

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560092

研究課題名（和文）せん断型微小疲労き裂進展抵抗に基づく軸受材料評価と強度設計法の提案

研究課題名（英文） Approaches of the materials evaluation and strength design for bearings based on the growth resistance of a shear-mode, small fatigue crack

研究代表者

遠藤 正浩 (ENDO MASAHIRO)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：30168835

研究成果の概要（和文）： 軸受の損傷は転がり疲労によるフレーキング（表面はく離）で起こる。本研究では、軸受の強度を決定づけている 1 mm 未満の微小なせん断型疲労き裂の進展挙動を定量的に調査した。その結果、日本製軸受で多用されている標準的なマルテンサイト組織と欧州で主流のベイナイト組織の強度面での優劣の差がないことを確認した。また、き裂面干渉が進展抵抗としてせん断型き裂の進展に大きな影響を及ぼすことを明らかにして、新しい強度設計のための評価式を提案した。

研究成果の概要（英文）： The failure of bearings is caused by flaking, i.e. surface delamination, due to rolling fatigue. In this study, the behavior of the shear-mode fatigue cracks smaller than 1 mm in size was quantitatively investigated, which dominates the strength of bearings. As a result, it was confirmed that there was no significant difference of strength between the martensite structure used mainly in Japan and the bainite structure used commonly in Europe. In addition, It was revealed that the interference of crack faces acted largely as a resisting force for shear-mode crack propagation, and an equation for a new strength design was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：疲労，軸受，材料評価，強度設計法

### 1. 研究開始当初の背景

風力発電は世界的な規模で開発が進んでいる。近年、これらの機器で使用される大型軸受で非金属介在物を起点とするフレーキング損傷（はく離損傷）が頻発し国内外で問題となっており、大型軸受の強度信頼性評価

法や損傷防止策の確立は、電力機器メーカーや軸受メーカーにとって重要な課題となっている。

一般に、小型の軸受では実物の疲労試験が多数実施され、確率統計的手法を用いて疲労寿命を統計的に把握することにより、高い信

頼性が確保されている。一方大型軸受では、実物試験はコスト的に難しいため、小型の軸受の統計データを元に疲労寿命の予測がおこなわれている。しかし、近年頻発している大型軸受の損傷事例は、小型の軸受で培われた設計法が有効でないことを物語っている。これを反映して、この問題の解決に向けた研究が国内外で活発化してきている。特に、確率統計に頼った従来の強度設計から、き裂進展メカニズムの解明や力学計算に重点をおいた新しい強度設計への変革の動きが見られる。次世代の大型軸受の強度設計法を構築するには、軸受の転がり疲労において材料内部の微小欠陥を起点としたはく離破壊を、微小疲労き裂の発生・進展の問題と捉えて破壊力学的視点から理解し、はく離強度の評価方法を確立することが重要である。

一方、研究代表者の研究チームは、軸受の破壊メカニズムを理解するために重要な鍵となる1mm未満のせん断型き裂進展を独自の疲労試験方法で再現することにより、き裂の発生から破壊までの過程を連続観察できる手法を考案し、国際的に高い注目を集めている。本研究では、これをさらに発展させた。

## 2. 研究の目的

力学計算に重点をおいた新しい強度設計への変革を推進するために必要な定量的なせん断型の疲労き裂進展特性を材質、き裂形状、負荷条件、環境の観点から明らかにすることを目的とした。具体的には、日本製軸受で多用されている標準的なマルテンサイト組織と欧州で主流のベイナイト組織の強度面での優劣を明らかにすること、およびき裂形状を関数とした強度設計の基礎となる評価式を提案すること、さらに軸受材料内のき裂の挙動を模擬する実験方法を確立することを目標とした。

## 3. 研究の方法

(1) 専用試験機の試作 丸棒試験片を繰返しねじり同時に静的な軸方向圧縮力を作用させることにより、き裂の分岐を抑制してせん断き裂を発生・進展させることが可能となる。これを実現するために用いてきた油圧サーボ疲労試験機に代わる専用試験機を試作した。特に高速化を目指した。

(2) 材料と試験片 硬さが異なるマルテンサイト組織とベイナイト組織の軸受材料(SUJ2)について、平滑試験片および表面上にき裂スターター用の微小な人工欠陥を加工した試験片を準備してせん断型き裂進展試験を行った。

(3) き裂面の干渉 人工欠陥とき裂の割合を変化させてき裂面の接触面積の影響を調べた。また、試験片軸に平行および直角なき裂を作り、き裂面に作用する圧縮力の影響について調べた。

(4) 進展挙動の観察 適時試験機を止めて試験片表面で採取したレプリカあるいは試験片本体を顕微鏡で観察して、き裂の進展過程を調べた。

(5) 進展下限界 せん断型疲労き裂を所定の長さまで進展させた後、せん断応力振幅を漸次減少させて、進展の下限界条件を明らかにした。停留したき裂は、試験片を逐次研磨して3次元形状を調べた。

(6) 応力解析 せん断応力をうけるき裂のせん断モード(モードIIとIII)の応力拡大係数とき裂形状の関係を明らかにした。

(7) 環境試験 専用試験機に真空チャンバーを取り付けて真空中で試験を行った。

## 4. 研究成果

1本の試験片に対するデータを収集に3~4ヶ月を要した従来の試験機に比べて5倍の試験速度でかつ1/10の価格、1/100のランニングコスト、メンテナンスフリーの特徴を持つ専用試験機(試作機)を完成させた。従来の油圧試験機とこの専用試験機で試験片と力学条件をそろえて試験を行ったところ、この新型専用試験機で迅速に同等の結果が得られることを確認した。この成果は、今後この研究分野を順調に発展させる鍵となるもので重要である。

日本で使われているマルテンサイト組織と欧州で使われているベイナイト組織の優劣とその原因は明確ではなかった。両材について、せん断型疲労き裂の発生と進展の挙動、進展の下限界条件、および停留き裂の3次元形状を比較したところ、材料間で大差はないことがわかった。普通は硬いマルテンサイト組織の方が強度が高いことが予想されるが、実際にはせん断き裂の強度特性はほぼ同じであった。この原因のひとつとして、マルテンサイト組織に硬さのばらつきがあり、柔らかい部分の局所的強度に支配されて強度が決定し、結果的に柔らかいベイナイト組織と同等になったことが考えられた。しかし、今後さらに、内部組織の変化やき裂面粗さ、き裂面の摩耗によって発生した摩耗分の役割について詳細に検討する必要がある。

せん断き裂の進展に対するき裂面に作用する摩擦などの干渉の影響は極めて大きいことがわかった。特に試験片軸に垂直なき裂がある場合は、高い圧縮力がき裂面に作用す

るため、せん断き裂の進展はないことを確認した。一方、試験片軸に平行な面を持つき裂ではき裂面に巨視的な圧縮力は作用しないが、この場合でもき裂面の粗さがき裂面の相対滑りを阻害して進展抵抗として働くことを定量的に明らかにした。そこで実験結果に基づいて、き裂の形状・寸法とき裂面の接触面積割合を関数としたき裂進展の下限界応力拡大係数幅を求める簡便な評価式を提案した。この式は力学計算に基づいて軸受の設計を行う際の重要な基礎式になるもので、本研究の中でも特に大きな成果である。

軸受内のき裂を模擬するために、試作した専用試験機に真空チャンバーを取り付けた。現時点では、試験機からの駆動力の損失が予想以上にあり試験片に所定のトルクを伝えるために駆動力を大きめに補正する必要がある。しかし真空環境でせん断き裂を進展させて、その様子を連続観察できることを確認した。

#### 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 13 件)

1. K. Yanase and M. Endo, Analysis of the Notch Effect in Fatigue, Journal of ASTM International, 査読有, 9/4, 2012, DOI:10.1520/JAI103944
  2. A. Kusaba, S. Okazaki, M. Endo and K. Yanase, Designing of a Testing Machine For SHEAR-MODE Fatigue Crack Growth, International Journal of Modern Physics: Conference Series (AMDP 2011), 査読有, 6/, 318-323, 2012, DOI:10.1142/S2010194512003376
  3. K. Shojima, K. Yanase and M. Endo, Prediction for Fatigue Crack Growth in Notched Plates, International Journal of Modern Physics: Conference Series (AMDP 2011), 査読有, 6/, 269-274, 2012, DOI: 10.1142/S2010194512003297
  4. K. Yanase, K. Shojima and C. Ogata, High-cycle fatigue threshold behaviors in notched plates, Int. J. Damage Mechanics, 査読有, 2012
  5. N. Shomura, K. Yanase, H. Matsunaga, M. Endo, Effects of crack size and crack face interference on shear fatigue crack growth in a bearing steel, Advanced Materials Research, 査読有, 275/, 15-18, 2011, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.275.15
  6. T. Shingo, K. Yanase, H. Matsunaga and M. Endo, An Analysis of Fatigue Strength of Notched Components, Advanced Materials Research, 査読有, 275/, 43-46, 2011, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.275.43
  7. A. J. McEvily and M. Endo, On a Mechanism for VHCF, Proceedings of Fifth International Conference on Very High Cycle fatigue, 査読有, 139-144, 2011
  8. M. Endo and A. J. McEvily, Fatigue Crack Growth from Small Defects under Out-of-phase Combined Loading, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, 78/6, 1529-1541, 2011, DOI:10.1016/j.engfractmech.2010.12.011
  9. M. Endo, K. Yanase, S. Ikeda and A. J. McEvily, A Modified LEFM Approach for the Prediction of the Notch Effect in Fatigue, Collected Proceedings of TMS 2011, 140th Annual Meeting & Exhibition, 査読有, 2/, 667-674, 2011
  10. H. Matunaga, N. Shomura, S. Muramoto, M. Endo, Shear mode threshold for a small fatigue crack in a bearing steel, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 査読有, 34/, 72-82, 2010
  11. N. Shomura, D. Koyanagi, H. Matsunaga and M. Endo, Interference of Crack Faces and Shear-Mode Fatigue Crack Threshold in a Bearing Steel, Multiscaling of Synthetic and Natural Systems with Self-Adaptive Capability (Proc. of Mesomechanics 2010), 査読有, 153-156, 2010
  12. T. Shingo, M. Endo, K. Yanase and A. J. McEvily, Prediction of Fatigue Notch Effects in Plates with an Elliptical Hole, Multiscaling of Synthetic and Natural Systems with Self-Adaptive Capability (Proc. of Mesomechanics 2010), 査読有, 173-176, 2010
  13. M. Endo and A. J. McEvily, The influence of Combined Loading on Fatigue Crack Growth from Small Defects, Proceedings of the 9th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF9), 査読有, 615-622, 2010
- [学会発表] (計20件)
1. M. Makizaki, H. Matsunaga, K. Yanase and M. Endo, Effect of occasional shear loading on fatigue crack growth in 7075 aluminum alloy, The 8th International Forum on Advanced Materials Science and Technology (IFAMST-2012), 2012年8月1-4日, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka
  2. C. Ogata, K. Shojima and K. Yanase, Est

- imation for fatigue behavior of notched plate with mean stress effect, The 8th International Forum on Advanced Materials Science and Technology (IFAMST-2012), 2012年8月1-4日, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka
3. M.Endo, H.Matunaga, Fatigue limit of T-6Al-4V alloy containing small defects, Expert Workshop on Corrosion-Fatigue Damage and Life Prediction in Steam Turbine Blades, 2012年7月19日, Boston, USA
  4. K.Yanase, C.Ogata and K.Shojima, A probabilistic study on fatigue threshold behaviors, 2012 Joint Conference of the Engineering Mechanics Institute and the 11th ASCE Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, 2012年6月17-20日, University of Notre Dame, Notre Dame, IN, USA
  5. 岡崎三郎, 草場敦司, 遠藤正浩, せん断型疲労き裂進展試験法の改良, 日本材料学会第61期学術講演会, 2012年5月25-27日, 岡山大学
  6. 正島健司, 緒方千尋, 柳瀬圭児, 遠藤正浩, 切欠きを有する板の疲労限度と停留き裂寸法予測, 第61回理論応用力学講演会 (NCTAM2011), 2012年3月7-9日, 東京大学生産技術研究所
  7. S.Okazaki, K.Yanase, H.Matsunaga and M.Endo, Shear-mode fatigue cracks from inclusions, Third International Symposium on Computational Mechanics (ISCM III), Second Symposium on Computational Structural Engineering (CSE II), 2011年12月5-7日, Taipei, Taiwan
  8. K.Shojima, K.Yanase and M.Endo, Fatigue behaviors in plate with an elliptical hole, Third International Symposium on Computational Mechanics (ISCM III), Second Symposium on Computational Structural Engineering (CSE II), 2011年12月5-7日, Taipei, Taiwan
  9. A.Kusaba, K.Yanase and M.Endo, Behavior of small fatigue cracks under cyclic torsion combined with static compression, The 8th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials, 2011年11月17日, Changwon, Korea
  10. K.Yanase, M.Endo, H.Matsunaga, Prediction for fatigue crack behavior under biaxial loading, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (ATEM'11), 2011年9月19-21日, Kobe
  11. A.Kusaba, S.Okazaki, M.Endo and K.Yanase, Designing of a Testing Machine for Shear Mode Fatigue Crack Growth, 6th International Conference on Advanced Materials development and Performance, 2011年7月15-18日, Tokushima University, Tokushima
  12. K.Shojima, K.Yanase and M.Endo, Prediction for Fatigue Crack Growth in Notched Plates, 6th International Conference on Advanced Materials development and Performance, 2011年7月15-18日, Tokushima University, Tokushima
  13. 遠藤正浩, 草場敦司, 岡崎三郎, 柳瀬圭児, 森山茂章, 松永久生, せん断モード疲労き裂進展試験について, 日本機械学会 M&M2011 (材料力学カンファレンス), 2011年7月15-18日, 九州工業大学
  14. 遠藤正浩, 松永久生, Shear-mode Propagation Threshold for Small Cracks in VHCF, SPP 1466 Meeting in Berlin (Invited lecture for the 1466 committee), 2011年6月28日-7月1日, Steinberger Hotel Berlin
  15. A.J.McEvily and M.Endo, On a Mechanism for VHCF, 5th Int. Conf. on Very High Cycle Fatigue, 2011年6月28-7月3日, Berlin
  16. K.Yanase and M.Endo, Analysis of notch effect in fatigue, 11th International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, 2011年5月18-20日, Marriott Anaheim; Anaheim, CA, USA
  17. M.Endo, K.Yanase, S.Ikeda and A.J.McEvily, A Modified LEFM Approach for the Prediction of the Notch Effect in Fatigue, TMS 2011, 140th Annual Meeting & Exhibition, 2011年2月27日-3月3日, San Diego, CA, USA
  18. N.Shomura, K.Yanase, H.Matunaga, M.Endo, Effects of crack size and crack face interference on shear fatigue crack growth in a bearing steel, International Conference on Structural Integrity and Failure (SIF2010), 2010年7月4-7日, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
  19. T.Shingo, K.Yanase, H.Matunaga, M.Endo, An Analysis of Fatigue Strength of Notched Components, International Conference on Structural Integrity and Failure (SIF 2010), 2010年7月4-7日, The University of Auckland, Auckland, New Zealand

20. M.Endo and A. J. McEvily, The influence of Combined Loading on Fatigue Crack Growth from Small Defects, 9th Int. Conf. on Multiaxial Fatigue and Fracture, 2010年6月7～9日, Parma, Italy

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）

名称：正逆微動回転軸受  
発明者：遠藤正浩，森山茂章  
権利者：学校法人 福岡大学  
種類：特許  
番号：特願 2012-187847  
出願年月日：平成 24 年 8 月 28 日  
国内外の別：国内

名称：軸体支持装置  
発明者：遠藤正浩  
権利者：学校法人 福岡大学  
種類：特許  
番号：特開 2011-180089  
出願年月日：平成 22 年 3 月 3 日  
国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

なし

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遠藤 正浩 (ENDO MASAHIRO)  
福岡大学・工学部・教授  
研究者番号：30168835

### (2) 研究分担者

柳瀬 圭児 (YANASE KEIJI)  
福岡大学・工学部・准教授  
研究者番号：20580187

### 研究分担者

松永 久生 (MATUNAGA HISAO)  
九州大学・工学（系）研究科（研究院）・  
准教授  
研究者番号：80346816

### (3) 連携研究者

なし