

4 円筒疲労試験によるリン系添加剤を用いた疲労き裂への影響評価

Effect of phosphorus-based additives on fatigue cracks in 4-roller fatigue tests

(株) 豊田中央研究所 (正) *青山 隆之 (正) 森谷 浩司 (正) 高橋 直子 (非) 大石 敬一郎

トヨタ自動車(株) (非) 山下 英男 (正) 佐野 敏成

Takayuki Aoyama*, Hiroshi Moritani*, Naoko Takahashi*, Keiichiro Oh-ishi*

Hideo Yamashita**, Toshinari Sano**

*Toyota Central R&D Labs., Inc., **Toyota Motor Corporation

1. はじめに

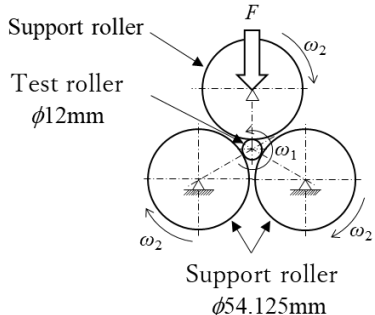
CO₂ 排出の抑制に向け、自動車の電動化が加速している。電動車両の動力損失に大きな割合を占める駆動系システムの損失低減に向け、駆動要素部品の損傷を防止しつつ潤滑油を低粘度化する技術が開発されている[1]。更なる損失低減を考えた場合、歯車の小型化による接触面圧の増加の影響も含め、油膜厚さが減少する傾向となり、歯面損傷の抑制が課題となる。その方策の一つに、潤滑油添加剤の反応被膜による摺動面の保護作用の向上がある。

過去の研究事例[2]では、リン系添加剤を基油に加えた供試油による円筒疲労試験で、被膜組成と疲労寿命との関係を調査した事例があるものの、被膜とき裂生成・進展の関係を論じた事例はない。そこで本研究では、市販油にリン系添加剤を追加した試作油による円筒疲労試験を対象に、摺動によって形成される被膜とき裂の関係から、疲労寿命向上に寄与する被膜の特徴を調査する。

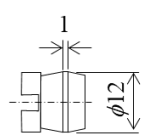
2. 試験法

転がりとすべりの摺動状態である歯車のかみ合いを模擬するため、Fig. 1 の 4 円筒式の疲労試験を行った。1 個の試験ローラに対し、120° 間隔で設置された 3 個の支持ローラで支えられ、試験時間の短縮が図られる。試験面圧は、歯車のかみ合い状態を参考に 1.5GPa とした。すべり率は、歯面でのピッチング損傷が発生する代表的な値とした。供試油は、市販油(トヨタ、e-トランスアクスフルード TE)を対象とし、これにリン系添加剤(トリクレジルホスフェート TCP)を追加添加した試作油と比較した。添加量は添加剤のリン量が市販油の 10 倍相当になる量とした。

この条件で疲労試験を実施し、試験面に疲労はく離が発生した際の振動で試験を停止し、ピッチング寿命とした。はく離後の試験片の表面性状や被膜厚さなどを観察し、添加剤による被膜とき裂への影響を評価した。



(a) Layout of 4-roller test rig



(b) Test roller

Material : SCM420
Surface Hardness : Hv750

Contact pressure	1.5 GPa
Slid Roll Ratio(*)	17%
Rolling speed(**)	3m/s

$$(*) = \frac{v_2 - v_1}{(v_1 + v_2)/2}$$
$$(**) = (v_1 + v_2)/2$$

v_1 : velocity of test roller
 v_2 : velocity of support roller

(c) Test condition

Fig.1 4-roller fatigue test (Micro Pitting Rig, PCS Instruments)

3. 結果

3.1 ピッチング寿命

試験で得た Fig.2 のピッチング寿命のように、試作油を用いた場合にピッチング寿命が大きく伸びた。後述する被膜と摺動面の調査から、寿命向上に寄与する因子を考察する。

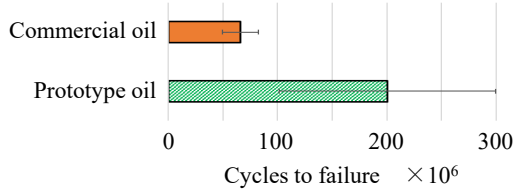


Fig. 2 Relationship between oil and pitting fatigue life

3.2 摺動被膜の組成比

試験片の摺動被膜の組成比を、硬 X 線光電子分光法(HAXPES)を用いて評価した。Table 1 から、リン、カルシウムのいずれも、試作油で増加傾向にあるものの、顕著な差は見られなかった。

Table 1 Properties of tribofilm [atomic %]		
	Phosphorus	Calcium
Prototype oil	22.9	3.62
Commercial oil	20.8	3.33

3.3 摺動面と被膜の特徴

光学顕微鏡、および走査型電子顕微鏡(SEM)による試験面画像、ならびに透過型電子顕微鏡(TEM)による試験片断面の被膜厚さ h

の関係を Fig.3-4 に整理した。市販油では、Fig.3 のように凹凸領域と平滑領域の 2 相に分かれ、マイクロピット近傍の平滑領域においては、被膜厚さは 6nm 程度であるとともに、き裂も見られた。一方、試作油では、Fig.4 のように試験面にマイクロピットが点在し、摺動面の状態は良好とは言えないものの、マイクロピット近傍の平滑化した面には 50～150nm の厚い被膜が形成され、き裂も少なかった。このことから、マイクロピット近傍の厚い膜による摺動面の保護によって、新たなき裂の生成を抑制していると推察される。

次に、研磨した試験片断面を光学顕微鏡で観察し、き裂とマイクロピットの特徴を調査した。き裂とマイクロピットの総和が 100 個となる区間を代表とし、Fig5(a)の定義にしたがい、き裂およびマイクロピットの長さや深さを計測し、Fig5(b),(c)に整理した。き裂、マイクロピット共に、試作油を用いた場合に長さや深さが減少し、ピッチング寿命に至るき裂の進展を抑制していると推定される。

4. 供試添加剤の作用機構

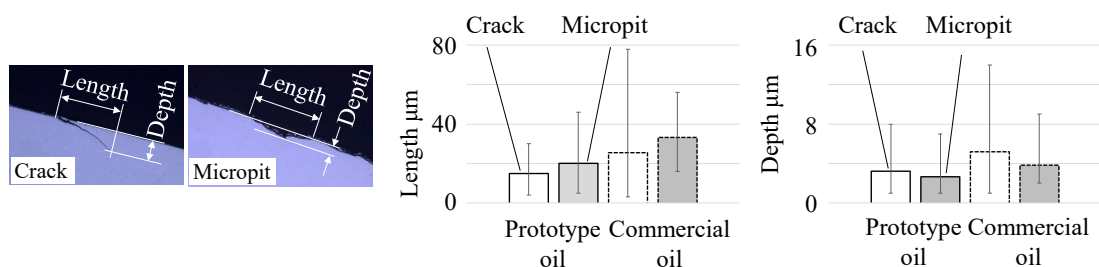
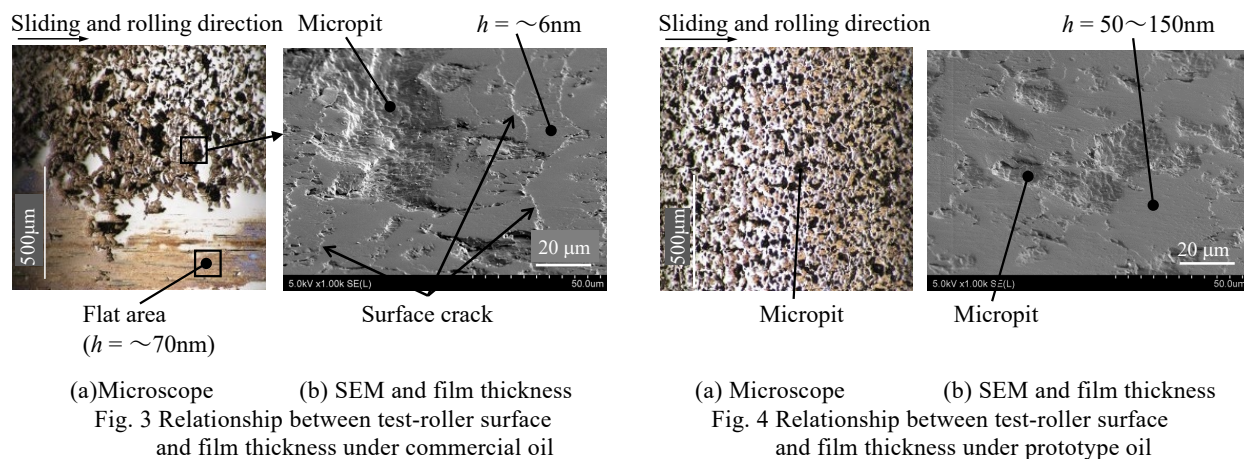


Fig. 5 Effect of phosphorus-based additives on crack and micropit

今回の試作油の作用機構を、Fig.6 に整理した。摺動初期では被膜の変化からき裂やマイクロピットが増加したと考えられる。その後、マイクロピット近傍では局所面圧が高くなり、被膜生成に関わる摺動エネルギーの増加によって、厚い被膜が形成された。この結果、疲労はく離に至る新たなき裂の生成・進展およびマイクロピットの集積を抑制し、ピッチング寿命が向上したと考えられる。

本試験での摺動面は Fig.4 のように凹凸が多い状態になっており、これを抑制しつつピッチング寿命を向上することが残存課題であるが、添加剤被膜の改良によるマイクロピット近傍での被膜厚さの確保によってピッチング寿命が向上したと推察された。

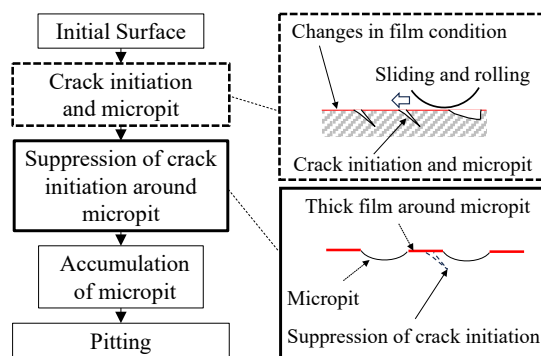


Fig. 6 Effects of phosphorus-based additives

5. 結言

市販油にリン系添加剤 TCP を加えた試作油を用いた歯車かみ合いを模擬する 4 円筒試験で、摺動被膜の改良によるピッチング寿命向上の可能性を評価した。面圧 1.5GPa、すべり率 17% の条件で、初期き裂およびマイクロピットの数の増加が課題であるが、その近傍における被膜厚さの確保によって、ピッチング寿命が向上する可能性を見出した。

文献

- 1) D. Tokozakura, T. Sano, T. Nakamura, A. Tada, Y. Susukida, H. Moritani & T. Shinyoshi: Development of Transaxle Fluid for Electrified Vehicles: Validating Optimized Viscosity through Targeted Hardware Testing, SAE International, 1103, 01 (2022).
- 2) 白濱・宮島・岡村：転がり疲れに及ぼすリン系添加剤の影響，トライボロジスト，46, 7 (2000) 564.