

次世代直列 4 気筒エンジン用高機能 ECU の開発

Development of Highly Functional ECU for Next Generation of Inline-four Engines

村 上 真*
Makoto MURAKAMI

山 中 竜 夫*
Tatsuo YAMANAKA

貝 谷 泰 正*
Yasumasa KAITANI

要 旨

ABSTRACT

次世代の直噴方式エンジン、ポートインジェクション方式エンジンおよびハイブリッド電気自動車用エンジンへの適用を目的として、新たな機能構成のエンジンコントロールユニットを開発した。機能実現にあたり、構成部品の発熱低減や部品点数の削減をおこなった。その結果、従来のエンジンコントロールユニットに比べて発熱を低減し、部品点数を 30% 削減した。

また、直噴方式エンジンにおいて、インジェクタ最小噴射量の低減のため、インジェクタの開弁タイミングを検知することでフィードバック制御をおこない、従来のシステムに比べてインジェクタ駆動信号時間の最小値を 46% 低減できた。

We developed an engine control unit having a new functional composition, with the goal of applying it to the next generation of direct-injection engines, port-injection engines, and hybrid electric vehicle engines. To achieve these functions, the heat generated by the components and the number of parts were reduced. As a result, we decreased generated heat and reduced the number of parts by 30% compared to the conventional engine control unit.

Also, in order to reduce the minimum injection quantity in direct-injection engines, feedback control was performed by detecting the close timing of the injector, and we reduced the minimum value of the injector drive signal time by 46% compared to the conventional system.

1. まえがき

パワートレインシステムのバリエーションを考えたとき、Fig. 1 に示すように、従来はエンジンとトランスミッションの組み合わせは限られていた。従って、これを制御するエンジンコントロールユニット (Engine Control Unit: ECU) とトランスミッションコントロールユニット (Transmission Control Unit: TCU) の組み合わせや、それらに要求される機能も限定されていた。このため、ECU

と TCU を一つのユニットとして統合して開発する事例があった。しかし、近年のますます厳しくなる環境規制対応のために、Fig. 2 に示すようにエンジンとトランスミッションに要求される機能が増加している。機能が増加すると、ECU と TCU を統合して開発することが難しくなるため、分けて開発をおこなう必要が出てきた。エンジンに関しては、燃費性に優れる直噴方式エンジンの採用が

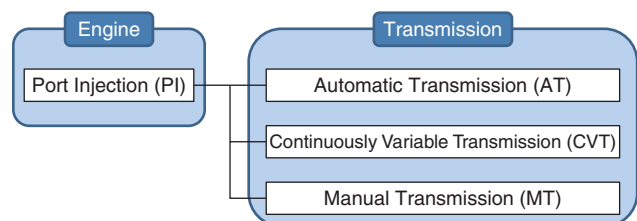


Fig. 1 Power train variations

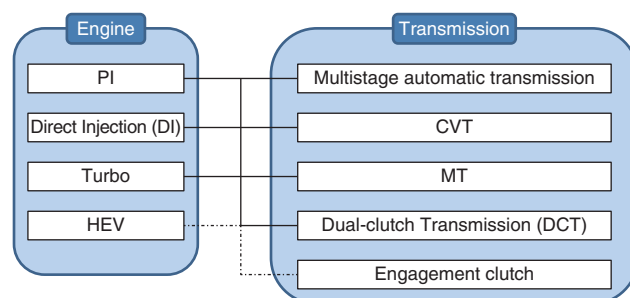


Fig. 2 Diversification of power train variations

* 四輪 R&D センター

拡大しており、また、過給機構の採用によるダウンサイジング化も加速している⁽¹⁾。Fig. 3に示すように、こうした新機能を実現するためにエンジンに付随するデバイスの種類が増大し、その結果ECUを構成する部品点数が増加し、部品からの発熱量も増加する。また、デバイスを制御するための新たなアルゴリズムも必要になってきている⁽²⁾。一方で、機能増加には対応しつつ、コストやサイズは抑える必要がある。そこで、次世代の直噴方式エンジン、ポートインジェクション方式エンジン、ハイブリッド電気自動車 (Hybrid Electric Vehicle: HEV) 用エンジンへの適用が可能な高機能ECUの開発をおこなった。

本稿では、高機能ECUを成立させるための機能集約技術、デバイス増加に伴って増加するECUの回路発熱を低減させる技術の応用例を紹介する。

また、自動車に関わるCO₂排出規制や燃費規制もますます厳しくなり、今後も全世界で排出ガス規制の強化が予定されている⁽³⁾。欧州では、2014年から新法規EURO6の発効が予定されている。特に、直噴方式エンジンは、粒子状物質 (Particulate Matter: PM) を低減するためにインジェクタの分割噴射が必要となってくる⁽⁴⁾。分割噴射は、混合気の均質度を向上し、燃料の筒内壁面付着を抑制することで、PM低減に役立つことがわかっている。分割噴射のためには、インジェクタ駆動信号時間 (Ti) の使用可能最小値 (MinTi) を低減して、最小噴射量を低減する必要がある。このMinTiを低減させる有効な手段として、インジェクタ閉弁タイミングを検知して補正をおこなう技術を紹介する。

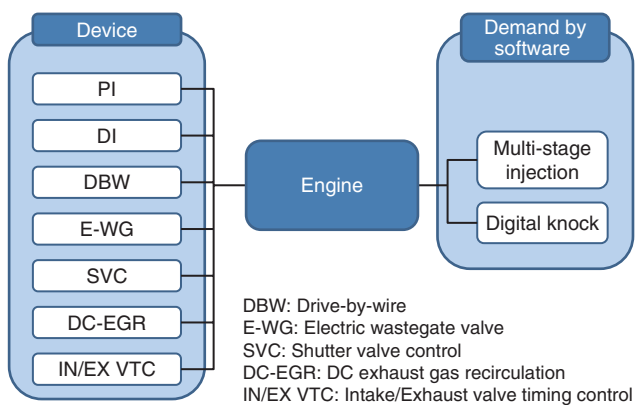


Fig. 3 Engine device and demand by software

2. 開発のねらい

これまで述べてきたように、環境規制対応に必要な技術を可能とするための機能が増加し、それに伴いデバイスおよびソフトウェアが増加する。この技術とデバイス、ソフトウェアの関係を Table 1 に示す。さらに、直噴エンジン、過給機構に加えて HEV 用エンジンを想定した場合、ECU

Table 1 Engine technology

Technology	Device and software
Lean-burn engine technology Engine with supercharger technology Downsizing engine technology	E-WG DC-EGR
Atkinson cycle technology	IN/EX VTC
PM reduction technology	Multi-stage injection Dual injection
Knock detection technology	Digital knock filter

として制御対象となるデバイスが増加するため、ますます回路構成部品は多くなり、回路発熱も増える懸念がある。

増加する部品点数に関しては、集約ドライバICの活用や昇降圧電源による低電圧動作回路の見直し、マイコン機能の活用による周辺回路の簡素化などによって、回路構成部品を削減する。

また、直噴方式エンジン用ECUは、ポートインジェクション方式エンジン用ECUに比べて、回路発熱も高くなる。このため、放熱構造が複雑化して、機構重量が増加する傾向がある。この機構重量を削減することをねらいとして、インジェクタ駆動回路の発熱自体を低減し、放熱構造の簡素化による軽量化を図った。

ソフト開発においては、直噴方式エンジンのPM低減に有効な、インジェクタの分割噴射に着目した。1噴射あたりのMinTiを低減させるには、インジェクタ閉弁タイミングを検知して、補正をおこなう技術が有効であり、その成立性を確認した。

以下、ねらいについてまとめる。

- (1) さまざまなエンジンバリエーションへの適用を想定した機能実現のための部品集約
- (2) 直噴インジェクタ駆動について、駆動回路の発熱低減とMinTi低減手段の構築

3. 機能実現のための部品集約

開発したECUは、Fig. 4で示すエンジンバリエーションへの適用が可能であり、約200の機能を有する。これらの機能を実現させるために採用した技術を紹介する。

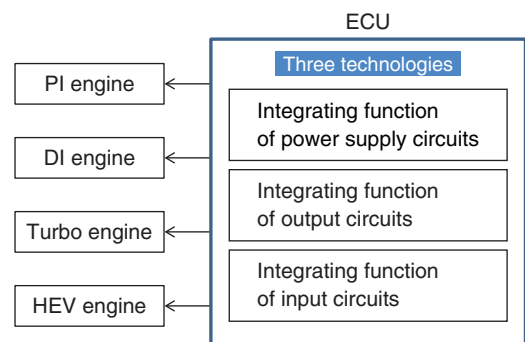


Fig. 4 Application of highly functional ECU

ECU の制御対象となる、各エンジンの約 200 の機能に対する要求分析をおこない、共通制御機能とエンジンバリエーションごとの個別制御機能を明らかにした。これをもとに、処理負荷、必要基板面積の予測をおこない、Central Processing Unit (CPU) の選定、基板サイズ、ケースサイズの目標値を定めた。

約 200 の機能を実装するために用いた技術として、Fig. 4 に示す電源構成部品の集約化、出力機能部品の集約化、入力機能部品の集約化の三つの技術を紹介する。

3.1. 電源構成部品の集約化

開発した ECU の電源生成には、システム電源 IC を採用した。システム電源 IC は、従来の電源 IC の機能に加え、CAN や LIN などの通信機能、外部からのハードウェア入力機能なども備えている。また、従来の ECU では、バッテリーの電圧変動時に供給電圧を安定化するための回路が必要であったが、今回採用したシステム電源 IC は、従来の電源 IC には無かった昇降圧機能を有しており、バッテリーの電圧変動時の供給電圧を安定化することができるようになった。これにより、従来の回路を削減できた。採用したシステム電源 IC の構成を Fig. 5 に示す。

3.2. 出力機能部品の集約化

開発した ECU の出力機能を実現するための回路の多くは、半導体に集約されている。従来から半導体への集約の考え方はあり、機能集約を進めてきたが、発熱が集中するといった課題から、集約できる機能に制限があった。しかし、近年の半導体プロセスの進化によって集約度の向上や内部抵抗の改善により、発熱損失が低減され、従来と比較し、より多くの機能を集約することができた。出力ドライバ IC の集約について、一例を Fig. 6 に示す。これにより、回路の簡素化ができ、部品点数が削減できた。

3.3. 入力機能部品の集約化

入力機能部品点数の削減として、デジタルロックフィル

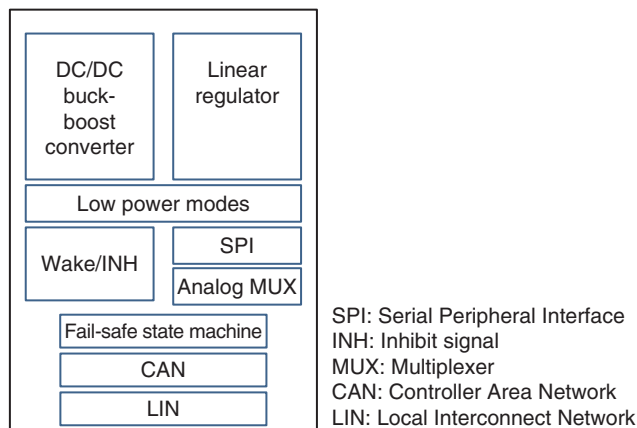


Fig. 5 System power supply IC

タの適用を一例にあげる。まず、ノッキング検知に必要な信号の周波数帯と、アナログデジタルコンバータ (Analog Digital Converter: ADC) のサンプリング周波数との関係を Fig. 7 に示す。従来の CPU では、ADC のサンプリング周波数は 100 kHz 程度であり、ノッキング検知に必要な周波数帯域と近く、高次のアナログフィルタの活用が必要であった。このため回路構成が複雑となり、部品点数も多くなっていた。

しかし、CPU の進化に伴い、ADC も高速サンプリングが可能となった。開発した ECU で使用した CPU では、1000 kHz 程度のサンプリングが可能であるため、ノッキング検知に必要な周波数帯域と離れており、低次のアナログフィルタの活用が可能となった。これにより、アナログフィルタの構成を簡素化し、部品点数を削減できた。

以上に述べた、電源構成部品、出力機能部品、入力機能部品を集約化することで、従来の ECU に比べて、部品点数を 30% 削減することができた。

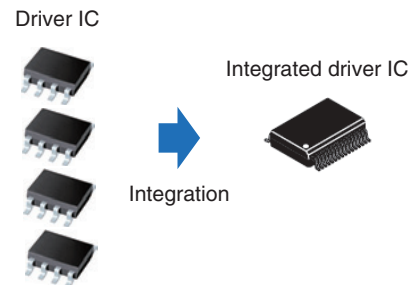


Fig. 6 Integrated driver IC

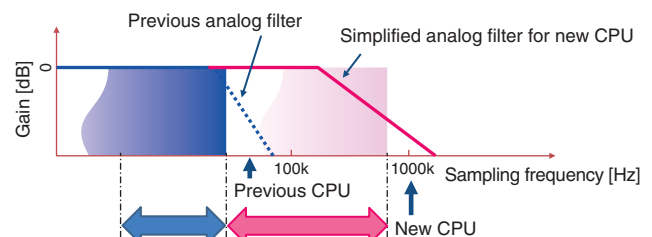


Fig. 7 Analog filter characteristics

4. 直噴インジェクタ駆動回路

4.1. 発熱低減

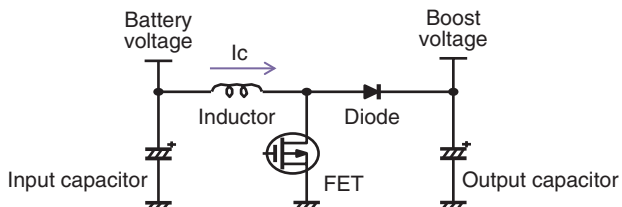
EURO6 準拠に向け、従来一回で噴射していた燃料噴射量を複数回に分割する必要がある。噴射を分割することで直噴インジェクタ駆動回数が増加し、駆動回路における出力電力量および発熱量は増大する。これらを抑制するために、直噴インジェクタ駆動回路の昇圧電源の発熱を低減させた手法について紹介する。

直噴インジェクタは、駆動するたびに駆動電圧用DC/DC昇圧回路からの開弁エネルギーの供給が必要となり、発熱量もそれに比例して増加する。そのため、噴射を分割するためには、昇圧回路の発熱低減が重要になる。そこで、昇圧回路の発熱量を計算するために、回路シミュレーションを活用し、駆動回路構成と構成部品、およびスイッチング周波数の最適化を図った。

Fig. 8 に、ECU に採用した昇圧回路の概略図を示す。バッテリー電圧を入力として昇圧することで、直噴インジェクタの駆動電圧を生成する。また、Fig. 9 に、スイッチング周波数と昇圧回路の各素子の発熱量の関係を、シミュレーション結果と実測結果についてそれぞれ示す。Fig. 9 より、スイッチング周波数が高くなると、インダクタによる発熱量は減少し、逆に半導体部品（ダイオード、FET）による発熱量は増加することがわかる。これにより、昇圧回路全体の発熱量が最小となる周波数が存在する。この周波数を使用することで、昇圧回路の発熱量を低減できた。

4.2. 直噴インジェクタ閉弁タイミング検知

分割噴射に必要な短い時間の噴射の領域は、駆動信号に対する噴射量がインジェクタごとに大きくばらつくため、これまで使用できなかった。そこで、ECU によってこのばらつきを補正する制御をおこない、今まで使用できなかった領域での噴射の実現を目指した。



Ic: DC/DC inductor current

Fig. 8 DC/DC boost converter

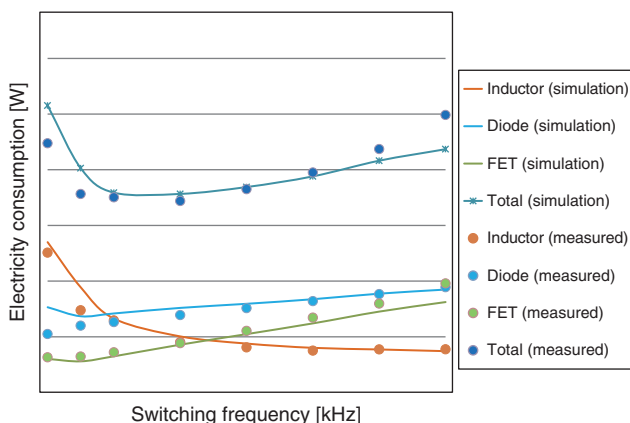


Fig. 9 Relationship between switching frequency and loss of DC/DC boost converter

4.2.1. インジェクタ噴射量と個体間ばらつき

Ti に対する噴射量 Q と、インジェクタの個体による Q のばらつきを Fig. 10 に示す。

Fig. 10 より、Ti が短い領域ではばらつきが大きくなっていることがわかる。

4.2.2. 閉弁タイミング検知アルゴリズム

閉弁タイミング検知の基本的な考え方は、閉弁時のインジェクタコア移動によってインジェクタのコイルのインダクタンスに変化が生じ、結果として電圧に生じる変曲点を検知するというものである。そこで、ECU にインジェクタの電圧を検出する回路を追加した。

ECU にて取得した電圧を信号処理することによって、閉弁により生じた電圧の変曲点を検知し、閉弁タイミングとして使用する。

4.2.3. 検知結果

検知性の確認のため、インジェクタ 10 本について、Ti に対して閉弁タイミング (Toff) の実測値と検知値を比較した。その結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 より、実測値と検知値との間に高い相関性があることがわかった。これにより、ECU にて算出した閉弁タイミングに有用性があることが立証できた。

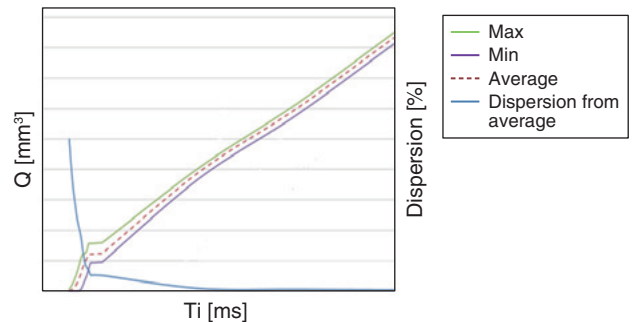


Fig. 10 Ti-Q characteristics

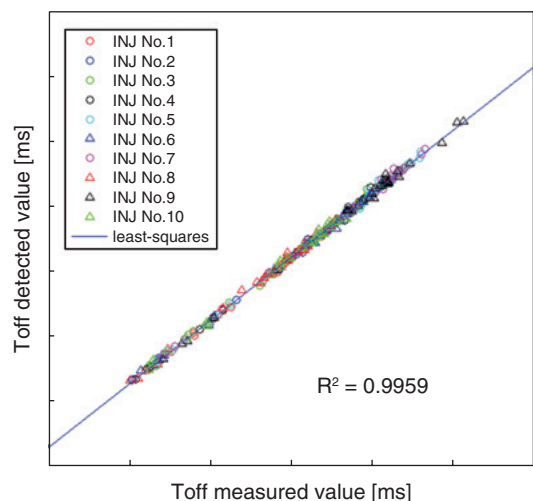


Fig. 11 Comparison of Toff measured value and Toff detected value

4.2.4. フィードバック制御

閉弁タイミングの検知結果を用いて T_i のフィードバック制御をおこなったときの T_i - Q 特性を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 より、制御前に比べて T_i が短い領域においても Q のばらつきが低減できていることがわかる。この制御により、 $\text{Min}T_i$ を 46% 低減することができた。

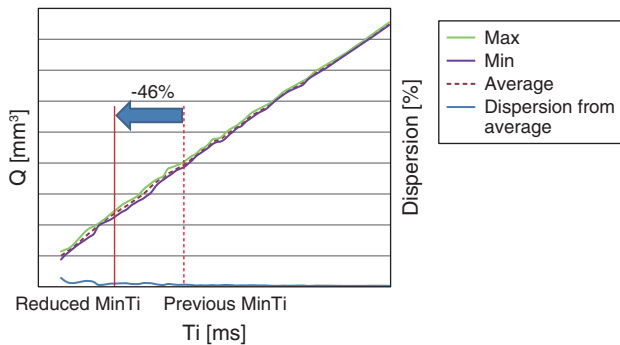


Fig. 12 T_i - Q characteristics after feedback control

5. まとめ

環境規制対応に必要な技術を可能とするための機能が增加する中で、集約ドライバICの活用や昇降圧電源による低電圧動作回路の見直し、マイコン機能の活用による周辺回路の簡素化などによって、回路構成部品を削減した。また、直噴インジェクタ駆動回路の発熱自体を低減し、放熱構造の簡素化による軽量化を図った。さらに、PM低減に有効な直噴インジェクタの分割噴射のために、 $\text{Min}T_i$ を低減させるインジェクタ制御技術を実現した。これらの技術を適用した高機能ECUを開発し、以下の結果を得た。

- (1) 今後のエンジンバリエーションへの適用を想定しながら、部品点数を 30% 削減できた。
- (2) 直噴インジェクタ駆動について、駆動回路の発熱を低減し、インジェクタ駆動時間の最小値を 46% 低減する手段の構築ができた。

参考文献

- (1) <http://www.env.go.jp/air/report/h21-01/ref3-1.pdf>
- (2) <http://www.jsae.or.jp/~dat1/vision/page1.html>
- (3) <http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/200812/06.html>
- (4) 草壁亮, 安倍元幸, 江原秀治, 石川亨, 安川義人: 直噴エンジン用インジェクタの噴射量シミュレータ開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.42-13, p.1-6(2013)

■ 著 者 ■



村上 真



山中 竜夫



貝谷 泰正