

二相固体の破壊挙動の二次元メソ解析

2-D Mesoscopic Simulation of Fracture Behavior of Two-Phase Materials

李 廷 権*・都 井 裕*

Jeoung Gwen LEE and Yutaka TOI

1. はじめに

材料中の微視的構造におけるマイクロクラックやマイクロポイドの発生と成長は、一般に材料の剛性、強度、靱性などの力学的特性の低下をもたらし、さらには巨視的な亀裂の発生と最終的な破断を引き起こす。

第二相粒子（短繊維またはインクルージョン）を含む二相材料は、個々の構成要素では達成し得ない性質を複合効果によって得られるという利点を有するが、発現する力学的挙動は組織内部の局所的不均質性および異方性により複雑なものとなる。すなわち、マイクロクラックを伴う損傷挙動において、母材、二相粒子および母材・二相粒子界面の力学的特性の違いにより亀裂の発生・進展の偏向が起こり、二相粒子自体の引き抜きや割れを伴う場合もある^{1),2)}。

本研究では、短繊維分散型と粒子分散型二相材料において観察される様々な現象、すなわち、方向性、含有率、二相材料自体の引き抜きや割れ等の影響による亀裂偏向、架橋のような力学挙動に対し、メソスケール（第二相粒子の長さスケール）の直接解析^{3),4)}を試みる。

2. 二次元メソ解析モデル

解析モデルは母材モデルと二相材料モデルから成るが、母材モデルはヴォロノイ分割法により生成された任意多角形メッシュを用いる。短繊維モデルは図1のように母点の間に位置するものと仮定し、インクルージョンモデルは図2に示したように母材メッシュ図の中でランダムに分散させた円型の内部に当たる要素をインクルージョンとして取り扱う。各要素および要素境界をそれぞれ剛体要素およびそれを結合する三つのばね系に置換する。すなわち、相対並進ばね k_m, k_s と相対回転ばね k_r から成るばね系を考える。要素 AB のヤング率を E_A, E_B とすれば、その平均や

ング率 E_c は次式のように表わせる。

$$E_c = \frac{E_A E_B}{E_A + E_B} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、要素 A, B がともに母材の場合、 E_A と E_B は E_m であり、短繊維の場合は E_f 、インクルージョンの場合は E_i 、母材とインクルージョンの界面の場合は $E_A = E_m$ または E_i 、 $E_B = E_i$ または E_m である。

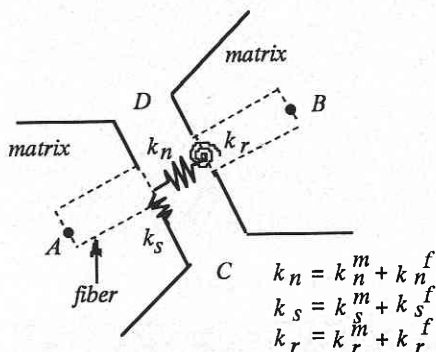


Fig. 1 Mesomechanics model for matrix and short fiber

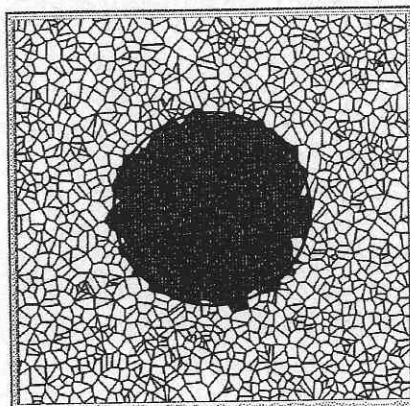


Fig. 2 Mesomechanics model for matrix and inclusion

*東京大学生産技術研究所 第2部

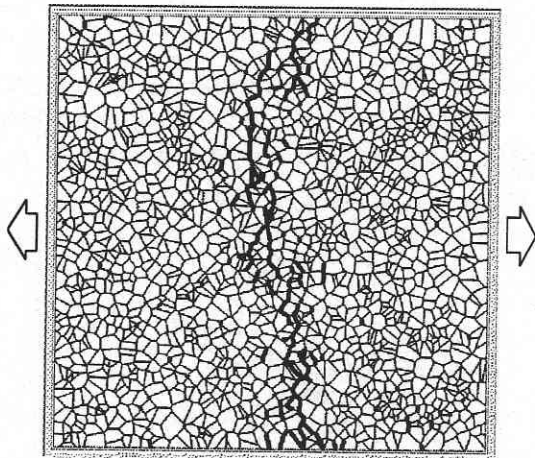
研究速報

したがって、結晶粒界面の三つのばね定数は以下のように計算される。

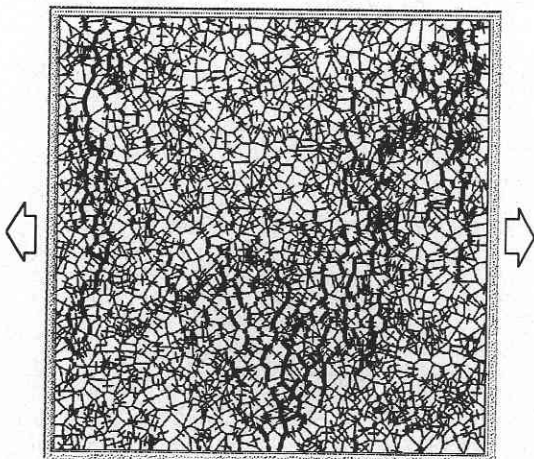
$$k_n = \frac{E_c L}{(d_1 + d_2)}, k_s = k_n \times c, k_r = k_n \times \frac{L^3}{12} \quad \dots\dots (2)$$

式中、 c は適当な定数であり、この値をコントロールすることにより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。 L は境界線の長さであり、母材またはインクルージョンの場合は $L=l_{CD}$ 、短繊維の場合は $L=w$ 、短繊維を含む母材の場合は $L=l_{CD}-w$ である。 w は短繊維の幅である。

次にマイクロクラックの発生、短繊維の破断および引き抜き等の条件は母材、インクルージョンおよび短繊維におけるそれぞれの垂直応力が各限界値に達した時に生ずると定義する。



(a) matrix only



(b) $A_i = 40\%$

Fig. 3 Microcracking pattern under tensile stress condition for the cases of matrix only and containing 40% short fibers

3. 計算結果と考察

3.1 短繊維を含む二相材料

図3に母材のみと短繊維を40%を含む二相固体のマイクロクラック進展図を示す。母材のみの場合には応力の増加に伴い最弱位置からマイクロクラックが発生し、その累積が連結・伝播を誘発し、やがては破断に至る。短繊維を含む要素境界部分においては、母材、短繊維の破断および母材・繊維間のはく離のそれぞれの条件により、母材のみにマイクロクラックが生じる繊維架橋、母材と繊維の界面にはく離が起こる繊維引き抜きなどが起こる。また、繊維補強により亀裂が生じにくくなる代わりに繊維がない所で亀裂が生じやすくなる亀裂偏向が現われる。図4は巨視的応力・ひずみ関係に関する計算結果である。図より、短繊維含有率が增大するに伴い残留強度が高くなっていることが

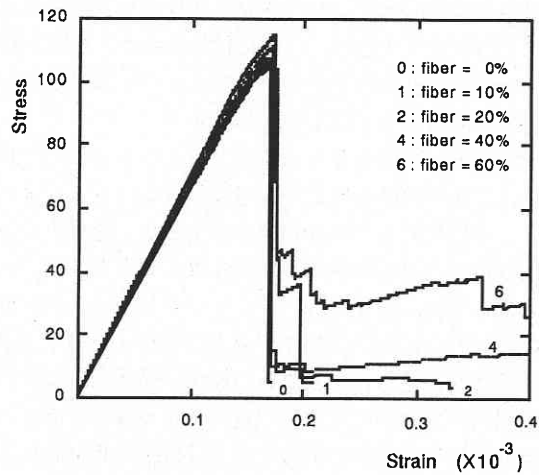


Fig. 4 Stress-strain relationship under tensile loading condition with various fiber area fractions

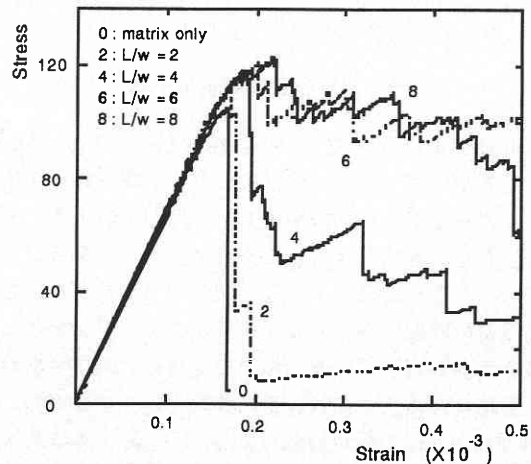


Fig. 5 Stress-strain relationship under tensile loading condition with various fiber aspect ratios

わかる。ここで用いた物性値は $E_f/E_m = 1.0$, $l/w = 2.0$, $\sigma_{fc}/\sigma_{mc} = 10.0$, $\sigma_{dc}/\sigma_{mc} = 9.0$ である。ここで, E_f , E_m はそれぞれ母材と短繊維のヤング率であり, σ_{mc} , σ_{fc} および σ_{dc} はそれぞれ母材, 短繊維および母材と短繊維の界面における限界応力である。また, 短繊維含有率を40%に固定し, アスペクト比 (l/w) を変化させた結果が図5である。本メソ解析モデルでは母点の間しか繊維が存在し得ないので, l/w を大きくすると繊維数が増加するため, 脆性的挙動から延性的挙動に変化している。

3.2 インクルージョンを含む二相材料

インクルージョンが存在する二相材料においては, 変形の初期段階からインクルージョンの割れあるいは母材・インクルージョン界面のはく離などの損傷が進行する場合, これが材料の高靱性化において重要な役割を果たすことが知られている⁵⁾。界面が強固な場合は母材における亀裂進展が界面に達した際に, インクルージョンの強度に依存して亀裂がインクルージョンを貫通したり, 迂回したりする。このような二相材料における様々な微視的損傷挙動をメソ解析法によりシミュレートする。インクルージョンを32%含む10000要素数のモデルで単軸引張り応力を与える。母材とインクルージョンのヤング率 E_m, E_i と, 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に示すような4ケースについて計算した。

3.2.1 剛なインクルージョン, 弱い界面

インクルージョンのヤング率および破壊強度が非常に大きく, 界面の破壊強度が母材より小さい場合(表1, case A)のマイクロクラックパターンを図6に示す。相対的に軟らかい母材の中に硬い粒子を分散することにより, その界面に応力集中が起こり, 図に示すように母材内の最大応力箇所が発生したクラックが界面に到達すると, 界面はく離を起こし, さらに母材内へ進展する。この界面はく離により, 図10に示したマクロ応力・ひずみ曲線に見られるような若干の延性化が発現すると考えられる。

3.2.2 強固なインクルージョン, 強い界面

図7にはインクルージョンが強固であり, かつ界面が強い場合(表1, case B)のマイクロクラックパターンを示す。インクルージョンと界面の強度が高いため, 界面はく離は見られず, ほとんどのマイクロクラックは母材内に生じる。したがって, 図10に見られるように剛性と最大応力値は高く, 脆性的な性質が顕著である。

3.2.3 弱いインクルージョン, 弱い界面

母材とインクルージョンのヤング率は等しく, 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(表1, case C)のマイクロクラックパターンを図8に示す。母材

および界面よりもインクルージョンの強度が低いため, ほとんどのマイクロクラックは当初インクルージョンの内部から生じ, インクルージョンを貫通した後に初めて母材の方に進展して行く。このため, 図10に見られるように, マクロな最大応力値は低いものの若干延性的な挙動を示している。

3.2.4 柔らかいインクルージョン, 弱い界面

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, インクルージョンの破壊強度が母材と等しい場合(表1, case D)のマイクロクラックパターンを図9に示す。ヤング率の相違により, まず母材から生じたマイクロクラックが進展して界面に達し, 界面に沿ってインクルージョンを回り込んでさらに伝播していく。このようなき裂偏向によりかなり延性的な挙動となっている。

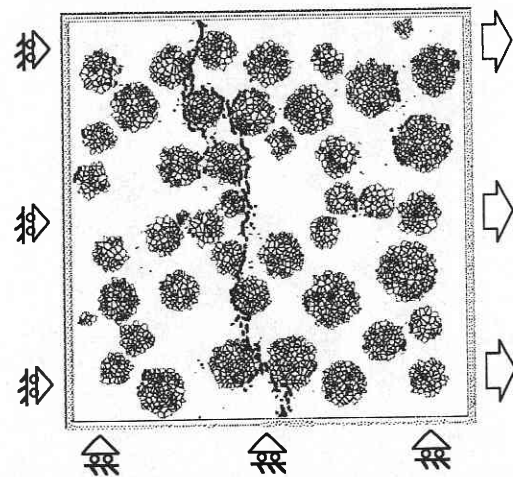


Fig. 6 Microcracking pattern with weakly-bonded rigid inclusions ($A_i=32\%$)

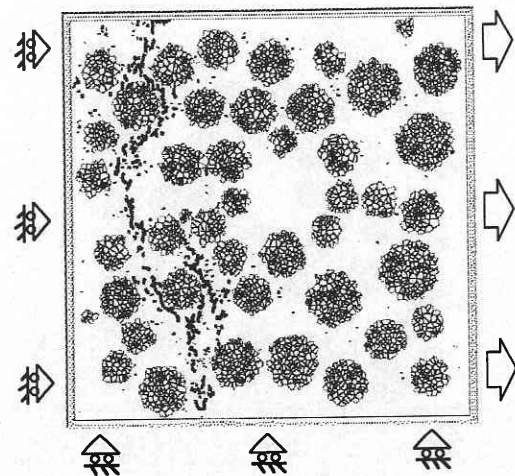


Fig. 7 Microcracking pattern with strongly-bonded tough inclusions ($A_i=32\%$)

4. 結 論

短繊維またはインクルージョンを含む分散型二相材料に対し、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、短繊維の引き抜きや亀裂偏向または母材、インクルージョンおよび母材・インクルージョン界面の弾性係数、破壊強度などがマイクロクラック損傷およびマクロな応力・ひずみ関係に及ぼす影響に関するパラメータ計算を行った。その結果、それらのパラメータの影響に関し、微視的損傷挙動をほぼ適切に解析し得ることが確認され、提示手法の有用性が示唆された。
(1997年1月16日受理)

参 考 文 献

- 1) K. Kishimoto, M. Notomi and T. Koizumi, Fracture toughness of short carbon fibre reinforced thermoplastic polyimide, Eng. Fracture Mechanics, 49, (1994), 943-952.
- 2) H. Okada, T. Tamura, N. Ramakrishnan, S. N. Atluri and J. S. Epstein, Analysis of toughening of magnesia partially stabilized zirconia due to dilatational transformation, Acta metall. mater. Vol. 40, No. 6, (1992), 1421-1432.
- 3) 都井・諸, 機論, 59-557, A (1993), 240.
- 4) 都井・清末, 機論, 59-568, A (1993), 2866.
- 5) Brian Lawn, Fracture of brittle solids, second edition, Cambridge solid state science series, (1993), 307-334.

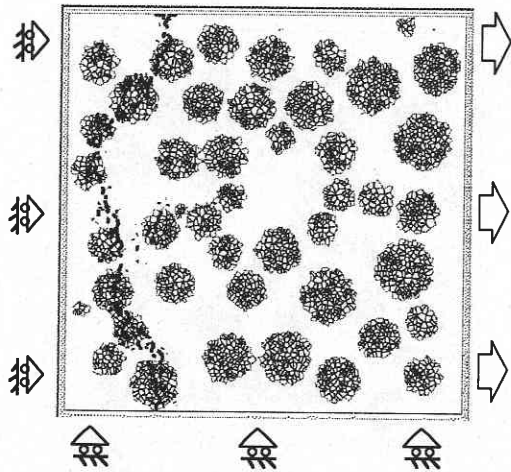


Fig. 8 Microcracking patten with weakly-bonded weak inclusions ($A_i=32\%$)

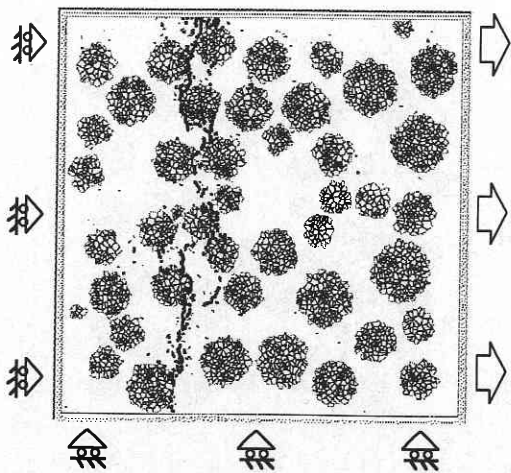


Fig. 9 Microcracking patten with weakly-bonded compliant inclusions ($A_i=32\%$)

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	$0.7 (S_m)_{cr}$

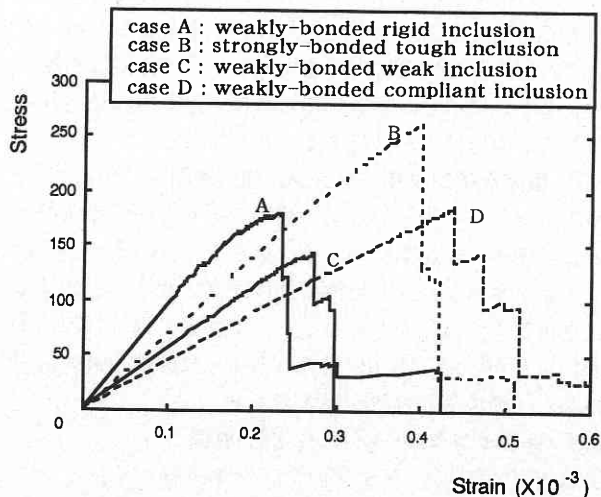


Fig. 10 Stress-strain relationship with different types of inclusions ($A_i=32\%$)