

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成31年度

受付番号 201960032

氏名 西川原 理仁

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。
なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ウースター、マサチューセッツ州（国名：アメリカ）
2. 研究課題名（和文） ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
サブミクロンスケールの静電ポンピング機構を用いた熱制御デバイスの開発
3. 派遣期間： 令和 元年 6 月 3 日 ~ 令和 3 年 9 月 16 日（837日間）
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名： ウースター工科大学
部局名： 機械工学部
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意（A4判相当3ページ以上、英語で記入**

も可)

【記載事項】

- ・ 研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等
 - ・ 新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置のうち、国内採用開始・採用期間延長・翌年度渡航のいずれかの適用を受けた場合は、当該措置の適用による影響等
- (注)「6. 研究発表」以降については様式10-別紙1~4に記入の上、併せて提出すること。

研究・調査実施状況

研究目的

本研究の目的は電気流体力学（EHD）現象を利用した高性能なポンプを開発し、熱制御デバイスに応用することである。EHDポンプは絶縁性流体に電場を与え、発生する電荷の輸送によって流動を起こす。可動部がないため、従来の機械式ポンプと比較して振動・騒音がなく軽量であり、電圧による流量制御が可能であり、EHDによる流動は電極を配置するだけなので、空間・重量が制限された宇宙機に適した候補技術であると考えている。本研究の目的は絶縁性液体の解離電荷を利用したコンダクションポンプにおけるサイズスケールの影響を調査しマイクロ・ナノスケールにおけるポンピング方法を見出すこと、また EHD 現象を利用した熱制御デバイスを開発し熱輸送への可能性を調査することである。

研究成果

【①マイクロスケールのコンダクション EHD ポンプ内蔵型蒸発器の開発】

高電圧下での解離電荷を利用したマイクロスケールのコンダクションポンプを作成し、更にそれと蒸発器を合わせることにより、ポンプ内蔵型蒸発器を作成し性能評価した。図1に作成した実験装置を示す。1.6 mm 直径の流路に3対の電極を配置した。負極、正極のそれぞれの長さは1 mm、3 mm であり、流れ方向に正味の力が作用するように非対称構造になっている。さらに正極は0.4 mm

の細孔が5つ空けられておりこの構造により、より大きな圧力が作用することがシミュレーションで明らかになっている。最下流の正極はヒーターにもなっている。差圧計、流量計、流量調節バルブが取り付けられた流体ループを構築し HFE7100 を用いてポンプ特性を評価した。1.2 kV 印加時に最大で 18 Pa の圧力、0.15 ml/min の流量を計測した。ヒーターをオンにして沸騰流におけるポンプの影響を調査したが、コンダクションポンプの動作の有無によって蒸発器の性能が変化することは確認できたが大した優位性は見られなかった。詳細は[5]を参照されたい。

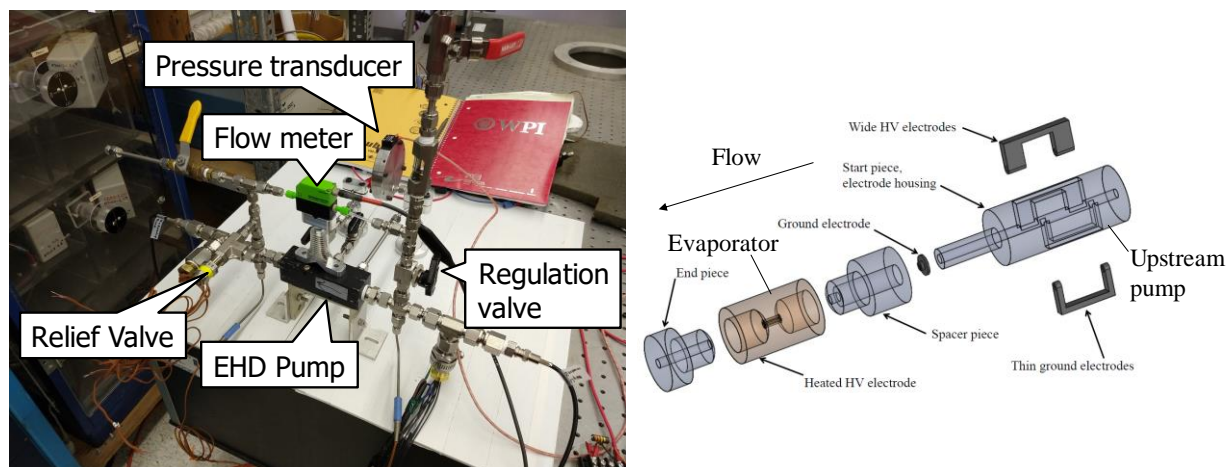


図1 EHD ポンプ内蔵型蒸発器の試験装置とポンプ概略.

【②コンダクション EHD ポンプのスケール効果】

EHD コンダクションポンプのスケール効果を調べるため、電気流体連成解析モデルを構築しシミュレーションを行った。コンダクション現象におけるスケール効果に関しては、文献1で平行平板におけるヘテロチャージ層形成に関して報告があり、スケールがある程度大きい時は電極付近にヘテロチャージ層がそれぞれ独立して形成されるが、スケールが小さくなるとそれぞれのヘテロチャージ層が干渉、オーバーラップして最終的にはヘテロチャージ層が消滅することが示されている。本研究では実際のポンプ電極形状でのスケール効果を調査した。シミュレーションは流体の連続の式、クーロン力を外力項に加えたナビエストークスの式、電気ガウスの法則、イオンの輸送を解いた。電極形状は正極、電極間距離(L_2)、負極、電極対距離、流路高さを 1:1:3:10:4 に固定し相似形状とした。図2にそれぞれのスケールでの電荷密度分布、赤線青線でヘテロチャージ層を示す。スケールが小さいほどヘテロチャージ層が流路全体に渡っており、文献1で示されたのと同様にそれぞれのヘテロチャージ層がオーバーラップしていることが分かる。正負のヘテロチャージ層の長さ比は $500 \mu\text{m}$ の時に 1:1.9 であるのに対して、 $5 \mu\text{m}$ では 1:1 とヘテロチャージ層の非対称性が失われていることが初めて明らかになった。すなわち数 μm 以下のスケールでは正味の圧力を発生させるためには電極形状の再考が必要であることが分かった。

現在、マイクロ・ナノスケールのポンピングを実現するため MEMS 技術を用いて相似形状のポンプを製作、評価しておりさらなる調査を進めている。本研究により機械式ファンでは到達できない領域での高性能熱流体制御を実現することができると考えている。詳細は[1,3]を参照されたい。

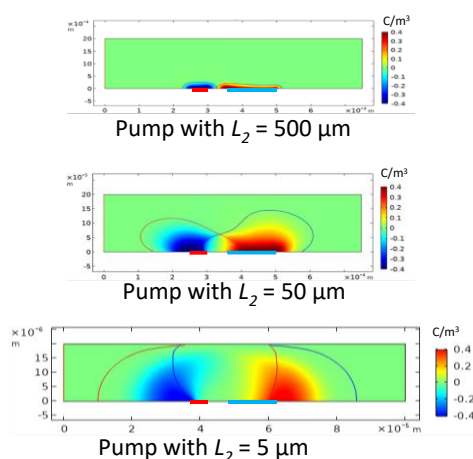


図2 各スケールでの電荷密度分布. $5 \mu\text{m}$ は境界条件の影響をなくすため幅を広くとっている.

【③発散電場中の気泡挙動と誘電泳動を利用した蒸発器の開発】

①でコンダクションポンプによる強制対流沸騰の熱性能向上の効果があまり見られなかったため解離電荷に働くクーロン力ではなく、気液界面に働く力、誘電泳動を利用することにより強制対流沸騰の熱性能向上を試みた。文献2で発散電場中の気泡に働く誘電泳動力についてシミュレーションによる調査が行われており、気泡は電場の弱い方向に誘電泳動力が働くこと、また気泡が変形

し電場に沿って伸長することが分かっている。本研究では、まず静電場解析によって蒸発器流路に常に流れ方向に誘電泳動力が作用するように電極を設計し、流体シミュレーションによって気泡に働く力を計算し流体力に対して誘電泳動力が大きくなる条件を調査した。設計した電極形状を有するマイクロチャネル蒸発器を製作し、流体ループによってその性能を評価した。

電極は図3に示すように30°の角度を有する拡大流路で入り口高さ250 μm 出口高さ1,000 μm 高さ、長さ3 mm である。上面および底面が電極であり、下流に向けて流れ方向に電場が弱くなることで誘電泳動力が流れ方向に対して正方向に働く。シミュレーションでは単一気泡を設置し、連続の式、ナビエストークスの式、ガウスの法則を解いた。気液界面でのマクスウェル応力を積分し誘電泳動力を算出した。狙い通り拡大流路全域およびその下流において流れ方向の誘電泳動力が働くことが分かった。流れ方向の誘電泳動力とドラッグの比については最大で6(平均電界強度5 kV/mm、質量流束50 kg/m²s の時)にも到達することがわかった。これにより気泡が加熱面より速く離れることができるので沸騰熱性能が向上することが期待できる。また底面および上面付近の気泡には壁面に向かう上下方向の大きな誘電泳動力が作用することも分かった。詳細は[2]を参照されたい。変形を考慮したシミュレーションにおいても調査を行ったが、結果については追って論文等で報告する。製作した蒸発器を流体ループに組み込んで熱性能を計測した。機械式ポンプで一定流量を蒸発器に流し底面の電極から加熱し、各熱流束において電極に電圧を印加した。流量1 ml/min 時の沸騰曲線を図3に示す。電圧を印加することにより過熱度が減少していることが分かる。最大印加熱流束140 W/cm²において1.4 °C低減した。帰国後も派遣先と連携し詳細に調査していく予定である。

今後は誘電泳動力が作用する気液界面のダイナミクスに関する基礎研究を行い、相変化熱輸送応用へと展開する。これら技術をもとに宇宙機搭載に向けた EHD 熱制御システムの開発、極低温域での応用を行い、高精度な望遠鏡などに有利な振動のない熱制御システム開発に貢献したと考えている。

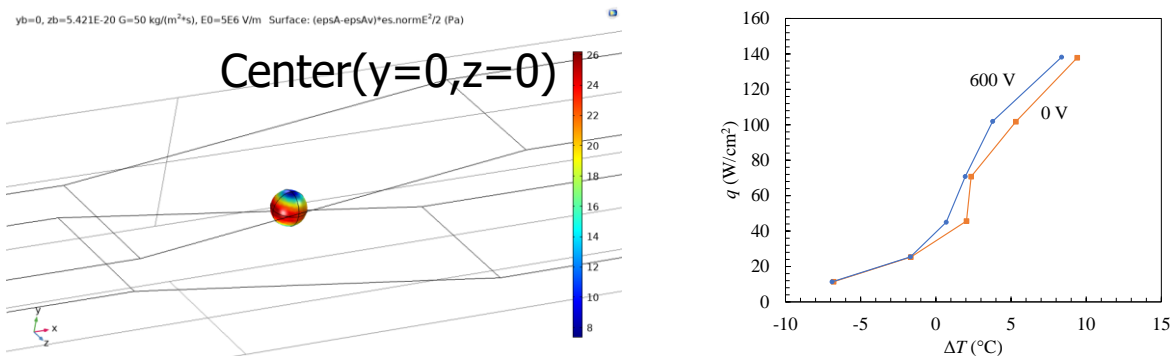


図3 気泡のマクスウェル応力分布と沸騰曲線。

参考文献

1. Vázquez, P. A., M. Talmor, J. Seyed-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, no. 11 (2019): 113601.
2. Pearson, Matthew R., and Jamal Seyed-Yagoobi. "Numerical study of dielectric fluid bubble behavior within diverging external electric fields." *Journal of heat transfer* 130, no. 3 (2008).

成果の発表・関係学会への参加状況等

派遣期間中に発表したものを以下に示す。

原著論文

- [1]. M. Nishikawara, R. Yoneda, Y. Shinagawa, H. Yanada, T. Miyakita, K. Sawada, "Temperature dependence of the characteristics of an electrohydrodynamic pump with plate-bar electrodes," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.56, No. 1, pp. 704-710,2020.

国際会議

- [2]. M. Nishikawara, Nathaniel J. O'Connor and J. Yagoobi, "Numerical study of dielectric fluid bubble behavior in microchannel evaporator in presence of diverging electric field," 56th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2021-EPC-0935, Oct. 13th, 2021.

- [3]. ○K. Okada, M. Nishikawara, S. Naito, H. Yokoyama, and H. Yanada, “Manufacturing and Evaluation of Similar Micro-Electrohydrodynamic Pumps with Different Scales,” 11th JFPS International Symposium on Fluid Power, No. ?, Hakodate, Oct., 2021.
- [4]. ○M. Nishikawara, “Advanced heat transfer with porous media and electrohydrodynamics,” Flash Talks Session, The 5th Japan-US Science Forum in Boston, 11/14/2020, Remote, Nov., 2020.
- [5]. ○M. Nishikawara, and J. Yagoobi, “Experimental study of Electrohydrodynamic Conduction Pumping Embedded in Micro-Scale Evaporator,” 55th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2020-EPC-1101, Remote, Oct., 2020.
- [6]. ○M. Nishikawara, “Pore-scale approach to developing high-performance capillary evaporator in loop heat pipe,” Thermal and Fluids Analysis Workshop 2020, Remote, TFAWS2020-AT-201-Nishikawara, Aug. 18th, 2020.
- [7]. ○M. Nishikawara, Y. Yamada, H. Yokoyama, and H. Yanada, “Maximizing heat-transfer coefficient of loop-heat-pipe evaporator with microgroove by three-dimensional simulation,” The 31st Spacecraft Thermal Control Workshop, Mar.24-26, 2020.
- [8]. ○M. Nishikawara, Y. Yamada, S. Tomita and H. Yanada, “Study on two-phase thermal hydraulics in porous structure and design method of capillary evaporator,” Proceedings of the 49th International Conference on Environmental Systems, No. ICES-2019-47, Boston, Jul., 2019.

新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置の適用による影響等

私の所属するウースター工科大学は 2020 年 3 月のロックダウン後、4 か月程度研究室にアクセス出来なくなり、この 4 か月間は全く実験ができない状況が続いた。再開後も大学は完全には復旧せず、装置製作などの施設は制限された運用であった。特例措置により帰国を 2021 年 6 月から 9 月まで延長できたおかげで十分に研究を遂行することができた。