

## 反射分光摩擦部その場観察装置による低温環境下における摩擦低減手法の提案

Proposal for a Friction Reduction Method in Low Temperature Condition Using in situ Reflectance Observation of the Contact Point

名大・工（学）高野 理貴\* 名大・工（正）梅原 徳次 名大・工（正）野老山 貴行 名大・工（正）張 銳璽

Riki Takano\*, Noritsugu Umehara\*, Takayuki Tokoroyama\*, Ruixi Zhang\*

\*Nagoya University

### 1. はじめに

現代社会において自動車は広く普及しており、温室効果ガス排出量削減のため燃費の向上が求められている。乗用車への投入エネルギーのうち 16.5 %が機械しゅう動部における摩擦損失であることが報告されている<sup>(1)</sup>。機械しゅう動部において摩擦の低減及び摩耗の抑制を目的として潤滑油が用いられており、潤滑油中における摩擦挙動は、油粘度、しゅう動速度及び荷重によって境界潤滑、混合潤滑及び流体潤滑状態の 3 つの潤滑状態に分類できることが知られている。境界潤滑状態では直接接触が発生し摩擦摩耗が増大する。よって境界潤滑状態の摩擦低減手法として摩擦調整剤である MoDTC が用いられている。MoDTC は 80 °C 程度の高温環境においては活発に反応する一方でしゅう動面の温度が低い場合には反応が不活性となり、十分な摩擦低減効果を得られない。従って低温領域において MoDTC を代替する新たな摩擦低減手法が必要である。一般的に潤滑油のベース油として使用されている鉱油は融点の高いパラフィンを含むため低温環境で析出して固相と液相の共存状態となる。従来研究より析出物を含有する潤滑油は、弾塑性的な挙動を示すことが報告されている。そこで固体としての挙動を示し、荷重分担能に優れる析出物をしゅう動面に維持することで 2 面の直接接触を抑制できると着想した。模式図を図 1 に示す。本研究では反射分光摩擦部その場観察装置を用いて接触点に存在する析出物の膜厚及び光学定数(屈折率  $n$  及び消衰係数  $k$ )を *in-situ* で分析した。光学定数スペクトルは物質に固有であるため、光学定数スペクトルを用いて析出物の組成や挙動を推定することができる。本研究では反射分光摩擦部その場観察を用いて低温析出型潤滑の摩擦低減メカニズムを解明し、設計指針を確立することを目的とする。

### 2. 試験片、実験装置及び実験方法

接触点の潤滑油中析出物の挙動を観察するために図 1 に示す反射分光摩擦部その場観察装置を用いて摩擦試験を行った。サファイア半球を通して摩擦試験中の接触点に測定光を入射し、絶対反射率を測定する装置である。絶対反射率を解析することで測定試料の膜厚及び光学定数を非破壊かつ非接触で測定することができる。模式図を図 3 に示す。摩擦試験は、ディスクに SUJ2、相手材に可視光領域における透過率が 85 %以上のサファイア半球を用いた。また SUJ2 ディスクは、硬度が 9.1 GPa、算術平均粗さ  $R_a$  は 2.6 nm、二乗平均平方根粗さ  $R_q$  は 2.8 nm であり、サファイア半球は直径 8 mm、硬度は 22.5 GPa、算術平均粗さ  $R_a$  は 2.5 nm、二乗平均平方根粗さ  $R_q$  は 3.9 nm であった。潤滑剤のベース油には PAO8 を使用し、析出物として融点 69.6 °C の高級飽和脂肪酸であるステアリン酸を使用した。実験条件を表 1 に示す。本実験では析出物含有潤滑油の温度変化に伴う相変態による摩擦特性の違いを検討するために、図 2 に示すように 30 °C-80 °C 間の加熱及び冷却過程での摩擦試験を行った。以下に実験手順を示す。

- ① 80 °C から 30 °C に自然冷却と共に摩擦試験を実施(1200 cycles)
- ② 30 °C に下がった後に、80 °C まで加熱するとともに再度、摩擦試験を実施(400 cycles)

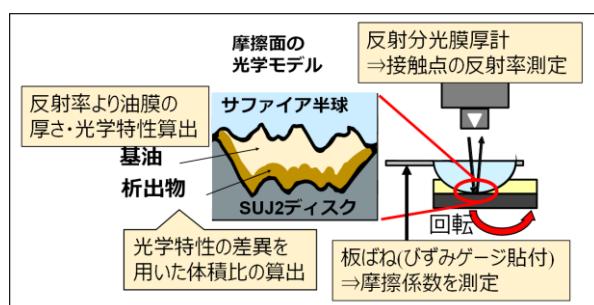


Fig. 1 Schematic diagram of in situ Reflectance Observation of the Contact Point

Tab. 1 Friction test conditions

サファイア半球vs SUJディスク	
試験片	PAO8+stearic acid 1.0 vol.% PAO8+stearic acid 2.1 vol.%
荷重 $L$ , N	0.4
温度 $T$ , °C	30-80
しゅう動速度 $V$ , mm/s	25.1
しゅう動回数 $N$ , cycles	1200+400
膜厚比 $A$	0.66-1.85(PAO8)

### 3. 実験結果

#### 3.1 ステアリン酸含有潤滑油の摩擦係数の比較

ステアリン酸含有潤滑下における摩擦進行曲線を図 7 に示す。70 °C 付近における平均摩擦係数は、PAO8 は 0.119 であるのに対し、PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% ではそれぞれ 0.102 及び 0.083 となった。PAO8 と比較すると、それぞれ 14.3 % 及び 30.3 % 摩擦係数が低減した。50 °C 付近における平均摩擦係数は、PAO8 が 0.111 であるのに対し、PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% でそれぞれ 0.040 及び 0.059 となった。PAO8 と比較すると、それぞれ 64.0 % 摩擦低減及び 46.8 % 摩擦増大した。30 °C 付近における平均摩擦係数は、PAO8 は 0.064 であるのに対し、PAO8+ stearic acid 1.0 vol.% では 0.024、PAO8+ stearic acid 2.1 vol.% では 0.039 となった。PAO8 と比較すると、それぞれ 62.6 % 及び 39.1 % 摩擦係数が増大した。以上より、70 °C 付近と比較して 30 °C 及び 50 °C のステアリン酸の融点以下の領域においては、特に大きな摩擦低減効果を発揮することが示唆された。また、融点以上の領域においてはステアリン酸含有量の大きい場合、融点以下の領域においてはステアリン酸含有量が小さい場合が大きな摩擦低減効果を得られた。以上より、ステアリン酸の析出量が過剰の場合、せん断抵抗が増大し、摩擦が増大する可能性が示唆された。

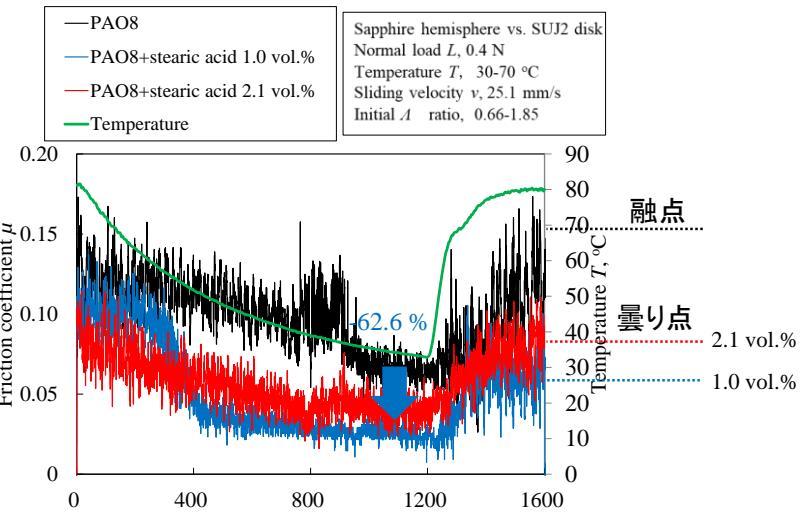


Fig. 2 Stearic acid friction test result in lubricants containing

#### 3.2 ステアリン酸含有潤滑油の油膜分析結果

Figure 1 に示す反射分光摩擦部その場観察装置を用いて摩擦部の反射率スペクトルをその場観察し、得られた反射率スペクトルから油膜分析を行った。光学モデルとして Fig. 4 に示すモデルを用いた。PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% における油膜分析結果を図 8 及び図 9 にそれぞれ示す。PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% の 1200 cycles 時における PAO8 層とステアリン酸層の合計油膜厚さはそれぞれ 19.3 nm 及び 46.8 nm であり、PAO8 単体の理論油膜厚さ 8.8 nm と比較してそれぞれ 2.2 倍及び 5.3 倍に増大した。よってステアリン酸の析出が油膜厚さ増大に寄与することが明らかとなった。また、PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% の 1200 cycles のステアリン酸層膜厚はそれぞれ 15.1 nm 及び 34.7 nm であった。以上より、ステアリン酸含有量が小さい場合、摩擦部におけるステアリン酸層膜厚が小さくなるとともに融点以下の摩擦が低減することが明らかとなり、摩擦係数がステアリン酸膜厚に大きく影響することが示唆された。

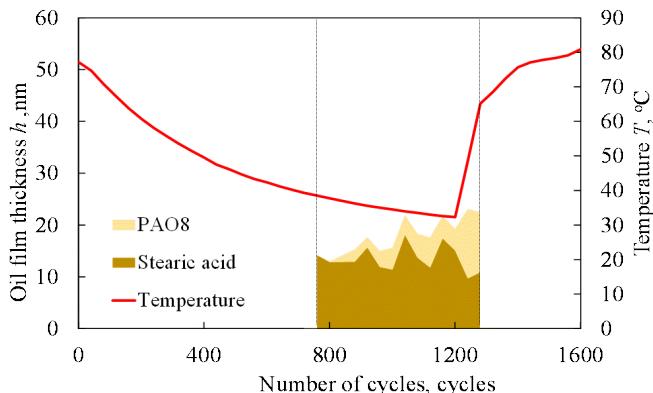


Fig. 3 Oil film analysis results in PAO8+ stearic acid 1.0 vol.%

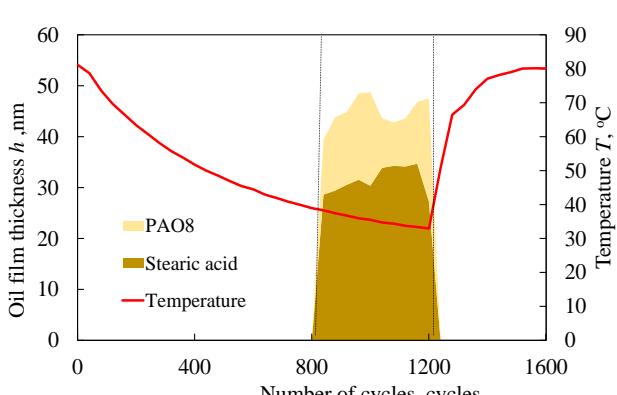


Fig. 4 Oil film analysis results in PAO8+ stearic acid 2.1 vol.%

#### 4. おわりに

本研究では析出物が摩擦係数に及ぼす影響を明らかにするため、反射分光摩擦面その場観察装置を用いた摩擦試験中の析出物のその場分析を行った。得られた結果を以下に示す。

1) ステアリン酸含有潤滑下における摩擦試験を行った。PAO8 の平均摩擦係数は 30 °C, 50 °C 及び 70 °C でそれぞれ 0.064, 0.111 及び 0.119, PAO8+stearic acid 1.0 vol.% はそれぞれ 0.024, 0.040 及び 0.102, PAO8+stearic acid 12.1 vol.% はそれぞれ 0.030, 0.059 及び 0.083 であった。PAO8+stearic acid 1.0 vol.% は PAO8 と比較して 30 °C, 50 °C 及び 70 °C でそれぞれ 62.6 %, 64.0 % 及び 14.3 % 摩擦低減、PAO8+stearic acid 2.1 vol.% はそれぞれ 39.1 %, 46.8 % 及び 30.3 % 摩擦が低減し、融点以下の析出している領域においては、ステアリン酸含有量が小さい場合に摩擦低減効果が大きいことが明らかとなった。以上より、ステアリン酸の析出量が過剰の場合、せん断抵抗が増大し、摩擦が増大する可能性が示唆された。

2) 次に、PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% の油膜分析を行い、摩擦係数と膜厚の関係を検討した。PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% の 30 °C 付近における PAO8 層とステアリン酸層の合計油膜厚さはそれぞれ 19.3 nm 及び 46.8 nm であり、PAO8 単体の理論油膜厚さ 8.8 nm と比較してそれぞれ 2.2 倍及び 5.3 倍に増大した。よってステアリン酸の析出が油膜厚さ増大に寄与することが明らかとなった。また、PAO8+ stearic acid 1.0/2.1 vol.% の 1200 cycles のステアリン酸層膜厚はそれぞれ 15.1 nm 及び 34.7 nm であった。以上より、ステアリン酸含有量が小さい場合、摩擦部におけるステアリン酸層膜厚が小さくなることが明らかとなった。

#### 文献

- 1) Holmberg, K., "Global energy consumption due to friction in passenger cars", *Tribology International*, Vol. 47, (2012), pp. 221-234.