

直交格子型解法に向けた初期形状定義手法の開発と直交カットセル法による壁面熱流束予測性能の評価

課題責任者

竹田 裕貴

岩手大学理工学部

著者

竹田 裕貴^{*1}, 上野 和之^{*1}, 松原 夏鈴^{*2}, 馬場 直樹^{*2}

^{*1} 岩手大学理工学部, ^{*2} 岩手大学大学院総合科学研究科

キーワード: 直交カットセル法, 数値流体解析, 圧縮性流れ, 壁面熱流束

1. はじめに

数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD) における複雑形状の取り扱い, 実用数値解析上の重要な課題のひとつである。複雑形状まわりの数値解析において, 境界適合非構造格子は格子生成上の自由度が高い一方で, 空間高次精度の実現の困難さやダーティなモデルに対する格子生成の困難さ, 複数・運動物体に対する適用性などの課題がある。そのため, 格子線が物体形状から独立した直交格子を用いた CFD は実用計算への適用上, 有望な手法である。

本研究で用いる直交カットセル法は, 計算セルを横切る微小平面の組み合わせとして物体形状を再現する手法である。直交カットセル法は同様の直交格子を用いる計算手法であるボクセル法と比較して, 物体形状の再現性において優れる。また, 埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method) では満足されない物体近傍での質量・エネルギー保存則を満足することができる。

本研究では, 直交カットセル法を用いた CFD コードの開発を行った。開発した CFD コードを用いて, 複雑形状に対する前処理のロバスト性およびカットセル法による形状再現性の評価を行った。また, 超音速流れおよび極超音速流れにおける壁面熱流束の予測性能を調査した。

2. 開発した前処理手法の評価

直交カットセル法をはじめとした直交格子型解法では, 計算格子に沿わない物体形状を数値解析のアルゴリズム上で判別するために, 物体形状を場の関数を用いて定義することが一般的である。本研究では, 物体外部の流体領域で正, 物体の内部では負の値をとる符号付きの距離関数を用いて物体形状を定義した。

物体の表面形状を構成する三角形のパネルにすき間や重なり, 単位法線ベクトルの逆転が存在するダーティな STL データから符号付きの距離関数を生成するとき, 限られたパネルの情報のみで内外判定を行った場合には STL データのエラーに起因する判定の誤りを生じやすい。本研究では各格子点の内外判定を行う際に, すべてのパネルの情報を用いることでロバスト性を確保した。本手法についての原著論文を Journal of Theoretical and Applied Mechanics に投稿し, 採録された[1]。以下に計算結果の例を示す。

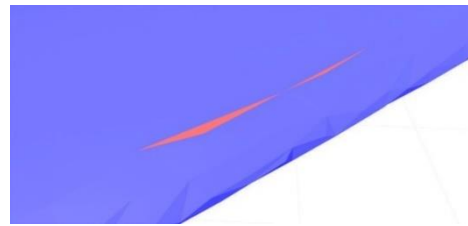


図 1 法線ベクトルが反転した三角形パネル (赤色)

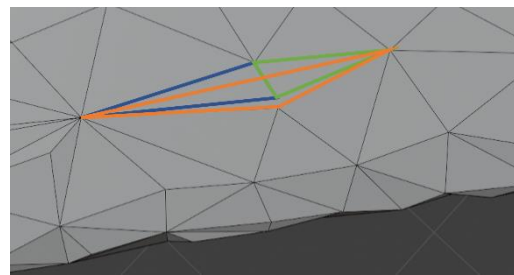


図 2 三角形パネル同士の重なり

翼, 胴体および水平尾翼を有した航空機全機形状モデルである NASA-CRM (Common Research Model) まわりの符号付き距離関数の生成を行った。生成に用いた NASA-CRM の STL データは図 1 および 2 に示すような法線ベクトルの反転や三角形パネルの重なりを含むいわゆるダーティなデータである。

図 3 にすべてのパネルの情報を用いて生成した符号付き距離関数のゼロレベル等値面を示す。また, 比較のために最近傍パネルの法線ベクトルのみを用いて生成した符号付き距離関数のゼロレベル等値面を図 4 に示す。本研究で実装したすべてのパネルの情報を用いた符号付き距離関数は適切にモデル形状を再現できた。一方, 最近傍パネルの法線ベクトルのみを用いた場合には, 法線ベクトルが反転した三角形パネルを参照した点では内外判定に誤りが生じている。そのため, 本研究で実装した符号付き距離関数の算出手法はダーティな形状に対してもロバストに前処理を行うことができるといえる。

生成した符号付き距離関数を用いて NASA-CRM の体積を算出した。体積算出には直交カットセル法およびボクセル法を用いた。符号付距離関数から算出された体積と STL データから算出された体積の誤差を図 5 に示す。緑のブ

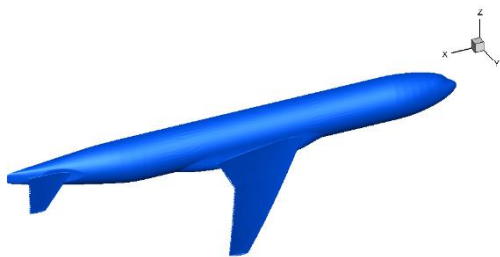


図 3 提案手法を用いて生成した符号つき距離関数

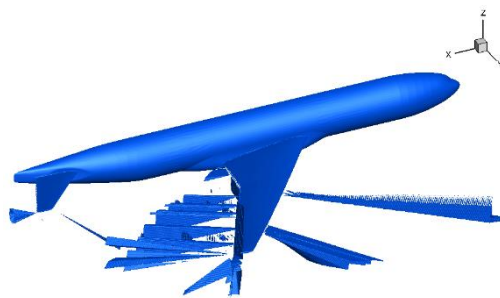
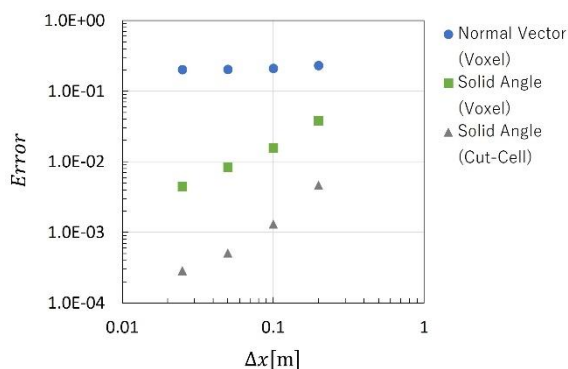
図 4 内外判定に最近傍パネルの情報のみを用いた場合
ロットで示されたすべての三角形パネルの情報を使用し

図 5 ボクセル法およびカットセル法による体積評価

た内外判定の場合には、ボクセル法による体積評価は格子解像度の向上とともに真値に向かって収束している。一方、青のプロットで示された最近傍パネルの法線ベクトルを用いた内外判定の場合には、体積評価に格子収束性がほとんどみられない。

灰色のプロットで示された、直交カットセル法による体積評価はボクセル法による体積評価よりも、すべての格子解像度においてより少ない誤差となっている。そのため、本研究における直交カットセル法は適切に実装されていることがわかる。

2. 超音速流れおよび極超音速流れにおける壁面熱流束の予測性能の調査

音速を超える流れでは物体の前方に衝撃波が発生し、衝撃波と物体の間には断熱圧縮により高温の領域が生じる。一般に衝撃層内の温度はマッハ数の増加とともに増加するため、空力加熱の予測とその防御は超音速機や宇宙機の開発における重要な課題の一つである。

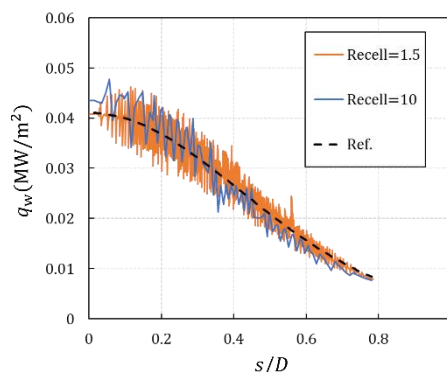
代表的な直交格子法ある Immersed Boundary 法では壁面近傍の境界セルにおける質量・エネルギー保存の問題があり、熱流束分布を過小評価する傾向にある。一方、直交カットセル法では、壁面近傍を含めたすべての計算セルで有限体積法を解くため、質量とエネルギーの保存が期待される。本研究では、直交カットセル法を用いた場合の壁面熱流束の予測性能を検証した原著論文を Journal of Fluid Science and Technology に投稿し、採録された[2]。以下に計算結果の例を示す。

図 6 は主流マッハ数 3 の流れにおける円柱周りの離脱衝撃波を密度勾配の大きさから求めた疑似シュリーレン画像により可視化したものである。画像の上下はセルサイズ基準のレイノルズ数 (Re_{cell}) が異なる 2 ケースの計算結果を表している。より格子解像度の高い下側の $Re_{cell} = 1.5$ のケースでは $Re_{cell} = 10$ のケースに比べて、より鮮明に衝撃波を解像していることがわかる。一方、円柱前縁のよどみ点と衝撃波との距離である衝撃波離脱距離は格子解像度によらずほぼ一致している。

図 6 $M_\infty = 3.0$ の円柱まわり流れにおける離脱衝撃波

図 7 は主流マッハ数 3 の流れにおける円柱表面の壁面熱流束を示す。横軸は円柱表面に沿ったよどみ点からの距離 s を円柱の直径 D で無次元化した円柱表面座標である。 $Re_{cell} = 10$ および 1.5 の両ケースにおいて熱流束の分布を良好に予測できていることがわかる。また、格子解像度の向上とともによどみ点および $s/D > 0.5$ における壁面熱流束の分布が改善しており、格子収束性が確認された。壁面熱流束の積分から得られる熱量の参照値との差は $Re_{cell} = 10$ では 0.4% ほどで、直交カットセル法では熱流束の分布に振動がある場合でも熱量を適切に予測可能であることを示した。

図 8 に主流マッハ数 8.03 の流れにおける壁面熱流束の分布をよどみ点熱流束 q_0 で正規化したものを示す。本

図 7 $M_\infty = 3.0$ の円柱まわり流れにおける壁面熱流束の分布

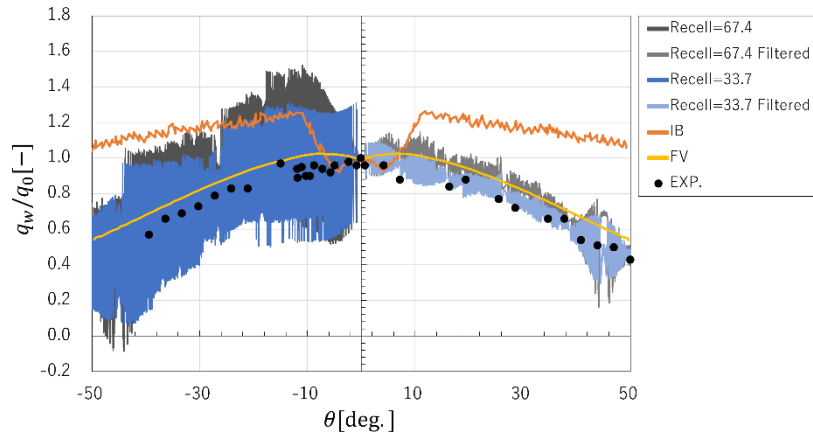


図 8 $M_\infty = 8.03$ の円柱周り流れにおける壁面熱流束の分布

研究の数値解析結果である $Re_{cell} = 67.4$ および 33.7 の 2 ケースに関しては、9 点移動平均によるローパスフィルター操作を施したデータを $\theta > 0$ の範囲にプロットしている。本研究の数値解析結果は数値振動を含むものの、実験値 (EXP.) や境界適合格子を用いた数値解析結果 (FV) おおむねよく一致している。一方、Immersed Boundary 法の数値解析結果 (IB) は $\theta > 10^\circ$ の広い範囲においてよどみ点よりも熱流束が高くなっており、不自然な分布となっている。さらに、よどみ点熱流束の値も Immersed Boundary 法では大きく過小評価していたが、直交カットセル法を用いることで大きく改善した。

4. まとめ

直交カットセル法による CFD コードの開発を行い、前処理手法の妥当性の検証と壁面熱流束の予測性能の検証を行った。これらの結果から、複雑形状まわりの流れ解析手法としての有用性を示した。また、壁面熱流束の予測において、既存手法である Immersed Boundary 法に対する優位性を示した。

謝辞

本研究成果は令和 5 年度地球シミュレータ公募課題により、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用して得られたものである。一部の数値解析結果は東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムによって得られた。ここで謝意を示す。

文献

- [1] Y. Takeda, K. Ueno, Y. Takahashi, and K. Matsubara, “Robust Generation Method of a Signed Distance Function for Preprocessing of Cartesian-Grid-Based CFD,” *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 61, No 3, pp. 453–463 (2023).
- [2] Y. Takeda, N. Baba, and K. Ueno, “Wall Heat Estimation using the Cartesian Cut-Cell Method,” *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 18, No 3 (2023).