



# 微視構造を有する材料の高強度・高機能化に関する研究

比嘉, 吉一

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-09-30

(Date of Publication)

2014-07-08

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2189

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002189>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【243】

氏名・(本籍) 比嘉 吉一 (京都府)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博い第191号

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の日付 平成12年9月30日

【学位論文題目】

微視構造を有する材料の高強度・高機能化に関する研究

審査委員

主査 教授 富田 佳宏 教授 森田 喜保

教授 多田 幸生

本研究では、微視構造を有する材料の高機能化、高強度化を行うべく、微視レベルからの詳細な変形機構を捉え、その結果生ずる巨視的な変形挙動を明らかにするために、微視的観点に立脚したいくつかの力学手法に対して、高精度化及び種々の変形応答を記述可能な形式へ一般化を行った。ついで、これらを導入した数値シミュレーションによって微視構造を有する材料に特有の変形挙動を解明した。

第2章では、非連合塑性理論に基づく粘塑性構成式、結晶塑性理論に基づく塑性構成式ならびに延性多孔質材の塑性構成式を導出した。つづいて、微視構造の存在に起因した微視的不均一性によって生ずる様々な巨視的変形応答を解明すべく、微視的観点に立脚した力学手法である固有ひずみ場を用いたマイクロメカニックスの均質化手法及び2変数漸近展開理論に基づく均質化法について示した。さらに、大きな変形をともなう弾粘塑性境界値問題を取り扱い可能な形式へ2変数漸近展開理論に基づく均質化法を一般化することで、微視的關係式、巨視的平衡方程式を導出し、本章にて示した構成式を導入した更新ラグランジュ法による有限要素方程式を定式化した。これにより、均質化法を用いた弾粘塑性問題の数値シミュレーションの基礎を確立した。

第3章では、固有ひずみ場を用いた複合材のマルチスケール解析手法に注目し、unit cell内に発生する固有ひずみ場の平均化手法の一つである Subdivisions Methodにより評価した複合材の機械的特性と2変数漸近展開理論に基づく均質化法を導入した有限要素解析による結果との比較により精度評価を行った。その結果、Subdivisions Methodにおいては、介在物領域内を等面積一様分割にて離散化することにより、高精度の弾性特性評価が行えることを示した。つづいて、本手法を一方向繊維強化型複合材及び短繊維強化型複合材に対して適用し、強化相配置の違いが巨視的な弾性特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、一方向繊維強化型複合材に対する弾性特性評価より、繊維の配向方向に対する横方向の巨視的な剛性が、繊維配置の違いに大きく依存し変化することを確認した。さらにこの変化は、マトリクス-強化相の剛性比が大きい場合、強化相内部に発生する固有ひずみが大きくなるため、より顕著となって現れることを明らかにした。また、短繊維強化型複合材の弾性特性の評価から、巨視的な剛性は、繊維の配置パターンの違いにより著しい変化を示し、その最大値と最小値との間で約25%の差異を生ずるものの、巨視的なせん断剛性に対して生ずる差異は5%程度であり、繊維の配置パターンの違いがせん断弾性定数に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。この結果より、適切な繊維配置を行うことで、必要な剛性をもつ複合材の創製が可能であることを示した。

第4章では、2章で定式化した弾粘塑性体の構成式を導入した2変数漸近展開理論に基づく均質化法へ、微視構造の特徴長さに依存した巨視的変形応答を記述するために、ひずみ勾配依存型構成式を導入することで、有限長さを考慮可能な数値モデルを構築した。ついで、これを用いた有限要素シミュレーションにより、粒子強化型複合材に見られる強化粒子の粒子径、体積含有率、粒子配置ならびに巨視的な負荷方向の違いが巨視的な変形応答に及ぼす影響について検討した。その結果、強化粒子径を一定とした場合は、強化材の体積含有率の増加にともない、複合材内部の強化粒子間隔が減少するため、マトリクス相に大きなひずみ勾配が発生することを確認した。これにより、体積含有率一定の下では、粒子径を小寸法とすることで、複合材の変形抵抗が増加することを明らかにした。また、マトリクス相に生ずるひ

ずみ勾配項の大きさは、強化材配置ならびに巨視的な負荷方向の違いに大きく依存しており、その結果、複合材としての変形抵抗が著しく変化することを明らかにした。以上の結果は、実験によって報告されている粒子強化型複合材の力学特性を数値シミュレーションによって再現しており、強化材の粒子寸法を小さく、使用環境下の力学状態に応じて、マトリクス相に発生するひずみ勾配項を大きくするような粒子配置を選択することで、複合材の変形抵抗を増大可能であることを示した。

第5章では、 $\gamma'$ 相含有 Ni 基単結晶超合金の機械的特性を明らかにする目的から、 $\gamma/\gamma'$ 相間の幾何学的配置における微視的周期性を仮定することにより、同材料の数値シミュレーションモデルを、結晶塑性理論に基づく構成式を導入した均質化法によりモデル化し、これに対応した有限要素法の定式化を行った。つづいて、同材料に見られる $\gamma'$ 相形状、体積含有率に加え、巨視的な負荷方向に対応した $\gamma/\gamma'$ 両相の結晶方位の違いが、巨視的な変形特性に及ぼす影響について平面応力問題を仮定して検討を行った。 $\gamma/\gamma'$ 両相の結晶方位に対応する巨視的な負荷方向の違いが巨視的な変形挙動に及ぼす影響について検討したところ、[001]loading とした場合に比して [110]loading とした場合の結果は、単結晶体の単軸引張挙動では活動しないすべり系が $\gamma$ 相中で新たに塑性変形に寄与することを確認した。さらに、 $\gamma'$ 相形状の違いにより $\gamma$ マトリクス中に発生する応力場が著しく異なるため、unit cell 内で観察されるひずみの吸収領域のパターンに差異を生ずることを確認した。その結果、[110]loading とした場合に、巨視的な変形抵抗に大きな差異を生ずることを明らかにした。ついで、 $\gamma'$ 相の体積含有率の違いが巨視的な変形挙動に及ぼす影響について検討したところ、体積含有率を小さくした場合に、変形の吸収を起こす $\gamma$ 相が広く、 $\gamma'$ 相のコーナー部及びコーナー部より進展し結合する部分で著しいひずみ集中を起こすことを明らかにした。また、体積含有率の増加とともに $\gamma$ 領域が狭くなるため、未塑性変形部分にも変形が及び顕著なひずみ集中が起こらないことを確認した。その結果、 $\gamma'$ 相体積含有率を大きくした場合に巨視的な変形抵抗が大きくなることを明らかにした。

第6章では、 $\gamma/\gamma'$ 両相の結晶方位ならびに $\gamma'$ 相の空間配置といった3次元的に存在する微視構造の詳細なモデル化を行うため、5章で示した結晶塑性理論を導入した均質化法による3次元シミュレーションモデルを作成した。ついで、 $\gamma'$ 相の体積含有率及び $\gamma/\gamma'$ 両相の結晶方位の違いが、巨視的な変形特性に及ぼす影響について有限要素シミュレーションより検討を行った。その結果、 $\gamma/\gamma'$ 両相の空間配置に対応した結晶方位を変化させた場合、 $\gamma'$ 相体積含有率の違いにより巨視的な弾性特性に顕著な差異を生じないことを明らかにした。これは、 $\gamma/\gamma'$ 両相の異方性弾性係数に大きな差がなく、巨視的な変形挙動に寄与する特性変位に大きな差を生じないためである。一方、 $\gamma/\gamma'$ 両相の空間配置に対応した結晶方位を(101)面内で変化させた場合に比して、(001)面内で変化させた場合に、粘塑性特性については大きな差異を生ずることを明らかにした。これは、 $\gamma'$ 相の存在に起因する不均一変形場に誘起される各すべり系でのせん断ひずみ速度が結晶方位の違いにより大きく異なるためであり、塑性変形を駆動する各すべり系での変形について平面応力問題の仮定では再現できなかった変形様式の著しい違いを再現した。また、 $\gamma'$ 相体積含有率を大きくした場合には、主なる変形を吸収する $\gamma'$ 相の領域が狭くなり、そこへ変形が集中するため巨視的な変形挙動に及ぼす影響が大きくなることを明らかにした。

第7章では、種々の初期空孔率を持った銅多孔質材の単軸引張試験結果に対し、

延性金属材料の応力-ひずみ曲線を精度良く評価することが可能な  $n$  乗硬化則が成立するものと仮定することで、形式的に塑性係数ならびに加工硬化係数を求め、これらの実験結果を外挿することにより母材の材料定数を算出した。つづいて、得られた母材の材料定数を用い、多孔質材に対するブリネル圧子押し込み試験の有限要素解析を行った。ここでは、これまでに提案されている延性多孔質材の塑性構成式を導入し、構成式の違いによる解析結果への影響等について検討した。また、放電プラズマ焼結法により作成された比較的高い空孔率を有する材料に対して、ブリネル硬さ試験を行い、数値解析結果との比較を行った。その結果、初期空孔率が 20%程度までの多孔質材に対する解析であれば、Tvergaard の修正 Gurson 型構成式ならびに Stereology 理論に基づく修正 Goya-Nagaki-Sowerby 塑性構成式を導入した場合の解析結果が実験結果との対応が良いことを明らかにした。一方、初期空孔率を 30%とした場合、上記 2 種類の塑性構成式を導入した解析結果と実験結果との対応が悪くなることを明らかにした。これは、実験に供されたこの種の高空孔率多孔質材において、銅球同士が大きく変形することなく単に少し接触する形で焼結されるため、空孔形状が球形であることをベースにした塑性構成式では微視的に見られる変形機構を表現できないことを指摘した。これにより、実験結果で現れた巨視的な変形特性は、多孔質材を形成する空孔形状そのものの影響が現れたものであり、高空孔率多孔質材の塑性構成式に対しては、形状効果等を包含することの可能な塑性構成式の提案が必要であることを示した。

以上より、材料の各種微視構造を反映した挙動及び強度評価に必要なマルチスケールモデルの構築を行い、それらを導入した数値シミュレーションにより、本研究において提案したモデルの妥当性と適用性について示した。今後は、複合材に見られるマトリクス-強化相間のはく離、析出強化型単結晶超合金に見られる変形の局所化-転位の集団挙動に関連した下部組織形成、析出相の連結といった微視レベルの動的変形過程の予測及びその結果生ずる巨視的な変形応答の評価に、本論文で示した力学手法が活用可能であると考えられる。

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏名	比嘉 吉一		
論文題目	微視構造を有する材料の高強度・高機能化に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	富田 佳宏
	副査	教授	森田 喜保
	副査	教授	多田 幸生
要 旨			
<p>本研究では、微視構造を有する材料の高機能化、高強度化を行うべく、微視レベルの詳細な変形機構を捉え、その結果生ずる巨視的な変形挙動を明らかにするために、微視的観点に立脚したいくつかの力学手法の高精度化及び種々の変形応答を記述可能な形式への一般化を行っている。ついで、これらを用いた数値シミュレーションによって微視構造を有する材料に特有の変形挙動を解明している。</p> <p>本論文の第1章は、本研究の背景と研究目的を述べている。第2章では、非連合塑性理論に基づく粘塑性構成式、結晶塑性理論に基づく塑性構成式ならびに延性多孔質材の塑性構成式が導出されている。ついで、微視構造の存在に起因した微視的不均一性によって生ずる様々な巨視的な変形応答を解明すべく、固有ひずみ場を用いたマイクロメカニックスの均質化手法及び2変数漸近展開理論に基づく均質化手法の大きな変形をともしなう弾粘塑性境界値問題への一般化を示し、後続の章における数値シミュレーションの基礎を確立している。</p>			

第3章では、固有ひずみ場を用いた複合材のマルチスケール解析手法に注目し、unit cell 内に発生する固有ひずみ場の平均化手法の一つである Subdivisions Method の高精度化をはかり、介在物領域内を等面積一様分割にて離散化することにより、高精度の弾性特性評価が行えることを示している。本手法を一方向繊維強化型複合材及び短繊維強化型複合材に対して適用し、一方向繊維強化型複合材では、繊維の配向方向に対する横方向の巨視的な剛性が繊維配置の違いに大きく依存すること、マトリクス-強化相の剛性比が大きい場合、強化相内部に発生する固有ひずみが大きくなるため、変化がより明確に現れること、短繊維強化型複合材では、巨視的な剛性は、繊維の配置パターンの違いにより著しい変化を示し、その最大値と最小値との間で約25%の差異を生ずること、巨視的なせん断剛性の変化は少ないことを確認している。これより、適切な繊維の配置により、必要な剛性を得る可能性が示された。

第4章では、2章で定式化した均質化法に、微視構造の特徴長さに依存した巨視的な変形応答を記述するために、ひずみ勾配依存型構成式を導入した数値モデルを構築している。これを用いた有限要素シミュレーションにより、複合材内部の強化粒子間隔が減少し、マトリクス相に大きなひずみ勾配が発生する場合、複合材の変形抵抗が増加することを確認している。これにより、体積含有率一定の下では、粒子径を小寸法とすることで複合材の変形抵抗が増加すること、マトリクス相に生ずるひずみ勾配項の大きさは、強化材配置ならびに巨視的な負荷方向の違いに大きく依存しており、その結果、複合材としての変形抵抗が著しく変化することを明らかにしている。このような結果は、粒子強化型複合材の実験によって得られた力学特性をよく再現しており、強化材の粒子寸法を小

さくし、使用環境下の力学状態に応じてマトリクス相に発生するひずみ勾配項を大きくするような粒子配置を選択することで、複合材の変形抵抗を増大できることを示唆している。

第5章では、 $\gamma'$ 相含有 Ni 基単結晶超合金の機械的特性を明らかにするために、 $\gamma / \gamma'$ 相間の幾何学的配置の微視的周期性を仮定することにより、均質化法に結晶塑性理論に基づく構成式を導入した有限要素法の定式化を行い、同材料に見られる $\gamma'$ 相形状、体積含有率に加え、巨視的な負荷方向に対応した $\gamma / \gamma'$ 両相の結晶方位の違いが、巨視的な変形特性に及ぼす影響について平面応力問題を仮定して検討を加えている。その結果、負荷方位の違いにより、単結晶体の単軸引張挙動では活動しないすべり系が $\gamma$ 相中で新たに活動し塑性変形に寄与すること、 $\gamma'$ 相形状の違いにより $\gamma$ マトリクス中に発生する応力場が著しく異なるため、unit cell 内で観察されるひずみの吸収領域のパターンに差異を生じ、巨視的な変形抵抗の差となって現れることなど、微視構造と巨視的な変形抵抗の本質的な関係が解明された。

第6章では、 $\gamma / \gamma'$ 両相の結晶方位ならびに $\gamma'$ 相の空間配置といった3次元微視構造の詳細なモデル化を行うため、結晶塑性理論を導入した3次元均質化モデルを作成している。ついで、有限要素シミュレーションにより、 $\gamma'$ 相の体積含有率及び $\gamma / \gamma'$ 両相の結晶方位の違いが、巨視的な変形特性に及ぼす影響について検討を行っている。その結果、 $\gamma / \gamma'$ 両相の異方性弾性係数の差が小さく、 $\gamma'$ 相体積含有率の違いが巨視的な弾性特性に与える影響は小さいこと、 $\gamma / \gamma'$ 両相の空間配置に対応した結晶方位を(101)面内で変化させた場合に比して、(001)面内で変化させた場合に、粘塑性特性に大きな差異を発生させることを明らかにしている。

これは、 $\gamma'$ 相の存在に起因する不均一変形場に誘起される各すべり系でのせん断ひずみ速度が結晶方位の違いにより大きく異なるためであり、平面応力問題の仮定では再現できなかった変形様式の著しい違いを再現できたことによる。

第7章では、種々の初期空孔率を持った銅多孔質材に対して、ブリネル圧子押し込み試験の有限要素解析を行い、延性多孔質材に対して提案されている構成式の妥当性を評価した。また、放電プラズマ焼結法により作成された比較的高い空孔率を有する材料に対して、ブリネル硬さ試験を行い、数値シミュレーション結果と比較検討し、初期空孔率が20%程度までの多孔質材に対しては、シミュレーション結果が実験結果と良い対応をすること、初期空孔率を30%とした場合、いずれの構成式も実験結果を十分説明できないことを明らかにしている。その原因として、実験に供された高空孔率多孔質材において、銅球同士が大きく変形することなく接触する形で焼結されるため、空孔形状が球形であることを仮定して定式化された塑性構成式では表現できないことを指摘している。これは、今後このような材料の構成式の定式化において重要な指針を与える。

本研究は、材料の各種微視構造を反映した挙動ならびに強度の評価に必要なマルチスケールモデルの構築を行い、それを用いたシミュレーションによって、提案したモデルの妥当性ならびに適用性を証明している。本研究で得られた成果は、今後の各種微視構造を有する材料の特性評価ならびにその制御による材料設計のための要請に十分応えられるものであり、材料工学の分野において重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者比嘉吉一は、博士(工学)の学位を得る資格があるものと認める。