

大規模 LES 流体解析による自動車非定常空力予測と性能向上に関する実証解析

坪倉 誠 (神戸大学 大学院システム情報学研究科)

1. 目的

自動車開発において、燃費向上のための空気抵抗低減は商品力の向上、社会的な要請の両面から、各自動車メーカーに課された重要な課題となっている。近年、空気抵抗低減のための研究の中で、横風や車両運動に伴う流れ構造の変化によって空気抵抗が変化し、運動性能や走行安定性にも影響を及ぼしている可能性が指摘されている。このような現象のメカニズム解明による抵抗低減・走行安定技術の向上が期待されるが、従来の実験的計測手法では詳細な解析が困難であった。数値解析による詳細な流れ構造の把握は、メカニズム解明に有用と思われる一方、実車の詳細形状を再現した数十億要素規模の大規模数値解析は各自動車メーカー所有のスーパーコンピュータではいまだ実現困難となっている。そこで、本研究では自動車まわり空気流れの最適化手法構築を目的とし、自動車の詳細形状と実走行環境を再現した大規模 Large-Eddy Simulation(LES)を行う。これにより、車体回りの特徴的な流れ構造とその非定常挙動を再現することで、自動車に作用する非定常空力特性に着目してメカニズム解明を目指す。特に、地球シミュレータを用いた解析では、自動車メーカー所有のスーパーコンピュータで実行可能な計算規模を想定し、産業界への普及を図るための実証解析を行う。なお、本稿では実例として、タイヤ肩部の局所的かつ微細な形状変化が車両全体の空力性能に及ぼす影響について着目した解析と、揚力の非定常特性に着目した解析の結果を示す。

2. 解析手法

本研究では非圧縮性流体を仮定し、節点中心有限体積法により離散化した Navier-Stokes 方程式を解いている。乱流モデルとして LES を採用し、サブグリッドスケールの乱流モデルとして Smagorinsky による渦粘性型モデルを用いている。モデル定数 C_s は 0.15 とし、壁面近傍では van-Driest 型のダンピング関数を用いて、渦粘性を減衰させている。また、壁面では計算コ

ストの面から、境界層の解像に十分な格子を配置できないため、速度境界条件として Spalding-law に基づく壁法則を適用し、壁面摩擦を境界条件として与えている。

解析領域は非構造格子によって離散化した。解析スキームとして、空間離散化には 2 次精度中心差分法を用い、対流項については中心差分に 1 次もしくは 3 次精度の風上差分をブレンドすることで安定化を図っている。時間積分法としては Euler 陰解法を用いている。速度と圧力のカップリングには SMAC 法を採用し、圧力ポアソン方程式の解法には ICCG 法を、その他行列解法には BiCGSTAB 法を用いている。

解析コードとしてはオープンソースソフトウェア FrontFlow/red を大規模自動車空力解析用に最適化した FrontFlow/red-Aero-HPC を用いた。なお、地球シミュレータで計測した並列化率は 99.6%、ベクトル化率は 95.6% である。

3. タイヤ詳細形状解析

本解析では、空気抵抗低減を目的とし、タイヤの接地箇所近傍におけるたわみ変形が自動車周りの流れ場に与える影響を LES により予測した。エンジンルームや床下機器形状といった詳細形状が再現された詳細自動車モデル(図 1)を解析対象とし、たわみ変形の有無のみが異なる 2 種のタイヤを搭載した場合に、定常空力にどのような差異が生じるか調べた。詳細な形状再現性が求められるタイヤは、水平方向解像度を 1.5mm~4mm 程度、垂直方向解像度を 0.5mm に設定し、車両においては表面解像度を 4mm~16mm 程度とし、総要素数は 5500 万要素程度となった。車速は 100km/h を想定し、直進状態での解析を行った。

図 2 に、左フロントタイヤ近傍の総圧分布を示す。たわみ変形の有無によってタイヤ表面からの剥離位置が異なり、それに伴い圧力欠損の差が生じている様子が見られる。また、フロントタイヤ近傍の流れ性状の違いは車両床下の流量や流線分布にも影響が及んでいることも確認できた。車両全体にかかる空気抵抗係数値

は、たわみ変形がつくことでおよそ 8.6%上昇したことから、微細な形状の再現性が、空気抵抗予測精度に大きく影響することが明らかになった。

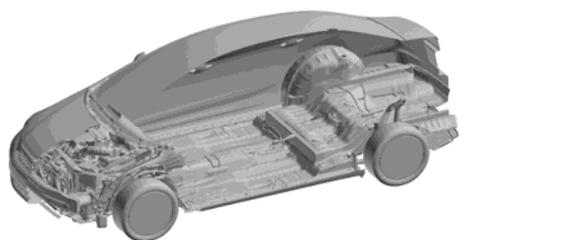


図1 解析対象

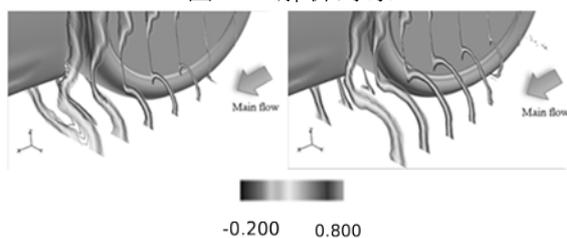


図2 フロントタイヤ近傍総圧分布
(左：変形なし，右：変形あり)

4. セダン形状車体の揚力変動解析

本解析では、揚力の時間的な変動に着目した計算を行い、動的な流れ構造を抽出するポスト処理に関する研究を行った。特に、自動車のサスペンション系の固有周波数 1~2Hz に近く、共振を生じる可能性がある比較的 low 周波の揚力変動と、その原因となる流れ構造を、固有直交分解 (POD) や動的モード分解 (DMD) によって抽出することを試みた。低周波変動の現象を捉えるため、従来の定常空力予測に要する実時間の 10 倍以上である 20 秒間の解析を実施した。なお、汎用的な PC クラスタを用いて同様の計算を実行すると 1500 時間程度要するのに対し、地球シミュレータを用いた際は同じ CPU 数でも 500 時間程度で計算が終了した。

解析対象は、エンジンルームや床下機器形状といった詳細形状を再現したセダン型車両 (図 3) である。解析対象の表面解像度は 4mm~20mm 程度とし総要素数は 4,500 万要素程度である。車速は 140km/h を想定し、直進状態での解析を行った。まず、図 4 に 20 秒間の揚力の時間変化に対して、FFT を適用した結果を示す。0.3Hz や 2 Hz 近傍にピークが見られる。続いて、解析領域内全節点の圧力に対して、DMD 解析を適用し、FFT でピーク生じた周波数に対応するモード分布を可視化することで、揚力変動の

発生箇所を検討した (図 5)。結果として、床下中央部にモード振幅が大きな領域が見られ、床下流れが揚力の低周波変動に寄与していることを特定した。なお、本研究は富士重工業株式会社との共同研究として行われた。



図3 解析対象

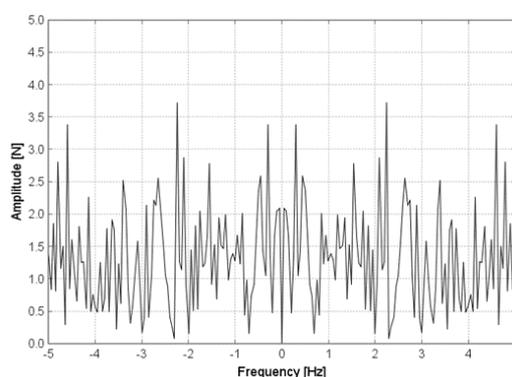


図4 揚力の振幅スペクトル

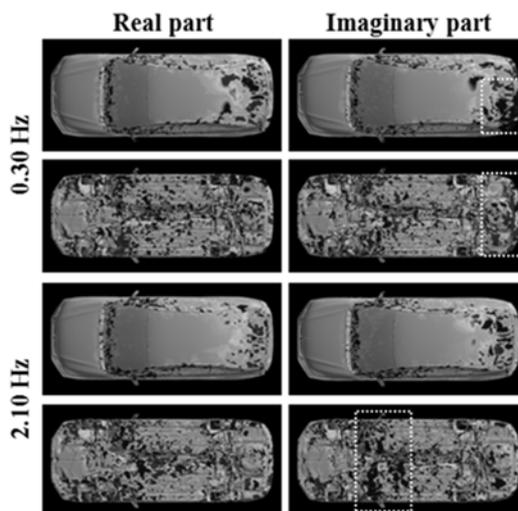


図5 0.3Hz および 2.1Hz のモード分布

謝辞

本研究は科研費基盤研究 (B) No. 26289033 の一部として行われた。また、解析ソフトウェアの開発は文部科学省「HPCI 戦略プログラム」分野 4 次世代ものづくりの支援によって行われた。ここに記して謝意を表す。