

令和元年6月18日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18016

研究課題名(和文)多成分混合気体の非定常な弱い蒸発・凝縮に関する分子気体力学解析

研究課題名(英文) Study on unsteady flow of multi-component mixtures of gases with weak evaporation and condensation

研究代表者

稲葉 匡司 (Inaba, Masashi)

大阪大学・工学研究科 助教

研究者番号：00648511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：単原子分子の多成分混合気体に関する非定常な弱い蒸発・凝縮を分子気体力学にもとづいた理論および数値計算によって解析することにより、気液界面近傍に形成されるKnudsen層とその外側に広がる流体力学的方程式系で記述される領域によって構成される流れ場のマルチスケール構造および非凝縮性気体が含まれる場合の蒸気の振る舞いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気液界面における蒸気の定常な蒸発・凝縮に関して、分子気体力学にもとづく研究は数多く行われているが、非定常な蒸発・凝縮に関してはいまだ明らかになっていない点が多く残されている。本研究で得られた成果は、多成分混合気体の非定常な弱い蒸発・凝縮をともなう流体力学の基礎方程式系となることから、基礎的かつ本質的に重要な知見である。

研究成果の概要(英文)：Unsteady flows of multi-component mixtures of monatomic gas with weak evaporation and condensation were investigated on the basis of molecular gas dynamics. The multi-scale structure of unsteady flow field with evaporation and condensation at a vapor-liquid interface and also the behavior of the vapor flow in the presence of a non-condensable gas was clarified.

研究分野：流体力学

キーワード：分子気体力学 Boltzmann方程式 蒸発 凝縮 多成分混合気体 音波

1. 研究開始当初の背景

液体の蒸発や気体の凝縮は、自然界では音もなくいたる所で生じている身近な現象であるが、我々はそのすべてを知っているわけではない。流体力学は気体や液体の流れや流れにともなうエネルギーの輸送を記述することができるが、流体力学だけでは蒸発・凝縮によって、液体から気体へ、あるいは、気体から液体へどれだけの質量・運動量・エネルギーの輸送が生じるかという問いに答えることができない。気体と液体の境界である気液界面へ入射する気体分子集団と、界面で反射、あるいは、液体から気液界面を通して気体中へ出ていく気体分子集団の統計的性質が異なることにより蒸発・凝縮が生じ、それゆえ、蒸発・凝縮が生じている界面近傍の気体は非平衡となるからである。したがって、蒸発・凝縮をともなう流れの解析には、局所平衡状態を前提として成り立つ流体力学よりも微視的な気体の振る舞いが記述可能な分子気体力学を用いなければならない。

分子気体力学における単原子分子気体の速度分布関数の時空間変化を記述する支配方程式は、Boltzmann 方程式と呼ばれる。気体論境界条件 (Boltzmann 方程式に対する境界条件) を用いた Boltzmann 方程式の境界値問題の解析例は数多く、かつ、単原子分子気体の運動に関する様々な物理現象を網羅している。それらの解析結果の中で、特に工学上有用な知見の一つとして、気体分子の平均自由行程と系の代表長さの比で定義される Knudsen 数 (Kn) が 1 に比べて十分小さい場合の解析結果 (漸近解析) があげられる。これによると、 Kn が 1 に比べて十分小さい場合、気体の流れはほとんどの領域で流体力学の方程式系にしたがう。さらに、境界近傍の非平衡な領域である気体論的境界層 (Knudsen 層) の解析から、境界が気液界面の場合、流体力学の方程式系に対する速度のすべり・温度の跳びの境界条件が導かれ、それらの境界条件に含まれるすべりの係数に分子間相互作用の詳細な情報が集約される。このように、Boltzmann 方程式の境界値問題を出发点として、 Kn が 1 に比べて十分小さい場合の解析から、流体力学の方程式系およびそれらに対する境界条件が導かれてきた (Y. Sone & Y. Onishi, J. Phys. Soc. Jpn., 44, 1978; Y. Sone, Molecular Gas Dynamics, 2007)。また、多原子分子気体に対するモデル方程式である ES-BGK Boltzmann 方程式の漸近解析 (線形理論) を用いて、音波によって誘起される多原子分子気体の非定常な弱い蒸発・凝縮に関する研究がなされ、流れ場のマルチスケール構造およびすべり・跳びの境界条件が導かれている (M. Inaba, et al., Fluid Dyn. Res. 2012)。

単原子分子の蒸気中に非凝縮性気体が含まれる場合について、多成分混合気体に対する Boltzmann 方程式の漸近解析や数値解析の結果などから重要な知見が得られている (S. Takata, et al., Transp. Theor. Stat. Phys., 2002; K. Aoki, et al., Eur. J. Mech., B/Fluids, 2003)。例えば、流体力学極限 ($Kn \rightarrow 0$) において、蒸気中に含まれる微量な非凝縮性気体は蒸発流によって界面から吹き流され、蒸気の凝縮が生じている界面に吹き寄せられてそこに留まるといことが示されている。その結果として、非凝縮性気体は界面近傍の薄い領域内 (Knudsen 層) にのみとどまり、その外側の領域では純粋蒸気の流れ場が形成される。このように界面近傍に形成された薄い非凝縮性気体の「膜」で覆われた層によって、蒸気の大域的な流れが変わってしまうという興味深い現象が報告されている。

分子気体力学にもとづく先行研究により、現在までに多くの工学上重要な知見が得られているが、先行研究の対象のほとんどは定常問題に限定されている。また、音波によって誘起される蒸発・凝縮の漸近解析においても、単成分気体についてのみ調べられている。したがって、蒸発と凝縮が時間的に交互に生じる場合の多成分混合気体に対する非定常な分子気体力学解析はこれまでになされておらず基本的なことも未解明のまま残されている。工学上重要な蒸気の流れは、純粋蒸気のみで構成されることはほとんどなく混合気体かつ非定常あって、それゆえに、非定常な多成分混合気体の蒸発・凝縮をともなう流れに対する分子気体力学解析が必要とされている。

2. 研究の目的

多成分混合気体 (凝縮性気体と非凝縮性気体の混合) の非定常な弱い蒸発・凝縮に関する物理現象を分子気体力学にもとづいた理論および数値解析により明らかにすることを目的とする。非定常な蒸発・凝縮現象は、工学上重要な物理現象のひとつである。気液界面から遠く離れた気体中において、蒸発・凝縮による気体の流れ、すなわち、蒸発・凝縮流れ、が誘起される。蒸発・凝縮流れは、界面の状態 (界面表面温度・飽和蒸気密度等) や遠方の気体の巨視的物質量 (密度・温度等) に依存し、それらが特定の関係を満たす場合に実現される。この関係は、流体力学の領域に対する境界条件を与えることから、個々の流体力学の問題を解く上で、基礎的かつ本質的に重要な知見である。本研究は、特に音波によって誘起される多成分混合気体の非定常な弱い蒸発・凝縮流れの振る舞いを明らかにし、流体工学の基礎と応用への貢献を目指す。

3. 研究の方法

多成分混合気体の非定常な弱い蒸発・凝縮に関する物理現象を分子気体力学にもとづいた理論および数値解析により明らかにすることを目的とし、多成分混合気体に対するモデル Boltzmann 方程式の系統的な漸近解析および精密な数値解析を行う。特に、音波や気液界面の時間周期的な振動によって誘起される時間的に交互に生じる蒸発・凝縮現象に着目する。この問題を特徴づける無次元パラメータは、主に Knudsen 数、Mach 数、および、蒸気と非凝縮性気体の分子数密度比があげられる。これらのパラメータに対し、特定の大きさの関係を設定し、モデル方程式の境界値問題に対する漸近解析を行い、流体力学的方程式系および境界条件を導出する。さらに、漸近解析の結果と対応する数値解の両面から多成分混合気体の非定常な弱い蒸発・凝縮流れに関する物理現象の解明を試みる。

4. 研究成果

単原子分子の多成分混合気体に関する非定常な弱い蒸発・凝縮をともなう気体の流れに対し、分子気体力学にもとづく漸近解析（線形理論・弱非線形理論）および数値解析を行い、下記の成果・知見が得られた：

(1)流れ場のマルチスケール構造の解明

多成分混合気体に対するモデル Boltzmann 方程式の漸近解析によって、時間周期的に振動する分子の平均自由行程程度の厚さをもつ気体論境界層 (Knudsen 層) が気液界面近傍に形成され、その外側には流体力学的振動境界層および音波によって記述される領域が広がることが明らかとなった。

(2)流体力学的方程式系および境界条件の導出

多成分混合気体に対するモデル Boltzmann 方程式の漸近解析によって、流体力学的方程式系および境界条件が得られた。それらを用いて弱い蒸発・凝縮をともなう多成分混合気体の非定常な（時間周期的な）流れを理論的に求めることが可能となる。

(3)非凝縮性気体の効果

非凝縮性気体の数密度が蒸気の数密度に比べて小さい場合、時間周期的な気液界面の振動によって誘起される界面での蒸発・凝縮は時間周期的に生じる。非凝縮性気体の数密度の増加にともない蒸発・凝縮は抑制される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

なし

〔学会発表〕(計 3 件)

(1)稲葉匡司, 矢野猛, “蒸発・凝縮をともなう二成分混合気体の非定常な流れに関する数値解析,” 日本流体力学会 年会 2018, 2018 年 9 月 3 日 ~ 6 日, 大阪大学豊中キャンパス.

(2)Masashi Inaba, Takeru Yano, “Molecular Gas Dynamics on Unsteady Flow of Binary Gas Mixture with Evaporation and Condensation,” 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 23-27, 2018, Glasgow.

(3)稲葉匡司, 矢野猛, “蒸発・凝縮をともなう多成分混合気体の非定常な流れに関する分子気体力学解析,” 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017 年 12 月 12 日 ~ 14 日, 京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス.

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

なし

取得状況（計 0 件）
なし

〔その他〕
なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし