

JAERI-Data/Code
95-015



非線形破壊力学簡易解析手法に基づく圧力容器
健全性解析プログラムの開発と例題解析

1995年11月

柴田勝之・磯崎敏邦・山崎 隆*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

非線形破壊力学簡易解析手法に基づく圧力
容器健全性解析プログラムの開発と例題解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
柴田 勝之・磯崎 敏邦・山崎 隆*

(1995年10月2日受理)

高経年軽水炉の安全性を確保する上で、原子炉圧力容器の健全性に係わる課題は最も重要なものの一つである。PWR原子炉圧力容器に対する最過酷事象とされる加圧熱衝撃(PTS)下においても、十分な安全余裕を確保できるよう圧力容器の健全性を厳しく管理していく必要がある。

この観点から、圧力容器寿命に与えるPTS事象の影響評価に関する研究を実施している。この研究では、非線形破壊力学を適用した亀裂進展解析により加圧熱衝撃下での安全余裕の評価を従来より高精度で行うことをめざしている。

一方、非線形破壊力学による亀裂進展解析を行う一手法としてR6法やEPRI-GE法等の簡易解析法が開発され適用性が検討されている。これらの手法は、有限要素法による詳細解析に比べ、計算が簡単で感度解析等に適するという利点がある。そこで、高経年圧力容器の加圧熱衝撃下の健全性評価に簡易法に基づく非線形破壊力学解析を適用するため簡易解析プログラムを開発した。本報告書は開発した簡易解析プログラムの解説と例題解析結果についてとりまとめた。

Development of a Simplified Non-linear Fracture Mechanics Analysis Program
for Evaluating Pressure Vessel Integrity and Results of Sample Analyses

Katsuyuki SHIBATA, Toshikuni ISOZAKI and Takashi YAMAZAKI*

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 2, 1995)

The subject which is concerned in the reactor pressure vessel(RPV) integrity is one of the key issue to attain the safety of an aged light water reactor plant. In order to secure the sufficient safety margin under the PTS event, which is considered to cause the most severe load to the RPV, the integrity of the aged pressure vessel has to be maintained stringently through its life.

To determine an accurate safety margin of the aged RPV, the applicability of non-linear fracture mechanics in which the crack extension analyses are involved have been studied. In this study, the simplified non-linear fracture mechanics analysis methodologies of R6 and EPRI-GE are to be applied to the integrity analysis of the RPV under PTS in addition to the detailed analysis by FEM.

This report describes the computer program of R6 and EPRI-GE methods developed for the simplified non-linear fracture mechanics analyses on the reactor pressure vessel integrity and the results of sample analyses.

Keywords: EPFM, Crack Extension, R6 Method, EPRI-GE Method, PTS, Structural Integrity,
Reactor Pressure Vessel

* Kanazawa Computer Service Corporation

目 次

1. まえがき	1
2. R 6 法による健全性解析法の概要と解析手順	3
2. 1 R 6 法の概要	3
2. 2 塑性崩壊パラメータ L_r の算出法に関する検討	3
2. 3 R 6 法による亀裂進展解析手順	4
3. E P R I - G E 法による健全性解析法の概要と解析手順	7
3. 1 E P R I - G E 法の概要	7
3. 2 E P R I - G E 法による亀裂進展解析手順	7
4. プログラムの使用法	8
4. 1 プログラムの概要	8
4. 2 入力データ	8
4. 3 出力データ	9
5. 例題解析 1 : MPA NKS-3 加圧熱衝撃試験解析	10
5. 1 MPA NKS-3 実験の概要	10
5. 2 入力データ	10
5. 3 解析結果	11
6. 例題解析 2 : 回転円筒試験体の加圧熱衝撃試験解析	12
6. 1 N E S C 計画における回転円筒試験体の加圧熱衝撃実験の概要	12
6. 2 入力データ	12
6. 3 解析結果	13
7. 結 言	13
参考文献	14
付録 1 入力データ例: MPA NKS-3 実験のR 6 法解析	49
付録 2 プログラムの解説	52

Contents

1. Introduction	1
2. Integrity Evaluation Procedure by R6 Method	3
2. 1 Outline of R6 Method	3
2. 2 Consideration of Plastic Collapse Parameter Lr	3
2. 3 Procedure of Crack Extension Analysis	4
3. Integrity Evaluation Procedure by EPRI-GE Method	7
3. 1 Outline of EPRI-GE Method	7
3. 2 Procedure of Crack Extension Analysis	7
4. Description of the Program	8
4. 1 Outline of the Program	8
4. 2 Input Data	8
4. 3 Output Data	9
5. Sample Analysis 1: Analysis of MPA-NKS-3 PTS Experiment	10
5. 1 Outline of MPA-NKS-3 Experiment	10
5. 2 Input Data	10
5. 3 Results of Analysis	11
6. Sample Analysis 2: Analysis of Spinning Cylinder PTS Experiment	12
6. 1 Outline of Spinning Cylinder Experiment	12
6. 2 Input Data	12
6. 3 Results of Analysis	13
7. Concluding Remarks	13
References	14
Appendix 1 Example of Input Data: Analysis of NKS-3 Experiment by R6 Method	
Option-1	49
Appendix 2 Instruction of the Program	52

図表リスト

- Table 3.1 EPRI-GE 法の h_1 関数の数表
- Table 4.1 解析モデルの種類とモデル番号
- Table 4.2 データ入力方法
- Table 5.1 NKS-3 試験体材料の20°C～320 °Cの降伏点および弾性係数
- Table 5.2 NKS-3 試験体の膜応力および熱応力の時刻歴
- Table 5.3 R 6 法による亀裂進展解析結果の数値出力
- Table 5.4 EPRI-GE 法による亀裂進展解析結果の数値出力
- Table 6.1 回転円筒試験体の形状データおよび材料データ
- Table 6.2 回転円筒試験体の膜応力および熱応力分布の時刻歴
- Table 6.3 回転円筒試験体の試験体温度分布時刻歴
- Fig. 2.1 R 6 法による破壊評価の概念
- Fig. 2.2 塑性崩壊荷重パラメータ $L r_{app}$ に関する検討
- Fig. 2.3 塑性崩壊荷重パラメータ $L r_{app}$ の算出式
- Fig. 2.4 片側亀裂平板モデルおよび半梢円亀裂平板モデルの $K r_{app}$ の算出式
- Fig. 3.1 J積分抵抗曲線に基づく破壊評価の概念
- Fig. 4.1 解析の流れ
- Fig. 4.2 亀裂付き圧力容器のモデル化
- Fig. 4.3 R 6 法の解析の流れ
- Fig. 4.4 EPRI-GE 法の解析の流れ
- Fig. 5.1 MPA のNKS-3 実験試験体形状
- Fig. 5.2 20°C および 320 °C の応力-歪線図
- Fig. 5.3 160 °C および 220 °C のJ- Δa 曲線
- Fig. 5.4 $t=0 \sim 1800\text{sec}$ の温度分布の変化
- Fig. 5.5 $t=0 \sim 1800\text{sec}$ の負荷応力時刻歴
- Fig. 5.6 R6法による解析結果の破壊評価線図
- Fig. 5.7 EPRI-GE 法による亀裂進展解析結果
- Fig. 5.8 亀裂進展解析結果の比較
- Fig. 6.1 NESG計画で使用される回転円筒試験体形状
- Fig. 6.2 回転円筒試験体のR6法解析用応力分布のモデル化
- Fig. 6.3 $t=0 \sim 1000\text{sec}$ の温度分布の変化
- Fig. 6.4 Case 1.1 (1500 rpm) の R 6 法解析結果
- Fig. 6.5 Case 1.1 (1500 rpm) の K_r と負荷係数1/Sfの時間変化
- Fig. 6.6 回転円筒試験体の破壊解析線図($a=20\text{mm}$)
- Fig. 6.7 回転円筒試験体の破壊解析線図($a=50\text{mm}$)
- Fig. 6.8 回転円筒試験体の破壊解析線図($a=100\text{mm}$)

記号表

- a : 亀裂深さ
 a_{eff} : 塑性域補正した亀裂深さ
 b : 亀裂半長
 J_{app} : 負荷 J 積分値
 K : 応力拡大係数
 n : Ramberg-Osgood則の指数
 P : 荷重
 W : 板幅
 M : 曲げモーメント
 E : 弹性係数
 K_r : R6法における塑性崩壊パラメータ
 L_r : R6法における破壊力学パラメータ
 Sf : 安全率
 $J(\Delta a)$: J 積分破壊抵抗曲線
 T : 温度
 t : 時刻
 K : 応力拡大係数
 K_{IC} : 材料の破壊靱性
 L : 負荷荷重
 L_c : 塑性崩壊荷重
 h : 矩形梁の高さ
 α : Ramberg-Osgood則の係数
 σ_u : 引張り強さ
 σ_y : 降伏強さ
 σ_m : 膜応力
 σ_b : 曲げ応力
 σ_t : 热応力
 σ_f : 流動応力
 ε_0 : Ramberg-Osgood則の参照歪 (通常, $\sigma_0 = E \varepsilon_0 = \sigma_y$)
 σ_0 : Ramberg-Osgood則の参照応力
 σ_{net} : 実断面応力

1. まえがき

原子炉圧力容器は、その破壊が炉心溶融事故に直接つながることから、プラントの安全性を確保する上で構造健全性を維持していくことが極めて重要な機器である。国の設計・製造、維持管理に係わる指針・基準等において最も重要な機器として位置づけられ、設計から供用期間中の維持・管理に至るあらゆる段階で健全性が維持できるよう厳重な注意が払われる。また、交換が極めて困難な機器の一つであることから、原子力プラントの寿命を支配する機器とされている。

今日、軽水炉時代の長期化が予測され、軽水炉の安全性を確保していくため高経年化問題が重要課題になっている。この課題の中で、高経年圧力容器については特に健全性を確認しておく必要がある。高経年圧力容器の健全性は、運転期間中に予測される経年変化を評価し、最も厳しい想定事象下においても十分な安全余裕を確保できることを示すことにより検討される。安全余裕は、工学的に十分妥当性のある手法により評価する必要がある。健全性を評価した結果、予定運転期間にわたって健全性が保証できない場合、適当な時期に、交換、補修、運転予定変更、廃炉といった適切な処置が必要となる。

加圧熱衝撃 (PTS : Pressurized Thermal Shock)は、長期間使用し、高速中性子により照射脆化を受けたPWR 原子炉容器における最過酷事象とされており、PWR 原子炉容器寿命を評価する上で最も重要な事象である。米国では、PWRの認可運転期間の更新に関するモデルプラントとしてヤンキーロー原発の評価・解析ケーススタディが行われたが、照射脆化により上部棚エネルギーが低下した圧力容器の PTS 評価におけるECCS水注入条件に関して NRCとの見解が対立したことが一因で寿命延長が断念された事例がある。これは加圧熱衝撃問題がプラントの寿命を支配した事例として挙げられる。

我が国の PWRは、圧力容器鋼材の不純物含有量が低いとされており、欧米ほど加圧熱衝撃問題が深刻ではないが、今後、初期のPWR の安全な稼働を期すとともに、供用期間を長期化した場合でも圧力容器の健全性を保証するためには、照射脆化予測の信頼性を高めることと PTS 事象下での安全余裕を正確に把握しておくことが重要である。

現在、加圧熱衝撃事象下の圧力容器の健全性評価を規定した日本電気協会技術規定¹⁾では、線形破壊力学に基づく解析法が採用されている。一方今日、非線形破壊力学解析法の研究が進展し、亀裂進展を含む詳細な解析が構造健全性解析法として注目されている。また、FALSIRE 計画²⁾や NESC計画³⁾において大型構造物の健全性評価への非線形破壊力学解析法の適用性検討が国際的に進められている。非線形破壊力学手法では、材料の亀裂進展抵抗曲線と負荷条件により亀裂進展解析が可能である。亀裂進展を含む非線形破壊力学解析法を圧力容器の健全性解析に適用し、亀裂進展による材料の抵抗増加、板厚方向への脆化勾配、板厚方向温度分布等を考慮して加圧熱衝撃下の健全性を詳細に評価することにより、安全余裕をより高精度に評価できる可能性がある。

このような観点から、原研では原子炉の構造安全性に係わる研究の一環として、加圧水型原子炉容器寿命への加圧熱衝撃 (PTS) の影響評価に関する研究を実施し、非線形破壊力学を適用

した亀裂進展解析により加圧熱衝撃下での安全余裕を従来より高精度で評価することをめざしている⁴⁾。

上記の非線形破壊力学解析手法には有限要素法による解析と簡易式による評価がある。有限要素法は適用性に一般性があるが、その都度膨大な入力データの準備と繁雑な計算を要し、さらに、結果の誤差評価が難しい。一方、簡易法は、形状や負荷を単純化して適用するので誤差もあるが感度解析等に適している。代表的な非線形解析の簡易法として、R 6 法⁵⁾とEPRI-GE 法⁶⁾が挙げられる。R 6 法は、英国のCEGB（現在 Nuclear Electronics）バークレイ研究所で開発された方法であり、非延性破壊基準（K_{IC}基準）と塑性崩壊破壊基準の両方を適用することにより非延性破壊から塑性崩壊にいたる広範な破壊条件に適用できることが特徴である。別名2パラメータ法と呼ばれ、英国の評価基準や、ASME Code Sec. XIの炭素鋼配管の評価基準（IWB3640）にすでに採用されている。

EPRI-GE 法は、German and Kumer⁶⁾によって開発された簡易 J 積分評価に基づいている。この方法では、Ramberg-Osgood則が適用できる材料について全歪理論に基づく J 積分を、Ramberg-Osgood則パラメタと代表的構造物形状について無次元化した有限要素法解析を行い、テーブル化して種々の材料、幾何形状、負荷条件の J 積分値を求める方法である。

高経年圧力容器の加圧熱衝撃下の健全性評価に亀裂進展を含む簡易非線形破壊力学解析法を適用するため非線形破壊力学簡易解析プログラムを開発し、さらに、例題解析として、ドイツ、シュツットガルト大学材料工学研究所(Materialprüfungsanstalt, MPA) のPTS 実験結果²⁾とNESC(Network for Evaluating Steel Components) 計画³⁾で実施を予定している回転円筒試験体(SC-7) 熱衝撃試験のパラメータ解析を行った。本報告書では、開発した簡易解析プログラムと例題解析結果についてとりまとめた。

2. R 6 法による健全性解析法の概要と解析手順

2. 1 R 6 法の概要

R 6 法は、英国の中央電力公社 C E G B (Central Electricity Generating Board, 現在 N E : Nuclear Electronics) が開発した構造機器の健全性評価手法であり、CEGBレポート R/H/6-Rev. 3⁵⁾ に詳述されている。非延性破壊基準 (K_{IC} 基準) と塑性崩壊破壊基準 (実断面応力基準) の両方を包絡するよう破壊条件 (破壊評価線図) を定めることにより、非延性破壊から塑性崩壊にいたる広範な破壊モードに適用できることが特徴であり、別名 2 パラメータ法と呼ばれている。Fig. 2.1 に R 6 法による破壊評価の概念を示す。図に示すように、負荷応力と亀裂寸法で決まる応力拡大係数を無次元化した破壊力学パラメータ Kr_{app} (縦軸の負荷パラメータ) と塑性崩壊パラメタ Lr_{app} の座標が材料の破壊評価線図 (FAD: Failure Assessment Diagram, 材料破壊抵抗曲線) の内側が非破壊領域、外側が破壊領域である。破壊条件が K_{IC} 基準の場合は、縦軸上の $Kr = 1.0$ ($K_{app} = K_{IC}$) で破壊が生じ、塑性崩壊の場合は横軸の塑性崩壊パラメータが一定値 (1.0 ~ 2.0 : 通常、流動応力) に達したときに破壊が生じる。破壊評価線図 FAD はこの 2 点を結ぶ破壊発生条件の Kr , Lr 値の軌跡として定義される。

構造物の負荷の増加とともに荷重点は FAD に近づき、荷重点が FAD に交わる点で亀裂が進展を開始する。さらに荷重を増加すると、FAD に沿って亀裂が進展し破壊が進行する。

負荷パラメータ Kr と Lr は次式で現される。

$$Kr_{app} = K/K_{IC}$$

$$Lr_{app} = L/L_c$$

ここで、 K は負荷荷重、 L_c は塑性崩壊荷重である。曲げ応力と膜応力の組合せの場合、 L と Lr は組合せ荷重のもとでの破壊条件により算出する必要がある (次節、2. 2 で詳細検討する)。

FAD には、3 種のオプションが準備されている。オプション 1 は、安全側に定められた線図であり、 Kr と Lr のみで表される。オプション 2 は、材料の応力 - 歪線図に基づいて決定される。オプション 3 は材料の J 積分破壊抵抗曲線から定められる。詳細については後述する。

開発したプログラムではオプション 1 またはオプション 2 を採用し、選択できるようにした。

2. 2 塑性崩壊パラメータ Lr の算出法に関する検討

塑性崩壊荷重パラメータ Lr は負荷荷重と亀裂断面が塑性崩壊する荷重の比として定義される。荷重が引張り荷重単独あるいは曲げ荷重単独の場合は、それぞれ、引張り荷重による塑性崩壊荷重または曲げ荷重による塑性崩壊荷重との比により求めることができる。しかし、引張りと曲げが同時に負荷される場合は、組合せ荷重と組合せ荷重のもとでの塑性崩壊荷重との比が塑性崩壊パラメータ Lr となる。文献 [5] には、この様な組合せ荷重下の Lr 計算式が記載されてはいるがその根拠が十分に説明されていない。そこで、以下に引張りと曲げが同時に負荷される場合の Lr

の算出法を詳細に検討する。

Fig. 2.2 に示す膜応力 σ_m と曲げ応力 σ_b が負荷されている片側亀裂付き平板（遠方でピン支持）を考える。亀裂断面の塑性崩壊条件は、亀裂断面と遠方応力の平衡条件から次式で与えられる。

$$\begin{aligned} -\sigma_b \cdot hW^2 / 6 &= \int_{-W/2}^{W/2} \sigma_z \, dA = \int_{-W/2+a}^e \sigma_y \cdot hy \, dy - \int_e^{W/2} \sigma_y \cdot hy \, dy \\ &= h \sigma_y (e^2 + W^2 / 4 + Wa/2 - a^2 / 2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 e は軸方向（z 方向）の荷重の平衡条件から $e = (W\sigma_m / \sigma_y + a) / 2$ で与えられる。

(1) 式を整理し、次式が得られる。

$$\sigma_b / \sigma_y = 2[-(\sigma_m / \sigma_y)^2 - (\sigma_m / \sigma_y)(2a/W) + (1-a/W)^2] / 3 \quad (2)$$

σ_b と σ_m が(2) 式を満たすとき、片側亀裂付き平板の亀裂断面において塑性崩壊が生じることになる。すなわち、(2) 式は組合せ荷重のもとでの塑性崩壊曲線を表す。Fig. 2.2 に示すように、負荷応力を σ_{ma} , σ_{ba} とし、原点と $(\sigma_{ma}, \sigma_{ba})$ を通る直線と(2) 式の塑性崩壊曲線との交点の膜応力を σ_{mc} , 曲げ応力を σ_{bc} とすると、 Lr は以下のように表される。

$$\begin{aligned} Lr &= \sigma_{ma} / \sigma_{mc} = \sigma_{ba} / \sigma_{bc} \\ &= 2(\sigma_{ma}^2 / \sigma_y) / [-A + \{A^2 + 4(1-a/W)^2 \cdot \sigma_{ma}^2\}^{1/2}] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $A = 2\sigma_{ba}/3 + 2a\sigma_{ma}/W$ である。

以上から分かるように、一般に多数の荷重 $P_{1a}, P_{2a}, \dots, P_{na}$ が同時に負荷される場合は、塑性崩壊曲面が存在するとして、原点と荷重点 $(P_{1a}, P_{2a}, \dots, P_{na})$ を通る直線と塑性崩壊曲面との交点 $(P_{1c}, P_{2c}, \dots, P_{nc})$ により以下のように Lr が算出できる。

$$Lr = P_{1a} / P_{1c} = P_{2a} / P_{2c} = \dots = P_{na} / P_{nc} \quad (4)$$

以上の Lr は片側亀裂付き平板の場合であるが、半楕円亀裂の場合は理論的に算出できない。A. Willoughby 等⁷⁾ は、半楕円亀裂を等価な片側亀裂に換算する次の経験式を提案しており、これを用いて半楕円亀裂の Lr を算出することにする。

$$a_{eff} = \pi ab / (4b + 2W) \quad (5)$$

2. 3 R6 法による亀裂進展解析手順

時刻 $t = t_i$ において、膜応力 $\sigma_m(t_i)$ 、曲げ応力 $\sigma_b(t_i)$ 、温度分布 $T(x, t_i)$ (x は深さ方向の位置) として、前のステップまでの亀裂進展量 Δa 、および前のステップまでの亀裂深さ a を

用い、以下の解析により時間 $t=t_i$ における各パラメータを求める。

1) 亀裂先端の温度、材料特性の計算

入力した温度分布データから内挿により亀裂先端温度 $T(X=a, t_i)$ を求め、この温度における下記の材料特性を入力材料データから内挿により求める。

- J- Δa 曲線
- 応力-歪曲線
- 引張り強さ、 σ_u
- 降伏強さ、 σ_y

以下、上記の亀裂先端温度の材料データを用いて $t=t_i$ の解析を進める。

2) 亀裂先端の材料破壊抵抗曲線 (FAD: $Kr_{mat} - Lr_{mat}$ 曲線) の計算

R 6 法における材料破壊抵抗曲線 $Kr_{mat} - Lr_{mat}$ には前述のように 3 種のオプションが準備されているが、ここでは以下に示すオプション 1 とオプション 2 の 2 種の曲線を使用する。

(1) O P. 1 :

$$Kr_{mat} = \begin{cases} (1-0.14Lr_{mat}^{-2}) [0.3+0.7\exp(-0.65Lr_{mat}^{-6})], & Lr_{mat} < 1.15 \text{ のとき} \\ 0.0, & Lr_{mat} \geq 1.15 \text{ のとき} \end{cases}$$

(2) O P. 2 :

$$Kr_{mat} = [E \varepsilon_{ref} / (Lr_{mat} \sigma_y + Lr_{mat}^{-3} \sigma_y / (2E \varepsilon_{ref}))]^{0.5}, \quad Lr_{mat} < 1.15 \text{ のとき}$$

$$Kr_{mat} = 0.0, \quad Lr_{mat} \geq 1.15 \text{ のとき}$$

ここで、 ε_{ref} は応力 $Lr_{mat} \sigma_y$ のときの真歪 ($= \ln(1+\varepsilon)$, ε : 工学歪)

$$Lr_{mat} = 1.0 \text{ のときは, } \varepsilon_{ref} = \sigma_y / E + 0.002$$

3) 負荷パラメータ Kr_{app} , Lr_{app} の計算

塑性崩壊パラメタ Lr_{app} および破壊力学パラメタ Kr_{app} を負荷条件から求める。

(1) Lr_{app} の求め方

Lr は次の 2 方法により求める。

1) 負荷応力 σ_m , σ_b を安全側に $\sigma_m + \sigma_b$ の一様引張り荷重として取り扱い次式を用いる。

半楕円亀裂の場合は(5) 式による補正を行う。

$$Lr = \sigma_{act} / \sigma_y = (\sigma_m + \sigma_b) W / (W-a) / \sigma_y$$

2) 片側亀裂について前出(3) 式により Lr を求める。半楕円亀裂の場合は(5) 式による補正を行う。以上の Lr 算出式を Fig. 2.3 にまとめた。

(2) Kr_{app} の求め方

Kr_{app} は次式により求める。

$$K_{r_{app}} = K/K_{rc} = K/[EJ(\Delta a)]^{1/2}$$

片側亀裂モデル⁸⁾および半梢円亀裂⁹⁾の応力拡大係数 K はFig. 2.4により計算する。なお、亀裂断面に熱応力が作用する場合は、熱応力を適切な曲げ応力にモデル化する。

4) 亀裂進展開始条件と安全率の計算*

1) および2)により得られた材料破壊抵抗曲線 ($K_{r_{mat}} - L_{r_{mat}}$) と、座標 ($K_{r_{app}}, L_{r_{app}}$) と原点とを結ぶ直線の交点 ($K_{rc} - L_{rc}$) を求める。

$K_{r_{app}} < K_{rc}$ ならば、荷重条件 ($K_{r_{app}}, L_{r_{app}}$) のもとでは亀裂進展しない。このとき亀裂進展までの荷重に対する安全率 S_f を次式により求める。

$$S_f = (K_{rc}^2 + L_{rc}^2)^{0.5} / (K_{r_{app}}^2 + L_{r_{app}}^2)^{0.5} \geq 1.0$$

つぎに、 $K_{r_{app}} > K_{rc}$ ならば亀裂進展しているので5)以下の解析を進める。

5) 亀裂進展解析

(1) 板厚方向への微小量の亀裂進展 da および表面方向への微小量の亀裂進展 $db = da b_0 / a_0$ を仮定する。

$a=a+da, b=b+db$ として新たな亀裂寸法に対応する $K_{r_{app}}, L_{r_{app}}$ を求める。ただし、

$$K_{app} = K/[EJ(\Delta a)]^{1/2}$$

とする。ここで、 Δa は、 $t=0$ sec からの亀裂進展量の積算であり、

$$\Delta a = a - a_0 + \sum (da_i)$$

とする。

(2) 負荷の座標 ($K_{r_{app}}, L_{r_{app}}$) と原点とを結ぶ直線と材料破壊抵抗曲線 ($K_{r_{mat}} - L_{r_{mat}}$ 曲線)との交点 ($K_{rc} - L_{rc}$) を求める

(3) $K_{r_{app}} > K_{rc}$ ならば(1)にもどる。

(4) $K_{r_{app}} < K_{rc}$ になるまで(1), (2)の手順を繰返し、内挿により $K_{r_{app}} = K_{rc}$ となる亀裂寸法、 $K_{r_{app}}, L_{r_{app}}$ を求める。これが、このステップ $t=t_i$ での亀裂進展解析結果である。

* R6法では、余裕係数(Reserve Factor)と呼んでおり、限界荷重、降伏荷重、亀裂寸法、破壊韌性のそれぞれに対する安全率を定義し、必要に応じて破損に対する評価・解析を行うことになっている。本プログラムでは、荷重に対する係数のみを安全率として出力することにした。

3. E P R I - G E 法による健全性 解析法の概要と解析手順

3. 1 EPRI-GE 法の概要

EPRI-GE 法 (EPRI-NP-3607) は, German and Kumer によって開発された簡易 J 積分評価に基づいている⁶⁾。この方法では, Ramberg-Osgood則が適用できる材料について全歪理論に基づく J 積分を, Ramberg-Osgood則パラメータと代表的構造物形状について無次元化した有限要素法解析を行い, テーブル化して種々の材料, 幾何形状, 負荷条件の J 積分値を求める方法である。

負荷で定まる上記 J 積分値を用い, 材料の J 値抵抗曲線に沿って亀裂進展をシミュレーションできる。Fig. 3.1 に J 積分に基づく亀裂進展解析法の概念を示す。

3. 2 EPRI-GE 法による亀裂進展解析手順

時刻 $t = t_i$ において, 膜応力 $\sigma_m(t_i)$, 曲げ応力 $\sigma_c(t_i)$, 温度分布 $T(x, t_i)$ (x は深さ方向の位置) として, 前のステップまでの亀裂進展量 Δa , および前のステップまでの亀裂深さ a を用い, 以下の解析により時間 $t=t_i+1$ における各パラメータを求める。

1) 入力温度分布データから内挿法により亀裂先端温度を求め, この温度における下記の材料特性を入力材料データから求める。

- J- Δa 曲線
- 応力-歪曲線
- 引張り強さ, σ_u
- 降伏強さ, σ_y

以下では上記の材料データを用い解析を進める。

2) 負荷条件 $\sigma_m(t_i)$, $\sigma_c(t_i)$ を用い, 5) により J_{app} を求める。

3) $J_{app} \leq J(\Delta a)$ のときは亀裂進展なし, 解析終了。

4) $J_{app} > J(\Delta a)$ のときは $J(\Delta a)$ 曲線上で J_{app} 値に対応する Δa を求め, 新たな Δa とし解析を終了する。

5) J_{app} の計算法

EPRI-GE 法の J_{app} は, 膜応力と曲げ応力が重置する片側亀裂付き平板の J 値の解を利用する。 J_{app} は次式により表される⁶⁾。

$$\begin{aligned} J_{app} &= J_{app}^e + J_{app}^p \\ J_{app}^p &= \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 (W-a)a h_1 (a/W, n, \lambda) (P/P_0)^{n+1} / W \\ J_{app}^e &= K^2 / E \end{aligned}$$

$$\lambda = M/(PW)$$

$$P = W \sigma_m$$

$$M = W^2 \sigma W/6$$

$$\sigma_0 = E \varepsilon_0 = \sigma_y$$

$$a_c = a + \phi r_y$$

$$\phi = 1/[1+(P/P_0)^2]$$

$$r_y = (n-1)/(n+1)(K/\sigma_0)^2 / (\beta \pi), \text{ただし } \beta=6.0 \text{とする。}$$

$$P_0 = 2\sigma_0 W [- (2\lambda + a/W) + \{(2\lambda + a/W)^2 + (W-a)^2/W^2\}^{0.5}] / 3^{0.5}$$

$h, (a/W, n, \lambda)$: $a/W, n, \lambda$ の関数, Table 3.1 の数表から直線補間して求める。

n, α : Ramberg-Osgood則定数 ($\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha(\sigma/\sigma_0)^n$)

(入力データ)

応力拡大係数 K は Fig. 2.4 に示す式において, $a = a_c$ として求める。

4. プログラムの使用法

4.1 プログラムの概要

解析の流れの概要を Fig. 4.1 に示す。第 1 ステップでは必要なデータの入力および入力データのプリントを行う。なお、入出力データは SI 単位とメトリック単位を選択できる。R 6 法または EPRI-GE 法のいずれかを選択できる。

亀裂付き圧力容器は、Fig. 4.2 のように曲げ応力 σ_y と膜応力 σ_m が同時に作用する片側亀裂または半楕円亀裂付き平板にモデル化する。ただし、熱応力は適切に曲げ応力に置き換えて評価する。解析手法とモデル化の組合せは Table 4.1 に示す 5 通りとし、いずれかを指定する。

第 2 ステップでは入力で指定した解析モデルを用い負荷の順序 (時刻歴, $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$) に従って順次亀裂進展解析を行う。計算経過のプリントおよびグラフ出力は入力で指定する。第 3 ステップでは、計算結果について数値およびグラフを出力する。

Fig. 4.3 および Fig. 4.4 に R 6 法, EPRI-GE 法の解析の流れを示す。

4.2 入力データ

本プログラムの入力データは下記の 13 項目から成る。入力データはすべて書式付きである。入力順序は任意である。コメント行は第一カラムを「#」としてどの位置にも挿入できる。入力データの変数名、入力フォーマット、入力方法を Table 4.2 に示す。

- (1) タイトル
- (2) 解析モデルデータ
- (3) 形状データ
- (4) 材料データ 1 (ヤング率, 降伏応力, 引張り強さ)

$$\lambda = M/(PW)$$

$$P = W \sigma_m$$

$$M = W^2 \sigma W/6$$

$$\sigma_0 = E \varepsilon_0 = \sigma_y$$

$$a_c = a + \phi r_y$$

$$\phi = 1/[1+(P/P_0)^2]$$

$$r_y = (n-1)/(n+1)(K/\sigma_0)^2 / (\beta \pi), \text{ただし } \beta=6.0 \text{とする。}$$

$$P_0 = 2\sigma_0 W [- (2\lambda + a/W) + ((2\lambda + a/W)^2 + (W-a)^2/W^2)^{0.5}]/3^{0.5}$$

$h_1(a/W, n, \lambda)$: $a/W, n, \lambda$ の関数, Table 3.1 の数表から直線補間して求める。

n, α : Ramberg-Osgood則定数 ($\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha(\sigma/\sigma_0)^n$)

(入力データ)

応力拡大係数 K は Fig. 2.4 に示す式において, $a = a_c$ として求める。

4. プログラムの使用法

4.1 プログラムの概要

解析の流れの概要を Fig. 4.1 に示す。第 1 ステップでは必要なデータの入力および入力データのプリントを行う。なお、入出力データは SI 単位とメトリック単位を選択できる。R 6 法または EPRI-GE 法のいずれかを選択できる。

亀裂付き圧力容器は、Fig. 4.2 のように曲げ応力 σ_b と膜応力 σ_m が同時に作用する片側亀裂または半楕円亀裂付き平板にモデル化する。ただし、熱応力は適切に曲げ応力に置き換えて評価する。解析手法とモデル化の組合せは Table 4.1 に示す 5 通りとし、いずれかを指定する。

第 2 ステップでは入力で指定した解析モデルを用い負荷の順序 (時刻歴, $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$) に従って順次亀裂進展解析を行う。計算経過のプリントおよびグラフ出力は入力で指定する。第 3 ステップでは、計算結果について数値およびグラフを出力する。

Fig. 4.3 および Fig. 4.4 に R 6 法, EPRI-GE 法の解析の流れを示す。

4.2 入力データ

本プログラムの入力データは下記の 13 項目から成る。入力データはすべて書式付きである。入力順序は任意である。コメント行は第一カラムを「#」としてどの位置にも挿入できる。入力データの変数名、入力フォーマット、入力方法を Table 4.2 に示す。

- (1) タイトル
- (2) 解析モデルデータ
- (3) 形状データ
- (4) 材料データ 1 (ヤング率, 降伏応力, 引張り強さ)

- (5) 材料データ 2 (J - Δa 曲線)
- (6) 材料データ 3 (σ - ε 曲線)
- (7) 材料データ 4 (Ramberg-Osgood則パラメータ)
- (8) 荷重データ 1 (解析時刻)
- (9) 荷重データ 2 (膜応力)
- (10) 荷重データ 3 (熱応力)
- (11) 荷重データ 4 (温度分布, T-X/W)
- (12) R 6 法解析パラメータ (微小仮想亀裂進展量)
- (13) グラフ出力指定用パラメータ

4. 3 出力データ

出力データは以下の 4 種類である。

- (1) 入力データの出力
- (2) 入力データの数値表出力およびグラフ出力

- 材料データ : J-Δa 曲線, σ - ε 曲線 (R6 法のみ)
- 荷重データ : T-X/W 分布, σ_m - t 曲線, σ_t - t 曲線

- (3) 計算経過 ($t=t_i$) の出力

R 6 法の場合 :

- Lr_{mat} , σ_{net} , ε_{eng} , ε_{ref} ($\ln(1+\varepsilon)$), Kr_{mat} の数値表 (オプション 1 以外)
- $Kr_{mat} - Lr_{mat}$ 曲線 (グラフ)
- 亀裂先端材料定数数値データ ; (Lr_{mat})max, σ_y , σ_u , σ_f , E, σ_m , σ_t , a, b, T(X=a)
- 亀裂先端材料特性 ; J-Δa 曲線 (グラフ), σ - ε 曲線 (グラフ)
- Kr_{app} , Lr_{app} , K, J(Δa), σ_{net} , Kr_c , Lr_c , Sf の数値表
- 破壊評価線図 ($Kr_{app} - Lr_{app}$, $Kr_{mat} - Lr_{mat}$, $Kr_{app} > Kr_c$ のときは亀裂進展の軌跡を図示する。)

EPRI-GE 法の場合 :

- 亀裂先端材料定数数値データ ; T(X=a), σ_y , σ_u , σ_f , n, α , σ_m , σ_t , a, b, J(Δa), E, ε_0 , σ_0
- 亀裂先端荷重条件数値データ ; J_{app} , $(J_{app})_e$, $(J_{app})_p$, K, Δa , Δb , λ , M, P, h1, a_0 , ϕ , r_y , P_0
- 亀裂先端材料抵抗曲線 ; J-Δa

- (4) 最終結果の出力

R 6 法の場合 :

- 結果の数値表 ; t_i , a, Δa , b, Δb , T(X=a), Kr_{app} , K, J(Δa), Lr_{app} , σ_{net} , σ_m , σ_t , σ_f , Sf
- 結果のグラフ ; 破壊評価線図 ($Kr_{app} - Lr_{app}$, $Kr_{mat} - Lr_{mat}$, $Kr_{app} > Kr_c$ のときは亀裂進展の軌跡を図示する。)

EPRI-GE 法の場合：

- ・結果の数値表； $t_i, a, \Delta a, b, T(X=a), K, J(\Delta a), \sigma_m, \sigma_t, \sigma_f$
- ・結果のグラフ； $J-\Delta a$

なお、入力データ例、プログラム構造の詳細、JCL、は付録に示す通りである。

5. 例題解析1：

MPA NKS-3 加圧熱衝撃試験解析

5. 1 MPA NKS-3 実験²⁾の概要

ドイツ、シュツットガルト大学材料研究所 (Materialprüfungsanstalt: MPA) では、圧力容器模擬試験体を使用した加圧熱衝撃試験を実施している。これまで数体の試験を行っている。この試験では、内面周方向に疲労亀裂を付加した円筒容器試験体を使用し、内圧および軸荷重の定常荷重と内面急冷による熱衝撃荷重を試験体に負荷することにより PTS (加圧熱衝撃) を模擬実験が行われた。試験体形状をFig. 5.1 に示す。円筒の外径は800 mm、肉厚は200mm であり、内面円周方向に 360° の一様深さ62.8mmの初期亀裂が導入されている。350 °Cに均一加熱された試験体の内面に注水して急冷された。試験後、平均 3.6mmの深さ方向への亀裂進展が観察された。

5. 2 入力データ

以下にNKS-3(Natkuhl Simulation 3) 実験の入力データの概要を示す。応力分布、温度分布、材料特性等の曲線はすべて離散点で入力する。なお、NKS-3 実験の入力データ例は付録に示す通りである。

1) 解析モデル

上記の厚肉円筒容器を板厚 $w=200\text{mm}$ 、初期亀裂深さ $a=62.8\text{mm}$ の片側亀裂付き平板にモデル化する。この平板に定常膜応力と急冷による変動熱応力が作用する。解析モデルにはR6法およびEPRI-GE 法の両方を適用する。

R 6 法における L_r は、熱応力を膜応力と見なして、安全側の評価を行った。

2) 材料データ

(1) 応力-歪線図

Fig. 5.2 に20°Cおよび 320°Cの応力-歪線図を示す。

(2) $J-\Delta a$ 曲線

Fig. 5.3 に 160°Cおよび 220°Cにおける $J-\Delta a$ 曲線を示す

EPRI-GE 法の場合：

- ・結果の数値表； $t_i, a, \Delta a, b, T(X=a), K, J(\Delta a), \sigma_m, \sigma_t, \sigma_f$
- ・結果のグラフ； $J-\Delta a$

なお、入力データ例、プログラム構造の詳細、JCL、は付録に示す通りである。

5. 例題解析1：

MPA NKS-3 加圧熱衝撃試験解析

5. 1 MPA NKS-3 実験²⁾ の概要

ドイツ、シュツットガルト大学材料研究所 (Materialprüfungsanstalt: MPA) では、圧力容器模擬試験体を使用した加圧熱衝撃試験を実施している。これまで数体の試験を行っている。この試験では、内面周方向に疲労亀裂を付加した円筒容器試験体を使用し、内圧および軸荷重の定常荷重と内面急冷による熱衝撃荷重を試験体に負荷することにより PTS (加圧熱衝撃) を模擬実験が行われた。試験体形状をFig. 5.1 に示す。円筒の外径は800 mm、肉厚は200mm であり、内面円周方向に 360° の一様深さ62.8mmの初期亀裂が導入されている。350 °Cに均一加熱された試験体の内面に注水して急冷された。試験後、平均 3.6mmの深さ方向への亀裂進展が観察された。

5. 2 入力データ

以下にNKS-3(Natkuhl Simulation 3) 実験の入力データの概要を示す。応力分布、温度分布、材料特性等の曲線はすべて離散点で入力する。なお、NKS-3 実験の入力データ例は付録に示す通りである。

1) 解析モデル

上記の厚肉円筒容器を板厚 $w=200\text{mm}$ 、初期亀裂深さ $a=62.8\text{mm}$ の片側亀裂付き平板にモデル化する。この平板に定常膜応力と急冷による変動熱応力が作用する。解析モデルにはR6法およびEPRI-GE 法の両方を適用する。

R 6 法における L_r は、熱応力を膜応力と見なして、安全側の評価を行った。

2) 材料データ

(1) 応力-歪線図

Fig. 5.2 に20°Cおよび 320°Cの応力-歪線図を示す。

(2) $J-\Delta a$ 曲線

Fig. 5.3 に 160°Cおよび 220°Cにおける $J-\Delta a$ 曲線を示す

(3) ヤング率 E, 降伏強さ σ_y

Table 5.1 に20°C ~ 320°Cにおけるヤング率および0.2%耐力および引張り強さを示す。

亀裂先端における材料特性は、亀裂先端温度を用いて上記の材料データから直線補間により求める。

3) 荷重・温度データ

(1) 定常膜応力 σ_m , 変動熱応力 σ_t

Table 5.2 に定常膜応力 σ_m および変動熱応力 σ_t と時間との関係を示す。

(2) 温度分布

Fig. 5.4 およびFig. 5.5 に 0秒から1800秒までの温度分布と負荷応力の時刻歴を示す。亀裂先端温度はこのデータと亀裂先端位置から直線補間により求める。解析は、温度分布測定時間ステップに従って実施した。

5. 3 解析結果

Table 5.3 にR 6法による解析結果の数値出力をまとめた。Fig. 5.6 にR 6法による解析から得られた破壊評価線図を示す。同図に示すように、 $t=9$ sec では、 $\Delta a=0$ とした仮想評価点がすでにFAD の外側にあるので、亀裂進展を開始していることが分かる。 $t=9$ sec の亀裂進展量は、 $\Delta a=0$ とした仮想評価点から微少量の仮想亀裂進展 da を繰返した仮想評価点の軌跡とFAD の交点で定まる。Table 5.3 から、 $t=9$ sec では $\Delta a= 0.075$ mm 亀裂が進展していることが分かる。同様にして、 $t=15$ sec では、 $\Delta a= 0.753$ mm, $t=21$ sec では、 $\Delta a= 2.881$ mm 亀裂が進展している。さらに、 $t=30$ secになると仮想評価点の軌跡とFAD の交点が定まらず、この場合はすでに不安定破壊（死荷重とした場合）が発生した後であることが分かる。Table 5.3 に示すように、 $t=30$ secでの亀裂寸法は $a=b= -999.9$ と表示されており、この表示は解が定まらなかったことを示している。

Table 5.4 にEPRI-GE 法による解析結果の数値出力をまとめた。Fig. 5.7 にEPRI-GE 法による解析から得られた亀裂進展評価線図を示す。Fig. 5.7 から、時間の経過とともにJ- Δa 曲線に沿って亀裂が進展することが分かる。 $t=120$ secまでに $\Delta a= 4.281$ mm 亀裂が進展し、その後はJ- Δa 曲線の範囲を越えたので解析は無効である。

Fig. 5.8 は、R 6法とEPRI-GE 法による解析結果について、時間の経過と亀裂進展量を比較したものである。R 6法の結果の傾向から、 $t=21$ sec 以後は急速に亀裂が進展し、 $t=30$ sec 以前に不安定破壊にいたる様子が良く分かる。EPRI-GE 法の結果は、R 6法の結果より、亀裂進展が遅くなっている。これは、R 6法では、Lrをかなり安全側に評価したためによると考えられる。

6. 例題解析2：

回転円筒試験体の加圧熱衝撃試験解析

6. 1 NESC 計画における回転円筒試験体の加圧熱衝撃実験³⁾の概要

NESC(Network for Evaluating Steel Components)計画は、ECが中心になって進められている鋼製構造機器の健全性に関する国際協力研究である。現在、Phase I の計画として回転円筒試験体の熱衝撃実験 SC-7 の準備が進められている。この計画では、板厚 150mm、直径1300mmの円筒容器を1000～2500rpmで回転させ、遠心力により膜応力を発生させるとともに、320°Cに均一加熱した試験体に内面から冷水スプレーにより急冷して加圧熱衝撃模擬実験が行われる。その試験条件を決定するため各国でパラメータ解析が行われ検討されている。実験は1996年に実施予定である。原研ではR6法オプション1により、亀裂寸法、回転数を変えて亀裂進展開始条件を検討した。以下にその解析結果をまとめる。

6. 2 入力データ

1) 解析モデル

Fig. 6.1 に回転円筒試験体を示す。この厚肉円筒容器を板厚 W=150mm、板幅 1300mm の半楕円側亀裂付き平板にモデル化する。この平板に遠心力による定常膜応力と急冷による変動熱応力が作用する。解析モデルにはR6法 Option 1 を用いた。ただし、亀裂進展開始点を求めるのが目的であるので、亀裂進展計算は実施しなかった。

2) 解析ケース

解析は、亀裂寸法と回転数を変えた下記の 9 ケースについて行った。

ケース1 (回転数 1500rpm)

ケース1. 1 a= 20mm, b= 60mm

ケース1. 2 a= 50mm, b=150mm

ケース1. 3 a=100mm, b=300mm

ケース2 (回転数 2000rpm)

ケース2. 1 a= 20mm, b= 60mm

ケース2. 2 a= 50mm, b=150mm

ケース2. 3 a=100mm, b=300mm

ケース3 (回転数 2500rpm)

ケース3. 1 a= 20mm, b= 60mm

ケース3. 2 a= 50mm, b=150mm

ケース3. 3 a=100mm, b=300mm

2) 材料データ

Table 6.1 に形状データおよび材料データをまとめる。

3) 荷重・温度データ

入力応力分布時刻歴をTable 6.2 に、温度分布時刻歴をTable 6.3 に示す。これらの入力データは、有限要素法汎用コードADINA-V6.1により亀裂無しの試験体の温度分布および応力分布を求めて作成した。亀裂なし試験体の弾性応力解析の結果、熱応力が極めて大きくなつたため、Fig. 6.2 のような簡易的な塑性変形の補正を行つて入力応力分布データを作成した。Fig. 6.3 に温度分布の変化を示す。

6. 3 解析結果

Fig. 6.4 にケース1.1 (1500rpm, a=20 mm)の破壊評価線図の解析結果を示す。この例では、t=50 secまでは、評価点はFAD の内側にあり亀裂進展していない。t=100 sec では、評価点はFAD の外に位置し、亀裂は50~100secの間に進展開始したことが分かる。

Fig. 6.5 にケース1.1 について、 K_{app} と $1/Sf$ の時間変化を示す。Sfは原点から亀裂進展開始点と評価点の距離の比で、亀裂進展開始までの安全率である。従つて、その逆数 $1/Sf$ 値は亀裂進展開始に対する負荷の割合を表わしている。

約250secで $1/Sf=1.0$ に達し、亀裂進展を開始する。一方、 K_{app} は約650 sec 後に1.0 に達しており、塑性崩壊が支配的な破壊が発生することを示唆している。

Fig. 6.6 にケース1.1, ケース2.1, ケース3.1 (a=20mmで1500, 2000, 2500rpm)の解析結果を破壊解析線図 (K-T 曲線) としてまとめる。この線図は、 K_{IC} 基準による破壊に対して適用される線図である。3 ケースとも K_{IC} 基準では500 sec 前後で亀裂進展開始するが、上記のように破壊が塑性崩壊で発生し、 K_{IC} 基準は適用できない。Fig. 6.7 にケース1.2, ケース2.2, ケース3.2 (a=50mmで1500, 2000, 2500rpm)の解析結果を、Fig. 6.8 にケース1.3, ケース2.3, ケース3.3 (a=100mm で1500, 2000, 2500rpm)の解析結果を破壊解析線図 (K-T 曲線) にまとめる。初期亀裂が深くなると、亀裂先端の温度低下が緩やかになり熱荷重は低下し、a=50mmおよび a=100mm のいずれの場合も K_{IC} 基準による亀裂進展は発生せず、塑性崩壊による破壊が先行して生じるという解析結果が得られた。R 6 法による上記解析結果から分かるように、塑性崩壊が生じる場合の破壊解析には K_{IC} 基準を適用した場合かなり非安全側の評価となるので注意が必要である。

7. 結 言

本報告書では、圧力容器等の破壊解析や健全性解析に用いることを目的に開発した非線形破壊力学簡易解析手法に基づく亀裂進展解析プログラムについて内容の解説を行うとともに大型構造物の加圧熱衝撃模擬実験について例題解析を実施し、その計算結果についてもまとめた。

機器信頼性研究室では、高経年圧力容器を対象に加圧熱衝撃下の健全性評価を進めており、この評価を行うことを念頭においてプログラム開発を行つた。R 6 法による例題解析結果から、安

2) 材料データ

Table 6.1 に形状データおよび材料データをまとめる。

3) 荷重・温度データ

入力応力分布時刻歴をTable 6.2 に、温度分布時刻歴をTable 6.3 に示す。これらの入力データは、有限要素法汎用コードADINA-V6.1により亀裂無しの試験体の温度分布および応力分布を求めて作成した。亀裂なし試験体の弾性応力解析の結果、熱応力が極めて大きくなつたため、Fig. 6.2 のような簡易的な塑性変形の補正を行つて入力応力分布データを作成した。Fig. 6.3 に温度分布の変化を示す。

6. 3 解析結果

Fig. 6.4 にケース1.1 (1500rpm, a=20 mm)の破壊評価線図の解析結果を示す。この例では、t=50 secまでは、評価点はFAD の内側にあり亀裂進展していない。t=100 sec では、評価点はFAD の外に位置し、亀裂は50~100secの間に進展開始したことが分かる。

Fig. 6.5 にケース1.1 について、 K_{app} と $1/Sf$ の時間変化を示す。Sfは原点から亀裂進展開始点と評価点の距離の比で、亀裂進展開始までの安全率である。従つて、その逆数 $1/Sf$ 値は亀裂進展開始に対する負荷の割合を表わしている。

約250secで $1/Sf=1.0$ に達し、亀裂進展を開始する。一方、 K_{app} は約650 sec 後に1.0 に達しており、塑性崩壊が支配的な破壊が発生することを示唆している。

Fig. 6.6 にケース1.1, ケース2.1, ケース3.1 (a=20mmで1500, 2000, 2500rpm)の解析結果を破壊解析線図 (K-T 曲線) としてまとめる。この線図は、 K_{IC} 基準による破壊に対して適用される線図である。3 ケースとも K_{IC} 基準では500 sec 前後で亀裂進展開始するが、上記のように破壊が塑性崩壊で発生し、 K_{IC} 基準は適用できない。Fig. 6.7 にケース1.2, ケース2.2, ケース3.2 (a=50mmで1500, 2000, 2500rpm)の解析結果を、Fig. 6.8 にケース1.3, ケース2.3, ケース3.3 (a=100mm で1500, 2000, 2500rpm)の解析結果を破壊解析線図 (K-T 曲線) にまとめる。初期亀裂が深くなると、亀裂先端の温度低下が緩やかになり熱荷重は低下し、a=50mmおよび a=100mm のいずれの場合も K_{IC} 基準による亀裂進展は発生せず、塑性崩壊による破壊が先行して生じるという解析結果が得られた。R 6 法による上記解析結果から分かるように、塑性崩壊が生じる場合の破壊解析には K_{IC} 基準を適用した場合かなり非安全側の評価となるので注意が必要である。

7. 結 言

本報告書では、圧力容器等の破壊解析や健全性解析に用いることを目的に開発した非線形破壊力学簡易解析手法に基づく亀裂進展解析プログラムについて内容の解説を行うとともに大型構造物の加圧熱衝撃模擬実験について例題解析を実施し、その計算結果についてもまとめた。

機器信頼性研究室では、高経年圧力容器を対象に加圧熱衝撃下の健全性評価を進めており、この評価を行うことを念頭においてプログラム開発を行つた。R 6 法による例題解析結果から、安

全率評価、亀裂進展解析、不安定破壊解析、破壊モードの特定等の機能が確認できた。また、EPRI-GE 法による例題解析では、簡易 J 積分評価に基づく亀裂進展解析機能が確認できた。

R 6 法やEPRI-GE 法は、非線形破壊力学を構造機器の健全性評価に適用することを目的として開発された簡易解析法であり、すでに配管等の評価基準において採用されているが、適用性については、今後も検討と改良が必要と思われる。このような簡易非線形破壊力学解析法とプログラム開発に関する課題として以下の項目があげられる。

- (1)塑性崩壊パラメータ L_r の算出における熱応力、残留応力の効果の評価
- (2) L_r の算出における支持条件、拘束効果の評価
- (3)半楕円亀裂の L_r の評価
- (4)表面方向への亀裂進展評価
- (5)半楕円亀裂の J 積分の簡易計算法開発

また、今回行った解析については、入力データの検討も必要であり、とくに、回転円筒試験体については弾塑性解析による入力データ作成が必要である。

開発した解析プログラムについては、今後、圧力容器の破壊解析に適用し検証と改良を進めていく予定である。また、別途進めている有限要素法による非線形破壊力学詳細解析とも平行して進め比較検討を行い、最終的に高経年圧力容器の評価に適用していく予定である。

参考文献

- 1) 原子力発電所用機器に対する破壊靭性の確認試験方法 JEAC 4206-1991 および
原子炉構造材の監視試験方法, JEAC 4201-1991
- 2) J. Sievers and H. Schulz:FALSIRE Phase I Comparison Report, GRS-108(NUREG/CR-5997,
April 1994
- 3) NESC DOC SC(94)12, Minuts of NESC Steering Committee Meeting No. 3, 1994
- 4) 磯崎、柴田、川上、大石:ADINA コードによるPTS 荷重下のき裂進展解析, JAERI-
Research 投稿中
- 5) I. Milne, R. A. Ainsworth, et al.:Assessment of the Integrity of Structures
Containing Defects, CECB Report R/H/R6-Rev. 3, May 1986
- 6) V. Kumer, M. D. German et al.: Advances in Elastic Plastic Fracture Analysis,
EPRI NP-3607, August 1984
- 7) A. Willoughby and T. Davey: Plastic Collapse in Part-Wall Flaws in Plate, ASTM STP
1020, 1989, pp. 390-409
- 8) H. Tada:The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation, 1983.
pp. 2.10 ~2.15
- 9) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju:Analyses of Surface Cracks in Finite Plates under
Tension or Bendind Loads, NASA-TP 1579, 1979

全率評価、亀裂進展解析、不安定破壊解析、破壊モードの特定等の機能が確認できた。また、EPRI-GE 法による例題解析では、簡易 J 積分評価に基づく亀裂進展解析機能が確認できた。

R 6 法やEPRI-GE 法は、非線形破壊力学を構造機器の健全性評価に適用することを目的として開発された簡易解析法であり、すでに配管等の評価基準において採用されているが、適用性については、今後も検討と改良が必要と思われる。このような簡易非線形破壊力学解析法とプログラム開発に関する課題として以下の項目があげられる。

- (1)塑性崩壊パラメータ L_r の算出における熱応力、残留応力の効果の評価
- (2) L_r の算出における支持条件、拘束効果の評価
- (3)半梢円亀裂の L_r の評価
- (4)表面方向への亀裂進展評価
- (5)半梢円亀裂の J 積分の簡易計算法開発

また、今回行った解析については、入力データの検討も必要であり、とくに、回転円筒試験体については弾塑性解析による入力データ作成が必要である。

開発した解析プログラムについては、今後、圧力容器の破壊解析に適用し検証と改良を進めていく予定である。また、別途進めている有限要素法による非線形破壊力学詳細解析とも平行して進め比較検討を行い、最終的に高経年圧力容器の評価に適用していく予定である。

参考文献

- 1) 原子力発電所用機器に対する破壊靭性の確認試験方法 JEAC 4206-1991 および
原子炉構造材の監視試験方法, JEAC 4201-1991
- 2) J. Sievers and H. Schulz:FALSIRE Phase I Comparison Report, GRS-108(NUREG/CR-5997,
April 1994
- 3) NESC DOC SC(94)12, Minuts of NESC Steering Committee Meeting No. 3, 1994
- 4) 磯崎、柴田、川上、大石:ADINA コードによるPTS 荷重下のき裂進展解析, JAERI-
Research 投稿中
- 5) I. Milne, R. A. Ainsworth, et al.:Assessment of the Integrity of Structures
Containing Defects, CEGB Report R/H/R6-Rev. 3, May 1986
- 6) V. Kumer, M. D. German et al.: Advances in Elastic Plastic Fracture Analysis,
EPRI NP-3607, August 1984
- 7) A. Willoughby and T. Davey: Plastic Collapse in Part-Wall Flaws in Plate, ASTM STP
1020, 1989, pp. 390-409
- 8) H. Tada:The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation, 1983,
pp. 2.10 ~2.15
- 9) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju:Analyses of Surface Cracks in Finite Plates under
Tension or Bendind Loads, NASA-TP 1579, 1979

Table 3.1 EPRI-GE法のh1関数の数表 (1 / 3)

h FUNCTIONS FOR A PLANE STRAIN SECP UNDER
COMBINED TENSION AND BENDING FOR THE CASE $\lambda = 1/8$

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 10$
$a/b = 1/8$	h_1 4.761	4.544	3.881	2.632	1.734	0.905
	h_2 5.275	4.988	9.314	2.872	1.873	0.962
	h_3 0.394	0.779	0.925	0.898	0.748	0.488
	h_5 0.328	0.309	0.324	0.289	0.240	0.158
$a/b = 1/4$	h_1 3.568	2.536	1.773	0.843	0.392	0.119
	h_2 4.510	3.193	2.195	1.006	0.445	0.138
	h_3 0.745	0.868	0.765	0.443	0.227	0.075
	h_5 0.889	0.682	0.548	0.321	0.165	0.054
$a/b = 3/8$	h_1 2.742	1.657	1.016	0.373	0.136	0.029
	h_2 4.027	2.316	1.357	0.468	0.163	0.034
	h_3 0.961	0.787	0.539	0.204	0.073	0.015
	h_5 1.536	0.952	0.612	0.237	0.085	0.018
$a/b = 1/2$	h_1 2.200	1.305	0.804	0.310	0.120	0.030
	h_2 3.767	1.977	1.131	0.399	0.149	0.036
	h_3 1.147	0.724	0.465	0.157	0.057	0.013
	h_5 2.116	1.192	0.714	0.259	0.097	0.023
$a/b = 5/8$	h_1 1.738	1.056	0.678	0.290	0.129	0.039
	h_2 3.518	1.781	1.055	0.411	0.174	0.051
	h_3 1.275	0.707	0.441	0.162	0.067	0.019
	h_5 2.560	1.341	0.830	0.320	0.135	0.040
$a/b = 3/4$	h_1 1.401	0.901	0.609	0.293	0.142	0.050
	h_2 3.373	1.727	1.073	0.459	0.214	0.073
	h_3 1.390	0.741	0.462	0.193	0.090	0.030
	h_5 2.881	1.513	0.946	0.402	0.188	0.064
$a/b = 7/8$	h_1 1.168	0.785	0.551	0.283	0.153	0.060
	h_2 3.348	1.751	1.113	0.512	0.260	0.100
	h_3 1.532	0.808	0.514	0.235	0.119	0.046
	h_5 3.171	1.664	1.059	0.486	0.247	0.095

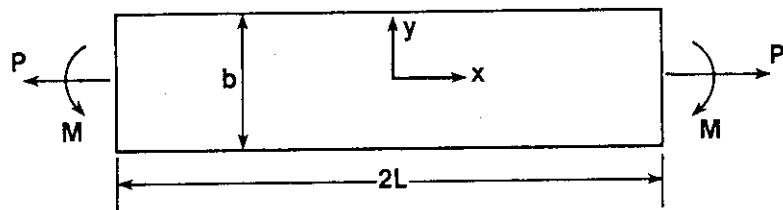


Table 3.1 (つづき, 2 / 3)

***h* FUNCTIONS FOR A PLANE STRAIN SECP UNDER
COMBINED TENSION AND BENDING FOR THE CASE $\lambda = -1/16$**

		<i>n</i> = 1	<i>n</i> = 2	<i>n</i> = 3	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 7	<i>n</i> = 10
<i>a/b</i> = 1/8	<i>h</i> ₁	1.910	1.781	1.494	1.101	0.865	0.692
	<i>h</i> ₂	3.111	2.437	1.823	1.098	0.683	0.344
	<i>h</i> ₃	0.279	0.353	0.364	0.294	0.310	0.428
	<i>h</i> ₅	0.181	0.253	0.252	0.139	0.007	-0.063
<i>a/b</i> = 1/4	<i>h</i> ₁	2.014	1.943	1.714	1.253	0.782	0.471
	<i>h</i> ₂	3.017	2.424	1.952	1.299	0.864	0.448
	<i>h</i> ₃	0.516	0.618	0.601	0.503	0.398	0.251
	<i>h</i> ₅	0.621	0.712	2.474	0.385	0.235	0.101
<i>a/b</i> = 3/8	<i>h</i> ₁	2.053	1.635	1.145	0.530	0.242	0.074
	<i>h</i> ₂	3.069	2.119	1.387	0.592	0.257	0.076
	<i>h</i> ₃	0.766	0.738	0.581	0.305	0.147	0.046
	<i>h</i> ₅	1.200	0.946	0.604	0.215	0.083	0.022
<i>a/b</i> = 1/2	<i>h</i> ₁	1.985	1.232	0.751	0.277	0.156	0.023
	<i>h</i> ₂	3.184	1.742	0.983	0.331	0.170	0.025
	<i>h</i> ₃	1.002	0.707	0.440	0.157	0.079	0.012
	<i>h</i> ₅	1.828	1.006	0.549	0.175	0.091	0.013
<i>a/b</i> = 5/8	<i>h</i> ₁	1.737	1.012	0.613	0.232	0.089	0.022
	<i>h</i> ₂	3.209	1.589	0.880	0.305	0.113	0.027
	<i>h</i> ₃	1.188	0.673	0.379	0.128	0.047	0.011
	<i>h</i> ₅	2.354	1.176	0.643	0.222	0.083	0.020
<i>a/b</i> = 3/4	<i>h</i> ₁	1.443	0.886	0.572	0.250	0.113	0.035
	<i>h</i> ₂	3.217	1.607	0.940	0.376	0.163	0.049
	<i>h</i> ₃	1.341	0.710	0.408	0.161	0.069	0.021
	<i>h</i> ₅	2.754	1.370	0.804	0.324	0.141	0.043
<i>a/b</i> = 7/8	<i>h</i> ₁	1.192	0.784	0.538	0.268	0.136	
	<i>h</i> ₂	3.284	1.697	1.044	0.470	0.229	
	<i>h</i> ₃	1.509	0.789	0.482	0.217	0.105	
	<i>h</i> ₅	3.107	1.602	0.987	0.445	0.217	

***h* FUNCTIONS FOR A PLANE STRAIN SECP UNDER
COMBINED TENSION AND BENDING FOR THE CASE $\lambda = -1/8$**

		<i>n</i> = 1	<i>n</i> = 2	<i>n</i> = 3	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 7	<i>n</i> = 10
<i>a/b</i> = 3/8	<i>h</i> ₁	1.490	1.364	1.180	0.804	0.509	0.241
	<i>h</i> ₂	2.296	1.646	1.276	0.786	0.472	0.213
	<i>h</i> ₃	0.598	0.565	0.507	0.374	0.260	0.137
	<i>h</i> ₅	0.928	0.798	0.628	0.327	0.166	0.057
<i>a/b</i> = 1/2	<i>h</i> ₁	1.723	1.235	0.816	0.346	0.147	0.042
	<i>h</i> ₂	2.685	1.646	1.001	0.386	0.155	0.043
	<i>h</i> ₃	0.869	0.689	0.469	0.210	0.091	0.029
	<i>h</i> ₅	1.574	0.985	0.547	0.179	0.066	0.016
<i>a/b</i> = 5/8	<i>h</i> ₁	1.682	0.988	0.594	0.217	0.080	0.019
	<i>h</i> ₂	2.949	1.491	0.825	0.279	0.100	0.024
	<i>h</i> ₃	1.111	0.671	0.395	0.136	0.048	0.013
	<i>h</i> ₅	2.178	1.093	0.571	0.185	0.067	0.015
<i>a/b</i> = 3/4	<i>h</i> ₁	1.456	0.874	0.553	0.231	0.099	0.029
	<i>h</i> ₂	3.101	1.556	0.899	0.345	0.143	0.042
	<i>h</i> ₃	1.303	0.724	0.412	0.154	0.063	0.019
	<i>h</i> ₅	2.659	1.279	0.740	0.289	0.120	0.035
<i>a/b</i> = 7/8	<i>h</i> ₁	1.217	0.784	0.532	0.259	0.130	0.065
	<i>h</i> ₂	3.259	1.694	1.032	0.454	0.219	0.104
	<i>h</i> ₃	1.500	0.794	0.481	0.210	0.101	0.048
	<i>h</i> ₅	3.081	1.585	0.971	0.429	0.207	0.099

Table 3.1 (つづき, 3 / 3)

***h* FUNCTIONS FOR A PLANE STRAIN SECP UNDER
COMBINED TENSION AND BENDING FOR THE CASE $\lambda = -3/16$**

		n = 1	n = 2	n = 3	n = 5	n = 7	n = 10
$a/b = 1/2$	h_1	1.246	1.148	0.973	0.598	0.350	0.157
	h_2	1.812	1.289	0.988	0.547	0.300	0.127
	h_3	0.636	0.521	0.438	0.285	0.179	0.084
	h_5	-1.203	-5.153	-2.895	-0.862	-0.238	-0.022
$a/b = 5/8$	h_1	1.526	0.976	0.609	0.234	0.090	0.044
	h_2	2.471	1.352	0.777	0.272	0.100	0.023
	h_3	0.962	0.612	0.379	0.136	0.050	0.011
	h_5	-2.744	-0.601	0.045	0.132	0.059	0.014
$a/b = 3/4$	h_1	1.456	0.855	0.525	0.204	0.081	0.021
	h_2	2.899	1.440	0.814	0.287	0.110	0.028
	h_3	1.234	0.685	0.387	0.129	0.049	0.012
	h_5	0.758	0.929	0.617	0.238	0.092	0.023
$a/b = 7/8$	h_1	1.223	0.781	0.522	0.245	0.119	0.042
	h_2	3.181	1.645	0.991	0.420	0.196	0.066
	h_3	1.469	0.776	0.464	0.194	0.090	0.031
	h_5	2.671	1.516	0.926	0.396	0.185	0.063

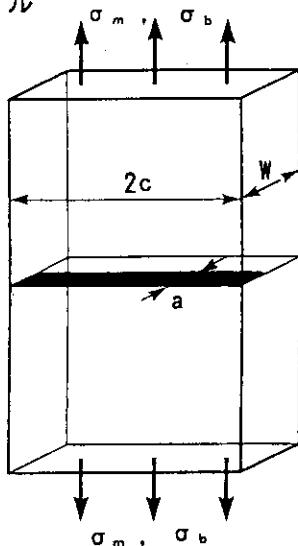
***h* FUNCTIONS FOR A PLANE STRAIN SECP UNDER
COMBINED TENSION AND BENDING FOR THE CASE $\lambda = -1/4$**

		n = 1	n = 2	n = 3	n = 5	n = 7	n = 10
$a/b = 5/8$	h_1	1.148	0.989	0.737	0.382	0.194	0.071
	h_2	1.521	1.074	0.736	0.348	0.168	0.059
	h_3	0.659	0.516	0.385	0.201	0.102	0.036
	h_5	-7.060	-3.118	-1.246	-0.133	0.024	0.023
$a/b = 3/4$	h_1	1.405	0.828	0.497	0.182	0.067	0.015
	h_2	2.491	1.264	0.705	0.236	0.084	0.019
	h_3	1.091	0.612	0.352	0.112	0.039	0.009
	h_5	-1.008	0.419	0.426	0.182	0.067	0.015
$a/b = 7/8$	h_1	1.445	0.977	0.703	0.375	0.207	0.087
	h_2	3.384	1.895	1.228	0.595	0.316	0.130
	h_3	1.572	0.902	0.580	0.277	0.147	0.060
	h_5	2.533	1.693	1.126	0.555	0.296	0.122

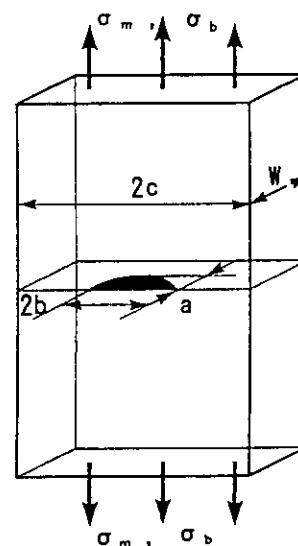
Table 4.1 解析モデルの種類とモデル番号

モデルNo.	解析法	モデル	負荷応力
No. 1	R 6 法 Op. 1	半梢円亀裂付き平板	$\sigma_m + \sigma_b$
No. 2	R 6 法 Op. 2	半梢円亀裂付き平板	"
No. 3	R 6 法 Op. 1	片側亀裂付き平板	"
No. 4	R 6 法 Op. 2	片側亀裂付き平板	"
No. 5	R 6 法 Op. 1	片側亀裂付き平板	"

モデル



片側亀裂付き平板



半梢円亀裂付き平板

Table 4.2 データ入力方法 (1/3)

入力データの単位は、S 1またはメトリック(工学)の2種類である。

(1) タイトル

変数名	意味	変数の意味
ITEM	1~10 A10	項目名文字列(必ず'TITLE'と入れる)
TITLE	1~80 A10	80文字以内の解析問題タイトル

(2) 解析モデルデータ

変数名	意味	変数の意味
ITEM	1~10 A10	項目名文字列(必ず'MODEL'と入れる)
MODEL	1~5 I5	解析モデル番号(1≤MODEL≤5)

ITEM 1: R6法,OP.1,半梢円型付き平板
2: R6法,OP.2,半梢円型付き平板
3: R6法,OP.1,片側丸型付き平板
4: R6法,OP.2,片側丸型付き平板
5: EPR1-G法,片側丸型付き平板

変数名	意味	変数の意味
IUNIT	6~10 I5	計算単位(0:SI, 1:FEET)
IPRINT	11~15 I5	数値出力オプション(0:出力しない, 1:出力する)
IGRAPH	16~20 I5	図形出力オプション(0:出力しない, 1:出力する)
ICALC	21~25 I5	電算量計算オプション(0:通常の計算 1:一回だけの計算)

(3) 形状データ

変数名	意味	変数の意味
ITEM	1~10 A10	項目名文字列(必ず'GEOMETRY'と入れる)
WTB	1~10 F10.0	板厚
A0	11~20 F10.0	初期電算深さ
B0	21~30 F10.0	初期電算半長(3≤MODEL≤5のとき、限りない大きい数字、例えば1.0E6のように入れる)

(4) 材料データ(ヤング率、0.2%耐力、引張り強さ)

変数名	意味	変数の意味
ITEM	1~10 A10	項目名文字列(必ず'MATERIAL'と入れる)
NMAT	1~5 I5	材料データの温度数
TMAT	1~80 8F10.0	温度(NMAT個入れる)
EMOD	1~80 8F10.0	ヤング率(NMAT個入れる)
SY	1~80 8F10.0	0.2%耐力(NMAT個入れる)
SU	1~80 8F10.0	引張り強さ(NMAT個入れる)

ITEM 1: 材料データは、温度の低い順に入力する。

(5) 材料データ(J→△・曲線)

変数名	意味	変数の意味
ITEM	1~10 A10	項目名文字列(必ず'J-DATA(A)'と入れる)
NRCV	1~5 I5	J→△・曲線の本数
IJRFLG	6~10 I5	J→△・曲線の計算オプションの値を採用する (1:(△▲) K:内部計算式で) 1:アロゲラム
TJR	1~80 8F10.0	温度(NRCV個入れる)
NPNTJR	1~5 I5	離散点数
DLTA	1~80 8F10.0	J 値(NPNTJR個入れる)
JINT	1~80 8F10.0	△ 値(NPNTJR個入れる)
RKIC	1~80 8F10.0	K 値(NPNTJR個入れる)

* NPNTJR,DLTA,JINTまたはRKICは3つで1組として温度の低い順にNRCV個入力する。
JINTはIJRFLG=0のときである。RKICはIJRFLG=1のときである。

Table 4.2 (つづき, 2/3)

(6) 材料データ ($\sigma - \varepsilon$ 曲線)

このデータは、MODELN=2または4のときに必要である。

変数名	種類	変数名	意味
ITEM	1~10	A10	項目名文字列(必ず'SIGMA-EPS'と入れる)
NSEPS	1~5	I5	$\sigma - \varepsilon$ 曲線の本数
TSEPS	1~60	8F10.0	" 温度 (NSEPS個入れる)
NPNTSE	1~5	I5	" 離散点数
EPS	1~80	8F10.0	" ε 値 (NPNTSE個入れる)
SIGMA	1~80	8F10.0	" σ 値 (NPNTSE個入れる)

※ NPNTSE, EPS, SIGMAは3つで1組として温度の低い順にNSEPS個入力する。

(7) 材料データ (Ramberg-Osgood則パラメータ)

このデータは、MODELN=3のときに必要である。

変数名	種類	変数名	意味
ITEM	1~10	A10	項目名文字列(必ず'RAOS'と入れる)
NRADS	1~5	I5	Ramberg-Osgood則パラメータの温度数
TRAOS	1~80	8F10.0	" 温度 (NRADS個入れる)
AN	1~80	8F10.0	" n (NRADS個入れる)
ALPHA	1~80	8F10.0	" α (NRADS個入れる)

※ TRAOS, AN, ALPHAは3つで1組として温度の低い順にNRADS個入力する。

(8) 荷重データ (解析時刻)

(9) 荷重データ (膜応力)

変数名	種類	変数名	意味
ITEM	1~10	A10	項目名文字列(必ず'LOAD'と入れる)
NT1	1~5	I5	解析時刻数
T1	1~80	8F10.0	解析時刻 (NT1個入れる)

(10) 荷重データ (熱応力)

変数名	種類	変数名	意味
ITEM	1~10	A10	項目名文字列(必ず'ST'と入れる)
ST	1~80	8F10.0	熱応力 (NT1個入れる)

(11) 荷重データ (T-X/W図)

変数名	種類	変数名	意味
ITEM	1~10	A10	項目名文字列(必ず'TEMP'と入れる)
ITFLG	1~5	I5	荷重データのX軸の入力方法 (0:X/Wで入力部計算する) 1:Xで入力部計算する
NPNTT	1~5	I5	T-X/W図の離散点数

(12) R 6 法の解析パラメータ

このデータは、1≤MODELN≤4のときに必要である。

変数名	種類	変数名	意味
ITEM	1~10	A10	項目名文字列(必ず'R6-PARAM'と入れる)
DA	1~10	F10.0	板厚方向の微小塑性進展量

Table 4.2 (つづき, 3/3)

(13) グラフデータ

変数名	値	意味
ITEM	1～10	A10 プロジェクト名 (必ずGRAPH-DATAと一緒に入る)
IGFLG	1～5	グラフ軸オプション (0:標準を適用する) (1:人力量を適用する)
GXMIN	11～20	F10.0 X軸最小値
GXMAX	21～30	F10.0 X軸最大値
GYMIN	31～40	F10.0 Y軸最小値
GYMAX	41～50	F10.0 Y軸最大値

* IGFLG～GYMAXは11図分必要である。以下に、各グラフの標準値を示す。
標準値はSI単位である。ただし、()内は工学単位である。

No	图形種類	X軸最小値	X軸最大値	Y軸最小値	Y軸最大値
1	I-A 曲線 (人間の筋肉)	0.0	5.E-3 (5.0)	0.0	1.E6 (200.0)
2	O-e 曲線 (人間の筋肉)	0.0	0.1	0.0	1000.0 (100.0)
3	T-x/w 曲線 (人間の筋肉)	0.0	1.0	0.0	500.0
4	O-a-t 線図 (人間の筋肉)	0.0	解剖学的 の筋肉量	-2.E9 (0.0)	2.E9 (50.0)
5	F-A 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	2.0	0.0	1.6
6	J-△ 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	5.E-3 (5.0)	0.0	1.E6 (200.0)
7	O-e 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	0.1	0.0	1000.0 (100.0)
8	K-f-L-f 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	2.0	0.0	2.0
9	K-f-L-f 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	2.0	0.0	2.0
10	J-△ 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	5.E-3 (5.0)	0.0	1.E6 (200.0)
11	J-△ 曲線 (筋肉の筋肉)	0.0	5.E-3 (5.0)	0.0	1.E6 (200.0)

Table 5.1 NKS-3試験体材料の20°C~320°Cの降伏点及び弾性係数

温度 °C	弾性係数 E kg/mm ²	耐力 σ_y kg/mm ²	引張り強さ σ_u kg/mm ²
20	21414	57.3	73.7
160	20394	52.9	68.5
260	19405	54.7	71.3
320	18803	53.3	71.6

Table 5.2 NKS-3試験体の膜応力および熱応力の時刻歴

No.	時間 t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t
1	0 sec	9.0 kg/mm ²	0.0 kg/mm ²
2	9 sec	"	15.0 "
3	15 sec	"	21.0 "
4	21 sec	"	23.7 "
5	30 sec	"	27.1 "
6	1 min	"	33.8 "
7	2 min	"	43.6 "
8	3 min	"	50.0 "
9	5 min	"	48.2 "
10	7 min	"	46.3 "
11	10 min	"	43.3 "
12	15 min	"	38.9 "
13	20 min	"	34.1 "
14	30 min	"	26.1 "

Table 5.3 R6法による亀裂進展解析結果の数値出力

FINAL DATA									
NO.	T _I (SEC)	A (MM)	DLT(A) (MM)	B (MM)	T(X=A) (DEG.C)	KRAP	SIF	J(DLT(A)) (KG/MM ²)	LRAP (KG/MM ²)
1	0.0	62.800	0.0	0.0	332.400	0.464	216.250	11.520	0.247
2	9.0	62.875	0.075	0.0	332.400	0.904	456.180	13.741	0.660
3	15.0	63.553	0.753	0.0	332.400	0.783	557.714	27.185	0.830
4	21.0	65.681	2.881	0.0	332.400	0.682	620.633	44.288	0.918
5	30.0	-999.900	2.881	-999.900	332.400	0.607	787.135	-999.900	1.096
6	60.0	-999.900	2.881	-999.900	324.000	0.864	787.818	-999.900	1.198
7	120.0	-999.900	2.881	-999.900	312.600	1.039	950.036	-999.900	1.465
8	180.0	-999.900	2.881	-999.900	291.000	1.148	1055.975	-999.900	1.628
9	300.0	-999.900	2.881	-999.900	260.400	1.107	1026.180	-999.900	1.557
10	420.0	-999.900	2.881	-999.900	237.600	1.067	994.729	-999.900	1.517
11	600.0	-999.900	2.881	-999.900	223.400	1.010	945.071	-999.900	1.441
12	900.0	-999.900	2.881	-999.900	203.400	0.910	872.238	-999.900	1.329
13	1200.0	-999.900	2.881	-999.900	182.000	0.806	792.784	-999.900	1.204
14	1800.0	67.863	5.063	0.0	156.600	0.569	682.093	70.363	1.002

NO.	SM (KG/MM ² *2)	ST (KG/MM ² *2)	SJ (KG/MM ² *2)	SF (KG/MM ² *2)	SAFE
1	9.000	0.0	62.336	2.052	
2	9.000	15.000	62.336	1.000	
3	9.000	21.000	62.336	1.000	
4	9.000	23.700	62.336	1.000	
5	9.000	27.100	62.336	-999.900	
6	9.000	33.800	62.413	-999.900	
7	9.000	43.600	62.518	-999.900	
8	9.000	50.000	62.716	-999.900	
9	9.000	48.200	62.996	-999.900	
10	9.000	46.300	62.485	-999.900	
11	9.000	43.300	62.158	-999.900	
12	9.000	38.900	61.698	-999.900	
13	9.000	34.100	61.206	-999.900	
14	9.000	26.100	60.817	1.000	

Table 5.4 BPRI-GE法による亀裂進展解析結果の数値出力

FINAL RESULT BY EPRI-GE METHOD										
NO.	T1 (SEC)	A (MM)	DLT(A) (MM)	B (MM)	Y(X=A) (DEG.C)	SIF (KG/MM)	J(DLT(A)) (KG/MM*2)	SM (KG/MM*2)	ST (KG/MN*2)	SF (KG/MN*2)
1	0.0	62.800	0.0	0.0	332.400	169.190	1.539	7.000	0.0	62.336
2	9.0	62.800	0.0	0.0	332.400	418.556	9.410	7.000	15.000	62.336
3	15.0	62.907	0.107	0.0	332.400	523.472	14.701	7.000	21.000	62.336
4	21.0	63.004	0.204	0.0	332.400	572.952	17.606	7.000	23.700	62.336
5	30.0	63.196	0.396	0.0	332.400	636.453	21.717	7.000	27.100	62.336
6	60.0	63.919	1.119	0.0	324.000	766.791	31.368	7.000	33.800	62.413
7	120.0	67.081	4.281	0.0	312.600	980.107	50.919	7.000	43.600	62.510
8	180.0	67.081	4.281	0.0	291.000	1186.763	73.801	7.000	50.000	62.716
9	300.0	67.081	4.281	0.0	260.400	1138.364	66.831	7.000	48.200	62.996
10	420.0	67.081	4.281	0.0	237.600	1094.356	61.057	7.000	46.300	62.485
11	600.0	67.581	4.781	0.0	223.400	1024.709	53.158	7.000	43.300	62.158
12	900.0	67.581	4.781	0.0	203.400	933.827	43.718	7.000	38.900	61.698
13	1200.0	67.581	4.781	0.0	182.000	829.600	34.151	7.000	34.100	61.206
14	1800.0	67.581	4.781	0.0	156.600	664.644	21.675	7.000	26.100	60.817

Table 6.1 回転円筒試験体の形状データおよび材料データ

形状、強さ、弾性係数

板 厚 W	150 mm
幅 B	1300 mm
耐力 σ_y	541 MPa
20 °C	
350 °C	537 MPa
引張り強さ σ_u	759 MPa
20 °C	
350 °C	737 MPa
弾性係数 E	212000 MPa
20 °C	
350 °C	189000 MPa

破壊靭性の温度依存性

温 度	破壊靭性 (MPa m ^{1/2})
20 °C	60
40 °C	65
60 °C	80
70 °C	90
80 °C	115
90 °C	135
100 °C	165
120 °C	225
140 °C	300
150 °C	350
300 °C	350

J-Δa 曲線への換算 :

$$J(\Delta a) = K_{Ic}/E = \text{Const} \quad \text{として行う}$$

Table 6.2 回転円筒試験体の膜応力および熱応力分布の時刻歴

(単位 : MPa , 1500 rpm)

時間 t (sec)	a = 20 mm (ケース 1.1)		a = 50 mm (ケース 1.2)		a = 100 mm (ケース 1.3)	
	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t
0	80	20	80	20	80	20
1	-211	389	48	68	70	30
2	-232	412.5	36	84	66	28
5	-343.5	577.5	40	120	57	51
10	-752.5	1162.5	-65	285	50	70
20	-710	1200	-155	495	47	133
50	-470	1050	-500	1000	32.5	247.5
100	275	225	-250	870	20.5	350
200	405	75	-150	750	14	416
500	370	90	-46	606	27.5	442.5
1000	202	180	1	429	45	345

(単位 : MPa , 2000 rpm)

時間 t (sec)	a = 20 mm (ケース 2.1)		a = 50 mm (ケース 2.2)		a = 100 mm (ケース 2.3)	
	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t
0	141.6	35.4	141.6	35.4	141.6	35.4
1	10	196	118	66	142	32
2	-37	247	105	75	126	42
5	-212.5	502.5	65	132	118	62
10	-496	478	0	300	120	90
20	-327.5	787.5	-60	420	102	128
50	162	308	-142	321	90	240
100	500	0	-150	770	80	350
200	505	0	-50	670	72	418
500	490	0	42	574	90	450
1000	420	0	74	416	110	360

(単位 : MPa , 2500 rpm)

時間 t (sec)	a = 20 mm (ケース 3.1)		a = 50 mm (ケース 3.2)		a = 100 mm (ケース 3.3)	
	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t	膜応力 σ_m	熱応力 σ_t
0	221.6	55.4	221.6	55.4	221.6	55.4
1	116	174	210	60	210	50
2	121	161	190	76	204	56
5	-25	375	140	170	194	76
10	-359	844	86	284	193	117
20	-20	490	26	414	183	247
50	142	318	-27	547	160	230
100	462	0	-36	671	140	320
200	493	0	80	540	140	410
500	495	0	155	455	155	435
1000	477	0	178	352	178	442

Table 6.3 回転円筒試験体の試験体温度分布時刻歴

時間t 座標x	0.0 sec	1	2	5	10	20	50
0 mm	320.0 °C	67.1	53.1	38.1	31.1	25.3	18.7
2	320.0	217.0	178.0	130.0	104.0	83.4	58.0
4	320.0	297.0	266.0	211.0	172.0	139.0	96.5
9	320.0	318.0	309.0	274.0	235.0	194.0	138.0
14	320.0	319.0	317.0	304.0	276.0	236.0	174.0
24	320.0	320.0	320.0	319.0	310.0	287.0	233.0
34	320.0	320.0	320.0	319.0	318.0	308.0	271.0
49	320.0	320.0	320.0	320.0	319.0	317.0	302.0
64	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	319.0	314.0
84	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	318.0
105	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	319.0
127	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0
150	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0

時間t 座標x	100	200	500	1000
0 mm	15.1	12.3	9.86	8.26
2	44.2	34.6	23.8	17.6
4	73.0	56.4	37.3	27.0
9	104.0	80.4	53.1	37.4
14	134.0	103.0	68.3	47.6
24	185.0	146.0	97.5	67.5
34	227.0	183.0	125.0	86.4
49	270.0	228.0	162.0	113.0
64	295.0	260.0	194.0	136.0
84	311.0	288.0	227.0	162.0
105	317.0	303.0	251.0	181.0
127	319.0	310.0	267.0	195.0
150	320.0	313.0	272.0	199.0

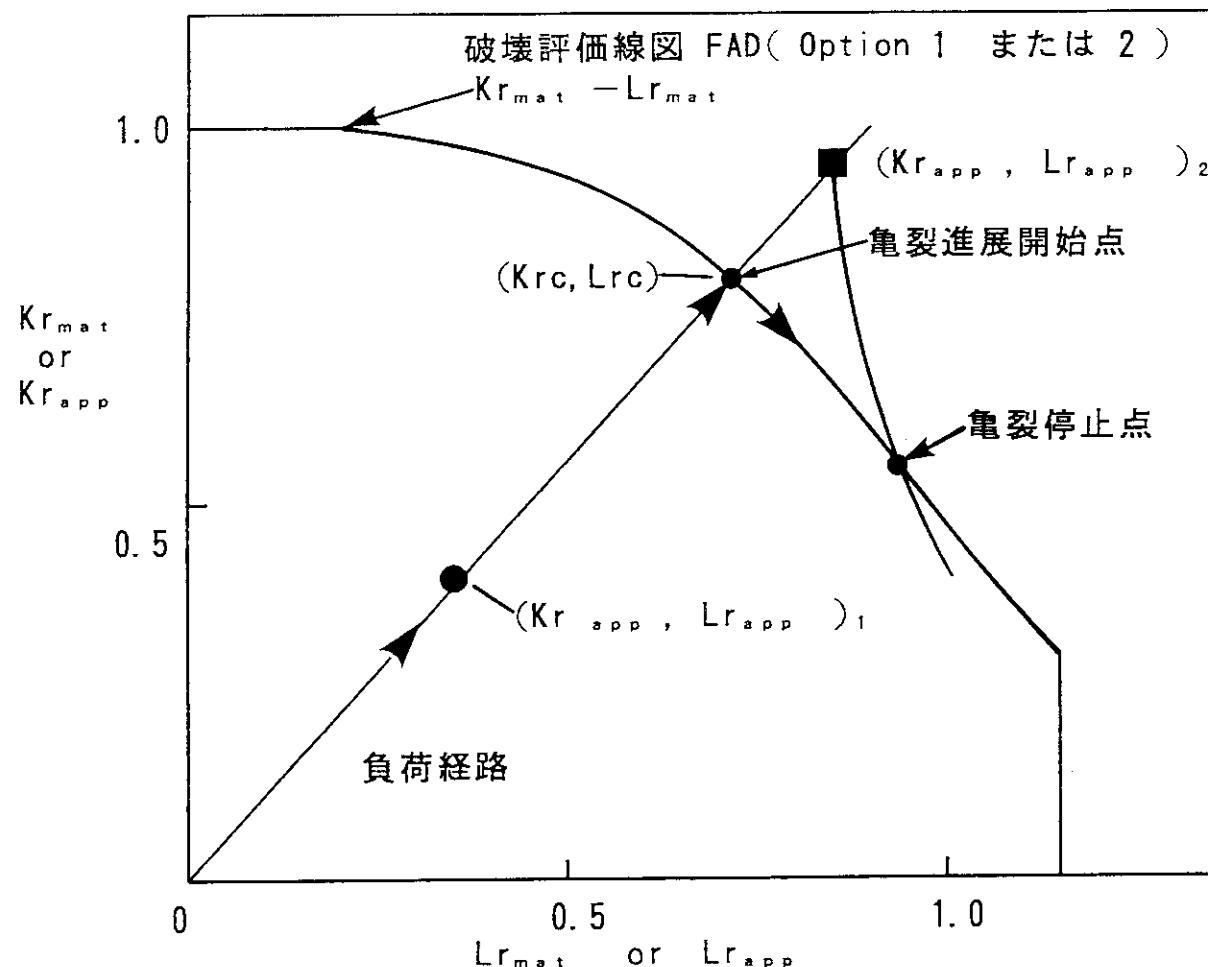
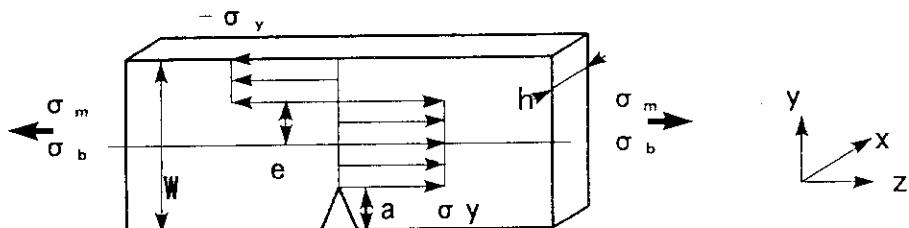
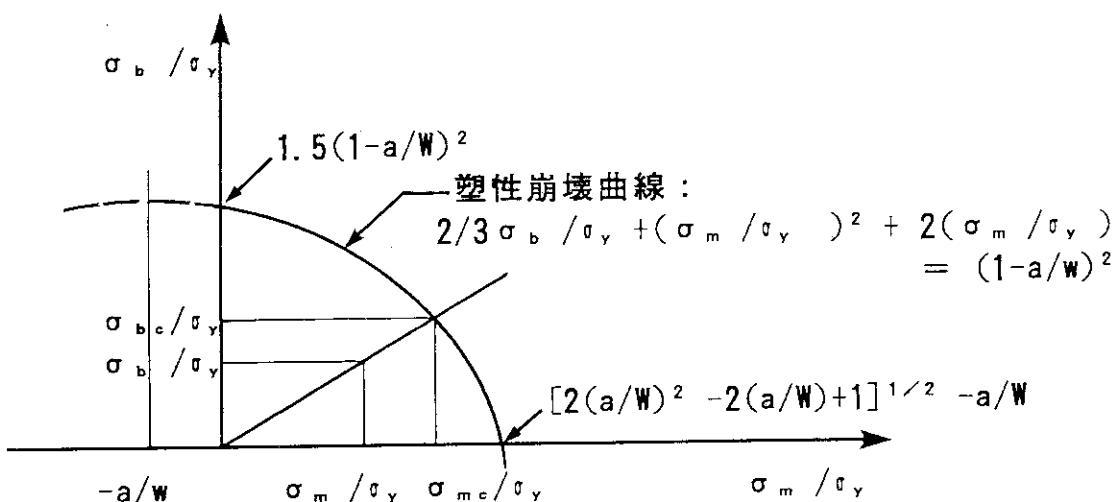


Fig. 2.1 R6法による破壊評価の概念

(σ_m と σ_b が負荷される片側亀裂付き平板の塑性崩壊状態)(σ_m と σ_b が負荷される片側亀裂付き平板の塑性崩壊曲線)L_rの計算式

片側亀裂付き平板の場合：

$$L_r = \sigma_m / \sigma_{m_c} = \sigma_b / \sigma_{b_c}$$

$$= 2(\sigma_m^2 / \sigma_y) / [-A + \{A^2 + 4(1-a/W)^2 \sigma_m^2\}^{1/2}]$$

$$A = 2\sigma_b / 3 + 2a\sigma_m / W$$

半梢円亀裂（亀裂長さ2b）付き平板の場合：

$a_{eff} = \pi b a / (4b+2W)$ により片側亀裂換算の有効亀裂深さを求め
上式を適用する。

(ASTM STP 1020, 390-409, by A. Willoughby, et al.)

Fig. 2.2 塑性崩壊荷重パラメータ L_{rapp}に関する検討

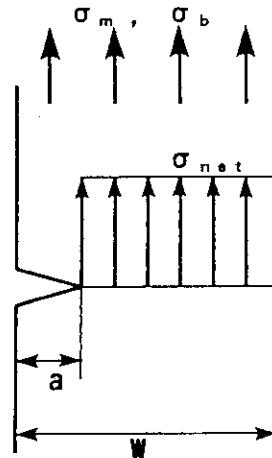
1. σ_m と σ_b の最大応力による安全側の荷重パラメータ L_r

亀裂部の安全側の実断面応力

$$\sigma_{n.e.t} = (\sigma_m + \sigma_b) W / (W-a)$$

荷重パラメータ L_r

$$L_r = \sigma_{n.e.t} / \sigma_y = (\sigma_m + \sigma_b) W / (W-a) / \sigma_y$$

2. σ_m と σ_b による亀裂断面塑性崩壊条件に基づく片側亀裂平板の塑性崩壊パラメータ L_r

亀裂断面塑性崩壊条件 :

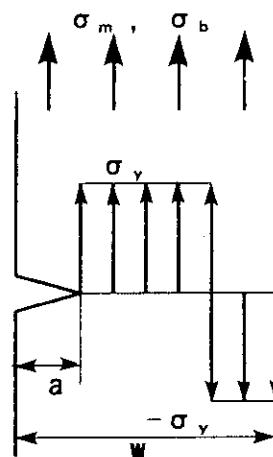
$$\sigma_b / \sigma_y = 2 [-(\sigma_m / \sigma_y)^2 - (\sigma_m / \sigma_y)(2a/W) + (1-a/W)^2] / 3$$

塑性崩壊パラメータ L_r :

$$L_r = 2(\sigma_m^2 / \sigma_y) / [-A + \{ A^2 + 4(1-a/W)^2 \sigma_m^2 \}^{1/2}]$$

ここで

$$A = 2\sigma_b / 3 + 2a\sigma_m / W$$

3. 片側亀裂付き平板の塑性崩壊パラメータの補正に基づく半梢円亀裂付き平板の塑性崩壊パラメータ L_r [ASTM STP 1020, P. 392, by A. Willowby 他より]塑性崩壊パラメータ L_r :

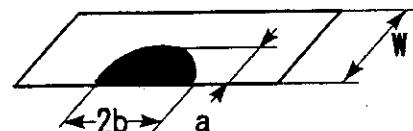
$$L_r = 2(\sigma_m^2 / \sigma_y) / [-A + \{ A^2 + 4(1-a_{eff}/W)^2 \sigma_m^2 \}^{1/2}]$$

ここで

$$A = 2\sigma_b / 3 + 2a_{eff}\sigma_m / W$$

また,

$$a_{eff} = \pi ab / (4b+2W)$$

Fig. 2.3 塑性崩壊荷重パラメータ $L_{r,p}$ の算出式

(1) 片側亀裂付き平板モデル

$$K = \sigma_m (\pi a)^{0.5} F_1 (A) + \sigma_b (\pi a)^{0.5} F_2 (A)$$

ここで、 $F_1 (A)$ より $F_2 (A)$ は、以下の計算式より求める。

$$A = \frac{a}{w}$$

$$F_1 (A) = 1.12 - 0.231 A + 10.55 A^2 - 21.72 A^3 + 30.39 A^4$$

$$F_2 (A) = 1.122 - 1.40 A + 7.33 A^2 - 13.08 A^3 + 14.0 A^4$$

(2) 半梢円亀裂付き平板モデル

$$K = (\sigma_m + H \sigma_b) F \left(\frac{\pi a}{Q} \right)^{0.5}$$

ここで、 H 、 F 、 Q は以下の計算式より求める。

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi$$

$$H_1 = 1 - 0.34 \frac{a}{w} - 0.11 \frac{a}{b} - \frac{a}{w}$$

$$H_2 = 1 + G_1 \frac{a}{w} + G_2 \left(\frac{a}{w} \right)^2$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12 \frac{a}{b}$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{b} \right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{b} \right)^{1.5}$$

$$P = 0.2 + \frac{a}{b} + 0.6 \frac{a}{w}$$

$$\phi = \frac{\pi}{2}$$

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right] f \cdot g \cdot f \cdot$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \frac{a}{b}$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{b}}$$

片側亀裂付き平板 半梢円亀裂付き平板

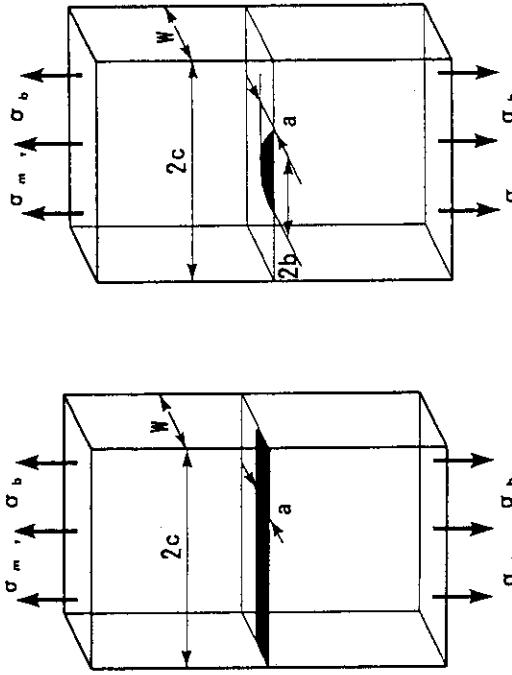
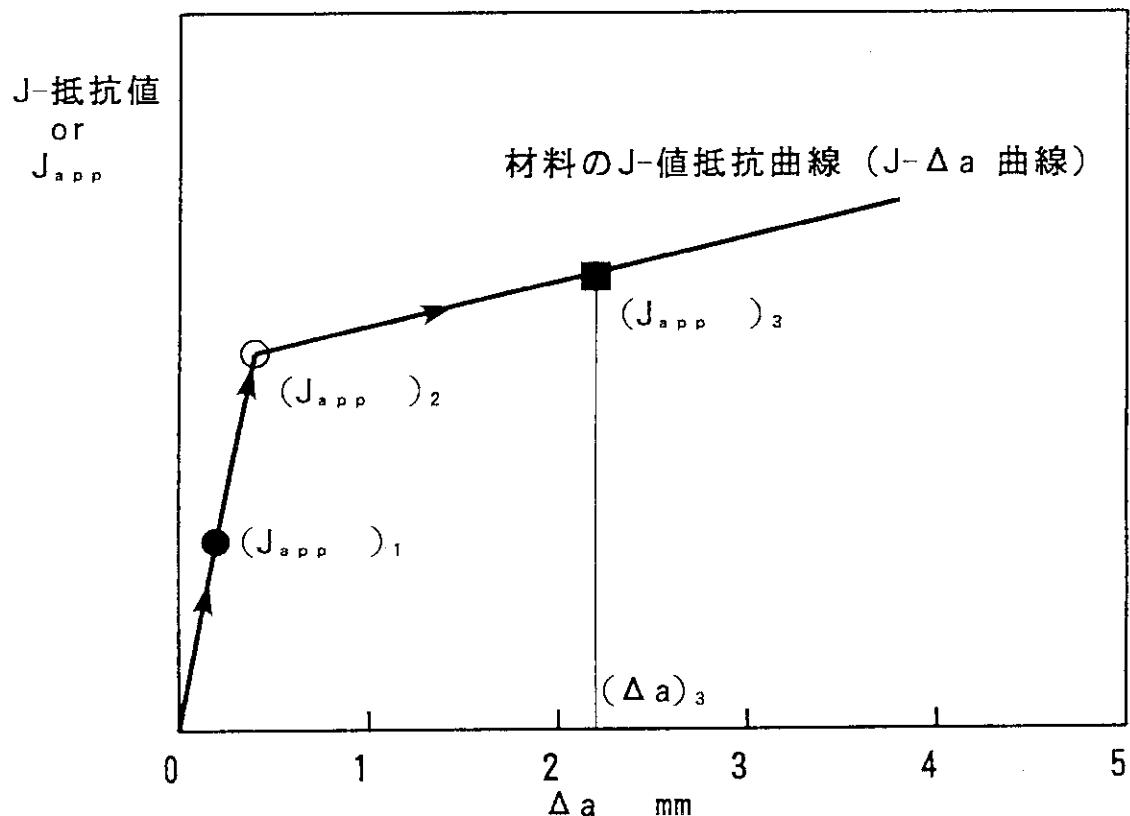


Fig. 2.4 片側亀裂平板モデルおよび半梢円亀裂平板モデルの算出式



- 負荷が $(J_{app})_1$ のときは亀裂進展なし。
- 負荷が $(J_{app})_2$ に達したとき亀裂進展開始。J- Δa 曲線に沿って亀裂進展
- 負荷が $(J_{app})_3$ のときは、亀裂進展量 $(\Delta a)_3$

Fig. 3.1 J 積分抵抗曲線に基づく破壊評価の概念

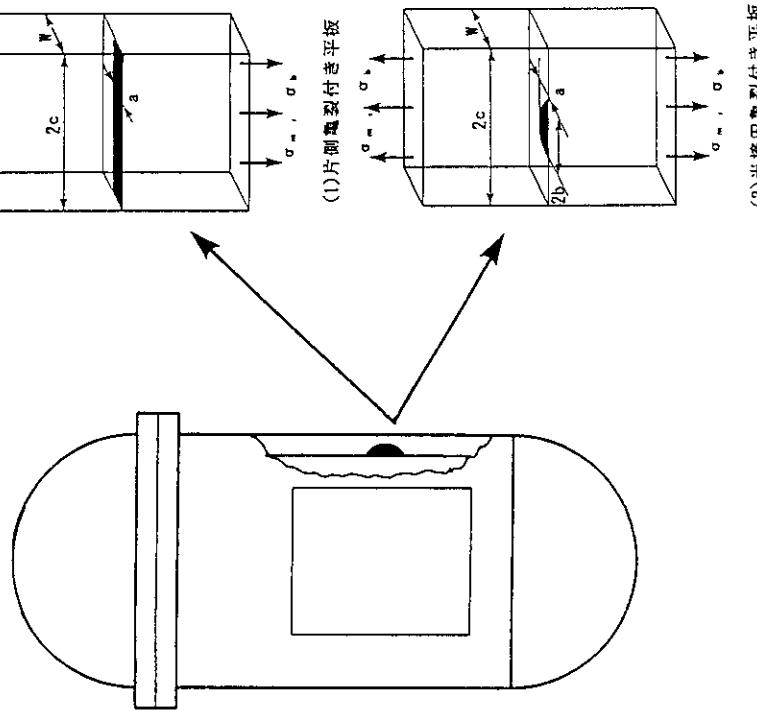
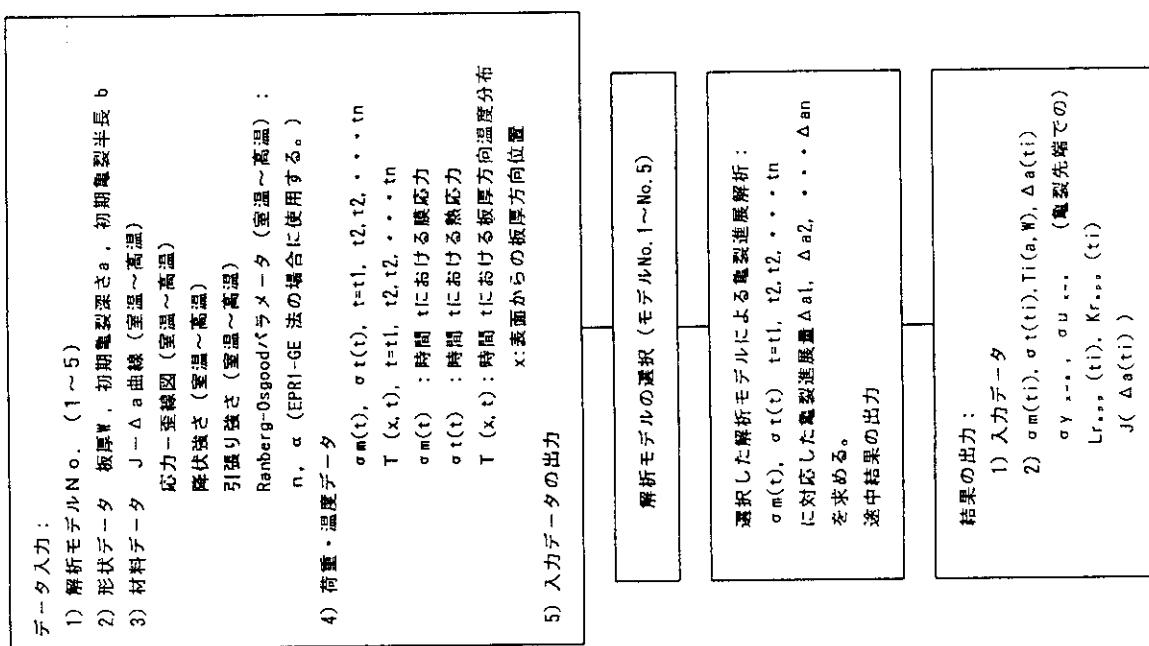


Fig. 4.2 壺裂付き圧力容器のモデル化

Fig. 4.1 解析の流れ

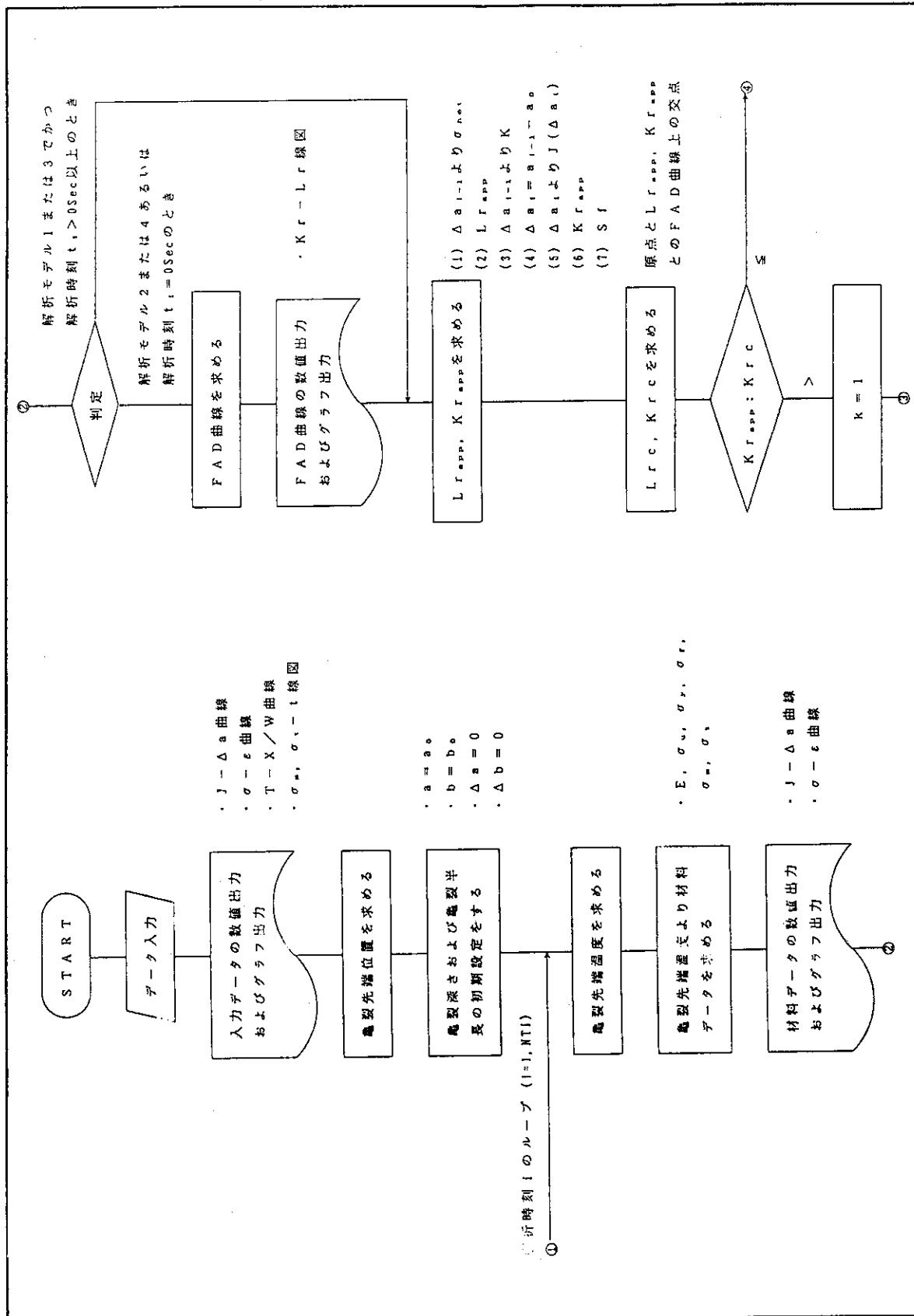


Fig. 4.3 R6法の解析の流れ (1/2)

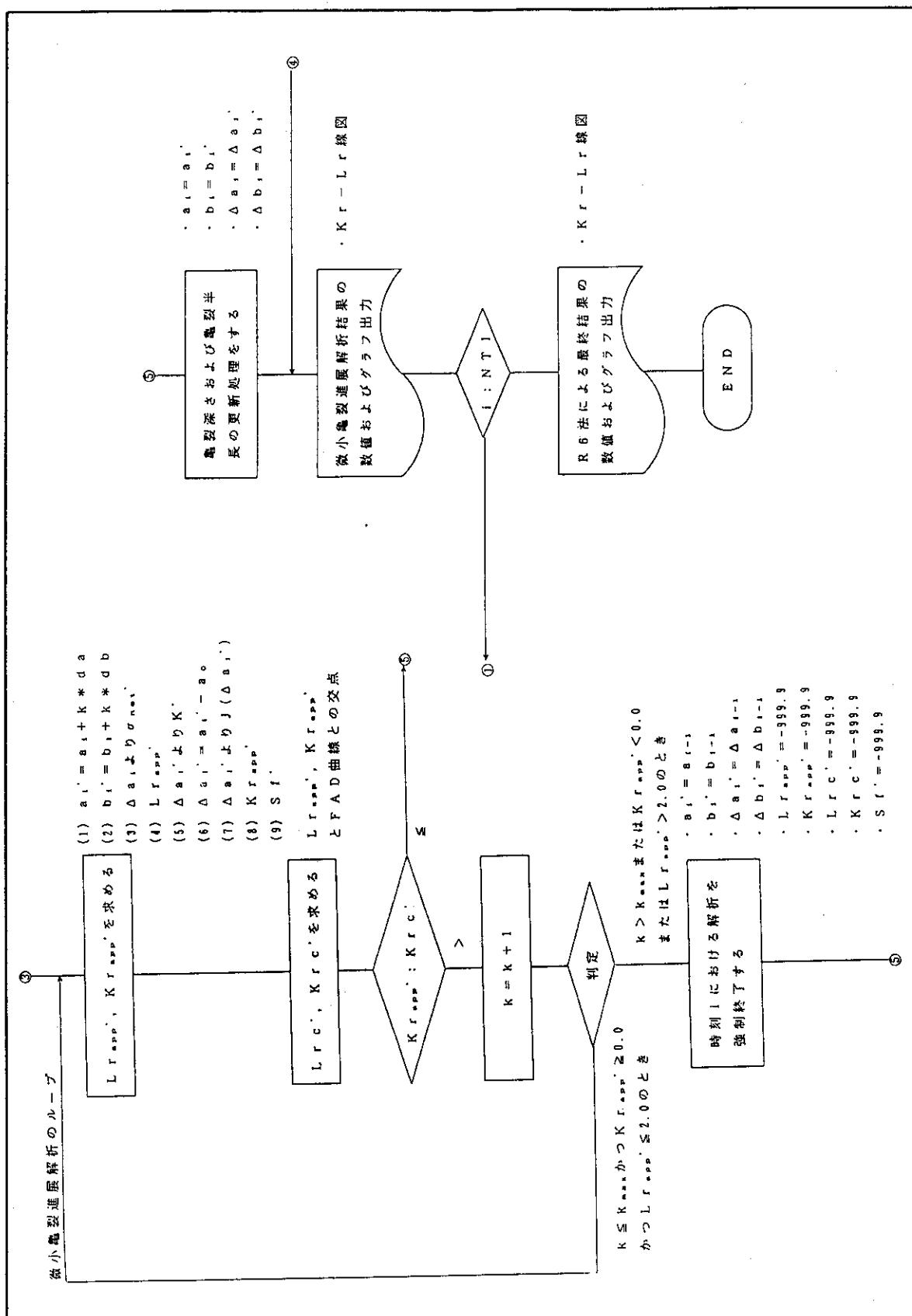


Fig. 4.3 (つづき, 2/2)

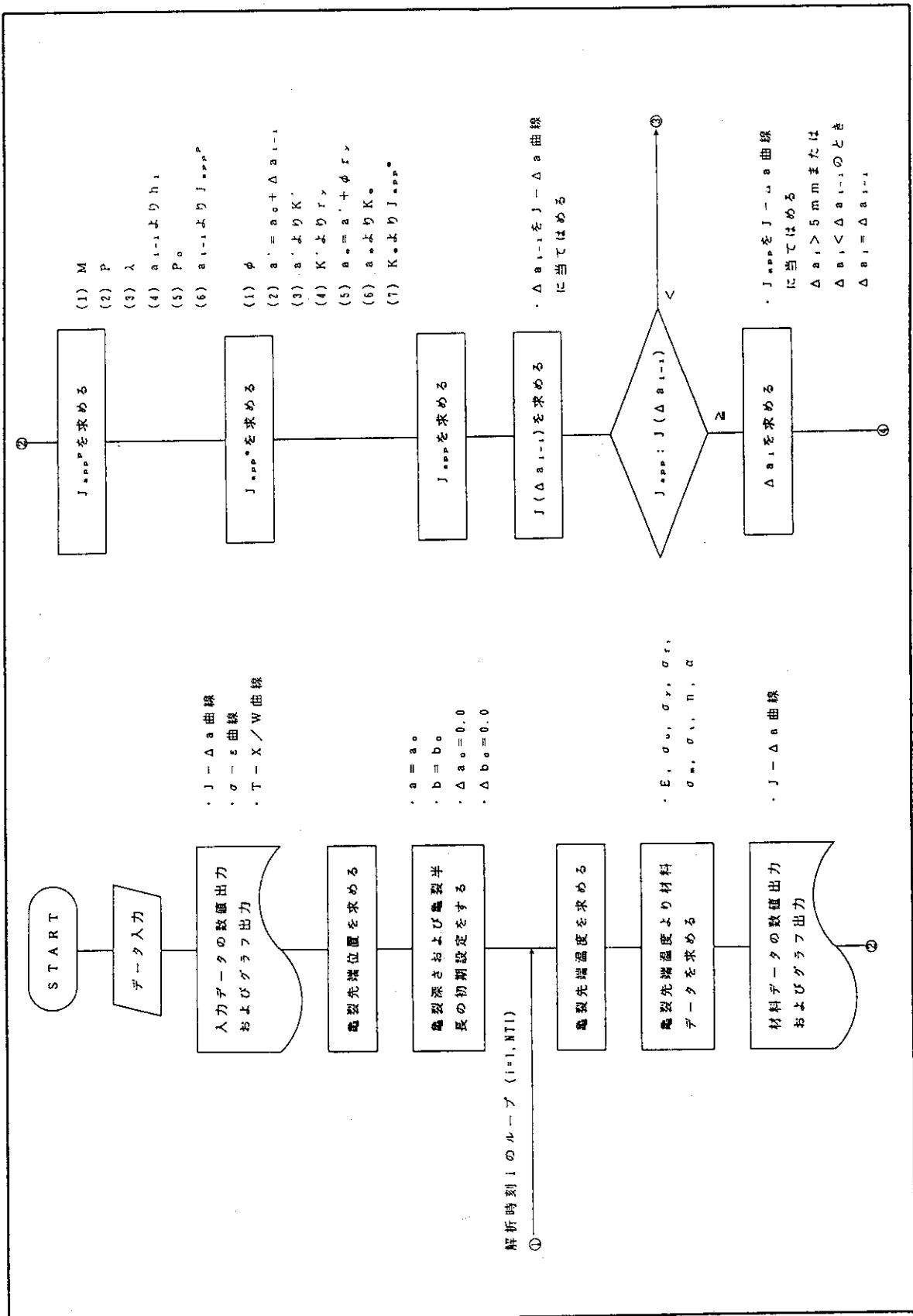


Fig. 4.4 EPRI-GE法の解析の流れ（1／2）

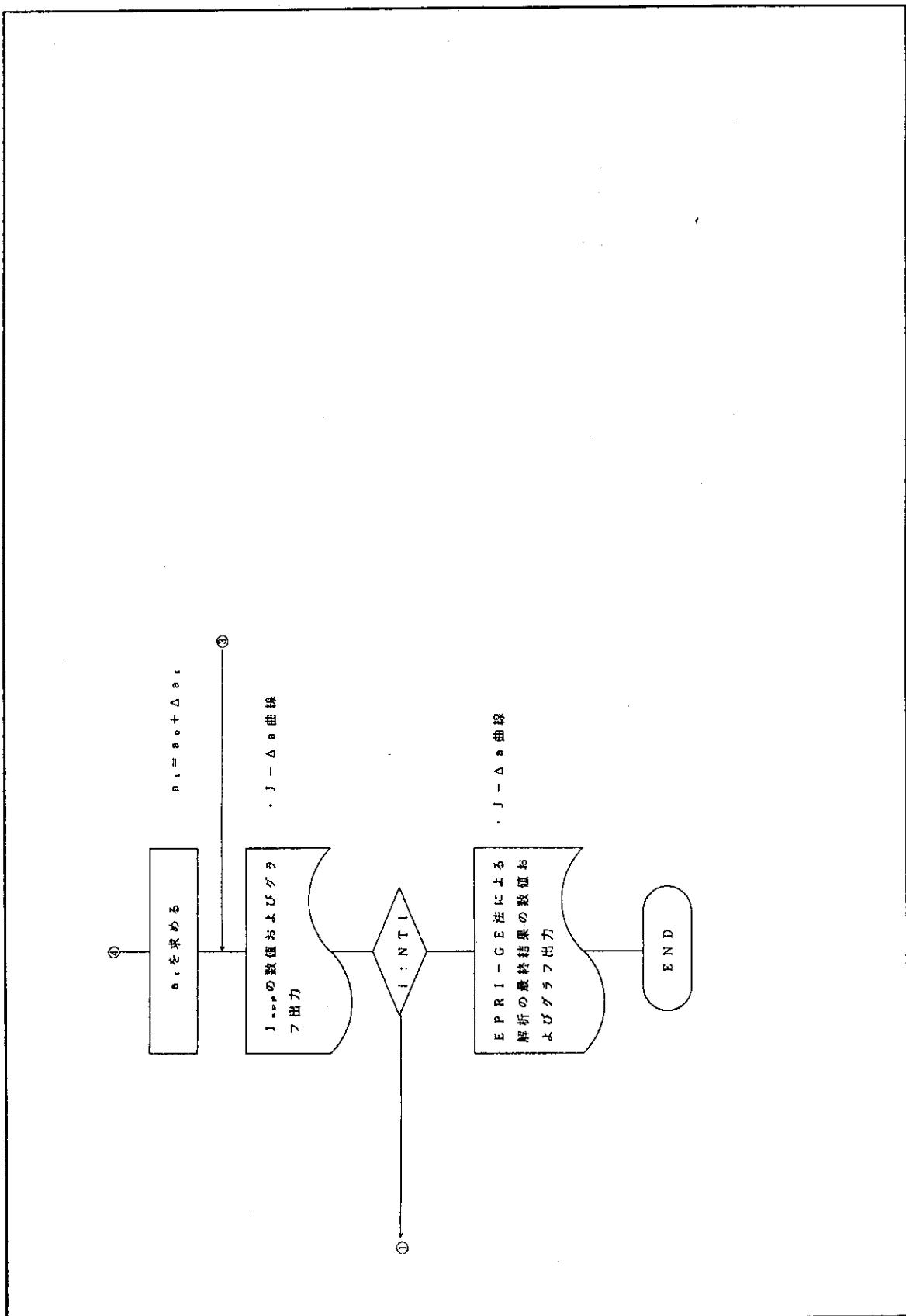


Fig. 4.4 (つづき, 2/2)

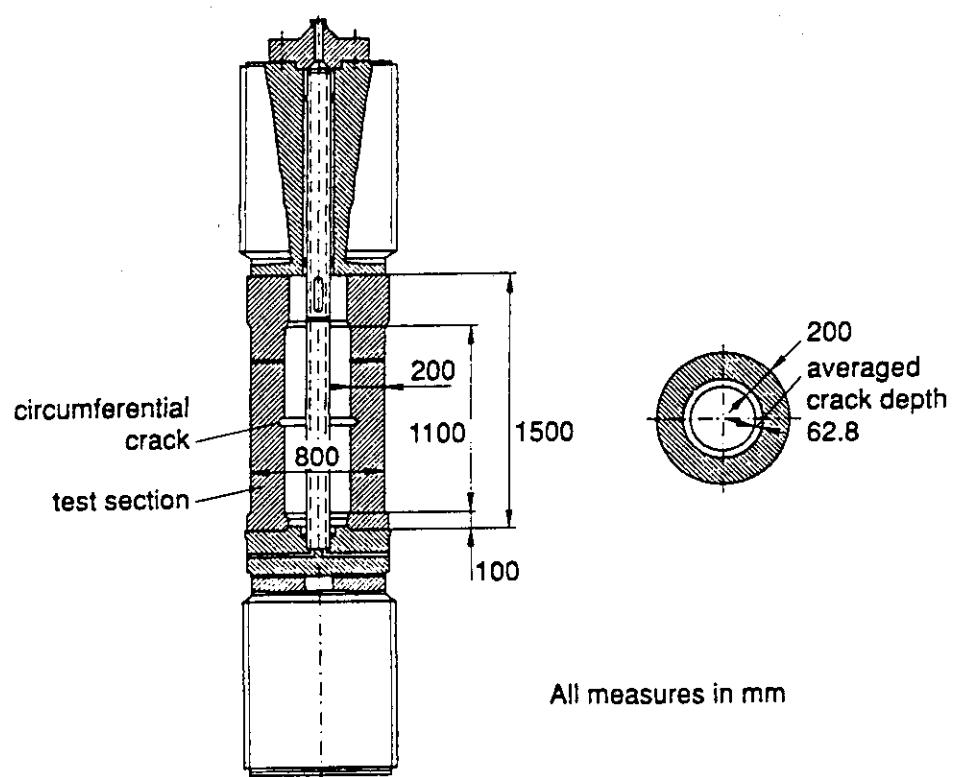


Fig. 5.1 MPAのNKS-3実験試験体形状

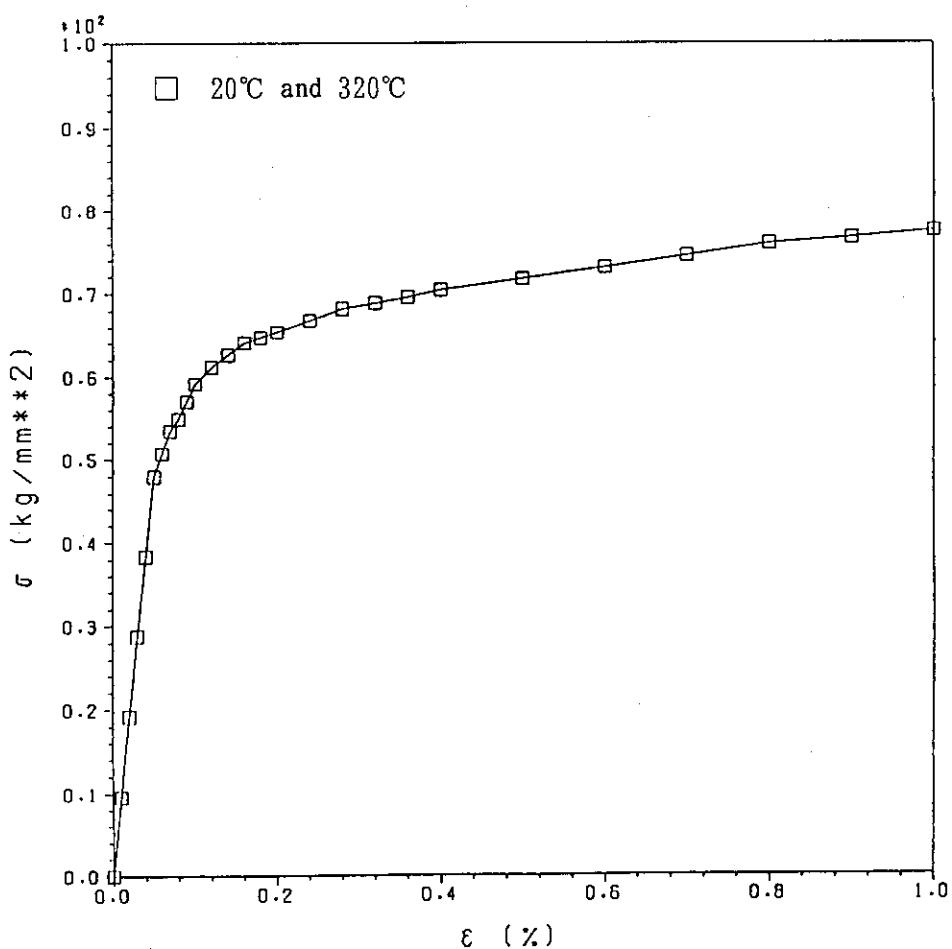


Fig. 5.2 20°Cおよび320°Cの応力-歪線図

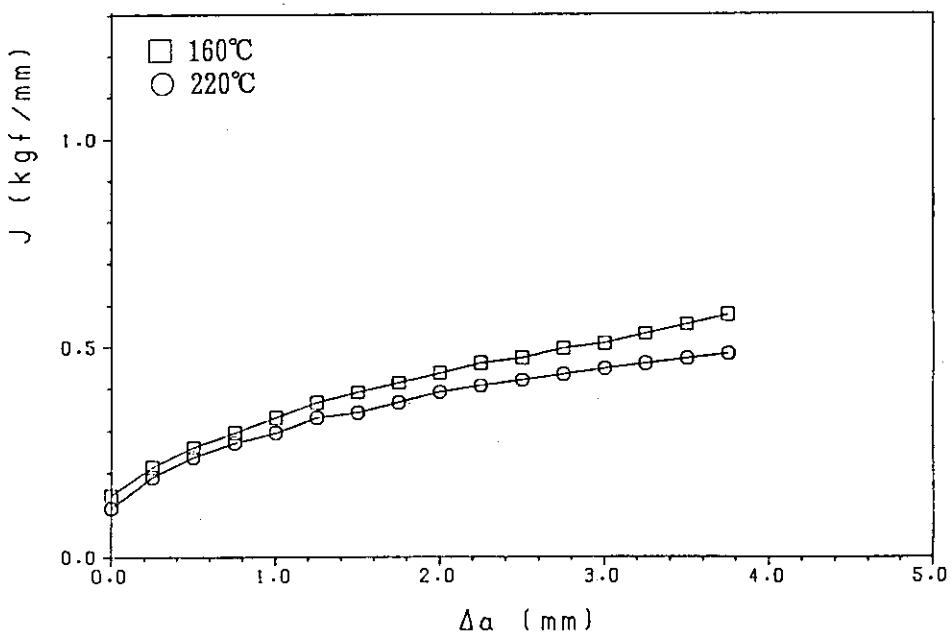
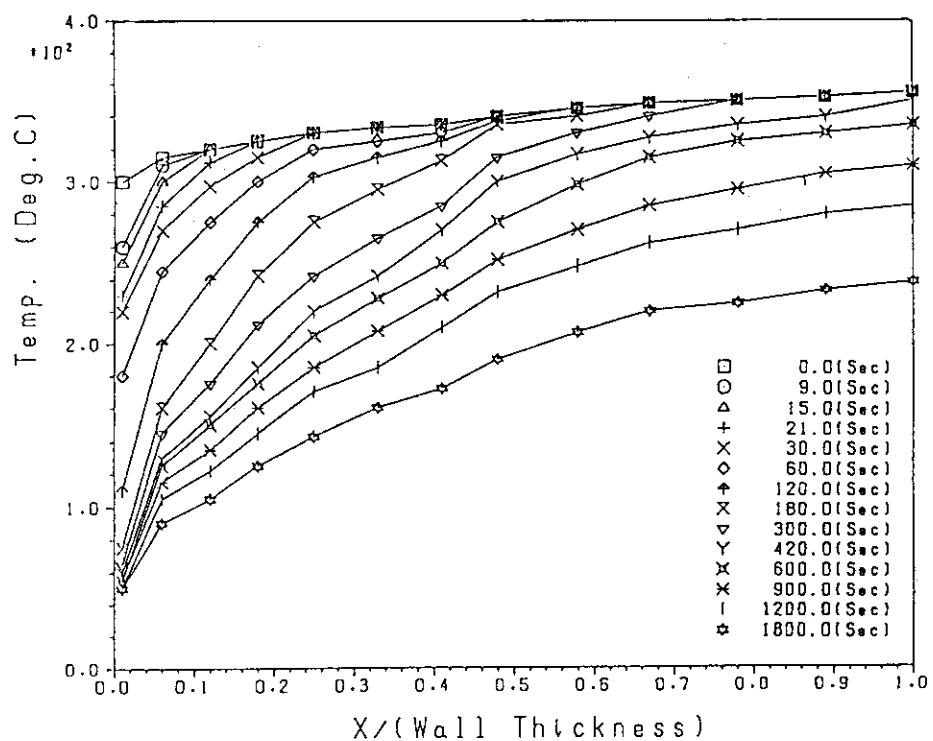
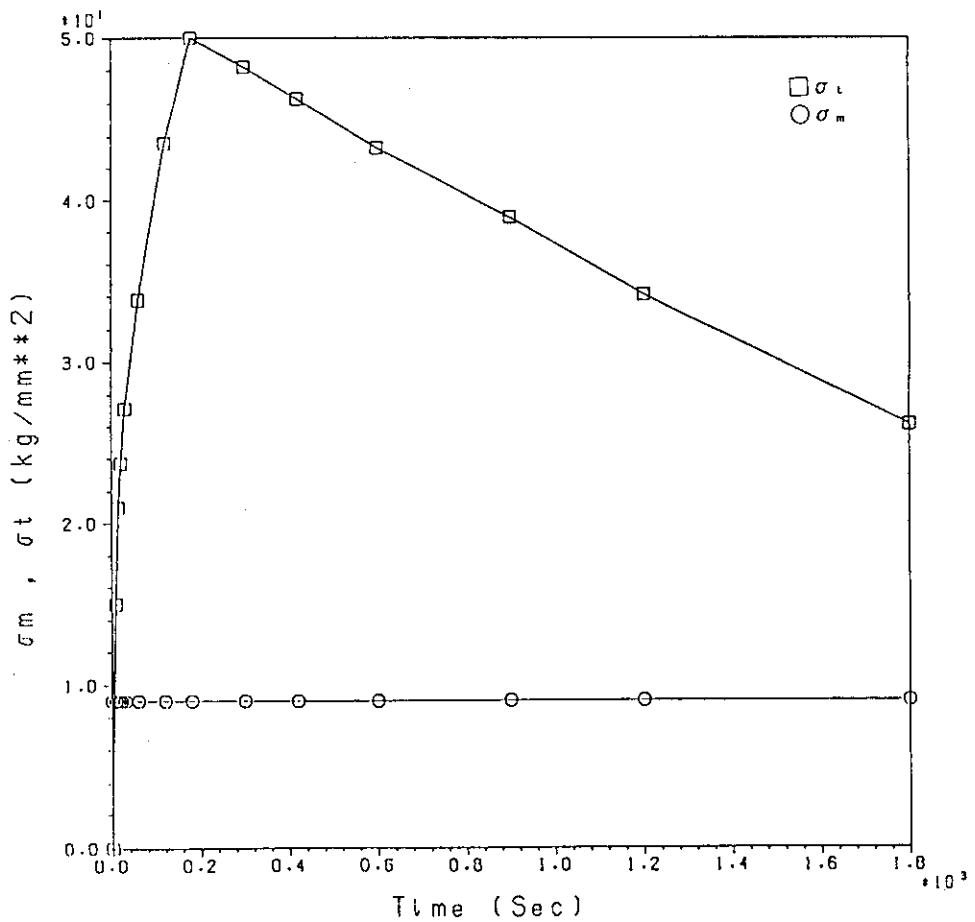


Fig. 5.3 160°Cおよび220°CのJ-Δa 曲線

Fig. 5.4 $t=0 \sim 1800\text{sec}$ の温度分布の変化Fig. 5.5 $t=0 \sim 1800\text{sec}$ の負荷応力時刻歴

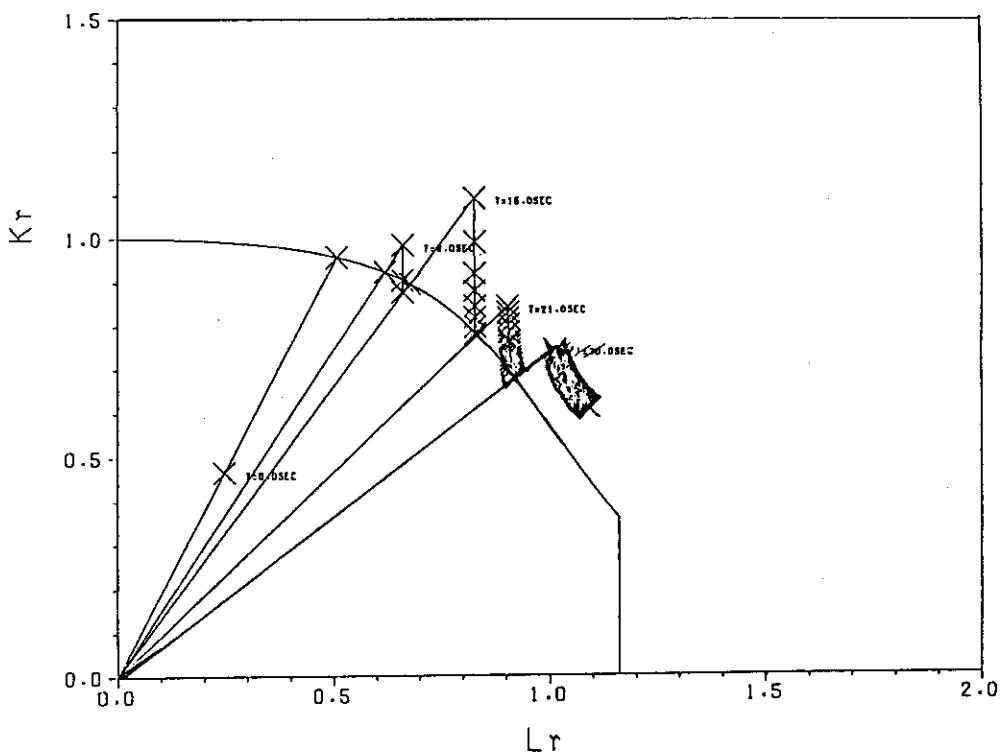


Fig. 5.6 R6法による解析結果の破壊評価線図

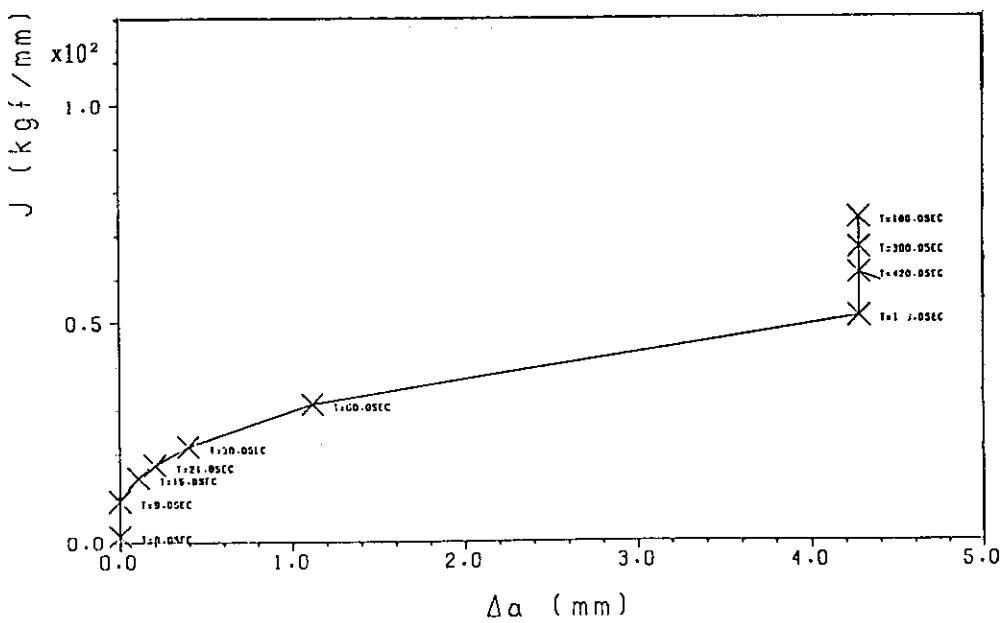


Fig. 5.7 EPRI-GE法による亀裂進展解析結果

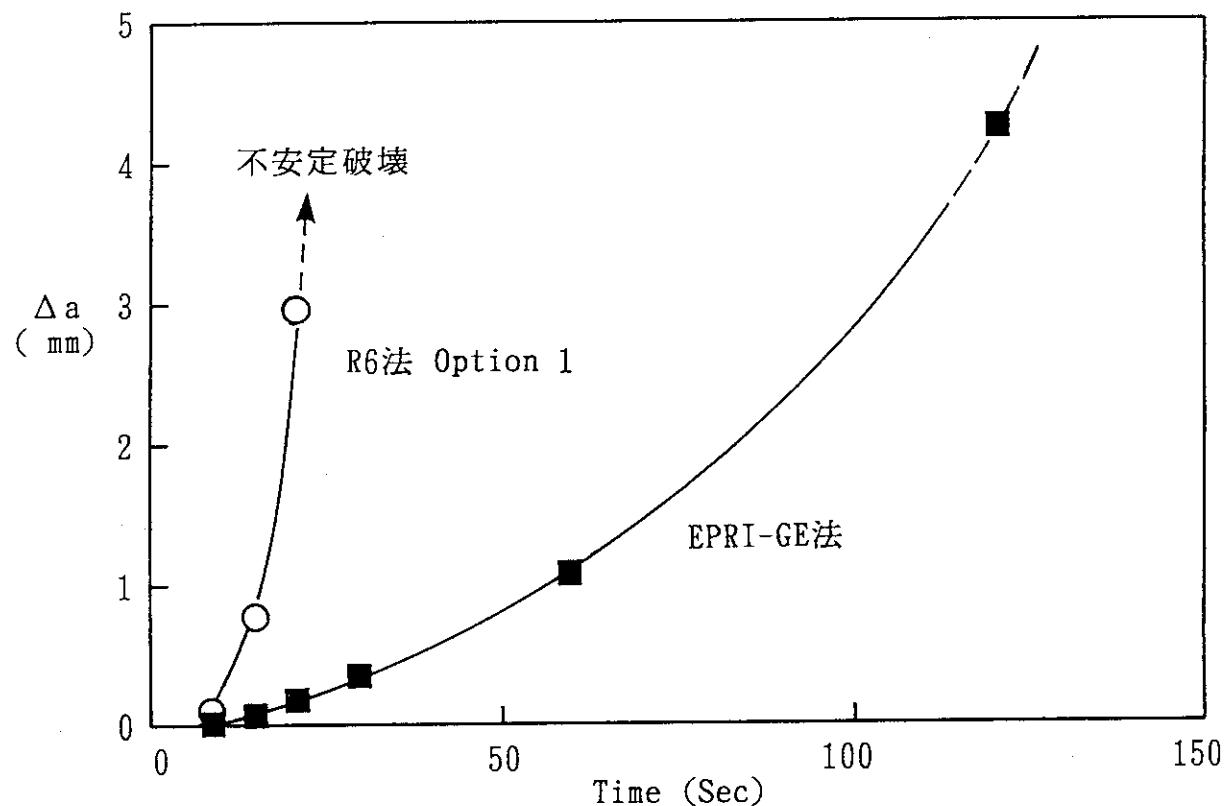


Fig. 5.8 龜裂進展解析結果の比較

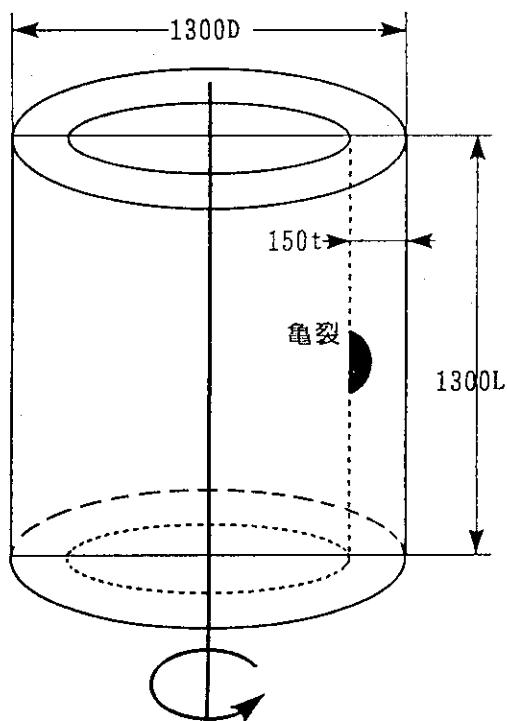


Fig. 6.1 NESO計画で使用される回転円筒試験体形状

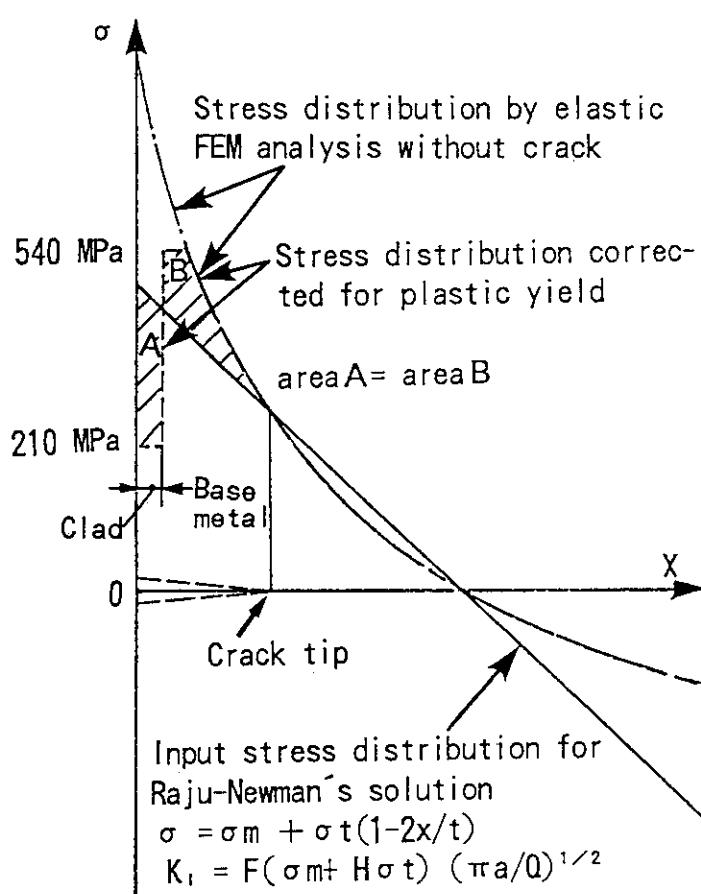


Fig. 6.2 回転円筒試験体のR6法解析用応力分布のモデル化

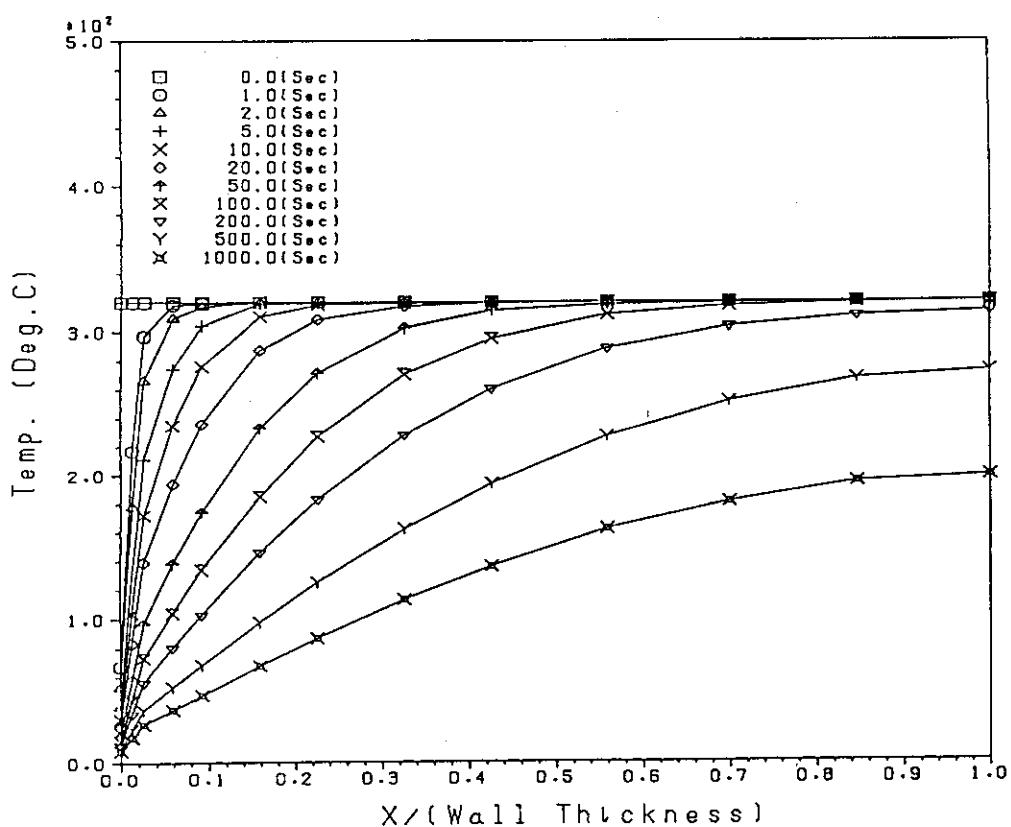
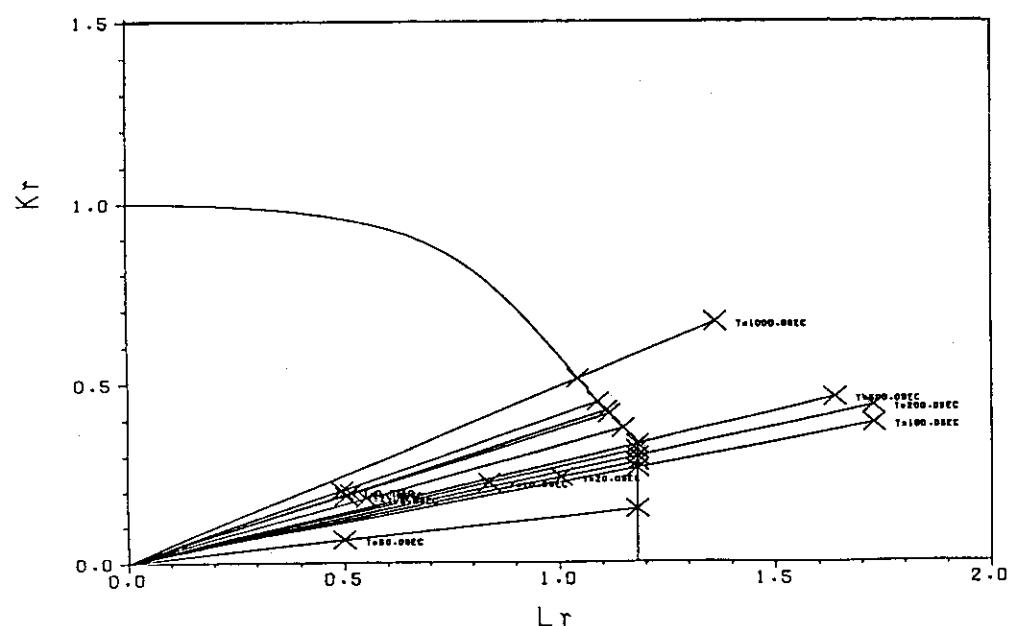
Fig. 6.3 $t=0\sim 1000\text{sec}$ の温度分布の変化

Fig. 6.4 Case 1.1 (1500 rpm)のR6法解析結果

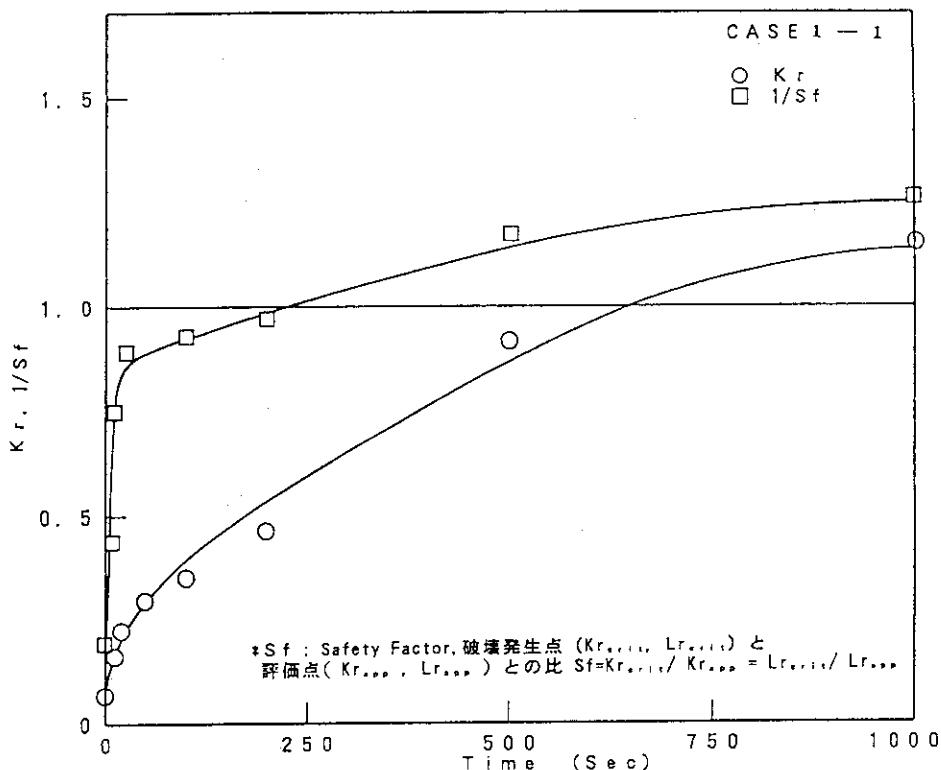


Fig. 6.5 Case 1.1 (1500 rpm)のKrと負荷係数1/Sfの時間変化

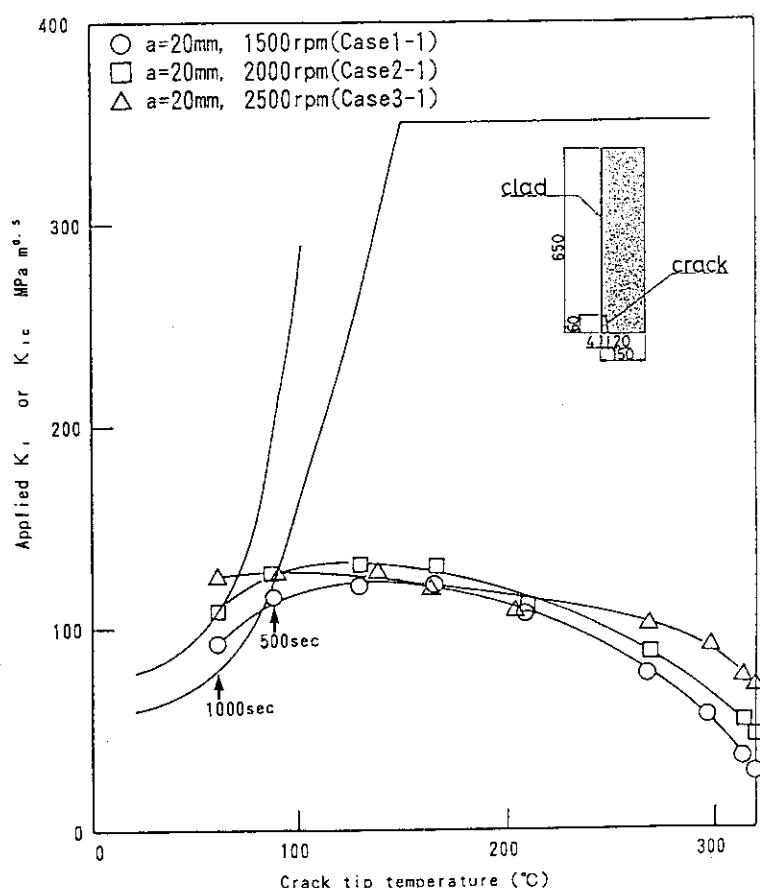


Fig. 6.6 回転円筒試験体の破壊解析線図(a=20mm)

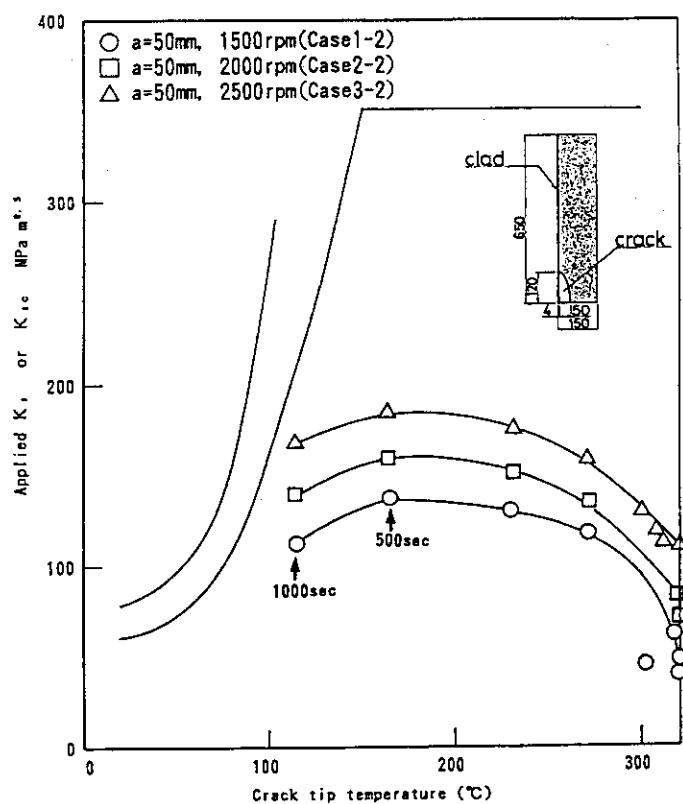


Fig. 6.7 回転円筒試験体の破壊解析線図(a=50mm)

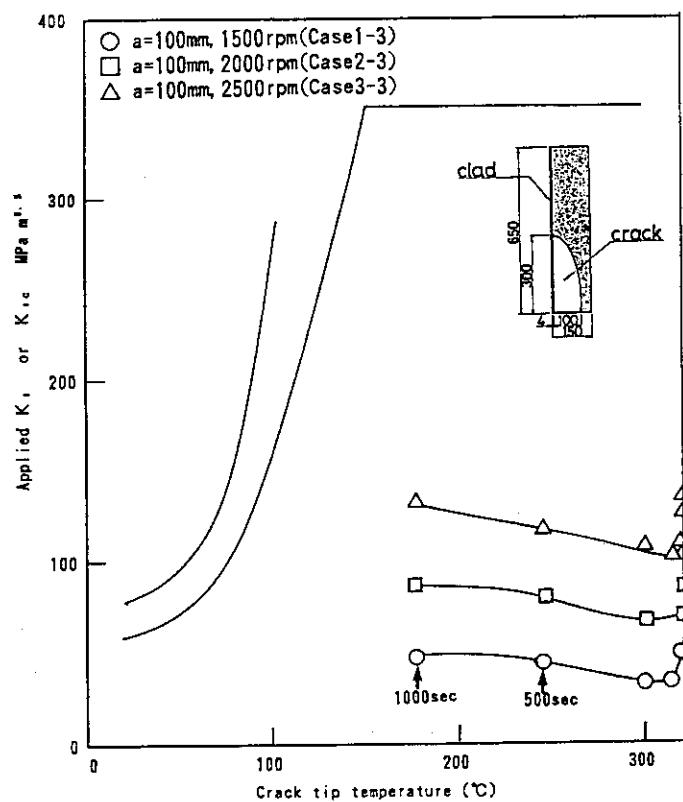


Fig. 6.8 回転円筒試験体の破壊解析線図(a=100mm)

付 錄

付録1 入力データ例：MPA NKS-3 実験のR6法解析

```

1   #
2   ##### 1. TITLE-DATA
3   #
4   TITLE-DATA
5     WTH = 200.0 (MM) , AO = 62.8 (MM) , MODEL = 3 (H05/03/19)
6   #
7   ##### 2. MODEL-DATA
8   #
9   MODEL-DATA
10    3   1   1   1
11   #
12   ##### 12. R6 METHOD PARAMETER
13   #
14   R6-PARAM DATA
15     0.1
16   #
17   ##### 3. GEOMETRY-DATA
18   #
19   GEOMETRY-DATA
20     200.0   62.8   1.E+64
21   #
22   ##### 4. MATERIAL-DATA
23   #
24   MATERIAL-DATA
25     4
26     20.0   160.0   260.0   320.0
27     21414.0  20394.0  19405.0  18803.0
28     57.3     52.9     54.7     53.3
29     73.7     68.5     71.3     71.6
30   #
31 ##### 4.1 J-DELTA(A)
32   #
33 J-DELTA(A) CURVE DATA
34     2
35     160.0   220.0
36   #
37 ##### (1) TEMPERATURE = 160.0 (DEG)
38   #
39     16
40     0.0     0.25    0.5     0.75    1.0     1.25    1.5     1.75
41     2.0     2.25    2.5     2.75    3.0     3.25    3.5     3.75
42     14.68   21.31   26.10   29.67   33.24   36.71   39.16   41.50
43     43.85   46.19   47.42   49.76   50.96   53.33   55.67   58.02
44   #
45 ##### (2) TEMPERATURE = 220.0 (DEG)
46   #
47     16
48     0.0     0.25    0.5     0.75    1.0     1.25    1.5     1.75
49     2.0     2.25    2.5     2.75    3.0     3.25    3.5     3.75
50     11.52   18.97   23.66   27.23   29.67   33.24   34.36   36.71
51     39.16   40.69   42.11   43.54   44.97   46.19   47.42   48.54
52   #
53 ##### 4.2 SIGMA-EPS
54   #
55 SIGMA-EPS CURVE DATA
56     1
57     260.0
58   #
59 ##### (1) TEMPERATURE = 260.0 (DEG)
60   #
61     27
62     0.0     0.001   0.002   0.003   0.004   0.005   0.006   0.007
63     0.008   0.009   0.010   0.012   0.014   0.016   0.018   0.020
64     0.024   0.028   0.032   0.036   0.040   0.050   0.060   0.070
65     0.080   0.090   0.100
66     0.0     9.59    19.17   28.76   38.34   47.93   50.68   53.43
67     54.86   57.00   59.14   61.18   62.61   64.04   64.65   65.36
68     66.79   68.22   68.83   69.54   70.36   71.68   73.11   74.54
69     75.97   76.68   77.50
70   #
71 ##### 4.3 RAMBERG OSGOOD PARAMETER
72   #

```

```

73   RAOS-DATA
74     4
75       20.0      160.0      260.0      320.0
76       0.0        0.0        0.0        0.0
77       0.0        0.0        0.0        0.0
78   #
79   ##### 5. LOAD-DATA
80   #
81   LOAD-DATA
82     14
83       0.0        9.0       15.0       21.0       30.0       60.0      120.0      180.0
84       300.0      420.0      600.0      900.0     1200.0     1800.0
85   #
86   ##### 5.1 SIGMA.M-DATA
87   #
88   SM-DATA
89       9.0        9.0        9.0        9.0        9.0        9.0        9.0        9.0
90       9.0        9.0        9.0        9.0        9.0        9.0        9.0        9.0
91   #
92   ##### 5.2 SIGMA.T-DATA
93   #
94   ST-DATA
95       0.0        15.0       21.0       23.7       27.1       33.8       43.6       50.0
96       48.2       46.3       43.3       38.9       34.1       26.1
97   #
98   ##### 5.3 TEMPERATURE-DATA
99   #
100  ##### (1) TIME = 0.0 SEC
101  #
102  TEMP-DATA
103    13
104     0.01       0.06       0.12       0.18       0.25       0.33       0.41       0.48
105     0.58       0.67       0.78       0.89       1.00
106     300.0      315.0      320.0      325.0      330.0      333.0      335.0      340.0
107     345.0      348.0      350.0      352.0      355.0
108   #
109  ##### (2) TIME = 9.0 SEC
110  #
111  13
112     0.01       0.06       0.12       0.18       0.25       0.33       0.41       0.48
113     0.58       0.67       0.78       0.89       1.00
114     260.0      310.0      320.0      325.0      330.0      333.0      335.0      340.0
115     345.0      348.0      350.0      352.0      355.0
116   #
117  ##### (3) TIME = 15.0 SEC
118  #
119  13
120     0.01       0.06       0.12       0.18       0.25       0.33       0.41       0.48
121     0.58       0.67       0.78       0.89       1.00
122     250.0      300.0      320.0      325.0      330.0      333.0      335.0      340.0
123     345.0      348.0      350.0      352.0      355.0
124   #
125  ##### (4) TIME = 21.0 SEC
126  #
127  13
128     0.01       0.06       0.12       0.18       0.25       0.33       0.41       0.48
129     0.58       0.67       0.78       0.89       1.00
130     230.0      285.0      312.0      325.0      330.0      333.0      335.0      340.0
131     345.0      348.0      350.0      352.0      355.0
132   #
133  ##### (5) TIME = 30.0 SEC
134  #
135  13
136     0.01       0.06       0.12       0.18       0.25       0.33       0.41       0.48
137     0.58       0.67       0.78       0.89       1.00
138     220.0      270.0      297.0      315.0      330.0      333.0      335.0      340.0
139     345.0      348.0      350.0      352.0      355.0
140   #
141  ##### (6) TIME = 60.0 SEC
142  #
143  13
144     0.01       0.06       0.12       0.18       0.25       0.33       0.41       0.48
145     0.58       0.67       0.78       0.89       1.00
146     180.0      245.0      275.0      300.0      320.0      325.0      330.0      340.0
147     345.0      348.0      350.0      352.0      355.0

```

```

148      #
149      ###      (7) TIME = 120.0 SEC
150      #
151      13
152      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
153      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
154      110.0     200.0     240.0     275.0     303.0     315.0     325.0     337.0
155      345.0     348.0     350.0     352.0     355.0
156      #
157      ###      (8) TIME = 180.0 SEC
158      #
159      13
160      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
161      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
162      75.0      160.0     200.0     242.0     275.0     295.0     313.0     335.0
163      340.0     348.0     350.0     352.0     355.0
164      #
165      ###      (9) TIME = 300.0 SEC
166      #
167      13
168      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
169      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
170      65.0      145.0     175.0     212.0     242.0     265.0     285.0     315.0
171      330.0     340.0     350.0     352.0     355.0
172      #
173      ###      (10) TIME = 420.0 SEC
174      #
175      13
176      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
177      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
178      60.0      130.0     155.0     185.0     220.0     242.0     270.0     300.0
179      317.0     327.0     335.0     340.0     350.0
180      #
181      ###      (11) TIME = 600.0 SEC
182      #
183      13
184      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
185      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
186      55.0      125.0     150.0     175.0     205.0     228.0     250.0     275.0
187      298.0     315.0     325.0     330.0     335.0
188      #
189      ###      (12) TIME = 900.0 SEC,
190      #
191      13
192      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
193      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
194      55.0      115.0     135.0     160.0     185.0     208.0     230.0     252.0
195      270.0     285.0     295.0     305.0     310.0
196      #
197      ###      (13) TIME = 1200.0 SEC
198      #
199      13
200      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
201      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
202      50.0      105.0     122.0     145.0     170.0     185.0     210.0     232.0
203      248.0     262.0     270.0     280.0     285.0
204      #
205      ###      (14) TIME = 1800.0 SEC
206      #
207      13
208      0.01      0.06      0.12      0.18      0.25      0.33      0.41      0.48
209      0.58      0.67      0.78      0.89      1.00
210      50.0      90.0      105.0     125.0     143.0     160.0     172.0     190.0
211      207.0     220.0     225.0     233.0     238.0
.....*....1....*....2....*....3....*....4....*....5....*....6....*....7....*....8
*** INPUT DATA END ***

```

付録2 プログラムの解説

付録2.1 概要

本プログラムはFORTRAN-77で作成し、グラフ出力にはARGUS-V4を使用した。コンモン変数はインクルードファイルにまとめ、配列の大きさはPARAMETER文を用いて設定した。現在の設定値を以下に示すが、これを越える大きさの解析をする場合は、設定値を修正する必要がある。

変数名	設定値	変数の意味
MAXTJR	10	J - Δa 曲線の本数
MAXPJR	100	" 離散点数
MAXTSE	10	σ - ε 曲線の本数
MAXPSE	100	" 離散点数
MAXRO	10	Ramberg-Osgood則パラメータの温度数
MAXMAT	10	材料データの温度数
MAXTI	50	解析時刻数
MAXPXW	100	T - X / W 図の離散点数
MAXFAD	101	F A D 曲線の離散点数
MAXANA	100	R6法の微小亀裂進展解析回数
MAXPCJ	100	解析時刻 i における J - Δa 曲線の離散点数
MAXPCS	100	解析時刻 i における σ - ε 曲線の離散点数
MAXFNL	50	解析時刻数(最終結果用)
MAXAR6	100	R6法の微小亀裂進展解析回数(最終結果用)
MAXGRP	11	出力グラフの種類

付録2. 2 プログラムの構造

```

MAIN  ----*DTLIST
    +-*ARGUS
    +-*INPUT  ----CNTSET
    |           +-*GODIM2 ----*STOR1D
    |           +-*SCSIZE
    |           +-*GRSIZE
    |           +-*ORIGIN
    |           +-*XSCALE
    |           +-*YSCALE
    |           +-*XAXIS
    |           +-*YAXIS
    |           +-*KLINE
    |           +-*COMENT
    |           +-*DATAAPT
    |           +-*CMTOPT
    |           +-*ONEDIM
    |           +-*ARGUS
    +-*R6      ----MODIFY ----INTPOL
    |           +-*GODIM1  ----*STOR1D
    |           +-*SCSIZE
    |           +-*GRSIZE
    |           +-*ORIGIN
    |           +-*XSCALE
    |           +-*YSCALE
    |           +-*XAXIS
    |           +-*YAXIS
    |           +-*KLINE
    |           +-*COMENT
    |           +-*DATAAPT
    |           +-*CMTOPT
    |           +-*ARGUS
    |           +-*ONEDIM
    |           +-*USYMB
    |           +-*UPLLOT
    +-*FADCV  ----INTPOL
    |           +-*GODIM1  ----*STOR1D
    |           +-*SCSIZE
    |           +-*GRSIZE
    |           +-*ORIGIN
    |           +-*XSCALE
    |           +-*YSCALE
    |           +-*XAXIS
    |           +-*YAXIS
    |           +-*KLINE
    |           +-*COMENT
    |           +-*DATAAPT
    |           +-*CMTOPT
    |           +-*ARGUS
    |           +-*ONEDIM
    |           +-*USYMB
    |           +-*UPLLOT
    +-*R6ONLY  ----KRLR   ----KFACT
    |           |           +-*INTPOL
    |           +-*KRCLRC  ----CROSS
    |           |           +-*INTPOL
    |           |           +-*CROSS
    +-*OUTR61  ----GODIM4  ----*STOR1D
    |           +-*SCSIZE

```

```
MAIN ----R6     ----OUTR61 ----GODIM4---+*GRSIZE
|           |           +-*ORIGIN
|           |           +-*XSCALE
|           |           +-*YSCALE
|           |           +-*XAXIS
|           |           +-*YAXIS
|           |           +-*KLINE
|           |           +-*COMENT
|           |           +-*DATAPT
|           |           +-*CMTOPT
|           |           +-*ARGUS
|           |           +-*ONEDIM
|           |           +-*UPLOT
|           |           +-*USYMB
|           +-OUTR62 ----GODIM5   ---*STOR1D
|           |           +-*SCSIZE
|           |           +-*GRSIZE
|           |           +-*ORIGIN
|           |           +-*XSCALE
|           |           +-*YSCALE
|           |           +-*XAXIS
|           |           +-*YAXIS
|           |           +-*KLINE
|           |           +-*COMENT
|           |           +-*CMTOPT
|           |           +-*ARGUS
|           |           +-*ONEDIM
|           |           +-*UPLOT
|           |           +-*USYMB
+--EPRIGE ----MODIFY ----INTPOL
|           |           +-*STOR1D
|           |           +-*SCSIZE
|           |           +-*GRSIZE
|           |           +-*ORIGIN
|           |           +-*XSCALE
|           |           +-*YSCALE
|           |           +-*XAXIS
|           |           +-*YAXIS
|           |           +-*KLINE
|           |           +-*COMENT
|           |           +-*DATAPT
|           |           +-*CMTOPT
|           |           +-*ARGUS
|           |           +-*ONEDIM
|           |           +-*USYMB
|           |           +-*UPLOT
|           +-JAPLD    ----H1FUNC  ----INTNUM
|           |           |           +-*INTPOL
|           |           |           +-*KFACT
|           |           |           +-*INTPOL
|           +-OUTEG1  ----GODIM1   ---*STOR1D
|           |           +-*SCSIZE
|           |           +-*GRSIZE
|           |           +-*ORIGIN
|           |           +-*XSCALE
|           |           +-*YSCALE
|           |           +-*XAXIS
|           |           +-*YAXIS
```

```
MAIN ----EPRIGE ----OUTEG1 ----GODIM1---+*KLINE
|                                         +-*COMENT
|                                         +-*DATAAPT
|                                         +-*CMTOPT
|                                         +-*ARGUS
|                                         +-*ONEDIM
|                                         +-*USYMB
|                                         +-*UPLOT
+--DUTEG2 ----GODIM3 ---*STOR1D
+--*SCSIZE
+--*GRSIZE
+--*ORIGIN
+--*XSCALE
+--*YSCALE
+--*XAXIS
+--*YAXIS
+--*KLINE
+--*COMENT
+--*CMTOPT
+--*ARGUS
+--*ONEDIM
+--*USYMB
```

付録2.3 ルーチンの説明

NO	ルーチン名	ルーチンの機能説明
1	MAIN	亀裂進展簡易解析プログラムを制御する(メインルーチン)
2	CNTSET	物性値の単位とグラフタイトルを設定する
3	CROSS	直線と直線との交点を求める
4	EPRIGE	E P R I - G E 法による解析を制御する
5	FADCV	F A D 曲線を求め数値およびグラフ出力する
6	GODIM1	解析途中の材料データおよびF A D 曲線をグラフ出力する
7	GODIM2	入力した材料データ、荷重データをグラフ出力する
8	GODIM3	E P R I - G E 法による最終結果をグラフ出力する
9	GODIM4	R 6 法による途中結果をグラフ出力する
10	GODIM5	R 6 法による最終結果をグラフ出力する
11	H1FUNC	E P R I - G E 法の場合の h ,function を求める
12	INPUT	入力データを読み込み数値およびグラフ出力する
13	INTNUM	線形補間テーブルのインデックスを求める
14	INTPOL	線形補間をする
15	JAPPLD	Japp を求める
16	KFACT	応力拡大係数を求める
17	KRCLRC	Krc と Lrc を求める
18	KRLR	Krapp と Lrapp を求める
19	MODIFY	亀裂先端温度、材料データ、荷重データを求め数値およびグラフ出力する
20	OUTEG1	E P R I - G E 法による解析の途中結果を数値およびグラフ出力する
21	OUTEG2	E P R I - G E 法による解析の最終結果を数値およびグラフ出力する
22	OUTR61	R 6 法による解析の途中結果を数値およびグラフ出力する
23	OUTR62	R 6 法による解析の最終結果を数値およびグラフ出力する
24	R6	R 6 法による解析を制御する
25	R6ONLY	R 6 法による微小亀裂進展解析をする

付録2.4 コモン変数の説明

```

===== SUBPROGRAM NAME VS. COMMON BLOCK NAME =====
+-----+
|_ PROGRAM   | C C E F G I G G G G H I I I J K I K K M M O I O O R R I I
|_ NAME      | N R P A O I O O O 1 I N N N A F I R R A O U I U U U 6 6 I I
|_           | T O R D D I D D D D F I P T T P A I C L I D T I T T T A I I
|_           | S S I C I I I I I U I U N P P C I L R N I E I E R R N I I
|_           | E S G V M I M M M M N I T U O L T I R F G I G 6 6 L I I
| COMMON    | T E 1 2 3 4 5 C I M L D I C Y 1 2 1 2 Y I I
| LABEL     |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1./ANLYR6 / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 2./CONST   / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 3./CRKTIP  / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 4./FINAL   / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 5./GRPPR1  / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 6./GRPPR2  / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 7./INPCL4  / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 8./INPUT1  / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 9./INPUT2  / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 10./INPUT3 / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 11./INPUT4 / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 12./INPUT5 / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 13./INPUT6 / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 14./RSLTEG / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
| 15./RSLTR6 / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 16./UNITC / | * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
+-----+

```

コモンブロック名		ANLYR6
PARAMETER (MAXANA=101)		
変数名	型	変数の意味
RAR6	R*4	R 6 法の微小亀裂進展解析の亀裂深さ a
RBR6	R*4	亀裂半長 b
RKRAP	R*4	K _{rapp}
RSIF	R*4	拡大応力係数 K
RJDAR6	R*4	J (Δa)
RLRAP	R*4	L _{rapp}
RSNET	R*4	亀裂部断面の実断面応力 σ _{net}
RLRC	R*4	L _{rc}
RKRC	R*4	K _{rc}
RSAFE	R*4	安全余裕 S _f
RINILR	R*4	原点と L _{rapp} と L _{rc}
RINIKR	R*4	原点と K _{rapp} と K _{rc}
NANLY	I*4	解析回数

コモンブロック名		CONST
COMMON /CONST /		
変数名	型	変数の意味
PAI	R*4	円周率 π

コモンブロック名		CRKTIP
		PARAMETER (MAXPCJ=100) PARAMETER (MAXPCS=100) COMMON /CRKTIP/ # CXOW ,CTIME ,CA ,CB ,CDLTB ,CTEMP # ,CSM ,CST ,CEMOD ,CSU ,CSY ,CSF # ,CSO ,CEPSO ,CAN ,CALPHA ,CLRMAX # ,CJINT(MAXPCJ) ,CDLTA(MAXPCJ) ,CSIGMA(MAXPCS) # ,CEPS(MAXPCS) ,NJRCP ,NSECP
変数名	型	変数の意味
CXOW	R*4	亀裂先端 X / W
CTIME	R*4	解析時刻 i
CA	R*4	亀裂先端における亀裂深さ a
CB	R*4	" 亀裂半長 b
CDLTB	R*4	" Δ b
CTEMP	R*4	" 温度
CSM	R*4	" 膜応力 σ_m
CST	R*4	" 热応力 σ_t
CEMOD	R*4	" ヤング率 E
CSU	R*4	" 引張り強さ σ_u
CSY	R*4	" 0.2%耐力 σ_y
CSF	R*4	" 流動応力 σ_f
CSO	R*4	" Ramberg-Osgood則パラメータの σ_0 値
CEPSO	R*4	" ϵ_0 値
CAN	R*4	" n 値
CALPHA	R*4	" α 値
CLRMAX	R*4	" FAD 曲線における $L_{r_{max}}$
CJINT	R*4	" J - Δa 曲線の J 値
CDLTA	R*4	" Δa 値
CSIGMA	R*4	" $\sigma - \epsilon$ 曲線の σ 値
CEPS	R*4	" ϵ 値
NJRCP	I*4	" J - Δa 曲線の離散点数
NSECP	I*4	" $\sigma - \epsilon$ 曲線の離散点数

コモンブロック名		FINAL
変数名	型	変数の意味
FA	R*4	最終結果の亀裂深さ a
FDLTA	R*4	" Δa
FB	R*4	亀裂半長 b
FCTEMP	R*4	温度
FSIF	R*4	応力拡大係数 K
FJINT	R*4	J (Δa)
FSF	R*4	流動応力 σ_f
FKRAP	R*4	K rapp
FLRAP	R*4	L rapp
FSNET	R*4	亀裂部断面の実断面応力 σ_{net}
PSAFE	R*4	安全余裕 S f
FR6LR	R*4	R 6 法の微小亀裂進展解析の L rapp
FR6KR	R*4	K rapp
IR6FLG	I*4	結果のフラグ
NR6PLT	I*4	解析回数

コモンブロック名 G R P P R 1		
PARAMETER (MAXGRP=11) CHARACTER XCMNT*40,YCMNT*40,ZCMNT*40,INCMT*25 COMMON /GRPPR1/ ¥ XCMNT(MAXGRP) ,YCMNT(MAXGRP) ,ZCMNT(MAXGRP) ¥ ,INCMT(2)		
変数名 型 変数の意味		
XCMNT	C*40	グラフのx軸タイトル
YCMNT	C*40	" y 軸タイトル
ZCMNT	C*40	" メインタイトル
INCMT	C*25	グラフに打ち出す温度と解析時刻

コモンブロック名 G R P P R 2		
COMMON /GRPPR2/ ¥ GXMIN(MAXGRP) ,GXMAX(MAXGRP) ¥ ,GYMIN(MAXGRP) ,GYMAX(MAXGRP)		
変数名 型 変数の意味		
GXMIN	R*4	グラフのx軸目盛りの最小値
GXMAX	R*4	" 最大値
GYMIN	R*4	y 最小値
GYMAX	R*4	" 最大値

コモンブロック名 I N P C L 4		
COMMON /INPCL4/ ¥ TJRMIN ,TJRMAX ,TSEMIN ,TSEMAX		
変数名 型 変数の意味		
TJRMIN	R*4	J - Δa 曲線の温度の最小値
TJRMAX	R*4	" 最大値
TSEMIN	R*4	σ - ε 曲線の温度の最小値
TSEMAX	R*4	" 最大値

コモンブロック名	INPUT 1			
CHARACTER TITLE*80 COMMON /INPUT1/ TITLE				
変数名	型	変数の意味		
TITLE	C*80	解析問題のタイトル		

コモンブロック名	INPUT 2			
COMMON /INPUT2/ MODEL N ,IUNIT ,IPRINT ,IGRAPH				
変数名	型	変数の意味		
MODEL N	I*4	解析モデル番号		
IUNIT	I*4	計算単位		
IPRINT	I*4	数値出力オプション		
IGRAPH	I*4	グラフ出力オプション		

コモンブロック名	INPUT 3			
COMMON /INPUT3/ WTH ,AO ,BO				
変数名	型	変数の意味		
WTH	R*4	板厚 w		
AO	R*4	初期亀裂深さ a。		
BO	R*4	初期亀裂半長 b。		

コモンブロック名		INPUT 4
<pre> PARAMETER (MAXTJR= 10) PARAMETER (MAXPJR=100) PARAMETER (MAXTSE= 10) PARAMETER (MAXPSE=100) PARAMETER (MAXRO = 10) PARAMETER (MAXMAT= 10) REAL*4 JINT COMMON /INPUT4/ * TJR(MAXTJR) ,JINT(MAXPJR,MAXTJR),DLTA(MAXPJR,MAXTJR) * ,TSEPS(MAXTSE) ,SIGMA(MAXPSE,MAXTSE),EPS(MAXPSE,MAXTSE) * ,TRAOS(MAXRO) ,AN(MAXRO) ,ALPHA(MAXRO) * ,TMAT(MAXMAT) ,EMOD(MAXMAT) ,SU(MAXMAT) * ,SY(MAXMAT) ,NPNTJR(MAXTJR) ,NPNTSE(MAXTSE) * ,NJRCV ,NSEPS ,NRAOS ,NMAT </pre>		
変数名	型	変数の意味
TJR	R*4	J - Δ a 曲線の温度
JINT	R*4	" J 値
DLTA	R*4	" Δ a 値
TSEPS	R*4	σ - ε 曲線の温度
SIGMA	R*4	" σ 値
EPS	R*4	" ε 値
TRAOS	R*4	Ramberg-Osgood則パラメータの温度
AN	R*4	" n 値
ALPHA	R*4	" α 値
TMAT	R*4	材料データの温度
EMOD	R*4	ヤング率 E
SU	R*4	引張り強さ σ u
SY	R*4	0.2%耐力 σ v
NPNTJR	I*4	J - Δ a 曲線の離散点数
NPNTSE	I*4	σ - ε 曲線の離散点数
NJRCV	I*4	J - Δ a 曲線の本数
NSEPS	I*4	σ - ε 曲線の本数
NRAOS	I*4	Ramberg-Osgood則パラメータの温度数
NMAT	I*4	材料データの温度数

コモンブロック名		INPUT 5
		PARAMETER (MAXTI = 50) PARAMETER (MAXPXW=100) COMMON /INPUT5/ TI(MAXTI) ,TEMP(MAXPXW,MAXTI) ,XOW(MAXPXW,MAXTI) ,SM(MAXTI) ,ST(MAXTI) ,NPNTT(MAXTI) ,NTI
変数名	型	変数の意味
TI	R*4	解析時刻 i
TEMP	R*4	T - X / W 図の温度
XOW	R*4	" T - X / W
SM	R*4	膜応力 σ_m
ST	R*4	熱応力 σ_s
NPNTT	I*4	T - X / W 図の離散点数
NTI	I*4	解析時刻数

コモンブロック名		INPUT 6
		COMMON /INPUT6/ DA
変数名	型	変数の意味
DA	R*4	板厚方向の微小亀裂進展量 da

コモンブロック名		R S L T E G
REAL*4		
変数名	型	変 数 の 意 味
COMMON /RSLTEG/		
AEG	R*4	E P R I - G E 法の場合の亀裂深さ a
BEG	R*4	" 亀裂半長 b
DLTAEG	R*4	" Δ a
DLTBEG	R*4	" Δ b
SIFEG	R*4	応力拡大係数 K
JAP	R*4	J app
JEL	R*4	J app ^c
JPL	R*4	J app ^p
H1	R*4	h, function
LAMDA	R*4	λ
MAP	R*4	M
PAP	R*4	P
PO	R*4	P _o
AEFF	R*4	a.
FAI	R*4	ϕ
RY	R*4	Γ_y
JDAEG	R*4	J (Δ a)

コモンブロック名		R S L T R 6
PARAMETER (MAXFAD=101)		
変数名	型	変数の意味
AR6	R*4	R6法の場合の亀裂深さ a
BR6	R*4	" 亀裂半長 b
DLTAR6	R*4	" Δ a
DLTBR6	R*4	" Δ b
SIFR6	R*4	応力拡大係数 K
SNET	R*4	亀裂断面部の実断面応力 σ_{net}
KRM	R*4	$K_{r_{mat}}$
LRM	R*4	$L_{r_{mat}}$
SYLRM	R*4	$\sigma_{net} * L_{r_{mat}}$
EPSREF	R*4	ϵ_{ref}
EPSENG	R*4	ϵ
KRAP	R*4	$K_{r_{app}}$
LRAP	R*4	$L_{r_{app}}$
KRC	R*4	K_{r_c}
LRC	R*4	L_{r_c}
DB	R*4	微小亀裂進展解析の d b
JDARG	R*4	J (Δ a)
NFADP	I*4	FAD曲線の離散点数
NFADO	I*4	$K_{r_{mat}} > 0$ となる FAD曲線の離散点数

コモンブロック名	UNITC	
<pre>CHARACTER ULENG*5,UPW*11,UTEMP*8,UJ*9 COMMON /UNITC / ULENG ,UPW ,UTEMP ,UJ</pre>		
変数名	型	
ULENG	C*5	長さの単位を表わす文字列
UPW	C*11	応力
UTEMP	C*8	温度
UJ	C*9	J (Δ a)

付録2. 5 JCL

JCLの例を以下に示す。

```
T(03) W(03) C(04) I(04) E(00) GRP
// EXEC FORT77,SO='J2376.KSBT',A='ELM(*),INCLUDE',LCT=60
//SYSINC DD DSN=J2376.KSBT.INCLUDE.FORT77,DISP=SHR
// EXEC LKED77
//SYSLIB DD DSN=J2636.ARGLIBV4.LOAD,DISP=SHR
//          DD DSN=SYS9.PNL.LOAD,DISP=SHR
//          DD DSN=SYS9.GGS.LOAD,DISP=SHR
//          DD DSN=SYS9.JSSL.LOAD,DISP=SHR
//          DD DSN=SYS9.NO.LOAD,DISP=SHR
// EXEC GO
//SYSIN DD DSN=J2376.KSBT.DATA(MDLN5001),DISP=SHR
//FT55FOO1 DD DSN=&&VIO,UNIT=VIO,DCB=(RECFM=FB,DSORG=PS,LRECL=80),
//           SPACE=(TRK,(10,10))
// EXPAND GRNLP,SYSPUT='*'
```