ER ゲルを適用した力伝達素子における片側電極設計*

柿 沼 康 弘^{*1}, 渡 邊 拓 昭^{*2}
青 山 藤 詞 郎^{*3}, 安 齋 秀 伸^{*4}

Design of One-sided Electrodes on ERG Force Transfer Device

Yasuhiro KAKINUMA^{*5}, Hiroaki WATANABE,
Tojiro AOYAMA and Hidenobu ANZAI^{*5} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Electro-Rheological Gel (ERG) is a functional material which changes its surface frictional property according to applied electric field. The one-sided pattern electrodes is a very useful idea to free sliding or rotating parts from wiring arrangements and contribute to extend the application field for ER materials. Application device of ERG is classified into two main groups; linear motion type and rotating motion type. In order to obtain the high ERG effect in the applications, it is necessary to design the pattern of one-sided electrode in which electric field is efficiently applied to ERG. In this study, equivalent circuit model of one-sided pattern electrodes on condition of using the opposite metal plate is proposed for these types of application. On basis of this proposed model, the one-sided pattern electrodes are designed and the validity of this electrode design method using the proposed model is verified by means of a numerical and experimental analysis. The general-purpose tool for the analysis of electric and magnetic field 'ANSYS 9.0' is used.

Key Words: ER Fluid, Functional Material, Electrode Design, Mechanical Element

1. 緒 言

機能性流体の一つに ER 流体がある。ER 流体とは電界を印加することにより粘弾性を高速かつ可逆的に変化させることができる流体の総称で、その効果を ER 効果と呼ぶ⁽¹⁾⁽²⁾。著者らは、粒子分散系 ER 流体をゲル化することで印加電界により、表面の摩擦特性が変化する機能性材料 ER ゲル (ERG) を開発することに成功した。ER 流体の ER 効果と区別するために、ERG の表面摩擦抵抗が電界により変化する効果を ERG 効果と呼ぶことにする。ERG 効果のメカニズムは、ER 流体における粒子鎖形成論⁽³⁾に基づく粘弾性変化メカニズムとは異なり、電界の印加に伴い、ERG 表面で粘着現象が生じることに起因する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ERG 効果を得るには、ERG に電界を印加する必要があるため、図 1(a) に示すように平行平板電極でそれを挟み込むような構造をとる必要があった。しかし回転部をもつデバイスに適用する際には、回転電極側にもス

リップリングなどを介して配線を施す必要があるため構造が複雑化するとといった問題が生じる。そこでこの問題を解決するために、電極を片側にのみ配置した片側構造電極⁽⁶⁾⁽⁷⁾の適用を試みた。図 1(b) に片側電極の概念図を示す。片側電極においても ERG 内に電場が発生するため ERG 効果を得ることができ、この電極構造をとることで対向材料の配線が不要になり、機械要素へ適用する際 ERG のはん用性が高まる。

従来の両側電極において ERG 内で発生する電界は単純であったが、片側電極においてそれは複雑化し、電極形状により電界分布は大きく変化する。そのため、電界強度に依存し発生する ERG 効果も片側電極形状に応じて大きく変化すると考えられる。しかし、ER 流体や ER ゲルの研究において片側電極形状と電

Fig. 1 Concept chart of both-sided electrodes and one-sided electrodes

* 原稿受付 2007 年 3 月 19 日。

^{*1} 正員, 慶應義塾大学理工学部 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

^{*2} 慶應義塾大学大学院理工学研究科。

^{*3} 正員, フェロー, 慶應義塾大学理工学部。

^{*4} 藤倉化成 (株) (〒327-0816 佐野市栄町 12-1)。

E-mail: kakinuma@sd.keio.ac.jp

界分布およびER・ERG効果の関係を明らかにし、その最適電極形状を理論的に考察した研究はこれまでにない。そこで本研究では、片側電極を適用したERGを力伝達素子へ応用することを想定し、対向材料に導電材料を用いた際に最も高いERG効果が得られる電極形状の理論的設計法を提案した。本論文では、実験および電場解析を通して提案した設計法により得られた最適片側電極形状の妥当性を検証したので、ここで報告する。

2. ERGの力伝達原理

ERGは、シリコーンゲル中に平均粒子径 $15\mu\text{m}$ のER粒子を分散した複合材料である(図2)。ERG効果発生のメカニズムを図3に示す。下部電極にERGシートを物理的に固定し、上部電極をERGシート上にのせる。無電界時には、ゲル表面より突起している滑り特性の良いER粒子が上部電極を支えている。上部電極とERG表面間の滑り抵抗は非常に小さいため、上部電極に作用した力は下部電極には伝達されない。その一方で電界を印加すると、誘電分極した粒子は互いに引き合うことでゲル中心方向に微小変位を生じる。この結果、表面に突起していたER粒子はゲル内部へと沈み込み、その作用によって表面にゲルが隆起する現象が起こる⁽⁶⁾。シリコーンゲルは、高い自己粘着性を有するため、表面に隆起したゲル部分とこれに接触した上部電極表面は粘着する。そのため、上部電極に滑り方向の力が作用した場合、その力はゲルの粘

Fig. 2 Surface of ERG

(a) Without electric field (b) With electric field

Fig. 3 Mechanism of ERG effect

着力により下部電極へと伝達される。ここで粘着力とは、接触面積およびせん断速度と比例関係にある力であり、垂直抗力に依存する摩擦力とは狭義では区別されるが、本研究では広義の摩擦力として粘着力を含めて摩擦力として扱う。ゲル部分との接触面積は、印加電界強度に比例して増大するため、最大静止摩擦力も電界強度に比例して増大する。最大静止摩擦力とは、上部電極がERG表面から滑り出す直前の摩擦力のことである。

次に、ERGに電界を印加した際に発生する摩擦力とせん断距離の関係を図4に示す。上部電極がERG表面から滑り出す直前のせん断距離を降伏点と定義すると、降伏点まではERGの弾性変形により線形的にせん断抵抗力が生じる。一方、せん断距離が降伏点を超えると滑り摩擦により一定のせん断抵抗力が生じる。ただし、せん断速度に応じてERGの摩擦力は変化することが確認されている。

3. 片側電極における電場分布

ERGに片側電極を適用した場合、対向する材料が導電体か絶縁体かにより、ERG内に発生する電場分布が大きく異なる。本論文では、対向材料に導電体を用いた構成を対向導電体形、絶縁体を用いた構成を対向絶縁体形と呼ぶことにする。片側電極を適用する利点としてERGシートを挟んで電極に対向する部品に

Fig. 4 Relation between friction force of ERG and shear displacement

(a) Opposed conductor without earth (b) Opposed insulator

Fig. 5 Relation between electric lines of force and the opposed materials

配線を施す必要がないことが挙げられる。本研究においてもこの利点を生かすため、対向導電体形において対向材料である導電体には配線を施さず、外部から電氣的に独立した状態にした。図5に片側電極に電極間電位差を与えた場合における対向材料と発生電場分布の関係を示す。対向導電体形の場合、図5(a)に示すように導電材料が電極間電位差のおおよそ半分の電位をもち、それに伴い電気力線が陽極から導電体に、導電体から陰極に発生する。また、電極のエッジ付近では陽極から陰極にアーチ状に電気力線が発生する。一方、対向絶縁体形の場合、図5(b)に示すように陽極から陰極に向かってアーチ状に電気力線が発生し、このアーチの形状は対向材料の誘電率に依存する。対向絶縁体形は、対向導電体形に比べ、ERG 効果により得られる摩擦力変化の幅が小さい。

ERG をデバイスに应用する際、最も高いERG 効果を得ることのできる片側電極形状を設計する必要があるが、上述したように、対向導電体形と対向絶縁体形ではERG 内に発生する電界が大きく異なる。そのため、それぞれにおいて最適電極形状の設計手法を提案し、検討する必要がある。片側電極を適用したERG の応用デバイスとして期待される摩擦クラッチなどの力伝達素子は、ERG 効果により発生する界面摩擦力で広範囲の力を原動側から従動側へ伝達する必要がある。そのため大きなERG 効果を得ることができる対向導電体形の片側電極を適用することが望ましい。そこで本論文では、ERG を力伝達素子へ応用する際の対向導電体形片側電極の最適形状について検討した。

4. ERG 力伝達素子の種類

ERG を適用した力伝達素子の機構は、大別して直動形と回転形がある。直動形は図6(a)に示すようにERG 表面に対向材料が直線運動し、対向材料側の推進力をERG 側に伝達する機構である。直動形の特徴として、対向材料とERG 表面の滑り速度が面全体で一様である。回転形は図6(b)に示すように、原動側の対向材料が従動側のERG と接触している構造を取り、片側電極に電圧を印加することでERG 効果により摩擦力が発生し、原動側の回転トルクが従動側に伝わる機構である。回転形の特徴として、回転中心から外周に向かうに従って対向材料とERG 表面の滑り速度が増す。

直動形は力、回転形はトルクでの評価である。ERG 効果により発生する摩擦力は滑り速度に依存することから直動形と回転形ではモデルが異なるため、それぞれのタイプにおいて最適電極形状を検討した。

5. 直動形力伝達素子における最適電極設計

5.1 対向導電体形におけるERG 回路モデル

直線運動する原動側の駆動力を従動側に伝達する直動形力伝達素子にERG を応用した場合の片側電極の最適形状を考える。これまでの研究で対向材料に導電体を用いた場合、片側電極の電極幅を広く、電極間隔を狭くすることで得られるERG 効果が大きくなることが明らかとなった⁽⁸⁾。つまり、最も効果的な電極構成は幅の広い一対の電極を図7(a)のように配置したモデルと考えることができる。ここで、この一対の電極をもつ対向導電体形片側電極の回路モデルを考える。電極のエッジ付近で陽極から陰極に向かって生じるアーチ状の電界を無視すると、陽極と陰極の間に誘電体ERG、導電体平板、ERG がこの順で挟み込まれた状態ととらえることができるため、図7(a)は図7(b)に示すように二対のコンデンサを含む電気回路モデルで表すことができる。各コンデンサのギャップはERG 厚さ d 、コンデンサの電極面積はそれぞれ陽極面積 S_1 と陰極面積 S_2 に対応する。片側電極を適用したERG のERG 効果は対向材料とERG 界面の平均電界強度に依存する。回路をモデル化することにより、一対の電極をもつ片側電極では、陽極と陰極の面積比率がERG 界面の電界強度に影響することが推測される。そこで、回路モデルから理論的に電極面積比率と電界強度の関係を求め、ERG 表面の平均電界強度を最大にする電極面積比率を算出する。

5.2 ERG 回路モデルによる電極設計

ERG 効果により発生する摩擦力とERG 界面の電界強度の関

Fig. 6 Two types of ERG force transfer device

Fig. 7 Circuit model of ERG

係は線形であることが、これまでの研究で確認されている⁵⁾。また、発生する摩擦力は滑り速度に依存するが、直動形力伝達素子の場合、滑り速度はERGシート全面で一様であるため電極設計において滑り速度を考慮する必要はない。そこで、対向導電材料とERGの界面における平均電界強度を電極面積の関数として求めることで、最適電極面積比率を算出することを考える。図7に示すように片側電極に電極間電位差 V を与えたとき、対向導電材料が電位 V_i をもち、各電極に電荷 Q が蓄えられるとする。そのときの陽極側コンデンサ、および陰極側コンデンサ内の電界 E_1 、 E_2 は式(1)、(2)のように表される。

$$E_1 = (V - V_i)/d = Q/\epsilon S_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_2 = V_i/d = Q/\epsilon S_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϵ はERGの誘電率である。各電極上での電界強度は電極面積に反比例することがわかる。電位 V_i は式(1)と式(2)より、

$$V_i = \frac{S_1}{S_1 + S_2} V \quad \dots\dots\dots (3)$$

と求めることができる。これよりERG界面の平均電界強度 $\bar{E}$ は式(4)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \bar{E} &= (E_1 S_1 + E_2 S_2) / (S_1 + S_2) = \frac{2 S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2} \times \frac{V}{d} \\ &= \frac{2}{2 + (S_1/S_2 + S_2/S_1)} \times \frac{V}{d} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

($S_1/S_2 + S_2/S_1$) は相加相乗平均の関係式より式(5)の

不等式が成立する。

$$S_1/S_2 + S_2/S_1 \geq 2 \sqrt{S_1/S_2 \times S_2/S_1} = 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(4)、(5)より陽極面積 S_1 と陰極面積 S_2 が等しい条件において、平均電界強度 $\bar{E}$ が最大値 $V/2d$ をとり、得られるERG効果が最大になると予想される。

5.3 電場解析による回路モデルの検証

5.3.1 電場解析モデル 図7(b)で示した回路モデルでは、電極のエッジ付近で発生するアーチ状の電界の影響を無視していた。そこで、数値解析ソフトANSYS 9.0を用いてERG界面での平均電界強度を調べ、これと回路モデルにより算出した平均電界強度を比較することで回路モデルの妥当性を評価した。解析モデルを図8に示す。電極厚さを30 μm 、電極間隔を1 mm一定とし、陽極と陰極の電極幅の比率が10 mm : 50 mm, 20 mm : 40 mm, 30 mm : 30 mmである3種類のモデルを用意し、電場解析を行った。ここで、陽極と陰極の電極幅比が10 mm : 50 mm, 20 mm : 40 mm, 30 mm : 30 mmである3種類のモデルをそれぞれA10 C50, A20 C40, A30 C30と呼ぶことにする。ERGシートは幅70 mm、厚さ0.3 mmとした。比誘電率は空気を1, ERGを30とし、陽極および陰極への印加電圧をそれぞれ900 V, 0 Vとした。

5.3.2 電場解析結果 それぞれの解析モデルにおけるERG表面の電場強度分布を図9に示す。電極上における電場強度は、電極面積に反比例していることがわかる。電極面積に大きな偏りがあるA10 C50を見ると、電極面積が小さい陽極側の電界強度が、約2600 V/mmと非常に高くなっている。一方電極に偏りが無いA30 C30では、陽極・陰極ともに約1600 V/mmである。つまり、陽極と陰極の電極面積に偏りがある場合、電極面積の小さい電極側で電界強度が高くなり絶縁破壊しやすくなる。そのため、陽極と陰極の電極面積が同一の場合に比べ、電極間に印加できる最大電圧は低くなる。

図9の電場強度分布から求めたERG界面の平均電場強度と、式(4)より算出した平均電場強度を表1に示す。回路モデルより算出した電界強度の値は、電極面積の偏りが増すことで、数値解析で求めた値と数

Fig. 8 Analysis model of ERG on one-sided electrodes

Fig. 9 Result of electric field analysis

Table 1 Average electric field in each type of one-sided electrodes

Type of one-sided electrodes	A10C50	A20C40	A30C30
Average electric field obtained by circuit model (V/mm)	833	1333	1500
Average electric field obtained by numerical analysis (V/mm)	847	1337	1499

V/mm 程度の違いが生じるもののほぼ同値である。つまり、陽極と陰極間に生じるアーチ状の電界を無視した回路モデルでも十分に ERG 内に発生する電界は計算可能であることが明らかとなった。

次に、ERG シートの平行度が ERG 表面の電界強度に与える影響について考える。実際に製造した 70×50 mm の ERG シートにおいて ERG シート上面(対向材料接触面)と下面(片側電極張付け面)との平行度は 0.05 mm 以下である。そこで、その平行度を 0.1 mm と仮定し、それぞれの片側電極モデルにおいて電場解析を行った。A10 C50 では ERG 厚さが均一な場合の平均電界強度(表 1 参照)に対する変動量は約 10%であったが、A30 C30 における変動量は 1%未満であった。

5.4 発生摩擦力による検証

5.4.1 摩擦力測定装置 電場解析と同様の 3 種類の片側電極を用意し、各片側電極を適用した場合の ERG 効果の比較試験を行うことで、回路モデルにより得られた最適電極形状の妥当性を実験的に検証した。片側電極はプリント基板に電極パターンを感光し、エッチングすることで製作した。製作した 3 種類の片側電極を図 10 に示す。電極間隔も含めた各片側電極の有効面積は 70×50 mm とし、それぞれの電極上に同面積で厚さ 0.3 mm の ERG シートを成形した。図 11 に摩擦力測定装置を示す。ERG シート上に対向導電材料であるアルミニウム平板を置き、片側電極に電極間電位差 900 V を印加した状態でアルミニウム平板を矢印の方向に押し、そのときに発生する摩

擦力をロードセルにより、対向材料の変位を渦電流式変位計により測定した。各試験における滑り速度は $20 \mu\text{m/s}$ とした。

5.4.2 摩擦力測定結果 摩擦力測定結果を図 12 に示す。ここで、縦軸に示すせん断応力とは、測定した摩擦力を ERG シートの見掛けの接触面積(70×50 mm)で除した値と定義する。ERG は降伏現象を示す材料であることがわかる。せん断変位に対する発生せん断応力について見てみると、降伏点を越える前のせん断変位(約 $20 \mu\text{m}$)では応力が対向材料の変位に対しほぼ線形的に変化し、降伏点を越えると応力がおおむね一定となる。これは既述したとおり、降伏点までは ERG が対向材料に密着して弾性変形を生じ、降伏点を越えると ERG と対向材料面の間で滑りが発生するためである。次にせん断応力と電極形状の関係について見てみると、電極面積が等しい A30 C30 において最も大きな摩擦力が発生していることがわかる。また、片側電極の陽極と陰極の電極面積の偏りが大きくなるに従って、発生する摩擦力が小さくなることがわかる。この結果より、回路モデルにより得られた最適電極形状の妥当性が実験的にも示された。

しかし、A20 C40 における降伏点付近のせん断応力の挙動は他の二つの電極形状におけるそれと比べ傾向が異なる。これは、表面に存在する ER 粒子のばらつきや製造時の表面精度が影響したものと考えられ、降伏時に弾性領域から滑り領域に瞬時に移行せず、粘着による固定部分と滑り部分が混在し、せん断距離が増すにつれ徐々に滑り領域に移行したためだと推測される。

6. 回転力伝達素子における最適電極設計

6.1 ERG 回路モデルによる電極設計 次に原

(a) A10 C50 (b) A20 C40 (c) A30 C30

Fig. 10 One-sided electrodes with different electrode area for linear force transfer device

Fig. 11 Schematic diagram of experimental setup for measurement of friction force

Fig. 12 Result of shear stress measurement in each electrode

動側から従動側に回転力を伝える回転力伝達素子に ERG を応力する場合の片側電極の最適形状を考える。回転力伝達素子用の片側電極モデルを図 13 に示す。半径 R_1 で面積 S_1 の円盤を陽極とし、内径 $2R_1$ 、外径 $2R_2$ で面積 S_2 の環状円盤を陰極とし、 R_2 を定数、 R_1 を変数とする。計算を簡易化するために陽極と陰極の電極間隔は零とした。ERG を介して原動側と従動側のディスクがせん断する際、ERG 表面と原動側ディスクの滑り速度 v は回転中心から外周に向かい線形的に増加する。ERG 効果により発生するせん断応力 τ は電界強度 E のみならず滑り速度 v にも依存するため、式 (6) のように表すことができる。

$$\tau = aE + \beta v = aE + \beta r\omega \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 r は半径、 ω は回転角速度である。 a および β は実験より求めることができる定数である。陽極上の電界強度 E_a および陰極上の電界強度 E_c は回路モデルの理論より、式 (7)、(8) となる。

$$E_a = \frac{V}{d} \times \frac{S_2}{S_1 + S_2} = \frac{V}{d} \times \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right] \quad \cdots \cdots (7)$$

$$E_c = \frac{V}{d} \times \frac{S_1}{S_1 + S_2} = \frac{V}{d} \times \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \quad \cdots \cdots (8)$$

ここで、 V は電極間電位差、 d は ERG 厚さである。陽極と陰極の境界で電界強度が不連続になることを考慮すると伝達トルクは式 (9) となる。

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{R_1} \tau_a \cdot 2\pi r \cdot r dr + \int_{R_1}^{R_2} \tau_c \cdot 2\pi r \cdot r dr \\ &= \frac{2a\pi R_2^3 V}{3d} \times \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^5 \right] \\ &\quad + \frac{\beta\pi\omega R_2^4}{2}, \quad \left(0 < \frac{R_1}{R_2} < 1 \right) \quad \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

Fig. 13 Model of one-sided electrode for torque transfer device

Fig. 14 Theoretical curve of transferred torque (three-dimensional view)

電極半径比率 $R_1/R_2 = x$ とおき、伝達トルク T を x の関数として微分すると、式 (10) を得る。

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{2a\pi R_2^3 V}{3d} \times x(10x^3 - 3x - 2) \quad \cdots \cdots (10)$$

$dT/dx = 0$ ($0 < x < 1$) より実数解 x を得る。

$$x = \left(\frac{3}{10\sqrt{10}} + \frac{1}{10} \right)^{1/3} + \frac{1}{10 \left(\frac{3}{10\sqrt{10}} + \frac{1}{10} \right)^{1/3}} \approx \frac{3}{4}$$

dT/dx は、 $x \approx 3/4$ を境に正から負へ変わることがわかる。つまり、電極半径比率 $R_1/R_2 \approx 3/4$ において伝達トルク T が最大になる。式 (9) より得られた伝達トルクの理論曲線を図 14 に示す。電極半径比率を $R_1/R_2 \approx 3/4$ とすることで、電極間電位差の変化による伝達トルクの変化幅を最大にすることができると考えられる。

6・2 トルク測定試験による最適電極形状評価

6・2・1 トルク測定装置 提案した電極設計法より求めた最適形状の片側電極とそれとは異なる電極形状を有する 3 種類の片側電極を用意し、各片側電極を ERG に適用した場合の ERG 効果の比較試験を行った。図 15 に製作した片側電極を示す。各電極の外径 $2R_2$ と電極間隔は同一とし、それぞれ 30 mm、1 mm とした。図 15 (a) は陽極と陰極の電極幅を等しくした電極 ($R_1 = 7$ mm)、(b) は陽極と陰極の電極面積を等しくした電極 ($R_1 = 10$ mm)、(c) は電極設計により得られた最適形状の電極 ($R_1 = 11.3$ mm)、(d) は陰極の電極面積を極端に小さくした電極 ($R_1 = 12.5$ mm) である。

ERG 効果の比較試験に用いたトルク測定装置を図 16 に示す。トルク測定装置は二つのディスク付きシャフトから構成されており、各シャフトは、ハウジングに取付けられた軸受により支持されている。ERG

Fig. 15 Four types of one-sided electrodes for torque transfer device

シートが成形された片側電極を従動側のディスクにねじ止め固定し、そのERGシート表面に原動側のディスクが一定の押付け圧で接触できる構造となっている。原動側のシャフトはカップリングを介してモータに直結されており、モータの駆動力で回転する。従動側のシャフト端点には、ロードセルに接続するためのレバーが取り付けられている。原動側シャフトを定速回転させた状態で、従動側ディスクに設置された片側電極に電圧を印加し、ERG効果によって伝達されるトルクを測定した。伝達トルクは、レバーに働く接線方向の力をロードセルにより検出し、その力にレバーの長さを乗じることで求めた。

6・2・2 トルク測定結果 各片側電極における電極間電位差と発生トルクの関係を図17に示す。原動側の回転数は 30 min^{-1} とした。電極形状にかかわらず、印加する電極間電位差を大きくすることで伝達トルクが増加することがわかる。電極形状別に見ると、回路モデルより最適設計した $R_1=11.3 \text{ mm}$ の電極を適用した場合において、最も高いトルクが発生していることがわかる。各電極の電場解析を行ったところ、表2に示すように $R_1=11.3 \text{ mm}$ の電極の平均電界強度は最大とならず、陽極と陰極の電極面積が等しい

$R_1=10 \text{ mm}$ の電極で最大となる。つまり、回転力伝達素子として最も伝達トルクが高くなるように片側電極形状を設計するためには、ERG表面の平均電界強度が最大になるよう設計するのではなく、回路モデルより各電極上の電界強度を求め伝達トルクを R_1/R_2 の関数として導出し、形状を決定する必要があることがわかった。

ここで、式(9)より得られる伝達トルクの概算値と実験値の比較を行う。概算値を求めるためには、式(6)に示す定数 α と β を実験より求める必要がある。 α は印加電界強度と降伏応力の関係における定数であり、 β は滑り速度と降伏応力の関係における定数である。ここで、降伏応力とは降伏点におけるせん断応力のことである。両側電極における印加電界強度と発生降伏応力の関係は、図18に示すようにおおよそ比例

Table 2 Average electric field in each type of one-sided electrodes

Radius of anode R_1 (mm)	7.0	10.0	11.3	12.5
Average electric field (V/mm)	987	1389	1312	1047

Fig. 16 Apparatus for measurement of transfer torque

Fig. 18 Relation between yield stress and electric field in both-sided electrodes

Fig. 17 Relation between applied voltage and transferred torque

Fig. 19 Relation between transferred torque and number of revolution

Fig. 20 Comparison between theoretical and experimental result

関係にあることがわかる。これより α を算出すると約 $1.56 \text{ Pa} \cdot \text{mm}/\text{V}$ となる。次に β を求めるため、原動側の回転数変化に伴う伝達トルクの変化を調べた。各電極間電位差における原動側シャフトの回転数と伝達トルクの関係を図 19 に示す。回転数増加に伴うトルクの増加量は電極間電位差にかかわらず、おおよそ一定である。これより、 β を算出すると約 $6.68 \times 10 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ となる。 $R_2 = 15 \text{ mm}$ とし、求めた α , β を用いて式 (9) より各電極形状の発生トルクを概算した結果を図 20 に示す。概算値と実験値は同様の傾向を示し、おおよそ一致している。この結果より、本論文で提案した最適電極形状の設計手法は妥当であると考えられ、その最適形状は $R_1/R_2 \approx 3/4$ である。

7. 結 論

対向導電体形片側電極を適用した ERG 力伝達素子において最も高い ERG 効果が得られる電極形状の設計法を提案し、その手法に基づき設計した片側電極形状を実験的に評価することで設計法および最適形状の妥当性を検証した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 一对の陽極と陰極からなる対向導電体形片側電極を適用した ERG は、二対のコンデンサを含む電気回路モデルで表すことができ、ERG 内の電界を容易に計算できる。

(2) 片側電極の陽極と陰極の面積を等しくすることで ERG 表面の電界強度が最大となり、直動形力伝達素子に应用する場合、得られる ERG 効果が最大と

なる。

(3) 回転形力伝達素子に应用する場合、その最適電極形状は、回路モデルより、各電極上の電界強度を求め伝達トルクを陰極と陽極の半径比率の関数として導出することで求めることができる。

(4) 陽極を半径 R_1 の円盤電極、陰極を内径 $2R_1$ 、外径 $2R_2$ の環状電極とすると、回転形力伝達素子の電極形状が $R_1/R_2 \approx 3/4$ の条件を満たすとき、伝達トルクが最大となる。

本研究で提案した導電体形片側電極の最適形状の設計手法は ERG のみならず、印加電界により流体の粘弾性が変化する ER 流体にも拡張可能であると考えられる。

本研究の一部は、平成 18 年度科学研究費補助金若手研究 (B) のもとで実施されたものであることを記し、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Halsey, T. C., *Electrorheological Fluids*, Science, Vol. 258 (1992), pp. 761-766.
- (2) Nakano, M. and Nagata, T., ER Properties and Flow-induced Microstructures of An ER Fluid between Two Parallel Disk Electrodes in Squeeze Flow Mode, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17, 18 (2002), pp. 2555-2561.
- (3) Klingenberg, D. J. and Zukoski, C. F., Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions, *Langmuir*, Vol. 6 (1990), pp. 15-24.
- (4) Kakinuma, Y. et al., Basic Properties of Gel-structured Electro-rheological Fluids, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 19, No. 7-9 (2005), pp. 1339-1345.
- (5) Kakinuma, Y. et al., Application of ER gel with Variable Friction Surface to the Clamp System of Aerostatic slider, *Precision Engineering*, Vol. 30 (2006), pp. 280-287.
- (6) Takesue, N. et al., Electro-rheological Effects of Liquid Crystalline Polymer on One-sided Pattern Electrodes, *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 3 (2002), pp. 1618-1623.
- (7) Takesue, N. et al., ER Effect of Homogeneous ER Fluid on One-Sided Pattern Electrodes, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 67, No. 653 (2001), pp. 73-78 (in Japanese).
- (8) Kakinuma, Y. et al., Basic Characteristics of ER Gel on One-sided Structured Electrodes, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 71, No. 12 (2005), pp. 1607-1612 (in Japanese).