

非定常渦構造の特性解明およびそれに基づく抜本的空気抵抗低減技術の開発

プロジェクト責任者

炭谷 圭二 トヨタ自動車株式会社 第1車両技術部

著者

杉田 祐輔^{*1}、炭谷 圭二^{*1}、窪田 達也^{*1}、加藤 千幸^{*2}、山出 吉伸^{*2}、上原 均^{*3}、
廣川 雄一^{*3}

*1 トヨタ自動車株式会社 第1車両技術部

*2 国立大学法人 東京大学 生産技術研究所

*3 独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成19年7月11日～平成20年3月31日

アブストラクト

通常、自動車の空気抵抗の解析では時間平均特性が重要視されているが、自動車周りの実在流れでは、大小様々なスケールの渦が発生～成長～離脱～消滅のサイクルを繰り返しており、それにより空気抵抗も時間的に変化している。本プロジェクトでは、地球シミュレータを用いたLarge Eddy Simulation (LES) を用いた非定常乱流の大規模数値シミュレーションにより、境界層内と後流の両方において、時間軸上で空気抵抗が小さい時の流れ構造を解明し、低空気抵抗状態を持続させるための制御要件を明らかにすることで、新たな空気抵抗低減の指針を得ることを目的とする。今年度は、計算コードと格子解像度の検証および車両周りの流れ場の把握を行うため、4面体格子および6面体格子を用いて数値計算を行った。その結果、6面体格子での計算を行うことで計算結果が実験値とほぼ一致することが確認できたと共に、本計算に必要な格子解像度を明確にすることができた。

キーワード： 自動車、空力、非定常流れ、LES、空気抵抗

1. はじめに

CO₂ 排出量低減のため、自動車の走行抵抗としての空気抵抗低減は重要な課題である。しかし、従来の経験や実験に基づく手法による改善は限界になりつつあり、物理現象の本質的な解明とそれに基づく空気抵抗低減方法の開発というパラダイムチェンジが求められている。

通常、空気抵抗の解析では時間平均特性が重要視されているが、自動車周りの実在流れでは、大小様々なスケールの渦が発生～成長～離脱～消滅のサイクルを繰り返しており、それにより空気抵抗も時間的に変化している。従って、非定常渦構造の解明が低空気抵抗化への新たな視点を与えてくれるものと考えられる。

2. 目的

本プロジェクトでは、地球シミュレータを用いた Large Eddy Simulation (LES) による非定常乱流の大規模数値シミュレーションを行い、境界層内と後流の両方において、時間軸上で空気抵抗が小さい時の流れ構造を解明し、低空気抵抗状態を持続させるための制御要件を明らかにすることで、新たな空気抵抗低減の指針を得ることを目的としている。

本プロジェクトの全体計画としては、下記の通りである。

STEP1. 計算コードと格子品質の検証および車両周りの非定常流れ場の把握 (H19 年度実施)

解析対象：自動車を模した 1/15 スケールモデル (実験共試体と同一形状)

格子点数：1,300 万点、3,800 万点

STEP2. 格子解像度の検討

解析対象：自動車を模した 1/15 スケールモデル (実験共試体と同一形状)

格子点数：数千万点

STEP3. 低空気抵抗を維持させる為の制御要件の明確化

解析対象：自動車を模したフルスケールモデル

格子点数：数千万点

今年度は、STEP1. を行った。

3. 計算対象

本プロジェクトの解析対象としては、車両周りの流れ場の基本構造に着目するため、凹凸やタイヤ、見切りなどをなくしたセダン形状のシルエットモデルとした (図 1)。モデルの支持は、車両床下から地面までを翼形状でつないだ一点支持とし、実験モデルも同様の支持方法とした。

4. 計算コード

計算コードは、FrontFlow/Blue を使用した。FrontFlow/Blue は有限要素法を用いた LES による非定常流解析の汎用コードで、東京大学生産技術研究所で開発され、ソースコードが無償公開されている。

本プロジェクトでは、運動方程式の解法にはクランクニ科尔ソン法を、圧力方程式の解法には Fractional Step 法を選択し、時間・空間二次精度の解析を行った。サブグリッドスケールモデルには、ダイナミック・スマゴリンスキー・モデル (DSM) を使用した。



図 1 計算対象

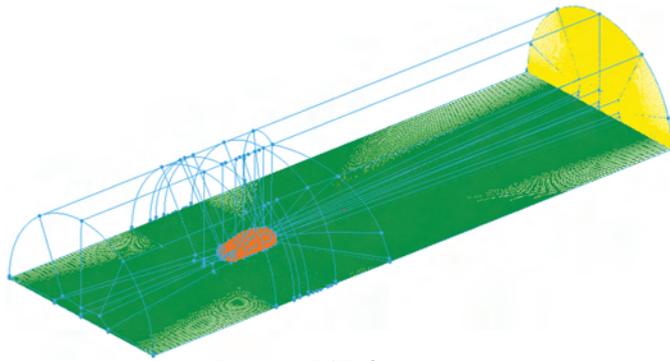


図2 計算領域

表1 格子解像度

	4面体格子	6面体格子
総要素数	1300万	3800万
最小格子幅	1/100 L	1/500 L
CPU数	13	38

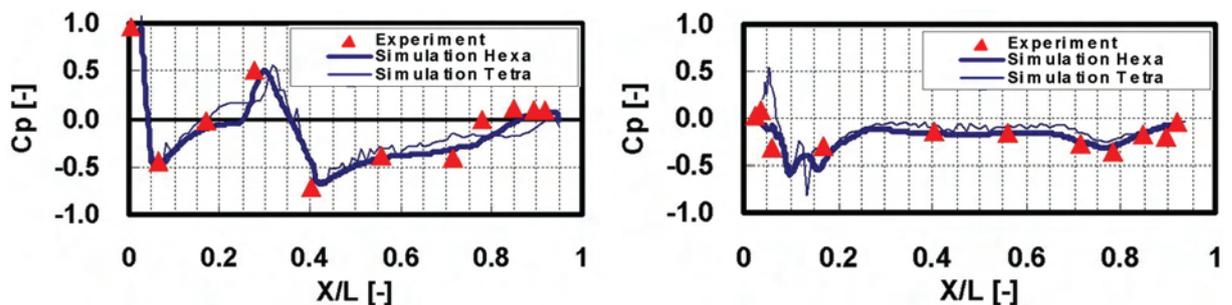
5. 計算格子

図2に計算解析領域を示す。数値計算の計算領域は、計算領域の境界で反射する非物理的な圧力波の影響を緩和させるように、流れ方向11L、幅方向6W、高さ方向7Hの領域とした。物体表面および地面の境界条件はNo Slip Wallとし、流出条件は自由流出境界、流入条件は流速一定として与えた。代表長さは、車両幅の長さWとする。ここに、L：全長（4.96m）、W：全幅（1.76m）。一様流の風速 U_0 と全幅を代表値とするレイノルズ数は、 $Re=1.0 \times 10^5$ 。風洞実験の試験風速は30m/s、モデルの縮尺は1/15、 $W=0.12\text{m}$ であり、レイノルズ数は、 $Re=3.0 \times 10^5$ 程度である。

格子解像度は、1300万要素数の4面体格子と、3800万要素数の6面体格子の2通りで解析を行った。解析領域は分割し、4面体要素は13ノード、6面体要素は38ノードで並列計算を行った。格子解像度に関する情報を表1に示す。6面体要素の格子は乱流境界層を解像できることを意図している。

6. 解析結果

図3に車両中央断面上面および車両側面の実験結果と計算結果（4面体格子、6面体格子）の時間平均圧力分布を示す。計算結果は、4面体格子を6面体格子にし格子解像度を高くすることにより実験値に近づく傾向にあり、車両周りの基本的な流れ場は再現できていると考える。しかし、バックウィンド上面（ $X/L=0.7 \sim 0.8$ ）近傍の圧力回復は6面体格子でも解くことはできていない。



(1) 車両上面

(2) 車両側面

図3 車両周りの圧力分布

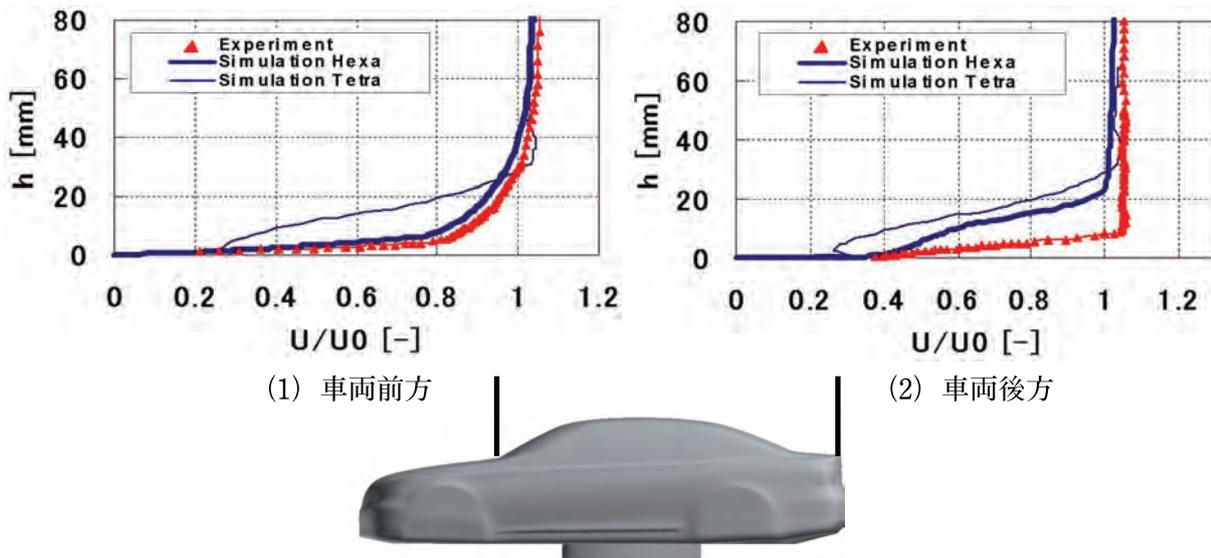


図4 車両表面の境界層プロファイル

図4に車両上面の境界層プロファイルの実験結果と計算結果（4面体格子、6面体格子）を示す。車両前方においては、4面体格子を6面体格子にし格子を密にすることで実験結果とほぼ一致しているが、車両後方においては6面体格子においても境界層を過大評価していることがわかる。この原因としては、バックウィンド上面（ $X/L=0.7$ ）近傍の流れ方向の格子密度が足りないためルーフからバックウィンドに添って流れる現象を十分に解像できていないことが原因であると考えられ、このことは、前述した平均圧力分布の傾向とも一致する。今後の検討においては、バックウィンド前縁部の格子を密にし計算を行っていく。

7. 今後の方針および計画

平成19年度で自動車周りの流れ場のLESを用いた非定常乱流の大規模数値シミュレーションの格子密度等の計算精度に関する準備がほぼ達成できたので、これを用いて、今後は車両表面の境界層を再現できるように格子密度の修正を実施すると共に、車両の形状を変えたケーススタディを実施し、車両周りに発生する渦のスケール・周期・位相に着目した時間軸上で空気抵抗が小さい場合の流れ構造を把握し、低空気抵抗状態を持続させるための要件を明らかにする。得られた結果は、非定常渦構造と空気抵抗との関係を考察することにより、低空気抵抗のための流れの制御技術につながると考えられ、自動車の空気抵抗低減以外の高速鉄道車両、航空機など多くの工学分野で利用されることが期待できる。

謝辞

本研究に関して、独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部の平野哲 部長、北脇重宗 調査役、新宮哲 産業利用推進グループリーダーから貴重なご指導、ご助言をいただいた。

計算コードFrontFlow/Blueは、文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの開発」プロジェクトの一環として、東京大学生産技術研究所で開発されたものである。

ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮澤真史ほか、“二次元翼周りの非定常流の空力音響解析（第1報、翼周りにはく離遷移流れのLES解析の精度検証）”、機械学会論文集B編、72巻、721号、pp.2140-2107,2006.
- 2) Kato, C., Ikegawa, M., “Large Eddy Simulation of Unsteady Turblent Wake of Circular Cylinder Using the Finite Element Method” , *ASME-FED.*, 117, pp.49-56,1991.
- 3) 青木清平ほか、“車両後部剥離流の渦構造の非定常数値解析”自動車技術会論文集、VOL.29、No.2、April, 1998.