

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

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：22102005

研究課題名（和文）バルクナノメタル創製の計算機・物理シミュレーション

研究課題名（英文）Physical and Numerical Simulations on the Formation of Bulk-nanostructured Metals

研究代表者

柳本 潤（YANAGIMOTO, Jun）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90220194

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 127,100,000円

研究成果の概要（和文）：相変態を含む強加工・熱処理プロセスによるバルクナノ組織生成への、大変形の影響あるいは変形様式の影響を定量的に把握することは、バルクナノメタル創製の機構を把握するための重要な課題である。本研究では、相変態を含む加工・熱処理プロセスによるバルクナノメタルの超微細粒組織形成、および形成される組織が呈する力学特性について、計算機シミュレーションおよび物理シミュレーションによる解明を行った。

研究成果の概要（英文）：Knowledge on the effect of the degree of deformation and deformation mode to the formation of bulk-nanostructured metal is essential for the understanding of the mechanism on the formation of bulk-nanostructured metals. This research revealed the formation of bulk-nanostructure metals through thermos-mechanical processing including transformation and the kinetic properties of formed metal by physical and numerical simulations.

研究分野：工学

キーワード：金属組織制御 ナノ構造 バルク材料 強ひずみ加工 材料強度 数値シミュレーション 物理シミュレーション 材料試験

1. 研究開始当初の背景

材料が構造材料として社会で利用されるには、マクロスケール寸法を有するシート材あるいはバルク材として供給されねばならない。一方、従来に無い画期的な特性を有する材料を創成するには、超微細なナノレベルでの組織形成とその制御が必要である。1990年代にバルク金属材料に非常に大きな塑性変形を与えることによってナノ組織が得られることが見出され、以後、様々な巨大ひずみ (severe plastic deformation) 加工の研究が行われてきた。また、これらの加工法によって生み出された粒界だらけの特異な結晶組織を持つバルクナノメタルの呈する特性についても、盛んに研究が行われており、今までに数多くの成果が得られ、今では材料科学分野で最も活発で注目度の高い研究領域を形成するに至っている。バルクナノメタルの創製には、3つの重要な課題がある。第1の課題はバルクナノメタルの創製原理が明らかになっていること、第2の課題は原理を利用してのバルクナノメタル創製のプロセスウィンドウが明示されていることである。また、今までのバルクナノメタル創製プロセスは常温から温間域で巨大ひずみ加工を利用するのが常であったが、実機生産の観点に立てば、これとは異なる熱加工履歴について検討を行う必要が高い。これが第3の課題である。バルクナノメタル創製の計算機・物理シミュレーションでは、これら3つの課題を解決することを目指して研究を実施した。

2. 研究の目的

(1) 相変態を含む強加工・熱処理プロセスによるバルクナノ組織生成への、大変形の影響あるいは変形様式の影響を定量的に把握することは、バルクナノメタル創製の機構を把握するための重要な課題である。本研究では、相変態を含む加工・熱処理プロセスによるバルクナノメタルの超微細粒組織形成、および形成される組織が呈する力学特性について、計算機シミュレーションおよび物理シミュレーションによる解明を行った。

(2) 計算機シミュレーション及び物理シミュレーションによって、バルクナノメタルの超微細粒組織が形成されるためのプロセス条件、すなわち相変態を含む加工-熱処理プロセスでの変形モード、変形速度、変形量等が明らかになる。バルクナノメタルの持つ結晶組織は豊富な結晶粒界によって特徴づけられる。この様な特異な材料についての計算機、物理シミュレーションは、バルクナノメタルの特異な結晶構造の影響を強く反映しつつ、バルクナノメタル創製のプロセスウィンドウを明らかにするものである。

3. 研究の方法

本研究では、主として相変態ルートによるバルクナノメタル創製を取り扱う。熱加工試験機を利用した微小試験片による基礎試験

研究を圧延によるバルクナノメタル創製に繋げ、さらに創製されたバルクナノメタルの力学特性に着目し望ましい組織形態を明らかにするために、以下の研究方法を取った。図1に、それぞれの研究方法の相互の関連を示す。

(1) 共通鋼種 Nb 鋼の熱加工試験機を利用した中止めせん断試験および圧縮試験により、相変態ルートを経るバルクナノメタル創製への、変形様式 (単純せん断, 単純圧縮, せん断圧縮変形) の影響を明らかにし、計算機シミュレーション法を構築する

(2) 共通鋼種 Nb 鋼の既存の圧延によるバルクナノメタル創製の物理および計算機シミュレーションによる定量化を行い、バルクナノメタル創製のプロセスウィンドウを明らかにする、

(3) 創製されたバルクナノメタルのモデル材であるフェライト-セメンタイト鋼 (FC 鋼) を利用して、バルクナノメタルの組織構造および組織を特徴づける結晶粒径などの因子が、その力学特性におよぼす影響を明らかにする、

(4) 共通鋼種 Nb 鋼の熱間 ECAE 加工により、バルクナノメタル創製の加工限界を明らかにする。さらに、熱間 ECAE 加工によるバルクナノ組織形成の機構を明示する。

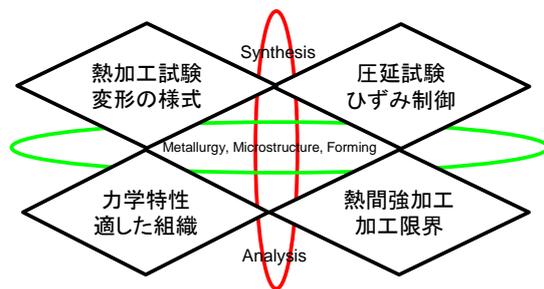


図1 研究方法相互の関連

4. 研究成果

(1) バルクナノメタル創製についての計算機シミュレーションを、古典的核生成理論と Nb 鋼の材料ゲノム解読と共に実施している。さらにバルクナノメタル創製の物理シミュレーションとしては、従来から実施してきた熱間中止めせん断変形試験 (強せん断変形) に加え、円柱の圧縮変形 (圧縮せん断複合変形)、およびダンベル試験片を用いた圧縮変形 (圧縮変形) について、引き続き物理シミュレーションを実施した。試験結果より、変形様式のバルクナノメタル創製におよぼす影響を定量的に明らかにしており、同一の変形量、ほぼ同一の加工熱処理履歴と比較した場合、強せん断変形が組織微細化には最も有利であり、鉄系合金のナノメタル化が可能であることが示された。図2に中止めせん断変形試験 (単純せん断変形) とダンベル圧縮試験 (単純圧縮変形) で形成された組織を比較する。相当ひずみは同程度であるが、平均結

晶粒径は0.99 ミクロン（中止めせん断変形）、2.54 ミクロン（単純圧縮変形）と大きな差がある。

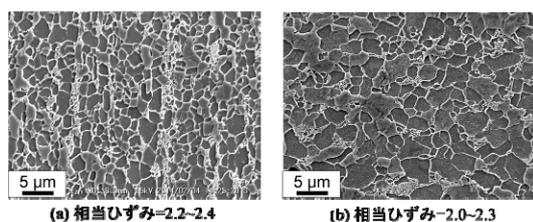


図2 (a)中止めせん断変形, (b)単純圧縮変形で形成される組織

(2) 組織微細化には強加工が必要であるが、単に強加工するだけではバルクナノメタルを効率的に創製できないため、組織と主要なプロセスパラメータの普遍的関係を構築することが重要である。既存圧延機を使用することで、単なる大圧下ではなく、シミュレーションによって圧下率、初期板厚、ロール直径によって決定されるロール間隙での幾何学的パラメータ L_d/t_d を適正化することで、共通鋼種 Nb 鋼に大ひずみを導入し、変態ルートでのバルクナノメタル薄鋼板創製を実施した。図3は、 $v=60\text{m/min}$ の圧延速度で1パス50%圧下後のピンの変形と各 site (surface, 1/4t, 1/2t) の SEM 組織写真を示したものである。圧延前に埋め込まれたピンの傾きは、板厚中心から表面にかけて大きくなり、中心から表面までの移動量 ΔL_s は圧下条件によって大きく異なる。このような変形挙動は摩擦係数 μ と L_d/t_d に支配されるため、同じ L_d/t_d の下で、 μ を変化させた有限要素解析を行った結果、ロールと鋼板の μ は約 0.3 と見積もられた。表層近傍では 4.0 以上の大きな相当ひずみ ε_{eq} が導入されているが、その大ひずみはロール間隙でのせん断力の影響がない板厚中心に向かって急激に小さくなる。結果的に、鋼板表面から 0.2 mm の範囲で $1\sim 2\ \mu\text{m}$ の微細粒が形成されたが、板厚内部では結晶粒の大きさは $10\ \mu\text{m}$ 弱となる。各サイトを EBSP で詳細に解析した結果、surface では $1.1\ \mu\text{m}$ の微細粒で、かつ特定の方位に集積した粒も見られない変態フェライト (α) 組織とセメンタイトの 2 相組織であり、1/4t では $4.5\ \mu\text{m}$ 、1/2t では $6\ \mu\text{m}$ の α /パーライト組織であった。なお、1/2t では若干亜粒界の割合が高くなり、bcc の加工集合組織となっていた。1パス圧延試験の結果から、 $\varepsilon_{eq} > 1.6$ で $1.1\ \mu\text{m}$ のフェライト粒を形成できると考え、鋼板全域に微細粒を形成することを狙って、累積圧下率 76% ($\varepsilon_{eq} = 1.64$) 以上の 3 パス圧延実験を実施した。結果として、表層だけでなく、1/4t、1/2t にも微細粒を形成させること

に成功した。

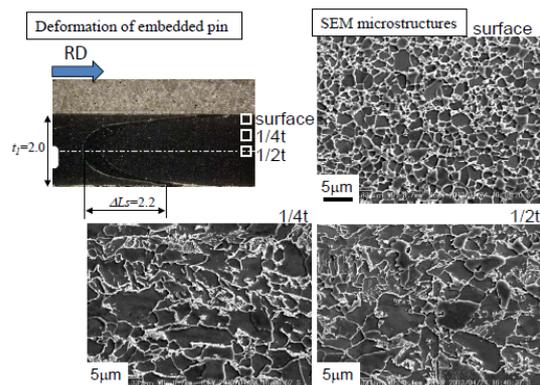


図3 1パス圧延後のピンの変形と鋼板表面、1/4t、1/2t で形成された組織

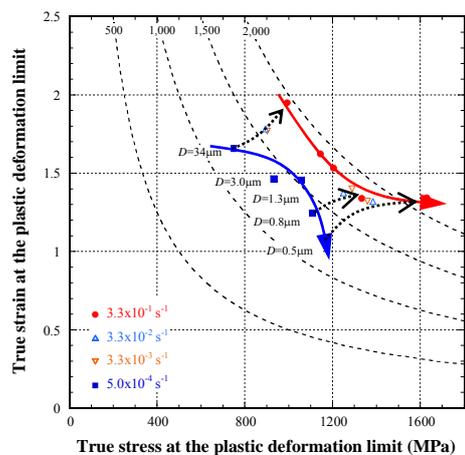


図4 フェライト結晶粒径の異なるフェライトセメンタイト鋼の塑性変形限界における真応力と真ひずみの関係

(3) 金属材料の変形挙動の理解において、「応力-ひずみ関係」は重要な役割を果たす。「バルクナノメタル創製の計算機・物理シミュレーション」のためには、強加工を加えられた材料の真の応力-ひずみ関係を実験的に取得するとともに、超微細粒鋼が優れた真応力-ひずみ関係を得るための条件を明らかにすることが重要である。本研究では、0.15%C 鋼より作製した結晶粒径の異なる FC 鋼をひずみ速度を変えて引張試験し、破断直前(塑性変形限界)までの真応力-ひずみ関係を推定した。図4に、ひずみ速度 3.3×10^{-1} から $5.0 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$ における塑性変形限界の真応力と真ひずみの関係を示す。どの結晶粒径の FC 鋼においてもひずみ速度増加により、真応力と真ひずみの両方が増大している事が分かった。これより、ひずみ速度の増加は塑性変形限界までの真応力-ひずみ関係の向上に有効であると言える。また、ひずみ速度 3.3×10^{-1} と $5.0 \times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$ の結果を比較すると、 $0.8\ \mu\text{m}$ から $0.5\ \mu\text{m}$ への結晶粒微細化による真応力と真ひずみの変化に違いが見られた。塑性変形

限界までの真応力-ひずみ関係においては、荷重や曲率半径の大きさが重要であり、さらに最高荷重点での伸びとその時のフェライト組織の変形がこれらの大きさに関係している。実験で対象としたひずみ速度 3.3×10^{-1} から $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の範囲での引張試験結果を整理したところ、 $0.8 \mu\text{m}$ までの結晶粒微細化は引張特性と塑性変形限界までの真応力-ひずみ関係の両方を向上するために有効であると結論づけられる。

(4) 強せん断加工と熱処理との組み合わせによるバルクナノメタルの創製とその加工限界を明らかにするために、熱間 ECAE(Eeul Channel Angular Extrusion)と冷却を組み合わせによるバルクナノメタルの創製を目指した。物理シミュレーションのために熱間フリーモーション ECAE 装置を開発した。本装置は T 型にエレクトロプレス(80kN)を配置し、速度、荷重を各々のユニットで任意に制御することで ECAE 加工中に速度、背圧、負荷経路などを反転させることが可能である。図 5 に金型を示す。X1 から Y1 方向へ 1 パス目の加工を行い、Y1 から X2 へ加工し、X2 から X1 へ材料を移動させる。これは Route A となる。また 2 パス目を X1 へ加工した場合 Route C となる。金型は加工部には SKD61、パンチガイド部には S50C を用いた。金型加熱には 200W($\phi 14\text{mm}$)のカートリッジヒーターを 12 本用いることで金型を 400°C まで加熱する。試験片は 960°C の加熱炉に SUS310 で作成したガイドブロックの中に共通鋼種 Nb 鋼(サイズ: $8 \times 8 \times 40\text{mm}$)を入れて、10 分保持した後、炉から出し 400°C に加熱した金型へ試験片(ガイドブロック)、パンチの順に挿入し ECAE 加工を行う。

冷間加工と比べ熱間では金型との摩擦の低減が重要であり、種々の潤滑剤を調査した結果、アルミ微粉末を用いると加工荷重を低減できることが分かった。加工速度を 16mm/s 以上にすることで 1 パス加工(相当ひずみ 1.2)とその後の冷却で、試験片全長にわたり $2\mu\text{m}$ 程度の相変態ルートによる微細フェライト組織を得ることができた。2 パス加工を実施したが、パス間で温度が低下してしまったためフェライトが析出しフェライトの加工組織となってしまった。

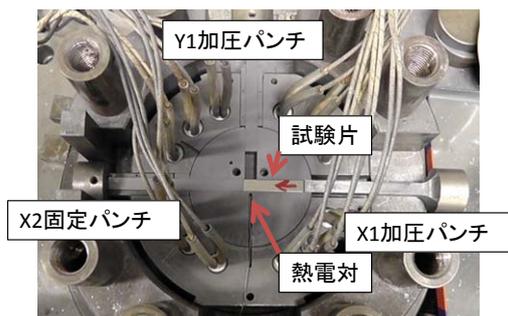


図 5 熱間 ECAE 金型とプレス軸

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 39 件)

[1]Y.Meng, S. Fukushima, S.Sugiyama, J.Yanagimoto, Cold Formability of AZ31 Wrought Magnesium Alloy Undergoing Semisolid Spheroidization Treatment, Materials Science and Engineering, 査読有, Vol.624, 2015, pp.148-156, DOI:10.1016/j.msea.2014.11.083

[2]Thet Thet Cho, Y. Meng, S. Sugiyama, J. Yanagimoto, Separation Technology of Tramp Elements in Aluminium Alloy Scrap by Semisolid Processing, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, Vol. 16, 2015, pp. 177-183, DOI:10.1007/s12541-015-0023-3

[3]N.Tsuchida, H.Nakano, T.Okamoto, T.Inoue, Effect of Strain Rate on True Stress-True Strain Relationship of Ultrafine-grained Ferrite-Cementite Steels up to the Plastic Deformation Limit, Mater. Sci. Eng. A, 査読有, Vol. 626, 2015, pp.441-448, DOI:10.1016/j.msea.2014.12.080

[4]Y.Meng, S.Sugiyama, J.Tan, J.Yanagimoto, Effects of Forming Conditions on Homogeneity of Microstructure and Mechanical Properties of A6061 Aluminum Alloy Manufactured by Time-Dependent Rheoforging on a Mechanical Servo Press, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.214, 2014, pp. 3037-3047, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2014.07.014

[5]Y.Meng, S.Sugiyama, J.Yanagimoto, Microstructure of Cr-V-Mo Steel Processed by Recrystallization and Partial Melting and Its Effect on Mechanical Properties, Materials Transactions, 査読有, Vol.55, 2014, pp. 921-929, DOI:10.2320/matertrans.M2013398

[6]木村勇次、井上忠信、超微細繊維状結晶粒組織鋼の強靱化に及ぼす炭素量の影響、鉄と鋼、査読有、Vol.100、2014、pp.56-65、DOI:10.2355/tetsutohagane.100.1104

[7]N.Tsuchida, T.Kawahata, E.Ishimaru, A.Takahashi, Effects of Temperature and Strain Rate on Tensile Properties in a Lean Duplex Stainless Steels, ISIJ International, 査読有, Vol.54, 2014, pp. 1971-1977, DOI: 10.2355/isijinternational.54.1971

[8]土田紀之、ステファヌス・ハルヨ、大貫貴久、友田 陽、鉄鋼材料の応力-ひずみ曲線、鉄と鋼、査読有、Vol.100、2014、pp.1191-1206、DOI:10.2355/tetsutohagane.100.1191

- [9]S. Fukushima, K. Miyata, M. Etou, A. Yanagida, J. Yanagimoto, Numerical Simulation of Ultrafine Grain Generation in Super Short Interval Multi-pass Rolling Process, 塑性と加工, 査読有, Vol.54, 2013, pp.148-152, DOI: 10.9773/sosei.54.148
- [10]J. Yanagimoto, Jian-Bo Tan, S. Sugiyama, Y. Meng, Controlled Semisolid Forging of Aluminium Alloys Using Mechanical Servo Press to Manufacture Products with Homo- and Heterogeneous Microstructure, Materials Transaction, 査読有, Vol.54, 2013, pp.1149-1154, DOI: 10.2320/matertrans.M2013098
- [11]J. Tokutomi, K. Hanazaki, N. Tsuji, J. Yanagimoto, Cross-Sectional Distributions of Mechanical Properties of Fine Cu-Sn Alloy Wire Manufactured by Continuous Rotary Draw Bending, Materials Transaction, 査読有, Vol.54, 2013, pp.1634-1641, DOI:10.2320/matertrans.MH201323
- [12]M. Asakawa, H. Shigeta, A. Shimizu, I. Tirtom, J. Yanagimoto, Experiments on and Finite Element Analyses of the Tilting of Fine Steel Wire in Roller Die Drawing, ISIJ International, 査読有, Vol.53, 2013, pp.1850-1857, DOI:10.2355/isijinternational.53.1850
- [13]Y. Meng, S. Sugiyama, J. Yanagimoto, Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Cr-V-Mo Steel Processed by Recrystallization and Partial Melting Method, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.214, 2013, pp.87-96, DOI: 10.4149/km_2013_1_83
- [14]T. Inoue, A. Yanagida, J. Yanagimoto, Finite element simulation of accumulative roll-bonding process, Materials Letters, 査読有, Vol.106, 2013, pp.37-40, DOI:10.1016/j.matlet.2013.04.093
- [15]T. Inoue, A. Yanagida, J. Yanagimoto, Effect of initial notch orientation on fracture toughness in fail-safe steel, Journal of Materials Science, 査読有, Vol.48, 2013, pp.4766-4772, DOI:10.1007/s10853-012-6874-4
- [16]C. Wang, Q. Hai, T. Inoue, Delaminating crack paths in ultrafine, elongated ferritic steel, ISIJ International, 査読有, Vol.53, 2013, pp.2272-2274, DOI:10.2355/isijinternational.53.2272
- [17]井上忠信, 木村勇次, 超微細粒組織を活用した低炭素鋼の強靱化、日本機械学会論文集 A 編、査読有、Vol.79、2013、pp.1226-1238、DOI:なし
- [18]N. Tsuchida, T. Inoue, H. Nakano, Effect of Ferrite Grain Size on Estimated True Stress-True Strain Relationships up to the Plastic Deformation Limit in Low Carbon Ferrite-Cementite Steels, Journal of Materials Research, 査読有, Vol.28, 2013, pp.2171-2179, DOI: 10.1557/jmr.2013.221
- [19]N. Tsuchida, Y. Yamaguchi, Y. Takagi, R. Ueji, Effects of Temperature and Strain Rate on TRIP Effect in SUS301L Metastable Austenitic Steel, ISIJ Int., 査読有, Vol.53, 2013, pp.1886-1892, DOI:10.2355/isijinternational.53.1881
- [20]N. Tsuchida, S. Kawabata, K. Fukaura, R. Ueji, Role of Stress-induced Martensitic Transformation in TRIP Effect of Metastable Austenitic Steels, J. Alloys and Compounds, 査読有, Vol.577(Suppl. 1), 2013, pp.S525-S527, DOI:10.1016/j.jallcom.2011.11.071
- [21]土田紀之、尾崎溪香、0.2C-1.2Si-1.5Mn 鋼の TRIP 効果におよぼすひずみ速度の影響、鉄と鋼、査読有、Vol.99、2013、pp.524-531、DOI: 10.2355/tetsutohagane.99.524
- [22]Y. Meng, S. Sugiyama, M. Soltanpour, J. Yanagimoto Effects of Predeformation and Semi-solid Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Cr-V-Mo Steel, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.213, 2013, pp.426-433, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2012.09.021
- [23]Y. Meng, S. Sugiyama, J. Yanagimoto, Microstructural Evolution during RAP Process and Deformation Behavior of Semi-Solid SKD61 Tool Steel, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.212, 2012, pp.1731-1741, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.04.003
- [24]J. Tokutomi, K. Hanazaki, N. Tsuji, J. Yanagimoto, Change in Mechanical Properties of Fine Copper Wire Manufactured by Continuous Rotary Draw Bending Process, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.212, 2012, pp.2505-2513, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2012.06.008
- [25]T. Inoue, Shape effect of ultrafine-grained structure on static fracture toughness in low-alloy steel, Science and Technology of Advanced Materials, 査読有, Vol.13, 2012, pp.035005-1-10,

DOI:10.1088/1468-6996/13/3/035005

[26]土田紀之、様々な金属材料を用いた断続引張試験と Bridgman の式による破断直前までの真の応力-ひずみ関係の推算、J. Japan Inst. Metals、査読有、Vol.76、2012、pp.579-586、DOI: 10.2320/jinstmet.76.579

[27]A. Yanagida, Simulation of Texture Evolution during ECAE Using Crystal Plasticity Finite Element Method with Representative Element, Steel Research International Special Issue, 査読有, ICTP2012, 2012, pp.1127-1130, DOI:なし

[28]J. Yanagimoto, S. Sugiyama, S. Kawando, A. Yanagida, Interrupt Shearing Test to Evaluate the Effect of Large Shear Deformation on the Evolution of Microstructure into Ultrafine Grains, Materials Transactions, 査読有, Vol.53, 2012, pp.2-7, DOI:10.2320/matertrans.MD201119

[29]J. Tokutomi, K. Hanazaki, J. Yanagimoto, N. Tsuji, Changes in Mechanical Characteristics of Pre-Annealed Wires of Cu- Sn Alloy Manufactured by Continuous Draw Bending, Materials Transactions, 査読有, Vol.53, 2012, pp.116-122, DOI:10.2320/matertrans.MD201114

[30]K. Hanazaki, J. Tokutomi, J. Yanagimoto, N. Tsuji, Significant Change in Mechanical Properties of Deep Drawn Ultrafine Grained Copper Wire by Additional Deformation, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol.534, 2012, pp.720-723, DOI: 10.1016/j.msea.2011.12.030

[31]N.Tsuchida, T.Inoue, K.Enami, Estimations of the True Stress and True Strain until just before Fracture by the Stepwise Tensile Test and Bridgman Equation in Various Metals and Alloys, Mater. Trans., 査読有, Vol.53, 2012, pp.133-139, DOI:10.2320/matertrans.MD201112

[32]A. Yanagida, J. Liu and J. Yanagimoto, Ferrite Transformation Kinetics of Severely Hot-Deformed Austenite, Materials Science Forum, 査読有, Vol.706-709, 2012, pp.1562-1567, DOI:なし

[33]J. Yanagimoto, J. Tokutomi, K. Hanazaki and N. Tsuji, Continuous Bending-Drawing Process to Manufacture the Ultrafine Copper Wire with Excellent Electrical and Mechanical Properties, Annals of the CIRP, 査読有, Vol.60, 2011, pp.279-282, DOI:10.1016/j.cirp.2011.03.148

[34]T.Inoue, Y.Kimura, S.Ochiai, Static fracture toughness of fail-safe steel, SCRIPTA

MATERIALIA, 査読有, Vol. 65, 2011, pp.552-555, DOI:10.1016/j.scriptamat.2011.06.025

[35]土田紀之、井崎栄政、田中知幸、深浦健三、Dual-Phase 鋼の応力-ひずみ曲線におよぼす温度とひずみ速度の影響と Kocks-Mecking モデルによる定式化、鉄と鋼、査読有、Vol. 97、2011、pp.201-208、DOI: 10.2355/tetsutohagane.97.201

[36]N.Tsuchida, R.Ueji, F.Yin and Y.Tomota, Static Tensile Deformation Behaviors of an Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP Steel studied by in-situ Neutron Diffraction, Journal of Iron and Steel Research International, 査読有, Vol.18, 2011, pp. 178-182, DOI:なし

[37]高木勝規、上路林太郎、水口 隆、土田紀之、準安定オーステナイト系ステンレス鋼 SUS301L の TRIP 効果におよぼすひずみ速度の影響、鉄と鋼、査読有、Vol.97、2011、pp.450-456、DOI: 10.2355/tetsutohagane.97.450

[38]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, Vol.51, 2011, pp.124-129, DOI: 10.2355/isijinternational.51.124

[39]A. Yanagida, K. Okazaki, K. Ishikawa and A. Azushima, Effect of Ti Addition on Tensile Properties of C-Mn Steels Subjected to ECAE and Heat Treatment, Steel Research International, 査読有, Vol.81, 2010, pp.462-465, DOI:なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

柳本 潤 (YANAGIMOTO, Jun)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号： 90220194

(2)研究分担者

井上忠信 (INOUE, Tadanobu)
独立行政法人物質・材料研究機構・元素戦略材料センター・グループリーダー
研究者番号： 90354274

(3)研究分担者

土田紀之 (TSUCHIDA, Noriyuki)
兵庫県立大学・工学研究科・准教授
研究者番号： 90382259

(4)研究分担者

柳田 明 (YANAGIDA, Akira)
東京電機大学・工学部・准教授
研究者番号： 20432065