

## ポリメチルメタクリレート共重合体のトライボロジー特性 (2) 極低速下の摩擦特性と部分 EHL 解析

### Tribological properties of polymethylmethacrylate copolymers (2) Friction characteristics under extremely low speed and partial EHL analysis

都産技研 (正) \*中村 健太 湘南工大 (正) 村木 正芳 都産技研 (正) 成田 武文  
都産技研 (非) 林 孝星 クラレ (非) 高橋 亨

Kenta Nakamura\*, Masayoshi Muraki\*\*, Narifumi Narita\*, Kosei Hayashi\*, Toru Takahashi\*\*\*

\*Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, \*\*Shonan Institute of Technology, \*\*\* Kuraray Co.,Ltd

#### 1. はじめに

潤滑油用添加剤として用いられる一部のポリマーが、EHL (Elasto Hydrodynamic Lubrication) において、油膜の薄膜化を抑制するとともに、摩擦を低減する効果を持つことが明らかになった。本研究では、特別に合成したポリメチルメタクリレート (PMMA) ブロック共重合体とランダム共重合体を用い、それらのトライボロジー特性を調べた。

#### 2. 試料油

試料油は、水素化分解型鉱油 HC (28.0mPa·s) と、HC に PMMA 共重合体をそれぞれ 1mass% 添加した C1-r (32.5mPa·s)、C1-b (33.1mPa·s) の 2 種類のポリマー添加油である。なお、粘度の測定温度は 25°C である。

#### 3. 油膜形成能と部分 EHL 下のトラクション係数

##### 3. 1 EHL 下の油膜形成能

測定には、ディスクオンローラ型試験機を用いた。ローラは材質が JIS SUJ2 で、転がり方向と軸方向の半径がともに 12.7 mm、表面粗さ ( $R_a$ ) 7 nm である。ディスクの材質は硬質ガラスで、直径 100 mm、厚さ 12 mm、表面粗さ ( $R_a$ ) 4 nm、合成表面粗さ  $\sigma$  は 10 nm である。

Figure 1 に、周速-油膜厚さ関係を示す。まず、基油においては、図中の周速全域にわたって測定膜厚  $h_{exp}$  は理論膜厚  $h_{cal}$  と一致している。一方、ポリマー添加油の  $h_{exp}$  の周速による変化は、ポリマーの種類によって異なり、C1-r の  $h_{exp}$  は、図中の最低周速 0.001m/s まで破線で示す理論値と概ね一致しているのに対して、C1-b の  $h_{exp}$  は周速 0.01m/s 以下の範囲において周速の低下によらず、ほぼ一定の理論値よりずっと大きな値を示すことがわかる。

##### 3. 2 部分 EHL 下のトラクション特性

油膜厚さ測定用と同じ試験機、試験片、条件で実験を行った。ただし、すべり率は 5% である。

Figure 2 に、平均周速  $U$  に伴うトラクション係数  $\mu$  の変化を示す。いずれの試料油も、周速 0.02m/s 以上ではほぼ一定の低い  $\mu$  を示し、試料油間の  $\mu$  の違いは見られない。一方、周速 0.02m/s 以下では  $U$  に伴う  $\mu$  の増大傾向が見られ、試料油間の  $\mu$  の差は拡大する。一定の周速下でポリマー添加油の  $\mu$  を比較すると、C1-r に比べて C1-b の方が低く、摩擦低減効果に優れることがわかる。

#### 4. 極低速下の摩擦特性

極低すべり速度における摩擦係数を、Fig. 3 に示すボールオン 3 ピン型試験機を用いて測定した。

試験片は、直径 12.7mm のガラスボールと直径 6.35mm、厚さ 7.8mm の円柱の鋼 (SUJ2) ピンの組み合わせである。

Figure 4 に、すべり速度に対する摩擦係数の変化を示す。いずれもすべり速度  $10^{-2}$ m/s 以下の範囲においてほぼ一定の値を示しており、両者において摩擦係数の顕著な違いは認められない。すなわち、本実験で得た C1-r と C1-b の境界摩擦係数  $\mu_b$  は、0.13~0.14 で同じと見ることができる。

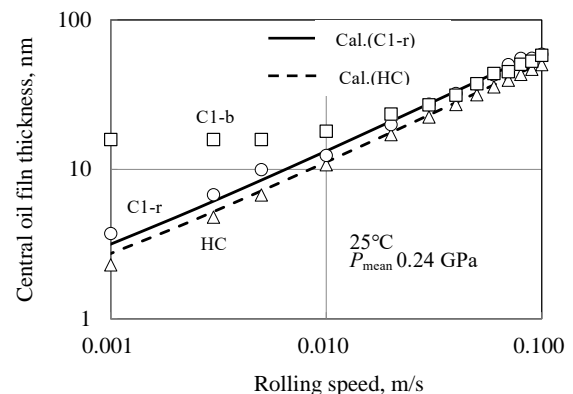


Fig. 1 EHL oil film forming properties

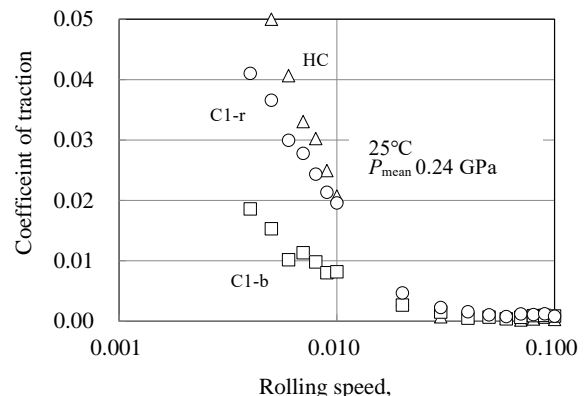


Fig. 2 Coefficient of traction-rolling speed relations

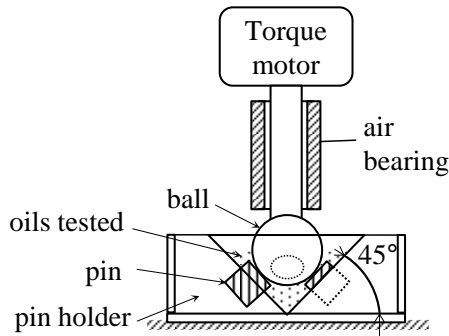


Fig. 3 Ball on 3-pin type tribo-unit

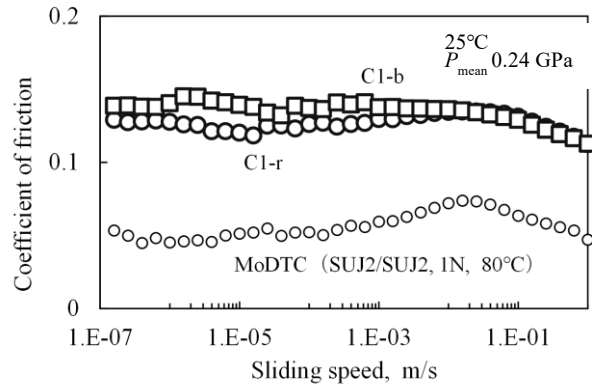


Fig. 4 Frictional properties under low sliding speed

同図に併せて示した MoDTC の  $\mu=0.04\sim 0.06$  は、従来報告されているのと同程度の低摩擦係数であって、本試験機による低速下のデータの妥当性が確認されたと考えられる。

## 5. 部分 EHL 解析

### 5. 1 潤滑解析

Figure 2 のトラクション特性を調べるために、接触部の潤滑解析を行った。具体的には、Greenwood-Trip の接触理論式、中央部の油膜厚さ  $h$  を与える式、荷重の釣り合い式を連立させて荷重分担割合を決め、その後、固体部には  $\mu_b$  を、油膜部には等温ニュートン粘性解に基づく  $\mu_{EHL}$  を適用することで  $\mu$  の計算結果を求めた。

なお、 $\mu_b$  は、部分 EHL 領域における実験データに計算式を当てはめ、カーブフィッティングにより求めた。得られた HC の  $\mu_b=0.16$ 、ポリマー添加油 C1-r と C1-b の  $\mu_b=0.14$  は極低速実験で得た値と一致している。

### 5. 2 解析結果

Figure 5 に  $\mu$ - $\Lambda$  関係を示す。まず記号で示す実験結果について、いずれも  $\Lambda \geq 3$  の範囲では、ポリマーの吸着による影響が現れない EHL 領域にあるため、基油の高圧粘度によって決まる一定の  $\mu$  を示す。一方、 $\Lambda < 3$  の領域は部分 EHL 領域であって、 $\Lambda$  の低下に伴い固体接触部が増加するため  $\mu$  は増大傾向を示す。図中、例として Fig. 2 の  $U=0.005\text{m/s}$  のデータを黒塗りで示しているが、低周速下の  $\mu$  が  $\text{HC} > \text{C1-r} > \text{C1-b}$  の順であったのは、油膜厚さ増大に伴う流体潤滑部の拡大によるものと解釈される。

また、 $\Lambda > 2$  の範囲において、C1-r の  $\mu$  と C1-b の  $\mu$  がほぼ同じ  $\mu$ - $\Lambda$  曲線上に乗っているのは、両者の境界摩擦係数  $\mu_b$  に違いがないためである。計算結果は、HC とポリマー添加油のそれぞれの実験結果の挙動をよく表している。ただし、計算結果の適用範囲は、C1-r の場合には図中の全域、C1-b の場合には油膜厚さが理論式に従う  $\Lambda > 2$  である。

注目するのは、実験結果の C1-b の特異的な挙動である。Figure 2 の低周速下で周速の変化によらず一定の油膜厚さを示すところが、Fig. 5 の  $\Lambda=1.6$  で、そこでは摩擦係数の異なる複数のデータが縦に並んでおり、部分 EHL 解析では説明ができない。膜厚比 1.6 の潤滑状態は固体部と油膜部からなると考えられるが、 $\Lambda$  一定の条件は各部の荷重分担割合は周速変化によらず不変である。ここで、固体部の境界摩擦係数は極低速下の実験結果から一定と見なせる。一方、周速低下に伴う一定の油膜厚さは、入口部の常圧粘度が上昇するためであって、加えて粘度-圧力係数の上昇も含めた接触部の高圧粘度の増大を考えると、周速低下に伴う油膜部のせん断抵抗増大は説明できる。

すなわち、C1-b の薄膜は、厚さの点では固体的な性質を示すが、摩擦に対しては粘性的に応答する粘弾性体と見ることができる。これらは、SPM の観察で見たブロック共重合体の吸着膜の粘弾性的性質と対応していると考えられるが、詳細は今後検討の予定である。

## 5. まとめ

PMMA ブロック共重合体とランダム共重合体のトライボロジー特性を調べ、以下の結果を得た。

- 1) ブロック共重合体の方がランダム共重合体と比べて、低周速下で厚い油膜と低トラクション係数を示した。
- 2) 極低すべり速度下の試験において、両者の境界摩擦係数は  $0.13\sim 0.14$  の値を示した。
- 3) トラクション係数  $\mu$ -膜厚比  $\Lambda$  関係において、低周速下でブロック共重合体が一定油膜厚さと低トラクションを示したのは、ブロック共重合体の吸着膜の粘弾性的性質によると解釈された。

## 謝辞

本研究は科研費 (20K04254) の助成を受けて実施したものである。

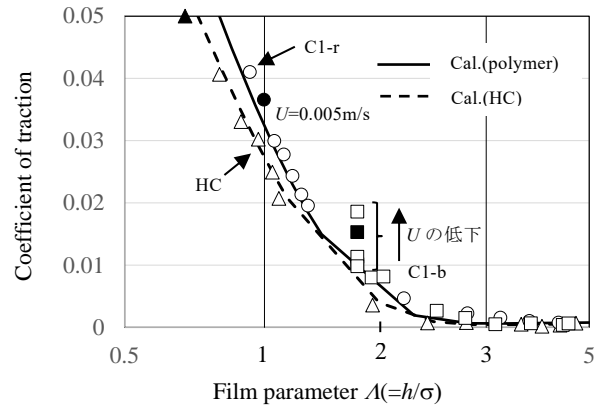


Fig. 5 Coefficient of traction-film parameter  $\Lambda$  relations