

PMA 系高分子添加剤を含む潤滑油の流体潤滑特性（第 2 報） — 狭小すきま往復摺動試験機を用いたせん断力特性評価 —

Fluid Lubrication Characteristics of Lubricants Containing PMA-Based Polymer Additives

Part 1 — Evaluation of Shear Force Characteristics Using a Narrow Gap Reciprocating Sliding Tester —

京大・工（学）*岡田 晟良 京大・工（正）山下 直輝 京大・工（正）平山 朋子 京大・工（正）波多野 直也

Akira Okada*, Naoki Yamashita*, Tomoko Hirayama*, Naoya Hatano*

*Kyoto University

1. はじめに

近年、省エネルギーの観点からエンジンオイルの低粘度化が進んでいる。しかし、潤滑油の粘度は温度に大きく依存するため、低温時に適切な粘度となるように調節していても、高温時の粘度低下によって油膜切れが生じる。そこで、高温時でも適切な粘度に保つため、高分子系の添加剤が広く使用されている。高分子添加剤は、高温時に分子鎖を広げることで基油の流動性を低下させて粘度低下を抑制できるため、粘度指数向上剤として用いられてきたが、その流体潤滑下での特性を詳細に評価した研究は少ない。我々の研究グループではこれまでに、独自設計した狭小すきま摺動試験機を使用して、高分子添加剤含有潤滑油の流体潤滑下でのせん断特性評価を行ってきた。その結果、高分子添加剤の中でも極性基を多く持ち、さらにアルキル基が直鎖もしくは分子量が大きい添加剤が、低せん断速度時に潤滑油の粘度を上昇させる現象を発見した。先行研究では、せん断速度とせん断応力から算出されるみかけ粘度に注目し、定常的な速度条件でのせん断特性を評価した。本研究では、狭小すきま摺動試験機を改良し、往復回転試験を行うことで、連続的に速度変化する流体潤滑下における高分子添加剤含有潤滑油のせん断特性評価を行った。

2. 実験方法

2.1 試験油

基油として GrIII オイルを用い、高分子添加剤として、分子量、極性基含有量、分散基の有無、アルキル基の分岐の有無が異なる 6 種類の PMA と OCP を添加して使用した (Table 1)。各潤滑油は 30°C での動粘度が約 30 mm²/s になるように調整した。

2.2 試験条件

狭小すきま試験機の試験部周辺の概要図を Fig.1 に示す。本実験で用いた試験機は上下のリング試験片（上試験片）とディスク試験片（下試験片）の間にある潤滑油膜を介して伝達される回転力を計測することができる。上試験片は SUS440C 製であり、中央部の給気孔となっている空気静圧軸受部、外側部のリング状試験部で構成されている。下試験片は上試験片との焼付き防止のために BK7 製ガラスディスク（シグマ光機、OPB-40S04-10-5、厚さ 4 mm、上下面の平行度 0.05）を用いた。荷重条件としては上からの空気供給圧を 0.235 MPa とし、下からの押し付け荷重は 60 N、70 N とした。また速度条件としては、せん断ひずみを振幅 6300、回転周波数 1.5 Hz、2 Hz の正弦波として、微分して得られるせん断速度を回転数[rpm]に換算して入力した。4 分間往復回転試験を行って 2 ms ごとに回転速度と回転力の値を測定した。また、周波数ごとに試験は 3 回ずつ行った。

3 実験結果・考察

往復回転試験を行う前に、基油を用いて各荷重におけるすきま長さを算出した結果、60 N では 3.11 μm、70 N では 1.76 μm にすきまが制御されていることが確認できた。往復回転試験の結果は増粘が顕著であった 70 N の結果を示す。

まず、基油と OCP を用いた 1.5 Hz における試験で得られた回転力波形を Fig. 2 に示す。基油と OCP の場合、回転速度の波形に比例した回転力波形が得られた。Figure 3 に 1.5 Hz における PMA 含有潤滑油を使用した際に得られた回転力波形を示す。高分子 PMA1、

Table1 Properties of PMA and OCP solutions in base oil

	Base oil	High PMA-1	High PMA-2	OCP
Molecular weight	—	350K	430K	350K
Dispersing group	—	Present	Absent	Absent
Polar group	—	Many	Many	Absent
Alkyl group	—	Branched	Branched	Linear
Polymer content, wt %	—	2.0	2.0	0.1
Kinematic viscosity, mm ² /s@30°C	30.2	30.0	30.1	30.2
	Low PMA-1	Low PMA-2	Low PMA-3	Low PMA-4
Molecular weight	30K	30K	30K	20K
Dispersing group	Absent	Absent	Absent	Absent
Polar group	Many	Few	Many	Many
Alkyl group	Linear	Linear	Branched	Branched
Polymer content, wt %	3.2	3.2	3.2	3.2
Kinematic viscosity, mm ² /s@30°C	30.1	30.3	30.9	30.2

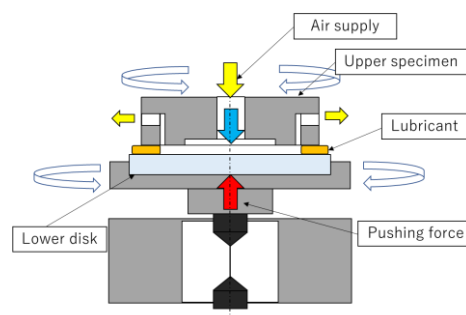


Fig.1 Schematic diagram of the test part

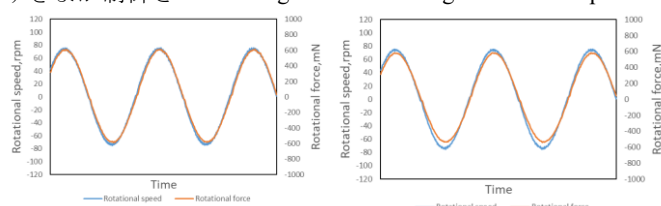


Fig.2 Rotational force measured in base oil and OCP (left : base oil right : OCP)

2, 低分子 PMA1, 3, 4 といった極性基を多く含む試験油では基油や OCP に比べて, 低せん断速度時に明らかに大きな回転力が計測された。これは先行研究でも確認された低せん断速度時における増粘挙動であり, この挙動を定量的に評価し, その経時変化を調査するために, 以下示す Z を定義する。

$$Z = \frac{\frac{d\sigma}{dt}}{2\pi f \sigma_0} \quad (1)$$

ここで, σ は回転力の計測値, f は周波数, σ_0 は回転力波形の振幅である。この Z の 1 周期における最大値 Z_{max} は増粘挙動が無い波形では 1 に, 増粘挙動がある波形では 1 より大きな値をとり, その値が大きいほど増粘の度合いが大きいことを意味する。 Z を定義する最大の利点は, 振幅の違う波形における増粘の度合いを無次元化した値で定量的に評価できる点である。すなわちこの値は, みかけ粘度そのものを評価するものではなく, 高速域でのみかけ粘度に対して 0 rpm 付近の低速域でのみかけ粘度がどの程度大きくなっているかを評価するためのものである。 Figure 4, 5 にそれぞれ基油と高分子 PMA1 の Z_{max} 推移を示す。基油では 240 秒間 Z_{max} が低い値で安定しているのに対し, 高分子 PMA1 では試験開始後すぐに Z_{max} が大きな値をとり, 次第に 5~6 程度の値に落ち着くような挙動が見られた。また, 他の試験油についても同様に Z_{max} 経時変化をまとめると, 極性基を持たない OCP では基油同様に増粘挙動がなく, 極性基を多少なりとも持つ PMA では増粘挙動が見られた。また, 高分子 PMA1 以外で増粘挙動が見られた試験油では, 3 回ずつの試験の中で試験開始直後は増粘挙動が見られないものや, 240 秒間では増粘し始めないものもあり, その「増粘しやすさ」は各高分子のパラメータに起因するものであると考えられ, その特徴を以下にまとめる。

- 極性基を少しでも持つ PMA は増粘しうるが, 極性基を全く持たなければ増粘しない。
- アルキル基が直鎖であったり, 分子量が大きいほど増粘しやすいが, そうでなくても増粘する。
- 分散基は種類の違う極性基と考えて矛盾はなく, 高分子 PMA1 が増粘しやすいことから, 分散基の極性はここでの極性基の極性より強いものであると考えられる。

以上のことから, 狭小すきまにおいて高分子添加剤は極性基によって油中で集合体を形成し, 基油の流動性を低下させているものと推察される。また, 立体障害が少ない直鎖のアルキル基を持ち, 分子量が大きいほど集合体の成長が早いために増粘しやすく, 2 Hz の回転周波数でも可逆的に進行するものと考えられる。

4 結論

本研究では, 狭小すきま摺動試験機を用いて往復回転試験を行うことで, 流体潤滑下における連続的に変化する速度条件での高分子添加剤含有潤滑油のせん断特性評価を行った。その結果, 極性基を持つ PMA のみで増粘挙動が生じ, アルキル基が直鎖, または分子量が大きい時に増粘しやすいことが確認できた。このことから高分子添加剤は低速せん断時に集合体を形成し, 基油の流動性を低下させているものと考えられる。また, 低速せん断時に増粘するという点では定常的な速度条件でのせん断特性と同じであるが, 増粘挙動に経時変化が見られたり, 低分子量なうえにアルキル基に分歧を持つ低分子 PMA3 や 4 で増粘が見られるというのは, 往復回転での試験特有のせん断特性であった。これは 1 秒間に何度も高速と低速のせん断速度を繰り返すことによって, 集合体形成が可逆的に進行したり, 金属表面に吸着しにくく, バルク側で集合体を形成することに起因していると考えられる。

謝辞

本研究において使用した高分子添加剤は三洋化成工業株式会社から提供されたものである。ここに謝意を表する。

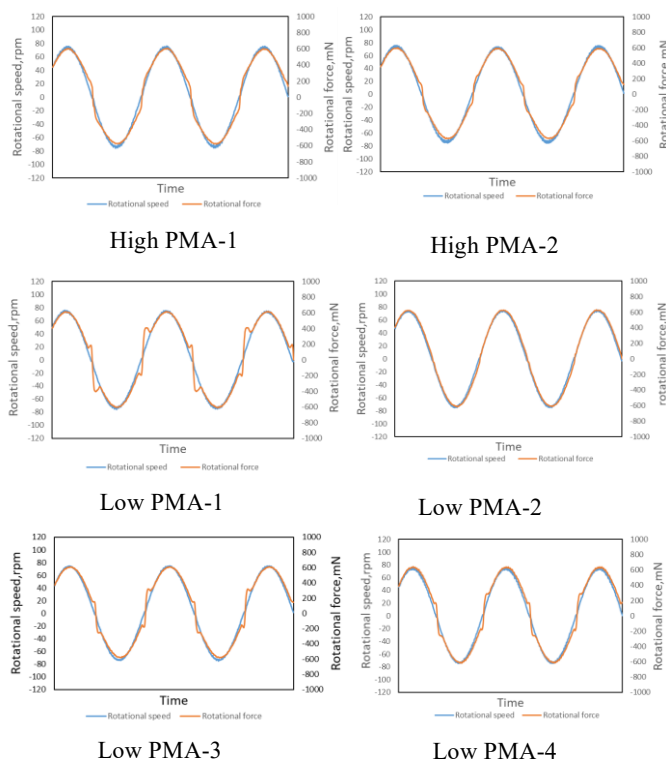


Fig.3 Rotational force measured in PMA

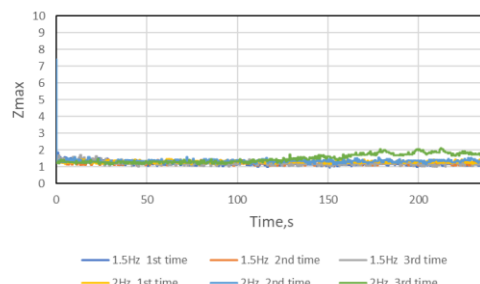


Fig.4 Z_{max} transition of base oil

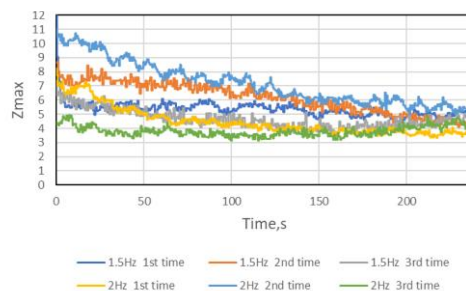


Fig.5 Z_{max} transition of High PMA-1