

アルミニウム粉末を含むタービン油の 電界中の見かけの粘度

岩 永 正 裕・山 岸 陽 一

Apparent Viscosity of Suspension in Electric Field

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

Abstract

Many trials have been done to put electroviscous effect to practical use, but no success has been reported.

So we decided to do fundamental study about electroviscous effect as the first step. We applied electric field across the suspension of mixture of turbine-oil and aluminum powder flowing in a rectangular duct, and studied the change of apparent viscosity of it. The experimental conditions was as follows. The volume fraction of aluminum powder α was 0~0.03, the electric field strength E was 0~ 6×10^5 V/m, the representative shearing stress τ was 2~10 Pa and Reynolds number was 8.9×10^{-6} ~ 5.5×10^{-2} .

As a result, the apparent viscosity increased by about 35 times, as the electric field increased, and the following relation was derived under our experimental conditions,

$$\bar{\mu}_E/\bar{\mu} = \exp \{58.2\alpha(\epsilon E^2/\tau)^{1.29}\}$$

where ϵ is the dielectric constant of turbine-oil.

1. ま え が き

電場を印加することにより見かけの粘度が変化する電気粘性効果は、今日まで多くの応用、開発が試みられたが、未だに実用に至っていないようである。

そこで、本研究は電気粘性流体としてタービン油にアルミニウム粉末を混入したものを用いて、これに電場を印加し、見かけの粘度の変化を調べる。

記 号

- a : 長方形流路断面の長辺の長さ
- b : 長方形流路断面の短辺の長さ
- C : 長方形流路の管摩擦係数にレイノルズ数を掛けた係数
- D : 円管の直径
- D_e : 長方形流路の相当直径
- E : 電界強度

- g : 重力加速度
- ΔH : ヘッド
- l_A : 供試流路の長さ
- l_B : 電界が加わらない長方形流路の長さ
- l_C : 円管の長さ
- Δp_A : 供試流路部に加わる圧力差
- u_c : 円管中の平均流速
- u_s : 長方形流路中の平均流速
- α : アルミニウム粉末の体積濃度
- ϵ : タービン油の誘電率
- μ : タービン油の粘度
- $\bar{\mu}$: 電界を加えない場合のサスペンションの見かけの粘度
- $\bar{\mu}_A$: 供試流路部の見かけの粘度
- $\bar{\mu}_E$: 電界を加えた場合のサスペンションの見かけの粘度
- $\bar{\rho}$: サスペンションの密度
- ρ : タービン油の密度
- τ : せん断応力の代表値（壁面せん断応力の平均値）

2. 実験装置及び方法

2.1 供試流体

供試流体として ISO VG68 無添加タービン油とこれに山石金属社製 YP4000 アルミニウム粉末を 0.01~0.03 の体積濃度で均一に混入したサスペンションを使用した。アルミニウム粉末は長径が $10\ \mu$ 以下の非球形粒子であり、比重は 2.71 である。タービン油の粘度は予めレッドウッド粘度計 1 号形で計測した。

2.2 供試流路

長方形流路の断面形状を Fig. 1 に示す。長方形流路は 5 枚の亚克力板を重ねて作成し、断面は $1 \times 10\ \text{mm}$ である。長さは 844 mm であり、その中央部の長さ 730 mm の範囲に電界を加えて供試流路部とした。

実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。タンクは 20 リットルのポリスチレン容器を使用し、タンクから長方形流路までを円管 (内径 10 mm, 長さ 2.5 m) で結んだ。バルブは円管内径と同径の穴のあいたボールバルブを使用した。長方形流路の出口には円管 (内径 10 mm, 長さ 20 cm) を接続した。

従って流路は以下の 3 種の流路部から構成されることがわかる。

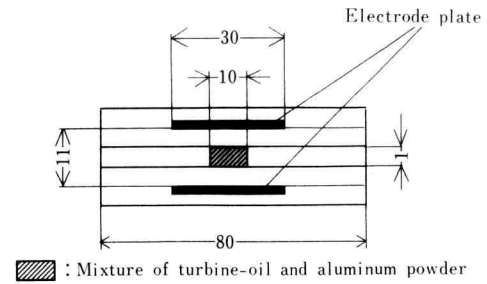


Fig. 1. Section of rectangular duct.

(A) 部: 電界が加わる長方形流路部 (供試流路部, 長さ 730 mm)

(B) 部: 電界が加わらない長方形流路部 (長さ 114 mm)

(C) 部: 内径 10 mm の円管部 (長さ 2.7 m)

2.3 高電圧発生装置

50 Hz, 100 V の電源をスライダックにより可変電圧とし、これに自動車用イグニッションコイル 1~4 本を直列につないでスライダックの出力電圧を増幅する。4 本のイグニッションコイルによって約 380 倍の増幅が得られ、最大実効出力電圧は 4,400 V であった。

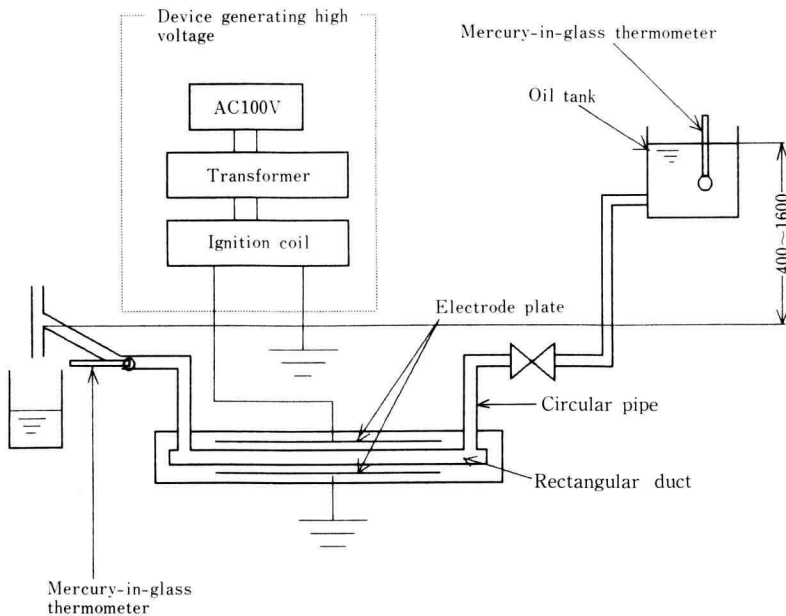


Fig. 2. Flow system.

電極は長さ 730 mm, 幅 30 mm の 2 枚のブリキ板を使用し, 供試流路部を覆った。電極間距離は 11 mm で供試流路部 (厚さ 1 mm) はその中央に位置する。電極の一方をアースし, もう一方をイグニッションコイル出力につないだ。

電界強度 E は電圧の最大片振幅を電極間距離で割った値を取り, 最大電界強度は 6×10^5 V/m であった。

2.4 実験方法

ヘッド ΔH (タンク油面と流路出口の高さの差) はタンクの高さを調節して変化させ 0.4~1.6 m の範囲で実験を行った。供試流路の圧力勾配は 5,000~20,000 Pa/m であった。

流量の計測は供試流体の比重を予め調べ, 重量法により計測した。流量は 0.03~4 cm³/min と非常に小さく, 流量計測中のヘッドの変化は無視できる。

油温はタンクと流路出口の 2 か所で計測した。これらの温度差は 1°C 以内であり, ほとんど差はなかった。

流路中の圧力損失は供試流体の密度を ρ とすると $\rho \Delta H g$ であり, (A) 供試流路部, (B) 電界が加わらない長方形流路部, (C) 円管部における層流による圧力損失の和であると考えられる。長方形流路 ((A) 部, (B) 部) の平均流速, 相当直径を u_s, D_e とし, 管摩擦係数を C/Re と置き, (C) 部の平均流速, 直径を u_c, D とする。(A) 部の見かけの粘度を $\bar{\mu}_A$, (B) (C) 部の見かけの粘度を $\bar{\mu}$ とし, 各流路部の長さをそれぞれ l_A, l_B, l_C とすると次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \rho \Delta H g = & \frac{C \bar{\mu}_A}{\rho u_s D_e} \frac{l_A}{D_e} \frac{\rho u_s^2}{2} \\ & + \frac{C \bar{\mu}}{\rho u_s D_e} \frac{l_B}{D_e} \frac{\rho u_s^2}{2} \\ & + \frac{64 \bar{\mu}}{\rho u_c D} \frac{l_C}{D} \frac{\rho u_c^2}{2} \end{aligned}$$

上式をもとに $\bar{\mu}_A$ を求めるにあたって以下の手順により実験を行なった。

(1) ISO VG68 無添加タービン油 (粘度測定済み) を流して長方形管路の係数 C を求める (このとき $\bar{\rho} = \rho$, $\bar{\mu}_A = \bar{\mu} = \mu$)。

(2) アルミニウム粉末を ISO VG68 無添加タービン油に混入して流路に流し, サスペンションの見かけの粘度 $\bar{\mu}$ を求める (このとき $\bar{\mu}_A = \bar{\mu}$)。

(3) 供試流路部に電界を印加して, (2) と同じサスペンションを流路に流す。(B) 部 (C) 部の粘度は (2) で求め

た見かけの粘度に温度補正をした上で等しいとして (A) 部の粘度 $\bar{\mu}_A$ を求める。

(2)~(3) の過程をヘッド, アルミ粉末の体積濃度, 電界を変化させて繰り返し実験を行う。

(1) の過程で求めた C の値は 85.2 であり, 縦横比 10 の長方形管路の層流理論解の値 84.6 とほぼ同じ値となった。なお圧力損失における (C) 部の寄与は 0.9% 以下であり, 供試流路部におけるレイノルズ数 $\bar{\rho} u_s D_e / \bar{\mu}_A$ の範囲は $8.9 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-2}$ であった。

2.5 実験データ整理方法

アルミ粉を混入しないタービン油の粘度を μ , 電界を加えない場合のアルミ粉を混入したタービン油のみかけの粘度を $\bar{\mu}$, 電界を加えた場合のアルミ粉を混入したタービン油のみかけの粘度を $\bar{\mu}_E$ とする。

本研究ではアルミ粉を混入した場合の見かけの粘度 $\bar{\mu}$ の変化 $\bar{\mu}/\mu$ と, 電界を加えることによる見かけの粘度の変化 $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ を調べる。

これらの量の変化を整理するためにアルミ粉の体積濃度 α の他に下記の量を使用する。

[壁面せん断応力の平均値] せん断応力の代表値として壁面せん断応力の平均値を供試流路部の圧力損失から次式のように求めて使用した。

$$\tau = \frac{\Delta p_A a b}{2 a l_A} = \frac{\Delta p_A b}{2 l_A}$$

ここに Δp_A , l_A , a , b は供試流路部の圧力損失, 長さ, 断面の長辺と短辺の長さである。

[電界から受ける応力とせん断応力の比] 電界 E の中に置かれた導体はまわりの物質の誘電率を ϵ とすると ϵE^2 に比例する単位面積あたりの力を受ける。そこで ϵE^2 と τ の比をとって無次元パラメータとした。

$$\frac{\text{電界中の導体受ける単位面積当りの力}}{\text{壁面せん断応力の平均値}} = \frac{\epsilon E^2}{\tau}$$

なお ϵ としてタービン油の誘電率を取った。

3. 実験結果

3.1 電場を印加しない場合の見かけの粘度

Fig. 3 は電場を印加しない場合のアルミ粉の体積濃度による見かけの粘度の変化を表したもので, 縦軸に見かけの粘度比 $\bar{\mu}/\mu$, 横軸にアルミ粉の体積濃度 α をとった。 α の増加に伴い $\bar{\mu}/\mu$ が増加することがわかる。

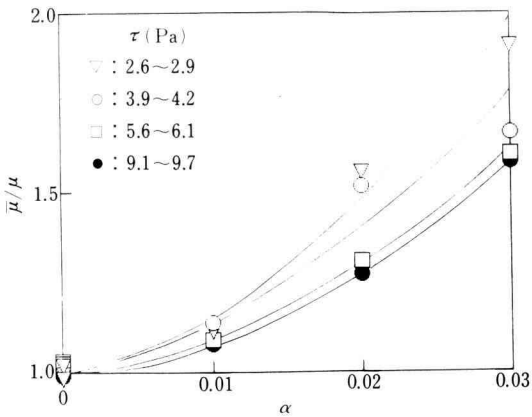


Fig. 3. Apparent viscosity and volume concentration of aluminum powder with no electric field.

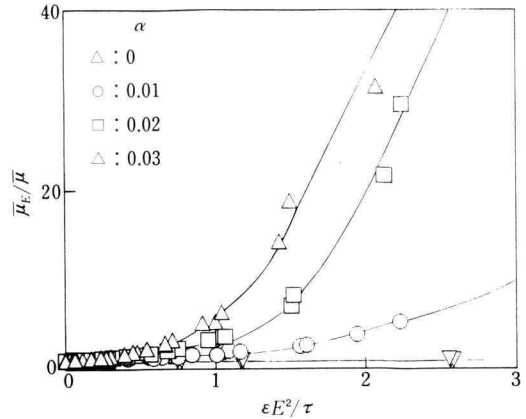


Fig. 5. Change of apparent viscosity with electric field.

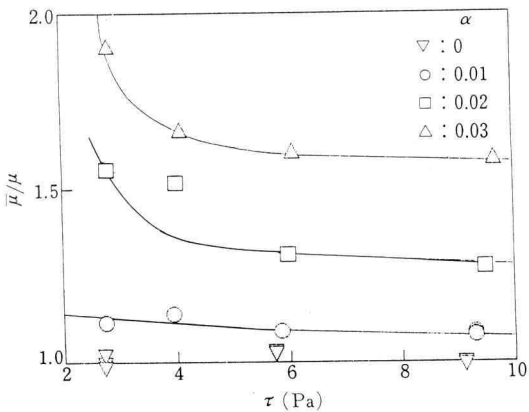


Fig. 4. Apparent viscosity and shearing stress with no electric field.

Fig. 4 は見かけの粘度のせん断応力による変化を示したものであり、縦軸に $\bar{\mu}/\mu$ 、横軸に壁面せん断応力の平均値 τ をとった。 α が 0.02 以上でせん断応力が 5 Pa 以下になると見かけの粘度が増加する非ニュートン性が顕著に表れることがわかる。

3.2 電場を印加することによる見かけの粘度の変化

Fig. 5 は電場を印加することによる見かけの粘度の変化を表したものである。縦軸に α と τ が同じ場合の電場を印加した場合の見かけの粘度 $\bar{\mu}_E$ と電場を印加しない場合のみかけの粘度 $\bar{\mu}$ の比をとり、横軸に電場

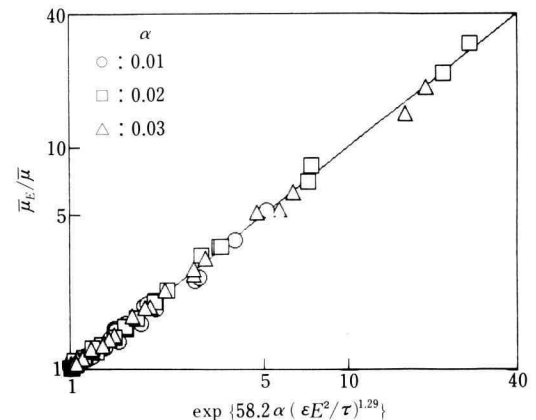


Fig. 6. Relation between $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ and $\exp\{58.2\alpha(\epsilon E^2/\tau)^{1.29}\}$

から受ける応力と壁面せん断応力の平均値との比 $\epsilon E^2/\tau$ をとった。このとき、 $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ は $\epsilon E^2/\tau$ の増加に伴い 1~約 35 倍まで増加することがわかった。

上記の関係を整理すると Fig. 6 のように $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ と $\epsilon E^2/\tau$ の関係は次式で表されることがわかった。

$$\frac{\bar{\mu}_E}{\bar{\mu}} = \exp\{58.2\alpha(\epsilon E^2/\tau)^{1.29}\}$$

4. む す び

アルミ粉の体積濃度 0.03 以下、電界強度 6×10^5 V/m 以下、せん断応力の代表値 2~10 Pa、レイノルズ数

$8.9 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-2}$ の範囲で実験を行ない以下の結果を得た。

(1) 電場を印加することにより見かけの粘度比 $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ を 1~35 倍までコントロールできることがわかった。

(2) 見かけの粘度比 $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ は、アルミニウム粉末の体積濃度 α と電界から受ける応力とせん断応力の比 $\epsilon E^2/\tau$ の無次元量で整理でき、次式の関係となることを明らかにした。

$$\frac{\bar{\mu}_E}{\bar{\mu}} = \exp \{58.2\alpha(\epsilon E^2/\tau)^{1.29}\}$$

6. 謝 辞

本研究は本学 4 年次卒業研究として行われたものであり、下記の諸君の協力を得た。ここに謝意を表します。

田中 徹, 鈴木 征和,
遊馬 晃, 田中 章弘