

機関番号： 11301
 研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2008 ～ 2010
 課題番号： 20560639
 研究課題名(和文) 放電プラズマ焼結法による高強度・大延性を示す大寸法バルク金属ガラス複合材の創製
 研究課題名(英文) Production of bulk glassy composites with large-size ultra-high strength and enhanced plasticity by spark plasma sintering
 研究代表者
 謝 国強 (XIE Guoqiang)
 東北大学・金属材料研究所・准教授
 研究者番号： 50422134

研究成果の概要(和文)：

放電プラズマ焼結法を用いて、結晶粒子が均一に分散し、かつ金属ガラスの結晶化が抑止する高強度・大延性を示す大寸法の結晶粒子分散型バルク金属ガラス複合材の開発に成功した。バルク金属ガラス複合材の性能を合金組成、組織、結晶粒子の種類、体積分率、サイズ、分布状態などの依存性を明確した。この延性向上の原因として、高強度な結晶粒子がせん断滑り帯の進展を抑え、多数のせん断滑り帯の形成を促進することを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：

Using a spark plasma sintering process, production of the bulk metallic glassy matrix composites with large-size ultra-high strength and enhanced plasticity has been carried out. Effect of the glassy alloy classification, microstructure, species of the crystalline particulates, fraction, particulate size, and distribution on the properties of the obtained composites was investigated. The improvement of plasticity of the fabricated bulk glassy alloy composites originates from the structural inhomogeneity caused by the particles inclusion. The additional particulates act as a resisting media causing deviation, branching and multiplication of shear bands.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 工学-材料組織制御

科研費の分科・細目： 材料工学・複合材料-物性

キーワード： 金属ガラス、放電プラズマ焼結、複合効果、電子顕微鏡、微細構造、延性

1. 研究開始当初の背景

金属ガラスは従来の結晶材料には見られないような高強度、高耐食性等の優れた特性を有し、将来広範囲の応用が期待されている。しかしながら、金属ガラスには転位のような欠陥が存在していないため、明瞭な延性を示さず、超高強度構造材料、機能材料等と

しての応用が制限されている。延性の改善は金属ガラス材料科学にとって避けて通ることのできない重要な課題の一つである。

一般に、金属ガラス中における結晶質相の存在は、その機械的性質を劣化させると言われている。しかしながら、特定の微細な結晶質相が金属ガラス相に均一に分散するな

らば、延性向上することが知られている。最近、バルク金属ガラス合金を熱処理することにより金属ガラス中にナノ結晶を分散させた組織が得られ、その結果、高強度と大延性を示すことが報告されている。一方、東北大学金研の井上グループでは銅鋳型鑄造法を用いて、ナノ粒子分散型 Zr 基及び Cu 基バルク金属ガラス複合材を作製し、室温で塑性伸びが 3%に達することを報告している。一方、従来の結晶粒子を分散した鑄造法による金属ガラスの高延性の研究は、現在世界 10 ヶ国以上で行われている。

金属ガラスは液体から高速冷却により得られるものの、冷却速度により制限されるため、通常の鑄造方法では大寸法の金属ガラスを得ることが困難である。一方、結晶質相を導入すると、金属ガラスの形成能は逆に低減する。これまでの方法による結晶粒子分散型バルク金属ガラスの作成は、特定の合金系における小寸法（直径数 mm 以下）試料に限られていた。金属ガラスの実用化を目指す場合、直径 3 cm 以上の大きな寸法を得ることが要求されている。これらの弱点の解決策として金属ガラス粉末を用いる粉末冶金成形法がある。この方法ではガラス形成能が低い合金や大寸法試料の作製も可能である。しかしながら、従来のホットプレス或は熱間静水圧プレスのような焼結技術を用いる場合、高温で数時間以上のプロセス処理を要する場合が多く、これらの方法では金属ガラス粉末の結晶化が生じ、焼結体性能の劣化を招くという欠点を持っている。

本研究では、各種新素材の開発に多く報告されている放電プラズマ焼結法(SPS)に注目する。この方法では、パルス状電気エネルギーを直接的に試料中に投入することにより加熱するため、通常の焼結法と比べ、低温・短時間で焼結が可能であり、加熱部分の熱容量が小さく、急速昇温と急速冷却が達成できる。その結果、通常の焼結法とは違って粉体のガラス相や準安定相及び微細結晶相とこれらが持っている種々の特性を損なうことなく焼結体を得ることができる。また、通電時の放電の発生で粉末表面の清浄化が進み、各種材料の焼結も促進される。パルス通電では粉体接触部における電流と発熱の集中により、粉体接触部の温度が粉体平均温度より高いことから、短時間に粒子間のネック形成が促進され、高強度材料の創製が容易となる。この方法はセラミックスや金属間化合物など難焼結材料の緻密化、傾斜機能材料、複合材料、異種材料の接合体の製造等の分野に応用され、興味ある結果が数多く報告され

ている。また、この方法は、ホットプレスなどと同様固体加圧焼結法であるため、大寸法ならびに複雑形状の焼結体が容易に作製できる。しかしながら、今まで放電プラズマ焼結による金属ガラス及び結晶粒子分散型バルク金属ガラスの創製に関する研究は国内外にはすくないである。

2. 研究の目的

バルク金属ガラスの幅広い実用化にとって、低い塑性と寸法制限の問題は克服されねばならない課題である。本研究では、低温・短時間に急速昇降温で焼結でき、焼結過程中粉体の接触部の温度が粉体内部の温度より高いことを特徴とする放電プラズマ焼結方法を用いて、結晶粒子が均一に分散し、かつ金属ガラスの結晶化が抑止でき、その結果、高強度・大延性を示す大寸法の結晶粒子分散型バルク金属ガラス複合材の創製することを目指している。また、その焼結メカニズム及び大きな延性の発現メカニズムを粉末粒子間の粘性流動に基づいて微視的観点より追求する。その為下記の三項目について研究を行う。(1).添加した結晶質相の種類、体積分率、サイズ、分布状態等による金属ガラス複合材の組織、機械的性質、特に延性及ばす影響を明らかにする。(2).出発原料としての金属ガラス粉末の種類、粒子サイズ等への金属ガラス複合材の組織、機械的性質の影響を明らかにする。(3).作製した複合材の粒子間微細構造、焼結メカニズム及び大延性の発現メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

高いガラス形成能をもつ $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ 合金（銅鋳型鑄造法で直径 3 cm のバルク材達成）と低いガラス形成能をもつ $Ni_{52.5}Nb_{10}Zr_{15}Ti_{15}Pt_{7.5}$ 合金（銅鋳型鑄造法で最大直径 2 mm のバルク材達成）、及び実用的な低コスト Cu-Zr-Al 及び Fe-Si-B-Nb 金属ガラス合金を選定し、結晶質の金属（Cu, W など）或はセラミックス（SiC, Al_2O_3 , ZrO_2 など）粒子を均一に分散した金属ガラス混合粉末を出発原料として、放電プラズマ焼結方法により結晶粒子が分散したバルク金属ガラス複合材を作製する。得られた試料の組織を解析するとともに、金属ガラスの結晶化を抑止する条件を明確する。更に、この結晶粒子分散型バルク金属ガラス複合材の機械的性質を評価し、その延性の合金組成、組織（結晶質相の種類、体積分率、サイズ、分布状態等）依存性を検討し、大延性を示す試料の組織特徴を解明する。詳しい研究方法は以下の通り

である。

- a) アーク溶解法による母合金を作製し、Arガスアトマイズ法による金属ガラス粉末を作製する。
- b) 作製した粉末とその他の予備試料の構造と性能の評価を行う。
- c) 放電プラズマ焼結装置を用いて、大寸法（直径30 mm及びそれ以上）のバルク金属ガラスとその結晶粒子分散型バルク金属ガラス複合材を作製する。焼結体の組織的特徴（特に粉末粒子間微細構造）及び物理的、熱的、磁氣的性質、機械的性質などを評価する。その延性のメカニズムと金属ガラス粉末の種類、粒子サイズなど、結晶粒子の種類、体積分率、サイズ、分布状態などとの関連を追求する。焼結体の構造はX線回折、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡及び透過型電子顕微鏡によって解析する。機械的性質はInstron型試験装置及びビッカースマイクロ硬度測定装置を用いて行う。焼結体中の気孔率は走査型電子顕微鏡法と密度測定から検討する。
- d) この大寸法バルク金属ガラスとその複合材の金属ガラス結晶化を抑制する条件を明確し、均一的結晶粒子分散した緻密な複合焼結体の作製プロセスを確立する。
- e) 他の形状（例えば四角状）の大寸法バルク金属ガラス試料の放電プラズマ焼結法による作製とその焼結体の組織的特徴（特に粉末粒子間微細構造）、物理的、熱的、機械的性質を検討する。
- f) 焼結体の各種性能評価結果と組織学的評価結果から、金属ガラス複合材の放電プラズマ焼結プロセスの最適条件の選定指針を確立し、高強度・大延性を示す結晶粒子分散型大寸法のバルク金属ガラス複合材の作製プロセスを確立する。

4. 研究成果

高圧 Ar ガスアトマイズ法を用いて、Ni 基、Zr 基、Cu 基、Fe 基金属ガラス粉末試料を作製した。そのガラス形成能、過冷却液体区の範囲、ガラス相の熱的安定性などを系統的に検討した。ガスアトマイズ法で作製した粒径 63 μm 以下の Ni 基($\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$)、250 μm 以下の Zr 基($\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$)及び Cu 基($\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$)、75 μm 以下の Fe 基($\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$)合金粉末は、ガラス単相であることが確認された。

この作製した Ni 基、Zr 基、Cu 基、Fe 基金属ガラス粉末及び結晶質の金属 (Cu, W など) 或はセラミックス (SiC , Al_2O_3 , ZrO_2 など) 粒子を均一に分散した金属ガラス混合粉末を出発原料として、放電プラズマ焼結

(SPS) 法により直径 30 mm、厚さ約 5 mm のバルク金属ガラス及びその金属ガラス複合材料の開発に成功した。また、 $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ 金属ガラスを用いて、放電プラズマ焼結による、寸法 50 mm×50 mm×30 mm の四角状のバルク金属ガラス材料 (図 1 に示す) の開発も成功した。

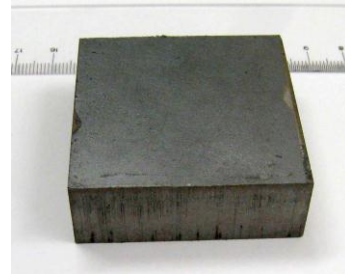


Fig. 1 Outer morphology of $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ metallic glassy sample with a size of 50 mm×50 mm×30 mm sintered by the SPS process at 643 K, 300 MPa, 15 min.

焼結体の示差走査熱量法 (DSC) 分析、X線回折解析と微細構造の検討による金属ガラスの結晶化抑制する条件を明確した。焼結温度ガラス遷移温度 (T_g) の近傍 ($\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$: 773 K ; $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$: 693 K ; $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$: 643 K ; $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$: 773 K) で焼結すると緻密な焼結体ができ、焼結体にはガラス相を保持されており、結晶化することが認められなかった。図 2 は、各種加熱温度で作製した Ni 基金属ガラス SPS 材の X線回折図形 (a) および DSC 曲線 (b) である。773 K 以下の加熱温度で作製した SPS 材は、X線回折パターンがブロードになっており、粉末と同様にガラス相であった。また、粉末と SPS 材の T_g や T_x の値は、ほぼ同程度であった。しかしながら、図に示すように、加熱温度が 798 K 以上になると、ガラス相中に $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7^{\text{SS}}$ (SS: solid solution) 化合物相が析出

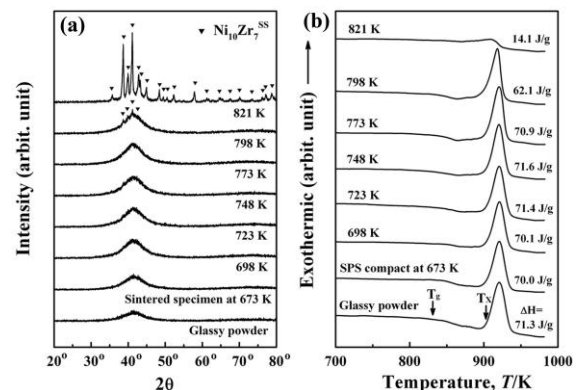


Fig. 2 XRD patterns (a) and DSC curves (b) of the $\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$ samples sintered at various temperatures, 600 MPa, 10 min.

するようになる。Ni 基金属ガラス SPS 材の相対密度は加熱温度が上昇するに従って増大し、773 K でほぼ真密度になった。この SPS 材を用いて、室温で、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度で圧縮試験を行った結果、圧縮破壊強度は約 2.5 GPa の高強度を示すことが分かった。

作製した結晶粒子分散型バルク金属ガラス複合焼結体の組織的特徴（特に粉末粒子間微細構造）及び物理的、熱的、機械的性質の評価による、その延性を合金組成、組織、結晶粒子の種類、体積分率、サイズ、分布状態などの依存性を明確した。Ni 基金属ガラスの場合には、773 K、600 MPa、10 min の焼結条件で、各種添加量の焼結体の相対密度は 97.3% 以上になり、粉末粒子間界面は良い接合になる（図 3 に示す）。結晶粒子が金属ガ

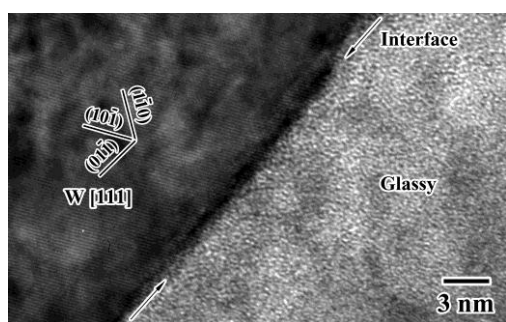


Fig. 3 High-resolution TEM image of the glassy alloy composite containing 5 vol.% W at an interface between powder particles.

ラス母相中にほぼ均一に分散した複合材料であることを示している。SPS 複合焼結体を室温で圧縮試験を行った結果、圧縮変形時の延性は、結晶粒子無添加の Ni 基バルク金属ガラス試料より大きく増加し（最大 5% 以上）、最適な結晶粒子添加量は 5-10 vol.% であることが明らかとなった（図 4 に示す）。結晶質 Cu 粒子添加の場合には、Cu 添加量を 0~40 vol.% に変化した焼結体の相対密度は 98% 以上になった。Cu 添加量の増加による、焼結体の電気抵抗率は著しくさがり、電気伝導率は大幅に増大する。また、Cu 粉末の添加による、圧縮変形時の延性は、無添加の金属ガラス試料より大きく増加することが明らかとなった。10% セラミックス粉末添加した Zr 基金属ガラスの場合には、643 K 以下、600 MPa、10 min での焼結体に、金属ガラスのガラス相を保ったまま、結晶化することが認められなかった。圧縮強度では、セラミックス無添加の Zr 基バルク金属ガラス試料と比較して大きな変化が見られなかったが、圧縮延性はバルク金属ガラス試料より約 2% 以上に増加することが明らかとなった。この延性向上の原因として、高強度な結晶粒子がせん断滑り帯

の進展を抑え、多数のせん断滑り帯の形成を促進することを明らかにしている。また、10% 以下 SiC 粉添加した $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$ 複合焼結体には、金属ガラス複合材の高周波磁性能が改善することが明らかとなった。

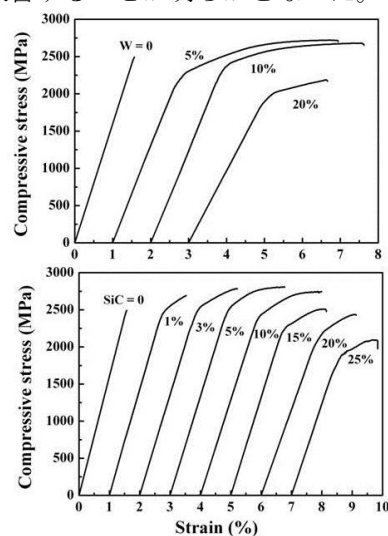


Fig. 4 Compressive stress-strain curves of the glassy composites with various W and SiC contents sintered by the SPS at 773 K, 600 MPa, 10 min.

アトマイズ法で作製した二種類の金属ガラス粉末を混合圧粉体にしてから、SPS 法で二相金属ガラス複合 SPS 材の開発も成功した。図 5 は $\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$ 金属ガラス粉末と $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$ 金属ガラス粉末を等量の体積比で作製した混合圧粉体を用いて、773 K、600 MPa、10 min の条件で作製した $\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$ 金属ガラス / $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$ 金属ガラス複合 SPS 材の SEM 像（図 a）、図 a の A 粒子を分析した EDS プロファイル（図 b）、図 a の B 粒子を分析した EDS プロファイル（図 c）である。なお、XRD 及び

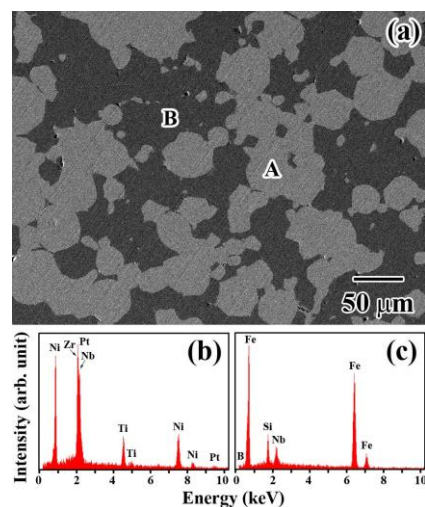


Fig. 5 SEM image of the cross section for the dual-glassy composite (a) and the corresponding EDS spectra taken from “A” (b) and “B” (c).

DSCにより、SPS後の試料に二種類の金属ガラスが結晶化せずガラス相であることを確認している。図aは、二種類の金属ガラス相が均一に相互分散していることを示している。高分解能TEM像では、粉末粒子間界面及び粒内に結晶相は観察されなかった。この $\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$ 金属ガラス / $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$ 金属ガラス複合SPS材を、室温で、歪み速度 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で圧縮試験を行なった結果、破壊強度は 2.6 GPa であった。また、このSPS材はFe基金属ガラスを含むため磁気測定を行った結果、飽和磁化は 0.61 T、保磁力は 1.2 A/m であった。

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 10 件)

- 1). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Fukuhara and A. Inoue. "Bulk metallic glassy composites with excellent electrical conductivity and enhanced plasticity fabricated by spark plasma sintering", *Mater. Sci. Forum*, Vol.675-677, 2011, pp.197-200. 査読有
- 2). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Fukuhara, H. Kimura and A. Inoue. "Cu particulate dispersed $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$ bulk metallic glassy composite with enhanced electrical conductivity", *Intermetallics*, Vol.18(10), 2010, pp.1973-1977. 査読有
- 3). G.Q. Xie, M. Fukuhara, D.V. Louzguine and A. Inoue. "Ultrasonic characteristics of porous $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ bulk metallic glass fabricated by spark plasma sintering", *Intermetallics*, Vol.18(10), 2010, pp.2014-2018. 査読有
- 4). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, H. Kimura and A. Inoue. "Microstructure and mechanical properties of crystalline particulates dispersed Ni-based metallic glassy composites fabricated by spark plasma sintering", *Intermetallics*, Vol. 18(5), 2010, pp. 851-858. 査読有
- 5). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Fukuhara, H. Kimura and A. Inoue. "Consolidation behavior of Cu-Zr-Al metallic glass powder by spark plasma sintering", *Mater. Sci. Forum*, Vols.654-656, 2010, pp.1086-1089. 査読有
- 6). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, S. Li, H. Kimura and A. Inoue. "Dual phase metallic glassy composites with large-size and ultra-high strength fabricated by spark plasma sintering", *Intermetallics*, Vol.17(7), 2009, pp.512-516. 査読有
- 7). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, S. Li, H. Kimura and A. Inoue. "Densification of gas atomized Ni-based metallic glassy powders by spark plasma sintering", *Mater. Trans.*, Vol.50(6), 2009, pp.1273-1278. 査読有

8). G.Q. Xie, D.V. Louzguine and A. Inoue. "Characterization of interface between the particles in NiNbZrTiPt metallic glassy matrix composite containing SiC fabricated by spark plasma sintering", *J. Alloys Compd.*, Vol.483(1-2), 2009, pp.239-242. 査読有

9). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, H. Kimura, A. Inoue and F. Wakai. "Large-size ultra-high strength Ni-based bulk metallic glassy matrix composites with enhanced ductility fabricated by spark plasma sintering", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.92(12), 2008, Paper:121907. 査読有

10). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, F. Wakai, H. Kimura and A. Inoue. "Microstructure and properties of ceramic particulate reinforced metallic glassy matrix composites fabricated by spark plasma sintering", *Mater. Sci. Eng. B*, Vol.148, 2008, pp.77-81. 査読有

[学会発表] (計 19 件) うち招待講演 (計 3 件)

1). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, H. Kimura, F. Wakai and A. Inoue. "Microstructure of interface between particles in Ni-based glassy matrix composites produced by spark plasma sintering", *The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2010)*, Proceedings of the Visual-JW 2010, pp.320-321, 2010.11.11-12, Osaka, Japan.

2). 謝国強, D.V. Louzguine, 木村久道, 井上明久, 「放電プラズマ焼結による Cu 粒子分散金属ガラス複合材の開発」、*粉体粉末冶金協会 2010 年秋季大会発表*, 2010.11.9-11, 京都大学, 日本。

3). 謝国強, 福原幹夫, D.V. Louzguine, 井上明久, 「放電プラズマ焼結による作製した Zr 基ポーラス金属ガラスの超音波特性」、*日本金属学会 2010 年秋期 (第 147 回) 大会発表*, 2010.09.25-27, 北海道大学, 日本。

4). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Fukuhara, H. Kimura and A. Inoue. "Consolidation behavior of Cu-Zr-Al metallic glass powder by spark plasma sintering", *The 7th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM-7)*, 2010.08.2-6, Cairns, Australia.

5). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, H. Kimura and A. Inoue. "Two-phase bulk metallic glasses produced by spark plasma sintering", *17th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2010)*, 2010.07.4-9, Zurich, Switzerland.

6). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, S. Li, H. Kimura and A. Inoue. "Production of bulk metallic glasses and the composites by spark plasma and microwave sintering", *The 7th International*

Forum on Advanced Material Science and Technology (IFAMST-7), 2010.06.26-28, Dalian, P.R. China. (招待講演)

7). G.Q. Xie, D.V. Louzguine and A. Inoue. "Characterization of interface nanostructure in Ni-based metallic glassy composites produced by spark plasma sintering", *International Conference on Nanomaterials: Synthesis, Characterization and Applications (ICN-2010)*, 2010.04.27-29, Kottayam, India.

8). 謝国強、D.V. Louzguine、福原幹夫、木村久道、井上明久、「放電プラズマ焼結法による Fe 基金属ガラス及びその複合材料の作製と評価」、*日本金属学会 2010 年春期 (第 146 回) 大会発表*、2010.03.28-30、筑波大学、日本。

9). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, H. Kimura and A. Inoue. "Cu particulates reinforced bulk metallic glassy composites with large size ultra-high strength and excellent electrical conductivity", *The 7th International Conference on Bulk Metallic Glasses (BMG2009)*, 2009.11. 1-5, Busan, Korea.

10). G.Q. Xie, M. Fukuhara, D.V. Louzguine and A. Inoue. "Ultrasonic characteristics of porous $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ bulk metallic glass fabricated by spark plasma sintering", *The 7th International Conference on Bulk Metallic Glasses (BMG2009)*, 2009.11. 1-5, Busan, Korea.

11). 謝国強、D.V. Louzguine、木村久道、井上明久、「延性を示す高強度結晶粒子分散 Ni 基金属ガラス複合材料の作製と評価」、*粉体粉末冶金協会 2009 年秋季大会発表*、2009.10.27-29、名古屋国際会議場、日本。

12). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, W Zhang, H. Kimura and A. Inoue. "Bulk metallic glasses and its composites fabricated by spark plasma sintering", *The 5th Japan-Korea Workshop on Metallic Glasses*, 2009.10.15-17, Okinawa, Japan. (招待講演)

13). G.Q. Xie, D.V. Louzguine and A. Inoue. "Characterization of particulates reinforced Ni-based metallic glassy matrix composites fabricated by spark plasma sintering", *The 12th Frontiers of Electron Microscopy in Materials Science (FEMMS2009)*, 2009.09. 27-10. 2, Sasebo, Japan.

14). 謝国強、D.V. Louzguine、木村久道、井上明久、「放電プラズマ焼結法による Cu 粒子分散金属ガラス複合材料の作製と評価」、*日本金属学会 2009 年秋期 (第 145 回) 大会発表*、2009.09.15-17、京都大学、日本。

15). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, S. Li, H. Kimura and A. Inoue. "Production and properties of bulk metallic glassy and the composites by spark plasma sintering", *16th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured*

Materials (ISMANAM2009), 2009.07.5-9, Beijing, P. R. China.

16). 謝国強、D.V. Louzguine、李松、木村久道、P. Sharma、井上明久、「Two-phase metallic glass composites fabricated by spark plasma sintering」、*日本金属学会 2009 年春期 (第 144 回) 大会発表*、2009.03.28-30、東京工業大学、日本。

17). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, S. Li and A. Inoue. "Fabrication and mechanical properties of metal particulates reinforced Ni-based metallic glass composites by spark plasma and microwave sintering", *TMS 2009: 138th Annual Meeting & Exhibition*, 2009.02.15-19, San Francisco, U.S.A.

18). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, S. Li, H. Kimura, F. Wakai and A. Inoue. "Large-size ultra-high strength Ni-based bulk metallic glass and its composites fabricated by spark plasma sintering process", *International Symposium of Amorphous Alloys*, 2008.11.19-22, Hangzhou, P. R. China. (招待講演)

19). 謝国強、D.V. Louzguine、李松、木村久道、井上明久、「延性を示す高強度 Ni 基金属ガラス複合焼結体の作製と結晶質粒子添加の効果」、*日本金属学会 2008 年秋期 (第 143 回) 大会発表*、2008.09.23-25、熊本大学、日本。

〔図書〕 (計 1 件)

1). G.Q. Xie, D.V. Louzguine, W. Zhang, H. Kimura and A. Inoue. "Fabrication and characterization of metallic glassy matrix composite reinforced with ZrO_2 particulate by spark plasma sintering process", in "Frontiers in Materials Research, Vol.10 of Series: Advances in Materials Research" Edited by Y. Fujikawa, K. Nakajima and T. Sakurai, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008), Chapter 19, pp.245-255.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：金属ガラス複合構造物及び金属ガラス複合構造物の製造方法

発明者：謝国強、井上明久、D.V. Louzguine、木村久道、李松

権利者：東北大学

種類：特許

番号：特願 2009-107145

公開番号：特開 2010-255053

出願年月日：2009 年 4 月 24 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

謝 国強 (XIE Guoqiang)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：50422134