

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820046

研究課題名(和文) 分子気体力学にもとづく非定常な蒸発・凝縮流れの数理的研究

研究課題名(英文) Molecular gas dynamics on unsteady evaporation and condensation flows

研究代表者

稲葉 匡司 (Inaba, Masashi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00648511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：単原子分子気体および多原子分子気体(水・メタノール等)の非定常な弱い蒸発・凝縮をともなう半無限境界値問題を考え、分子気体力学にもとづく数値解法の開発を行い、数値的に解析し、非定常な蒸発・凝縮が実現されるための関係を明らかにした。また、非定常な弱い蒸発・凝縮をともなう気体の流れ場のマルチスケール構造も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Half-space problems for unsteady monatomic and polyatomic vapor flows with weak evaporation and condensation were investigated on the basis of molecular gas dynamics. Relation between macroscopic variables at infinity and on the vapor-liquid interface were numerically derived. In addition, the multiscale structure of unsteady flow field accompanied with evaporation and condensation at the interface was clarified.

研究分野：工学

キーワード：流体力学 分子気体力学 気液界面 蒸発・凝縮

1. 研究開始当初の背景

蒸発・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、私たちはその全容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を解析するためには、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従う。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発点として、 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に対する境界条件が厳密に導かれてきた (Sone Y. & Onishi Y., J. Phys. Soc. Jpn., 44, 1978; Sone Y., 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 (Inaba, M., et al., Fluid Dyn. Res. 2012)。

平面凝縮相によって仕切られた半無限空間の弱い、あるいは、強い蒸発・凝縮をともなう定常な気体の流れについて、Boltzmann 方程式を用いた詳細な解析も行われている。

この問題の場合は代表長さがないため、Boltzmann 方程式内には、Knudsen 数がパラメータとして現れない。解析の主要な知見として、(1) 蒸発と凝縮現象は特定のパラメータ (無限遠の気体の圧力・温度・速度および界面表面温度・飽和蒸気圧力) の組みを指定することによって実現されること (2) 蒸発と凝縮ではパラメータの関係が異なること (3) 超音速の蒸発は実現されないこと等が報告されている (Bardos C., Glose F. & Sone Y., J. Stat. Phys., 124, 2006; Sone Y., Molecular Gas Dynamics, 2007)。

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有用な知見が得られているものの、先行研究の対象は単原子分子気体、かつ、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・凝縮に関する漸近解析においても、(1) Knudsen 数が 1 に比べて十分小さい (2) 分布関数を Knudsen 数のべき級数で展開する、という理論的枠組から気体論的境界層の気体を準定常状態として近似している。したがって、本質的に非定常な蒸発・凝縮流れに対する精密な分子気体力学解析はこれまでにない。

2. 研究の目的

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) や界面から十分遠く離れた気体の巨視的物理量 (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となる。本研究は、非定常な弱い蒸発・凝縮流れに関して界面および無限遠の気体の状態をつなぐ関係を見出す方法を確立することが目的である。

本研究の目的を実現するため、単原子・多原子分子気体に対する ES-BGK Boltzmann 方程式の非定常半無限境界値問題を考え、大規模かつ精密な数値解析を行い、上述の無限遠と界面の物理量をつなぐ関係を見出すとともに、以下の非定常の効果や分子種の影響についても明らかにする：

【非定常の効果】

ES-BGK Boltzmann 方程式には、非定常性の大きさの程度を表す無次元数 Strouhal 数が含まれる。Strouhal 数を様々な値に変えて数値解析を行うことにより、漸近解析 (Inaba, et al., 2012) では近似的にしか組み込まれていない非定常な効果を、非定常境界値問題の解から明らかにする。

【分子種の影響】

ES-BGK Boltzmann 方程式に含まれる分子種

を決めるためのパラメータを変えることで、工学上有用な水・メタノール等の分子種を再現し、分子種の違いが非定常境界値問題の解に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

平面凝縮相によって仕切られた半無限二次元空間内に凝縮相と同一種の単原子気体あるいは多原子分子気体(水・メタノール等)が満たされており、界面や無限遠の物理量の時間変動によって誘起される非定常な弱い蒸発・凝縮を考えた。支配方程式としてES-BGK Boltzmann 方程式、気液界面における気体論境界条件として完全凝縮条件を用い、いずれも線形化の近似を行った。さらに、適切な変換を行うことにより、気液界面における気体論境界条件内には、無限遠の巨視的物理量(密度・温度・速度)と界面表面の巨視的物理量(飽和蒸気密度・界面表面温度・界面の振動速度)の差がパラメータとして含まれ、無限遠は静止する問題へ帰着させることができる。このとき、界面における境界条件内のパラメータが時間周期的に変動することによって非定常(時間周期)な蒸発・凝縮流れが誘起される。密度差と温度差の時間変動は同位相、密度差と速度差の時間変動には位相差をパラメータとして与えた。

上述の非定常境界値問題の解を、方程式に含まれる非定常性の大きさの程度を表す Strouhal 数および位相差をパラメータとして数値的に求めた。

4. 研究成果

分子気体力学にもとづき、単原子分子気体および多原子分子気体の非定常な弱い蒸発・凝縮をともなう半無限境界値問題の数値解析を行い、下記の成果を得た：

(1) 非定常半無限境界値問題の数値解法の確立

線形化された ES-BGK Boltzmann 方程式の定常振動解を求めるため、解の形を時間周期解と仮定し、Boltzmann 方程式を時間微分項が含まれない形式へ帰着させ、解を求めるための数値計算方法を確立した。

(2) 定常振動状態を実現するための気体論境界条件内のパラメータの決定

線形化された ES-BGK Boltzmann 方程式に含まれる Strouhal 数が 0、かつ、境界条件内のパラメータがすべて同位相のときに蒸発・凝縮が実現される。一方、Strouhal 数が 0 でない場合、パラメータとして与えた任意の位相差に関して、蒸発・凝縮が実現されることが明らかとなった。

(3) 気体論境界条件内のパラメータと気液界面における質量流束の関係

気体論境界条件内に含まれる各パラメータ(密度差・温度差・速度差)と界面における質量流束の関係(振幅および位相)を明らかにした。これらの関係は Boltzmann 方程式に含まれる非定常性の大きさの程度を表す Strouhal 数、パラメータ間の位相差、分子種に依存する。また、Strouhal 数が 0 の場合、定常蒸発・凝縮問題における速度のすべり・温度の跳びの境界条件に帰着することも明らかになった。

(4) 流れ場のマルチスケール構造の解明

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る。その外側には流体力学的振動境界層および線形音波によって記述される領域が広がる。音波はよく知られているように、音の減衰率にしたがって指数関数的に減衰し、やがて無限遠で静止する。

以上の成果は、一般の非定常弱い蒸発・凝縮問題を扱うための基礎的な知見となり、極めて有意義なものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)
なし

[学会発表](計 4 件)

1. Inaba, M. and Yano, T., "Half-space problem of unsteady evaporation and condensation of polyatomic gas," 30th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 2016.7.10-15, Victoria BC, Canada. (accepted)
2. 稲葉 匡司, 矢野 猛, "平面凝縮相における弱い蒸発・凝縮によって誘起される多原子分子蒸気の非定常流れ," 日本流体力学会 年会 2015, 2015 年 9 月 26 日~28 日, 東京.
3. 稲葉 匡司, 矢野 猛, "線形化された ES-BGK モデルに関する非定常な蒸発・凝縮をともなう半無限境界値問題," 日本流体力学会 年会 2014, 2014 年 9 月 15 日~9 月 17 日, 仙台.
4. Inaba, M. and Yano, T., "Half-space problem for linearized ES-BGK model equation with unsteady evaporation and condensation flows," 29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 2014.7.13-18. Xian, China.

〔図書〕(計0件)

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

稲葉 匡司 (INABA, Masashi)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：00648511

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし