車体まわり非定常流れの制御による空気抵抗低減技術の開発

プロジェクト責任者

加藤 千幸 国立大学法人東京大学 生産技術研究所

著者

加藤 千幸*1、鈴木 康方*2、前田 和宏*3、槇原 孝文*3、北村 任宏*3、高山 務*4、

- 廣川 雄一*5、西川 憲明*5
- *1 国立大学法人東京大学 生産技術研究所
- *2 日本大学理工学部機械工学科
- *3 トヨタ自動車株式会社
- *4 みずほ情報総研株式会社
- *5 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 24 年 4 月 1 日~平成 25 年 3 月 31 日

アブストラクト

車体周りの流れの非定常特性に着目した空気抵抗低減手法の開発を目標とし、ベース形状および制 御形状(2種類)に対して、形状の変化が流れ場に影響するメカニズムについて検討を行うことを目的 とした7千万点規模の解析を行った。実験ではいずれのケースでも空気抵抗の低減が見られたのに対 し、解析では1ケースのみで空気抵抗が低減した。実験で確認された空気抵抗低減の詳細なメカニズ ムについては精細化メッシュを用いた解析を待つ必要があるが、車体後方及び底部における流れに差 異が生じていることが確認でき、今後の研究において着目すべき流れの特徴を絞り込むことができた。

キーワード:大規模シミュレーション、環境負荷低減、車体空力抵抗

1. 目的

自動車の CO2 排出量低減や省エネルギー性のさらなる改善を進める上で、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が求められている。例えば、 車体周りの平均的な流れ場に着目し、車体の全体的な形状を調整することで空気抵抗を低減する手法 は、概ね頭打ちとなってきており、従来手法とは異なる手法の模索が必要とされている。また、車体 形状によっては極めて空気抵抗が増大する場合があることが知られており、デザインや居住性などに 対する制約となっているため、形状を大きく変えることなく空気抵抗を低減させる手法を探索するこ とも重要な課題となっている。

こうした問題に対し、東京大学生産技術研究所とトヨタ自動車株式会社では、非定常な流れ場の物

理的特性を理解し、非定常特性に着目した制御手法を開発することを目標とした共同研究を行ってき た。現状の空気抵抗の解析は時間平均された流れを対象としているが、実現象は大小さまざまなスケー ルの渦が時間と共に、発生~成長~離脱~消滅のサイクルを繰り返し、それにより空気抵抗も時間的 に変化しているため、非定常な現象に基づいた空力制御手法が求められている(実車など実用的な形 状に応用した例は少ないが、基礎的な研究例としては[1]を参照)。このような制御手法は現時点では 確立されておらず、有効な手法が得られれば画期的な成果となることが期待される。

本研究の目的は、空力抵抗悪化への制御形状の基礎検討として、実験と解析を実施し制御形状の効 果を検証すると共に、流れ場に影響するメカニズムについて検討することである。本年度は7千万 要素規模のメッシュを用いて制御形状の効果を検証すると共に、流れ場に影響するメカニズムについ て検討を行うことを目的として解析を行った。本研究においては日本大学所有の風洞を用いた実験も 行っており、両者の結果を比較することで精度に関しても検証を行った。

2. 解析対象形状と手法

解析対象とした車体形状を図1に示す。このうち、図1にベース悪化形状と示した形状(以下、形状A)は東大ートヨタ間の共同研究において空気抵抗の悪化が確認された形状である。本研究では形状Aに対して、車体後方の流れを制御するための制御形状を2種類用意し、これに対し7千万要素規模のメッシュを用いてES2上で流れ解析を実施した。以下、制御形状2形状を形状B、形状Cと称す。







図1 空気抵抗悪化形状 (ベース形状) 左:空気抵抗悪化形状 (形状 A)の全体図 右:ベースとなる実車形状と悪化形状の比較

東大ートヨタ間の共同研究によって、形状Aでは、図2に示すような渦構造が形成されていること が確認されており、このような渦構造が生じた場合にバックウィンドウにおける圧力の著しい低下が 生じて空気抵抗の悪化につながっているものと考えられる。この渦構造の特徴として、

- ・バックウィンドウ上端において流れが大規模な剥離を起こさず、低圧の流体がバックウィンドウ
 に沿う形で流れている
- ・C ピラー部分において流れが付着しており、これによってバックウィンドウ下端中央付近へ集中 する流れが生じている
- ・バックウィンドウ下端へと向かった流れは バックウィンドウ下方、バンパー上方の領域 で左右2箇所に渦を形成し、特徴的な2本の 縦渦が形成される。
- といった点が挙げられる。制御形状では、このよ



図2 ベース形状に特徴的な車体後方の渦構造

うな特徴を持つ流れを弱める(あるいは、実現を回避する)ことを目的としている。

本解析では、乱流現象を高精度に予測することができる LES をベースとした有限要素法流れ解析 ソフトウェアである FFB ver.5.3 のソルバ les3c を用いた。解析において使用した各種設定条件を表 1にまとめる。

項目	内容			
乱流モデル	Dynamic Smagorinsky モデル			
運動方程式解法	Crank-Nicolson 法			
連続の式解法	Fractional Step 法			
レイノルズ数	$2.5 imes10^5$			
時間刻み	1.0-3 (無次元)			
境界条件	入口:流速一定(1.0 に規格化)			
	出口:圧力0、トラクションフリー			
	床面:速度0(滑り無し)			
	壁面および天井:速度一定(入口と同じ速度)			
計算資源	ES2 16 ノード			
メッシュ規模	約7千万要素			

表1 FFB ver.5.3 のソルバ les3c において使用した計算条件

3. 主要な解析結果

解析の結果得られた流体力係数を表 2 に示す。ここでは、日本大学所有の風洞を用いて行った実験 の結果も合わせて示している。実験の結果では形状 B、形状 C の両方のケースにおいて抵抗係数 Cd を低減する対策形状の効果が確認できているが、解析結果では形状 C のみで効果が得られ、形状 B では空気抵抗が悪化する結果となった。一方、揚力係数 Cl については、いずれの場合も明確に減少 しており、車体後方上部における低圧部分が軽減されていることを示唆している。この傾向は、図3 に示した背面圧力分布(平均場)からも確認できる。加えて、車体背面下部における圧力の差異が抵 抗係数の大小に相関しており、この部位の圧力が空気抵抗に大きく影響していることも示唆される。 現在の粗いメッシュでは車体底部に発達する境界層を完全に解像することはできておらず、底部の流 れの影響を見るためにはより詳細な解析結果を待たなければならない。

	表 2	各形状に対する流体力係数			
ケース	<i>Cd</i> (解析)	<i>Cd</i> (風洞)	Cl (解析)	<i>Cl</i> (風洞)	
形状 A	0.271	0.344	0.542	0.537	
形状 B	0.280	0.331	0.498	0.523	
形状 C	0.252	0.313	0.517	0.466	

表 2	各形状に	対する	流体ナ	係数
1 4			17141442~	ノレトタス



左:形状A 中央:形状B 右:形状C



左:車体中央面 右:車体側面 (バックウィンドウ中央高さ)

一方、図4に示した車体上面及び側面の静圧プ ロファイルは、いずれも車体後方に至るまでの区間 で同様の傾向を示しており、空気抵抗の変化をもた らした流れ場の構造の差異は車体背面からそれ以降 において生じていることを示唆している。一方、図 5に示すように車体底部の流速分布を確認したとこ ろ、明確な差異が認められており、車体底部の流れ の影響が重要であることが確認できる。

車体後方渦構造については、図 6 に示した総圧等 値面図、及び図 7 に示した y=80[mm] 断面における



図5 車体底部後端付近の流速プロファイル

静圧分布図(平均場)から確認できる。空気抵抗低減効果が確認できた形状Cにおいては、特徴的な 渦構造が弱まっている。このような傾向を示した原因としては、図8に示した y=80[mm] 断面におけ る静圧分布図(瞬時場)に見られる渦構造の差異があげられる。図7及び図8では、制御形状の方がバッ クウィンドウ下部に沿って流れる渦構造が強く、剥離が遅れている傾向が確認できる。従って、この ような非定常な構造が後方の渦構造に対して影響を及ぼしていることが示唆される。今回行った検証 解析では非定常特性を見るうえで十分なサンプル数を確保できておらず、また境界層を十分に解像で きるだけの解像度を持つメッシュを使用していないため、こうした非定常構造に対する議論はより長 期間の計算や詳細なメッシュによる解析を待たなければならないが、このように非定常構造が決定す る渦構造が空気抵抗に影響を与えている様子が示唆され、今後の研究において着目すべき点を絞り込 むことができたことは本研究項目の重要な成果である。



図 6 総圧等値面による後方渦構造の可視化 左:形状 A 中央:形状 B 右:形状 C



図 8 y=80 [mm] 断面における静圧分布(瞬時場) 左:形状 A 中央:形状 B 右:形状 C

4. まとめと今後の展望

本研究項目では、車体の空気抵抗低減を目指す一連の研究の一環として、空気抵抗悪化に対する対 策として考案された2種類の制御形状(形状 B、形状 C)に対し、その効果を検証すると共に、流れ 場に影響するメカニズムについて検討を行うことを目的として解析を行った。また、同じ形状に対し て日本大学所有の風洞による模型試験も行っており、両者の結果を比較した。

解析の結果、計算から得られた流体力係数においては、形状 C においては空気抵抗の低減が見られ たものの、形状 B においては空気抵抗が悪化し、対策形状の影響を明確な形で確認することはできな かった。これは、車体底部の流れを十分に解像できていないこと、及びメッシュが粗く車体背面にお ける剥離状況を完全には解像できていないことに起因するものと考えられる。

一方で、車体背面下部の圧力と空気抵抗には相関が見られ、車体底部の流れや車体バックウィンド ウに沿う流れの剥離状況、車体後方渦構造などに制御形状による差異が生じ、空気抵抗に影響したと 見られる箇所が確認できたことは、今後の研究に向けた重要な成果である。今後の研究では、今回の 研究項目で確認された点に注目し、非定常な流れ場の構造を理解するための詳細な解析を実施してい く予定である。

参考文献

小里泰章、菊池聡、今尾茂樹、山田泰史、"剥離せん断層が励起された柱状物体周りの流れ(物体が三角柱の場合)"、機械学会論文集(B編)、77巻775号、論文 No.10-0627、pp.628-636