

4

次世代商品群の空力・空力騒音性能開発 Aerodynamic and Aerodynamic Noise Performance Developments for Next Generation Vehicles

岡本 哲* ¹ Satoshi Okamoto	村上 健太* ² Kenta Murakami	大平 洋樹* ³ Hiroki Ohira
伊川 雄希* ⁴ Yuki Ikawa	西田 周平* ⁵ Shuhei Nishida	李 曄* ⁶ Ye Li

要 約

次世代商品群は、「ビークルアーキテクチャー構想」の基、全ての車を一括して考えて開発した。空力開発としては低燃費実現のため、空気抵抗の低減に注力して取り組んだ。空気抵抗は車体形状に大きく依存するため、デザインと空力の両立が課題である。特にマツダの「魂動デザイン」で表現したい形状を最大限に実現しつつ、空気抵抗を低減することを目指すなど、次世代商品群の空力開発は非常に難しいタスクであった。

この難易度の高いタスクを実践するため、風流れの運動エネルギー損失量を用いた車両周りを定量的に解析する手法を用いることで空気抵抗低減技術を更に進化させた。この進化させた技術とプロセスを適用することで、次世代商品群はクラストップレベルの空力性能と空力騒音性能を実現できた。

Summary

The next-generation vehicles were developed under “the Vehicle Architecture Concept”. To enhance the fuel economy performance, the focus was placed on reducing the aerodynamic drag through aerodynamic developments. Meanwhile, as the aerodynamic drag largely depends on the vehicle shape, it was a great challenge to establish compatibility between the design and the aerodynamic drag. In particular, we strived to reduce the aerodynamic drag while realizing the Mazda “Kodo” design concept to the maximum possible level. From the above, aerodynamic developments for the next-generation vehicles were quite demanding tasks.

To carry through the abovementioned challenge, we worked on a further innovation of the aerodynamic drag reduction technology by adopting a technique for quantitatively analyzing the vehicle peripheral area by use of the kinetic energy loss. By applying this evolved technology and process, we have been able to achieve the best-in-class aerodynamic performance and aerodynamic noise performance in our next-generation vehicles.

1. はじめに

近年のCO₂排出量の削減と排ガス規制の強化は自動車開発の重要課題となっている。よって、これに大きく寄与する空気抵抗低減が空力開発における重要な目的となっている。一方、自動車の空気抵抗低減はデザインとの両立が課題である。特に、マツダは美しさを追求したデザインの車づくりを実施しており、その「魂動デザイン」で表現したい形状を最大限に実現しつつ、空力性能を大

幅に向上させることが使命となる。

この使命をやり遂げるため、車全体で最適化や理想機能を考える「ビークルアーキテクチャー構想」の考え方にに基づき、車両周りの風流れに対し空気抵抗としての「風流れの運動エネルギー損失量」を定義し、ユニットごとに目標配分することで、それぞれのユニットで運動エネルギー損失量を抑制するという手法を見出した。その手法を次世代商品群の空力開発に適用することで、デザイン形状の変更によらない風流れ制御技術を検討し、

*1～6 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

クラストップレベルの空力性能と空力騒音を実現する風流れ制御技術を手に入れた。

本稿では、風流れの運動エネルギー損失量に基づく解析手法を適用した次世代商品群の空力開発プロセスとその具体的な制御技術について述べる。

2. 次世代商品群の空力開発

2.1 空気抵抗の各ユニットへの目標配分

空気抵抗の流れ場を定量的に解析する手法として、流れの運動量の指標を用いた解析方法が多く用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、運動量の指標では、速度の増減のみで運動量が変化した場合、見かけ上変化するだけで、速度が元に戻ると運動量も元に戻るため、現象の本質を捉えられていない。そのため、空気抵抗の各ユニットへの目標配分ができないという問題が生じる。また、車両の前端から後端までの流れで運動量が決まるため、後流の現象と流れの運動量のつながりが分からない。

そこで、内部流れの圧力損失を用いた運動エネルギー損失の考え方⁽³⁾にヒントを得て、外部流である空気抵抗に圧力損失（運動エネルギー損失）の考え方をを用いることを考えた。風流れの運動エネルギーであれば、各ユニットに対しての運動エネルギー損失量が定量化でき、後流の現象とのつながりも分かるため、空気抵抗の各ユニットへの目標設定に使用することができると考えた。

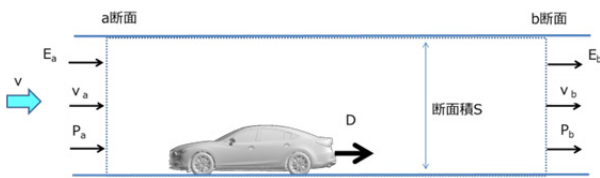


Fig. 1 Flow around Vehicle

自動車が高速で走行する際、自動車が空気になす仕事量は速度 v と抵抗 D との積 Dv であり、そのエネルギーはいったん空気の運動となるが、最終的には熱となって消散する。その結果、空気には圧力の低下が生じる。Fig. 1に示すように断面積 S の風洞に自動車を固定して風を速度 v で流せば、実走状態と相対的な流れは同一で Dv のエネルギーが消耗される。上流断面 a と下流断面 b が自動車から十分離れていて、速度が一樣になっている場合、風流れの運動エネルギー E の損失量は Dv と等価であり式(1)で表すことができる。

$$Dv = E_a - E_b \quad (1)$$

ここで運動エネルギー量 E は総圧と流量の積で表されるので、それぞれ速度 v 、静圧 P 、密度 ρ で表現すると式(2)となる。

$$E = \int (\frac{1}{2}\rho v^2 + P)v_x dS \quad (2)$$

ただし、 v_x ：主流方向速度である。この式(2)から風

流れの運動エネルギー損失量を求めると式(3)となる。

$$E_a - E_b = \int (\frac{1}{2}\rho v_a^2 + P_a)v_{ax} dS - \int (\frac{1}{2}\rho v_b^2 + P_b)v_{bx} dS \quad (3)$$

この式(3)を用いて、車両の前端の断面から、車両後方の運動エネルギーの減少がほぼなくなった断面までの風流れの運動エネルギーの損失を見たグラフがFig. 2である。このグラフに示すように、各断面までの風流れの運動エネルギーの損失量を見て取れる。このグラフを基に、車両のエネルギー損失を前方から輪切り分割し、各断面間での運動エネルギー損失量を算出することができる。

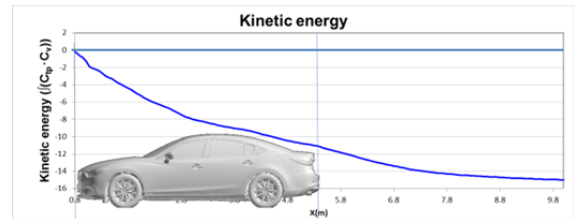


Fig. 2 Kinetic Energy of Flow around Vehicle

この車両全体の運動エネルギー損失量とCdの相関を確認した結果をFig. 3に示す。N=4ではあるが、相関が高く、空気抵抗の代用特性として使用可能であることを確認した。

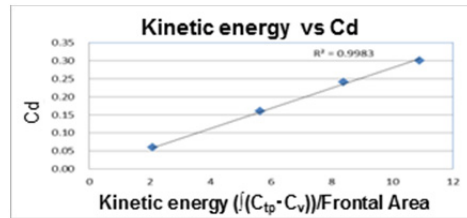


Fig. 3 Comparison between Kinetic Energy Results and Cd Results

2.2 風流れ制御の考え方

流体の運動エネルギーは粘性と速度差(速度と方向)によって熱に変換されるため、運動エネルギー損失量を低減するには、車両周りの流れの風速・風向を沿った流れにする(式(3): 速度 v 、静圧 P 、主流方向速度 v_x の変化を小さくする)こと、すなわち渦を抑制することがポイントである。風流れの運動エネルギー損失を発生させる渦は、以下3つに大別できる。

- ① 剥離渦：物体からの剥離により発生する渦…Aピラー・アンダーフロア
 - ② 混合渦：異なる流れが合流して発生する渦…タイヤ周り・エンジン冷却風出口
 - ③ 後流渦：物体後方で上面下面側面それぞれの流れが合流して発生する渦…車体後部・ドアミラー
- 従来車において、「剥離渦」「混合渦」「後流渦」が

主に発生している部位とその車両全体の運動エネルギー損失に対する割合を Fig. 4 に示す。これらの渦を抑制する制御技術を用いて運動エネルギー損失量を低減する。

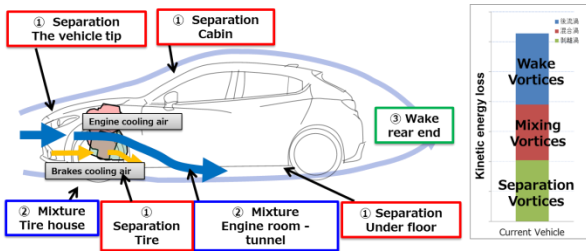


Fig. 4 Kinetic Energy Loss at Each Part of Vehicle

これまでの研究⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾から明らかになった「空気抵抗の発生要因となる渦構造の抑制の考え方 (Fig. 5)」に風流れの運動エネルギー損失の考え方を融合させ進化させた。

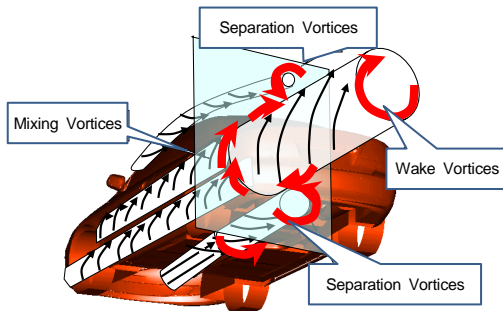


Fig. 5 Flow Structure around Vehicle

車両周りの各部位の「剥離渦」と「混合渦」を抑制することで、各部位の「風流れの運動エネルギー損失量」を低減しつつ、その結果、車両後端での速度差を小さくし、車両後方の「後流渦」を弱める。加えて、車両後端での上下左右の速度差を制御することで更に後流渦を弱め、後流渦の「風流れの運動エネルギー損失量」も低減し、車両トータルで「風流れの運動エネルギー損失量」を低減する。

これをどのような車両でも、つまり、車形が変わっても、車高が変わっても、それぞれの渦を同じ考え方の技術で制御することで、個別車両で相似形のような風流れを実現した。

この「風流れの運動エネルギー損失量」を低減する風流れ制御の肝は「剥離渦」は圧力勾配を制御して、物体表面に沿わせる(速度差を小さくすること)、「混合渦」と「後流渦」は圧力勾配を制御して合流する流れの速度差を小さくすることである。

3. 風流れ制御技術

本章以降では、これまで述べてきた風流れの運動エネ

ルギー損失量を低減する風流れ制御の考え方に基づいて、以下 3.1~3.4の制御技術の具体例について述べる。

- 3.1 アンダーフロアで発生する剥離渦
- 3.2 キャビンで発生する剥離渦とミラーの後流渦
- 3.3 タイヤ周りで発生する混合渦
- 3.4 車両後端で発生する後流渦

3.1 剥離渦：アンダーフロア

アンダーフロア周りで発生する剥離渦を抑制し、エネルギー損失量を低減するために検討した実例を述べる。

まず、フロアアンダーカバーでフロア表面の平滑度で圧力勾配を制御し速度差を小さくした。

特に制御の難しい箇所に、①トンネル部分には排気管周りの冷却風を確保するための排出口を設定したカバー ②リアサスペンション部には整流する機能を持たせたカバー ③サイレンサー周りには整流のためにフィンを設定 (Fig. 6)することによって速度差を小さくし (Fig. 7), アンダーフロア周りの剥離渦のエネルギー損失量を低減することができた。

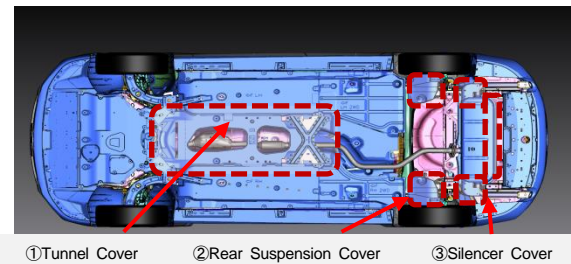


Fig. 6 Aerodynamics Optimization around Floor

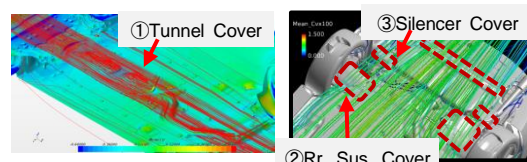


Fig. 7 Flow Stream Line around Floor

3.2 剥離渦：Aピラー・後流渦：ドアミラー

キャビン周りで発生するエネルギー損失量は空気抵抗になるだけでなく、一部が空力騒音となって車体を伝搬し、乗員に騒音として伝わる。車室内の快適性向上のためには、乗員への寄与が高いAピラーとドアミラーで発生する渦を抑制し、空力騒音を低減する必要がある。Aピラーの渦は、下流に向かって圧力が増加する過程で発生するため、圧力勾配を制御することで剥離渦を抑制できる (Fig. 8)。ドアミラーの渦は、後端での速度差を減らすことで、流れのせん断や巻き込みが低減され、後流渦を低減できる (Fig. 9)。また、渦をコントロールする各形状因子の寄与度を調べるため、それぞれの部位で単

純化したモデルを使って品質工学的な実験計画法を行った。その結果、Aピラー形状のRや段差、ドアミラー形状のRや面角度を最適化することによって、剥離渦・後流渦を低減できるようになり(Fig. 10)、Aピラー周りの剥離渦・ドアミラー周りの後流渦のエネルギー損失量を低減することができた。

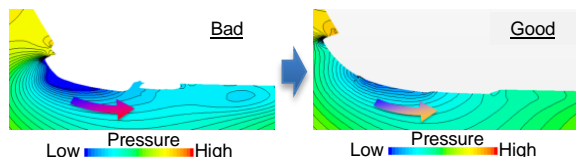


Fig. 8 Pressure Distribution of A-Pillar Cross-section

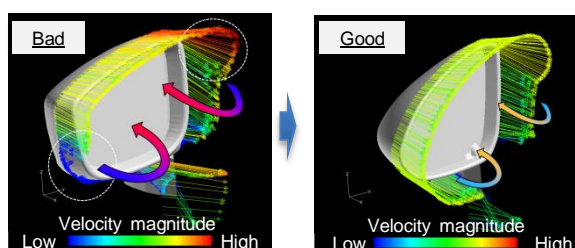


Fig. 9 Velocity Vector of Door Mirror Rear End

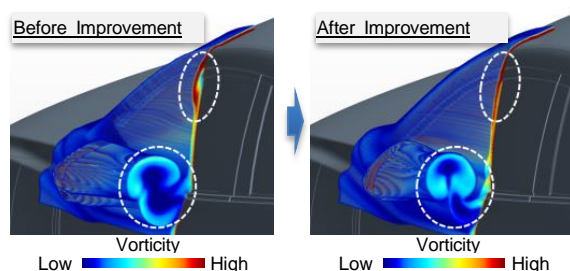


Fig. 10 Vorticity Distribution around A-pillar and Door Mirror

3.3 混合渦：タイヤ周り

従来の商品群では、タイヤハウスから流出する流れにより混合渦が生じ、エネルギー損失量が大きくなっている。そのため、タイヤハウスから吹き出す流れの抑制を試みたが、ブレーキの冷却性能確保の目的でブレーキローターに必要な風量を当てる必要があり、これ以上のタイヤハウスから吹き出す流れの抑制は難しかった。そこで、タイヤハウスを出入りする流量を分析し検討した結果、ブレーキ冷却風を確保しつつ、混合渦を抑制するためには、ブレーキ冷却風の出口であるホイール部分は圧力差を確保し吹き出す流れを許容しつつ、タイヤハウスの後方では、タイヤハウス内の圧力を下げ、その冷却風をタイヤハウス内に引き込むことを見出した。これにより、ブレーキ冷却風を確保しつつ、タイヤハウス部の混

合渦を抑制し、エネルギー損失量を低減することが可能となった(Fig. 11)。

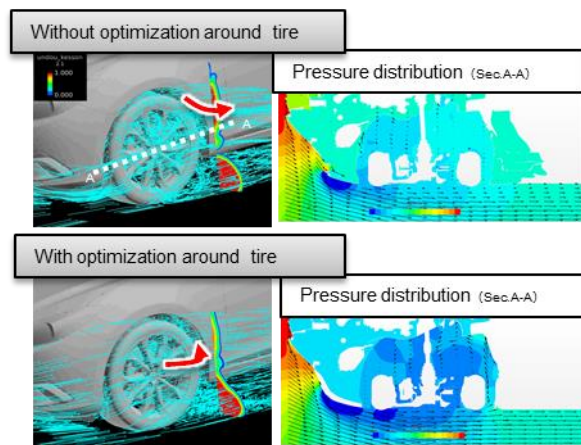


Fig. 11 Flow Stream Line & Pressure Distribution around Tire

タイヤディフレクター及びスブラッシュシールドカバーとタイヤハウス前方外側に導風ダクトを設定することで、タイヤハウス内外の圧力差を最適化した。その結果、圧力差でタイヤハウスからの流出を抑制するとともに、タイヤハウス後方では流れを引き込み、風向をそろえることで、混合渦を抑制することができ(Fig. 12)、タイヤ周りの混合渦のエネルギー損失量を低減することができた。

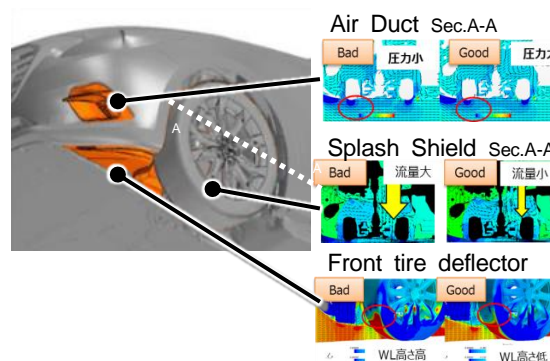


Fig. 12 Aerodynamics Optimization around Tires

3.4 後流渦：車両後端

車両後端で発生する後流渦を抑制し、運動エネルギー損失量を最小化するには、車両後端までの剥離渦・混合渦を抑制して風速差を小さくすることに加え、後流渦の規模を小さくするために、途中で剥離を発生させない程度に風向をそろえる必要がある。

そのために、前述の剥離渦・混合渦の抑制に加え、Fig. 13に示すように、車両後端の面積を小さくしつつ上面下面側面の風向差を小さくする目的で、アンダーフロアの角度を緩やかに跳ね上げる床下ラインを適用し、後流渦のエネルギー損失量を低減することができた。

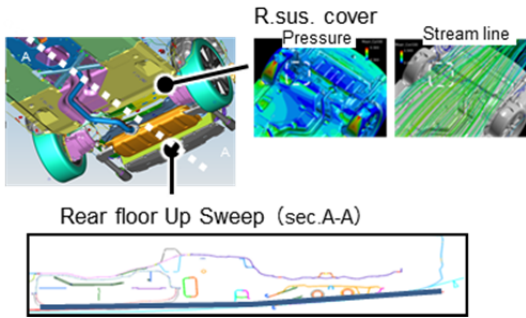


Fig.13 Aerodynamics Optimization around Rear Floor

4. 次世代商品群の空力性能

3章で述べた制御技術を各構成要素に適用することで、「剥離渦」「混合渦」「後流渦」を抑制し、車両周りの風流れの運動エネルギー損失量を現行車より14%低減する技術を手にすることができた (Fig. 14)。

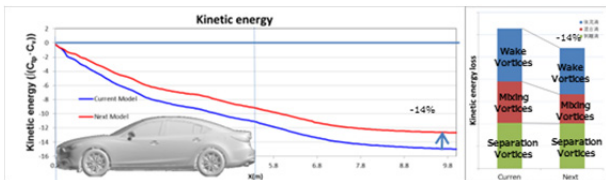


Fig. 14 Kinetic Energy of Flow around Vehicle

加えて、車両スケールが異なるスコープ間でも、同じ考え方の技術で制御することで、全スコープで車両周りの風流れの運動エネルギー損失量を低減し、クラストップレベルの性能を実現する技術を手にすることができた (Fig. 15)。

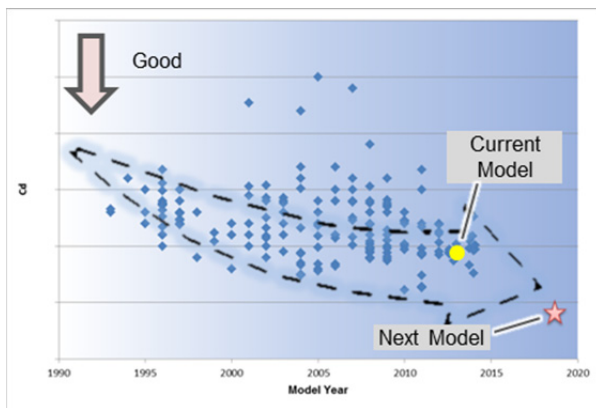


Fig. 15 Cd Performance

5. おわりに

従来商品群までに培ってきた風流れ制御コンセプトと空気抵抗低減技術を、車両周りの風流れの基本特性として運動エネルギー損失量を定義し、その特性値を制御する考え方で進化させ、次世代商品群の開発に適用した。その結果、クラストップレベルのCd目標を達成する技術を手に入れ、「魂動デザイン」を実現しつつ風流れを制

御する開発コンセプト、そして空気抵抗低減技術の実効性を確認した。

参考文献

- (1) 寺門晋ほか：空気抵抗低減に向けた車両後流構造に関する一考察，自動車技術会春季大会前刷集，No.78-15S, pp.1860-1865 (2015)
- (2) 外館直樹ほか：自動車周りに発生する縦渦による誘導抵抗の予測，自動車技術会春季大会前刷集，No.22-16, pp.509-514 (2016)
- (3) 妹尾泰利：流れの運動量・エネルギーと圧力損失②，ターボ機械，第16巻第12号，pp.46-52 (1988)
- (4) 農沢隆秀ほか：自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造：第2報，日本機械学会論文集B編，75, pp.1807-1813 (2009)
- (5) 中田章博ほか：新世代Bカー商品群の空気抵抗低減技とそれを実現するための空力開発のコンセプトおよびプロセス，自動車技術会春季大会前刷集，No.23-15S, pp.583-588 (2015)

■ 著 者 ■



岡本 哲

村上 健太

大平 洋樹



伊川 雄希

西田 周平

李 暉