

特集：MAZDA CX-30

04

タイヤ周りの風流れ制御技術を適用した MAZDA CX-30 の空力開発

Aerodynamic Development for Mazda CX-30 by Using Flow Control Technology Around Tire

中田 章博^{*1} 森川 陽介^{*2} 岡本 哲^{*3}
Akihiro Nakata Yosuke Morikawa Satoshi Okamoto

要約

自動車からの CO₂ 排出量削減のために空気抵抗の低減は欠かせない。ただし空気抵抗は車体形状に依存するため、商品開発においてはデザインと空力の両立が命題となる。私たちは、空力性能とデザインを高次元に両立するために、SUV デザインの重要ポイントの一つであり、Cd 値への寄与度が大きいタイヤ周りの風流れに注目し、Computational fluid dynamics (CFD) 技術と風流れ制御技術開発に取り組んだ。まず、タイヤ形状の再現度とホイール回転手法に着目し、タイヤ周りの風流れの現象を再現できる CFD 技術を構築した。そして CFD を用いて、Cd 値に寄与する風流れの運動エネルギー損失の発生要因を分析し、従来技術比で Cd 値を約 3% 低減できる新しい風流れ制御技術を確立した。そして新技術を CX-30 の商品開発に適用することで、デザインコンセプトとクラストップレベルの Cd 値の両立を実現できた。

Summary

Reducing the aerodynamic drag is essential for cutting CO₂ emissions. However, the aerodynamic drag depends on the geometry of the vehicle, so both the aerodynamic performance and the design are necessary for the product development. We studied the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique and aerodynamic drag reduction technology, focusing on the tire with rotation. First, we studied CFD validity of the flow around the tire with rotation, focusing on the tire shape and wheel rotation method. Secondly, we studied factors causing energy loss of flow by using the CFD, and achieved 3% Cd value reduction from the technology of previous generation. And, we adopted these new technologies on the aerodynamic development of CX-30. As a result, the vehicle achieved top level aerodynamic drag among the same class vehicles and realized the design concept.

Key words : Aerodynamics, Design, CFD

1. はじめに

マツダは走る喜びをお客様にお届けしつつクルマから排出される CO₂ を削減することで地球環境との永続的な共存を目指している。自動車の CO₂ 排出量は、エンジンの性能だけでなく走行抵抗にも依存する。私たちが取り組むのは、走行抵抗の一つである空気抵抗の低減である。走行抵抗は主に空気抵抗と転動抵抗に分けられる。空気抵抗の寄与度は車速が高まるほど大きくなり、時速 100km/h で走行する場合はおよそ 8 割を占める⁽¹⁾。空気抵抗の大小は空気抵抗係数 (Cd 値) に依存し、Cd 値に

比例して空気抵抗値は大きくなる。そして、Cd 値は車両周りを流れる風流れの状態によって決まる。私たちは車両周りの風流れにおいて渦が発生すると、風がもつ運動エネルギーが損失し、これに比例して空気抵抗が大きくなると考えている⁽²⁾。

従って、空気抵抗を低減するためには車両周りの風を制御し、渦を抑制すればよい。ただし、車両周りの風流れは目に見えない複雑な現象であり、渦の発生と発達に関する現象解明は途上にある。既存技術を用いて渦を低減するなら車両形状を平滑にするなどいくつかの手法があるが、既存技術だけに頼った制御は車両パッケージン

*1~3 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

グやデザインに対して制約を与えることになってしまう。従って、商品開発の重要課題はデザインを始めとした他機能と両立できる形状を導出することにある。本稿では魂動デザインと空気抵抗低減を高次元で両立させるために取り組んだCFD技術開発とタイヤ周りの風流れ制御技術開発、及びこれら技術を用いてデザイナーと共創したCX-30の空力開発の実例について述べる。

2. 新世代SUVの空力開発課題

2.1 風流れ制御の考え方

私たちはこれまでの研究により、Cd値を低減するためには風流れの運動エネルギー損失低減が重要であり、これを発生させる渦は、大きく三つに大別できると考えた⁽²⁾。一つ目は、物体からの剥離により発生する“剥離渦”，二つ目は異なる流れが合流して発生する“混合渦”，三つ目は物体後方で上下左右のそれぞれの流れが合流して発生する“後流渦”である。車両周りの各部で生じる(Fig. 1)これらの渦を小さくすることで風流れの運動エネルギー損失を小さくすることができる。

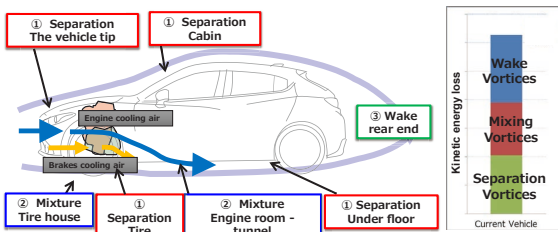


Fig. 1 Kinetic Energy Loss at Each Part of Vehicle⁽²⁾

2.2 CX-30における空力とデザインの両立課題

本研究ではタイヤ周りで発生する剥離渦と混合渦に着目し、技術開発を行った。その理由は車両全体の中でも、タイヤ周りの渦に起因する運動エネルギー損失の寄与度が大きいためである。一般的にも車両周りで発生する空気抵抗のうち、20%~30%はタイヤに起因するものと言われており⁽³⁾、SUVなどの車高が高い車型では、タイヤの露出量が増えるため、その影響が大きくなる。更に、CX-30では大胆なSUVの力強さを表現したいデザインコンセプトを実現するために、ボディ外側へタイヤの露出面積を拡大する造形が求められた。この露出面積の拡大はタイヤに当たる風量を増大させ、タイヤ周りの渦を更に強めてしまう。以上より、CX-30の空力とデザインを両立するための最大の課題は、タイヤ周りの渦を低減できる新たな制御技術を確認し、デザイン自由度の高い開発初期段階で空力とデザインを両立できる造形を共創することであった。

本稿では、この課題解決に向けて取り組んだタイヤ周りの現象解明に必要なCFD技術の構築(2章)、それを用いた制御技術の確立(3章)、CX-30での共創活動(4章)について報告する。

3. タイヤ周りの現象解明をサポートするCFD技術

3.1 CFD技術開発の検討アプローチ

回転を伴うタイヤ周りの現象を再現するためのCFD技術については、近年盛んに研究が行われ、タイヤ周りの風流れの総圧やCd値の予測精度について議論している^(4~7)。CFD技術は年々高度化しているが、回転を伴うタイヤ周りの流れ場には依然として誤差が残っており、研究は途上にある。CFDの精度を更に高め、現象解明や商品開発に応用していくためにはCFDと実測値の間に誤差が生じる要因を詳しく理解することが重要となる。これは、誤差の要因が判っていれば、CFDの精度を高めるための課題を明確にできることに加え、誤差要因とその程度を考慮に入れた実車の性能予測やスペック決定ができるためである。そこで、本検討ではCd値や風の運動エネルギー損失量の精度検証に加え、運動エネルギー損失量に寄与する風流れの中間特性値を定義し精度検証を行うことで、CFDと実現象の違いを詳しく理解する。

これまでの研究により⁽²⁾、タイヤ周りには上部と下部にそれぞれ特徴的な渦が存在することがわかっている(Fig. 2)。私たちは、その発生・発達過程を分析することで、これらの渦は“タイヤ正面部の圧力上昇により、風がホイールハウス内とタイヤ側部に曲がる現象”と“ホイール開口部やホイールアーチ隙に風が流入・流出する現象”の二つにより形成されていると考えた(Fig. 3)。そして、「タイヤ正面部の圧力」と「タイヤ側面開口部の流入・流出」を運動エネルギー損失量に寄与する中間特性値と定義した。

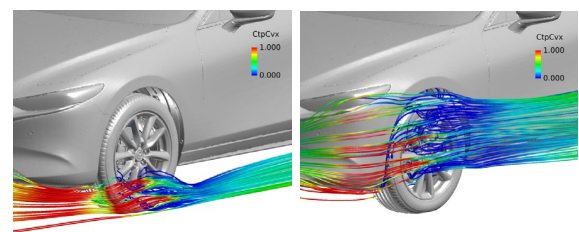


Fig. 2 Flow Streamline around Tire

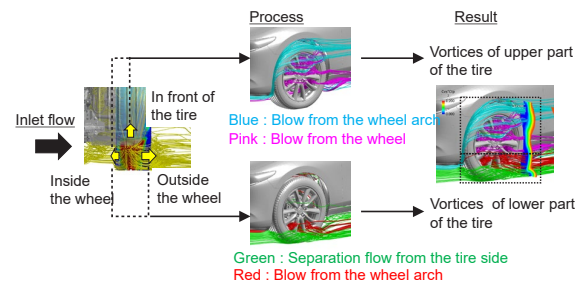


Fig. 3 Process of Causing Vortices around Tire

3.2 CFDの解析条件

本研究のCFDは汎用流体解析ソフトであるSTAR-CCM+®を用い乱流モデルにはDetached Eddy Simulation (DES)を適用し、非定常解析を行った。今回は特に、タイヤ正面部の圧力に影響が大きいと考えられるタイヤ形状の再現度(断面形状とパターン形状)と、タイヤ側面開口部の流入量への影響が大きいと思われるホイール回転手法の違いについて検討する。それぞれの影響を確認するために以下4条件の解析を実施した(Table 1)。

Table 1 CFD Setup

		Case1	Case2	Case3	Case4
Tire shape	Deformed	×	○	○	○
	Pattern	×	×	○	○
Wheel rotation method	Rotation wall boundary	○	○	○	—
	Sliding mesh method	—	—	—	○

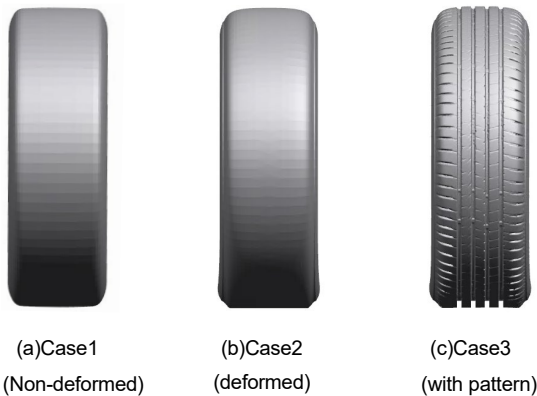


Fig. 4 Tire Shape

タイヤサイズは215/55 R18とし、3通りの形状データを用意した(Fig. 4)。Case1はタイヤの総幅と外径の情報を基に作成した簡易形状である。形状作成に際してタイヤのショルダRなど細部の形状については実際の形状の再現性は考慮していない。一方で、Case2, 3は風洞試験に用いたタイヤを3Dスキャンして取得した形状である。Case2, 3ともに風洞テスト時の接地による潰れは再現している。Case2, 3の違いはタイヤの溝の再現有無である。また、ホイールの回転再現手法については2通りの手法について検討した。一つは、実際にホイールのスポークは回転運動させずに、ホイールの壁面に回転速度を付与する手法(rotation wall boundary)、もう一方の手法はホイールスポーク部のメッシュを回転させることで、ホイールの剛体回転運動を再現する手法(sliding mesh technique)である。

3.3 風洞試験による流れ場計測

風洞試験はシュツットガルト工科大学のFKFS風洞にて、タイヤ回転と路面移動を再現した状態で実施した。タイヤ周りの流れ場計測には4孔ピトー管を使用し、フロントタイヤ前、側部にて全4断面にて速度と圧力を計測した(Fig. 5)。そして、計測した速度・圧力から以下の式(1)~(5)を用い、各特性値を算出した。

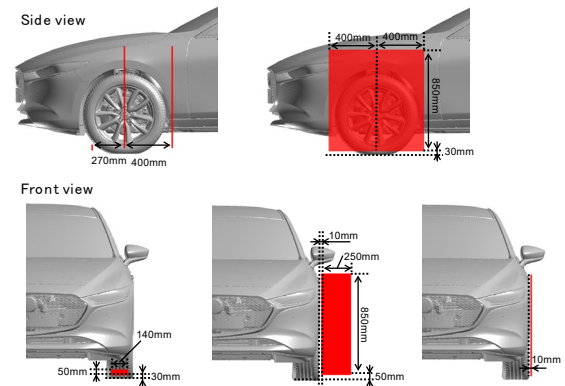


Fig. 5 Measurement Sections

$$C_p = \frac{P_{static} - P_{\infty}}{1/2\rho U_{\infty}^2} \tag{1}$$

$$C_{vx} = \frac{V_x}{U_{\infty}} \tag{2}$$

$$C_{vy} = \frac{V_y}{U_{\infty}} \tag{3}$$

$$C_{tp} = \frac{P_{total} - P_{\infty}}{1/2\rho U_{\infty}^2} \tag{4}$$

$$KE = C_{tp} \times C_{vx} \tag{5}$$

P_{static} : static pressure at measurement sections

P_{total} : total pressure at measurement sections

ρ : air density

$V_{x-direction}$: velocity component towards the X-axis at measurement sections

$V_{y-direction}$: velocity component towards the Y-axis at measurement sections

U_{∞} : testing wind speed

P_{∞} : absolute pressure in the wind tunnel

3.4 結果と考察

(1) タイヤ形状の影響

タイヤ形状の再現度の違いが、式(1)より求めたタイヤ前の圧力係数について及ぼす影響について検証した(Fig. 6)。赤い部分は圧力が高いことを意味し、図中の数値は圧力係数の計測断面の平均値を表している。タイヤ接地部の潰れと溝の形状を再現するとタイヤ前の圧力が低下し、実測値に近づいていることが分かる。Case2はCase1に比べ、タイヤ前圧力が低い。これはタイヤ潰れ

を再現することで、接地部の面積が減り、ショルダ部の曲率が大きくなったことで流れが側面に受け流されやすくなったためである (Fig. 6, 7)。また、Case3 は Case2 より更に、タイヤ前圧力が低くなっている。これはタイヤの縦溝と地面の間の空隙を風が通気するためである (Fig. 6, 7)。いずれもタイヤ形状の再現度を高めることで実測値に近づいており、中間特性の一つであるタイヤ前圧力の再現精度を高めるにはタイヤ接地部の断面形状と、タイヤの縦溝と地面の空隙部の通気の再現が重要であるといえる。

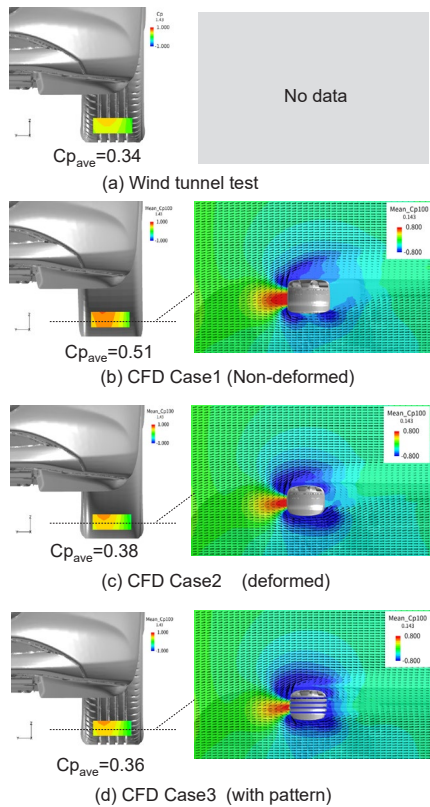


Fig. 6 Pressure in Front of Tire Measured by WT Test and CFD

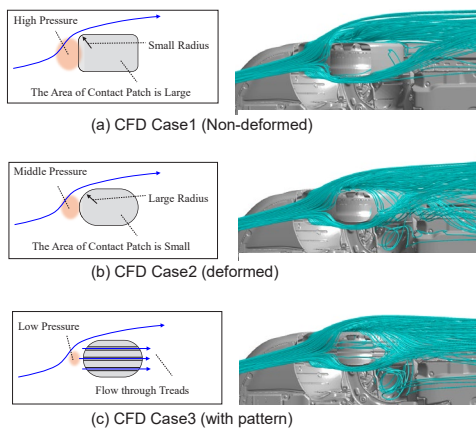


Fig. 7 Image of Flow Structure and Flow Stream Line Bottom of Tire

次にもう一つの間中特性である、式(3)より求めたホイール開口部で流入出する流れについて及ぼす影響を検証した (Fig. 8)。赤い部分はホイール開口部からの流出量が大きいことを示し、青い部分は反対に流入量が大きいことを示している。ホイール開口の上部に着目すると風洞での実測の場合はホイールへの流入方向の流れが支配的であるが、CFDで求めた結果 Case1~3 のいずれも流出方向の流れが支配的であり実測と逆である。このことから、タイヤ形状の再現精度を高めるだけでは回転を伴うホイール開口の再現精度を向上することは難しいと考えられる。

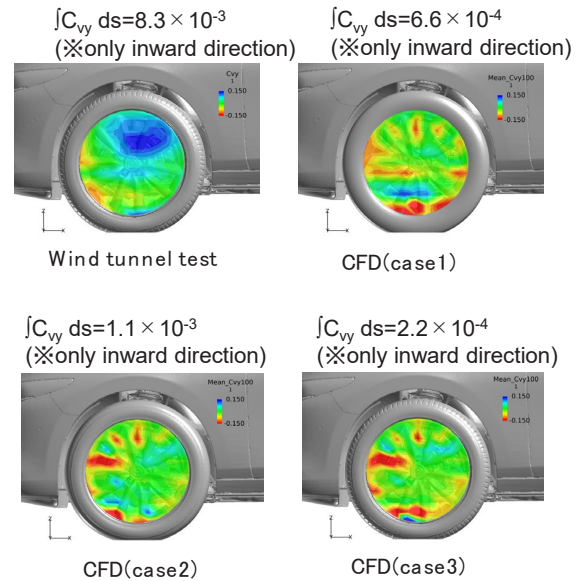


Fig. 8 Velocity Magnitude of Y Direction on Wheel Opening (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

(2) ホイールの回転手法の影響

ホイール回転手法の違いがタイヤ前圧力とホイール開口部で流入出する流れに及ぼす影響を確認した。ホイールの剛体回転運動を考慮した Case4 は、Case3 に比べタイヤ前圧力が上昇し (Fig. 9)、実測値からの乖離が大きくなる。一方で、ホイール開口上部やホイールアーチ隙への流入量については、実測値に近づいている (Fig. 10, 11)。これら変化の要因を理解するために、CFDの流れ場を分析した (Fig. 12)。ホイールの剛体回転有無により、ホイールスポーク部の風向が大きく変化していることが分かる。これはホイールの回転運動により主流がせん断されるためであり、せん断された流れの一部が開口内に流入すると考えられる。またその流入に誘起されてホイールアーチ後端からの流入も増加する。この流入はタイヤハウス内の圧力を高め、先に述べたタイヤ前圧力の上昇につながっていると推測する。以上より、もう一つの間中特性であるタイヤ側面開口部の流入量の再現精度を向上するにはホイール回転運動の再現が重要であるといえる。ただし、ホイール開口下部については実測値とCFD結果の差が大きく、精度向上は今後の課題となる。

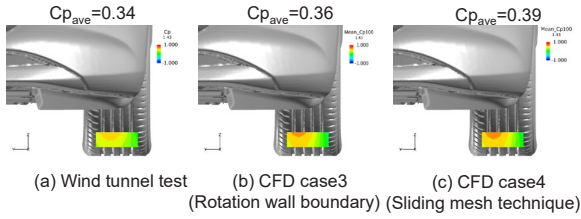


Fig. 9 Pressure in Front of Tire Measured by WT Test and CFD

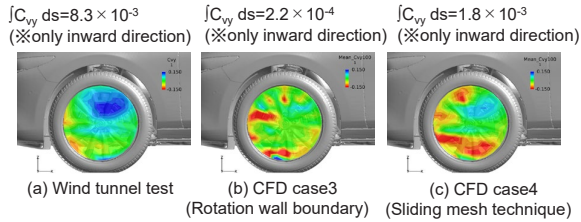


Fig. 10 Velocity Magnitude of Y Direction on Wheel Openings (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

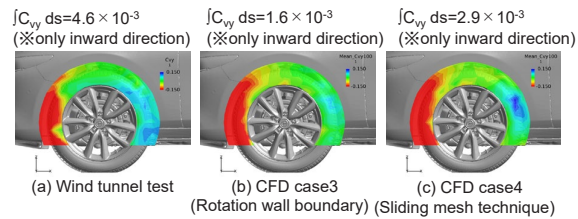


Fig. 11 Velocity Magnitude of Y Direction on Wheel arch Openings (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

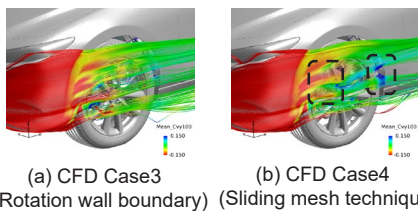


Fig. 12 Flow Path Line around Front Wheel (Blue: Inward Direction, Red: Outward Direction)

(3) 運動エネルギー損失と Cd 値の予測精度

タイヤ周りの運動エネルギー損失量を確認すると、前節までに述べた中間特性の再現精度が高い Case4 が最も実測値に近い値を示していることが分かる (Fig. 13)。

この結果を踏まえ、Case1 と Case4 の解析条件にて、タイヤ周りの形状が異なる複数仕様の解析を実施し、Cd 値の予測精度を検証した。Case4 は Case1 に比べて相関が高く、絶対値の予測精度も高い。以上より、中間特性の再現精度を高めることで最終性能の再現精度も向上できることを確認できた。更なる CFD の精度向上の技術開発は今後も継続するが、本技術開発で精度を検証できた解析条件は誤差影響を補正することでタイヤ周りの現象解明や車種開発のスペック決定に活用する。

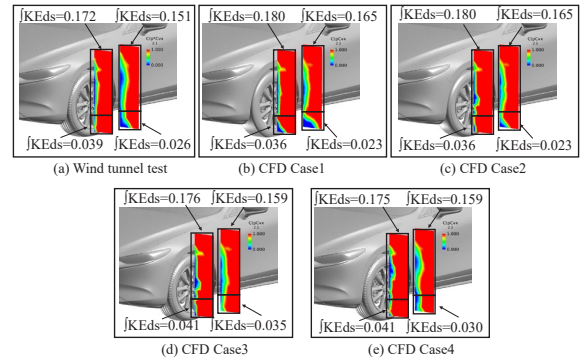


Fig. 13 Kinetic Energy Beside Tire

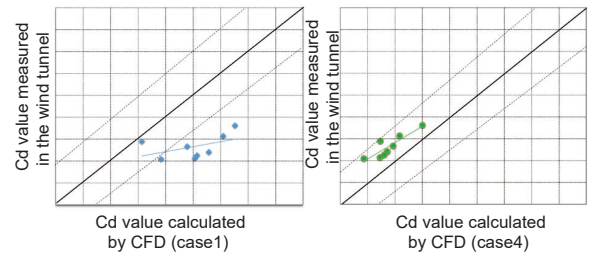


Fig. 14 Correlation Diagram of Cd Value between CFD and Wind Tunnel Test

4. タイヤ周りの風流れ制御技術開発

4.1 制御技術進化に向けたアプローチ

タイヤ周りの流れ場はタイヤ、ホイールの形状だけでなく、フロントバンパーなどのボディ形状、そして実走時はタイヤとホイールの回転運動などの複数の因子が影響する。そのためフルビークルの流れ場から各因子の影響を個別に把握し、異なる車種にも適用できる共通の考え方や制御因子を見出すことが難しい。そこで私たちは、まず簡易モデルを用いて、各因子がタイヤ周りの渦とそれに起因するエネルギー損失へ及ぼす影響を個別に理解することで、制御の発想を得るアプローチをとった。具体的には、自動車の与件であるタイヤ回転とボディの存在の影響のみを個別に評価できる簡易モデルを作成し検討を行った。

4.2 タイヤ回転が風のエネルギー損失に及ぼす影響

まず、タイヤ単体のモデルを用いてタイヤとホイールの回転運動が風の運動エネルギーに及ぼす影響を調査した (Fig. 15)。青い部分はエネルギーが低いことを示しておりタイヤの回転を再現するとタイヤ上部ではエネルギーが低下し、反対にタイヤ下部ではエネルギーが上昇することが分かる。図中に示す各断面で保有するエネルギー量からもその傾向が確認できる。これはタイヤ下部ではタイヤ回転と入力風の向きが一致するため、壁面近傍の速度が上昇し、剥離渦発生を抑制できるためである。一方、タイヤ上部はその逆である (Fig. 16)。従って、タイヤ前の上下方向の入力風向を制御し、剥離渦が発生し

にくいタイヤ下部へ風を導風すれば風のエネルギー損失を低減できると考えられる。

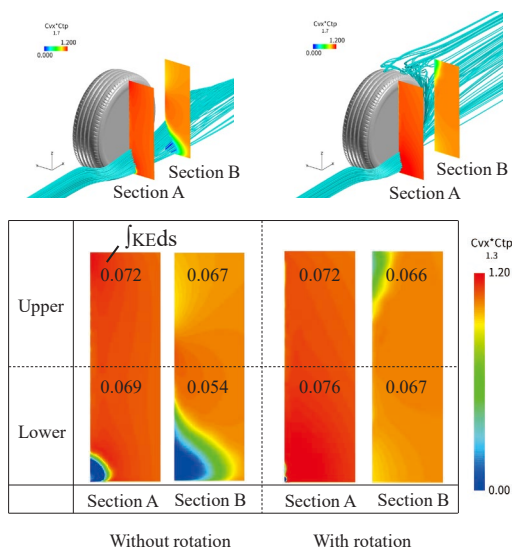


Fig. 15 Flow Streamline and Kinetic Energy Beside Tire

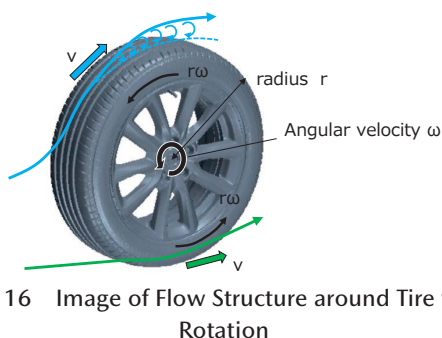


Fig. 16 Image of Flow Structure around Tire with Rotation

4.3 ボディーの存在が風のエネルギー損失に及ぼす影響

次に、簡易車両モデルを用いてボディーの存在が風の運動エネルギーに及ぼす影響を調査した。タイヤ単体の状態に比べ、ボディーが存在することで、タイヤ側部のエネルギーが低下することが分かる (Fig. 17)。この要因はボディーを取り付けた場合、タイヤ前の入力風向が主流に対してタイヤ外側に向かって曲がることにある (Fig. 18)。入力風の曲がりが大きくなることでタイヤ外側では、風がタイヤショルダから遠ざかる方向に流れることで剥離が誘発され、タイヤ内側ではタイヤ後部に風が巻き込むように流れる。その結果、タイヤ後部ではタイヤ内と外の風向差が大きくなりタイヤ背面の混合渦を強める (Fig. 19)。従って、タイヤ前の左右方向の風向を制御し、主流に対する風の曲がり小さくできればタイヤ側部と背面における風のエネルギー損失を低減できると考えられる。

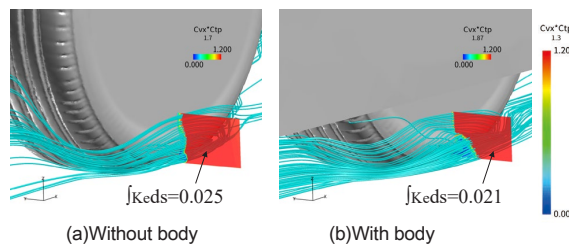


Fig. 17 Kinetic Energy Beside Tire

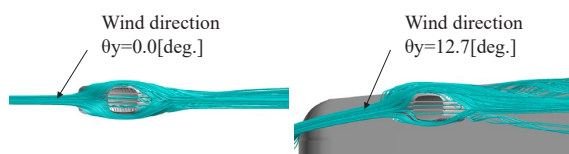


Fig. 18 Flow Structure around Tire with Body

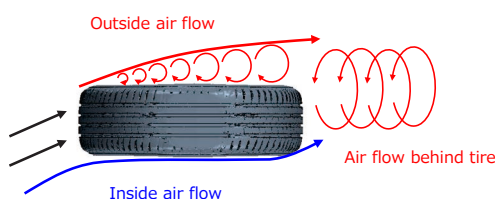


Fig. 19 Image of Flow Structure around Tire with Body

4.4 タイヤ下部の渦を低減する制御コンセプトと具体構造

前節までに、タイヤ前の入力風向を制御することでタイヤ周りのエネルギー損失量を低減する考え方を示した。具体的には左右方向の風の曲がり最小化しつつ、タイヤの回転方向と入力風向が一致するタイヤ下部に風を導風すればよい。本節ではこれを実現するための具体構造について言及する。デザインや車両レイアウトに制約がなければ、バンパーの外端位置や曲率などを制御因子として、ねらいの方向に風を導くことは可能である。しかし、この手法ではタイヤをバンパーから露出させたいデザインコンセプトを実現することは難しい。そこで、私たちはバンパー下部に小さく目立たないアタッチメント部品 (デフレクタ) を取り付けることで風向を制御し、デザイン自由度を高める取り組みを行った。

前世代 SUV 群では平板型のデフレクタ構造を採用し、タイヤへ当たる風を減らして、ホイールハウス内への風の流入を抑制することで、タイヤ上部の渦を低減していた。しかし、この構造ではデフレクタ表面で急激な圧力上昇を伴い、タイヤ直前で風が左右に大きく曲がってしまうため、タイヤ前での風向制御が難しい。そこで、私たちは3次元的なスロープ構造を着想し、バンパー下端から徐々に風を曲げることで、ねらいの風向制御を実現する形状を導出した (Fig. 20)。更なる部品小型化のためにデフレクタの基本形状だけでなく、風を利用した風向制御を検討した。具体的には、デフレクタ内に一度風を取り込み、背面からねらいの方向に風を排出することで、基本形状を小型化しても風向制御機能を維持できるとい

うものである (Fig. 21)。これらの構造により、運動エネルギー損失量に寄与するタイヤへの入力風向を約 6° 小さくすることができた (Fig. 22)。上記の進化によりデザインと両立しながら空力性能を高めることができ、前世代比で約 3% Cd 値を低減することができた (Fig. 23)。

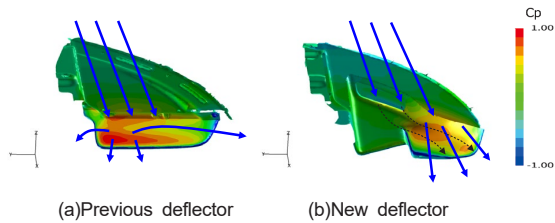


Fig. 20 Image of Flow around Deflector

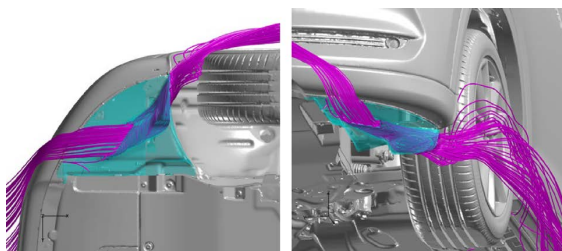


Fig. 21 Deflector with Air Blow Structure

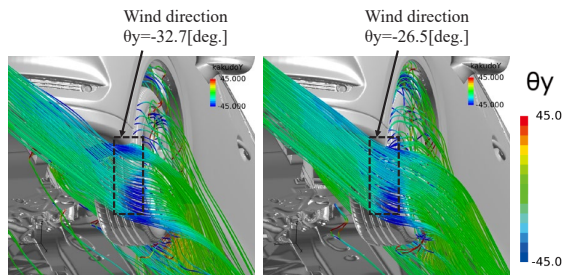


Fig. 22 Flow Streamline in Front of Tire

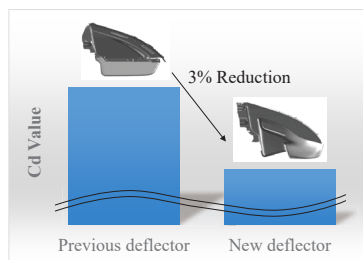


Fig. 23 Drag Reduction Performance of New Deflector

5. CX-30 の空力とデザインの共創活動

5.1 「人とともに創る」共創プロセスによる開発短期化
デザインと空力のブレークスルーの発想を得るためには、双方が両立に向けた議論を早い段階から行う必要がある。そこで私たちは先行段階からデザインコンセプトの理解に努めることに加え、現象理解が容易な CFD を活用し、空力の原理・原則と 4 章で述べた新しい制御の考

え方と必要機能を設計者やデザイナーにも理解してもらうための場を設け共創活動を行った。その甲斐があって、お互いにブレークスルーの提案をしあうことができ、結果として商品開発を早期収束させつつ、新しい風流れ制御技術を商品に反映させることができた。

5.2 風流れの制御機能とデザインの両立構造

空力とデザインの共創対象となった部品は複数ある (Fig. 24) が、特に注力した部位は新しい制御技術を採用したタイヤ周りの造形である。タイヤをボディから露出させたいデザインコンセプトを実現するために、4 章で述べた一度風を取り込んだ風をねらいの方向に排出する構造をフロントバンパーとデフレクタに採用することで、デザインコンセプトとタイヤ周りの風の運動エネルギー損失量低減機能を両立できる構造を導出した (Fig. 25)。

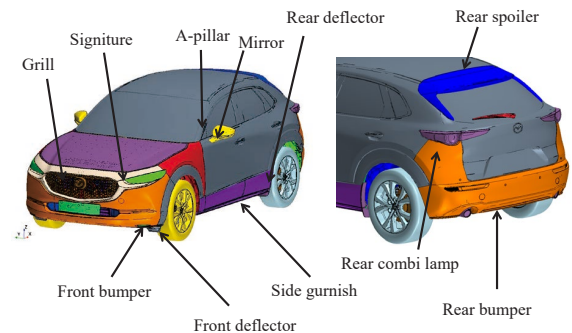


Fig. 24 Aerodynamic Parts on Upper Body of CX-30



Fig. 25 Aerodynamic Optimization around Tire of CX-30

5.3 最終性能の答え合わせ

ムービングベルト付き風洞にて、最終性能確認車両を用いた実機検証を実施し、車両周りの風流れの運動エネルギーについて CFD と風洞実験の相違点を比較検証した。ホイール開口下部の分布に差があるが、これは 2 章の検討で想定したものであり絶対値の誤差についても想定していた範囲に収まっていた (Fig. 26)。Cd 値についても、想定していた誤差の範囲内であり、CFD の結果が

ら予測していたクラストップレベルの Cd 値目標値を達成することができた (Fig. 27)。

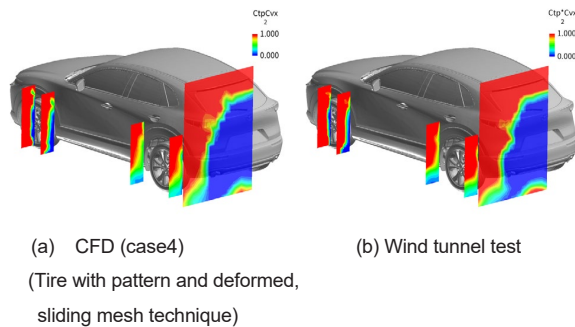


Fig. 26 Kinetic Energy around Vehicle

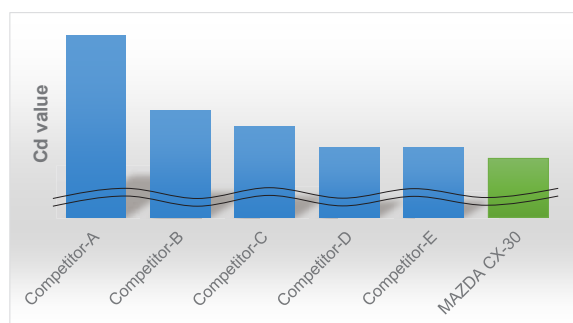


Fig. 27 Aerodynamic Drag of CX-30 and Competitors Measured in Wind Tunnel

6. おわりに

回転を伴うタイヤ周りの流れ現象に着目し、先行開発段階から取り組んできた CFD 技術とタイヤ周りの風流れ制御技術を更に進化させ、デザイナーとの共創活動を行うことで CX-30 のデザインコンセプトとクラストップレベルの Cd 値の両立を実現できた。私たちは引き続き、熱・風流れに責任をもつエンジニアとしての道を極めつつ、今後もデザイナーと互いの進化ビジョンと原理・原則を腹落ちするまで相互理解し、お客様に人生の輝きを提供するという共通意識の下、独自技術をともに創り上げていく姿勢で挑戦を続けていく所存である。

参考文献

- (1) 久我秀功ほか：新型 MAZDA3 の熱流体エネルギーマネジメント技術，[マツダ技報](#)，No.36, pp.102-106 (2019)
- (2) 岡本哲ほか：次世代商品群の空力・空力騒音性能開発，[マツダ技報](#)，No.35, pp.21-25 (2018)
- (3) Wickern, G., Zwicker, K., and Pfadenhauer, M., “Rotating Wheels : Their Impact on Wind Tunnel Test Techniques and on Vehicle Drag Results,” SAE Technical Paper 970133 (1997)
- (4) 川村哲祐ほか：移動地面条件下におけるタイヤ、ホイール開口及びフロントストレーキが空力性能に及

ぼす影響，自動車技術会春季大会学術講演会，講演番号 135, pp.742-747 (2017)

- (5) Charlie Lew et.al, Aerodynamic Simulation of a Standalone Rotating Treaded Tire, SAE 01-1551 (2017)
- (6) Alexander Waschle et.al, The Influence of Rotating Wheels on Vehicle Aerodynamics – Numerical and Experimental Investigations, SAE Technical Paper 01-0107 (2007)
- (7) K. shimizu. et.al, VISUALIZATION OF FLOW STRUCTURES AROUND THE FRONT WHEEL OF A SEDAN-TYPE AUTOMOBILE, The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing1-3, Kumamoto, JAPAN (2017)

■ 著 者 ■



中田 章博



森川 陽介



岡本 哲