

特集：新型ロードスター

13

## 新型ロードスター軽量化ボデーストラクチャの開発

### Development of Light Weight Body Structure for All-New Roadster

木村隆之\*1 池田敏治\*2 中髪修一\*3  
 Takayuki Kimura Toshiharu Ikeda Shuichi Nakagami  
 福田真祝\*4 田村学\*5 小橋正信\*6  
 Masanori Fukuda Manabu Tamura Masanobu Kobashi

#### 要約

新型ロードスターはマツダのブランドメッセージである“Zoom-Zoom”を最も具現化したライトウエイトスポーツカーである。マツダでは、スポーツカーとして美しさの実現と、「人馬一体」という基本コンセプト具現化のために足回りを支える強度・剛性の確保や、乗員や歩行者の衝突安全性の更なる向上を念頭に、運動性能向上の基本である軽量化のシナリオを描いた。

まずはボデーストラクチャを開発する柱として、板厚を下げてスポーツカーとしての剛性が確保できる軽量化構造の創出、そして、薄板化しても衝突時きちんとエネルギーを吸収し、高い強度を有する新材料の開発に取り組んだ。

これらと並行して衝突安全の対応構造と車体剛性の向上構造をうまくミックスし、機能統合による軽量化を目指した。その後も運動性能に直結する部分にこだわって軽量化検討を進めた。また、軽量化のみに突き進まず車体剛性値や実際に人間の感じる剛性感を重要視し、性能目標達成を前提とした軽量化を目指した。美しくなければスポーツカーといえない。そこで、デザインからの提案を軽量化技術と技術者の知恵で質量を掛けずに具現化した。

その結果、車体剛性値を従来車比で曲げ剛性で22%、捻り剛性で47%向上させながら、ホワイトボデー質量で13kg軽量化した。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1.6kgの軽量化を達成した。

#### Summary

New MX-5 is a lightweight sports car that embodies Mazda's brand message "Zoom-Zoom". We realized a sporty styling, and, envisioned and attained the scenario for weight saving while maintaining crash safety of occupants and pedestrians and body stiffness for chassis support so as to realize the basic concept of "Jinba Ittai" performance.

Our efforts were focused on creating a lightweight structure that maintains stiffness as a sports car even with thinner sheet metal as well as identifying a material appropriate for absorbing crash energy and hard to brake even with thinner sheet metal.

In parallel with these efforts, we aimed weight saving by functional integration of safety and stiffness enhancing structure with each other. Without interruption, we further advanced the weight saving, focusing on the parts that were directly linked to kinematics performance. While pursuing a lightweight body structure, we also emphasized a body stiffness rate and feeling of rigidity, we aimed at the weight saving on the premise that a performance target was achieved. Unbeautiful sports cars are of little worth. Therefore, we realized styling requirements without additional weight by lightweight technology and engineer's wisdom.

Consequently, as compared to a preceding model, bending and torsional stiffness were improved by 22% and 47% and the weight of a white body was reduced by 13kg respectively. Besides, the weight of a body structure including bumper reinforcement and other main components bolted up for serviceability or productivity was also reduced by 1.6kg.

\*1~6 ボデー開発部  
 Body Development Dept.

## 1. はじめに

オープンカーの質量ベンチマーク状況は、安全性要求の高まり、快適装備追加要求やハイパワー化からくる車体剛性向上要求より肥大化傾向にあり、ホワイトボデー単位で260kgから285kgのレベルで推移している。2代目ロードスターは230kgと質量的にはベスト・イン・クラスであり、新型車における更なる軽量化は難課題であった。

安全性についてはレギュレーション等の定量化された基準値があり予測がつくのだが、新型ロードスターのコンセプトである「人馬一体」という感性の領域について、どうすれば車体という物に置き換えられるかをまずは考えてみた。

初期の設計構想より他車のように全ての領域で高剛性を目指す考えをやめ、ライトウエイトスポーツとして必要な部分を重点的に固め、その他は割り切るといった軽いボデーを開発する構想を立てた。開発構想主要点は、

- 「人馬一体の躍動」：運動性能の基本である軽量化の完遂。
- 「人馬一体の感性」：馬の感度を上げ一体を感じさせる。
- 「人馬一体の繋がり」：人と馬の接点部の剛性に注力。
- 「人馬一体の絆」：馬の安全性能を上げ安心感を増す。

これにスポーツカーとしての美しさを実現するためにデザインオリエンテッド活動をリンクさせ車体を仕上げた。

本稿では、ボデーストラクチャのキーテクノロジーと構造の特徴を紹介する。

## 2. 人馬一体を実現した軽量化基本構造

### 2.1 軽量化構造の創出

ボデーの軽量化とは、材料強度を上げることで部品の板厚を下げて質量を低減する手法が早道であるが、一般的な車体構造において単純に板厚を下げると、スポーツカーとして必要な剛性の確保が困難となる。この課題に対して新しく軽量化構造を開発した。

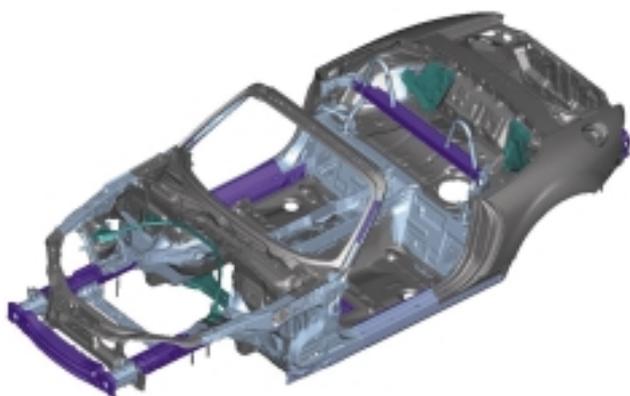


Fig.1 Body Structure

それは、車体剛性に直結するホイールベース間は大断面構造で薄板化しながらトンネル部にはRX-8より採用したハイマウント・バックボーンフレームを設ける構造とした。

具体的には、Fig.4に示すようにトンネル上面に背骨と

なる閉断面のフレームを前後方向に設定している。更に、Fig.2の略乗員ヒップポイント高さのボデー断面に示したように、フロントサスペンション固定部のあるフロントフレーム~ハイマウント・バックボーンフレーム~No.3クロスメンバ~リヤサスペンション固定部があるリヤフレームまで、板一枚にならず閉断面で連続させる構造とした。この結果剛性を確保したまま板厚を下げるのが可能となり、かつサスペンションと直結した車体の感度向上が図れた。

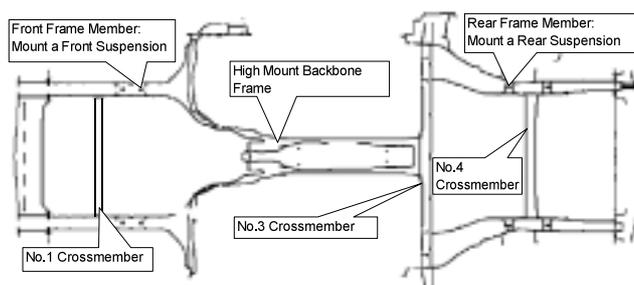


Fig.2 Hip Point Height SECT.

ハイマウント・バックボーンフレームは、Fun To Use. 乗員の乗降性を高める技術でもある。新型では通常のオープンカーが採用しているサイドシル部の断面を極大化して剛性を確保する手法を取らず、サイドシル部断面は小型化しトンネル側において剛性を確保する手法を選択した。

フロアパネルを薄板化すると、色々な操舵や路面状況によって、トンネル裾野部の口開きや、微小なパネル変形をおこし剛性感が変わる問題が発生する。新型ロードスターでは裾野の縦方向に2.5メンバを設定し、その下側にアルミ製のアンダクロスメンバを設定した。ハンドルを切り込む時も切り返した場合も同じに感じる車体剛性感を確保した (Fig.3, 4)。

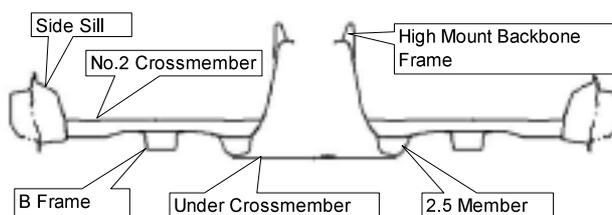


Fig.3 Seat Anchor Point SECT. (Front Side)

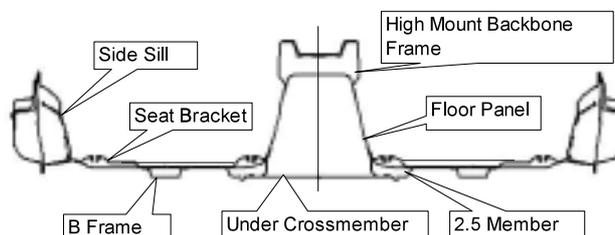


Fig.4 Seat Anchor Point SECT. (Rear Side)

### 2.2 超ハイテン材使用による軽量化

フロントフレームやサイドシルインナ部といった衝突時

に高耐力が欲しい部位に従来は不可能であった780MPa級超ハイテン材を採用した。同様に、Aピラー部には1,500MPa級超ハイテン材の鋼管を採用し、軽量化を図った。

衝突時のエネルギー吸収性能を高めるために780MPa級材を使用する訳だが、従来Maxサイズだった590MPa級材と性質が異なるため、社内の関連部門を招集してタスクチームを組み量産化の目処を立てた。

どのような断面がエネルギーを吸収するか、どれ位の溶接ピッチを取れば衝突させた時に安定して潰れるか、どの成分を使った780MPa級材が一番の性能が出せるのかまたは加工できるのか、等々検討を深めた。また、先行的に部品を試作し、圧縮テストを実施し検証をより確かなものに仕上げた。

加工性の問題も存在した。この超ハイテン材は普通材の約2.8倍の引っ張り強度を有するのだが、いざ加工しようと型具で成形させてもパネのように元に戻ろうとする難加工材である。そこでより加工が容易で折り曲げ加工が可能になるように部品を真っ直ぐにレイアウトした (Fig.5において直線で形成された部品である)。

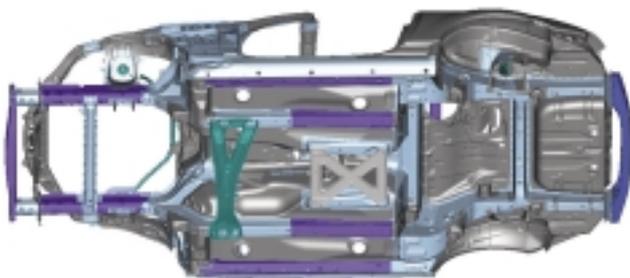


Fig.5 Body Structure (Bottom View)

Fig.1, 5に示す濃い青が780MPa級以上の超ハイテン材使用部位である。全体部品質量の12%使用した。薄い青が390~590MPa級のハイテン材である。全体部品質量の46%使用した。合計したハイテン化比率は58%に達した。

### 3. 軽量衝突安全ボデー

衝突安全の対応構造と車体剛性の向上構造を兼用することで軽量化を図った。

#### 3.1 前面衝突安全

前面衝突安全性の高いボデー構造とは、衝突時パンパからエンジンルームの範囲で、前方からの衝撃エネルギーを効果的に吸収し、更に客室部への入力を車体全体に分散させることで、客室部分の変形を抑える構造である。

新型ロードスターではFig.6に示すように、前述した780MPa級超ハイテン材製の六角形断面フロントフレームにてエネルギー吸収量を向上させるとともに、これを支える際の大荷重を客室前の三叉構造部でサイドシル、Bフレーム、バックボーンフレームに分散し、客室の変形を抑える構造とした。これはフロントサスペンションを固定しているフロントフレームの剛性アップに直結する構造ともいえる。

更にエネルギー吸収量を増やすために衝突バリアからフロ

ントタイヤを介してサイドシル部に入力するロードパスを確保した。このために、サイドシル部とカウルサイド部のガセットやレインフォースメントとの結合を強化し、フロントタイヤの客室侵入を抑制する構造をとった。この結合強化により、フロントドアやインパネを支えているヒンジピラーとサイドシルが高剛性に結合される構造となった。

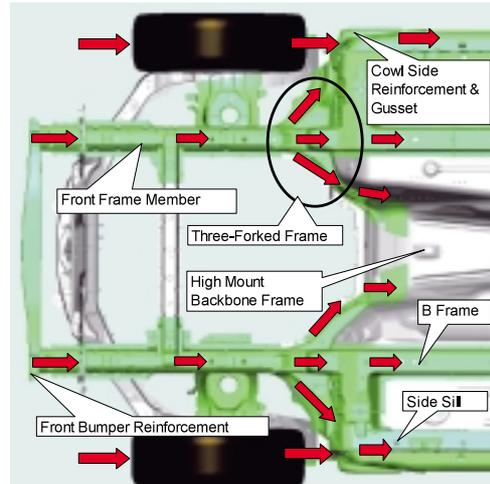


Fig.6 Energy Dispersion Body Structure

また、オープンカーはルーフが設定されていないため、前面衝突時にリヤボデーが前進しサイドシルがバナナ状に変形する現象が見られる。新型ロードスターでは前述したバックボーンフレーム後端とNo.3クロスメンバの結合強化と、Bピラー下のサイドシル後端部とリヤフレーム前端接合部の結合強化により対応した。この構造により最弱部のない車体剛性値の連続を図った。

#### 3.2 側面衝突安全

ライトウエイトスポーツにとって車幅増加は、質量増加と車両のとりまわし悪化に繋がる。これを最小にするためには、側面衝突時、車体内側面と乗員間の非常に限られた空間で、衝撃エネルギーをいかに効率良く分散し吸収するロードパスを増やすことが重要である。客室変形を抑えながら、乗員に与える衝撃を低減するエネルギー吸収構造を開発した。

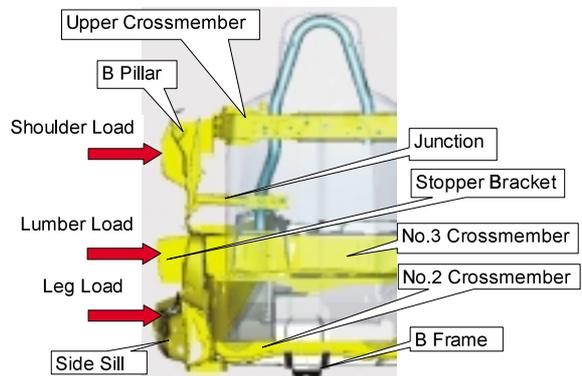


Fig.7 Seat Back Bar SECT.

新型ロードスターではFig.7に示すように、シートの真

後ろに設定されたシートバック・バーに内蔵された780MPa級超ハイテン材のアップークロスメンバ, 440MPa級ハイテン材のジャンクション, No.3クロスメンバと連続した590MPa級ハイテン材のストッパーブラケット, 780MPa級超ハイテン材のサイドシルによって乗員への肩入力, 腰入力, 脚部入力を受け止め, エネルギの吸収とバリア侵入の抑制を図った。衝突初期時の変形を抑えたことにより, サイドエアバックの展開スペースを確保した。

### 3.3 後面衝突安全

新型ロードスターでは車両の重心高を下げるため, フェーエルタンクの位置を120mm下方, かつ110mm前方に移設し床下格納した。その結果, 後面衝突時, 乗員の生存空間をいかに維持し, また, フェーエルタンクの保護性能をいかに高めるかが重要となった。

Fig.8に示すように, まずは衝突荷重をエネルギー吸収量が多い1,500MPa級超ハイテン材のリヤバンパレインフォースメントと590MPa級ハイテン材のリヤフレーム後半の圧縮により吸収する (Fig.8 Absorbing Area)。

フェーエルタンク部はリヤフレームを下方に拡大させ, サスペンションクロスメンバとの組み合わせ構造にて荷重分散させて変形しにくくさせた。この構造によりFR車で肝になるリヤサスペンション周りのボデー剛性も向上し, リヤがしっかりしたFR車の味を引き出している。

その前方に位置する乗員スペースは, 780MPa級超ハイテン材のサイドシルとBフレーム, そして前述したバックボーンフレームにより変形を抑制する構造を実現した。

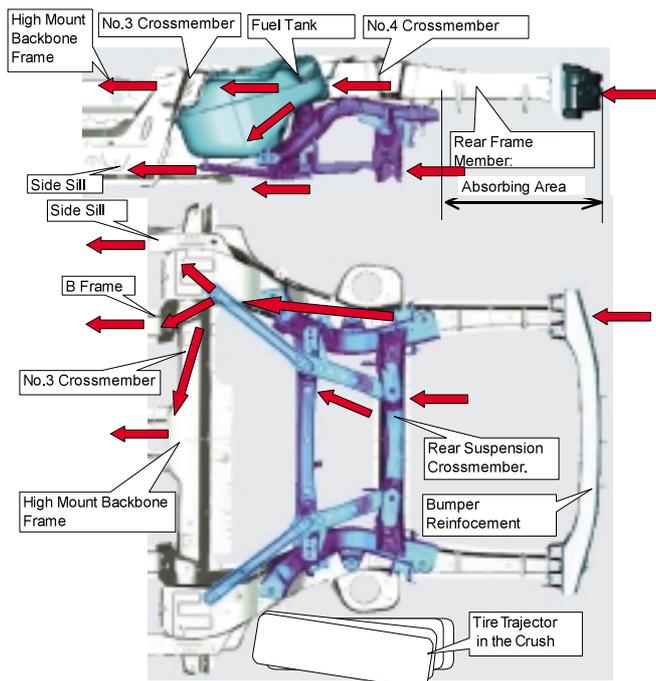


Fig.8 Body Structure for Rear Impact

後面衝突においてもリヤタイヤが前進しリヤフェンダパネルをドア後端に押し付け, 覆い被さってドアが開かなく

なる危険がある。新型ロードスターではRX-8と同様に衝突変形時リヤタイヤの車両内側部を積極的に先当てする構造を採用しタイヤをハの字変形させて (Fig.8下側図) リヤフェンダパネルの変形抑制を図る構造とした。

### 3.4 窓枠強度の確保

新型ロードスターではスポーツカーとして最適なコーナクリッピングポイントの視認性を上げるために, Aピラーの角度を立て乗員側に近づけた。ボデーの開発としてはフロントドアが取り付けられているヒンジピラーに対して上側のAピラーが後にずれて取り付けため, オフセット入力が増えて窓枠部の強度が取りづらくなるレイアウトであった。

この対応のため, Aピラー内部に1,500MPa級の超ハイテンパイプ (Fig.9赤色着色部) を設定し, ピラーの内側パネルは590MPa級ハイテン材と440MPa級ハイテン材を使用し, お互いを効果的にラップ (Fig.9黄色着色部) させながら強化を行った。

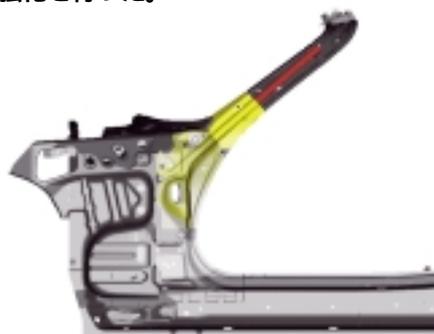


Fig.9 A Pillar Reinforcement

### 3.5 ストラットタワーバーと安全性能の両立

ボンネットを低く見せたいスポーツカーにおいて, ボンネットとエンジンルーム内の部品との隙はぎりぎりまで詰めたい。しかしながら, 事故時における歩行者頭部が, エネルギー吸収しながら侵入するスペースは必要である。

新型ロードスターでは国内向けのRS (Real Sports) 車と輸出のランフラットタイヤ装着車に, カウル結合タイプのストラットタワーバーを設定した。衝突時, タワーバー設定車においても, 歩行者頭部がエネルギー吸収するスペースを増やした。

また, このバーは, 前面衝突時などの大荷重が入力した場合に, ハの字に折れ曲がるように設計し, フロント・ウィンドウ・ガラス面へ侵入しにくい構造とした。

路面入力が必要なタイヤ装着時において, このバーの設定によりロール剛性を向上させ10Hz~20Hzの周波数帯の振動を抑えた。この結果, 剛性感のあるブルブル感の少ない乗り心地を実現した。

ストラットタワーバーが取り付けカウル部は, ストラットタワーバーのマウントとガラスマウントを隔離して, 室内空間への振動侵入防止を考慮した。更にフロント・ウィンドウ・ガラス接着面は閉断面化し, 剛性を上げることによってウィンドウ面の振動を大幅低下させた。閉断面化により鉄板の板厚は下げて2代目に比べ1.2kg軽量化した。

#### 4. ハンドリングに直結する軽量化へのこだわり

スポーツカーのハンドリングを支えるこだわりの一つに低ヨー慣性化がある。ボデー領域においてもホイールベース外側のオーバハング部の軽量化にこだわった。

フロントホイールエプロン部では、初代および2代目では鉄板面と樹脂部品で泥侵入防止の機能を持っていた構造を、鉄板を廃止して樹脂部品だけで機能をもたせることで軽量化した。

シュラウドパネル部についても、ボデー側のシュラウドパネルと、樹脂パンパの上面剛性を出すための鉄板製リテーナーパネルの機能を統合し軽量化した。また、ヘッドランプ固定位置を最適化して、シュラウドパネルに設定していた固定用の鉄板部を廃止した。

初代および2代目では、リヤタイヤ後のトランク横スペースに液漏れ防止型バッテリーを設定していたが、新型ロードスターでは、エンジンルームに標準バッテリーを設定し、ヨー慣性モーメントの低減とユーザ交換費用の低減を図った。

リヤの牽引フックはリヤフレーム下面から下側に伸ばす構造を見直し、1,500MPa級超ハイテン材のリヤパンパレインフォースメントに内蔵する構造とした。ねじ込み式の牽引ボルト込みで0.85kg軽量化した。

リヤ・オーバハング部のリヤ・エンドパネルについては、プラットフォームを強化した結果、板厚をクロードポデー車並まで下げた。普通では見過ごす内容だが、軽量化のこだわりと一品一品、部品仕様を吟味し刈り取った。

#### 5. あくなき剛性感の探求

##### 5.1 車体剛性値

軽量化すれば車は良くなるがそれが全てではない。その変位によって乗員が車体剛性を感じる車体部については、走行時の変位量についてマイクロ単位の目標を設定しCAEを駆使し、構造、板厚の最適化を繰り返した。そして最終的に実車にて確認していった。

今回のCAEによる最適化計算は衝突、NVH、信頼性をあわせて約1,000回の計算投入回数を数えた。Fig.10にCAEによる最適化例を示す。バックボーンフレーム、サイドシル部が赤く変色し構造体として機能していることが良く分かる。

車体全体における剛性値に関しては2代目と比較して曲げ剛性で22%、ねじり剛性では47%という大幅な向上を示している。Fig.11, 12に競合車比較値を示す。



Fig.10 Strain Distribution Chart

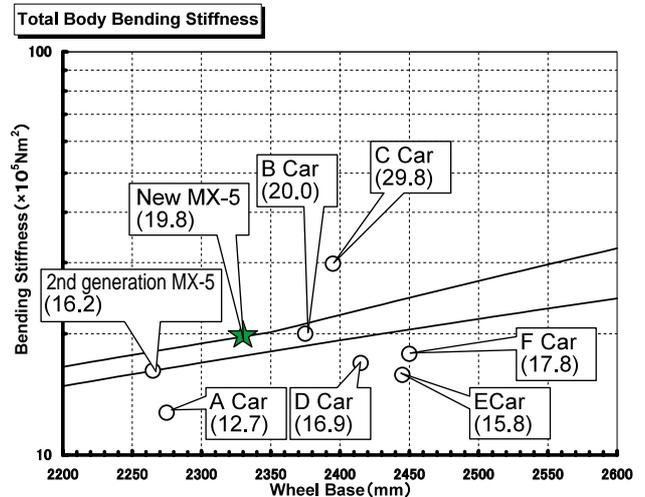


Fig.11 Total Body Bending Stiffness (他社数値はマツダ実測値による)

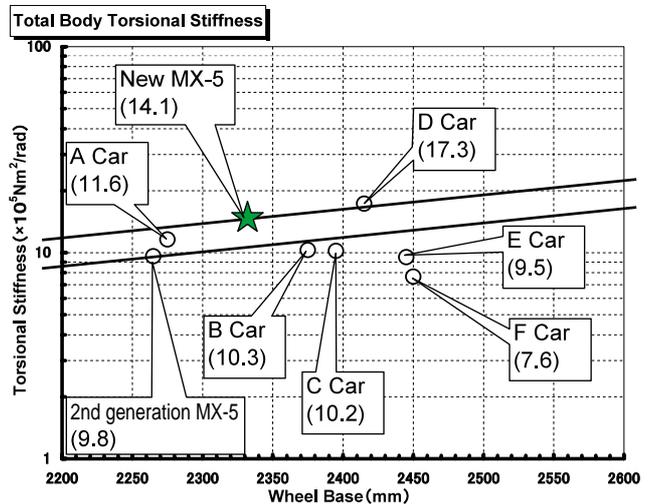


Fig.12 Total Body Torsional Stiffness (他社数値はマツダ実測値による)

##### 5.2 人馬の繋がりに

前章までに、ほとんどの部位において閉断面を大きくとってパネルを薄板化した説明を行ってきた。これでは軽くなるが人間を感じる車体剛性感の向上は十分ではない。

そこで人が感じやすい部位に注目した。普段、運転時人と車が接している‘ハンドルとシート’を重点的に剛性アップし、人が高剛性を感じやすくした。

新型ロードスターのハンドルはインパネフレームに固定されている。このインパネフレームを前述した剛性の高いAピラーのレインフォースメントと直接ボルトアップして(Fig.13)支持剛性の向上を図った。

シート取り付け部は、前側がNo.2クロスメンバに、後側が左右一体のシート取り付けブラケットに固定されている。しかしその下側を覗くと、前述したBフレームと2.5メンバにより前後方向に固められ、かつアンダークロスメンバで左右シートがトンネル下面で横方向に結合されている(Fig.3, 4)。車体全体の動きとシート固定部の動きが連動し、一体感を感じやすい構造とした。

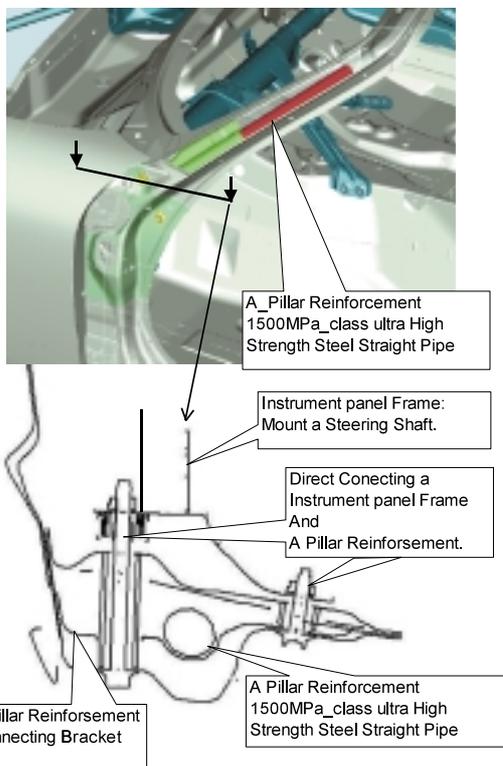


Fig.13 Steering Mounting SECT.

## 6. デザインオリエンテッドと軽量化の両立

新型においてもデザインは、どこから見てもロードスターと分かるプロポーションと、スポーツカーとしての美しさを表現する必要があった。開発チームは、デザイナーから要求される形状を実現するためのフィズ活動や、デザイン条件を極力少なくするために努力した。リアフェンダ面については5回もの修正が入るデザイナーのこだわりに対応し三次元図面データを育成した。

### 6.1 フロント・オーバハングの短縮

デザインコンセプト実現のため、四隅いっぱいまでタイヤが張り出すように前後のオーバハングを切り詰め、フロント部では更に平面から見た前端部のキャンバを絞り込むデザイン提案を受けた。ボデー構造としては、衝突エネルギーを吸収するフロントフレームの長さが短くなる厳しい要求であったが、軽量化技術と技術者の知恵で、高い耐衝突安全性を実現することができた。

一般にはフレームや他部品の板厚アップや補強で約7kg増加するこの課題を、車体生産基準面に対しボデー下面を一律6mm下げて断面を拡大させる（生産現場では6mmキャビンが上に持ち上がる）対応を生産部門と一体になり実施した。更に780MPa級超ハイテン材の活用で最終的に±0kgに抑え、オーバハングは2代目より約30mm短縮した。

### 6.2 窓枠一体構造

2代目ではAピラーアウトパネルとフロントヘッダパネルをミグ溶接によって結合していたウインドシールド窓枠を、新型では一体プレス成形した（Fig.14の青色部）。

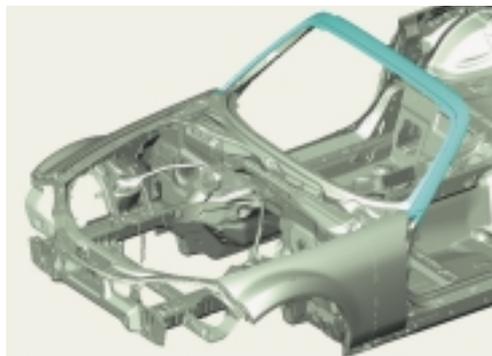


Fig.14 Windscreen Frame

この結果、従来技術では内板面に仕上げ用の作業穴が強度的に空く位置で、パネル接合部は平面が必要、といったデザイン表現の制約を撤廃し、デザインコンセプトからくるサーフェスの流れを自由に表現可能とした。また、溶接熱による鉄板面のメッキ劣化をなくして防錆力を向上させた。

## 7. おわりに

以上新型ロードスターのボデーストラクチャについて、キーテクノロジー構造と特徴を説明した。

成果として2代目よりホワイトボデー質量で13kg軽量化し217kgを達成した。パンパレインフォースメントやシートバック・バー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単位（Fig.1, 5に示す単位）の質量においても1.6kg軽量化し247.5kgを達成した。

現時点はオープンカーのベストな構造を具体化したと自負しているが、今後もベンチマークを続け更なる軽量化と性能向上に努め世界からベンチマークされる車体開発を目指す所存である。

### 著者



木村隆之



池田敏治



中髪修一



福田真祝



田村学



小橋正信