2版

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　５ 年　６ 月 １３ 日現在

機関番号：１２７０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：２０Ｋ０４３２２
研究課題名（和文）表面張力マニュピレーションによる薄液膜内の対流と混合の能動制御

研究課題名（英文）Active control of convection and mixing in thin liquid layer through surface-tension manipulation

研究代表者
西野　耕一（Nishino, Koichi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：９０１９２６９０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　3,400,000円

研究成果の概要（和文）：炭酸ガスレーザを用いたスポット加熱によって、薄液膜の表面張力をマニュピレーションし、温度差表面張力流を制御することを目指した基礎研究を実施した。研究成果は次の通りである。（１）2次元トラバーサを用いたスポット加熱装置を構築し、静的加熱および直線走査型の動的加熱について、レーザ出力、液膜厚さ、動粘性係数、走査速度を変化させ、系統的な実験データを取得した。（２）数値解析手法を構築し、実験データとの比較を通して、静的スポット加熱の解析結果を検証した。（３）スポット加熱で生じる表面流速分布に第１ピークと第2ピークが生じることを明らかにし、次元解析によって、現象を無次元数で記述することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
表面張力流は、液膜、液滴、気泡、液柱など、代表寸法が小さい気液界面の対流を支配する。本研究では、温度差駆動の表面張力流をCO2レーザの静的／動的スポット加熱によって操作することによって、小スケール界面における対流を能動制御する方法論を研究した。レーザ出力、液膜厚さ、動粘性係数、走査速度を変化させて取得した実験データの蓄積とともに、数値解析の方法も考案し、検証した。得られた研究成果から、薄液膜に局所対流を自在に生起・制御することが可能となり、薄液膜を対象とした新しい応用技術であるマイクロ流体制御、マイクロ物体搬送、局所混合制御、結晶成長制御など、幅広い工学分野での利用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Control of thermocapillary convection in thin liquid film is studied by means of the manipulation of surface tension at gas-liquid interface through the spot heating with a CO2 laser. The results are as follows. (1) A spot heating system is constructed by using a two-dimensional traversing mechanism. Stationary heating and linear-motion-type dynamic heating are given to the liquid film and experimental results for various laser powers, liquid film thickness, kinematic viscosities and traversing speeds are systematically accumulated. (2) A numerical technique for thermocapillary convection due to spot heating is proposed and its validity and accuracy is confirmed through the comparison with the experimental results. (3) The profiles of surface velocity due to spot heating show the presence of the 1st and 2nd peaks, and such unique characteristics are explained using non-dimensional parameters derived from the dimensional analysis.

研究分野：熱工学

キーワード：対流　表面張力流　液膜　数値解析　次元解析　レーザ加熱　能動制御

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

界面を有する熱・流体現象では、系のスケールが減少するにつれて、体積力に比べて表面力の寄与が著しくなり、やがては熱・流体挙動を支配するようになる。液膜、液滴、気泡、液柱などが代表的な系である。本研究代表者は、液柱における温度差駆動の表面張力流の不安定性を調べ、地上実験では直径数 mm の小液柱、体積力の消失する微小重力実験では直径数 10mm の大液柱に関する研究成果を報告した［例えば、文献(1)、(2)、(3)］。

温度差駆動の表面張力流は、駆動源である気液界面が剥き出しであることから、周囲との熱交換の影響に極めて敏感である（図 1）。文献(1)と(2)は鋭敏な感受性を実験と数値解析で明らかにしたものである。そのような感受性を、周囲からの影響の対象として捉えるのでなく、表面張力の積極的なマニュピレーションの対象とすることによって、表面張力流の能動制御を実現することが本研究の狙いである。

温度差駆動の表面張力流を制御しようという発想は、これまでにも見られる。例えば、小液柱の表面張力流の不安定性の制御［文献(4)］、マイクロチャネル内の気泡流動の制御［文献(5)］である。これらの研究は、表面張力流が関与する特定の現象を取り上げ、その制御が可能であることを実証する先駆的なものである。それに対して本研究は、工学的に重要な薄液膜を取り上げ、そこでの対流の能動制御のための汎用的なアプローチを構築することが狙いであり、これまでの研究成果を包含する新しい研究課題を開拓することを特徴とする。

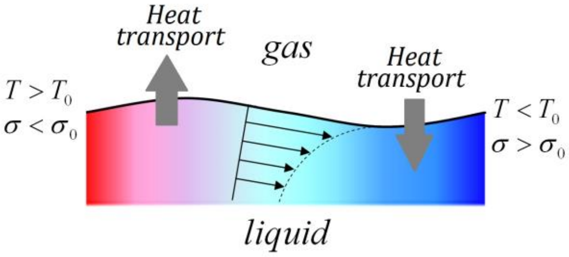

図１　温度差駆動表面張力流における界面熱移動

(1) Effect of interfacial heat transfer on basic flow and instability in a high-Prandtl-number thermocapillary liquid bridge, T. Yano, M. Hirotani & K. Nishino, Int. J. Heat and Mass Transfer, 125 (2018), 1121-1130.
(2) Effect of radiative heat transfer on thermocapillary convection in long liquid bridges of high-Prandtl-number fluids in microgravity, N. Shitomi, T. Yano & K. Nishino, Int. J. Heat and Mass Transfer, 133 (2019), 405-415.
(3) Sensitivity of hydrothermal wave instability of Marangoni convection to the interfacial heat transfer in long liquid bridges of high Prandtl number fluids, T. Yano, K. Nishino, I. Ueno, S. Matsumoto & Y. Kamotani, Physics of Fluids, 29 (2017), 044105.
(4) Feedback control of oscillatory thermocapillary convection in a half-zone liquid bridge, J. Shiomi, M. Kudo, I. Ueno, H. Kawamura & G. Amberg, J. Fluid Mechanics., 496 (2003), 193–211.
(5) Noncontact bubble manipulation in microchannel by using photothermal Marangoni effect, H. Takeuchi, M. Motosuke & S. Honami, Heat Transfer Engineering, 33(3) (2012), 234-244.

２．研究の目的

本研究は、工学的応用範囲の広い薄液膜を対象として、温度差駆動の表面張力流を自在に操作し、液膜内の対流を能動制御する方法論を構築することを目的とする。このような着想は、表面張力流の駆動源である気液界面が、周囲からの加熱・冷却の影響を敏感に受けることに基づいており、研究代表者のこれまでの研究成果の延長線上に位置する。

薄液膜は工学的に重要な対象でありながら、液膜全体の混合促進や厚さの均一化といったバルク特性の制御のみが研究対象であった［例えば、文献(6)］。即ち、薄いが故に、局所の対流を制御するという発想に至っていなかった。本研究の独自性は、表面張力流の鋭敏な感受性を積極的に利用して、薄液膜内の局所の対流を自在に能動制御しようとする点にある。そのような能動制御を実験的に示すだけでなく、現象の定式化とモデル化を経て、数値解析できるようにすることにも学術的な意義を有する。

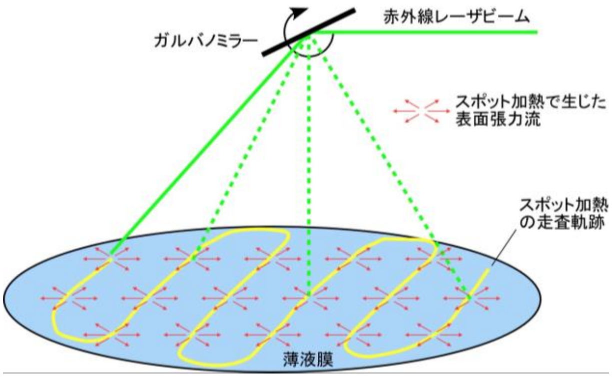

図 2　表面張力マニピュレーションと対流制御

本研究の目指す能動制御が実現すると、あたかも１枚の半導体ウェハーから多数の LSI チップが作り出されるように、一つの薄液膜に多数の局所対流を同時に生起させることが可能となり、薄液膜を対象とした新しい工学的応用の道が開かれる（図 2）。また、小さなスケールにおける表面張力流を能動的に制御する方法論が構築され、マイクロ流体制御、マイクロ物体搬送、局所混合制御、結晶成長制御など、幅広い工学分野の利用が期待される。

(6) Convective mixing of miscible liquids in a rotor-stator spinning disk reactor, H. Toma & K. Nishino, Chemical Engineering Journal, 346(15) (2018), 329-339.

３．研究の方法

① 薄液膜のレーザスポット加熱による表面張力流発生のメカニズムの把握

炭酸ガスレーザを用いたスポット加熱による表面張力流の発生のメカニズムを実験的に調べ、把握する。作動流体にはシリコーンオイルを用いる。赤外線吸収、局所温度分布、表面張力変化、物性値変化、液膜厚さ変化などを調べ、メカニズムを理解する。現有のマイクロ PIV システムを用いて液膜内対流および液膜表面温度の時間発展を測定し、基礎データを蓄積する。

② レーザビーム走査による表面張力マニュピレーション技術の開発

レーザビーム走査システムを構築し、炭酸ガスレーザを任意パターンで照射できるような制御システムを開発する。このシステムを用いて、50mm 程度の大きさで厚さ数 mm の薄液膜を対象として、レーザビーム走査による加熱パターンの制御を施し、液膜に生じる表面張力流パターンの様子を明らかにする。レーザビーム強度、走査速度、走査パターンなどを変えて、それらが表面張力流の分布に与える影響を調べる。

③ スポット加熱による表面張力流の時間発展の定式化と数値解析

表面張力流の発生と時間発展を定式化し、数値解析が行えるようモデル化する。特に、炭酸ガスレーザのビーム強度分布と吸収率を考慮した加熱モデルを考案し、数値解析への組み込みを図る。数値解析結果を実験結果と比較することにより、妥当性を検証する。数値解析には市販コードを利用し、表面張力の温度依存性などの特性をユーザ関数として組み込む。このことにより、幅広い液膜条件に対する効率的な数値解析を可能とする。

④ 表面張力流パターンの数値解析と次元解析

実験結果と比較できる数値解析を行い、表面流速分布の特性を明らかにする。複数の条件（加熱開始からの時間、レーザビーム径、レーザ出力、流体の動粘性係数など）の影響を統一的に解釈するため、次元解析による無次元数の見い出し、数値解析結果とのフィッティングによる相関式の導出を行う。

４．研究成果

４．１　薄液膜のレーザスポット加熱の実験と対流場の計測

アクリル製容器（長さ 60mm×幅 60mm×深さ 20mm）にシリコーンオイル（5、10cSt）の薄液膜（厚さ 2、3mm）を形成し、液膜表面を炭酸ガスレーザ（波長 10.6μm、ビーム径 2.4mm、出力 0.6、0.9W）でスポット加熱し、温度差駆動の表面張力流を発生させた。ビーム照射光学系を 2 次元トラバース装置に搭載することにより、スポット加熱位置を動的に制御できるようにした。用いた移動速度は 7.2mm/s、14.4mm/s である。図 3 に実験装置を示す。

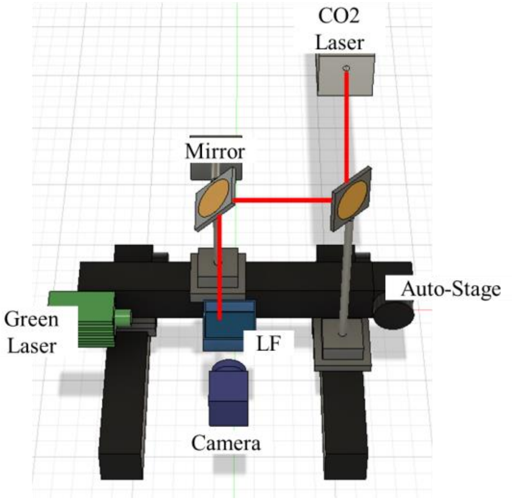

図 3　炭酸ガスレーザと 2 次元トラバーサによる動的スポット加熱システム

対流場を可視化計測するため、CW グリーンレーザ（波長 532nm、出力 400mW）のシート光（厚さ 1mm）を用いてナイロン粒子（平均粒径 5μm）の動きを高速度カメラ（300fps）で撮影した。PIV 解析を行うことによって、スポット加熱開始から時間発達する対流場の様子を 0.1s 間隔で定量化した。図 4 にスポット加熱の移動速度 14.4mm での速度場測定の結果を示す。

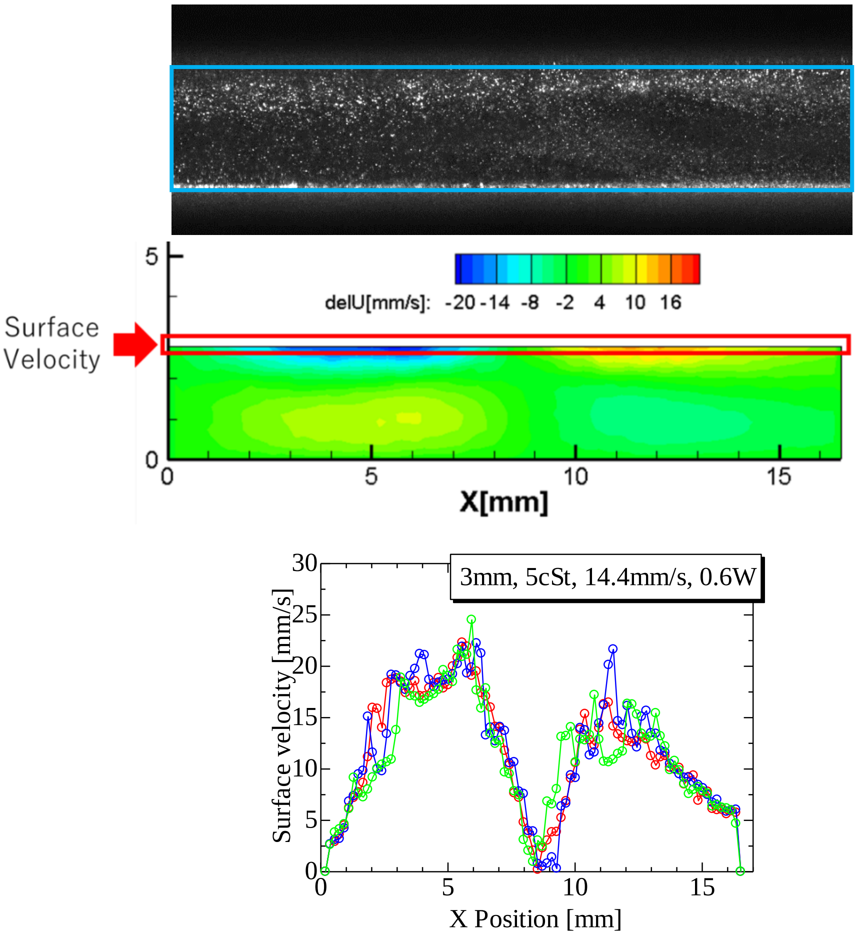

図 4 （上）液膜の可視化画像、（中）PIV 解析で得られた速度場、（下）液膜表面流速分布

上述の実験的研究で得られた結果と知見は次の通りである。

（1） 静止スポット加熱で生じる液膜内速度分布と表面流速分布を上述した多数の実験条件について測定し、静止スポット加熱による温度差表面張力流の基本的な特性を明らかにした。

（2）直線移動する動的スポット加熱で生じる温度差表面張力流の速度場を測定し、スポット加

熱の前方領域と後方領域の特性の違いを明らかにした。後方領域の表面流速分布は幅広い実験条件について静止スポット加熱の 0.4s における分布と類似すること、一方、前進領域のそれは静止スポット加熱での分布より幅広くなり、極大値はスポット移動速度の減少とともに小さくなり、静止スポット加熱の 0.8s での値に漸近することなどを明らかにした。

（３）レーザ出力、液膜厚さ、作動流体の動粘性係数が動的スポット加熱で生じる温度差表面張力流に与える影響を系統的に明らかにした。

４．２　薄液膜のレーザスポット加熱の数値解析と表面流速特性の次元解析

市販の熱流体数値解析コードを用いて、レーザスポット加熱が誘起する温度差表面張力流の数値解析手法を構築した。図 5 は解析対象の模式図である。軸対称性を仮定して、対称断面における 2 成分解析を行った。正規分布のレーザ強度分布を仮定し、シリコーンオイルにおける吸収長 0.256mm を組み込んだ。格子依存性を調べ、175×108 の計算格子を採用した。加熱開始後 0.1～0.6s について、速度場の数値解析と PIV 測定とが良好に一致することを示した。また、加熱開始後 0.1～5.0s について、液膜表面温度の数値解析と IR カメラ測定とが良好に一致することを示した。結果の一例として、表面流速分布の時間発展を図 6 に示す。

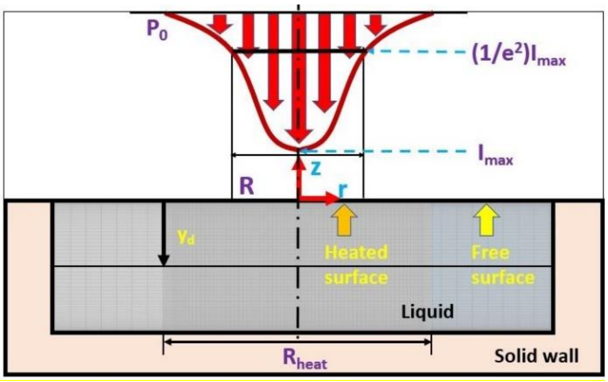

図 5　レーザスポット加熱による温度差表面張力流の数値解析モデル

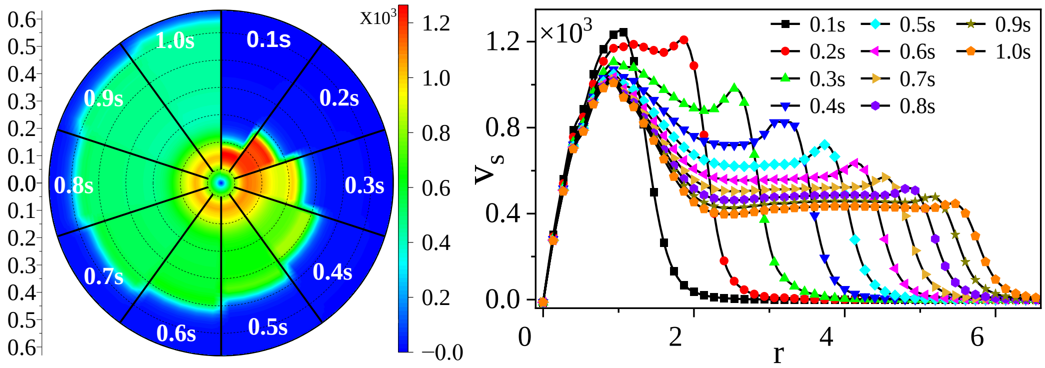

図 6　表面流速分布の時間発展（液膜厚さ 3mm、ビーム径 6mm、ビーム出力 0.6W）

上述の数値解析で得られた結果と知見は次の通りである。

（１）加熱開始後 5.0s までの表面流速分布、液膜内速度分布、表面温度分布の数値解析結果を幅広い条件（レーザ出力、レーザビーム径、液膜厚さ、作動流体の動粘性係数）で得た。

（２）表面流速分布には、加熱スポットからの距離が液膜厚さ程度の位置に最大値（第 1 ピーク）が生じるとともに、半径方向外側に第 2 ピークが生じることを示した。第 1 ピークの位置は時間とともにさほど変化しないのに対して、第 2 ピークは時間とともに外側に移動し、徐々に消えていくことを明らかにした。

（３）上述の表面流速分布の特徴（第 1 ピークと第 2 ピーク）について次元解析を行い、フーリエ数、マランゴニ数、プラントル数、無次元レーザビーム径によって特徴が整理できることを示し、ピーク位置と表面流速の大きさを与える無次元数の相関式を提案した。

（以上）

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 Yano Taishi、Mabuchi Yuki、Yamaguchi Makoto、Nishino Koichi	４．巻 63
２．論文標題 Internal flow structure and dynamic free-surface deformation of oscillatory thermocapillary convection in a high-Prandtl-number liquid bridge	５．発行年 2022年
３．雑誌名 Experiments in Fluids	６．最初と最後の頁 95-1～95-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-022-03453-2	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4件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 松野千映、矢野大志、西野耕一
２．発表標題 シリコーンオイルの表面張力の温度・電場依存性
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
４．発表年 2020年

１．発表者名 山﨑魁人、西野耕一
２．発表標題 温度場・電場による液柱マランゴニ対流の挙動
３．学会等名 可視化情報学会　第49回可視化情報シンポジウム
４．発表年 2021年

１．発表者名 小川秀真、西野耕一
２．発表標題 温度差マランゴニ対流を用いた液膜内部の対流制御
３．学会等名 日本マイクログラビティ応用学会　第33回学術講演会
４．発表年 2021年

１．発表者名 Koichi NISHINO, Ratnanjali TIWARI
２．発表標題 Characteristics of an Unsteady Surface Tension Convection Driven by Spot Heating of a Thin Liquid Layer
３．学会等名 可視化情報学会　第50回可視化情報シンポジウム
４．発表年 2022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