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［全文の要約］
Author(s)	大橋, 広太郎
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
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/2115/89555
Type	doctoral thesis
File Information	Kotaro_Ohashi_summary.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 約

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)

流体の蒸発・凝縮現象は私たちの日常において観察されるだけでなく，工業的にも応用されている．特にキャビテーションとして知られる気泡の崩壊現象は，崩壊の際に生成される高温・高圧場により周囲物体へ損傷を与えるが，近年ではその性質が様々な工業分野で応用されてきている．ここで連続体力学に基づく流体力学では蒸発・凝縮を伴う流れを正確に取り扱うことが出来ない．流体力学は局所平衡状態を仮定しているが，蒸発・凝縮を伴う流れは非平衡状態である．このような気体の流れを記述するには分子気体力学における Boltzmann 方程式を用いることが適している．しかし，Boltzmann 方程式を解くためには気液界面における境界条件である気体論境界条件（kinetic boundary condition, KBC）が必要であり，この境界条件は分子気体力学の枠組みでは決定することが出来ない．

KBC を決定するために分子動力学法や平均場運動理論などの分子シミュレーションによる研究が行われてきた．これらの研究は主に蒸気単成分系を対象としている．蒸気分子の KBC には蒸発確率を表す蒸発係数α_e^Vと凝縮確率を表す凝縮係数α_c^Vが含まれている．これらは 0 以上 1 以下の値を取る．蒸気単成分系の場合，これらの値は 1 に近い値を取ることが報告されているが，キャビテーション気泡の挙動を考えるとき，内部気体が圧縮され高温・高圧場が生成されるためには気液界面における凝縮質量流束が十分に小さくなる，すなわちα_e^Vとα_c^Vの値が 0 に近い必要があることが指摘されている．したがって，蒸気単成分系のこれまでの分子シミュレーションの結果と整合していない．α_e^Vとα_c^Vの値には非平衡凝縮効果という気液界面が高速で移動することによってその値が低下するという仮説が提唱されているがその真偽は明らかになっていない．また，気泡中に含まれる非凝縮性気体分子の影響も指摘されている．液相には非凝縮性気体が溶解しているため，キャビテーション気泡中には非凝縮性気体分子が含まれている．近年の研究より，気液平衡状態において非凝縮性気体分子が蒸気分子のα_e^Vとα_c^Vを低下させることが報告されているが，気体が高圧の場合や気液界面に向かって質量流束がある非平衡状態において，α_e^Vとα_c^Vが十分に小さい値を取るかについては完全に明らかにされていない．

以上のような背景を受けて，本研究では非凝縮性気体分子が蒸気分子の蒸発・凝縮係数に与える影響について検討した．本論文は以下の構成となっている．1 章では上述した研究背景を詳しく述べた．2 章では本研究で用いた平均場運動理論に基づく 2 成分系の Enskog—Vlasov 方程式と数値計算方法について説明した．この Enskog—Vlasov 方程式は Boltzmann 方程式と似た気体論方程式でありながら気液二相を扱えることが大きな特徴で，空間的に 1 次元の場合には分子動力学法より約 100 倍計算効率が良い．本研究ではこの方程式を解析に用いた．3 章では非凝縮性気体が高圧となる平衡状態の問題において蒸気分子の蒸発・凝縮係数を検討した．4 章では二液膜問題として知られる設定を用いた定常な非平衡問題において蒸気分子の蒸発・凝縮係数を検討した．5 章では高速で移動する液膜を用いた非定常な非平衡問題において蒸気分子の蒸発・凝縮係数を検討した．また非平衡凝縮効果が実際に起こるかどうかを検証した．6 章では 3 から 5 章で得られた知見をまとめて結論とした．

3 章の平衡状態の問題において，系の中央に厚さが約15σの液膜を配置し，蒸気と非凝縮性気体からなる気相を液膜の左右に配置した．ここでσは分子直径である．気相中の非凝縮性気体分子の数を計算ケースごとに変えて数値シミュレーションを行った．気液界面付近でα_e^Vとα_c^Vを取得した結果，非凝縮性気体分子の数が多くなり，計算系が高圧となるほど，α_e^Vとα_c^Vの値は低下した．非凝縮性気体分子が最も多い計算ケースでは$\alpha_e^V = \alpha_c^V = 0.1$程度まで低下した．ここで平衡状態では$\alpha_e^V = \alpha_c^V$となるため，$\alpha^V = \alpha_e^V = \alpha_c^V$というひとつのパラメータに表すことができる．また，非凝縮性気体分が多く含まれている点でこの状態はキャビテーション気泡の崩壊の最終段階に近い状態だと考えられる．

4 章では二液膜問題を用いた定常な非平衡状態において非凝縮性気体分子の影響を検討した．二液膜問題とは正味の蒸発が起こる高温液相と正味の凝縮が起こる低温液相の間に蒸気の流れが発生する問題設定である．流れの方向に約 35σの長さの気相領域に非凝縮性気体を入れることでα_e^Vとα_c^Vへの影響を調べた．また液相温度差を変えることで非平衡の度合いがα_e^Vとα_c^Vへ影響を及ぼすかどうかを検討した．数値シミュレーションの結果，非平衡度に関わらず単に気液界面での非凝縮性気体量を表すパラメータの増加に伴い，α_e^Vとα_c^Vは減少した．

上述の結果より，α_e^Vとα_c^Vは気液界面の非平衡の度合い関わらないため，平衡状態の蒸発・凝縮係数である$\alpha^V = \alpha_e^V = \alpha_c^V$を Boltzmann 方程式の解析に用いることができるのではないかと考えた．そこで，α^Vを KBC に組み込み，Boltzmann 方程式解析による検証を行った．その結果，KBC を正味の蒸発面と凝縮面に課して気相のみを解いた Boltzmann 方程式による結果は気液二相を解いた Enskog—Vlasov 方程式の結果と一致した．このことから平衡状態の蒸発・凝縮係数であるα^Vは KBC に使用可能であることが分かった．

5 章では実際に厚さ約30σの液膜に速度を与え，気体の音速程度の速さで移動する気液界面を実現した．これは崩壊するキャビテーション気泡の気液界面を模擬している．この高速移動する気液界面において，正味の凝縮が発生する．この界面において非凝縮性気体分子がα_e^Vとα_c^Vへ与える影響について検討した．検討の結果，このような気液界面においても凝縮

係数α_c^Vは平衡状態の蒸発・凝縮係数であるα^Vに近い値をとり，またα^Vが KBC として使用可能なことを Boltzmann 方程式解析により確認した．なお，気液界面において非平衡凝縮効果は確認できなかった．

6 章では 3-5 章の結果をまとめて結論とした．すなわち，非凝縮性気体の存在下で気液界面付近が非平衡な流れ場だとしても KBC に平衡状態の蒸発・凝縮係数α^Vを使用可能であり，気液界面での非凝縮性気体の分圧や密度が高くなるとα^Vは小さくなる．このα^Vは気液二相の流れを解析する際に有用である．ある非平衡系に固有のα_e^Vとα_c^Vを求める必要がなく，液相を巨視的な流体力学方程式で解き，気液界面に KBC を課して分子気体力学により気相を解けば，分子シミュレーションを同時に行わずに気液二相の解析が可能だからである．これは計算コストの面から利点となることを本研究で確認できた．