

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22102002

研究課題名（和文）バルクナノメタルの材料設計

研究課題名（英文）Materials Design of Bulk Nanostructure Metals

研究代表者

辻 伸泰（TSUJI, Nobuhiro）

京都大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30263213

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 227,000,000円

研究成果の概要（和文）：5年間の研究により、バルクナノメタルにおいて優れた力学特性を実現するための有益な知見が数多く得られた。特筆すべき研究成果として、種々の新しい加工熱処理などにより巨大ひずみ加工によらずにバルクナノメタルを作製する方法が見出されたこと、完全再結晶バルクナノメタルを作製することに成功したこと、バルクナノメタルが優れた靱性や耐水素脆性特性などを示すことが見出されたこと、Mg合金の結晶粒微細化およびナノ析出を通じた力学特性向上のための合金元素が明確にされたこと、高圧巨大ひずみ加工下での特異な相変態により形成されるナノ組織の構造物性が明らかとなったこと、などをあげることができる。

研究成果の概要（英文）：5-year research works have delivered a number of fruitful results for designing bulk nanostructure metals having superior mechanical properties. Examples of outstanding achievements are, (1) new thermomechanical processes for fabricating bulk nanostructure metals without severe plastic deformation, (2) succeeding in producing fully recrystallized bulk nano-metals in some alloys, (3) excellent toughness and good resistance to hydrogen embrittlement, (4) clarifying alloying elements suitable to good mechanical properties in bulk nanostructure Mg-alloys, and (5) structure and properties of peculiar nanostructures caused by phase transformations during severe plastic deformation under high pressure.

研究分野：金属材料学、材料組織学、材料強度学

キーワード：構造用金属材料 巨大ひずみ加工 超微細粒 相変態 結晶粒界 先端電子顕微鏡法 転位・双晶 力学特性

1. 研究開始当初の背景

現代社会においては、様々な金属・合金材料が、その多様な個性を生かして多量に用いられており、高度科学技術社会は金属材料なしには成り立たない。金属材料の最大の特徴は、高い強度を有しながら、脆く壊れることがない(ねばく、延性・靱性を有している)点にあり、その多くは力学的な特性を期待して構造材料として使用されている。科学技術の発達とともに、構造用金属材料に対する要求はますます厳しくなっている。特に環境・資源・エネルギー問題の克服が求められる現在、従来のように新たな元素を加えた安易な合金化による特性の向上といった材料開発手法では、多面化した社会の要求に応えることができない。すなわち、従来のメタラジであるいは材料学の延長線上にある解決法ではなく、金属材料科学の不連続的、飛躍的な発展が必要とされている。本提案が取り扱うバルクナノメタル (Bulk Nanostructured Metals)、すなわち「マトリクスを構成する結晶粒や相が 1 μm 以下のサイズを有する均一なバルク状金属系材料」は、化学組成上は従来の金属と大きく変わらないにもかかわらず、金属材料学の飛躍的な発展を可能とする画期的な新材料となりうるものである。しかし、バルクナノメタルは新しい材料であるがゆえに、優れた力学特性実現のための最適材料設計概念は明らかではなかった。

2. 研究の目的

強度と延性・靱性の両立といった、従来の常識を打ち破る優れた特性を示すバルクナノメタルの最適材料設計概念を確立することが、本計画班 A01 の目標であった。本研究では特に、粒界・界面だらけの材料であるバルクナノメタルからの相変態・析出現象と非平衡組織形成にも研究の重点を置き、組織形成原理の解明と力学特性との相関を系統的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

相変態・析出は、材料組織を決定する重要な冶金学的現象であるが、ナノメタルからの相変態現象は世界的にもほとんど研究されていない。三次元トモグラフィを含む高度電子顕微鏡法や三次元アトムプローブなどの最先端ナノ構造解析手法を駆使してバルクナノメタル自身の組織とその組織変化を定量的に解明し、A01 班が分担するシミュレーション結果を駆使しつつ、相変態・析出等の固相反応を通じたナノ組織形成の原理と合金組成の影響を明らかにする。得られた結果を A02 班のプロセッシングによる創製研究や、A03 班の力学特性研究に提供するとともに、これらの班の成果を受け、常識を超えた力学特性を示すバルクナノメタルの最適材料設計概念を確立することを目的とした。固相反応を通じた組織形成機構の解明を題材として、合金設計、組織設計、ナノ解析の

3つのキーワードの下、研究者間の強力な連携体制により上記目的を達成するための研究を推進した。

4. 研究成果

5年間の研究により、当初予定通りの研究が遂行され、バルクナノメタルにおいて優れた力学特性を実現するための有益な知見が数多く得られた。例えば特筆すべき研究成果として、種々の新しい加工熱処理などにより巨大ひずみ加工によらずにバルクナノメタルを作製する方法が見出されたこと、ある種の合金で完全再結晶バルクナノメタルを作製することに成功したこと、バルクナノメタルが優れた靱性や耐水素脆性特性などを示すことが見出されたこと、Mg 合金の結晶粒微細化およびナノ析出を通じた力学特性向上のための合金元素が明確にされたこと、高圧巨大ひずみ加工下での特異な相変態により形成されるナノ組織の構造物性が明らかとなったこと、高 Mn 鋼における変形双晶の発生と加工硬化の結晶粒径依存性が明らかになったこと、バルクナノメタルの引張変形中の格子欠陥増殖を検知・観察するための手法を構築することができたこと、などをあげることができる。数多い成果の中、以下では、完全再結晶バルクナノメタルに関する成果について詳しく報告する。

バルクナノメタルは、従来粒径材の4倍に及ぶ大きな強度を有するほか、従来の金属材料学における教科書的理解からは大きく外れる挙動が見られるなど、実用的にも基礎学問的にも興味深い事象が見いだされ、世界的に活発な研究が続けられている。一方これまでの研究により、ナノ双晶組織を有する純銅が、高い強度と延性を併せ持つことが報告されている。また、鉄鋼材料の分野では、変形時に変形双晶が現れることによって高い延性を示す FCC 鋼 (TWIP 鋼) が注目を受けている。こうした観点から、特に非常に低い積層欠陥エネルギーを有し、双晶が現れやすい合金系においては、極めて微細なナノ結晶組織や、優れた力学特性の発現が期待される。積層欠陥エネルギーを系統的に変化させてバルクナノメタルの組織形成と力学特性を丹念に調べた研究例はない。本研究では、組成を変化させることによって積層欠陥エネルギーを系統的に変化させた FCC 合金 (Fe-Mn 系および Cu-Al 系) を用い、ARB および HPT プロセスに伴うナノ組織の形成過程と、その機械的性質に及ぼす積層欠陥エネルギーの影響を系統的に明らかにした。

3種類の低積層欠陥エネルギー合金において、平均粒径 1 μm 以下の完全再結晶超微細粒組織を得ることができた。得られた最小平均粒径は、Cu-6.8wt%Al 合金で 0.60 μm 、Fe-30Mn-3Al-3Si 合金で 0.6 μm 、Fe-22Mn-0.6C 合金で 0.5 μm であった。Fig.1 に、Cu-6.8wt%Al 合金において得られた種々の粒径の組織の

EBSD 像を示す。

超微細粒材を含む種々の平均粒径を有する3種の合金の室温引張試験を行い、強度・延性と粒径の関係を系統的に明らかにすることができた。いずれの合金も、粒径が1 μm 以下となっても均一伸びがほとんど減少せず、結晶粒超微細化による高強度と大きな延性を両立した優れた力学特性を実現することができた。**Fig.2**には、種々の粒径のCu-6.8Al合金の応力ひずみ曲線を示す。種々のひずみ量まで引張試験を行った試料の変形下部組織をTEM観察し、変形組織として転位組織、積層欠陥組織、ナノ変形双晶の3種類が確認された。また、これらの変形機構の発現する段階が、結晶粒径を変化させることにより大きく変化することを初めて見出した。このことは、結晶粒超微細化によって低積層欠陥エネルギー合金の変形機構を制御し、ひいては強度と遠征を制御できることを示唆している。

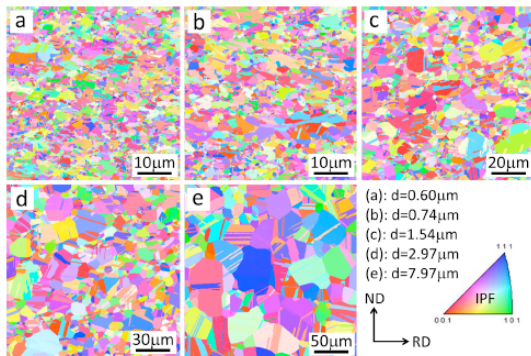


Fig.1 EBSD-IPF maps for the Cu-Al alloy with different grain sizes of (a) 0.60 μm , (b) 0.74 μm , (c) 1.54 μm , (d) 2.97 μm and (e) 7.97 μm , respectively.

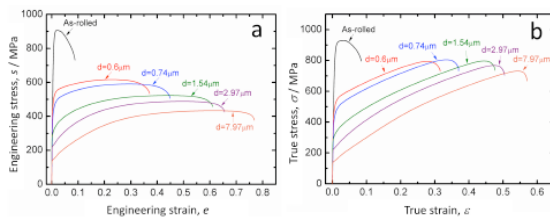


Fig.2 (a) Engineering stress-strain curves and (b) true stress-strain curves of the fully recrystallized Cu-6.8wt.%Al alloy specimens with different grain sizes.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計34件)

- ① K.Hanazaki, N.Shigeiri and N.Tsuji、

Change in Microstructures and Mechanical Properties during Deep Wire Drawing of Copper, *Mater. Sci. Eng. A*, 査読有、527巻、2010、5699-5707

DOI: 10.1016/j.msea.2010.05.057

- ② N.Tsuji、New Routes for Fabricating Ultrafine Grained Microstructures in Bulky Steels without Very High Strains, *Adv. Eng. Mater.*、査読有、12巻、2010、701-707
DOI: 10.1002/adem.201000018

- ③ Y.Miyajima, S.Komatsu, M.Mitsuhara, S.Hata, H.Nakashima and N.Tsuji、Change in Electrical Resistivity of Commercial Purity Aluminum Severely Plastic Deformed, *Phil. Mag.*、査読有、90巻、2010、4475-4488
DOI: 10.1080/14786435.2010.510453

- ④ Yoshitaka Okitsu, Tadashi Naito, Naoki Takaki, Tomoaki Sugiura and Nobuhiro Tsuji、Mechanical Properties and Crash Worthiness of Ultrafine Grained Multi-Phase Steel Sheets, *SAE Int. J. Mater. Manuf.*、査読有、3巻、2010、237-245
DOI: 10.1179/1743284714Y.0000000660

- ⑤ Y.Miyajima, M.Mitsuhara, S.Hata, H.Nakashima and N.Tsuji、Quantification of Internal Dislocation Density Using Scanning Transmission Electron Microscopy in Ultrafine Grained Pure Aluminum Fabricated by Severe Plastic Deformation, *Mater. Sci. Eng. A*、査読有、528巻、2010、776-779
DOI: 10.1016/j.msea.2010.09.058

- ⑥ Y.F.Sun, N.Tsuji, H.Fujii and F.S.Li、Cu/Zr Nanoscaled Multi-Stacks Fabricated by Accumulative Roll Bonding, *J. Alloys Comp.*、査読有、504巻、2010、S443-S447
DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.02.201

- ⑦ Dmitry Orlov, Yoshikazu Todaka, Minoru Umemoto and Nobuhiro Tsuji、Formation of Bimodal Grain Structures in High Purity Al by Reversal High Pressure Torsion, *Scripta Mater.*、査読有、64巻、2011、498-501
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.11.020

- ⑧ Y.Okitsu, N. Takata, N.Tsuji、Dynamic Deformation Behavior of Ultrafine Grained Iron Produced by Accumulative Roll Bonding and Annealing, *Scripta Mater.*、査読有、64巻、2011、896-899
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.01.026

- ⑨ P.P.Bhattacharjee and N.Tsuji、Development of Highly Cube Texture Nickel Superconductor Substrate Tapes by Accumulative roll Bonding (ARB), *Int. J. Mater. Res.*、査読有、102巻、2011、173-182
DOI: 10.3139/146.110465

- ⑩ H. Sepehri-Amin, W. F. Li, T. Ohkubo, T. Nishiuchi, S. Hirose, and K. Hono、Effect of Ga addition on the microstructure and magnetic properties of

- hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination processed Nd-Fe-B powder, *Acta Mater.*、査読有、58 卷、2010、1309-1316
DOI:10.1016/j.actamat.2009.10.035
- ⑪ K. Hono, C. L. Mendis, T. T. Sasaki, and K. Oh-ishi, Towards the development of heat treatable high strength wrought Mg alloys, *Scripta Mater.*、査読有、63 卷、2010、710-715
doi:10.1016/j.scriptamat.2010.01.038
- ⑫ B.D.Long, M.Umemoto, Y.Todaka, R.Othman, H.Zuhailawati, Fabrication of high strength Cu-NbC composite conductor by high pressure torsion, *Materials Science and Engineering A*、査読、528 卷、2011、1750-1756
DOI: 10.1016/j.msea.2010.11.005
- ⑬ I.Shuro, M.Umemoto, Y.Todaka, H.H.Kuo, H.Wang, Anomalous Property Evolution during Annealing in HPTed SUS 304 Austenitic Stainless Steel, *Materials Science Forum*、査読有、667-669 卷、2011、589-592
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.667-669.589
- ⑭ T.Mizuguchi, R.Oouchi, R.Ueji, Y.Tanaka and K.Shinagawa, Effect of Si content on fracture behaviour change by strain rate in Si steels, *Mater. Sci. Forum*、査読有、654-656、2010、1303-1306 DOI: <http://doi.org/10.2472/jsms.63.467>
- ⑮ N.Tsuchida, Y.Morimoto, T.Tonan, Y.Shibata, K.Fukaura and R.Ueji, Stress-induced Martensitic Transformation Behaviors at Various Temperatures and their TRIP Effects in SUS304 Metastable Austenitic Stainless Steel, *ISIJ International*、査読有、51 卷、2011、124-129
DOI: 10.2355/isijinternational.51.124
- ⑯ C.L. Mendis, K. Oh-ishi T. Ohkubo and K. Hono, Precipitation of prismatic plates in Mg-0.3Ca alloys with In additions, *Scripta Mater.*、査読、102 卷、2011、137 – 140
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.09.028
- ⑰ R.Yoda, K.Shibata, T.Morimitsu, D.Terada and N.Tsuji, Formability of Ultrafine Grained Interstitial-Free Steel Fabricated by Accumulative Roll-Bonding and Subsequent Annealing, *Scripta Mater.*、査読有、65 卷、2011、175-178
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.02.002
- ⑱ Y.F.Sun, H.Fujii, T.Nakamura, N.Tsuji, Y.Todaka and M.Umemoto, Critical Strain for Mechanical Alloying of Cu-Ag, Cu-Ni and Cu-Zr by High-Pressure Torsion, *Scripta Mater.*、査読有、65 卷、2011、489-492
DOI:10.1016/j.scriptamat.2011.06.005
- ⑲ J.J. Shen, K. Ikeda, S. Hata and H. Nakashima, Creep mechanisms in a fine-grained Al-5356 alloy at low stress and high temperature, *Materials Transactions*、査読有、52 卷、2011、1890-1898
DOI: 10.2320/matertrans.M2011143
- ⑳ K.Hase and N.Tsuji, Effect of Initial Microstructure on Ultrafine Grain Formation through Warm Deformation in Medium Carbon Steels, *Scripta Mater.*、査読有、65 卷、2011、404-407
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.05.018
- ㉑ K.Hanazaki, J.Tokutomi, J.Yanagimoto and N.Tsuji, Significant change in mechanical properties of deep drawn ultrafine grained copper wire by additional deformation, *Mater. Sci. Eng. A*、査読有、534 卷、2012、720-723
DOI: 10.1016/j.msea.2011.12.030
- ㉒ N. Park, A. Shibata, D. Terada, N.Tsuji, Flow Stress Analysis for Determining Critical Condition of Dynamic Ferrite Transformation in 6Ni-0.1C, *Acta Mater.*、査読有、61 卷、2013、163-173、
DOI: 10.1016/j.actamat.2012.09.043
- ㉓ I.Shuro, H.H.Kuo, Y.Todaka, T Sasaki, K. Hono, M Umemoto, G-phase precipitation in austenitic stainless steel deformed by high press, *Materials Science and Engine*、査読有、552 卷、2012、194-198
DOI: 10.1016/j.msea.2012.05.030
- ㉔ R.Ueji, D Kondo, Y Takagi, T Mizugushi, Y Tanaka, K Shinagawa, Grain size effect on high-speed deformation of Hadfield steel, *Journal of Materials Science*、査読有、47 卷、2012、7946-7953
DOI: 10.1007/s10853-012-6604-y
- ㉕ Rajib Saha, N.Tsuji, Fully Recrystallized Nanostructure Fabricated without Severe Plastic Deformation in High-Mn Austenitic Steel, *Scripta Mater.*、査読有、68 卷、2013、813-816
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.01.038
- ㉖ Yoshitaka Okitsu and Nobuhiro Tsuji, Effect of Ferrite Grain Size on Dynamic Tensile Properties of Ultrafine Grained Low Carbon Steels with Various Microstructures, *Mater. Trans.*、査読有、55 卷、2014、78-84
DOI: 10.2320/matertrans.MA201323
- ㉗ A.Shibata, S.Daido, D.Terada and N.Tsuji, Effect of Ferrite Grain Size on Dynamic Tensile Properties of Ultrafine Grained Low Carbon Steels with Various Microstructures, *Mater. Transa.*、査読有、54 卷、2013、1570-1574
DOI: 10.2320/matertrans.MH201312
- ㉘ K. Oh-ishi, K. Edalati, H. S. Kim, K. Hono, and Z. Horita, High-pressure torsion for enhanced atomic diffusion and promoting solid-state reactions in the aluminum-copper system, *Acta Mater.*、査読有、61 卷、2013、3482-3489
DOI: 10.1016/j.actamat.2013.02.042
- ㉙ R.Ueji, Y.Takagi, N.Tsuchida, K.Shinagawa,

- Y.Tanaka, T.Mizuguchi、Crystallographic orientation dependence of ϵ martensite transformation during tensile deformation of polycrystalline 30% Mn austenitic steel、Materials Science and Engineering A、査読有、61 卷、2013、14-20
DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.071
- ③⑩ Y.Z. Tian, Y. Bai, M. Chen, A. Shibata, D. Terada, N. Tsuji、Enhanced strength and ductility in Fe-22Mn-0.6C austenitic steel with fully recrystallized nanostructure、Metall Mater. Trans. A、査読有、45 卷、2014、5300-5304
DOI: 10.1007/s11661-014-2552-2
- ③⑪ T. Bhattacharjee, T. Nakata, T.T. Sasaki, S. Kamado, K. Hono、Effect of microalloyed Zr on an extruded microstructure of Mg-6.2Zn based alloys、Scripta Mater.、査読有、90-91 卷、2014、37-40
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2014.07.011
- ③⑫ S. Hata, K. Sato, M. Murayama, T. Tsuchiyama, and H. Nakashima、An Experimental Protocol Development of Three-Dimensional Transmission Electron Microscopy Methods for Ferrous Alloys: Towards Quantitative Microstructural Characterization in Three Dimensions、ISIJ International、査読有、55 卷、2015、623-631
DOI: 10.2355/tetsutohagane.100.889
- ③⑬ T. Nagoshi, A. Shibata, Y. Todaka, T.Sato, M.Sone Mechanical behavior of a micro-sized pillar fabricated from ultrafine-grained ferrite evaluated by a microcompression test、Acta Materialia、査読有、73 卷、2014、12-18
DOI: 10.1016/j.actamat.2014.03.04
- ③⑭ N. Xu, R. Ueji, H. Fujii、Enhanced mechanical properties of 70/30 brass joint by rapid cooling friction stir welding、Materials Science & Engineering A、査読有、610 卷、2014、132-138
DOI: 10.1179/1362171814Y.0000000261
- [学会発表] (計 17 件)
- ① N. Tsuji、Ways to Manage Both Strength and SDuctility in Nanostructured Steels (招待講演)、International Conference on Advanced Steels 2010 (ICAS 2010、2010.11.10、Guilin, China)
- ② N. Tsuji、Usefulness of EBSD Analysis for Nanostructured Metals Fabricated by Severe Plastic Deformation (招待講演)、EBSD 2011、2010.3.29、Duesseldorf, Germany
- ③ K. Hono and T. Ohkubo、Advances in laser assisted atom probe and its applications to the interface characterization of permanent magnets (招待講演)、The 13th Int. Conf. on Intergranular and Interphase Boundaries in Materials (iib 2010) (JIMIC-7)、2010.6.28、Toba, Japan.
- ④ N. Tsuji、Possibilities to Manage Both Strength and Ductility in Nanostructured Steels、Seminar at Seoul National University (招待講演)、2011/5/13、ソウル (韓国)
- ⑤ N. Tsuji、Macro-, Meso- and Nano-scale Analysis of Deformation Behaviors in Nano-structured or Hetero-structured Metallic Materials、The 4th Int. Workshop on Materials Behavior at Micro- and Nano-Scale (招待講演)、2011/5/19、西安 (中国)
- ⑥ S. Hata, H. Miyazaki, S. Miyazaki, M. Mitsuhara, S. Matsumura, K. Kimoto, K. Ikeda, H. Nakashima、High-angle triple-axis specimen holders developed for electron tomography、International Conference on Electron Nanoscopy & XXXII Annual Meeting of EMSI (招待講演)、2011/7/6、ハイデラバード (インド)
- ⑦ N. Tsuji, T.Maekawa, D.Terada and N.Takata、Acceleration of Grain Refinement by Repeating Severe Plastic Deformation and Phase Transformation in Fe-Ni-C Alloys、Thermec 2011: Severe Plastic Deformation (招待講演)、2011/8/4、ケベック (カナダ)
- ⑧ Y. Todaka, K.Koujina, T.Yakushiji, H.Nagai, Y.Iguchi, M.Umemoto、Mechanical Properties of Surface-Nanocrystallized Carbon-Steels Produced by SPD、Thermec 2011: Severe Plastic Deformation (招待講演)、2011/8/5、ケベック (カナダ)
- ⑨ K. Hono, C. L. Mendis, K. Oh-ishi and B. Tilak、Enhancement of precipitation hardening of magnesium alloys by microalloying、Asian Symposium on Magnesium Alloys 4 (ASMA 4) (招待講演)、2011/10/2、釜山 (韓国)
- ⑩ S. Hata, S. Matsumura, N. Kuwano、Quantitative microstructural analysis in metallic materials using electron tomography、12th KIM/JIM Joint Symposium (招待講演)、2011/11/6、沖縄コンベンションセンター (沖縄県)
- ⑪ N. Tsuji、Mechanical Properties of Bulk Nanostructured Metals: towards Managing Both Strength and Ductility、The 2012 International Workshop on Advanced Structural Metals (招待講演、2012 年 11 月 13 日~2012 年 11 月 14 日、Chongqing, China)
- ⑫ N. Tsuji、Unique Yielding Behaviors of Ultrafine Grained Metals、International Conference on Strength of Materials 16 (ICSMA 16) (招待講演)、2012 年 08 月 20 日~2012 年 08 月 24 日、Bangalore, India
- ⑬ K.Hono、Precipitation Hardenable Wrought

Magnesium Alloys, 9th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications (招待講演), 2012年07月07日~2012年07月12日, Vancouver, Canada

- ⑭ S.Hata, Fitting tomography-based transmission electron microscopy (TEM) to structural material problems: toward effective 3D TEM imaging and analysis, NIMS Conference 2012, Structural Materials Science and Strategy for Sustainability ;Back to the Basics- (招待講演), 2012年06月04日~2012年06月06日, Tsukuba, Japan
- ⑮ Nobuhiro Tsuji, Daisuke Terada, Motoki Hishida and Atsushi Ito, Dynamic Grain Growth at Room Temperature in Bulk Nanostructured Aluminum, 5th International Conference on Recrystallization & Grain Growth (招待講演), 2013年05月05日~2013年05月10日, Sydney, Australia
- ⑯ S.Hata, Electron tomography observation of microstructure in crystalline, International Center for Materials Research (ICMR) Summer School on Materials in 3D: Modeling and Imaging at Multiple Length Scales (招待講演), 2013年08月19日~2013年08月19日, Santa Barbara, USA
- ⑰ N. Tsuji, Ways to Fabricate Ultrafine Grained Structures in Steels, IUMRS-ICYRAM 2014 (招待講演), 2014年10月24日~2014年10月29日, Hainan, China

[図書] (計5件)

- ① Yoshitaka Okitsu, Tadashi Naito and Nobuhiro Tsuji, NOVA Publishers, N.Y., Automobiles: Performance Evaluation, Safety Assessment and Energy Consumption, 2010.
- ② N.Tsuji, Woodhead Publishing Ltd., Nanostructured Metals and Alloys: Processing, microstructure, mechanical properties and applications, 2011.
- ③ 辻 伸泰, (社)日本鉄鋼協会「鉄鋼材料の加工硬化特性への新たな要求と基礎研究 -加工硬化研究の最前線」第1章加工硬化基礎 1-8 巨大ひずみ加工により作製された超微細結晶粒鋼の加工硬化特性,2011,8
- ④ N.Tsuji, Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, Advanced Steels The Recent Scenario in Steel Science and Technology, 2011, 511
- ⑤ 辻 伸泰, 朝倉書店, 鉄の事典, 2014.

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: Mg 合金とその製造方法
発明者: 佐々木泰祐、宝野和博、F.エルセイ
ド、大久保忠勝、鎌土重晴
権利者: 物質・材料研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2013-209740
出願年月日: 2013年10月05日
国内外の別: 外国

名称: 潤滑油および潤滑システム
発明者: 市橋俊彦、池田樹、戸高義一、梅本
実、北川寛之、戸田健一
権利者: 出光興産株式会社, 国立大学法人豊
橋技術科学大学
種類: 特許
番号: 特願 2013-183481
出願年月日: 2013年09月04日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1)研究代表者

辻 伸泰 (TSUJI, Nobuhiro)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30263213

(2)研究分担者

宝野和博 (HONO, Kazuhiro)

物質・材料研究機構・フェロー

研究者番号: 30263213

波多 聡 (HATA, Satoshi)

九州大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号: 60229151

戸高義一 (TODAKA, Yoshikazu)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・
准教授

研究者番号: 60264107

上路林太郎 (UEJI, Rintato)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号: 80380145

寺田大将 (TERADA, Daisuke)

千葉工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80432524

柴田暁伸 (SHIBATA, Akinobu)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60451994

(3)連携研究者

なし