

第3回日本金属学会フロンティア研究助成報告(1)

日本金属学会フロンティア研究助成は、教育・研究機関での金属及びその関連材料分野の学術研究及び技術研究の発展や若手研究者の育成や奨励を主な目的として2020年度に設立されました。第3回フロンティア研究助成受給テーマ10件の研究期間終了に伴い、その成果をまてりあで報告します。

**「拡散-変位型変態を利用したチタン系
高温形状記憶合金の創出」**

1. 研究期間：2022年8月～2024年3月(2年間)

2. 研究の概要

本研究の目的は、600℃以上の高温で形状回復現象を示すチタン系高温形状記憶合金の創出である。形状記憶合金に関して数多くの研究開発が行われており、既に様々な用途で利用されている。しかし100℃以上の高温で動作する高温形状記憶合金は実用化されておらず、現在世界中で競争的に研究開発が行われている。研究代表者は従来のマルテンサイト変態ではなく、拡散-変位型相変態を用いた高温形状記憶効果の着想を得た。本研究ではこの現象の実証と理解の深化・発展を目標とし、熱機械試験と内部組織観察から形状回復現象の基礎的知見を確立することとした。本研究は準安定 β 型チタン合金における以下の拡散-変位型相変態を利用する： β 相 $\rightarrow$ 等温 α'' 相 $\rightarrow\alpha+\beta$ 相 $\rightarrow\beta$ 相。チタン合金の α - β 相変態において報告されている「格子点位置の保存」現象に加え、上述した相変態過程において最初の β 相バリエーションに戻るための強力なバリエーション選択を導入することで形状回復現象が現れると考えられる。従来のマルテンサイト変態に依らない現象であるため、形状回復動作を劣化させる析出物の形成は起こらず、貴金属の添加も不要となるはずである。本研究の遂行により、新たな原理に基づく形状記憶材料の創出を目指す。

3. 研究実施の概要(実施状況・研究成果等)

拡散変態であっても変位型変態の特徴を有し、相変態によって試料表面に起伏が生じる現象はチタン合金をはじめ、いくつかの合金で報告されている。この現象は拡散変態によって原子種が変わってもそれらが占める格子点位置が保存されるために生じるものと理解されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。研究代表者は準安定 β 型のTi-Mo系合金において、室温の β 相から試料を加熱した際に等温 α'' 相を経由して $\alpha+\beta$ 相に拡散変態したときに表面起伏が生成し、さらに高温で再び β 相へと逆変態することでそれらの起伏がほとんど消滅することを見出した⁽³⁾⁽⁴⁾。この結果は一連の拡散変態においても格子点位置が保存されており、表面起伏を生み出した格子歪み(変態歪み)は回復可能であることを意味している。以上より、研究代表者は拡散変態による形状回復現象の着想を得た。表面起伏が発生した部分では特定のバリエーションが形成しており、それがさらに高温で再び元の β 相に変態することで表面起伏が消滅したと考えられる。上述の実験は外力を加えずに行ったため、複数存在するバリエーションが全て生成し、試料の外形変化

は起こらなかった。しかし、試料全体にわたって単一のバリエーションに揃えることが出来れば、格子歪みを試料の外形変化として取り出すことが可能となるはずである。この機構はマルテンサイト変態による通常の形状記憶合金におけるバリエーション再配列と同じものである。一方、さらに高温に加熱して β 単相へと変態する際に、初期の β 相と同じ結晶方位のバリエーションを選択することができれば、形状回復が生じると考えられる。外力を負荷せずに行った上記の予備実験では表面起伏が消滅したことから、このバリエーション選択は可能であると考えられる。

以上の着想をもとに、まずは上述のTi-Mo系合金を用いて等温 α'' 相において外力を加え、バリエーション再配列による試料形状の変化が現れ得るかを調べた。Arアーク溶解法で合金インゴットを作製し、均質化熱処理を施してから放電加工機で試験片を切り出した。その後、溶体化処理を施して β 相単相とした後に、等温 α'' 相が生成する400℃にて歪み量約3%まで圧縮試験を行った。その後、試料を室温まで冷却し、表面研磨を施したのちに内部組織をX線正極点図(XRD-PF)測定及び電子後方散乱回折(EBSD)測定により観察した。その結果、各々の結晶粒において特定のバリエーションの等温 α'' 相が生成していることがわかった。このバリエーションを詳細に解析したところ、試料の圧縮方向に α 軸が配向するバリエーションであった。等温 α'' 相はマルテンサイト変態で生じる α'' 相と同様に、 β 相に対して格子対応関係を持つ⁽³⁾。生成したバリエーションは β 相に対して圧縮歪みを生成するものであり、優先バリエーションであることがわかった。この試料を更に加熱し、等温 α'' 相を直接 $\alpha+\beta$ 相へと分解させたところ、試料形状に大きな変化は現れなかった。室温に冷却後、各種内部組織観察を行ったところ、分解して生成した β 相は初期の β 相(溶体化後に観察された β 相)と同じ結晶方位のバリエーションであり、 α 相は等温 α'' 相の対応関係を引き継いだバリエーションであることがわかった。更に加熱を続けると、 $\alpha+\beta$ 二相における β 相分率が増加し、 β -transusを超えると β 単相となった。この際に、試料に残存していた圧縮歪み(400℃にて導入されたもの)が完全に回復し、溶体化直後の試料形状に戻った。 β 相の結晶方位を観察したところ、溶体化後の β 相とはほぼ同じ結晶方位のバリエーションになっていた。以上のように、形状回復が生じた際の相変態は $\alpha+\beta$ の二相から β 単相へと変化する温度域に対応する。これは長距離原子拡散による明確な組成変動を伴う拡散変態であり、研究代表者が想定した通りの新たなメカニズムによる形状記憶効果であると推測される。

前述のように、拡散変態であっても形状回復現象が起こるためには第一に格子点位置の保存が必要である。これによっ

て、拡散変態における結晶格子の変化(すなわち変態歪み)を試料の形状変化として取り出すことが可能となる。第二に、形状が回復するために初期の β 相と同じ結晶方位を持つバリエーションを選択して拡散変態が進行する必要がある。当然ながら、このバリエーション選択に失敗するとたとえ格子点位置の保存により変態歪みが発生したとしても元の試料形状には戻り得ない。これまでの報告から、チタン合金をはじめ、様々な合金系における拡散変態では格子点位置の保存が機能していることが指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾。本研究のチタン合金においても明瞭な表面起伏が観察されたことから、この格子点位置の保存は働いていることがわかる。一方、チタン合金の α/β 変態において上述したように強いバリエーション選択が発生することは報告がない。本研究のチタン合金における $\alpha+\beta$ 組織を透過電子顕微鏡で詳細に観察したところ、厚さ10 nm程度の極めて微細なラメラ組織が観察された。このラメラ組織を構成する α 相と β 相の間には相分解前に存在していた単一の等温 α'' 相バリエーションを介したBurgersの方位関係が存在していた。すなわち、HCPの α 相およびBCCの β 相はそれらの中間的な結晶構造を有するorthorhombicの等温 α'' 相から分解したために、この等温 α'' 相を経由して生成可能な α/β バリエーションペアのみが形成したと考えられる。これによって本研究のチタン合金においては $\alpha-\beta$ 相間に強固なバリエーション選択が生じ、拡散変態であっても形状回復が生じたものと考えられる。

参考文献

- (1) J. M. Howe: Metall. Trans. A, **25A**(1994), 1917–1922.
- (2) T. Furuhashi, T. Ogawa and T. Maki: Scr. Mater., **34**(1996) 381–386.
- (3) M. Tahara, K. Hasunuma, R. Ibaki, T. Inamura and H. Hosoda: Adv. Eng. Mater., **21**(2019) 1900416.
- (4) M. Tahara, K. Hasunuma and H. Hosoda: J. Alloys Compd., **868**(2021) 159237.

4. 成果の発表

- (1) 江頭亨侍, 安藤一斗, 野平直希, 邱, 海瀬晃, 田原正樹, 細田秀樹: Ti-Mo-Sn-Al合金における $\alpha-\beta$ 変態を利用した形状回復現象と二方向自発変形, 日本金属学会2023年秋期講演大会, 2023年9月19日。
- (2) 江頭亨侍, 安藤一斗, 野平直希, 邱, 海瀬晃, 田原正樹, 細田秀樹: 準安定 β -Ti合金における $\alpha-\beta$ 変態を利用した自発的形状変化, 日本金属学会関東支部第20回ヤングメタラジスト研究交流会, 2023年11月8日。
- (3) M. Tahara, K. Ando, N. Nohira, W. T. Chiu, A. Umise and H. Hosoda: Shape recovery phenomenon by diffusional-displacive phase transformation in metastable β -Ti alloy, The 15th World Conference on Titanium, 15 June, 2023.
- (4) 武尾遼, 江頭亨侍, 野平直希, 邱, 田原正樹, 細田秀樹: Ti-Mo系合金の $\alpha-\beta$ 変態による形状回復現象に及ぼす熱サイクルの影響, 日本金属学会2024年秋期講演大会, 2024年9月18日。

5. 本研究終了後の計画等

本研究は現在, JST さきがけにて継続中である。長距離

拡散を伴う変態でありながら明瞭に形状回復現象が現れることから、今後さらなる研究開発と応用が期待される。本研究ではチタン合金を用いて実験を行ったが、本現象の動作機構を一般化し、今後は他の合金でも同様の現象が得られないかを検証する計画である。

6. 研究代表者: 田原正樹

(東京科学大学総合研究院 准教授)

7. 共同研究者:

安藤一斗, 江頭亨侍, 武尾遼(東京科学大学)

「P/N 接合自己形成型相変化カルコゲナイドを用いたセレクトラ層フリー PCRAMの創成」

1. 研究期間: 2022年4月~2024年3月(2年間)

2. 研究の概要

次世代不揮発性メモリ(NVM)として相変化メモリ(PCRAM)が注目されている。PCRAMのメモリ層にはアモルファス/結晶間の可逆的な相変化を示すGe-Sb-Te化合物(GST)が実用されているが、耐熱性に乏しい、且つ消費電力が大きいなどの問題点が残している。また、PCRAMには大容量化のためにクロスポイント構造が採用されているが、クロストーク電流を防ぐために、メモリ層と同時に、ダイオード整流特性を示す選択素子(セレクトラ層)が必要である。現在量産されているセレクトラ層にはオボニックスイッチ(OTS)材料(材料自身が整流性を示す)が用いられているが、中間電極層やカーボン緩衝層を必要とし、その複雑な素子構造が更なる高集積化の妨げとなっている。OTSは閾値電圧(V_{th})を越える電圧印加によりON/OFF状態の高速な切り替えが可能であるが、それ自身がアモルファス相であるため、耐熱性に乏しく熱擾乱の影響を受けやすい。その点においても更なる微細化が困難となっている。申請者は、次世代超高集積・超大容量PCRAMの実現に向け、上記した既存PCRAMが抱える課題に対して、新相変化材料(PCM): NbTe₄を提案する。NbTe₄はGSTと異なり、高抵抗なP型結晶相が、ジュール加熱により低抵抗なアモルファス相に変化すると同時にN型伝導へと変化する。即ち、結晶/アモルファス相の界面においてPNダイオードを自己形成できるため、セレクトラ層フリーな革新的な微細構造の実現が期待される。本研究では、メモリ層自身がセレクトラ機能を併せ持つ、新しい概念に基づくメモリデバイス構造を提案し、大容量・低消費電力PCRAM素子の実現を目指す。

3. 研究実施の概要(実施状況・研究成果等)

令和4年度にNbTe₄メモリ動作や、アモルファスと結晶相の相変化に伴う界面物性調査を行った。先行研究でアニーリング温度に応じてNbTe₄薄膜の半導体特性を測定した。導電タイプN-P変化の開始点は、結晶化温度付近である270~272°Cのアニーリング温度内で確認された(図1A)。一般に、GeTeやGSTのような従来の相変化材料(PCM)では、アモルファス相におけるvalence-alternation pairs(VAPs)として知られる欠陥状態がP型伝導に寄与し、N型伝導、すなわちキャリアタイプ反転(CTR)を得ることは非

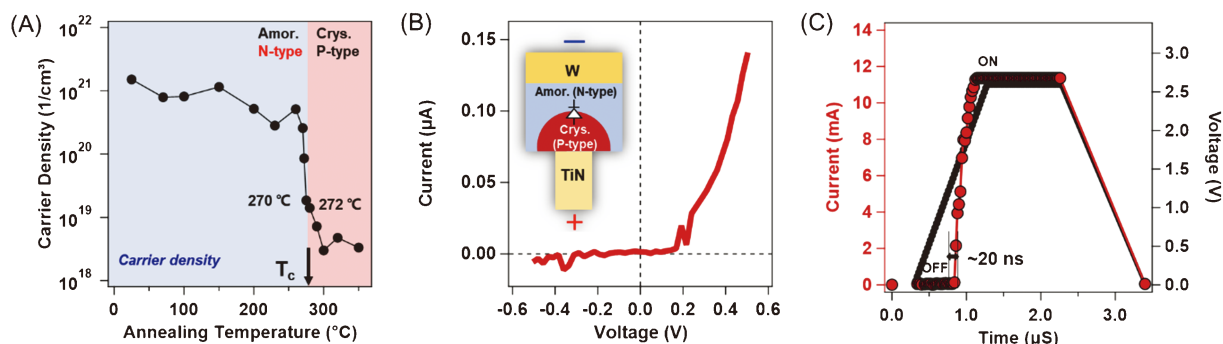


図1 (A) キャリア密度と温度の関係, (B) セット状態におけるNbTe₄ メモリセルの直流電流-電圧(I-V)特性, (C) パルスI-V特性. (オンラインカラー)

常に困難である[1, 2]アモルファスNbTe₄における独自のN型キャリアは、膜内に金属的なNbナノクラスターの自由電子によってもたらされることが放射光実験と第一原理計算実測できた(研究成果: 筆頭, 責任著者論文 *Advanced Materials* 35.39 (2023): 2303646). 申請書に記載通り, このP-N接合の非線形電子特性は, 特にメモリセルの三次元クロスポイント構造において, PCRAMデバイスのセレクト材として機能し, その利点をもたらす可能性がある[3, 4]. Hughesらは, イオン注入によってN型アモルファスPCMを開発することに成功している. 一方で, 今回の研究におけるNbTe₄は, 相変化のみで同一のPCM内で固有のCTR挙動を示すことが確認されている. メモリデバイスにおいて, 相変化はメモリ層の一部の体積でのみ発生することがよく知られている. このN型アモルファスマトリックスと相変化させたP型結晶NbTe₄の界面を利用することで, 追加のセレクト材なしで自己選択型メモリデバイスの実現が期待される. そこで, アモルファスマトリックスの一部を結晶化させるために電圧パルス(50 ns, 1 V)を印加し, セット(一部結晶)状態でI-V特性を測定したメモリデバイスを図1Bに示している. 図1Bに明確に示されているように, アモルファス/結晶NbTe₄界面においてP-N接合が形成され, 整流的なI-V挙動が確認されている. その選択性(非線形I-VのON/OFF比)は約10²と測定されており, よく知られているオボニック閾値スイッチング(OTS)セレクト材と匹敵する[5]. このP-N接合ベースのセレクト材のスイッチング速度は, パルスI-V特性によりメモリのスイッチング速度に匹敵する20 nsと確認された(図1C). したがって, NbTe₄ PCMは, セレクト材を必要としない高度にスケーラブルなPCRAMデバイスのための新たな戦略を提供している.

続いて, 上述のユニークなN型導電タイプを解明するため, 令和5年度にアモルファスNbTe₄の伝導メカニズムを系統的に調査し, 顕著な温度依存性が明らかになった. 300 K以下ではホッピング伝導が全体の伝導を支配し, 約80 KでMott-VRHからES-VRHへの明確な転移が観測された. 室温(300 K)以上では, 熱励起されたバンド伝導(BC)が顕著となる. キャリア伝導の活性化エネルギーは0.15 eVであり, 価電子帯端(VBM)はフェルミ準位の0.02 eV下に位置しており, 価電子帯近傍にテール状態が存在することを示している. アモルファスNbTe₄の光吸収係数から算出さ

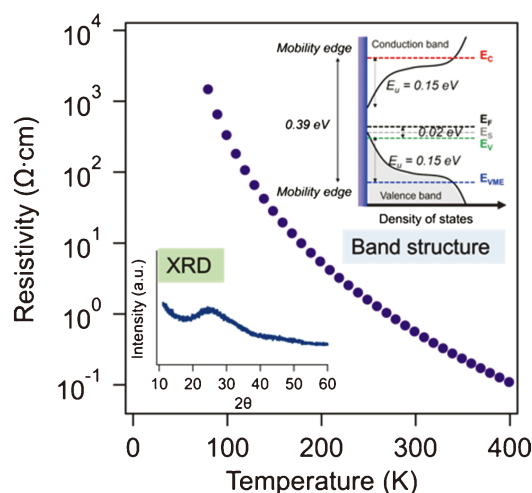


図2 アモルファスNbTe₄の抵抗率-温度依存性. (オンラインカラー)

れたテールエネルギー, すなわち移動度エネルギーは0.15 eVであり, これは活性化エネルギーと一致する. この顕著なテール状態の存在は, フェルミ準位がバンドギャップの中央付近にピン止めされている可能性を示唆している. このピン止め効果が, ホール測定において観測されたN型キャリア挙動やホール符号異常の発生に寄与している(図2).

アモルファスNbTe₄の伝導メカニズムを詳細に探ることで, その電子的特性に対する理解が深まり, 電子デバイスへの応用に向けた新たな洞察が得られる. (研究成果: 筆頭, 責任著者論文 *Materials Transactions* 65, 9(2024), 1061-1066)

参考文献

- (1) A. V. Kolobov, *Journal of Non-Crystalline Solids* **198-200**, 728 (1996).
- (2) M. A. Hughes, Y. Fedorenko, B. Gholipour, J. Yao, T. H. Lee, R. M. Gwilliam, K. P. Homewood, S. Hinder, D. W. Hewak, S. R. Elliott, and R. J. Curry, *Nature Communications* **5**, (2014).
- (3) B. H. Mun, B. K. You, S. R. Yang, H. G. Yoo, J. M. Kim, W. I. Park, Y. Yin, M. Byun, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *ACS Nano* **9**, 4120 (2015).
- (4) Y. Shuang, S. Hatayama, J. An, J. Hong, D. Ando, Y. Song, and Y. Sutou, *Scientific Reports* **9**, 20209 (2019).

- (5) A. Velea, K. Opsomer, W. Devulder, J. Dumortier, J. Fan, C. Detavernier, M. Jurczak, and B. Govoreanu, *Scientific Reports* 2017 7:1 7, 1 (2017).

4. 成果の発表

大会発表

- (1) 双 逸, 接触抵抗変化メモリの開発, 日本金属学会 2022秋期第171回講演大会, 福岡, 2022.9.23
- (2) 双 逸, 酸素ドーパントによる CrN 薄膜の P-N 変換とその熱電材料への応用, 日本金属学会2022春期第172回講演大会, 2023.3.8

Materials Transactions 投稿

- (3) Yi Shuang et al, Conduction Mechanism in Amorphous NbTe₄ Thin Film, *Materials Transactions* 2024年65巻9号 p.1061-1066

他の学術論文

- (4) Yi Shuang et al, NbTe₄ Phase-Change Material: Breaking the Phase-Change Temperature Balance in 2D Van der Waals Transition-Metal Binary Chalcogenide, *Advanced Materials* 35.39 (2023): 2303646.
- (5) Yi Shuang et al, Direct observation of phase-change volume in contact resistance change memory using N-doped Cr₂Ge₂Te₆ phase-change material, *Applied Physics Letter* 124, 061907 (2024)

5. 本研究終了後の計画等

本研究は材料科学, 半導体工学, デバイスプロセス技術を横断し, 学際的に展開するつもりである. 新型セレクトラフリー相変化メモリとし, フォトリソグラフ技術を用いた最適構造設計や, 電極材料設計に関しても考慮しながら研究を進める. さらに, デバイスの動作特性を評価し, 実用化を目指した研究に取り組む. 本研究では, 世界初の自己選択特性を持つ相変化メモリを提案するものであり, その PCM の伝導タイプ変化^oの起因を探究した上で, 新たな相変化材料群を創成することで, 従来のカルコゲナイド系相変化材料の枠を拡大させる. 将来, その新奇な P, N 伝導機構変化型 PCM を利用し, 相変化メモリへの応用のみならず, 熱電・光電子デバイスとしての幅広い応用も大きく期待できる. また, 日本学術振興会の科研費や, 他の民間財団からの研究助成を申請する予定である.

6. 研究代表者: 双 逸(Shuang Yi)

(東北大学材料科学高等研究所 助教)

7. 共同研究者(研究実施者) 該当しない

「複相合金の強加工メカニカルアロイングで作製したナノ結晶 Cu-Zr 過飽和固溶体合金の時効硬化挙動と極限的高強度化」

1. 研究期間: 2022年4月~2024年3月(2年間)

2. 研究の概要

Cu-Zr 合金では Cu 相への Zr 原子の最大固溶限は共晶温度で約 0.12 at.% でありほとんど固溶しない⁽¹⁾. また Cu 相と Cu₅Zr 相の共晶組成は 7.2 at.% であり, 亜共晶 Cu-2.7

at.%Zr 合金鑄造材では図1に示すような初晶 Cu 相と網目状に発達した共晶からなる複相組織を呈している. 研究代表者らの研究において, この亜共晶 Cu-2.7 at.%Zr 合金に巨大ひずみ加工(Severe Plastic Deformation: SPD)の一種である高圧ねじり(High-Pressure Torsion: HPT)加工を施すと, Cu₅Zr 相が分解して Cu 相への Zr 原子のメカニカルアロイングが生じた⁽²⁾. 最終的にはほぼ単相となり, 硬度 430 HV, 電気伝導率 8% IACS を示した平均結晶粒径 15 nm のナノ結晶単相 Cu-Zr 過飽和固溶体合金が形成された⁽²⁾.

本研究課題では, このナノ結晶単相 Cu-Zr 過飽和固溶体合金に対して熱処理を施し, さらなる高硬度・高強度化, 高導電性化, そして熱的安定性の向上の実現を目的とする. HPT メカニカルアロイング後の合金には, ナノ結晶レベルの結晶粒微細化強化, 転位強化及び固溶強化が同時に施されており, この状態に対してさらに析出強化を行うため, 既存の Cu 合金では実現できない極限レベルの高強度化の実現が期待される. また第2相の析出によって導電性も改善されるため, 高強度化と高導電性化の両立の実現も見込める. さらに Zr 元素は, 主要な添加元素の中でも Cu 相の回復や再結晶温度を格段に上昇させる元素であるため, 熱的安定性の向上も期待できる. 本研究課題の実施状況・成果等の概要を以下に記す.

3. 研究実施の概要(実施状況・研究成果等)

Cu-2.7 at.%Zr 合金鑄造丸棒材から切り出した円板形状試料を作製し, この試料に対して HPT 加工を50回転施した. HPT 加工材に対して, 最高で815℃までの温度域で1時間の当時焼鈍を真空中で施した. ビッカース微小硬度試験, 引張試験, 電気伝導率測定により機械的性質及び電気伝導率を調べた. 電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM)および透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて, 試料断面の微細組織観察を行った. X線回折装置を用いて各試料の格子定数および転位密度を求めた.

ビッカース微小硬度は, 焼鈍温度295~585℃において HPT まま材よりも顕著に上昇し, 405℃焼鈍材で最高硬度の 547 HV を示した. 600℃以上になると硬度は顕著に低下

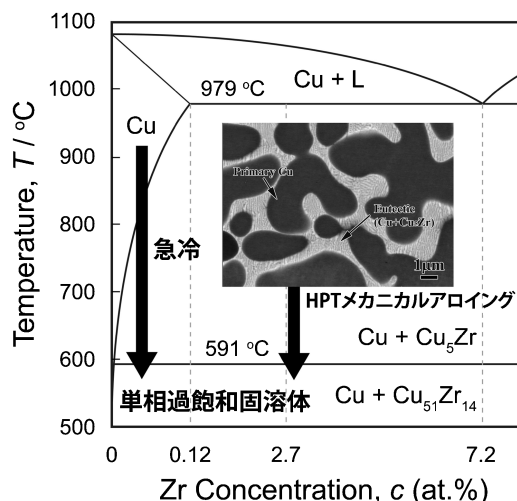


図1 Cu-Zr 合金の2元系状態図と単相過飽和固溶体合金の作製手順を示した概念図.

し始めたが、700℃程度においても硬度は鋳造材よりも高く、また93%一方向圧延材と同程度の250 HV程度を依然として保っていた。引張強度は焼鈍によってHPTまま材のそれよりも低下し、焼鈍温度560℃以下では、1000–1400 MPaの弾性域で脆性的に破断した。615℃以上になると塑性変形し、強度は93%一方向圧延材と同程度の800 MPa程度となった。電気伝導率は、焼鈍温度510℃以上になると著しく上昇し、815℃で最高値の63%IACSとなった。焼鈍による電気伝導率の上昇は、鋳造材の網目状共晶組織を、HPTメカニカルアロイングと焼鈍によって第2相であるCu₅Zr相を球状粒子型に形態変化させたことに起因する。これらの要点をまとめると以下のように要約される。

- ① 400℃程度の熱処理により547 HVの極限の高硬度ナノ結晶Cu-Zr合金が得られた。しかしながら塑性変形能がほぼ無いため、今後は塑性変形能の改善を試み、硬度に見合った引張強度を引き出すことを試みるとともに、更なる高硬度・高強度Cu合金の開発を進める。
- ② 600–800℃程度の熱処理により、強度・延性・電気伝導率のバランスの良い完全再結晶複相超微細結晶粒Cu-Zr合金が得られた。この材料に関しては、既存の理論体系により材料特性が良く説明できるため、早急に論文にまとめて報告する予定である。
- ③ ナノ結晶単相Cu-Zr過飽和固溶体合金の再結晶温度は660℃であり、通常の固溶体合金であるCu-0.05 at.%Zr合金の再結晶温度である500℃⁽³⁾より顕著に改善された。今後は更に熱的安定性の優れたナノ結晶Cu合金の開発を進める。

参考文献

- (1) K. Nakashima, K. Miyamoto, T. Kunimine, R. Monzen, N. Muramatsu: J. Alloys Compd., **816** (2020), 152650, 1–6.
- (2) K. Miyamoto, T. Kunimine, C. Watanabe, R. Monzen, R. Gholizadeh and N. Tsuji: Mater. Trans., **64** (2023), 2708–2713.
- (3) 堀茂徳, 田井英男, 片山博彰: 日本金属学会誌, **45** (1981), 1223–1228.

4. 成果の発表

【学会発表】

- [1] 「高圧ねじり加工で作製したナノ結晶Cu-2.7 at.%Zr過飽和固溶体合金の機械的性質」, 稲村岳士, 宮本健太, 國峯崇裕, ゴリザデー レザ, 辻 伸泰, 『日本金属学会』, 2022年9月
- [2] 「強加工メカニカルアロイングで作製したナノ結晶Cu-2.7 at.%Zr過飽和固溶体合金の低温引張変形挙動」, 國峯崇裕, 宮本健太, 稲村岳士, 門前亮一, ゴリザデー レザ, 辻 伸泰, 『日本金属学会』, 2024年3月
- [3] 「高圧ねじり加工で作製したナノ結晶Cu-2.7 at.%Zr過飽和固溶体合金における等時焼鈍に伴う微細組織, 機械的性質及び電気伝導率の変化」, 國峯崇裕, 稲村岳士, 西川直也, ゴリザデー レザ, 辻 伸泰, 『日本金属学会』, 2024年9月

- [4] “Tensile Deformation Behavior of a Nanocrystalline Cu-2.7 at.%Zr Supersaturated Solid-Solution Alloy Processed by the High-Pressure Torsion”, Takahiro Kunimine, Kenta Miyamoto, Ryoichi Monzen, Reza Gholizadeh and Nobuhiro Tsuji: TMS2024, 153rd Annual Meeting & Exhibition, Orlando, Florida, USA. (March 3–7, 2024)
- [5] “Influence of Annealing Atmosphere on Microstructural Evolution and Variations in Mechanical Properties and Electrical Conductivity during Isochronal Annealing in a Nanocrystalline Cu-Zr Alloy”, Takahiro Kunimine, Takeshi Inamura, Shuhei Yamaguchi, Naoya Nishikawa, Reza Gholizadeh and Nobuhiro Tsuji: TMS2025, 154th Annual Meeting & Exhibition, Las Vegas, Nevada, USA. (March 23–27, 2025) scheduled.

【論文】

- [1] “Mechanical Dissolution of Cu₅Zr Phase and Formation of Supersaturated Solid-Solution Nanocrystalline Structure by High-Pressure Torsion in a Hypoeutectic Cu-2.7 at.%Zr Alloy”, Kenta Miyamoto, Takahiro Kunimine, Chihiro Watanabe, Ryoichi Monzen, Reza Gholizadeh and Nobuhiro Tsuji: Materials Transactions 64 (2023) pp. 2708–2713.
- [2] “Morphological Evolution of Eutectic and Electrical Conductivity in a Hypoeutectic Cu-2.7 at.%Zr Alloy Deformed by Unidirectional- and Cross-Rolling”, Kaito Ebihara, Takeshi Inamura, Naokuni Muramatsu, Ryoichi Monzen and Takahiro Kunimine: Materials Transactions 65 (2024) in press.
- [3] “高圧ねじり加工で作製したナノ結晶Cu-2.7 at.%Zr過飽和固溶体合金における等時焼鈍に伴う微細組織, 機械的性質及び電気伝導率の変化”, 日本金属学会誌, 國峯崇裕, 他. 投稿予定.

【特許申請】

- [1] Cu-Zr合金材及び高強度Cu-Zr合金材並びにその製造方法, 発明者: 國峯崇裕
出願人: 国立大学法人 金沢大学 特願2022-116610
特開2024-014052

5. 本研究終了後の計画等

現在, 2024–2026年度 科研費 基盤研究(C) (研究課題名: ナノ結晶・非晶質Cu-Zr過飽和固溶体合金の時効析出による極限の高強度化と学理探求)により, 本研究の継続課題を実施している。

6. 研究代表者: 國峯崇裕

(金沢大学 理工研究域 機械工学系・准教授)

7. 共同研究者(研究実施者)

稲村岳士(金沢大学 大学院自然科学研究科 機械科学専攻・大学院生)

海老原魁人(金沢大学 大学院自然科学研究科 機械科学専攻・大学院生)

山口修平(金沢大学 大学院自然科学研究科 機械科学専攻・大学院生)