

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：52605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14611

研究課題名(和文)単結晶高品位化に資する、非定常表面張力差対流の新規制御法のための物理モデリング

研究課題名(英文)Physical modelling for building new method to control unsteady thermocapillary convection in order to create single crystals of high quality

研究代表者

工藤 正樹(Kudo, Masaki)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号：60634524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：フルゾーン液柱に対して効果的な制御手法を確立することを目標として、対流場と温度場を詳細に調査し、制御用の物理モデルの構築を行った。対流場と温度場の時空間構造を調査し、液柱上下で異なる振動モードを有することや周波数特性を明らかにした。物理モデル構築において、広範囲かつ詳細な温度および流速場の情報が必要であることがわかったため、数値シミュレーション(CFD)および粒子画像流速計(PIV)を導入した。始めにFZ液柱の簡易モデルである薄液膜に対してこれらを適用し、FZ液柱に導入するノウハウを得た。これらの知見を得て実用に耐えうる物理モデル(次元縮約モデルおよびデータ同化)を構築するための道筋ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非定常な温度差マランゴ対流に対して効果的な制御手法を確立するために対流場と温度場を詳細に調査し、制御用の物理モデルの構築の道筋をつけることができた。以上の成果は、FZ法の技術レベル向上に大きく貢献する。これにより半導体、レーザ、LED、二次電池材となる単結晶の高品位化、低コスト化が実現されることで、先端産業の発展に大きく貢献する。また、マランゴ対流のメカニズム解明は界面における熱流体力学の学術的発展に大きく寄与する。界面における熱流体力学は省エネ、環境問題の解決に不可欠な分野であり、世界中で積極的に研究されている。以上の点から、本研究の社会的波及効果は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：Thermal and flow fields of full-zone (FZ) liquid bridge were investigated carefully to construct a physical model of FZ liquid bridge for a flow control system. By investigating the spatiotemporal structures of thermal and flow fields, we observed different oscillatory modal structure and Fourier spectrum in upper and lower liquid bridge. Moreover, to construct the physical model, we introduced a numerical simulation (CFD) and a Particle Imaging Velocimetry (PIV) for obtaining broader and more detailed thermal and flow field. "Thin liquid layer model" was also introduced, because it is appropriate as a basis for making a reduced-order model (ROM) and a data assimilation. Broad and detailed thermal and flow field were obtained in the thin liquid layer model, then know-how to introduce CFD and PIV to the FZ liquid bridge was acquired. We achieved significant results for paving the way to make practical physical model.

研究分野：流体力学，伝熱工学

キーワード：単結晶高品位化 非定常表面張力差対流 物理モデリング 対流場，温度場 数値シミュレーション 粒子画像流速計

## 1. 研究開始当初の背景

最近5年ほどでIoT(Internet of Things)や省エネ化が急速に進む中、通信、照明や二次電池などの研究開発が急ピッチで進められている。これらの基盤となる半導体、レーザー、LED、二次電池材等の原料となる単結晶材の高品位化、低コスト化が強く求められている。これを解決できる技術としてフローティングゾーン法(FZ法)がある。溶融部分を入れる容器が不要のため、結晶に不純物が入らず、そのうえ試作コストが安いのが大きな利点である。しかし、非定常な温度差マランゴニ対流によって単結晶材に欠陥が生じるという課題が残されている。非定常対流のメカニズムは未解明であり、未だ有効な制御手法が確立されていない。

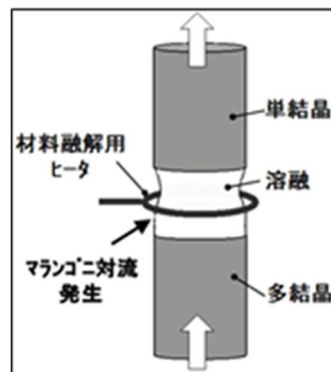


図1 フローティングゾーン法(FZ法)の概略

## 2. 研究の目的

本研究では効果的な制御手法を確立することを最終目的とする。そのためにFZ法の忠実モデルであるフルゾーン液柱(FZ液柱)に生ずる非定常流の調査を目的とする。特に対流場と温度場を詳細に調査し、これらをもとに制御用の物理モデルの構築を行う。

### (1) 対流場と温度場の時空間構造の調査

FZ液柱の物理モデルを構築するための基礎データを取得する。対流場と温度場が強く相関する系を対象としており、温度場を用いた能動的制御を最終目標として想定しているため、対流場と温度場を同時に計測し、時空間構造の相関関係を明らかにする。特に、挙動を捉えることが難しかった強非線形の対流場を綿密に観察する。

### (2) 対流の物理モデル構築

FZ液柱の制御アルゴリズムを構築するために物理モデルを構築する。例えば、一般的に用いられる最適制御では、非線形性を有する熱流体の支配方程式をベースに制御則を構築することから、制御出力の計算に時間がかかり、リアルタイムに制御ができないという問題点がある。そこで対流場と温度場をつなぐ物理モデルを構築することで計算時間を大幅に短縮し、リアルタイム制御を目指す。

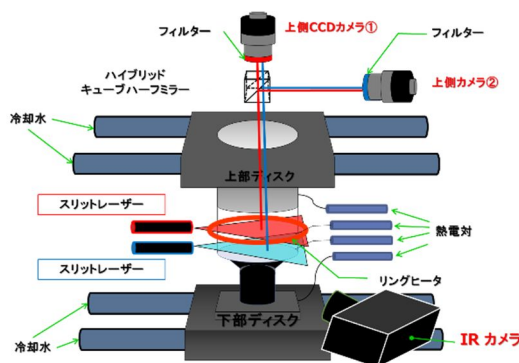


図2 FZ液柱の対流場の可視化および温度場計測装置

## 3. 研究の方法

調査対象はマランゴニ数  $Ma < 4Ma_{cr}$  のFZ液柱内非定常マランゴニ対流とする。ここで  $Ma$  はマランゴニ対流の強度を評価する無次元数であり、定常流から非定常流へ遷移する臨界点を臨界マランゴニ数  $Ma_{cr}$  と定義する。なおFZ液柱の簡易モデルであるハーフゾーン(HZ)液柱において、対流の乱流化が  $Ma_{cr}$  のおよそ4倍で生じると報告されており、強い非線形性を有する乱

流に対しては物理モデルの構築が困難である。

### (1) 対流場と温度場の時空間構造の調査

直径および高さ数 mm という微小な液柱に生ずる複雑な非定常対流に対して、2種類のシート状レーザ光を用いた上下液柱内対流場の可視化観測および高解像度のサーモグラフィを用いた自由表面温度の計測を同時に実施し、対流場と温度場の時空間構造の相関関係を把握する。

### (2) 対流の物理モデル構築

対流場と温度場の時系列データを用いた物理モデルを提案するために、システム同定や流体の運動方程式の簡略化などのモデル構築方法を試した。その結果、現実の制御で要求されるリアルタイム性を実現するためには、データ同化による次元縮約モデルの高精度化が有効であると判断した。そこで FZ 液柱の基礎モデルであり、単純な幾何形状の「薄液膜モデル」を導入し、次元縮約モデルの構築に向けて、薄液膜の3次元非定常流に対する数値シミュレーション(CFD)技術を構築する。さらにデータ同化技術の構築に向けて、粒子画像流速計(PIV)を用いた3次元振動流の計測技術を構築することとした。

## 4. 研究成果

### 4.1 FZ 液柱内温度差マランゴニ対流の対流場と温度場の時空間構造

FZ 液柱内温度差マランゴニ対流における液柱表面温度の赤外線画像およびトレーサ粒子法による対流場の可視化画像により以下のことを明らかにした。液柱上下の周期について、 $Ma$ によらず主となる周波数は同一であるが、細かい周波数成分は異なる。温度場と対流場の双方において脈動流や回転流が観察され、振動流のパターンは一致する。

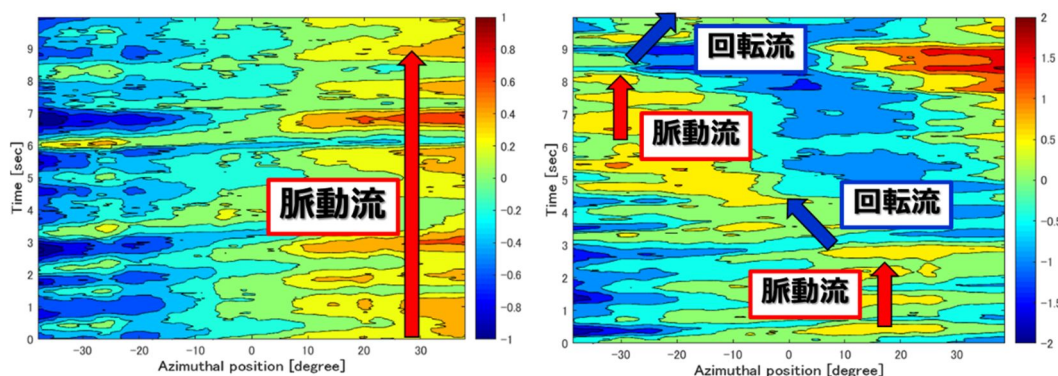


図3 下部液柱の自由表面における時系列周方向温度分布の例  
((左側)  $Ma=12,000$  (脈動流が支配的), (右側)  $Ma=18,000$  (脈動流, 回転流が共存))

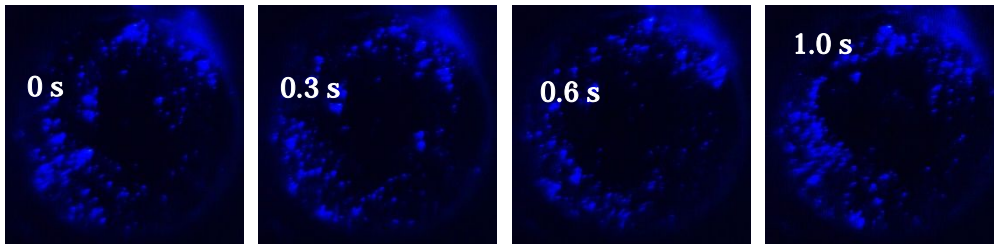


図4 下部液柱内部の一断面における3次元振動流の可視化例 (Ma=12,000, 脈動流が支配的)

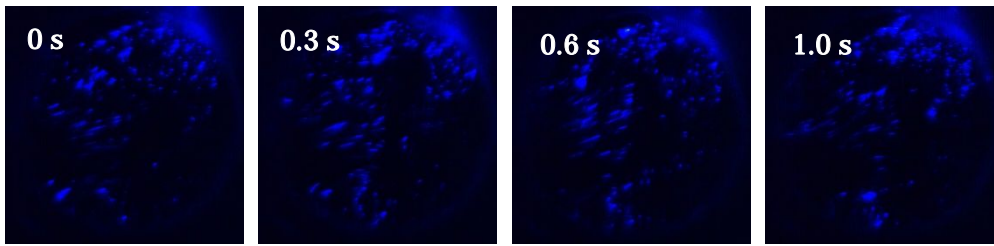


図5 下部液柱内部の一断面における3次元振動流の可視化例 (Ma=18,000, 脈動流と回転流が共存)

#### 4.2 FZ 液柱内温度差マランゴニ対流の対流場と温度場のカオス化過程

FZ 液柱内温度差マランゴニ対流の非定常流について遷移過程を調査した。特に遅れ時間や埋め込み次元を定量評価することで、カオス時系列解析をより精密に実施し、以下の知見を得た。フーリエスペクトル, 再構成アトラクタ, 相関次元, リアプノフスペクトラムの解析結果から  $\Gamma_H=0.6$  ではおよそ  $Ma=2.5Ma_c$  でカオスへ遷移する。(  $\Gamma_H (=H/R)$  は液柱のアスペクト比である。)

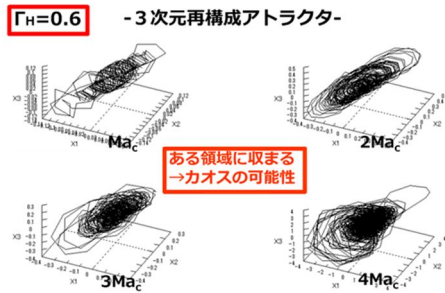


図6 下部液柱における自由表面温度の三次元再構成アトラクタの例 ( $\Gamma_H=0.6$ )

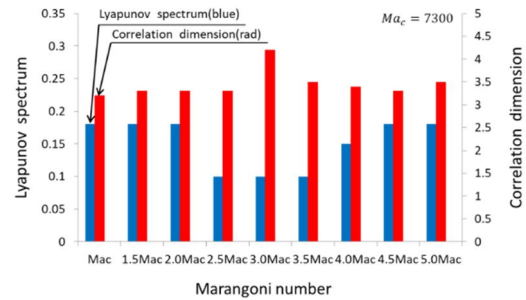


図7 下部液柱における自由表面温度の最大リアプノフ指数および相関次元 ( $\Gamma_H=0.6$ )

#### 4.3 薄液膜内温度差マランゴニ対流の数値シミュレーション

自由表面に平行に温度差を与えることで生じる非定常流を数値的にシミュレートした。液膜厚さを部分的に変化させ、厚みの局所変化が非定常流に与える影響を調査した。冷却側の液膜を厚くするとその厚みによって進行波(ハイドロサーマルウェーブ, HTW)の波数や伝播角が変化し、その影響が加熱側にまで及ぶことが分かった。加熱側の液膜を厚くするとその厚みによって部分的な伝播角の違いや先行実験と異なる対流が発生することが分かった(ここで  $Ma_L$  は代表長さに液膜厚さを取った場合のマランゴニ数を表す。)

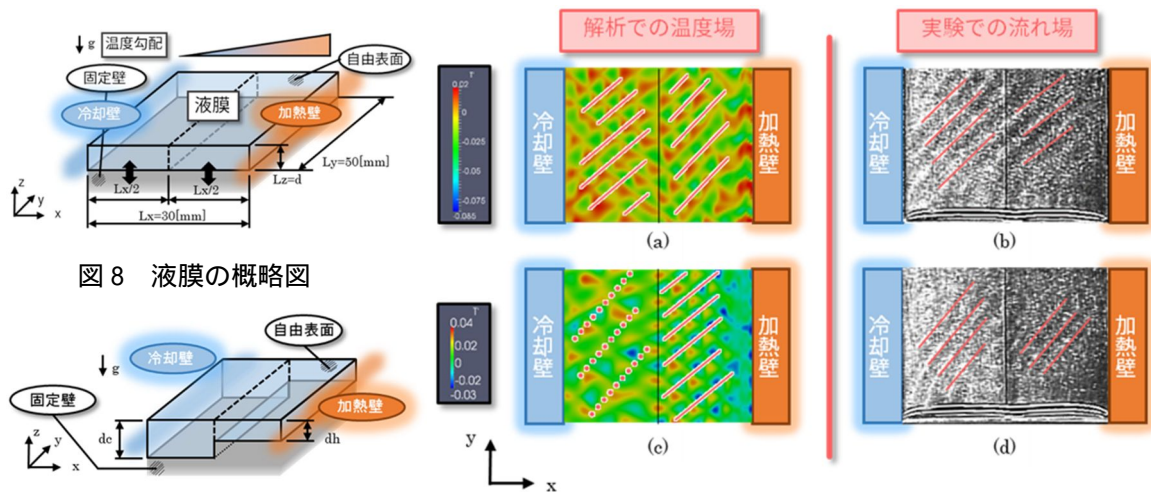


図8 液膜の概略図

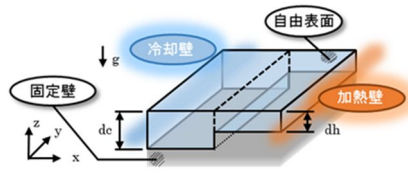


図9 冷却側の液膜が厚い条件 (冷却側深化)

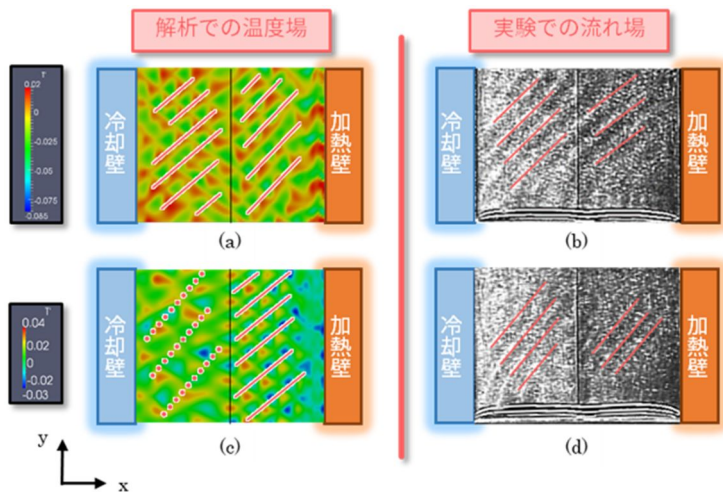


図10 冷却側深化条件でのHTW(左:数値解析,右:実験, (a),(b)Ma<sub>L</sub>=960, d<sub>c</sub>=1.1mm, (c),(d) Ma<sub>L</sub>=1020, d<sub>c</sub>=1.2mm)

#### 4.4 薄液膜内温度差マランゴニ対流の粒子画像流速計測

薄液膜内温度差マランゴニ対流において、部分的に液厚が変化する場合に生じる複雑な対流場の構造およびその特性を理解するため、その対象の一つであるHTWを対象として、ステレオPIVにより3次元非定常対流を調査した。その結果、HTWの3次元渦構造の可視化に成功しHTWの定性的特徴を捉えることができた。

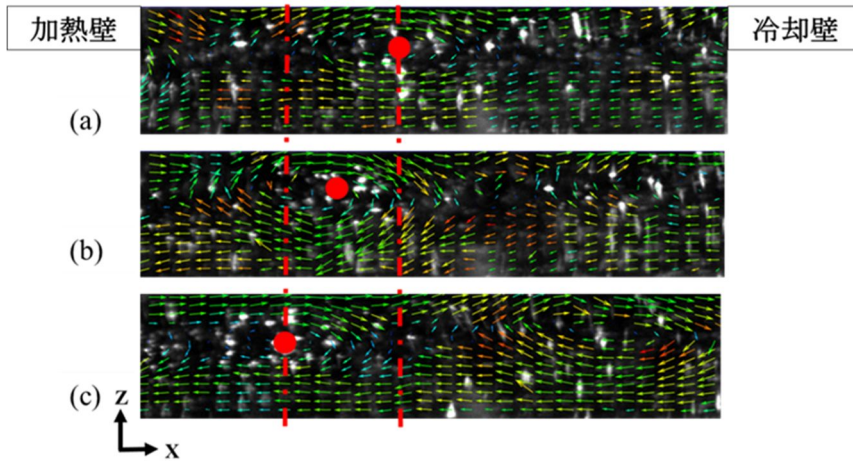


図11 HTWのステレオPIV解析結果 (d=1mm, Ma<sub>L</sub>=800, x=5mm, (a)0s, (b)0.5s, (c)1s)

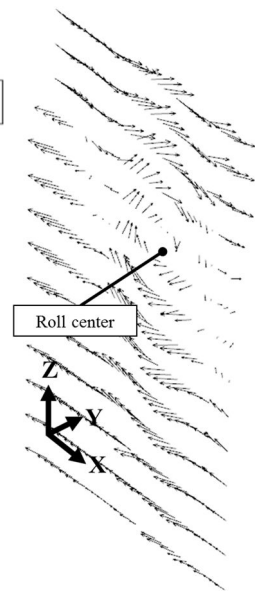


図12 HTWの3次元渦構造 (t=0.5s, x=12.5~17.5mm, y=2mm, z=0~1mm)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masaki Kudo, Takuro Ochi	4. 巻 -
2. 論文標題 Pattern formation in buoyant-thermocapillary convection currents in thin liquid layers: A comparison of numerical simulations and experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer (Accepted for publication)	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） なし	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林耀, 工藤正樹
2. 発表標題 フルゾーン液柱内温度差マランゴニ対流のカオス流への遷移について
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第26期講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川寛之, 工藤正樹
2. 発表標題 薄液膜内温度差マランゴニ対流に対するステレオPIV
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第26期講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十嵐啓太, 工藤正樹
2. 発表標題 加熱位置を考慮した薄液膜内温度差マランゴニ対流の抑制制御
3. 学会等名 日本マイクロ重力応用学会 第31回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤正樹, 越智拓郎
2. 発表標題 薄液膜内温度差マランゴニ対流の遷移に関する数値解析
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐啓太, 工藤正樹
2. 発表標題 薄液膜内非正常温度差マランゴニ対流の能動的制御
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川寛之, 工藤正樹
2. 発表標題 薄液膜内温度差マランゴニ対流に対するPIV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 五十嵐啓太, 工藤正樹
2. 発表標題 薄液膜内温度差マランゴニ対流の振動流に対する抑制制御
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第25期講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 工藤正樹
2. 発表標題 フルゾーン液柱内温度差マランゴニ対流のカオス化過程
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤正樹, 上野一郎
2. 発表標題 フルゾーン液柱内温度差マランゴニ対流の非定常流における対流場と温度場の構造について
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 越智拓郎, 工藤正樹
2. 発表標題 薄液膜内温度差マランゴニ対流の遷移に関する数値解析
3. 学会等名 関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018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
研究協力者	上野 一郎  (Ueno Ichiro)		



## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	西野 耕一  (Nishino Koichi)		
研究協力者	藤村 薫  (Fujimura Kaoru)		