

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03909

研究課題名(和文)冷媒流量を極限まで低減させる、薄液膜蒸発を利用した高密度除熱デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of high-density heat rejection device which realizes ultimately minimum mass flow rate of coolant

研究代表者

今井 良二 (Imai, Ryoji)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60730223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロチャネルと透明電極を用いたチャネル内流動挙動が可視化可能な試験体を製作した。マイクロチャネルに対して平行および垂直に電場を印加し、それぞれの電場方向における冷媒の駆動状況の観察を実施した。直流電場をマイクロチャネルに対して平行に作用させることにより、マイクロチャネル内の冷媒(純水)を駆動できることを確認した。マイクロチャネル内の液体に作用する慣性力、粘性力、毛細管力、重力、圧力による力、静電気力を考慮した運動方程式を立式し、電場によるマイクロチャネル内液体の駆動状況が再現できるようになった。上記流動解析モデルを用い、電場の大きさ、電場勾配が液体駆動特性に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

きわめて高い徐熱流束の実現が可能な気固液三相界面近傍の熱流束を利用した排熱デバイスの実現の第一ステップとして、電気毛管力によるマイクロチャネル内液体の駆動を実験および数値解析により実証した。電気流体力学を利用した排熱デバイスの実現に一步近づいた。本成果は電動化自動車および航空機に搭載されるパワーデバイスの冷却システムの小型化に貢献し、ひいては自動車や航空機のCO2排出抑制に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：A test specimen was created using a microchannel and transparent electrodes that allows the flow behavior within the channel to be visualized. An electric field was applied parallel and perpendicular to the microchannel, and the driving status of the refrigerant in each electric field direction was observed. It was confirmed that the refrigerant (pure water) within the microchannel could be driven by applying a DC electric field parallel to the microchannel. An equation of motion was formulated that takes into account the inertial forces, viscous forces, capillary forces, gravity, pressure forces, and electrostatic forces acting on the liquid within the microchannel, making it possible to reproduce the driving status of the liquid within the microchannel by an electric field. Using the above flow analysis model, the effects of the electric field magnitude and electric field gradient on the liquid driving characteristics were clarified.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：マイクロチャネル 三相界面 蒸発 高熱流束 毛細管力 電気毛管力 徐熱デバイス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の原因となっている CO<sub>2</sub> 削減が社会的課題となっており、多くの CO<sub>2</sub> を排出する自動車、航空機等の輸送機器の電動化が進められている。これらの電動化システムには多くのパワーデバイスが搭載され、これらの発熱密度は増大傾向にあり、例えば単位面積当たりの発熱量(熱流束)が 100W/cm<sup>2</sup> を超えている。これまで高密度排熱技術に関する研究は多く実施されている。水を单相流でもしくは沸騰を利用し 100W/cm<sup>2</sup> 以上の除熱密度を実現した例がある。これらの手法では高い液体流量が必要であり、例えば単位面積当たりの質量流量は单相流を用いる場合は 1000kg/m<sup>2</sup>/s、沸騰二相流を利用するものは数十 kg/m<sup>2</sup>/s を必要とする。これにより液体を駆動するためのポンプの容量が大きくなり、冷却システムの規模増大、消費エネルギー増大につながる。一方、沸騰気泡の伝熱面との接触線(三相界線)近傍では、界面蒸発を伴う極めて薄い液膜が形成され、局所的に非常に高い熱流束が得られることが知られている。提案者らは界面蒸発を伴う薄液膜を安定的に形成するため、加熱平板上に成形したマイクロチャネルに毛細管力を利用して液体を供給する方法を用い、低冷媒流量(質量流束 1.0kg/m<sup>2</sup>/s 以下)で 100W/cm<sup>2</sup> を超える熱流束を実現した。しかしながら今後の電子デバイスで要求される 300W/cm<sup>2</sup> を超える熱流束(3)には対応できていない。

### 2. 研究の目的

提案者は最低限の冷媒流量の下で薄液膜蒸発を安定的、継続的に実現するため、加熱面に設けた微細な溝(マイクロチャネル)に μm オーダーの液膜を保持し、かつそこに作用する毛細管力および静電気力(マクスウエルの応力)により蒸発により欠損した液体を補給する手法を考案した。本研究では本手法を適用した高熱流束排熱デバイスを試作し、今後の電子デバイスで要求される除熱流束の達成に必要な液体駆動の実証を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 薄液膜蒸発の伝熱特性

本研究では薄液膜が蒸発する性質を利用して効率的に熱を放散させ、高熱流束徐熱に対応させる。図1に液膜の薄膜化が起こっている液滴を示す。図の丸で示す部分に三相界面(液膜、固体基板、気相)が形成され、そこで高い熱流束が得られることが知られており、システムの熱除去能力を効果的に高めることができる。三相界面は図2に示すようにマイクロチャネルの壁面に見られる。

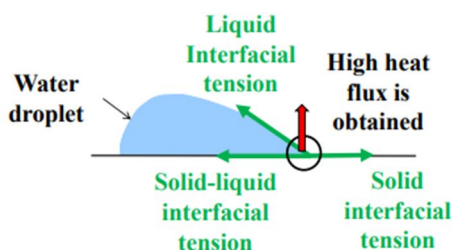


図1 三相界面の形成状況

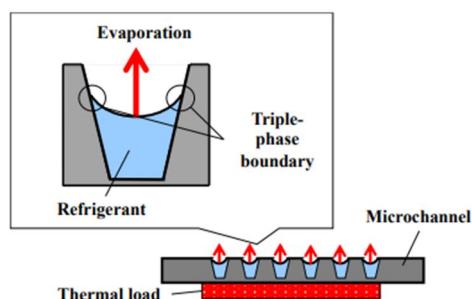


図2 マクロチャネルに形成される三相界面

#### 3.2 マイクロチャネル高熱流束除熱デバイス

図3 本研究で最終ターゲットとする冷却装置の概要を示す。冷媒はマイクロチャネルの入り口に流れ込み、毛細管力によって駆動される。冷媒が蒸発すると、熱源の温度が低下する。しかし、毛細管力による駆動が不十分なため、ドライアウト状態などのリスクを起る可能性がある。そこでこの研究では電極設置して電場を作用させ、毛細管力に電気毛細管力を併用することにより液体の移動を促進することを提案している。

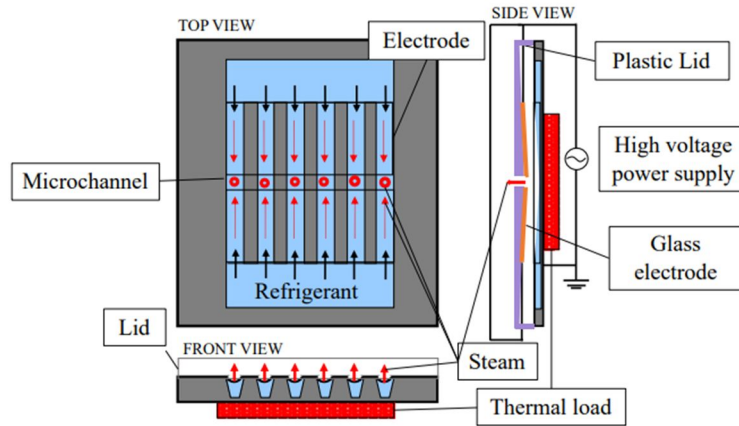


図3 本研究でターゲットとしている排熱デバイス

### 3.3 マイクロチャンネルに対する Electro-hydrodynamic(EHD) の効果

前述したように、本研究は電界の影響下におけるマイクロチャンネル内の液体の挙動を調査する。図4に示すように、マイクロチャンネルに対して平行する方向の電場を作用させる平行電極配置(図4(a))と垂直電極配置(図4(b))につき検討する。平行電極はマイクロチャンネルの壁に沿って配置され、電圧が印加されると空気層に電界が発生する。この電界は冷媒と相互作用し、冷媒表面の分子を分極させるため、電気伝導度の勾配が生じる。クーロン力の働きにより、発生した電荷が動き出し、流体の粘性により周囲の液体を流動させる。

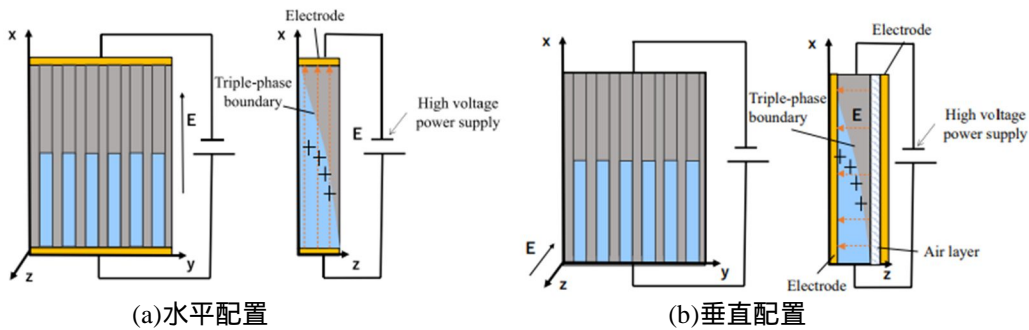


図4 電極の配置方法

## 4. 研究成果

マイクロチャンネル内の液体に対する電場の影響の可視化実験を実施した。

### 4.1 水平電極配置実験

図5に実験装置概要を示す。電極間隔は40 [mm]、傾斜角度は45°とした。冷媒には純水を用いた。電圧を印加すると、液体の高さの増加が観察される。

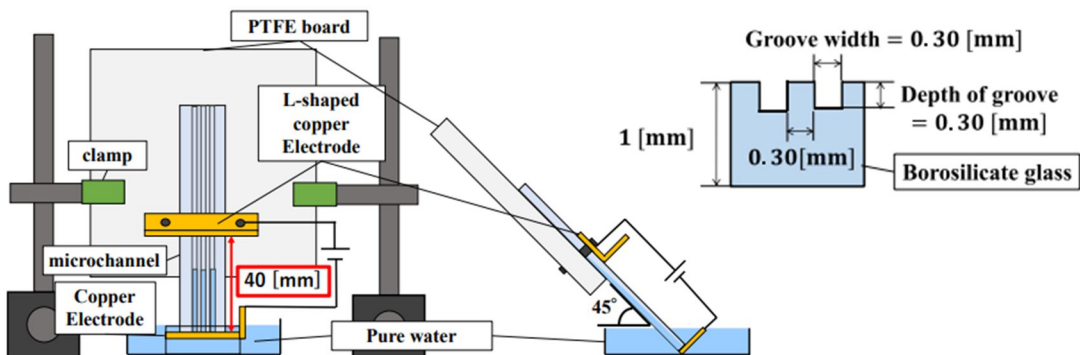


図5 水平電極配置実験装置概要

図6にグラフは電圧を印加した際のマイクロチャネルの各溝の液体の高さを示している。一列目が最も左の溝、八列目が最も右の溝である。このグラフから、電圧を上げると液体の高さも上がることがわかる。3000 [V]で3分間放置すると、二列目の溝の液体だけが15 [mm]の高さが増加している。電圧に対する液面の高さの応答は明確であるが、液面の高さは不均一である。これはマイクロチャネル表面の凹凸と電界の不均一性によるものと考えられる。

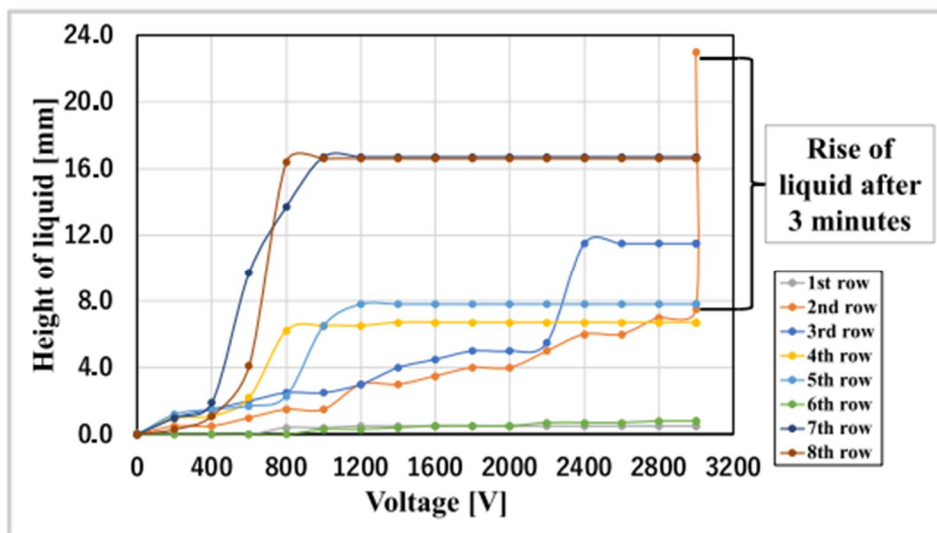


図6 水平電極配置実験結果 電圧と液体上昇高さの関係

#### 4.2 垂直電極配置実験

図7に実験装置概要を示す。ガラス製マイクロチャネルは、マイクロチャネル上の平行電極配置をシミュレートするために、二枚のITO導電性ガラスで挟まれている。ガラスはカプトンフィルム両面接着テープで接着されている。冷媒には純水を用いた。マイクロチャネル内の液体の高さの増加を記録した。また、銅製マイクロチャネルを用いた実験も実施した。ここで、銅製マイクロチャネルを使用したのは、熱負荷に取り付けた際に、ガラス製マイクロチャネルが破損する可能性を減らすことができるためである。

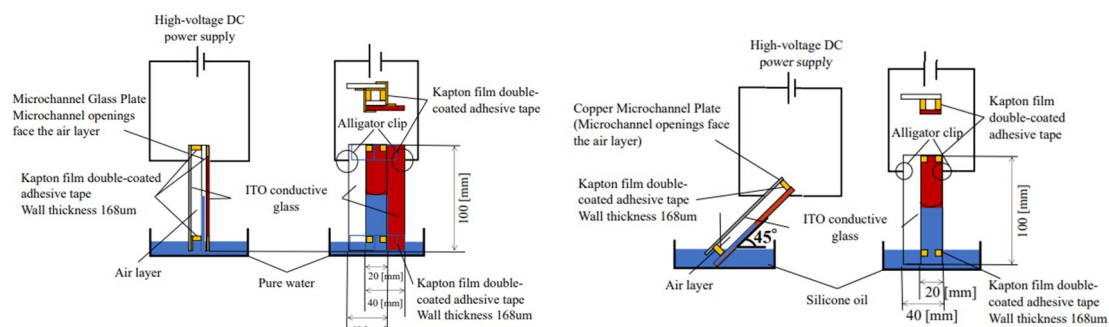


図7 垂直電極配置実験概要

##### a) ガラス製マイクロチャネル

図8は前方のITO導電性ガラスとガラス製マイクロチャネルの間の液面を示している(目盛は1 [mm] 間隔を示す)。緑線が電圧0 [V]のときの液面、赤線が電圧3000 [V]のときの液面である。電圧の差が大きくても、初期状態と終了状態を比較すると、各溝の液面の高さに大きな差は見られない。

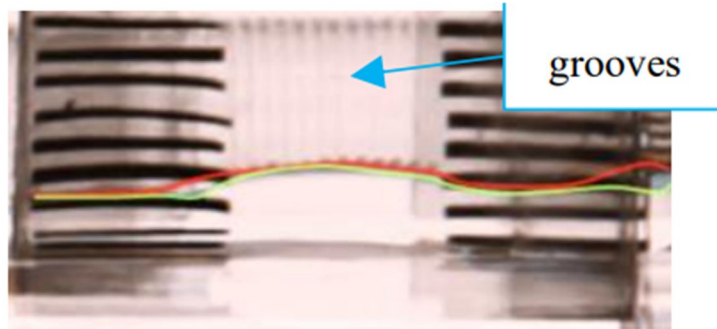


図 8 垂直電極配置実験結果 ガラス製マイクロチャネルを用いた場合

b) 銅製マイクロチャネル

図 9 は前方の ITO 導電性ガラスと銅製マイクロチャネルの間の液面を示している。緑線は電圧 0 [V]のときの液面，赤線は電圧 2200 [V]のときの液面，青枠は溝内の液面を示している。ガラス製マイクロチャネルと比較すると，シリコン油の粘性によるものと思われるが，液面にはかなりの差がある。しかし，液面の高さに大きな差があっても，溝内の液面は変化していないことが見られる。

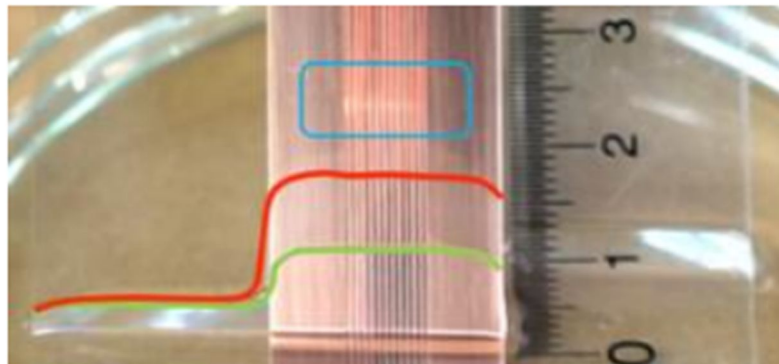


図 9 垂直電極配置実験結果 ガラス製マイクロチャネルを用いた場合

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 1件）

1. 著者名 Ryoji IMAI, Mori MICHIHARA	4. 巻 40
2. 論文標題 Study on the Sloshing Behavior under Microgravity Condition Targeted for a Propellant Tank (Dynamic Liquid Behavior in Axially Applied Acceleration)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15011/jasma.40.400102	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 ISMA NURIN BINTI RAZMAN
2. 発表標題 電場を付与したマイクロチャンネル上薄液膜蒸発を利用した高熱流束排熱デバイスに関する研究
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第35回学術講演会（JASMAC-35）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井良二、道原孟里
2. 発表標題 宇宙機用推進タンクを対象とした微小重力下スロッシング挙動に関する研究（軸方向加振による動的流体 挙動）
3. 学会等名 第20回HASTIC学術技術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河野通明、今井良二
2. 発表標題 微小重力環境下における界面相変化を考慮した動的濡れ挙動に関する研究
3. 学会等名 第19回HASTIC学術技術講演会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------