片側パターン電極における均一系 ER 流体の ER 効果* (第3報, 粘性概算法の提案)

武居 直行^{*1}, 古 荘 純 次^{*1}, 折 原 宏^{*2}
井 上 昭 夫^{*3}, 吉 村 一 郎^{*4}

ER Effects of Homogeneous ER Fluid on One-Sided Pattern Electrodes (3rd Report, Proposal of Viscosity Calculation Method)

Naoyuki TAKESUE^{*5}, Junji FURUSHO, Hiroshi ORIHARA,
Akio INOUE and Ichiro YOSHIMURA

^{*5} Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

The ER (electro-rheological) fluid is a substance that can change its apparent viscosity by applying an electric field. We have proposed one-sided pattern electrodes that have some advantages. Then, we have shown the ER effects of a homogeneous ER fluid on the proposed pattern electrodes experimentally. In this paper, we consider a calculation method for the viscosity by using FEM. The relationship between the configurations and viscosity is investigated.

Key Words: Homogeneous ER Fluid, ER Effect, Pattern Electrodes, Electric Field, Rheology

1. は じ め に

ER 流体は印加する電場によって見かけ上の粘性が変化する流体である^{(1)~(4)}。この ER 効果を利用して、ダンパやクラッチ、アクチュエータなど様々なメカトロニクス機器が開発・研究されている^{(5)~(12)}。これらの研究では、対向した電極間に ER 流体が充填されており、その電極間に印加する電場により、ER 流体のレオロジー特性を制御している。一般に、十分な ER 効果を得るには、数 [kV/mm] の電場が必要となる。たとえば電極間ギャップが 1 [mm] のときには、電流値は小さいものの数 [kV] の高電圧電源が必要となるが、電圧を下げるため電極間ギャップを狭くすると電極同士の接触が起こりやすくなる。また、せん断モードで

対向する電極を用いる場合、可動部側への配線が必要となるため、スリッリングやブラシなどの使用も考慮しなければならない。

そこで、筆者らは第1報⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾において片側パターン電極を提案し、均一系 ER 流体の ER 効果の発現について実験的に示した。片側パターン電極では、電極間の接触の問題がなく電極間隙を狭くでき、印加電圧を低くできるほか、移動体への配線が不要となり、メンテナンスなどの面でも有利であると考えられる。

第2報⁽¹⁵⁾では、4種類の電極構成について考え、電場解析結果と実験結果の比較から、電極構成による ER 効果の関係について考察した。また、別のタイプの均一系 ER 流体においても片側電極上での ER 効果を確認した。

本論文では、電場解析の結果を用いることにより、片側電極におけるせん断応力の概略値を求める方法を提案する。この概算法により、効率的な電極寸法を数値計算により求めることが可能となる。それにより、片側パターン電極による ER 流体を用いたメカトロニクス機器の設計開発に有用となる。

以下に本論文の構成を示す。第2章では、ER 流体

* 原稿受付 2002 年 11 月 13 日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院工学研究科 (☎ 565-0871 吹田市山田丘 2-1)。

^{*2} 名古屋大学理工科学総合研究センター (☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。

^{*3} 旭化成(株)電子応用研究所 (☎ 416-8501 富士市鮫島 2-1)。

^{*4} シャープ(株) (☎ 581-8585 八尾市北亀井町 3-1-72)。

E-mail: furusho@mech.eng.osaka-u.ac.jp

について概説する。3章では、片側パターン電極の概念について述べる。4章において粘性概算法を提案する。5章では、これまでの実験結果とも比較しながら、電極寸法による粘性力の影響について考察する。最後に6章で本論文を総括する。

2. ER 流体 (Electro-Rheological Fluid)

2.1 ER 流体の種類 ER 流体は、電気粘性流体とも呼ばれており、その名の通り、電場の強さに応じて見かけ上の粘性（レオロジー特性）が変化する流体である。ER 流体には大きく分けて、粒子分散系と均一系がある。粒子分散系 ER 流体は、絶縁油の中に微粒子を分散させたもので、電場を印加すると、粒子が誘電分極しクラスタを形成することによりレオロジー特性が変化する。一般に ER 流体というはこのタイプの流体のことを指す。

一方、低分子液晶や高分子液晶からなる均一系 ER 流体は、粒子系のような粒子がないため沈降や凝集などの問題がない。従来、このタイプの流体の ER 効果はそれほど大きなものではなかった。しかし、高分子液晶である側鎖型ポリシロキサン液晶 (LCP: Liquid Crystalline Polymer) をポリジメチルシロキサン (DMS: Polydimethylsiloxane, 一般にいうシリコン油) で希釈した流体において大きな ER 効果が発現することが井上⁽⁴⁾により見出された。

2.2 使用する高分子液晶系 ER 流体 本研究ではタイプ A (第2報⁽¹⁵⁾参照) の高分子液晶系 ER 流体を用いる。そのせん断応力-せん断速度特性を図1にそれぞれ示す。

Fig. 1 Characteristics of type A of ER fluid

3. 片側パターン電極

3.1 片側パターン電極の概念 従来, ER 流体に電場を印加する際は, 図 2 (a) のように対向する上下円盤の電極間に電圧をかけていた。これに対して, 筆者らは図 2 (b) に示すように, 上側円盤には電極を配さず絶縁体とし, 下側円盤に形成したパターン電極に電場を印加することを考えた。これを片側パターン電極と呼ぶ。片側パターン電極を用いる場合, 移動体への配線が不要になり, また電極間ギャップも製作時に固定できるようになるため, メンテナンスなどの面で有利であると考えられる。

Fig. 2 Concept chart of pattern electrodes

3.2 パターン電極の形状 前報までに, 片側パターン電極のパターン形状として, 同心円形パターン電極と放射形パターン電極を考えてきた。しかし放射形パターン電極における ER 効果は, 高せん断速度において低下してしまった。そこで, 本論文では実用上有用と思われる同心円形パターン電極 (図 3) のみを考える。

円盤の中心部において発生するトルクは, 円盤全体におけるトルクに比べ小さいため, 中心部における電極パターンは省略した。

Fig. 3 Model of concentric circles form of pattern electrodes

の太線内の領域) が繰り返されるものとして計算する。要素のメッシュサイズは 10 [μm] とした (計算領域が大きい場合には 20 [μm] とした)。また, 計算簡略化のため, 電極厚さを実際の 35 [μm] からメッシュの整数倍の 40 [μm] とした。

4.4 ER 流体の粘度 均一系 ER 流体は電場によって見かけの粘度が変化する。その発現機構は複雑で, 厳密には一様ではないが, 一様のものとする。また, せん断応力-せん断速度線図も線形ではないが, ここでは線形であると仮定し粘度を求めた。

両側電極における実験の結果より, 電場強度を変化させたときの粘度の変化は図 7 のように得られた。ただし, 粘度の計算は 150 [s⁻¹] (円盤角速度 1 [rad/s]) におけるせん断応力 (トルク) から求めた。

電場解析の結果およびこの粘度-電場線図から, 各要素の粘度を見積もる。

Fig. 7 Viscosity vs. electric field diagram

4.5 列要素の粘性計算 さまざまな粘度を持つ要素が集まったときの全体の等価粘度およびせん断応力について考える。ただし, 4.2 節で仮定したように, 横方向に隣り合う要素間での相互作用は無視できるものと仮定する。

そこで, 粘度 η_i ($i = 1, 2, \dots, n$) をもつ流体が図 8 左図のように厚さ h で上下方向に積層を成している状態を考える。このときの全体の等価粘度 η_{eq} およびせん断応力 τ_{eq} を求めることを考える。

第 i 層におけるせん断応力を τ_i とすると, τ_i は粘度 η_i とせん断速度 $\dot{\gamma}_i$ を用いて次式のように表される。

$$\tau_i = \eta_i \dot{\gamma}_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

せん断応力 τ_i はいずれの層においても等しいため, 次式が成り立つ。

Fig. 8 Model for equivalent viscosity of column element

$$\tau_{eq} = \eta_1 \dot{\gamma}_1 = \eta_2 \dot{\gamma}_2 = \dots = \eta_n \dot{\gamma}_n \quad \dots \dots \dots (2)$$

この式から, $\dot{\gamma}_i$ は, 次のように表される。

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{\tau_{eq}}{\eta_1}, \quad \dot{\gamma}_2 = \frac{\tau_{eq}}{\eta_2}, \dots, \quad \dot{\gamma}_n = \frac{\tau_{eq}}{\eta_n} \quad \dots \dots \dots (3)$$

第 i 層の上側の速度を u_i とすると, 第 i 層におけるせん断速度 $\dot{\gamma}$ は次式となる。

$$\dot{\gamma}_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{h} \quad \dots \dots \dots (4)$$

式 (3) を用いて, 上式の和を求めると, 次式となる。

$$\sum_{i=1}^n \dot{\gamma}_i = \tau_{eq} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i} = \frac{U}{h} \quad \dots \dots \dots (5)$$

まとめると,

$$\tau_{eq} = \eta_{eq} \cdot \frac{U}{H} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ただし,

$$\eta_{eq} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i}} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$H = nh \quad \dots \dots \dots (8)$$

各要素の粘度 η_i は前節より求まっているため, 等価粘度 η_{eq} およびせん断応力 τ_{eq} が算出できる。

4.6 合計トルク計算 前項で求めた等価粘度から, 半径 r および回転角速度 ω を考慮して全体のトルク T を求める。モデル図を図 9 に示す。

式 (6) より, 半径 r_j の微小幅 Δr におけるせん断応力 τ_{eq-j} は次式のように表せる。

$$\tau_{eq-j} = \eta_{eq-j} \cdot \frac{r_j \omega}{H} \quad \dots \dots \dots (9)$$

Fig. 9 Model for total torque calculation

よって、微小幅 1 周におけるトルクは次式となる。

$$T_j = 2\pi r_j^2 \tau_{eq-j} \Delta r \quad \dots\dots\dots (10)$$

和をとることにより、全体のトルクは次のように求まる。

$$T = \sum_{j=1}^m T_j = 2\pi \sum_{j=1}^m r_j^2 \tau_{eq-j} h \quad \dots\dots\dots (11)$$

5. 実験および概算結果の比較考察

前報までの実験結果および本論文で提案した数値計算法の結果を比較考察する。

5.1 電極配置による比較 図 10 に両側円盤電極、準両側電極、対向接地導体型片側電極および対向絶縁型片側電極における実験結果をまとめて示す⁽¹⁵⁾。各電極構成の説明は前報⁽¹⁵⁾を参照されたい。円盤間ギャップは 0.2 [mm] とし、印加電場が 2 [kV/mm] の場合の実験結果である。横軸は円盤外径におけるせん断速度で、縦軸は計測トルクから算出したせん断応力である。せん断速度 150 [s⁻¹] におけるそれぞれのせん断応力を表 1 に示す。

つぎに、数値計算シミュレーションの結果を示す。電界強度マップを図 11～14 に示す。概算法による数値解を表 2 に示す。

完全に一致しているわけではないが、本手法により、せん断応力の傾向を知ることができる。そこでつぎに、電極寸法等を変化させた比較を行う。

Fig. 10 Experimental results

Table 1 Experimental shear stresses at 150 [s⁻¹]

Electrode configuration	Shear Stress [Pa]
Both-sided electrodes	4690
Quasi-both-sided electrodes	3880
One-sided electrodes with opposed earthing conductor	3220
One-sided pattern electrodes	1700

Fig. 11 Map of electric field strength (both-sided)

Fig. 12 Map of electric field strength (quasi-both-sided)

Fig. 13 Map of electric field strength (opposed earthing conductor)

Fig. 14 Map of electric field strength
(EW:200,EG:200,DG:200,ET:40)

Table 2 Simulated shear stresses at 150 [s⁻¹]

Electrode configuration	Shear Stress [Pa]
Both-sided electrodes	4680
Quasi-both-sided electrodes	3730
One-sided electrodes with opposed earthing conductor	2800
One-sided pattern electrodes	2370

5.2 円盤間ギャップによる比較 円盤間ギャップを 100～1000 [μm] で変化させたときのせん断応力の比較を行う。実験結果を白丸で、シミュレーション結果を黒丸で、それぞれ図 15 に示す。円盤間ギャップが大きい場合はよく近似されているといえるが、円盤間ギャップが小さくなると双方の差が大きくなっている。

Fig. 15 Dependency of disk gap

誤差の生じる要因として以下のものが挙げられる。まず、パターン形状において、概算法では完全な同心円と仮定して計算しているが、実際には図3のように円周方向で途切れている箇所がある。つまり、部分的に放射形パターン⁽¹³⁾のようになっており、比較を行っているせん断速度ではせん断応力が低下する傾向⁽¹³⁾にあると考えられる。つぎに、上下円盤の組立・取付誤差、および回転偏心の影響がある。特に円盤間ギャップが小さいところでは、円盤間ギャップに対するせん断力の変化の割合(傾き)が大きくなっているため、装置の誤差が大きな影響を与えると見える。また、それ以外にはトルクの計測誤差、実験温度などの影響もあると思われる。概算法においては、前述したような諸仮定、モデル化などに起因したものが考えられる。

しかし、このような誤差は生じるものの、実験および数値計算ともに、せん断応力が増加する傾向を示していることが確認でき、定性的にはパターン電極の特性を考察することが可能と考えられる。定量的な精度をより向上させるためには実験装置および概算法の今後の改良が必要となるが、円盤間ギャップが微小な場合にはこのような誤差が生じるということを考慮しながら以下の検討を行う。

つぎに、円盤間ギャップが大きくなることによりせん断応力が低下するという現象を電界強度マップから考察する。図16に一例として円盤間ギャップが400 μm のときの電界強度マップを示す。円盤間ギャップが200 μm の図14と比較して分かるように、上下円盤間ギャップが大きくなることにより、上側円盤付近(図16では垂直方向0.3~0.4 [mm]の領域)で電場の弱い(色の薄い)層が形成されている。このように電場の弱い部分では粘度も低いため、この弱い層ですべりやすくなり、せん断応力が低下すると考えられる。

Fig. 16 Map of electric field strength
(EW:200,EG:200,DG:400,ET:40)

5.3 電極厚さによる比較 電極厚さを0~80 μm と変化させてシミュレーションを行った場合のせん断応力概算値を図17に示す。

電極厚さを変化させても、せん断応力にはあまり影響がないといえるが、電極厚さが小さいほど、若干ながらせん断応力が大きくなることが予想される。

Fig. 17 Dependency of electrode thickness

Fig. 18 Dependency of electrode width and gap

5.4 電極幅と電極間ギャップによる比較

5.4.1 電場一定の場合 公称印加電場(印加電圧/電極間ギャップ)が2 [kV/mm]で一定とする。電極幅および電極間ギャップを50, 100, 200, 300, 400 μm とした場合のせん断応力の概算値を図18に示す。

電極幅に関しては200~300 μm でせん断応力に極大値があることがわかる。また、電極間ギャップが大きいほどせん断応力が大きくなる傾向がある。しかし、電極間ギャップが400 μm くらいになると、上昇幅が小さくなっている。また、公称印加電場が2 [kV/mm]と等しくなるように電圧を決めているため、電極間ギャップが大きいと印加電圧も高くなっていることに注意が必要である。

つぎに、電場強度分布の面から考察する。

電極幅を200 μm として、電極間ギャップが50 μm および400 μm のときの電界強度マップを図19および図20に示す。電極間ギャップが200 μm のときの電界強度マップは図14である。電極間ギャップが大きいほど強い電場が広く分布し、せん断応力が高くなる

Fig. 19 Map of electric field strength
(EW:200, EG:50, DG:200, ET:40)

Fig. 20 Map of electric field strength
(EW:200, EG:400, DG:200, ET:40)

Fig. 21 Map of electric field strength
(EW:50, EG:200, DG:200, ET:40)

Fig. 22 Map of electric field strength
(EW:400, EG:200, DG:200, ET:40)

ことがわかる。

つぎに、電極間ギャップを 200 μm とし、電極幅が 50 μm および 400 μm のときの電界強度マップを図 21 および図 22 に示す。電極幅が 200 μm のときは図 14 に示した。電極幅が小さいとき、電極間における電場強度は強くなっているが、上側円盤直下に電場の弱い層が広がってしまうことが確認できる。また、電極幅が大きすぎると電極直上に電場の弱い部分ができてしまい、せん断応力が低下すると考えられる。

5.4.2 電圧一定の場合 つぎに、印加電圧を 100 [V] で一定として比較する。電極幅および電極間ギャップを 50, 100, 200, 300, 400 μm とした場合のせん断応力の概算値を図 23 に示す。

電極幅に関しては 200~300 μm でせん断応力に極大値があることがわかる。また、この領域では電極間ギャップが小さいほどせん断応力が大きくなる傾向がある。これは、電圧を一定としているため、電極間ギャップが小さいときに電場が高くなることと関係している。一方、電極幅が小さいところでは逆に電極間ギャップが小さいほどせん断応力も小さくなっている。

5.5 効果的な電極寸法に対する考察 実験・計算結果および電界強度マップをもとに、片側パターン電極に適している電極寸法について考察した。以下に、各寸法についてまとめる。

Fig. 23 Dependency of electrode width and gap (constant voltage $V=100[\text{V}]$)

- (1) 電極幅 EW に対するせん断力の関係は、必ずしも単調関数というものではなく、ある範囲で極大値をもつと予想される。本結果からは 200~300 μm 程度で極大になると予想される。
- (2) 電極間ギャップ EG は印加条件により若干異なる。電場一定で考えると、印加電圧が許される程度に大きい（たとえば 200~400 μm ）方がよいといえる。電圧一定で考えると、電極幅が 200 μm 以上の領域では、絶縁破壊を考慮しながらなるべく小さく（たとえば 50~100 μm ）するとよい。
- (3) 円盤間ギャップ DG は製作・組立精度内であるべく小さく（たとえば 100~200 μm ）することが望ましい。ただし、本結果からも言えるように、円盤間ギャップが小さい場合のせん断応力はその精度に敏感に影響を受ける可能性があり注意が必要である。
- (4) 電極厚さ ET に関してはその影響は少ないが、薄く（通常のプリント基板では 18, 35 μm 等）すると若干の効果が期待できる。

6. ま と め

- (1) 電場解析の結果から、片側電極におけるせん断応力の概算法を提案した。この概算法により、片側パターン電極の ER 効果の傾向を知ることができる。
- (2) 今までに行ってきたいくつかの実験結果と数値計算結果を比較して、その傾向をつかむには十分な結果が得られた。
- (3) 電極寸法等を変化させた場合について数値計算を行い、効果的な電極寸法の範囲を概観した。

最後に、本研究の一部は、科学研究費（基盤研究 (B) No.14350131）によって遂行された。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 古荘純次, ER 流体を用いたメカトロニクス機器の制御 (展望解説), 計測と制御 (計測自動制御学会誌), **34-9** (1995), 687-691.
- (2) 古荘純次, ER 流体を用いたメカトロニクスシステム (解説), フリッドパワーシステム (日本油空圧学会誌), **32-6** (2001), 390-395.
- (3) 井上昭夫, 均一系 ER 流体の開発動向 (解説), 計測と制御 (計測自動制御学会誌), **34-9** (1995), 698-701.
- (4) Inoue, A. and Maniwa, S., Electrorheological Effect of Liquid Crystalline Polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, **55** (1995), 113-118.
- (5) 武居直行, 章国光, 坂口正道, 古荘純次, 清沢芳秀, ER ダンパ内蔵型アクチュエータの開発およびその基礎的特性に関する検討, 電気学会論文誌, **120-D-1** (2000), 29-37.
- (6) Takesue, N., Zhang, G., Furusho, J., Sakaguchi, M., Precise Position Control of Robot Arms Using a Homogeneous ER Fluid, *IEEE Control Systems Magazine*, **19-2** (1999), 55-61.
- (7) 坂口正道, 章国光, 古荘純次, 両方向回転形 ER アクチュエータのモデリングと運動制御, 機論, **66-645**, C(2000), 1551-1558.
- (8) Furusho, J., Zhang, G. and Sakaguchi, M., Vibration Suppression Control of Robot Arms Using a Homogeneous-Type Electrorheological Fluid, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **4** (1997), 3441-3448.
- (9) 富澤元一, 青山藤詞郎, 田中克敏, 桜井宏治, ER 流体ダンパによる工作機械工具系の振動抑制, 機論, **64-622**, C(1998), 2287-2294.
- (10) 杉本旭, 電気粘性流体 (ERF) を用いた順応型アクチュエータに関する研究, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-96 (1997), 1-9.
- (11) 中野政身, 米川琢哉, 分散系 ER 流体を用いたアクティブダンパとその除振制御への応用, 機論, **62-593**, C(1996), 33-40.
- (12) 森下信, 液晶を用いた可変減衰ダンパ, 機論, **61-581**, C(1995), 43-48.
- (13) 武居直行, 古荘純次, 坂口正道, 井上昭夫, 片側パターン電極における均一系 ER 流体の ER 効果 (第 1 報, その概念と基礎特性), 機論, **67-653**, C(2001), 73-78.
- (14) Takesue, N., Furusho, J. and Inoue, A., Electrorheological Effects of Liquid Crystalline Polymers on One-Sided Pattern Electrodes, *Journal of Applied Physics*, **91-3**, (2002), 1618-1623.
- (15) 武居直行, 古荘純次, 井上昭夫, 吉村一郎, 片側パターン電極における均一系 ER 流体の ER 効果 (第 2 報, 電極構成による ER 効果の比較考察と均一系 ER 流体の種類による特性比較), 機論, **69-684**, C(2003), 2011-2017.
- (16) Inoue, A., Ide, Y., Maniwa, S., Yamada, H. and Oda, H., Properties of ER Fluids Comprised of Liquid Crystalline Polymers, *International Journal of Modern Physics B*, **13-14**, 15 & 16 (1999), 1966-1974.
- (17) Orihara, H., Doi, M. and Ishibashi, Y., Two Types of Mechanism of Electrorheological Effect in Polymer Blends, *International Journal of Modern Physics B*, **13-14**, 15 & 16 (1999), 1949-1955.
- (18) Kito, H., Tajiri, K., Orihara, H., Ishibashi Y., Doi, M. and Inoue, A.: A Novel mechanism of Electrorheological effect in polymer blends, *International Journal of Modern Physics B*, **13-14**, 15 & 16 (1999), 1983-1989.