

簡易車体周りの流れ構造が空力性能に及ぼす影響に関する数値解析的研究

Numerical Study of the Effect of flow structures around a simplified car body on aerodynamic performance

- 山口 幹太, 九大院, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744, E-mail: kanta-y@aero.kyushu-u.ac.jp
木原 尚, 九大工, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744, E-mail: kihara@aero.kyushu-u.ac.jp
安倍 賢一, 九大工, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744, E-mail: abe@aero.kyushu-u.ac.jp
Kanta Yamaguchi, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan
Hisashi Kihara, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan
Ken-ichi Abe, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

In recent years, due to the improvement of the thermal efficiency of internal combustion engines and the spread of EV/FCV, the percentage of air resistance in energy consumption becomes larger and larger. Therefore, it is necessary to reduce air resistance in order to cut back CO₂ emission. Because the pressure resistance, accounts for many percentages in air resistance, depends mainly on the difference between the front and back pressure on a car body surface, controlling the wake behind a car body contributes to the reduction of the pressure resistance. To control the wake, various types of aero parts are adopted not only on a sport car but also on a passenger car. In this study, we performed fluid-flow analysis about unsteady vortex structures generated around a simplified car body with several shapes of rear-spoiler, and investigated the effect of flow structures on aerodynamic performance.

1. 緒言

自動車に関する技術発展に伴う内燃機関の熱効率向上および電気・水素自動車の普及により、エネルギー効率が飛躍的に上昇することが予測されている。そのため、走行抵抗がエネルギー消費に占める割合が大きくなると考えられ、自動車の走行抵抗を低減することは今後の自動車開発、そしてCO₂排出量削減への取り組みにおいて重要な課題である。

走行時に生じる全抵抗の主な要素の中に空気抵抗がある。60 km/h で定常走行する自動車の場合、空気抵抗が走行抵抗に占める割合は半分程度だが、空気抵抗は速度の 2 乗に比例するため、高速走行時の空気抵抗は走行抵抗の大部分を占め^[1]、100 km/h の場合は約 8 割にもなる。今後、高速道路等の普及拡大や性能向上による自動車の高速化が進んでいくため、空気抵抗の低減は自動車のエネルギー効率向上に今まで以上に寄与することが期待される。

空気抵抗は圧力抵抗と摩擦抵抗に分類され、そのうち圧力抵抗は全空気抵抗の約 9 割を占める^[2]。圧力抵抗は車体前後の圧力差に依存しているため、車体後流の制御が可能となれば大幅な圧力抵抗の低減が望める。しかし、車体後流は縦渦の発生に伴う非定常性および三次元性により複雑な流れ場が形成されており、詳細な物理現象の解明は未だ成されていない。

各自動車メーカーは燃費向上のため高い空力性能を持つ車体形状の開発に取り組んでおり、乗用車にも車体後流の制御を目的としたエアロパーツが多く採用されている。エアロパーツとは主に車体のボディ外部に取り付けられ、車体の揚力・抵抗を低減することにより走行安定性や操縦性、燃費向上を目的としたパーツの総称である。

本研究では、その中でもリアスポイラーに焦点を当てて流体解析を行う。車体のルーフ部を過ぎた流れは剥離し圧力が低下する。剥離した流れは、抵抗の原因となる縦渦を発生させるとともに、下向きに流れるためその反力により揚力を発生させる。リアスポイラーは車体上面の後端に突起物として取り付けられ、ルーフ部を過ぎる流れが車体後方に回り込むことを防ぐことで揚力を低減することを目的としたエアロパーツである。また、車体からの滑らかな剥離を

促すことで車体後方表面の圧力低下を抑制し、圧力抵抗の低減をもたらす。

本研究は、リアスポイラーが流れ場に及ぼす影響を解明することで、車体後流に関する新たな知見を得ることを目的としている。また、リアスポイラーの有無および形状変化に伴う流れ場の変化が空力性能に及ぼす影響を解明する。

2. 計算手法

2.1 支配方程式

本研究では、支配方程式として以下に示す非圧縮性ナビエ・ストークス(NS)方程式、また乱流モデルとして Abe^[3]により提案された LES/RANS ハイブリッドモデルを用いて計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right\} \quad (2)$$

LES/RANS ハイブリッドモデルとは、LES の計算コストを軽減するために、特に計算格子が集中する壁面近傍を乱流の平均量を求める RANS に置き換え、壁面から離れた領域で LES と接続する手法である。上式中の \bar{u}_i 、 \bar{p} は、それぞれ i 方向速度、圧力であり、LES ではフィルター化された値、RANS ではレイノルズ平均された値を表す。また τ_{ij} は LES においては SGS 応力を表し、RANS ではレイノルズ応力となる。

本研究で用いたモデルでは、LES 領域に Abe^[4]の非等方性 SGS モデルが適用されており、一方で RANS 領域では 1 方程式非線形渦粘性モデルが適用されている。モデルの詳細については Abe^[3]を参照されたい。

本研究における数値解析には、非構造格子用 CFD ソフト "FrontFlow/red"^[5]を用いた。このプログラムは節点中心の有限体積法に基づいている。本計算では、NS 式の時間積分法として Crank-Nicolson 法を用い、対流項の離散スキームには非構造格子に起因する計算の不安定要素を除去するために 2 次精度中心差分法に一定量の 1 次精度風上差分を加えたブレンディングスキームを用いた。それぞれの割合は 2 次

精度中心差分法を 95%，1 次精度風上差分法を 5% とした。なお，本モデルで解くことが必要となる LES および RANS の乱流エネルギーの輸送方程式については，時間方向にはオイラー陰解法を，また対流項には 2 次精度風上差分法を，それぞれ用いた。

2.2 解析対象

本研究では，車体後流の流れ場を解析するために考案され，自動車に関する流体解析に広く用いられている簡易車体形状 Ahmed body^[6]を解析のベースモデルとした。Ahmed body の概略図と計算領域の境界条件をそれぞれ Fig.1, Fig.2 に示す。初めにリアスポイラーの有無に伴う流れ場の変化を調べるため，ベース形状とリアスポイラー装着時の形状について流れ場を比較した。リアスポイラー装着位置と形状を Fig.3 に示す。なお，レイノルズ数は Ahmed body の車体全長 L を代表長，主流速度 1 を代表速度として $Re = 1.0 \times 10^5$ に設定した。

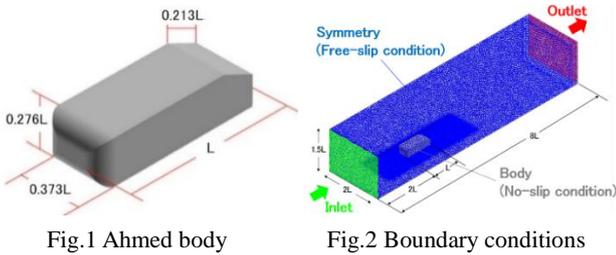


Fig.1 Ahmed body

Fig.2 Boundary conditions

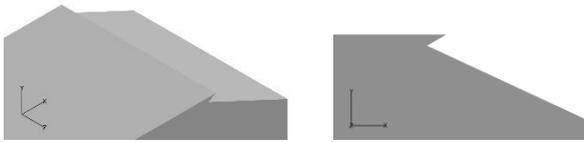


Fig.3 Rear-spoiler

次にリアスポイラーの形状変化に伴う流れ場の変化を調べるため，鋸状のリアスポイラー(以下 Notched rear-spoiler とする)を取り付けて流れ場を比較した。その形状を Fig.4 に示す。さらに Fig.5 に示すように，切れ込み角度を θ とし， 30° から 90° まで変化させ，各ケースを比較した。ここで $\theta = 90^\circ$ は，Fig.3 の切れ込み無しリアスポイラーの形状を表している。なお，Fig.3 のリアスポイラーの後端を基準線とし切れ込みの深さを変えることで， θ を調整している。これにより， θ に応じて解析対象の表面積が変化するが，その変化量は対象全体の表面積に比べて十分小さいことから，抵抗値の算出に影響を与えないと考えられる。

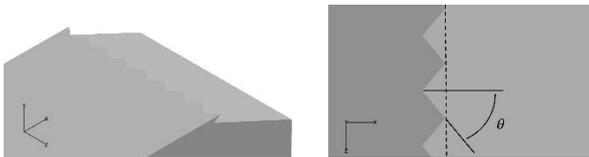


Fig.4 Notched rear-spoiler

Fig.5 Notch angle θ

抵抗係数 C_D および揚力係数 C_L の算出方法を以下に示す。ここで， D は抗力， L は揚力， ρ は流体密度， U は流速， S_x は x 方向投影断面積， S_y は y 方向投影断面積を表す。

$$C_D = \frac{D}{\rho U^2 S_x / 2} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{L}{\rho U^2 S_y / 2} \quad (4)$$

また，車体後流の渦構造を可視化するために速度勾配テンソルの第二不変量 Q を用いた。第二不変量の定義を以下に示す。ここで， Ω_{ij} は渦度テンソル， S_{ij} はせん断歪み速度テンソルを表す。

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij})$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

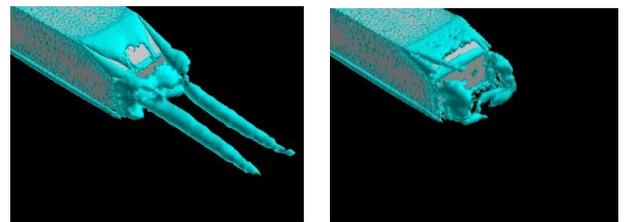
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

3. 結果と考察

3.1 リアスポイラーの有無

まず，リアスポイラーの有無に関して調べるため，リアスポイラーを装着していない (a) Base shape と装着した (b) Rear-spoiler を比較する。Fig.6 に速度勾配テンソル $Q = 10$ の等値面，Fig.7 に斜面付近の中央断面の流れ場，Fig.8 に斜面および C_p 分布，Table 1 に C_D および C_L を示す。

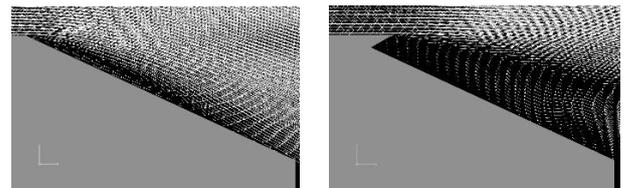
Fig.6 の渦構造からリアスポイラーを取り付けることにより，車体後方まで延びていた後引き渦が消滅していることが分かる。これは，リアスポイラーにより車体側面を通る流れが，斜面の内側へと巻き込む流れが弱くなったことが原因であると考えられる。(a) Base shape では斜面内側へと強く巻き込まれ，それと車体上面からの剥離流れが干渉することで縦渦が発生している。一方，(b) Rear-spoiler では，斜面で内側へと巻き込まれる流れが弱まっており，それにより後引き渦が発生しなかったと考えられる。また Fig.7 より，(a) Base shape では車体上面を流れる流れが後端で剥離し斜面に再付着していたが，リアスポイラーを取り付けることで剥離領域が拡大し，斜面で再付着していないことがわかる。これはリアスポイラーの目的のひとつである，後端からの滑らかな剥離が実現できていることを示している。これにより Fig.8 からも分かるように，(a) Base shape における後端で剥離する箇所での圧力低下を抑制し，斜面全体における圧力が上昇している。その結果， C_D が 5% ほど低下し， C_L の値も減少していることから走行安定性に寄与していることが確認できた。



(a) Base shape

(b) Rear-spoiler

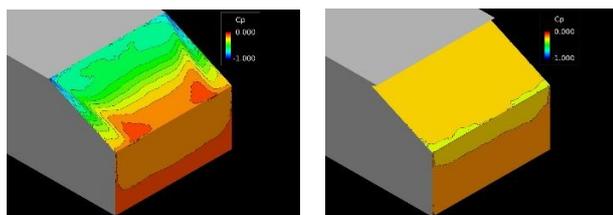
Fig.6 Isosurface of $Q = 10$



(a) Base shape

(b) Rear-spoiler

Fig.7 Flow field around slant surface



(a) Base shape (b) Rear-spoiler

Fig.8 Distribution of C_p

Table 1 C_D and C_L (Base shape vs. Rear-spoiler)

	Base shape	Rear-spoiler
C_D	0.418	0.396
C_L	0.0567	-0.0181

3.2 Notched rear-spoiler

次に Notched rear-spoiler の効果について述べる. Notched rear-spoiler について, Fig.9 に速度勾配テンソル $Q = 10$ の等値面, Fig.10 に斜面の C_p 分布, Fig.11, Fig.12 に切れ込みの角度 θ と C_D および C_L の関係を示す. ここにおいて, 黒線はベース形状における値, 黒点は各 θ における値を示している. なお, Fig.9, Fig.10 は $\theta = 50^\circ$ のケースを示している.

Fig.9, Fig.10 より, $\theta = 50^\circ$ の場合では剥離領域の凹凸の様子などに違いはあるものの, 概ね切れ込み無しの形状, つまり $\theta = 90^\circ$ と似た渦構造および C_p 分布を示していることがわかる. これは $\theta \geq 50^\circ$ ではどの θ でも同様であることが確認されており, それは Fig.11, Fig.12 の C_D, C_L が共に $\theta \geq 50^\circ$ において同じような値をとっていることから確認できる. $\theta \geq 50^\circ$ ではベース形状に比べて C_D と C_L が共に低下するという結果が得られ, リアスポイラーの揚力および抗力低減効果が得られたことがわかる. 一方, C_D と C_L 共に $\theta \leq 40^\circ$ と $\theta \geq 50^\circ$ の間に大きな差があることがわかる. C_L については, $\theta \geq 50^\circ$ ではベース形状に比べて大きく減少し負の値を示していたが, $\theta \leq 40^\circ$ では正の値となり, ベース形状に近い値を示している. さらに C_p については, $\theta \leq 40^\circ$ でベース形状よりも高い値を示しており, リアスポイラーが空力性能の面で逆効果をもたらすという結果になった. この結果から, $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の間に流れ場と空力性能を特徴づける何らかの明確な違いがあると考えられるため, 以下, $\theta = 40^\circ, 50^\circ$ の比較を行う.

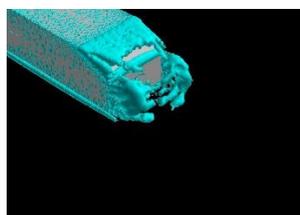


Fig.9 Isosurface of $Q = 10$
($\theta = 50^\circ$)

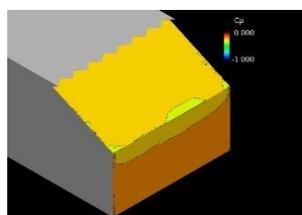


Fig.10 distribution of C_p
($\theta = 50^\circ$)

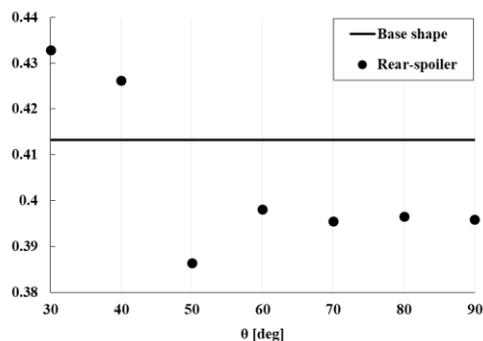


Fig.11 Relation between C_D and θ

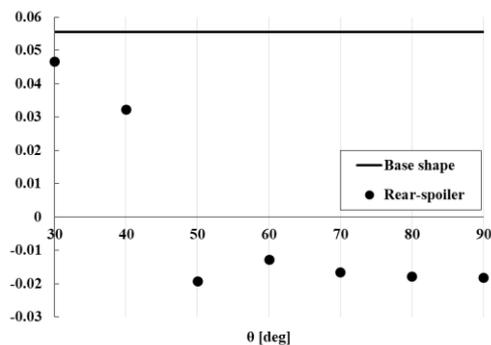


Fig.12 Relation between C_L and θ

3.3 $\theta = 40^\circ, 50^\circ$ の比較

$40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の間にある空力性能を特徴づける流れ場の変化を明らかにするために, $\theta = 40^\circ, 50^\circ$ の比較を行う. $\theta = 40^\circ$ について, Fig.13 に速度勾配テンソル $Q = 10$ の等値面, Fig.14 に斜面の C_p 分布を示す.

Fig.9, Fig.13 の渦構造を比較すると, 車体上面からの剥離領域に関して, $\theta = 40^\circ$ の方がよりはっきりとしており, $\theta = 50^\circ$ は崩れた領域が生成されていることが確認できる. 後方へ延びる後ひき渦に関しては, $\theta = 40^\circ$ では発生しているのに対して, $\theta = 50^\circ$ では発生していないことがわかる. また, Fig.14 の C_p 分布はベース形状に近い分布を示している.

これらの違いは, 剥離領域の非定常性と車体側面から発生する縦渦の干渉が原因であると考えられる. 形成される剥離領域が非定常であることはどちらも同じであるが, 崩れた領域が確認できることからその度合いは $\theta = 50^\circ$ の方が強いと考えられる. その強い非定常性と側面から生じる縦渦との干渉により, 斜面の圧力が上昇し C_D や C_L が比較的低い流れ場が形成されたと考えられる. 一方 $\theta = 40^\circ$ では, 剥離領域の非定常性が弱くベース形状のそれと同じような流れ場を示している. その結果, 高い C_D や C_L を示す流れ場が形成されたと考えられる. つまり, $\theta = 40^\circ, 50^\circ$ で上面後端からの剥離領域の非定常性に違いがあり, それが結果的に斜面圧力分布や後ひき渦の様子に違いをもたらしたと考えられる.

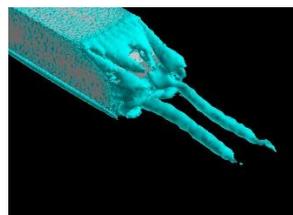


Fig.13 Isosurface of $Q = 10$
($\theta = 40^\circ$)

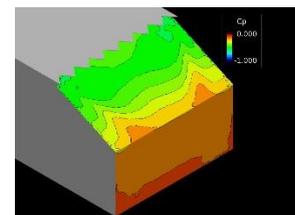


Fig.14 distribution of C_p
($\theta = 40^\circ$)

4. 結論および今後の展望

本研究では、簡易車体形状の Ahmed body にリアスポイラーを装着し、その形状を鋸状に変化させることにより、後流を制御するための知見を得ることを試みた。今回の解析から、切れ込み角度 θ によって形成される剥離領域の非定常性が変化し、その結果、流れ場が大きく変化することがわかった。その変化の原因となる形状の特徴を特定し、さらに詳細な流れ場の解明を進めていきたい。

謝辞

本研究は、主に九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用した。

参考文献

- [1] 炭谷圭二 他, "自動車と流体力学: 車体周り流れと空力特性", ながれ 23(2004), 445-454
- [2] 前田和宏, "自動車における空力開発と取り組み動向", 日本風工学会誌 第 36 卷 第 3 号(2011), 242-249
- [3] K.Abe, "An advanced switching parameter for a hybrid LES/RANS model considering the characteristic of near-wall turbulent length scale", Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 28, 499, 2014
- [4] K.Abe, "An improved anisotropy-resolving subgrid-scale model with the aid of a scale-similarity modeling concept", International Journal of Heat and Fluid Flow, 39, 42, 2013
- [5] 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研究開発」, <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/>
- [6] S. R. Ahmed, "Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake", SAE transactions, 93, 473-503, (1984)