

氏名	さかい りょうたろう 坂井 玲太郎
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成25年9月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	Study of Practical Large-Scale Turbulent Flow Simulation Method Using Cartesian Mesh (直交格子を用いた実用的な大規模乱流解析手法に関する研究)
指導教員	東北大学教授 大林 茂
論文審査委員	主査 東北大学教授 大林 茂 東北大学教授 山本 悟 東北大学教授 澤田 恵介 理事 中橋 和博 (宇宙航空研究開発機構)

論文内容要旨

第1章 序論

過去40年間に渡って数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)の研究は大きく進展し、同時にCFDで用いられる格子もまた直交格子から構造格子を経て非構造格子へと変化していった。その一方で、CFDの発展を継続的に支えてきたスーパーコンピュータも、初期の少数のプロセッサを用いた方式から多数のプロセッサを用いた大規模並列構造へと移り変わっていった。次世代CFDの要求として、頑健な格子生成・高精度な数値解析・大規模並列計算機上での高効率計算が挙げられ、これらの観点からCFDの初期に用いられた直交格子法が再び注目を集めている。そうした中で階層型ブロック構造による格子解像度制御を導入した手法として直交格子積み上げ法が提案され、本手法によって高速で頑健な自動格子生成と、効率的な大規模CFD解析が達成されてきた。しかしながら、直交格子に特有の物体表面の階段状近似、ならびに高レイノルズ数流れにおける格子解像度の不足から、物体表面近傍の解の信頼性については未だ改善の余地を残していた。さらに、大規模非定常CFD解析においては時系列の出力データのサイズが数テラバイトにも達するケースがままあり、大規模データの効率的な後処理が新たな課題として顕在化しつつあった。そこで本研究は直交格子積み上げ法において、解の信頼性向上を目指して埋め込み境界法に基づいた壁面乱流モデルを導入し、同時に大規模データの課題を解決するべく流体解析データ圧縮法を開発することで、直交格子積み上げ法を実用的な大規模乱流解析手法として確立することを目的とした。

第2章 埋め込み境界法に基づいた壁面乱流モデルの開発

物体表面の取り扱い直交格子法における重要な課題の1つであり、直交格子積み上げ法においてもそれは例

外ではない。この課題は物体表面の階段状近似と、高レイノルズ数流れにおける物体表面近傍での格子解像度不足の2点に起因しており、これまでに様々な解決策が提案されてきた。前者の物体形状の再現性については、とくに埋め込み境界法は実装が容易であることから、直交格子積み上げ法においてもその利点である計算効率を損ねることなく導入できると期待される。さらに高レイノルズ数流れを対象とした場合、後者の物体表面近傍での格子解像度不足も顕在化してくることから、壁面乱流モデルを採用することも必須である。本章では直交格子上での実用的な乱流の再現に向けて、埋め込み境界法に基づいた壁面乱流モデルを開発し、直交格子積み上げ法に導入した。

本章では非圧縮性を仮定した流体を対象とし、コロケート格子上で支配方程式の離散化を行うとともに、フラクショナルステップ法と運動量補間法を用いて計算アルゴリズムを構成した。乱流モデルについては、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式に基づく定常流解析では標準 $k\epsilon$ モデルを、ラージエディシミュレーションに基づく非定常流解析ではスマゴリンスキーモデルをそれぞれ採用した。埋め込み境界法には ghost-cell アプローチを採用し、物体内部のセルに対して速度境界条件を課すほか、流体領域のセルに対しても渦粘性の境界条件を課した。これらの境界条件の算出には壁面近傍の速度を記述する壁法則のほか、壁面近傍の渦粘性を記述する混合距離モデルを用いた。

平板乱流境界層を対象とした予備計算では、乱流境界層内部の速度プロファイルが対数則に一致することを確認するとともに、平板終端での摩擦係数が理論値に一致することを確認した。続く NACA0012 翼型周りの流れ計算では、翼表面の圧力係数分布が実験値とよく一致することを示し、さらに3種類の格子を用いて格子収束性を確認した。続いて3次元流れへの適用例として Ahmed body を対象に計算を実行し、対称面における主流方向速度プロファイルについて実験値との一致を確認したほか、従来の階段状近似で得られた解に比べて大幅な改善を確認した。これらの結果より、定常解析では格子幅が壁座標で100程度と大きい場合であっても、本モデルにより乱流を再現し妥当な解が得られることを示した。続いて本モデルを非定常解析に適用し、平均速度分布だけでなく速度変動分布についても妥当な結果が得られることを確認した。さきの定常流解析事例と異なり、変動量再現のためには境界層内部にある程度の格子点数が必要となるものの、本モデルにより直交格子上で変動量も含む乱流を再現できる可能性を示唆した。

第3章 ウェーブレットを用いた時系列流体解析データ圧縮法の構築

直交格子積み上げ法は大規模非定常 CFD 解析を実現したものの、一方では膨大な時系列データの効率的な後処理という新たな課題を顕在化させた。データサイズの肥大化という課題について、これまでに特異値分解などの各種信号処理手法を用いたデータ圧縮という形で解決策が提案されてきた。しかしながら直交格子積み上げ法においては、等方等間隔直交格子がデジタル画像表現におけるピクセルの3次元への拡張とみなせること、さら

に連続性の観点より画像と流体のアナロジーが成立することから、画像符号化手法が特に有効であることを見出した。本章では大規模 CFD 解析における効率的な後処理に向けて、離散ウェーブレット変換を中心とした画像符号化技法よりデータ圧縮法を構成し、直交格子積み上げ法より得られた時系列データに対して圧縮を実行した。

本章では離散ウェーブレット変換・量子化・エントロピー符号化の3つの技法を用いてデータ圧縮手法を構成した。離散ウェーブレット変換を時間領域と空間領域の双方で実行することで、流れ場を低周波数成分と高周波数成分を含む4象限に分離した。変換により得られた重要な領域について高い量子化ビットレートを割り当てる一方、重要でない領域については低い量子化ビットレートを割り当てることで、圧縮後データ品質と圧縮率の両立を図った。さらに直交格子積み上げ法におけるブロックの大きさも考慮して最終的な量子化ビットレートを決定し、物体近傍の重要な領域についてはビットレートを高くする一方、物体から離れた領域についてはビットレートを低く設定した。実際に圧縮を実行するにあたっては、Message Passing Interface (MPI) を用いて並列処理を実装した。

2次元円柱周りの流れ場を用いた予備検証では、離散ウェーブレット変換と可変の量子化ビットレートをを用いることで、データ品質を保ちつつデータサイズを効率的に小さくできることを確認した。続く F1 モデルを用いた予備検証では、直交格子積み上げ法より得られた格子点数約2億点の大規模データに対しても、本圧縮手法が有効に機能することを確認した。その後、3次元円柱および航空機主脚周りの解析より得られた時系列データに対してデータ圧縮を実行し、速度分布、乱流統計量分布、それに音響解析において元データをよく再現しつつ、データサイズを元データの10%未満に小さくできることを示した。これらの事例については圧縮実行時のコア数を変化させて処理時間を測定し、良好な並列化効率が得られていることも確認した。

第4章 データ圧縮手法の改良と流体シミュレーションとの統合

前章において提案したデータ圧縮手法は膨大な時系列データの後処理において1つの解決策を提示したものの、流体シミュレーションとの統合という観点からはまだ改善の余地が残っていた。まず、データ圧縮を流体シミュレーションと同時実行するために、時間領域の相関を利用することなくデータ圧縮率を向上することが課題であった。さらに、より流れに適合した圧縮を実現するために、これまでのアприオリな流れ場の重要度評価から、流れの物理に基づいた評価手法に変更することが課題であった。本章では直交格子積み上げ法の特徴に適合した新たな画像符号化技法を導入することでデータ圧縮手法を改善するとともに、データ圧縮と流体シミュレーションの統合を図り、大規模シミュレーションを通じてその解析環境の効果を検証した。

本章では前章の3つの画像符号化技法に加えて、新たに Embedded Zerotree Wavelet 符号化を導入してデータ圧縮手法を構成した。直交格子積み上げ法の各ブロックについて、再帰的な離散ウェーブレット変換により得られた階層的な周波数分布を持つ木構造に対し、3次元に拡張した本符号化手法を適用した。符号化の前処理と

して量子化を実行し、量子化の強弱は解適合細分化指標に基づいて決定することで、重要度評価に流れ場の情報を反映した。解適合細分化指標としては、流れ場の変動を表す渦度の大きさや圧力勾配の大きさを採用した。流体シミュレーションとの統合にあたっては、各時間ステップのデータ出力の前処理としてデータ圧縮を実行し、得られた圧縮データを元データの代わりに出力した。

球周りの流れ場を用いた検証では、速度と圧力係数の分布において前章と同様に元データと遜色の無い結果を再現しながらも、データ圧縮率を大幅に向上できることを確認した。また、解適合細分化指標により重要な領域の物理量データが選択的に保持されていることを確認したほか、圧縮データを用いた流れ場の再計算を通じて、圧縮時に生じる誤差が流れ場に悪影響を与えないことを示した。続いて、圧縮性流体解析結果として ONERA M6 翼周りの流れ場に対して本圧縮手法を適用し、衝撃波等の不連続面を含んだデータに対しても本圧縮手法が有効であることを確認した。さらに、格子点数約 2 億点の F1 モデル周りの流れ場に対して圧縮を実行し、データ品質を保ちつつデータサイズを元データの 5%未満に小さくできることを示した。最後にデータ圧縮と流体シミュレーションの統合を図り、ボルテックスジェネレーター周りの流れ場のシミュレーションを実行した。壁面乱流モデルにより流れ場が実験結果を定性的に再現すること、またデータ圧縮プロセスがメインの流体シミュレーションに悪影響を与えることなくデータサイズを効率的に小さくできることが示された。

第 5 章 結論

本研究では直交格子法をベースとした流体解析手法の実用的な利用に向けて、乱流再現のための壁面モデルと、大規模データに対応するためのデータ圧縮手法について開発と検証を行った。

第 2 章では、直交格子上での乱流再現のための壁面モデルを提案し、その有効性を検証した。各種検証問題を通じて、定常解析と非定常解析の双方において平均量および乱流統計量が再現できることを示した。

第 3 章では、直交格子積み上げ法の特徴を活かして画像符号化技法を中心としたデータ圧縮手法を構築し、その有効性を検証した。時系列データに対して、各種統計量において元データと遜色の無いデータ品質を保持しつつ、データサイズを元データの 10%未満に小さくできることを示した。

第 4 章では、新たな画像符号化技法を導入してデータ圧縮手法を改善するとともに、流体シミュレーションとの統合を図った。検証を通じて、時間領域の相関を用いることなくデータ圧縮率を向上したほか、流体シミュレーションとの統合からは大規模シミュレーションを効率的に実行できる可能性を示した。

論文審査結果の要旨

数値流体力学は今日にいたるまでに流体機械設計ならびに流体现象解明のためのツールとしての地位を確立している。近年ではとくに大規模並列計算機の登場と、次世代の数値流体力学への要求を背景に直交格子法が再び注目を集めており、その中でブロック構造型直交格子法としての Building-Cube Method (BCM) が提案されている。BCM では直交格子法の利点を生かした格子生成と数値計算を実現しているものの、その解の信頼性については未だ改善の余地を残している。また、BCM を用いた大規模解析においては出力データサイズが数テラバイトとなる場合もままあり、膨大なデータの後処理に困難をきたしつつある。そこで本研究では、これらの課題について、壁面乱流のモデル化とデータ圧縮という2つのアプローチから解決を図り、直交格子ベースの流体解析手法の実用的な利用に向けた技術開発と検証を行っている。

本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編5章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景、課題、目的を述べている。

第2章では、直交格子上で乱流計算を実現するための壁面モデルを提案している。埋め込み境界法をベースに直交格子上で正確な物体形状を表現し、かつ対数則を用いて壁面近傍の乱流を記述している。各種レイノルズ平均流れに適用してその効果を検証しているほか、ラージエディシミュレーションに基づく非定常流れにも適用し、その有効性も示している。これは直交格子法が持つ課題を克服する重要な成果である。

第3章では、時系列非定常流体解析データに対するデータ圧縮手法を開発している。画像符号化手法を用いて圧縮手法を構成し、非可逆圧縮ながらも重要領域を選択的に保存することで高い圧縮後データ品質と高い圧縮率を両立している。大規模流体解析データに適用してその圧縮効果を検証しているほか、時系列データへの適用からは高い圧縮率を得ながらも、元データと遜色の無い圧縮データを得ることに成功している。圧縮されたデータのサイズは、元の大きさの1割を切っている。これは、有益な成果である。

第4章では、第3章で提案したデータ圧縮手法の改良を行い、さらに流体シミュレーションとの統合を図っている。BCM の格子構造に適合した新たな符号化手法を導入して圧縮率を向上しているほか、格子細分化指標を応用し、より正確に流れ場の重要度を判別している。非圧縮性・圧縮性流体解析結果のデータ圧縮から手法の有効性を示し、さらに格子点数1億点規模のシミュレーションにデータ圧縮を導入し、数値計算に悪影響を与えることなく、また計算時間に多大な負荷をかけることなく、膨大なデータを効率的に削減できることを示している。これは BCM の実用的な利用に向けた有効かつ重要な成果である。

第5章は結論であり、本論文を総括している。

以上要するに本論文は、これまでの BCM の課題を踏まえたうえで解決策を提示し、各種解析事例を通じて直交格子法による流体シミュレーションの実用性を実証するものであり、航空宇宙工学及び数値流体力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。