

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360056

研究課題名(和文) 高輝度放射光の回折コントラストイメージを利用したコンカレント材料損傷評価

研究課題名(英文) Concurrent material damage evaluation using diffraction contrast imaging by 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) 14,800,000円、(間接経費) 4,440,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、高輝度放射光のX線回折を用いたコンピュータトモグラフィ(DCT)法を開発し、アルミニウム合金およびステンレス鋼多結晶体の結晶粒の形状を三次元的に同定した。その結果、SPring-8の偏向電磁石を利用した汎用のビームラインでも、結晶粒の形状および位置を三次元的に同定することができた。

各結晶粒の塑性ひずみを同定するため、結晶方位の拡がりを測定した。この結晶粒方位の拡がりには、転位構造と関連した結晶粒のモザイク性と関連しており、塑性ひずみの増加とともに結晶方位の拡がりが増加した。また、疲労過程での損傷の蓄積もDCTによって測定することができた。

研究成果の概要(英文)：The three dimensional grain mapping technique for polycrystalline material, which is called X-ray diffraction contrast tomography (DCT) has proposed. In the present study, the measurement of DCT was conducted in SPring-8, which is the brightest synchrotron radiation facility in Japan, and the condition of measurement and data procedure are discussed. Developed technique was applied to aluminium alloy and stainless steel. The shape and location of grain could be determined by the developed three-dimensional mapping technique using the apparatus in a bending beam line of SPring-8. To evaluate plastic deformation, the grain orientation spreads of individual grains were measured. The grain orientation spread is caused by the mosaicity, which relates to the dislocation structure in a grain. The grain orientation spread was found to increase with increasing plastic strain. Fatigue damage also could be evaluated by the grain orientation spread in the DCT measurement.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：マイクロ材料力学 シンクロトロン放射光 疲労 金属組織

## 1. 研究開始当初の背景

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、高輝度放射光を用いた CT イメージングは、X 線の平行度が高いために、異材界面における X 線の屈折を利用して、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が特徴であり、本研究グループでは、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(遮光スポット)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る(回折スポット)現象がある。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。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。このように、多種の材料状態量を同一の測定装置によって同時に計測できることから、コンカレント材料損傷評価と命名した。

## 2. 研究の目的

結晶方位解析については、EBSD 法が多用されてきたが、この場合、測定できるのは表面結晶粒に限られており、その分解能も 2~3° 程度であるのに対して、DCT の場合、試料回転の分解能(0.2°以下)まで分解能を上げることができるとともに、表面だけでなく、内部の結晶粒についても、方位、形状を同定することができる。本課題では、これらに加えて、弾性ひずみ、非弾性ひずみを同一の回折データから解析することも目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 測定装置 本実験は高輝度放射光施設 SPring-8 において行った。本実験では検出器としてビームモニタと CCD カメラを用いた。

(2) 再構成手順 透過像から減衰スポットの形状を抽出するためには、試料の透過像に回折コントラストが現れない場合の画像、すなわち背景画像を差し引く必要がある。画像処理する画像の前後数十枚の透過像郡に対して、同位置の画像ピクセルを取り出し、これらの画像ピクセルに一次元 median filter を適用する。回折による透過像から

median filter 処理像を差し引けば、回折による影響のみを得ることができる。回折スポットについては、ほかの箇所と比べて輝度が一定値以上大きい部分を回折スポットとして抽出した。

(3) 回折の拡がり角 回折角はある拡がりを持っている。そこで、同じ結晶と考えられるスポットを画像ごとに分類し、それらの連続する画像を結合させることで結晶の断面形状を持つ結合スポットを作成した。

## 4. 研究成果

(1) ステンレス鋼における DCT 測定には SUS304 鋼の試料を用いた。

テンプレートマッチングにより、任意の結晶の回折面から生じた減衰スポット、回折スポットの位置を得ることができた。そこで、この結果と試料・検出器間距離を利用して回折角を算出した。その結果、回折角 2θ の値は 9.2°, 10.7°, 15.1° に集中していることが分かった。これらの値は、SUS304 鋼の理論値とほぼ等しい。また、ART 法により三次元再構成を行うアルゴリズムを完成させた。

(2) ステンレス鋼における塑性ひずみの評価 引張負荷および片振り疲労損傷の測定には SUS304 鋼の試料を用いた。0.2%耐力は 255 MPa であった。そのため、引張試験では応力を 0 MPa, 100 MPa, 270 MPa および 380 MPa として負荷を与えながらその場測定を行った。また、疲労試験では最大負荷が 280 MPa となるように伸びを与え、この伸びの 80% の大きさの変位振幅を繰り返し与える片振り疲労試験を行った。0 cycle, 100 cycles, 300 cycles, 400 cycles ごとに一度試験を中断し回折コントラスト撮影を実施した。

両振り疲労損傷の測定には SUS316L 鋼を用いた。0.2%耐力は 278 MPa であった。また、ひずみ速度が 0.8 %/s となるように、アクチュエータの変位速度を 20 μm/s とし、変位量を 40 μm および 50 μm で試験を実施した。それぞれの条件における最大応力は 289 MPa と 376 MPa であった。

弾性変形ではヒストグラムの分布にほとんど差がなかったが、塑性変形後は、引張負荷が増えるにしたがって回折の拡がり角が大きい結晶の数が多くなっていった。

一つの結晶粒について、塑性変形前後における回折の拡がり角の比較を行ったところ、0 MPa では拡がり角が 0.4° であったのに対し、380 MPa では拡がり角が 0.95° に増加していることが分かった。一方、この場合も回折コントラスト像の形状は各試験力で変化しなかった。各結晶の回折コントラストから回折の拡がり角の平均値を求めた結果、すべての結晶に関して回折の拡がり角が大きくなっており、それは結晶ごとに差異があった。

引張負荷と同様に、疲労による影響を回折の拡がり角を検討した。引張試験装置を用いた片振り疲労試験による各繰り返し数におけるヒストグラムより、0 cycle に比べて繰返

し数を増加させると回折の拡がり角の大きい結晶の割合が増えていることが分かった。一方、100 cycles 以後はほとんど差が見られなかった。

両振り疲労試験による各繰返し数におけるヒストグラムより、繰返し数とともに拡がり角の大きい結晶の割合が増えていることが分かった。また、片振り疲労試験よりも、両振り疲労試験の方が繰返し数の増加に伴う回折の拡がり角の大きなスポットの割合が大きい傾向があった。

SUS316L 鋼試料に対し両振り疲労試験を実施した際の、回折スポットを回折面ごとに分類し、回折の拡がり角のヒストグラムを求めた結果、{111}面および、{200}面ともに繰返し数の増加とともにヒストグラムの重心の角度が増加していることが分かった。試験開始前は{111}面においては  $0.45^\circ$  で、{200}面においては  $0.44^\circ$  がヒストグラムの重心の角度であったが、{111}面では 420cycles では  $0.50^\circ$ 、720cycles では  $0.53^\circ$  とヒストグラムの重心が増加していた。また、{200}面では 420cycles では  $0.53^\circ$ 、720cycles では  $0.56^\circ$  となっており、{111}面および{200}面ともに繰返し数の増加に伴い、ヒストグラムの重心の角度が増加したが、{111}面と{200}面では大きな違いが認められなかった。

予ひずみ後に繰返し負荷を与えた際の回折の拡がり角の変化についても検討を行った。0 cycle、および予ひずみを与えた後、300 cycles、き裂が発生した 1215 cycles 時に DCT 測定を実施した。300 cycles まで応力の低下が見られたが、DCT 測定を行うため、一度試験機から取り外した後、再度 1215cycles まで疲労試験を実施した際には応力の低下は認められなかった。

0 cycle では  $0.44^\circ$  であったヒストグラムの重心が予ひずみを与えた後は  $0.76^\circ$  であった。次に予ひずみを与え、除荷した後、300 cycles の繰返し負荷を与えたところ、ヒストグラムの重心は  $0.67^\circ$  と減少した。

### (3) 純鉄における塑性ひずみの評価

工業用純鉄細線を用いた。降伏応力は 184 MPa であった。70 MPa、160 MPa および 220 MPa 負荷時に DCT 測定を行った。引張試験時における各試験力での回折の拡がり角を調べた結果、ステンレス鋼と同様に塑性変形前ではヒストグラムの分布傾向にほとんど差がないにもかかわらず、塑性変形後のヒストグラムでは回折の拡がり角が大きい結晶数が増加していることが分かった。

繰返し負荷を 0 cycle、400 cycles、500 cycles、700cycles 与えた場合の回折の拡がり角を調べた結果では、すべての結果でピークは約  $0.3^\circ$  に存在していたが、400 cycles 以降では  $0.3^\circ$  の回折の拡がり角を有する回折スポットの割合が減少し、代わって拡がり角が大きい結晶が多くなっていることが分かった。繰返し数の増加とともに回折の拡がり角が大きい結晶がより多く出現していた。疲労試験で

は引張試験とは異なり、塑性ひずみが生じやすい結晶と生じにくい結晶が存在している可能性が示唆された。

疲労試験では塑性ひずみが生じやすい結晶と生じにくい結晶が存在していた。そこで回折面ごとに回折の拡がり角について調べた。また、三次元再構成結果と回折の拡がり角から塑性ひずみ評価を行った。

純鉄の回折角  $2\theta$  の値は、 $9.5^\circ$ 、 $13.5^\circ$ 、 $16.5^\circ$  に集中していた。これらの値は、純鉄の理論値とほぼ一致している。これを利用して回折コントラスト像を回折面ごとに分類した。

回折面ごとに回折の拡がり角を求めた結果より、どの回折面においても回折の拡がり角の変化が大きい回折コントラスト像とほとんど変化がない回折コントラスト像が存在していることが分かった。回折の拡がり角は塑性変形によって生じることから、回折の拡がり角の変化が大きかった面ではすべり変形や転位が生じていると考えることができる。同一結晶の回折コントラスト像で回折の拡がり角を求めた結果より、{110}面で特に拡がり角の変化が大きく、次いで{200}面である。一方、{211}面においては変化が生じていないことが分かった。この結果から、特に回折の拡がり角の変化が大きかった{110}面方向がこの結晶の主すべり系であると考えられる。

三次元再構成した結果より、0 cycle と 700 cycles の間に变化した回折の拡がり角の大きさが  $0.56^\circ$  以上の結晶は試料表面にしか存在しておらず、これらは回折の拡がり角の変化がない結晶と隣接していた。前述の回折の拡がり角の変化が大きい結晶はテイラー因子が小さいと考えることができる。

### (4) EBSD との比較

EBSD 測定により得られた GOS マップと DCT 解析の結果には、相関関係があった。しかしながら、DCT における回折の拡がり角よりも GOS の方が大きな値が得られた。EBSD は小さな方位差に対する解析精度が低く、その誤差は  $1.0 \sim 2.0^\circ$  程度である。この測定誤差により GOS の値が大きくなっているものと考えられる。一方、DCT における回折の拡がり角は撮影時のステップ角が分解能に対応するため、GOS に対してミスオリエンテーションの測定をより高分解能で行うことができた。

## 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 15 件)

1. D. Shiozawa, T. Makino, Y. Neishi, and Y. Nakai, "Observation of Rolling Contact Fatigue Cracks by Laminography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", To be published in *Procedia Materials Science* (2014). 査読有
2. T. Makino, Y. Neishi, D. Shiozawa, Y. Fukuda, K. Kajiwarra and Y. Nakai, "Evaluation of Rolling

Contact Fatigue Crack Path in High Strength Steel with Artificial Defects”, International Journal of Fatigue, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.05.006 (2014). 査読有

3. Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, Ryotaro Miura, and Shota Matsuda, “Evaluation of Fatigue Damage by Diffraction Contrast Tomography Using Synchrotron Radiation”, Materials Science Forum Vols. 783-786, pp.2359-2364 (2014). 査読有

4. Yoshikazu Nakai, Takuto Imanaka and Daiki Shiozawa, “Fatigue of Ultra-fine Grained  $\alpha$ -brass”, Advanced Materials Research, Vols. 891-892, pp.1125-1130 (2014). 査読有

5. Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, Ryotaro Miura, and Shota Matsuda, “Evaluation of Fatigue Damage by Diffraction Contrast Imaging using Ultra-bright Synchrotron Radiation”, Advanced Materials Research, Vols. 891-892, pp.600-605 (2014). 査読有

6. D. Shiozawa, Y. Nakai, T. Murakami, and H. Noshō, “Observation of 3D Shape and Propagation Mode Transition of Fatigue Cracks in Ti-6Al-4V under Cyclic Torsion Using CT Imaging with Ultra-Bright Synchrotron Radiation”, International Journal of Fatigue, Vol.58, pp.158-165 (2014). 査読有

7. 宮部成央, 田中拓, 中井善一, 川西翔, 「水素チャージした TiNi 形状記憶合金細線の力学特性」, 材料, Vol. 61, No. 11, pp. 905-911 (2012). 査読有

8. T. Makino, Y. Neishi, D. Shiozawa, Y. Fukuda and Y. Nakai, “Evaluation of Rolling Contact Fatigue Crack Path of High Strength Steel with Artificial Defect”, Proceedings of the 4th International Conference on Crack Paths, CD-ROM, No.071 (2012). 査読無

9. Y. Nakai, D. Shiozawa, T. Murakami, and H. Noshō, “Observation of Fatigue Crack Propagation Mode Transition under Cyclic Torsion Using Micro-CT Imaging with Ultra-Bright Synchrotron Radiation”, Proceedings of the 4th International Conference on Crack Paths, CD-ROM, No.035 (2012). 査読無

10. Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, Yoshiyuki Fukuda, Yutaka Neishi, and Taizo Makino, “Observation of Cracks in Carbon Steel under Contact Rolling Fatigue by Micro CT Imaging using Ultra-bright Synchrotron Radiation”, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, CD-ROM, No.2635 (2012). 査読無

11. Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, Kenta Tsutsumi, Ryotaro Miura, Kento Kajiwar, “Development of Three-Dimensional Grain Mapping Technique in Spring-8 and Evaluation of Plastic Strain”, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, CD-ROM, 2772 (2012). 査読無

12. 宮部成央, 田中拓, 中井善一, 川西翔,

「TiNi 形状記憶合金細線の SSRT 強度に及ぼす水素吸収の影響」, 日本機械学会論文集(A 編), Vol. 78, No. 786 pp.190-200 (2012). 査読有

13. 宮部成央, 田中拓, 中井善一, 中村太郎, 「工業用純鉄細線の疲労損傷に及ぼす降伏現象の影響」, 日本機械学会論文集(A 編), 77 巻 784 号, pp.2098-2106 (2011). 査読有

14. Yoshikazu Nakai and Daiki Shiozawa, "Initiation and Growth of Pits and Cracks in Corrosion Fatigue for High Strength Aluminium Alloy Observed by Micro Computed-tomography Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", Applied Mechanics and Materials, Vol. 83, pp.162-167 (2011). 査読有

15. Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, Tomonori Murakami, and Hiroaki Noshō, "Observation of Fatigue Crack Propagation Behavior under Torsional Loading by Using Synchrotron Radiation Micro-CT Imaging", Procedia Engineering, Volume 10, pp.1483-1488 (2011). 査読有

〔学会発表〕(計 45 件)

1. D. Shiozawa, Y. Nakai, R. Miura, and 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, 21-26 September 21-26, 2014, The Resort and Conference Center at Hyannis, MA, USA.

2. 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講演会 (M&M2014) 福島市 2014 年 7 月 19 ~ 21 日 .

3. 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 (ECF20), Trondheim, Norway, June 30-July 4, 2014.

4. 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, 福岡市, 2014 年 5 月 17 ~ 18 日 .

5. 上野晃平, 中井善一, 今井 貴文, 「バルク金属ガラスの腐食環境下での下限界近傍における疲労き裂伝ぱに関する研究」, 日本機械学会関西支部 第 89 期定時総会講演会, 堺市, 2014 年 3 月 18 ~ 19 日 .

6. 大邊優, 中井善一, 「疲労破面の粗さより破壊力学パラメータを推定する手法の開発に関する研究」, 日本機械学会関西支部 第 89 期定時総会講演会, 堺市, 2014 年 3 月 18 ~ 19 日 .

7. D. Shiozawa, Y. Nakai, R. Miura, and S. Matsuda, “Evaluation of Fatigue Damage by Diffraction Contrast Imaging using Ultra-bright Synchrotron Radiation”, 11th International

- Fatigue Congress (Fatigue 2014), Melbourne, Australia, March 2-7, 2014.
8. Y. Nakai, T. Imanaka and D. Shiozawa, "Fatigue of ultra-fine grained  $\alpha$ -brass", 11th International Fatigue Congress (Fatigue 2014), Melbourne, Australia, March 2-7, 2014.
9. Y. Nakai, D. Shiozawa, and R. Miura "Evaluation of Fatigue Damage by Diffraction Contrast Imaging using Ultra-bright Synchrotron Radiation", International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC'2013), Las Vegas, USA, December 2-6, 2013.
10. 岡田宗大, 塩澤大輝, 中井善一, 「放射光  $\mu$ CT イメージングによる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」, 日本材料学会第16回破壊力学シンポジウム, 熊本県阿蘇郡, 2013年11月20~22日.
11. 政田尚也, 松田翔太, 塩澤大輝, 中井善一, 高輝度放射光を用いた回折コントラストイメージによるき裂発生過程の結晶組織観察 日本材料学会第16回破壊力学シンポジウム, 熊本県阿蘇郡, 2013年11月20~22日.
12. 河野久晃, 田中拓, 中井善一, 西本匡志 「水素環境下における繰返し応力がTiNi形状記憶合金の寿命に及ぼす影響」, 日本機械学会材料力学講演会(M&M2013), 岐阜市, 2013年10月11~14日.
13. 中山慎也, 中村孝, 小熊博幸, 塩澤大輝, 中井善一, 上杉健太郎, 「放射光  $\mu$ CT イメージングを用いたTi-6Al-4V内部に発生する微小疲労き裂の検出」, 日本機械学会材料力学講演会(M&M2013), 岐阜市, 2013, 10.11-14.
14. 佐藤一矢, 塩澤大輝, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 岡田宗大, 「放射光  $\mu$ CT 及び小型転動疲労試験機を用いた転動疲労き裂進展過程の観察」, 日本機械学会材料力学講演会(M&M2013), 岐阜市, 2013年10月11~14日.
15. 松田翔太, 政田尚也, 塩澤大輝, 中井善一, 三浦亮太郎, 「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疲労損傷評価に関する検討」, 日本機械学会材料力学講演会(M&M2013), 岐阜市, 2013年10月11~14日.
16. 中井善一, 今中拓人, 塩澤大輝, 「黄銅超微細結晶粒材の疲労強度」, 日本機械学会材料力学講演会(M&M2013), 岐阜市, 2013年10月11~14日.
17. 納庄宏明, 塩澤大輝, 中井善一, 「放射光  $\mu$ CT イメージモデルに基づいた有限要素解析によるねじり疲労き裂進展挙動の評価」, 日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会, 大阪市, 2013年3月16~17日.
18. 西本匡志, 田中拓, 中井善一, 宮部成央, 「水素吸収がTiNi形状記憶合金細線の破壊強度に及ぼす影響」, 日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会, 大阪市, 2013年3月16~17日.
19. 三浦亮太郎, 松田翔太, 塩澤大輝, 中井善一, 「高輝度放射光による三次元結晶マップング法を用いた多結晶金属組織観察」, 日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会, 大阪市, 2013年3月16~17日.
20. 小林亮, 田中拓, 中井善一, 宮部成央, 赤穂健太, 「工業用純鉄細線の引張特性と疲労寿命に及ぼす線径の影響」, 日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会, 大阪市, 2013年3月16~17日.
21. 今中拓人, 堤湧貴, 中井善一, 塩澤大輝, 「黄銅超微細結晶粒材作製法の開発とその強度評価」, 日本機械学会関西支部第88期定時総会, 大阪市, 2013年3月16~17日.
22. Y. Nakai, T. Koyama, B. He, K. Ueno, "Effect of Loading Frequency on Corrosion Fatigue Crack Growth of Zr-based Bulk Metallic Glass in the Region near Threshold" 142nd Annual Meeting & Exhibition (TMS2013), March 3-7, San Antonio, Texas, USA, 2013.
23. 塩澤大輝, 岡田宗大, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 福田嘉之, 「放射光  $\mu$ CT イメージングを用いた高強度鋼における転動疲労き裂進展挙動の観察」, 日本材料学会第31回疲労シンポジウム, 横浜市, 2012年11月20~21日.
24. R. Miura, D. Shiozawa, Y. Nakai, N. Masada, "Evaluation of Plastic Strain by Three-Dimensional Grain Mapping Technique Using SPring-8", The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), Toyohashi, Japan, November 5-8, 2012.
25. S. Okada, D. Shiozawa, Y. Neishi, T. Makino, Y. Nakai, "Observation of Crack Propagation under Rolling Contact Fatigue in High-Strength Steels by Micro CT Imaging", The 5th International Symposium on Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), Toyohashi, Japan, November 5-8, 2012.
26. Y. Nakai, D. Shiozawa, T. Murakami, and H. Noshio, "Observation of Fatigue Crack Propagation Mode Transition under Cyclic Torsion Using Micro-CT Imaging with Ultra-Bright Synchrotron Radiation", The 4th International Conference on Crack Paths (CP 2012), Gaeta, Italy, 19 - 21 September, 2012.
27. T. Makino, Y. Neishi, D. Shiozawa, Y. Fukuda and Y. Nakai, "Evaluation of rolling contact fatigue crack path of high strength steel with artificial defect", The 4th International Conference on Crack Paths (CP 2012), Gaeta, Italy, 19 - 21 September, 2012.
28. D. Shiozawa, Y. Nakai, Y. Fukuda, Y. Neishi, and T. Makino, "Observation of Cracks in Carbon Steel under Contact Rolling Fatigue by Micro CT Imaging using Ultra-bright Synchrotron Radiation", 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22-27 July 2012.
29. D. Shiozawa, Y. Nakai, Kenta Tsutsumi, Ryotaro Miura Kentaro Kajiwaru "Development

of Three-Dimensional Grain Mapping Technique in Spring-8 and Evaluation of Plastic Strain”, 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 22-27 July 2012.

30. 塩澤大輝, 三浦亮太郎, 政田尚也, 中井善一, 「結晶 3D マッピング法による塑性ひずみ評価法の開発」, 日本材料学会第 61 期学術講演会, 岡山市, 2012 年 5 月 25 ~ 27 日.

31. 福田嘉之, 岡田宗大, 根石豊, 牧野泰三, 塩澤大輝, 中井善一, 「放射光  $\mu$ CT を用いた高強度鋼における転動疲労下のき裂観察」, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会, 吹田市, 2012 年 3 月 16 ~ 17 日.

32. 堤健太, 中井善一, 塩澤大輝, 三浦亮太郎, 政田尚也, 「高輝度放射光の回折コントラストイメージを用いた三次元結晶マッピング法」, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会, 吹田市, 2012 年 3 月 16 ~ 17 日.

33. 赤穂健太, 宮部成央, 槻木佑馬, 田中拓, 中井善一, 「工業用純鉄細線の疲労損傷に及ぼす線径と負荷方法の影響」, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会, 吹田市, 2012 年 3 月 16 ~ 17 日.

34. Y. Nakai, and T. Koyama, “Environment Assisted Cracking of Zr-based Bulk Metallic Glass in the Region near Threshold”, 141st Annual Meeting & Exhibition (TMS2012), Orlando, FL, USA, 2012.3.11-15 (Invited).

35. Yoshikazu Nakai, “Fatigue of Bulk Metallic Glass”, 2nd Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures, Chengdu, China, October 17, 2011 (Invited).

36. N. Miyabe, H. Tanaka, K. Ako, and Y. Nakai, “Effect of Yield Stress on Fatigue Damage in Commercially Pure Iron Thin Wires”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM’11), Kobe, Japan, September 19-21, 2011.

37. D. Shiozawa, Y. Neishi, Y. Fukuda, T. Makino, and Y. Nakai, “Observation of Delamination Defects and Cracks in High-strength Steels under Rolling Contact Fatigue by SR Micro CT Imaging”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM’11), Kobe, Japan, September 19-21, 2011.

38. D. Shiozawa, K. Tsutsumi, Y. Nakai, and K. Kajiwara, “Development of Three-dimensional Grain Mapping Technique Using SPring-8 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM’11), Kobe, Japan, September 19-21, 2011.

39. D. Shiozawa, Y. Nakai, T. Murakami, and H. Noshio, “Evaluation of Torsional Fatigue Crack Propagation by Synchrotron Radiation Micro-CT Imaging”, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM’11), Kobe, Japan, September 19-21,

2011.

41. 福田嘉之, 塩澤大輝, 根石豊, 牧野泰三, 中井善一, 「放射光  $\mu$ CT を用いた高強度鋼の転動疲労下のき裂検出」, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 北九州市, 2011 年 7 月 6 ~ 18 日.

42. D. Shiozawa, Y. Nakai, T. Murakami, and H. Noshio, “Observation of Fatigue Crack Propagation Behavior under Torsional Loading by Using Synchrotron Radiation Micro-CT Imaging”, ICM11 (International Conference on Mechanical Behavior of Materials) Lake Como, Italy, July 5-9, 2011.

43. 塩澤大輝, 納庄宏明, 村上智宣, 中井善一, 「高輝度放射光 CT によるねじり疲労き裂の進展・分岐挙動の観察と評価」, 日本材料学会第 60 期学術講演会, 吹田市, 2011 年 5 月 23 ~ 26 日.

44. 宮部成央, 田中拓, 川西翔, 西本匡志, 中井善一, 「環境および負荷条件の異なる TiNi 記憶合金細線の水素劣化挙動」, 日本材料学会第 60 期学術講演会, 吹田市, 2011 年 5 月 23 ~ 26 日.

45. 宮部成央, 赤穂健太, 田中拓, 小林亮太, 中井善一, 「工業用純鉄細線の疲労寿命に及ぼす降伏現象の影響」, 日本材料学会第 60 期学術講演会, 吹田市, 2011 年 5 月 23 ~ 26 日.

【図書】(計 3 件)

1. 中井善一, 久保司郎, 「破壊力学」, 朝倉書店 (2014).

2. 中井善一, 三村耕司, 阪上隆英, 多田直哉, 岩本剛, 田中拓, 「材料力学」, 朝倉書店 (2013).

3. 中井善一, 「疲労の基礎」, 破壊力学体系 - 壊れない製品設計へ向けて, 服部敏雄, 川田宏之, 田川哲哉, 東郷敬一郎, 中井善一, 三浦英生編, pp.392-402, エヌ・ティー・エス (2012).

【産業財産権】

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

【その他】

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中井 善一 (Yoshikazu Nakai)

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 (Daiki Shiozawa)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60379336

田中 拓 (Hiroshi Tanaka)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80236629

### (3) 連携研究者

なし