

平成 22年 5月 13日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360309
 研究課題名（和文） 安定化局所不均質構造を有する新金属ガラスの創製と動的ナノ構造変化機構
 研究課題名（英文） Synthesis and dynamic nano structure change in metallic glasses with stable inhomogeneous local structure
 研究代表者
 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

研究成果の概要（和文）：

銅鋳型鋳造法においてチャンパー雰囲気を変えることで過冷却液体の低温領域での核生成制御が可能であることを示し、Pd や Nb を含有する優れた塑性変形能を有する新しい Zr 基バルク金属ガラスの作製に成功した。変形機構として、変形帯の移動にともなう動的な微細構造変化が起きることを確認した。また動的微細構造変化と金属ガラスの局所およびナノ構造制御による相乗効果が機械的性質、特に変形能の向上に有効であることを見出した。

研究成果の概要（英文）：

We observed that the nucleation mode in supercooled liquid can be controlled by changing atmosphere in the Cu mold casting technique. Zr-based bulk metallic glasses containing Pd or Nb exhibit a good plasticity. It is due to the deformation-induced dynamic nanostructure change. We also investigated that the synergy effect of dynamic nanostructure change and glassy structure control is very important on the improvement of mechanical properties such as plasticity in metallic glasses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：金属ガラス、微細構造、核生成、機械的性質、相変態

1. 研究開始当初の背景

低い冷却速度下でも結晶化しないバルク金属ガラスの高いガラス形成能すなわち高い過冷却液体の安定性は、特異な局所構造によることが知られていた。代表者らはこれまでの

研究において、このような特異局所構造の代表例として Zr を主たる成分とする合金系での二十面体局所構造を見いだしていた。またこのような局所構造を基本とし、金属原子同士がクラスターのように強固に結びついてい

る領域と原子間の結合性の比較的弱い領域によって構成される安定化局所不均質構造モデルが提唱されていた。

本モデルは金属ガラスの構造安定性を説明するだけでなく、応用化を大きく妨げている塑性変形能改善の可能性を示す理論的な裏付けとなるものであった。すなわち、金属ガラスでは変形が局所すべり帯（変形帯）によるものであり、一旦これが発生すると均一構造のため、抑制する機構がなく最終破断に至ることになる。従って不均質構造を制御することで変形帯の発生や伝搬をコントロールすることが可能になることが期待された。

2. 研究の目的

本研究では、安定化局所不均質構造を生成する新金属ガラスの合金系（組成）の探索と作製条件を検討し、得られた安定化局所不均質構造新金属ガラスの機械的性質（変形等）の調査により、動的ナノ構造変化などの特異現象が発現するかどうかの見極めをナノスケールの解析によって行うことを目的とする。

3. 研究の方法

安定化局所不均質構造を生成する新金属ガラスの作製においては、不均質性を誘導する適正な添加元素の選択（合金設計）とガラス形成能を維持させるための銅鋳型鋳造法によるチャンパー雰囲気制御を基本とする。得られたガラス構造の評価は通常の構造解析（X線または電子顕微鏡観察）に加えて、ガラスの緩和状態を測定することによっても行う。このような安定化不均質構造金属ガラスの機械的性質を評価し、すぐれた変形能を示したものについては透過電子顕微鏡等によるナノスケール解析を実施した。

4. 研究成果

(1) チャンパー雰囲気制御による冷却挙動の変化とガラス形成能

図1は $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0\sim 17.5$) 合金をチャンパー雰囲気を大気圧 Ar (10^5 Pa) (a) および真空中 (10^{-3} Pa) (b) とした種々の直径で銅鋳型鋳造した試料の構造を XRD と TEM で調べた結果をまとめたものである。表中の "G" はガラス相を、"QC" は正二十面体準結晶相 (I-Phase) を、またそれぞれの化学式は該当する化合物相の構造を有していることを示している。これまで一般に金属ガラスの作製に用いられてきた条件と近い真空雰囲気 (b) では、Pd の含有量が增大するのに従い、ガラス形成能は急激に低下している。本条件ではガラス単相が得られるのは Pd が 10at% までで、その最大直径は 2mm である。それ以上の Pd 量では準結晶または化合物相が生成した鋳造材が得られている。Pd は Zr 基金属ガラス合金系ではいわゆる Inoue

の3原則を阻害する元素として知られ、その添加によってガラス形成能は急激に低下することが報告されており、本結果はこれと一致するものである。一方、大気圧 Ar 雰囲気 (a) の結果を見ると、Pd 量が増大しても高いガラス形成能を保持しており、これまでガラス単相の作製報告がなかった高 Pd 含有合金 (~ 12.5 at%) でも 6mm 程度のバルク金属ガラスが得られている。この結果は大気圧 Ar 中での鋳造においては冷却速度の向上が起きていることを示唆するものであるが、低 Pd 含有合金（例えば Pd 量が 0 や 5at%）では期待される顕著なガラス形成能の向上は認められていない。

(a)

dia. (mm)	x = 0	x = 5	x = 7.5	x = 10	x = 12.5	x = 15	x = 17.5
2	G	G	G	G	G	G	G
3	G	G	G	G	G	G	G
4	G	G	G	G	G	G	G
5	G	G	G	G	G	G	G
6	G	G + Zr ₂ Cu + fcc-It-Zr ₂ Ni	G	G	G		QC
7	G + (Zr ₂ Cu, fcc-It-Zr ₂ Ni)	(Zr ₂ Cu + fcc-It-Zr ₂ Ni)	G + (Zr ₂ Cu, fcc-It-Zr ₂ Ni)		G (+QC)		QC
8		Zr ₂ Cu + fcc-It-Zr ₂ Ni					
9	Zr ₂ Cu + fcc-It-Zr ₂ Ni				QC + Zr ₂ Cu + fcc-It-Zr ₂ Ni		QC + fcc-It-Zr ₂ Ni

(b)

dia. (mm)	x = 0	x = 5	x = 7.5	x = 10	x = 12.5	x = 15	x = 17.5
2	G	G	G	G	G + (QC)	QC	QC
3	G	G	G	t-fcc-Zr ₂ Ni + Zr ₂ Cu (?)	t-Zr ₂ Ni (+QC)	t-Zr ₂ Ni	QC
4	G	G	G		t-Zr ₂ Ni + fcc-Zr ₂ Ni		t-Zr ₂ Ni
5	G	G + (Zr ₂ Cu, fcc-It-Zr ₂ Ni)	G + (Zr ₂ Cu, fcc-It-Zr ₂ Ni)				
6	G	Zr ₂ Cu + fcc-It-Zr ₂ Ni					

図1 銅鋳型鋳造時のチャンパー雰囲気を大気圧 Ar (10^5 Pa) (a) および真空中 (10^{-3} Pa) (b) とした時の種々の直径における $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0\sim 17.5$) 合金の構造

そこで Pd 含有量が 5at% と 17.5at% の 2 種類の合金を種々の直径および雰囲気下で鋳造し、連続冷却変態曲線を実測した。その結果を図2に示す。(a) は 5at%Pd、(b) は 17.5at%Pd の結果であり、縦軸は液相線温度 (T_l) で規格化している。(a) 図中の直径 4mm で真空 (vac)、Ar 圧 1kPa、大気圧 Ar (10^5 Pa) の 3 種類の冷却曲線を比較すると（いずれも作製試料はガラス単相）、比較的高温領域 ($T/T_l > 約 0.65$) ではほとんど差異がないことがわかる。しかしながらそれ以下の温度域では、Ar 圧力の上昇につれて勾配が急になって冷却速度が増大していることがわかる。つまり、雰囲気の効果は比較的低温領域（本合金系の場合、ガラス遷移温度 (T_g) から 150~200K 高い温度付近まで）での冷却速度の向上に寄与していることがわかった。これは、冷却過程の変化は高温域では溶湯と銅鋳型の接触が支配しているが、低温域では溶湯の一部固化によって体積収縮が起きる結果、鋳型との間に隙間（キャビティ）が生成するため、雰囲気を介した冷却に遷移することが原因であると考えられている。試料直径が増大するの

従って、冷却速度は低下し、化合物相の析出にともなう発熱（リカレッセンス）も観察されている。得られたバルク体の構造と発熱ピークをもとに化合物相の析出領域をプロットした結果を見ると、低 Pd 含有合金では高温領域に Zr_2Cu や Zr_2Ni の析出が認められるが、低温域にはこの時間スケールでは特に析出物は現れていない。

一方、(b)に示した高 Pd 合金では基本的な冷却過程は(a)で述べたとおりであるが、雰囲気の影響が強く現れる低温領域に準結晶相の析出領域が存在しており、これがガラス形成能の雰囲気依存性をもたらしているものと考えられる。

このように、雰囲気圧力を変えることで従来から知られた合金系においても核生成挙動を制御することが可能であり、特に低温域に（準）結晶相の析出領域を有する合金系においては、新バルク金属ガラスの創製が期待される。また冷却速度を向上させることによって自由体積の多い未緩和なバルク金属ガラスの作製に寄与できることも考察される。

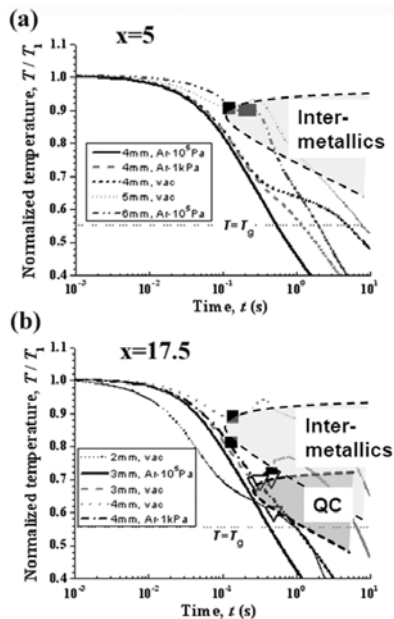


図2 Pd含有量が5at%(a)と17.5at%(b)の2種類の合金を種々の直径および雰囲気下で铸造した時の連続冷却変態曲線

(2) 核生成制御されたバルク金属ガラスの安定化不均質構造の評価

一般に、PdやNbのように構成元素と正の混合熱を有する元素は、いわゆるガラス形成能を阻害する働きをすることが知られている。しかしながら、このような原子はそれ故、他に負の混合熱をもった元素との強固なペアとそれにもとづくクラスターを形成することが考えられ、本課題の目標である安定化局所不均質構造の生成に好適であるとも考

えられる。従って、本作製方法はこのような不均質化促進元素を添加しつつも、ガラス形成能を維持できる手法として重要であると考えられる。

不均質ガラス構造の安定性を評価する一つの手法として緩和状態が挙げられる。マクロ的には同じガラス構造であっても、作製される際の冷却速度によって原子レベルでの構造が異なることが知られている。一般に急冷されるほどガラス構造は“乱れた”状態にあり、結晶析出というガラス構造の崩壊の観点からは安定性が高いと考えて良い。ガラス固体の緩和状態は精密な熱分析装置を用いてガラス遷移温度直下までの比熱曲線を、作製ままの状態から2度測定し、その差を積分すること（これを構造緩和量と呼ぶ）で評価することができる。図3は、真空、大気圧 Ar、大気圧 He の3種類のチャンバー雰囲気で作製した $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{12.5}Pd_5$ バルク金属ガラスのガラス遷移直下までの比熱曲線を比較したものである。図中の $C_{p,q}$ がそれぞれの作製ままの状態での比熱であり、 $C_{p,r}$ が一旦ガラス遷移温度までスキャンした後、もう一度室温からスキャンしたものである（これはいずれの試料でもほぼ一致するので図には代表的な一つの曲線のみ表示）。構造緩和量は大気圧 Ar ならびに He で作製したものはそれぞれ 8.2J/g、9.8J/g であり、両者にあまり大きな差異はないが、ともに真空中作製のもの（4.4J/g）に比べて顕著に大きくなっていることがわかる。実測した平均の冷却速度は、145K/s（真空）、940K/s（Ar）、1040K/s（He）であることから、構造緩和量と作製雰囲気（冷却速度）の間には明瞭な相関があると判断される。さらに、本方法はより未緩和なガラスすなわち不均質構造の安定化に有効であることが結論される。

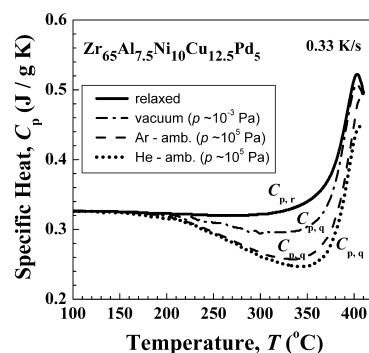


図3 真空、大気圧 Ar、大気圧 He の3種類のチャンバー雰囲気で作製した $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{12.5}Pd_5$ バルク金属ガラスのガラス遷移直下までの比熱曲線

(3) 核生成制御された不均質構造安定化バルク金属ガラスの機械的性質

表 1 は大気圧 Ar 中で作製した $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0\sim 17.5$) バルク金属ガラスの室温圧縮変形における降伏応力 (σ_y)、破断応力 (σ_{max})、ヤング率 (E) および塑性変形量 (ϵ_{pl}) をまとめたものである。Pd 含有量が変化しても強度やヤング率にはあまり大きな変化はなく、いずれのバルク金属ガラスでも破断応力は 1650MPa 前後でヤング率は 85GPa 程度である。一方塑性変形量は Pd を含まない合金が 1.4% であるのに対し、Pd を含む合金は 5~7% にもなり、大幅に向上していることがわかる。一般にガラス単相材料における塑性変形量は、ほとんど 0 に近いことを考えると、Pd を含む試料は非常に優れた塑性変形性を示すものと考えられる。なお、データは示さないが、Nb についても同様の効果を確認した。1. 背景でも述べたように、構造的に均質なガラス合金では応力下で発生する変形帯の移動を阻害する要因がないため大きな塑性変形量は期待できない。このためナノ結晶析出や中長距離秩序といった不均質性を意図的に導入することで塑性変形能を改善する試みが行われている。しかしながら、ここで示した Pd を含有する合金の作製ままの試料を高分解能 TEM で観察したが、ナノ結晶や中長距離秩序等を示すクラスタリングは認められず、均一なガラス構造を有していた。従って、本方法で核生成制御された Pd 含有バルク金属ガラスの塑性変形特性は特異な現象として注目することができる。

表 1 大気圧 Ar 中で作製した $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0\sim 17.5$) バルク金属ガラスの室温圧縮変形における機械的性質

Pd content, x (at%)	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	E (GPa)	ϵ_{pl} (%)
0	1582	1675	85	1.4
5	1530	1643	84	6.0
10	1501	1623	85	5.7
12.5	1587	1668	86	5.0
15	1641	1688	86	6.0
17.5	1582	1689	86	6.9

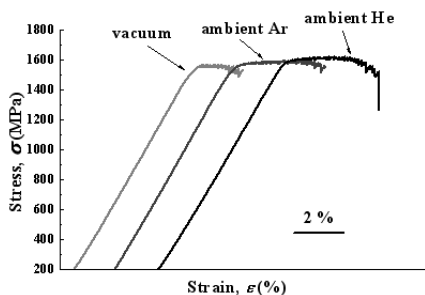


図 4 真空、大気圧 Ar、大気圧 He の 3 種類の雰囲気で作製した $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{12.5}Pd_5$ バルク金属ガラスの室温圧縮変形曲線

作製時の雰囲気の違いによる機械的性質を調べた結果を図 4 に示す。この図では、真空、大気圧 Ar、大気圧 He の 3 種類のチャンパー雰囲気で作製した $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{12.5}Pd_5$ バルク金属ガラスの室温圧縮変形における応力-歪み線図を示している。Ar や He 中で作製した試料に比べて真空中で作製した試料は明らかに塑性変形能が低下していることがわかる。具体的には、Ar や He 雰囲気で作製した試料では約 6% の塑性変形量であるのに対し、真空中で作製したものは 2% 程度である。Pd を含有する同じ組成のバルク金属ガラスにおいても、作製時の雰囲気による塑性変形性の違いが現れることは非常に興味深い結果であり、これは上述した緩和状態の違いによるものである。

以上述べたように、Pd を含有したバルク金属ガラスの作製時の雰囲気制御によって不均質構造を安定化させることで、塑性変形能を大幅に向上できたことは、金属ガラスの機械的特性改善に新たな知見を与えるものと考えられる。

(4) 核生成制御された不均質構造安定化バルク金属ガラスの塑性変形機構

①変形誘起動的微細構造変化

(3) で報告した Pd を含有するバルク金属ガラスにおいて大きな塑性変形伸びが発現する機構を解明することは、現在塑性変形能改善研究が世界的な規模で進められている点を考慮すればきわめて重要である。これまでの金属ガラスの塑性変形性改善には変形帯の移動を妨げ、またその数を増やす作用があるナノ結晶、中長範囲規則性、空孔、異種材料分散といった不均一性を導入する手法が主流であることは述べた。事実図 5 に示した Pd 含有量が 0at% (a) と 10at% (b) の破断面近傍の側面に現れる変形帯を比較すると、塑性変形がほとんど認められない Pd=0 ではわずしか変形帯が観察されないのに対し、Pd=10at% では多重変形帯 (Multi-shear band) が現れている。このことは Pd 含有合金では変形帯の移動を妨げる機構が働いていることを示唆しており、かつ変形帯の移動阻害と多重化が塑性変形能と密接に関連していることが推察される。

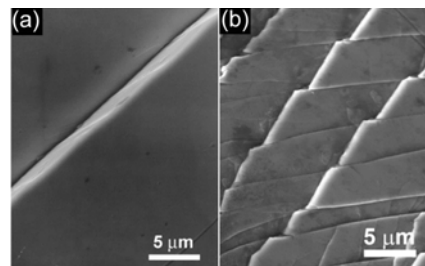


図 5 Pd 含有量が 0at% (a) と 10at% (b) の破断面近傍の SEM 像

しかしながら本試料は作製まゝの状態ではいずれも均一なガラス単相であった。しかし圧縮変形時の破面近傍を薄片化し、TEM で組織観察を行ってみると、図6 (Pd=0(a), 5at%(b), 10at%(c), 17.5at%(d)) に示すように Pd を含まない試料は均一な組織を有しており、作製まゝの組織とほぼ同じである。また制限視野回折においても構造変化を示すスポットは現れておらず、典型的なガラス構造のパターンである。一方、Pd を含有する試料においてはバンド (帯) 状のコントラストが観察されている。詳細に観察すると、コントラストの明るい部分はガラス特有の均一構造であったが、暗い部分は(e)に示すようにフリッジコントラストが観察され、直径 2~4nm の非常に微細な結晶が析出していることがわかった。この微細結晶は非平衡 fcc-Zr₂Ni 構造を有していると同定された。この析出は不均質ガラス固体中に存在する二十面体局所構造と相関があると推測される。

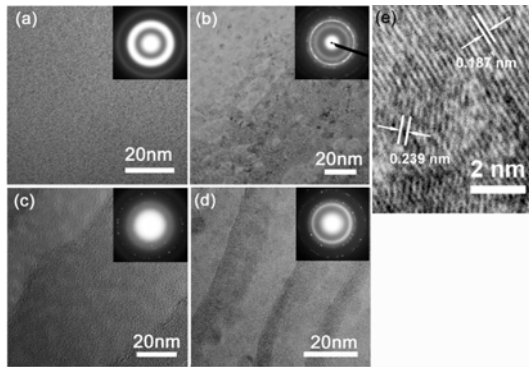


図 6 Pd=0(a) , 5at%(b) , 10at%(c) , 17.5at%(d) の破断面近傍の高分解 TEM 像

②自由体積 (Free volume)

次に作製時の雰囲気ともなう自由体積等のガラス構造の影響について検討する。作製時の雰囲気を Ar や He にすることで冷却速度が向上することは述べた。このような効果はガラスの緩和状態に影響を与え、速く冷却されるほど未緩和な状態となり、構造不均一性とも相関する自由体積の増大をもたらす。近年、自由体積は変形帯の前駆段階 (核生成) のサイト (Shear Transformation Zone, STZ) として働くことが指摘され、このようなサイトが多いほど多重変形帯が生じやすくなり、塑性変形能が向上することが報告されている。しかしながら、これまで緩和状態と変形能の相関にはあまり関心が向けられていなかった。本研究課題では作製雰囲気を制御することで種々の緩和状態を作り出せるという特徴を活かして、この観点からも解析を行った。

図 7 は種々の構造緩和量 (ΔH_{relax}) を有する $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0, 5$) バルク金属

ガラスの室温圧縮変形における破断応力 (σ_{max}) と塑性変形量 (ϵ_{pl}) をまとめたものである。両合金ともに構造緩和量が変化しても強度にはあまり大きな変化はないが、詳細に観察すると未緩和なガラスではわずかに低下が認められる。一方塑性変形量は緩和状態に大きく依存し、両合金ともに完全緩和状態 (すなわち構造緩和量が 0) においてはほとんど 0 であるのに対し、緩和量が増大するのに (すなわち未緩和になる) のにつれて塑性変形性は著しく改善されている。特に、変形誘起微細構造変化が生じ、より局所不均質ガラス構造を有すると推察される Pd 含有合金において、構造緩和量の依存性が大きいことも特筆される。

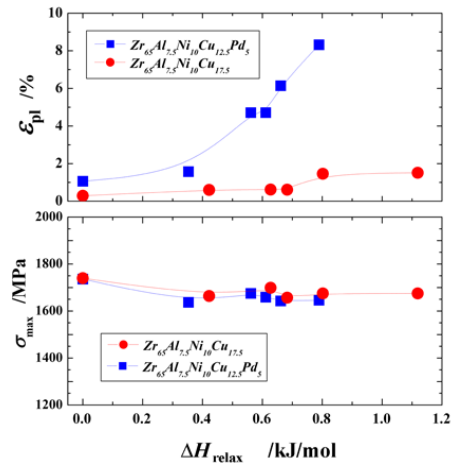


図 7 種々の構造緩和量 (ΔH_{relax}) を有する $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0, 5$) バルク金属ガラスの室温圧縮変形における破断応力 (σ_{max}) と塑性変形量 (ϵ_{pl})

以上述べたように、本研究課題では局所不均質構造の安定化と機械的性質とりわけ延性とは強い依存性があり、変形誘起局所構造変化および自由体積 (未緩和度と相関) の 2 つの機構またはその相乗効果が重要であることを明らかにした。このような知見はこれまでの金属ガラスの塑性変形性改善のための取り組みとは異なる新しい手法を提供するものである。言い換えれば、最近のガラス研究の潮流であったナノ組織制御に加えて、局所不均質構造の安定化というガラス構造そのものを制御する概念を提唱し、それによって特性の改善がもたらされることを示し、今後の研究の重要性を結論づけた。

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 22 件)

1. J. Saida, A. D. Setyawan, M. Matsushita,

- A. Inoue, "Effect of Nb on the transformation kinetics and mechanical properties in Zr-Al-Ni-Cu metallic glasses", Mater. Trans., 査読有, 2010年, 印刷中.
2. A.D. Setyawan, J. Saida, H. Kato, M. Matsushita, A. Inoue, "Deformation-induced structural transformation leading to ductility in $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{12.5}M_5$ (M=Nb, Pd) glassy alloys", J. Mater. Res., 査読有, 2010年, 印刷中.
 3. J. Saida, H. Kato, A.D. Setyawan, K. Yoshimi, A. Inoue, "Nanostructure controlling in Zr-based metallic glasses using icosahedral local structure", J. Alloys Compd., 査読有, 483巻, 2009年, 231-234.
 4. J. Saida, K. Itoh, S. Sato, M. Imafuku, T. Sanada, A. Inoue, "Evaluation of the local environment for nanoscale quasicrystal formation in $Zr_{80}Pt_{20}$ glassy alloy using Voronoi analysis", J. Phys. Condens. Matter, 査読有, 21巻, 2009年, 375104 1-6.
 5. J. Saida, A.D. Setyawan, H. Kato, M. Matsushita, A. Inoue, "Tailoring thermally induced nano-quasi-crystallization and deformation assisted nanocrystallization for mechanical property improvement in Zr-Al-Ni-Cu-Pd bulk metallic glass", Mater. Trans., 査読有, 50巻, 2009年, 2079-2086.
 6. H. Suzuki, J. Saida, H. Kato, A.D. Setyawan, M. Imafuku, "Evaluation of residual stress and deformation behavior on $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ bulk metallic glass containing ZrC particles using neutron diffraction", Scripta Mater., 査読有, 60巻, 2009年, 725-728.
 7. L.Y. Chen, A.D. Setyawan, H. Kato, A. Inoue, G.Q. Zhang, J. Saida, X.D. Wang, Q.P. Cao, J.Z. Jiang, "Free-volume-induced enhancement of plasticity in a monolithic bulk metallic glass at room temperature", Scripta Mater., 査読有, 59巻, 2008年, 75-78.
 8. A.D. Setyawan, H. Kato, J. Saida, A. Inoue, "Glass formation dependence on casting-atmosphere pressure in $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5-x}Pd_x$ ($x=0-17.5$) alloy system: A resultant effect of quasicrystalline phase transformation and cooling mechanism during mold-casting process", J. Appl. Phys., 査読有, 103巻, 2008年, 044907 1-8.

[学会発表] (計 29件)

1. J. Saida, A.D. Setyawan, H. Kato, M. Matsushita, A. Inoue, "Cooling process and cast structure of Zr-Al-Ni-Cu-Based BMGs produced in various atmospheres", 139th TMS Annual Meeting, 14-18 February 2010, Seattle, USA.
2. J. Saida, A.D. Setyawan, H. Kato, A. Inoue, "Mechanical properties of dynamic nanostructure controlled Zr-Al-Ni-Cu-based bulk metallic glasses", International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, THERMEC 2009, 25-29 August 2009, Berlin, Germany.
3. J. Saida, "Plastic deformation via in-situ nanostructure change in Zr-Al-Ni-Cu-based BMGs", 16th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials, 5-9 July 2009, Beijing, China.

[図書] (計 2件)

1. 才田淳治、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、10-21, 35-84, 125-158, 277-315.
2. 才田淳治、テクノシステム、「金属ガラスの基礎と産業への応用」、2009、24-38, 139-161.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等
<http://www.cir.tohoku.ac.jp/j/2research/prof.htm#saida>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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