

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21686017

研究課題名（和文） 電界共役流体の流動メカニズムの解明とこれを用いたマイクロ液圧源の最適設計法

研究課題名（英文） Mechanism of Electro-conjugate Fluid Flow and Design of Micro Fluid Power Source using Electro-conjugate Fluid

研究代表者

竹村 研治郎（TAKEMURA KENJIRO）

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：90348821

研究成果の概要（和文）：電界共役流体は電圧の印加によって流動する機能性流体である。この流動のメカニズムを明らかにするために、電界下において誘電体にはたらく電気的な力をニュートン流体の基礎方程式に導入した流動モデルを提案した。本モデルを用いた数値計算結果は、流動の可視化実験によって得られた流速と比較して、流速のオーダーおよび流速分布が定量的に一致した。また、流動モデルに基づいて設計した電極対を液圧源としたロボットハンドを開発し、電界共役流体の液圧源としての可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：Electro-conjugate fluid is a functional fluid, which generates a powerful flow when subjected to high voltage. In order to clarify its flow mechanism, this study introduces an electric force induced to a dielectric under electric field to Newtonian fluid equation of motion. The calculated flow velocity distribution using this model quantitatively corresponds to that obtained by an experiment. In addition, an electrode pair designed using the knowledge based on the model is introduced to develop a robot hand, and the hand proved the potential of electro-conjugate fluid as a micro fluid pressure source.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	14,800,000	4,440,000	19,240,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	21,200,000	6,360,000	27,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：電気流体力学現象、マイクロ液圧源、機能性流体

1. 研究開始当初の背景

電界の印加によって流動を生じる現象は、一般に電気流体力学（Electrohydrodynamics, EHD）現象と呼ばれている。EHD現象に関する研究は古くから行われており、そのメカニズムはイオンドラッグ、伝動流動、誘電泳動に大別される。イオンドラッグでは、液中に挿入されたエミッタ側から放出される電荷

が、同じく液中のコレクタ側に引き寄せられることにより全体流動が生じる（O.M. Stetzer, Ion-Drage Pressure Generation, J. Applied Physics, 30, pp. 984-994, 1959）。伝動流動は、不均一電界下において、電気分解により生じた anion と cation に加わる力の不均衡により全体流動が生じる現象である（L. Onsager, Deviations from Ohm's Law in Weak Electrolytes, J.

Chemical Physics, 2, p. 599, 1934). また, 誘電泳動は, 液体の自由表面などでの誘電率の違いに起因する表面電荷が, 移動電界に引きずられる流動である (J.R. Melcher, Travelling-Wave Induced Electroconvection, Physics of Fluids, 9(8), pp. 1548-1555, 1966). しかし, 申請者のこれまでの調査・実験によると, 電界共役流体に生じる流動は上記いずれの現象でも説明できず, より強力な流動を生じる新たなメカニズムに依るものと考えられる.

一方, 電界共役流体はアクチュエータなどの液圧源として有効な出力を取り出せることから, 応用研究は盛んに行われている. 研究代表者らが世界に先駆けて取り組む ECF マイクロモータ, ECF マイクロ人工筋アクチュエータ, ECF 液体レートジャイロなど (文献は業績欄を参照) をはじめ, ECF 強制液冷システム (W-S Seo et al., A high performance planar pump using electro-conjugate fluid with improved electrode patterns, Sensors & Actuators A, 134, pp. 606-614, 2007) や ECF リニアアクチュエータ (桜井ら, 管路型 ECF ポンプを用いたリニアアクチュエータシステムの試作, 平成 20 年度春季フルードパワーシステム講演会, pp.26-28, 2008.) など, 特に国内において研究が広がりを見せている.

以上のように, 電界共役流体の応用研究は活発化しているものの, 流動の発生メカニズムに関する研究は行われていないのが現状である. このため, ECF ジェットを発生させるのに最適な電極形状についても試行錯誤的な設計にとどまっている.

2. 研究の目的

上記のような背景から, 本研究は電界共役流体の流動メカニズムを明らかにし, 理論体系を確立することを目的とした.

はじめに, 電界下において誘電体にはたらく電気的な力に基づく電界共役流体の流動理論を提案する. つぎに, 数値計算によって求められる電界分布と上記理論を用いて, 電界共役流体に発生する流動の基礎方程式を構築し, 数値計算によって流動の様子を明らかにする. また, 数値計算モデルと同様の電極を用いた流動実験装置を製作し, 実際の流れの様子を可視化することによって空間的な流速分布を明らかにし, 計算結果と比較して提案した理論モデルの妥当性を検証する. また, 提案したモデルにより得られた知見から電極対を設計し, 応用例に適用する.

3. 研究の方法

(1) 電界下において誘電体にはたらく電気的な力に基づく電界共役流体の流動モデルの提案

電界共役流体は直流高電圧の印加によっ

て活発なジェット流を発生する機能性流体であり, 研究代表者の経験によると, 勾配変化が急峻な電界において活発な流動が得られている. このため, 電界下で空間に作用する電気的な力に着目し, 電界共役流体に生じる流動を理論的に解明する. 電気的な力は, 電界方向に空間を圧縮し, これと直交する方向に膨張させるよう作用する. すなわち, この力の分布が不均一で方向性を持つような電界では空間全体にある一方向の力が作用するはずである. これは, 電界共役流体が流動を発生する経験的な電極形状と合致している. このため, ニュートン流体の基礎方程式に対して, 電気的な力による項を追加し, 電界共役流体の基礎方程式を構成した.

構築した電界共役流体の基礎方程式を用いた数値解析を行った. 本モデルは, 電界分布の算出, 得られた電界分布に基づく電気的な力の算出, および電界共役流体の基礎方程式の解析, の3つの部分に大別される.

(2) 流動の可視化実験

提案した電界共役流体の流動モデルの妥当性を検証するには, 実際の流動との比較が不可欠である. このため, 適当な電極対を用いて電界共役流体に生じる流動を可視化した. 装置製作上の難易度を考慮して, このときの電極は mm オーダーのものとし, 提案する流動モデルの妥当性の確認を重視した.

流動の可視化画像を基に, PIV (粒子画像流速測定法) ソフトを用いて電極周辺での流速分布を明らかにした. また, 得られた流速分布と提案した流動モデルで得られた流速分布を比較し, モデルの妥当性を検証した.

(3) 応用例への適用

流動理論に基づき, 強い流動を発生する電極形状を提案し, これを液圧源として利用した応用例を開発し, 電界共役流体のパワー源としての可能性を示した.

4. 研究成果

(1) 電界下において誘電体にはたらく電気的な力に基づく電界共役流体の流動モデル

先述のように, 電界下に置いて誘電体にはたらく電気的な力をニュートン流体の基礎方程式に導入し, 電界共役流体の流動モデルを提案した. モデルは以下の式で表される.

$$d_m \left\{ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right\} = d_m \mathbf{g} - \nabla p \mathbf{I} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \varepsilon (\nabla \cdot \mathbf{E}) \mathbf{E} - \frac{E^2}{2} \nabla \varepsilon + \nabla \left(\frac{E^2}{2} d_m \frac{\partial \varepsilon}{\partial d_m} \right)$$

ただし, d_m : 質量密度, \mathbf{V} : 速度ベクトル, \mathbf{g} :

重力加速度, P : 圧力, μ : 粘性係数, ε : 誘電率, E : 電界である. 式の 1 行目に示されているのがニュートン流体の基礎方程式であり, 2 行目に示した 3 項が Korteweg-Helmholtz の式によって求められる電界下で誘電体にはたらく電気的な体積力である.

本モデルを用いて, 図 1 に示す電極形状に対して流速分布を数値解析した結果を図 2 に示す. なお, 液体の物性値は新技術マネジメント社製の電界共役流体である FF-1EHA2 のそれを適用し, 印加電圧 1332 V において計算を行った. 図 2 より, GND 電極の角において強い流動が発生し, +電極の間で全体流動と反対に向かう逆流が生じている様子が明らかとなった.

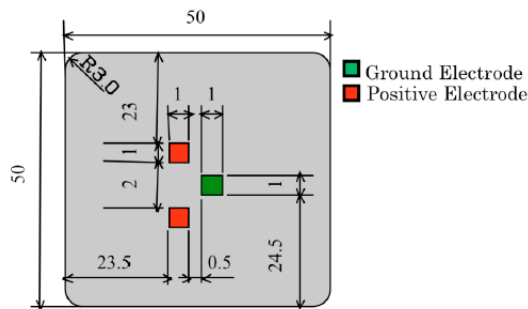


図 1 電極形状

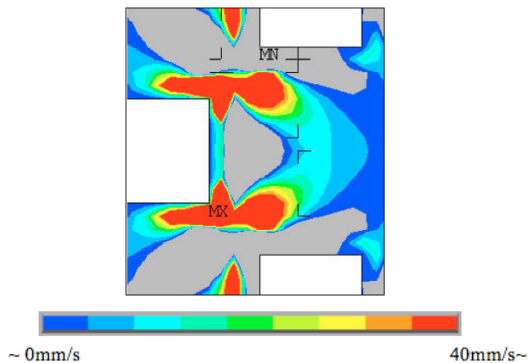


図 2 流速分布の解析結果

(2) 流動の可視化実験

図 1 に示した電極形状を実際に製作し, 高速度カメラを用いて流動の様子を撮影した. なお, 電界共役流体 (FF-1EHA2) は無色透明の液体であるため, 可視化に際して平均粒径 $8 \mu\text{m}$ の可視化粒子を混入し, フレームレート 1000 fps で撮影した. 印加電圧は (1) の数値計算と同様 1332 V である.

撮影した映像を用いて PIV (粒子画像流速測定法) 解析した結果を図 3 に示す. 図 3 より, 可視化実験においても GND 電極の角において強い流動が発生し, +電極の間で全体流動と反対に向かう逆流が生じている様子が明らかとなった. また, 図 2 と図 3 を比較

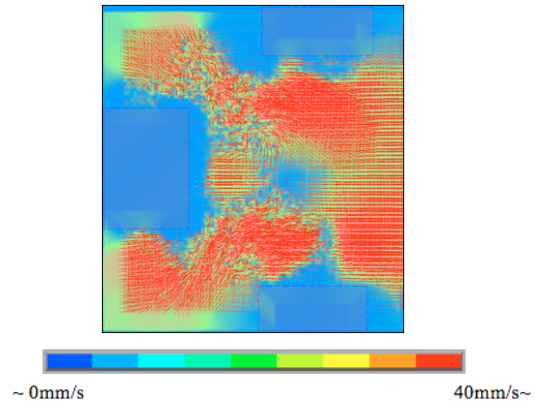


図 3 流速分布の計測結果

すると, 流速分布および流速のオーダーともによく一致していることがわかる. このため, 少なくとも FF-1EHA2 に関して, 提案した流動モデルが有効であることが示された.

(3) 応用例への適用

流動モデルの数値解析および流動の可視化実験の結果から, 電極角部において活発な流動が生じていることが明らかとなった. この知見に基づき, 図 4 に示す針-リング電極対を用いて電界共役流体の液圧源としての性能を実験的に評価した.

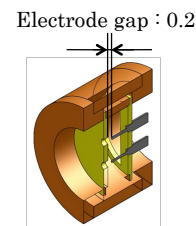


図 4 針-リング電極対

その結果, 電極対を直列に配置すると圧力が, 並列に配置すると流量が増加することが明らかとなった. 例えば, 電極対単体では 30kPa 程度の圧力を発生可能であるため, これを 10 個直列に配置すると, 0.3 MPa 程度の圧力が得られる. これは空気圧機器で用いられる圧力とほぼ等しいが, 圧力源としての電極対の寸法は cm オーダー以下であるため, 電界共役流体のマイクロ液圧源としての優れた特性がうかがえる.

図 4 の電極対を用いた応用例としてマイクロフレキシブルハンドを図 5 に示す. 各指の根本に電極対が配置されており, 掌部のタンクから指に向かって流動を発生するよう構成されている. 各指は繊維強化されたシリコーンゴムチューブであり, 流動に応じて内圧が増加すると湾曲するアクチュエータとなっている. すなわち, 本ハンドは液圧駆動でありながら, タンク, ポンプ, アクチュエー

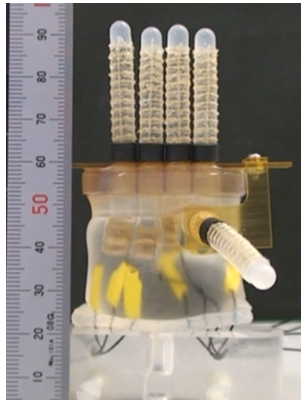


図5 フレキシブルロボットハンド

タがすべて一体化されたシステムである。図6に、駆動の様子を示す。各指は独立に駆動可能であるにも関わらず、ハンド全体の質量は50gである。

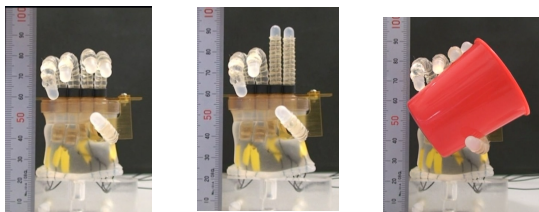


図6 ロボットハンドの駆動の様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

1. Akihiro Yamaguchi, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, A Robot Hand Using Electro-conjugate Fluid: Grasping experiment with balloon actuators inducing a palm motion of robot hand, *Sensors & Actuators A*, 174, 181-188, 2012. 査読あり
2. K. Mori, H. Yamamoto, K. Takemura, S. Yokota, K. Edamura, Dominant Factors Inducing Electro-conjugate Fluid Flow, *Sensors & Actuators A*, 167, 84-90, 2011. 査読あり
3. 山口彰浩, 竹村研治郎, 横田眞一, 枝村一弥, 電界共役流体を用いたポンプ・タンク一体型液圧駆動ロボットフィンガ, 日本機械学会論文集 (C 編), 76, 772, 507-513, 2010. 査読あり
4. Hideki Yamamoto, Kento Mori, Kenjiro Takemura, Leslie Yeo, James Friend, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Numerical Modeling of Electro-Conjugate Fluid Flows, *Sensors & Actuators A*, 161,

152-157, 2010. 査読あり

[学会発表] (計 22 件)

1. Akihiro Yamaguchi, A Robot Hand Using Electro-conjugate Fluid, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011.5.12, Shanghai.
2. Kento Mori, Theoretical Modeling and Corroborative Experiments for Electro-conjugate Fluid Flow, XIX International Conference on Electrical Machines, 2010.9.7, Rome.

[その他]

ホームページ等

<http://www.takemura.mech.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹村 研治郎 (TAKEMURA KENJIRO)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：90348821

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし