

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：32519

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630299

研究課題名(和文) 過冷却液滴衝突・混合・急速凝固堆積法によるAl基新非平衡相合金の創成と特性の解明

研究課題名(英文) Preparation and characterization of new Al-based non-equilibrium alloy by collision, mixing and rapid solidification of supercooled liquid

研究代表者

井上 明久 (INOUE, AKIHISA)

城西国際大学・環境社会学部・招聘教授

研究者番号：10108566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：急速凝固条件の調査過程において、構造や性質の新制御法を探り出した。金属ガラスの液体噴出温度の変化により、構造、熱的安定性、硬さが系統的に変化し、構造や特性を制御できる事を見出した。また、噴出温度制御により、1.85 T以上の高飽和磁束密度の軟磁性鉄基ガラス合金を開発した。同様に、高エントロピー型ガラス合金で、元素の結合力差に応じて、クラスターが自発的に非晶質相中に生成し、性質が系統的に変化することを見出した。Al基ガラス合金では、Al-Y-Ni-Co-Fe-Pd系において、Al + 化合物混相から高温域でAl + アモルファスとなる包晶反的逆変態を見出した。成果を共著論文を20編以上公表した。

研究成果の概要(英文)：In the study process of rapid solidification condition, we found a new method of controlling structure and properties. The structure, thermal stability and hardness can be systematically changed by the change of liquid ejection temperature, and the structure and properties can be controlled by controlling the ejection temperature. In addition, we developed soft magnetic iron-based glassy alloys with high saturation magnetic flux density of above 1.85 T by controlling the injecting temperature. Likewise, we found that clusters spontaneously formed in the amorphous phase and systematically changed in properties according to the difference in the bonding strength of the elements in the high entropy type glassy alloy. In the Al-based glassy alloy, a peritectic reaction reverse transformation was found to be Al + amorphous in the Al-Y-Ni-Co-Fe-Pd system from the Al + compound mixed phase in the high temperature region. Up to now, more than 20 papers on the mentioned results were published.

研究分野：ガラス合金

キーワード：急速凝固 ガラス合金 磁性鉄基ガラス合金

1. 研究開始当初の背景

これまでの金属学分野での合金開発は、合金成分を配合してそれを溶解後、通常凝固、加工、熱処理あるいは急速凝固などのプロセスを用いて作成するものである。この従来の合金作製法では材料の構造、組織、特性は合金成分調整に依存しており、それから脱却するために特殊な加工熱処理や急速凝固プロセスなどが用いられてきたが、自ずと限界があった。今回、新合金開発におけるこの根源的な制約・問題点を取り払うことを目的として、異なった成分の合金の過冷却液体粒を強制的に混合させて急速凝固堆積することにより、2種類以上の非平衡相が混合した全く新しい構造・組織のバルク材料としての作成を目指し、その学術的、技術的特長を解明して、新創成技術と新規工業材料の創出を目指す視点の研究はこれまでに全くなかった斬新でチャレンジ的なものと言える。

その際、我々が長年に亘り研究対象としてきた過冷却液体粒子[1,2]をその混合媒体として用いる点も斬新性を有していると考えている。平衡状態にある液体では成分の異なる液体を混ぜても容易に混合されてしまい、新規な非平衡相混在組織の生成は期待出来なくなる。また、過冷却液体では粘性が増大し、拡散能が低下するが、その欠点を克服するために微細化された液滴状の過冷却液体を高速で衝突・強制混合させ、さらに急速凝固堆積させて、ナノスケールで混在した新非平衡相材料をバルク材料として創成できる可能性があり、その技術の開発とそれを用いて新規材料を創成しようとする研究は、これまで国内外において全く例が見られない。

また、Al 基合金において、我々は、アモルファス相、ナノ Al 結晶分散アモルファス相、ナノ準結晶分散 Al 相、ナノ化合物分散 Al 相などの様々な非平衡相が生成することを世界に先駆けて見出している[3]が、本研究に用いる過冷却液滴粒として、上記した Al 基合金の様々な非平衡相が生成する組成を用いることも本研究の特長である。これらの非平衡相合金は単独相状態でこれまでに工業化された実績を有している[4,5]ことから判断しても、将来の人類社会が要望している地球環境保全に役立つ高比強度、高耐熱強度、高耐酸化性を備えた材料としてより一層発展できる高い可能性を有していると思っている。

さらに、本研究で開発を目指している過冷却液滴の強制混合・急速凝固堆積プロセスが確立され、その特長が解明されれば、その応用範囲は、Al 基合金のみに留まらず、Fe 基、Mg 基、Ti 基などの広範な他の合金系への応用展開が十分に可能であり、これまでの合金成分調整法とそれに基づいた合金溶解・加工・熱処理からなら金属・冶金学分野における合金化法および合金開発法を根源から変革することに繋がる可能性も十分に期待できる。

本研究では、強制混合液滴を高速で温度制御した銅基盤上あるいは銅鑄型内に急速凝固堆積させて、バルク形状材を得ることを目指しており、最終段階でも急速凝固が達成される点も、従来にない新非平衡相材料を得る点での特長であり、将来、本技術は非平衡相の表面被覆処理技術としての発展も期待できる。

上記の特長の外に、異種類の過冷却液体粒子を高速で強制衝突させることにより、条件により、個々の粉末の平均粒径を数マイクロメートル以下に超微細化できる可能性も有しており、その点についての基礎的知見も得られ、超微細粉末作成技術としての発展の期待も秘めている。

文献 1.井上明久、回転円錐体への合金液滴高圧ガス吹き付けによる非晶質合金粉の製造、粉体・粉末冶金, 40(1993),347-354. 2.井上明久、Al 基合金の大過冷却液体の利用による新しい非平衡相の創製と高機能特性、軽金属, 45(1995),284-292. 3. A. Inoue, Amorphous, Nanoquasicrystal and Nanocrystal Alloys in Al-Based Systems, Prog. Mater. Sci., 43(1998),365-520. 4.小口昌弘、原川義夫、松田尊行、井上明久、増本健、過冷却液体急冷法による扁平状非晶質合金粉末の製造とその応用、まてりあ、35(1996),415-417. 5.大寺克昌、寺林武司、竹谷桂之、井上明久、増本健、ナノ組織高強度・超塑性 Al 合金“GIGAS”の開発、まてりあ、36(1997),634-636.

2. 研究の目的

近年、地球環境保全のため、これまで以上の高比強度、高耐熱強度、高耐酸化性を持った構造用材料の開発が、資源的に豊富な元素を主にした合金系で強く求められている。我々は、これまでに Al 基合金においてアモルファスとナノ Al 結晶の混在相を温間押し出すことにより、約 800MPa の高引張り強度と約 5%の伸びを持つ高比強度 Al 基(商品登録名 GIGAS)を開発・産業化した[2]。また、ナノ準結晶分散 Al 合金の温間押し出しにより、摂氏 300 度で 300MPa の高耐熱強度 Al 合金の開発に成功し[3]、自動二輪車の駆動部材への展開が図られている。

今日までに、単ロール式液体急冷法、アトマイズ式急冷法、銅鑄型鑄造法などにより、ほとんど全ての金属元素を基本成分として、アモルファス相やガラス相が作成されている外に、Al 基合金では、さらに、ナノ Al 結晶分散アモルファス相、ナノ準結晶分散 Al 相、ナノ化合物分散 Al 相が作成され、その一部は通常の結晶材では得られない優れた特性のために実用化されている[4]。

本研究では、Al 基合金で優れた機械的特性を示す様々な非平衡相をナノスケールで混合したより微細な新組織を、異なった非平衡相が生成する異なった Al 基合金成分の過冷却液滴を高速で衝突・強制混合させて得た新混合成分の過冷却液滴を急速凝固堆積することにより、ナノスケールで混合した様々な新

非平衡相バルク材を生成し、構造・組織、基本的性質を解明し、新しい過冷却液滴衝突・混合・急速凝固堆積法による新規な Al 基工業材料創出の可能性を検討する。

過冷却液滴の衝突・混合・急冷堆積の概念、装置、生成合金に関する報告は国内外で全くない。我々は、これまでに工業化に成功している合金液体のガスアトマイズノズル^[5]を対向できる位置に配置し、アトマイズ噴霧で生成した高速で飛行する過冷却液滴を衝突させ、強制混合・急速凝固堆積させて、これまでの金属冶金的手法では不可能であった Al 基の新構造・組織の高強度バルク材料の作成を目指すものである。

これまでの予備実験により、Al 基のナノ Al 分散アモルファス相とナノ準結晶分散 Al 相が生成する各合金液体を衝突強制混合、急速凝固することにより、ナノ Al 結晶、アモルファス、ナノ準結晶が微細に混在した新構造・組織が生成する事を突き止めている。さらに、上記した非平衡相 Al 合金と商用の Al 合金の液体をそれぞれのノズルから噴出させて過冷却液体を衝突、強制混合、急速凝固することにより、Al+ナノ Al 分散アモルファス相、Al+ナノ準結晶分散 Al 相などが生成し、商用 Al 合金の改良にも繋がる大きな波及効果も有しており、新規材料創成法として、また Al 基合金の新ナノ構造・組織材料としての学術的、工業的価値と意義の見極めを行う。

[文 献] 1. A. Inoue, Amorphous, Nanoquasicrystal. and Nanocrystal. Alloys in Al-based Systems, Prog. Mater. Sci., 43(1998), 365-520. 2.大寺克昌、寺林武司、竹谷柱之、井上明久、増本健、ナノ組織高強度・超塑性 Al 合金“GIGAS”の開発、あたりあ、36(1997), 634-636. 3.鍛冶俊彦、徳岡輝和、西岡隆夫、井上明久、粉体・粉末冶金、55(2008), 653-660. 4.井上明久、ナノメタルの最新技術と応用開発、シーエムシー出版、2003, 1-300. 5 . 王新敏、井上明久、金属液体の多段階粉碎技術の開発と急速凝固球状微細粉末の作製、粉体・粉末冶金、53(2006), 849-855.

3 . 研究の方法

現有のアトマイズ粉末堆積装置をアトマイズノズル対向型過冷却液滴衝突・強制混合・急速凝固堆積装置に改造し、対向ノズルの内径、間隔、角度、アトマイズ圧力、溶湯の噴出温度と圧力等の諸因子の検討を行い、Al 基合金で異なった非平衡相が得られる成分の液体を強制混合した液滴の急速凝固堆積材を高効率で得る作成条件の確立を図る。堆積材の密度、構造、組織を調べ、その生成の過程や機構の解明を目指すと共に、非平衡相の熱的安定性を評価する。また、堆積材の密度、機械的性質とその温度依存性を調べ、作成条件、組み合わせ組成との関係を明らかにする。さらに、堆積材を温間プレスすることにより、真密度の新非平衡相バルク材の生成の可能

性を見極め、プレス材の構造、組織、引張り強度、伸び等の機械的性質とその温度依存性、耐食性、耐酸化性を評価する。これらの知見から、高強度、高耐熱強度の新 Al 合金の最適な作成条件、合金組み合わせ、構造・組織を決定し、新 Al 合金としての学術的新規性と価値を明確にする。

4 . 研究成果

平成 26 年度より平成 28 年度までの 3 年間、文部科学省科学研究費補助金「萌芽研究」をいただき、「26630299」と題する研究を行った。交付いただいた補助金額とその使用内訳ならびに研究成果として公表した論文をここに纏めており、これらの論文の概要と論文リストを表すことにより、本萌芽研究課題の成果報告書に替えさせていただきます。

本研究課題の当初の目的としては、液体急速凝固技術を駆使して、アモルファス相を主相として含むアモルファス+アモルファス複相、アモルファス+ガラス複相、アモルファス+ナノ結晶複相、アモルファス+結晶複相などからなる長尺のリボン材を作成できる急速凝固技術と条件を探索、解析して、工業上有用な特性を持つ新非平衡金属材料を創成して、工業化の将来性を検討して、人類社会に貢献することを目指していた。しかしながら、アモルファス相を積層した複相リボン材を長尺上で作成することは、より高度な制御技術を要することが判明し、萌芽研究の限られた経費で本目的を完全に達成することは容易でないことが認識された。その凝固条件と得られた材料の構造・組織との関連性を調査する過程において、急速凝固リボン材の構造、組織および性質を制御する新しい作成方法、プロセスを探り出した。その成果の一端として、Zr 基や Cu 基のバルク金属ガラスを作成することができる合金の液体噴出温度を広範囲に変化させることにより、単ロール急速凝固法により得られたガラス合金リボン材の構造、ガラス遷移挙動や過冷却液体域などの熱的安定性、さらにビッカース硬さが系統的に変化し、ガラス合金の構造ならびに特性を変化・制御することが可能である新知見を見出し、論文として公表している。また、この変化は合金液体が加熱温度により系統的に変化している、すなわち、高温になるに伴い、原子配列の中距離秩序性が低下した構造に変化し、この液体の温度を低下させると、その中距離秩序性が高まること、さらにその変化が可逆的に生じ、制御可能であることなどを突き止めると共に、この方法により、ガラス合金の構造や熱的安定性の外に、ガラス合金リボン材の性質も可逆的に変化、制御できることを公表しており、現在も他の合金において同じ現象が起きるか否かを系統的に調べており、この新知見の普遍性を見極めるための研究を継続している。

上記したガラス合金型液体の噴出温度制御による有用な特性合金開発に関する新知見

に基づいた他の視点でのより発展的な研究成果として、高性能軟磁性鉄基 Fe-Co-B 系アモルファス合金の開発を挙げることができる。これまでのアモルファス軟磁性合金では公表されていない優れた特性として、1.85T 以上の高飽和磁束密度、5A/m 以下の低保磁力、20000 以上の初期透磁率、周波数 1 kHz で 10000 以上の有効透磁率、580K 以上の高い磁気変態温度と飽和磁束密度の優れた熱安定性、最適な磁気特性を得るための熱処理後においてもアモルファス合金リボン材の良好な曲げ延性特性の保持、食塩水中での優れた耐食性などを同時に発現する組成を見出すことができ、この軟磁性アモルファス合金の将来の工業化に向けた取り組みが企業と共同で開始されつつある。これまでのアモルファス合金の飽和磁束密度が 2014 年に我々のグループが公表した 1.70T であったことから、本新合金の学術的、工学的新規性が容易に理解される。また、急速凝固時の噴出温度制御法の活用により、これまでに報告されていない種々の新組成ガラス・アモルファス合金を創成すると共に、それらの構造、熱的安定性、機械的性質、磁氣的性質、耐食性などを明らかにすることができた。この項目での成果の一端として、ハイエントロピー型の多成分・等組成比アモルファス合金において、構成元素間の結合エネルギーの差に応じて、アモルファス相中に結合エネルギーの大きな元素間ペアのクラスターが自発的に均一分散したアモルファス複相合金が生成し、それに伴い、熱的安定性、機械的性質、耐食性などの基本的性質も系統的に変化することを見出し、国際共著論文として報告している。また、これらの論文は、ハイエントロピー型アモルファス合金としての初めての論文とみなすこともでき、新学術・工学分野を開拓しつつあるとも言える。さらに、この新知見は、現在材料科学・工学分野で極めて高い注目を集めているハイエントロピー型合金の構造、組織、特性を任意に制御することが可能になる可能性を示唆しており、その学術的意義とその波及効果は極めて大きいものと捉えている。さらに、本課題の当初の目的遂行のための主アモルファス金属系である Al 基アモルファス合金においても、幾つかの新知見を得ることができた。この Al 基アモルファス合金を本課題の主合金として位置付けているのは、軽量性と高強度や耐熱強度・耐高温耐食性・高加工性を具備した材料への社会的要望が高まっているためであった。この分野の成果として、Al-Y-Ni-Co-Fe-Pd 系の多成分アモルファス合金においては、全溶質元素量が約 13 原子%以下では、アモルファス相はガラス遷移現象を示さず、最初に fcc-Al 相が約 20nm 直径で球形状物として析出し、より高温域で残りのアモルファス相から fcc-Al + Al 基金属間化合物が共晶的反應により析出して結晶化を終える。溶質

元素量が 13 - 15 原子%域では、加熱により、ガラス遷移を示した後、過冷却液体から Al 相がデンドライト形態で約 30-50nm の比較的に大きな粒径で析出した後に、残りのアモルファス相域から Al + 化合物が共晶反動的に析出して結晶化を終了する。溶質元素量が 16 原子%にさらに増大すると、結晶化反応は、ガラス遷移、次いで過冷却液体域から Al + 化合物 + アモルファスが析出した後、再び Al + アモルファス相に変化することを見出した。このように、Al + アモルファス相が高温の広い温度域で形成し、16 原子%の高溶質元素量 Al 合金においても、Al + アモルファス相からなら高温域で大きな塑性加工性を得ることが可能であり、材料工学的視点においても重要な意味を有している。さらに、上記した 16 原子%Al ガラス合金において、Al + 化合物 + アモルファスの混在相から、より高温域で Al + アモルファスとなる、すなわち、化合物がアモルファス + Al への包晶反動的に逆変態することが見出された。これはアモルファス合金分野では初めての研究結果であり、その新現象が起きる原因を組織学的ならびに自由エネルギー的視点より検討、考察して、Nature 出版社から論文として公表している。原因として、化合物は多くの溶質元素を多量に過飽和に固溶した、すなわち多くのひずみを内蔵した非平衡相固溶体であり、温度の更なる上昇に伴い、高エントロピー効果により過冷却液体の自由エネルギーが化合物相より低下して、アモルファス相に変化するものと理解された。この逆相変態によるアモルファス相の生成は、15 - 16%の総溶質元素量の範囲内で、各構成成分の比率を数%の範囲内で変化させても認められ、多成分 Al 基ガラス合金において普遍的に起きる現象であることが明らかにされた。

ここに簡単に紹介した Zr 基ガラス合金、Fe 基ハイエントロピー型アモルファス合金、Al 基多成分アモルファス合金の 3 種類に分類される研究成果を中心として、本萌芽研究期間の 3 年間にインパクトファクターが 2.5 以上の著名な国際雑誌に国際的共著論文を 20 編以上公表することができ、萌芽研究として当初の目的とは少し異なっているが、より重要且つ将来発展性に富んでいると見なされる分野を創成できつつあることから、本課題計画時に期待した以上の研究成果を挙げることができたと判断される。

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 23 件)

[1] J. Ding, A. Inoue, Y. Han, F.L. Kong, S.L. Zhu, Z. Wang, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, High entropy effect on structure and properties of (Fe,Co,Ni,Cr)-B amorphous alloys, J Alloy Compd, 696 (2017) 345-352.

- [2] F.F. Han, A. Inoue, Y. Han, F.L. Kong, S.L. Zhu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, High formability of glass plus fcc-Al phases in rapidly solidified Al-based multicomponent alloy, *J Mater Sci*, 52 (2017) 1246-1254.
- [3] F.F. Han, A. Inoue, Y. Han, F.L. Kong, S.L. Zhu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, A.L. Greer, Novel Heating-Induced Reversion during Crystallization of Al-based Glassy Alloys, *Scientific Reports*, 7 (2017) 46113.
- [4] Y. Han, J. Ding, F.L. Kong, A. Inoue, S.L. Zhu, Z. Wang, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, FeCo-based soft magnetic alloys with high Bs approaching 1.75 T and good bending ductility, *J Alloy Compd*, 691 (2017) 364-368.
- [5] A. Inoue, F.L. Kong, S.L. Zhu, F. Al-Marzouki, Peculiarities and usefulness of multicomponent bulk metallic alloys, *J Alloy Compd*, 707 (2017) 12-19.
- [6] F.L. Kong, Y. Han, X.H. Wang, F.F. Han, S.L. Zhu, A. Inoue, SENNTIX-type amorphous alloys with high Bs and improved corrosion resistance, *J Alloy Compd*, 707 (2017) 195-198.
- [7] F. Wang, A. Inoue, Y. Han, F.L. Kong, S.L. Zhu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, A. Obaid, Excellent soft magnetic Fe-Co-B-based amorphous alloys with extremely high saturation magnetization above 1.85 T and low coercivity below 3 A/m, *J Alloy Compd*, 711 (2017) 132-142.
- [8] F. Wang, A. Inoue, Y. Han, S.L. Zhu, F.L. Kong, E. Zanaeva, G.D. Liu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, A. Obaid, Soft magnetic Fe-Co-based amorphous alloys with extremely high saturation magnetization exceeding 1.9 T and low coercivity of 2 A/m, *J Alloy Compd*, (2017). (online)
- [9] J. Ding, Y. Han, F.L. Kong, A. Inoue, S. Zhu, Syntheses and Fundamental Properties of Cr/Mo-Adoped Fe-Rich Alloys With Metastable Phase and Saturation Magnetization Near 1.9 T, *Materials Research*, (2016) 1299-1303.
- [10] Y. Han, A. Inoue, F.L. Kong, C.T. Chang, S.L. Shu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, Softening and good ductility for nanocrystal-dispersed amorphous Fe-Co-B alloys with high saturation magnetization above 1.7 T, *J Alloy Compd*, 657 (2016) 237-245.
- [11] Y. Han, F.L. Kong, F.F. Han, A. Inoue, S.L. Zhu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, New Fe-based soft magnetic amorphous alloys with high saturation magnetization and good corrosion resistance for dust core application, *Intermetallics*, 76 (2016) 18-25.
- [12] X.H. Wang, A. Inoue, F.L. Kong, S.L. Zhu, M. Stoica, I. Kaban, C.T. Chang, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, J. Eckert, Influence of ejection temperature on structure and glass transition behavior for Zr-based rapidly quenched disordered alloys, *Acta Mater*, 116 (2016) 370-381.
- [13] X.H. Wang, A. Inoue, F.L. Kong, S.L. Zhu, H. Wang, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, Annealing-induced enthalpy relaxation behavior of Ni-Pd-P-B bulk glassy type alloys, *Mat Sci Eng A-Struct*, 674 (2016) 250-255.
- [14] Y. Han, F.L. Kong, C. Chang, S. Zhu, A. Inoue, E.-S. Shalaan, F. Al-Marzouki, Syntheses and corrosion behaviors of Fe-based amorphous soft magnetic alloys with high-saturation magnetization near 1.7 T, *J Mater Res*, 30 (2015) 547-555.
- [15] Y. Han, F.L. Kong, C. Chang, S. Zhu, S. Ketov, D. Louzguine, A. Inoue, Syntheses and Fundamental Properties of Fe-rich Metastable Phase Alloys with Saturation Magnetization Exceeding 1.9 T, *Materials Research*, 18 (2015) 127-135.
- [16] A. Inoue, Bulk Glassy Alloys: Historical Development and Current Research, *Engineering*, 1 (2015) 185-191.
- [17] A. Inoue, F.L. Kong, S. Zhu, C.T. Liu, F. Al-Marzouki, Development and Applications of Highly Functional Al-based Materials by Use of Metastable Phases, *Materials Research*, 18 (2015) 1414-1425.
- [18] A. Inoue, F.L. Kong, F. Al-Marzouki, Solidification Atmosphere and Glass-Forming Ability of Engineering Important Fe- and Zr-Based Bulk Glassy Alloys, *T Indian I Metals*, 68 (2015) 1131-1136.
- [19] A. Inoue, F.L. Kong, S.L. Zhu, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, Sub-Tg relaxation and multi-stage glass transition behavior for bulk glassy alloys, *J Alloy Compd*, 643, S1 (2015) S11-S16.
- [20] A. Inoue, F.L. Kong, S.L. Zhu, E. Shalaan, F.M. Al-Marzouki, Production methods and properties of engineering glassy alloys and composites, *Intermetallics*, 58 (2015) 20-30.
- [21] A. Inoue, Z. Wang, D.V. Louzguine-Luzgin, Y. Han, F.L. Kong, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, Effect of high-order multicomponent on formation and properties of Zr-based bulk glassy alloys, *J Alloy Compd*, 638 (2015) 197-203.
- [22] A. Inoue, F.L. Kong, Q.K. Man, B.L. Shen, R.W. Li, F. Al-Marzouki, Development and applications of Fe- and Co-based bulk glassy alloys and their prospects, *J Alloy Compd*, 615, S1 (2014) S2-S8.
- [23] F.L. Kong, C.T. Chang, A. Inoue, E. Shalaan, F. Al-Marzouki, Fe-based amorphous soft magnetic alloys with high saturation magnetization and good bending ductility, *J Alloy Compd*, 615 (2014) 163-166.

〔学会発表〕(計8件)

1. A. Inoue, F.L. Kong, S.L. Zhu, F. Al-Marzouki, Peculiarities and Usefulness of Multicomponent Bulk Metallic Alloys, 23rd International Symposium on Metastable, Amorphous and

Nanostructured Materials, Nara, Japan, July 3rd-8th, 2016

2. F.L. Kong, Y. Han, X.H. Wang, F.F. Han, S.L. Zhu, A. Inoue, SENNTIX-type amorphous alloys with high Bs and improved corrosion resistance, 23rd International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials, Nara, Japan, July 3rd-8th, 2016

3. A. Inoue, Influences of liquid temperature, atmosphere and production process on solidification structures and properties of bulk glassy alloys, 6th international conference on solidification science and processing, Hyderabad, India, November 24-27, 2015

4. A. Inoue, Development and Applications of Quasicrystal-dispersed Al- and Mg-based Bulk Alloys, 22nd International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials. Paris, France, July 12-17, 2015

5. A. Inoue, F. L. Kong, Y. Han, C. T. Chang, R. Domitri and F. Al-Marzouki, Syntheses and properties of Fe-based amorphous and glassy alloys as magnetic and structural materials, The 15th International Conference on Rapidly Quenched and Metastable Materials (RQ15) Shanghai, China, 24-28 August, 2014.

6. A. Inoue, Structural relaxation behavior of amorphous and bulk glassy alloys, The 21th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2014) in Cancún, México 29 June - 4 July, 2014

7. A. Inoue, Developments of High-Strength Al-based Alloys by Use of Amorphous, Nanocrystalline and Nanoquasicrystalline Phases, 14th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA 14), NTNU, Trondheim, Norway, 15-19 June 2014.

8. A. Inoue, C.T. Liu, F.L. Kong and G. chen. Production Method and Properties of Engineering Bulk Glassy Alloys, The 10th International Conference on Bulk Metallic Glasses (BMG X). Shanghai, China, 8-12 June, 2014.

〔図書〕(計2件)

[1] A. Inoue, F.L. Kong, F. Al-Marzouki, Fe-Based Glassy and Nanocrystalline Magnetic Alloys, LAP Lambert Academic Publishing, Deutschland, Germany, 2014.

[2] A. Inoue, F.L. Kong, Bulk Metallic Glasses: Formation and Applications, in: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 高延性・高加工性を持つ高磁束密度軟

磁性鉄基非晶質合金

発明者: 井上明久, 孔凡利, 常春涛, 真壁英一

権利者: 同上

種類: 特許願

番号: 公開番号 2015-127436

出願年月日: 2013年12月27日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 明久 (Akihisa Inoue)

城西国際大学・環境社会学部・教授

研究者番号: 10108566

(2) 研究分担者

孔 凡利 (Fanli Kong)

城西国際大学・国際グリーンマテリアル研究所・助手

研究者番号: 20724248

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()