

(論文内容の要旨)

液膜は、自然界や工学的な応用において遍在する現象である。液膜のダイナミクスは気液界面での相変化の効果によってしばしば影響を受ける。蒸発や凝縮を伴う液膜に関する過去の多くの研究では、液膜上の気相の深さを無限大として気相のダイナミクスが無視されてきた。しかし、応用上重要である、液膜が非常に薄く、気層が上部を壁で覆われかつ液層の深さと同程度である状況はこれまで解析が行われていなかった。このような状況では、蒸発や凝縮によって蒸気圧は層の横方向に揺らぐために気体は駆動され運動することになる。この結果、蒸気圧が高い場所では液層は押し下げられ、低い場所では引き上げられ、系が不安定化すると考えられる。

本学位論文では、上下を平行な壁で挟まれた、熱対流を無視できるほど薄い気液二層系におけるこのような現象を取り扱う。蒸気圧揺らぎが直接の動力源となるこのような液膜のダイナミクスはこれまで考えられていなかった。モデル化に際しては、気液両層に対して長波近似を適用した。本系では蒸気圧が揺らぐために、蒸気圧による飽和温度の変化の効果を取り入れた界面の境界条件を課した。一般的に、蒸発や凝縮は液体の質量の変化を伴うが、気体の密度が液体の密度に比べて十分小さいというスケールリングを仮定すると、質量変化の効果は蒸気圧揺らぎの効果に比べて無視できることが分かる。そのため、導出されたモデルは液層の質量の保存を保証する。結果として、液層の高さの時間発展を記述する非線形方程式が得られた。

このモデルは界面が平らな定常解を持つので、この解に対する安定性を調べ、分散関係を得た。この分散関係から、局所飽和温度の蒸気圧依存性が長波長モードの成長が抑制されることが明らかになった。また、気層が薄い方が蒸気圧勾配の効果が強いことも示された。物理的には、蒸気の流れは蒸気圧勾配の効果を緩和する働きを持っているので、気層が薄くなると上部の壁との摩擦により蒸気の流れが妨げられ、それにより蒸気圧勾配の効果が強化されるためであると考えられる。このことは、蒸気の粘性を大きくしても水平方向の蒸気圧勾配の効果が強化されることから説明できる。蒸気の粘性が大きくなれば、それに応じて蒸気の水平方向の流れも弱められるため蒸気圧の効果が高まると考えられる。このような蒸気の水平方向の流れの役割は、液膜が厚く熱対流を含む気液二層の線形安定性を調べた先行研究とは異なる。そこでは、蒸気の流れは系を安定化させるような働きをするものの、その原因は熱の移流によるためであると説明されている。

さらに、重力が系を安定化させるように働き、蒸気圧勾配の効果が不安定化させるように働くときの安定性条件を決定した。水-水蒸気系における物性値を用いて安定性条件を具体的に評価すると、気液二層間の温度差がわずかであっても系は不安定化することが明らかにされた。また、重力の向きが逆に働く場合は、温度差の符号を変えれば重力と蒸気圧勾配の効果が釣り合うと考えられるので、この場合も水-水蒸気系において安定性条件を数値的に求めた。その結果、実験的に可能な範囲で二つの効果が釣り合うことが示された。

最後に、安定性条件に対する熱平衡状態からのずれの効果を調べた。重力が安定化、蒸気圧勾配の効果が不安定化させる系では安定性条件に変化はないが、逆の場合では熱平衡状態からのずれに臨界値が存在し、それを超えると蒸気圧勾配の効果が弱まり安定な系が不安定化しうることを明らかにした。補遺では、表面張力の温度依存性の効果（マランゴニ効果）の影響が検討された。水-水蒸気系の場合、マランゴニ効果は線形の範囲で無視できることがわかり、先行研究と一致する結果を得た。

(論文審査の結果の要旨)

濡れ性の物質表面に液体が存在する場合、液膜は自発的に形成されるので自然界においてもまた人工的な環境においても遍在する現象である。近年ミクロスケールでの物質加工や機器の開発が重要視されているが、液膜の制御はその基本技術の中核を成すとみなされている。数理物理では実用よりも数理科学的な観点から液膜を含む界面のダイナミクスが詳細に研究されてきた。近年、これらの研究成果が工学的にも液膜の制御に応用できることが再認識され基礎・応用の両面から、より複雑な環境下での界面ダイナミクスの解明に向けた取り組みが精力的に行われている。

金谷氏は、薄膜のダイナミクスへの相転移の寄与を調べるために、鉛直方向に重力が働き弱い温度勾配を与えた平行平板間中の同じ物質からなる薄い気液共存系を取り扱った。この系では、蒸発や凝縮による液体の質量変化は無視できる近似が成り立つため、気層のダイナミクスは高次効果として無視できると考えられる。この結果、相転移の効果は考慮されてこなかった。しかし、気層が対流を無視できるほど十分薄い場合、液層では高次効果とみなされる相変化に伴う物質輸送は、気層の側では流体運動を励起する圧力変動を生み出すことが示された。特に、水平方向の流れが粘性効果により抑制されるため、圧力勾配は界面を上下させる流れを維持することに寄与することが明らかにされた。更に、気層側の圧力変動による界面での物質流量への寄与を考慮した境界条件を導入することで、整合的に気層のダイナミクスを取り込むことに成功した。この物質流量への気層の圧力変動の効果は、従来考慮されていた温度変動（潜熱）の効果とは逆向きの働きをするため、長波長での不安定性を抑制する。このために、系の不安定性は有限波長において最大値を持つ有限のモードが励起されることが期待され、系の定性的な振る舞いを大きく変えることが予想された。

金谷氏は、薄膜の解析においてに標準的な手法である界面変動の典型的な波長が液膜の厚さに比べ十分長いとする長波近似を前述の系に適用し、気液界面の高さと気層の蒸気圧の従う非線形方程式を導出した。この方程式を用いて、静止した平らな界面の線形安定性を調べ、分散関係を求めた。この結果、不安定モードは有限の波数に最大値を持ち波数が0の極限で中立安定（増幅率が0）になることを確かめた。また、粘性効果が大きい場合ほど、また気層の厚さが薄い場合ほど不安定性が強くなることから、水平方向の流れの抑制と不安定性の関連を確認した。

以上のように、本学位論文では、これまで無視できると考えられていた気層側のダイナミクスに焦点を当て、薄膜系のダイナミクスに定性的にも強く影響を及ぼすことを初めて明らかにした。また、気層での圧力揺らぎと気液界面の高さを従属変数とする、閉じた非線形発展方程式を導出し系の非線形発展を取り扱うための基礎を築いたことにより、今後のこの分野での研究の発展に大きく寄与することが期待できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。