

jh240066

非構造メッシュを用いた離散微分形式による流体音の大規模解析

深川宏樹(DeepFlow 株式会社)

概要

本研究は、ファンやドローン等が発する流体騒音の抑制を目標とし、非構造メッシュを用いた離散微分形式による大規模な流体音響直接解析技術の開発に取り組む。離散微分形式は構造格子における計算精度の向上および安定化の手法であるスタガード格子を非構造メッシュへ自然に拡張する枠組みであり、本研究では、これに並列計算に適した陽的解法を組み合わせることで、計算の安定性と高い並列化性能の両立を図る。

今年度の研究で離散微分形式が圧力計算を安定化させることが実証された一方、移流項に起因する計算の不安定性という新たな課題が判明した。その原因が四面体要素における速度場の情報欠損にあると突き止め、新たに速度ベクトルと流束を、従来の有限体積法で用いるメッシュとは双対の関係にある要素（頂点や辺）に配置する手法を考案し、移流計算の精度と安定性を抜本的に改善した。この知見を基にソフトウェアの全面的な再設計も行い、将来の数億メッシュ規模の複雑な音響解析に向けた、堅牢かつ拡張性の高い計算基盤を確立した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

九州大学 情報基盤研究開発センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

深川宏樹 (DeepFlow) ソルバーアルゴリズム開発

南里豪志 (九州大学) 並列化・実行の助言

小林泰三 (九州大学) 音響流体の助言

小井土真一(DeepFlow) シミュレーションの実行

神志那純 (DeepFlow) ソルバーの開発

石原拓哉 (DeepFlow) ソルバーの開発

2. 研究の目的と意義

ファン、風車、ドローンといった流体機械から発生する騒音の抑制は、製品の付加価値を向上させ、生活環境の改善に直結する重要な課題である。流体音は、渦運動などの非定常な流れから生じる圧力変動が音波として伝播する現象であり、その挙動を正確に予測するには、音源となる微細な流れの変動と、そこから広範囲に伝播する音波を同時に解析する、圧縮性流体の直接計算が極めて有効である。

この直接計算は、音源域での細かいメッシュ分割と、音速で伝播する波を捉えるための微小な時間刻みを要求するため、膨大な計算リソースを必要とする。この課題に対し、スタガード格子を用いた陽的解法は、計算安定性と並列性能が高くスーパーコンピュータによる大規模計算に適しているが、構造格子

にしか適用できず複雑形状の扱いに難点があった。そこで我々は、離散微分形式を用いてスタガード格子と同様の計算手法を、複雑形状を扱える非構造メッシュに自然に拡張するソフトウェアを開発した。

本研究では、この手法による実用的な直接流体音響解析技術を確立し、将来的には製品開発へ応用することを目指しており、その社会的意義は大きい。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究が目標とする流体音の直接計算は、数億規模のメッシュ要素と極めて微小な時間ステップを必要とするため、大規模な並列計算が可能なスーパーコンピュータの利用が研究遂行の絶対条件となる。

本研究で開発しているソルバーは、計算領域を多数のサブドメインに分割し MPI 通信で並列処理を行う特性上、その計算性能は、①各ノードの CPU 演算能力とコア数、②ノード間通信速度、③各ノードが搭載するメモリ容量に強く依存する。九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータ「玄界」は、これら全ての要求を最高水準で満たしており、本研究のような CPU 集約型の大規模物理シミュレーションに最適化されている。

本共同研究を通じて「玄界」の強力な計算能力を活用し、従来は実行不可能であった規模の音響解析と、その実用化に向けた検証を推進することには、将来の産業応用を鑑みても極めて大きな意義がある。

本研究が目標とする流体音の直接計算は、音源となる微細な渦から広範囲に伝播する音波までを同時に捉えるために数億規模のメッシュ要素と、音速の伝播を分解するための極めて微小な時間ステップを必要とする。そのため、大規模な並列計算を実行するためにスーパーコンピュータの利用が研究遂行の絶対条件となる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1. 圧力計算の精度向上の検証

本研究で開発中のソルバーは、時間発展の離散化に陽的解法を採用している。この手法は領域ごとの計算の独立性が高く、スーパーコンピュータの並列計算において CPU コア数に比例した計算速度の向上が可能である。

しかし、この陽的解法を有限体積法と組み合わせる圧縮性流体を扱う際には、「チェッカーボード不安定」と呼ばれる非物理的な圧力振動が発生することが知られている。この不安定性は、図 1 左図のように密度 ρ と速度場 u を共にメッシュ中心に配置する「同一配置」に起因する。この配置では、図 1 右図のように高圧（赤）と低圧（青）のセルが交互に並ぶと、隣接する高圧セルと低圧セルが互いに影響を与えずに時間発展してしまい、非物理的な圧力振動が生じる。

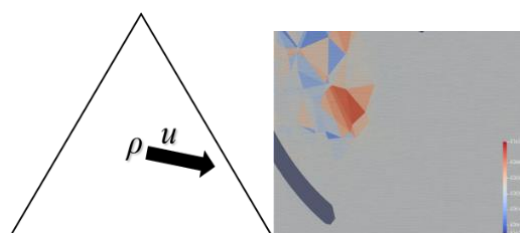
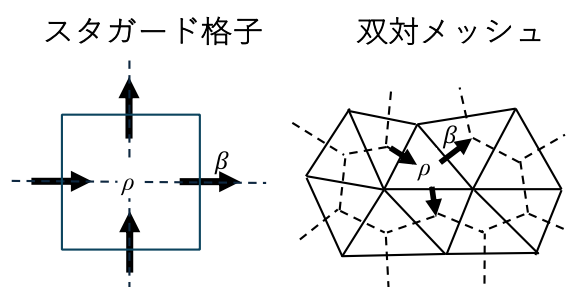


図 1 左図：有限体積法でのメッシュ内での密度と速度の配位。右図：チェッカーボード不安定を生じた計算例。

本研究では、この問題解決に離散微分形式を用いた。図 2 に示すように、離散微分形式ではスタガード格子と同様に、密度 ρ をメッシュ中心に、流束 $\beta := \rho u$ をメッシュ界面に配置する。これにより密度の勾配計算が安定し、物理的に妥当な圧力場が得られる。

図2 メッシュ内の密度 ρ と流束 β の配位

次に音の伝搬シミュレーションの結果を図3に示す。初期時刻0のときに x 座標0.5の位置に1.001の密度隆起を与えると、隆起は2つの山となり正負の方向に移動する。これは音の伝搬を表す。メッシュが粗いと、有限体積法では理論解と値が異なるが、離散微分形式では理論解に近い値となる。

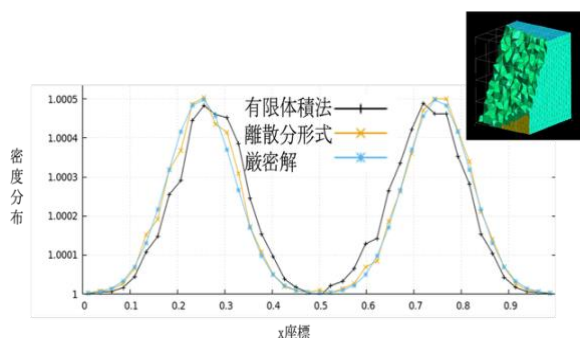
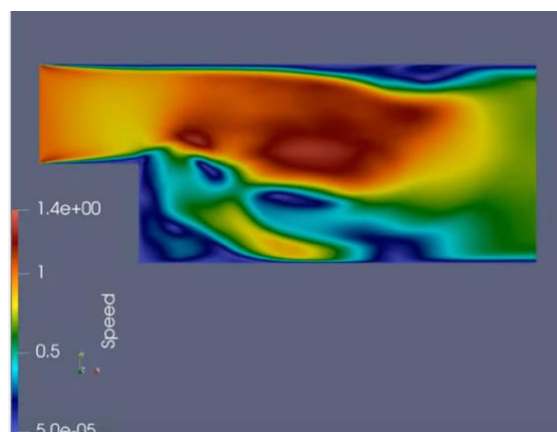


図3 音の伝搬のシミュレーション

5.2. バックステップ流れによる精度検証

ソルバーの計算精度検証のために、2次元バックステップ流れ(レイノルズ数1200)の直接数値シミュレーションを実施した。空間全体を構造格子で 256×1024 に分割し、時間刻み幅は $\Delta t = 1 \times 10^{-5}(\text{s})$ とした。計算には九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータ・玄界の1ノード(120CPUコア)を使用した。図4に示すように、ステップ下流における流れの剥離、複数の渦の生成と移流、そして流れの再付着といった複雑な流れの構造が良好に再現されている。これは、開発したソルバーが基礎的な流体现象を

高い精度で捉える能力を有することを示すものである。

図4 バックステップ流れの速さコンター図
レイノルズ数1200とした。渦生成が見える。

5.3. 移流計算の精度向上に向けた改良

前節までの検証で離散微分形式を使ったソルバーの有効性は示されたものの、非構造メッシュを用いた高レイノルズ数の大規模解析に進むと、ナビエ・ストークス方程式の移流項の離散化誤差が原因で、計算の安定性と精度を損なうという問題が顕在化した。

この原因は、離散微分形式における物理量の配置にある。スタガード格子では流束 β が界面を貫く値で与えられ、速度ベクトル v^i はセル中心を囲む面上もある β から求められる。離散微分形式でも同様にして v^i を求めるが、四面体要素などの面が少ない要素では、 v^i を求めるのに必要な β が十分に得られず、計算精度が低下した。この問題を解決するため、本研究では物理量の配置の抜本的な見直しを行った。図5に示すように、流束 β を単体の辺(1-form)上、もしくはその辺が貫く面上(dual 2-form)の値とし、速度場 v^i を単体の頂点(0-form)の値として定めた。これにより、 v^i を構築する際に参照できる β の数が増え、移流の計算精度が良くなり、全体の計算安定性が飛躍的に向上した。

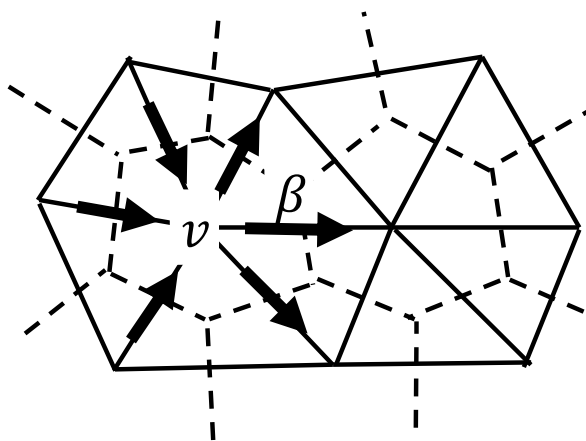


図5 流束 β と速度ベクトル v^i の配位

5.4. キャビティ流れでの移流計算の検証

新しい物理量配置が移流項の計算安定性と精度を向上させることを検証するため、天井駆動キャビティ流れのシミュレーションを行った。この流れは、上部壁の運動が粘性を介して流体に伝わり、その運動量が移流項によって内部へ輸送されることで特徴的な渦構造が形成されるため、移流計算の評価に最適なベンチマーク問題である。検証では、20,603 個の四面体要素からなる非構造メッシュを用い、レイノルズ数を 100 に設定した。

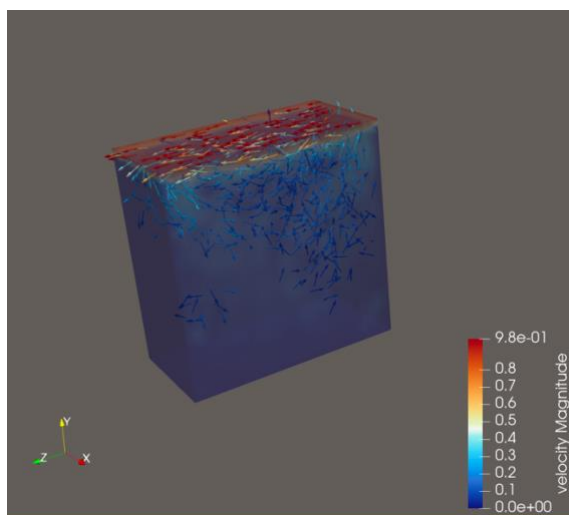


図6 天井駆動キャビティ流れ($Re=100$)。矢印は速度ベクトル、色は速さを表す。中心部に形成された主渦が確認できる。

図6のシミュレーション結果では、キャビティ中央に単一の主渦が明瞭に捉えられており、これは $Re=100$ における既知の現象とよく一致する。非構造メッシュを用いても、このように理論通りの流れ場を安定して再現できたことは、本研究の移流計算の改良が、計算精度の向上と安定化に有効であることを実証している。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

6.1. 本研究の成果と達成点

本研究は、離散微分形式を非構造メッシュに適用し、大規模な流体音響問題の直接解析手法を確立することを目的としている。

今年度の研究を通じて、まず離散微分形式を用いることで圧力場のチェッカーボード不安定性を解決し、非構造メッシュ上でも安定かつ高精度な圧力計算が可能であることを実証した。また、直接数値シミュレーションによる検証によりソルバーが高い計算精度を持つことも確認した。

一方で、大規模解析を進める中で、非構造メッシュにおける移流項の計算精度が全体の安定性を損なうという新たな課題に直面した。この原因が四面体要素における情報欠損にあると突き止め、本研究では流束を要素の辺（またはその双対面）に、速度ベクトルを頂点に配置する新しい手法を考案・実装することで解決した。この改良により移流計算の精度と安定性が飛躍的に向上し、陽的解法を用いた非構造メッシュによる複雑形状モデルのシミュレーションへの道が大きく開かれた。

この新スキームの実装に伴い、ソフトウェア基盤も全面的に再設計した。科学技術計算に適した Julia を開発言語に採用し、モジュール化を徹底した結果、コード量を大幅に削減すると同時に、可読性、保守性、拡張性を格段に向上させた。この新しいソフトウェア

は、今後の大規模流体シミュレーションを支える強固な基盤となる。

総括すると、本研究は離散微分形式における圧力計算の優位性を示すと共に、その実用化の障壁であった移流項の精度問題を解決し、非構造メッシュ上での精度と安定性を両立する新しい手法の礎を築いたと言える。

6.2. 今後の展望

今後の目標は本年度開発した高精度・高安定性ソルバーを基盤とし、実用的な流体音響問題の解析へと研究を展開することである。

当面は、ユーザー企業や大学との共同研究を通じて、開発したソルバーのさらなる検証を進める。まず LES (Large Eddy Simulation) モデルを完全に実装し、ファンや回転翼周りの流れといった高レイノルズ数の複雑流れを対象にシミュレーションを行う。本研究で得られた成果が、企業の製品開発におけるシミュレーション適用を促進し、開発の効率化に貢献できるものと確信している。

※7. 研究業績はウェブ入力です