

直交カットセル法による自動車まわりの流れの数値解析

竹田 裕貴 岩手大学理工学部

竹田 裕貴^{*1}, 上野 和之^{*1}, 古澤 篤実^{*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, DrivAer モデル, 非圧縮性流れ, 直交格子, 数値流体解析

1. はじめに

地球温暖化の要因となる二酸化炭素の削減を目的に, 2010 年代以降電動車の普及が進んでいる. 近年も電動車の販売台数は増加しており, 今後もこの傾向が継続すると予測されている[1]. 内燃機関のみを動力源とする従来の自動車の場合, 空気抵抗による消費エネルギー比率は 43%ほどである一方, 電動車の一種であるハイブリッド車の場合, 回生ブレーキによって転がり抵抗および加速抵抗による消費エネルギー比率が低下し, 全消費エネルギーのうち空気抵抗の比率が 62 %まで増加する[2]. そのため, 電動車における空力性能の向上は環境適合性の観点からインパクトが大きい.

自動車の空力性能の開発や研究においては, 風洞試験や数値解析が用いられる. 数値解析を活用した開発や研究に用いられる実車形状データには, 図 1 に示すような物体形状を構成する面同士の隙間や重なりが存在し, 境界適合格子を生成する上での障害となる. 直交格子法はこのような形状データの不具合に対するロバスト性に優れる[3]. その中でも, 直交カットセル法[4]は物体形状の再現性や質量およびエネルギーの保存性の面で他の直交格子法に対して優位性をもつ.

本研究では直交カットセル法を用いた DrivAer モデル[5]まわりの流れの数値解析を行い, 直交カットセル法による非圧縮性流れの予測性能を調査する.

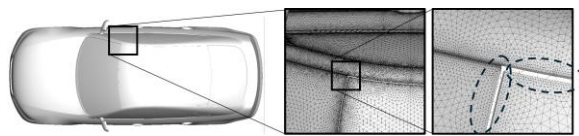


図 1: 物体表面における隙間

2. 数値解析手法および計算条件

流れの基礎方程式は非圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし, 時間積分には SMAC 法を 2 段階の Runge-Kutta 法に拡張した手法を採用した. セルインターフェイスにおける移流項の流束には空間 3 次精度 MUSCL[6] に Thornber の修正[7]を加えたものを使った. 粘性項は 2 次精度中心差分で評価した. 壁面せん断応力の評価には乱流境界層の内層をモデル化した壁面応力モデルを導入した[8]. 界面を含むセルごとに生成した法線方向 1 次元格子でモデル方程式を解き, 得られた壁面剪断応力を 3 次元直交カットセル法の壁面流束として与えた. 壁モデルを使った 陰的 LES (Implicit Large Eddy Simulation) であり, 3

次元直交格子計算部分ではサブグリッドスケールモデルは使っていない.

本研究では DrivAer Fastback Model まわりの流れの解析を行った(図 2). 主流流速は 15.9 m/s (時速 57 km) で, 車体の全長を代表長としたレイノルズ数は Heft ら[5]の実験と同じ 4.89×10^6 である.

本研究で使用した直交格子の全体像を図 3 に示す. 車体近傍では直交等間隔格子として, 車体から遠方の領域では直交不等間隔格子とした. 等間隔格子領域のセルサイズは 1.0×10^{-2} m と設定した.

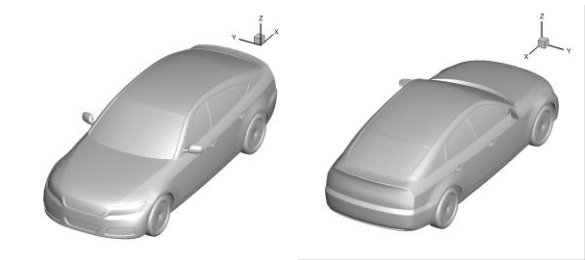


図 2: DrivAer Fastback Model の外形

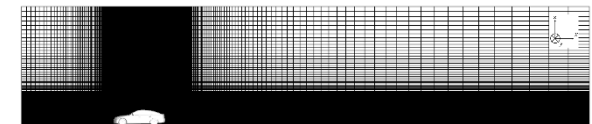


図 3: 計算格子

3. 計算結果

図 4 に瞬時の流れ場の速度勾配テンソルの第二不変量 (Q 値) の等値面を示す. 主流方向流速で色付けしたものである. サイドミラーやタイヤハウスにおいて形成される渦が下流へ向かって流れていく様子を確認できる. さらに, モデル前方の A ピラー部での剥離による A ピラー渦 (縦渦) と, モデル後方の C ピラー部での剥離による C ピラー渦 (縦渦) が形成されている. またボンネットとフロントウィンドウの境界付近にあたるカウル部では, 剥離に伴って横向きの渦が形成されている. 以上のような, 自動車の特徴的な渦構造を再現することができた.

図 5 に瞬時流速の主流方向成分の分布を示す. 車体の前方によみ点が存在することが確認できる. また

ボンネットやルーフ前縁付近の曲率大きい箇所では流速が速くなっている. カウル部では剥離に伴って流れが逆流していることが確認できる.

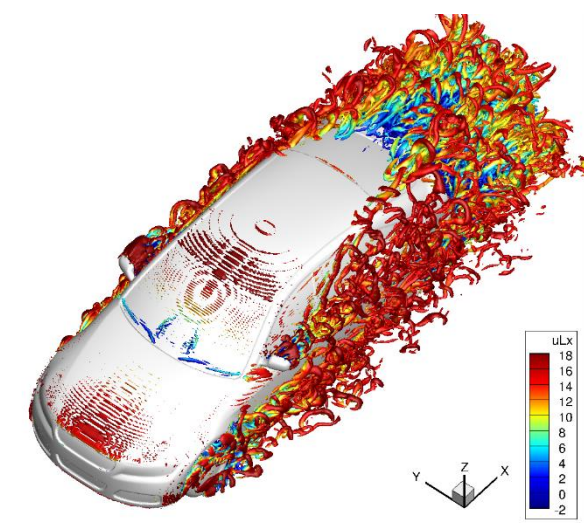


図 4：車体周りの渦構造 (Q 値等値面)

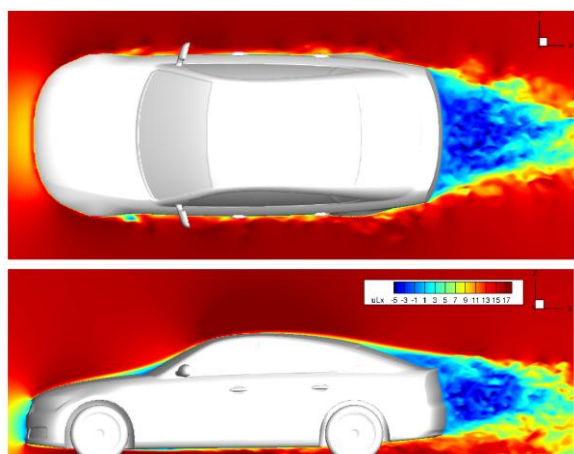


図 5：車体まわりの主流方向流速分布

4. まとめ

複雑形状物体まわり流れに適した直交カットセル法による非圧縮性流れの数値解析手法を開発した。その計算コードを使い、自動車の空力研究におけるベンチマーク形状である DrivAer Fastback Model まわり流れの数値解析を行った。その結果、自動車まわり流れとして典型的な渦構造を再現できることを確認した。

今後、数値解析結果に対してさらなる検討を行うほか、車体形状や横風に対する流れ場や空力係数の依存性を調査する。

謝辞

本研究の計算結果は、国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の地球シミュレータならびに東北大学サイバーサイエンスセンター大規模計算システムを利用して得られました。ここに記して関係者各位に謝意を表します。

文献

- [1] International Energy Agency. “International Energy Agency Global EV Outlook 2024,” <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- [2] ARC. The Effect of Aerodynamic Drag on Fuel Economy. Tech. rep. 4012 Championship Drive, Indianapolis, IN 46268: Auto Research Center, 2017, <http://www.arcindy.com/effect-of-aerodynamic-drag-on-fuel-economy.html>.
- [3] Takeda, Y., Baba, N., & Ueno, K., “Wall heat flux estimation using the Cartesian cut-cell method,” Journal of Fluid Science and Technology, 18 (3), (2023), <https://doi.org/10.1299/jfst.2023jfst0031>
- [4] Takeda Y., Ueno K. Takahashi Y., Matsubara K. “Robust Generation method of a signed distance function for preprocessing Cartesian-grid-based CFD”, Journal of theoretical and applied mechanics, 61, 3 (2024) pp.453-463.
- [5] Heft, A., Indinger, T., and Adams, N., “Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations”, SAE Technical Paper (2012)-01-0168.
- [6] Van Leer, B., “Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. V.A Second-Order Sequel to Godnov’s Method”, Journal of Computational Physics, 32, pp. 101-136, (1979)
- [7] Thornber, B., Mosedale, A., Drikakis, D., Youngs, D. and Williams, R. J., An improved reconstruction method for compressible flows with low Mach number features, Journal of Computational Physics 227 pp. 4843-4894 (2008)
- [8] Kawai, S., Larsson, J., Wall-modeling in large eddy simulation: Length scales, grid resolution, and accuracy, Physics of Fluids, 24, pp. 015105, (2012)