

Title	Numerical investigation of surface tension gradient induced flow in various scales
Author(s)	山本, 卓也
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/61817
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (山本卓也)

論文題名

Numerical investigation of surface tension gradient induced flow in various scales
(種々の空間スケールでの表面張力勾配駆動流に関する数値解析)

論文内容の要旨

表面張力勾配により駆動される流れはMarangoni対流と呼ばれ、塗装、レーザー切断、半導体結晶成長等において重要であり、その研究は応用面だけでなく基礎研究までと多岐に渡る。一般にMarangoni対流(表面張力勾配駆動流)のような界面現象は重力の影響が小さい宇宙空間や微小空間スケールにおいて重要となる。これまで、基礎的な研究も数多く行われてきたが、宇宙環境下で見られた特異な流れ等、不明な点が数多く存在する。本学位論文では宇宙環境下での特異な液膜内Marangoni対流のメカニズムを解明し、この現象を地上環境での応用へと生かすための研究を行った。特に、Marangoni対流と気液界面形状の関係性に着目し、宇宙環境下における基礎的な現象を地上、微小スケール、さらには実際の応用プロセスに渡って研究を発展させた。

初めに、宇宙環境下でのMarangoni対流の流動方向性に対して液膜形状の観点から研究を行い、流動方向が液膜形状に依存することを発見し、そのメカニズムを解明した。さらに、メカニズムが解明されていなかった宇宙環境下での液膜内振動Marangoni対流に対しても、液膜の形状に着目することでその発生条件とメカニズムを解明することに成功した。これらの現象は流動方向の制御技術になりうると発想し、半導体に用いる金属や酸化物の融液、有機溶媒等の幅広いPrandtl数流体での応用が期待されるため、流体のPrandtl数依存性を調査した。流動方向の液膜形状依存性は流体のPrandtl数に依らない一方、Prandtl数によって流動強さが大きく変わることが判った。続いて、宇宙で見られた流動方向の液膜形状依存性を地上での技術に生かすため、地上における容器内液膜での流動方向性について調査した。発達した流れは弱かったが、流動方向はその液膜形状に依存し、流動方向制御の一つの手法になりうることが判った。

続いて、地上重力環境下でもMarangoni対流が重要となるミクロスケールでの数値モデルの作成に取り組んだ。ミクロスケールでの数値モデル開発のために、離散的な効果による相互作用を取り入れられるようにするため、溶質に対しては離散的なLangevin方程式、その他混相流れを連続体モデルで表現し、離散的な効果を導入できる数値モデルを作成した。この数値モデルを用いたシミュレーションでは、マクロスケールでの現象を正確に表現しながらミクロスケールでの効果を取り入れることに成功した。

最後に、液膜形状とMarangoni対流の関係性が実際の半導体結晶成長プロセスにおいてどのように影響するかを調査した。本学位論文ではTSSG法によるSiC結晶成長に着目し、炉内全体の3次元グローバルシミュレーションを行った。まず、炉内全体の電磁場・温度場解析を行い、融液対流は電磁場駆動による流れが支配的であり、流れの3次元性はRFコイルの電流周波数に大きく影響されることが判った。Marangoni対流を考慮すると、Marangoni対流が結晶近傍での流れを反転させ、種結晶への炭素の輸送が遅くなり、結晶成長速度を大きく低下させることが判った。一方で、界面形状を変形させることで、このMarangoni対流の悪影響を緩和させることができると判った。

これらの研究を通して、宇宙環境下で見られた現象を解明することにより界面形状がMarangoni対流による流動方向を決定する新たな因子であることを特定した。その結果を微小スケール、材料開発の実プロセスへと展開することで、この関係性がこれらの問題に対しても重要であることを指摘し、宇宙環境で得られた知見を現実問題まで展開できた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (山 本 卓 也)	
	(職) 氏 名
論文審査担当者	主 査 教 授 岡 野 泰 則
	副 査 教 授 馬 越 大
	副 査 教 授 松 林 伸 幸

論文審査の結果の要旨

本論文は高度な数値計算を用い、表面張力勾配駆動流（以下Ma：Marangoni対流）に関し、基礎から応用、マクロからミクロを幅広く網羅したものである。水におけるMa対流は高温から低温に流れることが周知の事実であったが、2003年のNASAの国際宇宙ステーションにおいて、真逆の実験結果が報告された。この現象を解明するために多くの研究者が実験的、解析的な試みを行ったが、結論には至らなかった。本論文はこの結果に触発され一連の研究へと発展していった結果をまとめたものである。

本論文では最初にMa対流の流動方向と膜内に生じる渦構造の関係性を液膜形状に着目することにより論じ、理論的に宇宙で低温から高温へと流れるMa対流機構を明らかにした。それに引き続き、温度差が大きくなった際に液膜内に生じる2種類の流動不安定性について報告した。また低Prandtl数流体や地上の容器内薄膜においても同様の現象が発生することを数値的に予想した。一方、Ma対流を顕在化させる方法として微小重力の外に微小空間において体積力を減少させる方法について着目した。しかし空間が微小になるにつれ、流体の連続体近似が成立しなくなり、従来の解析基礎式では解析不能となることも知られている。そこで、従来の連続体近似による基礎式に離散的效果を取り入れ、100nm程度のマクロスケールとナノスケールの両者の性質を有する空間におけるMa対流の解析に成功した。実現象におけるMa対流の寄与の一例としては、TSSG法によるSiC結晶成長に着目した。Ma対流は成長時の結晶直下での流動方向を反転させるため、結晶成長速度の低下を誘起することが判った。しかし気液界面形状を変形させることにより、成長速度の低下を緩和しうることを指摘した。

以上で得られた知見は、気液界面を有する多くの非等温、非等濃度で行われる全ての単位操作における基礎をなすものであり、流体-流体界面を通しての諸移動現象を含む全てのプロセスにおいて有用であり、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。