解 説

電気粘性ゲル・エラストマーの応用

Application of Electrorheological Gel/Elastomer

小 柳 健 一^{*1} 柿 沼 康 弘^{*2} ^{*1}富山県立大学 ^{*2}慶應義塾大学Ken'ichi Koyanagi^{*1} and Yasuhiro Kakinuma^{*2} ^{*1}Toyama Prefectural University ^{*2}Keio University

1. は じ め に

電場や磁場に応じて、液体の粘弾性が著しく変化する流体を総称して機能性流体と呼ぶ。印加する電場で粘弾性が変化する流体を ER (Electro-rheological) 流体、磁場で変化する流体を MR (Magneto-rheological) 流体と言う。MR 流体は、この 10 年で流体そのものの性能が著しく向上し、自動車のサスペンションを主として、クラッチ、ダンパなどに幅広く応用されている。また、ER 流体もその応用機器が市場に広まりつつある。ただし、機能性流体は、粒子と分散媒に少なからず比重差があることから、ある一定期間放置されると粒子の沈降が生じ、性能が低下してしまうという問題は依然として残る。

これを解決するために、ER 粒子や MR 粒子をゴムやゲルなどの弾性材料に分散させた機能性エラストマーに関する開発研究が、近年活発に行われている [1]。筆者らの研究グループは、ER 流体をゲル化した機能性エラストマー “Electrorheological gel” (ER ゲル) の開発研究 [2] およびその応用に、世界に先駆けて取り組んできた。開発当初は、ER 流体の粒子沈降を抑制し、ER 効果の性能安定性向上を目的としたものであった。研究を重ねた結果、ER ゲルは、ゲルの硬度を高めることで ER 効果とはまったく異なる機能である “電気粘着効果” が発現することが明らかとなった。電気粘着効果は文字どおり、電界を印加することで ER ゲル表面の粘着性が変化する特性である。これまでの研究で基礎的な特性は実験的にほぼ解明され、現在は ER ゲルの高性能化や応用デバイス開発に関する実用レベルの研究が進められている。特に、藤倉化成 (株) の協力により、電極面上に精度よく ER ゲルを製造できるようになり、ER ゲルの応用デバイスの性能は著しく向上した。

本稿では、この ER ゲルの電気粘着効果のメカニズムと

基本的な特性について述べ、これを応用したリニアアクチュエータおよびクラッチについて紹介する。

2. 電気粘性ゲル・エラストマー

2.1 電気粘着ゲルの製造方法

まずはじめに、平均直径 15 [μm] の有機無機複合粒子とハイドロゲンシリコン、架橋剤、ジメチルシリコンオイル、白金触媒を一定の割合で配合して十分に攪拌する。その後、熱処理を施してゲル化 (ヒドロシリル化) することで、微粒子がシリコンゲルに分散した構造体を作る。この構造体に、化学処理などにより表層のシリコンゲルを微量除去して微粒子を突出させることで、ER ゲルが完成する。ER ゲルの全体写真と表面を拡大した写真を図 1 に示す。シリコンゲルに微粒子が物理的に拘束された構造であり、粒子がシリコンゲル表面より突出していることが確認できる。開発した ER ゲルは、粒子濃度が 50 [wt%]、シリコンオイルの粘度 100 [cSt] である。

2.2 電気粘着現象

電気粘着現象は、導電膜 (ITO 膜) を塗布したガラス電極を用いて、ER ゲルとガラス電極界面を観察することで確認できる [3]。ガラス電極 (上側) とアルミ電極 (下側) で 0.5 [mm]~1 [mm] の厚みを持つ電気粘着ゲルを挟み、ガラス電極の上側からマイクロスコープで観察する。ガラス電極と ER ゲルの界面において、印加する電界強度に応じて粘着現象が生じる様子を図 2 に示す。黒い斑点部分がゲルの粘着領域であり、電界強度の増加とともにその粘着面積が増えていくことが分かる。無電界時には電極を支えている微粒子の回りに、電界印加とともにゲルが隆起し、粒子を囲むようにして粘着が広がる様子を確認している。

図 1 ER ゲルの外観と表面の拡大写真

原稿受付 2013 年 2 月 25 日

キーワード: Electrorheological Elastomer, Electrorheological Gel

^{*1}〒 939-0398 射水市黒河 5180^{*2}〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1^{*1}Imizu-shi, Toyama^{*2}Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

図2 ERゲルの電気粘着現象

図3 電気粘着効果のメカニズム

電気粘着効果発生のメカニズムは、ER流体における粒子鎖形成論とは異なり、電界を印加することでERゲルの表面状態が変化すること起因する[2]。図3に電気粘着効果のメカニズムのイメージを示す。厚さ0.5~1.0[mm]のERゲルシートを一方の電極（以後、固定電極）に物理的に固定し、その上に他方の電極（以後、移動電極）を載せた構成とする。無電界時には、ゲル表面より突出している摩擦抵抗の低い誘電体粒子が移動電極を支えている。そのため、移動電極とERゲル界面で生じる抵抗（摩擦力）は非常に小さい。一方、電界を印加すると、粒子間引力により粒子間距離を狭めると同時にゲルを外へ押し出し、界面の電気力によりゲルが隆起する現象が生じる。よって、ERゲルの表面は、粘着性の高いシリコンゲルの占める割合が高くなる。移動電極はこのシリコンゲルと粘着して、移動時に大きな抵抗を受ける。これがERゲルの電気粘着効果である[3]。

電気粘着効果は電界印加後、電気系を含めても数十ミリ秒で生じ、また電界除去後の応答も同様であることから、可変抵抗のブレーキや可変減衰ダンパなど様々なデバイスに活用できる。

2.3 ERゲルの性能

2.3.1 印加電界とせん断応力の関係

図3と同様の構成において、ERゲルに電界を印加した際に発生する粘着抵抗とせん断距離の関係を図4に示す。上部電極がERゲル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ERゲルの弾性変形により線形的にせん断抵抗力が生じる。降伏点までのせん断距離はERゲルの厚さに依存するが、数十マイクロメートルである。一方、せん断距離が降伏点を超えると滑り摩擦

図4 せん断距離と発生せん断力

図5 印加電界と降伏応力の関係（ERゲル厚さ：0.5[mm]）

により一定のせん断抵抗力が生じる。ERGのせん断抵抗力は、せん断速度に応じて多少変化することが確認されているが、その変化量は電圧印加による変化に比べて十分に小さい。

厚さ0.5[mm]のERゲルを用いた場合の印加電界と、降伏点における最大せん断応力（降伏応力）の関係を図5に示す[3]。電界にほぼ比例して降伏応力が増加していくことが分かる。例えば、直径50[mm]のERゲルシートを用いて、1.5[kV/mm]（電極間電位差にして750[V]）を印加すると、25[N]の抵抗力が発生する。

一見すると、ERゲルに印加する電圧は非常に高く、実応用に問題があるように見える。しかし、流れる電流はわずか数十マイクロアンペアであり、消費電力は非常に低く、昇圧回路を用いれば乾電池でも十分に動作する。

2.3.2 経年変化と耐久性

ERゲルは粒子の沈降が生じないことから、ER流体のように長時間未使用の状態が続いても性能劣化が生じない。5年前に製作したERゲルも、当時の性能を維持していることを確認している。電気粘着効果を材料の固定装置のように使う場合には、半永久的に使用できる。半導体ウェハの保持機構に応用して6万回の繰り返し搬送試験を行ったところ、まったく問題なく使用できた。

図6 ERゲルのための二つの電極構造

一方で、電極とERゲルの界面でせん断が起こるクラッチやブレーキ機構などに応用する場合には、摩耗による劣化が起こりうる。その寿命は、使用環境に大きく依存するため、応用デバイスごとに試験をする必要がある。

2.4 ERゲルの電極構造

ERゲルをデバイスに応用する場合、用途に応じて電極構造を決めることが重要である。ERゲルの電極構造は図6に示すとおり、二つに大別できる。

図6(a)は、ERゲルシートを挟むように電極を配置して電界を印加する両側電極構造である。両側電極構造の特徴は、効率よく電界を印加することができ、高い電気粘着効果を得られることである。ただし、例えばこれをクラッチ機構に応用する場合、回転する原動(マスタ)側と従動(スレーブ)側の両方に配線を施すため、スリップリングなどが必要になる。もちろん電気粘着効果を得るためには、両側とも導電体材料を用いる必要がある。

図6(b)は、絶縁性の基板上に陽極と陰極を交互に配置した片側電極構造である。片側電極構造の特徴は、ERゲルに載せる対向板が、導電材料ばかりでなく半導体や絶縁材料であっても、電気粘着効果が得られることである。また、それには配線を施す必要がない利点もある。ただし、両側電極構造に比べ、得られる電気粘着効果は低くなる。

3. ERゲルの応用例

3.1 ERゲルの吸着力による機能性固定装置

図7は片側電極を適用した、ERゲルのマイクロ機械加工用フィクスチャである[4][5]。ERゲル上に加工物をおき、電圧を印加するだけで、簡単に固定ができる。また、工作物の固定位置を調整する際に、微弱に電圧を印加して弱い保持力を与えながら調整できる点もメリットである。位置が決定したら電圧を高め保持力をアップして工作物を固定する。電圧に対する工作物の着脱の応答性は、用いる電源の性能にも依存するが、20~100[ms]である。

3.2 ERゲルを平板クラッチに応用したアクチュエータ

ERゲルは、前節のように電界による吸着力の増大が主たる物性的特性であるが、吸着力が増大した結果として、表面のせん断応力も増大する。これを応用することで、可制御なすべり摩擦ブレーキやクラッチを構成できる。

図7 ERゲルを応用したマイクロ加工用フィクスチャ

図8 多板型 ERゲルドラムの内部構造

図9 ERゲルを用いたリニアアクチュエータ

筆者らは、金属円板上にERゲルを貼り付けたものともう1枚の金属円板を対向させた平板すべりクラッチ要素を、一対の入出力間に並列に多数組み込んだ構造を考案し、ERゲルドラム(ERGD)と呼んだ[6]。ERGDの軸方向断面図を図8に示す。ERGDは中央の軸が入力側であり、モータによって回転される。クラッチすべり面にあるERゲルへ電界を印加すると、ERゲル表面のせん断応力が増加し、対向した金属円板を介して出力側である本体の外周ドラム部分にトルクが伝達される。通常、入力側をグラウンド側に、出力側を高電圧側に通電し、電気回路を構成する。

図9に開発したERゲルリニアアクチュエータ(ERGLA)を示す。ERGLAは、その中心ユニットが外部に固定されたバーに沿って運動するタイプの直動アクチュエー

図 10 ER ゲルを貼り付けた電極シート

図 11 ER ゲルベルト伝達機構

タである。中心ユニットには二つの ERGD があるが、各 ERGD の入力軸は一つの駆動用モータと反転ギアにより同じ速度で逆向きに回転する。そのため、二つの ERGD の出力は互いに逆を向いた拮抗的な配置となっている。ERGD に印加する電圧を制御することで、ERGLA の駆動力とその方向を制御できる。これまでに、28 の ER ゲルクラッチ要素を用いて、最大で 588 [N] の出力を達成している [7]。

3.3 ER ゲルをプリー曲面に適用した伝達機構

前節までは、ER ゲルを常に平面に貼付した状態で使用していた。しかし、ER ゲルはある程度の柔軟性があるため、屈曲した状態で、もしくは屈曲しながらせん断応力を発現できる可能性がある。そこで、図 10 に示す ER ゲルを貼り付けた電極シートを、平ベルト伝達機構の従動側プリー側面に巻きつけた。この上に金属平ベルトを掛けることで、図 11 に示す ER ゲルベルト伝達機構を開発した。こ

の機構は、ベルト駆動機構の持つ減速機としての特性のみならず、クラッチとしての伝達率制御の特性も持つ。図 11 のものは、減速比が 3 であり、最大で 8 [Nm] 程度を伝達できる [8]。

4. お わ り に

今回報告した ER ゲルは、表面が比較的さらさらして全体に硬めの、電気粘性エラストマーと呼ぶべきものだが、組成によっては粘弾性を持つゲルとして作成することも可能である。研究が進むにつれ、いまだに新たな物性を発見することもある若い材料ではあるが、ロボットやメカトロ機器の一部に用いることで、それまでの機器よりすぐれた特性や、新たな機能を実現できると期待する。読者諸兄の新たなハードウェア開発の参考となれば幸いである。

参 考 文 献

- [1] H.X. Deng and X.L. Gong: "Adaptive Tuned Vibration Absorber based on Magneto-rheological Elastomer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, vol.18, pp.1205-1210, 2007.
- [2] Y. Kakinuma, T. Aoyama, H. Anzai, H. Sakurai, K. Isobe and K. Tanaka: "Application of ER Gel with Variable Friction Surface to the Clamp System of Aerostatic Slider," *Precision Engineering*, vol.30, pp.280-287, 2006.
- [3] Y. Kakinuma, T. Aoyama and H. Anzai: "Development of High-performance ER Gel based on the Principle of Electro-adhesive Effect," *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, vol.21, pp.1501-1508, 2010.
- [4] 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 南展史, 安齊秀伸: "真空プロセスのための電気粘着保持機構の開発", 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.807-808, 2009.
- [5] Y. Kakinuma, T. Aoyama and H. Anzai: "Application of the Electro-rheological Gel to Fixture Devices for Micro Milling Processes," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol.1, no.3, pp.387-398, 2007.
- [6] K. Koyanagi, Y. Kakinuma, H. Anzai, K. Sakurai, T. Yamaguchi, T. Oshima, N. Momose and T. Matsuno: "Basic Structure and Prototype of Novel Linear Actuator with Electro-Rheological Gel," *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp.3266-3271, 2007.
- [7] 高田悠大, 小柳健一, 柿沼康弘, 安齊秀伸, 桜井宏治, 大島徹: "ER ゲルを用いた大出力リニアアクチュエータの開発", 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1H1-1, 2011.
- [8] K. Koyanagi, M. Dohi, Y. Kakinuma, H. Anzai, K. Sakurai, T. Motoyoshi and T. Oshima: "Controllable Belt Drive System Using ER Gel," *Proceedings of the 13th International Conference on New Actuators*, pp.85-88, 2012.

小柳健一 (Ken'ichi Koyanagi)

2000 年 9 月大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同工学研究科助手, 富山県立大学工学部講師を経て, 2010 年 4 月より同准教授。博士 (工学)。機能性材料を用いたメカトロニクス機器の開発, パーチャルリアリティ・ロボティクスのリハビリへの応用などに従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

柿沼康弘 (Yasuhiro Kakinuma)

2006 年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了, 博士 (工学)。2005 年慶應義塾大学理工学部助手, 2008 年同専任講師, 2011 年同准教授。主として, ER ゲルの開発と応用, ナノマイクロ機械加工と知能化工作機械に関する研究に従事。CIRP, IEEE, 日本機械学会, 精密工学会などの会員。