変態塑性インクルージョンを含む二相固体の二次元メソ解析*

李 廷 権^{*1}, 都 井 裕^{*2}2-D Meso-Analysis of Two-Phase Materials
with Microinclusions Exhibiting Transformation Plasticity

Jeoung-Gwen LEE and Yutaka TOI

The microcracking behaviors of two-phase materials with microinclusions exhibiting transformation plasticity are analyzed by using the two-dimensional meso-analysis method. Numerical studies have been conducted for some aspects of transformation-induced plasticity which is observed in Zirconia toughened ceramics. Irreversible strains and macro, stress-strain relationship due to dilatational transformation have been simulated under tensile loading condition. *R*-curve behaviors and microcracking patterns considering the mismatch between matrix and inclusions and the transformation plasticity of second-phase particles have been discussed under model-I loading condition. Influences of the total area fraction and the size of second-phase particles have also been studied through the calculated results.

Key Words: Computational Mechanics, Composite Material, Micromechanics, Microinclusion, Two-Phase Material, Transformation Plasticity, Mesomechanics

1. 序

著者らはマイクロクラッキングを伴う多結晶脆性固体および第二相粒子(短繊維またはインクルージョン)を含む二相固体に対し, 計算不連続体力学モデルを用いたメソ解析手法を考案し, メソスケール(単相固体では結晶粒径, 二相固体では短繊維長さまたはインクルージョンサイズのスケール)における材料挙動のシミュレーションを試みてきた^{(1)~(6)}.

本研究では, 二次元メソ解析手法を, 第二相粒子(インクルージョン)としてジルコニアのような変態塑性粒子を含む二相材料の破壊強度および破壊靱性解析に応用する. すなわち, 伝ばき裂先端近傍の高応力場において起こるジルコニア粒子の正方晶から単斜晶への体積膨張を伴うマルテンサイト形相変態により, 周辺にマイクロクラックやき裂偏向が発生し, それらが材料の強度および靱性に大きく影響する. 本論文では, このような強化機構問題^{(7)~(12)}について考察する.

ジルコニアの相変態は4~6%の体積膨張と16%程

度のせん断変形を伴うが, せん断変形の影響はインクルージョンの内部に留まるため小さく, マイクロクラックの発生やき裂偏向などは主として体積膨張によることが実験により報告されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾. また, 変態の速度が音速に近い⁽¹³⁾, 各インクルージョンの内部が部分的に変態することはなく, 全体が一度に変態する. したがって, 変態塑性変形時の二相固体の応力・ひずみ関係は, 図1のような非線形挙動を示す. 図1において, 区間ABは変態前の挙動を表す. 区間DFは変態完了後の挙動であり, 損傷が生じない場合は初期剛性と一致する. 区間BDにおいては変態が進行しており, McMeeking⁽⁹⁾, Budiansky⁽¹⁰⁾らは一定の傾きを仮定している. その傾きは変態挙動により変わるが, Budiansky⁽¹⁰⁾らは $K_c = -4G/3$ を基準にして傾きがより小さい場合を下限界変態(Sub-critical transformation), より大きい場合を上限界変態(Super-critical transformation)のように区分した. すなわち, 部分安定化ジルコニア(Partially Stabilized Zirconia)に見られるように, ある応力場内部に分散したすべてのジルコニア粒子の変態条件が同じ場合は, 全粒子がほぼ同時に変態するため, 図1の経路BCのように傾きが K_c を上回るが, 各ジルコニア粒子の変態条件が異なる場合, または一部分が変態する

* 原稿受付 1997年6月20日.

^{*1} 正員, 東京大学大学院 (〒106-0032 東京都港区六本木7-22-1).^{*2} 正員, 東京大学生産技術研究所.

場合は、図1の経路BEのように下限界変態挙動を示す。本研究では、一般的に下限界変態挙動を示す、アルミナなどの他のセラミックス中に正方晶ジルコニアを分散したジルコニア強化セラミックス (Zirconia-Toughened Ceramics) について、マイクロクラッキングやき裂偏向を伴う変態塑性挙動を二次元メソ解析手法を用いてシミュレートし、解析手法の有用性について検討する。

2. 二相材料の二次元メソ解析モデル

2.1 二次元メソ解析モデル インクルージョンを含む二相材料の二次元メソ解析において、要素分割モデルの生成にはヴォロノイ分割図を、解析モデルとしては計算不連続体力学モデルを用いる。すなわち、ヴォロノイ分割図における任意多角形要素と要素境界を、それぞれ剛体要素とそれらを結合するばね系に置換する。以下では、図2に示すような、 x, y 方向並進相対変位に抵抗するばね K_x, K_y と回転相対変位に抵抗するばね K_θ の3種類から成るばね系により結合された、二つの任意多角形隣接剛体要素を考えて定式化を行う⁽⁴⁾。なお、本解析モデルにおける一要素はスケ

Fig. 1 Schematic stress-strain relationship for the transformation plasticity behavior

Fig. 2 Two-dimensional mesomechanics model

ールのにはほぼ一結晶粒に相当する。

2.2 インクルージョンの設定 ヴォロノイ分割によりあらかじめ生成された要素分割図において、インクルージョンの位置、大きさ、分布のランダム性を確保するため、まず要素分割とは無関係に円形インクルージョンの中心座標 (x, y) と半径 (これを r_i とする) を一様乱数により与え、任意多角形要素の中心点とその円形の内部にあるとき、それをインクルージョンの構成要素とみなす。すなわち、図3においては黒色の要素群が一つのインクルージョンを構成するものとする。また、各インクルージョンが重ならないように、隣接するインクルージョンの中心間距離 (l) を常に次式を満たすものとする。

$$l \geq \alpha \frac{l_1 + l_2}{2} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 l_1, l_2 は隣接するインクルージョンの直径であり、 α は 1.1 と仮定した。

2.3 計算法 図2に示すような、マイクロクラックが発生していない要素境界における各ばね定数は隣接要素 A, B 間の平均ヤング率 E_c と境界線 CD の長さ l_{CD} を用いて、以下のように計算される。

$$K_x = \frac{E_c l_{CD}}{d_1 + d_2}, \quad K_y = c \times K_x, \quad K_\theta = K_x \times \frac{l_{CD}^3}{12} \dots \dots \dots (2)$$

式中、係数 c の値を材料ごとにコントロールすることにより、母材およびインクルージョンのマクロなポアソン比の値を任意に設定することができる。

式(2)により決定したばね定数を用いて、要素境界ばね系に対する増分形剛性方程式は次式のように表現される。

Fig. 3 Mesh subdivision of matrix and inclusion for the case of $A_i=32\%$

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} + \{f_R\} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに,

$$[K] = [B]^T [D] [B] \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\{f_R\} = \{f_r\} + \{f_i\} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\{f_r\} = -[B]\{S\}$$

$$\{f_i\} = -[B]^T [D] \{d_i\}$$

ここに, $[B]$ は相対変位と要素 A, B の剛体変位間の関係, $[D]$ はばねの内力と相対変位間の関係を示すマトリックスであり, $[K]$ は要素境界ばね系の剛性マトリックスである。また, $\{S\}$ および $\{f_r\}$ は増分解析の前ステップにおいてマイクロクラックが発生したばね系に対する内力ベクトルと解放力ベクトルであり, $\{d_i\}$ および $\{f_i\}$ はインクルージョンの変態による相対変位の膨張変形量および膨張力ベクトルである。インクルージョンの体積膨張率を5%とみなし, 各方向には一様膨張であることを仮定して, 二次元的な膨張率として5%の2/3の値を用いた。

2.4 マイクロクラックの発生と閉鎖 母材内部, インクルージョン内部および母材・インクルージョン界面におけるマイクロクラック発生条件を, 次式により表す。

$$(S_m^x)_{\max} = (S_m)_{cr}$$

$$(S_i^x)_{\max} = (S_i)_{cr} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$(S_b^x)_{\max} = (S_b)_{cr}$$

ここに, m, i, b はそれぞれ母材, インクルージョンおよび界面を意味する。 $(S_k^x)_{\max, k=m, i, b}$ はそれぞれ x 方向(要素境界法線方向)の最大応力値であり, $(S_k)_{cr, k=m, i, b}$ はそれぞれの限界値(以後, 破壊強度と称する)である。本解析では, せん断応力の影響は副次的と仮定し無視したが, 本計算手順においてその影響を考慮することは容易である⁽⁵⁾。

式(6)によりマイクロクラックが発生したと判定された要素境界においては K_x および K_y をともに零とし, さらに解放応力を計算する。また, マイクロクラックが存在する要素境界において変形の過程で垂直相対変位が負になったとき, そのマイクロクラックは閉鎖したと判定する。このとき, 閉鎖した要素境界のばね定数 K_x はクラックが発生する前の値に戻し, K_y はクラック表面の摩擦を考慮しないことを前提として, 零のままとする。さらに, クラックが再び開いた場合には K_x, K_y はともに零となる。

他方, 粒界面における応力特異性に関する寸法効果に起因して, 小さな粒界面ではマイクロクラックが生じにくくなるという理論解析の結果が報告されている⁽¹⁶⁾。このことを考慮して, 式(6)の破壊強度が $(l_{cr}/l)^{1/2}$ に比例すると仮定する⁽⁵⁾。すなわち, 各要素

境界の長さ l および限界要素境界長さ l_{cr} を用いて, 破壊強度を次式のように仮定する。

$$(S_k)_{cr} = \begin{cases} (S_k)_{cr}, & l \geq l_{cr} \text{ の場合} \\ (S_k)_{cr} \sqrt{l_{cr}/l}, & l < l_{cr} \text{ の場合} \end{cases} \quad \cdots \cdots (7)$$

$$(k=m, i, b)$$

本研究では, l_{cr} の値として10 000要素数のときの要素境界線の長さの平均値 ($1.4 \times 10^{-4} L$, L : 全体モデルの辺長)を用いる。

2.5 変態塑性挙動 インクルージョンの変態条件については, 以下のように仮定する。

$$(S_i^x)_{\text{ave}} = (S_i)_{tr} \quad \cdots \cdots (8)$$

ここに, $(S_i^x)_{\text{ave}}$ は各インクルージョンの内部にある要素境界線における x 方向応力値の平均値であり, $(S_i)_{tr}$ は変態に対する限界値である。また, 式(8)によりインクルージョンの変態が発生すると, インクルージョン内部にあるすべての要素に変態変形量 $\{d_i\}$ を与え応力の再配分計算を行う。この際, 母材の側に相当程度の圧縮応力が生ずるので, 各増分ステップにおいて一つのインクルージョンのみが変態するように, 増分量を制御する。

3. メソ解析結果

インクルージョンを含む二相材料においては, 母材, インクルージョンおよび母材・インクルージョン界面の力学的性質により, 母材へのき裂偏向, インクルージョンのはく離あるいは割れなどが起こることが予想される。また, インクルージョンが変態する場合は, その体積膨張, 周辺のマイクロクラッキング, き裂偏向などにより材料の強度や靱性の向上が期待できる。

3章では, 2章で述べたメソ解析モデルにより, まず単軸引張応力下において, マイクロクラックの発生やき裂偏向を伴うインクルージョンの変態塑性挙動が, 二相材料の強度に及ぼす影響についてシミュレートする。続いて, モードI応力下におけるマクロき裂の進展挙動をシミュレートし, インクルージョンの変態塑性挙動, 母材とインクルージョンの諸性質, すなわち, 弾性係数, 破壊強度, 界面強度などが R 曲線(き裂進展抵抗曲線)挙動に及ぼす影響について考察する。

物性値については, 母材をアルミナ, インクルージョンをジルコニアとみなし, それぞれのヤング率を400 GPa, 200 GPa, ポアソン比はともに0.25と仮定した。インクルージョンの体積膨張率は5%と仮定する。解析モデルとしては, 図3に示した10 000要素図をもとにインクルージョンの面積比が8%, 16%および32%の場合のメッシュ図を作成し, 単軸引張応力を

与えて二相材料の変態塑性挙動およびマイクロクラッキング挙動を、シミュレートした。インクルージョンのサイズ分布は一様であり、計算条件は $(S_i)_{cr} = (S_b)_{cr} = (S_m)_{cr}$, $(S_i)_{tr} = 0.3(S_m)_{cr}$ とした。

3・1 単軸引張応力下の変態塑性挙動 まず、変態塑性挙動を明確化するため、母材とインクルージョンの諸性質が等しいと仮定し、マイクロクラックの発生を無視してインクルージョンの変態塑性挙動のみを考慮した計算を行った。

式(8)で定義した変態条件 $(S_i)_{tr}$ と母材の破壊強度 $(S_m)_{cr}$ の比を 0.1 および 1.0 と仮定した結果を図4に示す。2章で述べたように、初期剛性と変態完了後の剛性は等しい。変態が進行している間はインクルージョン周辺に相当程度の圧縮応力が生じ、図4のようにマクロ的に加えた引張応力を低減させる。続いて、次のインクルージョンが変態するまでマクロ応力が上昇し、このプロセスがインクルージョンの数だけ繰返される。2種類の変態条件を比較したが、膨張変形による永久ひずみ量にはほとんど変化のないことがわかる。

図5と図6には、インクルージョンの含有率と膨張

変形量(永久ひずみ量)の関係を示す。これらの結果からわかるように、膨張変形量は変態条件に無関係であり、主としてインクルージョンの含有率に依存する。さらに、その関係は線形に近いことが確認される。また、図7には、面積比を32%に固定し、インクルージョンの半径をモデル全体長さ(L)の0.0375, 0.05および0.0625倍と変化させた場合の結果を示す。永久ひずみ量は、インクルージョンの大きさとその数にも若干依存していることがわかる。

3・2 単軸引張応力下のマイクロクラッキング挙動

変態塑性体であるジルコニアをインクルージョンとして含む二相材料においては、粒子自体が直接受けもつ外力の部分は小さいが、インクルージョンが膨張することによって、その近傍で高応力場の緩和が起これ、母材の変形抵抗を高める。また、マイクロクラックの発生によるエネルギー吸収、き裂進展の偏向などが起これ、この結果として材料の強度や靱性の向上が期待できる。

図8(a), (b)には、インクルージョンの面積比を

Fig. 4 Effect of critical transformation condition on the stress-strain relationship

Fig. 6 Area fraction of the transformed inclusions as a function of the dilatation strain for different overall area fraction of inclusions

Fig. 5 Effect of total area fraction of the inclusion on the stress-strain relationship

Fig. 7 Effect of inclusion size on the stress-strain relationship

16%とし、その変態を考慮しない場合と考慮した場合のマイクロクラック進展図を示す。境界条件は図中に示すとおりである。図8(b)においては、インクルージョンの変態塑性変形の効果を等方的なものとするため、図8(a)とは異なる境界条件が仮定されている⁽¹²⁾。図8からわかるように、変態を考慮しない場合は、荷重の増加に伴い母材の最弱位置からマイクロクラックが発生し、それが伝ばしインクルージョンに到達するとそのままインクルージョンを貫通し進展していくので、マクロ応力・ひずみ曲線においては脆性的な傾向が顕著である。変態を考慮した場合は、インクルージョンが変態限界値に達すると膨張が起こり、インクルージョンの近傍で半径方向に圧縮応力を生ずるため、(図8の)インクルージョンの左右におけるマイクロクラックの発生が抑制される。また、周方向には引張応力が発生するため、インクルージョンの上下では外力との重畳により、多くのマイクロクラックが発生

Fig. 8 Microcracking patterns for the case of containing 16% inclusions

生する結果となる。その結果、変態を無視した場合にはインクルージョンを貫通し進展していくマイクロクラックが、変態によりインクルージョンを迂回し、さらに母材中を進展していく。このことにより、図9のマクロ応力・ひずみ関係にみられるように、変態を考慮した場合はインクルージョンの面積比に応じ、最大値以降の応力低下が緩やかとなり、より延性的な挙動に変化している。

3.3 モード I の変形を受ける場合のマクロクラック伝ば解析 3.3 節では、モード I 変形下のマクロクラック伝ば問題において、母材とインクルージョンの諸性質の相違およびインクルージョンの変態塑性がき裂進展挙動に及ぼす影響について検討する。

3.3.1 メッシュと境界条件 図10にマクロクラックを有する二次元メソ解析モデルの概略図を、図11には、マクロクラック先端近傍に位置する辺長 $2r$ 程度 (r はマクロクラック長さ R の1%) の矩形領域のメッシュ図を示す。クラック先端近傍ではヴォロノイ分割により生成された 10 000 要素数のメッシュを用い、インクルージョンはその内部のみにランダムに分散させる。外部領域ではより粗い規則的なメッシュを用いている。以後の解析では、この内部領域における

Fig. 9 Stress-strain relationship with transformation and without transformation

Fig. 10 Model-I loading on outer edge of analyzed area

Fig. 11 Mesh subdivision of matrix and inclusion within inner part for the case of $r_i=0.1r$, $A_i=32\%$

マクロクラック伝ばに着目する。

モード I 応力下において、モデルの外縁部における x, y 方向の変位成分 u_i は次式のように与えられる。

$$u_i = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{R}{2\pi}} F_i(\theta) \dots \dots \dots (9)$$

$$F_1(\theta) = \cos \frac{\theta}{2} \left(2 - 4\nu + 2 \sin \frac{2\theta}{2} \right)$$

$$F_2(\theta) = \sin \frac{\theta}{2} \left(4 - 4\nu - 2 \cos \frac{2\theta}{2} \right)$$

外縁部における要素境界の中心角を ϕ とし、その要素境界における x, y 方向の強制変位成分 u_x, u_y は次式

Table 1 Mechanical properties of two-phase materials

case	Inclusion	E_i	$(S_i)_{cr}$	Interface	$(S_b)_{cr}$
A	rigid	$\gg E_m$	$\gg (S_m)_{cr}$	weak	$0.7 (S_m)_{cr}$
B	tough	$2E_m$	$2 (S_m)_{cr}$	strong	$2 (S_m)_{cr}$
C	weak	E_m	$0.5 (S_m)_{cr}$	weak	$0.7 (S_m)_{cr}$
D	compliant	$0.5E_m$	$(S_m)_{cr}$	weak	$0.7 (S_m)_{cr}$

(a) Weakly bonded rigid inclusions (case A)

(b) Strongly bonded tough inclusions (case B)

(c) Weakly bonded weak inclusions (case C)

(d) Weakly bonded compliant inclusions (case D)

Fig. 12 Crack propagation for the case of containing 36% inclusions

により表せる.

$$\begin{aligned} u_x &= (u_1^{\theta+(\phi/2)} + u_1^{\theta-(\phi/2)})/2 \\ u_y &= (u_2^{\theta+(\phi/2)} + u_2^{\theta-(\phi/2)})/2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

さらに, 解析モデルの右端近傍における1要素の剛体変位3成分を拘束した.

3・3・2 インクルージョンおよび界面強度の影響

インクルージョンを含む二相材料においては, 母材, インクルージョン, および界面の力学的性質の相違により, 母材へのき裂偏向, インクルージョンのはく離あるいは割れなどのメソスケールの損傷が発生し, それが材料のマクロな破壊靱性に影響を及ぼす.

3・3・2項では, このような二相材料におけるさまざまな微視的損傷過程が R 曲線挙動に及ぼす影響をシミュレートする. 母材とインクルージョンのヤング率 E_m, E_i , 母材, インクルージョンおよび界面の破壊強度 $(S_m)_{cr}, (S_i)_{cr}$ および $(S_b)_{cr}$ に関し, 表1に示す4ケースについて計算した. インクルージョンの半径 r_i は $0.075r$ である.

図12(a)~(d)に, 各ケースにおいて面積比が36%の場合のマクロクラック進展図を, 図13には面積比が18%および36%の場合の R 曲線を示す. 図13において, 横軸は初期マクロクラック先端から連続

的に発生したマイクロクラック最先端までの x 方向の距離を初期のマクロクラック長さ R で除した値, 縦軸は母材のみの場合のマクロクラック伝ば開始時の値で無次元化した外力値である.

ケース A ではインクルージョンは強いが界面が弱い, 界面はく離を伴いながら, クラックは主として母材中を進展している. マクロクラックから離れた場所にも界面はく離が発生しており, 図13の R 曲線にも若干の向上が見られる. ケース B のインクルージョンが強固でかつ強い界面の場合は, クラックはインクルージョンを迂回しながら母材のみに進展していくので, R 曲線は4ケース中で最大値を示す. ケース C はインクルージョンと界面の破壊強度が母材より低い場合で, マクロクラックがインクルージョンの近傍に達するとインクルージョンの割れが発生し, マクロクラックと連結するため R 曲線の向上は期待できない. ケース D では母材とインクルージョンの破壊強度は等しいが, インクルージョンのヤング率と界面の破壊強度が母材より小さく, マクロクラックが界面に達すると界面に沿ってインクルージョンを回り込むので, R 曲線の最大値は4ケース中で2番目である.

図13(a)を見ると, ほとんどのケースについて母材のみの場合より R 曲線の最大値は上昇しているが, その差は大きくない. しかしながら, 図13(b)に示すように, インクルージョンの面積比を増やすと, そのヤング率や破壊強度に依存してマクロクラックがインクルージョンを貫通したり, 迂回することの影響が大きくなるので, R 曲線における差も増大する.

3・3・3 変態塑性挙動におけるインクルージョン含有率の影響 マクロクラック先端近傍の矩形領域内部にランダムに分布したインクルージョンの大きさ r_i を $0.1r$ に設定し, 面積比 A_i を 8, 16, 24, 32% の4種類に変化させた場合の R 曲線を図14に示す. 材料

(a) $A_i = 18\%$

(b) $A_i = 36\%$

Fig. 13 R -curves: Effect of inclusion types

Fig. 14 R -curves: Effect of area fraction with transformation for the case of $r_i = 0.1r$

(a) $A_i = 16\%$ (b) $A_i = 32\%$ Fig. 15 Crack propagation with transformation for the case of $r_i = 0.1r$

の物性値、マイクロクラック発生条件および変態条件は $E_i = 0.5E_m$, $(S_i)_{cr} = (S_m)_{cr}$, $(S_b)_{cr} = (S_m)_{cr}$, $(S_i)_{tr} = 0.3(S_m)_{cr}$ である。

面積比が0%と8%の場合の R 曲線には大きな相違はないが、16%以上になると、マクロクラック先端がインクルージョンに近づくにつれ、インクルージョンが膨張を開始し周囲の応力が緩和される。その後、マクロクラックはインクルージョンを迂回するため伝ば経路が長くなり、 R 曲線は上昇する。しかし、面積比が24%を超えると、逆に R 曲線は低下する。面積比が大きくなるとインクルージョン間の距離が短くなり、変態が次々に発生してマクロクラックの進路上にマイクロクラックがより多く生ずるので、マクロクラックが進展しやすくなると考えられる。したがって、インクルージョンの変態により破壊靱性の向上が期待されるが、強靱化をもたらすインクルージョンの含有率には、実験結果⁽¹⁴⁾にも報告されているような限界値が存在すると思われる。

Fig. 16 Effect of inclusion size with transformation

図15に、面積比が16%と32%の場合のマクロおよびマイクロクラック進展図を示す。単軸引張応力下で考察したように、インクルージョンの半径方向の多くのマイクロクラックの発生⁽¹⁵⁾や、インクルージョンを迂回しながらクラックが進展していく様子が観察される。

3.3.4 変態塑性挙動におけるインクルージョンサイズの影響 Claussen⁽¹⁴⁾らは変態塑性体に対する破壊靱性実験を行い、インクルージョンのサイズが小さくなると、破壊靱性が最大値をとる面積比は大きいほうに移動することを報告している。この現象を再現するための計算を行った。

図16に、インクルージョンの大きさ r_i を $0.075r$, $0.1r$ および $0.125r$ と変化させた場合の結果を示す。図中、横軸はインクルージョンの面積比、縦軸は R 曲線の各最大値を母材のみの場合の最大値で無次元化した値である。面積比は前項と同様に、8, 16, 24, 32%の4ケースである。Claussen⁽¹⁴⁾らの実験結果と同様に、インクルージョンの大きさが相対的に小さい場合には、破壊靱性が最大となる面積比が8%から24%のほうに移動していることが確認される。

4. 結 論

インクルージョンを含む二相材料に対し、インクルージョンの粒内破壊および変態塑性挙動を考慮に入れたメソスケールのシミュレーション手法である二次元メソ解析手法を提示した。この手法により、インクルージョンの変態塑性挙動に伴う体積膨張およびマイクロクラック損傷などが、マクロな応力・ひずみ関係および R 曲線挙動に及ぼす影響に関するさまざまなパラメータ計算を行った。その結果、これらのパラメータの影響に関し、ほぼ妥当と思われるシミュレーション結果を得ることができ、提示手法の有用性が示唆された。

文 献

- (1) 都井裕・諸正信, 機論, **59**-557, A(1993), 248-255.
  - (2) 都井裕・諸正信, 機論, **59**-563, A(1993), 1642-1649.
  - (3) 都井裕・清末考範, 機論, **59**-568, A(1993), 2866-2872.
  - (4) 都井裕・清末考範, 機論, **61**-582, A(1995), 447-453.
  - (5) 都井裕・清末考範, 機論, **62**-598, A(1996), 1488-1495.
  - (6) 李廷權・都井裕, 機講論, 974-1, (1997), 12-35~36.
  - (7) Evans, A. G. and Cannon, R. M., *Acta. Met.*, **34**(1986), 761-800.
  - (8) Evans, A. G., *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(1990), 187-206.
  - (9) Meeking, R. M. and Evans, A. G., *J. Am. Ceram. Soc.*, **65**(1983), 242-246.
  - (10) Budiansky, B., ほか2名, *Int. J. Solids Struct.*, **19**(1983), 337-355.
  - (11) Okada, H., ほか2名, *Acta. Met.*, **40**(1992), 1421-1432.
  - (12) Ramakrishnan, N., ほか2名, *Acta. Met.*, **39**(1991), 1297-1308.
  - (13) Yashima, M., ほか2名, *Taikabytsu*, **46**(1994), 91-98.
  - (14) Claussen, N., ほか2名, *Ceramic Bulletin*, **56**(1977), 559-562.
  - (15) Rule, M., ほか2名, *Acta. Met.*, **35**(1987), 2701-2710.
  - (16) Fu, Y. and Evans, A. G., *Acta. Met.*, **33**(1985), 1515-1523.
-