

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24360284

研究課題名(和文) 混乱原理に基づく高エントロピー・バルク金属ガラスの創製、性状の解明と応用化

研究課題名(英文) Fabrication of High-Entropy Bulk Metallic Glasses based on Confusion Principle, Clarification of their Properties and their Application

研究代表者

竹内 章 (Takeuchi, Akira)

東北大学・金属材料研究所・特任教授

研究者番号：40250815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、混乱原理(Confusion Principle)を巧みに利用して開発が進められている多元系等原子分率組成合金の高エントロピー(H-E)合金の優れた合金設計指針をバルク金属ガラス(BMG)へ適用することにより、例えば、臨界直径1.5ミリメートルのFe₂₅Co₂₅Ni₂₅(B, Si)₂₅HE-BMGを新規作製に成功した。さらに、関連合金として、世界で初めて、六方稠密充填(HCP)構造のYGdTbDyLuおよびGdTbDyTmLu合金の創成にも成功した。研究期間の5年間に、統計的手法に立脚したH-E関連合金の合金設計指針を確立した。

研究成果の概要(英文)：The present study has succeeded in fabricating high-entropy bulk metallic glasses (HE-BMGs) as represented by Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅(B, Si)₂₅ alloy with a critical diameter of 1.5 mm for forming glassy phase. The alloys were developed by applying a concept of confusion principle that has effectively been utilized for the alloy development of high-entropy (H-E) alloys of multicomponent equi-atomic compositions. Furthermore, a first success in fabricating H-E alloys with hexagonal dense-packed structure was reported by fabricating YGdTbDyLu and GdTbDyTmLu alloys. In the 5-year project, alloy designs of the H-E and relevant alloys have been established based on statistic analysis.

研究分野：材料工学

キーワード：バルク金属ガラス アモルファス材料 高エントロピー合金 等原子分率 固溶体 合金設計

1. 研究開始当初の背景

本研究の関連研究は、《 》バルク金属ガラス(BMG)および《 》高エントロピー(H-E)合金であり、これらの融合である《 》高エントロピー・バルク金属ガラス(HE-BMG)を本研究の対象とする。《 》BMGは、直径2、3mm以上の試料寸法をもつ塊状(=バルク)金属ガラスであり、機械的、化学的、磁氣的性質などで結晶性合金よりも優れた性質を発現すること、および、製品への省プロセス成形性を生かして、近年、工業化・実用化が加速している。その根底を支える新規BMGの開発に関しては、申請者の所属する東北大学を中心とした日本が1990年代以降世界を牽引し続けているが、近年、米国、中国、韓国などのグループとの激しい開発競争を繰り広げている。しかしながら、BMGの合金組成の最適化の指針(合金組成則)が確立されておらず、さらに、固溶体の一種である金属ガラス、BMGは構成元素の原子分率に関して不定性比であるため、BMGの開発には依然として多大な人的・時間的労力・コストを要しているのが現状である。一方、《 》H-E合金は、主に、fccまたはbcc単相、もしくはその混相から成る単純構造の結晶相であり、機械的特性およびその高温域の耐劣化性に特長のひとつをもつ合金である。H-E合金は、台湾国立清華大学の葉均蔚(J.W Yeh)教授を世界的権威の一人として研究が進められている(引用文献)。H-E合金は、例えば $A_{20}B_{20}C_{20}D_{20}E_{20}$ 合金のように、5元系以上の多元系等原子分率で定義され、合金設計に関して混乱原理(Confusion Principle: [A.L. Greer. Nature, 366, 303 (1993)])が最大限活用された例であり、下記のとおり2つの特徴をもつ。すなわち、(1)構成元素全ての濃度が $1/N$ (=原子分率で $100/N$)のN元系合金は、配置エントロピー(S_{config}/R : R =気体定数)が最高値(=ln N)をもつ。この S_{config}/R の値は、Nの増加に伴い単純増加する。(2)Nが5以上のH-E合金の場合、 $S_{\text{config}}/R = \ln 5$ は二元系合金の値($S_{\text{config}}/R = \ln 2$)の2.3倍以上に達し、多元系効果によるエントロピー因子(=乱雑さ)の大きさが固溶体のエネルギー的安定化に寄与している。一方、合金設計の観点からH-E合金を見た場合、合金系および構成元素数の選定することにより合金組成が自動的に決定されるため、合金組成探査に係る人的および時間的労力を劇的に低減できる点が特筆される。《 》HE-BMG)これまで、BMGおよびH-E合金は、それぞれ、得られる相状態および合金組成が異なるため、全く相容れない別合金と考えられ、独立に研究が進められてきた。しかしながら、これらの常識を打破して、葉均蔚(J.W Yeh)教授を含む申請者らのグループは、世界初のセンチメートル級 $Pd_{20}Pt_{20}Cu_{20}Ni_{20}P_{20}$

HE-BMGを発表している(引用文献)。現状で僅か二編のHE-BMG論文の他の一編は、ほぼ同時期に中国のグループから報告された直径3mmの $Zn_{20}Ca_{20}Sr_{20}Yb_{20}(Li_{0.55}Mg_{0.45})_{20}$ 合金であり、LiとMgの一部に合金組成の改良がなされている(引用文献)。HE-BMGは、H-E合金とBMGの融合から生まれた新規合金であり、今、正にその扉が開かれつつある。今後、激しい国際競争が予想される中、申請者らはその最前線に位置しており、迅速な研究の進展が求められている状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、多元系合金の混乱原理(Confusion Principle)を巧みに利用して開発が進められている高エントロピー(H-E)合金の優れた合金設計指針をバルク金属ガラス(BMG)へ適用することにより、新規合金として高エントロピー・バルク金属ガラス(HE-BMG)を創製するとともに、その学理の確立と応用・実用化を目指す。具体的な研究項目としては、HE-BMGに関する(1)合金探査、(2)測定・分析・解析および(3)計算機科学予測の基礎的研究とともに、(4)応用化・実用化の検証を掲げる。申請者らは、既に、世界初のセンチメートル級 $Pd_{20}Pt_{20}Cu_{20}Ni_{20}P_{20}$ HE-BMGの作製に成功しており、研究期間の5年間に十種類以上の新規HE-BMGを創製するとともに、BMGおよびH-E合金双方の融合・拡張を通じて、機能性金属材料の新たな可能性を追求することを目的とする。

3. 研究の方法

研究目的で記した4つの研究項目、すなわち、(1)合金探査、(2)測定・分析・解析、(3)計算機科学による解析および予測および(4)応用化・実用化を達成するための緻密な研究計画を策定している。具体的には、研究期間初年度の平成24年度では、特に、研究項目(1)および(2)を重点的に実施する。主に5元系H-E合金($A_{20}B_{20}C_{20}D_{20}E_{20}$)を起点として、既存のBMGの合金系・合金組成の類似性を検討して、数種類の新規HE-BMGの創製ならびにその性状を解明するとともに、平成25年度以降に実施される研究項目(3)のための土台を強固に構築する。平成25年度以降では、研究項目(2)および(3)で得られた成果を研究項目(1)にフィードバックさせる方式を採用し、研究のより高い効率化を図る。最終年度の平成28年度では研究項目(4)の検討を集中的に行う。以上の研究計画・方法とそれを支える精鋭研究者組織により、研究全体の強力で円滑な推進を図る。

4. 研究成果

これまでに得られた主要な研究成果は、
1. 新規 HE-BMG の開発、2. 世界初の HCP 構造の H-E 合金の開発、および 3. HE-BMG の合金設計の確立に大別される。それぞれの研究成果を以下に述べる。

(1) 新規 HE-BMG の開発

Fe、Co、Ni、B、Si から構成される等原子分率に近い組成の合金、すなわち、 $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}(\text{B}, \text{Si})_{25}$ 合金が臨界直径 1.5 ミリメートルの高エントロピーバルク金属ガラスとして作製できることを新規に見出した (図 1、論文)。この合金は、3624MPa の降伏強度と 3.1% の大きな塑性伸びを示し、これまでに見出された高エントロピーバルク金属ガラスを凌ぐ優れた機械的性質を示す。また、この合金は、世界初の強磁性高エントロピーバルク金属ガラスであり、その飽和磁化は 0.87 T、保磁力は 1.1 A/m、1 kHz における有効透磁率は 19,800 の優れた軟磁性を示す $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}(\text{B}, \text{Si})_{25}$ 合金で HE-BMG の開発に成功した。

その他の関連研究成果として、 $\text{Al}_{0.5}\text{TiZrHfPdNi}$ 合金を新規に見出した。この合金は、銅鑄型鑄造法で直径 1.5 ミリメートル棒材として作製した場合、体心立方格子 (bcc) 単相として得られ、液体急冷法で薄帯として作製した場合、ガラス単相として得られることが実験的に明らかになった (論文)。この合金で得られる相の冷却速度依存性を温度 時間 変態 (T-T-T) 曲線および連続冷却 (C-C-T) 曲線の概念で整理することに成功した。

(2) 世界初の HCP 構造の H-E 合金の開発

アーク溶解法によりボタン状の YGdTbDyLu および GdTbDyTmLu 合金を作製してその結晶構造を調査した結果、世界で初めて稠密六方晶 (HCP) 構造の高エントロピー合金 (HEA) の作製に成功した (図 2、論文)。液体からの合金作製に際して相分離を回避するため、合金選択に際しては、同素変態を許容した上で構成元素が室温で HCP 構造を有することを条件として課した。さらに、構成元素の二元系状態図が全率固溶体型であること、ならびに、固液分離および固相間分離の組成領域ならびに温度領域が狭小である組み合わせを慎重に選択する方針で合金設計を行った。その結果、両合金に例示されるように、主にランタノイド金属から構成される合金を選択するに至った。原子寸法差を表すデルタ (Δ) 値は、作製した HCP 構造の YGdTbDyLu および GdTbDyTmLu 合金で、それぞれ 1.4 および 1.6 であり、混合エンタルピー (H_{mix}) はともに 0 kJ/mol であることを示した。さらに、これらの合金の価電子濃度 (VEC) は、3 と算出され、HEA で初めて HCP 構造の VEC が定義された。これらの合金は HEA 合金の合金設計指針を与えることで知られる H_{mix} 図において、HEA がプロットされるゾーン S 内に両合金もプロットされることを示した。これらの結果から、今回作製した HCP 構造の HEA 合金は、これまでに見出された体心立方系 (BCC) および面心立方系 (FCC) 構造ならびにそれらの混相からなる HEA と同類であることを明らかにした。この結果により、HEA 相の定義を HCP 相の固溶体に拡張することに成功した。ガラス合金および高エントロピーバルク金属ガラスからのアプローチにより、これまで見出すことができなかった HCP 構造の HEA の開発

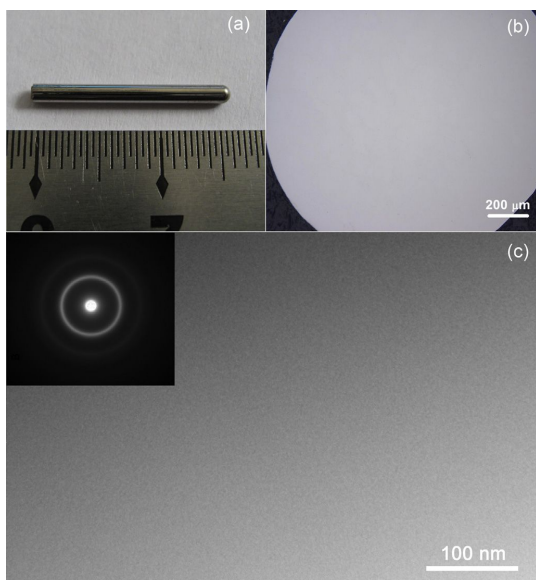


図 1 直径 1.5mm の $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}(\text{B}_{0.7}\text{Si}_{0.3})_{25}$ 鑄造合金棒材の (a) 外観写真および (b) 光学顕微鏡断面写真ならびに (c) 制限視野電子回折像を左上に含む透過電子顕微鏡像 (論文)

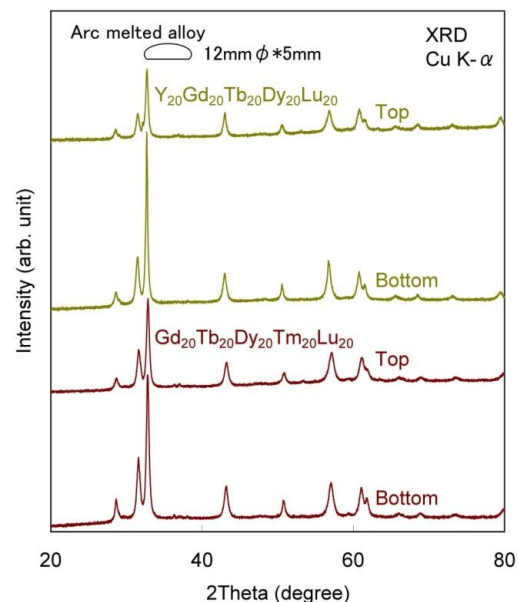


図 2 $\text{Y}_{20}\text{Gd}_{20}\text{Tb}_{20}\text{Dy}_{20}\text{Lu}_{20}$ および $\text{Gd}_{20}\text{Tb}_{20}\text{Dy}_{20}\text{Tm}_{20}\text{Lu}_{20}$ の X 線回折図形 (論文)

に成功したことは、学術的観点からきわめて高い意義を有する(論文、学会発表)。

(3) HE-BMGの合金設計の確立

Miedema法で取扱いが可能な73元素を基に、 H_{mix} とを統計計算して、1500万以上の5元型等原子分率合金の組み合わせから、高エントロピー合金、高エントロピーバルク金属ガラスの候補の抽出に成功した(論文)。

二元系1:1定比化合物に対するペティフォーマップの L_{10} 構造に着目して、五元系等原子分率組成のMnFeNiCuPtおよびMnFeNiCuCo合金の高エントロピー合金(HEA)の生成を検証した。貴金属元素濃度が20at.%以下で、78元素から成る構成二元系等原子分率組成が可能な限り多くの L_{10} 構造を有する条件を課した計算機支援による合金設計によりMnFeNiCuPt合金を候補として選択した。第二候補として、PtをCoに置換したMnFeNiCuCoを選択した。X線回折およびEDS組成分析機能を有する走査電子顕微鏡観察により、MnFeNiCuPtおよびMnFeNiCuCo鑄造材は約 $10\mu\text{m}$ 幅のデンドライトを含む二相fcc構造のHEAを生成することが分かった。MnFeNiCuPtおよびMnFeNiCuCo合金を1373Kで43.2ks熱処理した後水焼入れした合金は、それぞれ、fcc構造の単相および2相を呈した。また、熱処理後、炉冷却したMnFeNiCuPtおよびMnFeNiCuCo合金は、 L_{12} 規則相およびfcc2相構造となった。実験で得られたこれらの相は、部分的に、Thermo-Calc熱力学ソフトウェアの固溶体データベース(SSOL4およびSSOL5)で説明可能である。MnFeNiCuPtおよびMnFeNiCuCo合金は、それぞれ、0.23および0.43Tの飽和磁化および約1kA/mの保磁力を示す軟磁気特性を発現する。デジタル化結晶構造データに基づくHEAのための合金設計により新規HEAの発見が可能となった。

<引用文献>

J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau and S.Y. Chang, Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes, *Advanced Engineering Materials* 6 (2004), 299-303
A. Takeuchi, N. Chen, T. Wada, Y. Yokoyama, H. Kato, A. Inoue and J.W. Yeh, Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter, *Intermetallics*, 19 (2011), 1546-1554.
K. Zhao, X.X. Xia, H.Y. Bai, D.Q. Zhao, W.H. Wang, Room temperature homogeneous flow in a bulk metallic glass with low glass transition temperature, *Applied Physics Letters* 98 (2011), 141913/1-3.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)全て査読有

A. Takeuchi, K. Takenaka, Y. Zhang, Y.C. Wang and A. Makino, Stress-Enhanced Transformations from Hypothetical B2 to Stable L_{10} and Amorphous to fcc Phases in Fe₅₀Ni₅₀ Binary Alloy by Molecular Dynamic Simulations, *Materials Transactions*, 58 (2017), 646-654.

DOI: 10.2320/matertrans.M2016162

A. Takeuchi, T. Wada and Y. Zhang, MnFeNiCuPt and MnFeNiCuCo high-entropy alloys designed based on L_{10} structure in Pettifor map for binary compounds, *Intermetallics*, 82 (2017), 107-115.

DOI: 10.1016/j.intermet.2016.12.002

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada and K. Yubuta, High-Entropy Alloys Including 3d, 4d and 5d Transition Metals from the Same Group in the Periodic Table, *Materials Transactions*, 57 (2016), 1197-1201.

DOI: 10.2320/matertrans.M2016121

A. Takeuchi, Recent progress in alloy designs for high-entropy crystalline and glassy alloys, *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy* 63 (2016), 209-216.

DOI: 10.2497/jjspm.63.209.

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada and K. Yubuta, Dual HCP structures formed in senary ScYLaTiZrHf multi-principal-element alloy, *Intermetallics*, 69 (2016), 103-109.

DOI: 10.1016/j.intermet.2015.10.022

T.L. Qi, Y.H. Li, A. Takeuchi, G.Q. Xie, H.T. Miao and W. Zhang, Soft magnetic Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅(B,Si)₂₅ high entropy bulk metallic glasses, *Intermetallics*, 66 (2015), 8-12.

DOI: 10.1016/j.intermet.2015.06.015

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada and K. Yubuta, Alloy design for high-entropy alloys based on Pettifor map for binary compounds with 1:1 stoichiometry, *Intermetallics*, 66 (2015), 56-66.

DOI: 10.1016/j.intermet.2015.06.014

竹内 章、高エントロピー合金、バルク金属ガラスおよび高エントロピーバルク金属ガラスの合金設計、*日本金属学会誌*、79巻、2015、157-168.

DOI: 10.2320/jinstmet.J2014046

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K.

Yubuta, and W. Zhang, High-Entropy Alloys with a Hexagonal Close-Packed Structure Designed by Equi-Atomic Alloy Strategy and Binary Phase Diagrams, JOM, 66 (2014), 1984-1992.

DOI: 10.1007/s11837-014-1085-x

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, W. Zhang and A. Makino, Alloy Designs of High-Entropy Crystalline and Bulk Glassy Alloys by Evaluating Mixing Enthalpy and Delta Parameter for Quinary to Decimal Equi-Atomic Alloys, Materials Transactions, 55 (2014), 165-170.

DOI: 10.2320/matertrans.M2013352

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, W. Zhang and A. Makino, Entropies in Alloy Design for High-Entropy and Bulk Glassy Alloys, entropy, 15 (2013), 3810-3821.

DOI: 10.3390/e15093810

A. Takeuchi, J.Q. Wang, N. Chen, W. Zhang, Y. Yokoyama, K. Yubuta, S.L. Zhu, $Al_{0.5}TiZrPdCuNi$ High-Entropy (H-E) Alloy Developed through $Ti_{20}Zr_{20}Pd_{20}Cu_{20}Ni_{20}$ H-E Glassy Alloy Comprising Inter-Transition Metals, Materials Transactions, 54 (2011), 776-782.

DOI: 10.2320/matertrans.M2012370

A. Takeuchi and A. Inoue, Compositional Features of Bulk Metallic Glasses Analyzed with a Tetrahedral Composition Diagram from s-, p-, d- and f-Blocks, International Journal of Materials Research, 103 (2012), 1102-1107.

DOI: 10.3139/146.110801

A. Takeuchi, N. Chen, T. Wada, W. Zhang, Y. Yokoyama, A. Inoue and J.W. Yeh, Alloy Design for High-Entropy Bulk Glassy Alloy, Procedia Engineering, 36 (2012), 226-234.

DOI: 10.1016/j.proeng.2012.03.035

[学会発表](計15件)招待講演9件を含む

A. Takeuchi, Future Prospects of High-Entropy Alloys (HEAs) with Hexagonal Close-Packed, Glassy and Quasicrystalline Structures and Alloy Designs of HEAs Based on Empirical and Statistical Scheme, International Conference on High-Entropy Materials (ICHEM2016), November 8, 2016, Taipei, Taiwan. (招待講演)

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada and K. Yubuta, High-Entropy Alloys Including 3D, 4D and 5D Transition Metals from the Same Group in the Periodic Table, TMS 2016: 145th Annual Meeting & Exhibition, February 18, 2015, Nashville, TN, U.S.A. (招待講演)

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada and K. Yubuta, Alloy Design of Metallic Glasses and Relevant Alloys Based on Digitalized Empirical Criteria and Pettifor Map, European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processing (EUROMAT2015), September 23, 2015, Warsaw, Poland. (招待講演)

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、2相分離HCP構造を有するScYLaTiZrHf六元系等原子分率合金、公益社団法人 日本金属学会 2015年秋期講演大会(第157回)、2015年9月17日、九州大学

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、張 偉、ガラス合金および高エントロピー合金の計算機支援による設計と開発、一般社団法人 粉体粉末冶金協会 平成27年度春季大会(第115回講演大会)、2015年5月26日、早稲田大学 (招待講演)

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、二元系1:1化合物のPettifor Mapを利用した高エントロピー合金の開発、日本金属学会 2015年春期(第156回)大会、2015年3月20日、東京大学

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、張 偉、計算機支援、データベース利用等による金属ガラスおよび関連合金の設計および開発、金属ガラス・ナノ金属結晶材料合同講演会、2015年1月30日、兵庫県立工業技術センター (招待講演)

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、稠密六方晶系の高エントロピー合金の作製、日本金属学会 2014年秋期(第155回)大会、2014年9月26日、名古屋大学

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、張 偉、高エントロピー合金、バルク金属ガラスおよび高エントロピーバルク金属ガラス、日本材料学会・金属ガラス部門委員会・第26回研究会、2014年3月7日、兵庫県立大学・神戸ポートアイランドキャンパス (招待講演)

A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, W. Zhang and A. Makino, Mixing Enthalpy for Alloys Including Al and

Structural Enthalpy for High-Entropy Alloys, TMS 2014: 143rd Annual Meeting & Exhibition, February 20, 2014, San Diego, CA, U.S.A. (招待講演)

竹内 章、網谷 健児、和田 武、湯蓋 邦夫、張 偉、金属ガラスおよび高エントロピー合金の原子寸法差因子の相関の統計解析、日本金属学会2013年秋期(第153回)大会、2013年9月19日、金沢大学

A. Takeuchi, J.Q. Wang, N. Chen, K. Yubuta and W. Zhang, Statistical Analysis of Equi-Atomic Quinary Alloys for Mixing Enthalpy and Delta Parameter, 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8), August 5, 2013, Waikoloa, HI, U.S.A.

A. Takeuchi, J.Q. Wang, N. Chen, W. Zhang, Y. Yokoyama and K. Yubuta, High-Entropy Glassy Alloys Designed from Ti_2Ni and C_6Cr_{23} Structures Using Digitalized Crystallographic Database, TMS 2013: 142nd Annual Meeting & Exhibition, March 6, 2013, San Antonio, PA, U.S.A. (招待講演)

A. Takeuchi, J.Q. Wang, N. Chen, W. Zhang, Y. Yokoyama and K. Yubuta, Inter-Transition High-Entropy Glassy Alloys, Materials Science & Technology 2012 Conference & Exhibition (MS&T2012), October 9, 2012, Pittsburgh, PA, U.S.A. (招待講演)

竹内 章、王 軍強、陳 娜、張 偉、横山 嘉彦、湯蓋 邦夫、金属 - 金属系高エントロピーガラス合金の作製とガラス形成能、日本金属学会2012年秋期講演(第151回)大会、2012年9月18日、愛媛大学

[図書] (計1件)

A. Takeuchi, M.C. Gao, J.W. Qiao and M. Widom, Springer International Publishing, Switzerland, Chapter 13: High-Entropy Metallic Glasses, in High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications", 2016, 445-468.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 章 (TAKEUCHI Akira)

東北大学・金属材料研究所・特任教授
研究者番号：40250815

(2) 研究分担者

網谷 健児 (AMIYA Kenji)
東北大学・金属材料研究所・特任准教授
研究者番号：30463798

湯蓋 邦夫 (YUBUTA Kunio)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：00302208

和田 武 (WADA Takeshi)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：10431602

張 偉 (ZHANG Wei)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：20400400

横山 嘉彦 (YOKOYAMA Yoshihiko)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：00261511

陳 娜 (CHEN Na)
東北大学・原子分子材料科学高等研究
機構・助教
研究者番号：30532171

王 軍強 (WANG Junqiang)
東北大学・原子分子材料科学高等研究
機構・助手
研究者番号：80601385