

	きくちけいこ		
氏名	菊池圭子		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成15年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)材料加工プロセス学専攻		
学位論文題目	直接数値シミュレーションによる焼結複合材の物性推定および機能制御に関する研究		
指導教官	東北大学教授 川崎 亮		
論文審査委員	主査 東北大学教授 川崎 亮	東北大学教授 渡辺 龍三	
	東北大学教授 池田 圭介		

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

近年、材料に要求される特性が複雑化する中、ひとつの材料の中で任意に機能を分布させることができる傾斜機能材料が注目されている。しかし求められる機能をもつ材料を作成するためには、構成相や組成分布を適切に決定する必要がある。複合材料の物性値は組織や組成に依存した変化を示すが、この変化を定量的に把握することは傾斜機能材料の特性を制御するという観点から見て非常に重要である。そこで本論文では複合材料の組織から物性値を推定する新たな解析方法を提案した。

本研究の目的を以下に示す。

- (1) 複合材料の組織から物性値を推定する新たな解析方法を提案する。
- (2) 単純なモデルを用いてこれまで研究がなされてきた解析モデルと比較し、さらに実存する複合材料の実測値と比較することにより本研究で提案する物性値推定法の精度について検討を行う。
- (3) 本研究で提案する方法を用いて構成相同士の間での反応や界面剥離が生じている複合材料の物性値を推定する方法を提案する。
- (4) 本研究で提案する物性値推定法を組織が連続的に変化する傾斜機能材料に適用し、組織レベルからの傾斜構造設計を提案する。

### 第2章 実験方法・解析方法

本研究で用いた複合材料の作製方法および試料の評価方法についてまとめて述べた。また本研究で提案する物性値推定法の解析手順を示した。

Fig.1 に本研究で提案する物性値推定法の概略を示す。まず光学顕微鏡やSEMなどを用いて組織観察を行い、その組織をデジタル画像としてパソコン上に取り込む。次に組織画像に画像処理を施し複合材料の各相の領域に分離する。この画像処理を施された組織に従ってモデル内の要素それぞれに各相の物性値を割り当てることにより複合材料の組織が再現されたモデルとする。ただし要素の形状および大きさはモデル内で一定とした。このモデルに対し任意の境界条件を与えて有限要素解析を行い、その結果をもとに物性値の推定を行う。本研究では物性値を推定する方向の境界に10Kの温度落差 $\Delta T$ を与え、それ以外の境界には周期境界条件を与えた。以上の境界条件のもとで有限要素解析を行いモデル内に発

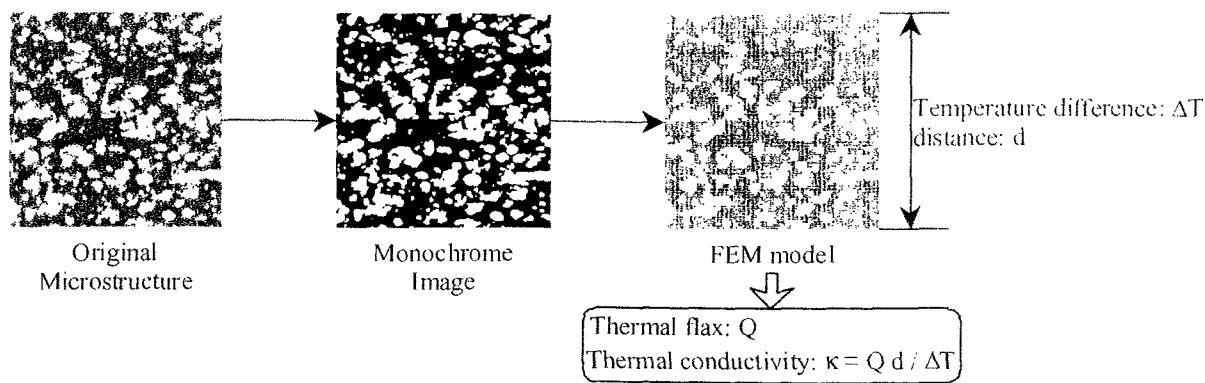


Fig.1 Procedure of thermal property simulation.

生ずる熱流束の分布を求める。有効熱伝導率  $\kappa$  はモデル内の平均熱流束  $Q$  と物性値を推定する方向のモデル 1 辺の長さ  $d$  を用いて以下の式により求められる。

$$\kappa = \frac{Qd}{\Delta T}$$

解析には汎用の有限要素法解析ソフトウェアである ANSYS を用いた。

### 第 3 章 従来の理論との比較による物性値推定法の評価

規則的に繰り返す組織をもつ複合材料を仮定し、本研究で提案する物性値推定法の精度を評価した。モデルは市松模様状に繊維が配列した一方向繊維強化材料、円柱状の繊維が規則的に配列した一方向繊維強化材料、球状の粒子が規則的に分散した粒子複合材料の 3 種類とし、従来の方法で理論的に求められた物性値と本研究で提案する方法による推定熱伝導率の比較を行う。規則的に繰り返す組織の 1 周期分にあたる領域を組織の基本構造を表すユニットセルとして扱い、解析要素数、解析モデルサイズ、構成相の熱伝導率比、繊維または粒子の体積分率が物性値に与える影響について検討した。市松模様状に繊維が配列した組織をもつ複合材料では、理論的に求められた厳密解との誤差が要素数、解析モデルサイズがともに増加するほど小さい値を示すということがわかった。また構成相の熱伝導率比の増加にともないこの誤差が一次関数的に増加するということが明らかにした。円柱状の繊維が配列した組織および球状の粒子が分散した組織をもつ複合材料について、両者の推定熱伝導率は同じ傾向をもって変化しており、要素数をある一定以上の値として解析を行うと推定熱伝導率は収束し、さらに解析モデルサイズや構成相の熱伝導率比にも依存しないということを明らかにした。また熱伝導率を推定するために従来から用いられてきた複合則と本研究で提案する方法と比較した場合、モデルの分散相どうしが接触しないという条件のもとでよく一致した。したがって本研究で提案する物性値推定法の精度は組織の形状に大きく依存するということが明らかにした。

### 第 4 章 繊維強化材料を用いた物性値推定法の評価

本研究で提案する物性値推定法を現実の複合材料に適用する場合の精度について検討した。モデル材料として Mo 繊維-Cu 複合材料をとりあげた。この系の複合材料はヒートシンク材料として一般に用いられており、理想的な界面をもつと考えられる。この材料に対して本研究で提案する物性値推定法を適用しさらに実測値との比較を行った。まず複合材料の組織の中から基本構造として考えるユニットセル

の大きさを変化させ、現実の材料に含まれる不規則な組織が物性値に与える影響をユニットセルを大きくすることによって考慮できることを示した。また Mo 繊維-Cu 複合材料について本研究で提案する方法による推定熱伝導率の実測値に対する誤差をユニットセルの大きさに関連付けて評価した。

## 第5章 焼結複合材料の熱物性評価

組織に異方性をもつCu-Mo系焼結複合材料に本研究で提案する物性値推定法を適用し、そこで得られた推定熱伝導率と実測値、Eshelbyの等価介在物法による解析値との比較を行った。また複合材料の組織から三次元有限要素モデルを作成し、二次元モデルから得られる推定熱伝導率との比較を行った。最初に解析に用いたCu-Mo系焼結複合材料の組織をFig.2に、二次元モデルを用いた推定熱伝導率と実測値および等価介在物法による解析値との比較を行った結果をFig.3に示す。本研究で提案する物性値推定法は組織の異方性や配向性を考慮したEshelbyの等価介在物法よりも正確に複合材料の物性値を推定できることを明らかにした。また本研究で提案する方法により組織に異方性をもつ複合材料の各方向の物性値を推定できることを示した。したがって本研究で提案する物性値推定法を用いると、試料形状などの制限からこれまでは測定することができなかった複合材料の特性についても推定できるようになる。また分散組織をもつ複合材料とネットワーク組織をもつ複合材料それぞれについて三次元モデルを作成し、二次元モデルから得られる推定熱伝導率との比較を行った。その結果、分散組織をもつ複合材料については2つ推定熱伝導率がほぼ一致し、本研究で提案する方法により二次元モデルを用いて推定した物性値は現実の複合材料の物性値を十分に表すことができることを明らかにした。またネットワーク組織をもつ複合材料については、組織の連続性を表すために分散組織をもつ複合材料よりも広い範囲の組織についてモデリングを行う必要があると考えられる。

## 第6章 ポア・界面剥離・界面反応相をもつ複合材料の熱物性評価

ポアや界面剥離、界面反応相をもつ複合材料の熱伝導率を本研究で提案する物性値推定法を用いて推定するための手法を提案した。またその適用例として界面剥離をもつステンレス-ZrO<sub>2</sub>系複合材料および界面反

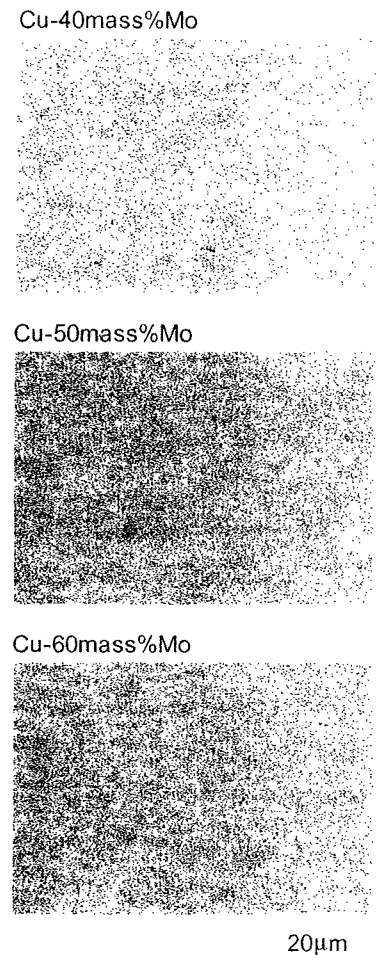


Fig.2. Optical micrographs of Cu-Mo composites.

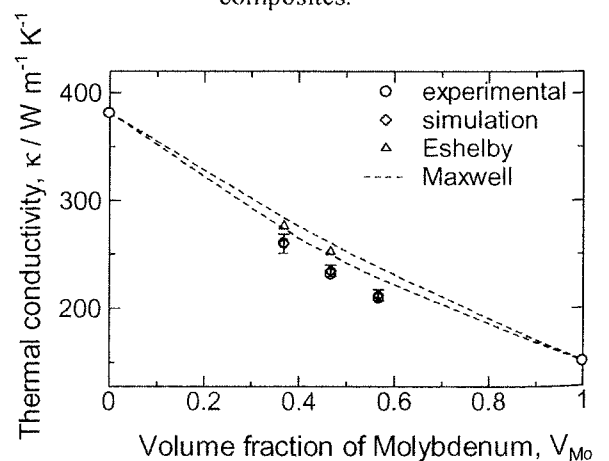


Fig.3 Thermal conductivities in thickness direction of Cu-Mo composites.

応相をもつ Al-SiC 系複合材料について熱伝導率の推定を行った。ステンレス-ZrO<sub>2</sub> 系複合材料については、界面がすべて剥離しているという条件のもと本研究で提案する方法を用いて熱伝導率の推定を行った。その結果、推定熱伝導率は界面剥離を考慮しない場合よりも低下し、より実測値に近い値を得ることができた。また Al-SiC 複合材料については、ウィスカー状の析出物が界面に析出している場合でも本研究で提案する方法を用いた物性値の推定を可能にするための手法を提案した。またその手法を適用し、界面すべてに反応相が析出しているという条件のもと、本研究で提案する方法を用いて熱伝導率の推定を行った。また本研究で提案する方法を用いて界面反応相を考慮した解析を行うことにより組織に依存して物性推定値が変化することが確かめられた。

## 第 7 章 傾斜機能材料の傾斜構造設計

まず本研究で提案する物性値推定法を傾斜機能材料へ応用する方法について述べた。またその例としてコンプライアントパッド材料をとりあげ、有限要素法による残留熱応力解析と組み合わせることにより Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系対称型傾斜機能材料の最適組成設計を行った。まず Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系複合材料について本研究で提案する物性値推定法を用いて熱伝導率を推定し、その結果を用いて次元熱伝導解析と有限要素法による熱応力解析により傾斜構造設計を行った。コンプライアントパッドとして用いられる Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系対称型傾斜機能材料の最適組成分布は傾斜構造指数  $p=0.07$  の場合であり、最大残留熱応力を Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の破壊応力より低くできることを示した。また最適組成分布をもつ傾斜機能材料を放電プラズマ焼結法を用いて焼結した結果、健全な Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系対称型傾斜機能材料を作製することができた。さらに作製した傾斜機能材料について、本研究で提案する物性値推定法を用いて材料内部の熱伝導率分布を明らかにし材料全体の熱抵抗を評価した。

# 論文審査結果の要旨

ひとつの材料の中で任意に機能を分布させることができる傾斜機能材料など、複合材料に要求される特性が複雑化している。これら複合材料の物性値は組織や組成に依存した変化を示すため、この変化を定量的に把握した上で構成相や組成分布を適切に決定する必要がある。しかし、複雑な組織を有する複合材料の物性値推定法は依然として十分ではなく、実際に作製した例えば傾斜機能材料内部の局所的な物性値の変化を評価する方法も確立されていないのが現状である。本論文は複合材料の組織から直接モデルを作成して物性値を推定する新たな解析方法を提案したもので、モデル組織に対する厳密解および複合則による推定値と比較することでその推定精度を明らかにし、また種々の焼結複合材料に適用しその有効性を明らかにした。さらに、ポアや界面剥離、界面反応相を考慮する方法並びに傾斜機能材料の組織構造設計への応用についても言及している。本論文は全編8章で構成されている。

第1章は序論であり、研究の背景および目的を述べている。

第2章では、本研究で用いた複合材料の作製方法および試料の評価方法について述べ、本研究で提案する物性値推定法の詳しい解析方法について説明した。

第3章では規則的に繰り返す組織をもつ複合材料を仮定し、本研究で提案する物性値推定法の精度を評価し、工学的に十分な精度を持つことを示した。

第4章ではモデル材料としてMo繊維-Cu複合材料をとりあげ、本研究で提案する物性値推定法を現実の複合材料に適用する場合の精度について検討した。

第5章では組織に異方性をもつCu-Mo系焼結複合材料に本研究で提案する物性値推定法を適用し、Eshelbyの等価介在物法よりも正確に複合材料の物性値を推定できることを明らかにするとともに、三次元モデルを作成し、二次元モデルから得られる推定熱伝導率との比較を行い、分散組織をもつ複合材料について二次元モデルを用いて物性値を十分に表すことができることを明らかにした。

第6章ではポアや界面剥離、界面反応相をもつ複合材料の熱伝導率を本研究で提案する物性値推定法を用いて推定するための手法を提案した。

第7章では、本研究で提案する物性値推定法を傾斜機能材料へ応用する方法について述べ、その例としてコンプライアントパッド材料をとりあげ、有限要素法による残留熱応力解析と組み合わせることによりNi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系対称型傾斜機能材料の最適組成設計を行った。作製した傾斜機能材料内部の局所的熱伝導率の分布および材料全体の熱抵抗を評価し、本法の有効性を示した。

第8章は本研究をまとめた総括である。

以上、要するに本論文では複合材料の組織から物性値を推定する新たな解析方法を提案し、数種類の複合材料を例としてとりあげることにより、この推定方法が様々な複合材料や組織が連続的に変化する傾斜機能材料の物性値を推定できることを明らかにした。また、工学的応用についても言及しており、材料加工プロセス学の発展に寄与することが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。