

2020（令和2）年度 修士学位論文

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

2021 年 3 月 11 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻  
知能機械工学コース

1235093 森 健人

指導教員 荻野 要介, 野崎 理

## 目次

第 1 章	1
序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 自動車の空力特性	2
1.3 先行研究	3
1.4 研究目的	4
1.5 研究方法	4
第 2 章	5
数値流体計算	5
2.1 ナビエ・ストークス方程式	5
2.2 レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式	5
2.3 乱流モデル	6
2.4 速度圧力解法	8
2.5 数値計算手法	10
第 3 章	11
ホイール形状による空力性能への影響	11
3.1 計算対象	11
3.2 計算領域と境界条件	12
3.3 結果と考察	14
第 4 章	18
流れ制御デバイス付加による空力性能への影響	18
4.1 流れ制御デバイスの考案	18
4.2 計算対象	20
4.3 計算領域と境界条件	21
4.4 流れ制御デバイスによる抵抗変化	22
4.4.1 フロントタイヤハウス内部の流れ	24
4.5.2 リアタイヤハウス内部の流れ	30
4.5.3 ボディーと床下の流れ	39
4.5.4 計算結果のまとめ	43
4.5.5 $C_D$ 値低減のための改善案	43

第 5 章.....	46
結論.....	46
謝辭.....	46
参考文献 .....	47

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。圧力抵抗はボディ形状による抵抗が大半を占めていることが分かっているが、ボディ形状はデザイン性や居住性にも関わっており、空力的に理想的な形状にすることが容易ではない。そこで、近年ではタイヤ周辺の流れが注目されており、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics 略称：CFD）と風洞試験によりタイヤ周辺の流れが車体全体の空気抵抗に及ぼす影響に関して、調査が行われてきた。児玉らは、図 1.1 に示すタイヤの車両内側のサイド部にフィンを持つフィンタイヤとノーマルタイヤのそれぞれを装着した自動車の空気抵抗を CFD と風洞試験により比較した。その結果、タイヤサイド部のフィンによってタイヤハウス内に渦流れが誘起され、タイヤハウス前面部の圧力が増加することで空気抵抗を減少させていることを明らかにし、タイヤハウス周辺の流れが車体全体の空気抵抗に影響を及ぼすことを示した<sup>[3]</sup>。

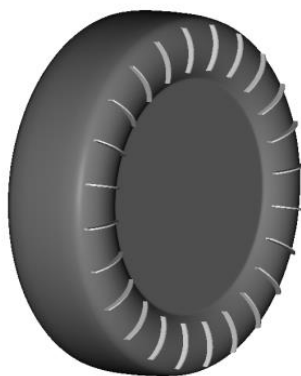


図 1.1 フィンタイヤ

## 1.2 自動車の空力特性

自動車に加わる空気力は車両の前後、左右、上下の各軸方向の力と各軸周りのモーメントで表され、これらを総称して空力六分力と呼ぶ（図 1.2）。



図 1.2 空気六分力<sup>[1]</sup>

空気力は無次元化して表され、車両の前後方向の抗力係数（空気抵抗係数）( $C_D$ )、同様に上下方向の揚力係数( $C_L$ )、左右方向の横力係数( $C_S$ )で表す。モーメントについても無次元化して表され、車両の前後軸周りのローリングモーメント係数( $C_{RM}$ )、同様に左右軸周りのピッチングモーメント係数( $C_{PM}$ )、上下軸周りのヨーイングモーメント係数( $C_{YM}$ )で表す。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2.1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2.2)$$

$$C_S = \frac{F_S}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2.3)$$

$$C_{RM} = \frac{M_{RM}}{\frac{1}{2}\rho v^2 Al} \quad (2.4)$$

$$C_{PM} = \frac{M_{PM}}{\frac{1}{2}\rho v^2 Al} \quad (2.5)$$

$$C_{YM} = \frac{M_{YM}}{\frac{1}{2}\rho v^2 Al} \quad (2.6)$$

ここで、 $F$ ：各軸方向の力[N]， $M$ ：各軸周りのモーメント[Nm]， $\rho$ ：空気密度[kg/m<sup>3</sup>]， $v$ ：相対風速[m/s]， $A$ ：前面投影面積[m<sup>2</sup>]， $l$ ：ホイールベース[m]である．これらの空力特性は車両の運動に関係し，各係数の影響を表 1 に示す．

表 1.1 各係数の影響

空気六分力	車両への影響
抗力係数( $C_D$ )	燃費，最高速度，加速性能
揚力係数( $C_L$ )	直進安定性，操舵時の安定性，横風安定性
横力係数( $C_S$ )	横風安定性
ローリングモーメント係数( $C_{RM}$ )	横風安定性
ピッチングモーメント係数( $C_{PM}$ )	直進安定性，横風安定性
ヨーイングモーメント係数( $C_{YM}$ )	直進安定性，操舵時の安定性，横風安定性

空気抵抗は走行抵抗の一つであるが平均的な乗用車における全走行抵抗消費仕事のうち空気抵抗の占める割合は約 10%～20%である<sup>[1]</sup>．空気抵抗は車体前後の流れ方の違いで生じた圧力差による圧力抵抗と車体表面と気流との摩擦抵抗に分けられる．圧力抵抗は形状抵抗，表面の凹凸による抵抗，吹き抜け抵抗，誘導抵抗に分けられる．主な空気抵抗発生割合を表 2 に示す<sup>[1]</sup>．

表 1.2 各部位ごとの空気抵抗発生割合

空気抵抗の種類	部位・原因	空気抵抗の割合
圧力抵抗	ボディー	40%
	床下	20%
	タイヤ	15%
	通気	15%
摩擦抵抗	摩擦	10%

### 1.3 先行研究

本研究の先行研究<sup>[4][5]</sup>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 1.3 に示すような流れ制御デバイスが考案された．この整流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，整流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整流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整流デバイスの影響の変化が調査された．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．

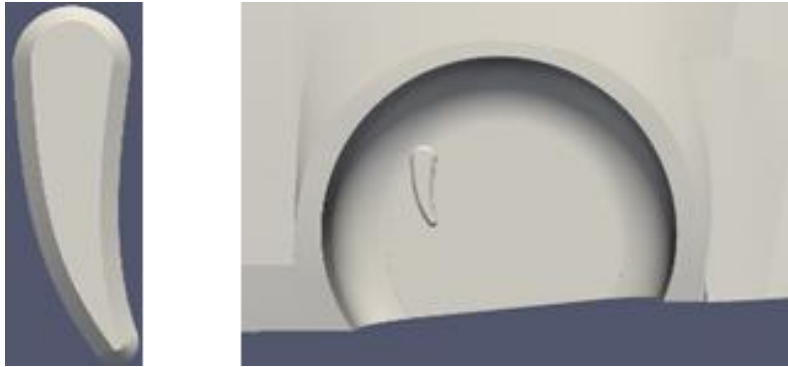


図 1.3 先行研究で考え出されたデバイスの形状と取り付け位置

#### 1.4 研究目的

本研究では先行研究と同様にタイヤハウス内の空気の流れに着目し，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する．そして，流れ制御デバイスが自動車全体の空力性能に及ぼす影響について考察する．

#### 1.5 研究方法

本研究では，まず先行研究の課題として残されたホイール形状による空力性能への影響の調査を行う．そして，流れ制御デバイスの形状を考案した後，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．

## 第2章

## 数値流体計算

### 2.1 ナビエ・ストークス方程式

非圧縮性流体を考えると，ナビエ・ストークス方程式は次式で表される．

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\nu \mathbf{D}) \quad (2.1)$$

ここで $\mathbf{u}$ は速度， $p$ は密度で割られた圧力である． $\mathbf{D}$ は速度勾配の対称部分で，次式で表される．

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \} \quad (2.2)$$

また，連続の式は

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.3)$$

### 2.2 レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式

ナビエ・ストークス方程式を考える．平均化の方法として，時間平均やアンサンブル平均を考える．速度 $\mathbf{u}$ の平均を次式で定義する．

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i \quad (2.4)$$

$n$ 回実験を行い，その平均をとる．速度 $\mathbf{u}$ は平均と変動 $\mathbf{u}'$ に分けられる．

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (2.5)$$

これをレイノルズ分解という．アンサンブル平均には次のような性質がある．

$$\overline{\bar{\mathbf{u}}} = \bar{\mathbf{u}} \quad (2.6)$$

$$\overline{\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}} = \bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}$$

$$\bar{\mathbf{u}'} = \overline{\mathbf{u}'\bar{\mathbf{u}}} = \overline{\bar{\mathbf{u}}\mathbf{u}'} = \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'\bar{\mathbf{u}}} = \mathbf{0}$$

$$\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} \neq \mathbf{0}$$

このような性質をもつ平均をレイノルズ平均(Reynolds averaging)という．

連続の式の平均化を考える．レイノルズ分解により

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} + \nabla \cdot \mathbf{u}' = \mathbf{0} \quad (2.7)$$

これにレイノルズ平均を適用すると

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{0} \quad (2.8)$$

これより次式を得る．

$$\nabla \cdot \mathbf{u}' = \mathbf{0} \quad (2.9)$$



ナビエ・ストークス方程式の平均化を考える．まず，ナビエ・ストークス方程式にレイノルズ分解を適用する．

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{u}}\mathbf{u}' + \mathbf{u}'\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'\mathbf{u}') \\ = -\nabla p - \nabla p' + \nabla \cdot (2\nu\mathbf{D} + 2\nu\bar{\mathbf{D}}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

両辺にレイノルズ平均を適用すると，次式を得る．

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (2\nu\bar{\mathbf{D}} - \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}') \quad (2.11)$$

もとの式と比較すると，速度が平均速度に置き換わったのに加え， $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ の項が加わった形になっている．この項は密度をかけると応力の単位になるため，レイノルズ応力と呼ばれる．また，2つの速度の変動成分の積の形をしているので，二次相関，二重相関，二次モーメントなどと呼ばれる．レイノルズ平均化されたナビエ・ストークス方程式のことを，レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式という．

## 2.3 乱流モデル

乱流の数値解析を行う場合，乱流モデル化した乱流モデルが用いられる．乱流モデルには，レイノルズ平均を用いるものと，空間平均を用いるものがある．レイノルズ平均を用いるモデルはレイノルズ平均モデルあるいは RANS モデルと呼ばれ，モデル化の種類として RANS 方程式のレイノルズ応力をモデル化するものと，レイノルズ応力輸送方程式をモデル化するものがある．RANS モデルは，大きなスケールの乱れをモデル化するため，モデル化のために参照した解析対象の条件を含めてモデル化されていると考えられ，汎用的なものにはなりにくい．そのため解析対象に合わせて様々なモデルが提案されている<sup>[6]</sup>．

ここでは $k$ - $\omega$ ， $k$ - $\omega$ SST の概要について述べる． $k$ - $\omega$ モデルは，変数として $k$ と比散逸率 $\omega$ を採用したモデルである．次式で表す．

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} = \frac{0.09k}{\beta\nu} \quad (2.12)$$

乱流粘性係数は次式で表される．

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (2.13)$$

$k$ の輸送方程式は次式で表される

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k\bar{u}_j}{\partial x_j} &= P_k - \beta^*k\omega + D_k \\ D_k &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$\omega$ の輸送方程式は次式で表される.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2 + D_\omega \quad (2.15)$$

$$D_\omega = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\}$$

定数は以下に示す.

$$\beta^* = 0.09, \sigma_k = 2, \sigma_\omega = 2, \gamma = 5/9, \beta = 0.075 \quad (2.16)$$

$\omega$ の境界条件は壁近傍の接点に対して次式で与えられる.

$$\omega = \frac{6\nu}{\beta_1 y^2} \quad (2.17)$$

この $k$ - $\omega$ モデルには、幾つかの種類がある. まず上で挙げた $k$ - $\omega$ モデルは、壁近傍の流れについては $k$ - $\varepsilon$ モデルよりも得意であるが、自由流れに弱い. この欠点の回避の目的として、 $k$ - $\omega$ SST モデルがある.  $k$ - $\omega$ SST モデルは2つのモデルからなる.

1つ目はBSL(baseline)モデルであり、壁近傍では $k$ - $\omega$ モデル、その外側では $k$ - $\varepsilon$ モデルから変換した $k$ - $\omega$ モデルを用いる. 2つ目はSST(share stress transport)モデルであり、乱流のせん断応力の輸送効果を考慮する.

$\varepsilon$ の輸送方程式に $\varepsilon = k\omega$ を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega u_j}{\partial x_j} = & (C_{\varepsilon 1} - 1) \frac{\varepsilon}{k} P_k - (C_{\varepsilon 2} - 1) \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} \\ & + \frac{2}{k} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2.18)$$

上式と $k$ - $\omega$ モデル $\omega$ の輸送方程式式(21)と比較すると、式(21)には上式の右辺最終項にあたるものがない. この項は交差拡散項と呼ばれ、 $k$ - $\omega$ モデルと $k$ - $\varepsilon$ モデルの差を表している.  $k$ - $\omega$ SST モデルの輸送方程式を示す.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \bar{P}_k - \beta^* k \omega + D_k \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} \bar{P}_k - \beta \omega^2 + D_\omega + (1 - F_1) \frac{2\alpha_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

ここで、 $F_1$ は混合関数(blending function)であり、次式で定義される.

$$\begin{aligned} F_1 = \tanh \left\{ \left( \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y} \frac{500\nu}{y^2}, \frac{4k\alpha_{\omega 2}}{CD_{k\omega}} \right) \right]^4 \right) \right\} \\ CD_{k\omega} = \max \left( \frac{2\alpha_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

壁から離れたところでは $F_1$ の値が0となって $k$ - $\varepsilon$ モデルになり、壁近傍では $F_1$ の値が1となって $k$ - $\omega$ モデルになるようになっている.

各係数についても、混合関数になり次のように表す.

$$\alpha_k = F_1 \alpha_{k2} + (1 - F_1) \alpha_{k2} (\sigma_k = 1/\alpha_k) \quad (2.21)$$

$$\alpha_\omega = F_1 \alpha_{\omega 2} + (1 - F_1) \alpha_{\omega 2} (\sigma_k = 1/\alpha_\omega)$$

$$\gamma = F_1 \gamma_2 + (1 - F_1) \gamma_2$$

$$\beta = F_1 \beta_2 + (1 - F_1) \beta_2$$

乱流粘性係数と乱流エネルギーの生成項には制限(limiter)をかける.

$$\nu_k = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, F_2 \sqrt{2 D_{ij} D_{ij}})} \quad (2.22)$$

$$\widetilde{P}_k = \min(P_k, \beta^* k \omega) \quad (2.23)$$

ここで,  $F_2$  は混合関数であり

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y'}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.24)$$

各定数は

$$\beta^* = 0.09, \alpha_{k1} = 0.85, \alpha_{k2} = 1, \alpha_{\omega 1} = 0.5, \alpha_{\omega 2} = 0.856 \quad (2.25)$$

$$\gamma_1 = 5/9, \gamma_2 = 0.44, \beta_1 = 0.075, \beta_2 = 0.828$$

## 2.4 速度圧力解法

速度圧力解法の 1 つに SIMPLE 法<sup>[7]</sup>がある. SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)法は, 速度 $u$ と圧力 $p$ を反復計算で求める. 反復計算におけるある時点での速度 $u$ と圧力 $p$ を, それぞれ予測値 $u^*$ ,  $p^*$ とその修正値 $u'$ ,  $p'$ の和で表す.

$$u = u^* + u' \quad (2.26)$$

$$p = p^* + p'$$

反復の最終段階で予測値が真の解と一致した場合, 修正値は 0 になる. 式(7)を部分的に有限体積法で離散化すると, 次式のように表せる.

$$A_P u_P + \sum A_N u_N = -\nabla p + s \quad (2.27)$$

式(26)と式(27)を代入すると,

$$A_P u_P^* + \sum A_N u_N^* = -\nabla p^* + s - \left( A_P u_P' + \sum A_N u_N' + \nabla p' \right) \quad (2.28)$$

右辺第 3 項は, 最終段階で修正値は 0 となることから, 0 にならなければならない. そのことから次式を得る.

$$A_P u_P^* + \sum A_N u_N^* = -\nabla p^* + s \quad (2.29)$$

$$u_p' = -\frac{\sum A_N u_N'}{A_p} - \frac{1}{A_p} \nabla p' \quad (2.30)$$

連続の式は次式で表される.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = 0 \quad (2.31)$$

式(32)より,

$$\nabla \cdot u_p = \nabla \cdot u_p^* + \nabla \cdot u_p' = 0 \quad (2.32)$$

これに式(31)を代入して次式を得る.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{A_p} \nabla p' \right) = \nabla \cdot u_p^* - \nabla \cdot \left( \frac{\sum A_N u_N'}{A_p} \right) \quad (2.33)$$

この式を解けば圧力の修正値が得られるが、右辺第二項が未知である. この項に含まれる速度修正値は 0 になるので、この項は無視できる. したがって次の 2 式を得る.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{A_p} \nabla p' \right) = \nabla \cdot u_p^* \quad (2.34)$$

$$u_p' = -\frac{1}{A_p} \nabla p' \quad (2.35)$$

上式から圧力と速度の修正値が得られる.

**SIMPLE** 法のアルゴリズムは以下のようになる.

1. 式(30)を解いて速度の予測値  $u^*$  を得る. 圧力の予測値  $p^*$  には前回の反復計算で得られた値を用いる.
2. 式(34)を解いて圧力の修正値  $p'$  を得る.
3. 式(36)より速度の修正値  $u'$  を計算する.
4. 式(26), (27)より速度  $u$  と圧力  $p$  を計算する.
5. 収束解が得られるまで上記の手順を繰り返す.

**SIMPLE** 法では式(33)の右辺第二項を無視したことにより圧力の修正値を過大に予測するため、圧力の計算が発散しがちであり、収束も遅い. そこで、不足緩和を用いてこの問題を解決する. 速度と圧力に対する緩和係数をそれぞれ  $\alpha_u$ ,  $\alpha_p$  とする. 速度の場合、前ステップの速度を  $u^{**}$  とすると、緩和係数により次式のように表される.

$$u_p^* = u_p^{**} + \alpha_u \left( \frac{s - \sum A_N u_N^*}{A_p} - \frac{1}{A_p} \nabla p^* - u_p^{**} \right) \quad (2.36)$$

すなわち、運動方程式が次式で表される.

$$\frac{A_p}{\alpha_u} u_p^* + \sum A_N u_N^* = -\nabla p^* + s + (1 - \alpha_u) \frac{A_p}{\alpha_u} u_p^{**} \quad (2.37)$$

圧力の場合は、緩和係数により次式で計算される.

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (2.38)$$

一般的には  $\alpha_u = 0.7$ ,  $\alpha_p = 0.3$  という値が用いられるが、最適な値は問題による.

## 2.5 数値計算手法

数値計算には OpenFOAM<sup>[7]</sup>を用いる．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ーに含まれる blockMesh と snappyHexMesh を用いる．

## 第 3 章

# ホイール形状による空力性能への影響

### 3.1 計算対象

数値計算で用いるホイール形状を考慮していない車体の半裁モデル（簡易タイヤモデル）を図 3.1、流れ制御デバイスの形状と設置位置を図 3.2 に示す。流れ制御デバイスはリアタイヤハウスのみに設置した。また、その各寸法を表 3.1 に示す。本計算では、タイヤ部分を簡易タイヤとしたものと図 3.3 に示す簡易ホイール形状に変更したモデル（簡易ホイールモデル）の 2 パターンに対して、それぞれ流れ制御デバイスを付加した場合と付加していない場合の計 4 パターンの比較計算を行った。

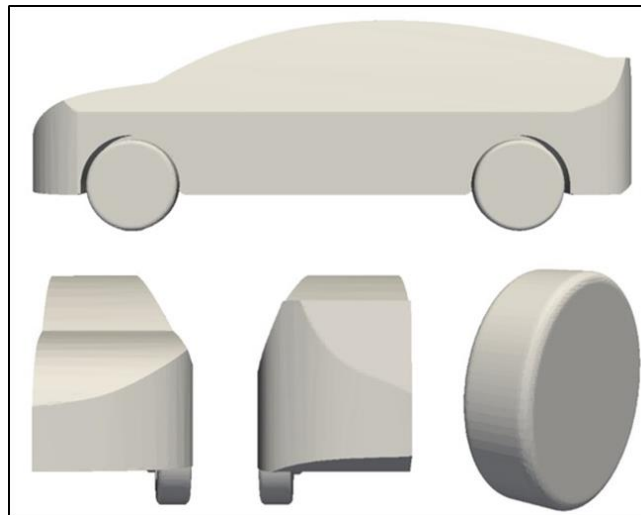


図 3.1 簡易タイヤモデルの車体形状とタイヤ形状

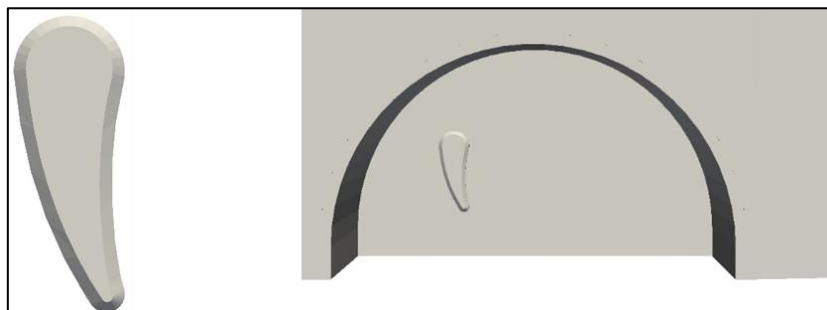


図 3.2 流れ制御デバイスの形状と設置位置

表 3.1 簡易タイヤモデルの寸法

全長 [mm]	4460
幅 [mm]	880
高さ [mm]	1490
タイヤ直径 [mm]	634.5
タイヤ幅 [mm]	195

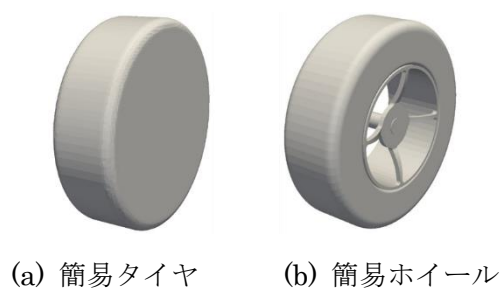


図 3.3 簡易タイヤと簡易ホイール

### 3.2 計算領域と境界条件

計算領域は図 3.4 に示す通りで主流方向×横方向×高さ方向に  $40\text{m} \times 6\text{m} \times 6\text{m}$  とした．また，本計算では半裁モデルを使用し，図 3.5 に示すように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．

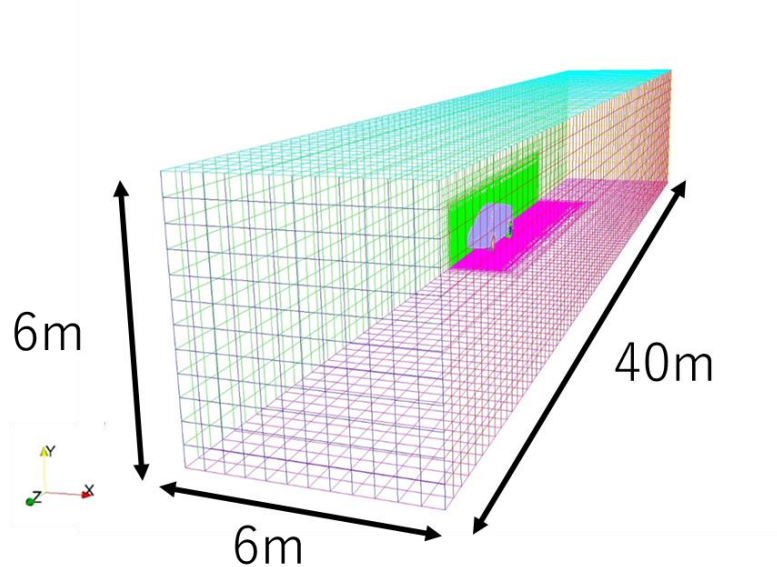


図 3.4 計算領域

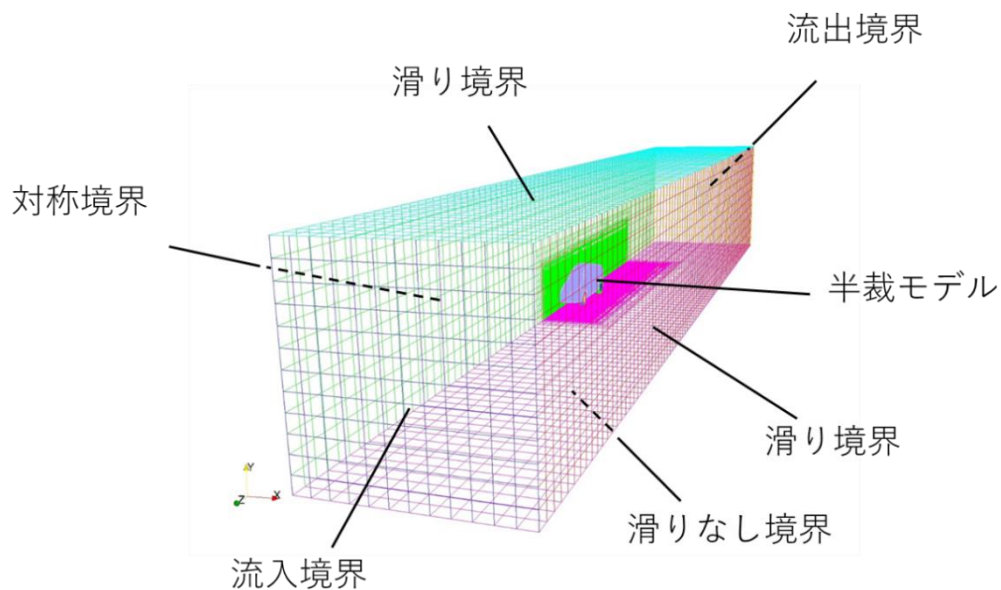


図 3.5 各境界条件

計算条件を表 3.2 に示す．自動車が時速 60km/h で走行することを想定したため，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．自動車のレイノルズ数は $4.96 \times 10^6$ である．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．

表 3.2 計算条件

流入速度[m/s]	16.667
乱流モデル	$k\omega$ -SST
乱流強度[%]	1
乱流エネルギー	0.042
比散逸率	5.555
タイヤ角速度[rad/s]	52.536



### 3.3 結果と考察

流れ制御デバイスを付加しない場合と付加した場合における、それぞれのホイール形状の有無による $C_D$ 値の変化を図 3.6 に示す。流れ制御デバイスを付加しない場合と付加した場合のどちらもホイール形状を考慮することによって、車体全体の $C_D$ 値は増加した。 $C_D$ 値の増加は、流れ制御デバイスを付加しない場合では約 8.8%, 付加した場合では約 8.0%であった。

次に、ホイール形状を考慮したことによる $C_D$ 値の増加が車体のどの部分によるものかを調べるために、各車体部分における $C_D$ 値の変化を調べた。流れ制御デバイスを付加しない場合を図 3.7, 付加した場合を図 3.8 に示す。まず、流れ制御デバイスを付加しない場合に着目すると、最も変化が大きかったのはフロントタイヤ部分であり、ここでの $C_D$ 値の増加分はホイール形状を考慮していない車体全体の $C_D$ 値の約 9.8%に相当すると分かった。次に、流れ制御デバイスを付加した場合に着目すると、最も変化が大きかったのは、流れ制御デバイスを付加しない場合と同様にフロントタイヤ部分であった。そして、 $C_D$ 値の増加分はホイール形状を考慮していない車体全体の約 11.1%に相当すると分かった。また、次に変化が大きかったフロントタイヤハウス部分における $C_D$ 値の減少分は約 2.7%に相当することが分かった。そして、流れ制御デバイスの有無によらず、ホイール形状を考慮することによってフロントタイヤ部分が最も影響されるということが分かった。

ここで、特に変化が大きかった流れ制御デバイスを付加した場合におけるフロントタイヤ周辺の流れに着目する。まず、フロントタイヤ表面の圧力分布を図 3.9 に示す。簡易タイヤモデルと簡易ホイールモデルを比較すると、フロントタイヤの前方下面部における圧力分布に差が生じていた。ホイール形状を考慮することでフロントタイヤの前方下面部の縁部分における圧力が上昇しており、これによりフロントタイヤ部分における $C_D$ 値が増加したと考えられる。次に、圧力上昇したタイヤの内側の縁部分と外側の縁部分付近の断面における主流方向速度分布をそれぞれ図 3.10 と図 3.11 に示す。どちらの断面においても、簡易タイヤモデルの場合ではタイヤの下半分程度の領域で大きな主流方向速度が分布しているのに対して、簡易ホイールモデルではタイヤ下面付近の主流方向速度が低下している。これにより、簡易ホイールモデルのタイヤ下面付近の圧力が上昇したと考えられる。

次に、フロントタイヤハウス壁面付近の高さ方向と主流方向の速度分布を図 3.12 に示す。簡易タイヤモデルと簡易ホイールモデルを比較すると、フロントタイヤハウス壁面付近の流れに変化が生じていることが分かる。簡易ホイールモデルでは前方から流れてきた流体がタイヤハウスの下からタイヤハウス後面を沿うように入り、そのままタイヤハウスの形状に沿いながら流れていることが分かった。

以上のことから、ホイール形状を加味したことによる $C_D$ 値の変化が大きかったフロントタイヤハウス部分に着目し、図 3.12 で確認されたタイヤハウス壁面付近の流れに対して作用することを期待した流れ制御デバイスを考案することとした。

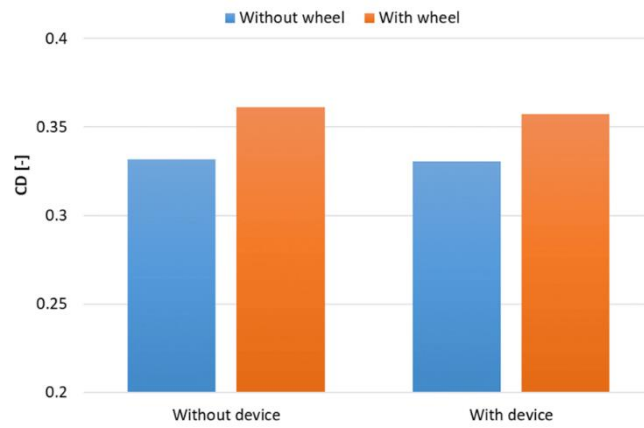


図 3.6 ホイール形状による $C_D$ 値の差

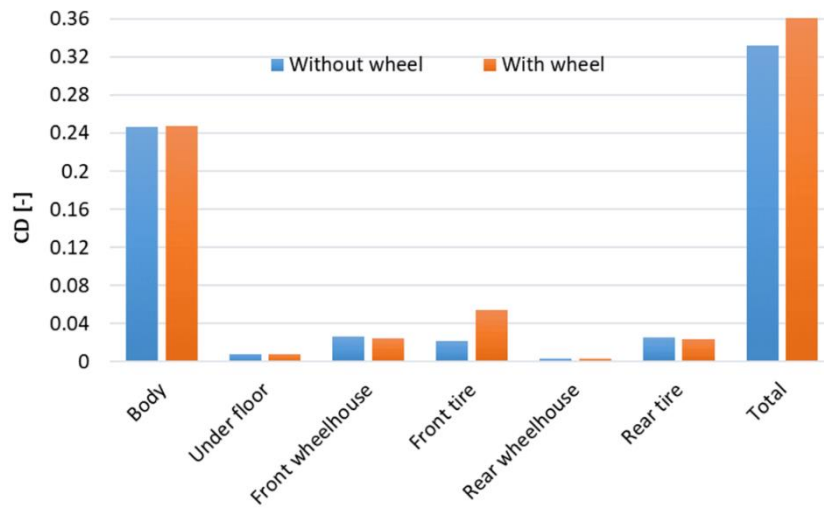


図 3.7 各車体部分における $C_D$ 値の差（流れ制御デバイスなし）

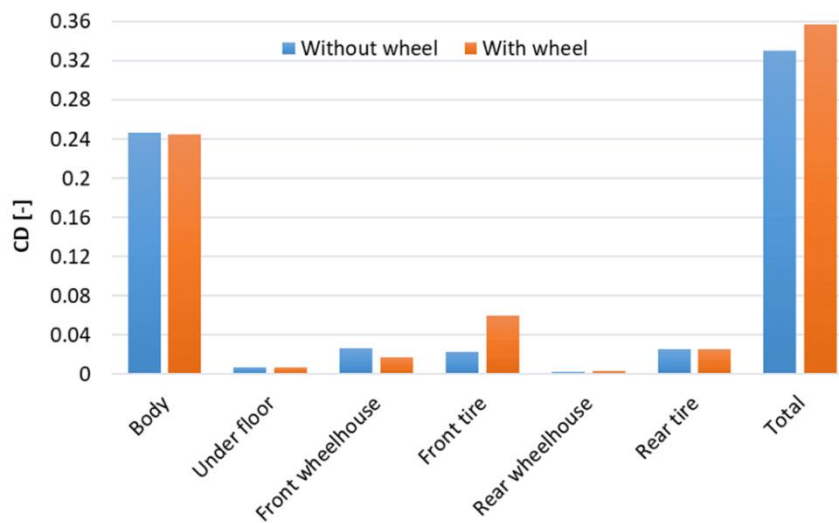


図 3.8 各車体部分における $C_D$ 値の差（流れ制御デバイスあり）

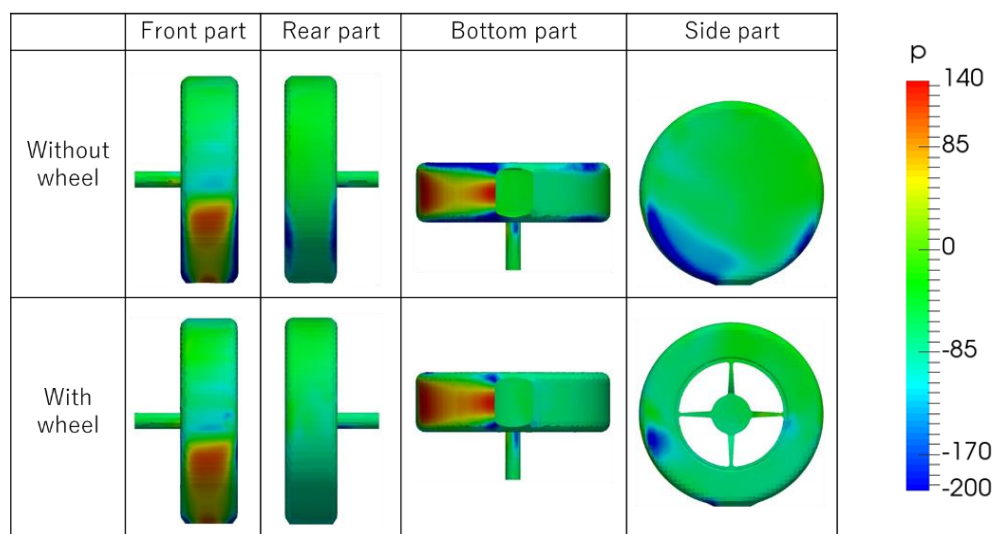


図 3.9 フロントタイヤ圧力分布（流れ制御デバイスあり）

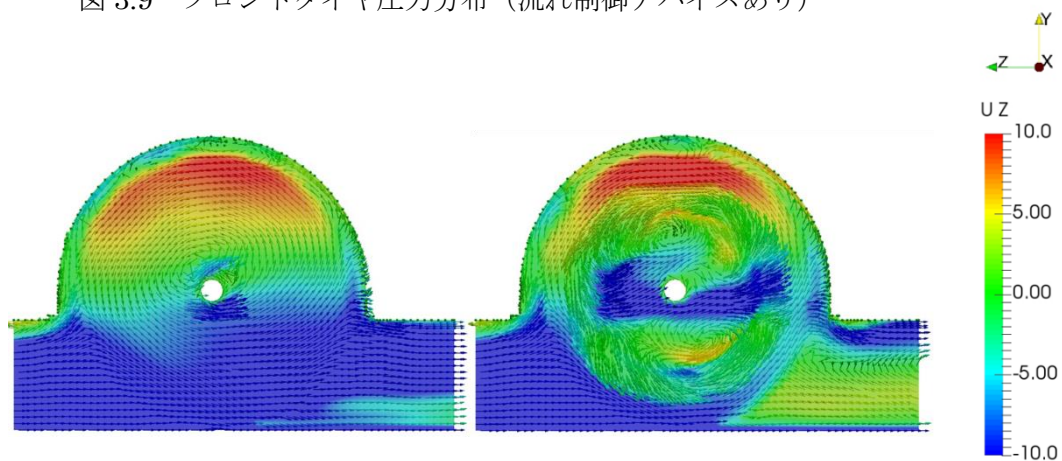


図 3.10 主流方向速度分布( $x = 0.68$ )

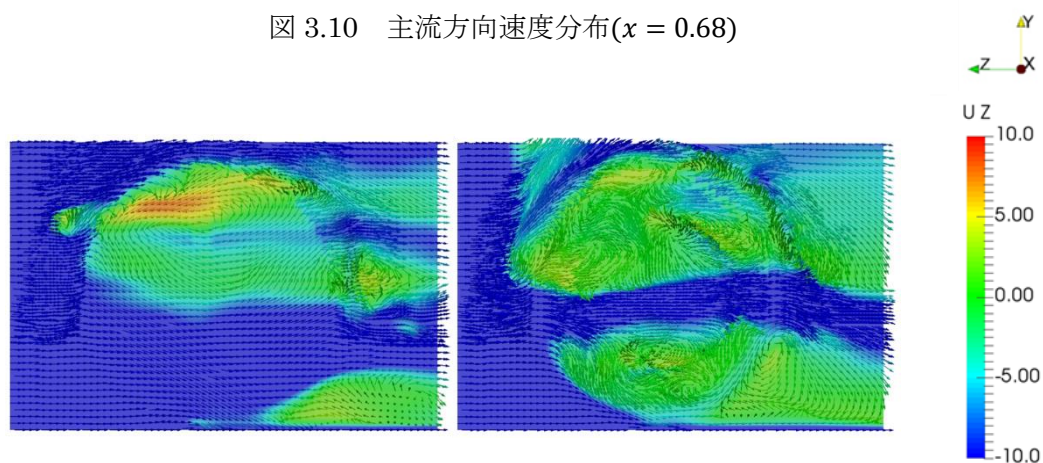
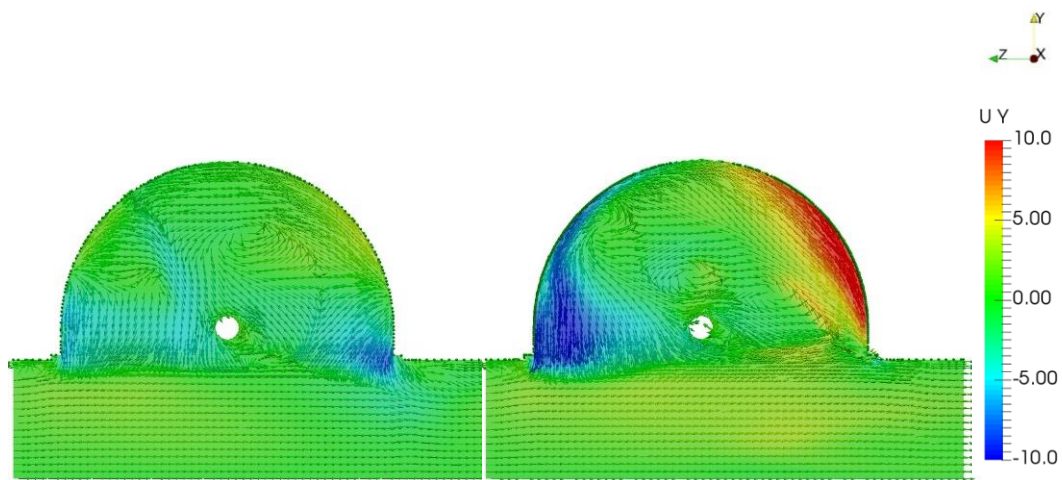
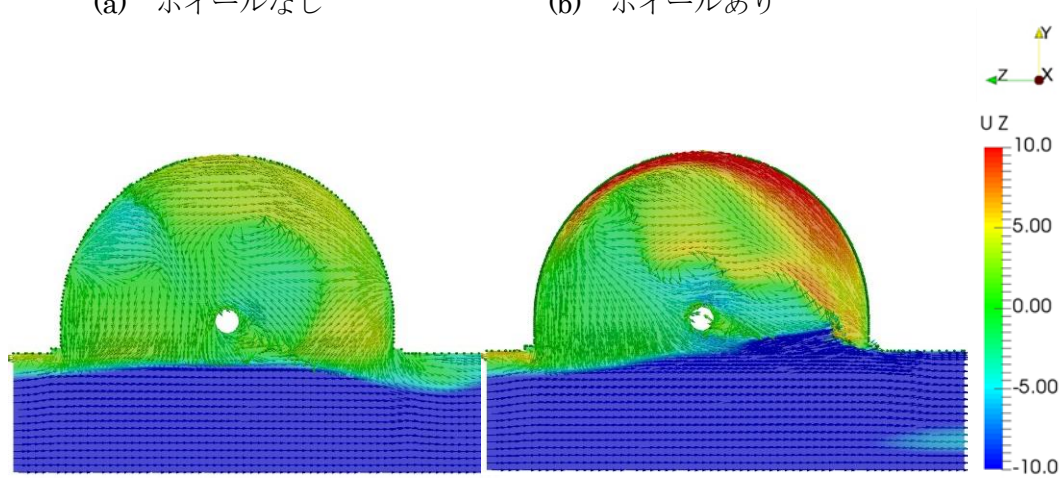


図 3.11 主流方向速度分布( $x = 0.89$ )



(a) ホイールなし

(b) ホイールあり



(a) ホイールなし

(b) ホイールあり

図 3.12 高さ方向速度分布と主流方向速度分布( $x = 0.54$ )

## 第 4 章

# 流れ制御デバイス付加による空力性能への影響

### 4.1 流れ制御デバイスの考案

第 3 章の結果より，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 4.1 に示すようなおおよ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．第 3 章で得られた簡易ホイールモデルのフロントタイヤハウス壁面付近の高さ方向と主流方向の速度分布を図 4.2 に示す．図 4.2 のようにタイヤハウスの後面部と前面部において，おおよそタイヤハウスの形状に沿いながらも，ややタイヤ軸中心方向に流れている箇所もある．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えた．考案した流れ制御デバイスの形状を図 4.3 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．

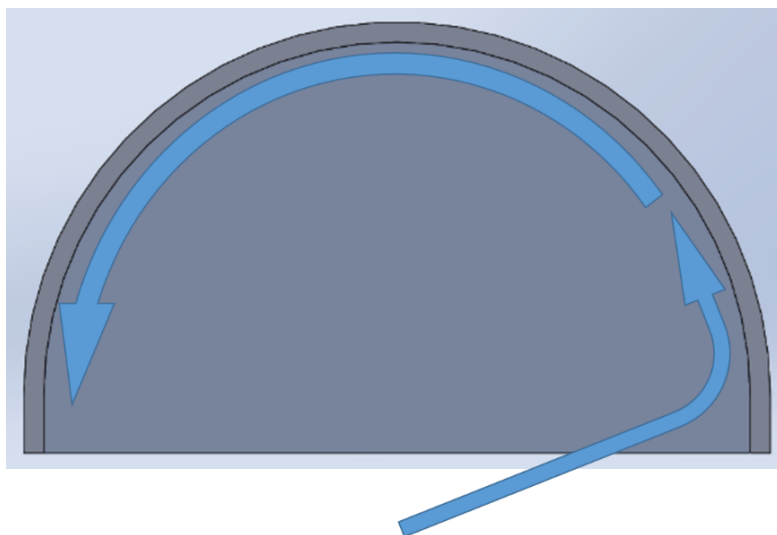


図 4.1 フロントタイヤハウス壁面付近の流れ方



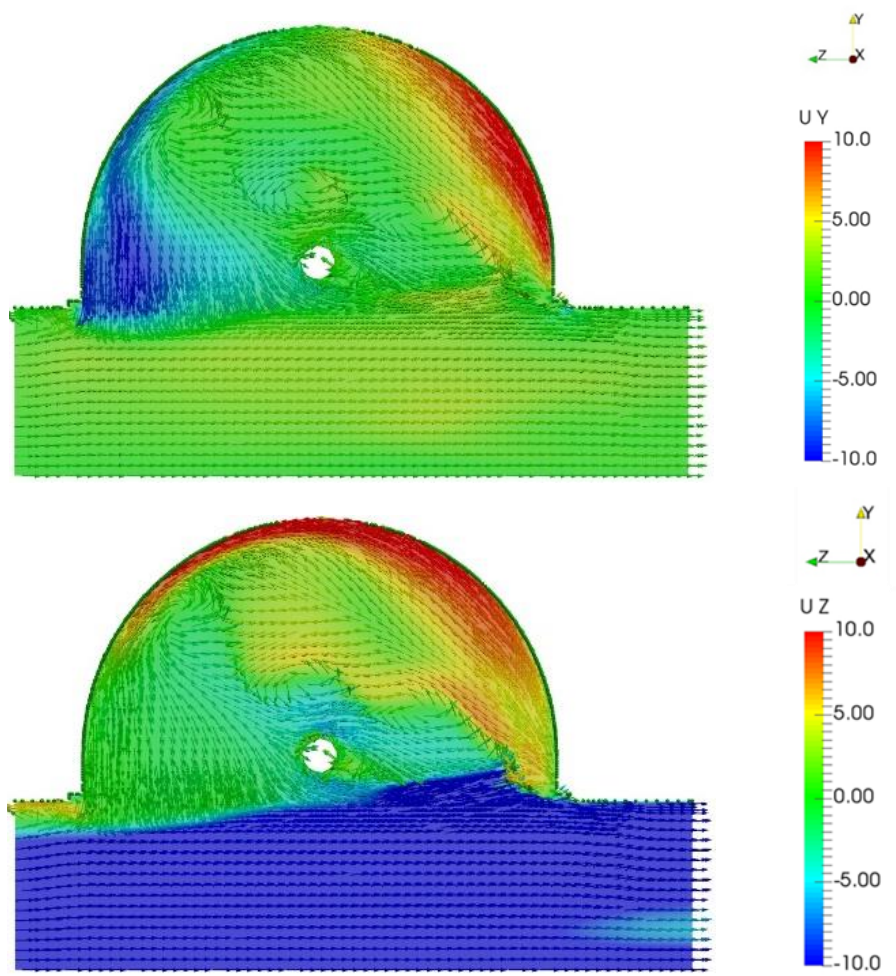
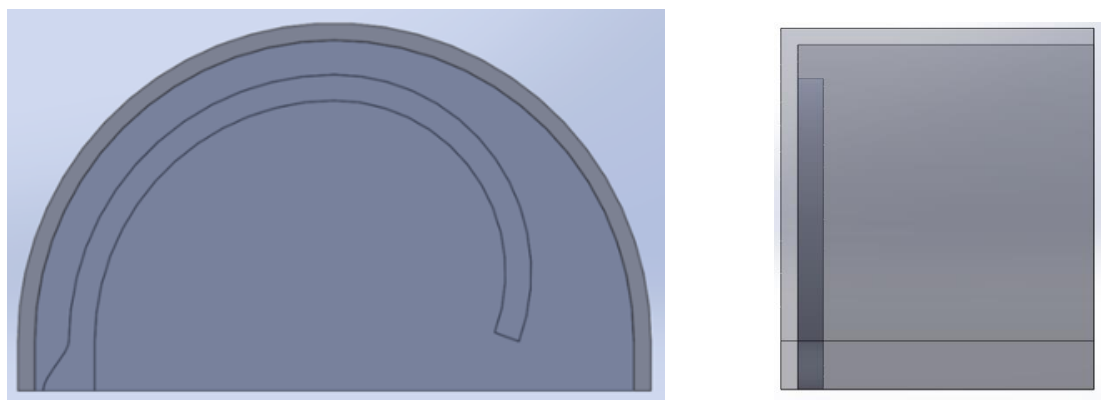


図 4.2 フロントタイヤハウス壁面付近の高さ方向（上図）と主流方向（下図）の速度分布



(a) 側面図

(b)正面図

図 4.3 考案した流れ制御デバイスの形状

## 4.2 計算対象

数値計算で用いるモデルを図 4.4 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 4.5 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.

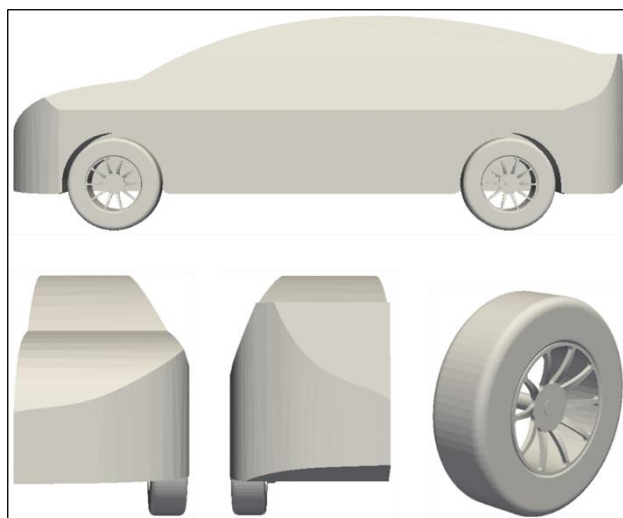
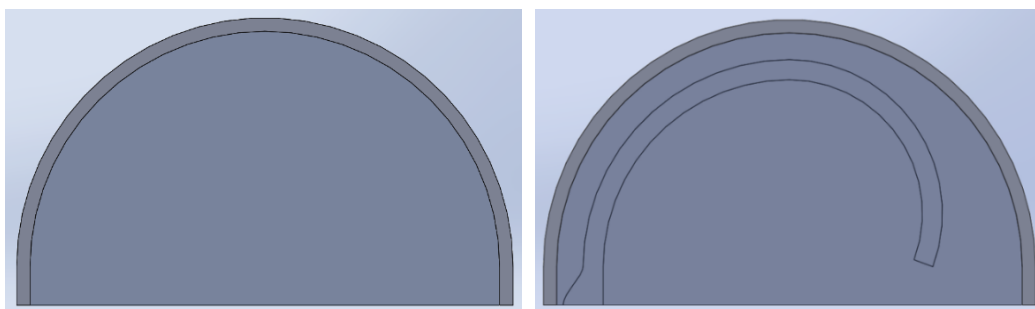


図 4.4 計算対象の半裁モデル



(a) base

(b) guide device

図 4.5 流れ制御デバイスの形状と設置位置

### 4.3 計算領域と境界条件

計算領域は図 4.6 に示す通りで主流方向×横方向×高さ方向に  $40\text{m} \times 6\text{m} \times 6\text{m}$  とした。  
また，本計算では半裁モデルを使用し，図 4.7 に示す通り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。

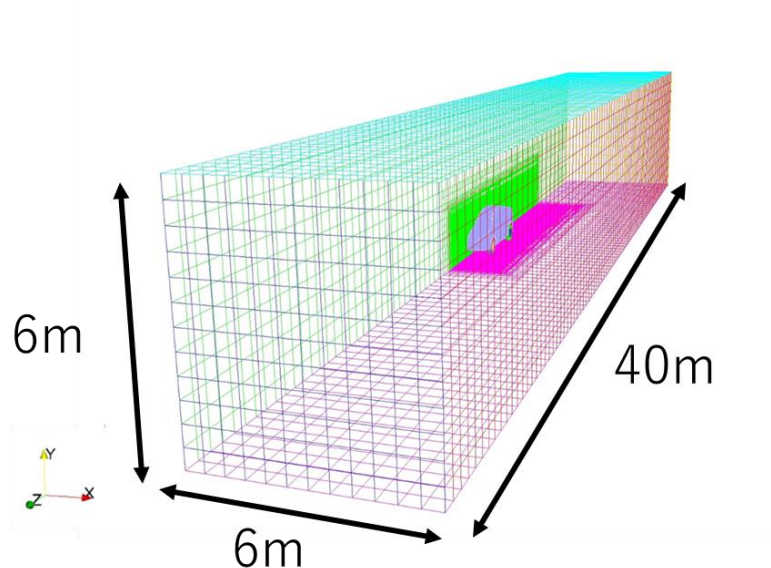


図 4.6 計算領域

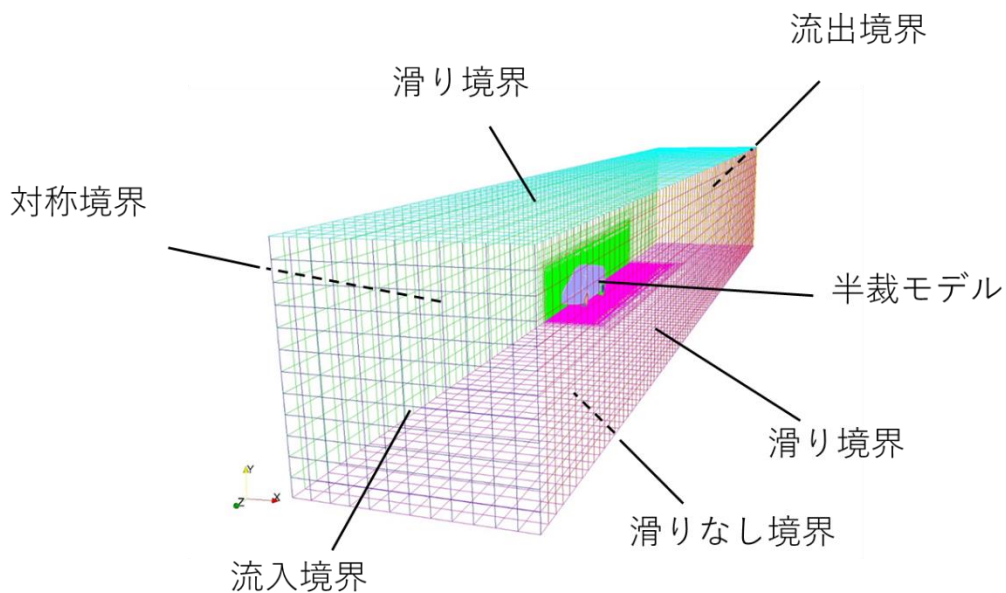


図 4.7 境界条件



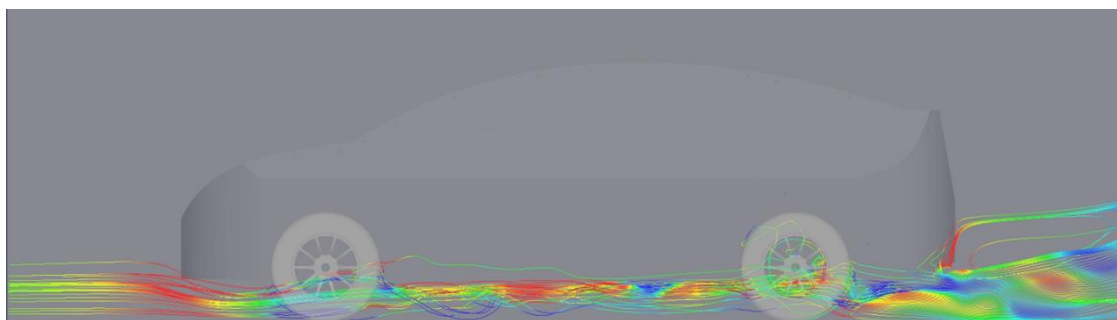
計算条件を表 4.1 に示す．自動車が時速 60km/h で走行することを想定したため，流入境界には主流速度 16.667m/s の一様流を与え，流入気流は乱流として 1% の乱流強度を与える．自動車のレイノルズ数は  $4.96 \times 10^6$  である．また，地面には主流速度と同じ速度を与えることで，実際の自動車が走行する時の車体と地面との相対速度を再現し，タイヤとホイール部分には地面の速度に対応する速度境界条件として 52.536rad/s の角速度を与える．

表 4.1 計算条件

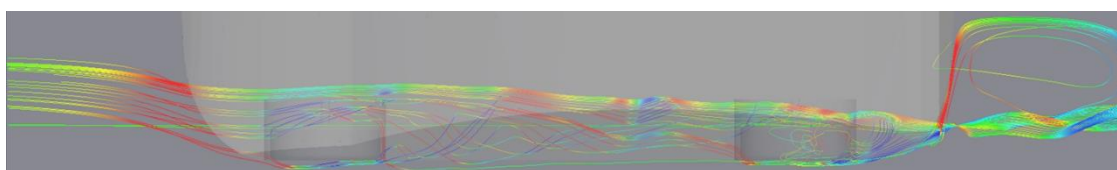
流入速度[m/s]	16.667
乱流モデル	$k\omega$ -SST
乱流強度[%]	1
乱流エネルギー	0.042
比散逸率	5.555
タイヤ・ホイール角速度[rad/s]	52.536

#### 4.4 流れ制御デバイスによる抵抗変化

guide device と base の車体下部を流れる車体全体周りの流線を図 4.8 と図 4.9 に示す．図 4.8 と図 4.9 より，車体全体周りの流れを確認すると，フロントタイヤハウス前方から流入してきた流れがフロントタイヤにぶつかりフロントタイヤハウス内に流入する流れとフロントホイールに向かう流れに分かれる．そして，フロントタイヤ後方あたりで流れが合流し，やがてリアタイヤにぶつかることでリアタイヤハウス内に流入する流れとリアホイールに向かう流れに分かれる．そして，リアタイヤ後方あたりで流れが再び合流し，最終的にボディー背面部に流れていく．guide device と base のどちらの場合においても，おおまかな流れはこの通りになっている．この時，特に重要なことはフロントタイヤ後方あたりで流れが合流する時に流れが複雑になり，渦のような流れが形成される．そして，この流れは下流に向かって流れていく．



(a) 真横から見た流線



(b) 真上から見た流線

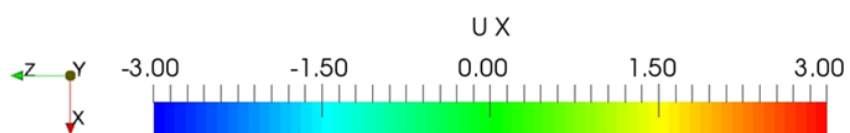
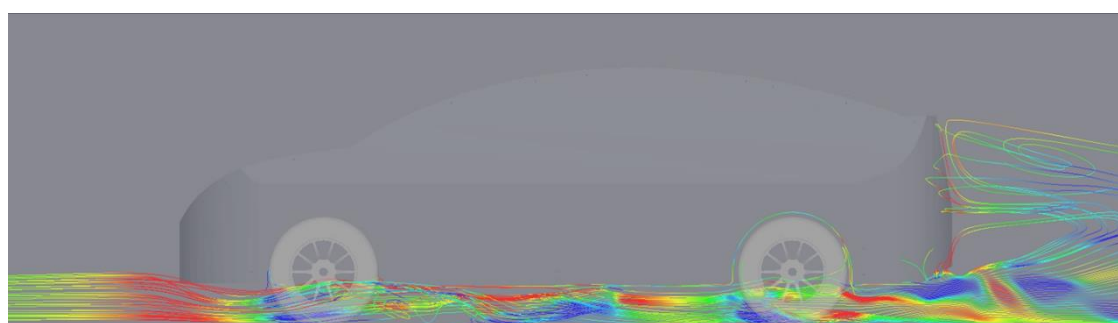
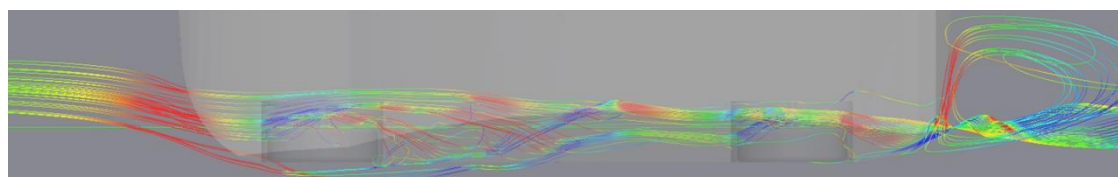


図 4.8 車体下部を流れる車体全体周りの流線 (guide device)



(a) 真横から見た流線



(b) 真上から見た流線

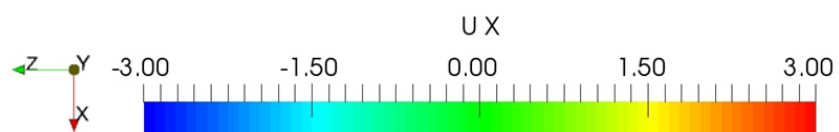


図 4.9 車体下部を流れる車体全体周りの流線 (base)

#### 4.4.1 フロントタイヤハウス内部の流れ

まず、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 4.10 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 4.11 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( $x = 0.54\text{m}$ )の断面における速度ベクトルと圧力分布を図 4.12 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( $x = 0.60\text{m}$ )における速度ベクトルと圧力分布を図 4.13 に示す。guide device 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，guide device 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。

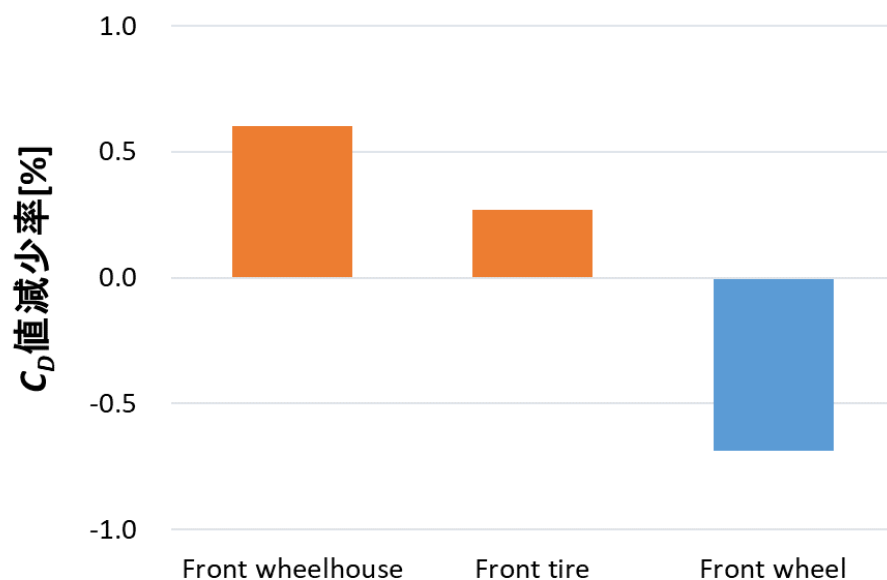


図 4.10 フロントタイヤハウス内における各部分ごとの  $C_D$  値減少率

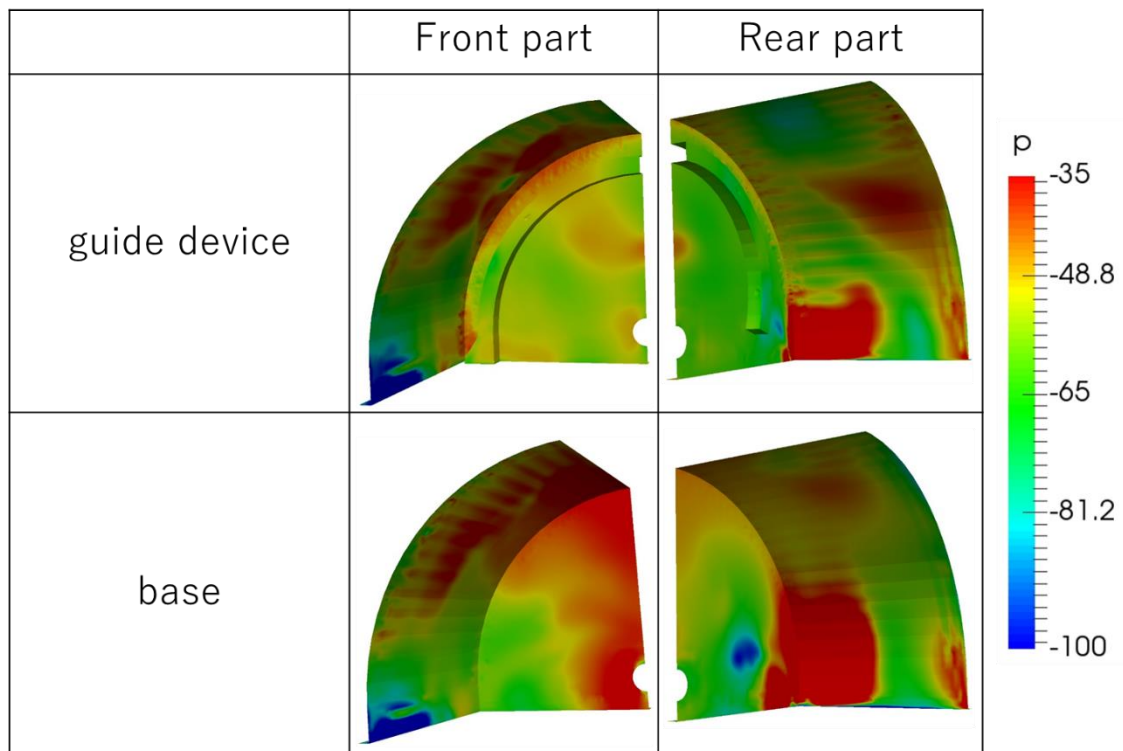
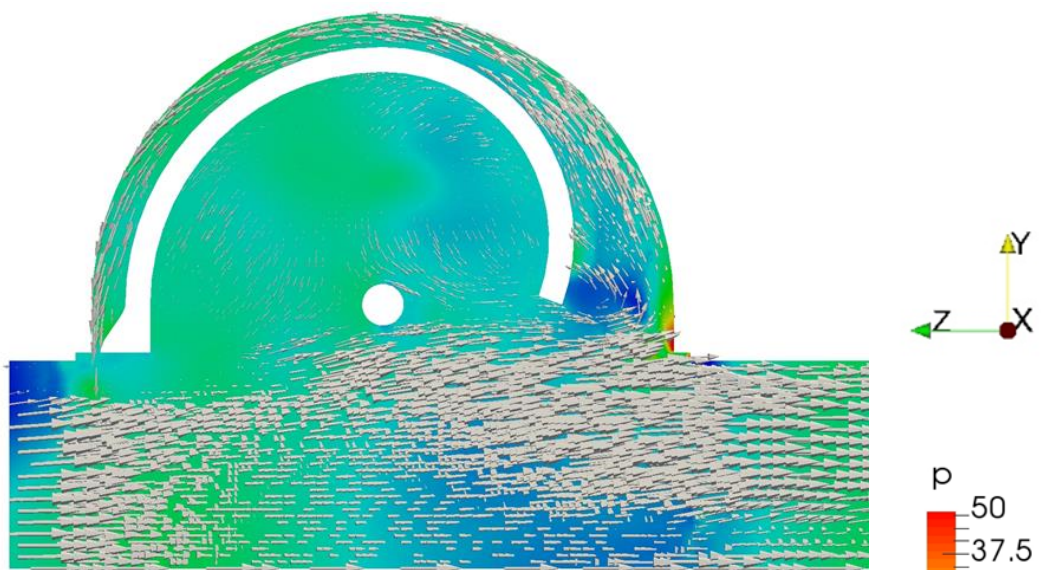
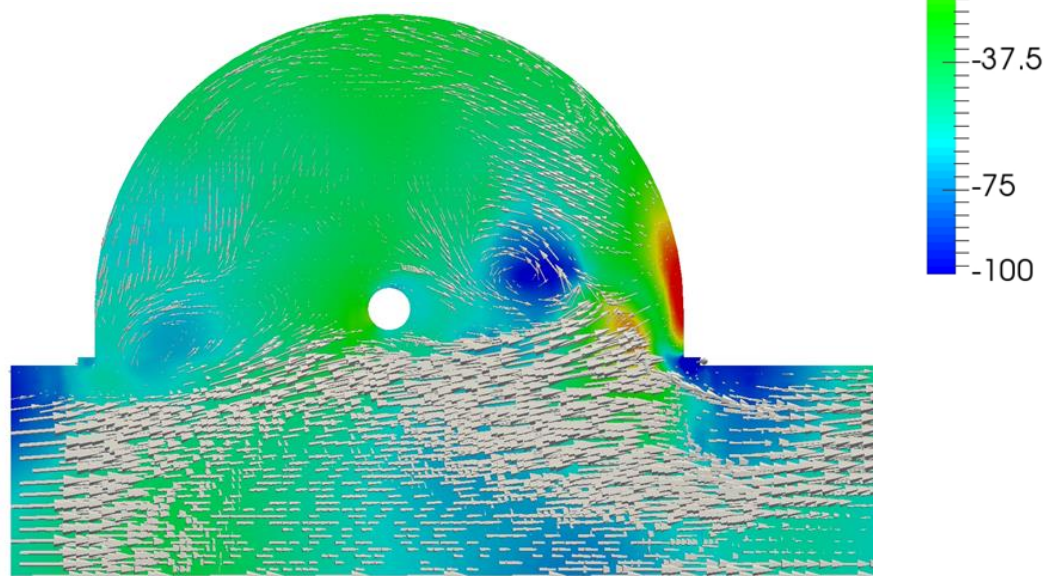


図 4.11 フロントタイヤハウスの圧力分布



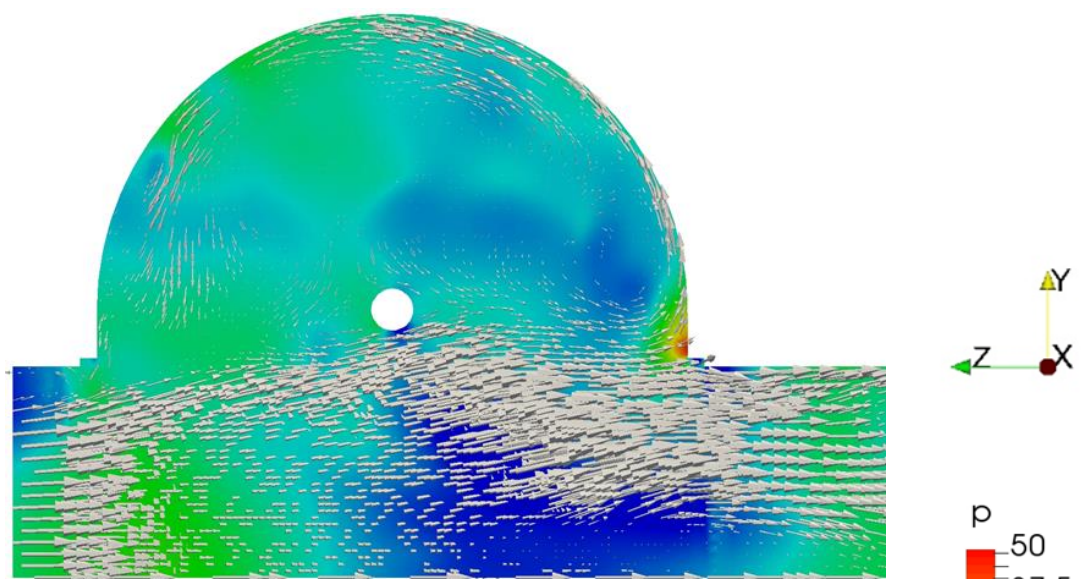
(a) guide device



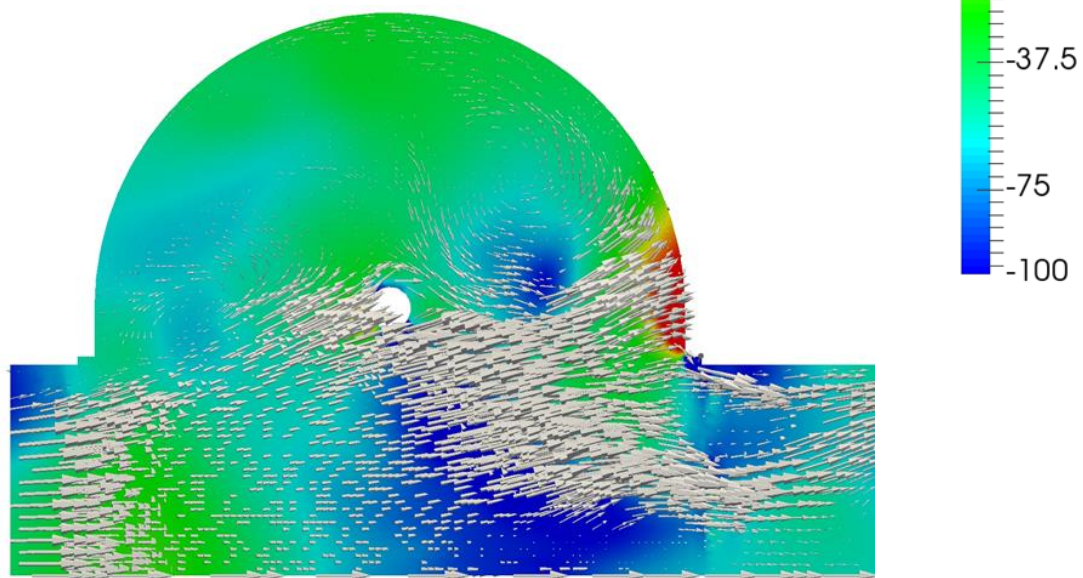
(b) base

図 4.12 速度ベクトルと圧力分布( $x = 0.54\text{m}$ )





(a) guide device



(b) base

図 4.13 速度ベクトルと圧力分布( $x = 0.60\text{m}$ )

次に、 $C_D$  値の減少率が負になってしまったフロントホイール部分に着目する。まず、外側と内側から見たフロントホイール部分の圧力分布を図 4.14 に示す。guide device と base のホイール内側部分の後面部を比較すると、guide device では圧力が高くなっていることが分かる。他の部分にも圧力分布に多少差は見られたが、最も大きな差が生じているのはホイール内側の後面部であった。したがって、この部分での圧力差によって guide device のフロントホイールにおける  $C_D$  値が増加したと考えられる。次に、この圧力差が生じた原因について考察する。圧力差が生じていた位置  $y = 0.29\text{m}$  (タイヤ径の約 0.45 倍) で断面を取り、速度ベクトルと圧力分布を図 4.15 に示す。guide device と base ではホイール内側後面部への流れ方が大きく変化していることが分かる。guide device ではホイール内側後面部に向かう流れが発生しているのに対して、base ではホイール内側に向かう流れは弱く、外側の流れが強くなっている。これにより、guide device では base よりもホイール内側後面部に流れが強くと当たることになり、圧力が増加したと考えられる。その結果、フロントホイール部分における  $C_D$  値が増加したと考えられる。

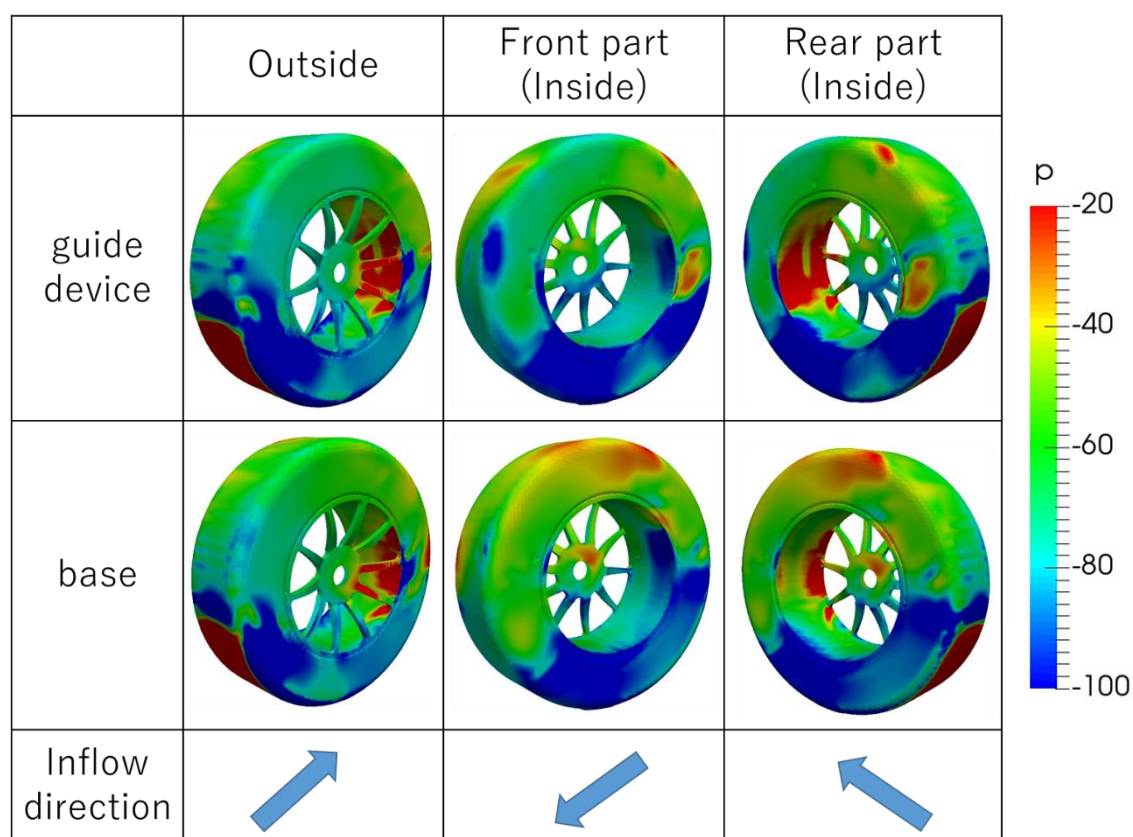


図 4.14 フロントホイールの圧力分布

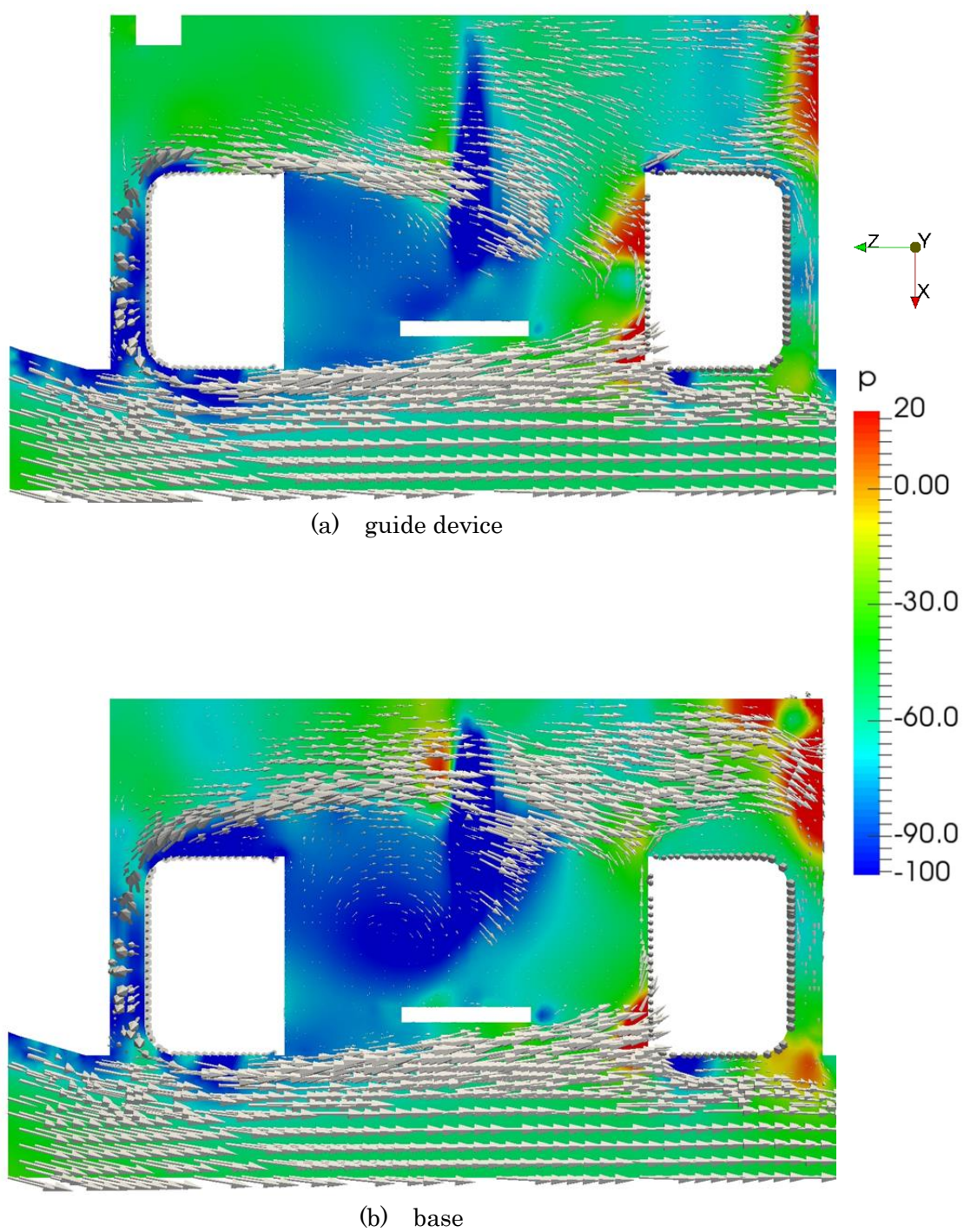


図 4.15 速度ベクトルと圧力分布( $y = 0.29\text{m}$ )



#### 4.5.2 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 4.16 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考えると、約 2.25%分 $C_D$ 値が増加した。ここで、唯一 $C_D$ 値が減少したリアタイヤハウスに着目する。リアタイヤハウスの圧力分布を図 4.17 に示す。guide device と base を比較すると、前面部では大きな圧力差は見られなかった。そして、後面部ではタイヤハウスの中央下部付近で圧力低下が見られた。これによって、リアタイヤハウスの $C_D$ 値が減少したと考えられる。

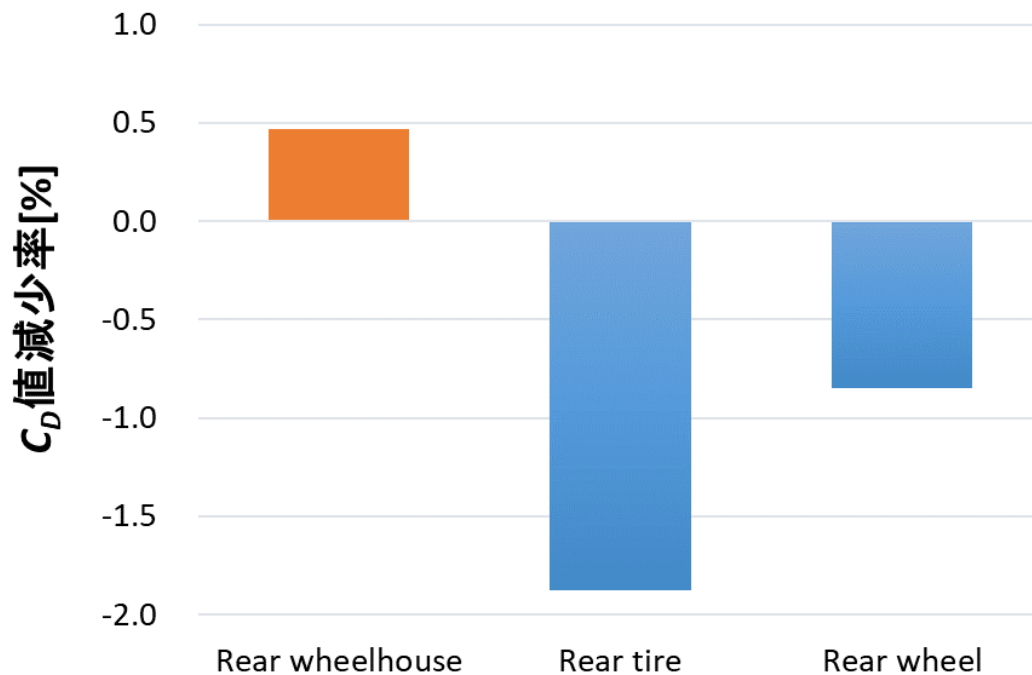


図 4.16 リアタイヤハウス内における各部分ごとの $C_D$ 値減少率

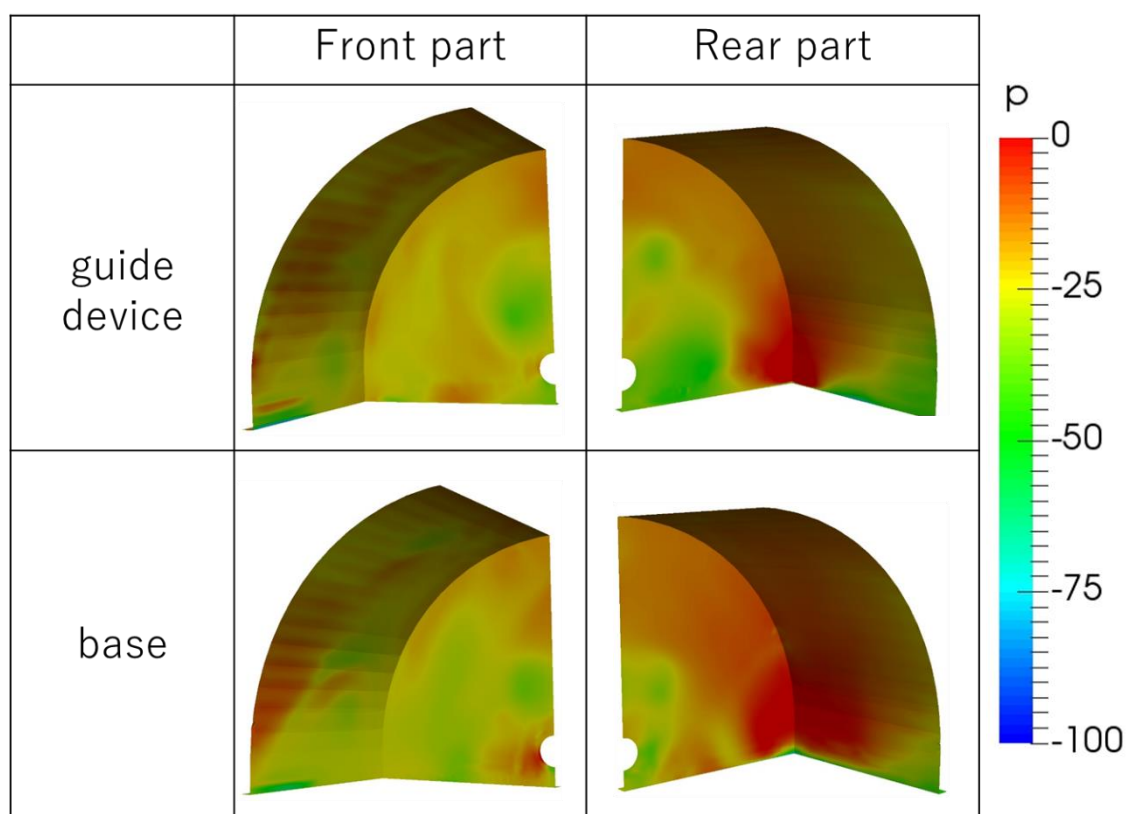


図 4.17 リアタイヤハウスの圧力分布

次に、 $C_D$ 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 4.18 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 4.19 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 4.20 と図 4.21 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るのが分かる．ここで，フロントタイヤ後方の位置 $z = -1.20\text{m}$ における断面を取り，guide device と base の $x$ 方向速度分布と速度ベクトルを図 4.22 に示す．さらに，この位置より $1.05\text{m}$ 主流方向に進んだ位置 $z = -2.25\text{m}$ における断面を取り， $x$ 方向速度分布と速度ベクトルを図 4.23 に示す．図 4.22 よりフロントタイヤ後方の位置で guide device と base のどちらの場合においても主流方向を軸とする渦が形成していることが分かる．そして，図 4.23 より，guide device と base のどちらの場合においても渦が確認できる．これらのことから，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．

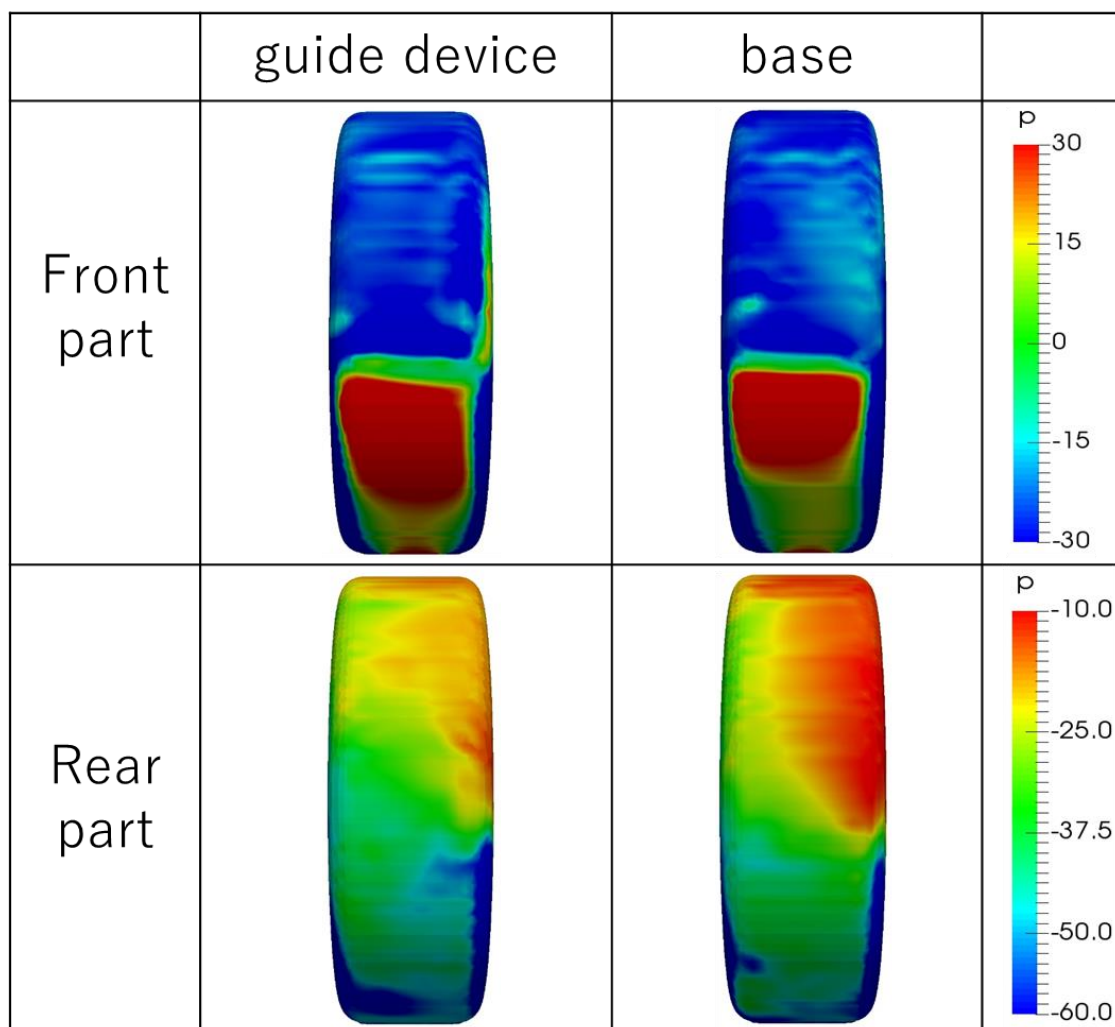


図 4.18 リアタイヤの圧力分布

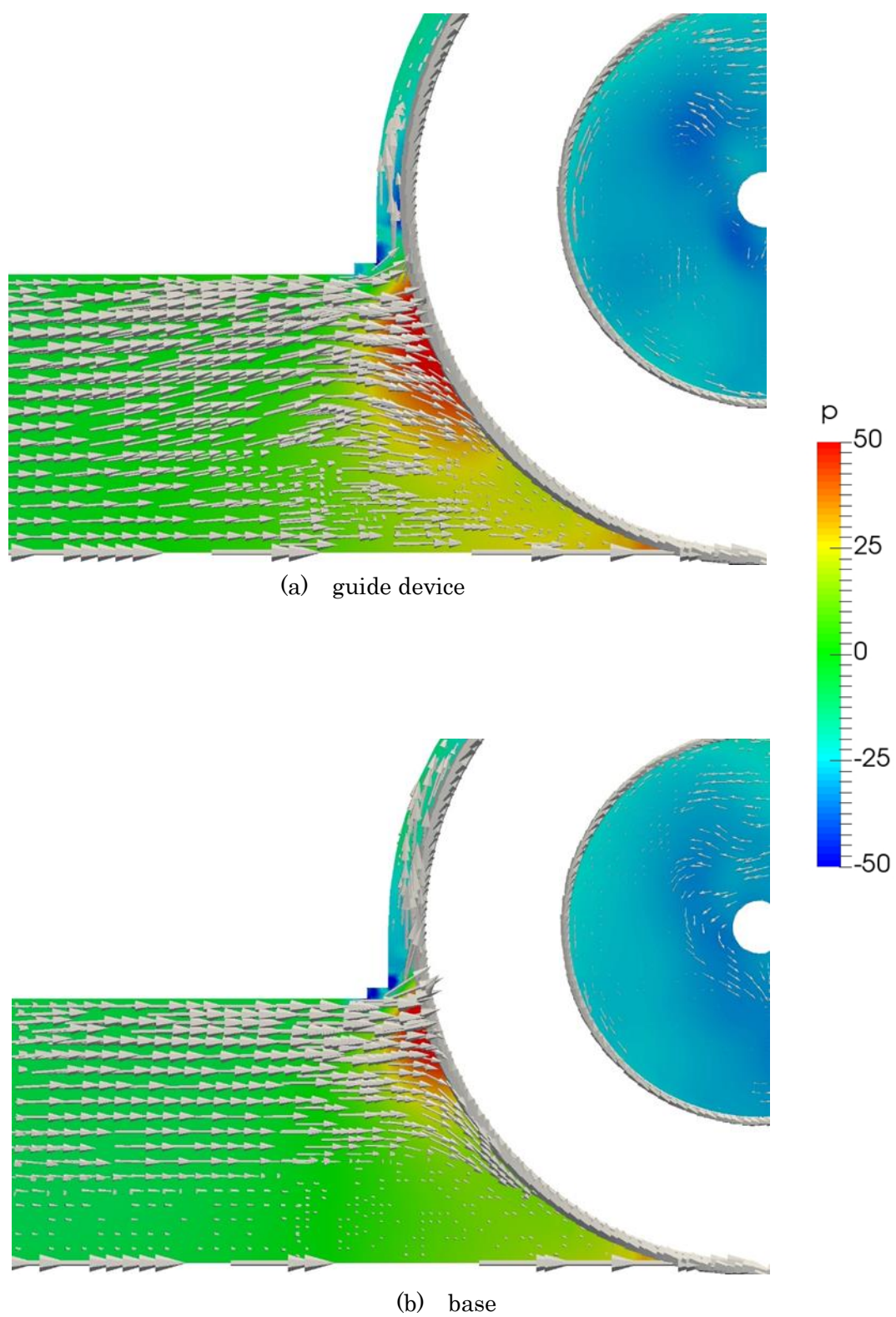
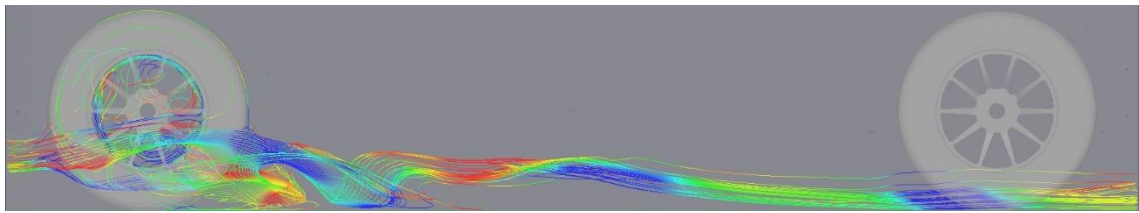
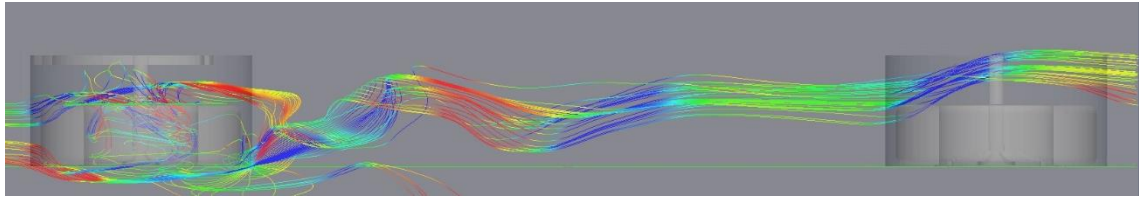


図 4.19 リアタイヤ中央での速度ベクトルと圧力分布



(a) 真横から見た流線



(b) 真上から見た流線

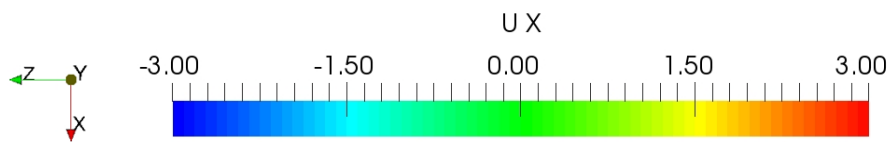
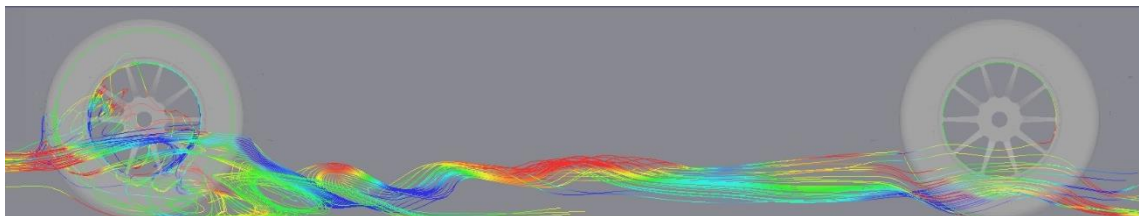
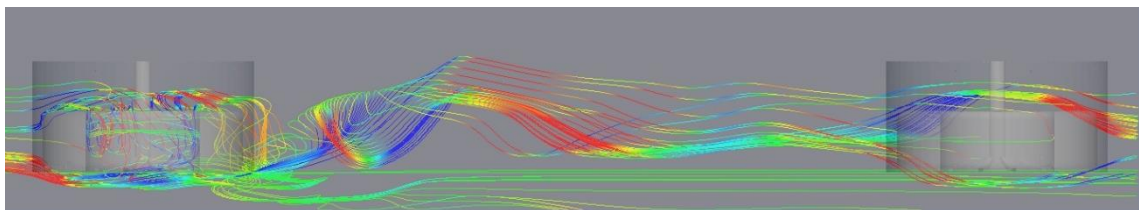


図 4.20 guide device の流線



(a) 真横から見た流線



(b) 真上から見た流線

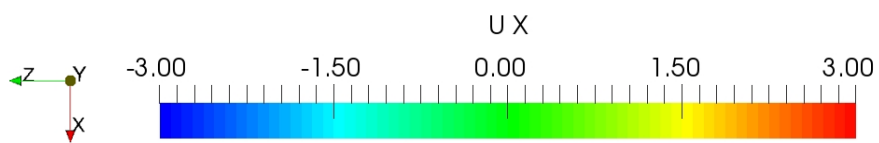


図 4.21 base の流線



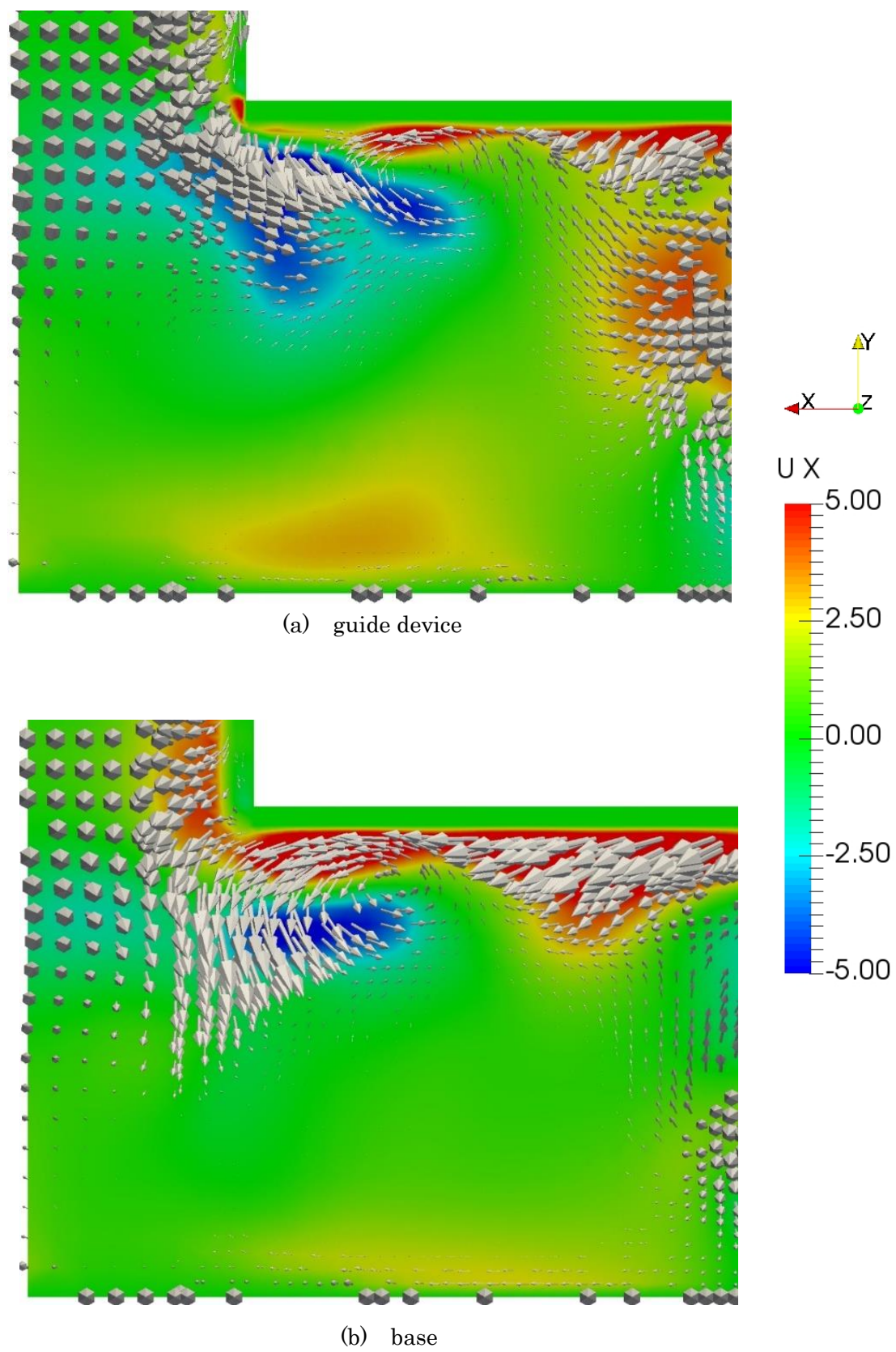


図 4.22  $x$ 方向速度分布と速度ベクトル( $z = -1.20\text{m}$ )

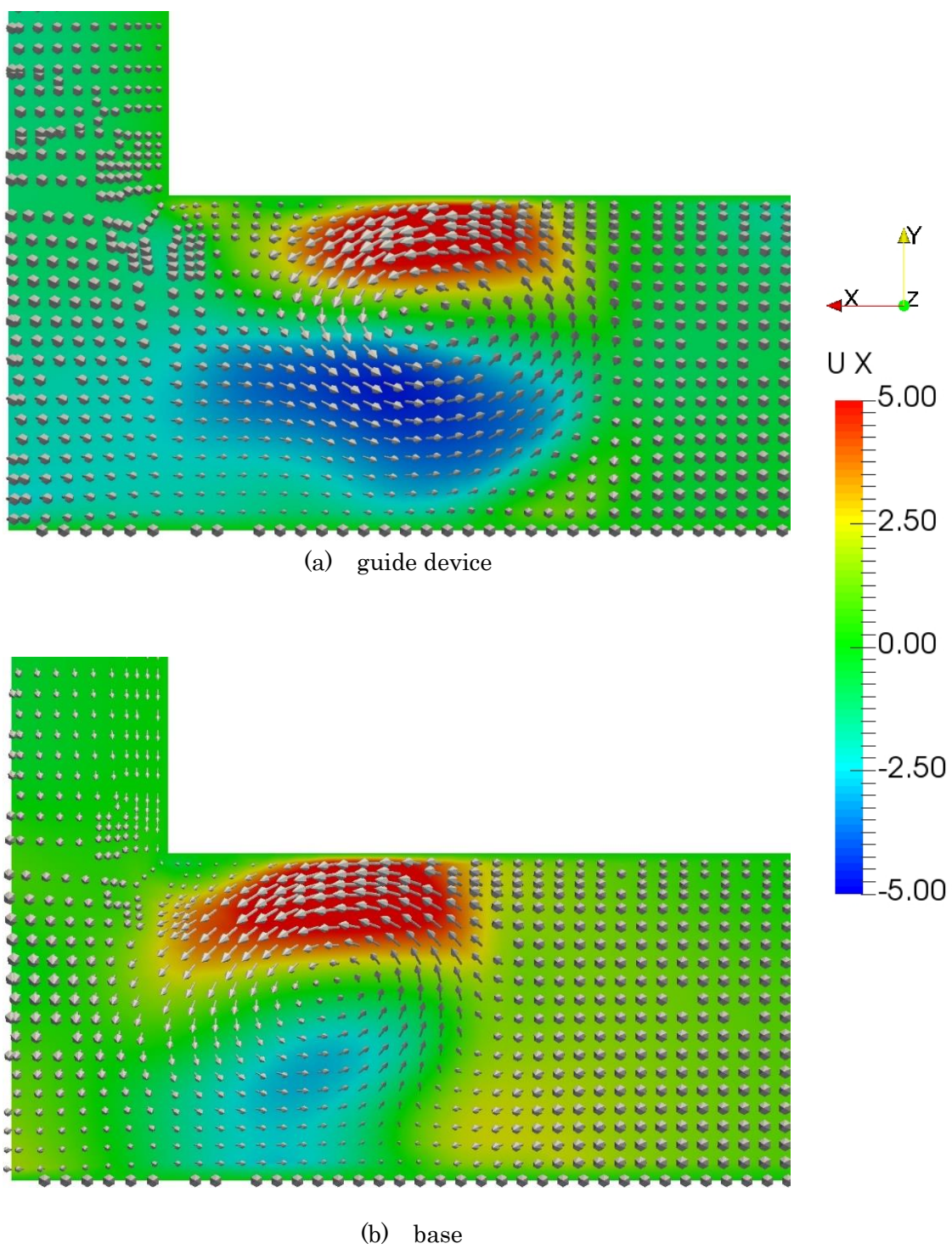


図 4.23  $x$ 方向速度分布と速度ベクトル( $z = -2.25\text{m}$ )



次に、 $C_D$ 値が増加したリアホイールに着目する。まず、リアホイールの圧力分布を図 4.24 に示す。guide device と base を比較すると、ホイール外側のスポーク部分で圧力差が生じており、それ以外の部分ではほとんど圧力差はなかった。そのため、リアホイールにおける  $C_D$  値の増加は外側のスポーク部分における圧力上昇が原因であると考えられる。この原因を考察するため、スポーク部分に当たる流体の流線を図 4.25 に示す。流線の主流方向速度を guide device と base で比較すると、guide device の主流方向速度の方が大きいことが分かる。そのため、スポーク部分に勢いよく流体がぶつかるため圧力が上昇したと考えられる。また、この流体がどこから流れてきたかを調べるために、さらに上流側の流線を調べた。guide device と base の流線を真横から見たものと真上から見たものをそれぞれ図 4.26 と図 4.27 に示す。図 4.26 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と分かった。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 4.27 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。

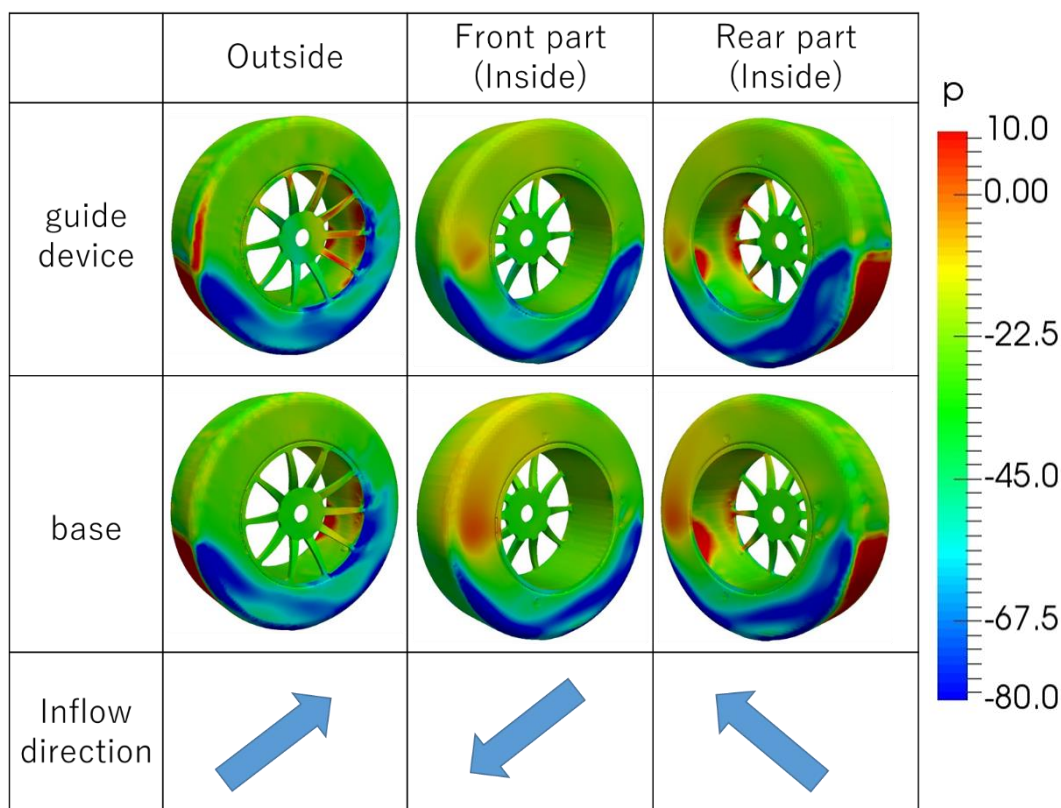


図 4.24 リアホイールの圧力分布

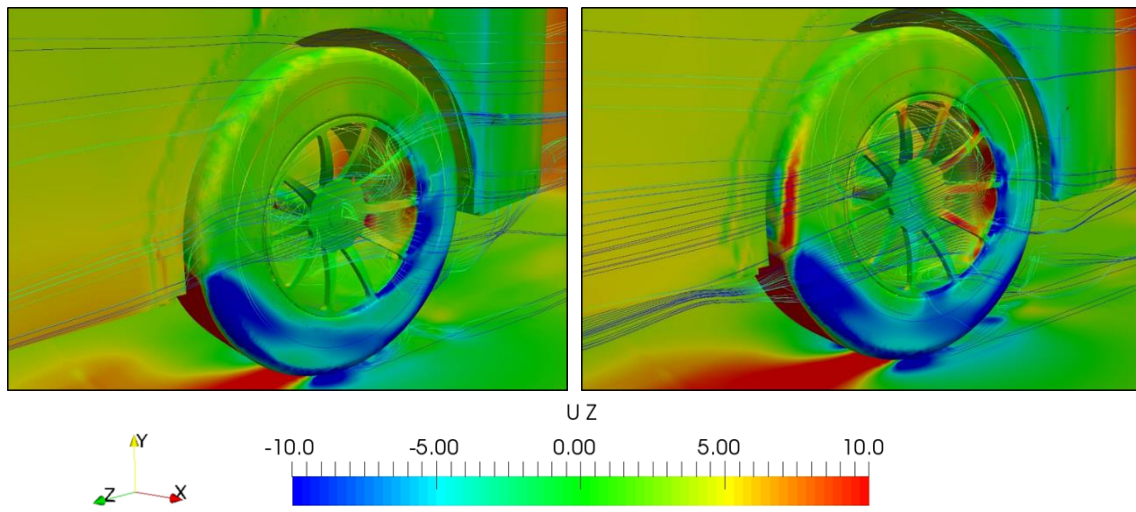
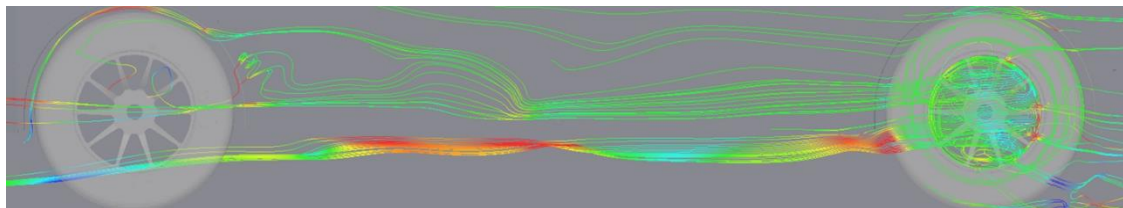
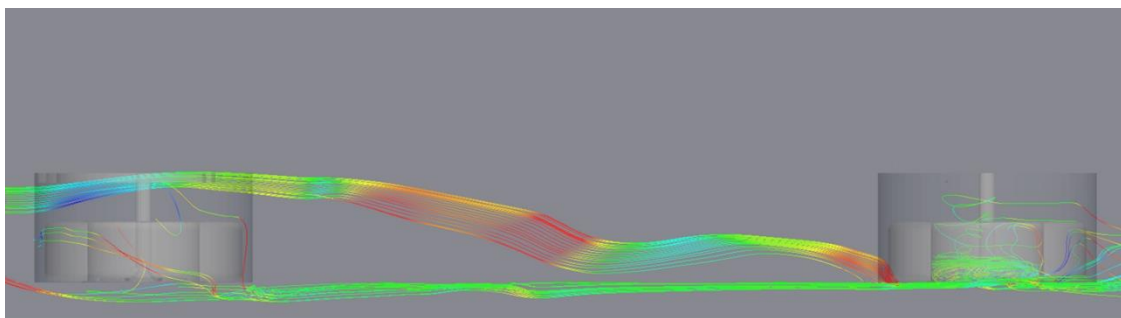


図 4.25 スポーク周りの流線

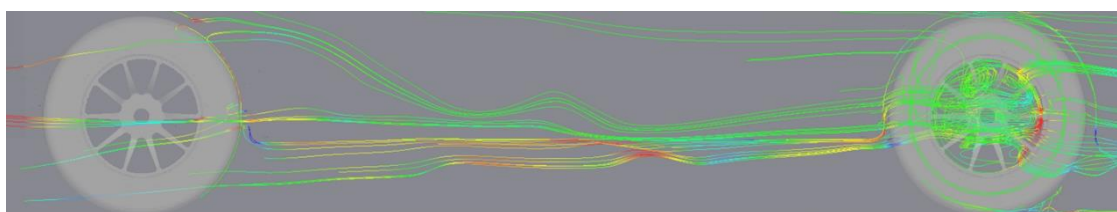


(a) 真横から見た流線

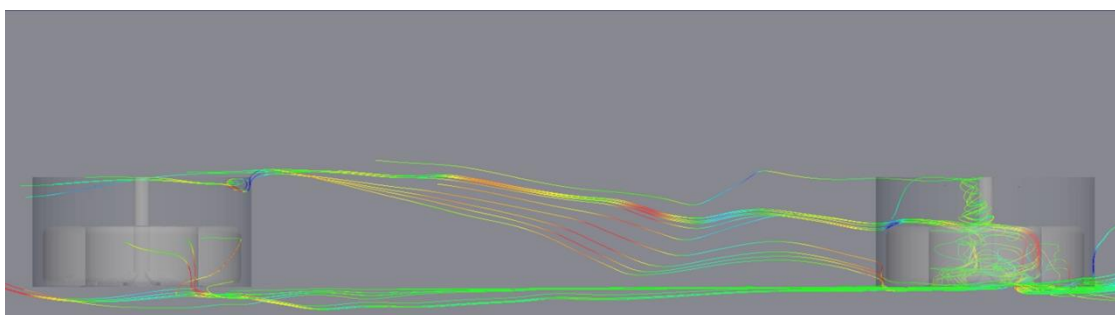


(b) 真上から見た流線

図 4.26 guide device の流線



(a) 真横から見た流線



(b) 真上から見た流線

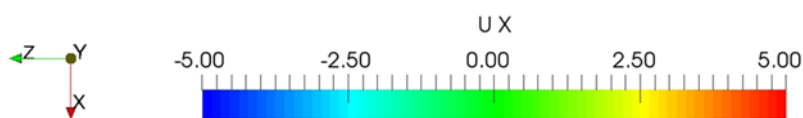


図 4.27 base の流線

リアホイールのスポーク部分に勢いよくぶつかる流体は、フロントタイヤハウス下部からの流れであった。フロントタイヤハウス下部からの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、最終的にリアタイヤハウスの下部からリアタイヤに向かってぶつかった後にリアホイールのスポーク部分にぶつかっているということが分かった。そのため、リアホイールでの $C_D$ 値を低減するためには、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考えられる。

#### 4.5.3 ボディー前方と後方、床下の流れ

ボディーと床下部分の $C_D$ 値の減少率を図 4.28 に示す。ボディーでは $C_D$ 値が 0.48%増加し、床下では 0.04%減少した。床下に関しては、今回の計算で使用したモデルは表面に凹凸が無く平らな形状をしているため、主流方向に作用するのは粘性応力による摩擦のみである。そのため、今回は床下による影響は小さい。次に、ボディーに着目する。ボディーの圧力分布を図 4.29 に示す。guide device と base を比較すると、前面部では圧力差はほとんど見られなかったが、後面部において guide device では圧力が低下している部分があることが分かった。圧力が低下している部分を通して $y = 0.75\text{m}$ の位置で断面を取り、その圧力分布

を図 4.30 に示す. **guide device** と **base** のどちらも同じ位置あたりに低圧の領域が出来て  
いることが分かった. この部分の流れを調べるために後面部付近の流線を図 4.31 に示す.  
その結果, **guide device** と **base** の両方の場合において, 後面部付近に竜巻のような形状を  
した流れが発生していると分かった. この流れの中心位置と後面部の低圧領域の中心が一  
致していたため, この流れによって後面部の低圧領域が形成されたと考えられる. この流れ  
は車体上面からの流れとリアタイヤハウスからの流れ, 床下の流れが合わさることによっ  
て形成されるが, **guide device** と **base** では床下の流れとリアタイヤハウスからの流れが変  
化することによって最終的に後面部にできる竜巻状の流れが変化したと考えられる. それ  
によって, 後面部の低圧領域が変化し,  $C_D$  値が変化したと考えられる. 今回の計算ではボデ  
ィーの  $C_D$  値が 0.48% 増加する結果となったが, それは竜巻のような流れの大きさとその影  
響を受けるボディー背面部の面積が大きいために影響を受けやすいからであると考えた.  
また, ボディー後面部付近の流れは上流側の流れによって変化するので, まずは上流側で流  
れを改善し, ボディー以外の部分で  $C_D$  値を低減することが重要である.

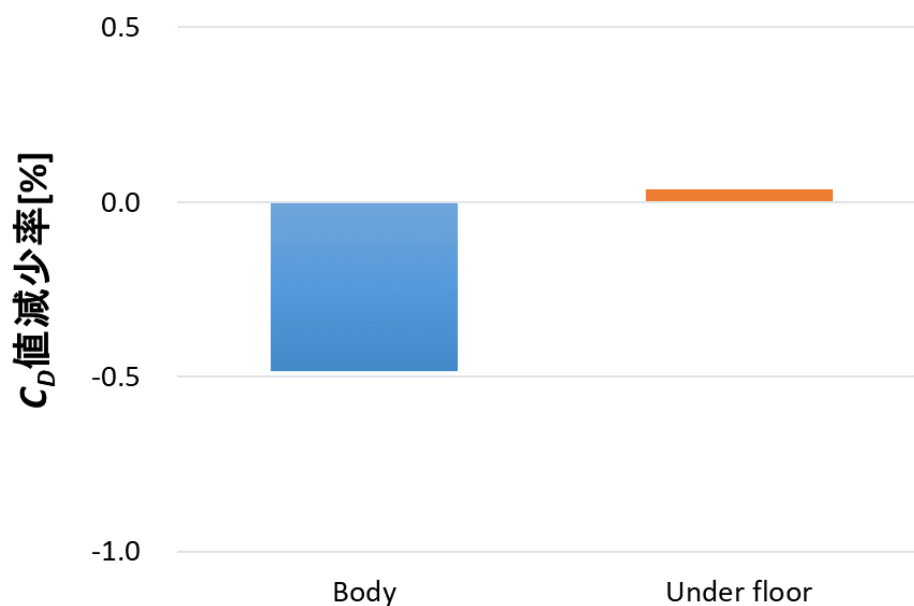


図 4.28 ボディーと床下の  $C_D$  値減少率

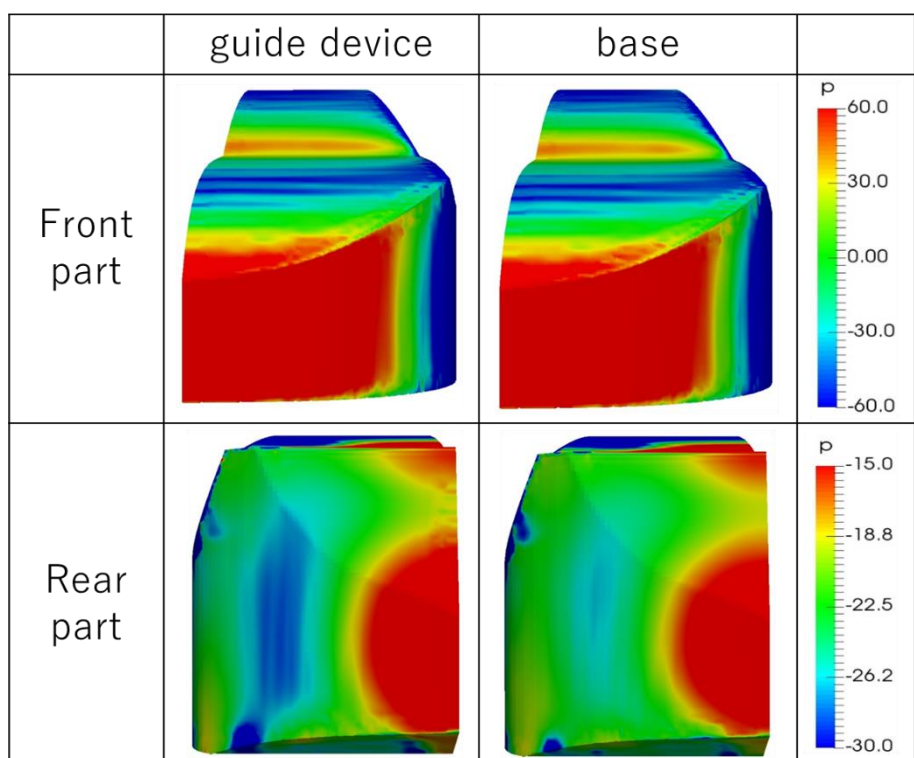
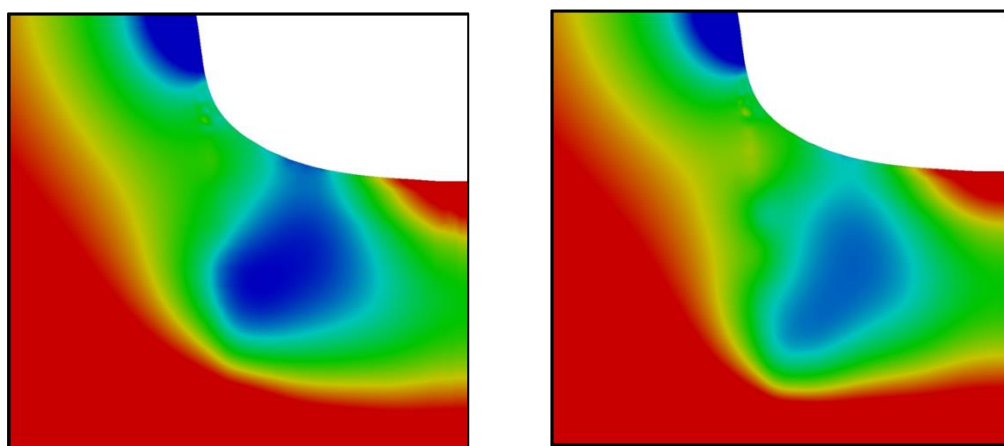


図 4.29 ボディーの圧力分布

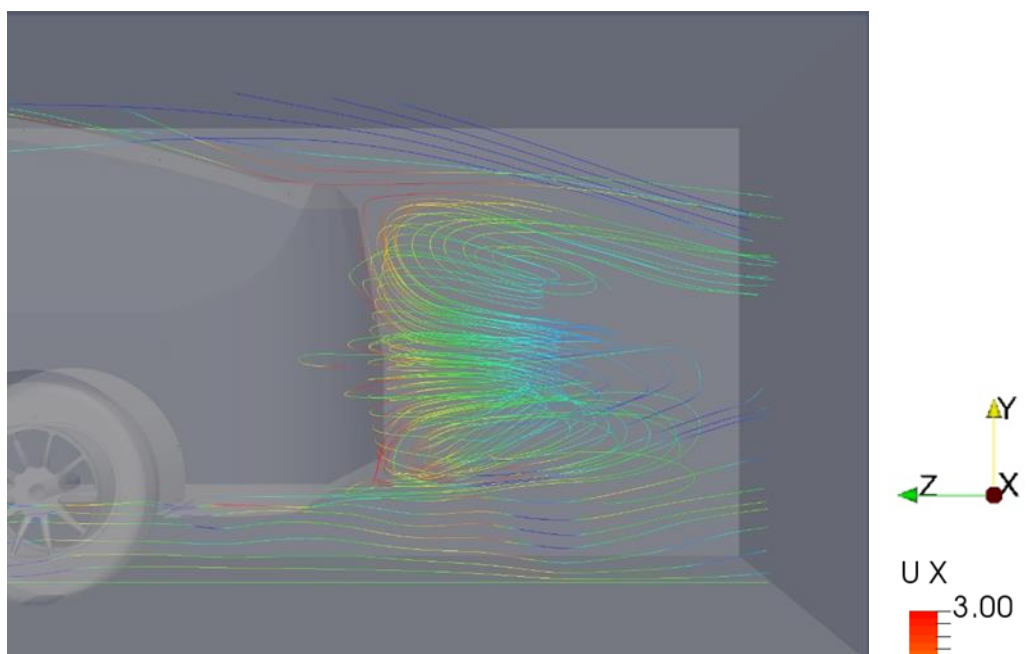


(a) guide device

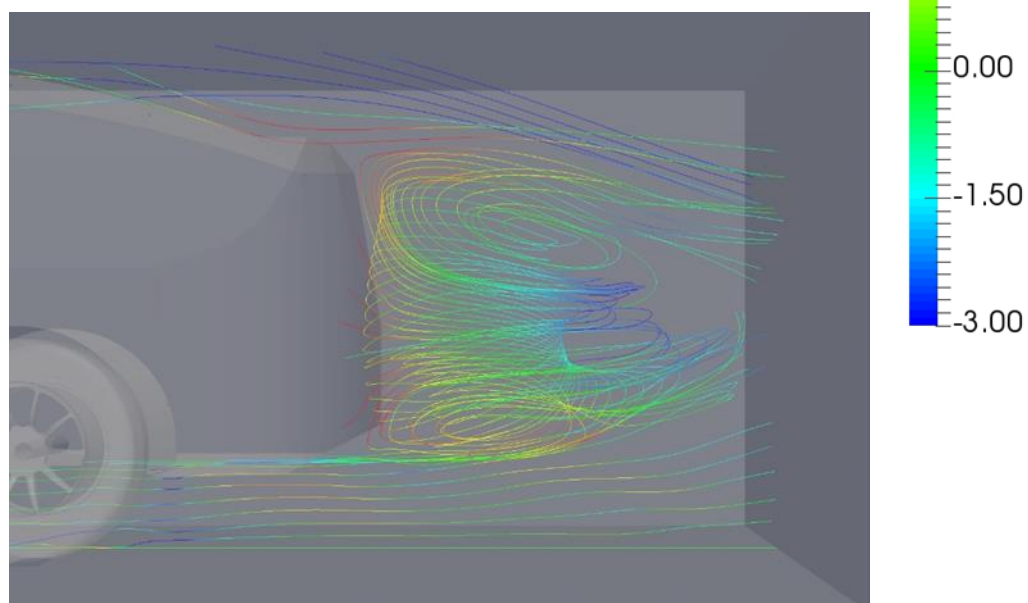
(b) base

図 4.30 車体後面部付近の圧力分布





(a) guide device



(b) base

図 4.31 車体後面部付近の流線

#### 4.5.4 計算結果のまとめ

各車体部分における guide device と base の $C_D$ 値の減少率を合計し、車体全体における $C_D$ 値の減少率を求めたところ guide device は base に対して車体全体の $C_D$ 値が約 2.5%増加することが分かった。フロントホイールハウス内では $C_D$ 値が減少したが、それ以上にリアタイヤハウス内で $C_D$ 値が増加してしまったことが車体全体の $C_D$ 値増加につながった。特に、リアタイヤでの $C_D$ 値の増加が大きく、その次にリアホイールでの $C_D$ 値の増加が大きかった。そのため、車体全体の $C_D$ 値を減少させるためにリアタイヤとリアホイールでの $C_D$ 値を減少させることが重要であると考えられる。

#### 4.5.5 $C_D$ 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模式図を図 4.32、真上から見た模式図を図 4.33 に示す。図 4.32 より、タイヤハウスの下部からタイヤハウス内部への流入を阻害する。そして、タイヤハウス内部の反時計回り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。図 4.33 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 4.34 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。



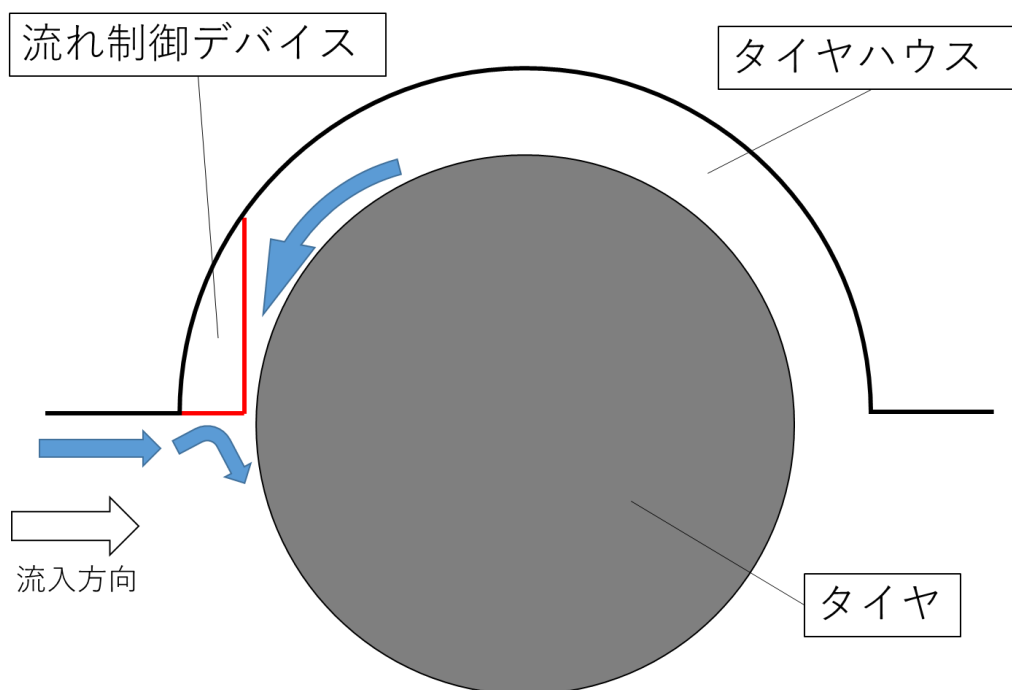


図 4.32 考案した流れ制御デバイスとその付近の流れ（真横）

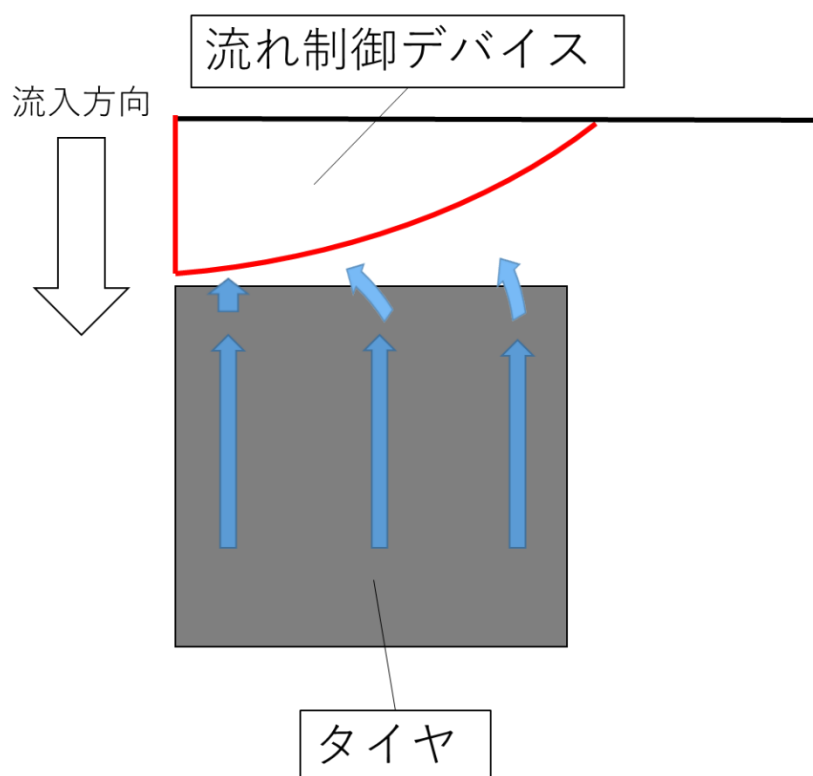


図 4.33 考案した流れ制御デバイスとその付近の流れ（真上）

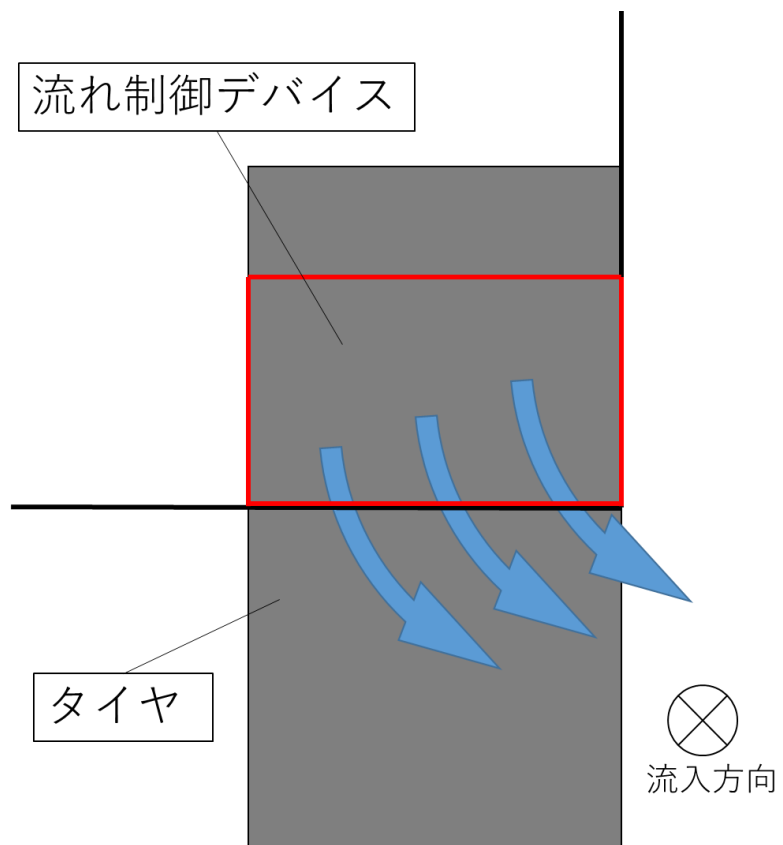


図 4.34 リアタイヤ前方における流れ

## 第5章

### 結論

本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。

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され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新たな流れ制御デバイスを考案した。これにより、車体全体で見た $C_D$ 値の低減を実現できる可能性がある。

### 謝辞

本研究を行うにあたって、荻野要介講師には多くのご指導を賜りました。日々研究を進める中で行き詰った際に多くのご助言をいただき、研究を導いて下さいました。時には厳しく熱心に指導して下さり、自分の未熟さを知り見つめ直すことで人として成長することが出来ました。心より感謝申し上げます。

野崎理教授には全体報告会や発表練習において、様々なご指導を賜り、研究を導いて下さいました。心より厚く御礼申し上げます。

また、本研究を行うにあたって協力、助言をして下さった航空エンジン超音速流研究室の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [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 卷, 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,
- [6] 春日悠, “乱流モデル”  
[http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/turbulence\\_model.pdf](http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/turbulence_model.pdf)
- [7] 春日悠, “非圧縮流体の圧力-速度連成手法”  
<http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/pressure-velocity.pdf>
- [8] 一般社団法人 “OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析 オープン CAE 学会編”, 森北出版株式会社, 2016
- [9] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, 共訳 松下洋介, 齋藤泰洋, 青木秀之, 三浦隆利, “数値流体力学[第 2 版]”, 森北出版株式会社, 2011
- [10] 自動車工学編集委員会, “自動車工学 第 2 版”, 東京電機大学出版局, 2017