

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月4日現在

機関番号：32519

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20226013

研究課題名（和文）センチメートル級の大型バルク金属ガラスの創製と工業化

研究課題名（英文）Fabrication of Bulk Metallic Glasses in Centimeter Class and Their Industrialization

研究代表者

井上明久（INOUE AKIHISA）

城西国際大学・環境社会学部・教授

研究者番号：10108566

研究成果の概要（和文）：本研究では、1cm以上のガラス形成能臨界直径をもつ大型バルク金属ガラス（BMG）の創製および局所的原子配列や様々な物性が発現する機構を基礎研究項目として究明するとともに、新規に開発された大型BMGを用いて応用分野のさらなる拡大を図り、高度に安全・安心で、より豊かな人類社会構築のための新基盤材料として確立することを目指すことを目的としている。

研究成果の概要（英文）：The present study deals with the fundamental and application items. The former includes the fabrication of large-scale bulk metallic glasses (BMGs) with a critical diameter of 1 cm or more and clarifications of local atomic arrangements and mechanisms for various properties, whereas the latter aims to widen the application fields based on the newly-developed large-scale BMGs found in the present study. The purposes of the present study is to establish new base materials used for highly-safety and assured social life based on the items proposed in the present study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	68,700,000	20,610,000	83,800,000
2009年度	38,600,000	11,580,000	50,180,000
2010年度	26,500,000	7,950,000	34,450,000
2011年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2012年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
総計	157,600,000	47,280,000	199,370,000

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：構造・機能材料

キーワード：バルク金属ガラス、アモルファス材料

1. 研究開始当初の背景

バルク金属ガラスの研究は現在材料科学分野の最も活発な研究分野のひとつとなり、最近においても急激に拡大を続けている研究分野である。この研究分野は1988～1993年の5,6年間に世界で我々のグループのみが、バルク金属ガラスがMg系、希土類金属(Ln)系、Zr系など数百種類の合金系で通常の銅鋳型などの徐冷凝固法により生成できること

を発見したことに端を発している。さらに1994年には、我々が見出した数百種類の合金系に基づいて、過冷却金属液体が安定化してバルク金属ガラスが生成するための3成分則を提唱し、これに基づいたバルクガラス合金探索の結果、現在では1千種類以上の多成分合金系でバルク金属ガラスの生成が報告され、金属分野に革新をおこしている。長年の歴史をもつ金属学において、3成分則を満

たした合金系において金属過冷却液体の結晶化変態に対する安定性が $10^8 \sim 10^9$ 倍も増大し、通常の徐冷凝固プロセスによっても過冷却液体が結晶化せずに融点 (T_m) に対して約 $0.6T_m$ 近傍のガラス遷移点で凝固し、長範囲的にランダムな原子配列をもつ金属ガラス固体が 3 次元形状が利用できる厚さが数 mm 以上のバルク形状材として生成することは、これまでの金属学の常識をくつがえす発見であり、材料科学者はもとより物理・化学・工学・結晶学の広範な分野の世界中の研究者の興味を引きつけることになった。その結果、バルク金属はこれまでの数千年間結晶相のみから構成されていたが、今日ではガラス構造相のバルク金属がこれまで報告された如何なる結晶金属でも得られない種々な特性やネット形状の精密鋳造加工性などを利用して、実用材料として使用され、社会貢献を果たし始めている。しかしながら、今日まで開発されてきたバルク金属ガラスの大部分の臨界直径は 1cm 以下であり、その臨界直径のさらなる増大および臨界冷却速度のさらに低い合金の開発が強く望まれていた。1cm 以上の臨界直径をもつバルク金属ガラスは 2005 年以前では Pd 基と Zr 基合金のみに限られていたが、最近の数年間に、最大直径は Cu 基で 2.5cm、Ni 基で 2.2cm、Fe 基で 1.8cm、Co 基で 1cm、Mg 基で 1.5cm に劇的に増大している。現在までに報告されている数 cm 以上の臨界直径をもつバルク金属ガラスにおいて、Zr 系、Pd 系、Fe-Co 系、Ni 系、Cu 系、Mg 系のいずれにおいても最大直径が得られる合金組成は我々のグループによって発見されており、他のグループの追従を許さない我々の独創的成果に基づいて本研究課題は着想されている。最近の数年間に世界に先駆けて、Fe-Co、Ni、Cu 系の多くの重要な遷移金属系で相次いで数 cm 以上の大型バルク金属ガラスの開発に成功を果たした実績から、今後においても数 cm 級の大型バルク金属ガラスが生成する合金系の数の増加ならびに最大径の劇的な増大が期待でき、本新規分野の研究を著しく拡大・発展させることができるものと確信している。

2. 研究の目的

以下に記す研究内容の遂行を本研究課題の目的とする。本研究期間の 5 年間に、(1) 我々が世界に先駆けて直径 1cm 以上の大型バルク金属ガラスの創製に成功した Zr、Pd、Mg、Fe-Co、Ni、Cu、Pt の最大直径をさらに増大させること、(2) 今日まで 1cm 以上の直径をもつ大型バルク金属ガラスが得られていない新しい合金系で 1cm 以上の臨界直径をもつ多くの新合金を見出すこと、(3) 異常に高いガラス形成能を示す根本原因の究明を目指して、詳細な構造解析による 20 面的原子配列、3 角プリズムやアルキメディアン多面体

のネットワーク的配列などの 1nm 前後の構成原子の中距離秩序性ならびに個々の原子分布の解明、ガラス相からのクラスターや結晶の核生成・成長を含む相変態・安定性機構の解明および最適合金成分、ガラス構造、熱的安定性の計算科学予測の諸研究を行い、cm 級のバルク金属ガラスが生成する支配因子の解明と合金設計法の確立を目指す。(4) 大型バルク金属ガラスの応用のための基礎的知見の確立を目指して、独特な作製プロセスの開発、機械的、物理的、化学的、磁氣的、光学的諸性質を調査して、数 cm 以上のバルク金属ガラス特有の有用性質の解明およびそれらの諸特性に及ぼす部分結晶化やクラスター化の影響を解明し、各特性において最高の機能を発現する cm 級のバルク金属ガラスの組成、構造および組織的特徴の確立を図る。(5) 粘性流動加工性、ネット形状鋳造性、精密転写加工性、切削加工性、種々の手法による接合加工性についても調査し、過冷却液体の安定化によって初めて可能となった金属過冷却液体加工技術の cm 級大型金属ガラスにおける特徴の解明に努める。これらの成果に基づいて、新規な cm 級の大型バルク金属ガラスの材料科学・工学の基礎の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究の主目的を達成するため、以下の (1)~(6) の計画・方法により研究を遂行する。(1) 新規センチメートル級バルク金属ガラスの開発：金属過冷却液体の安定化のための 3 成分則に基づいて、1cm 以上の直径をもつ大型バルク金属ガラスが生成する新合金組成を探索すると共に、その最大径と臨界冷却速度を決定する [担当：井上、木村、張]。(2) 金属ガラスの局所構造解析手法の確立：新たに見出した大形バルク金属ガラスの構造(特に中距離秩序構造の組成やプロセスによる違いに注目して)と加熱によるガラス相分解挙動を X 線回折、中性子回折、放射光施設を用いた異常散乱 X 線回折、高分解能透過電子顕微鏡観察とナノビーム EDX 分析、アトムプローブ電子顕微鏡解析などを用いて総合的に調査し、大型バルク金属ガラス生成のための構造・相分解挙動の特徴を把握する [担当：CHEN, LOUZGUINE]。(3) 相変態挙動の解明：大形バルク金属ガラスの加熱によるガラス遷移挙動、過冷却液体の温度幅および結晶化に対する熱的安定性について示差走査熱量計を用いて速度論的に解明する [担当：LOUZGUINE]。(4) 各種物性の測定：大型バルク金属ガラスの機械的性質(降伏強度、引張破壊強度、圧縮破断強度、ヤング率、剛性率、ポアソン比、弾性伸び、破断伸び、疲労強度、破壊靱性、衝撃破壊エネルギー、遅れ破壊靱性など) [担当：張]、物理的性質(熱膨張率、熱伝導率、電気抵抗、比熱、密度など)なら

びに化学的性質（種々の化学溶液中での腐食減量、腐食電流－電位曲線、表面での不働体皮膜成分の定量解析など）[担当：木村]、磁氣的性質（飽和磁束密度、保磁力、キュリー温度、最大透磁率、有効透磁率、磁歪など）[担当：張]、加工性（粘性流動挙動、転写加工性、精密なネット形状鑄造性、切削加工性、接合加工性）[担当：加藤]を調査する。さらに(5)計算機科学予想および実験的検証：計算機科学予想を行う[担当：竹内]とともに、その実験的検証を進める[担当：加藤]。上述の調査結果から、センチメートル級のバルク金属ガラス群を創出して材料科学・工学的価値を見極める基礎データの集積を果たすとともに、(6)応用化への展開を図る[担当：井上]。

本研究課題の開始以降、cm級BMGを作製するための設備備品(装置)として、平成20年度に「大型バルク金属ガラス鑄造装置」および「大容量母合金作製用アーク溶解炉」、平成21年度に、「バルク金属ガラス作製装置」、平成22年度に「簡易鑄造機構」を購入して研究を遂行した。その他、研究遂行に必要な設備備品は、既設の装置を用いた。

4. 研究成果

これまでに得られた研究成果は、下記の3つに大別される。すなわち、1. 新規cm級BMGの開発、2. 金属ガラスの局所的秩序の検証、3. 金属ガラスの応用展開である。それぞれの研究成果を以下に述べる。

(1) 新規cm級BMGの開発

本研究開始後、研究期間前半(2008年度から2010年度)は、遷移金属を主要元素とする合金系に着目して新規cm級BMGの開発を行った。その結果、本研究開始後、Cu基、Zr基およびPd基合金で新規センチメートル級BMGの開発に成功した(Cu基=論文⑧および⑩、Zr基=論文⑨および⑤、Pd基=論文⑥)。Cu基では、臨界直径15mmの新規センチメートル級バルク金属ガラスを $\text{Cu}_{47}\text{Zr}_{45}\text{Al}_8$ 合金で見出すとともに、この合金の過冷却液体域が83Kであること、および、換算ガラス化温度が0.604であることを示すとともに、圧縮破断強度=1942MPaおよびヤング率=110GPaの優れた機械的強度をもつことを明らかにした(論文⑩)。一方、Zr基では、 $\text{Zr}_{70}\text{Al}_8\text{Cu}_{13.5}\text{Ni}_{8.5}$ は最大直径10mmであり、過冷却液体域は80K、圧縮降伏強度は1570MPaおよびヤング率は80GPaであることを明らかにした(論文⑨)。さらに、従来BMG形成合金として知られている $\text{Zr}_{60}\text{Ni}_{25}\text{Al}_{15}$ 合金の作製方法に改良を加えることにより、最大直径15mmのセンチメートル級BMGとして作製可能であることを報告している(論文⑤)。Pd基合金では、 $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Si}_4\text{P}_{16}$ 金属ガラスの最大直径が20mmであり、過冷却液体域は107K、換算ガラス化温度は0.596、フラジリティーパー

ラメータは28の優れたガラス形成能をもつことを明らかにしている(論文⑥)。これらのCu基、Zr基およびPd基の新規センチメートル級BMGは、いずれも、従来知られているバルク金属ガラスの合金系、合金組成を再検討した結果を踏まえ、新たな合金元素の添加ならびに合金作製プロセスの改良等により目標を達成した研究成果である。

研究期間後半(2011年度および2012年度)はCu基、Zr基およびPd基合金で新規cm級BMGの開発に成功した。得られた新規cm級BMGの最大直径は、 $\text{Cu}_{47}\text{Zr}_{45}\text{Al}_8 = 15\text{mm}$ (論文⑨)、 $\text{Zr}_{70}\text{Al}_8\text{Cu}_{13.5}\text{Ni}_{8.5} = 10\text{mm}$ (論文⑩)、 $\text{Zr}_{60}\text{Ni}_{25}\text{Al}_{15} = 15\text{mm}$ (論文⑤)であることを明らかにしている。この中で、Pd基合金では、 $\text{Pd}_{42.5}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{7.5}\text{P}_{20}$ 合金で世界最大の直径の80mm、高さ85mmのBMGの作製に成功した(論文①)。これらの新規cm級BMGの開発と並行して、最近、BMGとともに研究が盛んに行われている高エントロピー合金に着目した研究を遂行した。高エントロピー合金は、5元系以上の多元系合金で、かつ、等原子分率もしくは等原子分率に近い合金組成で定義される結晶合金であるが、その合金開発指針は、BMGと同じく、構成元素間の原子寸法差と混合熱に着目する。本研究では、 $\text{Pd}_{20}\text{Pt}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{20}\text{P}_{20}$ 合金で世界初のセンチメートル級の高エントロピーバルク金属ガラスが得られることを報告した(論文③)。

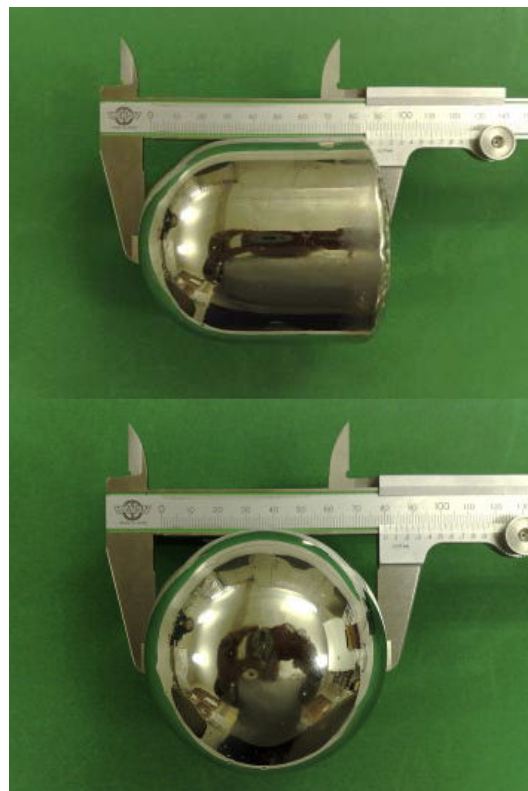


図1 世界最大寸法のバルク金属ガラスの外観写真(論文①)

(2) 金属ガラスの局所的秩序の検証

「ナノビーム」電子線回折と分子動力学シミュレーションを組み合わせることにより、金属ガラスの原子構造の特性を、これまでになく高い分解能で明らかにすることに成功した。数オングストロームの幅の細い電子ビームを用いて得た回折パターンから、金属ガラスの局所的秩序の存在を実証した(図2、論文⑦)。具体的には、約0.3ナノメートルの微量領域電子ビームにより単結晶から得られるものと同様の、はっきりした回折スポットが得られた(図2)。これにより、「金属ガラスは大きいスケールで見ると無秩序だが、秩序ある小さい原子クラスターが基本構造単位になっている」という予測が正しいことが確認された。観察の際には、原子構造を壊さないよう低出力ビームを用いて細いビームでサンプル上を走査し、約4~7Åの大きさの秩序クラスターを数百個サンプリングすることにより、秩序原子クラスター内の平均原子面間隔は2.4Åであることを明らかにした。また、分子動力学法で得られたモデルは、実験により測定された回折パターンの主な特徴を再現し、局所秩序が実際に観測されたことを裏づけた。

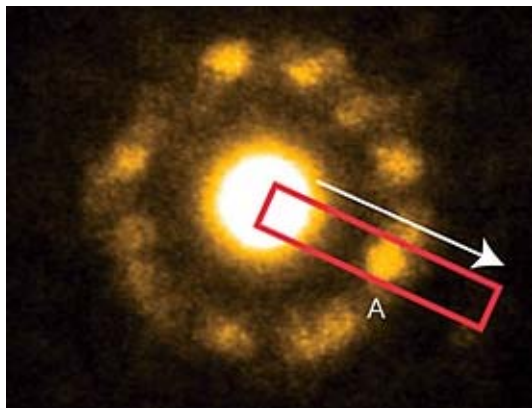


図2: $Zr_{66.7}Ni_{33.3}$ 金属ガラスのナノビーム電子線回折パターン。スポットAまでの距離を用いて短距離原子秩序をモデル化が可能となった(論文⑦)。

(3) 金属ガラスの応用展開

研究期間前半(2008年度から2010年度)では、金属ガラスの新規応用として、ハードディスクメディア用超高密度記録媒体の作製および(超々精密ギヤードモータの作製に成功した(論文④)。前者の超高密度記録媒体の作製では、金属ガラスを用いることにより、次世代の高密度磁気記録媒体技術として有力視されるパターンドメディアの作製技術を開発することを目的とする研究を行った。その結果、ドット径9nm、ピッチ18nm(2Tbit/inch²相当)で高アスペクト比(1以上)の金型の作製に成功した。一方、後者の超々

精密ギヤードモータの作製では、従来の世界記録にあたる直径1.5mmのマイクロギヤードモータを凌ぐ直径0.9mmのマイクロギヤードモータの作製に成功している。この直径1mm以下のマイクロギヤードモータの作製の成功は、医療現場などで求められている血管内血栓除去などの医療オペに対して光明を与える研究成果であり、今後、先端医療機器、バイオ研究、産業機器、航空・宇宙産業など幅広い応用分野への展開が期待される成果であると言える。

研究期間後半(2011年度および2012年度)では、金属ガラスを材料として用いた微小電気機械素子(MEMS)の開発に新規に成功した(図3、論文②)。この研究成果は、金属ガラスの新しい応用化分野の開拓成果の一つであり、これまで、本研究で取組がなされてきた生体医療材料の開発、ならびに、本研究期間5年の3年目の段階の基盤S研究進捗状況報告書に記載した超々精密ギヤードモータの作製マイクロギヤードモータやハードディスクメディアを指向した高密度記録媒体の作製以外の応用化例として、本研究期間後半に独自に開発した電子機器・デバイス材料分野への金属ガラスの応用化を開拓した成果である。

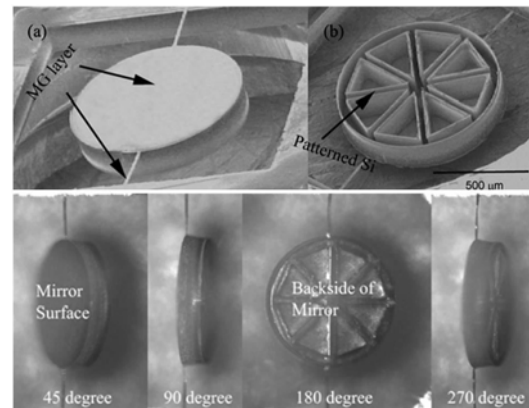


図3 (上) マイクロミラー構造の走査電子顕微鏡写真。(a)正面、(b)背面。(下) 硬質磁石による磁界により作動するミラーの回転の様子(論文②)

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68件) 全て査読有

① N. Nishiyama, K. Takenaka, H. Miura, N. Saidoh, Y. Q. Zeng and A. Inoue: “The World’s Biggest Glassy Alloy Ever Made”, *Intermetallics*, 30 (2012), 19-24.

DOI:10.1016/j.intermet.2012.03.020

② J.W. Lee, Y.C. Lin, N. Kaushik, P. Sharma, A. Makino, A. Inoue, M. Esashi and

T. Gessner, “Micromirror with Large-Tilting Angle using Fe-based Metallic Glass”, *Opt. Lett.*, 36 (2011), 3464-3466.

DOI: 10.1364/OL.36.003464

③ 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.

DOI:10.1016/j.intermet.2011.05.030

④ A. Inoue and A. Takeuchi: “Recent Development and Applications of Bulk Glassy Alloys”, *Acta Materialia*, 59 (2011), 2243-2267.

DOI: 10.1016/j.actamat.2010.11.027

⑤ Y.H. Li, W. Zhang, C. Dong, J.B. Qiang, A. Makino, M. Fukuhara and A. Inoue: “Glass-Forming Ability and Mechanical Properties of Zr_{75-x}Ni₂₅Al_x Bulk Glassy Alloys”, *J. Mater. Res.* 26 (2011), 533-538.

DOI: 10.1557/jmr.2010.54

⑥ N. Chen, H. A. Yang, A. Caron, P. C. Chen, Y. C. Lin, D.V. Louzguine-Luzgin, K. F. Yao, M. Esashi and A. Inoue: “Glass-Forming Ability and Thermoplastic Formability of a Pd₄₀Ni₄₀Si₄P₁₆ Glassy Alloy”, *J. Mater. Sci.*, 46 (2011), 2091-2096.

DOI: 10.1007/s10853-010-5043-x

⑦ A. Hirata, P.F. Guan, T. Fujita, Y. Hirotsu, A. Inoue, A.R. Yavari, T. Sakurai and M.W. Chen: “Direct Observation of Local Atomic Order in a Metallic Glass”, *Nat. Mater.*, 10 (2011), 28-33.

DOI: 10.1038/NMAT2897

⑧ B.W. Zhou, X.G. Zhang, W. Zhang, H.M. Kimura, T. Zhang, A. Makino and A. Inoue: “Synthesis and Mechanical Properties of New Cu-Based Cu-Zr-Al Glassy Alloys with Critical Diameters up to Centimeter Order”, *Mater. Trans.*, 51 (2010), 826-829.

DOI: 10.2320/matertrans.MBW200928

⑨ Y.H. Li, W. Zhang, C. Dong, J.B. Qiang, K. Yubuta, A. Makino and A. Inoue: “Unusual Compressive Plasticity of a Centimeter-Diameter Zr-Based Bulk Metallic Glass with High Zr Content”, *J. Alloys Comp.*, 504 (2010), S2-S6.

DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.02.069

⑩ W. Zhang, Q.S. Zhang, C.L. Qin and A. Inoue: “Formation and Properties of New Cu-Based Bulk Glassy Alloys with Critical Diameters up to 1.5 cm”, *J. Mater. Res.*, 24 (2009), 2935-2940.

DOI: 10.1557/JMR.2009.0344

[学会発表] (計 61 件) 61 件は全て招待講演 (基調講演を含む)

① A. Takeuchi, “High-Entropy Glassy Alloys Designed from Ti₂Ni and C₆Cr₂₃ Structures Using Digitalized Crystallographic Database”, TMS 2013: 142nd Annual Meeting & Exhibition, March 6, 2013, San Antonio, TX, U.S.A.

② A. Takeuchi, “Inter-Transition High-Entropy Glassy Alloys”, Materials Science & Technology 2012 Conference & Exhibition (MS&T2012), October 9, 2012, Pittsburgh, PA, U.S.A.

③ H. Kato, “Dynamic Study of Primary and Secondary Relaxations in Pd-Ni-Cu-P Glass”, International Union of Materials Research Society-International Conference in Asia 2012 (IUMRS-ICA 2012), August 27, 2012, Busan, Korea

④ D.V. Louzguine-Luzgin, “Vitrification and Devitrification Processes in Metallic Glasses”, International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials ISMANAM - 2012, June 21, 2012, Moscow, Russia

⑤ M.W. Chen, “Experimental and Theoretical Insights of Local Atomic Structure of Metallic Glasses”, International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials ISMANAM - 2012 (基調講演), June 18, 2012, Moscow, Russia

⑥ A. Inoue, “Development and Applications of Nonequilibrium Ti- and Zr-based Alloys as Medical Surgery and Biomedical Materials”, International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials ISMANAM - 2012 (基調講演), June 18, 2012, Moscow, Russia.

⑦ A. Takeuchi, “Alloy Design for

High-Entropy Bulk Glassy Alloys”, 12th IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA2011), September 20, 2011, Taipei, Taiwan.

⑧ A. Inoue, “Recent Progress of Bulk Metallic Glasses in Tohoku University”, The 14th International Conference on Rapidly Quenched and Metastable Materials (RQ 14) (基調講演), August 29, 2011, Salvador, Brazil.

⑨ A. Inoue, “Recent Development of Zr- and Ti-Based Bulk Glassy Alloys With and Without Ni Element”, 15th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM2010) (基調講演), July 5, 2010, Zurich, Switzerland.

⑩ A. Inoue, “Recent Progress in Bulk Metallic Glasses in Sendai Group”, International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications (THERMEC’ 2009) (基調講演), August 25, 2009, Berlin, Germany.

〔図書〕 (計 8 件)

① A. Takeuchi, D.V. Louzguine and U. Carow-Watamura, Springer-Verlag, Physical Properties of Ternary Amorphous Alloys, Phase Diagrams and Physical Properties of Nonequilibrium Alloys, Systems from Ag-Al-Ca to Au-Pd-Si, 2011, 1-383.

② A. Takeuchi, D.V. Louzguine and U. Carow-Watamura, Springer-Verlag, Physical Properties of Ternary Amorphous Alloys, Phase Diagrams and Physical Properties of Nonequilibrium Alloys, Systems from B-Be-Fe to Co-W-Zr, 2011, 1-450.

③ A. Takeuchi, D.V. Louzguine and U. Carow-Watamura, Springer-Verlag, Physical Properties of Ternary Amorphous Alloys, Phase Diagrams and Physical Properties of Nonequilibrium Alloys, Systems from Cr-Fe-P to Si-W-Zr, 2011, 1-420.

④ C. Suryanarayana and A. Inoue, CRC Press, Metallic Glasses, 2010, 1-565.

⑤ 井上明久、講談社、金属材料の最前線 (第 6 章 バルク金属ガラス)、2009、30。

⑥ 井上明久、(株) シーエムシー出版、バルク金属ガラスの材料科学と工学、2008、347ページ

⑦ 井上明久、(株) シーエムシー出版、普及版、ナノメタルの応用開発、2008、300ページ

⑧ 井上明久、(株) テクノシステム、新機能材料 金属ガラスの基礎と産業への応用、2008、650ページ

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 1 件)

名称：超精密歯車機構並びにマイクロギヤードモータ

発明者：井上明久他 7 名

権利者：並木精密宝石(株)

種類：特許

番号：4596559

取得年月日：2010 年 10 月 1 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://kaken.nii.ac.jp/d/p/20226013/2008/3/ja.ja.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 明久 (INOUE AKIHISA)

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

陳 明偉 (CHEN MINGWEI)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：20372310

竹内 章 (TAKEUCHI AKIRA)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・准教授

研究者番号：40250815

木村 久道 (KIMURA HISAMICHI)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：00161571

張 偉 (ZHANG WEI)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：20400400

ルズギン ドミトリ (LOUZGUINE DMITRI)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：60302212

加藤 秀実 (KATO HIDEMI)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：80323096