

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06190

研究課題名(和文) 温度場と電場を用いた表面張力流の対流制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on Surface-Tension-Convection Control Using Temperature and Electric Field

研究代表者

西野 耕一 (Nishino, Koichi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90192690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：表面張力流の温度場と電場を操作し、対流制御を実現するための研究を行った。対象は、対向ロッド間の液柱、下向きロッド端面の液滴、水平液体層であり、作動流体はシリコンオイルである。研究成果は次の通りである。(1) 界面熱移動は液柱の温度差駆動の表面張力流の不安定性に影響を与え、臨界マランゴニ数と無次元振動数が「伝熱比」で整理できる。(2) 微小重力環境では、液柱表面からの熱ふく射が温度・速度分布の重要な制御因子となる。(3) 液滴に電場を印可すると、温度差と電圧が小さいと対流が減衰し、両者が大きいと複雑な対流が誘起される。水平液体層を用いて表面張力の温度・電位依存性を測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面張力流は、温度差、電位差、濃度差によって駆動され、マイクロ流れ、溶液流れ、微小重力環境下の液流の主因である。特に、気泡、液膜、液滴、液柱など、表面力が体積力を凌駕する系では表面張力流の役割が支配的となる。本研究では、温度場と電場を操作することによって表面張力流を制御するための基礎研究を行った。即ち、界面熱移動が表面張力流の不安定に与える影響、微小重力環境に置かれた液柱の気液界面からの熱ふく射の影響、下向きロッド端面に懸架された液滴の温度差表面張力流への電場の影響、水平液体層に印可した温度差・電位差への表面張力の依存性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A study aiming at the control of surface-tension driven convection (STDC) through manipulation of temperature and electric fields has been conducted. The geometries are a liquid bridge (LB) formed in the gap between the opposing rods, a droplet suspended on the end face of the downward rod, and a horizontal liquid layer. The working fluid is silicone oil. The results are as follows. (1) Interfacial heat transfer affects the instability of STDC and the critical Marangoni number and dimensionless oscillation frequency are correlated with "heat-transfer ratio." (2) In microgravity, the thermal radiation from LB is an important control factor for temperature/velocity distribution. (3) Application of an electric field to a droplet attenuates STDC if the temperature difference and applied voltage are small while it generates a complicated convection if both are large. Also, the dependence of surface tension on temperature/electrical potential was measured in a horizontal liquid layer.

研究分野：熱工学

キーワード：対流 表面張力流 不安定性 対流伝熱 熱ふく射 電場 液柱 液滴

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

表面張力流は、温度差、電位差、濃度差によって駆動され、マイクロ流れ、溶融液流れ、微小重力環境下の液流の主因である。特に、気泡、液膜、液滴、液柱など、表面力が体積力を凌駕する系では、表面張力流の発生条件、対流不安定性の出現、周囲環境からの影響（例えば、周囲の温度場や電場の影響）などが対流の特性を支配する。

図1は温度差駆動の表面張力流の様子を模式的に示したもので、周囲気体との界面熱移動（高温部では熱損失、低温部では熱利得）の影響を受けながら、対流場が形成される。近年の研究によって、僅かな界面熱移動の変化が、表面張力流の不安定性に顕著な影響を与えることが明らかにされつつある（下記文献[1]、[2]）。研究代表者らが実施した「温度差表面張力流の不安定性に関する宇宙実験」でも、界面熱伝達率が線形安定性解析や直接数値解析の結果に大きな影響を与えることが示され（下記文献[3]、[4]）、Hydrothermal Waveの特性とともに論じられている（下記文献[5]）。

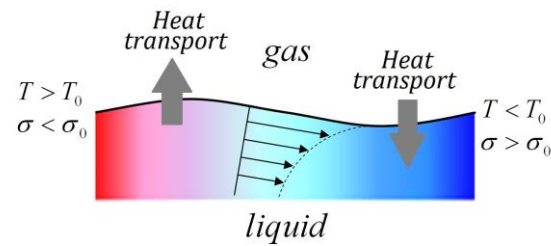


図1 温度差表面張力流における界面熱移動

表面張力流の駆動源として、温度差とともに電位差がある。電位差は比較的容易に印可・制御することができるため、能動制御への操作量として有望である。懸架液滴を用いた予備実験では、数百ボルトを印可することによって、温度差表面張力流を減衰・消滅できることが得られている。そのように、温度場と電場を操作することによって、表面張力流を能動的に制御（即ち、発生、抑制、安定化、不安定化）することが可能であり、マイクロ流れの対流制御、気泡制御（移動や除去）、液滴制御（移動や捕集）へと発展させることができる。

- [1] Y. Kamotani, L. Wang, S. Hatta, A. Wang & S. Yoda, Free surface heat loss effect on oscillatory thermocapillary flow in liquid bridges of high Prandtl number fluids, *International Journal of Heat Mass and Transfer* 46(17) (2003) 3211-3220.
- [2] V. Shevtsova, Y.A. Gaponenko & A. Nepomnyashchy, Thermocapillary flow regimes and instability caused by a gas stream along the interface, *Journal of Fluid Mechanics* 714 (2013) 644-670.
- [3] K. Nishino, T. Yano, H. Kawamura, S. Matsumoto, I. Ueno & M.K. Ermakov, Instability of thermocapillary convection in long liquid bridges of high Prandtl number fluids in microgravity, *Journal of Crystal Growth* 420 (2015) 57-63.
- [4] D.E. Melnikov, V. Shevtsova, T. Yano & K. Nishino, Modeling of the experiments on the Marangoni convection in liquid bridges in weightlessness for a wide range of aspect ratios, *International Journal of Heat Mass and Transfer* 87 (2015) 119-127.
- [5] T. Yano, K. Nishino, H. Kawamura, I. Ueno & S. Matsumoto, Instability and associated roll structure of Marangoni convection in high Prandtl number liquid bridge with large aspect ratio, *Physics of Fluids* 27 (2015) 024108.

2. 研究の目的

表面張力流制御のための基礎的知見の蓄積を目的として、以下の要因の影響を調べる。作動流体として低 Pr 流体であるシリコンオイルを対象とする。

(1) 界面熱移動が対流不安定性に与える影響

液柱の温度差駆動の表面張力流を対象として、液柱表面温度と周囲温度との間に意図的な差を与えて界面熱移動量を変化させ、それが対流の不安定性に与える影響を調べる。温度差と液柱形状を広範に変化させた実験を行うとともに、液柱と周囲気体を考慮した気液二相流の数値解析を行って界面熱移動を定量化する。

(2) 界面熱移動が対流パターンに与える影響

密度差対流の影響を受けない微小重力環境を対象とし、界面熱移動が温度差駆動の表面張力流の対流パターンに与える影響を調べる。微小重力データとして、「高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における液柱界面の動的変形効果の実験的評価」、日米加共同宇宙実験（実施期間：平成 25～28 年）で得られた実験データを解析する。

(3) 電場の影響

地上実験において、懸架液滴に直流電場を印可することによって、電位差駆動の表面張力流の発生と制御の特性を明らかにする。並行して、液膜に温度変化と電位変化を与え、白金プレート法による表面張力測定を行い、表面張力の温度場・電場依存性を実験的に調べる。

3. 研究の方法

(1) 界面熱移動が対流不安定性に与える影響

2cSt シリコンオイル液柱を対象とした地上実験を行った (図 2)。直径 5mm のロッド先端の隙間に液柱を形成し、ロッドに温度差を与えて温度差駆動の表面張力流を発生させ、液柱内部流動の可視化を行った。液柱を外部シールドで囲い、液柱表面温度と外部シールドの温度差を変化させた。液柱体積を精密に制御することによって、液柱形状を変化させた。液柱表面温度を細径熱電対プローブで測定し、対流不安定性の出現を検出した。市販コードを用いた数値解析によって、界面熱移動を定量化した。界面熱移動と対流不安定性との関係を調べた。

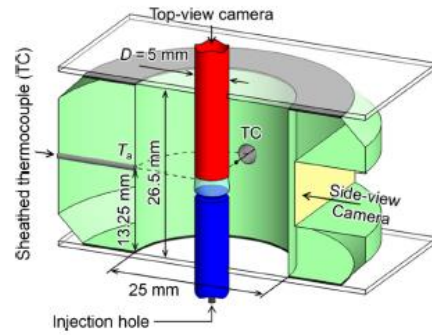


図 2 対流不安定性の観察装置

(2) 界面熱移動が対流パターンに与える影響

前述した宇宙実験のデータ解析を行うことによって、シリコンオイル液柱における界面熱移動と温度差表面張力流の特性を調べた。熱ふく射を考慮した熱・流動場の数値解析を行い、液柱と周囲との間の界面熱移動を定量化し、界面熱移動量と対流場の特性を系統的に整理した。

(3) 電場の影響

電場が温度差駆動の表面張力流に与える影響を明らかにするため、直径 5mm のロッド先端に懸架したシリコンオイル液滴に電場を印可し、対流の特性を調べた (図 3)。温度差、電場強さ、液滴体積などの影響を調べ、発生する電位差表面張力流の特性を可視化計測によって調べた。

また、電場が表面張力に与える影響を定式化するため、液膜の温度を変化させ、そこに直流電場を印可させ、白金プレート法で表面張力を測定した。実験結果から表面張力の温度場・電場依存性を定式化する。

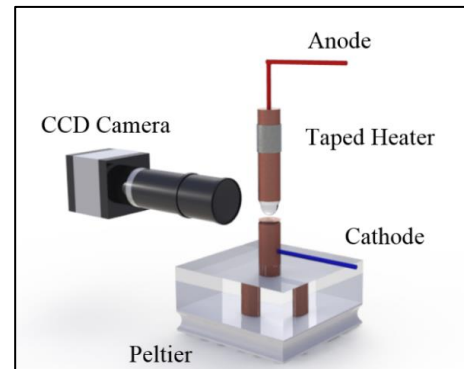


図 3 懸架液滴への電場印可

4. 研究成果

(1) 界面熱移動が対流不安定性に与える影響

研究成果を次の公表論文(1)として報告した。

- (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, International Journal of Heat and Mass Transfer, 125 (2018) 1121-1130.

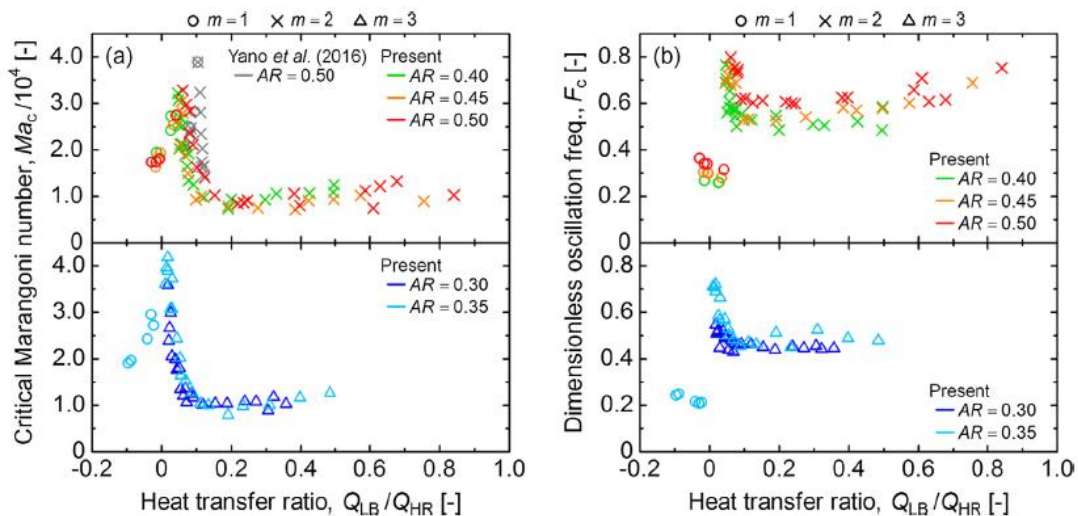


図 4 伝熱比 Q_{LB}/Q_{HR} と臨界マランゴニ数 Ma_c (左) および振動周波数 F_c (右) の関係

液柱アスペクト比 AR (=長さ/直径) が 0.35~0.50 の範囲において、対流不安定が生じる臨界温度差および振動周波数が、特定の $T_c - T_a$ (ここで、 T_c は冷却ディスク温度、 T_a は周囲気体温度) でピークを示すこと、そのピークの前後で周方向の振動モードが変化することを得た。伝熱比 Q_{LB}/Q_{HR} (ここで、 Q_{LB} は液柱表面から周囲への伝熱量、 Q_{HR} は加熱ディスクから液柱への

伝熱量) を数値解析から評価し、異なる AR に対する臨界マランゴニ数と無次元振動周波数が Q_{LB}/Q_{HR} で整理できること (図 4)、 Q_{LB}/Q_{HR} によって不安定性出現直前の液柱内部流動のパターンが分類できることを明らかにした (図 5)。

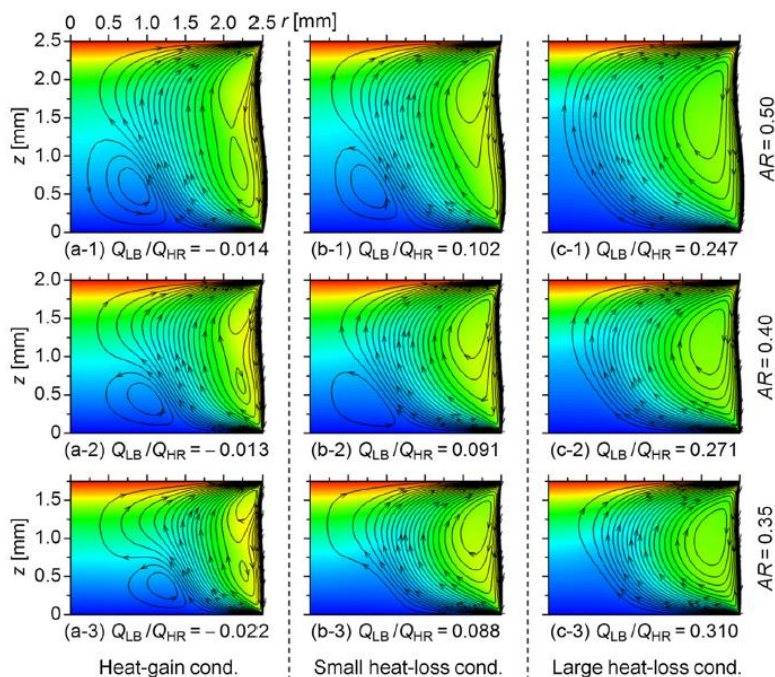


図 5 $AR=0.50, 0.40, 0.35$ おける液柱内部流動の伝熱比 Q_{LB}/Q_{HR} による整理

(2) 界面熱移動が対流パターンに与える影響

研究成果を次の公表論文(2)として報告した。また、データ解析の対象とした宇宙実験について公表論文(3)と(4)を報告した。

- (2) N. Shitomi, T. Yano & K. Nishino, Effect of radiative heat transfer on thermocapillary convection in long liquid bridges of high-Prandtl-number fluids in microgravity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133 (2019) 405-415.
- (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, *International Journal of Microgravity Science and Application*, 35(1) (2018), 7 pages.
- (4) 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 Science and Technology*, 12 (2018), 12 pages.

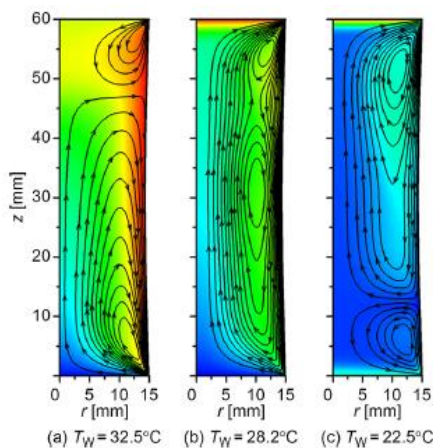


図 6 二次ロールの発生と温度場の関係

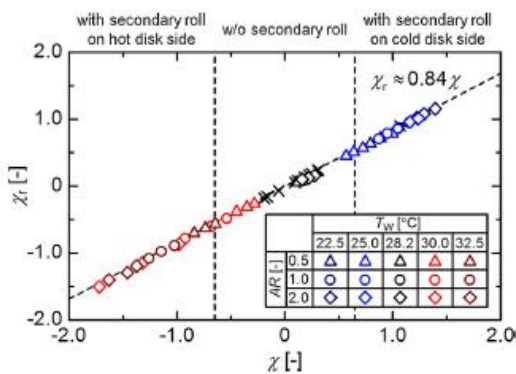


図 7 界面熱移動におけるふく射伝熱の寄与

微小重力環境における高 Pr 数流体の液柱を対象として、国際宇宙ステーションでの実験結果と、気液二相流の数値解析から、ふく射伝熱が温度差駆動の表面張力に与える影響を調べた。加熱ディスクから液柱への伝熱量 Q_{HD} 、液柱から冷却ディスクへの伝熱量 Q_{CD} 、液柱表面から周囲への伝熱量 Q_{LB} を評価した。微小重力では、気液界面からのふく射伝熱 Q_r の方が対流伝熱 Q_c より Q_{LB} への寄与が大きく、室温レベルでもその関係にあることが明らかになった。対流パターンが $\chi = Q_{LB} / \max(|Q_{HD}|, |Q_{CD}|)$ の大小によって四つに分類されることを示し、 χ を **modified heat transfer ratio** と名付けた。熱利得が大きい条件 ($\chi < -1$) と熱損失が大きい条件 ($\chi > 1$) では、対流場に二次ロールが生じる (図 6 の(a)と(c))。それらの条件では Q_{LB} の 84% がふく射伝熱によって担われている (図 7)。

(3) 電場の影響

温度差駆動の表面張力流が生じている懸架液滴に電場を印可すると、温度差が小さい条件では対流が消失し、温度差が大きな条件では複雑な対流が生じることを見いだした。そのような電場が与える影響をマップにまとめた (図 8)。

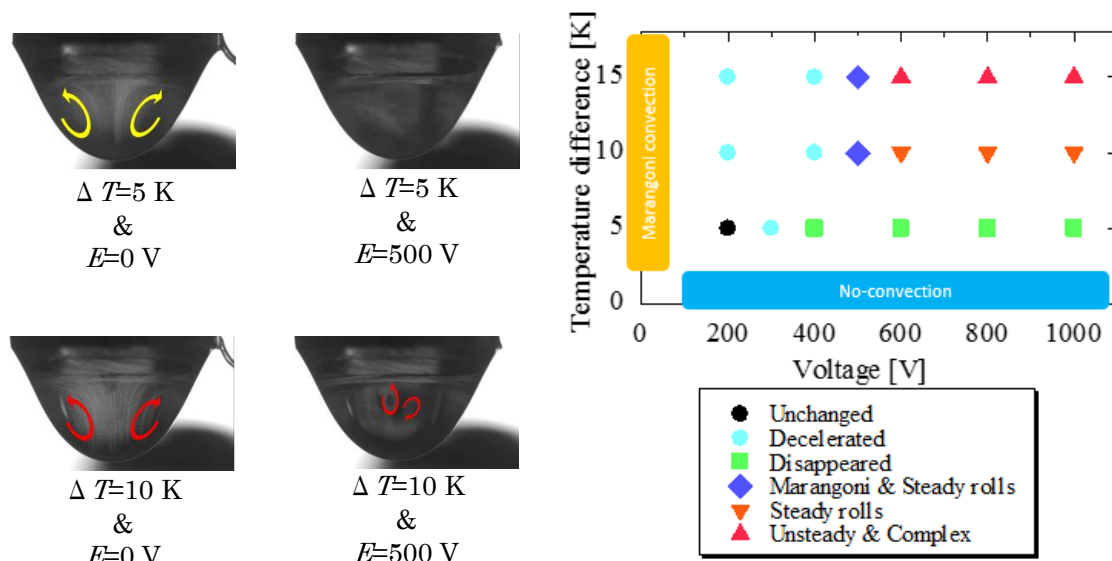


図 8 懸架液滴の温度差駆動表面張力流に与える印可電場の影響

水平液膜を対象として、電場が表面張力に与える影響を測定した (図 9)。印可電圧を 0~600V、液膜温度を 20~50°C の範囲で変化させた測定結果から、表面張力の温度と界面電位への依存性を与える実験整理式を得た。

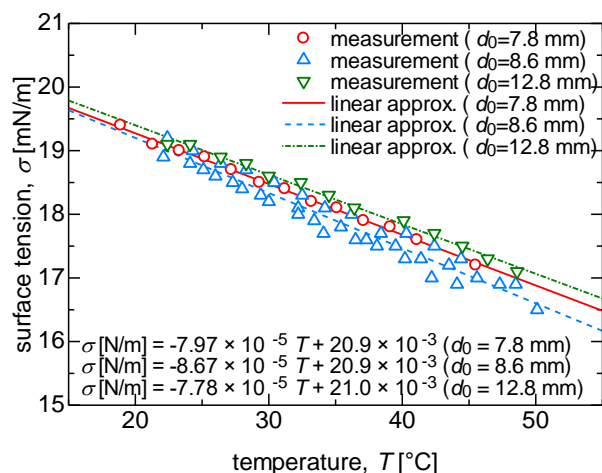


図 9 電場が表面張力に与える影響 (印可電圧 300V、 d_0 は電極間距離)

(以上)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yano Taishi, Hirotsu Makoto, Nishino Koichi	4. 巻 125
2. 論文標題 Effect of interfacial heat transfer on basic flow and instability in a high-Prandtl-number thermocapillary liquid bridge	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1121 ~ 1130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shitomi Nobuhiro, Yano Taishi, Nishino Koichi	4. 巻 133
2. 論文標題 Effect of radiative heat transfer on thermocapillary convection in long liquid bridges of high-Prandtl-number fluids in microgravity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 405 ~ 415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yano Taishi, Nishino Koichi, Matsumoto Satoshi, Ueno Ichiro, Komiya Atsuki, Kamotani Yasuhiro, Imaishi Nobuyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Report on Microgravity Experiments of Dynamic Surface Deformation Effects on Marangoni Instability in High-Prandtl-Number Liquid Bridges	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microgravity Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1,12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12217-018-9614-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Taishi YANO, Koichi NISHINO, Satoshi MATSUMOTO, Ichiro UENO, Atsuki KOMIYA, Yasuhiro KAMOTANI and Nobuyuki IMAISHI	4. 巻 35 (1)
2. 論文標題 Overview of "Dynamic Surf" Project in Kibo - Dynamic Behavior of Large-Scale Thermocapillary Liquid Bridges in Microgravity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	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) 10.15011//jasma.35.350102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計7件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 馬淵勇希, 山口諒, 矢野大志, 西野耕一
2. 発表標題 PIVを用いた振動流状態における液柱マランゴニ対流の内部流動計測
3. 学会等名 第46回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎紘一郎, 矢野大志, 西野耕一
2. 発表標題 懸下液滴内温度差マランゴニ対流に対する外部電場の影響の解析
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会第30回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬淵勇希, 山口諒, 矢野大志, 西野耕一
2. 発表標題 振動流状態における液柱マランゴニ対流の内部流動構造
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会第30回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Shitomi, Taishi Yano, Koichi Nishino
2. 発表標題 Radiative heat transfer from the surface of thermocapillary liquid bridges of high-Prandtl-number fluids in microgravity
3. 学会等名 9th Conference of the International Marangoni Association (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taishi Yano ¹ , Koichi Nishino, Satoshi Matsumoto, Ichiro Ueno, Atsuki Komiya, Yasuhiro Kamotani, Nobuyuki Imaishi
2. 発表標題 Report on Microgravity Experiments of Dynamic Surface Deformation Effects on Marangoni instability in High Prandtl Number Liquid Bridges
3. 学会等名 7th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS-7) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Yamaguchi ¹ , Taishi Yano, Koichi Nishino
2. 発表標題 Characteristics of Dynamic Surface Deformation in Oscillatory Marangoni Convection in Liquid bridges of High Prandtl Number Fluids
3. 学会等名 7th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS-7) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koichi Nishino and Taishi Yano
2. 発表標題 Space experiments and application of PIV techniques for the study of instability mechanisms of thermocapillary convection
3. 学会等名 International Symposium on Particle Image Velocimetry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017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