

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14875

研究課題名(和文) き裂の先端有効応力場の評価を通じた転がり疲労下モードII型き裂停留のメカニズム

研究課題名(英文) Evaluation of effective stress around Mode II crack tips under rolling contact fatigue

研究代表者

溝部 浩志郎 (Mizobe, Koshiro)

富山大学・学術研究部工学系・准教授

研究者番号：70727718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高炭素クロム軸受鋼の転がり疲労におけるき裂進展駆動力を測定するため、転がり疲労き裂の停留を観察することにある。そのため、炉高周波併用加熱法を用いて0.5mm程度の深さに最弱部がある高炭素クロム軸受鋼シャフトを作製した。その後、この試験片を用いて一点荷重転がり疲労試験を行った。その結果、非金属介在物から発生する様々な長さの転がり疲労き裂が観察された。これらのき裂の発生個所は幅広く分布したが、二重硬化層の最弱部ではき裂がより多くより長く成長することが確認できた。これは、発生したき裂の全数観察を通して転がり疲労き裂の発生、進展を制御できたことを意味する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風力発電機などに使用される大型軸受では、近年20年の実用寿命保証が求められており、軸受メーカーは超長期間、莫大な補償に備える事となっている。このような超長期全数保証の根拠を確率的な現象に求めてしまつては、あまりに経済的な損失が大きい。本研究で得られた成果は破壊力学のき裂停留パラメータに注目したものであり、将来的に軸受の全数寿命保障に対する設計指針を確立することにつながる。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate a driving force of the crack propagation under rolling contact fatigue using high-carbon high-chromium steels, we observed the fatigue cracks from non-metallic inclusions. We prepared the shaft which was furnace and induction quenched (FIH method) and performed one-point rolling contact fatigue. Through this FIH method, this specimen had a subsurface soft area of 0.5 mm from the surface. After the rolling contact fatigue tests, we found many fatigue cracks from the non-metallic inclusions. There were various lengths and depths of cracks and the cracks in the soft area were longer than those in other areas. This indicates that we successfully control crack initiation and propagation under rolling contact fatigue in FIH specimens.

研究分野：破壊力学、トライボロジー

キーワード：転がり疲労 介在物 き裂 炉高周波併用加熱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまで軸受破壊は L_{10} (10%破壊確率) を主要な寿命指標と考えた上で、確率的な破壊現象(LP理論⁽¹⁾)として扱われてきた。なぜなら軸受破壊の多くを占める内部起点型破壊が、鋼中の非金属介在物のランダムなサイズや位置に強く影響を受けるからである。そのため伝統的な破壊対策は、介在物数の低減、介在物サイズの縮小などの材料工学的なアプローチに重点を置かれてきた⁽²⁾。

しかし近年、風力発電機などに使用される大型軸受では、長期の実用寿命保証が求められており、軸受メーカーは超長期間、莫大な補償に備える事となっている。言い換えれば、生産した軸受全数の保証を求められているのである。このような超長期全数保証の根拠を確率的な現象に求めてしまえば、あまりに経済的な損失が大きすぎる。本研究では破壊力学のき裂停留パラメータに注目して、軸受の全数寿命保障に対する設計指針を確立することを目的とした。

[1]高田浩年、相原了: 転がり軸受の寿命と信頼性、日刊工業新聞社、118-122(2005)

[2]木田勝之: 転がり疲労とき裂、熱処理、48(2008)79-87

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで困難であった高炭素クロム軸受鋼の転がり疲労におけるき裂進展駆動力を測定するため、転がり疲労き裂の停留を観察し、き裂進展下限界を観察することにある。本研究ではこれを実現するため、炉 高周波併用加熱法を用いてシャフトを作製し、研究室で開発した実験手法である一点荷重式転がり疲労試験を行った。炉 高周波併用加熱法によって実現した二重硬化層は、はく離に至る主き裂の発生位置の特定及びき裂進展方向の制限を目的としており、また一点荷重式転がり疲労試験により、停留き裂の全数観察を行うこととした。

3. 研究の方法

(1) 試験片作成及び適切な実験条件の選定

まず様々な接触応力における転がり疲労き裂観察を行い、適切な停留条件を検討した。具体的には、高炭素クロム軸受鋼のシャフトに炉 高周波併用加熱法を用いて 0.5mm 程度の深さに最弱部ができるよう二重硬化層を制御した試験片を用いて、申請者らの研究室で開発した一点荷重式転がり疲労試験機により転がり疲労試験を行った。図1に炉 高周波併用加熱法のヒートチャートを示す。この手法は炉によって試験片に均一な硬さ分布を与えた後、高周波焼入れを行うことによって試験片内部に軟弱部を作製するものである。図2にこの熱処理法によって得た試験片の硬さ分布を示す。図2(a)は試験片全体の硬さ分布を示している。材料最表面では材料の十分な硬さが得られ、また内部に進むにつれ硬さが上昇した。

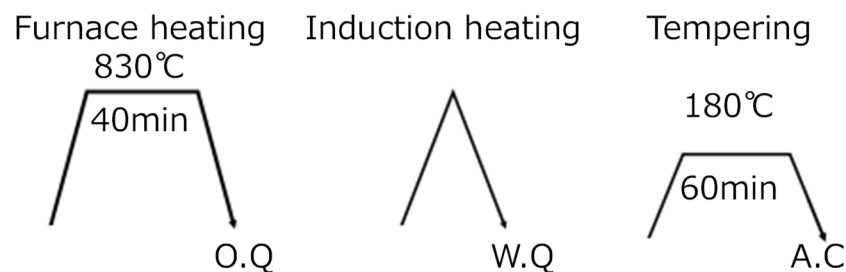


図1 炉 高周波併用加熱法のヒートチャート

図 2(b)はより詳細な硬さ分布を示している。本研究ではビッカース硬さが約 800[HV]以上かつ表面深さ 0.4[mm]までを Furnace induction heating area(FIH area)、400~700[HV]かつ表面深さ 0.5~3.3[mm]の領域を Furnace heating induction annealing area (FH-IA area)、700~800[HV]かつ表面深さ 3.8[mm]以降の領域を Furnace heating area (FH area)と定義した。

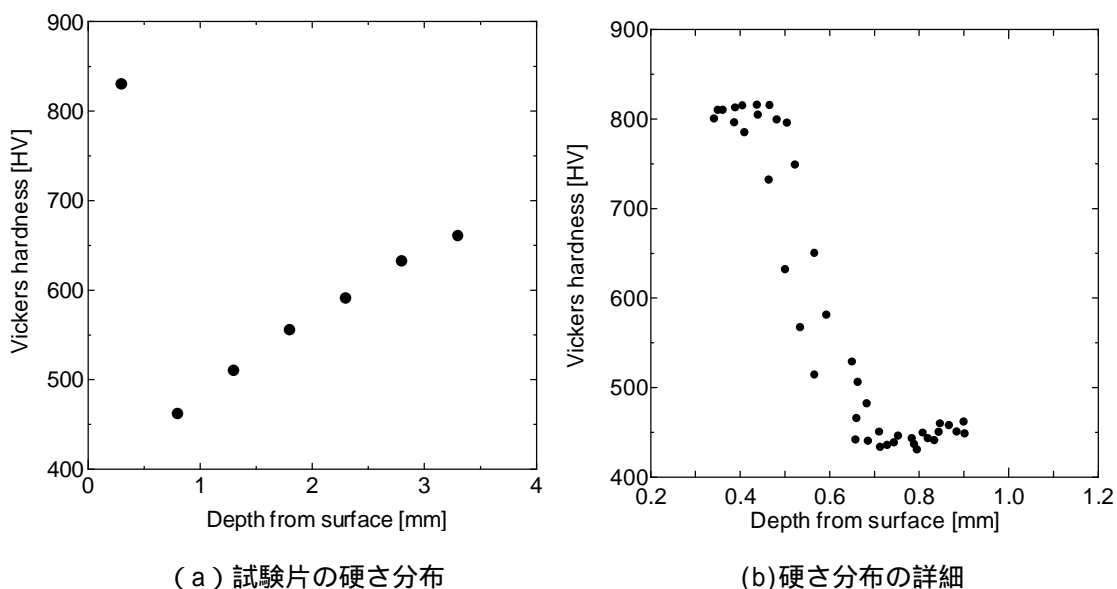


図 2 炉 高周波加熱法によって作成した試験片の硬さ分布

(2) 一点荷重式転がり疲労試験及びき裂の全数観察

また試験片作成後、接触応力 5.6GPa を試験条件として一点荷重疲労試験を行った。試験後材料内部に発生したき裂を観察するため、材料軟弱部周辺(表面から 1mm 程度)を範囲として介在物起点型き裂を全数観察した。

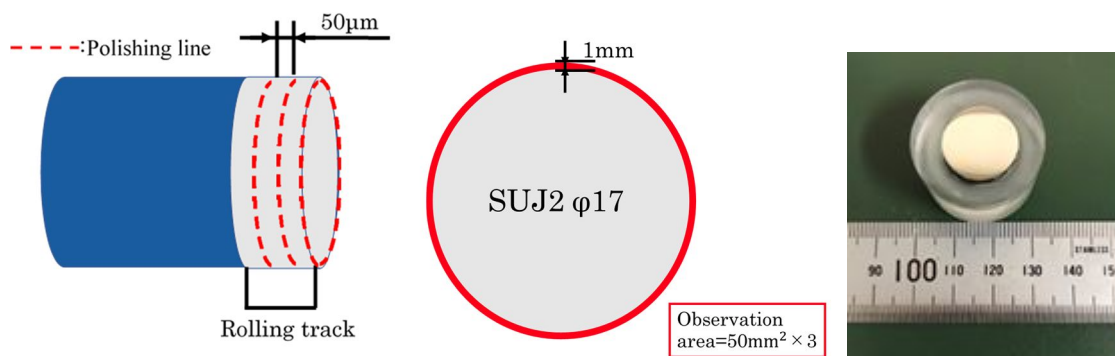


図 3 き裂観察領域の模式図及び写真

4. 研究成果

(1) 転がり疲労試験による全数き裂観察

図 4 に転がり疲労試験及びその後の観察によって得られたき裂の観察例を示す。試験後のシャフトはフレーキング破壊を起こしていなかったが、シャフト切断後の観察では、断面から多数のき裂が観察された。おおむね 2-4µm 程度の介在物から、最大 40µm のき裂が観察された。

図 5 にき裂長さとき裂発生深さの関係を示す。本実験では非金属介在物から発生する様々な長さの転がり疲労き裂が観察された。これらのき裂の発生個所は幅広く分布したが、二重硬化層の最弱部ではき裂がより多く、より長く成長したことを確認した。これは、発生したき裂の全数観察を通して転がり疲労き裂の発生、進展を制御できたことを意味する。

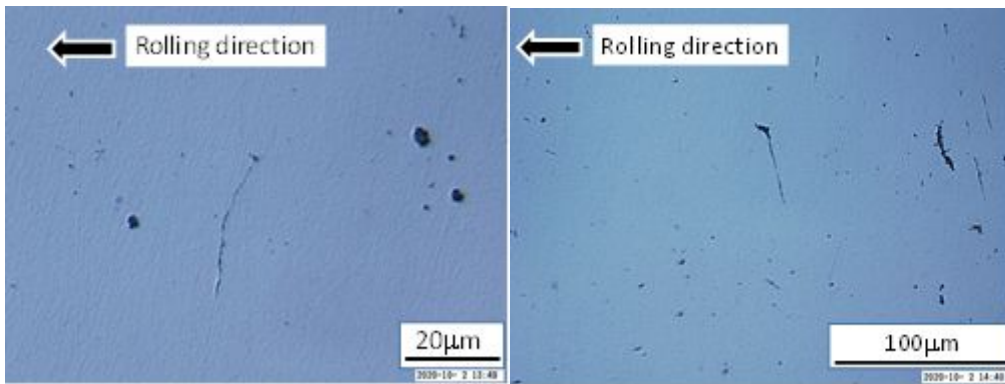


図4 介在物から発生した転がり疲労き裂の例(5.6 GPa, 1.0×10^7 cycles)

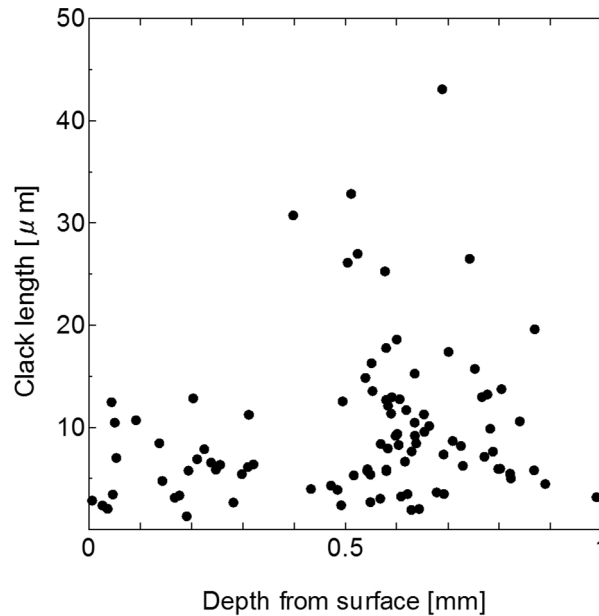


図5 き裂長さとき裂の発生深さの関係 (5.6 GPa, 1.0×10^7 cycles)

(2) クロム炭化物とその観察手法の開発

またき裂観察を通じて、高炭素クロム軸受鋼に含まれるクロム炭化物が転がり疲労き裂に影響を及ぼしている可能性が示唆された。このクロム炭化物の分布についてより詳しく観察することを目的として、画像処理によるクロム炭化物分布の観察法を開発した。図6にエッチングした高炭素クロム軸受鋼の組織を示す。この図は大きな旧オーステナイト粒内にクロム炭化物が分布していることを示している。本研究ではクロム炭化物の凝集部に注目して観察を行った。

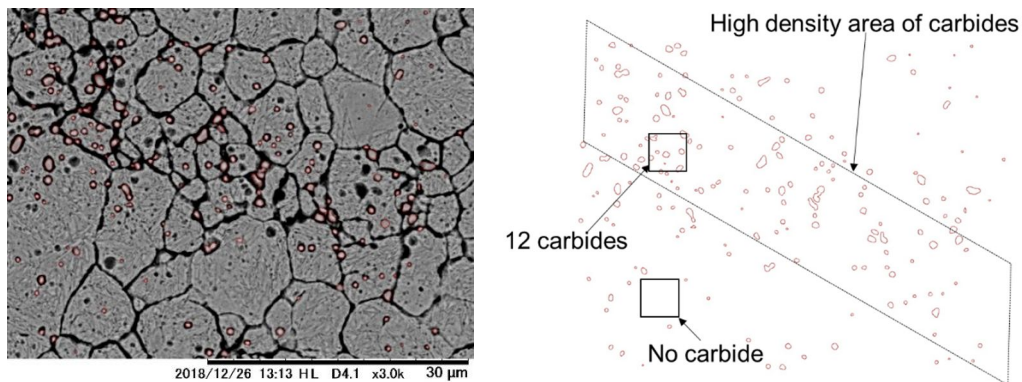


図6 旧オーステナイト粒とクロム炭化物

(3) 研究内容及び研究成果のまとめ

軸受の全数寿命保証を行うために重要な転がり疲労下における停留き裂の観察・評価を目的として研究を行った。具体的には炉 高周波併用加熱法を用いて試験片内部に軟弱部を作成し、介在物起点型き裂の発生場所、及びき裂進展を制御することを試みた。その結果、0.5mm程度の深さに軟弱部を導入することに成功し、また一点荷重転がり疲労試験によって、軟弱部からき裂を発生・進展させることに成功した。このき裂進展試験方法の開発により、応力分布及び硬さの異なる領域における停留き裂の全数観察が可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mizobe Koshiro, Matsueda Takahiro, Miyabe Yoshinobu, Kida Katsuyuki	4. 巻 315
2. 論文標題 Image Evaluation of Distribution of Carbide Particles in Repeatedly Quenched (Two and Three Times) JIS-SUJ2 Steels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Solid State Phenomena	6. 最初と最後の頁 66 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/SSP.315.66	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 Mizobe Koshiro, Nakamura Yuto, Yano Yuki, Matsueda Takahiro, Kida Katsuyuki	4. 巻 1033
2. 論文標題 Observation of Crack Originating from Non-Metallic Inclusions in Furnace-Induction Heated SUJ2 Steel under One-Point Rolling Contact Fatigue at High Contact Pressure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 3 ~ 7
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.1033.3	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 溝部浩志郎、木田勝之
2. 発表標題 鋼の回線返し焼入れした高炭素クロム軸転曲げ疲労試験から観察された疲労起点介在物と材料組織
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第178回秋季講演大会 機械構造用鋼表面硬化部材の疲労損傷 シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koshiro Mizobe
2. 発表標題 Effect of surface hardening methods (IH and FIH) on the various types of rolling contact fatigue (ball-shaft and ball-plate)
3. 学会等名 2020 the 8th International Conference on Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering (ICMEMSCE2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koshiro Mizobe
2. 発表標題 Fracture behavior of repeatedly induction-heated shafts on various types fatigue situation (rotating bending, rolling contact and reciprocating motion)
3. 学会等名 2020 8th International Conference on Metallurgy Technology and Materials (ICMTM2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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

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