

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月21日現在

**バルクナノメタルが示す特異な力学特性の
統一的理解とそれに基づく材料設計**

Novel Material Design Based on Unified Understanding on
Unique Mechanical Behaviors in Bulk Nanostructured Metals

課題番号：15H05767

辻 伸泰 (Tsuji Nobuhiro)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

直径1 μm 以下の超微細結晶粒から構成されるバルクナノメタルが示す7つの特異な力学特性の発現原理を基礎的に解明し、それらを統一的理解する。ナノスケール材料解析法、DICによるひずみ分布測定、変形中の中性子または放射光その場測定などの最先端実験手法を駆使し、社会の安全を保障する革新的構造材料としてのバルクナノメタル創製の基礎を確立する。

研究分野：構造・機能材料

キーワード：構造用金属材料、超微細粒、強度、延性、粒界

1. 研究開始当初の背景

金属材料のほとんどは多数の結晶粒の集合体ですが、従来金属では個々の結晶粒の大きさは数十 μm 以上でした。「バルクナノメタル」とは、1 μm 以下の超微細なサイズを有する結晶粒により構成されるバルク金属材料です。結晶粒をナノメートルスケールまで微細化することにより、材料は「粒界（結晶粒の境界）だらけ」になります。粒界だらけのバルクナノメタルは、これまでの金属材料科学の常識を覆す種々の興味深い特性を示すことが分かってきました。

2. 研究の目的

本研究の目的は、バルクナノメタルが示す種々の特異な力学特性の発現機構を基礎的に明らかにし、それらを統一的理解することです。バルクナノメタルは、従来の粗大粒金属・合金の4倍にも達する強度を示すなど、常識を覆す優れた力学特性を、合金元素の添加なしに示します。本研究では当初、我々が見出した7種類の興味深い特異力学現象を取り上げ、これらを統一的理解することを目標としています。構造用金属材料は、我々が暮らす社会の安全を担保する極めて重要な材料であり、本研究の成果によって革新的構造材料としてのバルクナノメタル創製の基礎が確立されることが期待できます。

3. 研究の方法

研究代表者がこれまでに開発してきたいくつかの手法によって、種々の金属・合金の

バルクナノメタルを系統的に作製し、その組織と力学特性の関係を、ナノスケール材料解析法、DICによるひずみ分布測定、変形中の中性子または放射光その場測定などの最先端実験手法を駆使して明らかにします。

4. これまでの成果

研究は順調に推移しており、バルクナノメタルが示す新しい力学現象も見出されています。当初予定していた7種類の特異力学現象のうち4件のメカニズムがほぼ判明し、かつそれらの起源が本質的にはつながっていることが明らかとなりました。他の3件についても系統的に発現条件が調べられ、メカニズムの解明に近づいています。一方で、バルクナノメタルの特徴的な変形挙動が合金元素の影響を強く受けることや、鉄鋼材料の水素脆性が結晶粒超微細化により抑制できることが新たに見出され、また巨大ひずみを必要としない簡便なバルクナノメタル作製手法を開発することもできました。これらの結果に基づき、強度と延性を両立したバルクナノメタル材料も複数実現できています。得られた成果を60件以上の国際学術雑誌論文として発表しており、20名以上の学生が関連研究で博士・修士・学士の学位を取得し、彼らが種々の賞を受賞するなど、若手人材育成のためにも有効に機能しています。これまでに得られた研究成果の概要を以下に示します。

バルクナノメタルが示す降伏点降下現象、Hall-Petch 関係における異常強化 (extra Hall-Petch hardening)、加工軟化・焼鈍硬化と

いう3種類の特異力学現象が、バルクナノメタル中の体積の小さな各結晶粒内の転位および転位源の枯渇という、共通の物理的背景により説明できることが明らかとなりました。この結果をもとに、「室温ひずみ速度依存変形」、「六方晶における不活性すべりの活性化」、「変形双晶と変形誘起マルテンサイトの安定性の変化」という3種類の特異現象も統一的に理解できる可能性が見出されつつあります。また「巨大バウシinger効果」についても、バルクナノメタル中の内部応力が鍵となることを突き止めており、上記の異常現象とも対比しながら理解を進めます。

一方、本研究の結果、バルクナノメタルの特異現象が微量合金元素の添加により大きく変化すること（合金元素の影響）、水素により金属材料が脆くなる現象である水素脆性が、バルクナノメタル化により抑制されること（水素脆性の抑制）、高い強度と大きな延性を有するバルクナノメタルの作製が可能であること（強度と延性の両立）が、新たに明らかになりました。これらはいずれも、バルクナノメタルの実用展開を考える上で重要な発見です。バルクナノメタルを実社会で用いるためには、優れた力学特性を引き出すための化学組成の決定（合金設計）が不可欠です。また水素脆性は、水素エネルギーを利用する場合の大きな問題ですが、今回の成果はその克服法の一つとなり得ます。また一般に、構造材料は強度を高めると延性・靱性が低下することが普通であり、こうしたトレード・オフ関係は、従来研究されてきた純金属系バルクナノメタルでも避けられませんでした。しかし我々は、ある種の合金において、高い強度と大きな延性を両立したバルクナノメタルを次々と発見しつつあります。一例として、種々の平均粒径を有するFe-22Mn-3Si-0.6C合金の応力-ひずみ曲線を下図に示します。結晶粒微細化とともに、強度・延性とも増大しています。こうしたバルクナノメタルは、「強さ」と「ねばさ」を兼ね備えた夢の構造材料になるものと期待されます。

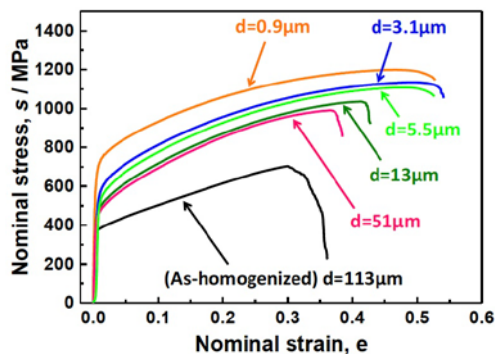


図 種々の粒径を有するFe-22Mn-3Si-0.6C合金の応力-ひずみ曲線

5. 今後の計画

引き続き着実かつ精力的にバルクナノメタル研究を進めて行きます。具体的には、次の項目を明らかにする予定です。

- 当初掲げた7つの特異な力学現象の発現原理を解明し、共通の物理に基づき統一的に説明します。
- 新たに判明した興味深い現象である「微量合金元素の影響」、「水素脆性の抑制」、「強度と延性を両立したバルクナノメタル」に関する研究を深化させ、上記の共通の物理に基づき解釈します。
- 将来的な実用化を見据え、「強さ」と「ねばさ」を両立した究極の構造材料としてのバルクナノメタルの設計概念を確立します。

こうした研究の遂行により、社会の安全を支える次世代構造材料としてのバルクナノメタルの可能性を大きく拓くことが可能になると考えています。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] "Simultaneous Strength-Ductility Enhancement of a Nano-Lamellar AlCoCrFeNi_{2.1} Eutectic High Entropy Alloy by Cold-Rolling and Annealing", T.Bhattacharjee, I.S.Wani, S.Sheikh, I.T.Clark, T.Okawa, S.Guo, *P.P.Bhattacharjee and N.Tsuji: *Scientific Reports*, (2018), 8, 3276.
- [2] "Hydrogen embrittlement behaviors of ultrafine-grained 22Mn-0.6C austenitic twinning induced plasticity steel", Bai, Y., Tian, Y., Gao, S., Shibata, A., Tsuji, N.: *Journal of Materials Research*, (2017) 32 (24), pp. 4592-4604.
- [3] "Simultaneously enhanced strength and ductility of Mg-Zn-Zr-Ca alloy with fully recrystallized ultrafine grained structures", Zheng, R., Bhattacharjee, T., Shibata, A., Sasaki, T., Hono, K., Joshi, M., Tsuji, N.: *Scripta Materialia*, (2017) 131, pp. 1-5.
- [4] "Combination of dynamic transformation and dynamic recrystallization for realizing ultrafine-grained steels with superior mechanical properties", Zhao, L., Park, N., Tian, Y., Shibata, A., Tsuji, N.: *Scientific Reports*, (2016) 6, art. no. 39127.
- [5] "Significant contribution of stacking faults to the strain hardening behavior of Cu-15%Al alloy with different grain sizes", Tian, Y.Z., Zhao, L.J., Chen, S., Shibata, A., Zhang, Z.F., Tsuji, N.: *Scientific Reports*, (2015) 5, art. no. 16707.
- [6] 【受賞】辻 伸泰：日本金属学会論文賞、2017年9月

ホームページ等

<http://www.tsujilab.mtl.kyoto-u.ac.jp>