ゲル構造電気粘性流体の開発とその基本特性解析*

柿 沼 康 弘** 青 山 藤 詞 郎*** 安 齊 秀 伸† 櫻 井 宏 治†
磯 部 和 之†† 日 野 賢 一†† 田 中 克 敏†††

Development and Basic Analysis of Gel-structured Electrorheological Fluids

Yasuhiro KAKINUMA, Tojiro AOYAMA, Hidenobu ANZAI, Hiroharu SAKURAI,

Kazuyuki ISOBE, Takakazu HINO and Katsutoshi TANAKA

Electrorheological fluids (ERF) are functional fluids whose viscoelastic properties vary with the intensity of the applied electric field. The property of ERF has been expected to control the performances of machine elements, and the ERF has been applied to machine elements such as variable dampers and clutches. However, the disadvantages of ERF are the sedimentation of ER particles and the requirement of seal mechanism. The sedimentation of ER particles reduces the ER effects, results in low stability of ER devices. To solve these problems, gel structured electrorheological fluids (ERG) were developed in this study. The separation and sedimentation of ER particles from the base oil are successfully suppressed because the frames of gel prevent the particles from sedimentation. The basic characteristics of ERG were experimentally analyzed in this study. The ERG sheet was sandwiched between a pair of plate electrodes and the variation of shear stress between the sheet and the upper electrode was measured when an electric field is applied to the ERG. Comparing with a conventional ERF, the developed ERG provides extremely higher shear stress and the long durability of ER performance. The dynamic response of shear stress of ERG film was also evaluated.

Key words: electrorheological fluids, basic characteristics, machine element

1. 緒 言

電気粘性流体 (Electrorheological Fluid 以後 ERF) とは、電界を印加することによって見かけの粘弾性が高速、かつ可逆的に大きく変化する流体の総称¹⁾で、この効果をエレクトロレオロジー効果 (以後 ER 効果)²⁾と呼ぶ。ERF の特徴として、応答性が良好であること、特性変化の幅が広いこと、電界強度により流体の見かけの粘度を制御できるため機械システムへの導入が比較的容易なことが挙げられ、様々な分野への応用が試みられている。具体的には、動力伝達要素や制動要素として、クラッチ^{3)~5)}、ダンパ⁶⁾⁷⁾、位置決め機構⁸⁾⁹⁾、バルブ¹⁰⁾ などへの応用が挙げられる。

代表的な ERF として、粒子分散系 ERF が挙げられる。粒子分散系 ERF は、粒子径が十数ミクロンの特殊粒子を絶縁性のシリコン油などに分散させたコロイド溶液で、無電界時にはニュートン流体の挙動を示し、電界を印加する事で ER 効果によってビンガム流体の挙動を示す¹¹⁾。ER 効果発生のメカニズムは ER 粒子の種類によって複数あるとされているが、最も有力な説として図 1 に示すように粒子の誘電分極による粒子鎖の形成論がある。ERF に電界を印加すると、分散粒子に電気分極が生じ、電界方向に並んだ粒子には引力が、電界垂直方向に並んだ粒子には斥力が発生する。この粒子間力により電極間で粒子が電界方向に結合してクラスタ (cluster) と呼ばれる鎖状構造を形成¹²⁾¹³⁾し、これが抵抗となり、見かけの粘弾性が変化する。

しかし、粒子分散系 ERF は電極構造やその使用環境などによって ER 効果が変化してしまうという性質があり、①時間経過に伴う粒子の沈降・凝集による ER 効果の再現性の低下が生ずる³⁾、②流体であるがゆえに機械要素に用いる際シール構造が必要となる、などの問題があり、ERF 応用デバイスの実用化が遅れる主な原因となっている。

このような背景のもと、電気粘性流体の問題点を解決し、実用デバイスへ適用しやすい新素材を提供することを目的として、近年 ERF をゲル化したゲル構造電気粘性流体の開発を進めてきた。本研究では、開発したゲル構造電気粘性流体 (Electrorheological Gel 以後 ERG) の基本特性を実験的に解析することで素材の性質を明らかにし、更に可変防振ダンパなどのメカトロニクスデバイスへの応用可能性を検討したのでここに報告する。

2. ERG の基本特性解析

2.1 ERG シートの製造

開発した ERG は、ERF に 2 種類のゲル化剤と触媒を混ぜ、加熱処理を行いゲル化したものである。本研究で用いた粒子分散

Fig.1 Mechanism of ER effect

*原稿受付 平成 16 年 5 月 7 日

**学生会員 慶應義塾大学大学院 (横浜市港北区日吉 3-14-1)

***正 会 員 慶應義塾大学 (横浜市港北区日吉 3-14-1)

† 藤倉化成 (株) (東京都港区芝公園 2-6-15)

†† 日本ユニカー (株) (東京都千代田区大手町 2-6-1)

††† 正 会 員 東芝機械 (株) (静岡県沼津市大岡 2068-3)

系 ERF は非含水系で、平均粒子径 $16\mu\text{m}$ の無機有機複合型 ER 粒子を 100cSt のシリコンオイル に分散させたものである。また、ERF の粒子濃度は 60wt% で、ゲル化剤と混合することで、ERG の粒子濃度を 50wt% となるようにした。ERG の特徴として、その中に含まれる ER 粒子はゲル部分によって保持されているため、ERF の最大の欠点であった粒子の沈降を起こすことがな

い。また、ERG は半固体状であるため応用デバイスに組み込む際に、流体の漏れ止めシール構造が不要となり、構造が簡単になる。このような特徴をもつ ERG の基本特性を調べるために、せん断方向 70mm×せん断垂直方向 50mm×厚さ 0.5mm の ERG シートを製造し実験的解析を行った。製造した ERG シートの写真を図 2 に示す。

Fig.2 ERG sheet

2.2 基本特性測定法

電気粘性効果に関する最も基本的な特性である電界強度とせん断応力の関係を調べた。ERG シートを 2 枚の平行平板電極で挟み、下部電極をベースプレートに固定し上部電極を自由にスライドできるようにしておく。上部電極と ERG シート上面とのせん断特性を調べる際に、ERG シート下面で滑りが生じないようにするために、下部電極には、その全面にわたりせん断方向に対して直角な方向に高さ 125 μm の微細な三角溝をピッチ 250 μm で加工してある。これにより ERG シートは下部電極に完全に固定されるため、印加する電界強度に関わらず、この部分で ERG シートが滑ることは無い。この平行平板電極に挟まれた ERG シートを図 3 に示すせん断応力測定装置に取り付け、ERG シートに電界を印加した状態で上部電極をスライドさせ、この時のせん断力を測定した。

本測定装置では上部電極を低速回転モータを用いて一定速度で送ることができる。上部電極の変位量を渦電流式変位計により、せん断力を、ロードセルを介し動歪み計により測定した。せん断応力は、測定したせん断力を ERG シートの表面積で除することによって求めた。

2.3 電界強度とせん断応力の関係

電界強度を 250V/mm 毎に 0V/mm から 1500V/mm まで変化させ、各電界強度において 600 μ m セン断させた時のセン断応力測定結果を図 4(a)に示す。ERG はこれに電界を印加することにより従来の ERF 同様に降伏応力を示す材料へと変化することが確認できる。また、電界強度に応じて降伏応力が大きく変化する。電界強度 1500V/mm 時には、約 3.5kPa と高い降伏応力

Fig.3 Test stand for measuring ERG basic properties

を発生している。更に電界強度 1000V/mm 時において従来の粒子分散型 ERF の降伏応力³⁾と比較すると、開発した ERG の降伏応力は ERF より約 20 倍高い。

次に変位に対するせん断応力の挙動について見てみると、降伏点を超える前の微小変位（約10 μ m）では応力が上部電極の変位に対しほぼ線形的に変化し、降伏点を超えると応力が概ね一定となる。これは降伏点までは ERG が上部電極に密着してせん断変形を生じ、降伏点を越えると ERG と上部電極面の間で滑りが発生するためである。ここで図 4(b)に示した変位量 20 μ m までの応力の挙動を見ると、微小変位においては上部電極のせん断変位量に対して応力がほぼ線形的に変化することに加え、電界強度が高くなるに連れその傾きが大きくなることがわかる。微小変位では ERG シートが電極に密着し弾性変形を生じることで力を発生することから、電界強度による傾きの変化は ERG のみかけの剛性変化を示している。

以上より、開発した ERG は電界強度に応じて降伏応力が大きく変化するばかりでなく、ERG 自体の剛性が変化する材料であることがわかった。

2.4 せん断速度とせん断応力の関係

ERF ではせん断速度がせん断応力に大きく影響することが知られている。そこで、電界強度を 1.5 kV/mm で一定とし、上部電極のせん断速度を変化させてせん断応力を測定した。測定結果を図 5 に示す。まず、図 5(b) に示す降伏点を越える前の微小変位 ($10\mu\text{m}$) でのせん断応力に注目してみると、電極は ERG の弾性変形により力を受けているため、せん断速度に依存していないことがわかる。しかし、降伏点を越え、ERG と電極の間で滑りが発生する領域では、図 5(a) に示すように、せん断速度が

(a) Sliding length 600 μ m

(b) Sliding length 20 μ m

Fig.4 Relation between displacement and shear stress
(Shear rate $16\mu\text{m/s}$, contact pressure 70Pa)

上がるに連れ、応力が低下することがわかる。これは ERG と電極面の間に部分的に非常に薄いシリコン油膜が介在しているため、滑り速度が速くなるに従い油膜の潤滑作用によって動摩擦係数が低下して、その結果せん断応力が低下するものと考えられる。

Fig.5 Relation between shear rate and shear stress

Fig.6 Reproducibility of ER effect

Fig.7 Mechanism of ERG effect

2.5 ER 効果の再現性

ERF は、時間経過に伴い粒子の沈降や凝集を生ずることから、安定した ER 効果を得ることができなかった。これに対し、ERG は粒子の沈降を起こさないことから、安定した ER 効果を得ることができると予想される。そこ

Fig.8 Surface of ERG

で、ERG に対し、時間経過に伴い発生するせん断応力の変化を調べるため、24 時間おきに 7 回、電界強度 1.5kV/mm を印加した状態でのせん断応力を測定した。測定結果を図 6 に示す。7 回の測定を通してせん断応力特性が大きく変化することなく、弾性変形領域においてもまた滑り領域においても応力特性の再現性が高いことが確認できる。このように、ERG は時間経過に伴う粒子の沈降や凝集が起こらないため、ER 効果の低下は生じない。つまり、ERG は ERF の最大の欠点であった ER 効果の再現性の問題を解決した素材であると考えられる。

3. ERG シートにおけるせん断力の発生機構の考察

開発した ERG シートのせん断応力特性を実験的に解析した結果、ERG は電界印加時に降伏応力を示すことや、ERG と電極の間に滑りが生じていること、また発生する力が非常に大きいことから、ERG のせん断応力発生メカニズムはこれまで ERF の挙動を説明した粒子鎖（クラスタ）形成理論からなるメカニズム¹³⁾とは明らかに異なると考えられる。

そこで図 7 に示すようなメカニズムにより降伏応力が発生するのではないかと考えた。ERG はその表面の写真（図 8）を見ると、ゲル部分より球面が突起している粒子が多数存在することがわかる。本研究で使用している ER 粒子は非常に滑り特性がよく、無電界時にはこの突起した ER 粒子の球面を電極がスライドすることで、せん断応力が非常に低い値を示す。ERG に含まれる粒子は、ゲル部分に拘束されていることにより、大きく動くことはできない。しかし、電界印加により多軸構造を持つ分極を生じた粒子（図 7(b)）は、互いに引き合うことで、ゲルシート中心方向に微小変位を生ずると考えられる。この結果、表面から突起していた粒子球面は沈み込み、その作用によってゲル部分が盛り上がることで、ERG のゲル部分が電極面と接触するようになる。ゲル部分は非常に高いぬれ特性を持つことから、電極に対する粘着性が増し、これにより、せん断時に降伏応力を示すようになり、同時にせん断応力は高い値を示すようになるものと考えられる。さらに電界強度の変化に応じて、表面に突起した粒子の沈み込み量は変化するので、電極に対するゲルの接面積が変化して降伏応力も変化する。尚、シリコンオイルを含むシリコンゲルは濡れ特性による粘着性を持つ一方、粘着部分に滑りが生じる場合には、シリコンオイルによる潤滑性が作用しせん断速度の増加に応じて動摩擦係数が低下する。その結果、せん断速度を増加させた場合せん断応力は図 5(a) に示したように低下する傾向にある。

ゲル部分の電極への粘着性がせん断応力の変化に関係しているとするれば、電極表面の面精度や電極とゲルの接触面圧の影響を受けるはずである。そこで、ERG と電極との接触状態の変化がせん断応力特性にどのような影響を及ぼすかを調べるため、

上部電極の面精度および接触面圧を変化させ、せん断応力の測定を行った。

まず、ERG に接する上部電極の面精度の影響を調べるため、表面粗さの異なる 2 種類の上部電極を用いて測定を行った。電極の一つは 2.3 節で使用したもので、これは通常の機械加工で製作した普通電極（表面粗さ $Ra=0.25\mu\text{m}$ ）である。他の一つはその電極の面精度を高めるため表面を研磨した高精度電極（表面粗さ $Ra=0.04\mu\text{m}$ ）である。用いた 2 種類の電極の表面粗さを測定した結果を図 9 に示す。高精度電極を用いて変位量 $600\mu\text{m}$ まで上部電極をスライドさせた時の測定結果を図 10 に示す。普通電極（図 4(a)）と高精度電極を比較すると、より良好な表面粗さを持つ高精度電極の方が全ての電界強度において 500Pa ～

Fig.9 Surface roughness of upper electrode

Fig.10 Relation between displacement and shear stress (polished surface, contact pressure 70Pa)

Fig.11 Relation between displacement and shear stress (polished surface, contact pressure 770Pa)

1000Pa 高いせん断応力が発生していることがわかる。これは表面粗さを良好にすることで電界印加時に上部電極と ERG シートのゲル部分との接触面積が増大して、大きな ERG 効果が得られたためと考えられる。また無電界時においては、電極表面の粗さに関係なく応力は 100Pa 程度で、応力値に大きな違いはみられなかった。また図 10 において、応力変化が粒子の沈みこみ作用によるゲル部分との接触面積の増加だとすると、ゲルの接触面積には上限値が存在するため、表面にある粒子がゲル内部に完全に沈み込めば接触面積は飽和し、せん断応力は一定値に収束すると推測されるが、測定結果ではせん断応力は電界強度にほぼ比例して増加している。試作した ERG シートは 2kV/mm 以上の電界強度を印加すると絶縁破壊を起こすため、粒子はある値以上を超えて沈み込むことはできない。つまり本実験の範囲では、粒子の沈み込み量はそれほど大きくないため、粒子の沈み込み作用に対するゲルの接触面積の変化はほぼ比例的に増加する。そのため、ゲルの接触面積に依存すると考えられるせん断応力も一定値に収束することなくほぼ比例的に増加するものと考えられる。

次に、電極と ERG との接触面圧の影響を調べるため、高精度電極に 200gf の付加荷重（分銅）を加えてせん断応力の測定を行った。この時の平均面圧は 770Pa である。また、付加重なしの場合の平均面圧は 70Pa である。平均面圧 770Pa で上部電極を変位量 $600\mu\text{m}$ までせん断した時の測定結果を図 11 に示す。ERG と電極の接触面圧を高くすると、無電界時の応力は 200Pa 程高くなり、電界印加時の応力は電界強度 1500V/mm で 700Pa 程低下する。この現象を従来の ERF と同様な視点のみから考えると説明がつかず、ERG を固体という視点から捉える必要があると考えられる。つまり、この現象を図 7 で示した ERG と電極面間での固体間摩擦状態の変化として考えてみる。

ERG 表面に高い接触面圧が加わると、電極と粒子が接触したままの状態でも ERG が圧縮される。そのため ERG 内部に密に存在する粒子間の距離がさらに狭まる。この状態で電界を印加しても粒子の沈みこみ量は小さく、またそれに対するゲルの盛り上がり作用も小さくなる。つまり面圧を上げることで電界印加時には、面圧の低い状態に比べ、電極がゲル部分と接する割合が減少するため、応力が低下するのではないかと考えられる。

以上のことから ERG と電極との接触状態の違いがせん断応力の変化に大きく影響することが確認された。つまり ERG 効果は、主として ERG 表面の摩擦特性の変化に起因していることが明らかとなった。

4. ERG の動的応答性

4.1 測定装置

基本特性解析の結果、機械要素に組み込む条件を整えることで、ERG は電界強度に応じて非常に高いせん断応力を示すことが明らかとなった。そこで ERG の応用分野の一つと考えられる制振装置等への応用可能性を検討するため ERG シートの基本的動特性の評価を行った。測定装置の外観を図 12 に示す。ERG は前節で使用した ERG シートである。動電型加振器によりスライダに振動を加えることで、上部電極を加振した。加振条件は、無電界時の振幅 $100\mu\text{m}$ で加振周波数 10Hz および振幅 $1\mu\text{m}$ で周波数 10Hz とした。また各条件において加振器への入力振幅は一定として実験を行った。加振状態で ERG シートに電界を印加し、その時の振幅変化を測定した。またその測定結果より電界に対する振幅変化の応答性を求めた。

4.2 加振実験結果

図 13(a)に振幅 $100\mu\text{m}$ で加振周波数 10Hz の測定結果を、図 13(b)に振幅 $1\mu\text{m}$ で加振周波数 10Hz の測定結果をそれぞれ示す。図 13(a)より $100\mu\text{m}$ の初期振動振幅が、電界を印加することで、

Fig.12 Experimental setup for the vibration test

Fig.13 Result of vibration test

Fig.14 Influence of electric field intensity on hysteresis characteristics

Table 1 Response of ERG

	ON-response (ms)	OFF-response (ms)
ERG	20~30	100~200

$10\mu\text{m}$ 以下の振動振幅に抑制されていることがわかる。同様に、図 13(b)より $1\mu\text{m}$ の初期振動振幅が約 250nm の振幅に抑制されていることが確認できる。この結果より ERG が制振要素として十分応用が可能であることがわかる。ここで加振周波数 10Hz の、加振一周期における電極変位とせん断応力の関係を図 14 に示す。この結果より電界強度 500V/mm までは減衰力が働いているが、電界強度 750V/mm を超えると減衰力はほとんど働かず、振動エネルギーが弾性エネルギーへと変化していることがわかる。つまり、ERG を用いて振動を抑制する方法として、低い電界強度を印加することで減衰力により振動を抑制することができ、高い電界強度を印加することで防振ゴムのように弾性エネルギーにより振動振幅を抑制することができるものと推定される。

表 1 に図 13 の結果より算出した ERG の電界に対する応答性を時定数で示す。この結果を従来の ERF の応答性³⁾⁹⁾と比較すると、ERF の時定数が数ミリ秒～数十ミリ秒なのに対し、ERG の時定数は十ミリ秒～百ミリ秒オーダーとなっている。ERG はゲル部分によって粒子が保持されているため、ERF のように粒子は広い範囲を自由に運動することができない。つまり、ゲル部分が粒子の動きを阻害しているため応答性が約 $1/2$ 低下すると考えられる。

5. 結 言

粒子分散系電気粘性流体の実用上の問題点を解決する新しい機能性材料としてゲル構造電気粘性流体 (ERG) を開発した、その基本特性を実験的に解析するために、シート型の ERG を製造しこれにせん断変形を与えた際の発生応力について、その静的ならびに動的な応答を測定した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) ERG は電界強度に応じて、せん断応力が大きく変化する。この時、微小変位においては弾性的特性を、降伏点を超えると電極と ERG の間で滑り特性を示す。
- (2) 電極の表面粗さを向上させることで、また接触面圧を低く抑えることで電界印加に対するせん断応力の変化幅を広くとることが可能で、高い ERG 効果を得ることができる。
- (3) 本研究で開発した ERG におけるせん断応力発生メカニズムは、従来の ERF に関するものとは異なり、ERG と電極面の接触部分における摩擦特性が電界強度に応じて変化することに基因するものと考えられる。
- (4) ERG に電界を印加することにより、せん断方向における電極の動的変位を抑制することが可能で、制振要素への応用が期待される。
- (5) ERG は、電気粘性特性を示す粒子の運動をゲル構造で拘束しているため、電界印加に対するせん断応力発生時の応答速度は従来の電気粘性流体に比較して遅く約 $1/2$ となる。

今後の課題として、可視化実験により ERG 効果のメカニズムを明確にし、更なるメカトロニクスデバイスへの適用を検討する計画である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省平成 15 年度 21 世紀 COE プログラム【知能化から生命化へのシステムデザイン】ならびに平成 15 年度科学研究費補助金基盤研究(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。

参 考 文 献

- 1) 三田達也: スマート流体に関する調査報告書, スマート流体研究会, (1990-2) .
- 2) M. Nakano and T. Nagata : 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, 17 & 18 (2002) 2555.
- 3) 井上昭夫, 笠潮: エレクトロレオロジー (ER) 流体, 未来材料, 2, 8 (2002) 27.
- 4) 古壮淳次, 坂口正道: 電気粘性流体を用いたアクティブ制御, トライボロジスト, 41-6 (1996) 72.
- 5) 園崎諭, 青山藤詞郎, 桜井宏治, 都築良彦, 田中克敏: 電気粘性流体の性質を応用した柔軟部品用低ひずみ固定装置の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), 64, 622 - 6 (1998) 413.
- 6) 藤田聡, 古屋治, 明貫太郎, 正木信男, 太田雅己: ER 流体を用いた床制振装置の基礎的研究, 日本機械学会 (No. 99-7) D&D'99 第 6 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, (1999) 225.
- 7) 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制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 64, 622 - 6 (1998) 421.
- 8) Hiroshi Hashizume and Hidenori Shinno : A Study on Nanometer Pointing Table System Equipped with Electrorheological Fluid Units, JSME International Journal, Series C, 43, 1 (2000) 183.
- 9) 石山誠, 青山藤詞郎, 枝村一弥, 都築良彦: ER 流体を応用した工作機械テーブルシステムの動特性向上, 日本機械学会第 72 回通常総会講演会講演論文集, 95-1 (1995) 417.
- 10) 萩野克也, 中野政身: PWM 制御 ER バルブによるミニチュアアクチュエータの制御特性, 日本機械学会第 76 回全国大会講演論文集 (IV), 10 (1998) 208.
- 11) 小山清人: 電気粘性 (ER) 流体の開発, シーエムシー出版, (1999), 163.
- 12) Tomas C. Halsey : Electrorheological Fluids, Science, 258, (1992), 761.
- 13) D. J. Klingenberg, C. F. Zukoski : Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions, Langmuir, 6 (1990) 15.