

機関番号：11301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18070001

研究課題名（和文）：金属ガラス/ナノ結晶粉末加熱による高密度バルク体の作製、構造変化と特性評価

研究課題名（英文）：Production of dense bulk samples by sintering metallic glassy and nanocrystalline powder and investigation of their general physical, mechanical and thermal properties.

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

電場と磁場を分離でき、加圧可能なシングルモードマイクロ波焼結装置を用いて、各種の金属ガラス粉末、結晶質粉末及びその混合粉末を焼結し、大寸法の（直径 30 mm 及びそれ以上）金属ガラス焼結体、結晶質/金属ガラス複合物、金属ガラス/ポリマー複合物、ナノ結晶粒子分散金属ガラス複合物の開発に成功した。コア-シェル複合モードによる有効ミディアル近似法を用いて金属粉末のマイクロ波加熱を理論的に解明した。また、水素貯蔵材料にマイクロ波を照射し、迅速かつ低エネルギーでの水素放出の可能性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

Using a new custom-made single mode microwave irradiation machine (operated at 915 MHz) which allows electrical and magnetic field separation and is equipped with an alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) press, production of the large-scale samples (30 mm in diameter and larger) of the metallic glasses, crystal-glassy and glassy-polymer composites as well as nanocrystalline dispersed glassy composites has been carried out in a vacuum and inert atmosphere. A theoretical explanation of microwave heating of metallic powders in microwaves using effective medium approximation for core-shell composite has been proposed. The hydrogen absorption behaviour, the structure change and dehydrogenation properties for metal hydrides and complex hydrides by microwave irradiation were investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	31,200,000	0	31,200,000
2007 年度	16,800,000	0	16,800,000
2008 年度	16,800,000	0	16,800,000
2009 年度	9,300,000	0	9,300,000
2010 年度	9,300,000	0	9,300,000
総計	83,400,000	0	83,400,000

研究分野：Microwave-induced treatment of Metallic Glassy and Nanocrystalline Materials

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料工学

キーワード：マイクロ波, 金属ガラス, 粉末焼結, 微細構造, 機械的性質, エネルギー, 水素, 結晶化

## 1. 研究開始当初の背景

金属ガラス及びナノ結晶、ナノ準結晶分散金属ガラスは、従来の結晶材料には見られ

ない高強度、高耐摩耗性、高耐食性、大弾性変形等優れた特性がある。例えば、Al 基金属ガラス合金の引張強度は約 1.5 GPa、Ti 基、

Cu 基と Zr 基合金は約 2 GPa、Ni 基合金は約 3 GPa、FeCo 基合金は約 4-5 GPa であり、極めて高い。さらに、金属ガラスあるいは準結晶合金材料は高比重密度を持っているため、安全材料及び水素吸蔵材料として高い注目を集めている。しかしながら、金属ガラスの作製は融体からの冷却速度に依存するため、一般的な鋳造方法では十分に大きな寸法の試料は困難である。一方、焼結技術を使用すれば、大寸法と複雑形状の試料を作製することが可能である。マイクロ波焼結方法では、マイクロ波電力を誘電体に吸収させて誘電体内部からの自己発熱を利用しているため、従来の熱伝導や輻射による加熱方式に比べて急速加熱、低温・短時間で焼結が可能で、もっと低いエネルギーで高密度の焼結体を作製することが可能である。しかしながら、今までマイクロ波照射誘起焼結法による、アモルファス/金属ガラス粉末の焼結に関する研究が皆無である。

## 2. 研究の目的

本研究では、広い過冷却液体領域（ガラス遷移温度 ( $T_g$ ) と結晶化温度 ( $T_x$ ) の差) を示す（すなわち、加熱によって優れた粘性流動特性を示す）新しい金属ガラス合金及びその複合材料を開発し、ガスアトマイズ法及びメカニカルアロイング法による金属ガラス及びナノ結晶粉末試料を作製する。マイクロ波照射誘起加熱プロセスを用いて、金属ガラス、結晶質/金属ガラス複合物、金属ガラス/ポリマー複合物、ナノ結晶粉末などから大寸法試料（直径 30 mm 及びそれ以上）を創製することが目的である。焼結体の物理的性質、機械的性質、熱的安定性及び水素吸蔵-放出性質を検討する。マイクロ波照射誘起加熱による、焼結過程の動力学、可能な相変態及び構造の安定性も詳しく検討します。また、粉末金属のマイクロ波加熱過程における電磁損失メカニズムの物理的理解について、試料の種類、サイズ、形状、空洞中マイクロ波エネルギーの分布、電磁照射過程における試料位置などの影響から検討する。これらの結果は、マイクロ波焼結メカニズムの理解及びプロセスの最適化条件を求める。

## 3. 研究の方法

本研究では、マイクロ波誘起加熱による金属及び金属ガラス粉末の焼結挙動、脱水素化反応の効果及びそれらのバルク金属ガラス、ポーラス金属ガラス、ナノ構造複合焼結体の各種性能に関する研究を行う。詳しい研究方法は以下の通りである。

a) マイクロ波焼結に使用できる広い過冷却液体領域を有する新しい金属ガラスを得ることを着目して、種々の金属ガラス粉末を検討す

る。

b) アーク溶解法或いは誘導加熱法による母合金を作製し、ガスアトマイズ法或いはメカニカルアロイング法による金属ガラス粉末を作製する。

c) 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。

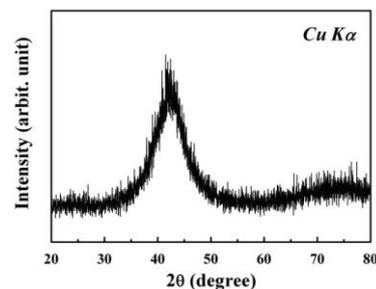
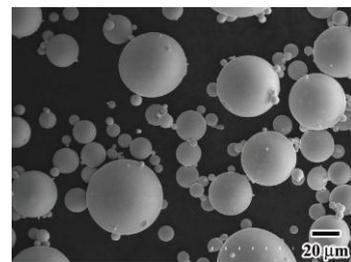
d) 電場と磁場分離でき、加圧可能なシングルモードマイクロ波焼結装置 (915 MHz 及び 2.45 GHz) 及びマルチモードマイクロ波焼結装置 (2.45 GHz) を用いて、金属、金属ガラス粉末及びその混合粉末のマイクロ波誘起焼結の焼結挙動及び可能な相変態を検討します。

e) マイクロ波加熱による作製した焼結体の組織、密度、機械的性質、磁氣的性質、熱的安定性などを検討する。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。また、金属水素化物、複合水素化物材料の水素吸蔵挙動、構造変化、脱水素性質などについても検討を行う。

f) 粉末金属と合金のマイクロ波加熱による焼結メカニズム及び電磁損失メカニズムに関する研究を行う。

## 4. 研究成果

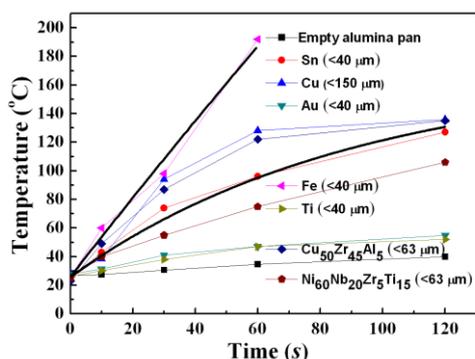
本研究において、マイクロ波焼結に使用できる広い過冷却液体領域を示す新しい金属ガラス合金及びその複合材料を開発した。ガスアトマイズ法及びメカニカルアロイング法による Cu 基、Ni 基、Zr 基、Ti 基、Fe 基など金属ガラス及びナノ結晶粉末試料を作製した。そのガラス形成能、過冷却液体区



**Fig. 1** SEM image and the XRD pattern of the  $\text{Ni}_{55}\text{Nb}_{25}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_5$  powders with a particle size below 63  $\mu\text{m}$ .

の範囲、ガラス相の熱的安定性などを系統的に検討した。金属ガラス粉末粒子のサイズは  $20\ \mu\text{m}$  から  $120\ \mu\text{m}$  である。図1に一例として Ni 基金属ガラス粉末の SEM 写真と X 線解析結果を示します。

マイクロ波誘起加熱による結晶金属や金属ガラス合金（例えば、 $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$ ,  $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{10}\text{Ga}_5\text{P}_{12}\text{C}_4\text{B}_4$ ,  $\text{Ni}_{52.5}\text{Zr}_{15}\text{Nb}_{10}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$ ,  $\text{Ni}_{65}\text{Zr}_{15}\text{Nb}_{10}\text{Ti}_{15}$ ,  $\text{Ni}_{59}\text{Ti}_{16}\text{Zr}_{20}\text{Sn}_5$ ,  $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$ ,  $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ ) の加熱挙動を検討し (図2に示す)、Au, Ti 以外の結晶金属や金属ガラスでは良好な加熱特性を有していた。Au や Ti では表面酸化皮膜が形成されていないか極めて薄いので、低加熱速度になることもわかった。Fe 粉末や Fe 基金属ガラス粉末は強磁性なので、渦電流と磁気損失の効果により加熱速度を速くすることができ、 $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{10}\text{Ga}_5\text{P}_{12}\text{C}_4\text{B}_4$  ガラスではマイクロ波誘起加熱によるナノ構造材料の作製に成功した。なお、スポンジ Ti についてはマイクロ波加熱できることも実証した。

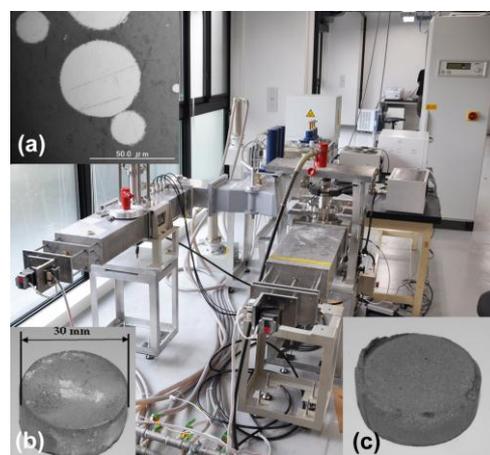


**Fig. 2** Heating behavior of several metals and glassy alloys in a multimode MW oven (1000 W, 2.45 GHz). Alumina container (pan) used was 4.6 mm in diameter and 5.2 mm in height. Black curves represent fitting according to the theoretical model.

内層金属粉末にマイクロ波浸透の効果を検討するため、専用試料チェンバーを作製した。四面と底部には金属板を使用し、上部を薄層金属粉末で遮蔽した状態でチェンバー内部の金属粉末をマイクロ波で加熱することも実証した。コア-シェル複合モードによる有効ミディアル近似法を用いて金属粉末のマイクロ波加熱を理論的に解明した。

電場と磁場分離でき、加圧可能なシングルモードマイクロ波焼結装置 (915 MHz, 5 kW) を設置した (図3に示す)。温度の制御は二種類 (低温型:  $200\text{--}700^\circ\text{C}$ ; 高温型:  $350\text{--}1600^\circ\text{C}$ ) のファイバ式放射温度計により行った。この装置及び2.45 GHzシングルモードマイクロ波焼結装置を用いて、各種の金属ガラス粉末、結晶質粉末及びその混合粉末を焼結し、各種の金属ガラス焼結体及びナノ構造材料を直

径30 mmサイズの試料の作製に成功した。開発されたCu基、Ni基、Zr基などを用いて、それぞれ独立の最大電場 (E) と最大磁場 (H) 中で単一モードキャビティによってマイクロ波焼結した金属ガラスサンプルの作製とその安定性の評価を行った。これらの金属ガラスは加熱時に50 Kを超す広い過冷却液体領域を示すことから、熱誘起結晶化に対する高い安定性をもった過冷却液体ならびにガラス相を有していると考えられる。マイクロ波加熱法による金属ガラス粉末およびその混合粉末の焼結において、電場或いは磁場で焼結した結果、粉末は磁場でよく加熱されたが、電場では十分に加熱されなかった。また、Snの添加による、焼結体の密度は増加することが明らかになった。



**Fig. 3** A single mode-type applicator MW sintering machine (915 MHz) combined with a vacuumed alumina press. The inserts: (a) SEM micrograph of metallic glassy-polymer composite. (b) optical micrographs of a sintered  $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$  glassy-Sn composite sample and (c) soft magnetic  $\text{Fe}_{73}\text{Si}_7\text{B}_{17}\text{Nb}_3$  sample.

加圧力を5 MPaとし、ガラス遷移温度付近で焼結すれば、ポーラス金属ガラス  $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$  焼結体、Cu-Zr-Al ガラス相-Fe 結晶相の二相混合焼結体及びポーラスの  $\text{Ni}_{59.35}\text{Nb}_{34.45}\text{Sn}_{6.2}$  焼結体が作製出来た。また、ボールリング法で作製した  $\text{Ni}_{59}\text{Ti}_{16}\text{Zr}_{20}\text{Sn}_5$ ,  $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{20}\text{Ti}_{15}\text{Zr}_5$ ,  $\text{Ni}_{59}\text{Ti}_8\text{Zr}_{28}\text{Sn}_5$  などのガラス粉末の焼結体も作製出来た。金属ガラス-結晶相 (例えば、 $\text{Ni}_{52.5}\text{Zr}_{15}\text{Nb}_{10}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$  と Sn) 及び金属ガラス-ポリマー (例えば、 $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$  と polyphenylene sulfide ( $\text{C}_6\text{H}_4\text{S}$ )<sub>n</sub>) の複合焼結体も開発した。Polyphenylene sulfide (PPS) は良い高温抵抗、優れた化学的抵抗、熱的安定性、寸法安定性及び耐火性など特徴を持ち、エンジニアリング熱可塑性材料である。ガラス-PPS 複合材料は金属ガラスの高強度と耐磨耗性及びPPSの軽量、塑性変形し易いとい

う総合的特長がある。ポリマー添加した混合粉末の焼結では、金属ガラスの量比が大きい場合、効率的な加熱ができ、均一構造の焼結体が得られた。金属ガラスとポリマー粒子間には良好な接合状態を有していた。ポリマー量比が大きい場合、傾斜構造の金属ガラス複合焼結体が形成された。

水素貯蔵材料にマイクロ波を照射し、迅速かつ低エネルギーでの水素放出の可能性を検討した。その結果、金属水素化物  $MH_n$  のうち、金属伝導を示す  $TiH_2$  において金属伝導に起因した急速な昇温が確認されたが、マイクロ波侵入深さが小さいために、表面層から少量(0.2 質量%以下)の水素しか放出しなかった。一方、錯体水素化物のうち、高い水素密度を示す錯体水素化物をマイクロ波照射することで脱水素化反応の促進効果を実証した。 $LiBH_4$  は 380K 以上の温度で迅速な温度上昇がおこり、13 質量%の水素が放出した。これらの結果は、マイクロ波を利用した省エネルギー型水素貯蔵素システムの可能性を示唆するものである。さらに、 $MgH_2$  の水素放出・吸蔵のサイクルを達成することができ、マイクロ波照射プロセスを用いた効率的な水素貯蔵システム構築の可能性を確認した。

#### 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 58 件)

- 1) S. Li, G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Sato and A. Inoue, Microwave-induced sintering of Cu-based metallic glass matrix composites in a single-mode 915-MHz applicator, *Metall. Mater. Trans. A*, 査読有, 42 (2011) 1463-1467.
- 2) K. Georgharakis, D.V. Louzguine, J. Antonowicz, G. Vaughan, A.R. Yavari, T. Egami and A. Inoue, Variations in atomic structural features of a supercooled Pd-Ni-Cu-P glass forming liquid during in situ vitrification, *Acta Mater.*, 査読有, 59 (2011) 708-716.
- 3) S. Li, D.V. Louzguine, G.Q. Xie, M. Sato and A. Inoue, Development of novel metallic glass/polymer composite materials by microwave heating in a separated H-field, *Mater. Lett.*, 査読有, 64 (2010) 235-238.
- 4) J. Saida, A.D. Setyawan, H. Kato, M. Matsushita and A. Inoue, Tailoring thermally induced nano-quasicrystallization and deformation-assisted nanocrystallization for mechanical property improvement in Zr-Al-Ni-Cu-Pd bulk metallic glasses, *Mater. Trans.*, 査読有, 50 (2010) 2079-2086.
- 5) 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*, 査読有, 18 (2010) 851-858.
- 6) F.O. Méar, D.V. Louzguine, A. Inoue, Structural investigations of rapidly solidified Mg-Cu-Y alloys, *J. Alloys Comp.*, 査読有, 496 (2010) 149-154.
- 7) D.V. Louzguine, G.Q. Xie, Q. Zhang and A. Inoue, Effect of Fe on the glass-forming ability, structure and devitrification behavior of Zr-Cu-Al bulk glass-forming alloys, *Philos. Mag.*, 査読有, 90 (2010) 1955-1968.
- 8) D.V. Louzguine, T. Wada, H. Kato, J. Perepezko and A. Inoue, In situ phase separation and flow behavior in the glass transition region, *Intermetallics*, 査読有, 18 (2010) 1235-1239.
- 9) D.V. Louzguine, G.Q. Xie, Q. Zhang, C. Suryanarayana and A. Inoue, Formation, structure, and crystallization behavior of Cu-based bulk glass-forming alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, 査読有, 41 (2010) 1664-1669.
- 10) G.Q. Xie, S. Li, D.V. Louzguine, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Ni-Nb-Sn bulk metallic glass matrix composites fabricated by microwave-induced sintering process, *Metall. Mater. Trans. A*, 査読有, 41 (2010) 1714-1719.
- 11) D.V. Louzguine, C. Suryanarayana, T. Saito, Q. Zhang, N. Chen, J. Saida and A. Inoue, Unusual solidification behavior of a Zr-Cu-Ni-Al bulk glassy alloy made from low-purity Zr, *Intermetallics*, 査読有, 18 (2010) 1531-1536.
- 12) G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Fukuhara, H. Kimura and A. Inoue, Cu particulate dispersed  $Cu_{50}Zr_{45}Al_5$  bulk metallic glassy composite with enhanced electrical conductivity, *Intermetallics*, 査読有, 18 (2010) 1973-1977.
- 13) 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, *Intermetallics*, 査読有, 18 (2010) 2014-2018.
- 14) D.V. Louzguine, G.Q. Xie, Q. Zhang and A. Inoue, Devitrification behavior and crystal-glassy mixed-phase structures observed in partially crystallized Cu-based glassy alloys, *Ceramic Transactions*, 査読有, 219 (2010) 3-8.
- 15) 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*, 査読有, 654-656 (2010) 1086-1089.
- 16) S. Li, G.Q. Xie, D.V. Louzguine, Z.P. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Phase transformations in Si-based alloy powder mixtures induced by microwave heating in a 2.45 GHz single-mode applicator, *Intermetallics*, 査読有, 18 (2010) 2030-2033.

- 17) 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*, 查読有, 17 (2009) 512-516.
- 18) G.Q. Xie, M. Suzuki, D.V. Louzguine, S. Li, M. Tanaka, M. Sato and A. Inoue, Analysis of electromagnetic field distributions in a 915 MHz single-mode microwave applicator, *Prog. Electromagn. Res.*, 查読有, 89 (2009) 135-148.
- 19) D.V. Louzguine, K. Georgarakis, A.R. Yavari, G. Vaughan, G.Q. Xie and A. Inoue, Effect of Ag addition on local structure of Cu-Zr glassy alloy, *J. Mater. Res.*, 查読有, 24 (2009) 274-278.
- 20) G.Q. Xie, S. Li, D.V. Louzguine, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Microwave-induced sintering of Ni-Nb-Ti-Pt metallic glass blended with Sn powders using a single-mode applicator, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 查読有, 144 (2009) 012049.
- 21) G.Q. Xie, S. Li, D.V. Louzguine, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Fabrication of Ni-Nb-Sn metallic glassy alloy powder and its microwave-induced sintering behavior, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 查読有, 43 (2009) 17-22.
- 22) D.V. Louzguine, G.Q. Xie, S. Li, A. Inoue, N. Yoshikawa and M. Sato, Microwave-induced heating of a single glassy phase and a two-phase material consisting of a metallic glass and Fe powder, *Philo. Mag. Lett.*, 查読有, 89 (2009) 86-94.
- 23) F.O. Méar, G.Q. Xie, D.V. Louzguine and A. Inoue, Spark plasma sintering of Mg-based amorphous ball-milled powders, *Mater. Trans.*, 查読有, 50 (2009) 588-591.
- 24) G.Q. Xie, S. Li, D.V. Louzguine, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Effect of Sn on microwave-induced heating and sintering of Ni-based metallic glassy alloy powders, *Intermetallics*, 查読有, 17 (2009) 274-277.
- 25) F.O. Méar, T. Wada, D.V. Louzguine and A. Inoue, Highly inhomogeneous compressive plasticity in nanocrystals toughened Zr-Cu-Ni-Al bulk metallic glass, *Philo. Mag. Lett.*, 查読有, 89 (2009) 276-281.
- 26) S. Li, G.Q. Xie, D.V. Louzguine and A. Inoue, Glass formation in mechanical milled Ni-Ti-Zr-Sn pre-alloy powders, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 查読有, 144 (2009) 012017.
- 27) J. Saida, H. Kato, A.D. Setyawan, K. Yoshimi and A. Inoue, Nanostructure controlling in Zr-based metallic glasses using icosahedral local structure, *J. Alloys Comp.*, 查読有, 483 (2009) 231-234.
- 28) D.V. Louzguine, S. Li, G.Q. Xie, A. Inoue, N. Yoshikawa and M. Sato, Microwave radiation processing of metallic glassy powders, *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 查読有, 43 (2009) 51-55.
- 29) S. Li, G.Q. Xie, D.V. Louzguine, Z.P. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Phase transformation and heating behaviors of iron based ceramic powders in a single mode microwave applicator, *J. Alloys Comp.*, 查読有, 476 (2009) 482-485.
- 30) S. Li, G.Q. Xie, D.V. Louzguine, M. Sato and A. Inoue, Glass formation in a Ni-based multicomponent alloy by mechanical milling and microwave treatment of the obtained powders, *Mater. Trans.*, 查読有, 50 (2009) 1489-1492.
- 31) D.V. Louzguine, G.Q. Xie, S. Li, A. Inoue, N. Yoshikawa, K. Mashiko, S. Taniguchi and M. Sato, Microwave-induced heating and sintering of metallic glasses, *J. Alloys Compd.*, 查読有, 483 (2009) 78-81.
- 32) 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*, 查読有, 148 (2008) 77-81.
- 33) S. Li, G.Q. Xie, D.V. Louzguine and A. Inoue, Glass forming ability and mechanical properties of new Ni-based bulk metallic glasses, *Mater. Trans.*, 查読有, 49 (2008) 494-497.
- 34) D.V. Louzguine, T. Saito, J. Saida, A. Inoue, Thermal conductivity of metallic glassy alloys and its relationship to the glass forming ability and the observed cooling rates, *J. Mater. Res.*, 查読有, 23 (2008) 2283-2287.
- 35) J. Saida, T. Sanada, S. Sato, M. Imafuku, C. Li and A. Inoue, Nanoquasicrystal formation and local atomic structure in Zr-Pd and Zr-Pt binary metallic glasses, *Zeitschrift fur Kristallographie*, 查読有, 223 (2008) 726-730.
- 36) J. Saida, A.D. Setyawan, H. Kato, M. Matsushita and A. Inoue, Improvement of plasticity in Pd containing Zr-Al-Ni-Cu bulk metallic glass by deformation-induced nanostructure change, *Mater. Trans.*, 查読有, 49 (2008) 2732-2736.
- 37) D.V. Louzguine, J. Antonowicz, K. Georgarakis, G. Vaughan, A.R. Yavari and A. Inoue, Real-space structural studies of Cu-Zr-Ti glassy alloy, *J. Alloys Comp.*, 查読有, 466 (2008) 106-110.
- 38) D.V. Louzguine, L.V. Louzguina, G.Q. Xie, S. Li, W. Zhang, A. Inoue, Glass-forming ability and crystallization behavior of some binary and ternary Ni-based glassy alloys, *J. Alloys Comp.*, 查読有, 460 (2008) 409-413.
- 39) V.D. Buchelnikov, D.V. Louzguine, A.P. Anzulevich, I.V. Bychkov, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Modeling of microwave heating of

metallic powders, Physica B: Condensed Matter, 査読有, 403 (2008) 4053-4058.

40) V. D. Buchelnikov, D. V. Louzguine, G. Q. Xie, S. Li, N. Yoshikawa, M. Sato, A. P. Anzulevich, I. V. Bychkov, and A. Inoue, Heating of metallic powders by microwaves: Experiment and theory, J. Appl. Phys., 査読有, 104 (2008) 113505.

41) S. Li, G. Q. Xie, D. V. Louzguine, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Microwave sintering of Ni-based bulk metallic glass matrix composite in a single-mode applicator, Mater. Trans., 査読有, 49 (2008) 2850-2853.

42) D. V. Louzguine, A. Vinogradov, A. R. Yavari, S. Li, G. Q. Xie, A. Inoue, On the deformation and fracture behavior of a Zr-based glassy alloy, Philo. Mag., 査読有, 88 (2008) 2979-2987.

43) S. Li, G. Q. Xie, D. V. Louzguine, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue, Microwave heating of metallic powders in a multimode and a single mode applicator, Proc. of Global Congress on Microwave Energy Applications (GCMEA), 査読無, (2008), 305-308.

44) D. V. Louzguine, S. Li, G. Q. Xie, A. Inoue, N. Yoshikawa and M. Sato, Microwave treatment of metallic glassy powders, Proc. of GCMEA, 査読無, (2008), 313-316.

45) V. D. Buchelnikov, D. V. Louzguine, G. Q. Xie, S. Li, N. Yoshikawa, M. Sato, A. P. Anzulevich, I. V. Bychkov, and A. Inoue, Penetration of microwave radiation through metallic powders, Proc. of GCMEA, 査読無, (2008), 521-524.

46) V. D. Buchelnikov, D. V. Louzguine, N. Yoshikawa, M. Sato, A. P. Anzulevich, I. V. Bychkov and A. Inoue, Modeling of microwave heating of metallic powders, Proc. of GCMEA, 査読無, (2008) 251-255.

47) N. Yoshikawa, D. V. Louzguine, K. Mashiko, G. Q. Xie, M. Sato, A. Inoue and S. Taniguchi, Microstructural changes during microwave heating of  $\text{Ni}_{52.5}\text{Zr}_{15}\text{Nb}_{10}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$  metal glasses, Mater. Trans., 査読有, 48 (2007) 632-634.

48) D. V. Louzguine, A. R. Yavari, M. Fukuhara, K. Ota, G. Q. Xie, G. Vaughan and A. Inoue, Free volume and elastic properties changes in Cu-Zr-Ti-Pd bulk glassy alloy on heating, J. Alloys Comp., 査読有, 431 (2007) 136-140.

49) G. Q. Xie, W. Zhang, D. V. Louzguine, H. Kimura and A. Inoue, Microstructure and mechanical properties of porous  $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$  bulk metallic glass fabricated by spark plasma sintering process, Mater. Trans., 査読有, 48 (2007) 1589-1594.

50) G. Q. Xie, W. Zhang, Q. S. Zhang, D. V. Louzguine, A. Okubo, H. Kimura and A. Inoue, Porous bulk metallic glass produced by spark plasma sintering of gas atomized  $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$  glassy powders, Ceramic Transactions, 査読有, 198 (2007) 45-50.

51) G. Q. Xie, D. V. Louzguine, A. Okubo, H. Kimura and A. Inoue, Spark plasma sintering of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particulate dispersed  $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$  metallic glassy matrix composite, Ceramic Transactions, 査読有, 198 (2007) 39-44.

52) Y. Nakamori, M. Matsuo, K. Yamada, T. Tsutaoka and S. Orimo, Effects of microwave irradiation on metal hydrides and complex hydrides, J. Alloys Comp., 査読有, 446-447 (2007) 698-702.

53) M. Matsuo, Y. Nakamori, K. Yamada and S. Orimo, Appl. Phys. Lett., 査読有, 90 (2007) 232907.

54) G. Q. Xie, D. V. Louzguine, H. Kimura and A. Inoue, Nearly full density  $\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$  bulk metallic glass obtained by spark plasma sintering of gas atomized powders, Appl. Phys. Lett., 査読有, 90 (2007) 241902.

55) G. Q. Xie, D. V. Louzguine, H. Kimura and A. Inoue, Fabrication of ZrCuAlNi metallic glassy matrix composite containing  $\text{ZrO}_2$  particles by spark plasma sintering process, Mater. Trans., 査読有, 48 (2007) 158-162.

56) G. Q. Xie, D. V. Louzguine, H. Kimura, F. Wakai and A. Inoue, Fabrication of  $\text{Ni}_{52.5}\text{Nb}_{10}\text{Zr}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Pt}_{7.5}$  bulk metallic glassy matrix composite containing dispersed  $\text{ZrO}_2$  particulates by spark plasma sintering, Mater. Sci. Forum, 561-565 (2007) 1291-1294. 査読有

57) G. Q. Xie, Q. Zhang, D. V. Louzguine, W. Zhang and A. Inoue, Structural characterization of  $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Ti}_5$  glassy alloy under thermal annealing and electron irradiation, Mater. Sci. Forum, 561-565 (2007) 2045-2048. 査読有

58) D. V. Louzguine, G. Q. Xie, W. Zhang and A. Inoue, Devitrification behavior and glass-forming ability of Cu-Zr-Ag alloys, Mater. Sci. Eng. A, 査読有, 65 (2007) 146-152.

[学会発表] (計 40 件)

(その中：国際会議招待講演：4 件；国際会議一般講演：22 件(リスト省略)；日本国内学会一般講演：14 件(リスト省略))

1) D. V. Louzguine and A. Inoue, Structural relaxation, glass-transition, viscous formability and crystallization of bulk metallic glasses on heating, TMS 2011, 2011.02.27-03.3, San Diego, USA. (招待講演)

2) D. V. Louzguine, A. Vinogradov, G. Q. Xie, S. Li, A. R. Yavari and A. Inoue, Investigation of deformation behavior of metallic glassy alloys and glassy-crystal composites, ISMANAM 2010, 2010.07.4-9, Zurich, Switzerland. (招待講演)

3) 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, IFAMST-7, 2010.06.26-28, Dalian, China. (招待講演)

4) D.V. Louzguine, Microwave-induced heating and sintering of metallic glasses, ISMANAM 2007, 2007.08.26-30, Corfu, Greece. (招待講演)

[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

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

### (2) 研究分担者

才田 淳治 (SAIDA Junji)

東北大学・学際科学国際高等研究センター・准教授

研究者番号：20359540

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

中森 裕子 (NAKAMORI Yuko)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：90359539

池田 一貴 (IKEDA Kazutaka)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：80451615

### (3) 連携研究者

李 松 (LI Song)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・研究員

研究者番号：90451624