

論文・解説

08

操縦安定性・乗心地のモデルベース開発 Model Based Development for Steering, Handling and Ride Comfort

大久保 英崇^{*1} 長谷川 貴司^{*2} 山本 紀輝^{*3}
Hidetaka Ohkubo Takashi Hasegawa Noriki Yamamoto

要約

モデルベース開発 (MBD) は開発コスト削減と性能向上を両立するための有効な手段であり、弊社でも SKYACTIV エンジンの開発に代表されるように開発現場での適用が進んでいる。しかし、操縦安定性・乗心地領域においては MBD の適用が容易ではなかった。その理由は、(1) 操縦安定性・乗心地性能の良し悪しを判断する“ひと”の取り扱いが難しいこと、(2) 対象とする“機械”システムの範囲が多岐にわたる上、それらシステム特性と性能がそれぞれ相互作用し合うため、メカニズムが複雑であること、の2点である。本稿では、“ひと”と“機械”を切り分けた上で、“機械”に注力して MBD に取り組むことにより、操縦安定性・乗心地の量産開発の現場に MBD を適用した結果を報告する。

Abstract

Model-based development (MBD) is an effective method for both reducing development costs and improving performance, and it is being applied in the development field, as exemplified by the development of the SKYACTIV engine. However, the application of MBD has been challenging in the areas of Steering, Handling and Ride comfort. The reasons for this are (1) It is difficult to handle the human factor in judging the quality of Steering, Handling and Ride comfort, and (2) The target “mechanical” systems themselves are diverse, and their system characteristics interact complexly with Steering, Handling and Ride comfort performance, making the mechanisms intricate. In this paper, we report the results of the application of MBD to the mass production development of Steering, Handling and Ride comfort by focusing on the “mechanical” aspects after separating “human” and “machine” factors.

Key words : Steering, Handling, Ride comfort, Vehicle dynamics, MBD, Optimization

1. はじめに

開発コスト削減と性能向上の両立は、商品をご購入されるお客様にとっての価値につながる。MBD はその両立実現のための有効な手段であり、弊社でも SKYACTIV エンジンの開発に代表されるように量産開発現場での適用が進んでいる⁽¹⁾。しかし、操縦安定性・乗心地領域においては MBD の適用は容易ではなかった。その理由は2点ある。

1 点目は操縦安定性・乗心地性能の良し悪しを判断する“ひと”の取り扱いが難しいからである。例えば、評価者間の体格、嗜好、経験などの違いに起因する、車両評価のばらつきを無視できない。料理の評価と同じよう

にとらえていただけたらイメージしやすいと思う。2 点目は、対象とする“機械”システムのメカニズムも難易度が高いからである。具体的には、対象とするシステムの範囲が多岐にわたる上、各システム特性と性能が複雑に相互作用し合うことが難易度を高めている。対象とするシステムはタイヤ、サスペンション、ステアリング、シート、車体、パワートレインと車両全体にわたる。これらシステムが、路面入力やドライバー操作（ステアリング操舵、アクセル、ブレーキ）を受け、各システムが作用し合いながら運動し、それらシステムの運動が最終的にドライバーと乗員に伝わる。例えばドライバーがコーナリング時に操作するステアリング操舵角の量は、直接ドライバーとつながっているタイヤ～ステアリング

*1,2 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

*3 MBD 革新部
MBD Innovation Dept.

ホイールの間にある前輪周りのシステムだけでなく、後輪のサスペンションやタイヤ特性が大きく関わる。

この難易度が高い操縦安定性・乗心地領域において MBD を実現するために、マツダは“ひと”と“機械”を切り分けた上で、“機械”に注力する方針で取り組んだ。具体的には、機械特性を MBD に織り込むことで、可能な限り数値で性能を作り込み、実車段階では、後述する匠が、ひとの感覚を活かしてねらいの性能に仕上げる。機械の MBD に注力する理由は、“ひと”が深く関連する操縦安定性・乗心地領域においても“機械”の重要性は変わらないと考えたからである。本稿では、操縦安定性・乗心地の MBD 開発環境の構築と、量産開発への適用結果について報告する。

2. 今までの開発プロセス

自動車の開発プロセスにおいて「V字開発」は一般的であるが、操縦安定性・乗心地開発の特徴は、「匠による作り込み」という工程が存在することである (Fig. 1)。具体的には、実車による性能作り込みのプロである匠が、彼らの感性を駆使し、部品変更によって商品としての性能を目標に仕上げる作業である。

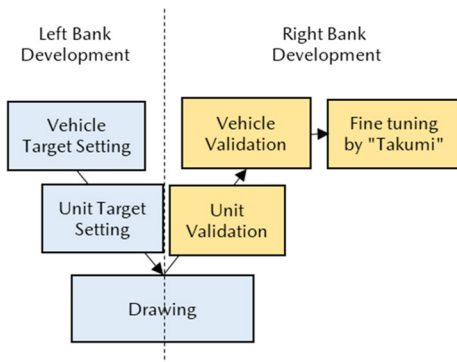


Fig. 1 V-Development Process

これまでの操縦安定性・乗心地開発プロセスは、「匠による作り込み」を軸に、性能を作り込む開発に時間をかけていた。具体的には、左バンクの解析結果を活用しつつも、右バンクで匠自身の感性を基に仕様を決めていくやり方である。

このようなプロセスでは、「開発効率」の問題があった。「開発効率」における問題は2点ある。1点目は、右バンクでの性能改善は、先述のように設計制約が多い上に、実車を扱うため多くのテスト時間を費やすため、開発工数あたりの性能改善効果が小さいことである。2点目は、右バンクでの性能改善は、官能評価主体の開発であるため、性能改善効果の定量管理が難しく、費用対効果に基づいた工数管理ができないことである。

このような開発になっていた原因は、操縦安定性・乗心地現象が複雑であるため、左バンクでの性能設計の対象を一部のテストモードに頼らざるを得なかったからで

ある。言い換えると「狭く深く」開発をしていたと言える。

3. これからの開発プロセス

3.1 目指す開発プロセス

マツダらしい性能を、効率よく達成するためには、「広く深く」開発することが課題ととらえた。課題達成のコンセプトは「MBDで“広く”機械性能（車の機械としての能力）を確保した上で、感性領域を匠の力で“深く”作り込む」とした。具体的には、まずCAEが扱うことができる数値化された機械システムに対して機能配分（各性能目標を満足させるために、各システムの設計パラメーター値を調整する行為）を行うことで、機械性能を確保する。その後、機械性能が確保された実車を用いて、匠はモデルでの表現が難しいひと領域の作り込みに専念するプロセスである。つまり、CAE担当者と匠、それぞれの強みを最大限発揮できるプロセスへと変革する。

操縦安定性・乗心地領域において MBD を活用するためのポイントは、実現象を表現するためにモデル（テストモード、設計パラメーター）を複雑化するのではなく、実現象のエッセンスを抽出したシンプルなモデルで表現することである。なぜなら、解析結果の解釈が容易となり、右バンクにおいても解析結果と感性のつながりがイメージしやすくなるからである。

3.2 テストモードの一般化

操縦安定性や乗心地評価はさまざまなテスト条件（路面、車速、操舵速度など）を網羅したテストモードで評価しなくてはならない。しかしテスト条件の組み合わせは無数にあるため、テストモードも無数にある。開発プロセスの MBD 化に向けて、これらテストモード全てを開発初期から検討対象とするのも一つの手であるが、計算コストや結果の解釈性などの点から機能配分のプロセスに織り込むことは難しい。そこで、代表的なテストモードのテスト条件を定量的に MAP 化し、シンプルかつ網羅的なテストモードを再構築した。例えば乗心地の場合、代表的な実走テストモードにおけるサスペンションへの入力レベルを MAP 化し、近い入力レベルのグループごとに一般化した加振波形による台上テストを用いたシンプルな加振テストモードを作成した (Fig. 2)。また性能指標については、「ISO2631-1: Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements」で規定されている周波数、振動の方向や評価部位ごとの人体感度を活用することで、テスト条件同様にシンプルかつ網羅的な指標にした。

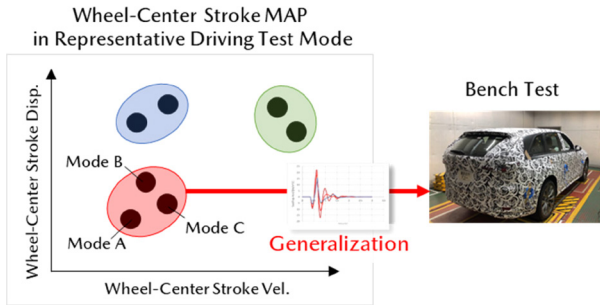


Fig. 2 Generalized Test Mode for Ride Comfort

3.3 サスペンション、タイヤ特性の設計パラメータ化

MBDで機能配分をするためには、操縦安定性や乗心地性能を構成する因子をパラメトリックに表現する必要がある。しかし、サスペンションやタイヤ特性の多くは非線形をもっており、非線形特性そのものを機能配分のプロセスに織り込むことは難しい。そこで、非線形特性を表現できる数式モデルを考案し、設計パラメータ化することで機能配分プロセスに織り込めるようにした。例として、ショックアブソーバーのピストン速度と減衰力特性の数式モデルを Fig. 3、タイヤやサスペンションなどによるコーナリングパワー（以下、CP）特性の数式モデルを Fig. 4 に示す。

(1) ショックアブソーバー ピストン速度 vs 減衰力モデル
 操縦安定性や乗心地性能が対象とするショックアブソーバーの使用域は、小さな力を出すオリフィス域、オリフィス域を超える入力ではバルブが開弁し大きな力を出すバルブ領域に大別できる。各領域の減衰力はおおよそ線形に近似できると仮定し、各領域の切り替わり速度と合わせることで、ショックアブソーバー減衰力特性を表現し、機能配分を可能とした。また、机上検討のためにモデルパラメータもこれらの数式に対応させた。

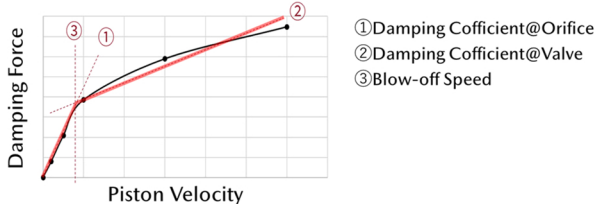


Fig. 3 Design Parameters of Shock Absorbers

(2) CP モデル

車両の旋回性能は、タイヤの接地荷重に対する CP 特性やサスペンションやステアリングなどの特性からなる前輪と後輪の等価 CP 特性によって評価できる。中でもタイヤ CP 特性はタイヤサイズと一定の相関があるため、レイアウト整合を取る開発初期段階から要件を提示し機械性能を確保する必要がある。そこで、目標とする旋回性能に対して必要なタイヤ CP のレベル感を理解しやす

くするため、1G ノミナル接地荷重における CP と、タイヤ CP の接地荷重に対する変化やサスペンション特性によるタイヤ CP の増減などを統合した CP 増幅率の 2 変数からなる単純化した数式で表現した。このモデルにより開発初期段階でのタイヤの性能を確保する機能配分を可能とした。

$$\text{Equivalent cornering power(CP)} = \text{Tire CP} \times \text{CP Scaling factor}$$

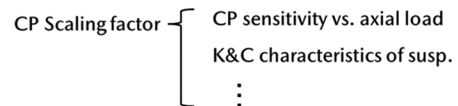


Fig. 4 Design Parameters of Tire CP

3.4 機能配分計算環境の構築

3.2, 3.3 で開発した技術を使って機械性能を確保するために、網羅的な計算が可能な環境を構築する。そこで、最適化計算ソフトである ESTECO S.p.A 社製 modeFRONTIER と各モデルとの連携環境を構築した。この連携環境を用いた開発での基本的な機能配分プロセスは以下の 6 ステップである。

(1) 物理モデルを使い、数百回のパラメータスタディを行う。

(2) (1) の結果を用いて、modeFRONTIER に実装されている応答曲面法により、物理モデルに比べ計算速度が速いサロゲートモデル（物理モデルを近似したモデル）を作成する。

(3) サロゲートモデルを使った最適化問題を設定する。具体的には、目的関数、制約条件、設計パラメータを定義する。

(4) (3) の最適化問題を数千～数万回の計算によって近似的に解く。この計算が機能配分に当たる。

(5) 機能配分の結果、全ての性能指標を満足できない場合は、どの制約条件がネックになっているかを示す。また、どこまで制約条件を緩和すれば性能指標を満足できるかを示す。つまり、理論限界とその突破手段の提示を行う。

(6) (5) の結果を企画や設計部門に説明し、「制約条件の緩和」または「性能目標の修正」について議論し、対策方針を決める。例えば、高い CP を確保するために、企画部門とタイヤ幅を拡大のためのレイアウト全体の見直しを議論することが挙げられる。

また、3.5 に後述する、実車作り込み段階でも MBD を活用するため、Excel をインターフェースとした実車作り込み支援ツールを作成する環境を構築した。以上、サロゲートモデルの作成から活用までのプロセスを Fig. 5 に示す。

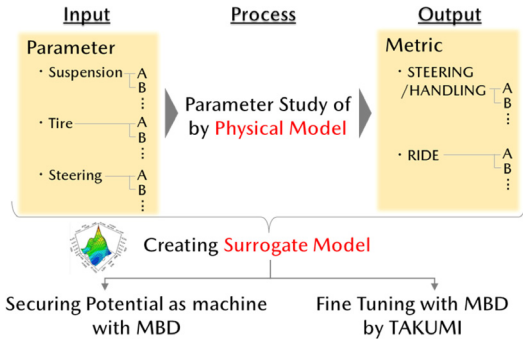


Fig. 5 Creation and Utilization Process of Surrogate Model

3.5 匠による実車作り込み段階での MBD 活用

3.4 の MBD 技術は実車作り込み前に機械性能を確保することをねらったものであるが、応用することで実車作り込み段階においても MBD により匠をサポートすることができる考えた。実車作り込み前に作成したサロゲートモデルを .xslm 形式で出力し、実車作り込み現場で匠が使いやすいようなデザインや機能（例えば、作り込みのベースとなるショックアブソーバー特性をテーブル形式で入力すると、自動でパラメトリック化する）などを追加した実車作り込み支援ツールを開発した (Fig. 6)。このツールにより、匠が自身の感覚と定量値を比較しながら作り込みの方向性の判断や、実車作り込みの進捗を第三者に分かりやすく示すことを目指している。なお、このツールは、サロゲートモデル化されているため即座に計算結果を確認でき、かつ .xslm 形式であるため、特別な計算環境の構築が不要であり、実車作り込み現場への適用を意図している。

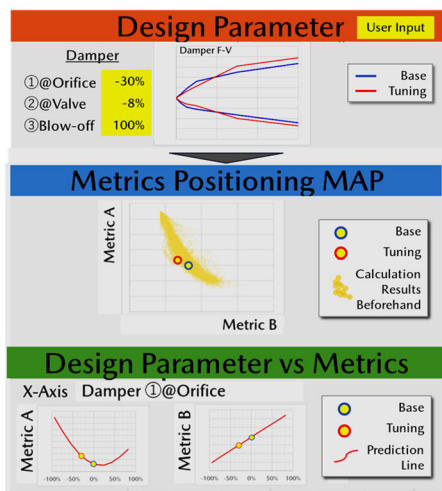


Fig. 6 Support Tool for Real World Development

4. 適用事例

4.1 乗心地開発への適用

(1) 概要

乗心地性能は、車両諸元・重量・タイヤ・サスペン

ションハードポイント・ブッシュ・コイルスプリング・ショックアブソーバー等、さまざまなシステムが影響する。このうち、ショックアブソーバーは乗心地性能上の問題を解決するための「魔法の道具」ととらえられることが多い。その理由は、ショックアブソーバーの内部構造の変更（以下、作り込み）により、レイアウトとコストの影響なしに特性調整ができるからである。しかし実際には、乗心地性能の中だけでもショックアブソーバーの減衰力を上げると向上する性能と悪化する性能が混在するため、ショックアブソーバーの作り込みだけでは乗心地性能全体の目標達成はできない。そこで、機能配分に MBD を活用することで、ショックアブソーバーの作り込みにおける“理論限界”を示した。これにより、設計などの関連部門とレイアウトやコストの調整を含めた他システムでの対策検討を加速させ、機械性能を確保した。更に機能配分だけでなく、実車でショックアブソーバー作り込みの際も MBD を活用し、効率的な仕様決定につなげる。

(2) MBD 活用による機能配分

3.3 で示したショックアブソーバーのパラメーターを使い、背反する 2 つの乗心地性能 (Metrics A と Metrics B) を目的関数として機能配分を実施した結果を Fig. 7 に示す。ベースのコイルスプリングでは理論限界においても性能目標達成できないが、コイルスプリングのバネ定数を低減させることで、理論限界が高まり目標達成できる解が存在することを示すことができた。この検討結果により、コイルスプリングの設計変更の必要性を関連部門と共有することができた。これにより、設計変更に向けたコストや生産性要件の調整をスムーズに進めることができ、ねらいの性能目標を達成できた。

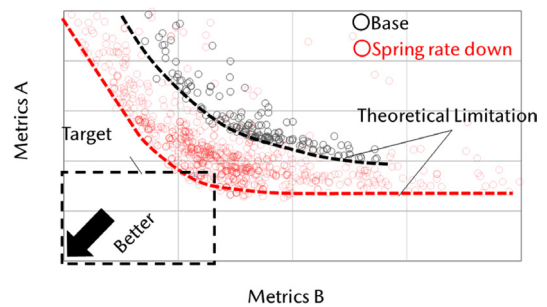


Fig. 7 Result of Optimization Calculation

(3) 実車作り込み段階の MBD 活用

机上で機械性能を確保した試作車を基に、匠により感性領域を作り込む段階にも MBD を活用する。実車でショックアブソーバーによる作り込みでは、匠による試作車の官能評価を基に、減衰力特性の調整方向が決められる。その際に 3.5 で述べたツールにより、減衰力調整による性能指標の変化量を即座に見積り、その結果を参考にすることで、実車評価する仕様を絞り込むことがで

きた (Fig. 8)。また、匠自らサロゲートモデルを使って解析することでモデルの有効性や実力を理解し、性能指標の課題をフィードバックしやすくなった。

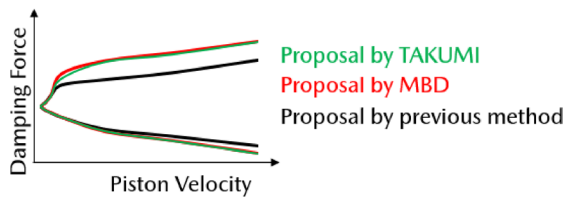


Fig. 8 Result of Optimization Calculation

4.2 操縦安定性開発への適用

(1) 概要

乗心地同様、個別の操縦安定性指標はサスペンション特性で性能向上できるが、性能指標間の背反が存在する。これらの両立策の一つとして、タイヤCPの向上が効果的である。しかし近年市場ニーズが高まっているバッテリー式電気自動車 (BEV) は、内燃機関 (ICE) 車と比べ、車両重量あたりの航続距離が極めて短い。そのため、タイヤ開発には、航続距離の短さをカバーするためのタイヤの転がり抵抗係数 (以下、RRC) の低減と、重量増をカバーするためのタイヤCP向上という背反性能の両立が求められている。

更に、タイヤCPはタイヤサイズと関係性が深い、タイヤサイズは車両レイアウト全体に関わるため、サイズ決定は開発初期段階に完了しなくてはならない。開発初期段階においては、サスペンションやステアリングといった操縦安定性に関わるシステムが具体化されていないことが多い。そこでMBDを活用した機能配分により、サスペンションやステアリングの前提条件が揃わない中で、性能目標達成に必要なタイヤCPを提示できる開発プロセスを構築した。具体的には、以下の2つのプロセスである。

(a) 3.3(2) で述べた等価CPを設計パラメーターとして機能配分することで、等価CPの要求値を導出する。また、その等価CPが必要とされる理由を説明できるようにする。

(b) 等価CPをサスペンション/ステアリングとタイヤ分に分解することで、タイヤ単体のCPの要求値を導出する。

(2) 等価CPを設計パラメーターとした機能配分

タイヤCPの提示には、サスペンションやステアリングを考慮する必要があるため、まずは3.3.(2) で述べた等価CPを設計パラメーターとして機能配分を行う。Fig. 9はMBD活用により、全ての性能指標が達成できる等価CP値の群 (等価CPの解空間) を示したものである。緑のプロットは全ての性能指標を満足できる等価CPを示し、灰色のプロットはいずれかの性能指標が満足できない等価CPを示している。赤線で示される緑と灰色の

プロットの境界線が理論限界である。これら理論限界はFig. 10の個別の性能指標ごとの理論限界の重ね合わせで説明することができる。これらFig. 9, 10により性能目標達成に必要な等価CPとその理由を提示できるようにした。

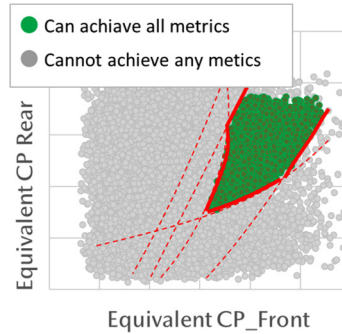


Fig. 9 Solution Area of Equivalent CP for All Metrics

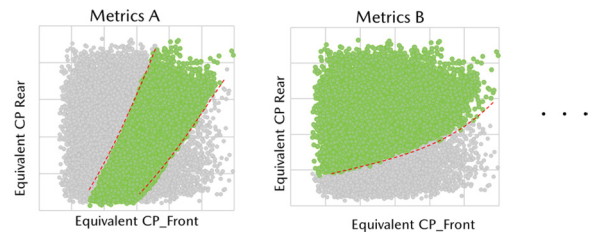


Fig. 10 Solution Area of Equivalent CP for Each Metrics

(3) 等価CP要求からタイヤCP要求へのカスケード

(1) で得た等価CPの要求を、タイヤCP要求へカスケードする。開発初期段階においては、等価CPを構成するサスペンション/ステアリングの構造が決まっていないため、それらシステムに関わる特性値は設計パラメーターとした。ただし、構造の実現可能性を考慮し、過去の開発車種やベンチマーク結果を参考にそれら設計パラメーターの検討範囲を制約条件として設定した。Fig. 11は等価CPを構成するサスペンション/ステアリング特性を設計パラメーターとして機能配分を実施した結果である。Fig. 9, 10との違いは、軸を前後輪の等価CPではなく、タイヤCPに変更している点である。このように軸を変更することにより、実現可能なサスペンション/ステアリング特性を加味した上で、性能目標達成に必要なタイヤCPを示すことができる。また、RRCが既に分かっている実在するタイヤのCPを記載することにより、燃費性能と操縦安定性の背反関係を明らかにできる。

以上まとめると、理論限界から必要なタイヤCPの要求値を明確にすることで、操縦安定性開発と燃費開発の歩み寄りが可能となり、機械性能を確保できるようになった。

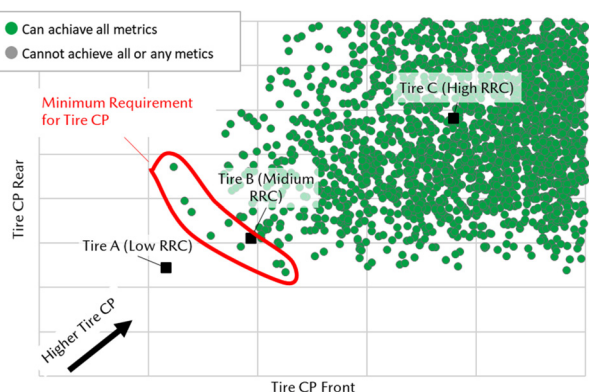


Fig. 11 Solution Area of Tire CP for All Metrics

5. 効果

今回の取り組みにより、コイルスプリング、ダンパーやタイヤといったシステムについて、機械性能の範囲において最適な仕様を左バンクで導出し、なぜ最適かを関連部門に説明できるようにした。その結果、左バンクの中で機械性能に関する課題解決ができるようになり、右バンクでは感性領域の作り込みに注力できるようになった。車種開発における定量的な効果を例に挙げると、今まで常態化していた性能改善を目的とした右バンクでのシステム作り込みの手戻りや、それに伴う制御システムの作り込みやレコードキープとしての車両特性計測のやり直しなどが減少し、その結果1車種あたり11%の開発工数を削減できた。

また、今までの仕様決定は匠がリードしてきたが、これからは基本性能領域の開発はCAE担当者がリードできるようになった。その結果、CAE担当者からは「操縦安定性と乗心地の仕様決定への貢献を明確に実感できた」といったコメントが得られた。また匠からは、「今までCAEは信じていなかったが、うまく使えば役立つことが分かった」、「基本性能が机上で担保できれば、右バンクでは感性領域の作り込みに注力できる」といったコメントが得られた。まさに、CAEと匠それぞれの強みを活かした、独自のMBDが実現しつつあるといえる。

6. おわりに

MBD化が容易ではなかった操縦安定性・乗心地領域において、“ひと”と“機械”を切り分けた上で、“機械”に注力してMBDに取り組むことにより、操縦安定性・乗心地の量産開発の現場にMBDを適用した。その結果、システムの仕様を機械性能に基づいて決めることができるようになり、手戻り削減につなげることができた。

このようなプロセスが実現できた重要なポイントは2点ある。1点目は、先人たちが積み上げてきた理論があったことである。例えば、操縦安定性の解析技術で言えば、マツダで使っている解析ソフトの一つであるADAMSなどが一般化するずっと前の1970年代から

DEMCOと呼ばれる独自と呼ぶ自社製プログラムが存在した⁽²⁾。これら積み上げてきた理論にmodeFRONTIERのような最適化ソフトを組み合わせることで、厳しい制約条件の中で最適な仕様提案ができるようになった。2点目は、マツダが長年の「走る喜び」を追求する過程で、匠はその技量の向上と伝承に、CAD担当は操縦安定性・乗心地の定量化に挑戦し続けてきたことである。これらの挑戦によって、機械特性で多くの操縦安定性・乗心地を表現できることが分かった。つまり、これまで脈々と築いてきた資産の融合により、「1.はじめに」で述べた「機械の重要性」に気付くことができた。

なお、本プロセスを実現するにあたり、(株)IDAJ様の多大な技術サポートをいただいた。関係諸氏にお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 横畑英明ほか：SKYACTIV エンジンの性能開発に活用したMBD, [マツダ技報, No.31, pp.54-59 \(2013\)](#)
- (2) 平井敏彦ほか：マツダ ユーノスロードスター 日本製ライトウェイトスポーツカーの開発物語, p.100 (2003)

■ 著 者 ■



大久保 英崇



長谷川 貴司



山本 紀輝