# 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<sup>\*1</sup>、前田 和宏<sup>\*1</sup>、炭谷 圭二<sup>\*1</sup>、加藤 千幸<sup>\*2</sup>、山出 吉伸<sup>\*2</sup>、鈴木 康方<sup>\*2</sup>、 廣川 雄一<sup>\*3</sup>、上原 均<sup>\*3</sup>

- \*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

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 21 年 4 月 1 日 ~ 平成 22 年 3 月 31 日

# アブストラクト

通常、自動車の空気抵抗低減は、時間平均値で議論されているが、実際の自動車周りの流れは、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、自動車の空気抵抗の変動に着目し、その抵抗の低い状態を維持、 または変動を小さくすることで時間平均値を低減させることを目的とした。今年度は、より実際の自 動車に近いタイヤを有する流れ場を対象に、地球シミュレータを用い、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、(1)実際の車両 に近い形状でも、簡素化モデルと同様に車両後方に渦輪が形成され、空気抵抗の変動を起こすこと、(2) タイヤが発生する渦変動が追加されるため、フロントとリアタイヤ周りおよび車両の後流が干渉し空 気抵抗の変動をさらに起こすことが確認でき、それらが時間平均値を悪化させていることが推察され た。また、低空気抵抗状態を維持するための制御方法として、(1)トランク上面後端の幅方向の境界 層速度分布の均一性を無くすことで、渦輪の車両背面からの遠方化、(2)フロントとリアタイヤ周り の流れの干渉抑制が有効であることを明らかにできた。

キーワード: 自動車、空力、非定常流れ、LES、空気抵抗、タイヤ

# 1. はじめに

近年の環境問題に対応する CO<sub>2</sub> 排出量低減のため、自動車の走行抵抗の1つである空気抵抗の低減 は重要な課題である。従来、経験や実験に基づく形状要因からの改善はかなり詳しく進められて来てお 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手法の開発が求められている。

通常、空気抵抗の解析は時間平均値で議論されているが、自動車周りの実際の流れは、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が5~ 10%の幅で時間的に変化している。その点に着目し、非定常な流れ現象、および渦構造を解明するこ とで、空気抵抗低減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・検討内容

自動車の空気抵抗は、図1に示すように時間的に変動している。その流れ変動の中で、空気抵抗が 低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のではないかと考え、その時の流れ 場解析より、新たな空気抵抗低減の指針を得ることを目的とした。そのために、時間的に変化してい る車両後流、および車両周りの境界層内の流れ構造の変動を解明し、低空気抵抗状態の維持、または

変動を抑える要件を明らかにする取り 組みを実施している。昨年度までは、 基本的な流れ構造を解明するため、タ イヤ等の無い簡素化した車両モデルを 対象に検討を行った。今年度は、よ り実際に近いタイヤを有する車両モデ ルを対象に地球シミュレータを用い、 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、および検証実験を行った。



図1 自動車の空気抵抗時間履歴(H20年度検討結果)

# 3. 流れ場の検討手法

# 3.1 流れ場の解析手法

数値計算においては、車両周りの最小変動スケールである境界層内の縦渦までを解像することを目 標とし、その渦を近似することなく解くことが可能な LES 解析手法を採用し、東京大学生産技術研究 所で開発された FrontFlow/blue ver.5.3 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用い、圧力方程式の解法には、Fractional Step 法を用い、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は、ダイナミック・スマゴリンスキー・モデル (DSM) を 用いた。車両周りに形成される縦渦を極力解像するために 5,000 万点の計算格子を作成し、1 つの計算 に対して、地球シミュレータにて 14 (ノード) × 70 (時間) = 980 (ノード時間積) 程度利用し、計 算を実施した。

実験においては、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。

# 3.2 検討モデル

今年度の検討対象モデルは、より実際の自動車に近い流れ場で検討するために、図2に示すように、 昨年度の1/15スケール簡素化セダンモデルから、1/4スケールに大きくし、さらに流れ場への影響が 大きいタイヤを取り付けた。今回の計算格子点数は、流れ場の再現性および計算コスト・計算時間を 考慮して5,000万点とした。この格子点数では境界層内の縦渦を十分には解像できていないことになる が、基本的な流れ構造としては再現できることを確認し、実験条件と同じレイノルズ数Re=4.5×10<sup>5</sup>(1/4 スケール、実験風速 30m/s 相当、代表長さ:トランク高さ)で計算を行った。



### 図2 検討モデル

#### 4. 流れ場の解析

# 4.1 計算精度の検証

表1に、空気抵抗係数 $C_D(以降、単に C_D と称す)の平均値 (AVE)$ と変動値( $\sigma$ )について実験結果との比較を示す。図3に、後流 の挙動に大きく関係する車両後方の速度分布、及び速度変動分布 の比較を示す。 $C_D$ は5%以内の精度で予測できており、速度分布 に関してもある程度一致していると言える。但し、速度変動分布 に関しては過大評価しており、境界層内の縦渦を完全には解像で きていないことが原因と考えられる。

#### 表1 空気抵抗係数C<sub>D</sub>比較

	CD			
	AVE	σ		
計算結果	0.227	0.003		
実験結果	0.238			



#### 図3 トランク前縁の速度分布と速度変動分布

#### 4.2 C<sub>D</sub>変動と流れ場(車両後方渦輪およびタイヤ乱れ)の関係

タイヤ有無での計算結果を、表2に $C_D$ の平均値・変動値、図4に $C_D$ の時間履歴で示す。 $C_D$ 変動を 時系列で見てみると、タイヤ有無共に、車両スケールに依存する周期的変動(無次元周波数 St=0.25) が存在していることがわかる。そして、タイヤ有は、タイヤ無に比べてタイヤがあることで空気抵抗 が高く、また高周波の変動が多いことが確認できる。周期的な流れ場変動を解析するため、図5に示 すように、 $C_D$ のしきい値を決め、流れ場を4つの段階(High, Middle – , Low, Middle +) に分類し 解析を行った。図6に、 $C_D$ が高い状態(High)の車両後方流れ場の総圧等値面(総圧 Cpt= – 0.15) 及び流線を、タイヤ有無の比較で示す。図7に、4段階に分類した車両後方の静圧分布をタイヤ有無 の比較で示す。タイヤ有の場合でも、無の場合と同様に、車両後方に総圧の低くなった部分がリング 状に発生しており、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

表2 タイヤ有無の C<sub>D</sub>

	車両全体 C <sub>D</sub>		
	AVE	σ	
タイヤ無	0.181	0.0041	
タイヤ有	0.227	0.0034	









図6 車両後方の総圧等値面及び流線



移動して拡散すると Cp が低くなることが、確認できる。渦輪の強さとしては、Cp が高い状態(High)で比 較するとタイヤ有の方が低圧部が弱くなっている。これは、車両後方の渦輪がタイヤの乱れによって形成し にくくなったことが原因と考えられる。そのため、表2に示す Cpの変動値も小さくなっていると考え られる。空気力の変動周波数を解析するため、空気力の3分力係数(C<sub>D</sub>、揚力係数C<sub>L</sub>、横力係数C<sub>s</sub>) パワースペクトルをタイヤ有無の比較で示す(図8)。タイヤ無の場合は、ストローハル数 St = 0.25 (St=f・D/U,ここでf:周波数(Hz),D:トランク高さ(m),U:流速(m/s)、実車100km/h相当 で 7.5Hz)でスペクトルピークが確認でき、その周波数は車両後方の渦輪の形成~発達~崩壊の周期 と同じであり、渦輪と空気力(C<sub>D</sub>、C<sub>1</sub>)変動に相関があることが確認できる。一方、タイヤ有の場合 は、車両後方の渦輪によるストローハル数 St = 0.25 のスペクトルピークが確認できるとともに、高 周波側にもストローハル数 St=0.5、0.6 のスペクトルピークが確認できる。そのスペクトルピークは、 タイヤの乱れによる発生渦が表われたものと考えられる。図9に、車両後方空間場の圧力係数パワー スペクトルを示す。Point1 では、渦輪の周期と同じストローハル数 St=0.25 のスペクトルピークが確 認できる。Point3 では、タイヤをつけたことで表れるストローハル数 St=0.6 のスペクトルピークが確 認できる。Point2 では、渦輪およびタイヤ乱れによるストローハル数 St=0.25、0.6 のスペクトルピー クが確認でき、車両後流にもタイヤ乱れの影響が表われたと考えられる。以上より、タイヤ有の場合は、 車両後方の渦輪の制御に加え、タイヤによる乱れを制御することでも、空気抵抗変動を抑制し低空気 抵抗状態を維持できると考えられる。





図9 圧力係数パワースペクトル (タイヤ有)

## 5. 流れ場の制御検討

# 5.1 車両後方渦輪の制御

渦輪の C<sub>D</sub>への影響を小さくする方法としては、①渦輪を小さく(弱く)、②渦輪の背面からの遠方 化、③渦輪の分断が考えられる。②の観点において、車両後方の渦輪の形状に着目すると、図 10 に示 すように、空気抵抗が高い時の渦輪の幅方向での形成位置は、中央ほど車両近くに形成されているこ とが確認できる。このとき、トランク上面後端の W=0, 0.2 (W:車両横幅に対する中央からの距離割合) での境界層速度分布は大きく差があり、中央ほど境界層の速度欠損が大きい。このことから、境界層 速度分布によって渦輪の形成位置が変化することが推察される。そこで、トランク上面の境界層速度 分布に着目し、中央の境界層の速度欠損を小さくすることで渦輪の形成位置を遠くへ変化させること ができるのではないかと考えた。図 11 に示すルーフからバックウィンドにかけて凹にした形状(制御 形状 A)を用いて、境界層速度分布を

変化させる検討を行った。

その結果、狙い通りトランク上面後端 の境界層速度分布は、基準形状に比べて 中央部が増速し、かつ幅方向に均一化し ていることが確認できる(図 12)。しか し、表3に示すように車両全体で $\Delta C_D$ =+0.003と空気抵抗が悪化、車両背面 で空気抵抗が増加する結果となった。



図 10 車両後方の渦構造および境界層速度分布

····· W=0 基準形状

W=0.2 基準形状 W=0 制御形状A

W=0.2 制御形状A

0.5

70

60

10 0 0

50 40 ل





図12 トランク後端の境界層速度分布(制御形状A)

u/U0 速度分布 1

1.5

 Cp
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05
 0.05

図13 車両後方の静圧分布 (Cp)

表3 車両全体  $C_D$  および部位別  $\Delta C_D$ 

	車両全体 C <sub>D</sub>		部位別ΔC <sub>D</sub>		
	AVE	σ	車両上面	車両背面	
基準形状	0.227	0.0034	—	—	
制御形状 A	0.230	0.0038	-0.002	+0.004	

渦輪の形成位置は、狙いとは逆に、基準形状に比べて車両背面近くに形成されるようになっており(図 13)、背面抵抗が増加、C<sub>D</sub>変動も大きくなっていることと一致する。境界層速度分布の幅方向の均一 化で渦形成位置が揃うことで、形成位置が車両背面近くになってしまったと考えられる。このことから、 逆説的ではあるが、境界層速度分布を幅方向に不均一に制御することで、変動を小さくし、渦輪の形 成位置を車両背面から遠くに形成させることができると推察される。それにより、低空気抵抗状態を 維持することができると期待できる。

# 5.2 タイヤ乱れの制御

タイヤをつけたことで発生した周期的な乱れを解析するため、車両床下流れ場の総圧の等値面の時 間変化を示す(図14)。フロントタイヤで発生した乱れが、リアタイヤ周りの流れと干渉することで、 大きな剥離が発生。さらに、その剥離が車両後方の剥離を拡大している現象が確認できる。このこと

から、フロントタイヤの乱れをリアタイヤ に干渉させない、当てないことで、リアタ イヤの剥離が抑制され、低空気抵抗状態を 維持できるのではないかと考えられる。図 15 に示すように、フロントタイヤ後方に フィンを設置した(制御形状 B)結果、表 4 に示すように車両全体で $\Delta C_D = -0.003$ と空気抵抗が減少、リアタイヤで $C_D$ が減 少、さらに車両背面でも $C_D$ が減少してい ることが確認できる。



図14 車両床下のタイヤ乱れの時間変化



表 4 車両全体	$C_{\rm D}$	およ	、び部	6位别	Δ	$C_{D}$
----------	-------------	----	-----	-----	---	---------

	車両全体 C <sub>D</sub>		部位別ΔC <sub>D</sub>			
	AVE	σ	フィン単体	リアタイヤ	車両背面	
基準形状	0.227	0.0034	—	_	_	
制御形状 B	0.224	0.0032	+0.001	-0.002	-0.002	



また、表4、および図16のC<sub>D</sub>の時間履歴の比較から、空気抵抗の変動も小さく、低い状態を維持で きており、図17の車両床下の静圧変動でも、リアタイヤ内側で剥離による変動が小さくなっている。 これらの結果から、フロントとリアのタイヤ周りの流れ干渉を抑制することで、変動を抑制し、低空 気抵抗状態を維持できることが確認できる。

### 6. まとめ・考察

自動車の空気抵抗の変動に着目し、その抵抗の低い状態を維持、または変動を小さくすることで時 間平均値を低減させる検討を、地球シミュレータを用いた LES による非定常乱流の大規模数値シミュ レーションにて実施した。今年度は、タイヤ有の 1/4 スケールセダン形状での検討を行い、下記を確 認した。

- (1) タイヤ有のモデルでも、車両後方に渦輪が形成され、空気抵抗の変動を起こしている。
- (2)トランク上面後端の境界層速度分布を制御することで、渦輪の形成位置を変化可能であり、幅 方向の境界層速度分布の均一性を無くすことで、渦輪を車両背面から遠方に形成できる可能性 を見出した。
- (3) タイヤ有のモデルでは、タイヤが発生する渦変動が追加されるため、フロントとリアタイヤ周 りおよび車両の後流が干渉し、空気抵抗の変動をさらに起こしている。
- (4) フロントとリアタイヤ周りの流れの干渉を抑制することで、車両後方の渦輪の変動を抑え、空気抵抗を減少させることができる。

#### 謝 辞

本研究に関して、独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター シミュレーション 応用研究グループ 新宮 哲氏にご指導、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

- 杉田祐輔、炭谷圭二、窪田達也、加藤千幸、山出吉伸、上原均、廣川雄一、"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(平成19年度分)"「平成20年度地球シミュレータ 産業利用プログラム」利用成果報告書,2008
- 2) 杉田祐輔、炭谷圭二、前田和宏、加藤千幸、山出吉伸、上原均、廣川雄一、"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(平成 20 年度分)"「平成 20 年度地球シミュレータ 産業利用プログラム」利用成果報告書,2009
- Kato, C., Ikegawa, M., "Large Eddy Simulation of Unsteady Turbulent Wake of Circular Cylinder Using the Finite Element Method", ASME-FED., 117, pp.49-56, 1991