構造解析の省力化を実現する 境界要素法応力解析システム

Boundary Element Stress Analysis System Realizing Labour-saving in Structure Analysis

構造解析でのデータ作成作業の大幅な低減を実現した境界要素法応力解析システム"BEMETHOD/2D"を開発した。本システムは、日立製作所で開発したデータ入出力を行う機械系統合プリ ポスト プロセッサHICAD/CADAS/W (Hitachi Computer Aided Design/Computer Aided Design Analysis of Structure System/Workstation)のもとで、ホストコンピュータおよびワークステーション上で活用が可能である。

解析機能としては、一般の応力解析のほかに、機械部品などの接触部の解析、 相対的に摺(しゅう)動している部分の解析、き裂部の強度評価解析、溶接欠陥 など構造欠陥の解析、平板中の小さな穴のような広い領域中の微小部分の解析、 熱による応力発生解析などがある。本システムは、定式化および数値積分など をくふうすることによって、解析の高精度化を実現している。また、接触解析 では、新しいアルゴリズムを採用し、従来手法に比べ約10倍の高速化を実現し ている。 江澤良孝* Yoshitaka Ezawa
岡本紀明* Noriaki Okamoto
小林久芳** Hisayoshi Kobayashi
中沢良夫** Yoshio Nakazawa

1 はじめに

構造物の設計を行うにあたって,数値構造解析は今や不可 欠なものとなっている。構造解析作業で, いちばん手間がか かるのが入力データの作成である。従来よく使われているFEM (有限要素法)は、入力データの作成で要素分割の作業量が非 常に多くなるという欠点を持っていた。これに対しBEM(境界 要素法)は、構造物の表面だけを要素分割すれば解析が可能と なる特長を持っており、大幅な作業量の低減が可能である1)。 特に,局所的に応力集中のある問題,例えば溶接欠陥のよう な構造欠陥応力,き裂応力,接触応力などの問題の解析には 効果が大きい。BEMETHOD/2Dは、このような特徴を持っ たBEMによる汎(はん)用二次元応力解析システムである。解 析プログラムは、スーパーコンピュータ用、汎用ホストコン ピュータ用およびワークステーション用があり、機械系統合 プリ ポスト プロセッサHICAD/CADAS/W (Hitachi Computer Aided Design/Computer Aided Design Analysis of Structure System/Workstation)のもとで動作する。

2 BEMETHOD/2Dの概要と特長

本システムは,次のような特長を持っている。

- (1) 解析対象の境界面だけを要素分割すればよく,入力データの作成が容易
- (2) 高い解析精度
- (3) 高速な計算
- (4) 一般応力解析以外の特殊な解析にも対応 解析機能は次のとおりである。
- (1) 一般二次元弹性応力解析
- (2) 接触応力解析
- (3) き裂・欠陥応力解析
- (4) 熱応力解析
- (5) 無限領域の解析

システムの全体構成は、図1のようになっている。入力データの作成は、ワークステーション2050G上のHICAD/CADAS/Wのプリプロセッサを用いて行う。作成された入力データは、ワークステーション上のデータベースに登録される。解析プログラムは、スーパーコンピュータ用、汎用ホストコンピュータ用およびワークステーション用があり、問題のサイズに応じて使い分けられる。大形コンピュータで解析するときは、作成入力データを大形コンピュータ上のデータ

^{*} 日立製作所 機械研究所 工学博士 ** 日立製作所 情報システム開発本部

ベースに転送して、解析を実行する。また、大形計算機上で解析した結果は、ワークステーションに転送し、HICAD/CADAS/Wのポストプロセッサを用いて出力する。

従来、境界要素解析で等応力線図を出力するときは、内部にセルと呼ばれる領域を生成する必要があった。しかし、セルの生成に手間がかかると、BEMの内部の要素分割が不要という長所がなくなりかねない。そこで、BEMETHOD/2Dでは、内部セルを自動生成し、簡単に等高線図が得られるようにしている。

3 解析精度の向上

BEMは、構造全体の変位uと表面力tの関係を表す境界積分 方程式を求め、それを離散化した連立方程式を解く手法であ る。BEMの解析精度は、この式の境界積分の精度に大きく依 存する。数値積分方法としては、Legendre-Gauss積分公式が 有名である。しかし、この方法では物体表面に近い場所の値 (応力など)を求めるときに、解の精度が極端に悪くなり、解 が発散するという問題があった。そこで、BEMETHOD/2D

ホスト BEMETHOD/2D 転送 ファイル ホスト ファイル転送 2050G プリプロセッサ HICAD/CADAS/W インタフェース CAE用 データ BEMETHOD/2D ファイル インタフェース ポストプロセッサ HICAD/CADAS/W

注:略語説明 BEMETHOD/2D (境界要素法応力解析システム), 2050G (ワークステーション2050G), HICAD/CADAS/W (Hitachi Computer Aided Design/Computer Aided Design Analysis of Structure System/Workstation), CAE (Computer Aided Engineering)

図 I BEMETHOD/2Dのシステム構成 ワークステーション版とホストコンピュータ版の 2 種から成り,両者はCAE用データファイルを介して連結される。

では、精度の出にくい特異性を持った積分に対しては、従来よく使われていたLegendre-Gauss積分公式の代わりに、より適した二重指数関数形積分公式を導入した²⁾。

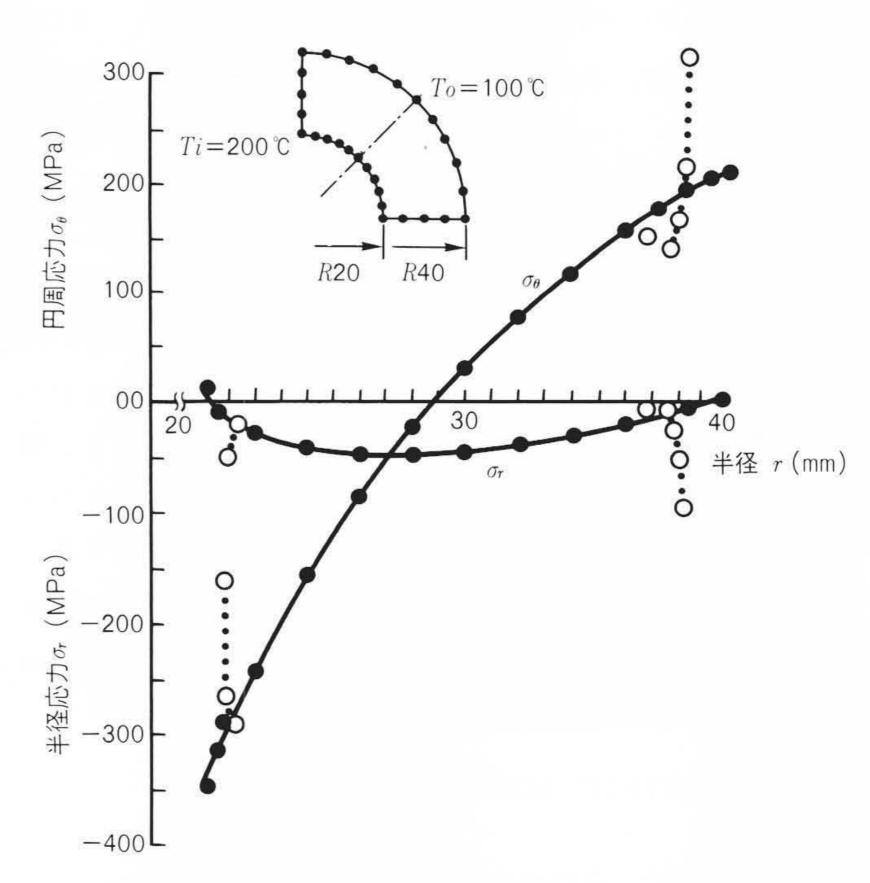
中空円筒が内外表面を熱伝達によって熱せられたときの内側での熱応力を求めたものを図2に示す。Legendre-Gauss積分公式を用いた手法では、内外表面近くで解が発散しているのに対し、二重指数関数形積分公式を用いたBEMETHOD/2Dの解は、厳密解と非常によく一致していることがわかる。

さらにBEMETHOD/2Dでは、境界積分方程式そのものにも改良を加えている。従来の境界積分方程式は、力の平衡条件を自動的に満足するようにはなっていなかったため、解析精度に問題が生じることがあった。そこでBEMETHOD/2Dでは、Lagrangeの未定乗数法を用いて、自動的に満足するようにした。

片持ばりの変形解析を、従来形の積分方程式を用いた場合と改良形の方程式を用いた場合で比較したものを図3、4および表1に示す。図4から本システムが、従来形の解析よりも精度がよいことがわかる。

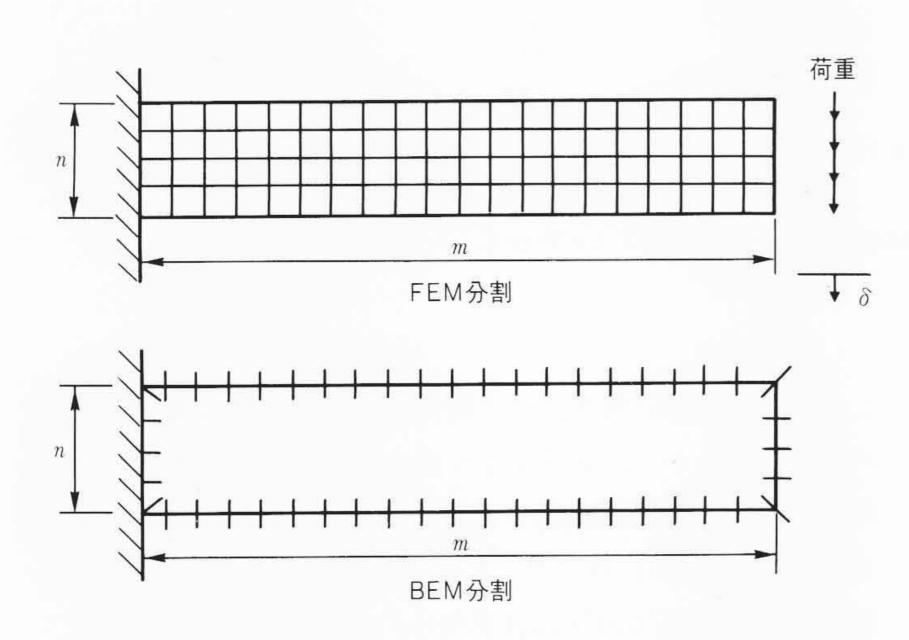
4 計算時間の短縮

接触応力解析では、接触状態が荷重と変形に依存するため、 非線形問題となる。したがって、接触状態を求めるための反 復計算が不可欠であり、計算時間が長くなる原因となってい た。そこでBEMETHOD/2Dでは、接触解析を行うにあたっ て、接合ブロックの概念を導入した³)。これは、隣り合うブロ



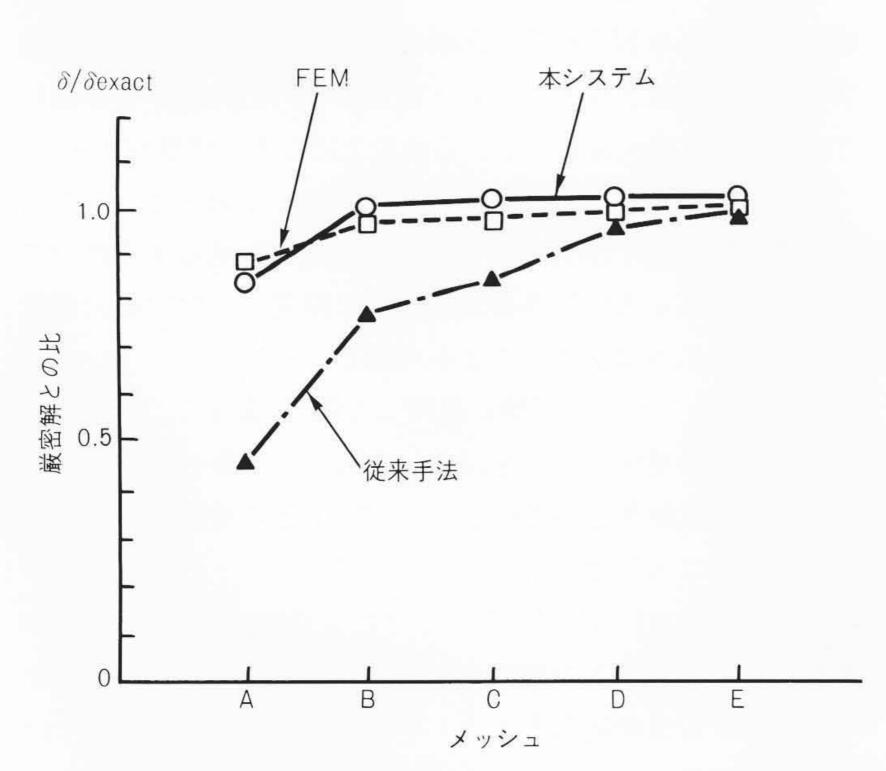
注:記号など説明 — 厳密解, ● BEMETHOD/2D, O 従来法(ガウス)

図2 厚肉円筒の熱応力 45度の断面上の内部点応力分布を示す。 従来法では表面近傍で解が発散するのに対し、本システムでは厳密解と よく一致する。 ックどうしを結合したり、分離したりする機能を持った特殊なブロックである。反復計算時には、この接合ブロックの特性だけを修正するようにした。さらに、反復時の連立方程式の求解計算では、スーパーコンピュータを使った反復過程の高速化技法を開発し、BEMETHOD/2Dに組み込んだ。これは通常、係数マトリックスは、微小変形の仮定を用いることができるときは、反復計算時の変化はほんのわずかであることに注目した手法である。すなわち、反復時には変化成分が解に与える影響ベクトルだけを計算するようにした。影響べ



注:略語説明 FEM (有限要素法),BEM (境界要素法),n (縦方向分割数),m (横方向分割数), δ (変位)

図3 片持ばりの変形解析 はりの一端を固定し、他端に下向き荷重をかけたときの変形を解析する。本システムでは、表面だけを要素分割する。



注:略語説明 δ (変位の解析解), δ exact (変位の厳密解)

図 4 曲げ変形の精度比較 境界積分方程式に改良を加えた本システムは、従来のBEMに比べて精度が向上している。

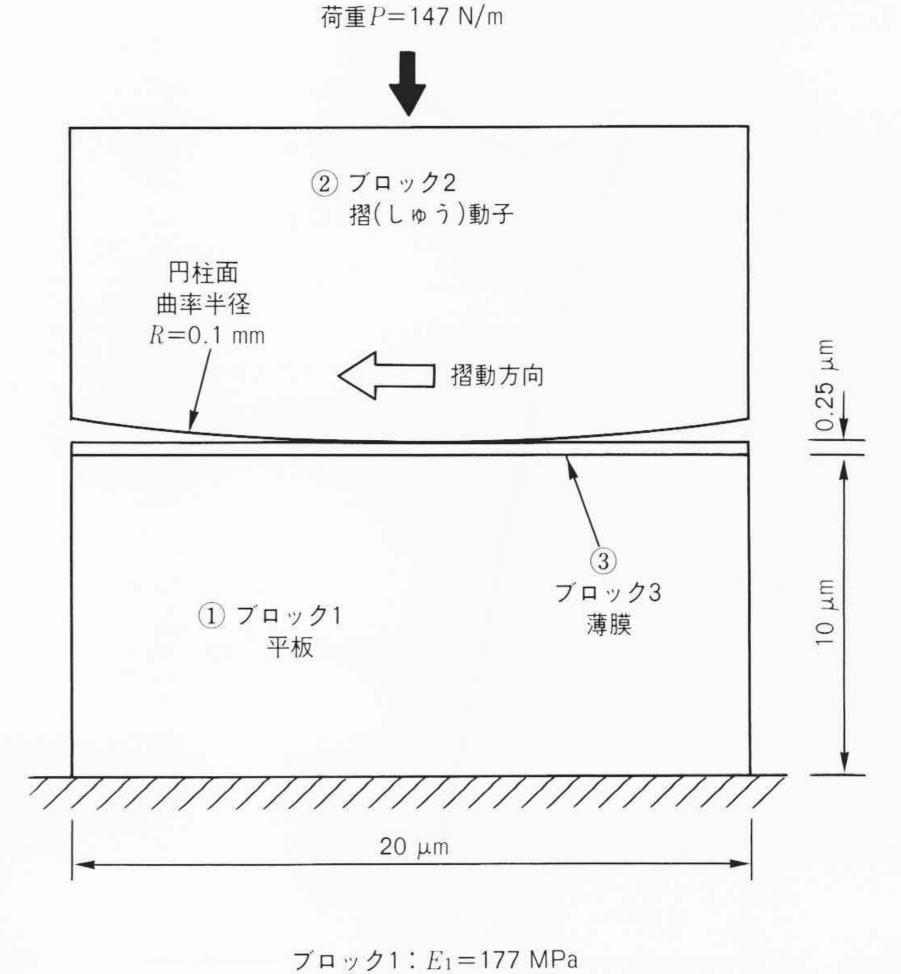
クトルはマトリックスの変化する行の数だけ求めればよく, また同じ行が反復修正されるときは改めて求め直す必要はない。さらにアルゴリズムのくふうによって影響ベクトルは複数同時に求めることができる³)。

解析例を図5,6,7に示す。膜の付いた平板の上を円柱

表 | 片持ばりのメッシュ分割数 五つのメッシュ分割タイプを比較して示す。

メッシュ	分	割	要素数	
	m	n	FEM	BEM
Α	10	2	20	24
В	20	4	80	48
С	25	5	125	60
D	50	10	500	120
E	100	20	2,000	240

注:略語説明 A, B, C, D, E(メッシュタイプ), m(横方向分割数), n(縦方向分割数)



 $u_1 = 0.3$ ブロック2: $E_2 = 245$ MPa

 $\nu_2 = 0.3$ ブロック3: $E_3 = 147$ MPa $\nu_3 = 0.3$ $\mu = 0.25$

注:略語説明 E(ヤング率), $\nu(ポアソン比)$, $\mu(摩擦係数)$

図 5 薄膜の付いた平板と円柱面の摺動 薄膜の付いた平板の上 を,円柱状の面を持つブロックが摺(しゅう)動する。

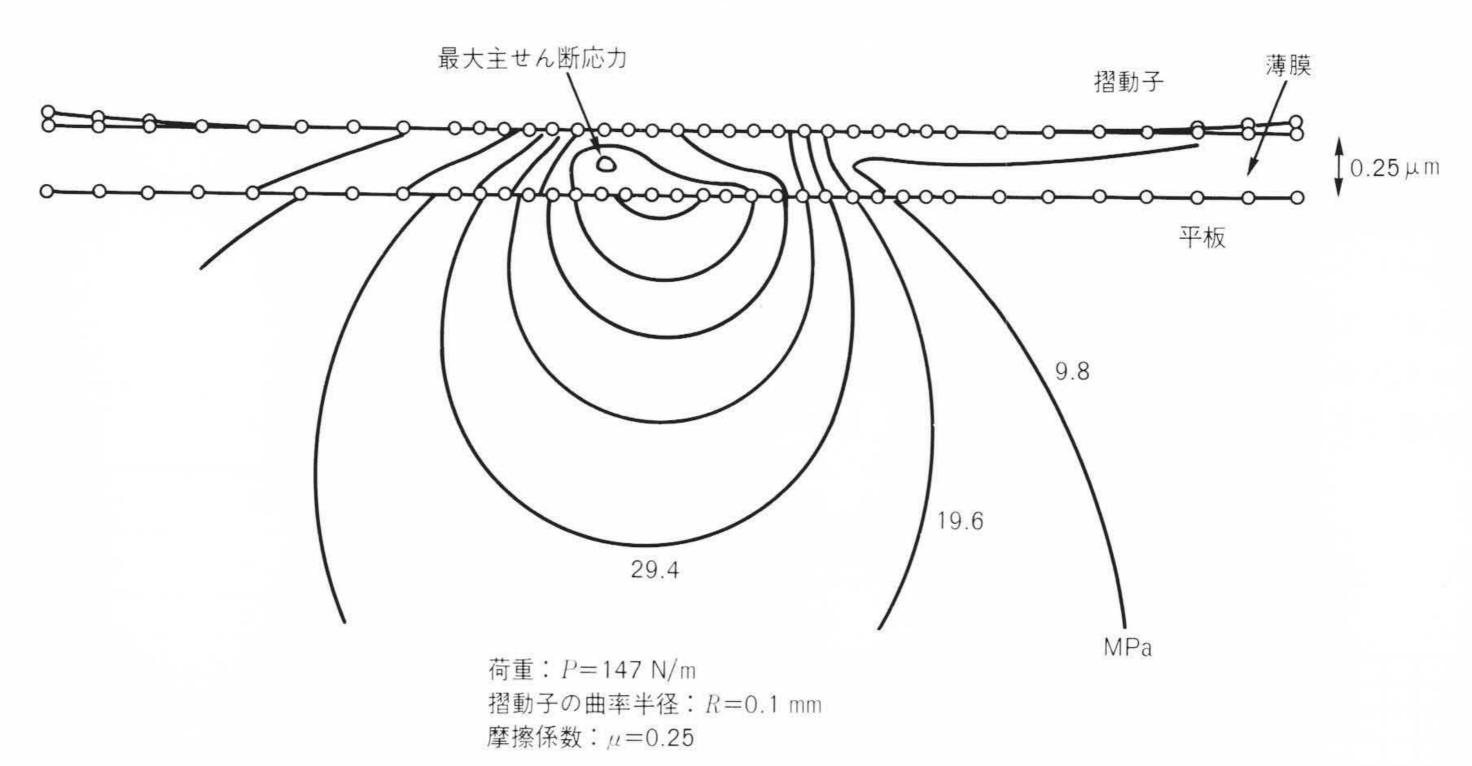


図 6 接触点近傍の主せん断応力分布 薄膜中に応力の最大点が生じていることがわかる。

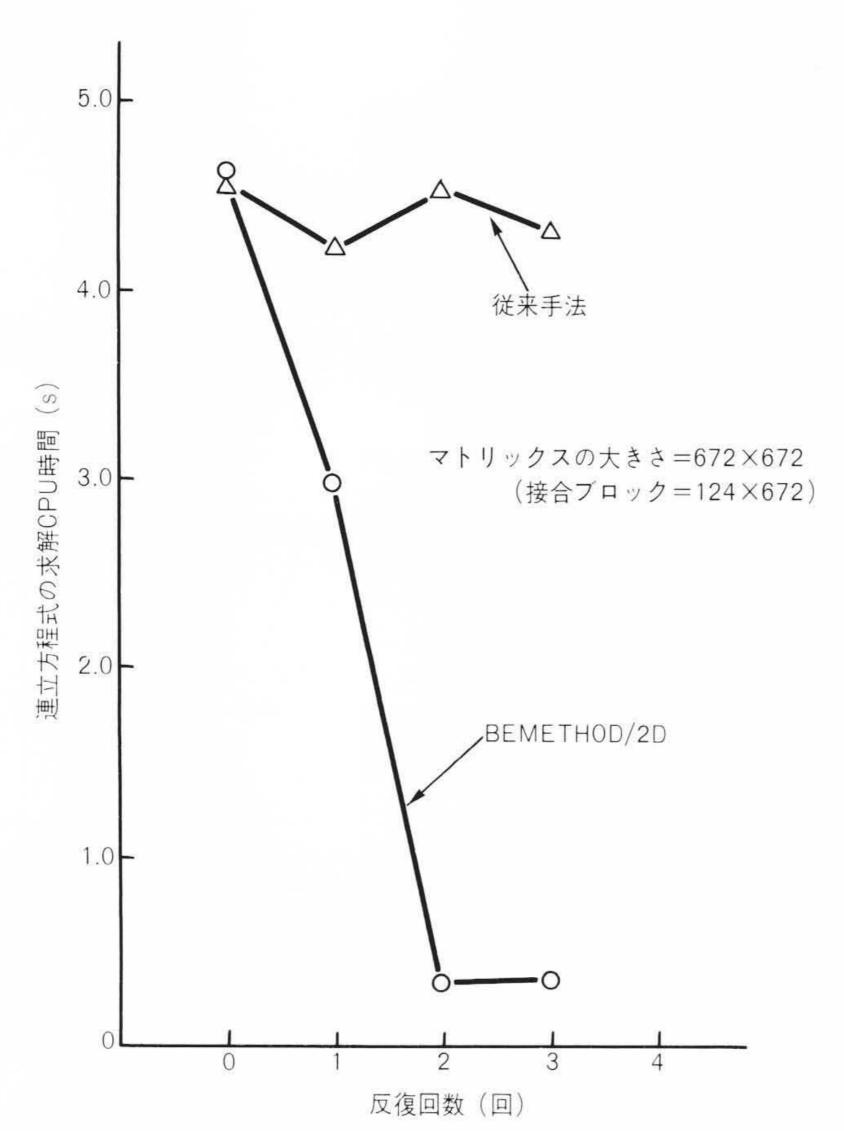


図7 接触解析での求解CPU時間の比較 反復2回目以降では、従来手法に比べて約10倍高速化している。

状の面を持つブロックが摺(しゅう)動する問題を図5で示している。膜と円柱面の間に仮想的な接合ブロックを挿入した。その解析結果が図6で、接触点近傍の主せん断応力分布を示

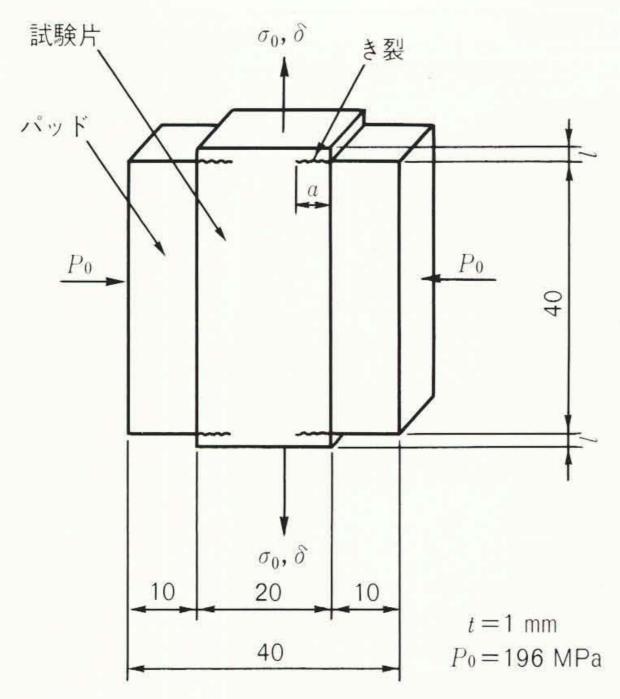
したものである。最大主せん断応力が,膜内になることがこの解析からわかり,破壊開始が膜内から生じることなどが予測できる。CPU時間は図7のようになる。ここでは初回(反復番号=0)の計算に縦ブロックがウス法を用いている。反復2回目以降は,CPU時間は従来解法の約10倍の高速化になっている。本解析では3回の反復修正で解が収束した。反復回数が多くなればなるほど,本手法が有利になってくることは明らかである。

5 破壊強度のシミュレーション

構造物の強度を評価するときに問題になることのひとつは、 構造に生じたき裂や構造欠陥部分の応力集中である。破壊力 学では、応力拡大係数Kという概念でこの応力集中を評価し ている。応力拡大係数Kがある値以上になると破壊が始まる。 したがって、この応力拡大係数Kを正確に求めることが重要 になる。BEMETHOD/2Dでは、き裂および構造欠陥部分の 応力の特異性を表す特異要素を新たに開発し、応力拡大係数 を簡便かつ正確に求めることを可能とした 4)。

フレッティング疲労試験に適用した例50が**図8**で、解析に用いたモデルの寸法、形状を示す。き裂は、実際のフレッティング疲労試験結果を参考にして、パッドとの接触端に接触面に垂直方向に入れた。

BEMETHOD/2Dを使って応力拡大係数Kを求めた例が **図9**で、き裂長さとの関係を示している。同図から、変位を一定値にする負荷制御方法のときには、き裂が長い領域ではき裂長さが増加しても、応力拡大係数Kはあまり増加しないことがわかる。すなわち、破壊が起こりにくいことがわかる。これに対し荷重を一定値にする制御方法のときは、応力拡大



注:略語説明 σ_0 (制御繰返し負荷荷重), t (試験片厚さ), δ (繰返し負荷変位), P_0 (パッド圧), a (き裂長さ), l (き裂までの距離)

図 8 フレッティング疲労解析モデル 試験片の両側にパッドで圧 力を加え,き裂と垂直方向の荷重または変位を制御する。

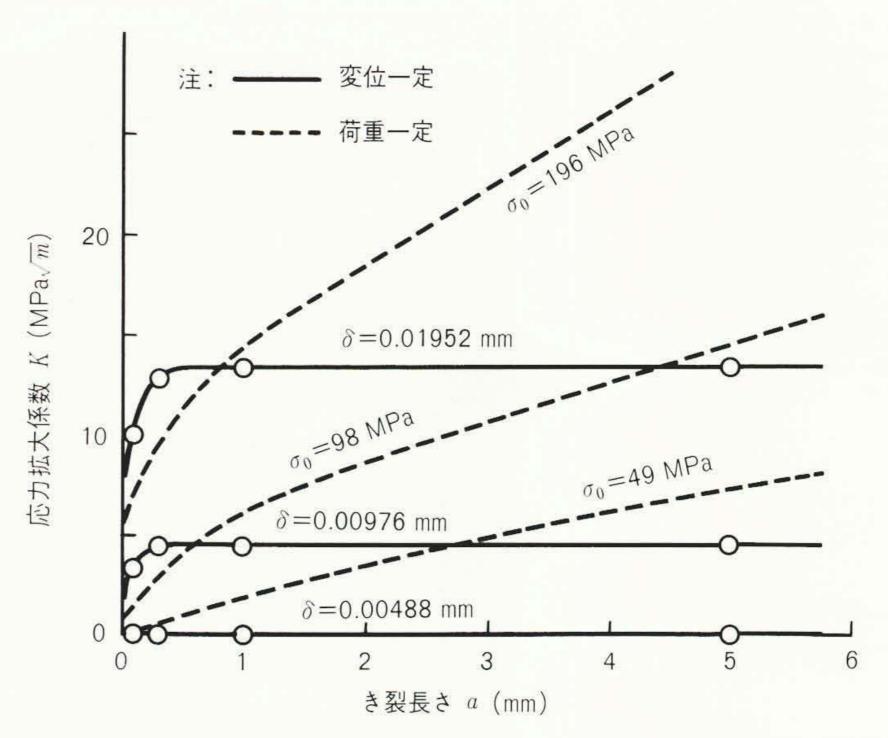


図 9 き裂長さと応力拡大係数の関係 変位制御条件下では、き裂 が長い領域ではき裂長さが増加しても、応力拡大係数Kはあまり増加し ないことがわかる。



図10 平板とブロックの接触応力分布 主せん断応力の分布をHICAD/CADAS/Wで出力した。要 素分割は各ブロックの周辺だけ行えばよい。

係数Kは単調増加し、破壊が進展することがわかる。

この解析例からもわかるように、BEMETHOD/2Dを用い て, き裂・欠陥応力集中部の応力解析および応力拡大係数計 算を簡便に行うことができる。

HICAD/CADAS/Wによる出力例

BEMETHOD/2Dを使って解析し、HICAD/CADAS/Wか ら出力した例を次に述べる。

平板にブロックを押し込んだときの, 主せん断応力分布を 解析した例を図10に示す。ブロック角部近傍は応力集中が生

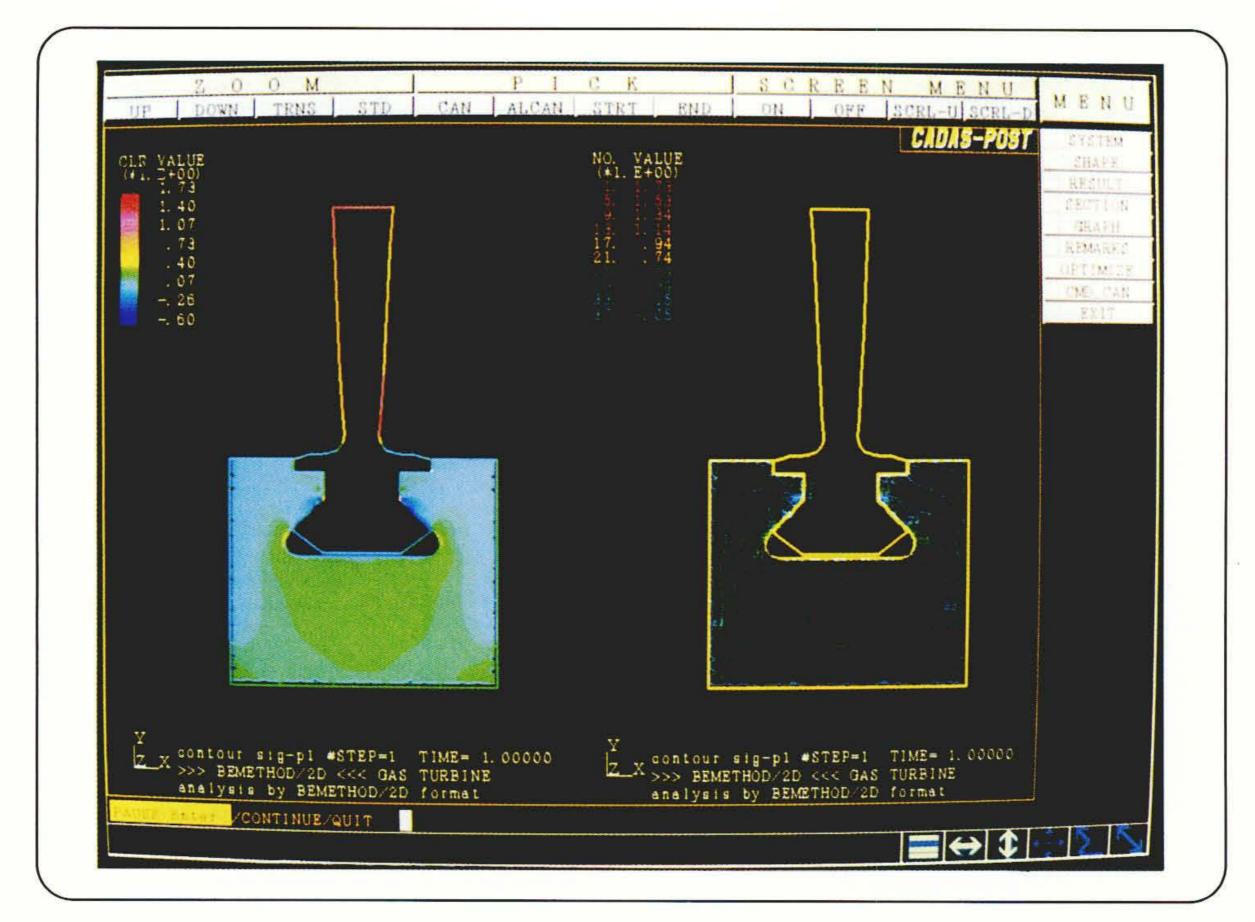


図 II ガスタービンブレード取付部応力分布 主応力の分布を示す。赤は引張応力、青は圧縮 応力を示す。

じるので、FEMで解析するときには、角部近傍の要素分割を かなり細かくする必要がある。しかし、BEMETHOD/2Dで は、表面だけの分割で簡便に精度よく解析できる。

ガスタービンブレードの軸取付部の主応力分布を解析した 例を図11に示す。このようなより複雑な形状でも簡単に解析 することができる。

おわりに

構造解析での入力データ作成作業の大幅な低減を実現した 境界要素法応力解析システム"BEMETHOD/2D"は、機械 系統合プリ ポスト プロセッサHICAD/CADAS/Wのもとで、 簡便かつ高精度な解析環境を実現している。

参考文献

- Brebbia, C. A.: The Boundary Element Method for Engineering, Pentech Press Ltd. (1978)
- 東町,外:境界要素法による構造解析の高精度化と実用化, 日本機械学会論文集, 第468号A編, 1967~1972(昭60-8)
- Ezawa, Y., et al.: High-Speed Boundary Element Contact Stress Analysis Using a Super Computer, Boundary Element Techniques, Computational Mechanics Publications. (1989)
- Ezawa, Y., et al.: Singularity Modeling in Two- and Three-dimensional Stress Intensity Factor Computation Using the Boundary Element Method, Boundary Elements **WI**, Springer-Verlag. (1985)
- 坂田、外:フレッティング疲労き裂の停留・進展挙動、日本機 械学会日立地方講演会論文集, 37~39(昭60-9)