

展 望

平成 19 年度の機能性流体分野の研究動向*

青山藤詞郎** 柿沼康弘**

*平成 20 年 6 月 23 日原稿受付

**慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

1. はじめに

機能性流体とは、電場や磁場などに反応して、物理的・化学的特性が変化することで特殊な「機能」が発現する流体の総称である。具体的な機能性流体として、電場や磁場を印加することで、粘弾性が変化する電気粘性流体 (ER 流体, Electrorheological Fluids) や磁気粘性流体 (MR 流体, Magnetrorheological Suspensions), 磁気力を発生する磁性流体 (Ferro fluids), クーロン力と誘電率・電界の勾配の複合作用により流れが生じる EHD 流体 (Electro-Hydro-Dynamic Fluids) が挙げられる。最近では、ER 流体や MR 流体を原料にした機能性エラストマーが開発され、機能性流体分野の一研究として位置づけている。

機能性流体はそれ自体が能動的もしくは受動的なアクチュエータとして機能するため、性能安定性に優れた機能性流体をフルードパワーデバイスに応用することで、デバイスの構造や機構を簡易化でき、さらに入力に対する機械的な応答性の向上が期待できる。外力が作用して性能が発現する受動的アクチュエータとして機能する流体は、ER 流体, MR 流体, 磁性流体で、これらを適用した具体的な応用デバイスとして、動力伝達を制御するブレーキ・クラッチ, 減衰性能を可変に調整できるダンパ, 可動部を必要としないバルブなどが挙げられ、多方面で活発に開発研究が進められている。能動的なアクチュエータとして機能する流体は、EHD 流体や電界共役流体 (Electro-Conjugate Fluids, ECF) で、これを作動流体にして脈動のないポンプやモータの開発研究が大学を中心に進められている。また、2 年に一度開催される機能性流体に関する国際会議 International Conference on ER Fluids and MR Suspensions (ERMR) で、2006 年度にアメリカで開催された第 10 回大会では ER 流体や MR 流体を原料にした機能性エラストマーに関する研究報告¹⁾が数件あり、これを受けてドイツ, アメリカ, 中国を中心に機能性エラストマーに関する研究が急速かつ勢力的に展開され始めている。機能性エラストマーは能動的と受動的要素の両面を有することが明らかにされつつあり、今後の機能性流体の新しい研究分野として発展していくと考えられる。2008 年度ドイツのドレスデンで開催予定の The 11th Int. Conference on ER Fluids and MR Suspensions (ERMR2008) では、“MR Elastomer”に関するセッションが新たに組まれることになっていることから、機能性エラストマーに対する国外の研究者らの関心の高さがうかがえる。

本稿では、日本フルードパワーシステム学会論文集および科学技術振興機構が提供する JDream などの文献データベースを活用して平成 19 年度における機能性流体分野の国内外の研究動向について調査を行ったので、ここで報告する。

2. 機能性流体分野の研究動向

ER 流体, MR 流体・磁性流体, 機能性エラストマー, EHD 流体・電界共役流体の各々に対する研究動向について以下に紹介する。

2.1 ER 流体

近年, ER 流体の基礎研究で注目すべきは、香港科学技術大学 (HKUST) の P. Shen 教授らが「nature materials」の Letter に 2003 年に発表したナノ粒子の巨大 ER 効果に関する研究であろう。この報告以来、ナノ粒子を分散した ER 流体の巨大 ER 効果に関する研究が、アジアを中心に活発に行われ、2007 年度もこれに関する多くの研究報告があった²⁾。巨大 ER 効果を示す ER 流体の開発において、クラスター形成に極性分子を作用さ

せることで、数百 kPa のせん断応力を示す PM-ER 流体(Polar molecule dominated electrorheological fluids) が開発されたことも特筆すべきことである³⁾。

ER 流体の応用研究は、高速制御性や機構の簡易性を活かした、ブレーキ、クラッチ、ダンパ、アクチュエータなどの応用デバイス開発が中心で、小形産業機器や医療分野への応用をターゲットにしているものが多い⁴⁾。ER 流体のクラッチを医療分野やアミューズメント分野で使用可能な力覚提示要素へと応用する研究^{5,6)}も国内外を問わず行われており、新しい機構の開発や被験者試験を通して、その有効性が検討されている。マイクロスケールへの応用研究も活発で、マイクロマシンで使用するためのフレキシブルマイクロアクチュエータ⁷⁾や μ -TAS (micro Total Analysis System) などを使用するマニピュレーションに ER 流体を適用した研究開発⁸⁾も試みられている。

ER 流体は電氣的に粘弾性特性を制御可能であることから、その制御法に関する研究も広く行われている。高い制御性を得るためには、正確なモデル化を行う必要があるため、ER 効果と流れの形態の関係を調査した研究⁹⁾や、応答遅れが ER ダンパの性能と安定性に及ぼす影響を数学モデルで検討した研究¹⁰⁾が行われている。制御法に関しては、ER ハプティックデバイスの力覚やナノ粒子の ER 流体を用いたダンパの減衰特性を、物理モデルやゲインを高速に切り替えるスライディングモード法により制御することで、応答追従性や安定性の向上を図った研究が行われており、ER 流体を高速かつ安定してコントロールするために適した制御手法の一つとして、その有効性が示されている^{11,12)}。

2.2 MR 流体・磁性流体

MR 流体は、1990 年代米国のロード社により量産化され、現在は自動車用のサスペンション、産業機器用ダンパ、ナノスケール鏡面仕上げ加工など多く分野で実用化されている。最近の研究で、MR 流体は磁場に対する応答性が 1 ミリ秒以下であることが明らかにされ、その実用展開はさらに広がると期待される。このような背景から MR の研究は応用研究が中心で、特にダンパ、クラッチ、ブレーキ、ショックアブソーバなどに関するものが多い。ロード社の出頭氏がレビューしているように、実際に MR ダンパは車両、土木・建築分野、義肢などで実用化され、MR ブレーキやクラッチは船舶の電動ステアなどに採用されている^{13,14)}。

最近の MR 流体・磁性流体の応用研究で注目すべきは、MR 流体のサブナノオーダー研磨加工への応用に関するものである。アメリカの QED 社が MR 流体をガラスレンズの研磨加工に応用し、形状精度を高精度に保ちつつ曲面のサブナノオーダー研磨まで可能にした研磨加工機を開発し、製品化している。これに関する研究論文は 2007 年度も多数発行されている^{15,16)}。また、MR 流体に磁場を印加した状態で、研磨液を噴出する MR ジェット研磨を提案し、その有効性を示している¹⁷⁾。国内でも MR 流体・磁性流体を利用した鏡面創成技術に関する研究は積極的に行われており、従来の研磨手法では能率的に加工することが難しい微細管の内壁などを高精度に研磨する手法として有効であることが示されている^{18,19)}。

2.3 機能性エラストマー

ER 流体や MR 流体は粒子と分散媒の比重差から長時間の使用において、粒子の沈降や凝集が生じて性能が低下してしまうことが問題となっていた。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研究開発が、近年活発に行われている。特に、MR エラストマーに関する研究はドイツ・中国を中心に展開しており、多くの研究者が開発に取り組んでいる²⁰⁻²³⁾。機能性エラストマーは、従来の ER 流体や MR 流体と同様に見かけの粘弾性が変化する特性を示すため、受動的なアクチュエータとして捉えることもできるが、一方で、電界や磁界を印加することで変形が生じるため、この特性を能動的なアクチュエータとして捉えることもできる。そのため、受動・能動の両面から特性解析などの基礎的な研究が進められている。まだ、多くの研究は基礎的で材料開発段階や基礎特性解析段階であるが、2008 年度 8 月に開催を予定している ERM08 国際会議では ER 流体、MR 流体、磁性流体に加え、「MR エラストマー」が新たなトピックスとして追加され、その発表件数 17 件に及ぶことから、今後「機能性エラストマー」に関する研究が国際的に活発化していくことが予想される。特性解析や高性能化が進み、数年以内には、実用化に向けた応用研究へと展開していくと推測される。

国内でも MR ゲルに関する研究²⁴⁾や、ER 流体をゲル化した ER ゲルに関する研究^{25,26)}が行われているが、これに携わる研究者は国外に比べて圧倒的に少ない。機能性エラストマーの研究は、まだ始まったばかりで

あり、国内での今後の発展・展開が期待される。

2.4 EHD 流体・電界共役流体

EHD 流体は電界を印加すると高出力な流動を示す誘電液体の総称である。その流動原理は、液体に印加する電界強度により、クーロン力が支配的なイオンドラッグ流動と電気歪みが支配的な純伝導流動の場合に大別される。しかし、その流動原理は未解明な部分も多く、電極配置や形状により流動特性が著しく変化するため、効率良く流動を誘起するための電極形状に関する検討²⁷⁾や、シミュレーションによる EHD 流動の解析²⁸⁾など基礎的な研究も多く試されている。応用研究としては、三井らにより EHD モータの開発²⁹⁾などが行われている。

一方、EHD 流体と類似した電界共役流体 (ECF) は、横田らが中心となって応用研究が積極的に展開されており、ECF マイクロモータに加え、指の動きを模した柔軟性を有するマイクロフィンガ³⁰⁾や平面形電極を利用した平面ポンプなどの開発³¹⁾が行われている。今後は新規なマイクロアクチュエータとしてマイクロマシン分野での実用化が期待される。

3. おわりに

機能性流体の中で、MR 流体はその性能や制御方法、応用分野がほぼ確立し、車両用ダンパや鏡面研磨技術として実用化され、その有効性が市場規模で認識され始めている。他の機能性流体については、実用化レベルで見ると、性能安定性の向上や従来アクチュエータとの差異および優位性を明確化することが求められるが、今後、それぞれの機能性流体が高性能化し、その機能性を安定して自在に制御する技術が開発されれば、次世代フルードパワーシステムとして多くの分野で実用化・製品化されることが期待される。これに関して、日本フルードパワーシステム学会では、平成 18 年度より「機能性流体を活用した次世代フルードパワーシステムに関する研究委員会」(委員長：中野政身教授(東北大学))が設置され、産学間で活発な研究活動を展開している。

参考文献

- 1) Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (Proceedings of 10th Int. Conf.), Edited by F.Gordaninejad, O.A.Graeve, A.Fuchs, D.York, World Scientific Publishing (2007).
- 2) B. Wang, X. Zhao et al. : Titanium Oxide Nanoparticle Modified with Chromium Ion and its Giant Electrorheological Activity, Composites Science and Technology, Vol. 67, (2007), pp. 3031/3038
- 3) R. Shen et al. : The Methods for Measuring Shear Stress of Polar Molecule Dominated Electrorheological Fluids, Journal of Applied Physics, Vol. 102, No. 024106 (2007)
- 4) S. Choi et al. : Field Test on Vibration Control of Vehicle Suspension System featuring ER Shock Absorbers, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1169/1174
- 5) 河西伸一, 他 3 名 : 電気粘性流体を用いたバーチャルグローブの開発 (ERF の特性と手の形状), 日本機械学会論文集 C, Vol.73, No. 733, (2007), pp.2419/2425
- 6) Weinberg B. et al. :Design, Control and Human Testing of an Active Knee Rehabilitation Orthotic Device, Proc of IEEE Conference on Robotics and Automation, (2007), pp. 4126/4133.
- 7) 吉田和弘, 他 2 名 : 均一系 ER 流体を用いたフレキシブル ER マイクロアクチュエータ, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.73, No.733, (2007), pp.2508/2513
- 8) X. Niu et al., Microfluidic Manipulation in Lab-chips, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1187/1190
- 9) 中野政身 : ER/MR 流体のレオロジー及び流動特性, 可視化情報学会誌, Vol.27, No.105, (2007), pp.103/110
- 10) K. Koyanagi: How does the Time Delay of an ER Fluid's Response Affect Control Performance of Servo-systems?, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (2007), pp. 1560/1565
- 11) S. Choi et al. : Speed Control of DC Motor using Electrorheological Brake System, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1191/1196

- 12) Y. Han et al. : Force Feedback Control of a Medical Haptic Master using an Electrorheological Fluid, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1149/1154
- 13) 出頭茂 : MR 流体とその応用, 日本フルードパワーシステム学会誌解説, Vol.38, No.2, (2007), pp.36/40
- 14) 古荘純次, 他 7 名 : せん断型コンパクト MR ブレーキを用いたインテリジェント下肢装具の研究開発 (第一報), 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, (2007), pp.867/873
- 15) J. Degroote et al: Removal Rate Model for Magnetorheological Finishing of Glass, Applied Optics, Vol.46, No. 32, (2007), pp.7927/7941
- 16) J. Seok: A Study on the Fabrication of Curved Surfaces using Magnetorheological Fluid Finishing, Machine Tools and Manufacture, Vol.47, (2007), 2077/2090
- 17) W. Kordonsiki and A. Shorey: Magnetorheological (MR) Jet Finishing Technology, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1127/1130
- 18) 佐藤隆史 他 3 名 : 磁気粘性流体を利用した鏡面創成技術の開発, 砥粒加工学会誌, Vol.51, No.4, (2007), pp.238/243
- 19) 西田均 : 磁気機能性流体による細管内面研磨の提案と技術的検討, 日本実験力学学会論文集, Vol.7, No.3(2007), pp.258/263
- 20) H. X. Deng and X. L. Gong: Adaptive Tuned Vibration Absorber based on Magnetorheological Elastomer, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1205/1210
- 21) D. York, et al : A New MR Fluid-Elastomer Vibration Isolator, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 18, (2007), pp. 1221/1225
- 22) L. Chen, et al : Investigation on Magnetorheological Elastomers based on Natural Rubber, Journal of Material Science, Vol.42, (2007), pp.5483/5489
- 23) X. Guan, X. Dong and J. Ou: Magnetostrictive Effect of Magnetorheological Elastomer, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 320, (2007), pp. 158/163
- 24) 砂子田勝昭 他 2 名 : 磁場反応材料の開発と特性調査, 平成 19 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2007), pp.46/47
- 25) 柿沼康弘 他 3 名 : ER ゲルを適用した力伝達素子における片側電極の最適設計” 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.733, (2007) pp.192/199
- 26) K. Koyanagi et al: Basic Structure and Prototype of Novel Linear Actuator with Electro-Rheological Gel, The 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2007), (2007), pp.3266/3271
- 27) 花岡良一 他 4 名 : EHD 液体ジェット発生用の実用的電極系と液体ポンピング特性, 電気学会論文誌 A, Vol.127, No.12, (2007), pp.769/776
- 28) Y. Ohtomo et al: Characteristics of the Electrohydrodynamic (EHD) Pump Working with an Electrostriction Force, 電気学会論文誌 A, Vol.127, No.9, (2007), pp.531/536
- 29) 寺阪澄孝 他 2 名 : EHD 現象を応用した回転型アクチュエータの開発-EHD モータの開発-, 精密工学会誌, Vol.74, No.1, (2008), pp.87/91
- 30) 横田真一 他 3 名 : ECF ジェット駆動マイクロフィンガの提案とラージモデルの特性評価, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.38, No.5, (2007), pp.65/70
- 31) W. Seo, et al: A High Performance Planar Pump using Electro-conjugate Fluid with Improved Electrode patterns, Sensors and Actuators A, Vol.134, (2007), pp.606/614

著者紹介



あおやま とうじろう
青山 藤詞郎 君

1974 年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業，1979 年慶應義塾大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了．同年慶應義塾大学理工学部助手，1988 年同大学理工学部助教授を経て 1995 年より同大学教授，現在に至る．流体軸受の最適設計，ER 流体の機械要素への応用，環境共生型機械加工システムなど生産工学に関する研究に従事．日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，精密工学会，CIRP，ASPE，NAMRI/SME などの会員．工学博士

E-mail: aoyama@sd.keio.ac.jp URL: <http://www.ina.sd.keio.ac.jp/aoyama/>



かきぬま やすひろ
柿沼 康弘 君

2002 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業，2006 年慶應義塾大学大学院工学研究科総合デザイン工学専攻後期博士課程修了．2005 年慶應義塾大学理工学部助手を経て 2008 年同大学専任講師，現在に至る．機能性エラストマーの開発と応用，ナノマイクロ機械加工，機械要素開発などを通して生産工学に関する研究に従事．日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，精密工学会，砥粒加工学会などの会員．博士（工学）

E-mail: kakinuma@sd.keio.ac.jp URL: <http://www.ina.sd.keio.ac.jp/aoyama/>