

特集：新型ロードスター

14 **新型ロードスター車体開発におけるCAE適用技術の紹介**
 CAE Application Technology in All-New Roadster Body Structure

田中 祐 充*1 胡 木 隆*2 砂 田 実*3
 Masamitsu Tanaka Takashi Ebisugi Minoru Sunada
 吉 井 群 治*4 松 岡 秀 典*5
 Gunji Yoshii Hidenori Matsuoka

要 約

新型ロードスターは安全性能・高剛性ボデー・乗り心地の主要性能の進化を実現しながら、伝統である軽量化・優れたパッケージングを継承することを開発目標に掲げた。本報では主要性能の進化と軽量化を両立するための構造上のキーポイントとして、①前面衝突向上における八角形断面フロントサイドメンバへの高張力鋼板の採用。側面衝突性能向上のための軽量クロスメンバ構造の採用、②際立った操縦安定性を実現するためのバックボーンフレーム・フロアメンバ構造採用、③オープンボデーでありながら上質なNVH性能を実現するためのパワープラントフレーム構造の開発、等について紹介するとともに、開発の各段階で適用した最新のCAE技術について紹介する。

Summary

New MX-5 was targeted to inheriting its traditional weight reduction and excellent package while realizing the development of primary performances : safety, highly rigid body, and riding comfort. This paper covers three structural key points for the compatibility between weight reduction and the development of primary performances : ①Adoption of high tensile steel panel for an octagonal section frame in improvement of frontal impact protection. Nurturing lightweight structure of cross-member, aiming at improving side impact performance. ②Adoption of backbone frame and floor member structures for realization of outstanding driving stability. ③Development of a power plant frame structure to realize superior NVH performance in spite of its open body structure. The latest CAE technologies applied to each development phase are also introduced in this paper.

1. はじめに

新型ロードスターの商品コンセプトは『人馬一体』『Lots of Fun』の継承と進化である。このため、開発領域においては、主要性能における進化を実現しながら、ロードスターの伝統である軽量化・優れたパッケージングを継承することを目標に掲げた。主要性能の進化とは、①安心してドライビングを楽しむための世界最高水準の安全性能を実現する、②人馬一体感の進化を行うための高剛性ボデーの開発、③オープンカーでありながら上質さを体感できるNVH性能の実現である。この中で、軽量化を行いながら主要性能の進化を実現するためには、最新のCAE技術を開発の各段階で適用し、性能向上・軽量化の両面から育成

を行うことが不可欠であると考えた。

本報では主要性能の進化と軽量化を両立するための構造上のキーポイントと、開発に適用したCAE技術について紹介する。

2. 衝突安全

2.1 全方位衝撃吸収ボデー

新型ロードスターではオープンカーにおける全方位衝撃吸収ボデーを実現するために前席乗員の後方にクロスメンバを配置した。クロスメンバは2代目モデルからの追加部品であるため、競合車の最軽量10kgに対し、更にストレッチした8kgを開発目標とした。構想段階からCAE検討を行った結果、クロスメンバをBピラー左右方向につなぐク

*1~4 CAE部
 CAE Dept.

*5 ボデー開発部
 Body Development Dept.

ロスバーとU字型パイプの基本構成とし、それぞれ780MPa級ハイテンと高張力鋼管を採用することで7.76kgと質量目標を達成した⁽¹⁾。また、クロスメンバの質量アップ分をBピラーレインフォースメントやバルクヘッドなどの軽量化で補うことにより、質量アップを行わずに全方位衝撃吸収ボデーを実現した。また、サイドドア上方に配置したインパクトバーを側面衝突のみでなく、前面および後面衝突時の車体変形にも効果を発揮する構造とすることで、アッパーボデーの軽量化を実現している (Fig.1)

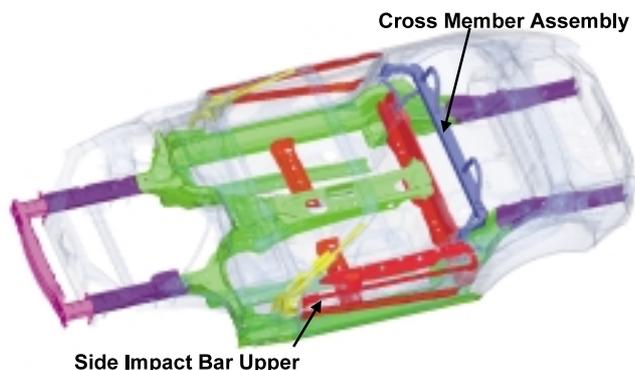


Fig.1 Geometric Motion Absorption Body for New MX-5

2.2 前面衝突安全

新型ロードスターでは、ライトウエイトスポーツとしてのコンパクト感を表現するためにキャンパを絞り込むデザインを採用した。それに伴い、前面衝突時のエネルギーの多くを吸収するフロントサイドメンバは、短い変形量で効率よくエネルギー吸収することが要求された。更に、車体の軽量化と軽衝突時のリペア性能の実現も不可欠な課題であり、フロントサイドメンバの潰れ荷重を高めながら軽量化を図る必要があった。この課題を解決するためフロントサイドメンバはRX-8で採用した8角形断面を基本構成とし、かつ材質を変更し590MPa級から780MPa級超ハイテン材を採用した。

このとき、超ハイテン材は、難加工材であるために、その形状決定には生産性を配慮する必要がある。そこで、構想段階から生産実現性を踏まえたCAE検討を実施した。結果、フレーム断面やビード位置・形状の改善とスポット溶接点の増加により、安定した潰れモードと高いエネルギー吸収効率の両立ができる構造を見出すことができた (Fig.2)

これにより、780MPa級ハイテン材の採用が可能となりフロントサイドメンバの質量を2代目モデルから増加させずにエネルギー吸収性能を達成することができた。

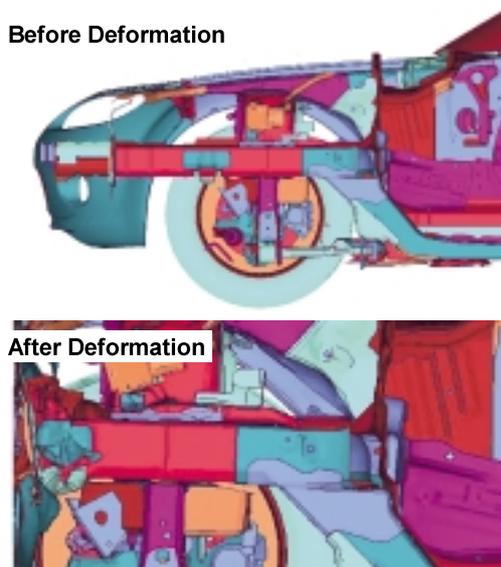


Fig.2 Front Side Member Deformation

また、フロントサイドメンバからの荷重入力を支えるダッシュ廻りの基本構造は、衝突時の入力をBフレーム、バックボーンフレームおよびサイドシルに効率よく分散させるために、RX-8と同様の三つ又フォーク形状を採用した (Fig.3)。オープンカーでは通常のクローズドボデーと異なり、衝突時の入力の大部分をアンダーボデーで受け持つことが重要になる。そのため衝突時の入力を三つ又フレームからアンダーボデーへ効率的に荷重伝達するように、結合部材の最適化やレインフォースメントの適正化を行い、各部の軽量化を実現した (Fig.4)。またキャビン変形を抑制するため、ドアを構造部材として荷重伝達させることで、ヒンジピラー入力によるキャビン変形の増加を抑制した (Fig.5)

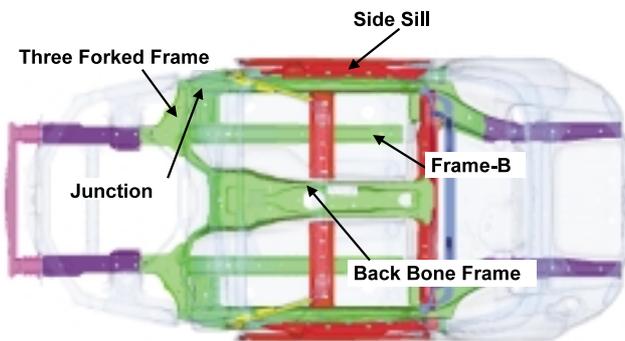


Fig.3 Key Structure for Frontal Impact

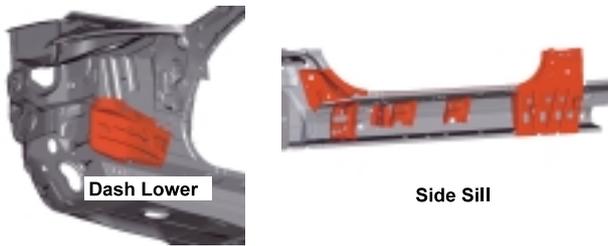


Fig.4 Structure Optimization

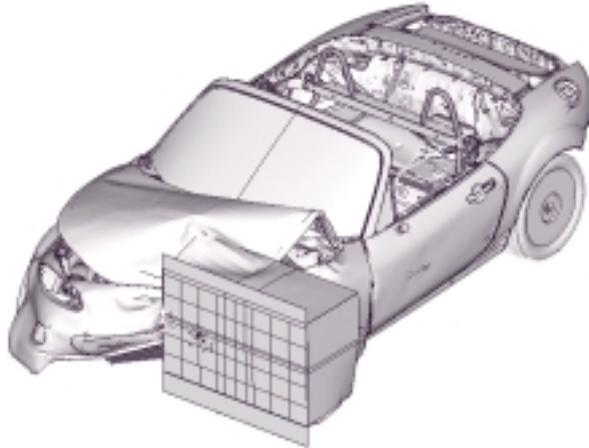


Fig.5 Frontal Impact Analysis Model

2.3 側面衝突

ロードスターのような車高の低い車ではハニカムバリアと乗員の上下方向のラップ量が増加するため、乗員位置での車体およびドアの侵入量低減、ドアトリムでの衝撃吸収特性の向上による対応を行った。まず、車体およびドアの侵入量低減と軽量化を両立させるため、サイドドアに上下2本のインパクトバーを配し、衝突時の荷重をBピラー左右方向につながるクロスバーとフロアクロスメンバに伝達させるレイアウトとした (Fig.6)。

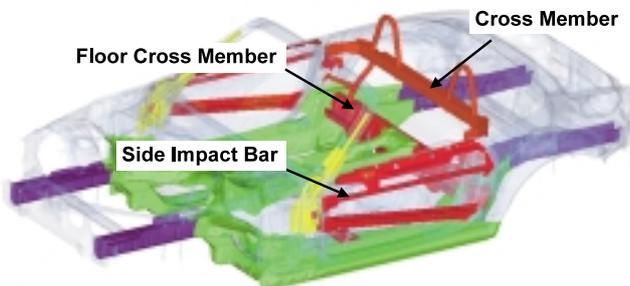


Fig.6 Key Structure for Side Impact

車体系の軽量構造実現を行うためのCAE検討の一例として、クロスメンバとBピラーの結合部を構成するリンクブラケットの検討事例を紹介する。リンクブラケットの側面衝突時の機能はBピラーからの左右方向入力を後方に位置

するクロスメンバに伝達させることである。このときシート最後端位置とソフトトップ位置をかわし、前後方向のオフセットを大きく取った形状とする必要があり、左右方向の伝達荷重目標との両立が課題であった。初期の図面形状をCAE評価した結果、部材の折れ部に応力集中をおこしており、また加工性からハイテンの使用ができないため、このままでは対策質量が増加することがわかった。この課題を解決するため、設計・加工メーカーと協力して構造案出しを行い、CAE検討を繰り返した。結果、応力集中部に590MPa級のパイプを角型に成型したものをを用いることで伝達荷重目標が達成でき、リンクブラケットを4ピース構造とすることでハイテンの加工が可能となる構造を見出した。これにより、初期の図面形状に対し、質量増加なしで性能向上を行うことができた (Fig.7)。

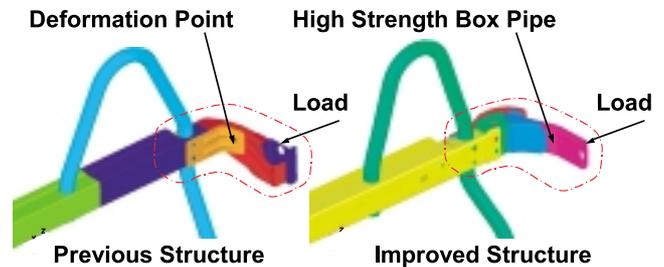


Fig.7 Link Bracket Optimization

次にドアトリムの衝撃吸収特性の育成事例について紹介する。ドアトリムは衝突時にドアと乗員の間で衝撃吸収を行う役割をもつ。このときトリムが硬すぎると乗員の傷害が大きくなり、柔らかすぎるとトリムでのエネルギー吸収ができない。したがって、側面衝突開発では、図面段階で狙いの荷重特性を満足するための構造化を行うCAE技術が重要となる。そのため、まず、ドアトリム材料と衝撃吸収パッドの応力-歪特性を使ってFEMモデル化を行い、荷重特性を予測する基盤技術を確認した。Fig.8は乗員胸部の打撃位置における衝撃吸収特性のCAE結果とテスト結果の比較である。この技術を用いることにより、図面段階で衝撃吸収目標を達成する構造が得られ、テスト結果に対し±10%の予測精度を実現することができた。同様に、腰位置における衝撃吸収パットの配置や、アームレストの衝撃吸収構造などにもこの手法を用い、図面段階で内装構造の育成を行った。

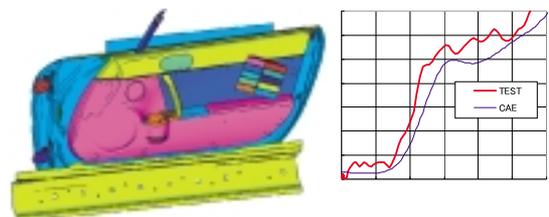


Fig.8 Interior Trim Optimization for Side Impact

車両各部の構造育成を行ったうえで、乗員傷害値の性能検証を車両レベルで実施するため、Fig.9に示す車両・内装・FEMダミーによるシステム解析を適用した。これにより図面段階で側突現象のメカニズムを分析し、車両各部における構造の更なる育成を行うことで、開発の各段階における図面品質向上による開発の効率化を行った。

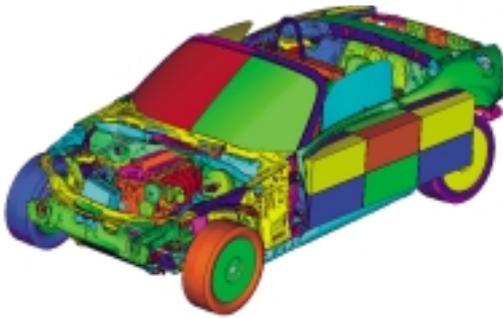


Fig.9 Side Impact Analysis System Model

2.4 後面衝突

後面衝突では、マツダが独自に定めた80km/hオフセット後突時の燃料漏れ防止に対応するため、様々な対策を織り込んだ。リヤサイドフレームについては後突時のエネルギー吸収を向上させるため、590MPa級ハイテンを採用し、軸方向の変形を発生させるよう形状のストレート化を行った。また、衝突時のタンクエリアの変形を抑制するためキックアップとサイドシル結合構造の強化、大型断面化、および590MPa級ハイテンの採用を行った (Fig.10)。解析結果をFig.11に示す。

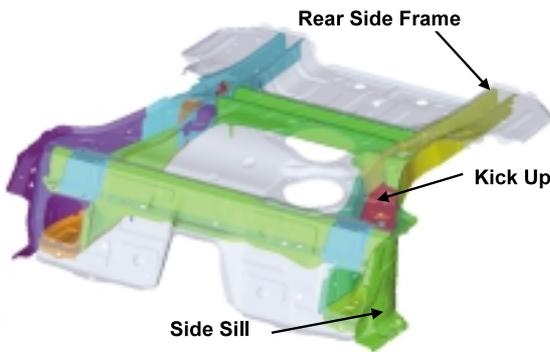


Fig.10 Key Structure for Rear Impact

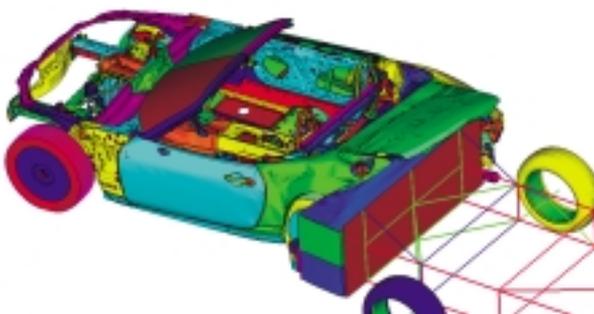


Fig.11 Rear Impact Analysis Model

2.5 歩行者保護安全

スポーツカーは、ボンネットを低く見せたいというデザイン要望があるが、エンジンルーム内の部品との隙が少なくなり歩行者保護安全において頭部のエネルギーを吸収するスペースが確保し難くなる。そこで、衝撃をボンネット全体で効率よく吸収する構造としてRX-8でも採用したショックコーンアルミボンネットを採用した (Fig.12)。CAEでは、新型のデザインにあわせてボンネットインナやアウトアおよびヒンジやストライカーレインフォースメントの形状・板厚・材質などの最適化を図り、歩行者保護性能は元よりボンネット剛性など各種性能要件を満たしながら、最終的にはボンネット質量を2代目モデルと同等まで抑えることを実現した。

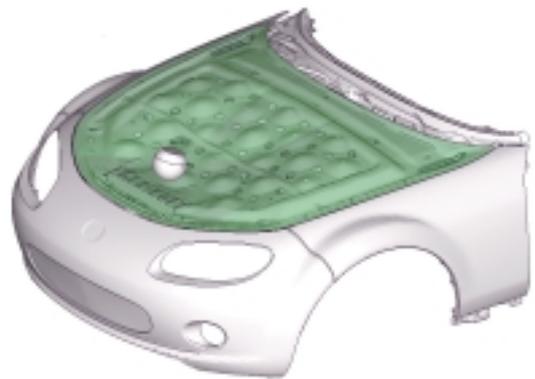


Fig.12 Shock Cone Aluminum Bonnet

3. 車体剛性, NVH

3.1 車体剛性

ロードスターの特徴である、際立った操縦安定性を実現するためには、サスペンションの性能はもとより、サスペンションから入力される力をしっかり受け止める高剛性の車体を開発する必要がある。しかし、一般的に剛性の向上には車体補強による質量の増加を伴うため、補強質量の抑制は大きな課題となる。そこで、まず、RX-8で採用しているバックボーンフレーム構造 (Fig.13)を採用し、曲げ、捻りという車体の全体的な剛性のポテンシャルアップを図った。

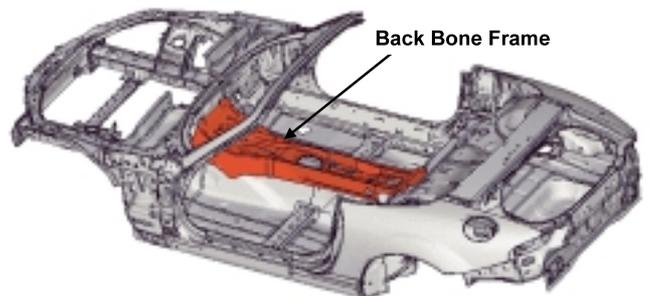


Fig.13 Back Bone Frame Structure

CAEでは、車体の曲げ、捩り剛性に加えて、車体のしっ
かり感と関係が深い局部剛性の向上に注力した。局部剛性
に関しては、Fig.14に示す車体各部の対角変位を指標とし
て採用し、その低減と軽量化を検討した。ここで、対角変
位は4輪多軸加振機を用いて実走状態を模擬した時の変位
であり、CAEでも同条件となるよう計算条件を工夫した。

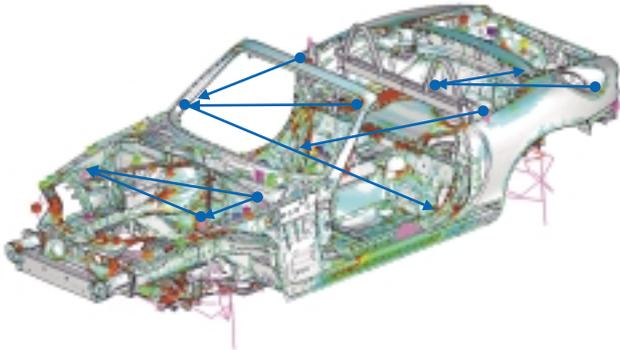


Fig.14 Body Diagonal Displacement Evaluation Point

更に、オープンボデーで特有の、フロントボデーとリア
ボデーの剛性の不連続性にも注目し改善を図った。Fig.15
は車体を捻ったときのアンダーボデーのフレーム類の捩り
角を表した線図であるが、更にこの線図の傾きを見ること
により剛性の不連続な箇所を特定した。

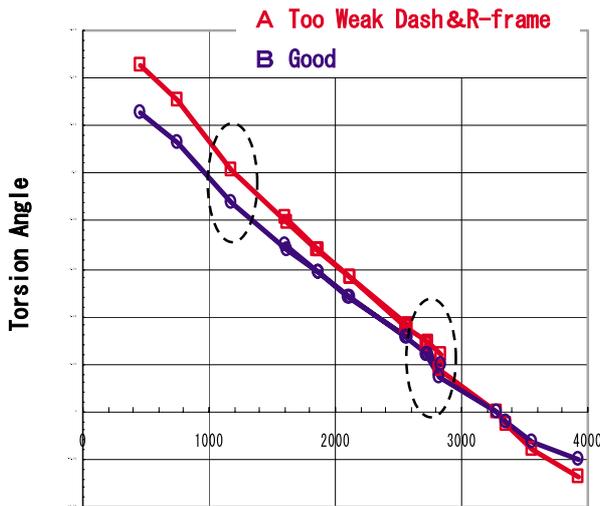


Fig.15 Body Torsion Characteristic

以上の検討を行うことで、トンネル部下のアタッチメン
トや、フロントバンパレインフォースメントといった局部
剛性を効率的に向上させる対策を織り込み、車体の軽量化
に貢献することができた (Fig.16)。

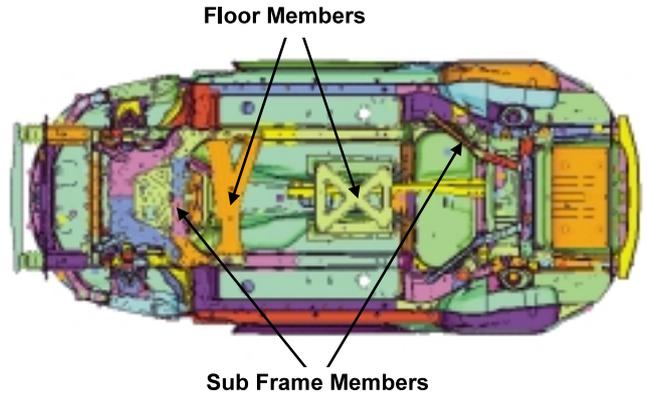


Fig.16 Body Attachment Structure for Rigidity

3.2 アイドル振動

オープンボデーの低周波NVH開発で問題となる現象と
して、車体の捩り共振に伴うアイドル振動、シェークなど
がある。アイドル振動開発では、関係する車体、ステアリ
ング、エンジン、パワープラントフレーム (以下PPF) と
いったユニットの共振周波数をアイドル域から遠ざけるこ
とで安定した性能を確保することとした。

車体の捩り共振周波数の目標は、エンジン剛体共振周波
数とアイドル回転の下限の周波数との間にもってくるこ
ととしたが、これには捩り共振周波数をこれまで以上に高
精度で予測することが要求された。オープンボデーは、ク
ローズドボデーにおけるルーフでの荷重分担が期待できな
いため、クローズドボデーに比べサイドドアの影響が大き
くなる。このため、サイドドアの挙動を正確に模擬する必
要があり、サイドドア有無での加振テストなどを繰り返
してCAEの結果と比較することでモデルの精度を向上させ
た。このモデルを用いて車体の捩り共振周波数をコントロ
ールする検討を実施したが、前述の車体剛性向上に伴い捩
り共振周波数がアイドル域に入る懸念が出てきたため、ア
イドル域下限を狙って補強を検討した。

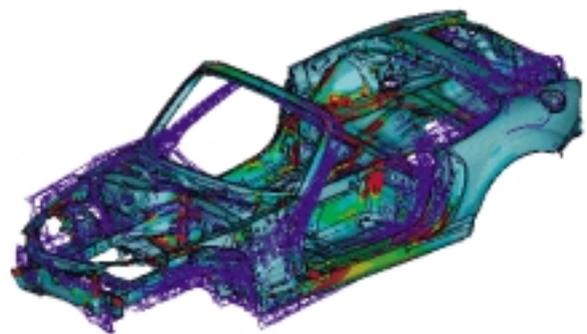


Fig.17 Torsion Body Mode

更に、PPF振動では、RX-8の開断面構造を軽量化しつつパワートレインの共振をコントロールする検討を行った。PPFの構造検討に際し、パワートレイン系をばねマス、PPFをFEMで表現したユニットモデルを使用した。結果、Z型の開断面構造をとることで、PPFの曲げ、モードの連成を回避してパワートレインからの入力を低減しつつRX-8のPPF質量を半減することができた。

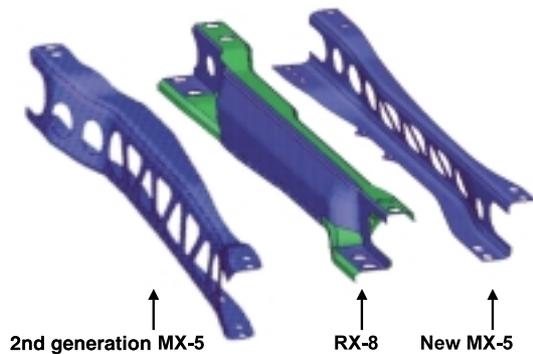


Fig.18 Power Plant Frame Structure

4. おわりに

新型ロードスターは部門・社内外を問わず関係者一丸となって軽量化に取り組んだ。開発段階においても性能向上のための対応策を検討する過程で、いかに質量をかけずに対応するかが重要課題であった。最終的に採用された性能向上対策は、生産・加工工程や材料の領域まで踏み込んで始めて実現したものがほとんどである。設計部門を通じ、ご協力いただいた部品・加工・材料メーカーの方々に感謝するとともに、今後も、我々CAE部門の技術力向上により、よりよい商品をお客様にお届けできるよう努力していく所存である。

参考文献

- (1) 三木ほか：オープンカーにおける高強度・薄型クロスメンバの開発，マツダ技報，No.24 (2006)

著者



田中祐充



胡木 隆



砂田 実



吉井群治



松岡秀典