

ナノ粒子添加剤を分散させた潤滑油の転がり軸受疲労特性
Rolling bearing fatigue of nanoparticles dispersed lubricant

出光興産（正）*砂川 洋二

Yoji Sunagawa*

*Idemitsu Kosan Co., Ltd.

1. はじめに

自動車への燃費要求の高まりから、潤滑油の攪拌による損失低減のために、潤滑油は低粘度化する傾向にある。これまでも潤滑油への機械要素の保護性能は非常に高いものが要求されているが、潤滑油低粘度化によって生じる油膜厚さの減少から、特に潤滑油添加剤の果たす役割は一層高まっている。潤滑油添加剤の代表として ZDDP（Zinc Dialkyldithiophosphate, ジアルキルジチオリン酸亜鉛 [1]）が挙げられるが、EV モータの冷却を兼ねた潤滑システムでは、硫黄を含有する構造から銅腐食が課題となり使用が難しいのが現実である。また潤滑油添加剤として使用される油性化合物は一般に極性基を有しており、多量に配合すると電気絶縁性を悪化させてしまう。そこで、銅腐食防止性や電気絶縁性を悪化させない新しい添加剤として酸化物ナノ粒子に着目し、本検討では酸化物ナノ粒子配合潤滑油について、軸受転がり疲れ特性を評価した。

2. 実験方法

Fig. 1 に本検討で使用したスラスト玉軸受疲労試験機の模式図を示す。本試験機を使用し、Table 1 の条件にて潤滑油の転がり疲れ特性を評価した。低粘度化による希薄潤滑条件[2]を考慮し、上部軌道輪の背面を試験に供試した。疲労試験後軌道輪の残留応力を X 線回折法（リガク社製、Auto MATE II, Cu K α ）により求めた。

一方、軸受鋼球の転がり条件における表面被膜形成度合いを評価する目的で、MTM（PCS Instruments 社製 Mini Traction Machine）による摩擦試験を実施した。試験条件を Table 2 に示す。一定時間における鋼球表面の被膜形成を SLIM（Spacer Layer Imaging Method）により観察した。

Table 3 に潤滑油の仕様を示す。基油に PAO4（Poly- α -Olefin, 100 °C 動粘度 4 mm²/s）を採用し、Sample A には酸化物ナノ粒子として ZrO₂ 粉末と酸化物ナノ粒子を安定に分散させるための分散剤を所定量配合した。比較として ZDDP 及び分散剤を配合した Sample B を合わせて用意した。

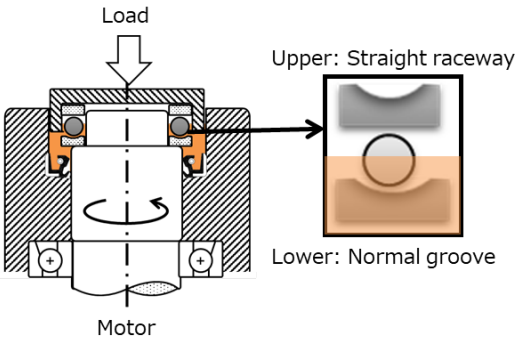


Fig. 1 Schematic of the bearing fatigue test apparatus

Table 1 Conditions of the bearing fatigue test

Bearing type	#51110 single-thrust ball bearing
Number of steel balls	6, reduced from 24 balls
Shaft rotation speed	1500 \pm 50 rpm
Test Load	980 N
Hertzian pressure, P _{max}	3.2 GPa
Upper washer	0.15-0.20 μ m Ra at flat side, as supplied, no-control
Temperature	80 \pm 3 °C, outside of the upper washer
Lubricant film parameter, Λ	0.5-0.6
Lubricant quantity	50 ml, dipping
Suspension judgment	Time when vibration reaching at 8.0 G or 300 hours

Table 2 Conditions of the MTM test

Specimen	Disk	AISI 52100 steel, 0.02 μ m Ra
	Ball	AISI 52100 steel, ϕ 3/4-inch, 0.02 μ m Ra
Test oil temperature	80 °C	
Test Load	70 N (P _{max} : 1.2 GPa)	
Entrainment speed	1.0 m/s	
Slide-roll ratio (SRR)	1.0 %	
Test time	240 min.	

Table 3 Lubricant formulations

Lubricant name	Sample A	Sample B
Base oil	PAO4	PAO4
Additives	ZrO ₂ nanoparticles powder (ZrO ₂ : 1 wt.%)	ZDDP (Zn: 2600 wt.ppm)
	Dispersant	Dispersant
Kinematic viscosity at 100 °C	4 mm ² /s	4 mm ² /s

3. 結果と考察

スラスト玉軸受疲労寿命試験の結果（ワイブルプロットにおける 50 % 損傷寿命, L50）および疲労寿命試験後における上部軌道輪表面の残留応力測定値を Table 4 に示す。ZDDP を配合した Sample B は寿命が 72 時間であったのに対して、ナノ粒子配合油 Sample A では 300 時間まで振動上昇が見られず、寿命に至ることなく試験を終了した。疲労寿命試験後の上部軌道輪観察より、どちらの潤滑油においても鋼球転走部に顕著な摩耗の発生はなく、差は見られなかった。また、Sample A の上部軌道輪表面における鋼球転がり方向の残留応力は Sample B に対し高い圧縮値を示した。

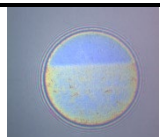
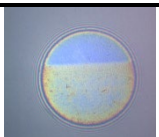
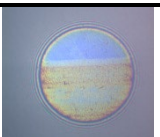
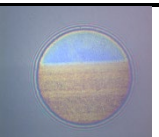




軸受鋼球の転がり条件を模擬した MTM 試験における鋼球表面の観察写真を Table 5 に示す。あわせてレーザー顕微鏡により取得した MTM 試験 240 分後のディスク表面の 3 次元高さ像を Fig 2 に示す。ZDDP はしゅう動部表面に反応被膜を形成し、損傷から表面を保護することが知られている[3]。しかし、Sample B の結果が示すように、転がり条件では被膜形成能は低いことが分かる。一方、Sample A では被膜の形成が確認された。

以上より、軸受材料表面に形成した酸化物ナノ粒子由来の被膜がき裂の発生を抑制するとともに、表面の高い圧縮残留応力が微小き裂の進展を抑制することで長い疲労寿命を示したと考察する[4]。

Table 4 Bearing fatigue test results

Results	Sample A	Sample B
L50 (n=6)	Over 300 hours	72 hours
Residual stress of upper washers	-826 ± 31 MPa	-659 ± 23 MPa

Table 5 MTM-SLIM images of ball during Rolling contact with micro-slip condition

Lubricant	After 30 min	After 60 min	After 120 min	After 240 min
Sample A				
Sample B				

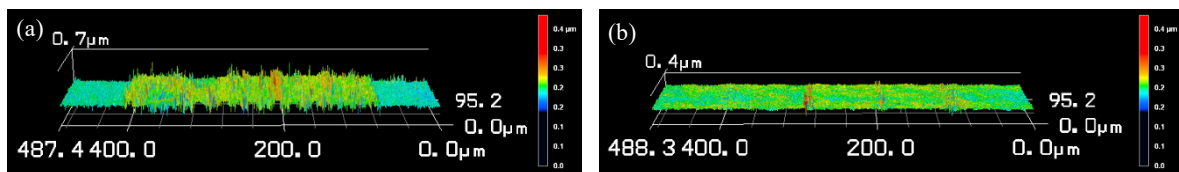


Fig. 2 Laser microscope images of MTM disk after 240 min test : a) Sample A and b) Sample B

4. おわりに

酸化物ナノ粒子は転がり条件でも被膜を形成し、転がり疲れ特性を向上させることが明らかとなった。

文献

- 1) H. Spikes: The history and mechanisms of ZDDP, Trib. Lett., 17, 3 (2004) 469.
- 2) 藤田・長谷川・嘉村・佐々木: 低ラムダ条件でのスラスト玉軸受の転動疲労寿命, トライボロジスト, 60, 11 (2015) 741.
- 3) 佐藤・大内・大久保・渡部・佐々木: AFM 摩擦面その場観察による ZDDP と有機系 FM 複合添加潤滑剤中の反応膜の生成過程と潤滑メカニズムの調査, トライボロジスト, 67, 5 (2022) 354.
- 4) 木田: 転がり疲労とき裂進展機構, 材料, 51, 8 (2002) 867.