

Virtual Engine Test Bench

先進テストベンチ：リアルタイム対応の熱力学エンジンモデル
(Hyundai Motor Europe Technical Center GmbH)



可変バルブシステムは最新のガソリンエンジンの効率を改善します。可変バルブシステム用に設計されたエンジン制御ユニットのテストには、高い物理量分解能を持つ斬新で詳細なシミュレーションモデルが必要です。精密なシミュレーション環境でラピッドプロトタイピングシステムを使用することによって、制御ユニットがまだ存在しない極めて早期の開発段階で、エンジン制御機能のテストが可能になります。これは仮想テストベンチへの新たな一歩です。

ディーゼルエンジンの燃費は、シリンダ内への燃料直接噴射によって改善されました。そしてガソリンエンジンに対しても、新たな制御コンセプトにより、同様の効果が見込まれます。中でも注目されるのが、均質予混合圧縮着火 (HCCI)、可変バルブタイミング (VVT)、連続可変バルブリフト (CVVL) です。これらの技術は、古典的なスロットル式給気量制御に代わって、ガス交換損失を低減し、大きく燃費を改善します (11 ページの「Technology Background」参照)。しかし、バルブの開閉タイミングとリフト (CVVL) を制御するための新たな自由度は、エンジン制御機能の開発と適合の

作業量を増加させます。これに加えて、仮想エンジンテストベンチ上の HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレーションの要求も生じさせます。今日まで、平均値モデルが使用されてきましたが、エンジンプロセスにおける新たな制御要素の影響を表現するには、平均値モデルの拡張が必要です。良い面としては、新しい詳細エンジンモデルによって、従来の適合タスクを実機エンジンのテストベンチから HIL テストベンチへ移行できます。このため、物理的で、リアルタイム対応のエンジンモデルによって、モデルベース開発プロセスが合理化され、開発効率が全体的に大きく改善されます。

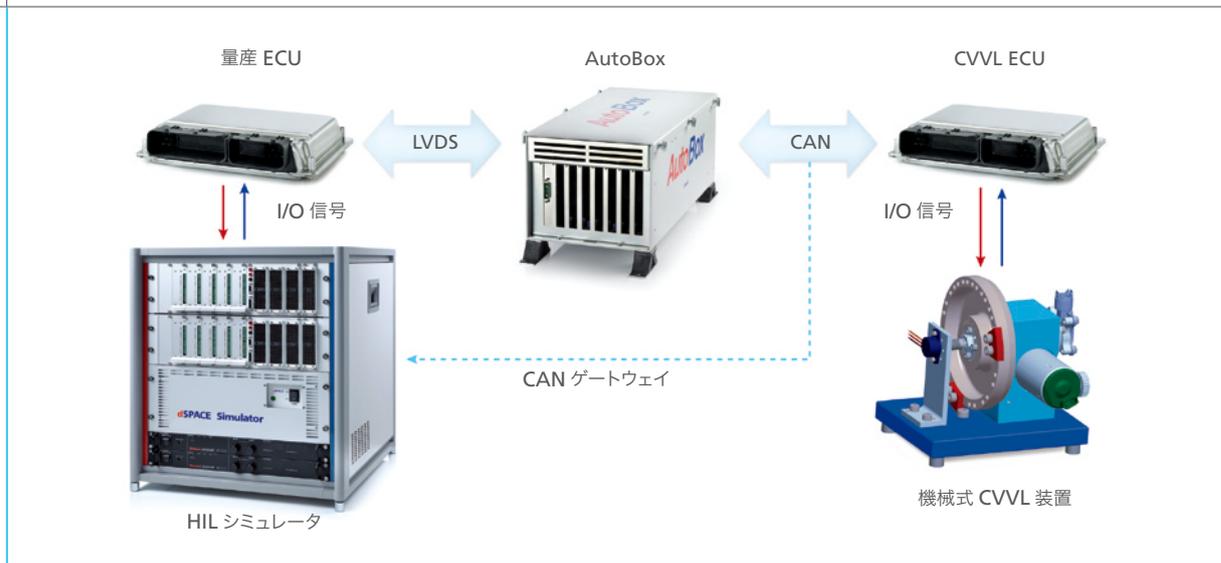


図 1：量産 ECU、新機能 CVVL 用ラビッドプロトタイプリングシステム、実バルブトレイン値を決定するための実負荷を含む HIL システムの構成

連続可変バルブリフトの開発

ドイツのリュッセルスハイムに所在する Hyundai Motor Europe Technical Center 社 (HMETC) では、先進開発プロジェクトの中で、連続可変バルブリフトを装備したガソリンエンジン用制御機能の解析が進められています。ここでは、プロトタイプリングシステムとして dSPACE AutoBox がバイパス手法で使用され、既存ガソリンエンジンの電子制御ユニット (ECU) が、可変バルブリフト用 ECU 機能によって拡張されました (「Technology Background」参照)。筒内圧に基づく新しい ASM Gasoline Engine InCylinder モデルが、開発の早期段階で、HIL テストベンチ上の新機能のテストと適合用に使用されます。ASM Gasoline Engine InCylinder モデルは、dSPACE の自動車用シミュレーションモデル (ASM) の一部です。

Patrizio Agostinelli 氏

Hyundai Motor Europe Technical Center 社 (リュッセルスハイム、ドイツ) における先進ガソリンエンジン用新機能制御コンセプトの開発責任者



プロトタイプコントローラの構造

新機能エンジン制御の開発には、スロットル制御式ガソリンエンジン用の既存量産 ECU が、dSPACE AutoBox とともに使用されます。新機能部分は AutoBox によって実行され、量産 ECU のスロットル式給気量制御機能は既に無効化されています。これに置き換わる給気量制御機能として、プロトタイプリングシステム上の可変バルブリフト制御機能が、バイパス手法の ECU によって実行されます (「Technology Background」参照)。したがって、量産 ECU の既存構造の大部分は、変更されずにそのまま残されます。

HIL シミュレータの機能

HIL システムの役割は、量産 ECU 上の給気要求量、プロトタイプリングシステム上の給気量制御、モデルによって計算されるエンジン給気量の相互作用をリアルタイムにシミュレートすることです。ASM Gasoline Engine InCylinder モデル内の筒内圧に基づく新しいエンジンモデルは、エンジンプロセスに対する可変バルブリフトの影響を計算します。この新世代エンジンモデルは、シリンダ給気量を、吸気および排気バルブを通過する混合気の流量に応じて計算します。これによって、シミュレーションに可変バルブトレインの影響を容易に含めることができます。このプロジェクトにおいては、オープンモデルのモジュール型構造によって、吸気側のバルブリフト変化を容易に組み込むことができました。

技術的な構成

開発用 ECU を作成するために、量産エンジン用 ECU が DCI-GSI バイパスと適合モジュールによって拡張され、高速 LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) 接続を介して、dSPACE AutoBox プロトタイプリングシステムへ接続されました (図 1)。要求給気量が量産 ECU 上で計算され、その結果が LVDS 接続を介して AutoBox 上で開発中の新制御機能へ転送されます。この新制御機能は、必要バルブリフト量を計算し、その結果を CAN バス経由で別のサテライト ECU (CVVL ドライバ：バルブリフト位置コントローラを内蔵) へ送信します。CVVL ドライバの位置センサに現実的なフィードバック信号を与えるために、バルブトレインのメカトロニクス部分が実負荷として構成され、これによって CVVL ドライバ ECU が閉制御ループで動作可能になります。これに加えて、実在の CVVL システムに置き換わる仮想モデルが HIL システム上にインストールされました。したがって、可変バルブリフトの HIL シミュレーションには、実負荷から測定されたリフトの代わりに、モデルでシミュレートされたリフトを使用することもできます。AutoBox と CVVL ドライバの間の必要な信号は、CAN ゲートウェイ経由で HIL シミュレータへ転送されます。したがって、この HIL システムは、実負荷と CVVL ドライバが存在しなくても動作可能です。これは保守性と柔軟性を高め、エラー原因の特定に役立ちます。

「HIL シミュレータと筒内圧に基づく新しいエンジンモデルを使用することにより、連続可変バルブリフト機構を備えたガソリンエンジンの給気制御の新しいアルゴリズムの開発と妥当性の確認を非常に短期間で効率良く行うことができました。さらに、これらの制御アルゴリズムは、プロトタイプ車両にも問題なく実装することができました」

Patrizio Agostinelli 氏, Hyundai Motor Europe Technical Center 社

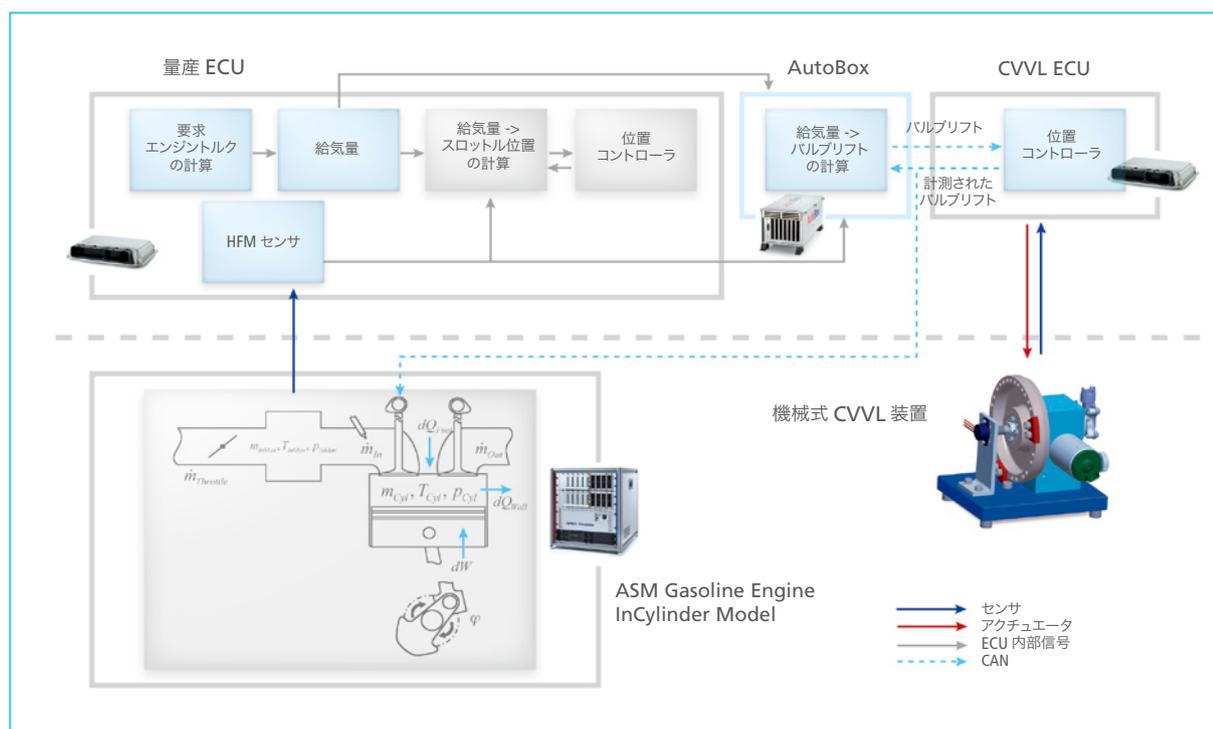
コントローラと被制御システムの機能的構造

量産 ECU は、現在のエンジン回転数とアクセルペダル位置に基づいて、ドライバーが求めているトルク (トルク要求) を計算し、次いで必要なリファレンス変数と給気量を決定します (図 2)。給気量制御の役割は、与えられた要求給気量に応じて、給気量に影響する「制御変数」を適切に計算することです。「制御変数」とは、バルブタイミングの効果をわきにおいて分かりやすく言えば、通常ガソリンエンジンシステムにおける「スロットル位置」に相当します。CVVL システムでは「吸気バルブの

リフト量」が制御変数になります。ある制御変数から別の制御変数への変換は、通常、モデルベースのフィードフォワード制御を介して、AutoBox 上で実行されます。この制御は、モデル誤差を相殺する適応アルゴリズムによってオーバーレイされます。計算された要求バルブリフト量は、CVVL ドライバへ転送されます。CVVL ドライバは要求リフト量に従ってバルブリフトを制御し、実際に得られたリフト量を返します。返された実リフト量と他の変数 (吸気の圧力/温度、エンジン回転数、バルブタイミングなど) から、実際の給気量が計算されます。制御の適応には、給気量の実測値

も必要です。この値を得るために、ECU は熱膜質量流量計 (HFM) を使用して、吸気システム内の質量流量を評価します。ラピッドプロトotypingを組み合わせた量産 ECU と、それに接続された HIL システムで構成されるこのセットアップでは、HIL シミュレータ上で実行されるプラントモデルから必要なすべての計測変数を得ることができます。たとえばエンジンモデルからは、吸気システム内の質量流量のシミュレート値が得られます。物理量ベースのシミュレーションは、質量流量を吸気バルブリフト (図 3) に応じてシミュレートすることを可能にします。

図 2 : 量産 ECU と AutoBox で構成される開発用 ECU に HIL シミュレータを接続



開発システムの評価

HIL シミュレータ、プロトタイピングのバイパスシステム、物理量エンジンモデルの組み合わせは、新型エンジン ECU 機能のリアルタイムシミュレーションを、極めて早期の開発段階で可能にします。エンジンモデルのパラメータ同定が、テストベンチの測定データに基づいて行われ、比較的短時間でモデル値と実測値の良好な一致が得られました。筒内圧モデルは、圧力と質量流量を十分な精度で計算し、ECU はエラーなく動作可能です。エンジンテストベンチでは計測されなかったエンジン運転条件（バルブタイミング/バルブリフトの組み合わせ）でも、十分にシミュレート可能です。

まとめ

新機能バルブ制御技術では、HIL テストに新たな手法とモデルが必要となります。物理量エンジンモデルによって、開発の極めて早期に HIL システム上で ECU プロジェクトのテストを実施することが可能になりました。新機能はバイパスシステム上に実装され、既存の量産 ECU との組み合わせで使用されました。筒内圧に基づくエンジンモデルによって、純粋な機能テストのみならず、新機能コントローラコンセプトの事前適合タスクも HIL テストベンチ上で実施可能になりました。これによって、従来必要とされた実機テストベンチ上の試行回数が削減されました。開発の早期段階で作成されたテストシナリオを、その後の段階でも再利用できることは大きな利点となります。新機能アルゴリズムは既にラピッドコントロールプロトタイピングシステムを接続した量産 ECU に実装済みであるため、今後の試作フェーズにはそれらを活用することができます。

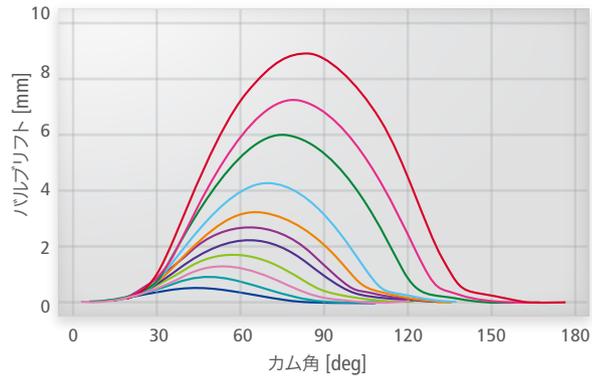


図3：ASM Gasoline Engine In-Cylinder モデルへ組み込まれた CVVL の可変バルブリフト曲線

オープンモデルは、シミュレーションモデルの拡張を容易にします。必要なパラメータと計測変数を容易に見つけ出して、リアルタイム適合中に表示することができます。

利点：シミュレータによる事前適合

シミュレータは純粋な機能テスト以外にも有効に活用できます。HIL システムを使用すれば、コントローラのパラメータを早期の開発段階で事前適合することもできます。これによって、ラピッドコントロールプロトタイピングシステムをエンジンテストベンチへ導入する以前に、コントローラのパラメータを適切に設定することができます。これはつまり、必要な実験業務の一部を、高価なエンジンテストベンチから比較的経済的な HIL シミュレータへ移行できることを意味します。コントローラ開発における HIL とラピッドコントロールプロトタイピングの組み合わせは、コントローラの適合と構築により高い柔軟性をもたらします。さらに、プラント自体のパラメータとサブモデルを変更することによって、さまざまな変数を容易に検討することができます。このような業務をテストベンチ上で行うと、時間と経費がかさむ適応作業が必要になります。

利点：RCP と HIL のリンクによるフロントローディング

さらなる利点は、拡張機能をラピッドプロトタイピング ECU から量産 ECU へ移植した後も、HIL テストベンチから得られたモデル、レイアウト、自動化テストを再利用できることです。この新機能 ECU は徹底的にテストする必要があります。このようなテストには、それより前の開発段階で得られた既存のモデルと実験環境を活用することができます。言い換えれば、このような物理量モデルは、コントローラ開発フェーズとそれに続く機能テストの両期間を通して、HIL システム上と実機テストベンチ上の開発プロセス間の統合化を促進します。■

Patrizio Agostinelli
Hyundai Motor Europe Technical Center
GmbH, ドイツ



Hyundai Motor Europe Technical Center 社 (HMETC)、リュッセルスハイム、ドイツ

Technology Background

CVVL エンジンテストベンチで使用された技術と開発手法

先進ガソリンエンジンコンセプト

内燃機関は燃料と空気の混合気を燃焼させて作動します。エンジン設計者は、混合気の状態を表現するために2つの特性値を使用します。第1の特性値は、噴射された燃料を過不足なく完全に燃焼させるために必要な空気/燃料比（空燃比）です。これは量論比と呼ばれます。ガソリンエンジンでは、燃料によりますが、この値は14.6になります。これはつまり、1 kg の燃料を完全に燃焼させるには14.6 kg の空気が必要であることを意味します。第2の特性値はラムダ値です。この値は、混合気の実際の空燃比が上記の量論比（ラムダ = 1）からどの程度隔たっているのかを示します。ガソリンエンジンの性能は、吸入される混合気量によって制御されます。吸入される新気量に対して、適正量の燃料がシリンダの上流で噴射されて、空気と混合されます。ほとんどの場合、この混合比は量論比に保たれます。すなわち、噴射された燃料を完全に燃焼させるのにちょうど必要な量の空気が常に確保されます。ラムダが常に1に保たれる通常のガソリンエンジンでは、燃料噴射量によって直接エンジン出力を制御することはできません。特定量の燃料を噴射するには、吸入される新気

の量を常にそれに見合った量に制御する必要があります。

このような古典的な給気量制御にはスロットルが使用されます。スロットルは、エンジン吸気システムの断面積を絞ることによって、吸気バルブ上流の圧力を制御します。吸入される空気量に見合った量の燃料が、吸気バルブの上流で噴射されて、燃料/空気混合気が形成されます。吸気バルブが開くと、混合気がシリンダ内へ吸引されます。このとき、スロットルによって調整される吸気バルブ上流の圧力が低ければ低いほど、吸気バルブが閉じた後のシリンダ内の混合気量（質量）が減少します。混合気の体積はほぼ一定となります。これはすなわち、燃料の質量も減少することを意味します。なぜならば、燃料の質量は空気質量に対して常に一定の比率に保たれるからです。したがって、吸気マニホールド圧力を調整することによって、給気量を制御することができます。この方法の短所は、吸気バルブ上流の圧力を下げると、混合気の吸引に費やされる仕事量が増加してしまう点にあります。これはガス交換仕事と呼ばれます。その仕事量はピストンに課せられるため、クランクシャフトから取り出され

る出力がその分減少します。可変バルブトレイン（可変バルブタイミングおよび/または可変バルブリフト）は、負荷/エンジン回転数マップの全域にわたって、スロットルを使用せずにガソリンエンジンの給気量を制御することができます。この場合、負荷/エンジン回転数の全域にわたって、混合気が大気圧レベルで吸引されるため、ガス交換仕事量（ひいては燃料消費量）が減少します（図4）。

加えて、吸気バルブと排気バルブの開角幅を変化させることによって、内部EGR量とシリンダ内の残留ガス量を制御することもできます。スロットルを除去し、空気/燃料の混合を改善することによって、ガソリンエンジンの効率と燃費が向上します。

HIL テスト

HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレータと仮想エンジンを使用することによって、電子制御ユニットの再現可能かつ自動実行可能な機能テストが可能になります。ECU アクチュエータ信号がI/Oボードによって読み取られて、リアルタイムエンジンモデルへ転送されます。エンジンモデルは、得られた各種の情報からエンジンの挙動を計算

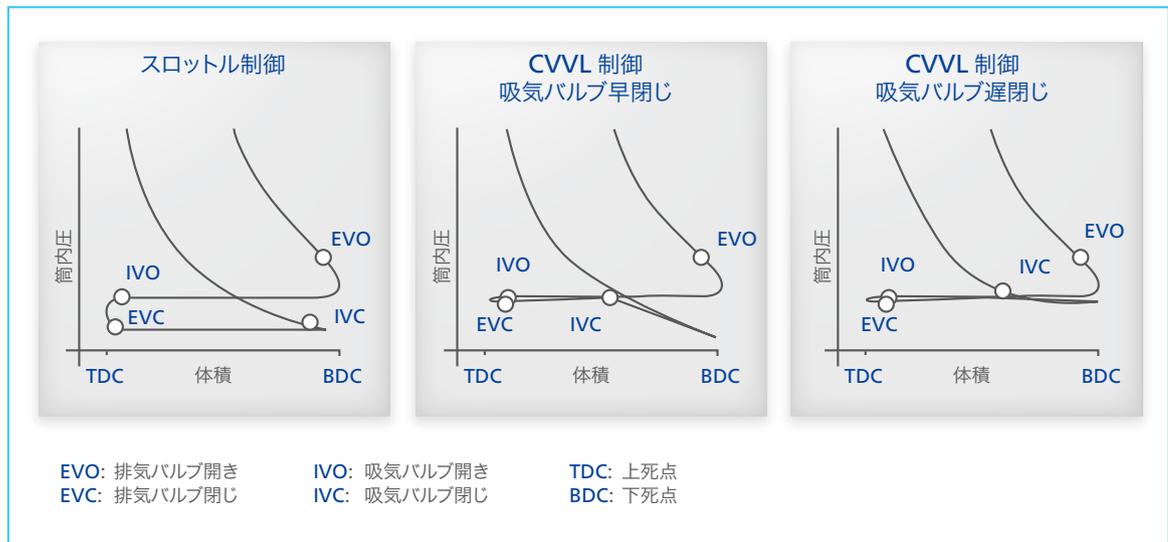


図 4: スロットル (左側) と可変バルブリフト (中央および右側) によるガソリンエンジンのガス交換仕事

して妥当なセンサ信号を生成し、これを電気信号として ECU へ返します。これによって、仮想エンジンによる閉制御ループでのテスト実施が可能になります。

エンジンシミュレーションモデル

リアルタイムエンジンシミュレーションには、従来、いわゆる平均値モデルが使用されてきました。このようなモデルでは、シミュレートされるエンジン動作データが、すべてエンジンの 1 サイクル (クランクシャフト 2 回転) で平均化されます。この種のモデルは、HIL テストベンチの大部分にとって十分なクオリティを提供することができ、シミュレーション精度、計算時間、パラメータ設定量のバランスという観点から、実用的なソリューションであると言えます。しかし、先進エンジンのコンセプトは、リアルタイム対応シミュレーションモデルに対してより高度な要求を課します。筒内圧計測を備えたディーゼルエンジ

ンや、可変バルブタイミング/リフトを備えたガソリンエンジンは、従来の平均値モデルに比べて、より精密にエンジンプロセスを記述するリアルタイム対応モデルを必要とします。これらの筒内圧モデルは、たとえば、吸気バルブと排気バルブを通過する流量をシミュレートすることによって、シリンダ給気量を計算することができます。この計算にはルックアップテーブルは使用されません。そのかわりに、吸気/排気システムとシリンダの間の質量流量が、バルブの開閉タイミングと瞬時のバルブリフトに対応して計算され、シリンダ内の混合気量がシミュレーションによって自動的に提供されます。これは、シミュレーションがバルブのリフトとタイミングの変化を考慮可能であることを意味します。

図 5 に、熱力学第 1 法則、新気/燃料/排気ガスの質量保存則、理想気体の法則に基づく基本的なシミュレ

ーションアプローチを示します。シリンダ内の状態は、燃焼、ピストン仕事、壁面熱損失、吸排気バルブを通過するエンタルピ流れの関数として計算されます。これは、温度、圧力、質量などの値の時間依存挙動 (現状 100 μ s のステップ幅) としての表現を可能にします。

ラピッドプロトタイプング

ラピッドプロトタイプングは、実プラント上で新機能制御アルゴリズムを実装およびテストするための実績のある方法です。Simulink で開発された制御アルゴリズムは、自動コード生成を介して、強力なプロトタイプングハードウェアへ直接ダウンロード可能です。このアルゴリズムは、Simulink モデル内で定義済みの I/O インターフェースを介してプラントへ接続可能です。ECU 開発プロセスでは、フルバス手法とバイパス手法が区別されます。フルバス手法では、エン

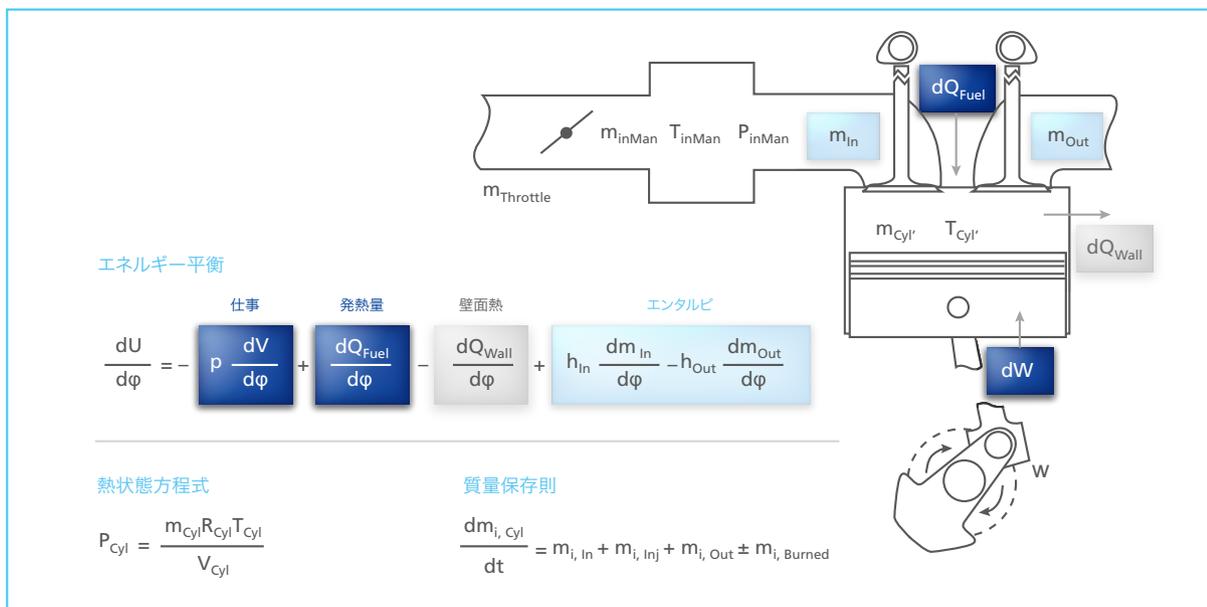


図5：筒内圧モデルの計算式

ジン等を制御する ECU の全体がプロトタイプハードウェアによって置き換えられます。バイパス手法では、プロトタイプハードウェア上の追加機能によって、既存のエンジン ECU の機能が拡張さ

れます (図 6)。たとえば後者の場合、給気量はスロットルによって制御されるのではなく、要求給気量がリファレンス値として、プロトタイプ ECU 上の新機能制御アルゴリズムへ転送されます。

次いで、そのリファレンス値に対応する必要バルブリフト量が、このアルゴリズムによって計算されます。このようなセットアップでは、既存 ECU をそのまま使用することができます。

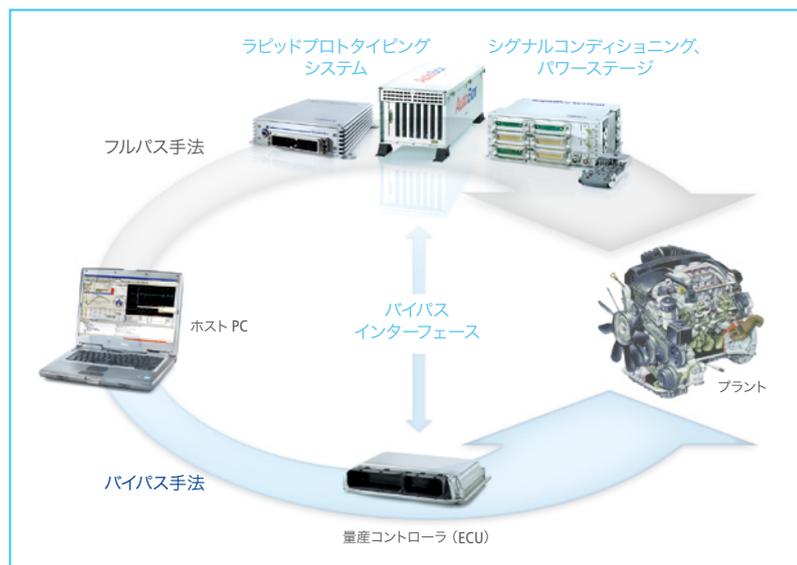


図6：フルバス手法およびバイパス手法によるラピッドプロトタイプ

用語解説

CVVL – 連続可変バルブリフトでは、吸気および排気バルブのリフト量、開角幅、タイミングのいずれかをエンジン運転中に変更することができる。

DCI GSI – dSPACE プロトタイプシステムをホスト PC へ接続するための低レイテンシバイパスインターフェース。

HCCI – 均質予混合圧縮着火。十分に混合された燃料と空気が圧縮されて、燃焼室内の混合気全体が自着火点に達する燃焼の形態。

LVDS – 低電圧差動信号。高速データ転送用のインターフェース規格。