

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 2 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760132

研究課題名（和文）新しい運動学的方程式を基とした超音速流体音の直接数値計算手法の確立

研究課題名（英文）Development of numerical method for simulating supersonic aerodynamic sound using new type of kinetic equation

研究代表者

片岡 武（KATAOKA TAKESHI）

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20273758

研究成果の概要（和文）：超音速流れおよび流体音をシミュレートできる新しい運動学的方程式計算モデルを構築した。このモデルは 2002 年に曾根により提案された自由分子型運動学的方程式を基礎としている。超音速流れをシミュレートできることを示す様々な数値シミュレーションを実行し、得られた結果が圧縮性 NS 方程式および Euler 方程式の解と一致することを確認した。

研究成果の概要（英文）：We have devised a new simple kinetic-equation model which can simulate supersonic flows and aerodynamic sound. This model is based on the free-molecular-type kinetic equation whose calculation system was constructed by Sone in 2002. Various numerical simulations are carried out to confirm that this model can compute supersonic flows and show that numerical results agree with the corresponding solutions of the compressible Navier-Stokes and Euler equations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学

キーワード：音響

1. 研究開始当初の背景

過去に、ジェットのスクリーチを始めとする衝撃波と渦の干渉による音波の発生現象が、TVD 法等を用いた高精度差分法により求められている。しかし音圧の変動は、流れの圧力変動値に比べて 10^{-3} ～ 10^{-4} 程度と小さく、これを解像するためには非常に精度の高い差分計算が必要とな

る。実際、音場計算には空間 6 次精度程度の差分スキームと、時間 4 次精度程度の時間積分法が用いられており、その計算量は空間 2 次元計算においてさえ膨大なものとなるのが現状である。

一方、NS 方程式の代わりに運動学的方程式を解く手法として、格子ボルツマン法が盛んに研究されている。運動学的方程式

は、分子気体力学方程式であるボルツマン方程式とのアナロジーがあり、流れの諸量を一つの分布関数で表す。この分布関数の移流がほぼ音速であることから、とくに音波の計算に適していることも分かっており、空間3次精度、時間2次精度のエオルス音などの計算において、過去の差分計算（空間6次精度、時間4次精度）に匹敵する結果が報告されている。

しかし、これまでの格子ボルツマン法が採用しているBGK型と呼ばれる運動学的方程式は、その衝突項のせいで流速が音速を超えると解が急速に振動して計算が不安定となる欠点を持つ。そのため、既存の格子ボルツマン法は超音速流れには適用できていないのが現状である。本申請は、衝突項を省いた新たな運動学的方程式を採用することでこの現状を打破し、超音速流で計算可能なモデルを構築しようというものである。

2. 研究の目的

音場のシミュレーションに運動学的方程式を用いることの利点は数多く報告されている。例えばエオルス音やエッジトーンをはじめとする音場を直接計算で精度よく捉えられ、物体後流の渦や乱れも精度よく解像できる。図1はエオルス音発生時の計算例であり、円柱からの音波の伝播がきれいにシミュレートされていることが分かる。また衝撃波をはじめとする不連続な流れも、解が振動することなく非常にシャープに捉えられる。しかし既存の格子ボルツマン法では、BGK型と呼ばれる平衡状態からのずれに比例した形の衝突項を含むため、物体を過ぎる超音速流れや超音速ジェットなど、音速を超えた流速変化を伴う場合に不安定な様相を示す。

そこで申請者は、7年前に曾根により提案された衝突項を省いた無衝突型の運動学的方程式を基とした計算手法を用いることで、この欠点を解消できないかと考えた。提案されたこの手法は連続的な分子速度分布を仮定しているためにそのままでは計算負荷が大きいものの、流体の運動を支配するNS方程式が厳密に導出され、従来の格子ボルツマン法が持っているクヌッセン数に関する誤差が全く現れない。申請者は提案されたこの手法を、さらに離散的な分子速度に対応したモデルへと拡張する。つまり分子速度数を減らすことで、計算負荷を減らすことが出来るという格子ボルツマン法としての利用を試みる。これまで一般に用

いられている音場の計算手法は、音場の方程式を流れと切り離して解くものがほとんどである。しかし、ジェットのスクリーチ、エッジ音など、実際に興味ある音場現象の多くがそうであるように、音波そのものの非線形効果などを考慮する場合、また音場が流れにフィードバックする場合には、流れ場と音場の同時計算を高精度におこなうことが必要となる。上述のように、NS方程式の高精度計算では膨大な計算負荷がかかる。一方で、衝突項を含む既存の格子ボルツマン法では超音速流れを安定に計算できない。そこで本申請課題では、無衝突型の運動学的方程式を解くことで、超音速流れとその音場を安定に精度良くシミュレートできる計算手法を確立する。

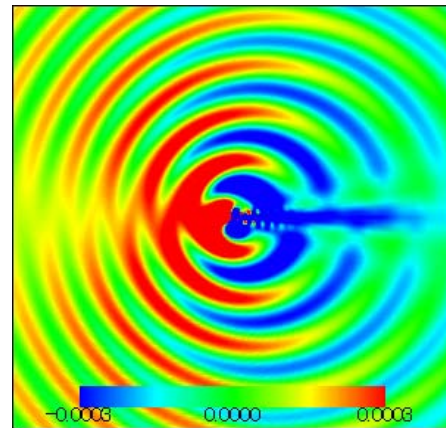


図1 円柱からのエオルス音の伝播。

3. 研究の方法

平成22年度は、曾根が発表した無衝突型の運動学的方程式による計算モデルは、分布関数を運動学的方程式によって時間発展させる度に、その段階での平衡分布関数に帰着させるものである。この平衡分布関数の形をうまく設定することにより、得られる解のマクロ量はNS方程式を満たすことができる。数値計算の負荷を考えると、できるだけ少ない分子速度の数でそのような平衡分布関数を導き出すのがよい。曾根が提案したモデルは、分子速度に関しては連続な分布を仮定しており、このままでは連続分布を模擬できる程度の多くの離散点（1次元では40以上、2次元では1600以上、3次元では64000以上!）が必要となり、多大な計算時間を要する。まずはこの支配方程式系をあらかじめ離散的な分子速度に対応したモデルに改良する必要がある。現段階で申請者が導出できた離散モデルについての結果を示すと、必要な離散点数が1次元で5、2次元で13、3次元で25であった。この離散点数は、格子ボルツマン法で

いわゆる熱流体モデルによって圧縮性流れを解析する際に要する離散点数よりも少なく、計算負荷の面においてもすでに、超音速流れを計算できない既存モデル以上のレベルにまで達している。

続いて粘着境界条件の設定を試みる。壁から気体中へ出ていく分子の速度分布関数を、壁の速度と温度に対応する平衡分布関数で与える。この場合、既存の格子ボルツマン法では壁近傍にクヌッセン層と呼ばれる格子幅程度の薄い非平衡層が現れ、物理量（密度、流速など）のとびが生じる。この層は、分子速度を離散的な分布としている格子ボルツマン法においては物理的に意味のない数値誤差であり、計算の不安定化の一因となっている。本手法ではクヌッセン数に関する誤差が現れないため、このようなクヌッセン層による物理量のとびは一切現れず、安定な計算をおこなうことが可能である。なお、粘着境界層や超音速ジェットのせん断層は、レイノルズ数の $1/2$ 乗のオーダーの薄い厚みをもって現れる。これは実際の流れで生じるものであり、この薄い層を精度良く解析するために当該領域には十分な数の空間離散点を配置する必要がある。

導出した離散分子速度モデルの妥当性を、上述の粘着境界条件のもとでの数値シミュレーションにより検証する。まずは二次元計算をおこなう。超音速流れにおける流体音は、ジェットのスクリーチを始めとしてそのほとんどが乱流を伴うため、得られたモデルの実際の流れに対応した計算検証は綿密におこなう。格子ボルツマン法では、乱流モデルを導入することなく、直接計算により乱流計算が可能であることが報告されている。本申請では、乱れを伴う流れにおいて、流体音による圧力変動、音波の非線形効果、流れへのフィードバックなどがどの程度精度よくシミュレートできるかに焦点を当てる。計算結果は可視化ソフト(CAE Visualizer)により詳細に調べ、NS方程式による解との差を確認する。

空間メッシュは、せん断層や境界層などの変化の激しい部分には細かく、主流から離れた音波の伝播領域には音波の波長に応じた配置を施す。この条件下で滑らかな配分となるように境界適合格子生成ソフト(メッシュジェネレータ)を利用して空間格子を形成する。

平成23年度は、前年度に2次元モデルのパフォーマンスについての一定の知見が得られた後、本年度は3次元モデルの検証をおこなう。2次元の場合と同様に粘着境界条件を設定する。数値結果の検証には、NS方程式の数値解との比較に加え、過去の実験における音圧および周波数測定結果との比較も合

わせておこなう。最初は、球や円錐など単純形状周りの流れおよび超音速ジェットを取り扱い、3次元モデルの基本的性能を調べる。とくに、超音速ジェットの主流内に形成される衝撃波のセル構造や、それに伴って発生するジェットスクリーチの音圧、周波数を様々なパラメータの条件のもとで調べ、比較検討を行う。

3次元計算においても空間メッシュを効率良く配分するが、とくに比較対象となるNS方程式の高精度計算は膨大な計算負荷となるため、MPIを用いた並列計算を行う。並列計算の手法については取得済みである。計算機は購入予定のPCクラスターを使用し、神戸大学内学術情報基盤センター内設置の並列計算機による並列計算も合わせて行う。

その後、より実地的な流れに即した複雑形状周り流れを取り扱う。超音速航空機周り、超音速ロケット周り、スクラムジェットエンジン内流れ等を取り扱う予定である。いずれもすでに多くの騒音実験が成されており、発生する騒音レベルにより数値モデルの妥当性を検証する。最後に、確立した計算手法をソルバーとして、上記可視化ソフトと格子生成ソフトを組み合わせ、任意形状周りの流れの計算が可能な汎用的なソフトを開発する。これにより、あらゆる超音速流れと音場の直接計算が簡単な操作で行えるようになる。

4. 研究成果

圧縮性 NS 方程式の直接差分法による空力音の直接計算が様々な流れ場において行われ、いずれも良い精度で音場を計算できることが確認されてきた。しかしながら流体音となるエオルス音やエッジ音などの計算において、任意のレイノルズ数およびマッハ数に対して、変動の小さな音波の生成、伝播現象を完全に捉えるには非常に高精度の計算が必要であった。

そこで、本研究では運動学的方程式を用いた新しい数値計算手法を導入した。これは10年前に曾根により提案された衝突項を省いた無衝突型の運動学的方程式を基とした計算手法であり、一般によく用いられているBKW方程式を用いた格子ボルツマン法とは性質が異なる。例えば、格子ボルツマン法では、流れのパラメータを自由に設定する事ができないが、本モデルでは自由に設定可能である。また、超音速流れに対してより安定なスキームの特徴を有している。この計算モデルを実際に構築して数値流体計算スキームとしての利用を試み、流体音の計算に成功した。

具体的な流れの計算対象としては、エオルス音を発生する円柱をすぎる流れを取り扱った。比較的広い範囲のレイノルズ数に対して、発生する音波の振動数を基にしたストールハル数が実験値とよく一致した。また、発生音波の振幅に関しても、流れのマッハ数が小さい時に有効な近似理論と一致し、ドップラー効果などの典型的な音波の特性もきれいに捉えられることを確認した。計算モデルは、超音速流れの計算できるものと、亜音速流れ専用だが分子速度数の少ない計算速度の速いモデルの2タイプを開発した。

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2件)

① T. Kataoka:

“Gas-flow simulations by novel lattice Boltzmann method”, Theoretical and Applied Mechanics, 査読有, Vol. 59, 2011, 221-227.

② T. Kataoka:

“Simulations of supersonic flows using new kinetic scheme based on the free-molecular-type equation”, Proceedings of 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, 査読有, 2010, Paper No. 229 (4pages).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 武 (KATAOKA TAKESHI)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20273758

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者