

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

11

SKYACTIV-ボディ
SKYACTIV-Body

木村隆之*¹ 清武真二*² 阪井克倫*³ 小橋正信*⁴
 Takayuki Kimura Shinji Kiyotake Katsunori Sakai Masanobu Kobashi
 上野正樹*⁵ 近藤量夫*⁶ 伊藤 司*⁷ 岡本 哲*⁸
 Masaki Ueno Kazuo Kondo Tsukasa Ito Satoshi Okamoto

要 約

軽量化は燃費を改善するだけでなく、エンジンの性能をフルに引き出し、走る・曲がる・止まるという自動車の基本性能を飛躍的に向上させるため、「走る喜び」を大切にするマツダにとって注力すべき領域である。

パワートレインとプラットフォームの同時刷新という機会を活用し、全体最適の視点からボデーの理想構造を追求した上で、新工法の採用・材料を最適化するプロセスを繰り返し行い、剛性・衝突安全性能の確保と軽量化という相反要素を両立させる技術のブレークスルーを図った。基本骨格は力学の原理原則に立ち返り、可能な限り直線で構成する「ストレート化」と各部の骨格を協調して機能させる「連続化」、入力を特定部品に集中させるのではなく、多くの部品に最適なバランスで分散させる「マルチロードパス」をコンセプトとした。また工法面ではウェルドボンドやスポット溶接を増やし、材料面では高張力鋼板材の使用拡大などを行い、前モデル比約30%の剛性向上、世界トップレベルの衝突安全性能（社内テストによる）と約8%の軽量化を実現した。

Summary

Reducing vehicle weight does not just boost fuel economy; it also complements engine's performance potential and significantly improves vehicle's basic attributes when driving, turning, and stopping: thus being one of the priorities for Mazda who values "driving pleasure".

Taking the renewal of power train and platform as an opportunity, we identified the ideal body structure from the total optimization viewpoint. By adopting new methods and iterating material optimization processes, we tried to achieve a technological breakthrough: a lightweight and highly-rigid body with excellent crash safety performance. As for the basic frame structure, going back to the basis of mechanics, we pursued three main concepts: "straight structure" where frames are straightened as much as possible, "continuous structure" where frames function in union, and "multi-load paths", which disperse loads to multiple parts rather than concentrating in a specific part. By increasing the number of spot-welding points and weld bonding points and expanding the use of high tensile strength steel, we have enhanced the stiffness by 30% compared with the previous model and achieved world-top-level crashworthiness (according to the internal test) while reducing the weight by approximately 8%.

1. はじめに

「走る喜び」と「世界トップレベルの環境・安全性能」を実現した上で、「軽量化」という相反課題を高次元で両立させ

るべく、技術のブレークスルーをすることが開発に対する至上命題であった (Fig.1)。

本稿では、この開発における考え方、開発プロセス、構造の特徴や性能を紹介する。

*1~4 ボデー開発部
Body Development Dept.

*7 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*5 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*8 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

*6 NVH性能・CAE技術開発部
NVH & CAE Technology Development Dept.

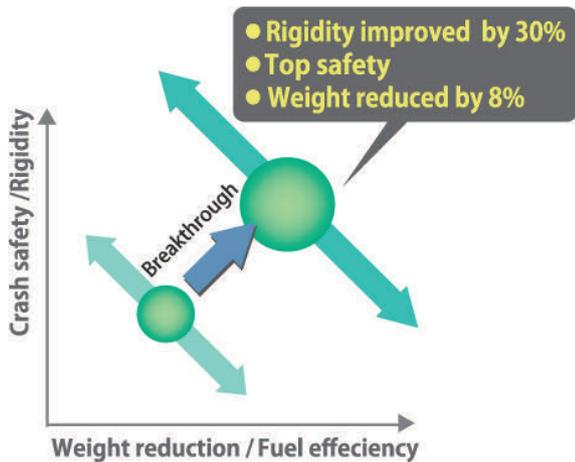


Fig.1 Aim of SKYACTIV-Body

2. 開発プロセス

2.1 ボデー開発プロセスとコンセプト

開発プロセスとして、まずボデー機能の定義を一から見直し、明確にした。そして、その一つ一つの機能のバラクリを徹底的に行った。ここでいう「バラクリ」とは、性能や現象を個別部品の機能に関連づけ、それを量的に明らかにし全体像として見える化したもので、その中に「メカニズム」も包含している。

それらの機能に基づき、ボデー構造は、力学の原理原則から以下を基本コンセプトとした。

- ① ストレート化
- ② 連続化
- ③ マルチロードパス

そして、性能目標から決定した機能配分量に対し、適正な工法と材料を選定した。

同時に、転写性を確保し競合力のある多品種生産を可能とするコモンアーキテクチャ構想と、同体質ライン化によるボリューム効率を高めるフレキシブル生産をサポートできるように、開発を行った。

前述の開発プロセスを何度も繰り返すことで、各プロセスの質を高め、より高精度な開発へと進化させた (Fig.2)。

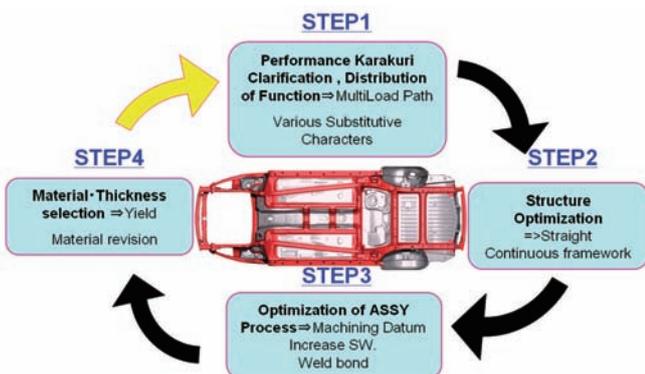


Fig.2 Body Development Approach Cycle

2.2 カラクリ解明と機能配分

前節にもあるように車両の全性能に対して、そのカラクリを解明し、ボデーの機能・機能配分にカスケードした。詳細は車両性能章で後述する。

更にボデーの部位・部品ごとに全性能に対する機能を定め、マッピング化する取り組みを行った。それにより、相反する性能・機能が一目で明らかになり、それらを両立させる構造検討を最初から着手し開発効率を高めた。

3. 構造の特徴

3.1 構造の特徴

(1) ストレート化

ボデー構造を考える上で、力学の原理原則に立ち返り、基本骨格を可能な限り直線で構成した。特にプラットフォームにおいては、極力湾曲や屈折をなくしたストレート形状とした。従来は、既存するパワートレインやドライブシャフトの可動軌跡を逃がすためにフレームに湾曲や凹み形状があったが、今回はパワートレインも含め一新し、車両全体が適正となる開発を一括して同時に進めたことにより、ストレート化を実現した (Fig.3)。



Fig.3 Straightening of Basic Framework and Continuous Framework Structure

(2) 連続化

従来は、一つの部品で衝突荷重や路面入力を支えていたものを、他の部品にも伝えることで、個々が協調して、分担荷重を低減し部品の軽量化ができる。具体的には、ストレート形状のフレームが、フロントからリヤまで連続する構成とした。ストレート化した上で、曲げが入らざるを得ない部分では、横方向のフレームとも連続接合し、また可能な限り閉断面構造とすることで、剛性を確保しながらの軽量化に大きく貢献させている。

トップハットも同様に連続化の構成部材として機能させている。具体的には、Fig.4に示したルーフレールやBピラーなどをはじめとするトップハットとプラットフォームのラインフォースメント全体で3つのリング構造を形成することで、ボデーの全体剛性を向上させた。更に、サスペンション・サブフレーム部も構造を一新し、単体の剛性向上とともに、ボデー側の取付位置の最適化を図ることで全体剛性向上に寄与させている。また、ホイールハウス内部の合わせ部といった細部に渡って連続構造を徹底した。

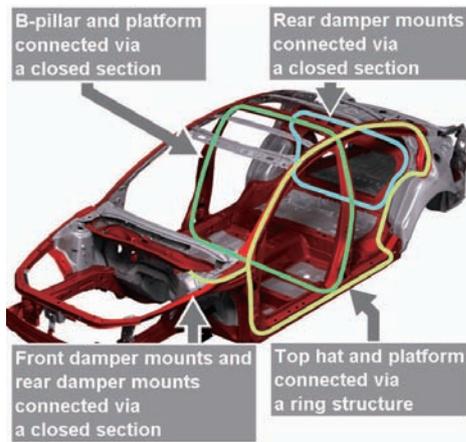


Fig.4 Ring Structure

(3) マルチロードパス

入力を特定の部位だけで受けるのではなく、多くの部品に最適なバランスで分散させる構造で、軽量で強い骨格を作る上で重要な考え方である。ここでは考え方の紹介に留め、詳細は衝突性能節で後述する。

3.2 工法

(1) 接合強化

「連続化」と「マルチロードパス」の実現手段として、ルーフレール後端部とリヤサスペンションリインフォースメントの結合部にウェルドボンドを採用した。

またプラットフォームでは、ウェルドボンドに併せてスポット溶接点数も増やし、部材の結合部を強化することで、ロードノイズ低減と剛性を向上させた (Fig.5)。

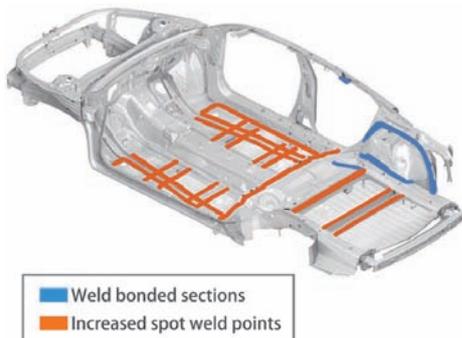


Fig.5 Weld Bonding, Increased Spot Weld

(2) ホットスタンプ

ホットスタンプとは、材料を約900℃に加熱してプレス型で成形と同時に急冷（高強度化1,200~1,470MPa）するという手法で、成形後の部品精度も良好で成形性と強度を同時に確保するものである。これをBピラーリインフォースメントに適用したことで、従来の780MPaハイテン材では側面衝突性能から強度上、リインフォースメントの内側に更にリインフォースメントが必要であったものを廃止することができ、軽量化を実現した (Fig.6)。

同様に、フロント・リヤバンパレインにも採用し、軽量化を行った。

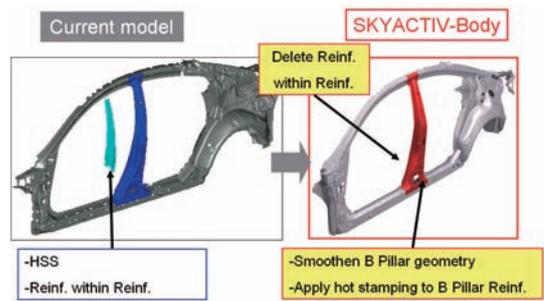


Fig.6 Manufacturing Method (Hot stamping)

3.3 材料

(1) ハイテン鋼板材 (高張力鋼板材)

車体剛性上必要な板厚をCAEにて算出して定め、その上で衝突性能上強度が必要な部品に、エネルギー吸収性と強度・信頼性に優れたハイテン鋼板を適用した。部品形状は、加工しやすいシンプルな形状に見直すことで適用を広げ、ハイテン鋼板適用率 (質量比) は現行CDセグメントで40%から60%に拡大させている。中でも生産性と性能の両立性が優れている590MPa級ハイテン鋼板の適用率を増やした (Fig.7)。

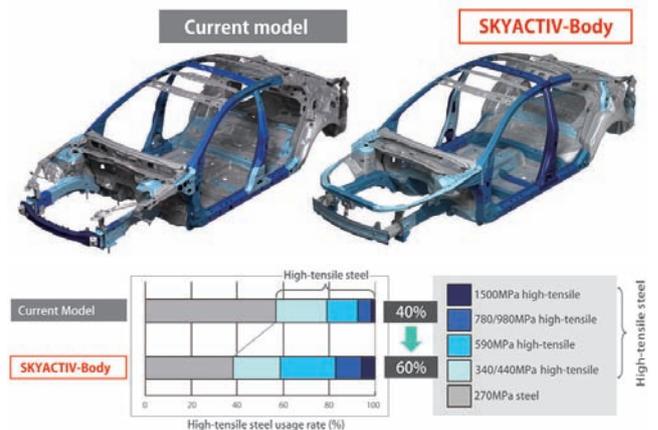


Fig.7 High-Tensile Steel Usage Rate

3.4 ボデー質量比較

前章の開発プロセス、構造・工法・材料を用いた結果、ホワイトボデーで従来モデル比約8%の軽量化を達成した。同時にCDセグメントの中で最軽量を実現した (Fig.8)。

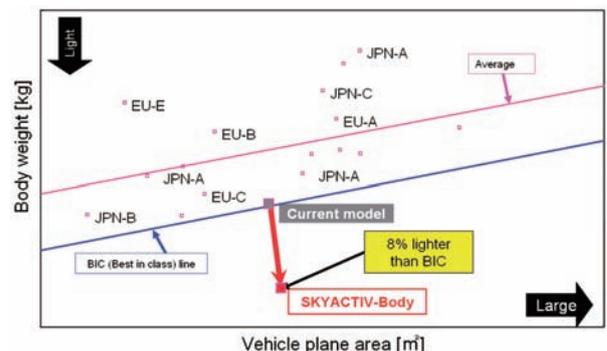


Fig.8 Vehicle Weight Per Projected Area

4. 車両性能

4.1 衝突性能

世界トップレベルの衝突安全性能と軽量化という、一見相反する目標を両立するため、「最適なエネルギー吸収シナリオ」構築と「耐力配分の適性化」を基本骨格レベルから行い、客室を強固に保護するボデー構造を実現した。

(1) 最適な車体各部のエネルギー吸収シナリオ

従来衝突時のエネルギーはフロントフレームのような主要エネルギー吸収部材を中心に吸収させていた。これに対し、今回のボデーでは、マルチロードパスコンセプトを採用し、フロントフレームの周辺に存在する部材にもより多くのエネルギー吸収をさせることで、無駄なくエネルギー吸収効率をあげている。例えば、前面衝突時の入力エネルギーは、「フロントフレームからアンダーフロアへ」「エプロンからフロントピラーへ」「サスペンション・サブフレームからアンダーフロアへ」の、3つの連続した経路（ロードパス）に分散されて吸収している（Fig.9）。

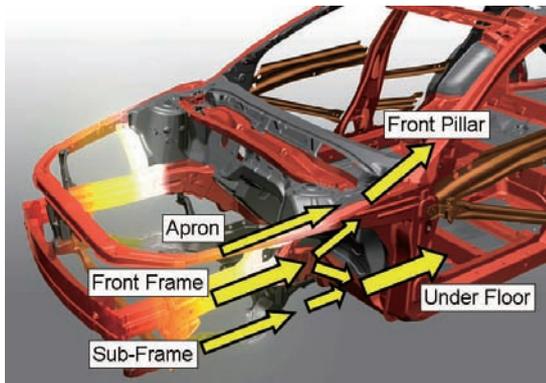


Fig.9 Multi-Load Path Concept

次に、このロードパスコンセプトに基づいて、車体各部の最適な耐力設計を行った。そのために、Fig.10に示すような車両を構成する主要骨格部材を簡単なバネと質点に置き換えた3次元バネマスモデルを開発した。その各バネには耐力に応じて質量も算出できる機能を追加し、最新の数値最適化計算技術と組み合わせて数千ケースにのぼるスタディの中から、質量効率に最も優れた耐力配分を見出した（Fig.11）。

(2) 最軽量を実現する構造化技術

車体各部の構造は、(1)の車体各部の耐力目標に基づいて、

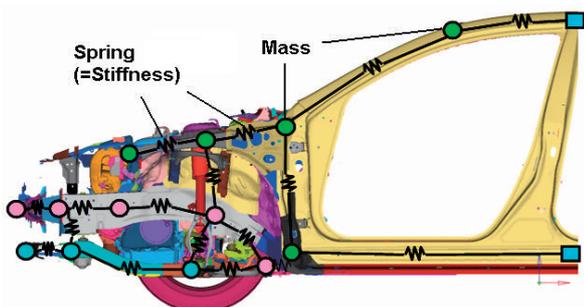


Fig.10 Concept of 3D Mass Spring Model

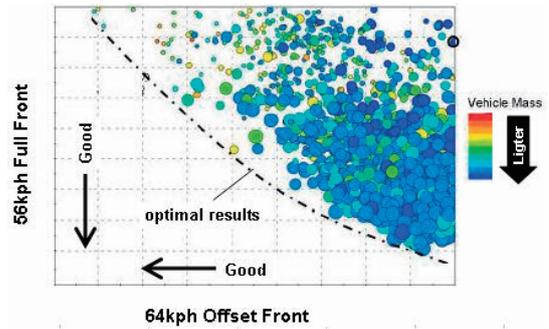


Fig.11 Optimization of Body Stiffness Balance

詳細なFEMモデルを用いて決定していった。

この中で、個々の部品設計においてもマルチロードパスの考え方を適用している。例えばクラッシュカンやフロントフレームでは、衝突エネルギーが主に構造体の稜線部分を通して伝わることに着目し、クラッシュカンからフロントフレーム前端部までの断面形状をFig.12に示すように十字型に成型している。従来の四角断面では稜線の本数は4本だが、十字型にすることにより稜線は12本になり、前方からの入力により広く分散される。これによってエネルギー吸収量を損なうことなく、部材の板厚を低減し軽量化を図った。またより短い長さでエネルギー吸収量を確保できるため、車両のフロントオーバーハングを短縮でき、エクステリアデザインの自由度も高めた。同様の考え方は、側突に重要なサイドドアや後突に重要なリアフレームなどにも採用し、車両全方位での安全性能向上と軽量化に貢献している。

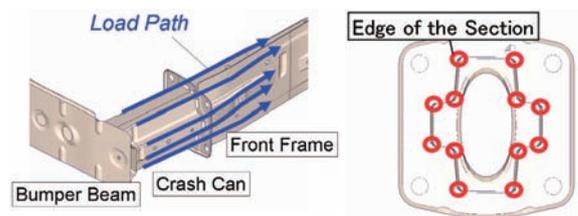


Fig.12 Multi-Load Path and Cross Section of The Frame

(3) 前面オフセット衝突性能検証結果

Fig.13に前面オフセット衝突時のダッシュ後退量と、車両前部の質量の関係を示す。上記のような新しいエネルギー吸収シナリオと耐力配分の最適化により、競合車比で大幅な軽量化を図りつつ、キャビン変形量の極めて少ない強固な車体構造を実現した。

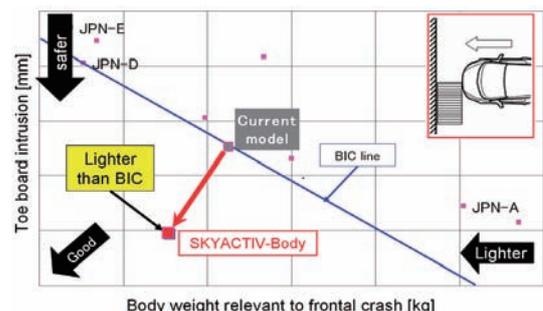


Fig.13 Crash Performance and Body Weight Comparison

4.2 振動・騒音性能

乗員がストレスなく会話できる静粛性と軽量化を両立するために、「ロードノイズのカラクリ解明」、「最適なボデー放射音低減シナリオ」構築と「機能配分」を行い、走行中の路面違いによる室内の音圧変化やピーク感を抑制するボデー構造を実現した。

(1) 最適なボデー放射音低減シナリオと機能配分

ロードノイズのカラクリは、「起振源系（タイヤ・ホイール特性）」、「サスペンション入力伝達系」、「ボデー伝達放射系」の3つに大きく分けられる。その中で、ボデーの関係する「ボデー伝達放射系」の開発では、従来、目標設定を行うために、サスペンション取付部に一定の力が加わったときの音の発生量「車体感度」を用いてきた。今回の開発では、この「車体感度」をFig.14に示すような3つの指標「①サスペンション取付部剛性 ②車体振動伝達特性 ③各ボデー骨格・パネル剛性」に機能配分した。更に、数百項目の目標を設定し、実車とCAE解析によるパラメータスタディを行い、寄与が高い経路と部品を特定し、最適な機能配分を実現した。

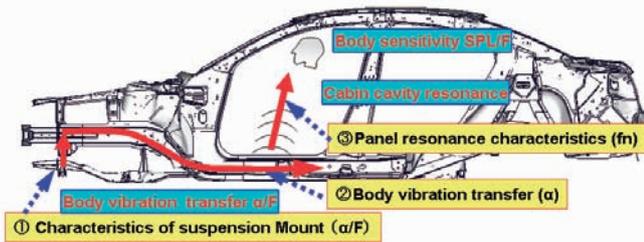


Fig.14 Road Noise Transmission

(2) 軽量化を図る具体構造化

(1)の機能配分したカスケード特性指標を元に、振動・騒音性能へ寄与が高い部品や経路を特定し、以下のような最適構造化を行った。

- ① サスペンション取付部剛性に関しては、フロントのサスペンションサブフレーム取付部に衝突性能との整合を取りつつ、剛性と軽量化を両立させた構造を採用し、ボデーの変形を抑制した (Fig.15)。
 - ② 車体伝達特性に関しては、リヤフレームのストレート化と、リヤダンパマウントとNo.4およびNo.4.5クロスメンバを連続化するデュアルブレース構造の採用により、骨格の剛性を確保し変形を抑えた (Fig.16)。
 - ③ パネルの特性に関しては、センターフロアやNo.4クロスメンバ上部に、曲面パネルを用いてパネル剛性を上げ、剛性向上部品の追加なしで、放射音を低減した (Fig.17)。
- (3) ロードノイズ検証結果

以上のように「車体感度」を各部品特性に機能配分し、構造を最適化することで、軽量化と他性能との整合を取りながら、高いロードノイズ性能を実現した (Fig.18)。

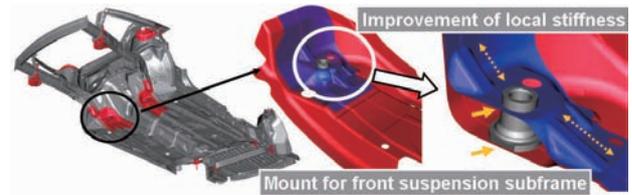


Fig.15 Front Structure

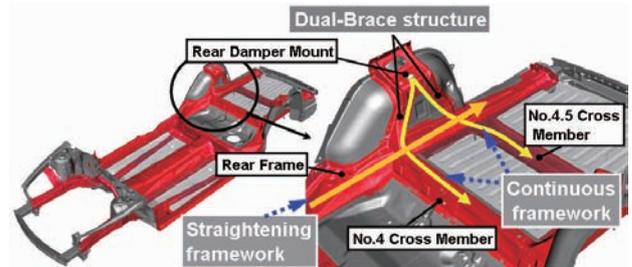


Fig.16 Rear Frame Work

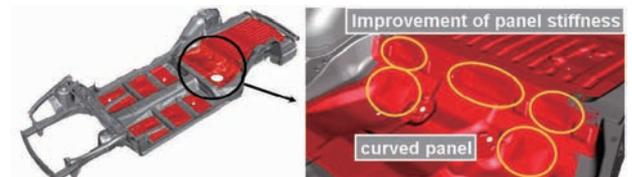


Fig.17 Center Floor Panel

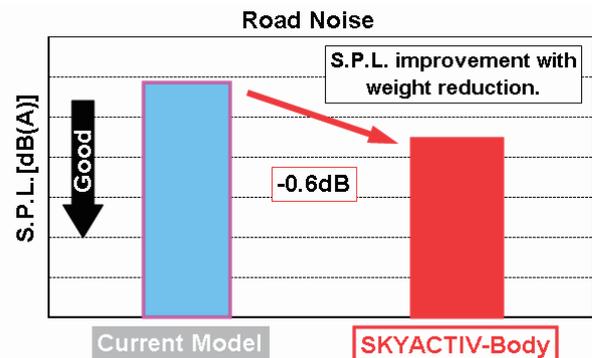


Fig.18 Road Noise Performance

4.3 操縦安定性・乗心地性能

走る喜びを提供できる高い操縦安定性・乗り心地性能と軽量化を両立するために、ボデー各部の「剛性配分の適性化」を行い、高剛性のボデーを実現した。

(1) 機能配分による剛性目標設定

操縦安定性や乗り心地に対するボデー性能を向上するためには、ねじり剛性のほかに、サスペンション取付部剛性、乗員周辺部の剛性などを向上する必要がある。今回、各々の剛性に対し目標値を割り振る「機能配分」において、性能目標と質量低減を両立する配分を実施した。

まず、各種の車体入力に対し主要変形となるねじれを抑制するため、ねじり剛性を大幅に向上させ、その上で曲げ、キャビンの倒れなどの主要変形や局所変形に起因する他の剛性項目も従来モデルを上回る剛性を確保する配分とした。更に、各々の剛性と実車性能の相関に基づいて各剛性の配分を再調整することで、質量効率の良い剛性配分を決定した。

(2) 剛性向上の構造化

各剛性目標を達成する具体的な構造化においては、他性能と同様にCAEを駆使して、ストレート化と連続化に注力した。ねじり剛性を例にあげると、品質工学の活用から、リヤダンパまわりなど寄与の高い部位を特定してから、構造の適性化を図った。同時に、Fig.5に示したスポット溶接点数増しやウェルドボンド追加を行い、結合部を強化することで、更に剛性を高めた。

特にリヤダンパまわりの構造では、車型の違いより操縦時に感じられる剛性感の差の最小化を目指した。ワゴン車型は、セダン車型と異なり、リヤに剛性に不利な大きな開口部を持つ。そこで、Fig.16に示したデュアルブレース構造の採用により、ワゴン車型でのリヤダンパマウント周辺の高剛性化を実現した。

(3) 剛性とボデー質量低減の両立結果

剛性配分の適正化と構造の効率化により、Fig.19に示すように、ボデー質量を低減しつつ従来モデルに対し、ねじり剛性を30%アップした。また、その他の剛性指標においても同様にCDセグメントの中でトップレベルの質量効率を実現した。

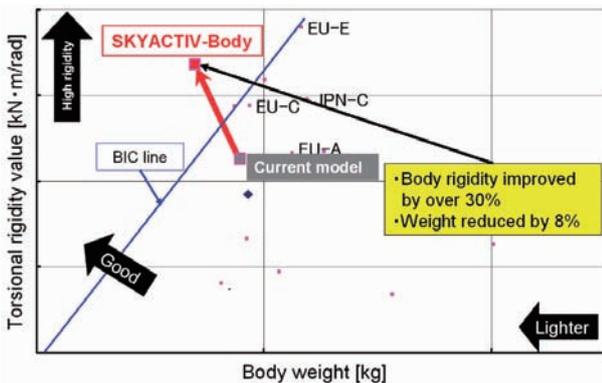


Fig.19 Body Stiffness

4.4 空力性能

ボデーの軽量化に加え、大幅な走行抵抗低減を実現するため、世界トップレベルの低Cdプラットフォームを開発した。この困難な目標を達成するために、車両周りの流れの解析を行い、「プラットフォームの理想流れを構築」し、「その流れを実現するための構造の具体化」を実施した。

(1) プラットフォームの理想流れの構築

従来プラットフォームでは、床下で発生する渦に着目し、その渦を小さくするためフロアのフラット化を実施し、空気抵抗低減を実現していた。しかし、フロアのフラット化だけでは空気抵抗力を決定する車両後方の後流の上下の流れのバランスをコントロールすることが難しく、その結果後流が吹き降ろす流れになり、十分な空気抵抗低減はできなかった。

そこで、後流の上下の流れを制御して一箇所に集約させることによって、車両後部の乱流・渦の発生を抑制し、空気抵抗を大幅に低減するコンセプトを実現した (Fig.20)。

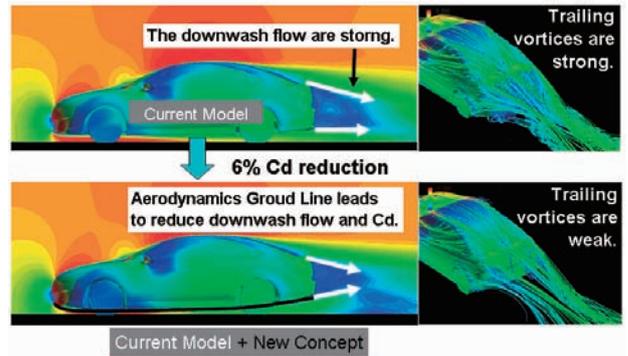


Fig.20 CFD-based Aerodynamics Optimization by Modifying Underbody Geometry

(2) 具体構造化

このコンセプトを実現するため、CFD (流体流れ解析) を用いてフロア形状の検討を行った。その結果、Fig.20に示す、車両後端部の空気の流れを持ち上げる形状と、Fig.21に示すトンネル部やタイヤ周りの空気の流れを制御するアンダーカバー形状を見出した。

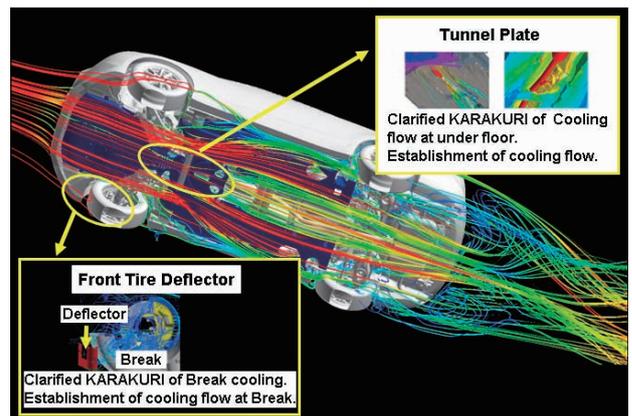


Fig.21 Flow Streamlines Around under Floor

(3) 空気抵抗検証結果

この形状を織りこんだ車両を評価した結果、従来プラットフォームと比較し、空気抵抗を8%低減でき、加えて、Yawモーメントとリフトバランスを最適化し高速直進安定性も改善した (Fig.22)。

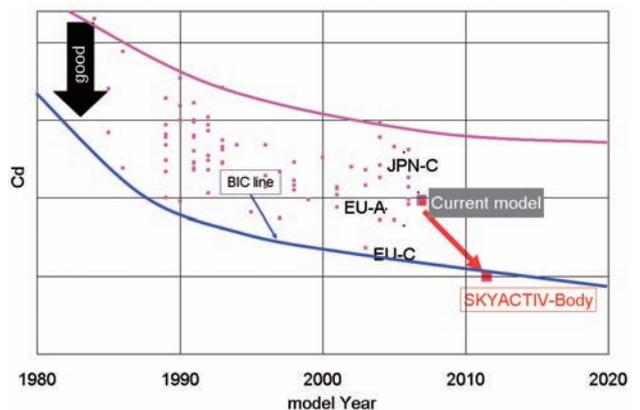


Fig.22 Cd Performance

5. おわりに

今回の開発は、開発部門、生産部門や社内外を問わず、全てのメンバが一丸となって、開発をゼロから見直して取り組んだ。それにより、設計から生産に至るまでの全てプロセスを一新し、大きな成果を上げることができた。

ご協力いただいた関係者の方々に感謝するとともに、今後もお客様により良い商品を提供できるように努力する所存である。

■ 著 者 ■



木村隆之



清武真二



阪井克倫



小橋正信



上野正樹



近藤量夫



伊藤 司



岡本 哲