

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03976

研究課題名（和文）相変化をとまなうマイクロ流路内の複雑流れの実験的解明と物理化学モデリング

研究課題名（英文）Investigation and modelling of complex flow with phase change in microchannels

研究代表者

松本 充弘 (Matsumoto, Mitsuhiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10229578

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、変圧器の鉄心に用いられる積層鋼板の蒸気洗浄を主なターゲットとし、表面粗さをもつ擬2次元流路中の液体が減圧条件下で蒸発・沸騰などの相変化を伴いながら流動するプロセスを詳細に解析することを目的とする。サンドブラストにより規定の表面粗さをもつすりガラス板を作成し、2枚のすりガラス間隙にテスト流体（水、エタノール、炭化水素液体など）を入れて、真空チャンバー内で可視化実験をおこない、液体の挙動を高速カメラと画像解析により追跡した。表面粗さと蒸発速度や蒸発パターンとの関連を議論し、imbibition過程との類似性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロチャネル内の流動の研究は、nmオーダーまで壁面を平滑にした流路とスパーサーを用いて行われることがほとんどだが、本研究では、逆にサンドブラストにより $1\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ 程度の粗さを設けた壁面間の流動を対象にした。これは、問題の発端が変圧器の鉄心に使われる積層鋼板からの絶縁油除去のメカニズム解明にあるからである。これにより壁面粗さの影響を定量的に解析することができ、新たな応用への道が開けた。

研究成果の概要（英文）：We have experimentally investigated evaporation and flow dynamics of liquid sandwiched between solid plates under reduced pressure to study the mechanism of vapor washing process of laminated plates in electric transformers. Water, ethanol, and several organic compounds were used as test liquids, and glass plates with specific surface roughness, fabricated with a sand-blast gun, were adopted to visualize the flow dynamics. We found that the surface roughness is one of the dominant factors for flow dynamics. Relation between the flow in the rough channel and the imbibition process was discussed.

研究分野：熱流体工学

キーワード：流体相変化 マイクロスケール流れ 蒸発 沸騰 パターン形成

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は、2015-2017 年度に実施した科研費基盤研究(C) (一般) 「擬 2 次元流体相変化メカニズムの解明とマイクロスケールの間隙洗浄技術への応用」(課題番号: 15K05826, 研究代表者: 松本充弘) をさらに発展させるために、2018-2020 年度に実施したものである。

(1) 研究の発端: これら一連の研究は、ある化学薬品メーカーから研究代表者が受けた相談に端を発する。大型変圧器の廃棄にあたって、鉄心となっている積層鋼板間隙に閉じ込められた絶縁油を効率よく取り除くにはどうしたらよいかという内容であった。古いタイプの変圧器では絶縁油として PCB がよく用いられてきたが、その毒性からこうした変圧器の廃棄には PCB を流出させないため、廃棄時には厳格な規制がある。従来は積層平板を 1 枚 1 枚はがして溶剤で洗浄し乾燥させるという効率の悪い手段か、大規模な閉鎖型施設を設けて、破碎・洗浄、もしくは高温焼却するといった高コストの方法しか存在しなかった。この薬品メーカーでは、この積層平板を一体のまま大きな洗浄槽に入れ、高温・減圧条件下で有機溶剤蒸気を循環させ、間隙内の絶縁油を蒸発させて取り除くというアイデアにより、効率よく間隙内液体が除去できることを見出した。こうした積層平板はスペーサーなどが入っているわけではなく、プレートがそのまま一定荷重で積層されているため、間隙幅はプレートの表面粗さと同じ 10~100  $\mu\text{m}$  程度とかなり小さい。このため、液体の排出速度はプレート表面の粗さや濡れ性に強く影響されることが当然予想できたが、実験プラントでは予想以上に速やかな液体排出が見られた。内部の流動状態を直接観測することはできないため、間隙内の液体相変化や流動のメカニズムが不明であり、運転条件の最適化が難しい状況であった。

(2) 準備状況: そこで、2015-2017 年度の基盤研究では、まず、間隙内の液体相変化や流動を可視化することを目的とした。このために、可視化の難しい積層鋼板ではなく、表面に同程度の粗さをもつガラス板で液体を挟んで、減圧下での蒸発や流動を観察した。たまたま市販のすりガラスが鉄心に使われる鋼板と同程度の表面粗さ(数十  $\mu\text{m}$ ) をもつことがわかったため、こうしたすりガラスで水・エタノール・炭化水素(ヘプタン等)といった透明液体を挟み、減圧下での可視化実験を行った。この過程で、透明アクリル製の真空チャンバーと真空ポンプなどからなる真空実験系を構築し、平面発光型 LED 照明や高速度カメラなどの光学系等、一連の実験装置を構築するに至り、液体の種類、圧力、チャンパー温度などと蒸発・流動ダイナミクスの関連を調べることが可能となった。その成果は文献(1)、(2)などで報告している。相変化速度や流動パターンを支配する制御因子として、液体粘性、表面張力、濡れ性などが考えられる。しかしながら 2015-2017 年度の研究内では、たとえば水と有機液体で流動パターンが異なるなどの理由を確定するには至らなかった。

### 2. 研究の目的

こうした準備状況のもと、2018-2020 年度に実施した本研究では、次の 3 点を主な研究目的とした。

(1) 壁面粗さが間隙内流体の流動ダイナミクスに与える影響を定量的に評価すること。このために、よく規定された表面粗さを持つチャンネルによるモデル系を準備することが重要となる。

(2) 複雑な流動パターンの起源を明らかにすること。擬 2 次元系の 2 相流において、viscous fingering 現象に代表されるような複雑なパターンがしばしば観測されることはよく知られている。しかし、我々が対象とする系は、減圧下での蒸発や沸騰といった相変化を伴う流動であり、粘性だけが主要な支配因子とは限らない。このため、さまざまな実験条件のもとで観察する必要がある。

(3) 関連する重要な現象として、imbibition (浸潤) の解析をおこなうこと。これは毛管力支配のもと、多孔体中の液体流動や繊維への液体浸み込みに典型的に見られるが、我々の擬 2 次元系においても、液体が高い濡れ性をもつために類似の現象が起きる可能性があり、その定量的評価をおこなう。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下の計画に沿って研究をおこなった。

(1) 真空チャンパー系は、2015-2017 年度の基盤研究で構築したものを改良しながら使用する(図 1)が、光学系(高速度カメラ、マクロレンズ等)を更

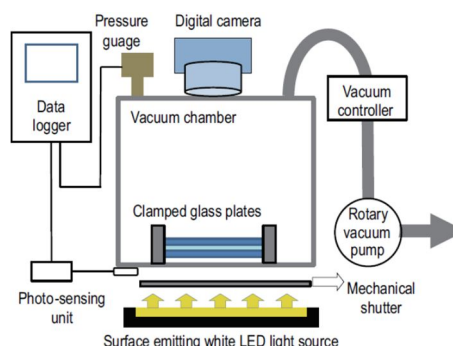


図 1 擬 2 次元流動の可視化装置(模式図)

新した。

(2) 規定された表面粗さをもつガラス板を作成し、間隙内流動の表面粗さ依存性を定量的に評価できるよう、サンドブラスト装置を導入した。これにより、2, 4, 5, 8 $\mu\text{m}$  程度の異なる表面粗さ（いずれも算術平均粗さ）をもつ2次元流路の作成が可能となり、流動ダイナミクスにおける粗さ因子の影響が議論しやすくなった。

(3) 蛍光微粒子によるPIV手法を導入し、蒸発をともなう流動の局所的な速度場を見積もる。このために、真空チャンバー内で近紫外領域の照射ができるLED光源を自作した。

(4) 粗さを持つ流路内流れと密接に関連する「流路へのimbibition」の可視化実験をおこない、両者の関連を議論する。

#### 4. 研究成果

(1) 表面粗さの影響は、蒸発速度に端的にあらわれる。図2にエタノールをテスト液体とした場合の濡れ領域のパターンと濡れ領域面積の時間変化の例を示す[元データは文献(3)]。表面粗さが大きいほど蒸発速度は大きい、濡れ領域が形成するパターンはそれほど違いがないことがわかった。簡単なモデルによる考察から、蒸発時間と間隙距離の間にべき乗則が成り立つことが示唆された。

(2) PIV手法により蒸発が進行している液膜端近傍の流動場を評価したところ、図3に示すように比較的高速(0.5-1 mm/s)の「旋回流」が観測された。これは、蒸発過程で生じる樹状パターン内を高速の蒸気流れが発生していることを示しているが、定量的な検討は今後の課題である。

(3) 濡れ性が最も大きいエタノールについて、重ねて垂直に立てたすりガラス板の間を液体が上昇するimbibition現象の可視化をおこない、上昇速度と表面粗さの関係などを調べた。図4[元データは文献(4)]に示す通り、基本的には固液界面張力(毛管力)が支配する $t^{1/2}$ 則で説明できると思われるが、水とエタノールの差異など詳細な検討は今後の課題である。

#### <引用文献>

- (1) K. Ogawa, Y. Yasumoto, M. Matsumoto, H. Wakabayashi, “Quasi two-dimensional evaporation and boiling under reduced pressure,” *Int. J. Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 25, no. 1 (2017) 1750003, DOI: 10.1142/S2010132517500031
- (2) M. Matsumoto, K. Ogawa, Y. Yasumoto, “Evaporation and boiling in narrow gap,” *Applied Therm. Engineering*, vol. 122 (2017) 706-711, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.035
- (3) K. Nagashima, E. Mae, H. Wakabayashi, M. Matsumoto, “Fluid motion during evaporation in rough thin gap,” *Applied Sciences*, in press.
- (4) D. Xu, K. Ogawa, M. Matsumoto, “Evaporation and boiling in thin gap,” *Proc. 16<sup>th</sup> Int. Heat Transf. Conf.* (2018, Beijing) 22230.

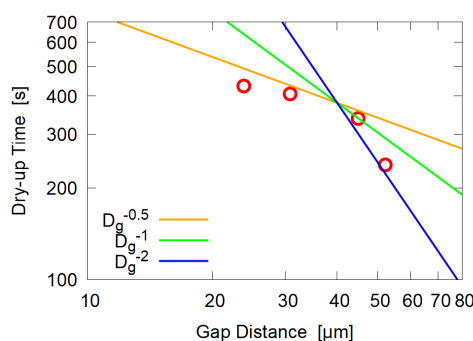
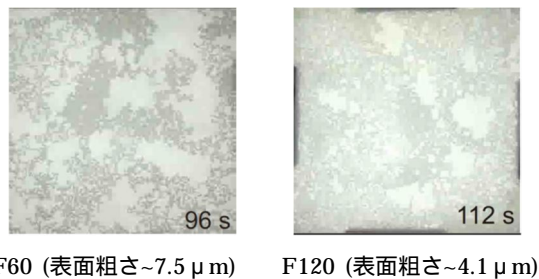


図2 蒸発領域のパターン形成の例と蒸発時間の間隙距離依存性。

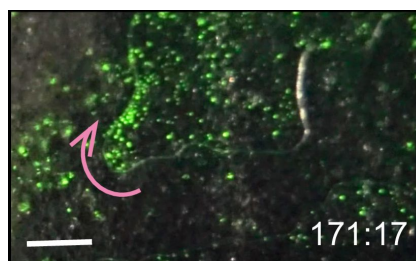


図3 PIV手法で検出した旋回流の例

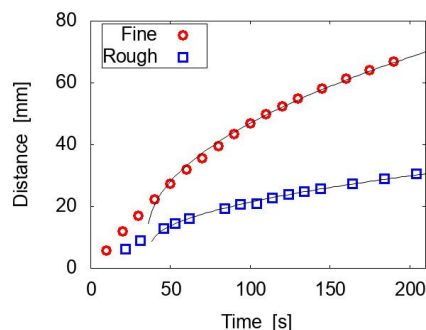


図4 エタノールのimbibitionによる上昇高さの例

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 K. Nagashima, E. Mae, H. Wakabayashi, M. Matsumoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Fluid motion during evaporation in rough thin gap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Science	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） なし	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 D. Xu, K. Nagashima, M. Matsumoto
2. 発表標題 Fluid Motion and Phase Change in Thin Gap
3. 学会等名 Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Matsumoto, K. Nagashima, D. Xu
2. 発表標題 Fluid Motion and Evaporation Dynamics in Rough Thin Gap
3. 学会等名 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Xu, K. Ogawa, M. Matsumoto
2. 発表標題 Evaporation and boiling in thin gap
3. 学会等名 16th International Heat Transfer Conference（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Xu, M. Matsumoto
2. 発表標題 Motion of liquid sandwiched between rough surface plates
3. 学会等名 29th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Xu, K. Nagashima, M. Matsumoto
2. 発表標題 Fluid motion and phase change in thin gap
3. 学会等名 14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (国際学会)
4. 発表年 2019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