

## 低中温域における ta-C 膜の低摩擦化に及ぼす ポリプロピレングリコールの分子量の影響

Effect of molecular weight of polypropylene glycol on low friction of ta-C films at low and medium temperatures

宇大・工（学）\*金子 太一 宇大・工（正）馬渕 豊 宇大（学）中村 瑞希

Taichi Kaneko, Yutaka Mabuchi, Mizuki Nakamura

Utsunomiya University

### 1. 背景及び目的

昨今、地球温暖化を背景に自動車業界では、二酸化炭素の排出量削減のため自動車エンジンの燃費向上が求められている。また、シリーズハイブリッド車の普及により、エンジンの等価平均油温は低下すると考えられる。このため、更なる燃費性向上のため、低中温域においてエンジンの摩擦低減に有効な技術が求められている。

先行研究<sup>1)</sup>にて次世代のベースオイルとして期待されるポリプロピレングリコール（PPG）と水素フリー DLC 膜（ta-C, tetra-hederal amorphous carbon）の組み合わせで、低温一定条件では摩擦係数が高い値のままであるのに対し、高温で一旦摺動した後に徐々に低温に下げるとき摩擦係数が低下し、さらに温度を上げても摩擦係数が低いままであることが分かっている（Fig.1）。

これは、高温摺動時に ta-C 膜表面に PPG 由来の OH 基が共有結合し、低温において、ta-C に結合した OH 基に PPG の OH 基が水素結合することで、吸着膜を形成し低せん断層となることで低摩擦化すると考えている<sup>2,3)</sup>。

一方、PPG は分子量を変えることができるため、PPG が吸着した際にできる低せん断層の厚さを制御し、更なる低摩擦化につながる可能性がある。そこで、異なる分子量の PPG に対し、油膜厚さ、合成表面粗さを含む潤滑状態を考慮しストライバック線図を作成することで摩擦解析を行い、低摩擦メカニズムを明らかにすることを目的とする。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試料

ta-C 膜の基材に SUJ2 鋼、直径 31.1mm、厚さ 2.4mm のディスクを用い、表面に硬さ約 40GPa のドロップレット生成を抑制した ITF 社製 ta-C 膜（MFA）を 1 μm 成膜した仕様を用いた。相手材に材質 SUJ2 鋼、硬さ HRC64、直径 3/8 インチのペアリング用ボールを用いた。試験油にポリプロピレングリコール（PPG）を用い、分子量の違いによる摩擦特性を調べるために分子量の異なる PPG を 5 種類用いた。それぞれの密度と動粘度を Table 1 に示す。

Table 1 Density and viscosity characteristics of each PPG.

	PPG250	PPG400	PPG1000	PPG2000	PPG4000
molecular weight	250	400	1000	2000	4000
Density at 15°C, g/cm <sup>3</sup>	1.0158	1.0117	1.0084	1.0070	1.0065
kinematic viscosity at 40°C, mm <sup>2</sup> /s	23.78	29.36	67.77	143.8	433.5
kinematic viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s	3.207	4.384	10.7	22.88	67.43

#### 2.2 実験条件

試験には軽負荷摩擦試験機を用い、潤滑状態でボールオンディスク試験を行った。試験荷重は 210g（最大ヘルツ接觸面圧 : 600MPa）、摺動回転数を 67rpm（周速度 : 0.028m/s）とし、混合潤滑域での評価とした。温度条件として 20°C 一定で 2 時間摺動する温度一定試験と、80°C で 1 時間摺動した後、ヒーターの電源を切り、温度を 20°C まで下げながら 1 時間摺動する温度変化試験の 2 条件での評価を、それぞれの PPG に対して行った。また試験後の各 T/P の粗さ Rq より合成表面粗さを、摩耗痕径から曲率を推定し hmin を、これらから λratio を算出し摩擦係数を整理した。

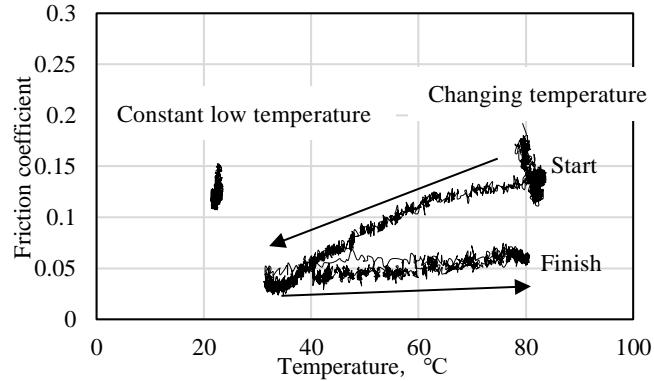


Fig.1 Friction coefficient for low temperature constant test and temperature change test.

### 3. 結果

各試験末期 10 分間の平均摩擦係数を Fig.2 に示す。いずれの試験においても摩擦係数は、温度一定試験に比べ、温度変化試験の方低い値を示した。一方で、分子量と摩擦係数の下がり代に直接的な相関は認められなかった。その要因として、試験中の摩耗による曲率の変化や表面粗さが変化し、分子量毎に潤滑状態が異なっていたためと考え、 $\lambda$ ratio による解析を行った。

### 4. 考察

Fig.3 に各試験末期の平均摩擦係数を、試験後の表面粗さ及び摩耗後の曲率を考慮して導出した  $\lambda$ ratio で整理したストライベック線図を示す。分子量違いによる摩擦低減効果は、 $\lambda$ ratio で整理することで、一旦 80°Cで摺動することの効果が明瞭に示された。同じ潤滑状態で摩擦係数が低い値を示すことから、表面突起間の接触部における低せん断層の形成が示唆される。

一方、摩擦係数の低減代は  $\lambda$ ratio が小さいほど減少する傾向も認められた。この要因として、厳しい潤滑条件下においては、ta-C 膜に吸着した物理吸着層が、粗さの突起間の干渉により除去されやすい状況を示している。

他方、同一の PPG 分子量で比較した場合、80°Cから20°Cに降温した場合の方が、試験後の合成表面粗さの悪化代が小さく、この傾向は PPG の分子量が大きいほど顕著であった。PPG の分子量が大きい場合、吸着層を含めた油膜厚さが厚くなるため、粗さの突起間の干渉も少なく表面粗さの悪化を抑制したためと考えられる。

### 5. 結言

- (1) いずれの分子量の PPGにおいても、80°Cで摺動後に 20°Cに降温した場合、摩擦係数の低下が認められた。
- (2) 分子量違いでの摩擦低減効果代は、試験後の摩耗による曲率変化、粗さ変化を考慮した潤滑状態  $\lambda$ ratio により整理することで、潤滑状態では説明できない作用 (ex.吸着膜形成) を顕在化することができた。
- (3) 分子量が大きいほど表面粗さの悪化代が小さくなつた。その要因の 1 つとして、分子鎖長が長い分、より厚い吸着層ができているためと考えられる。

### 文献

- 1) 七戸ら : ta-C/PPG による低中温域での低摩擦化現象とトライボフィルムの解析、トライボロジー会議 2020 秋別府 予稿集, A10, p21~22.
- 2) 野老山 貴行 : 炭素系硬質薄膜の潤滑油中摩擦摩耗の低減可能性とその場観察法、トライボロジスト第 63 卷 第 1 号 (2018) , p20~26.
- 3) Kentaro Yoshida, Yasuhiro Naganuma and Makoto Kano : Effect of Degree of Unsaturation in Vegetable Oils on Friction Properties of DLC Coatings, Tribology Online Vol.16, No.4 (2021), p210-215.

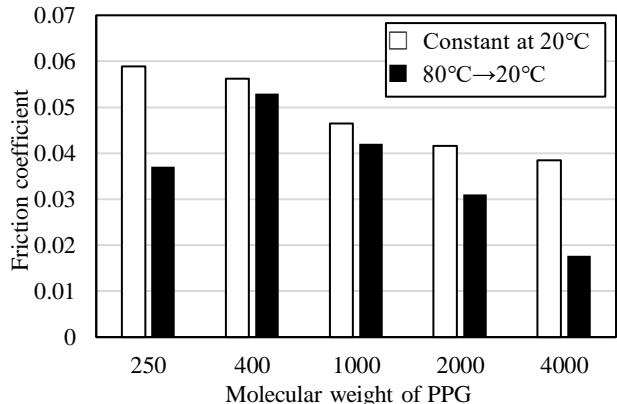


Fig.2 Friction coefficient at the end of the test.

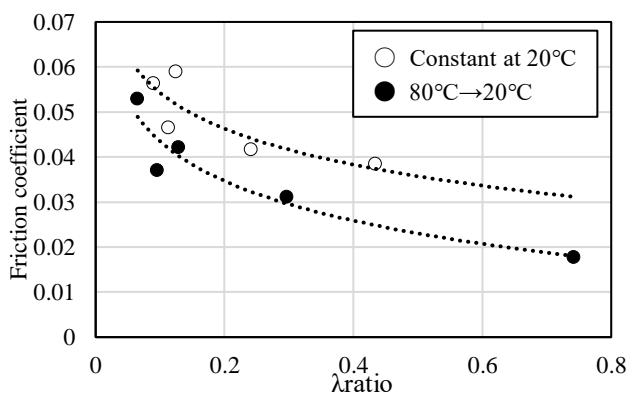


Fig.3 Relationship between  $\lambda$ ratio calculated from surface roughness and curvature after testing and coefficient of friction.