

特集：モデルベース開発

15

## SKYACTIV-DRIVE を支えたモデルベース開発 Model based Development for SKYACTIV-DRIVE

三谷 明弘\*1

Akihiro Mitani

南 竜洋\*4

Tatsuhiko Minami

柴田 哲孝\*2

Tetsutaka Shibata

清岡 毅\*3

Tsuyoshi Kiyooka

### 要約

マツダでは、技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル “Zoom・Zoom” 宣言」に基づき、環境に優しく、走って楽しい車造りを目指している。SKYACTIV-DRIVE では、低燃費、ダイレクト感、スムーズで力強い発進、滑らかな変速、を追求しており、トランスミッション制御開発ではこれらの開発目標達成に加え、飛躍的に増加する各ユニットとの協調制御も併行開発しなければならない。

SKYACTIV-DRIVE の制御開発では、モデルベース技術を基に開発プロセスを改善することで、多様化する技術開発を支え、機種開発の短期間化を実現した。本稿では、SKYACTIV-DRIVE の制御開発で導入した、モデルベース技術を基にした3つの技術について紹介する。

### Summary

Mazda aims to build environmentally friendly and fun-to-DRIVE vehicles based on the long-term vision, the Sustainable "Zoom-Zoom" concept. "Low fuel consumption", "direct feel", "smooth and powerful startup" and "smooth gearshift" were focused on in the SKYACTIV-DRIVE development.

In order to shorten development period, and develop new function, we improved the development process by applying model based technology during the development of SKYACTIV-DRIVE. This paper introduces the model based technology which supported development of SKYACTIV-DRIVE.

### 1. はじめに

近年、車における制御システムでは、各システムの機能の多様化、高性能化と共に、ユニット間の協調制御が増加しており、ソフトウェア開発の規模が飛躍的に増加している。更に車両適合させるパラメータの数も膨大となっており、その開発と検証に多くの人員と、長い期間を要している。またトランスミッション開発においても、早期開発を実現するためには制御対象となるトランスミッションユニットのハードウェア開発と、その制御手段となるソフトウェア開発を併行して行う必要がある。

従来から開発効率化のために取り入れられてきたモ

デルベース技術を、開発プロセス及び制御技術に対して適用範囲を拡大させることで、SKYACTIV-DRIVE の開発<sup>(1)(2)(3)</sup>を成功に導いた事例について紹介する。

### 2. SKYACTIV-DRIVE 開発プロセス

一般的にトランスミッションを動作させる各機能の開発は、下記3つのプロセスで構成されるV字サイクルで定義できる (Fig. 1(a))。

- ① 仕様設計の実施
- ② 協力メーカーによって TCM (Transmission Control Module) を試作して制御ソフトウェアを実装
- ③ 納入された TCM を用いた検証及びキャリブレーション

\*1~4 ドライブトレイン開発部  
Drivetrain Development Dept.

ーション（パラメータの車両適合）の実施

制御ソフトウェア全体の開発プロセスでは、最終的な製品に対する要求から、必要な要件、性能を定義し、必要な個別機能に落とし込む。機能開発を行うたびに①～③のV字サイクルを繰り返すことで、最終的なソフトウェアへ育成していく（Fig. 1(b)）。

またオートマチックトランスミッションでは遊星ギヤや油圧クラッチの数など内部の構成要素を自在に組み合わせることでギヤ多段化を実現している。構成要素に応じてアクチュエータを駆動する制御方法が異なり、その構成に最適な制御プログラムを構築する必要がある。

SKYACTIV-DRIVE では、さまざまな機能において理想を追求するため、従来機種とは全く異なる構成要素を採用した。それら構成要素に対応する制御プログラムは、多くが完全に新規開発となり、限られた開発期間の中で高品質と高機能化を両立させるために、開発効率の改善が必要であった。

2.1 V字サイクルの改善

開発効率の改善を行うために、従来の個々の機能を順番にV字サイクルを繰り返す開発から、各機能ごとのV字サイクルを同時併行で開発し、更にV字サイクル自体の短縮を検討した。その結果、②TCM 試作プロセスを省略し、更に③検証プロセスでの作業効率化を実現する「ラピッドプロト TCM 環境」（3章）を導入した。

従来機種ではソフトウェアシミュレーションを仕様検証に活用していたが、より実トランスミッションに

近い精度を実現する「リアルタイムシミュレーション」（4章）を、導入することで品質検証及びキャリブレーション工程を前倒しさせた。ラピッドプロト TCM 環境と組み合わせることで、機能開発におけるV字サイクルを効率化した（Fig. 2 (a)）。

これらの技術導入により、機能単位で併行開発を行い、機種開発にかかる期間を大幅に短縮した。これら技術の適応事例を「機能開発への活用事例」（5章）で紹介する。

2.2 機種開発サイクルの効率化

従来トランスミッションは、諸元や制御機能を最適化すると同時にさまざまな車種に搭載される。そのため、トランスミッションの機能開発を伴わない車種開発においても、搭載するパワートレインに合わせ、再度キャリブレーションを実施して車両適合させる必要がある。

SKYACTIV-DRIVE ではハードウェア面での精度向上技術と合わせて、高精度の仮想トランスミッションモデルを制御ソフトウェアに取り込むことで、従来機種に比べ高精度かつ高速な変速制御を実現した。これが「次世代モデルベースアルゴリズム」（6章）である。

この技術導入により高機能を実現すると共に、ユニットの物理特性を示す諸元データの設定と最小限のキャリブレーションのみで車両適合を可能としており、多様化する機種開発を短期間かつ省資源で開発することに成功した。

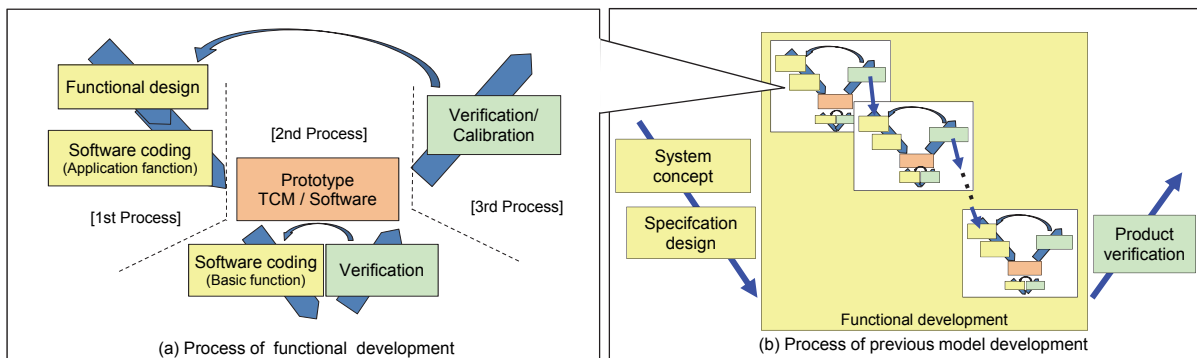


Fig. 1 Process of Previous Development

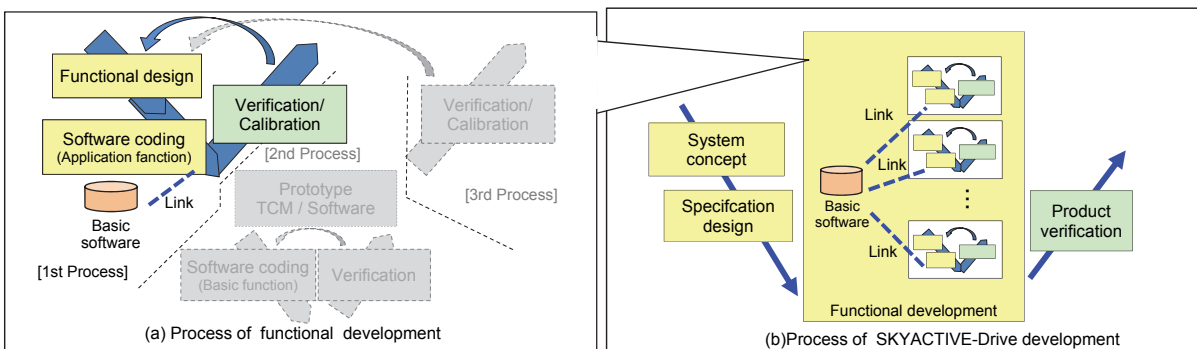


Fig. 2 Process of SKYACTIV-DRIVE Development

### 3. ラピッドプロト TCM 環境

ラピッドプロト TCM 環境とは、ソフトウェア開発の V 字サイクル短縮手段として導入したソフトウェア開発環境の総称である。下記の機能を備えた PC と対応する TCM で構成される。

- ① ソフトウェア生成機能
- ② リプログラミング (TCM への再書き込み)
- ③ TCM のデータエミュレーション
- ④ TCM 内データ、車両間通信のリアルタイムモニタ
- ⑤ データロガー

本ラピッドプロト TCM 環境を用いて、SKYACTIV-DRIVE の開発では、実際の TCM を使った機能検証や、実車や実トランスミッションを用いたキャリブレーション効率化をサポートする各種機能も合わせて実装した。

#### 3.1 ソフトウェア生成機能

ラピッドプロト TCM 環境では、電気的な入出力と制御ソフトウェアの時間的管理 (タスク管理) を扱う「ベーシックソフトウェア領域」と、変速制御などのトランスミッションの機能全般を扱う「アプリケーション領域」に、ソフトウェア構成上で分離した (Fig. 3)。

アプリケーション領域ではギヤ段制御や変速制御あるいは故障診断機能など、車両メーカーごとの独自制御が織り込まれる。これらアプリケーション領域と OS (Operation System) の役割を果たすベーシックソフトウェア領域を分離、再リンクすることで、アプリケーション領域を自由に仕様変更し、TCM で動作可能なソフトウェアを即時生成する機能を実現した。

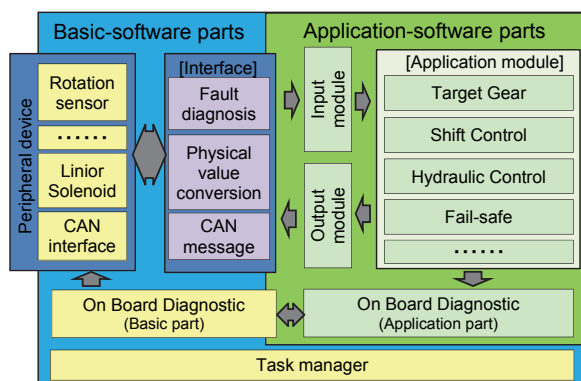


Fig. 3 Functional Definition of Control Software

#### 3.2 開発環境構成

機能開発やパラメータの車両適合に必要な開発環境として、一般的に使われている CCP (CAN Calibration Protocol) をベースに通信プロトコルを効率化して採用した。開発中の TCM には、CCP をベーシックソフトウェ

ア領域へ導入することにより、実作業で使用する機材は、ノート PC に CAN (Controller Area Network) インターフェースを組み込んだ構成を用いて実現した。

従来機種における開発では、マツダのパワートレイン開発における当時の標準機材を使用しており、各種イーサネット資産が活用できるメリットがあった。その一方で、専用コネクタを後付けした特殊 TCM を試作する必要があり、専用機材と TCM との間にインターフェース BOX を中継し、配線の取り回しや機材の配置など、開発における制約が存在していた。

ラピッドプロト TCM 環境では、トランスミッション制御開発に必要な基本機能を前述の 5 項目に整理して、必要機能を実現するための機材構成とし、汎用機器を活用したコンパクトで拡張性、汎用性の高い開発環境を構築した。

### 4. リアルタイムシミュレーション<sup>(4)</sup>

マツダでは従来から、実際の車両やエンジンあるいはトランスミッションなどの実機を用いずにコンピュータ上で机上検証できるソフトウェアシミュレーション環境を導入しており、ソフトウェアの品質検証に活用している。

SKYACTIV-DRIVE の開発においては、車種、エンジン仕様あるいはトランスミッション諸元の組み合わせに対応できるようにシミュレーション環境を再整備すると共に、トランスミッション内部油圧のシミュレーション精度を実機同等まで向上させ、実時間と同じ時間軸でシミュレーション演算を行う環境を新たに構築し、開発プロセスにおける左バンクとなる機能開発へリアルタイムシミュレーションを採用した。

#### 4.1 リアルタイムシミュレーション環境構成

SKYACTIV-DRIVE の開発で導入したリアルタイムシミュレーション環境では、TCM 及びエンジンを制御する PCM (Powertrain Control Module) は実機を採用し、各ユニットに接続されるアクチュエータやセンサなどを電子回路で構成した擬似負荷で模擬している (Fig. 4)。

TCM, PCM 以外のシミュレーション環境は、リアルタイムシミュレーション内に搭載する CPU モジュールで演算、制御される。CPU モジュールでは、エンジン及びトランスミッションの内部状態を、物理方程式を用いて高精度な仮想モデルで再現すると共に、補機類を含めた仮想車両モデルを演算している。作業者はアクセル、ブレーキなどを操作パネルで操作し、CPU モジュールによって現実時間と同じ時間軸で各モデルが演算され、リアルタイムシミュレーションが実行される。

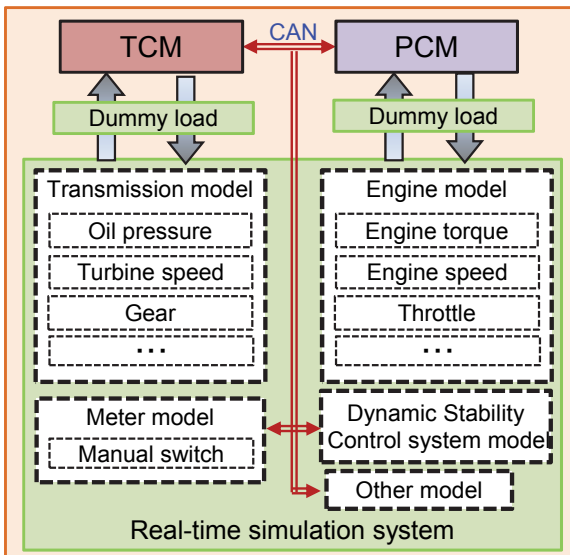


Fig. 4 Diagram of Real-Time Simulation System

## 4.2 拡張モデル

CPU モジュールに構成する仮想モデルを実車同様の単位に細分化することで、検証内容に応じてモデルから外部接続した制御ユニットに置き換えることを可能とした。トランスミッション油圧回路を仮想モデルで演算するのではなく、実トランスミッションに用いる油圧回路を接続したシミュレーション環境を新たに構築した。

SKYACTIV-DRIVE で採用しているギヤ段変速制御では、従来機種にはない高精度な油圧制御が必要となる。これらの技術では、油圧回路上に発生する微小な影響の積み重ねが無視できない。仮想モデルによるシミュレーションでは精度上回避できない誤差が生じるため、結果としてトランスミッション実機を用いた検証工程の負担を増加させてしまう。その対策として、仮想モデルではなく実際の油圧回路を疑似負荷として接続することで、高精度油圧モデルの仮想トランスミッションを実現した。

## 5. 機能開発への活用事例

トランスミッション制御開発では、ギヤ段変速時のクラッチ制御などトランスミッション単体で完結する機能開発のほか、エンジンやブレーキなどと協調する制御など、さまざまな機能を先述 (Fig. 2) の V 字サイクルに従って開発を行う。

SKYACTIV-DRIVE の開発ではラピッドプロトタイプ TCM の導入により、マツダが開発すべきコアの制御であるアプリケーション領域を自由に仕様変更し、評価用の特殊環境を必要に応じて作成可能とした。合わせてリアルタイムシミュレーション環境を活用することで、特定の機能開発に特化させた評価環境の作成や、シミュレーション評価の実施を容易とした。

### 5.1 機能開発事例：故障診断の機能検証

故障診断の機能検証には故障状態を作り出すために実

車やトランスミッション実機を用いた評価が必要となる。しかしながら、実車やトランスミッション実機を用いて故障模擬あるいは機能検証するには、検証目的によっては故障発生状態の再現が難しいケースがあり、網羅的な検証を行うためには多くの工夫と工数が必要であった。

マツダでは従来機種より、故障診断の機能検証にリアルタイムシミュレーション環境を活用していたが、SKYACTIV-DRIVE の開発では、サービス品質の向上を目的に故障部位を正確に特定できるよう故障診断機能を大きく進化させることにより、仕様設計の段階からリアルタイムシミュレーション環境を活用した。

より網羅的な機能検証を行うため、自動実行可能なシミュレーション環境を新たに構築し、パターンごとの可否判断も自動判別可能とした。これを用いて数十万パターンの評価を実施し、開発工数の大幅削減と網羅的な検証による品質向上を実現した。

更に、実車評価では危険が伴う、高車速での機能損失時のフェイルセーフ検証や、稀な発生頻度の故障形態での制御検証などにも活用しており、故障診断やフェイルセーフ制御開発の高品質化に貢献している。

### 5.2 機能開発事例：シフトインジケータ

新型アクセラでは、新たにシフトレバー横にレバー位置を表示するためのシフトインジケータが設置されており、シフトインジケータ表示は TCM とメータシステムとの協調制御によって実現している。

シフトインジケータ表示の機能開発においては、リアルタイムシミュレーション環境を用いて、メータ及びシフトインジケータの実機を駆動するシステムを構築し (Fig. 5)、表示の応答性やユーザ操作に対する網羅的な品質確認を行った。その結果、インジケータ表示検証を早期に開発完了することに成功した。

### 5.3 機能開発事例：最適メータ表示制御

パワートレインの魅力をより引き立てるために、車内のスピーカからエンジンサウンドを流す、あるいはギヤ変速時にタコメータを素早く動かす、という演出が一般化している。マツダにおいても、SKYACTIV-DRIVE の持つ本来の変速レスポンスを運転者が適切に感じられるようにするため、最適なメータ挙動を実現する技術開発を行った。

レスポンス評価では、常にタコメータを見ながら評価することになり、実車では脇見運転となりがちで危険が伴う。また同じ変速を繰り返し行うことも、実車評価では多大な工数を要するが、リアルタイムシミュレーション環境をメータ評価用に再構築 (Fig. 5) して繰り返し評価を実施し、短期間での技術開発を実現した。



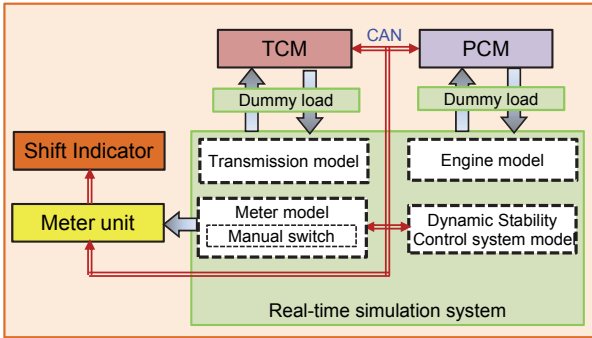


Fig. 5 Diagram of Real-Time Simulation with Meter System

5.4 機能開発事例：駆動力制御開発

「意のままに」のコセンプトを実現するため、SKYACTIV-DRIVE ではアクセル操作やカーブの曲率、路面勾配や外気温度などの周囲環境も考慮して、エンジン制御と協調して最適なエンジン出力と最適なギヤ段を選択する制御を採用している（例：コーナリング時のギヤ段保持制御（Fig. 6））。これらの機能開発では、制御の動作結果から運転者が感じ取るフィーリングが重要な開発視点となる。最初に定量的な視点から制御仕様を作成し、シミュレーション環境下で育成した後に、最終的な作りこみを実環境における車両評価にて行う。実車評価結果は定量的視点へフィードバックし、必要があれば仕様設計から再検討するプロセスを繰り返すことで、制御仕様を育成する。

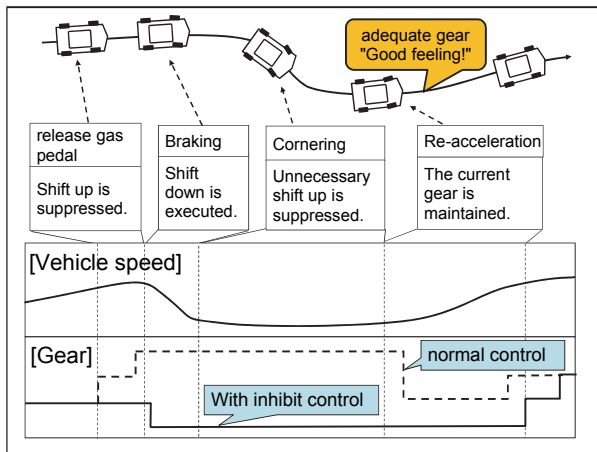


Fig. 6 Overview of Gearshift Control

SKYACTIV-DRIVE では、ラピッドプロト TCM 環境とリアルタイムシミュレーション環境を活用することで、机上における仕様設計の作りこみを実現した。また実車でのキャリブレーションや制御仕様評価を効率的に実施でき、ソフトウェアの即時生成機能を活用した迅速な仕様変更と再検証によって、従来機種より大きく進化した「意のままに」を実現する機能開発を短時間で実現した。

6. 次世代モデルベースアルゴリズム

従来機種の開発では、TCM の性能による制約（プログラム容量や演算速度など）から一部の制御に、制御特性をマップパラメータで表現する制御手法を採用していた。

さまざまな環境下でスムーズな変速ができるように、このパラメータをキャリブレーションする必要があり、ある程度穏やかな変速制御とする必要があった。

また、ベース機種からトランスミッション諸元やエンジンの変更がある場合、ベース機種のソフトウェアを流用すると諸元やトルク特性の違いから変速性能（変速の滑らかさ）にバラつきが発生してしまう。この性能バラつきを吸収するため、実車による車種適合が必要であった。

SKYACTIV-DRIVE では、製品ごとに生じる性能バラつきを補償する技術を導入し、ハードウェア面の精度向上を実現した。定量的な物理特性に基づく次世代モデルベース技術を制御ソフトウェアに導入することで、トランスミッション内部状態を推定し、高精度かつ高速な変速制御を実現した。

ベース機種からトランスミッション諸元やエンジン特性が変更される機種開発においても、物理特性に基づいた次世代モデルベース技術により、トランスミッション諸元などを設定し直すことで、最小限のキャリブレーションによる車両適合を可能とした。

6.1 変速制御の高精度、高速化

一般的な有段位トランスミッションでは、入出力軸の回転数を制御パラメータとして、内部クラッチを油圧制御して変速制御を行う。各ギヤ段は複数あるクラッチを締結する組み合わせで決定されるため、変速制御中は、各クラッチを適切なタイミングで締結及び解放を切り替える必要がある。

従来機種では、入出力軸の回転数変動と油圧スイッチの状態を基にクラッチの締結や解放状態を制御していた。締結や解放を行っている過渡状態では、回転数変動が少なくなる期間があり、上記の情報だけではクラッチの締結あるいは解放状態を正確に推定できない。そのため、あらゆる状況下でスムーズな変速を実現させるには、各クラッチの動作タイミングに若干の余裕を持たせ、緩やかに締結する必要があり、変速制御の応答性が抑制されていた。

SKYACTIV-DRIVE では、トリミングと呼ぶトランスミッションの固体ごとに性能補償する技術を導入すると共に、モデルベース技術に基づく仮想油圧回路モデルを TCM ソフトウェア内に織り込んでいる。この油圧回路モデルにより、リアルタイムにクラッチや油圧回路中のバルブの動作状態を推定することが可能と

なった。

ハードウェア面の精度向上と共にソフトウェア面からクラッチの動作タイミング補正を行うことで、高速変速を行っても外乱に対して安定した変速制御を実現した。更に有段位トランスミッションでありながら、従来機種以上の変速レスポンスとスムーズさを両立した変速性能を実現した (Fig. 7, 8)。

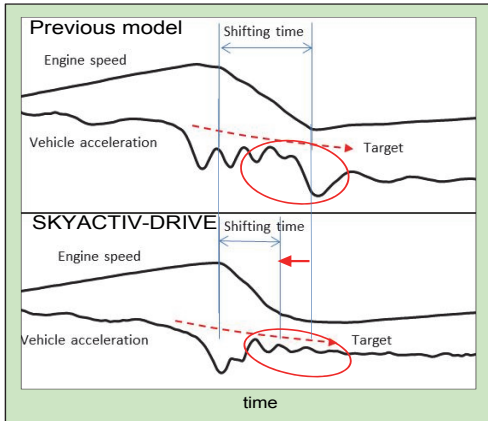


Fig. 7 Comparison of Upshift Control

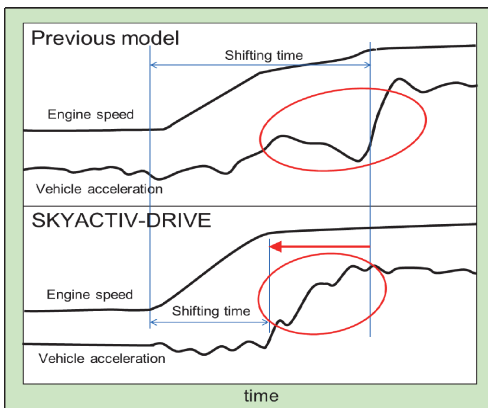


Fig. 8 Comparison of Downshift Control

### 6.2 機種開発サイクルの改善

従来機種では、一部制御に制御特性を簡易的な数式モデルに置き換えて特定のパラメータを軸にしたマップパラメータで表現する制御を採用していた。これらの制御には、さまざまな環境条件や運転操作に対応するための補正項が存在し、機種開発によってトランスミッションのギヤ比やエンジン特性などが変更されると、多くのパラメータを再キャリブレーションして車両適合する必要があった。

SKYACTIV-DRIVE では、物理特性に基づいた次世代モデルベースアルゴリズムを採用することで、制御の基礎となる諸元パラメータの設定と、制御を補正するための最小限のパラメータをキャリブレーションすることで、基本的な車両適合を完了させることができ、機種開発サイクルが完了する。

機種開発では、仕向けごとに地形や運転習慣の違い

が存在するため、これらに最適なギヤ比や制御仕様を採用すると、その数だけ必要工数は増加する。SKYACTIV-DRIVE では、次世代モデルベースアルゴリズムの採用により機種開発サイクルを改善し、各仕向けに応じた最適なトランスミッション仕様の採用を実現した。

### 7. おわりに

SKYACTIV-DRIVE では、開発環境のみならず制御技術にもモデルベース技術を導入することで、トランスミッション開発における理想系を追求した。その結果、低燃費、ダイレクト感、スムーズで力強い発進、滑らかな変速、など従来機種から大幅な性能改善を実現した。またモデルベース開発の導入によって実現した開発プロセスの変更により、大きく開発効率を改善し、多様化する SKYACTIV-DRIVE の開発を支えている。

### 参考文献

- (1) J. Doi, et al.: New MAZDA SYKACTIV-DRIVE Automatic Transmission, 10th International CTI Symposium in Berlin, A3 (2011)
- (2) J. Doi, et al. : Neues Automatikgetriebe SKYACTIV-DRIVE von Mazda, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 113, September 2011, pp.682-687
- (3) 土井ほか：SKYACTIV-DRIVE の開発、マツダ技報 30号, pp.19-23 (2012)
- (4) 仲岸ほか：AT 制御系開発における HILS の活用、自動車技術会シンポジウムテキスト 2005 年 No.10-05, pp.7-11 (2005)

### ■ 著 者 ■



三谷 明弘



柴田 哲孝



清岡 毅



南 竜洋