

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420663

研究課題名(和文)抽出分離法による時効硬化型銅合金の析出機構の学理究明

研究課題名(英文) Quantitative analysis of precipitation behavior for age-hardenable Copper-based alloys using extraction procedure

研究代表者

千星 聡 (Semboshi, Satoshi)

東北大学・金属材料研究所・特任准教授

研究者番号：00364026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高強度-高導電性材料として汎用されている時効硬化型銅合金では、熱処理中の組織変化を把握することが特性制御を実現するために重要となる。時効による析出挙動を正確に理解するためには試料中から析出物を採取して直接的に析出物の構造、組成を評価できる抽出分離法が有用である。本研究では、抽出分離法を利用して各種銅合金の時効にともなう析出物の構造、組成、析出量の変化を定量的に調査した。抽出分離条件を精査することにより適切に合金中から析出物を採取することができた。これにより各試料の定量的な組織解析が可能となったため、精密な等温変態図や部分平衡状態図が作成でき、材料特性を制御するための開発指針を的確に提案できた。

研究成果の概要(英文)：It is important to understand variations of the morphology, structure, volume fraction, and composition of precipitates in age-hardenable copper alloys during aging, because their mechanical and physical properties are critically influenced by the precipitation behavior. In this study, extraction procedure has been employed to quantitatively evaluate the precipitation behavior of age-hardening copper alloys, such as Cu-Ti, Cu-Ni-Si, and Cu-Mg-P systems. When the alloys were submerged in an acid solution, only the Cu solid solution matrix was dissolved chemically, but both precipitates remained as insoluble residue. Subsequent structural and compositional analyses of the insoluble residue reveal the fraction and composition of the precipitates, together with those of the matrix. Therefore, we obtained refined microstructural information, and proposed the time-temperature-transformation diagram and revised phase diagram for some age-hardenable copper alloys.

研究分野：金属材料

キーワード：銅合金 熱処理 析出 抽出分離 強度 導電性 相変態 相平衡

1. 研究開始当初の背景

電気・電子製品の小型化や効率化のニーズに呼応するためには、電子部品、実装配線などを構成する銅合金の高強度化、高導電性が重要である。図1には各種銅合金の引張強度と導電性を示す。従来までは製造プロセスが比較的簡易な固溶強化型銅合金（黄銅、リン青銅系など）が汎用されていたが、最近のスマートホンやタブレット端末では強度・導電率のバランスに優れた時効析出型銅合金（Cu-Ti系、Cu-Ni-Si系（コルソン系）等）が主力になりつつある。

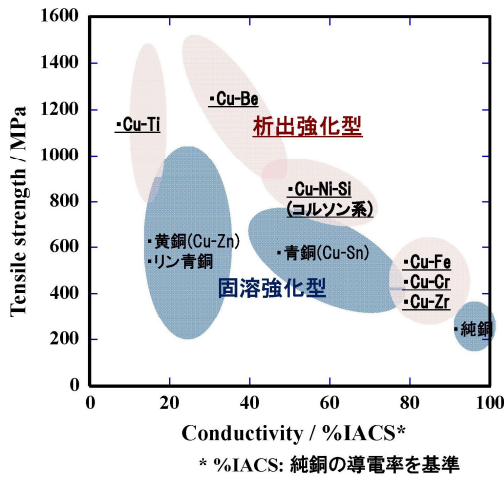


図1：各種銅合金の強度と導電性。小型機器の電子部品には強度・導電性バランスに優れた時効強化型銅合金が汎用される。

これらの合金の力学的・電気的特性は時効熱処理（以後、単に時効）による組織変化に大きく影響を受ける。そのため、今後の合金開発を効率的かつ的確に進めていくためには、時効中での析出物の生成・成長挙動を詳細に把握することが必要であり、そのための組織・構造評価技術が極めて重要となる。時効析出型合金では母相中に分散する微小な析出物を観察できる透過型電子顕微鏡法（TEM）や析出物の構造に関して統計的データが得られるX線（あるいは中性子線）回折法の利用が常套である。しかし、TEM観察法は析出物の組成や体積分率を定量的に測定することは不得手であり、回折法では合金中に少量分散する析出物の情報を引出すには試料状態や測定条件に厳しい制約がある。このようなことに起因して、Cu-Ti系およびCu-Ni-Si系合金などでは、未だに時効中の析出挙動に関して不明な点が多く残されている。

時効硬化型銅合金の時効にともなう一連の析出現象を定性的かつ定量的に把握するために、申請者らは「抽出分離法」の適用を提案する。ここで抽出分離とは、合金を酸/アルカリ溶液と化学反応させることにより合金の母相のみを溶解し、難溶性残渣として残る析出物相を濾過分離により回収

する操作をさす。抽出分離を用いれば、合金中の析出物のみを採取して、直接的にTEM観察、X線回折、化学組成分析などに供することができる。このため、析出物の形状、サイズ、構造、組成、生成量が信頼性高く評価される。本研究は、抽出分離の特徴を最大限に活用し、これまで深暗であった時効硬化型銅合金の時効析出挙動を究明しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、抽出分離により各種の時効硬化型銅合金の析出挙動を定性的かつ定量的に把握していくことを目的とする。具体的には、コネクタ用電子部材として研究・開発が最も盛んなCu-Ti系、Cu-Ni-Si系合金を中心に下記の項目を明らかにしていく。

- (1) 種々に時効した時効析出型合金中の析出物の構造、組成、生成量を抽出分離法により系統的に解析する。組織変化の挙動を速度論・平衡論的視点から整理し、学理的に体系化する。
- (2) 実用化されている時効析出型銅合金に関して、添加元素の母相/析出物への分配状態を定量的に評価する。これにより添加元素の析出挙動へ及ぼす影響を明確化する。
- (3) (1),(2)の知見に基づいて、高強度・高機能化のための合金開発の指導原理を提案する。

3. 研究の方法

コネクタ用電子部材として研究・開発が最も盛んなCu-Ti系、Cu-Ni-Si系合金、大電流用導電性材として期待されているCu-Fe-Ti系合金に関して、抽出分離による組織・構造解析を行った。また、時効析出型Ni基超合金に関しても抽出分離法による組織解析を利用し、組織と特性の関係を検討した。ここでは、紙面の関係上、Cu-Ti合金に関する事例を中心に研究の方法、研究成果を説明していく。その他、詳細な研究成果は発表論文等を参考にして頂きたい。

合金組成がCu-4 at. % Tiとなる厚さ0.22 mmの過飽和固溶体合金板材を供試材とした。これから長さ60 mm、幅5 mmの試験片を切出した。試験片を不透明石英管に真空封入し、温度420~700℃時間0~60日で時効した。試料の組織を電界放出型走査型電子顕微鏡法（FE-SEM）と透過型電子顕微鏡（TEM）により評価した。試料の力学特性をビッカース硬さ試験器にて評価した。室温にて電気抵抗を四端子法にて測定し、導電率を算出した。試料中の析出物相を硝酸溶液による抽出分離法にて採取した。抽出分離の手順は下記の通りである。試料表面の酸化層を研磨紙で十分研磨除去した後、板状試料から $2 \times 2 \times 0.22 \text{ mm}^3$ の小片を切出した。幾つかの試験片をビ

ーカーに秤取り，温度 0 °C の 7M 硝酸溶液に 20 min 浸漬して合金母相を溶解し，難溶解性の残渣として析出物を孔径 50 nm のニュークリポアフィルターを用いて吸引ろ過した．残渣は純水で洗浄後，デシケーター中で乾燥して回収した．抽出分離により採取した残渣（析出物相）を X 線回折測定（XRD）に供して析出物の構造を同定した．残渣の化学定量分析は誘導結合プラズマ発光分光分析装置（Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry: ICP-OES）を使用した．

4. 研究成果

(1) Cu-Ti 合金の定量的組織解析

Cu-4 at.% Ti 合金を 420 ~ 650 °C で時効した場合，時効初期では，スピノーダル分解による濃度変調がみられ，その後，針状（長さ 10 ~ 50 nm）の準安定相 β' -Cu₄Ti（正方晶）が結晶粒内に連続的に析出する．ピーク時効材以降では，微細な準安定相 β' -Cu₄Ti の生成・成長が進行すると同時に，結晶粒界から β -Cu₄Ti と銅固溶体相のラメラから構成されるセル状組織が不連続的に生成する．時効後期ではセル状組織が粗大化していき，最終的にセル状組織が試料全面を占有する．

上記の組織変化を定量的に解析するため，抽出分離法を用いた．時効材を温度 0 °C の 7 M 硝酸溶液に浸漬すると，銅固溶体相のみが溶解していき，20 min 後には，針状 β' -Cu₄Ti や層状 β -Cu₄Ti が溶液浸漬前と同様の形状，寸法で残渣粒子として残される（図 2）．残渣を回収し XRD 解析した結果，Cu からの回折ピークはみられず β' -Cu₄Ti と β -Cu₄Ti からの回折ピークが検出される．以上から，本手順により試料から析出物粒子のみを採取できることが確認できる．

抽出分離により採取した残渣を XRD-Rietveld 解析すれば，残渣を構成する析出物の構造と体積分率を解析することができる．また，抽出分離により採取した濾液（母相）と残渣（析出物）の ICP-OES 分析から，試料中の析出物量を測定できる．よって，試料中の析出物の体積分率を算出することができる．これを図 3 に図示する．スピノーダル分解による Ti 濃縮固溶体相は時効初期に 0.1% 程度みられるが，時効 12 h 以降ではみられない．一方， β' -Cu₄Ti の体積分率は時効とともに増加して 24 h 後に最大 1.8% となり，その後は減少していく．これは準安定相 β' -Cu₄Ti が安定相 β -Cu₄Ti に置き換わっていくためである． β -Cu₄Ti の析出量は時効初期では β' -Cu₄Ti より少ないが，時効とともに増加していき，最終的には試料の 17 vol% を占める．420 °C，500 °C，600 °C，650 °C で時効した試料でも組織観察を行い，上記と同様の組織変化（濃度変調 → Ti 濃縮相の規則化による β' -Cu₄Ti の生成 → セル状組織の生成・発達）が起こることを確認した．

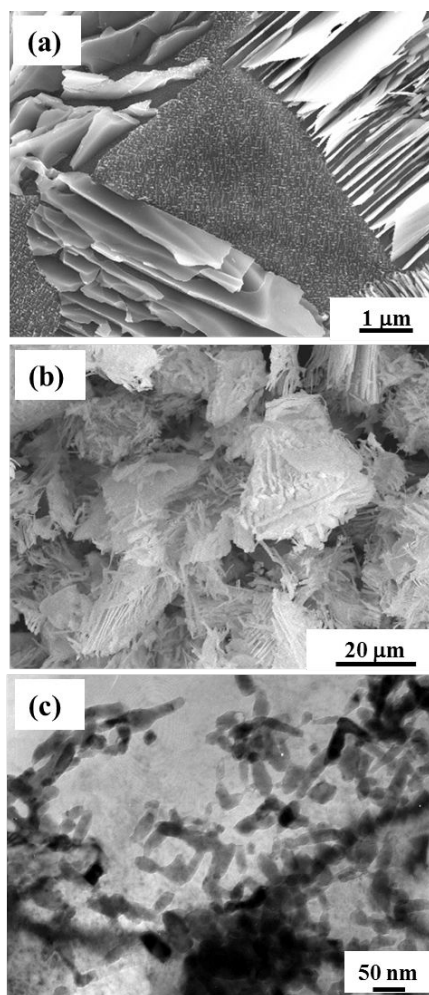


図 2: 時効 Cu-4at.% Ti 合金（時効温度：450 °C，時間：96 h）の抽出分離工程；(a)硝酸 7mol/L 水溶液に 30s 含浸したときの組織写真．(b)(c)20 min 含浸後に抽出分離された析出物（(b)は層状 β -Cu₄Ti，(c)は針状 β' -Cu₄Ti）．

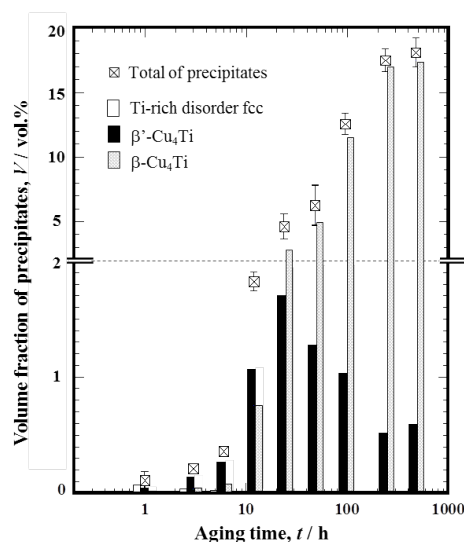


図 3: 450 °C 時効にともなう Cu-4at.% Ti 合金中での析出物量（体積分率）の変化

上記の組織観察，抽出分離による解析を基に等温変態図（TTT 線図）を図 4 のように作成した．TTT 線図では，Cu-4 at.% Ti 合金の時効にともなう組織変化は 4 つの領域に分類

されることを明示している．つまり，時効初期にて過飽和固溶体での濃度変調が進行する領域[I]，Ti 濃縮相 (fcc) が規則化して β' -Cu₄Ti が生成する領域[II]， β' -Cu₄Ti の連続析出と競合して結晶粒界反応によりセル状組織が生成・成長する領域[III]，セル状組織が試料全面を占有する (β' -Cu₄Ti は侵食され消失する) 領域[IV]である．領域[IV]では組織変化はみられないので組織的な平衡状態にあるといえる．上記の組織変化は時効温度が高いほど指数関数的に促進される．一般的な TTT 線図にみられるノーズは 420 °C ~ 650 °C の温度域ではみられない．

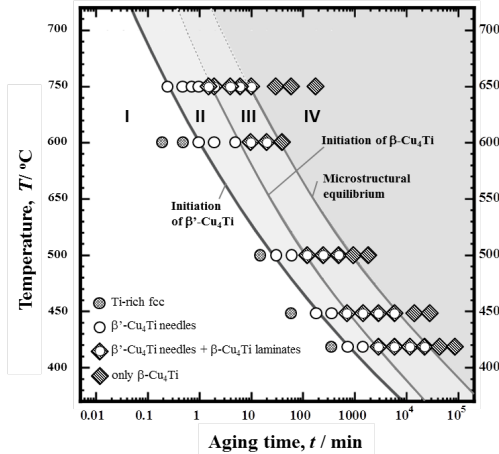


図 4: Cu-4at.% Ti 合金の等温変態図 (TTT 線図)

(2) 特性制御のための基盤学理

図 5 に 420 ~ 650 °C で時効した Cu-4 at.% Ti 合金の導電率およびビッカース硬さの変化を示す．どの時効温度でも硬さは時効初期から飛躍的に向上し，ピーク硬さに達した後著しく減少する．時効温度 420 °C のときは，ピーク硬さは 272 Hv と比較的高いが 48 h もの時間を要する．時効温度が高くなるほどピーク硬さは低下するが，ピーク硬さに達する時効時間は短縮される．一方，溶体化材の導電率は 4.5% IACS であるが，どの時効温度でも時効により導電率は単調に増加していき，やがて飽和する．時効温度 420 °C のときは，導電率は最終的に 31% IACS に達するが 480 h かかる．時効温度が高くなるほど短時間で飽和値に達するが，飽和値は時効温度の増加にともない減少する．

図 6 にはピーク硬さ，時効末期での最終硬さに達する時効条件，および導電率が 10, 15, 20, 25% IACS に達する時効条件を TTT 線図上に示した．ピーク硬さに達する時効条件はセル状組織の生成開始線と良く一致する．これは，試料強度が最高となるのは β' -Cu₄Ti の生成が十分に進行し (領域[II]終期)，セル状組織による β' -Cu₄Ti の侵食が始まる前 (領域[III]初期) であることを明示している．また，最終的に硬さが一定になる時効条件はセル状組織の生成終了線に対応する．

導電率は時効により組織変化が進むにつれて増加していくが，領域[IV]に達すると組織

変化が平衡化するため一定となる．時効温度が低いほど最終的な導電率は高くなる．これは，Cu-Ti 二元系平衡状態図により説明できる．つまり，420 ~ 650 °C では時効温度の低下によって銅固溶体相の固溶 Ti 量は 1.4 at.% から 0.4 at.% まで低減される．このため銅固溶体相の導電率が向上して，試料全体の導電率も向上する．

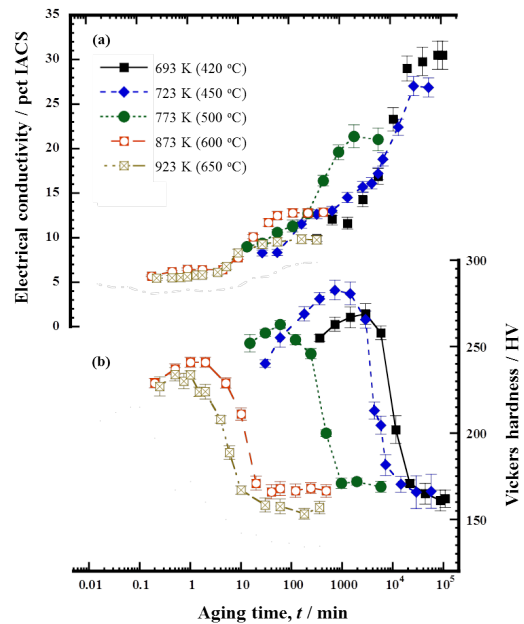


図 5: 時効 Cu-4at.% Ti 合金の硬さおよび導電率

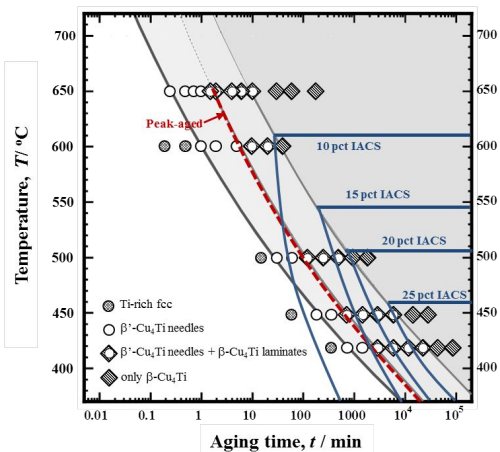


図 6: 時効 Cu-4at.% Ti 合金の組織変化と硬さおよび導電率との相関

以上より，強度および導電率の観点から言えば，TTT 線図は，強度と導電率が共に向上する時効条件を領域[I, II]，導電率は増加するが強度が低下する条件を領域[III]，強度と導電率が共に変化しない条件を領域[IV]として解釈できる．また，TTT 線図は，低温で時効するほどピーク時効での導電率が高くなることも示している．例えば，時効温度 420 °C 以下でピーク時効した試料の導電率は 15% IACS 以上になる．強度-導電性のバランスを更に改善するためには等温時効だけでは限界があることも TTT 線図から推察される．予備加工や熱間鍛造，多段時効の適用など他の

プロセスと組合せや合金化による組織制御を図ることが今後望まれる。

(3) 抽出分離の適用性と今後の展開

抽出分離法では、母相と析出物相を分離して、析出物粒子を直接的に化学分析や回折法に供することができるため、得られるデータの信頼性や精度は高いことが特色である。故に、上記の Cu-Ti 合金に関する解析によって、組織解析や TTT 線図だけでなく、部分状態図の改訂も提案したことも成果である。

抽出分離法では、抽出分離の条件（溶液、溶解温度、時間など）が分かれば、操作は比較的簡単であり、特殊な装置も不要である。このため、Cu-Ti 合金だけでなく他の合金系にも適用できうる技術である。例えば、Cu-Ni-Si コルソン系合金、Cu-Fe-Ti 系合金では、Cu-Ti 合金と同様の抽出分離条件が適用可能であることを見出した。Cu-Mg-P 系合金では、リン酸水溶液による電解研磨的手法により抽出分離が可能となる。最終年度では得られた知見を Ni 系合金の組織解析にも適用している。今後も継続的な成果の獲得が見込める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 36 件)【全て査読有】

S. Semboshi, M. Sato, Y. Kaneno, T. Takasugi, A. Iwase: “Grain boundary character dependence on nucleation of discontinuous precipitates in age-hardenable Cu-Ti alloy”, *Materials*, (2017) **10**, 415. (8 pages)
(doi:10.3390/ma10040415)

S. Semboshi, S. Amano, J. Fu, A. Iwase, T. Takasugi: “Kinetics and equilibrium of age-induced precipitation in Cu-Ti binary alloys”, *Metall. Mater. Trans. A*, (2017) **48**, 1501-1511. (doi:10.1007/s11661-016-3949-x)

S. Semboshi, S. Sato, A. Iwase, T. Takasugi: “Discontinuous precipitates in age-hardening Cu-Ni-Si alloys”, *Mater. Charact.*, (2016) **115**, 39-45. (doi:10.1016/j.matchar.2016.03.017)

千星 聡, 正橋 直哉, 阪本 康弘, 八木 俊介, 岩瀬 彰宏: “複合電析法によるチタン粒子分散強化型銅材料の作製” *銅と銅合金*, (2016), **55**, 114-118.

天野 晋太郎, 千星 聡, 岩瀬 彰宏, 高杉 隆幸, 須田 久, 佐々木 史明, 菅原 章: “時効硬化型チタン銅合金における等温変態図”, *銅と銅合金*, (2016), **55**, 168-173.

S. Semboshi, Y. Kaneno, T. Takasugi, A. Iwase: “Surface modification of age-hardenable Cu-Ti alloys by plasma-carburizing”, *Surf. Coat. Tech.* (2015) **283**, 262-267. (doi:10.1016/j.surfcoat.2015.11.003)

S. Semboshi, J. Ikeda, A. Iwase, T. Takasugi, S. Suzuki: “Effect of Boron Doping on Cellular Discontinuous Precipitation for Age-Hardenable Cu-Ti Alloys”, *Materials*,

(2015) **8**, 3467-3478.

(doi:10.3390/ma8063467)

S. Sato, A. Hasegawa, S. Semboshi, K. Wagatsuma: “Effect of dislocations on spinodal decomposition, precipitation, and age-hardening of Cu-Ti alloy”, *High Temp. Mater. Proc.*, (2015) **34**, 123-130.

(doi: 10.1515/htmp-2014-0038)

J. Ikeda, S. Semboshi, A. Iwase, W.L. Gao, A. Sugawara: “Precipitation behavior and properties for Cu-Ti alloys adding nitrogen*”, *Mater. Trans.*, (2015) **56**, 297-302.

(doi:10.2320/matertrans.M2014216).

S. Semboshi, Y. Sakamoto, H. Inoue, A. Iwase, N. Masahashi: “Electroforming of oxide-nanoparticle-reinforced copper-matrix composite”, *J. Mater. Res.*, (2015) **30**, 521-527. (doi:10.1557/jmr.2014.401)

S. Semboshi, H. Tsuda, Y. Kanano, A. Iwase, T. Takasugi: “Thermal conductivity of Ni₃V-Ni₃Al pseudo-binary alloys” *Intermetallics*, (2015) **59**, 1-7.

(doi:10.1016/j.intermet.2014.12.006)

千星 聡, 池田 潤, 岩瀬 彰宏, 高杉 隆幸, 鈴木 茂, 木村 崇, 高 維林, 菅原 章: “極微量 B を添加した時効硬化型 Cu-Ti 合金における不連続析出物の生成挙動”, *銅と銅合金*, (2015), **54**, 21-26.

千星 聡, 岩瀬 彰宏, 木村 崇, 高 維林, 菅原 章: “プラズマ窒化法による時効硬化型 Cu-Ti 合金の表面改質”, *銅と銅合金*, (2015), **54**, 125-129.

S. Semboshi, S. Kimura, A. Iwase, N. Ohtsu: “Surface hardening of age-hardenable Cu-Ti dilute alloys by plasma nitriding”, *Surf. Coat. Tech.*, (2014) **258**, 691-698.

(doi:10.1016/j.surfcoat.2014.08.015)

S. Semboshi, E. Hinamoto, A. Iwase: “Age-hardening behavior of a single-crystal Cu-Ti alloy”, *Mater. Lett.*, (2014) **131**, 90-93. (doi:10.1016/j.matlet.2014.05.128)

S. Semboshi, M. Ishikuro, S. Sato, K. Wagatsuma, A. Iwase, T. Takasugi: “Investigation of precipitation behavior in age-hardenable Cu-Ti alloys by an extraction-based approach”, *Metall. Mater. Trans. A*, (2014) **45A**, 3401-3411.

(doi:10.1007/s11661-014-2293-2)

佐藤 成男, 長谷川 啓史, 千星 聡, 我妻 和明: “X 線回折サイドバンドピークに基づく時効強化型 Cu-Ti 合金におけるチタン濃度揺らぎ領域の解析”, *銅と銅合金*, (2014), **53**, 166 - 170.

〔学会発表〕(計 69 件)

千星 聡, 岩瀬 彰宏, 高杉 隆幸, 須田 久: 水素による Cu-Ti 合金中不連続析出物生成の抑制, 日本金属学会 (東京), 2017/3/17.

S. Semboshi, T. Takeuchi, Y. Kaneno, A. Iwase, and T. Takasugi: “Influence of

microstructure and composition on thermal conductivity for Ni-Ni₃V-Ni₃Al pseudo ternary system”, 2016 MRS Fall Meeting, (Boston, USA), 2016/11/30.

千星 聡, 佐藤 充孝, 金野 泰幸, 岩瀬 彰宏, 高杉 隆幸, 須田 久: 時効析出型チタン銅合金における不連続析出物生成と結晶粒界性格との関係, 日本銅学会 (東京), 2016/10/29.

千星 聡, 津田 紘之, 金野 泰幸, 高杉 隆幸: “Ni₃V-Ni₃Al 擬二元系合金における組成・組織と熱伝導性の関係”, (独)日本学術振興会 合金状態図 172 委員会 (つくば), 2016/10/22, 53-58.

S. Semboshi, A. Iwase, Y. Kaneno, and T. Takasugi: Age-hardenable Cu-Ti alloys prepared by hydrogen process -Microstructural evolution of Cu-Ti alloys aged in a hydrogen atmosphere-, iLIM-1 (Osaka, Japan), 2016/10/17.

千星 聡, 石黒 三岐雄, 佐藤 成男, 岩瀬 彰宏, 高杉 隆幸: 抽出分離を利用した時効析出型銅合金の定量的組織解析, 日本鉄鋼協会 討論会 (大阪), 2016/9/22.

S. Semboshi, M. Sato, Y. Kaneno, T. Takasugi, and A. Iwase: Grain boundary character dependence on initiation of discontinuous precipitation for age-hardenable Cu-Ti alloys, PRICM 9 (Kyoto, Japan), 2016/8/5.

S. Semboshi, S. Sato, and A. Iwase: “Quantitative microstructural analysis for age-hardenable Cu-based alloys using extraction technique”, THERMEC 2016 (Graz, Austria), 2016/5/30.

千星 聡, 岩瀬 彰宏: Cu-Ni-Si 合金における不連続析出物の生成挙動, 日本金属学会 (東京), 2016/3/25.

千星 聡, 正橋 直哉, 岩瀬 彰宏: 複合電析法を利用したセラミックス粒子分散強化型銅材料の開発, 日本銅学会 (大阪), 2015/11/3.

千星 聡, 石黒 三岐雄, 佐藤 成男, 岩瀬 彰宏, 高杉 隆幸: 抽出分離法を利用した時効析出型 Cu-Ti 合金の組織解析, (独)日本学術振興会 合金状態図 172 委員会 (札幌), 2015/10/24.

千星 聡, 岩瀬 彰宏: 単結晶, 多結晶 Cu-Ti 合金における時効析出挙動の比較, 日本金属学会 (福岡), 2015/9/16.

千星 聡, 岩瀬 彰宏, 辻 宣佳: プラズマ浸炭による Cu-Ti 希薄合金の表面改質, 日本金属学会 (東京), 2015/3/19.

S. Semboshi, H. Tsuda, Y. Kaneno, A. Iwase, and T. Takasugi: Relationship between thermal conductivity and microstructure of Ni₃V-Ni₃Al pseudo binary system, 2014 MRS Fall Meeting, (Boston, USA), 2014/12/1.

石黒 三岐雄, 千星 聡, 佐藤 成男, 我妻 和明: 時効析出型 Cu-Ni-Co-Si 合金中の析出物の抽出分離定量, 分析化学討論会, 日本大学 (郡山), 2014/5/24-25.

〔図書〕(計 1 件)

千星 聡, 松尾 元彰, 折茂 慎一: 『水素の事典』 “第 4-1 節 水素と金属”, p. 47 - p. 57, [編集・発行]: 朝倉書店, [発売日]: 2014/4/25.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 4 件)

名称: チタン銅合金線材およびチタン銅合金線材の製造方法

発明者: 千星 聡, 中吉 勲, 清水 敏明

権利者: 東北大学, トクセン工業株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2016-70618

出願年月日: 平成 28 年 3 月 31 日

国内外の別: 国内

名称: 表面被覆が形成されたチタン銅合金材及びその製造方法

発明者: 千星 聡, 高維 林

権利者: 東北大学, DOWA ホールディングス

種類: 特許

番号: 特願 2015-038097

出願年月日: 平成 27 年 2 月 27 日

国内外の別: 国内

名称: Cu-Ti 系銅合金板材および製造方法並びに通電部品およびばね材 (B, Ca 添加材)

発明者: 千星 聡, 木村 崇, 高維 林

権利者: 東北大学, DOWA ホールディングス

種類: 特許

番号: 特願 2015-036132

出願年月日: 平成 27 年 2 月 26 日

国内外の別: 国内

名称: 分散強化銅含有材料の製造方法

発明者: 千星 聡, 正橋 直哉, 井上 明子, 桑原 鉄也, 中井 由弘

権利者: 東北大学, 住友電気工業株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2014-178702

出願年月日: 平成 26 年 9 月 3 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千星 聡 (SEMBOSHI, SATOSHI)

東北大学・金属材料研究所・特任准教授

研究者番号: 00364026

(2) 連携研究者

佐藤 成男 (SATO, SHIGEO)

茨城大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 40509056