

特集：新型ロードスター

24

新型ロードスター SKYACTIV-BODYストラクチャの開発 Development of SKYACTIV-BODY Structure for New Roadster

木村 隆之*1 阪井 克倫*2 山内 一樹*3
Takayuki Kimura Katsunori Sakai Kazuki Yamauchi
丸山 賢司*4 四柳 泰希*5 岡沢 恭久*6
Kenji Maruyama Taiki Yotsuyanagi Yasuhisa Okazawa

要 約

新型ロードスターは、“だれもが楽しめる”というロードスターの原点に立ち帰り人馬一体感を進化させた。これを支えるボデーストラクチャは、CX-5・アテンザ・アクセラで採用したSKYACTIV-BODYのアプローチをFRのオープンボデーに適用することで、操縦安定性能、衝突安全性能、NVH性能を劇的に向上させながら、初代ロードスターを上回る軽量ボデーの実現を目標設定した。また、デザインテーマ「魂動」によってスポーツカーとして美しさと生命感をカタチにすることを目指した。

結果として、操縦安定性能やNVH性能の基礎となる車体剛性の向上やトップレベルの衝突安全性能を実現しながら、ホワイトボデー質量で3代目217kg、2代目230kg、初代211kgを下回る197kgを達成し、セグメント中で最軽量を実現した。本稿ではこの軽量コンパクトなオープンボデー開発における実現手段を紹介する。

Summary

New Roadster is a product that is made by getting back to basics of Roadster “Everybody can enjoy” and focused on improving “Jinba-Ittai” performance. Following CX-5・Atenza・Axela, FR open body structure is applied the same approach of SKYACTIV-BODY and aimed to improve handling and stability, crash safety and NVH performance by lighter weight than the first Roadster. And we aimed to embody the beautiful sporty styling and a feeling of vitality by design theme “KODO: SOUL of MOTION”.

Consequently, body stiffness (fundamental of handling and stability and NVH performance) and crash safety are improved and the weight of body in white results in 197kg (3rd Roadster 217kg, 2nd Roadster 230kg, 1st Roadster 211kg) which is the lightest weight in open car segment. This paper outlines development activities for a light weight open body structure

1. はじめに

今回4代目新型ロードスターの開発に当たり、FRオープンスポーツカーの車体に求められる機能をもう一度ゼロから見つめ直した。実際に運転する車両状態で実現すべき「人馬一体」のキーコンセプトをボデーストラクチャのレベルにブレークダウンした。

開発目標は、人馬一体感とNVHの基礎となる車体剛性感の劇的進化。リアルワールドでの安全性向上のために衝突時のエネルギー吸収量の向上。そして、代々進化させてきたNVH性能の継続進化を目標とした。

更にライトウェイトスポーツの根幹をなす軽量化においては1989年発売の初代ロードスターを超える最軽量値を目標に掲げた。これらの実現には初代から続くロードスター

の伝統を受け継ぎ、乗員の運転姿勢や乗降性を含めて人馬一体感を表現すべく構造要件を定めた。

スポーツカーとしての美しさと生命感をカタチにすべく、「魂動」の深化を目指すデザインの方向をボデーストラクチャとしてサポートした。

2. 開発プロセス

2.1 開発アプローチ

SKYACTIV-BODY⁽¹⁾で紹介した開発アプローチ

- ① 力学の原理原則から構造の理想化
- ② 工法選択による接合効率の向上
- ③ 材料・板厚の適正化

を基に新型ロードスター開発における変化点

- ① エンジン/ミッションの縦置き化

*1~5 ボデー開発部
Body Development Dept.

*6 車両開発本部
Vehicle Develop Div.

- ② PPF (パワープラントフレーム) の採用
- ③ FFベースの4WD車に対しリヤ・デフを大型化
- ④ フロント&リヤ・サスペンションのシステム変更
- ⑤ オープンボデー化

によるボデー機能とカラクリ (性能のメカニズム) の変化を明確化し、それに対応するボデー構造を理想化した。

2.2 基本コンセプト

ボデーの理想の骨格を実現するためのコンセプトを

- ① 基本骨格のストレート化
- ② 連続フレームワーク
- ③ マルチロードパス。特にハイマウント・バックボーンフレームへの伝達強化

として開発構想を立案した (Fig. 1)。

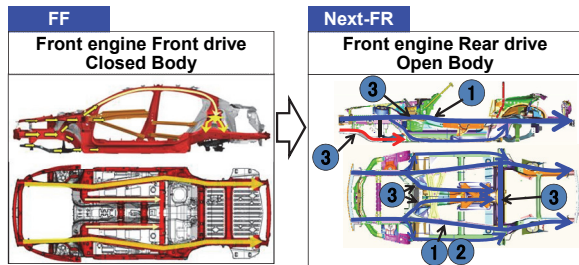


Fig. 1 SKYACTIV-BODY Vision

2.3 理想構造化のプロセス

理想構造を構築するに当たり

- ① 衝突, 剛性, NVH等に対応するフレームワークの構造検証
- ② 機能配分量の適正化
- ③ 品質工学による寄与度分析を用いた検証

を繰り返した。特にフレームワークの検証においてトポロジー解析を実行した。その結果ハイマウント・バックボーンフレームとフロント・サスストップの結合剛性向上が車体剛性の向上に有効であることが明確となり、開発構想の進化につながった (Fig. 2) (topology)。

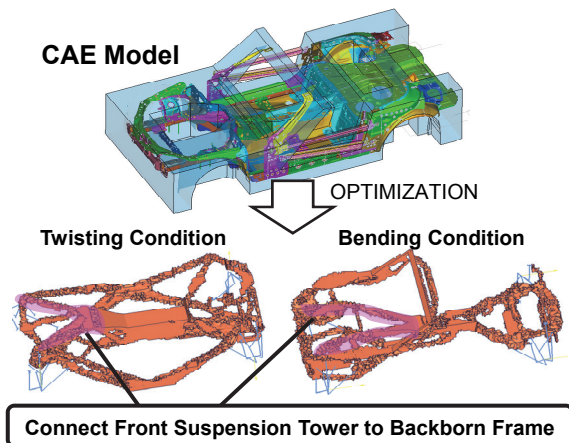


Fig. 2 Topology Analysis

3. ボデー構造

新型ロードスターのボデー構造の特徴をねらいと適用技術を踏まえて紹介する。

3.1 フロント・フレーム, クラッシュカン

衝突性能の実現のため、3代目ではクラッシュスペースが短いまま780MPa級超ハイテン材を採用し高い耐力を出すことで衝突エネルギーを吸収していた。これを、4代目ではクラッシュスペースをより長く確保し、耐力を相対的に下げる手法とした。

そのために、よりクラッシュスペースを広げる工夫を行い、バンパレイン後端からサスペンションタワー部までの範囲を十字断面とした。稜線の多い十字断面の効率の良さと耐力目標減から、材質を780MPa級超ハイテン材から440MPa級ハイテン材化し、板厚を1.6t ⇒ 1.2t / 1.4t に低減し、軽量化した。

次に、サスペンションタワー後方も潰してクラッシュスペースを無駄なく使い切る構造とした。この部位はサスペンションタワー支持部にもなるため、衝突性能と剛性のバランス取りに注力し、CAE 検討を繰り返しながら設計仕様を決定した。

これらの結果から、衝突時のキャビンへの入力が高減され、ボデー全体の軽量化へ寄与した。また、限られたスペースを無駄なく潰しきることによって、車両のフロント・オーバーハング短縮につながり、デザインを向上させた (Fig. 3)。

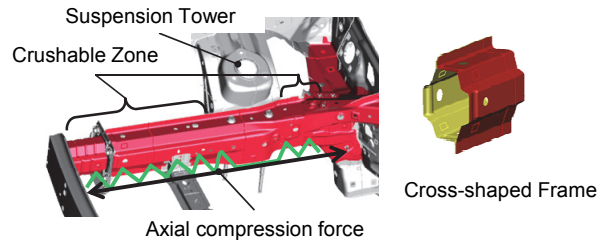


Fig. 3 Front Frame Structure

3.2 ダッシュクロスマンバ

ダッシュクロスマンバはフロント・フレームとバックボーンフレームをつなぐ部材であり、2.3で前述のように両者の結合を強化することで車体剛性は向上し、かつ前面衝突時の乗員足元保護にも有効である。一方、構造体を実現するには、ドライビングポジション適正化による足元スペース拡大や、ヨー慣性モーメント低減のためのエンジン後方配置等のパッケージとの両立が課題となった。

そこで車体性能とパッケージを高次元でバランスさせるため、従来車で断面内に設定していたステアリングシャフト用貫通穴を独立させて断面不連続部位をなくすとともに、もち上げた断面を緩やかにバックボーンフレームへつなぎ、部材全体で荷重を受ける構造として、足元スペース

に影響なく断面拡大を図った (Fig. 4)。また、1500MPa級ホットスタンプ材を適用し、構造変更と合わせて曲げ耐力を向上させた (5. 材料参照)。これらにより、パッケージと性能の両者に妥協なく、重量低減しながら高強度、高剛性化を実現した。

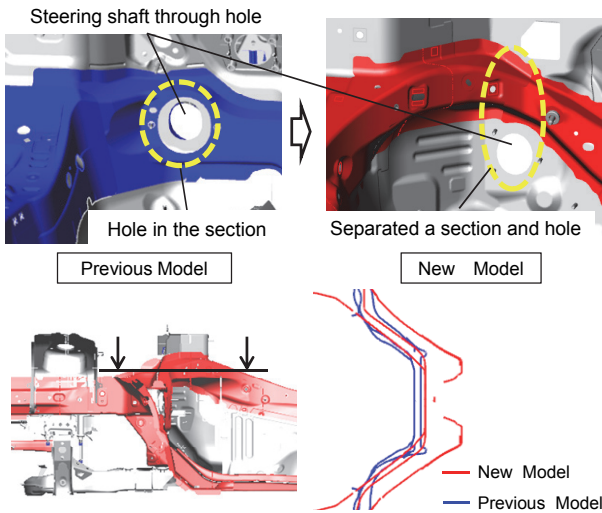


Fig. 4 Dash Cross Member

3.3 ハイマウント・バックボーンフレーム

バックボーンフレームはオープンボデー化に伴う剛性ダウンを、サイドシルに頼らずに向上できる技術である。新型ロードスターでは、SKYACTIV-BODYのストレート化、連続化の考えを徹底し、急激な折れや穴による断面不連続が生じないように、開発初期段階から関連部門と一丸となりONE MAZDAで活動し理想構造化した。部材がもつポテンシャルを最大限発揮させた。

(1) 断面稜線のスムーズ化

インパネ取り付けなどを適正化し、平面視、側面視ともにフレーム稜線の角度変化を最小限として、部材全体で荷重分担して軽量化した (Fig. 5)。

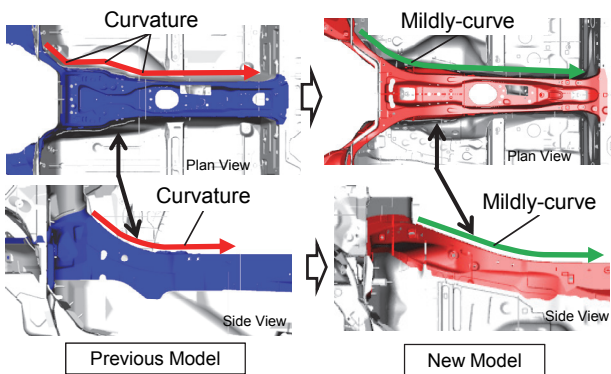


Fig. 5 High Mount Backbone Frame (1)

(2) 閉断面の連続化

パーキングレバー取り付け部の穴を工夫し、断面を後方部材まで一定の閉断面でつなげて断面の不連続をなくした (Fig. 6)。

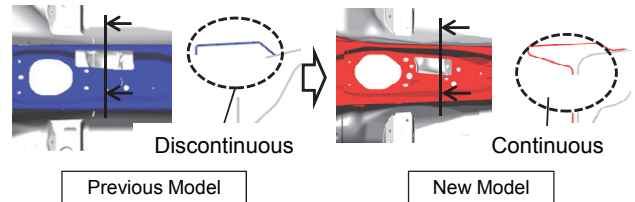


Fig. 6 High Mount Backbone Frame (2)

3.4 サイドシル

オープンカーにおいてサイドシルはフロント・ボデーとリヤ・ボデーをつなぐ重要な部品であり、高強度/高剛性が求められる。一方で乗員の乗降性の確保や、デザインテーマ「魂動」の実現のために断面サイズに制約がある。そこで新型ロードスターは断面形状の最適化に取り組むことでこの課題を解決した。

(1) 断面形状の最適化

新型ロードスターのサイドシルには、衝突時、断面の潰れ方をコントロールする新断面を採用した。この断面は、断面二次モーメントが小さいにもかかわらず稜線を増やすことで曲げ/ねじり強度を向上させる仕組みである。横からの衝突大荷重が入った場合は、断面は座屈し断面崩れを起こすが、稜線を意図的にかつ、適正な量と方向に設けることでこの現象を抑制した。この採用により現行モデルより高い性能を発揮しつつ、30%の質量低減を実現した (Fig. 7)。

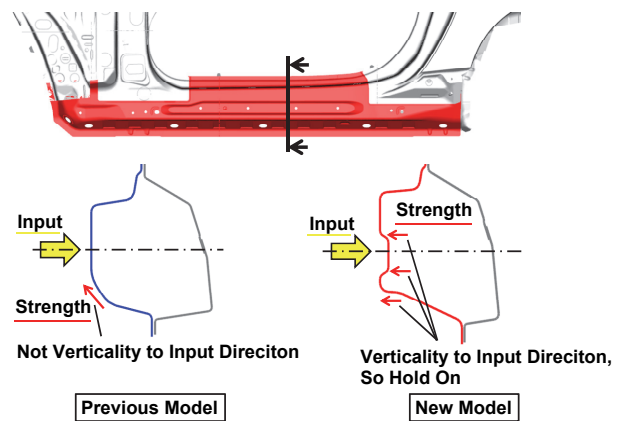


Fig. 7 Side-Sill

3.5 リヤ・サイドフレーム

デザインのリヤ・ショートデッキ化を実現するために、リヤ・サイドフレーム長を従来モデル比で90mm縮小した。そこで効率的にエネルギー吸収をさせるためにSKYACTIV-BODY技術を活用し、リヤ・サイドフレーム

にダブルハット断面を採用し、更にリヤ・フロアパネルにはハイテン材を使用した。これにより従来モデルより短いスペースでも、衝突安全性の向上を実現した (Fig. 8)。

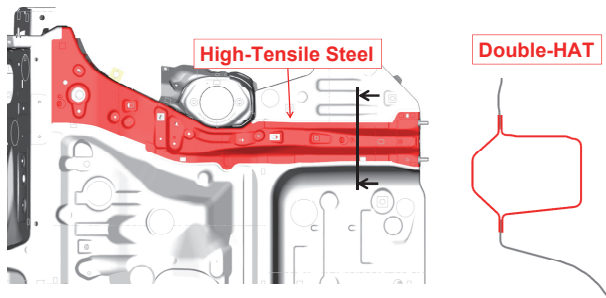


Fig. 8 Rear-Side Frame

3.6 フィラーリッド

軽量化と操作性向上を目的に、フィラーリッドをレバー操作によるケーブルロック式からパネルのプッシュ操作で開くドアロック連動の電磁ロック式へ切り替えた。従来構造を最大活用しながら部品削減を進め、前モデルに比べ操作性を向上させた上で、112g軽量化した (Fig. 9)。

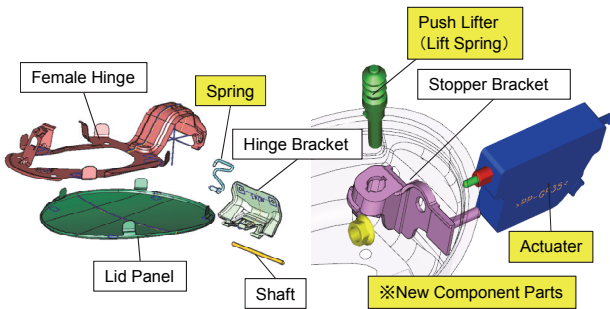


Fig. 9 Lid-Filler

4. 工法

車体の剛性感を向上させるため、カウル、フロアレイン、ホイールハウス、リヤ・サスペンションレインフォースの結合部にウェルドボンドを採用することにより、ロードノイズの低減と車体剛性を向上させた (Fig. 10)。

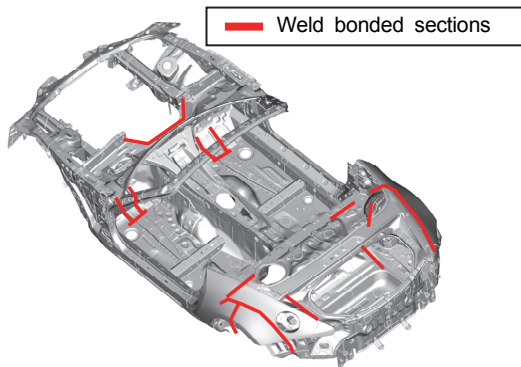


Fig. 10 Weld Bond

5. 材料

5.1 材料選定

車体剛性から必要な板厚を複数性能最適化技術 (Multi-disciplinary Design Optimization : MDO) (6. CAE の取り組み参照) にて算出し、その上で衝突性能から強度が要求される部品には、エネルギー吸収性と強度・信頼性に優れたハイテン材を適用した (Fig. 11)。中でも高耐力が求められるキャビン周囲には、新たに980/1180MPa級超ハイテン材、及び1500MPa級ホットスタンプを適用することで、あらゆる衝突モードでのキャビン部の変形を効率的に抑制した (Fig. 12)。また、前モデル比でハイテン材適用率は58%から62%に増加した。更に、フェンダ/バンパレインら車両の重心から遠く、ヨー慣性モーメント低減に効果的なフェンダ/バンパレインにアルミニウムを適用するなど (詳細は「新型ロードスターのアルミニウム適用拡大による軽量化 (ポデーショナル領域)」を参照願います。)、各部位に要求される特性に応じた効率的な材質を選定した。

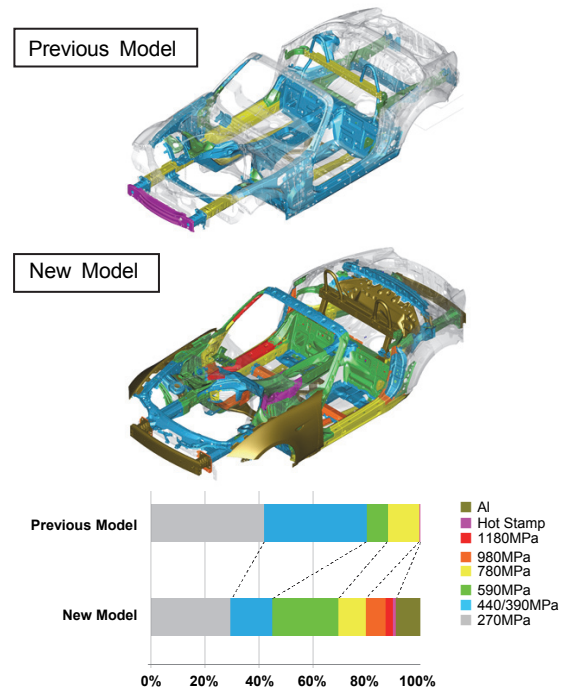


Fig. 11 High-Tensile Steel Usage Rate

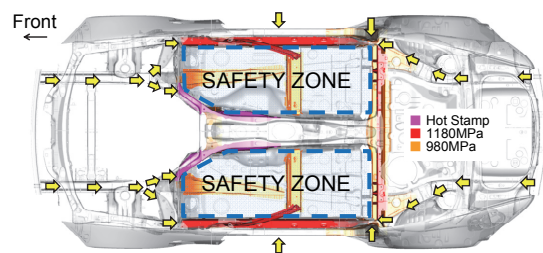


Fig. 12 Occupant Protection

5.2 ホットスタンプ材の車体適用

1180MPa級超ハイテン材を超える1500MPa級ホットスタンプ材を衝突荷重により潰したくない車体部品に適用した。より強い材料を効果的に使用することで薄板化により軽量化した。前述したバックボーンフレーム部の圧縮荷重入力部に採用した。部品加工性、溶接性や車体精度保証性を生産部門とONE MAZDAで取り組み量産化を実現した (Fig. 13)。

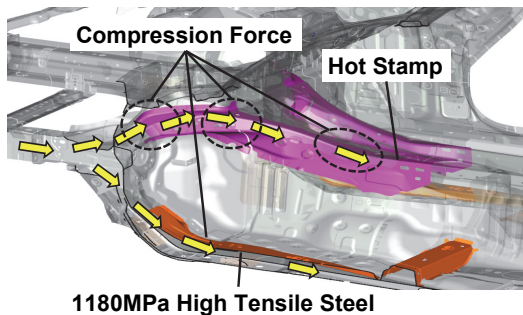


Fig. 13 Hot Stamp Material

6. CAEの取り組み

6.1 車体剛性感の劇的向上

主要な骨格構想を理想的な具体構造にする上で、詳細なCAEを開発初期段階から実施。最適な形状に到達するまで検討を繰り返す行うことで、軽量化と各部の剛性の維持改善を図り、車体剛性感を向上した。

フロント・サスペンショントップでは、バックボーンフレームとの結合剛性向上とともに、サイドシルへの結合剛性の向上に取り組んだ。特にサスペンショントップのダンパ取り付け周辺の構造を一新し、サスペンショントップへの入力荷重を車体外側へ効率よく分散させ、ダンパ支持剛性を向上した。その結果、ストラットタワーバーなしでも、従来モデルのストラットタワーバー付きと同等レベルのサスペンショントップのダンパ支持剛性を得た (Fig. 14)。

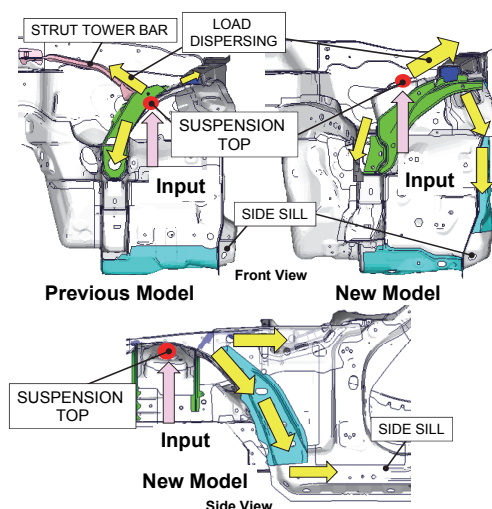


Fig. 14 Front Body Structure

リヤ・サスペンショントップでは、ダンパ取り付け構造の変更に合わせて、サスペンショントップとパッケージを従来モデルの構造から大幅変更し、サスペンショントップからの入力荷重をパッケージ側により効率良く分散する構造とすることで、フロントと同様に格段のダンパ支持剛性の向上を果たした (Fig. 15)。

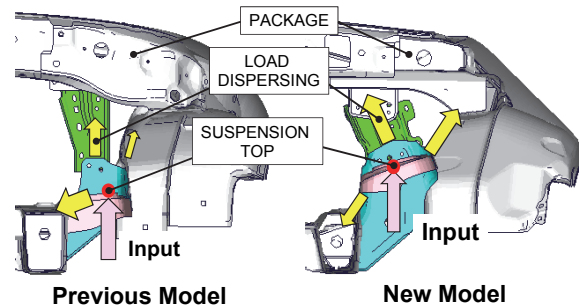


Fig. 15 Rear Body Structure

フロント・サスペンションアーム取り付け部においても、ボデー側への取り付け構造にブレースを設定し、サスペンションアームからの荷重をサイドシルへ分散させる構造とすることで、高剛性化した (Fig. 16)。

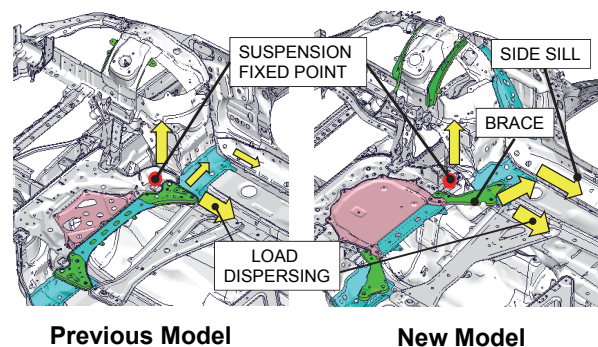


Fig. 16 Front Suspension Body Structure

6.2 複数性能最適化技術の適用

今回の新型ロードスターの開発では、MDOを適用し、複数性能 (衝突, NVH, 強度, 剛性) 間の同時最適化による質量効率の向上にも取り組んだ。具体的には、各性能目標を満足する指標を制約条件として与え、質量最小化を目的関数とするMDOをアンダボデー、アッパボデー各開発段階で実施し、最軽量化の検証を行った。

アンダボデー領域の開発段階では、プラットフォーム主要部品を設計変数として設定し、板厚変化による質量寄与度、性能寄与度を明らかにしたうえで、その分析結果から、トータル3.9kgの軽量化案を発掘した。

アッパボデー領域の開発段階では、アッパ系部品を中心に、他に最軽量となる板厚組み合わせの仕様可能性が残さ

れていないか、ぜい肉として板厚低減の余地がある部品が取り残されていないか、出図前最終確認としてMDOを実施した。この結果、追加での板厚低減（340g軽量化）とともに、車体トータルとして最軽量レベルを実現した（Fig. 17）。

132 Parts primarily in under body at 1st MDO (below left side)

54 Parts primarily in under body at 2nd MDO (below right side)

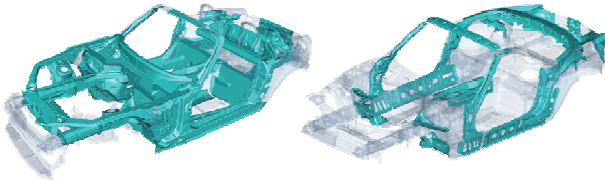


Fig. 17 MDO Application

7. 結果

7.1 車体剛性値

大幅な軽量化と、効果的な構造変更により、ねじり剛性や前後サスペンショントップのダンパ支持剛性などの各剛性値は、質量比で従来モデルから向上した（Table 1）。

Table 1 Stiffness

	Previous Model	New Model
Torsional Stiffness	100%	109%
Front Damper Stiffness	100%	119%
Rear Damper Stiffness	100%	117%

7.2 衝突安全性能

現代の自動車開発においては、安全性要求の高まりによりモデルチェンジを重ねるたびに質量増加する傾向がある。新型ロードスターでは、ライトウエイトへ原点回帰すべく、マルチロードパス構造や材料置換、工法の見直しによって衝突時の車体変形を大幅に抑えた。結果として、質量を下げながら社内テストにおいて各国の安全アセスメントプログラム（NCAP）トップレベルの車体性能を実現した。

7.3 軽量化

新型ロードスターはSKYACTIV-BODYの考え方を踏まえてFRとしての構造適正化を進めた結果、従来車を上回る剛性感や衝突安全性を実現しながら、アルミ材を使用していないホワイトボデー単位の質量で3代目217kg、2代目230kg、初代211kgより軽量の197kgを達成した（Fig. 18）。

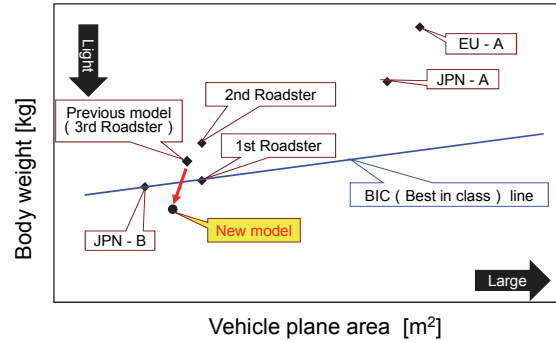


Fig. 18 Body in White Weight Per Projected Area

また、バンパレインフォースメントなどのサービス性や生産効率化のためボルトアップ化した主要部品を含めたボデーストラクチャ質量でも3代目248kgより軽量の225kgを達成した。

8. おわりに

以上が新型ロードスターのボデーストラクチャの進化と特徴である。SKYACTIV-BODYのアプローチをオープンボデーに適用し、軽量化が商品価値に直結するロードスターにおいて、パフォーマンスを向上させながら歴代を上回る軽量ボデーを実現できた。今後も技術を磨き、より軽量化でパフォーマンスの高いボデーの実現に向けて歩み続けていく所存である。

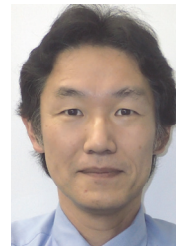
参考文献

- (1) 木村隆之ほか：SKYACTIV-Body, マツダ技報, No.29, pp.61-67 (2011)
- (2) 木村隆之ほか：新型ロードスター軽量化ボデーストラクチャの開発, マツダ技報, No.24, pp.66-71 (2006)

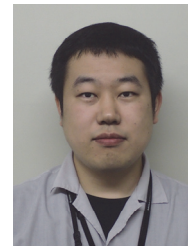
■ 著 者 ■



木村 隆之



阪井 克倫



山内 一樹



丸山 賢司



四柳 泰希



岡沢 恭久