Couette 流れにおけるアルミニウム粉末を含む タービン油の電気粘性効果*

岩 永 正 裕^{*1}, 山 岸 陽 一^{*1}

Electroviscous Effects of Suspension of Turbineoil and Aluminum Powder in Couette Flow

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

To determine the quantities affecting electroviscous effects, we studied the change of the effects due to the electric field, shear stress, volume concentration of powder and kinds of aluminum powder and turbineoil. As a result, it was found that the electroviscous effects was controlled by the non-dimensional parameter expressing the ratio of the force acting on the conductor per unit area in the electric field and the shear stress when no electric field was applied. The effects increased almost linearly with the increase of the non-dimensional quantity. The slope increased as volume-concentration of aluminum powder increased. The slope changed with the kind of alminum powder. As the grain diameter became larger, the slope increased, and a higher slope was obtained with flaky powder than with granular or acicular powder.

Key Words: Multiphase Flow, Non-Newtonian Fluid, Electroviscous Effect, Electrorheological Fluid, Apparent Viscosity, Couette Flow, Electric field, Suspension, Aluminum Powder

1. ま え が き

電場を加えることにより流体の粘性が変化する電気粘性効果の存在は古くから認められてきた。今日では可変減衰器として車両用ショックアブソーバ⁽¹⁾等への応用が実用化されつつあり多くの応用、開発が試みられはじめている。油に金属粉を混入した電気粘性流体に対してかなり高い電気粘性効果が報告されている⁽²⁾が、この現象がどのような物理量にどのような形で支配されるのかはまだ十分には明らかになっていないようである。

そこで著者らは電気粘性流体としてタービン油中にアルミニウム粉末を分散させたサスペンションを用い、電気粘性効果が何に起因するかを調べてきたが^{(3)~(5)}、本報告では同心二重円筒粘度計を使用してタービン油の種類、アルミニウム粉末の種類、体積濃度、電界、回転速度を変化させて実験を行って電気粘性効果の特性を調べ、電気粘性効果がどのような無次元量で整理できるかを明らかにする。

記 号

E : 電界強度
 h : サスペンション中に没している内円柱の高さ
 n : 外円筒の回転数
 R_1 : 外円筒の半径
 R_2 : 内円柱の半径
 T : トルク
 U : 外円筒周速度
 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掛けの粘度
 $\bar{\mu}_E$: 電界を加えた場合のサスペンションの見掛けの粘度
 τ : 電界を加えた場合のせん断応力
 $\tau_{E=0}$: 電界を加えた場合と同じ速度こう配における電界を加えない場合のせん断応力

2. 電気粘性効果の実験装置および方法

2.1 同心二重円筒粘度計 図1に同心二重円筒粘度計の概要を示す。外円筒はアクリル製で内径

* 原稿受付 平成5年10月26日。

^{*1} 正員, 神奈川工科大学工学部 (〒243-02 厚木市下荻野 1030)。

62 mm, 高さ 245 mm, 厚さ 5 mm であり, 可変速モータにより 1/500~1/2 500 の減速器を介して 0.02~3 rpm で回転される。内円柱はアルミニウム製で供試部の直径は 60 mm, 高さ 200 mm であり, ポリ塩化ビニル製厚さ 0.15 mm のフィルムで覆って絶縁した。外円筒とのすきまは 0.85 mm である。内円柱は上部に設置した直径 10 mm の真ちゅう製の軸を介して摩擦の少ないエアベアリング(キャノン製 AB・50 R)で支持されている。

外円筒が回転するときに受ける内円柱のトルクは内円柱上端の軸(直径 10 mm)に糸を巻き付け, 滑車を介してこの糸を電子てんびんに結んで荷重を計測し, この値に上端部の軸半径をかけることにより求める。使用したてんびんは 9.8 N {1 kgf} フルスケールで最小読取り単位 9.8×10^{-4} N {0.1 gf} であり, てんびんの計測値を RS-232 C ケーブルを介してパーソナルコンピュータに取り込み外円筒が一回転する間の時間平均処理をして荷重の値を読取った。外円筒の回転数は 1/100 s の精度で読取る装置を製作し計測した。これらの工夫により約 0.5 Pa のせん断応力まで精度よく計測できるようになった。

供試流体の温度は外円筒内面に接するように取付けられた温度計を用いてその都度計測を行い, 実験の温度範囲は 19.5~27°C であった。なお内円柱底部(すきま 8 mm)で生じる摩擦トルクは内円柱側面(すきま

0.85 mm)で生じる摩擦トルクに比べて小さく(1%未満)無視できる。

2・2 高電圧発生装置 100 V, 50 Hz 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 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 6 000 V であった。

電極はアクリル製外円筒の外側にアルミニウムテープを全面に巻いてこれを変動電圧用の電極とし, アルミニウム製の内円柱をアース電極とした。電極間距離は 6 mm であり, 供試流体に加える電界強度(電圧の最大片振幅/電極間距離)は $0 \sim 1.4 \times 10^6$ V/m である。

電圧の計測はテスタ(FLUKE 製 FLUKE 87)に高電圧測定用プローブを接続して行った。

2・3 供試流体 供試流体として見掛けの粘度計測用に 2 種類の無添加タービン油 ISO VG 68, ISO VG 32 に山石金属社製の 4 種類のアルミニウム粉末 YP 4000, YP 2000, YP 680, VA 2000 を 0.01~0.04 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。アルミニウム粉末の大きさの目安と特徴を表 1 に示す。YP 4000, YP 2000, YP 680 は片状粉でこの順に粒子径が増加し, VA 2000 は粒状粉と針状粉が混ざったものであり粒子の大きさは YP 4000 と同等である。

図 1 電気粘性効果測定装置

これらの顕微鏡写真を図2に示す。

2・4 実験手順 同心二重円筒形粘度計の内円柱と外円筒のすきま(0.85 mm)に供試流体を満たし、外円筒を一定速度で回転させながらトルクを計測し電界をかけない場合のせん断応力を求める。次に同じ回転数で外円筒を一定速度で回転させながら流れに対して垂直に電場を印加し、トルクを計測する。電界の強さは零から始めて徐々に増加させる。

以上をタービン油の種類、アルミニウム粉末の種類、体積濃度、回転数を変化させて実験する。

2・5 実験データ整理方法 アルミニウム粉末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ニウム粉末を混入したタービン油の見掛けの粘度を $\bar{\mu}$ 、電界を加えた場合のアルミニウム粉末を混入したタービン油の見掛けの粘度を $\bar{\mu}_E$ 、アルミニウム粉末の体積濃度を α とする。

本研究ではアルミニウム粉末を混入した場合の見掛けの粘度の変化 $\bar{\mu}/\mu$ と、電界を加えることによる見掛けの粘度の変化 $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ を調べる。

2・4節のようにして得られるトルクを T 、外円筒周速度を U 、サスペンション中に没している内円柱の高さを h 、内円柱の半径を R_2 、外円筒の内半径 R_1 とすると供試流体が単相流の場合粘度 μ は

$$\mu = \frac{T(R_1^2 - R_2^2)}{4\pi h R_1 R_2^2 U} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる⁽⁶⁾。式(1)をアルミニウム粉末を混入したサスペンションの場合やサスペンションに電界を加えた場合にも適用して見掛けの粘度 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\mu}_E$ を求める。供試二重円筒内部の流れは外部円筒回転であるため安定であり、

レイノルズ数=代表密度 $\times U(R_1 - R_2)$ /代表粘度の値は本研究では0.2以下であり層流である⁽⁶⁾。ここに代表密度は単相流の場合はタービン油の密度、サスペンションの場合は平均密度をとり、代表粘度は単相流の場合は μ 、サスペンションの場合は $\bar{\mu}$ 、電界を加えた場合は $\bar{\mu}_E$ をとった。本研究の場合すきまは円柱半径に比べて十分小さいのでCouette流れであると考えてよい。

$\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ は体積濃度 α と次の無次元パラメータにより整理できる。

$$\left[\frac{\text{電界中の導体を受ける単位面積当たりの力}}{\text{電界を加えた場合と同じ速度こう配における電界を加えない場合のせん断応力}} \right] = \frac{\epsilon E^2}{\tau_{E=0}}$$

これは電界 E の中に置かれた導体は ϵE^2 に比例する単位面積あたりの力を受けるので、 ϵE^2 と $\tau_{E=0}$ の比をとって無次元パラメータとしたものである。ここに ϵ はタービン油の誘電率(1.95×10^{-11} F/m)であり、 $\tau_{E=0}$ は電界を加えた場合と同じ速度こう配における電界を加えない場合のせん断応力であり、0.5~1.6 Paの範囲で実験を行った。

3. 実験結果

3・1 アルミニウム粉末の濃度と見掛けの粘度比

図3は供試流体として、ISO VG 68無添加タービン

表1 アルミニウム粉末

Aluminum Powder	Grading mesh	Reference Diameter μm	Shape
YP4000	500	5~10	Flaky Powder
YP2000	350	20~45	Flaky Powder
YP680	200	50~75	Flaky Powder
VA2000	500	5~10	Mixture of Granular Powder and Acicular Powder.

図2 アルミニウム粉末粒子の顕微鏡写真

油にアルミニウム粉末 YP 4000 を混入したものを用い、電場を印加しない場合の体積濃度による見掛けの粘度の変化を調べたもので、せん断応力が約 1.1 Pa の場合である。縦軸に見掛けの粘度比 $\bar{\mu}/\mu$ 、横軸にアルミニウム粉末の体積濃度 α をとったもので、 α の増加に伴い $\bar{\mu}/\mu$ はほぼ直線的に増加することがわかる。図 4 は縦軸に $\bar{\mu}/\mu$ 、横軸にせん断応力をとったもので体積濃度 α で記号を変えてある。せん断応力が減少するに従い $\bar{\mu}/\mu$ は増加することがわかる。

3・2 電場を印加することによる見掛けの粘度の変化 タービン油 ISO VG 68 にアルミニウム粉末 YP 4000 を体積濃度 0.02 で混入したサスペンションについて電気粘性効果を調べたものが図 5 である。縦軸に $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ 、横軸に電界 E をとり外円筒の回転数 n で記号を変えてある。 $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ は電界強度が増加すると放物線状に増加し回転数が増加すると減少することがわかった。図 5 と同様の実験点を $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ を縦軸、 $\varepsilon E^2/\tau_{E=0}$ を横軸にとって整理したものが図 6 であり、1 本の直線に整理できることがわかる。図 7 はタービン油 ISO VG 68 と ISO VG 32 にアルミニウム粉末 YP 4000 を体積濃度 0.02 で混入したサスペンションについて電気粘性効果を調べ比較したものであり、縦軸、横軸は図 6 と同様である。作動油の種類によらず 1 本の直線

に整理できることがわかる。図 8 はアルミニウム粉末 YP 4000 の体積濃度を 0~0.04 の範囲で変化させて電気粘性効果を調べたもので縦軸、横軸は図 6 と同様である。体積濃度 α が増すに従い直線の傾きが増加することがわかる。この直線の傾きを縦軸に取り、体積濃度 α を横軸にとったものが図 9 である。 α が増加するにつれて直線の傾きの増加率は鈍ることがわかる。

3・3 アルミニウム粉末の種類の影響 ISO VG 68 無添加タービン油に表 1 のアルミニウム粉末を体積濃度 0.02 で混入して電気粘性効果を調べたものが図 10 であり縦軸に $\bar{\mu}_E/\bar{\mu}$ 、横軸に $\varepsilon E^2/\tau_{E=0}$ をと

図 5 電気粘性効果と電界強度の関係

図 6 電気粘性効果と $\varepsilon E^2/\tau_{E=0}$ の関係

図 3 見掛けの粘度比と体積濃度の関係

図 4 見掛けの粘度比とせん断応力の関係

図 7 電気粘性効果のタービン油の種類による比較

図 8 電気粘性効果の体積濃度による変化

図 10 電気粘性効果のアルミニウム粉末粒子による変化

図 9 電気粘性効果の変化率と体積濃度の関係

った。縦軸の横軸に対する傾きは粒状粉と針状粉が混ざった VA 2000 の場合がいちばん小さく、片状粉については YP 4000 よりも粒子径が大きい YP 2000, YP 680 のほうが傾きが大きいことがわかる。

4. む す び

アルミニウム粉末を含むタービン油の電気粘性効果について数種の因子を変化させて実験を行い、その結果次のことが明らかになった。

(1) 電気粘性効果は電界の中に置かれた導体が単

位面積あたりに受ける力と電界を加えない場合のせん断応力の比を表す無次元量を用いて簡明に整理できることがわかった。また、電気粘性効果は上記無次元量の増加に伴い直線的に増加し、その傾きはアルミニウム粉末の体積濃度が増加するに従って増加する。

(2) アルミニウム粉末の種類によって電気粘性効果の無次元量に対する直線の傾きは変化し、粒状粉・針状粉は片状粉に比べて傾きは小さい。片状粉の場合は粒子径が大きいほど傾きは大きくなる。

なお本研究の遂行にあたっては神奈川工科大学 4 年次卒業研究生(当時)遊馬 晃, 田中章弘, 元野彰久, 森 俊之, 工藤晋作, 佐藤朝也, 八木敬徳, 越井 禎の諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 森下・三井・黒田, 機論, 56-524, C(1990), 928.
- (2) 笹田・岸・上条, 機論, 41-342 (1975), 568.
- (3) 岩永・山岸, 神奈川工科大学研究報告書, NO. B-14 (1990), 29.
- (4) 岩永・山岸, 神奈川工科大学研究報告書, NO. B-15 (1991), 11.
- (5) 岩永・山岸, 神奈川工科大学研究報告書, NO. B-16 (1992), 9.
- (6) 川田, 粘度, (1986), 101, コロナ社.