

Title	差分格子ボルツマン法における低マッハ数乱流解析に関する研究
Author(s)	國嶋, 雄一
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/69566
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (國 嶋 雄 一)

論文題名 差分格子ボルツマン法における低マッハ数乱流解析に関する研究

論文内容の要旨

自動車, 高速鉄道, 航空機といった輸送機器における騒音の抑制は工学的に重要な課題である. 近年では, 空調機器, PCの冷却装置といった生活環境における流体機器の低騒音化も求められている. 時々刻々の流れ場・音場の状況を再現できる数値解析 (computational fluid dynamics, CFD) は騒音機構の解明や騒音低減策を講ずる際の有力な手法である. CFDにおける解析の枠組みは, 流れ場から音場を推定する分離解法と両者を同時に解析する直接解法とに大別される. 共鳴に代表される音場から流れ場への影響 (音響フィードバック) を含む現象を扱うには直接解法が欠かせない. 空力音の直接解法では, 流れのマッハ数が0.3を下回り一般には非圧縮性流れとして扱われる低マッハ数条件における解析が難しい. 流体の圧縮性を扱うために, 代表速度に加えてマッハ数に反比例する速さを持つ音速を考慮する必要があるからである. すなわち, 連続体近似に基づく従来のCFD手法による低Mach数流れ解析は, 圧縮性Euler方程式系の特性理論からも分かるように, 流速と音速とのマルチスケール問題となる. 一方, 流体を移流・衝突を行う仮想的な粒子の集合体とみなし, それらの運動を解くことにより流体の運動を再現する解析手法として, 格子ボルツマン法や差分格子ボルツマン法が存在する. これらの手法は音速程度で移流する仮想粒子の運動を扱うため, 先述の連続体が持つマルチスケール性に捉われずに低マッハ数流れを扱うことができる. とここで, 冒頭の工業機器における流れのほとんどは高レイノルズ数流れで乱流を伴う. 物体表面に形成される境界層は, 剥離, 再付着, あるいは乱流への遷移といった非定常かつ複雑な挙動により, 騒音に対して直接・間接的な影響を有する. この影響を再現するためには壁乱流の非定常運動を再現できる直接シミュレーション (direct numerical simulation, DNS) が必要である. 境界層のDNSでは, 境界に鉛直方向の格子幅を残り2方向よりも細かくした境界適合格子が高い計算効率を有するため, 境界適合格子上で解析を行うことができる差分格子ボルツマン法は, 等方的な格子を必要とする格子ボルツマン法に対し優位である. 本研究では, 差分格子ボルツマン法による壁乱流のDNSを効率的に行うことができる離散化スキームを提示し, チャンネル乱流のベンチマークテストによりその性能を検証した. また, 差分格子ボルツマン法による空力音の直接解法を行うにあたり, 一般的に広く用いられている仮想粒子のモデリング (粒子モデル) は, 音速の変化を再現できず, 密度変動に対する線形化が成り立つ範囲でのみ使用できる. 音速の変化を考慮するためには異なる移流速度の粒子群が必要となりモデルが複雑となる. 本研究では, 3次元空間において音速の変化を再現できる比較的簡単な粒子モデルを提案し, その性質を検証した. 最後に, これらの2つの提案を組み合わせ, 壁乱流のDNSを効率的に行いつつ, 音速の変化を考慮できるという特長を持つ, 低マッハ数乱流における空力音の直接解法を構築し, NACA0012翼周りの解析により手法の妥当性を示した.

第1章では, 本研究の背景及び目的を述べた.

第2章では, 本研究において用いた数値解析手法である差分格子ボルツマン法の理論的背景及び特徴を示した. 加えて, 一般的に用いられている2次元9速度, 3次元15速度といった音速が固定される粒子モデルについて, 低マッハ数流れ解析における適用範囲を示した.

第3章では, 差分格子ボルツマン法による壁乱流のDNSにおいて乱流の再現性を高める離散化手法を提示した. 壁乱流のベンチマークテストであるチャンネル乱流のDNSを行い, 改良の有効性と壁乱流の再現に必要な格子解像度とを示した.

第4章では, 音速の変化を考慮できる新しい粒子モデル (3次元32速度モデル) を示した. 検証問題によりこの粒子モデルにより圧縮性粘性流体の運動を再現できることを示した.

第5章では, 第3章において提案した高次スキーム及び第4章において提案した新しい粒子モデルとを組み合わせ, 低マッハ数乱流解析における典型的な問題であるNACA0012翼周りの解析を行った. 先行研究における実験・解析結果との比較により, 低マッハ数乱流解析における本提案手法の妥当性を示した.

第6章では, 本研究により得られた知見を総括し, 今後の展望を示した.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (國 嶋 雄 一)			
論文審査担当者	(職)	氏	名
	主査	教授	梶 島 岳 夫
	副査	教授	田 中 敏 嗣
	副査	教授	矢 野 猛
	副査	教授	芝 原 正 彦

論文審査の結果の要旨

機械装置における低騒音化は工学的に重要な課題である。騒音源は、振動や摩擦などの機械力学的な要因と流れによる流体力学的な要因に大別される。後者は空力騒音として、車両や航空機のような輸送機関、風車に代表される発電設備、空調機器や電子計算機の冷却などにおいて、装置の高速化・大型化・高性能化にともなって顕在化する。空力騒音は音源も媒体も流体であることが特徴であり、実験的には音響の計測に比べて音源の特定は困難である。したがって、音環境の改善の基盤技術として音源と音場を解析できる数値シミュレーション手法の確立が期待されている。しかし、音源となる物体周りの流れと周辺での音響では時空間スケールが著しく異なり、共通の方程式で記述可能であるとしても、数値計算で同時に扱うことは容易ではない。そのため一般には、音源流れと音響伝播を分離して求める手法が採用されてきた。分離解法では、流れ場と音響場を接続する際に音源を与える近似理論が介在すること、両者の相互作用が考慮されないことが問題となり、適用範囲には制約が少なくない。なお、上述の機器の多くは、流れ場に対する圧縮性の影響が小さい低マッハ数、乱流現象が現れる高レイノルズ数である。以上の背景から、低マッハ数乱流に対して、工業的に適用可能な流れと音の同時解析法が希求されている。

本論文は、広範なマッハ数の流れに適用可能な近似解法のひとつである格子ボルツマン法に対して、空力騒音解析への応用を目指し、複雑な形状の物体周りにおける低マッハ数乱流の予測精度を向上することを目的とした一連の研究について、以下のような成果をとりまとめたものである。特に、境界適合座標を導入できる差分格子ボルツマン法を採用し、この方法に不可避の数値拡散を低減して壁乱流に対する解像能力を向上させる手法、計算負荷をあまり増大させずに音速の変化を模擬できる手法の開発に主眼が置かれている。

1. 数値拡散を局在化させる効果のある非線形風上法を提案し、平行平板間乱流の直接数値計算に適用して、幅広い精度次数に対して計算負担の増加と解像度向上の効果を調査し、乱流境界層の解析に必要な要件を示している。
2. 流体の物性や流れの状況による音速の変化に対応して比熱比を調整可能な新しい粒子モデルを提案し、微小密度差の衝撃波管問題、温度差のある二重円管内のテイラー・クエット流れに適用して妥当性を検証している。
3. 以上の新規提案を反映した差分格子ボルツマン法により NACA0012 翼のまわりの流れをシミュレートし、前縁近傍の流れの剥離・再附着にともなう翼面圧力変動に対して実験結果を良好に再現できることを確認している。

以上のように本論文は、高速車両や大型風車の空力音源に相当する低マッハ数乱流に対して数値シミュレーションの方法を進展させ、低騒音化技術への応用可能性を示すことにより、流体音響工学の進展に寄与するものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。