

新型 CIVIC の高速操縦安定性のための空力技術

Aerodynamic Development for High-speed Stability in New CIVIC

真 塩 享*
Susumu MASHIO

皆 川 真 之**
Masayuki MINAGAWA

要 旨

空気抵抗低減と高速操縦安定性の確保を目標に、CIVIC の空力開発をおこなった。空気力の車両運動性能への影響をあらわす評価軸として等価リフトを用い、リヤの等価リフト低減が安定性確保に重要であることを実走計測により確認した。リヤの等価リフト低減と低空気抵抗を両立するために、車体後方縦渦の抑制にねらいを定め、プラットフォームとエクステリアの両観点から対策をおこなった。床下デバイスによる床下流速増加と、エクステリア側面視プロファイルとリヤピラー周辺の空力処理によって、前モデルに対してリヤ等価リフトを約 50% 低減した。これにより車速によるリヤタイヤの性能変化を抑え、高速域での操縦安定性を確保した。

ABSTRACT

Aerodynamic design for the new model CIVIC sought to reduce aerodynamic drag and help ensure vehicle stability at high speeds. Equivalent lift was employed as an evaluation index expressing the effect of aerodynamic forces on vehicle dynamic performance, and the importance of reducing rear equivalent lift in helping to ensure stability was verified in driving test measurements. In order to reconcile the reduction of rear equivalent lift with low drag, the control of longitudinal vortices at the rear of the vehicle was set as a goal, with measures adopted in both the platform and the exterior. The realization of increased underfloor flow velocity through the use of underfloor devices and the aerodynamic engineering of the exterior side-view profile and the area around the rear pillars reduced rear equivalent lift by approximately 50% against the previous model. This has limited changes in rear tire performance with changes in vehicle speed, and helped to ensure vehicle stability in the high-speed range.

1. はじめに

空力性能がレース車にとって重要な役割を果たしていることは広く知られている。一方で、量産車では空力性能の影響がレース車両に比べてはるかに小さいため、操縦安定性に与える影響はそれほど大きくないと考えられがちである。しかし、実際には横風の影響を含め、量産車に働く空気力は無視できるほど小さくない。

レース車では、限界旋回性能を高めるために、専用の空力デバイスを装着することでダウンフォースを発生させ、接地荷重を増やしてタイヤ横力を増加させている。

しかしながら量産車では、常用域における各種機能やス

タイリングを満足するため、一般的に空気力によりリフトが発生する形状となることが多い。したがって、車速の増加とともに接地荷重は減少し、タイヤ横力が減るため、安定性が下がる方向に作用しやすい。特に高速操縦安定性(高速操安)においては、異なる空力仕様によってドライバが違いを感じるほどであり、空気力制御がビークルダイナミクスにとっては重要な要素のひとつとなる。高速域における空力による高速操安の分野は未だ解明されていないことも多く、定常流れだけでなく非定常流れへと研究の対象が移行してきており、自然風のような乱れを伴う流れ場を扱う研究も少なくない⁽¹⁾。

量産車の開発過程においては、近年の激しい燃費競争力

* HRD Sakura

** 本田技研科技(中国)有限公司

確保のために低空気抵抗 (低 CD) 開発の要望が高くなり、高速操安との両立が容易ではない。また、空気力による入力はタイヤやサスペンションを含むシステム特性の一要素であり、空力個別の目標値設定は容易ではない。

そこで新型 CIVIC では、プラットフォーム開発初期段階から、高速操安と、低燃費達成のための低 CD の両立を見据え開発をおこなった。本稿では、新型 CIVIC が目指した高速操安と低 CD の両立を達成する空力開発手法を、プラットフォーム開発とエクステリア開発の両観点から紹介する。

2. 新型 CIVIC の高速操安のねらい

新型 CIVIC の運動性能コンセプトは「ダントツのアジャイルニアハンドリングと安心感」である。低速域での軽快なハンドリングと高速域での安心感の両立には、高速域での空気力制御が重要となる。高速での安心感を確保するためには、高速走行時の定常ヨーレートゲインや横方向加速度位相遅れといった基本的な運動性能指標を改善することが必要である。

これらの運動性能指標と定常空気力を紐付ける評価軸として、リフトと横力の影響を包括した等価 CL という概念を導入した^{(2), (3)}。

新型 CIVIC 開発では、前後等価 CL の運動性能への寄与を明確にし、車両運動への効果を実走計測にて裏付け、目標とする等価 CL を低 CD と両立することをねらいとした。

3. 等価 CL の運動性能寄与

3.1. 高速操安と空気力の定式化

空気力は、車体の空力中心に抵抗、揚力、横力として作用するが、これはサスペンションを経由して前後タイヤの接地面で支えられる。空気力による操縦安定性への影響を考えると、タイヤに対する寄与を把握することが重要である。コーナリングパワー (CP) は、単位スリップ角あたりのタイヤ発生横力であり、タイヤの基本性能を示す指標として用いられる。Fig. 1 にタイヤ CP と垂直荷重の関係を示す。

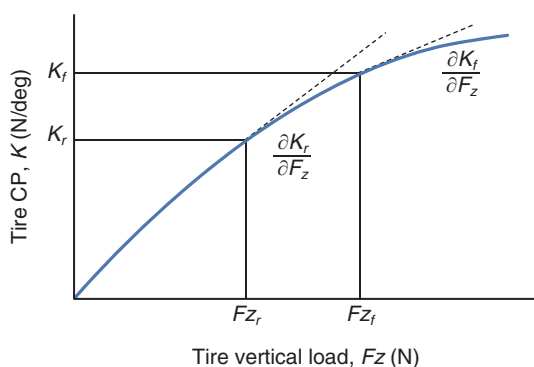


Fig. 1 Tire CP and vertical load for FF car

示す。ここで、 K はタイヤ CP, F_z は垂直荷重である。添え字 f, r はそれぞれフロント、リヤを示す。タイヤ CP は荷重に対して非線形な特性をもっている。CIVIC のような FF 車では重量配分が前寄りとなるため、フロントに比べリヤの垂直荷重が低い。したがって、垂直荷重の変化に対して、リヤ CP が変化しやすい。

定常円旋回を仮定した場合、横力を含む空気力の影響は、タイヤの発生横力を変化させる垂直荷重変動と捉えることができる。式 (1) に空気力によるタイヤ CP の変化を示す。ここで、 ρ は空気密度、 V は速度、 A は車両の前面投影面積、 CL は揚力係数、 CS は横力係数、 CYM はヨーモーメント係数である。

$$\Delta K_i = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A \cdot CL_i^* \cdot \frac{\partial K_i}{\partial F_z} \quad (i=f \text{ or } r) \quad (1)$$

ここで $*$ は等価 CL を表し、 CS, CYM を含むタイヤへの影響を表現した仮想的なリフト係数で表される。

$$\begin{aligned} CL_f^* &= CL_f + (\Delta CL_f)_{CS, CYM} \\ &\cong CL_f - \frac{\partial CS_f}{\partial \beta} \frac{l_f K_f}{l_r K_r} \bigg/ \frac{\partial K_f}{\partial F_z} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} CL_r^* &= CL_r + (\Delta CL_r)_{CS, CYM} \\ &\cong CL_r - \frac{\partial CS_r}{\partial \beta} \bigg/ \frac{\partial K_r}{\partial F_z} \end{aligned} \quad (3)$$

$$CS_f = \frac{CS}{2} + CYM, \quad CS_r = \frac{CS}{2} - CYM \quad (4)$$

β は車体スリップ角を表す。 CS_f, CS_r は前後横力係数を表し、横力をヨーモーメントで前後に配分した係数である。

等価 CL における CS, CYM の寄与は、少なくとも 10% 程度あり、過去のドライバによる実走テスト結果からも CS, CYM を考慮することで、等価 CL の大小と官能評価の相関が向上することが確認されている⁽³⁾。

等価 CL が車両運動に及ぼす影響を、安定性を示す指標であるスタビリティファクタを用いて考える。式 (5) にスタビリティファクタ K_s の定義式を示す。

$$K_s = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} \quad (5)$$

ここで m は車体重量、 l はホイールベース、 l_f, l_r はそれぞれ重心からの前後輪車軸までの距離を表す。

一般的に、スタビリティファクタが大きいほど車両はアンダステア特性をもち、安定方向である。Fig. 2 に、前後の等価 CL が等しく作用した場合の、車速に対するタイヤ CP とスタビリティファクタの関係の一例を示す。前述のタイ

ヤ CP の荷重依存性を考慮すると、FF 車では特に等価 CL_r によってリヤタイヤ CP が影響を受けやすい。したがって、前後同じ等価 CL 、すなわち同じ垂直荷重の減少であっても、前後でのタイヤ CP の変化量が異なるためスタビリティファクタも速度とともに減少し、車両は高速になるほどオーバステア特性をもつようになる。空気力は前後タイヤ CP に車速依存性をもたせる働きがあると言い換えることもでき、この特性を緩やかにすることを本開発における高速操縦の目標とした。

3.2. 等価 CL と操舵応答パラメータ

スタビリティファクタと同様に、等価 CL により前後のタイヤ CP が変化することで、車両運動システムの基本特性が変わり、操舵応答パラメータの変化となってあらわれる。操舵応答パラメータとは、車両のヨー運動の操縦性、安定性を示すもので、代表的なものに定常ヨーレートゲイン、ヨー共振周波数、操安キャパシティなどが挙げられる。これらはそれぞれ、操舵に対するヨー角速度の大きさ、速応性、過渡応答の収束性、を示す指標として用いられ、前後タイヤ CP を使って表すことができる⁽⁴⁾。

高速走行では、わずかな操舵に対するヨー運動は控えめで、修正舵に対してクルマが即座に反応し、かつその運動の収束が速いことが望ましい。したがって、ヨー角速度は小さく、速応性は高く、過渡応答の収束性が高いことが望ましい。

Fig. 3 は基準となる等価 CL に対する各操舵応答パラメータの等値線と、高速走行に好ましい等価 CL の方向性を示している。安定性と良好な過渡応答特性の両立を目標としたとき、等価 CL_f は各パラメータにより好ましい方向が異なり、一意に決まらない。一方、等価 CL_r 低減は、どのパラメータにとっても好ましい方向性である。これは、等

価 CL_r 低減によりリヤタイヤ CP が増加するからであり、高いリヤ CP を確保することが車両運動に対していかに重要であることを示している。リヤタイヤ CP を高速域でだけ増加させることは、サスペンション特性の変更では実現できない。したがって、高速域での直進安定性改善には、等価 CL_r 低減が有効であると考えられる。

3.3. 等価 CL_r 違いでの実走検証

等価 CL_r 低減の高速操縦への有効性を示すために、実走確認をおこなった。

空力デバイスを付加して等価 CL_r の異なる 2 仕様（空力仕様 A、空力仕様 B）を用意した。それぞれの空力仕様が、実走車両の操舵応答にどのような変化を及ぼすか計測した。

Fig. 4 に等価 CL の風洞計測値とそれによる時速 180 km/h でのタイヤ CP の変化を示す。空力仕様 A に対して、空力仕様 B は等価 CL_r が低い仕様となっている [Fig. 4 (a)]。これにより、空力仕様 B は空力仕様 A に対して、時速 180 km/h においてリヤタイヤ CP が 3% 以上改善している。一方、フロントタイヤ CP については変化が 1% 未

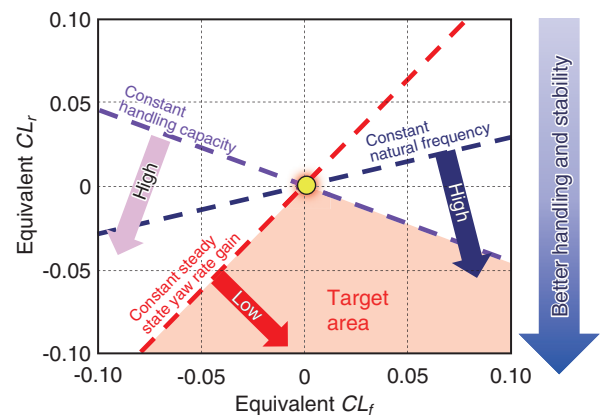


Fig. 3 Preferable directions for equivalent CL_f and CL_r in terms of handling indices

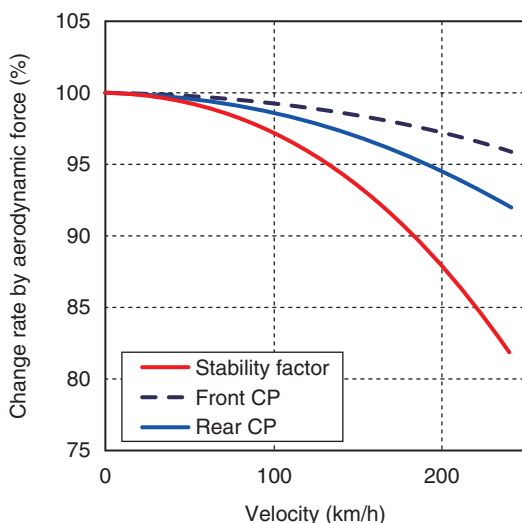


Fig. 2 Velocity dependency of stability factor and tire CP in relation to aerodynamic forces

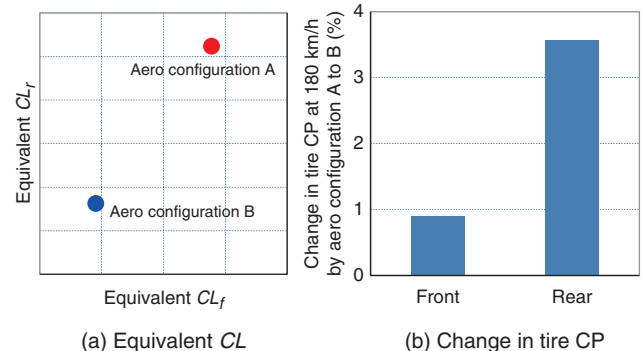


Fig. 4 Difference in equivalent CL between two aerodynamic configurations and its effect on tire CP

満におさまっている [Fig. 4 (b)]. したがって、これらの空力仕様違いの計測結果の差は、リヤタイヤ CP 変化、すなわち等価 CL_r の変化に起因すると考えてよい。

Fig. 5 に仕様ごとのヨーレイトゲインと横方向加速度位相遅れの実車計測値を示す。実車計測結果から、高速域において定常ヨーレイトゲインが約 10% 減少、横方向加速度位相遅れについても約 14% 減少していることがわかる。

以上により、等価 CL_r 低減が高速操安確保に効果的であることが、実走計測においても裏づけられたため、新型 CIVIC では等価 CL_r に集中して開発をおこなった。

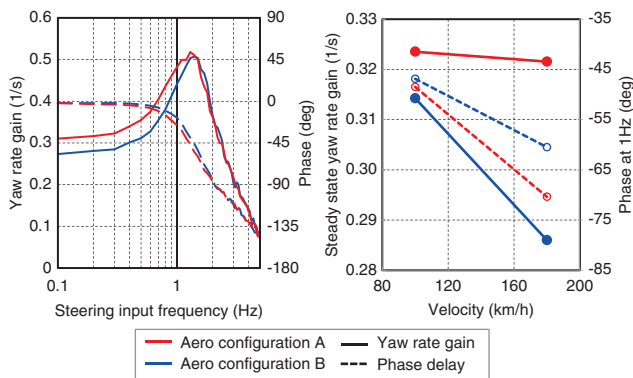


Fig. 5 Results of steering response tests using two aerodynamic configurations

4. 低等価 CL_r と低 CD の両立

等価 CL_r 低減の手法は式 (3) より、 CS_r/β の増加、 CL_r の低減、リヤタイヤ CP の荷重減少時の低下量軽減が考えられる。したがって、空力特性の変更で CS_r/β の増加と CL_r の低減が必要となる。等価 CL の導入の最大の利点は、前後 CL , CS , CYM といった複数の目的関数を、前後等価 CL に集約することである。したがって、実際に形状を最適化する段階ではその内訳を意識する必要はなく、等価 CL を下げることに注力すればよい。

一方で、ねらいとする各空力特性を得るために流れ場のコンセプトを定めることは空力開発にとって重要である。

ここでは、 CS_r/β の増加と CL_r の低減をねらった空力のコンセプトとアプローチを紹介する。

4.1. CS_r/β の増加

CS_r/β の増加は、車体のヨー復元力増加を意味し、 CS を大きく、 CYM を小さくすることで達成できるが、 CS を増加させることは横風の安定性を損なう恐れがあるため、 CS を増加させずに CYM を低下させることが望ましい。

エクステリアと床下デバイス違いでの CS , CYM 変化の CFD 結果を Fig. 6 に示す。 CS , CYM は床下デバイスでは

変化が 5% 以下と小さい。したがって、プラットフォームや床下デバイスについては CS , CYM の影響は無視してよいと考えられる。一方エクステリアでは、オーバハング、全高などの骨格を決める基本寸法の変化、すなわち基本パッケージが大きく変わる場合においては、 CS , CYM は大きく変化する。しかし、空力の詳細な形状最適化段階での形状差による変化は小さい。

4.2. CL_r の低減

4.2.1. プラットフォーム開発における CL_r 低減

等価 CL_r 低減と低 CD を両立するための、新型 CIVIC の空力コンセプトを Fig. 7 に示す。床下流れの高速化による上向き流れ (アップウォッシュ) の生成とエクステリアでの下向き流れ (ダウンウォッシュ) 抑制による車体後方縦渦の抑制である。また、車体後方縦渦抑制は、ヨー角時の左右不均一な縦渦成長を是正し、空気力のヨー特性の改善も期待できる。

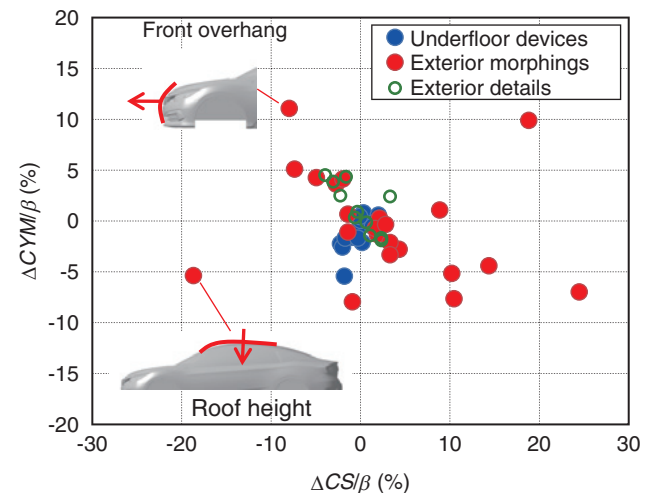


Fig. 6 CFD prediction of changes in CS and CYM by various aerodynamic features of prototype car

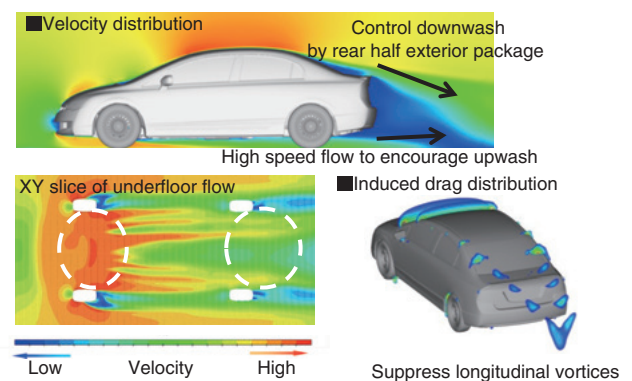


Fig. 7 Aerodynamic concept developed to balance low equivalent CL_r with low CD

プラットフォーム開発の段階から、床下流れ高速化をねらい車体全面にわたり空力アンダカバー類の適用範囲拡大と、リヤサスペンション、遮熱板、サイレンサを含めた空力カバー非適用部品の平滑化を徹底した。Fig. 8 に新型 CIVIC の床下形状を示す。Fig. 9 (a) に新旧モデルのフロア下の全圧分布の違いを、Fig. 9 (b) に床下近傍の速度場



Fig. 8 Aerodynamic treatment on new CIVIC underfloor

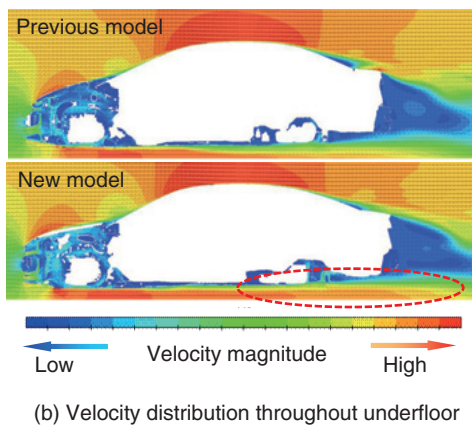
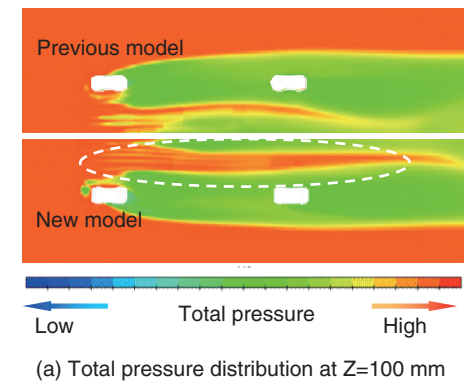


Fig. 9 Difference in flow under floor between new and previous model platform

の前モデルとの比較図を示す。エンジンアンダカバー、フロアカバーからリヤバンパにかけての平滑化により、フロントタイヤの間から車体後方に抜ける流れのうち、全圧の高い領域が占める割合が前モデルと比較して増加している [Fig. 9 (a)]。つまり、車体後方まで流速が低下することなく流れており、床下高速化が実現できていることがわかる [Fig. 9 (b)]。これらにより床下での CD 低減と CL_r 低減が背反せずに成立することを確認した。

4.2.2. エクステリアの空力コンセプト

タイヤ、部品の段差、エンジンルームの排熱風などの影響を受ける床下流れに比べ、エクステリア周辺の流れは、損失となる形状が少なく流速も大きいいため、車体全体の流れ場に支配的な影響をあたえる。

エクステリア開発においても、 CD 低減だけでなく、 CL_r 低減を実現させるため、三つの対策をおこなった。一つ目に、フード前端を張り出し、剥離を伴わない程度にエッジ感を強め、その部分に負圧を発生させた。二つ目に、フード前端の張り出しと合わせ、ルーフピーク前方化をおこない、ルーフ上の負圧域を前方化させた。最後に、車体後方のダウンウォッシュ抑制のために、C ピラー根元を後方に引くことで側面視の角度を浅くした。まず最初の2点について説明する。フード前端の張り出しとルーフピークの前方化により、車体上面に発生する負圧領域を前方に移動し、ピッチアップモーメントを発生させることで、相対的に CL_r を低減させた。特にフード前端は、車体の前縁に位置するため、形状によって圧力のピークが変化しやすく圧力中心が前後に移動しやすい。したがって、 CL の前後バランスを変化させやすい場所のひとつである。Fig. 10 にフード前端を張り出した場合の圧力係数の変化と前後 CL の変化の例を示す。白線で示したフード前端形状にすることで、フード周りの圧力分布が変化し、圧力が低い部分が、元の形状に対して相対的に前方に移動する。したがって CL 自体が変わることはないが、赤矢印で示した圧力中心が、青矢印の位置へ移動し、車体中心に働くピッチアップモーメントが増える。これにより、 CL の前後配分が前側に移動して、フード前端を張り出したほうが CL_r が低い。ルーフピーク前方化も程度は異なるが同様の効果が期待できる。

Fig. 11 に前モデルとの形状違いを、Fig. 12 に圧力係数の違いをそれぞれ示す。Fig. 12 の実線で示した圧力変化か

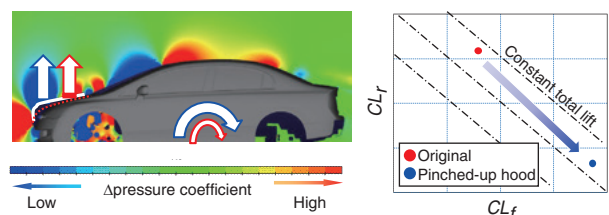


Fig. 10 Pressure difference and CL balance shift by pinching up front end of hood

ら Fig. 10 で述べた圧力分布の前方化が見て取れるため、 CL_r が低下していると考えられる。

これに加えて、ルーフピークの前方化によってその後のルーフからリヤウィンドウにかけての曲率変化は小さくなり、圧力回復が緩やかになっている。これにより、Fig. 12 破線で示したようなルーフ後端の強い逆圧力勾配によるリヤウィンドウでの境界層の発達や剥離をおさえ、流速の高い流れをトランク後方まで維持することでダウンウォッシュの抑制につながっていると考えられる (Fig. 13)。

次に C ピラーの後方引きについて説明する。Fig. 14 に前モデルとの C ピラー周辺の形状違いを示す。Fig. 15 に新旧モデルの C ピラー周辺の圧力分布を示す。Fig. 15 (a) に示すとおり、前モデルでは C ピラー周辺の負圧が強だけでなく、前述のとおりルーフ後端の負圧も強く、周辺の圧力分布にはばらつきがある。これに対して、新モデルでは C ピラーとルーフ後端の負圧はともに弱く、周辺との圧力差も小さい。つまり、C ピラーの後方引きは、C ピラー周辺の車体表面圧力分布を均一にしている。Fig. 15 (b) はルーフ後端断面での車体表面の圧力分布を示している。新

モデルはピラー側面とルーフ後端の圧力差が小さい。この圧力差が大きいと、車体側面からルーフ後端へ向かう流れの起点となり、さらに下流で C ピラーを回り込んで縦渦を形成する。新モデルの C ピラー形状は、ピラー周辺の圧力分布を均一にすることで、この C ピラーを回り込んで車体後方縦渦の基点となる車体側面から中心への巻き込みを抑制している。C ピラー側面から車体中心方向へ向かう速度成分は、新モデルで減少している (Fig. 16)。

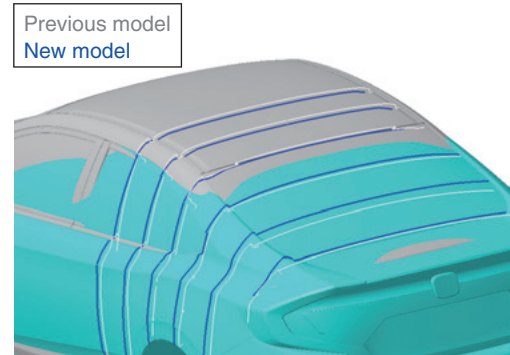


Fig. 14 Shallower inclination of C-pillar on new model



Fig. 11 Side view comparison of new and previous models

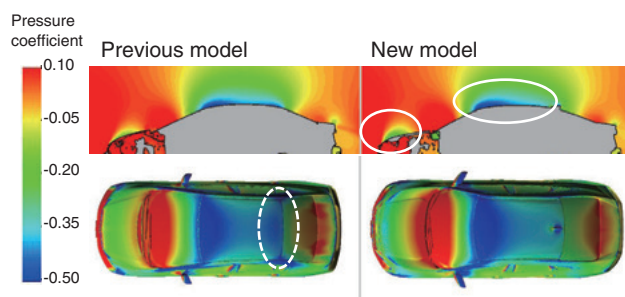


Fig. 12 Difference in pressure coefficient distribution by hood and roof profiles

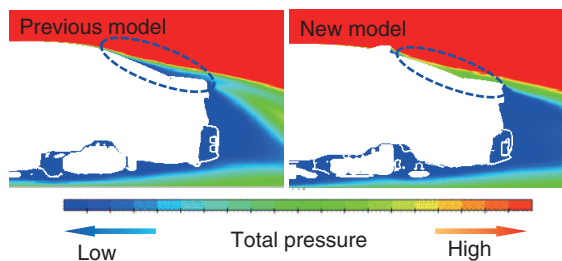
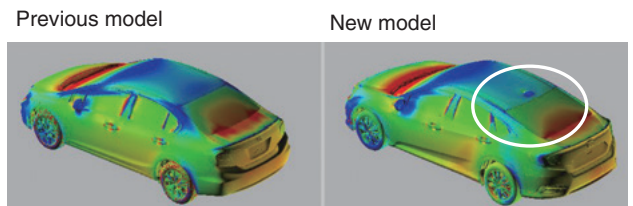
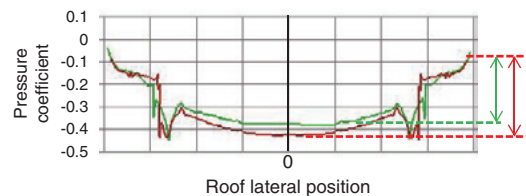


Fig. 13 Change in flow separation around rear window



(a) Uniformity of pressure coefficient in rear end of new model



(b) Pressure difference between C-pillar and roof

Fig. 15 Difference in pressure coefficient around C-pillar

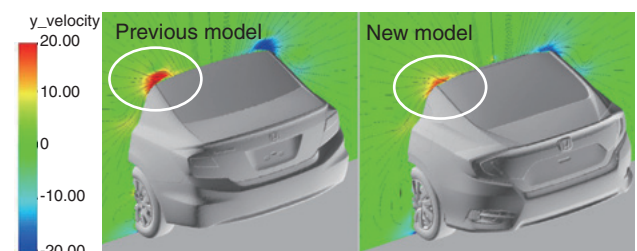


Fig. 16 Y-velocity difference around C-pillar

特に、この C ピラーからトランクにかけての形状は、セダンでありながらも、見る角度によってはクーペ感が漂う新型 CIVIC のデザインアイコンとなっており、デザイン要望と空力性能をより高次元で両立させた箇所である。

このようなフォルム提案と床下流速の向上により、ダウンウォッシュとサイドからの巻き込みを抑制し、車体後方に生じる縦渦を抑え、 CD 低減と CL_r 低減を両立させた。

Fig. 17 に、新旧モデルでの車体後方縦渦の違いを示す。Fig. 17 (a) は車体後方での主流方向の渦度分布を示し、新モデルでは車体後方に生成された渦が小さくなっているのがわかる。その結果、この縦渦による抵抗成分をあらわす誘導抵抗の分布も新モデルでは小さくなっている [Fig. 17 (b)]。

以上により、新型 CIVIC は前モデルに対して、等価 CL_r

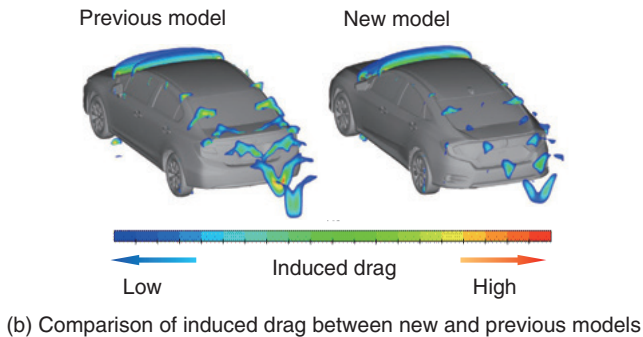
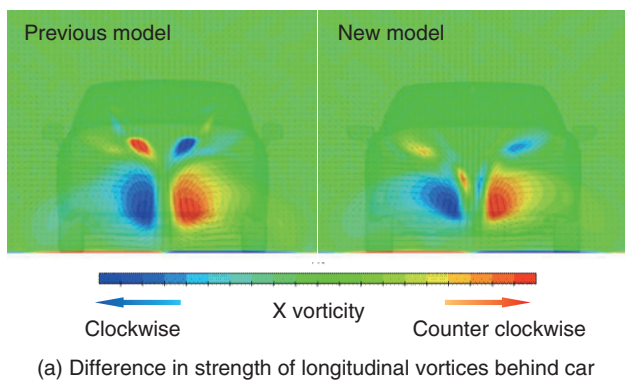
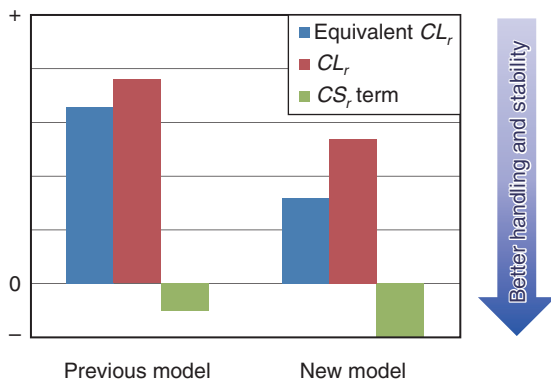
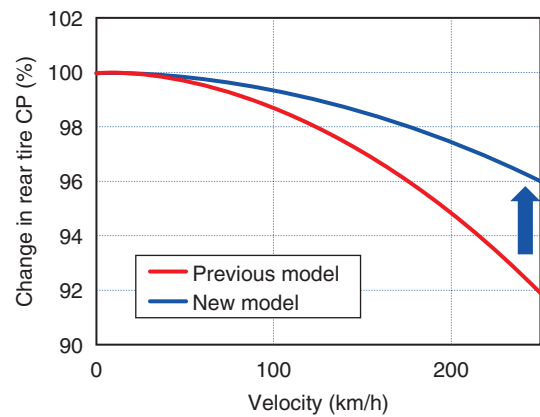


Fig. 17 Suppression of growth of longitudinal vortices for new CIVIC



約 50% の低減を達成した。Fig. 18 に新旧モデルの等価 CL_r とその内訳を示す。等価 CL_r の内訳である CL_r と CS_r term は、式 (3) 右辺の第 1 項、第 2 項をそれぞれ示している。等価 CL_r 低減に絞って開発を進めた結果、実際には CL_r 低減だけでなく CS_r 増加も実現できた。これによりリヤタイヤ CP の速度による低下を、前モデルの約 50% に抑えることができた (Fig. 19)。

CD についても前モデル比 14% 削減を達成しており、ねらいとする低等価 CL_r と低空気抵抗の両立の見込みのある空力仕様とすることができた。



5. まとめ

新型 CIVIC の高速操縦開発において以下をおこなった。

- (1) 等価 CL 指標を開発に適用し、高速操縦確保のパラメータを等価 CL_r 低減に絞った。
- (2) 等価 CL_r の高速直進安定性への効果を実走計測により定量的に裏付けた。
- (3) 等価 CL_r 低減と CD 低減を両立する手法として車体後方縦渦抑制に着目し、新プラットフォームとエクステリア両面から量産適用可能な空力仕様とした。

今後も非定常を含めた空気力が車両挙動におよぼすメカニズムを解明するだけでなく、量産可能な形での解決策が求められる。さらに、低空気抵抗との両立は必須であり、デザインの成立性を含めた総合的な空力設計力を高めていきたい。

参考文献

- (1) Stoll, D., Kuthada, T.: Unsteady Aerodynamic Vehicle Properties of the Driver Model in the IVK Model Scale Wind Tunnel, 10th FKFS-Conference, (2015)

- (2) Ogawa, A., Mashio, S.: Quantitative Representations of Aerodynamic Effects on Handling Response and Flat Ride of Vehicles, SAE Int. J. Passenger Cars - Mech. Syst., 5(1), p.304-323, (2012)
- (3) Shibue, H., Ogawa, A.: Method of Vehicle Dynamics Analysis by Means of Equivalent Cornering Stiffness for Aerodynamic Forces and Moments, SAE Int. J. Passenger Cars - Mech. Syst., 5(2), p.737-744, (2012)
- (4) 安部正人: 自動車の運動と制御, 東京電気大学出版局, 264p., (2008)

■ 著 者 ■



真塩 享



皆川 真之