

# 論文審査の結果の要旨

氏名 海田博司

本論文は5章からなる。天然に産する岩石や人工的に作られた材料はさまざまな組織を持つ。それぞれの組織は、岩石であればその成因遍歴を語り、材料であれば強度特性の決定要因となる。このような組織構造の形成メカニズムと機械的特性の関連性を解明することは、物質科学における重要な課題のひとつである。

本研究の最も重要な成果は、最新の単結晶育成技術であるマイクロ引き下げ(Micro-pulling-down method;  $\mu$ -PD)法を超高温強度材料の開発研究に展開し、新規な二元系および三元系酸化物共晶体ファイバー超高温強度材料を開発し、その微細組織構造および機械的特性の関連性の解明を通じて、エネルギー問題を解決できる超高温耐熱材料開発の開発指針を得ることに成功した点にある。

第1章では、本研究で対象となる複合材料および超高温強度材料に関するこれまでの研究成果を纏めている。1950年代の初めにウイスキー状の単結晶が理論値に近い強度を示すことが報告されて以来、それを利用した複合強度材料の開発研究が注目を集めてきた。最近では、高効率発電ガスタービンなど超高温運転を可能とする超高温耐熱複合強度材料の開発を目標とし、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  共晶体および  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GdAlO}_3$  共晶体など、一方向凝固共晶材料の研究が始まっている。本章では、このような現状を分析し、良好な機械的特性を示す微細組織の実現と同時に、従来の粉末焼結法では不可能である精密な微細組織制御ができる新たな作製方法の確立が不可欠であることを述べている。そして、最新の単結晶育成方法であるマイクロ引き下げ法の利点を述べ、組織制御した共晶材料の作製には、本マイクロ引き下げ法の利用およびその最適化が不可欠であることを述べている。

第2章では、本研究試料の合成に使用したマイクロ引き下げ法の詳細を記載してある。また、X線回折装置、走査電子顕微鏡および高温強度測定装置など、得られた試料の基礎特性評価装置に関して解説している。特に、本研究遂行のために新たに開発したコンピューター・プログラムの基本論理構成を紹介し、本論文の巻末 Appendix には、そのソースコードを掲載している。

第3章は、本研究の実験結果を記載してある。各種  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-RE}_2\text{O}_3$  系酸化物において、系統的な合成実験を行うことにより、目的とする  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{REAlO}_3$  型共晶体または  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{RE}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  型共晶体を作製できる最適な化学組成条件を決定した。また、新しい  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/\text{ZrO}_2$  三元系共晶体の作製も試み、得られた構成結晶相および組織に関して詳細に記載している。特に、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{RE}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  型共晶体および  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/\text{ZrO}_2$  三元系共晶体では、Chinese script 構造と呼ばれる微細組織を持つことを明らかにし、

この組織が超高温耐熱複合材料を開発するための一つの目標となることを指摘している。また本章では、結晶化速度、体積分率など様々な条件因子が、微細組織形成に与える影響をコンピューター・シミュレーションを駆使して解明している。一方、超高温強度材料への応用を視野に入れた高温引張試験および高温耐久試験を行い、これらの共晶体は酸化雰囲気の高圧状態で極めて安定であり、従来法で作製された材料と比較して数倍高い強度を示すことを実証している。

第4章では、第3章で述べられた結果に対して考察を進めている。詳細な合成実験に基づき、希土類元素を系統的変化させたときの  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-RE}_2\text{O}_3$  系の相平衡図の詳細を明らかにした。そして、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{REAlO}_3$  型および  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{RE}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  型共晶体作製に不可欠な、化学組成制限を考察している。また、微細組織形成の要因として、体積分率および構成相のファセット性を指摘し、コンピューター・シミュレーションの結果と本研究で作製した試料の成長様式や組織観察結果とを比較検討することによって、Chinese script 構造が、合金を含む共晶系では得られなかったファセット/ファセット共晶であると結論した。また、微細組織の大きさが、材料育成速度  $v$  と  $\lambda = kv^{-1/2}$  ( $k$ : 定数) の関係があること、また、強度と微細組織の関係が、Hall-Petch の関係式  $\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$  ( $\sigma_0, k$ : 定数) で整理できることを結論した。

第5章では、本論文を総括し、マイクロ引き下げ法により二元系および三元系の新規超高温耐熱複合強度材料を開発したこと、微細組織形成の因子を実験およびコンピューター・シミュレーションによって実証できたことを示し、これらのデータおよびその解析で得られた結果が、全て新しい知見であることを結論した。

本論文は、最新の単結晶育成技術であるマイクロ引き下げ法を、従来、主に粉末焼結法が用いられていた酸化物セラミックスの作製に応用し、新規超高温耐熱複合強度材料の開発研究に発展させた。同時に、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{REAlO}_3$  型共晶体、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{RE}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  型共晶体ファイバーおよび  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/\text{ZrO}_2$  三元系共晶体ファイバーを開発し、コンピューター・シミュレーションによる微細組織形成因子の特定および引張試験による高温機械特性の基礎評価を通じて、エネルギー問題を解決する超高温耐熱強度複合材料の開発指針を得ることに成功した。これらの研究成果は、岩石に代表される酸化物素材の微細組織形成因子を見出した点および結晶性複合材料合成に関する基礎手法を確立した点において、鉱物学および結晶学の発展に寄与するところが少なくない。したがって、博士(理学)の学位を授与するにふさわしいと認める。