

特集：新型ロードスター

22

新型ロードスターのPTシステムNVH
PT System NVH of New Roadster

小泉 陽*1 児玉 真吾*2 陳 宇*3
Yoh Koizumi Shingo Kodama Yu Chen

松岡 和洋*4
Kazuhiro Matsuoka

要 約

新型ロードスターは、SKYACTIV技術の適用により走りと燃費を大きく進化させた。このために必要な軽量化、エンジントルクの向上、エンジン低回転領域の使用拡大は、車体応答特性の悪化、起振力のレベル増大、周波数の各種共振周波数との近接等により、一般的にはいずれもNVHの悪化を招く。ここで問題となるNVH現象は、起振力となるエンジンやトランスミッション、伝達系となる駆動系やPTの剛体振動系、またサスペンションや車体といった車両全体にわたる構成要素が相互に影響しあいながら一体の系としてふるまう現象であり、PTシステムNVHと呼ぶ。PTシステムNVHの設計のためには、文字どおりシステムとしての最適が必要となるが、マツダでこれまで整備を進めてきたMBD (Model Based Development, モデルベース開発) のプロセスを活用することにより、優れたNVH性能を保ちながら高い「人馬一体」性能と低燃費を実現した。

Summary

Driving performance and fuel efficiency were greatly improved for Mazda all-new Roadster with SKYACTIV technology. To achieve both of them, weight reduction, engine torque increase and more frequent use of low engine speed range are required, which end in the deterioration of body response and excitation level, and put excitation force frequency closer to the resonance frequency of the vehicle, generally degrading NVH. The NVH phenomena are called "PT system NVH" as the components of vehicle overall including engine and transmission (excitation force), drivetrain and PT rigid body system (transfer system), suspension, and vehicle body interact each other and act as one, affecting each other's vibrations. Therefore, to properly design the PT system NVH, optimization of the whole system is necessary. The process of MBD (Model Based Development) that had been developed in Mazda was applied to realize the excellent "Jinba-Ittai" dynamic performance and fuel efficiency without compromising NVH performance.

1. はじめに

新型ロードスターは、大幅な軽量化と低速トルクを生かした走りの進化を、燃費改善とともに実現した。振動騒音 (NVH) は、気軽に楽しめる走りの気持ち良さのため、乗っていて楽しい、Zoom-Zoomを彩るエンジンサウンドとともに、こもり音等の不快な振動騒音現象が抑えられた、上質な室内空間を目指した。

パワートレイン (PT) の動作により生じるNVH現象は、エンジン、トランスミッション、駆動系といったPTの構成要素はもちろん、PTのマウント系、サスペンション、車体等の広範囲のコンポーネントが相互に複雑に関与する。この、さまざまな要素が一体のシステムとしてふるまう

NVH性能を迅速に最適設計するため、これまでマツダで整備を進めてきたMBD^{(1),(2),(3),(4)}を活用した。

本稿では、新型ロードスターのPTシステムNVHの最適設計の考え方と事例を、当社が進めているMBDの概要とともに紹介する。

2. PTシステムNVHとマツダのMBD

2.1 PTシステムNVH

PT NVHとは、PTの起振力により生じるNVH現象を指し、エンジン始動時の振動、アイドル中の振動、走行中のこもり音、ギャノイズ等、エンジンの始動から加減速、停止まで、車のあらゆる運転シーンにおいて、低周波から高周波まで可聴域全域にわたる幅広い周波数の音、及び振動

*1~4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

からなる。これらの現象には、起振力を発生するエンジン、トランスミッション等の他、発生した力を伝達するマウント、吸排気系、駆動系、サスペンション、伝達された力を受けて乗員が感知する振動騒音を発生するボデー等、すべての車両構成要素が関与する。

そしてこれらの関連要素は、強い相互作用を及ぼしあいながら複雑に応答する。例えば、高い変速段における低回転域のこもり音では、エンジンのトルク変動がフライホイール、トランスミッション、クラッチダンパ、ドライブシャフト、等で構成される駆動系のねじり振動を励起し、この振動が更にエンジン、リアデフ、PPF (Power Plant Frame)、マウントで構成される振動系と連成して車体に入力される。そして車体に入力された振動は、更にボデーシェル、各種のふた物、車室内空洞の共鳴等と連成して乗員位置の音や振動となる。このようにPT NVHは、関連する要素が一体の系として相互に影響しあうため、本稿では特にPTシステムNVHと呼ぶ (Fig. 1)。

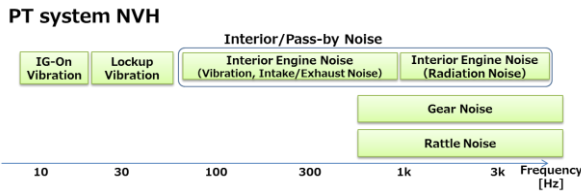
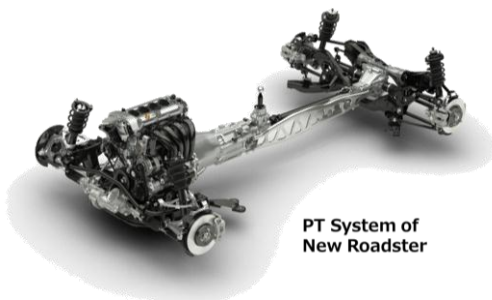


Fig. 1 PT System NVH

2.2 マツダのMBD

PTシステムNVHは、前述のとおり多くの要素の相互作用を伴うため、NVH性能向上のためにはこれらの要素を一体のものとして同時に最適化しなくてはならない。また関連要素が広いことから影響をあたえる性能も幅広く、加速応答、操縦安定性、乗り心地、燃費等もNVHと同時に最適設計する必要がある。

当社では、1990年代に開始したMDI (Mazda Digital Innovation) の活動をはじめとして早くから、旧来の実験に基づく試行錯誤開発から机上開発による合理的かつ効率的な開発への移行に取り組んできた。最適設計の対象は、古くはユニットの局所的な構造の設計パラメータ最適が中心であった。しかし近年ではモデルの大規模・高精度化に伴い、開発初期段階でのPTシステムNVHの最適化、また更

に早い段階では、市場におけるさまざまな使われ方の模擬による性能要求の把握にもCAEを活用している。一方開発後期には、詳細なプラントモデルと制御モデルによる制御パラメータのキャリブレーションへの適用も行っている。このように、マツダにおける開発の机上化は、単に実機試験をシミュレーションに置き換えることによる効率化にとどまらず、CAEの全面活用による詳細設計、構想設計、制御設計、生産品質開発、更には市場要求性能の把握にまで広範囲に及んでいる (Fig. 2)。

マツダでは、一般的には制御のシステム設計として使われることが多い“MBD”の語を、上記のような車両設計における初期のシステム設計から構造設計、制御のパラメータ設計等まで含めた広い概念ととらえている。以後、PTシステムNVHの設計を、MBDプロセスに則って新型ロードスターの開発に適用した例を紹介する。

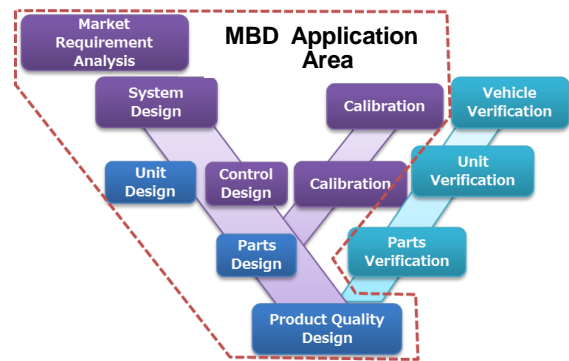


Fig. 2 MBD Application Area

3. 新型ロードスターのPTシステムNVHの課題に対するMBDの適用

3.1 PTシステムNVH性能の開発課題

一般的にPTシステムNVH性能は、走り、燃費性能と相反する。したがって、走り、燃費性能の劇的な向上を目標に掲げる新型ロードスターにとっても、これらの諸性能を高いレベルでバランスさせることが大きな課題であった。

例えば、走り性能、燃費性能の向上のための低速トルク向上やATのロックアップ範囲拡大は、こもり音の起振力となるエンジントルク変動を増大させる。アイドリング時の燃費改善のためのエンジン低回転化や、操縦安定性の向上などからのPTマウントの高剛性化はPTシステム共振周波数とエンジン回転の近接をまねくため、車体振動を悪化させる。また、車両の軽量化、例えばPTケースやボデーパネルの薄肉化、遮音材の削減は、振動応答や音響特性の増加を通じて車内音を悪化させる。

3.2 MBDによる課題解決へのアプローチ

走り、燃費性能、NVH性能は、PTマウントシステムや部品構造に大きく影響される。特にPTのマウントシステムは車両の基本骨格を大きく左右するため、実機のない段

階で慎重に選定する必要がある。新型ロードスターを開発するにあたり、これまでの開発で培ってきたMBDの技術とプロセスを活用し、PTマウントシステムの選定と、部品形状の検討を行った。

CAEモデルはPTシステムNVHに関与するさまざまな要素、例えばエンジン、トランスミッション、PPF、デフ、駆動系や排気系等をモデル化の対象とした。まず低周波性能向けのモデルを使用してPTの懸架方式やマウント等の基本構造を決定し、更に高周波向けのモデルを用いてエンジン、トランスミッションやPPF等の詳細形状を設計した。Fig. 3, 4にそれぞれ低、高周波現象のモデル外観を示す。評価する性能や検討する内容により、必要な自由度、再現すべき現象の性質が異なるため、モデルを使い分けた。

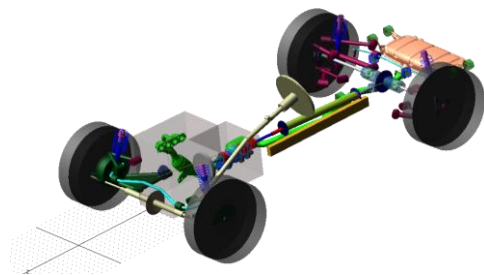


Fig. 3 CAE Model for Low Frequency NVH

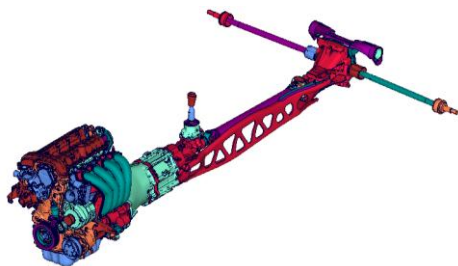


Fig. 4 CAE Model for High Frequency NVH

4. PTシステムNVHの設計

4.1 PT懸架方式の選定

開発最初期に、NVHや走り性能と質量の基本的な素性を決定づけるPT懸架方式の選定を行った。候補として、エンジントランスミッションとリアデフを独立して懸架する一般的なトランスミッションマウント方式 (a) と、エンジントランスミッションとリアデフをPPFで接続してPTシステムを一体として懸架するPPF方式 (b) を検討した (Fig. 5)。

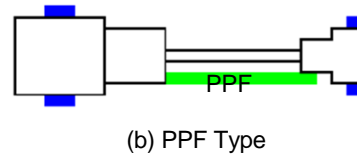
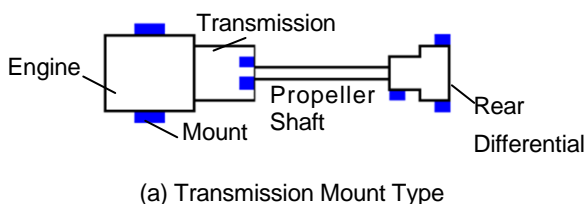


Fig. 5 PT Mount Type

選定の基準は、(1) 低周波NVH性能から要求されるPTシステム共振と、ボデー、サスの共振、PT起振力との周波数配置 (モーダルアライメント) のコントロール性、(2) 走り性能の要求としてエンジントルク入力に対するGの立ち上がりの速さと収束性、(3) シャシー側のフレームも含めた重量とした。(1) ~ (3) について、独自の指標を用いて評価し比較した結果、Fig. 6に示すとおり(1)については同等だが、(2) (3)はPPF方式が有利であることが分かった。これにより、歴代のロードスターで採用してきたPPF方式の優位性が改めて確認され、新型ロードスターでもこの方式を一層進化させることとした。

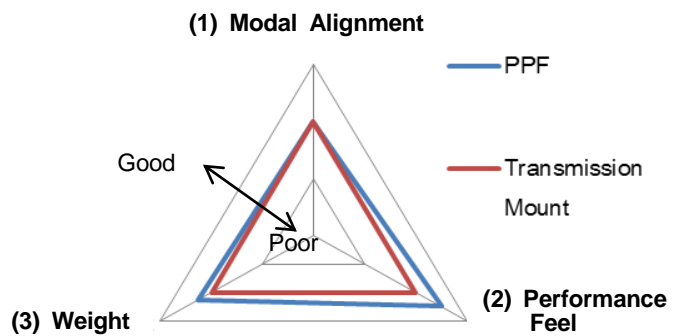


Fig. 6 Comparison of PT Mount Type

4.2 アイドル振動、低回転こもり音

本節では、PT全体にわたる基本構造である、エンジン-PPF-デフのマウント系と、駆動系ねじり振動の設計を決める、アイドル振動と低回転時のこもり音について述べる。

(1) アイドル低回転化と振動の両立

燃費改善のためのアイドル低回転化で、起振力とPT剛体共振の周波数が近接する。また、PTの軽量化や乗り心地の向上のためのPTのマウント高剛性化は、いずれもPT剛体共振周波数を上昇させるため、一層起振力周波数と近接する。そこで以下の施策によりアイドル低回転化と振動の両立に取り組んだ。

① PTロール共振周波数上昇の抑制

アイドル振動に大きく寄与するPTの剛体ロール共振周波数は、主にPTの慣性とロール剛性で決まる。ロール剛性はエンジンマウントの上下剛性と左右スパン (距離) の

積で表される。乗り心地向上のために必要な上下剛性を保ちつつロール共振周波数を低下させてアイドル振動の悪化を防ぐため、左右スパンを縮小した (Fig. 7)。初期設計にこの要件を考慮することによりステアリングシャフトとマウントの干渉を回避するレイアウトを確保し、マウントスパンを前モデル比10%程度短縮した。これにより前モデル比でPTを軽量化し、かつマウント剛性を向上する中でPTロール共振周波数の上昇を抑制できた。

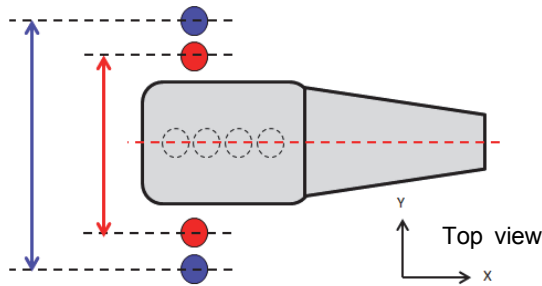


Fig. 7 Engine Mount Lateral Span

② PT剛体共振モード形状の最適化

アイドル時のエンジントルク変動は主にPTのロール運動を励起するが、共振モード間の連成によりヨー共振が励起され、アイドル時の車体の左右振動が悪化する。新型ロードスターでは、PT重心と弾性ロール軸（エンジンの動的なトルク入力に対してPTが回転する軸）が接近するようエンジンマウントの剛性配分と上下方向取り付け位置を設計した。この結果ロール共振とヨー共振の連成を改善し、アイドル時のヨー共振の励起を減少できた。

以上により、乗り心地要件を満足しながら振動悪化させることなくアイドル低回転化を実現した (Fig. 8)。

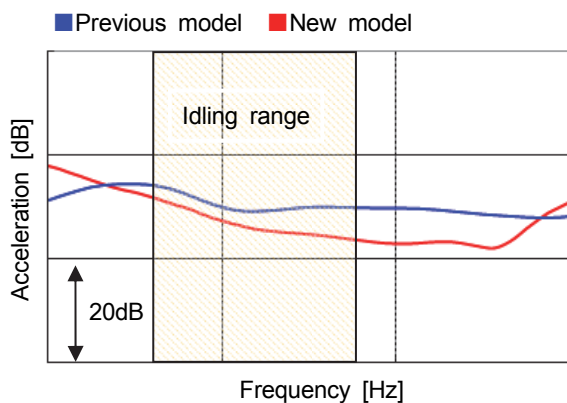


Fig. 8 Floor Vibration During Idling

(2) AT車ロックアップレンジ拡大とこもり音の両立

低燃費化のためのATロックアップレンジ拡大によるエンジントルク変動周波数の駆動系の共振周波数への近接は、こもり音及び振動を悪化させる。この現象に関与する、駆動系ねじり共振、及びデフの剛体共振特性を改善した。

① 駆動系2次共振特性の改善

駆動系のねじり共振周波数を決める重要なばね要素にロックアップダンパがある。新型ロードスターでは前モデル比大幅に低剛性なダンパ (Long Travel Damper) を採用することで、駆動系2次共振周波数を低下させ、常用域の振動応答特性を大幅に改善した (Fig. 9)。

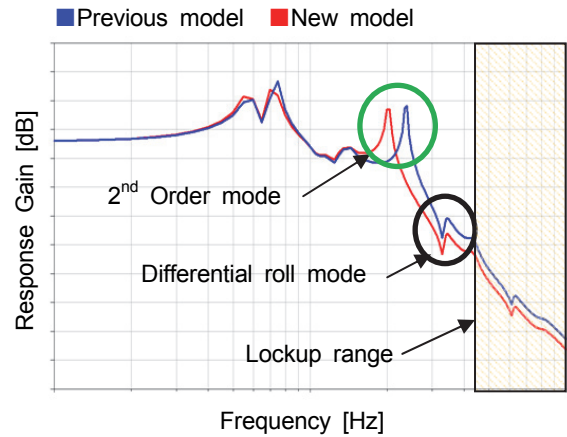


Fig. 9 Driveline Frequency Response

② デフロール共振特性の改善

車体振動の観点から、デフのロール共振周波数はエンジントルク変動周波数から離すために低周波化することが望ましいが、低過ぎるとアイドル振動の悪化につながるため、適正な配置が重要である。デフは前モデルより軽量化したため、デフマウントの剛性を下げ、デフロール共振の周波数上昇を抑制し、アイドル振動とロックアップ時の振動が両立する範囲にデフのロール共振周波数を配置した。

以上の取り組みで、前モデルよりロックアップ時の振動を大きく低減し、NVHの悪化を招くことなく大幅なロックアップ領域の拡大を実現した (Fig. 10)。

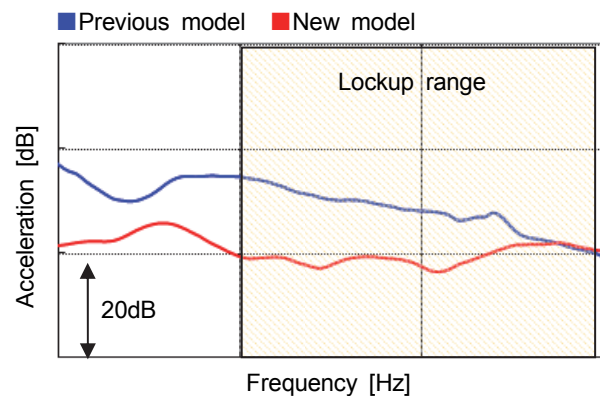


Fig. 10 Floor Vibration During Lockup

4.3 高回転こもり音

直列4気筒エンジンでは、ピストン、コンロッドの往復慣性力によるエンジン回転2次成分の力に起因する問題が非常に多い。近年のFF車はPTの高剛性化が進んでいるが、

FR車ではトランスミッションの細長い構造により、エンジンとトランスミッションが組み合わされて生じるPTの曲げ/捩りモード (PPB : Power Plant Bending) が比較的低い周波数に存在する。このPPBがエンジン回転2次の力により励起され、振動としてマウントから車体に伝わることで特に高回転で車内のこもり音となる。

新型ロードスターは前モデル同様に高回転エンジンを採用したため、PPBの高周波化に加え、ロードスターの特徴であるPPFと駆動系 (デフやドライブシャフト) の弾性モードの最適設計が課題である。前述のPTマウント系に続いて、PPBや駆動系についても、最適なモード配置・形状となるように取り組んだ。

(1) PPB周波数特性への取り組み

狙いのPPB周波数特性を最軽量で実現するため、トランスミッションケースの形状最適化を行い、必要な部位のみ肉厚を厚くしリブが不要となる構造にした (Fig. 11)。更にこのトランスミッションケースの最適化をエンジンとトランスミッション合わせ面のボルトパターン検討と組み合わせを行い、PPBが成立する最小の結合範囲となるボルト配置を決定した。CAEを活用したこれらの取り組みにより、軽量化しつつ前モデル同等のPPB周波数特性を確保した。

また、マウントブラケットをPPBの節位置に配置し (Fig. 12), PPB起因による振動を車体側に伝わりにくい構造とした。

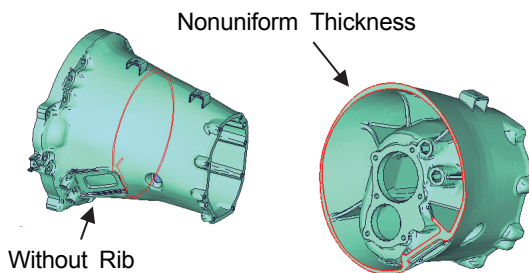


Fig. 11 Transmission Case Optimization

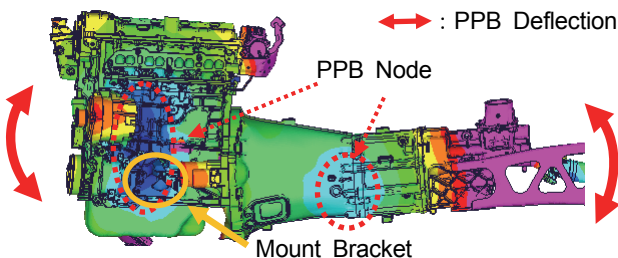


Fig. 12 PPB Mode Shape and Mount Position

(2) 駆動系共振への取り組み

駆動系にはPPF, プロペラシャフト, ドライブシャフトなどのローカルモードに加え、互いに連成するモードが低周波から多数存在する。新型ロードスターでは、他性能

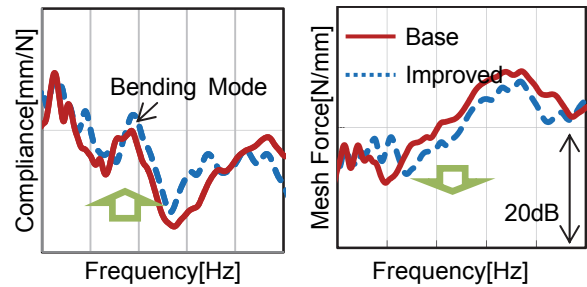
との整合を取りながらPPFの形状最適化, ドライブシャフトのローカルモードにチューニングを施し, エンジン2次振動の伝達を抑えた。

4.4 ギヤノイズ

懸架方式, 及びPT全体にわたる振動特性の最適設計を受け, PTの重要な構成ユニットであるトランスミッションの基本構造及びケース等形状の最適化設計を行った。新開発のマニュアルトランスミッションに対して, ギヤノイズの観点からメッシュフォース, 伝達特性の二つの振動特性に着目して, 軽量化との両立に取り組んだ。

(1) メッシュフォースの最適化

ギヤノイズの起振力であるメッシュフォースは, 対となるギヤの自己コンプライアンスが大きいほどレベルが小さくなるため⁽⁴⁾, 起振力の低下には関連する振動モードの応答を増加させることが有効である。メインドライブギヤの自己コンプライアンスに対してカウンタシャフトの曲げモードの寄与が高いことが判明したため, 信頼性に影響のない範囲でシャフトを細径化し, 曲げ剛性を落としてメインドライブギヤのコンプライアンスを増加させ, メッシュフォースを低減した (Fig. 13)。



(a) Countershaft Compliance (b) Mesh Force
Fig. 13 Mesh Force Improvement

(2) 軽量化と振動特性の両立

走り, 燃費性能の向上のためにトランスミッション, リアデフなどのケース設計において軽量化に取り組んだ。ケースを単純に軽量化し軸の支持剛性が低下した場合, ギヤかみ合い部のアライメントエラーが増加するためギヤノイズが悪化する。そこで位相最適化手法⁽⁵⁾を適用して, 高剛性で軽量な基本形状とした。

例として, リアデフキャリアの位相最適化の結果をFig. 14に示す。リアデフは軽量化のため, 鋳鉄からアルミへの材料置換を実施したが, 位相最適化より算出した効果的なリブの配置により鋳鉄と同等の支持剛性を保つことができた。トランスミッションでも, 前モデルに対して同等のシャフト支持剛性とPPB特性をキープしながら軽量化を実現した。

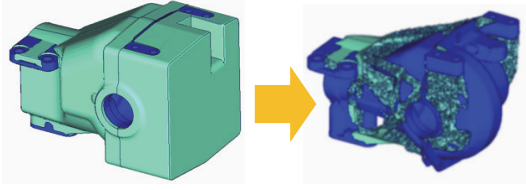


Fig. 14 Topology Optimization of Differential Carrier

また、PPFについても最適化手法を適用して軽量化とギヤノイズをはじめとするPTシステムNVH性能、走り性能の向上の両立に取り組んだ。位相最適化の結果を、断面形状や軽減孔の開け方に反映し、詳細形状については形状最適化も実施した。その結果、前モデルと比較して24%の軽量化を実現した (Fig. 15)。

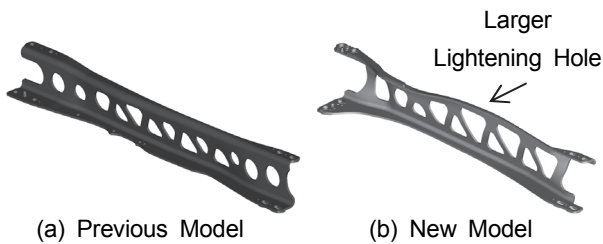


Fig. 15 New and Previous PPF

5. おわりに

マツダが長年進めてきたMBDの最新の成果として、新型ロードスターのPTシステムNVHの開発事例を紹介した。システムCAEモデルの適用による基本構造の最適設計により、従来を大きく上回る走りや燃費性能を、NVH、及び関連する周辺性能を犠牲にすることなく実現することができた。今後更に予測モデルの精細化、精度向上と開発プロセスの進化を進めることにより、「人馬一体」性能、燃費、デザインを極め、マツダのブランド価値を一層磨き上げてゆきたい。

参考文献

- (1) 小泉ほか：駆動系の非線形特性を利用した4WD車の燃費とNVの最適化，自動車技術会春季大会前刷集，No.44-12，pp.5-8 (2012)
- (2) 児玉ほか：駆動軸トルクと振動系の最適化によるi-stopシステムの再始動時振動の低減，自動車技術会駆動系シンポジウム2010前刷集，No.05-10，pp.6-11 (2010)
- (3) 三浦ほか：トランスミッションケース開発における基本骨格形状最適化，自動車技術会駆動系シンポジウム2013前刷集，No.03-13，pp.12-16 (2013)
- (4) 工藤ほか：モデルベースによるSKYACTIV-DRIVEのNVH開発，マツダ技報，No.31，pp.60-66 (2013)

■ 著 者 ■



小泉 陽



児玉 真吾



陳 宇



松岡 和洋