

転がり接触条件下における軸受鋼の疲労摩耗に及ぼす潤滑油粘度の影響

Influence of Lubricant Viscosity on Fatigue Wear of Bearing Steel under Rolling Contacts

東理大・工（正）*大橋 遼太郎 東理大・院（正） 原田 敦太

東理大・院（正）佐藤 魁星 東理大・工（正）佐々木 信也

Ryotaro Ohashi*, Atsuta Harada**, Kaisei Sato**, Shinya Sasaki*

* Tokyo University of Science, ** Graduate School of Tokyo University of Science

1. はじめに

近年、世界各国で電気自動車の普及が進む中で、減速機の疲労摩耗の抑制が求められている。電気自動車は、原動機内部にモータが利用されており、モータの回転数は従来のエンジン車と比較して非常に高い。したがって、動力伝達を担う減速機内の歯車や軸受では、単位時間あたりの接触回数が増大し、疲労寿命の早期化が問題となる。特に、疲労摩耗の一種であるピッキングの発生は看過できない問題であり、放置すれば歯車や軸受の性能が著しく損なわれるだけではなく、直接的に機械の停止を引き起こす。

従来のピッキングに関する研究では、すべりと転がり接触が同時に起こるような条件での試験が行われてきた¹⁾²⁾。しかしながら、すべりによる摩耗によって、疲労表面が排除されることが報告されている³⁾。したがって、ピッキングの発生を基礎的に理解するためには、すべりの影響の少ない純転がり条件下における疲労摩耗を調査することが必要となる。また、二面間の油膜保持の観点から、潤滑油粘度の選定は最重要項目の一つであり、粘度の増加が二面間の油膜厚さを増加させ、しゅう動面の疲労寿命に寄与するものと推測してきた¹⁾³⁾⁴⁾。しかしながら、潤滑油の粘度変化がピッキングの発生に与える影響を調査しつつ、そのメカニズムを正確に調査した研究事例はなく、疲労摩耗を代表とする表面損傷の保護といった観点における潤滑油粘度の選定指針は不明である。

本研究では、潤滑油の粘度が軸受鋼の転がり接触面における疲労摩耗に与える影響およびそのメカニズムを調査することを目的とし、動粘度の異なる潤滑油を用いてボールオンディスク方式の純転がり摩擦試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 MTM トランクション試験機を用いた純転がり摩擦試験

純転がり摩擦試験には MTM トランクション試験機(MTM2, PCS Instruments, UK)を用い、試験形態はボールオンディスク方式で行った。Figure 1 に試験形態の模式図を、Table 1 に試験条件を示す。試験に用いたボール、ならびにディスクは、寸法がそれぞれ直径 19.05 mm, 直径 46 mm であり、表面粗さはともに Ra 0.02 μm 未満、材質はともに軸受鋼の SUJ2 であった。潤滑油には、基油のポリアルルファオレフィン (PAO) のうち、65°Cの動粘度がそれぞれ 2.93, 8.79, 13.3, 19.5、ならびに 25.6 mm^2/s である、PAO2, PAO4, PAO6, PAO8、ならびに PAO10 を使用した。試験はボールとディスクの接触領域が潤滑油で完全浸漬された状態で行った。

2.2 純転がり摩擦試験後の表面形状観察

純転がり摩擦試験後、共焦点レーザ顕微鏡 (VK-X150, KEYENCE, JP) を用いて、しゅう動部の表面画像を各ディスクの 8 か所について取得した。また、疲労摩耗の発生領域を定量的に評価するため、MATLAB (MathWorks, US) を用いて、表面画像の深さ情報に対し、すべりによる線状のアブレシブ摩耗痕の最大深さをしきい値として二値化を行い、それより深い部分をピッキング深さ相当の疲労摩耗領域として黒色で表した。疲労摩耗領域の面積割合は、疲労摩耗領域の面積をしゅう動部全体の面積で除することで算出した。

3. 実験結果

3.1 ディスク表面観察結果

Figure 2 に PAO2、ならびに PAO10 潤滑下における試験後のディスク表面画像のうち、代表的な画像を示す。Figure 2 より、ディスク表面には、線状のアブレシブ摩耗痕、塑性流動、ならびにピッキングの 3 つの損傷形態が確認された。

3.2 ディスク表面画像処理結果

Figure 3 に Fig. 2 を二値化処理した画像を示す。Figure 3 の黒色部は疲労摩耗が発生した箇所を示しており、潤滑油の動粘度増加に伴い、疲労摩耗領域の増加が確認された。

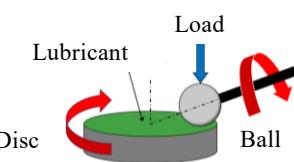


Fig. 1 Schematic illustration of ball-on-disc type pure rolling tests

Table 1 Test conditions

Lubricant temperature, °C	65
Lubricant volume, mL	50
Load, N	75
Maximum Hertzian Pressure, GPa	1.3
Entrainment speed, m/s	3.0
Slide-roll-ratio (SRR), %	0
Test time, h	24

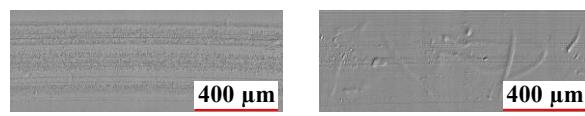


Fig. 2 Example of laser microscope images of disc surface after tests



Fig. 3 Example of binarized images on each fatigue wear surface of tested discs

3.3 潤滑油の動粘度と疲労摩耗の関係

Figure 4 に各潤滑油の 65°C における動粘度と、算出したディスク表面の疲労摩耗領域の面積割合の関係を示す。Figure 4 の結果より、動粘度が大きくなるにつれて、疲労摩耗領域の面積が増加する傾向が確認された。

4. 考察

4.1 二値化による疲労摩耗評価に関して

Figure 3 の二値化画像では、ピッティングに加え、塑性流動も確認された。このことは、今回の試験条件では塑性流動が線状摩耗痕より深い領域まで進んでいることを示している。

Figure 3 において、線状アブレシブ摩耗痕の最大深さより深い領域をピッティングと塑性流動による疲労摩耗領域として、その面積割合を算出したところ、疲労摩耗が定量的に評価可能となった。このことから、画像の二値化は、疲労摩耗評価において有効な手段であると考えられる。

4.2 潤滑油の粘度上昇によるピッティング発生メカニズム

Figure 5 に二円筒試験機を用いた先行研究におけるピッティングの発生メカニズムを示す。この二円筒試験機での実験においては、二円筒同士に速度差があり、すべりが起こる。したがって、き裂が接触面に進入する直前に、Fig. 5 (b) のようにき裂表面の片方のみがすべりに起因する摩擦力によって引っ張りを受けることで、き裂の口が開き、元のき裂の空隙体積以上の潤滑油が含まれる。その後、き裂の口が接触圧力により閉じ、圧縮されることで、潤滑油の圧力がき裂を内部から押し広げる方向に作用し、き裂の進展を促進する⁵⁾。

Figure 6 に、新規に提案する、純転がり条件下におけるピッティングの発生メカニズムのモデルを示す。今回の実験においては、純転がり条件であるため、すべりに起因するき裂を広げる摩擦力が存在しない。しかしながら、Fig. 6 のように接触圧力によりき裂の口が広がると考えられる。その結果、き裂が元の空隙体積以上の潤滑油を含み、前述したメカニズムと同様に、き裂の口が接触圧力により閉じられ、圧縮されることで、き裂の進展が促進されると考えられる。

Figure 4 より、潤滑油の動粘度が大きいほど、疲労摩耗領域の面積割合が増加することが確認された。この要因としては、潤滑油が粘度増加によって、き裂内部に留まりやすくなり、き裂内部に閉じ込められた潤滑油量が増加したことなどが考えられる。その結果、き裂が圧縮された際にき裂内部に生じる圧力が増加し、ピッティングの進展が促進されたと考えられる。

5. 結言

ボールオンディスク式トラクション試験機を用い、純転がり条件下において、動粘度の異なる 5 種類の基油潤滑油を用いて、転がり接触面における疲労摩耗の発生状態を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 純転がり条件下で疲労摩耗の発生が確認されたことから、ボールオンディスク方式による純転がり条件下において、疲労摩耗の評価が可能であることが確認された。
- (2) 純転がり摩擦試験後のレーザ顕微鏡画像について、アブレシブ摩耗痕の最大深さをしきい値として二値化を行うことで、疲労摩耗領域を定量的に評価できることから、疲労摩耗の評価において、画像の二値化は有効な手段であると考えられる。
- (3) 基油潤滑下において、動粘度が大きくなるにつれ、疲労摩耗領域の面積が増加することが確認された。これより、今回の試験条件では、潤滑油の粘度特性が疲労摩耗の発生に支配的に影響すると考えられる。

文献

- 1) J. E. Johansson, M. T. Devlin, J. M. Guevremont & B. Prakash: Effects of Gear Oil Properties on Pitting Life in Rolling Four-Ball Test Configuration, *Tribology Transactions*, 57, 1 (2013) 104-113.
- 2) J.G.Z. Tamayo, M. Björling, Y. Shi, B. Prakash & R. Larsson: Micropitting performance of glycerol-based lubricants under rolling-sliding contact conditions, *Tribology International*, 167 (2022) 107348.
- 3) A. Vrcek, T. Hultqvist, Y. Baubet, M. Björling, P. Marklund & R. Larsson: Micro-pitting and wear assessment of engine oils operating under boundary lubrication conditions, *Tribology International*, 129 (2019) 338-346.
- 4) B.-R. Höhn & K. Michaelis: Influence of oil temperature on gear failures, *Tribology International*, 37 (2004) 103-109.
- 5) 海藤・川元・太田・中島・長藤・七野・中尾・濱口：ピッティングに至るき裂の進展に関する一考察、日本機械学会論文集 C 編, 77, 773 (2011) 187-195.

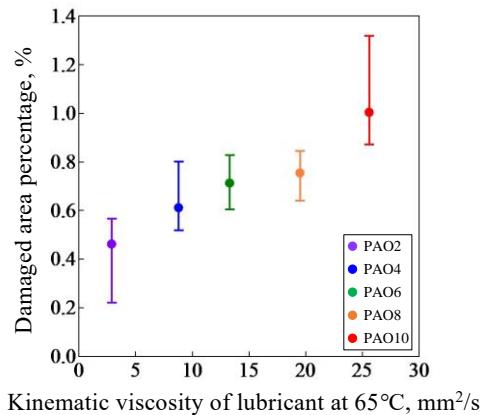


Fig. 4 The relationship between the damaged area percentage and the kinematic viscosity of the lubricants

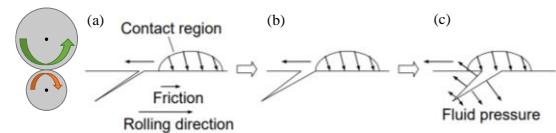


Fig. 5 Fluid pressurization mechanism in rolling-sliding contact⁵⁾

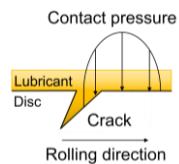


Fig. 6 Fluid pressurization mechanism in pure rolling contact