

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05826

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Investigation of quasi two-dimensional fluid phase change and its application to cleansing of laminated plates

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） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：変圧器に用いられる積層鋼板に入り込んだ絶縁油の除去のための、減圧条件下での蒸気洗浄技術のメカニズム解明を主な目的として、平板間隙に閉じ込められた液体が減圧下で示す、流動や蒸発/沸騰現象の可視化実験とモデリングをおこなった。すりガラス板の間にテスト流体（水、エタノール、揮発性有機液体など）をはさみ、減圧下での蒸発挙動を高速度カメラと画像解析により追跡し、液体物性（蒸気圧、表面張力、粘性、濡れ性）・表面粗さなどの制御パラメータ依存性を検討し、特に表面粗さと溶存気体量が蒸発パターンの重要な支配因子であることを見出した。

研究成果の概要（英文）：To study the washing mechanism of laminated plates with solvent vapor, we have experimentally investigated evaporation dynamics of liquid conined between solid plates under reduced pressure. As the test liquid, we use deionized water and several organic compounds. To visualize the fluid motion in the thin gaps, we adopt sand-blasted glass plates. In the case of water, many tiny spots of semi-dry region appear and expand at the initial stage, which is cavitation of dissolved gas. In organic liquid cases, dried region expands with complicated branching patterns. We investigated various control parameters, such as the influence of the chamber pressure, the surface roughness, and the plate deformation, among which the surface roughness is found to be one of the dominant factors.

研究分野：マイクロスケール熱流体工学

キーワード：流体相変化 蒸発 沸騰 マイクロスケール流れ パターン形成

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の発端となったのは、ある化学薬品メーカーから研究代表者が受けた相談である。大型変圧器のフェライトコアのように平板が数多く積層された間隙 (図1) に閉じ込められた液体 (例: 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。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手段しかなかったが、実際の機器で使用されている積層

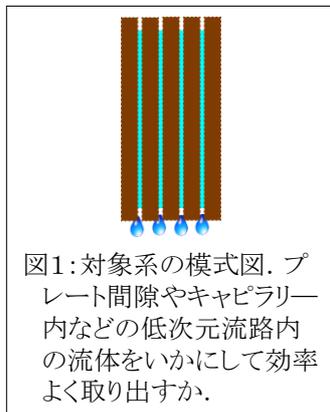


図1:対象系の模式図. プレート間隙やキャピラリー内などの低次元流路内の流体をいかにして効率よく取り出すか.

平板は場合によっては 1000 枚にもものぼることがあり、また一枚の平板が相当な大きさであるために、この洗浄作業を人手で行うのは効率が極めて悪く、一方で、破碎して洗浄するといった機械化・自動化も困難な状況

である。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・減圧条件下で間隙内液体を蒸発させて取り除くというアイデアを得て、簡単な試験装置での実験を行い、予想以上に効率よく間隙内液体が除去できることを見出した。この積層平板は特にスペーサー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 μm 程度とかなり小さい。このため通常の3次元流動とは異なり、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る。直感的にはこうした低次元流動は、バルク系の流動に比べてきわめてゆっくりしたものであろうと思われるのだが、上述の実験では速やかな液体排出が見られたため、非常に興味をもつに至った。

(2) この状況を受けて、減圧下での間隙内の液体流動をより詳細に調べるため、研究室既存の簡易真空装置を用い、2枚のガラス板に水やエタノールを挟み込んで蒸発実験を行った。片側をすりガラスにすると、真空槽内の圧力がほぼ液体の蒸気圧まで低下した段階で、

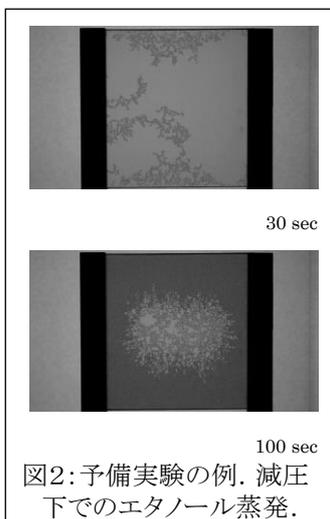


図2:予備実験の例. 減圧下でのエタノール蒸発.

図2に示すように、細い流路が板周囲から中央に向かって形成され、それが特徴的なパターンを描いて急速に発達する様子が見られた。このようなダイナミックな液体流動が、効率の良い液体排出機構の背後にあるのだろうという予想のもとに、そのメカニズムの解明と洗浄や間隙中の流体輸送の工学的応用の開拓を意図して、本研究を立案するに至った。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、平板間隙などに閉じ込められた低次元 (すなわち擬2次元) 液体の相変化 (蒸発, 沸騰, 脱気など) のダイナミクスを、可視化実験によって定量的に調べ、従来のバルク (3次元) 系と比較して低次元系の特徴を明らかにするとともに、低次元熱流体輸送モデルの構築を行うことを目的とする。さらに、その原理とモデリングに基づいて、間隙の洗浄や物質輸送への工学的応用をめざすものである。

(2) 本研究は、間隙洗浄技術のというきわめて具体的な工学的課題に端を発しているが、従来の3次元マクロスケールの熱流体輸送現象と比較して、擬2次元系の特色を明らかにするという、輸送現象の学術研究の側面も強く有している。このような低次元系では壁面の濡れ性や表面張力などが支配的なパラメタとなることが当然予想される。これまでマイクロフルイディクス分野でさまざまな研究が行われてきたが、その多くは、流路内で連続した温度・密度・組成などが変化する輸送現象であり、蒸発や沸騰をともなう場合の擬2次元混相流についての知見は未だに限定的である。本研究は、発端であった洗浄技術の効率化に寄与するだけでなく、キャピラリー内相変化などマイクロフルイディクス分野などへの貢献も企図している。

3. 研究の方法

固体壁にはさまれた低次元 (擬2次元) 流体の相変化挙動を可視化することで、そのダイナミクスを定量的に解析し、壁面の濡れ性・表面張力・粘性などを主要な制御パラメタとする低次元流動モデルの構築をおこなう。このために、以下の方法で研究を進めた:

(1) 圧力や温度を制御できる真空装置一式を設計構築し、その内部において、すりガラス板ではさまれた各種液体の蒸発過程を、高速度カメラで撮影し、相変化過程の可視化をおこなった。一連の実験により、相変化ダイナミクスに影響を与える可能性のあるさまざまな制御因子を検討した。

(2) 蒸発に伴う液体流動中に観察されるパターン形成を説明できる数理モデルの構築を図る。従来このようなパターン形成は

viscous fingering モデルなど表面張力と粘性によるものと解釈されることが多かったが、本研究が対象とする低粘度流体系での妥当性を検討し、必要であれば新しいモデルの構築を試みる。

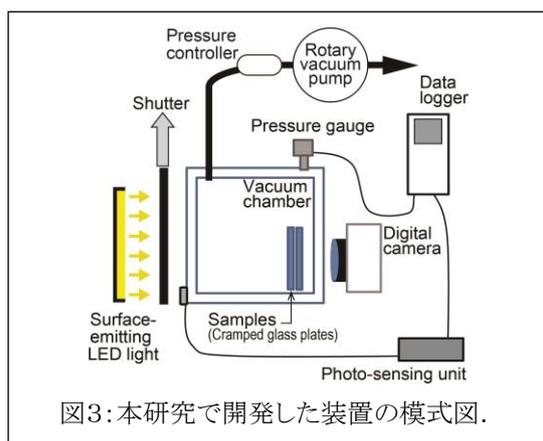
(3) 研究の発端となったプレート間隙中の液体の除去と洗浄という工学的応用に向けて、さまざまな条件で実験データの整理を行う。

4. 研究成果

(1) 実験装置の開発：いくつかの試作を経て、最終的には図3に示すような真空装置を完成させた。要点は

- ・圧力コントローラによるチェンバー内圧力の制御（精度 0.1kPa 程度）
- ・面発光 LED 光源の採用
- ・メカニカルシャッターと光センサーにより圧力計測と撮像を同期させる

こうした工夫により、プレート内の光量を可能な限り均一にし、あとの画像処理を容易にすることができた。



(2) 可視化による蒸発過程の定量的解析：すりガラスを背面から照射して撮影することにより、間隙が液体で満たされており最も明るい「濡れ領域」と間隙が完全に乾燥しているため入射光が散乱されて暗く見える「乾き領域」のほかに、中間的な明るさを持つ領域が見出された。これは、すりガラス表面に薄く液膜が存在する領域であることが、別途おこなった光学顕微鏡観察などからわかった。これらの知見に基づき、撮影画像を明るさの異なる3つの領域に分類し（図4）、それぞれの面積を測定することで、蒸発速度の定量化をおこなった。

(3) 液体物性の違いの影響：テスト液体として、イオン交換水・エタノール・アセトン・ヘプタン・オクタンの中から5種類を選び、実験をおこなった。これらはいずれも室温において相当の蒸気圧を持つため、特別な加熱装置を用いることなく、減圧下での蒸発挙動の観察が可能である。なお、予熱したテスト液体の蒸気をチャンバーに導入することにより、

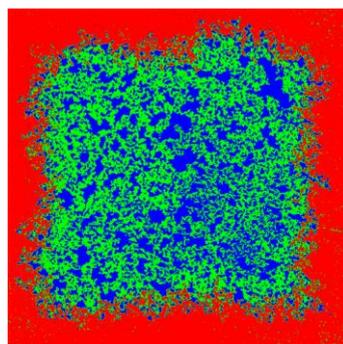
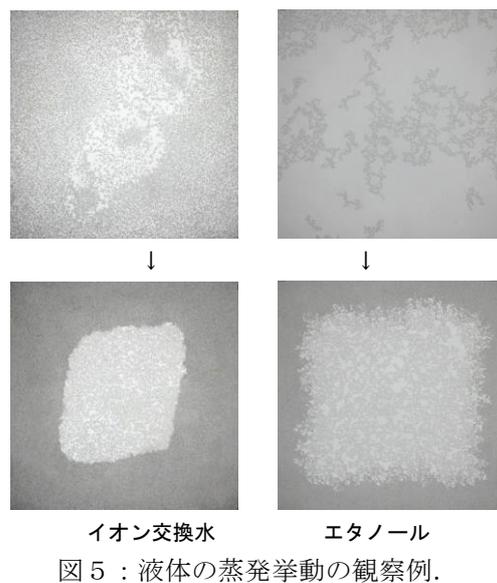


図4：撮影画像を3値化した例。青：濡れ領域，赤：乾き領域，緑：中間領域。



50℃程度まで昇温した実験ができるように、装置の改良もおこなった。図5に、イオン交換水とエタノールの蒸発挙動の違いを示す。水の場合は減圧開始直後に微小な気泡が多数発生し、それが成長していく。これは溶存気体が析出して気泡核となったものだと考えられる。これに対してエタノールや他の有機液体のばあいには、樹状構造の発達が顕著に見られた[雑誌論文①]ほか。溶存気体の影響は、実験開始前に、テスト液体を減圧脱気したり、逆にバブリングによって飽和させたりすることで検討したが、有機液体の場合は溶存気体の多少にかかわらず樹状構造の形成がみられた。このため、水と有機液体の蒸発挙動の違いは、溶存気体の量ではなく、主として液体の濡れ性に由来するものと結論づけた。

(4) 表面粗さの影響の検討：外注によりガラス板表面をサンドブラスト加工することで、3段階の異なる表面粗さ[図6]をもつすりガラスを作成し、蒸発実験をおこなった。表面粗さが大きい場合ほど蒸発速度は大きくなった。本実験ではガラス板間にスペーサーを入れていないため、その間隙は表面粗さのみで決まる。図7に示すように、蒸発速度

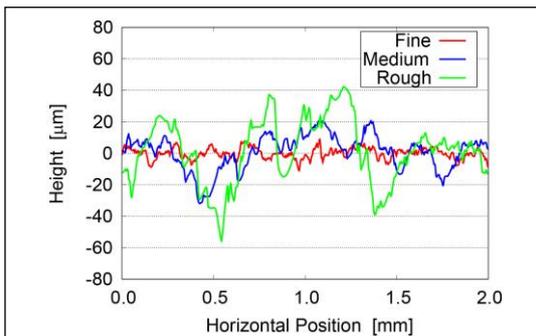


図 6 : ガラスサンプルの表面粗さ計測例.

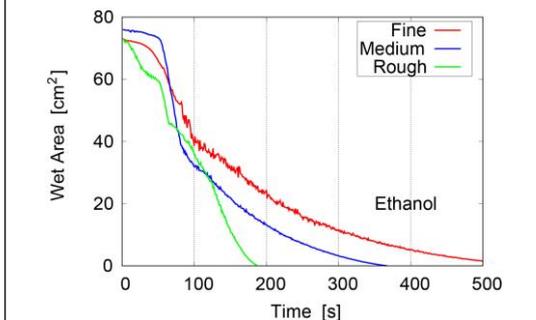


図 7 : 蒸発速度の表面粗さ依存性の例 : エタノール.

は表面粗さに大きく依存することを見出した [雑誌論文①ほか]. これは, 単純に開口部面積の違いのみで説明することはできず, 濡れ性 (見かけの接触角) の粗さ依存性など, 壁面のミクロスケールの構造が大きく影響していると考えている.

(5) その他の制御因子の検討: エタノールをテスト液体として, チェンバー内圧力と温度を変えた実験をおこない, その影響を調べた [雑誌論文①ほか]. また, 国際会議等での発表 [学会発表⑥~⑧など] に対するコメントを受けて, ガラス板の厚さを変えることでガラス板のたわみの影響を定量的に調べ, 報告した [雑誌論文①ほか].

(6) 数値シミュレーションならびに蒸発の数理モデルの開発: こうした一連の実験により, 表面粗さと濡れ性が, 間隙からの蒸発挙動の重要な支配因子であることがあきらかになった. こうした現象を説明できる数理モデルを構築するために, 2種類の数値シミュレーションをおこなった:

- ・間隙からの蒸発の分子動力学 (MD) シミュレーション [学会発表⑤, 図書①など]: 図 8 に示すように, 濡れ性が大きい場合, 蒸発により後退する界面近傍に極薄液膜が存在する. 表面粗さがある場合, その液膜の pinning が濡れ領域の樹状構造形成に寄与していることが示唆された.

- ・構造形成のモデリング: viscous fingering モデルなど, 樹状構造の形成を説明するモデルはいくつか存在するが, 表面粗さや濡れ性

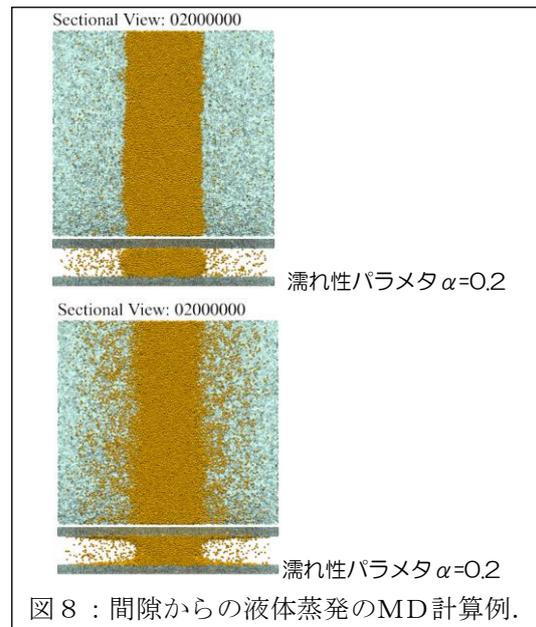


図 8 : 間隙からの液体蒸発の MD 計算例.

の影響をうまく取り扱うのは困難である. 本研究では, 多孔質体への流体浸透を取り扱う Lucas-Washburn モデルを出発点とした新たなモデルの構築を始めた. 本研究課題の終了時点ではまだ構築が完了していないが, 本研究で開発した実験装置を用いて, 新たに, ガラス板間隙への液体吸い上げの実験をおこない, 新しいモデルとの整合性をチェックしているところであり, その一部は国際会議で発表予定である [学会発表①].

(7) 突沸現象の解析: 可視化実験を進めていく中で, どのテスト液体の場合にも, 液体のゆっくりとした蒸発のほか, 時折, 液体界面が急激に移動し, それが同心円状に拡大していく様子が観察された. これは, ガラス表面で発生した気泡核からの突沸現象であると考えられる. 本研究での実験装置ではその定量的解析は困難であったため, 突沸に伴うガラス板の動きから定性的な知見を得ることを目的として, ガラス板をクリップで固定せず水平に設置した場合の jumping を観察した [雑誌論文②]. 図 9 に示すように, 減圧過程前半での独立的な jumping が突沸現象に対応していると考えられるが, それ以外に, 減圧過程後半において, 長く続く周期的な jumping が観察された. そのメカニズムは完全に明らかになったわけではないが, 蒸気の

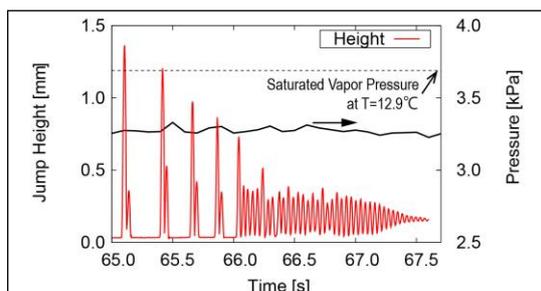


図 9 : 突沸に伴うガラス板の jumping 挙動の観察例.

不完全凝縮性に由来するものと考えている。突沸に対応する独立な jumping は、予想通り表面粗さに大きく影響されることも併せて見出された。

以上、本研究課題においては、主として可視化実験により、プレート間隙の液体が減圧下で蒸発する過程を追跡し、その支配因子を明らかにできた。当初の目的はほぼ達成されたものと考えているが、数理モデルの構築など一部未完了のものについては研究を継続している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Keita Ogawa, Yuichi Yasumoto, Mitsuhiro Matsumoto, Hidenobu 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 Mitsuhiro Matsumoto, Keita Ogawa, Yuichi Yasumoto, “Evaporation and boiling in narrow gap,” *Applied Therm. Engineering*, vol. 122 (2017) 706-711.
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.035
- ③ Takashi Ao and Mitsuhiro Matsumoto, “Example of a Fluid-Phase Change Examined with MD Simulation: Evaporative Cooling of a Nanoscale Droplet,” *Langmuir*, vol. 33 (2017) 11679-11686.
DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b02059

[学会発表] (計 10 件)

- ① Dike Xu, Keita Ogawa, Mitsuhiro Matsumoto, “Evaporation and boiling in thin gap,” 16th International Heat Transfer Conference (Beijing, China, 2018) paper 22230.
- ② Mitsuhiro Matsumoto, Keita Ogawa, Dike Xu, “Evaporation in thin gap,” 28th International Symposium on Transport Phenomena (Peradeniya, Sri Lanka, 2017) paper 11.
- ③ Mitsuhiro Matsumoto, Keita Ogawa, Dike Xu, Yuichi Yasumoto, “Evaporation and boiling in thin gap,” Liquid Matter Conference (Ljubljana, Slovenia, 2017) paper 7.011.
- ④ Dike Xu, Mitsuhiro Matsumoto, Keita Ogawa, “Liquid phase change in thin gap under reduced pressure,” 6th International Symposium on Micro and Nano Technology (Fukuoka, Japan, 2017)

paper 2138.

- ⑤ Takashi Ao and Mitsuhiro Matsumoto, “MD simulation of sandwiched liquid evaporation,” International Symposium on Computational Materials and Biological Sciences (Khujand, Tajikistan, 2016) 22-23.
- ⑥ Mitsuhiro Matsumoto, Keita Ogawa, Yuichi Yasumoto, “Evaporation and boiling in narrow gap,” 5th Micro and Nano Flows Conference (Milan, Italy, 2016) paper 125.
- ⑦ Keita Ogawa, Yuichi Yasumoto, Mitsuhiro Matsumoto, “Dominant factors for quasi two dimensional boiling,” 27th International Symposium on Transport Phenomena (Honolulu, USA, 2016) paper 083.
- ⑧ Keita Ogawa, Yuichi Yasumoto, Mitsuhiro Matsumoto, “Quasi two-dimensional boiling under reduced pressure,” 1st Pacific Rim Thermal Engineering Conference (Hawaii, USA, 2016) paper 14530.
- ⑨ Takashi Ao and Mitsuhiro Matsumoto, “MD simulation of sandwiched liquid evaporation,” 1st Pacific Rim Thermal Engineering Conference (Hawaii, USA, 2016) paper 14703.
- ⑩ Yuichi Yasumoto, Yuki Okura, Keita Ogawa, Mitsuhiro Matsumoto, “Quasi two-dimensional evaporation and boiling under reduced pressure,” 5th International Symposium on Micro and Nano Technology (Calgary, Canada, 2015) paper S7-115

[図書] (計 1 件)

- ① Takashi Ao and Mitsuhiro Matsumoto, Computer Design for New Drugs and Materials, ed. by K. T. Kholmurodov (Nova Science Publishers, 2017, total 231 pages) Chapter 6, pp. 109-122.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 充弘 (MATSUMOTO, Mitsuhiro)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10229578

(4) 研究協力者

加藤 栄一 (KATO, Eiichi)
AIP 株式会社・代表取締役社長