

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22015

研究課題名（和文）表面張力勾配により自己駆動する液滴を利用した宇宙居住用水浄化装置の開発

研究課題名（英文）Development of a water purification device for space residence using droplets that are self-driven by a surface tension gradient

研究代表者

岡野 泰則（Okano, Yasunori）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：90204007

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙居住を実現することを目的とし、自己駆動する液滴を利用した水浄化システムを考案した。その基礎研究として濃度差と温度差に起因する界面張力勾配が共存する際の液内流動現象に関し数値解析を用い解明を行った。濃度差、温度差に起因する駆動力が同方向あるいは逆方向であっても、起因する流動は単なる両者の和あるいは差で表すことはできず、極めて複雑な挙動を呈することが分かった。また従来の液内の液滴挙動に対し、基板の影響が顕著であり、移動速度は低減した。またこれ以外にも周囲温度の変化による輻射伝熱制御によっても液内の流動現象は制御可能であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常の現象においては温度差と濃度差が共存することが多いが、これまでどちらか一方のみを扱うことがほとんどであった。この両者を同時に考慮することにより新しい現象の発見とそれに伴う新しい制御法の提言が可能となった点に学術的な意義がある。また本法を拡大適用することにより、宇宙環境において従来法に比べ駆動エネルギーが極めて小さい流体輸送システムの構築が可能となり、人類の長年の夢である宇宙居住が実現しうる点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：For the purpose of realizing space residence, we devised a water purification system using self-driven droplets. As the basic research, numerical analysis was used to elucidate the fluid flow when the interfacial tension gradient caused by the concentration difference and the temperature difference coexist. It was found that even if the driving force caused by the concentration difference and the temperature difference is in the same direction or in the opposite direction, the resulting flow cannot be expressed simply by the sum or difference between the them, and exhibits extremely complicated behavior. In addition, the effect of the substrate on the conventional droplet behavior in the liquid was remarkable, and the moving speed was reduced. In addition to this, it was found that the flow phenomenon in the liquid can be controlled by radiative heat transfer control by changing the ambient temperature.

研究分野：化学工学

キーワード：マランゴニ対流 宇宙居住 数値解析 水浄化

1. 研究開始当初の背景

1969年にアポロ11号が初めて月の石を持ち帰ってから約50年が経過し、アポロ計画及びその後のLunar計画による月サンプルリターンに始まり、最近では、日本の小惑星探査機はやぶさによって小惑星イトカワのサンプルを持ち帰ってきた。また2019年1月には中国によって月の裏側への探査機着陸成功が成し遂げられ、世界各国で宇宙資源探査に関する計画の発表が相次いでいる。この中には私起業家による火星移住計画等も報じられており、宇宙資源探査を現実的に考えるべき時代が到来している。これからの宇宙探査を進めるにあたって、有人宇宙滞在技術の強化は必須となる。宇宙空間において、人の生命を安全に維持する技術であり、有人宇宙活動における根幹的な技術となる。特に、水・空気の再生率の向上は運用コスト削減のカギとなる。国際宇宙ステーション(ISS)で用いられている水浄化システムは減圧蒸留により大部分の不純物を取り除いた後、膜によって濾過を行うプロセスである。しかし、排水及び尿を再利用するものであり、尿に含まれるアンモニア等によりバクテリアなどが増殖し、膜性能の劣化を招いてしまうため、膜を頻繁に交換する必要がある。このことは、クルーの限られた作業時間を消費するものであり、長期の滞在に向けて大量の膜を運搬することはコスト増大につながる。そのため、本プロセスを長期間のミッションに適用することは困難であると考えられる。

2. 研究の目的

蒸留後の膜の交換頻度の増加という現状のプロセスの問題点解決のため、膜処理を極力高い純度に蒸留された後で行うことで、膜の性能悪化を抑えることを考える。本来、蒸留プロセスは重力を駆動力として用いる。しかし、微小重力環境では、浮力差、密度差等の重力効果を利用できない為、多段蒸留を実現することは難しい。また、宇宙までの輸送コストと宇宙空間の使用できる空間を考慮すると蒸留塔などの大規模装置の建造は困難である。そこで、表面張力差流れであるマランゴニ対流に注目する。不純物を取り除くプロセスを繰り返し行うことでより高純度な不純物除去を達成し、また細管を用いて設計することで装置の大きさ、重量の軽減を可能にする装置設計を目指す。宇宙環境を利用する機会が極めて限られており、微小重力での実験の多くが時間制限などの制約があるため、計算機シミュレーションを活用する。本研究ではゲートウェイ計画において当面の目的地としている月(1/6 G)で使用することを想定し、装置設計を目指したマランゴニ効果による液滴移動の数値解析を行った。

3. 研究の方法

液滴の移動に関して解析するにあたり、図1に示すような長方形領域を考えた。長方形領域に水滴一滴を設置し、周りは水蒸気とする。左右の壁をそれぞれ高温、低温となるよう温度設定した。支配方程式は連続式とNavier-Stokes方程式、気液界面形状解析(VOF法)で使われる流体率 α の移流方程式である。マランゴニ効果を考えるにあたり、Navier-Stokes方程式中の表面張力項 $F\sigma$ を以下のように定義し(Eq. (1))、また、相変化モデルを導入した(Eq. (2), (3))。

$$F\sigma = (\sigma\kappa n + \sigma T(\nabla T - n(n \cdot \nabla T)))|\nabla\alpha| \tag{1}$$

$$\dot{v}_{pc} = \frac{\dot{q}_{pc}}{h_{LV}} \left(\frac{1}{\rho_V} - \frac{1}{\rho_L} \right) \tag{2}$$

$$\dot{\alpha}_{pc} = -\frac{\dot{q}_{pc}}{\rho h_{LV}} \tag{3}$$

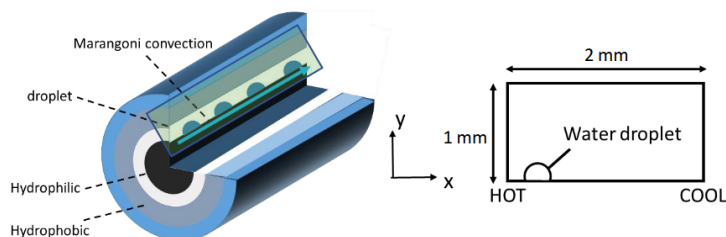


図1 解析領域

本研究では汎用性の高いオープンソースコードであるOpenFOAMを用いて計算を行った。

4. 研究成果

最初に両端に温度差のみを設けた2次元の長方形領域を考え、温度差マランゴニ効果による液滴の移動を考えた。左側を高温(380 K)、右側を低温(300 K)とし、高温側壁面から 0.4 mm 離れたところに半径 0.2 mm の水滴 1 滴を設置した(Ma_T : 2446, Gr : 0.07)。液滴の初期温度は 373 K とした。計算結果を以下に示す。両端に設けた温度差により、液滴(図中の赤色半円)が高温側(左側)から低温側(右側)に移動していく結果が得られた(図2左)。液滴内部の流れに注目すると、界面付近で強い流れが生じ、壁面付近では液滴の進行方向とは逆向きの流れが生じていることがわかった(図2左)。

温度差と移動速度との関係を図3に示す。図中の破線はYGB理論により得られる結果であり、いずれの場合も本研究ではYGB理論を下回った、これは下の壁のせん断応力の影響であり、壁の存在により液滴内部の流動を阻害したためと考えられる。

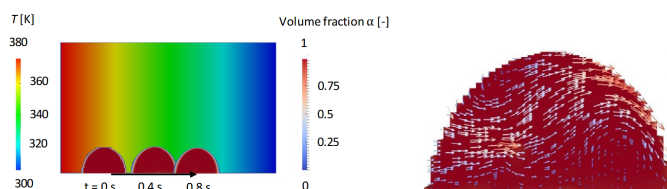


図2 温度差マランゴニによる液滴移動

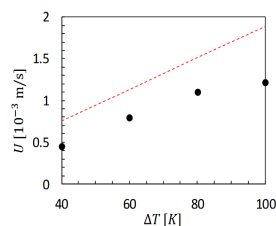


図3 移動速度の及ぼす温度差の影響

温度差と濃度差の両者が存在する場合の結果を図4に示す。計算条件は左側を380 K、右側を低温300 Kとし、高温側壁面から 0.4 mm 離れたところに半径 0.2 mm、濃度 $C = 0.05 \text{ kg/m}^3$ の水滴 1 滴を設置した。液滴の初期温度は 373 K とした。図4は 0.5 s 後の結果である。温度差・濃度差マランゴニ効果を両方考慮した場合でも、液滴が高温側(左側)から低温側(右側)に移動することが分かった。

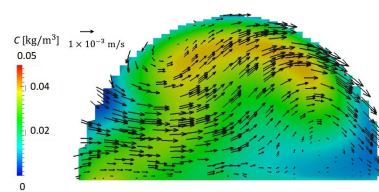


図4 温度差・濃度差マランゴニ共存時の液滴内流動

最後に液滴が複数存在する場合の解析結果を図5に示す。計算開始初期(0.1 s)では、低温側(右側)でより盛んに凝縮がおこり、小さな液滴が生じ始めた。時間経過とともに液滴の大きさが成長していき、隣接する液滴との合一がみられた。液滴がある程度の大きさまで成長すると、高温側(左側)から低温側(右側)に移動していく挙動を示した。

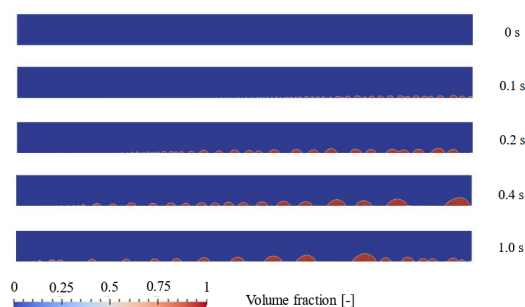


図5 複数の液滴移動の様子

5. まとめ

マランゴニ効果による流路内液滴移動を解析する手法を開発し、数値解析を行い、結果の妥当性を確認した。Young らによる YGB 理論との比較を行ったが、液滴移動速度は理論により与えられる値を下回ってしまった。この結果は、理論では考慮できていない壁面との相互作用が関係していると思われる。このことは、今後、装置のスケール等を考えるうえで、理論式による推算は難しく、本研究で開発した手法を用いて検討をしていくことを示唆している。またここでは示さないが、矩形内あるいは Floating Zone 内でのマランゴニ対流に関する検討において、周囲温度の変化が輻射伝熱の変化をもたらし、それにより対流現象が変化することも判明した。このことは単なる周囲温度制御という簡単かつ単純な制御により液滴移動を制御可能であることを示唆しており、本技術の実現化に有用であると思われる。

今後は本計算モデルを 3 次元へと展開し、物質の拡散および濃度差マランゴニ効果を考慮することで、最終的な目標とする水-アンモニア 2 成分系での計算手法構築が達成し、より現実

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 3件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Radeesha Laknath Agampodi Mendis, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano, Hisashi Minakuchi & Sadik Dost | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Global Linear Stability Analysis of Thermo-solutal Marangoni Convection in a Liquid Bridge Under Zero Gravity | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Microgravity Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 729-735 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12217-020-09798-9 | 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 該当する |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Radeesha Laknath Agampodi Mendis, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano, Hisashi Minakuchi and Sadik Dost | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 The Relative Contribution of Solutal Marangoni Convection to Thermal Marangoni Flow Instabilities in a Liquid Bridge of Smaller Aspect Ratios under Zero Gravity | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Crystals | 6. 最初と最後の頁 1-13 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/cryst11020116 | 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 該当する |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Chihao Jin, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano, Hisashi Minakuchi, and Sadik Dost | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Marangoni flows of opposite directions developing in a cylindrical liquid bridge under zero gravity | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Phys. Fluids | 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） 10.1063/1.5142071 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Chihao JIN, Atsushi SEKIMOTO, Yasunori OKANO, Hisashi MINAKUCHI |
| 2. 発表標題 Numerical Simulation of Thermal and Solutal Marangoni Convection in a Full Floating Zone with Radiative Heat Transfer under Zero Gravity |
| 3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第32回学術講演会（JASMAC-32） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Jiangao ZHANG, Atsushi SEKIMOTO, Yasunori OKANO |
| 2. 発表標題 Numerical Simulation of Thermal-solutal Marangoni Convection in a Shallow Rectangular Cavity with Mutually Perpendicular Temperature and Concentration Gradients |
| 3. 学会等名 日本マイクロ重力応用学会 第32回学術講演会 (JASMAC-32) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Radeesha Iaknath AGAMPODI MENDIS, Atsushi SEKIMOTO, Yasunori OKANO, Hisashi MINAKUCHI |
| 2. 発表標題 Global Linear Stability Analysis of Thermo-solutal Marangoni Convection with the Opposing Forces under Microgravity Conditions |
| 3. 学会等名 日本マイクロ重力応用学会 第32回学術講演会 (JASMAC-32) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 廣川 雄也、関本 敦、岡野 泰則 |
| 2. 発表標題 宇宙居住用水浄化装置の開発を目指したマランゴニ効果による単一液滴移動の数値解析 |
| 3. 学会等名 化学工学会 姫路大会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Chihao JIN, Atsushi SEKIMOTO, Yasunori OKANO, Hisashi MINAKUCHI |
| 2. 発表標題 Numerical Simulation of the Opposite Thermal and Solutal Marangoni Convections in a Liquid Bridge |
| 3. 学会等名 第31回日本マイクロ重力応用学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Radeesha Laknath AGAMPODI MENDIS , Atsushi SEKIMOTO , Yasunori OKANO , Hisashi MINAKUCHI |
| 2. 発表標題 Global Linear Stability Analysis of Marangoni Convection Under Microgravity Conditions |
| 3. 学会等名 第31回日本マイクロ重力応用学会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 稲富 裕光 (Yuko Inatomi) (50249934) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授 (82645) | |
| 研究分担者 | 堀河 俊英 (Hidetoshi Horikawa) (90380112) | 徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授 (16101) | |

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 | | |
|---------|----------|--|--|
| カナダ | ヴィクトリア大学 | | |