

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：14501  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26289008  
研究課題名(和文) 高輝度放射光を用いた回折コントラスト・ラミノグラフィーによる4D材料損傷評価

研究課題名(英文) 4D Fatigue Damage Evaluation by Diffraction Contrast Laminography Using Ultra Bright Synchrotron Radiation

研究代表者  
中井 善一 (NAKAI, YOSHIKAZU)  
神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90155656  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：多結晶金属材料中の個々の結晶粒の位置と形状を3次元的に再構成する技術として、回折コントラスト・ラミノグラフィーを開発し、ステンレス鋼とマグネシウム合金のインライン疲労試験に適用した。その結果、個々の結晶粒のミスオリエンテーションを測定した結果、1つの試料中のミスオリエンテーションの平均値は、繰返数とともに増加したが、その変化は主すべり面で最大であった。また、主すべり面の中でも、Schmid因子の大きい面のほうが、その最も大きい結晶粒で疲労き裂が発生した。次いでマグネシウム合金の双晶変形を観察した結果、双晶変形は疲労き裂発生に重要な役割を果たしていないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional grain mapping techniques for polycrystalline materials, called X-ray diffraction contrast laminography, were developed. This technique was applied to inline fatigue tests of a stainless steel and a magnesium alloy. The shape and location of grains could be determined. To evaluate the dislocation structure in fatigue of a stainless, the total misorientation of individual grains was measured. The average value of the total misorientation over one sample was increased with the number of cycles. In a grain, the change of the total misorientation was largest for the primary slip plane. The maximum change of the total misorientation in fatigue was larger for planes with larger Schmid factor, and the first fatigue crack initiation was occurred in a grain, which had the greatest change of the total misorientation. The twin deformation in magnesium alloy was also observed, and it was found that twin deformation was not play an important role for fatigue crack initiation.

研究分野：5501

キーワード：疲労損傷 高輝度放射光 ラミノグラフィー インライン疲労試験 回折コントラスト

## 1. 研究開始当初の背景

通常、工業用や医療用に用いられている X 線 CT イメージングは、材質による X 線吸収率の違いを利用して内部構造を有する固体内の物質の 3 次元像を得る手法であり、吸収コントラスト法と呼ばれている。それに対して、平行度が高い高輝度放射光による CT イメージングでは、異材界面における X 線の屈折を利用することにより、密度差の少ない物質間の界面を強調して表示することができ、より明瞭な物質像を得られること。研究代表者らは、既に、屈折コントラスト法を利用すれば、介在物や開口量の少ない微小な疲労き裂を検出できることを明らかにしていた。

一方、多結晶体においては、投影面上に Bragg の回折条件を満たした結晶粒の影(減光スポット)が現れ、それより回折角だけ離れた位置にその結晶粒の形が明るく投影された回折スポットが現れる現象がある。このような投影面に現れる影は、従来、CT イメージングの精度を低下させるものとして認識されてきたが、それを積極的に利用して新たな情報を得るのが回折コントラスト(DCT)法である。

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角度が多数存在する。回折条件を満たした場合の像を抽出して 3 次元像を再構成すると、結晶粒の位置と形状を 3 次元的に同定することができる。また、回折角より、結晶方位、原子間隔を求めることが可能となる。原理的には、試料を構成する全ての結晶粒の形状、方位、ひずみを 3 次元的に求めることができるので、多結晶体の強度研究に極めて有力な方法である。さらに、屈折コントラストイメージングと組み合わせることにより、き裂の 3 次元形状も同時に計測することができるものと考えられていた。

一方、これらの CT 法には、観察できる試料の寸法に制限がある。CT 法では図 2 に示すように試料を回転させてその透過像より断層像を再構成するため、全ての断面寸法が放射光の透過厚さ以下でなければならない。そのため実用的に重要な鉄鋼材料の場合、観察できる資料寸法は丸棒の場合直径 1mm 程度、長方形断面の場合、対角線の長さ 1mm 程度が限界であった。しかしながら、転動疲労などでは、試料寸法によって破壊メカニズムが大きく異なっており、細線によって解明した破壊のメカニズムは、実用的な通常のバルク材と異なることが明らかになっていた。

## 2. 研究の目的

ラミノグラフィは、試料の回転軸(試料表面垂直方法)を放射光入射方向に垂直な方向より  $\theta$  傾ける方法である。この場合放射光透過厚さは  $t/\cos\theta$  ( $t$ : 板厚)となり、試料表面に垂直に放射光を入射する場合よりも大きくなるが、回転によって変化することはない。したがって、細線だけでなく、薄板の観察の観察が可能となる。そこで、本課題では、ラミノ

グラフィによって回折コントラスト法を実現する技術を開発することを第一の目的とした。次いで、インライン疲労試験法を開発し、効率的に疲労損傷を計測する手法を確立することを試みた。

## 3. 研究の方法

小型のロードセルおよび PZT 駆動アクチュエータを採用することにより、回転ステージ上に設置可能な小型の疲労試験機を開発した。それを用いて、試験片を試験機から除外することなく DCT 測定を行った。

DCT 測定は、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL19B2 および BL46XU において実施した。

供試材として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L およびマグネシウム合金 AZ31 を用いた。

## 4. 研究成果

### (1) 結晶方位解析法の開発

回折スポットの位置より、各回折面の方向を同定するとともに、同一結晶に属する二つの回折面の方向から、結晶方位を同定する理論を構築するとともに、解析ソフトウェアを開発した。これによって、すべり面およびすべり方向を測定することができ、各すべり系の Schmid 因子を決定することが可能となった。

### (2) 回折スポット分類の高精度化

DCT 測定では、1 回の測定において、一つの結晶粒で 10 個程度の回折スポットが現れるため、観察領域に含まれる結晶粒数の 10 倍程度の数の回折スポットが得られる。DCT 法では、これらのスポットを結晶粒ごとに分類して、同じ結晶粒の多方向の投影形状より各結晶粒の三次元位置・形状を再構成する。従来は、減光スポットの幾何学的な位置関係を利用して結晶粒を仕分けしていたが、結晶粒が小さくなるほどスポット数が膨大になるとともに、減光スポット同士がオーバーラップするために、十分な精度で同定することが困難な場合があった。そこで、本課題では、回折面の方位関係を考慮して分類する方法を新たに提案した。両手法を併用することによって、結晶粒の位置・形状再構成の精度が向上するものと期待するが、後者については、理論構築のみで、実装するには至らなかった。

### (3) 回折コントラストラミノグラフィ

ラミノグラフィにおいても、減光スポットおよび回折スポットが現れることを確認し、薄板の疲労損傷評価に回折コントラストラミノグラフィが適用可能であることを示した。

### (4) ステンレス鋼の疲労損傷評価

転位の存在による回折面のミスオリエンテーションのため、同一回折面の回折条件を満たす試料回転角は、狭い角度範囲で分布する。従来の DCT はこれを合成することによって一つの回折スポット形状を得、それによ

って結晶粒の三次元形状を再構成することが行われていたが、本課題では、回折角度の拡がりより回折面のミスオリエンテーションを導く手法を開発した。また、DCT 測定による三次元再構成結果および EBSD 測定による組織観察結果を比較し、三次元再構成の精度評価を行った。その結果、位置精度が十分ではなかった。なお、ミスオリエンテーションは EBSD によって測定される GOS と対応していることが分かった。

#### (2) ステンレス鋼における疲労試験結果

ステンレス鋼を用いてインライン疲労試験を行い、高サイクル疲労試験中のミスオリエンテーション変化を観察した。その結果、繰返数とともにミスオリエンテーションの平均値が増加することが分かった。また、各回折面におけるミスオリエンテーションの全結晶に渡る平均値は、fcc 構造の主すべり面である{111}面において最も大きかった。

一方、結晶ごとにミスオリエンテーションの変化は異なっていた。また、同一結晶粒の{111}面の回折スポットについて Schmid 因子を求め、Schmid 因子とミスオリエンテーションの関係について調べた結果、Schmid 因子が大きな回折スポットほどミスオリエンテーションの変化量が大きいことが分かった。

さらに、結晶粒の位置・形状の三次元再構成結果をもとに検討したところ、き裂発生箇所位置した結晶粒において他の結晶粒よりもミスオリエンテーションが大きく変化することが明らかになった。

#### (3) マグネシウム合金の変形評価

hcp 構造をもつマグネシウム合金は、すべり系が少ないために双晶変形が重要であると考えられており、疲労き裂の発生も双晶変形に起因するものとの考えが支配的である。この双晶変形は圧縮応力下で生じ、引張応力下では生じないため、まず、疲労強度に及ぼす平均応力の影響を調べた。その結果、平均応力と疲労限度の関係は、双晶変形の生じない鉄鋼材料と同様であり、双晶変形が重要な役割を果たしていない可能性のあることが示唆された。実際に、EBSD によって結晶方位を観察した結果、き裂の発生位置には双晶は存在しなかった。そこで、繰返し応力下でのミスオリエンテーションを測定した。その結果、圧縮応力負荷によって双晶が発生したが、除荷することによって元に戻る可能性が大きいことが明らかになった。このような可逆的な変形によって損傷が蓄積する可能性は低く、DCT 測定の結果からも、双晶変形は疲労き裂の発生には関与していないものと結論された。

#### 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 16 件)

1. Y. Nakai, D. Shiozawa, N. Asakawa, K.

Nonaka, and S. Kikuchi, "Change of Misorientation of Individual Grains in Fatigue of Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation", Structural Integrity Procedia, 査読有, 2017 に掲載予定.

2. Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, H. Saito, and T. Makino, Y. Neishi, "4D Observations of Rolling Contact Fatigue Processes by Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", Engineering Fracture Mechanics, 査読有, 2017 に掲載予定, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.03.021.

3. 中井善一, 塩澤大輝, 「近年における疲労研究の趨勢 4. 高輝度放射光を利用した疲労損傷の計測」, 材料, Vol.66, No.8, 査読有, 2017 に 掲載予定.

4. Yoshikazu Nakai<sup>1</sup>, Daiki Shiozawa, Ryota Nakao, Naoya Asakawa, and Shoich Kikuchi, "Misorientation Measurement of Individual Grains in Fatigue of Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation", Materials Science Forum, 査読有, Vol.879, 2017, pp.1355-1360, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.1355.

5. Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, H. Saito, T. Makino, and Y. Neishi, "Inclusion Orientation Effect on Rolling Contact Fatigue crack paths observed by Laminography Using Synchrotron Radiation X-ray", Contributed Papers from Materials Science & Technology, 2016, 査読無, 2016, pp.975-982.

6. Fumiyoshi Yoshinaka, Takashi Nakamura, Shinya Nakayama, Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, and Kentaro Uesugi, "Non-destructive Observation of Internal Fatigue Crack Growth in Ti-6Al-4V by Using Synchrotron Radiation  $\mu$ CT Imaging", International Journal of Fatigue, 査読有, Vol. 93, 2016, pp.397-405, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.05.028.

7. Takashi Nakamura, Fumiyoshi Yoshinaka, Shinya Nakayama, Hiroyuki Oguma, Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, and Kentaro Uesugi, "Detection of Small Internal Fatigue Cracks in Ti-6Al-4V by Using Synchrotron Radiation  $\mu$ CT Imaging", Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Letters, 査読有, Vol. 2, 2016, Paper No.16-00233, DOI: 10.1299/mel.16-00233.

8. T. Makino, Y. Neishi, D. Shiozawa, S. Kikuchi, S. Okada, K. Kajiwara, Y. Nakai, "Effect of Defect Shape on Rolling Contact Fatigue Crack Initiation and Propagation in High Strength Steel", International Journal of Fatigue, 査読有, Vol. 92, 2016, pp.507-516, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.02.015.

9. Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, H. Saito, T. Makino, Y. Neishi, "Effects of Inclusion Size and Orientation on Rolling Contact Fatigue Crack Initiation Observed by

Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", *Procedia Structural Integrity*, 査読有, Vol. 2, 2016, pp.3117-3124, DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.389.

10. D. Shiozawa, Y. Nakai, R. Miura, N. Masada, S. Matsuda, and R. Nakao, "4D Evaluation of Grain Shape and Fatigue Damage of Individual Grains in Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation", *International Journal of Fatigue*, 査読有, Vol. 82, 2016, pp.247-255, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.014.

11. Taizo Makino, Yutaka Neishi, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Souta Okada, Kentaro Kajiwara, Yoshikazu Nakai, "Effect of Defect Length on Rolling Contact Fatigue Crack Propagation in High Strength Steel", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 査読有, 34, 2015, 379-386, DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.41.

12. Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, K. Sato, T. Obama, T. Makino, Y. Neishi, "In Situ Observation of Rolling Contact Fatigue Cracks by Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 査読有, 34, 2014, 246-254, DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.26.

13. 塩澤大輝, 岡田宗大, 中井善一, 「放射光 $\mu$ CTイメージングを用いた腐食疲労におけるピットの成長及びき裂発生過程の4D解析」, *軽金属*, 査読有, 第64巻, 11号, 2014, pp.564-570, DOI: 10.2464/jilm.64.564.

14. T. Makino, Y. Neishi, D. Shiozawa, Y. Fukuda, K. Kajiwara and Y. Nakai, "Evaluation of Rolling Contact Fatigue Crack Path in High Strength Steel with Artificial Defects", *International Journal of Fatigue*, 査読有, Vol. 68, 2014, pp.168-177, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.05.006.

15. D. Shiozawa, T. Makino, Y. Neishi, and Y. Nakai, "Observation of Rolling Contact Fatigue Cracks by Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", *Procedia Materials Science*, 査読有, Vol. 3, 2014, pp.154-164, DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.030.

16. Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, Ryotaro Miura, and Shota Matsuda, "Evaluation of Fatigue Damage by Diffraction Contrast Tomography Using Synchrotron Radiation", *Materials Science Forum*, 査読有, Vols. 783-786, 2014, pp.2359-2364, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2359.

〔学会発表〕(計45件)

1. Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, and H. Saito, T. Makino, and Y. Neishi, "Crack Initiation And Propagation Behaviors under Rolling Contact Fatigue Observed by Laminography Using Synchrotron Radiation X-Ray", 4th International Conference on Fracture, Rhodes (Greece), 2017.6.18-23.

2. 仁科多可志, 塩澤大輝, 齋藤仁史, 菊池将一, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「高輝度放射光ラミノグラフィを用いた軸受鋼の転動疲労き裂進展挙動に及ぼす MnS 介在物配向の影響評価」, 日本材料学会第66期学術講演会, 名城大学(愛知県), 2017.5.5.27-28.

3. 仁科多可志, 塩澤大輝, 齋藤仁史, 菊池将一, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「軸受鋼の転動疲労機構に及ぼす非金属介在物の影響の高輝度放射光ラミノグラフィによる観察」, 日本機械学会関西支部平成28年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 大阪大学(大阪府), 2017.3.11.

4. 中川湧紀, 浅川直也, 野中謙次, 塩澤大輝, 菊池将一, 中井善一, 「放射光回折コントラストトモグラフィを用いたマグネシウム合金 AZ31 における組織観察」, 日本機械学会関西支部平成28年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 大阪大学(大阪府), 2017.3.11.

5. Y. Nakai, D. Shiozawa, N. Asakawa, K. Nonaka, and S. Kikuchi, "Change of Misorientation of Individual Grains in Fatigue of Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation", XXIV Italian Group of Fracture Conference, Urbino (Italy), 2017.3.1-3.

6. Y. Nakai, D. Shiozawa, S. Kikuchi, T. Obama, H. Saito, "Inclusion Orientation Effect on Rolling Contact Fatigue Crack Paths Observed by Laminography Using Synchrotron Radiation X-Ray, MS&T 16, Salt Lake City (USA), 2016.10.23-27.

7. 野中謙次, 浅川直也, 中尾亮太, 塩澤大輝, 菊池将一, 中井善一, 「放射光インライン計測によるステンレス鋼の疲労損傷評価」, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学(兵庫県), 2016.10.8-10.

8. 齋藤仁史, 塩澤大輝, 小濱友也, 菊池将一, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「高輝度放射光ラミノグラフィを用いた転動疲労き裂発生および進展挙動に及ぼす介在物配向の影響」, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学(兵庫県), 2016.10.8-10.

9. 吉中奎貴, 中村孝, 高久和明, 塩澤大輝, 中井善一, 上杉健太郎, 「Ti-6Al-4V の超高サイクル疲労における内部破壊初期過程の放射光 $\mu$ CT イメージング」, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 神戸大学(兵庫県), 2016.10.8-10.

10. Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Tomoya Obama, Hitoshi Saito, Taizo Makino, Yutaka Neishi, "Effects of Inclusion Size and Orientation on Rolling Contact Fatigue Crack Initiation Observed by Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", 21st European Conference on Fracture, Catania, Italy, 2016.6.20-24.

11. Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Ryota Nakao, Naoya Asakawa, and Shoichi Kikuchi,

"Misorientation Measurement of Individual Grains in Fatigue of Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography Using Ultrabright Synchrotron Radiation, Graz (Austria), 2016.5.29-6.3.

12. 齋藤仁史, 塩澤大輝, 小濱友也, 菊池将二, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「MnS 介在物を起点とした転動疲労き裂発生および成長の高輝度放射光ラミノグラフィによる 4D 観察」, 日本材料学会第 65 期学術講演会, 富山大学(富山県), 2016.5.28-29.

13. 野中謙次, 中尾亮太, 浅川直也, 塩澤大輝, 菊池将二, 中井善一, 「ステンレス鋼における高サイクル疲労中のミスオリエンテーション変化の放射光 DCT による観察」, 日本材料学会第 65 期学術講演会, 富山大学(富山県), 2016.5.28-29.

14. 野中謙次, 中尾亮太, 浅川直也, 塩澤大輝, 菊池将二, 中井善一, 「ステンレス鋼における高サイクル疲労中のミスオリエンテーション変化の放射光 DCT による観察」, 日本材料学会第 65 期学術講演会, 富山大学(富山県), 2016.5.28-29.

15. 齋藤仁史, 塩澤大輝, 小濱友也, 菊池将二, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「MnS 介在物を起点とした転動疲労き裂発生および成長の高輝度放射光ラミノグラフィによる 4D 観察」, 日本材料学会第 65 期学術講演会, 富山大学(富山県), 2016.5.28-29.

16. 中井善一, 「高輝度放射光による結晶粒のミスオリエンテーション評価と疲労き裂のイメージング」, 日本材料学会第 325 回疲労部門委員会, 富山大学(富山県), 2016.5.27 (招待講演).

17. 中井善一, 「高輝度放射光を用いた疲労損傷評価」, 日本機械学会関西支部第 1 専門部会, 大阪市, 2016.4.18 (招待講演).

18. 齋藤仁史, 塩澤大輝, 小濱友也, 菊池将二, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「高輝度放射光ラミノグラフィによる MnS 介在物を起点とした転動疲労き裂進展過程の観察」, 平成 27 年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学(大阪府), 2016.3.10.

19. 野中謙次, 中尾亮太, 浅川直也, 塩澤大輝, 菊池将二, 中井善一, 「高輝度放射光によるオーステナイト系ステンレス鋼の疲労過程におけるミスオリエンテーション変化の観察」, 平成 27 年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 大阪電気通信大学(大阪府), 2016.3.10.

20. 中井善一, 「マイクロイメージングによる金属材料の 4D 疲労損傷評価」, SPring-8 金属材料評価研究会(第 11 回), 研究社英語センタービル(東京都), 2016.2.1 (招待講演).

21. 牧野泰三, 根石豊, 塩澤大輝, 菊池将二, 中井善一, 「放射光 X 線ラミノグラフィによる鉄鋼材料の転動疲労損傷評価」, 日本材料学会 第 52 回 X 線材料強度に関する討論会, 岡山国際交流センター (岡山県), 2015.12.4 (招待講演).

22. 小濱友也, 塩澤大輝, 菊池将二, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「高輝度放射光ラミノグラフィを用いた転動疲労き裂の発生および進展過程の観察」, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶応大学(神奈川県), 2015.11.21-23.

23. 中尾亮太, 浅川直也, 松田翔太, 塩澤大輝, 菊池将二, 中井善一, 「高輝度放射光によるステンレス鋼の疲労におけるミスオリエンテーション評価」, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶応大学(神奈川県), 2015.11.21-23.

24. Naoya Asakawa, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Shota Matsuda, Yoshikazu Nakai, "Evaluation of High Cycle Fatigue Damage for Austenitic Stainless Steel by Diffraction Contrast Tomography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15), ロワジールホテル豊橋(愛知県), 2015.10.4-8.

25. Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, and Shoichi Okada, "4D Observations of Pit Growth and Crack Initiation under Corrosion Fatigue of High-strength Aluminum Alloy by Micro CT Imaging Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15), ロワジールホテル豊橋(愛知県), 2015.10.04-8.

26. Tomoya Obama, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Yoshikazu Nakai, Yutaka Neishi, Taizo Makino, "4D Observation of Crack Propagation Behavior under Rolling Contact Fatigue by Synchrotron Radiation Laminography", International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15), ロワジールホテル豊橋(愛知県), 2015.10.4-8.

27. Taizo Makino, Yutaka Neishi, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Souta Okada, Kentaro Kajiwara, Yoshikazu Nakai, "Effect of defect length on rolling contact fatigue crack propagation in high strength steel", The 5th International Conference on Crack Paths (CP 2015), Ferrara (Italy), 2015.9.16-18.

28. Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Kazuya Sato, Tomoya Obama, Taizo Makino, Yutaka Neishi, "In situ observation of rolling contact fatigue cracks by laminography using ultra-bright synchrotron radiation", The 5th International Conference on Crack Paths, Ferrara (Italy), 2015.9.16-18.

29. 中井善一, 塩澤大輝, 菊池将二, 中尾亮太, 浅川直也, 「回折コントラストイメージングによる金属材料の疲労損傷評価」, 第 12 回 SPring-8 産業利用報告会, 川崎市産業振興会館(神奈川県), 2015.9.3-4.

30. 牧野泰三, 根石豊, 塩澤大輝, 菊池将二, 小濱友也, 齋藤仁史, 中井善一, 「放射光 X

線ラミノグラフィによる鉄鋼材料の転動疲労損傷観察」,第12回SPRING-8産業利用報告会,川崎市産業振興会館(神奈川県),2015.9.3-4.

31. 中井善一,塩澤大輝,菊池将一,「高輝度放射光の回折コントラストトモグラフィによる疲労すべりの3D観察」,日本材料学会第321回疲労部門委員会研究討論会,姫路・西はりま地場産業センター(兵庫県),2015.7.17.

32. 牧野泰三,根石豊,塩澤大輝,菊池将一,中井善一,「深さ方向に異なる長さの人工欠陥を導入した高強度鋼の転動疲労特性」,日本材料学会第64期学術講演会,山形大学(山形県),2015.5.23-24.

33. 浅川直也,松田翔太,中尾亮太,塩澤大輝,菊池将一,中井善一,「高輝度放射光を用いた回折コントラストトモグラフィによるSUS316L鋼の高サイクル疲労損傷の評価」,日本材料学会第64期学術講演会,山形大学(山形県),2015.5.23-24.

34. Yoshikazu Nakai, Daiki Shiozawa, Shoichi Kikuchi, Shota Matsuda, and Ryota Nakao, "Fatigue damage evaluation of polycrystalline alloy by diffraction contrast tomography using ultra-bright synchrotron radiation", 12th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM12), Karlsruhe (Germany), 2015.5.10-14.

35. 中井善一,塩澤大輝,松田翔太,中尾亮太,浅川直也,菊池将一,高輝度放射光の回折コントラストイメージングによる疲労過程中的転位構造変化の観察,日本機械学会関西支部第90期定時総会講演会,京都大学(京都府),2015.3.16-17.

36. 塩澤大輝,小濱友也,佐藤一矢,菊池将一,根石豊,牧野泰三,中井善一,「放射光ラミノグラフィを用いた転動疲労き裂進展の4D解析」,日本機械学会関西支部第90期定時総会講演会,京都大学(京都府),2015.3.16-17.

37. 浅川直也,松田翔太,中尾亮太,塩澤大輝,菊池将一,中井善一,「高輝度放射光を用いた回折コントラストトモグラフィによる高サイクル疲労損傷評価」,関西学生会平成26年度学生員卒業研究発表講演会,京都大学(京都府),2015.3.14.

38. 宇都裕貴,小濱友也,佐藤一矢,塩澤大輝,菊池将一,根石豊,牧野泰三,中井善一,「高輝度放射光ラミノグラフィを用いた転動疲労き裂進展観察」,関西学生会平成26年度学生員卒業研究発表講演会,京都大学(京都府),2015.3.14.

39. 牧野泰三,根石豊,塩澤大輝,菊池将一,宇都裕貴,小濱友也,佐藤一矢,中井善一,「放射光ラミノグラフィによる介在物起点の転動疲労き裂進展挙動の観察」,SPRING-8金属材料評価研究会(第10回),研究社英語センタービル(東京都),2015.2.6(招待講演).

40. D. Shiozawa, Y. Nakai, R. Miura, and S.

Matsuda", Evaluation of Fatigue Damage in Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography using Ultra-bright Synchrotron Radiation", Proceedings of the 3rd Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures, 高山市民文化会館(高山市), 2014, 11, 6-8.

41. D. Shiozawa, Y. Nakai, R. Miura, S. Matsuda, "4D Evaluation of Grain Shape and Fatigue Damage of Individual Grain in Polycrystalline Alloys by Diffraction Contrast Tomography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials X, Hyannis (USA), 2014, 9.21-26.

42. 中井善一,「回折コントラスト・トモグラフィによる多結晶金属材料の疲労損傷評価」,第11回SPRING-8産業利用報告会,姫路商工会議所(兵庫県),2014.9.4-5.

43. 小濱友也,塩澤大輝,佐藤一矢,根石豊,牧野泰三,中井善一,「高輝度放射光ラミノグラフィを用いた高強度鋼中の転動疲労き裂の観察」,日本機械学会材料力学カンファレンス(M&M2014),福島大学(福島県),2014.7.19-21.

44. D. Shiozawa, T. Makino, Y. Neishi, and Y. Nakai, "Observation of Rolling Contact Fatigue Cracks by Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", 20th European Conference on Fracture, Trondheim, Norway, 2014.6.30-7.4.

45. 中尾亮太,塩澤大輝,中井善一,政田尚也,松田翔太,「放射光回折コントラストトモグラフィによる低サイクル疲労の損傷評価」,日本材料学会第63期学術講演会,福岡大学(福岡県),2014.5.17-18.

〔図書〕(計2件)

1. 中井善一,久保司郎,朝倉書店,「破壊力学」,2014,総184ページ.

2. 中井善一,他16名,日本材料学会疲労部門委員会,「初心者のための疲労用語の解説」,2014,CD-ROM.

〔その他〕

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-fracture/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中井 善一 (NAKAI, Yoshikazu)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90155656

### (2) 研究分担者

塩澤 大輝 (SHIOZAWA, Daiki)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60379336  
菊池 将一 (KIKUCHI, Shoichi)  
神戸大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 80581579