

転動体強化による転がり軸受の高機能化技術

Enhanced performance of rolling bearings by improving rolling elements

日本精工（株）（正）*橋本 翔 （正）小俣 弘樹 （正）植田 徹 （正）岩永 泰弘

Hiroki Komata*, Sho Hashimoto*, Tohru Ueda*, Yasuhiro Iwanaga *

* NSK Ltd.

1. はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、自動車や産業機器の省エネルギー化の要求はますます高まっている。したがって、様々な機器に使用される転がり軸受においても、軽量化や低トルク化を実現することで社会ニーズに答えていかねばならない。このような背景から、転がり軸受に加わる荷重や潤滑状態はいっそう厳しくなり、表面起点型はく離などの表面損傷が加速されることが予想される。圧痕起点はく離やピーリング起因はく離に代表される表面起点型のはく離寿命は、計算寿命よりも極端に短くなるケースがあるため、この現象に対して長寿命化する技術開発が重要である。一般的には、浸炭窒化などにより、はく離が生じる軌道輪の残留オーステナイト量や残留応力を制御することが有効である。しかしながら、この種の処理の多くは、高価な合金元素を添加した材料との組み合わせによって長寿命効果を得ることが多い。その結果、軸受製造工程における環境負荷が増加し、ライフサイクルの観点で必ずしも現在の社会的要件に適応した製品とはなっていない。そこで著者らは、表面起点はく離に及ぼす影響因子の明確化に改めて取り組み、その知見を基にして環境負荷低減と長寿命化を両立する技術の開発を試みた。

2. 表面起点型はく離に及ぼす接線力の影響

圧痕起点型はく離は、潤滑油中の異物によって形成された圧痕の縁を起点にして発生する。その特徴は、転がり方向に対して圧痕の後方側ではく離が生じやすいことである。Chiu らは、圧痕縁の接触面圧の上昇（応力集中度）による圧痕起点型はく離の説明を試みたが¹⁾、応力集中度のみでは、はく離位置を説明することは出来ない。ピーリングの場合も、き裂の発生・進展方向は転がり方向に対して相関性を有する²⁾。そこで、著者らはこれまでに、2 円筒試験及びボールロッド寿命試験により、圧痕縁のき裂発生位置やピーリングの発生・進展方向は、接線力の方向と相関があることを実験的に明らかにした。さらに、接線力の増大がき裂の発生・進展を加速することを示した^{2), 3)}。

接線力の大きさには、表面粗さが影響することが知られている。軌道輪及び転動体の粗さが小さいほど接線力は小さくなり、表面起点型はく離寿命は延長すると考えられる。しかし、これまででは軌道輪粗さと転動体粗さの影響を分離した考察は行われていなかった。そこで、著者らは、軌道輪粗さと転動体粗さを変化させた転がり軸受の寿命試験を行ない、各々の表面粗さが転がり疲れ寿命に及ぼす影響を調査した。Figure 1 に、寿命試験の結果を、油膜パラメータ Λ とピーリング寿命の関係として示す。はく離はいずれも軌道輪で生じたが、その寿命は Λ が同じであっても転動体粗さの影響を強く受けた。すなわち、軌道輪のはく離寿命は、軌道輪そのものの粗さよりも、相手材である転動体の粗さの方が大きく影響することが明らかになった。このことから、はく離を生じやすい部位（軌道輪）の相手部材である転動体の表面粗さを向上させ、接線力を小さくすることが、表面起点はく離寿命を延長させる効率的な手法であると示された。

3. 転動体の改良による転がり軸受の長寿命化技術

転動体の表面粗さは、初期粗さが良好であっても、潤滑条件が厳しい場合（混合・境界潤滑あるいは異物混入潤滑下等）には摩耗や圧痕形成により悪化する可能性がある。長寿命化には、転動体の耐摩耗性や耐圧痕性を向上させ、使用中の表面粗さの悪化を低減し、接線力の増大を抑制することが重要である。その手法として、転動体硬さの向上が有効である。転動体硬さを上げる手段のひとつとして、硬質で微細な析出物をマトリックスに分散させる方法がある。微細な析出物を形成させるためには、Mo, V, W, Ti などの元素を添加した鋼に、浸炭または浸炭窒化する手法が有効である。なかでも Si は安価な元素であり、硬質な Si 窒化物を形成することが知られている。そこで、JIS-SUJ2 と比較して Si を多く含む材料に浸炭窒化処理を行い、窒化物を析出させることにより鋼球を強化した。Table 1 に、

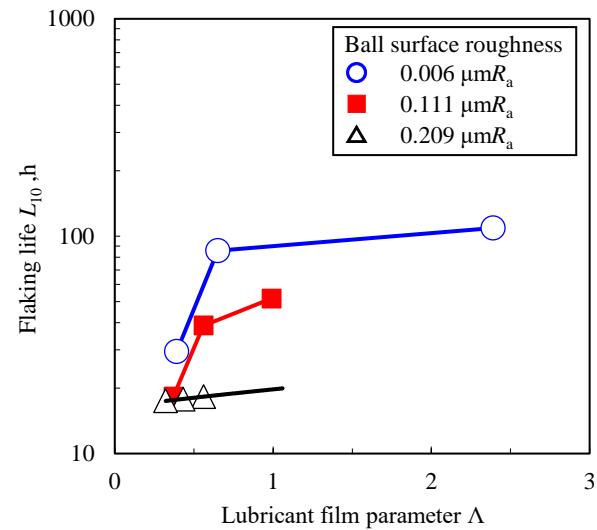


Fig. 1 Relationship between Lubricant film parameter Λ and flaking life (L_{10}) in each ball surface roughness.

JIS-SUJ2 焼入れ焼戻し鋼球（標準品）と窒化物析出鋼球の表面硬さと表面の金属顕微鏡写真を示す。窒化物析出鋼球の表面には、標準鋼球には見られない黒い斑点状の微細な析出物が観察できる。EDX を用いた成分分析により、黒い微細な析出物から N, Si, Mn が検出されたことから、この析出物は Si・Mn 系窒化物と考えられる。Si・Mn 系窒化物は非常に高硬度なため、標準鋼球と比較して、窒化物析出鋼球の表面硬さが 100 HV 程度向上した。

転動体に窒化物析出鋼球を用いた転がり軸受の寿命特性を確認するため、Table 2 に示した軌道輪と転動体の組み合わせの軸受を作製して、寿命試験を行った。軌道輪には、JIS-SUJ2 に焼入れ焼戻しを施した標準軌道輪と、残留オーステナイトが多い長寿命軌道輪を準備した。寿命試験は、試験軸受に JIS-6206 を用い、ラジアル荷重 $F_r = 6.2 \text{ kN}$ 、回転速度 $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ 、潤滑油として ISO-VG68 の鉱物油を用いた。潤滑環境は、異物混入油浴である。異物条件は、異物硬さ 870 HV、異物の大きさ $74 \sim 147 \mu\text{m}$ 、異物量 0.05 g / 潤滑油 1.2 L である。軌道輪及び鋼球に標準材を用いた軸受 (Bearing A) は比較用基準試験として実施した。Figure 2 に寿命試験結果を示す。なお、はく離はすべて軌道輪に生じた。Figure 2 に示したように、転動体に耐圧痕性を向上させた窒化物析出鋼球を用いるだけで、軌道輪の圧痕起点はく離寿命が約 2 倍に延びた。この寿命延長効果は、標準軌道輪だけでなく、長寿命軌道輪と組み合わせた場合にも確認できた。寿命延長効果が鋼球の耐圧痕性を向上させたことに起因することを確認するため、寿命試験を 1 時間で停止し、鋼球の圧痕形成状態を確認した。Table 1 に示したように、窒化物析出鋼球は SUJ2 焼入れ焼戻し標準鋼球と比較して、形成される圧痕の数が少なく、深い圧痕の形成も抑制されていた。

以上の結果から、窒化物析出鋼球を用いた場合の寿命延長効果は、鋼球の耐圧痕性が向上することで軸受稼働中の鋼球表面性状の悪化が低減され、軌道輪の圧痕縁に作用する接線力の増大を抑制したためと考えられる。

4. おわりに

使用に伴う転動体の表面粗さの劣化を抑制することによって、軸受そのものの耐久寿命を延長するという新たな指針に基づき、表面に微細な炭窒化物を析出させることで耐異物圧痕性や耐摩耗性を向上した転動体を開発した。本転動体を使用した転がり軸受は、標準仕様と比較して、異物混入潤滑において約 2 倍のはく離寿命を有しており、材料に高価な合金元素を添加することなく高耐久化することが可能である。本技術を適用した転がり軸受は、自動車向けトランスマッシャン用や工作機械用などに展開されており、様々なアプリケーションの省エネルギー化に寄与し、低炭素社会の実現に貢献している。

5. 謝辞

本技術開発は株式会社天辻鋼球製作所殿の多大なご協力の下に成されたものである。この場を借りて深く謝意を表する。

文献

- 1) Y. P. Chiu, J. Y. Liu: Transactions ASME F 92 (1970), 258-263.
- 2) S. Hashimoto, K. Ueda, T. Ueda, N. Mitamura: Proceedings of the International Tribology Conference, Hiroshima (2011).
- 3) T. Ueda, N. Mitamura: Tribology International, 42 (2009), 1832-1837.

Table 1 Hardness and surface condition of balls.

| Ball type | SUJ2 | Nitride precipitated material |
|--|-------|-------------------------------|
| Surface hardness | 801HV | 892HV |
| Surface condition before testing | | |
| Surface condition after 1 hour testing | | |

Table 2 Bearing component used for fatigue tests.

| Bearing set | A | B | C | D |
|------------------|------|-------------------------------|------|---------------------------------------|
| Symbol in Fig. 2 | ○ | ■ | ▲ | ◆ |
| Rings | SUJ2 | | | Material with high retained austenite |
| Balls | SUJ2 | Nitride precipitated material | SUJ2 | Nitride precipitated material |

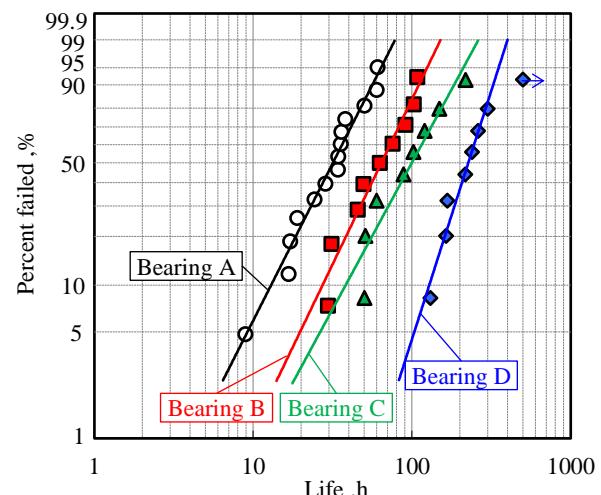


Fig. 2 Results of rolling contact fatigue tests.