

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 車両技術開発部

著者

杉田 祐輔^{*1}、炭谷 圭二^{*1}、前田 和宏^{*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 車両技術開発部

*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 20 年 4 月 1 日～平成 21 年 3 月 31 日

アブストラクト

自動車の空気抵抗の解析では時間平均特性で議論される場合が多いが、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、空気抵抗も時間的に変化している。本プロジェクトでは、非定常で流れを考え、空気力の変動を抑制することで空気抵抗が小さい状態を維持することができないかを明らかにし、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、空気抵抗が小さい時の流れ場を解明するため、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及び検証実験を行った。その結果、車両後方に大きな渦輪が形成され、それが周期的な成長～発達～離脱を起こし、空気抵抗変動が発生し、時間平均値を悪化させていることが推察された。低空気抵抗状態を維持するためには、空気抵抗変動の抑制が必要であり、制御方法として (1) 剥離放出渦を小さくする (境界層を薄くする)、(2) 剥離放出渦の放出周期を小さくする (渦輪の形成を遅らせる)、(3) 渦輪の崩壊、(4) 渦輪の背面からの遠方化、を提示した。これらの検証については、平成 21 年度に実施予定。

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

従来の経験や実験に基づく形状要因から考えた改善はかなり進められて来ており、今後は流れ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で議論されてきたが、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図 1 に示すように 5～10% で時間的に変化している。従って、非定常での流れ現象および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。

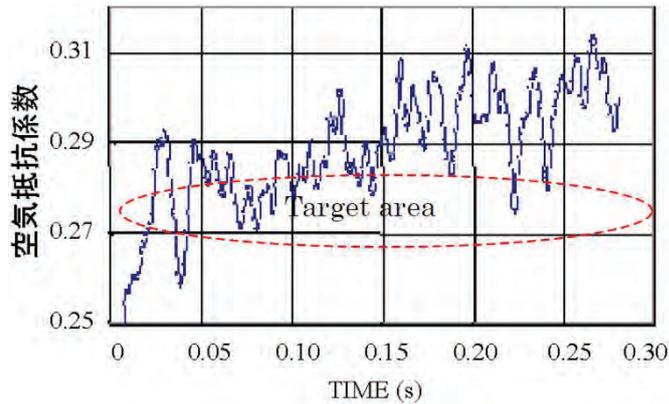


図1 自動車の空気抵抗の時間履歴

2. 目的

本プロジェクトでは、図1の点線で示す空気抵抗が小さい状態を維持することで、時間平均値を低減させることができる新たな空気抵抗低減の指針を得ることを目的とする。そのため、時間的に変化している車両周りの境界層内および後流において、空気抵抗が小さい時の流れ構造変化を解明し、変動を抑え、その構造を維持する要件を明らかにする。今年度は、流れ場の解明のため、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及び検証実験を行った。

3. 流れ場の検討手法

3.1 解析の必要内容とスケール

事前の検討結果より、空気力の変動は渦の変動が主原因と考えられるので、渦および変動の最小スケールである境界層内の変動まで解析する必要がある、かつ車両周り全体の流れ場も同時に解析する必要があると考えられる。

3.2 解析手法

数値計算においては、車両周りの最小の変動スケールである境界層内の縦渦を解像可能とするため、その渦を近似することなく解くことができる LES (Large Eddy Simulation) 解析手法である東大生研で開発された FrontFlow/blue ver.5.2 の流体解析ソルバーを用いた。運動方程式の解法にはクランクニコルソン法を、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。縦渦を解像するために縦渦を L, H, W 方向に (20, 10, 10) 分割できる 5,000 万格子点数の計算格子を作成し、1つの計算に対して地球シミュレータ 50 (ノード) × 70 (時間) = 3,500 (時間ノード積) 程度利用し計算を実施した。

実験に関しては、境界層内部の変動現象の計測は困難なため、計算の検証データ取得を目的とし、平均値での空気力および流速、圧力の計測を行った。

3.3 検討モデル

本検討で扱う車両モデルは、基本的な流れ構造を検討するために、図2に示す 1/15 スケールセダ

ン形状で、タイヤ、ドアミラー、床下構造等の複雑形状を無くし、簡素化したモデルを用いた。レイノルズ (Re) 数に関しては、実験にて検討を行い、レイノルズ数 $Re=2.5 \times 10^5$ 以上の範囲では、Re 数変化に対して空気抵抗係数の変化率が小さいため実車 Re 数の流れ場をほぼ再現できると考え、かつ計算コスト及び計算時間を考慮し今回の検討レイノルズ数 $Re=2.5 \times 10^5$ とした (図3)。

4. 空気力変動と流れ場の解析

4.1 計算精度の検証

図3に空気抵抗係数 C_D (時間平均値) の比較結果を示す。図4に後流の挙動に大きく関係するトランク上面後端の速度分布、及び速度変動分布の比較を示す。 C_D 値は1%以内の精度で予測できており、速度分布に関してもほぼ一致していると言え、流れ場を精度良く解析できていることが確認できる。

4.2 C_D 変動と流れ場 (車両後方渦) の関係

流れ場を時系列で解析するため、平均流れ場ではなく、図5に示すように、 C_D 値での閾値を決め、流れ場を4つの段階に分類し解析を行った。図6に4段階ごとに処理した車両後方流れ場の総圧等値面 (総圧 $C_{pt} = -0.15$) 及び流線を示す。車両後方に、総圧の低くなった部分がリング状に発生しているのが確認できる。この渦輪が大きく、かつ車両近くに形成されているときに C_D が高く、渦輪が後方に移動しながら拡散していくと C_D が低くなることが確認できる。以上から、空気力 (C_D) 変動と車両後方渦の形成～発達～崩壊



図2 検討モデル

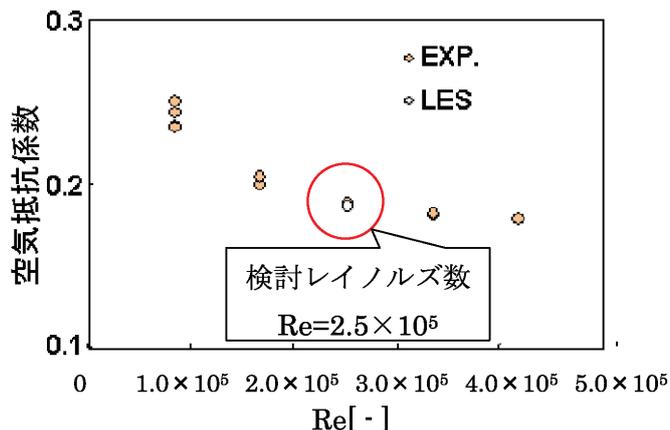


図3 Re 数ごとの空気抵抗係数

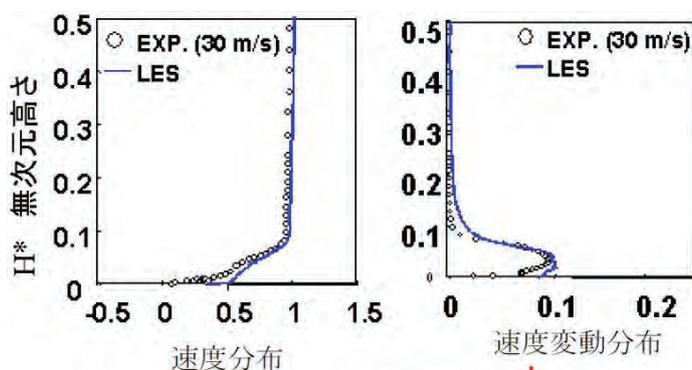


図4 トランク後端速度分布および速度変動分布

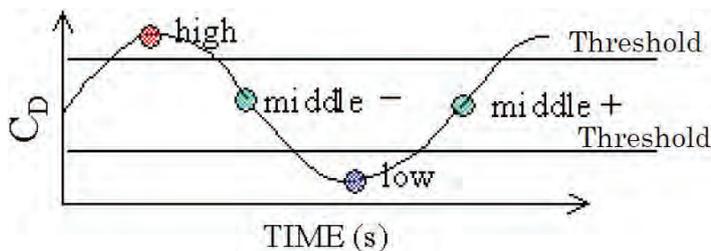


図5 流れ場の分類方法

には相関があり、 C_D 変動は 8%、変動周波数は実車 100km/h 相当で 7.5Hz であることが確認できた (図 7)。さらに、図 8 に静圧分布の変化を 4 段階に分けて示す。この結果からも、① 境界層の剥離渦が車両後方に放出、② 剥離渦が徐々に溜まっていく、③ 大きな渦輪を形成し、④ 渦輪が拡散しながら後方へ移動する、という渦の形成～発達～崩壊の周期を繰り返していることが確認できる。

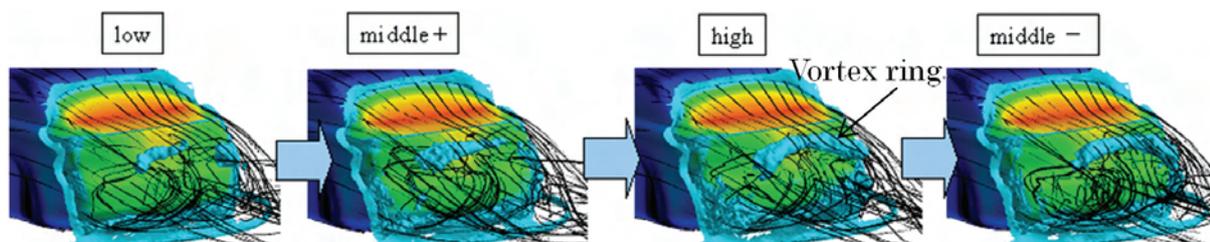


図 6 車両後方の総圧等値面及び流線

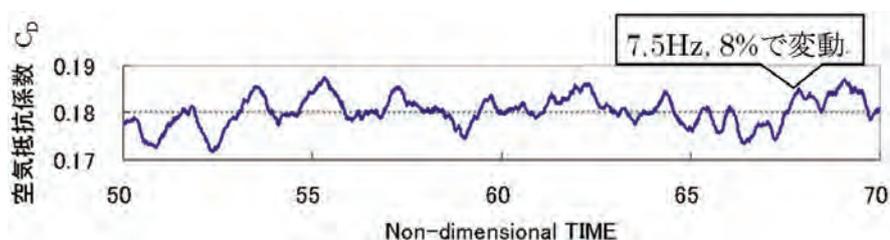


図 7 空気抵抗の時間履歴

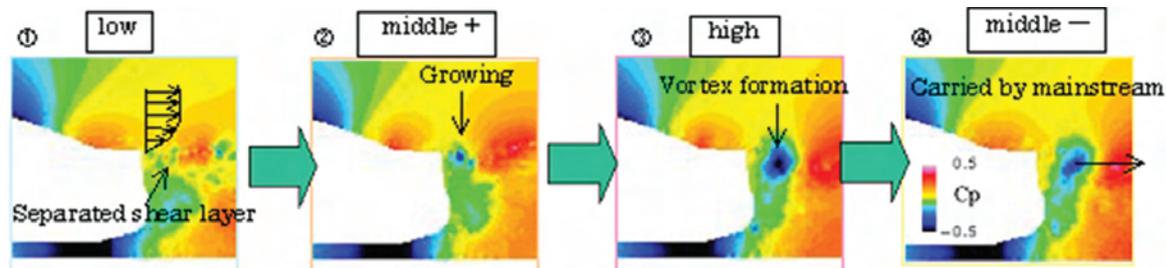


図 8 車両後方の静圧分布 (C_p)

5. まとめ・考察

前節で示した渦輪の成長過程の解析結果より、空気抵抗変動を抑制する方法として、(1) 剥離放出渦を小さくする (境界層を薄くする)、(2) 剥離放出渦の放出周期を小さくする (渦輪の形成を遅らせる)、(3) 渦輪の崩壊、(4) 渦輪の背面からの遠方化、が考えられる。これらにより、変動が縮小し低空気抵抗状態を維持することができると期待される。

6. 今後の方針および計画

平成 21 年度は、前節の (1) ~ (4) の考え方を検証するため、その考え方にに基づき制御形状を考案し数値計算により流れ場解析を実施する。また、今年度明らかにした渦輪と空気抵抗の関係が実際の自動車でも確認できるかを検討するため、① 検討 Re 数を実車 100km/h 相当に近づけ、Re 数効果、② タイヤ付きモデルを用い、タイヤが流れ場に及ぼす影響、③ 車型違い (セダン形状・箱型形状)

による流れ場構造の変化、を並行して実施する。得られた結果は、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.