

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18011

研究課題名(和文)電気毛管力により駆動される表面張力流を利用した界面挙動の制御

研究課題名(英文)Control of interface behavior by electrocapillary flow

研究代表者

矢野 大志 (Yano, Taishi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：50768679

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)：本研究は、電気毛管効果によって生じる表面張力流の特性について明らかにし、界面挙動の制御に応用することを目的とするものである。(1)シリコンオイル中に炭酸ナトリウム水溶液の液滴を形成し、静電場を変化させることによって起こる液滴の形状変化から界面張力と静電場の関係を調査した。(2)シリコンオイルと純水の油水界面を形成し、静電場を変化させることによって生じる電気毛管力が駆動する流動場の計測を行った。(3)気体中に形成されたシリコンオイル液滴に温度差表面張力流を誘起したあと、液滴に電圧を印加することによって表面張力流が抑制され流速が遅くなる現象を観察した。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study are to understand the characteristics of surface-tension-driven flow due to electrocapillarity, and to control the interface behavior using the electrocapillary flow. (1) The effect of electrostatic fields on the interfacial tension between silicone oil and sodium carbonate aqueous solution is studied by comparing the drop shapes obtained experimentally and theoretically, i.e., axisymmetric drop shape analysis technique. (2) The velocity distribution of electrocapillary flow along the interface between silicone oil and water is measured with particle image velocimetry. (3) The deceleration of thermocapillary flow in a hanging droplet is realized by applying voltage.

研究分野：流体工学，熱工学

キーワード：対流 表面張力 界面張力 電気毛管効果 不安定性 液滴 液膜

1. 研究開始当初の背景

表面張力は液体の表面積を縮小するように働く力であり、その強さは表面電荷密度、流体温度、溶液濃度などに依存する。そのため、これらの諸量が不均一に分布する場合には表面張力分布も不均一となり、結果として気液界面上の表面張力差によって流れが駆動される。表面張力流は気液界面を有し、かつ、重力などの体積力が抑制される系(例えば、微小な液滴、薄液膜、気泡など)において顕在化するため、その流動特性を理解することが微小スケールの流体ハンドリング技術の向上などにつながる。

表面張力流に関する研究は1970年代から盛んに行なわれるようになったが、その背景には表面張力流の不安定性が関係している。チョクラルスキー法やフローティングゾーン法のように融液から結晶を育成する場合、融液表面には大きな温度勾配が存在するため気液界面上に表面張力分布が生じ、流れが誘起される。表面張力流は駆動力の増加とともに流速が増し、特定の条件において流動パターンの変移が起きる。このような不安定性の発現は育成結晶の品質にも影響を及ぼすため、表面張力流の特性を把握し不安定化を制御することが求められている。

これまでの研究において表面張力流に関する基礎的なデータが多く蓄積され、不安定性の発現メカニズムが解明されつつある。しかし、電場と表面張力流の詳細な関係など、未だに明らかにされていない課題も存在する。気液界面あるいは非混合性の液液界面に電圧を印加することで表面(界面)張力が変化する。このことは電気毛管現象として広く知られているが、電圧を印加することによって生じる表面張力差を駆動力とする流れに着眼した研究例は少ない。表面張力流の駆動力には温度差、濃度差、電位差などが挙げられるが、電気的な力は操作性の観点から表面張力流の制御に貢献することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電気毛管効果によって生じる表面張力流の特性を調査し、液体の界面挙動の制御に応用することである。具体的には以下の点に着眼して研究を行った。

- (1) 静電場の変化に対する表面張力の変化を実験的に明らかにする。
- (2) 電気的な効果によって界面張力を変化させ、それによって誘起される流れを観察する。
- (3) 温度勾配によって駆動される表面張力流を電気的な効果によって制御する。

3. 研究の方法

本研究では、シリコンオイルを作動流体として実験を行った。シリコンオイルは温度差によって駆動される表面張力流の研究によく用いられており、温度変化に対する特

性に関しては多くの知見がある。しかし、電気毛管効果に関する研究例は少なく、本研究ではシリコンオイルと電気毛管現象の關係に着眼して研究を行った。シリコンオイルの表面(界面)張力と静電場の關係を把握するため Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) 法を用いて界面張力の測定を行った。また、電気的な効果によって駆動される表面張力流の観察には、トレーサ粒子を用いた画像計測技術を用いた。

4. 研究成果

4.1. ADSA 法による界面張力測定

図1に示す実験装置を用いて、さまざまな静電場中におかれた液滴の界面張力を測定した。シリコンオイル(ただし、シリコンオイルにはイオン導電性付与剤(PEL-100)が0.01wt%の割合で添加してある)の油槽中に挿入されたロッドの先端に炭酸ナトリウム水溶液の液滴を形成する。ADSA 法では、実験で得られた液滴形状と Young-Laplace の式で決定される理論的な液滴形状を比較することで界面張力を測定する。本実験装置では、上部ロッドの中心と油槽下部に電極(上がアノード、下がカソード)が設置されており、これらの電極間に電圧を印加することで静電場を変化させることができる。図2はシリコンオイル中に形成された炭酸ナトリウム水溶液の懸垂液滴(左)と電極間の電圧を0~400Vの範囲で変化させた場合の界面張力の変化(右)を示している。印加電圧を0Vから400Vまで増加すると界面張力が1mN/m程度増加していることがわかる。実験中の液温は一定に保たれているため、本実験で確認された界面張力の変化は電圧を印加したこと由来する。

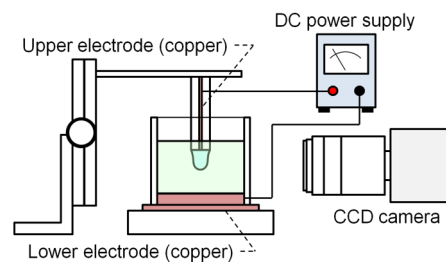


図1 Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA) 法による界面張力測定装置の模式図

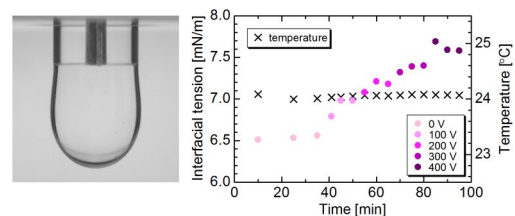


図2 シリコンオイル中に形成された炭酸ナトリウム水溶液の懸垂液滴(左)とさまざまな静電場中における界面張力の測定結果(右)

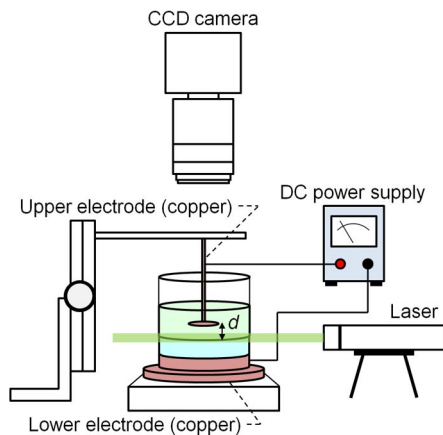


図3 電気毛管力によって駆動される流れを計測するための実験装置の模式図

#### 4.2. 電気毛管力によって駆動される流れのPIV計測

電圧を印加することによって生じる界面張力差を駆動力とする流れを観察するため、図3に示す実験装置を構築した。本実験では作動流体として純水とシリコンオイルを使用し、内径40mmの円形容器内に下が純水、上がシリコンオイルとなるように水相と油相の二重液膜を形成した。これらの二重液膜の界面を挟むように電極を配置し、電圧を印加することで界面張力を変化させて流れを誘起した。

本実験では、Particle Image Velocimetry (PIV) を用いて流れ場の様子を観察した。油相中に微小なトレーサ粒子を懸濁、グリーンレーザーを用いて容器側面から流れ場を照らし、トレーサ粒子の散乱光を上部の高速度カメラで記録する。得られたトレーサ粒子の挙動を解析することで油水界面付近の流動構造を計測した。上部電極をアノード、下部電極をカソードとして電極間に(1)170V、(2)250V、(3)350Vの電圧を印加した際に生じた流れの速度分布を図4に示す。電圧を印加すると上部の電極付近から湧き出すような流れが生じていることが確認できる。本研究で使用した実験装置は軸対称であり、そのため軸対称な流れが発生すると期待していたが、予想に反して非軸対称な流れが確認された。また、電圧の増加とともに流速が増加する傾向を確認することができるが、これは印加電圧が大きくなるにしたがって界面張力の変化も大きくなり、電気毛管効果による駆動力が増大するためである。

#### 4.3. 電圧印加による温度差駆動表面張力流の抑制

直径5mmの金属製ロッドの先端にシリコンオイルの懸架液滴を形成し、その4.5mm下にも同じく直径5mmの金属製ロッドを液滴とは接触しないように配置した。これらのロッドにはヒーターまたはペルチェ素子が取り付けられているため温度調節が可能で

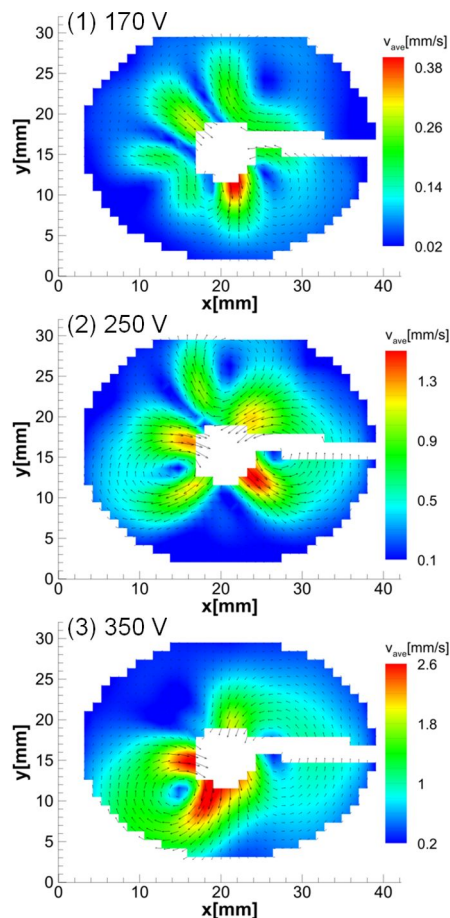


図4 電気毛管力によって駆動された流れのPIV計測結果:(1)170V,(2)250V,(3)350V

あり、上部のロッドを加熱、下部のロッドを冷却することによって温度差駆動の表面張力流を誘起することができる。上下のロッドは同時に電極(上がアノード、下がカソード)の役割も果たしており、液滴に対する電圧印加の影響を調べることが可能である。

電圧が印加されていない場合、ロッド間の温度差によって液滴の表面では上から下に向かう表面張力流が生じるが、ロッド間に電圧を印加すると液滴内部の流れが急激に減速する現象が確認された。ロッド間に $\Delta T = 5$  Kの温度差を与えた場合の液滴内の流れの様子を図5に示す。液滴内にはトレーサ粒子が懸濁されており、図5はトレーサ粒子の1s間の軌跡を示している。電圧が印加されていない場合は気液界面で下降流、内部で上昇流が生じており、その様子をトレーサ粒子の軌跡から確認することができる(図5(1))。一方、 $E = 600$  Vの電圧を電極間に印加するとたちまち対流が減速され、トレーサ粒子の軌跡が点状となっている(図5(2))。この結果から、表面張力流が抑制されていることがわかる。また、電圧印加を停止すると再び表面張力流が駆動されることも確認された。この結果は、電気的な効果によって表面張力流を制御できる可能性を示唆している。本研



図5 液滴内の温度差表面張力流(上)と600 Vの電圧を印加したことによる対流の抑制(下): 白い線または点は1秒間のトレーサ粒子の軌跡である

究ではロッド間の温度差, 印加電圧の大きさをさまざまに変化させた条件で実験を行った。また, 温度差表面張力流の制御に向けて不安定性の発現メカニズムに関する実験および数値解析も行った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- [1] T. Yano, M. Hirotsu, K. Nishino, "Effect of interfacial heat transfer on basic flow and instability in a high-Prandtl-number thermocapillary liquid bridge," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 125, pp. 1121-1130 (2018). 査読あり (DOI: 10.1016/j.ijheat-masstransfer.2018.04.132)
- [2] T. Yano, K. Nishino, S. Matsumoto, I. Ueno, A. Komiya, Y. Kamotani, N. Imaishi, "Report on microgravity experiments of dynamic surface deformation effects on Marangoni instability in high-Prandtl-number liquid bridges," *Microgravity Sci. Technol.*, accepted for publication (2018). 査読あり (DOI: 10.1007/s12217-018-9614-9)
- [3] T. Yano, K. Nishino, S. Matsumoto, I. Ueno, A. Komiya, Y. Kamotani, N. Imaishi, "Overview of "Dynamic Surf" project in Kibo-Dynamic behavior of large-scale thermocapillary liquid bridges in microgravity," *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, Vol. 35(1), 350102 (2018). 査読あり (DOI: 10.15011/jasma.35.350102)
- [4] T. Yano, K. Nishino, I. Ueno, S. Matsumoto, Y. Kamotani, "Sensitivity of hydrothermal wave instability of Marangoni convection to the interfacial heat transfer in long liquid

bridges of high Prandtl number fluids," *Phys. Fluids*, Vol. 29(4), 044105 (2017). 査読あり (DOI: 10.1063/1.4979721)

〔学会発表〕(計15件)

- [1] 矢野大志, 西野耕一, 松本聡, 上野一郎, 小宮敦樹, 鴨谷康弘, "高プラントル数液柱マランゴニ対流の動的表面変形効果に関する「きぼう」利用実験," 日本マイクログラビティ応用学会第29回学術講演会, 2017年10月25~27日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス.
- [2] 山崎紘一郎, 矢野大志, 西野耕一, "電圧印加による懸下液滴内温度差マランゴニ対流の抑制," 日本マイクログラビティ応用学会第29回学術講演会, 2017年10月25~27日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス.
- [3] 山口諒, 矢野大志, 西野耕一, "高プラントル数液柱マランゴニ対流における動的表面変形の特性," 日本マイクログラビティ応用学会第29回学術講演会, 2017年10月25~27日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス.
- [4] 部信寛, 矢野大志, 西野耕一, "数値解析による液柱マランゴニ対流のふく射伝熱の評価," 日本マイクログラビティ応用学会第29回学術講演会, 2017年10月25~27日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス.
- [5] T. Yano, K. Nishino, S. Matsumoto, I. Ueno, A. Komiya, Y. Kamotani, N. Imaishi, "Report on microgravity experiments of dynamic surface deformation effects on Marangoni instability in high Prandtl number liquid bridges," *The Joint Conference of the 7th International Symposium on Physical Sciences in Space & 25th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly*, October 2-6, 2017, Juan-les-Pins, France.
- [6] M. Yamaguchi, T. Yano, K. Nishino, "Characteristics of dynamic surface deformation in oscillatory Marangoni convection in liquid bridges of high Prandtl number fluids," *The Joint Conference of the 7th International Symposium on Physical Sciences in Space & 25th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly*, October 2-6, 2017, Juan-les-Pins, France.
- [7] T. Yano, T. Katakura, K. Nishino, "Tomographic PIV measurement of thermocapillary convection in liquid bridges formed in space experiment," *The 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, June 18-22, 2017, Busan, Korea.
- [8] T. Yano, K. Nishino, S. Matsumoto, I. Ueno,

- A. Komiya, Y. Kamotani, N. Imaishi, "Overview of space experiment on dynamic surface deformation effects in transition to oscillatory Marangoni flow in liquid bridge of high Prandtl number fluids, Joint Conference: 31st International Symposium on Space Technology and Science, 26th International Symposium on Space Flight Dynamics & 8th Nano-Satellite Symposium, June 3-9, 2017, Ehime, Japan.
- [9] 廣谷真, 矢野大志, 西野耕一, "液柱周囲の熱環境がマランゴニ対流の不安定性と振動モードに与える影響," 第54回日本伝熱シンポジウム, 2017年5月24~26日, 大宮ソニックシティ.
- [10] M. Yamaguchi, T. Yano, K. Nishino, "PIV measurement of electrocapillary flow at the interface of two immiscible liquid layers," *11th Asian Microgravity Symposium*, October 25-29, 2016, Hokkaido, Japan.
- [11] M. Hirotsu, T. Yano, K. Nishino, "Effect of cooling disk temperature and interfacial heat transfer on the instability of Marangoni convection in liquid bridge," *11th Asian Microgravity Symposium*, October 25-29, 2016, Hokkaido, Japan.
- [12] R. Seki, T. Yano, K. Nishino, Y. Kamotani, S. Matsumoto, I. Ueno, A. Komiya, M. Kawaji, N. Imaishi, "Characteristics of dynamic surface deformation of oscillatory Marangoni convection in liquid bridge," *11th Asian Microgravity Symposium*, October 25-29, 2016, Hokkaido, Japan.
- [13] 片倉大久真, 矢野大志, 西野耕一, "トモグラフィック PIV を用いた液柱マランゴニ対流の振動流構造の測定," 第44回可視化情報シンポジウム, 2016年7月19~20日, 工学院大学新宿キャンパス.
- [14] T. Yano, K. Nishino, Y. Kamotani, I. Ueno, S. Matsumoto, "Effect of interfacial heating/cooling on the hydrothermal wave of thermocapillary liquid bridges of high Prandtl number fluids," *8th Conference of the International Marangoni Association*, June 12-16, 2016, Bad Honnef, Germany.
- [15] 矢野大志, 西野耕一, 鴨谷康弘, 上野一郎, 松本聡, "気液界面の熱移動が高プラントル数液柱マランゴニ対流の Hydrothermal Wave 不安定性に与える影響," 第53回日本伝熱シンポジウム, 2016年5月24~26日, 大阪府立国際会議場.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

矢野 大志 (YANO, Taishi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 50768679

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

西野 耕一 (NISHINO, Koichi)