機能性流体の現状と今後の展望*

State of Art and Future Prospects on Functional Fluids

中野政身**

Masami NAKANO

Key words

functional fluids, electro-/ magneto-rheological fluids, liquid crystal, EHD fluid (ECF), magnetic fluid, functional gels

1. はじめに

身近な代表的な流体として水、油、空気がある。水や油は液体で粘度が高いが圧縮性が小さく、空気は気体で粘度が小さいが圧縮性があるなど、それぞれの流体に固有の性質をもっている。これらの粘性や圧縮性などの性質も流体のもつ1つの機能としてみれば、身近にある水や油そして空気なども機能性流体とみなされる。しかし、ここでいう機能性流体 (Functional Fluids) とは、流体を人工的に調製してある機能を強調しかつ外部から加える物理量 (電磁場・光・温度など) を制御することによってその物理化学的性質を機能的に変化できる流体を指している。すなわち、工学的に応用可能な機能性を発揮する流体の総称である。精密工学分野で活用の可能性のある機能性流体としては、現状では、電場や磁場に反応して粘弾性のレオロジー特性が変化するER流体 (Electro-Rheological Fluids, 電気粘性流体) やMR流体 (Magneto-Rheological Suspensions, 磁気粘性流体)、磁気体積力を発生する磁性流体 (Magnetic Fluids)、電場や磁場に反応して粘弾性などのゲル特性の変化する機能性ゲル、そして直流高電圧を印加するとジェット流が発生するEHD流体 (Electro-Hydro-Dynamic Fluids)・ECF (Electro-Conjugate Fluids, 電界共役流体) などが挙げられる。これらの機能性流体のもつ固有の機能性を工学的に有効に活用することによって、従来になかった機能を発揮し、かつ高速性、簡便性、コンパクト性、さらには知能性などの有意な特徴が付与される可能性があり、精密デバイスのスマート化が期待される。具体的には、ブレーキ、クラッチなどによる動力伝達制御、ダンパによ

る振動の抑制、可動部の全くないバルブによるアクチュエータの精密制御など、さまざまな方面に応用可能であり、多方面で活発に研究・開発が進められてきている^{1)~5)}。

本稿では、精密工学分野に活用の可能性のある機能性流体としてER流体、MR流体、磁性流体、およびEHD流体・ECF、機能性ゲルを取上げ、これらの機能性流体の種別ごとにその機能性と特徴について概観しながら研究開発の現状を紹介し、今後の研究開発の動向について展望を行う。

2. E R 流 体

2.1 ER流体の機能性と特徴⁴⁾

外部電場の作用のもとで流体の内部構造が変化しそのオロジエ的性質が大きく変化する現象をER効果 (Electro-Rheological Effect) といい、そのような機能を有する流体をER流体と呼ぶ。ER流体は、特にその粘性を数ミリ秒のオーダーで電気的に可逆的かつ連続的に変化できるため、電気信号によって直接「力」の信号に変換し制御できる特筆すべき機能を有している⁶⁾。1949年のWinslowによるER流体の最初の発見⁷⁾からこれまで、様々な種類のER流体が発見され、また新たに開発されてきている。これらのER流体は、その組成とER効果の違いから大きく分けて、シリコンオイルなどの絶縁性の液体中に電場下で分極しやすい物質からなる微粒子 (一般に、直径1~10 μm 程度) を分散した粒子分散系ER流体と低分子や高分子の液晶に代表される均一系ER流体に分けられる。

これらのER流体の機能発現は、粒子分散系ER流体では電場下で誘電分極した多数の分散粒子によるクラスタ構造の形成に起因し、液晶系ER流体では基本的には電場下での液晶の棒状分子や液晶ドメインの配向挙動に起因する。このようなER流体の種類によるER効果の発現因子の違いによってER効果の特性も大きく異なる。粒子分散系ER流体では電場印加によって形成された粒子クラスタ構造を崩壊する力、すなわち降伏せん断応力 τ_y が現れ、それ以下の応力では流動せず固体として振る舞いせん断応力がせん断歪みに比例して増加する弾性体としての特性が主となり (図1 (a))、応力が降伏せん断応力を越すと降

*原稿受付 平成18年5月19日

**山形大学工学部機械システム工学科 (山形県米沢市城南4-3-16)

中野政身

1982年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了、工学博士、1997年山形大学教授、現在に至る。1990年米国リーハイ大学客員教授。機能性流体、流体関連振動・騒音、振動制御、生体工学などに関わる流体制御システム工学に従事。日本機械学会フェロー。

図1 粒子分散系 ER 流体の一般的な ER 特性

伏現象と塑性流動が起こり粘性流体としての挙動を呈するビンガム流体に類似した挙動を示す(図1(b))。一方、液晶系 ER 流体では、有意な降伏せん断応力は現れず、電場下でもせん断応力はせん断速度にほぼ比例して増加しニュートン流体に類似した特性を示す。その増加割合が電場強度 E によって変化する。

2.2 ER 流体とその応用の現状と展望

ここ十数年に及ぶ流体の研究開発の結果、実用に供する ER 流体(粒子分散系 ER 流体と高分子液晶)が開発され国内でも供給できる体制が整備されつつある⁸⁾。これまで、ER 流体と MR 流体に関する国際会議が隔年で開催されてきており、2004 年に北京で開催された第 9 回の ERM 国際会議⁵⁾では、全発表件数の約 42% が ER 流体に関するもので、その約 70% が ER 流体の開発や特性評価に関するもの、残り 30% が応用分野に関する発表であった。依然、流体開発や特性把握が活発で斬新な性能を示す ER 流体の出現の可能性を示唆している。その例として、ホンコン科学技術大学(HKUST)の Ping Sheng 教授らによって開発されたナノ粒子 ER 流体⁹⁾が、基底粘度が非常に高い難点があるものの最大降伏応力が 100 kPa 程度を示し、従来の ER 流体の 20 倍程度の性能を発揮する ER 流体が出現したことは特筆すべきことである。

応用分野では、流体を媒体として動力を伝達するクラッチやブレーキ、流量や圧力を制御するバルブ、そして液体粘性を利用したダンパなどの流体が介在する機械要素への応用と同時に、振動制御、ロボット制御、アクチュエータ制御、マイクロマシン制御などの各種制御システムへの応用も期待される。1990 年代当初、ER 流体が粘性を可変する機能をもっていることと市場規模の大きさから、自動車産業での応用が考えられ、液体封入式エンジンマウント、ショックアブソーバなどへ応用し車両の振動制御性能を高めようという研究が活発に行われていたが、当時の ER 流体の完成度の低さと使用条件の過酷さから実用化レベルには至らなかった。その後、使用条件が過酷ではない一般産業への応用を目指して、除振テーブルへの適用を目指したペローズ ER ダンパの開発と除振制御法の提案¹⁰⁾、建築構造物の制振システムへの ER ダンパの応用、工作機械テーブルの剛性向上とひびり振動抑制、カンチレバーなど構造部材への ER 流体の減衰材としての適用、ER 流体の研磨

表1 粒子分散系 ER 流体と MR 流体の諸特性の比較

	粒子分散系 ER 流体	MR 流体
最大降伏応力	2 ~ 5 kPa	50 ~ 100 kPa
最大印加電磁場	~ 5 kV/mm	~ 250 kA/m
基底粘度	0.1 ~ 1.0 Pa·s	0.1 ~ 1.0 Pa·s
使用温度範囲	+5 ~ +90 °C (含水系) -25 ~ +125 °C (非含水系)	-40 ~ +150 °C
応答時間	< 数 m sec	< 数 m sec
流体密度	1 ~ 2 g/cm ³	3 ~ 4 g/cm ³
供給電源	2 ~ 5kV / 1 ~ 10mA	2 ~ 25V / 1 ~ 2A

加工への応用¹¹⁾、高分子液晶のリニアガイドシステムのダンピング制御への応用¹²⁾等々、多方面での ER 流体の応用研究が活発に行われてきている。ER 流体を作動流体とする液压システムの要素研究として、ER バルブの PWM 制御とアクチュエータ制御への応用^{13) 14)}、ER 流体ポンピング用圧電マイクロポンプ¹⁵⁾、ホトリソグラフィ法で製作したマイクロアクチュエータ¹⁶⁾など精密制御を目的としたマイクロフルードパワーシステム構築のための研究開発も試みられてきている。また、電動モータと ER クラッチからなる ER アクチュエータを活用した力覚提示装置を応用した 3 次元上肢リハビリ訓練システムが実用化レベルで開発されている¹⁷⁾。今後、電極だけで制御でき高速応答性が確保できる ER 流体の特徴を活用した、機器の軽量化・小型化を指向した実用化研究が望まれ、各種の小型化 ER デバイスの構築とそれらの温度変化の少ない環境で使用される一般産業用機器や医療・福祉機器などへの応用が期待できる。

3. MR 流体

3.1 MR 流体の機能性と特徴

MR 流体は、シリコンオイルなどの油を分散媒としその中に 1 ~ 10 μm の強磁性体粒子(カルボニル鉄)を分散させたコロイド溶液であり、磁場の印加によってそのレオロジー特性を急速かつ可逆的に変化できる機能(MR 効果)を示す流体である。磁場印加により多数の磁区を有する強磁性体粒子が磁気的に分極し、粒子分散系 ER 流体と同様に粒子同士が結合してクラスタ構造を形成することによりレオロジー特性が変化する。一方、このように外部磁場に反応する機能性流体として磁性流体が古くから知られているが、MR 流体との最も大きな違いは分散粒子径である。一般的な磁性流体の粒子径は 5 ~ 10 nm 程度であるのに対して MR 流体では 1 ~ 10 μm 程度であるため、この粒子径のオーダーの違いから MR 流体では磁性流体に比べ著しく大きな MR 効果が得られる。また、両流体とも粒子同士の凝集や分散安定性の向上のため分散粒子表面に界面活性剤等を吸着させているが、磁性流体ではブラウン運

動によって分散粒子が一様に分散するのに対して、MR 流体では分散粒子の粒径と比重が大きいと粒子の沈降が問題となる。この対策として、常に弱磁場を印加するなどして粒子沈降を抑制する提案がなされている。MR 流体の誘起せん断応力は、粒子分散系 ER 流体のものに比して格段に大きく、約 20 から 50 倍の値を示すのが特徴的である。表 1 には、粒子分散系 ER 流体と MR 流体との最大降伏応力、応答時間、流体密度、使用できる温度範囲などの諸特性を比較して示す。

3.2 MR 流体とその応用の現状と展望

MR 流体は、1948 年に Rabinow によって最初に発見され¹⁸⁾、現在では米国 Lord 社¹⁹⁾ から市販されているとおり商業ベースでの市場展開が行われている。現在年間 100 ton のオーダーの MR 流体が生産・販売されている。ERMR2004 国際会議⁵⁾ では、全発表件数の約 50 % が MR 流体に関するもので、その約 20 % が MR 流体の開発や特性に関するもので、残り 80 % が応用分野に関する発表であった。ER 流体と比較して発表件数が格段に多くなり、MR 流体が市販されるほど成熟していることから MR 流体の開発よりもむしろ実用化を目指した応用分野の研究が活発に行われていることを示唆するものである。MR 流体の応用機器としては、Dr. J.D. Carlson がレビューしているように²⁰⁾、各種の MR ブレーキ、クラッチ、ダンパ (Lord 社)、ショックアブソーバ (Delphi 社) などのモジュールが開発され、MR ダンパや MR ショックアブソーバは実際にトラックなどのシートダンパや乗用車 (Cadillac SRX, Porsche Carrera など) さらにはずり橋のワイヤ振動抑制装置やビルなどの建築構造物の免震装置などに搭載され実用化に至っており、今後の実績が期待される。ほかに、MR 流体をスポンジに含浸させた MR コンポジットブレーキを開発してコイル巻線用張力制御装置に應用して著しい張力変動の低減を実現したり²¹⁾、また、新規でコンパクトな MR パルプを用いた MR ベロズダンパが開発され、良好な制振特性を実現したりしている事例がある²²⁾。さらに、MR 流体を活用した研磨装置の開発、MR 流体の高圧シールへの応用としてその耐圧特性の検討、MR 流体が磁石に吸引される特性を活用した MR 流体自身を弁体としたパルプを用いたマイクロ流体システムの構築などが試みられている。MR 流体の場合は、高出力で温度依存性が少ないことから今後かなり広範な分野での応用の可能性が期待できるが、最大の欠点である粒子沈降が回避されかつ粒子の再分散性が保証できる応用に限定されるだろう。

4. 磁 性 流 体

1965 年に NASA の Dr. S.S. Papell によって無重力空間における液体燃料の流れを磁石を用いて制御するために初めて磁性流体が開発された²³⁾。磁性流体は、粒子表面を界面活性材処理した 5 ~ 10 nm 程度の強磁性微粒子を、水やケロシンなどの分散媒中に高濃度に分散した粒子コロイドである。非常に安定しており、重力や磁場勾配による凝

集を起こすことはなく、その基本的物性は磁性と粘性によって特徴づけられる。磁場の作用により強磁性体なみの磁気分極を示し、磁氣的性質はヒステリシスや残留磁化をもたない超常磁性の特性を示す。非一様磁場において磁気体積力が発生する性質をもち、また界面に作用する垂直磁場により界面の内外でマックスウェル応力による圧力差が生じる。分散濃度が低いと磁性流体はニュートン流体と同じ挙動を示すが、高濃度になると擬塑性流動を示し、若干ながら磁性流体粘度の磁界依存性も認められるようになる。これまで、マグネタイトやマンガン亜鉛フェライトなどの粒子を分散した酸化物磁性流体、コバルトやニッケルなどの強磁性金属や合金を用いた金属磁性流体、磁化の温度依存性の大きい感温性磁性流体、磁性粒子表面に形成される電気二重層の作用で安定に粒子を分散させるイオン性磁性流体などが開発されてきている^{3) 4)}。

磁性流体の応用としては、従来からシール材やボイスコイルのダンパなどの実用実績があるが、最近では、無重力環境を模擬した磁性流体の界面現象²⁴⁾、感温性磁性流体を活用した磁性流体熱交換ポンプや対流熱伝達の促進制御²⁵⁾、磁性流体マイクロマシン¹⁾ などの基礎研究が鋭意進められてきている。今後の磁性流体活用のブレークスルーと実用化が待たれるところである。

5. EHD 流体・ECF

誘電性液体 (実質的には絶縁性液体) に高い電場を与えると、導電率と誘電率との不均一性によって流体内部に電気的な力が発生する。直流電場では誘電泳動力よりも自由電荷に作用するクーロン力が支配的になり、このクーロン力が流体力学的不安定性を生じさせ流動を引き起こすことがある。このように高電場において誘電液体に対流や二次流れが発生する現象を電気流体力学 (Electrohydrodynamic; EHD) 効果という。近年、デカン二酸ジブチルなどに線状電極対を挿入して直流高電圧を印加すると電極間に顕著なジェット流が発生する現象が見出されるなど²⁶⁾、高出力の誘電液体が発見され、その特徴である小型化・マイクロ化を目指した応用研究が日本国内で活発に行われている¹⁾。

横田らのグループは、これらの高出力の誘電液体を ECF (Electro-conjugate fluids) と呼び、ECF を活用した各種のマイクロモータを開発するとともに、そのマイクロ化を鋭意進めてきている²⁷⁾。また、ECF ジェットによる発生圧力を活用したマイクロ人工筋や電子チップ冷却用 ECF ポンプなどの開発も実施している。また、中田らのグループは、二重螺旋状コイルを電極にもつ ECF ポンプとそれを駆動源とするリニアアクチュエータを提案し、簡単な構造をもつ ECF 駆動アクチュエータシステムの開発に取り組んでいる^{1) 27)}。さらに、三井らは、新たな異なる誘電液体で生じる流れ発生現象を EHD 現象として捉え、回転型アクチュエータとしてロータ側から流体が噴出するタイプの EHD モータや絶縁性の液体が気化した気体

中で生じるジェット流を活用した EGD モータなどを開発している²⁸⁾。また、誘電液体としてセバシン酸ジブチルを用いた EHD マイクロポンプが提案され試作され、そのポンプ性能の向上について理論と実験両面から検討した結果が報告されている²⁹⁾。今後とも、高出力の誘電液体の開発と同時に、マイクロモータ、マイクロポンプ、マイクロアクチュエータなどマイクロマシンの分野への応用が期待される。

6. 機能性ゲル

近年の新規機能性材料として、電磁場に反応して粘弾性特性が変化したり変形したりする興味深い機能性ゲルが開発されてきている。粒子分散系 ER 流体の粒子沈降やシール構造の必要性などを回避できる ER 粒子をゲル構造化した ER ゲルが開発され、この ER ゲルと接触して摺動する部材に接触界面の性状を電気的に可変して摩擦抵抗が変化できる機能性が明らかにされ、基本的な性能が評価されている³⁰⁾。今後、摺動ダンパやブレーキなどへの応用の可能性が期待される。また、電場により弾性率が変化する電場応答性シリコンゲルや、磁場により巨大磁気粘性効果を示すカラギーナンゲルが開発されている³¹⁾。これらの機能性高分子ゲルは電磁場によりその弾性率を大きく変化できることから、弾性の力覚提示などへの応用が期待される。さらに、電場に応答して大きな変形をする、低電圧駆動で応答性、耐久性、加工性に優れたイオン導電性高分子ゲル³²⁾や、高速大変形の可能な誘電性柔軟高分子ゲル³³⁾が開発されてきており、ソフトアクチュエータ材料として種々の分野への魅力ある応用が期待できる。

7. おわりに

21 世紀の技術革新をもたらす原動力の 1 つとして、新物質や新材料、特に高機能材料があげられる。ここで取上げた機能性流体も高付加価値製品の創出という観点からも産業および工業技術面において大きなブレークスルーをもたらすポテンシャルを有している。今後、種々の新規な機能性流体が創製されるとともに、各機能性流体の性能や信頼性のさらなる向上と機能性の詳細評価が依然として求められるが、各機能性流体固有の機能性を最大限に活用した独自の機能を発揮するコストパフォーマンスの高い機器の実用化・製品化を期待したい。本稿が精密工学分野でのその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 中野政身編集: 機能性流体を用いたスマートフルードパワーシステムに関する研究委員会研究成果報告書, 日本フルードパワーシステム学会 (JFPS), (2006)153.
- 2) M. Nakano, K. Koyama: *Electro-Rheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and their Applications*, World Scientific, (1998)893.
- 3) 日本機械学会編: 機能性流体・知能流体, コロナ社, (2000)179.
- 4) 日本機械学会編: 17・2 機能性流体, 機械工学便覧 (基礎編 α 4 流

- 体工学), 丸善, (2006)185.
- 5) K. Lu, R. Shen, J. Liu: *Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, World Scientific, (2005)991.
- 6) 中野政身, 米川琢哉: ER ダンパモデルにおける分散系 ER 流体の圧力応答, 日本機械学会論文集 (B 編), **61**, 581(1995)166.
- 7) W. M. Winslow: Induced fibrillation of suspensions, *J. of Applied Physics*, **20**, 12(1949)1137.
- 8) (株)ER テック: <http://www.ertec.jp/>
- 9) P. Sheng: Mechanism of the Giant Electrorheological Effect, 文献 5), (2005)143.
- 10) 中野政身, 伊藤浩也, 近野誠, 伊藤一寿: 分散系 ER 流体を用いた拮抗形ベローズダンパとそのアクティブダンパとしての除振制御への応用, 日本機械学会論文集 (C 編), **64**, 619(1998)804.
- 11) T. Kuriyagawa, M. Sasaki, K. Syoji: Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts, *Precision Engineering*, **26**(2002)370.
- 12) 張剣, 他 3 名: 高分子液晶系 ER 流体を用いたダンピングが制御可能なリニアガイドシステム開発のための基礎研究, 精密工学会誌, **71**, 4(2005)471.
- 13) M. Nakano, S. Minagawa, K. Hagino: PWM flow rate control of ER valve and its application to ER actuator control, *Int. J. of Modern Physics B*, **13**, 14, 15&16, (1999)2168.
- 14) M. Nakano, et al.: Three-ports micro ER valve for ER suspension fabricated by photolithography, *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, **13**, 7&8(2002)503.
- 15) 吉田和弘, 横田眞一: 高出力圧電マイクロポンプ, フルードパワーシステム, **35**, 6(2004)375.
- 16) 中野政身: 粒子分散系 ER 流体を用いたマイクロアクチュエータ, フルードパワーシステム, **35**, 6(2004)380.
- 17) 小柳健一, 古荘純次, 他 4 名: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発(第 2 報: 運動療法のためのソフトウェアの開発), 日本ロボット学会誌, **23**, 8(2005)1011.
- 18) J. Rabinow: The magnetic fluid clutch, *AIEE Transactions*, **67** (1948)1308.
- 19) Lord Corporation: <http://www.lord.com/>
- 20) J. D. Carlson: Smart magnetorheological fluids and devices, JFPS 平成 16 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2004)3.
- 21) 中野政身: MR 流体コンポジットブレーキを用いたコイル巻線用張力制御装置, 油空圧技術, **44**, 7(2005)41.
- 22) 中野政身: ER・MR 流体を活用した減衰力可変ダンパと制振技術, フルードパワーシステム, **35**, 3(2004)191.
- 23) S.S. Papell: Low viscosity Magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles, U.S. Patent, No.3215572(1965).
- 24) 須藤誠一, 他 3 名: 振動場における磁性流体の界面現象, 日本機械学会論文集 (B 編), **63**, 606(1997)424.
- 25) 山口博司, 他 3 名: 低沸点流体混合磁性流体の駆動力特性に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), **70**, 698 (2004)2591.
- 26) Y. Otsubo, K. Edamura: Dielectric fluid motor, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3(1997)318.
- 27) 横田眞一, 中田毅: ECF ジェットを応用したマイクロアクチュエータ, フルードパワーシステム, **35**, 6(2004)368.
- 28) 三井和幸, 他 6 名: EHD 現象を利用したアクチュエータの開発, 文献 1), (2006)139.
- 29) I. Kano, Y. Kano: Micro-electrohydrodynamic pump by dielectric fluid, *JSME Int. J. Series B*, **48**, 4(2005)770.
- 30) 柿沼康弘, 青山藤詞郎: ゲル構造電気粘性流体の開発とその基本特性解析, 精密工学会誌論文集, **70**, 12(2004)1538.
- 31) T. Mitsumata, et al.: Magnetism and compressive modulus of magnetic fluid containing gels, *J. of Applied Physics*, **85**, 12(1999)8451.
- 32) 安積欣志: イオン導電性高分子アクチュエータ, フルードパワーシステム, **35**, 6(2004)385.
- 33) 平井利博: 柔軟高分子材料の電場による大変形の多様性とアクチュエータとしての可能性, フルードパワーシステム, **35**, 6(2004)390.