

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560093

研究課題名(和文)超微細粒銅は機械・機能性材料としての耐疲労特性を有するか

研究課題名(英文)Fatigue characteristics of ultrafine grained copper for the application to components

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超微細粒銅を実際の機械・電子部品に適用する際に必要となる基本的疲労特性を明らかにするために、応力繰返しによる表面の疲労損傷の形成挙動を明らかにした。次に、疲労寿命を力学的に評価する上で必要となるき裂の進展挙動を調べた。その結果、き裂進展に応力レベルと組織の方向性による違いが生じることを見出した。この原因を明らかにするために、応力変動下のき裂進展試験を行い、き裂先端付近の損傷形成挙動とせん断帯の発生状況を調べ、応力の違いによるき裂進展機構の違いを明らかにした。また、変動応力が表面の疲労被害形成に及ぼす影響を検討し、その物理的背景を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the application of ultrafine grained (UFG) copper to the actual machine structures and components, the fundamental mechanism of fatigue damage formation should be clarified. In the present study, the fatigue tests of UFG copper processed by ECAP were conducted to study formation process of fatigue damage on the specimen surface. Then the crack growth behavior, which is needed to estimate quantitatively the fatigue life, was investigated, showing a dependency of microstructure and stress amplitudes on the crack growth mechanism. To clarify the reason for the dependency, two-step loading fatigue tests were conducted. Through the observations on the damage formation and shear banding around crack tip areas, the difference in crack growth mechanism between high and low stress amplitudes were studied. In addition to these, the effect of the stress change on the formation behavior of surface damage was studied.

研究分野：工学

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 き裂進展 切欠効果

1. 研究開始当初の背景

Segal が集合組織制御法として強変形加工法の 1 種である ECAP 法提案して以来、超微細材料は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。疲労に関する研究は、その学術的興味から当初低サイクル域を中心に行われ、繰返し軟化特性、組織変化、せん断帯の発生機構、せん断帯からのき裂進展などが検討されてきた。せん断帯に関して、下部組織や表面における形状などの観察を通していくつかの発生機構が提案されているが未だ不明な点が残されている。

一方、実機への使用を考えると低サイクル疲労もさることながら、高サイクル域の疲労特性の解明が必要不可欠である。そこで、近年高サイクル域の研究も盛んに行われるようになり、応力制御下の疲労寿命 (S-N プロット) が大きく増加すること、比較的大長いき裂の進展速度が応力拡大係数幅で整理できることなどが明らかにされている。一方、疲労損傷を評価するには、繰返しによる表面損傷の形成機構、損傷痕からのき裂発生および初期き裂の進展を明らかにする必要がある。しかし、高サイクル疲労における損傷形成挙動や微小き裂の進展挙動に関する研究は少ない。

さらに、実機は変動応力かで稼動するのが普通であるので、疲労損傷に及ぼす応力変動の影響を検討することは、設計上重要である。しかし、超微細粒材料の変動応力の影響に関する知見は無いのが現状である。

2. 研究の目的

上述「1. 研究開始当初の背景」で述べた事柄に基づいて本研究では以下のことを明らかにすることを目的とした。

- ・ ECAP により組織を微細化した銅材のせん断帯の発生機構挙動を検討し、発生機構の解明する。
- ・ 微小き裂の進展挙動に及ぼす ECAP 微細組織の影響とき裂先端付近のせん断帯が進展挙動に及ぼす影響を検討し、き裂進展機構を明らかにする。
- ・ 応力変動下の超微細組織の変化を調べ、き裂進展に及ぼす応力切換えの影響を明らかにし、超微細粒銅の変動応力下の疲労損傷評価に有益な知見を得ること。

3. 研究の方法

材料は市販の無酸素銅 (99.99% Cu) であり、それを焼ならしてから (500 °C, 1h) ECAP 加工 (B<sub>c</sub> ルート, 8 パス) を行った。熱処理後の粒径は約 100 μm であり、ECAP 後の平均粒径は 300 nm 程度であった。試験片は、平滑材とみなせる丸棒試験片である。試験片製作後、電解研磨により表面を 30 μm 程度除去してから実験に供した。試験機は小野式回転曲げ疲労試験機 (容量: 14.7Nm, 60Hz) である。表面の疲労被害の観察は、金属顕微鏡 (×400) と SEM により行った。応力  $\sigma_a$  は最小断面部の公称応力振幅で定義した。

4. 研究成果

図 1 に、本材に  $\sigma_a = 240\text{MPa}$  を繰返し破断させた後の表面の疲労被害を金属顕微鏡で観察したもの

を示す ( $N_f = 1.95 \times 10^5$ )。図には表面観察を行った位置を最終プレスのあるせん断面および試験片との関係で模式的に示している。軸方向に対し 45° 傾いた影を付けた面が ECAP の最終プレス (8 パス目) におけるせん断面である。表面には方向性を持つ微細な線状の被害が分布しており、分布方向は  $\theta = 0, 180^\circ$  では軸方向にほぼ直角、 $\theta = 45, 135^\circ$  では軸方向と約 55°, また  $\theta = 90^\circ$  では軸方向に対し約 45° をなす。すなわち、疲労被害の形成は ECAP の最終せん断面と密接に関係していることが明らかである。

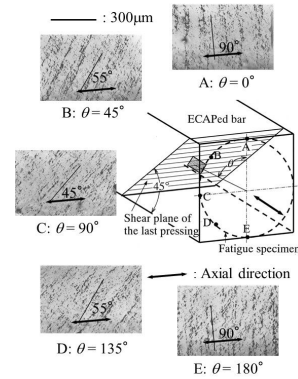


Fig.1 Shear bands in post-fatigued surface at  $\sigma_a = 240\text{MPa}$ .

図 2 に、 $\sigma_a = 240\text{MPa}$  ( $N_f = 1.95 \times 10^5$ ) を繰返したときの表面状態の変化を示す。図中の矢印は ECAP 最終プレスにおけるせん断方向である。寿命の 11% 程度で被害が確認された後、15% でせん断方向に平行な被害が数多く発生している。しかし、その後せん断方向と一致する方向に新たな被害の発生はほとんど認められず、その寸法も発生時に観察されたままであり繰返しにより濃さは多少増すが寸法の増加はほとんど認められない。一方、寿命の 20% 以降では、せん断面と関係しない方向性を持つ被害が発生し、その形態は寿命初期 ( $N/N_f < 0.2$ ) の被害の形態と明らかに異なる。

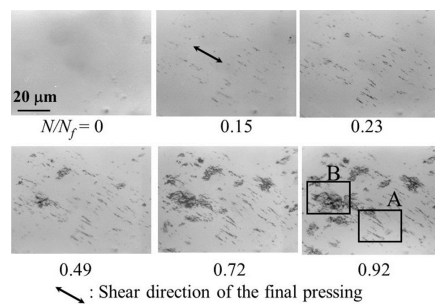
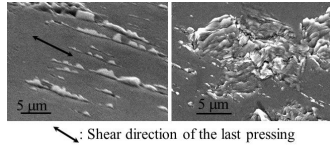


Fig.2 OM micrographs of the formation process of surface damage ( $\sigma_a = 120\text{MPa}$ ,  $N_f = 1.95 \times 10^5$  cycles).

図 3 に、図 2 の 印で囲んだ領域の SEM 写真を示す。(a) では数ミクロン以下の薄板状あるいは三角形のリボン状の突出しがせん断方向に平行に並んでいる。これは、PSB 状せん断帯 (PSB-like shear bands) と類似のものと考えられる。一方、(b) は突出しの形態と方向が PSB 状せん断帯と異なる。図 2 の連続観察結果と併せると、PSB 状せん断帯の発生がほぼ終了した後、いくつかの斜め

方向の突出しがぶつかりそれぞれが成長し全体的に盛上がっているようである。また、それぞれの突出しの方向はランダムであり、最終プレスのせん断面との関係は小さいようである。



SEM observation of **A** SEM observation of **B**

Fig.3 SEM micrographs of square limed area in Fig.2.

図 4 に、一定応力を繰返したときの、孔から発生したき裂の進展経路を示す。 $\sigma_a = 240\text{MPa}$  の場合は、き裂は主応力方向に対し  $45^\circ$  傾いた方向に直線的に進展する。一方、 $\sigma_a = 90\text{MPa}$  のき裂は、主応力方向にほぼ垂直に進展し、進展経路は、き裂の成長と共にジグザグの程度が大きくなる傾向にある。

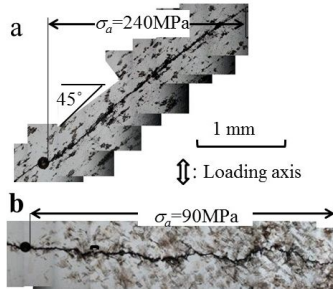


Fig.4 Crack growth paths under constant stressing.

応力レベルにより、き裂進展方向が異なる進展挙動を検討するため、2 段 2 重重複応力下の疲労試験を行った。すなわち、1 次応力 $\sigma_{a1} = 90$ (または  $240$ )MPa にて  $l = 0.55\text{mm}$  程度のき裂を発生させ、その後 2 次応力 $\sigma_{a2} = 240$ (または  $90$ )MPa を繰返した

図 5 に、応力変動下のき裂進展挙動を示す。図 a の応力上昇の場合は、主応力方向に垂直に進展したき裂は、2 次応力下で巨視的には主応力方向に垂直に進展するが、進展経路のジグザグの程度は著しく大きい。一方、図 b の応力下降の場合は、1 次応力で発生し、 $45^\circ$  方向に進展したき裂は、2 次応力(低応力)の下では進展方向を主応力方向にほぼ垂直に変えている。また、最初から低応力だけを繰返して進展させた場合(図 4b)より、進展経路のジグザグの程度は応力下降試験の方が小さい。

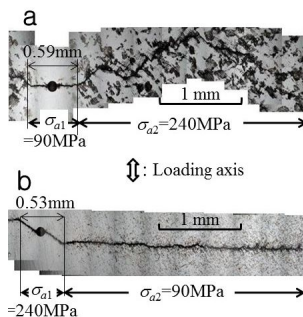


Fig. 5 Crack growth paths under two-step stressing.

図 6 に、図 5a に示した応力上昇試験の場合の、

応力切換え直後の切換え場所付近のき裂進展経路と表面状態の変化を示す。1 次応力下でき裂は  $l = 0.56\text{mm}$  に達し、き裂周辺には A, B で示す、すべり帯の損傷域が認められる。応力を切換えると同時にき裂先端から  $45^\circ$  方向にせん断き裂が発生し進展する。一定応力下( $\sigma_a = 240\text{MPa}$ )ではせん断き裂が  $45^\circ$  方向へ進展し続けたが、この場合のせん断き裂はすぐに進展を止めた。図 c の SEM 写真は、切換え直後に発生したせん断き裂の  $20\mu\text{m}$  程度前方に、新たなせん断帯の発生を示している。しかし、せん断帯はせん断帯き裂と同様に、前方にある損傷域に達した後は成長を止め(図 b)、直後に主き裂は右上  $45^\circ$  方向に向きを変え進展する。その後は、右上  $45^\circ$  および右下  $45^\circ$  方向のせん断帯の発生を伴いながら進展し、伝ば経路はかなりジグザグなものとなる。

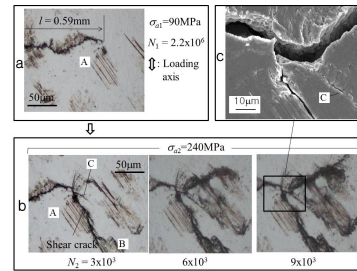


Fig. 6 Crack growth paths and surface damage just after the stress change in low-to-high block stressing.

図 7 に、図 5b に示した応力下降試験の場合の、応力切換え直後の切換え場所付近のき裂進展経路と表面状態の変化を示す。1 次応力下でき裂は  $l = 0.53\text{mm}$  に達し、き裂先端周辺には右下  $45^\circ$  方向のせん断帯が多数認められる。応力切換え後は、切換え前のき裂先端にせん断帯が新たに発生することなく、繰返しによる塑性変形が蓄積され(図 c)、き裂は主応力方向にほぼ直角に進展する。低応力ではせん断帯形成の駆動力が小さくせん断帯き裂が発生せず、非可逆な塑性変形の累積の結果としてき裂は進展したものと思われる。なお、応力下降試験では、2 次応力( $\sigma_a = 90\text{MPa}$ )の繰返しの下で、顕著な結晶粒の粗大化は認められなかった。これは、1 次応力の繰返しにより微細なせん断帯の発生や組織の粗大化(低応力に比べ寸法は小さいが密度は高い)が生じ、組織の非平衡状態が全体的に緩和されたことが関係すると思われる。このことは 2 次応力下のジグザグの少ない直線的な進展経路に繋がる。

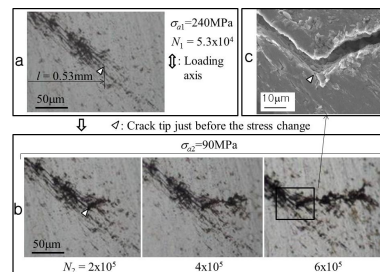


Fig. 7 Crack growth paths and surface damage just after the stress change in high-to-low block stressing.

以上の結果から、高応力下(低サイクル域)のき

裂は、最大せん断応力に誘起されたせん断帯の形成と分離機構により進展し、低応力下のき裂は、動的再結晶による結晶粒の粗大化を伴いながらき裂先端のストライエーション形成機構により進展すると結論できる。

疲労試験後の孔から発生したき裂周辺の組織変化をEBSD解析した。その結果、ECAP後の組織は、等軸結晶粒と多少引伸ばされた結晶粒からなり、GBマップにより計測した平均結晶粒径は360nm程度であった。疲労試験後の粒径はいずれの負荷形式の場合も粗大化するが、応力の大きさや変動順によりその傾向はかなり異なる。一定応力の場合、高応力下では粗大粒先方は数ミクロン程度であるが、低応力下では百ミクロンを大きく超える粗大粒が形成された。一方、変動応力の場合、応力上昇試験の粗大粒寸法は数ミクロン～数十ミクロンの範囲でばらついた。一方、応力下降試験では、ECAP後とそれほど寸法の変わらない微細粒の間に数ミクロン以下の粗大粒が形成された。始めの高応力の繰返し数が低応力のように大きくないため、この時点では粗大化がごく限られた部分にしか起きないが、その後の低応力の多数回の繰返しにより粗大化が生じたと考えられる。ただし、始めの大応力の下でエネルギーが高い組織のひずみが開放されたため、その後の低応力下では粗大化がそれほど促進されなかったと考えられる。

以上のように、変動応力下の疲労損傷を評価する際には、応力の大きさ、繰返し数のみならず変動順により組織の粗大化の程度が著しく異なることを考慮する必要がある。また、き裂の進展機構、進展方向に粗大化は影響するので、進展則を構築する際には、組織変化も反映させる必要があると思われる。

#### 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 25件)

1. Norihiro Teshima, Masahiro Goto, Seung-zeon Han, Kwangjun Euh, Kohtarou Yamauchi, Norio Kawagoishi. Surface damage and fatigue strength of ultrafine grained copper treated by mild annealing. *Key Engineering Materials*, Vols. **577-578**, 2014, pp. 145-148, 査読有.
2. Norio Kawagoishi, Kohji Kariya, Y. Maeda, E. Kinoshita, Qiang Chen. Masahiro Goto. Fatigue strength of aluminium cast alloy in plant oil. *Key Engineering Materials*, Vols. **577-578**, 2014, pp. 89-92, 査読有.
3. Dae-Ho Jung, Jae-Ki Kwon, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim, Masahiro Goto, Sangshik Kim. S-N fatigue and fatigue crack propagation behaviors of X80 steel at room and Low temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions*, Ser. A, Vol. **45**, Issue 2, 2014, pp. 654-662, 査読有.
4. Masahiro Goto, Norihiro Teshima, Sueng-Zeon, Han, Kwangjun. Euh, Terutoshi Yakushiji, Sangshik Kim, Jehyun Lee,

High-cycle fatigue strength and small-crack growth behavior of ultrafine-grained copper with post-ECAP annealing. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. **110**, 2013, pp. 218-232, 査読有.

5. Masahiro Goto, Kusno Kamil, Sueng- Zeon, Han, Kwangjun. Euh, Sangshik Kim, Jehyun Lee. Fatigue-induced grain coarsening and crack growth behavior in ultrafine-grained copper under different loading histories. *International Journal of Fatigue*, Vol. **51**, 2013, pp. 57-67, 査読有.

6. Masahiro Goto, Kusno Kamil, Sueng- Zeon, Han, Kwangjun. Euh, Sangshik Kim, Yuji Yokoho. Effects of grain refinement due to severe plastic deformation on the growth behavior of small cracks in copper. *International Journal of Fatigue*, Vol. **50**, 2013, pp.63-71, 査読有.

7. Masahiro Goto, Seung-zeon Han, Kwangjun Euh, Norihiro Teshima, Terutoshi Yakushiji, Norio Kawagoishi. Fatigue damage formation and microstructure of ultrafine grained copper under two-step loading. *WIT Transactions on Modeling and Simulation*, Vol. **55**, 2013, pp.317-326, 査読有.

8. Kohtarou Yamauchi, Masahiro Goto, Seung-zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji. Growth behavior of small surface-cracks of ultrafine grained copper at high and low cyclic stresses. *International Journal of Fracture Fatigue and Wear*, Vol. 1, No.1, 2013, pp. 42-47, 査読有.

9. Masahiro Goto, Kusno Kamil, Sueng- Zeon Han, Kwangjun. Euh, Yuji Yokoho, Sangshik Kim. Formation behavior of different topographies of crack growth path under high and low cyclic stresses in ultrafine-grained copper. *Scripta Materialia*, Vol.**66**, 2012, pp. 355-358, 査読有.

10. Masahiro Goto, Norihiro Teshima, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji. High-cycle fatigue characteristics of squeezed cast aluminum alloy smooth specimens cut from car wheels. *WIT Transactions of The Built Environment*, Vol.**124**, 2012, pp. 95-106, 査読有.

11. Kusno Kamil, Masahiro Goto, Sueng- Zeon Han, Kwangjun. Euh, Norio Kawagoishi, Sangshik Kim. Small crack growth behavior and evaluation of growth rate of copper processed by equal channel angular pressing. *International Journal of Modern Physics*, C-series, Vol.**6**, 2012, pp.245-250, 査読有.

12. Qiang Chen, Norio kawagoishi, Kohji Kariya, Masahiro Goto. Fatigue crack growth of age-hardened Al alloy under ultrasonic loading. *International Journal of Modern Physics*, C-series, Vol.**6**, 2012, pp.275-281, 査読有.

13. Hideki Maeda, Kohji Kariya, Norio

Kawagoishi, Yan Nu, Masahiro Goto. Propagation behavior of a fatigue crack of high strength Al alloy. *International Journal of Modern Physics, C-series, Vol.6*, 2012, pp.288-293, 査読有.

14. Hironori Matsusako, Kohji Kariya, Norio Kawagoishi, Qingyuan Wang, Masahiro Goto. Effect of texture on fatigue properties of age-hardened Al alloy under ultrasonic loading. *International Journal of Modern Physics, C-series, Vol.6*, 2012, pp.294-299, 査読有.

15. Kohji Kariya, Norio Kawagoishi, Hideki Maeda, Qiang Chen, Masahiro Goto, Yan Nu, Fatigue fracture mechanism of extruded Al alloy 7075-T6 in high humidity. *Key Engineering Materials, Vols.488-489*, 2012, pp.45-48, 査読有.

16. Akihiro Higashi, Kohji Kariya, Norio Kawagoishi, Qiang Chen, Masahiro Goto. Effect of microstructure on fatigue properties of Al alloys, *International Journal of Modern Physics, C-series, Vol.6*, 2012, pp.300-305.

17. Norihiro Teshima, Masahiro Goto, Sueng-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji, Yuya Tatsukawa. Effects of mild-annealing on fatigue behavior of oxygen-free copper processed by equal channel angular pressing. *Proceedings of APCFS-MM 2012, CDR, 2012*, pp. 1-8, 査読なし.

18. Kusno Kamil, Masahiro Goto, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji and Yuya Tatsukawa

Effect of Pre-stressing on the Growth Direction of Surface Cracks in Ultrafine Grained Copper. *Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Crack Paths, 2012*, pp.123-134, 査読なし.

19. Masahiro Goto, Sueng-Zeon Han, Kwangjun Euh, Norio Kawagoishi, Sangshik Kim, Kusno Kamil. Statistical description of the effect of Zr addition on the behavior of microcracks in Cu-6Ni-2Mn-2Sn-2Al alloy. *Journal of Materials Science, Vol.47, No. 3*, 2012, pp. 1497-1503, 査読有.

20. Masahiro Goto, Kazuya Nakashima, Seung-Zeon Han, Yuji Yokoho, Kwangjun Euh and Norio Kawagoishi. Fatigue Strength of Ultrafine Grained Copper Treated by Post-ECAP Mild Annealing. *Advanced Materials Research, Vol. 275*, 2011, pp. 23-26, 査読有.

21. Masahiro Goto, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh, Joo-Hee Kang, Kusno Kamil, Norio Kawagoishi, Sangshik Kim. Evaluation of crack growth rate and growth model of ultrafine grained copper. *WIT Transactions of Modeling and Simulation, Vol. 51*, 2011, pp.327-338, 査読有.

22. Masahiro Goto, Kusno Kamil, Sueng-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji, Norio Kawagoishi. Change in surface states of

ultrafine grained copper due to cyclic stresses. *WIT Transactions of Engineering Sciences, Vol. 71*, 2011, pp.135-146, 査読有.

23. 皮籠石紀雄, 仮屋孝二, 陳強, 後藤真宏, 中村祐三. 時効硬化 Al 合金押出し材のせん断形疲労き裂の伝ば機構. *材料*, 60 巻 10 号 2011, pp.890-897, 査読有.

24. Norio Kawagoishi, Kohji Kariya, Qingyan Wang, Hideki Maeda, Masahiro Goto. Effect of loading frequency on fatigue crack growth of age-hardened Al alloy. *Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Very High Cycle Fatigue*. 2011, pp.269-274, 査読なし.

25. 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*, 2011, pp. 645-648, 査読有.

〔学会発表〕(計 25 件)

1. 後藤真宏, 北村純一, Han Seungzeon, Kim Sangshik. ARB 加工された銅材の組織と引張強度. 日本機械学会九州支部第 67 期総会・講演会, 九州工業大学, 2014 年 3 月 13 日.

2. 手島規博, 後藤真宏, Han Seungzeon, 山内康太郎, 葉師寺輝敏. 超微細粒銅の疲労損傷に及ぼす低温焼なましの影響. 日本機械学会九州支部第 67 期総会・講演会, 九州工業大学, 2014 年 3 月 13 日.

3. 山内康太郎, 後藤真宏, 手島規博, Han Seung-Zeon, 葉師寺輝敏, 皮籠石紀雄. ECAP パス数の異なる超微細粒銅の疲労き裂進展特性. 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 岐阜大学, 2013 年 10 月 13 日.

4. 仮屋孝二, 陳強, 後藤真宏, 中村祐三, 前田義和. ショットピーニングによる時効硬化 Al 合金の高湿度中における疲労強度の改善. 日本機械学会鹿児島地方講演会, 鹿児島大学, 2013 年 9 月 28 日.

5. 陳強, Qingyuan Wang, 仮屋孝二, 皮籠石紀雄, 後藤真宏. 高強度金属材料の超音波疲労におけるき裂伝ば機構. 日本機械学会鹿児島地方講演会, 鹿児島大学, 2013 年 9 月 28 日.

6. Kohtarou Yamauchi, Masahiro Goto, Seung-zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji. Growth behavior of small surface-cracks of ultrafine grained copper at high and low cyclic stresses. 2nd International Symposium on Engineering Mechanics and Its Applications, 九州工業大学, 2013 年 9 月 1 日.

7. Seung-zeon. Han, Masahiro Goto, Kwangjun Euh, Jee-hyuk Ahn. Grain growth of ultrafine grained copper during cyclic stresses. (presented on Friday July 5<sup>th</sup>) The 20th International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2013), イタリア, トリノ市, 2013 年 7 月 5 日.

8. 立川 裕也, 後藤真宏, 手島 規博, 山内 康太郎, Kamil Kusno, 薬師寺 輝敏. 強変形加工により形成された銅の微細組織と疲労強度. 日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2012, 大阪工業大学, 2012年12月2日).

9. 薬師寺輝敏, 渡部杏伍, 後藤真宏, 戸高 義一. 摩擦加工を施した Ti-6Al-4V 合金の表面組織と回転曲げ疲労特性. 機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2012, 大阪工業大学, 2012年12月2日).

10. Masahiro Goto, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji and Yuya Tatsukawa, Effect of Pre-stressing on the Growth Direction of Surface Cracks in Ultrafine Grained Copper. The 4th International Conference on Crack Paths (招待講演), イタリア, Gaeta 市, 2012年9月19日.

11. 立川裕也, 後藤真宏, Han Seung-Zeon, Euh Kwangjun, Kusno Kamil. 超微細粒銅の繰返しによる結晶粒粗大化とき裂進展挙動. 日本機械学会 2012年度年次大会, 金沢大学, 2012年9月12日.

12. Masahiro Goto, Norihiro Teshima, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji. High-cycle fatigue characteristics of squeezed cast aluminum alloy smooth specimens cut from car wheels. 6th International Conference on High-Performance Structures and Materials, 連合王国, サウスサンプトン市, 2012年6月20日.

13. Norihiro Teshima, Masahiro Goto, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh, Terutoshi Yakushiji, Yuya Tatsukawa. Effects of mild-annealing on fatigue behavior of oxygen-free copper processed by equal channel angular pressing. International Conference APCFS-MM 2012, 韓国, 釜山市, 2012年5月14日.

14. Kamil Kusno, Masahiro Goto, Seung-Zeon Han, Kwangjun Euh. Fatigue fracture surface of ultrafine grained copper processed by four passes of equal channel angular pressing. 日本機械学会九州支部第 65 期総会講演会, 佐賀大学, 2012年3月16日.

15. 横尾勇治, 後藤真宏, 薬師寺輝敏, 立川裕也, Kamil Kusno, 皮籠石紀雄. 超微細粒銅のき裂進展挙動に及ぼす応力レベルの影響. 日本機械学会九州支部宮崎講演会, 宮崎大学, 2011年9月30日.

16. 後藤真宏, 横尾勇治, Kamil Kusno, Han Seung-Zeon, Euh Kwangjun. ECAP により組織を微細化した銅の微小き裂進展機構. 日本機械学会 2011年度年次大会, 東京工業大学, 2011年9月14日.

17. 松迫 洋憲, 皮籠石紀雄, 後藤真宏, 王 清遠, 中村 祐三. マルエージング鋼の疲時効硬化 Al 合金の超音波疲労における集合組織の影響. 日本機械学会 2011年度年次大会, 東京工業大学, 2011年9月14日.

18. 東晃広, 皮籠石紀雄, 後藤真宏, 王 清遠. 時効硬化 Al 合金の高湿度下における疲労特性に及ぼす組織の影響. 日本機械学会 2011年度年次大

会東京工業大学, 2011年9月14日.

19. 後藤真宏, Han Seung-Zeon, Euh Kwangjun, Kamil Kusno. 銅合金 Cu-6Ni-2Sn-2Mn-2Al のき裂発生および伝ば挙動に及ぼす微量の Zr 添加の影響. 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 九州工業大学, 2011年7月19日.

20. 仮屋孝二, 皮籠石紀雄, 後藤真宏. 時効硬化 Al 合金の疲労き裂伝ば挙動に及ぼす湿度の影響. 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 九州工業大学, 2011年7月19日.

21. Hironori Matsusako, Kohji Kariya, Norio Kawagoishi, Masahiro Goto, Effect of texture on fatigue properties of age-hardened Al alloys under ultrasonic loading. 6th International Conference on Advanced Materials Development & Performance, 徳島大学, 2011年7月15日.

22. Kusno Kamil, Masahiro Goto, Seung-seon Han, Kwangjun Euh, Norio Kawagoishi, Sang-shik Kim. Small crack growth behavior and evaluation of growth rate of copper processed by equal channel angular pressing. 6th International Conference on Advanced Materials Development & Performance, 徳島大学, 2011年7月15日.

23. Qiang Chen, Kohji Kariya, Norio Kawagoishi, Qingyan Wang, Nu Yan, Masahiro Goto. Fatigue crack growth of age-hardened Al alloy under ultrasonic loading. 6th International Conference on Advanced Materials Development & Performance, 徳島大学, 2011年7月15日.

24. Akihiro Higashi, Kohji Kariya, Norio Kawagoishi, Qiang Chen, Masahiro Goto. Effect of microstructure on fatigue properties of Al alloys. 6th International Conference on Advanced Materials Development & Performance, 徳島大学, 2011年7月15日.

25. Hideki Maeda, Kohji Kariya, Norio Kawagoishi Yan Nu, Masahiro Goto. Propagation behavior of a fatigue crack of high strength Al alloy. 6th International Conference on Advanced Materials Development & Performance, 徳島大学, 2011年7月15日.

〔図書〕(計 1 件)

1. 後藤真宏 (他 51 名), 材料強度の確率モデル, 日本材料学会, 2012年5月

#### 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) 海外研究協力者

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