

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：33603

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360101

研究課題名（和文） 宇宙ステーション実験棟「きぼう」におけるマランゴニ対流実験の継続実施と結果の解析

研究課題名（英文） Space experiment and its analysis of Marangoni convection on Kibo in International Space Station.

研究代表者

河村 洋 (KAWAMURA HIROSHI)

諏訪東京理科大学・工学・マネジメント研究科・教授

研究者番号：80204783

研究成果の概要（和文）：

国際宇宙ステーションの日本の実験棟「きぼう」において、一連の液柱内マランゴニ対流実験を、成功裏に実施した。その結果、地上では出来ない広範な液柱高さや直径の比の実験を行い、定常流から非対称非定常流への臨界マランゴニ数に関して、液柱高さやプラントル数の影響に関する幅広いデータを取得し、かつ、解析・検討を行った。さらに、マイクロ流体力学に関わる半球液滴に関する実験等を実施し、所期の目的を達成した。

研究成果の概要（英文）：

A series of microgravity experiment of the Marangoni convection in a liquid bridge was performed successfully using the Japanese experimental module Kibo on the International Space Station. The liquid bridges with a wide variety of the aspect ratios, i. e., height to diameter ratios, which cannot be achieved on the ground, were tested. Critical Marangoni numbers of the transition from the steady to the oscillatory flow were obtained for various aspect ratios and Prandtl numbers. In addition, hydrodynamic experiment of a hemispherical droplet was made in relation to microhydrodynamics, where the surface tension plays a crucial role.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、熱工学

キーワード：対流、マランゴニ対流、宇宙利用

1. 研究開始当初の背景

本研究は、無重力下で顕著に現れる表面張力に起因するマランゴニ対流に関するもので界面流体力学の進展に寄与すると共に、地上での半導体などの結晶成長やマイクロ流体技術、宇宙での高効率ヒートパイプ等の開発等

に貢献することを目的としている。表面張力に関わる流体现象は、地上においてもつねに存在して様々な影響を及ぼしているが、通常は重力の陰に隠れてわかりにくい。そのため無重力下において、表面張力の影響を顕在化させた実験を行うことが有効となる。そこ

で本研究者等は、国際宇宙ステーションに搭載されている日本実験等「きぼう」における宇宙実験の第一次募集に応募し、2008年には「きぼう」における最初の科学実験として実施した。なお、宇宙ステーション実験については、装置はJAXAから提供されるが、結果の解析および地上準備研究については、研究者側が費用を負担して実施することとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、表面張力に起因するマランゴニ対流に関して、界面流体力学の進展に寄与すると共に、地上での半導体などの結晶成長やマイクロ流体技術や高効率ヒートパイプ等の開発等へ貢献する点にある。

(1)宇宙実験による臨界マランゴニ数の実験による取得と実験データの解析：微小重力下においてアスペクト比（高さ対直径の比）が0.1~2.0程度までの液柱を用いて、液柱内マランゴニ対流が定常流から振動流に遷移する限界のマランゴニ数を測定する。さらに、得られた温度変動等のデータについて解析を行い、本研究の目的の一つである、カオス化過程を明らかにする。

(2)試験流体のプラントル数の影響：地上では、大きな液柱の形成が困難なため、高いプラントル数に対して、臨界マランゴニ数を実験的に取得することは困難である。そこで、「きぼう」における実験では、高いプラントル数のシリコンオイルを使用する実験を行い、プラントル数の影響を求める。

(3)レーザーフォトリソグラフィによる表面流速測定：液柱表面の流速を測定するために、液柱表面に紫外域スポットレーザを照射し、フォトリソグラフィ発色領域を形成して、表面流速を測定する。これにより、宇宙実験における大直径・高アスペクト比の液柱に出現する Hydrothermal wave の伝播特性を明らかにする。

(4)非常に短い液柱の実験と解析：非常に短い液柱の振動流臨界条件は未だ明確には把握されていない。これは、地上においてもある程度可能なので、宇宙及び地上実験を実施し、さらに、線形安定理論による解析を行い、理論的な安定限界を求め、実験と比較する。

(5)液滴の温度差のある固体面への再接触：一般に、液体を固体面に接触させようとする際に、両者に温度差があると、直ちには再接触（再浸潤）しない。しかし、この非再浸潤の条件は未だ把握されていないので、液滴の固体面再浸潤に関する支配的なパラメータを把握することを目的として宇宙及び地上実験を行う。これは、表面張力が支配的なマイクロ流体の取り扱いに、重要なデータを提供するものである。

3. 研究の方法

宇宙実験は、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」（図1）に搭載された流体物理実験装置を用いて行った。実験装置の取り付けや、補修は宇宙飛行士に依頼するが、実験そのものは、研究者が学生補助者3~4名と共にチームを構成して筑波のJAXA内に設けられた UOA (User Operation Area) に入り、地上からの遠隔コマンドによって装置を操作して実施した。実験中は側面や端面からの画像、いくつかの測定点の温度、ディスクの位置等が、リアルタイムでダウンリンクされるので、実験者は、それらを見ながら、実験を進めることが出来る。また、宇宙実験を補完するために、小液柱による地上実験を行った。さらに並行して、線形安定理論による解析を行い、理論的な安定限界を求め、実験と比較した。

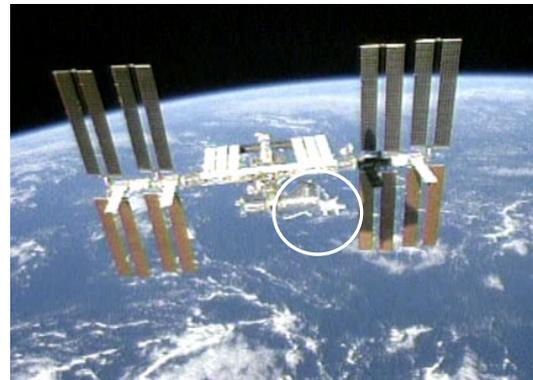


図1 国際宇宙ステーションと日本の実験棟「きぼう」(円内) ©NASA

4. 研究成果

(1)宇宙実験による臨界マランゴニ数の取得およびカオス化過程の解析：

本研究期間中に、MEIS-2, 3, 4のシリーズについて、各16日、28日、24日の実験を実施した。試験流体には、物性値の安定性の上から、シリコンオイルを用いた。なお、MEISは Marangoni Experiment in Space の略で、本実験シリーズの国際公式呼称である。実験の条件は、表1の通りである。

表1 「きぼう」におけるマランゴニ対流実験の条件

MEIS	ディスク直径	アスペクト比 (高さ/直径)	プラントル数 (Pr)
-2	30mm	0.15~2.00	67
-3	30mm	0.35~2.00	207
-4	50mm	0.225~1.25	207

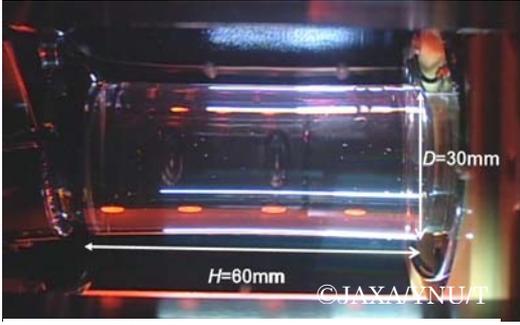


図2 「きぼう」に形成した大液柱。
(液体:シリコンオイル, 直径 30mm,
長さ(高さ):最大 60mm, 右:高温,
左:低温ディスク。) ©JAXA/YNU/TUS

微小重力下で形成した液柱の一例を図2に示す。この図で、右端が高温側、左端は低温に保持される。右側端面は透明な人工サファイアで作られていて、端面から液柱内部の流動を観察することが出来る。両端面の間隔は自由に調整出来、それによって、アスペクト比 (AR =液柱の高さ/直径) を調節する。これらの宇宙実験により、軸対称定常流から振動流への遷移に関する臨界マランゴニ数を、各種のアスペクト比やプラントル数に対して求めることが出来た。結果を図3に示す。図3にみるとおり、臨界マランゴニ数は、アスペクト比に対して複雑な変化をするが、これはアスペクト比に応じて、周方向モード数が増加する等の原因による。

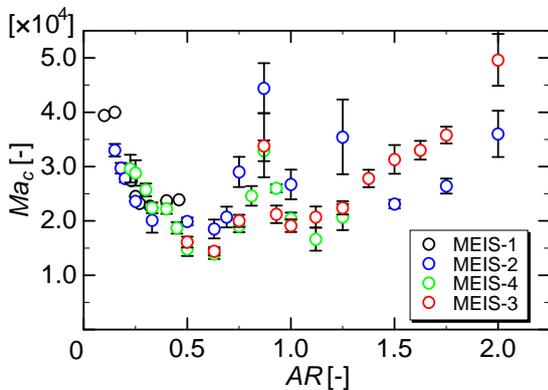


図3 宇宙実験から得られた非定常流への遷移の臨界マランゴニ数

$$Ma = \frac{|\sigma_T| \Delta TH}{\rho \nu \kappa} \quad AR = \frac{H}{d}$$

(ΔT : 上下面の温度差, H : 液柱高さ, d : 液柱直径, σ_T : 表面張力の温度係数, ρ : 密度, ν : 動粘性係数, κ : 熱拡散係数)

その他、試験流体中の微粒子がある条件下で閉曲線上に並ぶ粒子集合現象 (PAS: Particle Accumulation Structure) の観察に、

大直径液柱では初めて成功した。

つぎに、液柱内対流場のカオス・乱流化過程の解明は、本研究の大きな目的の一つである。そのため、実験では、液柱側面の液面近傍に設置した熱電対によって、流体表面温度の変動を測定し、対流の強非線形状態が期待出来る高アスペクト比液柱を対象にカオス化過程の解析を行った。液柱に付与したマランゴニ数は、振動流遷移点であるマランゴニ数 Ma_c からの距離 $\varepsilon = (Ma - Ma_c) / Ma_c$ (過臨界パラメータ) を導入して記述した。カオス化過程の解析には、上述の表面温度変動データを解析対象スカラー場として用いる。この時系列データに対して遅れ時間法を用いた擬位相空間の再構築を行った後、リアプノフ指数および並進誤差を求めた。本報告では、解析対象場の擬位相空間内アトラクタと並進誤差を解析例として示す。

本研究では、並進誤差 E_{trans} は、Wayland (PRL, 1993)による下記定義を用いた。

$$E_{trans} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k \frac{|\nu_i - \langle \nu \rangle|^2}{|\langle \nu \rangle|^2}$$

ここで、

$$\langle \nu \rangle = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k \nu_i$$

$$\nu_i = \nu(t_i + T\tau) - \nu(t_i)$$

ν : 擬位相空間を構成する変数, k : 対象点近傍において選択するデータ点数, t : 時間, T : 遅れ時間制御パラメータ, τ : 遅れ時間。

解析の結果を図4に示す。いずれのパラメータにおいても、過臨界パラメータ ε が1近傍のデータについては、アトラクタはリミットサイクルに近い挙動を示しており、並進誤差も単調に増加している。いずれのケースにお

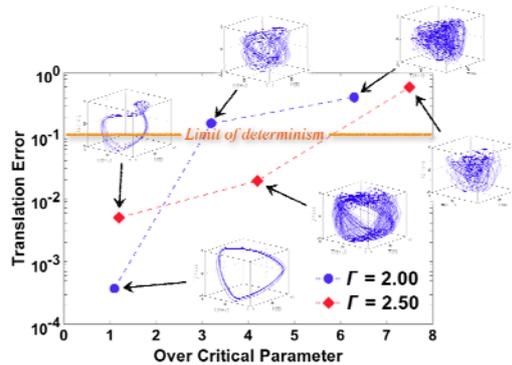


図4 高アスペクト比液柱 (Γ =液柱高さ/半径=2AR) における対流場非線形過程: 並進誤差(縦軸)および各状態における遅れ時間法により再構築した擬位相空間内アトラクタ。

いても ε が 3~4 においてカオス的な挙動が対流場に出現し、6~7 において乱流的な挙動が表れていることを定量的に示すことが出来た。

(2) 試験流体のプラントル数 (Pr) の影響

宇宙実験では 5cSt ($Pr=67$) と 20cSt ($Pr=207$) の試験流体を用いた。後者のプラントル数は、小液柱を用いる地上実験では、大きな温度差を必要とするため、臨界条件を定めることが難しい条件である。臨界マランゴニ数の測定結果(液柱アスペクト比=0.5)を、これまでの地上実験および数値解析結果と比較した。 $Pr < 30$ 程度では $Ma_c \propto Pr^{2/3}$ の関係が示唆されていたが、 $Pr > 30$ では Pr への依存性が大きく変化し、 Pr に殆ど依存しなくなるのが分かった。そのような変化の様子は、過去の線形安定性解析(但し、 $Pr < 50$)の結果にも認められるが、 $Pr=207$ の条件を含む今回の宇宙実験結果によって明確化された。

(3) レーザーフォトリックによる表面流速測定

平成 21, 22 年度の宇宙実験において、フォトリック染料 (TNSB 0.01-0.05wt%) を溶解させたシリコンオイルを用いて表面流速測定を行った。

とくに、大きな長液柱においては、時間スケールも大きいため、本可視化手法が振動流遷移を判断するための鋭敏な手法であることが分かった(図 5)。また、ディスク直径 d で無次元化した表面流速分布によって、異なる液柱長のデータおよび地上実験結果が良く整理できることも分かった。さらに、表面流速の測定結果は、IR カメラによる表面温度の測定結果、3-D PTV による内部流動の測定結果と複合的に解析され、Hydrothermal Wave (以下 HTW) の伝播に伴う表面流速の変化を明らかにした。

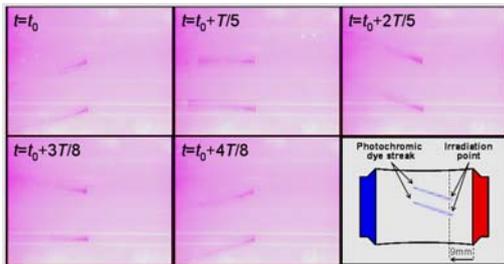


図 5 表面流速測定の可視化画像
(表面流れの方向は右から左で、振動的であることが明確に観察される)

(4) 短い液柱の実験と解析

短い液柱は、地上でも実験が可能であるため、実験回数の限られる宇宙実験を補完する意味で、一連の地上実験を行った。実験から、これまで観察されたことのない形状の PAS が観察された。それは、図 6 に示すような、二重構造の PAS の発見である。図 6 の左は通常の PAS で、周方向モード数 m は $m=12$ である。それに対して、右は、PAS が二重になっており、 $m=12$ に $m=6$ が重畳している。そこでこれを混合モード PAS と名付けた。

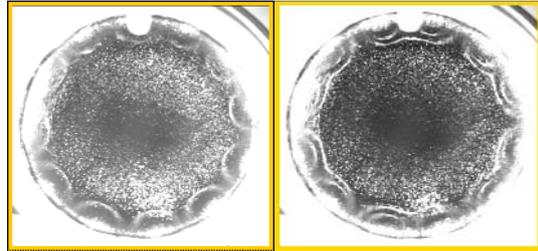


図 6 単一モード PAS (左) と混合モード PAS (右) : 液柱直径 $d=10\text{mm}$, $AR=0.08$

このときの表面温度変動のパワースペクトルを図 7 に示す。3.8Hz が $m=12$ に対応するピークで、それに加えて半分の周波数 1.9Hz のピークが現れており、これが $m=6$ に対応している。この種の PAS は、世界的にも初めての発見であった。

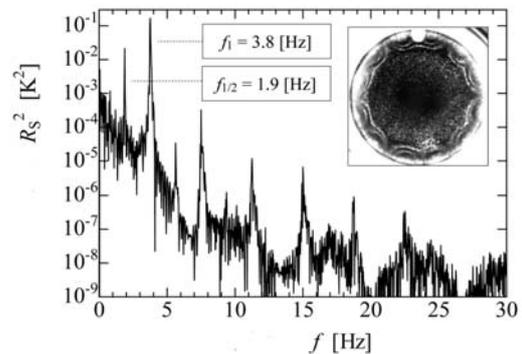


図 7 混合モード PAS 発生時の温度変動のパワースペクトル

宇宙実験によって得られた臨界条件は、短い液柱の場合、従来の線形安定性解析の結果と比べてかなり低い値をとる。その原因を探る目的で、線形並びに弱非線形安定性解析を行った。

支配方程式は軸対称なマランゴニ対流解を持つ。安定性解析では、この解に加えた微小攪乱の消長を、ノーマルモード解析に基づいて検討した。その際に、液柱は円柱形状を保ち、液柱表面は無変形であると仮定した。重力の影響は無視し、液柱表面では断熱条件を課した。

図8には、液柱半径 R と高さ H の比が1の液柱に対する臨界条件を、プラントル数 $P \leq 1$ の流体について示す。図から、臨界条件は周方向波数 $m=1, 2, 3$ のモードによって与えられることが分かる。定常解と振動解が図中の臨界曲線上から分岐可能である。今回の解析によって、定常解/振動解間のモード入れ替えは0.058という、液体金属に対応する低いプラントル数において生じることが分かった。

安定な振動モードは、振動の「節と腹」の位置が移動しない定在波(standing wave, 以下SW)か、「節と腹」が周方向に進行する回転型の進行波(traveling wave, 以下TW)かのいずれか一方の形態をとるが、いずれが安定なモードとして選択されるのかについては、線形理論の枠内では結論することができないので、本研究では弱非線形解析を実行した。解析結果を図8の下部に示す。定在波が安定なパラメータ領域と進行波が安定な領域がプラントル数の値によって入れ替わる。

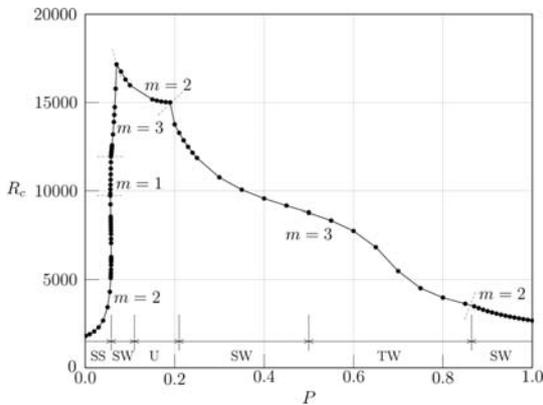


図8 $H/d=0.5$ の液柱に対する臨界条件と弱非線形特性。(横軸: プラントル数, 縦軸: マランゴニレイノルズ数, 下段横線の領域表示; SS: 安定定常解, SW: 安定定在波, TW: 安定進行波, U: 不安定振動解。)

今回の解析の範囲では、プラントル数=7の場合は定在波、また、プラントル数=25では進行波が安定な超臨界分岐解として予想される。宇宙実験に対応するより高いプラントル数については、今後の課題である。

(5) 液滴内のマランゴニ対流と温度差のある固体面への再接触

今回の一連の宇宙実験の成果の一つは、意図的に液柱を分離し液滴を形成して、半球液滴(懸垂液滴)の挙動やマランゴニ対流に関する実験が出来るようになった点にある。図9には、液柱内の流体を意図的に吸引して液柱を分離することによって形成した対向二液滴を示す。ほぼ対称な二つの液滴が形成されている。この二液滴を再度接触させたときに、

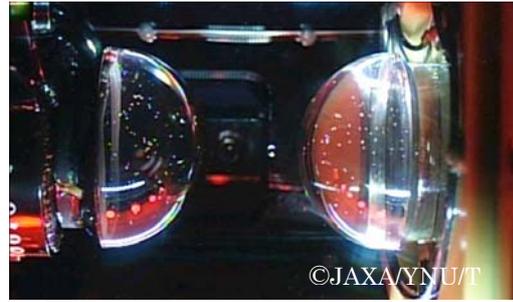


図9 液柱を分離させて形成した対向二液滴。©JAXA/YNU/TUS

両者の温度が異なると、直ちには合体しないこと等を確認した。その他、懸垂液滴内にも、粒子集合現象を発現させることに成功した。

これと並行して、地上において懸垂液滴の実験を実施した。その結果の一例を図10に示す。温度差を増加させていくと、液柱において見られた通り、軸対称定常流から三次元振動流へと遷移する。遷移後には、液柱と同様に表面温度振動HTWが観察された。図10には、このHTWと液滴底面から観察した粒子挙動を同期して示している。下段では、放射温度計により取得した表面温度の瞬時値に対し、液滴表面時間平均値を差し引いた変動分を示している。

HTW発生後は、粒子はひとつの閉じた線上に集まる。振動流遷移直後では、(a)定在波(SW)が観測され、更に温度差を大きくしていくと(b)進行波(TW)が観測された。定在波では、高温領域と低温領域とが交互に現れ、一定の周期を持って振動する。進行波では、液滴表面温度を観察すると、高温領域と低温領域とが一定の周方向速度を有しながら周方向に回転し、さらに(b)に示すように粒子集合の線が一定の周方向速度で回転運動をすることが観察された。

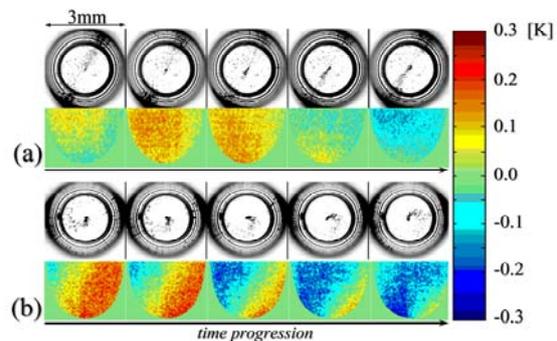


図10 温度差マランゴニ効果による懸垂液滴内対流場: 上方からの観察(各フレーム上)と放射温度計による表面温度変動分(各フレーム下). (a)は定在波SW, (b)は進行波TW.

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 17 件)

(1)Kawamura, H., Nishino, K., Matsumoto, S. & Ueno, I., Report on Microgravity Experiments of Marangoni Convection Aboard International Space Station, Trans. ASME J. Heat Transfer 134, 031005 (13 pages), 2012. 査読有

doi:10.1115/1.4005145

(2)Yano, T., Nishino, K., Kawamura, H., Ohnishi, M., Ueno, I., Matsumoto, S. and Yoda, S., 3-D flow structure of oscillatory thermocapillary convection in liquid bridge in MEIS, Journal of The Japan Society of Microgravity Application, Vol. 28, No. 2, pp. 126-131. 2011. 査読有

(3)Yano, T., Nishino, K., Kawamura, H., Ueno, I., Matsumoto, S., Ohnishi, M., 3-D PTV Measurement of Marangoni Convection in Liquid Bridge in Space Experiment, Exp. Fluids, 2011. 査読有, DOI: 10.1007/s00348-011-1136-9,

(4) T. Yano, K. Nishino, H. Kawamura, I. Ueno, S. Matsumoto, M. Ohnishi, Space experiment on the instability of Marangoni convection in large liquid bridge – MEIS-4: effect of Prandtl number –, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 327, pp. 012029 1-7

doi:10.1088/1742-6596/327/1/012029

(5)Ueno, I. & Watanabe, T., Flow transition in a free rectangular liquid film under a temperature gradient, Int. J. Transport Phenomena 12, pp.301-306, 2011. 査読有

(6)S.C. Generalis and K. Fujimura: “Range of validity of weakly nonlinear theory in the Rayleigh-Bénard problem”, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 084401/1–11 (2009). 査読有

doi: 10.1143/JPSJ.78.084401

(7)Ueno, I., Kawazoe, A. & Enomoto, H., Effect of ambient-gas forced flow on oscillatory thermocapillary convection of half-zone liquid bridge, Fluid Dynamics & Materials Processing (FDMP) 6, pp. 99-108, 2010. 査読有

doi: 10.3970/fdmp.2010.006.099

(8)Ueno, I. & Torii, T., Thermocapillary-driven flow in a thin liquid film sustained in a rectangular hole with temperature gradient, Acta Astronautica 66, pp.1017-1021, 2010. 査読有

doi:10.1016/j.actaastro.2009.09.027

(9)Abe, Y., Ueno, I. & Kawamura, H., Dynamic Particle Accumulation Structure (PAS) due to Thermocapillary Effect in Non-Cylindrical Half-Zone Liquid Bridge, Interdisciplinary Transport Phenomena 1161 (ed. Sadhal, S.), New York Academy of Science, New York, pp.240-245, 2009. 査読有

doi: 10.1111/j.1749-6632.2008.04073.x

他

〔学会発表〕(計 31 件)

(招待講演)

(1)Ueno, I., Nishino, K., Kawamura, H., Ohnishi, M. & Matsumoto, S., Non-linear thermocapillary convection in half-zone liquid bridge - on-orbit experiments on Kibo aboard the ISS, 6th Int. Conf. Two-Phase Systems for Ground & Space Applications (9/25-9/28, 2011, Salerno, Italy).

(2)Matsumoto, S., Yoda, S., Kawamura, H., Nishino, K., Ueno, I., Outcomes and Perspective of JAXA Marangoni Research Project Onboard Kibo, 4th Int. Symp Physical Sciences in Space (ISPS4) (7/11-7/15, 2011, Bonn, Germany).

(3)Kawamura, H., Nishino, K. & Ueno, I., Space Experiment of Marangoni Convection on International Space Station, 14th Int. Heat Transfer Conf. (8/8 - 8/13, 2010, Washington DC, USA.), proceedings (paper #: IHTC14-23346)

(4)Kawamura, H., Nishino, K., Ueno, I., Matsumoto, S., The First Space Experiment on KIBO, 27th Int. Symp on Space Technology and Science (7/8- 7/10, 2009, Tsukuba)

(一般講演)

(5) Nishino, K., Kawamura, H., Ueno, I., Ohnishi, M., Matsumoto, Marangoni Convection Experiments in ‘KIBO’ on ISS - The Second Series of Experiments-, Proc. 5th Conf. of the International Marangoni Association (IMA5) (7/7-7/10, 2010, Florence, Italy)

他

〔その他〕

ホームページ等

<http://murasun.me.noda.tus.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 洋 (KAWAMURA HIRISHI)

諏訪東京理科大学・工学・マネジメント研究科・教授

研究者番号：80204783

(2) 研究分担者

①西野 耕一 (NISHINO KOUICHI)

横浜国立大学, 工学研究院, 教授
研究者番号：90192690

②上野 一郎 (UENO ICHIROU)
東京理科大学, 理工学部, 准教授
研究者番号：40318209

③藤村 薫 (FUJIMURA KAORU)
鳥取大学, 工学研究科, 教授
研究者番号：70294337

(3) 連携研究者

加藤 由紀 (KATOU YUKI)

鳥取大学, 工学研究科, 助教
研究者番号：10304198