

論文の内容の要旨

論文題目 異方性損傷理論による複数分布する
疲労き裂の進展挙動シミュレーション

氏名 高垣 昌和

近年の科学技術の進歩に伴って機器やプラントは、構造的により複雑になっている上、非常に過酷な稼動条件となっているため、構造物にはき裂などさまざまな損傷が生じ、深刻な場合、複数の損傷が点在しているような状況がある。このような損傷が存在する構造物に疲労負荷がかかると広範囲に力学的な影響を与え、これらの損傷は近接していなくとも相互干渉して、構造物は予測よりも短寿命となる。このため、すべての損傷を考慮して構造全体を対象として損傷評価を行わなければならない。

従来、疲労き裂の損傷評価は、破壊力学概念を適用して FEM などにより応力解析を実施した結果よりき裂進展解析を行うといった手順で行われる。しかし、単一のき裂などが対象であるならば、十分な精度で損傷評価ができると考えられる。しかし、複雑に分布するき裂などを従来の方法で評価するためには個々のき裂を FEM などによりモデル化して応力解析を実施した後、き裂の損傷評価を一つ一つ行わなければならない。コンピュータの計算速度が飛躍的に高速化しているものの解析には相当の労力、時間が必要となる。また、複数の損傷を個々に評価するために破壊力学を直接適用することは不可能でないにせよ大変困難である。よって、複雑に分布するき裂に対する損傷評価法を、新たに提案することは工学的に大変重要なことは、明らかである。

本研究では、損傷力学概念を導入して複数分布するき裂の進展挙動解析を提案しその妥当性の評価を行った。損傷力学では、図 1(b)のように分布欠陥を有した部材の断面 A は、欠陥により実断面積は減少している。そこで仮想的に(c)のように実断面積 A^* の同形状の部材を取り扱うことにより損傷による剛性低下を考慮しつつ通常の連続体力学と同様に計算することができる。このとき、 $D = 1 - A^*/A$ のような面積欠損率 D を損傷変数と呼ばれている。また、FEM に損傷力学概念を適用することにより、巨視的き裂を図 3 のように損傷変数を導入した要素でモデル化し、き裂進展解析が行われている。しかし、この分野は本来、クリープ破壊などを対象としているため、損傷は等方的に近似された形で扱われている。しかし、巨視的き裂が生じている部材は力学的に異方性を示すため、単一要素ではき裂を表現できないという問題がある。したがって、損傷変数をスカラではなくテンソルで

記述する必要がある。一方、微小欠陥をより厳密に表すため図 2(a)のように異方性を考慮した損傷テンソルが提案されている。座標軸は、損傷の主軸であり、損傷変数はその主値となる。そこで、微小き裂の集合が巨視的き裂であると考え、巨視的き裂に対しても(b)のように定義した。ただし、本研究の目的は、複雑き裂の解析であるため任意方向のき裂が表現できなければならない。よって、定義したテンソルを座標変換した次式のような形を考えた。ここでは、2次元場について示した。

$$\mathbf{D}' = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D\sin^2\theta & -D\sin\theta\cos\theta \\ -D\sin\theta\cos\theta & D\cos^2\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 θ はX軸に対するき裂の角度を表す。

この損傷テンソルを用いて損傷による剛性低下を表現するため、実質応力と弾性係数マトリックスを次式のように書き換える。なお、テンソルは、行列表記している。

$$\tilde{\sigma} = [M]\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \phi_1^2 & \phi_{12}^2 & 2\phi_1\phi_{12} \\ \phi_{12}^2 & \phi_2^2 & 2\phi_2\phi_{12} \\ \phi_1\phi_{12} & \phi_2\phi_{12} & (\phi_{12}^2 + \phi_1\phi_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $A = 1 - 1/\sqrt{1-D}$ であり、各成分は(3)のようになる。

$$\Phi^{-1/2} = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_{12} \\ \phi_{12} & \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - A\sin^2\theta & A\sin\theta\cos\theta \\ A\sin\theta\cos\theta & 1 - A\cos^2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

一方、弾性係数マトリックス D^e は、

$$\mathbf{D}^e = [M^{-1}][D^e][M^{-T}]$$

$$= \begin{bmatrix} \phi_1^2 & \phi_{12}^2 & 2\phi_1\phi_{12} \\ \phi_{12}^2 & \phi_1^2 & 2\phi_2\phi_{12} \\ \phi_1\phi_{12} & \phi_2\phi_{12} & \phi_1^2 + \phi_1\phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E}{(1-\nu^2)} & \frac{\nu E}{(1-\nu^2)} & 0 \\ & \frac{E}{(1-\nu^2)} & 0 \\ \text{sym} & & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1^2 & \phi_{12}^2 & \phi_1\phi_{12} \\ \phi_{12}^2 & \phi_1^2 & \phi_2\phi_{12} \\ 2\phi_1\phi_{12} & 2\phi_2\phi_{12} & \phi_1^2 + \phi_1\phi_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

のように表すことができる。以上のように異方性損傷テンソルを用いて任意座標における実質応力及び弾性係数マトリックスが示された。これにより任意方向のき裂の力学的効果を構成式に組み込むことが可能となる。また、損傷要素の配置と異方性損傷変数によって

巨視的き裂を定義することが容易になり、さらに複数の巨視的き裂を表現することも簡単に行うことができる。

次に低サイクル疲労き裂伝播を表現するために損傷変数の発展式が必要となる。損傷力学において疲労破壊に対する損傷発展式がいくつか提案されているが、ほとんど単軸負荷を考慮したものである。巨視的き裂の進展方向が最大主応力方向と一致すると考えると、従来の発展式が適用できる。Lemaitre によると疲労における損傷発展式は

$$\frac{\partial D}{\partial N} = \int_{1\text{Cycle}} \dot{D} dt = \frac{(\Delta\tilde{\sigma}/2)^2}{2ES} 2 \int_0^{\Delta\varepsilon_s} \dot{\varepsilon}_s dt = \frac{\Delta\tilde{\sigma}^2}{4ES} \Delta\varepsilon_s \quad (5)$$

のように示されている。ここで、 $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon_s$ は、それぞれ主応力方向の応力範囲とひずみ範囲である。また、 E はヤング率、 S は損傷に対する強さを表す材料定数である。

続いて、疲労き裂の挙動を表現するために検討しなければならない課題がある。ひとつはき裂の開閉口挙動であり、もうひとつは、これに伴って力学的異方性が表れるため異方性の降伏関数を検討しなければならない。き裂の開閉口は、これまでに応力やひずみの正負を基準として開閉口の判定条件が提案されている。単軸負荷では問題ないと思われるが、複数のき裂が存在するならば複雑な応力場が予測される。したがって、従来の基準では精度よく表現できないと考える。そこで、新たに判定基準を検討した。本研究では FEM を用いることからそれぞれの要素の各応力、ひずみ成分が計算される。そこで、想定されるき裂の角度から変換則によってき裂面に垂直な方向の応力、ひずみが求められる。き裂開閉口の判定にこの値を適用する。判定条件は、ひずみが負になるとき裂の閉口し、応力が正になると開口するものとする。

また、降伏関数は、空げきによる圧縮性を考慮した Gurson の降伏関数を拡張して、き裂の開閉口条件と合わせて力学的異方性を表現する。引張負荷での剛性の低下を表すために下式のように応力を実質応力で書き換える。

$$F_G = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{eq}}{R} \right)^2 + 2qf \cosh\left(\frac{\tilde{\sigma}_H}{2R} \right) - \left[1 + (qf)^2 \right] \quad (6)$$

ここで、 $\tilde{\sigma}_{eq}$, $\tilde{\sigma}_H$ はそれぞれ実質応力による相当応力と平均応力である。また、 R は、降伏応力、 f は損傷の体積分率を表し、 q は補正值である。以上、述べてきたことを用いて、一般的な固体力学の手法により弾塑性損傷構成側を求めた。

$$\{d\sigma\} = \left(\begin{array}{c} [\tilde{D}^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [\tilde{D}^e] \\ [\tilde{D}^e] \end{array} \right) \frac{1}{F_{DENO}} \{d\varepsilon\} \quad (7)$$

$$- \frac{2[\tilde{D}^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left(\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} [dM^{-T}] \{\tilde{\sigma}\} + \left\{ \frac{\partial f}{\partial D} \right\} \{dD\} \right)}{F_{DENO}} + 2[dM^{-T}] \{\tilde{\sigma}\}$$

ただし、分母 F_{DENO} は、

$$F_{DENO} = -\frac{\partial f}{\partial R} b(R_S - R) \frac{\{\sigma\}^T}{\sigma_{eq}} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (8)$$

$$+ \frac{2}{3} c \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} - \frac{2}{3} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \gamma \{\alpha\} \frac{\{\sigma\}^T}{\sigma_{eq}} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [\tilde{D}^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$$

と求められた。この損傷を考慮した構成則を FEM に導入することによりき裂を考慮した応力解析を行う。

まず、これまでに提案した理論の妥当性を検証するために CCT 試験片をモデル化して応力解析を行った。解析条件は、弾性範囲の単純引張負荷を与えている。比較として汎用コードにより一般的なき裂進展解析法を用いた解析を合わせて行った。その結果は図 5 に示した。左図の中央左端に損傷要素を指定している。両図を比較すると十分な一致が見られることから、異方性損傷変数の妥当性が示されたものとする。

次に、低サイクル疲労き裂伝播の解析結果と比較するために平板試験片を用いて低サイクル疲労き裂伝播試験を実施し、き裂の進展挙動、特にき裂間の干渉と合体について評価した。供試材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。また、試験片には、図 6 のように 2 つの有孔部を施してある。それぞれの配置は、水平、平行、段違いの試験を行った。この試験結果は、解析結果と合わせて示すが特徴的な挙動について知見が得られた。

これより低サイクル疲労き裂進展解析について述べる。はじめに損傷発展則の材料定数を決定するために単一き裂の解析を実施した。材料定数 S は、それぞれ 2.0, 3.0, 4.0 について実施した。解析結果として繰返し数-き裂長さの関係を図 7 に示した。この図中の実線は、単一き裂の実験結果である。これより $S=3.0$ がもっと一致していることがわかる。

続いて、先の実験で用いた段違いの有孔部（高さ 5mm, 幅 15mm 間隔）がある試験片をモデル化し解析を行った。解析条件は、試験条件と同一である。得られた結果は、図 8 に示したようにおおよそ満足のものである。この結果よりき裂進展方向についてさらに検討する必要があると考えられる。

2つのき裂の進展挙動解析が十分な精度を有していることが示されたのでさらに本研究の目的である複雑分布するき裂の解析を実施した。負荷条件は、先ほどの解析と同条件とし初期き裂を図9のように配置した。得られた結果は、図10に示した。これは、2000サイクル目の応力状態である。それぞれのき裂により応力集中部が近接する互いのき裂先端方向に偏っていることがわかる。このように複数にき裂であっても従来の解析法と異なり節点解放などのメッシュモデルへの処理が必要でないため、き裂がさらに複雑に存在したとしても容易にモデル化すること可能である。

これまで述べてきたように異方性損傷理論による疲労き裂進展解析法の有効性が示された。最後に結論として、本研究で提案した損傷を考慮した応力解析法は、これまで複雑に損傷が分布する場合、従来の手法では正確な解析が困難とされてきた問題に対しても容易に適用することができる。これまで損傷力学の分野では、複雑にき裂が分布する部材の低サイクル疲労への適用は損傷の機構上困難とされ、他の破壊機構と比べてあまり研究が進んでいないのが現状であった。しかし、本研究において提案した解析法を適用することにより低サイクル疲労破壊を十分に評価することが可能であるものと考えられる。

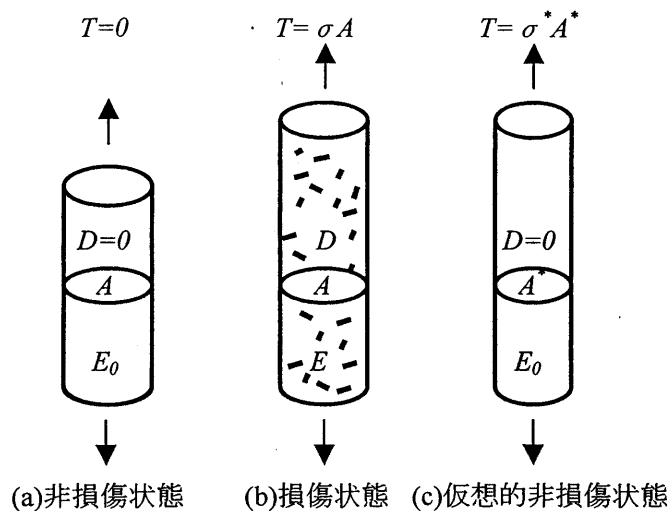


図 1 棒材の引張負荷における変形と損傷

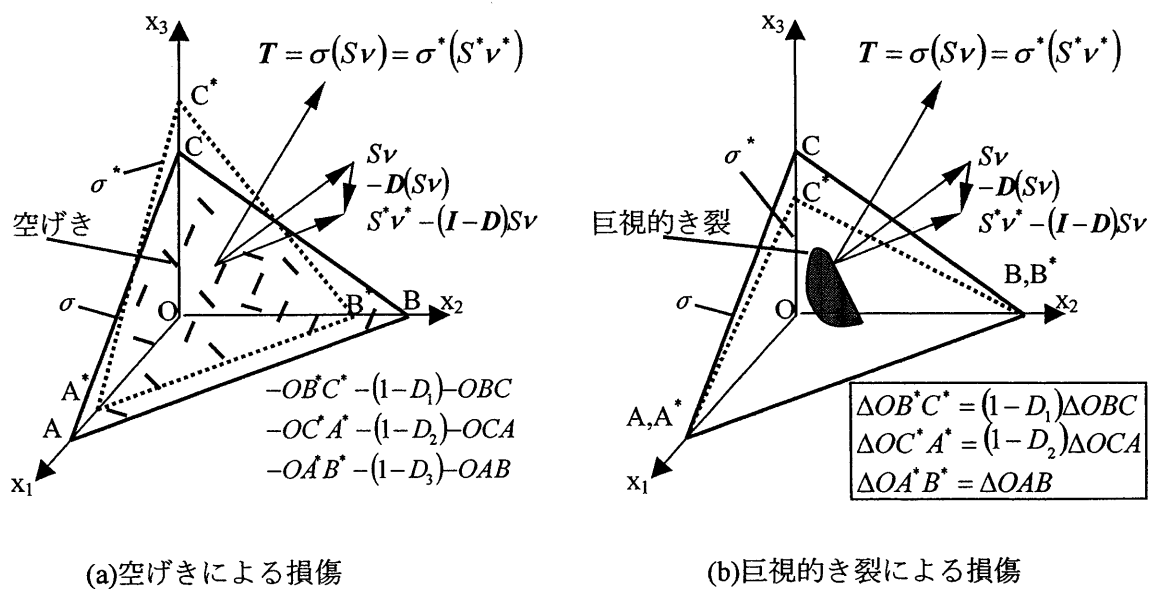
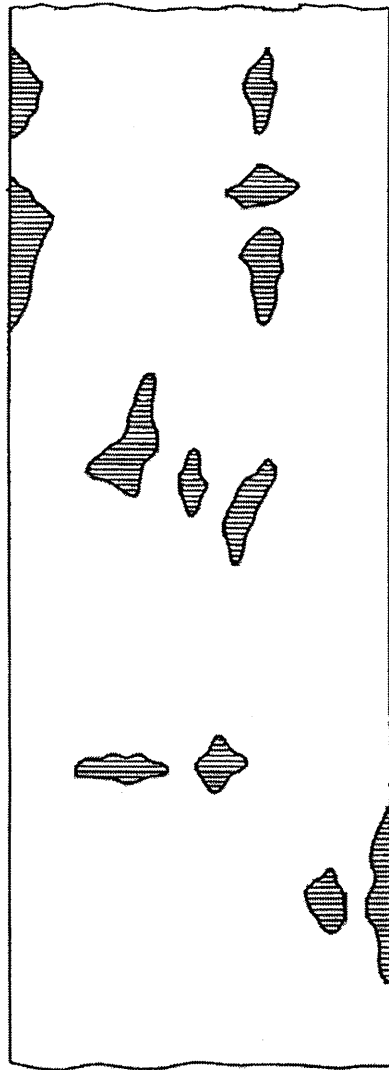
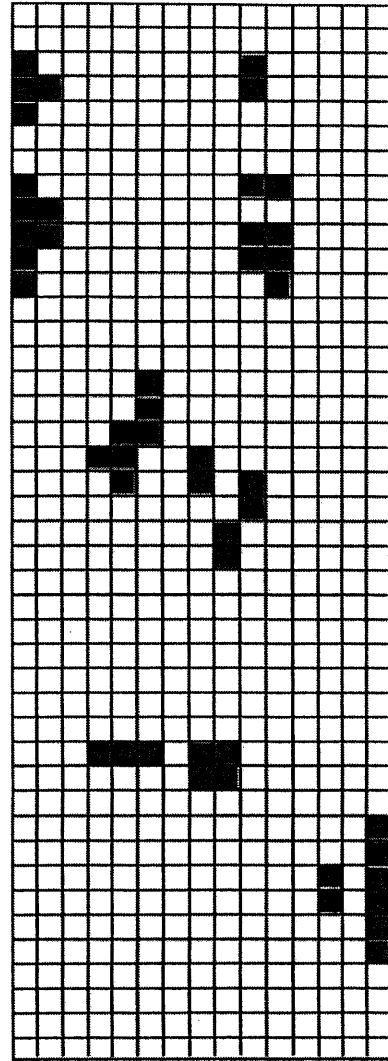


図 2 実質面積ベクトルと有効応力テンソル



(a) 複数平面き裂の配置



(b) 複数平面き裂を表現した

メッシュモデル

図 3 損傷理論による複数平面き裂のモデル化

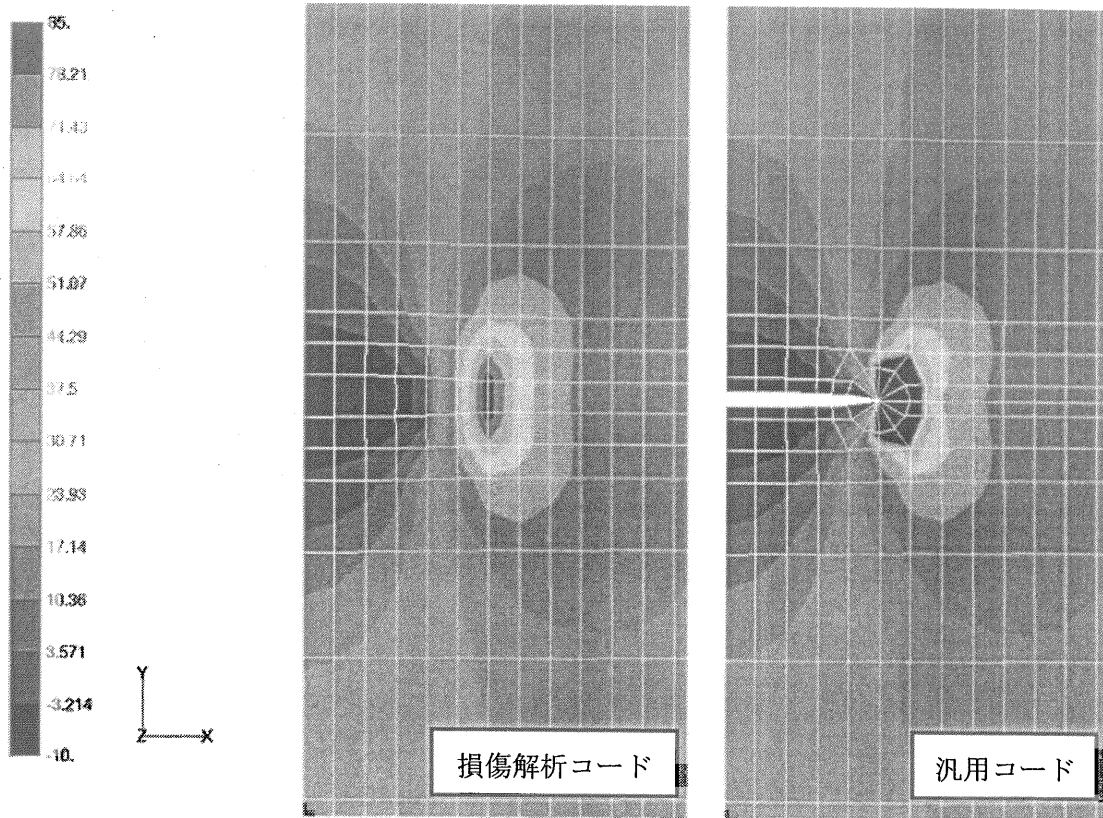


図 5 弾性範囲における解析（負荷方向応力コンター図）

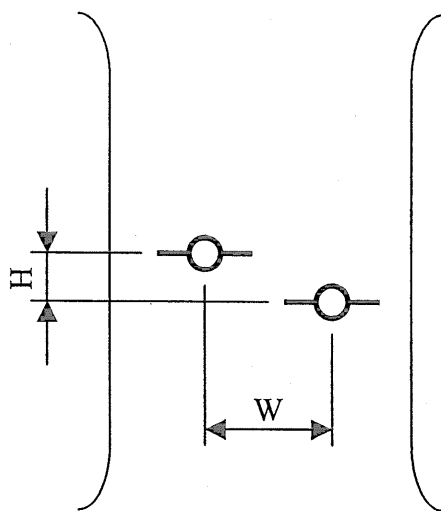


図 6 有孔部配置図

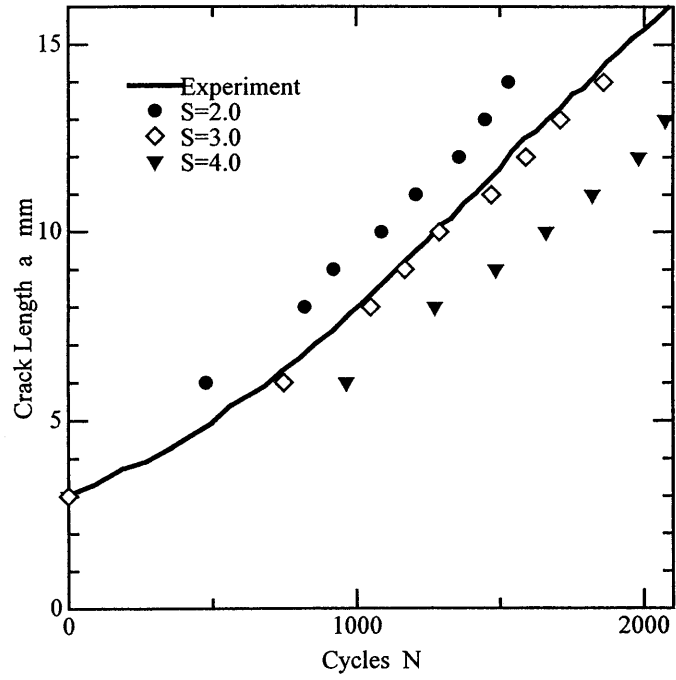


図 7 単一き裂のき裂長さ-サイクル数の関係

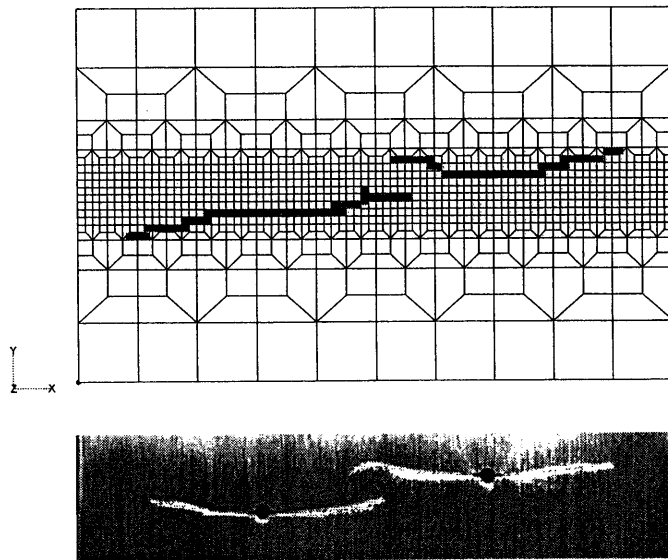


図 8 き裂進展挙動の比較 (2000cycles)

VI

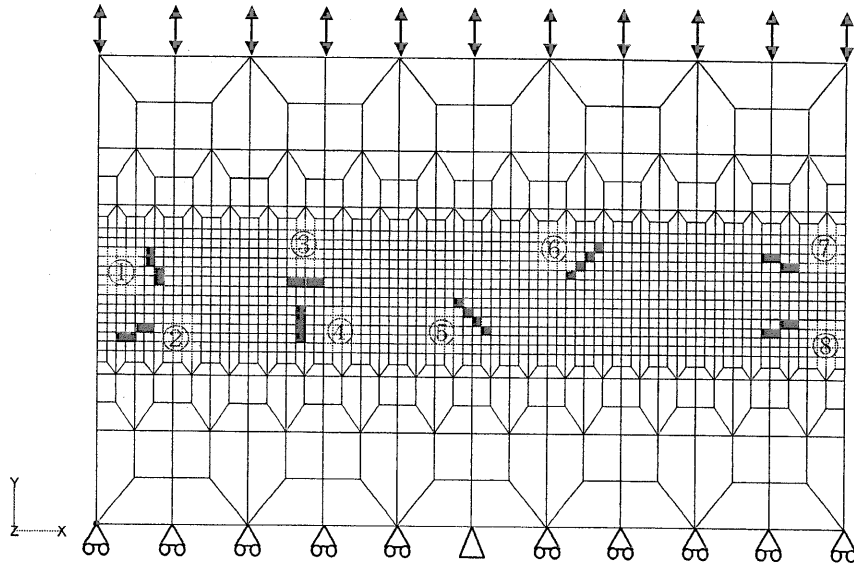


図 9 複雑分布するき裂

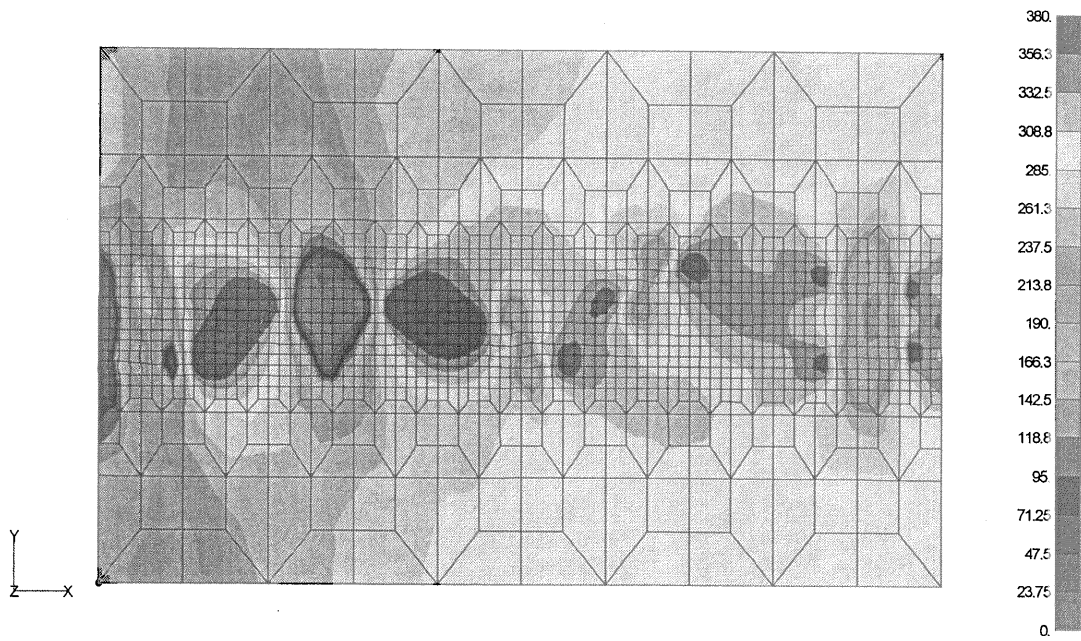


図 10 複雑分布するき裂の解析結果 (Y 軸応力コンター)