氏　　名	みなみ　あき **南　　亜　樹**
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 393 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規程第 3 条第 3 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　先端ファイブロ科学専攻
学位論文題目	**繊維強化複合材料の剛性損傷のマイクロメカニックス解析に関する研究**
審査委員	(主査) 教授　岩本正治 教授　濱田泰以 教授　荒木栄敏

論文内容の要旨

本研究では，繊維強化複合材料損傷の初期段階において生じる繊維破断と母材微視き裂による剛性低下をマイクロメカニックスにより解析し，陽な解が得られる手法を提案した．本論文は，これらの研究成果をまとめ，以下に示す６章から構成されたものである．

第１章では，複合材料内部に生じる微視的損傷による剛性低下の重要性について述べるとともに，その解析についてこれまでに行われてきた代表的なものについて述べ，残された問題を明らかにして，本研究の目的と意義について論じた．

第２章では，本研究で用いる Eshelby テンソルとき裂密度について検討した．マイクロメカニックス解析において用いられる Eshelby テンソルは，母材のポアソン比と介在物の形状を含むものである．しかしながら，これは形状の影響が複雑な形となっているため，これを母材のポアソン比と強化基材の形状に起因する部分とに完全に分離した形で記述した．また，き裂密度については，既に Budiansky と O'Connell により巨視的弾性定数に及ぼすき裂含有量の影響として定義されていが，本研究では，き裂間の相互作用を相互作用場で表すという Mori-Tanaka の定理に基づく手法を用いるという観点から，場の量である全ひずみに及ぼすき裂含有量の影響としてき裂密度を再定義した．

第３章では，複合材料中の繊維は偏在してクラスタを形成しており，破断した繊維と未破断のものを多数含む繊維クラスタが存在する状態をモデル化し，これを解析する手法を検討した．繊維の破断により繊維中にはき裂が生じることから，これらを含む繊維クラスタを多相三重不均質物としてモデル化した．まず，全ての相の弾性定数は母材のそれと同じであるが，相ごとに異なった固有ひずみを有する多相三重介在物が無限体母材中に１個存在する場合に対して，Hori と Nemat-Nasser の二重介在物に対する考え方を拡張して適用することで，各領域に渡る全ひずみと固有応力の体積平均を求めた．また，この多相三重介在物が有限物体中に多数存在する場合に対して，通常の一重介在物に対する Mori-Tanaka の定理を拡張することで多相三重介在物間の相互作用を求め，多相三重介在物の応力－ひずみ関係を定式化した．さらに，複合材料のモデルとして定義した多相三重不均質物が有限物体中に多数存在する場合に対して応力－ひずみ関係を求め，得られた結果を多相三重介在物に対するものと比較することで，多相三重不均質物の等価式を導いた．

この等価式を解くことで，材料内の繊維と母材各領域の応力及び材料の巨視的弾性係数を定式化し，繊維クラスタのアスペクト比やクラスタリングの程度及び繊維の破断がこれらに及ぼす影響を明らかにした．さらに，繊維の強度分布を考慮して，材料の剛性低下挙動に繊維のクラスタリングが及ぼす影響を明らかにした．

第４章では，母材微視き裂を含む一方向繊維強化複合材料に対して巨視的弾性定数が陽な形で得られる手法を検討した．まず，均質材料中に一方向に配列したき裂が多数分布する場合に対して，陽な解が得られるという特徴を有する Mori-Tanaka の定理に differential scheme の考え方を導入することで，き裂密度に関する巨視的全ひずみの微分方程式を導出するという方法を構築した．得られた微分方程式を解くことで巨視的全ひずみ，平均相互作用応力，巨視的弾性係数を定式化し， self-consistent 法の結果や Huang らの数値解析結果と比較した．次に，母材微視き裂を多数含む一方向繊維強化複合材料に対して，構築した手法を適用することで巨視的弾性定数を求め，Taya の手法による結果と比較することで，その適用範囲が繊維の存在によりどのように変化するかを明らかにした．

第５章では，き裂面が互いに垂直な方向に配向したき裂が均質材料中に多数分布する場合に対して，前章で構築した解析手法を適用し，平均相互作用応力や巨視的弾性定数を求め，differential scheme の結果や Huang らの数値解析結果と比較した．さらに，得られた結果を用いて，3 方向繊維強化複合材料に引張負荷が作用して母材中に多数の微視き裂が生じた場合に対して，材料中に生じる相互作用応力を求めた．

第６章は本研究の結論であり．これまでの章で得られた結果をまとめるとともに，繊維強化複合材料の剛性損傷のマイクロメカニックス解析に対する本研究の総括を行った．

論文審査の結果の要旨

本論文では，複合材料損傷の初期段階において生じる繊維破断と母材微視き裂による剛性低下をマイクロメカニックスにより解析し，陽な解が得られる手法が提案された．

繊維破断による剛性低下の解析においては，繊維の強度分布のみならず，その空間分布もまた重要な要因となることから，繊維強化複合材料中に破断繊維や未破断繊維を多数含む繊維クラスタが多数存在する状態を取り扱った．破断により繊維内には多数のき裂が生じることから，これらを含む繊維クラスタを多相三重不均質物としてモデル化し，Hori と Nemat-Nasser の二重介在物法の考え方を拡張することで，材料内に生じる応力場や材料の巨視的な弾性係数を定式化した．得られた結果は，繊維破断とともに巨視的弾性係数は減少し，また，クラスタ内に繊維が集中するとクラスタ外側の繊維濃度は疎となり母材領域の変形が増大するため，巨視的弾性係数は小さくなるという妥当なものであった．さらに，繊維の強度分布を考慮することで，材料の剛性低下挙動に対する繊維のクラスタリングの影響を明らかにした．

母材微視き裂による剛性低下の解析においては，繊維強化複合材料の母材中に多数の微視き裂が存在する状態に対して，陽な解が得られるという特徴を有する Mori-Tanaka の定理に differential scheme の考え方を導入することで，材料の巨視的な全ひずみのき裂密度に関する微分方程式を導くという方法を構築した．本解析手法により，巨視的全ひずみ，平均相互作用応力，巨視的弾性定数が陽な形で得られた．巨視的弾性定数の結果は，き裂密度の増加とともに零に漸

近するという物理的に妥当なものであり，その精度は，数値解析手法である self-consistent 法や differential scheme による結果と同程度のものであった．

本論文で構築した解析手法により得られた結果は陽な解であり，材料が最終的な破壊に至るまでに生じる繊維／母材界面における破壊を取扱う際にも有用なものであると考えられる．

なお，本論文の内容は主に下記の１１篇の論文を基礎に構成されたものである．そのうち８篇は申請者が筆頭著者となっている．

【本学位論文の基礎となった学術論文】

1. 荒木栄敏，山下浩儀，南亜樹，非圧縮性構成要素を含む複合材料に対する等価式の検討，日本機械学会論文集 A 編，71 巻 701 号，(2005 年)，pp.157-164.
2. 荒木栄敏，南亜樹，岩本正治，強化基材クラスタ中の強化基材破断による複合材料の剛性低下挙動の解析（第 1 報，多相三重介在物のひずみ場と応力場)，日本機械学会論文集 A 編，（投稿中)．
3. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，強化基材クラスタ中の強化基材破断による複合材料の剛性低下挙動の解析（第 2 報，多相三重不均質物の応力―ひずみ関係と等価式)，日本機械学会論文集 A 編，（投稿中)．
4. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，強化基材クラスタ中の強化基材破断による複合材料の剛性低下挙動の解析（第 3 報，強化基材クラスタリングと破断が応力場に及ぼす影響)，日本機械学会論文集 A 編，（投稿中)．
5. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，強化基材クラスタ中の強化基材破断による複合材料の剛性低下挙動の解析（第 4 報，強化基材のクラスタリングと破断が剛性低下に及ぼす影響)，日本機械学会論文集 A 編，（投稿中)．
6. 荒木栄敏，南亜樹，岩本正治，き裂問題への Mori－Tanaka の定理の拡張（第 1 報，配向したスリットき裂を含む材料の巨視的弾性係数)，日本機械学会論文集 A 編，70 巻 693 号，(2004 年)，pp.731-739.
7. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，き裂問題への Mori－Tanaka の定理の拡張（第 2 報，配向したペニー形き裂を含む材料の巨視的弾性係数)，日本機械学会論文集 A 編，70 巻 694 号，(2004 年)，pp.830-836.
8. Aki MINAMI, Shigetoshi ARAKI and Masaharu IWAMOTO, Application of Differential Scheme to the Mori-Tanaka Theorem for Macroscopic Stiffness Analysis of Aligned Elliptic Cracked-solids, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, Vol.52(2003), pp.3-18.
9. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，き裂問題への Mori－Tanaka の定理の拡張（第 3 報，2 方向に配向したスリットき裂を含む材料の巨視的弾性係数)，日本機械学会論文集 A 編，71 巻 701 号，(2005 年)，pp.140-148.
10. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，き裂問題への Mori－Tanaka の定理の拡張（第 4 報，母材き裂を含む 1 方向繊維強化複合材料の巨視的弾性定数)，日本機械学会論文集 A 編，71 巻 701 号，(2005 年)，pp.149-156.
11. 南亜樹，荒木栄敏，岩本正治，き裂問題への Mori－Tanaka の定理の拡張（第 5 報，3 方向に配向したペニー形き裂を含む材料の巨視的弾性係数)，日本機械学会論文集 A 編，（投稿中)．

【参考論文】

1. Kenji SAITO, Shigetoshi ARAKi, Tatsuro MORITA, Noritake MORI and Aki MINAMI, Stress Intensity Factor for Inclined Micro-Flaw ahead of Mode III Crack, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, Vol.48(1999), pp.171-178.