

自動車の空力性能向上のためのタイヤハウス内の流れ制御デバイス開発

Development of Flow Control Device in Tire House for Improvement of Aerodynamic Characteristics of Automobile

知能機械工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1235093 森 健人

1. 緒言

近年の自動車開発では化石燃料の枯渇化や地球温暖化などの環境問題への対策として、燃費向上、二酸化炭素排出量の低減が重要な課題となっている。燃費向上の実現により、二酸化炭素排出量の低減が可能であるが、燃費向上を実現するための手段の一つとして走行抵抗の低減が挙げられる。そして、その走行抵抗は転がり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗、加速抵抗の四つに分類される⁽¹⁾。これらの内、空気抵抗は定速走行時において車速の二乗に比例して大きくなるため、車速 60km/h を超えたあたりから走行抵抗の中で大きな割合を占めるようになる。そのため、高速走行時において走行抵抗低減を実現するためには空気抵抗の低減が重要となってくる。自動車の空気抵抗は車体前後の圧力差によって生じる圧力抵抗と車体表面と気流との間に生じる摩擦抵抗の二つに分類され、圧力抵抗が約 90% を占めている⁽²⁾。圧力抵抗は車体の形状抵抗が大半を占めていることが分かっているが、近年ではタイヤハウス周辺の流れに影響されることも報告されている⁽³⁾。

そこで、本研究の先行研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾ではタイヤハウス内の空気の流れに着目し、タイヤハウス内の流体に変化を与えることを期待して図 1 に示すような流れ制御デバイスが考案された。そして、この流れ制御デバイスを取り付けたタイヤハウス内の流れの変化を数値流体計算によって予測し、流れ制御デバイスが自動車の空力性能に及ぼす影響に関して調査が行われた。実際の走行時における流れ制御デバイスの影響を調査するため、タイヤの回転の有無による流れ制御デバイスの影響の変化が調査された。その結果、タイヤの回転によってリアタイヤハウス内の流れと車体下面部で合流する流れ、車体後面部の流れが変化することで車体全体の C_D 値が変化することが確認された。

本研究では、ホイール形状を考慮した状態でのタイヤハウス内の流れに対して、有効な流れ制御デバイス形状を考案し、数値計算によって自動車の空力性能に及ぼす影響に関して考察することを目的とする。

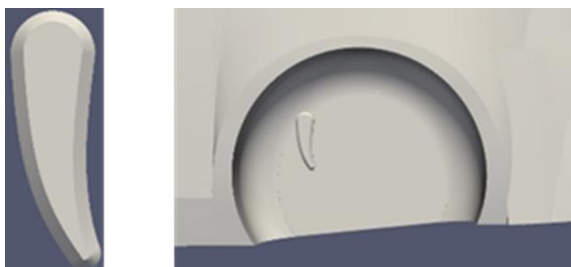


Fig. 1 Flow control device shape and set position.

2. 数値計算手法

本研究では三次元非圧縮性乱流を扱い、数値計算には OpenFOAM を用いる。支配方程式は連続の式、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を用い、乱流モデルは $k\omega$ -SST を用いる。速度・圧力解法として SIMPLE 法を適用し、空間の離散化は有限体積法を用い、方程式の対流項には二次精度風上差分法、拡散項には二次精度中心差分法を用いた。格子生成には OpenFOAM の標準ユーティリティに含まれる blockMesh と snappyHexMesh を用いる。

3. 流れ制御デバイス付加による空力性能への影響

3.1 流れ制御デバイスの考案

事前の数値計算の結果より、ホイール形状を考慮することによってフロントタイヤハウスの壁面付近では図 2 に示すような、おおそタイヤハウスの形状に沿った流れが発生するということが分かった。しかし、ややタイヤ軸中心方向に流れている箇所もあったため、この流れに対してよりタイヤハウス形状に沿うようにガイドする流れ制御デバイスを考案した。考案した流れ制御デバイスの形状を図 4.2 に示す。流れ制御デバイスの形状に関して、タイヤハウス後面部付近ではタイヤハウス内に流入する流れに対して入り口を広げた形状にすることでタイヤ軸中心方向に向かう流れをよりタイヤハウスの形状に沿うようにガイドすることを期待した。それに加えて、後面部付近で流れを加速させることで圧力が低下することを期待して設計した。また、タイヤハウス前面部付近では、出口付近で角度をつけた丸みを付けた形状にすることで流れが前向きになりタイヤハウス前面部に流れがぶつかることでタイヤハウス前面部の圧力を上昇させることを期待して設計した。

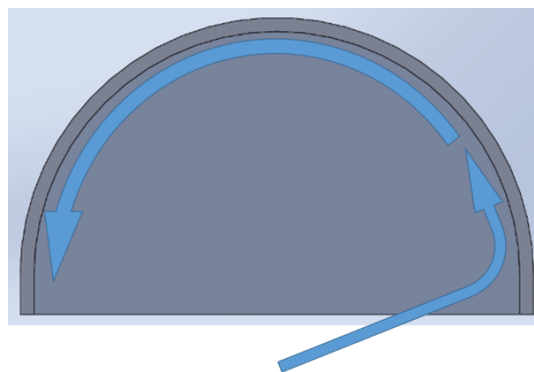


Fig. 2 Flow near the wall of the front tire house.

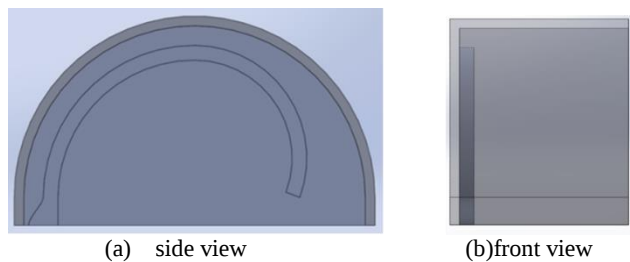


Fig. 3 Flow control device shape.

3.2 計算対象

数値計算で用いるモデルを図4に示す。また、モデル寸法を表1に示す。ホイール部分はより実現象に近づけるために実際のホイール形状に近いものとなっており、このモデルをbaseとする。そして、baseのフロントタイヤハウス部分に図3に示す流れ制御デバイスを取り付けたモデルをguide deviceとする。

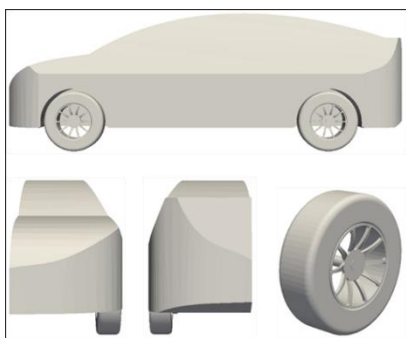


Fig. 4 base model.

Table 1 Model dimensions.

Full length [mm]	4460
Width [mm]	880
Height [mm]	1490
Tire diameter [mm]	634.5
Tire width [mm]	195

3.3 計算領域と境界条件

計算領域は図5に示す通りで主流方向×横方向×高さ方向に40m×6m×6mとした。また、本計算では半裁モデルを使用し、車体の中心断面と接する面を対称境界とし車体と地面は滑りなし境界、その他を滑り境界とする。計算条件を表2に示す。流入境界には主流速度16.667m/sの一様流を与え、流入気流は乱流として1%の乱流強度を与える。また、地面には主流速度と同じ速度を与えることで、実際の自動車が走行する時の車体と地面との相対速度を再現し、タイヤとホイール部分には地面の速度に対応する速度境界条件として52.536rad/sの角速度を与える。

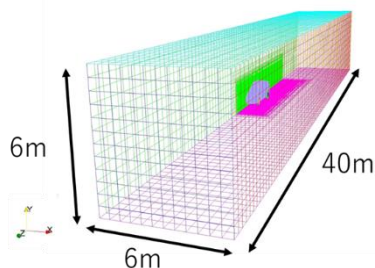


Fig. 5 Calculation area.

Table 2 Calculation conditions.

Inflow velocity [m/s]	16.667
Turbulence model	$k\omega$ -SST
Turbulent intensity [%]	1
Turbulent energy	0.042
Specific dissipation rate	5.555
Tire angular velocity [rad/s]	52.536

3.4 フロントタイヤハウスの流れ

流れ制御デバイスを取り付けたフロントタイヤハウス内に着目する。base全体の C_D 値に対するフロントタイヤハウス内の各部分における C_D 値の減少率を図6に示す。 C_D 値はフロントタイヤハウスでは約0.60%、フロントタイヤでは約0.27%減少し、フロントホイールでは約0.69%増加した。フロントタイヤハウス内で考えると、約0.18%分 C_D 値を減少させることが出来た。ここで、最も C_D 値の減少率が高かったフロントタイヤハウスに着目する。フロントタイヤハウスの圧力分布を図7に示す。guide deviceの前面部ではbaseに比べて壁面下部付近と上面付近でやや圧力が上昇した。後面部では壁面下部付近の圧力が前面部の圧力変化に対して大きく減少した。そのため、フロントタイヤハウスにおける C_D 値の減少は主に後面部の圧力が低下したことが原因であると考えられる。次に、この後面部の圧力が低下した原因について考察する。まず、フロントタイヤハウス壁面付近($x=0.54m$)の断面における速度ベクトルと圧力分布を図8に示す。guide deviceとbaseを比較すると、baseではタイヤハウス形状に沿った周方向の流れが弱かったが、guide deviceでは強くなっている。その流れが流れ制御デバイスによってガイドされることでタイヤハウス前面の下部まで誘導できている。次に、この断面から6cm分壁から離れる方向に移動した断面($x=0.60m$)における速度ベクトルと圧力分布を図9に示す。device1とbaseを比較すると、タイヤハウス下面部から流入した流れのタイヤハウス後面部への当たり方が大きく変化しており、device1の後面部に向かう流れが弱まっていることが分かる。その結果、タイヤハウス後面部の圧力が低下し、フロントタイヤハウス全体の C_D 値が低下したと考えられる。

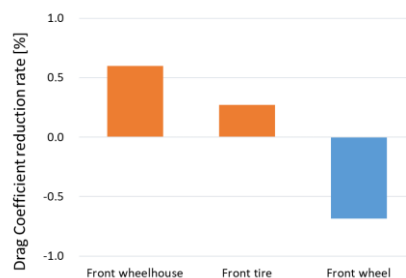


Fig. 6 Drag Coefficient reduction rate (front tire house).

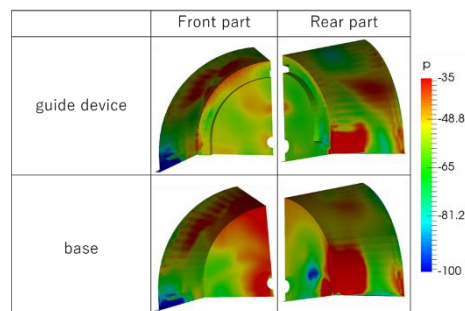


Fig. 7 Front tire house pressure distribution.

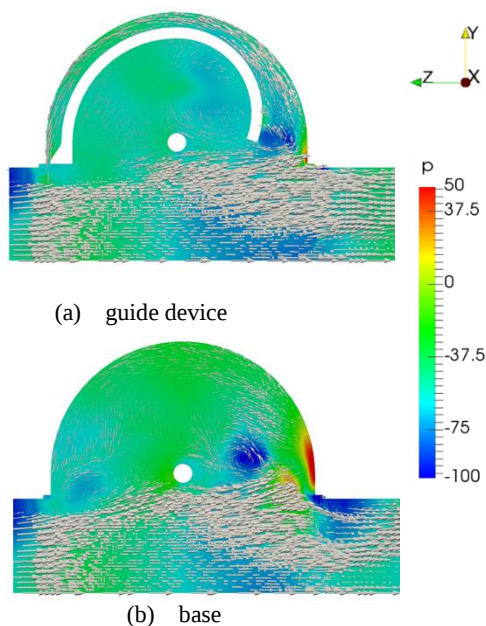


Fig. 8 Velocity vector and pressure distribution($x=0.54$).

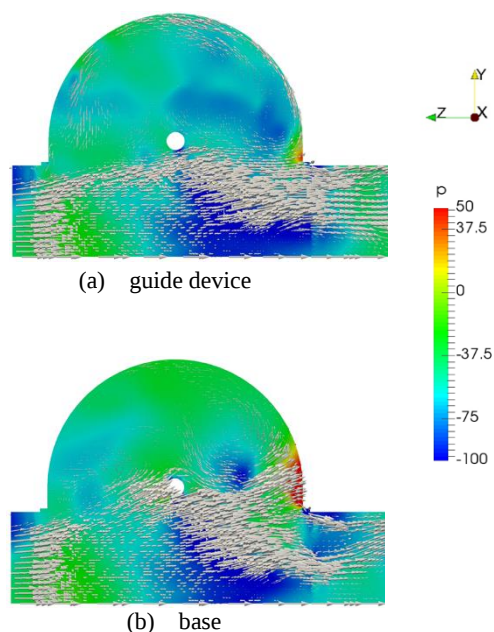


Fig. 9 Velocity vector and pressure distribution($x=0.60$).

3.5 リアタイヤハウス内部の流れ

次に、リアタイヤハウス内に着目する。流れ制御デバイスは、フロント側にのみ設置していることに注意されたい。base 全体の C_D 値に対するリアタイヤハウス内の各部分における C_D 値の減少率を図 10 に示す。 C_D 値の変化の原因は、上流側の流れの変化によるものである。 C_D 値はリアタイヤハウスでは約 0.47% 減少し、リアタイヤでは約 1.88%、リアホイールでは約 0.85% 増加した。リアタイヤハウス内では、約 2.25% 分 C_D 値が増加した。 C_D 値が最も大きく増加したリアタイヤに着目する。まず、リアタイヤの圧力分布を図 11 に示す。リアタイヤの前面部に着目すると、base に比べて guide device ではタイヤ下面部の圧力が高くなっていることが分かる。後面部では、逆に base に対して device1 ではタイヤ上面部の圧力がやや低くなっている。したがって、guide device は base よりもタイヤ前面部と後面部の圧力差が大きくなり、 C_D 値が増加した。リアタイヤの前面部と後面部における圧力の変化は相対的に前面部の方が大きいので、 C_D 値増加の原因はタイヤ前面部の圧力上昇であると考えられる。次に、リアタイヤ前面の下面部において圧力が上昇した原因について、考察する。まず、リアタイヤの中央 ($x=0.7825\text{m}$) で断面を取り、速度ベクトルと圧力分布を図 12 に示す。guide device と base のどちらも左から右に流れている主流がタイヤ下面部でぶつかることで圧力が上昇しているが、guide device と base を比較するとタイヤ下面付近の主流方向速度が guide device の方が大きいことが分かる。そのため、guide device の方が、よりタイヤ下面付近に流れが勢いよくぶつかるため、タイヤ前面部の圧力が上昇したと考えられる。リアタイヤにぶつかる流体の流れ方は guide device と base のいずれも図 13 と図 14 の流線に示す通り、上流側のフロントタイヤハウスから出ていく流れによって影響されることが分かる。また、どちらもフロントタイヤの後方付近で渦のような流れができていたことが分かる。フロントタイヤ後方で形成した渦が下流に流れていき、最終的にリアタイヤにぶつかることで悪影響を及ぼしている可能性があることが分かった。そのため、リアタイヤでの C_D 値を低減するためには、フロントタイヤ後方の位置で形成する渦自体を小さくするかリアタイヤに渦がぶつからないようにするなどの対策が重要になってくる。

次に、 C_D 値が増加したリアホイールに着目する。スポーク部分に当たる流体の流線を guide device と base の場合において真横から見たものと真上から見たものをそれぞれ図 15 と図 16 に示す。図 15 より、guide device においてリアホイールのスポーク部分にぶつかる流体はフロントタイヤハウス下部からの流れてきたものであることが分かった。フロントタイヤハウスの下部における流れが、下流に進むにつれて主流方向に対して右側に曲げられ、タイヤの外側を通り最終的にホイールのスポーク部分に当たっており、流れ制御デバイスによってタイヤハウス後流が大きく変化した。これに対して base では図 16 から分かるように同じようにタイヤハウス下部における流れが下流に進むにつれて主流方向に対して右側に曲げられるが、タイヤの前方でタイヤの外側と内側に分かれてその一部のみがスポーク部分に当たる。そのため、guide device の方が勢いよくスポーク部分に流れがぶつかることで圧力が高くなったと考えられる。

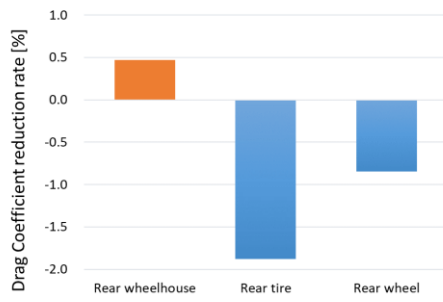


Fig. 10 Drag Coefficient reduction rate (rear tire house).

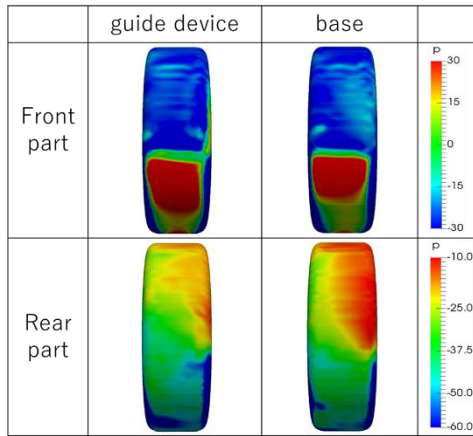


Fig. 11 Rear tire pressure distribution.

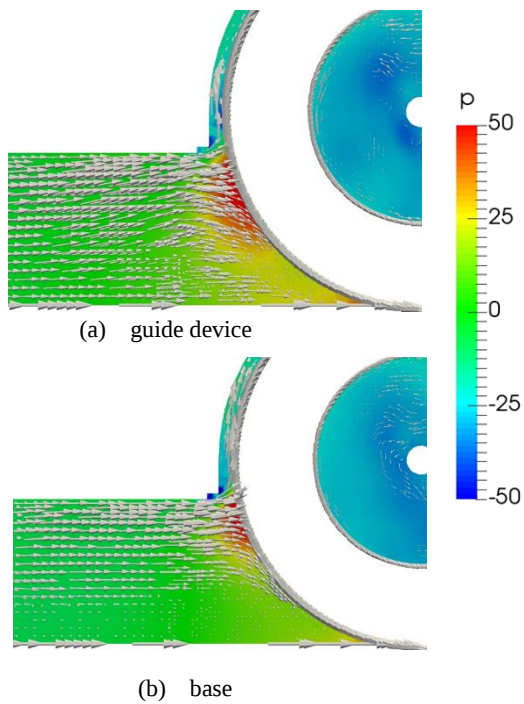


Fig. 12 Velocity vector and pressure distribution in the center of the rear tire.

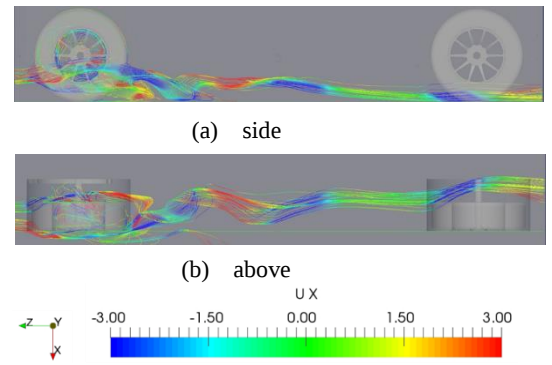


Fig. 13 Streamline of guide device.

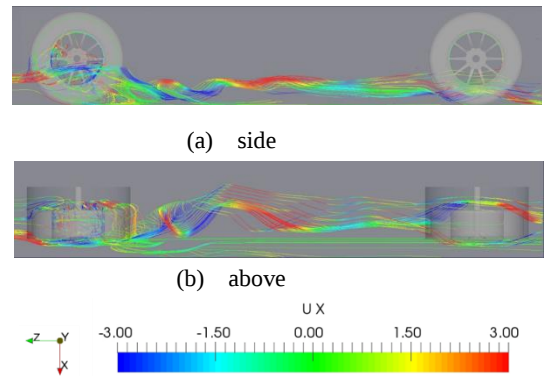


Fig. 14 Streamline of base.

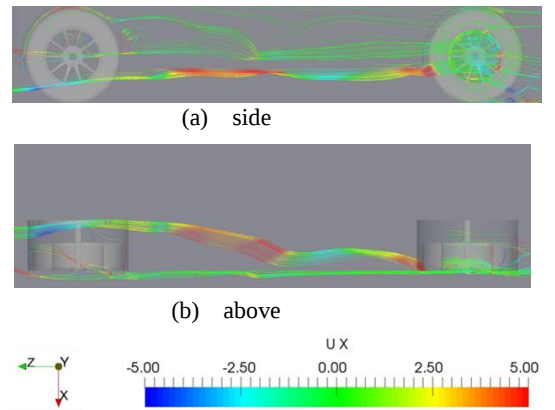


Fig. 15 Streamline of guide device around the wheel.

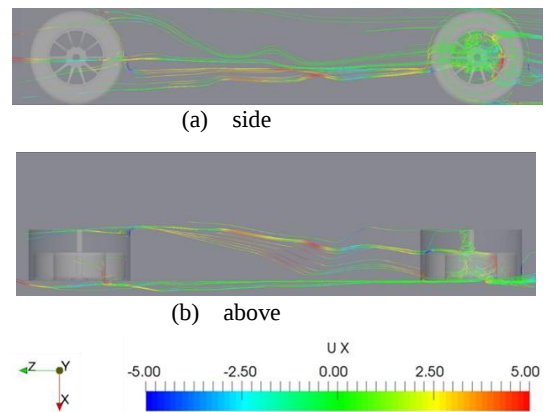


Fig. 16 Streamline of base around the wheel.

4. C_D 値低減のための改善案

リアタイヤとリアホイールにおいて C_D 値を低減するための対策としてリアタイヤハウスに新たな流れ制御デバイスを取り付ける方法を考えた。この流れ制御デバイスはリアタイヤにぶつかる流れを車体の外側に逃がすという効果を期待して考案した。新たに考案した流れ制御デバイスとその付近の流れを真横から見た図を図 17、真上から見た図を図 18 に示す。図 17 より、タイヤハウスの下部からタイヤハウス内部に流れが入ってこないようになっている。そして、タイヤハウス内部からの流れはタイヤハウス下部に向かうにつれて流路が狭まっており、非圧縮性流れであるとして考えると流れが下向きに加速するようになっている。図 18 より、真上から見るとタイヤハウスの内側から車体の外側に向かって流路が狭まるようになっている。それによって、外側に向かうほど流れが速くなり、圧力が低くなると考えられる。したがって、タイヤハウスの内側を流れる流体はより外側を流れる流体に向かって曲げられると考えられる。その結果、図 19 に示すようなリアタイヤ前方下部において車体の外側に向かっていく流れが発生すると考えられる。この流れによって、リアタイヤとリアホイールに対して悪影響を及ぼす原因となるリアタイヤにぶつかる流れを外側に向かって逃がすことができると考えている。それによって、リアタイヤとリアホイール部分の C_D 値を低減することで、車体全体における C_D 値の低減につながると考えている。

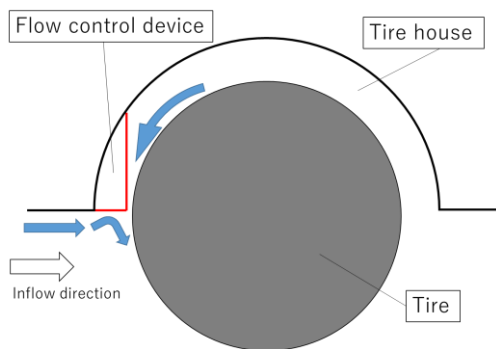


Fig. 17 Rear flow control device and surrounding flow (side).

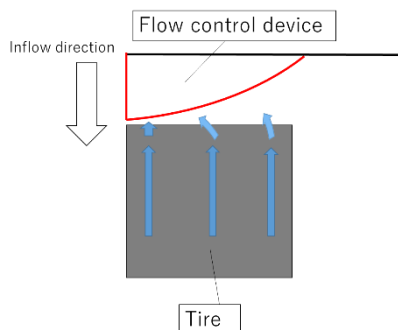


Fig. 18 Rear flow control device and surrounding flow (above).

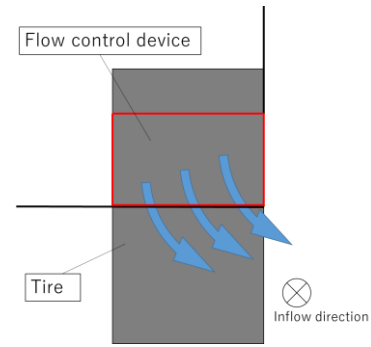


Fig. 19 Flow in front of the rear tire.

5. 結論

研究ではホイール形状による空力性能への影響を調査した後、ホイール形状を考慮した状態におけるタイヤハウス内の流れに対して、有効な流れ制御デバイスを考案し自動車の空気抵抗低減を実現することを目的として数値計算を行った。その結果、フロントタイヤハウス内においては、考案した流れ制御デバイスの効果によって C_D 値を低減させることができた。しかし、リアタイヤハウス内においては、 C_D 値を増加させる結果となった。そして、フロントタイヤハウス内における C_D 値の減少分に対して、リアタイヤハウス内における C_D 値の増加分が大きかったため、車体全体における C_D 値は増加する結果となった。特に C_D 値が大きく増加したリアタイヤとリアホイール部分に関しては、どちらもフロントタイヤハウス下部からの流れが原因であると分かった。リアタイヤに関しては、フロントタイヤ後方で形成する渦による影響が大きいことが分かり、この渦の影響をリアタイヤが受けないようにすることが重要であると分かった。リアホイールに関しては、フロントタイヤハウス下部からの流れが主流方向に対して右側に曲げられることでリアタイヤにぶつかり、最終的にリアホイール部分にぶつかることが原因であると分かった。そのため、フロントタイヤハウス下部からの流れをリアタイヤ部分に当てないようにすることが重要であると分かった。

以上のことを踏まえて、リアタイヤとリアホイールにおいて C_D 値を低減するための対策として、リアタイヤにぶつかる流れを車体の外側に逃がすための流れ制御デバイスを考案した。

文献

- (1) 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 巻，第 3 号(通号 128 号)，平成 23 年 7 月
- (2) 公共社団法人 自動車技術会，“自動車の空力技術 流体技術部門委員会編”，株式会社精興社，2017
- (3) 児玉勇司，小石正隆，“タイヤによる自動車の空気抵抗低減技術に関する研究”，第 26 回数値流体力学シンポジウム，D06-1，2012
- (4) 松雪壮一郎，“リアタイヤハウス内の構造が自動車の空力性能に及ぼす影響”，高知工科大学大学院，修士論文，2018
- (5) 森健人，“自動車の空力性能向上のためのリアタイヤハウス内デバイスの効果検証”，高知工科大学，卒業論文，