

簡易法き裂進展プログラム
「CANIS-G」のデータベース拡充

1992年6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)

簡易法き裂進展評価プログラム「CANIS-G」のデータベース拡充

田中信之*

渡士克己**

要旨

構造室ではこれまでに、部材板厚内で大きさに分布が生じるような熱荷重を含めた種々の荷重を受ける構造物中に存在するき裂の進展挙動を「影響関数法」を用いることにより簡易的に計算するき裂進展評価プログラム(CANIS-G)の開発を進め、その原型版を完成させている。これを受けて、現在は空気冷却熱過渡試験施設(ATTF)を用いた熱荷重下でのき裂進展データの取得と、このデータに基づいたプログラムの検証解析、さらにこれと並行させて影響関数法で使用する応力拡大係数(K値)の無次元化したデータ(F値と呼ばれる)の既存データベースに対する拡充作業を進めている。

現在、CANIS-Gに組み込まれているF値のデータベースとしては、表面き裂に関しては、有限、無限平板の表面き裂のデータ、円筒周方向、軸方向表面き裂のデータ等が用意されており、この他、エッジき裂のデータとして、円筒の全周き裂、同じく円筒軸方向の無限長き裂のデータ等がある。しかしながら、今後、蒸気発生器伝熱管の解析等において使用頻度が高まることが予想される円筒内表面上の軸方向半楕円表面き裂のF値のデータについては、円筒の内半径に対する肉厚比(t/r)が0.1の条件でのデータしか組み込まれておらず、 t/r がこれよりも大きい場合には本条件でのF値をそのまま使用することとしている。そこで、本報ではより大きな t/r 条件、すなわち厚肉側でのF値のデータベースの拡充を図ることを目的として、まず $t/r = 0.4$ 条件での破壊力学パラメータの解析を行った。

解析では最初に、 $t/r = 0.4$ の円筒での本解析に先立ち、 $t/r = 0.1$ 条件においてF値を計算し、既に白鳥らによって求められている計算結果と比較してその解析手法の妥当性について検証を行い、次に、 $t/r = 0.4$ 条件において、き裂のアスペクト比(a/b)で4ケース、肉厚に対するき裂深さ比(a/t)で5ケースの計20ケースのき裂形状に対して、影響関数法で使用する荷重ケースとして、板厚内応力分布が0次(一定値)、1次(曲げ)、2次(放物線)および3次の単位応力を負荷した場合のF値を求めるための、計80ケースの応力解析をFINAS-Version11を用いて行った。

F値の計算では、この応力および変位の解析結果を使用して、経路積分法により3次元破壊力学パラメータを解析するプログラム(CANIS-J)により応力拡大係数K値を求め、さらに、これを無次元化してF値を算出した。

以上の計算手法の検討および算出されたF値の挙動に関する検討の結果、今回得られたF値を簡易法き裂進展評価プログラム(CANIS-G)のデータベースに組み込むことの妥当性が確認できた。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

** 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

Fracture Mechanics Parameter Analysis for the Simplified Crack Growth
Analysis Code 'CANIS-G'

TANAKA. N *

WATASHI. K **

ABSTRACT

This report describes fracture parameter analysis results for the simplified crack growth analysis code 'CANIS-G'.

Dimensionless stress intensity factor; K of the semi-elliptical surface cracks axially located in the inner surface of the cylinder with the thickness of 0.4 in t/r , here t ; thickness of the cylinder and r ; inner diameter.

The shape and dimension of the surface cracks are ranged from 0.1 to 0.8 in a/t , and 0.2 to 1.0 in a/b , here a ; crack depth and b ; crack surface length.

Elastic stress analyses with the condition of constant, linear, quadratic and cubic stress distribution on the crack surface were performed by FINAS computer code.

Stress intensity factor; K was calculated with the fracture parameter analysis code 'CANIS-J' using the elastic analysis results, and was transformed to dimensionless stress intensity factor; F .

As the result, calculated F values were considered to be reasonable compared with the F values formerly obtained by SHIRATORI under the condition of 0.1 in t/r . So, the newly obtained F values were installed within the fracture parameter data-base of the simplified crack growth analysis code 'CANIS-G'.

* Structural Engineering Section, O-arai Engineering Center

** Presently with Material Development Section, O-arai Engineering Center

目次

| | | |
|------|----------------------------------|-----|
| 1. | まえがき | 1 |
| 2. | 解析したき裂の形状 | 3 |
| 3. | 応力拡大係数の解析方法 | 4 |
| 3.1 | 解析コード | 4 |
| 3.2 | 解析ケースおよび応力拡大係数の計算方法 | 5 |
| 3.3 | 応力分布の負荷条件 | 6 |
| 4. | 検証解析結果と検討 | 7 |
| 4.1 | 内半径対板厚比; $t/r=0.1$ の円筒における検証解析結果 | 7 |
| 4.2 | 検証解析結果に対する検討 | 8 |
| 5. | 本解析結果と検討 | 12 |
| 5.1 | 内半径対板厚比; $t/r=0.4$ の円筒における本解析結果 | 12 |
| 5.2 | 本解析結果に対する検討 | 13 |
| 6. | 結論 | 49 |
| 7. | 謝辞 | 50 |
| 8. | 参考文献 | 51 |
| 付録 | | |
| 付録 A | 解析モデル図 | 53 |
| 付録 B | 応力解析結果 | 77 |
| 付録 C | CANIS-J 使用上の修正事項について | 88 |
| 付録 D | 変位法による F 値の解析結果 | 97 |
| 付録 E | 解析に使用したデータセットについて | 102 |
| 付録 F | 別冊内部資料について | 106 |
| 付録 G | 今後のデータ拡充の方向について | 108 |
| 付録 H | MUNZらの半楕円表面き裂付き平板の K 値解 | 111 |
| 付録 I | MUNZらの内・外表面軸方向き裂付き円筒の K 値解 | 119 |

表リスト

| | | |
|---------|--|----|
| 表 3 - 1 | 解析ケース一覧表 | 5 |
| 表 4 - 1 | $t/r=0.1$, $a/t=0.8$, $a/b=0.2$ のき裂形状における F 値 | 9 |
| 表 4 - 2 | $t/r=0.1$, $a/t=0.8$, $a/b=0.2$ の F 値の白鳥の解との比較 | 9 |
| 表 5 - 1 | $t/r=0.4$ のき裂形状の応力分布ごとの最深部及び表面部の K 値 | 16 |
| 表 5 - 2 | $t/r=0.4$ のき裂形状の応力分布ごとの最深部及び表面部の F 値 | 18 |
| 表 5 - 3 | き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った K 値分布 | 20 |
| 表 5 - 4 | き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った F 値分布 | 25 |
| 表 5 - 5 | 変位法による応力分布ごとの最深部及び表面部の K 値 | 30 |
| 表 5 - 6 | 変位法による応力分布ごとの最深部及び表面部の F 値 | 32 |
| 表 5 - 7 | き裂最深部の膜、曲げ及び放物線ピーク成分の F 値 | 34 |
| 表 5 - 8 | き裂表面部の膜、曲げ及び放物線ピーク成分の F 値 | 35 |

図リスト

| | | |
|----------|---|----|
| 図 2 - 1 | き裂形状図の説明 | 3 |
| 図 2 - 2 | き裂への単位応力分布の負荷図 | 3 |
| 図 3 - 1 | 計算のフロー | 4 |
| 図 4 - 1 | $t/r=0.1$, $a/t=0.8$, $a/b=0.2$ の F 値分布図 (白鳥の解重ね書き) | 10 |
| 図 4 - 2 | CANIS-J と変位法により算出した F 値と白鳥の解との比較 | 11 |
| 図 4 - 3 | CANIS-J と変位法により算出した F 値の白鳥の解に対する偏差 | 11 |
| 図 5 - 1 | $t/r=0.4$, $a/t=0.1$, $a/b=0.2$ の F 値分布図 | 36 |
| 図 5 - 2 | $t/r=0.4$, $a/t=0.1$, $a/b=0.4$ の F 値分布図 | 36 |
| 図 5 - 3 | $t/r=0.4$, $a/t=0.1$, $a/b=0.6$ の F 値分布図 | 37 |
| 図 5 - 4 | $t/r=0.4$, $a/t=0.1$, $a/b=1.0$ の F 値分布図 | 37 |
| 図 5 - 5 | $t/r=0.4$, $a/t=0.2$, $a/b=0.2$ の F 値分布図 | 38 |
| 図 5 - 6 | $t/r=0.4$, $a/t=0.2$, $a/b=0.4$ の F 値分布図 | 38 |
| 図 5 - 7 | $t/r=0.4$, $a/t=0.2$, $a/b=0.6$ の F 値分布図 | 39 |
| 図 5 - 8 | $t/r=0.4$, $a/t=0.2$, $a/b=1.0$ の F 値分布図 | 39 |
| 図 5 - 9 | $t/r=0.4$, $a/t=0.4$, $a/b=0.2$ の F 値分布図 | 40 |
| 図 5 - 10 | $t/r=0.4$, $a/t=0.4$, $a/b=0.4$ の F 値分布図 | 40 |
| 図 5 - 11 | $t/r=0.4$, $a/t=0.4$, $a/b=0.6$ の F 値分布図 | 41 |
| 図 5 - 12 | $t/r=0.4$, $a/t=0.4$, $a/b=1.0$ の F 値分布図 | 41 |
| 図 5 - 13 | $t/r=0.4$, $a/t=0.6$, $a/b=0.2$ の F 値分布図 | 42 |
| 図 5 - 14 | $t/r=0.4$, $a/t=0.6$, $a/b=0.4$ の F 値分布図 | 42 |
| 図 5 - 15 | $t/r=0.4$, $a/t=0.6$, $a/b=0.6$ の F 値分布図 | 43 |
| 図 5 - 16 | $t/r=0.4$, $a/t=0.6$, $a/b=1.0$ の F 値分布図 | 43 |
| 図 5 - 17 | $t/r=0.4$, $a/t=0.8$, $a/b=0.2$ の F 値分布図 | 44 |
| 図 5 - 18 | $t/r=0.4$, $a/t=0.8$, $a/b=0.4$ の F 値分布図 | 44 |
| 図 5 - 19 | $t/r=0.4$, $a/t=0.8$, $a/b=0.6$ の F 値分布図 | 45 |
| 図 5 - 20 | $t/r=0.4$, $a/t=0.8$, $a/b=1.0$ の F 値分布図 | 45 |
| 図 5 - 21 | CANIS-J で算出した最深点での F 値($t/r=0.4$) | 46 |
| 図 5 - 22 | CANIS-J で算出した表面点での F 値($t/r=0.4$) | 46 |
| 図 5 - 23 | 白鳥らの算出した最深点での F 値($t/r=0.1$) | 47 |
| 図 5 - 24 | 白鳥らの算出した表面点での F 値($t/r=0.1$) | 47 |
| 図 5 - 25 | CANIS-J で算出した最深点での F 値の白鳥らの解に対する比 | 48 |
| 図 5 - 26 | CANIS-J で算出した表面点での F 値の白鳥らの解に対する比 | 48 |

1. まえがき

高度の安全性、信頼性が要求される高速炉では、厳しい製作、検査基準によりその製造時に初期欠陥が存在することの無いよう管理されるばかりでなく、信頼性の高い設計基準により、プラント運転中にクリープ疲労他の要因によるき裂の発生が防止されているため、構造部材中にき裂が存在する確率は非常に小さいと考えられる。しかしながら、高速炉の安全論理の構築上、冷却材ナトリウムを内包する機器、配管等において、万が一き裂が存在した場合にもその健全性が維持できることが示されれば、より信頼性の高いものとなる。このような観点から、破断前漏洩（LBB）の概念が検討されている。

LBBとは、例えば配管の内表面に周方向のき裂が存在する場合、繰返し熱荷重がかかるとこのき裂は板厚方向と周方向に同時に進展するが、仮に「周方向に大きく成長して配管が二分するような破壊」が生じる前に板厚を貫通し、その後もしばらくの間安定して周方向へ成長し続けるのであれば、ナトリウム漏洩を検出した後からでも有効な対策が講じられる、という考え方である。LBBの成立性を裏付けるためには、構造物中のき裂がさまざまな荷重条件のもとでどのように成長するのかを精度良く予測できる評価法が必要とされる。さらに、構造物の破損形態を予測し、適切な対策を講じる上でもこのようなき裂評価法の開発は重要な課題となっている。

これまでの研究では、構造物中のき裂の進展挙動を支配するパラメータ（破壊力学パラメータ）を計算し、その進展挙動を予測するためには、個々の構造、き裂形状・寸法、荷重条件ごとにFEM解析を行ってきた（詳細解析法；構造室ではこのために「CANIS-J」コードを開発している^{1) 3)}）が、近年種々の構造、き裂形状・寸法、荷重条件に対して破壊力学パラメータのデータベース化が進められるとともに、これをベースとした影響関数法（重み付き関数法）と呼ばれる簡易計算法が開発され、着目されるようになった^{9) 10)}。

影響関数法では、破壊力学パラメータを算出するのに必要とされる応力、ひずみ等の情報としてはき裂をモデル化しない通常のFEM解析の結果が使用できるために、従来のき裂までモデル化する必要のあった詳細解析法に比べて計算時間が大幅に短縮できるメリットがある。

このような背景から、構造室ではこれまでに、部材板厚内で大きさに分布が生じるような熱荷重を含めた種々の荷重を受ける構造物中に存在するき裂の進展挙動を影響関数法を用いることにより簡易的に計算するき裂進展評価プログラム「CANIS-G」の開発を進め、その原型版を完成させている²⁾。さらにこれを受けて、現在は空気冷却熱過渡試験施設「ATTF」を用いた熱荷重下でのき裂進展データの取得⁵⁾と、このデータに基づいたプログラムの検証解析を進めるとともに¹⁾、これと並行させて影響関数法で使用する無次元化応力拡大係数（F値と呼ばれる、詳細はP. 5参照）の既存データベースに対する拡充作業も進めている。

現在、CANIS-Gに組み込まれているF値のデータベースとしては、表面き裂に関しては、有限、無限平板の表面き裂のデータ、円筒周方向、軸方向表面き裂のデータ等が用意されており、この他、エッジき裂のデータとして、円筒の全周き裂、同じく円筒軸方向の無限長き裂のデータ等がある。しかしながら、今後、蒸気発生器伝熱管の解析等において使

用頻度が高まると考えられる円筒内表面軸方向半楕円表面き裂のF値のデータについては、円筒の内半径に対する肉厚比 (t/r) が 0.1 の条件でのデータしか組み込まれておらず、 t/r がこれよりも大きい場合には本条件でのF値をそのまま使用せざるを得ない状況である。そこで、今回の検討ではより大きな t/r 条件、すなわち厚肉側でのF値のデータベースの拡充を図ることを目的として、その第1ステップとして $t/r = 0.4$ 条件での破壊力学パラメータの解析を行った。

解析ではまず、 $t/r = 0.4$ の条件での本解析に先立ち、 $t/r = 0.1$ 条件においてF値を計算し、既に白鳥ら⁹⁾ によって求められている計算結果と比較してその解析手法の妥当性について検証を行った。

この後、 $t/r = 0.4$ 条件において、き裂のアスペクト比 (a/b) で4ケース、肉厚に対するき裂深さ比 (a/t) で5ケースの計20ケースのき裂形状に対して、影響関数法で使用する荷重ケースとして、板厚内応力分布が0次(一定値)、1次(曲げ)、2次(放物線)および3次の単位応力を負荷した場合のF値を求めるための、計80ケースの応力解析を FINAS-VersionIIを用いて行った。

F値の計算では、この応力および変位の解析結果を使用して、経路積分法により3次元破壊力学パラメータを解析するプログラム「CANIS-J」により応力拡大係数K値を求め、さらに、これを無次元化してF値を算出した。なお、K値の算出法としては上記経路積分法の他にも有力な手法として変位法が開発されている。従って、本解析では変位法でもK値、F値をもとめ上記「CANIS-J」によるK値の算出結果と比較し、算出法の違いによる差の検討も行った。

本報は、以上の計算手法の検証結果および算出されたF値の挙動に関する検討の結果について述べたものである。

本検討により、今回得られたF値は妥当な値であると判断できた。従って、今回作成したF値のテーブルを簡易法き裂進展評価プログラム「CANIS-G」のデータベースに組み込んだ。

2. 解析したき裂の形状

解析に使用したき裂形状は以下の通りである。

- ・き裂の種類： 円筒軸方向半楕円表面き裂
- ・き裂形状： t (肉厚) / r (内半径) = 0.1, 0.4
 - $t/r = 0.1$ のケース： $a/t = 0.8, a/b = 0.2$
 - $t/r = 0.4$ のケース： $a/t = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$
 - $a/b = 0.2, 0.4, 0.6, 1.0$

ここで、 a :き裂深さ、 b :き裂半長

き裂形状図を図2-1に示す。なお、付録Aには解析に使用したFEMモデル図を示す。

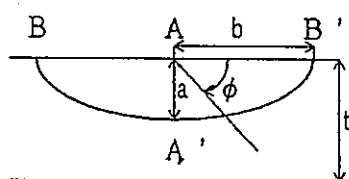


図2-1 き裂形状図

き裂面に負荷する単位応力分布は図2-2のように4種類を負荷した。

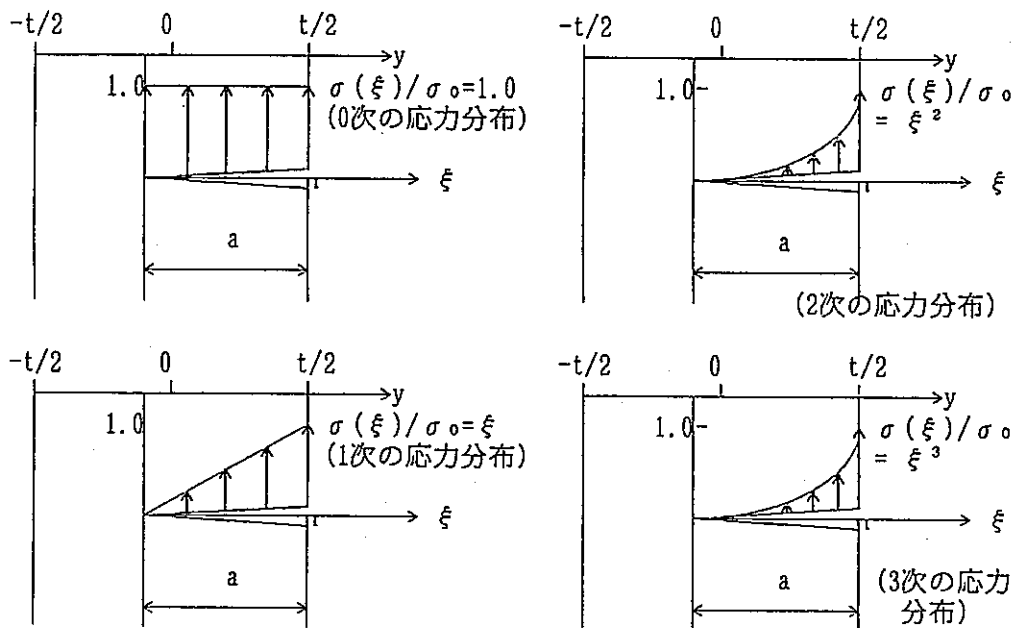


図2-2 き裂形状への単位応力分布の負荷図

ここで、 ξ はき裂深さで正規化座標であり、板厚方向座標 y と次の関係を有する。

$$\xi = 1 - (t/2 - y)/a = 1 - t/2a + y/a$$

3. 応力拡大係数の解析方法

3.1 解析コード

き裂面に単位分布力を負荷したときのK値と無次元K値（以後F値と呼ぶ）の値を求めるための解析は主に以下の3ステップよりなる。

（ステップ1）

負荷した荷重によるき裂面上の積分点における応力分布、ひずみ、および節点変位の計算を有限要素法による汎用非線形構造解析コード「FINAS-Version 11」を用いて行う。また、その計算結果のポストファイルを作成する。

（ステップ2）

上記で作成した積分点での応力、ひずみデータおよび節点の変位データを用いて3次元破壊力学パラメータ解析コード「CANIS-J」により、応力拡大係数K値の計算を行う。

（ステップ3）

ステップ2の結果は積分点出力であるので、目的とするき裂表面点および最深点でのK値に直線外挿する。また、K値をF値に変換する。さらに、CANIS-Gでの使用上の便宜を考慮し、F値を座標変換して、膜、曲げ、放物線ピーク成分に変換する。

以上のステップから求められるF値は経路積分法による値であるが、本報ではこれとは別に、変位法によるK値、F値の計算も合わせて実施し、両者の比較を試みることにした。

以上一連の計算の流れを図3-1に示す。

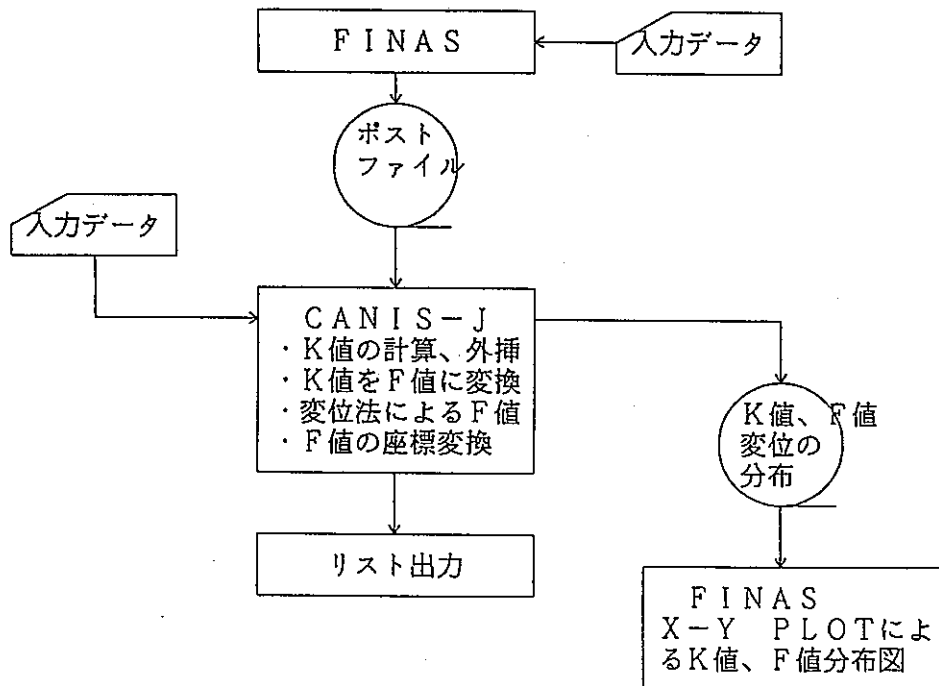


図3-1 計算のフロー

3. 2 解析ケース及び計算方法

表 3-1 にき裂形状に対する解析ケースの一覧表を示す。

| a/b \ a/t | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.2 | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ |
| 0.4 | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ |
| 0.6 | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ |
| 1.0 | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ⊙ |

表 3-1 解析のケース (t/r=0.4)

き裂形状に対応する解析ケースは、20 ケースとなる。更に、応力分布の荷重ケースが 4 種類あり計 80 ケースの計算ケースとなる。

計算項目及び計算方法は次の通りである。

① 応力拡大係数 K 値及び F 値のき裂面に沿った積分点での分布を求める。

K 値から F 値への変換は以下の式を用いた。

$$F_n(\phi) = K_n(\phi) / (\sigma_0 \sqrt{\pi a/Q}) \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

$$Q = 1 + 1.464(a/b)^{1.65}$$

n: 0~3 次の応力分布

φ: き裂離心角 (図 2-1 参照)

$$(0 \leq \phi \leq \pi/2)$$

(σ₀ は単位応力、図 2-2 参照)

② き裂表面部及び最深部の K 値及び F 値を直線外挿により求める。

き裂表面部 (φ = 0.0)、最深部 (φ = π/2) の K 値及び F 値を前 2 点の積分点の値を直線外挿して計算した。

③ 変位法により K 値を求め①の変換式により F 値を算出する。

最深部の K 値は、図 2-1 の A-A' 断面の変位 u(r) を算出し以下の式により各積分点での K 値を算出した。

$$K_i = (E u(r_i) \sqrt{2 \pi / r_i}) / 4(1-\nu^2) \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

E: ヤング率

u(r_i): 座標 r_i の変位

r_i: き裂表面から深さ方向の座標

ν: ポアソン比

き裂最深部の K 値は、以下の式により求めた。

$$K_0 = (K_3 + K_4 + K_5) / 3 \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

ここで、K₃、K₄、K₅は、き裂最深部手前 2 点を除いた 3 点の積分点の K 値を示す。表面部の K 値は同様に、図 2-1 の B-B' 断面の変位 u(r) を算出し②の式により積分点の K 値を算出した。但し、変位はき裂長さ方向の変位をとる。各積分点での K 値が算出されたら、③の式によりき裂表面端 (図 2-1 の B 点) の手前 2 点を除

く3点の積分点のK値より表面部のK値を算出した。

以上の結果、算出されたK値より①式によりF値に変換した。

④ F値を以下の座標変換の式により膜、曲げ及び放物線ピークの成分に変換する。

$$\left. \begin{aligned} F_m &= F_0, F_b = (2a/t)F_1 + (1-2a/t)F_0 \\ F_p &= 6(a/t)^2 F_2 + 6(a/t)(1-2a/t)F_1 + (1-6(a/t)(1-a/t))F_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots ③$$

ここで、F₀, F₁, F₂は 0~2 次の応力分布によるF値である。計算には、表面部(φ=0.0)と最深部(φ=π/2)のF値を用いてその膜、曲げ及びピーク成分のF値を算出した。

3. 3 応力分布の負荷条件

図2-2に示す様にき裂面上のき裂深さ方向(板厚方向)に変化する0, 1, 2及び3次の単位応力分布を負荷した。き裂先端を座標の原点として座標ξをとる時、応力分布の式は次の通りである。

3次の応力分布は一般的に次の様になる。

$$\sigma(\xi) = (A\xi^3 + B\xi^2 + C\xi + D)\sigma_0 \dots\dots\dots ④$$

この各項の応力成分を分解して影響関数法で使用するために、以下の式の応力分布のF値を計算した。

$$\left. \begin{aligned} 0 \text{ 次の応力分布} &: \sigma(\xi) / \sigma_0 = 1.0 \\ 1 \text{ 次の応力分布} &: \sigma(\xi) / \sigma_0 = \xi \\ 2 \text{ 次の応力分布} &: \sigma(\xi) / \sigma_0 = \xi^2 \\ 3 \text{ 次の応力分布} &: \sigma(\xi) / \sigma_0 = \xi^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots ④$$

この4種類の荷重による「FINAS」の計算は、「HISTORY」データの「INTERVAL」データを4ステップに区切り、「FORCE」データの荷重増分にかかる係数を「-1」として一回のJOBで計算できるように作成した。従って、「FINAS」による計算はき裂形状に依存する20ケースの計算となった。

また、「CANIS-J」の計算でも同様に「STEP」の指定により、4種類の荷重によるK値の計算を一度に行うようにした。

4. 検証解析結果と検討

4.1 内半径対板厚比; $t/r=0.1$ の円筒における検証解析結果

検証解析では、影響関数法で使用する正規化（無次元化とも呼ばれる）K値いわゆるF値のデータテーブル拡充のための解析の予備検証として、白鳥の解析結果⁹⁾の存在する円筒内半径に対する板厚比; $t/r=0.1$ のレファレンス条件での弾性応力解析と応力拡大係数の計算を行った。

なお、影響関数法のための白鳥の解は内外の研究者によって一応の評価を得ており、現時点で解析例の少ない円筒内表面軸方向表面き裂の解としては、ほとんど参照可能な唯一のものである。

詳細解析条件は以下のとおりである。

- ・肉厚（ t ）／内半径（ r ）=0.1
 - ・き裂深さ（ a ）／板厚（ t ）=0.8
 - ・アスペクト比： $a/b=0.2$
 - ・荷重：き裂面に0次から3次の単位分布力（4条件）
- 以上き裂形状1条件×荷重条件4条件の4ケース

付録BにはFINASによる弾性応力解析結果をまとめて示した。

弾性解析結果からの応力拡大係数の算出にはCANIS-Jによる方法と変位法の2種類の方法を試みた。このうち、CANIS-Jによる方法については、付録Cに示した予備検討によって、CANIS-JのJ積分算出の部分に、き裂面に作用する分布力の影響を考慮する修正を行うことにより、白鳥の解に近い正規化応力拡大係数F値が得られることが明らかになっている。そこで、本節ではまず今回採用した手法で解析が正しく行われていることを確認するために、レファレンス条件での解析結果の検討を行った。

レファレンス条件での正規化した応力拡大係数（F値）の計算結果を以下に示す。

- ・表4-1には、CANIS-JによるF値および変位法によるF値として、き裂最深部と表面部における値を白鳥の解と合わせて示した。
- ・表4-2には、白鳥の解に対するCANIS-JによるF値の比を示した。
- ・図4-1には、CANIS-JによるF値をき裂前縁に沿った離心角に対する分布の形で示すとともに、き裂最深部と表面部では白鳥の解も合わせて対比させて示した。

以上の図表より以下の傾向が確認できる。

- (1) まず、CANIS-JによるF値および変位法によるF値の両者とも、程度の差はあるが、白鳥の解に対して0次～3次のいずれの応力分布でも大きめの値となっている。
- (2) このうち、CANIS-JによるF値は、表面部においては、0次～3次の応力分布のいずれ

れの条件においても白鳥の解に対して0.3%~0.7%程度の差であり、非常に良い一致を示している。

(3) また、最深部においては、0次の応力分布で7.5%、3次の応力分布で15%と応力分布の次数が高くなるに従ってやや差が大きくなるが、最大でも15%程度の誤差であり、許容しうる範囲である。

(4) これに対して、変位法によるF値はいずれの応力分布でも、白鳥の解よりも大きいCANIS-JによるF値よりもさらに大きめとなっている。また、この傾向は表面部ではわずかであるが、最深部においては顕著である。

4.2 検証解析結果に対する検討

- ・図4-2には、CANIS-Jと変位法により算出した正規化応力拡大係数Fと白鳥の解との比較を示した。(き裂最深点と表面点での0次~3次の単位分布力下の値)
- ・図4-3には、CANIS-Jと変位法により算出した正規化応力拡大係数Fの白鳥の解に対する偏差を示した。(き裂最深点と表面点での0次~3次の単位分布力下の値)

図4-2, 4-3はレファレンス解析条件($t/r=0.1$)において、応力拡大係数の算出にCANIS-Jによる方法と変位法の2種類の方法を採用した場合の結果を白鳥の解と比較して示した図で、図4-2は絶対値そのものを、図4-3は白鳥の解に対する偏差を示している。

まず、き裂表面点(B)では、CANIS-Jと変位法の両者ともほぼ白鳥の解と等しい値となっており、特にCANIS-Jでは白鳥の解に対する偏差は1%以下と良好な結果を与えている。一方、き裂最深点(A)では、CANIS-Jと変位法の両者とも白鳥の解よりも大きい値となっている。このうち、CANIS-Jでは白鳥の解に対する偏差が10%程度に収まっているのに対して、変位法ではさらに偏差が大きくなり、0次の単位分布力下では10%程度であるが、1次以上の単位分布力下では30%程度となっている。

以上、レファレンス条件での白鳥の解に対する検証計算の結果、CANIS-Jによる方法と変位法の2種類の方法ではCANIS-Jによる方法のほうが白鳥の解に良く一致しており、影響関数法のK値テーブルのデータとしてはこの結果のほうを採用すべきと判断した。

なお、現時点では、経路積分法を採用しているCANIS-Jの結果と変位法に基づいた結果に差の生じた原因については明らかになっていない。考えられる原因の一つとして、変位法では、今回き裂最深点および表面点の値を外挿して求める際に、き裂全縁に最も近い2点の値を除外してその外側の3点での変位の分布から外挿する手法を採用した(P.5参照)、ことがあげられる。FEM解析結果から変位法に基づいてK値を推定する詳細な方法については、現在開発段階である。

表 4-1 $t/r=0.1$ 、 $a/t=0.8$ 、 $a/b=0.2$ の
き裂形状の時の F 値の計算結果及び白鳥の解

(最深部：A)

| | CANIS-J | 変位法 | 白鳥の解 |
|-----------|---------|--------|-------|
| CONSTANT | 1.9594 | 2.0279 | 1.823 |
| LINEAR | 0.9706 | 1.1317 | 0.876 |
| QUADRATIC | 0.6725 | 0.7886 | 0.591 |
| CUBIC | 0.5182 | 0.6096 | 0.449 |

(表面部：B)

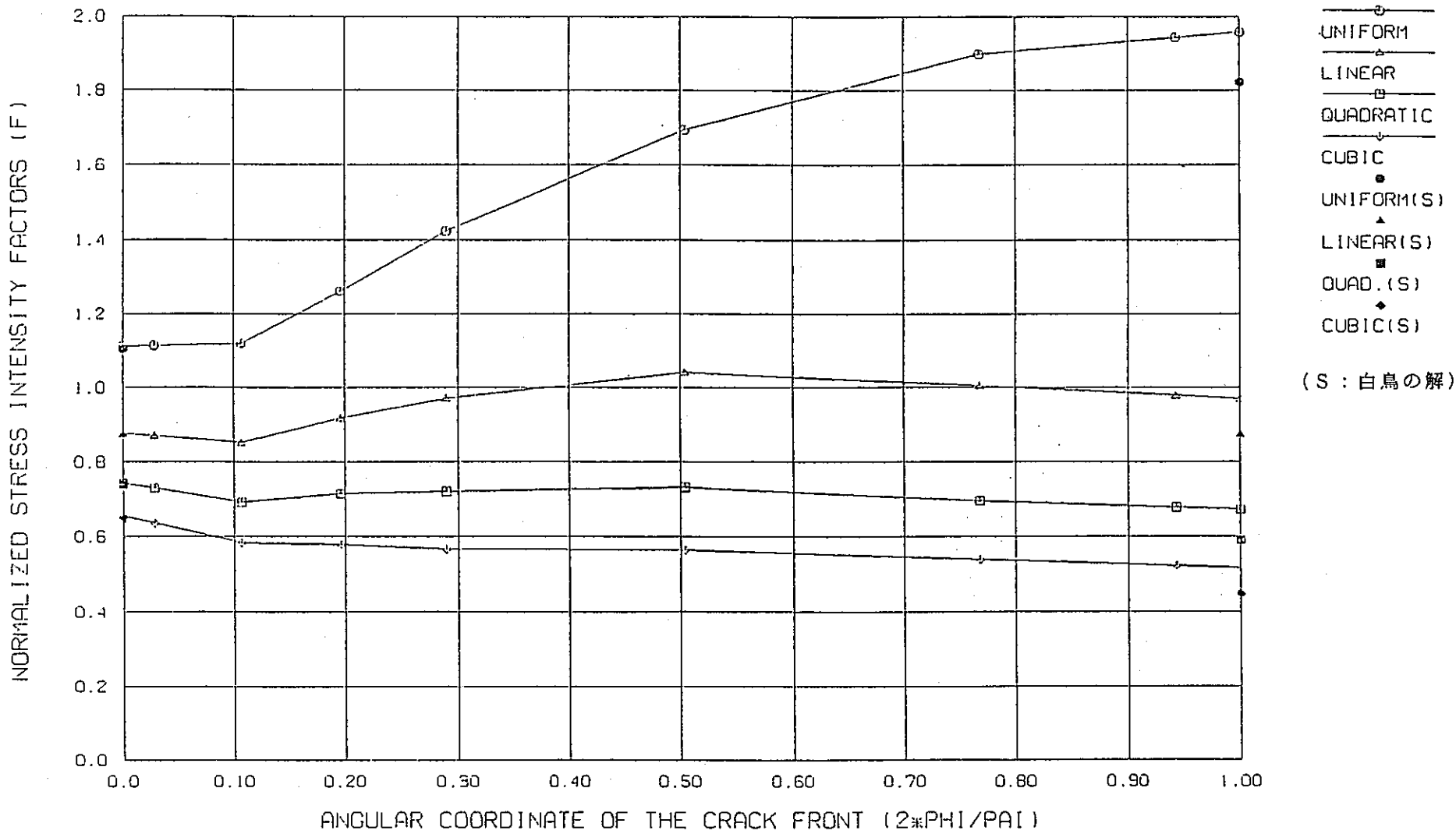
| | CANIS-J | 変位法 | 白鳥の解 |
|-----------|---------|--------|-------|
| CONSTANT | 1.1113 | 1.1637 | 1.104 |
| LINEAR | 0.8778 | 0.9067 | 0.875 |
| QUADRATIC | 0.7433 | 0.7571 | 0.741 |
| CUBIC | 0.6541 | 0.6570 | 0.650 |

表 4-2 $t/r=0.1$ 、 $a/t=0.8$ 、 $a/b=0.2$ の
き裂形状の時の F 値の白鳥の解との比較 (%)

$$\left\{ \frac{(\text{白鳥の解}) - (\text{CANIS-J})}{(\text{白鳥の解})} \times 100 \right\}$$

| | 表面部 | 最深部 |
|-----------|--------|---------|
| CONSTANT | -0.661 | -7.482 |
| LINEAR | -0.320 | -11.941 |
| QUADRATIC | -0.310 | -13.790 |
| CUBIC | -0.631 | -15.412 |

FINAS



(S : 白鳥の解)

図4-1 DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.8,A/B=0.2)

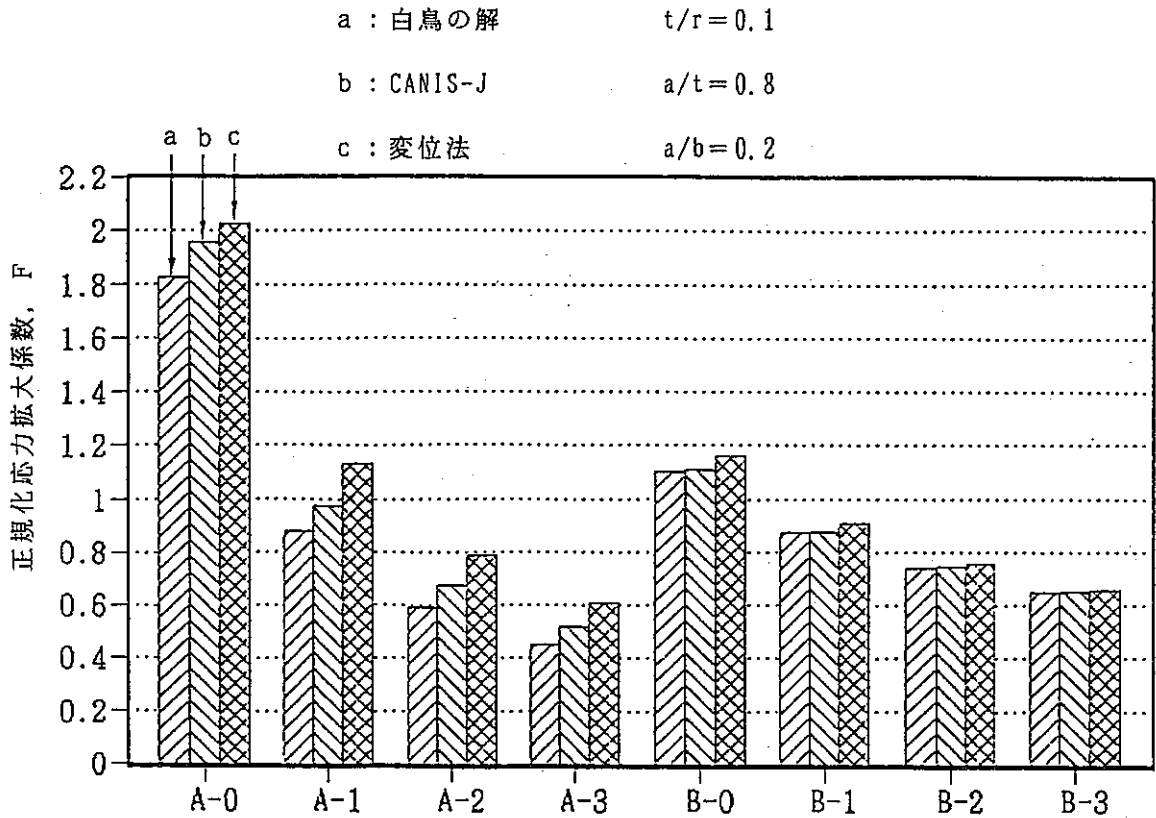


図 4-2 CANIS-Jと変位法により算出した正規化応力拡大係数 F と白鳥の解との比較
き裂最深点 (A) と表面点 (B) での 0 次 (-0) ~ 3 次 (-3) の単位分布力下の値

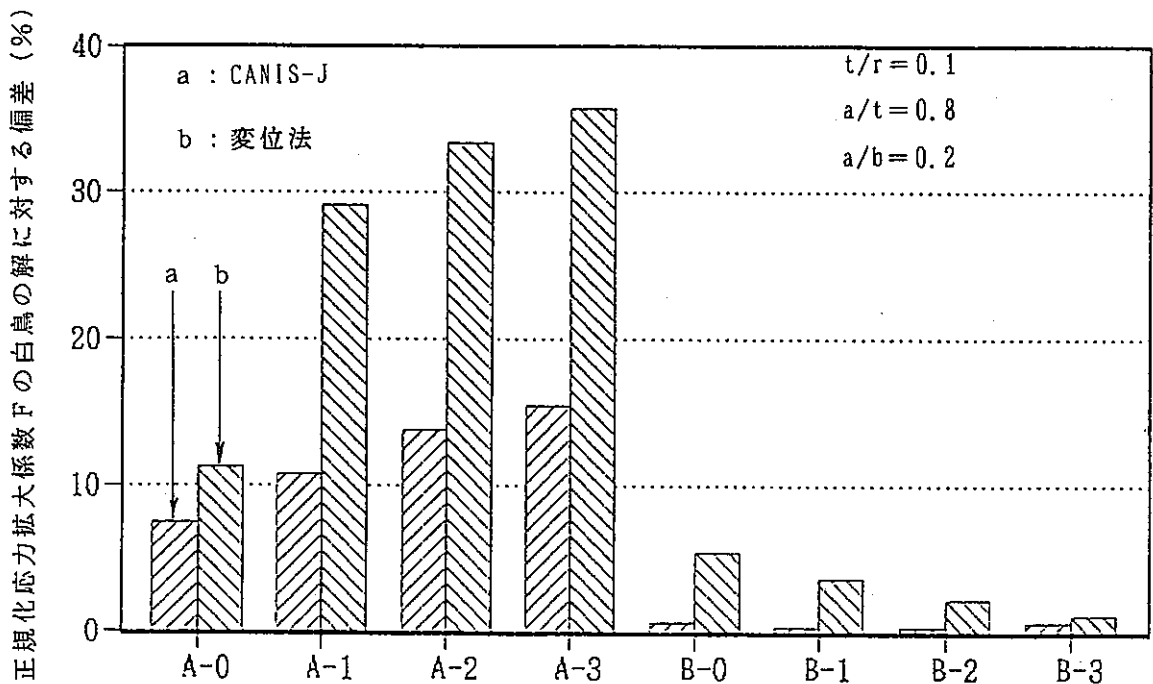


図 4-3 CANIS-Jと変位法により算出した正規化応力拡大係数 F の白鳥の解に対する偏差
き裂最深点 (A) と表面点 (B) での 0 次 (-1) ~ 3 次 (-3) の単位分布力下の値

5. 本解析結果と検討

5.1 内半径対板厚比; $t/r=0.4$ の円筒における本解析結果

本解析では、影響関数法で使用する正規化K値（F値）のデータテーブル拡充のための解析として、円筒内半径に対する板厚比として $t/r=0.4$ の解析条件での弾性応力解析と応力拡大係数の計算を行った。詳細解析条件は以下のとおりであった。

- ・肉厚（ t ）／内半径（ r ）=0.4（1条件）
- ・き裂深さ（ a ）／板厚（ t ）=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8（5条件）
- ・アスペクト比： $a/b=0.2, 0.4, 0.6, 1.0$ （4条件）
- ・荷重：き裂面に0次から3次の単位分布力（4条件）
以上き裂形状20条件×荷重条件4条件の80ケース

内半径対板厚比; $t/r=0.4$ の円筒における本解析結果を、以下の表5-1～表5-8及び図5-1～図5-20に示した。

- ・表5-1には、各き裂形状及び荷重条件に対するK値の解析結果として、き裂最深部及び表面部での値を示した。
- ・表5-2には、各き裂形状及び荷重条件に対するF値の解析結果として、き裂最深部及び表面部での値を示した。
- ・表5-3には、各き裂形状及び荷重条件に対するK値の解析結果として、き裂離心角に対応したき裂前縁での値を示した。
- ・表5-4には、各き裂形状及び荷重条件に対するF値の解析結果として、き裂離心角に対応したき裂前縁での値を示した。
- ・図5-1から図5-20には、各き裂形状ごとに、き裂離心角に対応したき裂前縁沿ったF値の分布を示した。同図において、UNIFORM, LINEAR, QUADRATIC, CUBICはそれぞれ0次、1次、2次、3次の応力分布が負荷された場合のF値を示している。

以上のK値、F値はCANIS-Jを用いて経路積分法により算出した値である。

- ・表5-5には、変位法によるK値の計算結果を、き裂最深部、表面部ごとに示した。
 - ・表5-6には、変位法によるF値の計算結果を、き裂最深部、表面部ごとに示した。
- これらの変位法による結果については付録Dにて検討を加えている。

- ・表5-7には、座標変換によるF値の膜成分(F_m)、曲げ成分(F_b)及び放物線ピーク成分(F_p)のき裂最深部における値を示した。
- ・表5-8には、座標変換によるF値の膜成分(F_m)、曲げ成分(F_b)及び放物線ピーク成分(F_p)のき裂表面部における値を示した。

表5-7,表5-8のF値はCANIS-Jを用いて経路積分法により算出した値である。

5.2 本解析結果に対する検討

以下にCANIS-J を用いて経路積分法により算出したF値の挙動につき検討する。

- ・ 図5-21には、CANIS-J により算出したき裂最深点での正規化応力拡大係数F
- ・ 図5-22には、CANIS-J により算出したき裂表面点での正規化応力拡大係数F
- ・ 図5-23には、白鳥らの $t/r = 0.1$ におけるき裂最深点での正規化応力拡大係数F
- ・ 図5-24には、白鳥らの $t/r = 0.1$ におけるき裂表面点での正規化応力拡大係数F
- ・ 図5-25には、CANIS-J により算出したき裂最深点でのF値の、白鳥の解に対する比
- ・ 図5-26には、CANIS-J により算出したき裂表面点でのF値の、白鳥の解に対する比をそれぞれ示した。

図5-21, 22 は本解析条件 ($t/r = 0.4$) において、CANIS-J により計算した正規化応力拡大係数F値を、単位分布力の次数、き裂深さ、アスペクト比の全組み合わせ条件について比較して示した図で、図5-21がき裂最深点での、図5-22がき裂表面点でのF値を示す。

また、図5-23, 24 は白鳥の解 ($t/r = 0.1$) について図5-21, 22 と同様に整理した図であり、 $t/r = 0.1$ 条件でのF値における、単位分布力の次数の変化に対する挙動、き裂深さの変化に対する挙動、アスペクト比の変化に対する挙動を把握するためのものである。

さらに、図5-25, 26 は円筒の板厚が $t/r = 0.1$ から0.4 に厚肉化した場合のF値の変化を把握するために、今回の解析で得られたCANIS-J による正規化応力拡大係数F値と白鳥の解を比の形で示した図である。

まず、今回得られた $t/r = 0.4$ でのF値データと白鳥の解について、以下の3種の観点から検討する。

① 単位分布力の次数の変化に対する挙動

今回の結果はき裂最深点 (A : 図5-21)、き裂表面点 (B : 図5-22) とともに高次になる程F値は小さくなる。この傾向はき裂最深点では顕著に、き裂表面点では穏やかに現れる。この傾向は白鳥の解 (図5-23, 24) についても同様に認められる。

② き裂深さの変化に対する挙動

今回の結果はき裂最深点 (A : 図5-21)、き裂表面点 (B : 図5-22) とともにき裂深さが深くなる程F値は大きくなる。この傾向は低アスペクト比側では顕著に、高アスペクト比側では穏やかに現れる。この傾向は白鳥の解 (図5-23, 24) についても同様に認められる。

③ アスペクト比の変化に対する挙動

今回の結果はき裂最深点 (A : 図5-21) ではアスペクト比が小さくなる程F値が大きくなるのに対して、き裂表面点 (B : 図5-22) ではアスペクト比が大きくなる程F値が大きくなる。き裂最深点における上記傾向は深いき裂側では顕著に、浅いき裂側では穏やかに現れるが、き裂表面点における上記傾向はき裂深さに依らず一様に認められる。また、これらの傾向は白鳥の解 (図5-23, 24) についても同様に認められる。

以上、今回得られた $t/r=0.4$ での F 値データの上記 3 種の観点からみた変化の傾向は、 $t/r=0.1$ での白鳥の解に良く一致しており、妥当な結果であると判断される。

次に、円筒の板厚が $t/r=0.1$ から 0.4 に厚肉化した場合の F 値の変化を把握する。図5-25, 26 は白鳥の解 ($t/r=0.1$) に対する、今回の解析で得られた CANIS-J による正規化応力拡大係数 F 値 ($t/r=0.4$) の比を示した図であり、図5-25がき裂最深点での、図5-26がき裂表面点でのものである。

図5-25において、今回得られた $t/r=0.4$ でのき裂最深点での F 値は、き裂深さ (a/t) が 0.8 での結果を除けば、単位分布力の次数、き裂深さ、アスペクト比のあらゆる組み合わせ条件において、 $t/r=0.1$ での K 値に対して 10% 以内の差にあり (傾向として低め)、ほとんど差が無いといえる。ただし、 $a/t=0.8$ の条件では 5% から 20% 高めの結果となる (単位分布力の次数が高く、アスペクト比が小さいほど差が大きい)。

また、図5-26において、今回得られた $t/r=0.4$ でのき裂表面点での K 値は、単位分布力の次数、き裂深さ、アスペクト比のあらゆる組み合わせ条件において、 $t/r=0.1$ での F 値に対して 10% 以内の差にあり (傾向として低め)、ほとんど差が無いといえる。

以上の結果、円筒内表面軸方向表面き裂の K 値データとしては $t/r=0.1$ 程度の薄肉円筒から $t/r=0.4$ 程度の厚肉円筒まで、変化は小さいといえる。ただし、厚肉円筒でき裂深さが $a/t=0.8$ 程度にまで深くなった場合には、き裂最深点では薄肉円筒のデータに対してやや高めへの補正が必要と判断される。今回得られたデータテーブルをそのまま使用するのであれば、問題はない。

以上、今回の解析結果の概要は検証解析も含めて以下のようにまとめられる。

- ① レファレンス条件での白鳥の解に対する検証計算の結果、CANIS-J による方法と変位法の 2 種類の方法では CANIS-J による方法のほうが白鳥の解に良く一致しており、影響関数法の K 値テーブルのデータとしてはこの結果のほうを採用すべきと判断される。
- ② 今回得られた $t/r=0.4$ での K 値データの下記 3 種の観点からみた変化の傾向は、 $t/r=0.1$ での白鳥の解に良く一致しており、妥当な結果であると判断される。
 - ・荷重条件である単位分布力の次数の変化に対する挙動
 - ・き裂深さの変化に対する挙動
 - ・アスペクト比の変化に対する挙動
- ③ 結果として、今回得られた $t/r=0.4$ でのき裂表面点での K 値は、単位分布力の次数、き裂深さ、アスペクト比のあらゆる組み合わせ条件において、 $t/r=0.1$ での K 値に対して 10% 以内の差にあり (傾向として低め)、ほとんど差が無いといえる。
- ④ 今回得られた $t/r=0.4$ でのき裂最深点での K 値は、き裂深さ (a/t) が 0.8 での結果を除けば、単位分布力の次数、き裂深さ、アスペクト比のあらゆる組み合わせ条件において、 $t/r=0.1$ での K 値に対して 10% 以内の差にあり (傾向として低め)、ほとんど差が無いといえる。ただし、 $a/t=0.8$ の条件では 5% から 20% 高めの結果となる (単位分布力の次数が高く、アスペクト比が小さいほど差が大きい)。

- ⑤ 以上の結果、円筒内表面軸方向表面き裂のK値データとしては $t/r=0.1$ 程度の薄肉円筒から $t/r=0.4$ 程度の厚肉円筒まで、ほとんど変化が見られない。ただし、厚肉円筒でき裂深さが $a/t=0.8$ 程度にまで深くなった場合には、き裂最深点では薄肉円筒のデータに対してやや高めへの補正が必要となる。

なお、以上の結果は予備検討により妥当と結論付けられたCANIS-JによるK値、F値の挙動であるが、参考として、付録Dには変位法により得られたK値、F値の挙動について若干の検討を加えている。

なお、付録Eには、今回の解析に使用したFINAS, CANIS-J用のデータセットの一覧を、さらに、付録Fには、別冊内部資料としてまとめた図表類の内訳を示した。

表 5 - 1 (a) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi / 2$) 及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (K 値)(POINT A : $\phi = \pi / 2$, B : $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

● (き裂最深部: A)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 0.2 | 3.6346 | 5.3263 | 8.7259 | 13.2731 | 19.8671 |
| 0.4 | 3.2312 | 4.6448 | 7.0258 | 9.7068 | 13.5083 |
| 0.6 | 2.8637 | 4.0961 | 6.0053 | 7.9161 | 10.4216 |
| 1.0 | 2.2390 | 3.2130 | 4.6328 | 5.8913 | 7.3357 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.9046 | 1.3389 | 2.4772 | 4.2546 | 6.7367 |
| 0.4 | 0.7549 | 1.0709 | 1.7346 | 2.6157 | 3.8374 |
| 0.6 | 0.6172 | 0.8595 | 1.3110 | 1.8412 | 2.4951 |
| 1.0 | 0.3767 | 0.5186 | 0.7556 | 0.9966 | 1.2452 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.4247 | 2.0943 | 3.7153 | 6.1955 | 9.7670 |
| 0.4 | 1.2095 | 1.7152 | 2.6958 | 3.9792 | 5.8168 |
| 0.6 | 1.0076 | 1.4088 | 2.0998 | 2.8996 | 3.9570 |
| 1.0 | 0.6573 | 0.9056 | 1.3037 | 1.6953 | 2.1562 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.6681 | 0.9909 | 1.8737 | 3.2656 | 5.1705 |
| 0.4 | 0.5532 | 0.7833 | 1.2871 | 1.9625 | 2.8705 |
| 0.6 | 0.4477 | 0.6207 | 0.9565 | 1.3550 | 1.8168 |
| 1.0 | 0.2654 | 0.3641 | 0.5327 | 0.7073 | 0.8641 |

表 5-1 (b) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi/2$) 及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (K 値)(POINT A: $\phi = \pi/2$, B: $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

⊙ (き裂表面部: B)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 0.2 | 1.7013 | 2.5612 | 4.4841 | 6.8142 | 9.8212 |
| 0.4 | 2.3019 | 3.3523 | 5.3663 | 7.7421 | 10.9300 |
| 0.6 | 2.5740 | 3.6690 | 5.4862 | 7.5931 | 10.2246 |
| 1.0 | 2.6433 | 3.7219 | 5.3842 | 7.0120 | 8.8023 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.3873 | 2.0528 | 3.3730 | 4.8416 | 6.6665 |
| 0.4 | 1.7423 | 2.5298 | 3.8917 | 5.3575 | 7.2793 |
| 0.6 | 1.9177 | 2.7334 | 3.9633 | 5.3251 | 6.9210 |
| 1.0 | 1.9520 | 2.7537 | 3.9411 | 5.0312 | 6.1892 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.5245 | 2.2678 | 3.7977 | 5.5717 | 7.8249 |
| 0.4 | 1.9672 | 2.8556 | 4.4495 | 6.2407 | 8.6116 |
| 0.6 | 2.1733 | 3.0952 | 4.5399 | 6.1691 | 8.1383 |
| 1.0 | 2.2200 | 3.1284 | 4.4978 | 5.7867 | 7.1794 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.2702 | 1.8757 | 3.0691 | 4.3440 | 5.8887 |
| 0.4 | 1.5719 | 2.2870 | 3.5013 | 4.7538 | 6.3904 |
| 0.6 | 1.7322 | 2.4730 | 3.5604 | 4.7450 | 6.0981 |
| 1.0 | 1.7586 | 2.4823 | 3.5378 | 4.4919 | 5.4907 |

表5-2(a) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi/2$) 及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (F 値)

$(F = K_1 / \sigma_0 \sqrt{\pi a / Q})$ (POINT A: $\phi = \pi/2$, B: $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

● (き裂最深部: A)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.0768 | 1.1157 | 1.2925 | 1.6053 | 2.0809 |
| 0.4 | 1.0484 | 1.0656 | 1.1398 | 1.2857 | 1.5495 |
| 0.6 | 1.0315 | 1.0432 | 1.0815 | 1.1640 | 1.3271 |
| 1.0 | 0.9915 | 1.0060 | 1.0257 | 1.0650 | 1.1484 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.2680 | 0.2805 | 0.3669 | 0.5146 | 0.7056 |
| 0.4 | 0.2449 | 0.2457 | 0.2814 | 0.3465 | 0.4402 |
| 0.6 | 0.2223 | 0.2189 | 0.2361 | 0.2707 | 0.3177 |
| 1.0 | 0.1668 | 0.1624 | 0.1673 | 0.1802 | 0.1949 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4221 | 0.4387 | 0.5503 | 0.7493 | 1.0230 |
| 0.4 | 0.3924 | 0.3935 | 0.4373 | 0.5271 | 0.6672 |
| 0.6 | 0.3629 | 0.3588 | 0.3781 | 0.4264 | 0.5039 |
| 1.0 | 0.2911 | 0.2835 | 0.2886 | 0.3065 | 0.3376 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.1979 | 0.2076 | 0.2775 | 0.3949 | 0.5416 |
| 0.4 | 0.1795 | 0.1797 | 0.2088 | 0.2599 | 0.3293 |
| 0.6 | 0.1612 | 0.1581 | 0.1723 | 0.1992 | 0.2341 |
| 1.0 | 0.1175 | 0.1140 | 0.1179 | 0.1279 | 0.1353 |

表 5-2 (b) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi/2$) 及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (F 値)

$$(F = K_1 / \sigma_0 \sqrt{\pi a / Q}) \quad (\text{POINT A: } \phi = \pi/2, \text{ B: } \phi = 0) \quad (t \text{ (板厚)} / r \text{ (内半径)} = 0.4)$$

⊙ (き裂表面部: B)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.5040 | 0.5365 | 0.6642 | 0.8241 | 1.0287 |
| 0.4 | 0.7469 | 0.7691 | 0.8705 | 1.0255 | 1.2538 |
| 0.6 | 0.9271 | 0.9345 | 0.9880 | 1.1165 | 1.3020 |
| 1.0 | 1.1705 | 1.1654 | 1.1921 | 1.2676 | 1.3781 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4110 | 0.4300 | 0.4996 | 0.5856 | 0.6982 |
| 0.4 | 0.5653 | 0.5804 | 0.6313 | 0.7096 | 0.8350 |
| 0.6 | 0.6907 | 0.6962 | 0.7138 | 0.7830 | 0.8813 |
| 1.0 | 0.8643 | 0.8622 | 0.8726 | 0.9095 | 0.9690 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4516 | 0.4751 | 0.5625 | 0.6739 | 0.8196 |
| 0.4 | 0.6383 | 0.6551 | 0.7218 | 0.8266 | 0.9878 |
| 0.6 | 0.7828 | 0.7883 | 0.8176 | 0.9071 | 1.0364 |
| 1.0 | 0.9830 | 0.9795 | 0.9958 | 1.0461 | 1.1240 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.3763 | 0.3929 | 0.4546 | 0.5254 | 0.6168 |
| 0.4 | 0.5100 | 0.5247 | 0.5680 | 0.6297 | 0.7330 |
| 0.6 | 0.6239 | 0.6298 | 0.6412 | 0.6977 | 0.7765 |
| 1.0 | 0.7787 | 0.7772 | 0.7833 | 0.8120 | 0.8596 |

表 5 - 3 (a) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿ったK値分布

($a/t=0.1$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.7013 | 1.5245 | 1.3873 | 1.2702 |
| 0.0534 | 1.8007 | 1.5425 | 1.3522 | 1.2012 |
| 0.1829 | 2.0418 | 1.5862 | 1.2671 | 1.0339 |
| 0.2998 | 2.5259 | 1.7459 | 1.2710 | 0.9676 |
| 0.4096 | 2.8826 | 1.7465 | 1.1727 | 0.8563 |
| 0.5860 | 3.2647 | 1.6562 | 1.0373 | 0.7491 |
| 0.8025 | 3.5404 | 1.4957 | 0.9376 | 0.6900 |
| 0.9513 | 3.6114 | 1.4422 | 0.9128 | 0.6735 |
| 1.0000 | 3.6344 | 1.4247 | 0.9046 | 0.6681 |

($a/t=0.1$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 2.5740 | 2.1733 | 1.9177 | 1.7322 |
| 0.0314 | 2.5237 | 2.0868 | 1.8063 | 1.6034 |
| 0.1108 | 2.3966 | 1.8682 | 1.5246 | 1.2778 |
| 0.2140 | 2.4001 | 1.6964 | 1.2645 | 0.9778 |
| 0.3336 | 2.4837 | 1.5301 | 1.0305 | 0.7440 |
| 0.5074 | 2.6373 | 1.3363 | 0.8060 | 0.5586 |
| 0.7480 | 2.8059 | 1.1147 | 0.6624 | 0.4751 |
| 0.9365 | 2.8491 | 1.0346 | 0.6286 | 0.4546 |
| 1.0000 | 2.8637 | 1.0076 | 0.6172 | 0.4477 |

($a/t=0.1$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 2.3019 | 1.9672 | 1.7423 | 1.5719 |
| 0.0446 | 2.2977 | 1.9045 | 1.6416 | 1.4469 |
| 0.1625 | 2.2867 | 1.7386 | 1.3753 | 1.1164 |
| 0.2912 | 2.4917 | 1.6717 | 1.1919 | 0.8929 |
| 0.4136 | 2.7108 | 1.5771 | 1.0298 | 0.7376 |
| 0.5840 | 2.9635 | 1.4383 | 0.8750 | 0.6215 |
| 0.7963 | 3.1676 | 1.2814 | 0.7858 | 0.5723 |
| 0.9494 | 3.2154 | 1.2274 | 0.7626 | 0.5579 |
| 1.0000 | 3.2312 | 1.2095 | 0.7549 | 0.5532 |

($a/t=0.1$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 2.6433 | 2.2200 | 1.9520 | 1.7586 |
| 0.0350 | 2.5879 | 2.1150 | 1.8157 | 1.6020 |
| 0.1103 | 2.4686 | 1.8892 | 1.5225 | 1.2651 |
| 0.2395 | 2.3799 | 1.5934 | 1.1340 | 0.8434 |
| 0.4197 | 2.3178 | 1.2420 | 0.7570 | 0.5149 |
| 0.5773 | 2.2953 | 0.9922 | 0.5528 | 0.3717 |
| 0.7578 | 2.2854 | 0.7911 | 0.4351 | 0.3002 |
| 0.9255 | 2.2533 | 0.6984 | 0.3946 | 0.2761 |
| 1.0000 | 2.2390 | 0.6573 | 0.3767 | 0.2654 |

表 5 - 3 (b) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿ったK値分布

($a/t = 0.2$ $a/b = 0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 2.5612 | 2.2678 | 2.0528 | 1.8757 |
| 0.0522 | 2.7053 | 2.2949 | 2.0029 | 1.7757 |
| 0.1732 | 3.0393 | 2.3577 | 1.8871 | 1.5439 |
| 0.2912 | 3.7051 | 2.5646 | 1.8720 | 1.4286 |
| 0.4065 | 4.2208 | 2.5555 | 1.7173 | 1.2562 |
| 0.5860 | 4.7818 | 2.4191 | 1.5177 | 1.0981 |
| 0.8025 | 5.1831 | 2.1947 | 1.3831 | 1.0197 |
| 0.9513 | 5.2910 | 2.1191 | 1.3498 | 0.9980 |
| 1.0000 | 5.3263 | 2.0943 | 1.3389 | 0.9909 |

($a/t = 0.2$ $a/b = 0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 3.6690 | 3.0952 | 2.7334 | 2.4730 |
| 0.0282 | 3.6034 | 2.9811 | 2.5855 | 2.3011 |
| 0.0999 | 3.4364 | 2.6912 | 2.2096 | 1.8639 |
| 0.2057 | 3.4297 | 2.4368 | 1.8244 | 1.4148 |
| 0.3431 | 3.5705 | 2.1746 | 1.4515 | 1.0430 |
| 0.5208 | 3.7891 | 1.8751 | 1.1237 | 0.7805 |
| 0.7526 | 4.0141 | 1.5666 | 0.9281 | 0.6638 |
| 0.9364 | 4.0750 | 1.4493 | 0.8772 | 0.6318 |
| 1.0000 | 4.0961 | 1.4088 | 0.8595 | 0.6207 |

($a/t = 0.2$ $a/b = 0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 3.3523 | 2.8556 | 2.5298 | 2.2870 |
| 0.0402 | 3.3433 | 2.7704 | 2.3939 | 2.1175 |
| 0.1482 | 3.3191 | 2.5415 | 2.0288 | 1.6622 |
| 0.2724 | 3.5677 | 2.4247 | 1.7467 | 1.3174 |
| 0.3977 | 3.8693 | 2.2743 | 1.4943 | 1.0738 |
| 0.5740 | 4.2432 | 2.0654 | 1.2564 | 0.8912 |
| 0.7922 | 4.5453 | 1.8276 | 1.1202 | 0.8146 |
| 0.9484 | 4.6201 | 1.7431 | 1.0831 | 0.7911 |
| 1.0000 | 4.6448 | 1.7152 | 1.0709 | 0.7833 |

($a/t = 0.2$ $a/b = 1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 3.7219 | 3.1284 | 2.7537 | 2.4823 |
| 0.0366 | 3.6610 | 2.9884 | 2.5635 | 2.2598 |
| 0.1195 | 3.5231 | 2.6713 | 2.1329 | 1.7557 |
| 0.2558 | 3.3966 | 2.2290 | 1.5610 | 1.1480 |
| 0.4266 | 3.3148 | 1.7515 | 1.0620 | 0.7232 |
| 0.5763 | 3.2852 | 1.4026 | 0.7752 | 0.5188 |
| 0.7455 | 3.2727 | 1.1284 | 0.6168 | 0.4230 |
| 0.9130 | 3.2334 | 0.9817 | 0.5521 | 0.3843 |
| 1.0000 | 3.2130 | 0.9056 | 0.5186 | 0.3641 |

表 5 - 3 (c) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿ったK値分布

($a/t=0.4$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 4.4841 | 3.7977 | 3.3730 | 3.0691 |
| 0.0302 | 4.5167 | 3.7589 | 3.2806 | 2.9361 |
| 0.1129 | 4.6060 | 3.6526 | 3.0276 | 2.5719 |
| 0.2038 | 5.2807 | 3.8874 | 3.0103 | 2.4109 |
| 0.2923 | 6.0328 | 4.0045 | 2.8791 | 2.1919 |
| 0.5023 | 7.2846 | 4.1294 | 2.7199 | 2.0028 |
| 0.7668 | 8.3255 | 3.8260 | 2.4967 | 1.8804 |
| 0.9426 | 8.6273 | 3.7425 | 2.4820 | 1.8753 |
| 1.0000 | 8.7259 | 3.7153 | 2.4772 | 1.8737 |

($a/t=0.4$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 5.4862 | 4.5399 | 3.9633 | 3.5604 |
| 0.0209 | 5.4094 | 4.4223 | 3.8149 | 3.3883 |
| 0.0945 | 5.1390 | 4.0082 | 3.2922 | 2.7823 |
| 0.1879 | 5.0546 | 3.6240 | 2.7512 | 2.1661 |
| 0.2776 | 5.1366 | 3.2978 | 2.3078 | 1.7149 |
| 0.4455 | 5.4221 | 2.9475 | 1.8426 | 1.2898 |
| 0.7146 | 5.8208 | 2.3869 | 1.4351 | 1.0346 |
| 0.9280 | 5.9588 | 2.1722 | 1.3423 | 0.9762 |
| 1.0000 | 6.0053 | 2.0998 | 1.3110 | 0.9565 |

($a/t=0.4$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 5.3663 | 4.4495 | 3.8917 | 3.5013 |
| 0.0240 | 5.3063 | 4.3421 | 3.7476 | 3.3291 |
| 0.1014 | 5.1126 | 3.9956 | 3.2831 | 2.7737 |
| 0.1988 | 5.2571 | 3.7899 | 2.8876 | 2.2809 |
| 0.2990 | 5.5675 | 3.5887 | 2.5209 | 1.8841 |
| 0.4863 | 6.1573 | 3.3396 | 2.1178 | 1.5152 |
| 0.7668 | 6.7673 | 2.9011 | 1.8185 | 1.3408 |
| 0.9426 | 6.9622 | 2.7463 | 1.7552 | 1.3003 |
| 1.0000 | 7.0258 | 2.6958 | 1.7346 | 1.2871 |

($a/t=0.4$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 5.3842 | 4.4978 | 3.9411 | 3.5378 |
| 0.0397 | 5.2831 | 4.2744 | 3.6435 | 3.1946 |
| 0.1218 | 5.0741 | 3.8124 | 3.0281 | 2.4849 |
| 0.2525 | 4.8848 | 3.1984 | 2.2414 | 1.6509 |
| 0.4247 | 4.7585 | 2.5067 | 1.5185 | 1.0319 |
| 0.5803 | 4.7068 | 1.9978 | 1.1114 | 0.7470 |
| 0.7578 | 4.6797 | 1.5947 | 0.8819 | 0.6077 |
| 0.9208 | 4.6481 | 1.3989 | 0.7969 | 0.5572 |
| 1.0000 | 4.6328 | 1.3037 | 0.7556 | 0.5327 |

表 5 - 3 (d) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿ったK値分布

($a/t=0.6$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 6.8142 | 5.5717 | 4.8416 | 4.3440 |
| 0.0234 | 6.8177 | 5.5155 | 4.7379 | 4.2022 |
| 0.0930 | 6.8279 | 5.3484 | 4.4294 | 3.7805 |
| 0.1832 | 7.6419 | 5.6501 | 4.4213 | 3.5816 |
| 0.2789 | 8.6420 | 5.8427 | 4.2774 | 3.3077 |
| 0.4935 | 10.5422 | 6.2104 | 4.2096 | 3.1590 |
| 0.7622 | 12.4560 | 6.1672 | 4.1637 | 3.1892 |
| 0.9415 | 13.0721 | 6.1885 | 4.2322 | 3.2468 |
| 1.0000 | 13.2731 | 6.1955 | 4.2546 | 3.2656 |

($a/t=0.6$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 7.5931 | 6.1691 | 5.3251 | 4.7450 |
| 0.0281 | 7.4498 | 5.9603 | 5.0666 | 3.4497 |
| 0.1080 | 7.0426 | 5.3667 | 4.3318 | 3.6100 |
| 0.2089 | 6.9008 | 4.8380 | 3.6125 | 2.8107 |
| 0.3156 | 7.0016 | 4.3803 | 3.0127 | 2.2200 |
| 0.4840 | 7.2972 | 3.8664 | 2.4212 | 1.7196 |
| 0.7342 | 7.7077 | 3.2182 | 1.9806 | 1.4461 |
| 0.9329 | 7.8635 | 2.9800 | 1.8764 | 1.3780 |
| 1.0000 | 7.9161 | 2.8996 | 1.8412 | 1.3550 |

($a/t=0.6$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 7.7421 | 6.2407 | 5.3575 | 4.7538 |
| 0.0310 | 7.6366 | 6.0636 | 5.1257 | 4.4820 |
| 0.1278 | 7.3069 | 5.5106 | 4.4021 | 3.6332 |
| 0.2473 | 7.5736 | 5.2162 | 3.8416 | 2.9639 |
| 0.3708 | 8.0659 | 4.9403 | 3.3697 | 2.4906 |
| 0.5549 | 8.7815 | 4.5840 | 2.9320 | 2.1437 |
| 0.7829 | 9.4323 | 4.1597 | 2.6840 | 2.0069 |
| 0.9461 | 9.6387 | 4.0240 | 2.6326 | 1.9735 |
| 1.0000 | 9.7068 | 3.9792 | 2.6157 | 1.9625 |

($a/t=0.6$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 7.0120 | 5.7867 | 5.0312 | 4.4919 |
| 0.0397 | 6.8604 | 5.4931 | 4.6519 | 4.0607 |
| 0.1218 | 6.5468 | 4.8860 | 3.8675 | 3.1691 |
| 0.2525 | 6.2594 | 4.0944 | 2.8741 | 2.1235 |
| 0.4247 | 6.0661 | 3.2161 | 1.9663 | 1.3490 |
| 0.5803 | 5.9788 | 2.5763 | 1.4557 | 0.9893 |
| 0.7578 | 5.9275 | 2.0657 | 1.1615 | 0.8079 |
| 0.9208 | 5.9031 | 1.8164 | 1.0505 | 0.7402 |
| 1.0000 | 5.8913 | 1.6953 | 0.9966 | 0.7073 |

表 5 - 3 (e) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿ったK値分布

($a/t = 0.8$

$a/b = 0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 9.8212 | 7.8249 | 6.6665 | 5.8887 |
| 0.0315 | 9.7888 | 7.7098 | 6.4843 | 5.6544 |
| 0.1190 | 9.6986 | 7.3902 | 5.9785 | 5.0035 |
| 0.2139 | 10.9169 | 7.8775 | 6.0585 | 4.8553 |
| 0.3099 | 12.3449 | 8.2754 | 6.0378 | 4.6769 |
| 0.5172 | 15.0623 | 8.9825 | 6.2051 | 4.7329 |
| 0.7728 | 18.2567 | 9.4571 | 6.4920 | 5.0000 |
| 0.9441 | 19.4709 | 9.6908 | 6.6765 | 5.1285 |
| 1.0000 | 19.8671 | 9.7670 | 6.7367 | 5.1705 |

($a/t = 0.8$

$a/b = 0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 10.2246 | 8.1383 | 6.9210 | 6.0981 |
| 0.0306 | 9.9927 | 7.8400 | 6.5708 | 5.7098 |
| 0.1209 | 9.3086 | 6.9597 | 5.5376 | 4.5638 |
| 0.2313 | 9.0527 | 6.2199 | 4.5863 | 3.5450 |
| 0.3369 | 9.1170 | 5.6344 | 3.8670 | 2.8611 |
| 0.5017 | 9.4528 | 5.0222 | 3.1879 | 2.2962 |
| 0.7445 | 10.0477 | 4.3021 | 2.6794 | 1.9596 |
| 0.9356 | 10.3273 | 4.0440 | 2.5415 | 1.8528 |
| 1.0000 | 10.4216 | 3.9570 | 2.4951 | 1.8168 |

($a/t = 0.8$

$a/b = 0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 10.9300 | 8.6116 | 7.2793 | 6.3904 |
| 0.0304 | 10.7069 | 8.3358 | 6.9565 | 6.0304 |
| 0.1180 | 10.0639 | 7.5409 | 6.0261 | 4.9933 |
| 0.2226 | 10.1518 | 7.1119 | 5.3414 | 4.1978 |
| 0.3270 | 10.5887 | 6.7781 | 4.7882 | 3.6242 |
| 0.5128 | 11.5310 | 6.4355 | 4.2478 | 3.1464 |
| 0.7617 | 12.8053 | 5.9870 | 3.9199 | 2.9446 |
| 0.9408 | 13.3336 | 5.8591 | 3.8579 | 2.8889 |
| 1.0000 | 13.5083 | 5.8168 | 3.8374 | 2.8705 |

($a/t = 0.8$

$a/b = 1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 8.8023 | 7.1794 | 6.1892 | 5.4907 |
| 0.0397 | 8.5835 | 6.8057 | 5.7241 | 4.9715 |
| 0.1218 | 8.1311 | 6.0330 | 4.7623 | 3.8977 |
| 0.2525 | 7.7296 | 5.0560 | 3.5609 | 2.6427 |
| 0.4247 | 7.4781 | 3.9951 | 2.4688 | 1.7096 |
| 0.5803 | 7.3796 | 3.2323 | 1.8517 | 1.2669 |
| 0.7578 | 7.3533 | 2.6144 | 1.4750 | 1.0199 |
| 0.9208 | 7.3415 | 2.3060 | 1.3204 | 0.9150 |
| 1.0000 | 7.3357 | 2.1562 | 1.2452 | 0.8641 |

表 5 - 4 (a) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った F 値分布

($a/t=0.1$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.5040 | 0.4516 | 0.4110 | 0.3763 |
| 0.0534 | 0.5335 | 0.4570 | 0.4006 | 0.3559 |
| 0.1829 | 0.6049 | 0.4699 | 0.3754 | 0.3063 |
| 0.2998 | 0.7483 | 0.5172 | 0.3765 | 0.2866 |
| 0.4096 | 0.8540 | 0.5174 | 0.3474 | 0.2537 |
| 0.5860 | 0.9672 | 0.4907 | 0.3073 | 0.2219 |
| 0.8025 | 1.0488 | 0.4431 | 0.2778 | 0.2044 |
| 0.9513 | 1.0699 | 0.4273 | 0.2704 | 0.1995 |
| 1.0000 | 1.0768 | 0.4221 | 0.2680 | 0.1979 |

($a/t=0.1$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.9271 | 0.7828 | 0.6907 | 0.6239 |
| 0.0314 | 0.9090 | 0.7516 | 0.6506 | 0.5775 |
| 0.1108 | 0.8632 | 0.6729 | 0.5491 | 0.4602 |
| 0.2140 | 0.8645 | 0.6110 | 0.4554 | 0.3522 |
| 0.3336 | 0.8946 | 0.5511 | 0.3711 | 0.2680 |
| 0.5074 | 0.9499 | 0.4813 | 0.2903 | 0.2012 |
| 0.7480 | 1.0106 | 0.4015 | 0.2386 | 0.1711 |
| 0.9365 | 1.0262 | 0.3726 | 0.2264 | 0.1637 |
| 1.0000 | 1.0315 | 0.3629 | 0.2223 | 0.1612 |

($a/t=0.1$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.7469 | 0.6383 | 0.5653 | 0.5100 |
| 0.0446 | 0.7455 | 0.6179 | 0.5326 | 0.4694 |
| 0.1625 | 0.7419 | 0.5641 | 0.4462 | 0.3622 |
| 0.2912 | 0.8084 | 0.5424 | 0.3867 | 0.2897 |
| 0.4136 | 0.8795 | 0.5117 | 0.3341 | 0.2393 |
| 0.5840 | 0.9615 | 0.4667 | 0.2839 | 0.2016 |
| 0.7963 | 1.0277 | 0.4158 | 0.2549 | 0.1857 |
| 0.9494 | 1.0432 | 0.3982 | 0.2474 | 0.1810 |
| 1.0000 | 1.0484 | 0.3924 | 0.2449 | 0.1795 |

($a/t=0.1$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.1705 | 0.9830 | 0.8643 | 0.7787 |
| 0.0350 | 1.1459 | 0.9365 | 0.8040 | 0.7094 |
| 0.1103 | 1.0931 | 0.8365 | 0.6742 | 0.5602 |
| 0.2395 | 1.0539 | 0.7056 | 0.5021 | 0.3735 |
| 0.4197 | 1.0263 | 0.5500 | 0.3352 | 0.2280 |
| 0.5773 | 1.0164 | 0.4394 | 0.2448 | 0.1646 |
| 0.7578 | 1.0120 | 0.3503 | 0.1927 | 0.1329 |
| 0.9255 | 0.9978 | 0.3093 | 0.1747 | 0.1222 |
| 1.0000 | 0.9915 | 0.2911 | 0.1668 | 0.1175 |

表 5 - 4 (b) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った F 値分布

($a/t=0.2$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.5365 | 0.4751 | 0.4300 | 0.3929 |
| 0.0522 | 0.5667 | 0.4807 | 0.4196 | 0.3720 |
| 0.1732 | 0.6367 | 0.4939 | 0.3953 | 0.3234 |
| 0.2912 | 0.7761 | 0.5372 | 0.3921 | 0.2993 |
| 0.4065 | 0.8842 | 0.5353 | 0.3597 | 0.2632 |
| 0.5860 | 1.0017 | 0.5068 | 0.3179 | 0.2300 |
| 0.8025 | 1.0858 | 0.4598 | 0.2897 | 0.2136 |
| 0.9513 | 1.1083 | 0.4439 | 0.2828 | 0.2091 |
| 1.0000 | 1.1157 | 0.4387 | 0.2805 | 0.2076 |

($a/t=0.2$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.9345 | 0.7883 | 0.6962 | 0.6298 |
| 0.0282 | 0.9177 | 0.7592 | 0.6585 | 0.5860 |
| 0.09999 | 0.8752 | 0.6854 | 0.5627 | 0.4747 |
| 0.2057 | 0.8735 | 0.6206 | 0.4646 | 0.3603 |
| 0.3431 | 0.9093 | 0.5538 | 0.3697 | 0.2656 |
| 0.5208 | 0.9650 | 0.4776 | 0.2862 | 0.1988 |
| 0.7526 | 1.0223 | 0.3990 | 0.2364 | 0.1691 |
| 0.9364 | 1.0378 | 0.3691 | 0.2234 | 0.1609 |
| 1.0000 | 1.0432 | 0.3588 | 0.2189 | 0.1581 |

($a/t=0.2$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.7691 | 0.6551 | 0.5804 | 0.5247 |
| 0.0402 | 0.7670 | 0.6356 | 0.5492 | 0.4858 |
| 0.1482 | 0.7615 | 0.5831 | 0.4654 | 0.3813 |
| 0.2724 | 0.8185 | 0.5563 | 0.4007 | 0.3022 |
| 0.3977 | 0.8877 | 0.5218 | 0.3428 | 0.2464 |
| 0.5740 | 0.9735 | 0.4739 | 0.2882 | 0.2045 |
| 0.7922 | 1.0428 | 0.4193 | 0.2570 | 0.1869 |
| 0.9484 | 1.0599 | 0.3999 | 0.2485 | 0.1815 |
| 1.0000 | 1.0656 | 0.3935 | 0.2457 | 0.1797 |

($a/t=0.2$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.1654 | 0.9795 | 0.8622 | 0.7772 |
| 0.0366 | 1.1463 | 0.9357 | 0.8027 | 0.7076 |
| 0.1195 | 1.1031 | 0.8364 | 0.6678 | 0.5497 |
| 0.2558 | 1.0635 | 0.6979 | 0.4888 | 0.3594 |
| 0.4266 | 1.0379 | 0.5484 | 0.3325 | 0.2265 |
| 0.5763 | 1.0286 | 0.4392 | 0.2427 | 0.1625 |
| 0.7455 | 1.0247 | 0.3533 | 0.1931 | 0.1324 |
| 0.9130 | 1.0124 | 0.3074 | 0.1729 | 0.1203 |
| 1.0000 | 1.0060 | 0.2835 | 0.1624 | 0.1140 |

表 5 - 4 (c) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った F 値分布

($a/t=0.4$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.6642 | 0.5625 | 0.4996 | 0.4546 |
| 0.0302 | 0.6690 | 0.5568 | 0.4859 | 0.4349 |
| 0.1129 | 0.6823 | 0.5410 | 0.4485 | 0.3810 |
| 0.2038 | 0.7822 | 0.5758 | 0.4459 | 0.3571 |
| 0.2923 | 0.8936 | 0.5932 | 0.4265 | 0.3247 |
| 0.5023 | 1.0790 | 0.6117 | 0.4029 | 0.2967 |
| 0.7668 | 1.2332 | 0.5667 | 0.3698 | 0.2785 |
| 0.9426 | 1.2779 | 0.5544 | 0.3676 | 0.2778 |
| 1.0000 | 1.2925 | 0.5503 | 0.3669 | 0.2775 |

($a/t=0.4$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.9800 | 0.8176 | 0.7138 | 0.6412 |
| 0.0209 | 0.9742 | 0.7964 | 0.6870 | 0.6102 |
| 0.0945 | 0.9255 | 0.7218 | 0.5929 | 0.5011 |
| 0.1879 | 0.9103 | 0.6526 | 0.4955 | 0.3901 |
| 0.2776 | 0.9250 | 0.5939 | 0.4156 | 0.3088 |
| 0.4455 | 0.9765 | 0.5308 | 0.3318 | 0.2323 |
| 0.7146 | 1.0483 | 0.4298 | 0.2584 | 0.1863 |
| 0.9280 | 1.0731 | 0.3912 | 0.2417 | 0.1758 |
| 1.0000 | 1.0815 | 0.3781 | 0.2361 | 0.1723 |

($a/t=0.4$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.8705 | 0.7218 | 0.6313 | 0.5680 |
| 0.0240 | 0.8608 | 0.7044 | 0.6080 | 0.5401 |
| 0.1014 | 0.8294 | 0.6482 | 0.5326 | 0.4500 |
| 0.1988 | 0.8528 | 0.6148 | 0.4684 | 0.3700 |
| 0.2990 | 0.9032 | 0.5822 | 0.4089 | 0.3056 |
| 0.4863 | 0.9989 | 0.5418 | 0.3436 | 0.2458 |
| 0.7668 | 1.0978 | 0.4706 | 0.2950 | 0.2175 |
| 0.9426 | 1.1294 | 0.4455 | 0.2847 | 0.2109 |
| 1.0000 | 1.1398 | 0.4373 | 0.2814 | 0.2088 |

($a/t=0.4$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.1921 | 0.9958 | 0.8726 | 0.7833 |
| 0.0397 | 1.1697 | 0.9464 | 0.8067 | 0.7073 |
| 0.1218 | 1.1234 | 0.8441 | 0.6704 | 0.5502 |
| 0.2525 | 1.0815 | 0.7081 | 0.4962 | 0.3655 |
| 0.4247 | 1.0536 | 0.5550 | 0.3362 | 0.2285 |
| 0.5803 | 1.0421 | 0.4423 | 0.2461 | 0.1654 |
| 0.7578 | 1.0361 | 0.3531 | 0.1953 | 0.1345 |
| 0.9208 | 1.0291 | 0.3097 | 0.1764 | 0.1234 |
| 1.0000 | 1.0257 | 0.2886 | 0.1673 | 0.1179 |

表 5 - 4 (d) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った F 値分布

($a/t=0.6$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 0.8241 | 0.6739 | 0.5856 | 0.5254 |
| 0.0234 | 0.8245 | 0.6671 | 0.5730 | 0.5082 |
| 0.0930 | 0.8258 | 0.6468 | 0.5357 | 0.4572 |
| 0.1832 | 0.9242 | 0.6833 | 0.5347 | 0.4332 |
| 0.2789 | 1.0452 | 0.7066 | 0.5173 | 0.4000 |
| 0.4935 | 1.2750 | 0.7511 | 0.5091 | 0.3821 |
| 0.7622 | 1.5065 | 0.7459 | 0.5036 | 0.3857 |
| 0.9415 | 1.5810 | 0.7485 | 0.5119 | 0.3927 |
| 1.0000 | 1.6053 | 0.7493 | 0.5146 | 0.3949 |

($a/t=0.6$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.1165 | 0.9071 | 0.7830 | 0.6977 |
| 0.0281 | 1.0954 | 0.8764 | 0.7450 | 0.6543 |
| 0.1080 | 1.0356 | 0.7891 | 0.6370 | 0.5308 |
| 0.2089 | 1.0147 | 0.7114 | 0.5312 | 0.4133 |
| 0.3156 | 1.0295 | 0.6441 | 0.4430 | 0.3264 |
| 0.4840 | 1.0730 | 0.5685 | 0.3560 | 0.2529 |
| 0.7342 | 1.1334 | 0.4732 | 0.2912 | 0.2126 |
| 0.9329 | 1.1563 | 0.4382 | 0.2759 | 0.2026 |
| 1.0000 | 1.1640 | 0.4264 | 0.2707 | 0.1992 |

($a/t=0.6$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.0255 | 0.8266 | 0.7096 | 0.6297 |
| 0.0310 | 1.0115 | 0.8032 | 0.6789 | 0.5937 |
| 0.1278 | 0.9678 | 0.7299 | 0.5831 | 0.4812 |
| 0.2473 | 1.0032 | 0.6909 | 0.5088 | 0.3926 |
| 0.3708 | 1.0684 | 0.6544 | 0.4463 | 0.3299 |
| 0.5549 | 1.1631 | 0.6072 | 0.3884 | 0.2839 |
| 0.7829 | 1.2494 | 0.5510 | 0.3555 | 0.2658 |
| 0.9461 | 1.2767 | 0.5330 | 0.3487 | 0.2614 |
| 1.0000 | 1.2857 | 0.5271 | 0.3465 | 0.2599 |

($a/t=0.6$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.2676 | 1.0461 | 0.9095 | 0.8120 |
| 0.0397 | 1.2402 | 0.9930 | 0.8410 | 0.7341 |
| 0.1218 | 1.1835 | 0.8833 | 0.6992 | 0.5729 |
| 0.2525 | 1.1315 | 0.7402 | 0.5196 | 0.3839 |
| 0.4247 | 1.0966 | 0.5814 | 0.3555 | 0.2439 |
| 0.5803 | 1.0808 | 0.4657 | 0.2631 | 0.1788 |
| 0.7578 | 1.0716 | 0.3734 | 0.2100 | 0.1460 |
| 0.9208 | 1.0671 | 0.3284 | 0.1899 | 0.1338 |
| 1.0000 | 1.0650 | 0.3065 | 0.1802 | 0.1279 |

表 5 - 4 (e) き裂形状及び応力分布によるき裂前縁に沿った F 値分布

($a/t=0.8$ $a/b=0.2$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.0287 | 0.8196 | 0.6982 | 0.6168 |
| 0.0315 | 1.0253 | 0.8075 | 0.6792 | 0.5922 |
| 0.1190 | 1.0158 | 0.7740 | 0.6262 | 0.5241 |
| 0.2139 | 1.1434 | 0.8251 | 0.6346 | 0.5085 |
| 0.3099 | 1.2930 | 0.8668 | 0.6324 | 0.4899 |
| 0.5172 | 1.5776 | 0.9408 | 0.6499 | 0.4957 |
| 0.7728 | 1.9122 | 0.9905 | 0.6800 | 0.5237 |
| 0.9441 | 2.0394 | 1.0150 | 0.6993 | 0.5372 |
| 1.0000 | 2.0809 | 1.0230 | 0.7056 | 0.5416 |

($a/t=0.8$ $a/b=0.6$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.3020 | 1.0364 | 0.8813 | 0.7765 |
| 0.0306 | 1.2725 | 0.9984 | 0.8367 | 0.7271 |
| 0.1209 | 1.1854 | 0.8863 | 0.7052 | 0.5812 |
| 0.2313 | 1.1528 | 0.7921 | 0.5840 | 0.4514 |
| 0.3369 | 1.1610 | 0.7175 | 0.4924 | 0.3643 |
| 0.5017 | 1.2037 | 0.6395 | 0.4060 | 0.2924 |
| 0.7445 | 1.2795 | 0.5478 | 0.3412 | 0.2495 |
| 0.9356 | 1.3151 | 0.5150 | 0.3236 | 0.2359 |
| 1.0000 | 1.3271 | 0.5039 | 0.3177 | 0.2314 |

($a/t=0.8$ $a/b=0.4$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.2538 | 0.9878 | 0.8350 | 0.7330 |
| 0.0304 | 1.2282 | 0.9562 | 0.7980 | 0.6917 |
| 0.1180 | 1.1544 | 0.8650 | 0.6912 | 0.5728 |
| 0.2226 | 1.1645 | 0.8158 | 0.6127 | 0.4815 |
| 0.3270 | 1.2146 | 0.7775 | 0.5492 | 0.4157 |
| 0.5128 | 1.3227 | 0.7382 | 0.4873 | 0.3609 |
| 0.7617 | 1.4689 | 0.6868 | 0.4496 | 0.3378 |
| 0.9408 | 1.5295 | 0.6721 | 0.4425 | 0.3314 |
| 1.0000 | 1.5495 | 0.6672 | 0.4402 | 0.3293 |

($a/t=0.8$ $a/b=1.0$)

| $2\phi/\pi$ | CONSTANT | LINEAR | QUADRATIC | CUBIC |
|-------------|----------|--------|-----------|--------|
| 0.0000 | 1.3781 | 1.1240 | 0.9690 | 0.8596 |
| 0.0397 | 1.3438 | 1.0655 | 0.8961 | 0.7783 |
| 0.1218 | 1.2730 | 0.9445 | 0.7456 | 0.6102 |
| 0.2525 | 1.2101 | 0.7915 | 0.5575 | 0.4137 |
| 0.4247 | 1.1707 | 0.6255 | 0.3865 | 0.2677 |
| 0.5803 | 1.1553 | 0.5060 | 0.2899 | 0.1983 |
| 0.7578 | 1.1512 | 0.4093 | 0.2309 | 0.1597 |
| 0.9208 | 1.1494 | 0.3610 | 0.2067 | 0.1433 |
| 1.0000 | 1.1484 | 0.3376 | 0.1949 | 0.1353 |

表 5 - 5 (a) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi / 2$)
及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (変位法による K 値計算結果)

(POINT A : A : $\phi = \pi / 2$, B : $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

⊙ (き裂最深部 : A)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 0.2 | 3.3049 | 4.8294 | 8.1687 | 12.7479 | 19.7191 |
| 0.4 | 2.9380 | 4.2001 | 6.5307 | 9.2050 | 13.0706 |
| 0.6 | 2.5980 | 3.6934 | 5.5616 | 7.4345 | 9.9502 |
| 1.0 | 2.0465 | 2.9116 | 4.3104 | 5.5161 | 6.9500 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.1792 | 1.7319 | 2.7353 | 4.5753 | 7.3772 |
| 0.4 | 1.0324 | 1.4728 | 2.0043 | 2.9028 | 4.2658 |
| 0.6 | 0.8970 | 1.2661 | 1.5920 | 2.1278 | 2.8587 |
| 1.0 | 0.6512 | 0.9202 | 1.0392 | 1.2855 | 1.5707 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 0.2 | 1.7931 | 2.6264 | 4.1647 | 6.7469 | 10.7024 |
| 0.4 | 1.5828 | 2.2593 | 3.1533 | 4.4673 | 6.4676 |
| 0.6 | 1.3889 | 1.9657 | 2.5784 | 3.3984 | 4.5334 |
| 1.0 | 1.0479 | 1.4853 | 1.8076 | 2.2261 | 2.7289 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.8663 | 1.2751 | 2.0397 | 3.4822 | 5.6656 |
| 0.4 | 0.7537 | 1.0749 | 1.4658 | 2.1581 | 3.1962 |
| 0.6 | 0.6493 | 0.9150 | 1.1426 | 1.5470 | 2.0858 |
| 1.0 | 0.4574 | 0.6448 | 0.7122 | 0.8898 | 1.0847 |

表 5-5 (b) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi/2$)
及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (変位法による K 値計算結果)

(POINT A : A : $\phi = \pi/2$, B : $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

● (き裂表面部 : B)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 0.2 | 1.9798 | 2.9337 | 4.8472 | 7.1926 | 10.4631 |
| 0.4 | 2.4313 | 3.5221 | 5.5201 | 7.9570 | 11.1352 |
| 0.6 | 2.5648 | 3.7034 | 5.5737 | 7.6736 | 10.2565 |
| 1.0 | 2.4696 | 3.4806 | 5.2297 | 6.8192 | 8.5802 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.4462 | 2.1163 | 3.4469 | 4.9379 | 6.8074 |
| 0.4 | 1.6880 | 2.4627 | 3.8418 | 5.2609 | 7.1334 |
| 0.6 | 1.7886 | 2.5936 | 3.8802 | 5.1539 | 6.6559 |
| 1.0 | 1.6384 | 2.3025 | 3.4859 | 4.4996 | 5.5964 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.6665 | 2.4490 | 3.9875 | 5.7820 | 8.1656 |
| 0.4 | 1.9796 | 2.8765 | 4.4801 | 6.2689 | 8.6071 |
| 0.6 | 2.0878 | 3.0198 | 4.5231 | 6.0991 | 7.9936 |
| 1.0 | 1.9524 | 2.7473 | 4.1508 | 5.3806 | 6.7260 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.2791 | 1.8665 | 3.0599 | 4.3556 | 5.8856 |
| 0.4 | 1.4784 | 2.1657 | 3.3944 | 4.5681 | 6.1419 |
| 0.6 | 1.5766 | 2.2923 | 3.4306 | 4.5006 | 5.7458 |
| 1.0 | 1.4221 | 1.9962 | 3.0196 | 3.8841 | 4.8110 |

表 5 - 6 (a) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi / 2$)
及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (変位法による F 値計算結果)

($F = K_1 / \sigma_0 \sqrt{\pi a / Q}$) (POINT A : $\phi = \pi / 2$, B : $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

● (き裂最深部: A)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.9791 | 1.0117 | 1.2100 | 1.5418 | 2.0654 |
| 0.4 | 0.9532 | 0.9636 | 1.0594 | 1.2192 | 1.4993 |
| 0.6 | 0.9358 | 0.9407 | 1.0016 | 1.0932 | 1.2671 |
| 1.0 | 0.9062 | 0.9117 | 0.9543 | 0.9972 | 1.0881 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.3493 | 0.3628 | 0.4052 | 0.5533 | 0.7727 |
| 0.4 | 0.3350 | 0.3379 | 0.3251 | 0.3845 | 0.4893 |
| 0.6 | 0.3231 | 0.3225 | 0.2867 | 0.3129 | 0.3640 |
| 1.0 | 0.2883 | 0.2881 | 0.2301 | 0.2324 | 0.2459 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.5312 | 0.5502 | 0.6169 | 0.8160 | 1.1210 |
| 0.4 | 0.5135 | 0.5183 | 0.5115 | 0.5917 | 0.7419 |
| 0.6 | 0.5003 | 0.5006 | 0.4643 | 0.4997 | 0.5773 |
| 1.0 | 0.4640 | 0.4651 | 0.4002 | 0.4024 | 0.4272 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.2567 | 0.2671 | 0.3021 | 0.4211 | 0.5934 |
| 0.4 | 0.2445 | 0.2466 | 0.2378 | 0.2859 | 0.3666 |
| 0.6 | 0.2339 | 0.2330 | 0.2058 | 0.2275 | 0.2656 |
| 1.0 | 0.2025 | 0.2019 | 0.1577 | 0.1608 | 0.1698 |

表 5 - 6 (b) 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部 ($\phi = \pi / 2$)
及び表面部 ($\phi = 0$) の応力拡大係数 (変位法による F 値計算結果)

($F = K_I / \sigma_0 \sqrt{\pi a / Q}$) (POINT A : $\phi = \pi / 2$, B : $\phi = 0$) (t (板厚) / r (内半径) = 0.4)

● (き裂表面部: B)

CONSTANT $\sigma(\xi) = \sigma_0$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.5865 | 0.6146 | 0.7180 | 0.8699 | 1.0959 |
| 0.4 | 0.7888 | 0.8080 | 0.8955 | 1.0539 | 1.2773 |
| 0.6 | 0.9238 | 0.9432 | 1.0038 | 1.1283 | 1.3061 |
| 1.0 | 1.0936 | 1.0898 | 1.1579 | 1.2327 | 1.3433 |

QUADRATIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^2$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4284 | 0.4433 | 0.5106 | 0.5972 | 0.7130 |
| 0.4 | 0.5477 | 0.5650 | 0.6232 | 0.6968 | 0.8183 |
| 0.6 | 0.6442 | 0.6605 | 0.6988 | 0.7578 | 0.8476 |
| 1.0 | 0.7255 | 0.7210 | 0.7718 | 0.8134 | 0.8762 |

LINEAR $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4937 | 0.5130 | 0.5907 | 0.6993 | 0.8553 |
| 0.4 | 0.6423 | 0.6599 | 0.7268 | 0.8303 | 0.9873 |
| 0.6 | 0.7520 | 0.7691 | 0.8146 | 0.8968 | 1.0179 |
| 1.0 | 0.8645 | 0.8602 | 0.9190 | 0.9727 | 1.0530 |

CUBIC $\sigma(\xi) = \sigma_0 \xi^3$

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.3789 | 0.3910 | 0.4532 | 0.5268 | 0.6165 |
| 0.4 | 0.4797 | 0.4968 | 0.5507 | 0.6051 | 0.7045 |
| 0.6 | 0.5679 | 0.5838 | 0.6178 | 0.6618 | 0.7317 |
| 1.0 | 0.6297 | 0.6250 | 0.6686 | 0.7021 | 0.7532 |

表 5-7 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂最深部の膜、
曲げ及びピーク成分

F 値の膜成分 (Fm)

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 1.0768 | 1.1157 | 1.2925 | 1.6053 | 2.0809 |
| 0.4 | 1.0484 | 1.0656 | 1.1398 | 1.2857 | 1.5495 |
| 0.6 | 1.0315 | 1.0432 | 1.0815 | 1.1640 | 1.3271 |
| 1.0 | 0.9915 | 1.0060 | 1.0257 | 1.0650 | 1.1484 |

F 値の曲げ成分 (Fb)

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 0.2 | 0.9458 | 0.8449 | 0.6988 | 0.5781 | 0.3883 |
| 0.4 | 0.9172 | 0.7968 | 0.5778 | 0.3753 | 0.1379 |
| 0.6 | 0.8977 | 0.7694 | 0.5188 | 0.2788 | 0.0100 |
| 1.0 | 0.8514 | 0.7170 | 0.4361 | 0.1548 | -0.1490 |

F 値の放物線ピーク成分 (Fp)

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 0.2 | 0.7140 | 0.4278 | 0.0477 | -0.1344 | -0.1535 |
| 0.4 | 0.6853 | 0.3849 | -0.0214 | -0.1968 | -0.1694 |
| 0.6 | 0.6620 | 0.3526 | -0.0677 | -0.2343 | -0.1780 |
| 1.0 | 0.6058 | 0.2834 | -0.1522 | -0.3001 | -0.1776 |

表 5-8 内壁に軸方向半楕円表面き裂を持つ円筒のき裂表面部の膜、
曲げ及びピーク成分

F 値の膜成分 (Fm)

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.5040 | 0.5365 | 0.6642 | 0.8241 | 1.0287 |
| 0.4 | 0.7469 | 0.7691 | 0.8705 | 1.0255 | 1.2538 |
| 0.6 | 0.9271 | 0.9345 | 0.9880 | 1.1165 | 1.3020 |
| 1.0 | 1.1705 | 1.1654 | 1.1921 | 1.2676 | 1.3781 |

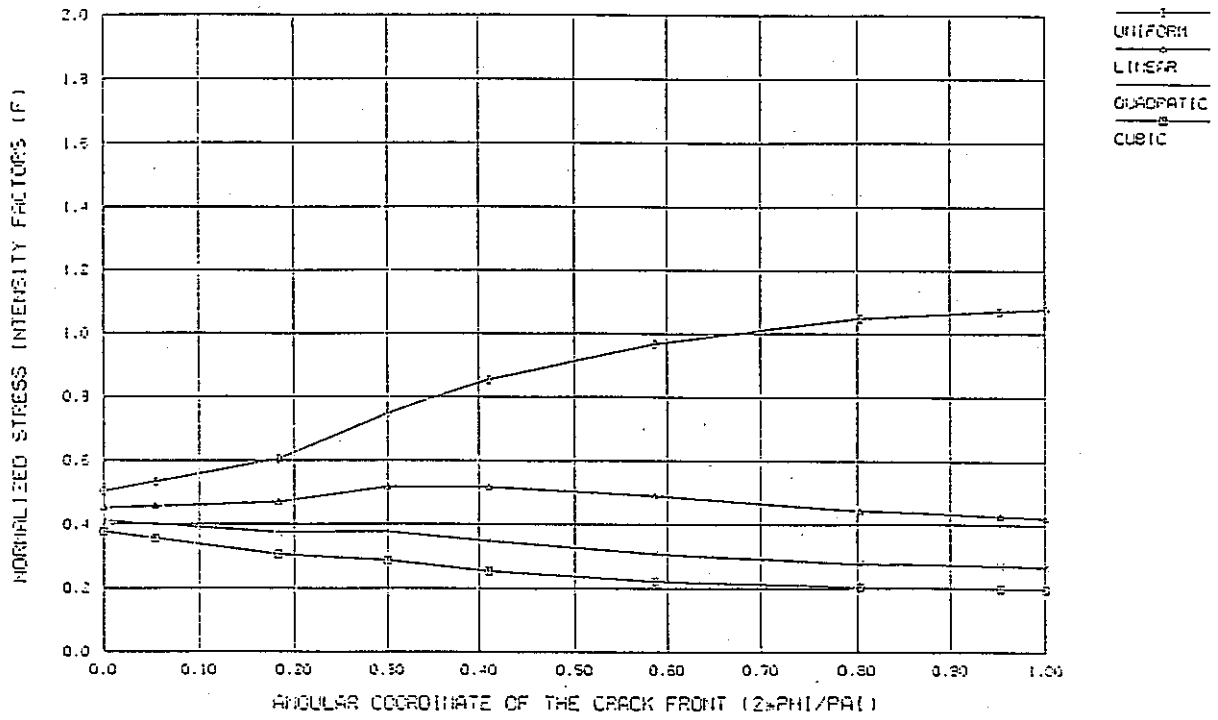
F 値の曲げ成分 (Fb)

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4935 | 0.5119 | 0.5829 | 0.6438 | 0.6941 |
| 0.4 | 0.7251 | 0.7235 | 0.7516 | 0.7868 | 0.8283 |
| 0.6 | 0.8982 | 0.8760 | 0.8517 | 0.8652 | 0.8770 |
| 1.0 | 1.1330 | 1.0910 | 1.0351 | 1.0018 | 0.9715 |

F 値の放物線ピーク成分 (Fp)

| a/t \ a/b | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2 | 0.4733 | 0.4667 | 0.4574 | 0.4170 | 0.3620 |
| 0.4 | 0.6838 | 0.6417 | 0.5695 | 0.4864 | 0.4116 |
| 0.6 | 0.8436 | 0.7720 | 0.6429 | 0.5469 | 0.4517 |
| 1.0 | 1.0621 | 0.9588 | 0.7912 | 0.6536 | 0.5389 |

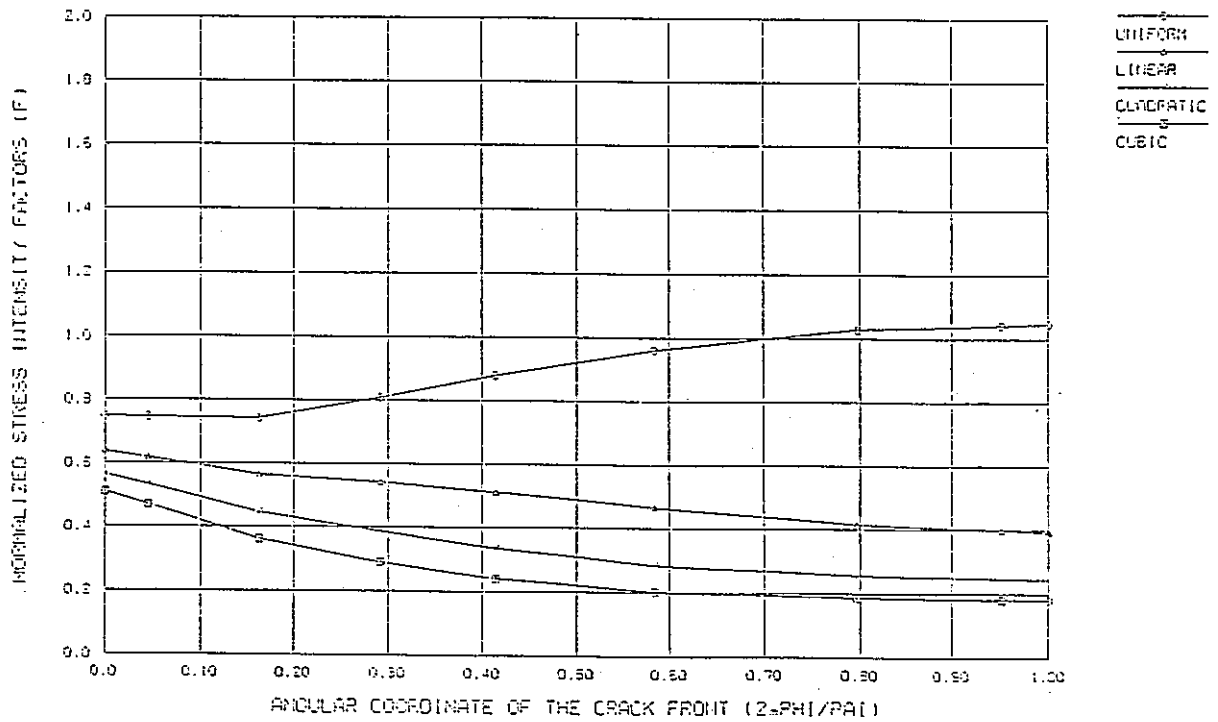
F(1)AS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.1, a/2=0.2)

図 5 - 1 t/r=0.4, a/t=0.1, a/b=0.2の F 値分布図

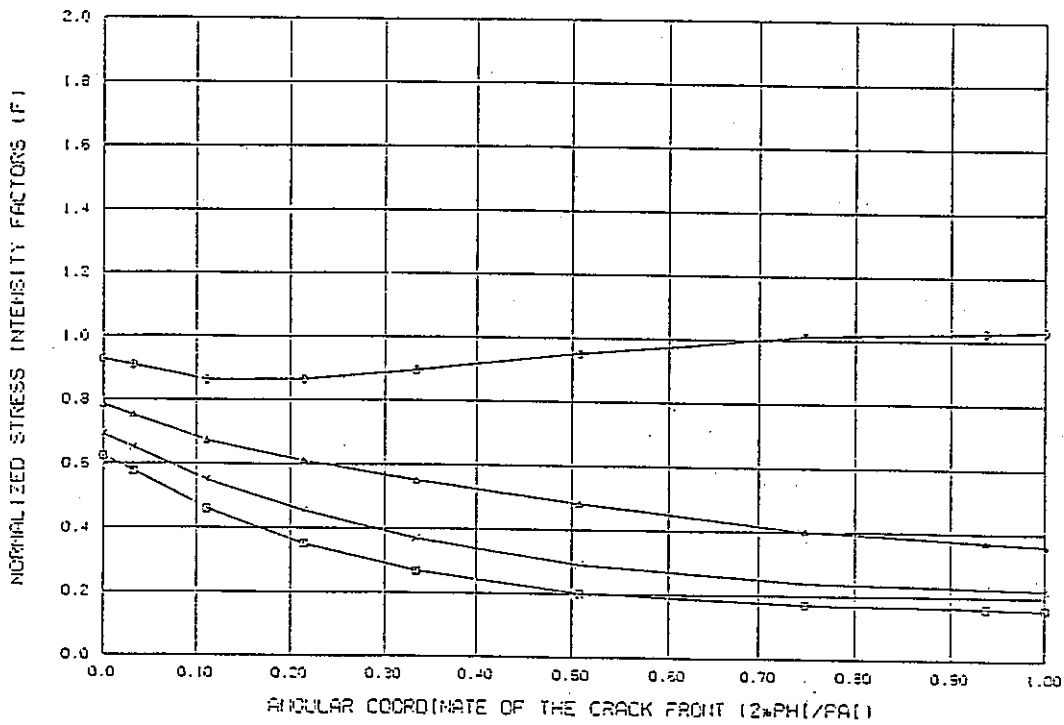
F(1)AS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.1, a/2=0.4)

図 5 - 2 t/r=0.4, a/t=0.1, a/b=0.4の F 値分布図

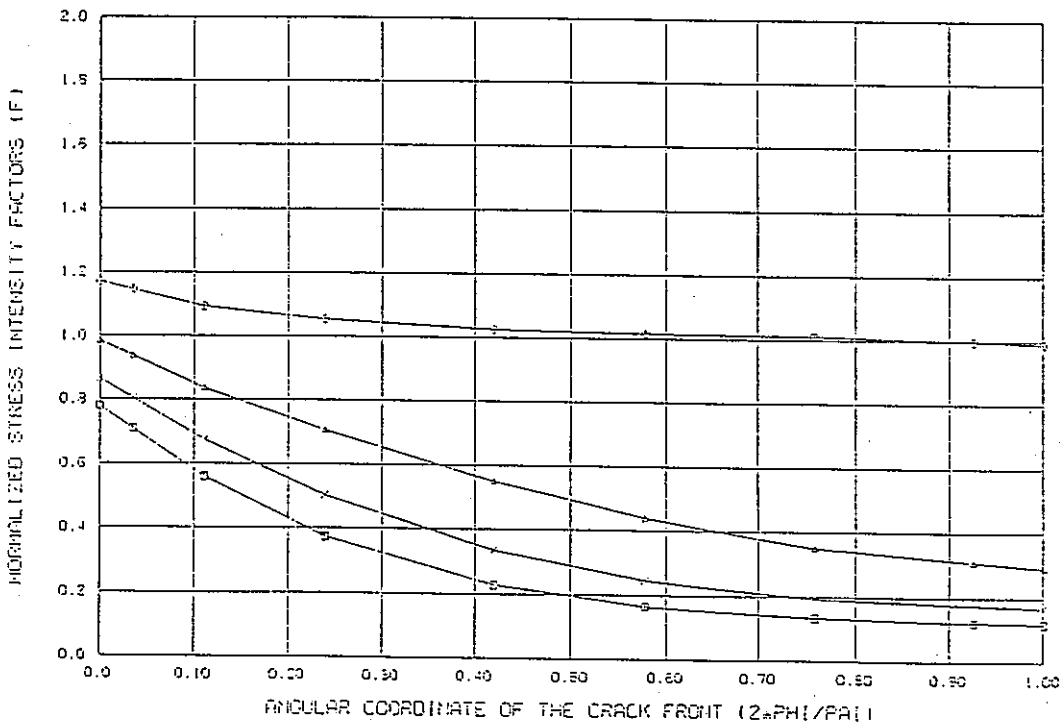
F1HAS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.1, A/B=0.5)

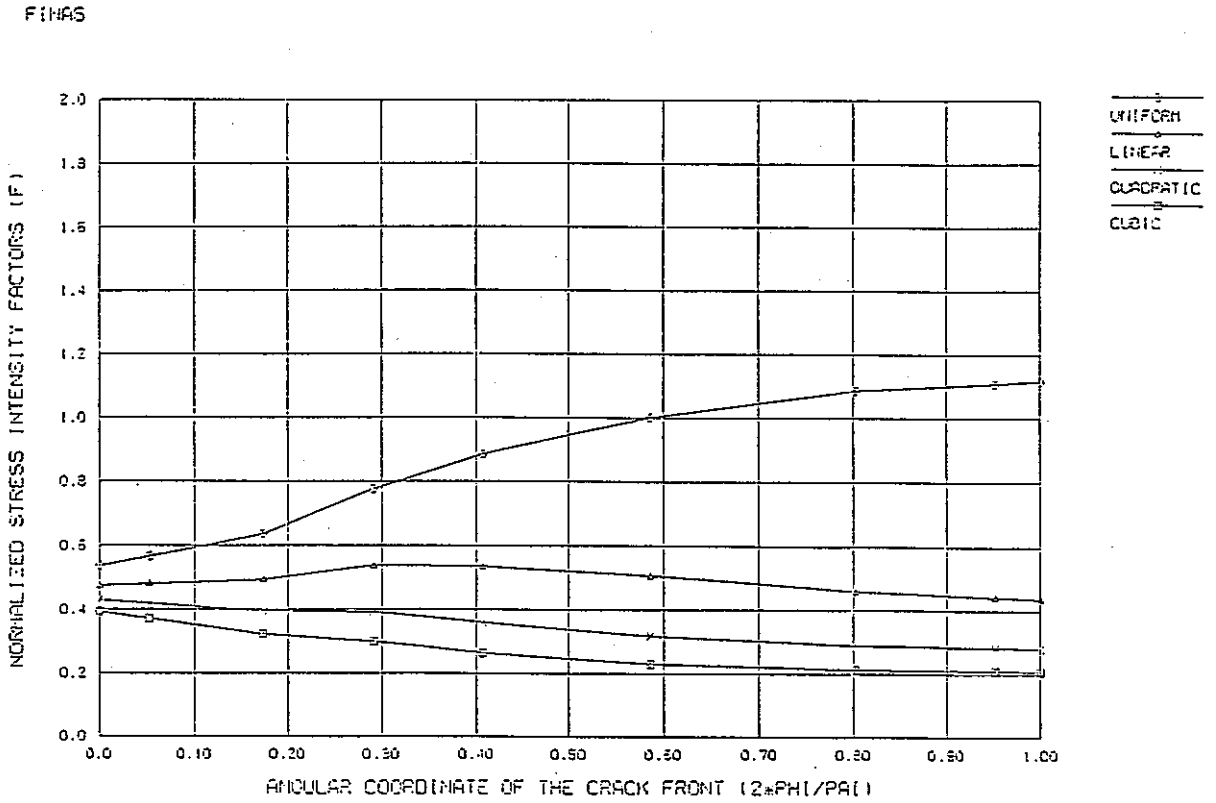
图 5-3 t/r=0.4, a/t=0.1, a/b=0.6 の F 値分布図

F1HAS



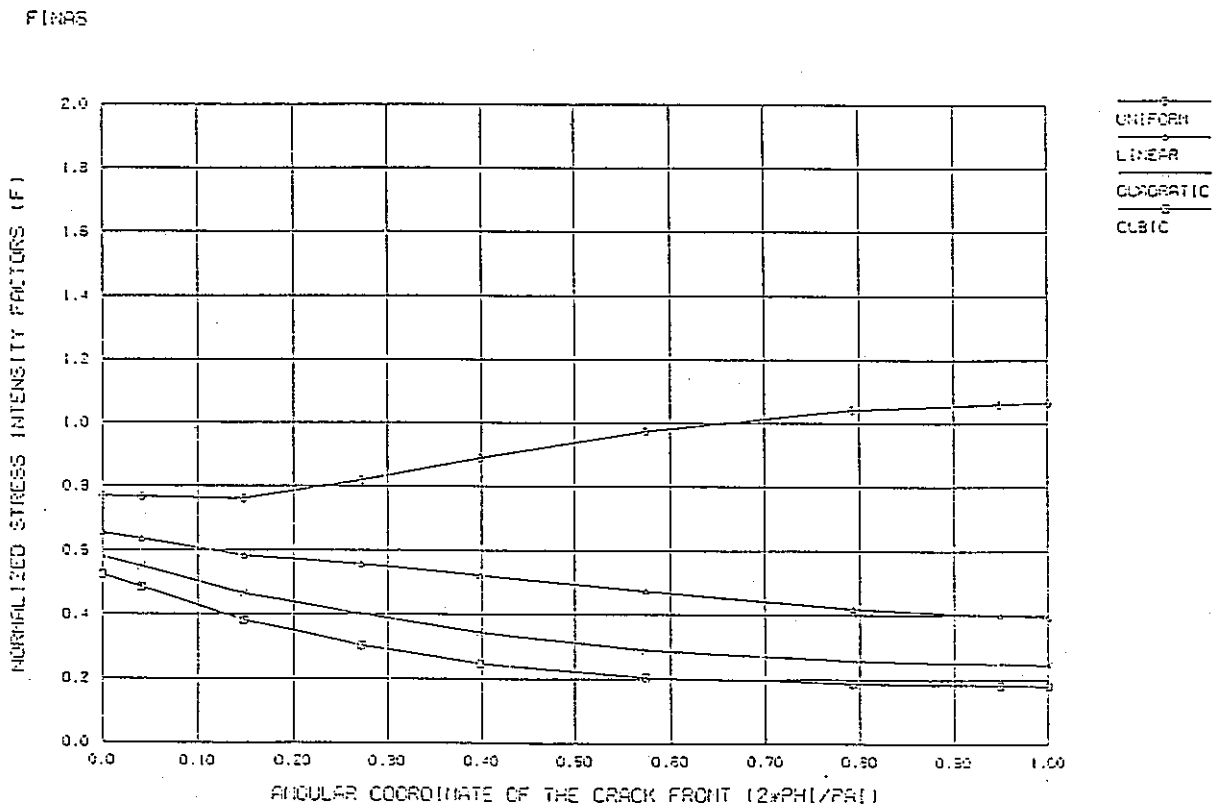
DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.1, A/B=1.0)

图 5-4 t/r=0.4, a/t=1.0, a/b=1.0 の F 値分布図



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS ($A/T=0.2, A/B=0.2$)

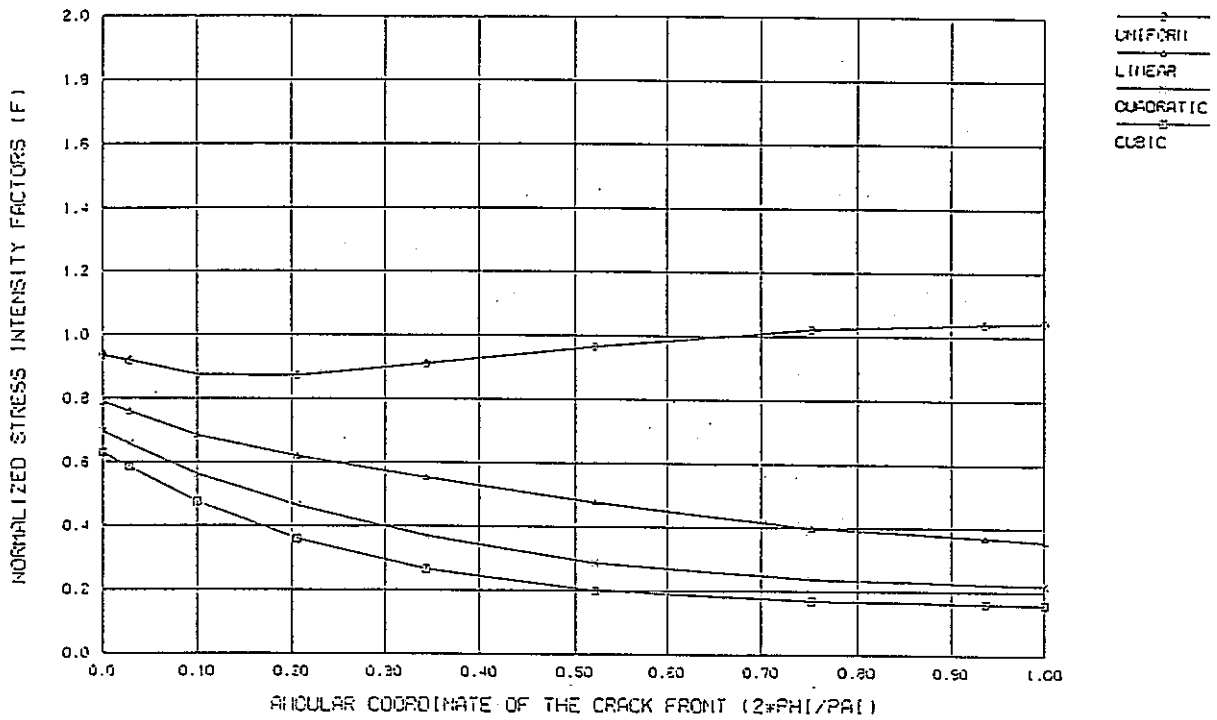
図 5 - 5 $t/r=0.4, a/t=0.2, a/b=0.2$ の F 値分布図



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS ($A/T=0.2, A/B=0.4$)

図 5 - 6 $t/r=0.4, a/t=0.2, a/b=0.4$ の F 値分布図

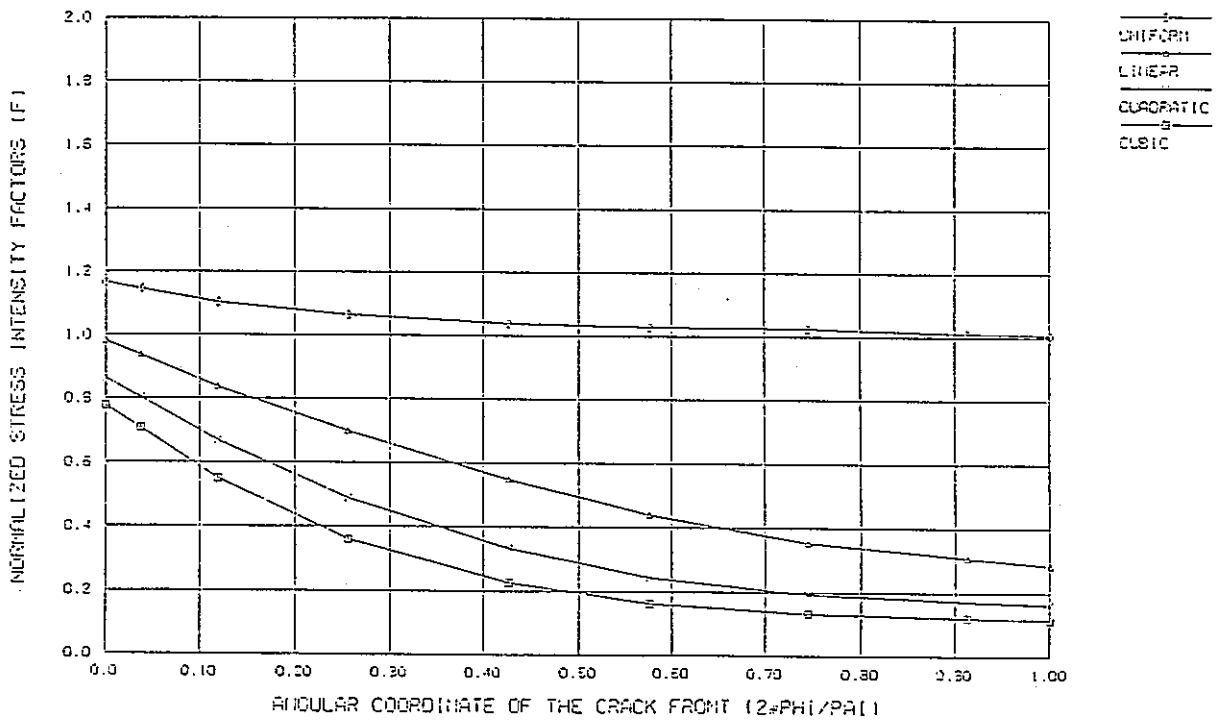
F11AS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.2, A/B=0.6)

図 5 - 7 t/r=0.4, a/t=0.2, a/b=0.6の F 値分布図

F11AS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.2, A/B=1.0)

図 5 - 8 t/r=0.4, a/t=0.2, a/b=1.0の F 値分布図

FIMAS

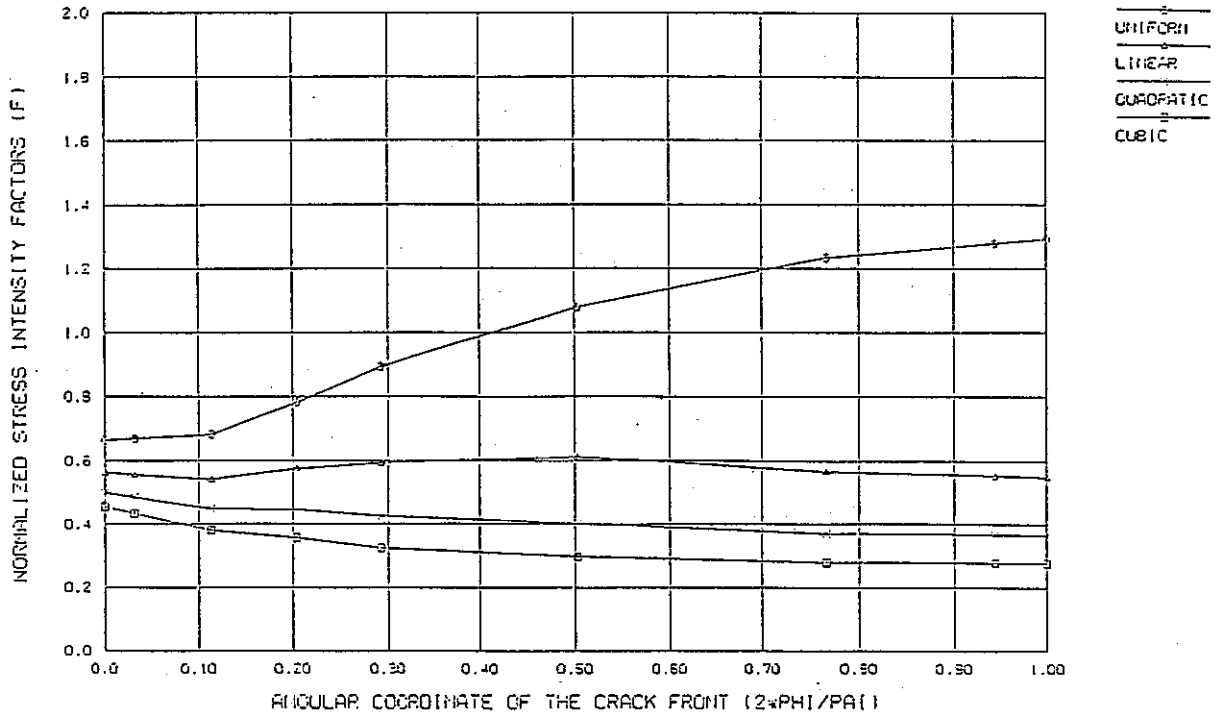


図 5-9 t/r=0.4, a/t=0.4, a/b=0.2 の F 値分布図

FIMAS

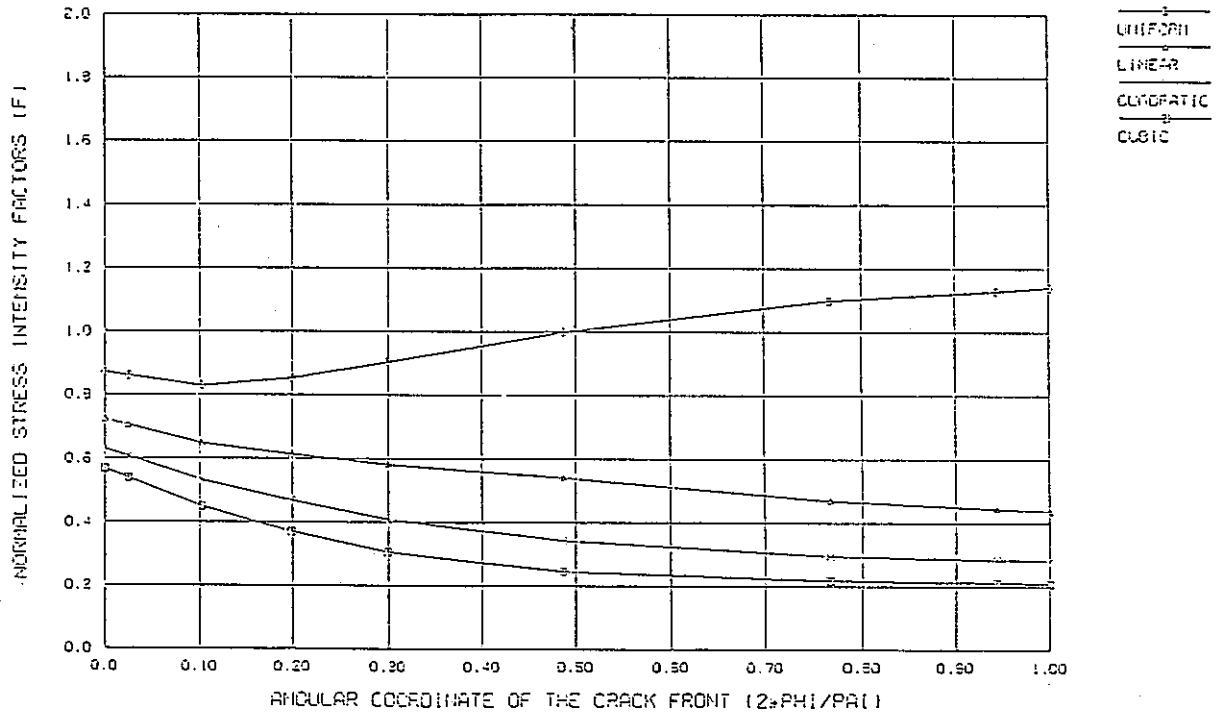
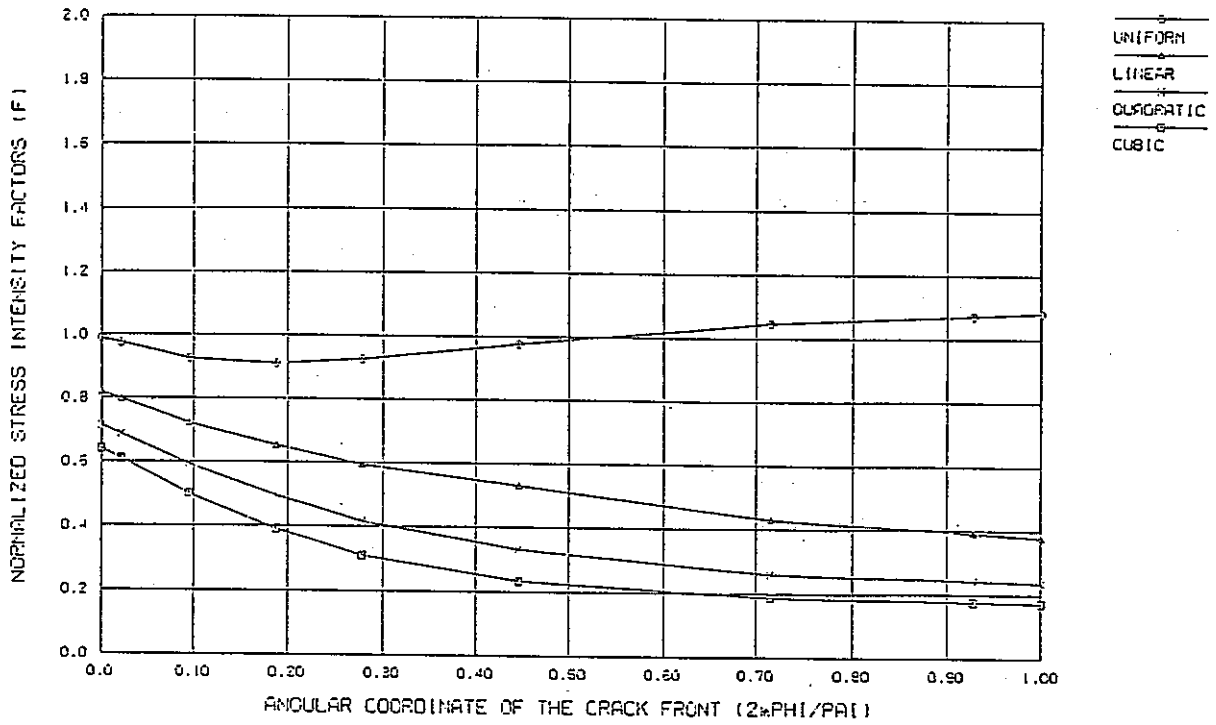


図 5-10 t/r=0.4, a/t=0.4, a/b=0.4 の F 値分布図

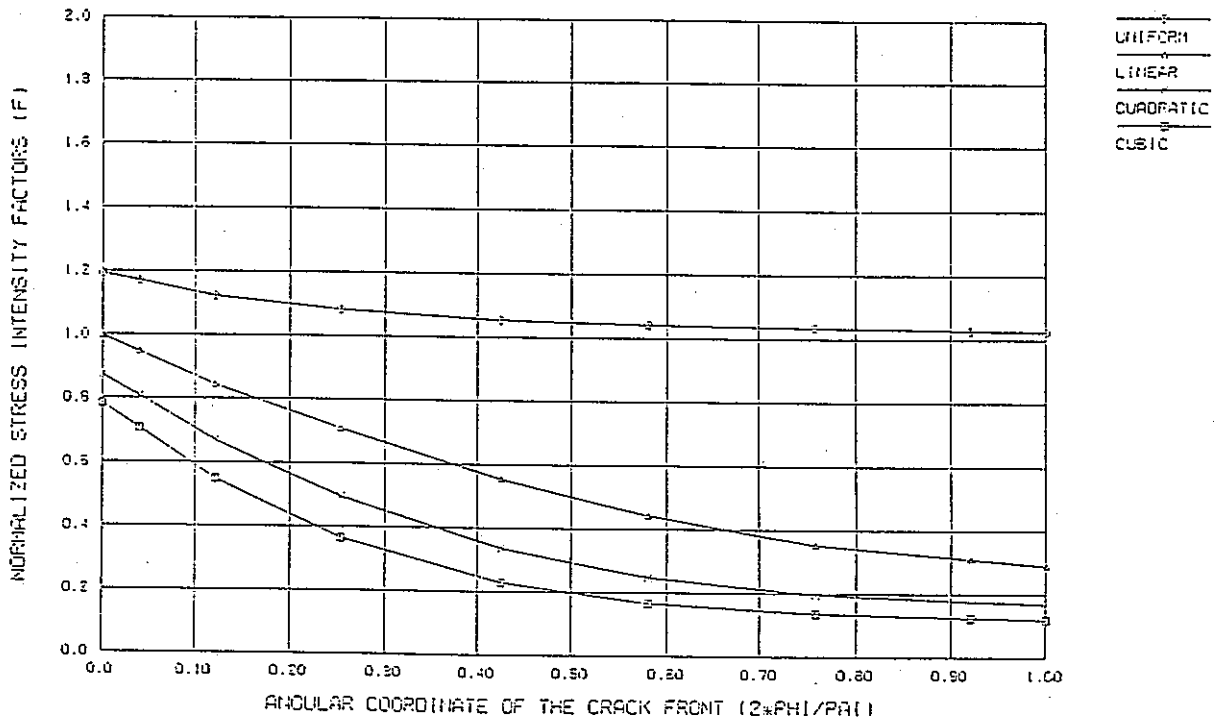
FIG. 11



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.4, A/B=0.6)

图 5-11 t/r=0.4, a/t=0.4, a/b=0.6 の F 値分布图

FIG. 12



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.4, A/B=1.0)

图 5-12 t/r=0.4, a/t=0.4, a/b=1.0 の F 値分布图

FIMAS

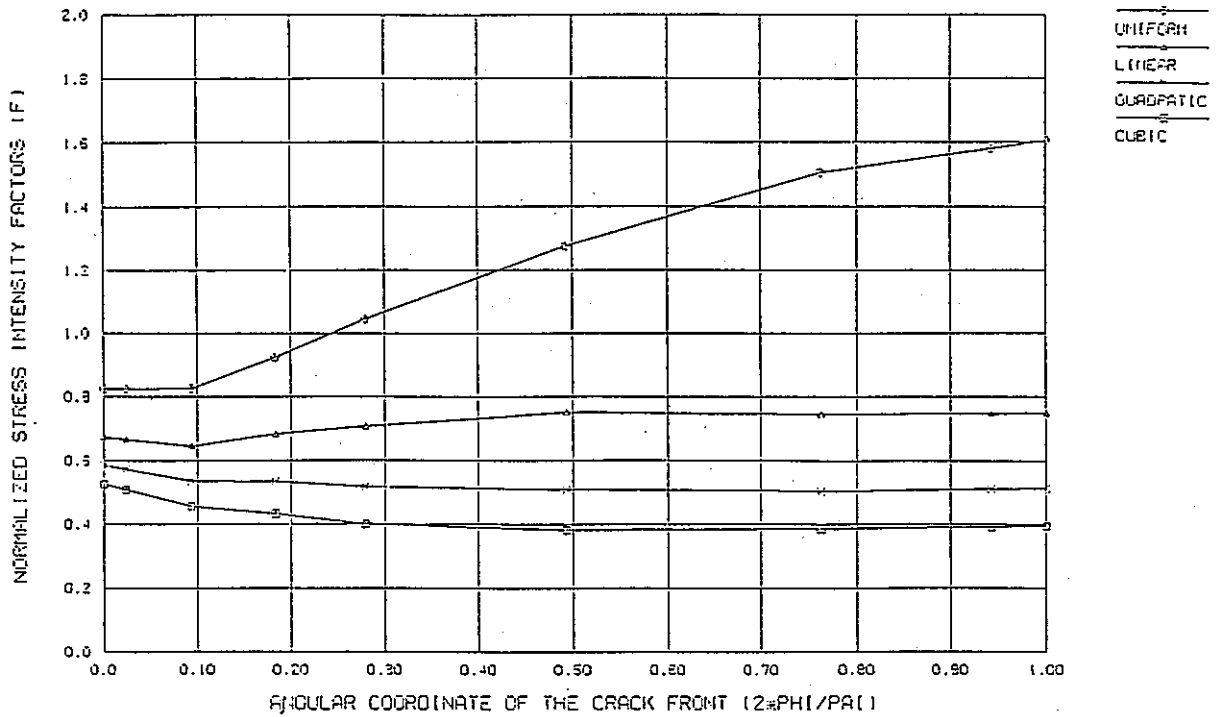


図 5-13 $t/r=0.4, a/t=0.6, a/b=0.2$ の F 値分布図

FIMAS

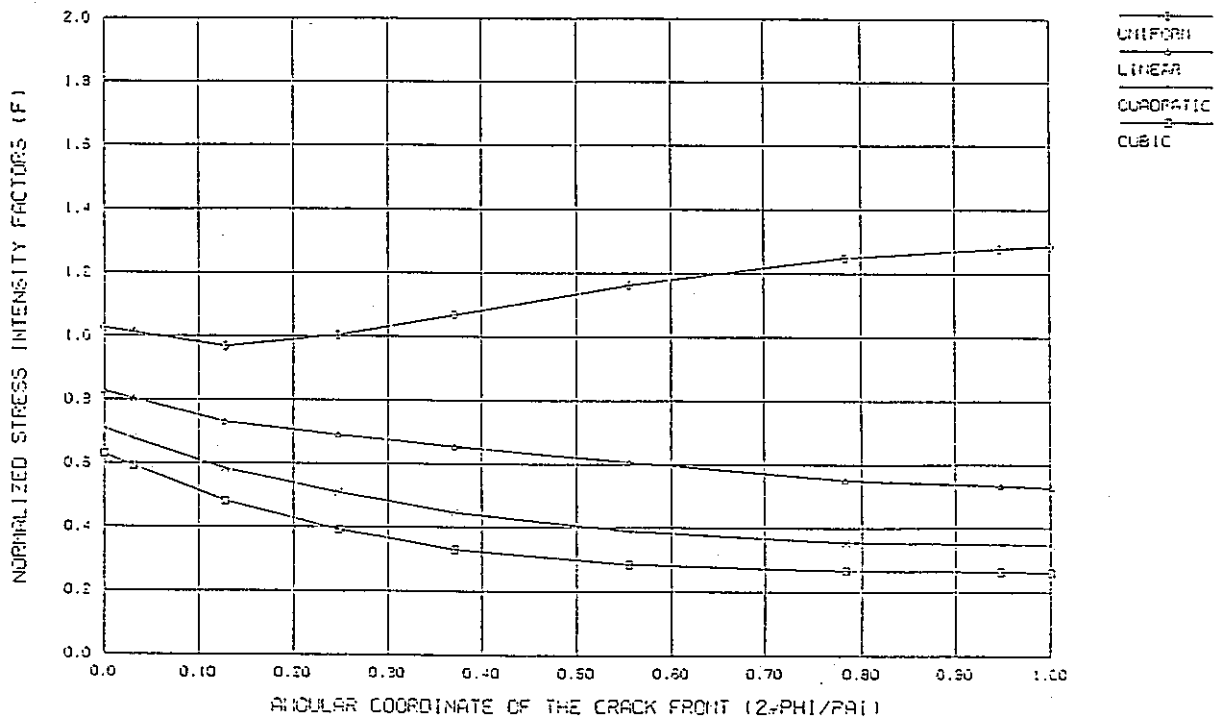


図 5-14 $t/r=0.4, a/t=0.6, a/b=0.4$ の F 値分布図

FINAS

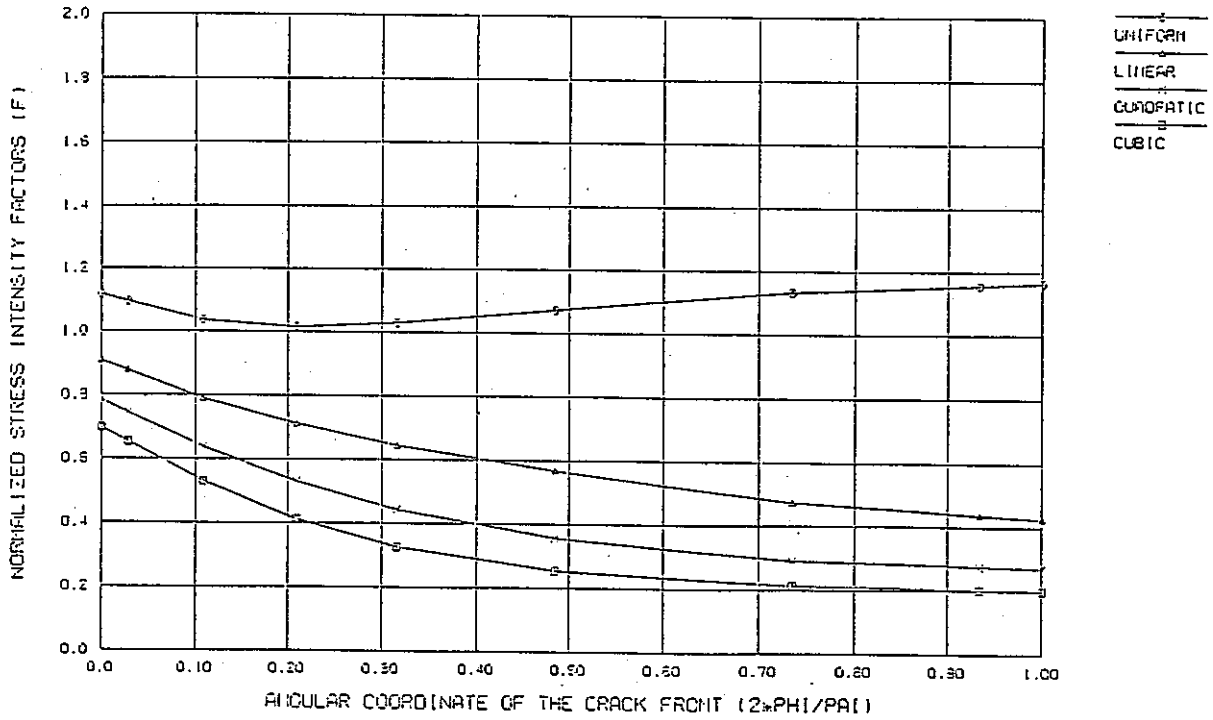


图 5-15 t/r=0.4, a/t=0.6, a/b=0.6 の F 値分布图

FINAS

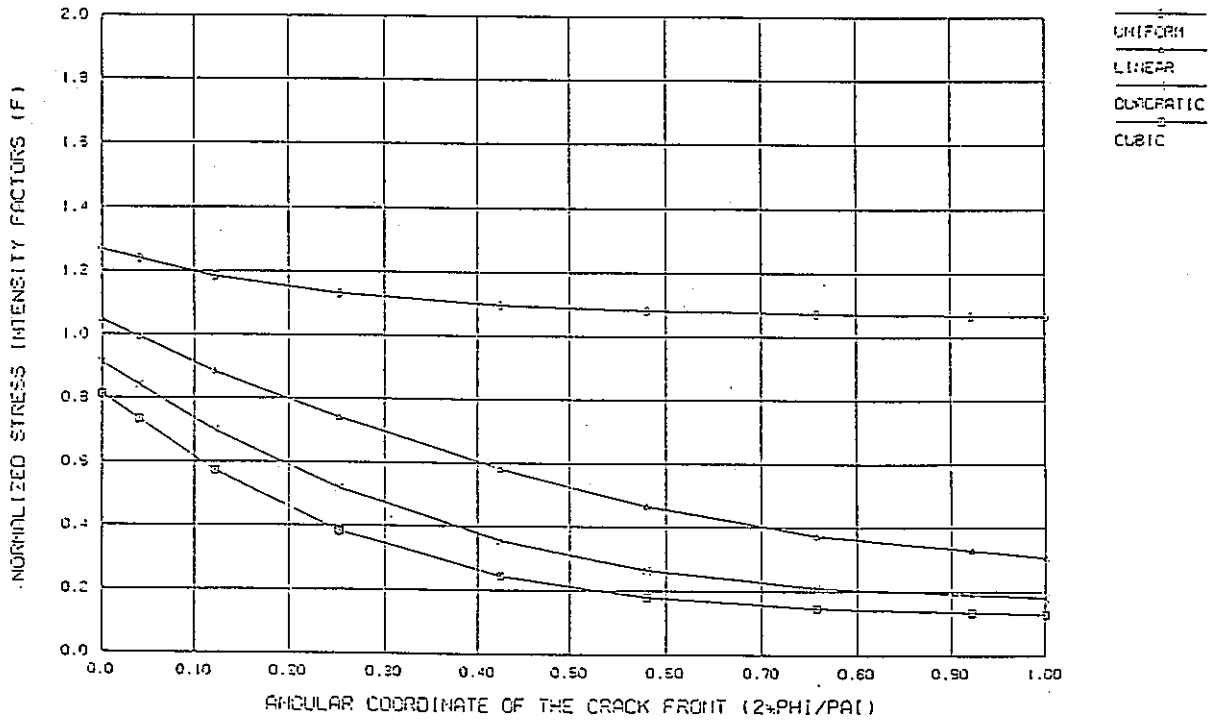
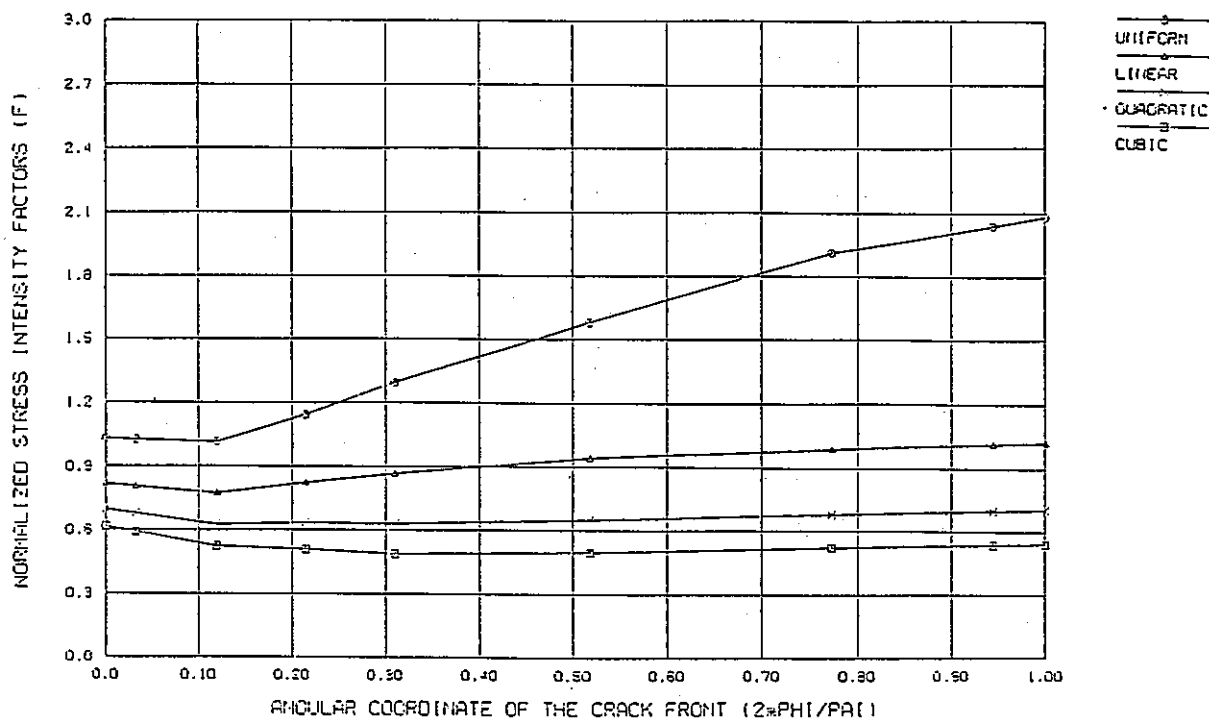


图 5-16 t/r=0.4, a/t=0.6, a/b=1.0 の F 値分布图

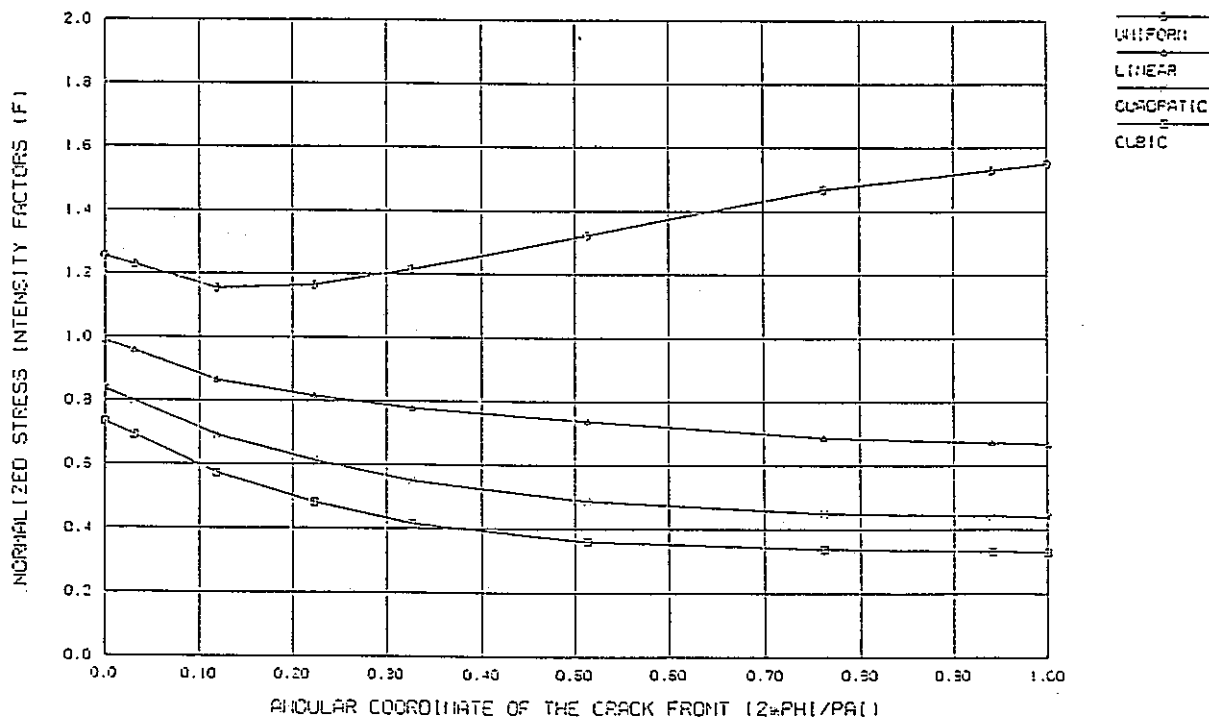
F(IIAS)



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.8, A/B=0.2)

图 5-17 $t/r=0.4$, $a/t=0.8$, $a/b=0.2$ の F 値分布図

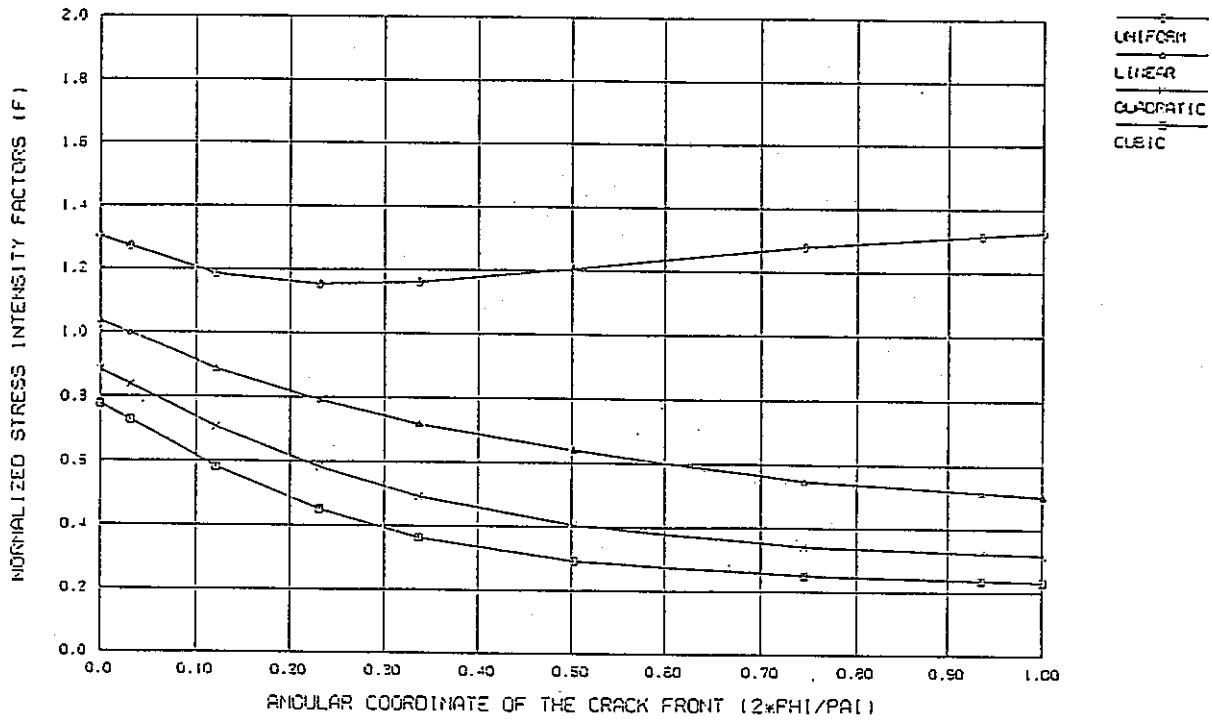
F(IIAS)



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.8, A/B=0.4)

图 5-18 $t/r=0.4$, $a/t=0.8$, $a/b=0.4$ の F 値分布図

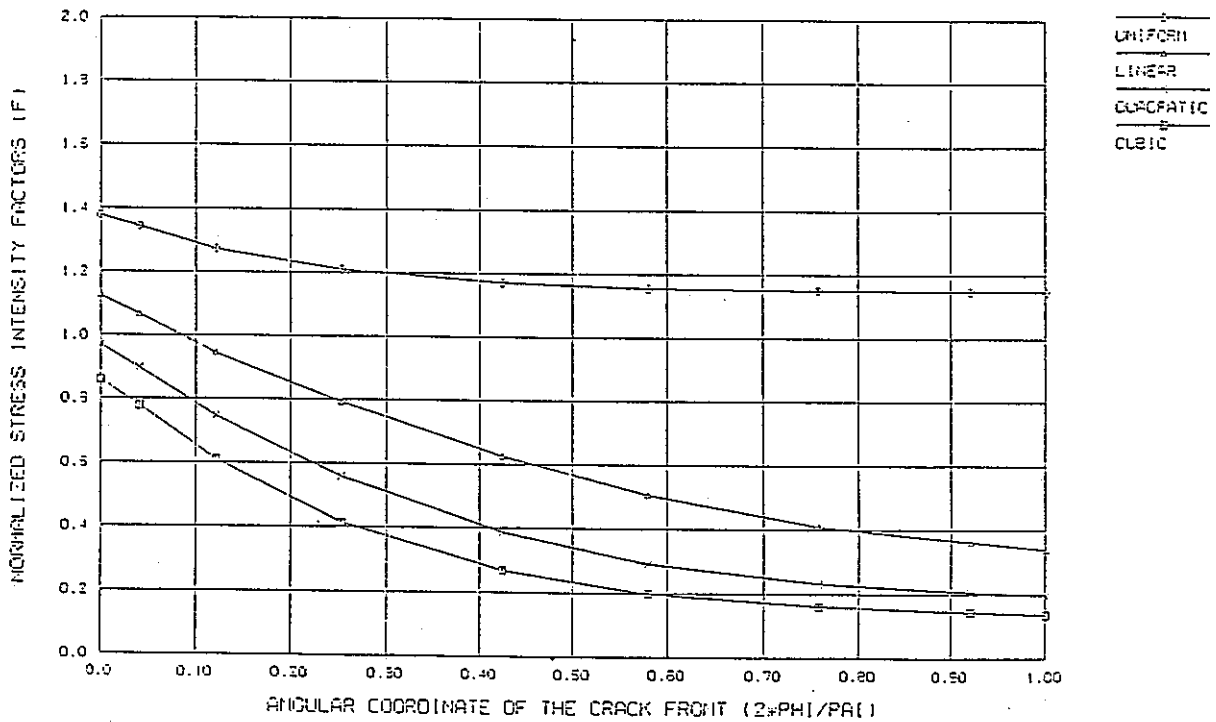
FINAS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.8, A/B=0.6)

图 5-19 $t/r=0.4, a/t=0.8, a/b=0.6$ の F 値分布图

FINAS



DISTRIBUTION OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS (A/T=0.8, A/B=1.0)

图 5-20 $t/r=0.4, a/t=0.8, a/b=1.0$ の F 値分布图

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

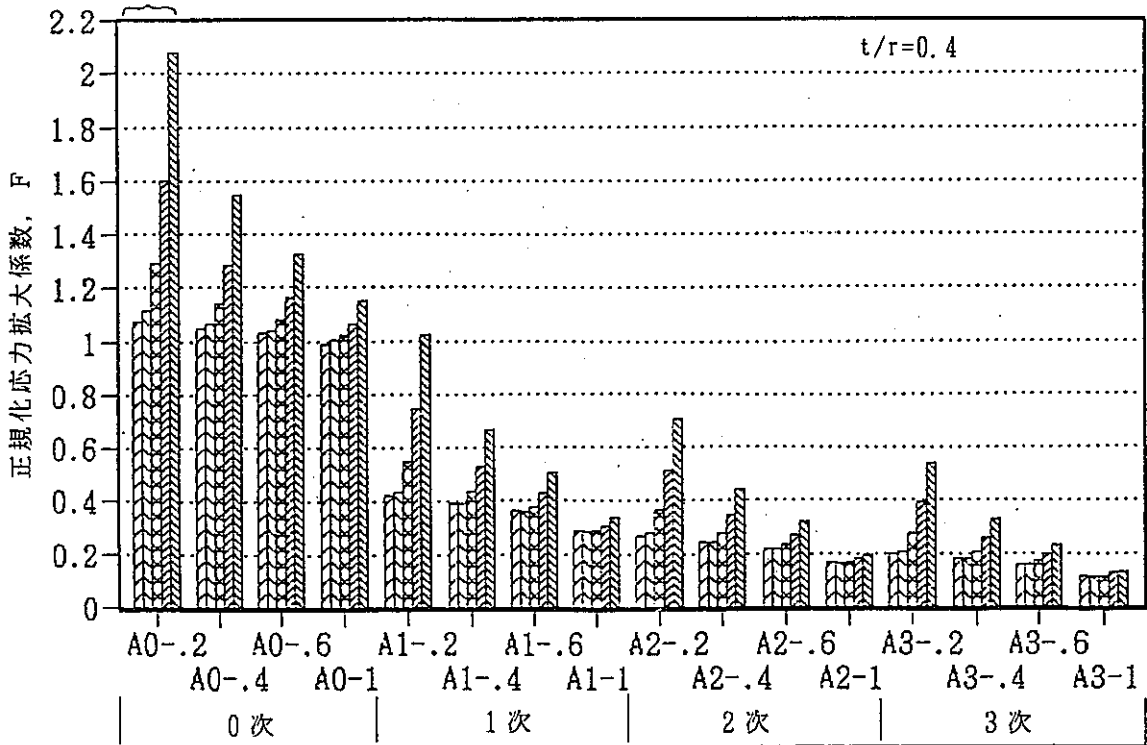


図5-21 CANIS-Jにより算出した円筒内表面軸方向半楕円表面き裂の最深点 (A) での正規化応力拡大係数 F
(記号AI-Xは I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

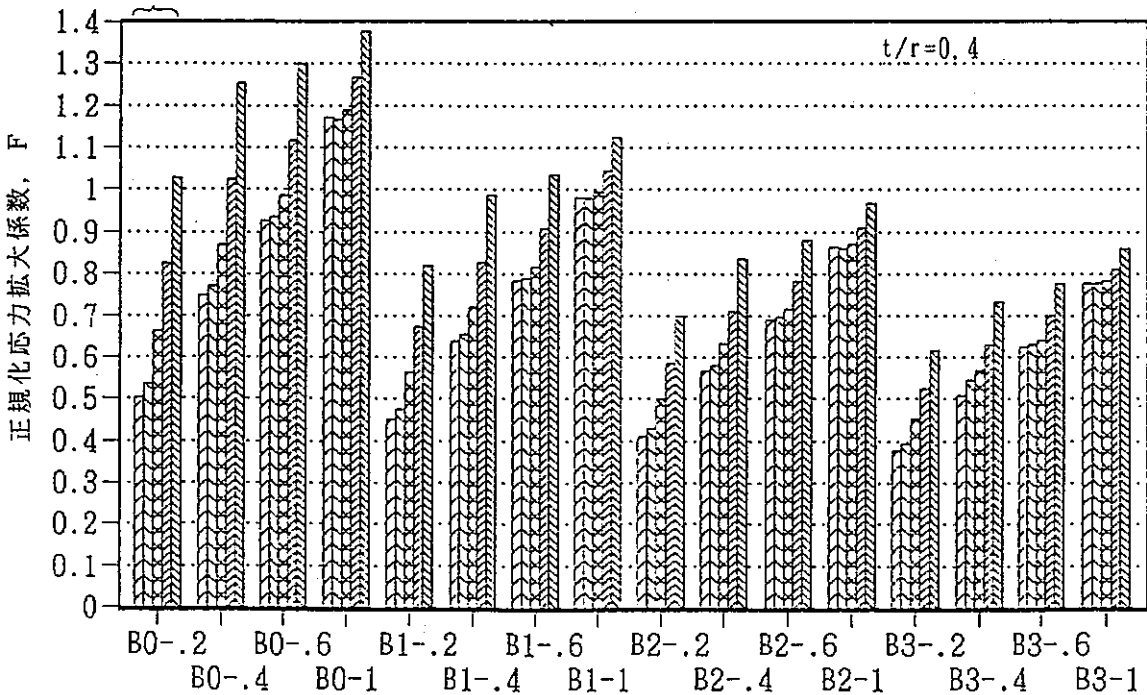


図5-22 CANIS-Jにより算出した円筒内表面軸方向半楕円表面き裂の表面点 (B) での正規化応力拡大係数 F
(記号BI-Xは I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

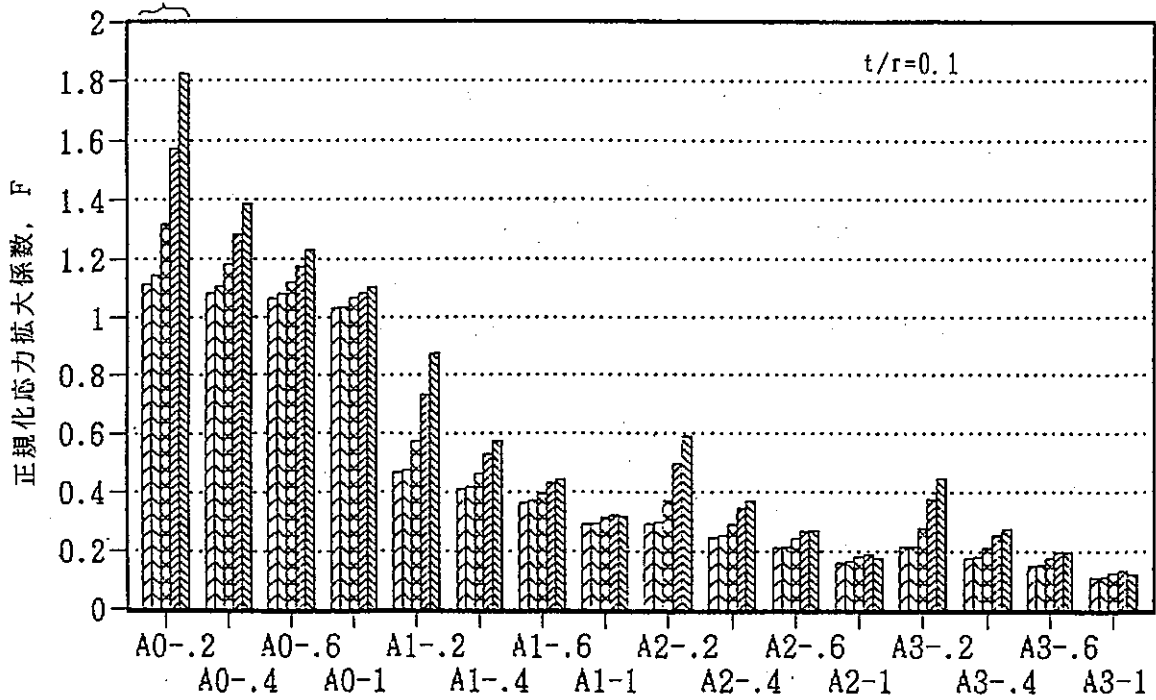


図5-23 白鳥らの円筒 ($t/r=0.1$) 内表面軸方向半楕円表面き裂の最深点 (A) での正規化応力拡大係数 F

(記号 $A1-X$ は I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

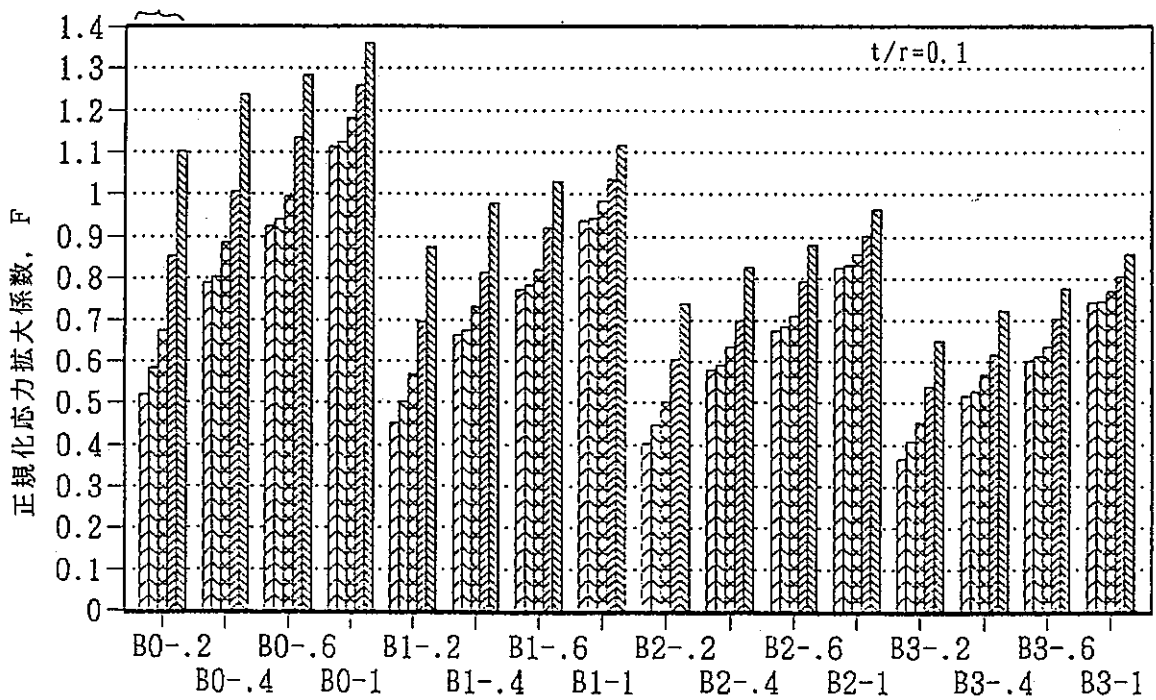


図5-24 白鳥らの円筒 ($t/r=0.1$) 内表面軸方向半楕円表面き裂の表面点 (B) での正規化応力拡大係数 F

(記号 $B1-X$ は I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

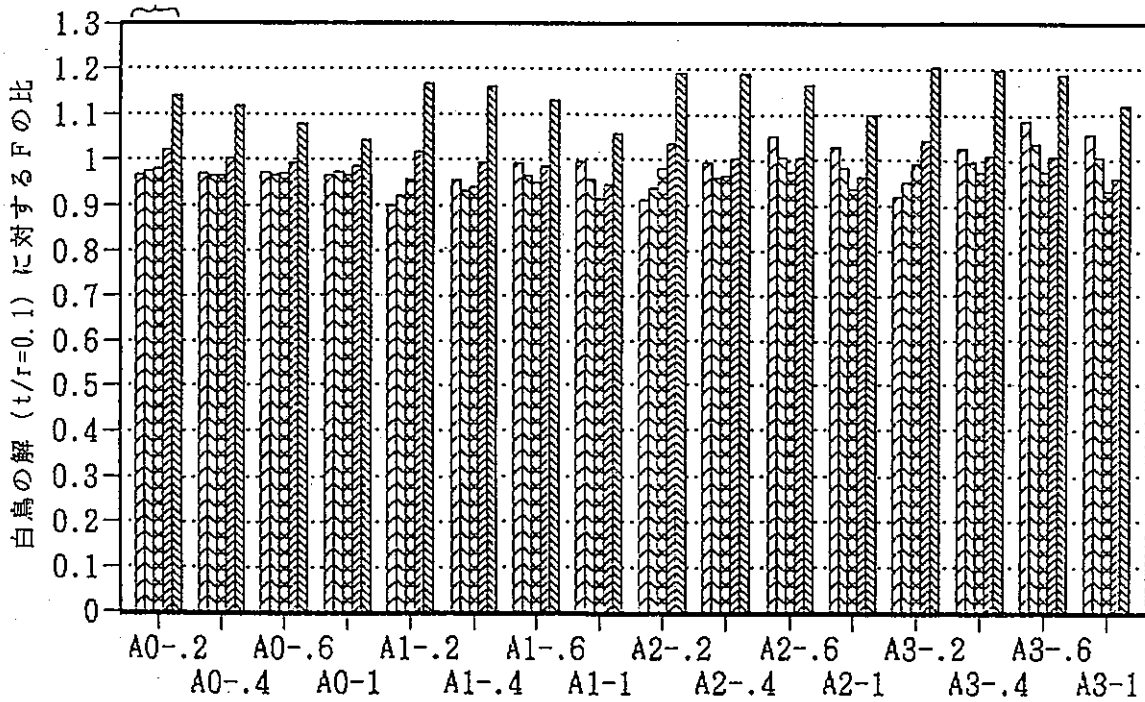


図 5-25 CANIS-Jにより算出したき裂最深点 (A) での正規化応力拡大係数 F の白鳥の解 ($t/r=0.1$) に対する比
(記号 AI-X は I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

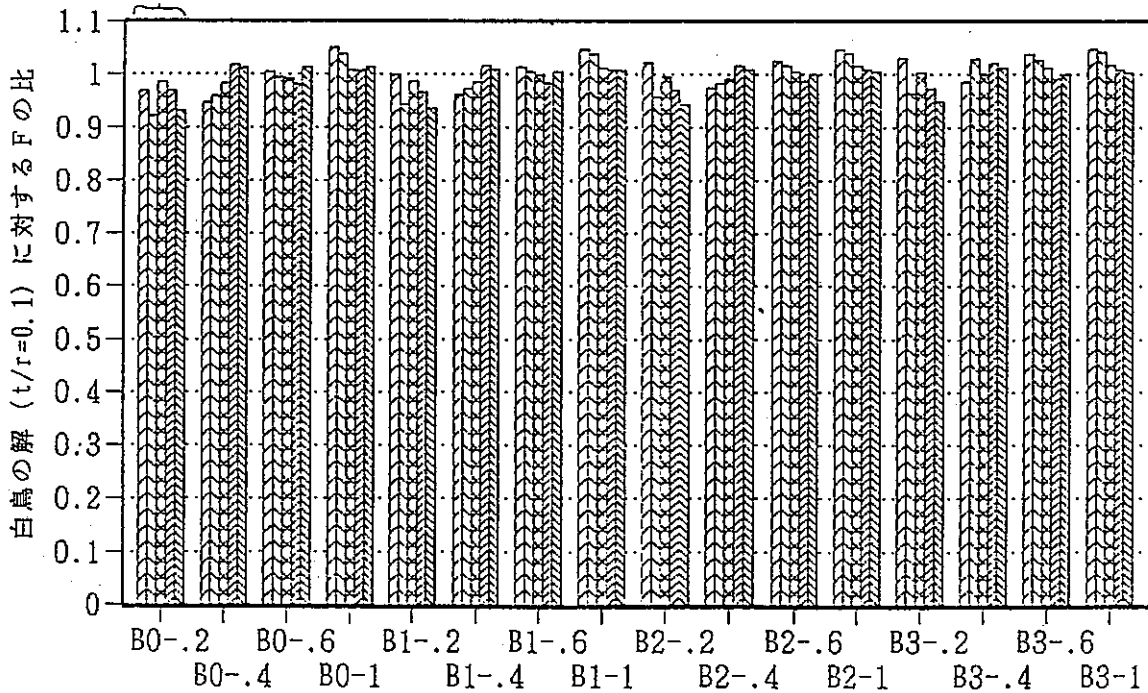


図 5-26 CANIS-Jにより算出したき裂表面点 (B) での正規化応力拡大係数 F の白鳥の解 ($t/r=0.1$) に対する比
(記号 BI-X は I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)

6. 結論

本報では、影響関数法で使用する無次元化応力拡大係数（F 値）の既存データベースに対する拡充作業の一環として、今後、蒸気発生器伝熱管の解析等において使用頻度が高まると考えられる円筒内表面軸方向半楕円表面き裂の F 値のデータの解析を行い、データベースへの組み込みの妥当性検討を行った。結果は以下のとおりである。

- (1) まず、円筒寸法が $t/r = 0.4$ 条件での本解析に先立ち、 $t/r = 0.1$ 条件において F 値を求め、既に白鳥らによって求められている計算結果と比較することにより、今回採用した解析手法の妥当性について検証を行った。その結果両者間で良い一致が確認された。
- (2) その後、 $t/r = 0.4$ 条件において、き裂のアスペクト比 (a/b) で 4 ケース、肉厚に対するき裂深さ比 (a/t) で 5 ケースの計 20 ケースのき裂形状に対して、影響関数法で使用する荷重ケースとして、板厚内応力分布が 0 次（一定値）、1 次（曲げ）、2 次（放物線）および 3 次の単位応力を負荷した場合の F 値を算出し、各種影響因子に対する F 値の変動挙動を検討した。その結果、今回得られた $t/r=0.4$ での F 値データの種々の観点からみた変化の傾向は、 $t/r=0.1$ での白鳥の解に良く一致しており、妥当な結果と判断された。
- (3) 以上の計算手法の検証結果および算出された F 値の挙動に関する検討の結果、今回得られた F 値は妥当な値であると判断できた。従って、今回作成した F 値の、簡易法き裂進展評価プログラム(CANIS-G) のデータベースへの組み込みを行うこととした。

なお、現時点において、本検討により得られた F 値データテーブルの CANIS-G への組み込み作業は完了し、CANIS-G の適用範囲の拡大が図られている。

また、付録 G には今後のデータ拡充の方向を示した。さらに、付録 H, I には最近入手した MUNZ らの K 値解を添付した。CANIS-G のデータベースは今後引き続きこれらのデータを参照しながら、改定を図っていく予定である。

7. 謝辞

本検討は構造工学室において行われた。このうち、解析モデルの作成は㈱CRC総研に、応力計算、K値、F値の計算はISL㈱に依頼して実施した。

構造工学室・岩田耕司前室長（現開発部部長代理）、㈱CRC総研の古橋一郎氏、吉田博治氏ならびにISL㈱の佐々木敏彦氏ほか関係各位の皆様感謝します。

8. 参考文献

- (1) CANIS-J 使用説明書 (2次元、3次元破壊力学パラメータ)
センチュリリサーチセンタ株式会社、構造技術部、第1課
- (2) 佐々木、古橋、渡士 簡易法によるクリープ疲労き裂進展解析コード
「CANIS-G V-2」取扱い説明書 PNC PN9460 91-001
- (3) Watashi K., Yoshida H., CANIS computer code for inelastic fracture mechanics
ASME PVP Vol. 167(1989)15-23.
- (4) Watashi K., Horikiri M., Furuhashi I., Iwata K., Crack growth behavior of a
circumferentially slitted cylinder under cyclic cold transients,
SMIRT 11 Transactions Vol. L (Aug. 1991) L11(G)/3
- (5) 堀切、渡士、岩田 繰返し熱過渡荷重を受ける円筒内表面環状き裂の進展挙動
日本機械学会第69期材料力学講演会 (1991)
- (6) 田中、渡士 繰返し熱過渡荷重を受ける軸対称構造物中のき裂進展挙動評価
日本機械学会第69期材料力学講演会 (1991)
- (7) 田中、渡士、岩田、吉田 熱応力緩和構造モデル(1) 供試体 熱過渡強度試験
第5報 き裂の解析と進展評価 PNC ZN9410 91-295
- (8) 菊池他 表面き裂付き円筒の熱クリープ疲労き裂進展
PNC N9410 90-183
- (9) 白鳥、影響関数法による応力拡大係数の解析、機械学会講習会教材、No. 900-2(1990)
- (10) Matteck, C., Morawietz, P., Stamm, H., Comparison of different methods for
the determination of stress intensity factors of cracks in pipes with
stress gradients, J. Pressure Vessel Technology 106(1984)209-213

付録

- 付録－A 解析モデル図
- 付録－B 応力解析結果
- 付録－C CANIS-J 使用上の修正事項について
- 付録－D 変位法によるF値の解析結果
- 付録－E 解析に使用したデータセットについて
- 付録－F 別冊内部資料について
- 付録－G 今後のデータ拡充の方向について
- 付録－H MUNZらの半楕円表面き裂付き平板のK値解
- 付録－I MUNZらの内・外表面軸方向き裂付き円筒のK値解

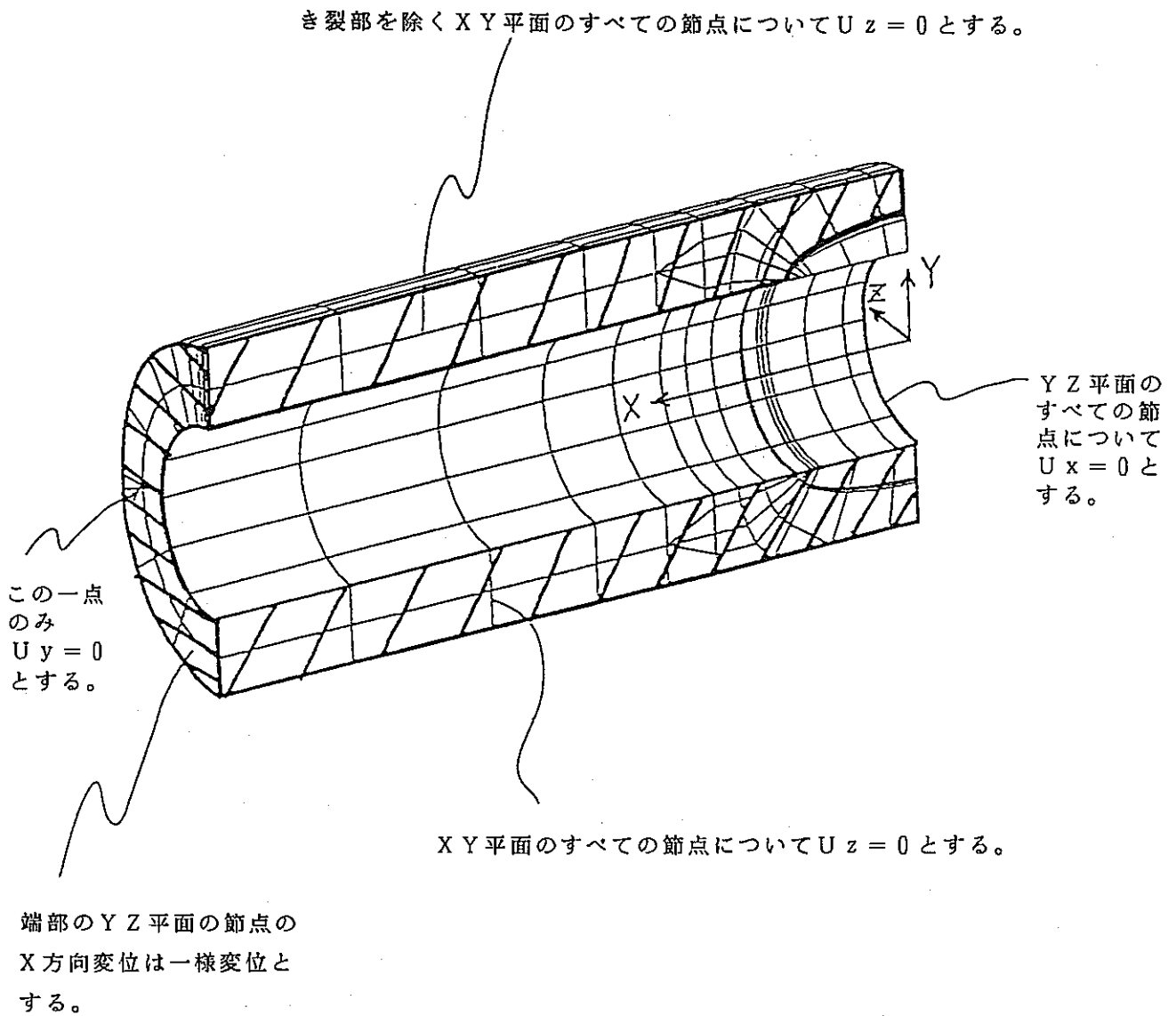
付録-A 解析モデル図

付録Aとして、解析に使用したFEMモデル図を示す。

- 表 A.1 各モデルの離心角
- 図 A.1 解析時の境界条件
- 図 A.2 モデル1-1 のメッシュ図
- 図 A.3 モデル2-1-1 のメッシュ図
- 図 A.4 モデル2-1-2 のメッシュ図
- 図 A.5 モデル2-1-3 のメッシュ図
- 図 A.6 モデル2-1-4 のメッシュ図
- 図 A.7 モデル2-2-1 のメッシュ図
- 図 A.8 モデル2-2-2 のメッシュ図
- 図 A.9 モデル2-2-3 のメッシュ図
- 図 A.10 モデル2-2-4 のメッシュ図
- 図 A.11 モデル2-3-1 のメッシュ図
- 図 A.12 モデル2-3-2 のメッシュ図
- 図 A.13 モデル2-3-3 のメッシュ図
- 図 A.14 モデル2-3-4 のメッシュ図
- 図 A.15 モデル2-4-1 のメッシュ図
- 図 A.16 モデル2-4-2 のメッシュ図
- 図 A.17 モデル2-4-3 のメッシュ図
- 図 A.18 モデル2-4-4 のメッシュ図
- 図 A.19 モデル2-5-1 のメッシュ図
- 図 A.20 モデル2-5-2 のメッシュ図
- 図 A.21 モデル2-5-3 のメッシュ図
- 図 A.22 モデル2-5-4 のメッシュ図

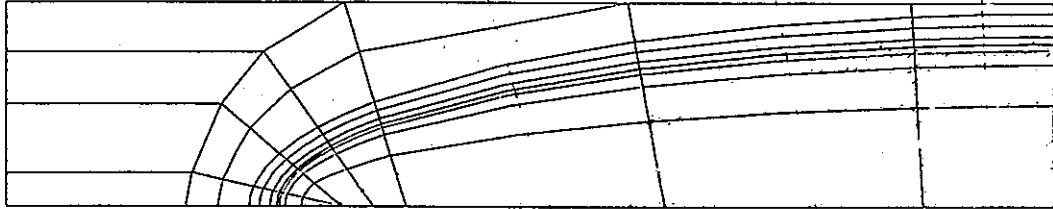
表A.1 各モデルの離心角

| MODEL 1-1 | MODEL 2-1-1 | MODEL 2-2-1 | MODEL 2-3-1 | MODEL 2-4-1 | MODEL 2-5-1 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ |
| 1 0.02790 | 1 0.05337 | 1 0.05216 | 1 0.03019 | 1 0.02335 | 1 0.03146 |
| 2 0.10679 | 2 0.18286 | 2 0.17315 | 2 0.11293 | 2 0.09298 | 2 0.11899 |
| 3 0.19610 | 3 0.29977 | 3 0.29119 | 3 0.20377 | 3 0.18324 | 3 0.21392 |
| 4 0.28955 | 4 0.40955 | 4 0.40645 | 4 0.29227 | 4 0.27885 | 4 0.30991 |
| 5 0.50394 | 5 0.58597 | 5 0.58597 | 5 0.50233 | 5 0.49353 | 5 0.51720 |
| 6 0.76760 | 6 0.80253 | 6 0.80253 | 6 0.76676 | 6 0.76215 | 6 0.77280 |
| 7 0.94286 | 7 0.95126 | 7 0.951126 | 7 0.91264 | 7 0.94148 | 7 0.94408 |
| MODEL 2-1-2 | MODEL 2-2-2 | MODEL 2-3-2 | MODEL 2-4-2 | MODEL 2-5-2 | |
| $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | |
| 1 0.04464 | 1 0.04023 | 1 0.02395 | 1 0.03104 | 1 0.03036 | |
| 2 0.16251 | 2 0.14815 | 2 0.10144 | 2 0.12781 | 2 0.11797 | |
| 3 0.29122 | 3 0.27236 | 3 0.19883 | 3 0.24734 | 3 0.22264 | |
| 7 0.41362 | 7 0.39768 | 7 0.29896 | 7 0.37078 | 7 0.32696 | |
| 5 0.58396 | 5 0.57395 | 5 0.48628 | 5 0.55492 | 5 0.51284 | |
| 6 0.79629 | 6 0.79222 | 6 0.74740 | 6 0.78285 | 6 0.76171 | |
| 7 0.94937 | 7 0.94841 | 7 0.93712 | 7 0.94608 | 7 0.94077 | |
| MODEL 2-1-3 | MODEL 2-2-3 | MODEL 2-3-3 | MODEL 2-4-3 | MODEL 2-5-3 | |
| $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | |
| 1 0.03141 | 1 0.02819 | 1 0.02085 | 1 0.02808 | 1 0.03057 | |
| 2 0.11083 | 2 0.09987 | 2 0.09454 | 2 0.10796 | 2 0.12088 | |
| 3 0.21395 | 3 0.20571 | 3 0.18789 | 3 0.20892 | 3 0.23129 | |
| 4 0.33357 | 4 0.34312 | 4 0.27764 | 4 0.31563 | 4 0.33688 | |
| 5 0.50737 | 5 0.52083 | 5 0.44546 | 5 0.48402 | 5 0.50168 | |
| 6 0.74804 | 6 0.75255 | 6 0.74161 | 6 0.73419 | 6 0.74447 | |
| 7 0.93653 | 7 0.93644 | 7 0.92795 | 7 0.93288 | 7 0.93558 | |
| MODEL 2-1-4 | MODEL 2-2-4 | MODEL 2-3-4 | MODEL 2-4-4 | MODEL 2-5-4 | |
| $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | $2\phi/\pi$ | |
| 1 0.03498 | 1 0.03657 | 1 0.03974 | 1 0.03974 | 1 0.03974 | |
| 2 0.11029 | 2 0.11953 | 2 0.12184 | 2 0.12184 | 2 0.12184 | |
| 3 0.23949 | 3 0.25584 | 3 0.25246 | 3 0.25246 | 3 0.25246 | |
| 4 0.41973 | 4 0.42663 | 4 0.42467 | 4 0.42467 | 4 0.42467 | |
| 5 0.57730 | 5 0.57631 | 5 0.58027 | 5 0.58027 | 5 0.58027 | |
| 6 0.75776 | 6 0.74551 | 6 0.75776 | 6 0.75776 | 6 0.75776 | |
| 7 0.92554 | 7 0.91301 | 7 0.92083 | 7 0.92083 | 7 0.92083 | |

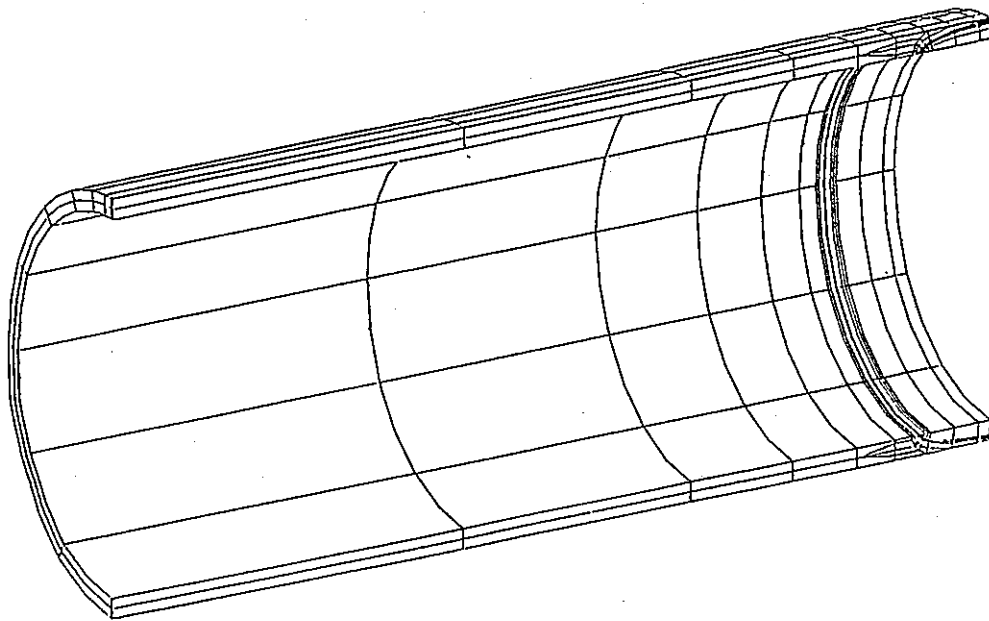


軸方向き裂モデルの境界条件

図 A. 1 解析時の境界条件

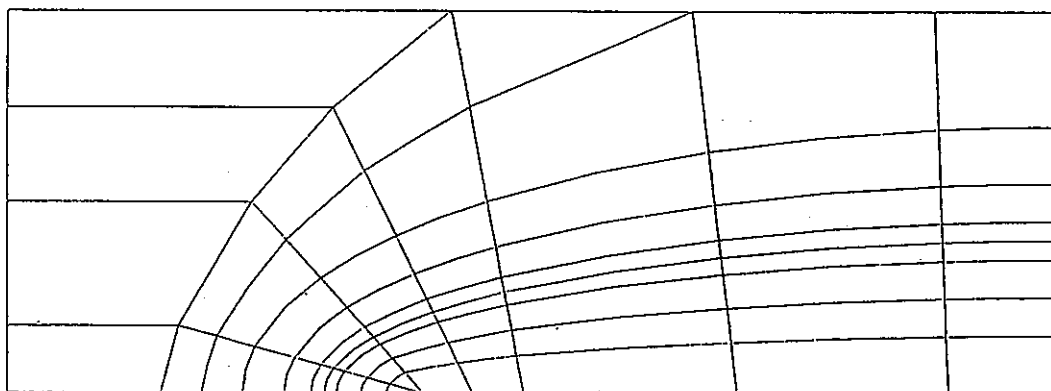


MODEL 1-1

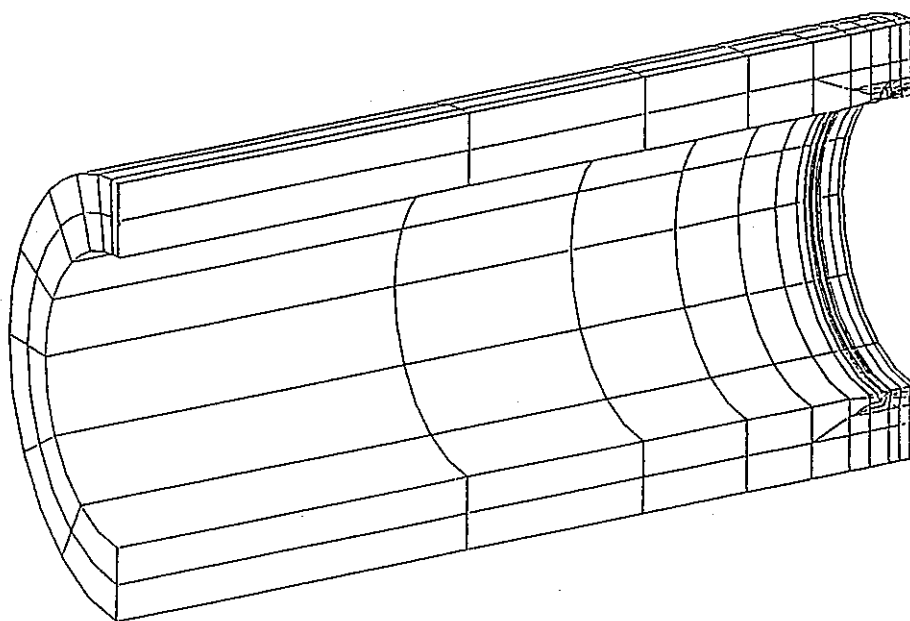


MODEL 1-1

図A.2 モデル1-1のメッシュ図

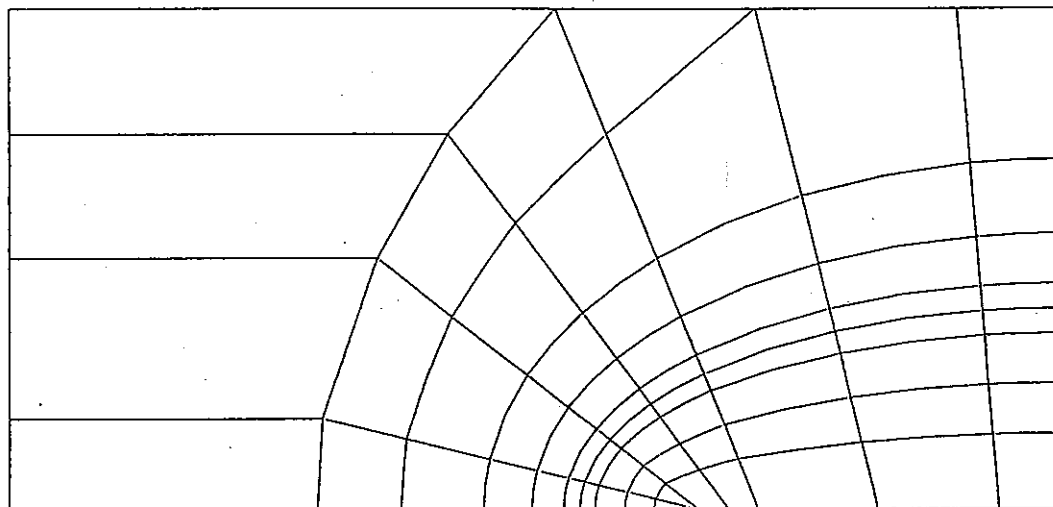


MODEL2-1-1

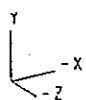
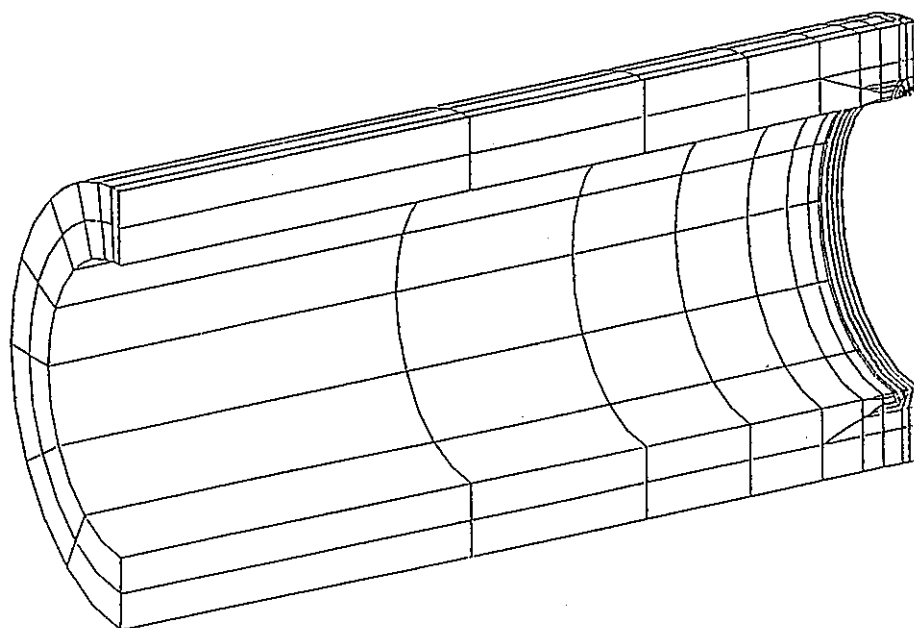


MODEL2-1-1

図A.3 モデル2-1-1のメッシュ図

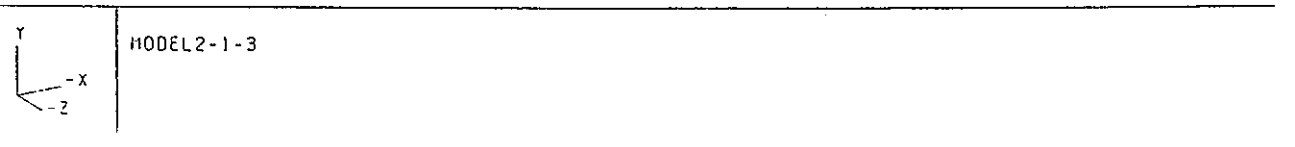
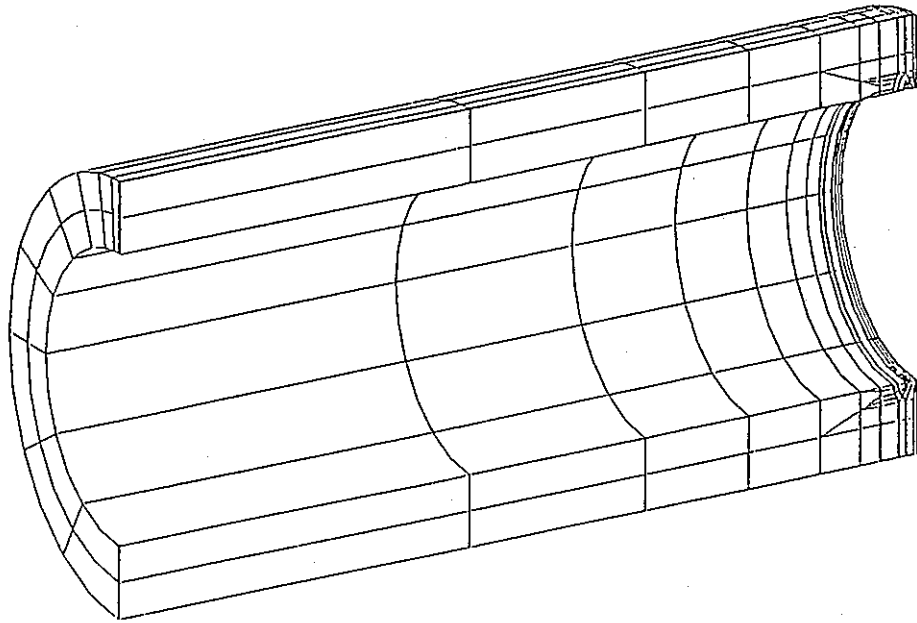
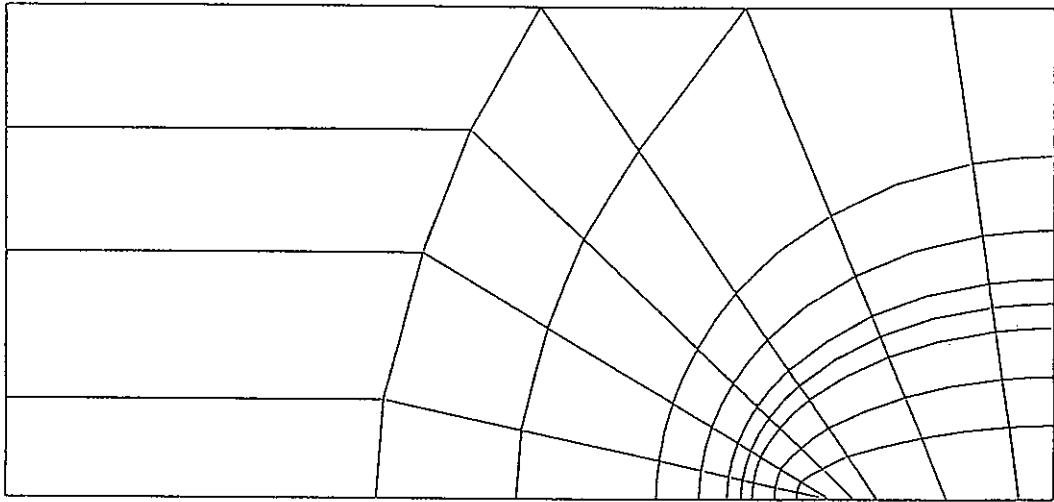


MODEL2-1-2

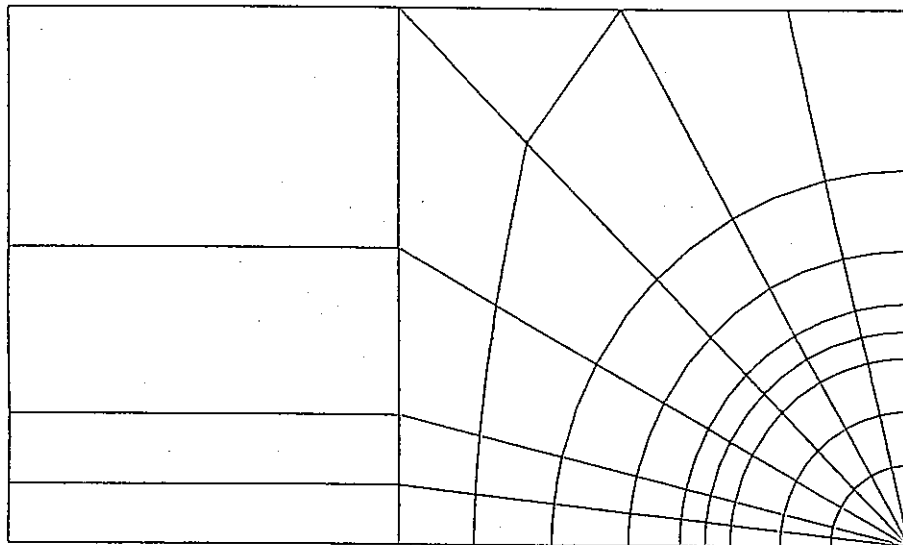


MODEL2-1-2

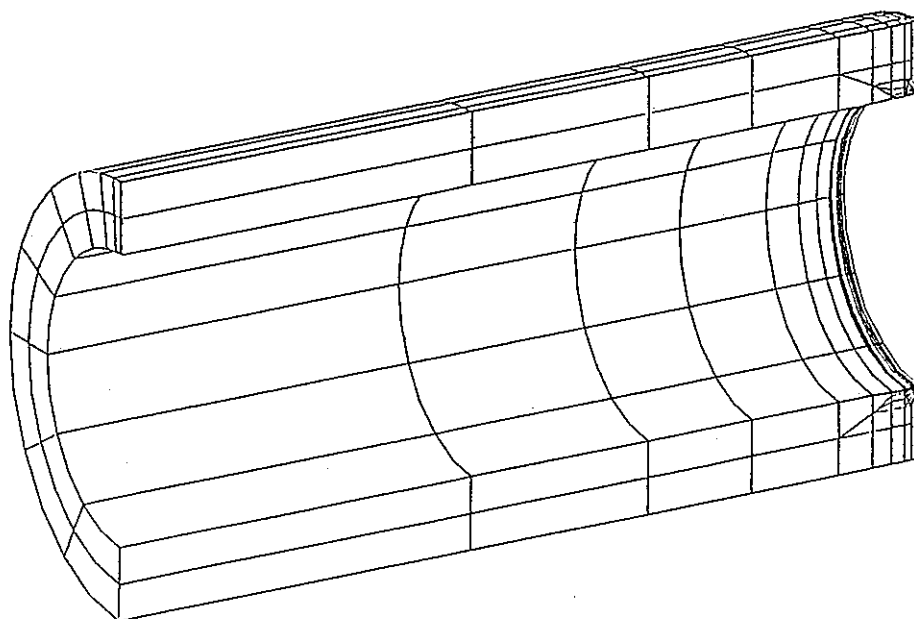
図A.4 モデル2-1-2のメッシュ図



図A.5 モデル2-1-3のメッシュ図

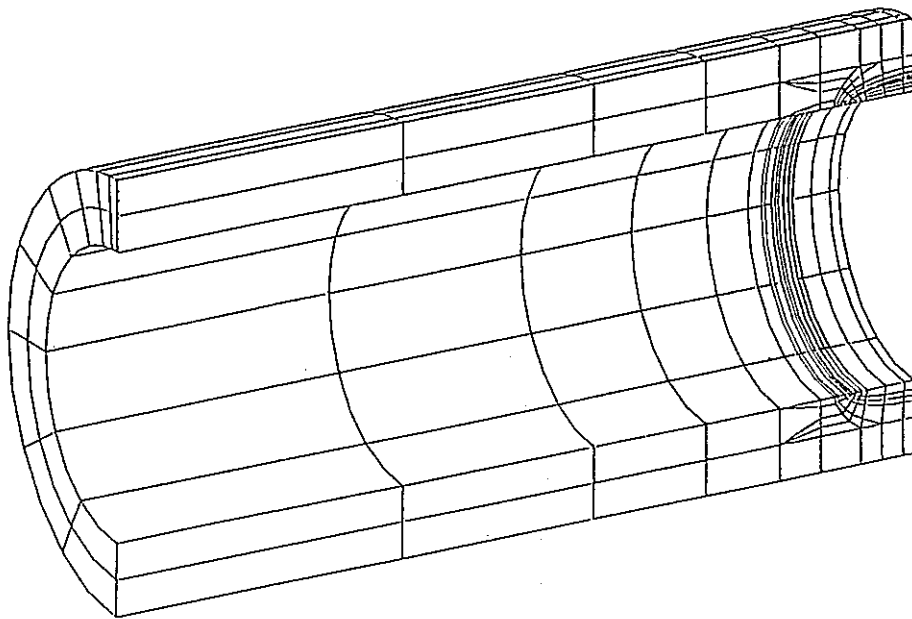
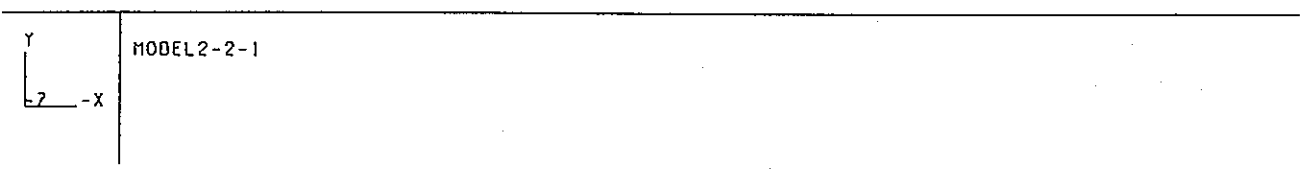
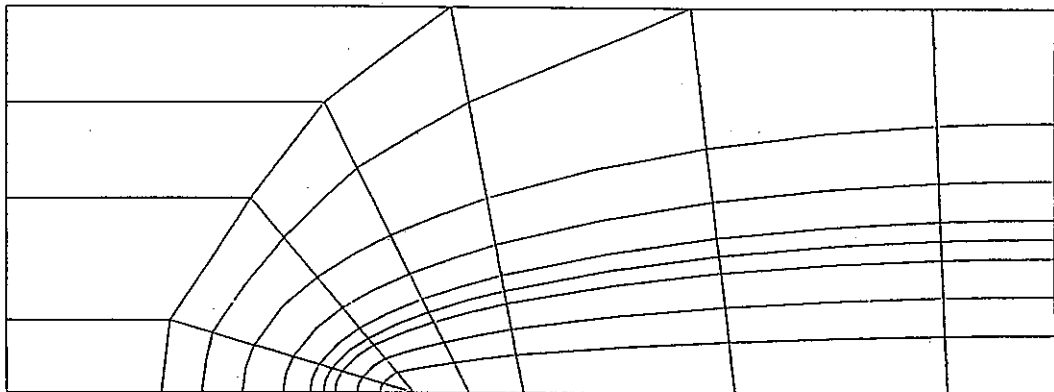


MODEL 2-1-4

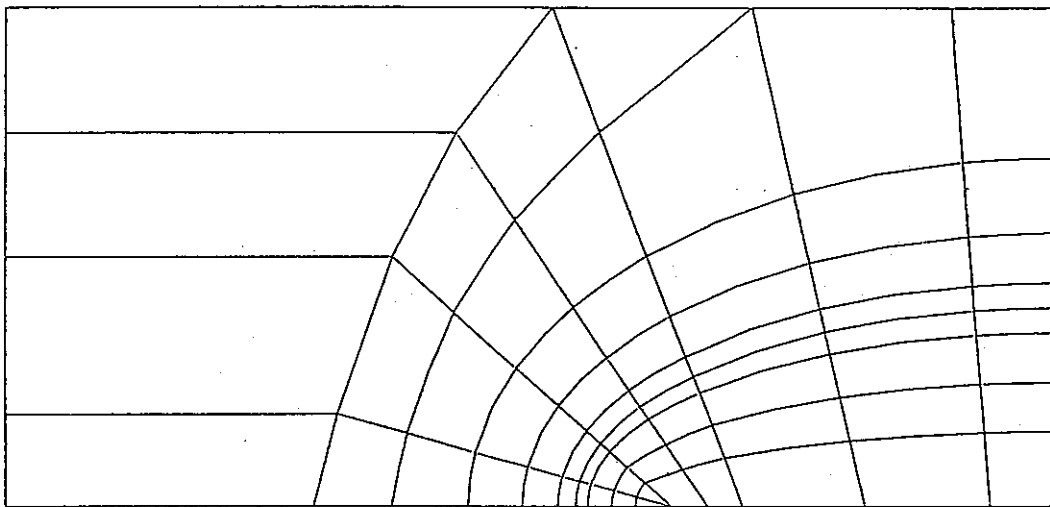


MODEL 2-1-4

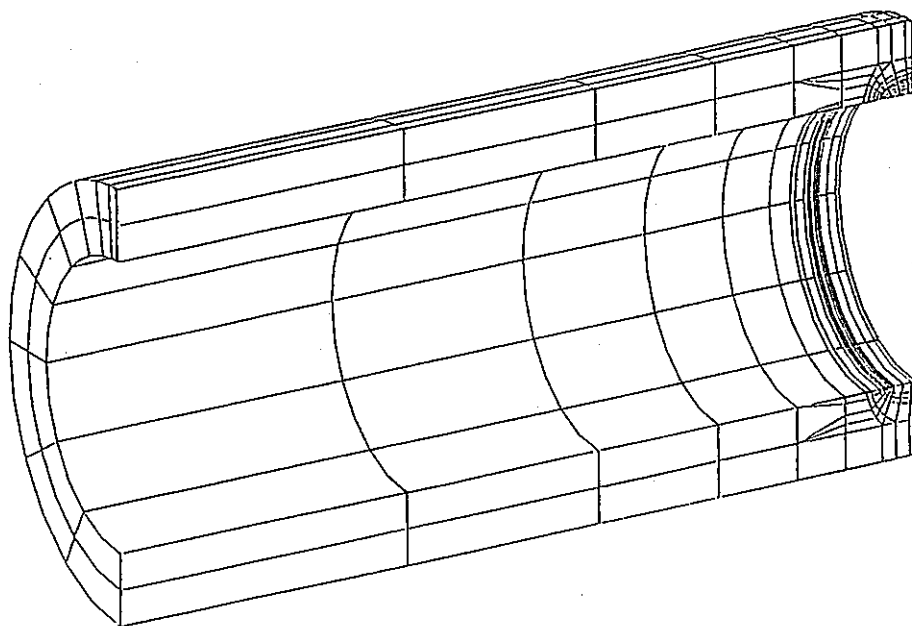
図 A. 6 モデル 2 - 1 - 4 のメッシュ図



図A.7 モデル2-2-1のメッシュ図

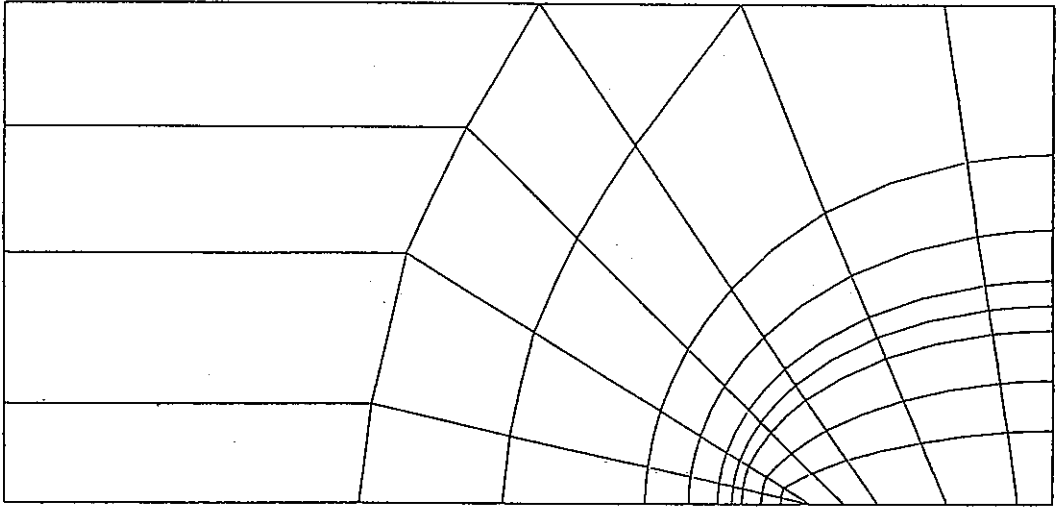


MODEL 2-2-2

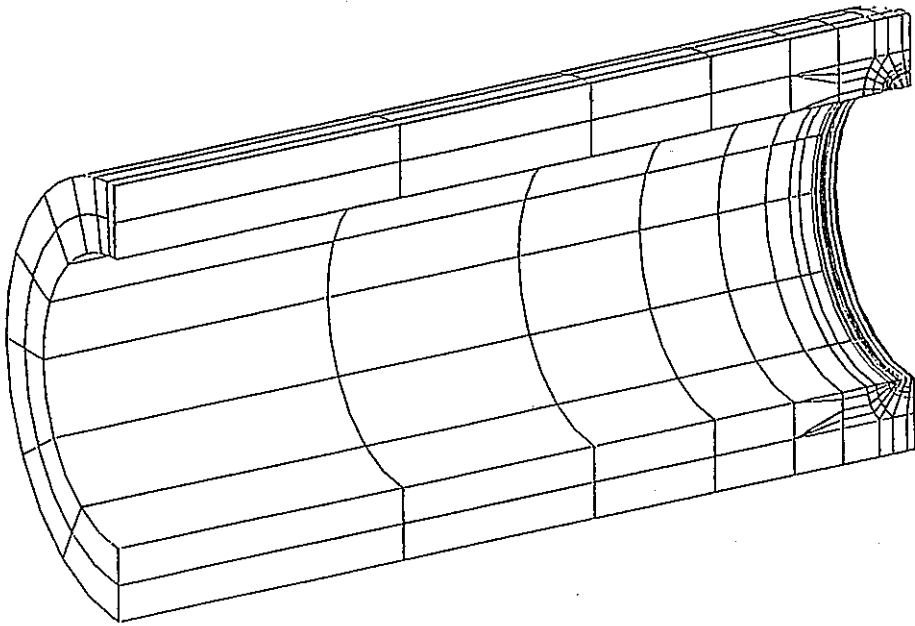


MODEL 2-2-2

図A.8 モデル2-2-2のメッシュ図

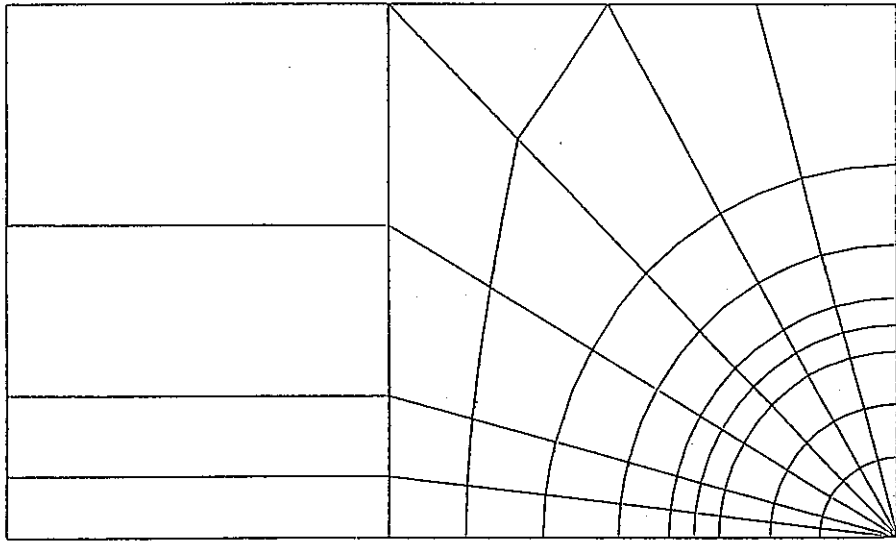


MODEL2-2-3

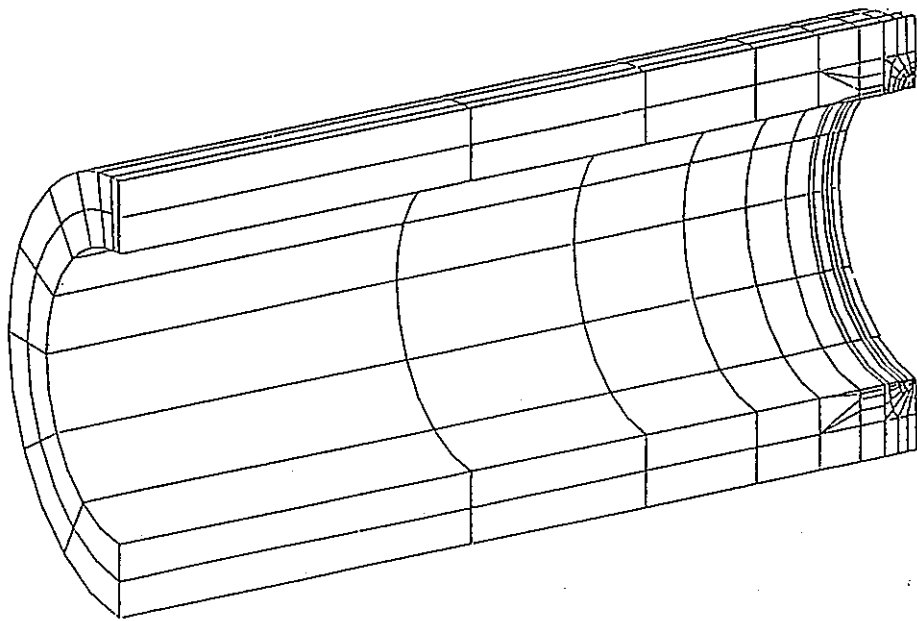


MODEL2-2-3

図A.9 モデル2-2-3のメッシュ図

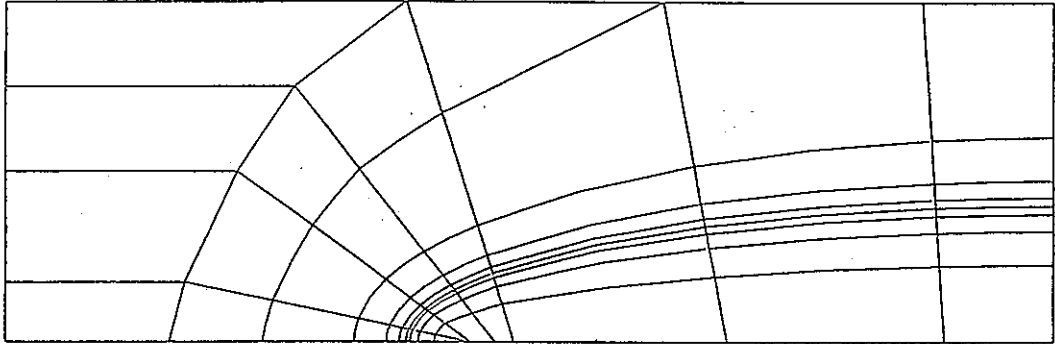


MODEL2-2-4

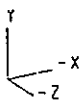
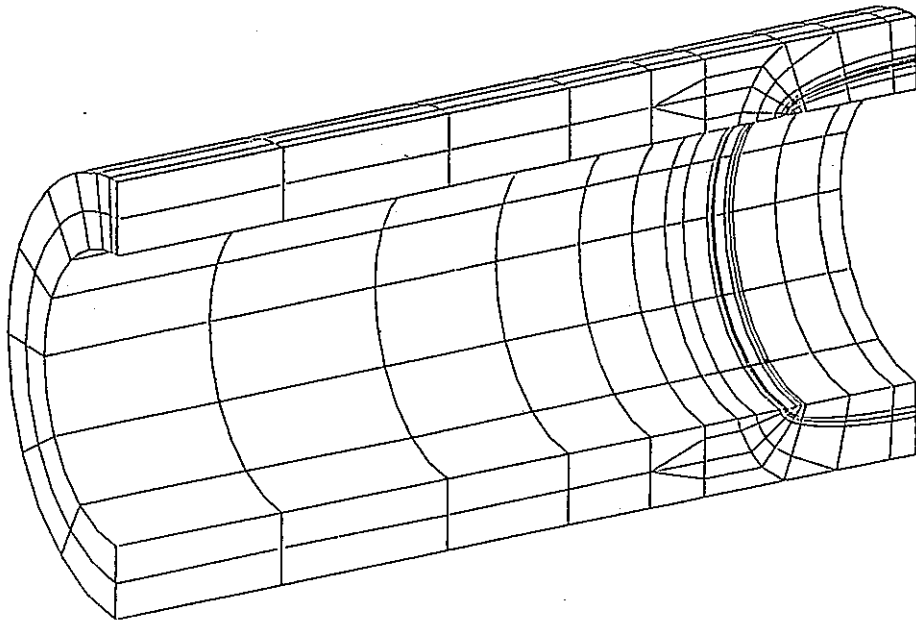


MODEL2-2-4

図A.10 モデル2-2-4のメッシュ図

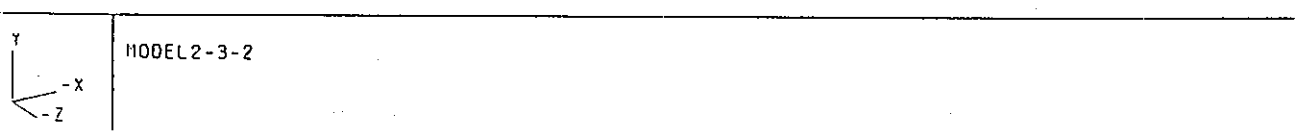
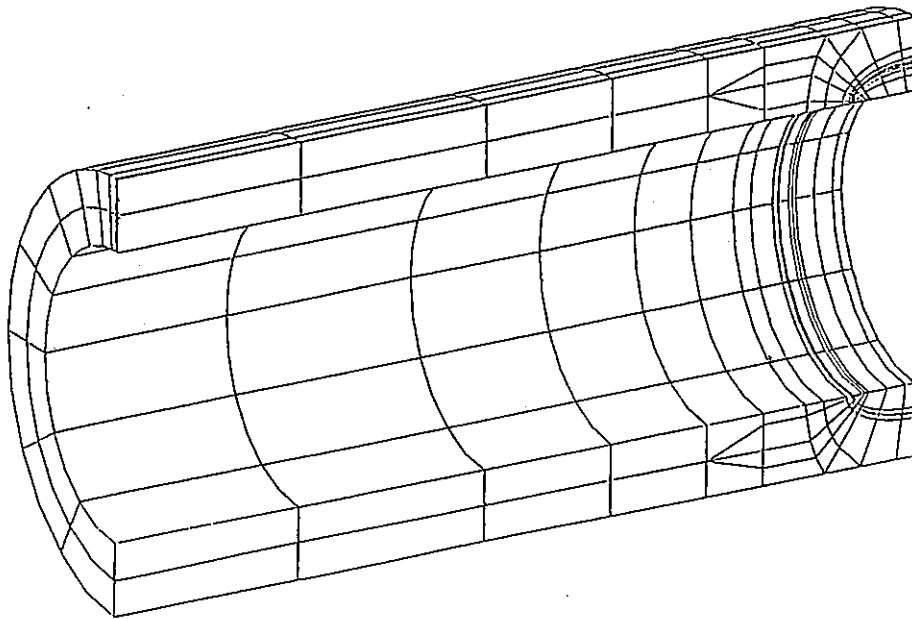
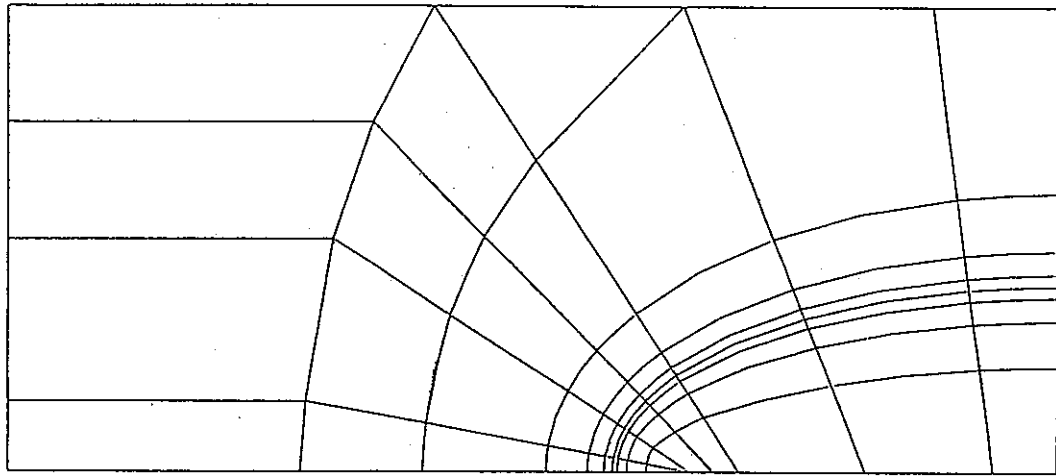


MODEL2-3-1

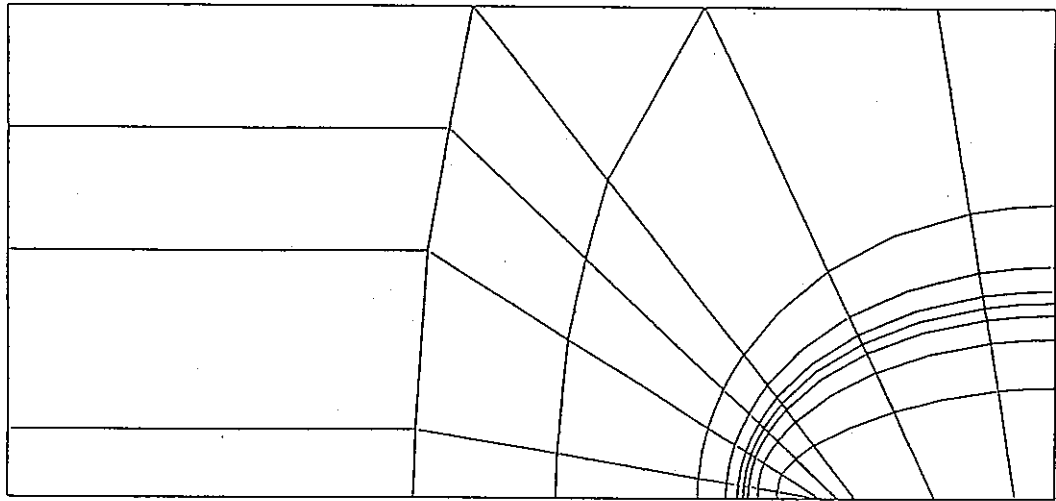


MODEL2-3-1

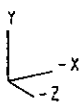
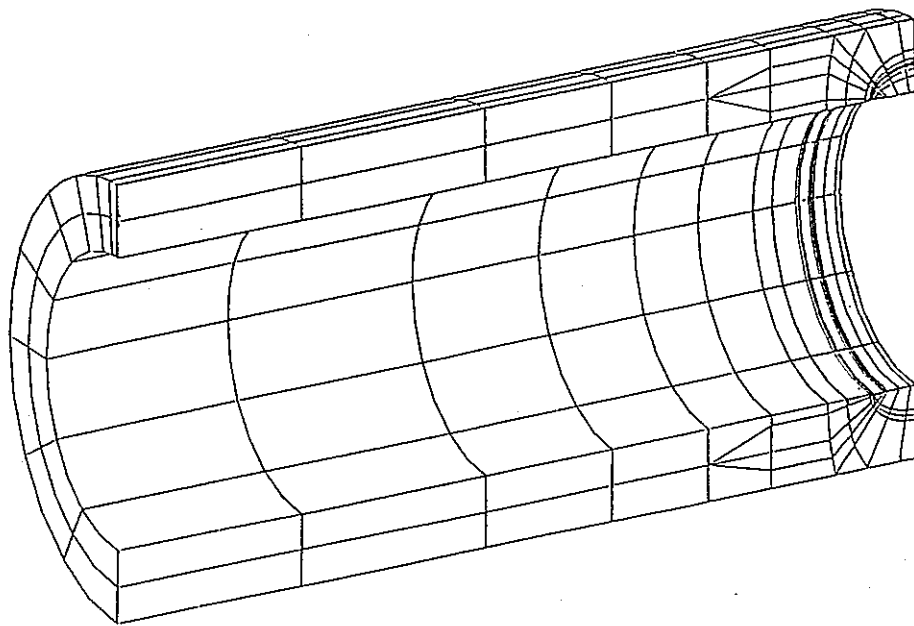
図A.11 モデル2-3-1のメッシュ図



図A.12 モデル2-3-2のメッシュ図

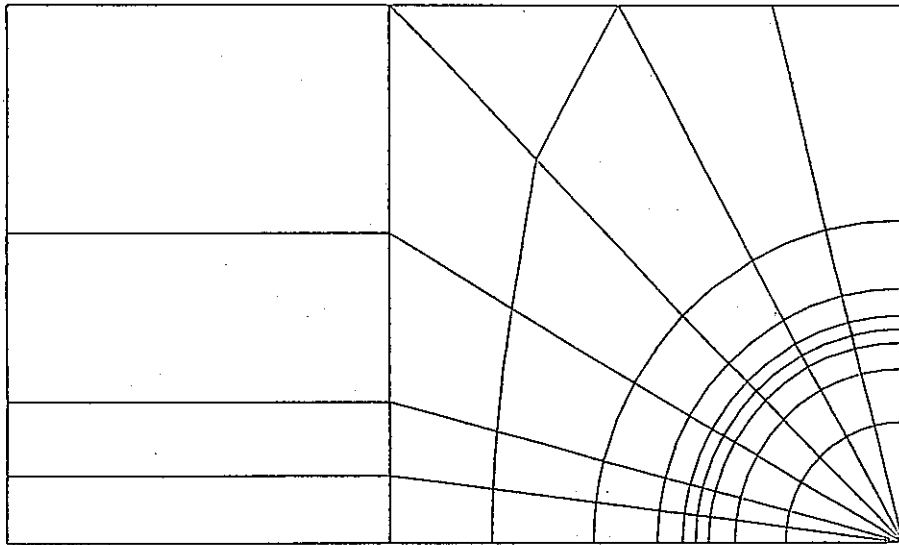


MODEL 2-3-3

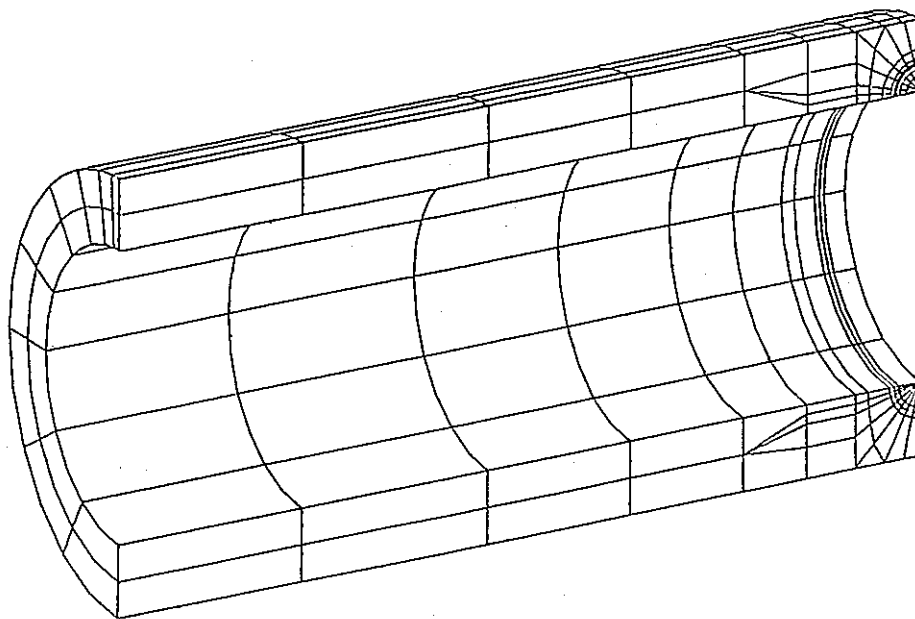


MODEL 2-3-3

図A.13 モデル 2-3-3 のメッシュ図

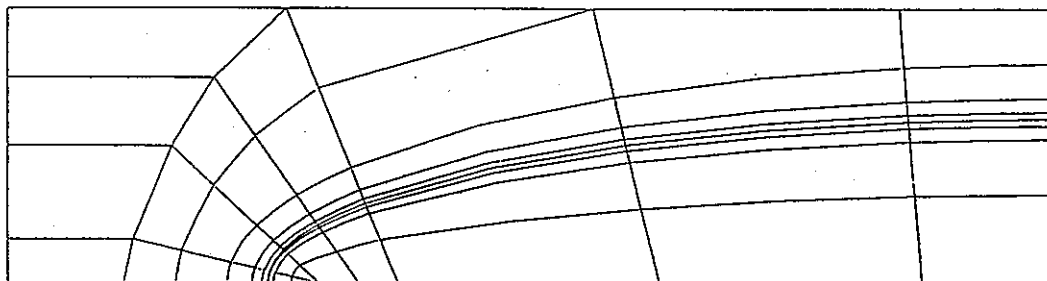


MODEL 2-3-4

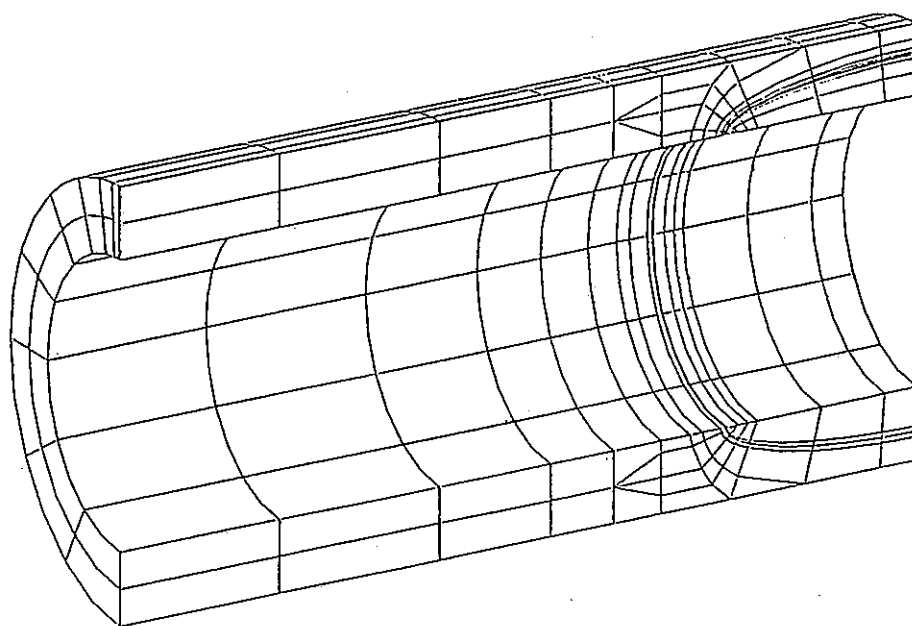


MODEL 2-3-4

図 A.14 モデル 2-3-4 のメッシュ図

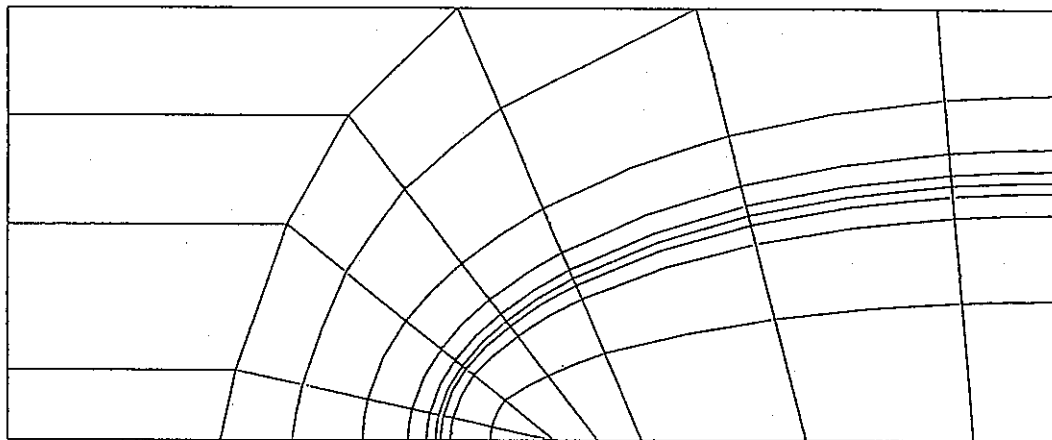


MODEL2-4-1

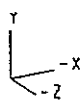
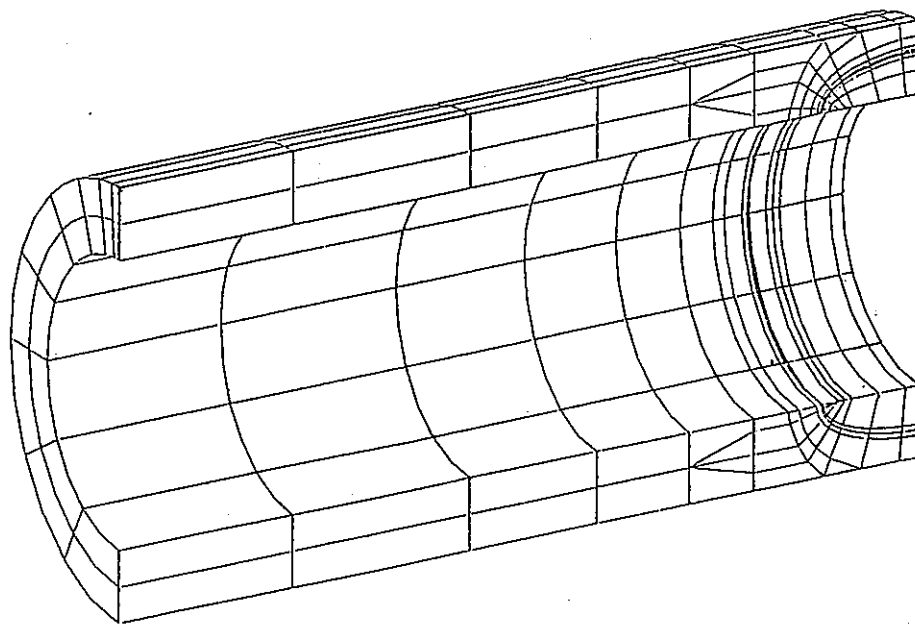


MODEL2-4-1

図A.15 モデル2-4-1のメッシュ図

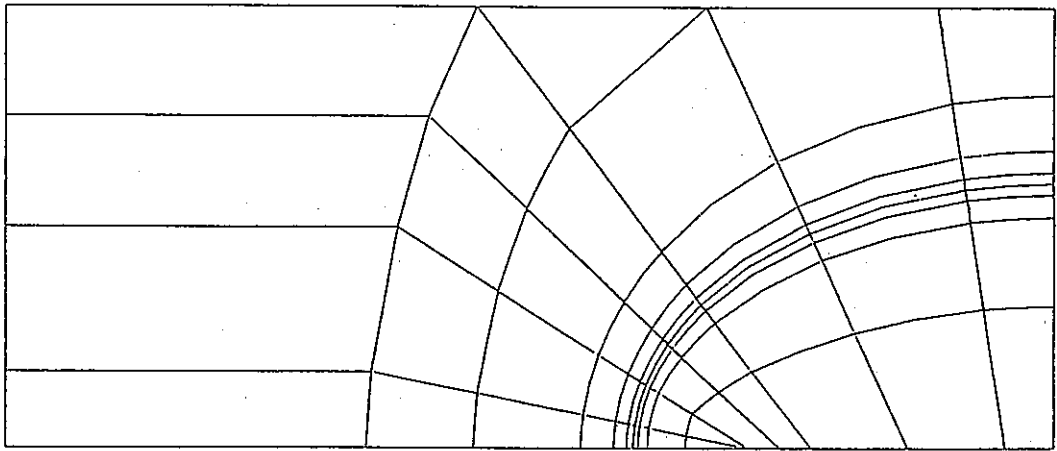


MODEL 2-4-2

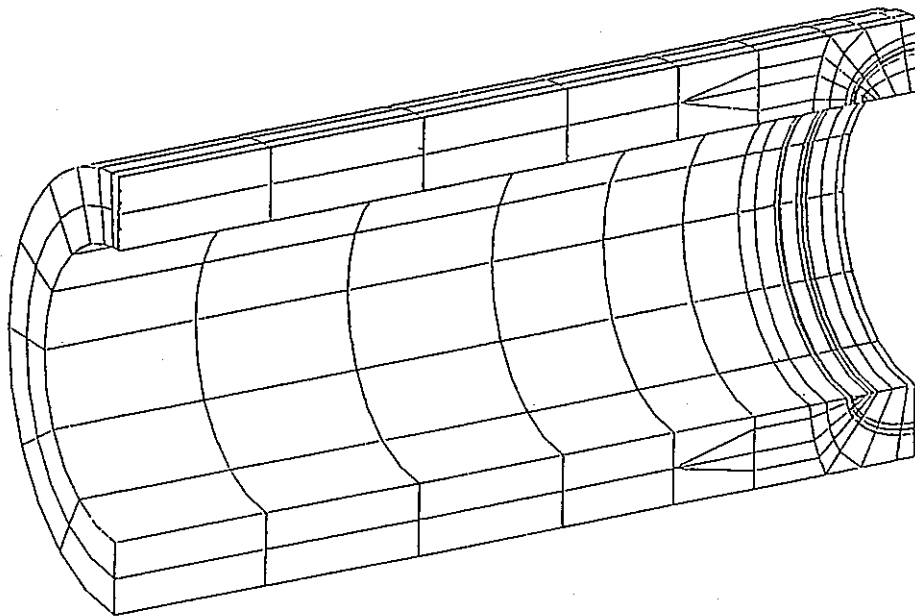


MODEL 2-4-2

図A.16 モデル 2-4-2 のメッシュ図

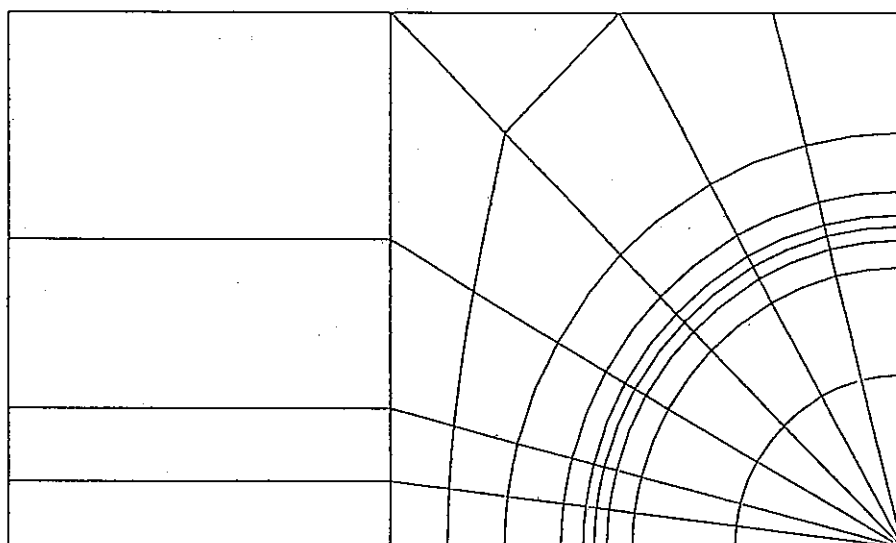


MODEL 2-4-3

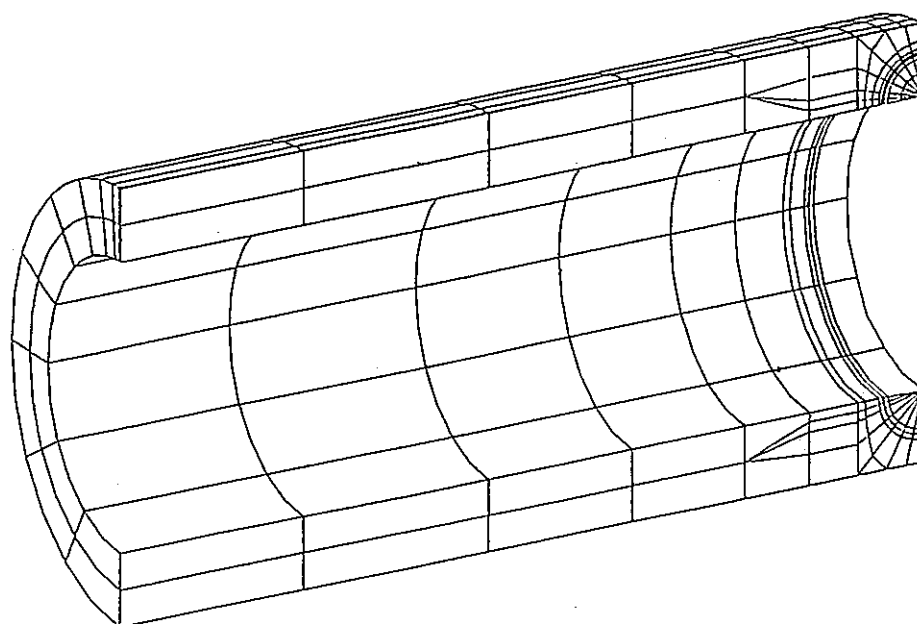


MODEL 2-4-3

図A.17 モデル2-4-3のメッシュ図

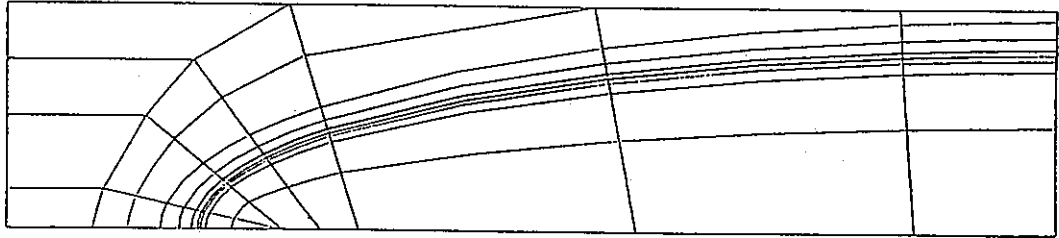


MODEL2-4-4

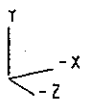
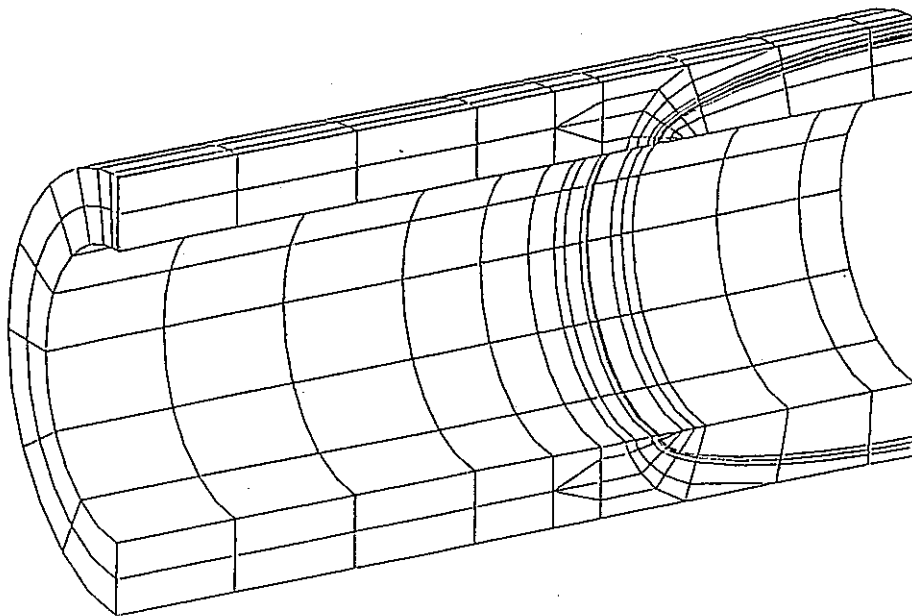


MODEL2-4-4

図A.18 モデル2-4-4のメッシュ図

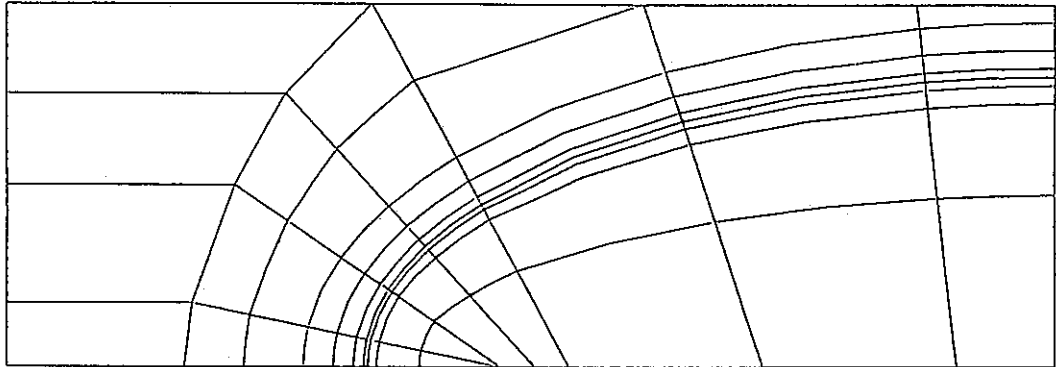


MODEL 2-5-1

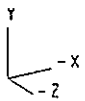
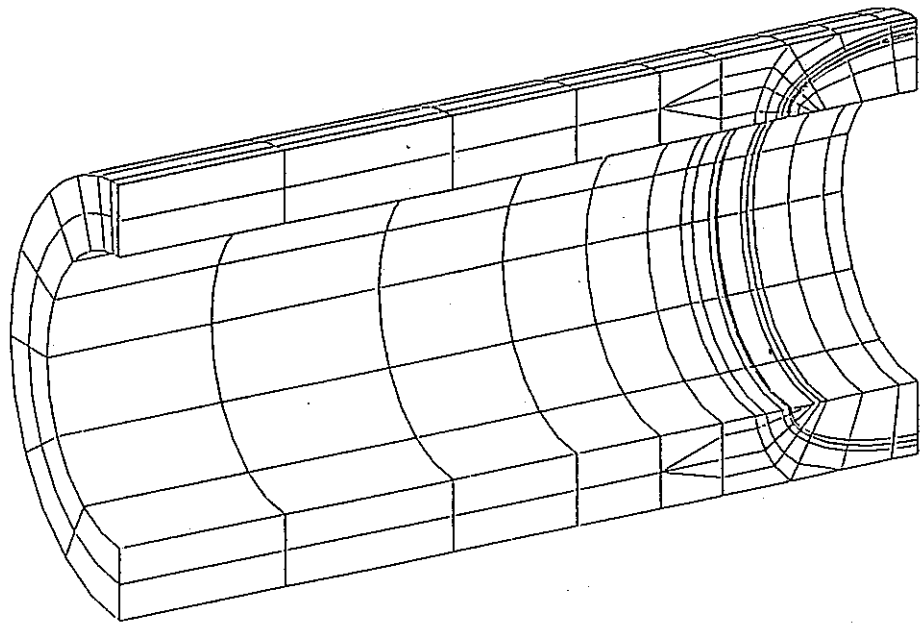


MODEL 2-5-1

図 A.19 モデル 2-5-1 のメッシュ図

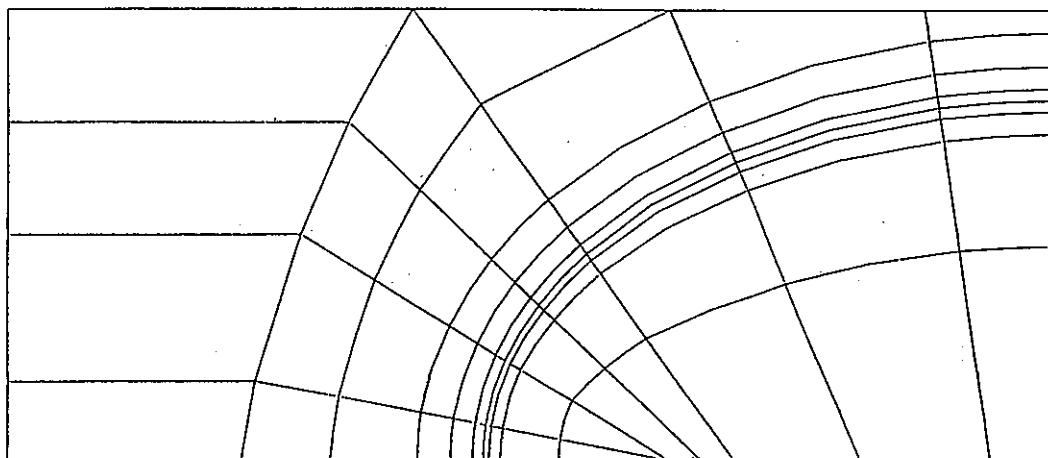


MODEL2-5-2

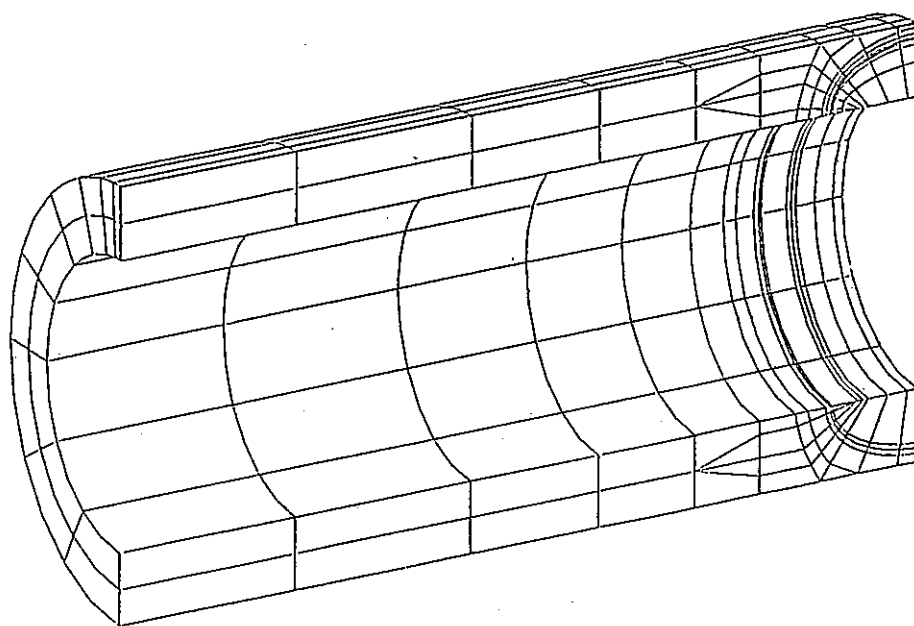


MODEL2-5-2

図A.20 モデル2-5-2のメッシュ図

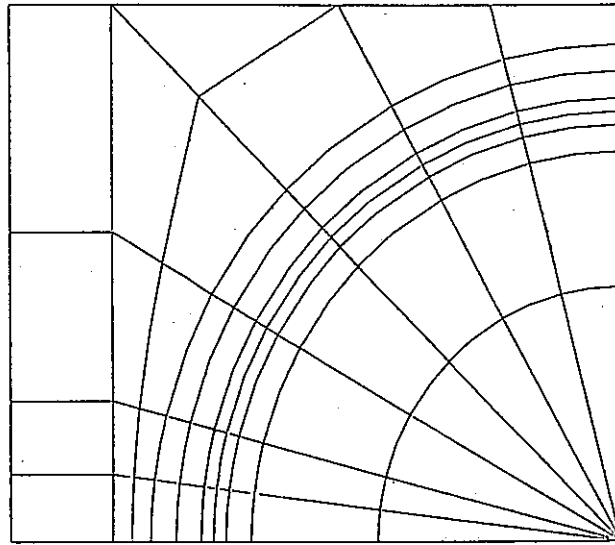


MODEL2-5-3

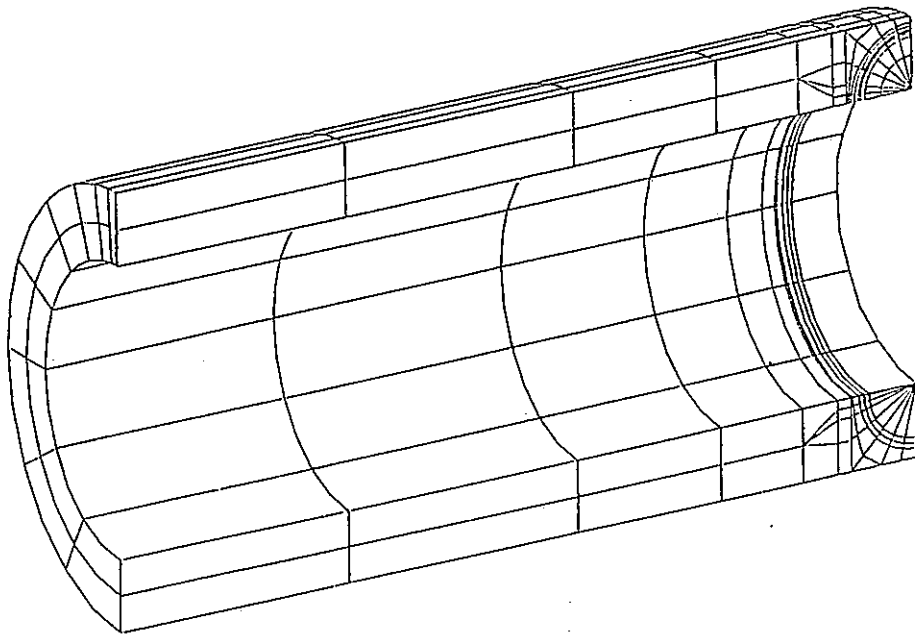


MODEL2-5-3

図A.21 モデル2-5-3のメッシュ図



MODEL2-5-4



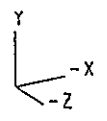
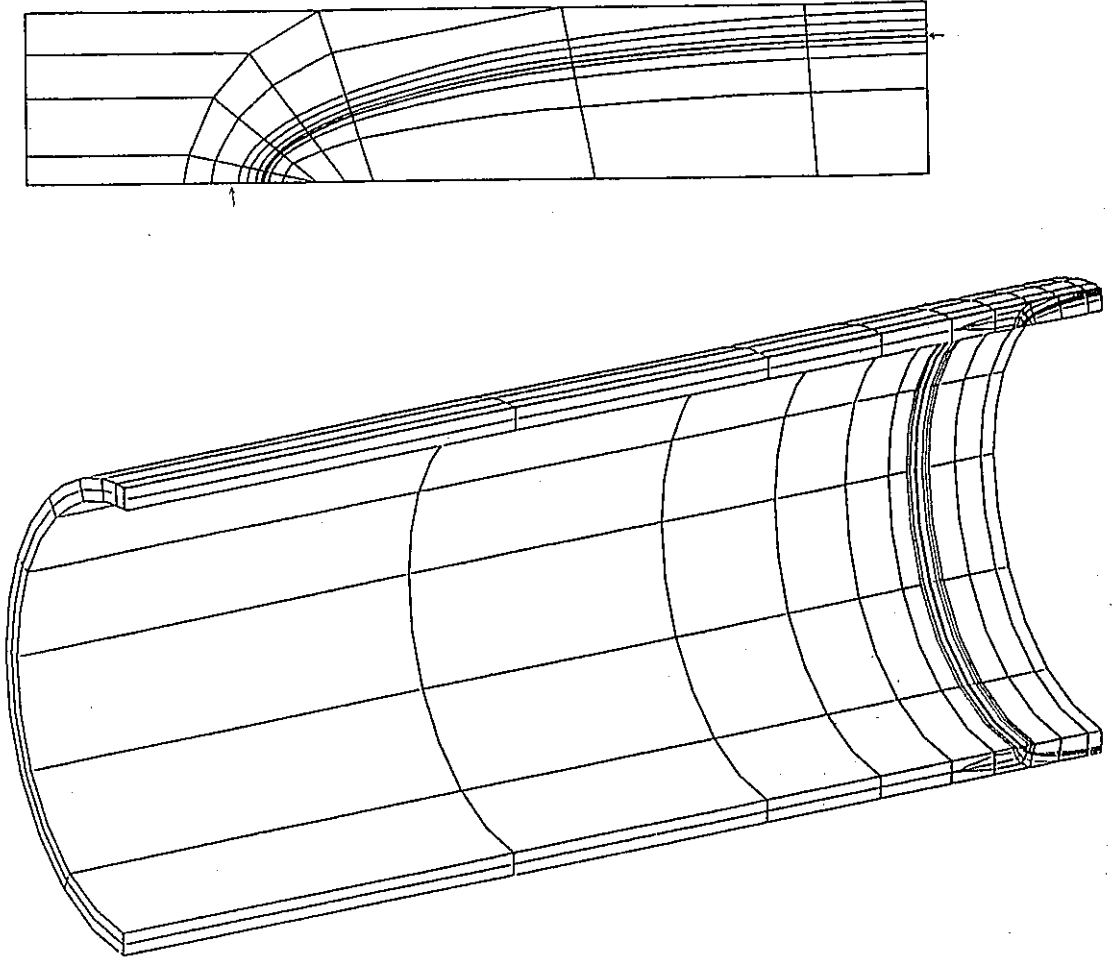
MODEL2-5-4

図A.22 モデル2-5-4のメッシュ図

付録－B 応力解析結果

付録Bには、FINAS による弾性応力解析結果として、検証解析($t/r=0.1$) のケースと本解析($t/r=0.4$, $a/t=0.4$, $a/b=0.4$) のケースでの代表例を示す。

- 図 B.1 検証解析用モデル1－1のメッシュ図
- 図 B.2 ミーゼス相当応力のコンター図
- 図 B.3 き裂面垂直応力成分 σ_{THETA} のコンター図
- 図 B.4 き裂前縁に沿った各応力成分の分布図
 - (a) 0 次の応力分布負荷での結果
 - (b) 1 次の応力分布負荷での結果
- 図 B.5 き裂前縁に沿った各応力成分の分布図
 - (a) 2 次の応力分布負荷での結果
 - (b) 3 次の応力分布負荷での結果
- 図 B.6 本解析用モデル2－3－2のメッシュ図
- 図 B.7 ミーゼス相当応力のコンター図
- 図 B.8 き裂面垂直応力成分 σ_{THETA} のコンター図
- 図 B.9 き裂前縁に沿った各応力成分の分布図
 - (a) 0 次の応力分布負荷での結果
 - (b) 1 次の応力分布負荷での結果
- 図 B.10 き裂前縁に沿った各応力成分の分布図
 - (a) 2 次の応力分布負荷での結果
 - (b) 3 次の応力分布負荷での結果



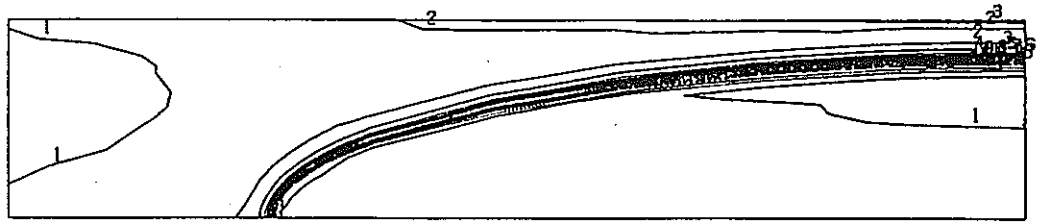
MODEL1-1

PIPE WITH AXIAL CRACK MODEL1-1 (A/T=0.8,A/B=0.2)

図B.1 検証解析用モデル1-1のメッシュ図

CONTOUR VALUES

- 1 0.300000
- 2 1.300000
- 3 2.300000
- 4 3.300000
- 5 4.300000
- 6 5.300000
- 7 6.300000
- 8 7.300000
- 9 8.300000
- 10 9.300000

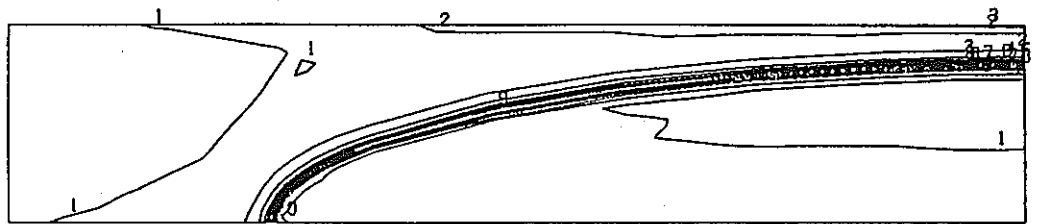


STEP NO. 1

MODEL I-1-K0 (VON-MISES)

CONTOUR VALUES

- 1 0.370000
- 2 1.020000
- 3 1.670000
- 4 2.320000
- 5 2.970000
- 6 3.620000
- 7 4.270000
- 8 4.920000
- 9 5.570000
- 10 6.220000

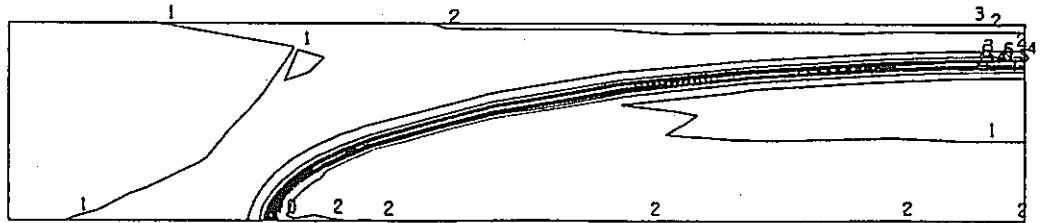


STEP NO. 2

MODEL I-1-K1 (VON-MISES)

CONTOUR VALUES

- 1 0.300000
- 2 0.840000
- 3 1.380000
- 4 1.920000
- 5 2.460000
- 6 3.000000
- 7 3.540000
- 8 4.080000
- 9 4.620000
- 10 5.160000

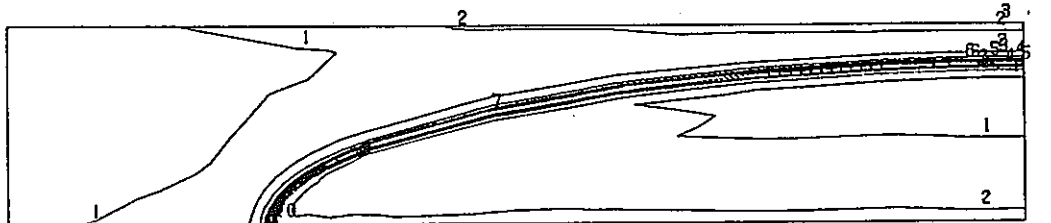


STEP NO. 3

MODEL I-1-K2 (VON-MISES)

CONTOUR VALUES

- 1 0.260000
- 2 0.730000
- 3 1.200000
- 4 1.670000
- 5 2.140000
- 6 2.610000
- 7 3.080000
- 8 3.550000
- 9 4.020000
- 10 4.490000



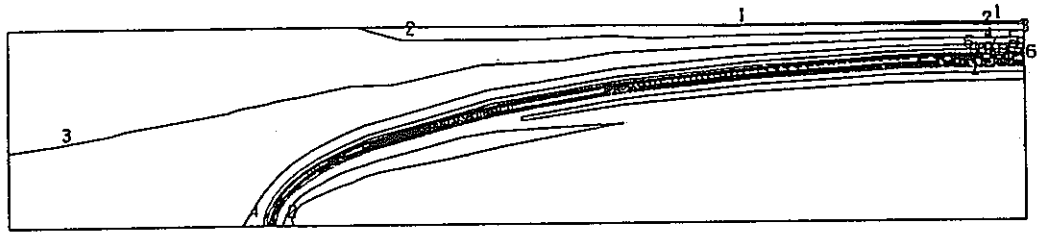
STEP NO. 4

MODEL I-1-K3 (VON-MISES)

図B.2 ミーゼス相当応力のコンター図

CONTOUR VALUES

- 1 -2.60000
- 2 -1.20000
- 3 0.200000
- 4 1.600000
- 5 3.000000
- 6 4.400000
- 7 5.800000
- 8 7.200000
- 9 8.600000
- 10 10.00000

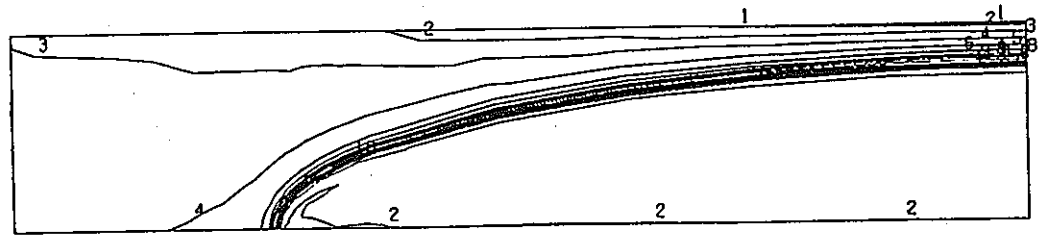


STEP NO. 1

MODEL1-1-K0 (SIG-TH)

CONTOUR VALUES

- 1 -1.85000
- 2 -1.01000
- 3 -0.17000
- 4 0.670000
- 5 1.510000
- 6 2.350000
- 7 3.190000
- 8 4.030000
- 9 4.870000
- 10 5.710000

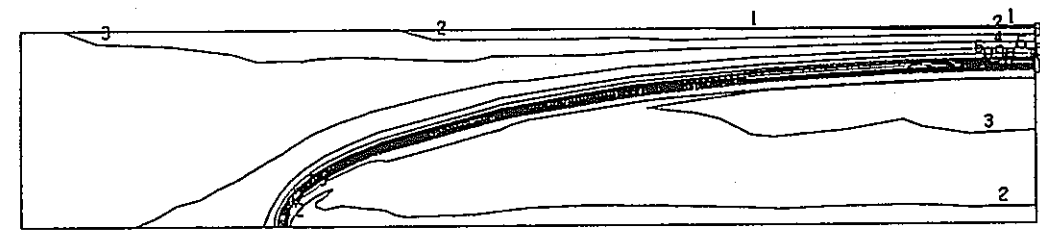


STEP NO. 2

MODEL1-1-K1 (SIG-TH)

CONTOUR VALUES

- 1 -1.43000
- 2 -0.81000
- 3 -0.19000
- 4 0.430000
- 5 1.050000
- 6 1.670000
- 7 2.290000
- 8 2.910000
- 9 3.530000
- 10 4.150000

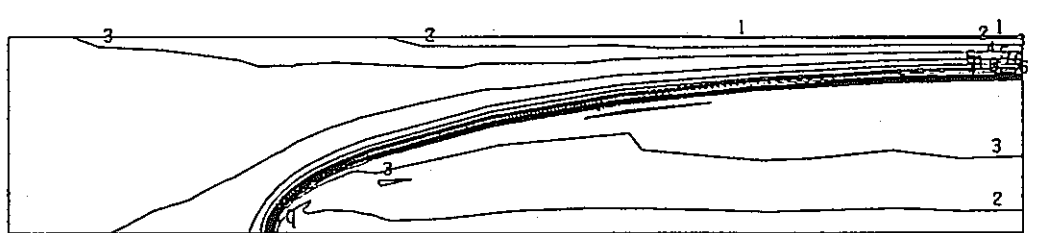


STEP NO. 3

MODEL1-1-K2 (SIG-TH)

CONTOUR VALUES

- 1 -1.17000
- 2 -0.67000
- 3 -0.17000
- 4 0.330000
- 5 0.830000
- 6 1.330000
- 7 1.830000
- 8 2.330000
- 9 2.830000
- 10 3.330000

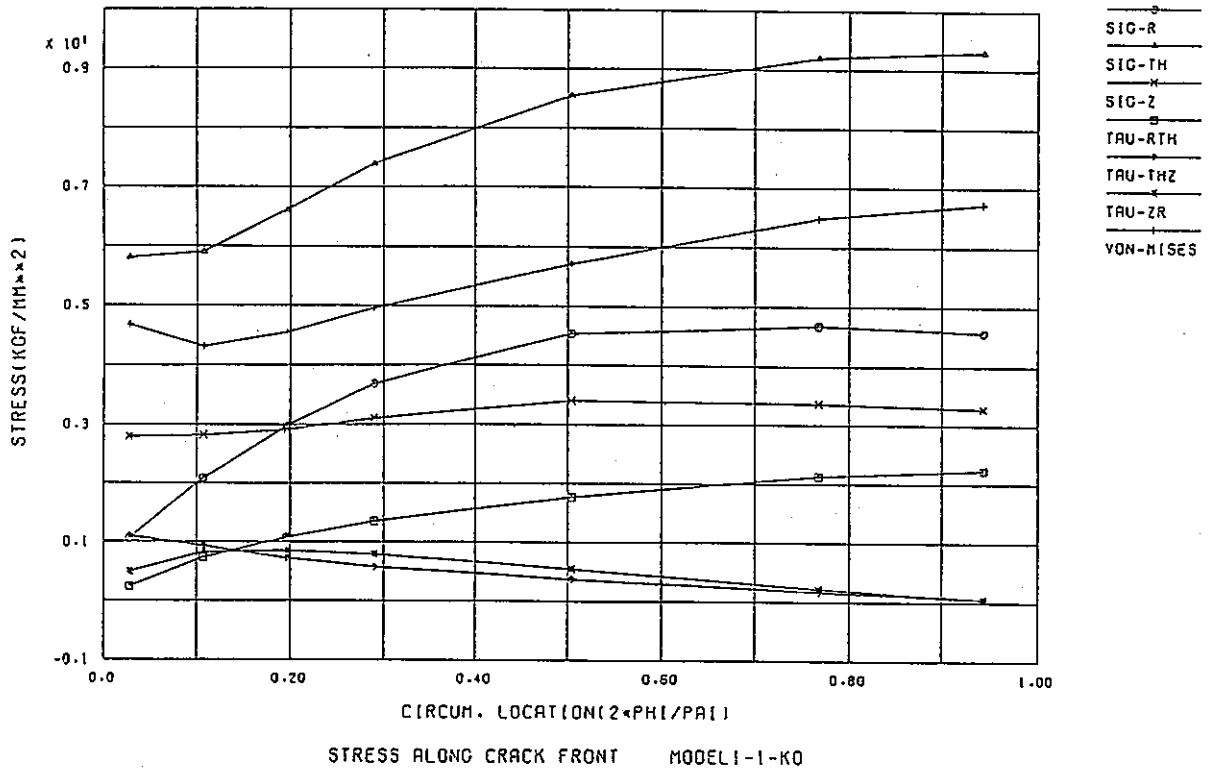


STEP NO. 4

MODEL1-1-K3 (SIG-TH)

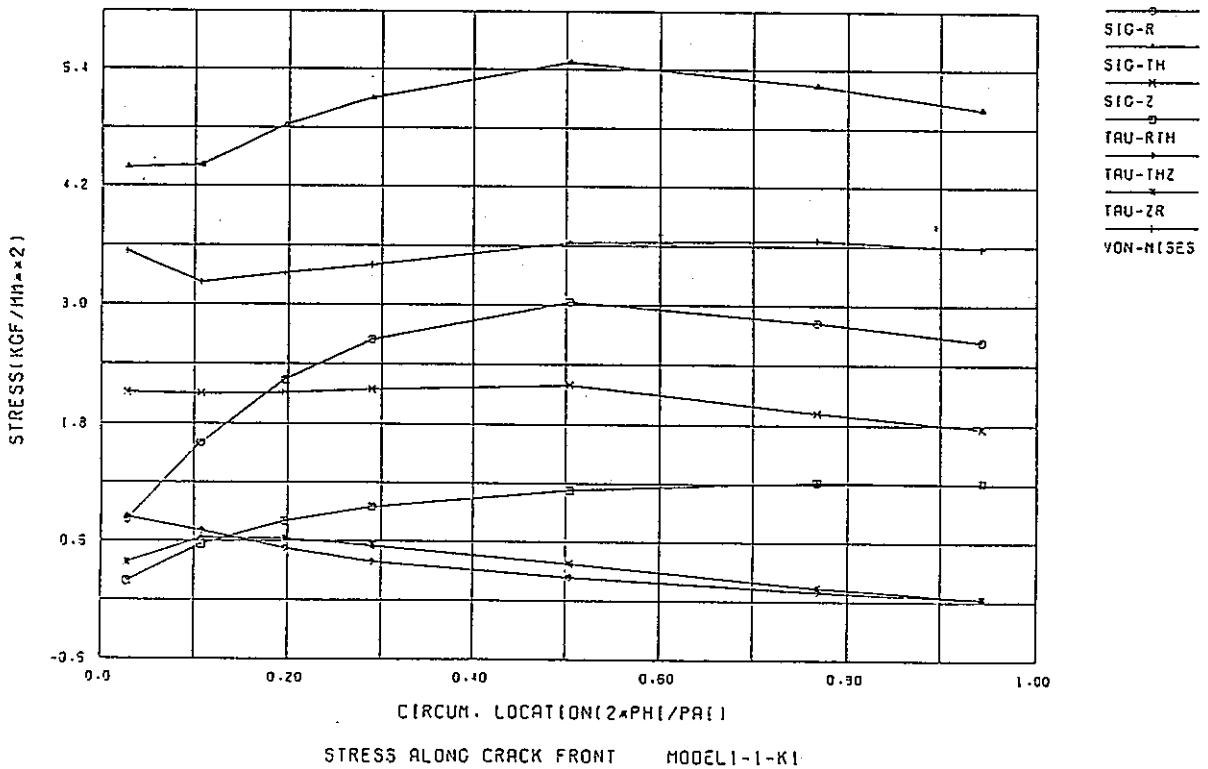
図B.3 き裂面垂直応力成分 σ_{THETA} のコンター図

FINAS



(a) 0 次の応力分布負荷での結果

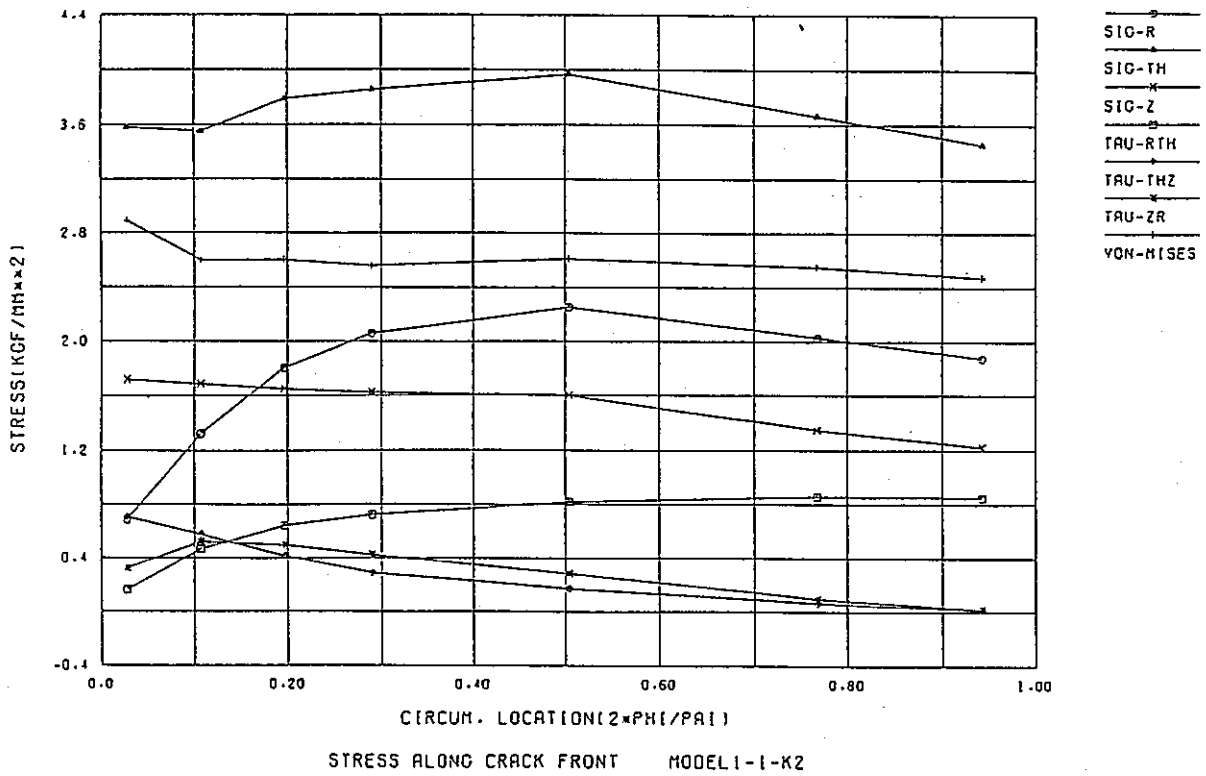
FINAS



(b) 1 次の応力分布負荷での結果

図 B. 4 き裂面前縁に沿った各応力成分の分布図

FINAS



FINAS

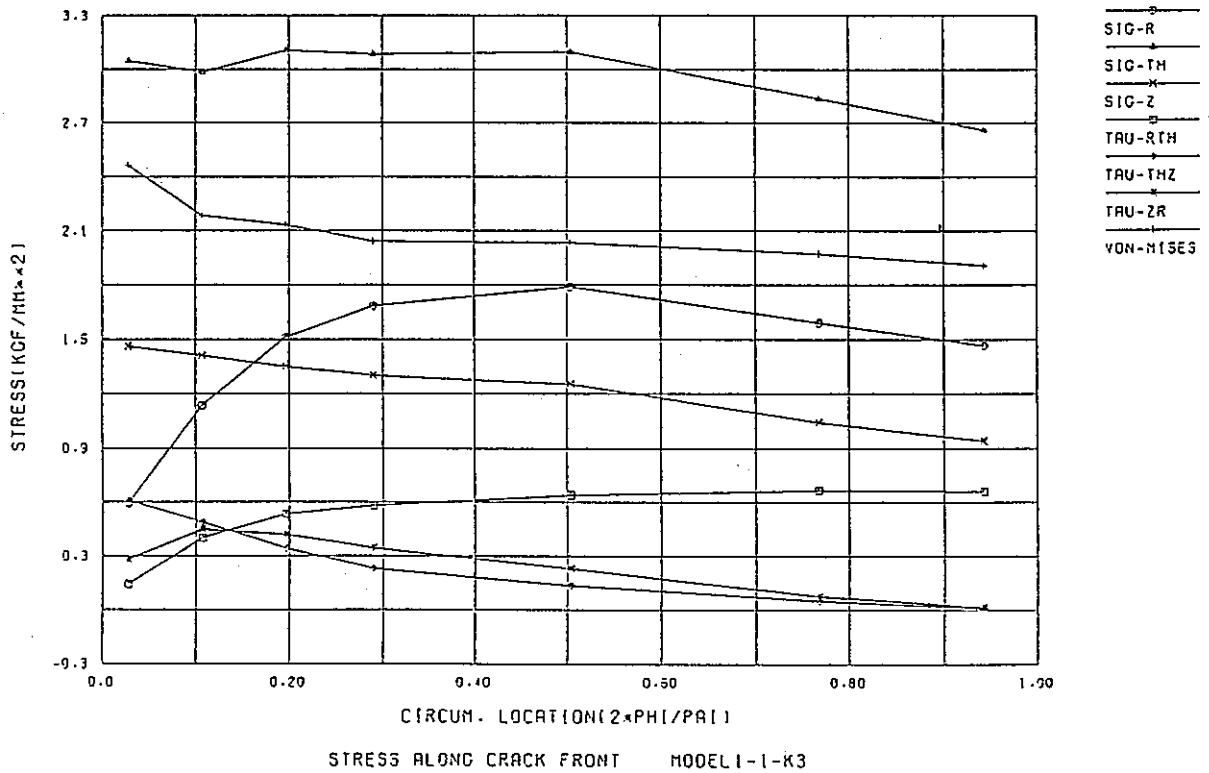
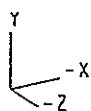
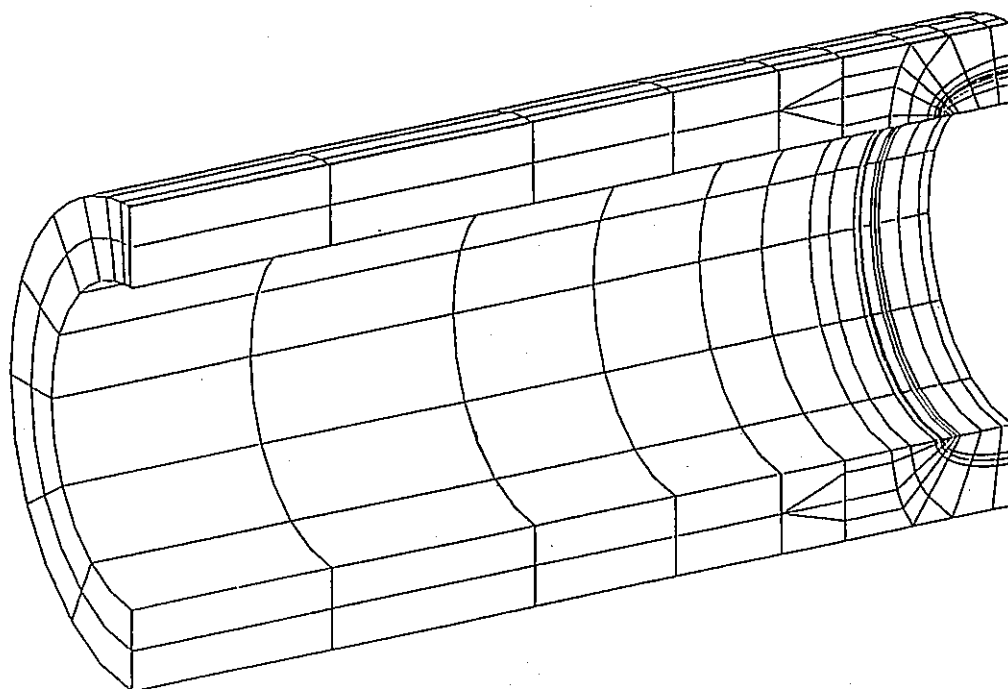
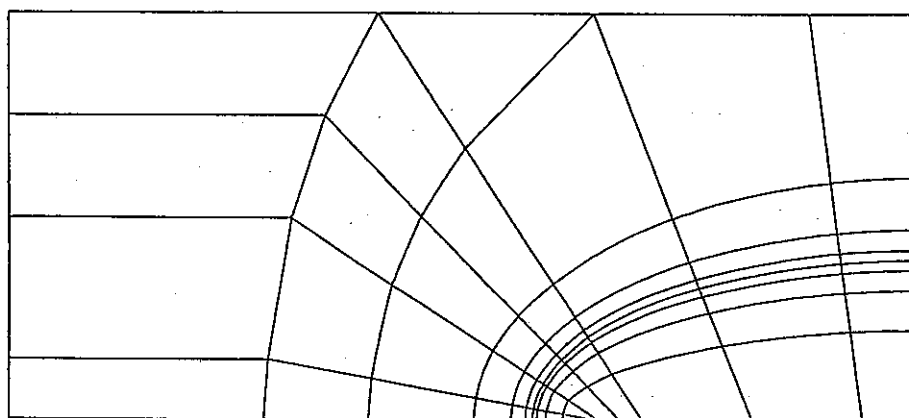


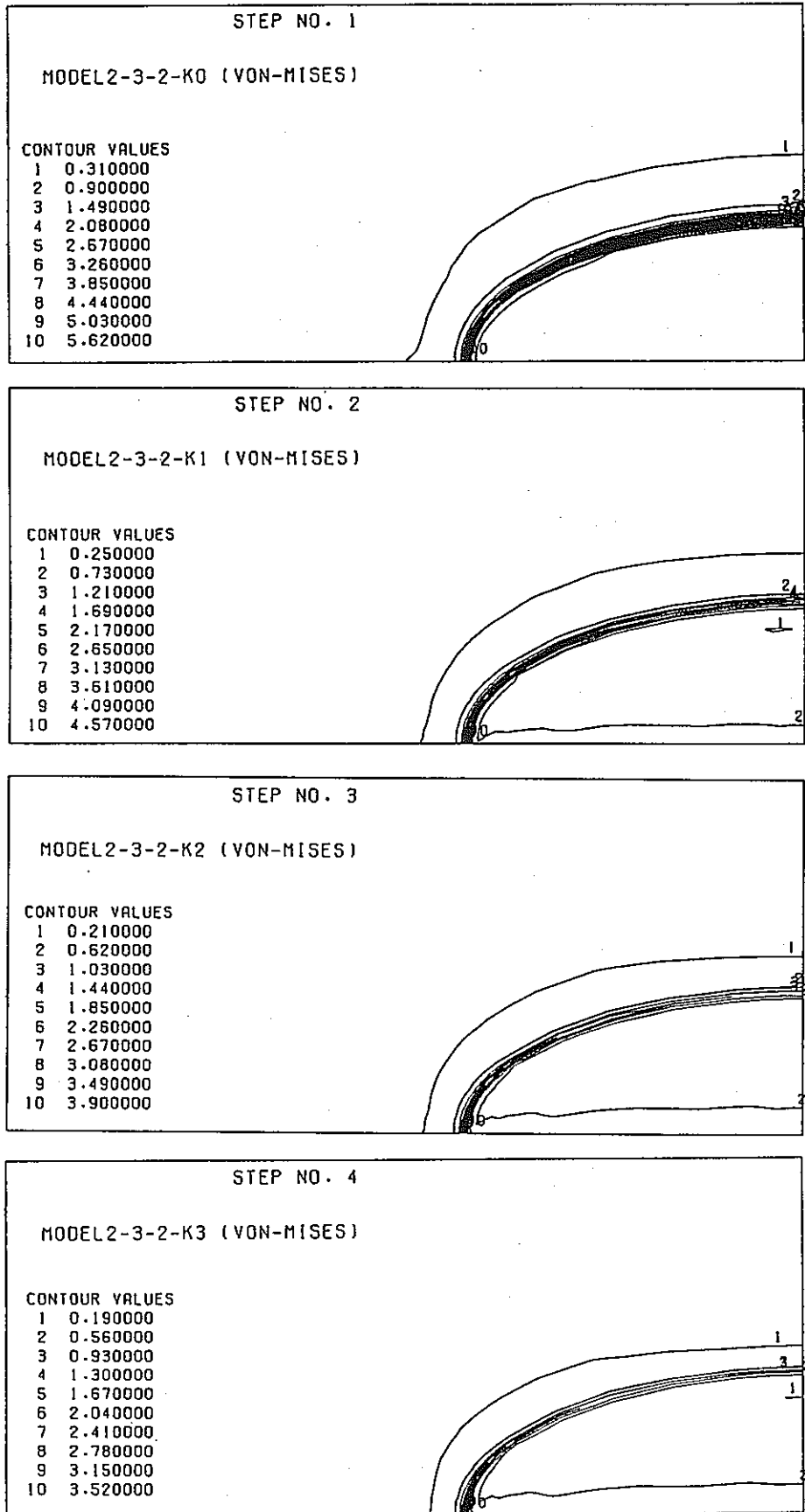
図 B. 5 き裂面前縁に沿った各応力成分の分布図



MODEL2-3-2

PIPE WITH AXIAL CRACK MODEL2-3-2 (R/T=0.4, A/B=0.4)

図B.6 本解析用モデル2-3-2のメッシュ図



図B.7 ミーゼル相当応力のコンター図

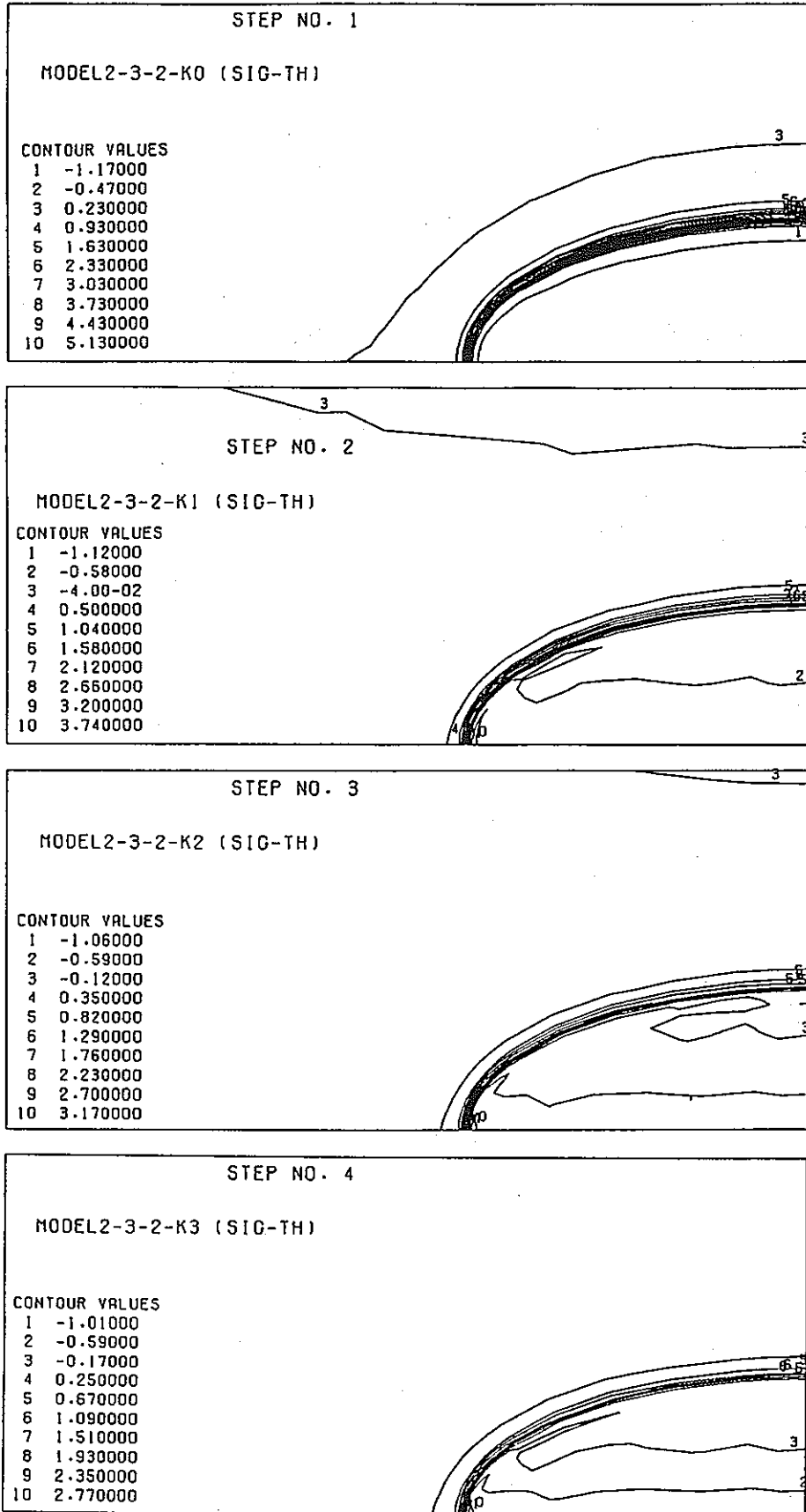
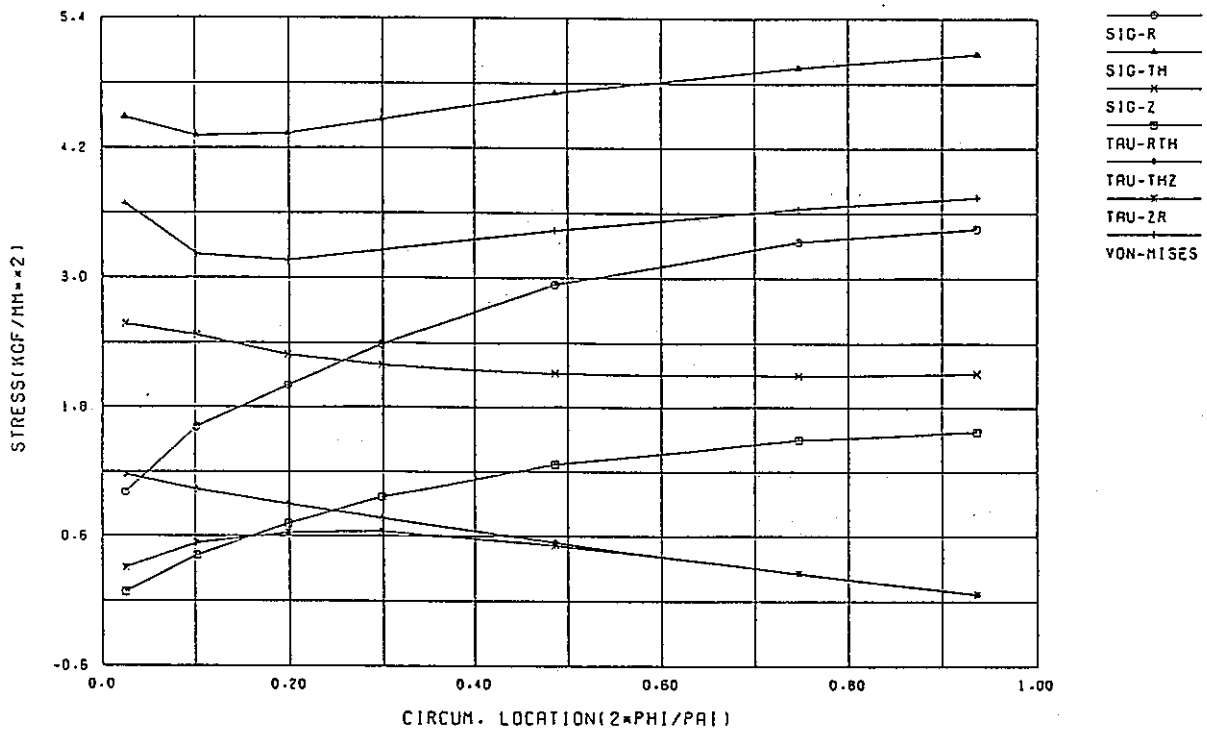


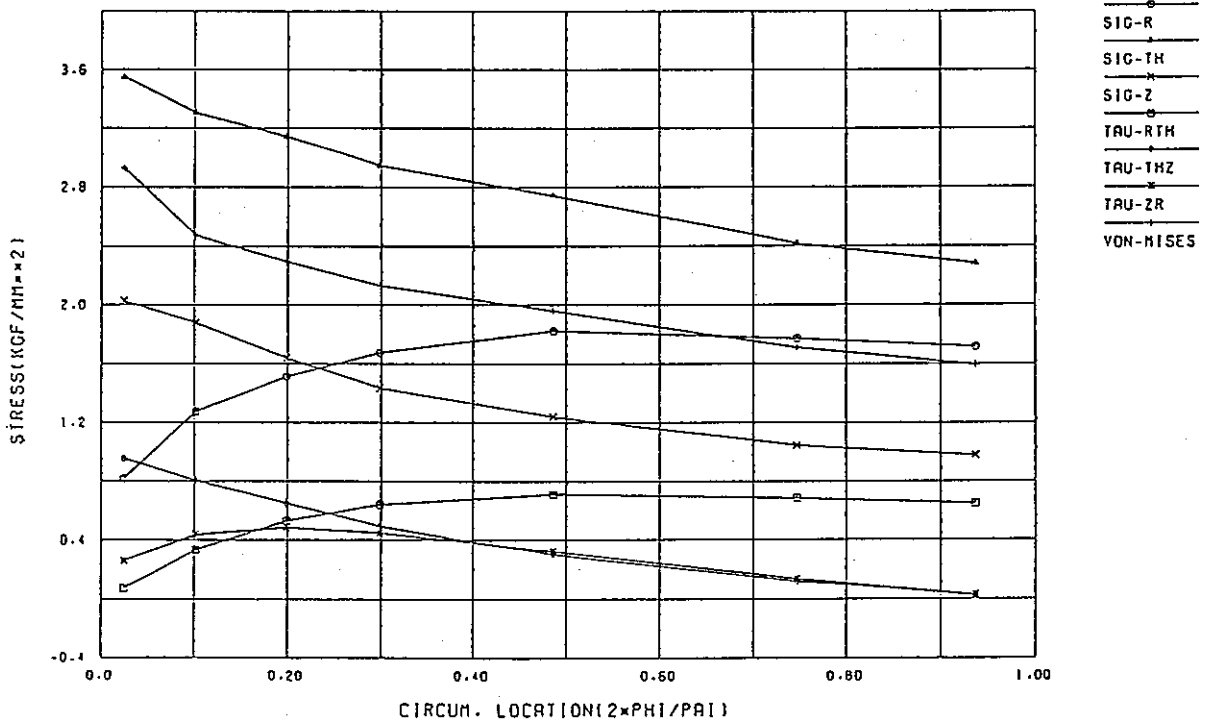
図 B. 8 き裂面垂直応力成分 σ_{THETA} のコンター図

FINAS



(a) 0 次の応力分布負荷での結果

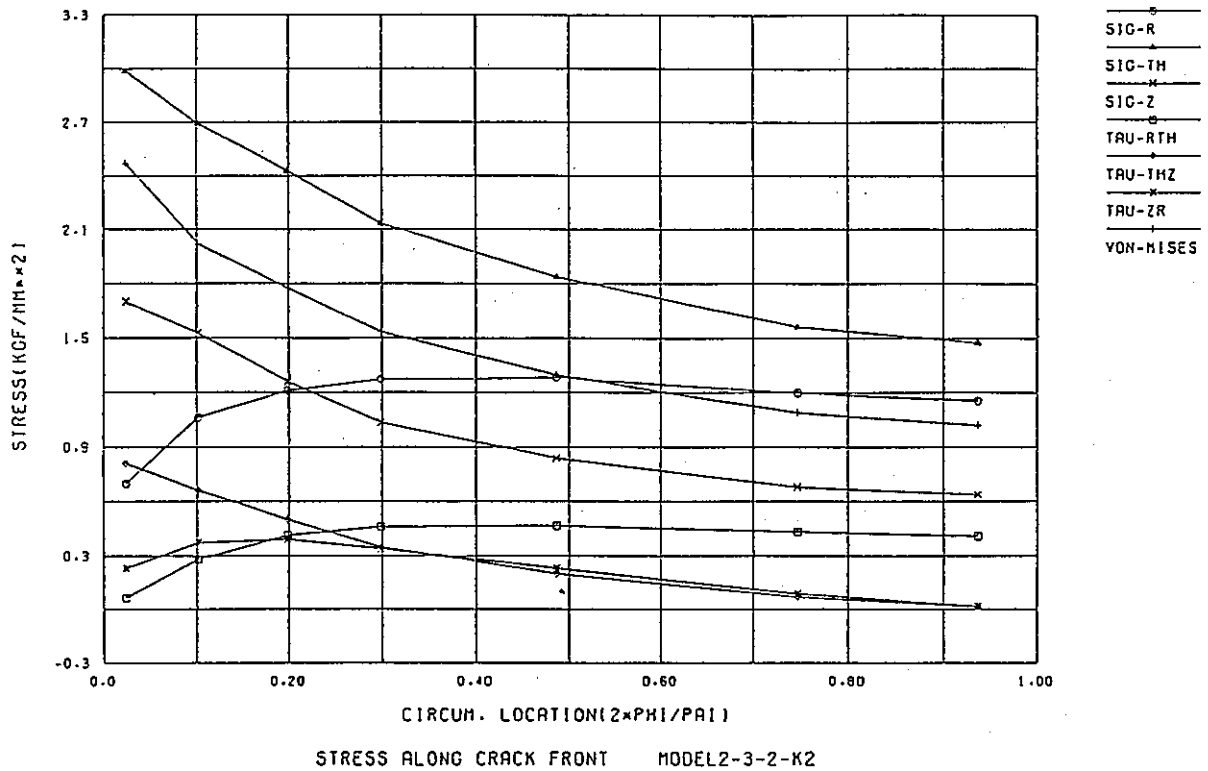
FINAS



(b) 1 次の応力分布負荷での結果

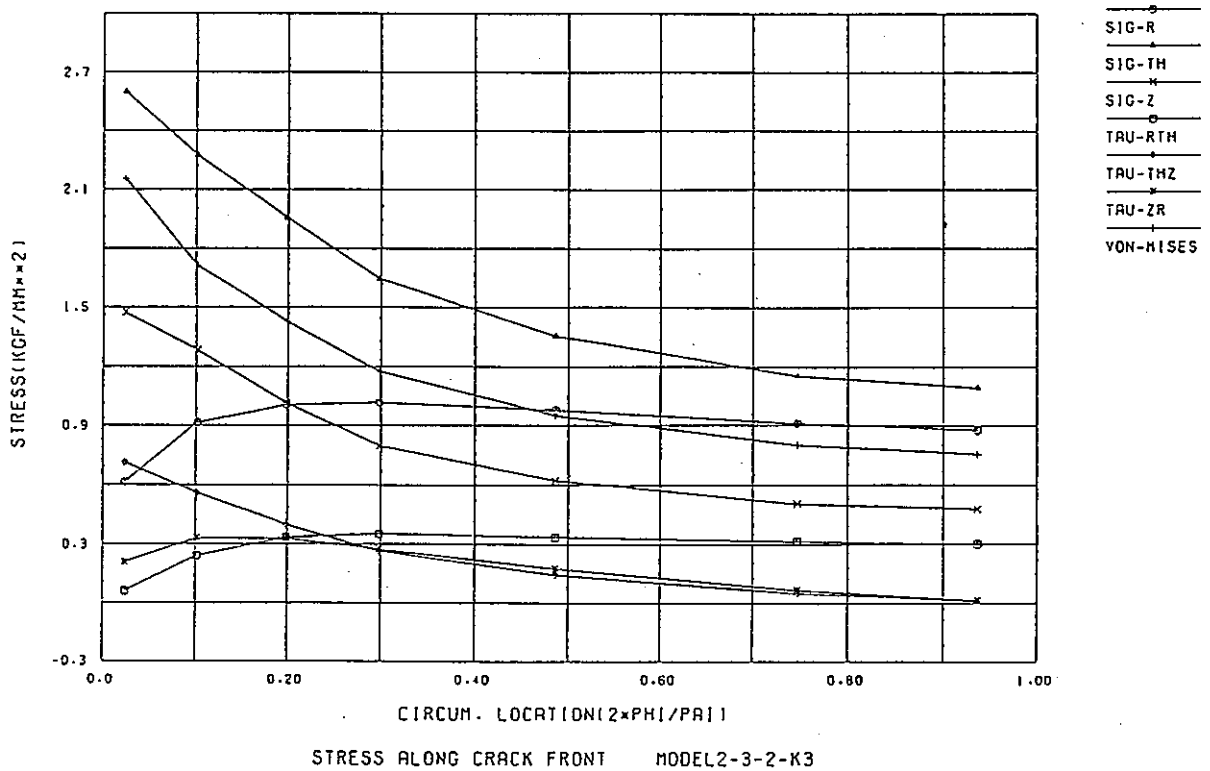
図 B. 9 き裂面縁に沿った各応力成分の分布図

FINAS



(a) 2 次の応力分布負荷での結果

FINAS



(b) 3 次の応力分布負荷での結果

図 B.10 き裂面縁に沿った各応力成分の分布図

付録-C CANIS-J 使用上の修正事項について

影響関数法の F 値テーブルのデータ拡充の解析作業の第 1 ステップとして、白鳥の解析結果の存在する下記条件での検討を行った。付録 C には、その予備検討結果を示す。

- ・肉厚 (t) / 内半径 (r) = 0.1
- ・き裂深さ (a) / 板厚 (t) = 0.8
- ・アスペクト比 : a / b = 0.2

検討の結果、CANIS-J の J 積分算出の部分に、き裂面に作用する分布力の影響を考慮する改良を行うことにより、白鳥の解に近い (偏差として最大 10%) 正規化応力拡大係数 F 値が得られた。

従って、本手法をベースとして K 値テーブルのデータ拡充の為の解析作業を進めることとした。

表 C.1 CANIS-J 改良前の K 値、F 値の計算結果 (モデル 1-1-1, 検証解析)

表 C.2 CANIS-J 改良後の K 値、F 値の計算結果 (モデル 1-1-1, 検証解析)

表 C.3 CANIS-J 改良前の K 値、F 値の計算結果 (モデル 2-3-2, 本解析の 1 例)

表 C.4 CANIS-J 改良後の K 値、F 値の計算結果 (モデル 2-3-2, 本解析の 1 例)

図 C.1 き裂前縁に沿った正規化応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較
(CANIS-J 改良前、平面歪条件)

図 C.2 き裂前縁に沿った正規化応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較
(CANIS-J 改良後、平面歪条件)

図 C.3 き裂前縁に沿った正規化応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較
(CANIS-J 改良後、平面応力条件)

図 C.4 き裂表面点 (C), 最深点 (A) での 0 次 (F₀) ~ 3 次 (F₃) の単位分布力での正規化応力拡大係数

図 C.5 き裂表面点 (C), 最深点 (A) での 0 次 (F₀) ~ 3 次 (F₃) の単位分布力での正規化応力拡大係数の白鳥の解に対する偏差

以下、白鳥の解に対する検証解析結果の概要について述べる。

図C.1 き裂前縁に沿った正規化応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較

(CANIS-J 改良前、平面歪条件)

- CANIS-J 改良前では0次の分布力に対してF値は表面点、最深点とも白鳥の解に対して20%程度小さい。また、1次～3次の分布力に対して表面点では30～40%小さく、最深点では逆に5～15%大きい。

図C.2 き裂前縁に沿った正規化応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較

(CANIS-J 改良後、平面歪条件)

- CANIS-J 改良後、平面歪条件で算出したF値は表面点では、0次～3次の分布力の全条件で白鳥の解とほぼ一致している（偏差1%以下）が、最深点では0次～3次の分布力に対して、7～15%（高次になるほど大きい）の偏差を有する。ただし、白鳥の解も含めてF値は高次になるほど値が小さくなるため（図4参照）その影響は小さいと考えられる。

図C.3 き裂前縁に沿った正規化応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較

(CANIS-J 改良後、平面応力条件)

- CANIS-J 改良後、平面応力条件で算出したF値は図2の平面歪条件で算出したF値を全体的に5%程度小さく算出しており、0次～3次の分布力に対して表面点では、5%程度白鳥の解よりも小さく、最深点では逆に5～10%程度大きくなる。白鳥の解に対する偏差という観点からは平面歪条件の場合よりも良好である。

図C.4 き裂表面点（C）、最深点（A）での0次（ F_0 ）～3次（ F_3 ）の単位分布力下での正規化応力拡大係数

- 白鳥の解と今回検討したCANIS-J 改良前、後での平面歪条件および平面応力条件でのF値の大きさを直接的に比較して示した。全体としてCANIS-J 改良後のF値は平面歪条件および平面応力条件を問わずほぼ妥当な結果と見られる。

図C.5 き裂表面点（C）、最深点（A）での0次（ F_0 ）～3次（ F_3 ）の単位分布力下での正規化応力拡大係数の白鳥の解に対する偏差

- 今回検討した4条件でのF値の白鳥の解に対する偏差を示した。CANIS-J 改良後のF値のうち平面歪条件でのものは表面点での精度は高いが最深点で最大15%（3次の分布力）の偏差を示す（F値を大きめに評価する）。これに対して、平面応力条件でのF値は偏差の幅そのものは平面歪条件の場合と変わらないが、全体としてF値の小さい方にシフトするため、偏差0のまわりへの収束は良くなる。

表 C. 1 CANIS-J改良前のK値, F値の計算結果 (モデル1-1-1, 検証解析)

MODEL 1-1-1 K0 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 1 TIME= 0.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 3.8364 | 0.8036 | 3.9797 | 0.8337 |
| 0.0279 | 3.8705 | 0.8108 | 4.0151 | 0.8411 |
| 0.1068 | 3.9670 | 0.8310 | 4.1153 | 0.8621 |
| 0.1961 | 4.6169 | 0.9672 | 4.7895 | 1.0033 |
| 0.2896 | 5.2726 | 1.1045 | 5.4697 | 1.1458 |
| 0.5039 | 6.1698 | 1.2925 | 6.4004 | 1.3408 |
| 0.7676 | 6.7709 | 1.4184 | 7.0240 | 1.4714 |
| 0.9429 | 6.8771 | 1.4406 | 7.1341 | 1.4944 |
| 1.0000 | 6.9117 | 1.4479 | 7.1700 | 1.5020 |

MODEL 1-1-1 K1 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 2 TIME= 1.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 2.7298 | 0.5718 | 2.8318 | 0.5932 |
| 0.0279 | 2.7748 | 0.5813 | 2.8785 | 0.6030 |
| 0.1068 | 2.9022 | 0.6079 | 3.0106 | 0.6307 |
| 0.1961 | 3.3607 | 0.7040 | 3.4863 | 0.7303 |
| 0.2896 | 3.7030 | 0.7757 | 3.8414 | 0.8047 |
| 0.5039 | 4.2242 | 0.8849 | 4.3821 | 0.9180 |
| 0.7676 | 4.3376 | 0.9086 | 4.4998 | 0.9426 |
| 0.9429 | 4.3182 | 0.9046 | 4.4796 | 0.9384 |
| 1.0000 | 4.3118 | 0.9032 | 4.4730 | 0.9370 |

MODEL 1-1-1 K2 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 3 TIME= 2.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 2.1010 | 0.4401 | 2.1795 | 0.4566 |
| 0.0279 | 2.1556 | 0.4515 | 2.2361 | 0.4684 |
| 0.1068 | 2.3099 | 0.4839 | 2.3962 | 0.5020 |
| 0.1961 | 2.6584 | 0.5569 | 2.7578 | 0.5777 |
| 0.2896 | 2.8585 | 0.5988 | 2.9653 | 0.6212 |
| 0.5039 | 3.1701 | 0.6641 | 3.2885 | 0.6889 |
| 0.7676 | 3.1499 | 0.6598 | 3.2676 | 0.6845 |
| 0.9429 | 3.0914 | 0.6476 | 3.2069 | 0.6718 |
| 1.0000 | 3.0723 | 0.6436 | 3.1872 | 0.6676 |

MODEL 1-1-1 K3 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

CRACK OPENING DISP.

STEP= 4 TIME= 3.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 1.7084 | 0.3579 | 1.7722 | 0.3712 |
| 0.0279 | 1.7674 | 0.3702 | 1.8334 | 0.3841 |
| 0.1068 | 1.9341 | 0.4052 | 2.0064 | 0.4203 |
| 0.1961 | 2.2081 | 0.4626 | 2.2907 | 0.4798 |
| 0.2896 | 2.3299 | 0.4881 | 2.4170 | 0.5063 |
| 0.5039 | 2.5258 | 0.5291 | 2.6202 | 0.5489 |
| 0.7676 | 2.4686 | 0.5171 | 2.5609 | 0.5364 |
| 0.9429 | 2.4023 | 0.5032 | 2.4921 | 0.5220 |
| 1.0000 | 2.3807 | 0.4987 | 2.4697 | 0.5173 |

表 C. 2 CANIS-J改良後の K 値, F 値の計算結果 (モデル1-1-1, 検証解析)

MODEL 1-1-1 K0 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 1 TIME= 0.000

| 2*PHI/PAI | 平面応力 | | 平面歪 | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| | K | F | K | F |
| 0.0000 | 5.1141 | 1.0713 | 5.3052 | 1.1113 |
| 0.0279 | 5.1234 | 1.0733 | 5.3149 | 1.1134 |
| 0.1068 | 5.1499 | 1.0788 | 5.3424 | 1.1191 |
| 0.1961 | 5.8038 | 1.2158 | 6.0207 | 1.2612 |
| 0.2896 | 6.5484 | 1.3717 | 6.7931 | 1.4230 |
| 0.5039 | 7.8024 | 1.6344 | 8.0940 | 1.6955 |
| 0.7676 | 8.7341 | 1.8296 | 9.0605 | 1.8980 |
| 0.9429 | 8.9474 | 1.8743 | 9.2818 | 1.9443 |
| 1.0000 | 9.0169 | 1.8888 | 9.3539 | 1.9594 |

MODEL 1-1-1 K1 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 2 TIME= 1.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 4.0392 | 0.8461 | 4.1902 | 0.8778 |
| 0.0279 | 4.0089 | 0.8398 | 4.1587 | 0.8712 |
| 0.1068 | 3.9231 | 0.8218 | 4.0697 | 0.8525 |
| 0.1961 | 4.2281 | 0.8857 | 4.3862 | 0.9188 |
| 0.2896 | 4.4702 | 0.9364 | 4.6373 | 0.9714 |
| 0.5039 | 4.7912 | 1.0037 | 4.9703 | 1.0412 |
| 0.7676 | 4.6242 | 0.9687 | 4.7970 | 1.0049 |
| 0.9429 | 4.5054 | 0.9438 | 4.6738 | 0.9791 |
| 1.0000 | 4.4668 | 0.9357 | 4.6337 | 0.9707 |

MODEL 1-1-1 K2 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 3 TIME= 2.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 3.4206 | 0.7165 | 3.5484 | 0.7433 |
| 0.0279 | 3.3593 | 0.7037 | 3.4849 | 0.7300 |
| 0.1068 | 3.1860 | 0.6674 | 3.3051 | 0.6923 |
| 0.1961 | 3.2891 | 0.6890 | 3.4120 | 0.7147 |
| 0.2896 | 3.3178 | 0.6950 | 3.4418 | 0.7210 |
| 0.5039 | 3.3715 | 0.7063 | 3.4975 | 0.7326 |
| 0.7676 | 3.2021 | 0.6708 | 3.3217 | 0.6958 |
| 0.9429 | 3.1210 | 0.6538 | 3.2377 | 0.6782 |
| 1.0000 | 3.0946 | 0.6483 | 3.2103 | 0.6725 |

MODEL 1-1-1 K3 T/R= 0.1000 A/T= 0.8000 A/B= 0.2000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 4 TIME= 3.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 3.0102 | 0.6306 | 3.1227 | 0.6541 |
| 0.0279 | 2.9247 | 0.6127 | 3.0340 | 0.6356 |
| 0.1068 | 2.8830 | 0.5620 | 2.7833 | 0.5830 |
| 0.1961 | 2.6654 | 0.5583 | 2.7650 | 0.5792 |
| 0.2896 | 2.8053 | 0.5458 | 2.7026 | 0.5661 |
| 0.5039 | 2.5995 | 0.5445 | 2.6966 | 0.5649 |
| 0.7676 | 2.4798 | 0.5195 | 2.5725 | 0.5389 |
| 0.9429 | 2.4080 | 0.5044 | 2.4980 | 0.5233 |
| 1.0000 | 2.3846 | 0.4995 | 2.4737 | 0.5182 |

表 C. 3 CANIS-J改良前の K 値, F 値の計算結果 (モデル2-3-2, 本解析の 1 例)

MODEL 2-3-2 K0 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 1 TIME= 0.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 2.8657 | 0.4649 | 2.9728 | 0.4823 |
| 0.0240 | 2.7924 | 0.4530 | 2.8968 | 0.4699 |
| 0.1014 | 2.5562 | 0.4147 | 2.6518 | 0.4302 |
| 0.1988 | 2.5618 | 0.4156 | 2.6576 | 0.4311 |
| 0.2990 | 2.6384 | 0.4280 | 2.7370 | 0.4440 |
| 0.4863 | 2.7328 | 0.4433 | 2.8349 | 0.4599 |
| 0.7474 | 3.0244 | 0.4906 | 3.1374 | 0.5090 |
| 0.9371 | 3.1657 | 0.5135 | 3.2840 | 0.5327 |
| 1.0000 | 3.2125 | 0.5211 | 3.3326 | 0.5406 |

MODEL 2-3-2 K1 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 2 TIME= 1.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 2.1868 | 0.3548 | 2.2686 | 0.3680 |
| 0.0240 | 2.0959 | 0.3400 | 2.1742 | 0.3527 |
| 0.1014 | 1.8026 | 0.2924 | 1.8700 | 0.3034 |
| 0.1988 | 1.7825 | 0.2892 | 1.8491 | 0.3000 |
| 0.2990 | 1.8064 | 0.2930 | 1.8739 | 0.3040 |
| 0.4863 | 1.9939 | 0.3235 | 2.0684 | 0.3355 |
| 0.7474 | 2.2027 | 0.3573 | 2.2851 | 0.3707 |
| 0.9371 | 2.2750 | 0.3691 | 2.3600 | 0.3828 |
| 1.0000 | 2.2989 | 0.3729 | 2.3848 | 0.3869 |

MODEL 2-3-2 K2 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 3 TIME= 2.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 1.9515 | 0.3166 | 2.0244 | 0.3284 |
| 0.0240 | 1.8508 | 0.3002 | 1.9199 | 0.3115 |
| 0.1014 | 1.5259 | 0.2475 | 1.5829 | 0.2568 |
| 0.1988 | 1.4398 | 0.2336 | 1.4936 | 0.2423 |
| 0.2990 | 1.4549 | 0.2360 | 1.5093 | 0.2448 |
| 0.4863 | 1.5669 | 0.2542 | 1.6254 | 0.2637 |
| 0.7474 | 1.6269 | 0.2639 | 1.6877 | 0.2738 |
| 0.9371 | 1.6233 | 0.2633 | 1.6840 | 0.2732 |
| 1.0000 | 1.6222 | 0.2632 | 1.6828 | 0.2730 |

MODEL 2-3-2 K3 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K, F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 4 TIME= 3.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 1.8201 | 0.2953 | 1.8881 | 0.3063 |
| 0.0240 | 1.7069 | 0.2769 | 1.7707 | 0.2872 |
| 0.1014 | 1.3419 | 0.2177 | 1.3920 | 0.2258 |
| 0.1988 | 1.2299 | 0.1995 | 1.2758 | 0.2070 |
| 0.2990 | 1.2343 | 0.2002 | 1.2805 | 0.2077 |
| 0.4863 | 1.2710 | 0.2062 | 1.3185 | 0.2139 |
| 0.7474 | 1.2608 | 0.2045 | 1.3080 | 0.2122 |
| 0.9371 | 1.2379 | 0.2008 | 1.2842 | 0.2083 |
| 1.0000 | 1.2303 | 0.1996 | 1.2763 | 0.2070 |

表 C. 4 CANIS-J改良後のK値, F値の計算結果 (モデル2-3-2, 本解析の1例)

MODEL 2-3-2 K0 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 1 TIME= 0.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 5.1732 | 0.8392 | 5.3665 | 0.8706 |
| 0.0240 | 5.1153 | 0.8298 | 5.3065 | 0.8608 |
| 0.1014 | 4.9286 | 0.7995 | 5.1128 | 0.8294 |
| 0.1988 | 5.0679 | 0.8221 | 5.2573 | 0.8529 |
| 0.2990 | 5.3671 | 0.8707 | 5.5677 | 0.9032 |
| 0.4863 | 5.9357 | 0.9629 | 6.1575 | 0.9989 |
| 0.7474 | 6.5237 | 1.0583 | 6.7675 | 1.0978 |
| 0.9371 | 6.7115 | 1.0888 | 6.9623 | 1.1295 |
| 1.0000 | 6.7738 | 1.0989 | 7.0269 | 1.1399 |

MODEL 2-3-2 K1 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 2 TIME= 1.000

| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 4.2894 | 0.6958 | 4.4497 | 0.7218 |
| 0.0240 | 4.1858 | 0.6790 | 4.3422 | 0.7044 |
| 0.1014 | 3.8518 | 0.6249 | 3.9958 | 0.6482 |
| 0.1988 | 3.6535 | 0.5927 | 3.7901 | 0.6148 |
| 0.2990 | 3.4596 | 0.5612 | 3.5888 | 0.5822 |
| 0.4863 | 3.2194 | 0.5223 | 3.3398 | 0.5418 |
| 0.7474 | 2.7966 | 0.4537 | 2.9012 | 0.4706 |
| 0.9371 | 2.6474 | 0.4295 | 2.7464 | 0.4455 |
| 1.0000 | 2.5980 | 0.4214 | 2.6951 | 0.4372 |

MODEL 2-3-2 K2 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 3 TIME= 2.000

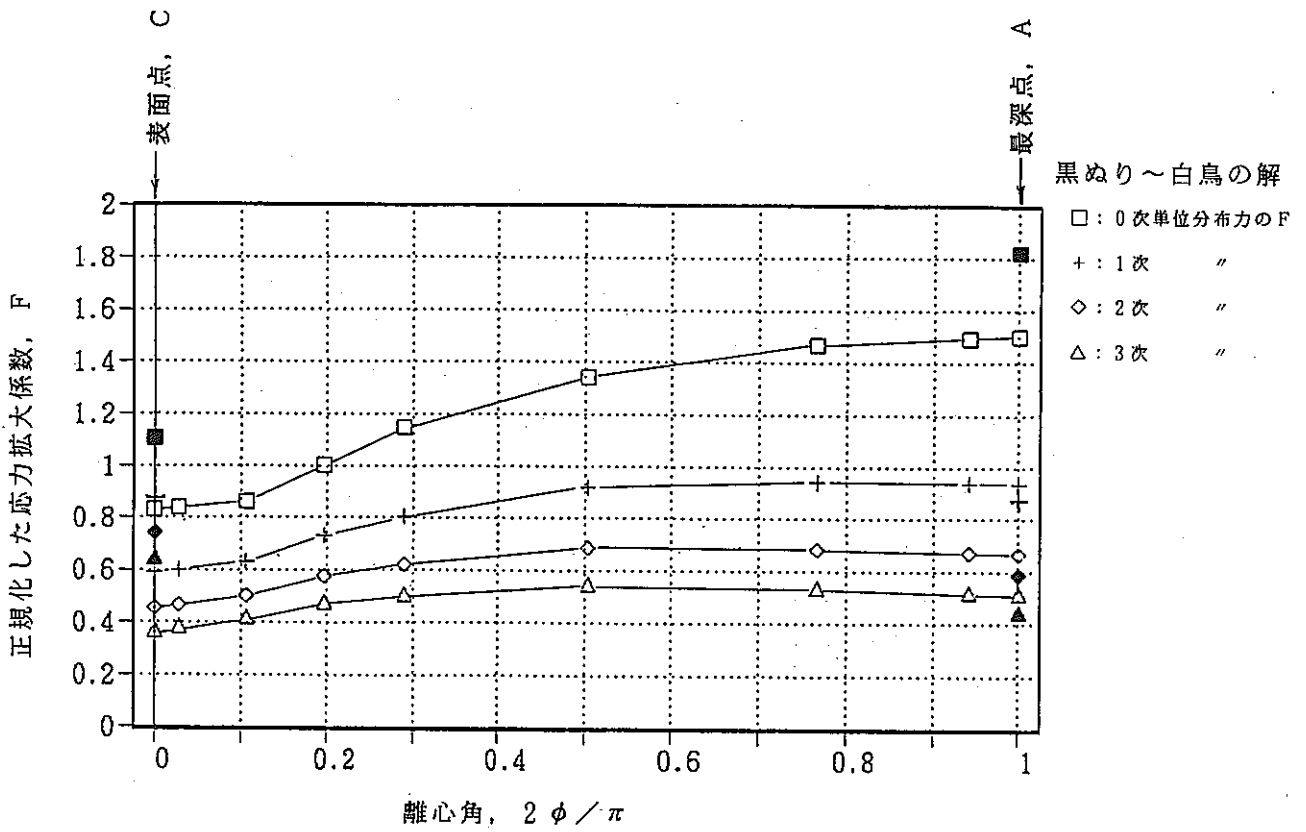
| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 3.7516 | 0.6086 | 3.8918 | 0.6313 |
| 0.0240 | 3.6128 | 0.5861 | 3.7478 | 0.6080 |
| 0.1014 | 3.1650 | 0.5134 | 3.2833 | 0.5326 |
| 0.1988 | 2.7837 | 0.4516 | 2.8877 | 0.4685 |
| 0.2990 | 2.4302 | 0.3942 | 2.5210 | 0.4090 |
| 0.4863 | 2.0416 | 0.3312 | 2.1179 | 0.3436 |
| 0.7474 | 1.7530 | 0.2844 | 1.8185 | 0.2950 |
| 0.9371 | 1.6920 | 0.2745 | 1.7552 | 0.2847 |
| 1.0000 | 1.6718 | 0.2712 | 1.7343 | 0.2813 |

MODEL 2-3-2 K3 T/R= 0.4000 A/T= 0.4000 A/B= 0.4000

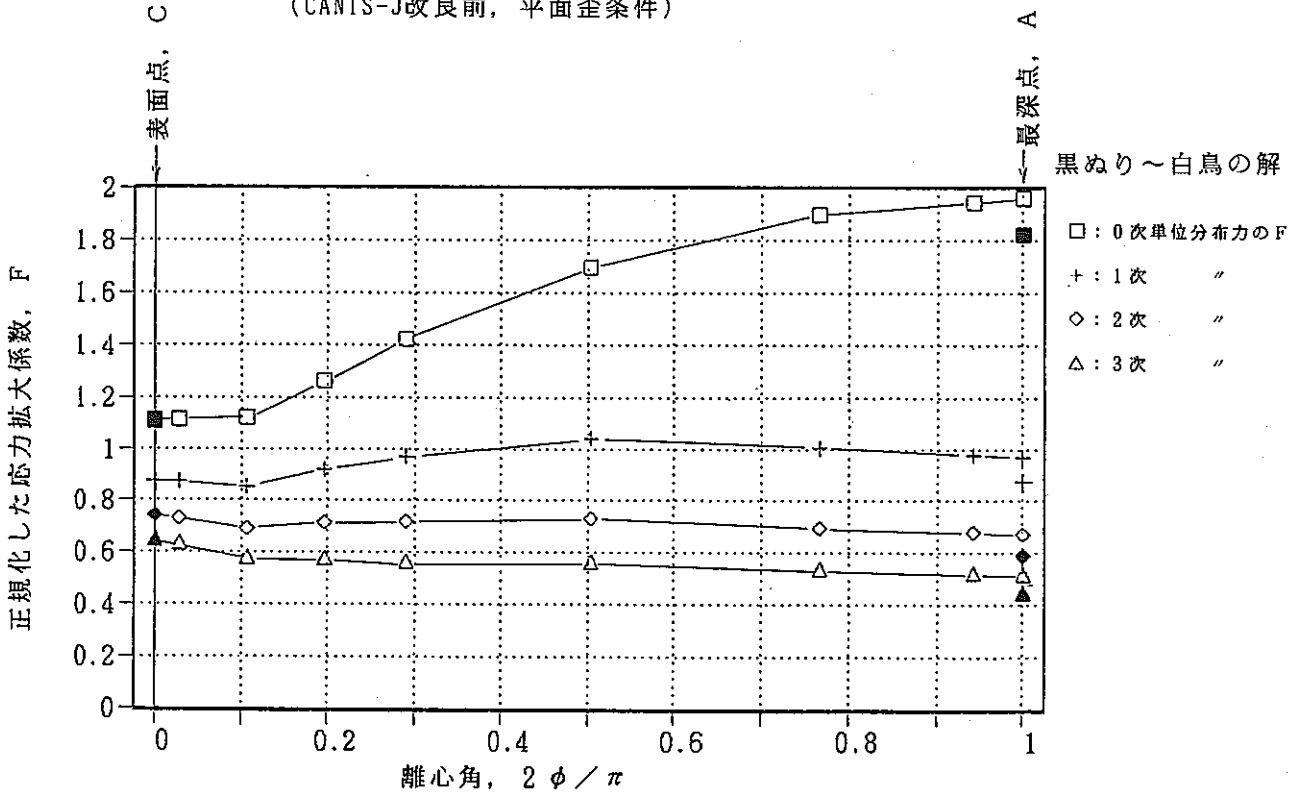
K,F VALUE ALONG CRACK FRONT

STEP= 4 TIME= 3.000

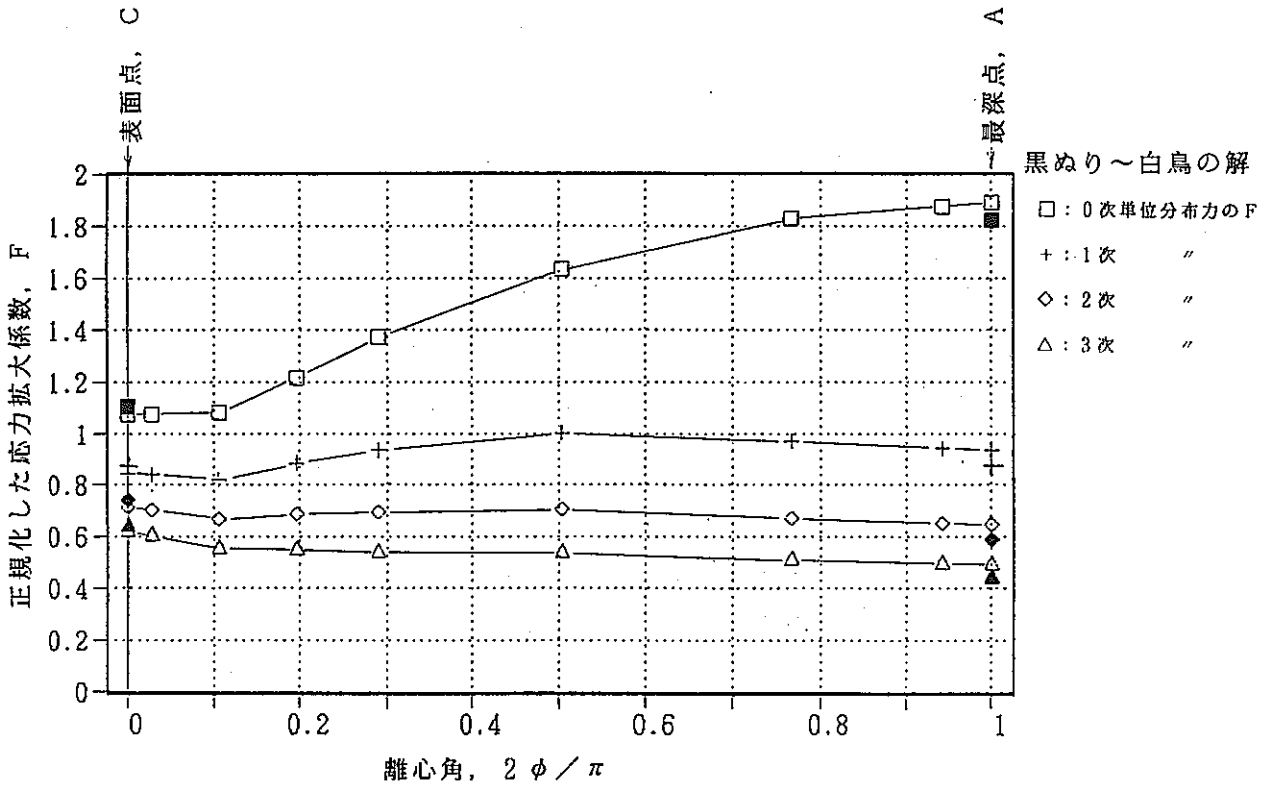
| 2*PHI/PAI | K | F | K | F |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0000 | 3.3753 | 0.5476 | 3.5015 | 0.5680 |
| 0.0240 | 3.2093 | 0.5206 | 3.3293 | 0.5401 |
| 0.1014 | 2.6739 | 0.4338 | 2.7738 | 0.4500 |
| 0.1988 | 2.1988 | 0.3567 | 2.2810 | 0.3700 |
| 0.2990 | 1.8163 | 0.2946 | 1.8842 | 0.3057 |
| 0.4863 | 1.4606 | 0.2369 | 1.5152 | 0.2458 |
| 0.7474 | 1.2925 | 0.2097 | 1.3408 | 0.2175 |
| 0.9371 | 1.2535 | 0.2033 | 1.3003 | 0.2109 |
| 1.0000 | 1.2405 | 0.2012 | 1.2869 | 0.2088 |



図C.1 き裂前縁に沿った正規化した応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較
(CANIS-J改良前, 平面歪条件)

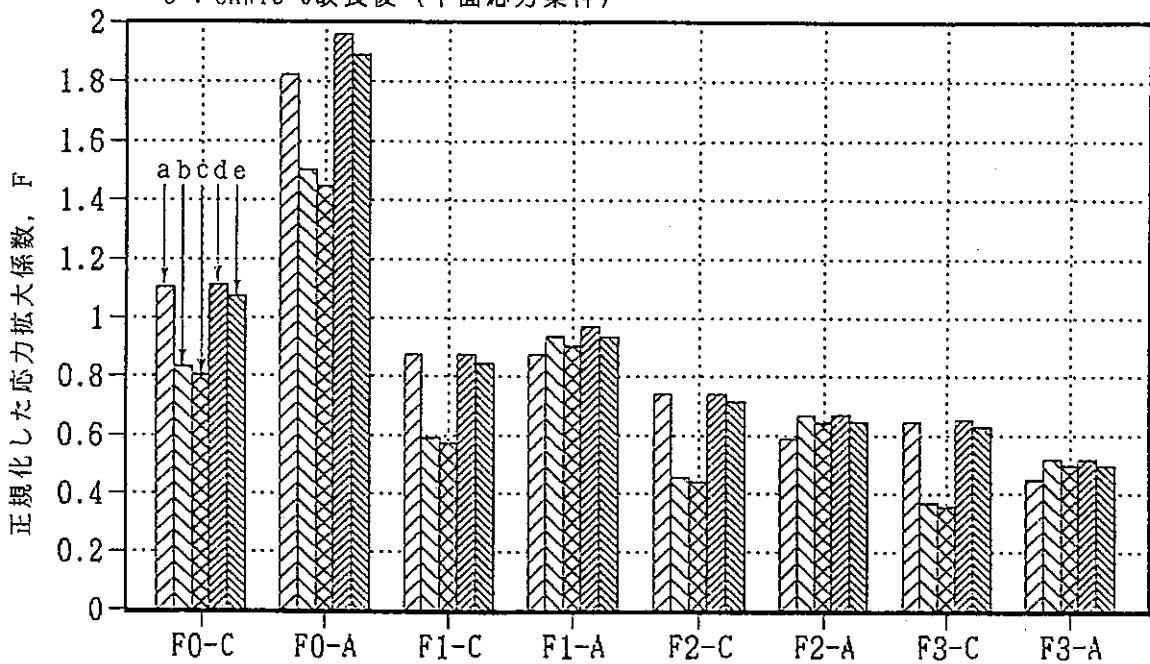


図C.2 き裂前縁に沿った正規化した応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較
(CANIS-J改良後, 平面歪条件)



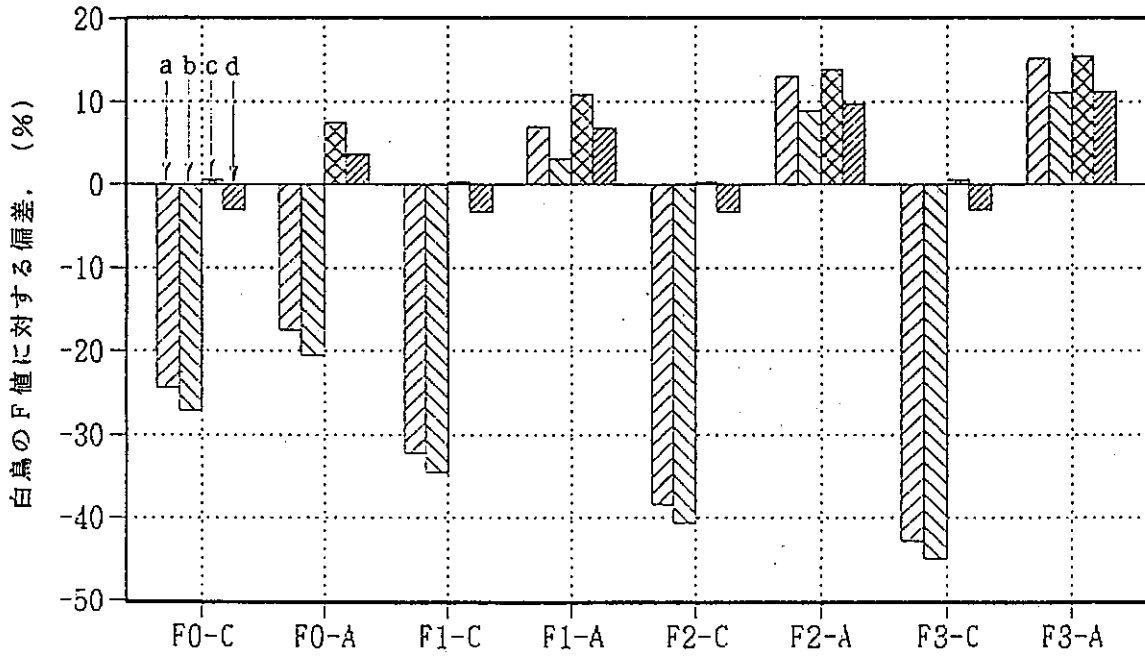
図C.3 き裂前縁に沿った正規化した応力拡大係数の分布と白鳥の解の比較 (CANIS-J改良後, 平面応力条件)

- a : 白鳥の解
- b : CANIS-J改良前 (平面歪条件)
- c : CANIS-J改良前 (平面応力条件)
- d : CANIS-J改良後 (平面歪条件)
- e : CANIS-J改良後 (平面応力条件)



図C.4 き裂表面点 (C), 最深点 (A) での0次 (F0) ~ 3次 (F3) の単位分布力下の正規化した応力拡大係数

- a : 白鳥の解
- b : CANIS-J改良前 (平面歪条件)
- c : CANIS-J改良前 (平面応力条件)
- d : CANIS-J改良後 (平面歪条件)
- e : CANIS-J改良後 (平面応力条件)



図C.5 き裂表面点 (C), 最深点 (A) での0次 (F0) ~ 3次 (F3) の単位分布力下の正規化した応力拡大係数の白鳥の解に対する偏差

付録-D 変位法によるF値の解析結果

付録Dとして、変位法により算出したF値の挙動を取りまとめておく。本編第4章の検証解析に対する検討において、今回CANIS-GのF値データベースとしては変位法による結果よりもCANIS-Jで計算したF値の方が妥当と判断されたため、本資料はあくまで参考データ資料の位置づけである。なお、ここで取り扱う変位法による結果は本編第5章の表5-5, 6に掲載したデータである。

図D.1 変位法により算出したき裂最深点(A)での正規化応力拡大係数F

図D.2 変位法により算出したき裂表面点(B)での正規化応力拡大係数F

図D.3 変位法により算出したき裂最深点(A)でのF値の、CANIS-Jの結果に対する比

図D.4 変位法により算出したき裂表面点(B)でのF値の、CANIS-Jの結果に対する比

図D.5 変位法により算出したき裂最深点(A)でのF値の、白鳥の解に対する比

図D.6 変位法により算出したき裂表面点(B)でのF値の、白鳥の解に対する比

図D.1～図D.4には参考資料として変位法により算出したF値と、それらのCANIS-Jの結果に対する比を示す。前述のように、レファレンス解析条件での検討によりCANIS-Jの結果を正と判断しているため、ここでは変位法による計算結果に含まれる誤差の検討の位置づけとして取り扱う。

図D.1, D.2には変位法により算出したき裂最深点とき裂表面点でのF値を示すが、単位分布力の次数、き裂深さ、アスペクト比の変化に対するF値の挙動はCANIS-Jの結果（本編第5章図5-21, 22）および白鳥の解（同図5-23, 24）に類似している。

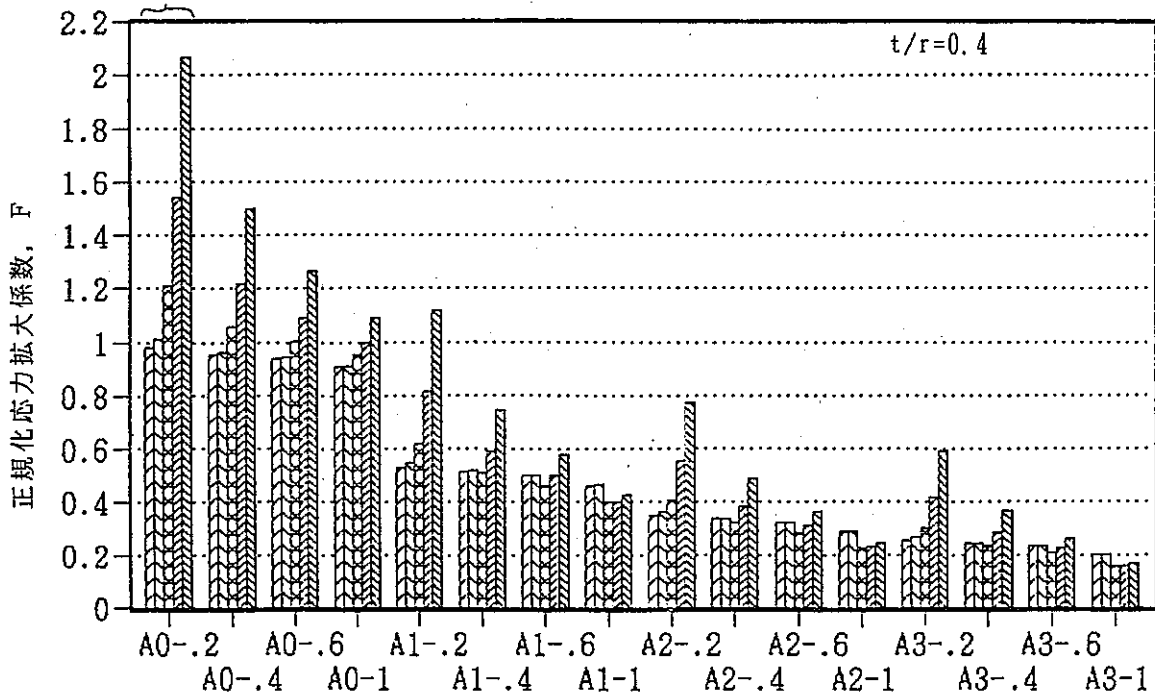
図D.3, D.4には変位法により算出したき裂最深点とき裂表面点でのF値の、CANIS-Jの結果に対する比を示す。き裂最深点（図D.3）については0次の単位分布力下では10%以内の偏差で収まっているが、1次以上の単位分布力下では浅いき裂の高アスペクト比側で偏差が大きくなる傾向にある（最大80%）。一方、き裂表面点（図D.4）については全ケースとも20%以内の偏差に収まっている。

以上、変位法により算出したF値は、き裂表面点については比較的精度が良いが、き裂最深点については精度が落ちると判断される。

図D.5, D.6は白鳥の解（ $t/r=0.1$ ）に対する、今回の解析で得られた変位法による正規化応力拡大係数F値（ $t/r=0.4$ ）の比を示した図であり、図D.5がき裂最深点での、図D.6がき裂表面点でのものである。

これらの図はあくまで参考データであり、仮に変位法が正しいと判断された場合の本編第5章の図5-25, -26に代わる図である。

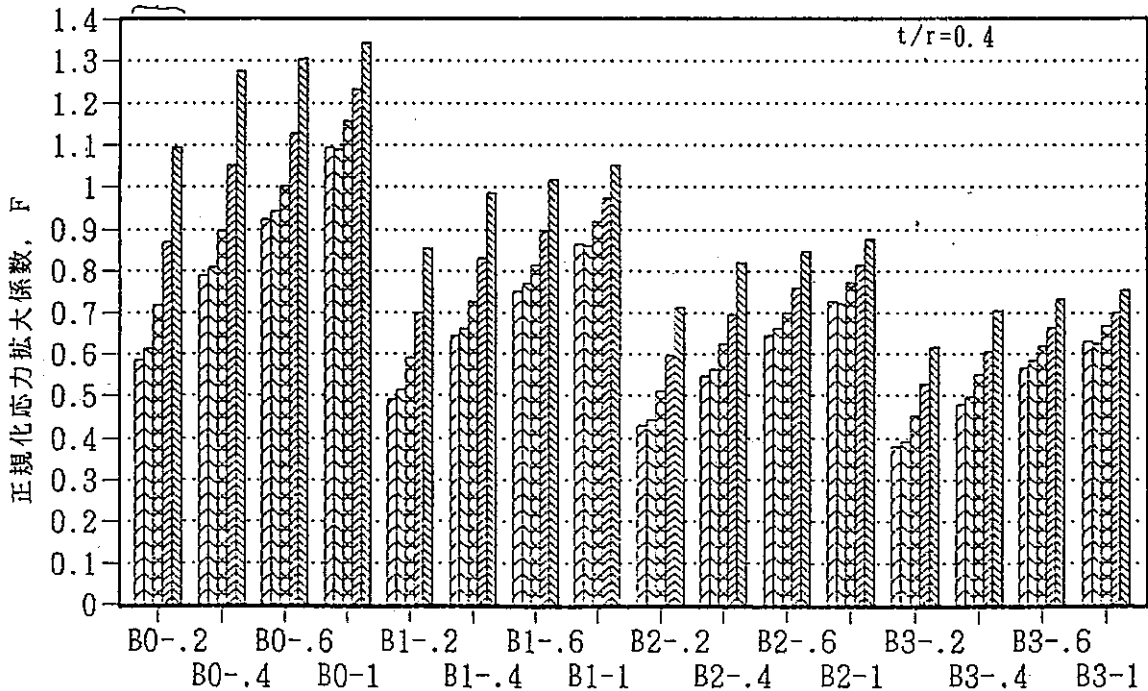
5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値



図D.1 変位法により算出した円筒内表面軸方向半楕円き裂の最深点 (A) での正規化応力拡大係数 F

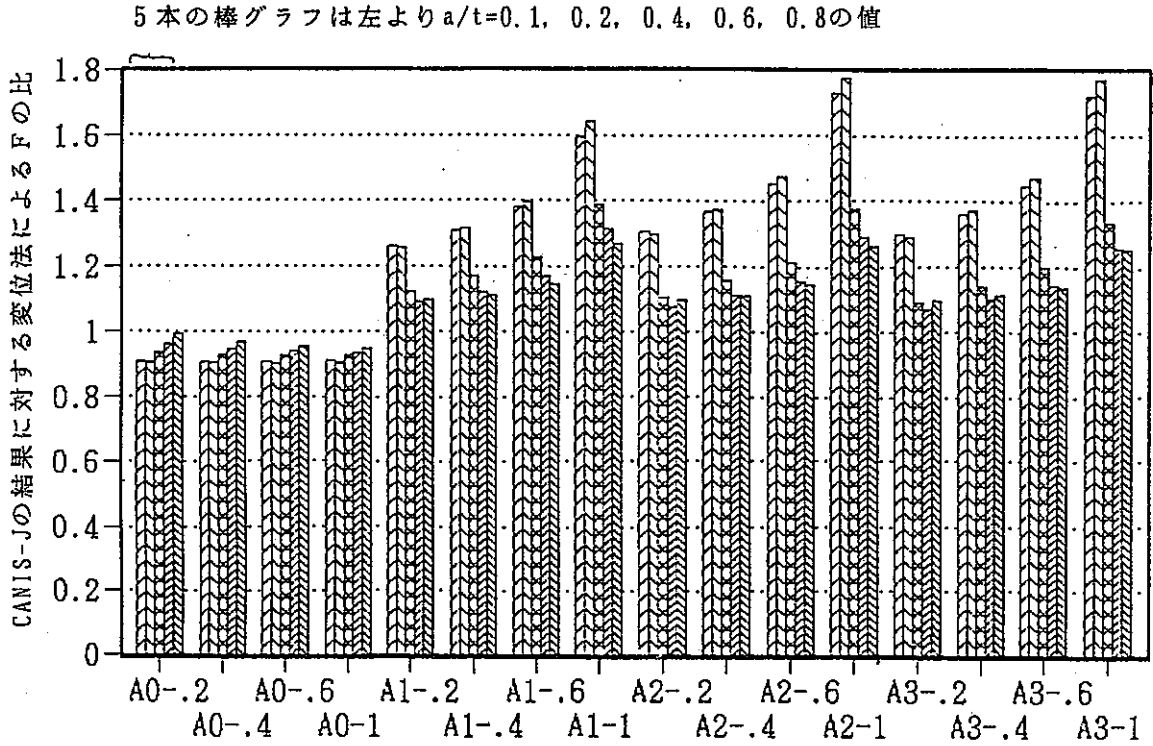
(記号AI-Xは I が単位分布力の次数, Xがアスペクト比 (a/b) を表わす)

5本の棒グラフは左より $a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の値

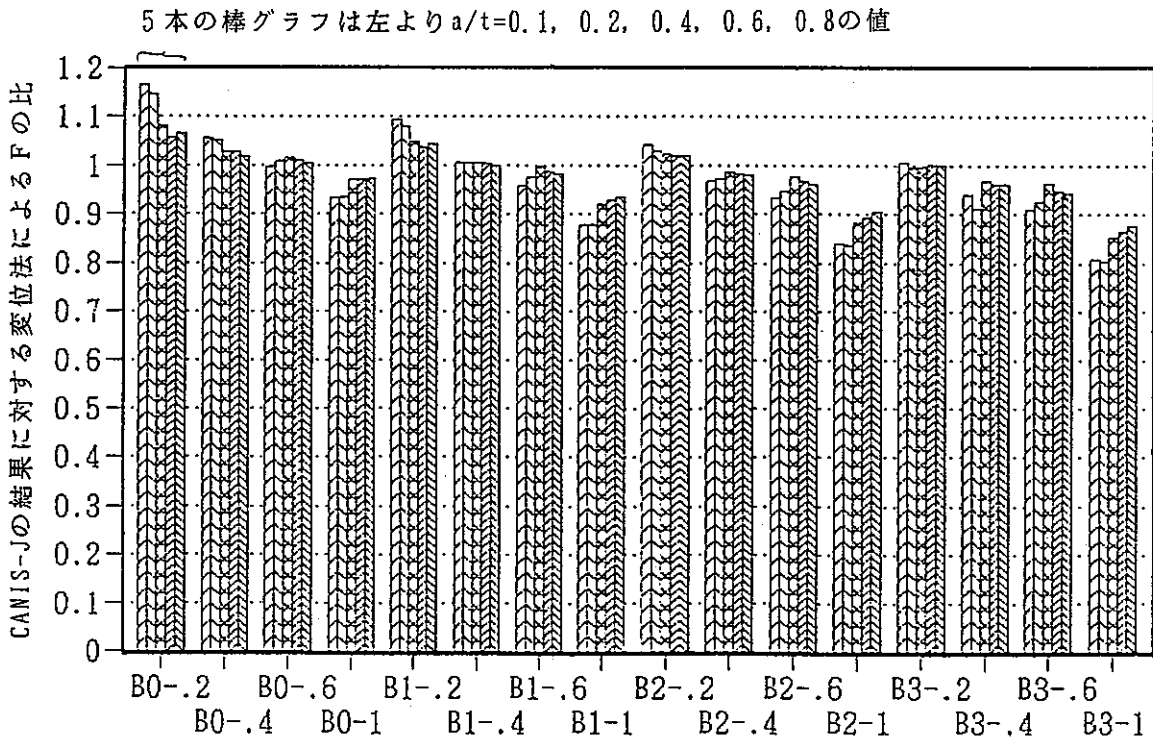


図D.2 変位法により算出した円筒内表面軸方向半楕円き裂の表面点 (B) での正規化応力拡大係数 F

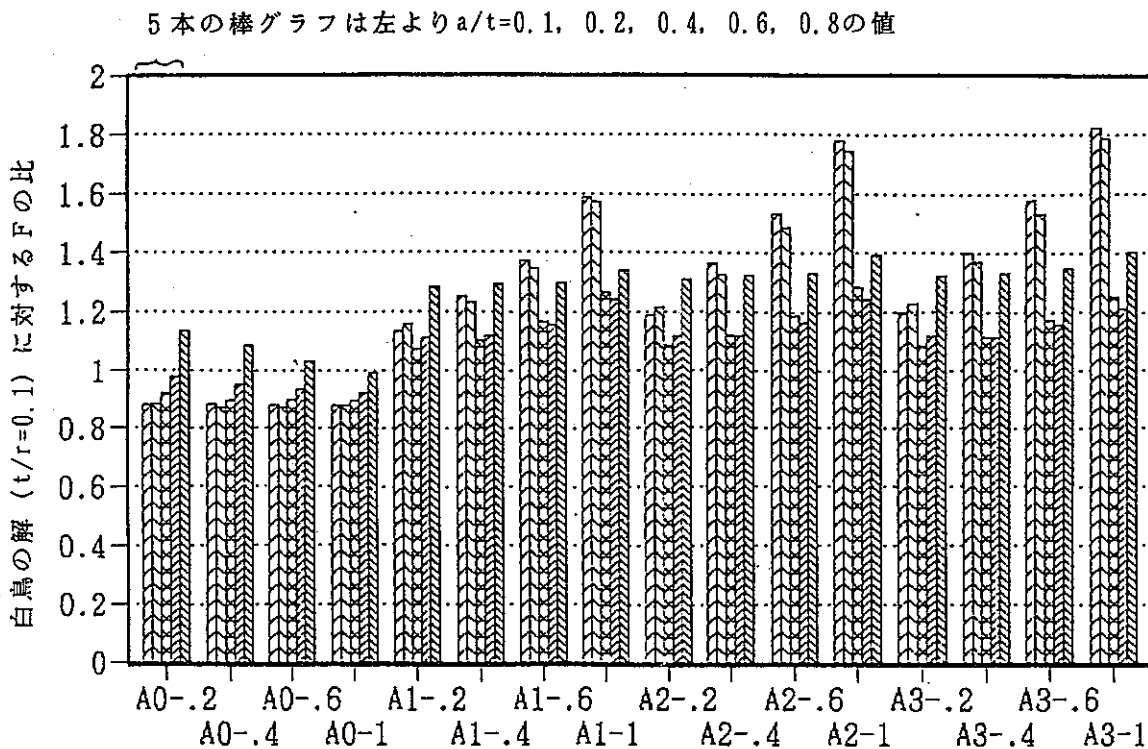
(記号BI-Xは I が単位分布力の次数, Xがアスペクト比 (a/b) を表わす)



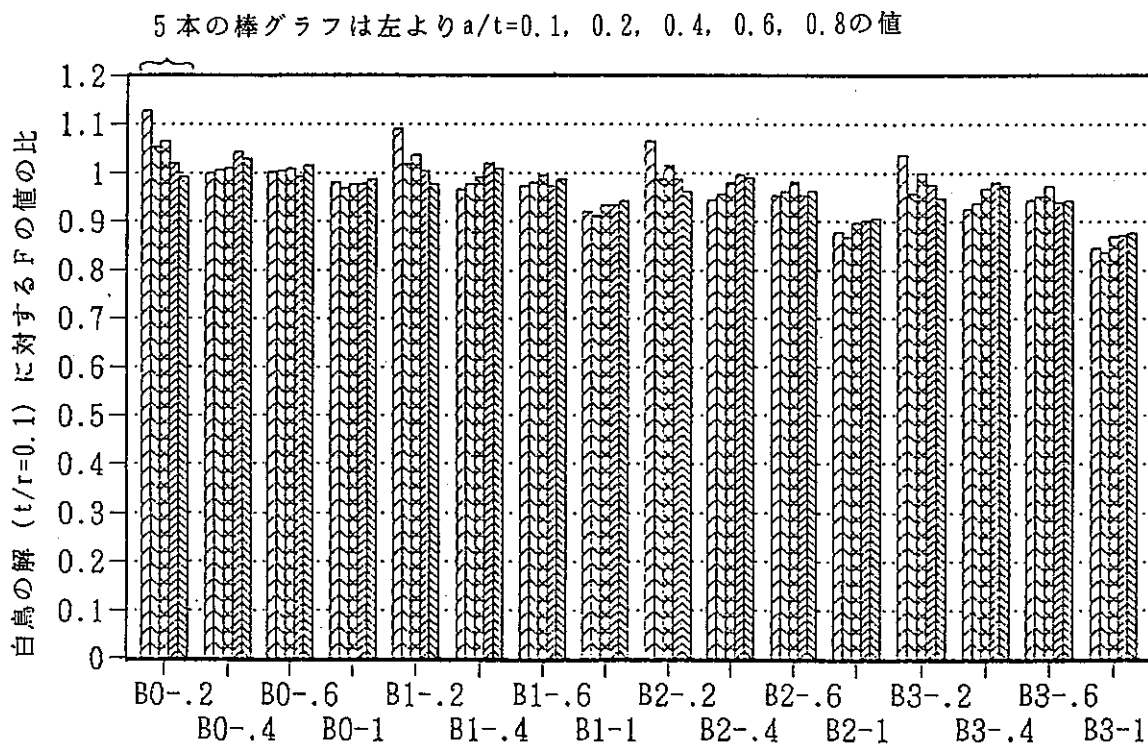
図D.3 変位法により算出したき裂最深点 (A) での正規化応力拡大係数 F のCANIS-J による結果に対する比
 (記号AI-Xは I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)



図D.4 変位法により算出したき裂表面点 (B) での正規化応力拡大係数 F のCANIS-J による結果に対する比
 (記号BI-Xは I が単位分布力の次数, X がアスペクト比 (a/b) を表わす)



図D.5 変位法により算出したき裂最深点(A)での正規化応力拡大係数Fの白鳥の解 (t/r=0.1) に対する比 本結果はt/r=0.4でのもの (記号AI-XはIが単位分布力の次数, Xがアスペクト比(a/b)を表わす)



図D.6 変位法により算出したき裂表面点(B)での正規化応力拡大係数Fの白鳥の解 (t/r=0.1) に対する比 本結果はt/r=0.4でのもの (記号BI-XはIが単位分布力の次数, Xがアスペクト比(a/b)を表わす)

付録－E 解析に使用したデータセットについて

付録Eには、今回の解析としてFINAS, CANIS-Jでの計算に使用した入力データおよびJC L, F 値の分布のプロット用入力データの一覧表を添付する。また、合わせてオリジナルのCANIS-J ソースプログラムに追加した若干の計算機能とそれらのプログラム上の修正箇所、内容について添付した。

追加した機能は以下のとおりである。

- ① 変位法によるK値、F値の計算機能
- ② F値の膜成分(F_m)、曲げ成分(F_b)および放物線ピーク成分(F_p)の計算機能

表 E.1 FINAS, CANIS-Jでの計算に使用したデータセットの一覧表

図 E.1 CANIS-J の修正箇所と修正内容

表 E.1 「FINAS」, 「CANIS-J」の計算で使ったデータセット一覧表

「FINAS」 JCL:POD2B17.CRACK1.DATA(¥FJCL)
 「CANIS-J」 JCL:POD2B17.CANISJ.DATA(¥CJCL)、ソースプログラム:POD2B17.CRACK.FORT(CANIS2)

| き裂形状 | | | | | | CRACK1.DATA | | CMT | | | CANISJ.DATA | CPLOTF.DATA | |
|------|--------------------------|-------------------|------|----------|--------|-------------|--------|---------|----------|-----|-------------|------------------------|------------|
| a/t | a/b | t/r* ¹ | t | a | b | モデルデータ | 荷重データ | ポスト名 | CMT Vol. | Pos | CANIS-J データ | プロット用入力データ | PLOT用データ |
| 0.8 | 0.2 | 0.1 | 10 | 8 | 40 | MODEL11 | M1#1 | SPOS11 | TANA21 | 3 | CRACK11 | C11, S11* ² | CXY11.DATA |
| 0.1 | 0.2 0.4 0.6 1.0 | 0.4 | 40 | 4 | 20 | MODEL211 | M2#1#1 | SPOST11 | TANA22 | 3 | CRACK211 | C21 | CXY21.DATA |
| | | | | | 10 | MODEL212 | M2#1#2 | SPOST12 | TANA23 | 3 | CRACK212 | | |
| | | | | | 6.66 | MODEL213 | M2#1#3 | SPOST13 | TANA24 | 3 | CRACK213 | | |
| | | | | | 4 | MODEL214 | M2#1#4 | SPOST14 | TANA25 | 3 | CRACK214 | | |
| 0.2 | 0.2 0.4 0.6 1.0 | | | 8 | 40 | MODEL221 | M2#2#1 | SPOST21 | TANA22 | 6 | CRACK221 | C22 | CXY22.DATA |
| | | | | | 20 | MODEL222 | M2#2#2 | SPOST22 | TANA23 | 6 | CRACK222 | | |
| | | | | | 13.3 | MODEL223 | M2#2#3 | SPOST23 | TANA24 | 6 | CRACK223 | | |
| | | | | | 8 | MODEL224 | M2#2#4 | SPOST24 | TANA25 | 6 | CRACK224 | | |
| 0.4 | 0.2 0.4 0.6 1.0 | | | 16 | 80 | MODEL231 | M2#3#1 | SPOST31 | TANA26 | 3 | CRACK231 | C23 | CXY23.DATA |
| | | | | | 40 | MODEL232 | M2#3#2 | SPOST32 | TANA27 | 3 | CRACK232 | | |
| | | | | | 26.6 | MODEL233 | M2#3#3 | SPOST33 | TANA28 | 3 | CRACK233 | | |
| | | | | | 16 | MODEL234 | M2#3#4 | SPOST34 | TANA29 | 3 | CRACK234 | | |
| 0.6 | 0.2 0.4 0.6 1.0 | 24 | 120 | MODEL241 | M2#4#1 | SPOST41 | TANA22 | 9 | CRACK241 | C24 | CXY24.DATA | | |
| | | | 60 | MODEL242 | M2#4#2 | SPOST42 | TANA23 | 9 | CRACK242 | | | | |
| | | | 40 | MODEL243 | M2#4#3 | SPOST43 | TANA24 | 9 | CRACK243 | | | | |
| | | | 24 | MODEL244 | M2#4#4 | SPOST44 | TANA25 | 9 | CRACK244 | | | | |
| 0.8 | 0.2 0.4 0.6 1.0 | 32 | 160 | MODEL251 | M2#5#1 | SPOST51 | TANA26 | 6 | CRACK251 | C25 | CXY25.DATA | | |
| | | | 80 | MODEL252 | M2#5#2 | SPOST52 | TANA27 | 6 | CRACK252 | | | | |
| | | | 53.3 | MODEL253 | M2#5#3 | SPOST53 | TANA28 | 6 | CRACK253 | | | | |
| | | | 32 | MODEL254 | M2#5#4 | SPOST54 | TANA29 | 6 | CRACK254 | | | | |

* 1 r = 100 (内半径)

* 2 白鳥の解との重ね書き用入力データ

| 修正ルーチン名 | PR POS I |
|---------|--|
| 003522 | II = 0 |
| 003523 | DO 3200 L = 1, NPOS+2 |
| 003524 | IF (L.EQ.1 .OR. L.EQ.NPOS+2) THEN |
| 003525 | II = II+ 1 |
| 003526 | WRITE(LUPR,8210) OIH(I),OKV1(L),OFV1(L),OKV2(L), |
| 003527 | AKDISP(II),OFV2(L),AFDISP(II) |
| 003528 | ELSE |
| 003529 | WRITE(LUPR,8215) OIH(L),OKV1(L),OFV1(L),OKV2(L),OFV2(L) |
| 003530 | ENDIF |
| 003531 | 3200 CONTINUE |
| 003532 | C |
| 003533 | WRITE(LUPR,8220) |
| 003534 | C |
| 003535 | WRITE(LUPR,8020) H1,H2,H3,H4, TBR,ADT,ADD, ISIP(I),TIME(I) |
| 003536 | DO 3300 J = 1, 2 |
| 003537 | WRITE(LUPR,8300) LABL(J) |
| 003538 | NP = HDSP(J) |
| 003539 | DO 3300 K = 1, NP |
| 003540 | WRITE(LUPR,8310) DLNG(K,J),ODSP(K,J) |
| 003541 | 3300 CONTINUE |
| 003542 | WRITE(LUPR,8320) |
| 003543 | C |
| 003544 | IF (I.EQ.NSIP) THEN |
| 003545 | DO 8325 J = 2, 1, -1 |
| 003546 | IF (J.EQ.2) THEN |
| 003547 | WRITE(LUPR,8330) FM(J),FB(J),FP(J) |
| 003548 | ELSE |
| 003549 | WRITE(LUPR,8335) FM(J),FB(J),FP(J) |
| 003550 | ENDIF |
| 003551 | 8325 CONTINUE |
| 003552 | ENDIF |
| 003553 | C |
| 003554 | WRITE(LUXY,8301) |
| 003555 | 8301 FORMAT('Y') |

* 6 表面部及び最深部出力時のみ、AKDISP、AFDISP
を出力

* 7 FM、FB、FPを出力

図E.1 「CANIS-J」の修正箇所及び修正内容（続き）

付録-F 別冊内部資料について

本解析で出力した図表類は大部に及ぶため、別冊内部資料としてまとめている。その内容のリストを次頁に示す。

各き裂形状におけるグラフの構成は以下の順になっている。

- ① 構造体図
- ② Von-Mises 応力コンター図 (UNIFORM応力分布)
- ③ $\sigma-\theta$ 応力コンター図 (UNIFORM応力分布)
- ④ Von-Mises 応力コンター図 (LINEAR応力分布)
- ⑤ $\sigma-\theta$ 応力コンター図 (LINEAR応力分布)
- ⑥ Von-Mises 応力コンター図 (QUADRATIC応力分布)
- ⑦ $\sigma-\theta$ 応力コンター図 (QUADRATIC応力分布)
- ⑧ Von-Mises 応力コンター図 (CUBIC応力分布)
- ⑨ $\sigma-\theta$ 応力コンター図 (CUBIC応力分布)
- ⑩ き裂前縁に沿った応力分布 (UNIFORM応力分布)
- ⑪ き裂前縁に沿った応力分布 (LINEAR応力分布)
- ⑫ き裂前縁に沿った応力分布 (QUADRATIC応力分布)
- ⑬ き裂前縁に沿った応力分布 (CUBIC応力分布)
- ⑭ 応力拡大係数K値の分布
- ⑮ 応力拡大係数F値の分布
- ⑯ き裂半長方向のき裂開口変位
- ⑰ き裂深さ方向のき裂開口変位

付録-G 今後のデータ拡充の方向について

付録Gとして、今後のデータ拡充の方向について示す。

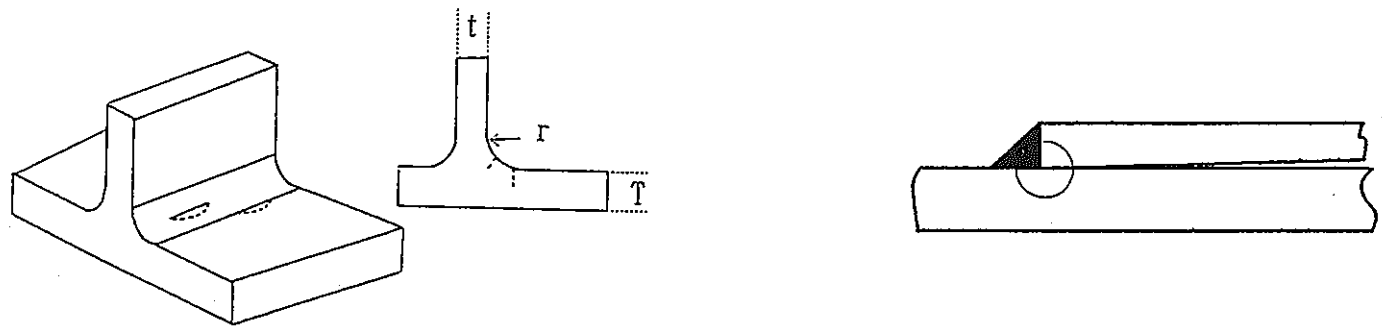
図 G.1 今後データ拡充の期待される問題

表 G.1 現状CANIS-Gの軸方向無限長さ裂のK値解

図 G.1に示される今後データ拡充の期待されるき裂の問題のうち、(1)の位置づけとして本解析が実施された。(3)、(4)のき裂は、同図左下および右下に示されるようなき裂である。また、(2)については現在CANIS-Gにおいて表 G.1に示されるK値を採用しているが、近年MUNZらにより内・外表面軸方向き裂付き円筒のK値解が示されている。これについては、付録-Iに示す。

More information needed for CANIS-G completion

- (1) Cylinder with circumferential and axial semi-elliptical surface crack especially for large t/R .
- (2) Cylinder with one-side crack.
- (3) T-butt weldment configuration (Corner crack) \Rightarrow Left side figure
- (4) So-called crack like defect \Rightarrow Right side figure



図G.1 今後データ拡大の期待される問題

表G.1 現状CANIS-Jの軸方向無限長き裂のK値解

Cylinder with axial infinite crack

Based on the work of Labbens et al. ASTM STP 590(1976) using weight function method.

| a/t | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| F_M | 1.120 | 1.150 | 1.330 | 1.979 | 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 |

For application, the CANIS-G interpolates tabulated values.

付録-H MGNZらの半楕円表面き裂付き平板のK値解

付録Hには、MGNZらの半楕円表面き裂付き平板のK値解を文献とともに示す。既にC A N I S - Gに組み込まれている Newman & Rajuらの解との比較検討を実施する予定である。

表 H.1 半楕円表面き裂表面点での形状係数 F_a の値

表 H.2 半楕円表面き裂最深点での形状係数 F_b の値

表 H.3 式(17)の係数 C_{ij} の値

図 H.1 形状係数 F_b の低次での文献値と高次への外挿値

表 H. 1 半楕円表面き裂表面点での形状係数 F_n の値Table 1. Geometric function F_n for the surface points of the semi-ellipse

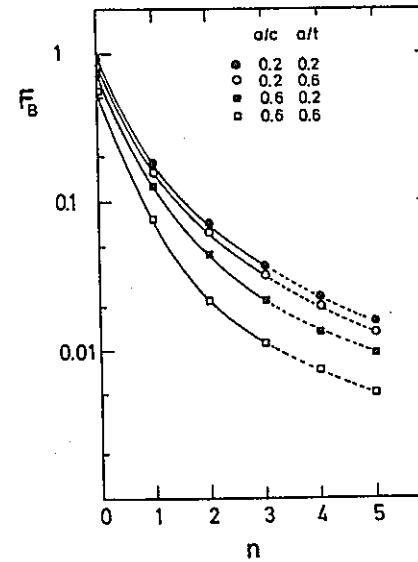
| n | a/c | $a/t = 0$ | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0 | 0.20 | 0.5159 | 0.5540 | 0.6549 | 0.8396 | 1.1433 |
| 0 | 0.40 | 0.6727 | 0.7039 | 0.7917 | 0.9212 | 1.1472 |
| 0 | 0.60 | 0.7232 | 0.7474 | 0.8031 | 0.9339 | 1.0702 |
| 0 | 0.80 | 0.7300 | 0.7490 | 0.7951 | 0.9010 | 0.9950 |
| 0 | 1.00 | 0.7156 | 0.7289 | 0.7767 | 0.8391 | 0.9174 |
| 1 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 1 | 0.20 | 0.0685 | 0.0762 | 0.0990 | 0.1571 | 0.2427 |
| 1 | 0.40 | 0.1043 | 0.1138 | 0.1391 | 0.1825 | 0.2442 |
| 1 | 0.60 | 0.1175 | 0.1246 | 0.1449 | 0.1802 | 0.2178 |
| 1 | 0.80 | 0.1240 | 0.1260 | 0.1440 | 0.1670 | 0.1930 |
| 1 | 1.00 | 0.1178 | 0.1229 | 0.1331 | 0.1483 | 0.1668 |
| 2 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2 | 0.20 | 0.0171 | 0.0219 | 0.0390 | 0.0628 | 0.0990 |
| 2 | 0.40 | 0.0322 | 0.0382 | 0.0530 | 0.0739 | 0.0973 |
| 2 | 0.60 | 0.0392 | 0.0439 | 0.0564 | 0.0721 | 0.0870 |
| 2 | 0.80 | 0.0410 | 0.0455 | 0.0542 | 0.0655 | 0.0763 |
| 2 | 1.00 | 0.0414 | 0.0446 | 0.0503 | 0.0579 | 0.0662 |
| 3 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 3 | 0.20 | 0.0086 | 0.0114 | 0.0190 | 0.0324 | 0.0552 |
| 3 | 0.40 | 0.0152 | 0.0183 | 0.0265 | 0.0382 | 0.0521 |
| 3 | 0.60 | 0.0192 | 0.0219 | 0.0290 | 0.0372 | 0.0470 |
| 3 | 0.80 | 0.0210 | 0.0230 | 0.0282 | 0.0332 | 0.0416 |
| 3 | 1.00 | 0.0216 | 0.0229 | 0.0255 | 0.0293 | 0.0350 |
| 4 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.20 | 0.0053 | 0.0074 | 0.0121 | 0.0201 | 0.0343 |
| 4 | 0.40 | 0.0088 | 0.0107 | 0.0159 | 0.0241 | 0.0315 |
| 4 | 0.60 | 0.0114 | 0.0135 | 0.0176 | 0.0230 | 0.0286 |
| 4 | 0.80 | 0.0130 | 0.0138 | 0.0173 | 0.0205 | 0.0255 |
| 4 | 1.00 | 0.0136 | 0.0143 | 0.0154 | 0.0178 | 0.0223 |
| 5 | 0.00 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5 | 0.20 | 0.0038 | 0.0051 | 0.0078 | 0.0133 | 0.0226 |
| 5 | 0.40 | 0.0058 | 0.0071 | 0.0109 | 0.0168 | 0.0209 |
| 5 | 0.60 | 0.0078 | 0.0095 | 0.0120 | 0.0157 | 0.0197 |
| 5 | 0.80 | 0.0095 | 0.0100 | 0.0120 | 0.0145 | 0.0172 |
| 5 | 1.00 | 0.0096 | 0.0101 | 0.0106 | 0.0119 | 0.0153 |

表 H. 2 半楕円表面き裂最深点での形状係数 F_n の値Table 2. Geometric function F_n for the deepest point of the semi-ellipse

| n | a/c | $a/t = 0$ | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
|-----|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.00 | 1.1225 | 1.3801 | 2.1061 | 4.0246 | 11.918 |
| 0 | 0.20 | 1.0532 | 1.1061 | 1.3051 | 1.5716 | 1.7011 |
| 0 | 0.40 | 0.9385 | 0.9570 | 1.0460 | 1.1460 | 1.1900 |
| 0 | 0.60 | 0.8330 | 0.8410 | 0.8845 | 0.9300 | 0.9600 |
| 0 | 0.80 | 0.7410 | 0.7460 | 0.7710 | 0.8000 | 0.8200 |
| 0 | 1.00 | 0.6590 | 0.6630 | 0.6780 | 0.6920 | 0.6970 |
| 1 | 0.00 | 0.6817 | 0.7837 | 1.0592 | 1.7504 | 4.4367 |
| 1 | 0.20 | 0.6063 | 0.6397 | 0.7244 | 0.8148 | 0.8796 |
| 1 | 0.40 | 0.5796 | 0.5945 | 0.6310 | 0.6680 | 0.6978 |
| 1 | 0.60 | 0.5487 | 0.5539 | 0.5680 | 0.5868 | 0.6050 |
| 1 | 0.80 | 0.5100 | 0.5120 | 0.5190 | 0.5310 | 0.5480 |
| 1 | 1.00 | 0.4705 | 0.4730 | 0.4794 | 0.4864 | 0.4965 |
| 2 | 0.00 | 0.5240 | 0.5820 | 0.7347 | 1.1046 | 2.4838 |
| 2 | 0.20 | 0.4434 | 0.4674 | 0.5245 | 0.5711 | 0.6140 |
| 2 | 0.40 | 0.4337 | 0.4459 | 0.4746 | 0.4954 | 0.5214 |
| 2 | 0.60 | 0.4254 | 0.4301 | 0.4419 | 0.4543 | 0.4755 |
| 2 | 0.80 | 0.4110 | 0.4125 | 0.4160 | 0.4220 | 0.4360 |
| 2 | 1.00 | 0.3874 | 0.3877 | 0.3896 | 0.3960 | 0.4048 |
| 3 | 0.00 | 0.4395 | 0.4781 | 0.5779 | 0.8137 | 1.6651 |
| 3 | 0.20 | 0.3570 | 0.3741 | 0.4198 | 0.4483 | 0.4807 |
| 3 | 0.40 | 0.3525 | 0.3633 | 0.3886 | 0.4068 | 0.4276 |
| 3 | 0.60 | 0.3510 | 0.3588 | 0.3707 | 0.3805 | 0.3994 |
| 3 | 0.80 | 0.3460 | 0.3520 | 0.3555 | 0.3620 | 0.3750 |
| 3 | 1.00 | 0.3365 | 0.3370 | 0.3385 | 0.3419 | 0.3487 |
| 4 | 0.00 | 0.3855 | 0.4135 | 0.4850 | 0.6510 | 1.2352 |
| 4 | 0.20 | 0.3020 | 0.3142 | 0.3480 | 0.3770 | 0.3990 |
| 4 | 0.40 | 0.3015 | 0.3104 | 0.3323 | 0.3500 | 0.3672 |
| 4 | 0.60 | 0.3005 | 0.3090 | 0.3200 | 0.3313 | 0.3461 |
| 4 | 0.80 | 0.2997 | 0.3060 | 0.3090 | 0.3165 | 0.3260 |
| 4 | 1.00 | 0.2990 | 0.2994 | 0.3000 | 0.3037 | 0.3088 |
| 5 | 0.00 | 0.3473 | 0.3688 | 0.4233 | 0.5477 | 0.9772 |
| 5 | 0.20 | 0.2685 | 0.2770 | 0.3040 | 0.3270 | 0.3430 |
| 5 | 0.40 | 0.2675 | 0.2733 | 0.2917 | 0.3093 | 0.3239 |
| 5 | 0.60 | 0.2665 | 0.2710 | 0.2850 | 0.2951 | 0.3101 |
| 5 | 0.80 | 0.2662 | 0.2700 | 0.2782 | 0.2840 | 0.2950 |
| 5 | 1.00 | 0.2660 | 0.2690 | 0.2710 | 0.2735 | 0.2777 |

表H.3 式(17)の係数 C_{ij} の値

| Table 3. Coefficients C_{ij} for eq. (17) | | | | |
|---|-----|---------|----------|---------|
| n | i | $j=1$ | 2 | 3 |
| 0 | 1 | 1.1473 | -0.5819 | 0.0920 |
| 0 | 2 | 4.3333 | -10.2657 | 6.1650 |
| 0 | 3 | -3.2113 | 7.5773 | -4.5653 |
| 1 | 1 | 0.6257 | -0.0866 | -0.0684 |
| 1 | 2 | 1.8226 | -4.5240 | 2.7672 |
| 1 | 3 | -1.3965 | 3.6188 | -2.2505 |
| 2 | 1 | 0.4476 | -0.0046 | -0.0556 |
| 2 | 2 | 1.1277 | -2.6306 | 1.5132 |
| 2 | 3 | -0.8983 | 2.2250 | -1.3032 |
| 3 | 1 | 0.3540 | 0.0166 | -0.0339 |
| 3 | 2 | 0.8137 | -1.6779 | 0.8679 |
| 3 | 3 | -0.6699 | 1.4863 | -0.7967 |
| 4 | 1 | 0.3020 | 0.0050 | -0.0079 |
| 4 | 2 | 0.5622 | -0.9119 | 0.3526 |
| 4 | 3 | -0.4572 | 0.8071 | -0.3339 |
| 5 | 1 | 0.2706 | -0.0105 | 0.0068 |
| 5 | 2 | 0.3600 | -0.4090 | 0.0841 |
| 5 | 3 | -0.2778 | 0.3602 | -0.1043 |

Fig. 1 Geometric function F_B for $n=0, 1, 2, 3$ and extrapolations to $n=4, 5$.図H.1 形状係数 F_B の低次での文献値と高次への挿入値

REFERENCES

- [1] J. C. Newman and I. S. Raju, An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack. *Engng Fracture Mech.* 15, 185-192 (1981).
- [2] J. C. Newman and I. S. Raju, Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads. *NASA Technical Paper 1578* (1979).
- [3] M. Isida, H. Noguchi and T. Yoshida, Tension and bending of finite thickness plates with a semi-elliptical surface crack. *Int. J. Fracture* 26, 157-188 (1984).
- [4] M. Shiratori, T. Miyoshi and K. Tanikawa, Analysis of stress intensity factors for surface cracks subjected to arbitrarily distributed surface stresses. *Trans. Japan Soc. Mech. Engrs* 52, 390-398 (1986).
- [5] V. Murakami *et al*, *Stress Intensity Factors Handbook*. Pergamon Press, Oxford, U.K. (1987).
- [6] I. S. Raju and J. C. Newman, Internal and external surface cracks in cylindrical vessels, *Stress Intensity Factors Handbook*, 751-758. Pergamon Press, Oxford, U.K. (1987).
- [7] H. Bueckner, A novel principle for the computation of stress intensity factors. *ZAMM* 50, 529-546 (1970).
- [8] T. Fett, A weight function for the single edge crack based-on approximate displacement fields. *Theor. and Appl. Fracture Mech.* 8, 169-172 (1987).
- [9] T. Fett, C. Mattheck and D. Munz, Approximate weight function for 2D and 3D-problems. *Engng Analysis with Boundary Elements* 6, 48-63 (1989).

LOCAL STRESS INTENSITY FACTORS FOR SURFACE CRACKS IN PLATES UNDER POWER-SHAPED STRESS DISTRIBUTIONS

T. FETT, D. MUNZ and J. NEUMANN

Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Material- und Festkörperforschung IV

Abstract—The stress intensity factors under arbitrary stress distributions can be easily calculated approximating the given stress by polynomials. Therefore, geometric functions for semi-elliptical surface cracks under power-shaped stress distributions were derived from literature data for the exponents $n = 0, \dots, 3$ from literature data and extended to the aspect ratio $a/c = 0$. By a special extrapolation procedure values for $n = 4$ and 5 were obtained. The results are given in tables which are appropriate for interpolation by cubic splines and by approximative formulae.

1. INTRODUCTION

ONE POSSIBILITY of determining stress intensity factors for components under arbitrary stresses is the so-called weight-function method. This method is often applied especially in cases of one-dimensional cracks. If two-dimensional cracks are involved, the weight functions are available only for the simplest load cases (e.g. an elliptical crack in an infinite body under tension). The introduction of "averaged weighted stress intensity factors" is a helpful means of extending the weight function method to complex components and load cases. A second procedure to calculate local stress intensity factors is based on the reduction of a given load in simple basic load cases for which the stress intensity factors have to be determined, e.g. by finite element calculations. The simplest basic load cases are those with power shaped stress distributions

$$\sigma_n = C_n \left(\frac{x}{t} \right)^n \quad (1)$$

and more complex stress distributions can be composed by polynomials

$$\sigma = \sum_{(n)} C_n \left(\frac{x}{t} \right)^n. \quad (2)$$

To guarantee good agreement of stress polynomial and real stress a sufficiently high number of power solutions is necessary.

In this investigation the semi-elliptical surface crack is treated where the coordinate x is the distance from the surface and t is the thickness of the plate. Figure 1 shows the geometrical quantities. The stress intensity factors for the basic loads can be superimposed which results in

$$K_I = \sqrt{a\pi} \sum_{(n)} C_n F_n \left(\frac{a}{t} \right)^n. \quad (3)$$

2. SOLUTIONS FROM THE LITERATURE

In the literature stress intensity factors for power stresses up to $n = 3$ are available. The geometric functions F_n may be defined by

$$K_{in} = \sigma^* F_n \sqrt{a\pi} \left(\frac{a}{t}\right)^n \quad (4)$$

where σ^* is a characteristic stress value, for example the stress at $x = t$. For crack growth and failure predictions the stress intensity factors at the deepest point (subscript A) and at the surface points (subscript B) are of interest. The geometric function F_0 is given by the pure tension load case and outlined in detail in [1-3]. From bending results also described in [1-3] F_1 can be obtained as

$$F_1 = \frac{1}{2}(F_0 - F_{\text{bending}}). \quad (5)$$

The values F_2 and F_3 for some values of a/t and a/c can be derived from [4]. In this reference stress distributions of the type

$$\sigma_n = D_n \left(1 - \frac{x}{a}\right)^n \quad (6)$$

are investigated resulting in geometric functions F_n^* . Based on these data, the F_2 and F_3 are given by

$$F_2 = F_0^* - 2F_1^* + F_2^* \quad (7.1)$$

and

$$F_3 = F_0^* - 3F_1^* + 3F_2^* - F_3^*. \quad (7.2)$$

This reevaluation gives trustworthy results only in case of the deepest point (A). In case of point B relatively small values F_2 , F_3 are obtained on the order of about 3-10% of the F_n^* -values used in eqs (7.1, 7.2). Since all used solutions F_n^* have numerical errors of several per cent, error propagation causes an increase in the absolute error of the resulting geometric functions. Therefore, the relative errors for point B are intolerably high. To obtain values for points B , FEM-results published by Newman and Raju [6] for inner and outer surface cracks in tubes under power-shaped stresses and ratios of wall thicknesses t to tube radii R of 0.1 and 0.25 were extrapolated to $t/R = 0$.

3. DETERMINATION OF SOLUTIONS FOR $n = 4$ AND 5

For thermal stresses and other special applications the solutions F_0, \dots, F_3 are not sufficient to characterize the real stress shape. Therefore, an extension of available solutions is necessary. To determine F_4 and F_5 the known solutions were extrapolated by two methods.

Graphic method

For points B the logarithms of F_n were plotted against the number n which resulted in monotonically decreasing curves easily extendable to $n = 4$ and 5 . Figure 1 shows some examples. The results are introduced in Table 1.

Analytical method

For point A an analytical approximation was used. The procedure is demonstrated for F_4 . First the power x^4 was approximated by the best third degree polynomial

$$x^4 \simeq C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3. \quad (8)$$

In terms of least squares this polynomial results from the condition

$$\int_0^1 (C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 - x^4)^2 dx = \min \quad (9)$$

and by taking the derivatives with respect to the parameters C_0, \dots, C_3 it results from

$$\frac{\partial}{\partial C_n} \int_0^1 (C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 - x^4)^2 dx = 0 \quad (10)$$

a system of 4 equations with the solution

$$C_0 = -1/70, \quad C_1 = 2/7, \quad C_2 = -9/7, \quad C_3 = 2. \quad (11)$$

The maximum deviations between the polynomial and x^4 are less than 0.015. Thus, it follows for F_4

$$F_4 \simeq C_0F_0 + C_1F_1 + C_2F_2 + C_3F_3. \quad (12)$$

In the same way F_5 can be obtained with the coefficients

$$C_0 = 1/252, \quad C_1 = -5/42, \quad C_2 = 5/6, \quad C_3 = -20/9, \quad C_4 = 5/2. \quad (13)$$

The results are represented in Table 2.

4. THE LIMIT CASE $a/c \rightarrow 0$

The limit case of extremely shallow elliptical cracks with $a/c \rightarrow 0$ is given by the "edge crack". Since this limit is a one-dimensional crack, the weight function method can be applied. In this case, the stress intensity factor of an edge crack loaded by the stress $\sigma(x)$ is given by

$$K = \int_0^a h\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{t}\right) \sigma(x) dx \quad (14)$$

where h is the weight function depending only on the geometry of the crack-component configuration. Weight functions for numerous crack types and components are available in the literature. Especially in case of the edge notched beam Bueckner's weight function[7] is appropriate for relative crack sizes of $a/t \leq 0.6$. A solution for the range $a/t \leq 0.9$ has been developed by the authors[8, 9].

$$h(x, a) = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \frac{1}{\sqrt{1-\rho}} [1 + A_1(1-\rho) + A_2(1-\rho)^2 + A_3(1-\rho)^3] \quad (15)$$

where the coefficients are fitted by

$$A_1 = \frac{0.4523 + 1.1690 \frac{a}{t} + 8.5078 \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 13.6598 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + 4.4806 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{(1 - a/t)^{3/2}}$$

$$A_2 = \frac{0.7017 - 2.2134 \frac{a}{t} + 2.7344 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 4.6756 \left(\frac{a}{t}\right)^3 - 6.0185 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{(1 - a/t)^{5/2}}$$

$$A_3 = \frac{-0.3102 + 0.9970 \frac{a}{t} - 0.5156 \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 2.0149 \left(\frac{a}{t}\right)^3 - 1.8843 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{(1 - a/t)^{5/2}}$$

The evaluation of the integral eq. (15) leads to the geometric function

$$F_n = \frac{\sqrt{2}}{\pi} n! \left[\frac{\Gamma(1/2)}{\Gamma(n+3/2)} + A_1 \frac{\Gamma(3/2)}{\Gamma(n+5/2)} + A_2 \frac{\Gamma(5/2)}{\Gamma(n+7/2)} + A_3 \frac{\Gamma(7/2)}{\Gamma(n+9/2)} \right] \quad (16)$$

The geometric functions resulting from this equation are represented in Table 2. For point B it evidently holds that $F_n = 0$.

5. TABLES FOR INTERPOLATIONS AND APPROXIMATE FORMULAE

The extended Tables 1 and 2 are now a sufficient base for stress intensity factor calculation by parabolic interpolation in the ranges

$$0 \leq n \leq 5, \quad 0 \leq a/t \leq 0.8, \quad 0 \leq a/c \leq 1.$$

The interpolations can easily be performed with existing computer programs, for instance the IMSL-cubic-spline routines IBCIEU, ICSCCU and ICSEVU. To avoid unwanted oscillations the interpolation range should be restricted on the interval $0.2 \leq a/c \leq 1$.

The values of geometric function F_n for the deepest point of the semi-ellipse as listed in Table 2 can be represented within $\pm 2\%$ by the equations

$$F_n = C_1 + C_2 \left(\frac{d}{t} \right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{t} \right)^3 \quad (17.1)$$

with

$$C_i = C_{i1} + C_{i2} \left(\frac{a}{c} \right) + C_{i3} \left(\frac{a}{c} \right)^2 \quad (17.2)$$

for $(0.2 \leq a/c \leq n; a/t < 0.6)$.

The coefficients C_{ij} are given in Table 3. The accuracy of the geometric functions is estimated as: Point A: $< 2\%$ for $n = 1, 2, 3, 4$ and $\approx 3\%$ for $n = 5$; Point B: $< 2\%$ for $n = 1, 2, 3$, $< 3\%$ for $n = 4$ and $< 4\%$ for $n = 5$.

6. SUMMARY

Literature data on geometric functions for semi-elliptical surface cracks under power-shaped stress distributions were extended to exponents $n = 4$ and $n = 5$ using a special technique of extrapolation. The results are given in tables appropriate for interpolation by cubic splines and by approximative formulae. With these new data arbitrary stress distributions can be sufficiently approximated by polynomials.

付録-I MUNZらの内・外表面軸方向き裂付き円筒のK値解

付録 I には、MUNZらの内・外表面軸方向き裂付き円筒のK値解を示す。

表 I.1 円筒内表面軸方向き裂のべき乗応力分布下での形状係数

表 I.2 円筒外表面軸方向き裂のべき乗応力分布下での形状係数

図 I.1 内・外表面軸方向き裂付き円筒の寸法、き裂位置

図 I.2 円筒内表面軸方向き裂のべき乗応力分布下での形状係数

7.6.1 Tube with internal axial crack

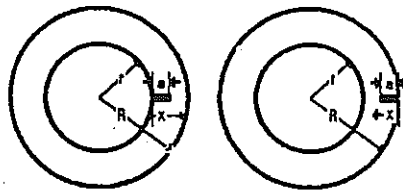


図 1.1 内・外表面軸方向き裂付き円筒の寸法、き裂位置

Fig.7.8 Geometric data of a tube with axial cracks

Data are based on Andrasic und Parker [7.1] for $R/r \geq 1.25$ and on the plane plate-solution-yielding the limit case $r/R \rightarrow 1$. The resulting curves, shown in Fig.7.9, are fitted by polynomials. In the representation

$$K_I = \sigma_n \sqrt{a} Y_n(r/R, \alpha) \quad \sigma(x) = \sigma_n \left(\frac{x}{R-r} \right)^n \quad (7.38)$$

the geometric function results with the coefficients given in Tables 7.9a-d as

$$Y_n = \frac{1}{(1-\alpha)^{3/2}} \sum A_{\mu\nu} \alpha^{\nu+n} (r/R)^\mu \quad (7.39)$$

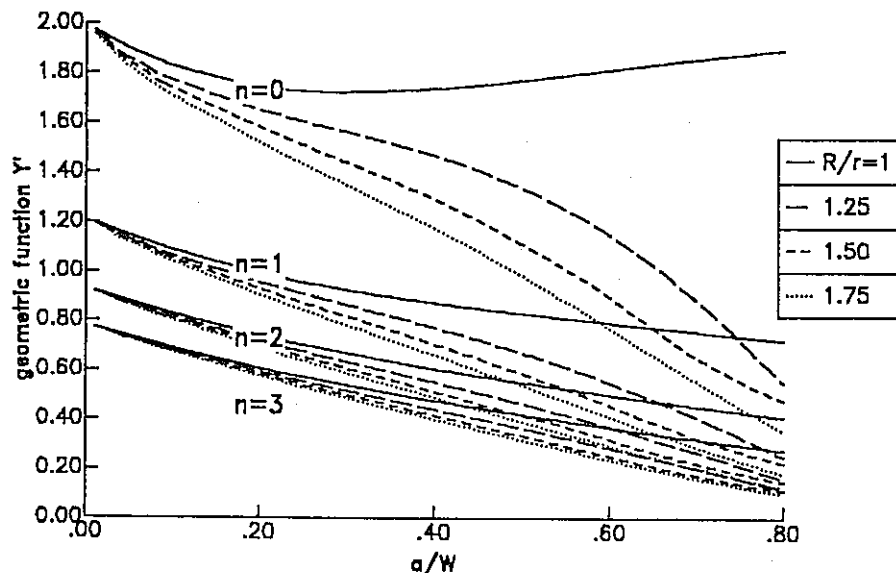


Abb.7.9 Geometric function for the internal (axial) crack under power-shaped stress distribution.

図 1.2 円筒内表面軸方向き裂のべき乗応力分布下での形状係数

表 I.1 円筒内表面軸方向き裂のべき乗応力分布下での形状係数

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 2.2069 | 16.933 | -126.67 | 293.43 | -123.665 |
| $\mu=1$ | -0.4700 | -38.366 | 276.042 | -604.97 | 239.28 |
| $\mu=2$ | 0.3293 | 24.729 | -184.51 | 389.60 | -142.3 |
| $\mu=3$ | -0.0765 | -5.431 | 40.716 | -83.399 | 28.584 |

Table 7.9a Coefficients for eq.(7.39) ($n=0$)

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 1.1902 | 8.7853 | -65.067 | 145.041 | -70.304 |
| $\mu=1$ | 0.0426 | -20.829 | 140.291 | -299.00 | 138.24 |
| $\mu=2$ | -0.0296 | 13.643 | -93.90 | 193.80 | -84.69 |
| $\mu=3$ | 0.0065 | -3.0148 | 20.716 | -41.575 | 17.312 |

Table 7.9b Coefficient for eq.(7.39) ($n=1$)

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 0.8513 | 6.0221 | -45.145 | 99.645 | -52.883 |
| $\mu=1$ | 0.1672 | -14.70 | 96.872 | -206.284 | 106.042 |
| $\mu=2$ | -0.1142 | 9.6891 | -65.079 | 135.261 | -67.146 |
| $\mu=3$ | 0.0256 | -2.1446 | 14.410 | -29.335 | 14.164 |

Table 7.9c Coefficients for eq.(7.39) ($n=2$)

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 0.7118 | 4.0775 | -32.106 | 71.523 | -39.756 |
| $\mu=1$ | 0.1442 | -10.419 | 68.863 | -148.31 | 80.262 |
| $\mu=2$ | -0.0974 | 6.879 | -46.324 | 97.670 | -51.381 |
| $\mu=3$ | 0.0216 | -1.5248 | 10.280 | -21.289 | 10.964 |

Table 7.9d Coefficients for eq.(7.39) ($n=3$)

表 I. 2 円筒外表面軸方向き裂のべき乗応力分布下での形状係数

7.6.2 Tube with external axial crack

Also in case of a tube with external crack eqs.(7.38) and (7.39) are applicable. In this case the origin of x is at the outer surface.

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 2.156 | 14.028 | -89.22 | 210.0 | -71.963 |
| $\mu=1$ | -0.3670 | -34.229 | 206.438 | -451.72 | 147.00 |
| $\mu=2$ | 0.2622 | 23.183 | -143.86 | 302.26 | -91.835 |
| $\mu=3$ | -0.0610 | -5.119 | 32.229 | -65.877 | 18.694 |

Table 7.10a Coefficients for eq.(7.39) (n=0)

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 1.1936 | 7.3065 | -47.627 | 105.31 | -44.803 |
| $\mu=1$ | 0.0249 | -18.337 | 106.37 | -222.57 | 90.209 |
| $\mu=2$ | -0.0095 | 12.331 | -72.862 | 147.35 | -56.315 |
| $\mu=3$ | 0.0008 | -2.715 | 16.15 | -31.827 | 11.465 |

Table 7.10b Coefficients for eq.(7.39) (n=1)

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 0.8571 | 5.247 | -35.34 | 77.25 | -38.68 |
| $\mu=1$ | 0.1487 | -13.418 | 77.769 | -163.22 | 79.501 |
| $\mu=2$ | -0.0969 | 9.035 | -53.20 | 109.13 | -51.68 |
| $\mu=3$ | 0.0210 | -1.996 | 11.832 | -23.871 | 11.031 |

Table 7.10c Coefficients for eq.(7.39) (n=2)

| | $A_{\mu 0}$ | $A_{\mu 1}$ | $A_{\mu 2}$ | $A_{\mu 3}$ | $A_{\mu 4}$ |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu=0$ | 0.7208 | 3.365 | -24.151 | 52.707 | -27.074 |
| $\mu=1$ | 0.1194 | -9.114 | 52.999 | -111.17 | 55.65 |
| $\mu=2$ | -0.0760 | 6.108 | -36.18 | 74.36 | -36.29 |
| $\mu=3$ | 0.0161 | -1.345 | 8.049 | -16.31 | 7.802 |

Table 7.10d Coefficients for eq.(7.39) (n=3)

Reference

- [7.1] C.P. Andrasic, A.P. Parker, Dimensionless stress intensity factors for cracked thick cylinders under polynomial crack face loadings, Engng. Fract. Mech. 19(1984),187-193.