

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワー

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

システム

Nov. 2023 Vol. 54 No. 6

特集「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」

日本フルードパワーシステム学会誌

フルードパワーシステム

目次

特集「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」

【巻頭言】

「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」発刊にあたって 中野 政身 234

【解説】

交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステム 吉田 和弘 236

電界共役流体の流動によるチップ上での液滴の生成とソーティング 竹村研治郎 240

EHDポンプを用いたロボット駆動機構の開発 三井 和幸 243

イオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収の高性能化 高奈 秀匡 249

車両用ドライMR流体ブレーキの開発と超小型EVへの実装 中野 政身 254

MR流体ブレーキの装着型力覚提示装置への応用 澤橋龍之介, 奥井 学, 中村 太郎 259

MR流体を活用した吸盤 塚越 秀行, 中野 政身 264

MCFを用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の特性 西田 均 268

【会議報告】

ROBOMECH2023におけるフルードパワー関連技術の研究動向 塚越 秀行 273

【トピックス】

Youは日本をどう思う？第22回：日本生活10年目の韓国人，仕事と生活で思うこと 姜 玟佑 275

【研究室紹介】

広島市立大学 小寄研究室 小寄 貴弘 277

【企画行事】

2023年春季フルードパワーシステム講演会開催報告 趙 菲菲 280

【会告】

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 2023年秋季フルードパワーシステム講演会	272
日本フルードパワーシステム学会 2023年度フェロー認定者推薦のお願い	272
日本フルードパワーシステム学会 2023年度受賞候補者募集のお知らせ	272
キャリア支援セミナー開催のお知らせ	279
2024～2025年度役員（理事・監事）候補者推薦のお願い	282
理事会・委員会報告	283
共催・協賛行事のお知らせ	284
学会創立50周年記念パーティーと特別記念講演終了報告	285
会員移動	285
資料一覧表	286
フルードパワーシステム総目次（第54巻）	291
次回予告	294

■表紙デザイン：浅賀美希 勝美印刷株

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441 FAX：03-3433-8442

E-Mail：info@jfps.jp

JOURNAL OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Contents

Special Issue "Frontier Development of Fluid Power Systems Utilizing Functional Fluids"

[Preface]

On the Special Issue "Frontier Development of Fluid Power Systems Utilizing Functional Fluids"	Masami NAKANO	234
--	---------------	-----

[Review]

ER Microactuator Systems using Alternating Pressure Source	Kazuhiro YOSHIDA	236
On-chip Droplet Generation and Sorting using Electro-conjugate Fluid	Kenjiro TAKEMURA	240
Development of Robot Drive Mechanisms using EHD Pumps	Kazuyuki MITSUI	243
High-performance CO ₂ Selective Absorption by Ionic Liquid Electrospray	Hidemasa TAKANA	249
Development and Implementation of Automotive Brake using Dry MR Fluid for Super-compact EV	Masami NAKANO	254
Application of MR Fluid Brake to Wearable Force Feedback Devices	Ryunosuke SAWAHASHI, Manabu OKUI, Taro NAKAMURA	259
Suction Cups Utilizing Magneto-Rheological Fluids	Hideyuki TSUKAGOSHI, Masami NAKANO	264
Characteristics of Precision Polishing using Magnetic Compound Fluid while Simultaneously Applying Magnetic and Electrical Fields	Hitoshi NISHIDA	268

[Conference Report]

Research Trend of Fluid Power System on the Robotics and Mechatronics Conference 2023 (ROBMECH2023)	Hideyuki TSUKAGOSHI	273
---	---------------------	-----

[Topics]

What do you think of Japan? 22th : An Essay about 10 years of Life in Japan	Kang MINWOO	275
---	-------------	-----

[Laboratory Tour]

Kosaki Laboratory, Hiroshima City University	Takahiro KOSAKI	277
--	-----------------	-----

[JFPS Activities]

Report on the Spring 2023 Fluid Power System Conference	CHO FEIFEI	280
---	------------	-----

[JFPS News]

272, 279, 282, 283, 284, 285, 286, 291, 294

「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」 発刊にあたって

著者紹介



なか の まさ み
中野政身

株式会社SmartTECH Lab.
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
東北大学産学連携先端材料研究開発センター内
E-mail: mnakano@smarttech-lab.com

1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了。
1981年早稲田大学助手、1982年山形大学助手、
助教授を経て、1997年同教授、2008年東北大学
教授流体科学研究所、2018年同教授未来科学技
術共同研究センター、2023年SmartTECH Lab.
代表取締役社長兼CEO、現在に至る。機能性流体、
流体関連振動・騒音、振動制御などに関わるス
マート流体制御システム工学に従事。JFPS、
JSME、JSAE、EJAJなどの会員。

電場や磁場などの外場に反応して流体の物理化学的性質が変化する機能性流体としては、ER (Electro-Rheological) 流体、液晶、EHD (Electro-Hydro-Dynamic) 流体・ECF (Electro-Conjugate Fluid)、MR (Magneto-Rheological) 流体、磁性流体、磁気混合流体 (MCF) などがある。これらの機能性流体を作動媒体とする各種のフルードパワーシステムは、機能性流体特有の特徴的な機能性を効果的に活用することによって、従来にない機能を付与できると同時に、かつ小型・高出力化、簡便化、高速化、知能化、低廉化、高い信頼性や安全性の確保などの点で卓越した優位性を実現できる可能性を有する。本会誌では、Vol. 42, No. 1 (2011年1月号) 特集号「機能性流体テクノロジーの最前線」¹⁾とVol. 47, No. 6 (2016年11月号) 特集号「機能性流体を活用したフルードパワーシステムの実用化最前線」²⁾において、これらの機能性流体に関する車両、生産、加工、福祉、および土木・建築などの各分野における最新の研究開発の事例についてレビューを行うとともに、いくつかの実用化あるいは実用化に近い開発事例を紹介してきている。

その後7年程度経過していることから、本特集号では、その後の機能性流体を活用した応用についてのフロンティア的研究開発事例を紹介し、機能性流体のフルードパワーシステムへの応用とその可能性に関する最新情報を提供することとする。

最初に、電場によって機能性を制御する機能性流体として、ER流体、電界共役流体 (ECF)、EHD流体、およびイオン液体の応用事例を取り上げている。

まず、吉田和弘氏 (東京工業大学) には、均一系ER流体であるネマティック液晶や粒子分散系ER流体を作動液とし、配管系を簡素化できる交流圧力源とERバルブによって駆動される多自由度ERマイクロアクチュエータシステムの構成と動作原理などについて解説していただき、3種のマイクロフィンガシステムの開発事例を取り上げて紹介いただいた。

竹村研治郎氏 (慶應義塾大学) には、Droplet μ TASの液滴の生成とソーティングを目的に開発されたスリット電極と三角柱電極からなるECFポンプによる電界共役流体 (ECF) の流動を活用したチップ上の液滴の生成と分割、液滴のソーティングシステムに関して解説いただいた。

三井和幸氏 (東京電機大学) には、電気流体力学現象を呈する液体を用いたEHDポンプの構造や電極構成について解説いただき、双方向多段EHDポンプを圧力源として駆動される2つのペロフラムシリンダからなる揺動型EHDアクチュエータを用いた蛇型ロボットの試作例や、一方向多段EHDポンプとペローズをペアとして2組並列接続した揺動型アクチュエータを4基一体化した魚の尾ひれ駆動機構に関して紹介いただいた。

高奈秀匡氏 (東北大学) には、イオン液体のもつガス吸収能力をひとつの機能性としてとらえて活用したCO₂分離吸収の高性能化をめざした、イオン液体の静電噴霧による超微細化噴霧技術を活用した二酸化炭素分離吸収に関する研究成果に関して紹介いただいた。印加電圧の増加に伴い、液滴の微細化が促進され、比表面積効果によりCO₂分離吸収が顕著に向上すること、直流パルス電圧印加の周波数を適切に選択することにより、より多くの微細液滴が形成されることからCO₂分離吸収効果がより向上することなどが示されている。

後半は、磁場印加によって機能性が発揮するMR流体や磁気混合流体 (MCF: Magnetic Compound Fluid) のフロンティア的応用事例を取り上げている。

まず、中野政身氏（㈱SmartTECH Lab.）には、オイル系MR流体のもつ過酷な環境温度変化に対する諸問題を解決する目的で開発されたオイルフリーでガスを分散媒とし流動性を高めた強磁性体粒子の粉体からなるドライMR流体に関して解説いただき、その応用として車両用ドライMR流体ブレーキの開発とその超小型EVへの実装に関して紹介いただいた。

澤橋龍之介氏（中央大学）、他には、MR流体ブレーキやクラッチを用いた力覚提示装置が有する高いバックドライバビリティ、高い応答性、連続的なトルク制御性などの特徴を活かした、MR流体ブレーキを活用した装着型力覚提示装置の開発事例を紹介いただいた。上肢、下肢などの提示対象の身体部位ごとに分類し、著者ら以外が開発した装着型力学提示装置への応用事例も含めて幅広くレビューしている。

塚越秀行氏（東京工業大学）、他には、MR流体そのものの吸着現象を解明するための基礎的な実験結果を提示いただき、その結果に基づいて試作されたMR流体吸盤の吸着性能を紹介いただいた。MR流体吸盤は、吸着力が最大化する最適な磁場の強さが存在すること、コンクリート面、金網、穴の開いた板など従来の真空吸盤では吸着し難かった素材へも実用的な吸着力を発生することなどが示されている。

西田均氏（富山高等専門学校）には、磁性流体に数 μm サイズの強磁性体粒子を分散させた磁気混合流体（MCF）を用いた磁場・電場同時印加によるMCF精密研磨に関して紹介いただいた。砥粒を含んだMCF加工液に磁場に加えて同時に電場を印加した場合の平面研磨特性と加工除去量について論じており、電場印加により加工能率が向上すること、微細V溝に対しては大局的形状を維持した全面研磨が可能であることを提示している。

以上の本特集号で取り上げた事例以外にも、紙面の都合や本誌への重複掲載の回避の面から取り上げなかった特徴的な研究開発事例もある。以下では、このようにいくつかの事例を紹介する。

マイクロマウス（長さ：50mm、幅：34mm、高さ：20mm）へ搭載することを目的に粒子分散系ER流体を用いた小型の多層円盤型ブレーキが開発されている³⁾。マイクロマウスに搭載されている駆動用モータと同程度のサイズで、モータと並列に組み込まれ、開発したERブレーキによるDCモータの制動特性などが実験と数値解析により検討されている。

流路底面に電極対を配置したタイプAと、上流側の電極を流路の中央の高さに下流側の電極を天井面と底面に配置したタイプBの2種のEHDポンプについて、注入電荷、解離電荷、および両方の電荷を考

慮した場合の圧力・流量の完全特性の数値解析結果が示されている⁴⁾。

ECFの流動を用いてジャミング効果に必要な負圧を生成するマイクロジャミンググリッパ（ $\phi 14 \times 40$ ）が開発されている⁵⁾。ガラスビーズを充填したグリッパに直列して、ECF流動発生部の上下流に弾性膜を配置した負圧発生部が連結されており、ECFの流動によってグリッパに負圧を発生させ、ジャミングを発生させる構造となっている。

MR流体クラッチとモータからなるツインドライブ型MR流体アクチュエータが開発され、そのMR流体アクチュエータを用いた手術支援用ハプティックデバイスや汎用型のハプティックデバイスへの応用が試みられている⁶⁾。

低沸点媒体であるフッ化炭素をひとつの機能性流体ととらえ、その液相から気相へ変化する気液相変化を利用してかつ圧力フィードバック制御を付加することによって空気圧ゴム人工筋を比較的高速で駆動できるようにし、そのゴム人工筋を用いたマニピュレータの制御結果が報告されている⁷⁾。

末筆ながら、ご多忙な中をご執筆いただいた著者の皆様に厚く御礼を申し上げる。また、会員の方々には、機能性流体のフルードパワーシステムへの応用とその可能性に関する最新情報の提供に資することができれば、望外の喜びである。

参考文献

- 1) 特集号「機能性流体テクノロジーの最前線」, フルードパワーシステム, Vol. 42, No. 1, p. 11-61 (2011)
- 2) 特集号「機能性流体を活用したフルードパワーシステムの実用化最前線」, フルードパワーシステム, Vol. 47, No. 6, p. 264-298 (2016)
- 3) Togawa, T., Tachibana, T., Tanaka, Y., Jinghui, P. : Hydro-disk-type Electrorheological Brake for Small Mobile Robots, Int. J. of Hydromechatronics, Vol. 4, No. 2, p. 99-115 (2021)
- 4) 樽谷啓介, 柳田秀記, 西川原理仁, 横山博史 : 電気流体力学ポンプの完全特性, 日本設計工学会東海支部令和4年度研究発表講演会前刷集, p. 1-2 (2023)
- 5) Tanaka, Y., Suzuki, R., Edamura, K., Yokota, S. : Design and Fabrication of Micro Gripper using Functional Fluid Power, Int. J. of Automation Technology, Vol. 16, No. 4, Paper Au16-4-12111, p. 1-8 (2022)
- 6) 菊池武士, 高野哲仁, 池田旭花 : MR流体を用いた繊細ハプティックデバイスの開発と医療ロボットへの挑戦, フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 3, p. 126-132 (2023)
- 7) 加藤友規 : 気液相変化により駆動されるゴム人工筋アクチュエータ, フルードパワーシステム, Vol. 54, No. 5, p. 207-210 (2023)

(原稿受付：2023年10月12日)

解説

交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステム

著者紹介



よし だ かず ひろ
吉田 和 弘

東京工業大学科学技術創成研究院
未来産業技術研究所
〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259-R2-42
E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp

1989年東京工業大学大学院博士課程修了，同大学助手，助教授（准教授）を経て2015年4月教授。2008年10月～2009年3月米国UCSB客員研究員，2015年7月～9月米国MIT客員研究員。機能性流体，パワーマイクロロボットの研究に従事。JFPS, JSME, IEEEなどの会員，工学博士。

1. まえがき

産業用プラントの配管内などの狭い空間で，垂直移動を含む広範囲の移動，配管内の流れによらず位置，姿勢を維持した作業など，パワーを要する作業を行うマイクロロボットが必要とされている。著者らはこれをパワーマイクロロボットと呼び，その実現のための研究開発を行っている^{1)~6)}。

パワーマイクロロボットの駆動系のため，著者らは，各種アクチュエータをマイクロ化したときのエネルギー密度について，簡単なモデルを用いた計算を行った。その結果，液圧駆動の有効性を示した¹⁾。

また，機能性流体のひとつで，電界を印加すると著しく粘度が高くなるERF（electro-rheological fluid. ER流体，電気粘性流体とも呼ばれる）を作動流体とすると，上面と下面に電極を配置した流路で，印加電界により粘度を変化させその流れを制御することができる。このようなデバイスはERバルブと呼ばれ

る。ERバルブはしゅう動部のないシンプルな構造であるため，マイクロ化に適している。著者らは，ERマイクロバルブで液圧パワーを制御する駆動系がパワーマイクロロボットに適していると考えている。

パワーマイクロロボットは，走行，操舵，物体のハンドリングなど多くの機能性を実現する必要がある，多数のアクチュエータを含む多自由度運動システムとなる。しかし，従来の直流圧力源システムでは，各アクチュエータに液体の供給と戻りの配管が必要になるため，図1(a)に示すように，配管系が複雑になり，そのスペースも大きい問題があった。これに対し，交流圧力源を用い，各アクチュエータに設置したバルブで同期整流すれば，1本の配管を供給と戻りに時間的に切り替えて使用することができるようになり，図1(b)に示すように，配管系の問題を大幅に軽減できると考えられる。

著者らは，交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステムを提案し，その開発を進めている。以下では，著者らの研究成果を中心に紹介する。なお，多自由度液圧駆動システムの課題は，マイクロロボットだけでなく関心を集めており，交流圧力源を応用したシステムが開発されている⁷⁾。

2. 交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステムの提案と原理検証

図2に，提案する交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステムの一つとして，交流圧力源を用いたERフィンガシステムの構造および動作

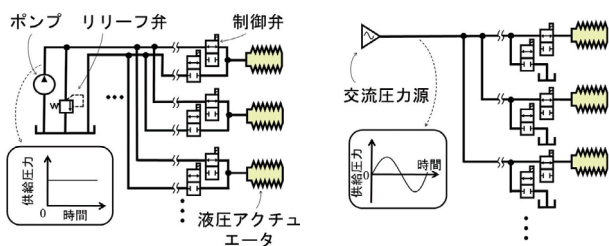


図1 多自由度液圧アクチュエータシステム

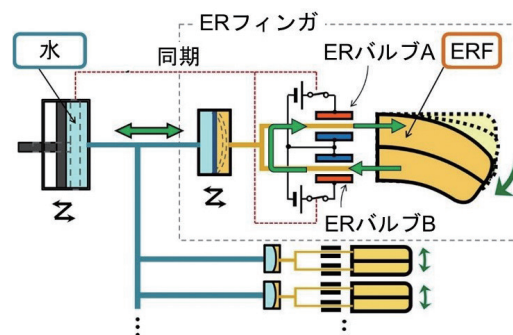


図2 多自由度ERフィンガシステムの動作原理

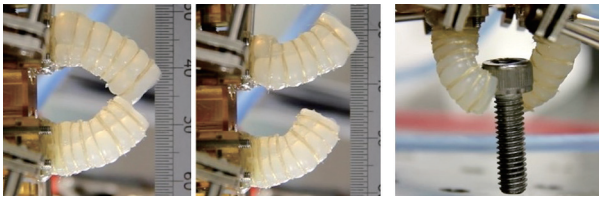


図3 2指ERフィンガラージモデル（長さ16mm）の動作

原理を示す。ERフィンガは屈曲形であるが、2個の液圧室を直列に配置すれば直動形も実現可能である。本システムは、1個の交流圧力源に複数のERフィンガが接続された構成となっている。ERフィンガは、圧力伝達部、ERバルブAおよびB、およびフィンガ部から成る。交流圧力源は、流量によらず設定された時間波形の交流圧力を発生するものである。たとえばその出口を封鎖した場合、流量は0であるが、設定された時間波形の交流圧力を発生する。

図2のERフィンガシステムでフィンガ部を下方に屈曲させる動作は以下の通りである。交流圧力源から流体を吐出する行程では、ERバルブBに電圧を印加し閉状態とし、ERバルブAには電圧を印加せず開状態とする。このときフィンガ部の上側の液圧室のみ流体が供給され伸長するため、フィンガ部は1ステップ下側に屈曲する。続く交流圧力源が流体を吸入する行程では、ERバルブAに電圧を印加し閉状態とし、ERバルブBには電圧を印加せず開状態とする。このときフィンガ部の下側の液圧室からのみ流体が吸い出され収縮するためフィンガ部は1ステップ下側に屈曲する。この繰り返しにより下側の液圧室の流体を上側の液圧室に移動させ、下側への段階的な屈曲を実現する。ERバルブAとBで電圧を印加するタイミングを入れ替えるとフィンガ部を上側に屈曲させることができる。ERバルブAおよびBに同時に電圧を印加し閉状態とすると流体の出入りなくなり、停止状態とすることができる。

提案するERフィンガシステムは、ERフィンガへの配管を時間により供給と戻りに切り替えて使用するため、配管数が1/2の単純で小形の配管系となり配管系の問題を大きく軽減することができる。また、交番流を利用するため、流路の途中に柔軟なメンブレンによる仕切りを入れることができる。これにより、長い配管系となる交流圧力源側の流体を水などの低粘度のものとするれば、圧力損失が低下するため配管径を小さくすることができ、この点でも配管スペースの低減に貢献することができる。さらに、チェック弁を必要としない交流圧力源はシンプルかつマイクロ化可能で、ERバルブとともにMEMSプロセスに適している特長を有する。

提案するERフィンガシステムの妥当性を検証す

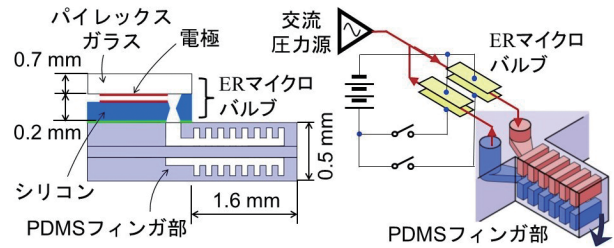


図4 長さ1.6mmのERマイクロフィンガ

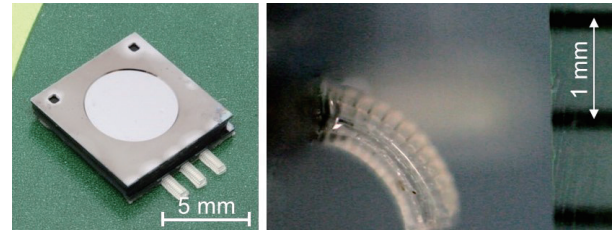


図5 長さ1.6mmのERマイクロフィンガの動作

るために、長さ16mmのシリコンゴム製のフィンガ部2個を有するラージモデルを試作した²⁾。交流圧力源は、印加電流に比例した力を発生するボイスコイルモータでピストンを駆動するもので、正弦波の電流を印加することで正弦波の交流圧力を発生させた。ERバルブは機械加工により製作した。試作した2指ERフィンガラージモデルの動作を図3に示す。交流圧力源は1個であるが2個のフィンガ部の屈曲は異なり、独立に制御できることが確認された。図3右図のようにグリッパのように動作させることもでき、その妥当性が確認された。

3. 交流圧力源を用いたERマイクロフィンガシステムの開発事例

3.1 MEMS技術を用いた長さ1.6mmのERマイクロフィンガシステム³⁾

MEMS技術を用い、図4に示す長さ1.6mmのERマイクロフィンガシステムを開発した。ERマイクロバルブは、シリコン基板に異方性エッチングで溝を設け、その上部にパターニングした電極を有するパイレックスガラスを陽極接合したものである。電極幅は0.10mm、電極間隔は47 μ m、電極長さは2.0mmである。長さ1.6mmのフィンガ部はシリコンゴムの一種のPDMSを用い、フォトレジストSU-8で型を製作して成型加工した。複数の離型剤を用い、超音波処理も利用しアスペクト比の高い内部強化壁構造を実現している。試作したERマイクロフィンガと屈曲の様子を図5に示す。ERFには電界無印加時の基底粘度103mPa $\cdot$ s、ER効果指数（粘度変化率）3.3のネマティック液晶を用い、供給圧力は周波数15Hz、振幅160kPaでバイアス圧力を加えた。ERマイ

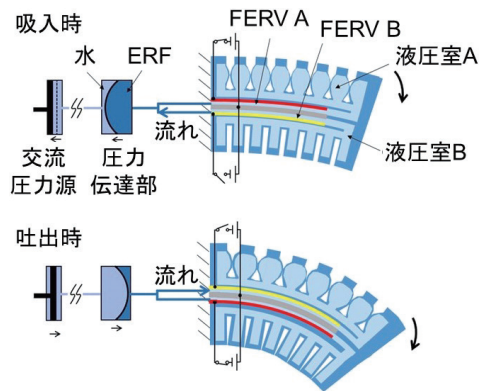


図6 FERVマイクロフィンガの動作原理

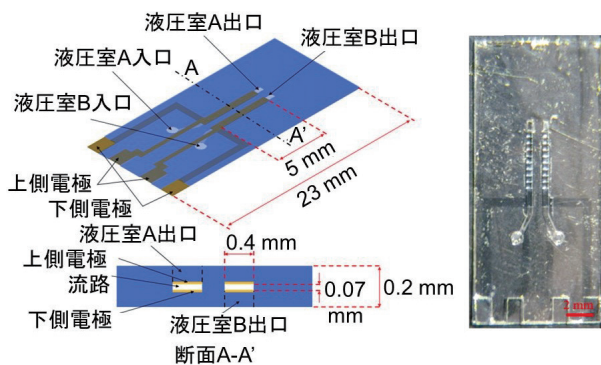


図7 導電性高分子を用いたFERV

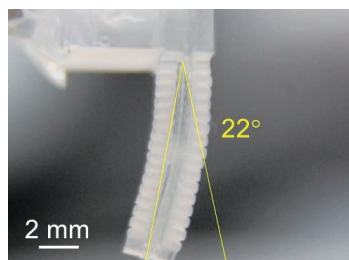


図8 FERVマイクロフィンガの動作

クロバルブの印加電圧は350V（電界7.5kV/mm）とした。立ち上がり時間1.1sで先端変位1.1mmが得られることが確認された。

3.2 フレキシブルERマイクロバルブ（FERV）を用いたERマイクロフィンガシステム⁴⁾⁵⁾

著者らは、マイクロフィンガに搭載するため、柔軟に屈曲できるフレキシブルERマイクロバルブ（flexible ER microvalve : FERV）を提案、開発しており、図6に示すようなFERVを搭載したマイクロフィンガシステムを開発した⁴⁾。

図7に搭載したFERVを示す。紫外線硬化性を付与したきわめて柔軟な導電性高分子PEDOT:PSSを電極材料、紫外線硬化性PDMSを構造材、フォトレジストSU-8をスペーサおよび補強壁の材料とし、フォトリソグラフィで製作した。電極幅は0.4mm、

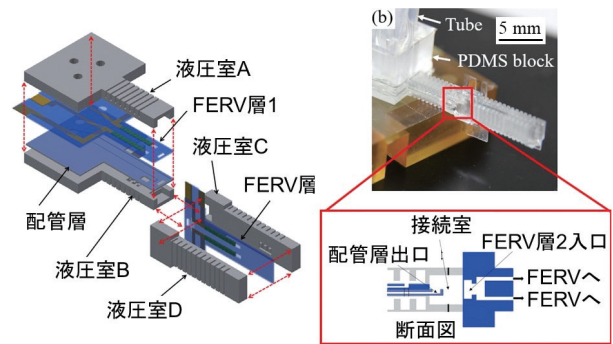


図9 2自由度FERVマイクロフィンガ

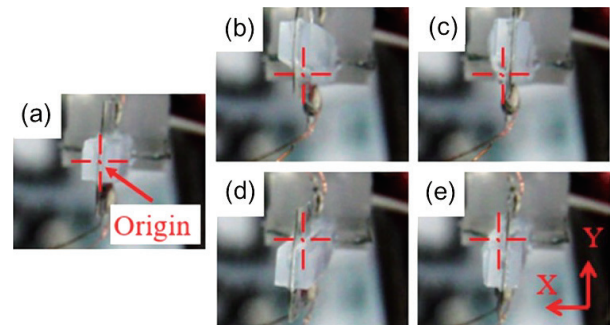


図10 2自由度FERVマイクロフィンガの先端の動作

電極間隔は70 μ m、電極長さは5.0mmである。

このFERVを搭載した長さ10mmのマイクロフィンガを試作した。図8にその屈曲動作を示す。ERFとして基底粘度14.3mPa $\cdot$ s、ER効果指数4.4のネマティック液晶を用い、供給圧力は周波数5 Hz、振幅50kPaでバイアス圧力を加えた。ERマイクロバルブへの印加電界は4 kV/mmとした。22°の屈曲動作が確認された⁴⁾。

また、一方向に屈曲するERマイクロフィンガ2個を90度回転して直列に接続し、2自由度の屈曲動作を行う図9のようなERマイクロフィンガシステムの試作を行った⁵⁾。先端の変位を先端側から観測した結果を図10に示す。2方向の屈曲が可能であることが確認された。

3.3 粒子分散系ERFを用いたERマイクロフィンガシステム⁶⁾

3.1節、3.2節のシステムでERFとして用いたネマティック液晶は、均一な液体であるため狭い流路に閉塞なく安定して流すことができる。一方、粘度変化は生じるが流れを完全にしゃ断することはできないため、内部漏れが生じる。そこで、誘電性液体中に誘電体微粒子を分散させた懸濁液で、電界印加で流れを完全にしゃ断することができる粒子分散系ERFを用いた交流圧力源システムを提案、開発した⁶⁾。分散粒子による閉塞を防ぐため流路の高さがある程度高くしなければならないが、ERFはERフィ

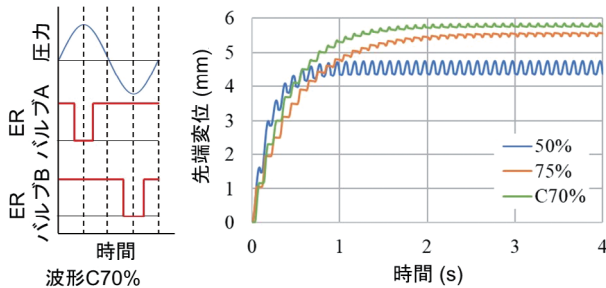


図11 粒子分散系ERFを用いたERマイクロフィンガのシミュレーション

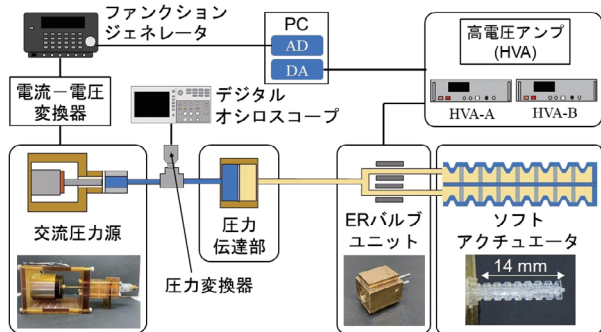


図12 粒子分散系ERFを用いたERマイクロフィンガの実験装置

ンガ内のみで使用するため、システム全体のマイクロ化の障害にはならないと考えた。

先端変位の時間変化のシミュレーションを行った。各ERバルブを閉じる期間の比率を示すデューティ比およびその位相を変え求めた結果の例を図11に示す。以下では、定常変位が大きく、変位の振動が小さい、図11左に示す波形C70%を用いている。

試作した粒子分散系ERFを用いたERマイクロフィンガシステムを図12に示す。フィンガ部の長さは14mm、ERバルブAおよびBの電極幅は4.2mm、電極間隔は0.52mm、電極長さは5.0mmである。

屈曲動作実験を行った結果を図13に示す。ERFは(株)ERテック製の粒子分散系ERF、供給圧力は周波数5 Hz、振幅40kPaでバイアス圧力を加えた。ERバルブへの印加電圧は1 kV（電界1.9kV/mm）とした。シミュレーション結果と同様に、波形C70%において定常変位が大きく、屈曲動作を実現できることが確認された。

4. あとがき

本稿では、多自由度ERマイクロアクチュエータシステムのため、著者らが提案、開発を進めている、

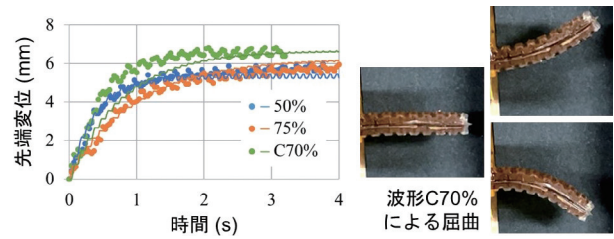


図13 粒子分散系ERFを用いたERマイクロフィンガの動作

配管系の問題が少なく、各要素の構造がシンプルでMEMS技術に対応可能な、交流圧力源を用いた多自由度ERマイクロアクチュエータシステムについて紹介した。さらに研究開発事例として、MEMS技術を用いた長さ1.6mmのERマイクロフィンガシステム、FERVマイクロフィンガシステムおよびその2自由度形、および流れを完全にしゃ断可能な粒子分散系ERFを用いたERマイクロフィンガシステムについて紹介した。今後、本システムのさらなる発展、展開が期待される。

参考文献

- 1) 吉田和弘, 横田真一: 流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究 (第1報 微小化に適したアクチュエータ方式の検討と管内走行機械への応用), 油圧と空気圧, Vol. 25, No. 2, p. 281-288 (1994)
- 2) Miyoshi, T., Yoshida, K., Eom, S.I., Yokota, S.: Proposal of a multiple ER microactuator system using an alternating pressure source, Sensors and Actuators A, Vol. 222, p. 167-175 (2014)
- 3) Miyoshi, T., Yoshida, K., Kim, J.-w., Eom, S.I., Yokota, S.: An MEMS-based multiple electro-rheological bending actuator system with an alternating pressure source, Sensors and Actuators A, Vol. 245, p. 68-75, (2016)
- 4) Sudhawiyangkul, T., Yoshida, K., Eom, S.I., Kim, J.-w.: A novel bending microactuator with integrated flexible electrorheological microvalves using an alternating pressure source for multi-actuator systems, Microsystem Technologies, Vol. 26, p. 1507-1519 (2020)
- 5) Sudhawiyangkul, T., Yoshida, K., Eom, S.I., Kim, J.-w.: A multi-DOF soft microactuator integrated with flexible electro-rheological microvalves using an alternating pressure source, Smart Materials and Structures, Vol. 30, 085006, (2021)
- 6) 早川佳範, 吉田和弘, 金俊完: 粒子分散系ERFを用いた高性能交流圧力源システムに関する研究, 機学2022年度年次大会予稿集, J111-03 (2022)
- 7) Nishioka, Y., Suzumori, K., Kanda, T., Wakimoto, S.: Multiplex pneumatic control method for multi-drive system, Sensors and Actuators A, Vol. 164, p. 88-94 (2010)

(原稿受付: 2023年8月6日)

解説

電界共役流体の流動によるチップ上での 液滴の生成とソーティング

著者紹介



たけ むら けん じろう
竹 村 研治郎

慶應義塾大学

〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

E-mail: takemura@mech.keio.ac.jp

2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。同大学助手（有期）、東京工業大学助手、助教を経て、2008年慶應義塾大学理工学部専任講師、現在教授。機能性流体、ソフトロボティクスなどの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

近年、試料の検査を微小なチップ上で行う生化学分析システム（Micro total analysis system, μ TAS）の活用が期待されている¹⁾²⁾。なかでも、試料を液滴状にして操作するDroplet μ TASは分析時間の短縮や試料の使用量低減などの利点がある³⁾。Droplet μ TASは液滴の生成、混合、ソーティングなどの過程があるが、本稿では液滴の生成とソーティングに関する機能性流体の新たな可能性を紹介する。

チップ上での液滴の生成やソーティングには微小流路内での流動制御が重要な役割を果たす。印加電界に応じて流動が発生する電界共役流体（Electroconjugate Fluid, ECF）は、チップ上での流動制御に適した駆動源である。特に、分析のためのサンプルや試薬を液滴として扱うDroplet μ TASではECFの流動により液滴を生成、輸送できる可能性があり、真のオンチップデバイスの実現が期待される。このため、Droplet μ TASにECFを適用した研究成果を以下に紹介する。

2. 電界共役流体を用いた液滴の生成⁴⁾

液滴の生成はDroplet μ TASの基本的要素である。特に、液滴の生成だけでなくこれを微小化することへの要求もある。こうした目的のために開発した液滴生成および液滴分割デバイスを図1に示す。液滴生成デバイスは、ベース、カバー、電極対、ねじおよび栓によって構成されている。液滴生成に重要な

パラメータである流路幅はT字の合流地点で連続相が1.5mm、分散相が0.5mmであり、深さは共に1.5mmである。2つの流路の上流には真鍮で製作された同様の五角柱スリット電極対⁵⁾が配置されている。連続相の主流を発生させる電極対と分散流を発生させる電極対に電圧を印加することで各々の流動を発生させ、T字路で合流させる。この合流地点で主流と押し出された試料が交わり、せん断力が働くことで液滴を生成させる⁶⁾。一方、生成された液滴をより微小な液滴へと分割する液滴分割デバイスは、ベース、カバー、電極対およびねじで構成されている。流路幅は1.5mmであり、Y字で分岐後の流路幅は1.2mmとし、深さは共に1.5mmである。チューニング流れを発生させる電極対は液滴生成デバイスと同じものである。これら2つのデバイスを接続してECF（FF-505-15、新技術マネージメント）で満たされたビーカーに入れて実験し、流入口である2つの流路よりECFを取り込み、生成した液滴が吐出側の2つの流路から出ていく構成となっている。

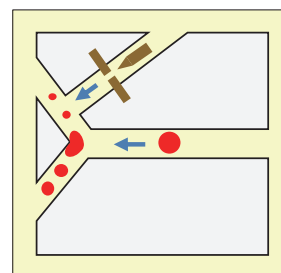
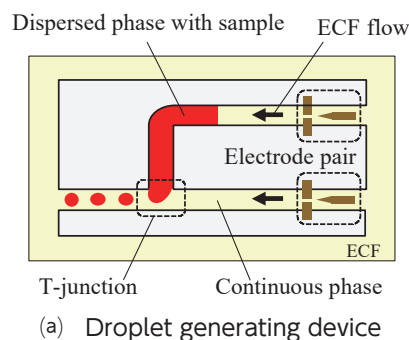


図1 液滴の生成と分割

まず、液滴生成について、連続相流量 Q_c と分散相流量 Q_d に対する生成された液滴の直径の関係を図2に示す。この結果から、 Q_c と Q_d の組み合わせによって液滴の直径を制御できることがわかる。つぎに、液滴分割について、チューニング流れの流量を変化させた際の実験結果を図3に示す。この結果から、チューニング流れがないときは液滴は半分に分割され、チューニング流れが大きいほど、液滴の直径の比が小さくなることがわかり、液滴の微小化が実現できることがわかる。

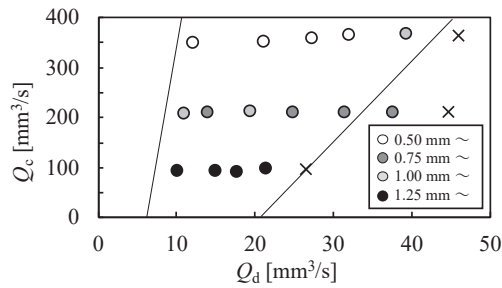


図2 流量パラメーターの組み合わせと液滴径

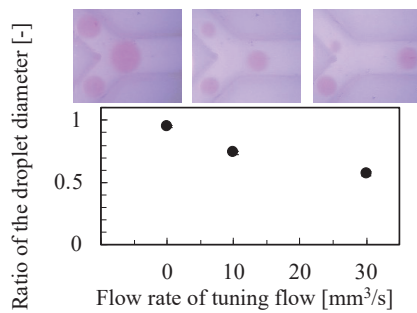


図3 チューニング流れと流量と分割比

3. 電界共役流体を用いた液滴のソーティング⁷⁾

図4に液滴ソーティングシステムの概念図を示す。本システムは2章で紹介した液滴生成のためのT字路を含む流路と、液滴のソーティングを行う分岐路から構成される。流路全体はECFで満たされ、それぞれの流路に電極対が配置される。T字路で生成された液滴は主流に沿って移動し、分岐点において

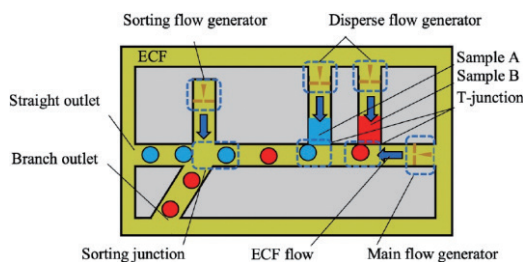


図4 液滴のソーティング

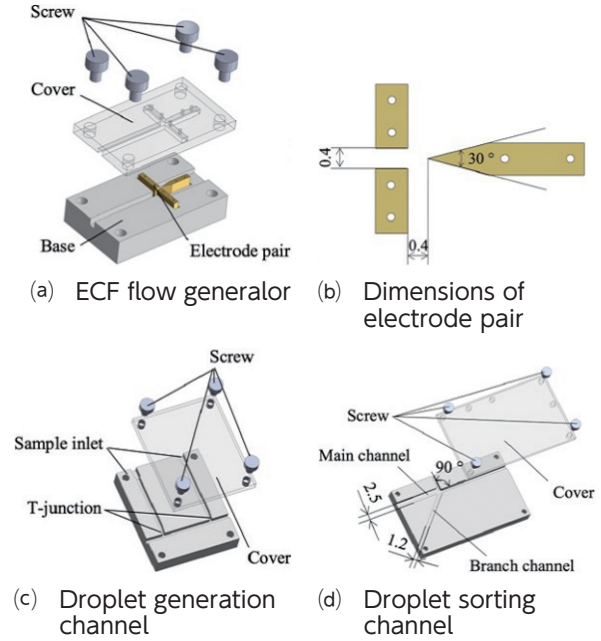


図5 液滴ソーティングシステムの構成要素

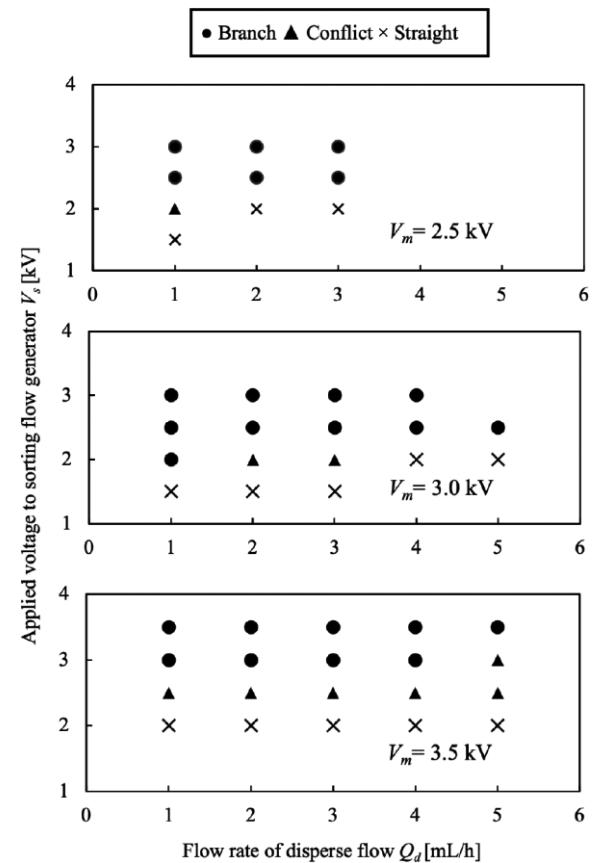


図6 液滴ソーティングの結果

ソーティングが行われる。液滴を直進させる場合は分岐流を発生させないが、液滴を分岐させる場合は分岐流を発生させる。

図5はシステムの構成要素の概略図を示している。図5(a)に示すECF流動発生部はベース、電極対、カ

バー、ねじから構成される。電極対は流路内に配置が容易な五角柱-スリット電極対（図5(b)）である⁶⁾。図5(c)に液滴生成部を示す。主流路と分散流路が直角に交わるT字路の形状である。なお、分散流の生成にはシリンジポンプ（SPDC-2、アズワン株式会社）を使用した。液滴分岐部（図5(d)）では流路がY字に分岐し、分岐流が主流路に直交する方向から導入される。組み立てられたシステムは、ECFで満たされた容器に沈めて実験を行った。

図6に液滴の分岐に必要な分岐流発生用電極対への入力電圧 V_s の条件を示す。この結果から、主流発生電極対への入力電圧 V_m が2.5～3.0kVのとき、液滴が分岐出口を通過するには V_s を2.5kV以上にする必要があり、 V_m が3.5 kVのときは V_s を3.0kV以上にする必要があることがわかる。また、 V_s が2.0kVを下回る場合は V_m によらず液滴は分岐されない。

4. ま と め

本稿では、Droplet μ TASへのECFの導入の可能性として、液滴の生成と分割、液滴のソーティングの研究成果を紹介した。いずれの研究も流動発生がチップ上の流路と一体となった構成であり、真のオンチップデバイスとしての実現の可能性を示している。こうした新規駆動源の導入によって、Droplet

μ TASの分野がさらに発展することを期待したい。

参考文献

- 1) Teh, S.-Y., Lin, R., Hung, L.-S., Lee, A.P. : Droplet microfluidics, Lab on a Chip, Vol. 8, p. 198-220 (2008)
- 2) Weibel, D.B., Whitesides, B.M. : Applications of microfluidics in chemical biology, Current Opinion in Chemical Biology, Vol. 10, No. 6, p. 584-591 (2006)
- 3) Shoji, S. : Micro Total Analysis System (μ TAS), Electronics and Communications in Japan Part 2, Vol. 82, No. 2, p. 385-393 (1999)
- 4) 飯島佳樹, 竹村研治郎, 枝村一弥 : 電界共役流体を用いた液滴生成および分割デバイス, 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 94-96 (2016)
- 5) Abe, Y., Takemura, K., Sato, K., Yokota, S., Edamura, K. : Droplet μ TAS using electro-conjugate fluid - Feedback position control of multiple droplets in flow channel matrix, Sensors and Actuators A, Physical, Vol. 198, p. 1-7 (2013)
- 6) Nunes, J.K., Tsai, S.S.H., Wan, J., Stones, H.A. : Dripping and jetting in microfluidic multiphase flows applied to particle and fibre synthesis, Journal of Physics D, Applied Physics, Vol. 46, No. 11, p. 4002-4021 (2013)
- 7) 青木裕嗣, 竹村研治郎 : 電界共役流体を用いた液滴ソーティングシステムの開発, 2022年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 141-143 (2022)

(原稿受付：2023年8月8日)

解説

EHDポンプを用いたロボット駆動機構の開発

著者紹介



みつ い かず ゆき
三井和幸

東京電機大学工学部先端機械工学科
〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番
E-mail: mitsui@cck.dendai.ac.jp

1988年東京電機大学大学院理工学研究科博士
後期課程満期退学。同大学助手、助教授を経て、
2002年同大学工学部教授。機能性流体関連、医
療福祉機器開発の研究に従事。日本フルードパ
ワーステム学会理事、ライフサポート学会理
事、日本ロボット学会、精密工学会などの会員。
工学博士。

1. はじめに

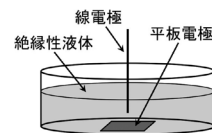
近年、電場（電界）や磁場などの外場に反応して物理化学的性質が変化する機能性流体の応用研究が進められており、今回の特集においては、他の著者の方々が個々の研究について紹介されていることと思われる。その中で著者らは、EHD（Electro-hydrodynamics：電気流体力学）現象を有する流体に注目し、電気（電圧）で液体に流れを生じさせることで液圧を発生できるEHDポンプと名付けた圧力源を利用するロボット等の駆動機構の開発や、その圧力源を医療機器の駆動源として応用する研究¹⁾を行ってきた。本稿では、著者らが開発してきたEHDポンプとそれを利用したロボット駆動機構について述べることにする。

2. EHDポンプ

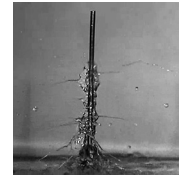
2.1 EHD現象を応用したEHDポンプの構造

EHD（Electro-hydrodynamics：電気流体力学）現象とは、ある種の絶縁性流体に挿入した電極から、その流体に数kVオーダの高電圧を印加することで発生する電界により、その流体に機械的な外力が作用していないにもかかわらず流れが発生する現象である²⁾。この現象においては、特に1956年に数元らにより発表され数元効果と呼ばれる現象³⁾がこの分野では知られている。数元効果とは2本以上の針状の電極間もしくは針状の電極と板やリング状の電極間に印加される電界により液体に流動が生じる現象

のことで、図1(a)に示すように板状の平板電極とそれに直交する方向に間隔を空け線電極を配置するという電極の組み合わせを絶縁性の液体に入れ高電圧を印加すると、図1(b)に示すように液体が線電極上を上昇する現象がその一例である。



(a) 絶縁性液体中に配置する
平板電極と線電極



(b) 線電極を上昇する液体
平板電極と線電極

図1 数元効果と呼ばれるEHD現象の一例

この数元効果を発生する電極構成を基に、絶縁性液体を電圧により一方向性のジェット流として流動させるために、図2に示すような板状の+電極と、その上に傾斜させた平板のGND電極という電極構成を考案し⁴⁾、それを内蔵することで、液体を吸入し、増圧して吐出するEHDポンプを考案した²⁾⁴⁾⁵⁾。なお、この電極構成において+電極およびGND電極の幅は流れる流量に、そして電極間の最も狭い部分の間隔は液体に印加する電界強度に影響する値なので、製作するEHDポンプの使用目的に応じて決定させることが有効であるが、GND電極の+電極に対する傾斜角度については、過去の研究⁴⁾からエネルギー効率を考慮し30°としている。

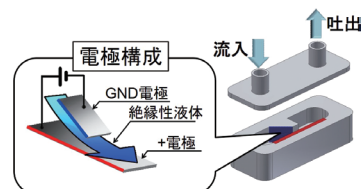


図2 考案したEHDポンプと電極構成

また、このEHDポンプでの使用に適した液体は種々考えられるが、著者らはスリーエム社製のNovecTM7200という液体を使用している。

2.2 用途に応じた電極構成

著者が考案した電極構成においては、その組み合わせを変更することで、吐出圧力の増幅や、吸入と吐出の方向を変更するなど用途に応じた変更が可能となる²⁾。吐出圧については、図3のように図2で示した電極構成を多数直列に接続（多段化）することで、流量は変えずに吐出圧を段数に比例した形で増幅（増圧）することができる²⁾⁵⁾。

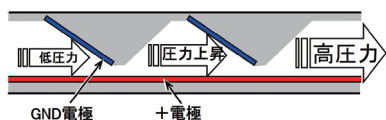


図3 電極の多段化による吐出圧の増幅（増圧）

また、図4に示すように図2で示した電極構成のGND電極を対称に2枚配置し、その電極への通電をスイッチで切り替えることで液体の吸入と吐出の方向を変更することが可能となる²⁾⁵⁾。なお、この液体の吸入と吐出の方向を変更することが可能な電極構成を内蔵するEHDポンプを双方向EHDポンプと名付けた。

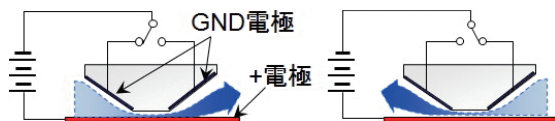
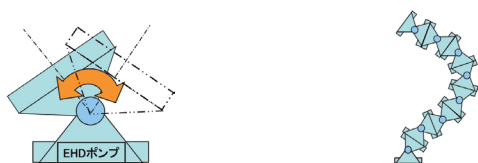


図4 液体の吸入と吐出の方向の変更が可能な電極構成

3. EHDポンプ駆動の蛇型ロボットの開発

災害現場や配管検査などにおいてロボットの活用が進められている。このような現場では複雑に入り組んだ場所が多く、蛇型の多関節ロボットが注目され⁶⁾、負荷に対して柔軟に対応できる流体駆動型のソフトロボットが開発されている⁷⁾。しかし、流体駆動型ロボットにはその駆動源としてコンプレッサ等の外部機器が必要となるほか、流体を供給するための配管が必要となるなどシステム全体が大型化してしまうという問題が考えられる。そこで著者は、2.で示したEHDポンプを内蔵し、外部からの配管が不要で図5(a)のシーソーのように揺れ動く揺動型



(a) 揺動型EHDアクチュエータ (b) 多関節ロボット
図5 揺動型EHDアクチュエータと多関節ロボットのイメージ

EHDアクチュエータを考案した。さらに、この揺動型EHDアクチュエータを1つの関節とし、これを図5(b)のように多段に接続していくことで、関節それぞれに駆動源を有した蛇型の多関節ロボットが開発できると考えた⁸⁾。

3.1 揺動型EHDアクチュエータ

3.1.1 揺動型EHDアクチュエータの構造

考案した揺動型EHDアクチュエータは図6に示すように、アッパーデッキ、ブリッジ、双方向EHDポンプを内蔵したロアデッキ、および2基の稼働部により構成した。稼働部にはベロフラムシリンダを用い、ロアデッキの双方向EHDポンプに直接接続した。この構造による動作の概念図を図7に示す。

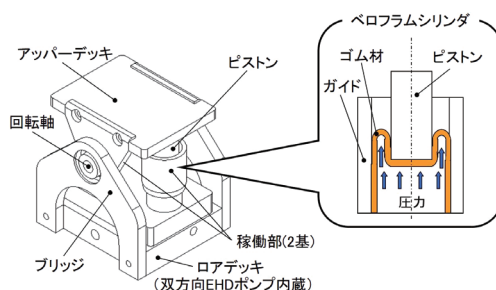


図6 揺動型EHDアクチュエータの構造

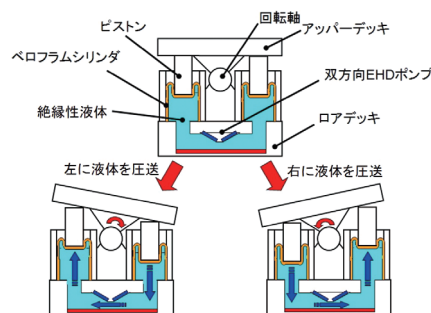


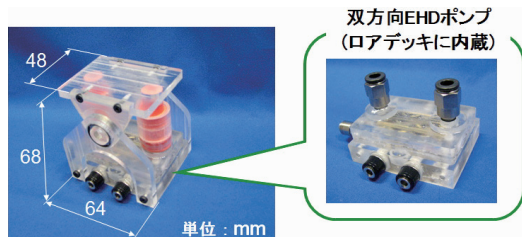
図7 揺動型EHDアクチュエータの動作の概念図

双方向EHDポンプに電圧を印加し、一方のベロフラムシリンダに液体を圧送することでピストンがアッパーデッキを押し、回転軸を中心としてアッパーデッキが傾くしくみである。さらに、双方向EHDポンプへの印加電圧を切り替え、液体の流れを反転させ動作するベロフラムシリンダを切り換えることで、アッパーデッキの傾く方向が切り換わり、揺動運動ができる構造とした。ベロフラムシリンダを稼働部に採用したことで、通常のシリンダとは異なり稼働部内部の液体の漏れを防ぐことができる。また、2基のベロフラムシリンダ内部の液体が揺動運動の度に交互に移動するため、ベロフラムシリンダが相互にリザーバの役目も果たすこととなる。その結果、配管や外部機器のみならずリザーバを

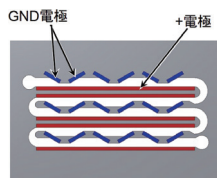
も必要としないシンプルな構造を実現できた。

3.1.2 製作した揺動型EHDアクチュエータ

実際に製作した揺動型EHDアクチュエータは図8(a)に示すように、48mm×64mm×68mmの大きさであり、重さは約170gである。また、ロアデッキに内蔵する双方向EHDポンプは図8(b)に示すように、図4で示した電極構成を15段直列に配置することで、15kV印加時に吐出圧力57.3kPa、流量8.5mL/sを発揮している。この双方向EHDポンプによる駆動で、アッパーデッキとロアデッキを平行にした状態を0°として、回転軸を中心に左右-12°から+12°の角度範囲の揺動運動を可能としている。



(a) 揺動型EHDアクチュエータの外観



(b) 内蔵する双方向EHDポンプの電極配置

図8 製作した揺動型EHDアクチュエータ

3.2 試作した蛇型ロボット

3.1で示した揺動型EHDアクチュエータを関節として2基接続することで、3節の蛇型ロボットを試作することとした。そのために、まず1基の揺動型EHDアクチュエータが発揮する揺動トルクの測定実験を行ったところ、印加電圧11kVにおいて116.5mNmのトルクを発揮することが確認できた。図9のように揺動型EHDアクチュエータを2基接続して動作させるために1基目のアクチュエータに必要な揺動トルクは計算上81.0mNmとなったため、揺動型EHDアクチュエータは、2段接続し動作させることが可能である。なお実際に図9のように接続し水平方向で動作させたところ、なめらかな揺動運動が可能であった。

揺動型EHDアクチュエータを2基接続しても揺動運動が可能だったことから、次の段階として、2基の揺動型アクチュエータを関節として接続した3節の構造の各節に受動車輪を取り付け、平面上を蛇行しながら走行する蛇型ロボットを試作した。その蛇型ロボットの大きさは図10に示すように、194.5mm



図9 2基接続した揺動型EHDアクチュエータ

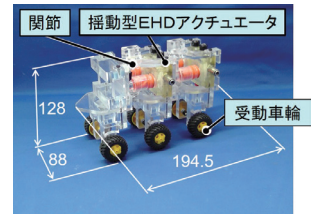


図10 試作した蛇型ロボット

×88mm×128mmである。

3.3 蛇型ロボットの動作確認

試作した蛇型ロボットを直線走行させた様子を図11に示す。この場合、搭載する2基の揺動型EHDアクチュエータの揺動角度の位相をスイッチでずらすことで、3節に取り付けられた受動車輪により僅かに蛇行しながらも直線走行を行うことができた。

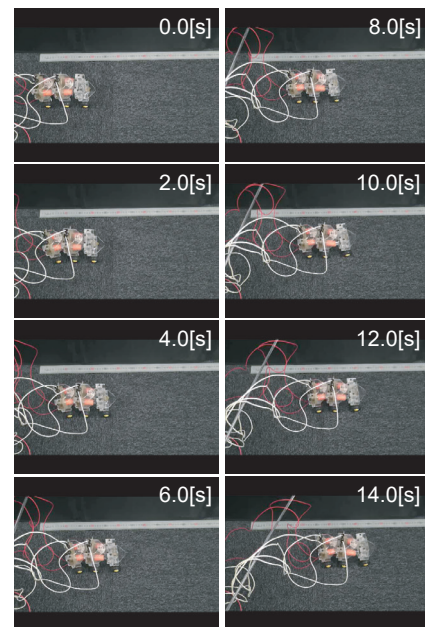


図11 直線走行する試作した蛇型ロボット

4. 魚型ロボットへの応用を目指した尾ヒレ駆動機構の開発

3. で示したように、EHDポンプを駆動源とする揺動型EHDアクチュエータを開発することで外部からの配管やリザーバが不要で、かつ流体（液体）駆動によるなめらかな揺動運動が可能で、ソフトロボットである蛇型ロボットを試作することができた。この駆動源である揺動型EHDアクチュエータのさらなる応用先として、海中の生態調査を行うための魚型ロボットを考えた。海中の生態調査を行うロボットとして、スクリー駆動のAUVなどが開発されているが、その外観とスクリーから発生する音や騒音により調査対象を警戒させ自然な状態での生態調

査が難しい⁹⁾。また、外観を魚に似せ動きもなめらかなヒレ駆動による魚型ロボットも開発されているが、その駆動源としてモータやエンジンを使用するものが殆どで、やはり音や振動の発生が問題となる。これに対して、著者らが開発した揺動型EHDアクチュエータは、なめらかな揺動運動が可能なることに加え、EHDポンプには機械的稼働部が存在しないことから、音や振動の発生が無い。そこで、揺動型EHDアクチュエータを改良し、それを搭載した尾ヒレ駆動機構の開発ができれば、将来的に従来の問題点を解消した魚型ロボットの開発が可能となると考えた¹⁰⁾¹¹⁾。

4.1 尾ヒレ駆動機構の基本構造

尾ヒレ駆動機構を開発するため、揺動型EHDアクチュエータの改良を行った。この改良した揺動型EHDアクチュエータを揺動型アクチュエータと呼ぶこととし、その構成を図12に示す。

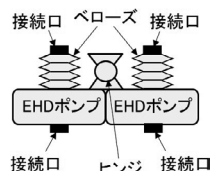


図12 揺動型アクチュエータの構成

蛇型ロボットの場合は多段の双方向EHDポンプを1個搭載していたが、この揺動型アクチュエータでは、液体の吐出が一方の電極構成を多段化し内蔵したEHDポンプに、収縮・伸長が可能なベローズと他の揺動型アクチュエータとの接続口を設けたものを2組並列接続し、回転支点であるヒンジを取り付けた。この揺動型アクチュエータを図13のように実際の魚の背骨をイメージした多関節構造となるよう接続したものが考案した尾ヒレ駆動機構である。

各揺動型アクチュエータのEHDポンプは尾ヒレ側から頭部に向かい液体を圧送するものであり、前後のEHDポンプ同士はベローズを流路として接続している。なお、頭部側には流路の蓋を兼ねた固定部を、尾ヒレ側には左右のEHDポンプを接続するための流路を設けてある。

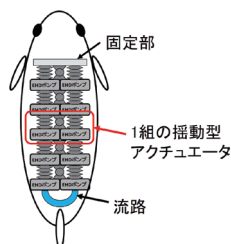
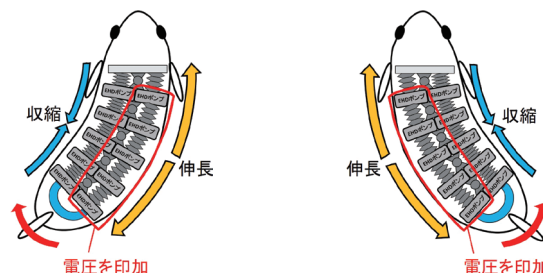


図13 考案した尾ヒレ駆動機構

この尾ヒレ駆動機構は図14(a)に示すように図の右側のEHDポンプに電圧を印加すると、右側の全てのEHDポンプからベローズに液体が吐出され右側のベローズが全て伸長し、これと同時に左側の全てのベローズ内の液体が吸引され、左側の全てのベローズが収縮する。その結果として機構全体が左側に向かって曲がり、尾ヒレを左側に動かすことができる。また、これとは逆に図14(b)に示すように左側のEHDポンプに電圧を印加すると、図14(a)の動作とは逆に、左側のベローズが伸長し、右側のベローズが収縮して尾ヒレを右に動かすことができる。



(a) 尾ヒレが左に動く場合 (b) 尾ヒレが右に動く場合

図14 尾ヒレ駆動機構の動作

4.2 製作した尾ヒレ駆動機構

製作した尾ヒレ駆動機構は、図12で示した揺動型アクチュエータを4基搭載しており、1基の揺動型アクチュエータのEHDポンプは4.1で説明したように並列に接続した2組を図15に示すように一体化し、1つのEHDポンプには流量増加の目的で32段の電極構成を並列に内蔵させた。一体化したEHDポンプ全体の大きさは40mm×62mm×115mmとした。なお、4基のEHDポンプの吐出圧力と吐出流量を測定した結果、10kV印加時の吐出圧力は平均23.5kPa、吐出流量は平均8.8mL/sであった。

実際に製作した尾ヒレ駆動機構を図16に示す。

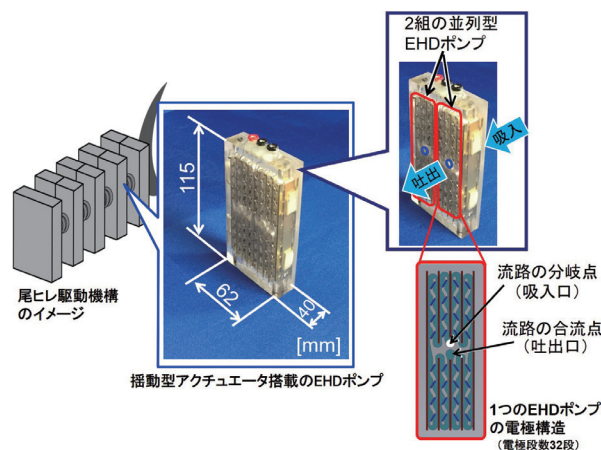


図15 尾ヒレ駆動機構の揺動型アクチュエータに搭載したEHDポンプの構造

既に説明したように揺動型アクチュエータを4基搭載し、その先端に擬似的に試作した尾ヒレを接続した構造である。この尾ヒレ駆動機構の大きさは70 mm×430 mmで、試作した尾ヒレの高さは305 mmとした。この尾ヒレ駆動機構は試作段階であるため、EHDポンプに印加する電源は、バッテリーからの電圧を市販の昇圧器で10 kV程度まで昇圧して使用した。また、尾ヒレを左右に動作させるために、左右のEHDポンプに印加する電圧をスイッチで切り換えることとした。

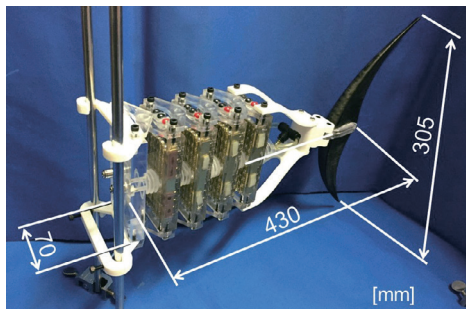
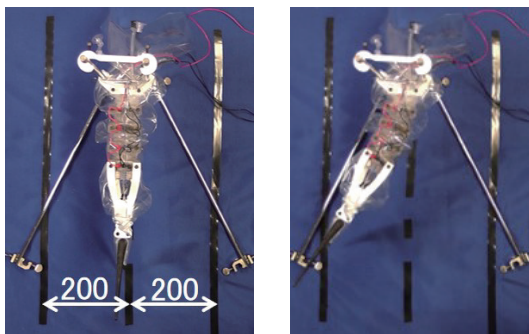


図16 製作した尾ヒレ駆動機構

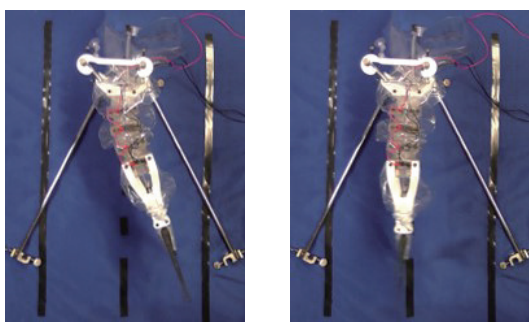
4.3 尾ヒレ駆動機構の動作実験

製作した尾ヒレ駆動機構の動作速度を確認するため振幅200 mmでの揺動周期を測定した。測定は、将来の水中での動作に多少なりとも近づけるために防水用カバーを装着した状態で200 mm間隔の線を目安に揺動運動させることで行った。また、電圧を印加



(a) 0.0s (動作開始時)

(b) 0.6s



(c) 1.2s

(d) 1.4s (1周期終了時)

図17 尾ヒレ駆動機構 1周期の動作

するEHDポンプの切り換えはスイッチにより手動で行った。なお、印加電圧は放電が発生しない7 kVとした。このときの1周期の動作の様子を図17(a)～(d)に示す。測定の結果、揺動周期は約1.4 sであった。また、動作時の揺動型アクチュエータからの音や振動は騒音計を用いた測定ではないが、確認できるレベルではなかった。

5. ま と め

本稿では、著者らが開発してきたEHD現象を応用したEHDポンプと、それを利用したロボット駆動機構について紹介した。一般的なロボット駆動機構において、モータを利用するものについては、モータおよびギヤなどからの騒音や振動の発生が問題となることが多い。また、この騒音や振動の発生を防ぎ、かつソフトな動きが可能な空気圧に代表される流体駆動のものも多く開発されているが、配管等が必要となるなど問題も多い。これに対して今回紹介したEHDポンプを利用したロボット駆動機構は、ソフトな動きが可能、そして騒音や振動を発生しないという流体駆動の利点を生かし、かつ機構にポンプやリザーバを内蔵することが可能であるため外部からの配管も不要という従来のロボット等の駆動機構の問題点のほとんどを解消できる従来にはない新たな駆動機構を実現できるものである。著者らはEHDポンプ駆動による人工筋も開発¹²⁾、さらにはそれを用いたロボットハンドの開発¹³⁾など、今回紹介した以外にもEHDポンプやEHD現象を応用したロボット等の開発にも取り組んでおり、今後もEHDポンプやEHD現象を応用し、ロボットや医療機器の開発に挑戦して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 根本拓実, 村田隼人, 武井裕輔, 岩瀬秀明, 前田浩行, 前田睦浩, 金子和夫, 寺阪澄孝, 下大川丈晴, 三井和幸: EHD現象を応用した新たなフットポンプの開発に関する基礎的研究, 第10回看護理工学会学術集会プログラム・抄録集, p. 45 (2022)
- 2) 三井和幸: EHD現象利用ポンプの開発とアクチュエータへの応用, フルードパワーシステム, Vol. 42, No. 1, p. 33-36 (2011)
- 3) 数元伊之助: 液状誘電体が電極を上昇する現象, 応用物理, 25巻, 第6号, p. 264-265 (1956)
- 4) 寺阪澄孝, 工藤周, 三井和幸: 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, p. 87-91 (2008)
- 5) 寺阪澄孝, 三井和幸: EHD現象を応用した揺動運動型アクチュエータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 42, No. 5, p. 95-100 (2011)
- 6) 山田浩也, 広瀬茂男: 索状能動体の研究—多関節体感による連続曲線近似法—, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 1, p. 110-120 (2008)

- 7) 鈴森康一, 脇本修一: 流体駆動ソフトメカニズムの設計, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 6, p. 484-487 (2011)
- 8) 高橋智久, 佐藤嶺至, 寺阪澄孝, 下大川丈晴, 三井和幸: 揺動型EHDアクチュエータを用いた多関節ロボットの開発に関する基礎的研究, 平成26年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 73-75 (2014)
- 9) 平田宏一, 春海一佳: 魚ロボットに関する基礎的研究, 海上技術安全研究所報告, Vol. 2, No. 3, p. 281-307 (2002)
- 10) 森田浩輔, 武井裕輔, 寺阪澄孝, 下大川丈晴, 三井和幸: EHDポンプを駆動源とした水中ソフトロボットの開発に関する基礎的研究—ヒレ駆動機構の開発—, 2019年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 23-25 (2019)
- 11) 酒井昂輝, 森田浩輔, 武井裕輔, 寺阪澄孝, 下大川丈晴, 三井和幸: EHDポンプを駆動源とした魚型ロボットの開発に関する基礎的研究—動作速度の向上—, 2020年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 66-68 (2020)
- 12) 武井裕輔, 寺阪澄孝, 下大川丈晴, 三井和幸: EHDポンプを駆動源とした人工筋システムの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 53, No. 2, p. 28-35 (2022)
- 13) 石原亮裕, 村田隼人, 武井裕輔, 寺阪澄孝, 下大川丈晴, 三井和幸: EHD人工筋を駆動源としたロボットハンドの開発に関する基礎的研究, 2023年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 101-103 (2023)

(原稿受付: 2023年8月23日)

解説

イオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収の高性能化

著者紹介

たかな ひでまさ
高奈秀匡東北大学流体科学研究所
〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
E-mail: takana@tohoku.ac.jp

2004年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。東北大学流体科学研究所助手、助教、講師、准教授を経て、2022年同大学流体科学研究所教授。機能性流体工学の研究に従事。日本機械学会、日本混相流学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

地球温暖化の主要因とされる温室効果ガスの排出削減が国際的に喫緊の課題となっている。主要な温室効果ガスとして位置づけられる二酸化炭素の実質的排出ゼロの実現に向け、排気ガス中のCO₂を選択的に分離吸収し、高濃度CO₂を地中深くに圧入・貯留する手法（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）が注目を集めている。CO₂分離吸収技術のひとつとして、温度変化によるCO₂と塩基性水溶液の反応性の違いを利用した化学吸収法と呼ばれる分離回収法がある。CO₂の吸収溶媒として、アミン水溶液が用いられたCO₂化学吸着法がすでに実用化されているが、アミン溶液はCO₂の吸収速度が低いため、装置が大型となること、さらには、吸収後のアミン溶液からのCO₂脱離温度が高いことが課題として挙げられている¹⁾。これらの課題を克服すべく、近年では、従来の分子性吸収液と比較し、特異なCO₂吸収性能を有するイオン液体を吸収溶媒として用いることが提案され、注目を集めている¹⁾⁻⁴⁾。

イオン液体とは、アニオンとカチオンのみから構成され、その強い静電的な相互作用力により室温でも液体として存在する常温溶融塩である⁵⁾⁻⁶⁾。イオンのみで構成されることに起因して、不揮発性、高イオン導電率、難燃性、熱・化学的安定性、高いガス吸収能力などのさまざまな機能性を有する。イオン液体を構成するイオンの組み合わせや化学構造を自由にデザインすることで、用途に応じた機能性

を発現することが可能であることから、イオン液体は、化学的機能性流体としても注目を集めており、その応用研究が急速に進展している。

イオン液体をCO₂の吸収溶媒とした化学吸収法では、従来のアミンを用いた手法と比べると、イオン液体の熱容量が小さいことや水の蒸発潜熱を考慮する必要がないことから、CO₂加熱回収に使用するエネルギーの大幅な低減が可能である。また、イオン液体の不揮発性を利用し、CO₂放散過程の駆動源に熱スイングと真空スイングを併用することで、低温排熱で吸収液を再生する高効率プロセスが提案されている^{2), 7)-9)}。

イオン液体を用いたCO₂吸収は、気液界面での化学反応および内部への拡散により行われるため、吸収率向上には微細化による比表面積の増加が不可欠である。そこで、イオン液体による高効率なCO₂吸収法をめざし、イオン液体の微細化技術に静電噴霧を利用した新規なCO₂分離吸収技術が提案されている¹⁰⁾⁻¹³⁾。静電噴霧とは静電気力を利用した液体の超微細化噴霧技術であり^{14), 15)}、イオン液体が供給されるノズルと対向電極との間に数kVの直流電圧を印加することにより、静電気力により微細噴霧を発生させる方法である。本手法により、安定的にナノオーダーの超微細液滴を生成することができるため、比表面積効果によるCO₂分離吸収の高度化が期待できる。以下にこれまで行われたイオン液体静電噴霧の基礎特性解析およびCO₂分離吸収における静電噴霧の有効性について述べる。

2. 数値シミュレーションによるイオン液体静電噴霧現象の解明

静電噴霧現象に関しては、水やエタノール等の低粘度液体に対して多くの報告がなされているが、イオン液体のような高導電率かつ高粘度の液体に対する静電噴霧課程は十分に明らかにされていなかった。文献10)においては、界面追跡法を用いた二次元混相数値シミュレーションにより、イオン液体静電噴霧における液滴形成過程が解明され、印加電圧や流量に対する噴霧特性が明らかにされている。

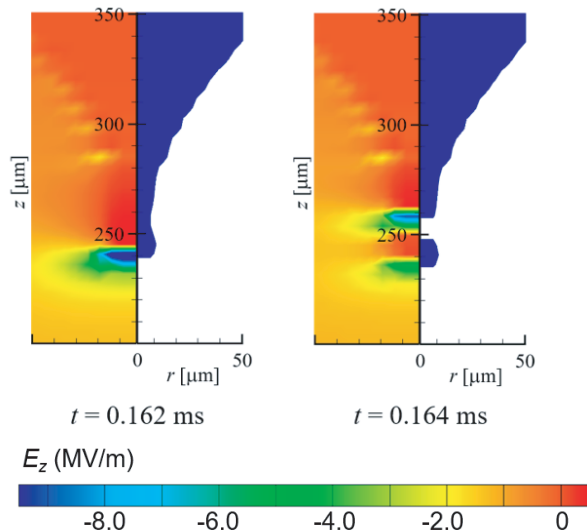


図1 イオン液体静電噴霧における液滴形成過程
(左：電界分布，右：界面形状)

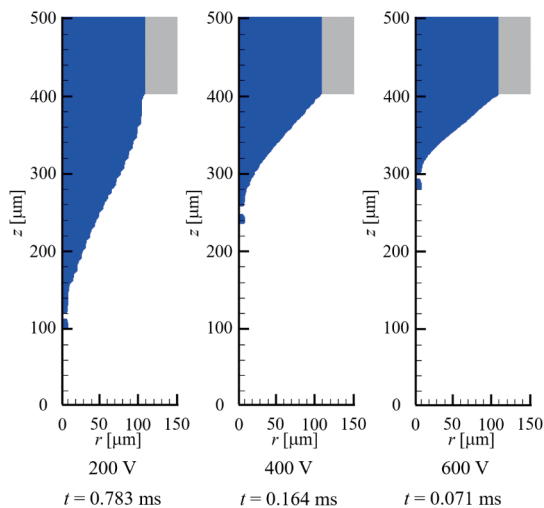


図2 印加電圧に対する液系分裂位置

図1は液滴形成過程を示したものであり，軸方向電場の経時変化と界面形状とを合わせて示している。このときの流量および印加電圧は，それぞれ0.3mL/minおよび400V（電極間距離0.4mm）である。また，鉛直下向きを負としている。細管・対向電極間に軸方向下方の電場を印加した際，イオン液体内に形成された緩やかな電位勾配により界面近傍にカチオンが蓄積され，界面に静電気力が下方に作用することでテイラーコーンが形成される。先鋭なコーン先端では，局所的に高い負電場が生じ，静電気力により液系が下方に伸長する。静電気力による急激な伸長により，液系への液体の供給が追いつかなくなり，液系の径が減少する。その後， $z=260\mu\text{m}$ の位置にくびれが生じ，この位置で液系が分裂して液滴が形成される。

一定流量の下では，図2に示すように，印加電圧の増加に伴い，テイラーコーン高さは減少し，より

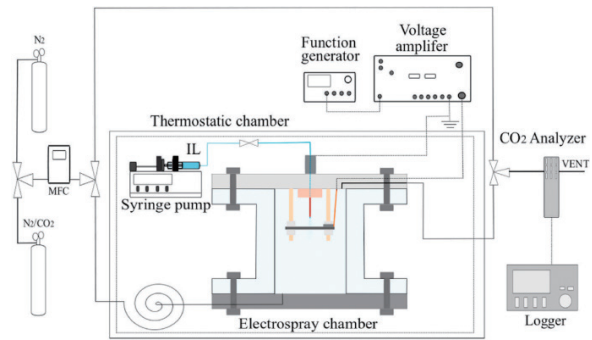


図3 実験装置の概略図

上流側で分裂が生じる。また，液滴生成に要する時間は短くなり，液滴生成周波数は高くなる。

3. イオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収の高性能化に関する実験的研究

3.1 噴霧挙動と二酸化炭素吸収特性解析

イオン液体静電噴霧においては，ヒューズドシリカ製のキャピラリーノズル（内径 $100\mu\text{m}$ ，外径 $375\mu\text{m}$ ）を用い，対向電極にはSUS製のリング状電極（内径10mm，外径11mm）を使用し，リング中心とノズル軸が一致するように設置した。なお，ノズル先端からリング電極までの距離は6.0mmであり，ノズル側を設置し，対向電極に高電圧を印加することにより静電噴霧を発生させている。イオン液体には，優れた CO_2 吸収性を示す1-ethyl-3-methyl imidazolium acetateを用い，シリンジポンプにより供給した。実験装置および実験条件の詳細については，文献11）を参照されたい。

図3にイオン液体静電噴霧による CO_2 吸収特性評価のための実験装置概略図を示す。上述の静電噴霧ノズルおよび対向電極はアクリル製容器（内径40mm，高さ40mm，容積 50.3cm^3 ）の内部に設置され， CO_2/N_2 混合気はチャンバー下部から上部へ流入出する。静電噴霧による CO_2 吸収量はチャンバー下流側に接続された赤外線吸収式の CO_2 濃度計により計測した。粘性等のイオン液体物性は温度により大きく変化するため，シリンジポンプおよびアクリルチャンバーを対流式恒温槽内に設置し，一定の環境温度の下で実験を行った。

図4にイオン液体供給量を1.0mL/hとし，8kVを印加した際の高速度カメラによるイオン液体静電噴霧の可視化写真を示す。なお，ハロゲン光源を背景光に用い，shadow graph法により可視化している。電圧印加により，カチオンが気液界面に蓄積し，静電気力が下方に作用する。表面張力に対して静電気力が支配的となると，テイラーコーンと呼ばれる円錐状界面が形成される（1.25ms）。その後，局所

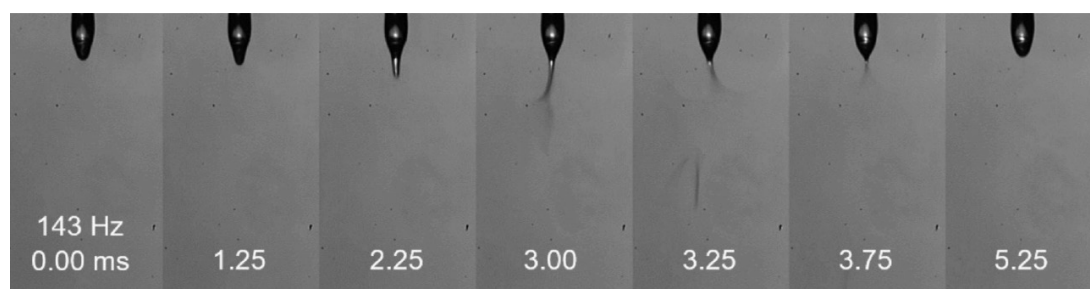


図4 高速度カメラによるイオン液体静電噴霧の可視化（印加電圧：8 kV）

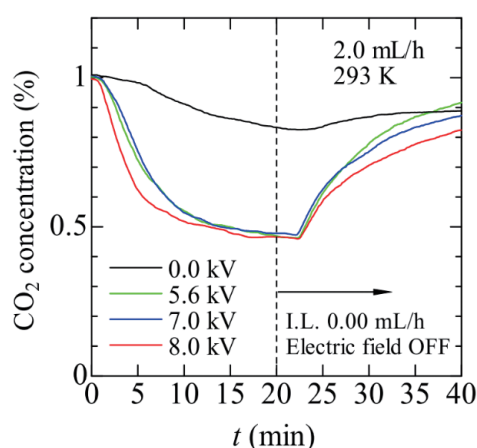


図5 印加電圧に対するチャンバー内二酸化炭素濃度の経時変化（20分後にイオン液体供給および印加電圧を停止）

的に高電界となるテイラーコーン先端において液糸が伸長する。このとき、帯電液糸のクーロン反発により、液糸先端が3次元的に振れながら分裂することで微細液滴が形成される、いわゆるwhipping mode¹⁴⁾⁻¹⁶⁾と呼ばれる噴霧形態を示す（3.00ms）。液糸の伸長とともに、下方に作用する静電気力が強くなり、液糸が分断することで比較的大きな液滴も形成されるが（3.25ms）、その後もコーン先端から平均径が75nm程度の超微細液滴が連続的に形成される（3.75ms）。また、このとき、帯電液滴間のクーロン反発により、空間的に広がりを持つ噴霧が形成される。コーン先端からの噴霧量が液体の供給量よりも多くなることで、噴霧が停止し、テイラーコーンが消失するが（5.25ms）、再びテイラーコーンが形成され、これら一連の噴霧現象が間欠的に繰り返される。なお、このときの噴霧周波数は143Hzであった。

図5にイオン液体静電噴霧を行った際のチャンバー内CO₂濃度の経時変化を示す。チャンバー入口においてCO₂体積濃度が1.03%のCO₂/N₂混合気が20cm³/minの流量で流入し、イオン液体の供給量を2.0mL/hとした。最初の20分間に静電噴霧を行い、その後の20分間は、イオン液体の供給および電圧印加を停止した。無電場の場合では、イオン液体の供給から20分後でのCO₂濃度が1.03%から0.83%

に減少するのに対し、電圧を印加した場合では、イオン液体静電噴霧によりCO₂吸収が促進されるため、チャンバー内のCO₂濃度が0.47-0.48%まで減少する。その後、イオン液体および電圧印加を停止した際、チャンバー内のCO₂濃度は緩やかに上昇し、初期濃度に漸近することから、イオン液体静電噴霧による明確なCO₂吸収促進効果が示された。印加電圧が8.0kVの場合は、他の条件と比較して初期のCO₂濃度の減少率が大きい。これは、本条件においてより微細な液滴が生成されるとともに、空間に広がりを持つ噴霧が形成され、比表面積効果により、表面反応が促進されるためである。しかしながら、20分後におけるチャンバー内CO₂濃度は、いずれの印加電圧においてもほぼ等しい値となる。これは、CO₂反応生成物の液滴内部への拡散律速に起因すると考えられ、液滴をさらなる微細化や処理ガスの滞在時間を長くすること、もしくはマルチノズル化することが必要である。

3.2 パルスDC電圧印加による二酸化炭素吸収の高性能化

3.1節で述べたように、直流電圧印加でのイオン液体静電噴霧においては、テイラーコーンが周期的に振動しつつ、液滴が発生することが高速度カメラによる可視化から明らかになっている。そこで、直流パルス電圧を印加することで、テイラーコーンを強制的に振動させ、その振動周波数を印加電圧周波数に同期させることで、効率な液滴生成が行われると考えた。3.1節と同様の実験系を用い、直流矩形型パルス電圧をデューティー比50%として印加し、周波数を50-300Hzの範囲で変化させた。詳細な実験条件については文献13)を参照されたい。

50Hzの直流パルス電圧印加時におけるテイラーコーン高さの経時変化を図6に示す。ここで、テイラーコーン高さとは、ノズル先端部からテイラーコーン先端に形成される液糸部を含む高さとする。また図中の黒丸・実線は噴霧が発生していること、また、白丸・破線は噴霧が行われていないことを表している。テイラーコーンは、周期的に伸長・収縮を繰り返しており、最大伸張時およびその前後にお

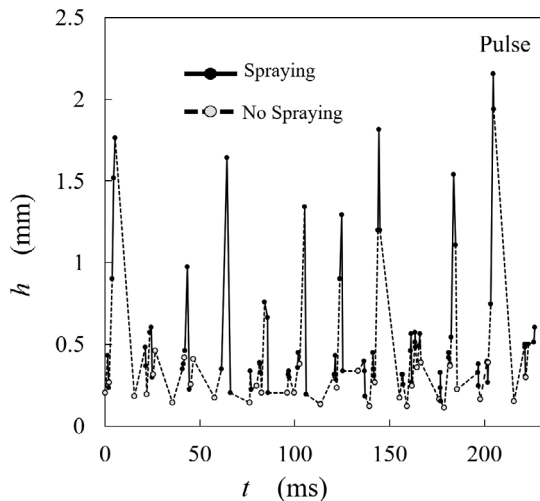


図6 50Hzの直流パルス電圧印加時におけるテイラーコーン高さの経時変化

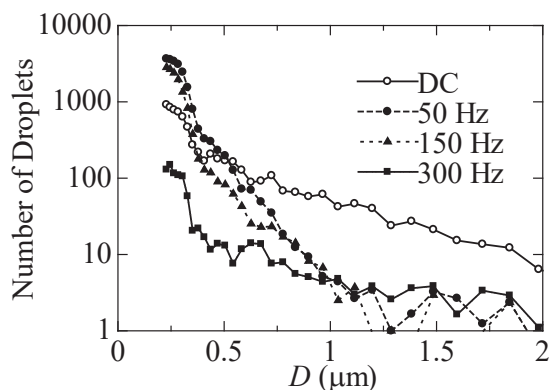


図7 生成液滴径分布に与えるパルス電圧周波数依存性

いて液滴が発生することが分かる。このとき、1秒間当たりの噴霧回数として定義される噴霧周波数は47Hzであり、印加電圧のパルス周波数である50Hzにほぼ同期した噴霧が行われる。

図7に直流パルス電圧周波数における噴霧液滴径分布を示す。50および150Hzの直流パルス電圧時は、CO₂吸収において重要となる比表面積の大きな0.2-0.4μmの液滴が直流時に比べ多数生成される。一方で、0.5μmを超える大きな液滴は、直流時に比べ、50Hzおよび150Hzの直流パルス電圧印加時では液滴数が減少する。また、300Hzにおいては、パルス電圧印加による微細化促進効果は得られない。これは、高周波数側の直流パルス電圧印加では、ノズル先端の液体振動が電圧変化に追従できず、テイラーコーン形成に至らないためである。以上の結果より、直流パルス電圧の噴霧液滴微細化効果においては、最適な周波数帯が存在することが明らかになった。

直流パルス電圧印加によるCO₂吸収効果を3.1節と同様の方法で評価した結果を図8に示す。なお、

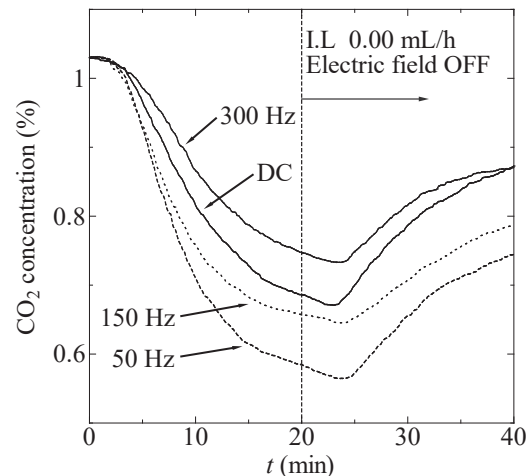


図8 直流パルス電圧印加時におけるチャンバー内二酸化炭素濃度の経時変化

このときのイオン液体供給量およびCO₂/N₂混合気流量は、それぞれ1.0mL/hおよび10cm³/minであり、図5の条件よりも低流量となっている。周波数が50および150Hzの直流パルス電圧印加時のCO₂濃度の低下は、直流電圧印加時と比較して顕著である。それに対し、300Hz印加時でのCO₂吸収は、直流電圧時に比べ低下する。20分後における直流電圧印加時のCO₂吸収率が33%であるのに対し、50および150Hzの直流パルス電圧印加時の吸収率は、それぞれ43%および36%となる。これより、本周波数の直流パルス電圧の印加により、直流電圧時に比べてCO₂吸収率が最大で30%向上するという明確な向上効果が得られた。なお、300Hzの直流パルス電圧印加時におけるCO₂吸収率が直流電圧印加時に比べて低下するのは、先述のように、本条件下では、ノズル先端での液体部が外部パルス電界に追従することができず、噴霧液滴数が直流時に比べて大幅に減少するためである。

4. ま と め

イオン液体静電噴霧における噴霧形成過程と基礎特性、さらには、イオン液体静電噴霧によるCO₂分離吸収の高性能化について述べた。印加電圧の増加に伴い、液滴の微細化が促進され、比表面積効果により、CO₂分離吸収特性が顕著に向上することから、CO₂分離吸収におけるイオン液体静電噴霧の有用性が示された。また、直流パルス電圧印加により、電圧周波数に同期させた噴霧が可能になることが明らかとなった。液体が追従できる50-150Hzの直流パルス電圧印加時では、噴霧液滴の更なる微細化促進効果が示され、直流電圧印加時に比べより多くの微細液滴が生成されることでCO₂分離吸収効果の向上が示された。

本技術は、低濃度のCO₂混合気に対しても効率的にCO₂分離吸収することが可能であることから、排ガス中のCO₂処理のみならず、宇宙ステーションや潜水艦などの密閉空間における生活環境維持のためのCO₂処理に対しても応用できるものであり、実用化に向けたさらなる研究展開が大いに期待される。

謝辞

本研究はJSPS科研費16H04262を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Makino, T., Umecky, T. and Kanakubo, M. : CO₂ Absorption Properties and Mechanisms for 1-Ethyl-3-methylimidazolium Ether-Functionalized Carboxylates, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 55, p. 12949-12961 (2016)
- 2) Bara, J.E., Carlisle, T.K., Gabriel, C.J., Camper, D., Finotello, A., Gin, D.L. and Noble, R.D. : Guide to CO₂ Separations in Imidazolium-Based Room-Temperature Ionic Liquid, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 48, p. 2739-2751 (2009)
- 3) Babamohammadi, S., Shamiri, A., and Aroua, M.K. : A review of CO₂ Capture by Absorption in Ionic Liquid-based Solvents, *Reviews in Chemical Engineering*, Vol. 31, p. 383-412 (2015)
- 4) Lei, Z., Dai, C. and Chen, B. : Gas solubility in ionic liquids, *Chemical Review*, Vol. 114, No. 2, p. 1289-1326 (2014)
- 5) Lei, Z., Chen, B., Koo, Y.M. and MacFarlane, D.R. : Introduction : Ionic Liquids, *Chemical Review*, Vol. 117, No. 10, p. 6633-6635 (2017)
- 6) Vekariya, R.L. : A Review of Ionic Liquids : Applications towards Catalytic Organic Transformations, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 227, p. 44-60 (2017)
- 7) Makino, T., Sakurai, M. and Kanakubo, M. : Solubilities of Gases in Ionic Liquid and its Applications to Separation Processes, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, Vol. 56, No. 3, p. 12-20 (2013)
- 8) Blanchard, L.A., Hancu, D., Beckman, E.J. and Brennecke, J.F. : Green Processing Using Ionic Liquid and CO₂, *Nature*, Vol. 399, p. 28-29 (1999).
- 9) Carvalho, P.J., Kurnia, K.A., and Coutinho, J.A.P. : Dispelling Some Myths About the CO₂ Solubility in Ionic Liquids, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 18, p. 14757-14771 (2016)
- 10) 川谷康二, 高奈秀匡：イオン液体静電噴霧における液滴形成過程および噴霧特性の数値シミュレーション, *混相流*, Vol. 32, No. 1, p. 97-107 (2018)
- 11) Takana, H., Hara, N., Makino, T. and Kanakubo, M. : Effect of Environmental Temperature on CO₂ Selective Absorption Characteristics by Ionic Liquid Electrospray in Flow System, *Journal of Electrostatics*, Vol. 114, 103634 (2021)
- 12) Takana, H., Yamamoto, K., Makino, T. and Kanakubo, M. : Improvement of CO₂ Absorption by Ionic Liquid Electrospray, *Europhysics Letters*, Vol. 131, 34002 (2020)
- 13) 大竹一彦, 高奈秀匡：高効率二酸化炭素分離吸収に向けたイオン液体静電噴霧に与える直流パルス電圧印加効果, *混相流*, Vol. 36, No. 1, p. 120-127 (2022)
- 14) Wang, Y., Tan, M.K., Go, D.B. and Chang, H.C. : Electrospray Cone-jet Breakup And Droplet Production for Electrolyte Solutions, *Europhysics Letters*, Vol. 99, 64003 (2012)
- 15) Cloupeau, M., and Prunet-Foch, B. : Electrohydrodynamic Spraying Functioning Modes : A Critical Review, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 25, p. 1021-1036 (1994)
- 16) Gañán-Calvo, A.M., López-Herrera, J.M., Herrada, M.A., Ramos, A., and Montanero, J.M. : Review on the Physics of Electrospray : From Electrokinetics to the Operating Conditions of Single and Coaxial Taylor Cone-jets, and AC Electrospray, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 125, p. 32-56 (2018)

(原稿受付：2023年8月17日)

解説

車両用ドライMR流体ブレーキの開発と超小型EVへの実装

著者紹介

なかのまさみ
中野政身株式会社SmartTECH Lab.
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
東北大学産学連携先端材料研究開発センター内
E-mail: mnakano@smarttech-lab.com1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了。
1981年早稲田大学助手、1982年山形大学助手、
助教を経て、1997年同教授、2008年東北大学
教授流体科学研究所、2018年同教授未来科学技
術共同研究センター、2023年(株)SmartTECH Lab.
代表取締役社長兼CEO、現在に至る。機能性流体、
流体関連振動・騒音、振動制御などに関わるス
マート流体制御システム工学に従事。JFPS、
JSME、JSAE、EJAJなどの会員。

1. はじめに

MR流体 (Magneto-Rheological Fluid) は、シリコンオイル等の液体の分散媒中に数 μm サイズの強磁性体微粒子を分散させた懸濁液であり、外部磁場の作用の下でレオロジー的性質が大きく変化する現象、いわゆるMR効果を示す機能性流体である。MR流体の応用に際しては、無磁場時のエネルギー損失を僅少にすることと、磁場印加による降伏せん断応力の変化幅を大きくすることなどの観点から、MR流体の無磁場時の基底粘度は低い方が好ましいとされている。そのため、低粘度の分散媒オイルが用いられ、かつ粘度上昇を伴うことから粒子体積分率の上限も存在する。また、MR流体の使用温度範囲もオイル等の分散媒の沸点や凝固点に依存する。さらに、MR流体の長期間静置時の分散した鉄粒子の沈降も応用に際して問題となる場合もある。このように、MR流体がシリコンオイル等の液体を分散媒としている関係から、MR流体の諸特性への種々の制約や限界が生じてくる。

以上のような、現状のMR流体に関する分散媒として液体を用いることによる諸制約や限界を踏まえて、分散媒として液体を用いないで気体を用いるドライMR流体を提案し、 SiO_2 のナノ粒子を数 μm サイズの鉄粒子にCore-shellコーティングして流動性を高めた粉体からなるドライMR流体を創製してお

り^{1),2)}、車両用ドライMR流体ブレーキを開発している^{3),4)}。分散媒として気体を用いることにより、最も高い粒子体積分率で分散が可能となるため、MR流体のMR効果の向上、粒子沈降の回避、使用温度範囲の拡大、応答性の向上などさまざまな特性の向上が期待される。

本解説では、オイルフリーで最も身近な空気を分散媒として TiO_2 のナノ粒子をCore-shellコーティングした数 μm サイズの鉄粒子を分散した粉体からなる、より高い流動性をもつドライMR流体を取りあげ、その流動性の向上と磁気レオロジー特性などについて記述し、その車両用ブレーキへの適用、さらにそのブレーキの超小型EVへの実装の事例を紹介する。

2. TiO_2 被覆CI粒子粉体からなるドライMR流体³⁾

2.1 ドライMR流体の創製

オイル系MR流体と同様に、分散粒子として数 μm サイズのカルボニル鉄粒子 (CIP CS, $\phi 6.6\mu\text{m}$, BASF Japan) を用い、ドライMR流体としての流動性をより向上するために、このカルボニル鉄粒子の表面に摩擦式粉砕機によってチタニアのナノ粒子 (TiO_2 , $\phi 20\text{nm}$) をCore-shellコーティングしている。すなわち、新たに創製したドライMR流体は、表面をナノチタニア粒子でコーティングしたカルボニル鉄粒子からなる流動性の高い磁性粉体である。図1(a), (b)には、それぞれカルボニル鉄粒子そのものと、1.0wt%のナノチタニア粒子をコーティング

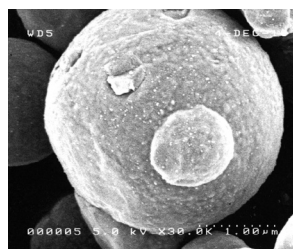
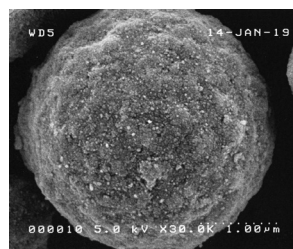
(a) TiO_2 : 0.0wt%(b) TiO_2 : 1.0wt%

図1 カルボニル鉄粒子そのものと、チタニアナノ粒子を被覆したカルボニル鉄粒子のSEM写真

したカルボニル鉄粒子の表面のSEM写真を示す。図1(b)では、ナノチタニア粒子が数 μm サイズのカルボニル鉄粒子表面にコーティングされたCore-shell構造が観察される。

2.2 ドライMR流体の流動性評価とMR効果

カルボニル鉄粒子のコーティング材であるナノチタニア粒子は非磁性体であることから、この添加量が増すにつれてMR効果が低下するため、流動性を向上させながらMR効果も向上させる最適な添加量が重要となる。粉体は流動性が高いと一定容積へのその充填割合が高くなることから、一定容器にドライMR流体（粉体）を静かに軽く充填しすり切った状態の質量をその容積で除した「ゆるみかさ密度」によって流動性とカルボニル鉄粒子の充填割合を評価している。図2には、ナノチタニア粒子（ TiO_2 ）の添加量（wt%）に対する測定したゆるみかさ密度の変化を示す。非被覆のカルボニル鉄粒子粉体そのもの（0.0wt%）のかさ密度は約 $2.38\text{g}/\text{cm}^3$ であるが、0.5wt%と僅かな TiO_2 を添加することによってドライMR流体のかさ密度は $3.105\text{g}/\text{cm}^3$ と急上昇しており、流動性がかなり向上していることがわかる。 TiO_2 の添加量を1.0wt%，1.5wt%，2.0wt%，7.25wt%と

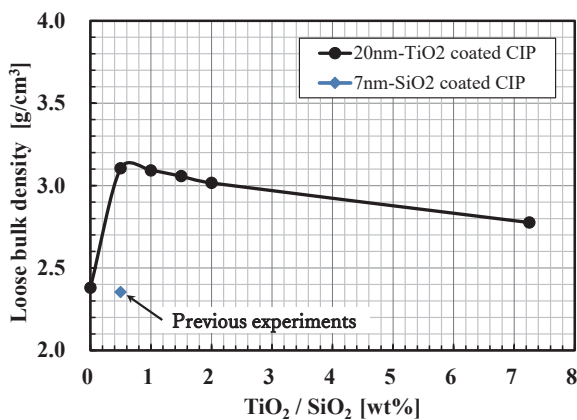


図2 被覆材（ TiO_2 ， SiO_2 ナノ粒子）の添加量によるゆるみかさ密度の変化

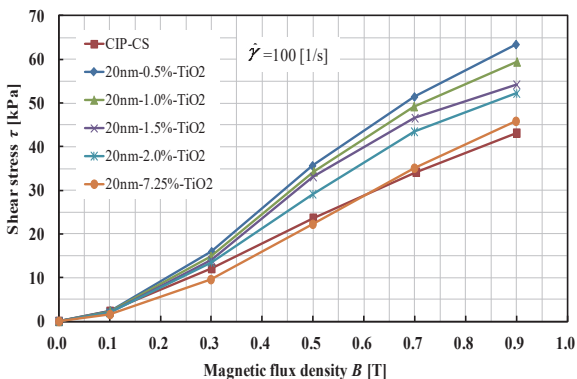


図3 TiO_2 ナノ粒子添加量によるせん断応力-印加磁場曲線の変化

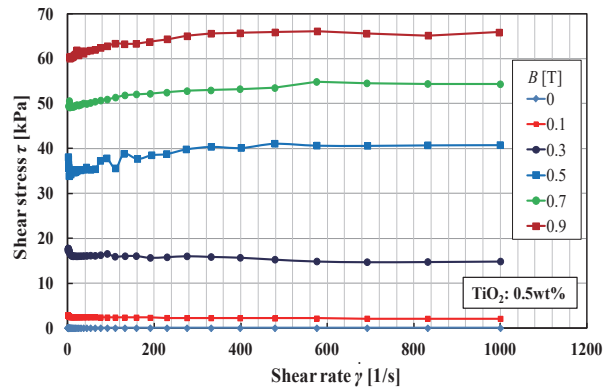


図4 ドライMR流体（最適添加量： $\text{TiO}_2=0.5\text{wt}\%$ ）のせん断応力-せん断速度曲線

増やすにつれて、流動性は高まるがカルボニル鉄粒子より低密度の TiO_2 のナノ粒子が増えることによってかさ密度は漸減する。さらに、非磁性体である TiO_2 の添加量が増えるにともない、強磁性体であるカルボニル鉄粉が減ることによって、図3に示すように同一印加磁場に対してせん断応力が低下しMR効果は低下する。以上から、流動性およびMR効果の向上という観点から最適な TiO_2 の添加量は0.5wt%といえる。なお、図2には、ナノシリカ粒子（ SiO_2 ， $\sim 7\text{nm}$ ）0.5wt%でカルボニル鉄粒子の表面をコーティングした粉体からなるドライMR流体¹⁾の測定したゆるみかさ密度も併記してあるが、約 $2.36\text{g}/\text{cm}^3$ と添加量が同量の $\text{TiO}_2=0.5\text{wt}\%$ のドライMR流体に比して約 $0.745\text{g}/\text{cm}^3$ 程度低下しており、流動性が低くかつMR効果も低下することを示唆している。

図4には、最適な $\text{TiO}_2=0.5\text{wt}\%$ の添加量のドライMR流体の印加磁束密度 B に対する流動曲線（せん断応力-せん断速度曲線）の変化を示す。この図4および図3は、磁場印加型の平行二円盤レオメータを用いて、二円盤間に測定したゆるみかさ密度でドライMR流体を充填して測定したものである。ドライMR流体のMR特性は、オイル系の通常のMR流体と同様に、印加磁場によって降伏せん断応力が誘起されるビンガム流体に類似した特性を示すことがわかる。 $B=0.5\text{T}$ 以上では、せん断速度の増大に伴いせん断応力が僅かに上昇する傾向を呈する。 $B=0.9\text{T}$ 印加時に、比較的高い約 65kPa 程度のせん断応力が生じている。

3. 車両用ドライMR流体ブレーキとその性能

3.1 開発した車両用ドライMR流体ブレーキ

MR流体を車両用のクラッチやブレーキ等の動力伝達・制動装置に活用する場合には、低温環境下でのオイル系MR流体の粘度上昇による引きずりトルクの著しい増大が問題となる。その解決策として、

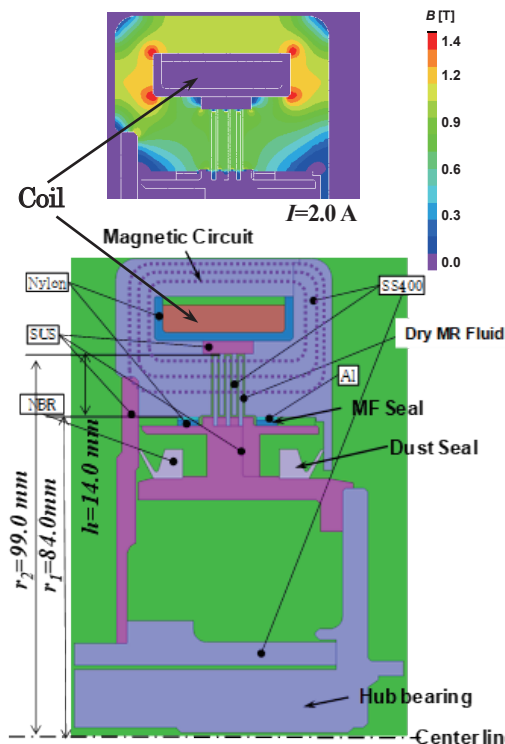


図5 車両用ドライMR流体ブレーキの構造と磁場解析結果

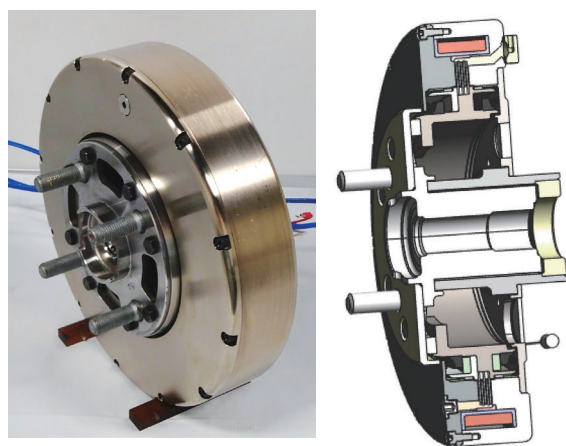


図6 開発した車両用ドライMR流体ブレーキ

オイルフリーのドライMR流体の使用が有効な手段となる。

超小型EVコムの四輪へ搭載することを目的に、車両用ドライMR流体ブレーキを開発している³⁾⁻⁵⁾。開発されたドライMR流体ブレーキは、図5および図6に示すように、車両側に固定された円盤（2枚）とハブベアリングと一緒に回転する円盤（3枚）が交互に配置された円盤間隙0.5mmの多層円盤間にドライMR流体（ TiO_2 ：0.5wt%）をかさ密度 $3.105\text{g}/\text{cm}^3$ で充填した多層円盤型の構造をとっている。多層円盤外周に配置された円環状電磁コイル（線径 $\phi 0.8\text{mm}$ 、巻数260turns）に電流を流すと、図5の上図の磁場解析結果に示すように固定電磁

ヨークに磁界が発生して多層円盤間のドライMR流体に効果的に磁界が印加され（ $B=0.7\text{T}$ at $I=2.0\text{A}$ ）、回転円盤3枚にドライMR流体のせん断力が働きブレーキとして作動する。電磁コイルへの印加電流 I によってドライMR流体への印加磁場を可変して回転円盤に働くドライMR流体のせん断力を変えることによりブレーキの制動トルクが可変となる。その詳細な作動原理を示すと次のようになる。多層円盤に垂直方向に磁界が印加されるため、ドライMR流体中の強磁性体粒子は磁気分極し互いに引き付け合い円盤に垂直な磁界方向に鎖状の粒子クラスターやカラム構造を形成する。回転円盤は回転し続けているため、固定円盤と回転円盤とに固着した鎖状粒子クラスターやカラムがせん断変形を受け円盤間で崩壊してはつながる現象を繰り返すことで⁴⁾、回転円盤に抵抗力が発生してブレーキ機能が働く。このような作動原理のため、機械的摩擦ブレーキとは異なり摩耗粉が発生せず静粛で、環境負荷軽減に貢献する。

開発したドライMR流体ブレーキの外観を図6に示す。本ドライMR流体ブレーキを搭載する超小型EVコムのオリジナルの12in.のホイール内のスペースに装着できるように、ドライMR流体ブレーキのサイズは外径 $\phi 244\text{mm}$ 、幅約54mmとしている。従来の油圧駆動式ディスクブレーキのように軸方向に動く駆動メカが不要なため、比較的シンプルな外観となっている。

3.2 ドライMR流体ブレーキの制動トルク特性

ドライMR流体ブレーキの制動トルク特性は、サーボモータとトルク変換器からなる制動トルク特性計測装置（最大設定回転数100rpm、最大トルク400Nm）を用いて測定している。図7には、回転数 $N=100\text{rpm}$ 一定時に電磁コイルへの印加電流 I の目標値を矩形波状（0Aと目標 I A間の20秒間の立ち上がり、立下り波形）に与えた際の制動トルクの時間応答を測定した結果を示す。コイル電流 I の印加に対して、制動トルクはほぼ瞬時（立ち上がりの時定数が22ms）に上昇して、電流が大きくなると若干時間とともに低下する傾向を示すがほぼ一定の制動トルクを呈し、電流のOFFに対してほぼ瞬時（立下り時定数15ms）に電流印加前のトルクに復帰している。また、印加電流 I が大きくなるに伴い制動トルクも増大している。その定常的な制動トルクは、図8に示すように印加電流 I にほぼ比例して増大し、最大印加電流 $I=2.5\text{A}$ 時に設計目標トルク160Nmを超える250Nmの制動トルクを発揮している。同図には、 SiO_2 -0.5wt%添加ドライMR流体（充填かさ密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$ ）^{3), 4)}およびオイル系MR流体（MRF-

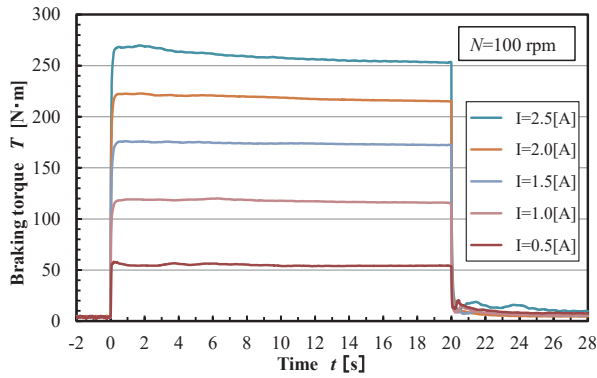


図7 ドライMR流体ブレーキの制動トルク T のON/OFF応答（印加電流 I 可変）

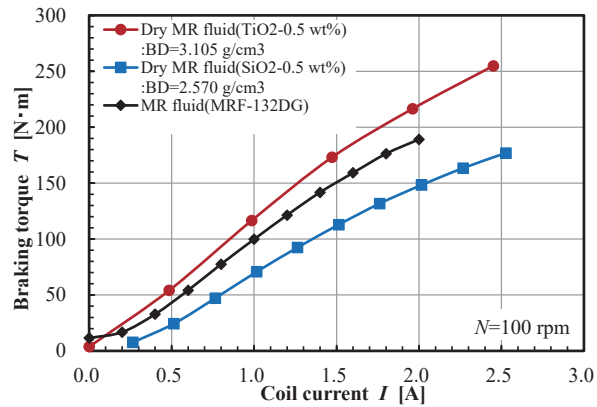


図8 ドライMR流体ブレーキの印加電流 I に対する制動トルク特性（ SiO_2 -0.5wt%添加ドライMR流体およびオイル系MR流体（MRF-132DG）を充填したブレーキとの比較）

132DG）（カルボニル鉄粒子32vol%）^{6),7)}を充填した同サイズの車両用ブレーキの定常的な制動トルク特性も比較のために併記してある。本 TiO_2 -0.5wt%添加ドライMR流体は流動性が高くブレーキにゆるみかさ密度 3.105g/cm^3 に相当するかさ密度で充填できていることから、最も大きな制動トルクを発揮していることがわかる。

図9には、印加電流 $I=0.0\text{A}$ 時の開発したドライMR流体ブレーキの引きずりトルク特性を示す。ド

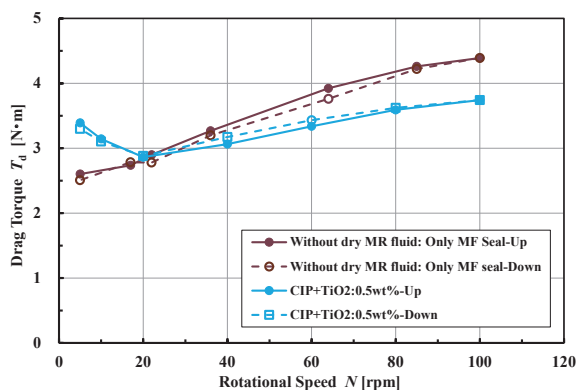


図9 ドライMR流体ブレーキの引きずりトルク特性

ライMR流体の無磁場時の流動抵抗がブレーキの引きずりトルクにどの程度寄与しているかを調べるために、ドライMR流体充填前（シール抵抗のみ）のブレーキの引きずりトルクを計測した結果も比較して併記してある。 $N=100\text{rpm}$ 程度までの計測であるが、この引きずりトルクはシールでの粘性抵抗によって回転数に比例して増大する特性を示し、約 2.5Nm から 4.5Nm 程度までトルクが変化している。一方、ドライMR流体を充填したブレーキの引きずりトルクは、 $N=20\text{rpm}$ 以内の極低速で若干増大する傾向を示すが、充填していないブレーキの引きずりトルクとほぼ同等の値（ $3.0\text{Nm} \sim 3.7\text{Nm}$ 程度）を呈しており、ドライMR流体による流動抵抗に起因する引きずりトルクへの寄与はほとんどなく、省エネルギーの観点からも好ましい結果を得ている。

4. ドライMR流体ブレーキの超小型EVへの実装

開発したドライMR流体ブレーキを超小型EVコンスの4輪に装着し、油圧をまったく使用せず電線のみでつながった完全なブレーキバイワイヤシステム（Brake by Wire System）を構築している。ブレーキペダルの電気信号を電子制御装置が受け取り、それに応じた電流をドライMR流体ブレーキに印加することで制動トルクが発生する単純な構成となっている。図10には、実際の走行試験において、坂道で一旦停止して再度発進している様子を示している。良好なブレーキ性能を発揮することが実証されている⁵⁾。



図10 四輪にドライMR流体ブレーキを搭載した超小型EVの走行試験の様子（坂道での一旦停止）

5. おわりに

従来のオイル系MR流体がシリコンオイル等の液体を分散媒としている関係から、オイル系MR流体の諸特性への種々の制約や限界が生じてくる。ドライMR流体は、オイルフリーで高い流動性を示す

磁性粉体であるため、かなりの低温から高温まで広範な環境温度で使用可能である。本解説では、 TiO_2 のナノ粒子を数 μm サイズのカルボニル鉄粒子に Core-shellコーティングすることにより、流動性をより向上させ、かつ一層のMR効果を発揮するドライMR流体に関して、その創製から流動性およびMR特性の評価結果までを提示している。さらに、開発したドライMR流体を車両用ブレーキに適用し、かつ超小型EVへ実装することにより、良好なブレーキ性能を発揮することとその有効性を実証している。ドライMR流体を用いることによるMR効果の向上、粒子沈降の回避、使用温度範囲の拡大、および応答性の向上などさまざまな特性の向上が期待されるため、今後、車両関係にとどまらず、より広範な応用分野でのドライMR流体のブレーキやクラッチなどへの応用が期待される。

謝辞

本研究の一部はJSPS科学研究費補助金基盤研究(B)(16H04288)の助成を受けて実施している。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) Nakano, M., Abe, H., Tian, T., Totsuka, A., Sato:

Magneto-Rheological Effects and Fluidity Improvement of Novel Dry MR Fluids, Proceedings of the 10th JFPS Int. Symp. on Fluid Power (FUKUOKA 2017), Paper No. 1B11, p. 1-5 (2017)

- 2) 中野政身, 野間淳一: トルク伝達媒体及びこれを用いたクラッチ, 特許第6232026, (2017)
- 3) Nakano, M., Taguchi, O., Shibata, F., Sun, S., Yang, J., Abe, H.: Development of Dry MR Fluid Brake for Super-compact Electric Vehicle, Proceedings of 16th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2019), Sendai, Japan, p. 392-393 (2019)
- 4) 中野政身: 3.3ドライMR流体, 機能性流体入門—基礎と応用—, 中野政身編著, 日本工業出版(株), p. 121-133 (2021)
- 5) Nakano, M., Taguchi, O., Sato, C., Sun, S.: Development of Multi-disk Type Automotive Brake using Dry MR Fluid of TiO_2 Coated CI Particles, Proceedings of 18th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2021), Sendai, Japan, p. 350-351 (2021)
- 6) 中野政身, 道辻善治: 第1編第3章第3節 MR流体ブレーキの開発とEVへの適用, 電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電技術, 堀洋一, 横井行雄監修, (株)エヌ・ティー・エス, p. 116-129 (2019)
- 7) 中野政身: 車両用MR流体ブレーキの開発とその小型EVへの実装, 車載テクノロジー, Vol. 9, No. 12, p. 52-59 (2022)

(原稿受付: 2023年10月2日)

解説

MR流体ブレーキの装着型力覚提示装置への応用

著者紹介

さわ はし りゅうの すけ
澤橋 龍之介中央大学理工学研究科
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27
E-mail: r_sawahashi@bio.mech.chuo-u.ac.jp

2022年中央大学理工学部精密機械工学専攻博士前期課程修了。VR空間における空気圧アクチュエータとMR流体を用いた可変粘性を有する力覚装置による人間の認知の研究に従事。修士(工学)。

おく い まなぶ
奥井 学中央大学研究開発機構
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27
E-mail: manabu.okui48@gmail.com

2014年東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻修了。日産自動車(株)などを経て2023年4月より研究開発機構機構准教授。空気圧アクチュエータ、機能性流体関連の研究に従事。博士(工学)。日本フルードパワーシステム学会平成29年度学術論文賞受賞。

なか むら た ろう
中村 太郎中央大学理工学部
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27
E-mail: nakamura@mech.chuo-u.ac.jp

2003年信州大学大学院博士課程修了。博士(工学)。1999年秋田県立大学助手。2004年中央大学理工学部専任講師。2006年同大学准教授。2012年スイス連邦工科大学ローザンヌ校Visiting Professor。2013年より中央大学教授。2017年株式会社ソラリス設立。同社技術顧問。現在に至る。人工筋肉を用いたソフトロボットおよび生物型ロボットの開発と応用に従事。

装置を固定するため、ユーザの移動が制限される。一方で、装着型の装置は移動しながら力覚提示が可能である。装着型の力覚提示装置としてはモータと減速機を用いた装置³⁾⁴⁾がある。このような装置はモータと減速機により弾性、摩擦や粘性などの多様な力覚提示が可能だが、バックドライバビリティが低く、無負荷状態の提示が困難である。また、装着者に対してアクティブに力覚提示するため、安全性に課題がある。

モータに代わる手法として、空気圧人工筋肉を用いた力覚提示装置が開発されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。これらは人工筋肉の構造的な弾性特性から、自然な弾性力を提示できる。しかし、空気圧駆動に起因する応答速度の遅さにより、応用先がリハビリテーションのアシストなど装着者の動作が比較的低速の状況に限られる。

そこで、パッシブ駆動で応答性の高い力覚提示をめざし、機能性流体のER (Electrorheological) 流体やMR (Magnetorheological) 流体が着目されている。これらの機能性流体をブレーキやクラッチとして用いた力覚提示装置は、高いバックドライバビリティを有し⁸⁾、応答性が高く、連続的にトルク制御が可能であることから摩擦力や粘性力の提示が容易である。また、これらの装置はパッシブに力を提示するため機構的に安全である。ER流体を用いた装置⁹⁾¹⁰⁾はER流体の特性上、応答性は数ミリ秒と非常に速いが、出力重量比が比較的低いため、装着型装置への応用は難しい。対するMR流体は発生する最大降伏応力が50-100kPaと大きいため、装置を構造的に小型化することが可能である¹¹⁾。

本稿では、MR流体ブレーキを用いた装着型力覚提示装置について、提示対象の身体部位ごとに分類し、それぞれの装置の応用例を紹介する。

2. 磁気粘性流体ブレーキ

磁気粘性流体ブレーキ(以下、MRブレーキ)は高出力密度、高いバックドライバビリティ、高速応答という特徴を持つ。層状型MRブレーキの外観と内部構造を図1に示す。MRブレーキは、内部に磁

1. はじめに

力覚提示装置はロボットの遠隔操作、歩行支援やリハビリテーション、トレーニングのフィードバックやエンターテインメントの分野におけるVR環境の現実感や臨場感の向上を目的として多くの装置が開発されてきている。

一般的な力覚提示装置はTouch (3D System)¹⁾やOmega (Force Dimension)²⁾に代表されるような卓上型の装置である。卓上型の装置は机などに置いて使用するため、ユーザに提示する力以外の負荷が加わらず、違和感の少ない力覚提示ができる。しかし、

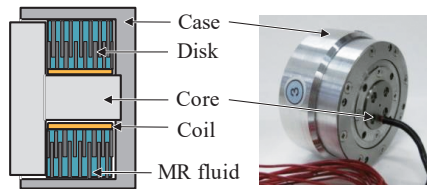
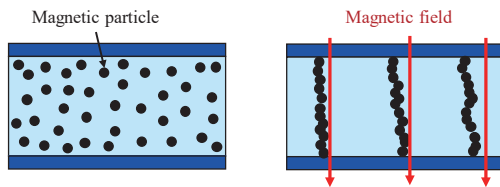
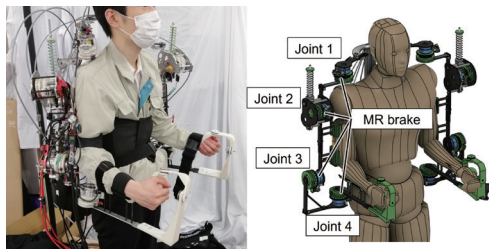
図1 MR流体ブレーキの外観と内部構造¹³⁾

図2 電流印可時のクラスタ形成

図3 双腕装着型力覚提示装置¹³⁾

気粘性流体を封入し、内部コアと連動して回転するディスクと、磁場を発生させるコイルで構成される。電流を印加し磁場が発生すると、図2のようにディスクの回転方向とは垂直に磁性粒子のクラスタが形成される。ディスクの回転によりクラスタが切断され、このとき生じるせん断応力が制動トルクとして出力される。また、磁場の強度を高めることでクラスタ構造の結合力が強くなるため、せん断応力がさらに増加する。この制動トルクは数十ミリ秒単位で制御できる¹²⁾。

3. MR流体ブレーキの装着型力覚提示装置への応用

3.1 ハプティクス

ハプティクスへの応用は主にVR (Virtual Reality) 空間と連動し、VR空間内のバーチャル物体と接触した感覚を提示する。これにより現実感や没入感を高めることを目的にしている。

3.1.1 上肢

上肢装着型力覚提示装置は主に、手で仮想物体に触れたり、物体を押したり挟んだりするようなインタラクションにおける反力提示に使用される。図3に示す双腕装着型力覚提示装置¹³⁾はMR流体ブレーキと人工筋肉を組み合わせ、各腕4自由度の力覚提

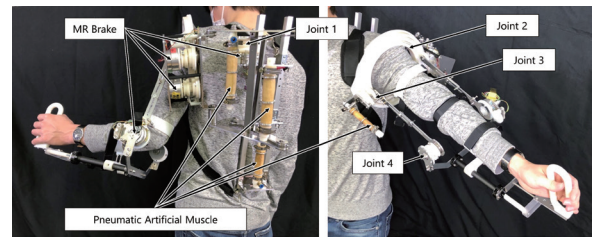
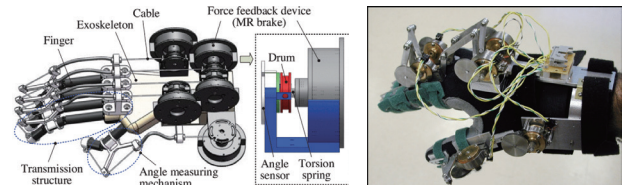
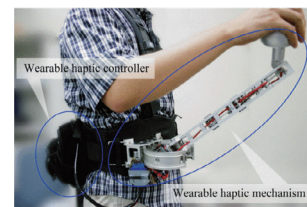
図4 可動域を広げた上肢装着型力覚提示装置¹⁵⁾(a) Passive force feedback data glove¹⁶⁾(b) MR glove¹⁷⁾

図5 指外骨格

図6 VR文化遺産体験装置¹⁸⁾

示が可能である。本装置は装着型装置にすることにより、固定された空間だけでなく移動を含めて動作に対応でき、弾性、粘性、粘弾性力をフィードフォワード制御によるシンプルな制御で装着者に提示することが可能である¹⁴⁾。VR空間で空気圧ボールを押し込むような動作を再現することができる。図4に示したMRブレーキと肩部に差動歯車機構を組み込んだ装着型力覚提示装置¹⁵⁾も開発されている。軽量かつ可動域を拡張した装置であり、VR空間を動き回りながら粘性物体とインタラクションしたときの現実感の向上とVR酔いの低減効果を検証した。

また、グローブ型で手と指に装着して運用する指外骨格として図5のようなPassive force feedback data glove (FFDG)¹⁶⁾やMR glove¹⁷⁾が開発されている。FFDGはロボットの遠隔操作時の相互作用力の提示を目的とした装置であり、PID制御によるワイヤ駆動により力をフィードバックする。MR gloveは重量84gの小型MRブレーキを親指、人差し指、中指にそれぞれ2つずつ搭載し、リンク機構で各部品を接続している。全体の重量は640gと軽量であり、仮想物体をつかんだとき硬さ感覚を提示できる。

他にも図6に示す文化遺産を仮想的に体験する装置¹⁸⁾は3自由度で最大10Nまでの力覚提示に対応している。腰に装着し、ドア開閉時の摩擦、硬さの提

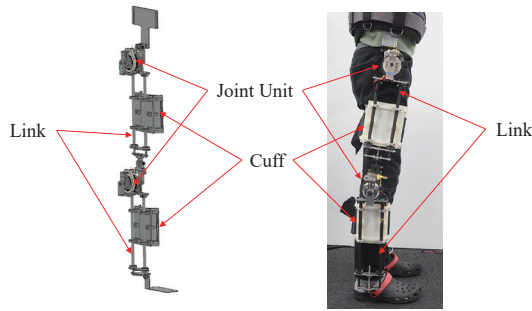
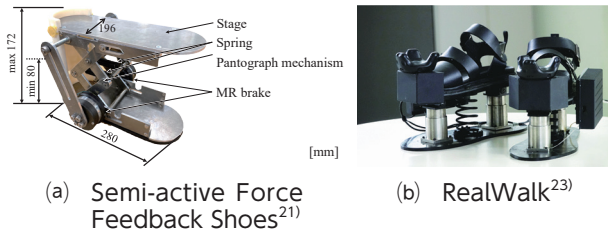
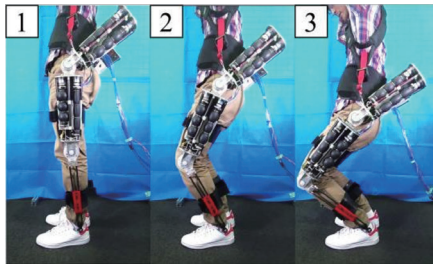
図7 下肢装着型外骨格²⁰⁾

図8 靴型力覚提示装置

図9 Airsist I⁸⁾

示やざらざらしたテクスチャ表現が可能である。

3.1.2 下肢

下肢に対する力覚提示は、地面環境に伴った上下方向の相互作用力の提示や重力に起因した感覚が重要となる。また足底に提示する靴型装置の場合、ユーザの自重を支持する必要がある。このような感覚を装置によって実現することにより、落下や溺水の危険が伴う作業を扱うVR職業訓練のようなコンテンツで、より高い現実感や臨場感が得られる。その結果、VR空間における危険予測訓練の効果を高めることが期待できる。

回転型のMRブレーキを用いた下肢装置としては図7に示す装着型下肢外骨格^{19) 20)}や図8(a)に示すセミアクティブシューズ²¹⁾がある。本外骨格は膝と股関節部にMRブレーキと減速機で構成した駆動軸を配置している。撃力と水中動作感覚の提示が可能である。撃力はボールキック時の撃力の力積に着目し、比較的小さいトルクを実際より長い時間提示することで提示する。また、水中の抗力などの作用力を再現することで、水中での動作感覚提示が可能である。

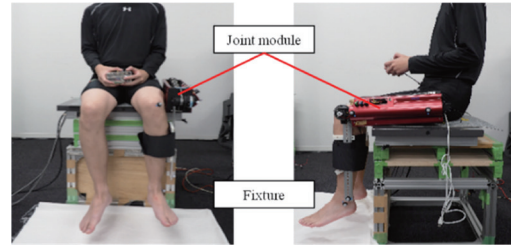
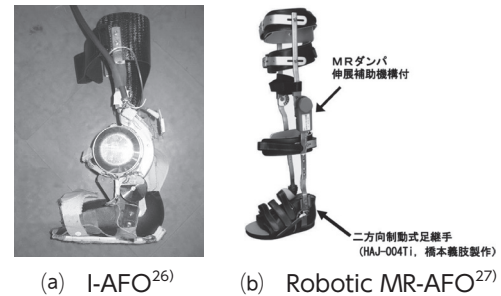
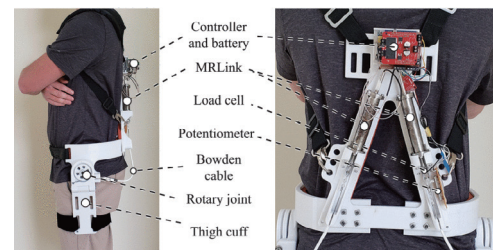
図10 Variable viscoelastic joint module²⁵⁾

図11 MR流体ブレーキを用いた装着型歩行訓練装置

図12 MRLift²⁸⁾

セミアクティブシューズは落下感覚を提示することを目的とした80mmの可動距離を持つ靴である。初期姿勢で足底の高さを維持し、VR映像に合わせてMRブレーキを開放することで装着者に下向きの加速度を与える。このような外骨格と靴型装置を合体した下肢スーツによって、ひとつのVRコンテンツ内で複数の感覚を提示する試みも行われている²²⁾。

直動型MRブレーキを用いた装置としては図8(b)に示すVR用ハプティックシューズRealWalk²³⁾がある。本装置はふたつのMRブレーキと圧力センサで構成されており、地面環境の草、砂、泥、雪といったテクスチャ情報に応じた周波数でブレーキを駆動させることにより、歩行時の地面感覚を提示できる。

3.2 アシスト

装着型アシスト装置は主に膝関節など下肢のアシストに使われることが多い。主に下肢関節部にMRブレーキを配置し、歩行や着座動作をアシストする。

図9に示す下肢アシスト装具AirsistはMRブレーキときつ抗配置した人工筋肉を組み合わせ、可変的な粘弾性力により歩行動作や着座動作をアシストする。重量は片足1.9kg、全体で7.9kgと軽量である。

人間の関節と同様に弾性や粘性を変化させながら、人体親和性の高いアシストを行うことができる^{8),24)}。また、本装置は低慣性かつバックドライバビリティが高いため、装着者は違和感なく下肢動作が可能である。粘弾性駆動関節モジュール²⁵⁾も開発されており、図10のように下肢に装着してアシストする。

短下肢装具として、図11に示すインテリジェント短下肢装具i-AFO²⁶⁾や装着型歩行訓練用ロボットRobotic MR-KAFO²⁷⁾がある。どちらの装具も歩行アシストを目的としており、MRブレーキと遊脚期のトルク補助用のバネを組み合わせている。i-AFOはMRブレーキを装具の足継手に組み込み、足関節し緩性麻痺患者に対する臨床評価により歩行機能改善効果を確認している。MR-KAFO試作機の重量は1.7kgであり、MRブレーキを膝継手に組み込んでい。立脚期において8段階に可変の制動力をかけることで、膝折れを予防することができる。

図12に示すセミアクティブ腰部サポート外骨格MRLift²⁸⁾はMRLinkというMR流体と圧縮バネで構成した直動型リンク機構を搭載している。かがみ動作により得られる位置エネルギーを弾性エネルギーとして蓄積し、MRクラッチで保持する。このときの保持力をMR流体に印加する電流により制御し、必要ときにエネルギーを開放することで動作支援する。

4. おわりに

本稿ではMR流体ブレーキの装着型力覚提示装置への応用例を紹介した。MRブレーキを組み込んだ装置は、安全性が高く、軽量という利点があり、ハプティクス、アシストやリハビリ分野で応用されている。MRブレーキと人工筋肉を組み合わせたハイブリッドな装置も台頭し、MRブレーキの応用先の拡大が期待される。

参考文献

- 1) 3D Systems Touch Haptic Device, <https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/touch/> [Accessed February 17, 2022]
- 2) Force Dimension - products - omega.3 - overview, <http://www.forcedimension.com/products/omega-3/overview/> [Accessed February 17, 2022]
- 3) X. Cui, et al., "Design of a 7-DOF Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX-7) and a Controller for Dexterous Motion Training or Assistance," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 22, No. 1, pp. 161-172, doi:10.1109/TMECH.2016.2618888 (2017)
- 4) S. Saga and N. Ikeda, "Dynamic Brake Control for a Wearable Impulsive Force Display by a String and a Brake System," J. Robot. Mechatron., Vol. 33, No. 5, pp. 1075-1081 (2021)
- 5) S. Balasubramanian, et al., "RUPERT: An Exoskeleton Robot for Assisting Rehabilitation of Arm Functions," Proc. of Virtual Rehabilitation 2008, pp. 163-167, doi:10.1109/ICVR.2008.4625154 (2008)
- 6) H. Li, et al., "Achieving haptic perception in forceps' manipulator using pneumatic artificial muscle," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 1, pp. 74-85, doi:10.1109/TMECH.2011.2163415 (2013)
- 7) D. Sasaki, et al., "Development of Wearable Master-Slave Device for Upper Limb Constructed with Pneumatic Rubber Muscles", J. of the Robotics Society of Japan, Vol. 28, No. 2, pp. 208-214 (2020)
- 8) M. Okui, et al., "Variable Viscoelastic Joint System and Its Application to Exoskeleton," 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, BC, pp. 3897-3902 (2017)
- 9) 古荘純次ら, "ロボット・VRおよび理学療法の技術を取り入れた上肢リハビリ支援システムによる訓練とその脳活動を含む評価", バイオメカニズム学会誌, Vol. 33, No. 2, pp. 109-116 (2009)
- 10) Jong-Seok Oh, et al., "A 4-DOF haptic master using ER fluid for minimally invasive surgery system application," Smart Mater. Struct., Vol. 22, No. 4, 045004, doi:10.1088/0964-1726/22/4/045004 (2013)
- 11) 中野政身編著, "機能性流体入門—基礎と応用—", 日本工業出版, p. 70 (2021)
- 12) B.J. Park, et al., "Core-Shell Typed Polymer Coated-Carbonyl Iron Suspension and Their Magnetorheology," J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 149, No. 1, pp. 1-5, doi:10.1088/1742-6596/149/1/012078 (2009)
- 13) R. Sawahashi, et al., "Development of a Bimanual Wearable Force Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Fluid Brakes and Sensibility Evaluation by Pushing Motion," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 35, No. 1, pp. 180-193, doi:10.20965/jrm.2023.p0180 (2023)
- 14) R. Sawahashi, et al., "Development of a Wearable Four-Degrees-of-Freedom Force Feedback Device with a Clutch Mechanism Using Artificial Muscle Contraction," 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 47-54, doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453574 (2021)
- 15) J. Komatsu, et al., "Development of Shoulder Mechanism for a Wearable Upper Limb Force-Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Brakes", 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, doi:10.1109/SII55687.2023.10039212 (2023)
- 16) D. Wang, et al., "Development and Control of an MR Brake-Based Passive Force Feedback Data Glove," in IEEE Access, Vol. 7, pp. 172477-172488, doi:10.1109/ACCESS.2019.2956954 (2019)
- 17) J. Blake, et al., "Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, No. 5, pp. 606-615, doi:10.1109/TMECH.2008.2010934 (2009)
- 18) D. Ryu, et al., "Development of Wearable Haptic System for Tangible Studio to Experience a Virtual Heritage Alive," 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, pp. 466-471, doi:10.1109/IROS.2006.282266 (2006)
- 19) T. Masuda, et al., "Prototype of an exoskeletal lower

- limb force-feedback device for moving extensively in VR space”, Proc. of the 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2022), SS30_1, (2022)
- 20) R. Sawahashi, et al., “Presentation of Underwater Sensation by Drag in Knee Motion with a Lower Limb Exoskeleton Using MR Fluid Brakes”, Proc. of the 32nd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2023), Helsinki-Espoo, Finland, ISIE23-000226 (2023)
- 21) R. Sawahashi, et al., “Development of Semi-active Force Feedback Shoes with MR Brake Rendering a Falling Sensation and Descent Acceleration Measurement”, Proc. of the 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2022), SS30_1 (2022)
- 22) 澤橋龍之介ら, “Vivid Ground Generator—VR空間を足から堪能するハプティクス—”, 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会, 1A3-08, (2022)
- 23) H. Son, et al., “RealWalk: Haptic Shoes Using Actuated MR Fluid for Walking in VR,” 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 241-246, doi:10.1109/WHC.2019.8816165 (2019)
- 24) R. Suzuki, et al., “Evaluation Experiment of Squat Motion With Variable Viscoelastic Assistive Suit “Airsist I”,” IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, Issue 22, pp. 73-77, ISSN 2405-8963, doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.050 (2019)
- 25) T. Fujita, et al., “Development of Variable Viscoelastic Joint Module Performance Evaluation and Proposal of Application Examples,” Actuators, Vol. 11, No. 3, p. 89, doi:10.3390/act11030089 (2022)
- 26) 谷田惣亮ら, “コンパクトMR流体ブレーキを用いたインテリジェント短下肢装具3次試作機の開発と足関節弛緩性麻痺患者への適用”, 生体医工学, Vol. 48, No. 1, pp. 50-58 (2010)
- 27) 椿原障夫ら, “MR流体ブレーキを膝継手に搭載した装着型歩行訓練用ロボットの開発”, 日本義肢装具学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 283-288 (2020)
- 28) M. Hassan, et al., “MRLift: a Semi-active Lower Back Support Exoskeleton based on MR Fluid and Force Retention Technology,” 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, pp. 7349-7354, doi:10.1109/IROS40897.2019.8967819 (2019)

(原稿受付：2023年10月4日)

解説

MR流体を活用した吸盤

著者紹介



つか 越 秀 行

東京工業大学工学院
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S5-19
E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp

1998年東京工業大学大学院工学研究科博士課程修了。同大学助手を経て、2004年同大学工学部助教授、准教授を経て、2021年同大学工学院教授、現在に至る。流体ソフトアクチュエータ、バイオミメティクス、レスキューロボット、医療用アクチュエータの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員、博士（工学）。



なか の まさ み
中 野 政 身

株式会社SmartTECH Lab.
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
東北大学産学連携先端材料研究開発センター内
E-mail: mnakano@smarttech-lab.com

1982年早稲田大学大学院博士後期課程修了。1981年早稲田大学助手、1982年山形大学助手、助教授を経て、1997年同教授、2008年東北大学教授流体科学研究所、2018年同教授未来科学技術共同研究センター、2023年(株)SmartTECH Lab. 代表取締役社長兼CEO、現在に至る。機能性流体、流体関連振動・騒音、振動制御などに関わるスマート流体制御システム工学に従事。JFPS、JSME、JSAE、EJなどの会員。

1. はじめに

橋梁やトンネルなどのインフラ点検作業を安全に遂行するために、作業員に代わって構造物に吸着しながら移動できる壁面移動ロボットが望まれている。その実現には、コンクリート、タイル、金網など、屋外構造物に特有の外壁素材に対して、吸着力を安定に生成する吸着手法が求められる。

これまでさまざまな吸着手法が検討されてきた。ファンデルワールス力、静電気力、磁力、負圧、粘着力、などの利用^{1)~7)}である。表面が滑らかな板やガラスなどの素材に対して、これらは比較的高い吸着力を示した。しかし、亀裂や凹凸のある面では、気密性の低下や接触面積の減少による吸着機能の劣化が課題となっていた。

この解決の一策として、筆者らは吸盤と吸着面の間にMR流体を注入し、密閉性と接触面積を確保

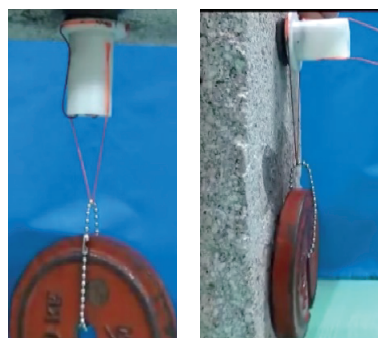


図1 コンクリート面に吸着中のMR流体吸盤

しつつ、流体を固化させて吸着力を生成する手法に着目してきた。一方、これまでも、MR流体の吸着作用に関する報告例は存在したが⁸⁾、主にMR流体の限定的な現象のみに着目し、境界面に生じる複雑な現象について未解明のままであった。筆者らの実験の結果、従来研究だけでは説明しきれない興味深い現象がいくつか確認された^{9)~11)}。

本解説では、MR流体の吸着現象を解明するために行った基礎的な調査結果の一部を紹介する。そして、新たに試作したMR流体吸盤（図1）を用いて、コンクリート面、金網、穴の開いた板など、従来の吸盤では吸着しづらかった素材への吸着実験を行った結果を紹介し、当該吸盤の可能性と課題を述べる。

2. 吸着現象

2.1 MR流体

MR (Magneto-Rheological) 流体は、分散媒のオイルに強磁性体粒子を分散させた懸濁液である。この流体に磁場を加えると粒子が架橋構造（クラスター）を形成し、粘性が見かけ上増加する機能性を示す。厳密には、磁場印加下では降伏応力が発生し磁

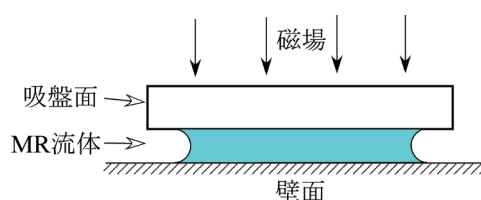


図2 MR流体による吸着状態

場とともに増大し固相として振る舞う。そして、磁場がない状態に戻すと、再び液相として振る舞う¹²⁾。このようなMR流体の機能性を利用すると、磁場のオン・オフ操作により、ふたつの平板間の吸着と離脱の切換が可能となる(図2)。

2.2 先行研究における吸着現象の解釈

先行研究では、MR流体による吸着は、2枚の板間に存在する粘性流体の液柱を引っ張り分離させる際の応力により生じる、と解釈されていた⁸⁾。すなわち、流体の体積が一定に保存されたまま板間の隙間を増加するには、流体は液柱の内側へ流れ込む必要が生じるという考えである。この内側への流れには、流体の内圧が周囲より低くなるような圧力勾配が必要となり、その大きさが降伏せん断応力に依存する。この結果生じる負圧が、板を互いに引き寄せるため、吸着力が生じる、という理解である。一方、磁場が増すほどMR流体の降伏せん断応力が大きくなるため、その吸着力も単調増加すると考えられていた。

2.3 吸着力を最大にする磁場の存在

MR流体の吸着力は、磁場の強さの増加に伴い本当に単調増加するのか、著者らはこれを明らかにするための実験を行った。

図3に示すように、吸盤としてABS製の底面のある円筒ケースを用い、その底面にMR流体を塗布し、ケース内部には円柱状のスペーサとネオジウム磁石を挿入する構成とした。実験では、まずケースの底面にMR流体を塗布し、それをアクリル製の平面に

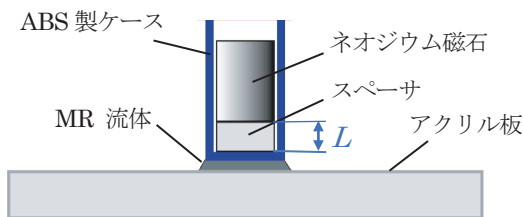


図3 スペーサの厚みの変化で磁場の強さを変える簡易装置

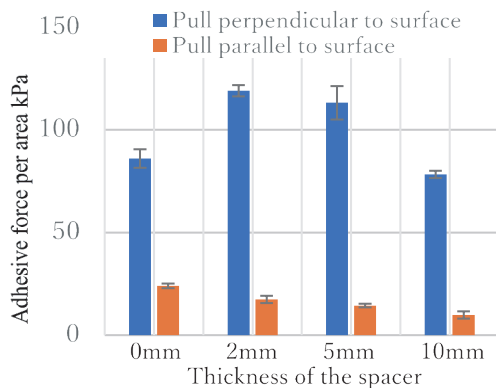


図4 磁場の強さとMR流体の吸着力との関係⁹⁾

押し付けた。そして、ケース内にスペーサとネオジウム磁石を入れて垂直方向とせん断方向にそれぞれけん引し、平面から離れたときの力を測定した。MR流体に与える磁場の強さは、スペーサの厚さ L を変えて調節した。測定結果(図4)に示す通り、せん断方向の吸着力はスペーサを薄くして印加磁場を強くするほど増加したものの、垂直方向の吸着力はスペーサの厚みの変化に対して単調変化とはなかった。すなわち、 $L=0\text{mm}$ の場合のように磁場が過度に強いと、垂直方向の吸着力が低下する現象が確認された。なお、スペーサの厚み $L=0\text{mm}$, 2mm , 5mm , 10mm でのMR流体が塗布されていない状態でのABSケース底面の磁束密度は各々 500mT , 350mT , 200mT , 90mT を示した。

2.4 負圧の生成

上記の原因を探るために、アクリル板に穴をあけて圧力センサを挿入し、MR流体とアクリル板との境界面の圧力変化を $L=2\text{mm}$ のスペーサを設けた状

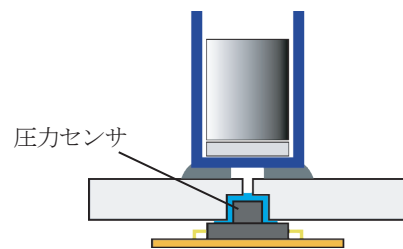


図5 境界面に圧力センサを挿入した装置

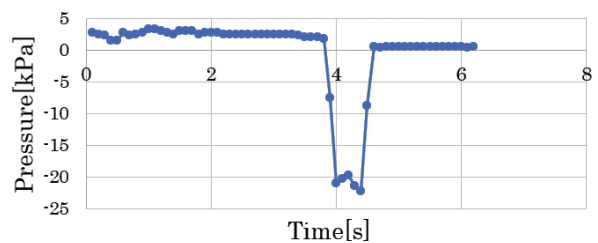
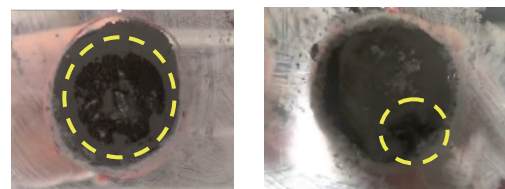


図6 圧力センサで計測された境界面の圧力変化



$L=2\text{mm}$ では中央部に負圧の非接触空間が形成された。
 $L=0\text{mm}$ では真空破壊が生じ、
 $L=10\text{mm}$ では非接触空間が形成されなかった。
 $L=10\text{mm} \rightarrow$

図7 吸着面の裏側から撮影したMR流体の状態

態で計測した（図5）。垂直方向への引張動作と同期して、境界面に -20kPa 程度の負圧が生じた（図6）。この結果より、 $L=2\text{mm}$ の吸着では、負圧の作用も関与していたと考えられる。

また、境界面の現象を視覚的に確認するため、離脱直前のMR流体の状態の変化をアクリル板の裏面からビデオで記録した（図7）。 $L=2\text{mm}$ では、面に非接触の閉じた空間が中央部に生じている。この空間で負圧を生じたと思われる。一方、 $L=0\text{mm}$ では非接触部は端に偏り閉じられていなかった。境界面の濡れ性が劣化し、剥離して真空破壊が生じた。また、 $L=10\text{mm}$ では引張動作の過程で、MR流体がアクリル面に残されたまま吸盤が脱離した。これは、降伏せん断応力の不足が原因と思われる。

以上より、MR流体の吸着には、流体の圧力勾配に関わる吸着作用に加えて、中央部に形成される非接触の閉じた空間による大きな負圧も作用すること、また、磁場が強過ぎると濡れ性の劣化で真空破壊が生じやすくなるため、垂直方向の吸着力を最大にする最適な磁場の強さの存在が明らかとなった。一方、せん断方向に関しては、摩擦が関与するため、これとは異なる傾向が生じたと予想される。

3. MR流体吸盤

3.1 構造

着脱機能とMR流体の吐出機能の双方を有する吸盤を試作した。垂直方向の吸着力を最大化するため、

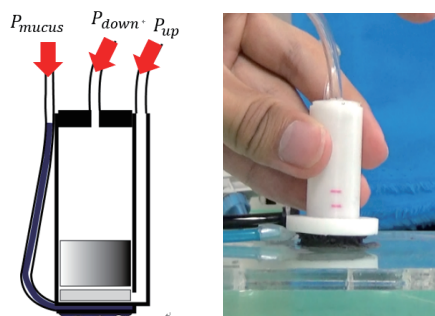


図8 MR流体吸盤の構造（左）とアクリル板を持ち上げている試作機の外観（右）

表1 MR流体吸盤の試作機のスペック

全体の質量	19g
ケースの大きさ	$\phi 17 \times 50\text{mm}$
ネオジウム磁石の大きさ	$\phi 15 \times 10\text{mm}$
P_{up} , P_{down} の印可圧力	150kPa
P_{mucus} の印可圧力	100kPa
粘着に要する吐出量	500mg

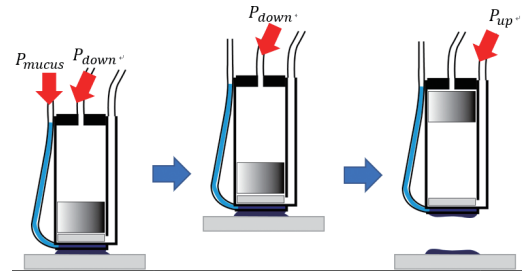


図9 吐出・吸着→持ち上げ→離脱のプロセス

前記予備実験の結果をもとに、 $L=2\text{mm}$ のスペーサを吸盤内の底面に固定し、その上に着脱機能としてネオジウム磁石が空気圧で上下する構成を導入した。また、吐出機能として、MR流体を外側底面に吐出するチューブを設け、空気圧で出し入れの操作を行う構成とした。その外観とスペックを図8と表1に示す。また、MR流体としてLORD社MRF-140CGを用いた。

図9に、3系統の空気圧の加減圧により、MR流体の吐出、吸着、持ち上げ、離脱の各動作を行う操作を示す。

3.2 多様な素材への吸着

アクリル板、コンクリートブロック、隙間幅 1mm のスリット付きアクリル板、20メッシュ（ 1.71mm ピッチ）のアルミ製金網、直径 5mm の穴が一定間隔毎に開けられたアルミ製パンチングメタル、以上5種類の各素材に対して、図8のMR流体吸盤を用いて吸着力を測定した。測定は、デジタルフォースゲージを介して吸盤を引っ張った際、面から離れた瞬間のピーク値を底面の面積で除した値を記録した。

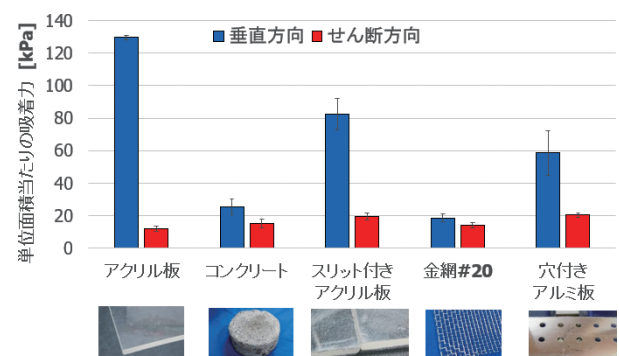


図10 5種類の異なる素材に対するMR流体吸盤の吸着力



図11 スリット付きアクリルの隙間にMR流体が流入後に固化して吸着している様子

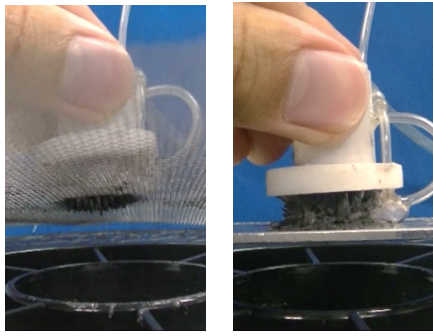


図12 金網への吸着（左）とパンチングメタルへの吸着（右）

垂直とせん断の各方向に5回ずつ測定し、その平均値を記録した結果を図10に示す。

まず、アクリル板において、垂直方向の単位面積当たりの吸着力が130kPaを示し、完全真空中で吸引した場合より30%ほど大きい吸着力を示した点は注目に値する。次に、真空吸盤では吸着できなかったコンクリートブロックに対し、30kPa程度の実用的な吸着力を示した点である。気密性を保ちづらい素材への吸着として、MR流体吸盤の適用が期待される。さらに、スリット付きアクリル板において、せん断方向の吸着力がスリット無しの場合より大きい値を示した点も特筆すべき点である。これは、図11に示すように、スリットにMR流体が流れ込んだ後に固化し、アンカーロックの作用が生じたためと考えられる。一方、金網やパンチングメタルにおいては、穴の裏側まで流体が回り込んで対象面に固化している現象が確認された（図12）。

4. おわりに

本解説では、MR流体の吸着現象を解明するための基礎的な実験結果を紹介した。吸着力が最大化する最適な磁場の強さの存在が明らかとなったこと、その一因として、境界面に大きな負圧が生成されていたこと、その形成の有無はMR流体と接触面との濡れ性に依存すること、などが新たな成果として挙げられる。また、従来の真空吸盤では気密性や接触面積を確保しづらいコンクリート、スリットや穴のある面、金網に対しても、MR流体吸盤は実用的な吸着力を生成することも紹介した。MR流体吸盤をさらに実用化に近づけるためには、接触対象面にMR流体を残さずに回収することも求められる。この解決方法は、また別の機会に紹介させていただきたい。

謝辞

本研究に多大な協力をしていただいた濱研吾君に感謝する。

参考文献

- 1) Kim, S., Spenko, M., Trujillo, S., Heyneman, B., Santos, D., Cutkosky, M.R. : Smooth Vertical Surface Climbing with Directional Adhesion, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No. 1, p. 65-74 (2008)
- 2) Prahlad, H., Pelrine, R., Stanford, S., Marlow, J., Kornbluh, R. : Electroadhesive Robots—Wall Climbing Robots Enabled by a Novel, Robust, and Electrically Controllable Adhesion Technology”, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2008, p. 3028-3033 (2008)
- 3) Shen, W., Gu, J., Shen, Y. : Permanent Magnetic System Design for the Wall-climbing Robot, Applied Bionics and Biomechanics, Vol. 3, No. 3, p. 151-159 (2006)
- 4) Nagakubo, A., Hirose, S. : Wall Gait : A Standard Gait for the Quadruped Wall-climbing Robot, Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics, p. 547-552 (1993)
- 5) Daltorio, K.A., Horschler, A.D., Gorb, S.N., Ritzmann, R.E., Quinn, R.D. : A Small Wall-walking Robot with Compliant, Adhesive Feet, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 3648-3653 (2005)
- 6) Tsukagoshi, H., Fuchigami, K., Watari, E., Kitagawa, A. : Deformable Anchor Ball for Thrown Referring to Octopus Suckers, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 26, No. 4, p. 477-485 (2014)
- 7) Tsukagoshi, H., Osada, Y. : Soft Hybrid Suction Cup Capable of Sticking to Various Objects and Environments, Actuators, Vol. 10, No. 3, 50, p. 1-13 (2021)
- 8) Ewoldt, R.H., Tourkine, P., McKinley, G.H., Hosoi, A.E. : Controllable Adhesion using Field-activated Fluids, Physics of Fluids, Vol. 23, Paper No. 073104 (2011)
- 9) Tsukagoshi, H., Hama, K., Nakano, M. : Study on Suction Cups Utilizing Magneto-Rheological Fluids, Proceedings of 19th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2022), p. 368-371 (2022)
- 10) 濱研吾, 塚越秀行, 中野政身 : 混合型MR流体による粘着力の生成とその制御, 2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, p. 93-95 (2019)
- 11) 濱研吾, 中島達哉, 塚越秀行, 中野政身 : 混合型MR流体の吸着現象を利用した吸盤の提案—第3報：吸着原理の検討—, ROBOMECH2020 (ロボティクス・メカトロニクス講演会), p. 1P2-H05 (2020)
- 12) 中野政身, 吉田和弘, 柳田秀記, 横田真一, 竹村研治郎, 三井和幸, 西田均, 柿沼康弘, 奥崎秀典, 藤原由紀乃 : 機能性流体入門 一基礎と応用一, 日本工業出版, p. 68 (2021)

(原稿受付：2023年10月10日)

MCFを用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の特性

著者紹介



にしだ ひとし
西田 均

富山高等専門学校
〒939-8630 富山県富山市本郷町13
E-mail: nishida@nc-toyama.ac.jp

1979年富山大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。2004年富山工業高等専門学校教授、2018年富山高等専門学校名誉教授、2020年富山高等専門学校特命フェロー、現在に至る。機能性流体、流体研磨の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、磁性流体研究連絡会、日本機械学会、などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

現在、高硬度材料や難削材料の研磨加工では加工能率の向上と研磨後の形状精度の維持が課題になっている。この課題に対して筆者らは磁気混合流体（MCF）を用いた平面や円筒内面に対する研磨法を開発して、その研磨原理と加工特性を明らかにした^{1),2)}。MCFを用いた研磨（MCF研磨）は磁場印加により磁力線方向に形成される細長く弾力性のある磁気クラスタが砥粒に作用することで行われる。そのため、平面内の小径凹面に対して、形状精度を維持した精密仕上げが可能である³⁾。しかし、MCF研磨は高硬度材料に対して加工能率が低いという問題があった。このような状況で、砥粒を含んだMCF（MCF加工液）が電気粘性流体（ER流体）であることがわかった。

そこで、著者らは平面と円筒内面に対して、磁場に加え電場を印加した研磨加工法を開発し、その加工量特性と表面性状を調べた⁴⁾。その結果、電場印加によって、加工能率の向上と加工能率の時間的減少を抑制することがわかった。また、平面内の微細V溝に対する研磨では、電場印加によりV溝の表面形状を維持した全面研磨が可能になることがわかった⁵⁾。本稿では磁場と電場の同時印加による平面と微細V溝に対する研磨特性を紹介するとともに、加工除去量に及ぼす電場の影響について説明する。

2. 平面に対する研磨特性

2.1 研磨のしくみ

平面研磨の模式図を図1に示す。工具は円柱状の永久磁石である。MCF研磨での磁気クラスタは磁力線方向に形成されるので、加工表面に対してほぼ垂直に作用する。この磁気クラスタを著者らは垂直磁気クラスタと呼んでいる。研磨は砥粒に磁気クラスタの加工力が作用することで砥粒と加工表面の相対運動によって行われる。

2.2 永久磁石工具を用いた研磨実験装置

図2に研磨実験装置の構造を示す。実験装置は上部の研磨工具部と下部のワーク固定部で構成されている。研磨工具は樹脂製の本体とステンレス鋼製のカラー、円柱形永久磁石（ネオジウム磁石）で構成されている。被研磨物（ワーク）はステンレス鋼製の

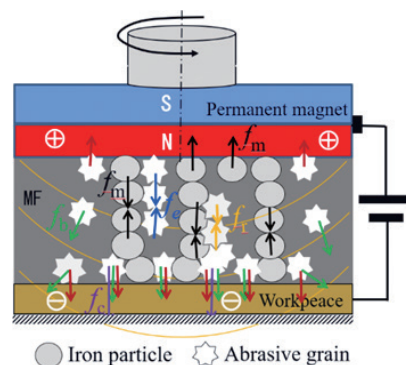


図1 平面研磨の模式図

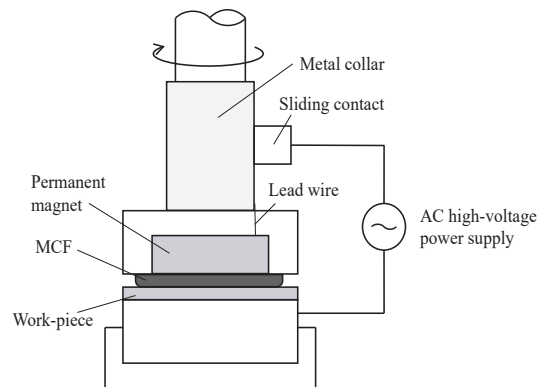


図2 永久磁石工具を用いた研磨実験装置⁴⁾

円板（直径30mm，厚さ2mm，SUS304-2B）を用いた。研磨実験では工具先端とワークの隙間間隔 $\delta=1.0\text{mm}$ とし，工具回転数 $n=500\text{rpm}$ で行った。

2.3 研磨除去量の特性

図3に印加電場ごとの加工量 M と加工時間 t の関係を示す。磁場のみ（無電場）と $E=250\text{V/mm}$ では， $t=20\text{min}$ ほどで飽和することがわかる。しかし， $E=500\text{V/mm}$ の場合， $t=30\text{min}$ 以上でも研磨除去量が増加している。無電場と 250V/mm では $t=20\text{min}$ を越えると砥粒が研磨面に作用していないと考えられる。一方， $E=500\text{V/mm}$ では電場の効果により，砥粒が研磨領域に存在し，加工面に作用していると考えられる。

2.4 電流特性

図4に $E=500\text{V/mm}$ の場合の電流 I の時間的変化を示す。電場印加後，電流はいったん減少するものの，その後は増加を続けることがわかる。すなわち，MCFの電気抵抗が小さくなっていくことがわかる。平面研磨の直流磁場ではワークに作用する軸力が時間とともに増加して定常状態になる¹⁾。これは磁場印加後，回転流れにより磁気クラスタの破断と凝集が繰り返され，時間の経過とともに太い磁気クラスタを形成するためである。電流の多くは磁気クラスタを通して流れると考えられるので，電流の増加は

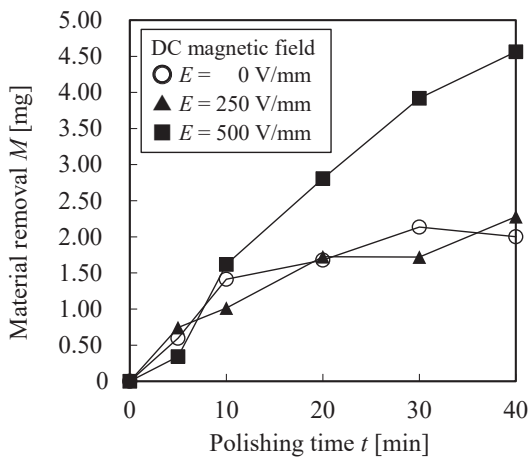


図3 加工量除去量と加工時間の関係⁴⁾

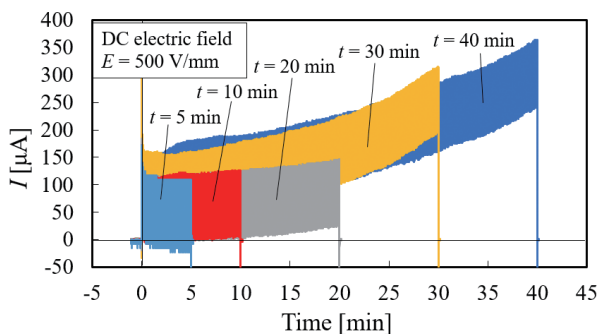


図4 電流の時間的変化⁴⁾

時間的に磁気クラスタの断面積が増加するためと考えられる。すなわち，電流の時間的変化は磁気クラスタの構造の時間的変化によるものと考えられる。

3. 平面内微細V溝に対する研磨特性

3.1 円錐台工具による研磨のしくみ

図5は微細V溝を有するワークとその上方に設置された先端が円錐台形状の電磁石の鉄心（工具），および，その間にあるMCF加工液の模式図である。磁性流体中にある砥粒は非磁性体であるため，磁気浮力⁶⁾によって磁場強度の小さい所に集まる。このため，砥粒は主にワーク表面に集まり，磁気クラスタによって保持される。この状態で工具とワークの間のMCF加工液に電場を印加すると，この加工液が粒子分散系の電気粘性流体であれば，誘電体である砥粒は電気力線に沿って凝集体を形成するとともに，電極面に近い砥粒は帯電して電極面に付着する。磁場印加のみの場合，ワーク表面の砥粒は回転流れによって半径方向の力を受けるため，時間の経過とともに半径方向に移動する。しかし，電場の印加によって砥粒の移動を抑制されることが考えられる。

3.2 円錐台工具を用いた研磨実験装置

図6に実験装置の外観を示す。装置は小型NCフライス盤を用いており，研磨工具部とXYテーブル

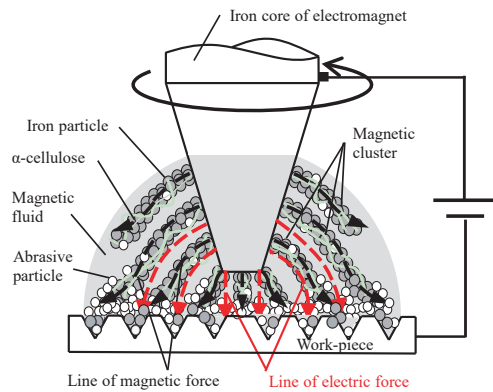


図5 円錐台工具による研磨の模式図⁵⁾

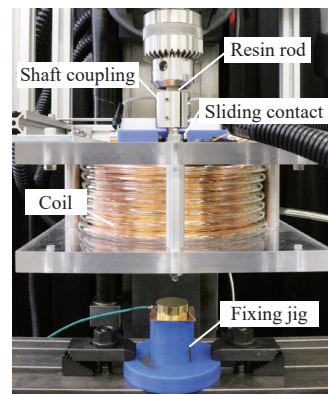


図6 電磁石鉄心の円錐台工具による研磨装置⁵⁾

上に設置されたワーク固定部で構成されている。研磨工具は電磁石の純鉄製鉄心（直径20mm）であり、フライス盤の主軸に取り付けられている。工具の先端は円錐台形状であり、先端の直径は5mmである。図7に微細V溝を有するワークの外観と形状を示す。ワークは表面に同心円状に7個のV溝を有しており、V溝の寸法は幅 $w=0.62\text{mm}$ 、深さ $h=0.40\text{mm}$ 、中心角度 60° である。このワークに対する研磨では工具をワーク中心に対して半径3mmの円周上を反時計回りに回転数1rpmで公転させた。磁場は直流磁場およびパルス磁場（周波数 $f=0.1\text{Hz}$ 、デューティ比0.5）の2種類を用いた。加工時間は直流磁場で40min、パルス磁場では80minとした。

3.3 微細V溝に対する研磨特性

微細V溝に対する直流磁場とパルス磁場の印加において、流電場を同時印加した場合のそれぞれの研磨特性を調べた。その結果、磁場印加のみではV溝の底部は研磨されないが、電場を印加することでV溝底部が研磨できることがわかった。

図8に微細V溝に対する直流磁場の無電場とパルス磁場に電場を印加の場合の研磨前後の断面曲線をそれぞれ示す。また、図9にはそれぞれの場合のV溝角部とV溝底部のマイクロスコープ写真を示す。図8(a)と図9(a)から、直流磁場のみの場合では、研磨後V溝上部角部は丸みを帯び、平面部も傾斜しており、表面形状が変化する。V溝の右側斜面ではうねりが見られる。また、V溝底部では研磨前の筋状の切削溝（表面写真における色の濃い縦溝）がそのままの状態であり、研磨されていないことがわかる。直流磁場の磁気クラスタは太いために体積が大きく磁気力が大きい。そのために、V溝角部の形状を崩すとともに斜面にうねりを生じたと考えられる。図8(b)と図9(b)から、電場を印加した場合、角部のバリが除去されるとともに平面部の傾斜は小さい。また、V溝斜面ではうねりは見られない。V溝底部では研磨前の幅の広い切削溝が見られず、研磨されたことがわかる。電場印加によりV溝底部に付着した砥粒に磁気クラスタが作用したと考えられる。パル

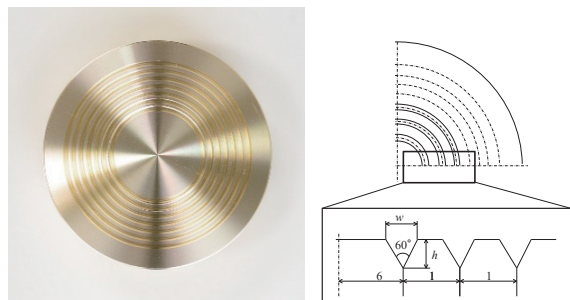
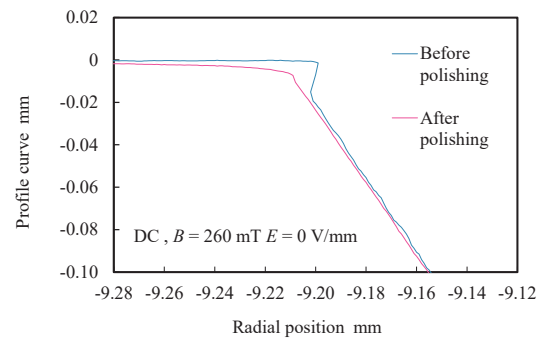
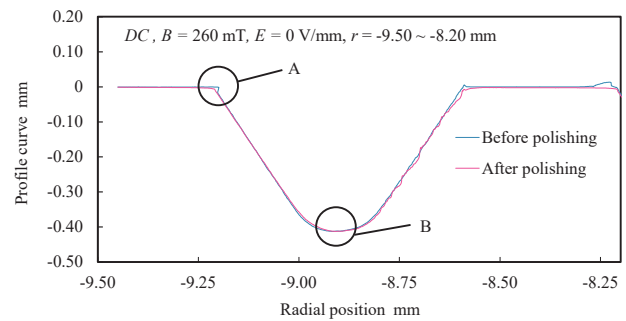
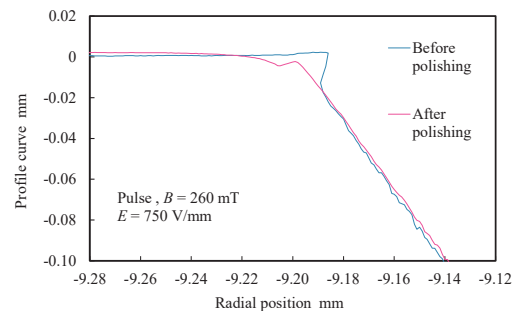
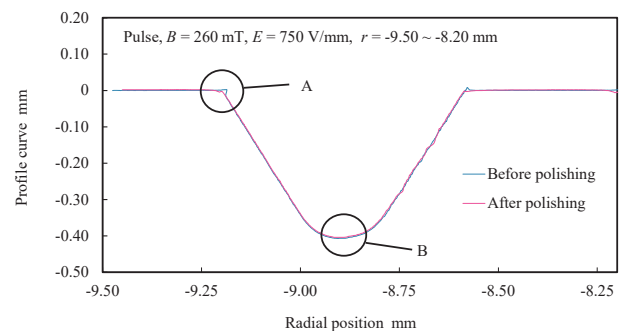


図7 微細V溝を有する被研磨物⁵⁾



(a) 直流磁場のみの場合



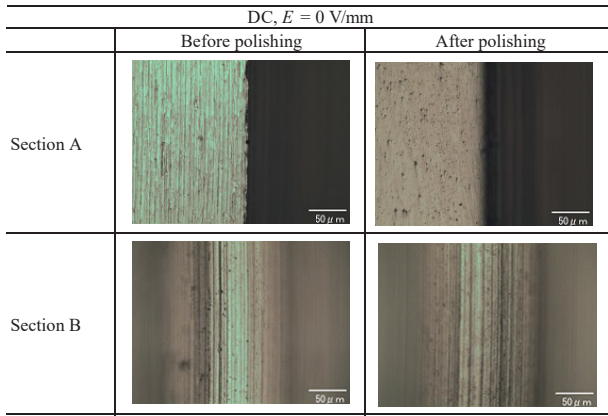
(b) パルス磁場に電場を同時に印加した場合

図8 研磨前後の断面曲線の変化⁵⁾

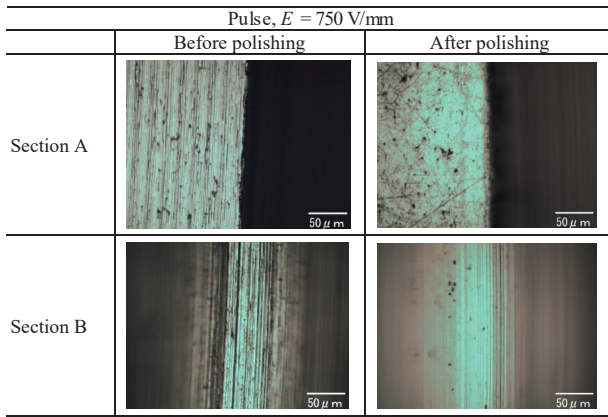
ス磁場に電場を印加することで、V溝全面に対してグローバル形状を変化させない研磨ができることが明らかになった。

4. 加工除去量に及ぼす磁場と電場の影響

磁場と電場による加工除去量特性を調べるために、電磁石の純鉄製丸棒鉄心（直径20mm、材質ELCH2S）をローターにした平行円板型レオメータ兼平面研磨装置を開発した。この装置による黄銅製円板（直径30mm、厚さ1.0mm、材質C3604）の



(a) 直流磁場のみの場合



(b) パルス磁場に電場を同時に印加した場合

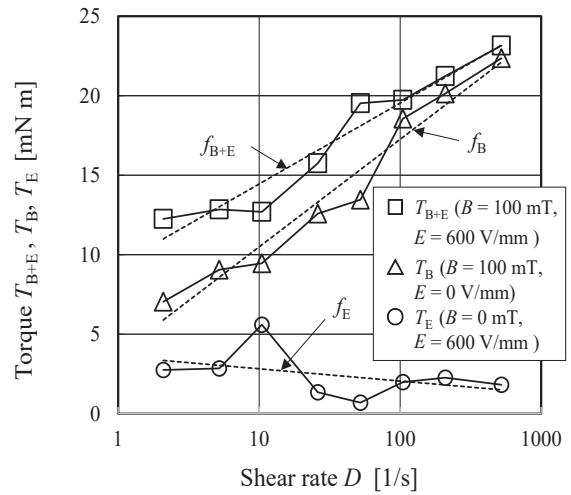
図9 微細V溝の角部と底部のマイクロスコップ写真⁵⁾

加工時間20minにおける加工能率 M/t とローター先端面に作用するトルク T の関係を図10に示す。同図から、 M/t と T はほぼ線形関係にあることがわかる。従って、加工除去量 M は次式で表される。

$$M = k_1 \rho A T u t \quad (1)$$

ここで、 k_1 は比例係数、 A は加工面積、 u は加工速度、 t は加工時間である。

また、この装置を用いた磁場下にローターに作用するトルク T_B と電場下にローターに作用するトルク T_E 、および、電磁場下のローターに作用するトルク T_{B+E} とせん断速度の関係を図11に示す。同図から、電磁場下のトルク T_{B+E} の近似関数 f_{B+E} は磁場下のトルク T_B の近似関数 f_B と電場下のトルク T_E の近似関数 f_E の重ね合わせに近いことがわかる。MCF加工液のせん断応力 τ は平行円板面に作用するトルクと線形関係にある。したがって、電磁場下のMCF加工液のせん断応力 τ は磁場下のせん断応力 τ_m と電場下のせん断応力 τ_e の重ね合わせであり、次式のように表される。

図11 せん断速度とトルクの関係⁷⁾

トルク T_E 、および、電磁場下のローターに作用するトルク T_{B+E} とせん断速度の関係を図11に示す。同図から、電磁場下のトルク T_{B+E} の近似関数 f_{B+E} は磁場下のトルク T_B の近似関数 f_B と電場下のトルク T_E の近似関数 f_E の重ね合わせに近いことがわかる。MCF加工液のせん断応力 τ は平行円板面に作用するトルクと線形関係にある。したがって、電磁場下のMCF加工液のせん断応力 τ は磁場下のせん断応力 τ_m と電場下のせん断応力 τ_e の重ね合わせであり、次式のように表される。

$$\tau = \tau_m + \tau_e \quad (2)$$

したがって、式(1)の加工除去量 M は以下のようになる。

$$M = k \rho A (\tau_m + \tau_e) u t \quad (3)$$

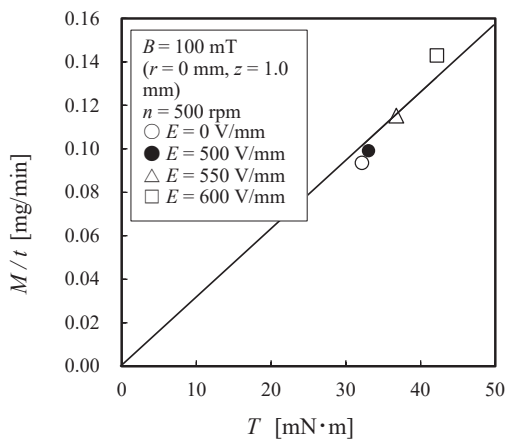
ここで、 $k = k_1 \pi R^3 / 2$ であり、 R は平行円板形レオメータの円板の半径である。

5. おわりに

本稿ではMCF加工液に磁場に加え電場を同時印加した場合の研磨特性と加工除去量について紹介した。電場の印加によって、加工能率が向上することと微細V溝に対してはグローバル形状を維持した全面研磨ができることについて説明した。

参考文献

- 1) 西田均, 島田邦雄, 井門康司: 磁場制御による磁気混合流体を用いた平面研磨の基本特性, 実験力学, Vol. 12, No. 4, p. 354-360 (2012)
- 2) 西田均, 島田邦雄, 吉野一郎: 磁気混合流体を用いた円管内面マイクロ加工の開発研究, 実験力学, Vol. 12, No. 4, p. 361-368 (2012)
- 3) 西田均, 島田邦雄, 井門康司, 百生登, 山本久嗣: 磁場制御による平面および凹面に対する精密研磨特性, 砥粒加工学会誌, Vol. 61 No. 12, p. 666-673 (2017)
- 4) 西田均, 山本久嗣, 藤岡里美, 島田邦雄, 井門康司:

図10 加工能率とトルクの関係⁷⁾

MCFを用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の電気的特性, 日本AEM学会誌, Vol. 29, No. 2, p. 219-225 (2021)

- 5) 西田均, 山本久嗣, 島田邦雄, 井門康司: 磁気混合流体を用いた微細V溝に対する精密研磨に及ぼす磁場と電場の影響, 精密工学会誌, Vol. 88, No. 5, p. 402-408 (2022)
- 6) 中野政身編著: 機能性流体入門, 日本工業出版, p. 196

(2021)

- 7) 西田均, 山本久嗣, 島田邦雄, 井門康司: 磁場と電場の同時印加によるMCF研磨の加工除去量の特性, 第35回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, p. 48-53 (2023)

(原稿受付: 2023年8月7日)

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) をご覧ください。

日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会 共催 2023年秋季フルードパワーシステム講演会 開催日: 2023年11月30日(木)・12月1日(金) 会場: 岡山理科大学 50周年記念館 (岡山県岡山市)

2023年秋季フルードパワーシステム講演会は2023年11月30日(木)・12月1日(金)に岡山理科大学50周年記念館(岡山県岡山市)で開催されます。本講演会では、一般講演に加えて、特別講演、学内施設見学ツアーや技術懇談会などを企画する予定です。講演会では新型コロナウイルス対策

を講じたうえで、通常の対面での実施を予定しております。感染状況によっては変更になる場合もあります。詳細は学会ホームページに随時掲載いたしますので、ご確認いただきますようお願いいたします。皆様の積極的なご参加をお待ちしております。

日本フルードパワーシステム学会 2023年度フェロー認定者推薦のお願い

日本フルードパワーシステム学会フェローは、フルードパワー技術の進展に貢献した正会員、本学会の諸活動に貢献した正会員に贈られる名誉ある称号です。認定された本人には本学会より認定証を交付します。

本年も当学会の「フェローに関する規程」にもとづき、日本フルードパワーシステム学会フェロー認定者の推薦をお願いいたします。

推薦の方法など詳しくは学会ホームページをご覧ください。

日本フルードパワーシステム学会 2023年度受賞候補者募集のお知らせ

当学会は、我が国の油圧・空気圧・水圧工学の振興と発展の奨励を目的として毎年優れた研究・技術を表彰しております。本年も当学会の「表彰規程」にもとづき、日本フルードパワーシステム学会2023年度受賞候補者を募集いたします。

つきましては、独創的な研究、画期的な新技術、累積効果抜群な研究者、技術者などについて、適格な受賞候補者をご推薦ください。

募集要項など詳しくは学会ホームページをご覧ください。

会議報告

ROBOMECH2023における
フルードパワー関連技術の研究動向

著者紹介



つか 越 秀 行

東京工業大学工学院
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S5-19
E-mail: htsuka@cm.ctrl.titech.ac.jp

1998年東京工業大学大学院工学研究科博士課程修了。同大学助手を経て、2004年同大学工学部助教授、准教授を経て、2021年同大学工学院教授、現在に至る。流体ソフトアクチュエータ、バイオメディクス、レスキューロボット、医療用アクチュエータの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

2023年6月28日(水)から7月1日(土)まで、名古屋国際会議場にて日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門主催のROBOMECH2023が対面式で開催された。

本講演会は、ロボティクス関連では国内最大規模の講演会のひとつであり、例年1,000件を超える最新の研究成果が発表される。学生の参加率も高く非常に活気に満ちている。また、ポスター発表の形式のため、発表者と聴講者が近距離からインタラクティブに意見を交換し合える。そのため、論文や登壇形式の発表だけでは入手しづらい情報を発表者に

直接提供してもらえる機会も多い。ここ数年はオンライン開催やハイブリッド開催だったこともあり、本来の恩恵をあずかりにくい状況が続いていた。

今年は、発表件数1,467件、参加人数2,172名と久々に活気を取り戻した状況下で開催された。ポスターの発表中にブース間を移動する際、聴講者の人波に押し戻されてしまうほどの混雑ぶりであり、さながらラッシュ時のホームのような状況だった（図1）。落ち着いて聴講できるように、運営側には通路幅を拡張する改善策を求めたい。対面式の学会発表に初めて参加した学生達からは、これほど多くの聴講者に自分達の研究を一挙に見てもらえたことに、想定以上の緊張感と充実感を味わえたとの声がかかれた。

本稿では、本講演会で発表されたフルードパワー関連の研究動向を報告する。

2. フルードパワー関連の研究動向

本講演会では、13のセッションカテゴリに大別され、その中に73のオーガナイズド・セッションが企画される形でプログラムが組まれた。講演予稿集をもとに筆者が独自に分析した結果、油圧・水圧・空気圧・機能性流体に関する研究が81件ほど発表されていた。その内訳は表1に示す通りである。

フルードパワーをコア技術として組まれたOSを除くと、ソフトロボットやナノ・マイクロシステムのツールとして、フルードパワー技術がさまざまな用途で適用されていることがうかがえる。また、建設ロボットなどのメガスケールから医療ロボットなどのマイクロ・ナノスケールまで、幅広いスケールにわたってフルードパワーが活用されていることも特筆すべきことである。この背景には、多様なスケールの流体デバイスが要素技術として整いつつあることが一因と考えられる。

3. フルードパワーロボティクスの研究紹介

本講演会で企画されたオーガナイズド・セッションのうち、フルードパワー技術に焦点をあてて組まれたOS「フルードパワーロボティクス」において

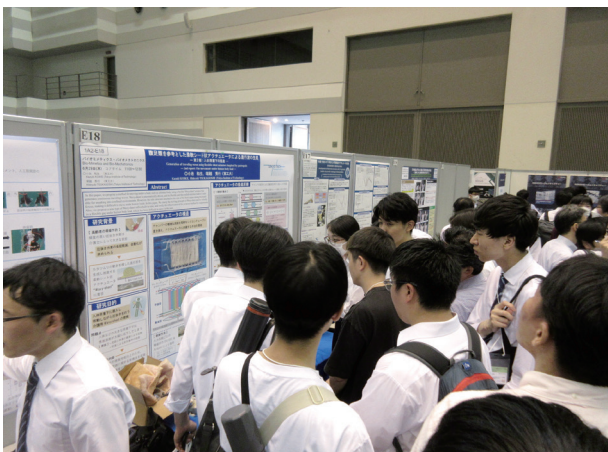


図1 ポスター発表の様子

表1 各OSにおけるフルードパワー関連の発表件数

オーガナイズド・セッション名	件数
フルードパワーロボティクス	16
ソフトロボット学／フレキシブルロボット学	5
リハビリテーションロボティクス・メカトロニクス	4
アクチュエータの機構と制御	9
ナノ・マイクロ流体システム	15
刺激—応答メカニズム	3
医療ロボティクス・メカトロニクス	4
バイオミメティクス・バイオメカトロニクス	3
ロボットハンドの機構と把持戦略	4
建設&インフラ用ロボット・メカトロニクス	7
ウェアラブルロボティクス	4
その他のセッション	7

16件の最新成果が発表された。本稿では、それらの研究成果の一部を紹介する。なお、本OSは徳島大学の高岩先生と著者が共同で担当しており、ロボットへの応用をめざしたフルードパワー技術の研究が多角的に報告されていた。

渡辺や多田隈ら¹⁾は、伸縮・揺動の2軸の柔剛の切替が可能な線状メカニズムを偏平チューブ内の空気圧を切り替えることにより実現していた。姿勢保持アシストの可動域の拡張用のデバイスに応用することを想定している模様である。

高岩ら²⁾は、免荷型空気式パワーアシスト装置を用いた片脇支援時の身体負担を評価した。アクティブ型とパッシブ型の双方で右半身の筋負担が大幅に軽減されることを示していた。

佐々木ら³⁾は、歩行時体幹保持力を支援するための人工筋肉制御システムを提案した。人工筋の圧力応答の遅れを考慮するため、バルブの有効断面積に着目した駆動システムの提案を行っていた。

石井ら⁴⁾は、海中作業用アシストスーツのための水圧駆動人工筋肉とその駆動系を報告した。McKibben型人工筋肉の作動流体を空気圧から水圧に変更したことにより、優れたアシスト効果が確認されたことが報告されていた。

塚越ら⁵⁾は、空気圧駆動式柔軟チューブを用いた長距離配管内移動ロボットの速度向上手法を提案していた。駆動部の分散配置の構成として直列配置と並列配置とを比較し、後者の優位性を指摘していた。

中村ら⁶⁾は、流体圧人工筋肉で駆動されるシャコ

規範型打撃機構の瞬発駆動力のシミュレーションを報告していた。回転中心固定プーリに比べて、偏心プーリの導入により打撃速度を向上できることを示していた。

鈴森ら⁷⁾は、油圧人工筋肉を用いた7自由度パワーソフトロボットのはつり作業実験について報告していた。合計29本のマッキベン型人工筋肉に油圧5.0MPaを印加して質量40kgのアームを持ち上げながら作業できる様子が報告されていた。

その他にも、さまざまな興味深い研究成果が報告されていたが、紙面の都合上、やむを得ず紹介を割愛させていただく。

4. おわりに

本講演会では、予稿集の原稿が例年3月に提出される。したがって、各大学研究室の卒論・修論などの最新の研究成果が報告されるケースが多い。ここ数年はオンライン発表のため、発表者と聴講者の双方にとって成果を伝えづらい状況が続いていた。しかし、今年の講演会では本来の活気を取り戻すどころか、むしろ以前より聴講者が増えていたようにも感じられた。そして、フルードパワーをロボティクスに取り入れた研究事例もここ数年で増加傾向をたどっているようである。これらの研究者が当学会でも積極的に発表する機会を設けて、双方の学会間の研究交流が活発化していくことを願ってやまない。

参考文献

- 1) 高橋景虎, 恩田一生, 阿部一樹, 渡辺将広, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭: 伸縮・揺動の2軸の柔剛切替えが可能な線状メカニズム, ROBOMECH2023, 2A1-F15 (2023)
- 2) 横田雅司, 高岩昌弘: 免荷型空気式パワーアシスト装置を用いた片脇支援時の身体負担評価, ROBOMECH2023, 1A1-F16 (2023)
- 3) 八瀬快人, 佐々木大輔, 門脇惇, 原田孝, Egor Kuzmin: 歩行時体幹保持力を支援するための人工筋肉制御システムの構築, ROBOMECH2023, 1A1-F17 (2023)
- 4) 市川翼, 根本紘希, 石井千春: 海中作業用アシストスーツのための水圧駆動人工筋肉とその駆動系の開発, ROBOMECH2023, 1A1-F18 (2023)
- 5) 佐藤可惟, 塚越秀行: 長距離配管内移動ロボットの速度向上に関する考察, ROBOMECH2023, 1A1-G11 (2023)
- 6) 伊藤文臣, 車谷駿一, 加賀谷勝史, 中村太郎: 外骨格の弾性要素と水の抵抗との相互作用を考慮にいたしたシャコ規範型打撃機構の瞬発駆動シミュレーション, ROBOMECH2023, 1A1-G12 (2023)
- 7) 馮雲皓, 井手徹, 難波江裕之, 鈴森康一, 櫻井良, 大野信吾: 油圧人工筋肉を用いた7自由度パワーソフトロボットのはつり作業実験, ROBOMECH2023, 1A1-G13 (2023)

(原稿受付: 2023年9月4日)

What do you think of Japan? (Youは日本をどう思う?)

第22回 日本生活10年目の韓国人、 仕事と生活で思うこと



かん み ぬ
姜 玟佑

川崎重工業株式会社
精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ディビジョン 品質保証部
〒651-2239 神戸市西区榎谷町松本234番地
E-mail : kang_m@khi.co.jp

著者紹介

1. はじめに

1.1 自己紹介

私は韓国で生まれ、今は国際空港で有名な仁川で幼少年期を、のちにソウルで大学時代を過ごした。LK-99という新物質を発表し最近一部の界隈で話題になった高麗大学 (Korea University) が私の母校であり、そこで4年間機械工学を学んだ。卒業と同時に日本へ渡航し、現在の会社に勤め始め今年でちょうど10年目となる。

1.2 来日までの経緯

私は物心がついてから、新しいことや新しいものに強く惹かれる質であり、慣れ親しんだ故郷で仕事を始めることに対してはあまり魅力を感じられなかった。

特に大学1年生の時にロシアを旅行し世界の広さを垣間見てからは、韓国に留まることを窮屈にさえ感じるようになり、次々と国内の大手企業へ就職を決める友人たちを横目に、海外へ進出する道を模索するようになった。われながら、難儀な気質である。

そのような時期に、海外人材の募集活動を精力的に展開していた現在の勤め先が私の大学で採用説明会を開催した縁もあり、日本企業への就職と日本国への渡航を決めることになった。

2. 日本での仕事について

2.1 職場と業務内容について

私は大学を卒業した2014年から現在に至るまで、

川崎重工業株式会社の精密機械事業部門で品質管理業務を務めている。入社当時は油圧ポンプ関連の仕事が中心であったが、次第に油圧のモーションコントロールシステム全般へ拡張してきており、現在は電気電子・ソフトウェア製品にも携わっている。開発や生産部署とは違い、一言で仕事の内容を表すことはむずかしいが、製品に「安心感」という大きな付加価値を与えることのできる誇るべき仕事と考えている。

2.2 現在の仕事について思うこと

昨今は多くの技術に国境がなく、紙コップのような日用品からスマートフォンといった先端技術の結晶に至るまで、製造国にこだわる必要性が薄まりつつある。しかしそれを承知の上で、大事な場面を使う物、長く快適に使いたい物はちょっとお高いけど日本 (または折り紙付きの国や会社の) 製に…といった経験は読者の皆様もないだろうか。製品カタログ上のうたい文句が同じでもそうになってしまうのだから実に不思議なものであるが、各国・企業が積み重ねてきた品質が消費者の信頼を勝ち取ったともいえる。

機械工学という数式と物理現象が支配する無機質な世界の住人でありながら、このように顧客の「気持ち」に訴えかける要素をつくり込む私の現在の仕事は、底がしれないほどチャレンジングでありながらも非常に面白みを感じさせてくれる。

2.3 日本での会社生活で感じたこと

現在の職場では従業員がワーク・ライフ・バランスを実現できるよう、各々のプライベートを尊重する文化が定着しており働きやすいと感じている。これは国柄というより私が職場環境に恵まれた側面もあると考えるし、韓国も最近は同様の風潮であると聞き及んではいるが、総じて日本は韓国より年平均労働時間が短く (OECD統計資料より)、より先進的な働き方が広がっている国であると考え。

組織文化に関しては、いわゆる「日本的経営」の産物で硬直化されているとばかり思っていたがき憂

であり、風通しのよい職場であると感じた。しかしながらビジネスシーンにおける日本特有の奥ゆかしいコミュニケーションは、時には伝えたいメッセージを弱らせ、相手に響きにくい場面も多々あると感じた。人間関係の潤滑も、程よい塩梅に留めておくのが賢明であろう。

3. 日本での生活について

3.1 日本での日常生活で感じたこと

日本へは学生時代にも幾度か旅行したことがありわかってはいたが、日韓における都会の景色というのは驚くほど似通っているものである。地理的・文化的に親和性が高く、昔から影響を与え合ってきたこともあり自然なこととも言えるが、そのおかげで他国でのひとり生活も大きなストレスなく送ることができている。もちろん、生活の具体的なところは韓国と大きく変わる点もあり、食生活などは特にそうだったが、個人的には地元より各段に美味しいうどんやそばが食べられる環境になったためうれしい限りである。



写真1 香川県の旅行中に会い、感動を覚えたうどん

3.2 日本の文化で興味を覚えたこと

来日10年目の今、あえて日本語の「勉強」を始めてみたいと考えている。正直、今までは見よう見まねの言葉を勢いませでまかり通してきたが、最近は深いコミュニケーションが必要な場面も多くなり、語彙の乏しさが足を引っ張る経験が増えてきた。何とかしたいと思いつつも表現力を豊かにする方法がなかなか見つからず悩んでいたが、ひょんなことから日本語の辞典を読んでもこれが非常におもしろく内容も膨大であり、ようやく良い先生に出会えた気がした。当面は小学生に戻った気持ちで、楽しく言葉の勉強に励みたいと考える。

3.3 日本に来てよかったと感じたこと

職人魂あふれる現場の諸先輩と巡り合い、多くの教えを受けることができたことである。私自身がエンジニアリングよりテクニクに親しみを感ずることもあり、常に現物と経験に立脚して語られる数々

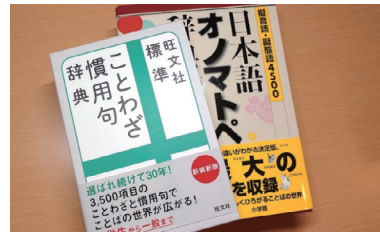


写真2 最近の愛読書

の教えはわかりやすく、とても勉強になった。それは単に知識の域にとまらず、技術者としての考え方や仕事の進め方までに至っている。まだ入社してで意欲と知識だけが空回りしていたころ、幾度もなく「君はいったい何がしたいんだ～(後略)」と厳しくも愛のある指導を受けたことは今となっては懐かしい記憶だが、今も自分への戒めになっている。

職人文化は日本に限られた物ではないが、長い歴史と技術への自負心がある職場に入ることができた点では、日本へ来たことは間違いなく自分にプラスになったと考えている。

3.4 日本の生活で困ったこと

仕事はもちろんのこと日常生活の中でも、漢字を手書きする場面が意外に多く、いまだにその都度もたついてしまう(加えて、格好も付かない)ことがある。

韓国も昔は漢字併用が基本だったが、ちょうど私が学校に通い始めた1990年代の半ばからはハングルオンリーが主流となり、習字は教養にとまるようになったため、頭が柔らかいうちに馴染ませる機会を逃してしまった。今からでも私の努力次第で幾分の改善は望めるだろうが、「なぜ今時、手書きにこだわるか?」という疑問を覚えてしまい、勉強になかなか身が入らないことを言い訳にしている。

幸いにも最近はDXの恩恵を受け私のような漢字弱者も生活しやすい環境になりつつあることが救いである。

4. おわりに

私にとって日本で過ごしたこの10年間は、現在進行形で十分に刺激的であり、まだまだ飽きが来る気配はない。おそらくは、肌によく合うのであろう。そろそろ次のステージに向け、永住資格の準備と10年、20年先のキャリアプランニングを行いたいと考えている。

その中で海の外から来た珍しい者として、この国へ何をもたらすことができるか、職場に何を貢献することができるかを考えるというむずかしい宿題の答えもじっくり探していきたい。

(原稿受付: 2023年8月7日)

研究室紹介

広島市立大学 小寄研究室

著者紹介



こ さき たか ひろ
小 寄 貴 弘

広島市立大学大学院情報科学研究科
〒731-3194 広島市安佐南区大塚東3-4-1
E-mail: t-kosaki@hiroshima-cu.ac.jp

1996年金沢大学大学院工学研究科修士課程修了、広島市立大学情報科学部助手、助教授（准教授）を経て、2023年同大学教授。メカトロニクスに関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員。博士（工学）。

1. はじめに

被爆地として広く知られる広島市は、2023年5月の主要7か国首脳会議（G7サミット）の開催地となり、G7首脳に加えウクライナのゼレンスキー大統領が訪問するなど、改めて世界の注目を集めることとなった。筆者が勤務している広島市立大学のキャンパスは、広島市内に位置し、被爆建物である原爆ドームがある広島市中心部からバスでおおよそ15分の距離にある。丘陵地を切り開いてキャンパスが造成されているため、学生たちは緑に囲まれた閑静な環境で勉学に励むことができる（図1）。

広島市立大学は、「科学と芸術を軸に世界平和と地域に貢献する国際的な大学」という基本理念の下で、1994年に広島市によって設置された大学であり、2010年の公立大学法人への移行を経て、来年には開学30周年を迎える。現在は、国際学部、情報科学部、芸術学部の3学部に加え、大学院の国際学研究科、情報科学研究科、芸術学研究科、平和学研究科の4研究科があり、また、附置機関として、1998年に設置された広島平和研究所を有しており、比較的小規模な大学ではあるが特色ある構成となっている。総学生数は、学部生が約1,800人、大学院生が約300人である。一般的な学生寮の他に、外国人留学生と共同生活を送ることで、グローバル人材に必要とされるコミュニケーション能力、協調性などを育成することを目的とした国際学生寮がある。

筆者が所属する情報科学部は、2012年度以降は

情報工学科、知能工学科、システム工学科、医用情報科学部の4学科構成で、現在に至っている。情報科学部の1学年の学生定員は210人であり、学生は入学時においては学科には所属せず、2年生に進級した際に本人の希望に基づいていずれかの学科に配属され、卒業をめざすことになる。大学院への進学率は例年30～40%である。

情報科学部の研究体制は、2022年度までは数名の教員が共同でひとつの研究室を運営するものであったが、2023年度からは各教員が独立した研究室を持ち、教育・研究活動を行う体制となった。これに伴い、柔軟に研究グループを組織することが可能となった。



図1 広島市立大学

2. 研究室の紹介

筆者は、1996年に広島市立大学情報科学部に着任し、現在、システム工学科に所属している。システム工学科は、ロボット開発に関連した技術、情報機器等の利活用のためのインタフェース技術などに関する教育・研究を担っている。システム工学科は、数理システムデザイン、人間・ロボット共生、インタフェースデザインの3つの講座から編成されており、筆者は人間・ロボット共生講座の一員である。本講座では、近い将来到来する人間とロボットが共生する社会で活躍できるロボットを開発する能力を備えた技術者・研究者の育成を目標として掲げている。

筆者は2022年度までメカトロニクス分野の研究室に所属していたこともあり、体制が移行し、研究室を主宰するようになった2023年度以降も引き続きメカトロニクスや制御工学に関する講義を担当しており、また、研究に関しても、メカトロニクス、制御工学にフルードパワーシステムを加えた範囲を中心として行っている。情報系の学部では少数派であるが、メカに興味があるような学生が本研究室を希望してくれ、現在、大学院生2名、学部4年生3名の研究指導を担当している。

3. 研究テーマの紹介

フルードパワーシステム関連の研究としては、1998年頃から空気圧サーボシステムの研究を始め、2007年頃からはMcKibben型人工筋のモデル化や制御に関する研究、2013年頃からはフルードパワーを駆動源とするパワーアシスト装置の開発を進めている。以下では、近年の主な研究について紹介する。

3.1 空気圧式下肢用パワーアシスト装置の開発

パワーアシスト装置は、使用者の動きに合わせて駆動力を発揮し、荷積や歩行などの動作を支援する装置であり、使用者の負担軽減や自立支援に役立つ。筆者らは、身体に装着して用いるタイプでは、人に対する高い安全性が必要不可欠であることから、駆動源にフルードパワーを用いたパワーアシスト装置の研究を推進している。

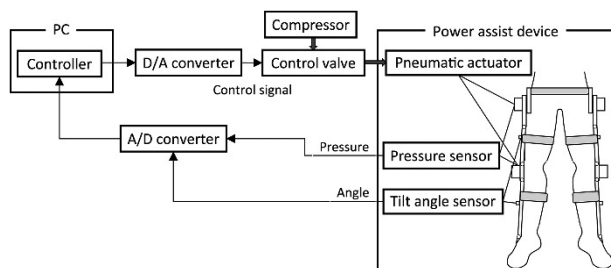


図2 空気圧式下肢用パワーアシスト装置

筆者らは、ロータリタイプの空気圧アクチュエータを用いた、腰や膝の関節の動作を支援するためのパワーアシスト装置を試作している(図2)。この装置に対し、下肢の各関節の動きと身体の重心移動のタイミングが合致するように空気圧アクチュエータを制御することにより、身体の動揺を低減化しながら装着者の動作支援を行うシステムを提案している¹⁾。提案手法では、人体モデルに基づいて、装着者の動作と重心移動が連動するようなアシストトルクを算出し、それを目標値として空気圧アクチュエータを制御することにより、装置を装着しない場合の動作にできるだけ近づけ、かつ筋活動量の低減

化を図っている。

3.2 水圧人工筋式パワーアシスト装置の開発

3.1節で述べた空気圧アクチュエータを用いたパワーアシスト装置では、空気の圧縮性によるコンプライアンスが期待できるものの、作業現場での使用を想定すると空気源の確保が問題となることがある。そこで、ポンプを用いず、水道水圧をそのまま主駆動源にできるMcKibben型人工筋に着目し、装着者の肘の動作を支援するパワーアシスト装置への応用を試みている(図3)。McKibben型人工筋は、柔軟、軽量といった特長があることから、最近、ソフトアクチュエータの一種として改めて脚光を浴びている。このパワーアシスト装置では、装置と装着者の動的な相互作用を調節可能なインピーダンス制御と、装着者のトルク増幅制御から構成される制御システムを実装している²⁾。

現在、柔軟で安全性の高い人工筋を用いる利点を生かすため、硬質の外骨格をできるだけ使用せず、人工筋とワイヤで構成されるようなパワーアシスト装置の研究も進めている。



図3 水圧人工筋式パワーアシスト装置

3.3 人工筋のモデル化と制御

筆者が最初に研究に取り組んだのは、空気圧で駆動されるMcKibben型人工筋であり、過去には、制御精度劣化の一因となるヒステリシスを含む非線形特性のモデル化に従事してきた。

その経験を踏まえ、近年注目されている機械学習が有用と考え、水道水圧を駆動源とするMcKibben型人工筋を対象とし(図4)、SVM(Support Vector Machine)を用いたモデル化を試みている(図5)。加えて、提案手法で構築されたモデルを組み込んだモデル予測制御システムの研究³⁾や、その改良型であるスライディングモード制御システムの研究⁴⁾も行っている。

4. おわりに

本稿では、広島市立大学や筆者の研究内容につい

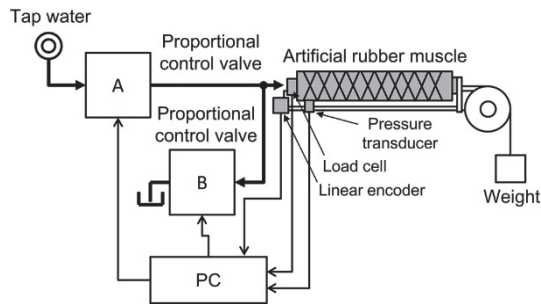


図4 水圧人工筋駆動装置

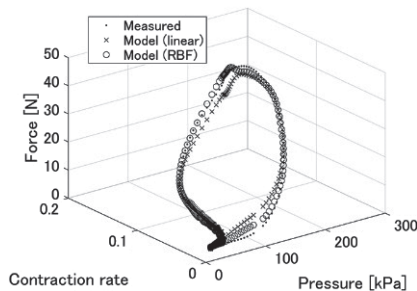


図5 水圧人工筋モデル化例

て簡単に紹介した。情報系の学部には所属していることを生かし、フルードパワーシステムのモデル化や制御に、今後も積極的に人工知能技術を取り入れていきたいと考えている。

2024年には、The 12th JFPS International Symposium on Fluid Powerが広島市で開催される。会場としては、G7広島サミットで各国首脳が訪れた広島平和記念資料館の隣にある広島国際会議場が予定されている。この機会に、多くの方々に広島市を訪問していただければ幸いである。

参考文献

- 1) 杉野詠一, 小寄貴弘, 高橋雄三, 李仕剛: 重心移動を考慮した空気圧駆動式下肢用パワーアシスト装置の制御, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 862, [DOI: 10.1299/transjsme.17-00519] (2018)
- 2) 小寄貴弘, 二反田晃尚, 厚海慶太, 李仕剛: 水道水圧駆動人工筋アクチュエータを用いた肘関節用パワーアシスト装置の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 841, [DOI: 10.1299/transjsme.16-00174] (2016)
- 3) Y. Kawahara, T. Kosaki, and S. Li: LS-SVM Based Modeling and Model Predictive Control for a Water-Hydraulic Artificial Muscle Actuator, Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 13, No. 3, pp. 114-121 (2020)
- 4) T. Kosaki and S. Li: A Sliding Mode Controller Using an LS-SVM Model for a Water-Hydraulic Artificial Muscle Actuator, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 32, No. 5, pp. 903-910 (2020)

(原稿受付: 2023年8月29日)

会 告

詳細は学会ホームページ (<http://www.jfps.jp>) をご覧ください

キャリア支援セミナー開催のお知らせ

開催日時 第1回: 2023年12月15日 (金) 17:00~18:30
 第2回: 2024年1月19日 (金) 17:00~18:30
 第3回: 2024年2月16日 (金) 17:00~18:30
 第4回: 2024年3月8日 (金) 17:00~18:30

2024年度卒業・修了予定の学生の皆さんを対象として、学生と賛助会員企業の若手技術者との交流を目的としたキャリア支援企業セミナーを企画しました。上記のような月1回程度の頻度でリモート形式により開催します。いずれの回もフルードパワー関連企業3社程度から企業紹介や

仕事内容の紹介、個別相談等を行います。参加費用は無料です。大学や高専などの教育関係の教員の皆様は学生の皆さんにホームページを見るようご案内ください。

基盤強化委員会

企画行事

2023年春季フルードパワーシステム講演会開催報告

著者紹介



ちょう 趙 ふえい 菲菲

岡山理科大学
〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1
E-mail: f-cho@ous.ac.jp

2011年岡山理科大学大学院システム科学専攻博士後期課程修了。国立高専機構津山工業高等専門学校助教、講師、准教授を経て、2022年岡山理科大学情報理工学部准教授、介護支援ロボット、空圧機器の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会、日本機械学会などの会員、博士（工学）

1. はじめに

2023年5月25日（木）と26日（金）の二日間、「春季フルードパワーシステム講演会」が東京都港区にある機械振興会館にて対面式で開催された。まずは、本学術講演会開催に際し、ご参加いただいた皆様、発表していただいた講演者の皆様、講演会の企画および運営にご尽力いただいた企画委員の皆様、学会事務局の皆様にご心よりお礼申し上げます。おかげさまで、参加者も113名を越え、無事盛会のうちに終了することができた。今後ともご参加やご協力のほど、よろしくお願い申し上げます。



図1 久しぶりの東京の街と飛行機

2. 開催の概要

2.1 会場

新型コロナ禍前の春季フルードパワーシステム講演会は毎年、東京タワーの真下にある機械振興会館で開催するのが慣例であり、学会の昼休み時間には外に出て、空を見上げ、東京タワー（図2）を眺めることが筆者の楽しみのひとつであった。



図2 毅然と聳える65歳の東京タワー



図3 点灯した東京タワー

しかし、2019年以来、コロナ禍で中止となったり、Online開催となったり、あっという間に3年の歳月が経ちました。3年ぶりの東京タワーは変わらず現代感あふれる東京の街に1958年以来、立ち続けている。観光客も増え、コロナ禍以前の賑やかさが徐々に戻ってきた。一日の学会が終了後、機械振

興会館から出て、濃紺の夜空に浮かぶ東京タワー（図3）は目の前に現れ感動した。機械振興会館の外ガラスに映っている台座の部分はまるで建物の装飾のように輝いている（図4）。



図4 夜に機械振興会館のガラスに映っている東京タワー

2.2 開催形式

今年の春季講演会は2室に分かれ、それぞれのセッション講演が行われた。第1室（図5）は主に空気圧に関する講演で、第2室（図6）は液圧・機能性流体をはじめ、多岐にわたる講演があった。

今回の講演会では賛助会員企業の参加者向けに団体視聴用のライブ配信を行い、質疑応答は対面式をメインにした。団体視聴者の質疑に関しては、集計し、後日講演者に回答してもらう形式を取った。会



図5 第1室講演風景



図6 第2室講演風景

場では活発な質疑応答があり、有用なアドバイスや貴重なコメントをいただいて満足気あふれた表情を持った講演者もいた。コロナ禍で集団会議などはすべてOnline上のみの時代が終盤に向かい、活気が戻ってきた実感が滝のように湧いてきた。機械振興会館の広い部屋でのライブ配信は初回の試みだったため、質問者の収音が問題となり、マイクのあるテーブルに移動していただくというハプニング対応もあったが、ハイブリッド形式ならではの醍醐味があった。

3. 一般講演および製品・技術紹介セッション

【分野別講演件数】多い順

空気圧：	23件
油圧・水圧：	9件
機能性流体：	7件
製品・技術紹介：	6件

合計：45件

【講演者】

学生：	24名
一般：	21名

合計：45名



図7 製品・技術紹介セッション

今回の講演会では空気圧の講演件数が圧倒的に多く、研究分野の偏りが顕著であった。しかし、2室とも、非常に活発な質疑応答があった。中には議論が伯仲して時間をかなりオーバーすることもあった。また、対面式の学会発表を初めて行った大学院生も多く、かなり緊張したようである。しかし、講演発表後、「貴重な経験で、発表して良かったです」と感想を述べた。そして、製品・技術紹介セッションでは企業の方々から新製品や先端技術などについての紹介があった。図7のように、製品・技術紹介セッションでは部屋に入れないほどたくさんの方々に参加した。より詳細なプログラムは「日本フルードパワーシステム学会」ホームページ（www.jfps）。

jp) からご覧いただきたい。

4. 優秀講演賞表彰式および技術懇談会

新型コロナウイルスの感染法上の分類が2023年5月8日から、季節性インフルエンザと同じ「5類」に引き下げられたため、優秀講演者の表彰式後、軽食を伴う技術懇談会を企画した。コロナ禍を乗り越えて、おいしそうな料理を前にして、久々の歓談風景に筆者は思わず感動した。90名を越える多数の参加者がソフトドリンクを手にし、乾杯の音頭を待つ瞬間をカメラに収め、図8に示す。



図8 技術懇談会風景

5. おわりに

2023年春季フルードパワーシステム講演会は新型コロナウイルス禍が収束に近づいた時期に東京都港区の機械振興会館にて開催された。対面式とライブ配信を同時に行い、企画委員、学会事務局の皆様をはじめ、大勢の参加者の皆様のおかげで無事に終了できたことを心から感謝申し上げます。筆者も対面で参加者の顔を見ることがや話をする事ができ、よかったです。

(原稿受付：2023年7月27日)

会 告

2024～2025年度役員（理事・監事）候補者推薦のお願い

選挙管理委員会委員長 早川 恭弘

一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会では、一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会 細則 第5章第25条および第29条にもとづき、2024～2025年度役員（理事・監事）候補者の推薦を受付けます。

- ・定数：理事 20、監事 3
- ・任期：2024年6月22日～2026年6月26日（予定）

つきましては、細則 第5章第27条により役員候補者の推薦をお願いします。
なお、役員候補者は、正会員3名以上連記の推薦を受けた正会員となります。

推薦にあたりましては、正会員3名以上連記の推薦書（形式自由）を下記のように提出ください。

提出期限：2024年1月22日(月)

提出先：学会事務局 (info@jfps.jp)

〒105-0011

東京都港区芝公園3-5-22 機械振興会館別館102

TEL：03-3433-8441、FAX：03-3433-8442

会 告

〈理事会・委員会日程〉

8月30日	企画委員会
9月4日	情報システム委員会
9月21日	理事会
10月2日	基盤強化委員会
10月4日	編集委員会
10月12日	論文集委員会

〈理事会報告〉

2023年度第3回理事会

9月21日 15:00～17:00

機械振興会館6F 6-64, オンライン (参加者21名)

- (1) 国際シンポジウム広島2024開催準備状況
- (2) 2023年秋季講演会開催準備状況
- (3) 学会創立50周年記念パーティー開催準備状況
- (4) 2023年学会賞各賞の選考委員長について
- (5) 会員の推移
- (6) 次期会長選挙について
- (7) 各委員会からの報告
- (8) その他

〈委員会報告〉

2023年度第2回企画委員会

8月30日 15:00～17:00

Web開催 (参加者17名)

- (1) 2023年秋季講演会開催準備状況
- (2) 2023年オースタムセミナー開催準備状況
- (3) 2023年ウィンターセミナー開催準備状況
- (4) 2024年春季講演会併設セミナー開催準備状況
- (5) その他

2023年度第1回情報システム委員会

9月4日 15:00～16:00

Web開催 (参加者12名)

- (1) 学会誌掲載の会議報告について
- (2) 学会HPのSSL化について
- (3) 学会HPへの退会案内の掲載について
- (4) 正会員を有する大学・高専・研究機関の掲載について
- (5) その他

2023年度第2回基盤強化委員会

10月2日 16:00～17:00

Web開催 (参加者14名)

- (1) 2023年度キャリア支援セミナー企画
- (2) 学会パンフレットの更新作業について
- (3) フェロー推薦依頼と技術開発賞推薦依頼
- (4) 会員入会特典について
- (5) IFPEX2024について
- (6) その他

2023年度第3回編集委員会

10月4日 15:00～16:30

Web開催 (参加者19名)

- (1) 会誌特集号の現状と企画
 - 1) Vol.54 No.6「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」
 - 2) Vol.55 No.1「フルードパワーを活用した超高压技術」
 - 3) Vol.55 No.2「触覚技術と応用技術 (仮)」
 - 4) Vol.55 No.3「DX時代の生産技術を支えるフルードパワー (仮)」
 - 5) Vol.55 No.4「フルードパワーシステムにおけるMDB活用 (仮)」
 - 6) Vol.55 No.5「未定」
 - 7) Vol.55 No.5「機械工学を学ぶ皆さんへーフルードパワーのすすめー (仮)」
- (2) その他
 - 1) 会議報告
 - 2) 今後の特集について

2023年度第3回論文集委員会

10月12日 10:30～12:00

Web開催 (参加者7名)

- (1) JFPS2024広島の特集号について
- (2) 利益相反 (COI) に関する論文集の対応について
- (3) 論文著者の連絡先 (メールアドレス) について
- (4) HPのSSL化について
- (5) その他
 - 1) 日中韓JWSについて
 - 2) 論文の投稿・査読状況等について
 - 3) 対面形式の委員会開催について

会 告

共催・協賛行事のお知らせ

シンポジウム「動力伝達系の最新技術2023」

主 催：公益社団法人 自動車技術会 動力伝達系部門委員会、CVT・ハイブリッド部門委員会

開 催 日：2023年11月17日(金)

会 場：東京工業大学すずかけ台キャンパス 大会会館多目的ホール（神奈川県横浜市緑区長津田町4259）

U R L：https://www.jsae.or.jp/assoc/event/gakkai/research/sympo/page07-23/

No.23-107 講習会「ソフトマテリアルを用いたアクチュエータ・センサの基礎と応用」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 機素潤滑設計部門

開 催 日：2023年11月17日(金)

会 場：オンライン開催（ZOOM）

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/23-107/

連続講習会（全4回）機械-電気の統合モデルによるモデルベース開発

主 催：一般社団法人 日本機械学会 交通・物流部門

開催日程：2023年11月21日(火) 物理機能モデルの要素モデル（機械と電気の1次要素）

2023年12月26日(火) 物理機能モデルによるモデル（機械と電気の2次要素）

2024年1月23日(火) 物理機能モデルによるモデル化（機械と電気の共振構造と非線形化、機械と電気の統合モデル化実習）

会 場：日本機械学会事務局第1会議室（東京都新宿区新小川町4番1号 KDX飯田橋スクエア2階）

U R L：https://www.jsme.or.jp/event/23-76/

EcoDesign2023 第13回環境調和型設計とインバースマニュファクチャリングに関する国際シンポジウム

主 催：エコデザイン学会連合

開 催 日：2023年11月29日(水)～12月1日(金)

会 場：奈良県コンベンションセンター（奈良県奈良市三条大路1-691-1）

U R L：https://ecodenet.com/ed2023/

2023年度 計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業（固体力学分野・熱流体力学分野・振動分野）

主 催：一般社団法人 日本機械学会 計算力学技術者資格認定事業委員会

試験日程：2023年12月1日(金) 1級認定試験（固体力学分野・熱流体力学分野・振動分野）

2023年12月7日(木) 2級認定試験（熱流体力学分野・振動分野）

2023年12月8日(金) 2級認定試験（固体力学分野）

会 場：下記HPを確認ください

U R L：https://www.jsme.or.jp/cee/

キャビテーションに関するシンポジウム（第21回）

主 催：日本学術会議 第三部

第21回キャビテーションに関するシンポジウム実行委員会

開 催 日：2023年12月7日(木)～12月8日(金)

会 場：大阪大学吹田キャンパス 銀杏会館（大阪府吹田市山田丘2-2）

U R L：https://cav21-mech.eng.osaka-u.ac.jp/

第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2023）

主 催：公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門

開 催 日：2023年12月14日(水)～12月16日(金)

会 場：朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター（新潟県新潟市中央区万代島6-1）

U R L：https://sice-si.org/

第390回講習会「事例に学ぶ流体関連振動」

主 催：一般社団法人 日本機械学会 関西支部
開 催 日：2024年1月25日(木)～1月26日(金)
会 場：オンライン開催 (Webex)
U R L：https://jsmekansai.org/Seminar/kou390.html

各行事の最新情報は、主催者のホームページまたは各行事のURLからご確認ください。

会 告

学会創立50周年記念パーティーと特別記念講演終了報告

2020年春季フルードパワーシステム講演会とあわせて開催を予定していました「学会創立50周年記念パーティー」を特別記念講演とあわせて、2023年9月29日(金)に多数の参加者(記念講演会：77名、記念パーティー81名)を得て、無事終了しましたこと、ご報告申し上げます。

学会創立60周年に向け会員各位のご協力を得て、本学会を

発展させていくことができればと、強く思っております。

今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

なお、特別記念講演資料は、学会HPよりダウンロード可能となっておりますので、参考にいただけますよう、お願いいたします。

会長 早川恭弘

会 員 移 動

会員の種類	正会員	海外会員	学生会員	賛助会員
会員数 (10月10日現在)	806	8	116	123
差引き増減	+2	±0	+11	±0

正会員の内訳 名誉員17名・シニア員73名・ジュニア員72名・その他正会員644名

〈新入会員〉

正会員

松野 孝博 (近畿大学)

矢動丸紀章 (株式会社東洋空機製作所)

学生会員

三宅 慶典 (岡山大学)

山岡 将輝 (岡山大学)

赤熊 昶瑠 (岡山大学)

NI Yilei (岡山大学)

若生 瑛貴 (法政大学)

地野 夢輝 (芝浦工業大学)

張 雁斌 (信州大学)

跡上 大稀 (岡山理科大学)

角宮 大輝 (徳島大学)

阿部 哲平 (山形大学)

高井 真人 (東京工業大学)

会 告

資料一覧表

価格は、(一社)日本フルードパワーシステム学会事務局までお問い合わせください。

資 料 名	発行年月
〈講演論文集〉	
平成元年春季油空圧講演会講演論文集	平成元年 5 月
平成元年秋季油空圧講演会講演論文集	平成元年 11 月
平成 2 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 2 年 11 月
平成 3 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 3 年 11 月
平成 4 年春季油空圧講演会講演論文集	平成 4 年 5 月
平成 4 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 4 年 10 月
平成 5 年春季油空圧講演会講演論文集	平成 5 年 5 月
平成 5 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 5 年 11 月
平成 6 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 6 年 10 月
平成 7 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 7 年 11 月
平成 8 年春季油空圧講演会講演論文集	平成 8 年 5 月
平成 8 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 8 年 10 月
平成 9 年春季油空圧講演会講演論文集	平成 9 年 5 月
平成 9 年秋季油空圧講演会講演論文集	平成 9 年 10 月
平成 10 年春季油空圧講演会講演論文集	平成 10 年 5 月
平成 10 年秋季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	平成 10 年 11 月
平成 11 年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	平成 11 年 5 月
平成 12 年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	平成 12 年 5 月
平成 12 年秋季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	平成 12 年 10 月
平成 13 年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集	平成 13 年 5 月
平成 13 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 13 年 11 月
平成 14 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 14 年 5 月
平成 15 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 15 年 5 月
平成 16 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 16 年 5 月
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	平成 16 年 11 月
平成 17 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 17 年 5 月
平成 18 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 18 年 5 月
平成 18 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 18 年 11 月
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	平成 19 年 5 月
平成 19 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 19 年 11 月
平成 20 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 20 年 5 月
平成 21 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 21 年 6 月
平成 21 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 21 年 11 月
平成 22 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 22 年 5 月
平成 22 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 22 年 12 月
平成 23 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 23 年 5 月
平成 24 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成 24 年 5 月

平成24年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成24年11月
平成25年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成25年 5月
平成25年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成25年11月
平成26年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成26年 5月
平成27年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成27年 5月
平成27年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成27年11月
平成28年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成28年 5月
平成28年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成28年10月
平成29年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成29年 5月
平成30年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成30年 5月
平成30年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	平成30年10月
2019年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集	2019年 5月
2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	2019年11月
2020年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集	2020年12月
2021年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2021年 6月
2022年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2022年 5月
2022年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2022年11月
2023年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 (CD)	2023年 5月
〈IFPEX〉	
平成9年IFPEX第18回油圧・空気圧国際見本市大学・研究室展出展内容説明書	平成9年10月
平成11年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	平成11年10月
平成14年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	平成14年 6月
平成17年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	平成17年 8月
平成20年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ講演会講演論文集	平成17年 4月
平成23年IFPEXフルードパワーシステムワークショップ国際見本市論文集	平成23年 7月
平成26年第24回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集	平成26年 9月
平成29年第25回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集	平成29年 9月
2021年第26回IFPEXカレッジ研究発表展示コーナー論文集 (CD)	2021年10月
〈フォーラム〉	
フォーラム'91「賢い電子油圧制御をいかに実現するか」	平成3年 7月
フォーラム'92「ここまできた電子油空圧制御システム」	平成4年 7月
フォーラム'93「水圧システムの現状と課題ー作動流体として水はどこまで使えるか」	平成5年 7月
フォーラム'94「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題その1」	平成6年 7月
フォーラム'95「油空圧駆動と電動駆動の現状と課題その2」	平成7年 7月
フォーラム'96「油空圧技術を支えるトライボロジー」	平成8年 7月
フォーラム'97「21世紀を見つめた新技術開発」	平成9年 7月
フォーラム'98「オフロードビーグル用走行装置の動向」	平成10年 7月
フォーラム'99「技術開発におけるトラブル事例」	平成11年 7月
フォーラム2000「油空圧機器の省エネルギー化はこれだ！」	平成12年 7月
フォーラム2001「自動車における最新油空圧技術の動向」	平成13年 7月
フォーラム2002「電動かフルードか」	平成14年 8月
フォーラム2003「電動かフルードかⅡ」	平成15年 5月
フォーラム2004「最近の緩衝・制振・免振技術」	平成16年 5月
〈セミナー〉	
オータムセミナー「最近の油空圧」	昭和61年10月
オータムセミナー「表面改質」	昭和62年10月
オータムセミナー「油空圧技術の将来のために」	昭和63年10月
オータムセミナー「油空圧のためのセンシング技術」	平成元年10月

オートムセミナー「メカトロニクス関連センサ」	平成2年10月
オートムセミナー「200X年における電子油空圧はどうあるべきかPart1」	平成3年10月
オートムセミナー「油空圧を支える解析技術」	平成4年10月
オートムセミナー「油圧機器・システムにおける振動をいかに克服するか」	平成5年10月
オートムセミナー「油空圧制御と高速インターフェース技術の融合」	平成6年11月
オートムセミナー「油空圧におけるシミュレーション技術の現状と課題」	平成7年10月
オートムセミナー「最新制御理論の超活用法（油空圧システムとロバスト制御の融合）」	平成8年9月
オートムセミナー「油空圧システムに於ける最新制御理論の超活用法 （油空圧システムとロバスト制御の融合）」	平成9年9月
オートムセミナー油圧機器応用「パワーパッケージの現状と動向」	平成10年9月
オートムセミナー「フルイドパワーシステムへの最新制御手法の適用」	平成11年10月
オートムセミナー「環境適合技術の動向」	平成12年9月
オートムセミナー「フルイドパワーシステムに用いられる制御技術の動向」	平成13年9月
オートムセミナー「ハイブリッドカーの現状と将来」	平成14年10月
オートムセミナー「フルードパワーと環境・リサイクル」	平成15年10月
オートムセミナー「食品機械におけるフルードパワーの利用と課題」	平成16年10月
オートムセミナー「レスキューにおけるフルードパワーシステム」	平成17年10月
オートムセミナー「生活に密着したフルードパワー」	平成18年10月
オートムセミナー「鉄道におけるフルードパワー技術」資料は『油空圧技術』Vol.46No.4	平成19年4月
オートムセミナー「フルードパワーシステムと環境・省エネルギー」	平成20年10月
オートムセミナー「フルードパワーシステムのためのlinux開催環境」	平成21年10月
オートムセミナー「BOPビジネスの可能性～CSRとビジネスの両立～」	平成22年11月
オートムセミナー「パワートレインにおけるフルードパワー技術」	平成23年11月
オートムセミナー「フルードパワー技術を生かす油圧作動油の最新動向」	平成24年11月
オートムセミナー「鉄道車両とフルードワー技術」	平成25年10月
オートムセミナー「医療・福祉・介護分野でのフルードパワーを利用したロボティクス」	平成26年11月
オートムセミナー「アクアドライブシステムの産業利用の現状」	平成27年11月
オートムセミナー「生産技術に貢献するフルードパワー in トヨタ産業技術記念館」	平成28年11月
オートムセミナー「ロボティクス分野におけるフルードパワー活用の現状と今後について」	平成29年11月
オートムセミナー「知っておきたい空気圧システム設計技術の新常識」	平成30年11月
オートムセミナー「アディティブ・マニュファクチャリングの最新技術と適用事例 ーフルードパワー分野への活用を考えるー」	2019年12月
オートムセミナー「自動車におけるフルードパワー技術」	2020年11月
オートムセミナー「機能性流体入門ー基礎と応用ー」	2021年11月
オートムセミナー「フルードパワーシステムにおけるMBD活用」	2022年12月
オートムセミナー「環境負荷の低減を進める空気圧システム」	2023年11月
ウインターセミナー「油空圧システムの低騒音化のために」	平成2年2月
ウインターセミナー「知っておきたい新しいアクチュエータ」	平成3年2月
ウインターセミナー「200X年における電子油空圧はどうあるべきかPart2」	平成4年2月
ウインターセミナー「新素材の油空圧への応用」	平成5年2月
ウインターセミナー「空気圧の新たな可能性を求めて」	平成6年2月
ウインターセミナー「人と環境に優しい油空圧ー油空圧機器・システムの低騒音化技術ー」	平成7年2月
ウインターセミナー「油圧システムの高圧化に関する現状と将来」	平成8年2月
ウインターセミナー「フルイドパワーにおける流体の役割」	平成9年2月
ウインターセミナー「ER流体の可能性とその油空圧技術への応用」	平成10年1月
ウインターセミナー「ユーザは語る・自動化機器における駆動方式の現状と将来像」	平成11年1月
ウインターセミナー「水圧システムの現状と応用事例・展望」	平成12年1月
ウインターセミナー「省エネ、環境のためのセンシング」	平成13年1月

ウインターセミナー「油空圧機器・システムにおける省エネルギー化の方法」	平成14年1月
ウインターセミナー「油空圧機器に係わる加工技術～共存する油空圧機器と加工技術～」	平成15年1月
ウインターセミナー「メンテナンスエンジニアリングーランニングコストを安く～」	平成16年1月
ウインターセミナー「医療・福祉におけるフルードパワーシステムの応用動向」	平成17年1月
ウインターセミナー「機械システムの安全性」	平成18年2月
ウインターセミナー「家庭の中のフルードパワー」	平成19年2月
ウインターセミナー「航空機とロケットへの応用」	平成20年2月
ウインターセミナー「海と船のフルードパワー」資料は『学会誌』Vol.39No.5	平成21年2月
ウインターセミナー「フルードパワー機器・システムの小型化」資料は『学会誌』Vol.39No.5	平成22年2月
ウインターセミナー「福祉・医療環境における空気圧応用の現状と問題」	平成23年2月
ウインターセミナー「圧縮空気エネルギーの有効利用技術」	平成24年2月
ウインターセミナー「アクアドライブシステム（新水駆動圧技術）の現状と将来」	平成25年2月
ウインターセミナー「大型機械と油圧技術」	平成26年2月
ウインターセミナー「大型機械・大型施設で活躍するフルードパワー」	平成27年2月
ウインターセミナー「フルードパワー技術を支える要素技術」	平成28年3月
ウインターセミナー「自動車の動力伝達機能を支える油圧技術」	平成29年2月
ウインターセミナー「フルードパワーに利用できるマイコン技術 ～機器の駆動に関わるマイコン技術～」	平成30年3月
ウインターセミナー「フルードパワーシステムと1DCAE」	2019年2月
ウインターセミナー「フルードパワーシステムにおける解析技術」	2021年3月
ウインターセミナー「機械学習の基礎とフルードパワーシステムへの応用」	2023年3月
〈教育講座〉	
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	平成元年8月
教育講座「現代制御理論講座」（大学上級コース）	平成元年10月
教育講座「マイコン制御講座」（大学上級コース）	平成2年8月
教育講座「トライボロジー講座」（大学上級コース）	平成3年8月
教育講座「油空圧における鋳造技術講座」	平成5年10月
教育講座「油空圧における最新の制御技術の理論と実際」	平成6年10月
教育講座「トライボロジー講座」	平成9年9月
教育講座「空気圧システム入門」	平成10年6月
教育講座「空気圧システム入門」	平成11年6月
教育講座「フルードパワーシステムへの最新制御手法の適用と コンピュータソフトウェアツールの体験実習」	平成12年8月
教育講座「トライボロジー講座」	平成14年9月
教育講座「空気圧システム入門」	平成15年5月
教育講座「空気圧システムの基礎」	平成15年5月
〈国際シンポジウム論文集〉	
第1回油空圧国際シンポジウム論文集	平成2年1月
第2回油空圧国際シンポジウム論文集	平成5年9月
第3回油空圧国際シンポジウム論文集	平成8年11月
第4回油空圧国際シンポジウム論文集	平成11年11月
第5回油空圧国際シンポジウム論文集	平成14年11月
第6回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（CD-ROM）	平成17年11月
第7回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	平成20年9月
第8回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	平成23年10月
第9回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（冊子，CD-ROM）	平成26年10月
第10回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（HP公開のみ）	平成29年10月
第11回JFPSフルードパワー国際シンポジウム論文集（HP公開のみ）	2021年10月

〈書籍〉

日本フルードパワーシステム学会創立30周年記念出版3冊セット（分冊頒布可）	平成15年4月
「油圧駆動の世界—油圧ならこうする—」	
「空気圧システム入門」	
「水圧駆動テキストブック」	
日本フルードパワーシステム学会創立40周年出版3冊セット（分冊頒布可）	平成23年4月
「油圧システムのモデリングと解析手法」	
「Webシミュレーション解説」	
「アクアドライブ技術の進展」	
新版「油空圧便覧」	平成元年2月
初歩と実用シリーズ「圧縮性流体の計測と制御—空気圧解析入門—」	平成22年7月
「油圧機関技術—伝承と応用—」	平成26年9月
初歩と実用シリーズ「機能性流体入門—基礎と応用—」	2021年7月
〈研究成果報告書〉	
フルードパワーのトライボロジー研究委員会研究成果報告書	平成19年6月
フルードパワーのトライボロジー研究委員会研究成果報告書II	平成22年5月
フルードパワーのトライボロジー研究委員会研究成果報告書III	平成25年5月
水圧駆動システム研究委員会成果報告書	平成16年6月
水圧駆動システムの有効利用に関する研究委員会	平成25年5月
空気圧システム省エネルギー研究委員会報告書	平成15年3月
空気圧機器の流量特性評価法に関する研究委員会成果報告書	平成15年9月
空気圧のシミュレーション研究委員会報告書	平成16年2月
空気圧システム及び機器の信頼性に関わる研究委員会成果報告書	平成19年3月
空気圧シリンダ系動特性研究委員会研究成果報告書	平成16年2月
油空圧駆動システムにおける制御手法の適用と評価に関する研究委員会報告書	平成14年2月
油空圧制御系の研究開発力推進に関する研究委員会報告書	平成24年11月
機能性流体の油空圧機器への応用に関する研究委員会研究成果報告書	平成14年3月
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	平成18年1月
機能性流体を活用した次世代型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	平成22年6月
機能性流体を核としたフルードパワーシステムの融合化に関する研究委員会研究成果報告書	平成24年9月
機能性流体との融合化によるフルードパワーシステムの新展開に関する研究委員会研究成果報告書	2022年4月
機能性流体テクノロジーの次世代FPSへの展開に関する研究委員会研究成果報告書	2022年5月
機能性流体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（電子版）	2022年9月

フルードパワーシステム 総目次 (第54巻)

	号	通し頁		号	通し頁
【挨拶】					
新年のご挨拶	…早川 恭弘	1 4	センサ技術を利用した故障予知と遠隔メンテナンス	…松山 俊明 …秋本 義和	4 160
年頭にあたって	…川上 幸男	1 5	オイル状態監視による建設機械の見守り	…後藤 淳	4 164
特集「フルードパワーとソフトロボティクス」			水グリコール系難燃性作動油の状態監視システムの開発について	…三好 真介	4 167
「フルードパワーとソフトロボティクス」発行にあたって	…谷口 浩成	1 6	ターボコンプレッサの稼働状態を見える化するリモートモニタリング	…摩嶋 完治	4 171
ソフトロボティクスにおけるフルードパワー	…鈴森 康一	1 7	「緑陰特集」		
ラバーアクチュエータを活用したソフトロボットハンド	…大野 信吾	1 12	2022年度学会誌のレビュー	…柳田 秀記	E1 E1
ソフトロボット技術を用いた蠕動運動機構の事業化	…梅田 清 …中村 太郎	1 16	2022年度の油圧分野の研究活動の動向	…一柳 隆義	E1 E3
減圧駆動式ソフトグリップの動作原理と応用例	…波多野 至	1 21	2022年度の空気圧分野の研究活動の動向	…齋藤 直樹	E1 E6
物体操作を学習するロボットアームの空気圧駆動可変剛性手首	…田中 一敏	1 25	2022年度の機能性流体分野の研究活動の動向	…眞田 一志	E1 E9
質量・体積可変な水駆動ソフトロボットのロコモーション	…田熊 隆史	1 28	2022年度の機能性流体分野の研究活動の動向	…金 俊完	E1 E53
ソフトロボットのアクチュエーションとセンシング（電界共役流体と光導波路の導入）	…竹村研治郎	1 32	小特集「日本フルードパワーシステム学会賞受賞者および研究委員会の紹介」	…柳田 秀記	E1 E12
外骨格を使用しない空圧式パワーアシストウェアとその周辺機器の開発	…佐々木大輔	1 35	伝熱と摩擦を伴う空気圧管内定常流に関する研究（モデル化と実験的検証）	…中野 和夫	E1 E13
特集「フルードパワーとハイブリッド」			2022年度技術開発賞受賞について	…佐々木勝美	E1 E18
「フルードパワーとハイブリッド」発行にあたって	…村岡 裕之	2 56	2022年度SMC高田賞受賞について	…土方 聖二	E1 E22
油圧ハイブリッド技術の最新動向	…田中 豊	2 57	2022年度SMC高田賞受賞について	…見上 慧	E1 E27
油圧ポンプ回転数制御システムへの単純適応制御の適用	…小川 恭右	2 62	2022年度学術貢献賞受賞について	…眞田 一志	E1 E32
ボンドグラフ法を用いた電空ハイブリッドアクチュエータのシステムモデル表現	…肥後 寛	2 66	2022年度技術功労賞受賞について	…五嶋 裕之	E1 E35
電空ハイブリッド超精密鉛直位置決め装置	…加藤 友規	2 71	2022年度油空圧機器技術振興財団論文顕彰について	…桜井 康雄	E1 E38
空圧・電動ファクトリー	…齊藤 悠	2 75	名誉員を拝命して	…早瀬 敏幸	E1 E42
空気と水で動かす空水圧ハイブリッドロボット	…玄 相昊	2 79	油圧機器のトライボロジーなど基盤技術に関する基盤研究委員会	…西海 孝夫	E1 E45
特集「医療福祉技術を支えるフルードパワー」			空気圧機器システム特性基盤研究委員会	…香川 利春	E1 E47
「医療福祉技術を支えるフルードパワー」発刊にあたって	…齋藤 直樹	3 102	機能性流体FPSのフロンティア展開に関する研究委員会	…中野 政身	E1 E48
補助人工心臓の設計のための数値流体解析	…矢野 哲也	3 103	深層学習を活用したフルードパワーシステムに関する研究委員会	…小林 亘	E1 E52
空気圧を利用した手術支援システム	…只野耕太郎 …川嶋 健嗣	3 109	特集「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」		
空気圧人工筋を用いた身体運動支援システム	…宮崎 哲郎	3 113	「ゴム人工筋を駆動する圧力源の新展開」発行にあたって	…藤田 壽憲	5 190
油圧を用いた短下肢装具の開発	…山本 澄子	3 117	空気圧駆動McKibben型人工筋肉を用いたアシストスーツとその性能の評価	…佐々木陽一	5 191
マイクロ流体システムを用いた細胞融合	…鳥取 直友 …山西 陽子	3 121	油圧駆動の超高出力ゴム人工筋	…大野 信吾	5 195
空気圧を利用したリハビリテーションデバイス	…高岩 昌弘	3 125	McKibben型人工筋の水圧駆動化に関する検討	…小林 亘	5 199
MR流体を用いた繊細ハプティックデバイスの開発と医療ロボットへの挑戦	…菊池 武士 …高野 哲仁 …池田 旭花	3 129	EHDポンプ駆動による人工筋気液相変化により駆動されるゴム人工筋アクチュエータ	…三井 和幸 …加藤 友規	5 202 5 207
特集「フルードパワーにおける品質向上技術の活用」			DMEの燃焼により駆動する人工筋肉アクチュエータ	…奥井 学 …澤橋龍之介 …中村 太郎	5 211
「フルードパワーにおける品質向上技術の活用」発刊にあたって	…北村 剛	4 148	水の電気分解／合成を利用したゴム人工筋アクチュエータ	…難波江浩之 …鈴森 康一	5 215
連成解析における遠心ファン翼形状最適化	…石澤 夏希	4 149	特集「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」		
電磁切換弁の状態検出	…永野 卓	4 153	「機能性流体フルードパワーシステムのフロンティア展開」発刊にあたって	…中野 政身	6 234
建設機械用油圧機器の状態監視実施例	…遠藤 寛和	4 156	交流圧力源を用いたERマイクロアクチュエータシステム	…吉田 和弘	6 236
			電界共役流体の流動によるチップ上での液滴の生成とソーティング	…竹村研治郎	6 240

EHDポンプを用いたロボット駆動機構の開発	三井 和幸	6	243	2022年度ウィンターセミナー「機械学習の基礎とフルードパワーシステムへの応用」	1	24
イオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収の高性能化	高奈 秀匡	6	249	<新企画>日本フルードパワーシステム学会キャリア支援セミナー開催のお知らせ	1	20
車両用ドライMR流体ブレーキの開発と超小型EVへの実装	中野 政身	6	254	理事会・委員会報告	1	46
MR流体ブレーキの装着型力覚提示装置への応用	澤橋龍之介 奥井 学 中村 太郎	6	259	共催・協賛行事のお知らせ	1	47
MR流体を活用した吸盤	塚越 秀行 中野 政身	6	264	2023年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	1	48
MCFを用いた磁場・電場同時印加による精密研磨の特性	西田 均	6	268	2023年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」	1	48
【会議報告】				2023年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」	1	48
日本機械学会2022年度年次大会におけるフルードパワー技術研究	脇元 修一	1	38	日本フルードパワーシステム学会論文集53巻(2022)抄録	1	49
山梨講演会2022におけるフルードパワー技術研究	吉田 和弘	2	83	日本フルードパワーシステム学会賛助会員一覧表	1	51
第23回流体計測シンポジウムにおけるフルードパワー関連技術の研究動向	宮崎 哲郎	3	133	次回予告	1	52
日本機械学会第21回機素潤滑設計部門講演会におけるフルードパワー関連技術の研究動向	谷口 浩成	4	174	2023年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	2	91
The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology - ICMDT 2023におけるフルードパワー関連技術の研究動向	竹村研治郎	5	219	2023年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」	2	94
ROBOMECH2023におけるフルードパワー関連技術の研究動向	塚越 秀行	6	273	2023年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」	2	94
【トピックス】				理事会・委員会報告	2	95
学生さんへ、先輩が語る—自分が感じたフルードパワーの魅力について—	横田 雅司	1	40	共催・協賛行事のお知らせ	2	96
学生さんへ、先輩が語る—今できることを精一杯やる—	畑中翔太郎	2	85	日本フルードパワーシステム学会英文論文の投稿規程改定のお知らせ	2	97
学生さんへ、先輩が語る—学生時代に大切にしていたこと、開発職の魅力について—	松内 泰樹	3	134	会員移動	2	97
学生さんへ、先輩が語る—油圧機器の設計・開発に携わる社会人の日常—	中山 大輔	4	176	次回予告	2	98
学生さんへ、先輩が語る—高専教員になるという働き方—	門脇 惇	5	221	2023年春季フルードパワーシステム講演会のお知らせ	3	139
Youは日本をどう思う?第21回:13年目での日本生活	李 晶	2	88	2023年春季フルードパワーシステム講演会併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」	3	139
Youは日本をどう思う?第22回:日本生活10年目の韓国人、仕事と生活で思うこと	姜 玟佑	6	275	理事会・委員会報告	3	140
【研究室紹介】				共催・協賛行事のお知らせ	3	141
徳島大学 高岩研究室	高岩 昌弘	1	43	会員移動	3	142
広島市立大学 小岩研究室	小岩 貴弘	6	277	2023年春季フルードパワーシステム講演会併設企画「製品・技術紹介セッション」	3	142
【企画行事】				日本フルードパワーシステム学会賛助会員一覧表	3	143
2023年度企画行事紹介	桜井 康雄 小林 亘	2	90	次回予告	3	144
2022年度オータムセミナー開催報告「フルードパワーシステムにおけるMBD活用」	名倉 忍	2	92	理事会・委員会報告	4	181
2022年秋季フルードパワーシステム講演会開催報告	竹村研治郎	3	137	2022年度学会賞表彰	4	182
2022年度ウィンターセミナー開催報告「機械学習の基礎とフルードパワーシステムへの応用」	小林 亘	4	179	公益財団法人油空圧機器技術振興財団2023年度研究助成募集のお知らせ	4	182
2023年春季講演会併設セミナー「フルードパワーとハイブリッド」	落合 正巳	5	224	会員移動	4	183
2023年春季フルードパワーシステム講演会開催報告	趙 菲菲	6	280	学会創立50周年記念パーティーと特別記念講演のご案内	4	183
【会告】				共催・協賛行事のお知らせ	4	184
会員移動		1	24	2023年度(第42期)通常総会終了	4	185
				次回予告	4	186
				日本フルードパワーシステム学会2023年度受賞候補者募集のお知らせ	5	214
				会員移動	5	214
				公益財団法人油空圧機器技術振興財団2023年度研究助成募集のお知らせ	5	225
				日本フルードパワーシステム学会2023年度フェロー認定者推薦のお願い	5	225
				理事会・委員会報告	5	226
				共催・協賛行事のお知らせ	5	227
				2023年度オータムセミナー「環境負荷の低減を進める空気圧システム」	5	228

日本フルードパワーシステム学会・ 日本機械学会共催2023年秋季フ ルードパワーシステム講演会	5	228
一般社団法人日本フルードパワーシ ステム学会賛助会員一覧表	5	229
次回予告	5	230
日本フルードパワーシステム学会・ 日本機械学会共催2023年度秋季フ ルードパワーシステム講演会	6	272
日本フルードパワーシステム学会 2023年度フェロー認定者推薦のお 願い	6	272
日本フルードパワーシステム学会 2023年度受賞候補者募集のお知らせ	6	272
理事会・委員会報告	6	283
キャリア支援セミナー開催のお知らせ	6	279
2024～2025年度役員（理事・監事） 候補者推薦のお願い	6	282
共催・協賛行事のお知らせ	6	284
学会創立50周年記念パーティーと特 別記念講演終了報告	6	285
会員移動	6	285
資料一覧表	6	286
フルードパワーシステム総目次（第 54巻）	6	291
次回予告	6	294

編集室

次号予告

—特集「フルードパワーを活用した超高压技術」—

【挨拶】 新年のご挨拶

新年のご挨拶

早川 恭弘

田中 豊

【巻頭言】「フルードパワーを活用した超高压技術」発行に当たって

佐藤 恭一

【解説】

超高压インパルス耐圧試験の高压技術とサーボ制御

加藤 祐輔

200MPaを超えるディーゼルエンジン用燃料噴射技術

芹澤 晃

高压容器用サイクル試験装置と破裂試験装置

水上 峻一

地震大国日本で活躍する建築構造実験用超高压油圧試験装置

今井 亮太

フルードパワーシステム評価のための高压試験

木附 敬雄

高水压技術を生かした「チューブハイドロフォーミング」

岩村 忠儀

深海への挑戦：高压実験水槽の概要と成果，現況

高橋 和行，

大嶋 真司

超高压プレスを利用したベルト型高温高压装置と物性・材料研究（10GPa・2000℃など）

宮川 仁

【トピックス】

学生さんへ，先輩が語る一開発職の心構えー

浅野広太郎

ラクイラ（イタリア）滞在記

伊藤 和寿

【企画行事】

キャリア支援セミナー記事

田中 豊

2023年度「フルードパワーシステム」編集委員

委員長 柳 田 秀 記（豊橋技術科学大学）

委 員 中 野 政 身（株式会社SmartTECH Lab.）

副委員長 山 田 宏 尚（岐阜大学）

中 山 晃（日立建機株式会社）

委 員 飯 尾 昭一郎（信州大学）

藤 田 壽 憲（東京電機大学）

飯 田 武 郎（株式会社小松製作所）

丸 田 和 弘（株式会社小松製作所）

加 藤 友 規（福岡工業大学）

水 上 和 哉（CKD株式会社）

北 村 剛（油研工業株式会社）

村 岡 裕 之（株式会社コガネイ）

窪 田 友 夫（カヤバ株式会社）

山 本 久 嗣（富山高等専門学校）

五 嶋 裕 之（株式会社工苑）

吉 見 浩 司（川崎重工業株式会社）

齋 藤 直 樹（秋田県立大学）

吉 満 俊 拓（神奈川工科大学）

佐々木 大 輔（香川大学）

担当理事 伊 藤 隆（カヤバ株式会社）

佐 藤 恭 一（横浜国立大学）

学会事務局 成 田 晋

妹 尾 満（SMC株式会社）

編集事務局 竹 内 留 美（勝美印刷株式会社）

谷 口 浩 成（大阪工業大学）

（あいうえお 順）

会 告

複写される方へ

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので，本誌に掲載された著作物を複写したい方は，同協会より許諾を受けて複写してください。ただし（公社）日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。したがって，社外頒布用の複写は許諾が必要です。

権利委託先：（一社）学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

TEL：03-3475-5618 FAX：03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp

なお，著作物の転載・翻訳のような，複写以外の許諾は，学術著作権協会では扱っていませんので，直接本会へご連絡ください。

〒105-0011 東京都港区芝公園三丁目五-21 機械振興会館別館101 電話(03)3433-8441 FAX(03)3433-8442
編集兼発行人 一般社団法人日本フルードパワーシステム学会 振替口座 東京00110-31233690

東京都文京区白山1-3-7 アクア白山ビル5階
印刷所 勝美印刷株式会社