

## オリフィス高圧粘度計によるフッ素系合成油グリースの粘度圧力係数に関する研究

### Pressure Viscosity Index of Some Fluorinated Greases by Orifice High Pressure Viscometer

佐賀大・理工（正）\*張 波 佐賀大・理工（非）藤田 淳世 佐賀大・理工（正）馬渡 俊文

Bo Zhang\*, Kosei Fujita\*, Toshifumi Mawatari\*

\*Saga University

#### 1. はじめに

転がり軸受や歯車のような極高接触圧の高次対偶の潤滑剤としてよく使われているグリースは、半固体である上に、非透明であるため、高圧下での流動特性に関する研究は皆無の状態である。本研究は新しい原理に基づくオリフィス高圧粘度計を開発し、昨年度先駆的に行った高圧密封用グリースの高圧粘度の測定に続き、真空またはクリーン環境に使われる4種類のフッ素系合成油グリースの高圧粘度を測定した。

#### 2. 実験方法および実験条件

Fig.1に本実験で使用された潤滑油高圧粘弹性測定機の概略図を示す。試料油を上部プランジャーと下部プランジャーで仕切られた高圧円筒に入れ、オリフィスを通過して圧力計に直結させる。高圧円筒内は上部プランジャーを万能試験機により定速加圧することで加圧され、印加荷重を万能試験機の荷重計で、潤滑油の圧力を圧力計でそれぞれ測定する。また、プランジャー荷重をシリンダー断面積で割った圧力を高圧円筒圧力、圧力計で測定した圧力をゲージ圧力とする。オリフィスには $\phi 0.27 \times 7.22$ のものを用いた。圧力計はOmega社製のPX91P1-200KS5Tで、定格測定圧が1.38 GPaである。測定温度は下部プランジャーに埋め込んだ熱電対で測定しながら高圧円筒を包み込む恒温器によって加熱・冷却することで制御される。

高圧円筒内の圧力が上昇するとともに、圧力計の容積の膨張や油の圧縮からオリフィスを経由して試料油が圧力計内に流れ込む。通常の潤滑油の粘度ではオリフィスを通過する際の圧力降下は無視できるほど小さいが、高圧の場合、粘度圧力効果で圧力降下が無視できないほど高くなることがある。

本研究で使用した潤滑油高圧粘弹性測定機はオリフィスの圧力降下を測定することで、粘度圧力係数を測定するものである。オリフィス圧力降下と流量との関係は次式で表される。

$$p_c - p_g = \lambda_c \eta Q_c \quad (1)$$

ここで $p_c$ と $p_g$ はそれぞれ高圧円筒内の圧力と圧力ゲージの圧力で、 $\lambda_c$ はオリフィスの抵抗係数、 $\eta$ は潤滑油の粘度である。長さ $l$ 、半径 $r_c$ のオリフィスに対して抵抗係数は次式で計算できる。

$$\lambda_c = \frac{8l}{\pi r_c^4} \quad (2)$$

また、粘度を高圧円筒内の圧力に次のBarus式で関係付けることができる。

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p_c) \quad (3)$$

さらに、圧力ゲージ内の潤滑油体積変化は次式のように圧力計の圧力に比例すると仮定する。

$$p_g = K_g \frac{\Delta V_g}{V_g} \quad (4)$$

ここで、 $K_g$ は圧力計総合容積剛性、 $V_g$ は圧力計の低圧の容積である。圧力計の容積変化がオリフィスに流れをもたらすため、オリフィスの流量と圧力計の容積変化は次式で関係付けられる。

$$Q_c = \frac{d\Delta V_g}{dt} = \frac{V_g}{K_g} \frac{dp_g}{dt} = \frac{V_g}{K_g} \frac{dp_g}{dp_c} \frac{dp_c}{dt} \quad (5)$$

$dp_c/dt$ は高圧円筒の加圧速度であり、一つの実験条件である。ここで、計測時の加圧速度が一定であるとする。式(3)と式(5)を式(1)に代入すると、次式が得られる。

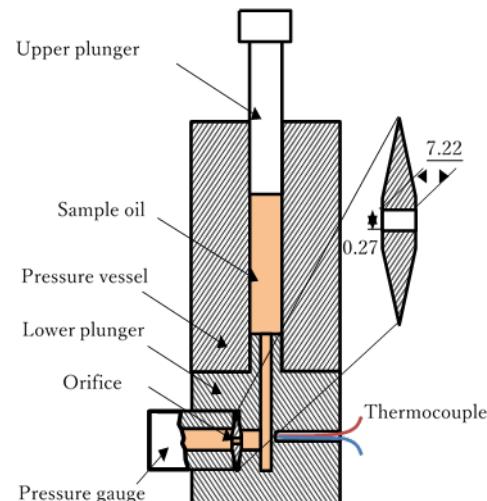


Fig. 1 Schematic of high-pressure viscometer

$$p_c - p_g = \lambda_c \eta_0 \frac{V_g}{K_g} \frac{dp_c}{dt} \exp(\alpha p_c) \frac{dp_g}{dp_c} = G \exp(\alpha p_c) \frac{dp_g}{dp_c} \quad (6)$$

式(6)の解は次式になる.

$$p_g = p_c - \exp\left[\frac{1}{\alpha G} \exp(-\alpha p_c)\right] \int_0^{p_c} \exp\left[-\frac{1}{\alpha G} \exp(-\alpha p)\right] dp \quad (7)$$

ここで、 $G$ は次式で表す、圧力の単位を持つシステム定数である.

$$G = \lambda_c \eta_0 \frac{V_g}{K_g} \frac{dp_c}{dt} \quad (8)$$

式(8)には粘度圧力指数 $\alpha$ とパラメータ $G$ だけがあり、パラメータ $G$ はオリフィスの形状と加圧速度以外に大気圧下での試料油粘度に依存するため、実験前に計算することできる定数である。ゲージ圧力 $p_g$ と高圧円筒内 $p_c$ の圧力と実験関係に式(8)の計算結果を合わせることで、粘度圧力指数 $\alpha$ を求めることができる。

Table 1 Components of greases

Grease	Thickener	Base oil	Penetration	Service temperature
FF1	PTFE	PFAE	300	-20~250°C
FF2	PTFE	PFAE	No.1(310~340)	-20~250°C
FT3	PCTFE	-	No.3(220~280)	~150°C
FZ4	PTFE	PFPE	No.2(265~295)	-60~260°C

本研究で使用したグリースの基本構成をTable.1に示す。4種類のグリースの中で、FT3だけがPTFE(PolyTetraFluoroEthylene)ではなく、機械的強度により優れたものの耐熱性がやや劣るPCTFE(PolyChloroTriFluoroEthylene)を増ちょう剤にしている。また、カタログによるとFT3グリースはふつ素樹脂オイルに化学的に不活性で耐熱性の高い微粒末高分子物質を添加したグリースになっている。基油にはFF1グリースとFF2がPFAE(PerFluoroAlkylEther)を使用したのに対して、FZ4はPFPE(PerFluoroPolyEther)を使用した。FT3についてはふつ素樹脂オイルだけを示しているが、詳細は分からぬ。

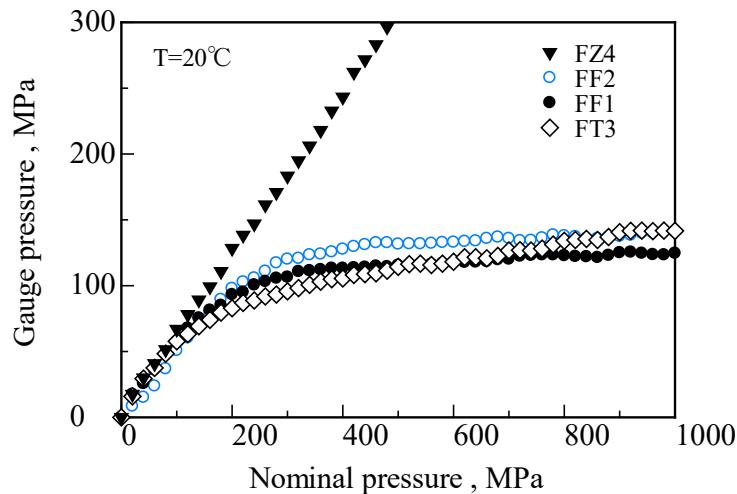


Fig. 2 Dependence of gauge pressure on nominal pressure for 4 different greases at temperature 20°C

### 3. 実験結果及び考察

Figure 1に20°Cの温度下で4種類の供試グリースの見かけ圧力(高圧円筒圧力)によるゲージ圧力の推移を示す。FZ4だけが約1000 MPaまでの全測定圧力範囲内でゲージ圧力がほぼ見かけ圧力に比例するのに対して、他の3種類のグリースはほぼ同様に約200 MPaの極めて低い見かけ圧力でゲージ圧力が飽和し始める。これはFZ4の最低使用温度が-60°Cと、他の3種類のグリースに比べて40°Cもひくいことに関係すると考えられる。FF1とFF2はちょうどだけが若干違うものの、ほぼ同じものであるため、圧力挙動も大きく変わらないと予想通りの結果を示したが、FT3は全く違ったもので、ちょうどこそが同程度であったが使用温度も全く違うにも関わらず、同等な圧力挙動を示すことになった。また、FT3は圧力変曲点を通過してからもゲージ圧力が見かけ圧力とともに増加し続けることは高圧下でもある程度の流動性を保持することを示唆している。今回は基油の粘度が分からぬため、グリースの粘度圧力指数を計算できなかった。

### 4. おわりに

4種類のフッ素系合成油グリースについて、オリフィス高圧粘度計を用いて高圧下での流動特性を測定した。