

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12608
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01293
研究課題名（和文）電気駆動型ハイパワーソフトアクチュエータの創成

研究課題名（英文）Electrically Driven High Power Soft Actuators

研究代表者

前田 真吾（Maeda, Shingo）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：40424808

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大きな外部装置を必要とせず、完全に電気駆動型で大変形し、かつ大きな発生力を有するパワー型のソフトアクチュエータを実現することを自指した。そこで研究代表者は ElectroHydroDynamics (EHD) に着目し、EHD アクチュエータの長所と誘電液体を活用した静電駆動型アクチュエータの長所を併せ持った新しいメカニズムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの EHD ポンプやアクチュエータとは異なり、対向型電極にすることで極めて頑健でハイパワーなポンプを実現するに至った。従来の EHD では一度でも放電が生じるとデバイスが駆動しなかったが、本研究で提案する対向型電極では 50 回放電しても、デバイスが駆動することを実現した。頑健なデバイスだけでなく密度当たりの出力も大きく実用的であることも分かった。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to realize a power-type soft actuator that is completely electrically driven, has large deformation, and has a large power without the need for large external devices. The principal investigator focused on ElectroHydroDynamics (EHD) and proposed a new mechanism that combines the advantages of an EHD actuator with those of an electrostatically driven actuator utilizing a dielectric liquid.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：EHD ソフトアクチュエータ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ウェアラブルデバイスや人間共存型機械やロボットの次世代技術として、やわらかさを内包するソフトアクチュエータに関する研究が注目を集めている。一般に、流体圧駆動型ソフトアクチュエータにはポンプなどの大型装置が必須となる。ポンプはデバイス構成を肥大化させ、そして駆動音が大きい。さらにそのようなデバイス構成によって、速度と効率が制限されることが知られている。熱応答性ポリマで構成される人工筋肉は大きな発生力を有するが、応答速度が極めて低く効率が極めて低い。静電駆動する誘電エラストマーアクチュエータ(Dielectric Elastomer Actuator: DEA)は、高速応答性と高いエネルギー変換効率を有しているが、DEAは高電圧をエラストマに印加するため、絶縁破壊を生じることやエラストマの劣化が課題となっている。また、DEAが大変形するためには、アクチュエーション時に予歪をエラストマに加える事が必須となる。そこで研究代表者は ElectroHydroDynamics(EHD)に着目した[1]。EHDは誘電溶液内で電極反応が誘起され、電界によって加速されたイオン種と溶液分子との衝突により流れが生じる現象である。研究代表者は EHD を活用した流体圧で駆動する屈曲型ソフトアクチュエータを開発することに成功した[2]。

〔文献〕

1. A. Castellanos ed., ElectroHydroDynamics, Springer-Verlag Wien GmbH, 1998.
2. V. Caccuciolo et al., Stretchable pumps for soft machines, Nature 572, 516-519, 2019.

2. 研究の目的

研究代表者らの EHD で駆動するソフトアクチュエータによって、外部の大型ポンプを必要とせず、ポンプを内蔵した軽量の電気駆動型のソフトアクチュエータを実現することが可能となった。一方で、EHD で駆動するソフトアクチュエータのパワーが小さく、実用的であるとは言い難い。本研究ではこれまでの研究を継続発展させつつ、大変形可能なソフトアクチュエータへと展開する。そこで、研究代表者は EHD アクチュエータの長所と誘電液体を活用した静電駆動型アクチュエータの長所を併せ持った仕組みを提案する。

3. 研究の方法

本研究では、静電駆動部分と EHD ポンプについてチューブを介して直列に接続する。そこで静電駆動については Keplinger らによって開発された HEASEL を参考にして独自の駆動系を考案した(図1)。EHD の駆動にはフッ素系液体を利用した。この静電駆動部分の特性を図2に示す。EHD ポンプは銅薄膜をレーザーカッターによって櫛型に加工して作製した(図2)。

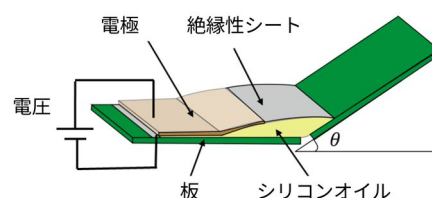


図1. 静電駆動部分

4. 研究成果

研究の方法で示した静電駆動の特性を図3に示す。静電駆動部分にはシリコンオイル、EHD ポンプ用の作動溶液としてフッ素系溶媒(NOVEC7300)を利用した。シリコンオイルとフッ素系溶媒がそれぞれ相分離するため、混合せず提案したデバイスが駆動することを実験で実証した。さらに、溶媒を統一することができれば極めてシンプルなシステムになるため、本研究では静電駆動部分に利用したシリコンオイルでEHDが発現するか検証した。結果として13kV以上でそれらを統合したデバイスが駆動させることに成功した。

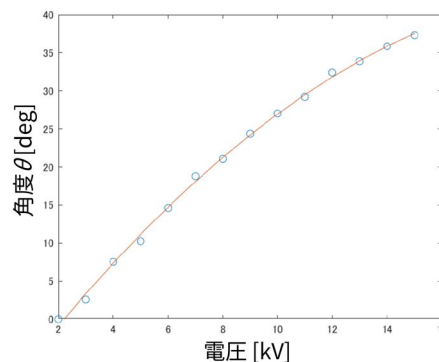
一方でこれらのデバイスを統合するにあたり、以下の2点を新たな課題として見出した。

- (1) 流量のセンシング
 - (2) EHD 作動時の絶縁破壊に対する頑健性
- これら2点は本研究課題のデバイスを制御すること、安定して動作させるために、必須事項として検討した。

(1)について新たに流量センサをつけることなく、電流値をモニタリングするのみで実現する手法を考案した。そこで電極間の拡散電流 I_{dif} と流量 Q を式(1)



図2. EHD ポンプ[1]



で関係づけられるモニタする手法を確立した。ただし、 I_{dri} はドリフト電流である。

$$I = I_{dif} + I_{dri} = \alpha Q^{1/3} + I_{dri} \dots (1)$$

これにより、外部の装置をつけずに EHD ポンプの流量を知る事ができ、ポンプの制御に応用できた。

(2)について、対向電極 EHD の電極を設計することで電極間の絶縁破壊後も電極間の炭化が形成されずに EHD が機能することを見出した。図 5 に示す計測装置を構築した。実験装置には、シリンジ、バルブ、流量センサ、圧力センサ、そして対向電極 EHD ポンプが取り付けられている。シリンジは、チューブ内に存在するバブルを取り除く為に取り付けた。バルブは圧力と流量の測定を切り替えるために設置した。10 ペアの EHD ポンプを使用し、対向電極 EHD ポンプの耐久性を調査した。EHD ポンプを 50 回放電させたときの電圧と圧力を測定した。結果として、極めて安定してハイパワーを生成することが可能となった。従来の楕型電極の形状の場合は 1 回放電させると、2 回目以降は電圧を印加できなくなり使用できなくなったことに対し、対向電極では 50 回放電させても導通せずに使用できた。対向電極であると絶縁性の流体を挟むので導通が防げるためであると考えられる。EHD により生成した圧力は放電させた回数を増やすほど低下した。次に、電極のペア数による圧力と流量の評価を行った。電圧が上がるにつれて流量が上昇したが、ペア数による差がないとわかった。ペア数が多いほど圧力の値が高いとわかった。よって、流量ではペア数の影響は受けずに、圧力ではペア数が多いほど高くなるとわかった。最大圧力は、100 ペア、6 kV で 34Pa であったのでパウチアクチュエータ(図 6)を動かすための必要な圧力を超えた。最大で約 30%程度の収縮が生じることが分かった。

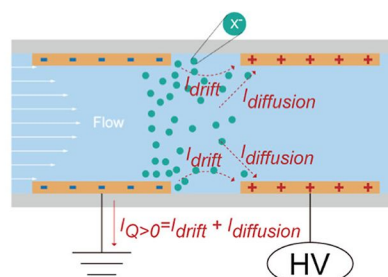


図 4. 流量のセンシング

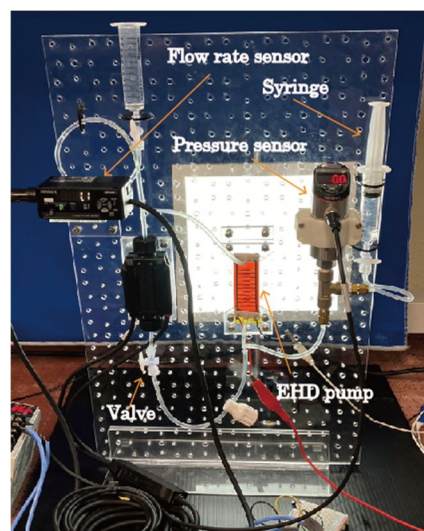


図 5. 計測システム

〔雑誌論文〕

1. Yu Kuwajima, Yuya Yamaguchi, Yuhei Yamada, Takafumi Morita, Ardi Wiranata, Ayato Minaminosono, Naoki Hosoya, Yasuaki Kakehi, Shingo Maeda, Pocketable and smart EHD pump for clothes, ACS Applied Materials & Interfaces, 16, 1833-1891, 2024.
2. Ziyuan Jiang, Takafumi Morita, Kanon Aoyama, Yu Kuwajima, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, Yasuaki Kakehi, A Method for Controlling the Continuous Transparency of Three-dimensional Objects Utilizing Mechanical Emulsification, In Proceedings of the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '23), 51, 1-6, 2023.

〔招待講演〕

1. 前田真吾, ソフトマテリアルを活用したソフトマシン, 日本化学会秋季事業 第 13 回 CSJ 化学フェスタ 2023, タワーホール船堀, 2023 年 10 月 18 日
2. Shingo Maeda, Smart materials and soft robots, Sakura Science, Chuo University, 2023 年 2 月 4 日
3. 前田真吾, ソフトマテリアルを活用したソフトロボット, 21-6 ポリマーフロンティア 21, 2022 年 3 月 11 日 (オンライン)
4. Shingo Maeda, Soft Robotics, IEEE RAS Sri Lanka Section Chapter, 1st December, 2021. (オンライン)
5. Shingo Maeda, Autonomous chemical machines, International Conference on Active Materials and Soft Mechatronics (AMSM) 2021
6. Shingo Maeda, Soft and wet robotics, JST オンライン大学訪問イベント, 23rd October, 2021. (オンライン)
7. 前田真吾, 自律性を有するソフトマテリアルとやわらかい機械, 日本機械学会イブニングセ

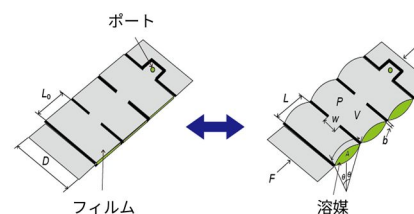


図 6. パウチアクチュエータ

ミナー, オンライン, 2021年9月10日

8. Shingo Maeda, Chemical and soft machines, 2021 Japan-America Frontiers of Engineering Symposium (JAFOE), 24th June, 2021. (オンライン)

[学会発表]

1. 瀬川空矢, 桑島悠, 毛澤兵, 細矢直基, 前田真吾, EHDポンプを用いたリニアパウチアクチュエータ, ROBOMECH2023, 2023年6月30日(名古屋大学).
2. 磐崎悠仁, 山田雄平, 瀬川空矢, 桑島悠, 細矢直基, 前田真吾, くし型 EHD ポンプを用いたリニアパウチアクチュエータ, ROBOMECH2023, 2023年6月30日(名古屋大学).
3. Y. Kuwajima, Y. Yamada, N. Hosoya, S. Maeda, Active suction cup with detecting softness, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022).
4. Takafumi Morita, Yu Kuwajima, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda, Yasuaki Kakehi, Demonstrating HydroMod: Constructive Modules for Prototyping Hydraulic Physical Interfaces, In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22).
5. Takafumi Morita, Yu Kuwajima, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda, Yasuaki Kakehi, HydroMod: Constructive Modules for Prototyping Hydraulic Physical Interfaces, In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '22).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ku wajima Yu, Yamaguchi Yuya, Yamada Yuhei, Morita Takafumi, Wiranata Ardi, Minaminosono Ayato, Hosoya Naoki, Kakehi Yasuaki, Maeda Shingo	4. 巻 16
2. 論文標題 Pocketable and Smart Electrohydrodynamic Pump for Clothes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 1883 ~ 1891
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsami.3c15274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Jiang Ziyuan, Morita Takafumi, Aoyama Kanon, Ku wajima Yu, Hosoya Naoki, Maeda Shingo, Kakehi Yasuaki	4. 巻 51
2. 論文標題 A Method for Controlling the Continuous Transparency of Three-dimensional Objects Utilizing Mechanical Emulsification	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 In Proceedings of the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI ' 23)	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3569009.3573122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 7件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 前田真吾
2. 発表標題 ソフトマテリアルを活用したソフトマシン
3. 学会等名 日本化学会秋季事業 第13回 CSJ化学フェスタ2023（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shingo Maeda
2. 発表標題 Smart materials and soft robots
3. 学会等名 Sakura Science（招待講演）
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Kuwajima, Y. Yamada, N. Hosoya, S. Maeda
2 . 発表標題 Active suction cup with detecting softness
3 . 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Ziyuan Jiang, Takafumi Morita, Kanon Aoyama, Yu Kuwajima, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, and Yasuaki Kakehi
2 . 発表標題 A Method for Controlling the Continuous Transparency of Three-dimensional Objects Utilizing Mechanical Emulsification
3 . 学会等名 In Proceedings of the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '23) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Takafumi Morita, Yu Kuwajima, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda, Yasuaki Kakehi
2 . 発表標題 Demonstrating HydroMod: Constructive Modules for Prototyping Hydraulic Physical Interfaces,
3 . 学会等名 In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Takafumi Morita, Yu Kuwajima, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda, Yasuaki Kakehi
2 . 発表標題 HydroMod: Constructive Modules for Prototyping Hydraulic Physical Interfaces,
3 . 学会等名 In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '22) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 前田真吾
2. 発表標題 ソフトマテリアルを活用したソフトロボット
3. 学会等名 21-6 ポリマーフロンティア21 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Maeda
2. 発表標題 Soft Robotics
3. 学会等名 IEEE RAS Sri Lanka Section Chapter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Maeda
2. 発表標題 Autonomous chemical machines
3. 学会等名 International Conference on Active Materials and Soft Mechatronics(AMSM) 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Maeda
2. 発表標題 Soft and wet robotics
3. 学会等名 JSTオンライン大学訪問イベント (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Maeda
2. 発表標題 自律性を有するソフトマテリアルとやわらかい機械
3. 学会等名 日本機械学会イブニングセミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Maeda
2. 発表標題 Chemical and soft machines
3. 学会等名 2021 Japan-America Frontiers of Engineering Symposium (JAF0E) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	細矢 直基 (Hosoya Naoki) (40344957)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	
研究分担者	重宗 宏毅 (Shigemune Hiroki) (40822466)	芝浦工業大学・工学部・准教授 (32619)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
インドネシア	Gadjah Mada University			