

特集：MAZDA CX-60

14

CX-60 の空力開発に適用した 車両後部の風向制御技術

Aerodynamic Development for CX-60 Adapting Flow Control Technology around Wake

伊川 雄希^{*1} 久我 秀功^{*2} 岡本 哲^{*3}
Yuki Ikawa Yoshiatsu Kuga Satoshi Okamoto

要約

地球温暖化抑制に向けた CO₂ 削減の取り組みの一つとして、燃費向上させた商品をお客様にお届けすることが私たちの使命である。CO₂ 排出量は走行抵抗に比例して増大し、その構成要素である空気抵抗は車両形状に依存するため、商品開発においては魂動デザインと空気抵抗低減の両立が必須課題となる。私たちは、空気抵抗係数 (Cd 値 : Drag Coefficient) への寄与度が大きい車両後方の渦に注目し、簡易モデルを用いた風流のメカニズム解明と風流れ制御技術開発に取り組んだ。その結果、車両後端部の風向を制御することで、空気抵抗を決定づける風流の運動エネルギー損失を低減させるコンセプトを構築した。このコンセプトを具現化することで、従来同型比で Cd 値を 12% 低減できる新しい風流れ制御技術を確立した。これらの新技術を CX-60 の商品開発に適用し、高い次元で魂動デザインと両立させながら、クラストップレベルの Cd 値を実現させた。

Abstract

It is important to improve fuel economy for cutting CO₂ emission contributing to the environment. However, it is necessary to balance the aerodynamic drag reduction and the design in the automotive product development because the drag depends on the geometry of the vehicle. To achieve this goal, the technologies of the drag reduction were developed by using the simple shaped model. We made a concept to reduce the loss in the kinetic energy of flow by controlling the flow direction at the rear end of the vehicle. By realizing this concept, the new flow control technologies that can reduce the drag by 12% compared to the previous model were developed. By applying these technologies, the CX-60 achieved top level aerodynamic drag among the same class vehicles and realized the design concept.

Key words : Aerodynamics, Design

1. はじめに

地球温暖化の対応策として CO₂ 排出削減は重要であり、マツダでも商品・生産の両面から CO₂ 排出削減に取り組んでいる。CO₂ 排出量は、パワーソースの性能のみならず、走行抵抗に比例して増大する。走行抵抗は主に転がり抵抗と空気抵抗に分けられる。空気抵抗は車速が高まるほど走行抵抗に対する寄与度が大きくなり、時速 100km で走行する場合には、およそ 8 割を占める⁽¹⁾。空気抵抗は Cd 値に比例するため、Cd 値を小さくすることが走行抵抗低減のために極めて重要である。

Cd 値は車両周りの風流れによって決まる。マツダは、

風流れによって生じる渦を運動エネルギー損失で表し、これに比例して空気抵抗が増大することを提案し、その確からしさを検証してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。その活動の中で車両周りの風流れを制御し、渦を低減すれば風流の運動エネルギー損失を低減でき、結果として Cd 値を低減できることが分かってきた。渦を低減するためには、車両表面を平滑にするなどいくつか手法はあるが、既存技術に頼った制御は車両パッケージングやデザインをはじめとした他性能に対して大きな制約となる。本稿では、他性能と Cd 値の両立を目指して実施した車両後方の風流れ制御技術開発と、この技術を用いた CX-60 の空力開発について述べる。

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

2. 新世代 SUV の空力開発課題

2.1 風流れ制御の考え方

これまでの研究⁽²⁾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の低減が重要であることが分かった。運動エネルギー損失を発生させる渦は、三つに大別できる。一つ目は車両表面から風が剥離することにより発生する“剥離渦”，二つ目は異なる流れが合流して発生する“混合渦”，三つ目は車両後方で上下左右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これらの渦 (Fig. 1) を抑制することで風流れの運動エネルギー損失を小さくできる。特に、混合渦と後流渦は、風流れが車両進行方向に対してなす角度である風向によって運動エネルギー損失が変化するため、風向の制御が重要となる。

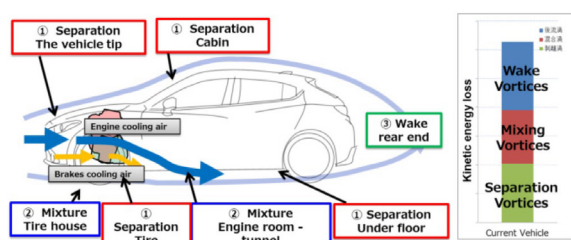


Fig. 1 Kinetic Energy Loss at Each Part of the Vehicle⁽²⁾

2.2 CX-60 の空力性能開発の課題

SUV において車両周り全体で発生する運動エネルギー損失のうち、約 3 割が後流渦に起因するため⁽³⁾、後流渦に着目し技術開発を行った。CX-60 ではスポーティーな SUV デザインコンセプトを実現するために、バックウィンドウが傾斜し、リアバンパーを丸い造形にすることが求められた。そのため、ルーフ上部やリアバンパーコーナーにおいて風流れが巻き込み、後流渦を強めてしまう。以上より、CX-60 のデザインと空力性能を両立するための課題は、車両周りの局所で発生する渦による運動エネルギー損失を低減しつつ、後流渦の運動エネルギー損失を低減することである。そのために後流渦の新たな制御技術を確認し、クラストップレベルの性能となる従来同型比 12% の Cd 値改善を実現することを目標とした。

本稿では、この課題解決に向けて取り組んだ後流渦の運動エネルギー損失の低減コンセプト (3 章)、制御コンセプト実現のための風流れ制御技術 (4 章)、CX-60 の空力開発への適用 (5 章) について報告する。

3. 後流渦の運動エネルギー損失の低減コンセプト

3.1 CFD の解析条件

本研究の Computational Fluid Dynamics (以下 CFD) は、汎用流体解析ソフトである Siemens 社の STAR-CCM+[®] を使い、乱流モデルには Detached Eddy Simulation (DES)

を適用し、非定常解析を行った。

3.2 運動エネルギー損失の発生メカニズム解明

後流渦によって生じる運動エネルギー損失の大小は、車両後端部を流れる風の向きによって決まると考えた。この風向は、後端部の形状だけではなく、後端部に至るまでの風流れにも依存して決まると仮説を立てた。この仮説を検証する。

検証に用いたモデルを Fig. 2 に示す。車両前方から流れてくる風と後流渦の関係、及び後流渦が空気抵抗に与える影響を確認するため、車両固有の要素を排除した涙滴形状 MODEL A と、自動車の床下は地面に平行であることを模擬して中心軸を下方に 8 度傾けた MODEL B の 2 つを用いた。

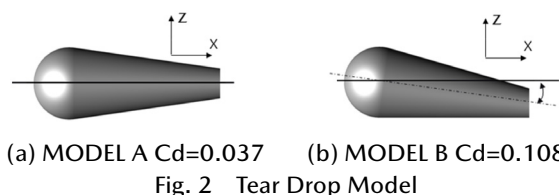


Fig. 2 Tear Drop Model

X 軸方向における運動エネルギー損失のグラフを Fig. 3 へ示す。このグラフは、モデルの前端の断面からモデル後方の運動エネルギーの減少がほぼ無くなった断面までの風流れの運動エネルギー損失を示す。MODEL B では、モデル後端以降で運動エネルギー損失が大きくなった。これは、後端上部の風が吹き下ろすことで後流渦が強まったと考えられる。

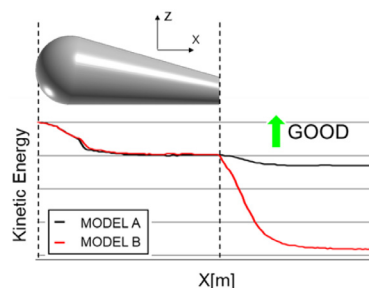
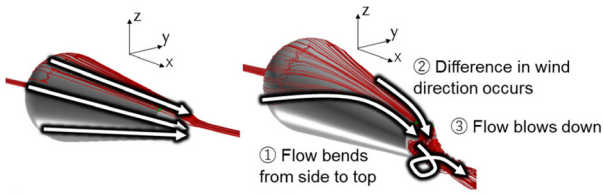


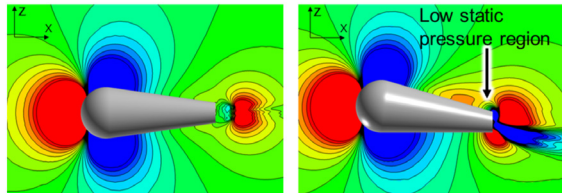
Fig. 3 Kinetic Energy of Flow around MODEL A and B

Fig. 4 にモデル表面近傍の流線を示す。両モデルとも、後端まで表面に沿って流れる。MODEL B では側面から上面に巻き込む風が発生することで (Fig. 4(b)①)、後端部で風向に差が生じ (Fig. 4(b)②)、吹き下ろす現象が確認された (Fig. 4(b)③)。

MODEL B においてモデル側面から上面に風が巻き込んだ要因を分析するため、Fig. 5 にモデル中心の Y 断面における静圧分布を示す。MODEL A では、後端部に生じた負圧が小さい。一方で MODEL B では後端部の上方に負圧が発生した。Fig. 4(b)①の流線は、この負圧に向かって巻き込んだと考えられる。

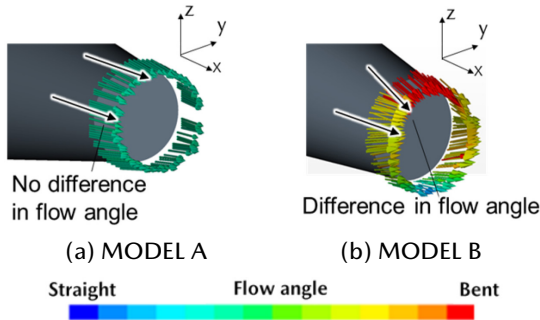


(a) MODEL A (b) MODEL B
Fig. 4 Streamlines at Body Surface and Wake



(a) MODEL A (b) MODEL B
Low Static Pressure High
Fig. 5 Static Pressure Distribution

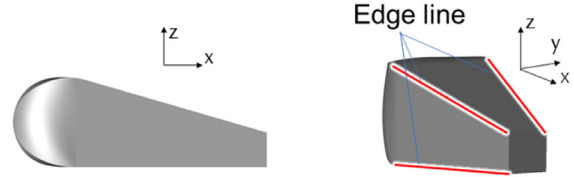
Fig. 6 にモデル後端部の X 断面の風向を示す。MODEL A では、後端部の風向は一定の角度である。一方 MODEL B では、斜め上を向く風がモデル後端までに生じるため後端部において風向差が発生し、Y 軸方向に流れが捻じれる。そのため上面の流れが押し下げられ、急激に吹き下ろす流れとなる。以上より、後流渦は後端部の形状だけでなく、後端部に至るまでの風流れにも影響されるといふ仮説は正しいことが証明された。



(a) MODEL A (b) MODEL B
Straight Flow angle Bent
Fig. 6 Velocity Distribution at Cross Section X

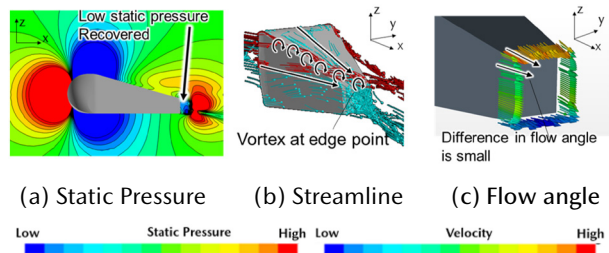
MODEL B においても、モデル上面と側面の風を後端部まで真っ直ぐに流せば、後端部での風向差が無くなり、後流の吹き下ろしが弱まるという仮説を立てた。この仮説を検証するために、丸い断面の MODEL B に対し、四面の平面にして直線のエッジ部をもつことで、上面と側面の風を真っ直ぐ流すことをねらった MODEL C を導き出した (Fig. 7)。

MODEL C の流れ場を Fig. 8 に示す。MODEL B に対し、MODEL C はモデル背面上部に生じる負圧が小さい (Fig. 8(a))。そのため側面から上面に巻き込む流れが発生しない (Fig. 8(b))。また、Fig. 8(c) に示すように、側面と上面のエッジ部で発生した渦により、側面と上面の流れ



(a) Side view (b) Diagonal view from behind
Fig. 7 MODEL C Cd=0.060

を真っ直ぐに制御できた。その結果、後流渦による運動エネルギー損失を低減できた (Fig. 9)。以上より、上面と側面の風を後端部まで真っ直ぐに流せば、後端部での風向差が無くなり、後流での吹き下ろしが弱まるという仮説は正しいことが証明された。



(a) Static Pressure (b) Streamline (c) Flow angle
Low Static Pressure High Low Velocity High
Fig. 8 Flow and Streamline at MODEL C

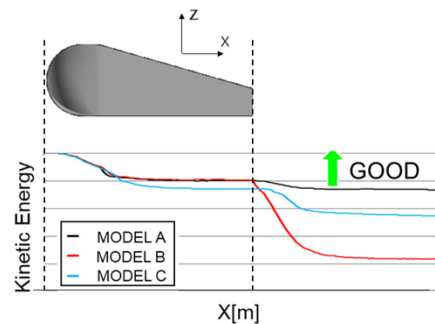


Fig. 9 Kinetic Energy of Flow at MODEL C

これを基に「四面の表面近傍を流れる風を真っ直ぐ流すことで、後端部での風向差をなくすこと」を後流渦による運動エネルギー損失を低減するコンセプトとした。

3.3 車両全体での運動エネルギー損失低減コンセプト

前節で導いたコンセプトを基に、目標とする運動エネルギー損失の低減を実現するため、車両の四面での圧力差を発生させずに速度差を低減することで後流渦の巻き込みを抑制し、後端は風向差なく流す (Fig. 10)。その風向目標を定義するため、それぞれの面の後端部における風向と運動エネルギー損失の関係を導き出した。そして、それぞれの面における風向が互いに影響し合う交互作用を考慮し、車両後方で一点収束する流れが実現できる風向を目標とした (Fig. 11)。

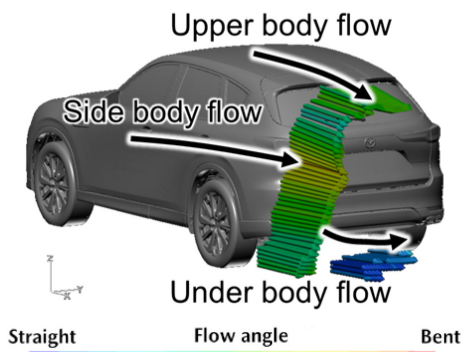


Fig. 10 Flow Angle around the Vehicle

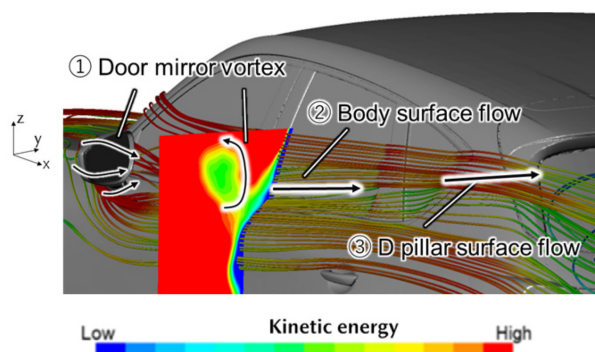


Fig. 13 Door Mirror Vortex and Body Side Flow

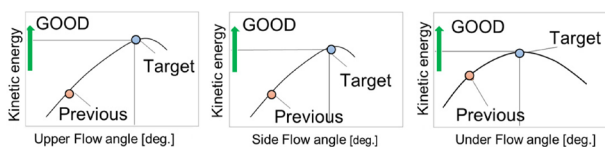


Fig. 11 Flow Angle and Kinetic Energy

4. 制御コンセプト実現のための風流れ制御技術

本章では制御コンセプト実現のための風流れ制御技術について述べる。具体的には車両後端部での風向目標を実現するために、ドアミラー・タイヤ周り・床下の個別箇所において適用したコンセプトと制御技術について述べる (Fig. 12)。

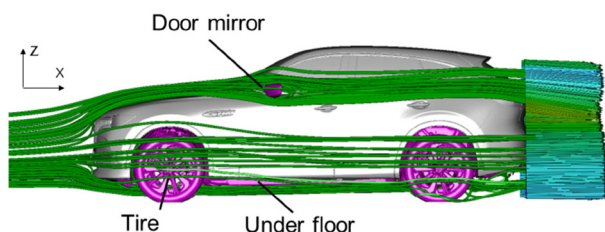


Fig. 12 Streamline around the Vehicle

4.1 ドアミラー周りでの風流れ制御技術

車両側面では、車両近傍の風を車両後端まで真っ直ぐ流すことで、ねらいの風向を実現させる。Fig. 13 にドアミラー周りの流れの模式図と、車両近傍の流線を示す。ドアミラー後方には渦が生じ (Fig. 13 ①)、その後方で流れる車両近傍の風 (Fig. 13 ②) がDピラー近傍で上方に曲った (Fig. 13 ③)。これはドアミラーとドアミラーベースの形状によって、ドアミラー後部の渦が車両表面に近づくことで、車両表面の風が巻きあげられたため、Dピラー近傍の風向が上方に曲ったと考えられる。

Dピラー及びリアサイドスポイラー部で流れの方向の模式図を Fig. 14(a) に示す。真っ直ぐ水平に流れる場合は A-A 断面に沿って流れる。巻き上がって流れる場合は B-B 断面に沿って流れる。ねらいは後端まで風を沿わせ

て流すこと (Fig. 14(b)) である。一方、Dピラー近傍で上方に曲がる流れになると、曲率が大きな断面 (Fig. 14(c)) を流れる。これによりDピラー近傍の流れが減速するため剥離が前方に移動し、ねらいの風向にできない。

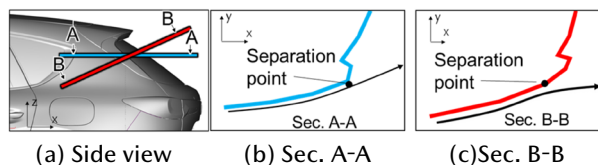


Fig. 14 Flow Image around Rear End

これを制御するため、「ドアミラー後方の渦を車両から遠ざけて車両表面の風を真っ直ぐ流すこと」をコンセプトとした。ドアミラー後方の流れを Fig. 15 に示す。ドアミラー後方の渦が車両に近づいている (Fig. 15(a) ①)。これは、ドアミラーベースの外側の風向 (Fig. 15(a) ②) と内側の風向 (Fig. 15(a) ③) が揃わないためである。ドアミラーベースの形状で風向を揃えることで風向差を制御した (Fig. 15(b) ④)。

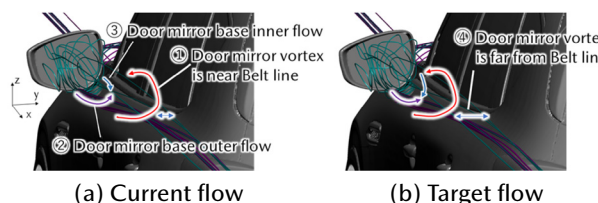


Fig. 15 Flow Image around Mirror

4.2 タイヤ周りの運動エネルギー損失低減技術

タイヤ周りでは、Fig. 16 に示す①～③の3つの混合渦によって運動エネルギー損失が生じる。これらの渦の大きさが不均一な場合、渦と渦の境界部で運動エネルギー損失が増え、その後方で渦が発達し、強まる。この渦は車両後端部で風向差を発生させ、後流渦による運動エネルギー損失が増大させる。そのため、タイヤ周りの Fig. 16 の①～③の混合渦は小さく・均一にすることが重要である。これを実現するため、タイヤ周りの各部位で渦を低減させた技術について述べる。

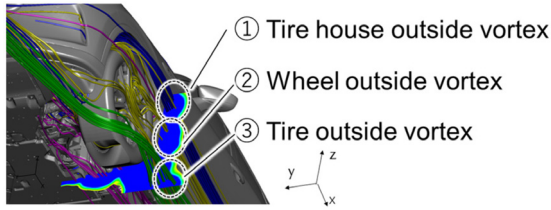
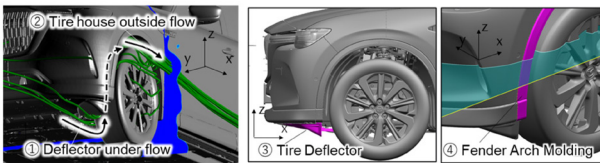


Fig. 16 Streamline around Front Tire

(1) タイヤハウスから吹き出す渦

タイヤハウスから吹き出す風流れの模式図を Fig. 17 に示す。タイヤ正面に入射した風 (Fig. 17 (a)①) が、タイヤハウス内で上方に向けて巻き上がり、バンパー側部の主流と合流するため、渦が発生する (Fig. 17 (a)②)。この渦を抑制するためにはタイヤ正面から巻き上がる風速を下げつつ、タイヤハウスから吹き出す風とバンパー側部の風を風向差なく合流させることが重要である。そのため、タイヤデフレクター (Fig. 17 (b)③) の面角度・高さでタイヤ正面からタイヤハウス内の上方に向かう風を制御し、タイヤハウスから吹き出す風の向きを真っ直ぐにした。また、フェンダーアーチモールルの断面形状でバンパー側部を通る風の向きも真っ直ぐにした (Fig. 17 (c)④)。これらにより風向差を制御した。



(a) Streamline and Tire House Vortex (b) Tire Deflector (c) Fender Arch Molding

Fig. 17 Flow Image around Tire House and Parts

(2) ホイールから吹き出す渦

ホイール周りの風流れの模式図を Fig. 18 に示す。エンジンルームからホイールに向かう風 (Fig. 18 ①)、バンパー下部からタイヤデフレクター内側を通った風がホイール内に入る風 (Fig. 18 ②)、それらの風がバンパー側部の主流 (Fig. 18 ③) と合流する際に渦が発生する (Fig. 18 ④)。

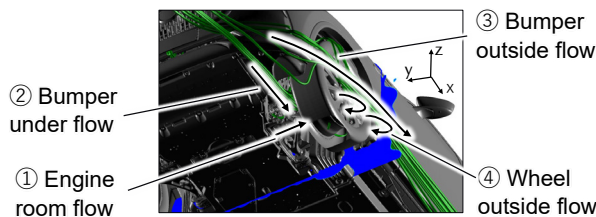
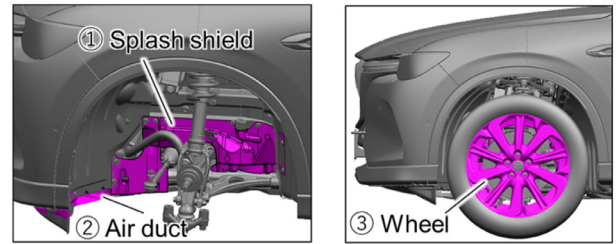


Fig. 18 Streamline and Tire Side Vortex

ホイール内に入る風は、タイヤハウス内から出てゆく風の速度と向きによって決まるため、この制御が渦の低

減に重要である。タイヤハウス内から出る風速と風向は、エンジンルームとタイヤハウスの空隙を閉塞しているスプラッシュシールドの開口面積を縮小することで制御した (Fig. 19 (a)①)。バンパー下部からタイヤデフレクター内側を通る風は、ダクト (Fig. 19 (a)②) を通ってエンジンルームから吹き出す風によって向きをまっすぐにし、ホイール内に向かう風を抑制した。ホイール内の風は、ホイール外周の形状 (Fig. 19 (b)③) を用いて、バンパー側部の主流との風向差を制御した。



(a) Tire house parts (b) Wheel

Fig. 19 Tire House Parts and Wheel

(3) タイヤ下部の外側で発生する渦

タイヤ下部の外側の流れを Fig. 20 に示す。バンパー下部を通過した風 (Fig. 20 ①) が、タイヤ正面に対し内側から斜めに入射する。これによりタイヤ側部に向かう風速が大きくなり、タイヤショルダ部で風が追従しきれず、渦が発生する⁽⁴⁾ (Fig. 20 ②)。

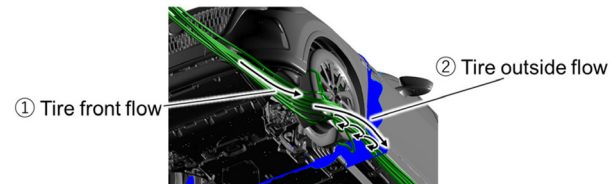


Fig. 20 Streamline and Tire Outside Vortex

タイヤショルダ部で風を沿わせるためには、タイヤ正面向かって真っ直ぐ風を入射し、タイヤ側部に向かう風向を真っ直ぐにすることが重要である。そこで、タイヤに沿わせるためにタイヤデフレクター形状 (Fig. 21) で風を真っ直ぐに入射させ、タイヤ下部の外側の風向を制御した。

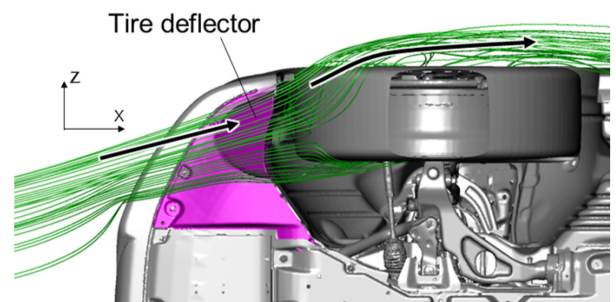


Fig. 21 Streamline and Tire Deflector

4.3 床下での運動エネルギー損失の低減技術

床下の流れを Fig. 22 に示す。エンジンルームからフロントタイヤ後方や床下に吹き出す風による混合渦が発生する (Fig. 22 ①)。これらの渦によって床下で風が曲げられ、ボディーサイドに吹き出す (Fig. 22 ②)。その風がリアタイヤに斜めに当たることで、リアタイヤ周りの混合渦を強める (Fig. 22 ③)。

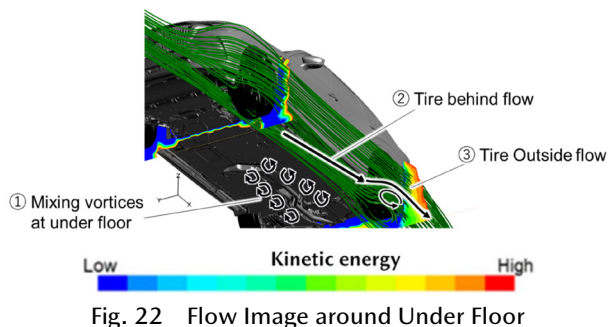


Fig. 22 Flow Image around Under Floor

リアタイヤに真っ直ぐ風を当てて混合渦を改善するために、以降の3点を要件化した。

- 1) エンジンルームからホイールハウスの内側に吹き出す風向をタイヤ周りの主流の風向に合わせて速度差を小さくする。
- 2) 床下は平滑化する。
- 3) 渦が発生しても真っ直ぐ流す。

特に、3) 渦が発生しても真っ直ぐ流す要件については、3.2 節の Fig. 8 (b) で述べたエッジ部で生じる渦による巻き込み抑制の現象を応用した。具体的には、マッドガード後端部の凹凸 (Fig. 23 (a) ①) で渦を発生させ (Fig. 23 (b) ③)、タイヤ内側を通った風を真っ直ぐにする。そしてフロアカバー外端部の側面から下面に巻き込む際にエッジ部 (Fig. 23 (a) ②) で渦 (Fig. 23 (b) ④) を活用し、床下からボディーサイドに向かう風を真っ直ぐ流した (Fig. 23 (b) ⑤)。

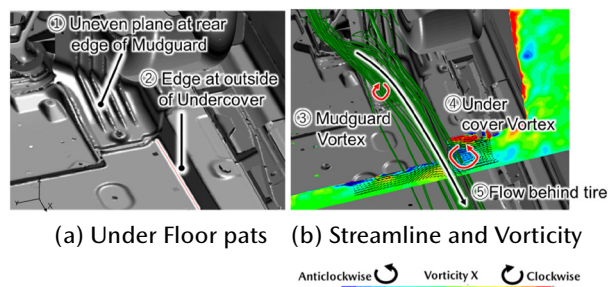


Fig. 23 Flow Image at behind the Front Wheel

4.4 後流部の風流れ

以上、車両後端に至るまでの個別箇所において適用したコンセプトと風流れ制御技術により、上面・側面・下面のそれぞれの面でねらった風向を実現でき、前モデル

比で Cd 値を約 12% 低減する技術を確立した (Fig. 24, 25)。

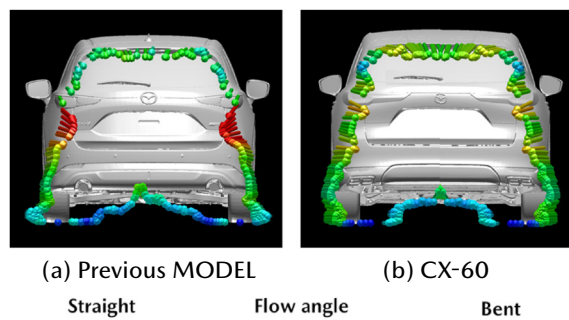


Fig. 24 Flow Angle Distribution at Rear End

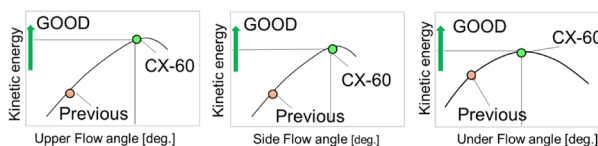


Fig. 25 Flow Angle and Kinetic Energy

5. CX-60 の空力開発への適用

5.1 後流渦を制御する技術の車両への適用

4 章で確立した風流れの制御技術を基に、CFD をベースとした開発によって魂動デザインと高次元で両立させつつ、車両周り全体で風流れの運動エネルギー損失を低減させる構造を CX-60 に織り込んだ (Fig. 26)。

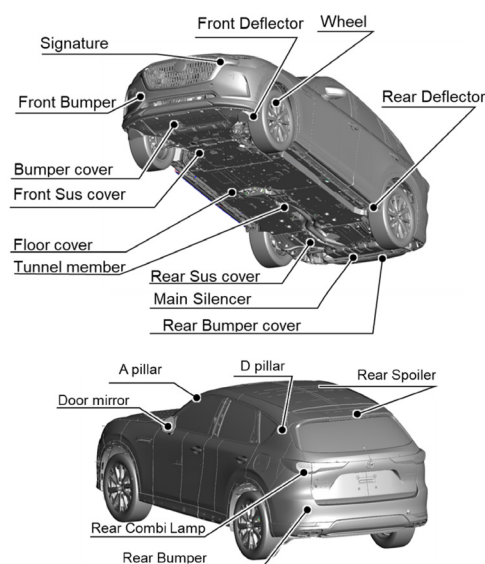


Fig. 26 Aerodynamic Parts of CX-60

5.2 最終性能の実機検証

シュツットガルト工科大学の FKFS 風洞にて、最終性能確認車両を用いて、車両後端部の風向及び風流れの運動エネルギーを計測し、CFD と比較検証した (Fig. 27,

28)。風向特性と運動エネルギーは、いずれも良く一致している。加えて、目標とするCd値が実現できていることを確認し、CFDを主体として導出したコンセプトが妥当であることを検証した。最終的に、従来同型比12%のCd値改善によりクラストップレベルのCd値を達成できた (Fig. 29)。

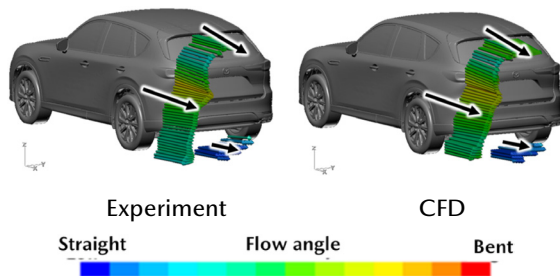


Fig. 27 Flow Angle around CX-60

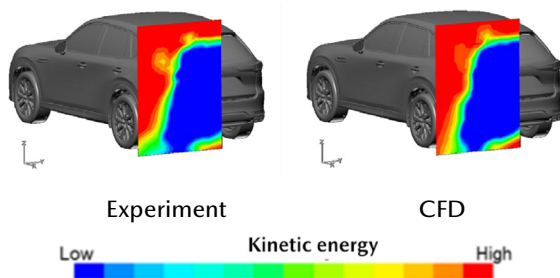


Fig. 28 Kinetic Energy behind CX-60

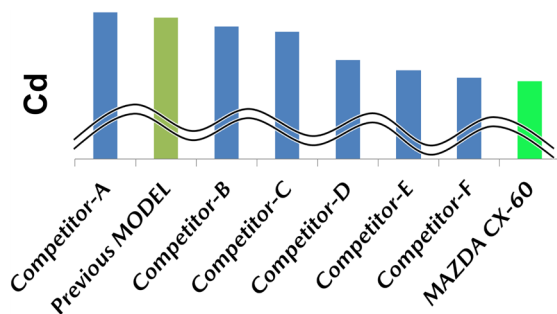


Fig. 29 Aerodynamic Drag Coefficient of CX-60 and Competitors Measured in Wind Tunnel

6. おわりに

風流れのメカニズム解明を通して制御技術を進化させ、デザイナーとの共創活動を行うことでCX-60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。マツダは引き続き、熱や風流れの制御技術を追求しながら、共創活動の拡大により車両全体の性能を向上させ、お客様により良い商品を提供していく。

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) Irving Brown, et al.: Effect of Base Bleed and Rear Cavities on the Drag of an SUV, SAE Technical Paper 2010-01-0512 (2010)
- (4) 中田章博ほか：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，[マツダ技報](#)，No.37，pp.19-26 (2020)

■ 著 者 ■



伊川 雄希



久我 秀功



岡本 哲