

直交カットセル法を用いた CFD コードの開発

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, 港 怜*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, 非圧縮性流れ

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, 物体まわりの流れを対象とした数値解析を行った.

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場合に, 限られたパネルの情報のみで内外判定を行った場合に誤りを生じやすい. 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.

図 1 に回転楕円体の STL データを用いて作成した符号付き距離関数の断面内における分布を示す. 図中の黒線で描かれたゼロレベルに対して距離と距離が適切に算出されていることがわかる.

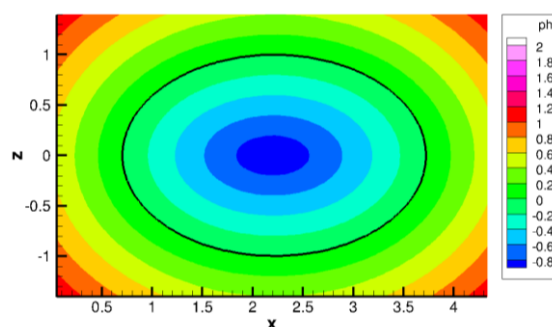


図 1 回転楕円体まわりの符号つき距離関数

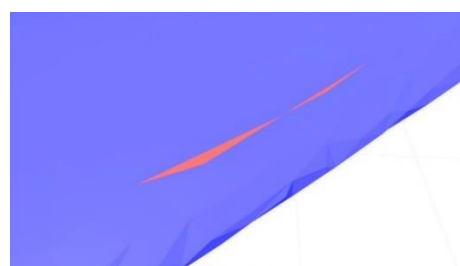


図 2 法線ベクトルが反転した三角形パネル (赤色)

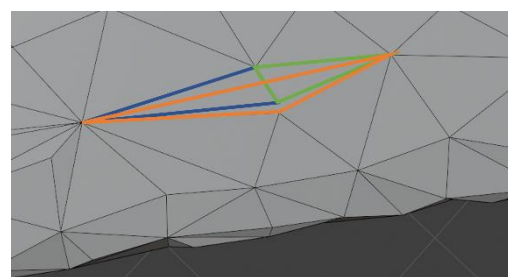


図 3 三角形パネル同士の重なり

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 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ダーティなデータである.

図 4 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 5 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

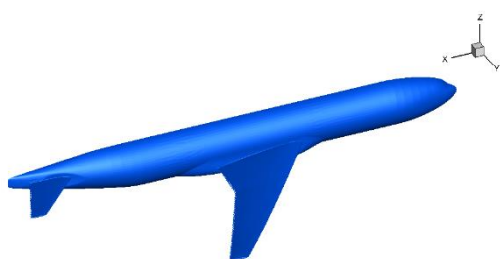


図 4 提案手法を用いて生成した符号つき距離関数

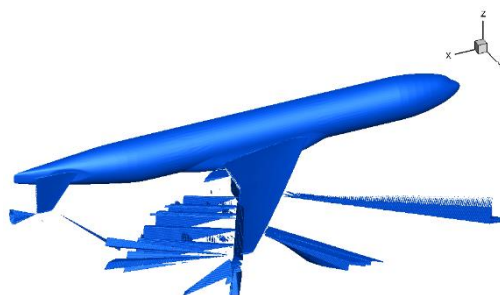


図 5 内外判定に最近傍パネルの情報のみを用いた場合

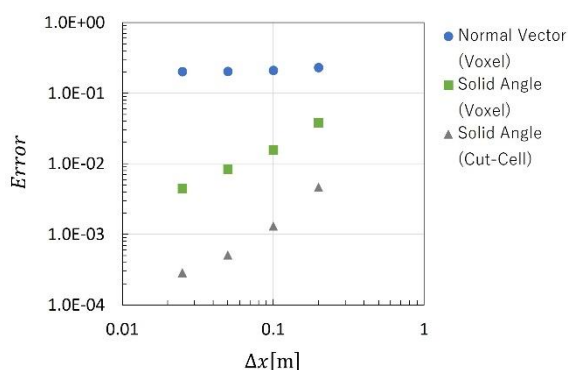


図 6 ボクセル法およびカットセル法による体積評価

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つ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。

生成した符号つ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 6 に示す。緑のプ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はみられない。

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

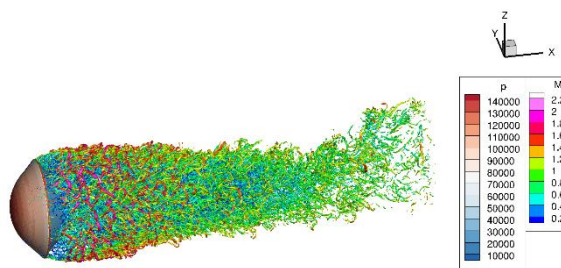


図 7 はやぶさ SRC まわりの流れ場

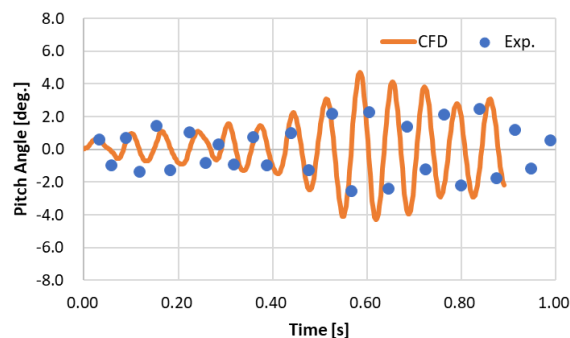


図 8 ピッチ角の時間履歴

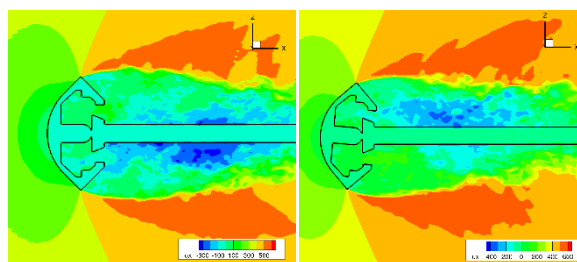


図 9 支持具つきはやぶさ SRC 模型まわりの流れ場

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。

上記の前処理手法については、Journal of Theoretical and Applied Mechanics に投稿済みで、現在査読中である[1]。また、本研究で開発した直交カットセル法についての原著論文についても令和 5 年度中の投稿を計画している。

3. 開発した直交カットセル法の CFD コードを用いた数値解析結果

3.1 大気突入カプセル

はやぶさ SRC (Sample Return Capsule) におけるカプセルまわりの流れとピッチング運動の連成解析を実施した。図 7 および 8 にカプセルまわりの流れ場の様子とピッチ角の時間履歴を示す。連成解析の結果、実験と同様に振幅の増減を繰り返す亜音速型の振動が得られた[2, 3]。これにより、直交カットセル法が物体の運動を伴う問題にも適用できることを示した。連成解析を引き続き行い、この結果は令和 5 年度中に原著論文としての投稿を目指す。

はやぶさ SRC 模型に支持具を装着した風洞試験を模擬

した CFD を行った[4, 5]. 図 9 にピッチ角 0° と 5° のカプセル付近の流れ場の様子を示す. カプセル模型が支持具から独立して回転した状況を再現できていることがわかる. 今後, カプセル模型が自由に回転する連成解析へと展開する予定である.

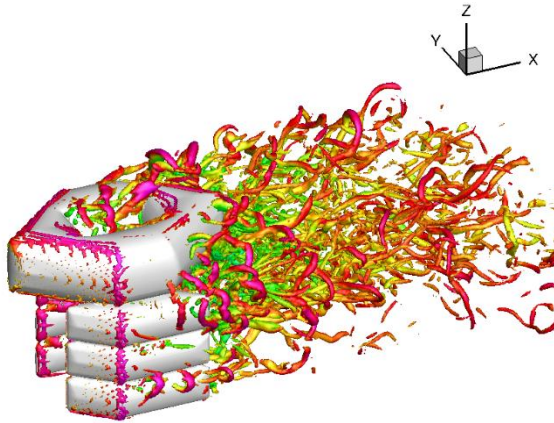


図 10 縦型飛行船まわりの流れ場

3.2 飛行船形状

縦型の飛行船形状の CFD を行った. 数値解析結果を図 10 に示す. 本計算には, 非圧縮性流れの CFD コードを用いた. これにより, 複雑形状まわりの非圧縮性流れにも開発した直交カットセル法の CFD コードが適用可能であることを示した[6].

本数値解析結果は研究グループで開発中の流れ場の可視化手法である分極分解へと適用する元データとしても利用する予定である.

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実用計算への適用を行った. これらの結果から, 運動物体や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.

謝辞

本研究成果は令和 4 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. また, 本研究成果には科研費(21K20390)の助成を受けたものを含む. ここで謝意を示す.

文献(10 ポイント太字)

- [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*, Under Review.
- [2] 竹田裕貴, 馬場直樹, 上野和之, 「大気突入カプセルの動的安定性推定に向けた連成数値解析の取

り組み」, 第 36 回数値流体力学シンポジウム, C05-5, オンライン, 2022 年 12 月.

[3] 竹田裕貴, 馬場直樹, 上野和之, 「大気突入カプセルの運動のモデル化に向けた流れと運動の連成解析」, 令和 4 年度 宇宙航行の力学シンポジウム, ISAS2022-SFMA-053, 神奈川県, 2022 年 12 月.

[4] 松原夏鈴, 「大気圏再突入カプセルの支持干渉の CFD 解析」, 令和 4 年度 岩手大学修士論文, 2023.

[5] 竹田裕貴, 松原夏鈴, 上野和之, 「スティング支持された鈍頭形状カプセルの風洞試験における支持干渉の数値解析」, 日本航空宇宙学会北部支部 2023 年講演会, 宮城県, 2023 年 3 月.

[6] 港怜, 「直交カットセル法を用いた縦型双胴飛行船まわりの非圧縮性流れの数値解析」, 令和 4 年度 岩手大学修士論文, 2023.