

〔論文〕

自動車リヤデザイン自由度を高める空気抵抗低減デバイス

東 大輔・濱地 剛尚

Aerodynamic Drag Reduction Devices Giving the Automotive Design Greater Latitude

Daisuke AZUMA and Takahisa HAMACHI

Abstract

In the study and practice of aerodynamics, the rear part of an automobile's design is significant. In particular, Coda-Tronca treatment is an effective technique in reducing aerodynamic drag and extremely important in overall design theme. However, shaping the rear part of the car into an edge may affect the balance of anterior-posterior design. Therefore, the researcher considered a formulation of a flow control device giving the automotive design greater latitude. In the first part of this paper, the mechanism of aerodynamic drag reduction of Coda-Tronca is described. In the second part, the study of the installation position of the flow devices is conducted and described.

1. まえがき

ますます深刻化する環境問題への対応から、自動車エクステリアデザインの開発はデザイン性と空力性能を高い次元で融合させながら慎重に進める必要がある^{1,2)}。中でも車両リヤ周りの形状は空気抵抗低減に特に重要な部位の一つであり、細心の注意を払って開発を進めなければならない。これは自動車が航空機の翼や飛行船のように物体後部が収斂する形状ではないため、流れが車両の後端もしくは途中で剥離してしまうことに起因する。この剥離した流れは車両後方で渦巻いて後流(wake)と呼ばれ

る流れの乱れた領域を形成するが、後流はエネルギー損失を招いて車両の空気抵抗を増大してしまうため、ルーフ後端形状やトランク高さなどを最適にして後流を制御することが重要なのである(Fig. 1)。

この後流領域を制御する研究は近年でも Hucho や農沢らをはじめとする多くの研究者によって行われているが^{3, 17)}、実はその歴史はかなり古く、自動車形体が馬車様式から脱却しはじめた頃まで遡る。内燃機関の動力性能が向上し、スピードを追い求めていた自動車開発黎明期の1920年代。航空分野から転身した自動車空力技術者は車体に生じる空気抵抗を低減しようと航空機形状を模し、車両後部を収斂



Fig. 1 Wake region behind the vehicle

させた形状の研究を盛んに行った¹⁸⁾。しかし、無理に車体後部を収斂させると流れが車体の途中で剥がれてしまうために車体後部を後方へ大きく伸ばそうとしたことや後部の尖った車両は使い勝手が悪いなどといった課題があり、市場には全くと言って良いほど受け入れられなかった。そんな中、アウトパーンの建設が本格化して逸早く自動車の高速化時代が到来していた1930年代のドイツにおいて、シュツットガルト工科大学のカム博士が車両後部をエッジに近い形状で切り落とすと空気抵抗を低減できる事を発見した。この形状はカム博士に因んでカムテールやカムフォルムなどと呼ばれるが、イタリア語で「尻尾をスパッと切る」という意味の「コーダ・トロンカ」と呼ばれる事も多い。コーダ・トロンカは有用な空力デザイン基本形状の一つとして現在でも多くのモデルに盛り込まれているが¹⁹⁾ (Fig. 2) フロント周りに丸みを帯びたモデルなどではリヤ周りのみにエッジ処理を施すと車両前後のデザインバランスが崩れると懸念する声も少なくない。



Fig. 2 Coda-Tronca example in the commercial model

そこで本研究では、自動車リヤデザイン自由度と空力性能を両立する新たな空力デバイスとして、走行状況に応じて必要な場合のみ作動する空気抵抗低減デバイスの研究を行う。この空力デバイスの研究を進めるにあたり、はじめに風洞試験とCFD (Computational Fluid Dynamics ; 空力シミュレーション) を用いてコーダ・トロンカの空気抵抗低減メカニズムを詳細に分析した。そしてその結果を踏まえ、有意な空気抵抗低減効果が得られる空気抵抗低減デバイスの形状や設置位置について調査を行った。

2. 風洞実験装置

風洞試験には2009年に財団法人日本自動車研究所 (JARI) から久留米工業大学に寄贈された自動車研究開発用ゲッチングン型小型風洞を用いた (Fig. 3、4)。この風洞は一度加速した流れが再びプロペラに戻る回流式でエネルギー効率がよく、最大風速は50 [m/s] を誇る。テストセクションの吹き出し口断面は600×600 [mm] でオープンテストセクション型である。今回は試験効率とCFDのレイノルズ数を考慮して試験風速を27.6 [m/s] とした。



Fig. 3 Goettingen type scale model wind tunnel used in car design

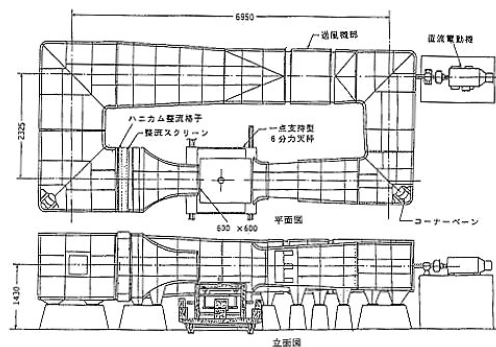


Fig. 4 Configuration of the wind tunnel

3. CFD システム

CFD システムには自動車メーカーの使用実績が豊富で高い信頼性を誇るCRADLE社のSCRYU/Tetraを用いた。本システムはCADデータの取り込みから解析実行まで一連の作業をシームレスに行え、

高い操作性を有する CFD システムである。本研究では支配方程式に質量保存式と非圧縮性 Navie-Stokes 方程式。乱流モデルには標準 k- モデルを用いた。計算格子は非構造テトラメッシュを基本とし、物体表面には境界層メッシュを挿入した。なお、本研究では計算機能力を配慮して定常計算とし、モデル全長を基準長としたレイノルズ数は $Re = 8.3 \times 10^5$ とした。

質量保存式

$$\frac{u_i}{x_i} = 0$$

非圧縮性 Navie-Stokes 方程式

$$\frac{u_i}{t} + \frac{u_i u_j}{x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{p}{x_i} + \nu \left(\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_i} \right)$$

ここで、 u_i ($i = 1, 2, 3$) はデカルト座標系での速度成分、 p は圧力、 ν は空気動粘性係数である。

4. コーダ・トロンカ

4.1 コーダ・トロンカ研究用供試モデル

コーダ・トロンカの研究を行う風洞試験供試モデルには実車の 1/10 サイズで製作したスポーツクーペタイプのクレイモデルを用いた (Fig. 5)。車体を上面から見たボデーサイドのリヤへの絞り込み角度は 0 度と 10 度の 2 ケースを用意し (Fig. 6) それぞれのケースにおいてリヤコーナー R0、R20、R40 [mm] の空力性能調査を行うことで、コーダ・

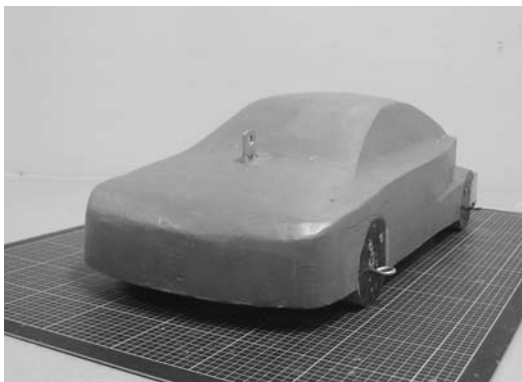


Fig. 5 Test model used in Coda-Tronca research (Front perspective view)

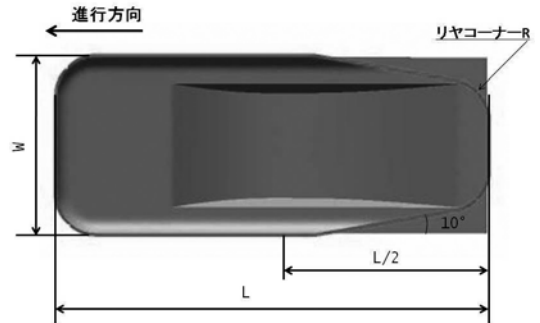


Fig. 6 The part to change on the test model (Top view)

トロンカの空気抵抗低減メカニズムと、ボデーサイド絞り角とコーダ・トロンカ空力効果の関係を明らかにした。ここで、コーダ・トロンカ形状はリヤコーナー R0 の状態である。また、CFD に用いた供試 CAD モデルは風洞試験用クレイモデルから主要寸法を採寸して作成した。

4.2 コーダ・トロンカ空力性能試験

風洞試験と CFD 解析による各ケースの空気抵抗係数変化量 ΔC_D を Fig. 7 にまとめる。ここで示す ΔC_D は、リヤコーナー R0 (コーダ・トロンカ) をベースとしてリヤコーナー R を変化した時の空気抵抗係数 C_D の変化量である。形状変更に伴う C_D 値変化は定量的に差があるものの、その傾向は風洞試験と CFD で一致した。

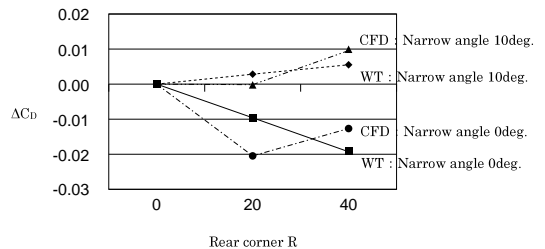


Fig. 7 Amount of the aerodynamic drag coefficient change

ボデーサイド絞り込み角 10 度のケースではリヤコーナー R を大きくすると C_D 値が増加しており、R0 すなわちコーダ・トロンカ形状にすることで空気抵抗低減に効果があると言える。一方、ボデーサイド絞り込み角 0 度のケースではリヤコーナー R を大きくすると C_D 値が小さくなった。すなわち、コーダ・トロンカによる空気抵抗低減効果は、ボデーサイドに適度な絞り込み角度を持たせた車体形

状にのみ有効であることが示唆される。

4.3 コーダ・トロンカ空気抵抗低減メカニズム

次に、CFD を用いてリヤコーナー周りの流れ場を精査し、コーダ・トロンカの空気抵抗低減メカニズムを明らかにした。Fig. 8 にコーダ・トロンカの空気抵抗低減効果が見られたボデーサイド絞り込み角度10度のケースにおける、ボデー表面圧力分布の後斜視を示す。図中、色の青い部分は圧力が低くボデー表面を流体側に引く力が働いていることを示している。リヤコーナー R0 と R40 のケースを比較すると、 C_d 値が増加した R40 のケースではリヤコーナー付近に圧力の低い領域（色の青い領域）が存在することを確認できる。

この部分の流れの様子を詳細に見るために、車体後部を上から見たリヤコーナー付近の流れ断面の速度ベクトル分布と圧力分布を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。Fig. 9 の速度ベクトル分布図を見ると R40 のケースではボデーサイドに沿ってきた流れがリヤコーナー R に沿って車体背面に回り込み、R0 のケースよりも後流領域が小さくなる様子が分かる。この外側に膨らんだ R に沿って流れが曲げられる効果をコアンダ・エフェクトと呼び、この部分では流れが加速されて Fig. 10 からわかるように圧力が下がる。圧力の低い場所では物体表面を流体側に引く力が働くが、このケースでは圧力の低い領域はリヤコーナーの後方、車体背面付近まで広く及んでいるため、リヤコーナーの R 面には車体を斜め後方に引く力が働くことになり、空気抵抗が増大していたことが分かった。R40 のケースのほうが R0 のケースに比べて後流領域が小さいので空気抵抗も小さいように思われたが、コアンダ・エフェクトによるリヤコーナー R 面の圧力低下が大きく影響したと考える。また、後流領域はその大きさよりもエネルギー損失の強さが重要であり、これに関してはさらに深く調査を進める必要がある。

一方、コーダ・トロンカの効果がなかったボデーサイド絞り角0度のケースを見ると (Fig. 11)、ボデーサイド絞り角10度のケースと同様に R40 のリヤコーナー付近に圧力の低い領域が見られるが、その範囲が小さいのが見て取れる。Fig. 12 に示したリヤコーナー付近の速度ベクトル分布図を見ると、R40 のケースはリヤコーナーに沿おうとする流れが見ら

れるものの、ボデーサイド絞り角10度 (Fig. 9) R40 のケースよりも流れが剥がれるポイントが上流側になっているのが分かる。その結果、Fig. 13 の R40 の圧力分布図から分かるように圧力低下に伴う物体表面を引く力の向きが側方よりになり、後流縮小による空気抵抗低減効果が支配的となって R0 (コーダ・トロンカ) のケースよりも空気抵抗が低くなったと考えられる。

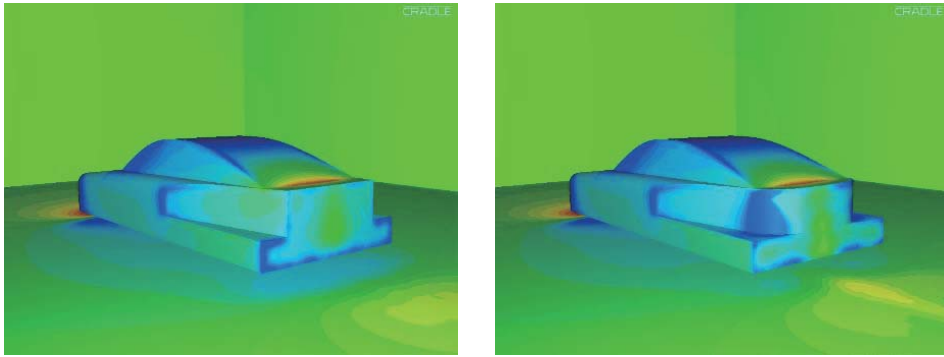
5. デザイン自由度を高める空力デバイス

コーダ・トロンカは空気抵抗低減に有効な空力デザインアイテムではあるが、リヤコーナーをエッジ処理しなければならないというデザイン上の大きな制約がある。そこで、このデザイン上の制約を抑え、デザイン自由度を高める空力デバイスの検討を進める。

5.1 空力デバイス検討用供試モデル

4章では現象の特徴にフォーカスする目的で大幅に形状を簡略化したクーペモデルを用いた。しかし、ここでは提案する空力デバイスが実際に市販されるモデルへ搭載することを想定し、空力性能に優れた BMW 3 シリーズ (E90型) の形状を模擬したセダンモデルを供試モデルとして用いることにした。ただし、形状を模擬したモデルとは言え、車体を上面から見たボデーサイドのリヤへの絞り込み形状や車体を側面から見た外形線などは市販車の三面図と正確に合わせてある (Fig. 14)。なお、4章ではクレイモデルを用いたが、ここでは風洞試験用供試モデルを CFD 用 3D CAD データから直接 3 次元切削機 Roland MDX 40A を用いて製作している (Fig. 15)。このように CFD モデルと風洞試験モデルを同一の CAD データから製作することで、CFD と風洞試験のより正確な比較検証が可能になった。また、この風洞試験用供試モデルは発泡剤を用いて実車の 1/10 サイズで製作してあり、リヤコーナー R など流れの剥離点が重要な部位には紙テープで表面を覆い、フラッシュサーフェス処理を施してある。

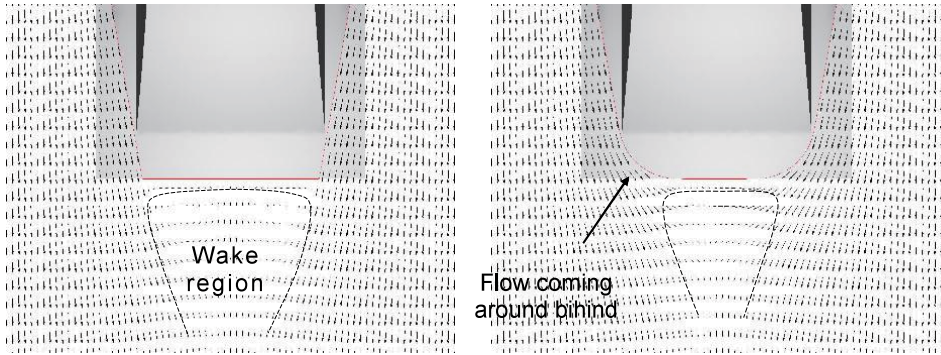
なお、空力デバイスの検討はリヤコーナー R40 のモデルに対して行うため、ここではリヤコーナー R40 のケースを基準モデルとする。また、このモデルの全長を基準長さとしたレイノルズ数は $Re = 8.3 \times 10^5$ とした。



(a) Rear corner R0

(b) Rear corner R40

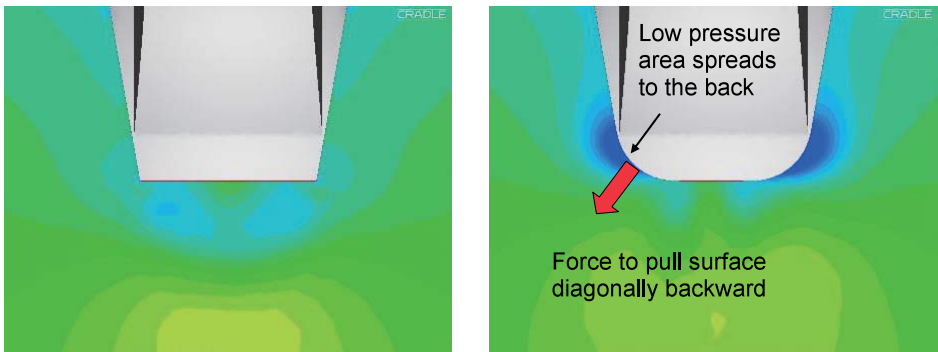
Fig. 8 Surface pressure distribution (Rear perspective: Narrow down angle 10deg.)



(a) Rear corner R0

(b) Rear corner R40

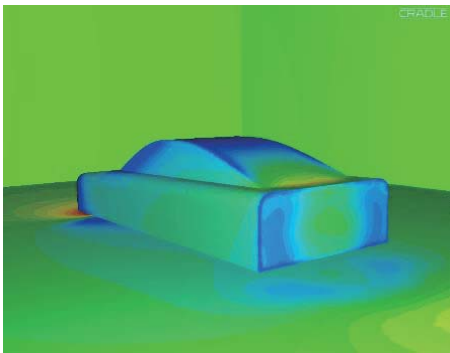
Fig. 9 Velocity vectors distribution (Top view: Narrow down angle 10deg.)



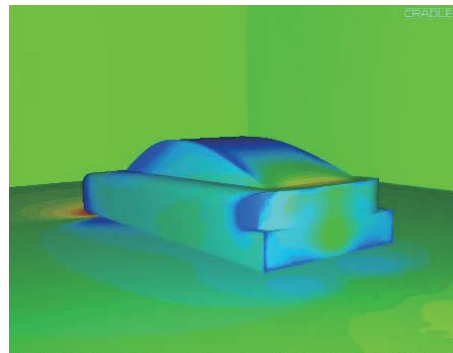
(a) Rear corner R0

(b) Rear corner R40

Fig. 10 Pressure distribution (Top view: Narrow down angle 10deg.)

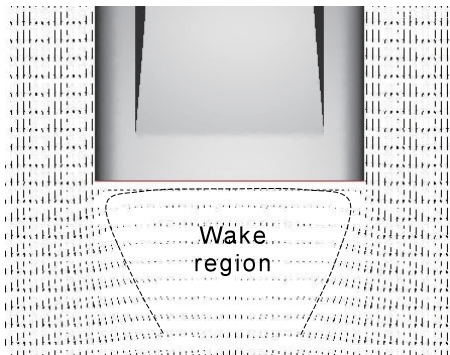


(a) Rear corner R0

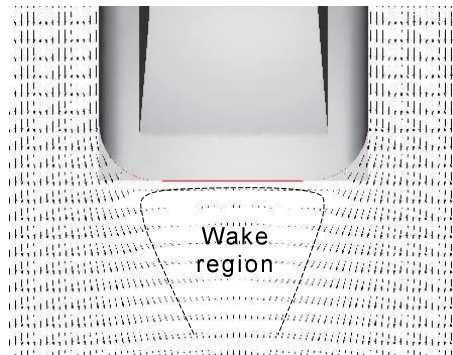


(b) Rear corner R40

Fig. 11 Surface pressure distribution (Rear perspective: Narrow down angle 0deg.)

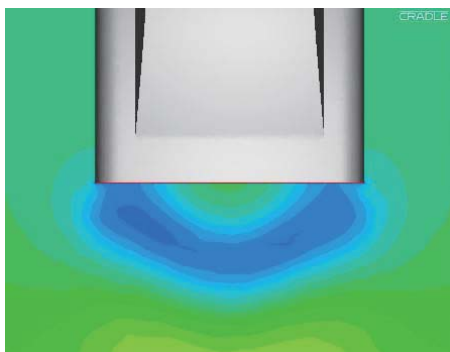


(a) Rear corner R0

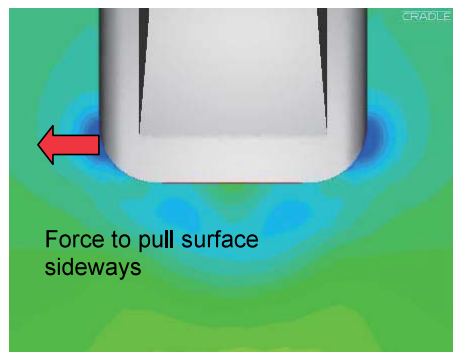


(b) Rear corner R40

Fig. 12 Velocity vectors distribution (Top view: Narrow down angle 0deg.)



(a) Rear corner R0



(b) Rear corner R40

Fig. 13 Pressure distribution (Top view: Narrow down angle 0deg.)

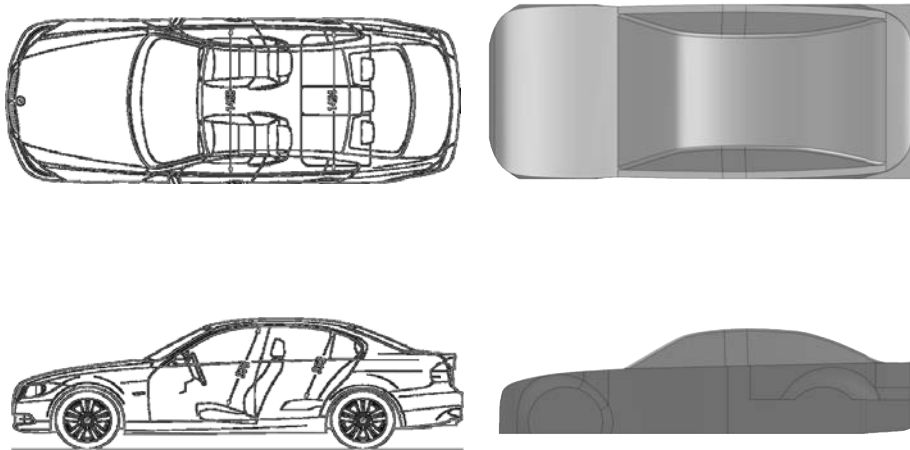


Fig. 14 BMW 3 series sedan mock model

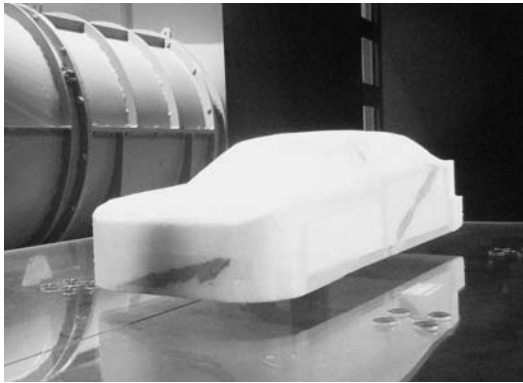


Fig. 15 Test model used in wind tunnel

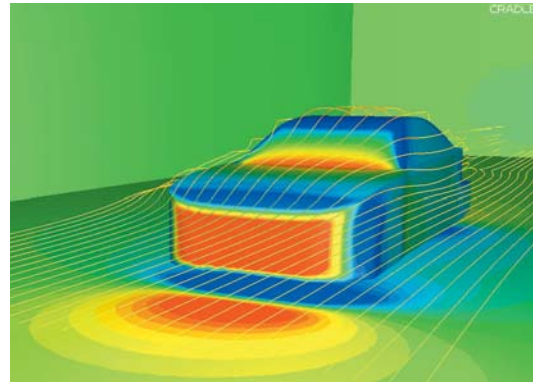


Fig. 16 Surface pressure distribution (Front perspective view)

5.2 基準モデル周りの流れ

4章でコーダ・トロンカの空気抵抗低減効果がポデーサイドの絞り込み具合によって異なることを示した。そこで空力デバイスの検討に先立ち、このBMW 3シリーズ模擬モデルでもコーダ・トロンカの空気抵抗低減効果が有効に働くか事前確認を行った。

CFD解析で得られた基準モデル（リヤコーナーR40）のポデー表面圧力分布を Fig. 16および Fig. 17に示す。図中、色の青い部分は圧力が低く、ポデー表面を流体側に引く力が働いている箇所である。Fig. 17の後斜視から、4章クーペモデルのポデーサイド絞り角10度 R40のケースと同様に基準モデルのリヤコーナー付近には圧力の低い領域（色の青い領域）が広範囲に生じていることが見て取れる。

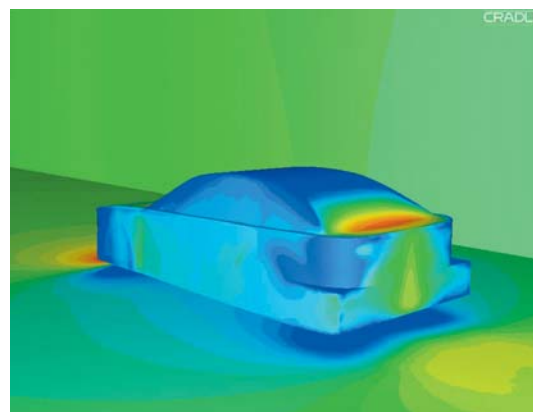


Fig. 17 Surface pressure distribution (Rear perspective view)

Fig. 18にリヤコーナー付近を上から見た流れ断面の速度ベクトル分布と圧力分布を示す。速度ベクト

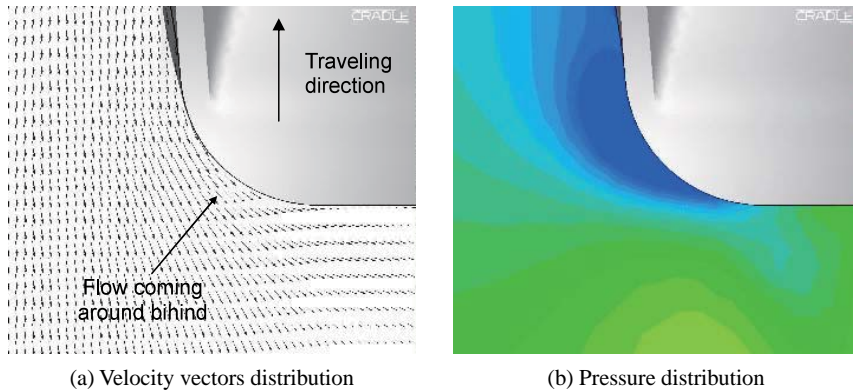


Fig. 18 Flow around the rear corner in the base model

ル分布図 (Fig. 18(a)) でコアンダ・エフェクトによる流れの車体背面への回り込みが見られることや、この流れの加速に伴う圧力低下領域がリヤコーナーの後方、車体背面付近まで及ぶ (Fig. 18(b)) ことで空気抵抗を増加しているのも4章クーペモデルと同様であった。なお、このBMW 3シリーズ模擬モデルにおけるコーダ・トロンカの空気抵抗低減効果は、風洞試験で $\Delta CD = -0.016$ 、CFDでも $\Delta CD = -0.006$ であり、本モデルにおいてもコーダ・トロンカは有意な効果を示すことを確認した。

5.3 空力デバイスの最適設置位置調査

リヤコーナーに沿って流れが車両背面まで回り込むことが問題ならば、適切な部位で流れを強制的に剥離させるエッジを設ければ良い。しかし、流れをドラスティックに変化させるためには相応の大きさのエッジをリヤコーナーから突出させる必要があり、デザインへの影響が懸念される。そこで、車両の走行状況やリヤコーナー付近の流れの状況に応じて必要な場合にのみ作動するフラップ状の空力デバイスを提案する (Fig. 19)。

デバイス検討の第1段階として風洞試験で最適設置位置の検討を行った。基準モデルのリヤコーナー部に幅10 [mm]、高さ30 [mm]のエッジを設置し、デバイスによる空気抵抗係数 C_b 値の変化を調べた。設置位置の基準として、リヤコーナーの終わる位置 (車両背面)の角度を $\theta = 0$ 度、リヤコーナーが始まる位置 (ボデーサイド後端)の角度を $\theta = 90$ 度としている。また、各設置位置におけるフラップの張出し角度を α とし、車両進行方向に平行な形状を

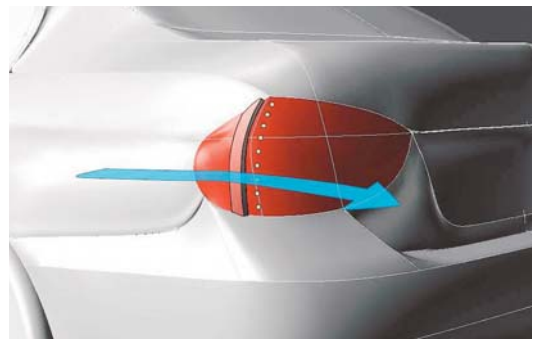


Fig. 19 Schematics of the aerodynamic devices

$\theta = 0$ 度、 α の角度を車両外側に広がる形状、 $\alpha = -$ を車両内側に寄る形状とした (Fig. 20)。Fig. 21に基準モデルに対する各ケースの空気抵抗係数変化量 (ΔC_b)を示す。風洞試験結果から $\theta = 70$ 度の位置に $\alpha = 20$ 度と30度、および $\theta = 60$ 度の位置に $\alpha = 30$ 度でデバイスを設置した場合を除き、全てのケースで空気抵抗が低減した。 $\theta = 70$ 度の位置はコーナーのかなり上流側に位置するため、その位置に $\alpha = 30$ 度でデバイスを設置すると先端が車体側面から大きく外側へ張り出すため、後流領域の拡大とデバイスの形状抵抗で空気抵抗が増大したと考える。空気抵抗が最も低減したのは $\theta = 50$ 度の位置にデバイスを $\alpha = 0$ 度で設置したケースで、空気抵抗係数の変化量は $\Delta C_b = -0.027$ であった。

風洞試験で最も空気抵抗が低減した $\theta = 50$ 度、 $\alpha = 0$ 度のケースに対し、空気抵抗低減メカニズムを確認すべくCFD解析を行った。Fig. 22にリヤコーナー付近を上から見た断面の速度ベクトル分布と圧力分布を示す。Fig. 22(a)の速度ベクトル分布図が

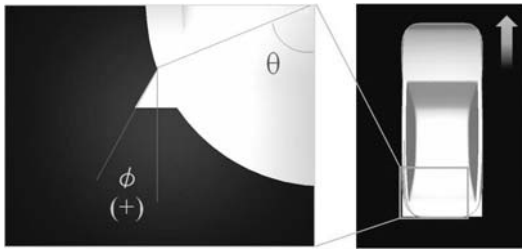


Fig. 20 aerodynamic devices installation position θ and flap angle Φ

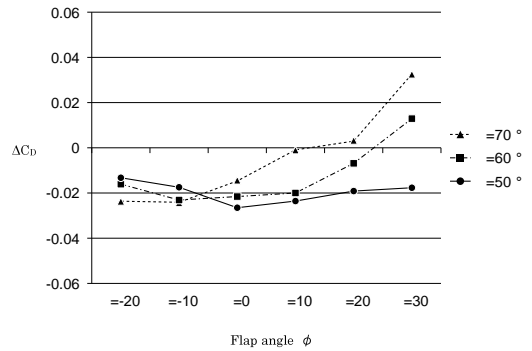
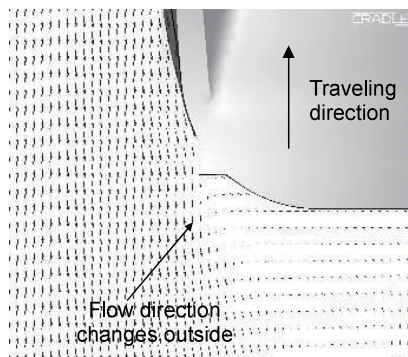
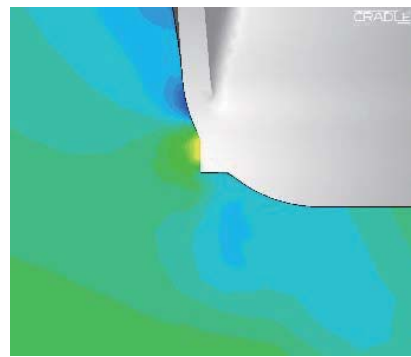


Fig. 21 Amount of the aerodynamic drag coefficient change



(a) Velocity vectors distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 22 Flow around the rear corner with aerodynamic devices

らデバイスによってコアンダ・エフェクトの流れの回り込みが抑えられていることが分かる。これにより基準モデルで見られたコーナー後部の圧力低下が抑えられ、空気抵抗が低減したことを確認した。

6. まとめ

風洞試験とCFDを用いて、自動車のリヤデザイン自由度と空力性能を両立する新たな空気抵抗低減デバイスの検討を行った。また、デバイスの検討に先立ち、空気抵抗低減に有効とされるコーダ・トロンカ処理の空気抵抗低減メカニズムを明らかにした。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) コーダ・トロンカによる空気抵抗低減効果はすべての車体形状に有効な訳ではなく、ボデーサイドからリヤエンドにかけて適度な絞り込み角度が施されている車両に対してのみ有意な空気抵抗低減効果を示す。
- (2) コーダ・トロンカの空気抵抗低減メカニズムの主要素は、リヤコーナーをコアンダ・エフェク

トで回り込む流れによる表面圧力低下を防ぐことである。

- (3) 1/10サイズ、リヤコーナー R40のモデルにおいてコアンダ・エフェクトによる流れの回り込みを防ぐフラップ状の空力デバイスを検討した。その結果、リヤコーナーエンドから $\phi = 50^\circ$ の位置にフラップ角度 $\phi = 0$ でデバイスを設置すると最も空気抵抗が低減し、基準モデルに対する空気抵抗係数の変化量は $\Delta C_D = -0.027$ であった。

今後は走行風の状況に応じて自律的に作動する空力デバイスの実現を目指し、自動制御系を組み込んだ空力デバイスの検討を進める。

謝 辞

本研究を進めるにあたり有益なご助言とご指導を賜った九州大学大学院芸術工学研究科の石井明教授、本学交通機械工学科の渡邊孝司教授、森和典教授他の先生方に心より感謝する。また、風洞実験等で協

力してくれた本学交通機械工学科空力デザイン研究室の諸君に深く感謝する。

本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会の科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）課題番号23611050、「サステナブルな自動車社会のための自動車エコデザイン支援システムの研究」によった。

参考文献

- (1) 石井明, 「設計」と「デザイン」の相違点とは, 日本機械学会, No.04 38, pp.1-4, 2004.
- (2) 東大輔, 最大のデザイントレンドは空力, Motor Fan DESIGN 誌, Vol.2, pp.10-11, 2010.
- (3) Hucho Wolf-Heinrich, Aerodynamics of Road Vehicles, SAE, 1998.
- (4) Akiyoshi Yamada and Shingo Ito, Computational Analysis of Flow Around a Simplified Vehicle-Like Body, SAE, PT-49, pp.329-339, 1996.
- (5) T. Han, D. C. Hammond, Jr., and C. J. Sagi, Optimization of Bluff-Body Rear-End Shape for Minimum Drag in Ground Proximity, SAE, PT-49, pp.341-354, 1996.
- (6) Kazuo Yanagimoto, Kunio Nakagawa, Hiroshi China, Tomio Kimura, Minoru Yamamoto, and Takashi Sumi, The Aerodynamic Development of a Small Specialty Car, SAE, PT-49, pp.399-409, 1996.
- (7) Nariaki Horinouchi, Yoshihiro Kato, Sayoko Shinano, and Tsuguo Kondoh, Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System, SAE, PT-49, pp.411-418, 1996.
- (8) Hans-Joachim Emmelmann, Helmut Berneburg and Joset Schulze, The Aerodynamic Development of the Opel Calibra, SAE, PT-49, pp.437-450, 1996.
- (9) Gioacchino Vio, Simon Watkins and Peter Mousley, The Passenger Vehicle Wake Under the Influence of Upstream Turbulence, SAE, SP-1786, pp.209-218, 2003.
- (10) Rajneesh Singh, Automated Aerodynamic Design Optimization Process for Automotive Vehicle, SAE, SP-1786, pp.277-281, 2003.
- (11) Silvestre Artiaga Hahn, Nicolas Kruse and Frank Werner, Virtual Aerodynamic Engineering at GM Europe Development of the 2006 OPEL Corsa, SAE, SP-2066, pp.43-51, 2007.
- (12) Xijia Zhu and Mark Gleason, A CFD Application of Surface Morphing for Vehicle Exterior Development, SAE, SP-2066, pp.131-138, 2007.
- (13) Jeff Howell, Geoff Le Good, The Effect of Backlight Aspect Ratio on Vortex and Base Drag for a Simple Car-Like Shape, SAE, SP-2151, pp.209-215, 2008.
- (14) Nina Tortsas and Kenneth Karbon, Aerodynamic Development of the 2011 Chevrolet Volt, SAE, SP-2305, pp.179-184, 2011.
- (15) Ashok D. Khondge, Sandeep Sovani and Gunjan Verma, Automation of Vehicle Aerodynamic Shape Exploration and Optimization using Integrated Mesh Morphing and CFD, SAE, SP-2305, pp.195-211, 2011.
- (16) Wolfgang Mayer and Gerhard Wickern, The New Audi A6/A7 Family - Aerodynamic Development of Different Body Types on One Platform, SAE, SP-2305, pp.269-278, 2011.
- (17) 農沢隆秀・佐藤浩, 自動車形状を持つにふい物体の空気抵抗低減に関する形状パラメータの研究, 日本機械学会論文集, 58巻556号, pp.64-69, 1992.
- (18) 石井明・東大輔, 環境に優しい自動車の空力デザイン(2) 空力デザインの歴史, Car Styling 誌, 第188号, pp.109-120, 2008.
- (19) 石井明・東大輔, 新型 Nissan GT-R の空力デザインを考察する, Car Styling 誌, 第183号, pp.59-63, 2008.
- (20) 東大輔・石井明自動車空力デザインにおけるコーダ・トロンカ処理, 日本デザイン学会, 第5支部平成22年度研究発表会概要集, pp.16-17, 2010.
- (21) 東大輔・亀井宏晃・濱地剛尚・石井明, 自動車デザインにおけるコーダ・トロンカの空気抵抗低減効果, 日本デザイン学会, 第58回春季研究発表大会2011大会概要集, pp.444-445, 2011.