



Title	Numerical simulation of thermal and solutal Marangoni convection developing in a floating zone with different heating boundaries under zero gravity
Author(s)	Jin, Chihao
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/89640">https://doi.org/10.18910/89640</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name ( Chihao JIN )	
Title	Numerical simulation of thermal and solutal Marangoni convection developing in a floating zone with different heating boundaries under zero gravity (無重力環境下で異なる条件により加熱されたフローティング・ゾーン内で発達する温度差および濃度差マランゴニ対流に関する数値解析)
<p><b>Abstract of Thesis</b></p> <p>Marangoni convection develops along an interface between two fluids due to variation of surface tension caused by temperature and/or concentration gradients, which is called thermal and/or solutal Marangoni convection. It develops during crystal growth whenever there exists surface tension gradients. However, Marangoni convection may adversely affect the crystal quality by forming growth striations by temperature fluctuations and solutal gradients. Therefore, it is important to investigate the dual effects of thermal and solutal Marangoni convection. Due to the opaqueness of semiconductor melt and expensive experiment equipment, numerical simulation provides an effective tool to examine Marangoni flow and make mechanism of heat and mass transfer available, with assumption of zero-gravity condition to eliminate effect of natural convection in the simulation. A floating-zone (FZ) system in a cylindrical shape growing SiGe is selected as the numerical domain. By creating temperature and concentration gradients in the same/opposite directions along the free surface and choosing a full zone or half zone, thermal and solutal Marangoni convection are observed in the same/opposite directions.</p> <p>Firstly, numerical simulation of thermal and solutal Marangoni convection in a full floating zone under zero gravity has been performed to investigate the actual process of crystal growth with heating coils outside the melt. In the system, thermal and solutal Marangoni convection develop along the free surface in the same/opposite directions depending on the region selected. The ambient temperature outside the system is taken as a Gaussian profile, and the radiative heat transfer is considered dominant. The features of concentration pattern in the floating zone vary due to different Marangoni numbers. The flow velocity field exhibits two or four main vortices along the free surface by effects of suppression or augmentation of the two Marangoni flows.</p> <p>Secondly, the separated lower-half zone is selected as the numerical domain with thermal and solutal Marangoni convection developing in the opposite directions. Due to the complexity of the opposite-direction flow, the supercomputer is required to conduct the simulation. Compared to the study of thermal and solutal Marangoni convection in the same direction in a half floating zone, the flow patterns of opposite directions behave diversely in various regimes with 2D axisymmetric flow, chaotic flow, oscillatory rotating flow, 3D steady flow, and even switching flow under different Marangoni ratios and combinations of (<math>Ma_c</math>, <math>Ma_T</math>). Furthermore, two kinds of flow transitions are predicted with the increase of <math> Ma_T </math> depending on value of <math>Ma_c</math>.</p> <p>Thirdly, numerical simulation of thermal and solutal Marangoni convection in a floating half zone with radiation effects under zero gravity has been performed. The ambient temperature is kept constant and radiation due to heat loss and heat gain is considered as dominant heat transfer from the ambience. Transition mode maps, based on concentration distribution with respect to Marangoni ratio and ambient temperature have been developed to investigate the radiation effects at unequal or equal (<math>Ma_c</math>, <math>Ma_T</math>) values. Furthermore, two sorts of oscillatory modes are observed in the same-direction Marangoni flows under either heat loss or heat gain. While two kinds of stabilizing effects are predicted under heat loss in the opposite-direction Marangoni flows.</p> <p>This thesis demonstrates the characteristics of thermal and solutal Marangoni convection developing in a full or half floating zone during crystal growth of SiGe with different heating boundaries under zero gravity. Unique findings, such as characteristic flow patterns, as well as transition mode predictions and suppressions of flow instability, would contribute to the control of unsteady Marangoni convection and obtaining the crystal with higher quality.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( Chihao JIN )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	岡野 泰則
	副 査	教 授	西山 憲和
	副 査	教 授	境 慎司
	副 査	准教授	水口 尚 (琉球大学 工学部)

論文審査の結果の要旨

マランゴニ対流は、温度および/または濃度勾配によって引き起こされる表面張力の変化により、2 つの流体間の界面に沿って発生する。これは、熱および/または溶質マランゴニ対流と呼ばれ、成長結晶内の成長縞を形成することにより、結晶品質に悪影響を与える。したがって、熱と溶質のマランゴニ対流の二重の効果を調査することが重要である。半導体融液は不透明であるのに加え、実験装置が高価であるために、数値シミュレーションが有効なツールとなりうる。本論文では自然対流の影響を排除するために無重力状態を仮定する。数値解析モデルとして、SiGe 成長の円筒形のフローティング ゾーン (FZ) システムを想定した。自由表面に沿って同じあるいは反対方向に温度勾配と濃度勾配を作成し、フルゾーンまたはハーフゾーンを選択することにより、熱および溶質のマランゴニ対流が同じ/反対方向に発生する。

最初に、融液の外側で加熱コイルを使用した実際の結晶成長プロセスを想定した解析を行った。システム外部の周囲温度はガウスプロファイルとし、輻射伝熱により加熱されるとした。マランゴニ数の違いにより、浮遊帯の濃度パターンの特徴が異なった。流動場は、2 つのマランゴニ流の抑制または増大の効果により、自由表面に沿って 2 つまたは 4 つの主な渦を示した。

次に、熱および溶質のマランゴニ対流が反対方向に発達する領域として、下半分のゾーンを模擬した解析を行った。逆方向の流れは複雑なため、シミュレーションを実行するには高度な数値解析を必要とする。半浮遊ゾーンでの同じ方向の熱および溶質マランゴニ対流の研究と比較して、反対方向の流れパターンは、2D 軸対称流れ、カオス流れ、振動回転流れ、3D 定常流れなど、さまざまな領域で多様な構造を示した。

最後に、無重力下での放射効果を伴う浮遊半帯における熱および溶質のマランゴニ対流の数値シミュレーションを行った。周囲温度を一定に保ち、周囲からの熱損失と熱獲得による放射が支配的な系について注目した。マランゴニ比と周囲温度に関する濃度分布に基づく遷移モード マップを、等しくないまたは等しい ( $Ma_c$ ,  $Ma_T$ ) 値での放射効果の元、提案した。さらに、同じ方向のマランゴニ流では、熱損失または熱増加のいずれかの下で、2 種類の振動モードが観測された。逆方向のマランゴニ流での熱損失下では、2 種類の安定化効果が予測された。

本研究により、無重力下で異なる加熱境界を持つ SiGe の結晶成長中に、完全または半浮遊ゾーンで発生する熱および溶質のマランゴニ対流の特性を明らかにすることができた。特徴的な流れパターンや遷移モードの予測、流れの不安定性の抑制など、独自の知見は、非定常マランゴニ対流の制御やより高品質な結晶の取得に貢献する。

以上のように本研究はマランゴニ対流現象の本質的理解という極めて本質的な部分から実際の工業製品品質制御の可能性まで広範囲に波及しうる成果を有しており、博士 (工学) の学位論文として価値のあるものと認める。