研究論文

ERゲルにおけるせん断応力発生メカニズム*

柿沼 康弘**, 青山 藤詞郎***, 安齊 秀伸†
 櫻井 宏治†, 磯部 和之††, 田中 克敏†††

Occurrence mechanism of shear stress in ER gel

Yasuhiro KAKINUMA, Tojiro AOYAMA, Hidenobu ANZAI
 Hiroharu SAKURAI, Kazuyuki ISOBE and Katsutoshi TANAKA

ER Fluid (ERF) is a functional substance that can change its apparent viscoelastic properties by the application of an electric field. This is called the ER effect. The Applications of ERF to mechanical devices have been anticipated. However, separation and sedimentation of ER particles over long term use, which reduces the ER effect and results in low stability of ER devices, has been an obstacle to such application. To solve these problems, an ER gel was developed and the basic characteristics of ER gel were experimentally analyzed. A thin sheet of ER gel was sandwiched between a pair of plate electrodes and the variation of shear force between the ER gel sheet and the electrode was measured under varied electric field intensity. The developed ER gel produced extremely high shear force and showed a slip phenomenon at the contact surface of the electrode under high electric field intensity. These results suggest that the developed ER gel has a different shear stress occurrence mechanism from conventional ERF. In this study, the shear stress occurrence mechanism in ER gel was also experimentally analyzed.

Key words : Functional Fluid, New Material, Tribology, Visco-Elasticity

1. 緒 言

機能性流体の一つに、印加する電界の強度に応じて見かけの粘弾性が変化するER流体 (Electro-rheological Fluid 以後ERF) がある。ERFは、電界の印加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⁾⁴⁾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、電界印加によって誘電分極を生じる特殊な微粒子を絶縁性のシリコンオイルに混合したもので、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Fig. 1に示す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・凝集によりER効果の再現性が低下する、②流体であるがゆえに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、ERF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ERゲルの開発を進めてきた¹⁴⁾。本研究では、ERゲル (Electro-rheological Gel 以後ERG) における基本特性解析および電界印加持の粒子挙動の観察を通して、ERGにおけるER効果が従来の粒子鎖

*平成16年7月2日

**慶應義塾大学大学院

***慶應義塾大学

(所在地 〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

†藤倉化成株

(所在地 東京都港区芝公園2-6-15)

††日本ユニカー(株)

(所在地 東京都千代田区大手町2-6-1)

†††東芝機械(株)

(所在地 静岡県沼津市大岡2068-3)

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

Fig. 1 Mechanism of ER effect

形成論とは異なるメカニズムであることを解明したのでここに報告する。

2. 開発したERGの基本特性

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、ゲルの分類としてはシリコンゲルにあたる。本研究で用いた粒子分散系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Fig. 2に示す。

2.2 基本特性測定法

ER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。Fig. 3に示すように、ERGシートを2枚のアルミ合金製平行平板電極で挟み、下部電極をベースプレートに固定する。上部電極は、これに接続したモータ駆動テーブルによって一定速度でスライドさせることができる。また下部電極は、せん断時にERGシートがこの部分で滑らないようにその表面に細かな溝加工を施

Fig. 2 ERG sheet

してある。上部電極をスライドさせた際の変位量を渦電流式変位計（分解能： $0.4\mu\text{m}$ ）により、せん断力をロードセル（分解能： 10gf ）を介し動歪み計により測定した。この測定は室温 23°C の恒温室で行った。

2.3 電界強度とせん断応力の関係

電界強度を 500V/mm 毎に 0V/mm から $1,500\text{V/mm}$ まで変化させ、各電界強度において上部電極を $600\mu\text{m}$ 変位させた時の公称せん断応力測定結果をFig. 4に示す。ここで、公称せん断応力は、測定したせん断力をERGシートの表面積（ $70\text{mm}\times 50\text{mm}$ ）で除することによって求めた。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特性が変化する。また、降伏応力は電界強度に応じて顕著に変化する。電界強度 $1,500\text{V/mm}$ 時には、約 8kPa と高い降伏応力を発生している。また、電界強度 $1,000\text{V/mm}$ 時において開発したERGの降伏応力は、従来のERFの降伏応力³⁾に比べて約30倍大きい。

次に電極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 $20\mu\text{m}$ ）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。

以上述べたように、ERGは従来のERFと同様に、電界印加によってせん断応力が変化するが、その大きさが従来

Fig. 3 Schematic diagram of shearing test stand

Fig. 4 Relation between displacement and nominal shear stress (23°C)

のERFに比べ極端に大きいことや、電極の変位量に応じて異なる特性（弾性特性と滑り特性）を示すことから、せん断応力変化のメカニズムはERFにおける粒子鎖（クラスタ）形成論による粘弾性変化によるものとは明らかに異なると考えられる。

3. ERGにおけるせん断応力発生メカニズム

3.1 せん断応力発生の推定メカニズム

ERGはその表面写真（Fig. 5）を見るとゲル部分により粒子が拘束されており、流体の場合とは異なり自由に運動することが困難なことがわかる。そのため電界の印加によりER粒子が粒子鎖（クラスタ）を形成することは無いと考えられる。また、ERGは電界印加時に非常に大きな降伏応力を示すことや、せん断変位量に応じて弾性的特性から滑り特性へと変化することから、ERG表面と電極の界面における摩擦特性の変化がせん断力発生の原因ではないかと考えた。

Fig. 6に推定されるERGのせん断応力発生メカニズムについて示す。ERG表面（Fig. 5）には、ゲル部分より球面が突起している粒子が多数存在する。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滑るため、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って分極を生じた粒子（Fig. 6(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

Fig. 5 Surface of ERG

Fig. 6 Occurrence mechanism of shear stress in ER gel

から突起していた粒子球面は沈み込み、その作用によって周囲の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、電極に対する接着性が増し、これにより、大きなせん断応力を示すようになり、かつ接着しているゲル部分が滑りを生ずる直前に、応力の降伏現象を示すものと考えられる。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が変わり、同時に電極に対するゲルの接着面積が増減してせん断応力も変化するものと考えられる。

3.2 推定メカニズムの検証

推定したせん断応力発生メカニズムを検証するために、ERGと電極面間の接触状態の変化を詳細に観察した。基本特性測定で使用したERGシートを、ITO膜を塗布したガラス電極（上部電極）と金属電極（下部電極）で挟み、下部電極をベースに固定する。ガラス電極の上側にマイクロ스코プを設置し、電界の有無によるERG表面とガラス電極の接触面における状態変化を観察した。その結果をFig. 7に示す。電界を印加することによりERGと電極との界面でぬれ特性による接着現象が生じていることが確認できる。ぬれ特性はシリコンゲルに見られる接着現象¹⁵⁾であり、電界強度の増加とともにガラス電極とゲル部分の接触面積が増加する傾向が認められる。つまりERGにおけるせん断力の変化は表面のER粒子、ゲル部分、空孔部の比率に依存しており、特にゲル部分との接触面積の変化が大きく寄与していると考えられる。

そこで、ゲル部分の電極への真の接触面積を求め、その値と測定されたせん断力の関係を調べてみた。マイクロSCOプで撮影した表面画像から画像処理¹⁶⁾によりゲル部分との接触面積を求め、これで測定したせん断力を除することにより、ゲル粘着部分での真のせん断応力を求めた。異

Fig. 7 Observation at boundary between ERG and the glass electrode

なる電界強度におけるゲル部分の接触面積の全電極面積に対する割合をTable. 1に、またゲル粘着部分の真のせん断応力の変化をFig. 8に示す。ゲル粘着部分の真のせん断応力は印加電界強度に関係無くほぼ一定となる。このことからERGにおけるせん断力の変化はゲル部分の接触面積の変化に起因することが明らかとなった。

次に、電界印加により表面のER粒子がどのような動きをするか調べるためERGと電極の界面をその側面からマイクロSCOPEにより観察した。電界強度0 V/mmと1,500 V/mm印加時におけるER粒子及びその周囲の様子を撮影した結果をFig. 9に示す。電界を印加することによって、粒子が微小変位ながらゲル内部へ移動していることが確認できる。また、微小移動に伴い、粒子周囲にあるゲル部分が隆起している。粒子球面に接触しているゲルは粒子の沈みこみ作用により、押し付け力を受ける。ゲル自身は粘着性が高く弾性変形しやすい材料であるため、粒子球面と接着した状態で変形し、そのため粒子を包み込むような変形が

Table. 1 Increase of adhesive gel area on the glass electrode according to the increase of applied electric field

Applied electric field intensity (V/mm)	Ratio of gel contact area (%)
500	6.5
1,000	12.6
1,500	17.3

Fig. 8 True shear stress related to gel adhesion

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

Fig. 9 Behavior of ER particle

生じ、ゲルが表面に隆起するものと考えられる。このとき、粒子の移動量は電界印加時に生じるER粒子内の誘電分極により粒子同士が相互に引き合う力とゲル部分の弾性力の釣り合いによって決まると考えられる。つまり電界強度に応じて、粒子の移動量は変化し、それによりゲルの隆起する量も変化する。これによりゲル部分と電極が接触する面積が変化すると考えられる。

電界の印加によって、粒子がゲル内部に微小変位するならば、これにともなって電極にも同方向の変位が生じるはずである。そこで、ERGシートを平行平板金属電極で挟み下部電極をベースに固定し上部電極の電界方向への変位を測定した。上部変位測定には、2.2節で使用した渦電流式変位計を使用した。電界強度1,500V/mmを2秒毎に印加した結果をFig. 10に示す。電界の印加に応じて電極は応答性良く約2 μmの変位を生じていることが確認された。

しかしながら、変位が生じる原因が、電極間のクーロン力によるERGの弾性変形である可能性やシリコンゲル自体がER効果を持つ可能性も考えられる。そこで同一寸法のER粒子を含まないゲルシートを製造し、その特性を調べた。電界強度を1 kV/mm毎に0 V/mmから2 kV/mmまで変化させ、各電界強度における公称のせん断応力を測定した結果をFig. 11に、電極の電界方向変位の測定結果をFig. 12に示す。Fig. 4に示したERGのせん断応力測定結果

Fig. 10 Relation between displacement in direction of electric field and applied electric field

Fig. 11 Characteristic of silicone gel

と同様に、シリコンゲルシートは降伏応力を示す。しかしながら、その大きさは印加電界の強度に関係なくほぼ一定である。また、電界方向変位について見てみると、電界強度 2 kV/mm を印加しても、電極に変位は生じないことがわかる。以上の結果から、電界強度に応じてせん断力が変化するERGの特性は、ER粒子の作用によるものであり、ERG特有の現象であることが明らかとなった。

3.3 異なる接触条件下でのER効果

ERGの特性は、先にも述べたように表面のER粒子、ゲル部分、空孔部の比率に依存していると考えられる。そこで、ERGの製造時におけるER粒子、シリコンオイルおよびゲル化剤の含有比率を変えて同様の特性測定を行った。

まず、処方するシリコンオイル量を変え表面状態の異なるERGシートを5種類製造しせん断応力測定及び電界方向変位測定を行った。それぞれの表面状態をFig. 13に示す。オイルを多量に含むERGの表面はゲル部分が多く、オイルの含有割合が少なくなるにつれ粒子が占める割合が多くなっている。含有するオイルの割合と降伏応力の関係をFig. 14に示す。オイル含有量が増えると、降伏応力は小さくなるのがわかる。これはオイルがゲル表面に染み出し電極面間の潤滑性が向上するためであり、高い降伏応

Fig. 12 Relation between displacement in direction of electric field and applied electric field in silicon gel

Fig. 13 Surfaces of ERGs in different oil content

Fig. 14 Relation between oil content and nominal yield stress

Fig. 15 Relation between oil content and nominal yield stress

力を得るためには含有するオイル量をなるべく少なくすることが望ましいと言える。実際34wt%シリコンオイルを含むERGは表面にオイルが染み出しており、ERGと接触していた上部電極面にはオイルが多量に付着していることを実験後に確認している。

ERGは、電界を与えることによりせん断力が増大する一方で、逆に電界を除去することによってせん断力が減少する可逆的な特性を示すことが実用上望ましい。そのためには、ゲル内に含まれるER粒子の微小変位が可逆的でなくてはならない。Fig. 15は、電界を10秒間印加して、その後電界を取り除いた状態で公称せん断応力を測定した結果である。ゲルの粘着によるせん断応力はオイル量が30wt%付近で最大値を取ることが確認できる。ERGはオイル量が少ない場合、その内部に空孔が多く存在するため粒子は運動しやすくなる。また、無電界時の表面状態をみても、粒子の占める割合が多いためゲルによる粘着は起きにくい。その一方でオイル量が多い場合は染み出すオイルの潤滑性により、ゲルの粘着性が低下する。電界強度の変化に対してせん断力の変化を可逆的に応答良く実現するためには、ERGが含有するオイルを低量とし表面に占める粒子の割合を多くする必要がある。次にオイル含有量と電極の電界方向変位の関係をFig. 16に示す。含有オイル量が

Fig. 16 Relation between displacement of electrode in direction of electric field and oil content

Fig. 17 Relation between yield stress and surface temperature

28wt%以上になると、オイル量が増えるに連れ電界方向の変位は小さくなるのがわかる。オイル含有量が多いと、ゲル部分が膨張しERG内にある気孔が塞がれ、そのため粒子は粘着性の高いゲル部分に拘束される状態となり、変位が生じにくくなるものと考えられる。

3. 4 温度の影響

ER効果およびシリコンゲルの粘着性は温度により影響を受ける。ERGにおけるER効果が粒子の沈み込み作用によるシリコンゲルの粘着性によるものならば、温度の影響は無視できない。そこで、周囲温度がERGの性能に及ぼす影響を調べた。図17に周囲温度と1.5kV/mm印加時に発生するERGの降伏応力の関係を示す。温度が上昇するにつれて、発生する降伏応力は低下していくことが確認できる。温度が上昇することで、ER粒子の引き合う作用およびゲルの粘着性が低下するため、発生する降伏応力もまた低下するものと考えられる。常温(20~25℃)における降伏応力の温度影響は10%未満であり、性能の変化はほとんどない。温度上昇による性能の劣化は避けられないが、70℃で測定した後に再度23℃での測定を行なったところ、応力値は初期の測定値と同等の値を示した。高温下においてER粒子の引き合う作用およびゲルの粘着性は低下するが、温度を下げることでその性能は回復する

ことがわかる。

4. 結 言

ER流体の実用上の問題を解決する機能性材料としてこれをゲル化したERGを開発した。ERGにおける印加電界強度とせん断力の関係は、従来のER効果による粒子鎖形成論では説明が困難であることがわかった。そこで本研究では、ERGの応力発生メカニズムを解明するために、シート状のERGを製造しその基本特性を実験的に解析し、ERG表面と電極の接触面における現象を観察した。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、せん断力が著しく変化する。この時、微小せん断変位においては弾性的特性を示し、変位が大きくなると電極とERGの間で滑りが生じてせん断応力に降伏現象が認められる。
- (2) ERGにおけるせん断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起因する。
- (3) 電界印加時の摩擦特性の変化は、電極に対するゲル部分の接触面積の変化に関係する。ゲル部分の接触面積の変化は電界印加によりER粒子がゲル内部へ沈み込む現象により生ずる。
- (4) ERGの表面状態は含有するオイル量により異なり、オイル量を少なくすることでゲル表面にER粒子が占める割合が大きくなる。含有オイル量を少なくすることで電界によるせん断力の変化を可逆的にかつ高い応答性をもって得ることができる。
- (5) 周囲温度が上昇することで、ERGの発生する降伏応力は低下するが、温度を下げることでその性能は元に戻る。

ERGにおけるせん断応力の発生メカニズムが実験的に明らかとなった。今後の課題として、クラッチ機構やブレーキ機構などメカトロニクスデバイスへの応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, Vol. 16, Nos. 17 & 18 2555/2561 (2002)
- 3) 井上昭夫, 笠潮：エレクトロレオロジー (ER) 流体, 未来材料第2巻第8号, 27/34 (2002)
- 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), p. 72
- 5) 園崎論, 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巻622号, 413/419 (1998-6)
- 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, 225/228 (1999)
- 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巻622号, 421/427, (1998-6)
- 8) Hiroshi Hashizume and Hidenori Shinno : A Study on Nanometer Pointing Table System Equipped with Electrorheological Fluid Units, JSME International Journal, Series C, Vol. 43, No. 1, 183/189, (2000)
- 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, 417/418, (1995)
- 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), 208/209 (1998-10)
- 11) 小山清人：電気粘性 (ER) 流体の開発, 163/165, (1999)
- 12) Tomas C. Halsey : Electrorheological Fluids, Science, Vol. 258, 761 (1992)
- 13) D.J. Klingenberg, C.F. Zukoski : Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions, Langmuir, Vol. 6, 15 (1990)
- 14) Y. Kakinuma, T. Yakoh, T. Aoyama, H. Anzai, K. Isobe: Development of Gel-structured Electro-rheological Fluids and their Application to Mechanical Damper Elements, the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'04), Kwasaki, Japan, 541/545 (2004-3)
- 15) 木村直大, 亀岡利行：流れ現象の画像解析に関する研究, 可視化情報学会誌, Vol. 16, No. Suppl 2, 51/54, (1996)
- 16) 入江正浩：機能性高分子ゲルの製造と応用, 52/65, シーエムシー (1988-8)