

# 転がり軸受の圧痕起点はく離に及ぼす影響因子と寿命予測モデルの検討

## Study on Influencing Factors and a Life Prediction Model of Dent-Initiated Spalling in Rolling Bearings

NSK (正) \*安部 剛史    NSK (正) 小俣 弘樹  
Takafumi Abe\*, Hiroki Komata\*  
\*NSK Ltd.

### 1. 緒言

はく離は、転がり軸受（以下軸受と称する）の耐久寿命を決定する損傷形態である。潤滑剤に異物が浸入すると軸受軌道面に圧痕が形成され、圧痕への応力集中に起因した圧痕起点はく離（表面起点はく離の一種）が生じることが知られている<sup>1)</sup>。表面起点はく離は回転機器の早期故障リスクになることから、これまでに多くの研究がなされている<sup>2-5)</sup>。ISO 281 で定められた寿命予測モデルは、潤滑状態の影響を考慮した統合的な予測値を与えるものである<sup>6)</sup>。しかしながら、はく離の駆動力である圧痕の応力集中そのものを考慮したものではない。省資源化・高効率化に伴う軸受の使用環境の過酷化により、今後、表面起点はく離リスクは高まっていくと予想される。そこで、本研究では、圧痕起点はく離の寿命予測モデルを検討すると共に、圧痕の密度や応力場が寿命に及ぼす影響について検討した。

### 2. 圧痕起点はく離の寿命予測モデルの検討

軸受の生存確率を $S$ 、応力繰返し数を $N$ 、圧痕部の応力を $\sigma_d$ 、疲労限に相当する材料強度を $\sigma_{d,th}$ 、圧痕部の応力体積を $V_d$ 、 $c$ 、 $e$ 、 $B_d$ を定数として、圧痕起点はく離の寿命確率モデルを式(1)で表す。

$$\ln \frac{1}{S} = B_d \cdot N^e \int (\sigma_d - \sigma_{d,th})^c dV_d \quad (1)$$

ここで、圧痕密度を $\rho_d$ 、軌道面の表面積を $A$ 、1つの圧痕に発生する応力体積を $v_d$ としたとき、 $V_d = A \cdot \rho_d \cdot v_d$ である。また、圧痕の大きさはばらつきをもって分布することを考慮し、応力および応力体積について、圧痕の大きさ水準で区分して考える。応力繰返し数 $N$ は寿命値 $L$ と比例することから、式(1)は、 $B'_d$ を定数として以下のように表される。

$$L = B'_d \left\{ \int (\sigma_d - \sigma_{d,th})^c dV_d \right\}^{\frac{1}{e}} \approx B'_d \left( \sum_i (\sigma_{di} - \sigma_{d,th})^c V_{di} \right)^{\frac{1}{e}} = B'_d \left( \sum_i (\sigma_{di} - \sigma_{d,th})^c A \cdot \rho_{di} \cdot v_{di} \right)^{\frac{1}{e}} \quad (2)$$

添え字 $i$ は圧痕の大きさ水準を表す。ここで、仮に大きさ水準 $k$ の圧痕が均一に形成されていた場合、 $\alpha$ および $\beta$ を定数として次式が成り立つ。

$$L \propto (\sigma_{dk} - \sigma_{d,th})^\alpha \cdot \rho_{dk}^\beta \cdot v_{dk}^\beta \quad (3)$$

そこで本研究では、圧痕起点はく離寿命予測モデルの検討として、式(3)が成り立つような圧痕形状を制御した転がり疲労試験を実施し、はく離寿命に及ぼす圧痕部の応力場と圧痕密度の影響を調査した。

### 3. 実験方法

Fig. 1 に示すスラスト型試験機を用いて転がり疲労試験（RCF 試験）を実施した。試験条件を Table 1 に示す。試験軸受にはスラスト玉軸受 51305 を使用し、軌道輪及び転動体材料は JIS-SUJ2 とした。ガスアトマイズ法により製造された硬さ 850 HV 程度の球状粉末を、振動篩によって分級し異物として用いた。作製した異物とその平均直径 $\phi_{ave}$ 及びその標準偏差 $\sigma$ を Fig. 2 に示す。大きさ 4 水準の異物をそれぞれ含んだ潤滑油を用いて 1 分間回転させ、軌道面に圧痕を付与した後、レーザー顕微鏡を用いて圧痕形状と数を測定した。測定範囲は、最大面圧に対し 90 %以上の面圧が発生する領域とし、単位面積当たりの圧痕個数（圧痕密度 $\rho_d$ : count/mm<sup>2</sup>）を計算した。その後、異物を含まない潤滑油を用いて、はく離が生じるまで RCF 試験を実施した。

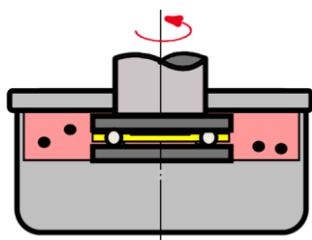


Fig. 1 Schematic of RCF test rig

Table 1 RCF test conditions

Maximum contact pressure, GPa	3.0
Rotating speed, min <sup>-1</sup>	1000
Lubricant	ISO-VG68

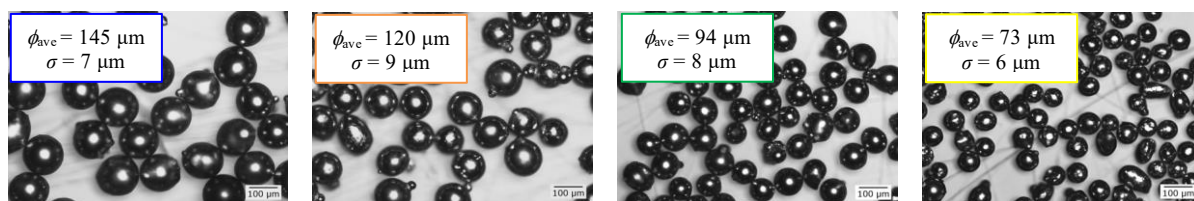


Fig. 2 Debris appearance (four levels of size)

#### 4. 実験結果および考察

圧痕の直径に対して、圧痕深さ、盛り上がり高さを整理した結果を Fig. 3 に示す。粒径を制御した異物を用いたことで、圧痕形状を制御した試験片を作製することができる。同一の荷重条件で RCF 試験に供した場合、圧痕部の応力場を同水準とみなすことで、式(3)が成り立つと考えられる。これらの軸受軌道輪を用いて RCF 試験を行った。試験結果を Fig. 4 に示す。全体の傾向として、異物の直径（すなわち圧痕の直径）が大きいほど、圧痕密度が大きいほど寿命が低下することがわかる。しかしながら、圧痕の直径を同等にしても寿命にはばらつきがみられた。また、Fig. 4 における直線の傾き（式(3)で  $\beta$  で表される指数）においてもばらつく結果となった。そこで、はく離起点となった圧痕位置が、溝底を中心とした 0.4 mm 幅の領域であった試験結果に限定してプロットした結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、圧痕密度及び異物の直径と寿命の相関がより明瞭となり、直線の傾きも特定の値に収束する傾向となった。スラスト玉軸受は、軌道面と転動体の転がり接触において半径方向にすべり速度が変化する。すなわち、はく離が発生した圧痕位置によってすべり速度が異なり、圧痕部の応力場が変化したことが寿命に影響したと考えられる。以上の試験結果は、より高精度な寿命予測モデルを構築するためには、すべりの影響も考慮した圧痕の応力集中を検討する必要があることを示唆する。発表では、 $\mu$ -EHL 解析を用いた、すべりの影響を考慮した圧痕部の応力計算結果についても報告する。

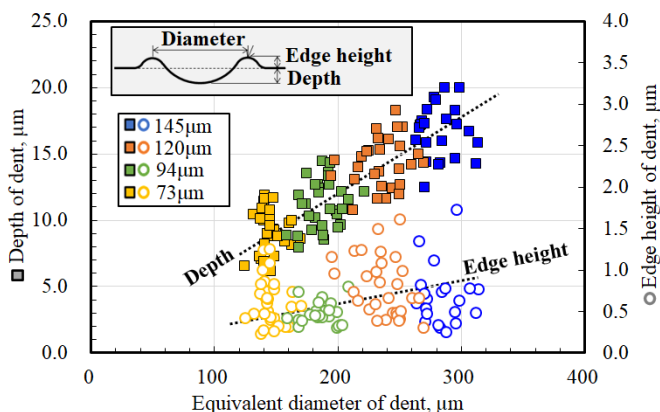


Fig. 3 Dent shape parameters for each debris diameter

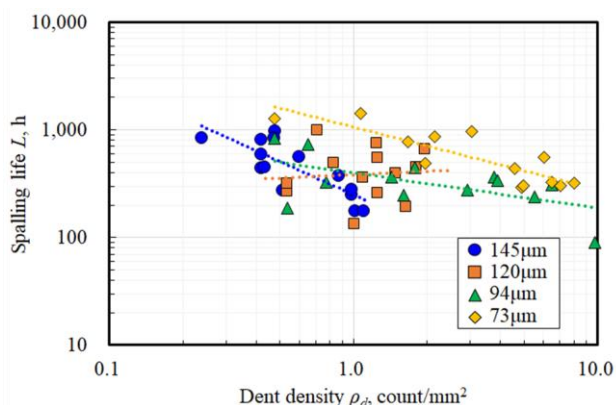


Fig. 4 The relationship between spalling life and dent density for each debris diameter

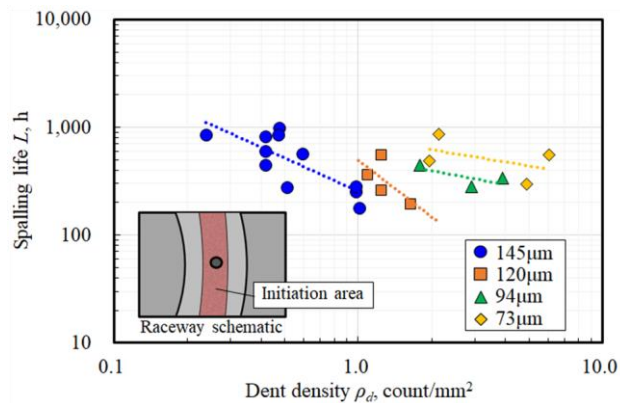


Fig. 5 The relationship between spalling life and dent density (where spalling occurs from dents around groove bottom)

#### 5. 結言

圧痕形状を制御した RCF 試験の結果、圧痕の直径及び圧痕密度が大きくなるほど圧痕起点はく離寿命が低下した。また、はく離の起点となった位置で分類したことで、圧痕密度に関する指数  $\beta$  が特定の値に収束する傾向にあった。これは、接触部の半径方向のすべり変化に伴って圧痕部の応力場が変化するためであると考えられる。

#### 文献

- 1) 三田村：転がり軸受の疲れとその研究動向，トライボロジスト，53, 10 (2008) 641-646.
- 2) G. E. Morales-Espejel, A. Gabelli, A. J. C. Vries: Tribology Transactions, 58, 5 (2015) 894-906.
- 3) I. I. M. Yazid, H. Komata, S. Hashimoto, K. Ueda: Tribology Online, 18, 1 (2023) 1-9.
- 4) G. E. Morales-Espejel, Y. Zhou: Tribology Online, 19, 1 (2024) 95-104.
- 5) I. I. M. Yazid, H. Yanagisawa, F. Aikawa, H. Komata: Tribology Online, 19, 6 (2024) 560-572.
- 6) ISO 281:2007. 2nd ed. Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life.