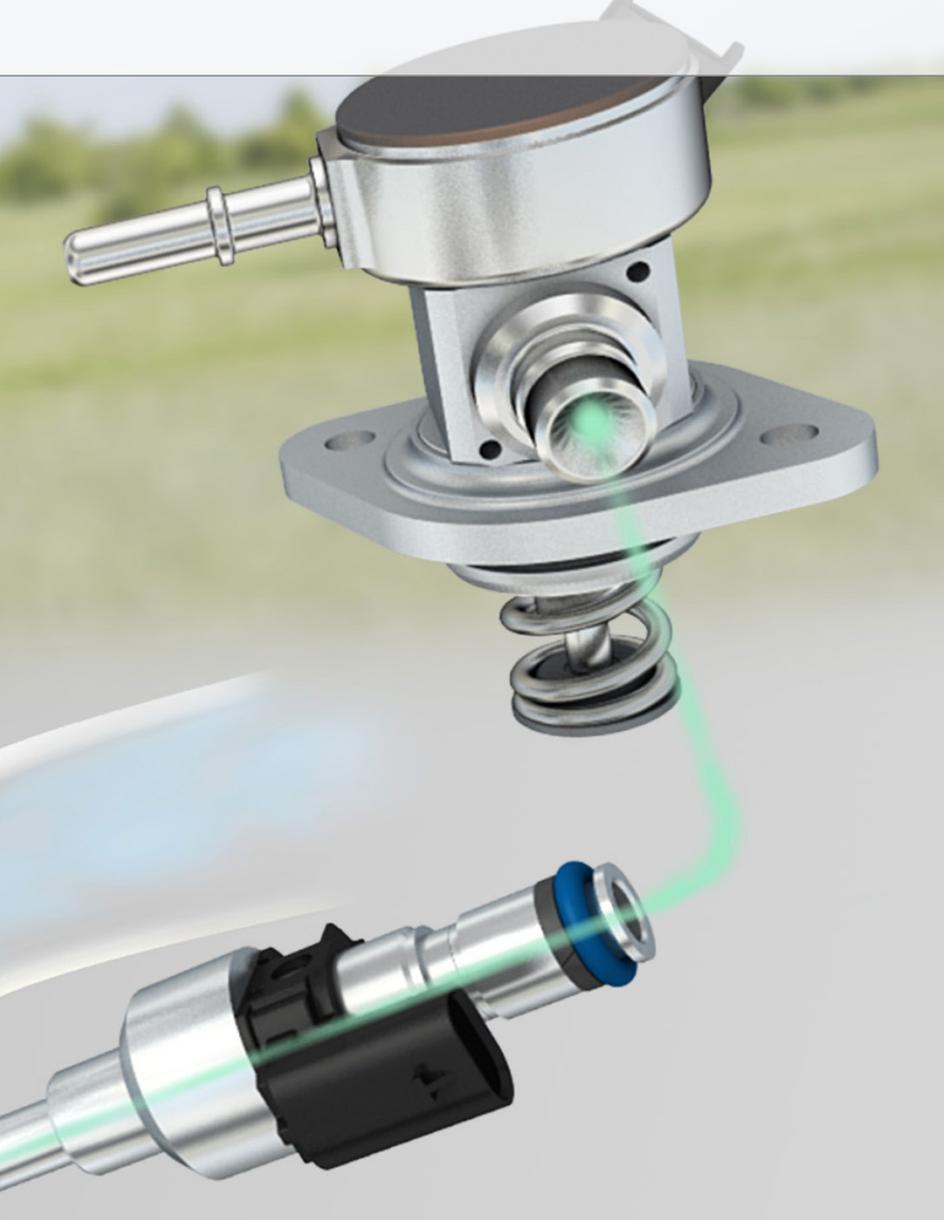


クローズドループテストシステムの
セットアップによる燃料インジェクタの
高精度制御

The Perfect Dosage

ガソリンエンジンでは、空気 / 燃料の混合気を完全に調整することが効率的な燃焼の前提条件となります。Continental 社では、エンジンのライフサイクル全体を通じて必要となる正確な量の燃料を常に供給できる新しい制御方式を搭載したインジェクションシステムを開発しています。同社では、ラボでの正確な試験のために dSPACE のテストシステムを使用しています。



排ガス規制の厳格化により、火花点火エンジンの開発には新たな課題が生じています。つまり、これまでにない新たな技術的アプローチにより、従来よりも厳しい排出基準に適合できるエンジンが求められています。特に、理想的な空燃比の混合気を作り出し、効率性の高い燃焼を実現するには、適切な燃油量を精密に噴射することが必要となります。このような場合、必要とされる量の燃油を提供するために、ノズルの開閉間隔を変化させることができる電子制御式インジェクタを使用します。ただし、この噴射プロセスの場合、インジェクタ制御の間隔と現在のレベルの影響を受けるという側面があります。また、燃圧もインジェクタニードルをリフトさせる原因となります。従来の噴射プロセスでは、予制御式噴射が使用されており、インジェクタの開閉間隔の決定は電子エンジン制御ユ

ニット (EECU) が行っています。この方式では、インジェクタの製造上の機械的公差や経年を把握して修正することができます。そのため、実際の開弁時間は経年的に変化してしまい、差異が生じることになります。自動車部品メーカーである Continental 社では、開弁時間および噴射する燃油量を計測し制御するためのプロセスを開発しました。

COSI による高精度の燃料噴射

制御式ソレノイド噴射 (COSI) と呼ばれるセンサレス評価システムは、特にインジェクタの開弁タイミングを検出する場合に使用します。このシステムは位置依存型誘導を採用しており、インジェクタコイルと可動インジェクタニードルによってこれを実現しています。インジェクタニードルがニードルシートに接触すると、特徴的な電流プロファイルがコイル上で計測されま

す。コントローラは望ましい開弁タイミングと計測された開弁タイミングとの差を制御偏差として使用し、次のパワーstrokeの開弁時間を決定します。この制御方式では、最小の公差で必要な燃料噴射量に精緻に対応することができるため、燃料噴射の大幅な向上と燃焼行程の安定化が実現します。これらは共に、適応制御プロセスによってコンポーネントのライフサイクル全体を通じて維持されます。

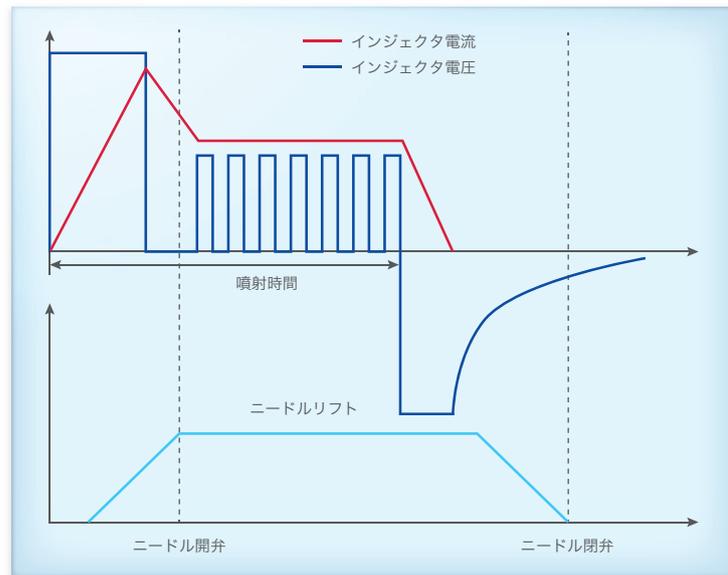
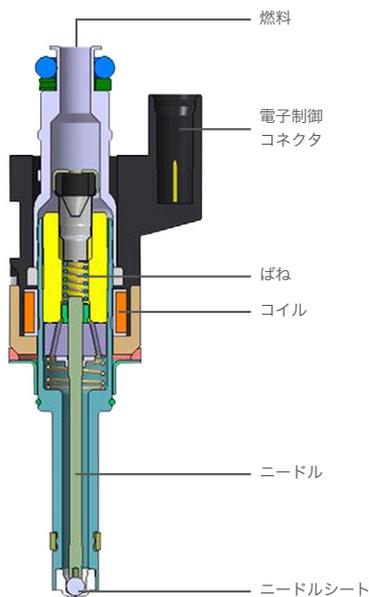
妥当性確認の要件

COSI 機能を搭載した EECU の妥当性確認を行う場合、ソフトウェア機能をテストし、インジェクタの開弁時間を検出することが必要になります。そのため、加圧下のインジェクタの特徴的な電圧および電流曲線をシミュレートしなければなりません。この場合、擬似負荷や実際の部品を使用するだけでは不十分です。なぜなら、これらは一般的に燃料を使用しないドライテストの際に使用するものであり、燃料噴射によって発生する吸気マニホールドやシリンダの圧力変化を発生させることができません。そのため、エンジンの各動作点における動作圧力を考慮しながら、リアルタイムにインジェクタの電気的挙動をシミュレートできるソリューションが必要になります。ただし、この場合に大きな課題となるのは、ほんの数ミリ秒しか続かない極めて短いインジェクタの開弁時間です。このような開弁時間では、使用されている各コンポーネントのわずかな差異も重要になってきます。そのため、容易に扱えて、さらにはシミュレーションにも柔軟に対応できるテストソリューションが必要となります。

仮想インジェクタを使用したテスト

一般に、EECU の妥当性確認には HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレータを使用します。そのため、Continental 社では、COSI 機能をテストできるよう HIL シミュレータの拡張を図りました。高度に動的なプロセスは短い時間間隔で発生します。そのため、同社がインジェクタの挙動を高速に計算処理できたのは、FPGA (フィールドプログラマブルゲートアレイ) を使用した場合のみでした。また、同社がテスト領域でセットアップした dSPACE SCALEXIO HIL システムにおいて最適と思われたソリューションは、各インジェクタ向けに FPGA Board (DS2655) お

>>



左：高圧マグネットインジェクタの構成：コイルおよび可動ニードル（磁心）が可変インダクタンスを生み出します。右：理想的なインジェクタ制御、ニードル引き上げ、および噴射時間を示した図。

よび新しく開発された電子負荷モジュール (EV1139) を使用した構成でした。この構成では、電子負荷モジュールは動作電圧の影響を受けないガルバニック絶縁された EECU インターフェースとしてセットアップされており、EECU に接続されるインジェクタの実際の電流および電圧をエミュレートします。このモジュールでは、FPGA モデルで計算されたインダクタンス特性を持つインジェクタ挙動を使用します。dSPACE のオープンでカスタマイズ可能なモデルは、インジェクタの特性に合わせて正確に調整することができます。また、このセットアップは短絡や断線のテストなど、他の電氣的欠陥シミュレーションのテストもサポートしています。さらには、バルブの開閉タイミングを早めたり遅らせたりする操作が可能のため、機能的な欠陥を生成して、システムの挙動から排出ガスの値に至るまでのさまざまな情報を評

価することもできます。関連するモデルコンポーネントをパラメータ調整すれば、コンポーネントごとの差異や経年の影響をシミュレーションですばやくテストすることも可能です。

プロジェクトでの使用

Continental 社は、dSPACE の協力のもと、テストシステムの構築を進めました。まずは、情報収集、特許法に関連する疑問点の明確化、要件に関するドキュメントの作成などを行う必要がありました。両社は共にこれらの手順に沿って作業し、強力なプロトタイプを完成させました。dSPACE の開発者には完全なアクセス権が提供されたため、SCALEXIO シミュレータと ECU を適切にセットアップし、新しい COSI テストソリューションを統合することができました。テストラボにおけるコミッショニング段階では、以下の追加タスクを

実現するため、テストシステムの最適化が行われました。

- 単回および複数回の高精度燃料噴射
- インジェクタの閉弁タイミングの正確な変更
- 2つのシリンダバンクでの並列噴射

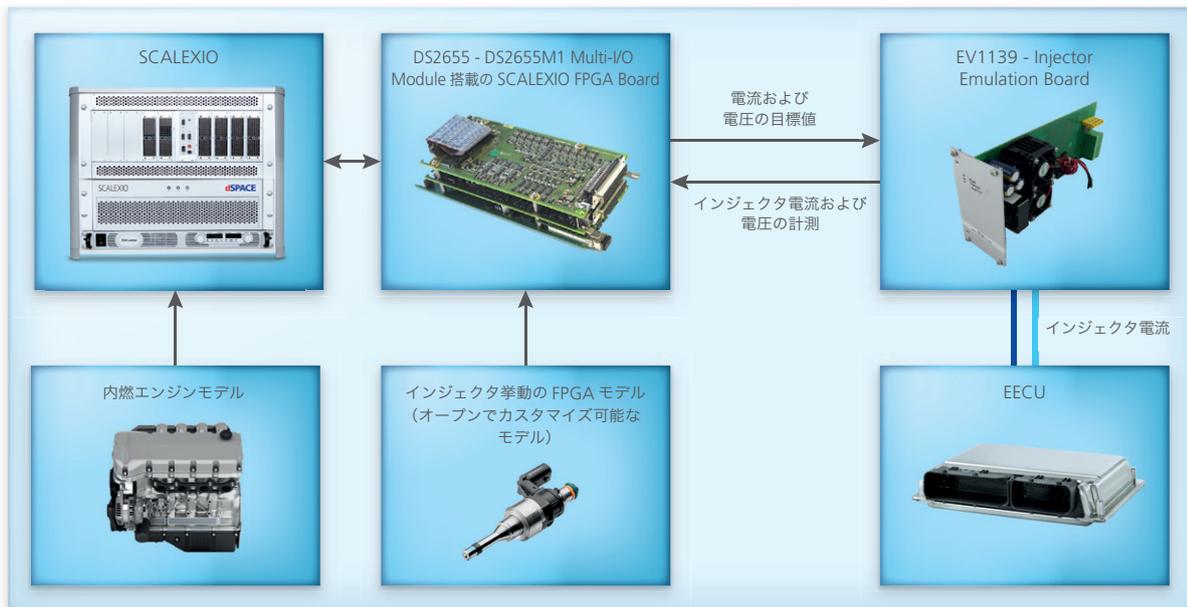
現在、テストシステムの調整は完了しており、EECU の妥当性確認プロセスに実装されています。このシステムは、COSI 機能を搭載した EECU が正確に動作するかをクローズドループで検証したり、EECU ソフトウェアの要件の妥当性を確認したりできる柔軟性と性能を備えているだけでなく、EECU の診断機能のテストも行うことができます。

まとめと展望

制御式燃料インジェクタでは、EECU の妥当性確認を行う際に新たな課題が生じて

「センサレス制御によるソレノイド駆動の妥当性検証を実現するには、ECU テストの厳しい要件への対応が必要となります。SCALEXIO シミュレータとその拡張ソリューションを使用すると、極めて動的なプロセスを高精度で再現することが可能になり、ECU の検証における信頼性が向上します。」

Michael Mench 氏、Continental 社



インジェクタシミュレーション向けの SCALEXIO HIL シミュレータの構成：内燃エンジンのシミュレーションは SCALEXIO プロセッサユニットで行われます。インジェクタのシミュレーションは、EV1139 電子負荷モジュールを制御する FPGA ボードにより行われます。負荷は EECU に対して実際のインジェクタのように挙動し、実際の電圧および電流を生成します。その後、電流および電圧の計測値が FPGA ボードに返されます。

いました。そのため、Continental 社は dSPACE の協力のもと、コントローラのテストおよび妥当性確認のための新たなテストソリューションを設計しました。このテストソリューションでは、インジェクタの挙動をシミュレートし、実際の電流をエミュレートすることができます。これは、高速な FPGA ベースの演算ユニットと電子負荷を使用することで実現しました。これにより、

EECU をクローズドループで動作させたり、ラボで柔軟にテストしたりできるようになりました。現在、Continental 社ではこのテストシステムを使用して、最新世代の EECU の妥当性確認を行っています。このセットアップは極めて柔軟性に優れており、将来的な ECU 機能の開発にも容易に利用することができます。■

Michael Mench 氏、
Alexander Zschake 氏、
Continental 社

図 4：インジェクタ電流の計測値（上）と dSPACE ControlDesk で表示したシミュレーション値（下）との比較：両波形がほぼ一致していることが瞬時に見て取れます。



Michael Mench 氏
Continental 社（レーゲンスブルク、ドイツ）
インジェクションシステムの妥当性確認
担当者



Alexander Zschake 氏
Continental 社（レーゲンスブルク、ドイツ）
インジェクションシステムの妥当性確認
担当者

