

$$A_1 = 1.131346 + 8.665061 * 10^{-9} * T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_4 = -1.374387 * 10^{-2} + 4.910723 * 10^{-5} * \log_{10}(e_s)$$

## A1.9 2¼Cr-1Mo鋼の材料データ

## • 単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式(300 ≤ T ≤ 550)

$$E = 20100.0 - 4.0 * T \quad (T < 450) \quad T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$E = 21640.11 - 7.060216 * T + 3.684193 * 10^{-3} * T^2 - 1.014639 * 10^{-5} * T^3 \quad (T \geq 450)$$

$$\text{板材、SCMV4} \quad S_Y = 42.9566 - 4.59888 * 10^{-2} * T + 1.47316 * 10^{-4} * T^2 - 1.93388 * 10^{-7} * T^3$$

$$\text{管材、STBA24} \quad S_Y = 35.1902 - 3.29051 * 10^{-2} * T + 6.01783 * 10^{-5} * T^2 - 6.32459 * 10^{-8} * T^3$$

$$k_m = 83.0 - 8.75 * 10^{-2} * T$$

$$m_m = 0.417 - 5.125 * 10^{-4} * T$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,m}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.1節の(A1.2)式で与える。

## • 繰り返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式(300 ≤ T ≤ 550)

$$k_c = 10 * ( -5.011106 + 5.259598 * 10^{-2} * T - 1.222898 * 10^{-4} * T^2 + 9.048195 * 10^{-8} * T^3 )$$

$$m_c = -3.46931 + 2.953373 * 10^{-2} * T - 7.15088 * 10^{-5} * T^2 + 5.518891 * 10^{-8} * T^3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,c}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いてA1.2節の(A1.4)式で与える。

## • クリープ破断特性(375 ≤ T ≤ 650)

$$B_0 = -15.956105 + 18600.626 / T_k \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$B_1 = 659.76676 / T_k$$

$$B_2 = -2655.7865 / T_k$$

クリープ破断時間  $t_R$  (hr) は補正係数 PNC TN9410 94-201 A1.5)式で与える。

## • クリープひずみ特性(375 ≤ T ≤ 550)

$$F = 13.5699 * \exp [ -33435.0 / (8.31 * T_k) ] \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$\lambda = -1.09319$$

$$s_1 = 45.2986$$

$$\alpha_1 = -0.56858$$

$$s_2 = 14.3245$$

$$\alpha_2 = -0.82278$$

$$g_1 = 0.30456$$

$$\beta_1 = 0.59235$$

$$g_2 = 0.26505$$

$$\beta_2 = 0.81657$$

## • 疲労破損特性

$$A_0 = 1.1101 - 2.43973 * 10^{-8} * T^2 * \log_{10}(e_s)$$

$$A_1 = 0.5709357$$

$$A_2 = 0.1874343$$

$$A_4 = -1.445453 * 10^{-2} + 7.045986 * 10^{-6} * T - 6.562716 * 10^{-5} * \log_{10}(e_s)$$

## A1.10 改良9Cr-1Mo 鋼の材料データ

- 単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式 ( $315 \leq T \leq 650$ )

$$E = 21023.6 - 9.71895 * T \quad T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$S_Y = 54.6367 - 7.06234 * 10^{-2} * T + 2.56775 * 10^{-4} * T^2 - 3.52683 * 10^{-7} * T^3$$

$$k_m = 83.0 - 8.75 * 10^{-2} * T$$

$$m_m = 0.417 - 5.125 * 10^{-4} * T$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,m}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いて A1.1 節の (A1.2) 式で与える。

- 繰り返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式 ( $315 \leq T \leq 650$ )

$$k_c = 10 * ( 98.73990 - 0.52935 * T + 9.6421 * 10^{-4} * T^2 - 5.85 * 10^{-7} * T^3 )$$

$$m_c = 49.895 - 0.27257 * T + 5.0036 * 10^{-4} * T^2 - 3.0647 * 10^{-7} * T^3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,c}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いて A1.2 節の (A1.4) 式で与える。

- クリープ破断特性 ( $375 \leq T \leq 700$ )

$$B_0 = -29.11460 + 31808.82 / T_k \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$B_1 = 3055.520 / T_k$$

$$B_2 = -5148.248 / T_k$$

クリープ破断時間  $t_R$  (hr) は補正係数  $\alpha_R$  を用いて A1.3 節の (A1.5) 式で与える。

- クリープひずみ特性 ( $375 \leq T \leq 650$ )

$$F = 13.570 * \exp [ -33435.0 / (8.31 * T_k) ] \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$\lambda = -1.09319$$

$$s_1 = 45.2986$$

$$\alpha_1 = -0.56858$$

$$s_2 = 14.3245$$

$$\alpha_2 = -0.82278$$

$$g_1 = 0.30546$$

$$\beta_1 = 0.59235$$

$$g_2 = 0.26505$$

$$\beta_2 = 0.81657$$

- 疲労破損特性 (現在データ取得中である。当面 2¼Cr-1Mo 鋼のデータを使用する。)

$$A_0 = 1.1101 - 2.43973 * 10^{-8} * T^2 * \log_{10}(e_s)$$

$$A_1 = 0.5709357$$

$$A_2 = 0.1874343$$

$$A_4 = -1.445453 * 10^{-2} + 7.045986 * 10^{-6} * T - 6.562716 * 10^{-5} * \log_{10}(e_s)$$

## A1.8 改良 SUS316 鋼の材料データ

- 単調負荷の弾塑性応力ひずみ関係式 ( $315 \leq T \leq 650$ )

$$E = 21023.6 - 9.71895 * T \quad T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$S_Y = 26.8073 - 5.04547 * 10^{-2} * T + 8.03961 * 10^{-5} * T^2 - 5.11282 * 10^{-8} * T^3$$

$$k_m = 40.0909 - 9.6999 * 10^{-3} * T$$

$$m_m = 0.326245 + 6.13276 * 10^{-5} * T$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,m}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いて A1.1 節の (A1.2) 式で与える。

- 繰り返し負荷の弾塑性応力ひずみ関係式 ( $425 \leq T \leq 650$ )

$$k_c = 10 * ( 4.139556 - 4.434273 * 10^{-3} * T + 1.354228 * 10^{-6} * T^2 + 1.593061 * 10^{-9} * T^3 )$$

$$m_c = 2.171727 - 7.045263 * 10^{-3} * T + 7.832692 * 10^{-6} * T^2 - 2.0836 * 10^{-9} * T^3$$

$\sigma_Y$  と  $\sigma_{P,c}$  は補正係数  $\alpha_Y$  を用いて A1.2 節の (A1.4) 式で与える。

- クリープ破断特性 ( $425 \leq T \leq 825$ )

$$B_0 = -25.82042 + 32232.27 / T_k \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$B_1 = -39.74271 / T_k$$

$$B_2 = -3481.803 / T_k$$

クリープ破断時間  $t_R$  (hr) は補正係数  $\alpha_R$  を用いて A1.3 節の (A1.5) 式で与える。

- クリープひずみ特性 ( $425 \leq T \leq 650$ )

$$F = 241.33 * \exp [ -51222.0 / (8.31 * T_k) ] \quad T_k \text{ (絶対温度)} = T + 273.15$$

$$\lambda = -1.1032$$

$$s_1 = 103.37$$

$$\alpha_1 = -0.72607$$

$$s_2 = 17.255$$

$$\alpha_2 = -0.86775$$

$$g_1 = 1.2692$$

$$\beta_1 = 0.74491$$

$$g_2 = 0.48449$$

$$\beta_2 = 0.81155$$

- 疲労破損特性

$$A_0 = 1.621827 - 4.56785 * 10^{-8} * T^2 * \log_{10}(e_s)$$

$$A_1 = 1.131346 + 8.665061 * 10^{-9} * T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_4 = -1.374387 * 10^{-2} + 4.910723 * 10^{-5} * \log_{10}(e_s)$$

## 付録 2 正味断面形状関数のライブラリ

正味断面クライテリアによるき裂断面の正味断面応力 $\sigma_{NS}$ は次式で定義される。

L (負荷荷重)

$$\sigma_{NS} = \frac{L}{L_F} \times \sigma_F \quad (\text{崩壊応力、材料データ}) \quad (A2.1a)$$

$L_F$  (き裂断面の崩壊荷重)

ここでL、 $L_F$  は任意の一般化荷重であり、引張力、曲げモーメント等の直接的な荷重、変位分布、ひずみ分布等の間接的な荷重、あるいは複数の荷重が重畳した複合荷重など、多種多様の荷重形態を含むものとする。但しLと $L_F$  は同一の荷重形態でなければならない。(A2.1a) 式を $\sigma_F$  で割ると

$$\sigma_{NS} / \sigma_F = L / L_F \quad (A2.1b)$$

となる。崩壊荷重に対する負荷荷重の相対値を、材料固有の崩壊応力に対するき裂断面の相対応力値に換算したものが $\sigma_{NS}$ である。

CANISでは以下の簡易法により $\sigma_{NS}$ を評価している。

①荷重データは全て、き裂無し断面に弾性解析を適用して求められた断面内応力分布で与える。これを膜応力、曲げ応力、放物線形ピーク応力の和で近似する。

②材料の弾塑性応力ひずみ関係と弾塑性パラメータ $q$ を考慮した簡易弾塑性解析によりき裂無し断面に負荷される正味の応力を解析コード内で算出する。

$\sigma_M$  正味の引張力に対応した膜応力

$\sigma_B$  正味の弾塑性板曲げモーメントに対応した曲げ応力

$\sigma_P$  正味の表面ピークひずみに対応したピーク応力

③円筒周方向断面については、軸曲げモーメントによる最大表皮応力を、膜応力 $\sigma_M$ として取り扱う。軸曲げモーメントに対する応力拡大係数解および正味断面形状関数を選択使用する事で対応する。

④ピーク応力 $\sigma_P$ は塑性崩壊に寄与せず、荷重Lは形状、 $\sigma_M$ 、 $\sigma_B$ で表現されるものとする。

⑤一般に $\sigma_M$ と $\sigma_B$ が重畳する場合、荷重Lおよび崩壊荷重 $L_F$ を数学的に正確に定義するのは困難である。 $\sigma_M$ と $\sigma_B$ の一方が荷重制御で他方が変位制御の場合、一方を定数とし他方を変数とする場合、あるいは双方が一定比率を保つ変数の場合、など様々な条件に応じた定義方法が考えられる。正味断面応力は一般に様々なパラメータを含む関数で与えられる。

$$\sigma_{NS} = f(\text{断面形状、き裂形状、}\sigma_M、\sigma_B、\sigma_F、\text{その他の様々な条件}) \quad (A2.2a)$$

⑥CANISでは(A2.2a) 式を次の簡易式で近似的に与える。

$$\sigma_{NS} = F_{NS} (p_M \sigma_M + p_B \sigma_B) \quad (A2.2b)$$

ここで $F_{NS}$ は荷重形態、断面形状およびき裂形状の関数であり、これを正味断面形状関数と呼ぶことにする。 $p_M$ を膜応力補正パラメータ、 $p_B$ を曲げ応力補正パラメータと呼ぶ事にする。

⑦ $\sigma_M$  単独あるいは $\sigma_B$  単独の典型的な荷重に対して $F_{NS}$ を定義し、ライブラリ化する。

$$\begin{aligned} \cdot \text{引張による}\sigma_M \quad & L = A (\text{断面積}) \times \sigma_M、L_F = \{A - A_C (\text{き裂面積})\} \times \sigma_F \text{より} \\ & F_{NS} = A / (A - A_C)、p_M = 1 \end{aligned} \quad (A2.3a)$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{板曲げによる}\sigma_B \quad & L = Z (\text{き裂無し板の断面係数}) \times \sigma_B、 \\ & L_F = Z_P (\text{き裂有り板の塑性断面係数}) \times \sigma_F \text{より} \\ & F_{NS} = Z / Z_P、p_B = 1 \end{aligned} \quad (A2.3b)$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{円筒周方向断面の軸曲げによる}\sigma_M \quad & L = Z (\text{き裂無し断面の軸曲げ断面係数}) \times \sigma_M、 \\ & L_F = Z_P (\text{き裂有り断面の軸曲げ塑性断面係数}) \times \sigma_F \text{より} \\ & F_{NS} = Z / Z_P、p_M = 1 \end{aligned} \quad (A2.3c)$$

- ⑧主な荷重成分 ( $\sigma_M$  または  $\sigma_H$ 、荷重制御または変位制御) に対する  $F_{NS}$  を選択使用する。  $F_{NS}$ 、 $p_M$  および  $p_B$  を適度に調整設定し、その他の荷重成分の寄与を考慮する。
- ⑨次小節以降にライブラリの内容を示す。これらのライブラリ以外にユーザーが独自の  $F_{NS}$  を定義することが可能である。

### A2.1 定数 (Key=1、全形状、全荷重ケース)

$$F_{NS} = \text{定数 (入力値、デフォルト値は 1)} \quad (\text{A2.4})$$

・例1 — 変位制御の引張荷重の場合とする。き裂断面の変位吸収能力 (コンプライアンス) が相対的に大きく、一定値に制御された全変位の大部分がき裂部分の変位と見なせ、その結果き裂断面の断面積減少に比例して荷重が減少するようなケースに有効である。

$$\begin{aligned} \text{荷重 } P &\approx (A - A_c) \sigma_M, & \text{崩壊荷重 } P_F &= (A - A_c) \sigma_F \\ \sigma_{NS} &= F_{NS} \sigma_M = (P / P_F) \sigma_F \approx \sigma_M \\ F_{NS} &= \text{一定} \approx 1, & p_M &= 1 \end{aligned} \quad (\text{A2.5a})$$

荷重制御の場合でも、き裂面積  $A_c$  が全断面積  $A$  に比べて無視できる場合は有効である。

・例2 — 変位制御の板曲げ荷重の場合とする。き裂断面の板曲げ変位 (板曲げひずみ) が一定と見なせるケース、例えば板厚内温度勾配による熱曲げ応力などに有効である。

荷重制御の板曲げの場合、 $Z$  (き裂無し断面係数) と  $Z_P$  (き裂断面の塑性断面係数) を用いて、

$$\begin{aligned} \text{荷重 } M &= Z \sigma_B, & \text{崩壊荷重 } M_F &= Z_P \sigma_F \\ \sigma_{NS} &= F_{NS} \sigma_B = (M / M_F) \sigma_F = (Z / Z_P) \sigma_B \\ F_{NS} &= Z / Z_P \quad (\text{き裂寸法が 0 の時、平板では } 2/3 \text{ となる}) \end{aligned}$$

となり  $F_{NS}$  はき裂寸法の増加と共に増加するが、変位制御の場合は荷重  $M$  がき裂寸法の増加と共に減少し、き裂断面の正味応力値  $\sigma_{NS}$  は一定と見なせる。従ってき裂無しの  $Z_P$  を用いて

$$F_{NS} = \text{一定} \approx 2/3 = 0.6667, \quad p_H = 1 \quad (\text{A2.5b})$$

と見なして良い。荷重制御の場合でも、き裂寸法が全断面積に比べて無視できる場合は有効である。

・例3 — 周方向き裂付きの薄肉円筒の変位制御の軸曲げの場合とする。荷重制御の軸曲げの場合

$$\begin{aligned} \text{荷重 } M &= Z \sigma_M, & \text{崩壊荷重 } M_F &= Z_P \sigma_F \\ \sigma_{NS} &= F_{NS} \sigma_M = (M / M_F) \sigma_F = (Z / Z_P) \sigma_M \\ F_{NS} &= Z / Z_P \quad (\text{き裂寸法} \rightarrow 0 \text{ および } t/R \rightarrow 0 \text{ の時、} \pi/4 \text{ となる}) \end{aligned}$$

となり  $F_{NS}$  はき裂寸法の増加と共に増加するが、変位制御の場合は荷重  $M$  がき裂寸法の増加と共に減少し、き裂断面の正味応力値  $\sigma_{NS}$  は一定と見なせる。従って薄肉円筒 ( $t/R \ll 1$ ) では

$$F_{NS} = \text{一定} \approx \pi/4 = 0.7854, \quad p_M = 1 \quad (\text{A2.5c})$$

と見なして良い。荷重制御の場合でもき裂寸法が全断面積に比べて無視できる場合は有効である。

## A2.2 関数 (Key=2、全形状、荷重制御引張)

表面き裂に対しては図A2.1に示す局所部分断面の正味応力を与える。

$$A \text{ (局所断面積)} = (2b + t)t, \quad A_c = \pi ab / 2$$

$$\text{局所断面荷重 } P = A \sigma_M, \quad \text{局所断面崩壊荷重 } P_F = (A - A_c) \sigma_F$$

$$\sigma_{NS} = F_{NS} \sigma_M = (P / P_F) \sigma_F = [A / (A - A_c)] \sigma_M$$

$$F_{NS} = A / (A - A_c) \approx 1 / [1 - \pi ab / \{2(2b + t)t\}] \quad (\text{A2.6a})$$

$$\text{あるいは等価き裂深さを } a_{eq} = \pi ab / \{2(2b + t)\} \quad (\text{A2.6b})$$

$$\text{として } F_{NS} \approx 1 / (1 - a_{eq} / t), \quad p_M = 1 \quad (\text{A2.6c})$$

片側き裂および貫通き裂に対しては全断面の正味応力を与える。

$$\text{片側き裂 } F_{NS} = A / (A - A_c) \approx 1 / (1 - a / t), \quad p_M = 1 \quad (\text{A2.6d})$$

$$\text{貫通き裂 } F_{NS} = A / (A - A_c) = 1 / (1 - b / W), \quad p_M = 1 \quad (\text{A2.6e})$$

本形状関数を用いて正味断面応力クライテリア [ $\sigma_{NS} \geq \sigma_Y$  又は  $\sigma_F$ ] を満たした場合は、表面き裂に対しては局所的な崩壊すなわち貫通と見なし、片側き裂および貫通き裂に対しては断面全体の崩壊すなわち破断と見なし、両者を区別するのが現実的である。

## A2.3 関数 (Key=3、全形状、荷重制御の板曲げ)

表面き裂に対しては図A2.1に示す局所部分断面の正味応力を与える。

$$\text{等価き裂深さを } a_{eq} = \pi ab / \{2(2b + t)\} \text{ として} \quad (\text{A2.7a})$$

$$\text{荷重 } M = Z \sigma_B, \quad \text{崩壊荷重 } M_F = Z_P \sigma_F$$

$$\sigma_{NS} = F_{NS} \sigma_B = (M / M_F) \sigma_F = (Z / Z_P) \sigma_B$$

$$F_{NS} = Z / Z_P \approx (2 / 3) / (1 - a_{eq} / t)^2, \quad p_B = 1 \quad (\text{A2.7b})$$

片側き裂および貫通き裂に対しては全断面の正味応力を与える。

$$\text{片側き裂 } F_{NS} = Z / Z_P \approx (2 / 3) / (1 - a / t)^2, \quad p_B = 1 \quad (\text{A2.7c})$$

$$\text{貫通き裂 } F_{NS} = Z / Z_P = (2 / 3) / (1 - b / W), \quad p_B = 1 \quad (\text{A2.7d})$$

本形状関数を用いて正味断面応力クライテリア [ $\sigma_{NS} \geq \sigma_Y$  又は  $\sigma_F$ ] を満たした場合は、表面き裂に対しては局所的な崩壊すなわち貫通と見なし、片側き裂および貫通き裂に対しては断面全体の崩壊すなわち破断と見なし、両者を区別するのが現実的である。

## A2.4 関数 (Key=4、全形状、変位制御の板曲げ)

表面き裂に対しては図A2.1に示す局所部分断面の正味応力を与える。

$$\text{等価き裂深さを } a_{eq} = \pi ab / \{2(2b + t)\} \text{ として} \quad (\text{A2.8a})$$

$$\text{荷重 } M \text{ は } (1 - a_{eq} / t)^2 \text{ に比例し、 } M \approx Z \sigma_B (1 - a_{eq} / t)^2$$

$$\text{崩壊荷重 } M_F \text{ は面積に比例するとして、 } M_F \approx Z_P \sigma_F (1 - a_{eq} / t)$$

$$\sigma_{NS} = F_{NS} \sigma_B = (M / M_F) \sigma_F \approx (Z / Z_P) (1 - a_{eq} / t) \sigma_B$$

$$F_{NS} \approx Z / Z_P (1 - a_{eq} / t) = (2 / 3) \cdot (1 - a_{eq} / t), \quad p_B = 1 \quad (\text{A2.8b})$$

片側き裂および貫通き裂に対しては全断面の正味応力を与える。

$$\text{片側き裂 } F_{NS} \approx (2 / 3) \cdot (1 - a / t), \quad p_B = 1 \quad (\text{A2.8c})$$

$$\text{貫通き裂 } F_{NS} \approx (2 / 3), \quad p_B = 1 \quad (\text{A2.8d})$$

## A2.5 関数 (Key=10、平板および薄肉円筒、荷重制御の引張)

$$F_{NS} = A / (A - A_c) \quad , \quad p_M = 1 \quad (A2.9a)$$

$$A \text{ (き裂無し断面積)} = 2 W t \quad (A2.9b)$$

$$A_c \text{ (き裂面積)} = 2 a b \quad (A2.9c)$$

き裂形状を図A2.2のように矩形近似した平板の形状関数であり、Wは板幅/2である。薄肉円筒に対しては以下のWを用いて、平板近似する。

$$\text{円筒周方向内面き裂 } W \text{ (内周/2)} = \pi R \quad (A2.10a)$$

$$\text{円筒周方向外面き裂 } W \text{ (外周/2)} = \pi R_o \quad (A2.10b)$$

$$\text{円筒軸方向き裂 } W \text{ (荷重影響範囲)} = 5 (R_m t)^{1/2} \quad (A2.10c)$$

## A2.6 関数 (Key=11、平板および薄肉円筒、荷重制御の板曲げ)

き裂形状を図A2.2のように矩形近似した平板の形状関数であり、Wは板幅/2である。

$$\bullet \text{ き裂深さ } a \leq W t / (2 W - b) \text{ に対して} \quad (A2.11a)$$

$$\text{中立面深さ } c = (W t + a b) / (2 W) \geq a \text{ となり} \quad (A2.11b)$$

$$t^2$$

$$F_{NS} = \frac{\quad}{3 [(t-c)^2 + (c-a)^2 + \{c^2 - (c-a)^2\} (1-b/W)]} \quad (A2.11c)$$

$$, \quad p_B = 1$$

$$\bullet \text{ き裂深さ } a > W t / (2 W - b) \text{ に対して} \quad (A2.12a)$$

$$\text{中立面深さ } c = (W t - a b) / [2 (W - b)] < a \text{ となり} \quad (A2.12b)$$

$$t^2$$

$$F_{NS} = \frac{\quad}{3 [(t-c)^2 - (a-c)^2 + \{c^2 + (a-c)^2\} (1-b/W)]} \quad (A2.12c)$$

$$, \quad p_B = 1$$

## A2.7 関数 (Key=20、40、円筒の周方向き裂、荷重制御の軸引張)

き裂形状を図A2.3のように扇型近似した円筒の形状関数である。

$$F_{NS} = A / (A - A_c) \quad , \quad p_M = 1 \quad (A2.13a)$$

$$A \text{ (き裂無し断面積)} = 2 \pi (R + t/2) t = \pi R t (2 + t/R) \quad (A2.13b)$$

• 内面き裂(Key=20) では

$$\beta \text{ (き裂角度/2)} = b/R \text{ として} \quad (A2.14a)$$

$$A_c \text{ (き裂面積)} = 2 \beta (R + a/2) a = a b (2 + a/R) \quad (A2.14b)$$

• 外面き裂(Key=40) では

$$\beta \text{ (き裂角度/2)} = b/R_o \text{、 } R_o = R + t \text{ として} \quad (A2.15a)$$

$$A_c \text{ (き裂面積)} = 2 \beta (R_o - a/2) a = a b (2 - a/R_o) \quad (A2.15b)$$



## A2.8 関数 (Key=21、円筒の周方向内面き裂、荷重制御の軸曲げ)

き裂形状を図A2.4のように扇型近似した円筒の軸曲げに対する形状関数である。

$$F_{NS} = Z / Z_P \quad , \quad p_M = 1 \quad (A2.16a)$$

$$Z = \pi (R_o^4 - R^4) / (4R_o) \quad (A2.16b)$$

$$R_c \text{ (き裂最深部の半径)} = R + a \quad (A2.16c)$$

• き裂角度/2  $\beta \leq \pi (R_o^2 - R^2) / (2R_o^2 - R_c^2 - R^2)$  に対して  $(A2.17a)$

中立面角度  $\alpha = \beta (R_c^2 - R^2) / \{2(R_o^2 - R^2)\}$  となり  $(A2.17b)$

$$Z_P = (4/3)(R_o^3 - R^3)\cos(\alpha) - (2/3)(R_c^3 - R^3)\sin(\beta) \quad (A2.17c)$$

• き裂角度/2  $\beta > \pi (R_o^2 - R^2) / (2R_o^2 - R_c^2 - R^2)$  に対して  $(A2.18a)$

中立面角度  $\alpha = (\pi - \beta)(R_c^2 - R^2) / \{2(R_o^2 - R_c^2)\}$  となり  $(A2.18b)$

$$Z_P = (4/3)(R_o^3 - R_c^3)\cos(\alpha) + (2/3)(R_c^3 - R^3)\sin(\beta) \quad (A2.18c)$$

## A2.9 定数 (Key=22、42、円筒の周方向内面および外面き裂、変位制御の軸曲げ)

$$F_{NS} = Z / Z_P = 3\pi (R_o^4 - R^4) / \{16R_o (R_o^3 - R^3)\} \quad , \quad p_M = 1 \quad (A2.19)$$

$$Z_P \text{ (き裂無し塑性断面係数)} = (4/3)(R_o^3 - R^3)$$

き裂寸法増加に伴い軸曲げ荷重が低下し、き裂断面応力が一定と見なせるケース、あるいは荷重制御の軸曲げでき裂寸法が断面積に比べ無視できる程度に小さい場合に有効である。

## A2.9 関数 (Key=23、43、薄肉円筒の周方向内面および外面き裂、荷重制御の軸曲げ)

図A2.4および図A2.5を平均半径  $R_m$  でシェル近似した場合の簡易式である。

$$F_{NS} = Z / Z_P \quad , \quad p_M = 1 \quad (A2.20a)$$

$$Z \text{ (薄肉円筒の簡易式)} \approx \pi R_m^2 t \quad (A2.20b)$$

•  $\beta \leq \pi / (2 - a/t)$  に対して  $(A2.21a)$

$$\alpha = (\beta/2) (a/t) \text{ となり} \quad (A2.21b)$$

$$Z_P \text{ (簡易式)} \approx 4 R_m^2 t \cos(\alpha) - 2 R_m^2 a \sin(\beta) \quad (A2.21c)$$

$$F_{NS} = \pi / \{4 \cos(\alpha) - 2(a/t) \sin(\beta)\} \quad (A2.21d)$$

•  $\beta > \pi / (2 - a/t)$  に対して  $(A2.22a)$

$$\alpha = \{(\pi - \beta) / 2\} (a/t) / (1 - a/t) \text{ となり} \quad (A2.22b)$$

$$Z_P \text{ (簡易式)} \approx 4 R_m^2 (t - a) \cos(\alpha) + 2 R_m^2 a \sin(\beta) \quad (A2.22c)$$

$$F_{NS} = \pi / \{4 (1 - a/t) \cos(\alpha) + 2(a/t) \sin(\beta)\} \quad (A2.22d)$$

## A2.10 関数 (Key=30、31、50、51、円筒内面、外面の軸方向き裂、荷重制御の膜応力)

米国 Battelle 研究所における内圧破裂試験による実験式である。形状パラメータ  $f$  を

$$\left( \begin{array}{l} \text{KEY=30、50 (original)} \quad f = \{1 + 1.61b^2 / (Rt)\}^{1/2} \\ \text{KEY=31、51 (revised)} \quad f = \{1 + 1.05b^2 / (Rt)\}^{1/2} \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \text{(A2.23a)} \\ \text{(A2.23b)} \end{array}$$

として  $F_{NS}$  を次式で与える ( $p_M = 1$ )。

$$\left( \begin{array}{l} \text{表面き裂 (} a < t \text{)} \quad F_{NS} = \{1 - a / (ft)\} / (1 - a / t) \\ \text{貫通き裂 (} a = t \text{)} \quad F_{NS} = f \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \text{(A2.23c)} \\ \text{(A2.23d)} \end{array}$$

## A2.11 関数 (Key=32、52、円筒内面、外面の軸方向き裂、荷重制御の膜応力)

$$\text{表面き裂に対し} \quad f = \{1 + 1.61b^2 / (Ra)\}^{1/2} \text{として} \quad \text{(A2.24a)}$$

$$F_{NS} = 1 / \{1 - a / t - a / (ft)\}, \quad p_M = 1 \quad \text{(A2.24b)}$$

$$\text{片側き裂に対し} \quad F_{NS} = 1 / (1 - a / t) \quad \text{(A2.24c)}$$

$$\text{貫通き裂に対し} \quad F_{NS} = \{1 + 1.61b^2 / (Rt)\}^{1/2} \text{ (Battelle式)} \quad \text{(A2.24d)}$$

## A2.12 関数 (Key=41、円筒の周方向外面き裂、荷重制御の軸曲げ)

き裂形状を図A2.5のように扇型近似した円筒の軸曲げに対する形状関数である。

$$F_{NS} = Z / Z_p, \quad p_M = 1 \quad \text{(A2.25a)}$$

$$Z = \pi (R_o^4 - R^4) / (4R_o) \quad \text{(A2.25b)}$$

$$R_c \text{ (き裂最深部の半径)} = R_o - a = R + t - a \quad \text{(A2.25c)}$$

$$\cdot \text{き裂角度} / 2 \quad \beta \leq \pi (R_o^2 - R^2) / (R_o^2 + R_c^2 - 2R^2) \text{ に対して} \quad \text{(A2.26a)}$$

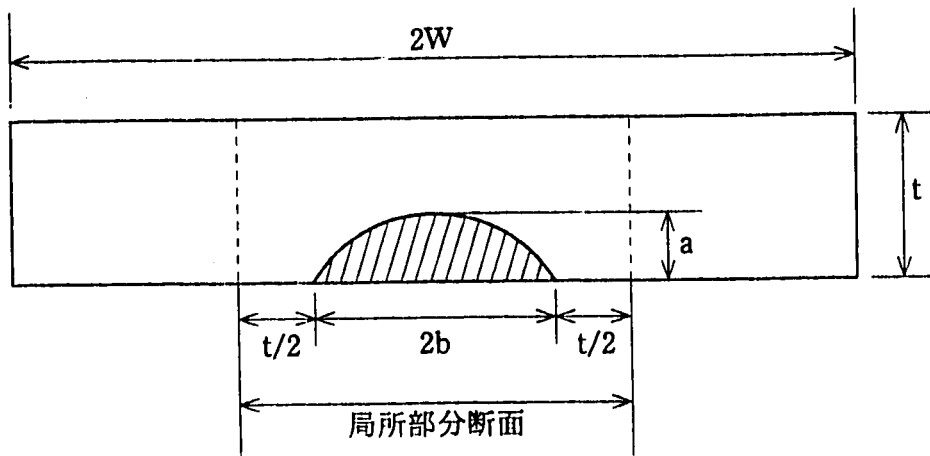
$$\text{中立面角度} \quad \alpha = \beta (R_o^2 - R_c^2) / \{2 (R_o^2 - R^2)\} \text{ となり} \quad \text{(A2.26b)}$$

$$Z_p = (4/3)(R_o^3 - R^3)\cos(\alpha) - (2/3)(R_o^3 - R_c^3)\sin(\beta) \quad \text{(A2.26c)}$$

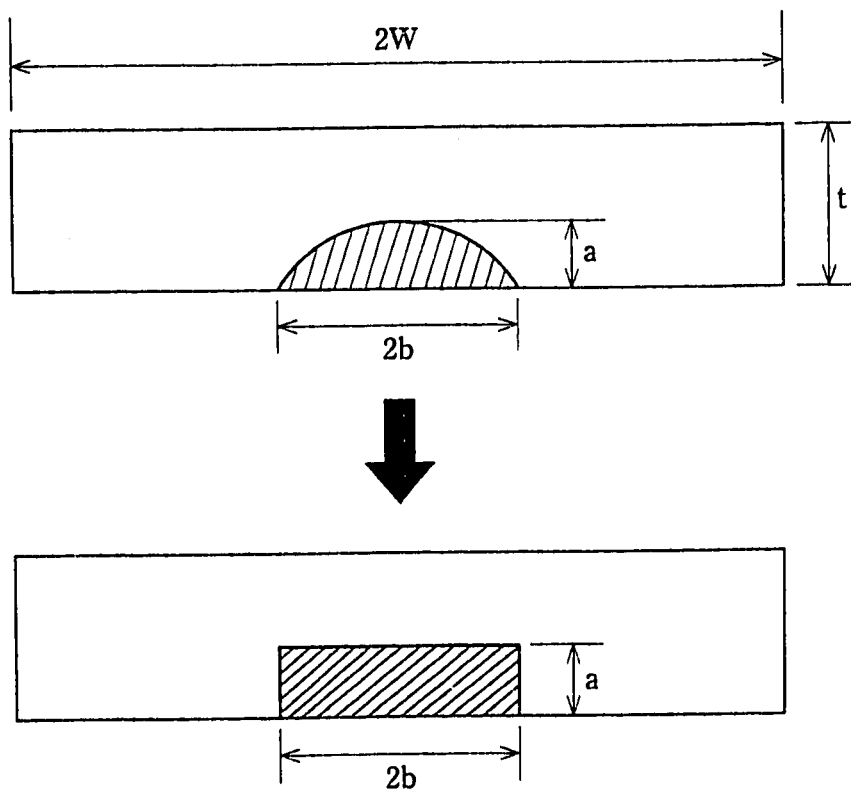
$$\cdot \text{き裂角度} / 2 \quad \beta > \pi (R_o^2 - R^2) / (R_o^2 + R_c^2 - 2R^2) \text{ に対して} \quad \text{(A2.27a)}$$

$$\text{中立面角度} \quad \alpha = (\pi - \beta)(R_o^2 - R_c^2) / \{2 (R_c^2 - R^2)\} \text{ となり} \quad \text{(A2.27b)}$$

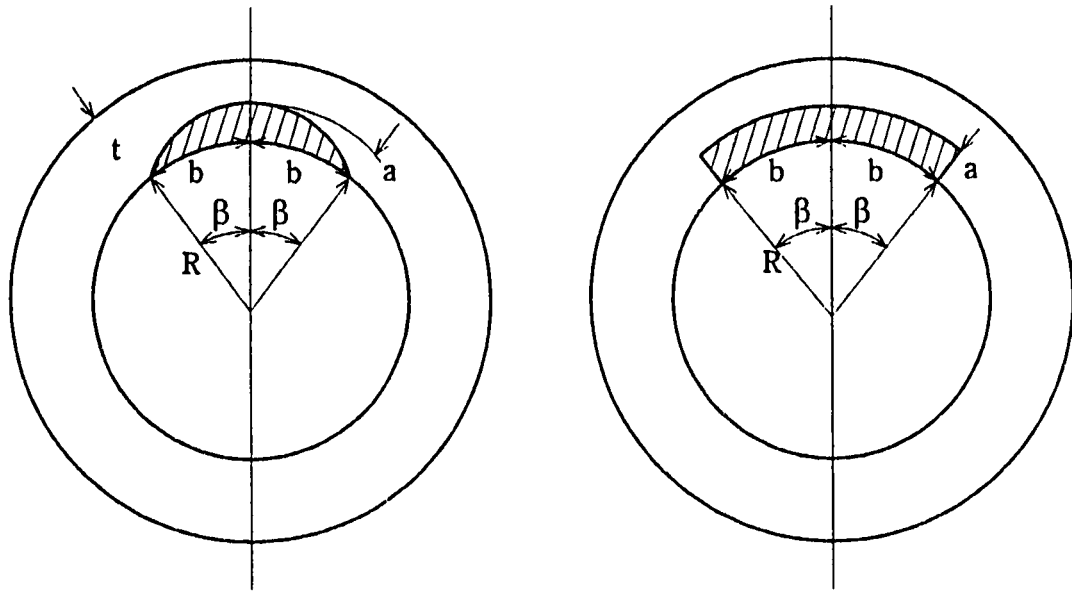
$$Z_p = (4/3)(R_c^3 - R^3)\cos(\alpha) + (2/3)(R_o^3 - R_c^3)\sin(\beta) \quad \text{(A2.27c)}$$



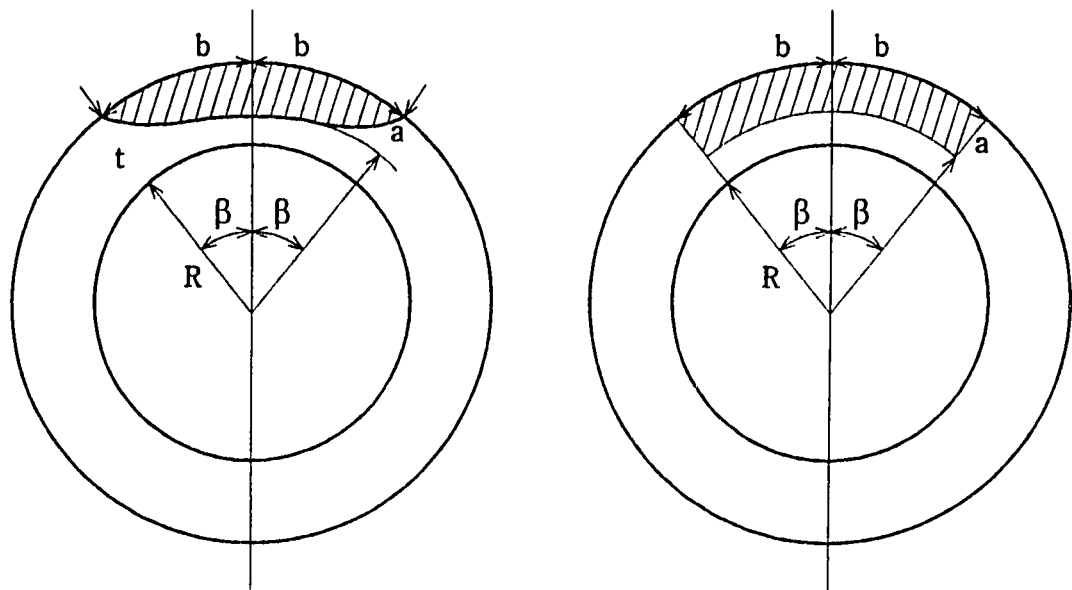
図A 2.1 表面き裂付き平板の局所部分断面



図A 2.2 表面き裂の矩形近似

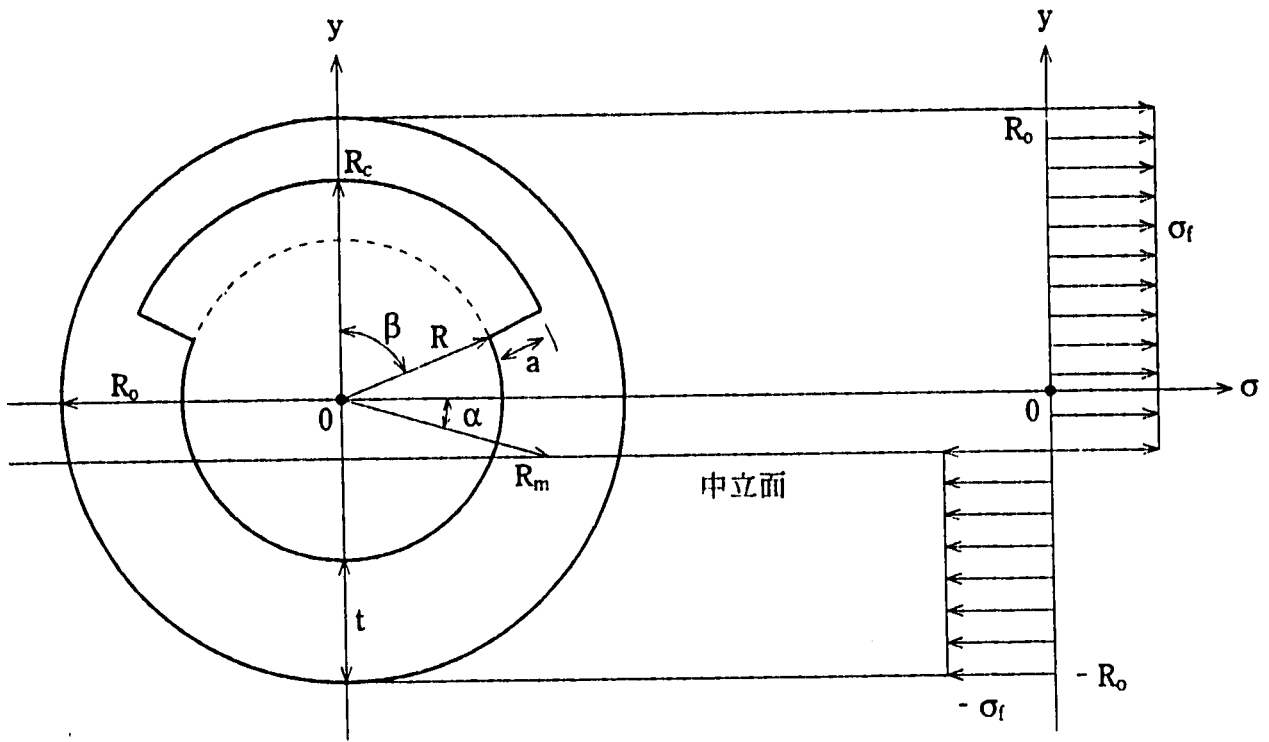


(a) 内面き裂

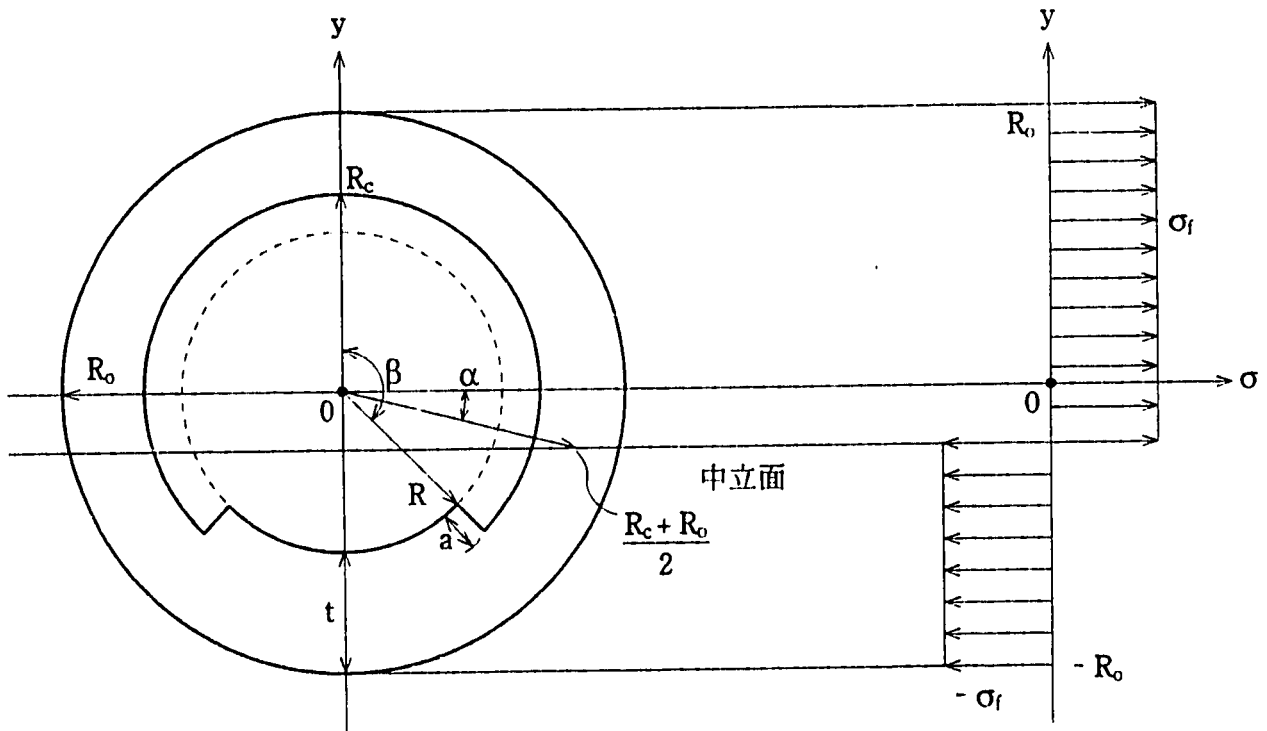


(b) 外面き裂

図A2.3 周方向き裂の扇型近似

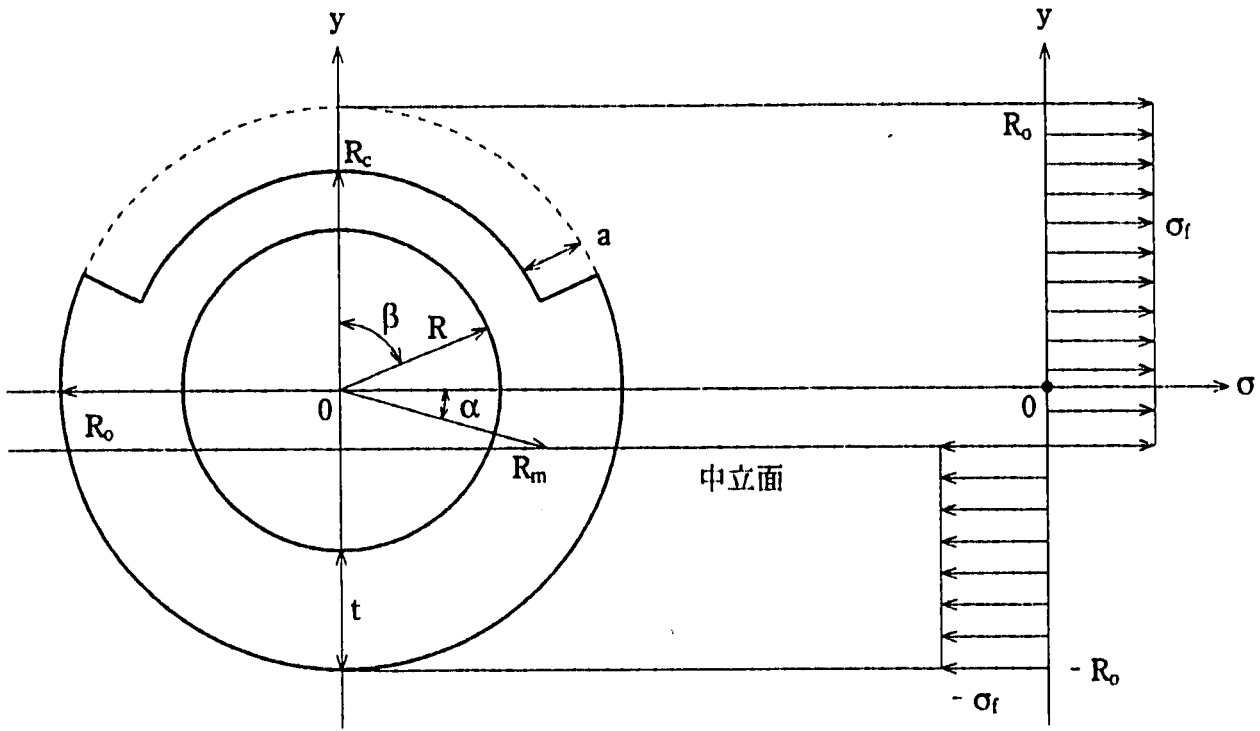


(a) 中立面がき裂の範囲外の場合

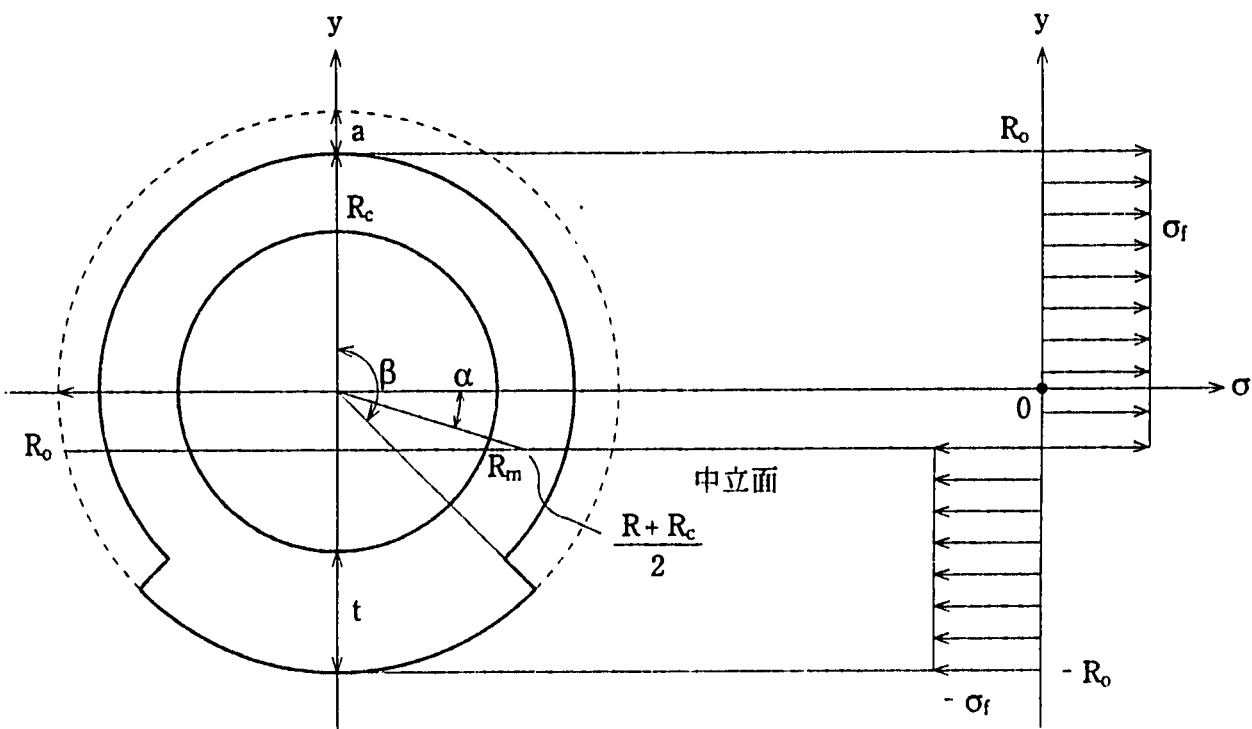


(b) 中立面がき裂の範囲内の場合

図A2.4 内面に扇型き裂を有する円筒の軸曲げ



(a) 中立面がき裂の範囲外の場合



(b) 中立面がき裂の範囲内の場合

図A2.5 外面に扇型き裂を有する円筒の軸曲げ

付録3 表面き裂K値解のライブラリ

公表されている半楕円表面き裂のK値解についてサーベイを行い、使用するのに適すると思われるものを11種類選択し、サブプログラム化しCANISに組み込んだ。その内容を以下に記す。CANISではき裂無し断面の板厚方向応力分布（き裂面に垂直に作用する応力成分）を放物線近似し膜応力成分 $\sigma_M$ 、曲げ応力成分 $\sigma_B$ （き裂側+）および放物線形ピーク応力成分 $\sigma_P$ の和で表す。き裂の最深部（A）および表面部（B）のK値が次式で与えられるものとしている。

$$K_A = (\sigma_M F_{M,A} + \sigma_B F_{B,A} + \sigma_P F_{P,A}) (\pi a)^{0.5} \tag{A3.1}$$

$$K_B = (\sigma_M F_{M,B} + \sigma_B F_{B,B} + \sigma_P F_{P,B}) (\pi a)^{0.5} \tag{A3.2}$$

ここにFは無次元K値解であり、1番目の添字M, B, Pはそれぞれ膜、曲げ、ピーク応力を表し、2番目の添字A, Bはそれぞれ最深部、表面部を表す。本付録では公表K値解データをすべて無次元K値解 $F_{M,A}$ 、 $F_{B,A}$ 、 $F_{P,A}$ 、 $F_{M,B}$ 、 $F_{B,B}$ 、 $F_{P,B}$ の形式に整理した。一部データ不足の箇所については、他のK値解データを参考とした。また表面き裂の半長bが無限に大きくなった場合（即ちアスペクト比 $a/b$ が0に近づく場合）の外挿データとしては、可能な限り片側き裂K値解データを採用し、外挿精度の向上を図った。

A3.1 白鳥らの解、三好らの解および片側き裂の解の合成（Key=10、平板、テーブル値）

(1) 白鳥らのK値解

白鳥ら(REF. 1)は半楕円表面き裂付き平板についてパラメトリックなFEM解析を実施し、き裂面の任意の局所領域に単位分布荷重が作用した時のき裂フロント各点のK値を求めデータベース化した。形状パラメータはアスペクト比 $a/b = \beta = 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 2.0$ 、相対深さ $a/b = \alpha = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ である。これらのK値を重ね合わせることで（き裂無し断面に任意の応力分布が生じるような）任意の荷重が作用した場合のき裂フロント任意位置のK値を算出する手法（影響関数法）を提案している。また影響関数法により任意の応力分布に対するき裂の最深部および表面部のK値を算出するパソコンプログラムも公表されている。文献(REF. 1)では影響関数法により、図A3.1に示すようなき裂深さで規格化した0次～3次の応力分布に対するき裂の最新部および表面部のF値を求め表A3.1のように与えている。

$$F_{j,A} = K_{j,A} / \{ \sigma (\pi a / Q)^{0.5} \} \tag{A3.3a}$$

$$F_{j,B} = K_{j,B} / \{ \sigma (\pi a / Q)^{0.5} \} \tag{A3.3b}$$

ここに添字jは応力分布の次数を表し、添字A, Bはき裂の最深部および表面部を表す。第2種完全楕円積分Qは、次の近似式を使用する。

$$Q = 1 + 1.464 \beta^{1.05} \tag{A3.4}$$

0～2次の応力分布に対する解 $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ を膜応力、曲げ応力および放物線形ピーク応力に対するF値に変換するには、重ね合わせの原理より、次式を用いれば良い。

$$F_M Q^{0.5} = F_0 \tag{A3.5a}$$

$$F_B Q^{0.5} = 2 \alpha F_1 + (1 - 2 \alpha) F_0 \tag{A3.5b}$$

$$F_P Q^{0.5} = 6 \alpha^2 F_2 + 6 \alpha (1 - 2 \alpha) F_1 + (1 - 6 \alpha + 6 \alpha^2) F_0 \tag{A3.5c}$$

ここで左辺に $Q^{0.5}$ を乗じたのは(A3.1)、(A3.2)式の表示に合わせるためである。本節では公表されているパソコンプログラムを用いて膜、曲げおよびピーク応力に対するF値を求めた。但し一部形状（ $\beta = 0.2, \alpha = 0.6$  および  $\beta = 1.0, \alpha = 0.1$  の2点）では文献公表値と合致せず、データ解析および

関数fitting 等による検討の結果、文献値が正しくパソコンプログラムのデータベースに入力ミスのような何らかの問題があるものと判定した。この2形状については文献の $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ を(A3.5)式により変換して膜、曲げおよびピーク応力に対するF値を求めた。

#### (2) 三好らのK値解

三好ら(RBF.2)は貫通前後の深いき裂( $\alpha=0.8 \sim 1.2$ 、 $\beta=0.2 \sim 1.2$ )を対象としてパラメトリックなBEM解析を実施し、膜応力および曲げ応力に対するF値を求めた。 $\alpha=0.8 \sim 1.0$ の範囲のき裂の最深部と表面部のF値のみを抜粋して表A3.2に示す。

#### (3) 片側き裂付き平板のK値解

片側き裂付き平板の膜応力および曲げ応力に対するF値として次式が知られている(REF.3)。

$$F_{M,A} = \{(\tan \theta)/\theta\}^{1/2} \{0.752 + 2.02\alpha + 0.37(1 - \sin \theta)^3\} / \cos \theta \quad (A3.6)$$

$$F_{B,A} = \{(\tan \theta)/\theta\}^{1/2} \{0.923 + 0.199(1 - \sin \theta)^4\} / \cos \theta \quad (A3.7)$$

ここに $\theta = \pi \alpha / 2$ である。放物線形ピーク応力に対する $F_{P,A}$ は、付録4のA4.1節で近似重み関数法により、表A3.3のように求められた。

#### (4) 合成F値テーブルの作成

白鳥らの解による $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  ( $\beta=0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 2.0$ 、 $\alpha=0.0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )

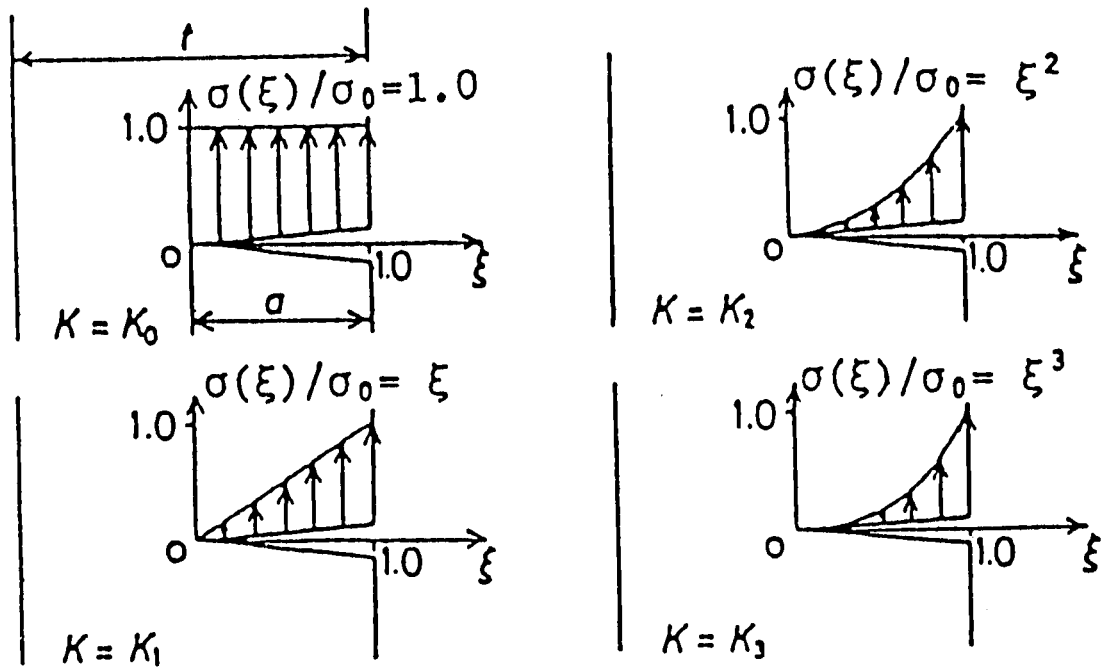
三好らの解による $F_M$ 、 $F_B$  ( $\beta=0.2, 0.4, 0.6, 1.0$ 、 $\alpha=0.9, 1.0$ )

片側き裂付き平板の $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  ( $\beta=0.0$ 、 $\alpha=0.0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0$ )

を合成してF値テーブルを表A3.4のように作成した。最深部(A)については $FQ^{0.5}$ をテーブル値とし、表面部(B)については $F(Q/\beta)^{0.5}$ をテーブル値とした。最深部については $Q^{0.5}$ を乗じることでアスペクト比 $\beta$ の変化に対するF値の変化が緩やかになり、線形内挿の精度が向上する。一般に表面部では $\beta \Rightarrow 0$ で $F \Rightarrow 0$ となり、線形内挿の精度が悪くなる。データ解析の結果、表面部については $(Q/\beta)^{0.5}$ を乗じることにより、 $\beta$ に対するF値の変化が緩やかになり( $\beta$ の全範囲0~2で1前後の値)、線形内挿の精度が向上することが分かった。即ち表面部のF値は $(\beta/Q)^{0.5}$ にはほぼ比例する傾向にあることが分かった。表A3.4のテーブル値を線形内挿し、最深部については $Q^{0.5}$ で除し、表面部については $(\beta/Q)^{0.5}$ を乗じて、(A3.1)および(A3.2)式のF値を得ることになる。なお表A3.4で\*印のあるものは外挿その他の手法による推定値である。 $\beta=2.0$ 、 $\alpha=0.9, 1.0$ における $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$ 値および $\beta \leq 1$ 、 $\alpha=0.9, 1.0$ における $F_P$ は次節A3.2のfitting式による外挿値である。 $\beta \geq 0.2$ 、 $\alpha=0.0$ では、 $\alpha=0.1, 0.2$ の値を線形外挿して $F_M$ 値を求め、 $F_B$ 、 $F_P$ 値は $F_M$ 値と等しいとした。 $\alpha=a/t \Rightarrow 0$ では応力分布によるモーメント成分が無視でき、表面応力値のみにF値が依存する結果、 $F_M = F_B = F_P$ となることを考慮したものである。また片側き裂( $\beta=0$ )では $\alpha \Rightarrow 1.0$ でF値は $\infty$ に発散するが、数値計算の都合で有限値とし $\alpha=0.8, 0.9$ の値を用いて、膜および曲げ応力に対しては線形外挿により求め、ピーク応力に対しては放物線外挿により求めた。また片側き裂の表面部のテーブル値は $\beta=0.2$ の値を用いた。これは、 $\beta=0 \sim 0.2$ 間の表面部のF値を(定数) $\times (Q/\beta)^{0.5}$ と近似することに相当する。

白鳥らの解および三好らの解は有限板幅の効果が無視できる $W/b=4$ のFEM解析およびBEM解析に基づくものである。CANISのサブプログラムではNewman-Rajuの板幅補正係数(A3.26)式により有限板幅の効果を考慮している。即ちテーブル補間により得られたFに(A3.26)式の $f_w$ を乗じて有限平板のF値としている。





図A3.1 き裂面上板厚方向に変化する基本モードの分布力

表A3.1 半楕円表面き裂を持つ平板のき裂最深部 ( $\phi = \pi/2$ ) 及び表面部 ( $\phi = 0$ ) の応力拡大係数

$$(F = K_I / \sigma_0 \sqrt{\pi a} / Q)$$

(POINT A:  $\phi = \pi/2$ , C:  $\phi = 0$ )

(1) CONSTANT  $\sigma(F) = \sigma_0$

a/c	a/l					
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	A	1.119	1.162	1.371	1.651	1.787
	C	0.512	0.582	0.688	0.882	1.201
0.4	A	1.087	1.119	1.216	1.327	1.379
	C	0.794	0.810	0.911	1.060	1.320
0.6	A	1.069	1.090	1.143	1.206	1.228
	C	0.933	0.954	1.025	1.192	1.366
1.0	A	1.039	1.047	1.083	1.106	1.107
	C	1.133	1.145	1.220	1.318	1.441
2.0	A	1.020	1.012	1.007	1.030	1.016
	C	1.528	1.548	1.538	1.631	1.667

(2) LINEAR  $\sigma(F) = \sigma_0 F$

a/c	a/l					
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	A	0.476	0.490	0.610	0.795	0.863
	C	0.444	0.502	0.578	0.718	0.945
0.4	A	0.418	0.435	0.490	0.563	0.576
	C	0.666	0.678	0.750	0.850	1.039
0.6	A	0.371	0.383	0.418	0.457	0.449
	C	0.779	0.795	0.840	0.960	1.091
1.0	A	0.299	0.304	0.330	0.342	0.327
	C	0.951	0.960	1.010	1.080	1.174
2.0	A	0.197	0.196	0.196	0.202	0.185
	C	1.319	1.331	1.317	1.390	1.420

(3) QUADRATIC  $\sigma(F) = \sigma_0 F^2$

a/c	a/l					
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	A	0.300	0.309	0.400	0.539	0.584
	C	0.393	0.447	0.509	0.620	0.796
0.4	A	0.252	0.264	0.310	0.369	0.373
	C	0.581	0.593	0.650	0.726	0.874
0.6	A	0.216	0.225	0.257	0.288	0.277
	C	0.678	0.692	0.727	0.823	0.927
1.0	A	0.166	0.170	0.189	0.200	0.183
	C	0.836	0.842	0.879	0.934	1.011
2.0	A	0.099	0.092	0.097	0.097	0.082
	C	1.182	1.185	1.171	1.232	1.256

(4) CUBIC  $\sigma(F) = \sigma_0 F^3$

a/c	a/l					
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.2	A	0.219	0.226	0.300	0.412	0.445
	C	0.358	0.405	0.459	0.553	0.695
0.4	A	0.179	0.188	0.229	0.277	0.278
	C	0.519	0.531	0.579	0.641	0.763
0.6	A	0.151	0.158	0.187	0.213	0.202
	C	0.605	0.618	0.647	0.727	0.814
1.0	A	0.114	0.117	0.134	0.143	0.127
	C	0.751	0.756	0.785	0.832	0.896
2.0	A	0.066	0.060	0.065	0.066	0.050
	C	1.081	1.076	1.062	1.115	1.135

表A3.2 三好らのK値解

		膜応力 $F_M Q^{0.5}$					曲げ応力 $F_B Q^{0.5}$				
		$\alpha = a/t$					$\alpha = a/t$				
$\beta =$	$a/b$	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.2	A	1.862	1.893	1.932	2.050	2.673	0.344	0.268	0.180	-0.112	-0.878
	B	1.179	1.248	1.316	1.396	1.462	0.810	1.026	1.192	1.228	1.330
0.4	A	1.453	1.476	1.519	1.620	2.268	0.132	0.045	-0.052	-0.211	-0.704
	B	1.333	1.403	1.471	1.520	1.556	0.933	1.003	1.040	1.057	1.085
0.6	A	1.272	1.295	1.327	1.416	2.144	0.028	-0.064	-0.198	-0.390	-0.669
	B	1.393	1.429	1.453	1.480	1.527	0.916	0.932	0.951	0.972	0.998
0.8	A	1.185	1.209	1.236	1.322	2.133	-0.042	-0.138	-0.246	-0.403	-0.770
	B	1.440	1.468	1.493	1.512	1.525	1.004	1.007	1.010	1.014	1.022
1.0	A	1.128	1.144	1.179	1.257	1.988	-0.098	-0.202	-0.306	-0.459	-0.761
	B	1.497	1.532	1.556	1.580	1.601	1.058	1.072	1.080	1.086	1.093
1.2	A	1.098	1.112	1.139	1.211	1.911	-0.148	-0.249	-0.349	-0.496	-0.791
	B	1.525	1.555	1.585	1.599	1.629	1.149	1.137	1.136	1.130	1.116

表A3.3 片側き裂付き平板の  $F_{P,A}$  (近似重み関数法、付録4のA4.1節)

a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$F_{P,A}$	1.124	0.788	0.562	0.399	0.276	0.187	0.134	0.133	0.295	1.122

表A3.4(a) 膜応力に対する補正係数 [上段  $F_{M,A} Q^{0.5}$ 、下段  $F_{M,B} (Q/\beta)^{0.5}$ ]

$\beta =$	位置	$\alpha = a/t$								
		0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	
0.0	A	1.1220	1.1957	1.3667	2.1080	4.0432	11.993	34.719	57.445*	
	B	0.9903*	1.1455*	1.3007*	1.5377*	1.9722*	2.6853*	2.9427*	3.2691*	
0.2	A	1.0762*	1.1190	1.1618	1.3710	1.651	1.7873	1.932	2.673	
	B	0.9903*	1.1455	1.3007	1.5377	1.9722	2.6853	2.9427	3.2691	
0.4	A	1.0549*	1.0867	1.1185	1.2161	1.3273	1.3786	1.519	2.268	
	B	1.2289*	1.2548	1.2807	1.4395	1.6757	2.0873	2.3259	2.4603	
0.6	A	1.0469*	1.0685	1.0901	1.1432	1.2058	1.2283	1.327	2.144	
	B	1.1760*	1.2040	1.2320	1.3234	1.5386	1.7638	1.8758	1.9713	
1.0	A	1.0314*	1.0393	1.0472	1.0828	1.1055	1.1068	1.179	1.988	
	B	1.1211*	1.1332	1.1453	1.2196	1.3182	1.4410	1.556	1.601	
2.0	A	1.0281*	1.0202	1.0123	1.0071	1.0296	1.0162	1.013*	1.003*	
	B	1.0662*	1.0802	1.0942	1.0877	1.1533	1.1790	1.2290*	1.2693*	

表A3.4(b) 曲げ応力に対する補正係数 [上段 $F_{B,A} Q^{0.5}$ 、下段 $F_{B,B} (Q/\beta)^{0.5}$ ]

$\beta =$ a/b	位置	$\alpha = a/t$							
		0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
0.0	A	1.1220	1.0408	1.0355	1.2345	1.8982	4.6744	12.469	20.264*
	B	0.9903*	1.1151*	1.2295*	1.3416*	1.5322*	1.7690*	2.6654*	2.9740*
0.2	A	1.0762*	0.9905	0.8930	0.7624	0.6238	0.3081	0.180	-0.878
	B	0.9903*	1.1151	1.2295	1.3416	1.5322	1.7690	2.6654	2.9740
0.4	A	1.0549*	0.9530	0.8450	0.6353	0.4099	0.0942	-0.052	-0.704
	B	1.2289*	1.2145	1.1973	1.2362	1.2784	1.3767	1.6444	1.7155
0.6	A	1.0469*	0.9290	0.8071	0.5630	0.3077	-0.0187	-0.198	-0.669
	B	1.1760*	1.1643	1.1495	1.1327	1.1802	1.1946	1.2277	1.2884
1.0	A	1.0314*	0.8910	0.7498	0.4808	0.1888	-0.1417	-0.306	-0.761
	B	1.1211*	1.0966	1.0711	1.0515	1.0320	1.0139	1.080	1.093
2.0	A	1.0281*	0.8555	0.6860	0.3579	0.0380	-0.3137	-0.447*	-0.548*
	B	1.0662*	1.0507	1.0329	0.9623	0.9487	0.8992	0.8768*	0.8174*

表A3.4(c) ピーク応力に対する補正係数 [上段 $F_{P,A} Q^{0.5}$ 、下段 $F_{P,B} (Q/\beta)^{0.5}$ ]

$\beta =$ a/b	位置	$\alpha = a/t$							
		0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
0.0	A	1.1220	0.7881	0.5620	0.2765	0.1339	0.2952	1.1220	4.3804*
	B	0.9903*	1.0569*	1.1003*	1.0357*	0.9709*	0.8539*	0.6820*	0.4360*
0.2	A	1.0762*	0.7614	0.4733	0.0737	-0.1346	-0.1706	0.036*	0.323*
	B	0.9903*	1.0569	1.1003	1.0357	0.9709	0.8539	0.6820*	0.4360*
0.4	A	1.0549*	0.7147	0.4211	-0.0024	-0.1932	-0.1695	-0.018*	0.284*
	B	1.2289*	1.1380	1.0481	0.9220	0.7749	0.6606	0.5629*	0.4332*
0.6	A	1.0469*	0.6826	0.3730	-0.0557	-0.2377	-0.1798	-0.042*	0.304*
	B	1.1760*	1.0891	1.0023	0.8397	0.7238	0.6096	0.5383*	0.4506*
1.0	A	1.0314*	0.6314	0.3014	-0.1366	-0.3005	-0.1938	-0.034*	0.381*
	B	1.1211*	1.0278	0.9389	0.7914	0.6606	0.5568	0.512*	0.466*
2.0	A	1.0281*	0.5696	0.2040	-0.2561	-0.3889	-0.1775	0.057*	0.369*
	B	1.0662*	0.9947	0.9224	0.7630	0.6661	0.5661	0.5360*	0.5049*

## A3.2 白鳥らの解、三好らの解および片側き裂の解の合成 (Key=11、平板、関数fitting)

前A3.1節のテーブル値を以下のように関数fittingした。膜応力に対して

$$F_{M,A} = (M_{A1} + M_{A2}\alpha^2 + M_{A3}\alpha^4 + M_{A4}\alpha^6) / Q^{0.5} \quad (A3.8a)$$

$$F_{M,B} = (M_{B1} + M_{B2}\alpha + M_{B3}\alpha^4 + M_{B4}\alpha^6) (\beta/Q)^{0.5} \quad (A3.8b)$$

曲げ応力に対して

$$F_{B,A} = (1 + B_{A1}\alpha + B_{A2}\alpha^3 + B_{A3}\alpha^5) F_{M,A} \quad (A3.9a)$$

$$F_{B,B} = (1 + B_{B1}\alpha + B_{B2}\alpha^3 + B_{B3}\alpha^5) F_{M,B} \quad (A3.9b)$$

放物線形ピーク応力に対して

$$F_{P,A} = (1 + P_{A1}\alpha + P_{A2}\alpha^2) F_{M,A} \quad (A3.10a)$$

$$F_{P,B} = (1 + P_{B1}\alpha + P_{B2}\alpha^2) F_{M,B} \quad (A3.10b)$$

ここに $\alpha = a/t$ は相対き裂深さ、 $\beta = a/b$ はアスペクト比である。

$0 \leq \beta < 1$ に対して各係数を次式でfittingした。

$$M_{A1} = 1.059 + 0.0087 / (0.1 + \beta) - 0.022 (0.1 + \beta)^4 \quad (A3.11a)$$

$$M_{A2} = 0.925 - 0.555\beta + 9.028(1 - \beta)^6 - 6.190(1 - \beta)^8 \quad (A3.11b)$$

$$M_{A3} = -0.475 - 0.982(1 - \beta)^2 - 2.560(1 - \beta)^6 + 16.09(1 - \beta)^{24} \quad (A3.11c)$$

$$M_{A4} = 1.055 - 0.339(1 - \beta)^2 - 4.262(1 - \beta)^6 + 125.0(1 - \beta)^{24} \quad (A3.11d)$$

$$M_{B1} = 1.097 + 0.444(1 - \beta)^2 - 1.182(1 - \beta)^6 \quad (A3.12a)$$

$$M_{B2} = 0.466 - 0.188\beta + 3.220(1 - \beta)^8 \quad (A3.12b)$$

$$M_{B3} = 2.959 - 2.499\beta + 3.415(1 - \beta)^6 \quad (A3.12c)$$

$$M_{B4} = -0.240 - 1.228(1 - \beta)^{0.5} - 3.696(1 - \beta)^7 \quad (A3.12d)$$

$$B_{A1} = -1.090 - 0.161\beta^{0.5} - 0.079\beta^4 \quad (A3.13a)$$

$$B_{A2} = 0.623 - 1.301\beta + 0.550\beta^3 \quad (A3.13b)$$

$$B_{A3} = 0.084 - 1.215(1 - \beta)^{2.5} - 0.962(1 - \beta)^{12} \quad (A3.13c)$$

$$B_{B1} = 0.277 - 1.459\beta^{0.5} + 0.853\beta \quad (A3.14a)$$

$$B_{B2} = -1.466 + 2.182\beta^{0.5} - 0.840\beta^{1.5} \quad (A3.14b)$$

$$B_{B3} = 0.144 - 0.064(1 - \beta)^2 + 1.446(1 - \beta)^4 \quad (A3.14c)$$

$$P_{A1} = -2.788 - 2.164\beta + 0.800\beta^2 \quad (A3.15a)$$

$$P_{A2} = 1.944 + 2.079\beta - 0.679\beta^2 \quad (A3.15b)$$

$$P_{B1} = 0.054 - 2.594\beta^{0.5} + 1.541\beta \quad (A3.16a)$$

$$P_{B2} = -0.702 + 1.457\beta^{0.5} - 0.464\beta^2 \quad (A3.16b)$$

$1 \leq \beta \leq 2$ に対して各係数を次式でfittingした。

$$M_{A1} = 1.057 - 0.022\beta \quad (A3.17a)$$

$$M_{A2} = 0.698 - 0.328\beta \quad (A3.17b)$$

$$M_{A3} = -0.898 + 0.423\beta \quad (A3.17c)$$

$$M_{A4} = 2.110 - 1.055\beta \quad (A3.17d)$$

$$M_{B1} = 1.119 - 0.022\beta \quad (A3.18a)$$

$$M_{B2} = 0.494 - 0.216\beta \quad (A3.18b)$$

$$M_{B3} = 0.693 - 0.233\beta \quad (A3.18c)$$

$$M_{B4} = -0.385 + 0.145\beta \quad (A3.18d)$$

$$B_{A1} = -1.133 - 0.197\beta \quad (\text{A3.19a})$$

$$B_{A2} = -0.058 - 0.070\beta \quad (\text{A3.19b})$$

$$B_{A3} = -0.011 + 0.095\beta \quad (\text{A3.19c})$$

$$B_{B1} = -0.358 + 0.029\beta \quad (\text{A3.20a})$$

$$B_{B2} = -0.233 + 0.129\beta \quad (\text{A3.20b})$$

$$B_{B3} = 0.309 - 0.195\beta \quad (\text{A3.20c})$$

$$P_{A1} = -3.504 - 0.648\beta \quad (\text{A3.21a})$$

$$P_{A2} = 2.520 + 0.824\beta \quad (\text{A3.21b})$$

$$P_{B1} = -1.151 + 0.152\beta \quad (\text{A3.22a})$$

$$P_{B2} = 0.337 - 0.046\beta \quad (\text{A3.22b})$$

これらの関数fitting 式による計算値とA3.1節の参照K値解との比較結果を表A3.5に示す。CANISのサブプログラムではNewman-Rajuの板幅補正係数(A3.26)式により有限板幅の効果を考慮している。即ち(A3.8)~(A3.10)式によるFに(A3.26)式の $f_w$ を乗じて、有限平板のF値としている。

表A3.5(a) 白鳥らの平板K値解のfitting (膜応力)

A/B		LOC	a/t						
			0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
0.0	FIT	A	1.185	1.316	2.057	4.100	11.918	34.621	138.436
	REF	A	1.196	1.367	2.108	4.043	11.993	34.719	$\infty$
	E(%)	A	-0.9	-3.7	-2.4	1.4	-0.6	-0.3	-
0.2	FIT	A	1.109	1.171	1.387	1.639	1.783	1.841	2.245
		B	0.523	0.568	0.687	0.889	1.192	1.351	1.467
	REF	A	1.119	1.162	1.371	1.651	1.787	1.932	2.673
		B	0.512	0.582	0.688	0.882	1.201	1.316	1.462
	E(%)	A	-0.9	0.8	1.2	-0.7	-0.2	-4.7	-16.0
		B	2.1	-2.4	-0.2	0.8	-0.7	2.7	0.4
0.4	FIT	A	1.085	1.114	1.214	1.320	1.364	1.439	2.009
		B	0.788	0.818	0.904	1.064	1.319	1.457	1.563
	REF	A	1.087	1.119	1.216	1.327	1.379	1.519	2.268
		B	0.794	0.810	0.911	1.060	1.320	1.471	1.556
	E(%)	A	-0.2	-0.4	-0.2	-0.5	-1.1	-5.3	-11.4
		B	-0.7	1.0	-0.8	0.4	-0.1	-0.9	0.4
0.6	FIT	A	1.072	1.090	1.150	1.208	1.231	1.336	2.046
		B	0.929	0.958	1.037	1.177	1.381	1.477	1.525
	REF	A	1.069	1.090	1.143	1.206	1.228	1.327	2.144
		B	0.933	0.954	1.025	1.192	1.366	1.453	1.527
	E(%)	A	0.3	0.0	0.6	0.2	0.2	0.7	-4.6
		B	-0.5	0.4	1.2	-1.2	1.1	1.6	-0.1
1.0	FIT	A	1.039	1.049	1.082	1.107	1.107	1.219	1.985
		B	1.125	1.153	1.219	1.312	1.445	1.521	1.595
	REF	A	1.039	1.047	1.083	1.106	1.107	1.179	1.988
		B	1.133	1.145	1.220	1.318	1.441	1.556	1.601
	E(%)	A	0.0	0.2	-0.1	0.1	0.0	3.4	-0.2
		B	-0.7	0.7	-0.1	-0.4	0.3	-2.2	-0.4
2.0	FIT	A	1.013	1.015	1.018	1.021	1.019	1.013	1.003
		B	1.529	1.538	1.563	1.608	1.687	1.738	1.795
	REF	A	1.020	1.012	1.007	1.030	1.016		
		B	1.528	1.548	1.538	1.631	1.667		
	E(%)	A	-0.6	0.3	1.1	-0.8	0.3		
		B	0.1	-0.6	1.6	-1.4	1.2		

表A3.5(b) 白鳥らの平板K値解のfitting (曲げ応力)

A/B		LOC	a/t						
			0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
0.0	FIT	A	1.056	1.036	1.242	1.959	4.989	13.863	50.391
	REF	A	1.041	1.035	1.234	1.898	4.674	12.469	$\infty$
	E(%)	A	1.5	0.0	0.6	3.2	6.7	11.2	-
0.2	FIT	A	0.981	0.902	0.774	0.611	0.297	-0.024	-0.764
		B	0.512	0.542	0.607	0.685	0.797	0.952	1.343
	REF	A	0.990	0.893	0.762	0.624	0.309	0.180	-0.878
		B	0.498	0.550	0.600	0.685	0.791	1.192	1.330
	E(%)	A	-0.9	0.8	0.9	-0.8	-0.6	-10.6	4.3
		B	1.2	-0.7	0.5	0.0	0.3	-12.4	0.5
0.4	FIT	A	0.956	0.849	0.645	0.408	0.100	-0.119	-0.620
		B	0.764	0.767	0.778	0.811	0.871	0.937	1.086
	REF	A	0.953	0.845	0.635	0.410	0.094	-0.052	-0.704
		B	0.768	0.757	0.782	0.808	0.870	1.040	1.085
	E(%)	A	0.2	0.4	0.8	-0.2	0.4	-4.4	3.7
		B	-0.4	0.9	-0.4	0.2	0.1	-6.8	0.1
0.6	FIT	A	0.941	0.823	0.583	0.309	-0.008	-0.197	-0.619
		B	0.897	0.891	0.886	0.902	0.933	0.955	0.996
	REF	A	0.929	0.807	0.563	0.307	-0.018	-0.198	-0.669
		B	0.902	0.890	0.877	0.914	0.926	0.951	0.998
	E(%)	A	1.1	1.4	1.8	0.2	0.8	0.1	2.3
		B	-0.5	0.1	0.8	-1.0	0.5	0.3	-0.1
1.0	FIT	A	0.900	0.769	0.498	0.195	-0.128	-0.310	-0.742
		B	1.088	1.076	1.051	1.026	1.015	1.030	1.086
	REF	A	0.891	0.750	0.481	0.189	-0.141	-0.306	-0.761
		B	1.097	1.071	1.052	1.032	1.014	1.080	1.093
	E(%)	A	0.8	1.7	1.4	0.4	0.9	-0.0	0.9
		B	-0.8	0.5	-0.1	-0.5	0.1	-3.2	-0.3
2.0	FIT	A	0.858	0.703	0.384	0.045	-0.298	-0.447	-0.548
		B	1.483	1.446	1.378	1.325	1.281	1.240	1.156
	REF	A	0.855	0.686	0.358	0.038	-0.314		
		B	1.486	1.461	1.361	1.342	1.272		
	E(%)	A	0.2	1.2	1.9	0.5	1.2		
		B	-0.2	-1.0	1.2	-1.2	0.7		



表A3.5(c) 白鳥らの平板K値解のfitting (ピーク応力)

A/B		LOC	a/t						
			0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
0.0	FIT	A	0.878	0.684	0.403	0.111	0.164	2.266	21.596
0.2	FIT	A	0.781	0.533	0.136	-0.121	-0.104	0.036	0.323
		B	0.481	0.476	0.460	0.442	0.379	0.305	0.195
	REF	A	0.761	0.473	0.074	-0.135	-0.171		
		B	0.472	0.492	0.463	0.434	0.383		
	E(%)	A	2.6	12.2	13.4	3.2	17.7		
		B	1.1	-3.3	-0.7	1.7	-1.2		
0.4	FIT	A	0.731	0.447	0.020	-0.205	-0.155	-0.018	0.284
		B	0.713	0.664	0.574	0.500	0.418	0.356	0.274
	REF	A	0.716	0.421	-0.002	-0.192	-0.171		
		B	0.720	0.663	0.583	0.490	0.417		
	E(%)	A	2.2	3.9	3.8	-2.6	3.9		
		B	-0.9	0.2	-1.6	2.2	0.3		
0.6	FIT	A	0.697	0.390	-0.055	-0.264	-0.188	-0.042	0.304
		B	0.835	0.770	0.653	0.559	0.472	0.417	0.349
	REF	A	0.683	0.373	-0.056	-0.238	-0.180		
		B	0.844	0.777	0.650	0.562	0.472		
	E(%)	A	1.6	2.2	0.1	-4.6	-1.6		
		B	-1.0	-0.8	0.4	-0.5	-0.1		
1.0	FIT	A	0.642	0.318	-0.136	-0.318	-0.201	-0.034	0.381
		B	1.016	0.936	0.789	0.663	0.559	0.512	0.466
	REF	A	0.631	0.302	-0.137	-0.301	-0.195		
		B	1.028	0.939	0.792	0.660	0.559		
	E(%)	A	1.0	1.8	0.1	-2.6	-1.1		
		B	-1.2	-0.3	-0.4	0.5	0.1		
2.0	FIT	A	0.569	0.210	-0.258	-0.388	-0.176	0.057	0.369
		B	1.403	1.293	1.095	0.933	0.808	0.758	0.714
	REF	A	0.570	0.204	-0.256	-0.390	-0.177		
		B	1.407	1.305	1.080	0.943	0.800		
	E(%)	A	0.0	0.5	-0.2	0.2	0.2		
		B	-0.3	-0.9	1.4	-1.1	1.0		

## A3.3 Newman-Raju のK値解 (Key=13、平板、関数 fitting)

Newman-Raju はパラメトリックな FEM 解析を実施し、表面き裂付き平板の膜応力および曲げ応力に対する K 値解を形状パラメータ ( $\alpha = a/t$ ,  $\beta = a/b$  および  $b/W$ ) とき裂フロント位置の関数形に整理し以下のように与えている (REF. 4)。

$$F_M(\phi) = \{M_1 + M_2 \alpha^2 + M_3 \alpha^4\} g f_w f_x / Q^{0.5} \quad (A3.23)$$

$$F_B(\phi) = H(\phi) \cdot F_M(\phi) \quad (A3.24)$$

ここに  $\phi$  はき裂フロント位置を表す変数 (楕円離心角、 $\phi = 0$  が表面、 $\phi = \pi/2$  が最深部を表す) であり、

$$H(\phi) = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi \quad (A3.25)$$

は曲げ応力に対する補正係数を表し、

$$f_w = [\sec \{(\pi/2)(b/W) \alpha^{0.5}\}]^{0.5} \quad (A3.26)$$

は有限平板に対する板幅補正係数を表す。Q は第 2 種完全楕円積分、 $f_x$  は位置係数、 $g$  は FEM 解に fitting させるための補正係数を表す。

$0 \leq \beta \leq 1$  に対して各係数が以下のように与えられている。

$$Q = 1 + 1.464 \beta^{1.05} \quad (A3.27a)$$

$$f_x = (\beta^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi)^{0.25} \quad (A3.27b)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \beta \quad (A3.27c)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89 / (0.2 + \beta) \quad (A3.27d)$$

$$M_3 = 0.5 - 1 / (0.65 + \beta) + 14 (1 - \beta)^{2.4} \quad (A3.27e)$$

$$g = 1 + (0.1 + 0.35 \alpha^2) (1 - \sin \phi)^2 \quad (A3.27f)$$

$$p = 0.2 + \beta + 0.6 \alpha \quad (A3.27g)$$

$$H_1 = 1 - 0.34 \alpha - 0.11 \beta \alpha \quad (A3.27h)$$

$$H_2 = 1 + G_{21} \alpha + G_{22} \alpha^2 \quad (A3.27i)$$

$$G_{21} = -1.22 - 0.12 \beta \quad (A3.27j)$$

$$G_{22} = 0.55 - 1.05 \beta^{0.75} + 0.47 \beta^{1.5} \quad (A3.27k)$$

$1 < \beta \leq 2$  に対しては、 $\eta = b/a = 1/\beta$  として、各係数が以下のように与えられている。

$$Q = 1 + 1.464 \eta^{1.05} \quad (A3.28a)$$

$$f_x = (\eta^2 \sin^2 \phi + \cos^2 \phi)^{0.25} \quad (A3.28b)$$

$$M_1 = (1 + 0.04 \eta) \eta^{0.5} \quad (A3.28c)$$

$$M_2 = 0.2 \eta^4 \quad (A3.28d)$$

$$M_3 = -0.11 \eta^4 \quad (A3.28e)$$

$$g = 1 + (0.1 + 0.35 \eta \alpha^2) (1 - \sin \phi)^2 \quad (A3.28f)$$

$$p = 0.2 + \eta + 0.6 \alpha \quad (A3.28g)$$

$$H_1 = 1 + G_{11} \alpha + G_{12} \alpha^2 \quad (A3.28h)$$

$$H_2 = 1 + G_{21} \alpha + G_{22} \alpha^2 \quad (A3.28i)$$

$$G_{11} = -0.04 - 0.41 \eta \quad (A3.28j)$$

$$G_{12} = 0.55 - 1.93 \eta^{0.75} + 1.38 \eta^{1.5} \quad (A3.28k)$$

$$G_{21} = -2.11 + 0.77 \eta \quad (A3.28l)$$

$$G_{22} = 0.55 - 0.72 \eta^{0.75} + 0.14 \eta^{1.5} \quad (A3.28m)$$

$\beta$  および  $b/W$  の適用範囲は次式で与えられている。

$$0 \leq \beta \leq 2 \quad , \quad b/W \leq 0.5 \quad (\text{A3.29})$$

$\alpha$  の適用範囲は次式で与えられている。

$$\alpha < 1.25(\beta + 0.6) \quad \text{for} \quad 0 \leq \beta \leq 0.2 \quad (\text{A3.30a})$$

$$\alpha < 1 \quad \text{for} \quad 0.2 \leq \beta \leq 2 \quad (\text{A3.30b})$$

最深部の F 値は  $\phi = \pi/2$  での値として与えられ、表面部の F 値は  $\phi = 0$  での値として与えられる。

$$F_{M,A} = F_M(\pi/2), \quad F_{M,B} = F_M(0) \quad (\text{A3.31})$$

$$F_{B,A} = F_B(\pi/2) = H_2 F_{M,A} \quad (\text{A3.32a})$$

$$F_{B,B} = F_B(0) = H_1 F_{M,B} \quad (\text{A3.32b})$$

CANIS のサブプログラムでは放物線形ピーク応力に対し、前A3.2節(白鳥らの解の関数fitting)で求められたピーク応力に対する補正係数を用い、次式で算出する。

$$F_{P,A} = (1 + P_{A1}\alpha + P_{A2}\alpha^2) F_{M,A} \quad (\text{A3.33a})$$

$$F_{P,B} = (1 + P_{B1}\alpha + P_{B2}\alpha^2) F_{M,B} \quad (\text{A3.33b})$$

ここに係数  $P_{A1}$ 、 $P_{A2}$ 、 $P_{B1}$ 、 $P_{B2}$  はアスペクト比  $\beta$  の関数であり、その具体的な表示は前A3.2節を参照されたい。

#### A3.4 白鳥らの K 値解 (Key=20、円筒内面の周方向き裂)

白鳥ら(RBF.1)は円筒内面の周方向き裂についてパラメトリックな FEM 解析を実施し、き裂面の任意の局所領域に単位分布荷重が作用した時の K 値を求めデータベース化した。形状パラメータは、 $R/t=10.0, 5.0, 2.5, 1.67, 1.25$  ( $t/R=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )、 $\beta=0.2, 0.4, 0.6, 1.0$ 、 $\alpha=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  である。これらの K 値解を重ね合わせることで(き裂無し断面に任意の応力分布が生じるような)任意荷重に対する K 値を算出することができる(影響関数法)。また影響関数法により、任意応力分布に対するき裂の最深部および表面部の K 値を算出するパソコンプログラムを公表している。本節ではパソコンプログラムを用いて膜応力、曲げ応力および放物線形ピーク応力に対する F 値テーブルを表A3.6のように作成した。なお  $R/t=1.25$  のデータはパソコンプログラムに含まれないので除外した。 $\alpha=0$  のデータは、膜応力 ( $F_M$ ) については  $\alpha=0.1, 0.2$  のデータの線形外挿値とし、曲げ ( $F_B$ ) およびピーク応力 ( $F_P$ ) については膜応力の外挿値に等しいとした。これにより  $\alpha \Rightarrow 0$  で  $F_M = F_B = F_P$  となり理論と整合し、その結果として曲げおよびピーク応力が重なる場合の  $\alpha \Rightarrow 0$  の外挿精度が向上することになる。表A3.6には内面全周き裂 ( $\beta=0$ ) が含まれているが、これらは Labbens らの解(付録4のA4.5節、 $R/t=10.0$ ) および植田らの解(付録4のA4.3節、 $R/t=4.786, 2.577, 0.8375$ ) を内外挿して求めたものである。これら全周き裂の解をデータに含めることで  $\beta \Rightarrow 0$  での外挿精度が向上することになる。テーブル値はA3.1節と同様に最深部では  $F Q^{0.5}$ 、表面部では  $F(Q/\beta)^{0.5}$  とした。テーブル値を内挿し、最深部では  $Q^{0.5}$  で除し、表面部では  $(\beta/Q)^{0.5}$  を乗じて任意き裂形状の F 値を得ることになる。また  $\beta=0$  の表面部のテーブル値は  $\beta=0.2$  の値を用いた。これは  $0 < \beta < 0.2$  での表面部の F 値を (定数)  $\times (\beta/Q)^{0.5}$  と外挿することに等しい。なお、CANIS のサブプログラムでは、データ解析結果を反映させて、 $F_{M,A}$  と  $F_{P,A}$  については  $\alpha > 0.4$  領域で深さ方向に放物線内外挿を採用し、その他については全て線形内外挿とした。

表A3.6(1a) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=10.0、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.120	1.142	1.217	1.550	2.040	2.674
	B	0.9658	1.1298	1.2938	1.4600	1.7128	1.9650
0.2	A	1.0720	1.0906	1.1092	1.2914	1.4467	1.6542
	B	0.9658	1.1298	1.2938	1.4600	1.7128	1.9650
0.4	A	0.9343	1.0151	1.0959	1.1666	1.2483	1.3316
	B	1.0683	1.1493	1.2303	1.3713	1.5557	1.7579
0.6	A	0.8505	0.9531	1.0557	1.1028	1.1574	1.2026
	B	0.9053	1.0250	1.1447	1.2510	1.4244	1.5675
1.0	A	0.8646	0.9000	0.9354	1.0434	1.0709	1.1089
	B	0.9621	0.9725	0.9829	1.1430	1.2223	1.3334

上段  $F_{M, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{M, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(1b) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=10.0、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.120	1.009	0.936	0.883	0.814	0.600
	B	0.9658	1.1000	1.2378	1.2883	1.3875	1.3967
0.2	A	1.0720	0.9645	0.8436	0.7002	0.4844	0.2086
	B	0.9658	1.1000	1.2378	1.2883	1.3875	1.3967
0.4	A	0.9343	0.8902	0.8280	0.5985	0.3526	0.0470
	B	1.0683	1.1129	1.1514	1.1857	1.2121	1.2111
0.6	A	0.8505	0.8306	0.7854	0.5373	0.2757	-0.0384
	B	0.9053	0.9912	1.0681	1.0755	1.1077	1.0876
1.0	A	0.8646	0.7741	0.6763	0.4624	0.1736	-0.1467
	B	0.9621	0.9401	0.9155	0.9868	0.9644	0.9526

上段  $F_{B, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{B, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(1c) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=10.0、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.120	0.773	0.499	0.120	-0.119	-0.218
	B	0.9658	1.0429	1.1349	1.0158	0.9524	0.8016
0.2	A	1.0720	0.7399	0.4325	0.0383	-0.1799	-0.1830
	B	0.9658	1.0429	1.1349	1.0158	0.9524	0.8016
0.4	A	0.9343	0.6685	0.4128	-0.0209	-0.2200	-0.1855
	B	1.0683	1.0437	1.0102	0.8964	0.7666	0.6428
0.6	A	0.8505	0.6142	0.3706	-0.0637	-0.2490	-0.1921
	B	0.9053	0.9271	0.9316	0.8045	0.6993	0.5858
1.0	A	0.8646	0.5528	0.2844	-0.1341	-0.3055	-0.2061
	B	0.9621	0.8789	0.7962	0.7446	0.6266	0.5390

上段  $F_{P, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{P, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(2a) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=5.0、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.033	1.133	1.216	1.443	1.751	2.234
	B	0.9730	1.1281	1.2832	1.4064	1.5682	1.8216
0.2	A	1.0751	1.0852	1.0953	1.2429	1.3706	1.6074
	B	0.9730	1.1281	1.2832	1.4064	1.5682	1.8216
0.4	A	0.9362	1.0122	1.0882	1.1448	1.2220	1.3352
	B	1.0712	1.1477	1.2242	1.3415	1.4664	1.6270
0.6	A	0.8513	0.9520	1.0527	1.0930	1.1465	1.2224
	B	0.9063	1.0238	1.1413	1.2345	1.3839	1.5034
1.0	A	0.8645	0.9009	0.9373	1.0464	1.0784	1.1329
	B	0.9630	0.9722	0.9814	1.1371	1.2095	1.3034

上段  $F_{M, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{M, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(2b) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=5.0、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.033	0.963	0.894	0.760	0.601	0.371
	B	0.9730	1.0984	1.2286	1.2485	1.2976	1.3242
0.2	A	1.0751	0.9595	0.8315	0.6643	0.4356	0.1813
	B	0.9730	1.0984	1.2286	1.2485	1.2976	1.3242
0.4	A	0.9362	0.8873	0.8211	0.5818	0.3327	0.0404
	B	1.0712	1.1113	1.1461	1.1632	1.1528	1.1360
0.6	A	0.8513	0.8295	0.7825	0.5290	0.2660	-0.0367
	B	0.9063	0.9900	1.0651	1.0628	1.0805	1.0460
1.0	A	0.8645	0.7748	0.6776	0.4625	0.1731	-0.1454
	B	0.9630	0.9397	0.9141	0.9817	0.9545	0.9282

上段  $F_{B, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{B, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(2c) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=5.0、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.033	0.791	0.494	0.047	-0.167	-0.204
	B	0.9730	1.0415	1.1281	0.9955	0.9296	0.7892
0.2	A	1.0751	0.7354	0.4236	0.0203	-0.1959	-0.2071
	B	0.9730	1.0415	1.1281	0.9955	0.9296	0.7892
0.4	A	0.9362	0.6660	0.4075	-0.0300	-0.2255	-0.1909
	B	1.0712	1.0423	1.0061	0.8845	0.7439	0.6237
0.6	A	0.8513	0.6131	0.3680	-0.0692	-0.2545	-0.1897
	B	0.9063	0.9261	0.9292	0.7972	0.6882	0.5717
1.0	A	0.8645	0.5532	0.2846	-0.1367	-0.3080	-0.2030
	B	0.9630	0.8786	0.7949	0.7410	0.6210	0.5275

上段  $F_{P, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{P, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(3a) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=2.5、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.127	1.133	1.169	1.311	1.521	1.924
	B	0.9840	1.1249	1.2658	1.3407	1.4600	1.5733
0.2	A	1.0785	1.0753	1.0721	1.1808	1.3045	1.6294
	B	0.9840	1.1249	1.2658	1.3407	1.4600	1.5733
0.4	A	0.9383	1.0065	1.0747	1.1131	1.1846	1.3759
	B	1.0755	1.1444	1.2133	1.2969	1.3900	1.5219
0.6	A	0.8530	0.9499	1.0468	1.0785	1.1358	1.2624
	B	0.9085	1.0214	1.1343	1.2080	1.3264	1.4216
1.0	A	0.8639	0.9025	0.9411	1.0529	1.0947	1.1878
	B	0.9644	0.9715	0.9786	1.1272	1.1900	1.2802

上段  $F_{M, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{M, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(3b) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=2.5、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.127	0.961	0.853	0.664	0.477	0.244
	B	0.9840	1.0954	1.2133	1.1992	1.2361	1.1810
0.2	A	1.0785	0.9502	0.8113	0.6174	0.3893	0.1795
	B	0.9840	1.0954	1.2133	1.1992	1.2361	1.1810
0.4	A	0.9383	0.8820	0.8091	0.5570	0.3061	0.0425
	B	1.0755	1.1083	1.1364	1.1294	1.1046	1.0692
0.6	A	0.8530	0.8274	0.7768	0.5162	0.2536	-0.0344
	B	0.9085	0.9878	1.0588	1.0421	1.0409	0.9921
1.0	A	0.8639	0.7761	0.6800	0.4634	0.1740	-0.1406
	B	0.9644	0.9391	0.9113	0.9732	0.9384	0.9085

上段  $F_{B, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{B, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(3c) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (R/t=2.5、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.127	0.663	0.425	0.034	-0.192	-0.205
	B	0.9840	1.0388	1.1166	0.9695	0.9021	0.7536
0.2	A	1.0785	0.7273	0.4086	-0.0041	-0.2144	-0.2043
	B	0.9840	1.0388	1.1166	0.9695	0.9021	0.7536
0.4	A	0.9383	0.6612	0.3981	-0.0440	-0.2402	-0.2019
	B	1.0755	1.0396	0.9983	0.8660	0.7272	0.6018
0.6	A	0.8530	0.6110	0.3628	-0.0782	-0.2633	-0.2051
	B	0.9085	0.9241	0.9242	0.7850	0.6707	0.5514
1.0	A	0.8639	0.5540	0.2850	-0.1412	-0.3155	-0.2203
	B	0.9644	0.8779	0.7924	0.7347	0.6108	0.5159

上段  $F_{P, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{P, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(4a) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (  $R/t=1.667$ 、膜応力)

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.136	1.124	1.140	1.246	1.427	1.811
	B	0.9909	1.1219	1.2529	1.3040	1.3950	1.4828
0.2	A	1.0789	1.0663	1.0537	1.1444	1.2779	1.6567
	B	0.9909	1.1219	1.2529	1.3040	1.3950	1.4828
0.4	A	0.9388	1.0011	1.0634	1.0916	1.1718	1.4277
	B	1.0785	1.1412	1.2039	1.2662	1.3389	1.4697
0.6	A	0.8542	0.9479	1.0416	1.0691	1.1343	1.3096
	B	0.9104	1.0191	1.1278	1.1911	1.2918	1.3846
1.0	A	0.8648	0.9048	0.9448	1.0594	1.1081	1.2378
	B	0.9686	0.9722	0.9758	1.1195	1.1745	1.2658

上段  $F_{M, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{M, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(4b) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (  $R/t=1.667$ 、曲げ応力)

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.136	0.950	0.828	0.621	0.426	0.197
	B	0.9909	1.0925	1.2021	1.1725	1.1850	1.1121
0.2	A	1.0789	0.9417	0.7952	0.5890	0.3655	0.2958
	B	0.9909	1.0925	1.2021	1.1725	1.1850	1.1121
0.4	A	0.9388	0.8769	0.7989	0.5396	0.2928	0.0471
	B	1.0785	1.1053	1.1282	1.1059	1.0701	1.0337
0.6	A	0.8542	0.8254	0.7718	0.5072	0.2468	-0.0294
	B	0.9104	0.9856	1.0530	1.0288	1.0162	0.9624
1.0	A	0.8648	0.7780	0.6823	0.4646	0.1741	-0.1365
	B	0.9686	0.9396	0.9086	0.9663	0.9254	0.8913

上段  $F_{B, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{B, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.6(4c) 円筒内面の周方向き裂の補正係数 (  $R/t=1.667$ 、ピーク応力)

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.136	0.671	0.408	0.013	-0.201	-0.208
	B	0.9909	1.0362	1.1081	0.9568	0.8840	0.6914
0.2	A	1.0789	0.7198	0.3963	-0.0203	-0.2280	-0.1566
	B	0.9909	1.0362	1.1081	0.9568	0.8840	0.6914
0.4	A	0.9388	0.6566	0.3901	-0.0544	-0.2491	-0.2129
	B	1.0785	1.0369	0.9924	0.8527	0.7129	0.5882
0.6	A	0.8542	0.6091	0.3582	-0.0851	-0.2706	-0.2149
	B	0.9104	0.9221	0.9195	0.7769	0.6588	0.5366
1.0	A	0.8648	0.5553	0.2853	-0.1450	-0.3226	-0.2299
	B	0.9686	0.8783	0.7899	0.7292	0.6022	0.5039

上段  $F_{P, A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{P, B} (Q/\beta)^{0.5}$

A3.5 白鳥らのK値解 (Key=21、円筒内面の周方向き裂、軸曲げに対する $F_M$ )

膜応力 $\sigma_M$ に対する $F_M$ 値を除いて前A3.4節と同一のK値解である。前A3.4節では軸引張荷重に対応する純粋な膜応力 $\sigma_M$ に対する $F_M$ 値を用いた。本節では円筒ビームの軸曲げモーメント荷重に対する最大表皮応力 $\sigma_M$ に対する $F_M$ 値を用いる。き裂の中心が最大引張応力側にあるものとしている(図A3.2参照)。本節の $F_M$ 値を用いる事により、軸曲げによる応力を膜応力として取り扱う事ができる。軸曲げ荷重に対する $F_M$ 値テーブルを表A3.7に示す。

表A3.7(a) 円筒内面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 ( $R/t=10.0$ )

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.0148	1.0440	1.1191	1.4391	1.9107	2.5233
	B	0.8811	1.0264	1.1717	1.3148	1.5228	1.7195
0.2	A	0.974	0.997	1.020	1.199	1.355	1.561
	B	0.8811	1.0264	1.1717	1.3148	1.5228	1.7195
0.4	A	0.848	0.928	1.008	1.086	1.174	1.267
	B	0.9692	1.0451	1.1210	1.2507	1.4199	1.6049
0.6	A	0.772	0.872	0.972	1.028	1.091	1.149
	B	0.8211	0.9321	1.0431	1.1425	1.3052	1.4395
1.0	A	0.784	0.823	0.862	0.974	1.014	1.064
	B	0.874	0.885	0.896	1.045	1.121	1.227

上段 $F_{M,A} Q^{0.5}$   
下段 $F_{M,B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.7(b) 円筒内面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 ( $R/t=5.0$ )

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	0.8590	0.9542	1.0369	1.2539	1.5445	1.9874
	B	0.8184	0.9369	1.0554	1.1113	1.1560	1.2365
0.2	A	0.894	0.914	0.934	1.080	1.209	1.430
	B	0.8184	0.9369	1.0554	1.1113	1.1560	1.2365
0.4	A	0.778	0.853	0.928	0.999	1.089	1.214
	B	0.8934	0.9582	1.0230	1.1163	1.2127	1.3313
0.6	A	0.707	0.803	0.899	0.957	1.027	1.120
	B	0.7539	0.8546	0.9553	1.0367	1.1645	1.2652
1.0	A	0.720	0.761	0.802	0.920	0.973	1.049
	B	0.801	0.812	0.823	0.958	1.025	1.110

上段 $F_{M,A} Q^{0.5}$   
下段 $F_{M,B} (Q/\beta)^{0.5}$



表A3.7(c) 円筒内面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 (  $R/t=2.5$  )

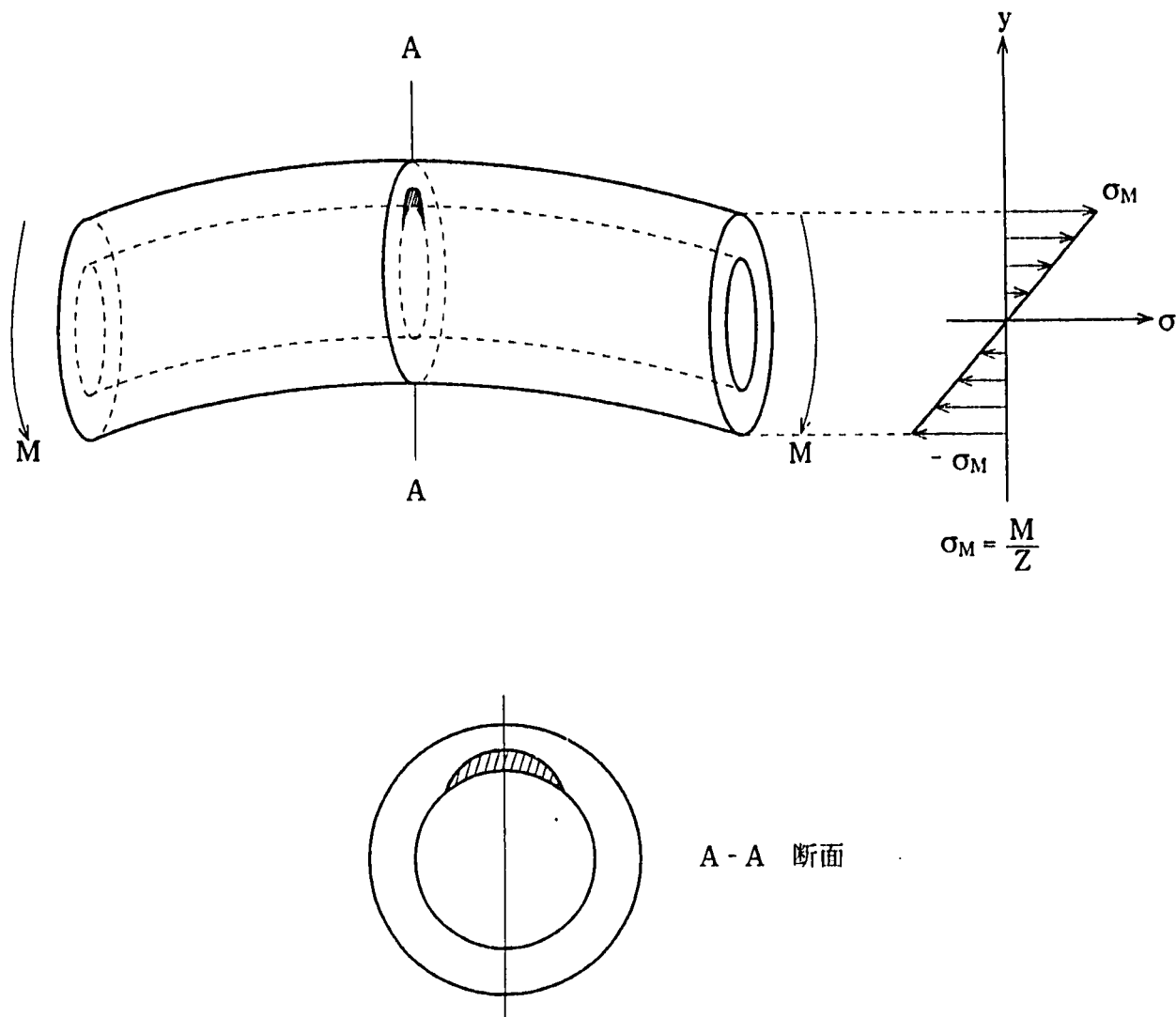
a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	0.8036	0.8271	0.8734	1.0148	1.2009	1.4973
	B	0.7379	0.7938	0.8497	0.7401	0.5478	0.2817
0.2	A	0.769	0.785	0.801	0.914	1.030	1.268
	B	0.7379	0.7938	0.8497	0.7401	0.5478	0.2817
0.4	A	0.668	0.736	0.804	0.871	0.962	1.150
	B	0.7731	0.8190	0.8649	0.8981	0.9155	0.9360
0.6	A	0.605	0.695	0.785	0.849	0.932	1.077
	B	0.6507	0.7333	0.8159	0.8663	0.9411	0.9928
1.0	A	0.615	0.662	0.709	0.835	0.911	1.035
	B	0.689	0.698	0.707	0.821	0.872	0.942

上段  $F_{M,A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{M,B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.7(d) 円筒内面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 (  $R/t=1.667$  )

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	0.7097	0.7263	0.7617	0.8732	1.0195	1.2090
	B	0.6865	0.6798	0.6731	0.3980	0.0000	-0.4025
0.2	A	0.674	0.689	0.704	0.802	0.913	1.106
	B	0.6865	0.6798	0.6731	0.3980	0.0000	-0.4025
0.4	A	0.584	0.648	0.712	0.779	0.879	1.102
	B	0.6846	0.7131	0.7416	0.7210	0.6609	0.5977
0.6	A	0.530	0.615	0.700	0.770	0.866	1.049
	B	0.5718	0.6403	0.7088	0.7359	0.7681	0.7811
1.0	A	0.539	0.589	0.639	0.772	0.864	1.024
	B	0.606	0.613	0.620	0.717	0.753	0.811

上段  $F_{M,A} Q^{0.5}$   
 下段  $F_{M,B} (Q/\beta)^{0.5}$



図A3.2 円筒の軸曲げ（周方向内面き裂）

## A3.6 LLNLのK値解 (Key=22、円筒周方向内面き裂、関数 fitting)

LLNLでは代表的なPWR配管 ( $t/R=0.2$ )内面の周方向半楕円表面き裂に対してパラメトリックなBEM解析を実施し、K値を算出し、形状パラメータ  $a/t$ ,  $a/b$  の多項式でfittingした(RBF.5)。LLNLが求めたのは膜応力に対するグローバルK値(global-K)であり、前節までの局所K値(local-K)とは若干異なる。グローバルK値の定義については文献(例えば本文のRBF.2)を参照されたい。形状パラメータ  $\alpha = a/t$ ,  $\beta = a/b$  の範囲を  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \beta \leq 1$  として膜応力に対するF値が次式で与えられている。

$$F_{M,A} = (M_{A1} + M_{A2}\alpha + M_{A3}\alpha^2 + M_{A4}\alpha^3) / \{\pi(1-\alpha)\}^{0.5} \quad (\text{A3.33a})$$

$$F_{M,B} = (M_{B1} + M_{B2}\alpha + M_{B3}\alpha^2 + M_{B4}\alpha^3) / \{\pi(1-\alpha)\}^{0.5} \quad (\text{A3.33b})$$

ここに各係数は次式で与えられている。

$$M_{A1} = 1.4401 - 0.34296\beta - 0.4041\beta^2 + 0.29273\beta^3 \quad (\text{A3.34a})$$

$$M_{A2} = -0.68159 - 0.42330\beta - 0.49695\beta^2 + 0.96951\beta^3 \quad (\text{A3.34b})$$

$$M_{A3} = 0.036574 + 11.798\beta - 20.734\beta^2 + 9.6933\beta^3 \quad (\text{A3.34c})$$

$$M_{A4} = 0.42562 - 15.827\beta + 29.538\beta^2 - 15.044\beta^3 \quad (\text{A3.34d})$$

$$M_{B1} = 0.97917 + 0.20174\beta - 0.24769\beta^2 + 0.05483\beta^3 \quad (\text{A3.35a})$$

$$M_{B2} = 1.0621 - 6.6880\beta + 9.2182\beta^2 - 4.2890\beta^3 \quad (\text{A3.35b})$$

$$M_{B3} = -2.7479 + 21.818\beta - 36.218\beta^2 + 18.606\beta^3 \quad (\text{A3.35c})$$

$$M_{B4} = 1.4344 - 17.705\beta + 31.190\beta^2 - 16.477\beta^3 \quad (\text{A3.35d})$$

CANISにはこれらの多項式近似によりF値をもとめるサブプログラムが内蔵されている。CANISでは、曲げ応力に対してはA3.3節(Newman-Rajuの解)の曲げ補正係数[(A3.27)式の $H_1$ ,  $H_2$ ]を用いて次式で計算している。

$$F_{B,A} = H_2 F_{M,A} \quad (\text{A3.36a})$$

$$F_{B,B} = H_1 F_{M,B} \quad (\text{A3.36b})$$

放物線形ピーク応力に対してはA3.2節のピーク補正係数[(A3.15), (A3.16)式]を用いて次式で計算している。

$$F_{P,A} = (1 + P_{A1}\alpha + P_{A2}\alpha^2) F_{M,A} \quad (\text{A3.37a})$$

$$F_{P,B} = (1 + P_{B1}\alpha + P_{B2}\alpha^2) F_{M,B} \quad (\text{A3.37b})$$

## A3.7 Raju-Newman のK値解 (Key=30、円筒内面の軸方向き裂対、関数fitting)

Raju-Newman(RBF. 6)は円筒内面の軸方向き裂についてパラメトリックなFEM解析を実施し、板厚方向の0次～3次の圧力分布がき裂面に負荷された時のK値解を求めた(図A3.3参照)。形状パラメータは  $R/t=10.0, 4.0$ ,  $\beta=0.2, 0.4, 1.0$ ,  $\alpha=0.2, 0.5, 0.8$  である。重ね合わせの原理によりき裂面の圧力分布は、き裂無し断面に生ずる応力分布と等価である。従って、き裂無しの軸方向断面に板厚方向の任意の周方向応力分布が生ずるような荷重が軸方向き裂付き円筒に負荷された場合に対して、周方向応力分布を3次式近似し圧力分布の0～3次の解を重ねあわせることで、K値を算出することが出来る。一般に軸方向き裂では、1個の単独き裂よりも、2個のき裂が  $180^\circ$  離れて対を成す方が、K値が大きくなる。本節は2個のき裂対の解である。0～3次の圧力分布

$$\sigma_J = (z/a)^J \quad \text{for } J=0, 1, 2, 3 \quad (\text{A3.38})$$

に対するG値

$$G_J = K / (\pi a / Q)^{0.5} \quad \text{for } J=0, 1, 2, 3 \quad (\text{A3.39})$$

を表A3.8に示す。ここに  $z$  は内面からの半径方向距離であり、 $G_J$  は影響係数と呼ばれる。膜応力、曲げ応力および放物線形ピーク応力に対するF値は次式で求めることが出来る。

$$F_M Q^{0.5} = G_0 \quad (\text{A3.40a})$$

$$F_B Q^{0.5} = G_0 - 2\alpha G_1 \quad (\text{A3.40b})$$

$$F_P Q^{0.5} = G_0 - 6\alpha G_1 + 6\alpha^2 G_2 \quad (\text{A3.40c})$$

き裂の最深部および表面部のF値を表A3.9に示す。

Raju-Newmanの解から得られるF値は以下の前記の形状パラメータ値における離散値であり、これを以下のパラメータ範囲に内外挿することを考える。

$$4.0 \leq R/t \leq 10.0, \quad 0.0 \leq \beta \leq 1.0, \quad 0.0 < \alpha < 1.0 \quad (\text{A3.41})$$

$\beta \Rightarrow 0.0$  に外挿するためには内面軸方向無限き裂のK値解が必要である。本節では付録4のA4.8節 [Labbensらの単独き裂の解、 $R/t=10.0$ 、表A3.10(a)] とA4.6節 [Xue-Ren Wuのき裂対の解、 $R/t=4.0$ 、表A3.10(b)] を用いた。これら表A3.9および表A3.10を以下の式でfittingした。

$$F_{M,A} = (M_{A1} + M_{A2}\alpha^2 + M_{A3}\alpha^4) / Q^{0.5} \quad (\text{A3.42a})$$

$$F_{M,B} = (M_{B1} + M_{B2}\alpha + M_{B3}\alpha^2) F_{M,A} \beta^{0.5} \quad (\text{A3.42b})$$

$$F_{B,A} = (B_{A1} + B_{A2}\alpha + B_{A3}\alpha^2) F_{M,A} \quad (\text{A3.43a})$$

$$F_{B,B} = (B_{B1} + B_{B2}\alpha + B_{B3}\alpha^2) F_{M,B} \quad (\text{A3.43b})$$

$$F_{P,A} = (P_{A1} + P_{A2}\alpha + P_{A3}\alpha^2) F_{M,A} \quad (\text{A3.44a})$$

$$F_{P,B} = (P_{B1} + P_{B2}\alpha + P_{B3}\alpha^2) F_{M,B} \quad (\text{A3.44b})$$

$R/t=10.0$ のfitting係数を表A3.11(a)に、 $R/t=4.0$ のfitting係数を表A3.11(b)に示す。

曲げおよびピーク応力に対するfittingは適用範囲を  $0.0 < \alpha \leq 0.5$  および  $0.5 < \alpha < 1.0$  に2分割した。 $0.0 < \alpha \leq 0.5$ の範囲では  $\alpha \Rightarrow 0$  で  $F_M = F_B = F_P$  となるようにfittingし理論との整合を図った。また  $\beta = 0$ の表面部のfitting係数は  $\beta = 0.2$  と共通とした。これは  $0 < \beta < 0.2$ での表面部のF値を(定数)  $\times (\beta/Q)^{0.5}$  と外挿することに等しい。求めたfitting関数による計算結果を表A3.12に示す。参照パラメータ点( $\beta=0.2, 0.4, 1.0$ ,  $\alpha=0.2, 0.5, 0.8$ )ではRaju-Newmanの参照解に一致し、かつ滑らかにfittingされているのが分かる。なおCANISのサブプログラムでは、

$R/t$ に関しては、 $4.0 < R/t < 10.0$ では線形補間し、 $R/t \leq 4.0$ では  $R/t=4.0$ の値を用い、 $R/t \geq 10.0$ では  $R/t=10.0$ の値を用い、範囲外への外挿は行わない。

表A3.8 円筒内面の軸方向き裂対の $G_j$  値(a)  $R/t=10.0$ Table 1 Influence coefficients,  $G_j$ , for semi-elliptical surface crack on inside of a cylinder ( $t/R=0.1$ )

Type of loading	a/b	0.2			0.4			1.0		
	$\frac{2\phi}{\pi} \frac{a}{t}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Uniform ( $G_0$ )	0	0.607	0.791	1.179	0.777	0.936	1.219	1.140	1.219	1.348
	0.25	0.740	0.932	1.284	0.810	0.948	1.164	1.068	1.126	1.200
	0.5	0.945	1.188	1.568	0.940	1.076	1.243	1.033	1.074	1.091
	0.75	1.073	1.366	1.798	1.038	1.180	1.357	1.019	1.055	1.090
	1.0	1.115	1.427	1.872	1.072	1.217	1.393	1.015	1.050	1.090
Linear ( $G_1$ )	0	0.079	0.138	0.253	0.125	0.176	0.259	0.197	0.221	0.255
	0.25	0.206	0.268	0.374	0.246	0.291	0.356	0.359	0.377	0.397
	0.5	0.422	0.503	0.619	0.442	0.487	0.538	0.541	0.554	0.555
	0.75	0.603	0.705	0.859	0.608	0.657	0.727	0.669	0.683	0.703
	1.0	0.673	0.783	0.960	0.672	0.723	0.806	0.715	0.729	0.760
Quadratic ( $G_2$ )	0	0.023	0.052	0.104	0.043	0.069	0.106	0.074	0.085	0.099
	0.25	0.075	0.105	0.154	0.097	0.119	0.149	0.153	0.162	0.170
	0.5	0.237	0.277	0.331	0.256	0.279	0.302	0.333	0.339	0.337
	0.75	0.429	0.480	0.560	0.441	0.466	0.505	0.514	0.520	0.533
	1.0	0.514	0.571	0.671	0.523	0.549	0.601	0.588	0.596	0.618
Cubic ( $G_3$ )	0	0.010	0.027	0.056	0.021	0.036	0.056	0.038	0.044	0.051
	0.25	0.032	0.049	0.077	0.044	0.058	0.074	0.075	0.080	0.085
	0.5	0.146	0.169	0.199	0.161	0.174	0.187	0.218	0.222	0.219
	0.75	0.332	0.363	0.412	0.346	0.360	0.385	0.417	0.420	0.429
	1.0	0.438	0.462	0.529	0.441	0.456	0.493	0.512	0.515	0.532

(b)  $R/t=4.0$ Table 2 Influence coefficients,  $G_j$ , for semi-elliptical surface crack on inside of a cylinder ( $t/R=0.25$ )

Type of loading	a/b	0.2			0.4			1.0		
	$\frac{2\phi}{\pi} \frac{a}{t}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Uniform ( $G_0$ )	0	0.606	0.797	1.201	0.770	0.924	1.219	1.128	1.191	1.316
	0.25	0.736	0.925	1.270	0.801	0.932	1.154	1.058	1.105	1.180
	0.5	0.935	1.170	1.549	0.928	1.056	1.241	1.025	1.060	1.088
	0.75	1.057	1.343	1.838	1.024	1.157	1.385	1.013	1.045	1.099
	1.0	1.097	1.405	1.959	1.057	1.193	1.443	1.009	1.041	1.105
Linear ( $G_1$ )	0	0.079	0.141	0.262	0.123	0.174	0.263	0.194	0.214	0.248
	0.25	0.205	0.268	0.372	0.243	0.287	0.356	0.356	0.371	0.393
	0.5	0.419	0.498	0.615	0.438	0.481	0.540	0.538	0.550	0.556
	0.75	0.598	0.698	0.876	0.603	0.650	0.740	0.667	0.680	0.708
	1.0	0.666	0.776	0.996	0.666	0.715	0.828	0.713	0.726	0.768
Quadratic ( $G_2$ )	0	0.023	0.054	0.108	0.042	0.068	0.109	0.072	0.082	0.097
	0.25	0.075	0.106	0.154	0.096	0.118	0.150	0.152	0.159	0.169
	0.5	0.236	0.275	0.330	0.254	0.276	0.304	0.332	0.338	0.339
	0.75	0.426	0.477	0.571	0.439	0.462	0.513	0.512	0.519	0.537
	1.0	0.511	0.567	0.692	0.520	0.545	0.614	0.583	0.594	0.623
Cubic ( $G_3$ )	0	0.010	0.028	0.059	0.021	0.036	0.059	0.037	0.043	0.050
	0.25	0.032	0.050	0.077	0.044	0.057	0.075	0.075	0.079	0.085
	0.5	0.145	0.168	0.199	0.160	0.173	0.188	0.217	0.221	0.220
	0.75	0.330	0.361	0.419	0.345	0.358	0.391	0.416	0.419	0.431
	1.0	0.426	0.460	0.542	0.439	0.454	0.509	0.511	0.515	0.536

表A3.9(a) 円筒内面の軸方向き裂対の補正係数 ( $R/t = 10.0$ )

$\beta = a/b$ $\alpha = a/t$	0.2			0.4			1.0		
	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{M,A} Q^{0.5}$	1.115	1.427	1.872	1.072	1.217	1.393	1.015	1.050	1.090
$F_{M,B} Q^{0.5}$	0.607	0.791	1.179	0.777	0.936	1.219	1.140	1.219	1.348
$F_{B,A} Q^{0.5}$	0.846	0.644	0.336	0.803	0.494	0.103	0.729	0.321	-0.126
$F_{B,B} Q^{0.5}$	0.575	0.653	0.774	0.727	0.760	0.805	1.061	0.998	0.940
$F_{P,A} Q^{0.5}$	0.431	-0.066	-0.159	0.391	-0.129	-0.168	0.298	-0.243	-0.185
$F_{P,B} Q^{0.5}$	0.518	0.455	0.364	0.637	0.512	0.383	0.921	0.684	0.504

表A3.9(b) 円筒内面の軸方向き裂対の補正係数 ( $R/t = 4.0$ )

$\beta = a/b$ $\alpha = a/t$	0.2			0.4			1.0		
	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{M,A} Q^{0.5}$	1.097	1.405	1.959	1.057	1.193	1.443	1.009	1.041	1.105
$F_{M,B} Q^{0.5}$	0.606	0.797	1.201	0.770	0.924	1.219	1.128	1.191	1.316
$F_{B,A} Q^{0.5}$	0.831	0.629	0.365	0.791	0.478	0.118	0.724	0.315	-0.124
$F_{B,B} Q^{0.5}$	0.574	0.656	0.782	0.721	0.750	0.798	1.050	0.977	0.919
$F_{P,A} Q^{0.5}$	0.420	-0.073	-0.165	0.383	-0.135	-0.174	0.295	-0.246	-0.189
$F_{P,B} Q^{0.5}$	0.517	0.455	0.358	0.632	0.504	0.375	0.912	0.672	0.498

表A3.10(a) 円筒内面の軸方向無限単独き裂のF値 ( $R/t = 10.0$ 、付録4のA4.8節参照)

a/t	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8
$F_M$	1.12	1.15	1.33	1.97	3.17	4.27	5.60
$F_B$	1.12	1.001	1.057	1.194	1.433	1.710	1.926
$F_P$	1.12	0.768	0.602	0.252	0.032	-0.057	-0.146

表A3.10(b) 円筒内面の軸方向無限き裂対のF値 ( $R/t = 4.0$ 、付録4のA4.6節参照)

a/t	0.001	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
$F_M$	1.1213	1.1298	1.1721	1.3273	1.5625	1.8932	2.3493	2.9571	3.7236	4.1624
$F_B$	1.1199	1.0608	1.0307	1.0205	1.0487	1.1096	1.2058	1.3311	1.4636	1.5224
$F_P$	1.1172	0.9308	0.7804	0.5447	0.3579	0.2060	0.0876	0.0015	-0.0498	-0.0556

表A3.11(a) 円筒内面の軸方向き裂対のfitting 係数 (R/t=10.0)

$\beta = a/b$	0.0	0.2	0.4	1.0				
$M_{A1}$	1.12180	1.04983	1.04039	1.00726	$\Leftrightarrow$ for $0.0 < a/t < 1.0$			
$M_{A2}$	4.55806	1.65231	0.80609	0.19765				
$M_{A3}$	3.69271	-0.57448	-0.39866	-0.10684				
$M_{B1}$	1.28399	1.28399	1.15354	1.11903	$\Leftrightarrow$ for $0.0 < a/t < 1.0$			
$M_{B2}$	-0.49641	-0.49641	-0.14593	-0.02158				
$M_{B3}$	0.81472	0.81472	0.54194	0.21083				
	$\Downarrow$ for $0.0 < a/t \leq 0.5$				$\Downarrow$ for $0.5 < a/t < 1.0$			
$\beta = a/b$	0.0	0.2	0.4	1.0	0.0	0.2	0.4	1.0
$B_{A1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00640	0.98341	0.98412	0.98831
$B_{A2}$	-1.06887	-1.27923	-1.29870	-1.42260	-1.21200	-1.16311	-1.18756	-1.34078
$B_{A3}$	0.21933	0.36367	0.22100	0.06800	0.48000	0.19778	0.06222	-0.04889
$B_{B1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00228	1.00228	1.00244	1.00014
$B_{B2}$	-0.20650	-0.20650	-0.28600	-0.33577	-0.22244	-0.22244	-0.30311	-0.33678
$B_{B3}$	-0.28500	-0.28500	-0.18000	-0.05367	-0.26222	-0.26222	-0.15556	-0.05222
$P_{A1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	0.53000	0.89403	0.93189	0.96954
$P_{A2}$	-3.29667	-3.71743	-3.81950	-4.24480	-1.38167	-2.97567	-3.34272	-4.03161
$P_{A3}$	2.80833	3.24967	3.21500	3.56400	0.85833	2.19000	2.53389	3.25944
$P_{B1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.04537	1.04537	1.02389	1.00554
$P_{B2}$	-0.65527	-0.65527	-0.89767	-1.01563	-0.97283	-0.97283	-1.06489	-1.05444
$P_{B3}$	-0.38867	-0.38867	-0.01667	0.27567	0.06500	0.06500	0.22222	0.33111

表A3. 11(b) 円筒内面の軸方向き裂対のfitting 係数 (  $R/t=4.0$  )

$\beta = a/b$	0.0	0.2	0.4	1.0				
$M_{A1}$	1.12155	1.03756	1.03099	1.00310	$\Leftrightarrow$ for $0.0 < a/t < 1.0$			
$M_{A2}$	4.59444	1.48897	0.65081	0.14672				
$M_{A3}$	1.44270	-0.07692	-0.01099	0.01954				
$M_{B1}$	1.25158	1.25158	1.12455	1.11201	$\Leftrightarrow$ for $0.0 < a/t < 1.0$			
$M_{B2}$	-0.15863	-0.15863	0.09380	0.00663				
$M_{B3}$	0.38467	0.38467	0.21267	0.11506				
	$\Downarrow$ for $0.0 < a/t \leq 0.5$				$\Downarrow$ for $0.5 < a/t < 1.0$			
$\beta = a/b$	0.0	0.2	0.4	1.0	0.0	0.2	0.4	1.0
$B_{A1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	0.87624	0.99092	0.99598	0.99416
$B_{A2}$	-1.21489	-1.28443	-1.29843	-1.42430	-0.83099	-1.22089	-1.27028	-1.38339
$B_{A3}$	0.47324	0.35967	0.19967	0.05900	0.20046	0.26889	0.15944	0.00056
$B_{B1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00332	1.00332	1.00153	0.99830
$B_{B2}$	-0.20413	-0.20413	-0.27893	-0.33623	-0.22739	-0.22739	-0.28967	-0.32433
$B_{B3}$	-0.29933	-0.29933	-0.19533	-0.04633	-0.26611	-0.26611	-0.18000	-0.06333
$P_{A1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.74445	0.89656	0.93936	0.97587
$P_{A2}$	-3.96438	-3.73983	-3.82990	-4.24827	-7.04132	-3.01572	-3.40539	-4.07233
$P_{A3}$	2.48072	3.27167	3.20700	3.55133	5.65782	2.23722	2.60056	3.30000
$P_{B1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.04646	1.04646	1.02511	1.00387
$P_{B2}$	-0.65203	-0.65203	-0.88733	-1.01477	-0.97722	-0.97722	-1.06311	-1.04183
$P_{B3}$	-0.41233	-0.41233	-0.04333	0.28633	0.05222	0.05222	0.20778	0.32500

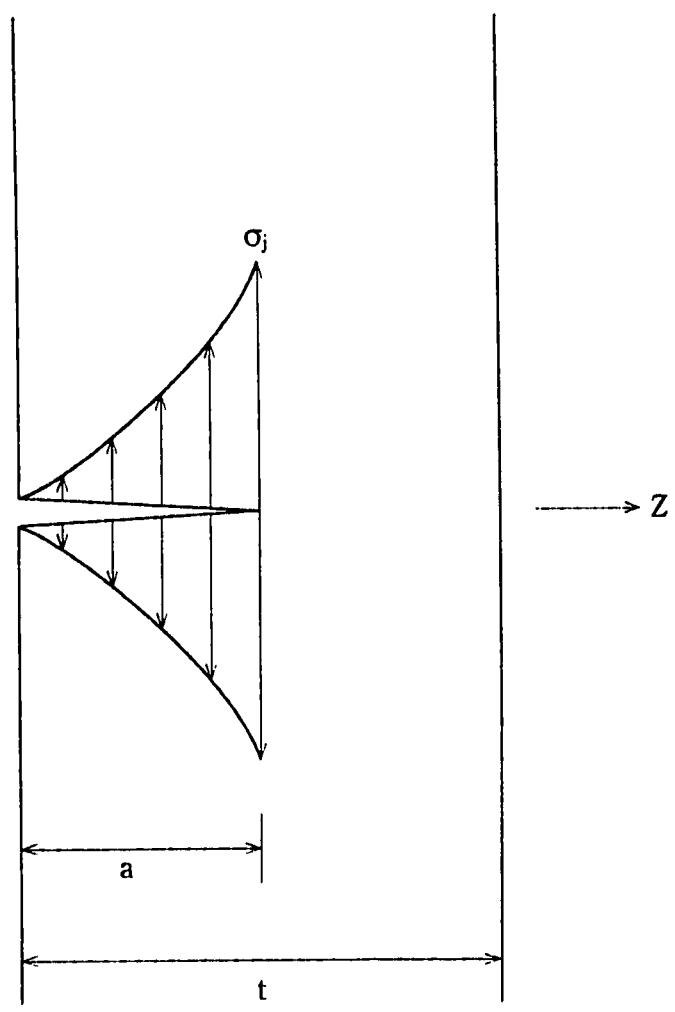


表A3.12(a) fitting式による計算結果 (R/t=10.0)

AXIAL CRACK		A/t=0.0	A/t=0.1	A/t=0.2	A/t=0.3	A/t=0.4	A/t=0.5	A/t=0.6	A/t=0.7	A/t=0.8	A/t=0.9	A/t=1.0
A/C=0.00	MEM.A	1.1218	1.1678	1.3100	1.5619	1.9456	2.4921	3.2413	4.2419	5.5515	7.2366	9.3726
	B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	REN.A	1.1218	1.0455	1.0415	1.0919	1.1821	1.2969	1.4651	1.6679	1.9097	2.2028	2.5718
	B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	PEK.A	1.1218	0.8156	0.5934	0.4120	0.2542	0.1339	0.0324	-0.0704	-0.1444	-0.1321	0.0624
	B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
A/C=0.05	MEM.A	1.0981	1.1365	1.2547	1.4623	1.7748	2.2143	2.8089	3.5931	4.6076	5.8996	7.5222
	B	0.3153	0.3157	0.3415	0.3951	0.4825	0.6137	0.8036	1.0732	1.4509	1.9750	2.6951
	REN.A	1.0981	1.0119	0.9861	1.0039	1.0512	1.1141	1.2027	1.2987	1.3955	1.4897	1.5871
	B	0.3153	0.3083	0.3235	0.3605	0.4206	0.5066	0.6223	0.7706	0.9526	1.1646	1.3950
	PEK.A	1.0981	0.7830	0.5475	0.3541	0.1886	0.0636	-0.0512	-0.1488	-0.1877	-0.0958	0.2413
	B	0.3153	0.2938	0.2915	0.3036	0.3260	0.3530	0.3898	0.4252	0.4479	0.4394	0.3707
A/C=0.10	MEM.A	1.0684	1.0992	1.1931	1.3559	1.5966	1.9282	2.3673	2.9340	3.6524	4.5500	5.6581
	B	0.4338	0.4319	0.4593	0.5181	0.6138	0.7558	0.9578	1.2393	1.6265	2.1541	2.8669
	REN.A	1.0684	0.9733	0.9269	0.9139	0.9213	0.9368	0.9573	0.9673	0.9560	0.9128	0.8274
	B	0.4338	0.4217	0.4351	0.4727	0.5351	0.6239	0.7417	0.8899	1.0678	1.2703	1.4844
	PEK.A	1.0684	0.7470	0.5008	0.2990	0.1306	0.0072	-0.1100	-0.1943	-0.2025	-0.0647	0.3254
	B	0.4338	0.4019	0.3920	0.3981	0.4148	0.4347	0.4646	0.4911	0.5071	0.4792	0.3943
A/C=0.15	MEM.A	1.0352	1.0583	1.1282	1.2466	1.4164	1.6416	1.9273	2.2798	2.7066	3.2163	3.8186
	B	0.5148	0.5093	0.5319	0.5834	0.6669	0.7880	0.9550	1.1794	1.4763	1.8650	2.3697
	REN.A	1.0352	0.9320	0.8662	0.8246	0.7957	0.7692	0.7334	0.6792	0.5972	0.4783	0.3137
	B	0.5148	0.4973	0.5039	0.5323	0.5814	0.6505	0.7396	0.8469	0.9692	1.0997	1.2266
	PEK.A	1.0352	0.7093	0.4548	0.2479	0.0813	-0.0349	-0.1440	-0.2075	-0.1900	-0.0392	0.3167
	B	0.5148	0.4739	0.4539	0.4483	0.4507	0.4533	0.4633	0.4673	0.4557	0.4149	0.3259
A/C=0.20	MEM.A	0.9997	1.0154	1.0617	1.1368	1.2374	1.3588	1.4952	1.6393	1.7826	1.9152	2.0260
	B	0.5740	0.5642	0.5780	0.6144	0.6728	0.7532	0.8555	0.9792	1.1227	1.2823	1.4518
	REN.A	0.9997	0.8892	0.8055	0.7378	0.6762	0.6132	0.5334	0.4363	0.3200	0.1854	0.0366
	B	0.5740	0.5509	0.5475	0.5605	0.5865	0.6218	0.6625	0.7032	0.7370	0.7562	0.7515
	PEK.A	0.9997	0.6709	0.4104	0.2015	0.0408	-0.0629	-0.1540	-0.1899	-0.1514	-0.0195	0.2195
	B	0.5740	0.5250	0.4933	0.4721	0.4546	0.4332	0.4150	0.3880	0.3466	0.2853	0.1947
A/C=0.30	MEM.A	0.9537	0.9649	0.9979	1.0511	1.1218	1.2064	1.3000	1.3968	1.4898	1.5710	1.6314
	B	0.6367	0.6307	0.6459	0.6813	0.7366	0.8113	0.9045	1.0147	1.1391	1.2728	1.4082
	REN.A	0.9537	0.8433	0.7523	0.6723	0.5959	0.5171	0.4230	0.3139	0.1887	0.0491	-0.1004
	B	0.6367	0.6137	0.6080	0.6167	0.6367	0.6642	0.6960	0.7266	0.7500	0.7594	0.7473
	PEK.A	0.9537	0.6325	0.3748	0.1686	0.0110	-0.0919	-0.1719	-0.1971	-0.1531	-0.0269	0.1888
	B	0.6367	0.5805	0.5403	0.5102	0.4840	0.4552	0.4296	0.3976	0.3548	0.2978	0.2244
A/C=0.40	MEM.A	0.9046	0.9116	0.9321	0.9649	1.0078	1.0581	1.1120	1.1648	1.2112	1.2449	1.2588
	B	0.6599	0.6597	0.6756	0.7070	0.7534	0.8138	0.8869	0.9702	1.0599	1.1504	1.2337
	REN.A	0.9046	0.7952	0.6982	0.6081	0.5199	0.4295	0.3269	0.2135	0.0895	-0.0427	-0.1778
	B	0.6599	0.6397	0.6321	0.6349	0.6455	0.6608	0.6781	0.6927	0.6999	0.6944	0.6708
	PEK.A	0.9046	0.5977	0.3399	0.1385	-0.0135	-0.1122	-0.1796	-0.1938	-0.1461	-0.0300	0.1549
	B	0.6599	0.6004	0.5538	0.5155	0.4808	0.4452	0.4124	0.3758	0.3330	0.2874	0.2236
A/C=0.50	MEM.A	0.8546	0.8604	0.8774	0.9046	0.9403	0.9820	1.0266	1.0703	1.1086	1.1363	1.1474
	B	0.6936	0.6936	0.7086	0.7382	0.7816	0.8380	0.9059	0.9828	1.0654	1.1485	1.2246
	REN.A	0.8546	0.7485	0.6527	0.5625	0.4735	0.3822	0.2799	0.1681	0.0469	-0.0813	-0.2118
	B	0.6936	0.6721	0.6624	0.6624	0.6697	0.6814	0.6948	0.7058	0.7102	0.7030	0.6797
	PEK.A	0.8546	0.5538	0.3096	0.1153	-0.0305	-0.1246	-0.1854	-0.1940	-0.1428	-0.0264	0.1554
	B	0.6936	0.6302	0.5795	0.5372	0.4988	0.4604	0.4253	0.3876	0.3454	0.2971	0.2425
A/C=0.60	MEM.A	0.8062	0.8109	0.8247	0.8468	0.8757	0.9096	0.9457	0.9810	1.0119	1.0340	1.0426
	B	0.7132	0.7135	0.7272	0.7540	0.7932	0.8438	0.9045	0.9730	1.0461	1.1194	1.1865
	REN.A	0.8062	0.7036	0.6093	0.5193	0.4302	0.3388	0.2378	0.1283	0.0109	-0.1126	-0.2377
	B	0.7132	0.6909	0.6792	0.6762	0.6797	0.6871	0.6960	0.7028	0.7037	0.6948	0.6718
	PEK.A	0.8062	0.5167	0.2812	0.0944	-0.0451	-0.1344	-0.1889	-0.1924	-0.1386	-0.0231	0.1541
	B	0.7132	0.6472	0.5933	0.5475	0.5062	0.4655	0.4287	0.3906	0.3495	0.3044	0.2550
A/C=0.80	MEM.A	0.7117	0.7205	0.7288	0.7419	0.7592	0.7793	0.8007	0.8215	0.8394	0.8519	0.8561
	B	0.7257	0.7266	0.7371	0.7569	0.7854	0.8220	0.8654	0.9139	0.9653	1.0165	1.0634
	REN.A	0.7117	0.6218	0.5309	0.4424	0.3542	0.2643	0.1672	0.0643	-0.0440	0.1563	0.2694
	B	0.7257	0.7027	0.6872	0.6779	0.6731	0.6711	0.6701	0.6676	0.6612	0.6482	0.6260
	PEK.A	0.7117	0.4497	0.2312	0.0589	-0.0680	-0.1478	-0.1905	-0.1855	-0.1287	-0.0175	0.1478
	B	0.7257	0.6569	0.5984	0.5473	0.5011	0.4574	0.4180	0.3798	0.3417	0.3032	0.2643
A/C=1.00	MEM.A	0.6417	0.6429	0.6466	0.6525	0.6601	0.6689	0.6782	0.6870	0.6944	0.6990	0.6995
	B	0.7181	0.7194	0.7262	0.7383	0.7552	0.7766	0.8016	0.8294	0.8588	0.8880	0.9152
	REN.A	0.6417	0.5519	0.4644	0.3780	0.2917	0.2045	0.1127	0.0177	0.0803	0.1803	-0.2808
	B	0.7181	0.6949	0.6759	0.6604	0.6473	0.6358	0.6247	0.6128	0.5988	0.5814	0.5593
	PEK.A	0.6417	0.3929	0.1898	0.0309	-0.0843	-0.1548	-0.1872	-0.1755	0.1178	0.0131	0.1381
	B	0.7181	0.6483	0.5867	0.5317	0.4817	0.4357	0.3945	0.3564	0.3211	0.2884	0.2583

表A3.12(b) fitting式による計算結果 (R/t=4.0)

AXIAL CRACK	A/t=0.0	A/t=0.1	A/t=0.2	A/t=0.3	A/t=0.4	A/t=0.5	A/t=0.6	A/t=0.7	A/t=0.8	A/t=0.9	A/t=1.0
A/C=0.00 MEM.A	1.1215	1.1676	1.3076	1.5467	1.8936	2.3603	2.9625	3.7192	4.6529	5.7896	7.1587
B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BEN.A	1.1215	1.0313	1.0147	1.0489	1.1168	1.2058	1.3326	1.4608	1.5808	1.6832	1.7590
B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PEK.A	1.1215	0.7337	0.4006	0.0525	-0.3576	-0.8545	-1.3140	-1.9328	-1.2451	-0.0573	2.5839
B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
A/C=0.05 MEM.A	1.0949	1.1329	1.2485	1.4453	1.7296	2.1105	2.5993	3.2099	3.9588	4.8652	5.9504
B	0.3064	0.3140	0.3448	0.4003	0.4833	0.5986	0.7526	0.9539	1.2135	1.5452	1.9661
BEN.A	1.0949	0.9984	0.9630	0.9688	1.0002	1.0449	1.1077	1.1607	1.1931	1.1945	1.1545
B	0.3064	0.3067	0.3266	0.3650	0.4207	0.4927	0.5803	0.6809	0.7901	0.9010	1.0023
PEK.A	1.0949	0.7205	0.4064	0.0991	-0.2331	-0.6005	-0.9345	-1.0870	-0.8779	-0.0428	1.7865
B	0.3064	0.2923	0.2942	0.3071	0.3254	0.3417	0.3604	0.3701	0.3618	0.3234	0.2388
A/C=0.10 MEM.A	1.0623	1.0923	1.1831	1.3371	1.5584	1.8525	2.2269	2.6902	3.2531	3.9275	4.7273
B	0.4204	0.4282	0.4621	0.5237	0.6158	0.7431	0.9119	1.1306	1.4102	1.7641	2.2089
BEN.A	1.0623	0.9603	0.9071	0.8859	0.8832	0.8879	0.8963	0.8889	0.8556	0.8668	0.6728
B	0.4204	0.4181	0.4377	0.4775	0.5361	0.6116	0.7031	0.8070	0.9182	1.0287	1.1261
PEK.A	1.0623	0.7029	0.4077	0.1380	-0.1257	-0.3835	-0.6135	-0.7134	-0.5722	-0.0301	1.1322
B	0.4204	0.3985	0.3942	0.4018	0.4146	0.4242	0.4367	0.4387	0.4204	0.3692	0.2683
A/C=0.15 MEM.A	1.0262	1.0482	1.1146	1.2263	1.3851	1.5936	1.8549	2.1729	2.5521	2.9978	3.5161
B	0.4975	0.5032	0.5332	0.5833	0.6704	0.7829	0.9303	1.1184	1.3550	1.6492	2.0122
BEN.A	1.0262	0.9195	0.8494	0.8030	0.7691	0.7386	0.7027	0.6502	0.5733	0.4650	0.3186
B	0.4975	0.4915	0.5051	0.5364	0.5836	0.6444	0.7173	0.7983	0.8822	0.9617	1.0259
PEK.A	1.0262	0.6825	0.4054	0.1691	-0.0368	-0.2064	-0.3552	-0.4165	-0.3319	-0.0197	0.6286
B	0.4975	0.4683	0.4549	0.4514	0.4513	0.4470	0.4455	0.4340	0.4039	0.3451	0.2444
A/C=0.20 MEM.A	0.9880	1.0022	1.0446	1.1150	1.2130	1.3379	1.4889	1.6651	1.8654	2.0884	2.3326
B	0.5530	0.5555	0.5770	0.6176	0.6779	0.7589	0.8622	0.9897	1.1436	1.3266	1.5414
BEN.A	0.9880	0.8770	0.7913	0.7215	0.6596	0.5990	0.5288	0.4463	0.3475	0.2296	0.0908
B	0.5530	0.5425	0.5466	0.5632	0.5901	0.6247	0.6648	0.7064	0.7446	0.7736	0.7858
PEK.A	0.9880	0.6602	0.4000	0.1923	0.0334	-0.0696	-0.1600	-0.1968	-0.1571	-0.0114	0.2754
B	0.5530	0.5170	0.4923	0.4739	0.4564	0.4333	0.4129	0.3840	0.3409	0.2776	0.1872
A/C=0.30 MEM.A	0.9438	0.9536	0.9828	1.0314	1.0990	1.1854	1.2901	1.4126	1.5523	1.7084	1.8801
B	0.6142	0.6204	0.6425	0.6808	0.7361	0.8093	0.9018	1.0149	1.1506	1.3108	1.4976
BEN.A	0.9438	0.8331	0.7400	0.6578	0.5805	0.5029	0.4170	0.3199	0.2081	0.0784	-0.0714
B	0.6142	0.6039	0.6051	0.6164	0.6359	0.6616	0.6917	0.7228	0.7511	0.7721	0.7800
PEK.A	0.9438	0.6236	0.3662	0.1610	0.0048	-0.0979	-0.1775	-0.2037	-0.1589	-0.0209	0.2374
B	0.6142	0.5712	0.5377	0.5097	0.4827	0.4518	0.4243	0.3911	0.3485	0.2922	0.2181
A/C=0.40 MEM.A	0.8964	0.9021	0.9190	0.9473	0.9867	1.0373	1.0989	1.1714	1.2546	1.3485	1.4527
B	0.6376	0.6481	0.6695	0.7020	0.7464	0.8034	0.8739	0.9590	1.0599	1.1780	1.3148
BEN.A	0.8964	0.7867	0.6877	0.5953	0.5058	0.4156	0.3200	0.2166	0.1026	-0.0244	-0.1669
B	0.6376	0.6288	0.6269	0.6310	0.6398	0.6521	0.6667	0.6814	0.6938	0.7009	0.6993
PEK.A	0.8964	0.5855	0.3330	0.1323	-0.0186	-0.1174	-0.1843	-0.1993	-0.1513	-0.0257	0.1954
B	0.6376	0.5903	0.5495	0.5124	0.4763	0.4382	0.4038	0.3670	0.3260	0.2787	0.2232
A/C=0.50 MEM.A	0.8475	0.8522	0.8662	0.8896	0.9223	0.9642	1.0154	1.0757	1.1451	1.2234	1.3107
B	0.6727	0.6824	0.7021	0.7322	0.7732	0.8258	0.8908	0.9692	1.0620	1.1704	1.2958
BEN.A	0.8475	0.7413	0.6438	0.5516	0.4615	0.3706	0.2742	0.1704	0.0566	-0.0695	-0.2104
B	0.6727	0.6615	0.6568	0.6576	0.6629	0.6715	0.6823	0.6935	0.7029	0.7081	0.7062
PEK.A	0.8475	0.5477	0.3037	0.1102	-0.0346	-0.1289	-0.1894	-0.1989	-0.1477	-0.0229	0.1912
B	0.6727	0.6204	0.5748	0.5334	0.4936	0.4531	0.4166	0.3792	0.3392	0.2950	0.2453
A/C=0.60 MEM.A	0.8002	0.8040	0.8153	0.8342	0.8607	0.8947	0.9362	0.9853	1.0419	1.1061	1.1777
B	0.6944	0.7029	0.7203	0.7470	0.7834	0.8301	0.8877	0.9571	1.0391	1.1345	1.2454
BEN.A	0.8002	0.6974	0.6017	0.5102	0.4203	0.3292	0.2330	0.1300	0.0179	-0.1017	-0.2428
B	0.6944	0.6809	0.6732	0.6704	0.6718	0.6762	0.6826	0.6895	0.6953	0.6910	0.6951
PEK.A	0.8002	0.5116	0.2764	0.0902	-0.0484	-0.1380	-0.1922	-0.1967	-0.1432	-0.0204	0.1851
B	0.6944	0.6380	0.5883	0.5431	0.5004	0.4580	0.4201	0.3826	0.3441	0.3036	0.2601
A/C=0.80 MEM.A	0.7135	0.7158	0.7224	0.7336	0.7492	0.7694	0.7943	0.8238	0.8582	0.8976	0.9420
B	0.7124	0.7178	0.7297	0.7481	0.7734	0.8058	0.8459	0.8942	0.9512	1.0178	1.0949
BEN.A	0.7135	0.6176	0.5258	0.4363	0.3476	0.2580	0.1641	0.0651	-0.0408	-0.1553	-0.2801
B	0.7124	0.6944	0.6806	0.6705	0.6634	0.6587	0.6555	0.6531	0.6504	0.6464	0.6398
PEK.A	0.7135	0.4463	0.2281	0.0562	-0.0702	-0.1502	-0.1929	-0.1888	-0.1323	-0.0160	0.1694
B	0.7124	0.6493	0.5929	0.5418	0.4944	0.4496	0.4099	0.3727	0.3375	0.3038	0.2715
A/C=1.00 MEM.A	0.6390	0.6400	0.6428	0.6475	0.6543	0.6632	0.6743	0.6878	0.7040	0.7229	0.7450
B	0.7106	0.7128	0.7186	0.7281	0.7414	0.7587	0.7804	0.8068	0.8384	0.8756	0.9190
BEN.A	0.6390	0.5492	0.4612	0.3743	0.2877	0.2007	0.1108	0.0179	-0.0790	-0.1810	-0.2895
B	0.7106	0.6885	0.6689	0.6516	0.6362	0.6224	0.6094	0.5973	0.5854	0.5736	0.5612
PEK.A	0.6390	0.3908	0.1880	0.0292	-0.0858	-0.1567	-0.1892	-0.1780	-0.1204	-0.0125	0.1509
B	0.7106	0.6425	0.5810	0.5252	0.4744	0.4281	0.3869	0.3500	0.3172	0.2885	0.2638



図A3.3 き裂面の圧力分布

## A3.8 白鳥らのK値解とPNCのK値解 (Key=31、円筒内面の軸方向単独き裂)

(1) 白鳥ら(REF. 1) は円筒内面の軸方向単独き裂についてパラメトリックなFEM解析を実施し、き裂面の任意の局所領域に単位分布荷重が作用した時のK値を求めデータベース化した。形状パラメータは  $R/t=10.0$ ,  $\beta=0.2, 0.4, 0.6, 1.0$ ,  $\alpha=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  である。これらのK値解を重ね合わせることで(き裂無し断面に任意の応力分布が生じるような)任意荷重に対するK値を算出することができる(影響関数法)。また影響関数法により、任意応力分布に対するき裂の最深部および表面部のK値を算出するパソコンプログラムを公表している。本節ではパソコンプログラムを用いて膜応力、曲げ応力および放物線形ピーク応力に対するF値テーブルを表A3.13のように作成した。 $\alpha=0$ のデータは、膜応力( $F_M$ )については $\alpha=0.1, 0.2$ のデータの線形外挿値とし、曲げ( $F_B$ )およびピーク応力( $F_P$ )については膜応力の外挿値に等しいとした。これにより $\alpha \Rightarrow 0$ で $F_M = F_B = F_P$ となり理論と整合し、曲げおよびピーク応力が重なる場合の $\alpha \Rightarrow 0$ の外挿精度が向上することになる。表A3.13には内面無限き裂( $\beta=0$ )が含まれているが、これらはLabbensらの単独き裂の解(付録4のA4.8節参照、 $R/t=10.0$ )から求めたものである。無限き裂の解をデータに含めることで $\beta \Rightarrow 0$ での外挿精度が向上する。

(2) PNCでは $R/t=2.5$ のFEM解析を実施しF値を算出した(REF. 7)。パラメータ $\beta$ と $\alpha$ は(1)と同一条件である。作成したF値テーブルを表A3.14に示す。 $\alpha=0$ のデータは(1)と同様に外挿した。内面無限き裂( $\beta=0$ )のデータは付録4のXue-Ren Wuの単独き裂の解(付録4のA4.7節参照、 $R/t=4.0, 2.0$ )から求めた。

(3) テーブル値はA3.1節と同様の理由から最深部では $F Q^{0.5}$ 、表面部では $F (Q/\beta)^{0.5}$ とした。テーブル値を内挿し、最深部は $Q^{0.5}$ で除し、表面部は $(\beta/Q)^{0.5}$ を乗じて任意き裂形状のF値を得ることになる。また $\beta=0$ の表面部のテーブル値は $\beta=0.2$ の値とした。これは $0 < \beta < 0.2$ での表面部のF値を(定数) $\times (\beta/Q)^{0.5}$ と外挿することに等しい。なおCANISのサブプログラムでは、データ解析結果を反映させて、最深部の $F_{M,\Lambda}$ と $F_{P,\Lambda}$ についてのみ $\alpha > 0.4$ 領域では深さ方向に放物線内外挿を採用し、その他については全て線形内外挿とした。 $R/t$ に関しては、 $R/t \geq 10.0$ では表A3.13を用い、 $10.0 > R/t > 4.0$ では表A3.13と表A3.14を内挿し、 $R/t \leq 4.0$ では表A3.14を用い、範囲外への外挿はしない。

表A3.13(a) 円筒内面の軸方向単独き裂の補正係数 (R/t=10.0、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.12	1.15	1.33	1.97	3.17	5.60
	B	1.0228	1.1628	1.3028	1.5068	1.9157	2.4695
0.2	A	1.0813	1.1126	1.1439	1.3182	1.6140	1.8225
	B	1.0228	1.1628	1.3028	1.5068	1.9157	2.4695
0.4	A	1.0553	1.0790	1.1027	1.1804	1.2811	1.3849
	B	1.2255	1.2470	1.2685	1.3991	1.5938	1.9584
0.6	A	1.0446	1.0610	1.0774	1.1149	1.1709	1.2288
	B	1.1701	1.1921	1.2141	1.2839	1.4679	1.6585
1.0	A	1.0212	1.0280	1.0348	1.0631	1.0811	1.1000
	B	1.1068	1.1154	1.1240	1.1833	1.2590	1.3614

⇐(Labbensらの解)

↓ (白鳥らの解)

上段  $F_{M, A} Q^{0.5}$   
下段  $F_{M, B} (Q/\beta)^{0.5}$ 

表A3.13(b) 円筒内面の軸方向単独き裂の補正係数 (R/t=10.0、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.12	1.001	1.057	1.194	1.433	1.926
	B	1.0228	1.1323	1.2323	1.3186	1.4930	1.6472
0.2	A	1.0813	0.9839	0.8767	0.7232	0.5869	0.3084
	B	1.0228	1.1323	1.2323	1.3186	1.4930	1.6472
0.4	A	1.0553	0.9454	0.8305	0.6080	0.3797	0.0877
	B	1.2255	1.2075	1.1871	1.2056	1.2249	1.3020
0.6	A	1.0446	0.9217	0.7953	0.5414	0.2846	-0.0257
	B	1.1701	1.1533	1.1340	1.1028	1.1346	1.1346
1.0	A	1.0212	0.8808	0.7391	0.4657	0.1728	-0.1494
	B	1.1068	1.0801	1.0522	1.0237	0.9934	0.9690

⇐(Labbensらの解)

↓ (白鳥らの解)

上段  $F_{B, A} Q^{0.5}$   
下段  $F_{B, B} (Q/\beta)^{0.5}$ 

表A3.13(c) 円筒内面の軸方向単独き裂の補正係数 (R/t=10.0、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	A	1.12	0.768	0.602	0.252	0.032	-0.146
	B	1.0228	1.0737	1.1042	1.0243	0.9554	0.8257
0.2	A	1.0813	0.7546	0.4601	0.0545	-0.1560	-0.1815
	B	1.0228	1.0737	1.1042	1.0243	0.9554	0.8257
0.4	A	1.0553	0.7083	0.4091	-0.0166	-0.2031	-0.1764
	B	1.2255	1.1323	1.0413	0.9058	0.7550	0.6407
0.6	A	1.0446	0.6757	0.3632	-0.0668	-0.2453	-0.1852
	B	1.1701	1.0796	0.9909	0.8237	0.7077	0.5942
1.0	A	1.0212	0.6226	0.2938	-0.1444	-0.3055	-0.1972
	B	1.1068	1.0134	0.9241	0.7760	0.6460	0.5452

⇐(Labbensらの解)

↓ (白鳥らの解)

上段  $F_{P, A} Q^{0.5}$   
下段  $F_{P, B} (Q/\beta)^{0.5}$

表A3.14(a) 円筒内面の軸方向単独き裂の補正係数 (R/t=2.5、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	
0.0	A	1.1207	1.1527	1.2614	1.6228	2.1293	2.7847	⇐(Xue-Ren Wu の解)
	B	1.0543	1.1270	1.1997	1.4852	1.8427	2.3002	
0.2	A	1.0379	1.0768	1.1157	1.2925	1.6053	2.0809	⇓ (PNCの解)
	B	1.0543	1.1270	1.1997	1.4852	1.8427	2.3002	
0.4	A	1.0312	1.0484	1.0656	1.1398	1.2857	1.5495	上段 $F_{M,A} Q^{0.5}$ 下段 $F_{M,B} (Q/\beta)^{0.5}$
	B	1.1459	1.1810	1.2161	1.3764	1.6215	1.9824	
0.6	A	1.0198	1.0315	1.0432	1.0815	1.1640	1.3271	
	B	1.1874	1.1969	1.2064	1.2755	1.4414	1.6809	
1.0	A	0.9770	0.9915	1.0060	1.0257	1.0650	1.1484	
	B	1.1756	1.1705	1.1654	1.1921	1.2676	1.3781	

表A3.14(b) 円筒内面の軸方向単独き裂の補正係数 (R/t=2.5、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	
0.0	A	1.1207	1.0129	0.9650	0.9210	0.8587	0.7226	⇐(Xue-Ren Wu の解)
	B	1.0543	1.1035	1.1446	1.3034	1.4396	1.5521	
0.2	A	1.0379	0.9458	0.8449	0.6988	0.5781	0.3883	⇓ (PNCの解)
	B	1.0543	1.1035	1.1446	1.3034	1.4396	1.5521	
0.4	A	1.0312	0.9172	0.7968	0.5778	0.3753	0.1379	上段 $F_{B,A} Q^{0.5}$ 下段 $F_{B,B} (Q/\beta)^{0.5}$
	B	1.1459	1.1465	1.1440	1.1884	1.2440	1.3097	
0.6	A	1.0198	0.8977	0.7694	0.5188	0.2788	0.0100	
	B	1.1874	1.1596	1.1309	1.0995	1.1170	1.1322	
1.0	A	0.9770	0.8514	0.7170	0.4361	0.1548	-0.1490	
	B	1.1756	1.1330	1.0910	1.0351	1.0018	0.9715	

表A3.14(c) 円筒内面の軸方向単独き裂の補正係数 (R/t=2.5、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	
0.0	A	1.1207	0.7655	0.5064	0.1267	-0.1018	-0.1328	⇐(Xue-Ren Wu の解)
	B	1.0543	1.0583	1.0436	1.0228	0.9324	0.8095	
0.2	A	1.0379	0.7140	0.4278	0.0477	-0.1344	-0.1535	⇓ (PNCの解)
	B	1.0543	1.0583	1.0436	1.0228	0.9324	0.8095	
0.4	A	1.0312	0.6853	0.3849	-0.0214	-0.1968	-0.1694	上段 $F_{P,A} Q^{0.5}$ 下段 $F_{P,B} (Q/\beta)^{0.5}$
	B	1.1459	1.0812	1.0146	0.9005	0.7691	0.6508	
0.6	A	1.0198	0.6620	0.3526	-0.0677	-0.2343	-0.1780	
	B	1.1874	1.0891	0.9966	0.8300	0.7060	0.5831	
1.0	A	0.9770	0.6058	0.2834	-0.1522	-0.3001	-0.1776	
	B	1.1756	1.0621	0.9588	0.7912	0.6536	0.5389	

## A3.9 白鳥らのK値解 (Key=40、円筒外面の周方向き裂)

白鳥ら(REF. 1) は円筒外面の周方向き裂についてパラメトリックなFEM解析を実施し、き裂面の任意の局所領域に単位分布荷重が作用した時のK値を求めデータベース化した。形状パラメータは、 $R/t=10, 0.5, 0.2, 0.1, 0.67$  ( $t/R=0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ )、 $\beta=0.2, 0.4, 0.6, 1.0$ 、 $\alpha=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ である。これらのK値解を重ね合わせることで(き裂無し断面に任意の応力分布が生じるような)任意荷重に対するK値を算出することができる(影響関数法)。また影響関数法により、任意応力分布に対するき裂の最深部および表面部のK値を算出するパソコンプログラムを公表している。本節ではパソコンプログラムを用いて膜応力、曲げ応力および放物線形ピーク応力に対するF値テーブルを表A3.15のように作成した。なお  $R/t=1.67$ についてはパソコンプログラムと文献(REF. 1)のテーブルが一致しないので除外した。

(1)  $\alpha=0$ のデータは、膜応力( $F_M$ )については $\alpha=0.1, 0.2$ のデータを線形外挿し、曲げ( $F_B$ )およびピーク応力( $F_P$ )については膜応力の外挿値に等しいとした。これにより $\alpha \Rightarrow 0$ で $F_M = F_B = F_P$ となり理論と整合し、その結果として曲げおよびピーク応力が重なる場合の $\alpha \Rightarrow 0$ の外挿精度が向上する。

(2) テーブル値は最深部、表面部とも $F Q^{0.5}$ とした。最深部ではテーブル値を $\beta$ に関して線型内外挿した結果を $Q^{0.5}$ で除してF値を求める。表面部では(テーブル値/ $\beta^{0.5}$ )を $\beta$ に関して線型内外挿した結果に $(\beta/Q)^{0.5}$ を乗じてF値を求める。実質的な内容はA3.1節と同様である。但し、 $\beta=0$ の最深部のデータ(全周き裂データ)を使用せず、 $0 < \beta < 0.2$ 領域では $\beta=0.2$ と $0.4$ のデータを線型外挿することになる。

(3)  $F_{M,\Lambda}$ と $F_{P,\Lambda}$ の $\alpha > 0.4$ 領域のみは深さ方向に放物線内外挿を採用し、その他については全て線形内外挿とした。

表A3.15(1a) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=10.0、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(F Q <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0683	1.1005	1.1327	1.3773	1.6439	1.9654	
	B	0.4285	0.5061	0.5837	0.6765	0.8331	0.9899	
0.4	A	0.9320	1.0206	1.1092	1.2049	1.3256	1.4221	
	B	0.6743	0.7286	0.7829	0.8886	1.0444	1.2340	
0.6	A	0.8489	0.9551	1.0613	1.1192	1.1875	1.2240	
	B	0.7003	0.7956	0.8909	0.9839	1.1434	1.2974	
1.0	A	0.8656	0.8983	0.9310	1.0353	1.0586	1.0751	
	B	0.9610	0.9730	0.9850	1.1489	1.2377	1.3656	

表A3.15(1b) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=10.0、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(F Q <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0683	0.9738	0.8640	0.7633	0.6051	0.3693	
	B	0.4285	0.4928	0.5580	0.5938	0.6629	0.6851	
0.4	A	0.9320	0.8954	0.8398	0.6279	0.4037	0.1057	
	B	0.6743	0.7054	0.7325	0.7662	0.8055	0.8318	
0.6	A	0.8489	0.8326	0.7908	0.5516	0.2998	-0.0113	
	B	0.7003	0.7693	0.8311	0.8449	0.8853	0.8906	
1.0	A	0.8656	0.7727	0.6735	0.4608	0.1765	-0.1380	
	B	0.9610	0.9406	0.9176	0.9924	0.9773	0.9764	

表A3.15(1c) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=10.0、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(F Q <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0683	0.7479	0.4475	0.0693	-0.1455	-0.1582	
	B	0.4285	0.4672	0.5110	0.4636	0.4399	0.3722	
0.4	A	0.9320	0.6731	0.4221	-0.0048	-0.2020	-0.1699	
	B	0.6743	0.6615	0.6423	0.5760	0.4987	0.4211	
0.6	A	0.8489	0.6161	0.3755	-0.0539	-0.2371	-0.1802	
	B	0.7003	0.7195	0.7247	0.6305	0.5535	0.4679	
1.0	A	0.8656	0.5520	0.2838	-0.1296	-0.2938	-0.1936	
	B	0.9610	0.8795	0.7983	0.7494	0.6350	0.5506	



表A3.15(2a) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=5.0、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(FQ <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0699	1.1039	1.1379	1.3805	1.6487	1.9931	
	B	0.4298	0.5061	0.5824	0.6598	0.7602	0.8730	
0.4	A	0.9325	1.0226	1.1127	1.2096	1.3424	1.4639	
	B	0.6752	0.7290	0.7828	0.8818	1.0098	1.1765	
0.6	A	0.8489	0.9558	1.0627	1.1205	1.1921	1.2472	
	B	0.7006	0.7961	0.8916	0.9805	1.1307	1.2750	
1.0	A	0.8663	0.8976	0.9289	1.0295	1.0509	1.0651	
	B	0.9609	0.9731	0.9853	1.1463	1.2309	1.3449	

表A3.15(2b) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=5.0、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(FQ <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0699	0.9769	0.8685	0.7657	0.6067	0.3854	
	B	0.4298	0.4927	0.5570	0.5817	0.6190	0.6319	
0.4	A	0.9325	0.8972	0.8430	0.6319	0.4136	0.1299	
	B	0.6752	0.7059	0.7325	0.7615	0.7831	0.8014	
0.6	A	0.8489	0.8332	0.7923	0.5535	0.3048	0.0062	
	B	0.7006	0.7697	0.8319	0.8428	0.8782	0.8785	
1.0	A	0.8663	0.7721	0.6720	0.4583	0.1764	-0.1317	
	B	0.9609	0.9407	0.9180	0.9909	0.9742	0.9639	

表A3.15(2c) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=5.0、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(FQ <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0699	0.7507	0.4508	0.0704	-0.1466	-0.1743	
	B	0.4298	0.4671	0.5103	0.4580	0.4304	0.3691	
0.4	A	0.9325	0.6748	0.4247	-0.0022	-0.1959	-0.1650	
	B	0.6752	0.6619	0.6423	0.5741	0.4912	0.4160	
0.6	A	0.8489	0.6168	0.3770	-0.0518	-0.2338	-0.1683	
	B	0.7006	0.7199	0.7254	0.6301	0.5525	0.4664	
1.0	A	0.8663	0.5516	0.2833	-0.1285	-0.2900	-0.1802	
	B	0.9609	0.8796	0.7988	0.7494	0.6356	0.5477	

表A3.15(3a) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=2.5、膜応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(F Q <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0719	1.1094	1.1469	1.3929	1.6849	2.1515	
	B	0.4315	0.5059	0.5803	0.6370	0.7104	0.7279	
0.4	A	0.9329	1.0257	1.1185	1.2195	1.3634	1.5500	
	B	0.6766	0.7296	0.7826	0.8720	0.9893	1.1252	
0.6	A	0.8489	0.9658	1.0647	1.1232	1.2015	1.2768	
	B	0.7013	0.7968	0.8923	0.9753	1.1119	1.2408	
1.0	A	0.8675	0.8964	0.9253	1.0200	1.0372	1.0503	
	B	0.9609	0.9733	0.9857	1.1423	1.2195	1.3324	

表A3.15(3b) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=2.5、曲げ応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(F Q <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0719	0.9821	0.8762	0.7744	0.6261	0.5559	
	B	0.4315	0.4926	0.5552	0.5653	0.5896	0.5396	
0.4	A	0.9329	0.9002	0.8483	0.6400	0.4294	0.1776	
	B	0.6766	0.7065	0.7323	0.7546	0.7725	0.7747	
0.6	A	0.8489	0.8343	0.7944	0.5570	0.3142	0.0312	
	B	0.7013	0.7705	0.8325	0.8395	0.8677	0.8618	
1.0	A	0.8675	0.7711	0.6695	0.4544	0.1759	-0.1194	
	B	0.9609	0.9409	0.9185	0.9887	0.9687	0.9621	

表A3.15(3c) 円筒外面の周方向き裂の補正係数 (R/t=2.5、ピーク応力)

a/b	a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	(F Q <sup>0.5</sup> 値)
0.2	A	1.0719	0.7552	0.4564	0.0742	-0.1441	-0.1161	
	B	0.4315	0.4670	0.5091	0.4502	0.4211	0.3244	
0.4	A	0.9329	0.6775	0.4289	0.0026	-0.1927	-0.1563	
	B	0.6766	0.6624	0.6424	0.5713	0.4905	0.4121	
0.6	A	0.8489	0.6179	0.3792	-0.0483	-0.2281	-0.1670	
	B	0.7013	0.7206	0.7261	0.6293	0.5508	0.4651	
1.0	A	0.8675	0.5509	0.2825	-0.1267	-0.2836	-0.1779	
	B	0.9609	0.8798	0.7995	0.7495	0.6361	0.5522	

A3.10 白鳥らのK値解 (Key=41、円筒外面の周方向き裂、軸曲げに対する $F_M$ )

膜応力 $\sigma_M$ に対する $F_M$ 値を除いて前A3.9節と同一のK値解である。前A3.9節では軸引張荷重に対応する純粋な膜応力 $\sigma_M$ に対する $F_M$ 値を用いた。本節では円筒ビームの軸曲げモーメント荷重に対する最大表皮応力 $\sigma_M$ に対する $F_M$ 値を用いる。き裂の中心が最大引張応力側にあるものとしている。本節の $F_M$ 値を用いる事により、軸曲げによる応力を膜応力として取り扱う事ができる。軸曲げ荷重に対する $F_M$ 値テーブルを表A3.16に示す。

表A3.16(a) 円筒外面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 ( $R/t=10.0$ )

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	( $F Q^{0.5}$ 値)
0.2	A	1.0683	1.094	1.120	1.348	1.592	1.882	
	B	0.4285	0.505	0.580	0.664	0.805	0.938	
0.4	A	0.9320	1.014	1.096	1.178	1.282	1.360	
	B	0.6743	0.727	0.780	0.880	1.027	1.205	
0.6	A	0.8489	0.949	1.048	1.093	1.146	1.167	
	B	0.7003	0.794	0.887	0.976	1.129	1.274	
1.0	A	0.8656	0.892	0.919	1.009	1.017	1.019	
	B	0.9610	0.971	0.981	1.141	1.221	1.346	

表A3.16(b) 円筒外面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 ( $R/t=5.0$ )

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	( $F Q^{0.5}$ 値)
0.2	A	1.0699	1.093	1.115	1.325	1.548	1.826	
	B	0.4298	0.503	0.573	0.626	0.683	0.730	
0.4	A	0.9325	1.012	1.090	1.160	1.261	1.346	
	B	0.6752	0.726	0.776	0.863	0.972	1.110	
0.6	A	0.8489	0.945	1.040	1.072	PNC TN9410 94-201		
	B	0.7006	0.793	0.885	0.965	1.101	1.220	
1.0	A	0.8663	0.887	0.908	0.981	0.977	0.964	
	B	0.9609	0.970	0.979	1.132	1.206	1.307	

表A3.16(c) 円筒外面の周方向き裂の軸曲げ荷重に対する補正係数 ( $R/t=2.5$ )

a/b	a/t $\Rightarrow$	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	( $F Q^{0.5}$ 値)
0.2	A	1.0719	1.090	1.108	1.293	1.495	1.811	
	B	0.4315	0.499	0.557	0.549	0.512	0.385	
0.4	A	0.9329	1.007	1.079	1.133	1.220	1.332	
	B	0.6766	0.725	0.770	0.832	0.905	0.977	
0.6	A	0.8489	0.939	1.025	1.040	1.071	1.091	
	B	0.7013	0.792	0.881	0.945	1.052	1.140	
1.0	A	0.8675	0.878	0.888	0.938	0.913	0.881	
	B	0.9609	0.968	0.975	1.116	1.174	1.262	

## A3.11 Raju-Newman のK値解 ( Key=50、円筒外面の軸方向き裂対、関数fitting )

Raju-Newman(RBF. 6)は円筒内面の軸方向き裂についてパラメトリックなFEM解析を実施し、板厚方向の0次～3次の圧力分布がき裂面に負荷された時のK値解を求めた。形状パラメータは、 $R/t=10.0, 4.0$ ,  $\beta=0.2, 0.4, 1.0$ ,  $\alpha=0.2, 0.5, 0.8$ である。重ね合わせの原理によりき裂面の圧力分布は、き裂無し断面に生ずる応力分布と等価である。従って、き裂無しの軸方向断面に板厚方向の任意の周方向応力分布が生ずるような荷重が軸方向き裂付き円筒に負荷された場合に対して、周方向応力分布を3次式近似し圧力分布の0～3次の解を重ねあわせることで、K値を算出することが出来る。一般に軸方向き裂では、1個の単独き裂よりも、2個のき裂が $180^\circ$ 離れて対を成す方が、K値が大きくなる。本節は2個のき裂対の解である。0～3次の圧力分布

$$\sigma_J = (z/a)^J \quad \text{for } J=0, 1, 2, 3 \quad (\text{A3.45})$$

に対するG値

$$G_J = K / (\pi a / Q)^{0.5} \quad \text{for } J=0, 1, 2, 3 \quad (\text{A3.46})$$

を表A3.17に示す。ここに $z$ は外面から円筒中心方向への半径方向距離であり、 $G_J$ は影響係数と呼ばれる。膜応力、曲げ応力および放物線形ピーク応力に対するF値は次式で求めることが出来る。

$$F_M Q^{0.5} = G_0 \quad (\text{A3.47a})$$

$$F_B Q^{0.5} = G_0 - 2\alpha G_1 \quad (\text{A3.47b})$$

$$F_P Q^{0.5} = G_0 - 6\alpha G_1 + 6\alpha^2 G_2 \quad (\text{A3.47c})$$

き裂の最深部および表面部のF値を表A3.18に示す。

Raju-Newmanの解から得られるF値は以下の前記の形状パラメータ値における離散値であり、これを以下のパラメータ範囲に内外挿することを考える。

$$4.0 \leq R/t \leq 10.0, \quad 0.0 \leq \beta \leq 1.0, \quad 0.0 < \alpha < 1.0 \quad (\text{A3.48})$$

$\beta \Rightarrow 0.0$ に外挿するためには内面軸方向無限き裂のK値解が必要である。本節では付録4のA4.10節 [Xue-Ren Wuのき裂対の解、 $R/t=4.0$ 、表A3.19]を $R/t=10.0$ と $4.0$ の両方に対し共通に用いた。これら表A3.18および表A3.19を以下の式でfittingした。

$$F_{M,A} = (M_{A1} + M_{A2}\alpha^2 + M_{A3}\alpha^4) / Q^{0.5} \quad (\text{A3.49a})$$

$$F_{M,B} = (M_{B1} + M_{B2}\alpha + M_{B3}\alpha^2) F_{M,A} \beta^{0.5} \quad (\text{A3.49b})$$

$$F_{B,A} = (1.0 + B_{A1}\alpha + B_{A2}\alpha^2) F_{M,A} \quad (\text{A3.50a})$$

$$F_{B,B} = (1.0 + B_{B1}\alpha + B_{B2}\alpha^2) F_{M,B} \quad (\text{A3.50b})$$

$$F_{P,A} = (1.0 + P_{A1}\alpha + P_{A2}\alpha^2) F_{M,A} \quad (\text{A3.50a})$$

$$F_{P,B} = (1.0 + P_{B1}\alpha + P_{B2}\alpha^2) F_{M,B} \quad (\text{A3.50b})$$

fitting係数を表A3.20に示す。 $\alpha \Rightarrow 0$ で $F_M = F_B = F_P$ となるようにfittingし理論との整合を図った。また $\beta=0$ の表面部のfitting係数は $\beta=0.2$ と共通とした。これは $0 < \beta < 0.2$ での表面部のF値を(定数)  $\times (\beta/Q)^{0.5}$ と外挿することに等しい。求めたfitting関数による計算結果を表A3.21に示す。なおCANISのサブプログラムでは $R/t$ に関しては、 $4.0 < R/t < 10.0$ では線形内挿し、 $R/t \leq 4.0$ では $R/t=4.0$ の値を用い、 $R/t \geq 10.0$ では $R/t=10.0$ の値を用い、範囲外への外挿は行わない。

表A3.17 円筒外面の軸方向き裂対の $G_j$  値(a)  $R/t=10.0$ Table 3 Influence coefficients,  $G_j$ , for semi-elliptical surface crack on outside of a cylinder ( $t/R=0.1$ )

Type of loading	a/b	0.2			0.4			1.0		
	$\frac{2\phi}{\pi} \backslash \frac{a}{t}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Uniform ( $G_0$ )	0	0.612	0.806	1.262	0.788	0.984	1.378	1.156	1.266	1.453
	0.25	0.750	0.968	1.432	0.823	1.002	1.325	1.082	1.165	1.278
	0.5	0.965	1.272	1.867	0.958	1.147	1.425	1.044	1.106	1.144
	0.75	1.102	1.502	2.208	1.061	1.267	1.541	1.029	1.083	1.125
	1.0	1.147	1.584	2.298	1.096	1.310	1.565	1.025	1.078	1.118
Linear ( $G_1$ )	0	0.080	0.142	0.277	0.128	0.192	0.309	0.202	0.236	0.286
	0.25	0.208	0.279	0.419	0.250	0.309	0.406	0.363	0.390	0.421
	0.5	0.428	0.530	0.715	0.448	0.511	0.595	0.544	0.565	0.570
	0.75	0.614	0.752	0.993	0.616	0.687	0.784	0.673	0.692	0.712
	1.0	0.685	0.839	1.099	0.680	0.755	0.858	0.718	0.738	0.765
Quadratic ( $G_2$ )	0	0.023	0.053	0.114	0.045	0.076	0.129	0.076	0.092	0.113
	0.25	0.076	0.110	0.175	0.099	0.128	0.173	0.155	0.168	0.181
	0.5	0.240	0.290	0.377	0.259	0.290	0.329	0.335	0.344	0.344
	0.75	0.434	0.504	0.626	0.445	0.481	0.531	0.515	0.524	0.536
	1.0	0.521	0.600	0.739	0.528	0.565	0.625	0.590	0.600	0.619
Cubic ( $G_3$ )	0	0.010	0.028	0.062	0.022	0.040	0.070	0.039	0.048	0.059
	0.25	0.032	0.052	0.088	0.046	0.063	0.088	0.077	0.084	0.091
	0.5	0.147	0.177	0.226	0.163	0.181	0.202	0.219	0.224	0.222
	0.75	0.335	0.378	0.450	0.349	0.370	0.400	0.418	0.422	0.430
	1.0	0.432	0.480	0.568	0.444	0.466	0.505	0.513	0.518	0.533

(b)  $R/t=4.0$ Table 4 Influence coefficients,  $G_j$ , for semi-elliptical surface crack on outside of a cylinder ( $t/R=0.25$ )

Type of loading	a/b	0.2			0.4			1.0		
	$\frac{2\phi}{\pi} \backslash \frac{a}{t}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Uniform ( $G_0$ )	0	0.612	0.786	1.160	0.793	0.994	1.400	1.163	1.286	1.498
	0.25	0.752	0.952	1.346	0.828	1.016	1.365	1.088	1.184	1.320
	0.5	0.972	1.278	1.860	0.967	1.175	1.513	1.049	1.123	1.183
	0.75	1.114	1.541	2.344	1.072	1.311	1.682	1.034	1.100	1.163
	1.0	1.162	1.640	2.510	1.109	1.360	1.727	1.030	1.094	1.156
Linear ( $G_1$ )	0	0.080	0.134	0.242	0.130	0.195	0.318	0.204	0.243	0.302
	0.25	0.209	0.272	0.389	0.252	0.315	0.421	0.365	0.396	0.435
	0.5	0.430	0.532	0.713	0.451	0.521	0.626	0.546	0.570	0.583
	0.75	0.618	0.767	1.044	0.620	0.702	0.833	0.674	0.698	0.724
	1.0	0.691	0.861	1.178	0.685	0.773	0.914	0.720	0.743	0.777
Quadratic ( $G_2$ )	0	0.023	0.049	0.097	0.045	0.078	0.134	0.077	0.096	0.122
	0.25	0.076	0.106	0.159	0.100	0.130	0.180	0.156	0.171	0.188
	0.5	0.241	0.291	0.376	0.261	0.295	0.345	0.336	0.347	0.350
	0.75	0.437	0.513	0.654	0.447	0.489	0.556	0.516	0.527	0.542
	1.0	0.524	0.613	0.782	0.530	0.575	0.653	0.591	0.603	0.625
Cubic ( $G_3$ )	0	0.010	0.025	0.051	0.022	0.041	0.073	0.040	0.051	0.064
	0.25	0.032	0.050	0.079	0.046	0.064	0.093	0.077	0.086	0.095
	0.5	0.148	0.177	0.225	0.164	0.184	0.212	0.220	0.226	0.226
	0.75	0.337	0.383	0.468	0.350	0.375	0.416	0.418	0.424	0.433
	1.0	0.434	0.488	0.596	0.445	0.472	0.523	0.513	0.520	0.536

表A3.18(a) 円筒外面の軸方向き裂対の補正係数 ( $R/t = 10.0$ )

$\beta = a/b$ $\alpha = a/t$	0.2			0.4			1.0		
	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{M, A} Q^{0.5}$	1.147	1.584	2.298	1.096	1.310	1.565	1.025	1.078	1.118
$F_{M, B} Q^{0.5}$	0.612	0.806	1.262	0.788	0.984	1.378	1.156	1.266	1.453
$F_{B, A} Q^{0.5}$	0.873	0.745	0.540	0.824	0.555	0.192	0.738	0.340	-0.106
$F_{B, B} Q^{0.5}$	0.580	0.664	0.819	0.737	0.792	0.884	1.075	1.030	0.995
$F_{P, A} Q^{0.5}$	0.450	-0.033	-0.139	0.407	-0.108	-0.153	0.305	-0.236	-0.177
$F_{P, B} Q^{0.5}$	0.522	0.460	0.370	0.645	0.522	0.390	0.932	0.696	0.514

表A3.18(b) 円筒外面の軸方向き裂対の補正係数 ( $R/t = 4.0$ )

$\beta = a/b$ $\alpha = a/t$	0.2			0.4			1.0		
	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
$F_{M, A} Q^{0.5}$	1.162	1.640	2.510	1.109	1.360	1.727	1.030	1.094	1.156
$F_{M, B} Q^{0.5}$	0.612	0.786	1.160	0.793	0.994	1.400	1.163	1.286	1.498
$F_{B, A} Q^{0.5}$	0.886	0.779	0.625	0.835	0.587	0.265	0.742	0.351	-0.087
$F_{B, B} Q^{0.5}$	0.580	0.652	0.773	0.741	0.799	0.891	1.081	1.043	1.015
$F_{P, A} Q^{0.5}$	0.459	-0.024	-0.142	0.414	-0.097	-0.153	0.308	-0.231	-0.174
$F_{P, B} Q^{0.5}$	0.522	0.458	0.371	0.648	0.526	0.388	0.937	0.701	0.517

表A3.19 円筒外面の軸方向無限き裂対のF値 ( $R/t = 4.0$ 、付録4のA4.10節参照)

a/t	0.001	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
$F_M$	1.1216	1.1434	1.1884	1.3395	1.5697	1.8947	2.3457	2.9544	3.7273	4.1619
$F_B$	1.1202	1.0744	1.0468	1.0325	1.0563	1.1121	1.2017	1.3214	1.4473	1.4979
$F_P$	1.1175	0.9443	0.7959	0.5559	0.3653	0.2087	0.0831	-0.0120	-0.0737	-0.0861

表A3.20 円筒外面の軸方向き裂対のfitting 係数

$\beta = a/b$	R/t=10.0				R/t=4.0			
	0.0	0.2	0.4	1.0	0.0	0.2	0.4	1.0
$M_{A1}$	1.12224	1.05959	1.04915	1.01241	1.12224	1.07019	1.05695	1.01538
$M_{A2}$	4.60231	2.20187	1.19577	0.22100	4.60231	2.29815	1.31810	0.37523
$M_{A3}$	1.42494	-0.41696	-0.60868	-0.24910	1.42494	-0.07571	-0.42368	-0.24298
$M_{B1}$	1.31080	1.31080	1.18820	1.14040	1.28598	1.28598	1.17016	1.13922
$M_{B2}$	-0.75016	-0.75016	-0.42766	-0.15033	-0.61661	-0.61661	-0.31023	-0.13272
$M_{B3}$	0.80833	0.80833	0.85333	0.43666	0.37611	0.37611	0.56223	0.41056
$B_{A1}$	-1.19661	-1.24759	-1.26284	-1.38649	-1.19661	-1.25010	-1.27775	-1.39503
$B_{A2}$	0.45720	0.36391	0.20797	0.02253	0.45720	0.38935	0.27410	0.06346
$B_{B1}$	-0.20584	-0.20584	-0.28946	-0.33681	-0.21216	-0.21216	-0.28781	-0.33483
$B_{B2}$	-0.29146	-0.29146	-0.19881	-0.07102	-0.25636	-0.25636	-0.20810	-0.08546
$P_{A1}$	-3.22570	-3.38022	-3.58146	-4.13136	-3.22570	-3.35923	-3.55270	-4.11308
$P_{A2}$	2.48797	2.56830	2.76145	3.35447	2.48797	2.54884	2.74050	3.34434
$P_{B1}$	-0.58061	-0.58061	-0.97127	-1.04261	-0.76928	-0.76928	-0.97202	-1.04715
$P_{B2}$	-0.58493	-0.58493	0.09399	0.29354	-0.10141	-0.10141	0.08570	0.28555

表A3.21(a) fitting式による計算結果 (R/t=10.0)

AXIAL CRACK	A/t=0.0	A/t=0.1	A/t=0.2	A/t=0.3	A/t=0.4	A/t=0.5	A/t=0.6	A/t=0.7	A/t=0.8	A/t=0.9	A/t=1.0
A/C=0.00											
MEM.A	1.1222	1.1684	1.3086	1.5480	1.8951	2.3619	2.9637	3.7195	4.6514	5.7850	7.1
B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
REN.A	1.1222	1.0340	1.0195	1.0562	1.1270	1.2193	1.3246	1.4385	1.5616	1.6998	1.86
B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
PEK.A	1.1222	0.8206	0.5946	0.3966	0.2043	0.0216	-0.1178	-0.1446	0.0546	0.6486	1.87
B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
A/C=0.05											
MEM.A	1.1008	1.1408	1.2616	1.4669	1.7624	2.1562	2.6585	3.2821	4.0420	4.9553	6.0418
B	0.3227	0.3173	0.3366	0.3800	0.4493	0.5486	0.6846	0.8673	1.1099	1.4298	1.8495
REN.A	1.1008	1.0078	0.9785	0.9922	1.0325	1.0867	1.1453	1.2023	1.2550	1.3050	1.3588
B	0.3227	0.3098	0.3188	0.3466	0.3913	0.4521	0.5283	0.6185	0.7201	0.8274	0.9297
PEK.A	1.1008	0.7970	0.5645	0.3615	0.1684	-0.0111	-0.1481	-0.1841	-0.0255	0.4639	1.4725
B	0.3227	0.2970	0.2896	0.2938	0.3029	0.3091	0.3020	0.2662	0.1789	0.0052	-0.3062
A/C=0.10											
MEM.A	1.0735	1.1070	1.2082	1.3786	1.6218	1.9414	2.3429	2.8329	3.4191	4.1105	4.9171
B	0.4450	0.4354	0.4558	0.5051	0.5847	0.6985	0.8533	1.0587	1.3277	1.6773	2.1286
REN.A	1.0735	0.9763	0.9328	0.9243	0.9357	0.9546	0.9716	0.9798	0.9754	0.9573	0.9279
B	0.4450	0.4252	0.4318	0.4607	0.5093	0.5757	0.6584	0.7549	0.8614	0.9706	1.0701
PEK.A	1.0735	0.7693	0.5322	0.3263	0.1351	-0.0378	-0.1679	-0.2076	-0.0833	0.3088	1.1072
B	0.4450	0.4076	0.3922	0.3905	0.3942	0.3936	0.3763	0.3250	0.2140	0.0061	-0.3524
A/C=0.15											
MEM.A	1.0424	1.0696	1.1511	1.2872	1.4781	1.7242	2.0258	2.3836	2.7982	3.2704	3.8010
B	0.5292	0.5153	0.5319	0.5776	0.6527	0.7598	0.9036	1.0910	1.3308	1.6344	2.0153
REN.A	1.0424	0.9417	0.8847	0.8553	0.8397	0.8266	0.8074	0.7757	0.7277	0.6620	0.5797
B	0.5292	0.5032	0.5038	0.5267	0.5685	0.6262	0.6972	0.7780	0.8634	0.9458	1.0131
PEK.A	1.0424	0.7394	0.4991	0.2920	0.1051	-0.0582	-0.1775	-0.2157	-0.1187	0.1852	0.7854
B	0.5292	0.4823	0.4577	0.4466	0.4400	0.4281	0.3985	0.3349	0.2145	0.0060	-0.3336
A/C=0.20											
MEM.A	1.0090	1.0299	1.0922	1.1945	1.3343	1.5083	1.7123	1.9410	2.1882	2.4468	2.7086
B	0.5915	0.5729	0.5828	0.6188	0.6803	0.7675	0.8819	1.0258	1.2017	1.4120	1.6583
REN.A	1.0090	0.9052	0.8356	0.7865	0.7461	0.7047	0.6549	0.5920	0.5139	0.4207	0.3151
B	0.5915	0.5594	0.5520	0.5644	0.5925	0.6326	0.6805	0.7315	0.7797	0.8171	0.8336
PEK.A	1.0090	0.7082	0.4660	0.2593	0.0785	-0.0725	-0.1773	-0.2090	-0.1323	0.0933	0.5094
B	0.5915	0.5163	0.5015	0.4785	0.4586	0.4325	0.3890	0.3149	0.1937	0.0052	-0.2745
A/C=0.30											
MEM.A	0.9622	0.9776	1.0234	1.0979	1.1982	1.3205	1.4596	1.6095	1.7627	1.9109	2.0445
B	0.6585	0.6420	0.6530	0.6901	0.7527	0.8410	0.9556	1.0970	1.2648	1.4574	1.6701
REN.A	0.9622	0.8577	0.7782	0.7127	0.6514	0.5861	0.5106	0.4208	0.3152	0.1948	0.0628
B	0.6585	0.6245	0.6143	0.6236	0.6486	0.6853	0.7293	0.7750	0.8158	0.8432	0.8471
PEK.A	0.9622	0.6634	0.4200	0.2147	0.0408	-0.0980	-0.1885	-0.2105	-0.1395	0.0493	0.3763
B	0.6585	0.5906	0.5453	0.5147	0.4895	0.4631	0.4262	0.3692	0.2810	0.1499	-0.0358
A/C=0.40											
MEM.A	0.9122	0.9225	0.9529	1.0015	1.0650	1.1390	1.2179	1.2946	1.3608	1.4071	1.4227
B	0.6855	0.6733	0.6851	0.7200	0.7771	0.8556	0.9542	1.0701	1.1982	1.3300	1.4521
REN.A	0.9122	0.8080	0.7202	0.6408	0.5625	0.4791	0.3863	0.2821	0.1671	0.0449	-0.0781
B	0.6855	0.6525	0.6400	0.6446	0.6624	0.6893	0.7202	0.7490	0.7683	0.7693	0.7431
PEK.A	0.9122	0.6176	0.3756	0.1744	0.0098	-0.1143	-0.1885	-0.1993	-0.1331	0.0189	0.2561
B	0.6855	0.6085	0.5546	0.5163	0.4869	0.4602	0.4304	0.3918	0.3393	0.2686	0.1782
A/C=0.50											
MEM.A	0.8613	0.8699	0.8953	0.9357	0.9885	1.0499	1.1149	1.1776	1.2309	1.2667	1.2756
B	0.7188	0.7074	0.7187	0.7519	0.8060	0.8801	0.9725	1.0803	1.1983	1.3183	1.4276
REN.A	0.8613	0.7598	0.6718	0.5903	0.5090	0.4226	0.3274	0.2218	0.1065	-0.0148	-0.1357
B	0.7188	0.6851	0.6709	0.6728	0.6872	0.7102	0.7368	0.7614	0.7771	0.7760	0.7497
PEK.A	0.8613	0.5753	0.3400	0.1455	-0.0115	-0.1275	-0.1942	-0.1998	-0.1328	0.0140	0.2388
B	0.7188	0.6387	0.5810	0.5387	0.5054	0.4754	0.4434	0.4042	0.3534	0.2877	0.2057
A/C=0.60											
MEM.A	0.8121	0.8192	0.8399	0.8728	0.9158	0.9655	1.0178	1.0676	1.1091	1.1352	1.1383
B	0.7374	0.7271	0.7376	0.7680	0.8175	0.8849	0.9684	1.0649	1.1695	1.2744	1.3679
REN.A	0.8121	0.7135	0.6257	0.5428	0.4595	0.3712	0.2750	0.1695	0.0558	-0.0627	-0.1797
B	0.7374	0.7038	0.6880	0.6869	0.6973	0.7153	0.7366	0.7559	0.7670	0.7631	0.7367
PEK.A	0.8121	0.5350	0.3069	0.1195	-0.0297	-0.1377	-0.1970	-0.1979	-0.1308	0.0098	0.2212
B	0.7374	0.6559	0.5955	0.5499	0.5131	0.4801	0.4462	0.4069	0.3587	0.2988	0.2263
A/C=0.80											
MEM.A	0.7222	0.7265	0.7391	0.7591	0.7849	0.8143	0.8445	0.8721	0.8930	0.9026	0.8954
B	0.7469	0.7393	0.7476	0.7708	0.8083	0.8586	0.9199	0.9894	1.0627	1.1334	1.1926
REN.A	0.7222	0.6294	0.5427	0.4585	0.3731	0.2837	0.1885	0.0869	-0.0199	-0.1285	-0.2336
B	0.7469	0.7148	0.6967	0.6887	0.6898	0.6964	0.7051	0.7120	0.7125	0.7016	0.6742
PEK.A	0.7222	0.4626	0.2488	0.0757	-0.0582	-0.1505	-0.1963	-0.1891	-0.1233	0.0034	0.1869
B	0.7469	0.6657	0.6020	0.5510	0.5082	0.4699	0.4328	0.3938	0.3509	0.3026	0.2483
A/C=1.00											
MEM.A	0.6450	0.6470	0.6530	0.6623	0.6740	0.6868	0.6988	0.7082	0.7122	0.7082	0.6928
B	0.7355	0.7310	0.7364	0.7514	0.7752	0.8065	0.8438	0.8846	0.9256	0.9623	0.9885
REN.A	0.6450	0.5575	0.4725	0.3882	0.3026	0.2147	0.1231	0.0287	-0.0675	-0.1676	-0.2522
B	0.7355	0.7058	0.6847	0.6707	0.6619	0.6564	0.6517	0.6452	0.6341	0.6152	0.5853
PEK.A	0.6450	0.4014	0.2011	0.0414	-0.0781	-0.1559	-0.1895	-0.1758	-0.1127	-0.0008	0.1546
B	0.7355	0.6569	0.5915	0.5363	0.4883	0.4453	0.4051	0.3662	0.3275	0.2881	0.2480



表A3.21(b) fitting式による計算結果 (R/t=4.0)

AXIAL CRACK		A/T=0.0	A/T=0.1	A/T=0.2	A/T=0.3	A/T=0.4	A/T=0.5	A/T=0.6	A/T=0.7	A/T=0.8	A/T=0.9	A/T=1.0
A/C=0.00	MEM.A	1.1222	1.1684	1.3086	1.5480	1.8951	2.3619	2.9637	3.7195	4.6514	5.7850	7.1495
	B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BEN.A	B	1.1222	1.0339	1.0194	1.0560	1.1266	1.2187	1.3237	1.4372	1.5597	1.6972	1.8631
	B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PEK.A	B	1.1222	0.8206	0.5946	0.3966	0.2043	0.0216	-0.1178	-0.1446	0.0546	0.6486	1.8751
	B	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
A/C=0.05	MEM.A	1.1035	1.1436	1.2654	1.4724	1.7711	2.1701	2.6808	3.3169	4.0947	5.0331	6.1532
	B	0.3173	0.3141	0.3332	0.3736	0.4354	0.5200	0.6303	0.7703	0.9462	1.1656	1.4385
BEN.A	B	1.1035	1.0103	0.9814	0.9963	1.0386	1.0960	1.1594	1.2230	1.2848	1.3469	1.4168
	B	0.3173	0.3066	0.3157	0.3412	0.3806	0.4315	0.4919	0.5592	0.6304	0.7010	0.7645
PEK.A	B	1.1035	0.7995	0.5673	0.3645	0.1716	-0.0081	-0.1456	-0.1818	-0.0214	0.4752	1.5070
	B	0.3173	0.2896	0.2806	0.2840	0.2944	0.3068	0.3163	0.3172	0.3025	0.2628	0.1860
A/C=0.10	MEM.A	1.0787	1.1127	1.2155	1.3896	1.6389	1.9689	2.3869	2.9016	3.5234	4.2642	5.1375
	B	0.4387	0.4321	0.4527	0.4987	0.5698	0.6673	0.7936	0.9530	1.1514	1.3966	1.6985
BEN.A	B	1.0787	0.9813	0.9387	0.9326	0.9479	0.9729	0.9986	1.0186	1.0296	1.0312	1.0271
	B	0.4387	0.4218	0.4288	0.4554	0.4981	0.5537	0.6194	0.6918	0.7671	0.8399	0.9027
PEK.A	B	1.0787	0.7744	0.5376	0.3320	0.1409	-0.0327	-0.1643	-0.2052	-0.0782	0.3270	1.1608
	B	0.4387	0.3984	0.3812	0.3790	0.3852	0.3937	0.3983	0.3925	0.3681	0.3149	0.2196
A/C=0.15	MEM.A	1.0501	1.0780	1.1620	1.3033	1.5034	1.7649	2.0909	2.4852	2.9523	3.4976	4.1269
	B	0.5230	0.5127	0.5300	0.5728	0.6402	0.7325	0.8514	0.9997	1.1816	1.4029	1.6710
BEN.A	B	1.0501	0.9491	0.8935	0.8674	0.8574	0.8528	0.8452	0.8285	0.7991	0.7557	0.6999
	B	0.5230	0.5005	0.5021	0.5231	0.5596	0.6079	0.6645	0.7257	0.7872	0.8437	0.8881
PEK.A	B	1.0501	0.7468	0.5069	0.3001	0.1128	-0.0521	-0.1744	-0.2153	-0.1156	0.2063	0.8575
	B	0.5230	0.4728	0.4463	0.4354	0.4328	0.4322	0.4273	0.4117	0.3777	0.3164	0.2161
A/C=0.20	MEM.A	1.0191	1.0409	1.1065	1.2154	1.3674	1.5616	1.7975	2.0740	2.3901	2.7443	3.1353
	B	0.5861	0.5717	0.5828	0.6169	0.6724	0.7485	0.8452	0.9634	1.1046	1.2711	1.4659
BEN.A	B	1.0191	0.9149	0.8471	0.8022	0.7688	0.7375	0.7012	0.6548	0.5954	0.5222	0.4366
	B	0.5861	0.5581	0.5521	0.5634	0.5877	0.6211	0.6596	0.6993	0.7359	0.7644	0.7791
PEK.A	B	1.0191	0.7178	0.4759	0.2694	0.0877	-0.0662	-0.1761	-0.2127	-0.1341	0.1132	0.5945
	B	0.5861	0.5271	0.4907	0.4689	0.4546	0.4416	0.4242	0.3967	0.3531	0.2866	0.1896
A/C=0.30	MEM.A	0.9706	0.9871	1.0362	1.1172	1.2287	1.3688	1.5351	1.7244	1.9333	2.1576	2.3927
	B	0.6528	0.6414	0.6550	0.6923	0.7523	0.8350	0.9408	1.0706	1.2258	1.4075	1.6170
BEN.A	B	0.9706	0.8656	0.7880	0.7270	0.6727	0.6173	0.5543	0.4790	0.3889	0.2830	0.1622
	B	0.6528	0.6239	0.6162	0.6259	0.6491	0.6821	0.7210	0.7615	0.7984	0.8261	0.8373
PEK.A	B	0.9706	0.6720	0.4296	0.2248	0.0501	-0.0915	-0.1865	-0.2126	-0.1395	0.0686	0.4515
	B	0.6528	0.5855	0.5408	0.5110	0.4893	0.4698	0.4467	0.4140	0.3658	0.2956	0.1965
A/C=0.40	MEM.A	0.9190	0.9304	0.9642	1.0191	1.0929	1.1825	1.2838	1.3921	1.5016	1.6056	1.6966
	B	0.6801	0.6736	0.6895	0.7269	0.7852	0.8642	0.9633	1.0816	1.2173	1.3672	1.5261
BEN.A	B	0.9190	0.8141	0.7284	0.6536	0.5823	0.5080	0.4263	0.3339	0.2301	0.1157	-0.0062
	B	0.6801	0.6528	0.6441	0.6505	0.6687	0.6949	0.7248	0.7534	0.7749	0.7826	0.7693
PEK.A	B	0.9190	0.6254	0.3848	0.1843	0.0190	-0.1079	-0.1862	-0.2005	-0.1325	0.0359	0.3186
	B	0.6801	0.6087	0.5578	0.5205	0.4907	0.4627	0.4312	0.3911	0.3375	0.2661	0.1735
A/C=0.50	MEM.A	0.8671	0.8766	0.9049	0.9507	1.0121	1.0864	1.1701	1.2588	1.3475	1.4304	1.5008
	B	0.7143	0.7081	0.7233	0.7591	0.8149	0.8903	0.9845	1.0963	1.2236	1.3628	1.5083
BEN.A	B	0.8671	0.7650	0.6788	0.6012	0.5256	0.4466	0.3600	0.2631	0.1551	0.0372	-0.0875
	B	0.7143	0.6858	0.6751	0.6789	0.6941	0.7169	0.7434	0.7686	0.7872	0.7930	0.7793
PEK.A	B	0.8671	0.5819	0.3479	0.1539	-0.0039	-0.1225	-0.1929	-0.2015	-0.1328	0.0284	0.2927
	B	0.7143	0.6392	0.5843	0.5430	0.5095	0.4785	0.4451	0.4047	0.3530	0.2966	0.2078
A/C=0.60	MEM.A	0.8170	0.8248	0.8480	0.8854	0.9355	0.9957	1.0631	1.1338	1.2035	1.2670	1.3185
	B	0.7340	0.7282	0.7423	0.7754	0.8270	0.8964	0.9827	1.0845	1.1993	1.3233	1.4507
BEN.A	B	0.8170	0.7179	0.6315	0.5519	0.4732	0.3909	0.3032	0.2020	0.0927	-0.0254	-0.1489
	B	0.7340	0.7049	0.6923	0.6931	0.7045	0.7229	0.7446	0.7653	0.7798	0.7826	0.7679
PEK.A	B	0.8170	0.5406	0.3135	0.1265	-0.0235	-0.1337	-0.1963	-0.1998	-0.1310	0.0219	0.2667
	B	0.7340	0.6567	0.5988	0.5541	0.5173	0.4837	0.4487	0.4085	0.3596	0.2991	0.2252
A/C=0.80	MEM.A	0.7254	0.7303	0.7445	0.7674	0.7977	0.8336	0.8727	0.9122	0.9489	0.9788	0.9977
	B	0.7459	0.7413	0.7522	0.7780	0.8180	0.8715	0.9370	1.0127	1.0958	1.1822	1.2660
BEN.A	B	0.7254	0.6322	0.5466	0.4645	0.3821	0.2963	0.2047	0.1061	0.0008	-0.1097	-0.2217
	B	0.7459	0.7167	0.7004	0.6947	0.6971	0.7049	0.7149	0.7238	0.7274	0.7217	0.7020
PEK.A	B	0.7254	0.4665	0.2535	0.0806	-0.0539	-0.1479	-0.1957	-0.1900	-0.1229	0.0120	0.2163
	B	0.7459	0.6672	0.6050	0.5548	0.5123	0.4738	0.4362	0.3968	0.3533	0.3044	0.2492
A/C=1.00	MEM.A	0.6469	0.6492	0.6562	0.6671	0.6811	0.6969	0.7129	0.7268	0.7364	0.7389	0.7311
	B	0.7369	0.7337	0.7409	0.7581	0.7846	0.8193	0.8607	0.9067	0.9543	0.9993	1.0360
BEN.A	B	0.6469	0.5591	0.4748	0.3917	0.3080	0.2219	0.1321	0.0397	-0.0555	-0.1508	-0.2424
	B	0.7369	0.7085	0.6887	0.6761	0.6687	0.6646	0.6613	0.6562	0.6465	0.6290	0.6006
PEK.A	B	0.6469	0.4039	0.2042	0.0447	-0.0750	-0.1536	-0.1881	-0.1747	-0.1105	0.0053	0.1691
	B	0.7369	0.6589	0.5942	0.5394	0.4918	0.4488	0.4084	0.3690	0.3293	0.2886	0.2470

## A3.12 付録3の参考文献

- REF.1 白鳥正樹、影響関数法による応力拡大係数の解析、日本機械学会(No. 900-2)講習会教材(1990-1.17、東京、表面き裂—その解析と評価—)
- REF.2 三好俊郎他、三次元表面き裂の貫通前・貫通後における応力拡大係数のデータベース、日本機械学会論文集(A編)、56巻527号、P.1563-1568、1990.
- REF.3 岡村弘之、線形破壊力学入門、培風館、1976.
- REF.4 J.C.Newman, Jr. and I.S.Raju, Stress-Intensity Factor Equations For Cracks In Three-Dimensional Finite Bodies Subjected To Tension And Bending Loads, NASA Technical Memorandum 85793, April 1984.
- REF.5 B.Y.Lim, Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant, Vol.9;PRAISE Computer Code User's Manual, NUREG/CR-2189, Vol.9, 1981.
- REF.6 I.S.Raju and J.C.Newman, Jr., Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels, Journal of Pressure Vessel Technology, November 1982, Vol. 104, P. 293-298.
- REF.7 田中信之他、簡易法き裂進展プログラム「CANIS-G」のデータベース拡充、PNC社内報告書、PNC ZN9410 92-217、1992年6月、印刷中

## 付録4 片側き裂のK値解ライブラリ

公表されている片側き裂のK値解についてサーベイを行い、使用するのに適すると思われるものを11種類選択し、サブプログラム化しCANISに組み込んだ。平板の片面の均一深さ $a$ のき裂、円筒内面および外面の均一深さ $a$ の軸方向無限き裂、円筒内面および外面の均一深さ $a$ の環状き裂をとり扱う。CANISではき裂無し断面の板厚方向応力分布(き裂面に垂直に作用する応力成分)を放物線近似し、膜応力成分 $\sigma_M$ 、曲げ応力成分 $\sigma_B$ (き裂側+)および放物線形ピーク応力成分 $\sigma_P$ の和で表す。き裂先端のK値は次式で与えられるものとする。

$$K = (\sigma_M F_M + \sigma_B F_B + \sigma_P F_P) (\pi a)^{0.5} \quad (A4.1)$$

ここに $F$ は無次元K値解であり、添字 $M$ 、 $B$ 、 $P$ はそれぞれ膜、曲げ、ピーク応力を表す。本付録では公表K値解データをすべて無次元K値解 $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$ の形式に整理した。一部データ不足の箇所については、解析を行いデータを取得した。

## A4.1 片側き裂付き平板のK値解 (Key=10、11)

## (1) 膜および曲げ応力に対するK値解

片側き裂付き平板の膜応力および曲げ応力に対する $F$ 値として次式が知られている(REF. 1)。

$$F_M = \{(\tan \theta) / \theta\}^{1/2} \{0.752 + 2.02\alpha + 0.37(1 - \sin \theta)^3\} / \cos \theta \quad (A4.2)$$

$$F_B = \{(\tan \theta) / \theta\}^{1/2} \{0.923 + 0.199(1 - \sin \theta)^4\} / \cos \theta \quad (A4.3)$$

ここに $\alpha = a/t$ はき裂の相対深さであり、 $\theta = \pi \alpha / 2$ である。(A4.2)および(A4.3)式は全定義領域 $0 < \alpha < 1$ で0.5%以内の精度を有する。

## (2) 重み関数の近似数値解

特定の荷重に対するK値(参照K値解)とき裂面の変位分布(参照変位分布解)が既知の場合、それらを用いて重み関数を求めることができる。重み関数を用いれば、き裂面に任意の圧力分布が作用した時のK値を求めることができる。重ね合わせの原理によると、き裂面の任意の圧力分布は、き裂が無い場合に生ずる応力分布と等価である。従って(き裂が無い場合に任意の応力分布が生ずる)任意の荷重がき裂付き部材に作用した時のK値を求めることができる。Petroski-Achenbach(REF. 2)は参照K値解のみ既知の場合に対し、き裂先端の特異性を満たすような近似的な変位分布関数を仮定し、重み関数の近似解を得る手法を提案している。本付録では以後この手法をPA法と略記することにする。BuecknerはPA法により $\alpha \leq 0.5$ の範囲で片側き裂付き平板の重み関数の近似解を求めている(REF. 3)。本節では精度のよい参照K値解(A4.2)式を用い、Buecknerと同様のPA法により、実用上充分と思われる $\alpha \leq 0.9$ の範囲で片側き裂付き平板の重み関数の近似数値解を求めた。これを用いて放物線形ピーク応力に対する $F_P$ 値を求めた。

き裂面に任意の圧力分布荷重 $\sigma(x)$ が作用した時のK値は重み関数 $M$ を用い、次式で求められる。

$$K = \int_0^a \sigma(x) M(x, a) dx \quad (A4.4)$$

参照荷重（参照応力 $\sigma_0$ 、き裂無し部材に生ずる応力分布またはき裂面の圧力分布を $\sigma_R(x)$ とする）に対する参照K値解 $K_R$ と参照変位分布解 $u_R(x, a)$ が既知の場合、重み関数は次式により求められる。

$$M(x, a) = \frac{H}{K_R} \frac{\partial u_R(x, a)}{\partial a} \quad (\text{A4.5})$$

ここにHは平面応力場ではヤング率E、平面ひずみ場では $E/(1-\nu)^2$ で与えられる。一般にき裂先端近傍（ $x \rightarrow a$ ）では変位 $u_R(x, a)$ は次式に漸近することが知られている。

$$x \rightarrow a \text{ で } u_R(x, a) \rightarrow \frac{4 K_R}{H} \left( \frac{a-x}{2\pi} \right)^{0.5} = \frac{4 \sigma_0}{H \sqrt{2}} F_R a^{0.5} (a-x)^{0.5} \quad (\text{A4.6})$$

ここに $F_R$ は次式で定義される無次元K値である。

$$F_R = F_R(a/t) = K_R / [\sigma_0 (\pi a)^{0.5}] \quad (\text{A4.7})$$

(A4.6)式はFEM解析あるいは実験等によりき裂先端近傍の変位を求め、K値を算出する際に良く用いられる。Petroski-Achenbachは(A4.6)式に追加項を加えた次式の近似変位分布関数を提案した。

$$u_R(x, a) = \{ 4 F_R(a/t) a^{0.5} (a-x)^{0.5} + G(a/t) a^{-0.5} (a-x)^{1.5} \} \sigma_0 / (H \sqrt{2}) \quad (\text{A4.8})$$

(A4.5)式を(A4.4)式に代入し、 $\sigma(x)$ を参照圧力分布 $\sigma_R(x)$ とすると、(A4.4)式は参照解 $K_R$ 自身を求める式となり次式が得られる。

$$K_R = \frac{H}{K_R} \int_0^a \sigma_R(x) \frac{\partial u_R(x, a)}{\partial a} dx \quad \text{---->}$$

$$K_R^2 = \sigma_0^2 [F_R(a/t)]^2 \pi a = H \int_0^a \sigma_R(x) \frac{\partial u_R(x, a)}{\partial a} dx \quad \text{---->}$$

$$\sigma_0^2 \pi \int_0^a [F_R(a/t)]^2 a da = H \int_0^a \sigma_R(x) u_R(x, a) dx \quad (\text{A4.9})$$

(A4.8)式を(A4.9)式に代入すると、近似変位分布関数の追加項の無次元関数 $G(a/t)$ を定めるための次式が得られる。

$$G(a/t) = [I_1(a) - 4 F_R(a/t) a^{0.5} I_2(a)] a^{0.5} / I_3(a) \quad (\text{A4.10})$$

ここに

$$I_1(a) = \sigma_0 \pi \sqrt{2} \int_0^a [F_R(a/t)]^2 a da \quad (\text{A4.11a})$$

$$I_2(a) = \int_0^a \sigma_R(x) (a-x)^{0.5} dx \quad (\text{A4.11b})$$

$$I_3(a) = \int_0^a \sigma_R(x) (a-x)^{1.5} dx \quad (\text{A4.11c})$$

である。 $\sigma_R(x) = \sigma_0$ （一定）の場合は(A4.11b)、(A4.11c)式は容易に積分でき、次式が得られる。

$$G(a/t) = \frac{5\pi}{a^2 \sqrt{2}} \int_0^a [F_R(a/t)]^2 a da - \frac{20}{3} F_R(a/t) \quad (A4.12)$$

このようにして近似変位分布関数(A4.8)式を決定することができる。(A4.8)を(A4.5)式に代入すると次式が得られる。

$$M(x, a) = [2 / \{2\pi(a-x)\}^{0.5}] m(x/a, a/t) \quad (A4.13)$$

ここに $m(x, a)$ は無次元重み関数であり、次式で与えられる。

$$m(x/a, a/t) = 1 + m_1(a/t) \cdot (1-x/a) + m_2(a/t) \cdot (1-x/a)^2 \quad (A4.14)$$

$$m_1(a/t) = 1 + (2 F_R' / F_R) a/t + (3 G / 4 F_R) \quad (A4.15a)$$

$$m_2(a/t) = [G' / (2 F_R)] a/t - G / (4 F_R) \quad (A4.15b)$$

膜応力に対するK値解(A4.2)式を参照解 $F_R$ として(A4.12) および(A4.15) 式により  $0 < a/t \leq 0.9$  の範囲で重み関数の数値解を求めた。 $m_1$ 、 $m_2$  の数値解を表A4.1に示す。

表A4.1 片側き裂付き平板の重み関数の数値解

a/t	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$m_1$	0.673	0.758	0.918	1.151	1.452	1.820	2.258	2.773	3.377	4.089	4.938
$m_2$	0.109	0.109	0.111	0.126	0.171	0.265	0.430	0.690	1.081	1.651	2.473
a/t	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90			
$m_1$	5.964	7.230	8.831	10.922	13.781	17.949	24.666	37.578			
$m_2$	3.663	5.414	8.062	12.231	19.184	31.806	57.968	126.601			

表A4.1の数値テーブル解を多項式近似し次式を得た( $\alpha = a/t$ )。

$$m_1(\alpha) = 0.673 + 19.74\alpha^2 - 15.09\alpha^4 + 68.49\alpha^8 \quad (A4.16a)$$

$$m_2(\alpha) = 0.121 - 1.035\alpha^2 + 43.50\alpha^4 + 521.1\alpha^{10} \quad (A4.16b)$$

(A4.16) 式の $m_1$ 、 $m_2$  を用いて計算した無次元重み関数 $m(x/a, a/t)$  の値を表A4.2に示す。表にはBuecknerが  $0 < \alpha \leq 0.5$  で求めた次式の $m_1$ 、 $m_2$  による計算結果も参考として示した。

$$m_1(\alpha) = 0.6147 + 17.18144\alpha^2 + 8.7822\alpha^6 \quad (A4.17a)$$

$$m_2(\alpha) = 0.2502 + 3.2899\alpha^2 + 70.0444\alpha^6 \quad (A4.17b)$$

表A4.1あるいは(A4.16) 式の $m_1$ 、 $m_2$  を用いれば、無限遠方で板厚方向に任意の応力分布が生ずる場合のK値を、(A4.4)式から求めることが出来る。ただし実用上は、典型的な応力分布に対する解をあらかじめ求めておき、それらを重ね合わせて任意応力分布の解を得る方が便利である。先ず最初に図A4.1に示すj次の圧力分布 $\sigma_0(1-x/a)^j$  がき裂面に負荷された場合の解を求めることにする。(A4.13), (A4.14) 式および圧力分布 $\sigma_0(1-x/a)^j$  を(A4.4)式に代入し、積分を実行すると以下の解が得られる。

$$F_0 = K_0 / [\sigma_0(\pi a)^{0.5}] = (1 + m_1/3 + m_2/5) \quad (A4.18a)$$

$$F_1 = K_1 / [\sigma_0(\pi a)^{0.5}] = (1/3 + m_1/5 + m_2/7) \quad (A4.18b)$$

$$F_2 = K_2 / [\sigma_0(\pi a)^{0.5}] = (1/5 + m_1/7 + m_2/9) \quad (A4.18c)$$

$$F_3 = K_3 / [\sigma_0(\pi a)^{0.5}] = (1/7 + m_1/9 + m_2/11) \quad (A4.18d)$$

漸化式で表示すると次式が得られる。

$$F_j = K_j / [\sigma_0(\pi a)^{0.5}] = [1/(2j+1) + m_1/(2j+3) + m_2/(2j+5)] \quad (A4.19)$$

(A4.16) 式の  $m_1$ 、 $m_2$  を用いて計算した  $F_0 \sim F_3$  を表A4.3および図A4.2に示す。比較参考として Buecknerの解(A4.17) 式による計算結果も示した。

無限遠方で一定膜応力  $\sigma_M$  を生ずる場合の解は、重ね合わせの原理により、次式で与えられる。  

$$F_M = K_M / [\sigma_M (\pi a)^{0.5}] = F_0 \tag{A4.20a}$$

無限遠方で曲げ応力  $\sigma_B (1-2x/t)$  を生ずる場合の解は次式で与えられる。

$$F_B = K_B / [\sigma_B (\pi a)^{0.5}] = 2 \alpha F_1 + (1 - 2 \alpha) F_0 \tag{A4.20b}$$

無限遠方で放物線形ピーク応力  $\sigma_P [1.5(1-2x/t)^2 - 0.5]$  を生ずる場合の解は次式で与えられる。

$$F_P = K_P / [\sigma_P (\pi a)^{0.5}] = 6 \alpha^2 F_1 + 6 \alpha (1 - 2 \alpha) F_0 + (1 - 6 \alpha + 6 \alpha^2) F_0 \tag{A4.20c}$$

(A4.16) 式の  $m_1$ 、 $m_2$  を用いて計算した  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.3に示した。表中には参考として Buecknerの解(A4.17) 式による計算結果も示した。また  $F_M$ 、 $F_B$  については参照解(A4.2)式および (A4.3)式との相対誤差を示した。なおCANISのサブプログラムでは表A4.1のオリジナル数値解テーブルの  $m_1$ 、 $m_2$  を用いて計算した  $F_P$  テーブル解(表A4.4)を使用している。

表A4.4 片側き裂付き平板のピーク応力に対する  $F_P$  (表A4.1の重み関数数値解を使用)

a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$F_P$	1.122	0.799	0.567	0.396	0.269	0.180	0.133	0.147	0.301	1.132

また付録3のA3.1およびA3.2節では、平板の表面き裂のアスペクト比  $a/b \rightarrow 0$  の極限として、片側き裂の  $F_P$  解を用いているが、付録3では関数fittingされた(A4.16)式の  $m_1$ 、 $m_2$  を用いて計算した  $F_P$  解(表A4.3参照)を用いた。

(4) Xue-Ren Wuの重み関数数値解

Xue-Ren Wu は変位分布関数  $u_R(x, a)$  として  $(a-x)$  の 0.5、1.5、2.5、3.5 乗の4項からなる近似解を仮定し、同様の手法で重み関数の数値解を求めた(REF.4)。Xue-Ren Wu の重み関数を用いて求めた  $F_P$  数値解を表A4.5に示す。

表A4.5 片側き裂付き平板のピーク応力に対する  $F_P$  (Xue-Ren Wuの重み関数数値解を使用)

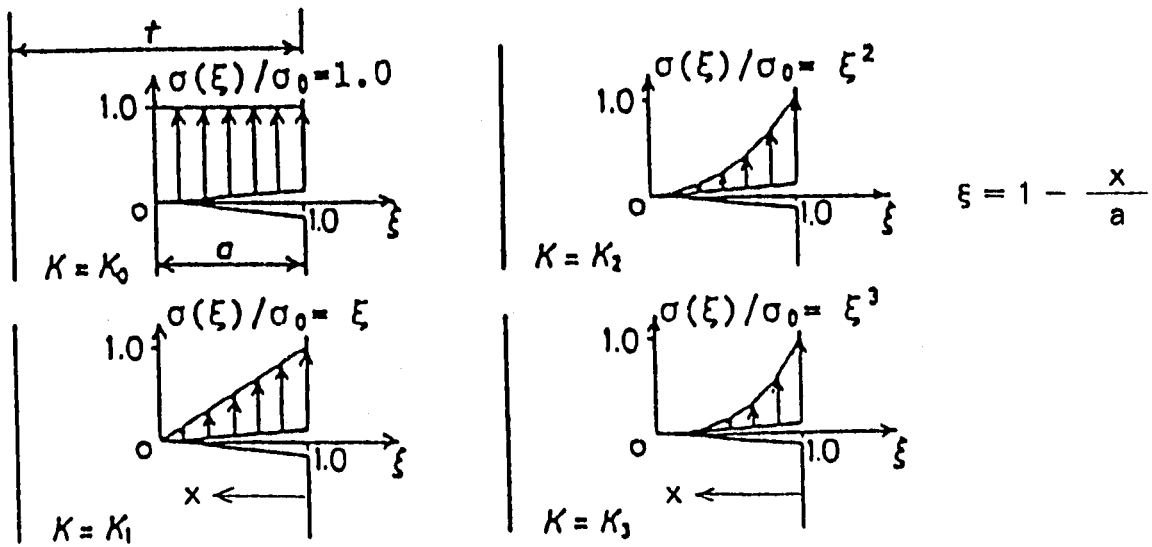
a/t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$F_P$	1.122	0.796	0.571	0.402	0.269	0.167	0.094	0.047	0.033	2.033

(5) CANISのサブプログラム

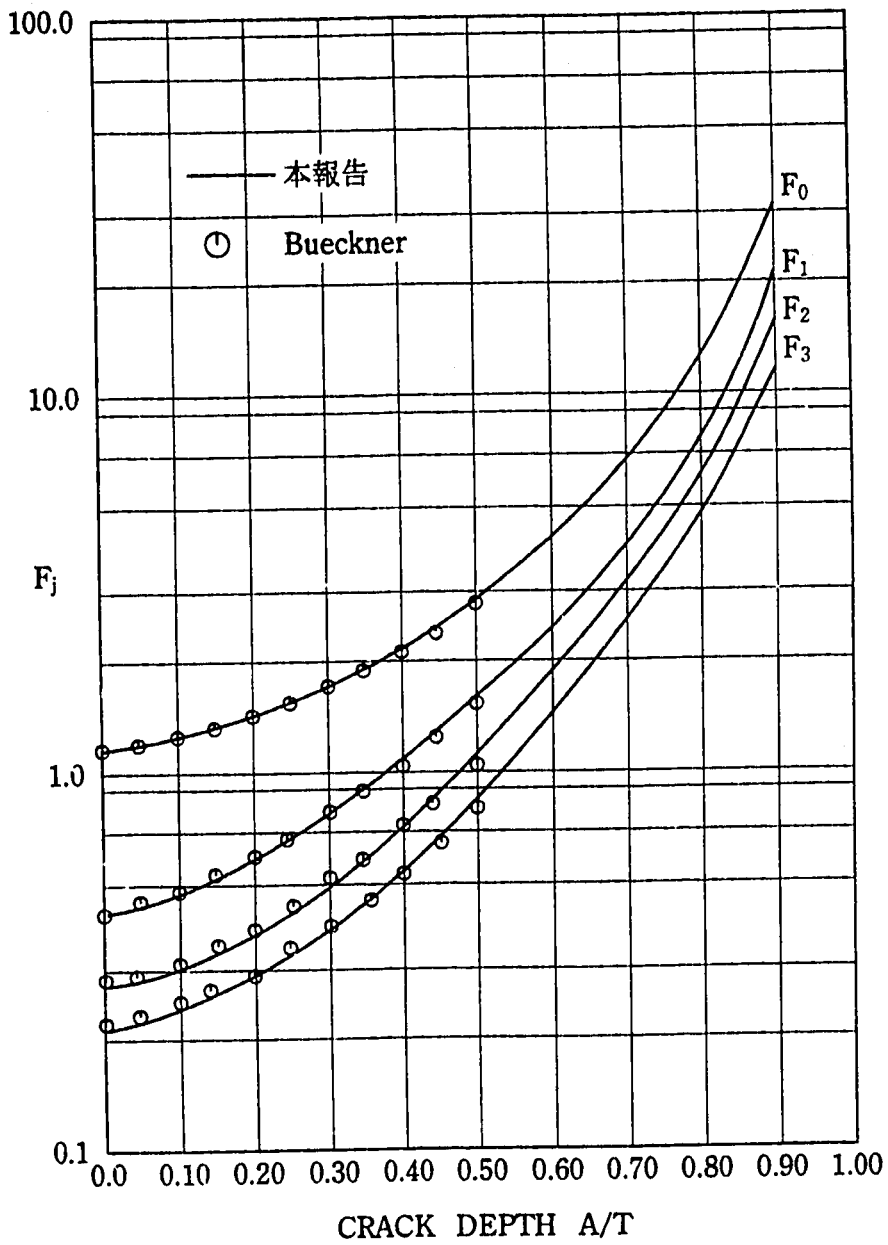
CANISのサブプログラムでは  $F_M$  は(A4.2)式により、 $F_B$  は(A4.3)式により計算する。 $F_M$  と  $F_B$  は  $\alpha \rightarrow 1$  で  $\infty$  に発散するので、適用範囲は  $\alpha \leq 0.99$  とした。 $F_P$  については表A4.4と表A4.5が選択使用し、テーブル値を線形内外挿して計算する。

選択 Key=10 → 表A4.4 (本小節のオリジナル重み関数数値解による  $F_P$ ) を使用する。

選択 Key=11 → 表A4.5 (Xue-Ren Wuの重み関数数値解による  $F_P$ ) を使用する。



図A4.1 き裂面上板厚方向に変化する基本モードの分布力



図A4.2 無次元応力拡大係数

表A4.2 無次元重み関数m (x/a, a/t)

A/T	X/A	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.1	M(THIS)	1.984	1.875	1.769	1.665	1.563	1.463	1.366	1.271	1.178	1.088	1.000
	M(B.WF)	2.070	1.937	1.810	1.689	1.574	1.464	1.360	1.261	1.169	1.081	1.000
0.2	M(THIS)	2.588	2.416	2.246	2.080	1.917	1.757	1.599	1.445	1.294	1.145	1.000
	M(B.WF)	2.689	2.485	2.289	2.101	1.921	1.748	1.583	1.426	1.276	1.134	1.000
0.3	M(THIS)	3.712	3.407	3.109	2.819	2.536	2.261	1.994	1.734	1.482	1.237	1.000
	M(B.WF)	3.765	3.435	3.116	2.810	2.516	2.233	1.963	1.704	1.457	1.223	1.000
0.4	M(THIS)	5.559	5.007	4.476	3.967	3.479	3.012	2.567	2.143	1.741	1.360	1.000
	M(B.WF)	5.464	4.922	4.401	3.901	3.423	2.966	2.530	2.116	1.723	1.351	1.000
0.5	M(THIS)	8.521	7.536	6.603	5.721	4.891	4.113	3.387	2.713	2.090	1.519	1.000
	M(B.WF)	8.215	7.299	6.425	5.596	4.809	4.066	3.366	2.709	2.096	1.526	1.000
0.6	M(THIS)	13.507	11.758	10.120	8.593	7.176	5.870	4.675	3.590	2.616	1.753	1.000
	M(B.WF) †	12.913	11.299	9.778	8.352	7.019	5.781	4.637	3.586	2.630	1.768	1.000
0.7	M(THIS)	23.461	20.154	17.082	14.247	11.647	9.283	7.155	5.262	3.606	2.185	1.000
	M(B.WF) †	21.171	18.245	15.520	12.998	10.678	8.560	6.644	4.930	3.418	2.108	1.000
0.8	M(THIS)	51.560	43.629	36.337	29.684	23.670	18.294	13.558	9.460	6.001	3.181	1.000
	M(B.WF) †	35.632	30.305	25.391	20.892	16.807	13.137	9.881	7.039	4.612	2.599	1.000
0.9	M(THIS)	161.628	134.371	109.601	87.319	67.525	50.218	35.399	23.068	13.224	5.868	1.000
	M(B.WF) †	60.341	50.794	42.050	34.109	26.971	20.636	15.103	10.373	6.446	3.322	1.000

上段M (THIS) は本報告の値 [(A2.16)式使用]

下段M (B. WF) はBuecknerの値 [(A2.17)式使用, 但しa/t ≥ 0.6は適用範囲外の参考計算値である。]

表A4.3 無次元応力拡大係数の比較

A/T	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
FM(REF)	1.122	1.196	1.367	1.655	2.108	2.827	4.043	6.376	11.993	34.719	(A2.2)式
FB(REF)	1.122	1.041	1.035	1.098	1.234	1.475	1.898	2.716	4.674	12.469	(A2.3)式
M1(FIT)	0.673	0.869	1.439	2.332	3.490	4.932	6.974	10.671	18.616	36.245	73.813
M2(FIT)	0.121	0.115	0.149	0.380	1.069	2.589	5.533	11.790	31.944	124.384	563.686
FO(WFM)	1.124	1.182	1.359	1.669	2.140	2.847	3.990	6.226	12.239	34.174	124.551
F1(WFM)	0.437	0.471	0.578	0.769	1.066	1.521	2.268	3.738	7.761	22.824	86.090
F2(WFM)	0.279	0.303	0.380	0.518	0.736	1.073	1.631	2.732	5.770	17.284	66.062
F3(WFM)	0.206	0.225	0.285	0.393	0.565	0.834	1.279	2.161	4.605	13.935	53.648
FM(WFM)	1.124	1.182	1.359	1.669	2.140	2.847	3.990	6.226	12.239	34.174	124.551
EROR(X)	0.2	-1.2	-0.6	0.8	1.5	0.7	-1.3	-2.4	2.1	-1.6	
FB(WFM)	1.124	1.040	1.047	1.129	1.281	1.521	1.923	2.743	5.074	13.744	47.630
EROR(X)	0.2	-0.1	1.1	2.8	3.8	3.1	1.3	1.0	8.5	10.2	
FP(WFM)	1.124	0.788	0.562	0.399	0.276	0.187	0.134	0.133	0.295	1.122	4.380
M1(FIT)	0.615	0.787	1.303	2.168	3.400	5.048	7.211	10.068	13.915	19.201	26.581
M2(FIT)	0.250	0.283	0.386	0.597	1.063	2.167	4.703	10.103	20.717	40.139	73.585
FO(WFM)	1.130	1.187	1.361	1.658	2.112	2.805	3.911	5.741	8.807	13.890	22.127
F1(WFM)	0.443	0.478	0.584	0.767	1.049	1.488	2.203	3.412	5.470	8.920	14.551
F2(WFM)	0.284	0.310	0.386	0.519	0.724	1.046	1.578	2.486	4.042	6.665	10.960
F3(WFM)	0.211	0.230	0.291	0.394	0.556	0.811	1.235	1.963	3.216	5.335	8.810
FM(WFM)	1.130	1.187	1.361	1.658	2.112	2.805	3.911	5.741	8.807	13.890	22.127
EROR(X)	0.7	-0.7	-0.4	0.2	0.2	-0.7	-3.3	-10.0	-26.6	-60.0	
FB(WFM)	1.130	1.046	1.050	1.124	1.262	1.488	1.862	2.481	3.468	4.944	6.974
EROR(X)	0.7	0.5	1.4	2.4	2.2	0.9	-1.9	-8.7	-25.8	-60.3	
FP(WFM)	1.130	0.794	0.568	0.401	0.269	0.166	0.101	0.082	0.120	0.247	0.583

→ (参考計算結果)



## A4.2 円筒内面の環状き裂のK値解 (Key=20、Xue-Ren Wuの重み関数解)

Xue-Ren Wu は円筒内面の環状き裂に対して、変位分布解(A4.8)式を仮定し、軸引張に対する参照K値解を用い、重み関数の数値解を求めた(REF.4)。形状パラメータは  $R/R_0 = 0.7, 0.8, 0.9$  ( $R/t = 2.33, 4.0, 10.0$ )、 $\alpha \leq 0.6$  である。Xue-Ren Wuの重み関数を用いて算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.6に示す。CANISのサブプログラムでは、 $\alpha \leq 0.4$  領域ではテーブル値を線形内挿し、 $0.4 < \alpha < 1.0$  領域ではテーブル値を放物線内外挿する。 $R/t \geq 10.0$ では  $R/t = 10.0$ のデータを使用し、 $R/t \leq 2.33$ では  $R/t = 2.33$ のデータを使用し、 $2.33 < R/t < 10.0$ ではテーブル値を  $R/t$  に関して線形内挿する。 $R/t$  に関しては範囲外への外挿はしない。

表A4.6 円筒内面の環状き裂の無次元K値 (Xue-Ren Wuの重み関数解より算出)

R/t ↓	a/t ⇨	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
10.0	$F_M$	1.1219	1.1312	1.1580	1.2530	1.3920	1.5680	1.7790	2.0250
	$F_B$	1.1082	1.0622	1.0178	0.9576	0.9170	0.8820	0.8440	0.7962
	$F_P$	1.0811	0.9321	0.7696	0.5009	0.2846	0.1092	-0.0269	-0.1194
4.0	$F_M$	1.1204	1.1227	1.1380	1.1980	1.2861	1.3969	1.5291	1.6880
	$F_B$	1.1067	1.0540	0.9994	0.9112	0.8355	0.7625	0.6859	0.6030
	$F_P$	1.0795	0.9245	0.7541	0.4688	0.2397	0.0585	-0.0759	-0.1624
2.3333	$F_M$	1.1190	1.1147	1.1190	1.1500	1.2030	1.2750	1.3660	1.4880
	$F_B$	1.1053	1.0463	0.9819	0.8708	0.7716	0.6774	0.5834	0.4870
	$F_P$	1.0782	0.9174	0.7393	0.4409	0.2044	0.0226	-0.1071	-0.1870

## A4.3 円筒内面の環状き裂のK値解 (Key=21、植田らの解)

植田ら(REF.5)は円筒内面の環状き裂に対しFEM軸対称解析を行い、無限遠方で一定膜応力  $\sigma_M$  を生ずる時の  $K_M$ 、板厚内に直線温度分布  $T_1(x) = \Delta T(x/t)$  が、PNC TN9410 94-201 厚内に放物線温度分布  $T_2(x) = \Delta T[1 - (1-x/t)^2]$  が生じた時の  $K_2$  を求めた。形状パラメータは内半径  $R = 33.5\text{mm}$ 、板厚  $t = 7, 13, 40\text{mm}$  である ( $R/t = 4.7857, 2.5769, 0.8375$ )。  $K_M$  を図A4.3に、  $K_1$  を図A4.4に、および  $K_2$  を図A4.5に示す。

図A4.3を読み取り次式により  $F_M$  を求めた。

$$F_M = K_M / [\sigma_M (\pi a)^{0.5}] \quad (\text{A4.21})$$

直線温度分布  $T_1(x)$  による無限遠方の軸方向応力分布は次式で与えられる。

$$\sigma_1(x) = [E\alpha / (1-\nu)] [T_{M1} - T_1(x)] \quad (\text{A4.22})$$

ここに  $T_{M1}$  は板厚内の体積平均温度であり、次式で与えられる。

$$T_{M1} = \left[ \int_0^t T_1(x) 2\pi(R+x)dx \right] \frac{1}{\pi(R+t)^2 - \pi R^2} = \Delta T \left[ \frac{1}{2} + \frac{\zeta}{6(2+\zeta)} \right] \quad (\text{A4.23})$$

ここに  $\zeta = t/R$  は板厚半径比である。 $T_1(x)$  および(A4.23)式を(A4.22)式に代入すると次式が得られる。

$$\sigma_1(x) = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)} \left[ 1 - 2x/t + \frac{\zeta}{3(2+\zeta)} \right] \tag{A4.24}$$

従って  $K_1 = F_M (\pi a)^{0.5} E\alpha\Delta T \zeta / [6(1-\nu)(2+\zeta)]$  は線形曲げ応力  $E\alpha\Delta T(1-2x/t)/[2(1-\nu)]$  に対する  $K$  値を表し、これを  $E\alpha\Delta T/[2(1-\nu)] (\pi a)^{0.5}$  で除して  $F_B$  を求めた。即ち次式から  $F_B$  を求めた。

$$F_B = K_1 / \left[ \frac{E\alpha\Delta T (\pi a)^{0.5}}{2(1-\nu)} \right] - F_M \frac{\zeta}{3(2+\zeta)} \tag{A4.25}$$

同様に放物線温度分布  $T_2(x)$  による無限遠方の軸方向応力分布は次式で与えられる。

$$\sigma_2(x) = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\nu} \left[ (1-x/t)^2 - \frac{1}{3} + \frac{\zeta}{6(2+\zeta)} \right] \tag{A4.26}$$

従って  $K_2 - K_1$  は次式の放物線形ピーク応力に対する  $K$  値を表すことになる。

$$\sigma_P(x) = \sigma_2(x) - \sigma_1(x) = \frac{E\alpha\Delta T}{6(1-\nu)} [1.5(1-2x/t)^2 - 0.5] \tag{A4.27}$$

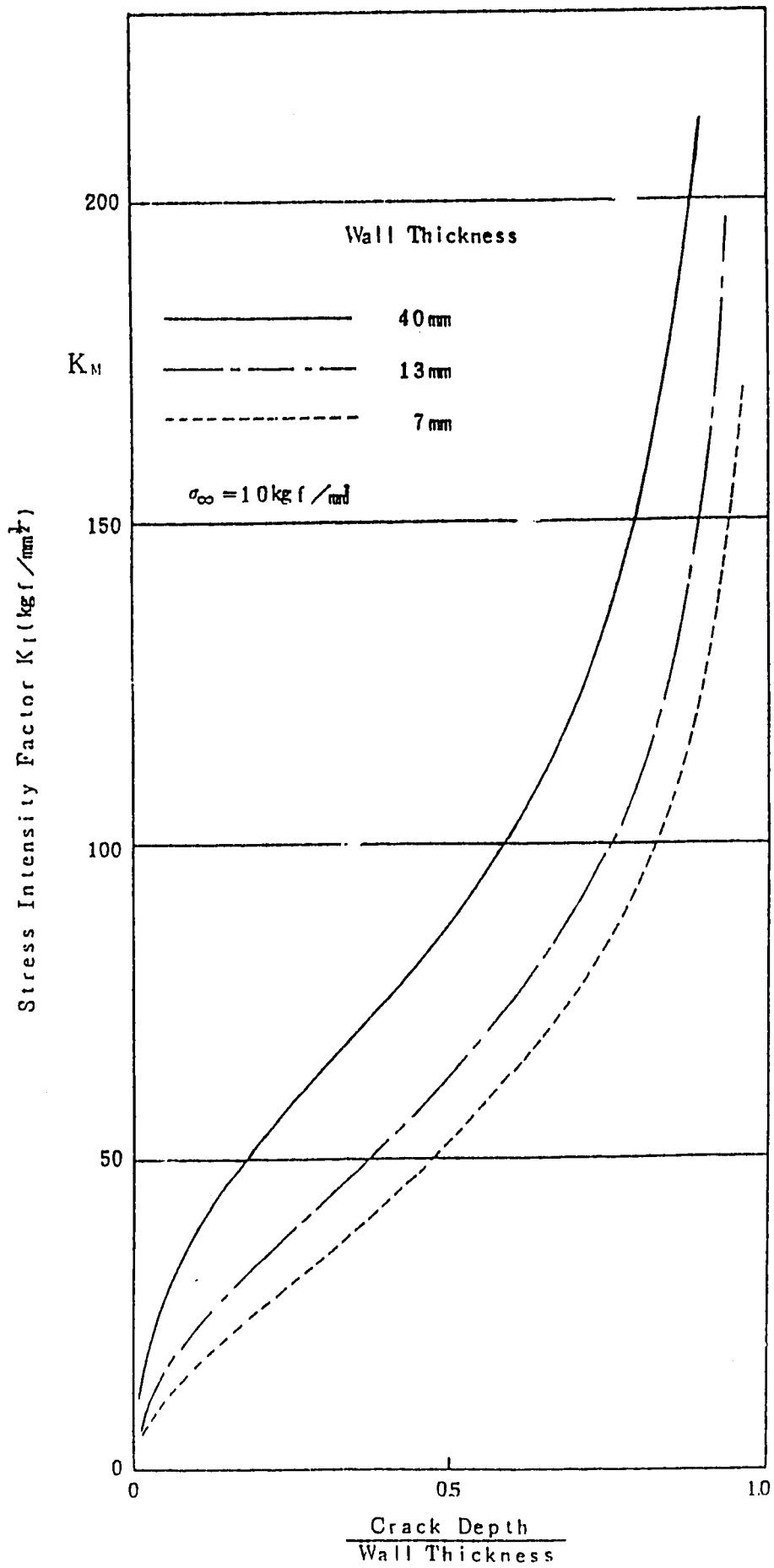
$K_2 - K_1$  を  $E\alpha\Delta T/[6(1-\nu)] (\pi a)^{0.5}$  で除して  $F_P$  を求めた。

$$F_P = (K_2 - K_1) / \left[ \frac{E\alpha\Delta T (\pi a)^{0.5}}{6(1-\nu)} \right] \tag{A4.28}$$

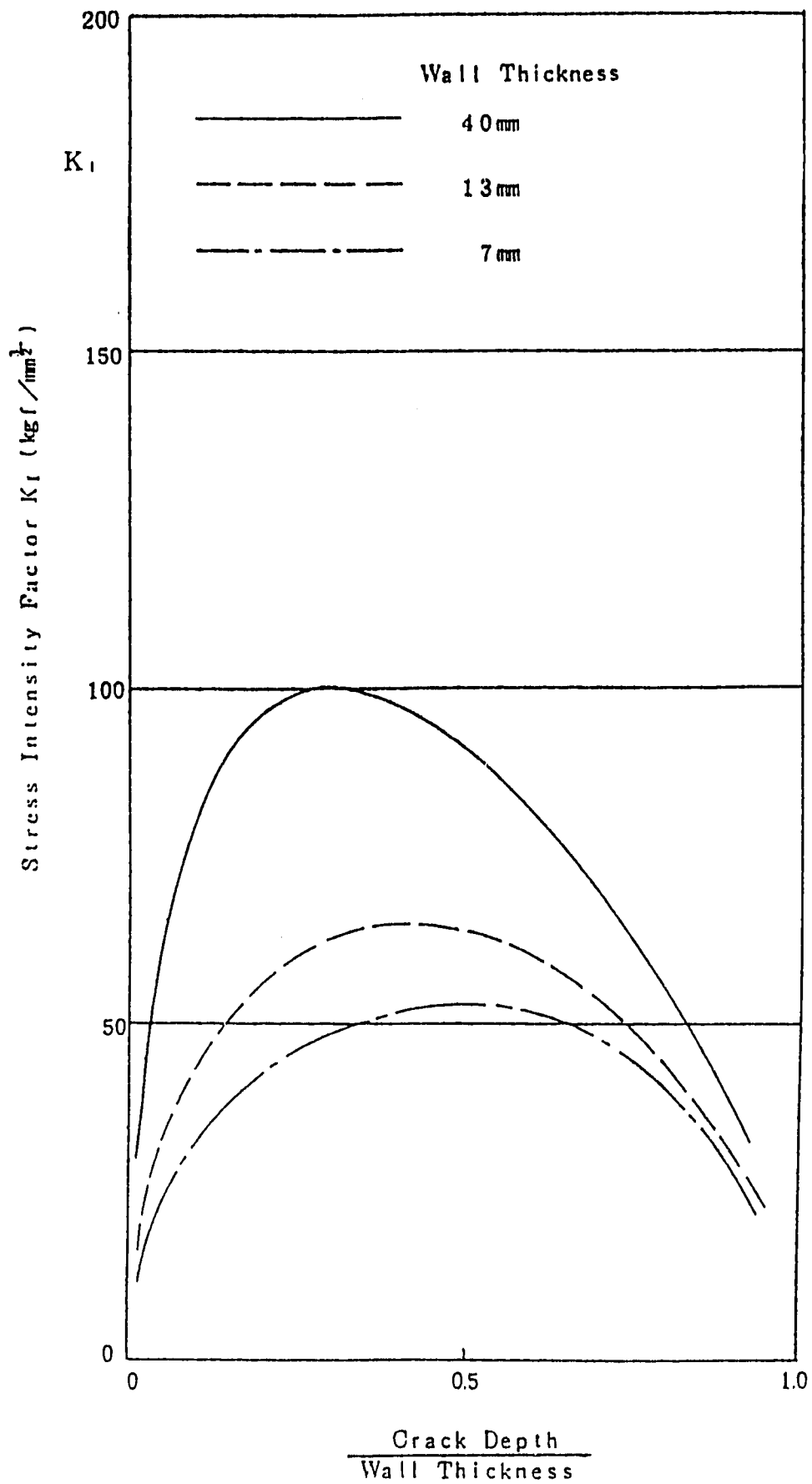
このようにして求めた  $F$  値を表A4.7に示す。CANISのサブプログラムでは表A4.7を線形内外挿して  $F$  値を求めている。但し  $R/t$  に関しては範囲外への外挿は行わない。

表A4.7 円筒内面の環状き裂の無次元  $K$  値 (植田らの解より算出)

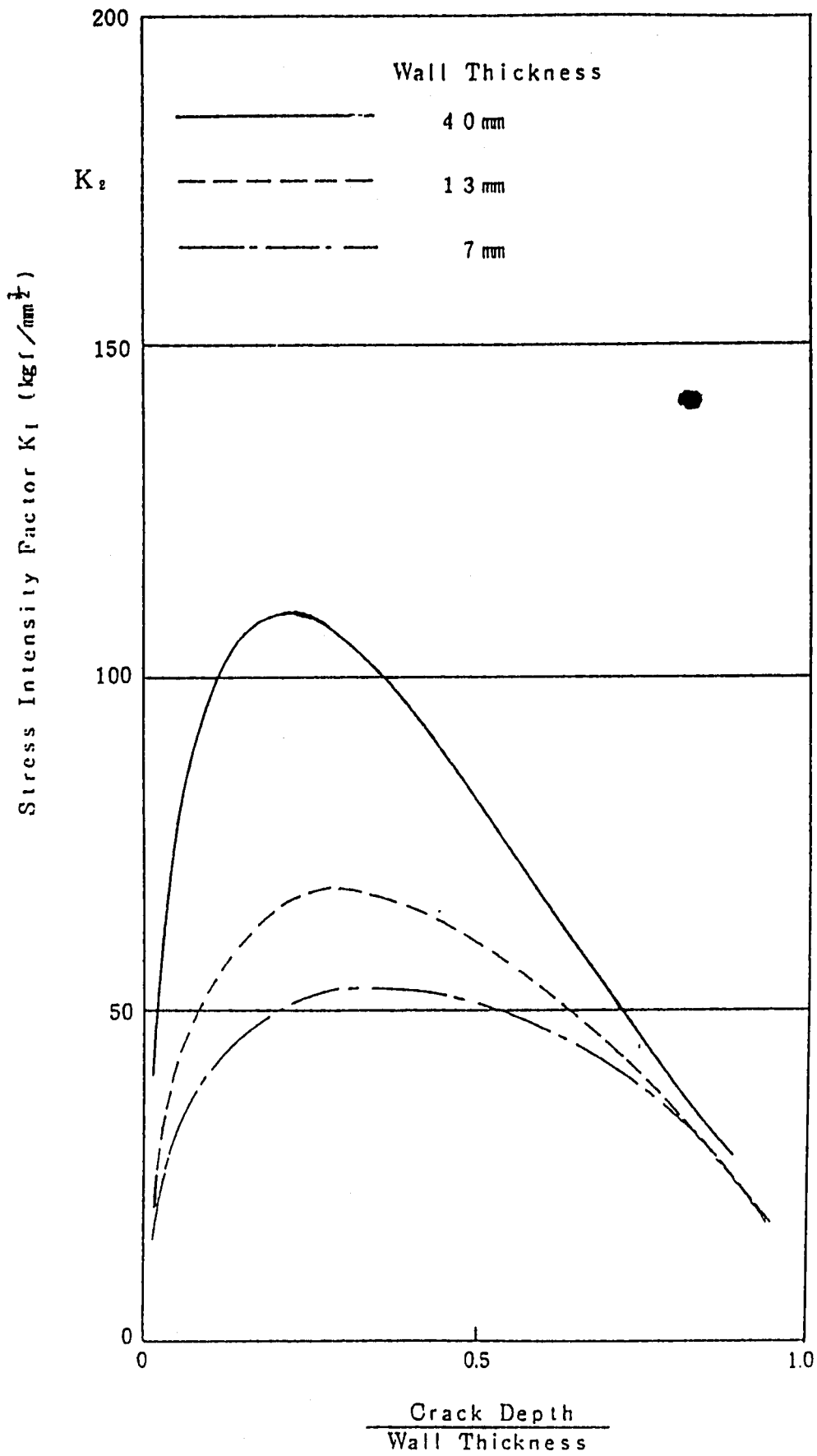
$\Downarrow R/t$	$a/t \Rightarrow$	0.0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
4.7857	$F_M$	1.033	1.068	1.133	1.216	1.320	1.443	1.586	1.751	1.937	2.234	2.796
	$F_B$	1.033	0.997	0.963	0.894	0.822	0.760	0.683	0.601	0.498	0.371	0.206
	$F_P$	1.033	0.987	0.791	0.494	0.263	0.047	-0.075	-0.167	-0.211	-0.204	-0.168
2.5769	$F_M$	1.127	1.134	1.133	1.169	1.240	1.311	1.405	1.521	1.674	1.924	2.540
	$F_B$	1.127	1.046	0.961	0.853	0.757	0.664	0.571	0.477	0.365	0.244	0.093
	$F_P$	1.127	0.869	0.663	0.425	0.205	0.034	-0.098	-0.192	-0.212	-0.205	-0.150
0.8375	$F_M$	1.162	1.125	1.100	1.057	1.044	1.062	1.096	1.165	1.283	1.496	1.968
	$F_B$	1.162	1.022	0.918	0.757	0.619	0.500	0.390	0.282	0.179	0.065	-0.079
	$F_P$	1.162	0.826	0.693	0.361	0.117	-0.047	-0.165	-0.227	-0.247	-0.218	-0.159



図A4.3 植田らのK値解 (一様引張り)



図A4.4 植田らのK値解 (直線温度分布)



図A4.5 植田らのK値解 (放物線温度分布)

## A4.4 円筒内面の環状き裂のK値解 (Key=22、植田らの解、関数fitting)

円筒内面環状き裂に対する植田らのK値解から求められたF値テーブル(表A4.7)を関数fittingし次式を得た( $\alpha = a/t$ )。

$$F_M = 1.033 + 0.824\alpha + 0.465\alpha^2 + 0.350\alpha^4 + 1.467\alpha^{12} \quad (R/t=4.7857) \quad (A4.29a)$$

$$F_M = 1.127 - 0.005\alpha + 1.215\alpha^2 - 0.327\alpha^4 + 2.297\alpha^{12} \quad (R/t=2.5769) \quad (A4.29b)$$

$$F_M = 1.162 - 0.778\alpha + 1.297\alpha^2 + 0.004\alpha^4 + 1.849\alpha^{12} \quad (R/t=0.8375) \quad (A4.29c)$$

$$F_B = 1.035 - 0.752\alpha + 0.221\alpha^2 - 0.474\alpha^4 - 0.039\alpha^6 \quad (R/t=4.7857) \quad (A4.30a)$$

$$F_B = 1.103 - 1.402\alpha + 0.878\alpha^2 - 0.862\alpha^4 + 0.201\alpha^6 \quad (R/t=2.5769) \quad (A4.30b)$$

$$F_B = 1.107 - 1.942\alpha + 1.104\alpha^2 - 0.360\alpha^4 - 0.188\alpha^6 \quad (R/t=0.8375) \quad (A4.30c)$$

$$F_P = 1.163 - 3.873\alpha + 2.785\alpha^2 - 0.028\alpha^4 - 0.156\alpha^6 \quad (R/t=4.7857) \quad (A4.31a)$$

$$F_P = 0.987 - 3.191\alpha + 1.922\alpha^2 + 0.501\alpha^4 - 0.284\alpha^6 \quad (R/t=2.5769) \quad (A4.31b)$$

$$F_P = 1.050 - 4.215\alpha + 3.822\alpha^2 - 1.111\alpha^4 + 0.422\alpha^6 \quad (R/t=0.8375) \quad (A4.31c)$$

CANISのサブプログラムではこれらの関数fitting式による計算値をR/tに関して内挿してF値を算出する。R/tに関して範囲外への外挿は行わない。

A4.5 円筒内面の環状き裂のK値解 (Key=23、Labbens らの重み関数解)

Labbensら(RBF.6)は、円筒内面の環状き裂に対しFEM軸対称解析を行い、き裂面の任意深さ位置に対応する円周上に線荷重を負荷した場合のき裂面のコンプライアンスを計算し、き裂深さおよび線荷重の負荷位置を変えた時のコンプライアンスの変化から重み関数の数値解を得る手法を提案している。Labbens らは $t/R=0.1$ の円筒について重み関数数値解を求め、それをを用いてき裂面に深さ方向の0~3次の圧力分布が作用する場合のK値を図A4.6のように求めた。図A4.6中の $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ を読み取り、き裂深さで規格化した0~2次の応力分布 1.0、 $x/a$ 、 $(x/a)^2$ に対する $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ に次式で変換する。

$$\text{図A4.6中の} F_1 \rightarrow = F_0 = K / (\pi a)^{0.5} \text{ for } \sigma = 1.0 \quad (\text{A4.32a})$$

$$(\text{図A4.6中の} F_2) \times (2 / \pi) \rightarrow = F_1 = K / (\pi a)^{0.5} \text{ for } \sigma = x/a \quad (\text{A4.32b})$$

$$(\text{図A4.6中の} F_3) / 2 \rightarrow = F_2 = K / (\pi a)^{0.5} \text{ for } \sigma = (x/a)^2 \quad (\text{A4.32c})$$

変換された $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ を用いて次式により膜、曲げおよび放物線形ピーク応力に対する $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$ に変換する。

$$F_M = F_0 \quad \text{for } \sigma = 1.0 \quad (\text{A4.33a})$$

$$F_B = F_0 - 2 \alpha F_1 \quad \text{for } \sigma = 1 - 2x/t = 1 - 2 \alpha (x/a) \quad (\text{A4.33b})$$

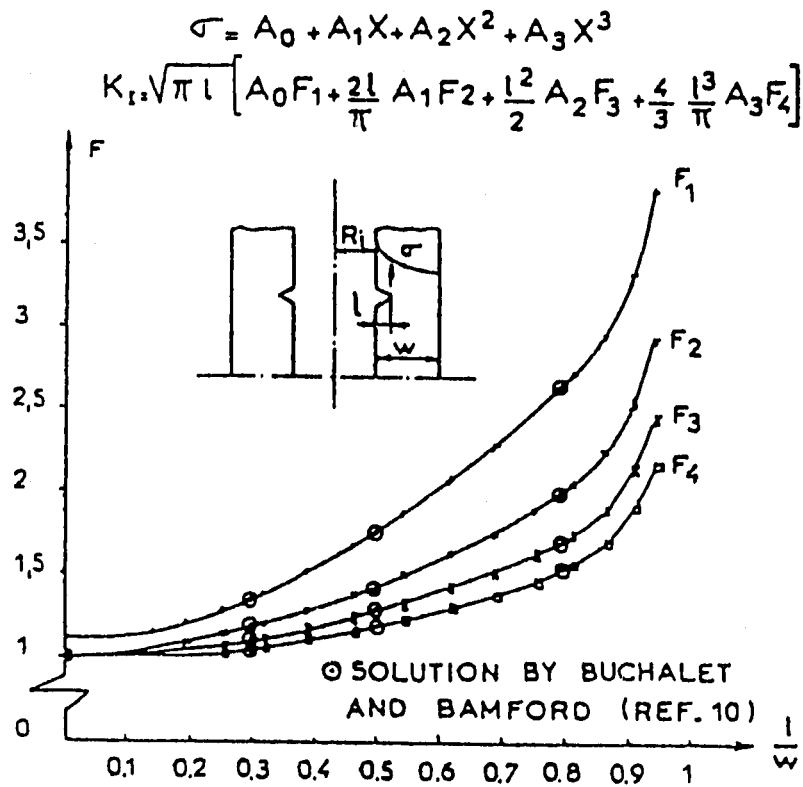
$$F_P = F_0 - 6 \alpha F_1 + 6 \alpha^2 F_2 \text{ for } \sigma = 1.5(1 - 2x/t)^2 - 0.5 = 1 - 6 \alpha (x/a) + 6 \alpha^2 (x/a)^2 \quad (\text{A4.33c})$$

求めた $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  テーブルを表A4.8に示す。

CANISのサブプログラムでは表A4.8のテーブル値を線形内外挿してF値を求めている。

表A4.8 円筒内面の環状き裂の無次元K値 (Labbens らの重み関数解より算出)

a/t	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9
$F_M$	1.120	1.142	1.217	1.550	2.040	2.324	2.674	3.274
$F_B$	1.120	1.009	0.936	0.883	0.814	0.726	0.600	0.450
$F_P$	1.120	0.773	0.499	0.120	-0.119	-0.197	-0.218	-0.102



図A4.6 Labbensらの環状き裂K値解 (R/l=10.0)



## A4.6 円筒内面の軸方向無限き裂対のK値解 (Key=30、Xue-Ren Wuの重み関数解)

Xue-Ren Wu は円筒内面の軸方向無限き裂に対して、変位分布解(A4.8)式を仮定し、既知の参照K値解を用い、重み関数の数値解を求めた (REF. 4)。形状パラメータは  $R_0/R=1.25, 1.5, 1.75, 2.0, \sim 10.0$ 、 $\alpha \leq 0.75$ である。一般に単独き裂の場合よりも2個のき裂が  $180^\circ$  離れて対を成す方がK値が大きくなる。本節では2個のき裂対とし、 $R_0/R$ については最初の4ケース、即ち  $R/t=4.0, 2.5, 1.33, 1.0$ を採用した。

Xue-Ren Wu の重み関数を用いて算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.9に示す。CANISのサブプログラムでは、 $\alpha \leq 0.6$  領域ではテーブル値を線形内挿し、 $0.6 < \alpha < 1.0$  領域ではテーブル値を放物線内外挿する。 $R/t \geq 4.0$  では  $R/t=4.0$  のデータを使用し、 $R/t \leq 1.0$  では  $R/t=1.0$  のデータを使用し、 $1.0 < R/t < 4.0$  ではテーブル値を  $R/t$  に関して線形内挿する。 $R/t$  に関しては範囲外への外挿はしない。

表A4.9 円筒内面の軸方向無限き裂対の無次元K値 (Xue-Ren Wuの重み関数解より算出)

R/t ↓	a/t ⇔	0.001	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
4.0	$F_M$	1.1213	1.1298	1.1721	1.3273	1.5625	1.8932	2.3496	2.9571	3.7236	4.1624
	$F_B$	1.1199	1.0608	1.0307	1.0205	1.0487	1.1096	1.2058	1.3311	1.4636	1.5224
	$F_P$	1.1172	0.9308	0.7804	0.5447	0.3579	0.2060	0.0876	0.0015	-.0498	-.0556
2.0	$F_M$	1.1213	1.1246	1.1584	1.2900	1.4874	1.7492	2.0827	2.4907	2.9637	3.2177
	$F_B$	1.1199	1.0558	1.0181	0.9890	0.9908	1.0092	1.0369	1.0635	1.0717	1.0617
	$F_P$	1.1172	0.9262	0.7698	0.5229	0.3257	0.1640	0.0343	-.0587	-.1077	-.1117
1.3333	$F_M$	1.1218	1.1148	1.1420	1.2591	1.4298	1.6476	1.9162	2.2361	2.6027	2.8033
	$F_B$	1.1204	1.0464	1.0030	0.9629	0.9468	0.9384	0.9314	0.9175	0.8847	0.8573
	$F_P$	1.1177	0.9175	0.7570	0.5047	0.3021	0.1344	0.0016	-.0919	-.1369	-.1385
1.0	$F_M$	1.1207	1.1092	1.1294	1.2310	1.3826	1.5734	1.8051	2.0784	2.3979	2.5854
	$F_B$	1.1193	1.0410	0.9914	0.9392	0.9104	0.8866	0.8611	0.8274	0.7767	0.7434
	$F_P$	1.1166	0.9126	0.7473	0.4884	0.2819	0.1124	-.0207	-.1116	-.1557	-.1590

## A4.7 円筒内面の軸方向単独き裂のK値解 (Key=31、Xue-Ren Wuの重み関数解)

本節では Xue-Ren Wu の円筒内面の軸方向単独き裂の重み関数数値解 (RBF. 4)を用いた。算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.10 に示す。CANISのサブプログラムでは、 $\alpha \leq 0.6$  領域では一プル値を線形内挿し、 $0.6 < \alpha < 1.0$  領域ではテーブル値を放物線内外挿する。R/t に関しては、範囲内では線形内挿し、範囲外への外挿はしない。

表A4.10 円筒内面の軸方向単独き裂の無次元K値 (Xue-Ren Wuの重み関数解より算出)

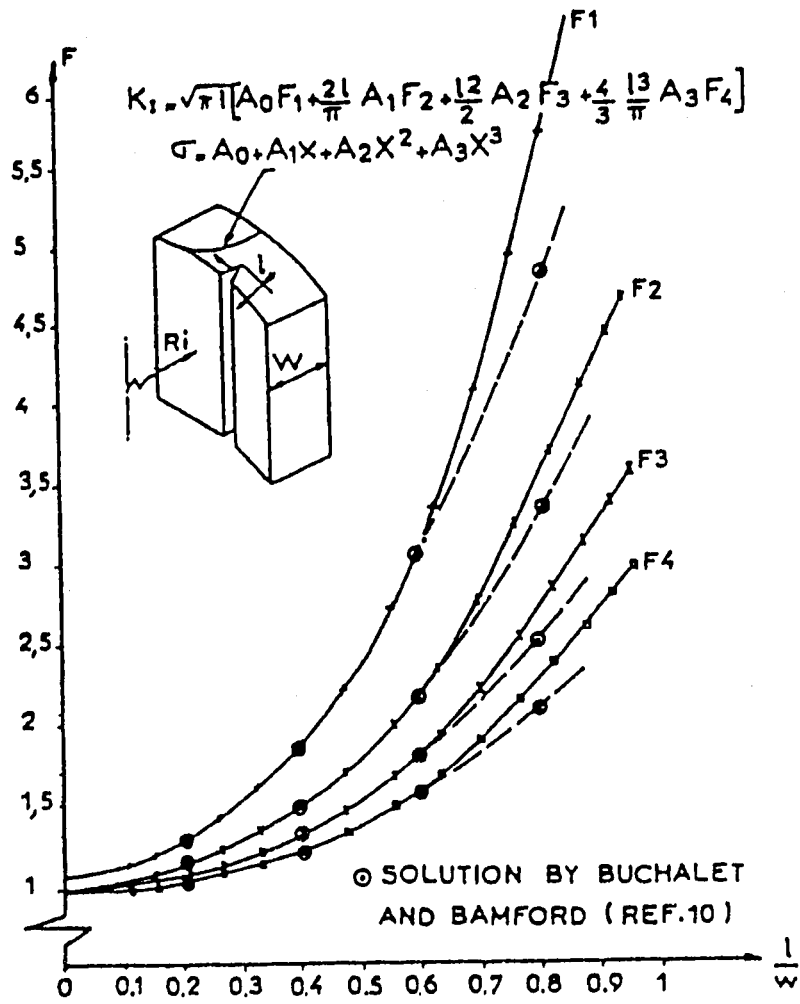
R/t ↓	a/t ⇒	0.001	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
4.0	$F_M$	1.1212	1.1302	1.1688	1.3038	1.5066	1.7828	2.1332	2.5492	3.0152	3.2587
	$F_B$	1.1198	1.0612	1.0277	1.0006	1.0054	1.0326	1.0700	1.0994	1.1006	1.0847
	$F_P$	1.1171	0.9312	0.7779	0.5308	0.3336	0.1736	0.0464	-.0482	-.1012	-.1055
2.0	$F_M$	1.1210	1.1198	1.1473	1.2473	1.3902	1.5694	1.7713	1.9893	2.2402	2.3852
	$F_B$	1.1196	1.0512	1.0079	0.9531	0.9158	0.8838	0.8417	0.7785	0.6960	0.6516
	$F_P$	1.1169	0.9219	0.7613	0.4983	0.2840	0.1110	-.0239	-.1197	-.1670	-.1648
1.3333	$F_M$	1.1208	1.1101	1.1269	1.1995	1.3012	1.4251	1.5647	1.7170	1.8953	2.0013
	$F_B$	1.1194	1.0419	0.9891	0.9127	0.8476	0.7829	0.7107	0.6240	0.5233	0.4703
	$F_P$	1.1167	0.9133	0.7454	0.4701	0.2469	0.0683	-.0649	-.1526	-.1879	-.1815
1.0	$F_M$	1.1205	1.1021	1.1076	1.1567	1.2323	1.3245	1.4298	1.5518	1.7064	1.8042
	$F_B$	1.1191	1.0342	0.9714	0.8765	0.7947	0.7131	0.6256	0.5298	0.4266	0.3636
	$F_P$	1.1164	0.9063	0.7304	0.4449	0.2180	0.0396	-.0912	-.1732	-.2016	-.1938

## A4.8 円筒内面の軸方向単独き裂のK値解 (Key=32、Labbensらの重み関数解)

Labbens らは円筒内面の軸方向単独き裂の重み関数数値解を求め、それを用いてき裂面に0~3次の圧力分布が作用する場合のK値を求めた (REF. 6、図A4.7参照)。図A4.7を読み取り (A4.32)式と (A4.33)式により算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.11 に示す。形状パラメータR/t = 10.0である。CANISのサブプログラムでは表A4.11を $\alpha$ に関し線形内外挿し、R/tは考慮しない。

表A4.11 円筒内面の軸方向単独き裂の無次元K値 (Labbensらの重み関数解より算出)

a/t ⇒	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8
$F_M$	1.120	1.150	1.330	1.970	3.170	4.270	5.600
$F_B$	1.120	1.001	1.057	1.194	1.433	1.710	1.926
$F_P$	1.120	0.768	0.602	0.252	0.032	-0.057	-0.146



図A4.7 Labbensらの軸方向無限き裂K値解 (R/t=10.0)

## A4.9 円筒外面の環状き裂のK値解 (Key=40、Xue-Ren Wu の重み関数解)

本節では Xue-Ren Wu の円筒外面の環状き裂の重み関数数値解 (REF. 4)を用いた。形状パラメータは  $R/R_0 = 0.7, 0.8, 0.9$  ( $R/t = 2.33, 4.0, 9.0$ )、 $\alpha \leq 0.6$  である。算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.12 に示す。CANIS のサブプログラムでは、 $\alpha \leq 0.4$  領域では一歩値を線形内挿し、 $0.4 < \alpha < 1.0$  領域ではテーブル値を放物線内外挿する。 $R/t$  に関しては、範囲内では線形内挿し、範囲外への外挿はしない。

表A4.12 円筒外面の環状き裂の無次元K値 (Xue-Ren Wu の重み関数解より算出)

$R/t \downarrow$	$a/t \Rightarrow$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
9.0	$F_M$	1.1248	1.1408	1.1735	1.2846	1.4425	1.6406	1.8782	2.1529
	$F_B$	1.1110	1.0714	1.0320	0.9844	0.9561	0.9328	0.9072	0.8673
	$F_P$	1.0838	0.9405	0.7815	0.5193	0.3065	0.1309	-0.0065	-0.1055
4.0	$F_M$	1.1245	1.1399	1.1692	1.2608	1.4842	1.5328	1.7090	1.9179
	$F_B$	1.1107	1.0705	1.0281	0.9642	0.9112	0.8572	0.7988	0.7321
	$F_P$	1.0836	0.9397	0.7782	0.5056	0.2817	0.0985	-0.0421	-0.1365
2.3333	$F_M$	1.1241	1.1394	1.1680	1.2471	1.3498	1.4752	1.6268	1.8180
	$F_B$	1.1104	1.0700	1.0270	0.9527	0.8846	0.8166	0.7458	0.6718
	$F_P$	1.0831	0.9394	0.7774	0.4978	0.2666	0.0805	-0.0600	-0.1536

## A4.10 円筒外面の軸方向無限き裂対のK値解 (Key=50、Xue-Ren Wuの重み関数解)

Xue-Ren Wu は円筒外面の軸方向無限き裂の重み関数数値解を求めた (REF. 4)。形状パラメータは  $R_0/R=1.25, 1.5, 1.75, 2.0, \sim 10.0$ 、 $\alpha \leq 0.75$  である。一般に単独き裂の場合よりも2個のき裂が  $180^\circ$  離れて対を成す方がK値が大きくなる。本節では2個のき裂対とし、 $R_0/R$ については最初の4ケース、即ち  $R/t=4.0, 2.0, 1.33, 1.0$  を採用した。

Xue-Ren Wu の重み関数を用いて算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.13 に示す。CANISのサブプログラムでは、 $\alpha \leq 0.6$  領域ではテーブル値を線形内挿し、 $0.6 < \alpha < 1.0$  領域ではテーブル値を放物線内外挿する。 $R/t \geq 4.0$  では  $R/t=4.0$  のデータを使用し、 $R/t \leq 1.0$  では  $R/t=1.0$  のデータを使用し、 $1.0 < R/t < 4.0$  ではテーブル値を  $R/t$  に関して線形内挿する。 $R/t$  に関しては範囲外への外挿はしない。

表A4.13 円筒外面の軸方向無限き裂対の無次元K値 (Xue-Ren Wuの重み関数解より算出)

R/t ↓	a/t ⇒	0.001	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
4.0	$F_M$	1.1216	1.1434	1.1834	1.3395	1.5697	1.8947	2.3457	2.9544	3.7273	4.1619
	$F_B$	1.1202	1.0744	1.0468	1.0325	1.0563	1.1121	1.2017	1.3214	1.4473	1.4979
	$F_P$	1.1175	0.9443	0.7959	0.5559	0.3653	0.2087	0.0831	-.0120	-.0737	-.0861
2.0	$F_M$	1.1217	1.1469	1.1887	1.3222	1.5139	1.7665	2.0921	2.4907	2.9412	3.1814
	$F_B$	1.1203	1.0777	1.0470	1.0180	1.0135	1.0227	1.0419	1.0591	1.0490	1.0254
	$F_P$	1.1176	0.9474	0.7961	0.5461	0.3420	0.1711	0.0341	-.0665	-.1248	-.1354
1.3333	$F_M$	1.1218	1.1489	1.1887	1.3092	1.4748	1.6816	1.9349	2.2308	2.5521	2.7228
	$F_B$	1.1203	1.0797	1.0470	1.0070	0.9834	0.9634	0.9429	0.9118	0.8525	0.8068
	$F_P$	1.1176	0.9491	0.7961	0.5384	0.3254	0.1462	0.0041	-.0972	-.1497	-.1566
1.0	$F_M$	1.1221	1.1517	1.1916	1.3013	1.4451	1.6209	1.8299	2.0656	2.3182	2.4567
	$F_B$	1.1207	1.0824	1.0497	1.0003	0.9603	0.9209	0.8767	0.8188	0.7342	0.6789
	$F_P$	1.1180	0.9516	0.7983	0.5337	0.3122	0.1281	-.0163	-.1160	-.1646	-.1701

## A4.11 円筒外面の軸方向無限単独き裂のK値解 (Key=51、Xue-Ren Wuの重み関数解)

本節では Xue-Ren Wu の円筒外面の軸方向無限単独き裂の重み関数数値解 (RBF, 4) を用いた。形状パラメータは  $R_0/R=1.25, 1.33, 1.5, 1.75, 2.0, \sim 10.0$ 、 $\alpha \leq 0.75$  である。  $R_0/R$  は最初の 5 ケース、即ち  $R/t=4.0, 3.0, 2.0, 1.33, 1.0$  を採用した。算出した無次元K値解  $F_M$ 、 $F_B$ 、 $F_P$  を表A4.14 に示す。CANISのサブプログラムでは、 $\alpha \leq 0.6$  領域ではテーブル値を線形内挿し、 $0.6 < \alpha < 1.0$  領域ではテーブル値を放物線内外挿する。  $R/t$  に関しては、範囲内では線形内挿し、範囲外への外挿はしない。

表A4.14 円筒外面の軸方向無限単独き裂の無次元K値 (Xue-Ren Wuの重み関数解より算出)

R/t ↓	a/t ⇒	0.001	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75
4.0	$F_M$	1.1216	1.1428	1.1873	1.3263	1.5372	1.8314	2.2205	2.7281	3.3653	3.7051
	$F_B$	1.1202	1.0738	1.0458	1.0215	1.0310	1.0682	1.1233	1.1913	1.2633	1.2851
	$F_P$	1.1175	0.9438	0.7951	0.5486	0.3509	0.1910	0.0599	-0.0415	-0.0967	-0.1031
3.0	$F_M$	1.1221	1.1493	1.1892	1.3132	1.5047	1.7688	2.1083	2.5257	3.0271	3.3024*
	$F_B$	1.1207	1.0800	1.0475	1.0100	1.0057	1.0238	1.0525	1.0777	1.0873	1.0762*
	$F_P$	1.1180	0.9495	0.7964	0.5398	0.3366	0.1710	0.0377	-0.0639	-0.1247	-0.1332*
2.0	$F_M$	1.1217	1.1455	1.1856	1.3049	1.4742	1.6979	1.9773	2.3086	2.7025	2.9431
	$F_B$	1.1203	1.0764	1.0442	1.0033	0.9826	0.9747	0.9701	0.9554	0.9203	0.8971
	$F_P$	1.1176	0.9461	0.7938	0.5357	0.3244	0.1511	0.0129	-0.0884	-0.1493	-0.1601
1.3333	$F_M$	1.1217	1.1465	1.1855	1.2930	1.4390	1.6261	1.8540	2.1288	2.4735	2.6825
	$F_B$	1.1203	1.0774	1.0441	0.9934	0.9554	0.9245	0.8918	0.8512	0.8033	0.7781
	$F_P$	1.1176	0.9470	0.7937	0.5291	0.3091	0.1297	-0.0120	-0.1128	-0.1647	-0.1675
1.0	$F_M$	1.1218	1.1491	1.1854	1.2838	1.4160	1.5826	1.7862	2.0333	2.3450	2.5420
	$F_B$	1.1204	1.0799	1.0440	0.9856	0.9378	0.8940	0.8486	0.7971	0.7378	0.7068
	$F_P$	1.1177	0.9493	0.7936	0.5237	0.2996	0.1166	-0.0258	-0.1243	-0.1738	-0.1778

\*  $R/t=3.0, a/t=0.75$  のみは関数fittingにより算出した。

## A2.12 付録4の参考文献

- REF.1 岡村弘之、線形破壊力学入門、培風館、1976.
- REF.2 H. J. Petroski and J. D. Achenbach, Computation of the weight function from a stress intensity factor, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, 1978, P. 257-266.
- REF.3 H. F. Bueckner, Methods of Analysis of Crack Problems, Chapter. V, G. C. Sih edited, Noordhoff International Publishing, Leyden, The Netherlands, 1973.
- REF.4 Xue-Ren Wu and A. Janne Carlsson, Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions, PERGAMON PRESS, 1991, ISBN 0-08-041702-7
- REF.5 植田正弘他、熱疲労き裂進展挙動の破壊力学的検討、PNC-SN-941-81-104, 1981.
- REF.6 R. Labbens et al., Practical Method for Calculating Stress-Intensity Factors Through Weight Functions, ASTM STP 590, 1976, P. 368-384.

## 付録5 貫通き裂K値解のライブラリ

貫通き裂については曲げおよびピーク応力の作用は無視できるものとする。長さ  $2b$  の貫通き裂の長さ方向の応力拡大係数が、無次元K値解  $F_M$  を用いて次式で与えられるものとする。

$$K_B = \sigma_M F_M (\pi b)^{1/2}$$

## A5.1 平板中央の貫通き裂 (Key=10)

中央に貫通き裂を有する平板のK値解は次式が良く知られている(REF. 1)。

$$\xi = b/W \text{ として} \quad F_M = \{\sec(\pi \xi / 2)\}^{1/2} \quad (\text{A5.1})$$

適用範囲は  $\xi < 1$  である。

## A5.2 円筒周方向断面の貫通き裂 (軸引張、Key=20、40)

Zahoor(REF. 2) は円筒の周方向貫通き裂の軸引張  $F$  に対する SandersのK値解(REF. 3) を関数近似し、次式を与えている。形状パラメータ  $A$  を

$$A = \{ 0.125 (R_m / t) - 0.25 \}^{0.25} \quad \text{for } 5 \leq R_m / t \leq 10 \quad (\text{A5.2a})$$

$$A = \{ 0.4 (R_m / t) - 3.0 \}^{0.25} \quad \text{for } 10 < R_m / t \leq 20 \quad (\text{A5.2b})$$

として、 $\sigma_M = F / (2 \pi R_m t)$  に対して

$$F_M = 1 + A (5.3303 \xi^{1.5} + 18.773 \xi^{4.24}) \quad (\text{A5.3})$$

ここに  $R_m = R + t/2$  は平均半径、 $\xi$  は円周長に対する相対き裂長さであり次式で与えられる。

$$\xi = b \text{ (内面基準)} / (\pi R) \text{、又は} \quad \xi = b \text{ (外面基準)} / (\pi R_o) \quad (\text{A5.4})$$

適用範囲は  $\xi \leq 0.55$  である。

## A5.3 円筒周方向断面の貫通き裂 (軸曲げ、Key=21、41)

Zahoor(REF. 2) は円筒の周方向貫通き裂の軸曲げモーメント  $M$  に対する SandersのK値解(REF. 3) を関数近似し、次式を与えている。(A5.2)式の  $A$  および(A5.4)式の  $\xi$  を用いて、

$$\sigma_M = M / (\pi R_m^2 t) \text{ に対して} \\ F_M = 1 + A (4.5967 \xi^{1.5} + 2.6422 \xi^{4.24}) \quad (\text{A5.5})$$

適用範囲は  $\xi \leq 0.55$  である。

## A5.4 円筒軸方向断面の貫通き裂 (Key=30、50)

Tada-Paris(REF. 4) は内圧を受ける円筒の軸方向貫通き裂に対して、Erdogan のK値解(REF. 5) やその他のK値解を関数近似して次式を与えている。形状パラメータを

$$\lambda = b / (R_m t)^{1/2} \quad (\text{A5.6})$$

として、

$$F_M = (1 + 1.25 \lambda^2)^{1/2} \quad \text{for } 0 < \lambda \leq 1 \quad (\text{A5.7a})$$

$$F_M = 0.6 + 0.9 \lambda \quad \text{for } 1 < \lambda \leq 5 \quad (\text{A5.7b})$$



A5.5 付録5の参考文献

REF.1 岡村弘之、線形破壊力学入門、倍風館、1976.

REF.2 A. Zahoor, Closed Form Expressions for Fracture Mechanics Analysis of Cracked Pipes,  
J. of PVT, Vol. 107, PP. 203-205, 1985.

REF.3 J. L. Sanders, Jr., Circumferential Through-Crack in a Cylindrical Shell Under Combined  
Bending and Tension, ASME J. of Applied Mech., Vol. 50, No. 1, P. 221, 1983.

REF.4 P. C. Paris, H. Tada, The Application of Fracture Proof Design Methods Using Tearing  
Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through Wall Cracks,  
NUREG/CR-3464, Section II -1, 1983.