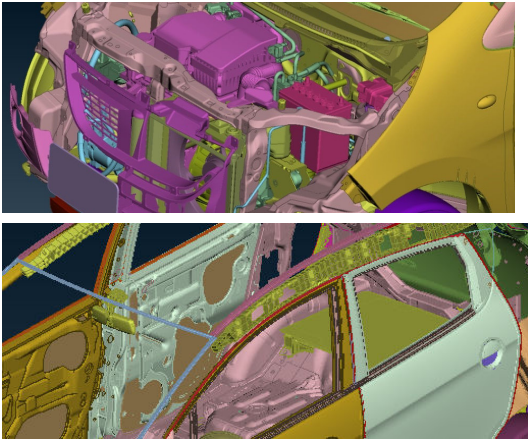


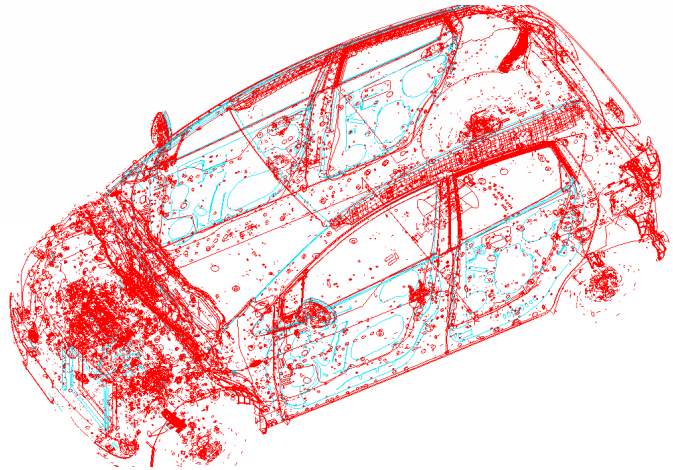
氏名	おおにし けいじ 大西 慶治
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成25年9月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)航空宇宙工学専攻
学位論文題目	任意複雑形状を扱う修正埋め込み境界型仮想セル法を用いた直交格子法の研究
指導教員	東北大学教授 大林 茂
論文審査委員	主査 東北大学教授 大林 茂 東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 山本 悟 理事 中橋 和博 (宇宙航空研究開発機構)

論文内容要旨

工業分野における数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) の応用技術は, この 20~30 年で目覚ましい進歩を遂げてきた. 特に商用の汎用熱流体解析コードを用いた数値シミュレーションの製品設計開発現場への適用は, ここ数年で急速に進んできているが, その計算格子を品質良く作成する手段には依然として問題を抱えており, 解析の現場では一般的に商用の格子生成ソフトを用いた手作業による事前の形状準備作業に依然として多くの時間が必要とされている. この問題は主に製品 CAD データのデータ変換の際, 面の接合部に隙間 (ギャップ) や重なり (オーバーラップ) といった不整合が生じやすいこと, 厚みの無い面が存在すること, 計算では用いない数 mm 以下の微細形状や部品内部に多数の面が存在すること, などに起因しており, この種のデータは '汚い' CAD データなどと呼ばれている. 例として図 1 に自動車の空力解析で使用される CAD データを示す. 図 1(b) は水密な状態にならない要因として CAD データに不整合が存在する箇所を示しており, 赤線はギャップがある辺を, 青線は多重に接続された辺を表している. 計算格子を作成する際には, これら不整合を修正していくことになるが, この例では全体で 1,000 か所を超えるギャップ・オーバーラップがデータ中に存在し, すべてを手作業で直すには数週間~数か月を要する. そのため最近では, 医療用 3 次元イメージングの技術に応用した Surface Wrapping 技術[が一部で使用され, 形状修正作業を数日程度で完了することができるようになってきたが, この時低解像度の形状簡略化がなされるため, CFD が必要とする形状再現の要求を十分満たした表面格子が常に得られるとは言い難い. さらに今後計算機の発展に伴って計算できる空間解像度が向上すると, 表面形状の解像度も向上させる必要があり, この修正作業はより困難なものとなる. このため, 近い将来さらに CFD 作業者の負担が増えることが懸念される. この事前準備作業にかかる負担は工業分野での CFD の活用を妨げる要因の一つとなっており, 解決する必要がある.



(a) CAD データの可視化



(b) CAD データに不整合が存在する箇所

図 1 自動車空力解析に使用する CAD データの例

一方，1970 年代に Peskin C.S.らにより提案された埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method, IBM) が，複雑形状の取り扱いが容易なことからここ 10 年ほど CFD のコミュニティで再び脚光を浴びている．この手法を用いることで準備作業にかかる負担を大幅に減らすことができるが，工業分野ではまだ適用が始まった段階であり，筆者の知る限りでは図 1 に示すような‘汚い’ CAD データに対して成功裏に適用された事例は残念ながらいまだ報告されていない．

そこで本研究では，直交格子による IBM の壁面境界条件を拡張することにより，ギャップ・オーバーラップならびに厚みのない要素を含む‘汚い’形状データでも計算することができる計算手法を提案している．これにより，自動車 CAD データのような複雑な形状データに対して，事前の形状準備作業なしに IBM の壁面境界条件が適用可能となった．

第 2 章では，本研究で提案した計算手法の詳細について述べている．空間はキューブと呼ばれる立方体領域の分割とキューブ内を等間隔に分割したセル分割の 2 段階で離散化される．これにより計算アルゴリズムはシンプルになり，各キューブ内の格子数 (セル数) を同一に保てるため，計算効率が高く大規模計算に有利となる．支配方程式には連続の式および IBM の外力項を付与した非圧縮の Navier-Stokes 方程式を採用する．移流拡散項は 2 次精度中心差分に 1 次精度風上差分をブレンドしたスキームを，もしくは QUICK スキームを用いて離散化し，時間進行には 2 次精度 Adams-Bashforth 陽解法を用いて Fractional Step 法による圧力・速度修正法を採用して解いている．圧力 Poisson 式の解法には Red/Black オーダリングによる SOR 法を採用し，圧力・速度の変数はセル中心にコロケート配置している．壁面境界条件の算出方法には，Mohd-Yusofz らにより提案された Direct forcing 法を使用する．本研究ではさらに壁面の離散化によりギャップやオーバーラップといった不整合に対する対策を，任意仮想セル法により厚みの無い面に対する対策を施すことで，‘汚い’ CAD データに対して適用可能な手法に拡張している．面欠損のある球ならびに厚みの無い平板翼，さらに自動車 CAD データに対してテスト計算を行い，本提案手法が従来では取り扱い不可能とされてきた形状に対し，適用可能であることを示し

た。

第3章では、本研究で提案した手法を用いて低 Re 数における球ならびに平板翼まわりの流れを解析した。本研究による計算手法は基本的な流れ場を定性的に良く再現しており、球まわり流れ解析では力の積分値が実験の予測式から概ね 5%以内で予測できることを示し、過去の解析による報告例と比較して定量的に良い精度で予測解が得られていることを示した。平板翼まわり流れ解析では薄板形状まわりにおけるはく離流れを良く捉えられており、過去の実験による報告例と比べ定性的に良く現象を再現できていることを示した。さらに、OpenMP と MPI を併用したハイブリッド並列処理に対する計算効率について述べ、6万を超える大規模並列環境においても高い実行性能が得られることを示した。

第4章では本研究で用いた LES ならびに壁モデルの詳細について述べている。本研究で提案した手法を高 Re 数流れへ適用するにあたり、壁面境界条件を拡張した平板乱流境界層の対数則を基本とする 2 layer モデル、ならびに壁面摩擦速度を用いた LES 標準 Smagorinsky モデル、壁面境界条件の安定化手法を提案した。LES による結果と差分スキームで調節された人工粘性により得られた結果を、高 Re 数球まわり流れに対して予測、比較を行い、格子解像度ならびに数値粘性の効果を判断する指針を例示した。臨界 Re 以下の条件においては、 Cd 値および Cp 分布は共に Achenbach の実験ならびに Muto の解析結果と良く一致する。臨界 Re 以上で完全な乱流状態となる条件においては、LES の結果は Cd 値を過大評価しており、 Cp 値の分布から判断すると、はく離点が正しく捉えられておらず層流の状態に近づいていることがわかった。これは、230億要素を用いた大規模格子による LES の解が Cd 値の予測精度を改善したことからもわかるように、LES に必要な格子解像度が不足しているため過大な渦粘性が導入されたためと考えられる。一方、陰的 LES を適用した結果は、はく離点が後流方向へ移動し、Achenbach ならびに Muto らの解に近づいており、本研究で用いた解像度による解析格子では、LES の正しい渦粘性を見積もることが難しく、陰的に粘性を取り扱った手法の方がより正しい解を得られることが分かった。工業分野での応用を考えた場合、高 Re 数流れを計算する際に本研究で用いたような大規模格子を日常的に使用するのはいまだ非現実的であり、代替案が必要となる。陰的 LES はその一例であるが、適用する問題に応じて格子解像度ならびにハイブリッドスキームのブレンド率を変化させるなど、風上項の導入で人工粘性の大きさを適切に調整する必要がある。なお、本研究で用いた解析条件は、第5章で示した自動車の空力解析の条件に基づき決定されているが、産業界の他の実アプリケーションに適用する際には、本研究で行ったのと同様、取り扱う問題と同じ条件による検証解析を行うのが妥当であることをここでは指摘している。

第5章では、自動車空力解析の解析手法ならびに解析結果について述べている。実車相当の製品 CAD データを使用し、QUICK ならびに LES を用いた解析で、定性的に妥当な流れ場を再現することができた。特に、エンジンルーム内および図3に示すように Fr スポイラまわりの流れ場は良く再現できており、車両空力解析を行うのに適した流れ場が得られていることを示した。風洞試験で得られた Cd 値とラジエータモデルを組み込んだ解析による Cd の予測値とを比較し、抵抗係数は約 6mm の解像度で約 26%程度の誤差で予測できることを示した。

ただし、非構造格子による解析においても17%程度の誤差が出ていることが報告されており、使用した車体モデルの特殊性、また解析実行時の風洞との条件違い、積分力評価時に余分な部品の数値も含まれていることなどを考慮に入れる必要があり、今後格子解像度を高めた大規模解析や空力パーツ有無による差異を評価する取り組み、風洞測定条件と解析条件との擦り合わせ手法を見直すなど評価技術の向上と合わせて、さらなる予測精度の改善が期待されることを示唆している。

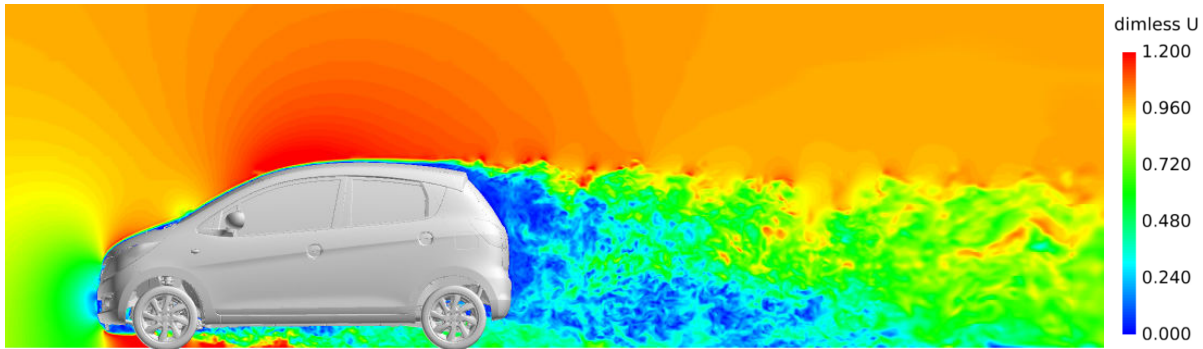


図2 車体まわり瞬時速度コンタ図

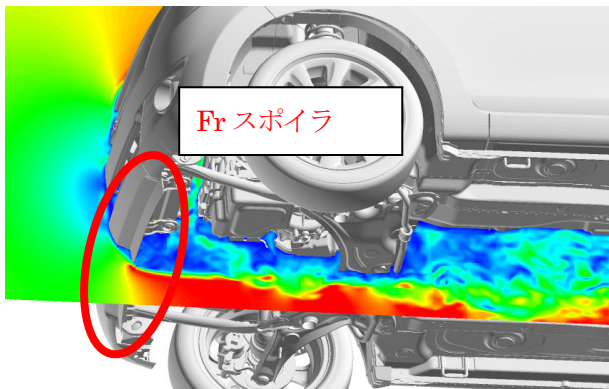


図3 Fr スポイラまわり瞬時流速拡大図

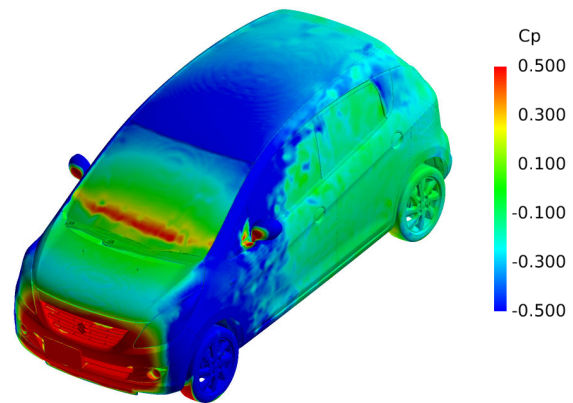


図4 車体表面の瞬時静圧分布

以上から、本研究で提案した新しい計算手法により、最新の IBM の報告例で示されているものよりさらに複雑な自動車車体形状データに対し、事前の形状準備作業を行うことなく、短時間で有効に解析できることが確認できた。形状CADデータを受領してから最初の解析結果を受け取るまで最短で1日以内で結果が得られており、これは本手法が今後の計算機の発達に伴って、自動車の実製品開発の現場において設計プロセスそのものに変革をもたらす革新的な計算スキームとなる可能性を示している。ただし、自動車空力の性能評価に対してはまだ定性的な予測をするに留まっており、今後大規模解析や評価技法の改善、壁モデルの高度化など、さらなる予測精度向上に努めなければならない。

論文審査結果の要旨

数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) の発展に伴い, 製品設計など産業面での利用が広がっている。設計分野では早くから CAD システムが取り入れられ製図作業に利用されているが, CFD を利用するに当たり CAD データとの親和性が問題となっている。CFD の形状定義に CAD データをそのまま利用すると隙間や重複だらけの '汚い' 形状データとなってしまうことが知られている。このため, CFD の計算格子作成時に事前の準備作業が必要となっている。本研究は CFD の形状準備作業を不要にすることを目的とし, '汚い' 形状データをありのまま取り扱うための新しい計算手法を提案し, 自動車空力解析で使用される実車相当の製品 CAD データに対し, CFD を効率的に適用できることを示すものである。本論文は, これらの研究成果をまとめたものであり, 全編 6 章からなる。

第 1 章は諸言であり, 本研究の背景, 目的および構成を述べている。

第 2 章では, 本研究で提案した計算手法の詳細について述べている。本研究では, 埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method, IBM) の壁面境界条件を拡張することにより, 隙間や重複ならびに厚みのない要素を含む '汚い' 形状データでも計算することができる計算手法を提案し, 複雑な形状データに対して IBM の壁面境界条件が適用可能となることを示している。自動車空力解析で使用される実車相当の製品 CAD データに対し形状準備作業を不要にできることを実証しており, これは有益な成果である。

第 3 章では, 低 Re 数における球ならびに平板翼周りの流れに対して検証解析を実施し, 基本的な流れ場を定量的に良く再現できることが示されている。また並列計算の効率は, 6 万を超える大規模並列環境においても高い実行性能が得られた。これらは, 有効かつ重要な成果である。

第 4 章では, 高 Re 数流れへ適用するにあたり, Large Eddy Simulation (LES) モデル, 壁関数, 壁面境界条件の安定化手法を提案している。球まわり高 Re 数流れに対する検証解析では, 想定した解析条件では大規模格子による LES 解析を行うのが難しい場合, LES による渦粘性よりも風上差分スキームによる人工粘性の方がより現実に近い解を与えることを示している。球まわり高 Re 数流れに対して適切なスキームを選択することで妥当な解が得られることが示されており, これは産業界の実アプリケーションへ応用するために重要な知見である。

第 5 章では, 自動車空力解析の解析手法ならびに解析結果について述べている。実車相当の製品 CAD データを使用した自動車空力解析について, QUICK ならびに LES を用いた解析で定性的に妥当な流れ場を再現することを明らかにした。特に, ラジエータモデルを組み込んだエンジンルーム内およびフロントスポイラまわりの流れ場は良く再現できており, 車両の空力解析を行うために必要な流れ場情報が得られることを示している。風洞試験で得られた Cd 値と解析による Cd 予測値とを比較し, 約 6mm の解像度で非構造格子による解析例と同等な誤差で予測することができることを示している。最初の解析結果が得られるまで最短で 1 日程度で結果が得られており, 本計算手法が自動車の実製品開発の現場において, 設計プロセスそのものに変革をもたらす革新的な計算スキームとなる可能性を実証している。これは自動車設計開発への CFD 実用化に向けた有効かつ重要な成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は, 産業界における CFD において, 複雑形状の CAD データに基づく解析を事前準備無しに直交格子法により短期間で実施可能とするものであり, 航空宇宙工学およ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。