



持続可能なモビリティを可能にする電動化技術 –  
4代目トヨタプリウスの開発

# A Forward Leap for E-Volution

トヨタプリウスは、ハイブリッドテクノロジーを搭載した先駆的な自動車として世界的に知られています。トヨタ自動車は、dSPACEの量産コード生成ツールであるTargetLinkとBTC Embedded Systems AGのテストソリューションを用いた新たなモデルベースのツールチェーンの導入により、開発プロセス全体の最適化を行い、この車両の効率のみならず商品力全体を大幅に向上させました。



ど うすれば、長期にわたって人や環境に過度な負担をかけることのない持続可能な自動車を実現することができるでしょうか。これは、持続可能なモビリティの実現を基本的な開発目標に掲げるトヨタにとって、最も重要な問題です。同社は、この問題の答えを新型プリウスで体現しました。新型プリウスでは、JC08 テストサイクルでの燃費が40.8 km/l (95.97 mpg)、すなわち100 kmあたり2.45 リットルにまで向上しているだけでなく、車両の駆動力も最適化されており、より一層ダイナミックな操縦性を実現しています。

#### 4 代目プリウスの飛躍的進化

4 代目プリウスのパワートレインでは、シリアルおよびパラレルハイブリッドテクノロジーを独自に組み合わせる方式が採用されています。この方式では、パワースプリットデバイス (PSD) と呼ばれるプラネタリギアを用いて、内燃エンジンと2つのモーターを連結させています。これにより、完全な電動走行やエネルギー回収が可能になるだけでなく、モーターおよび内燃エンジンを直列または並列で動作させることができるようになります。また、PSDは無段変速機 (CVT) としての役割も担っています。パワートレインは、将来のレクサスやトヨタの車両モデルの基礎となる新たなモジュール型プラットフォームであるToyota New Global Architecture (TNGA) の一部です。トヨタでは、このプラットフォームの導入に際して、関連するすべてのコンポーネントの設計を根本的に見直しました。これにより、各国固有のテストドライブサイクルにおいて燃費の大幅な向上が可能になり、4 代目プリウスの燃費は日本で26%、欧州で20%、米国で14%改善されました。 >>

### 制御開発の最適化

4代目となるプリウスでは、車両性能を向上させるための制御要求が従来と比べ大幅に増加しました。そのため、制御構造を最適化することが、開発の効率性を高めるうえで極めて重要になります。たとえば4代目プリウスでは、部品の小型化、燃費向上を目指すため、モーターの制御を高応答、高速制御化する必要がありました。トヨタでは、このような新たな制御要求に迅速に対応できるように、また、今後の技術革新・車両の展開にも備えるため、制御構造、開発プロセス、および開発ツールの使い易さや効率の良さも含め、制御開発全体を徹底的に見直しました。

### 制御構造の見直し

トヨタではまず、よりシンプルで一貫した構造の確立を目指し、制御構造全体を根本から練り直しました。これにより、経験の少ないメンバーでも短期間で制御構造を理解し、制御設計が可能になり、デバッ

グにかかる時間が減少します。また、新たな制御構造とコード生成ツールを組み合わせれば、プログラムコード効率を向上させることも可能になります。

### 開発プロセスの見直し

効率的な開発プロセスとは、求められる品質を確保するのに最小限のステップで構成されたプロセスです。トヨタが従来の開発プロセス工程を見直したところ、モデルベース開発 (MBD) を導入し、開発工程の一気通貫、最適なツールの導入自動化、省力化を実現すれば、制御開発全体の工数を削減できることが明らかになりました。また、ツールの導入は、ISO 26262への準拠も容易になり、効率良く品質を保証できるソリューションとなることもわかりました。トヨタでは、サプライヤとも、従来の検査工程以外にも、より開発工程の上流で協業できる形を視野に入れていました。

### モデルベースのツールチェーンを確立

より効率的な開発プロセスを実現するため、トヨタは MATLAB®/Simulink® 環境を用いたモデルベースのツールチェーンを導入しました。その際、導入候補として挙げられたさまざまなツールに対し、同社が設定した効率性向上のための目標を達成できるかどうかを見極めました。

### 開発効率の向上

トヨタは、dSPACEの量産コード生成ツールである TargetLink® を選択しました。TargetLink では、信頼性の高いコードを自動的に生成し、モデルからオブジェクトコードまで一貫したコンセプトでシミュレーションも行うことができます。

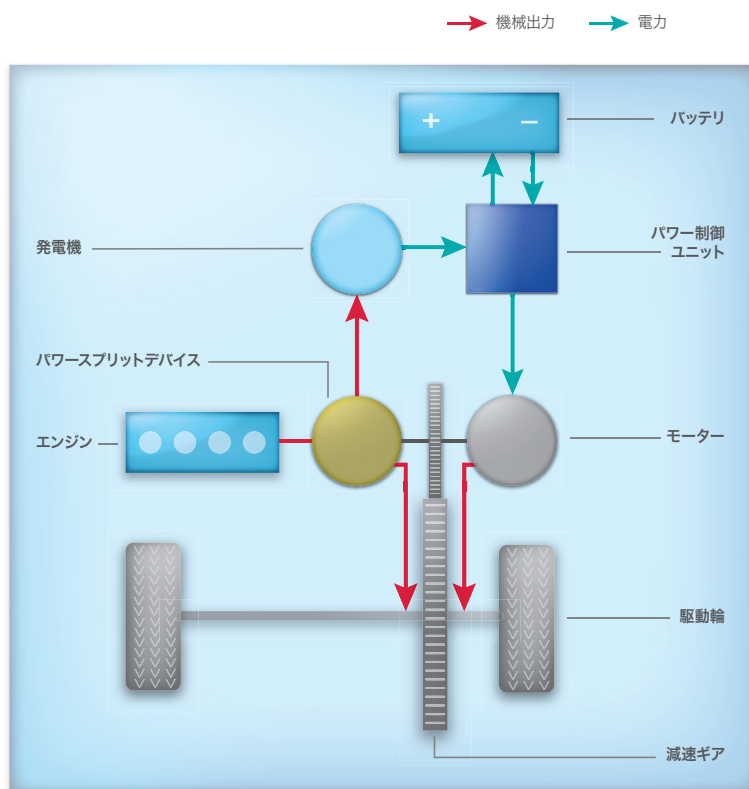
### 実装に耐え得る品質の確保

トヨタは、BTC Embedded Systems AG 社のテストツールである BTC EmbeddedValidator® および BTC EmbeddedTester® を使用して品質保証を行っています。これらのテストツールにより、開発の早期の段階から定型化されたプロセスで TargetLink モデルや生成コードを実装レベルでチェックすることが可能です。

### モデリングガイドラインの規定と運用

モデルベースの Simulink/TargetLink 開発環境は、構造化モデリングに最適であり、予め規定したモデリングガイドライン

パワースプリットデバイスにより、内燃エンジンおよびモーターのトルクは車輪や発電機へと分散されます。



をMES Examiner®へ取込み、チェックする工程を自動化することで開発者の作業を軽減することができます。さらには、モデリングの一貫性を維持し、MISRA Cにも準拠した効率性の高い量産コードを生成することも可能です。dSPACEはBTC社と共に、エンジニアリングサービスに加えて、即実践に適用可能な総合的なセミナーやワークショップを提供することで、トヨタにおける新しいワークフローの実現をサポートしました。トヨタでは、TargetLink向けのISO 26262リファレンスワークフローやBTC EmbeddedValidator、EmbeddedTesterを活用しながら、開発作業を行いました。

#### 新たなツールチェーンの使用

トヨタがTargetLinkとBTC製テストツールの組み合わせを評価したところ、従来の検査工程を含む開発プロセス全体の工数を削減できることが判明しました。これにより、新しい機能をすばやく正確に開発するという目標の達成が可能になりました。トヨタの環境開発者はTargetLinkの操作の一連の流れを、比較的容易に自動化できることを高く評価しています。この環境を使用すると、実装可能なコードを簡単に生成できるだけでなく、たとえばクリック1つですべてのモデルブロックに、実装情報設定を適用するといったトヨタの細かいニーズにも対応しています。また、以前はトヨタ側およびサプライヤ側の両方でコードを作成・検査する工程がありましたが、TargetLink、EmbeddedTesterを使用することで、実装コード生成、検査が自動化され、サプライヤとの重複工程が解消、サプライヤ側の工数が削減されました。これによりサプライヤとも機能を共同で開発し易くなりました。

#### 完全な妥当性確認

トヨタの従来のテスト手法でも、コードの品質については十分に確保されていましたが、それなりの工数を要していました。BTC EmbeddedValidatorを使用した形式検証では、仕様とモデルの一致性を自動で完全に検証します。次のような実例を用いて、要件に違反しないことを完全に数学的に証明します。

入力信号の全ての組み合わせで次の状況が例外なく実現できることを確認。

- 万一、バッテリーを使用することができない状況が発生した場合、



トヨタプリウスの内燃エンジン。モーターおよびパワースプリットデバイスと直接接続されています。



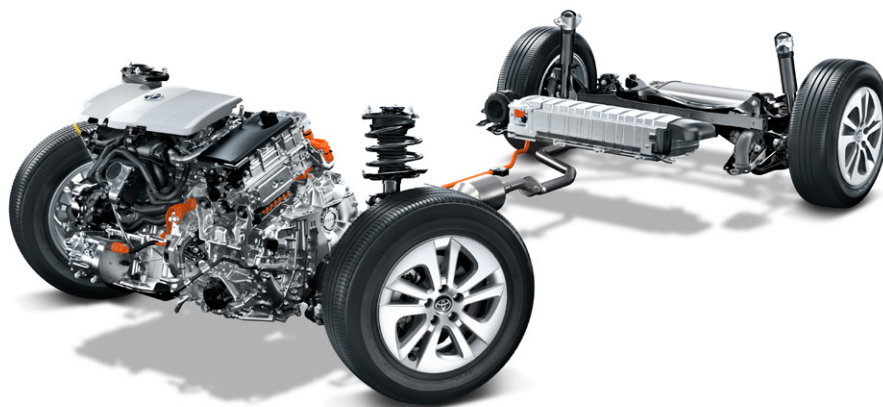
すべてのハイブリッド走行機能は、パワー制御ユニットにより制御されています。

- 車両がバッテリーを使用しない走行モードに例外なく移行

BTC EmbeddedValidatorはこの要件で考えられるすべての値の組み合わせを生成し、反例の有無を確認・証明します。さらに、BTC EmbeddedTesterでは、Simulink/TargetLinkモデルと量産コードの間で、完全に自動化されたバックトゥバックテス

トを行い、MC/DCコードカバレッジのテストケースを自動的に生成します。また、このツールでは値の範囲違反やゼロ除算など、コード上のあらゆる問題を抽出します。これらの解析結果は、作成した全ベクタも含め、自動的に作成されるレポートで確認することができます。バックトゥバックテストにおいて、ターゲットマイクロプロ

>>



4代目トヨタプリウスの電動ドライブトレイン機構

「TargetLink、BTC EmbeddedValidator、BTC EmbeddedTester、および関連するツールチェーンを自動化の仕組みとあわせて活用することにより、検査も含めた開発プロセス全体としての効率が向上する目途が立ちました」

トヨタ自動車株式会社 石川直樹氏

セッサ（ハードウェア）やクロスコンパイラ（オブジェクトコード）もテストに組み込み、最終的な妥当性確認を行います。その際には、TargetLinkとBTC EmbeddedTesterを連携させて実際に使用するマイクロプロセッサを使用したPIL（Processor-in-the-Loop）を実行します。このテスト手順により、ISO 26262に準拠した形で、より効率的に妥当性確認を行うことができます。

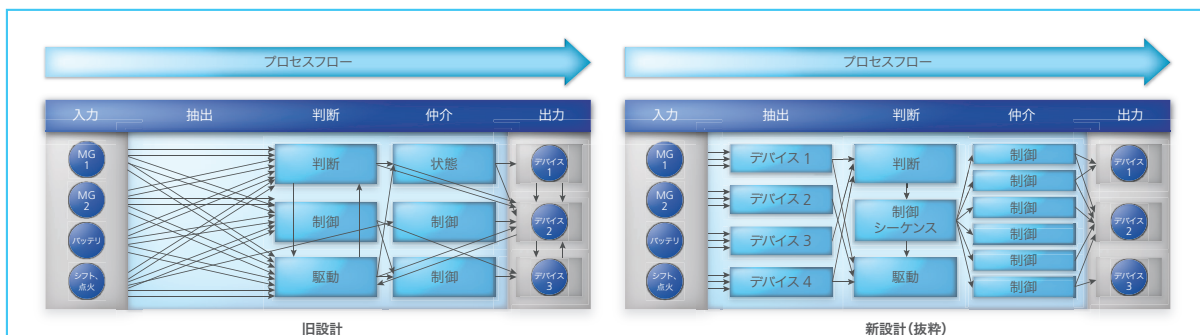
#### 課題と今後の展望

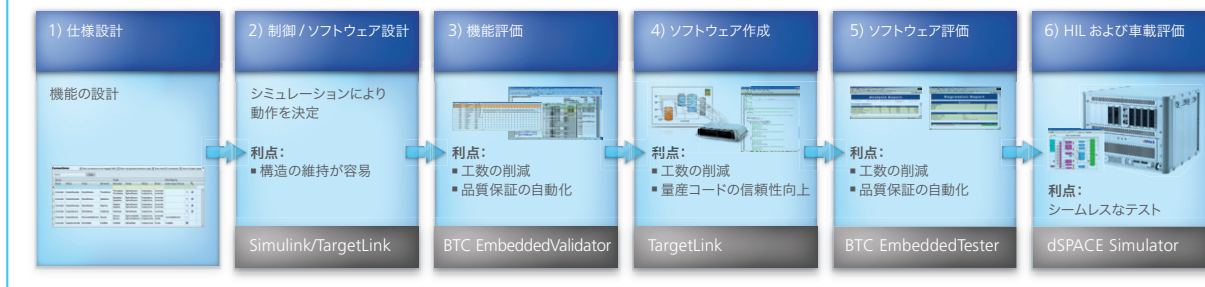
今回車両開発と並行して、開発工程の一気通貫、新しいプロセス、自動化の仕組みも含めた各種ツール・環境を導入してきましたが、当初想定していたよりも工数は増加しました。適切な体制、やりきる意志が必要であることも痛感しました。今後は、開発者にとってのメリットがより明確になるよう、開発プロセスおよびツールチェーン・環境の効率性をさらに向上させる取

組みが必要であると感じています。例えば、開発の上位工程でのコントローラモデルの積極的な活用（dSPACE VEOS®によるバーチャルシミュレーション）や、制御開発環境のさらなる改善（SYNECT®を使用したテストパターン、パラメータ、およびxILS用プラントも含めたコンポーネントの再利用等）、また、環境そのものの使い勝手向上を検討していきます。■

トヨタ自動車株式会社 阿部眞一氏、石川直樹氏

#### 最適化を行う前後の制御構造





モデルベース導入時の開発プロセスにおける各工程と使用されるツールの利点

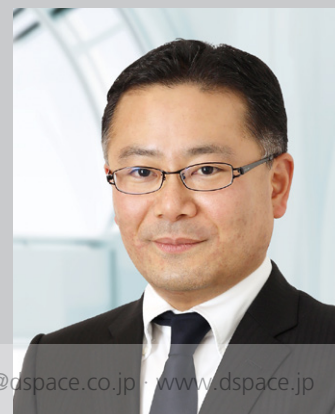
## 「ツールを活用することにより、HV 開発の効率化を進める準備を整えることができました」

トヨタ自動車株式会社 阿部眞一氏

阿部眞一氏

HV システム制御開発部 部長、  
トヨタパワートレーンカンパニー、  
トヨタ自動車株式会社 (愛知県)

石川直樹氏

元 HV システム制御開発部  
HV 制御先行開発室 主任  
現ユニット開発基盤デジタル改革部、  
プロセス改革室 MBD 制御2G、  
トヨタパワートレーンカンパニー、  
トヨタ自動車株式会社 (愛知県)

最適化された開発プロセスでは、工程が必要最小限になるため、開発効率が向上します。

