

R-GIROの活動報告 特定領域型R-GIRO 研究プログラム(2008年度採択研究プロジェクト)

Project Theme 自然共生型機械材料システム創成プロジェクト

## 構造材料のパラダイムを転換する「ナノ・ヘテロ・調和」材料

「ナノ・ヘテロ・調和」という新しい発想で  
強度と延性を兼ね備えた調和組織材料を創製しました。

限られた資源の中で地球の自然環境を保持しながら産業を発展させていく上で、希少元素や有害物質を用いず、かつ高い機能を持つ新しい材料が求められています。こうした要請に応え、世界最先端といわれる日本の構造用材料の開発・製造において今後も先陣を切っていくために、私たちのプロジェクトでは新たな発想で高機能な構造用材料の開発を進めています。

材料の高機能化は従来、いかに「超微細(ナノ)」で「均一・均質」な微細組織を作るかということに重点が置かれてきました。しかしこれには高強度と高延性という二律背反する機能を両立させることができないという限界があります。これに対して私たちは「ナノ・ヘテロ(不均一)・調和」という新しい着想を見出しこの限界を乗り越えることに成功しました。これは、大きさの異なる不均一なナノ微結晶粒を調和的に配置しネットワーク構造を持った調和組織材料を創製するという点に着想を得たものです。

本プロジェクトでは、超強加工(ミリング)粉末冶金法を応用して粒径数十～数百nmという超微細結晶粒で外側のシェル(殻)部分を形成し、内側のコア部分に数 $\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$ の粗大結晶粒を配置して3次元ネットワーク構造を有する材料を作製しました。そしてこれによって得られた調和組織が高強度と高延性を同時に発現することを実証しました。これまでに純チタン、チタン合金、純鉄、純銅、ステンレス鋼などの金属材料でその

同時発現を確認しています。

調和組織材料は、他の元素を添加せずに高機能化できるため希少元素を必要としない上、リサイクル性に優れた環境に配慮した材料です。また、製造には従来技術を適用できるというメリットもあります。今後、ステントやカテーテルワイヤなどの生体材料、衛星や機体の超軽量高強度材料など、高い機能性が要求される医療・生体、航空・宇宙、環境・エネルギー分野への応用が期待されています。

高強度と高延性が両立する調和組織材料の  
変形機構を解明し実用化に向けて前進しました。

調和組織材料の実用化を射程に入れる最近の大きな進展は、高強度と高延性が両立する変形機構を解明したことです。

「微細・均一」な従来の材料は、高強度を持つ反面、延性に乏しく、材料に外から力が加わった時、変形はかなり早い段階で塑性変形が不安定になって加工硬化能を失い破壊します。つまり、限界以上の力が加わって塑性変形した時、加工硬化することで変形状態が保たれ延性が得られますが、いったん加工硬化能を失えば一気に破壊に至ってしまうのです。

一方、調和組織材料では、外力が加わると変形初期には従来の材料と同じように加工硬化能が急激に低下するものの、その後は、塑性変形が不安定になることなく、一定の加工硬化を維持したまま均一な伸びを示します。こうした大きな延性が得られる理由は、3次元に連結したネットワーク構造の網

目の一つひとつが均等に伸び、全体として形状変化することで塑性変形がどこかに集中するのを避け、均一なひずみ分布を維持できるためだと考えています。すなわち超微細粒(シェル)と粗大粒(コア)のミクロな変形と、これらが連結してネットワークになったマクロな変形の相乗効果によって強度と延性が両立するというわけです。この知見は、粉末冶金分野に限らず、新しい組織制御法の確立にもつながる画期的なものです。現在、計算機シミュレーションによる変形メカニズムの確認を進めています。

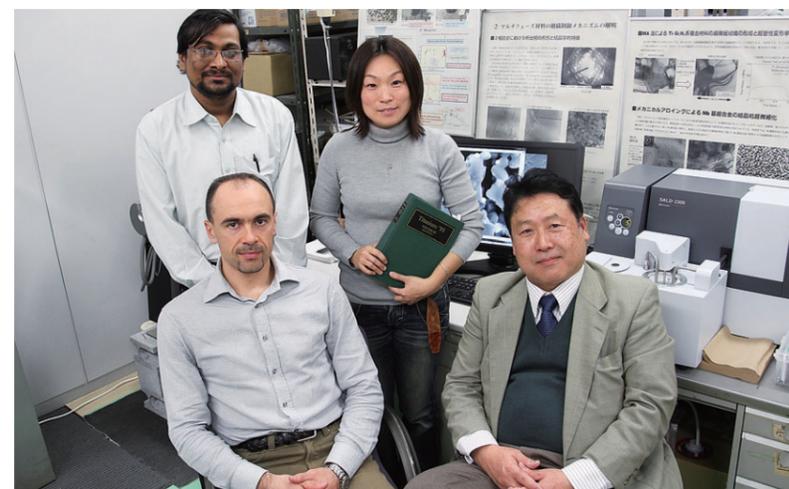
さらに実用化へと近づけるためには、調和組織材料をより小さいサイズで作製する必要があります。実験段階で用いたミリング法では、100 $\mu\text{m}$ 程度の粒子径の粉末でしか調和組織粉末粒子を作ることができません。私たちはガスを高圧噴射して微小な粉末粒子のミリングができる方法を開発し、工業的に製品化が可能な粒子径20 $\mu\text{m}$ 程度の調和組織粉末粒子粒を作ることに成功しました。

セラミックス材料でも高強度と高靱性の両立を実現。  
有機材料を融合し、新規材料の「創発」を追求します。

次いで本プロジェクトでは、高強度・高靱性を実現するセラミックス材料の開発を試みています。粒子径数 $\mu\text{m}$ の炭化ケイ素(SiC)の粒子と数十nmのジルコニアのナノ粒子を複合化焼結してネットワーク構造を持つ複合セラミックスを作製し、強度と靱性の両方が高まることを確かめました。現在は各粒子の大きさや割合を変えて、最適な組織の制御法を検討しています。

セラミックスは先端材料としてさまざまな産業分野で重用されていますが、高硬度な反面もろくて壊れやすいという弱点があります。とりわけ内部に局所的な力が集中すると、き裂が発生すると同時に一気にき裂が進んでしまいます。超微細粒と粗大粒が混合した調和組織構造にすれば、外から加わる力を分散して強度を高めることができる上、粗大な粒子がき裂の進展を防ぐためもろさも改善されます。従来は壊れにくくするためにイットリウムを添加したイットリア安定化ジルコニア(YSZ)などが用いられてきましたが、調和組織構造のセラミックス材料なら、希少元素であるイットリウムやジルコニウムを使わずに同じ性能を発現させることが可能です。

ミクロな微視的構造がマクロに組み合わせることで、調和組織材料は周期的な力学特性を示します。このような、単純な総和にとどまらず、それ以上の性能が現れることを「創発」と呼びますが、私たちはその可能性を追求してこうとしています。調和組織材料は、構造用材料では初めてといえる「創発」材料設計の事例です。私たちは、これをさらに進めて無機材料と有機材料を融合させることを考えています。2012年度より5年計画で文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に「ソフト・ハード融合材料の階層的構造制御による新材料の創発」プロジェクトが採択されました。結晶粒径をより小さくしていくという発想で進んできた構造用材料開発に、分子サイズからはじまる有機材料開発のある意味で逆の発想を付加することで、これまでの材料をドラスティックに変革するような「創発」を目指していきます。



[写真 前列右]  
立命館大学工学部 教授  
飴山 恵 プロジェクトリーダー

[写真 前列左]  
立命館グローバル・イノベーション研究機構 研究員

Dmytro Orlov

[写真 後列左]  
立命館グローバル・イノベーション研究機構 ポストドクトラルフェロー

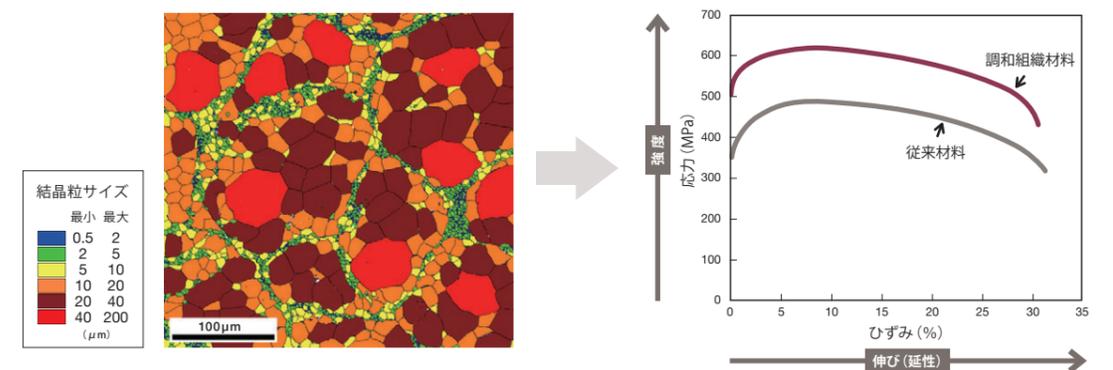
Sanjay Kumar Vajpai

[写真 後列右]  
立命館グローバル・イノベーション研究機構 リサーチアシスタント

太田 美絵

純チタン調和組織材料<sup>®</sup>の粒径分布像(EBSD像)、および引張試験結果

※800℃で10分間の放電プラズマ焼結



微細な結晶粒が粗大な結晶粒を包む3次元ネットワーク構造を形成

調和組織材料は、従来材料と同等の延性を有しながらも、より高強度を示す

- 参考文献/1 "Creation of Harmonic Structure Materials with Outstanding Mechanical Properties", Kei Ameyama, Hiroshi Fujiwara, Materials Science Forum, Vols. 706-709(2012), pp.9-16. 2 "Effect of Particle Morphology on Sinterability of SiC-ZrO<sub>2</sub> in Microwave", Lydia Anggraini and Kei Ameyama, Journal of Nanomaterials, vol. 2012, Article ID 741214 2012, 8pages. doi:10.1155/2012/741214. 3 "New Microstructure Design for Commercially Pure Titanium with Outstanding Mechanical Properties by Mechanical Milling and Hot Roll Sintering", Tatsuya Sekiguchi, Keita Ono, Hiroshi Fujiwara and Kei Ameyama, J. of Materials Transactions, Vol. 51(2010), pp.39-45.
- 連絡先/立命館大学びわこ・さつキャンパス 飴山研究室 電話:077-561-2756 <http://www.amelab.se.ritsumei.ac.jp/>