

機関番号：17501

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560080

研究課題名 (和文) 超微細粒銅の電気電子材料への実用化に関する研究

研究課題名 (英文) Study on the application of ultrafine grained copper to electric materials.

研究代表者

後藤 真宏 (GOTO MASAHIRO)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：30170468

研究成果の概要 (和文)：本研究では、ECAP により結晶粒を微細化した銅を用いて、疲労メカニズムの解明を行った。そして、疲労き裂の発生挙動、繰返しによる表面硬さの変化と疲労損傷の関係、疲労き裂の進展挙動と進展機構、および平滑材の疲労寿命の大部分を支配する微小表面き裂の進展則を明らかにした。更に、長寿命域の疲労強度がほとんど改善しない理由が、非平衡粒界など組織の不安定性によることから、低温焼なましにより組織の非平衡状態を改善した銅(99.99%Cu および 99.9%Cu)を用いて疲労試験を行った。その結果、99.9%Cu に 180℃ の回復焼なましを行うことで、 $2 \times 10^7$  回疲労限度が約 1.4 倍増加することを見出した。

研究成果の概要 (英文)：In the present study, the fatigue tests of UFG copper processed by ECAP were conducted to clarify the fatigue mechanism. The experimental analysis was made and the fatigue crack initiation behavior, the relationship between the change in surface hardness and fatigue damage due to stressing, the crack growth behavior and growth mechanism, and the growth law of small surface-cracks which control the fatigue life of smooth specimens, were clarified. In addition, post-ECAP annealing was conducted to improve the fatigue strength in a long-life field because that the less improvement of fatigue strength in long life fields resulted from instability of microstructure with non-equilibrium grain boundaries. Results of copper (99.9%Cu) with post-ECAP annealing at 180℃ showed the enhanced fatigue strength at  $2 \times 10^7$  cycles (about 1.4 times of as-ECAPed copper with 99.99%Cu).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：材料強度学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：結晶粒微細化, 銅, 疲労, 微小き裂, 非平衡粒界

1. 研究開始当初の背景

(1) ECAP による結晶粒微細化は、1981 年に

Segal が集合組織制御法として提案して以来様々の観点から研究されている。超微細粒銅

を実機に使用し信頼性を確保するには、疲労機構の解明が不可欠である。近年、疲労機構解明のための研究が行われるようになったが、これまでの研究は、繰返しひずみを特定の回数与えた時点の表面を観察しただけで、形成過程を明らかにする試みは行われていない。また、多くの場合繰返し数は数万回以内である。

(2) ECAP により組織を微細化された銅の強度特性に関する一般的な結論として、引張強さは2~2.5倍程度まで向上するが、応力制御試験の長寿命域の疲労限度はほとんど増加しないことが示されている。一方、疲労強度改善に関して、低サイクル域（ひずみ制御下）の疲労強度が低温焼なましにより増加することが報告されている。しかし、高サイクル域の応力制御下の疲労強度の改善に関する報告は現在のところないようである。

(3) Fail Safe の概念に基づいて実機の設計を行う際、疲労寿命（き裂進展寿命）を予測する必要がある。切欠きなど応力集中部から発生した大寸法のき裂の進展に関して、応力拡大係数幅 $\Delta K$ により進展速度が評価できること、および同一 $\Delta K$ のもとでは超微細粒材料の進展速度は粗大粒材料より加速する傾向にあることなどの結果が幾つかの材料で報告されているが、平滑材の疲労寿命の大部分を支配する微小表面き裂について進展則を明らかにした研究は行われていない。

## 2. 研究の目的

(1) 研究開始当初の背景(1)で述べたように、実機の強度設計・保守管理を合理的に行うには、材料の信頼性を確保する必要がある。そのためには疲労機構の解明が不可欠である。さらに、実機を想定した、例えば数百万回を超える寿命域における疲労損傷を検討する必要がある。そこで、 $10^7$ 回を超える寿命域を含めた疲労機構の解明を目的とした研究を行う。

(2) 研究開始当初の背景(2)で述べたように、超微細粒銅の疲労強度はほとんど増加しない。すなわち、長微細粒銅を実用化するためには、長寿命域の疲労強度特性を改善することが必要である。ひずみ制御の低サイクル疲労では、低温焼なましにより強度特性が改善させる結果が得られているが、応力制御の高サイクル疲労では疲労強度改善の方法は報告されていない。そこで、多くの部材の設計で重要となる高サイクル域の疲労強度改善を目的とした研究を行う。

(3) 研究開始当初の背景(3)で述べたように、Fail Safe に基づいて強度設計・保守管理を合理的に行うには、き裂進展寿命を決定するパラメータを把握する必要がある。平滑部から発生した微小き裂の進展速度を決定するパラメータは明らかにされていない。そこで、

微小表面き裂の進展則を明らかにする研究を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 表面損傷形成機構とき裂進展機構：超微細粒銅（純銅）の ECAP 最終プレス方向に沿った方向性を有する疲労損傷の形成機構は明らかになりつつあるが、ランダムな方向性の損傷の形成機構については未だ明らかになっていない。このため、ほぼ同じ粒径をもち平衡状態が異なる超微細粒銅を作製し、繰返しによる表面損傷の形成過程を SEM により観察した。平衡状態の測定は示差操作熱量計により行うと共に、TEM による組織観察結果も行い、これらの結果を比較検討し表面損傷の形成、き裂進展機構と超微細粒材料の非平衡状態との関係を検討した。

(2) 組織安定性と疲労強度の改善：予備的に行っていた回復熱処理の組織安定化へ効果を踏まえ、条件の異なる熱処理を行った材料、および純度の違う超微細粒銅を作成し、引張特性、硬さ、疲労強度などの特性を調べる。また、それぞれの材料の微細化後の組織を TEM 観察を行い、組織の非平衡度の改善を行い、疲労強度の向上を図った。

(3) 余寿命評価と微小き裂進展則：実機の強度設計、保守管理を合理的に行うためには、疲労寿命を予測することが重要である。平滑材の疲労寿命は、微小表面き裂の進展寿命でほぼ決定できる。そこで、レプリカ法によりき裂発生と進展挙動を連続観察し、き裂発生・進展挙動を明らかにし、微小表面き裂の進展則を提案する。

## 4. 研究成果

(1) 表面の疲労損傷の形成過程を金属顕微鏡および SEM により観察した。 $10^7$ 回疲労強度を超える応力下では、繰返し初期に最終プレスのせん断面に沿う方向のせん断帯が発生する。一方、 $10^7$ 回を基準とした時間疲労限以下の応力振幅では、最終プレスのせん断面と突出しの関係は認められず、薄板状およびリボン状の突出しが傾いて突出した形態のものが繰返しと共に成長した。これらせん断帯の寸法は超微細粒寸法よりはるかに大きく低応力下の方が寸法は大きい。図1は、疲労前後の組織の TEM 写真である。応力繰返しにより結晶粒が粗大化している。すなわち、

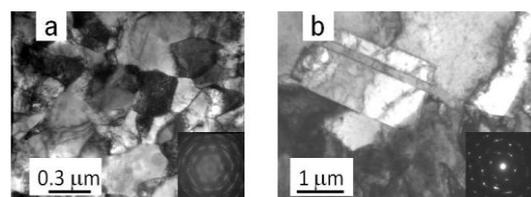


図1 TEM 写真(a)繰返し前、(b)繰返し後

せん断帯の発生に先行して動的再結晶により組織の粗大化が起こり、その後すべりによりせん断帯が形成したことになる。高応力の方が再結晶の形成サイトが多いため、せん断帯の寸法は低応力下より小さい。

(2) 引張強さは1パス目のECAPにより急激に増加するが、パス数の増加とともにその増加量は減少し、4パス以降はほぼ飽和する傾向にある。一方、伸びは1パス目の減少が特に大きく、その後3パス目までは僅かに減少し21%になる。しかし、4パス以降はパス数とともに増加する傾向にあり、8パス後の静強度がECAP前の2.4倍に増加したときでも伸びは28%ある。ただし、8パス以降は引張強さの増加は認められない。以上の結果はひずみ硬化機構のみでは説明できず、結晶粒の微細化が関与していると結論できる。S-N曲線はECAP前より長寿命側に位置し、応力が大きいほど疲労寿命の増加は著しい。しかし、長寿命域ではその差は小さくなり、 $N=5 \times 10^7$ を越える範囲でS-N曲線が一致する傾向にある。引張強さの増加に比べ $10^7$ 回の疲労限度の増加は小さく、4P材で約10%、8P材で約20%である。また、8P材の疲労寿命は4P材より疲労寿命の全域で大きい。

(3) 表面硬さは繰返しと共に減少する。図2に示すように、減少は寿命の初期は緩やかで、その主な原因は粒界における転位の消滅により転位密度が低下したことである。一方、その後の硬さの減少は著しく大きい。減少傾向が表面被害の形成傾向と密接に関係していることから、硬さの急激な減少には結晶粒の粗大化が関係すると思われる。

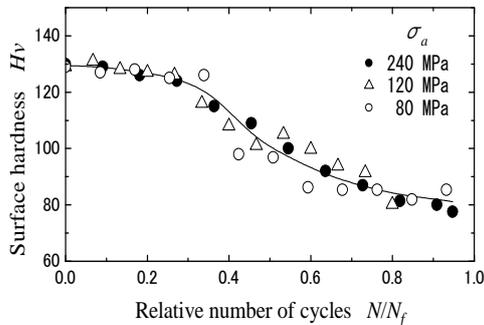


図2 表面硬さと繰返し数比の関係

(4) 主き裂は繰返しの初期にせん断帯を起点として発生する。低応力下では、 $l=0.1$  mm程度まではせん断帯に沿って直線的に進展し、その後は微視的にはジグザグであるが巨視的には主応力方向にはほぼ垂直に進展する。高応力下では、高密度のせん断帯が発生し、せん断帯に沿って進展した主き裂は、周辺のせん断帯と合体しながらせん断帯に沿った方向へ進展する。高応力下のき裂進展速度はき裂長さと共に増加するが、図3に示すように、低応力下では $l=0.1 \sim 0.4$  mmの範囲で一時的に $dl/dN$ の低下が生じる。

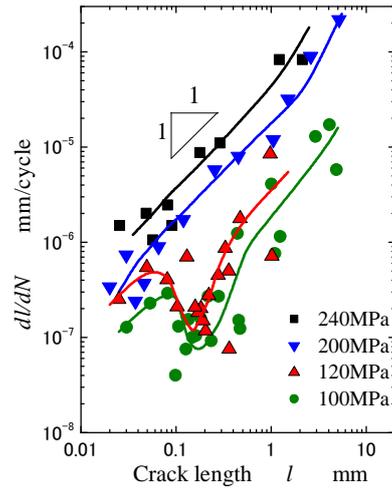


図3 き裂進展特性

(5) 疲労破面は、き裂発生後しばらくは平坦で無特徴であるが、その後き裂の進展につれ粒状、続いてストライエーションを呈するようになる。き裂先端の繰返し塑性域寸法と粒径の比を調べたところ、平坦な破面、粒状の破面およびストライエーション状の破面が認められたときの $r_{rp}/d$ の値は、いずれの応力下でもそれぞれ $r_{rp}/d < 1$ 、 $r_{rp}/d \approx 1 \sim 2$  および  $r_{rp}/d > 2$  であった。粒径と繰返し塑性域寸法の関係に破面解析の結果を併せて検討し、図4に示す超微細粒銅の表面き裂の進展機構を明らかにした。結論(4)で述べた $dl/dN$ の一時的低下には、き裂進展機構の変化が関係する(特に駆動力の小さい低応力下で進展するき裂でき裂進展機構の変化の影響が顕著に表れる)。

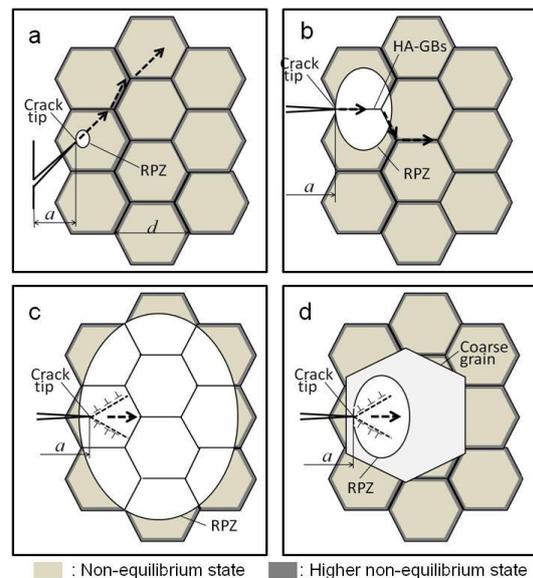


図4 き裂進展機構; (a)  $r_{rp}/d < 1$ , (b)  $r_{rp}/d \approx 1 \sim 2$ , (c)  $r_{rp}/d > 2$ , (d) 粗大結晶におけるストライエーション形成。

(6) 超微細粒銅 (UFG) とそれを 180°C で回復焼なまししたもの (UFGA) について、疲労試験を行った。図 5 に S-N 曲線を示す。回復焼なましにより引張強さは減少し、疲労寿命は、応力が大きければ UFGA 材の方が UFG 材より小さい。しかし、応力の減少と共にその差は小さくなり、 $N=10^7$  回を超える長寿命域では UFGA 材の疲労寿命の方が大きい。また、 $2 \times 10^7$  回疲労限度は、静強度が小さい UFGA の方が、UFG より 40% 程度大きい。疲労限度の改善には、き裂進展経路のジグザグ化による破面粗さ誘起き裂閉口が関係している。

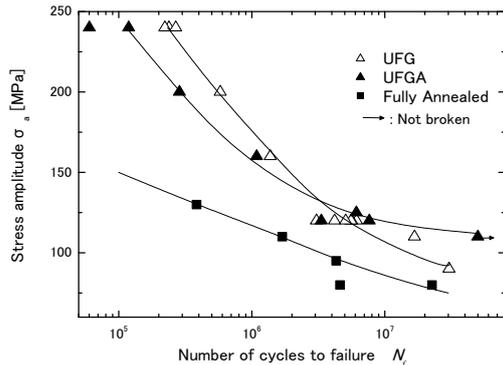


図 5 疲労強度に及ぼす回復焼なましの影響

(7) 超微細粒材の微小表面き裂の伝ば速度  $dl/dN$  は、 $\sigma_a^n l$  により決定できる。進展則の材料定数  $n$  の値は、ECAP パス数、純度に影響されず、いずれの場合も  $n=4.4$  であった。図 6 に、 $dl/dN \cdot \sigma_a^n l$  関係を示す。応力拡大係数幅により整理できない微小き裂の進展速度が一義的に決定できることが分かる。

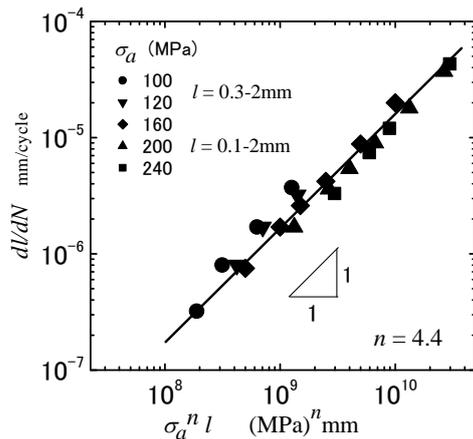


図 6  $dl/dN \cdot \sigma_a^n l$  関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 30 件)

① Masahiro Goto, Yoshinori Ando, Seung-zeon Han, Sangshik Kim, Norio Kawagoishi, Kwangjun Euh, The effect of microstructural inhomogeneity on the growth paths of surface-cracks in copper processed by equal channel angular pressing, Engineering Fracture Mechanics, Vol.77, Issue 11, 査読有, 2010, pp. 1914-1925.

② Norihiro Teshima, Masahiro Goto, Terutoshi Yakushiji, Yoshinori Ando, Seung-zeon Han, Norio Kawagoishi, Fatigue damage formation process of ultrafine grained oxygen-free copper and deoxidized phosphorous copper, International Journal of Modern Physics B, Vol. 24, Issue 15-16, 査読有, 2010, pp. 2506-2511.

③ Norio Kawagoishi, Masahiro Goto, Xishu Wang, Qingyuan Wang, Initiation and propagation behavior of a fatigue crack of allot 718, International Journal of Modern Physics B, Vol. 24, Issue 15-16, 査読有, 2010, pp. 2857-2862.

④ 後藤真宏, 安藤吉則, 韓承傳, 手島規博, 薬師寺輝敏, 金祥植, 超微細粒銅平滑材のき裂進展挙動と疲労破面, 日本機械学会論文集A編, 第76巻, 第765号, 査読有, 2010, pp. 610-616.

⑤ 皮籠石紀雄, 福留拓朗, 中村祐三, 大園義久, 後藤真宏, 時効硬化 Al 合金押し材の超音波疲労におけるせん断形き裂の伝ば, 日本機械学会論文集A編, 第76巻第767号, 査読有, 2010, pp. 938-946.

⑥ 福留拓朗, 皮籠石紀雄, 燕怒, 大園義久, 後藤真宏, 時効硬化 Al 合金の超音波疲労強度に及ぼす大気湿度の影響, 日本機械学会論文集A編, 第76巻第767号, 査読有, 2010, pp. 947-954.

⑦ Masahiro Goto, Seungzeon Han, Kwangjun Euh, Joo-Hee Kang, Sangshik Kim, Norio Kawagoishi, Formation of high-cycle fatigue fracture surface and crack growth mechanism of ultrafine grained copper with different stages of microstructural evolution, Acta Materialia, Vol. 58, Issue 19, 査読有, 2010, pp. 6294-6305.

⑧ Masahiro Goto, Seungzeon Han, Yuji Yokoho, Kazuya Nakajima, Sangshik Kim, Kwangjun Euh, The relationship between shear bands and crack growth behavior in ultrafine grained copper processed by severe plastic deformation, Key Engineering Materials, Vols. 452-453, 査読有, 2011, pp. 645-648

⑨ 皮籠石紀雄, 福留拓朗, 仮屋孝二, 陳強, 後藤真宏, 高湿度下における時効硬化 Al 合金押し材の疲労強度(回転曲げ疲労と超音

波疲労), 日本機械学会論文集A編, 第76巻, 第772号, 査読有, 2010, pp.1651-1658.

⑩ Masahiro Goto, Yoshinori Ando, Seung-zeon Han, Yuji Yokoho, Kwangjun Euh, Norio Kawagoishi, Growth behavior of a small crack in ultrafine grained copper processed by twelve passages of equal channel angular pressing, Proceedings of 18th European Conference on Fracture, CD-R (B.02.1-2), 査読無, 2010, pp. 1-8.

⑪ Masahiro Goto, Kazuya Nakashima, Seungzeon Han, Yuji Yokoho, Kwangjun Euh, Norio Kawagoishi, Fatigue Strength of Ultrafine Grained Copper Treated by Post-ECAP Mild Annealing, Proceedings of International Conference on Structural Integrity & Failure, 査読無, 2010, pp.1-6.

⑫ Masahiro Goto, Seung-zeon Han, Yoshinori Ando, Norio Kawagoishi, Norihiro Teshima, Sangshik Kim, Growth behavior of surface cracks in coarse and ultrafine grained copper, Transactions on Modeling & Simulations (WIT), Vol. 48, 査読有, 2009, p. 497-508.

⑬ Eunhal Jeong, Seungzeon Han, Masahiro Goto, Sangshik Kim, Effects of thermo-mechanical processing and trace amount of carbon addition on tensile properties of Cu-2.5Fe-0.1P alloys, Materials Science and Engineering, A520, Issue 1-2, 査読有, 2009, pp. 66-74.

⑭ Jaeki Kwon, Youngju Kim, Seungzeon Han, Masahiro Goto, Sangshik Kim, Effect of loading type on S-N fatigue behavior of SPRC340 steel sheet, Metals and Materials International, Vol.15, No. 6, 査読有, 2009, pp.925-929.

⑮ Masahiro Goto, Seungzeon Han, Sangshik Kim, Yoshinori Ando, Norio Kawagoishi, Growth mechanism of a small surface crack of ultrafine-grained copper in a high-cycle fatigue regime, Scripta Materialia, Vol.60, Issue 8, 査読有, 2009, p. 729-732.

⑯ Norio Kawagoishi, Takanori Nagano, Masahiro Goto, Yoshikazu Maeda, Michihiko Moriyama, Effect of humidity on fatigue strength of shot peened maraging steel, Transactions on Engineering Science, Vol. 62, 査読有, 2009, pp.195-203.

⑰ Seungzeon Han, Masahiro Goto, Chayong Lim, Su-hyeon Kim, Sangshik Kim, Fatigue damage generation in ECAPed oxygen free copper, Journal of Alloys and Compounds, 査読有, Vol. 483, 2009, pp.159-161.

⑱ Masahiro Goto, Yoshinori Ando,

Seung-zeon Han, Terutoshi Yakushiji, Norio Kawagoishi, Growth path of small surface-cracks in ultrafine grained copper under cyclic loading, Proceedings of 9<sup>th</sup> Inter. Conference on Crack Paths, 査読無, 2009, p. 663-670.

⑲ 皮籠石紀雄, 山根健作, 後藤真宏, 近藤英二, 森野数博, Alloy718 の中高温下におけるき裂伝ば抵抗に及ぼす結晶粒径の影響, 日本機械学会論文集A編, 第75巻, 第758号, 査読有, 2009, pp.1387-1394.

⑳ Yoshinori Ando, Masahiro Goto, Seungzeon Han, Kwangjun Euh, Norio Kawagoishi, Sangshik Kim, Fatigue strength and surface damage of copper processed by twelve passages of equal channel angular pressing, Proc. Asia Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009, 査読無, 2009, a-41 (CD-R), pp.1-4.

㉑ 皮籠石紀雄, 大園義久, 中村祐三, 後藤真宏, Alloy718 の中高温疲労におけるき裂発生について, 材料, 第58巻, 第12号, 査読有, 2009, pp. 997-1002.

㉒ Goto Masahiro, Han, Seungzon, Yakushiji, Terutoshi, Kim, Sangsik, Lim, Chayng, Fatigue strength and formation behavior of surface damage in ultrafine grained copper with different non-equilibrium microstructures, Int.ernational Journal of Fatigue, 査読有, Vol.30, Issue 8, 2008, p.1333-1344.

㉓ Goto Masahiro, Han Seungzon, Kim, Changjo, Kawagoishi Norio, Kim Sangsik, Effect of trace zirconium on the initiation and propagation behavior of fatigue cracks in Cu-6Ni-2Mn-2Sn-2Al alloy, Materials Letters, 査読有, Vol. 62, Issues 17-18, 2008, p. 2832-2835.

㉔ Han Seungzon, Goto Masahiro, Lim Chayomng, Kim, Changjoo, Kim Sangshik, Fatigue damage in nano-size grained oxygen free copper, Reviews on Advanced Materials Science, Vo.18, Issue 7, 査読有, 2008, pp. 600-603.

㉕ 皮籠石紀雄, 吉見祥吾, 後藤真宏, 中村祐三, 大園 義久, Ni 基超合金インコネル 718 の室温における疲労特性に及ぼす時効条件の影響, 日本機械学会論文集, 74 巻 743 号 A 編, 査読有, 2008 年, p.994-999.

㉖ 皮籠石紀雄, 前村英史, 陳 強, 後藤真宏, 森野数博, Ni 基超合金インコネル 718 の超音波疲労特性に及ぼす結晶粒径の影響, 日本機械学会論文集, 74 巻 743 号 A 編, 査読有, 2008 年, p.1000-1005.

㉗ 後藤真宏, 手島規博, 韓承傳, 葉師寺輝敏, 姫野貴正, 皮籠石紀雄, 超微細粒銅の疲労損傷と微小き裂進展挙動に及ぼす 160°C 焼

なましの影響, 日本機械学会論文集, 74 巻 743 号 A 編, 査読有, 2008 年, p.1006-1015.

㉘ Jang Younghwan, Kim, Sangshik, Han, Seungzeon, Lim Chayong, Goto Masahiro, Tensile behavior of commercially pure copper sheet fabricated by 2-and 3-layered accumulative roll bonding (ARB) process, Metals and Materials International, Vol.14, No.2, 査読有, 2008, pp.171-175.

㉙ Goto Masahiro, Teshima, Norihiro, Han Seungzeon, Yakushiji, Terutoshi, Kim, Sangshik, Effect of trace impurities on high-cycle fatigue damage of ultrafine grained copper processed by equal channel angular pressing, Materials Science Forum, Vols.584-86, 査読有, 2008, p.809-814.

㊀ Chen, Q., Kawagoishi, Norio, Oki, M., Goto Masahiro, Wang, Q., Crack growth behavior of Al alloy 7075-T6 under ultrasonic fatigue, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.2, No.11, 査読有, 2008, p.1399-1409

[学会発表] (計 12 件)

①後藤真宏, Cu-2.5Fe-0.1P合金の引張強さに及ぼす熱加工処理と微量の炭素添加の影響, 機械学会M&M2010材料力学カンファレンス講演会, 2010年10月10日, 長岡技術科学大学.

②横尾勇治 (後藤真宏), 微小孔を有する超微細粒銅平滑材の微小き裂進展挙動, 機械学会九州・中国四国支部合同徳島講演会, 2010年10月16日, 徳島大学工学部.

③中島和哉 (後藤真宏), 回復焼なましを行った超微細粒銅の疲労挙動, 機械学会九州・中国四国支部合同徳島講演会, 2010年10月16日, 徳島大学工学部.

④皮籠石紀雄, 時効硬化 Al 合金押し出し材の高湿度下における疲労破壊機構, 材料学会第12回フラクトグラフィシンポジウム, 2010年12月3日, 埼玉大学東京ステーションカレッジ

⑤安藤吉則 (後藤真宏), ECAPにより結晶粒を微細化した銅の微小き裂進展挙動, 日本機械学会M&M2009材料力学カンファレンス, 2009年7月26日, 北海道大学工学部.

⑥安藤吉則 (後藤真宏), 粗大粒銅と超微細粒銅の微小き裂伝ば挙動, 日本機械学会九州・中国四国支部合同長崎講演会, 2009年10月9日, 長崎大学工学部.

⑦後藤真宏, 超微細粒銅の長寿命域における疲労強度と表面損傷の形成挙動, 日本材料学会第57期学術講演会, 2008年5月25日, 鹿児島大学工学部.

⑧金丸智紀 (皮籠石紀雄, 切欠材の疲労強度に及ぼす結晶粒径の影響) 日本材料学会第57期学術講演会講演論文集, 2008年5月24日, 鹿児島大学工学部.

⑨宮園正美 (皮籠石紀雄), マルエージング鋼の疲労強度に及ぼす微視組織の影響, 日本材料学会第57期学術講演会講演論文集, 2008年5月24日, 鹿児島大学工学部.

⑩陳強, インコネル 718 の超音波疲労特性, 日本材料学会第57期学術講演会講演論文集, 2008年5月25日, 鹿児島大学工学部.

⑪安藤吉則 (後藤真宏), 超微細粒銅の高サイクル疲労における表面損傷とき裂進展挙動, 日本機械学会材料力学カンファレンス, M&M2008, 2008年9月16日, 立命館大学理工学部.

⑫ Masahiro Goto, Fatigue strength of ultrafine grained copper processed by Equal Channel Angular Pressing (ECAP) and its related phenomena, Workshop of Future Technology Research Centre, Chungbuk National University, 招待講演, September 2008年11月13日, Chingbuk 国立大学 (韓国).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

後藤 真宏 (GOTO MASAHIRO)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号: 30170468

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

韓 承傳 (HAN SEUNGZEON)  
韓国材料科学研究院・主任研究員