

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20977

研究課題名(和文)自由表面を有する閉空間内トポロジー対流場と低ストークス粒子コヒーレント構造

研究課題名(英文)Topology of thermocapillary-driven convection and induced coherent structures by low-Stokes-number particles in closed system with free surface

研究代表者

上野 一郎 (UENO, ICHIRO)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：40318209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、表面張力差を駆動力とする対流場内に付与した低ストークス( $St$ )数粒子が自発的に集合し周方向に閉じた特異なコヒーレント構造を形成する現象に注目してきた。周方向波数 $m=1$ を有する対流場を対象とし、国際宇宙ステーションおよび地上実験で取得した結果について、コヒーレント構造の空間的定量化および発現条件を明らかにした。また、トポロジー対流場とコヒーレント構造を形成する低 $St$ 粒子挙動間の相互関係を、さらに、自由液膜系における温度差マランゴニ駆動による対流場および含有粒子挙動に関する実験および数値解析を展開し、特に、複数のセル構造が発現する条件を実験および数値解析とともに見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉空間内対流場における秩序構造、さらにその対流場による微小粒子の集合・分散の制御を実現する。Kolmogorov-Arnold-Moser環状体と高い相関を有するコヒーレント構造の発現条件やその空間構造の定量化、コヒーレント構造を構成する微小粒子の時空間挙動の解明により学術的貢献に資するとともに、結晶成長過程における結晶核の集合・分散制御や、汚染源となる微小物体の効率的排除機構の開発等に貢献する。

研究成果の概要(英文)：We investigate the coherent structures by low-Stokes-number particles suspended in high-aspect-ratio liquid bridges of high-Prandtl number via microgravity and terrestrial experiments. We especially focus on the structure by the suspended particle accumulation, or, the particle accumulation structure (PAS), of  $m = 1$  in azimuthal wave number emerged in the traveling-wave-type time-dependent convection. We also investigate multicellular convective structures induced in free liquid films by thermocapillary effect. A thin film of high-Prandtl-number liquid is prepared in a rectangular aperture of the order of 0.1 mm in thickness sustained by its surface tension. The multicellular structure is established in the free liquid films. The cell number increases in a stepwise manner as the liquid-film width increases. It is found that another pair of the cells always newly emerges when the cell number increases.

研究分野：界面熱流体力学

キーワード：表面張力差駆動対流 コヒーレント構造 低ストークス数粒子

1. 研究開始当初の背景

ハーフゾーン液柱として知られる自由表面を有する閉空間において、表面張力差を駆動力とする対流場内に付与した低ストークス (St) 数粒子が自発的に集合し特異な粒子集合構造 (Particle accumulation structure, PAS) が発現することが知られている<sup>(1)</sup>。このPASは液柱内において対流場が有する周方向波数と同じ波数を有し、かつ、周方向に閉じたコヒーレントな構造であることが示されている<sup>(2)</sup>。その後、このコヒーレント構造が、モデル対流場を導入した数値解析によって得られたカオス的領域がほとんどを占める閉空間内対流場において発現するKolmogorov-Arnold-Moser (KAM) 環状構造体と呼ばれるトポロジー対流場と高い相関を示すことが示された<sup>(3)</sup>。研究代表者らはこれまでに、PASが対流場内に同時に複数発現し、さらにそれらの構造がKAM環状構造体と高い相関を有することを明らかにしている<sup>(4)</sup>。しかしながら、コヒーレント構造の発現機構、トポロジー対流場と低St数粒子によるコヒーレント構造の相関について明らかになっていない。さらに、CIとして参画している国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験モジュール「きぼう」でのプロジェクトにおいては依然、安定的なPAS実現に成功しておらず、重力加速度の影響も未解明の状態である。

2. 研究の目的

本研究では、自由表面を有する閉空間内トポロジー対流場内において低St数粒子群が自発的に形成するコヒーレント構造を対象として、その形成過程の解明、および、KAM環状構造体からなるトポロジー対流場とコヒーレント構造を形成する粒子挙動間の相互関係の解明を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、自由表面を有する閉空間内対流場を対象とし、地上および微小重力環境下での現象を扱う。地上実験では、研究代表者がこれまで行ってきた $O(10^{-3} \text{ m})$ スケールの液柱あるいは液滴を主な対象系とし、通常重力下での静水圧の影響を出来るだけ小さくしつつ低St数粒子の追跡を実現する。単独粒子の運動の再構築を実現しうる粒子追跡速度計測法 (particle tracking velocimetry (PTV)) を用い、トロイダル運動を基本運動とする粒子一つ一つの時空間的運動を高精度に計測することにより、トポロジー対流場との相互関係を明らかにする。本地上研究では、トポロジー対流場の強度 (表面張力差駆動レイノルズ数  $Re = |\gamma_T \Delta T L / (\rho \nu \kappa)$  ( $\gamma_T = \partial\gamma/\partial T$ : 表面張力 $\gamma$ の温度係数,  $\Delta T$ : 温度差,  $L$ : 代表長さ,  $\rho$ : 密度,  $\nu$ : 動粘度,  $\kappa$ : 温度拡散係数) を従来になく高精度に制御する機構を実現し、さらにPTVによる粒子の時空間4次元挙動再構築、放射温度計による自由表面上温度波計測、共焦点型レーザ変位計による自由表面の動的変形計測、極薄シート光源を用いたPoincaré断面計測の同時計測系を新たに構築し、系内粒子挙動-コヒーレント構造形成-トポロジー間の時空間相互作用の定量化を目指した。

4. 研究成果

本研究ではまず、周方向波数  $m = 1$  を呈する高アスペクト比液柱における振動流発生条件を数値解析および実験により明らかにした<sup>(5)</sup>。ここで、アスペクト比 $\Gamma$ は液柱高さ $H$ および液柱を保持するロッド半径 $R$ により、 $\Gamma = H/R$ で定義する。特に、液柱内に  $m = 1$  の対流場が発現することが知られている  $\Gamma = 2.0$  の条件において、数値解析では周囲流体との熱伝達を表す無次元数ビオ数 $Bi$ を、実験では周囲流体レイノルズ数 $Re_{amb}$ をパラメータとして発生条件を求めた。その結果、液柱体積比  $V/V_0 = V/\pi R^2 H \sim 1$  の条件下ではPASの発現に不可欠な回転振動流は抑制され、脈動振動流が支配的となることを明らかにした。また、回転振動流が発現したとしてもPASが形成されないことを明らかにした。派生的な結果として、ISSでの微小重力実験で明らかとなっていた脈動振動流で見つかった特異な表面温度変動を数値解析および地上実験で良好に再現した。

通常重力環境下でのPAS発現条件を探索し、安定的に  $m = 1$  の回転振動流下でPAS形成を実現する条件を見出した<sup>(6)</sup>。当該条件により、ISSでの微小重力環境で得られたPASと定性的に同一の構造、すなわち、液柱上部から観察

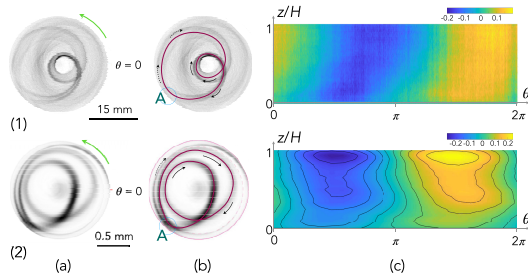


図1 微小重力(1)および通常重力環境下で実現した  $m = 1$  の回転振動流場でのPAS<sup>(6)</sup>: (a)液柱上部から観察した回転座標系における粒子画像投影図と(b)その軌道を強調したもの、(c)自由表面上での温度変動成分分布。

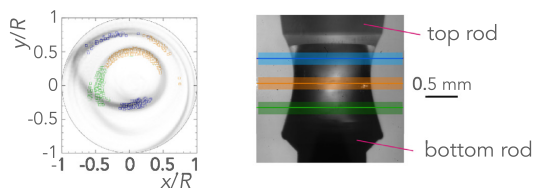


図2  $m = 1$  回転振動流場で実現したPASの異なる高さ位置でのPoincaré点の分布<sup>(9)</sup>。

した投影図において液柱中央部に螺旋状構造を有するPASを実現した(図1)。この構造は数値解析により存在が予測<sup>(7,8)</sup>されており、重力環境や試験流体物性値(プラントル数Pr)、液柱形状に依らず発現することを示唆した。さらに、地上実験によりシート光を用いたPASのPoincaré断面観察を行い、数値解析で予測されていた3次元構造とほぼ同一の構造を呈していることを明らかにした<sup>(9)</sup>(図2)。

また、自由液膜系における温度差マランゴニ駆動による対流場および含有粒子挙動に関する実験および計算を展開し、特に、複数のセル構造が発現する条件を実験および数値解析ともに見出した<sup>(10)</sup>(図3)。自由液膜のスパン方向アスペクト比に対し、セル長が長くなりながらもセル数が維持され、閾値を超えると1組のセルが常に新たに発現することを明らかにした。

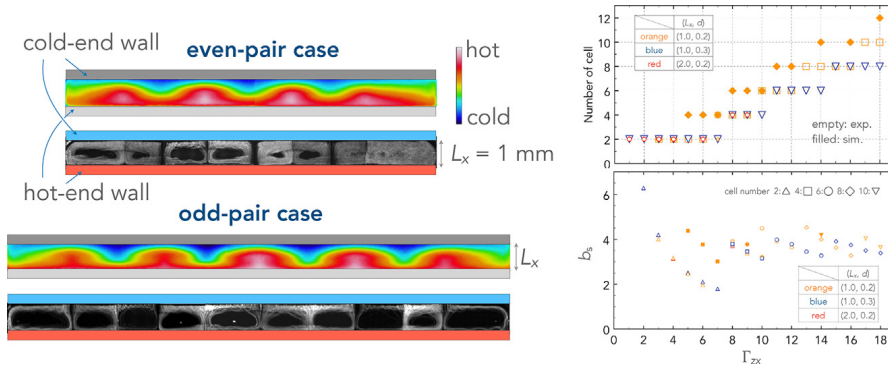


図3 (左) 自由液膜内で実現した複数セル構造を有する対流場における自由表面上温度分布および粒子画像：(上) 偶数組および(下) 奇数組の例。(右) スパン方向アスペクト比に対する(上) セル数および(下) 無次元波数<sup>(10)</sup>。

#### 参考文献

- (1) D. Schwabe, P. Hintz & S. Frank, New features of thermocapillary convection in floating zones revealed by tracer particle accumulation structure (PAS), *Microgravity Sci. Technol.* 9, 163-168, 1996.
- (2) S. Tanaka, H. Kawamura, I. Ueno & D. Schwabe, *Phys. Fluids* 18, 067103, 2006.
- (3) F.H. Muldoon & H.C. Kuhlmann, Coherent particulate structures by boundary interaction of small particles in confined periodic flows, *Physica D: Nonlinear Phenomena* 253, 40-65, 2013.
- (4) H.C. Kuhlmann, R.V. Mukin, T. Sano & I. Ueno, Structure and dynamics of particle-accumulation in thermocapillary liquid bridges, *Fluid Dynamics Research* 46, 041421, 2014.
- (5) Y. Fukuda, T. Ogasawara, S. Fujimoto, T. Eguchi, K. Motegi & I. Ueno, Thermal-flow patterns of  $m = 1$  in thermocapillary liquid bridges of high aspect ratio with free-surface heat transfer, *Int. J. Heat Mass Trans.* 173, 121196, 2021.
- (6) T. Sakata, S. Terasaki, H. Saito, S. Fujimoto, I. Ueno, T. Yano, K. Nishino, Y. Kamotani & S. Matsumoto, Coherent structures of  $m = 1$  by low-Stokes-number particles suspended in a half-zone liquid bridge of high aspect ratio: Microgravity and terrestrial experiments, *Phys. Rev. Fluids* 7, 014005, 2022.
- (7) I. Barmak, F. Romano & H.C. Kuhlmann, Finite-size coherent particle structures in high-Prandtl-number liquid bridges, *Phys. Rev. Fluids* 6, 084301, 2021.
- (8) P. Capobianchi & M. Lappa, On the influence of gravity on particle accumulation structures in high aspect-ratio liquid bridges, *J. Fluid Mech.* 908, A29, 2021.
- (9) S. Terasaki, S. Sensui & I. Ueno, Thermocapillary-driven coherent structures by low-Stokes-number particles and their morphology in high-aspect-ratio liquid bridges, *Int. J. Heat Mass Trans.* 203, 123772, 2023.
- (10) T. Homma, T. Yamashita, R. Wada, K. Kawazu, K. Kurose, T. Tsukahara & I. Ueno, Multicellular structures in thin free liquid films induced by thermocapillary effect, *J. Colloid Interface Sci.* 641, 187-196, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Tomoki Sakata, Sayo Terasaki, Hiroki Saito, Sorachi Fujimoto, Ichiro Ueno, Taishi Yano, Koichi Nishino, Yasuhiro Kamotani, and Satoshi Matsumoto	4. 巻 vol.7
2. 論文標題 Coherent structures of $m = 1$ by low-Stokes-number particles suspended in half-zone liquid bridge of high aspect ratio - microgravity and terrestrial experiments -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids 7	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） 10.1103/PhysRevFluids.7.014005	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 Yuya Fukuda, Toru Ogasawara, Sorachi Fujimoto, Toshikazu Eguchi, Kosuke Motegi & Ichiro Ueno	4. 巻 173, 121196
2. 論文標題 Thermal-flow patterns of $m = 1$ in thermocapillary liquid bridges of high aspect ratio with free-surface heat transfer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat Mass Transfer	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） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121196	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 Ichiro Ueno	4. 巻 105
2. 論文標題 Experimental study on coherent structures by particles suspended in half-zone thermocapillary liquid bridges: review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fluids 6	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） 10.3390/fluids6030105	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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Koki Kawazu, Takahiro Homma, Ichiro Ueno, Takahiro Tsukahara
2. 発表標題 Numerical study on basic-flow patterns of thermal Marangoni convection in rectangular free liquid film
3. 学会等名 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川津 晃貴, 本間 貴大, 黒瀬 築, 上野 一郎, 塚原 隆裕
2. 発表標題 数値解析による矩形型自由液膜内温度差マランゴニ対流における基本定常流の $Ma \cdot Ca$ 依存性
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間 貴大, 川津 晃貴, 和田 亮平, 塚原 隆裕, 黒瀬 築, 上野 一郎
2. 発表標題 矩形自由液膜内温度差マランゴニ対流における single-layered flow 構造とアスペクト比の関係性
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間 貴大, 和田 亮平, 川津 晃貴, 塚原 隆裕, 黒瀬 築, 上野 一郎
2. 発表標題 自由液膜内温度差マランゴニ対流におけるアスペクト比依存性 - Single-layered flow対流場構造 -
3. 学会等名 熱工学コンファレンス
4. 発表年 2021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			
フランス	Univ. Lille	Univ. Paris-Saclay	Univ. Côte d'Azur	