極圧剤の反応膜形成によるフルーチング抑制効果の検討

Examination of fluting suppression effect by reaction film formation of extreme-pressure additive

ＮＴＮ（正）*葛谷　紘澄　　（正）伊藤　元博　（正）川村　光生

Hiroto Kuzuya*, Motohiro Ito*, Mitsuo Kawamura*

* NTN Corporation

1.　はじめに

軸受の損傷形態の一つとして電食が挙げられる．軸受における電食とは軸受内に電流が通過することに起因して軌道面などが損傷する現象のことであり，軌道面が梨地状に変質するフロスティングや，フロスティングから進展し波板状になるフルーチング（リッジマーク）が形成され[1]，軸受振動の原因となる．転動体と内外輪間で形成される油膜が絶縁破壊して，軌道面にフロスティングやフルーチングを形成すると考えられている．フルーチングが形成されるメカニズム[2]やフルーチング形成に必要なエネルギー量[3]などは研究されているが，未解明な部分は未だ多い．

また，近年のモータやインバータの高性能化やカーボンニュートラル化に伴う電気自動車のモータ適応領域の拡大に伴い，軸受に電流が通過する環境下での使用頻度が増加する．そのため，電食の発生が増加することが考えられ，メカニズムの解明や電食発生までの使用時間，そして電食対策の需要も高まっている．

本報では，金属同士の接触による発熱時に反応膜を形成する極圧剤と，油膜の絶縁破壊時に発生する発熱に着目し，極圧剤によるフルーチングの抑制効果を報告する．

2.　試験サンプルおよび潤滑油

軸受電食試験に冠型樹脂保持器を組み込んだ 6206，振動摩擦摩耗試験に SUJ2 の鋼球及びプレートを使用した．また潤滑油には添加剤有無や添加剤化合物が異なる 6 種類の合成油（ポリ-α-オレフィン（以後 PAO と呼称））を使用した．Table 1 に供試油の性状を示す．

Table 1　Characteristics of test oil

Test	Sample name	Oil type	Viscosity at 40 ℃, mm²/s	Additives	Additive quantity, wt%	Base
Electric erosion tester	A	Poly-α-olefin	30.7			
	B			Extreme pressure additives	0.5	Sulfur
	C					Phosphorus
Vibration friction and wear tester	D		65.1			
	E			Extreme pressure additives	0.5	Sulfur
	F				0.2	Phosphorus

3.　試験方法

3.1 軸受電食試験

Figure 1 に軸受試験機の概略図を示す．試験機は自重によるラジアル荷重および板バネによるアキシアル荷重を軸受に負荷し，試験軸受のみに電気を流しながら軸受内輪を回転する構造である．試験軸受以外に電流が流れないよう，駆動モータと軸の接続部に絶縁カップリング，支持軸受転動体にセラミックス球，試験軸受周辺部に樹脂をそれぞれ使用している．また本試験では直流安定化電源を使用し，内輪が正極，外輪が負極となるように電気回路を構築している．本試験において供試油封入量は 4.0 g とし，シールにより密閉した．試験軸受のラジアル荷重は 38.2 N，アキシアル荷重は 101 N，内輪回転速度は 1600 min^{-1}，軸受温度は成り行きとし外輪温度を熱電対で測定した．また，軸受への電圧・電流印加については定電流制御を行い，電流は 5 A，電圧は成り行きとした．試験時間は先行研究[4]を参考にフルーチングに進展する試験時間である 7 h の 1 水準とし，試験後軸受を分解し内輪転走面を光学顕微鏡で観察した．

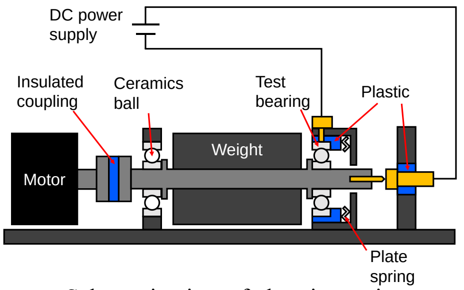


Fig.1　Schematic view of electric erosion tester

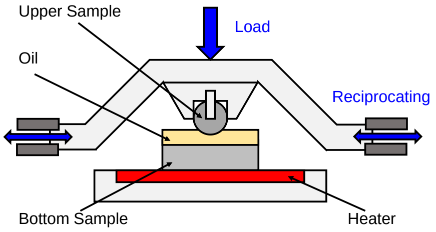


Fig.2　Schematic view of vibration friction and wear tester

3.2 振動測定

軌道面の形状変化による振動値を評価するため，アンデロンメータを用いて，アンデロンメータ測定値（以後アンデロン値と呼

称する）である Low-band，Middle-band，High-band をそれぞれ測定した．供試油封入量は 8.3 mg，内輪回転速度は 1800 min^{-1} とし，軸受電食試験による損傷部の振動値を測定するため，測定時のアキシアル荷重を 100 N とした．また，先行研究 [4]同様未使用の外輪，保持器およびセラミックス転動体を使用し，内輪のみ試験後品を用いてアンデロン測定を行った．内輪回転 5 s 後のアンデロン値を 5 回測定しその平均値を算出した．

3.3 反応膜電気特性評価

Figure 2 に振動摩擦摩耗試験機の概略図を示す．本試験機は上部試験片を下部試験片に垂直に押し付けることで荷重を負荷し，上部試験片を水平方向に往復運動することで滑り摩擦状態を再現し，境界潤滑条件下での極圧剤反応膜の電気特性を評価する．本試験における振幅及び振幅周波数はそれぞれ 1 mm，50 Hz とし潤滑油温度は 40 ℃である．また初期荷重を 50 N とし，5 min ごとに 50 N ずつ負荷荷重を上げ 200 N まで負荷した．反応膜の電気特性評価のため，抵抗値を測定し，各荷重における後半 1 min の平均値を評価した．

4 試験結果

4.1 軸受電食試験

Table 2 に供試油 A，B，C を封入した軸受の 7 h 試験後における内輪の観察結果を示す．無添加油である供試油 A および硫黄系極圧剤を添加した供試油 B ではフルーチングが発生しているが，リン系極圧剤を添加した供試油 C ではフロスティングにとどまることが分かった．

4.2 振動測定

Figure 3 に供試油 A，B，C を封入した軸受のアンデロン値測定結果を示す．無添加油である供試油 A と比較して，極圧剤を添加した供試油 B，C ではアンデロン値の High-band が低下した．特にリン系極圧剤を添加した供試油 C のアンデロン値の High-band は供試油 A のそれと比較して半分以下であった．

4.3 反応膜電気特性評価

Figure 4 に評価結果の一例として負荷荷重 100，200 N における供試油 D，E，F の電気抵抗値の結果を示す．無添加油である供試油 D の電気抵抗値と比較して，硫黄系極圧剤を添加した供試油 E のそれは一様に低く，リン系極圧剤を添加した供試油 F のそれは一様に高いと言える．

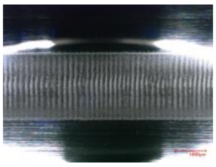
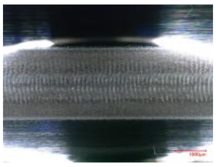
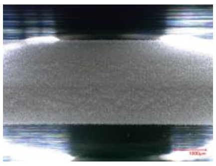
5 考察

反応膜の電気特性の評価結果によれば，リン系極圧剤は絶縁性の反応膜を形成すると考えられる．これらの結果より，油膜の絶縁破壊時に発生する熱によってリン系極圧剤が軌道面表面と反応し絶縁性反応膜を形成して，絶縁破壊時に生じる損傷を低減するため，フルーチングも抑制されたと考えられる．硫黄系極圧剤によって形成される被膜は絶縁性を有していないためフルーチング抑制効果が小さいと推測する．

6 まとめ

本報では，極圧剤の反応膜形成によるフルーチングの抑制効果を検討した．光学顕微鏡観察結果および振動測定結果より，リン系極圧剤を用いればフルーチングを抑制可能と考えられる．

Table 2　Observation results of an inner ring raceway after testing

Sample A	Sample B
	
Sample C	
	

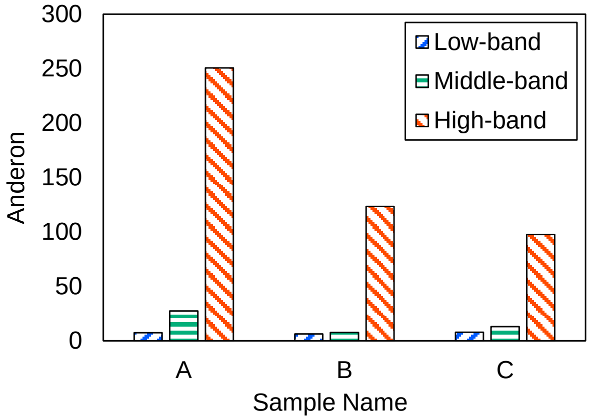


Fig.3　Anderon measurement results of Sample A，B，C

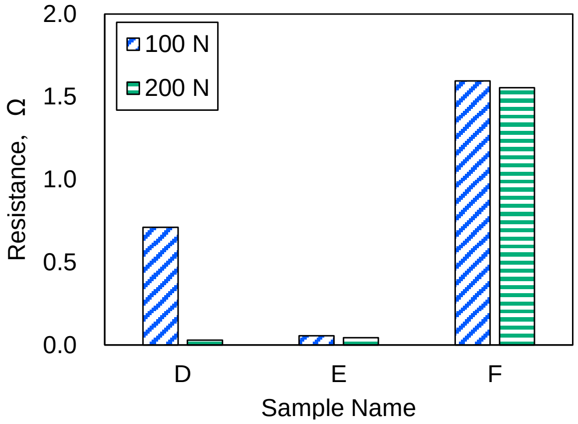


Fig.4　Resistance measurement results of Sample D，E，F

文献

1) 野口・堀田：スラスト玉軸受を用いたリッジマーク成長過程のミクロ的観察，トライボロジスト，62, 6 (2017) 405.
2) 古谷・西川・松田・砂原・山本：電食による損傷の進展挙動，トライボロジー学会予稿集，東京，2013-5, D14.
3) H.Tischmacher：Systemanalysen zur elektrischen belastung von wälzlagern bei umrichtergespeisten elektromotoren，(1966) .
4) 葛谷・川村・奥野・小長井：転がり軸受のフルーチング形成メカニズムの解明- 一定電力条件下における電食観察 -，トライボロジー学会予稿集，東京，2024-5, A15.