

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02065

研究課題名（和文）境界近傍の気体の空間多次元性非平衡流れと流体力学方程式の解を接続する理論

研究課題名（英文）Theoretical analysis of multidimensional nonequilibrium gas flows and fluid dynamics equations near the boundaries

研究代表者

矢野 猛（YANO, TAKERU）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：60200557

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,500,000円

研究成果の概要（和文）：BKW方程式にしたがう固気・気液の境界面近傍の気体の空間多次元性非平衡流れに対して、数値解析と理論解析を併用して、その特徴を明らかにした。とくに、軸に直交する方向に調和振動する同軸2重円筒間を満たす希薄気体を考えて、円筒表面近傍の気体の振る舞いを詳細に調べ、速度すべり、温度のとび、および曲率の効果について特徴を示した。さらに、BKW方程式の線形分散関係を注意深く再検討し、円筒表面近傍のせん断波についても特徴を明らかにし、空間多次元性非平衡流れとの対比に有用であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、空間2次元のボルツマン方程式の境界値問題の精密な数値解を求め、その解の非平衡な振る舞いの特徴を明らかにした。これによって、ボルツマン方程式の多次元問題の解に対する数学的な理解と物理的な理解の向上、すべりの境界条件の定式化に利用可能な精度で多次元問題を解くための計算技術の発達などにおいて、学術的かつ社会的な意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：We have theoretically and numerically studied the multi-dimensional non-equilibrium gas flows near the gas-solid and gas-liquid boundaries based on the Boltzmann-Krook-Welander (BKW) equation. The problem of gas flows between the coaxial circular cylinders induced by the harmonic oscillation of the cylinders has been solved numerically by the finite-difference method and we have clarified the velocity slip and temperature jump on the boundary and the effect of curvature. We found that there is an important relationship between the multi-dimensional non-equilibrium gas flows and shear wave obtained from the linear dispersion relation.

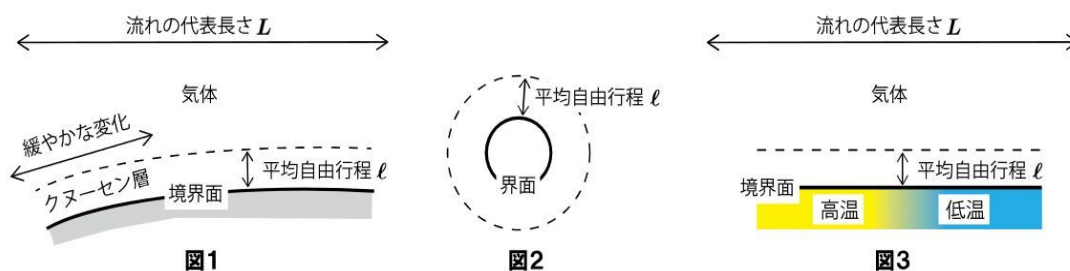
研究分野：流体力学

キーワード：希薄気体 流体力学 境界層

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固気・気液の境界面から気体分子の平均自由行程 ℓ (常温常圧の空気では $\ell \sim 0.1 \mu\text{m}$) 程度の領域では、全場が静止平衡状態にある場合を除いて、気体はかならず熱的に非平衡である。その理由は、界面に向かう気体分子と界面から離れる気体分子では、速度分布が異なるからである。このとき、流れの代表長さ L が平均自由行程 ℓ に比べて大きければ、すなわち $\text{Kn} = \ell/L \ll 1$ であれば、気体の振る舞いはナビエ・ストークス方程式に従い、これに対する境界条件に非平衡効果を示す補正項が追加される。ここで、 Kn はクヌーセン数とよばれる無次元パラメータであり、非平衡効果を示す補正項を含む境界条件はすべりの境界条件とよばれる。また、境界面近傍の非平衡領域はクヌーセン層とよばれる(図1)。ナビエ・ストークス方程式に対するすべりの境界条件に関する研究は、曾根・青木らによって網羅的に取り組まれて、すでに大きな理論体系となっている。



しかしながら、 $\text{Kn} \ll 1$ という条件は、クヌーセン層内の流れにおいて境界面に沿う接線方向の変化が緩やか、すなわち、クヌーセン層内の流れが法線方向の座標に強く依存する1次元の流れであることを意味する(図1)。一方、境界面の曲率半径が ℓ 程度である場合(図2)や、境界面に沿って大きな温度勾配がある場合(図3)などでは、空間多次元性非平衡流れが生じ得る。図2の場合に該当する液滴の噴霧燃焼、雲粒成長、マイクロバブルの崩壊などは、現状では、非平衡効果を無視して流体力学的に解かれるか、そうでなければ、図1の設定に基づくヘルツ・クヌーセン型境界条件を根拠なく流用(誤用)して解かれる。図3の場合に該当する応用として熱音響エンジン(熱音響冷凍機)があげられるが、この分野では非平衡効果の重要性は正しく認識されておらず、単純に流体力学的に扱われるのみである。

2. 研究の目的

問題1: 2つの平行な凝縮相が面内振動することで誘起される、非定常な蒸発・凝縮をともなう蒸気の1次元の流れを考える。この問題において、凝縮相間の距離を代表長さにとれば、これと平均自由行程との長さの比や、面内振動によって発生する音波の波長との比を取ることにより、非平衡性が設定できる。また、面内振動の速度振幅の設定によって非線形性も設定できる。この1次元の問題を Boltzmann 方程式のモデル方程式の一つである ES-BGK モデル方程式を用いて詳細な数値解析を行い、主に振動開始から十分に時間が経った後の定常振動状態での気体の振る舞いを調べることにより、本質的に非定常な蒸発・凝縮問題に対する知見を得る。

問題2: 軸方向に無限の長さを持ち、同軸となる半径 $R1$ の外円筒と半径 $R2$ の内円柱を考える。外円筒と内円柱の壁面温度は $T0$ で一定とする。外円筒と内円柱の間は単原子分子理想気体で満たされ、気体は初期に温度 $T0$ 、圧力 $p0$ 、密度 ρ_0 の静止平衡状態にある。XY 平面の原点が初期の同軸二重円筒の中心軸と垂直に交わるように座標を設定する。時刻 $t = 0$ より、円筒は大きさを変えず、かつ、中心軸を傾けずに、円筒1と円筒2の同軸を維持したまま、振幅 a 、角振動数 ω で X 軸に平行な方向に調和振動を行う。円筒の並進振動によって誘起される希薄気体の非定常流れを BKW 方程式を用いて数値的に解析する。

3. 研究の方法

問題1は空間1次元問題であるが、境界に対する接線方向成分の巨視的速度をもつため、空間多次元性非平衡流れの特徴を明らかにするためにも、重要な問題である。この問題に対して、

Mach 数の整数べきによる漸近展開と差分法を基本とする数値解析を適用して、ES-BGK モデル方程式の初期値・境界値問題の解を構成した。また、ES-BGK モデル方程式の線形分散関係の解析も実行して、境界近傍に出現するせん断波の特徴を明らかにすることも行った。

問題 2 は空間多次元性非平衡流れの問題である。二重円筒の中心軸上に原点をもつ極座標系を用いて BKW 方程式を表現し、差分法を適用して、初期値・境界値問題の解を数値的に求めた。

4 . 研究成果

図 4 は問題 1 の数値解の一例である。面の振動方向に平行な応力成分 p_{12} と熱流束ベクトルの成分 q_2 の空間分布について、振動面に垂直な座標 x_1 の関数として図示している。ただし $x_1=0$ は、振動面から十分遠方のある基準位置を表す。図示された例においては、応力と熱流の接線成分はともに振動面近傍で Mach 数程度の無次元振幅をもち、振動面から離れるにつれて急速に振幅を減少させてゆく。

図 5 は問題 2 の数値解の一例である。境界上で、速度すべり、温度のとび、境界の曲率効果などが確認できる。

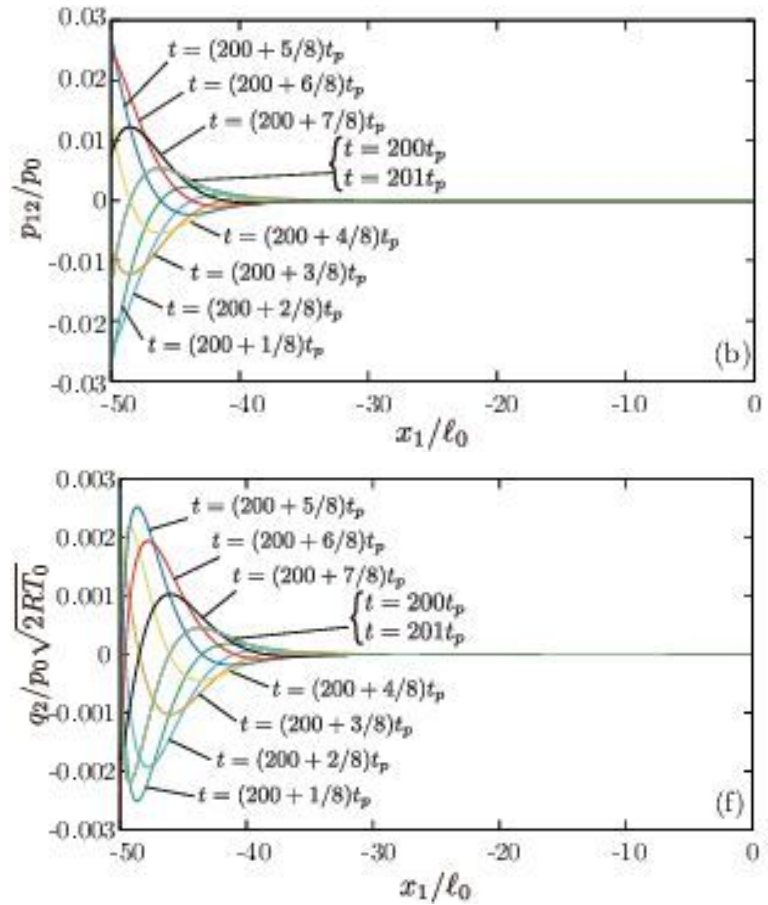


図 4 : 問題 1 の数値例。上図は応力の接線成分、下図は熱流の接線成分。

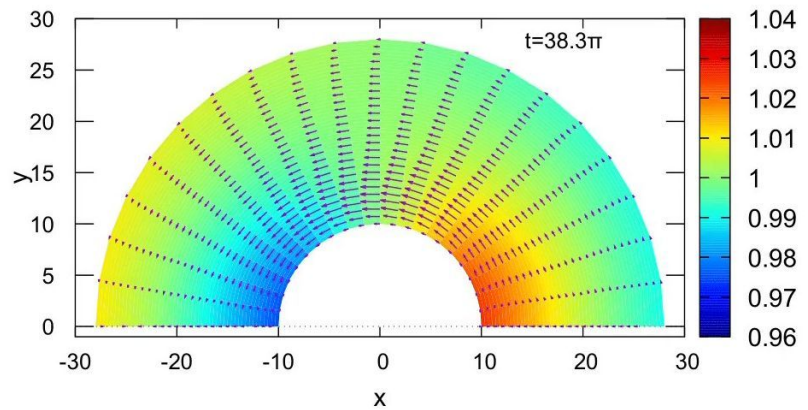


図 5 : 問題 2 の数値例。矢印は速度ベクトルを表し、カラーは圧力分布を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|