

(様式2)

学位論文の概要及び要旨

氏 名 佐伯 文浩 印

題 目 照射加熱による液膜のマランゴニ不安定性に関する研究

学位論文の概要及び要旨

本論文は、光照射によって加熱される液膜に生じるマランゴニ不安定性、すなわち、表面張力勾配によって引き起こされる界面不安定性について論じたものである。固体基板上に広がる液体層の照射加熱は、対流、接触線近傍の流れといった基礎的な流体现象に対する実験的研究において利用されている他、レーザー溶融による固体表面加工、コーティング膜の乾燥・硬化処理といった工学技術にも応用されている。このような問題に対する理論的・数値的な研究はこれまでも行われており、モデル方程式は様々な効果を取り込む形で発展してきている。しかし、いずれも対象にしている状況が限定的であり、これまでのところ、液膜および基板の物性、特に光吸収性に対する任意性を許容する一般的なモデルは報告されていない。

本研究では、照射加熱を受ける液膜に生じるマランゴニ不安定性を、広範な状況に対して詳細に調べることを念頭に置き、まずはその基礎となるモデル方程式の構築を目的として、空間2次元の液膜/基板系を対象に、液面形状と温度場の時間発展問題を定式化した。液膜については、その厚さが横方向の変動スケールに比べて十分に小さいと仮定し、基礎方程式系に対して薄膜近似(長波近似)を適用した。また固体基板については、厚さに対して制約を課さない一般的な場合と、液膜と同様に薄膜近似を適用して方程式系を単純化した場合の2通りの状況を想定し定式化を行った。これについて、前者は、実験および工学的応用における現実の系に配慮した定式化であり、後者は、現象を説明する際の見通しのよさに配慮した定式化である。また、温度場の記述に関しては、照射加熱の特徴である媒質内部への光の吸収を液膜と基板の両方に対して考慮し、さらにエネルギー反射の影響も考慮した。本研究で採用したエネルギー反射率は膜厚の関数として表され、液膜への光吸収および液面における光干渉の寄与を含む。特筆すべきは、反射率を通して光干渉効果を考慮した点であり、このような効果は液膜の照射加熱に関する過去の理論的・数値的な研究では考慮されてこなかった。

定式化によって得られた支配方程式系の中には、液面形状の時間発展を記述する薄膜方程式と固体基板に対する熱方程式が含まれる。前者は空間1次元4階非線形拡散方程式の一種であり、後者は空間2次元反応拡散方程式の一種である。これらの方程式を数値的に解く際、

時間の離散化については、効率性と簡便性の観点から半陰解法と近似因数分解を組み合わせた手法を採用し、空間の離散化については、保存性の観点から2次精度の有限体積法を採用した。数値計算法に関連して、上記のような互いに空間次元が異なる方程式を連成するとき、各方程式に適用するスキームの組み合わせによって計算量が増大する場合があります、その回避策として近似因数分解が有効であることを明らかにした。

また本研究では、具体的な問題として、光透過性液膜／光吸収性基板系の一様照射問題を取り上げた。このような系の場合、光干渉の影響により、エネルギー反射率は膜厚に対して周期的に変動する。数値シミュレーションにより、液面の安定性および不安定化した液面に形成されるパターンが、膜厚と反射率勾配（反射率を膜厚に対してプロットした曲線の勾配）との関係に依存することを明らかにした。さらに、液面の安定性は線形安定性解析により裏付けられ、非一様なパターンの発現機構は相分離問題との類似性の観点から説明できることを示した。なお、このような液面の振舞いは、マランゴニ不安定性に対して光干渉が影響を及ぼすことによって起こるものであり、このことは、本研究によって初めて明らかにされた。

本研究で構築した支配方程式系は、液膜自身が光を吸収する場合のみならず、固体の光吸収に起因する液膜の加熱も含めて、液膜の照射加熱問題を統一的に扱うことを可能とした。このことは、マランゴニ不安定性による液膜の流体现象を基礎科学的な観点から解明することに役立つだけでなく、照射加熱が応用されるレーザー加工技術やコーティング技術、さらには今後応用の広がり期待される微細構造の形成技術等においても、高精度化および新たな技術の開拓に貢献し得る。