

学 位 論 文 題 名

複雑形状周りの流れを短期間に解析するための
直交格子法に関する研究

学位論文内容の要旨

今日、数値流体解析 (CFD : Computational Fluid Dynamics) は工業製品の設計・開発に欠かすことのできないツールとなっている。特に自動車業界においては、空力性能や空調性能といった流体が強く関わる性能の開発から生産効率の改善検討に至るまで幅広く CFD が活用され、コスト削減、開発期間の短縮、環境負荷の低減に貢献してきた。しかし近年、市場のニーズに合わせてタイミングよく製品を提供するため、これまで以上に開発期間の短縮化が求められている。このため開発現場の CFD に対しても、これまで以上に解析期間の短縮化が求められるようになってきた。

しかし自動車のように解析対象の形状が複雑な場合、解析期間の短縮は容易ではない。具体的には、計算格子の生成に要する時間と労力が問題となる。一般に広く使用されている非構造多面体格子を用いて解析モデルを作成する場合、事前に水密化されたポリゴンデータ (ポリゴン要素で構成された形状データ) を用意しておく必要がある。しかし、この水密化されたポリゴンデータを作成することは容易ではなく、形状の複雑さに応じて数日から数週間もの時間と労力が費やされている。特に、形状データが数百万ものポリゴン要素で構成され、なおかつポリゴン要素同士に無数の重なりや隙間が存在する品質の悪い形状データが設計現場から提供された場合、ポリゴン要素の修正に多大な手間と時間がかかる。また、形状データにはネジやワイヤーといった流体計算に不必要なデータが含まれていることもあり、これらを取り除く形状簡略化と呼ばれる作業にも多大な手間を要する。一方、計算時間は計算機の演算速度の飛躍的な向上により、数千から 1 億レベルの大規模な格子数でも一日から数日程度で計算できるようになってきている。今後も計算機的能力は更に向上していくと考えられるため、相対的に計算格子の作成期間がターンアラウンドタイム短縮のボトルネックになると思われる。このような背景から、水密化されていない形状データからでもポリゴン要素の修正や形状簡略化を行うことなしに流体解析できるシステムの登場が期待されている。これまでの研究から、ボクセル法に代表される直交格子法を用いることで、水密化されていないポリゴンデータからでも短期間かつ完全自動で格子作成が可能であることが示されている。しかし直交格子法は、物体適合格子に比べて形状近似精度が劣るため適用範囲が限られてしまう。このため近年、直交格子の形状近似精度を向上させる研究が数多く行われている。しかし、これまでに報告されている改善手法は形状近似の精度向上と引き換えに形状データの水密化やデータ修正が必要であり、形状近似精度の向上と格子作成期間短縮を両立させた手法は見当たらない。

このような背景を踏まえ本研究は、水密化されていないポリゴンデータを修正無しにそのまま扱う特徴を残しつつ、形状近似精度を向上させる直交格子法の開発を目的としている。また本研究では自動車分野への適用を視野に入れているため、形状近似精度の向上だけでなく、熱交換器の圧力損

失や冷却ファンの圧力利得を直交格子に反映させる手法の開発を行った。

第1章では、ものづくりの代表例として自動車分野を取り上げ、CFD 活用の具体例を通して、解析期間を短縮する上で解決すべき課題点を明確にし、本研究の目的を導いている。また従来研究についても言及し、従来研究が持つ課題と成果を踏まえ、本研究で取り組んだ直交格子の形状近似精度の改善方針について述べている。

第2章では、本研究で用いた流体計算手法および直交格子の形状近似精度の改善方法について述べている。本手法は、背景にある直交格子の格子点からポリゴン要素までの距離情報を用いて、壁面上で滑り無し条件を満足する仮想的な速度を線形外挿により求め、その速度を境界条件として用いている。一方、物体境界の圧力境界条件については、物体が存在する方向の圧力勾配をゼロとする境界条件を用いている。ところで、これらの境界条件を流体計算へ反映させる際に、物体内部に設定した仮想セルを用いる方法も考えられる。しかし、この方法では計算空間を物体の内部と外部に分ける必要が出てきてしまうため、物体の内部・外部を定義できない非水密な形状や格子幅よりも薄い板を扱うことができない。そこで本手法は仮想セルを使用せず、速度と圧力の境界条件を差分式に埋め込む方法を採用している。これにより、物体境界の両側が流体セルとなるような薄い板まわりの流れについても計算を可能にしている。この工夫は、これまでの直交格子法の研究では見当たらず、本研究の新しい提案と言える。

第3章では、熱交換器の圧力損失特性と冷却ファンの圧力利得特性を、流体の支配方程式の外力項を通して直交格子上へ反映させる方法について述べている。この際、熱交換器（またはファン）の傾斜角度を考慮できるように、圧力損失（または圧力利得）の大きさと流出角度を各方向成分に分解し、外力項へ反映させた。

第4章では、基礎形状を用いて精度検証を行い提案手法の計算精度、有効性を明らかにしている。4.1,4.2 節では、形状近似精度の改善効果を検証するため、低レイノルズ数および高レイノルズ数の流れに適用し、ボクセル法よりも形状近似精度が高いこと、水密化されていない形状についても適切に計算できること、本手法を LES と組み合わせることで剥離・再付着が存在する高レイノルズ数の流れ場を定量的に精度よく計算できることを示した。さらに 4.3 節では、熱交換器モデルおよびファンモデルについても検証を行い、提案手法が流れ場に所望の圧力損失（または圧力利得）を与えられることを示した。

第5章では、自動車開発での利用を想定した問題を取り上げ、これらの問題を解くことで本手法の精度および有効性を明らかにしている。本研究では、20% スケールモデルを用いた空力性能解析とエンジンルーム内のラジエータ通過風速解析について精度検証を行った。この結果、本手法は実用問題に対しても短時間に計算格子を作成できること、また自動車まわり、エンジンルーム内の複雑な流れを適切に予測できることが示された。

第6章では、本研究で得られた成果、本研究の意義、今後の展開について述べている。本研究の成果として、直交格子法の利点である格子作成を自動化・短縮化できる特徴を残しつつ、形状近似精度を向上させる計算手法を開発することができた。この成果は、格子作成時の人的労力の低減および解析期間の短縮化に大きく貢献できると考える。

最後に本研究を通して、直交格子の形状近似精度の改善方法、および熱交換器・ファンの圧力特性を直交格子上に反映させる手法を開発し、種々の精度検証結果から本手法が、高い計算精度と格子作成期間の短縮化を実現していることを明らかにした。本研究の成果を自動車分野の CFD 利用に応用することで解析期間の短縮および人的労力の削減効果が期待できる。

学位論文審査の要旨

主 査	客員准教授	小 野 謙 二
副 査	客員教授	牧野内 昭 武
副 査	教 授	佐々木 克 彦
副 査	教 授	大 島 伸 行

学 位 論 文 題 名

複雑形状周りの流れを短期間に解析するための 直交格子法に関する研究

今日,CFD(数値流体力学)は工業製品の設計・開発に欠かすことのできないツールとなっている。特に自動車業界においては,性能開発から生産効率の改善検討に至るまで幅広く CFD が活用され,コストの削減,開発期間の短縮に貢献してきた。しかし近年,計算格子の作成に要する時間と労力が問題となっている。例えば非構造多面体格子を用いて計算格子を作成する場合,事前に水密化されたポリゴンデータ(ポリゴン要素で構成された完全に閉じた形状データ)を用意しておく必要があるが,この水密化作業は容易ではなく,ポリゴンデータが持つ不具合に応じて数日から数週間もの時間と労力が費やされている。そこで本研究では,格子作成に要する時間と労力の削減を可能にするため,非水密なポリゴンデータからでも流体解析が可能な解析システムの開発を目的としている。

本研究では直交格子法の特徴に着目し,流体解析システムの開発を行った。直交格子を用いた流体解析手法はこれまでも提案されており,その中でも物体形状を階段状に近似するボクセル法は非水密なポリゴンデータからでも自動で計算格子を作成できる長所を持っている。しかし形状近似精度の観点から,非構造多面体格子や物体適合格子の代用には成り難く適用範囲が限定される。一方で,より高次の形状近似精度を持った直交格子法(カットセル法など)も提案されているが,これらの手法は水密化されたポリゴンデータを要求するため,提起された問題の解決手段とは成り得ない。このため,非水密なポリゴンデータからでも自動で格子を作成でき,かつ高次の形状近似精度を有する直交格子法の開発に主眼を置き研究を行った。

提案手法では直交等間隔格子を前提に流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式の離散化を行っている。但し,形状境界を含むセルでは,壁面上での滑り無し条件を満足する仮想的な速度を用いて離散化式を構成している。ここでの仮想速度は,形状境界から速度定義点(セルセンタ)までの距離を用いて線形外挿により求めている。これにより,形状境界から速度定義点までの距離情報を流れ場に反映できるため,ボクセル法よりも形状近似精度が改善される。また,この距離情報はポリゴンデータ(三角形要素)とセルセンタ間を結ぶ線との交差判定から求めている。この交差判定は,プログラムによる自動化が可能であり,かつ非水密なポリゴンデータに対しても実施できる。このことは,ポリゴンデータの水密化作業が不要になることを意味しており,本研究で提起された問題の解決を可能にしている。

この他、提案手法を実用問題へ適用するため、LES 乱流モデル (標準 Smagorinsky モデル) およびネスティング型の格子細分化法を実装し、高レイノルズ数流れへ対応、局所的な格子解像度の向上を可能にした。

本研究では自動車分野への適用を視野に入れている。このため、エンジンルーム内の流れを解析する場合は、熱交換器や冷却ファンが持つ流れの特性 (圧力損失や圧力利得など) を再現させる必要がある。この際、十分細かい格子を用いて熱交換器内部の微細なフィン形状や回転するファンの効果を直接計算する方法も考えられる。しかし計算機性能や計算時間の制約から、部品内部の流れとエンジンルーム内の流れを同時に計算することは難しい。そこで本研究では、これらの部品が持つ流れの特性を直接解かず、実験式を用いてモデル化し流れ場に反映させる手法の開発を行った。また実装する際、圧力損失 (または圧力利得) の大きさを直交格子の座標軸方向の成分に分解し、Navier-Stokes 方程式の外力項を通して速度場および圧力場へ反映させている。これより、格子に沿わない方向に対しても熱交換器や冷却ファンが持つ流れの特性を再現できる実用的なモデル化と実装方法を提案している。

次に、提案手法の有効性、計算精度を確認するため基礎形状を用いた検証を実施した。低レイノルズ数の流れにおける精度検証として、円管内の流れ ($Re=10$)、円柱まわりの流れ ($Re=40, 100$)、曲がりダクト内の流れ ($Re=790$) を計算し、提案手法が物体適合格子と同等の計算精度を有することを明らかにしている。さらに、高レイノルズ数の流れにおける精度検証として、薄い板まわりの流れ ($Re=5.1 \times 10^4$) を計算し、本手法を LES 乱流モデルと組み合わせることで剥離・再付着が存在する複雑な流れ場を定量的に精度良く計算できることを示した。

最後に自動車開発での利用を想定した検証問題として、1/5 スケールモデルを用いた空力解析およびエンジンルーム内のラジエータ通過風速解析を取り上げ、計算精度および格子作成時間の評価を行った。空力解析の精度検証では、提案手法を用いて計算した車体周りの圧力分布が実験値と良好な一致を示すこと、また市販の流体解析ソフトウェア (非構造多面体格子を使用) の計算結果と比較して同等の精度を有することを明らかにした。次にラジエータ通過風速解析の検証では、非水密なポリゴンデータから格子作成および流体解析を行った。この検証の結果、提案手法を用いることで市販の格子作成ソフトウェアよりも短時間に格子を作成できること、また自動で格子が作成できることにより格子品質、格子作成時間が解析担当者の技量によって影響を受け難く安定していることを示した。

以上をまとめると本研究の直接的な成果は、形状近似精度を高めつつ、非水密なポリゴンデータからでも完全自動で格子生成が可能な直交格子法を開発した。このような特徴を持つ直交格子法はこれまでに提案されておらず、直交格子法の適用範囲を広げることができたという点で本研究の意義は大きい。また、非水密な形状データを扱えるという特徴は、ポリゴンデータの修正作業が不要になることを意味しており、本研究の成果は自動車分野のみならず産業界で活用されている CFD の解析期間短縮と人的労力の削減に大きく貢献できる。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。