

二円筒接触試験機を用いたフルーチング形成メカニズムの調査

Investigation of Fluting Formation Mechanisms Using a Twin-Cylinder Contact Testing Machine

NTN (正) *葛谷 紘澄 (正) 川村 光生

Hiroto Kuzuya*, Mitsuo Kawamura*

* NTN Corporation

1. はじめに

軸受の損傷形態の一つとして電食が挙げられる。軸受における電食とは軸受内に電流が通過すること起因して軌道面などが損傷する現象のことであり、軌道面が梨地状に変質するフロスティングや、波板状の損傷になるフルーチング（リッジマーク）が形成され、軸受振動の原因となる。転動体と内外輪間で形成される油膜が絶縁破壊して、軌道面にフロスティングやフルーチングを形成すると考えられている。一般的に放電エネルギー量が小さいとフロスティングを維持し、放電エネルギー量が大きいとフルーチングとなると言われているが、フルーチングが形成されるメカニズム^{2),3)}は未解明な部分が多い。

本報では、フルーチング形成メカニズムの解明を目的として、二円筒接触試験機を用いたフルーチング形成実験を行い、メカニズムの調査を行った結果を報告する。

2. 実験方法

フルーチング形成実験において、Fig. 1,2 に示す二円筒接触試験機を用いた。モーターと接続した軸にそれぞれ円筒を取り付け、これらを接触し転動させた。また試験片以外に電流が流れないように、ハウジングと土台間に絶縁用樹脂板を挿入し、それらの締結部には樹脂カラーと樹脂ネジを用いた。またゴム製の V ベルトにより、モーターと絶縁を維持した状態での回転軸への動力伝達を行った。各回転軸にはスリップリングが接続されており、レギュレータ電源により直流電圧を印加した。円筒形状については両円筒ともに外径 $\phi 40$ mm、内径 $\phi 20$ mm、厚さ $t 12$ mm であり、一方の円筒のみ外径面に軸方向の曲率 ($R60$ mm) を設けた。軸方向に曲率を持つ試験片を R 試験片、持たない試験片を St 試験片とする。材質は高炭素クロム軸受鋼 JIS-SUJ2 製で、一般的な焼入・焼戻処理を施しロックウェル硬度を 60-62 HRC にした。St 試験片を陽極、R 試験片を陰極とした。

2.1. 流体潤滑条件におけるフルーチング形成試験

熱処理後の外径面について、両円筒ともに超仕上げを施し、軸方向の算術平均粗さ R_a を約 $0.02 \mu\text{m}$ にした。Table 1 に実験条件を示す。給油は運転中の円筒に潤滑油を接触させる油浴潤滑とした。油膜パラメータは Chittenden らの油膜厚さ計算式と熱修正係数 ϕ_r 、転動面の二乗平均平方根粗さから計算した。試験中の円筒に対して、光学顕微鏡を用いた表面観察を一定時間ごとに行った。また X 線応力測定装置を用いて垂直入射における回折環内のピーク強度の標準偏差⁴⁾・残留オーステナイト量を測定した。

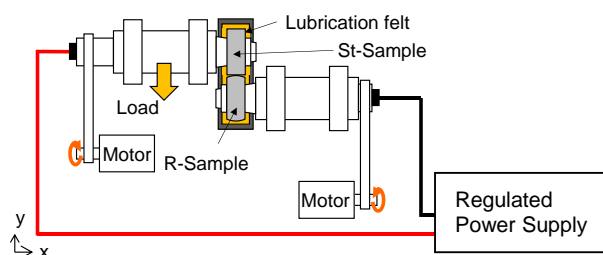


Fig.1 Twin-cylinder type rolling contact fatigue (RCF) testing under fluid lubrication conditions

Table 1 Test conditions of the RCF testing

Lubricant	PAO (poly- α -olefin, $30.7 \text{ mm}^2/\text{s}@40^\circ\text{C}$)
Rotational speed, min^{-1}	500
Load, N	98
Hertzian contact pressure P_{max} , GPa	0.81
Oil film parameter Λ	8.79
Current, A	5.0

2.2. 境界潤滑条件におけるフルーチング形成試験

熱処理後の外径面について、R 試験片は研削加工、St 試験片は超仕上げを施し、軸方向の算術平均粗さ R_a をそれぞれ約 $0.2 \mu\text{m}$ 、 $0.02 \mu\text{m}$ にした。Table 2 に実験条件を示す。給油は潤滑油を含浸したフェルトパッドを運転中の円筒に接触させ行った。油膜パラメータは Chittenden らの油膜厚さ計算式と熱修正係数 ϕ_r 、転動面の二乗平均平方根粗さから計算した。試験中の円筒に対して、光学顕微鏡を用いた表面観察を一定時間ごとに行った。

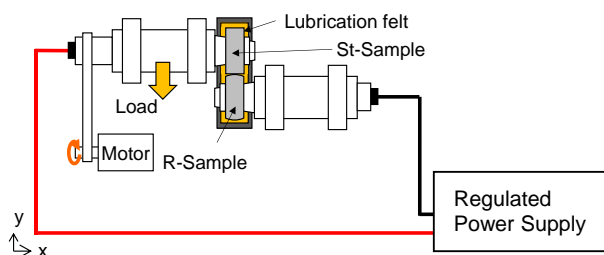


Fig.2 Twin-cylinder type rolling contact fatigue (RCF) testing under boundary lubrication conditions

Table 2 Test conditions of the RCF testing

Lubricant	PAO (poly- α -olefin, 8.3 mm ² /s@40°C)
Rotational speed, min ⁻¹	1600
Load, N	800
Hertzian contact pressure P_{max} , GPa	1.63
Oil film parameter Λ	0.36
Current, A	5.0

3. 実験結果

3.1. 流体潤滑条件におけるフルーチング形成試験

光学観察結果を Fig. 3 に示す。385 min 時点で陰極側の R 試験片に波板状模様が確認され、1440 min 時点では陽極の St 試験片で波板状損傷を確認した。Figure 4,5 に St 試験片の X 線回折環の測定結果を示す。所定の運転時間でのピーク強度の標準偏差を S ，試験前の S を S_0 とし，変化を S/S_0 で表した。運転時間が長くなるにつれ回折環の半価幅 (FWHM) が小さくなったが，回折環内のピーク強度の標準偏差の変化は見られなかった。また，残留オーステナイト量は一度極大値をとり，その後低下した。

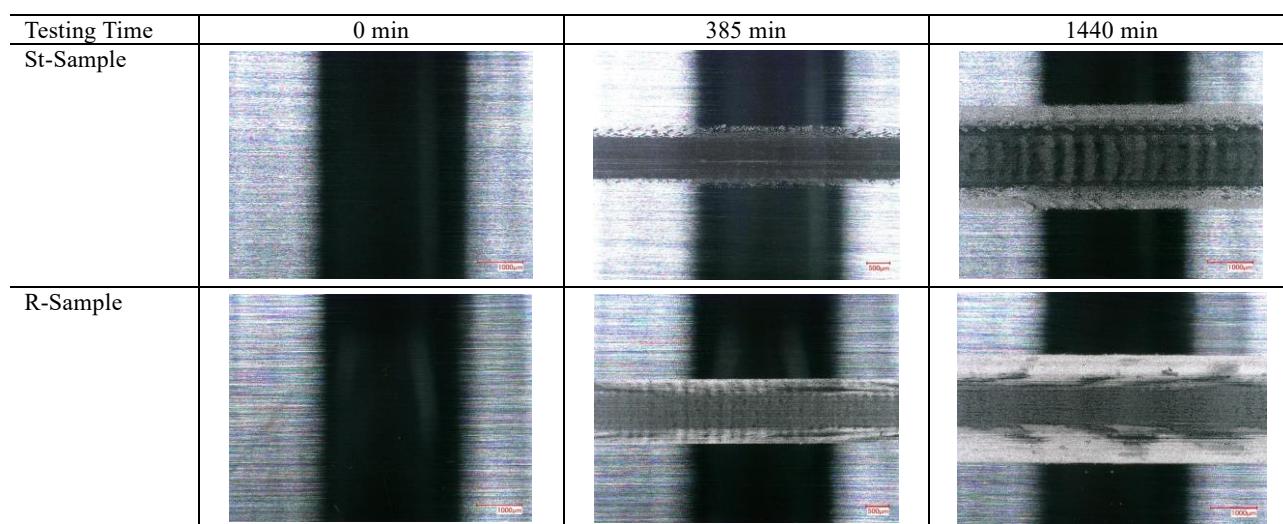


Fig. 3 Optical microscope images of rolling contact area for cylinders under fluid lubrication conditions

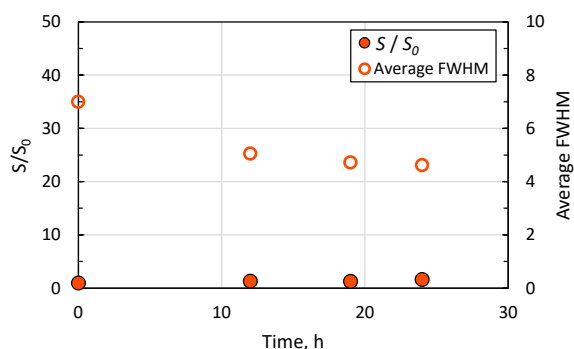


Fig.4 Progress of the crystallite orientation parameter and average FWHM

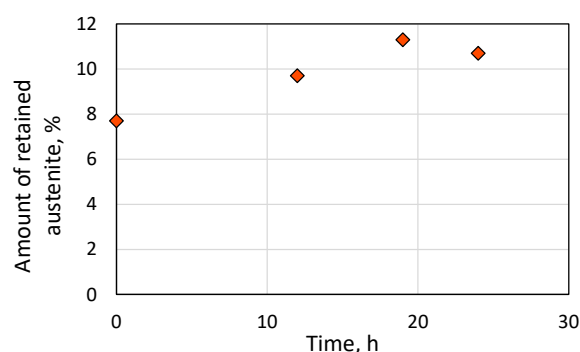


Fig.5 Amount of retained austenite

3.2. 境界潤滑条件におけるフルーチング形成試験

光学観察結果を Fig 6,7 に示す。2880 min 時点で陰極である R 試験片に波板状損傷を確認した。また 2400 min において陽極である St 試験片の接触槽円外側に放電痕が形成されていることを確認した。

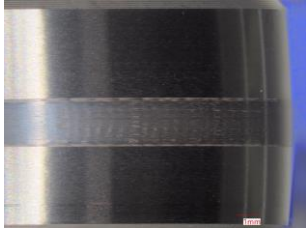
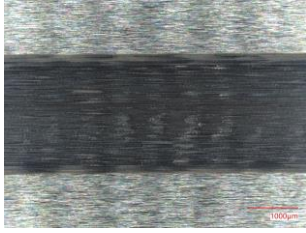
Testing Time	2880 min	
Magnification	Low	High
R-Sample		

Fig. 6 Optical microscope images of rolling contact area for R-Sample under boundary lubrication conditions

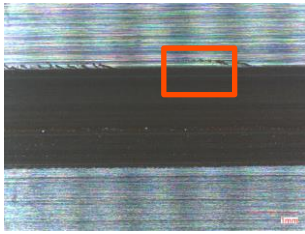
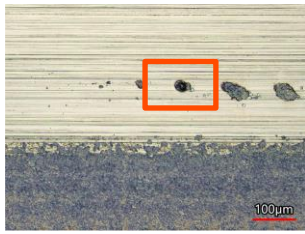
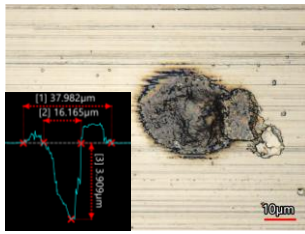
Testing Time	2400 min		
Magnification	Low	Middle	High
St-Sample			

Fig. 7 Optical microscope images of rolling contact area for St-Sample under boundary lubrication conditions

4. 考察

4.1. 流体潤滑条件におけるフルーチング形成試験

X 線回折環の半価幅は運転時間が長くなるごとに低下していることから、材料表面の軟化が考えられる。これは放電により生じた熱による焼き戻しを示唆している⁵⁾。軸受電食においても同様の報告⁶⁾があることから、二円筒接触試験機で生じた波板状損傷はフルーチングであると言える。また残留オーステナイトは極大値を示したが、加工表面の熔融層が放電終了時の急冷によりマルテンサイトに変態されずに残留した結果増加し⁷⁾、その後表層が除去されたため低下したと考えられる。一方、ピーク強度の標準偏差は転動面の結晶配向の進行を示すが今回の実験では変化が見られなかったことから、フルーチング形成は塑性変形に由来するものではないと考えられる。

4.2. 境界潤滑条件におけるフルーチング形成試験

油膜パラメータ Λ 0.36 の境界潤滑条件においてフルーチングが形成されたことから、流体潤滑条件で油膜の絶縁破壊が発生することはフルーチング形成における必要条件ではないと考えられる。また、Fig. 7 より接触楕円外側に放電痕が形成されていることは、境界潤滑条件において放電が発生するような要素があることを示唆している。

5. まとめ

フルーチング形成メカニズムの解明を目的として、二円筒接触試験機を用いたフルーチング形成実験を行い、メカニズムの調査を行った。その結果、二円筒接触試験機においてもフルーチング形成の再現ができることが分かった。またフルーチング形成は塑性変形によるものではないことを示唆する結果が得られ、運転条件が流体潤滑条件であることは必要条件ではないことを示唆する結果も得られた。さらに境界潤滑条件において放電が発生するような要素があることを示唆する結果も得られた。

文献

- 1) 野口・堀田：スラスト玉軸受を用いたリッジマーク成長過程のミクロ的観察，トライボロジスト，62, 6 (2017) 405.
- 2) 古谷・西川・松田・砂原・山本：電食による損傷の進展挙動，トライボロジー学会予稿集，東京，2013-5, D14
- 3) H.Tischmacher：Systemanalysen zur elektrischen belastung von wälzlagern bei umrichtergespeisten elektromotoren，(1966) .
- 4) T.Fujita, N.Kamura, Y.Maruyama, T.Sasaki：Evaluation of Rolling Contact Fatigue Using X-Ray Diffraction Ring, ASTM MPC, 5, 1 (2016)23.
- 5) 小峰・中西・森：焼入焼もどしされた材料の半価幅とかたさの対応について，材料，Vol.26, No.280(1977), 24-30
- 6) 鈴村：鉄道における転がり接触面の X 線表面解析に関する研究，金沢大学大学院自然科学研究科，博士論文 (2022)
- 7) 向井・日原：熱疲労に基因する放電加工面品質の研究(第 1 報)-形彫り放電加工 SKD61 焼きなまし材の熱疲労特性-，電気加工学会誌，24, 48(1991), 24-34