

過酷しゅう動環境におけるエステル混合潤滑油の境界潤滑油膜モデルの解明  
Boundary Lubrication Film Modeling of Ester Mixture Lubricants  
in Severe Sequestration Environments

名古屋大・工（学）\*小田 知季 名古屋大・工（正）梅原 徳次 名古屋大（正）野老山 貴行  
名古屋大・工（正）張 鋭瑩 出光興産（正）武川 大輔 出光興産（正）成田 恵一

Tomoki Oda\*, Noritsugu Umehara\*, Takayuki Tokoroyama\*, Ruixi Zhang\*, Daisuke Takekawa\*\*, Keiichi Narita\*\*  
\*Nagoya University, \*\*Idemitsu Kosan Co., Ltd.

1. はじめに

現在，エネルギー資源の枯渇が問題として取り沙汰されている．限りある資源を有効に活用するために高効率化の技術が求められており，特に自動車の燃費改善のために様々な技術開発が行われてきた．特に摩擦によって失われるエネルギーが問題であり，摩擦低減が喫緊の課題である．摩擦低減のために潤滑油が用いられており，特に固体接触が激しい境界潤滑状態においては基油にエステル油を混合させたエステル混合潤滑油が用いられるケースがある．エステル油は極性のあるエステル基を持ち，これが金属表面へ吸着し摩擦を低減すると言われている．平田らは反射分光その場分析摩擦試験機を用いて，エステル油の膜厚が増大することで低摩擦が発現することを明らかにした<sup>(2)</sup>．また，武川らは不飽和脂肪酸構造を持つエステル油は，その脂肪酸部が変性し高粘度化すると考察した<sup>(3)</sup>．しかし，エステル油の変性物が摩擦特性に及ぼす影響を定量的に明らかにした研究は存在しない．そこで本研究では，エステル油の吸着膜が，エステルの変性物との混合層であると仮定し，エステル油及びエステルの変性物層の温度による変化を検討した．具体的には，ピンオンディスク型反射分光その場分析摩擦試験機を用いて摩擦試験を行い，摩擦係数と油膜厚さを測定し，その結果から吸着膜の粘度を算出し，粘度変化から変性物の生成量の推定を試みた．

2. 試験片，実験装置及び実験方法

本研究では，ピンオンディスク型反射分光その場分析摩擦試験機を用いた．装置の概略図を図1に示す．試験片はサファイア半球とSUJ2ディスクを用いた．試験油にはポリ $\alpha$ オレフィン（PAO）に不飽和脂肪酸構造を持つエステル油であるトリメチロールプロパントリオレート（TMPTO）を9 vol.%添加させたエステル混合潤滑油を用いた．摩擦試験の条件を表1に示す．TMPTOの変性物生成量の温度及び加熱時間による違いを推定するため，試験温度を23℃及び40℃とし，準備完了後に即実験を開始する条件と30分放置したのちに試験を開始する条件を用意した．油膜厚さは，ピンオンディスク型反射分光その場分析摩擦試験機を用いて反射率を測定し，事前に取得した屈折率及び消衰係数から算出を行った．TMPTOとその変性物には光学特性に違いがないため，同一層とみなした．摩擦係数及び油膜厚さの結果から，式(1)を用いて粘度算出を行った．ここで， $h_1$ ， $h_3$ は混合層の油膜厚さ， $h_2$ はPAO層の厚さ， $\mu$ は摩擦係数， $\mu_b$ は境界潤滑状態における摩擦係数， $\gamma$ は荷重分担比， $V$ はしゅう動速度， $A$ はヘルツの接触面積， $W$ は垂直荷重， $\eta_2$ はPAOの粘度， $\alpha$ は粘度-圧力係数， $p_{mean}$ は平均ヘルツ接触圧力をそれぞれ表している．

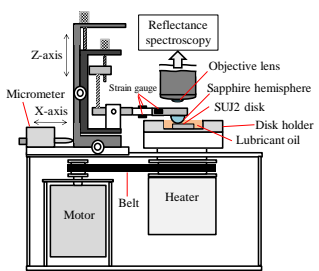


Fig. 1 Friction tester with in situ reflectance spectroscopy

$$\eta_{ad} = \frac{h_1 + h_3}{\frac{1 - \gamma}{\mu - \gamma \mu_b} \frac{VA}{W} \frac{h_2}{\eta_2 \exp(\alpha p_{mean})}} \quad (1)$$

Table 1 Friction test conditions

Temperature $T$ [°C]	23	40
Test time $t$ [s]	1800	
Normal load $L$ [N]	0.5	
Sliding speed $v$ [mm/s]	3.14	8.38
Initial $\Lambda$ ratio	1.80	
Viscosity $\eta$ [Pa·s]	0.508	0.198

### 3. 実験結果

#### 3.1 摩擦係数及び油膜厚さ

測定した摩擦係数を図 2 に示す. 同温度で比較すると 1800 s において 30 分放置した条件の方が放置していない条件よりも高いことがわかった. また, 測定した反射率から算出した油膜厚さを図 3(a)~(d) に示す. 試験初期段階を比較すると, 23 °C では 30 分放置した条件の方が TMPTO 層が大きかった. また, 23 °C と比較して 40 °C の方が TMPTO 層の厚さが小さかった. また, 時間経過による膜厚の変化はどの条件でも小さかった.

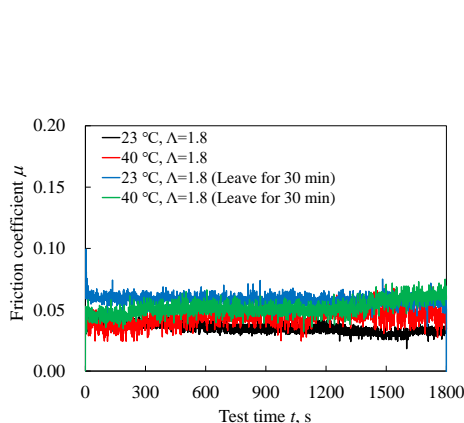


Fig. 2 Friction coefficient under each condition

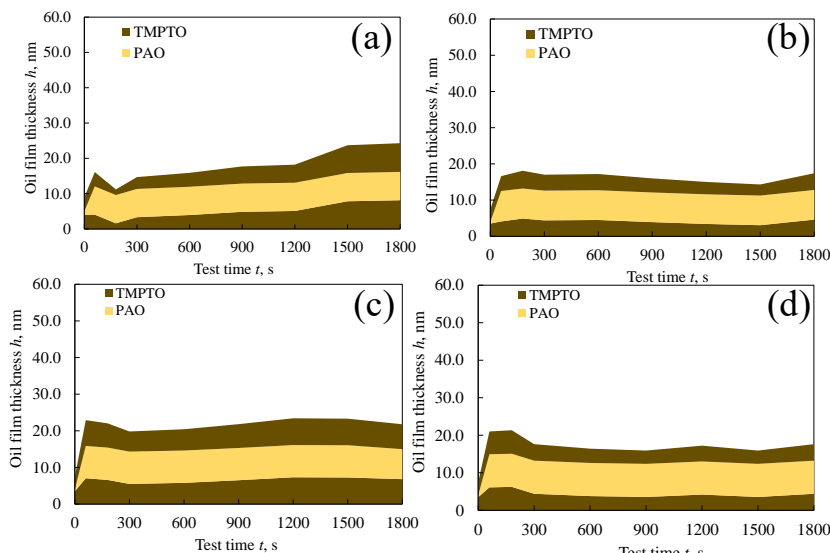


Fig. 3 Oil film thickness under conditions (a) at 23 °C, (b) left at 23 °C for 30 min, (c) at 40 °C, (d) left at 40 °C for 30 min

#### 3.2 粘度算出

3.1 の結果から式 (1) を用いて算出した粘度の時間変化を図 4 に示す. 全体を通して 30 分放置した条件では放置していない条件と比較して高い粘度となった. また, 粘度の時間変化は上昇する時間と減少する時間があり, 時間経過に伴い粘度が増加したとは言えない.

#### 3.3 考察

しゅう動試験前に 30 分放置した方が, 粘度が高くなったが, その理由として, 放置中に TMPTO が吸着層を形成し, ある程度油膜が成長した段階でしゅう動を開始したため, 初期から相対的に高粘度になったためだと考えられる. 表面吸着力は低温の方が大きく<sup>(4)</sup>, そのため, 23 °C の方が初期粘度の違いが大きかったと考えられる. また, 時間経過に伴う粘度上昇, つまり, 変性があまり起こらなかった理由として, 試験温度が低く, また固体接触の頻度がそれほど多くなかったためだと考えられる. 温度が変性の支配的要因と考えており, 高温環境とならない条件での試験だったと考えられる.

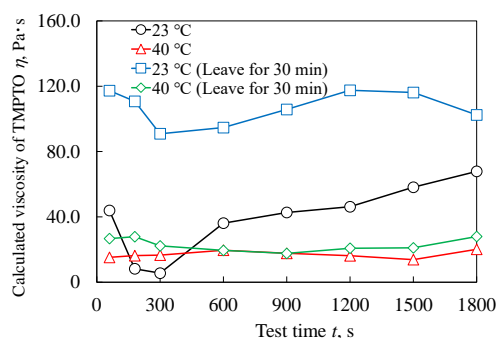


Fig. 4 Time variation of viscosity of TMPTO layer for each condition

### 4. 結論

TMPTO 含有潤滑油の摩擦試験, 油膜厚さの算出及び TMPTO 層の粘度算出を行い, 以下の知見が得られた.

- 1) 時間経過によって TMPTO の吸着膜は成長し, 層が厚くなった結果高粘度化することが示唆された.
- 2) 変性には温度が支配的要因であると考えられ, より高温かつ固体接触頻度が多く摩擦熱が大きい環境ほど変性が促進されることが示唆された.

### 文献

- 1) Hirata, K., Murashima, M., Umehara, N., Tokoroyama, T., Hashizume, N., Lee, W.Y., Takekawa, D., and Narita, K., "Clarification of the effects of adsorption films of ester-blended oil on friction by in situ reflectance spectroscopy", Tribology International, 187(2023), 108718
- 2) 武川大輔, 成田恵一, 梅原徳次, 野老山貴行, 村島基之, "境界潤滑下におけるエステル油の摩擦特性", トライボロジー会議 2023 春 東京予稿集
- 3) Toth, J., "Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis", Marcel Dekker, New York, 2002