

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01334

研究課題名(和文) ナノヘテロ構造制御によるナノ結晶/アモルファス複合合金の高強度・高延性化

研究課題名(英文) Development of high-strength and high high-plastic deformable nanocrystalline/amorphous complex alloys by controlling thier nano-hetero structures

研究代表者

山崎 徹 (YAMASAKI, Tohru)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：30137252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)： ナノ結晶合金やアモルファス合金は結晶粒の超微細粒化等により極端に高強度化・硬質化しており、塑性変形中の加工硬化メカニズムは存在せず脆性的に破壊する。本研究は、ナノヘテロ構造制御を利用してナノ結晶/アモルファス複合合金の高強度・高延性化を目指した。これら合金は変形誘起のナノ結晶粒成長により加工硬化を発現できることを明らかとした。ナノ結晶粒成長には母相となるアモルファス相中に残留するフリーボリューム量に依存しすることを明らかにした。また、Zr-Cu-Ni-Al系金属ガラスに中性子照射を行い、過剰なフリーボリュームを導入したときの機械的特性変化についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、単相ではほとんど塑性変形能を持たない結晶粒径5nmのナノ結晶相とアモルファス合金相を組み合わせたナノヘテロ構造を作製することによって、元々備えていた高強度に加えて延性を両立させることを実現している。一方、電析法はフォトリソグラフィ技術との併用により試料作製と様々な部品形状への加工が同時に可能であるため、電析法により作製したナノ結晶/アモルファスNi-W複合合金により、高強度・高耐久性のマイクロギア等の精密金属機械部品の試作に成功しており、今後の幅広い産業利用が期待される。

同様の組織有するZu基の金属ガラス合金に関しても、高強度に加えて高延性特性が発揮できることを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)： Nanocrystalline and amorphous alloys have exhibited high strength without ductility. This is due to the no-work hardening effects during plastic deformation. In the present study, the electrodeposited Ni-W alloys and Zr-Cu-Ni-Al based BMG alloys having amorphous and nanocrystalline complex structures have been developed. These alloys have exhibited work hardening due to the stress-induced nanocrystalline grain growth in the amorphous matrix. On the other hands, stress-induced nanocrystalline grain growth has been strongly influenced by the amount of free-volume in the amorphous phase matrix. In the case of the Zr-based bulk metallic glasses, compositional dependence of neutron irradiation embrittlement have been examined. As the results, the neutron irradiation behaviors of the Zr-based BMGs may depend on the amounts of the free volume in the BMGs. There may be upper and lower acceptance limits for moderate amounts of free volume to obtain the ductile metallic glasses.

研究分野：金属材料学

キーワード：結晶・組織制御 ナノ結晶材料 アモルファス合金 マイクロ加工

1. 研究開始当初の背景

ナノ結晶合金や金属ガラス合金は、結晶粒の超微細化等により極端に高強度化・硬質化しており、一般に、塑性変形中の加工硬化は生じない。このため、引張変形中には塑性伸びは殆ど伴わず、Shear Band と呼ばれる局所的な塑性変形模様を生じて脆性的に破壊する。このマクロな延性の欠如が実用化への大きな障害となっている。しかしながら、最近になって、このような Shear Band の形成は直径 1 μ m 以下の極小ピラー状サンプルを用いた圧縮試験では発生し難いこと、また、軟質 Cu/ 硬質 Zr-Cu アモルファス相とのナノ積層合金の圧縮試験においても、均一変形が観察されていること[1, 2]から、サイズ効果とヘテロ構造との関係が注目された。一方、Ma らは[3]、液体窒素中での冷間圧延によって得られたナノ結晶銅に熱処理を加えて粗大粒を混在させると、高強度を維持しつつ、大きな延性が発現することを見出し、Schultz らは[4]、Ti 基のナノ結晶合金中にデンドライドを分散析出させると大幅な延性の改善が見られることを報告している。これらのことから、超硬質の合金においても材料組織のサイズや複合化を制御することにより従来の転位論で説明される加工硬化理論とは異なる機構による加工硬化の発現が可能で、大きな延性を発現できる可能性が指摘されていた。

2. 研究の目的

本研究申請者らは、これまでに電解析出法を用いて作製した Ni-W 合金において、ナノ結晶/アモルファスの二相からなるナノヘテロ組織を形成させることによって高強度・高延性が発現することを報告してきた[5-9]。このような優れた機械的特性の発現は結晶粒子サイズが 15~20nm 以下の領域で観察されており、その原因として、アモルファス母相中に分散したナノ結晶粒子が、応力誘起による粒成長を起こし加工硬化を発現していると考えた。

本研究では、ナノ結晶/アモルファス複合組織を有する各種の合金の電解析出法、液体急冷法等を用いた金属ガラス、メカニカルアロイング法を用いて作製条件を検討するとともに、これら複合組織を有する合金の機械的性質とナノ結晶粒成長を伴う加工硬化メカニズムおよび塑性変形能の経時変化について検討した。また、これらナノスケールにまで高均質化された合金を用いて、マイクロスケールの各種の金属構造部材の成形加工についても検討した。

3. 研究の方法

① 高強度・高延性ナノ結晶電析合金の創製については、Ni および Ni-W 系ナノ結晶合金を対象とした。電析 Ni-W 合金を用いて W 含有量を制御することにより、ナノ結晶単相材、アモルファス単相材および、ナノ結晶/アモルファス複合材料を作製し、熱収縮挙動を熱機械試験機(TMA)を用いて、これら合金の収縮量と引張強度と塑性変形伸びとの相関性を検討した。安定な fcc 結晶構造を有する純 Ni もしくはナノヘテロ構造を有する Ni-W 合金をマイクロメータサイズに積層電析材を作製した。Ni 相は最密充填構造で熱収縮はほとんど認められず、Ni-W 相は過剰なフリーボリュームの放出により収縮する。これらを積層化することにより、Ni-W 相の収縮を抑制し、加工硬化性能を維持しつつ脆化の抑制効果を検討した。

② 上記①で作製した Ni および Ni-W ナノヘテロ合金の積層材量に関して、塑性変形中の Ni-W 相中の結晶粒成長および残留応力変化過程のダイナミック測定を行う。放射光を用いた X 線回折測定は高輝度光科学研究センター SPring-8 の BL46XU にて行った。入射 X 線ビームのエネルギーは 30keV、ビーム径を 0.4 \times 0.4mm²とした。

③ バルク状ナノ結晶合金の創製については、Zr-Cu-Ni-Al 系アモルファス合金を中心に準結晶相の析出を促進させる Au, Pt, Pd, Ag 等の貴金属元素を添加し、HPT 等の強加工技術の導入と種々の熱処理条件を組み合わせることで塑性変形誘起のナノ結晶化挙動を検討した。さらに、結晶粒サイズが 10nm 程度の超微細組織を有し、高強度・高延性を発現するバルク状ナノ結晶合金の創製条件について検討するとともに、また、究極の塑性変形とも言える中性子照射による脆化に関する脆化防止効果についてもしらべた。

4. 研究成果

4-1. 高強度・高延性 Ni-W ナノ結晶合金の引張破断挙動の合金組成依存性

図 1 に、電解析出法により作製した Ni-W 合金の引張試験結果を示す。アモルファス単相組織を有する Ni-19.9 at. % W 合金においては、破断強度は 3,000MPa を超える高い強度を有し、約 2% を超える弾性変形を示すことから、優れたバネ特性を有していた。しかしながら、破断までの塑性変形量は 0.5% 以下となり、アモルファス合金特有の局所的なせん断帯を生じて脆性的に破断した。Ni-13.8 at. % W 合金においては、結晶粒サイズが 10 nm 以下のナノ結晶単相組織を有しており、

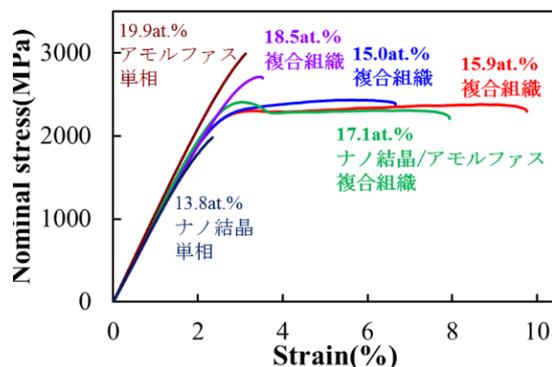


図 1 電解析出法により作製した Ni-W 合金の引張試験結果。

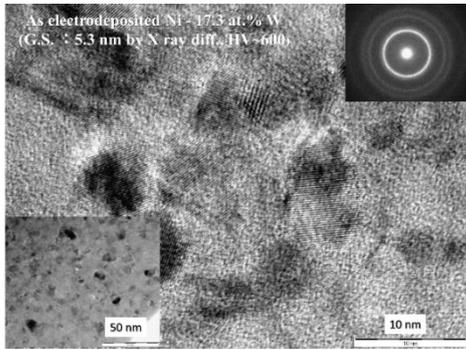


図2 電析 Ni-17 at.% W 合金の高分解能透過電子顕微鏡観察結果

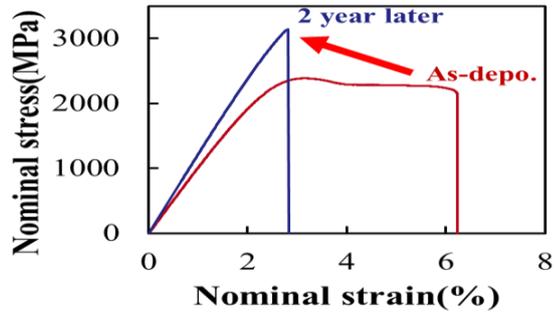


図3 試料作製してから室温保管した Ni-16.9 at.% W 合金試料の引張試験結果。
→徐々に延性が低下。

引張破断強度は 2,000MPa 程度にまで低下したが、破断までの塑性変形量は、同様に 0.5%以下となり、局所的なせん断帯を生じて脆的に破断した。W 含有量が 15.9~18.5 at.% の時、図2の高分解能透過電子顕微鏡観察結果に示すように、アモルファス母相中にナノ結晶粒子が分散する複合組織が形成され、W 含有量の増加とともに、アモルファス相の割合の増加が認められた。これら複合組織を有する合金では、2,500 MPa 程度の高い降伏強度を維持しながら、加工硬化を伴う大きな塑性変形伸びを示した。図2中には低倍率像と制限視野回折像を合わせて示している。

一方、図3に示すように、ナノ結晶/アモルファス複合金の引張塑性変形量は、室温における経時変化とともに減少し、Ni-16.9at%W 合金の場合、試料作製当初では約6%以上の引張破断伸びを示していたが、試料作製後に室温で2年間保持した試料ではヤング率の上昇と破断までの塑性伸びの大幅な減少が観察された。アモルファス母相中の原子拡散を伴った応力誘起のナノ結晶粒成長は、母相中に残留する過剰なフリーボリュウム量に依存すると推定され、図4に示すように、室温でのアモルファス相中の過剰なフリーボリュウムの放出は、応力誘起のナノ結晶粒成長を抑制し、加工硬化の発現にも大きく阻害していると考えられた。このようなフリーボリュウムは、室温でも徐々に放出することから加工硬化性能が減少し、塑性変形伸びが時間とともに減少すると考えられた。

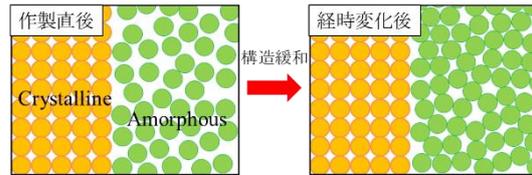


図4 ナノ結晶/アモルファス複合組織の経時構造変化のモデル図。

4-2. Ni および Ni-W ナノヘテロ合金の積層化による経時劣化の抑制

安定な fcc 結晶構造を有する純 Ni 相は最密充填構造で常温付近で熱収縮は認められない。一方、Ni-W 相は母相となるアモルファス相中の過剰なフリーボリュウムの放出により収縮し、収縮に伴って室温でも脆化が生ずる。これら純 Ni 相と Ni-W 相を積層化することにより、Ni-W 相の収縮を抑制し脆化の抑制効果を検討した。図5に Ni/Ni-W の48 積層材の試料断面組織の SEM 反射電子像を示す。明部が Ni-W 相、暗部が純 Ni 相である。Ni-W 相と Ni 相がおおよそ 0.33 μm 厚さで交互に積層し、全体の厚さを約 16 μm に積層した試料である。

図6に各相の厚さを変化させたときの Ni 相と Ni-W 相の積層材の引張試験結果を示す。Ni 単層材、Ni-W 単層材ではともに塑性伸びは約 0.9 %程度であったが、8 積層材 (各層 2 μm 厚) と 16 積層材 (各層 1 μm 厚) は 1.5 %, 2.5 % と大きく増大した。48 積層材 (各層 0.33 μm 厚) では 0.9 % 程度まで減少した。

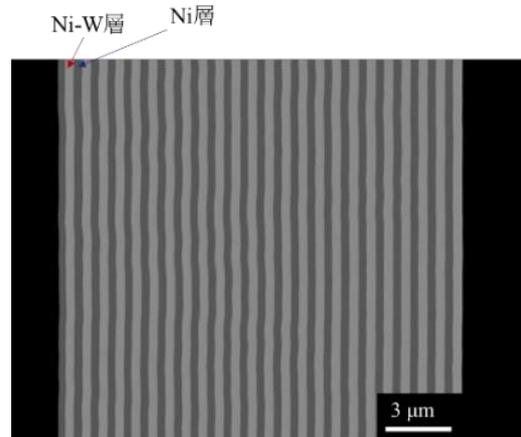


図5 Ni 相と Ni-W 相の 48 積層材の試料断面組織の SEM 反射電子像

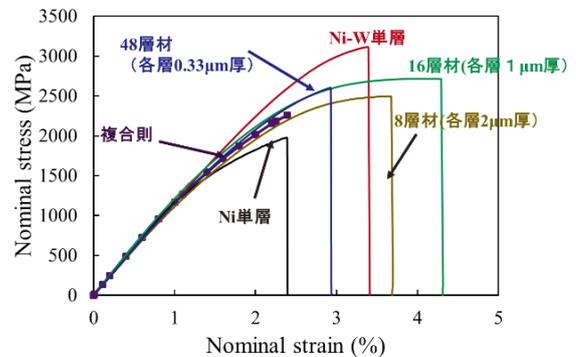


図6 Ni/Ni-W 積層材の引張試験結果。

図 7(a)に Ni-W 単層材及び Ni/Ni-W16 積層材 (各層 1 μ m 厚) における, 室温での引張特性の経時変化を示す。Ni-W 単層材は作製から 1 週間経過で塑性伸びは 0.95 % から 0.45 % に減少し脆化が進んだ。図 7(b)の 16 積層材では作製から 1 ヶ月経過しても, 弾性伸びを差し引いた塑性変形伸び量は殆ど変わらず約 2 % を維持していた。

図 8 に TMA 測定による 590K-110 min までの保持時間の熱収縮曲線を示す。粗大粒純 Ni 材 (スルファミン酸浴) では熱収縮は殆ど見られないが, 微細粒純 Ni 材 (Watt 浴) においては約 0.02 % 収縮した。Ni-W 単層材では約 0.05 % と大きな収縮を示し, Ni/Ni-W 多層材においては層厚が薄くなっていくに従い収縮量は小さくなった。すなわち, 10 層材 (各層 2 μ m 厚), 20 層材 (各層 1 μ m 厚), 60 層材 (各層 0.33 μ m 厚) においては, それぞれ約 0.045, 0.035, 0.03 % と減少した。以上の結果から, Ni/Ni-W 多層材においては, 収縮量の少ない Ni 層が Ni-W 層の収縮を抑制するとともに, Ni-W 相の延性の低下を抑制したと考えられる。

4-2 放射光マイクロビームを利用した純 Ni と Ni-W 合金の積層材の塑性変形挙動

電解析出法により作製した Ni/Ni-W 多層材における変形機構を調査するために, 大型放射光施設 SPring-8 の BL46XU にて引張試験その場 XRD 測定を行った。引張試験条件は初期ひずみ速度を 4.2×10^{-4} /sec, XRD 測定は試験片平行部に 0.4×0.4 mm² の範囲に X 線を連続照射し, 時間分解能 2 sec で行った。Ni-W 単層材, 微細粒 Ni 単層材, Ni/Ni-W 多層材の Ni-W(111), Ni(111)の回折ピーク分離解析を行い, それぞれの格子面間隔を求めた。印加応力 0 MPa のときの格子面間隔を d_0 として, 応力印加時の格子ひずみを求め, 格子ひずみと真応力の関係を求めた。

図 9 に Ni/Ni-W 多層材の 10 層材 (各層 2 μ m 厚), 20 層材 (各層 1 μ m 厚), 60 層材 (各層 0.33 μ m 厚) の真応力-格子ひずみ曲線を示す。いずれの多層材においても印加応力が 900~1000 MPa 程度の値になると, Ni-W 層の格子ひずみの勾配が急になり, 同時に Ni 層の格子ひずみの勾配が緩やかになった。これは多層材に使用した微細粒 Ni 材の降伏応力が 984 MPa であり, Ni-W の 1667 MPa よりも低い値となっているために, Ni 層の降伏点からより高い応力を Ni-W 層が負担するようになる応力分配という現象が起きているためである。

応力分配の様子について, 1 層あたり 2 μ m で多層にした 10 層材, 1 μ m で多層にした 20 層材では, この応力分配により生じる格子ひずみのギャップが大きくなっている。しかし 1 層あたり 0.33 μ m で多層にした 60 層材ではこの応力分配が 10 層材, 20 層材よりも起きておらず, 各層厚さが薄いと, 付加応力の増加により Ni-W 層の破断が進行していると考えられる。

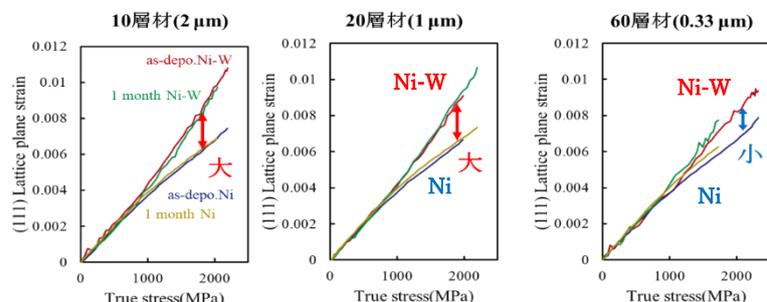


図 9 Ni/Ni-W 多層材の 10 層材 (各層 2 μ m 厚), 20 層材 (各層 1 μ m 厚), 60 層材 (各層 0.33 μ m 厚) の真応力-格子ひずみ曲線。

4-3 高強度 Zr-Cu-Ni-Al 系金属ガラスの脆化に及ぼすフリーボリューム量の影響

4-3-1 中性子照射による脆化

これまでに, Zr-Cu-Ni 系および Zr-Cu-Ni-Al 系の Zr-rich 側の亜共晶組成を有する金属ガラスが熱処理時の構造緩和脆性に極めて有効な抵抗を示すことを明らかにしている。これら耐構造緩和脆化は, 耐中性子照射脆性にも適応でき, 上述の Ni-W 電析合金と同様にナノ結晶/アモルファス複合組織の形成により改善することが考えられ検討した。

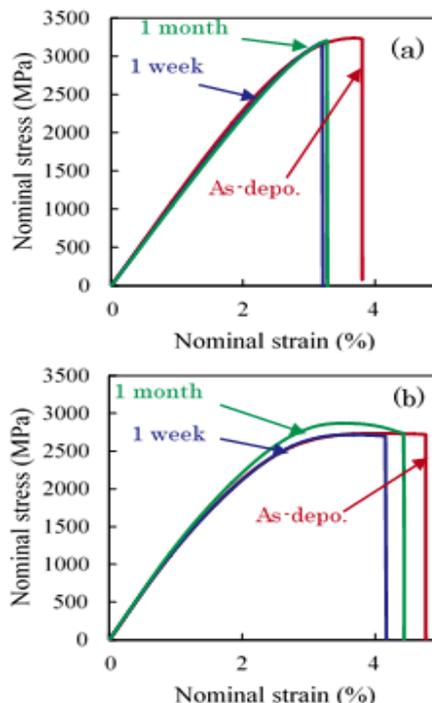


図 7 経時変化による引張特性変化 (a)Ni-W 単層材 (b)Ni/Ni-W16 積層材

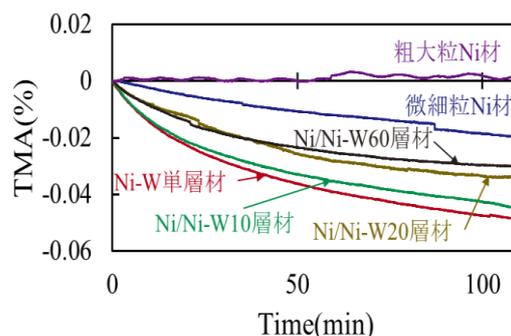
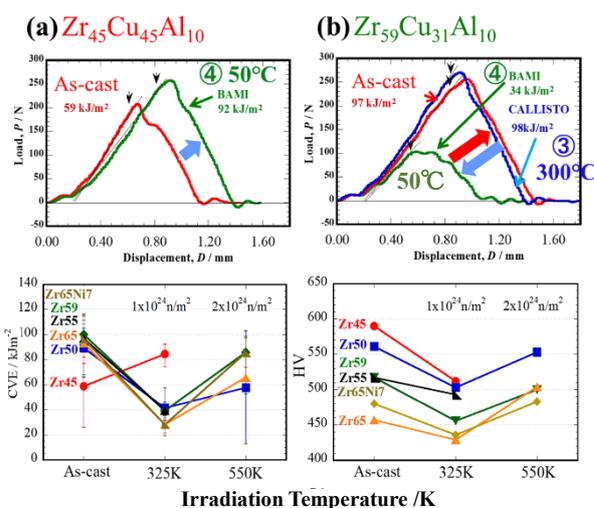


図 8 TMA 測定による熱収縮挙動

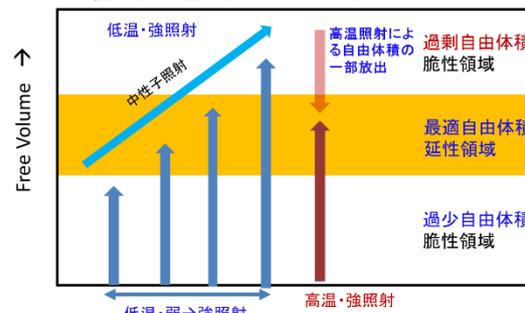
中性子照射実験に用いた合金試料の組成は、Zr含有量を45~65 at%まで変化させたZr-Cu-Ni-Al系金属ガラスを用いた。これら金属ガラスを20mm x 1.5mm x 1.5mmの角柱型のVノッチ型の小型衝撃試験片に加工した。中性子線照射条件として、図10中の表に示すように、100°C付近の低温条件で軽照射と重照射の2種類について実施した。図中に中性子照射前後のZr基金属ガラスの中計装化シャルピー衝撃試験により検討した結果を示す。



中性子照射条件 強照射条件: $1\sim 2 \times 10^{22}$ n/m²
照射温度 約50°C、約300°C

| Facility/Device | Capsule | Fluence [n/m ² , E≥1MeV] | Cooling water Temp. [K] | Atmo. |
|-----------------|----------|--|----------------------------|-------|
| CALLISTO | 08M-14BR | 2×10^{21} | 553 ~ 563 | He |
| BAMI | 09M-21BR | 1×10^{24} | 323 ~ 333 | He |

単位は、中性子数/(m³) × (m/秒)



中性子照射後のZr基金属ガラスの衝撃試験結果硬度との関係 中性子照射材のフリーボリュームと脆化発現のイメージ図

図10 Zr-Cu-Ni系金属ガラスの中性子照射による衝撃試験結果。

Zr₄₅Cu₄₅Al₁₀合金：脆化状態→50°C中性子照射により軟化を伴い延性化。

Zr₅₉Cu₃₁Al₁₀合金：延性状態→50°C中性子照射により軟化を伴い脆化。

→300°C照射により硬化とともに延性回復。

Zr₄₅Cu₄₅Al₁₀合金はAs-castの急冷直後の状態でも脆性状態であるが、50°Cでの中性子強照射により、フリーボリュームが増加し軟化・膨張とともに延性が認められる。一方、Zr₅₉Cu₃₁Al₁₀合金はAs-cast状態で高い延性を示すが、50°Cでの強照射により軟化・膨張を伴って逆に脆化する。300°Cで同様に強照射すると過剰なフリーボリュームの一部がアニールアウトされて硬化・収縮し、高延性化が生ずる。図12中の脆化のイメージ図に示すように、アモルファス合金の延性発現には最適フリーボリューム領域があり、過剰でも不足でも脆化すると考えられた。

4-3-2 脆化に及ぼす貴金属添加効果

著者らは、図11に示すようにZr基金属ガラス合金に微量のAuを添加すると、塑性変形誘起のナノ準結晶相の析出が生じ、加工硬化が生じて引張延性の大幅な改善が生ずることを明らかにしてきた[10-12]。これら合金の中性子照射による脆化挙動をしらべた。照射条件は100°C付近の低温で軽照射と重照射の2種類について実施したが、いずれの条件でも部分的な結晶化とともに激しい脆化が生じた。

まとめ

ナノ結晶/アモルファス複合組織を有する高強度・高延性の合金を開発した。母相となるアモルファス相中で応力誘起によるナノ結晶粒子の成長や析出により、加工硬化が発現できることを見出し、Ni-W電析合金およびZr基金属ガラス合金によってそれら効果の発現が確認された。これら応力誘起による拡散を伴った加工硬化現象は、アモルファス相中のフリーボリュームの存在が重要である、中性子照射によりアモルファス相中のフリーボリューム量を変化させると、延性発現には最適フリーボリューム領域があり、過剰でも不足でも脆化すると考えられた。

参考文献

- [1] T. G. Nieh et al., Scripta Mater. 58 (2008) 890–893. [2] J.Y. Zhang et al., Acta Mater. 60 (2012) 7183–7196. [3] En Ma et al., Nature, 49 (2002) 912-915. [4] L. Schultz et al., Nature Materials, Vol. 2, No. 1 (2003). [5] T. Yamasaki et al., J. Alloys and Comp. 643 (2015) S22–S26. [6] T. Yamasaki et al., Microsystem technologies, Vol. 20, 1941-1948 (2014). [7] T. Yamasaki et al., NanoStructured Materials, 10, 375-388 (1998). [8] T. Yamasaki, Scripta Mater., 44, 1497-1502 (2001). [9] T. Yamasaki et al., J. Japan Inst. Metals, Vol. 75, No. 6 (2011) 348-354. [10] 山崎徹ら, 粉体および粉末冶金, Vol. 63, No. 4, 230-238 (2016). [11] 山崎徹ら, 日本金属学会誌, Vol. 78, No. 12, 449-458 (2014). [12] T. Yamasaki et al., Mat. Sci. and Eng. 63, 012167 (2014).

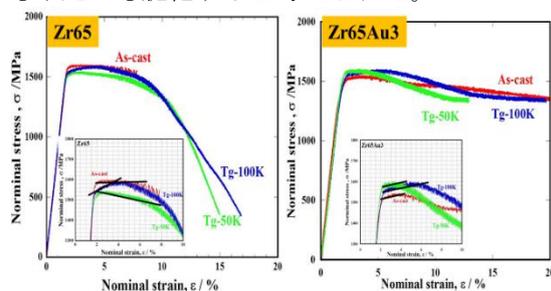


図11 Zr₆₅Cu₂₀Ni₅Al₁₀(Zr65)およびZr₆₅Cu₁₇Ni₅Al₁₀Au₃(Zr65Au3)金属ガラスの圧縮試験結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 11件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Yoji Miyajima, Ryu Ichikawa, Hiroki Adachi, Tohru Yamasaki, Toshiyuki Fujii, and Masaharu Kato | 4. 巻 100 |
| 2. 論文標題 Temperature and strain-rate dependence of flow stress of nanocrystalline nickel fabricated by electrolytic deposition | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Philosophical Magazine Letters | 6. 最初と最後の頁 571-580 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09500839.2020.1823023 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 T. Wada, J. Jiang, K. Yubuta, H. Kato, A. Takeuchi, | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Septenary Zr-Hf-Ti-Al-Co-Ni-Cu high-entropy bulk metallic glasses with centimeter-scale glass-forming ability | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Materialia | 6. 最初と最後の頁 10372 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 J.C. Qiao, Q.Wang, J. M. Pelletier, H. Kato, R. Casalini, D. Crespo, E. Pineda, Y. Yao, Y. Yang, | 4. 巻 104 |
| 2. 論文標題 Structural heterogeneities and mechanical behavior of amorphous alloys | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Progress in Materials Science | 6. 最初と最後の頁 2150227 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 M. Luckabauer, T. Hayashi, H. Kato, T. Ichitsubo | 4. 巻 99 |
| 2. 論文標題 Decreasing activation energy of fast relaxation processes in a metallic glass during aging | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 140202 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 4.R.V. Belosludov, A.I. Oreshkin, S.I. Oreshkin, D.A. Muzychenko, H. Kato, D.V. Louzguine-Luzgin | 4. 巻 816 |
| 2. 論文標題 The atomic structure of a bulk metallic glass resolved by scanning tunneling microscopy and ab-initio molecular dynamics simulation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds | 6. 最初と最後の頁 152680 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yuya Ogawa, Eri Miura-Fujiwara | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Effect of Nb Addition on Oxide Formation on Ti-xNb Alloys | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Mater. Trans., | 6. 最初と最後の頁 2204-2212 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Tatsuya Fujii, Takahiro Namazu, Koichi Sudoh, and Eri Miura-Fujiwara | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Effects of Vacuum Annealing on Mechanical Properties of Gallium-implanted Silicon Nanowire | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Sensors and Materials | 6. 最初と最後の頁 683-695 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 藤田和孝, 三隅孝祐, 富樫 望, 清水幸春, 横山嘉彦 | 4. 巻 Vol. 68 |
| 2. 論文標題 低不純物低欠陥Zr基バルク金属ガラスの超高耐久比を示す疲労特性 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 材料 | 6. 最初と最後の頁 212-217 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 J. Jiang, D.X. Wei, T. Wada, D.V. Louzguine-Luzgin, H. Kato, | 4. 巻 768 |
| 2. 論文標題 The mechanical cycling behavior of TiNi based crystal/glassy alloy in the superelastic mode | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds | 6. 最初と最後の頁 176-180 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 K. Amiya, M. Komaki | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Preparation of the Glassy Thermal Spray Film for Torque Sensor | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proc .9th Asian Thermal Spray Conf. | 6. 最初と最後の頁 1067-1070 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Akinobu Shibata, Fumitaka Ichikawa, Hiroki Adachi, Tohru Yamasaki & Nobuhiro Tsuji | 4. 巻 97 |
| 2. 論文標題 Cooperative strain accommodation over grains in martensitic transformation from Fe-Ni nanocrystalline austenite | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Philosophical Magazine Letters | 6. 最初と最後の頁 132-139 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09500839.2017.1292057 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 20件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 山崎徹, 山崎正徳, 外山健 |
| 2. 発表標題 中性子照射したZr基金属ガラスの機械的性質 |
| 3. 学会等名 第6回材料Week、日本材料学会、京都テレサ (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 網谷健児, 西垣迅, 山崎徹 |
| 2. 発表標題 Zr-Al-Cu-Ni系金属ガラスへのNb添加による延性向上 |
| 3. 学会等名 第6回材料Week、日本材料学会、京都テレサ |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森口裕樹、周偉偉、三浦永理、野村直之、山崎徹 |
| 2. 発表標題 メカニカルアロイング法によるFe-TiN ナノ結晶複合粉末の作製と金属3D積層造形への応用 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演(第165回)大会, オンライン |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tohru Yamasaki |
| 2. 発表標題 Plastic Deformation of Ni-based and Zr-based alloys having Amorphous and Nanocrystalline Dual Phase Structures |
| 3. 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM-10) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tohru Yamasaki |
| 2. 発表標題 Developments of high-precision forming for metallic materials in University of Hyogo |
| 3. 学会等名 Inter. Sympo. on Photocatalysis, Photofunctional Materials and Nano-Science & Technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tohru Yamasaki |
| 2. 発表標題 Nano-microscale molding of some metal plates with high strength Ni-W alloy molds |
| 3. 学会等名 The 8th TKU-ECUST-OPU-KIST-UH-IHU-KMITL-TNU Joint Symposium on Advanced Materials and Applications (JSAMA-8) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野原一晟、網谷健児、山崎徹 |
| 2. 発表標題 Zr基金属ガラスの選択エッチングによる微細表面形状に及ぼす添加元素の影響 |
| 3. 学会等名 第3回材料Week、日本材料学会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Kato |
| 2. 発表標題 Nanoporous and Nanocomposite metals by Liquid Metal Dealloying |
| 3. 学会等名 Joint Symposium SAKES (Sendai Albi Knowledge in Engineering Seminars) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Kato, Masanari Datekyu, Wataru Yashiro |
| 2. 発表標題 Imprinting Pd-based metallic glass grating with Si mold |
| 3. 学会等名 International conference on METALLURGY AND MATERIALS ENGINEERING, DEVELOPMENT AND RESEARCH ON ADVANCED TECHNOLOGY AND NEW MATERIALS (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 J. Jiang, H. Kato, D. Louzguine |
| 2 . 発表標題 Cryogenic Thermal and Mechanical Processing of TiNi Based Crystalline/Amorphous Alloys |
| 3 . 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM10) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 T. Wada, H. Kato |
| 2 . 発表標題 Preparation of High Entropy Bulk Metallic Glass with High Glass Forming Ability |
| 3 . 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM10) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Miura-Fujiwara, Y. Ogawa, T. Yamasaki |
| 2 . 発表標題 : Effect of Nb addition on high-temperature oxidation behavior, oxide layer structure, and Its exfoliation resistance of Ti-Nb Alloys |
| 3 . 学会等名 The 14th world conference of Titanium (Ti-2019), Nantes, France (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Miura-Fujiwara, K. Uchida, A. Tanaka, T. Yamasaki |
| 2 . 発表標題 Oxidation behavior and oxide layer microstructure of Ti-29Nb-13Ta- 4.6Zr and Ti-6Al-7Nb alloys |
| 3 . 学会等名 JSAMA-8(The 8th TKU-ECUST-OPU-KIST-UH-IHU-KMITL- UTAR-TNU Joint Symposium on Advanced Materials and Applications) (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西村 直樹, 三浦 永理, 山崎 徹 |
| 2. 発表標題 Ti-Nb合金のフレットング摩耗挙動に及ぼす組成と熱処理の影響 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2019秋期(第165回)講演大会, 岡山大学津島キャンパス |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. FUJITA, C. KISAKI, M. FUJISIGE, Y. YAMAZAKI, K. AMIYA, T. YAMASAKI, H. KATO |
| 2. 発表標題 Investigation of Casting Diameter, Surface Defects and Low Temperature Thermal Cycles on Ductility in Bulk Metallic Glasses with usual and High Super Cooled Liquid Viscosity. |
| 3. 学会等名 Abstracts of International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials(THERMEC'2018) P119, p.846. (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tohru Yamasaki, Hiroki Adachi, Koichi Tsuchiya and Hidemi Kato |
| 2. 発表標題 Formation of Amorphous and Nanocrystalline Zr-Cu-Ni-Al Based Dual Phase Alloys and Their Plastic Deformation |
| 3. 学会等名 Abstracts of International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials(THERMEC'2018) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tohru Yamasaki |
| 2. 発表標題 Formation of Amorphous and Nanocrystalline Zr-Cu-Ni-Al-Au Dual Phase Alloys |
| 3. 学会等名 The 12th International Conference on Bulk Metallic Glasses (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 粟根昂也、足立大樹、山崎 徹 |
| 2. 発表標題 電解析出法を用いたナノスケールNi/Ni-W多層材の作製とその機械的特性 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野原一成、網谷健児、山崎 徹 |
| 2. 発表標題 Zr基金属ガラスの選択エッチングによる微細表面形状に及ぼす添加元素の影響 |
| 3. 学会等名 第3回材料Week |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 J. Jiang, H. Kato, D.V. Louzguine-Luzgin, |
| 2. 発表標題 Cryogenic thermal and mechanical processing of Ti-Ni-Cu-Zr based crystal/glassy alloys, |
| 3. 学会等名 The 25th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2018), 2018.7.2-6, Rome, Italy (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Jing Jiang, Hidemi Kato, Dmitri V. Louzguine-Luzgin, |
| 2. 発表標題 The effect of cryogenic thermal cyclic processing on the mechanical properties of TiNi based crystalline/amorphous alloys, |
| 3. 学会等名 日本金属学会2019年春期講演大会(第164回)、2019年3月20-22日、東北電気大学、東京 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 J. Jiang, H. Kato, D.V. Louzguine-Luzgin, 東北大学 |
| 2. 発表標題 Cryogenic thermal cycling and high pressure torsion processing of Ti-Ni based crystal/glassy alloys |
| 3. 学会等名 金属材料研究所共同研究ワークショップ・日本バイオマテリアル学会東北地域講演会「女性研究者が語るバイオマテリアル研究」、2018年8月24日、金属材料研究所、宮城 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Amiya, T. Kano, M. Komaki |
| 2. 発表標題 Preparation of amorphous alloy coating films with magnetostriction by thermal spraying. |
| 3. 学会等名 Abstracts of THERMEC2018, Paris (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Amiya |
| 2. 発表標題 Inverse Magnetostrictive Properties and Application of (Fe, Co)-Si-B-Nb Amorphous Alloys |
| 3. 学会等名 Sym. 30th Anniversary Nano-crystalline Soft Magnetic Alloys, 2018.8.29-31, Sendai (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Yamasaki, T. Doi, K. Fujita, H. Kato |
| 2. 発表標題 Crystallization Behavior and Plastic Deformation of Zr-Cu-Ni-Al-M (M: Pd, Pt, Au and Ag) Bulk Metallic Glasses |
| 3. 学会等名 FIMPART'2017, Bordeaux, France (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 T. Yamasaki, T. Doi, K.Tsuchiya, H. Kato |
| 2 . 発表標題 Formation of Amorphous and Nanocrystalline Zr-Cu-Ni-Al Based Dual Phase Alloys by Severe Plastic Deformation |
| 3 . 学会等名 I U M S R - I C A M, 2017, Kyoto, Japan (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 T. Yamasaki, T. Doi, K. Fujita, H. Kato |
| 2 . 発表標題 Plastic Deformation Behavior of Zr-Cu-Ni-Al-NM (NM: Noble Metal) Bulk Metallic Glasses |
| 3 . 学会等名 JSPMIC 2017, Kyoto, Japan (国際学会) |
| 4 . 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 C. Kasaki, K. Fujita, Y. Yamazaki, K. Amiya, T. Yamasaki |
| 2 . 発表標題 Influence of Casting Diameter, Surface Defect and Low Temperature Thermal Cycles on Improvement of Ductility in Bulk Metallic Glass. |
| 3 . 学会等名 JSPMIC 2017, Kyoto, Japan (国際学会) |
| 4 . 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 T. Doi, T. Yamasaki, H. Kato |
| 2 . 発表標題 Remedial Effects of Au, Pd Additions on Plastic Deformation of Zr-Cu-Ni-Al Metallic Glasses |
| 3 . 学会等名 JSPMIC 2017, Kyoto, Japan (国際学会) |
| 4 . 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎 徹 |
| 2. 発表標題 高強度・高延性ナノ結晶/アモルファス合金の開発 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会、北海道大学(招待講演) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 野原一晟、網谷健児、山崎 徹 |
| 2. 発表標題 Zr基金属ガラスの選択エッチングによる微細表面形状に及ぼすPd添加量の影響 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会、北海道大学 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 栗根昂也、山崎 徹、足立大樹、安井 学 |
| 2. 発表標題 高強度Ni-W電鍍金型を用いた超微細粒Alのナノインプリント加工 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会、北海道大学 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野原一晟、網谷健児、山崎 徹 |
| 2. 発表標題 Zr基金属ガラスの選択エッチングによる微細表面形状に及ぼす添加元素の影響 |
| 3. 学会等名 第3回材料WEEK、日本材料学会、京都テレサ |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--------------------------------------|--------------------------|
| 研究分担者 | 足立 大樹 (Adahi Hiroki) (00335192) | 兵庫県立大学・工学研究科・教授 (24506) | 放射光を利用した動的組織変化測定。 |
| 研究分担者 | 網谷 健児 (Amiya Kenji) (30463798) | 東北大学・金属材料研究所・特任准教授 (11301) | Zr基金属ガラス合金の作製、最適合金組成の探索。 |
| 研究分担者 | 三浦 永理 (Miura Eri) (70315258) | 兵庫県立大学・工学研究科・准教授 (24506) | 透過電子顕微鏡による組織観察。 |
| 研究分担者 | 加藤 秀実 (Kato Hidemi) (80323096) | 東北大学・金属材料研究所・教授 (11301) | 急冷技術を用いた試料作製。熱力学的データ解析。 |
| 研究分担者 | 藤田 和孝 (Fujita Kazutaka) (10156862) | 宇部工業高等専門学校・機械工学科・嘱託教授 (55501) | 合金の機械的特性評価。 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|