

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03837

研究課題名（和文）高輝度放射光4D-DCTによるMg合金の疲労き裂発生に及ぼす双晶変形の影響の解明

研究課題名（英文）Study on influence of twin deformation to fatigue crack initiation of Mg alloy using ultra-bright synchrotron radiation 4D-DCT

研究代表者

中井 善一（Nakai, Yoshikazu）

神戸大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：90155656

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：集合組織材では、繰返し負荷を行った結果、圧縮応力下でのみ双晶帯が発生し、それは後続の引張応力下で全て消滅した。また、双晶帯とその消滅は可逆的な場合と、不可逆な場合があることがあった。一方、ランダム方位材では、引張、圧縮のいずれの応力下でも双晶帯が発生し、圧縮応力下で発生した双晶帯は、後続の引張応力負荷で消滅しなかった。さらに、双晶消滅の生じない圧縮-圧縮の繰返し負荷を多数回繰り返した場合、底面の法線(c-軸)が負荷軸方向に揃った集合組織に変化した。高輝度放射光を利用した回折コントラストトモグラフィによってミスオリエンテーションを測定した結果、の変化と変形と双晶発生との関係が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Mg合金は、結晶のすべりだけでなく双晶変形を生じなければ、塑性変形できないことが知られている。しかしながら、高サイクル疲労においては、すべり易い方位を持った結晶粒のみがすべり変形を起こし、大部分の結晶粒は塑性変形しなくても、疲労き裂が発生することを明らかにしたことが本研究の学術的意義である。一方、地球温暖化対策として、自動車を始めとした各種輸送機器に、金属材料中で最も比強度が高いMg合金を積極的に活用し、車体を軽量化することによって省エネルギー化することが必要である。本研究では、Mg合金の疲労破壊機構を解明することによって、Mg合金を用いた輸送機器の強度保証をするための基本的な指針が得られた。

研究成果の概要（英文）：In the textured material, cyclic loading showed that twinning occurred only under compressive stress, and all twinning disappeared under subsequent tensile stress. In some cases, the twinning bands and their disappearance were reversible, while in other cases, they were irreversible. On the other hand, in the randomly oriented material, twinning bands occurred under both tensile and compressive stresses, and the twinning bands that occurred under compressive stress did not disappear under subsequent tensile stress loading. Furthermore, after repeated cyclic compression-compression loading that did not cause twinning, the normal (c-axis) of the bottom surface changed to an aggregate structure with the loading axis aligned in the direction of the loading axis. Diffraction contrast tomography using high-brilliance synchrotron radiation was used to measure the misorientation. The relationship between the change in , deformation, and twinning was clarified.

研究分野：18010

キーワード：マグネシウム合金 双晶変形 双晶消滅 集合組織 高輝度放射光 トモグラフィ

## 1. 研究開始当初の背景

マグネシウム合金は hcp 構造であるためすべり系が少なく、双晶変形を起こさなければ Mises の降伏条件を満たすことができないため、多結晶マグネシウム合金を圧縮変形した場合、結晶のすべりだけでなく一部の結晶粒において双晶変形を生じることが知られていた。このため、疲労き裂発生にも双晶変形が関与しているのではないかと推測が多かったものの、決定的な証拠は見つかっていなかった。一方、Mises の降伏条件を満たさなければならないのは、全ての結晶粒が塑性変形する塑性加工や低サイクル疲労の場合であって、高サイクル疲労の場合、Schmid 因子が大きく、すべり易い方位を持った結晶粒のみがすべり変形を起こし、大部分の結晶粒は塑性変形していないことは、多くの金属材料の研究で明らかになっていた。マグネシウム合金についても、双晶変形とは関係なく、最もすべりやすい結晶粒から疲労き裂が発生しているのではないかとということが筆者らの疑問であった。

## 2. 研究の目的

地球温暖化対策として、ガソリン車・ディーゼル車から電気自動車への転換が急速に進められている。しかしながら、電気自動車は航続距離が短いという欠点を抱えている。それを解決するには、金属材料中で最も比強度が高いマグネシウム合金を積極的に活用し車体を軽量化することによって燃費を向上させることが必要である。マグネシウム合金は、各種モバイル機器などで既に使用されているが、自動車に適用するにあたっては、長期の強度保証が必要であり、そのためにも疲労破壊機構の解明が不可欠である。

マグネシウム合金の疲労破壊機構を明らかにすることが必要である。特に、前述のように、疲労き裂発生機構と双晶変形の関係については不明であったため、高輝度放射光による回折コントラストトモグラフィ (DCT) によって研究目的を達成することを本課題の目的とした。欧州シンクロトロン放射光研究所 (ESRF) の研究者によって十数年前に提案された DCT は、多結晶体を構成する全結晶粒の三次元的な形状と方位を同定する画期的な手法である。筆者らは、SPRING-8 を用いて独自に技術開発を開始した結果、結晶粒の三次元的な形状と方位だけでなく、転位密度に対応した各結晶粒のミスオリエンテーションも同時に測定することが可能とすることも、本研究の目的である。

一方、マグネシウム合金に関して EBSD による双晶変形の観察が既に数多く行われていたが、この場合、材料表面の情報に限られるとともに、マグネシウム合金は表面が酸化されやすいため EBSD では観察直前に表面を研磨する必要がある。この操作はき裂発生に影響を及ぼす可能性があるため、き裂発生過程の連続的な観察を行うことができなかった。そのため観察は疲労試験前と疲労試験後に限定されていた。さらに、双晶回復 (detwinning) のため、実際に双晶が発生しても観察時には消滅している可能性がある。逆に、研磨によって双晶が発生することもある。DCT 法では、材料内部の観察が可能のため、表面に酸化皮膜が付着していても観察に支障がなく、き裂発生点近傍における双晶変形の有無およびその形成と消滅を連続的に観察することができる。また、DCT によって、疲労過程での転位密度変化を継続的に測定することも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) DCT 測定精度の向上

高輝度放射光を用いた CT は、放射光の平行度が高いために、異材界面における放射光の屈折により物質間の界面を強調して表示することができ、これを利用すれば微小な疲労き裂を検出できる。一方、多結晶体に放射光を照射した場合、Bragg の回折条件を満たした結晶粒の影 (減衰スポット) と回折スポットが観察される。試料を回転させると、各結晶粒に対して回折条件を満たす回転角が多数存在し、異なった方向からの結晶粒の投影形状より多結晶体中の各結晶粒の三次元形状と結晶方位を再構成するのが DCT 法である。

屈折コントラスト法と DCT 法に必要な装置は同一であり、それらを組み合わせることにより、き裂発生過程から進展過程を連続的に捉えることができるが、DCT 法の場合、精度向上のために回折角の大きいスポットまで検出するには、検出器をできるだけ試料に近づけなければならないのに対して、試料と検出面間の距離が大きいほど屈折コントラストの効果が大きく疲労き裂を検出しやすいという特徴がある。これまでの DCT 観察では、試料-検出面間の距離を 10 mm に設定していたため、屈折コントラストの効果が十分ではなかった。そこで、2 台の検出器を適切な位置に配置したことにより、屈折コントラスト法および DCT を、それぞれに最適の条件でほぼ同時に実施した。

ここで、結晶粒の三次元形状と位置を再構成するためには、観察された各回折スポットがどの結晶粒からのものであるかを分類しなければならない。これまで減衰スポットの幾何学的な位置関係より判定していたが、この場合微細な結晶粒については分類が困難な場合が多く、また、結晶粒の位置に関しても誤差が大きかった。そこで、本課題では、各回折スポットのデバイ環上の位置より計算される回折面の方位関係も取り入れた分類を併用する手法を開発した。

### (2) き裂発生条件の解明

DCT 観察を行う試料台上に設置することができ、試験機より試験片を取り外すことなく DCT 観察を行うことのできるインライン疲労試験機を開発した。この場合、DCT 観察ごとの軸合わせが不要になり、SPRING-8 の限られたビームタイムを有効に利用することができる。

本課題では、疲労き裂発生メカニズムを解明するため、光学顕微鏡による試験片表面の観察

と、き裂発生部位近傍の試験片表面の EBSD (Electro Backscattered Diffraction) 法による解析を行うとともに、疲労試験を適宜中断し DCT 観察および屈折コントラスト観察を繰り返し行うことにより、き裂発生までの結晶のミスオリエンテーション変化と各結晶粒の Schmid 因子、結晶粒径、隣接結晶との方位差の関係、双晶変形の有無、き裂面の結晶方位、疲労き裂発生条件を調べた。

疲労試験は、コンピュータ制御の動電型疲労試験機を用いて、平面曲げ、室温、大気中で、応力比-1, -0.1, 0.1, 0.5, 10 で行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 集合組織材

##### ① 疲労寿命

応力振幅と疲労寿命の関係は、応力比に依存し、平均応力が高いほど同一応力振幅に対する疲労寿命は短く、疲労限度は低かったが、Smith-Watson-Topper の提案した等価応力振幅と疲労寿命の関係は、平均応力にほとんど依存しなかった。これらの結果は、双晶変形しない通常の金属材料と同様であった。

##### ② 引張りから負荷を開始した場合 (図 1)

EBSD によって観察した試験片表面の結晶方位を図 1 に示した。観察は、(a) 負荷前、(b) 引張負荷後の除荷時、(c) 圧縮負荷後の除荷時に行ったもので、図中に示したように、最大引張応力は単調応力下での引張降伏強さ  $\sigma_{YT}$  以下、最大圧縮応力 (絶対値) は単調応力下での圧縮降伏強

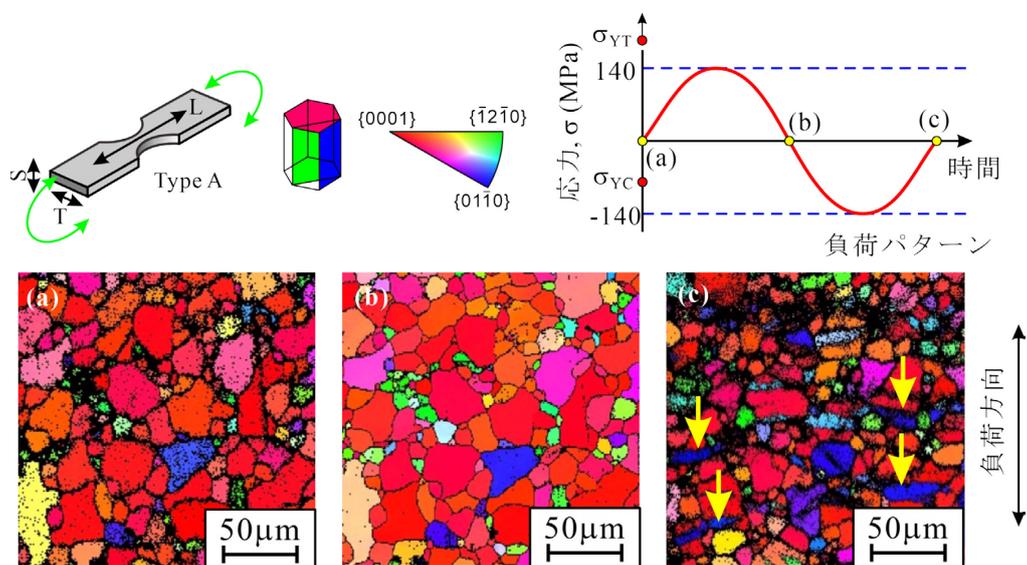


図 1. 引張りから繰返し負荷を開始した場合の結晶方位の変化 (集合組織材) .

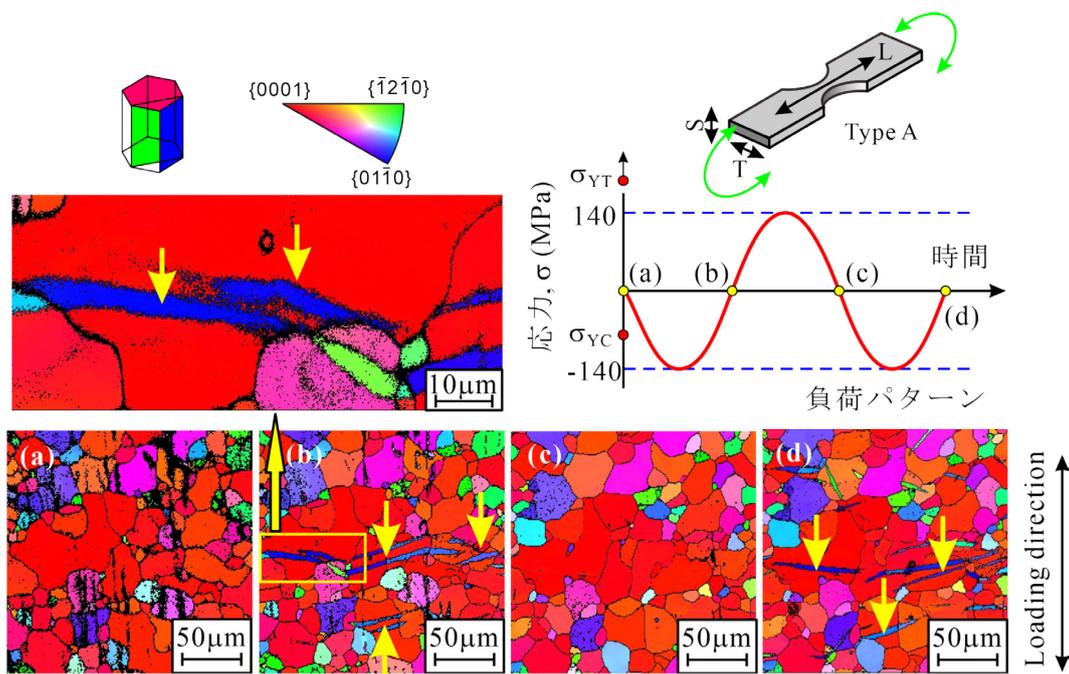


図 2. 圧縮から繰返し負荷を開始した場合の結晶方位の変化 (集合組織材) .

さ  $\sigma_{YC}$  以上である. 同図(a)に示したように, この試料には負荷前に双晶帯はなく, (b)に示したように, 引張負荷では双晶帯は形成されなかったが, (c)圧縮負荷後は, 矢印で示したような多くの双晶帯が形成された.

### ③ 圧縮から負荷を開始した場合 (図 2)

(a) 負荷前, (b) 圧縮応力除荷時, (b) 引張り応力除荷時, (c) 圧縮応力除荷時の結晶方位を示している. この場合も, 最大圧縮応力(絶対値)は単調負荷下での圧縮降伏強度  $\sigma_{YC}$  以上で, 最大引張り応力は単調負荷下での引張降伏強度  $\sigma_{YT}$  以下である. 圧縮応力後の除荷後に得られた図 2(b)および(d)では, 矢印で示したような双晶帯がみられるが, (c)で示したように, 引張負荷後の除荷後には, 新たな双晶帯が形成されることなく, すべての双晶帯が消滅している. また, (d)では, 再圧縮後, 再び双晶帯が形成されている.

### ④ き裂発生部近傍の観察 (図 3, 図 4)

き裂発生部近傍の, 基底すべり系の Schmid 因子を図 3 に示した. 結晶粒 I と II は, 粒径が大きいとともに, 基底すべり系の Schmid 因子が大きいことがわかる. また, これらの結晶粒は小さい結晶粒に隣接している. き裂が小結晶粒に隣接する大結晶粒から発生したのか, 大結晶粒に隣接する小結晶粒から発生したのかは不明であるが, き裂発生直後に大結晶粒にき裂が進展していることから, き裂発生には Schmid 因子の大きい大結晶粒の存在が必須であると考えられる.

これらの結果から, 疲労き裂は転位運動による不可逆的なすべりの結果として発生し, 高サイクル疲労き裂発生は, 双晶変形によるものではないことが明らかになった.

圧縮—圧縮疲労試験における  $N=1.0 \times 10^7$  cycles におけるき裂発生部近傍の様相を図 4 に示した. ここで, (a)は光学顕微鏡写真, (b)および(c)は EBSD 解析により得られた結晶粒の方位, (d)は Schmid 因子である. EBSD 解析では粒界とき裂の区別が難しいため, 図 4(b), (c), (d)では光学顕微鏡によって観察したき裂の輪郭を白線で示した. 図 4(b)は, き裂がミスフィットの大きい

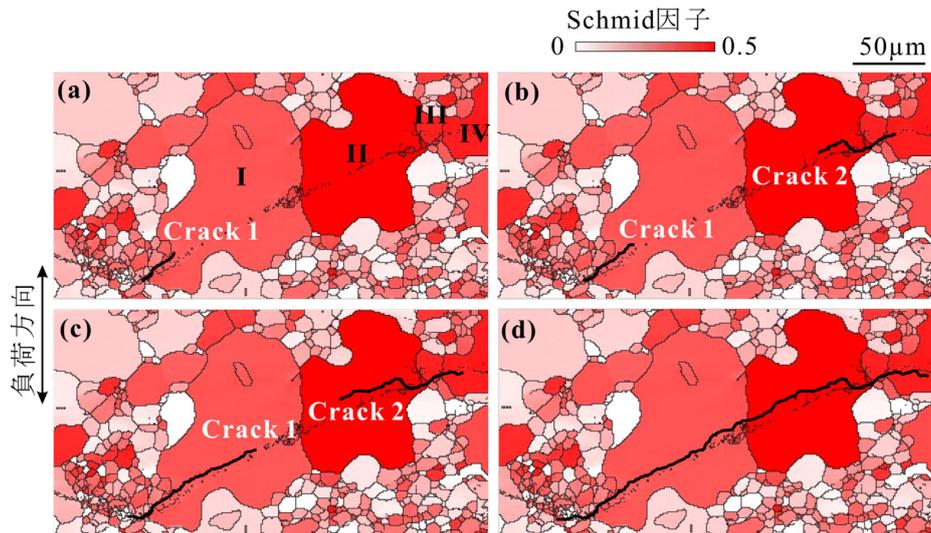


図 3. き裂発生点近傍の結晶粒の Schmid 因子とき裂形態 (集合組織材, 応力振幅 120 MPa, 応力比 -1). (a)  $N=2.0 \times 10^3$ , (b)  $N=4.0 \times 10^3$ , (c)  $N=1.2 \times 10^4$ , (d)  $N=2.0 \times 10^4$  cycles.

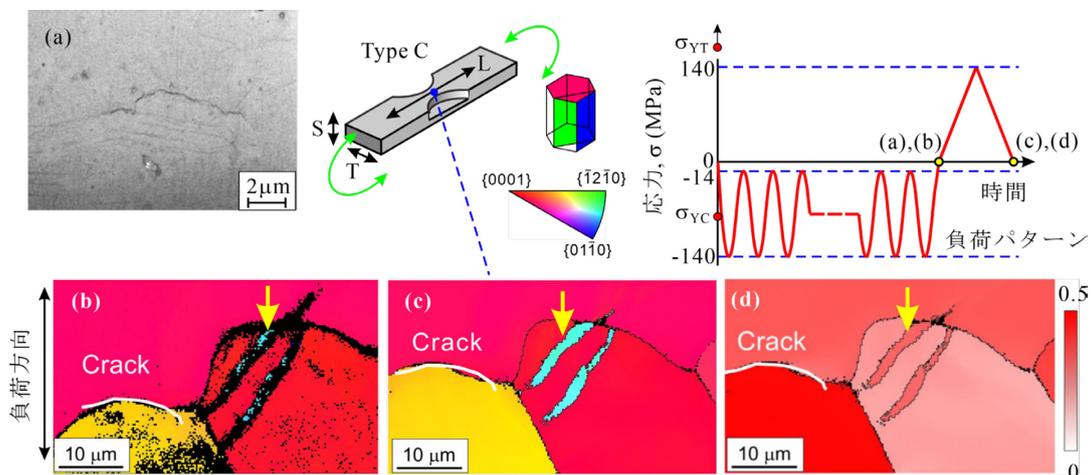


図 4. 圧縮—圧縮疲労におけるき裂発生(集合組織材, 応力比 = 10). (a) 光学顕微鏡写真 ( $N=1.0 \times 10^7$  cycles), (b), (c) IPF マップ, (d) Schmid 因子.

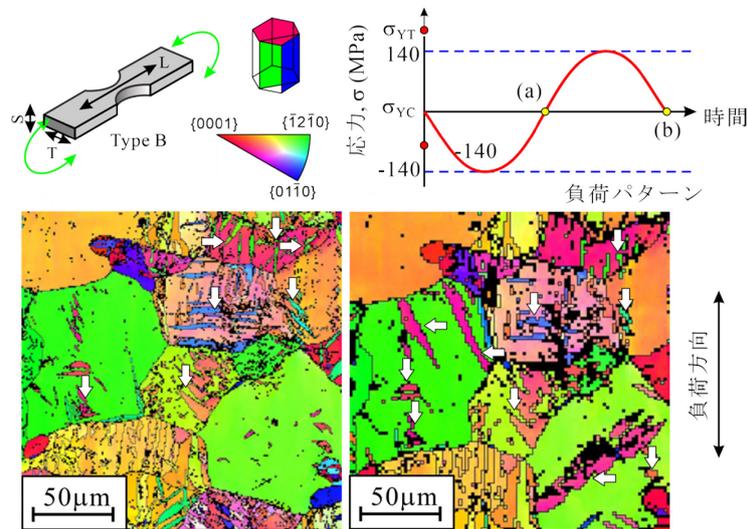


図 5. 圧縮から繰返し負荷を開始した場合の結晶方位の変化（ランダム方位材）。

粒界に沿って疲労き裂が発生していることを示している。また、き裂発生部近傍には、基底すべり系の Schmid 因子が高い結晶粒が多かった。き裂先端近傍には、矢印で示したような双晶帯が形成されているが、き裂発生部では双晶帯は観察されない。したがって、この場合も、双晶変形はき裂発生メカニズムに影響を与えていなかったものと考えられる。この観察の後、試験片に引張応力を加え、除荷した後の結晶方位を(c)、Schmid 因子を(d)に示した。図 2 に示したように、両振り疲労では圧縮応力により形成された双晶帯は、その後、引張応力負荷によって消滅したが、図 4(c)に示すように圧縮—圧縮疲労によって形成された双晶帯は、試験後の引張応力負荷によっては双晶は消滅しない。

### ⑤ 超高輝度放射光 DCT による観察

以上は EBSD による試験片表面の観察結果であるが、本研究では、超高輝度放射光を用いた屈折コントラストトモグラフィー(DCT)によって、集合組織材内部の各結晶粒の形状を三次元的に再構成するとともに、各結晶面のミスオリエンテーションを測定することに成功した。その結果、通常、双晶変形しない金属材料では、塑性ひずみとともにミスオリエンテーションは増加するが、マグネシウム合金では、圧縮応力の増加に伴いミスオリエンテーションの平均値が減少し、圧縮応力下で双晶が生成していることが明らかになった。また、いくつかの結晶粒の回折スポットの形状より、圧縮応力下で双晶が生じ、引張応力下で双晶が消滅していることも明らかになった。このような観察結果は、EBSD 解析の試験片表面における観察結果と一致するものである。

### (2) ランダム方位材 (図 5)

表面結晶粒の方位がランダムな材料の、圧縮側から繰返し負荷した場合の結晶方位の変化を図 5 に示した。(a)は、圧縮応力負荷後除荷した時の結晶方位である。この場合、下向き矢印で示したような双晶帯が形成され、(a)に右向き矢印で示した圧縮応力下で形成された双晶帯の一部は(b)に示したように双晶回復により消滅したが、下向き矢印で示した双晶帯は残存している。さらに、(b)の左向き矢印で示すような双晶帯が、引張応力下で新たに出現しており、圧縮応力下だけでなく、引張応力下でも、c 軸が応力方向と平行な結晶粒に双晶帯が形成されることを示している。

なお、結晶方位がランダムな材料でも、圧縮—圧縮疲労中に結晶方位が変化し、集合組織に変化することが分かった。これは、双晶変形を繰り返した結果であると考えられる。

### (3) 調和組織材

DCT によるミスオリエンテーション測定では、全結晶粒の平均値を求めることに成功したが、疲労き裂発生メカニズムを明らかにするためには、き裂発生の起点となった結晶粒の繰返し中の転位密度変化を測定することが必要である。このような技術を開発するため、粗大粒組織(Core)を微細粒組織(Shell)が取り囲む調和組織を有するオーステナイト系ステンレス鋼について DCT 解析を行ない、各結晶粒の三次元形状と位置を再構成するだけでなく、疲労過程における過剰転位密度の変化  $\Delta\rho$  も測定した。その結果、 $\Delta\rho$  は回折面、Schmid 因子、結晶粒径に依存し、調和構造材料の疲労過程における  $\Delta\rho$  の変化は従来材料よりも小さいことがわかった。この結果は、調和構造中の微細結晶粒のネットワークが微視的変形を担い、粗大結晶粒の変形を抑制していることを示している。さらに、き裂発生に無関係な結晶粒の  $\Delta\rho$  はサイクル数とともに連続的に増加するのに対し、き裂発生部位近傍の  $\Delta\rho$  はき裂発生とともに減少することがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 中井善一, 菊池将一	4. 巻 73
2. 論文標題 K漸減疲労き裂伝ば試験法とき裂開閉口測定方法の改善 - JIS規格制定に向けて	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 材料に掲載可	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshikazu Naka, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Hitoshi Saito, Takashi Nishina, and Hiroshi Kobayashi, Taizo Makino, and Yutaka Neishi	4. 巻 45
2. 論文標題 Inclusion orientation dependent flaking process in rolling contact fatigue observed by laminography using ultra-bright synchrotron radiation X-ray	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 2200-2214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adem.202201836	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 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Daiki Shiozawa, Issei Nakazawa, Keisuke Fujita, Mie O. Kawabata and Kei Ameyama	4. 巻 43
2. 論文標題 Misorientation Measurement in Tensile Test of Bimodal Harmonic Structured Stainless Steel by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation X-ray	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Procedia Structural Integrity	6. 最初と最後の頁 221-227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adem.202201836	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 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Daiki Shiozawa, Takumi Hase, Issei Nakazawa, Keisuke Fujita, Mie O. Kawabata, and Kei Ameyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Dislocation Density of Coarse and Fine Grains in Bimodal Harmonic Structured Steel Observed by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 202201836
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adem.202201836	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 Yoshikazu Nakai, Tsuyoshi Hirai, Shoichi Kikuchi	4. 巻 254
2. 論文標題 Compliance Method to Measure Crack Length and Crack Closure for Automated Fatigue Crack Propagation Test of Nanocrystalline Nickel Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 107923-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2021.107925	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 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Kaito Asayama, Hayata Yoshida	4. 巻 826
2. 論文標題 Twinning, Detwinning and Fatigue Crack Initiation in Extruded Magnesium Alloy AZ31	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 141941-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2021.141941	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 菊池将一, 中井善一	4. 巻 68
2. 論文標題 調和組織を有するチタン系材料の下限界近傍における疲労き裂伝ば特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 チタン	6. 最初と最後の頁 142-146
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 菊池将一, 川井考生, 中井善一, 中村裕紀, 赤堀俊和	4. 巻 69
2. 論文標題 生体用低ヤング率チタン合金Ti-29Nb-13Ta-4.6Zrの下限界近傍における疲労き裂伝ば特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 875-881
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.69.875	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 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Kaito Asayama, Hayata Yoshida	4. 巻 1016
2. 論文標題 Stress Ratio Effect on Fatigue Crack Initiation Mechanism of Magnesium Alloy AZ31	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 1003-1008
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.1016.1003	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 Y. Nakai, S. Kikuchi, K. Osaki, M.O. Kawabata, and K. Ameyama	4. 巻 143
2. 論文標題 Effects of rolling reduction and direction on fatigue crack propagation in commercially pure titanium with harmonic structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 106018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.106018	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 Shoichi Kikuchi, Yuta Nakatsuka, Yoshikazu Nakai, Masashi Natakani, Mie Ota Kawabata, Kei Ameyama	4. 巻 48
2. 論文標題 Evaluation of fatigue properties under four-point bending and fatigue crack propagation in austenitic stainless steel with a bimodal harmonic structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frattura ed Integrita Strutturale	6. 最初と最後の頁 545-553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3221/IGF-ESIS.48.52	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 Yoshikazu Nakai, Ryota Takeshige, Tsuyoshi Hirai, Shoichi Kikuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Brightener on Mechanical and Fatigue Properties of Electrodeposited Nanocrystalline Nickel Thin Films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 13th International Conference on the Mechanical Behaviour of Materials (ICM13)	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Yuki Nakagawa, Kaito Asayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Observations of Twinning and Detwinning in Magnesium Alloy by Synchrotron Radiation DCT and EBSD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia Structural Integrity	6. 最初と最後の頁 -
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 Shoichi KIKUCHI, Yuhei NUKUI, Yuta NAKATSUKA, Yoshikazu NAKAI, Masashi NAKATANI, Mie Ota KAWABATA, Kei AMEYAMA	4. 巻 127
2. 論文標題 Effect of Bimodal Harmonic Structure on Fatigue Properties of Austenitic Stainless Steel under Axial Loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 222-228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.016	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 Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Naoya Asakawa, Kenji Nonaka, and Shoichi Kikuchi	4. 巻 2
2. 論文標題 Fatigue Damage Evaluation by Diffraction Contrast Tomography Using Ultra-Bright Synchrotron Radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ICEM18-05210	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 Yoshikazu NAKAI, Shoich KIKUCHI, Hideki OKAE, Masahiko SAKA, Hayata YOSHIDA	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Twinning and Detwinning on Fatigue Crack Initiation and Propagation Paths in Magnesium Alloy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 6th International Conference on Crack Paths (CP 2018)	6. 最初と最後の頁 -
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 Yoshikazu NAKAI, Masahiko SAKA, Hayata YOSHIDA, Kaito ASAYAMA, and Shoich KIKUCHI	4. 巻 123
2. 論文標題 Fatigue Crack Initiation Site and Propagation Paths in High-cycle Fatigue of Magnesium Alloy AZ31	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 248-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2019.02.024	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 -

[学会発表] 計43件(うち招待講演 6件/うち国際学会 17件)

1. 発表者名 中井善一
2. 発表標題 疲労部門委員会・国際・国内規格対応委員会の活動
3. 学会等名 日本材料学会第355回疲労部門委員会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中井善一, 菊池将一, 塩澤大輝, 長谷卓海, 中澤一成, 藤田佳祐, 川畑美絵, 飴山恵
2. 発表標題 調和組織材料中の粗粒および微細粒における過剰転位密度の高輝度放射光を用いた回折コントラストトモグラフィーによる測定
3. 学会等名 日本材料学会・第57回X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Tsuyoshi Hirai, Shoich Kikuchi
2. 発表標題 Effect of Grain Size and Force Ratio on Fatigue Crack Propagation Behavior of Nanocrystalline Ni Thin Film
3. 学会等名 19th International Conference on Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中井善一
2. 発表標題 高輝度放射光を利用した疲労損傷の評価
3. 学会等名 日本材料学会・第350回疲労部門委員会 研究討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, , Shoichi Kikuchi, Daiki Shiozawa, Issei Nakazawa, Keisuke Fujita, Mie O. Kawabata, Kei Ameyama
2. 発表標題 Misorientation Measurement in Tensile Test of Bimodal Harmonic Structured Stainless Steel by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation X-ray
3. 学会等名 10th International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Daiki Shiozawa, Issei Nakazawa, Keisuke Fujita, Mie O. Kawabata, Kei Ameyama
2. 発表標題 Misorientation of Grains in Deformation Process of Bimodal Harmonic Structured Steel Observed by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation
3. 学会等名 Materials Science and Engineering Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Fujita, K. Ameyama, H. Fujiwara, Y. Ishimura, M.O. Kawabata, S. Kikuchi, Y. Nakai
2. 発表標題 High cycle fatigue properties of notched austenitic stainless steel with harmonic structure under axial loading
3. 学会等名 Materials Science and Engineering Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田佳祐, 石村芳暉, 中井善一, 川畑美絵, 藤原弘, 飴山恵, 菊池将一
2. 発表標題 調和組織制御による切欠き効果フリーステンレス鋼の創成
3. 学会等名 日本材料学会・第35回疲労シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Daiki Shiozawa, Kenji Nonaka, Issei Nakazawa, Keisuke Fujita, Mie O. Kawabata, Kei Ameyama
2. 発表標題 Evaluation of Dislocation Density in Bimodal Harmonic Structured Stainless Steel Observed by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation X-ray
3. 学会等名 27th International Conference on Fracture and Structural Integrity
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Kohei Osaki, Mie O. Kawabata, Kei Ameyama
2. 発表標題 Effect of Grain Size and Force Ratio on Fatigue Crack Propagation of Commercially Pure Titanium with Harmonic Structure
3. 学会等名 5th International Symposium on Hetero Structure and Advanced Materials
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shoichi Kikuchi, Yoshiki Ishimura, Keisuke Fujita, Yoshikazu Nakai, Mie O. Kawabata, Hiroshi Fujiwara, Kei Ameyama,
2. 発表標題 Observation of misorientation behavior in SUS304 and SUS316L with Harmonic structure by synchrotron DCT under tensile and cyclic loading
3. 学会等名 5th International Symposium on Hetero Structure and Advanced Materials
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daiki Shiozawa, Issei Nakazawa, Shoichi Kikuchi, Yoshikazu Nakai, Mie O. Kawabata, Kei Ameyama
2. 発表標題 Fatigue Properties of Notched Austenitic Stainless Steel with Harmonic Structure
3. 学会等名 5th International Symposium on Hetero Structure and Advanced Materials
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Kaito Asayama, Hayata Yoshida, and Shoichi Kikuchi
2. 発表標題 Stress Ratio Effect on Fatigue Crack Initiation Mechanism of Magnesium Alloy AZ31
3. 学会等名 THERMEC'2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nakai, S. Kikuchi, K. Osaki, M.O. Kawabata, and K. Ameyama
2. 発表標題 Effects of grain size on fatigue crack propagation in rolled commercially pure titanium with harmonic structure
3. 学会等名 EUROMAT 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井善一, 菊池将一, 藤田佳佑
2. 発表標題 疲労き裂伝ば下限界の迅速測定法の提案(基調講演)
3. 学会等名 日本材料学会・第20回破壊力学シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Kaito Asayama, Hayata Yoshida
2. 発表標題 Twinning, Detwinning and Crack Initiation in Compression-compression Fatigue of Extruded Magnesium Alloy AZ31
3. 学会等名 TMS 2022 Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai
2. 発表標題 Evaluation of Fatigue Damage Using Ultra-bright Synchrotron Radiation X-ray
3. 学会等名 2nd International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoichi Kikuchi, Kohei Osaki, Mie O. Kawabata, and Kei Ameyama
2. 発表標題 Effect of Rolling on Fatigue Crack Propagation in Harmonic Structured Commercially Pure Titanium
3. 学会等名 TMS 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池将一, 塩澤大輝, 中井善一, 川畑美絵, 飴山 恵
2. 発表標題 高輝度放射光を用いたDCTインライン計測による調和組織制御オーステナイト系ステンレス鋼の疲労損傷評価
3. 学会等名 日本金属学会春期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池将一, 温井悠平, 中塚悠太, 中井善一, 中谷仁, 川畑美絵, 飴山恵
2. 発表標題 調和組織を有するSUS304L の疲労特性および疲労き裂伝ば特性評価
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝山快音, 吉田隼大, 菊池将一, 中井善一
2. 発表標題 マグネシウム合金AZ31 における疲労き裂の発生および伝ばと双晶変形の関係
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Yuki Nakagawa, Kaito Asayama
2. 発表標題 Observations of Twinning and Detwinning in Magnesium Alloy by Synchrotron Radiation DCT and EBSD
3. 学会等名 9th International Conference on MATERIALS STRUCTURE & MICROMECHANICS OF FRACTURE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoich Kikuchi, Daiki Shiozawa, Kenji Nonaka, Takumi Hase, Yuki Nakagawa, Kei Ameyama
2. 発表標題 Misorientation and Deformation in Bimodal Harmonic Structured Stainless Steel by Synchrotron Radiation Diffraction and Refraction Contrast Imaging
3. 学会等名 EUROMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nakai, H. Enomoto, R. Takeshige, T. Hirai, S. Kikuchi
2. 発表標題 Effect of Grain Size and Grain Boundary Stability on Fatigue and Fracture of Nanocrystalline Nickel Thin Film
3. 学会等名 New Trends in Fatigue and Fracture - NT2F19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nakai, S. Kikuchi, D. Shiozawa, K. Nonaka, T. Hase, Y. Nakagawa, K. Ameyama
2. 発表標題 Evaluation of Misorientation and Local Deformation in Bimodal Harmonic Structured Stainless Steel by Hybrid Imagings of Diffraction and Refraction Contrast Using Synchrotron Radiation X-ray
3. 学会等名 TMS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒川諒, 平井豪, 中井善一, 菊池将一
2. 発表標題 ナノ結晶ニッケル薄膜の疲労き裂伝ば挙動に及ぼす結晶粒径および応力比の影響
3. 学会等名 日本機械学会関西支部・関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉山雄一, 朝山快音, 菊池将一, 中井善一
2. 発表標題 マグネシウム合金の圧縮-圧縮疲労における微小き裂発生と進展に及ぼす双晶変形の役割
3. 学会等名 日本機械学会関西支部・関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木雅博, 大崎航平, 菊池将一, 中井善一, 石橋信治, 嶋田慶太, 水谷正義, 厨川常元
2. 発表標題 Ti-6Al-4V 合金の疲労き裂伝ば特性に及ぼす三次元金属積層造形条件の影響
3. 学会等名 日本機械学会関西支部・関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 羽地貴哉, 中井善一
2. 発表標題 4点曲げ試験における SCM 材の疲労寿命と破壊過程
3. 学会等名 日本機械学会関西支部・関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田柁志, 長谷卓海, 三島一郎, 中井善一, 塩澤大輝, 菊池将一
2. 発表標題 放射光 DCT インライン計測による SUS304L の疲労損傷の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部・関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本修治, 菊池将一, 中井善一, 川畑美絵, 飴山恵
2. 発表標題 切欠きを有する調和組織制御オーステナイト系ステンレス鋼の疲労特性
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nakai, D. Shiozawa, N. Asakawa, K. Nonaka, and S. Kikuchi
2. 発表標題 Fatigue Damage Evaluation by Diffraction Contrast Tomography Using Ultra-Bright Synchrotron Radiation
3. 学会等名 International Conference on Experimental Mechanics (ICEM 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池将一, 塩澤大輝, 野中謙次, 長谷卓海, 中川湧紀, 中井善一, 飴山恵
2. 発表標題 高輝度放射光を用いたDCT- $\mu$ CTインライン計測によるSUS304L調和組織材の引張損傷評価
3. 学会等名 日本材料学会第52回X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Shoich Kikuchi, Hideki Okae, Masahiko Saka, and Hayata Yoshida
2. 発表標題 Effect of Twinning and Detwinning on Fatigue Crack Initiation and Propagation Paths in Magnesium Alloy
3. 学会等名 The 6th International Conference on Crack Paths (CP 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中井善一, 塩澤大輝, 菊池将一
2. 発表標題 調和組織材の引張過程におけるミスオリエンテーション変化の観察
3. 学会等名 第15回SPring-8産業利用報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai
2. 発表標題 Effect of inclusion orientation on rolling contact fatigue processes observed by laminography using ultra-bright synchrotron radiation
3. 学会等名 2nd International Conference on Structural Integrity and Durability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai
2. 発表標題 Evaluation of Fatigue Damage Using Ultra-bright Synchrotron Radiation X-ray
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 朝山快音, 吉田隼大, 菊池将一, 中井善一
2. 発表標題 マグネシウム合金AZ31 における微小疲労き裂発生および伝ば挙動の観察
3. 学会等名 日本材料学会第34回 疲労シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷 卓海, 中川 湧紀, 野中 謙次, 塩澤 大輝, 中井 善一, 菊池 将一
2. 発表標題 放射光回折コントラストトモグラフィーによるマグネシウム合金 AZ31 の引張 - 圧縮過程における変形挙動の観察
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 南家健太, 吉田隼大, 朝山快音, 菊池将一, 中井善一
2. 発表標題 マグネシウム合金 (AZ31) の疲労過程における双晶の発生・回復のEBSDによる分析
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会 2018年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相良俊介, 中川湧紀, 長谷卓海, 中井善一, 塩澤大輝, 菊池将一
2. 発表標題 放射光回折コントラストトモグラフィによる調和組織ステンレス鋼の転位密度評価
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会 2018年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朝山快音, 吉田隼大, 菊池将一, 中井善一
2. 発表標題 マグネシウム合金AZ31 における疲労き裂の発生および伝ばと双晶変形の関係
3. 学会等名 日本材料学会第68 期通常総会・学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Yuki Nakagawa, Kaito Asayama
2. 発表標題 Observations of Twinning and Detwinning in Magnesium Alloy by Synchrotron Radiation DCT and EBSD
3. 学会等名 9th International Conference on Materials Structure & Micro Mechanics of Fracture (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中井善一, 他41名	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本材料学会	5. 総ページ数 439
3. 書名 機械材料学 第5版	

〔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	塩澤 大輝  (Shiozawa Daiki)  (60379336)	神戸大学・工学研究科・准教授   (14501)	
研究 分担者	菊池 将一  (Kikuchi Shoichi)  (80581579)	静岡大学・工学部・准教授   (13801)	

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