

# 塑性流動の可視化と内部応力解析によるピーリング現象の解明

## Elucidation of Micropitting Phenomenon by Plastic Flow Visualization and Internal Stress Analysis

日本精工（株） (正) \*柳澤 穂波 (非) Izyan Iryani Mohd Yazid (非) 福島 康介 (正) 相川 文明

(正) 橋本 翔 (非) 佐藤 佳宏朗 (正) 小俣 弘樹

Honami Yanagisawa, Izyan Iryani Mohd Yazid, Yosuke Fukushima, Fumiaki Aikawa, Sho Hashimoto,

Yoshihiro Sato, and Hiroki Komata

NSK Ltd.

### 1. はじめに

産業機器の省エネルギー化の要求は年々増しており、転がり軸受の摩擦損失を低減するため、潤滑油の低粘度・低油量化の流れが加速している。このような希薄潤滑条件下においては、表面を起点とする損傷の増加が予想される。表面起点型の損傷の一種であるピーリングは、転がり接触表面に生じる微小き裂・微小はく離であり、表面粗さと密接な関係があると言われている<sup>1)</sup>が、その発生要因についてはまだ十分に解明されていない。これまでの研究で、ピーリングには塑性流動部の大きさや深さが関係していることが示唆されている<sup>2)</sup>ものの、塑性流動部の可視化や定量化には課題があった。そこで本研究では EBSD(Electron Backscatter Diffraction)分析による塑性流動部の可視化と内部応力解析による応力状態の評価を行い、転動体の表面粗さや応力サイクル数が塑性流動に及ぼす影響について調査した。

### 2. 方法

#### 2.1 試験条件

試験に用いた軸受と転がり疲労試験機の模式図を Fig. 1 に示す。試験軸受にはスラスト玉軸受 51305 を使用し、軌道輪材料は標準的な JIS-SUJ2 焼入れ焼戻し材を用いた。疲労試験は表面粗さ  $Rq$  の値を 0.1, 0.3, 0.5  $\mu\text{m}$  と変化させた 3 種類の転動体を使用し行った。このとき、全ての試験で油膜パラメータ  $\Lambda$  が 0.18 になるよう、潤滑油の粘度や回転速度を調整した。微細構造の観察には SEM(Scanning Electron Microscope)を、結晶構造の分析には EBSD を用いた。

#### 2.2 解析条件

$Rq = 0.5 \mu\text{m}$  の転動体の表面粗さ分布を測定し、波長 10  $\mu\text{m}$  以下の細かい粗さを取り除いたうえで振幅を調整することで、 $Rq = 0.1, 0.3, 0.5 \mu\text{m}$  の表面粗さ分布を作成した。この粗さ分布をインプットファイルとし、潤滑油の粘度・回転速度・荷重・滑り率などの条件を試験とそろえ、Micro-EHL 解析を行った。また粗さ突起先端で生じる滑りによる接線力の影響を考慮した内部応力を明らかにするため、Liu らの報告<sup>3)</sup>をもとに内部応力解析を行った。

### 3. 結果と考察

Figure 2 に転がり方向と平行な断面における軌道面の SEM 観察および EBSD 分析の結果を示す。転動体粗さ  $Rq = 0.3, 0.5 \mu\text{m}$  ではピーリングに伴う微小き裂が発生したが、 $Rq = 0.1 \mu\text{m}$  では発生しなかった(Fig. 2(a))。 $\Lambda$  はいずれの試験でも同一であることから、転動体粗さが大きいほどピーリングが発生しやすいといえる。また、 $Rq = 0.3, 0.5 \mu\text{m}$  の表面近傍を見ると、微小き裂と塑性流動の方向が一致した。よって、ピーリングの発生には塑性流動が関連することが伺える。また、Fig. 2(b)の EBSD 像を見ると、上部に結晶方位の情報が取得できない領域が存在する。これは材料表面で塑性流動が発生し、結晶構造が崩れているためであると考えられる。この領域を塑性流動層とみなして塑性流動深さを定量化すると、転動体粗さが大きいほど塑性流動深さが増加した。このように塑性流動挙動が変化する理由として、表面近傍における内部応力状態の変化が考えられる。そこで潤滑状態を考慮した Micro-EHL 解析および内部応力解析を行い、塑性流動との関係を調査した。Figure 3 は解析結果のうち、転がり方向と平行かつ接触軸円中心の断面を抜き出して示している。Figure 3(a)は解析に用いた粗さ分布であり、転動体粗さが大きいほど突起の振幅が大きいことがわかる。Figure 3(b)

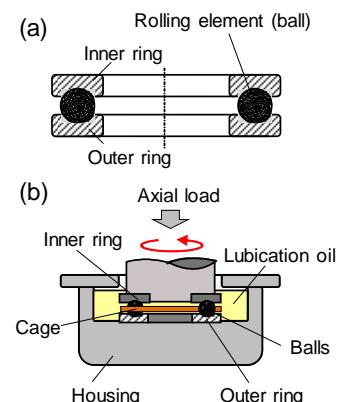


Fig. 1 Schematics of (a) Thrust ball bearing and (b) Rigs for the fatigue test

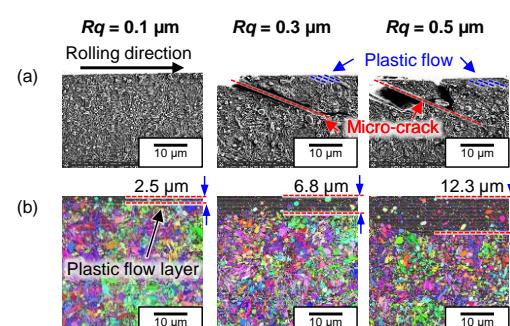


Fig. 2 Fatigue test results for each surface roughness  
(a) SEM images (b) EBSD images

はあるステップにおける Micro-EHL 解析の結果を示しており、転動体粗さが大きいほど面圧が増加した。これは粗さ突起の振幅が大きいほど、突起が接触域に入る際のスクイーズ作用が大きくなるためであると考えられる。Figure 3(c)は内部ミーゼス応力分布のうち、基準応力以上の応力が生じている部分のみを抜き出して示している。なお、基準応力は 1.35 GPa(標準的な JIS-SUJ2 焼入れ焼戻し材の 0.2%耐力の 90%)とした。転動体粗さが大きいほど基準応力を超える応力が深くまで生じており、Fig. 2(b)の塑性流動深さと傾向が一致していた。これらの結果から、塑性流動の深さ、微小き裂の発生および内部応力の深さはそれぞれ相関すると考えられる。

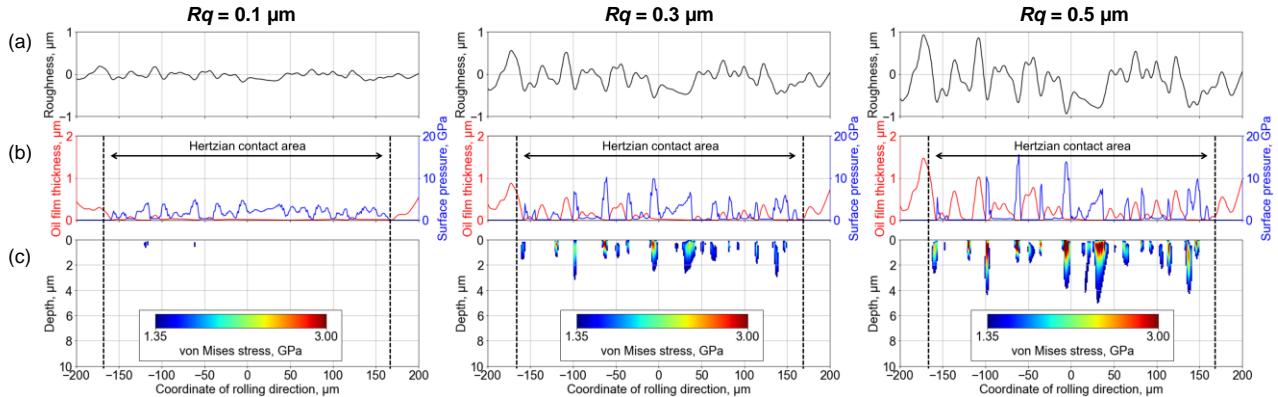


Fig. 3 Micro-EHL and internal stress analysis results for each surface roughness

- (a) Input surface roughness (b) Micro-EHL analysis results of oil film thickness and surface pressure  
(c) Internal von Mises stress distributions (Stress areas higher than 1.35 GPa are extracted and shown.)

次に、塑性流動の進展過程を明らかにするため、応力サイクル数と塑性流動深さの関係を、EBSD を用いて調査した。結果は Fig. 4 で示され、応力サイクル数の増加とともに塑性流動深さが増加した。ここで、Fig. 3(c)を見ると基準応力を超える応力は各粗さ突起の近傍に局所的に生じている。したがって、塑性流動は材料内部に降伏応力を超える応力が作用することで局所的に発生し、応力サイクルを重ねるごとに局所的な塑性流動部がランダムに重なり全体を埋めつくすことで塑性流動層が形成されると推察される。この仮説を検証するため、内部応力解析結果をもとに応力サイクル数の増加に伴う塑性流動深さ変化の予測を試みた。まず、各粗さ突起に起因する局所的な内部応力について、基準応力を超える最大深さを求めた。続いて、最大深さごとの頻度を対数正規分布でフィッティングすることで、接触幅内に 1 サイクル当たりに生じる、局所的な塑性流動部の深さと発生頻度を統計的に推定した。さらに、発生頻度分布に任意の応力サイクル数を掛け、単位面積当たりの局所的な塑性流動部の発生個数が 1 個/ $\mu\text{m}^2$  を超えるような深さを、その応力サイクル数における塑性流動深さと定義した。解析による塑性流動深さの推定結果を Fig. 5 に示す。転動体粗さが大きいほど、応力サイクル数が増加するほどに塑性流動深さの値が大きくなり、実験的に求めた塑性流動深さ (Fig. 4) と傾向が概ね一致している。以上のように、塑性流動部は材料内部に降伏応力を超える内部応力が繰り返し生じることで発生し、転動体粗さが大きいほど、また、応力サイクル数が増加するほどに塑性流動が深くまで生じ、ピーリングが発生・進展すると考えられる。

#### 4. まとめ

EBSD 分析結果から定量化した塑性流動深さは、転動体の表面粗さが大きいほどに増加していた。また、内部応力解析をもとに塑性流動深さを推定すると、実験と傾向が一致していた。したがって、油膜パラメータ  $\Lambda$  が同じであっても、転動体粗さが大きいほど、また応力サイクル数が増加するほど、内部応力に由来する塑性流動が深くまで生じ、ピーリングが発生・進展すると考えられる。

#### 文献

- 1) Olver, A. V.: The Mechanism of Rolling Contact Fatigue: An Update, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 219, 5 (2005) 313-330.
- 2) I. I. M. Yazid et al., The Effect of Surface Roughness on the Peeling Failures of Rolling Bearings, Abstracts of International Tribology Conference Sendai 2019, Sep. 2019, 21-E-5.
- 3) S. Liu, et al.: Studying Contact Stress Fields Caused by Surface Traction With a Discrete Convolution and Fast Fourier Transform Algorithm, ASME J. Tribology, 124, (2002) 36-45.

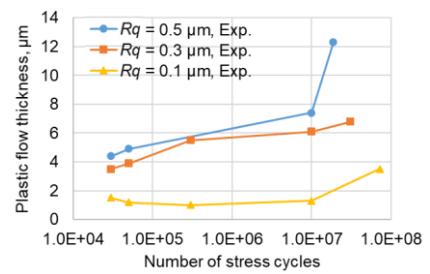


Fig. 4 Relationship between number of stress cycles and plastic flow thickness obtained from EBSD images

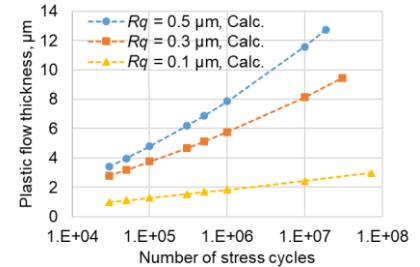


Fig. 5 Relationship between number of stress cycles and plastic flow thickness estimated by internal stress analysis