

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360078

研究課題名(和文)大スケール表面張力流の不安定性と動的界面変形の影響

研究課題名(英文) Instability and Effect of Dynamic Surface Deformation in Large-Scale Surface Tension Flow

研究代表者

西野 耕一 (Nishino, Koichi)

横浜国立大学・工学(系)研究科(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) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：大直径かつ高アスペクト比のシリコンオイル液柱の温度差駆動表面張力流の不安定性と動的界面変形の影響を、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」での宇宙実験ならびに地上実験と数値解析・不安定性解析を用いて調べた。その結果、臨界マランゴニ数と振動周波数のアスペクト比依存性、Hydrothermal Waveの逆方向伝播、高マランゴニ数における対流のカオス化・乱流化、粒子集合現象、動的界面変形特性などに関する微小重力実験データを得た。また、不安定性に関する線形・弱非線形安定性解析、ロッド内熱伝導の影響、フルゾーン液柱の不安定性、薄液膜の不安定性について地上実験や数値解析で明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Instability and effect of dynamic surface deformation of thermocapillary convection in large-diameter, high-aspect-ratio liquid bridges of silicone oil have been studied in space experiments in Japanese Experiment Module 'KIBO' on the International Space Station as well as in ground experiments and by means of numerical calculation and instability analysis. The microgravity experimental results are obtained for the dependence of critical Marangoni number and oscillation frequency on the aspect ratio, the counter-flow propagation of the hydrothermal waves, the transition to chaotic and turbulent states in high Marangoni number convection, and the characteristics of dynamic surface deformation. The results for the linear and weakly nonlinear stability analysis, the effect of heat conduction in the rods, the instability of full-zone liquid bridge and the instability of thin liquid layers are also obtained from the ground experiments and the numerical calculations.

研究分野：熱工学

キーワード：対流 表面張力流 不安定性 微小重力実験 線形安定性解析

1. 研究開始当初の背景

表面張力流は密度差対流が抑制される系(例えば、マイクロスケールや微小重力環境)において顕在化し、そこでの熱流体现象・装置に関わっている。1980年代後半からは、多数の微小重力実験(例えば、落下塔、航空機、小型ロケット、スペースシャトルを利用したもの)が実施され、知見の蓄積が進められてきた。一方、地上では、密度差対流の影響を抑えるため、「微小スケール表面張力流」(例えば、薄い液膜、微小液滴、微小気泡、小型液柱などに見られるもの)を対象とした基礎研究が行われ、界面流体力学/工学が構築されてきた。その具体的な応用先として、半導体結晶育成、マイクロ流体技術、気泡/液滴ハンドリング技術、高効率ヒートパイプ等がある。

国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験モジュール「きぼう」で2008年8月から開始された宇宙実験は、直径30mmと50mmの液柱ならびに半球液滴を形成し、温度差駆動の「大スケール表面張力流」の不安定性と対流制御性を実験的に調べることを目的とするものである。これまでの宇宙実験から、次のような学術的成果が得られつつある。

(1) 大スケール液柱における表面張力流の不安定性が過去の欧米における一連の微小重力実験の結果と異なることが示され、不安定性発現メカニズムの見直しを促す実験データが取得されている。

(2) 液柱長や液柱体積比を広範囲に変えた系統的な実験データが得られ、安定性解析等による検証が待たれている。特に、地上では実現できない長液柱において、液柱軸方向に複数のモード構造を有する longitudinal mode の発生を観察することに成功した。

(3) 小スケール液柱で容易に出現する粒子集積現象が、大スケール液柱では出現しにくいことが示され、日欧共同研究の対象として検討が進められている。

(4) 大スケールの半球液滴における表面張力流が観察され、地上実験との類似点/相違点が明らかにされつつある。

2. 研究の目的

本研究は2012~2014年に実施される計4シリーズの宇宙実験、ならびに地上研究を通して、液柱および液滴における「大スケール表面張力流」の特性を明らかにすることを目的とする。具体的には次の通りである。

(1) 地上実験より一桁大きな高マランゴニ数条件を実現し、対流場のカオス化ならびに乱流遷移の過程を明らかにする。「表面張力乱流」が出現するか否かを調べる唯一の実験となる。

(2) そのような高マランゴニ数条件における粒子集積現象を調べる。粒子集積現象が「大スケール表面張力流」で出現しにくいことの原因を宇宙実験および数値解析によ

って明らかにする。

(3) ISS 特有の g ジッタの影響が不安定性に与える影響を調べるとともに、不安定性自身が誘起する動的界面変形の特性を測定する。それによって、動的界面変形が存在する表面張力対流場の不安定性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究期間中の2012~2014年(平成24~26年)に計画されている計4シリーズの宇宙実験(各6週間程度)を実施し、長時間微小重力環境を活かした実験データを取得する。後半3シリーズは、米国およびカナダの研究者との共同実験である。実験データは、熱電対信号、IR画像、トレーサ粒子画像、フォトリソミック画像などで構成されており、物理的知見を得るための詳細解析を行う。具体的には、熱電対出力からの振動流遷移の検出、IR画像からの Hydrothermal Wave の把握、トレーサ粒子画像からの3次元流動の定量化、フォトリソミック画像からの表面流速測定などを行う。並行して、物性値測定、地上対比実験、装置検証実験などを実施することにより、宇宙実験の遂行を支援する。さらに、「大スケール表面張力流」の実験結果と対比できる線形安定性解析および直接数値解析を行う。

4. 研究成果

4.1 不安定性発現条件と熱流動構造

広範な実験条件において液柱マランゴニ対流の振動流遷移の臨界条件を計測し、プラントル数 (Pr)、アスペクト比 (AR =液柱高さ/ディスク直径)、体積比 (VR =液柱体積/ディスク間体積)、加熱速度などの影響を明らかにした。宇宙実験の主な実験条件は表1に示すとおりである。

表1 実験条件

	D [mm]	AR [-]	Pr [-]
MEIS-1	30	0.10-2.00	67
MEIS-2	30	0.15-2.00	67
MEIS-3	30	0.35-2.00	207
MEIS-4	50	0.225-1.25	207
MEIS-5	50	0.25-1.25	112

図1, 2は計測された臨界マランゴニ数 (Ma_c) と無次元振動周波数 (F) を AR に対してプロットしたグラフである。ここで Ma_c と F は、

$$Ma_c = |\sigma_T| \Delta T_c R / (\rho \nu \alpha)$$

$$F = fR^2 / (\alpha Ma_c^{0.5})$$

(ΔT_c : 臨界ディスク間温度差, R : ディスク半径, σ_T : 表面張力温度係数, ρ : 密度, ν : 動粘度, α : 熱拡散係数, f : 振動周波数)

で定義される無次元数である．これまで，高 AR 液柱における実験データは乏しかったが，研究では宇宙実験の特性を利用して広範な AR における Ma_c 、 F の計測に成功し，液柱マランゴニ対流の不安定性に対する AR の影響を明らかにした．

$AR \leq 1$ の範囲では， Pr とディスク直径に依らず Ma_c と F の傾向はよく一致しているが， $AR > 1$ では Pr によって異なる傾向を示すことが確認された． $Pr=207$ の場合には Ma_c と F が一定であるのに対して， $Pr=67$ では Ma_c と F が急激に減少（ジャンプ）している．これは， $Pr=67$ の $AR > 1.25$ で軸方向の振動モードが変化したためである．液柱マランゴニ対流が振動流へと遷移すると，液柱表面を低温の波（hydrothermal wave，以下 HTW）が伝播する．その際，気液界面付近の渦構造（roll structure，以下 RS）も HTW と同期して伝播することが本研究で確認された．

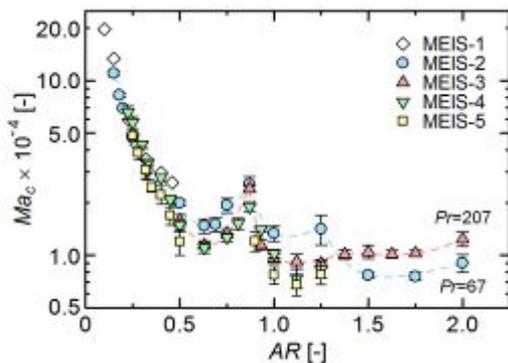


図 1 臨界マランゴニ数のアスペクト比依存性．

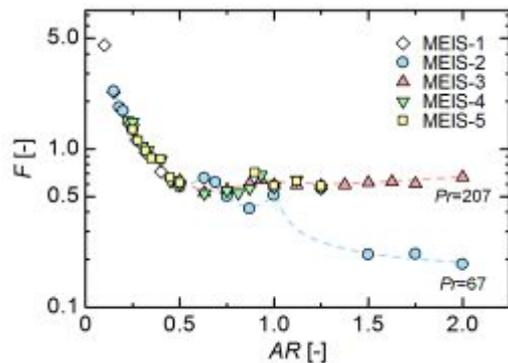


図 2 無次元振動周波数のアスペクト比依存性．

図 3 は， Ma_c と F が減少する前 (a) と減少した後 (b) の RS の伝播の様子を 3-D PTV で可視化した結果である． $AR \leq 1.25$ では RS (HTW) が高温側 (上) から低温側 (下) へと伝播しているのに対して， $AR \geq 1.50$ では低温側 (下) から高温側 (上) へと伝播しており，このような RS (HTW) の伝播方向の変化に伴って Ma_c と F が急激に変化したことが明らかになった．このような現象は，線形安定解析や数値計算の結果でも見られており，実験結果と良好な一致を示している．

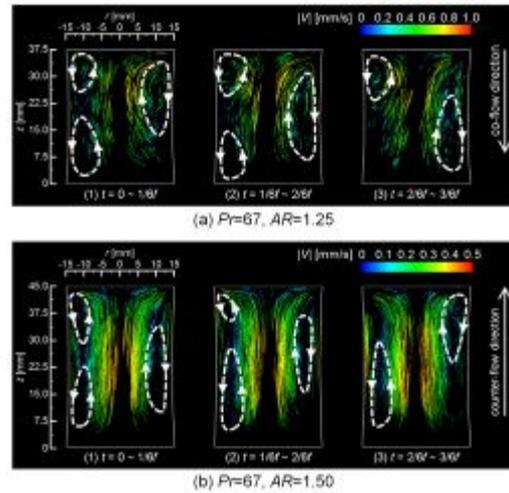


図 3 流れの可視化計測結果 (a) $Pr=67$, $AR=1.25$ ，
(b) $Pr=67$, $AR=1.50$ ．

本研究では，振動流遷移後に現れる液柱の動的表面変形 (DSD) も計測した．ISS には残留重力による微小な振動 (g ジッタ) が存在しており，適切なフィルタリングを施すことで振動流遷移による DSD と g ジッタによる DSD を分離することが可能である．これによって，微小重力環境において大スケール液柱の振動流遷移由来の DSD の計測に初めて成功した．小スケール液柱における DSD も地上実験において計測しており，これらの結果を比較することで液柱サイズが DSD に与える影響と振動流遷移条件に与える影響を調査した．

4.2 カオス化過程と粒子集合現象

微小重力実験 (図 4) を対象に，従来から行われてきた擬位相空間内でのアトラクタやポアンカレ断面といった定性的評価や，リアプノフ指数や相関次元といった定量的評価に加えて，並進誤差や順列エントロピーといった新たな定量的評価を実施し (図 5)，高プラントル数 ($Pr > 100$) 流体における高アスペクト比液柱内対流場のカオス化過程の定量的解析を初めて実施した．

液柱内で発現する粒子集合現象 (Particle Accumulation Structure: PAS) に関し，実験的アプローチによりその構造や発現条件の高精度検出を実現するとともに，ISS で得られた実験データ解析手法を適用し，PAS 発現時におけるスカラー場の非線形解析を実施した．地上で周方向波数 $m=3$ の PAS を定常的に実現した上で，Hydrothermal Wave の回転座標系で PAS を再構築し (図 6 左)，主要な PAS 構造に加えて，液柱自由表面近くに存在する Core 部，さらにその Core 部を取り巻くように存在する特定の軌道を初めて抽出した．この再構築した構造は，単純化した液柱内対流場で構成される Kolmogorov-Arnold-Moser (KAM) トーラスの主要構造 (図 6 右) と大変よい一致を見せており，今後 PAS 発現メカニズム解明に向けて実験・理

論の双方向から大きな発展が期待される。また、液柱内に発現する PAS の発現条件の客観的評価の導入に向けて、液柱アスペクト比および付加したマランゴニ数に対して粒子の集合度合いの定量化や非線形性の定量化を実験的に初めて行った。

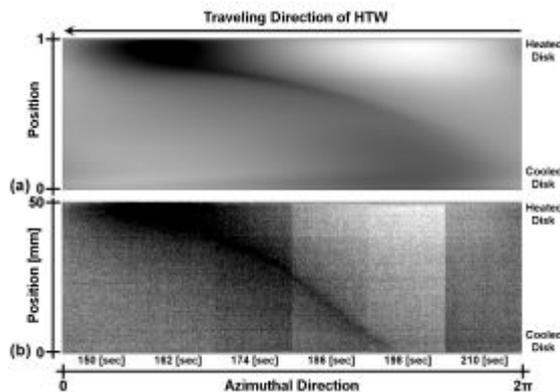


図 4 高 AR 高 Pr 液柱における周方向波数 $m=1$ を有する Hydrothermal wave 不安定性発現時の表面温度変動分布の例：(上) 数値解析で予測した表面温度変動成分、(下) 実験で得られた分布。

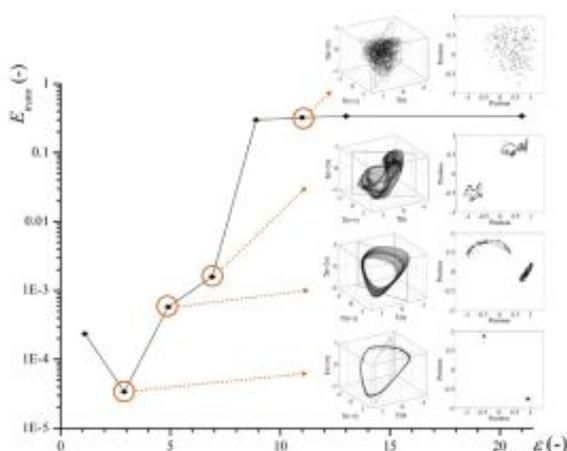


図 5 高 AR 高 Pr 液柱における並進誤差の分布：特徴的な点における擬位相空間内アトラクタおよびポアンカレ断面内での軌道分布も挿入している。

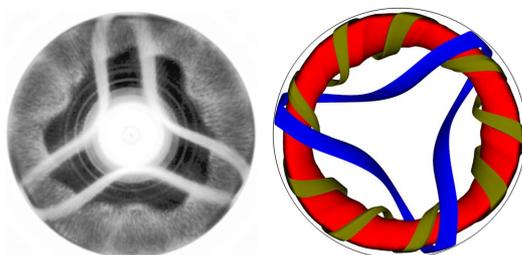


図 6 (左) 地上実験において実現した直径 5 mm のハーフゾーン液柱内 PAS の回転座標系表示、(右) モデル化した対流場構造から抽出した KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser) トーラスの主要構造。

4.3 地上研究

4.3.1 $AR=1$ の液柱マランゴニ対流の安定性解析

ハーフゾーンモデルの液柱マランゴニ対流の線形並びに弱非線形安定性を、それぞれノーマルモード解析と弱非線形解析によって調べ、回転波と定在波が選択されるプラントル数範囲を特定した。まず、安定性を調べる対象である主流(軸対称定常マランゴニ対流)を求めするために、チェビシェフ多項式展開を行ったが、その際に上下ロッドのエッジ付近の液柱内に生じる「特異性」を回避するため、余弦関数にもとづく「正則化」を用いた。安定性解析にもチェビシェフ多項式展開を用い、全固有値と固有関数を計算することにより、過去に有限差分法を用いて得られていた臨界条件を $Pr \leq 10$ の範囲で精度良く再現したと同時に、低 Pr 領域に新しい臨界モードが存在することを見出した。弱非線形解析では、同変分岐理論と振幅展開を用いて、定常モードに対しては $dA/dt = \sigma A + \lambda |A|^2 A$ 、Hopf モードに対しては

$$\begin{aligned} dB/dt &= \sigma B + \lambda |B|^2 B + \mu |C|^2 B \\ dC/dt &= \sigma C + \mu |B|^2 C + \lambda |C|^2 C \end{aligned}$$

の形の振幅方程式を流体方程式から矛盾なく導出し、そこに含まれる係数の値を数値解析によって求めた。図 9 に解析結果を示す。広い Pr 範囲にわたる解析を行うことにより、わずかに超臨界の領域(準臨界領域)で安定に選択される不安定モードが Pr によって入れ替わることを見出した。Leypoldt, et al. は、数値シミュレーション結果から振幅方程式の係数を評価することによって、 $Pr \geq 1$ の流体については、 $Pr = 7.8 \pm 0.1$ で回転波から定在波に入れ替わることを予想したが、今回の弱非線形解析では 7.48 で入れ替わるという、定性的のみならず定量的にもほぼ一致する結果が得られた。

4.3.2 上下ロッド内の熱伝導が主流に及ぼす影響

液柱の気液界面で課されるマランゴニ条件と液柱端面での粘着条件、等温(完全伝導)条件によって、液柱のコーナー部には「特異性」が生じ、その結果、高 Pr では主流の数値解析が困難になることはよく知られている。「正則化」はこの「特異性」を緩和するために頻繁に使用されてきたが、その導入を正当化する数学的な根拠は存在しない。

さて、これまで行われた安定性に関する解析の全てにおいて、液柱端面では等温条件が用いられている。一方、上下ロッド内には、少なくとも軸方向に温度分布が観察される。また、地上実験において下部ロッド端面に貼り付けた感温液晶シートによって、定常軸対称マランゴニ対流の場合でも動径方向に温度分布が観察される。そこで、より現実的な状況として、上下ロッド内の熱伝導率を有限であると仮定して、液柱内の主流流れ場と温

度場，ロッド内の温度場を連立させて，チェビシェフ多項式展開により主流を数値的に求めた．その結果，上下ロッド内の熱伝導を考慮に入れることにより，「正則化」を用いることなく「特異性」が解消され，関数展開

を用いて主流を求めることのできる Pr の上限は 30 を超えることが明らかになった．これによって，「正則化」を用いることなく高プラントル数流体に対する安定性解析を行うことの可能性が示された．

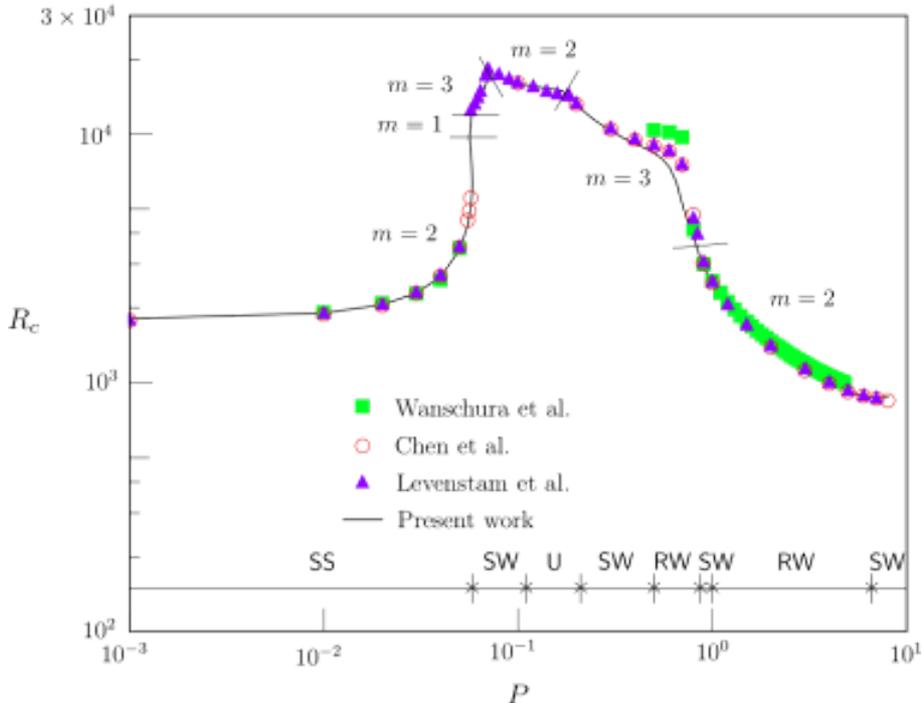


図7 AR=1の液柱マランゴニ対流の線形・弱非線形安定性特性． P ：プラントル数， R_c ：臨界レイノルズ数， m ：臨界波数．図の上部は線形臨界条件，また，下部には弱非線形理論によって予測された安定に選択される準臨界モードのまとめを示す．ここで，SSは定常モード，SWは定在波，RWは回転波，またUはいずれのモードも不安定であることを意味する．

4.3.3 フルゾーン液柱内温度差マランゴニ対流の遷移について

高 Pr 流体を対象としてフルゾーン(FZ)液柱内温度差マランゴニ対流におけるモード構造を調査した．これまでは限られたアスペクト比 Γ_H (=液柱高さ/液柱半径) に対する臨界点のみ調査されていることを鑑み，広範囲のアスペクト比に対する臨界点を調査した．また臨界点付近の振動流でも HZ 液柱と比べて FZ 液柱は複雑であり，可視化映像の目視だけではモード構造を判断できないため，新たに可視化映像を用いるモード構造分析方法を構築し，モード構造の分析を実施した．以下の成果を得た(図8)．

(1) $\Gamma_H=0.45 \sim 1.3$ では臨界マランゴニ数 $Ma_{cr}=5.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$ であり，HZ 液柱のおよそ半分となる．

(2) $\Gamma_H=0.45 \sim 1.3$ の範囲では単独のモード構造が出現することは稀であり，モード 1～3 の混在状態となる．また HZ 液柱で成立する関係式 $\Gamma_H \cdot m^2$ (m ：モード数) は FZ 液柱では成立しない．

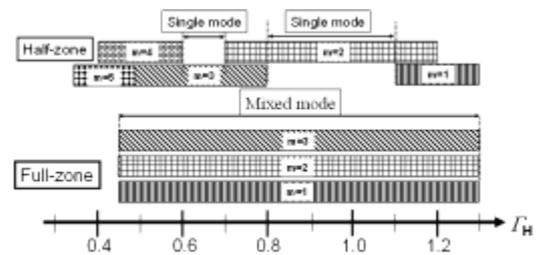


図8 アスペクト比 (Γ_H) とモード構造．

4.3.4 フルゾーン液柱内温度差マランゴニ対流の遷移について

FZ 液柱周囲の気流が振動流の遷移に与える影響を調査した．具体的には，液柱内対流場と周囲気体の流れ場の同時観察と液柱近傍の温度分布を測定した．

上下ロッドに取り付けた仕切り板によって，液柱の周囲気流が抑制されることで液柱の周囲気流の温度が上昇し，周囲気流から液柱への熱流入が大きくなり臨界マランゴニ数が増加することが分かった(図9)．

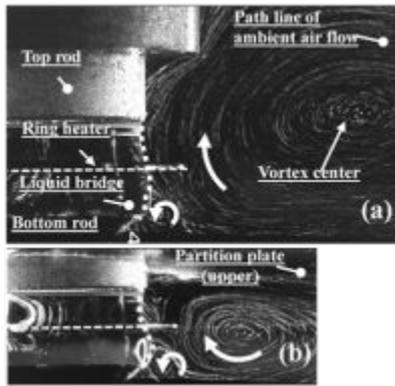


図9 周囲気流の可視化写真：(a)仕切り板広い，(b)狭い

4.4.4 薄液膜内温度差マランゴニ対流の遷移について

基礎的な実験系である薄液膜内温度差マランゴニ対流において、気-液界面へ平行に温度差を与えて定常流から振動流への遷移を観察した。従来は液膜厚さを一定として取り扱われていたが、本研究では液膜厚さを部分的に変化させることで振動流のパターンおよびその特性を調査し、以下の成果を得た。

(1) 高温側と低温側の異なる2つの流れの構造が混合した対流が発生する。

(2) 液膜厚さが部分的に変化した場合も厚さ一様の条件で見られる流れの構造が現れ、類似のボンド数 Bo とマランゴニ数 Ma の関係が得られる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

- (1) T. Matsugase, I. Ueno, K. Nishino, M. Ohnishi, M. Sakurai, S. Matsumoto, H. Kawamura, Transition to chaotic thermocapillary convection in a half zone liquid bridge, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, accepted for publication
- (2) Denis. E. Melnikov, Valentina Shevtsova, Taishi Yano, Koichi 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 and Mass Transfer*, 87, 2015, 119-127, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.016
- (3) M. Gotoda, T. Sano, T. Kaneko, I. Ueno, Evaluation of existence region and formation time of particle accumulation structure (PAS) in half-zone liquid bridge, *European Physical Journal Special Topics*, 224, 2015, 299-307, 10.1140/epjst/e2015-02361-7
- (4) Taishi Yano, Koichi Nishino, Effect of liquid bridge shape on the oscillatory thermal Marangoni convection, 2015, *The European Physical Journal Special Topics*, 224(2), 2015, 289-298, 10.1140/epjst/e2015-02360-8
- (5) Koichi Nishino, Taishi Yano, Hiroshi Kawamura, Satoshi Matsumoto, Ichiro Ueno, Michal 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, 10.1016/j.jcrysgro.2015.01.039
- (6) Taishi Yano, Koichi Nishino, Hiroshi Kawamura, Ichiro Ueno, Satoshi Matsumoto, Instability and associated roll structure of Marangoni convection in high Prandtl number liquid bridge with large aspect ratio, *Physics of Fluids*, 27, 2015, 024108-1 - 024108-13, 10.1063/1.4908042
- (7) I. Ueno, H. Kawasaki, T. Watanabe, K. Motegi, T. Kaneko, Hydrothermal-wave instability and resultant flow patterns induced by thermocapillary effect in a half-zone liquid bridge of high aspect ratio, *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference (IHTC15)*, 2014, IHTC15-9489, 10.1615/IHTC15.fcv.009489
- (8) H. C. Kuhlmann, R. V. Mukin, T. Sano, I. Ueno,

Particle-accumulation signatures in thermocapillary liquid bridges, *Fluid Dynamics Research*, 46 (041421), 2014, 10.1088/0169-5983/46/4/041421

(9) T. Watanabe, D. E. Melnikov, T. Matsugase, V. Shevtsova, I. Ueno, The stability of a thermocapillary-buoyant flow in a liquid bridge with heat transfer through the interface *Microgravity Science and Technology*, 26, 2014, 17-28, 10.1007/s12217-014-9367-z

(10) D. E. Melnikov, T. Watanabe, T. Matsugase, I. Ueno, V. Shevtsova, Experimental study on formation of particle accumulation structures by a thermocapillary flow in a deformable liquid bridge, *Microgravity Science and Technology*, 26, 2014, 365-374, 10.1007/s12217-014-9405-x

(11) 工藤正樹, 上野一郎, 河村洋, 温度差マランゴニ効果によるフルゾーン液柱内対流場の遷移, *日本機械学会論文集*, 80, 2014, TEP95 (1-15), 10.1299/transjsme.2014tep0095

(12) Gregory Cartland-Glover, Kaoru Fujimura, Sotos Generalis, Pattern formation in volumetrically heated fluids, *International Journal of Nonlinear Science*, 1, 2013, 19-30

(13) Kaoru Fujimura, Linear and weakly nonlinear stability of Marangoni convection in a liquid bridge, *Journal of the Physical Society of Japan*, 82, 2013, 074401, 10.7566/JPSJ.82.074401

(14) D. Limsukhawat, Y. Dekio, K. Ikebukuro, C. Hong, I. Ueno, Flow patterns induced by thermocapillary effect in a thin free liquid film of a high Prandtl number fluid, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 13, 2013, 133-144

(15) F. Sato, I. Ueno, H. Kawamura, K. Nishino, S. Matsumoto, M. Ohnishi, M. Sakurai, Hydrothermal wave instability in a high-aspect-ratio liquid bridge of $Pr > 200$ - On-orbit experiments in the Japanese Experiment Module 'Kibo' aboard the International Space Station -, *Microgravity Science and Technology*, 25, 2013, 43-58, 10.1007/s12217-012-9332-7

〔学会発表〕(計32件)

(1) K. Fujimura, Weakly nonlinear stability of Marangoni convection in a half-zone liquid bridge, 7th Conference of the International Marangoni Association (IMA7), June 23-26, 2014, Vienna University of Technology, Vienna, Austria

(2) D. Limsukhawat, I. Ueno, Thermocapillary-driven flow in a thin free liquid film under heat transfer with ambient gas, 5th Int. Symp. Physical Sciences in Space (ISPS5), Nov. 3rd-8th, 2013, Orlando, Florida, USA

(3) Taishi Yano, Koichi Nishino, Hiroshi Kawamura, Ichiro Ueno, Satoshi Matsumoto, Effect of liquid-bridge shape on instability of Marangoni convection in space experiment, 15th International Symposium on Flow Visualization (keynote lecture), 2012年6月28日, Minsk, Belarus

(他29件)

〔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

西野耕一 (Koichi NISHINO)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：90192690

(2) 研究分担者

上野一郎 (Ichiro UENO)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：40318209

藤村薫 (Kaoru FUJIMURA)

鳥取大学・工学系研究科・教授

研究者番号：70294337

工藤正樹 (Masaki KUDO)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづく

り工学科・助教

研究者番号：60634524

(以上)