



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	非凝縮性気体分子の存在下における蒸気分子の蒸発と凝縮に関する平均場運動理論解析 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	大橋, 広太郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15354号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89556
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kotaro_Ohashi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 大橋 広太郎

学位論文題名

非凝縮性気体分子の存在下における蒸気分子の蒸発と凝縮に関する平均場運動理論解析
(Mean-field kinetic theory analysis on the evaporation and condensation of vapor molecules in the presence of non-condensable gas molecules)

本学位論文で対象としている液体の蒸発および蒸気の凝縮は、工業の様々な場面で見られる現象である。例えば、燃料噴霧時の微細液滴の蒸発、乾燥炉内における溶剤液体の乾燥、さらに蒸気の凝縮によるキャビテーション気泡の激しい崩壊などが挙げられる。ここで、蒸発・凝縮といった相変化現象は、気液界面近傍における分子の非平衡性から引き起こされる現象である。これより、気液界面における相変化に伴う質量・運動量・エネルギー輸送量は、連続体を前提としている流体力学では求めることができず、分子運動の非平衡性を取り扱うことができる分子気体力学を用いて初めて取り扱うことができる。分子気体力学は、分子の速度分布関数を用いて記述されており、速度分布関数の支配方程式である Boltzmann 方程式を解析することで、速度分布関数および密度場や温度場といった巨視量の時空間発展を知ることができる。

分子気体力学解析を用いて気液界面における質量・運動量・エネルギー輸送量を知るためには、その界面において速度分布関数として境界条件を課す必要がある。この境界条件には蒸発係数と凝縮係数と呼ばれる 0 以上 1 以下の値を持つパラメータが含まれている。蒸発係数と凝縮係数は、それぞれ、液体分子の蒸発確率および蒸気分子の凝縮確率を意味している。蒸発係数および凝縮係数に対して、これまで多くの研究が分子動力学計算に代表される分子計算を用いて行われてきており、その値が明らかとなりつつある。特に近年では、これら係数の値が液体温度の影響を受けることや、気液界面における非凝縮性気体分子数の影響を受けること、つまり、気液界面における気体圧力の影響を受け、その圧力の上昇と共に蒸発係数および凝縮係数の値が小さくなることが明らかとなってきた。

これまでも数多く行われてきた蒸発係数と凝縮係数の値であるが、キャビテーション気泡の崩壊現象について考えると、未解明な課題が多く存在する。例えば、気泡が激しく崩壊する際には、気泡内部圧力は非常に高圧となる。この非常に高圧な状態下において、蒸発係数や凝縮係数の値はどのような値を取るのか未だ明らかにはなっていない。また、液体が高速に移動している状態でも、蒸発係数と凝縮係数は静止した液体と同じ値を取るのかといった課題も挙げられる。更に、高速で移動している気液界面においては、過去の研究より、液体表面において蒸気の凝縮が抑制されるといった仮説が提唱されているが、その真偽は明らかとなっていない。

このような背景を受け、本学位論文では、主に以下の三つの課題について研究を行った。

1. 気液平衡状態における蒸発係数と凝縮係数の値に対する非凝縮性気体の影響
2. 気液非平衡状態における蒸発係数と凝縮係数の値に対する非凝縮性気体の影響
3. 高速で動く液体表面上での蒸発係数と凝縮係数の値に対する非凝縮性気体の影響

上記三つの課題を解析するため、本研究では平均場運動解析を用いて解析を行った。平均場運動論の支配方程式は Enskog-Vlasov 方程式と呼ばれる。この平均場運動方程式を用いた解析は、分子動力学計算に比べて高速に計算ができるため、非凝縮性気体の分子を十分多くした計算、つまり分子数が

非常に多い高圧場における計算や、統計誤差の影響を大きく受ける非定常計算を精度よく行うことができるために、上記三つの課題の解析に適している。

以下では、全6章で構成されている本学位論文の概要を説明する。

第1章の序論では本研究の背景や目的を述べる。特に、本研究の研究対象である Boltzmann 方程式の境界条件について、過去の研究や最新の研究結果について述べる。第2章では、本研究で使用した Enskog-Vlasov 方程式について述べる。また、Enskog-Vlasov 方程式の数値計算方法についてもその詳細を述べる。

第3章では、気液平衡状態における蒸発係数と凝縮係数の値に対する非凝縮性気体の影響について検討した結果について述べる。計算系の中央に液膜を用意し、その液膜を挟むように蒸気と非凝縮性気体から成る混合気体が存在するような系を用意する。この液体表面における分子群のふるまいを調べることで、蒸発係数および凝縮係数の値を取得した。この研究の結果、蒸発係数および凝縮係数の値は、気液界面近傍の非凝縮性気体分子の数が大きくなるほど、つまり気体の圧力が十分大きくなると、その値が減少することが明らかとなった。また、非凝縮性気体の数が大きくなるほど、これら係数の値はゼロに近い値になることが明らかとなった。この結果より、非常に高圧条件下において、蒸気分子は非凝縮性気体分子のようにふるまうことが示唆された。

第4章では、気液非平衡状態における蒸発係数と凝縮係数の値に対する非凝縮性気体の影響について検討した結果について述べる。対象としている非平衡系として、温度差の異なる二液膜問題について解析を行った。高温の液体と低温の液体をその間に気相ができるように設置すると、高温の液体から低温の液体に向けて質量の輸送が自然に起こる。このような非平衡系を解析した結果、蒸発係数および凝縮係数の値は、第3章で述べた気液平衡状態で求めた値と同じ値をとることが明らかとなった。この結果より、平衡状態の蒸発係数および凝縮係数の値を求めておけば、Boltzmann 方程式の境界条件に使用できることが明らかとなった。また、蒸発係数および凝縮係数の液体温度の依存性についても詳細に調べた。その結果、蒸発係数および凝縮係数の値は、液体温度の関数および非凝縮性気体の密度(圧力)の関数として記述できることが明らかとなった。

第5章では、高速に動く液体表面における蒸発係数と凝縮係数の値に対する非凝縮性気体の影響について検討した結果について述べる。液体を超音速で移動させることで、液体表面には蒸気分子の凝縮が起こる。この解析を行うことで、第4章で使用した非平衡系とは異なる別の非平衡系を実現することができる。この研究の結果、第4章とは異なる非平衡系においても、蒸発係数および凝縮係数の値は、第3章で述べた気液平衡状態で求めた値と同じ値となることが明らかとなった。つまり、静止した液体と高速に動いている液体表面における分子の蒸発・凝縮確率は同じ値を取ることが明らかとなった。

第6章では、各章の結果を総括し、本学位論文で得られた結果が当該分野の今後の研究にどのように寄与・貢献できるのかを説明する。