

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390031

研究課題名(和文)電解析出法による強度・延性バランスに優れたバルクナノ結晶Fe合金の創製

研究課題名(英文) Fabrication of bulk nanocrystalline Fe alloys with high strength and high tensile ductility by electrodeposition

研究代表者

瀧川 順庸 (Yorinobu, Takigawa)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70382231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：電解析出法によるバルクナノ結晶Fe-Ni、Fe-Ni-C、Fe-Mn合金の作製を行った。Fe-Ni合金では、強度1.5GPa、伸び15%の高強度・高延性材料の創製に成功した。この材料の延性は、結晶成長モードと欠陥形成に関連する(200)配向度と粒界脆化に関連するS濃度で記述されることが明らかになり、延性予測式を構築した。さらに、(200)配向度の向上とS濃度低減プロセスを開発し、強度1.5GPa、伸び24%の材料創製に成功するとともに、延性予測式の妥当性を実証した。また、プロピオン酸添加による粒界自由体積を緩和した高硬度Fe-Ni-C合金、欠陥およびき裂のないFe-Mn合金の作製にも成功した。

研究成果の概要(英文)：Bulk nanocrystalline Fe-Ni, Fe-Ni-C and Fe-Mn alloys were fabricated by an electrodeposition. Fe-Ni alloys exhibit high strength of 1.5GPa and large tensile ductility of 15%. The intrinsic ductility of these alloys was explored, taking into consideration the relationship between ductility and the orientation index or contents of grain boundary embrittlement element. An applying multiple regression analysis provides accurate predictions for the ductility. The analysis of this study points to the potency that the intrinsic ductility of nanocrystalline Fe-Ni alloys is higher than that of the present highest value of 24%. Fe-Ni-C alloys with high hardness are also fabricated. The addition of propionic acid to the deposition bath could release the excess grain boundary defects of electrodeposited alloys in as-deposited states. Fe-Mn alloys without voids and cracks were also fabricated.

研究分野：材料プロセス

キーワード：電解析出法 ナノ結晶材料 バルク 延性 結晶成長 粒界偏析

1. 研究開始当初の背景

鉄の電解析出(めっき)は、主に軸受や金型など鋼材の摩耗した部分を修復したり、削り過ぎた部分を盛り上げたりする用途で使用されている。その特徴として、溶接と比較してひずみが少ない、純度が高いので錆びにくいという点が挙げられる。さらに、鉄めっきはクロムやニッケルめっきに比べて浴組成が人体や環境にもやさしいだけでなく、リサイクル性を有するというメリットもある。鉄の電解析出に求められる特性として、強度、延性といった機械的特性とともに、ミリメートルオーダーの厚みを得るための内部応力の低下、長時間安定した電解浴が必要になってくる。現状、ミリメートルオーダーの厚みを有する鉄の電解析出あるいは電解製造(電鍍)がすでに実用化されている。しかしながら、現状使用されているものの強度は硬度で350HV程度であり、軸受や金型の母材である工具鋼などと比べると半分程度の強度にとどまっている。さらなる用途の拡大には、延性などの特性を大幅に低下させることなく、その強度を例えば工具鋼と同程度まで向上することが一つの課題として挙げられる。

提案者のグループでは、ニッケルの電解析出において、電解浴組成、pH、界面活性剤、光沢剤などを最適化することにより、微細組織をナノレベルで制御した高強度・高延性バルクナノ結晶ニッケルの作製に成功している[1,2]。さらに、Ni-W合金においても、試料中の組成のばらつきが0.4at%以下を保ち、2mm以上の厚みの試料が作製可能な連続めっきプロセスを開発するとともに[3]、電解析出条件を最適化することによる延性付与に成功しつつある[4]。これらニッケル基合金について得られた知見を鉄合金の電解析出に応用することにより、高強度・高延性を有し、ミリメートルオーダーの厚みを有するバルク体を作製可能な低内部応力、高析出速度の電解析出による鉄あるいは鉄合金の作製が可能となると考えられる。

これまでの鉄の電解析出予備実験において、様々な硬度を有するナノ結晶材料が得られている。その中で、工具鋼と同程度の700HV以上の硬度を有する厚み2mm以上のナノ結晶材料が得られているものの、電解析出中に炭素を0.5wt%程度含んでいることから析出時の急冷効果によりマルテンサイト変態が生じてしまい、非常に脆い材料しか得られていない。逆に、炭素が混入しない浴組成で電解析出した場合、ナノ結晶材料が得られず十分な強度が得られていない。これを解決する一つの手段として、現在、Niとの合金化により、マルテンサイト変態開始点を室温以下に下げ、室温において応力誘起変態が生じるバルクナノ結晶オーステナイトFe合金の作製、その評価を進めている。このように、合金化により準安定オーステナイトの形成、固溶強化など様々な方法により強度・延性バ

ランスに優れたバルクナノ結晶Fe基合金の開発の可能性が考えられ、これらの作製が今後の課題であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、電解析出法を用いた合金化により、様々な強度・延性バランスを有する均質でかつ内部応力を低減した厚み2mm以上のFe基バルクナノ結晶材料を創製することを目的とする。これにより、鉄基ナノ結晶材料の有する強度・延性バランスの本質に迫ることを目指す。具体的には、電解析出法による、Fe-Ni、Fe-Ni-C、Fe-Mnの3種類の合金の作製を試みた。また、延性支配因子についての検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 高強度と高延性を両立する電析バルクナノ結晶Fe-Ni合金の創製

Fe供給源である硫酸鉄とNi供給源であるスルファミン酸ニッケルの添加量を変えることで、電析浴中のNiとFeのモル比(Ni/Fe ratio)が異なる浴を作製した。光沢剤としてサッカリンナトリウムを添加し、電析浴のpH調整は1.0 mol/Lスルファミン酸を用いた。電析は浴温度40-60、pH 2.0-2.5、電流密度10 mA/cm²の条件下で行った。予備実験として各電析浴、電析条件で1Lビーカーでの24hの電析を行い、得られた皮膜の特性評価を行った。これらの結果をふまえ、5L電析浴にてバルクナノ結晶Fe-Ni合金の作製を行った。

バルクナノ結晶Fe-Ni合金作製のために、本研究ではNi/Fe ratio=2.98、1.78、1.66、1.54、1.31、1.07の電析浴を用いた。電析は浴温度50、pH 2.3、電流密度10 mA/cm²の条件下で行い、厚さ0.7-0.8mmのバルク材を作製した。

電流効率は、陰極の質量変化から算出した。作製した試料に対し、エネルギー分散型X線分光法(EDS)によるNi量測定を行った。C、S量は、高周波赤外吸熱法によって測定した。結晶相はX線回折(XRD)により同定し、得られた回折ピーク幅の広がりからシェラーの式によって結晶粒径を概算した。また、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて、結晶粒の直接観察を行った。ビッカース硬さ試験は荷重500g、保持時間10sで行った。引張試験片は作製した試料より平行部長さ12mm、幅4mmに放電加工により作製した。引張試験は室温にて、ひずみ速度 $8.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で行った。破断伸びは引張前後でのけがき線長さの変化から算出した。引張試験後の破断面観察には走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。

(2) カルボン酸添加による電析バルクナノ結晶Fe-Ni合金の強度向上

上述したFe-Ni電析浴に、プロピオン酸、酢酸、コハク酸、アジピン酸、吉草酸、グルタル酸をそれぞれ添加した電析浴を使用し

た。各種電析浴において、電流密度 10 mA/cm^2 、浴温 323 K 、 pH 2.2 の条件下で 48 h 電析を行い、厚さ約 $300 \mu\text{m}$ のバルクナノ結晶 Fe-Ni 合金を作製した。さらに、各種電析浴の電流効率から添加剤の選定を行い、最も優れた添加剤については添加量 0、0.1、0.5、1.0、2.0、3.0 g/L 添加した 6 種の添加浴を作製した。解析方法は(1)と同様である。

(3) 高強度・高延性な Fe-Mn 合金作製に向けた電析プロセスの構築

Fe-Mn 合金の作製には硫酸 Fe と硫酸 Mn を主成分とする電析浴を用いた。この浴組成を用いて電流密度 $10\text{-}50 \text{ mA/cm}^2$ 、浴温度 325 K 、 pH 2.0-2.4 の条件下で 24 h の電析を行い、電析ナノ結晶 Fe-Mn 合金を作製した。解析方法は(1)と同様である。

(4) 電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金における高延性化指針の提案とその実証

これまでに得られたデータおよび過去の文献データから、延性支配因子を検討した。また、Fe 合金における粒界脆化元素である S の試料への共析を防ぐ脱硫プロセスの構築を目指した。工業用の鉄鋼において、S による材料の脆化を防ぐため、S と親和性の高い Mn を添加し MnS の形成・分散を行っている。また、電析プロセスでは、Mn はイオン化傾向が水素に比べて非常に卑であるため析出ししないと予測される。脱硫剤として塩化 Mn を選択し電析プロセスでの脱硫効果を検討した。塩化 Mn 量、サッカリン量、浴温度の最適条件を探索した。その後、予備実験の結果を踏まえてバルク試料の作製を行った。(1)の Fe-Ni 電析浴脱硫剤として塩化 Mn を 30 g/L 添加した新規電析浴を用いた。また、サッカリン量を 1.0 g/L に変えた浴を用いた。電析は、電流密度 10 mA/cm^2 、浴温度 50、55、 pH 2.1 の条件下で行い、厚さ $0.7\text{-}0.8 \text{ mm}$ の電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金を作製した。解析方法は(1)と同様であるが、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)による Mn 量測定を行った。

4. 研究成果

(1) 高強度と高延性を両立する電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の創製

Ni/Fe ratio の異なる電析浴から、 $10\text{-}47\text{Ni}$ を示す電析 Fe-Ni 合金を作製した。XRD による結晶構造解析の結果、Ni 組成によって異なる結晶構造を示した。 $10\text{-}28\text{Ni}$ の範囲では体心立方(BCC)構造を示した。BCC 構造の Fe-Ni 合金では、シェラーの式から概算された結晶粒径は $10\text{-}24 \text{ nm}$ で硬さは $4.1\text{-}5.7 \text{ GPa}$ と非常に高硬度を示したが、高い内部応力からき裂が伸展しており、非常に脆かった。また、 $34\text{-}40\text{Ni}$ の組成範囲では BCC 構造と面心立方(FCC)構造の混相が確認された。この領域では、結晶粒径は約 $1 \mu\text{m}$ まで粗大化し、硬さは 2.6 GPa まで低下した。BCC 構造と FCC 構

造間の界面エネルギーを駆動力とした粒成長によって、強度が低下したと考えられる[5]。一方、 $40\text{-}47\text{Ni}$ では FCC 構造を示した。この組成内では、シェラーの式から概算された結晶粒径は $12\text{-}15 \text{ nm}$ であり、硬さは $3.8\text{-}4.1 \text{ GPa}$ であった。また簡便な曲げ試験の結果、 180° 曲がったことから延性の発現が期待できる。以上の結果から、高強度と高延性を両立する電析ナノ結晶 Fe-Ni 合金の作製には、FCC 構造を示す Fe-Ni 合金が適していると考えた。

図 1 に 3 種類の電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金のクロスヘッド変位における応力-ひずみ曲線を示す。電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金は最大引張強度 $1.56\text{-}1.87 \text{ GPa}$ を示した。また、けがき線の変化量から算出した破断伸びは $5.5\%\text{-}15.8\%$ を示し、 10% 以上の大きな延性を示すバルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の作製に成功した。この引張特性は、商業 Fe 合金を超える強度と延性のバランスである。図 2(a) に引張後における試験片の SEM 像を示す。特に大きな伸びを示した sample C では、引張前後での試験片長さの大きな変化や明瞭なネッキングが観察された。図 2 (b)-(d) に sample A、C、E における引張破面の SEM 像を示す。いずれのサンプルにおいても、延性破壊時見られるディンプルパターンが観察された。

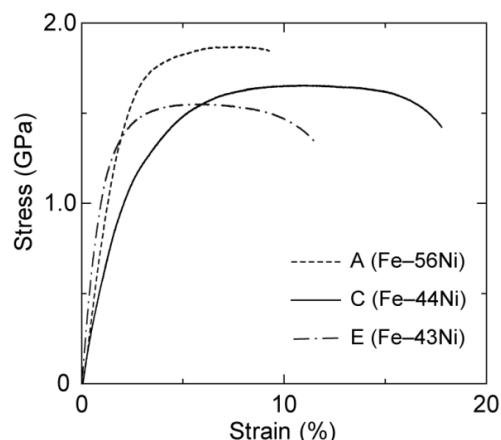


図 1 電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の引張試験結果

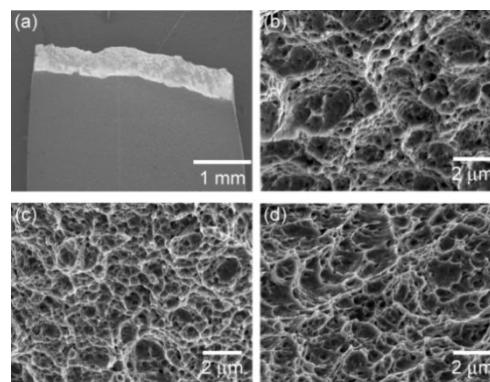


図 2 電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の引張後の試験片および破面の SEM 像

(2) カルボン酸添加による電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の強度向上

各種カルボン酸を添加した電析浴の電流効率から添加剤の選定を行った。従来の Fe-Ni 電析浴の電流効率と比較して、プロピオン酸添加浴は同程度の値を示し、その他の電析浴の低い値を示した。したがって、最も優れた添加剤としてプロピオン酸を選定した。

プロピオン酸を 0-3.0 g/L 添加した各電析浴から得られた試料は、すべて FCC 構造を有していた。結晶粒径は 13-14 nm 程度であった。また、各電析浴の電流効率、得られた試料の Ni 量、S 量および C 量は、ほぼ一定の値を示した。BCC 構造を有する Fe 合金における結果とは異なり、今回得られた試料の C 量は最大で 0.02 wt% であった。

プロピオン酸添加に伴い、硬さは大きく向上した。しかし、各電析浴から得られた試料の粒径、C 量は同程度の値を示している。したがって、プロピオン酸添加に伴った硬さの向上は、粒径変化や C 量の増加では説明できない。一般に、ナノ結晶材料は、作製プロセスの不完全性から、粒界上に欠陥(過剰体積)を有している。この過剰体積が熱処理により緩和され、より安定な粒界構造に遷移することで強度が向上すると考えられている[6]。すなわち、プロピオン酸添加に伴った硬さ向上は、初期粒界構造の違いに起因していると考えられる。そこで、プロピオン酸を 0、3.0 g/L 添加した電析浴から得られた試料(0P、3.0P)に対して、それぞれ結晶粒成長の生じない低温熱処理を行った。熱処理時間と硬さの関係を図 3 に示す。0P の硬さは熱処理時間とともに大きく変化し、最終硬さは初期硬さの約 21% 向上した。一方で、3.0P の硬さはほとんど変化せず、最終硬さは初期硬さの約 3% しか変化しなかった。0P の最終硬さは、3.0P の初期硬さと同程度の値を示した。これらの結果から、3.0P は、熱処理前の初期粒界構造がすでに安定した構造を有していたことが推察される。したがって、プロピオン酸添加浴から得られた電析 Fe-Ni 合金の硬度向上は、より安定した初期粒界構造を有したことが原因と考えられる。

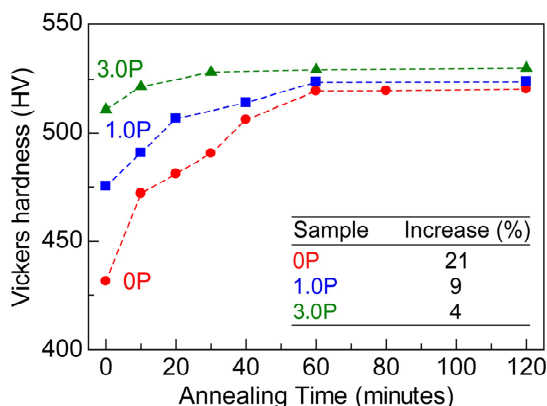


図 3 電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の低温熱処理による硬さ変化

(3) 高強度・高延性な Fe-Mn 合金作製に向けた電析プロセスの構築

得られた試料の Mn 量は 0.7-3.7 at.% であり、すべて BCC 構造を有していた。また、結晶粒径は 11~31 nm であった。電流効率は 37-88% であり、電流密度及び pH の増加に伴って増加することがわかった。70% 以上の高い電流効率が得られる電析条件は pH 2.2-2.4、電流密度 20-50 mA/cm² であることがわかった。また、高電流効率達成条件から得られた試料の Mn 量は 2.1-3.7 at.%、硬さは 560-610 HV であった。過去に報告されている電析 Fe-Ni 合金では硬さ 400-500 HV であることから、Mn 添加により Fe-Ni 合金以上の強度が期待できる。

次に、得られた試料の延性発現の可能性を探索した。SEM 観察の結果、低電流効率試料では試料断面に数 μm 程度の欠陥が数多く観察された。この断面に観察される欠陥は、電流効率の増加に伴う水素発生の低減により減少することがわかった。一方、高電流効率達成試料を含む多くの試料表面にき裂が観察された。そこで、き裂形成と関係のあるパラメータを探索した。XRD パターンを比較したところ、(200)面の強度が高い試料ではき裂が観察されなかった。このような(200)配向度(N₂₀₀)とき裂形成の関係は、電析 Ni-W 合金において報告している結晶成長モードに関連した現象[7]であると考えられる。図 4 に Mn 量と N₂₀₀ の関係を示す。Mn 量 1-2 at.% の試料において N₂₀₀ が高くなり、き裂が発生しなくなることがわかった。

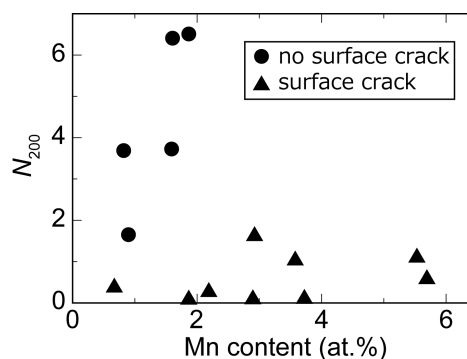


図 4 電析 Fe-Mn 合金における Mn 量と (200)配向度の関係

以上より、試料断面の欠陥形成は電流効率、試料表面のき裂形成は N₂₀₀ が支配因子であり、N₂₀₀ は Mn 量により制御できることがわかった。この結果から、高電流効率で Mn 量 1-2 at.% の試料作製により、断面の欠陥、表面き裂ともに低減可能であると考えた。そこで、高電流効率達成条件(pH 2.2、電流密度 30、50 mA/cm²)を用いて、浴組成の Mn と Fe のモル比(Mn/Fe)を 1-13 の範囲で変えることによって Mn 量を変化させた。その結果、(Mn/Fe)=5 の電析浴組成において 70% の高電流効率のまま Mn 量を 1.7 at.% に制御することができ

た。この試料の SEM 観察の結果、断面の欠陥および表面き裂は観察されなかった。以上の結果より、pH、電流密度による電流効率の制御と浴組成による Mn 量の制御を組み合わせることにより、高電流効率な試料作製と、数 μm 以上の断面の欠陥および表面き裂のない試料作製の両立が可能であることがわかった。

(4) 電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金における高延性化指針の提案とその実証

過去に報告されている電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金のデータを解析した結果、延性支配因子は試料中に不純物として含まれる S 量および N200 であることが示唆された。そこで、電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の S 量、N200 が延性に与える影響を重回帰分析により評価したその結果、以下の延性予測式が得られた。

$$\epsilon_{\text{prediction}} = -355.31S + 6.65N_{200} + 35.1 \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_{\text{prediction}}$ は、延性予測値(%)、S は S 量 (at%)を表す。図 5 に電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の実験値と予測値の関係を示す。直線は、実験値と予測値が等しいことを表す。式(1)の R^2 値は 0.93 であり、式(1)が延性予測式として非常に高い精度を有していることが分かった。今回の解析結果から、電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の延性支配因子は試料中に含まれる S 量および N200 であり、これらのパラメータから正確に延性を予測することが可能であることが分かった。この延性予測式に基づき実験による検討を行うことで高延性電析バルクナノ結晶 Fe-Ni 合金の作製を試みた。

予備実験の結果、塩化 Mn 量、サッカリン量、浴温度の最適条件は、それぞれ 30 g/L、1.0 g/L、55 であった。この結果を踏まえ、いくつかの電析浴からバルク試料を作製した。得られた試料の結晶粒径はいずれも 15 nm 程度であった。また、各電析浴の電流効率、得られた試料の Ni 量、粒径は同程度の値を示した。一方、塩化 Ni に代えて塩化 Mn を用いた浴から作製した試料において、S 量の 29%の低減に成功した。また、試料中に Mn は検出されなかったが、電析後の M 浴には Mn と S の化合物の沈殿が観察された。したがって、Mn が S との化合物を形成し、試料中への S の共析を防いだことにより S 量低減に成功したと考えられる。

得られた試料の N200 は、電析浴のサッカリン量、浴温度により変化する。サッカリン量 1.0 g/L、浴温度 55 で作製した試料の N200 は、従来条件で作製した N50 の N200 と比較して 2 倍程度高い値を示した。各試料の最大引張強度は 1.60-1.64 GPa と同程度の値を示した。また、破断伸びは、11-24%を示した。試料中の S 量低減および N200 の改善により、高強度 1.6 GPa を維持しつつ 20%以

上の高延性試料作製に成功した。図 5 に今回得られた試料の実験値と予測値もプロットしている。今回の結果とも非常に良い相関を得られ、式(1)は、高延性範囲にも適用可能であることが分かった。

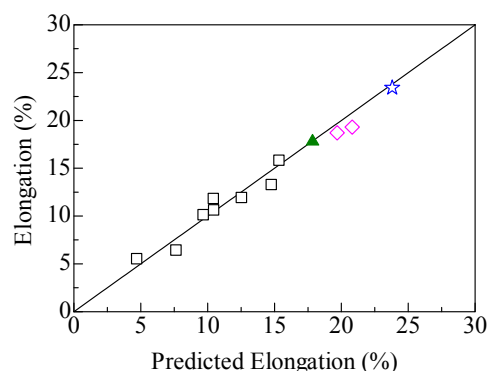


図 5 (1)式から予測された伸びと引張試験により得られた伸びの比較

<引用文献>

- I. Matusi, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi: "Enhanced Tensile Ductility in Bulk Nanocrystalline Nickel Electrodeposited by Sulfamate Bath," *Mater. Lett.*, 65, 2351-2353 (2011).
- 松井功, 岩見英明, 瀧川順庸, 上杉徳照, 東健司, "各種光沢剤を添加したスルファミン酸浴から作製したバルクナノ結晶 Ni の引張特性," *表面技術*, 62 [12], 686-690 (2011).
- Y. Kimoto, S. Wakayama, A. Fujii, Y. Takigawa, K. Higashi, "Novel Electroforming Process of Bulk Nanocrystalline Ni-W Alloys with Minimized W-concentration Gradient and Fluctuation," *Mater. Trans.*, 48[6], 1483-1491 (2007).
- I. Matusi, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi: "Improvement in Tensile Ductility of Electrodeposited Bulk Nanocrystalline Ni-W by Sulfamate Bath using Propionic Acid," *Microelectronic Eng.*, 91, 98-101 (2012).
- J. K. Chen, D. Farkas and W. T. Reynolds; "Atomistic simulation of an f.c.c./b.c.c. interface in Ni-Cr alloys," *Acta Mater.*, 45[11], 4415-4421 (1997).
- T.J. Rupert, J.R. Trelewicz, C.A. Schuh, "Grain boundary relaxation strengthening of nanocrystalline Ni-W alloys," *J. Mater. Res.* 27, 1285-1294 (2012).
- I. Matusi, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi: "Effect of orientation on tensile ductility of electrodeposited bulk nanocrystalline Ni-W alloys," *Mater. Sci. Eng. A* 578, 318-322 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

H. Mori, I. Matsui, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi; Reduction in sulfur content of electrodeposited bulk nanocrystalline Fe-Ni alloys using manganese chloride, Materials Letters 175 (2016) 86-88. (査読有り)

DOI: 10.1016/j.matlet.2016.03.146

I. Matsui, H. Mori, T. Kawakatsu, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi; Mechanical behavior of electrodeposited bulk nanocrystalline Fe-Ni alloys, Materials Research 18 (2015) 95-100. (査読有り)

DOI: 10.1590/1516-1439.329014

I. Matsui, H. Mori, T. Kawakatsu, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi; Enhancement in mechanical properties of bulk nanocrystalline Fe-Ni alloys electrodeposited using propionic acid, Materials Science and Engineering A 607 (2014) 505-510. (査読有り)

DOI: 10.1016/j.msea.2014.04.042

I. Matsui, Y. Takigawa, D. Yokoe, T. Kato, T. Uesugi, K. Higashi; Strategy for electrodeposition of highly ductile bulk nanocrystalline metals with a face-centered cubic structure, Materials Transactions 55 (2014) 1859-1866. (査読有り)

DOI: 10.2320/matertrans.M2014268

I. Matsui, T. Kawakatsu, Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Higashi; Fabrication of bulk nanocrystalline Fe-Ni alloys with high strength and high ductility by an electrodeposition, Materials Letters 116 (2014) 71-74. (査読有り)

DOI: 10.1016/j.matlet.2013.10.108

〔学会発表〕(計 2 6 件)

瀧川順庸, 松井功, 上杉徳照, 東健司; 電解析出法による高強度・高延性バルクナノ結晶材料の作製, 日本金属学会 2016 年春季大会, 2016 年 3 月 24 日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都葛飾区)(招待講演)

Y. Takigawa, I. Matsui, T. Uesugi, K. Higashi; Fabrication of Bulk Nanocrystalline Alloys with Tensile Ductility by Electrodeposition, Twenty-Fourth International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM XXIV), 2015 年 12 月 18 日, 関西大学(大阪府吹田市)(招待講演)

Y. Takigawa, I. Matsui, T. Uesugi, K. Higashi; Fabrication of bulk nanocrystalline materials with tensile ductility by electrodeposition, 8th International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2013), 2013 年 12 月 6 日 (Las Vegas, USA)(招

待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀧川 順庸 (TAKIGAWA, Yorinobu)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70382231

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

松井 功 (MATSUI, Isao)

川勝 智 (KAWAKATSU, Tomo)

森 宏樹 (MORI, Hiroki)

小倉 悠 (OGURA, Yu)