

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01743

研究課題名（和文）新規高強度-高導電性銅合金群創製のための指導原理

研究課題名（英文）Principles for developing high-strengthened and high-conductive copper alloys via over-aging and severe deformation processing

研究代表者

千星 聡（SEMBOSHI, Satoshi）

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：00364026

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：析出強化型銅合金において、強度特性を著しく劣化させる因子として敬遠されてきた組織形態（過時効処理により生成される不連続析出物）を積極的に活用するという着想により、従来材よりも強度と導電性の両方で卓越した線材を創製できる新規プロセス（過時効-強加工プロセス）を開発した。特に、過時効-強加工プロセスにともなう銅合金の組織形態の変化に及ぼす合金系、合金組成、過時効材の組織、伸線加工条件の影響を系統的に評価することにより、特性発現に関する組織学的支配因子を明確化することができた。得られた知見より、高強度-高導電性銅合金群の創製に資する新規の組織制御法の可能性と方策を明示することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1) 過時効材の活用：今まで工業的素材として注目されていなかった過時効材を積極的に活用した新規の組織制御法を示すことができた。このため得られた成果は斬新で独自性が高い。(2) 指導原理の構築：本研究にて合金系、合金組成、過時効材の組織、加工条件の影響を系統的に検討したことにより、高強度-高導電性銅合金を作製するための指導原理が提案できた。本成果は新規の材料開発に貢献する創造的なものといえる。(3) 産業界への波及性：本研究により特徴的な特性を有する銅合金線材、薄板材が試作できた。今後、コイル・モーター巻き線、ピックアップワイヤ、導電性板パネ、リードフレームなどへの用途展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：We were interested in discontinuous precipitates appeared in some over-aged copper alloys, which has been avoided as a factor that significantly deteriorates strength properties. Based on the microstructural controlling via over-aging and severe deformation process, we have developed the conductive wires and sheets with excellent mechanical properties. We also revealed how the composition, over-aged microstructure, and deformation conditions influenced on the changes in the microstructural morphology and the properties such as hardness, strength, and electrical conductivity of the copper alloys. Behalf of the findings obtained, we were able to clarify the possibility and policy of a new microstructural control method that contributes to the creation of a group of high-strength and high-conductivity copper alloys.

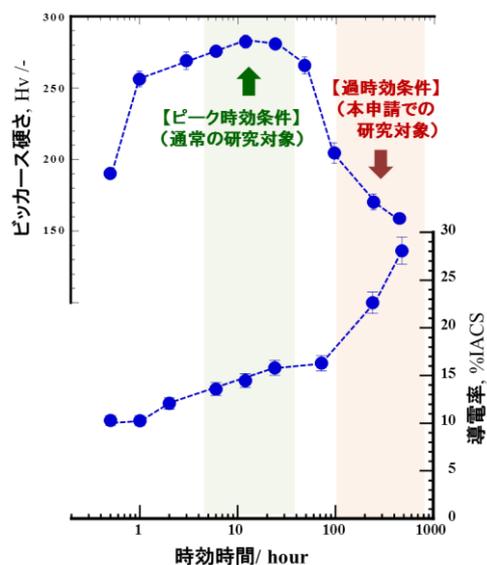
研究分野：金属組織制御

キーワード：金属組織 材料加工プロセス 銅合金 状態図 熱処理 強度 導電性 透過型電子顕微鏡

## 1. 研究開始当初の背景

電気・電子分野では機器の小型化や効率化のニーズに呼応するために、電子部品や実装配線などを構成する銅合金線材/薄板材の高強度化、高導電率化が重要である。従来までは通電用接点材料として比較的 low コストである固溶強化型合金（黄銅，リン青銅系など）が汎用されてきたが，最新のモバイル機器端末では多少高価でも強度-導電性バランスに優れた析出強化型合金（Cu-Be，Cu-Ti，Cu-Ni-Si 系）が使用されている。しかしながら，時効析出型銅合金の開発では既成の合金設計と組織制御法から大きく脱却できないままにしている現状があり，飛躍的な特性改善が長い間達成されていない。

図 2 には，Cu-Ti 合金を等温時効処理（以後，単に「時効」）した時の典型的な硬さと導電率の変化を示す。通常，析出強化型 Cu-Ti 合金線材/薄板材は強度重視の部位に利用されるので，強度が最高になるピーク時効材が利用される。一方，過時効した合金は強度が著しく低下するため，これまで積極的に利用されることはなかった。ここで，申請者等は Cu-Ti 合金過時効材を強加工（伸線加工）することにより，従来のピーク時効-強加工材より高強度の線材が得られることを見出した。過時効材はもともとピーク時効材よりも導電率が高いため，結果として，実用銅合金において最高レベルの強度-導電性バランスをもつ Cu-Ti 合金線材を試作することに成功した（図 1）<sup>[1]</sup>。しかしながら，本研究は探索的な試料作製による特性評価と実践的な技術課題の解決に終止しており，「過時効-強加工プロセスにともないどのような組織変化が起きているのか」，「組織変化や強度，導電性はどのように制御できるのか」，「どのような合金系が適用可能なのか」に関する基礎的知見が欠落したままであった。



【Fig. 1】 Variations of hardness and electrical conductivity for Cu-4 at.% Ti alloys isothermally aged at 450 °C.

## 2. 研究の目的

上記の背景のもと，本研究では，過時効処理と強加工（伸線加工）を融合させた新規のプロセスにともなう各種銅合金の組織変化と特性向上の機構を解明し，従来材の強度-導電性バランスを凌駕する銅合金線材/薄板材を創製するための指導原理を構築することを研究目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3.1 過時効-強加工プロセスによる Cu-Ti 合金線材の組織と特性向上の機構解明

過時効-強加工（伸線加工）プロセスによる組織制御の指導原理を構築するための基盤となる学術的知見を獲得する。これを達成するために，Cu-Ti 合金にて組成や過時効条件を制御することにより過時効組織を変化させ，それが伸線加工後の特性に及ぼす影響を把握した。ここで実施した実験手順を下記する。

- (1) 種々の Ti 組成（1～6 at.%）の Cu-Ti 合金棒材（φ 3.0 mm）を準備した。棒材試料を溶体化後に，等温相変態線図（TTT 線図）を参考に多段で過時効し，組織形態を変化させた試料を作製した。
- (2) 棒材試料を冷間にて種々の加工率（最小径 φ 0.1 mm 程度）まで強伸線加工した。

- (3) 過時効-伸線加工にともなう組織形態の変化を回折法，電子顕微鏡観察法，抽出分離法，3D-APT によりマクロからナノの多角的視点で系統的かつ定量的に追跡した。
- (4) 時効および伸線加工した試料を硬さ試験，引張試験，導電率測定に供して，材料の機械的・電気的特性を評価した。
- (5) (1)–(4)で得られたデータより強化への因子（分散強化，固溶強化，加工強化，結晶粒微細化強化），導電率への因子（固溶度，析出物の体積分率，サイズ・形状，分散状態）の寄与を検討した。

### 3.2 高強度-高導電性銅合金線材を創製するための指導原理の確立

Cu-Ti 合金だけでなく Cu-Ni-Si, Cu-Be, Cu-In 系合金などの実用銅合金でも過時効処理により不連続析出物が生成し，過時効条件次第でその生成率を比較的自由に制御できる。本研究では，幾つかの銅合金に過時効-強加工プロセスを適用することにより，Cu-Ti 合金で提案した特性発現機構の知見の妥当性を検証した。各銅合金試料を前述した 1)–5) のフローにて研究を遂行し，各合金系で共通する，あるいは個別の特徴を比較検討した。幾つかの銅合金系で獲得した知見の普遍性と特異性を包括して，高強度-高導電性銅合金線材を創製するための指導原理を構築することを目指した。

## 4. 研究成果

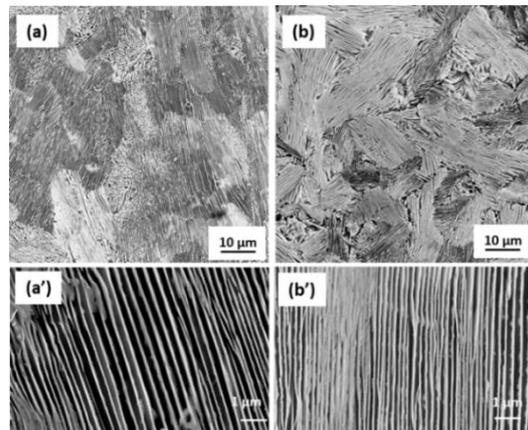
### 4.1 過時効-強加工プロセスによる Cu-Ti 合金線材の組織と特性向上

Fig. 2 に多段階時効した Cu-2.7 at.% Ti および Cu-4.3 at.% Ti 合金の横断面組織を示す。どちらも試料全体を板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相と Cu 相が積層したラメラ組織が試料全面を占有する。ラメラ組織の積層配向はランダムで，板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti の厚さは 100 nm~200 nm と大差がないが，平均ラメラ層間隔は Cu-4.3 at.% Ti 合金の方が Cu-2.7 at.% Ti 合金より狭い。

抽出分離法にて多段階時効棒材の Cu 相と  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相中の Ti 濃度，および  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相の体積分率を測定したところ，Cu-(2.7~4.3) at.% Ti のいずれの合金でも Cu および  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相中の Ti 濃度はほぼ一定であるが， $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相の体積分率は合金の Ti 組成にともない 8 vol.% から 20 vol.% まで単調に増加した。Ti 組成にともなう  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti

相の体積分率の増加は Cu-Ti 二元系状態図から天秤の法則にて算出される値とよく一致する。これは，多段階時効にて試料が相平衡状態に達したことを示唆している。

Fig. 3 に多段階時効した Cu-2.7 at.% Ti および Cu-4.3 at.% Ti 合金を伸線加工したときの横断面組織像を示す。どちらの試料も伸線加工の初期段階ではラメラ組織の積層方向が伸線方向に対して垂直に揃いだし，次に板状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti の厚さや間隔が減少し， $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti が湾曲し始める。さらに伸線加工すると  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti は分断されファイバー状になる。さらに伸線加工をすすめると，ファ



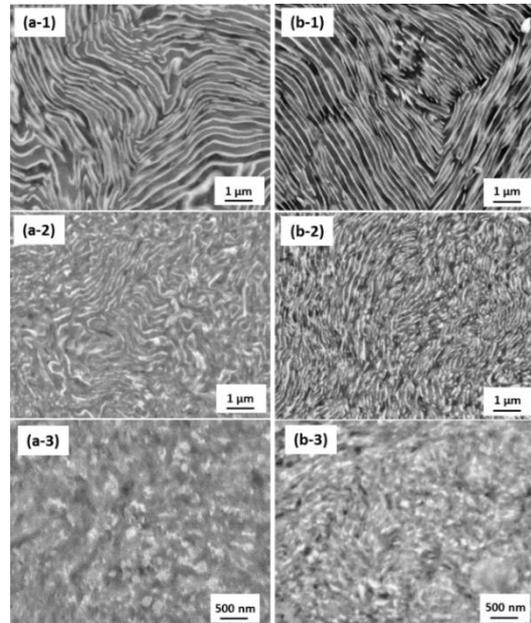
【Fig. 2】 Fig. 1 Cross-sectional FESEM micrographs of (a) Cu-2.7 at.% Ti, and (b) Cu-4.3 at.% Ti alloy sticks (3 mm diameter) that were fully over-aged in multiple steps. High-magnification micrographs of the lamellae nearly parallel to the cross-section are shown in (a') and (b'), in which the darker and brighter areas correspond to the matrix of the Cu solid solution and discontinuous precipitates of  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti, respectively.

イパー状  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti が微細化されるため観察が不明瞭になる．以上のような伸線加工にともなう  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti の形態変化は Cu-(2.7~4.3) at.% Ti 合金のいずれでも同様であるが，Ti 組成が大きい試料ほど  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti の体積分率が大きくなるため，ナノファイバーが高密度に形成される．

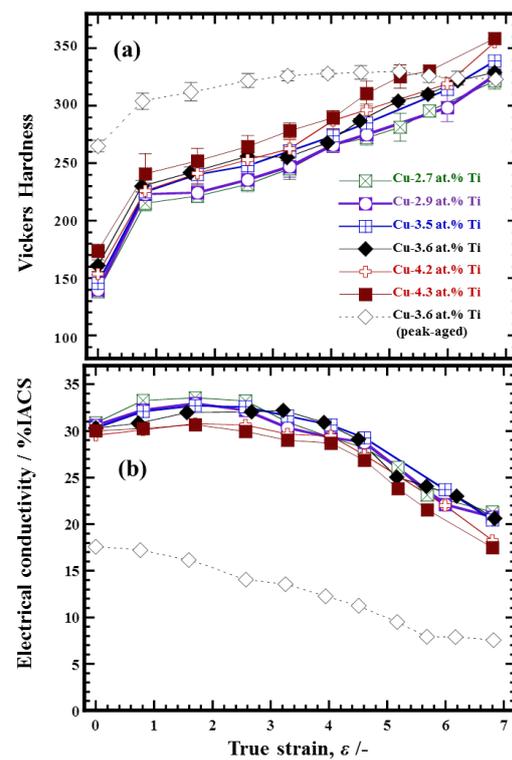
Fig. 4 に多段階時効した Cu-(2.7~4.3) at.% Ti 合金を伸線加工したときの加工度にもなうビッカース硬さおよび導電率の変化を示す．ここで，加工度は真ひずみ  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \ln(d_0/d)$ ,  $d_0, d$  は伸線加工前後の試料の直径) で示す．また，比較のためピーク時効，過時効した Cu-3.6 at.% Ti 合金のデータも付記する．いずれの合金組成でも， $\varepsilon = 4.0$  ( $d = 0.4$  mm) までは硬さは比較的緩やかに増加するが，それ以降では加工にともなう硬さは顕著に増加し， $\varepsilon = 6.8$  ( $d = 0.1$  mm) 以降ではピーク時効材と同等以上になる．Ti 組成が大きいほど硬さが増加する傾向がある．また，いずれの合金組成でも導電率は伸線加工前は 30% IACS であり，加工度  $\varepsilon = 4.0$  ( $d = 0.4$  mm) までは僅かに増加する．それよりも伸線加工が進むと，導電率は徐々に低下するが，ピーク時効材の導電率 (最大 17% IACS) より高い値を示す．Ti 組成が大きいほど導電率は低下する傾向がある．

Fig. 5 に本研究で作製した線材および各種実用銅合金線材の引張強さー導電性の関係をまとめる．ここで，Fig. 5 にプロットされるデータは加工度  $\varepsilon = 4.6$  ( $d = 0.3$  mm) および 6.8 ( $d = 0.1$  mm) で伸線加工した線材の値を用いている．Fig. 5 では従来のピーク時効ー伸線加工プロセスで作製された Cu-Ti 合金線材よりも過時効ー伸線加工で作製した線材の方が強度ー導電性バランスに優れることが確認される．また，Ti 組成が高い線材ほど Fig. 5 では右上の位置にプロットされ，強度ー導電性バランスが改善されることが明示される．過時効ー伸線加工で作製した Cu-Ti 合金線材群は，強度ー導電性バランスでは実用銅合金中で最高レベルにあるといえる．

本研究より，合金の Ti 組成を制御すれば比較的広い範囲で強度ー導電性バランスを制御できることも示唆される．Cu-Ti 二元系状態図では Cu に対する Ti の最大固溶度は 5 at.% である．例えば，最大固溶限の組成を持つ合金線材を過時効-伸線加工プロセスに供すれば，



【Fig. 3】 Cross-sectional micrographs of (a) Cu-2.7 at.% Ti and (b) Cu-4.3 at.% Ti wires that were over-aged and then drawn to a true strain of 1.6 (1.28 mm diameter of upper row), 3.2 (0.58 mm diameter of middle row), and 4.5 (0.3 mm diameter of lower row).



【Fig. 4】 Variations of (a) Vickers hardness and (b) electrical conductivity of Cu-(2.7 to 4.3) at.% Ti wires drawn from over-aged alloy sticks as a function of true strain, together with the data for Cu-3.6 at.% Ti wires drawn from peak-aged alloy sticks7).

引張強さ 1500 MPa—導電率 27% IACS をもつ線材（加工度  $\varepsilon = 4.6$ ）、あるいは引張強さ 1900 MPa—導電率 17% IACS を示す線材（加工度  $\varepsilon = 6.8$ ）の実現が予想される。今後、合金組成だけでなく加工・時効工程を精査すれば、更に高性能な合金線材が実現する可能性は高い。

#### 4.2 高強度-高導電性銅合金線材を創製するための指導原理

Cu-Ti 合金だけでなく Cu-Ni-Si, Cu-Be, Cu-In 系合金などの実用銅合金でも過時効処理により不連続析出物が生成させ、その後に強伸線加工による不連続析出物のナノファイバー化による高強度化を試みた。Cu-Ni-Si 合金では過時効処理で生成される不連続析出物の形態が既にファイバー状であり、その後に強伸線加工では強化の度合いは小さかった（引張強度： $<1000$  MPa）。Cu-Be および Cu-In 系合金では過時効処理で試料全面に不連続析出物を生成すると、その後の伸線加工で細線試料を作製するまでに加工性不足から破断が起きる。先行事例の Cu-Cr, Cu-Ag 線（どちらも共晶反応を利用した In-situ composite 材を強伸線加工）を加味すると、二相組織材料を強伸線加工に供して高強度銅合金線材を創製するためには、以下のことが基本方針となると提案できる。

(1) 伸線加工前材（In-situ composite 材）に求められる組織および特性

- ① 強伸線加工できる十分な加工性を有すること。そのために、第二相は十分な変形能があること、銅母相と第二相は整合性が高く相間で破断が起きにくいことが重要となる。
- ② 高導電性であること。特に、銅母相中の溶質濃度が低くなるように前工程までの熱加工プロセスにて組織制御されていることが望ましい。第二相の導電率も高いことが望ましい。第二相の導電性が低い場合は体積分率等で調整する必要がある。
- ③ 第二相が高密度分散していること。第二相の形態は層状であることが望ましい。積層間隔が狭く、体積分率が大きいほど伸線加工後の線材の強度が向上できる

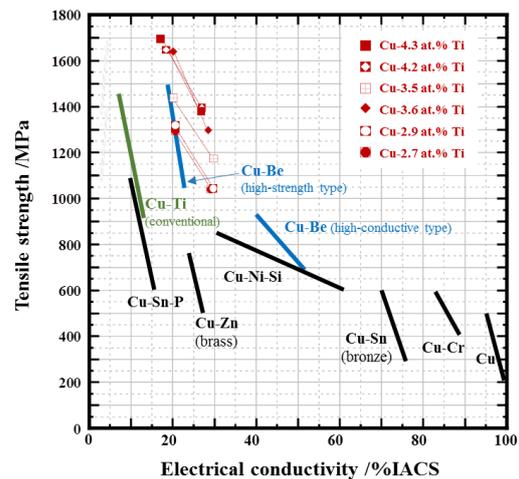
(2) 伸線加工時に求められる条件

加工発熱が抑制されること。潤滑油が不適切であったり、ダイス伸線加工時での加工ひずみ量が大きい場合は加工発熱により動的回復、動的再結晶、第二相の母相への再固溶が起り、強度特性の効率的な向上抑制されたり導電率の顕著な低下が引き起こされる。

(3) その他

多くの銅合金では、強加工後に本時効条件よりも低い温度にて短時間の時効処理で強化および高導電率化が起こることが報告されている（所謂“低温時効硬化現象”）。本技術を併用することにより更に高強度—高導電性の線材を得ることも可能である。

以上の基本指針を元に、現在では Cu-Ni-Al 合金、Al-Li 合金、Al-Zn 合金にて高強度線材の試作を進めており、顕著な高強度化が見られている。線材だけでなく薄板材製造にも本研究の成果を展開させている。その結果、Cu-Ti 合金では従来のピーク時効薄板材と同等の強度でありながら導電性が 2~3 倍に向上した過時効薄板材が得られている。以上は、本研究の成果が多種の合金系素材の開発に重要な貢献を果たす可能性を示唆している。



【Fig. 5】 Relationship between the tensile strength and electrical conductivity of Cu-(2.7 to 4.3) at.% Ti wires fabricated in this study (data from Fig. 8) compared to commercial Cu-based alloy wires.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 29件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 S. Semboshi, R. Hariki, T. Shuto, H. Hyodo, Y. Kaneno, N. Masahashi	4. 巻 52A
2. 論文標題 Age-induced precipitating and strengthening behaviors in a Cu-Ni-Al alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 4934-4945
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11661-021-06435-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Masahashi, Y. Mori, H. Kurishima, H. Inoue, T. Mokudai, S. Semboshi, M. Hatakeyama, E. Itoi, S. Hanada	4. 巻 543
2. 論文標題 Photoactivity of an anodized biocompatible TiNbSn alloy prepared in sodium tartrate / hydrogen peroxide aqueous solution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 148829
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.assusc.2020.148829	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Hanada, N. Masahashi, S. Semboshi, T.K. Jung	4. 巻 802
2. 論文標題 Low Young's modulus of cold groove-rolled beta Ti-Nb-Sn alloys for orthopedic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science & Engineering A	6. 最初と最後の頁 140645
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.msea.2020.140645	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Nagase, A. Shibata, M. Matsumuro, M. Takemura, S. Semboshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Fabrication of the Casting Products in Cu-Zn-Mn-Ni Medium-Entropy Brasses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 856-863
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MT-M2020259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R.Y. Umetsu, S. Semboshi, Y. Mitsui, H. Katsui, Y. Nozaki, I. Yuitoo, T. Takeuchi, M. Saito, H. Kawarada	4. 巻 62
2. 論文標題 Microstructure, Morphology and Magnetic Property of (001)-Textured MnAlGe Films on Si/SiO <sub>2</sub> Substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 680-687
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 姜婉青, 兵藤宏, 渡辺宏治, 成枝宏人, 千星聡	4. 巻 60
2. 論文標題 エッチング加工性に優れた Cu-Ni-Co-Si 系高強度銅合金の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 銅と銅合金	6. 最初と最後の頁 256-261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34562/jic.60.1_256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Semboshi Satoshi, Nakamura Hiroshi, Kawahito Yosuke, Kaneno Yasuyuki, Takasugi Takayuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Unidirectional Crystal Orientation of Dual-Phase Ni <sub>3</sub> Al-Based Alloy via Laser Irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1011 ~ 1011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met10081011	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 Saito Kaichi, Suzuki Makio, Semboshi Satoshi, Sato Katsuhiko, Hayasaka Yuichiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Isothermal Aging Behaviors of Copper-Titanium-Magnesium Supersaturated Solid-Solution Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1912 ~ 1921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okitsu Kenji, Semboshi Satoshi	4. 巻 69
2. 論文標題 Synthesis of Au nanorods via autocatalytic growth of Au seeds formed by sonochemical reduction of Au(I): Relation between formation rate and characteristic of Au nanorods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ultrasonics Sonochemistry	6. 最初と最後の頁 105229 ~ 105229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultsonch.2020.105229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Semboshi Satoshi, Kaneno Yasuyuki, Takasugi Takayuki, Masahashi Naoya	4. 巻 51
2. 論文標題 Suppression of Discontinuous Precipitation in Cu-Ti Alloys by Aging in a Hydrogen Atmosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 3704 ~ 3712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-020-05801-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato Hikaru, Semboshi Satoshi, Kaneno Yasuyuki, Takasugi Takayuki	4. 巻 51
2. 論文標題 Effects of Iron Addition on the Microstructures and Mechanical Properties of Two-Phase Ni3Al-Ni3V Intermetallic Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 2469 ~ 2479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-020-05680-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sueyoshi Tetsuro, Kotaki Tetsuya, Furuki Yuichi, Fujiyoshi Takanori, Semboshi Satoshi, Ozaki Toshinori, Sakane Hitoshi, Kudo Masaki, Yasuda Kazuhiro, Ishikawa Norito	4. 巻 59
2. 論文標題 Strong flux pinning by columnar defects with directionally dependent morphologies in GdBCO-coated conductors irradiated with 80 MeV Xe ions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 023001 ~ 023001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab6f2b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Tomoko, Fukuda Kengo, Semboshi Satoshi, Saitoh Yuichi, Amekura Hiroshi, Iwase Akihiro, Hori Fuminobu	4. 巻 31
2. 論文標題 Control of optical absorption of silica glass by Ag ion implantation and subsequent heavy ion irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 455706 ~ 455706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/abaadf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S.Z. Han, S. Semboshi, J. H. Ahn, E.-A. Choi, M. Cho, Y. Kadoi, K. Kim	4. 巻 99
2. 論文標題 Accelerating heterogeneous nucleation to increase hardness and electrical conductivity by deformation prior to aging for Cu-4 at.% Ti alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Philosophical Magazine Letter	6. 最初と最後の頁 275-283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09500839.2019.1670879	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Ioroi, Y. Kaneno, S. Semboshi, T. Takasugi	4. 巻 34
2. 論文標題 Microstructures and tensile properties of off-stoichiometric Ni3Al-Ni3V pseudo-binary alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research	6. 最初と最後の頁 3061-3070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/jmr.2019.269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Nagase, A. Shibata, M. Matsumuro, M. Takemura, S. Semboshi	4. 巻 181
2. 論文標題 Alloy design and fabrication of ingots in Cu-Zn-Mn-Ni-Sn high-entropy and Cu-Zn-Mn-Ni medium-entropy brasses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials and Design	6. 最初と最後の頁 107900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2019.107900	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 S. Semboshi, Y. Kaneno, T. Takasugi, S.Z. Han, N. Masahashi	4. 巻 50
2. 論文標題 Effect of composition on the strength and electrical conductivity of Cu-Ti binary alloy wires fabricated by aging and intense drawing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 1389-1396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-018-5088-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Semboshi, R. Sasaki, Y. Kaneno, T. Takasugi	4. 巻 9
2. 論文標題 Age-induced Precipitation and Hardening Behavior of Ni3Al Intermetallic Alloys Containing Vanadium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met9020160	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 千星 聡, 正橋 直哉, 金野 泰幸, 高杉 隆幸, S.Z. Han	4. 巻 58
2. 論文標題 Cu-Ti合金線材の組織、強度および導電性に及ぼす合金組成の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 銅と銅合金	6. 最初と最後の頁 86-91
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Semboshi, T. Takeuchi, Y. Kaneno, A. Iwase, T. Takasugi	4. 巻 92
2. 論文標題 Thermal conductivity of Ni3(Si,Ti) single-phase alloys	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Intermetallics,	6. 最初と最後の頁 119-125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.intermet.2017.10.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Uekami, S. Semboshi, Y. Kaneno, T. Takasugi	4. 巻 59
2. 論文標題 Effects of W addition combined without and with Nb addition on microstructural development and hardening behavior of two-phase Ni <sub>3</sub> Al-Ni <sub>3</sub> V intermetallic alloys	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Transaction	6. 最初と最後の頁 204-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MC201702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Semboshi, M. Ishikuro, A. Iwase, T. Takasugi	4. 巻 59
2. 論文標題 Microstructural subsequence and phase equilibria in an age-hardenable Cu-Ni-Si alloy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Transaction	6. 最初と最後の頁 182-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MC201706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Ochi, H. Kojima, F. Hori, Y. Kaneno, S. Semboshi, Y. Saitoh, Y. Okamoto, N. Ishikawa, and A. Iwase	4. 巻 427
2. 論文標題 Effect of elastic collisions and electronic excitation on lattice structure of NiTi bulk intermetallic compound irradiated with energetic ions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B (NIMB)	6. 最初と最後の頁 14-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2018.04.035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Ochi, H. Kojima, K. Fukuda, Y. Kaneno, S. Semboshi, F. Hori, Y. Saitoh, A. Iwase	4. 巻 43
2. 論文標題 Thermal stability of irradiation-induced metastable lattice structures in NiTi intermetallic compound	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Materials Research Society of Japan (T-MRSJ)	6. 最初と最後の頁 53-56
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Semboshi, Y. Kaneno, T. Takasugi, N. Masahashi	4. 巻 49
2. 論文標題 High strength and high electrical conductivity Cu-Ti alloy wires fabricated by aging and subsequent severe drawing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions A	6. 最初と最後の頁 4956-4965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11661-018-4816-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中美樹, 山口拓人, 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸	4. 巻 82
2. 論文標題 レーザーメタルデポジションにより作製した炭化物粒子分散型Ni基金属間化合物合金肉盛層の組織と特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本金属学会誌	6. 最初と最後の頁 451-460
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 千星 聡, 金野 泰幸, 高杉 隆幸, 中吉 勲	4. 巻 57
2. 論文標題 高強度-高導電性Cu-Ti合金線材の作製	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 銅と銅合金	6. 最初と最後の頁 249-253
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 千星 聡, 金野 泰幸, 高杉 隆幸, 兵藤 宏, 須田 久	4. 巻 57
2. 論文標題 水素中時効によるCu-Ti合金中不連続析出物生成の抑制	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 銅と銅合金	6. 最初と最後の頁 53-58
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兵藤 宏, 須田 久, 成枝 宏人, 千星聡	4. 巻 57
2. 論文標題 熱加工プロセス条件の最適化によるCu-Ni-Co-Si系銅合金の高導電率化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 銅と銅合金	6. 最初と最後の頁 254-259
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計46件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 千星聡, 正橋直哉, 瀧藤優斗, 金野泰幸, 兵藤宏
2. 発表標題 高強度-高導電性Cu-Ti合金板箔材作製のための適切な加工熱処理工
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部泰寛, 千星聡, 正橋直哉
2. 発表標題 ラメラ組織制御したCu-In合金線材の強度と導電性
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒須望実, 千星聡, 亀岡聡
2. 発表標題 箔型Cu触媒材料の作製とその表面組織観察
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 E.-A. Choi, S.Z. Han, J.H. Ahn, S. Semboshi, J. Lee, S.H. Lim
2. 発表標題 Co effect in the precipitation behavior in Cu-Ni-Si alloy
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永瀬丈嗣, 柴田彰弘, 松室光昭, 武村守, 千星聡
2. 発表標題 等原子組成比CuSnZn, CuSnAl, CuSnZnAl合金の構成相と凝固組織
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠谷周平, 首藤俊也, 兵藤宏, 渡辺宏治, 成枝宏人, 千星聡, 宮本吾郎
2. 発表標題 VCM板ばね向け超高強度Cu-Ni-Al系合金の高強度発現メカニズム
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安野利希, 千星聡, 金野泰幸
2. 発表標題 Cu-Ni3Al擬二元系状態図の作成
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部泰寛, 千星聡, 正橋直哉
2. 発表標題 高強度-高導電性Cu-In合金線材の開発
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斎藤嘉一, 鈴木牧生, 千星聡, 佐藤勝彦, 早坂祐一郎, 竹中佳生
2. 発表標題 マグネシウムをドーブしたチタン銅合金の不連続析出挙動
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安野利希, 千星聡, 金野泰幸
2. 発表標題 Cu-Ni3Al擬二元系実験状態図の検討
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永瀬丈嗣, 田村卓也, 柴田顕弘, 松室光昭, 武村守, 千星聡
2. 発表標題 Cuを含むハイエントロピー合金の偏析現象
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千星聡
2. 発表標題 Cu-20 at.% Ni-6.7 at.% Al合金における時効析出挙動
3. 学会等名 日本金属学会 状態図・計算熱力学研究会 第一回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千星聡, 正橋直哉, 金野泰幸
2. 発表標題 ラメラ組織を有するCu-Ti合金の引抜き加工による高強度-高導電性線材の作製
3. 学会等名 日本塑性加工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 末吉哲郎, 千星聡, 尾崎壽紀, 坂根仁, 喜多村茜, 石川法人
2. 発表標題 80 MeV Xeイオンを照射した高温超伝導体に形成される柱状欠陥構造の照射方向依存性
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎壽紀, 柏原卓弥, 久保友幸, 千星聡, 末吉哲郎, 岡崎宏之, 越川博, 山本春也, 八巻徹也, 坂根仁
2. 発表標題 低エネルギーAuイオン照射したGdBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> 線材の超伝導特性
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千星聡, 川人洋介, 金野泰幸, 高杉隆幸, 中村浩
2. 発表標題 レーザー照射によるNi3Al/Ni3V二重複相合金の一方方向結晶配向化
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 姜婉青, 兵藤宏, 渡辺宏治, 成枝宏人, 千星聡
2. 発表標題 薄型多ピンリードフレーム用Cu-Ni-Co-Si系高強度銅合金の開発
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千星聡, 榎木隆太, 金野泰幸, 首藤俊也, 兵藤宏
2. 発表標題 Cu-Ni-Al系合金の時効析出硬化挙動
3. 学会等名 学際・国際的高度人材育成ライフイノベーションマテリアル創製共同研究プロジェクト 第四回公開討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 溝口未祐, 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 '-Ni3Al / -Cu 複相合金の組織と力学特性
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎壽紀, 柏原卓弥, 久保友幸, 千星聡, 末吉哲郎, 岡崎宏之, 越川博, 山本春也, 八巻徹也, 坂根仁
2. 発表標題 10 MeV Auイオン照射したYBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 薄膜の酸素アニール効果
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Semboshi, Y. Kadoi, N. Masahashi, Y. Kaneno, T. Takasugi:
2. 発表標題 High performance Cu-Ti alloy wires prepared by over-aging and intense cold-drawing
3. 学会等名 Copper 2019 in COM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千星聡, 榎木隆太, 金野泰幸, 高杉隆幸, 首藤俊也, 須田久
2. 発表標題 等温時効したCu-Ni <sub>3</sub> Al系合金の組織および強度の変化
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門井祐輔, 千星聡, 正橋直哉
2. 発表標題 時効にともなうCu-In合金の時効析出挙動
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木牧生, 佐藤勝彦, 齋藤嘉一, 千星聡, 早坂祐一郎
2. 発表標題 Cu-Ti-Mg系合金の時効挙動と析出組織
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門井祐輔, 千星聡, 正橋直哉
2. 発表標題 Cu-In合金の時効析出挙動
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 高強度-高導電性チタン銅合金線材の開発: 最適な熱加工プロセスの検討,
3. 学会等名 (独)日本学術振興会「合金状態図172委員会」 合同研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千星聡, 門井祐輔, 正橋直哉, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 過時効処理-伸線加工により作製したCu-Ti合金線材の特性に及ぼす組成の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前島加奈, 金野泰幸, 高杉隆幸, 千星聡
2. 発表標題 炭化物添加によるNi基超々合金鑄造材の組織と機械的性質の変化
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野航, 金野泰幸, 高杉隆幸, 千星聡
2. 発表標題 Ni基超々合金の組織と機械的性質に及ぼすCr添加の効果
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀史説, 福田健吾, 岩瀬彰宏, 千星聡, 斎藤勇一, 石川法人, 岡本芳浩, 雨倉宏
2. 発表標題 透明SiO <sub>2</sub> ガラスへのAgイオン注入および重イオン照射によるナノ粒子形態制御と光学特性
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 高強度-高導電性チタン銅合金線材の開発: 合金組成の影響
3. 学会等名 (独)日本学術振興会「合金状態図172委員会」 合同研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五百蔵一成, 金野 泰幸, 高杉 隆幸, 千星 聡
2. 発表標題 Ni3Al - Ni3V複相金属間化合物合金の組織形成と硬化挙動におよぼす遷移金属元素の効果
3. 学会等名 (独)日本学術振興会「合金状態図172委員会」 合同研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千星 聡
2. 発表標題 照射によって改質した材料表面層の微細組織観察技術と観察例
3. 学会等名 第67回放射線科学研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Z. Han, E.-A. Choi, J.H. Ahn, K.N. Huh, M. Jo, J. Lee, Y. Kadoi, S. Semboshi
2. 発表標題 The effect of cold deformation prior to aging on the precipitation behavior in Cu-Ti alloy
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E.-A. Choi, S.Z. Han, J. H. Ahn, K.N. Huh, M. Jo, K. Kim, B. Han, S. Semboshi
2. 発表標題 The second phase stability calculation in the Cu-Ti alloy by density functional theory
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千星聡, 正橋直哉, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 高強度-高導電性Cu-Ti合金線材の作製~合金組成の影響~
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永瀬丈嗣, 柴田顕弘, 松室光昭, 武村守, 千星聡
2. 発表標題 ハイエントロピー鑄造黄銅の開発
3. 学会等名 日本銅学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千星聡, 川人洋介, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 レーザー照射によるNi基二重複相合金の組織制御 II
3. 学会等名 学際・国際的高度人材育成ライフイノベーションマテリアル創製共同研究プロジェクト 第三回公開討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩瀬彰宏, 金野泰幸, 堀史説, 千星聡, 斉藤勇一, 石川法人
2. 発表標題 イオン照射による高密度エネルギー付与がもたらす合金の結晶構造変態
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩瀬彰宏, 堀史説, 千星聡, 斉藤勇一
2. 発表標題 高エネルギー荷電粒子照射と熱処理を組み合わせた複合反応場によるアルミ合金内ナノクラスター生成と表面硬度制御
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門井祐輔, 千星聡, 正橋直哉
2. 発表標題 高強度-高導電性チタン銅合金線材に及ぼすNi添加の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝口未祐, 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 Ni <sub>3</sub> Alの機械的特性に及ぼすV添加の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤光, 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 Ni基超々合金の組織と機械的特性に及ぼすFe添加の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五百蔵一成, 千星聡, 金野泰幸, 高杉隆幸
2. 発表標題 Ni基超々合金の組織と機械的性質に及ぼす非化学量論組成効果
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Semboshi, Y. Kaneno, A. Iwase, T. Takasugi, and Y. Kawahito
2. 発表標題 Study on high-strength and high-electrical conductivity Cu-Ti alloy wires
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (iLIM-2)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Semboshi
2. 発表標題 Recent study on high-strength and high-electrical conductive Cu alloys
3. 学会等名 Russia-Japan joint international seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 銅-チタン-マグネシウム合金およびその製造方法	発明者 斎藤嘉一、千星聡、 その他4名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-091681	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

東北大学金属材料研究所 新素材共同研究開発センター  
<http://www.crdam.imr.tohoku.ac.jp/>  
東北大学金属材料研究所 産学官広域連携センター  
<http://www.trc-center.imr.tohoku.ac.jp/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
韓国	Korea Insitute of Materials Science		