モデルダンパー内における電気粘性流体の挙動特性*

山口 博 司*¹, 島 田 邦 雄*²
張 信 栄*¹, 井 上 大 輔*³

Flow Characteristics of ER Fluid in Model Damper

Hiroshi YAMAGUCHI*⁴, Kunio SHIMADA,
Xinrong ZHANG and Daisuke INOUE*⁴ Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Tatara-Miyakodani, Kyo-Tanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

A basic study of a gap flow in a closed piston-cylinder system of ER fluid was carried out. The purpose of this study is to elucidate flow behavior of ER fluid in the piston-cylinder system. The electric field is applied between inner wall of the cylinder and outer wall of the piston, and the pressure difference between upper and lower chamber of the piston is measured. Theoretical formula of pressure difference was obtained by the one-dimensional assumption of the flow in the gap of cylinder. Furthermore, simulation cord is developed in the present study based on the finite volume method (FVM) with moving boundary condition. In comparison with the theoretical approximation and experimental results, it was found that some difference occurs in the case of the lower aspect ratio of the piston. However, when aspect ratio is large and piston speed is low, the theoretical approximation and experimental results show fair agreement. On the contrary the simulation results showed a good agreement with whole results in experiments.

Key Words: Damper, Pipe Flow, Finite Volume Method, Moving Boundary, Electro Rheological Fluid, Pressure Difference

1. 結 論

非ニュートン流体の中で、外部電場に応答して流体のレオロジー特性が変化する現象を電気レオロジー効果（以下 ER 効果）と言い⁽¹⁾、特に ER 効果の大きい流体を電気粘性流体（以下 ER 流体）と言う。ER 流体は加える電圧を変化させることで流体の粘性を制御できる上、降伏応力が発生することから現在、様々な工学的応用が考えられている^{(2)~(3)}。一方、ER 効果を利用した機器を設計する上で、ER 効果の流体力学的視点からの検討が必要不可欠⁽⁴⁾であるものの、ER 流体を用いて流体力学的に取り扱う研究報告は少ない。また、これまでの研究報告では平行平板流路に関するものが多く、エンジンマウントやダンパー等の振動制御機器が持つ流動場の狭小流路形状における ER 流体の挙動特性に関する報告例⁽⁵⁾は少ないのが現状である。

そこで、本研究では工学的応用例としてピストンと

シリンダにより構成されるモデルダンパー内における ER 流体の基礎的な挙動特性を調べることが目的とした。実験ではまずレオメータを使用して ER 流体のレオロジー特性の調査を行った。次にピストンに定速運動を加えて差圧を測定し、モデルダンパー内での ER 流体の圧力特性を明らかにした。また、シリンダ上下部での差圧の近似式を求め、様々なピストン速度、アスペクト比および印加電場における圧力測定値と比較を行った。さらに二次元軸対称座標系において非圧縮、粘性流体を想定し数値解析によりモデルダンパー内部の流体挙動を明らかにした。

2. お も な 記 号

E	直流電場 [kV/mm]
ΔP	圧力差（差圧） [Pa]
U_p	ピストン速度 [m/s]
$\dot{\gamma}$	せん断速度の大きさ [1/s]
η_E	塑性粘度 [Pa·s]
τ	せん断応力 [Pa]

3. 実 験

* 原稿受付 2005 年 4 月 8 日。

*¹ 正員、同志社大学工学部(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3)。*² 福島大学理工学群(〒960-1296 福島市金谷川 1)。*³ 同志社大学大学院工学研究科。

E-mail: hyamaguc@mail.doshisha.ac.jp

3.1 供試流体 本研究において供試流体として用いるのは十分な ER 効果が期待でき、粒子が安定分散する 3wt% の濃度のシリコンオイルベースのスメクタイト分散系 ER 流体である。分散系 ER 流体は比較的大きな ER 効果が得られる事が確認されており、メチルフェニルシリコンオイル (KF-56 信越化学製) を溶媒として、スメクタイト SPN (コープケミカル製) を安定分散させたものを用いた。合成スメクタイト粒子は、平均厚みが 2~50nm と非常に小さく円盤状で比表面積が $710 \sim 760 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、密度が 2670 kg/m^3 であり、約 1% 以下の水分を含む含水系の粒子である。図 1 の流動曲線に示されるように今回作成した ER 流体は電場を印加するに従って明確な降伏応力が生じることを確認した。

Fig.1 Flow curve of ER fluid (22°C)

Fig.2 Experimental apparatus

3.2 実験装置 モデルダンパーの概略を図 2 に示す。ピストン運動は、ロボットモジュール⑥に取り付けたアーム⑤からピストンロッドへと動力を伝えることによって行われる。シリンダ部の全長を 660mm とし、シリンダ②内に供試流体を満たす。シリンダ②の内径は 44mm、ピストン③の直径は 40mm とし、間隙は 2mm とした。また、実験により得られるピストン上下面の差圧については静圧孔をシリンダ壁面に設け、差圧計④によって測定する。測定した差圧はアンプ⑦ (DPM-700B 型 共和電業製) を介してコンピュータに取り込む。

3.3 実験条件 本研究では、モデルダンパー内での ER 流体の基礎的な挙動特性について調べるため、ピストンに一定速度を加え、以下に示すアスペクト比の条件で実験を行った。

電場 $E = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 \text{ kV/mm}$

ピストン速度 $Up = 20, 60, 100 \text{ mm/s}$

アスペクト比 $As = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0$

ただし、本実験装置ではピストン速度が 0 から Up になるまで、 35.0 m/s^2 の加速度で上昇させるため、 Up が $20 \sim 100 \text{ mm/s}$ となる立ち上げ時間は $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ sec}$ のオーダーとなる。従って、本研究ではピストンはほぼステップ的に立ち上げているものとみなすことができる。ロボットモジュールの設定条件を以下に示す。

- ・ 定速上昇運動
- ・ 定速下降運動

ここで、本実験で用いた ER 流体のような低濃度の流体では電気抵抗が小さくなり電流が流れ、ショートする可能性が生じるために最大電場印加を 1.0 kV/mm とした。また、実験時の室温は $22.0 \pm 1^\circ \text{C}$ で一定とした。

3.4 実験方法 実験に先立ち、レオメータにより ER 流体のレオロジー特性を確認する。レオメータは、外径 40mm の回転内筒と内径 42mm の静止外筒による共軸二重円筒型レオメータを用いた。ER 流体は図 1 に示すように電場印加時にはビンガム流体の性質を示し、印加電場の増加に伴いせん断応力が増す傾向があるため、この性質をダンパーに利用できる。

本研究では、本実験の動力部であるロボットモジュールにピストンに動力を伝えるためのアームを取り付け、ロボットモジュールの原点を調整する。また、シリンダをアームと平行に取り付け、実験液を満たし、差圧計、変位計を取り付ける。さらに、電場印加の端子をシリンダに接触させ、ピストンロッドの最下点にアースを取り付ける。ここで、安全のためにシリンダの外壁をゴムシートで覆うものとした。次に、差圧計と変位計のゼロ点

を合わせ、実験を開始する。実験においては再現性を確認するために各実験条件下で3回計測を行った。

3.5 差圧近似理論式 シリンダ、ピストン間隙における流体の微小要素に働く圧力を P 、せん断応力を τ として、管軸方向に z 軸、半径方向を r 軸とするとき次式が成立する。

$$\frac{dP}{dz} + \frac{1}{r} \left\{ \frac{d(\tau r)}{dr} \right\} = 0 \quad (1)$$

ここで、せん断応力とせん断速度の関係はビンガム流体の近似式を用いると以下の式で表せる。

$$\tau = - \left(\eta_E \frac{du}{dr} + \tau_E \right) \quad (2)$$

但し、 η_E は塑性粘度(plastic viscosity)、 τ_E は降伏応力(yield stress)、 u は z 軸方向の流速とする。 η_E は、 $\dot{\gamma}$ の関数である3次の外挿式から求める。 η_E は印加電場の大きさにより形が異なり、無電場時は定数となる。(1)式に rdr を乗じてさらに積分操作を行うと、(2)式を用いて以下の式が得られる。

$$\frac{dP}{dz} \frac{r^2}{4} - (\eta_E u + \tau_E r) = A \ln r + B \quad (3)$$

但し、 A 、 B は積分定数。本研究では、内円筒移動の条件で実験を行うため、 $r = r_1$ に $u = Up$ で動く内円筒、 $r = r_2$ に固定外円筒があるとすると、速度分布は

$$u = u(r) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\eta_E} \left[\frac{1}{4} \frac{dP}{dz} (r_1^2 - r_2^2) - \tau_E (r_1 - r_2) - \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} \left\{ \frac{1}{4} \frac{dP}{dz} (r_1^2 - r_2^2) + \eta_E Up - \tau_E (r_1 - r_2) \right\} \right]$$

となり、ここで、 r_0 はピストンロッドの半径、 dP/dz は

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\frac{\eta_E}{2} (r_1^2 - r_0^2) Up - \frac{\tau_E}{6} (r_1^3 + 2r_1^3 - 3r_2 r_1^2) - \frac{2r_1^2 \ln(r_1/r_2) + (r_2^2 - r_1^2)}{4 \ln(r_1/r_2)} \{ \eta_E Up - \tau_E (r_1 - r_2) \}}{\frac{1}{4} (r_1^2 - r_2^2) \left\{ \frac{2r_1^2 \ln(r_1/r_2) + (r_2^2 - r_1^2)}{4 \ln(r_1/r_2)} - \frac{1}{4} (r_1^2 - r_2^2) \right\}}$$

である。したがってピストンの外側壁面($r = r_1$)及び、シリンダの内側壁面($r = r_2$)におけるせん断速度 $\dot{\gamma}_1$ 、 $\dot{\gamma}_2$ はそれぞれ(4)式に r_1 、 r_2 を代入することで得られる。また、ピストンの外側壁面におけるせん断力を τ_1 、シリンダの内側壁面におけるせん断力を τ_2 とくと、管軸方向に働く摩擦力和圧力から求める力のつりあいより、ピストン長を l とすると、上下面の差圧 ΔP は

$$\Delta P = \frac{2l(\tau_1 r_1 + \tau_2 r_2)}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで本研究では(5)式の τ_1 、 τ_2 に対し、それぞれの $\dot{\gamma}_1$ 、 $\dot{\gamma}_2$ に対応する値をレオロジー計測より得られるデータを用いた。

4. 数値解析

4.1 支配方程式 本研究では数値モデルとして二次元軸対称座標系を設定した。座標系には管軸方向を z 、半径方向を r とする座標系を導入して計算を行った。以下に、本研究の数値解析に用いた支配方程式を示す。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (7)$$

(6)式は連続の式、(7)式はコーシー方程式である。右辺第2項の $\boldsymbol{\tau}$ は(2)式を応力テンソル型で表記したビンガム流体の構成方程式である。また、右辺第3項は、重力による体積項である。本研究で用いるER流体は電場に依存して粘度が変化するため、粘度 η_E は(2)式のレオロジー特性値から求めた値を用いるものとした。

4.2 数値計算方法 本研究では、(6)、(7)式を (z, r) の直交格子で離散化した後、有限体積法(SIMPLE法⁶⁾による反復計算を行い、時間進行で速度および圧力について定常状態となるまで計算を行った。計算領域は、図3に示すように実際のモデルダンパー形状に則した軸対称領域を設定し、 660×36 に分割された直交スタガード格子を用いた。本研究ではピストン-シリンダ間隙付近で圧力、流速の変化が最も大きくなるため、軸中心から半径方向に向かって格子間隔が密になる不等間隔メッシュを採用した。管軸方向については、等間隔格子とし、シリンダ内径を参照長さとして無次元化した。

Fig.3 Mesh configuration for numerical analysis

4.3 移動境界条件 モデルダンパー実験では固定された(静止した)シリンダ内をピストンが与えられた速度で運動するため、これを数値解析で実行する場合、ピストンの固体壁面位置を時々刻々変化させる必要がある。まず、現時間ステップにおいて、速度および圧力の収束解が得られるまで反復計算を行った後、次の時間ステップへ進行する。この時ピストン固体壁が計算格子を一つ隣へ移動し、その位置における新たな境界条件を付与することで移動境界を実現する。本研究では流体に粘性が存在するため no-slip の条件を考え、ピストン上下

面に隣接するセルの z 方向速度成分はピストン速度として定義した。以下に境界条件を示す。

シリンダ内壁面 : $u = 0, v = 0$

ピストン上下面 : $u = U_p$

ピストンおよびロッド側面 : $u = U_p$

4.4 解析条件 モデルダンパー実験と同条件を設定した。

電場 $E = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 \text{ kV/mm}$

ピストン速度 $U_p = 20, 60, 100 \text{ mm/s}$

アスペクト比 $As = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0$

5. 結果および考察

5.1 ピストン速度の比較

Table1. Response time of pressure difference ($As = 1.0$)

E [kV/mm]		0.0	0.5	1.0
Response time	$U_p = 20 \text{ mm/s}$	6.0	7.1	7.5
constant λ_t [sec]	$U_p = 60 \text{ mm/s}$	4.8	6.0	6.4

(a) $U_p = 20 \text{ mm/s}$

(b) $U_p = 60 \text{ mm/s}$

Fig.4 Transient characteristics of pressure difference ($As = 1.0$)

5.1.1 圧力応答時間 図 4(a),(b)は、それぞれ対応する数値解析結果として $As = 1.0$ における定速運動での代表的計測結果として $U_p = 20 \text{ mm/s}$, $U_p = 60 \text{ mm/s}$ の圧力応答特性を示しており、図 5 はそれぞれに対応する数値解析結果として $As = 1.0$ における各電場、ピス

トン速度条件下におけるシリンダ内部の流れ場の数値解析結果を示す。また、表 1 に図 4 の結果として各ピストン速度における圧力が定常に達するまでの時間 (圧力応答時間 λ_t) を示す。(a) $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ における圧力応答時間は 6.0 秒となり、(b) $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ にお

Fig.5 Flow fields ($As = 1.0$)

ける圧力応答時間は 4.8 秒となる。ここで、本研究では圧力応答時間は、定常値の約 99% に達する時間とした。この条件における流れ場を示した図 5(i) と (ii) を比較すると、ピストン移動速度が速いほど急激な流れの変化が生じている様子が確認できる。これはピストン始動よりシリンダ内の流れ場、シリンダ内のピストン上下空間における流れパターンの形成がそれぞれのピストン移動速度に依存するものである。また電場が上昇するほど、ピストン速度のステップ立ち上げに対する圧力応答時間は増加することが示された。例えば、図 4(b) に示されるように、 $E = 1.0 \text{ kV/mm}$ の印加電場では圧力応答時間は $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ (無電場) に対して約

1.3 倍となることが分かる。これは、図 5(iii)に示すように、同じピストン速度においても電場を印加するに従って、ピストン-シリンダ間隙部における粘度が上昇し、流動抵抗が増加することで圧力伝達特性が変化し、流れの発達が遅延される事が考えられる。さらに、その傾向はピストン速度が小さいほど大きく現れることが分かった。これは必ず速度の上昇に伴って、粘度が減少する *shear-thinning* 性が寄与するためであると考えられる。すなわち、発達時間に対して印加電場の上昇がモデルダンパーの圧力応答特性に大きく影響することが分かった。今回の数値解析でも差圧が一定になるまでには、実験で観測された分に相当する時間がかかることが確認された。また、本研究では、クラスター形成など ER 流体の粒子の緩和時間は msec. のオーダーであるとする⁷⁾、流体の発達時間は 3 オーダーほど高く、緩和過程における現象への寄与は無視できるものとする。

5.1.2 定常圧力値 各ピストン速度に対応する差圧の定常値はピストン速度が速いほど大きくなる。これは前述（差圧近似式の導出）に示されるようにピストンとシリンダ壁のせん断応力がせん断速度に依存するため、ピストン速度の上昇に伴い、せん断速度が上昇するためである。また、電場の上昇に伴い、差圧の値も上昇することが図 4 から分かる。これはシリンダとピストン壁面におけるせん断応力が電場の増加とともにビンガム流体的に上昇するためである。

5.2 アスペクト比の比較

5.2.1 圧力応答時間 図 6 は $U_p = 20 \text{ mm/s}$ におけるアスペクト比が 0.25 の圧力応答特性の計測結果を示したものである。図 4(a)と図 6 に見られるように、同一電場条件およびピストン移動速度条件において、アスペクト比による圧力応答時間の変化が生じないことがわかる。例えば、図 4(a) $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ における圧力応答時間は 6.0 秒となり、図 6 $E = 0.0 \text{ kV/mm}$ における圧力応答時間も 6.0 秒である。この条件における流れ場を示した図 5(i)と図 7 を比較すると、ピストンの長さ分だけ流れ場の位置がずれるものの、ほぼ同一の流れ場が形成されていることが確認できる。これはシリンダ上下端付近の流れ場とピストン周辺の流れ場が干渉し合わない限り、アスペクト比の変化がピストン-シリンダ間隙以外の流れ場形成に影響を及ぼさないためである。これは、いずれのアスペクト比条件においても同様の傾向を示す事が確認された。すなわち、発達時間に対してピストンのアス

ペクト比が圧力応答時間に影響を及ぼさないことが分かった。

Fig.6 Transient characteristics of pressure difference ($As = 0.25$)

Fig.7 Flow fields ($As = 0.25$)

5.2.2 定常圧力値 アスペクト比が小さいほど差圧の定常値は小さくなる。一部のピストン速度が速い条件を除き、アスペクト比と差圧の値には比例関係が成立することが確認された。これは前述（差圧理論近似式の導出）に示されるようにピストンとシリンダ壁のせん断応力が作用する面積に依存するため、アスペクト比の低下に伴い、ピストン側面に働くせん断力が減少するためである。

5.3 差圧定常値比較

5.3.1 近似値との比較 差圧の定常値に対して、図 8 に ER 流体をビンガム流体として求めた理論近似値と実験値の比較を示す。図 9 は無電場時におけるピストン-シリンダ間隙部の速度分布解析結果を示しており、各位置 P_i （ピストン前端からの距離）における速度分布を模式的に示したものである。図 8(i)から分かるようにアスペクト比が大きく、ピストン速度が遅い場合には、近似値と実験値は比較的良好一致を示すことが分かる。このことからこれらの実験範囲にお

いては、本研究に用いた ER 流体をビンガム流体として扱った 1 次元近似理論式の妥当性が確かめられた。ただし、ピストン速度が大きい $Up=100\text{mm/s}$ の条件では、最大 17% の相対差が生じた。さらに図 8(ii) に示すアスペクト比が小さい条件ではこの傾向が更に顕著に現れ、ピストン速度 $Up=100\text{mm/s}$ の条件では実験結果が近似値を約 39% 上回った。その他の条件でも同様

Fig. 8 Comparison between analytical approximation and experiments

の結果が得られており、アスペクト比が小さく、ピストン速度が大きくなるほど近似値と実験値の乖離が大きくなる事が確認された。一方、電場条件によって乖離幅は変化を示しておらず、粘度の変化と差異の生じた原因とは無関係であることが分かった。ここで、近似値と実験値での大きな差異が生じた理由として、ピストン運動時における後流渦の影響が考えられるものの、これは前節 (5.2.1) で数値解析結果を踏まえて述べたとおり、アスペクト比の違いが流れ場の形成に及ぼす影響は非常に小さいことが確認されている。すなわち、渦形成などの流れのパターンが圧力の差異に影響を与えた可能性は非常に低いと考えられる。次に、ピストン-シリンダ間隙部における速度分布に着目す

Fig. 9 Velocity distribution in gap space ($Up=60\text{mm/s}$)

Fig. 10 Comparison between numerical results and experiments

ると、図 9(i) に示されるようにアスペクト比が大きい条件においてはピストン前端から 5mm 付近以降で速度分布が一致する (流れの発達区間 $L_d=5\text{mm}$) のに対して、図 9(ii) のアスペクト比が小さい条件においては

全ての位置で速度分布が一致しない事を確認した。すなわち、アスペクト比が小さいピストン表面においては、発達流れは十分に存在しないことが分かった。すなわち、本研究で提案した近似式は十分発達した流れの仮定の下で求められたので、間隙部分に生じる流れが十分に発達するまでの距離がピストンに存在しない場合では、この仮定が成立せず、近似値と乖離する傾向が見られるものと考えられる。

5.3.2 解析結果との比較 同様にして差圧の定常値に対して、図 10 に数値解析により計算した結果と実験値の比較を示す。図 10(i), (ii)に示されるように両者の間には良い一致が得られた。すなわち、ピストン運動時の差圧を把握するのにピストン-シリンダ間隙部における 1 次元流れを考慮するだけでは一部の試験条件を除き不十分であり、2 次元方向でシリンダ内部を一つの系として計算する必要がある。

6. 結 言

本研究により、ER 流体を用いたモデルダンパーにおいて以下の結論を得た。

1. 電場を加えることで流動抵抗が大幅に増加し、差圧の値が増加することを確認した。
2. 電場印加時に非常に緩慢な流れ場が形成され、ピストン速度をステップ的に立ち上げた時の圧力応答時間が長くなることを確認した。
3. アスペクト比の違いが流れ場の形成に及ぼす影響は非常に小さく、応答時間にも関与しない事を確認した。

4. 圧力特性を評価する場合、ピストン-シリンダ間隙部における 1 次元流れを考慮するだけでは不十分であり、2 次元方向でシリンダ内部を一つの系として計算する必要がある。

謝 辞

本研究の遂行には、文部科学研究費（基盤研究 C）の補助を得た。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- (1) Nakae, T., Rheology Engineering and the Applied Technology, Fujitec Corporation, (2000), pp.781~786.
- (2) Takesue, N., et al., ER Effects of Homogeneous ER Fluid on One-Sided Pattern Electrodes, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.69, No.684, (2003-4), pp.2011-2017.
- (3) S.B.Choi et al. Control characteristics of a continuously variable ER damper, Mechatronics 8 (1998), pp.143-161.
- (4) Tada, S. and Kabetani, N., Hydrodynamic Behavior of Electrorheological Fluids, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.63, No.613, (1997-9), pp.2985-2992.
- (5) Yamaguchi, H. et al. Pressure characteristics of ER Damper with Different Piston Velocity, International Journal of Modern Physics B, (2005), in press.
- (6) Suhas V. Patankar, NUMERICAL HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW, Monikita Shuppan Co., Ltd., (1985), pp.116-142.
- (7) Koyama, K. Application & Development of Electro Rheological Fluid, CMC Publishing CO., LTD. pp.11-13.