

調和組織材料の革新的力学特性発現機構の解明と

次世代構造材料創製指導原理の創発

Clarification of innovative deformation mechanism in harmonic structure materials and creation of design principle for structure materials for next generation

課題番号: 18H05256

飴山 恵 (AMEYAMA, KEI)

立命館大学・理工学部・教授



研究の概要（4行以内）

これまで高強度と高延性の両立は不可能とされていた金属材料の性質を、調和組織制御という新しい方法で解決しました。調和組織材料には、強度・延性の両立以外に、様々な特異な性質が認められます。本研究課題では、調和組織材料の特異力学現象の統一的理解を通じて、次世代構造材料創製の指導原理を創発することを目指しています。

研究分野：構造材料および機能材料関連、材料加工および組織制御関

キーワード：社会基盤構造材料、ヘテロ構造、粉末冶金、加工熱処理、結晶組織制御

1. 研究開始当初の背景

社会基盤の骨格とも言える構造用金属材料には、高い強度と大きな延性が同時に要求されます。しかし、“*Considère's criterion*”が19世紀の終わりに発表されて以来、金属材料の強度と延性は理論上、両立しない性質であり、両者は二律背反であることが常識とされてきました。このような課題を解決すべく、これまでに様々な研究が進められ、この分野では日本が世界をリードしてきました。そのような背景の中で、研究代表者は「調和組織材料」の創製に成功し、調和組織材料が高強度と高延性を両立する普遍的な性質を有することを示しました。そして、調和組織材料の研究を進める中で、通常の均一材料には見られない様々な特異現象が見つかりました。

2. 研究の目的

本研究では、図1に模式的に示す調和組織を持った材料が示す数々の特異力学現象を統一的に理解し、その結果を基に次世代構造用金属材料創製の指導原理を創発することを目的としています。そして、得られた成果をもとに、高強度と高延性・高靱性などのいくつもの優れた力学特性を具備し軽量化も達成できる、安心・安全な次世代構造材料としての調和組織材料創製を試みます。

3. 研究の方法

調和組織材料の特異現象の発現は、主に転位のすべり運動により担われるナノ・ミクロ

領域の現象と、周期構造を持った数十～数百ミクロンのマクロ領域の現象が重畳した結果と推測されます。結晶粒界は転位の障害物としてだけでなく、転位の発生源かつ消滅場所として働いていると考えられます。同時に、結晶粒径に広い分布（粒径勾配）が存在する調和組織では、粒径勾配に起因した特異な変形も起こりえます。そうした観点の下、本研究では、多彩な学術分野の研究者が結集し、ミクロからマクロに広がる転位/粒界/周期構造の関連性を系統的に明らかにします。調和組織材料の「高強度と高延性・高靱性の両立」をはじめとする様々な特異な力学特性を、大型放射光施設や最先端の力学特性・組織解析手法を駆使して解明します。

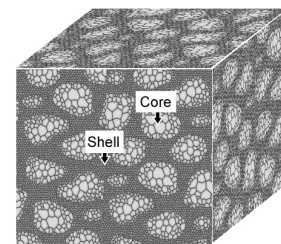


図1：調和組織

4. これまでの成果

これまでの特筆すべき成果として、「シナジー硬化現象」や「新たな延性発現機構」を見出しました。「シナジー硬化 (Synergy Extra Hardening)」は、従来の Hall-Petch 関係に依らない、特異な強度上昇が見られる現象です。図2に、Hall-Petch 関係図に現れた純 Cu のシナジー硬化現象を示します。また、「新たな延性発現機構」とは、強度が上

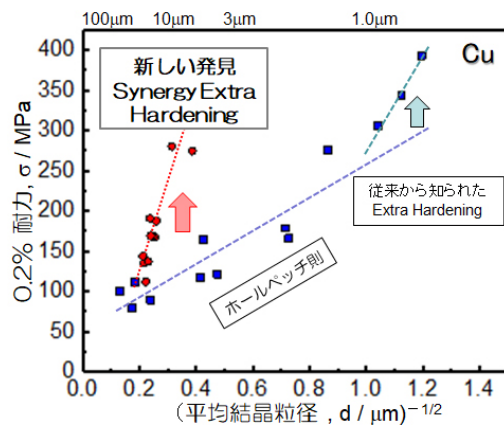


図2 シナジー硬化現象

昇すれば全伸びに占める局部伸びが低下する、という従来常識に反して、高強度化しても局部伸びは低下せず、その結果、高延性に結びつく現象で、加工硬化の増大による延性増加とは異なる、新しい延性発現機構です。「降伏とは何か?」、「延性とは何か?」という学術的に意義深い問いを改めて突きつける成果が得られました。これまでの材料科学の知識・常識を打ち破るパラダイムシフトが期待できる成果です。

5. 今後の計画

大型試験片を作製可能なバイモーダルミリング (BiM) 法を開発できたことから、様々な材料系、特に、結晶構造、積層欠陥エネルギー、単相・複相、といった違いに着目して、研究を加速する予定です。調和組織材料の準静的力学特性評価、動的力学特性評価、変形の温度依存性評価、大型放射光 (Spring-8) による変形その場解析、MD・FEMによる計算材料科学からの検討、等々を実施していきます。

同時に、国際共同研究をこれまで以上に展開することで、国際連携ネットワークをさらに広げ、若手研究者の育成・交流を推進させて行きます。

6. これまでの発表論文等

【学術論文】

- [1] "Microstructure and mechanical behavior of Ti-25Nb-25Zr alloy prepared from pre-alloyed and hydride-mixed elemental powders", B.Sharma, S.K.Vajpai, T.Nakano, K.Ameyama: Mater. Trans., doi:10.2320/matertrans.MT-MK2019001, (2020)
- [2] "Influence of strain rate on the mechanical behaviors of gradient-structured copper", X.Zhu, J.Zhang, Y.Cao, H.Pan, H.Gao, X.Yang, X.Li,

X.Liu, B.Shu, Y.Zhu, K.Ameyama: Mater. Trans.,doi:10.2320/matertrans.MT-M2019373, (2020)

- [3] "The Effects of Thermo-mechanical Processing on Fatigue Crack Propagation in Commercially Pure Titanium with a Harmonic Structure", S.Kikuchi, K.Osaki, Y.Nakai, M.O.Kawabata, K.Ameyama: Mater. Sci. Eng. A, Vol.773, 138892., (2020)
- [4] "Harmonic-structure materials: idea, status and perspectives", *D.Orlov, K.Ameyama: Mater. Sci. Tech., doi.org/10.1080/02670836.2020.1719306, (2020).

[5] "調和組織制御された純Niの機械的性質に及ぼす微細組織の影響",永田勝也,堀川直樹,川畑美絵, 鮎山恵:日本金属学会誌, Vol.83, 231-237.,(2019)

[6] "Fretting wear mechanism for harmonic, non-harmonic and conventional 316L stainless steels", P.K.Rai, S.Shekhar, K.Yagi, K.Ameyama, K.Mondal: Wear, Vol. 424-425, 23-32., (2019)

[7] "Evaluation of Fatigue Properties under Four-point Bending and Fatigue Crack Propagation in Austenitic Stainless Steel with a Bimodal Harmonic Structure", S.Kikuchi, Y.Nakatsuka, Y.Nakai, M.Nakatani, M.O.Kawabata, K.Ameyama: Frattura ed Integrità Strutturale,Vol.48, 545-553., (2019)

[8] "Effect of Bimodal Harmonic Structure on Fatigue Properties of Austenitic Stainless Steel under Axial Loading", S.Kikuchi, Y.Nukui, Y.Nakatsuka, Y.Nakai, M.Nakatani, M.O.Kawabata, K.Ameyama: Int. Fatigue, Vol.127, 222-228., (2019)

[9] "A three-dimensional multi - scale polycrystalline plasticity model coupled with damage for pure Ti with harmonic structure design", J.Li, J.Liu, G.Dirras, K.Ameyama, F.Cazes, M.Ota: Int. J. Plasticity,Vol.100,192-207. (2018)

<他、23編>

国内外会議招待講演・基調講演：20件

【産業財産権】

- [1] "双晶変形が抑制されたチタン合金の製造方法及びチタン合金", 鮎山恵,川畑美絵,南谷大樹,長野健太郎
特願 2019-038687, 2019 年
- [2] "炭素含有鉄合金材の製造方法及び炭素含有鉄合金材", 鮎山恵,入谷竜平,川畑美絵
特願 2018-157141, 2018 年

7. ホームページ

<http://www.ritsumei.ac.jp/~ameyama/html/index.html>