Poiseuille 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}, 鳥 谷 謙 一^{*3}, 水 上 健^{*4}
久保田 朗広^{*2}, 山 岸 陽 一^{*1}

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

Masahiro IWANAGA^{*5}, Kenichi TORIYA, Takeshi MIZUKAMI,
Akihiro KUBOTA and Yoichi YAMAGISHI

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology,
1030 Shimoogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan

There were two ways to treat electroviscous effects in the recent papers. Some papers treated them as increasing phenomena of apparent viscosity and the others treated them as those of Bingham fluid. So we investigated whether they were incompatible with each other. We had used the way to treat them as phenomena increasing apparent viscosity when we studied with Couette flow in our previous papers. But it became clear that the empirical formula of increase of apparent viscosity we deduced also suggested that the test fluid would behave as Bingham fluid under electric fields. Furthermore, it suggested that the yield stress of Bingham fluid would be in proportion to the stress acted on conductors in the test fluid by electric fields, and that the proportionality constants were influenced by volume concentrations and apparent dielectric constants of the suspension. To express the characteristics with Couette flow, the two ways mentioned above seemed to be compatible with each other. Next we calculated the velocity distributions and the flow rates with Poiseuille flow under electric fields as Bingham fluid. And we performed experiments with suspension of turbineoil and aluminum powder to obtain velocity distributions and flow rates. The calculated results almost agreed with experimental values. So we concluded that the test fluid should be treated as Bingham fluid. And we could obtain the same characteristics of yield stress experimentally with Poiseuille flow as those deduced from the results with Couette flow mentioned above. We had tried to investigate the characteristics of suspension containing metal powders with high specific gravities experimentally with Couette flow, but we found it difficult because of precipitation of the metal powders. So we expect that it becomes possible to investigate those characteristics experimentally with Poiseuille flow.

Key Words: Multi-phase Flow, Non-Newtonian Fluid, Electrorheological Effect, Electrorheological Fluid, Bingham Fluid, Poiseuille Flow, Electric Field, Suspension, Aluminum Powder

1. ま え が き

電界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は、今日では可変減衰器として車両用ショックアブソーバ等へ実用化されつつあり、多くの応用、開発が試みられている。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かを明確にするために、いくつかの研究が行われてきた^{(1)~(4)}。なかには見掛けの粘度が増加する現象として整理するものと⁽²⁾⁽³⁾、ビンガム流体としての挙動を示唆するものとがある⁽¹⁾⁽⁴⁾。これらが矛盾してはいないか調べる必要がある。

著者らは Couette 流れにおける電気粘性効果の基

礎実験をまとめるにあたり、見掛けの粘度が増加する現象としてとらえ整理してきた⁽²⁾⁽³⁾。本報ではこの整理方法とビンガム流体としての整理方法の間に矛盾がないかを調べ、前報⁽²⁾⁽³⁾の Couette 流れの実験結果をビンガム流体の特性として再整理する。

さらにこのビンガム流体としての特性を Poiseuille 流れに適用して、ビンガム流体として挙動するならばどのような速度分布、流量比(無電界時の流量 $Q_{E=0}$ と電界印加時の流量 Q_E の比)となるかを計算で求める。次にアルミニウム粉末を含むサスペンションの Poiseuille 流れにおける速度分布と流量比を実験により求めて、上記計算値と比較して、果たしてビンガム流体として挙動するかどうかを実験的に検証する。

最後に Poiseuille 流れにおける流量比の実験結果からビンガム流体の特性を独立に求め、先に Couette 流れの結果を再整理して求めたビンガム流体の特性と比較する。

記 号

A: 電気粘性効果として整理する場合、電気粘性

* 原稿受付 2002年6月19日。

^{*1} 正員、神奈川工科大学工学部(☎243-0292 厚木市下荻野1030)。

^{*2} 学生員、神奈川工科大学大学院。

^{*3} 正員、アネスト岩田(株)(☎223-8501 横浜市港北区新吉田町3176)。

^{*4} 正員、長野トヨタ自動車(株)(☎380-8509 長野市南石堂町1326-1)。

E-mail: iwanaga@me.kanagawa-it.ac.jp

効果の増加分は ϵE^2 と $\tau_{E=0}$ の比に比例する.

A はこの比例定数

ビンガム流体として整理する場合, 降伏応力は ϵE^2 に比例する. A はこの比例定数とも考えられる

E : 電界強度 (供試流路中央部の値)

f : Poiseuille 流れにおける速度分布がフラットな部分の長さ $= 2A\epsilon E^2/\beta$

F : Poiseuille 流れにおける速度分布がフラットな部分の長さを流路幅で無次元化した量 $= f/h$

h : 流路幅

p : 圧力

Q_1, Q_2, Q_3 : 電界印加時の各領域における流量

$Q_{E=0}$: 無電界時の流量

Q_E : 電界印加時の流量

u : 各点の x 方向の速度 (y によって変化する)

$U_{\max E=0}$: 無電界時の最大流速

$U_{\max E}$: 電界印加時の最大流速

x : 流れ方向の座標

y : 流れに垂直方向の座標

Y : 流量比 $= Q_{E=0}/Q_E$

α : アルミニウム粉末の体積濃度

β : 圧力こう配

ϵ : 油の誘電率

$\bar{\epsilon}$: サスペンションの見掛けの誘電率

$\bar{\mu}$: Couette 流れにおける電界を加えないときのサスペンションの見掛けの粘度

$\bar{\mu}_E$: Couette 流れにおける電界を加えたときのサスペンションの見掛けの粘度

τ_E : 電界を加えた場合のせん断応力

$\tau_{E=0}$: Couette 流れにおける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

τ_y : ビンガム流体の降伏応力

2. Couette 流れの実験結果の ビンガム流体としての再整理

Couette 流れにおけるアルミニウム粉末と油を含むサスペンションの電気粘性効果の基礎研究⁽²⁾⁽³⁾で, 式(1)のような関係が求まっている. 電気粘性効果(電界を加えたときの見掛けの粘度 $\bar{\mu}_E$ と電界を加えないときの見掛けの粘度 $\bar{\mu}$ の比)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 ϵE^2 と, 電界を加えない場合のせん断応力 $\tau_{E=0}$ の比を表す無次元量 $\epsilon E^2/\tau_{E=0}$ を用いて1本の直線で整理できることを意

Fig. 1 Relation between shear stress and shear rate under electric field

味する.

$$\frac{\bar{\mu}_E}{\bar{\mu}} = A \frac{\epsilon E^2}{|\tau_{E=0}|} + 1 \dots \dots \dots (1)$$

ここで ϵ は油の誘電率, E は電界強度を表す. $\tau_{E=0}$ は電界を加えない場合の見掛けの粘度と速度こう配の積 $\tau_{E=0} = \bar{\mu} \partial u / \partial y$ を表す. 比例定数 A は直線の傾きを表しており, サスペンションの種類, 体積濃度 α により値が異なる. 式(1)の両辺に $\tau_{E=0}$ を掛けて整理すると, 電界を加えた場合のせん断応力 $\tau_E = \bar{\mu}_E \partial u / \partial y$ を得る.

$$\begin{aligned} \tau_E &= \text{sign}(\tau_{E=0}) A \epsilon E^2 + \tau_{E=0} \\ &= \text{sign}(\tau_{E=0}) A \epsilon E^2 + \bar{\mu} \frac{\partial u}{\partial y} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

式(2)は電界に関する項と速度こう配により発生する項からなり, $\text{sign}(\tau_{E=0})$ は $\tau_{E=0}$ の符号を表す. 図1に示すように電界を加えることにより $A \epsilon E^2$ の降伏応力 τ_y が発生してビンガム流体の挙動を示唆している. すなわち

$$\tau_y = A \epsilon E^2 \dots \dots \dots (3)$$

となる.

以上のように Couette 流れにおける見掛けの粘度が上昇する現象としての記述とビンガム流体としての記述に矛盾はなく, 同じことを意味していることがわかる.

そこで Couette 流れの実験結果⁽²⁾⁽³⁾をビンガム流体の降伏応力として整理し直す. 式(3)は降伏応力 τ_y と電界が導体に及ぼす単位面積あたりに働く力 ϵE^2 に比例することを表している. 図2は無添加タービン油 ISOVG 68 と ISOVG 32 の2種類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の Couette 流れにおける実験結果(前々報⁽²⁾ 図7)を整理し直したものである. 縦軸に降伏応力と ϵE^2 の比

Fig. 2 Relation between the ratio of yield stress to εE^2 and $\varepsilon E^2/\tau_{E=0}$ for Couette flow

Fig. 3 Relation between the ratio of yield stress to εE^2 and $[1/(\alpha+8\alpha^2)][(\bar{\varepsilon}-\varepsilon)/\varepsilon]^2$ for Couette flow

を、横軸に εE^2 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とった。降伏応力と εE^2 の比はほぼ一定であることがわかる。

図3は無添加タービン油 ISOVG 68, シリコン油 WF 30 とサラダ油に大きさと形状の異なるアルミニウム粉末 YP 4000, YP 2000, YP 680 と VA 2000 を体積濃度 0.01~0.04 の範囲で混入したサスペンションの Couette 流れにおける実験結果(前報⁽³⁾ 図9)を再整理したものである。縦軸に降伏応力と εE^2 の比をとり、横軸には、アルミニウム粉末の種類、油の種類、体積濃度によらず特性を1本の直線に整理できる無次元量の係数をとって整理し直した。式(4)示す直線上にほぼ分布し両者は比例していることがわかる。なお式(4)は Couette 流れについて得られた実験式[前報⁽³⁾ 式(2)]を式(1), (3)を用いて整理し直したものである。降伏応力 τ_y は εE^2 に比例し、その比例定数はアルミニウム粉末の体積濃度とサスペンションの見掛けの誘電率により変化することを表している。

Fig. 4 Velocity distribution for Poiseuille flow under electric field

$$\frac{\tau_y}{\varepsilon E^2} = 0.3 \cdot \left(\frac{1}{\alpha + 8\alpha^2} \right) \left(\frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

3. ビンガム流体として計算した電界中の Poiseuille 流れの速度分布と流量比

電界を加えた場合の Poiseuille 流れが、ビンガム流体としてふるまうと仮定したときの、速度分布と流量比を求める。せん断応力は図4に示すように

$$\tau_E = -\beta y$$

で与えられる。ここに β は圧力こう配である。

このせん断応力の絶対値が $A\varepsilon E^2$ を超えない範囲では、式(2)の第3辺、第1項の電界に関する項がせん断応力を受け持ち、速度分布がフラットになることが予測される[式(9)参照]。図4の斜線部は電界に関する項の大きさを表している。

f を速度分布がフラットとなる領域の幅とすると、 $y = \pm f/2$ における条件から $\beta f/2 = A\varepsilon E^2$ となり、 f を流路幅 h で無次元化して F と定義すると

$$F = \frac{f}{h} = 2A \frac{\varepsilon E^2}{\beta h} \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる関係が得られる。

Poiseuille 流れの流量比 Y を、同じ圧力こう配における電界を加えない場合の流量 $Q_{E=0}$ と電界を加えた場合の流量 Q_E の比として定義して求めると、 Y は次式によって求められる[式(18)参照]。

$$Y = \frac{Q_{E=0}}{Q_E} = \frac{1}{1 - \frac{3}{2}F + \frac{1}{2}F^3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

4. 可視化実験装置ならびに実験方法

図5に供試流体の速度分布を可視化して求めるための実験装置概略を、図6に供試流路断面図を示す。

供試管流路はアクリル製で断面 1×23 mm, 長さ 230 mm であり、流路に十分な光を当てるために、硫酸銅溶液を密封して電極として使用した。これにより

Fig. 5 Schematic diagram of apparatus for flow visualization

Fig. 6 Cross section of visualization position

流路が透明になり、可視化しやすくなった。

高電圧発生装置は 100 V, 50 Hz の電源をスライダックにより可変電圧として、これに自動車用イグニッションコイル 4 本を直列につないだもので、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。幅 1 mm の供試矩形管流路の両側に実効出力電圧 0~4 000 V を印加した。

供試流体は、無添加タービン油 ISO VG 68 にアルミニウム粉末 YP 680 (粒子径 50~75 μm , 片状粉, 山石金属製) を体積濃度 0.000 1 で混入したサスペンションを使用した。

図 6 に示すように、供試流体のアルミニウム粉末の動きを顕微鏡に CCD カメラを取付けて撮影した。流路奥行き中央部に焦点を合せ、ハロゲン光を照射し

Fig. 7 Comparison of the experimental velocity distributions with calculated velocity distributions

て流路中央部断面のアルミニウム粉末を明示できるようにしている。顕微鏡撮影が可能な程度の微小な流速を作り出すには、まず圧力容器を減圧して流れを静止させる。次に注射器を用いて適当な量の空気を圧力容器に手で一気に注入する。その直後から下向きの流れが発生し、徐々に流量を減らしながら流れが持続する。数 s 無電界状態で流した後、目的の電圧を印加する。撮影は常時継続して行い、撮影した映像から単位時間当たりのアルミニウム粉末の移動距離を求めることにより、流路中央部断面の速度分布が得られる。無電界時ならびに電界印加時の速度分布を得るのに必要な約 20 s ほどの間に圧力こう配は減少するが、その変化は数%以内に抑えられている。このようにしてほぼ同じ印加圧力のもとでの無電界時ならびに電界印加時の速度分布を得ることができる。

アルミニウム粉末の体積濃度が微量のために無電界時の供試流体の粘度はアルミニウム粉末を含まない供試液体の粘度と同じであると考えてよい。したがって無電界時の最大流速 $U_{\max, E=0}$ から流路内の圧力こう配を見積もることができる。圧力こう配の範囲は $\beta = (8/h^2)\bar{\mu}U_{\max}$ から、ほぼ 109~181 Pa/m であった。

5. 可視化実験結果

無添加タービン油 ISO VG 68 にアルミニウム粉末 YP 680 を体積濃度 0.000 1 で混入したサスペンションを用いて実験を行った。図 7 に供試流路内の Poiseuille 流れの速度分布を示す。縦軸は可視化から求めた流速を同じ圧力こう配における無電界時の最大流速で無次元化したものである。横軸は粒子の流路位置を流路幅で無次元化したものである。電界を印加し

たときビンガム流体特有の中央部分にフラットになる部分が存在することが確認できる。無電界時の流路中央における最大速度の値と電界印加時における最大速度の値の比から F の値を求めることができる [式(15)]。実線はこの値をもとに速度分布を計算して重ねて表示した。

左右壁面近傍で計算値と実験値の間にずれがある。これは顕微鏡で幅 1 mm の流路において手前壁面より 11.5 mm 奥をのぞいた画像をもとに速度を求めているために、左右壁面位置の確認の難しさと像のゆがみによって、壁面と粒子の y 方向相対位置の把握の精度が落ちており、 y/h の値には 10% 以上の誤差(偏差)が含まれることが原因であると考えられる。速度こう配が大きい左右壁面近傍でこの影響が顕著に現れることを考慮すると、計算による速度分布は実験結果と比較的よく一致している。

図 8 は電界をかけたときとかけないときの最大流速の比 [式(15)] から求めた F の値を縦軸に、流路形状と最大流速から圧力こう配 β を求めて $\varepsilon E^2/\beta h$ の値を計算して横軸にとったものである。実験点は原点を通る直線の周りに分布しており、 F が $\varepsilon E^2/\beta h$ に比例することが確かめられた [式(5)]。

以上のことから Poiseuille 流れの中で供試流体がビンガム流体としてふるまうことが実験結果より確認できた。

6. Poiseuille 流れにおける流量比実験装置

図 9 に流量比を求める実験装置概略を示す。供試管流路はアクリル製で流路断面が 1×15 mm、長さ 250 mm であり、アルミニウムはくを電極として使用した。電極間距離は 7 mm である。0~4 000 V の実効出力電圧を電極に印加し、電界強度を $0 \sim 2.2 \times 10^6$ V/m の範囲で供試流路に加えた。

Fig. 8 The change of nondimensional width of flat velocity region

供試流体には無添加タービン油 ISO VG 68 にアルミニウム粉末 YP 4000 (粒子径 $5 \sim 10 \mu\text{m}$, 片状粉, 山石金属製) を体積濃度 0.02 で混入したサスペンションを使用した。サスペンションの見掛けの誘電率 ε は前報⁽³⁾ と同様の方法で求めた。

供試流体が供試流路を時間的に変動のない一定流速で流れるように、供試流路に比べて底面の大きい内径 153 mm、高さ 200 mm のアクリル製円筒容器を供試管流路上部に設置して、供試流体ヘッドの時間変動を抑えた。円筒容器に内径 500 mm、高さ 1 200 mm の圧力容器をつないで空気圧の変化を抑えて、コンプレッサと真空ポンプを用いて $-1.9 \sim 9.5$ kPa の範囲で圧力を調整した。圧力容器を介して円筒容器内の供試流体に圧力を加えて供試流体の流速を変化させた。マノメータで印加圧力を求め、圧力こう配を算出した。円筒容器内には供試流体の温度を計測するための温度計、体積濃度を均一にするためのかくはん用の水中モータを設置した。

7. Poiseuille 流れにおける流量比実験結果

図 10 は無添加タービン油 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の実験結果であり、縦軸に流量比 Y 、横軸に速度分布のフラット部長さと供試流路幅の比 F をとった。プロットは実験値で式(5)に Couette 流れの実験結果⁽³⁾ から求めた $A=0.193$ を代入し、その他のすべての値については Poiseuille 流れの実験値を用いて F の値を求めて横軸の値とした。実線は式(6)より導いた値を示し、両者はよく一致していることがわかる。

Fig. 9 Schematic diagram of apparatus for measurement of flow rate

Fig. 10 Relation between the ratio of flow rate and nondimensional width of flat velocity region

Fig. 11 Relation between the ratio of yield stress to ϵE^2 and nondimensional width of flat velocity region

8. Poiseuille 流れの降伏応力の整理

Poiseuille 流れの実験結果をビンガム流体の降伏応力として整理する。図 11 は図 10 と同じ Poiseuille 流れの実験点を整理しなおしたものである。

Poiseuille 流れの流量比 Y に関する式 (6) に、実験で求めた流量比 Y の値を代入して F の値を求めて横軸にとる。式 (5) より

$$A = F \frac{\beta h}{2\epsilon E^2}$$

となり上式の右辺にこの F の値と実験条件の諸量の値を代入して A の値を求めて縦軸にとった。式 (3) より A は降伏応力 τ_y と ϵE^2 の比を意味する。実験値は図 2 の Couette 流れの実験結果 $A=0.193$ とほぼ同じ値をとることがわかる。

図 12 は無添加タービン油 ISOVG 68 とシリコン油 WF 30 にアルミニウム粉末 YP 4000 と YP 2000 を体積濃度 0.005, 0.01, 0.02 と 0.04 で混入したサスペンションの実験結果である。縦軸に図 11 と同様の方法で求めた降伏応力と ϵE^2 の比を横軸に図 3 の横軸と同様の量をとって整理した。図 3 と同様に、Poiseuille 流れの場合も、式 (4) に示す直線上に実験

Fig. 12 Relation between the ratio of yield stress to ϵE^2 and $[1/(\alpha+8\alpha^2)][(\bar{\epsilon}-\epsilon)/\epsilon]^2$

点は分布することがわかる。降伏応力に関して整理した Couette 流れの実験結果と Poiseuille 流れの実験結果は一致することが確かめられ、今後は Poiseuille 流れの実験を行うことによってビンガム流体の降伏応力の実験的性質を求めることができることがわかった。

9. む す び

見掛けの粘度が増加する現象として取扱った Couette 流れにおける電気粘性効果の実験研究結果⁽²⁾⁽³⁾をもとに、ビンガム流体としての挙動が矛盾なく導き出せることを示した。次に Couette 流れの結果を再整理すると、ビンガム流体の降伏応力は、電界が誘電体に及ぼす単位面積当たりの力を表す量(油の誘電率と電界強度の二乗の積)に比例するという形に整理できて、その比例定数は種々のアルミニウム粉末を含む種々の油を液相とするサスペンションについて体積濃度と見掛けの比誘電率によって定まることを導いた。

このビンガム流体の特性を用いて Poiseuille 流れの速度分布と流量比を計算で求めた。一方アルミニウム粉末を含むタービン油を用いて、実験的に Poiseuille 流れの速度分布と流量比を求め、計算結果と比較した。速度分布、流量比ともに計算結果と実験結果はよく一致し、ビンガム流体として挙動することを実験的に確かめた。

さらに Poiseuille 流れの流量比の実験結果をもとにビンガム流体の特性を求め、先に Couette 流れの実験結果を再整理したビンガム流体の特性と比較した。その結果両者はよく一致し、Poiseuille 流れの実験だけでビンガム流体の特性を求めることも可能であることを示した。

Couette 流れの装置では比重が重い金属を含む供試流体の特性を調べることは、沈殿現象により困難である場合が多く、今後はこれらの計測に対して Poiseuille 流れの装置で研究を試みていきたい。

なお本研究を遂行するにあたり、当時神奈川工科大学 4 年次卒業研究生の田中徹、鈴木征和、丸義和、本山武志、田代義雄、竹内順一、中澤秀人、布施永了、橋本大樹、若狭慶春、星昌宏、村中憲一、真野田悟、板橋佑介、岩澤哲弥、赤沼祐一、萩原辰徳、新垣洋、大田諭、前田康博、早藤順一、内藤雅人、袴田和久、新藤雅一、鈴木良介、北原金吾、小本康広の諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

付録 1. セン断応力の分布

図 4 の Poiseuille 流れでは圧力こう配の大きさを β とすると

$$\frac{\partial \tau_E}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial x} = -\beta.$$

したがって ($y=0$, $\tau_E=0$ より)

$$\tau_E = -\beta y \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、せん断応力は直線的に変化する。流路全体に式(2)を適用して電気粘性効果を求める。

$$y \geq 0 \text{ のとき} \quad \tau_E = -A\epsilon E^2 + \tau_{E=0}$$

$$y < 0 \text{ のとき} \quad \tau_E = A\epsilon E^2 + \tau_{E=0}$$

式(7)において、 τ_E の絶対値が $A\epsilon E^2$ よりも小さい範囲 $-f/2 \leq y \leq f/2$ においては ($f=2A\epsilon E^2/\beta$)、せん断応力は電界により発生する応力が受け持ち、速度こう配は零となると考える。すなわち

$$\textcircled{1} \frac{h}{2} \geq y > \frac{f}{2} \text{ のとき}$$

$$\tau_E = \bar{\mu} \frac{\partial u}{\partial y} - A\epsilon E^2 = -\beta y \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\textcircled{2} -\frac{f}{2} \leq y \leq \frac{f}{2} \text{ のとき}$$

$$\tau_E = -\beta y \leq A\epsilon E^2, \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\textcircled{3} -\frac{h}{2} \leq y < -\frac{f}{2} \text{ のとき}$$

$$\tau_E = \bar{\mu} \frac{\partial u}{\partial y} + A\epsilon E^2 = -\beta y \quad \dots\dots\dots (10)$$

付録 2. 速度分布の計算

式(8)～(10)を積分することにより、それぞれの領域で速度分布を求めることができる。

$$\textcircled{1} \frac{h}{2} \geq y > \frac{f}{2} \text{ のとき}$$

$$u = \frac{\beta}{2\bar{\mu}} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 - f \left(\frac{h}{2} - y \right) \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

② $-\frac{f}{2} \leq y \leq \frac{f}{2}$ のときせん断速度が $\partial u_E / \partial y = 0$ なので、流速は前式を $y=f/2$ とすることにより求められる。

$$u = \frac{\beta}{8\bar{\mu}} (h-f)^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\textcircled{3} -\frac{h}{2} \leq y < -\frac{f}{2} \text{ のとき}$$

$$u = \frac{\beta}{2\bar{\mu}} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 - f \left(\frac{h}{2} + y \right) \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

これらを図示して電界印加時の速度分布を求めると本文中、図 4 のようになる。

付録 3. 速度分布のフラット部分の算出方法

式(12)より、同じ圧力こう配 β において無電界時の最大流速を $U_{\max E=0}$ 、電界印加時における最大流速を $U_{\max E}$ とすると

$$\frac{U_{\max E}}{U_{\max E=0}} = \frac{\frac{\beta}{8\bar{\mu}} (h-f)^2}{\frac{\beta}{8\bar{\mu}} h^2} = \left(1 - \frac{f}{h} \right)^2 = (1-F)^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(14)より Poiseuille 流れにおける速度分布のフラットな部分の長さは

$$F = 1 - \sqrt{\frac{U_{\max E}}{U_{\max E=0}}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となり、最大流速を求めることによりフラットな部分を求めることができる。

付録 4. 流 量

式(11)～(13)を積分して各領域における電界印加時の流量を求める。

$$\textcircled{1} \frac{h}{2} \geq y > \frac{f}{2} \text{ における流れ}$$

$$Q_1 = \frac{\beta h^3}{24\bar{\mu}} (1-3F+3F^2-F^3)$$

$$\textcircled{2} -\frac{f}{2} \leq y \leq \frac{f}{2} \text{ における流れ}$$

$$Q_2 = \frac{\beta h^3}{8\bar{\mu}} (F+F^3-2F^2)$$

$$\textcircled{3} -\frac{h}{2} \leq y < -\frac{f}{2} \text{ における流れ}$$

$$Q_3 = \frac{\beta h^3}{24\bar{\mu}} (1-3F+3F^2-F^3)$$

電界印加時の全流量は次のようになる。

$$Q_E = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{\beta h^3}{12\bar{\mu}} \left(1 - \frac{3}{2}F + \frac{1}{2}F^3 \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

付録5. 流量比の計算

文 献

圧力こう配 β のとき電界を加えない場合の流量 $Q_{E=0}$ は

$$Q_{E=0} = \frac{\beta h^3}{12\bar{\mu}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となり, 流量比は式(16), (17)より次式となる.

$$\frac{Q_{E=0}}{Q_E} = \frac{\frac{\beta h^3}{12\bar{\mu}}}{\frac{\beta h^3}{12\bar{\mu}} \left(1 - \frac{3}{2}F + \frac{1}{2}F^3\right)} = \frac{1}{1 - \frac{3}{2}F + \frac{1}{2}F^3} \quad \dots\dots\dots (18)$$

- (1) 浅野和俊, 電気粘性流体とその応用に関する研究分科会成果報告書 (P-S C 221, 木村好次主査), (1994), 2-21, 日本機械学会.
- (2) 岩永正裕・山岸陽一, 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, 機論, **60**-577, B (1994), 3039-3043.
- (3) 山岸陽一・岩永正裕・鳥谷謙一, Couette 流れにおけるアルミニウム粉末を含むサスペンションの電気粘性効果, 機論, **63**-611, B (1997), 2316-2321.
- (4) 多田茂・壁谷尚樹・吉田英生・腰越亮三, 電気粘性流体の流体力学的特性に関する基礎的研究, 機論, **63**-613, B (1997), 2985-2992.