

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01340

研究課題名(和文) 導電性と強度が飛躍的に高いナノファイバー過時効組織を持つ耐疲労性銅合金の創生

研究課題名(英文) Creation of anti-fatigue copper alloy strengthened by nanofiber-shaped discontinuous precipitate with superior conductivity and high strength

研究代表者

後藤 真宏 (Goto, Masahiro)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：30170468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：Ni-Si系銅合金に数ナノのNi₂Siを析出させ最高硬さを得る時効を行った材料(時効材)のき裂発生起点は粒界であり、これは時効中に粒界に沿って析出物の枯渇した領域(PFZ)と数十ナノの粗大析出物が形成されたことによる。過時効すると粒内にファイバー状の析出物が発達する。過時効材は時効材より導電性は優れ静的強度は低い。一方、疲労限度に差は認められず、き裂発生起点は時効前の粒界であった。過時効材を強変形(80%の圧延)すれば、時効材より導電性(IACS値)が1.6倍、静的強度と疲労限度がそれぞれ1.05倍、1.5倍になった。強変形加工により作製した超微細粒銅材のき裂発生機構、き裂進展機構を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気電子部品の小型軽量化、高集積化、高効率化の要求から、その素材となる銅合金の特性向上が望まれている。銅合金の開発は、加工熱処理条件と添加元素の工夫を通して行われているが、強度が向上すれば導電性は低下する問題がある(二律背反的)。また、実際の電気電子部品は使用中の繰返し応力、通電や使用環境による熱ひずみを受け、耐疲労特性が要求される。本研究成果は、普通は使用されない過時効材の組織を改変することで強度と導電性の優れた素材が得られることを示し今後の銅合金の開発の道を開いた。また、強変形された組織を調べ、これまで不明であった超微細粒材料の疲労損傷の形成メカニズムを解明したことは学術的に意義がある。

研究成果の概要(英文)：In general, Cu-Ni-Si alloy is used after aging that produces nanosized Ni₂Si precipitates to give the alloy maximum hardness. The crack initiation site of aged alloy was grain boundaries (GBs), this is because of the formation of precipitate-free zone along GBs and coarse precipitates at GBs. After over aging, fiber-shaped precipitates were grew within the original grains (grains before aging). The overaged alloy has higher conductivity and lower tensile strength than aged one, and there was no deference in fatigue strength at 10⁷ cycles between aged and overaged alloys. The starting point of fatigue crack of overaged alloy was original GBs. The overaged alloy with severe plastic deformation (80% cold rolling) exhibited 1.6, 1.05 and 1.5 times of conductivity (IACS), tensile strength and fatigue strength at 10⁷ cycles of the aged alloy, respectively. Fatigue crack initiation and propagation mechanism of ultrafine grain copper fabricated by severe plastic deformation were clarified.

研究分野：材料力学

キーワード：銅合金 不連続析出 疲労 組織 強変形加工 微細化

1. 研究開始当初の背景

現代社会は電気電子部品なくしては立ち行かず、その素材となる銅合金の特性向上が強く望まれている。Cu-Ni-Si 系合金は、強度と導電性の組合せ特性が良好で、昨今の電気電子部品の小型軽量化、高集積化、高効率化の要求から現在最も活発に研究開発が進められている銅合金である。銅合金の開発は、加工熱処理条件と添加元素の工夫を通して行われているが、強度が向上すれば導電性は低下する問題がある（強度と導電性は二律背反的である）。強度と導電性の組合せ特性の向上には、加工熱処理条件と添加元素の工夫に基づく従来の方法とは異なる観点からの取り組みが必要と考えられる。

実際の電気電子部品は使用中の繰返し応力、通電や使用環境による熱ひずみを受け、耐疲労特性が要求される。Cu-Ni-Si 合金の強度に関する研究は、一方向引張や曲げに関するものが多く、疲労に関する研究はそれほど多くない。特に組織との関係からき裂発生、進展など疲労機構を検討したものはあまり認められない。耐疲労特性の優れた Cu-Ni-Si 合金を開発するには、疲労損傷機構を把握しその結果を材料開発に反映させる必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、銅材料の組織に注目して疲労損傷機構を解明し耐疲労特性の勝る組織構造の知見を得ること、および銅合金の強度と導電性の間にある二律背反関係を打破り、導電性と耐疲労強特性の優れた電気電子部品用素材を開発することである。

Cu-Ni-Si 系合金は、時効により微細な金属間化合物 Ni_2Si が Cu 母相中に析出することにより強化される。硬さと強度は時効処理の時間の増加と共に向上するが、最高硬さの得られる時効時間（以下では通常時効と呼ぶ）を超えて時効（過時効）すると硬さと強度は減少するため、通常時効の時間を超えて時効することは考えられず、過時効した材料を実機に使用することはあり得ない。通常時効材の疲労に関しては、S-N 特性を調べた研究はあるが、き裂発生など疲労機構を明らかにした研究はない。そこで、組織に注目して通常時効材のき裂発生・進展機構を明らかにし通常時効材の耐疲労性の向上に関する知見を得る。

一方、過時効材の強度は通常時効材に比べて劣るが、導電性に優れる。すなわち、過時効材の組織を強化すれば、導電性と強度特性の優れた素材を得ることができる。これを合理的に行うため、まず過時効材の組織構造と強度特性など基本的性質を明らかにし、その知見を考慮して過時効材の強化を行う。具体的には、過時効材の組織構造、引張強度、疲労挙動を調べ過時効組織の疲労機構を解明する。次に、強変形加工により過時効組織をナノファイバー化した材料について、組織構造、引張特性、疲労特性を明らかにし、導電性と耐疲労特性の優れた銅合金を開発する。更に、学術的な観点から強変形加工により組織を微細化した銅材について疲労損傷の発生機構とき裂進展機構を解明する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するため、次の3つの観点から研究を行った。(1) 通常時効材の組織と強度、(2) 過時効材の組織と強度、(3) 強変形加工処理材の組織と強度。以下にそれぞれについて研究の方法を概説する。

(1) については、通常時効によりナノサイズの寸法の金属間化合物 Ni_2Si を析出させた Cu-6Ni-1.5Si 合金の組織構造と疲労き裂発生・進展挙動など疲労損傷機構の解明を行う。すなわち、最高硬さが得られる時効を施した材料の疲労試験において、表面の連続観察を行いき裂発生・進展挙動を解明する。その際に、SEM、TEM を用いて組織構造を調べ、き裂発生個所と組織の関係を調べることで疲労機構を明らかにする。さらに他の組成・加工熱処理条件の合金についても検討し、Cu-Ni-Si 系合金の耐疲労強度の向上を図る。

(2) については、不連続析出物（過時効組織）の体積率がほぼ 100%の Cu-6Ni-1.5Si 合金を製作し、疲労特性（S-N 曲線、き裂発生挙動、き裂進展挙動、破面形態）を明らかにする。また、過時効材の組織を SEM、TEM にて観察し、過時効組織がき裂発生および進展に及ぼす役割の通常時効材との違いを解明する。

(3) については、強度は低い導電性に優れる過時効組織を強変形加工により改変し強度の向上を達成する。強変形は冷間圧延を繰返すことで与える。加工条件を系統的に変化させて、より高い引張強さを得る最適条件を決定する。また、最高の引張強さの強変形材料が必ずしも疲労強度が最高とは限らないので、疲労損傷に及ぼす強変形組織（強変形により微細化された組織）の役割を明らかにする。更に、ECAP 加工により繰返し強変形を与え組織を微細化した銅材について、表面損傷の形成機構、き裂発生機構およびき裂進展機構を組織との関係から検討し、微細

粒材料の強度特性に関する学術的知見を得る。

4. 研究成果

得られた主な研究成果を3つの項目：(1) 通常時効材の組織と強度，(2) 過時効材の組織と強度，(3) 強変形加工処理材の組織と強度，それぞれについて示す。

(1) 通常時効材の組織と強度

最高硬さの得られる時効を施した Cu-6Ni-1.5Si 合金の疲労き裂は粒界から発生した。き裂が粒界から発生したのは、寸法が数十～100 nm 程度の粗大析出物 (Ni₂Si) や析出物の枯渇した領域 (PFZ) が粒界周辺に発生し (図1, 粒界に沿った明るい帯状領域が PFZ), これにより粒界付近に大きなひずみが集中したためである。PFZ が粒界に沿って形成したのは、溶体化処理の冷却中に粒界に析出した Ni₂Si が時効中に成長したためである。この成長は、粒界拡散により粒界周辺の Ni, Si 原子が供給されたことによりもたらされ、したがって粒界に沿って Ni₂Si が枯渇した領域が形成されることになる。疲労強度特性を改善する1つの方法として、き裂発生抵抗を増加することがある。すなわち、粒界周辺の寸法の大きい析出物と PFZ の発生を抑制すれば粒界き裂の発生は妨げられる。PFZ は、溶体化処理後の時効により発生・拡大するので時効を行わなければ PFZ は形成しない。しかし、時効をしなければ母相中に Ni₂Si が析出せず強度が向上しない。そこで、時効中の Ni, Si 原子の吸収を妨げるために時効前に母相中に Ni₂Si を析出させるを試みた。すなわち溶体化処理の冷却速度を遅くし、冷却中に Ni₂Si を析出させる。具体的には、冷却方法を水冷から空冷に変えたところ、母相中に数十ナノサイズの Ni₂Si がほぼ均一に析出し、その後の時効処理において粒界の Ni₂Si 粒子の成長が抑制され、PFZ は形成しなかった。この手法により作製した試験片の疲労試験を行った結果を図2に○で示す。静的強度は通常時効した材料より低下したが、実用上重要な疲労強度は通常時効材に比べ向上した。

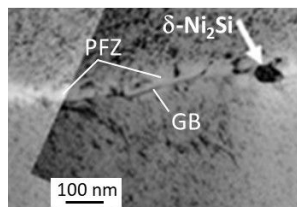


図1. 通常時効材の粒界付近の TEM 写真。

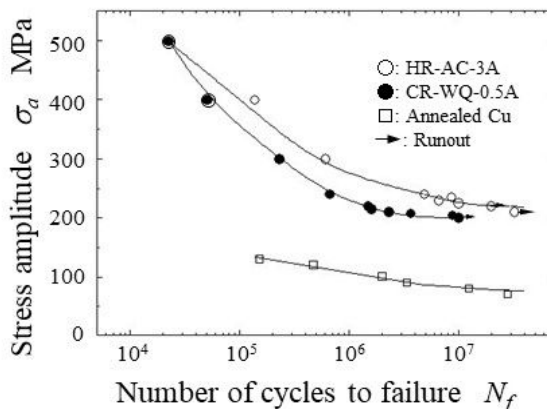


図2. S-N 特性に及ぼす溶体化処理の冷却速度違いの影響(比較のため焼なました銅の結果を○で示す)。

(2) 過時効材の組織と強度

Cu-Ni-Si 合金は時効により析出するナノオーダーの金属間化合物 δ -Ni₂Si により強化される。適切な時効時間を越えて時効(過時効)を続けると析出物の粗大化を招き強度は低下する。さらに母相粒界から不連続析出相 (DP) が発生し、条件によっては母相のほぼ全域が DP になる。図3(a)は Cu 母相内に DP が形成される途中過程を示した模式図である。粒界の複数の個所からファイバー状の DP (Ni₂Si) が移動

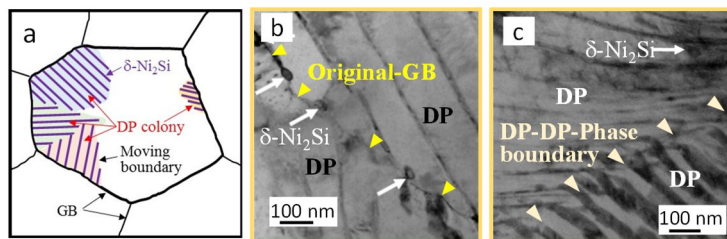


図3. 過時効材の組織：(a) DP 形成の途中段階を示す模式図，(b) 結晶粒界周辺の TEM 写真，(c) DP/DP 相境界の TEM 写真。

粒界を伴って粒内に発達し、やがて粒内は異なる方向性を持つ複数の DP 相の領域により区分される。DP は機械的性質を著しく低下させるため、常識的に過時効材が使用されることはない。ただ、DP の導電性は良好である。すなわち、DP を強化できれば強度と導電性の優れた材料が開発できることになる。開発を合理的に行うには DP の引張特性と基本的疲労特性を把握しておく必要がある。しかし、実際に使用されることの無い DP の疲労特性を調べた研究は皆無である。

ここでは、DP の組織と疲労機構を検討した結果を示す。

過時効により組織を DP にした試験片の疲労試験を行い S-N 曲線を求め通常時効材の S-N 曲線と比較したところ、引張強さは通常時効材より低い疲労強度に両材の違いは認められなかった（両材の S-N 曲線はほぼ一致）。また、いずれの材料もき裂発生場所は粒界であった。過時効材の疲労強度が低下しない理由を調べるため、粒界付近の組織を観察した。図 3(b) は粒界の、図 3(c) は DP 相境界の TEM 写真である。同一粒内の DP 相の整合性は高くき裂は粒内ではなく粒界から発生した。先に述べたように過時効材より通常時効材の静的強度の方が高いが、通常時効材では粒界に沿って軟らかい PFZ が形成された（図 1）。一方、過時効材の静的強度は低い、図 3(b) に示すように粒界に PFZ が存在しないためき裂発生抵抗の低下は抑制される、実際に、結晶粒オーダーのき裂の発生寿命は通常時効材より過時効材の方が大きかった。反面、き裂進展寿命は静的強度の高い通常時効材の方が大きく、結果として S-N 曲線は引張強さの高い通常時効材とほぼ一致したと思われる。また、過時効材の疲労強度向上を狙い、溶体化処理前の圧延の影響を調べたところ、熱間圧延の方が冷間圧延より疲労強度は多少増加することを明らかにした。

(3) 強変形加工処理材の組織と強度

良好な導電性を有する過時効組織は Cu 母相とファイバー状の金属間化合物 Ni_2Si から成る（図 3）。したがって、強変形加工により Ni_2Si をナノファイバー化すれば強度の向上が期待できる。そこで過時効材に 80% の冷間圧延を施し強化した。圧延前後の組織を図 4 に示す。圧延により DP ファイバーの直径と間隔は減少し、ファイバーの方向が圧延方向に近づいた。

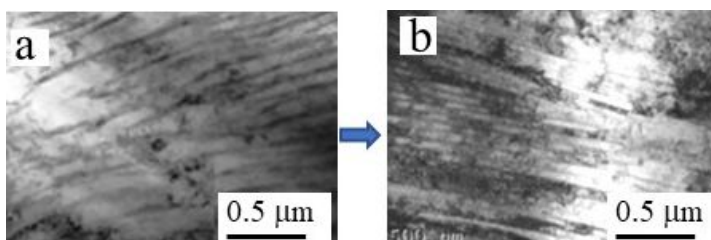


図 4. 強変形加工による組織の変化：(a) 変形加工前、(b) 変形加工後。

図 5 に、通常時効材 (CP)、過時効材 (DP)、強変形加工した DP 材 (CR-DP) および純銅の S-N 曲線を示す。また、これら材料の機械的性質と導電性 (IACS 値) を表 1 に示す。CR-DP 材は CP 材より引張強さは 1.06 倍、疲労強度は 1.46 倍、導電性は 1.64 倍となり、強度と導電性の組合せ特性が優れた材料となった。強度の増加の主因は、DP ファイバー間隔の減少により転位運動の臨界せん断応力が増加したためと考えられる。母相の加工硬化も強度の増加に寄与したと考えられるが、加工硬化はファイバー間隔の減少の影響ほど大きくはない。

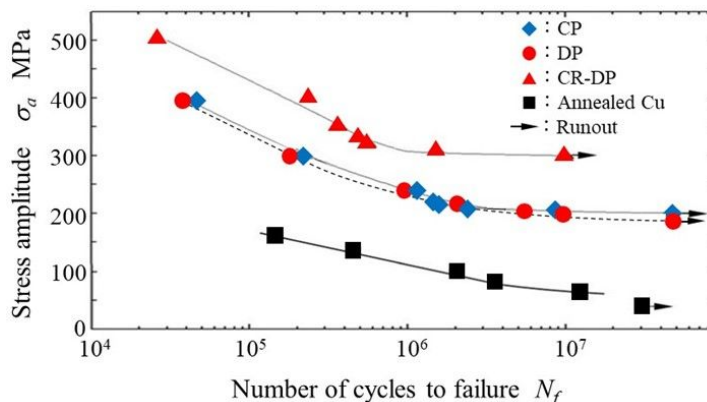


図 5. 各種材料の S-N 曲線（ \blacklozenge : 通常時効材、 \bullet : 過時効材、 \blacktriangle : 強変形した過時効材、 \blacksquare : 純銅）。

表 1. 各種材料の機械的性質と導電性 (IACS 値)。

Materials	σ_u [MPa]	σ_y [MPa]	φ [%]	Hv	σ_w [MPa]	$\frac{\sigma_w}{\sigma_u}$	IACS [%]
CP	820	634	14.3	259 ± 8	205	0.25	25
DP	567	342	18.9	187 ± 10	200	0.35	45
CR-DP	871	545	3.4	223 ± 9	300	0.34	41
Annealed Cu	232	31.6	51.5	63 ± 6	80	0.34	100

σ_u : Ultimate tensile strength, σ_y : Yield strength (0.2%), φ : Tensile elongation, Hv : Vickers hardness, σ_w : Fatigue limit at 10^7 cycles, IACS: International annealed copper standard.

強変形加工を受けた組織の疲労メカニズムを明らかにするため、ECAP加工にて組織を超微細化した銅材の損傷機構、き裂発生機構、特異なき裂進展機構を検討し以下の結論を得た。

超微細粒銅では通常結晶粒材料では認められない特異な疲労損傷形態が見られた。図6に典型的な疲労損傷域のSEM写真を示す。(a),(b)は高応力下で認められ、ECAPせん断面に沿ったせん断帯(SHB)である。(c)~(f)は低応力下で形成され、動的再結晶粒内に発生したすべり帯である。(c)の形態のすべり帯は通常結晶粒寸法の多くの材料で観察されているが、(d)~(f)は強変改加工を受けた超微細粒材に特有なものである。

組織解析と損傷形成挙動の連続観察を行い、特異な損傷形態は、1次すべり帯が発生した結晶粒の周辺の動的再結晶粒の成長とそのすべり変形により結晶粒内のひずみ場が繰返しと共に変化し、2次すべり、3次すべりが誘発された結果であることを明らかにした。また、き裂発生場所の連続観察と組織解析の結果から、き裂は高応力ではせん断帯から発生し、低応力では強変形により発生した欠陥密度の高い領域(幅 $1\mu\text{m}$ 、長さ $5\mu\text{m}$ の領域)と動的再結晶粒内のすべり帯から発生することを示した。ところで、超微細粒材のき裂進展挙動は、通常結晶粒寸法の材料で認められる一般的傾向(低応力下では粒界や結晶学的すべり方向などの組織の影響を強く受け屈曲を伴い進展し、高応力下では力学主導で巨視的には主応力方向に対し直角に進展)と逆である。この特異な進展傾向が、せん断形き裂の進展下限界応力が開口形き裂のそれより高いこと、およびき裂進展に及ぼす組織感受性が開口形き裂よりせん断形き裂の方が大きいことが関係して生じたことを明らかにした。

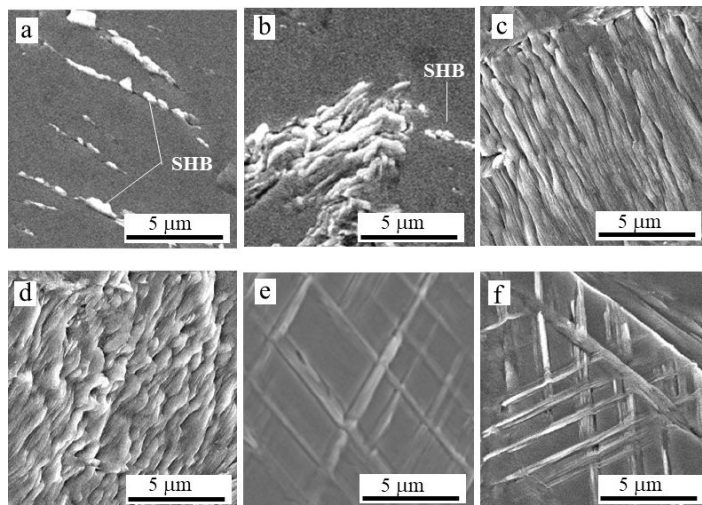


図6．応力繰返しにより認められた典型的な疲労損傷形態：

(a), (b) 高応力下 ($\sigma_a = 240 \text{ MPa}$) , (c) ~ (f) 低応力下 ($\sigma_a = 120 \text{ MPa}$) .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Masahiro Goto, Terutoshi Yakushiji, Sangshik Kim, Takaei Yamamoto, Seung Zeon Han	4. 巻 899
2. 論文標題 Formation process of fatigue slip bands with unique configurations of ultrafine-grained high-purity Cu fabricated by severe plastic deformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 163263:1/14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2021.163263	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 Masahiro Goto, Takahito Utsunomiya, Takaei Yamamoto, Seung Zeon Han, Junichi Kitamura, Jee-Hyuk Ahn, Sung Hwan Lim, Terutoshi Yakushiji	4. 巻 130
2. 論文標題 Microstructure and fatigue properties of Cu-Si alloy strengthened by Ni ₂ Si intermetallic compounds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 WIT Transactions on Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 75/86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2495/CEM210071	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 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung Zeon Han, Takahito Utsunomiya, Sangshick Kim, Junichi Kitamura, Jee-hyuk Ahn, Sung Hwan Lim, Jehyun Lee	4. 巻 288
2. 論文標題 Simultaneous increase in electrical conductivity and fatigue strength of Cu-Ni-Si alloy by utilizing discontinuous precipitates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 129353:1/5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2021.129353	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 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Jee-hyuk Ahn, Sung Hwan Lim, Sang-Jun Lee, Takahito Utsunomiya, Jehyun Lee	4. 巻 1016
2. 論文標題 Fatigue behavior of age-hardening Cu-6Ni-1.5Si alloys with different grain sizes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 125/131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.125	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 Masahiro Goto, Takaiei Yamamoto, Seung-zeon Han, Sangshik Kim, Junichi Kitamura, Terutoshi Yakushiji, Jee-hyuk Ahn, Ryohtarou Takanami, Takahito Utsunomiya, Jehyun Lee	4. 巻 142
2. 論文標題 Stress-dependent opening- and shear-mode propagation behavior of fatigue cracks in ultrafine-grained Cu fabricated by equal channel angular pressing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 105978:1/10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.105978	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 Heesoo Choi, Sumin Kim, Yongnam Kwon, Masahiro Goto, Sangshik Kim	4. 巻 27
2. 論文標題 Effect of Microstructure on High Cycle Fatigue and Fatigue Crack Propagation Behaviors of beta-Annealed Ti-6Al-4V Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metals Materials International	6. 最初と最後の頁 2239/2248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12540-019-00598-4	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 Masahiro Goto, Takaiei Yamamoto, Seung-zeon Han, Sung Hwan Lim, Sangshik Kim, Jee-Hyuk Ahn, Sang-Jun Lee, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee	4. 巻 788
2. 論文標題 Crack initiation mechanism in ultrafine-grained copper fabricated by severe plastic deformation in the high-cycle fatigue regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering A	6. 最初と最後の頁 139569:1/11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2020.139569	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 Masahiro Goto, Takaiei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Takahito Utsunomiya, Jee-Hyuk Ahn, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee	4. 巻 2309
2. 論文標題 Fatigue behavior of Cu-6Ni-1.5Si alloy with discontinuous precipitates and the effect of difference in rolling before solution heat treatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Institute of Physics Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020022:1/8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0034053	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 Masahiro Goto, Takashi Iwamura, Seung-zeon Han, Sangshik Kim, Takaei Yamamotoa, Sung-hwan Lim, Jee-hyuk Ahn, Junichi Kitamura, Jehyun Lee	4. 巻 123
2. 論文標題 Fatigue crack initiation and propagation behaviors of solution-treated and air-cooled Cu-6Ni-1.5Si alloy strengthened by precipitation hardening	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 135/143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2019.02.004	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 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung Zeon Han, Jee-Hyuk Ahn, Junichi Kitamura, Ryotarou Takanami, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee	4. 巻 125
2. 論文標題 Behavior of small fatigue-cracks in Cu-5.5Ni-1.28Si alloy round-bar specimens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 WIT Transactions on Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 3/15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2495/CMEM190011	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 葉師寺 輝敏, 徳澄 翼, 後藤 真宏	4. 巻 85
2. 論文標題 SCM435切削摩擦加工材の疲労特性に及ぼす圧縮残留応力の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集 (材料力学, 機械材料, 材料加工)	6. 最初と最後の頁 1/12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00131	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 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Junichi Kitamura, Seung Zeon Han, Ryotarou Takanami, Terutoshi Yakushiji and Jehyun Lee	4. 巻 827
2. 論文標題 Growth rate of small surface-cracks in age hardening Cu-Ni-Si alloy under cyclic stressing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 216/221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.827.216	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 Masahiro Goto, Takahei Yamamoto, Seung-zeon Han, Sung-hwan Lim, Sangshik Kim, Takashi Iwamura, Junichi Kitamura, Jee-hyuk Ahn, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee	4. 巻 747
2. 論文標題 Microstructure-dependent fatigue behavior of aged Cu-6Ni-1.5Si alloy with discontinuous/cellular precipitates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science & Engineering A	6. 最初と最後の頁 63/72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2019.01.057	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 Masahiro Goto, Takahei Yamamoto, Seung-zeon Han, Jee-Hyuk Ahn, Junichi Kitamura, Kusuno Kamil, Terutoshi Yakushiji, Toshiki Masuda, Takashi Iwamura, Sangshik Kim	4. 巻 6
2. 論文標題 Relationship between shear plane of the final pressing and fatigue crack growth behaviour of round-bar specimens of CU processed by ECAP	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements	6. 最初と最後の頁 691/702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2495/CMEM-V6-N4-691-702	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 Soojin Ahn, Daeho Jeong, Yongnam Kwon, Masahiro Goto, Hyokyung Sung, Sangshik Kim	4. 巻 111
2. 論文標題 Environmental fatigue crack propagation behavior of -annealed Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution under controlled potentials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 186/195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2018.02.013	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 Seung Zeon Han, Jee Hyuk Ahn, Young Soo You, Jehyun Lee, Masahiro Goto, Kwangho Kim, Sangshik Kim	4. 巻 24
2. 論文標題 Discontinuous precipitation at the deformation band in copper alloy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Metals and Materials International	6. 最初と最後の頁 23/27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12540-017-6626-8	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 該当する

1. 著者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Takashi Iwamura, Junichi Kitamura, Seung-zeon Han, Jee-hyuk Ahn, Sangshik Kim	4. 巻 -
2. 論文標題 Fatigue strength of precipitation hardening Cu-6Ni-1.5Si alloy produced through solution-heat-treatment with air cooling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 6th International Conference on Crack Paths	6. 最初と最後の頁 245/250
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 Masahiro Goto, Takashi Iwamura, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Terutoshi Yakushiji	4. 巻 941
2. 論文標題 Behavior of fatigue cracks generated from a small artificial-defect in plain specimen of copper processed by equal channel angular pressing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 614/619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.614	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

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takahito Utsunomiya, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Jee Hyuk Ahn, Sung Hwan Lim, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee
2. 発表標題 Microstructure and fatigue properties of Cu-Ni-Si alloy strengthened by Ni ₂ Si intrametric compounds
3. 学会等名 20th International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Terutoshi Yakushiji, Jee-hyuk Ahn, Jehyun Lee
2. 発表標題 Fatigue behavior of age-hardening Cu-6Ni-1.5Si alloys with different grain sizes
3. 学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇都宮崇人, 後藤真宏, 山本隆栄, 北村純一
2. 発表標題 超微細粒銅のき裂進展挙動に及ぼす応力レベルの影響
3. 学会等名 日本材料学会九州支部第8回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Ryotaro Takanami, Takahito Utsunomiya
2. 発表標題 Effect of applied stress amplitudes on the growth behavior of fatigue cracks in ultrafine grained Cu specimen with a small-hole
3. 学会等名 4th International Symposium on Fatigue Design and Material Defects (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung Zeon Han, Junichi Kitamura, Takahito Utsunomiya, Jee-hyuk Ahn, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee
2. 発表標題 Fatigue behavior of Cu-6Ni-1.5Si alloy with discontinuous precipitates and the effect of difference in rolling before solution heat treatment
3. 学会等名 19th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇都宮崇人, 北村純一, 山本隆栄, 後藤真宏
2. 発表標題 析出強化銅合金 Cu -6Ni-1.5Siの強度と導電性の向上
3. 学会等名 日本材料学会九州支部第7回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高浪涼太郎, 北村純一, 山本隆栄, 後藤真宏
2. 発表標題 強変形加工により作製した超微細粒銅のき裂発生機構
3. 学会等名 日本材料学会九州支部第7回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩下健, 薬師寺輝敏, 竹尾恭平, 中島祐介
2. 発表標題 切削摩擦加工材の疲労き裂発生及び停留挙動に及ぼす圧縮 残留応力の影響
3. 学会等名 日本材料学会九州支部第7回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Ryotaroh Takanami
2. 発表標題 A unique crack growth behavior of ultrafine grained copper processed by ECAP under cyclic stresses
3. 学会等名 2nd International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Jee Hyuk Ahn, Junichi Kitamura, Ryotaroh Takanami, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee
2. 発表標題 BEHAVIOUR OF SMALL FATIGUE-CRACKS IN CU-5.5NI-1.28SI ALLOY ROUND-BAR SPECIMENS
3. 学会等名 19th International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Junichi Kitamura, Seung-zeon Han, Ryotaro Takanami, Terutoshi Yakushiji, Jehyun Lee
2. 発表標題 Growth Rate of Small Surface-Cracks in Age Hardening Cu-Ni-Si Alloy under Cyclic Stressing Microstructure and fatigue behavior of precipitation hardening Cu-Ni-Si alloy
3. 学会等名 The 18th international conference on fracture and damage mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto
2. 発表標題 Improvement of electric conductivity and fatigue resistance of Cu-Ni-Si alloys strengthened by continuous and discontinuous precipitates
3. 学会等名 International Magnetism & Magnetic Materials Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤真宏, 山本隆栄, 北村純一, Seungzeon Han
2. 発表標題 強変形加工により形成した超微細粒銅の高サイクル疲労き裂発生機構 動的再結晶粒からの発生の場合
3. 学会等名 日本材料学会九州支部第6回学術講演会・総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Takashi Iwamura, Terutoshi Yakushiji
2. 発表標題 Role of precipitate microstructure near grain boundaries on the behavior of fatigue cracks in Cu-6Ni-1.5Si alloy
3. 学会等名 2018 International Conference on Material Strength and Applied Mechanics (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takashi Iwamura, Takaei Yamamoto, Seung-zeon Han, Junichi Kitamura, Terutoshi Yakushiji
2. 発表標題 Behavior of fatigue cracks generated from a small artificial-defect in plain specimen of copper processed by equal channel angular pressing
3. 学会等名 International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Seungzeon Han, Takaei Yamamoto, Junichi Kitamura, Takashi Iwamura, Terutoshi Yakushiji
2. 発表標題 Microstructure and fatigue behavior of precipitation hardening Cu-Ni-Si alloy
3. 学会等名 EMN Meeting on Alloys and Compounds (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Iwamura, Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Junichi Kitamura, Terutoshi Yakushiji
2. 発表標題 Microstructure and Fatigue strength of Cu-6Ni-1.5Si alloy
3. 学会等名 3rd International Conference on Design, Materials and Manufacturing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Goto, Takaei Yamamoto, Takashi Iwamura, Junichi Kitamura, Seung-zeon Han, Jee-hyuk Ahn, Sangshik Kim
2. 発表標題 Fatigue strength of precipitation hardening Cu-6Ni-1.5Si alloy produced through solution-heat-treatment with air cooling
3. 学会等名 The Sixth International Conference on Crack Paths (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩村貴史, 北村純一, 山本隆栄, Seungzeon Han, 後藤真宏
2. 発表標題 異なる時効組織を持つ析出硬化Cu-6Ni-1.5Si合金の疲労強度
3. 学会等名 日本機械学会機械材料・材料加工部門, 第25回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩村貴史, 北村純一, 山本隆栄, Seungzeon Han, 後藤真宏
2. 発表標題 ECAP加工した銅材の高応力下における表面き裂の進展挙動
3. 学会等名 九州支部第5回学術講演会・総会 / 第31回信頼性シンポジウム
4. 発表年 2018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	薬師寺 輝敏 (Yakushiji Terutoshi) (90210228)	大分工業高等専門学校・機械工学科・教授 (57501)	

	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 協力者	韓 承傳 (Han Seung-zeon)	韓国材料科学研究院・Structural Materials Division・ Principal Researcher	海外研究協力者
連携 研究者	山本 隆栄 (Yamamoto Takaei) (20295166)	大分大学・理工学部・准教授 (17501)	

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 Institute of Materials Science	Gyeongsang National University	Changwon National University	他1機関