

特集：モデルベース開発

12 モデルベースによる SKYACTIV-DRIVE の NVH 開発

Model Based NVH Development of SKYACTIV-DRIVE

工藤 健志*1

Kenji Kudo

田中 和宏*2

Kazuhiro Tanaka

佐野 徹*3

Toru Sano

要約

マツダは技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」の中で、「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」を高次元で両立することを宣言している。その実現のために SKYACTIV-DRIVE は、理想の変速機が果たすべき使命として定義した「低燃費」「ダイレクト感」「滑らかな変速」「スムーズで力強い発進」を追求した新型自動変速機である。

上記使命を達成するためには全域ロックアップや軽量化が有効な手段であるが、従来の技術では、こもり音／振動やギャノイズなどの NVH 性能が障害となっていた。SKYACTIV-DRIVE の開発では、一括企画に基づく一括開発を行うと共に、モデルベースにより効率的に開発を行うことで、全域ロックアップ、軽量化を実現し、燃費・走り性能と NVH 性能とを高次元で両立させた。

Summary

Mazda's long-term vision of technology development, "Sustainable Zoom-Zoom", declares achievement of both driving pleasure and environmental performance. The newly developed automatic transmission, SKYACTIV-DRIVE, achieves "low fuel consumption", "direct feel", "smooth shift of transmission" and "smooth and powerful start" of an ideal transmission.

The most effective ways to achieve the above are full range lockup and weight reduction, but they cause NVH issues such as booming noise/vibrations and gear noise. For the SKYACTIV-DRIVE, bundled development based on the bundled planning as well as effective model based development method were performed to realize both the full range lockup and weight reduction, resulted in the improvement in fuel economy, driving performance and NVH performance.

1. はじめに

マツダは「走る歓び」と「優れた環境・安全性能」の高次元での両立を実現した革新的な新世代技術“SKYACTIV TECHNOLOGY”を採用した新世代商品群を一括開発した。その中の新型自動変速機(AT)“SKYACTIV-DRIVE”⁽¹⁾⁽²⁾は、従来型ATから最大7%の燃費改善を可能とした上で、総重量・サイズ共に大幅に低減した。更に、発進の容易さを維持しながら、手動変速機(MT)並みのダイレクトドライブフィールを実現した。これらの背景には背反するNVH性能の改善がある。本稿ではモデルベースによってどのようにして燃費・走り性能とNVH性能をハイバランスで成立させたか紹介する。

2. SKYACTIV-DRIVE コンセプト

SKYACTIV-DRIVEの開発にあたり、ATの理想を再定義した。理想のATが果たすべき使命は以下の4つと考え、その実現を目指した。

- (1) 低燃費への貢献
- (2) MTのようなダイレクト感とクイックシフト
- (3) 滑らかな変速
- (4) スムーズで力強い発進性能

低燃費の実現においては、動力伝達ロスの低減とユニットの軽量化に注力した。動力伝達ロスに関してはトルクコンバータのロスが大きいことに着目し、走行中の滑りをなくす全域ロックアップを、軽量化に関しては背反するNV性

*1, 2 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

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

能の根本改善による構造体の大幅な質量低減をそれぞれ目指した。ダイレクト感、滑らかな変速についてはロックアップクラッチ及び変速クラッチを高精度で応答の良い、緻密な制御ができるようにしたいと考えた。スムーズで力強い発進性能についてはトルクコンバータの使用を発進時のみにできないかと考えた。

これら理想実現のためにはロックアップの拡大がキーイネーブラとなるが、ロックアップの拡大は、こもり音／振動やショックなどのNVH性能の悪化を伴うためにこの克服が必要となる。なお、ATのロックアップ状態はトルクコンバータを作動させない直結状態であるため、振動構造上はMTと同等となるが、ATは一般にMTよりも厳しいNVH性能が求められる。これは、MTの場合はお客様が走行段位を自分の意志で選択するため、エンジンの運転領域変化（負荷・回転数の変化）に伴うNVH性能の変化にはある程度納得感が得られる一方、ATは段位などの運転状態がお客様の意図によらず変化するためである。つまりATでのロックアップの拡大はMTと同じ振動構造で、より厳しいNVH目標を達成しなければならないという非常にハードルの高い開発となる。

軽量化に関してもトランスミッション開発の永遠の課題であるギャノイズに代表されるNV性能と背反関係にある。構造の適正化などによる設計は従来からすでに追求されており、多段化の進む中、これまで通りの開発プロセス及び設計技術では大幅な軽量化は困難であるため、開発手法の抜本的な改革から取り組んだ。

3. 開発の考え方

マツダのSKYACTIV技術を搭載した商品群は、パワートレイン（PT）から車両に及ぶすべての領域で同時刷新開発を行った。限られたリソースで効率的に開発するために、マツダでは一括企画に基づく一括開発を行った。これはエンジン、車種、仕向地などの全ラインアップを企画段階から見据え、全体最適となる仕様を一括して決めることで開発効率を向上させるものである。そのために、単に部品を共通化するだけでなく、共通化できない部品であっても、共通の設計コンセプト、共通の特性、共通の生産手法などを目指して開発した。

一括企画の考えは、NVH開発にも適用した。FMEA（Failure Mode & Effect Analysis）をベースに開発初期段階で設計すべきNVH性能と関連する部品・起振力・振動現象を洗い出し、背反性能の見える化などを実施した。その上で全ラインアップを見据え、NVH性能の骨格となるシステム・部品の設計を企画段階から行った。

その開発方法の事例を、前述のロックアップ拡大の弊害である“こもり音／振動”と、軽量化の弊害である“ギャノイズ”について紹介する。

4. モデルベースによる機能配分

性能目標を達成するための機能を、各システム、更に下位層の各コンポーネントへ定量目標として配分することを機能配分と呼んでおり、NVH性能においても、低周波の振動から、高周波のギャノイズまで、一括開発構想に基づいた機能配分を実施している。

このNVH性能の機能配分をモデルベースで効率的に実践するために、実験部門ではNVHの起振力となるエンジン燃焼圧をはじめ、ATやドライブシャフトの振動伝達特性、そして車体の音響感度特性などを分析し、現象解明する一方で、解析部門ではそれをCAEモデルとして再現させると共に、モデルのアセンブリ、計算などの自動化を行い、開発技術として迅速に駆使できるツールを構築した。

また、機能配分する上では、性能寄与度が高いコンポーネントで重点的に対策することが効果的かつ効率的であることから、入力伝達経路の寄与度の調査を、既存車両の実験解析で徹底的に実施した。これをベースに、新世代商品群で新規設計となるエンジンの起振力や制御、PT構造、車両構造等の変化を、モデルで予測することで、重点対策すべきコンポーネントへ確度の高い目標を設定した。

4.1 こもり音／振動の機能配分

車両性能のこもり音／振動目標を、PTの目標に機能配分するために、実験による伝達経路解析（TPA: Transfer Path Analysis）を実施した。車両とPTが結合される箇所であるエンジンマウント、排気系ハンガマウント、サスペンションブッシュの振動入力の寄与度を求め、その寄与度に応じた改善目標を設定した（Fig. 1）。特に寄与度の高いサスペンションブッシュの入力に対しては、それと結合するドライブシャフトのトルク変動入力へ目標値を機能配分したが、この部分に関しては必要となる改善代が大きいいため、車体側の音響感度も改善する配分を行った。

PT、車両の双方でこの機能目標を達成するよう課題解決に向け取り組んだ。

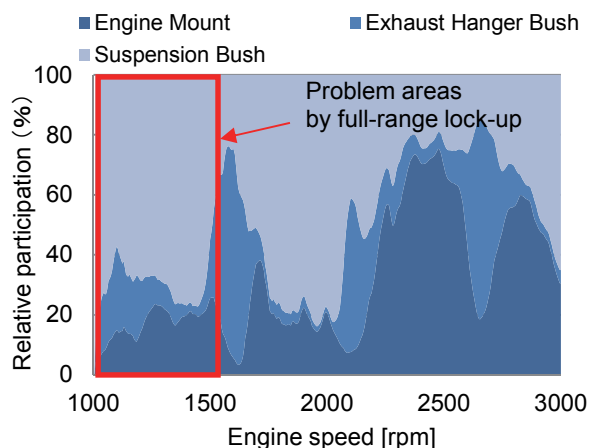


Fig. 1 Contribution of the Body Input by TPA (Transfer Path Analysis)

4.2 ギヤノイズの機能配分

ギヤノイズに関しては、前述のように厳しい軽量化ニーズに加え、静粛性改善、すなわちギヤノイズ自体の改善ニーズがあった。このため、こもり音/振動性能と同様に伝達経路解析を用いて、ユニットの改善すべき箇所を特定し、その改善に注力した。ギヤノイズの場合は、主な振動入力点として、マウントブラケット、そして放射音入力としてケース表面を改善箇所と特定した。

また、そのユニット目標に対して、ユニット内でも機能配分を行った。起振力となるギヤの噛み合い伝達誤差 (TE: Transmission Error) とその噛み合い点からエンジンマウントブラケットやケース表面までの振動伝達特性の目標を定量設定し、その改善に取り組んだ。

5. こもり音/振動改善

5.1 駆動系ねじり振動メカニズム

こもり音/振動の寄与度が高いドライブシャフトのトルク変動は、エンジンのトルク変動と駆動系ねじり振動特性によって決まる。ここで、エンジンのトルク変動はエンジン諸元に依存し、その低減は困難なため、目標の配分はせず、これを条件として扱い、駆動系ねじり振動特性の改善に取り組んだ。駆動系ねじり振動特性は、Fig. 2に示すクラクシャフトから車体までのねじりバネマス系でモデル化できる。ATの主要なねじり振動の共振点は、エンジンが4気筒の場合、エンジンの常用域以下に発生する (Fig. 3)。このため、常用域での振動レベルを下げるには駆動系ねじり二次共振周波数を低周波化して、そのすそ野のレベルを下げるのが有効となる。

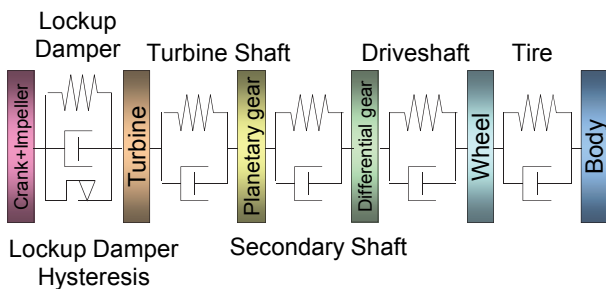


Fig. 2 Schematic Model Structure of Drivetrain Torsional Vibration

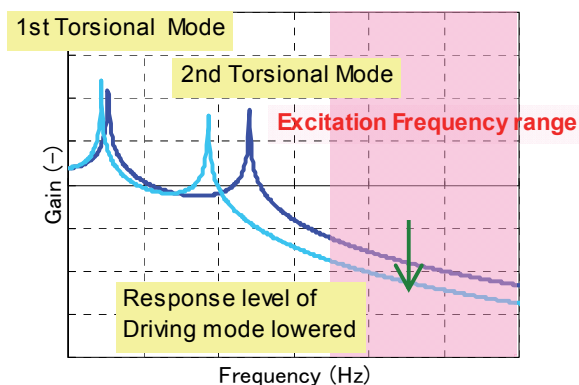


Fig. 3 Drivetrain Vibration Characteristics

5.2 駆動系ねじり振動最適化

駆動系ねじり二次共振周波数を下げるためにはどのようなバネマス配置が良いかをモデルベースで検討した。具体的には、ATのどの位置にダンパを配置するのが良いかを Fig. 4に示すようなねじりバネマス配置にてケーススタディした。駆動系ねじり振動特性からだけではなく、コスト・重量・レイアウトを含めハイバランスする、最適なねじりバネマス配置を検討した。

前述したように、駆動系ねじり二次共振周波数の低周波化を基本としながら、駆動系ねじり三次共振周波数をなるべく高周波へ配置することで、二次共振と三次共振の谷間の低減を狙った。このため、ロックアップダンパの特性に加え、トランスミッションユニット内の剛性も最適化した。

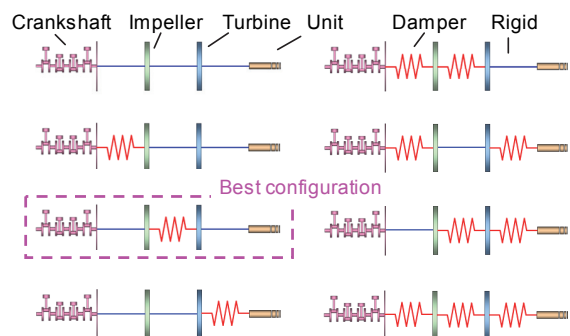


Fig. 4 Case Study of Damper Arrangement

5.3 ロックアップダンパ構造の最適化

前述のバネマスモデルで求めた理想の特性を、より詳細なモデルで具体化した。

ロックアップダンパは従来よりも大幅な低剛性化が必要となった。当初、限られたスペースの中で低剛性化するために、Fig. 5に示すような高トルク域での剛性変化を伴う構造を検討した。しかし、このように大幅な剛性変化があると、それをまたぐ起振力が入力された場合、ダンパ剛性の非線形性により、起振力とは異なる周期の振動 (分数調波振動) が発生し、許容レベルを超えることがモデルで判明した⁹⁾。そこでロックアップの拡大により、トルクコンバータの使用領域が縮小されていることを利用し、トルクコンバータをコンパクト化することで、ロックアップダンパの広角低剛性化を実現した。

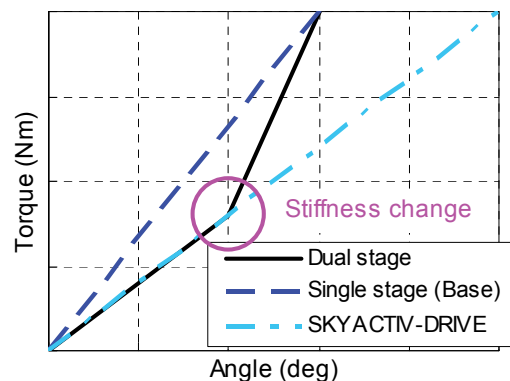


Fig. 5 Lockup Damper Torsional Characteristics

また、ロックアップクラッチについては、摩擦による振動増幅現象であるジャダーを発生させないための要件をモデルで求めた。前述のねじりバネマスモデルに減衰モデルを加え、摩擦面の μ -V特性に起因する負減衰が、ねじり振動全体の減衰より大きくならないように、 μ -V特性の目標を決めた。これを実現するために、セグメントタイプの湿式多板クラッチを採用し、冷却性能を高めることで対応した。

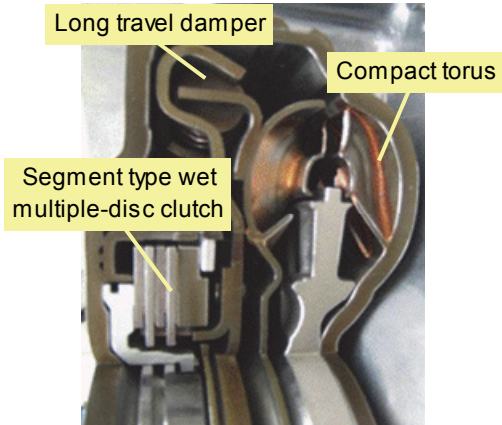


Fig. 6 Torque Converter Structure

これらのモデルによる構造の最適化を行い、Fig. 6のようなトルクコンバータ、ロックアップダンパ、ロックアップクラッチの配置を持つ構造とした。

5.4 ドライブシャフト構造の最適化

ロックアップダンパの最適化を行うと共に、駆動系ねじり二次共振周波数を更に低周波化するためにドライブシャフトの低剛性化にも取り組んだ。しかし、ドライブシャフトは一次の駆動系ねじり振動に大きく寄与しており、低剛性化するとその振幅が増大し、加速ショックなどによる振動が悪化する。そこでこの加減速ショックによる振動に対してはエンジントルクを制御することで対策し、ドライブシャフトの低剛性化を実現した。

5.5 車体音響感度の改善

こもり音が問題となる40~50Hz付近は、車室内空気の密度変化による空洞共鳴があるため、これの改善にも取り組んだ。この周波数は車室寸法によって決定され、コントロールが困難であることから、空洞共鳴を励起させない構造の設計に取り組んだ。具体的にはフロントヘッダ、リヤヘッダ、リフトゲートなどの共振周波数を空洞共鳴から離すよう設計し、車内音圧レベルを従来比改善させている。

5.6 こもり音/振動性能改善まとめ

モデルによるこれらの開発を行い、駆動系ねじり振動と車体音響感度のレベルを改善することでFig. 7に示すように車内音圧レベルを低下させ、走行中のロックアップ可能範

囲を大幅に拡大した。Fig. 8に示すようにJC08モード走行中のロックアップ範囲を従来の49%に対し、SKYACTIV-DRIVEでは82%に拡大することができた。

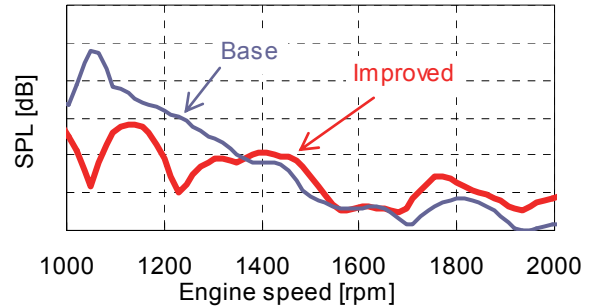


Fig. 7 Cabin Sound Pressure Level

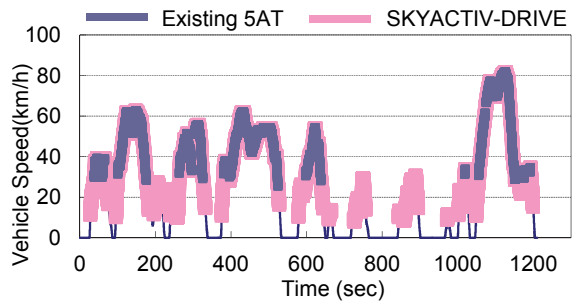


Fig. 8 Lockup Area in JC08 Mode

6. ギヤノイズ性能改善

6.1 ギヤノイズ性能開発コンセプト

理想の変速機の実現のために、ギヤノイズ性能の改善と低燃費へ貢献のための軽量化に取り組んだ。一般にNV対策はケース類のリブ追加など、質量増加につながるため、従来通りの開発プロセス及び設計指針では抜本的な軽量化にはつながらないと考えた。そこでSKYACTIV-DRIVEでは変速機の基幹部品であるトランスミッションケースの開発プロセスを見直し、またNV対策の設計指針についても見直しを図ることでギヤノイズのポテンシャルを飛躍的に向上させながら、抜本的な軽量化の実現を目指した。更にあらかじめ予測精度の向上を行ったCAE技術を全面適用することで、開発の短期化・効率化を実現した。

6.2 CAE 技術開発

ギヤノイズ開発に適用するCAE技術については、商品開発に先行して、過去の総括と次期の開発でニーズがある項目をあらかじめ抽出し、手戻りが生じないよう技術整備を行った。形状情報からはモデル化できない各種結合部やジョイント、ベアリングといった境界条件や、各種材料の振動特性に対し実験によるメカニズム究明と、CAE予測技術への反映を徹底的に実施した。そして、ここで得られた共通の要素技術をベースとして構築した、「マスタCAE」と呼ぶ予測技術・モデルを、一括に各ユニット開発のフェー

ズで適用した。部品単品から大規模なアセンブリまでの予測技術を段階的に積み上げ、最終的に構築したモデルでのギヤノイズの応答結果がFig. 9である。ピーク周波数や変位応答のレベルは捉えられており、ギヤノイズをモデルで開発できる予測精度を有すると判断した。

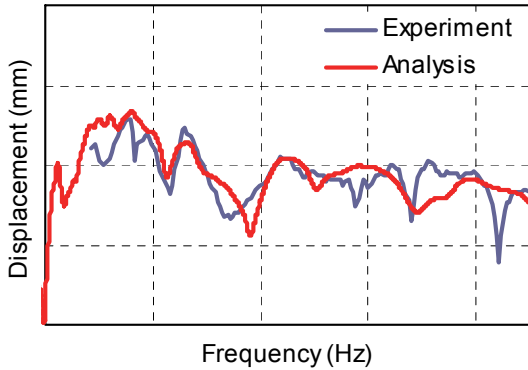


Fig. 9 Gear Noise Vibration of Engine Mount

6.3 アライメントエラー最適化

まずはギヤノイズの起振力であるTEを最小にすることを目的に、ギヤ噛み合い部のアライメントエラーを最小にする基本剛性を造り込んだ。基本剛性はケースの基本形状に依存するところが大きく、必要最低限の質量で最適な形状を求めるため位相最適化の技術を適用した。Fig. 10に位相最適化のイメージを示す。レイアウト要件を満たす設計領域を設定し、この領域内で指定した剛性の指標が最大限となるような、最も質量効率の良い形状を導き出した。こうして得られた結果を元に、初期の基本形状やリブ配置を決定した。基本形状決定後、更にアライメントエラーを低減させるため、アライメントエラーに対するギヤシャフト、ベアリング、ケースなど各要素の寄与を求めた。そして、この寄与を用いることで、アライメントエラーのレベル及びトルクに対するロバスト性の観点から最適な詳細形状を決定した (Fig. 11)。

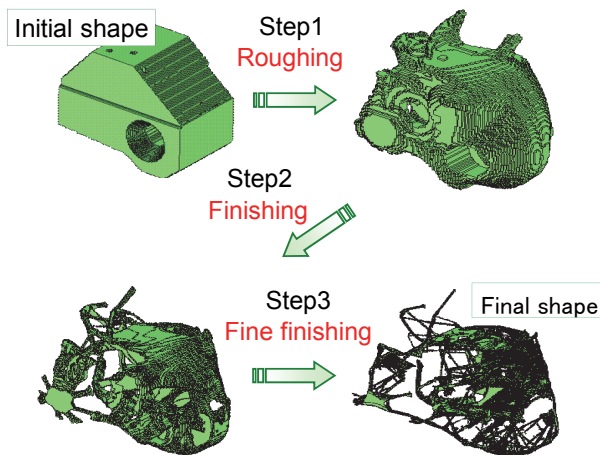


Fig. 10 Topological Optimization of Transmission Case

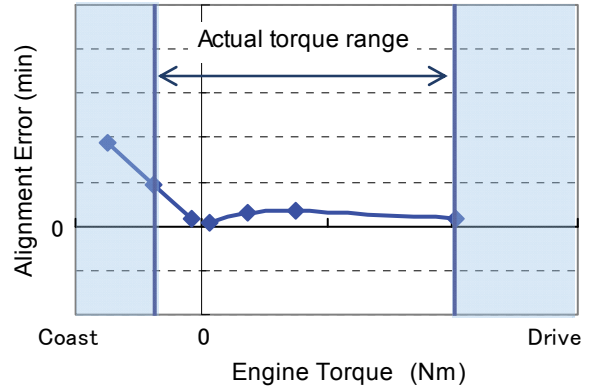


Fig. 11 Change in Gear Alignment Error According to Engine Torque

6.4 噛み合い周波数とTEの最適化

変速機におけるギヤの歯数は、噛み合い周波数としてギヤノイズの周波数範囲を決めると共に、起振力であるTEに影響する重要な要素となっている。一般に、車の暗騒音は車速が高く周波数が低いほど大きくなるため、ギヤ歯数が少ないほうが車速に対し低い周波数となり、暗騒音によるマスキング効果が大きくなる。一方、TEについてはギヤ歯数の減少は噛み合い率が低下するため悪化する方向にある。

SKYACTIV-DRIVEユニットでは、既存ユニットに対してギヤ歯数を減らし、噛み合い周波数を低周波数化させて、開発対象となる周波数を最小範囲に限定し、更にマスキング効果を増加させた。TEの悪化については、歯幅・歯丈・ねじれ角などの主要諸元を最適化することで噛み合い率の低下を最小限に抑えた。Fig. 12に、マスキング効果とTEとの関係を示す。歯数を減少させることでTEの悪化が見られるが、マスキング効果を十分に得られることでギヤノイズ性能は改善方向にあることがわかる。

SKYACTIV-DRIVEではマスキング効果がTEより最も大きくなるポイントを採用した。

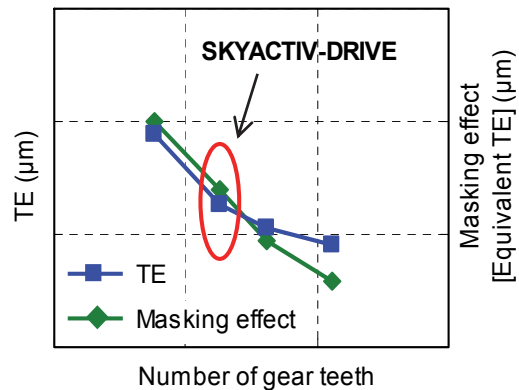


Fig. 12 Relation between Masking Effect and Transmission Error (TE)

6.5 メッシュフォースの最適化

歯面の動荷重であるメッシュフォースについては、振動伝達特性とハイバランスさせたギヤシャフト構造を構築することに注力した。

メッシュフォースは、歯面の自己コンプライアンスの逆数で表され、振動伝達特性とは背反する性能である上に、強度や全長など極めて多くの設計要素が加わるため、最適解を得ることは非常に難しい。そこでギヤの形状に対して形状最適化の技術を適用した。以下にギヤボディ形状を最適化し、強度の限界を超えない範囲で振動伝達特性とメッシュフォースをバランスさせ、最適形状を検討した例を示す。Fig. 13にトランスファギヤでの形状最適化の様子、Fig. 14に最適化前後の振動応答結果を示す。ギヤ形状の最適化によりメッシュフォースを低減し、振動応答が下がっている。またFig. 15はそれぞれ最適化前後の振動伝達特性とメッシュフォースを示す。振動伝達特性は、加振点への力入力に対する応答点の変位で表現している。応答レベルの高い高周波側にメッシュフォースの谷を形成することでギヤノイズが低減している。更に、低周波側についても振動伝達特性は悪化するが、メッシュフォースとのバランスでギヤノイズが低減していることがわかる。

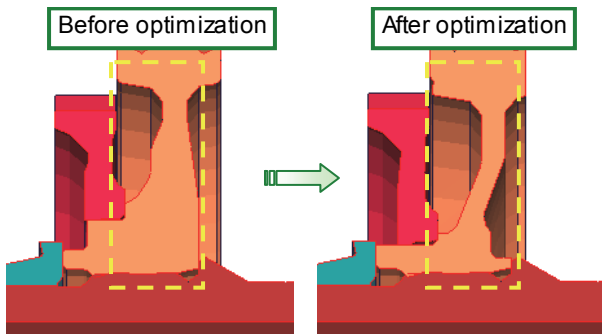


Fig. 13 Shape Optimization of Transfer Gear Body

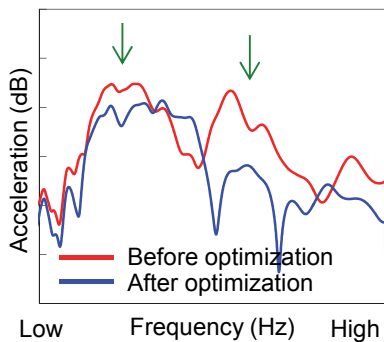


Fig. 14 Gear Noise After Optimization

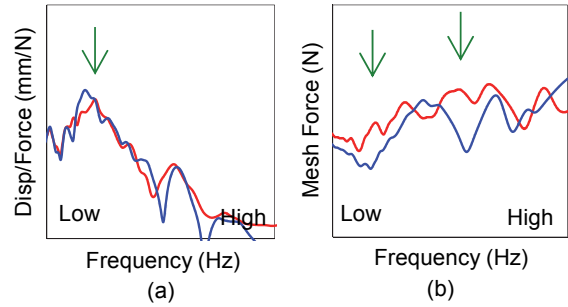


Fig. 15 (a) Frequency Response Function (b) Mesh Force After Optimization

6.6 振動伝達特性最適化

振動伝達特性についてはシステム最適化設計を行った。通常、ギヤノイズは走行段位や噛み合い位置によってメッシュフォースの周波数特性やTEのレベルが異なる上に、対策が段位によって背反する場合もある。したがって、各段位に対して個別に対策をし、共通解を模索するのは効率が悪い上に質量やコストの増加の原因となる。そこで、振動低減コンセプトとして、PTが車両に結合される出口の部品での対策に着目した。

前述のようにFF車の主変速ギヤノイズの伝達パスの中で寄与が高い経路として、エンジンマウントからの入力が増げられる。SKYACTIV-DRIVEでは、このエンジンマウントの振動モードに注力して振動低減対策を実施し、出口部品の改善に注力することで質量の使い方をシステムとして最適にし、車両トータルとして軽量化を実現した。

Fig. 16にエンジンマウント形状を示す。マウントブラケットの先端部分に質量を付与し、ブラケットの共振をコントロールすると共に、その振動のマスラインを利用し振動伝達特性を低減させている。ブラケットの共振コントロール及び質量の付与についても形状最適化を適用し、強度やレイアウトなど多くの制約の中、付与する質量の重量配分や位置、ブラケット形状など目的とする特性を満たす最適形状を導き出した。本来、振動伝達特性改善目的でトランスミッション各部に使用する質量をマウントブラケットに集約させることで、マウントブラケット自体の質量は増加するがシステムとしての軽量化を達成した。

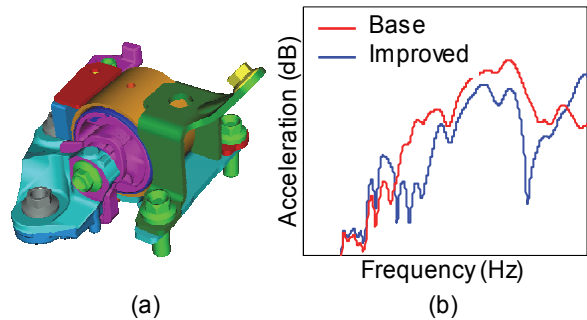


Fig. 16 (a) Engine Mount and (b) Gear Noise Response of Engine Mount

6.7 音響放射特性最適化

トランスミッションユニットからの放射エネルギーの対策は、まずトランスミッションケース断面形状を球面化させることで、ポテンシャルの高いケース形状とした。更に車内へ伝搬する放射エネルギーのうち、ケース表面のどの部位からのエネルギーが寄与しているのかCAE及び実験的に求め、寄与の高い部位にリブなどの対策を集中的に実施することで、無駄のない最適な対策を実施した (Fig. 17)。

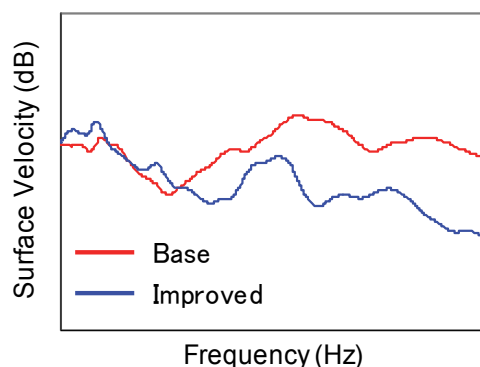


Fig. 17 Surface Integral Velocity of Transmission Case

6.8 ギャノイズ性能改善まとめ

モデルを用い上記開発を行うことで、ギャノイズ性能目標を最小限の質量で達成した。その結果、SKYACTIV-DRIVEは6速ATにもかかわらず、当社既存5速ATに対し、トランスミッションケースでは8%の軽量化を達成し燃費改善に貢献した。

7. おわりに

新型自動変速機“SKYACTIV-DRIVE”は、モデルベース開発を適用することにより、燃費・走り性能とNVH性能を高次元で両立させた。

- (1) 一括企画により、企画段階からNVH性能の骨格となるシステム・部品を機能配分により造り込んだ
- (2) こもり音/振動については、駆動系ねじり振動特性をモデルベースで見直し、広角低剛性ダンパを採用することで走行中の全域ロックアップを実現した
- (3) ギャノイズについては、CAE技術を駆使し開発プロセスを見直し、システム最適設計を行うことでギャノイズ性能と軽量化との両立を実現した

今後も、更にモデルベースによる機能配分を進化させ、品質の向上を継続し一層の商品力の向上を実現していく。

参考文献

- (1) J.DoI,et al: Neues Automatikgetriebe SKYACTIV-Drive von Mazda, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 113, September 2011, pp.682-687
- (2) J.DoI,et al: New MAZDA SYKACTIV-Drive Auto-

matic Transmission, 10th International CTI Symposium in Berlin, A3 (2011)

- (3) 田辺裕樹ほか:広角捻りダンパの非線形振動分析, 動力伝達系の最新技術2008, pp. 1-5 (2008)
- (4) 宮本崇史ほか: SKYACTIV T/Mユニット同時開発に対するギャノイズ解析の適用, 動力伝達系の最新技術, pp. 1-6 (2012)

■ 著 者 ■



工藤 健志



田中 和宏



佐野 徹