

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14075

研究課題名（和文）電気流体力学コンダクションポンピングのスケール効果に関する研究

研究課題名（英文）Scale effects on electrohydrodynamic conduction pumping

研究代表者

西川原 理仁（Nishikawara, Masahito）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：50757367

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、機械的可動部のない電気流体力学（EHD）コンダクションポンプにおけるスケール効果を明らかにすることを目的とし、マイクロメートルスケールにおけるポンプ特性やヘテロチャージ層形状について実験、シミュレーションの両面より調査した。その結果、逆極性の電極近傍に形成される解離イオンで構成されるヘテロチャージ層はスケールが小さくなるにつれて相対的に大きくなることが分かった。スケールが小さくなると両ヘテロチャージ層がオーバーラップし、クーロン力が打ち消しあうことが分かった。さらに、スケールが小さくなると正負のヘテロチャージ層の非対称性が失われることが初めて明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、数十マイクロメートル以下のスケールにおいては従来のように電極を非対称性に設計しても流動の源である正味のクーロン力は流れ方向に発生しにくくなることが分かった。すなわち小さなスケールではそのような現象を考慮した設計が必要であるということが本研究で分かった重要な成果である。EHDポンプの最大印加電圧は液体の絶縁破壊電圧で決まり、絶縁破壊電界（印加電圧/電極間距離）はおおよそ10 kV/mm以下である。マイクロEHDポンプでは電極間距離が短いので印加電圧は数～数百Vまで低くすることができ運用がより容易になり応用の幅が広がると考えられる。本研究ではその設計における基礎的な知見を獲得した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate scale effects on electrohydrodynamic (EHD) conduction pumps which operate without mechanical moving parts. Pump characteristics and heterocharge layer shapes at the micrometer scale were investigated both experimentally and numerically. It was found that the heterocharge layer, which consists of dissociated ions formed near the electrode of opposite polarity, becomes relatively larger as the scale decreases. It was found that as the scale decreases, the two heterocharge layers overlap and the Coulomb forces cancel each other out. Furthermore, it was found for the first time that the asymmetry of the positive and negative heterocharge layers is lost as the scale decreases.

研究分野：エネルギー熱流体工学

キーワード：電気流体力学 絶縁性液体 ポンプ 機能性流体 高電圧工学 解離電荷

1. 研究開始当初の背景

絶縁性の液体に高電界を印加すると液体中の電荷にクーロン力が作用して流動が起きる。これを利用したポンプを電気流体力学(EHD)ポンプという。EHDポンプは液体中の電荷の生成方法の違いにより、2つのタイプのポンプ、イオンドラッグポンプとコンダクションポンプが存在する。平行平板間などの平等電界における絶縁性液体の基本的な電圧-電流特性は、図1のようなになる。領域A、Bは低電界電気伝導と呼ばれ、不純物や解離反応によって発生した解離電荷によって電気が流れる。領域Cは高電界電気伝導と呼ばれ、注入電荷やオンサガー効果による解離電荷の増加によって電流が急増する。領域Cでの注入電荷を利用したポンプはイオンドラッグポンプであり、領域A、Bはコンダクションポンプに対応するが、領域Aの電圧電流特性が線形関係になるオーム領域と、領域Bの電流が一定値になる飽和領域とを区別してコンダクションポンプの原理はこれまでに説明されていない。電極が小さなスケールになると、解離電荷が再結合するまでの電荷の緩和時間に対して電極間を電気泳動によって進む時間が短くなるので、飽和領域に入りポンプ性能に影響してくると思われるが、コンダクションポンプにおけるこのスケール効果は未解明なままである。

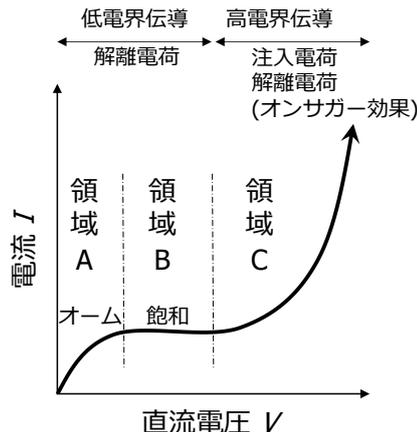


図1 平等電界における絶縁性液体の電気伝導特性 (イオンの発生や輸送方法の違いにより3つの領域が存在)

2. 研究の目的

そこで本研究では、EHDコンダクションポンプにおけるスケール効果を明らかにすることを目的とした。特にミリメートルスケールからマイクロメートルスケールでのオーム領域から飽和領域におけるポンプ特性やヘテロチャージ層形状について明らかにする。マイクロスケールでのEHDコンダクションポンピングによる流動の基礎を構築し、その応用を展開するための知見を獲得し、ナノスケールへの応用について検討できるようにすることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、平行平板などの単純な電極形状ではなく実際にポンプとして機能する流れ方向に対して非対称な電極形状を用いて実用的な条件にて調査した。相似形状で異なるサイズスケールを有するポンプを製作、ポンプ性能を評価しスケールの影響を調査した。また電場と流体の連成シミュレーションによって電荷密度、電極近傍に形成されるヘテロチャージ層へのスケールの影響を調査した。

(1) 実験方法

本研究で製作したマイクロEHDポンプの電極及び流路カバーの寸法を図2に示す。本研究で用いる電極基板はフォトリソグラフィ技術を用いて製作した。電極基板はガラス基板にチタンをスパッタリングによって成膜し、レジスト、露光、エッチングによって電極形状を形成した。流路カバーの材料はアクリル材を機械加工し流路長さ75mm、流路幅37.5mm、流路高さh=200μmで製作した。電極基板と流路カバーをシーライト、万力で固定し、テーパねじで流路部分と接続した。図3に電極対分の形状を示す。コンダクション現象で発生するクーロン力を流路方向に作用させるためにGround電極(青)とHV電極(赤)が非対称形状になっている。Ground電極長さL1=50μm、電極間距離L2=50μm、HV電極L3=150μm、Pair間距離L4=500μmであり、電極対を100対とした。製作したポンプを差圧計と流量計が設置された流体ループ内に配置し、ポンプの圧力-流量特性を計測した。

(2) 数値シミュレーション

シミュレーションでは実験と同じポンプ形状を使用した(図3)。2つの電極は壁に埋め込まれている。電極寸法、流路高さの比は先行研究^[1]を基に設計し、L1:L2:L3:L4:h=1:1:3:20:4とした。寸法比は固定し、スケール(電極間距離L2)のみを500μm、50μm、5μmと変化させた。連続の式、クーロン力を考慮したナビエ・ストークス方程式、解離の電界依存性、電気泳動、

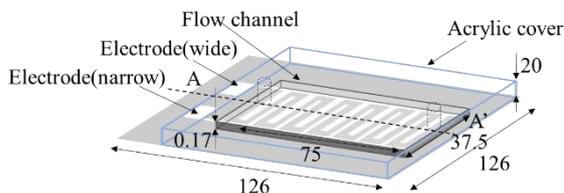


図2 EHDポンプ概要

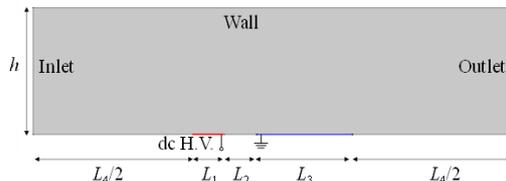


図3 ポンプ形状

対流、拡散を考慮した電荷の保存則，ガウスの法則を支配方程式として用いた．下記に無次元化した電荷の保存則を示す．

$$\frac{\partial q^*}{\partial t^*} + \nabla^* \cdot \mathbf{J}_q^* = C_0^2 F(\omega) / 2 - 2q^* w^* \quad (1)$$

ここで， $C_0 = \sigma L_2 / 2\epsilon\mu_0 E_0 = (L_2/2)/L_{\text{travel}}$ でありコンダクション数と呼ばれ，解離電荷が再結合するまでに電気泳動によって進む距離と電極間距離の比を表す．平行平板電極では $C_0 > 1$ ではオーム領域となり， $C_0 < 1$ では飽和領域となる^[2]． $F(\omega)$ はオンサガー関数と呼ばれ，電界の高いところで解離電荷密度が増加するオンサガー効果を表している．詳細は文献^[2,3]を参照されたい．

4. 研究成果

下記に主な成果について記す．

- ・HFE7100 を作動流体とした時，実験では印加電界 4 kV/mm， $Q = 0$ ml/min において 100 Pa 程度の圧力を計測した．さらに圧力-電界特性においては，マイクロスケールでの特徴である線形関係となることが計測された．ポンプの PQ 特性についても計測，0.2 ml/min 程度の流量が発生することを確認した (図 4)．

- ・シミュレーションとの比較においては，電流値はおおむね一致したが，圧力については実験値の方が大きくなり (図 4)，差異が生じた．シミュレーションにおいて各種物性 (イオン移動度，導電率など) を変更して発生圧力の影響を調査したが，差異の原因の特定はできなかった．実験精度の問題と考えており引き続き実験点を増やしていく予定である．

- ・逆極性の電極近傍に形成される解離イオンで構成されるヘテロチャージ層はスケールが小さくなるにつれて相対的に大きくなることが分かった (図 5)．スケールが小さくなると両ヘテロチャージ層のオーバーラップが観測され，平行平板電極を用いた先行研究^[2]と同様の結果が得られた一方で，本研究のポンプとして機能する非対称構成の電極では，スケールが小さくなると正負のヘテロチャージ層の非対称性が失われることが初めて明らかになった．負のヘテロチャージ層の長さで正規化した正のヘテロチャージ層の長さは 500 μm のポンプから順に，2.3，1.5，1.1 となった．そのため従来のように電極を非対称性に設計しても流動の源である正味のクーロン力は流れ方向発生しにくくなると考えられる．すなわち小さなスケールではそのような現象を考慮した設計が必要であるということが本研究で分かった重要な成果である．

- ・本流量範囲 (最大 0.7 ml/min 程度) においては，流量および流速がヘテロチャージ層形状の変化に大きく影響を与えないことが新たに分かった．

EHD ポンプの最大印加電圧は液体の絶縁破壊電圧で決まり，絶縁破壊電界 (印加電圧/電極間距離) はおよそ 10 kV/mm 以下である．マイクロ EHD ポンプでは電極間距離が短いため印加電圧は数〜数百 V まで低くすることができ運用がより容易になり応用の幅が広がると考えられる．本研究ではその設計における基礎的な知見を得ることができた．

<引用文献>

- [1] M.R. Pearson and J. Yagoobi, Experimental study of linear and radial two-phase heat transport devices driven by electrohydrodynamic conduction pumping, *J. Heat Transf.* 137 (2015) 22901.
- [2] P.A. Vázquez, M. Talmor, J. Yagoobi, P. Traoré, and M. Yazdani, In-depth description of electrohydrodynamic conduction pumping of dielectric liquids Physical model and regime analysis, *Physics of Fluids* 31 (2019), 113601.
- [3] 西川原理仁, 電気流体力学コンダクションポンプにおける寸法効果, 研究成果報告書, 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, 日本フルードパワーシステム学会, pp. 102-107, 2022/9.

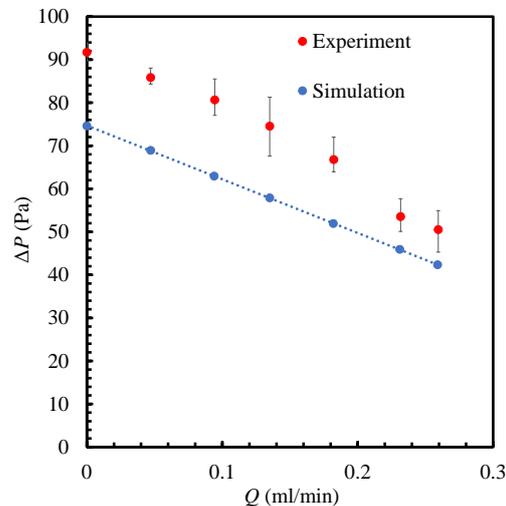


図 4 発生圧力の比較

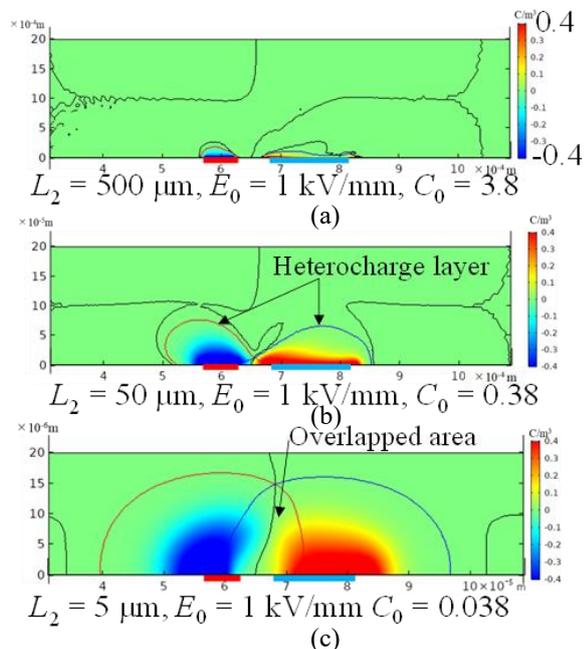


図 5 電荷密度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishikawara Masahito, Ueda Tomoya, Yokoyama Hiroshi, Yanada Hideki	4. 巻 -
2. 論文標題 Scaling Effect on Micro Electrohydrodynamic Conduction Pump with Flush Electrode	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 2023 IEEE 22nd International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICDL59152.2023.10209307	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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tomoya Ueda, Masahito Nishikawara, Hideki Yanada, Hiroshi Yokoyama, and Hiroki Nagai
2. 発表標題 Simulation in micro EHD conduction pump with asymmetric flush electrode
3. 学会等名 The 19th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022), IFS Collaborative Research Forum (AFI-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Nishikawara, K. Okada, H. Yokoyama, and H. Yanada
2. 発表標題 Scaling Effect on Electrohydrodynamic Conduction Pump with Embedded Electrode
3. 学会等名 12th International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma for Pollution Control & Sustainable Energy (ISNTP-12) and International Symposium on Electrohydrodynamics 2022 (ISEHD 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西川原理仁
2. 発表標題 マイクロ電気流体力学コンダクションポンプにおけるスケール効果
3. 学会等名 第46回静電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Okada, M. Nishikawara, S. Naito, H. Yokoyama, and H. Yanada
2. 発表標題 Manufacturing and Evaluation of Similar Micro-Electrohydrodynamic Pumps with Different Scales
3. 学会等名 11th JFPS International Symposium on Fluid Power, OS2-05, Remote(Hakodate) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田光太郎, 西川原理仁, 横山博史, 柳田秀記
2. 発表標題 電気流体力学コンダクションポンプ特性におけるスケール効果
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和3年度研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田光太郎, 西川原理仁, 内藤駿一, 柳田秀記, 横山博史
2. 発表標題 電気流体力学コンダクションポンピングのスケール効果
3. 学会等名 日本伝熱学会東海支部2021年度支部講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中野政身ほか	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本フルードパワーシステム学会	5. 総ページ数 135
3. 書名 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	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	Worcester Polytechnic Institute (WPI)			