

エンジン ECU に適用される基盤技術

Key Technology Applied to Engine Electronic Control Unit

山本 賢治
Kenji YAMAMOTO

伊藤 淳
Atsushi ITO

神谷 有弘
Arihiro KAMIYA

土谷 直矢
Naoya TSUCHIYA

ECU has carried out technical evolution to the environmental maintenance, the safety and reliability. Especially on Engine ECU development, we have challenged to the emission regulations, the miniaturization and the development period shortening. Furthermore, considering the future mobility society, the key technologies are established with security and functional safety. This paper introduces our key technologies on Engine ECU.

Key words :

Engine ECU, Signal Analysis, Miniaturization, CAE

1. はじめに

カーエレクトロニクスの技術は環境・安全・安心の軸で目まぐるしく進化を続けており、その結果さまざまな製品となって車に搭載されてきた。近年では、環境・安全・安心に加えてモビリティ社会というキーワードも加わり、注力技術分野である電動化・自動化・コネクティッドの軸でさらに速いスピードで進化している。本論文では、その中でも環境を軸に長い間、技術進化を牽引し続けている製品であるエンジン ECU (Electrical Control Unit) に適用されている基盤技術について紹介する。

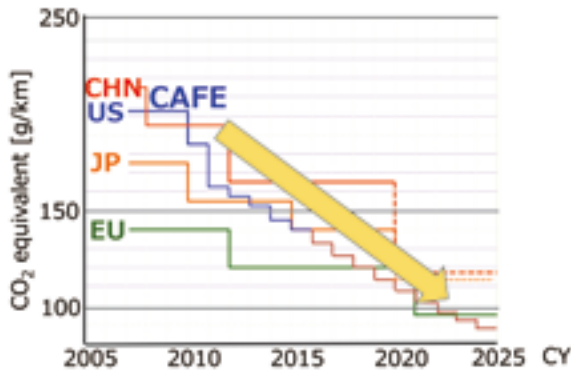
2. エンジン ECU に適用する基盤技術

エンジン ECU とは、エンジン性能を高めて高出力化や燃費向上を実現するためにエンジンに燃料をタイミングよく、そして最適に噴射するための電子制御装置¹⁾である (Fig. 1)。エンジン ECU に適用する主な基盤技術

は、次に示す 3 つの提供価値を実現するための技術として進化している。ひとつは、NO_x や CO₂ などの環境規制 (Fig. 2) をクリアするためにシステム制御性能を向上させる信号処理技術。もうひとつは、電子化に伴い増大していく ECU の数と広い車室内空間の確保を両立するために必要となる ECU を小型化する技術。残りのひとつは、大規模かつ複雑化していく開発の中で、品質確保と市場への製品投入タイミングを両立するために期待される開発期間短縮の手段である。以下、システム制御技術・小型化技術・開発期間短縮技術についてデンソーでの取組みを紹介する。



Fig. 1 Engine ECU

Fig. 2 Future CO₂ Emission regulations

2.1.1 システム制御技術²⁾

ガソリンエンジンにおいては、排ガス低減と燃費向上を両立するシステムとして直噴システム（GDI）が期待されている。両項目を成立するためには、少ない燃料でうまく燃焼させる必要があり ECU の燃料噴射制御においては、マルチ噴射・微小噴射・短期間隔での噴射といった様々な噴射仕様が求められる。中でも難しいのが微小噴射領域での高精度噴射の実現である。

ソレノイドのインジェクタで微小噴射を実現するためには、インジェクタが完全に開き切る前のハーフリフト領域での細かい制御が必要となる（Fig. 3）。しかしながら、このハーフリフト領域はインジェクタの動作として完全に開くまでの動作途中であるため、リフト挙動が安定しにくく結果的に噴射量のばらつきが大きくなる傾向があり、高精度な噴射量を実現することが課題となる。

デンソーは、インジェクタのリフトばらつきを ECU で検出して補正することにより高精度な微小噴射を実現することを試みた。インジェクタのリフトばらつきは、インジェクタの開閉のタイミングと相関があることがわかっているため、エンジン ECU で開閉それぞれ動作タイミングを検出して噴射量を補正することを試みた。開閉タイミングに現れるインジェクタ駆動波形の特徴点に着目し、開閉タイミング検出では、インジェクタの電流変化からポイントを抑え、閉弁タイミング検出では、インジェクタの電圧変化の特徴（Fig. 4）を特殊なアルゴリズムで捉えることを試みた。

開弁検出と閉弁検出の実機検証結果を Fig. 5 で示す。ともに横軸は、レーザで計測した実際の開弁もしくは閉弁タイミングであり縦軸は、評価ボードで検出した電流

波形もしくは電圧波形を解析することで検出した開弁タイミングもしくは閉弁タイミングである。ともに 10 μ sec 以下の誤差での検出を実現している。

システム性能を向上するにあたり、従来はそれぞれの製品（本事例の場合ではインジェクタと ECU）において性能を引き上げた上でシステム構築していたが、最近では更なる性能向上をめざして、実際の波形を使って ECU で信号解析・補正することで制御ばらつきを極限まで減らすことを試みている。

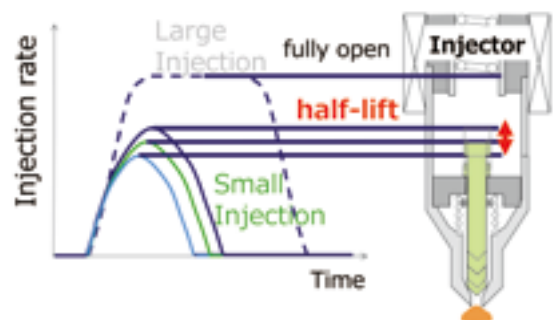


Fig. 3 Features of small amount Injection

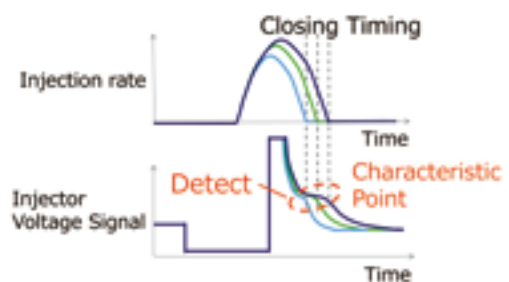


Fig. 4 Detect Closing timing

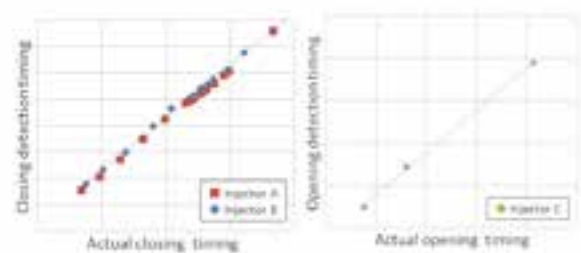


Fig. 5 Correlation between closing detection timing and actual closing timing

2.1.2 ECU への機能実装²⁾

制御性能を引き上げる方式を決めた後、実際の ECU に機能を配置する方法について紹介する。今回のインジェクタの事例において開閉タイミングを検出するために必要な基本機能は、電流検出部・電圧検出部・微小信号を検出しやすくするためのゲイン調整部・A/D 変換

部・デジタル信号処理部である。さらに実現にあたり厳しい仕様が求められている。電流検出部には0～20Aのダイナミックレンジと20mA未満の微小な電流変化を検出すること。電圧検出部には、0～80Vの広いダイナミックレンジと50mV未満の微小な電圧変化を検出すること。A/D変換部には分解能10bit・サンプリング周期1MHz以上であること。これらの機能をECUにて高精度で実現する為には、マイコンとASIC（汎用部品含む）に配置する必要がある。電流検出・電圧検出・ゲイン調整・A/D変換部は実現精度・コストを考慮してASIC（汎用部品含む）への配置が適当と比較的容易と考えられるが、どちらでも実現できるデジタル信号処理部については、マイコンの処理負荷とASICのチップサイズへの影響を検討する必要がある。仮にデジタル信号処理部をASIC内に配置すれば、マイコンの処理負荷は増加しないが、ASICのチップサイズが大きくなる懸念がある。一方、マイコンに配置した場合は、もともとデジタル信号処理部の演算は優れているものの、実行すべき演算量が本来のエンジン制御要件に加えて増えるうえ、ASICとの通信処理も必要のため処理負荷増加が懸念される。このようなマイコンとASICの特徴を理解したうえで機能配置案を考える必要がある。

デンソーは、処理性能負荷を検証するために従来は実際のソフトウェアを準備して検証していたが、最近ではシミュレーション技術を適用して機能配置の最適化を行っている。マイコンの処理能力はMPUのクロック周波数やRAMなどで制限されるため、デジタル信号処理部の処理負荷が採用予定のマイコンの処理能力におさまることを見極めて機能配置を決定する必要がある。簡単にその内容を紹介する。本手法は、ソフトウェアをコーディングすることなくソフトウェアと仮想ECUの処理性能負荷を高精度に予測することを可能にしたデンソー独自の技術である。キーコンポーネントは2つある。1つはソフトウェアモデリング、もう1つは、ECUチップセットモデリングである。ソフトウェアモデリングは、既存のソフトウェアの特徴を詳細にプロファイルし、処理性能に影響する主な設計パラメータのみを抽出し、柔軟性を持たせる。一方、ECUモデリングは、一般的なモデルを組合せ、処理性能に影響する主な設計パラメータを設定することで、柔軟に多様なECUモデルを表現

できる。この2つのキーコンポーネントの組合せにより、今回の機能配置の検証を可能にした。実際の検証パターン、設定条件と結果を示す（Fig. 6）（Table 1）（Fig. 7）。今回の事例においてデジタル信号処理部は、ASICに配置する方がよいことがわかる。このように製品構想を決めるにあたり、早い段階で最適なパターンに導けるようにデジタルモデリング技術とシミュレーション技術の活用を積極的に行っている。

Table 1 Setting Parameters of simulation

Clock frequency	320MHz
Pipeline stage	Frontend:3 /Backend:3
Fetch hit ratio of cache	0.95
Interconnect bus division ratio [LMem/ Flash/ GMem/ Peripheral]	1/ 4/ 2/ 4
Latency [LMem/ Flash/ GMem/ IO]	3/ 5/ 6/ 8

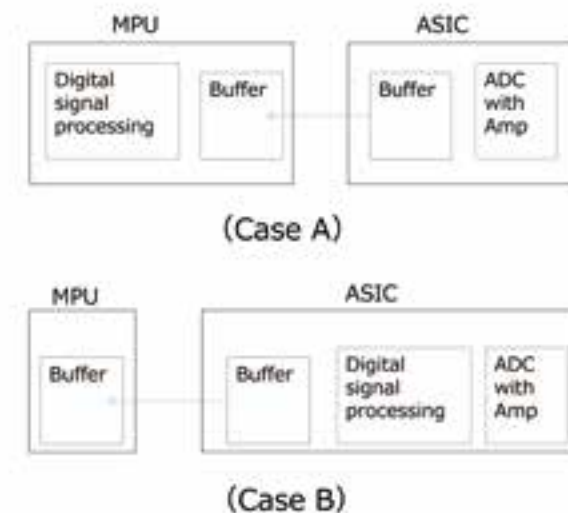


Fig. 6 Function implementation

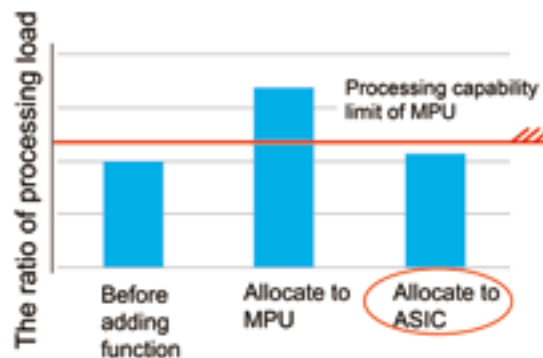


Fig. 7 Comparison of Processing load between before adding function, Case A and Case B

2.1.3 今後のシステム制御技術への貢献

今後も環境維持のために、燃料の種類に関わらずエネルギーを効率よく生成～消費まで管理するという期待は継続する。ECUにとっては、現状のシステム状態を精度よく検出して、エネルギー視点で最適な状態に制御する技術が求められる。そのために我々は、ECUでの信号解析技術の進化はもちろんのこと、それを実現するための演算処理能力の視点でも進化させる必要があり、構成するマイコンの処理能力をあげるようなIP開発や、使いこなすためのソフトウェア・ハードウェア技術を向上させていく。

2.2 ECU 小型化技術^{3) 4)}

車載電子制御システムが複雑化し、車両1台あたりに多数の電子製品が搭載されるようになり、必然的に電子製品全般の小型・軽量化が求められてきた。軽量化は車両燃費向上のためであり、小型化はそれに加えて広い車室内空間の実現のためである。ECUにとって小型化を実現するための基盤技術は、主に民生品で開発された技術を応用展開する機会が多い。しかしながら小型技術を車載に適用するにあたって、温度・振動など耐環境性への適用が課題となる。具体的には、温度に対する放熱性確保、もうひとつは、電子部品と回路基板の接合部が微小になることに伴う、はんだあるいはそれ以外の接合材料の寿命確保である。ここでは課題となりやすい放熱について述べる。

放熱技術

基本的に車載電子製品は、車両の隙間に搭載されることが多い。あるいは、最終的に制御対象となるアクチュエータ上に搭載されることもある。たとえば、エンジンECUがエンジン上に搭載されている場合や、ECUがアクチュエータであるモータと一体に組み立てられている場合もある。このように、搭載環境によっては搭載環境上の熱の影響を考慮しつつ、自己発熱分を考慮した放熱設計が重要である。

最初に考慮すべき項目は、ECUの回路基板を保護する外部筐体をどのように熱設計で扱うかである。熱伝導率の面からは、金属筐体が有利なように思える。しかしながら、一概にそうとも言えない。Fig. 8は、車載ECU

の放熱方法の割合の一例を示す。これからわかるように、中心となる熱伝導以外に、放射によるものも20%ほどある。これは筐体の色に依存して放射率が変わるため車室内に搭載されるECUに採用例が多いが、黒色樹脂ケースでもECU内温度を下げられるということである。その上で、回路基板上の熱分布をシミュレーションする。その後、対策が必要な部位が抽出できたなら、具体的な放熱設計を適用する。回路基板における放熱のポイントは、以下の通りである(Fig. 9)。

- (1) 基板の放熱性向上
- (2) 高放熱なデバイスパッケージの選定
- (3) デバイスパッケージの放熱実装構造

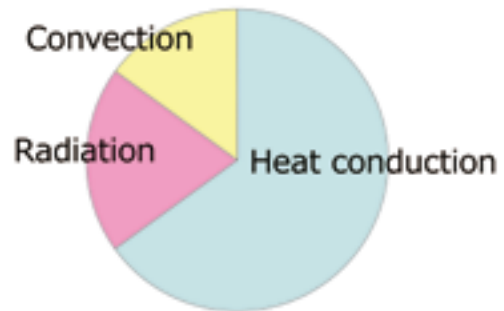


Fig. 8 The rate of the heat dissipation in ECU

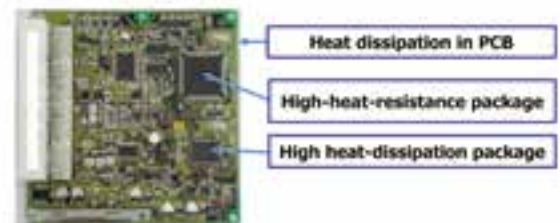


Fig. 9 The point of the thermal design in ECU

2.2.1 基板の放熱向上

基板の放熱性向上への対応としては、基板そのものの熱伝導率の改善、つまり基材の選定という方法もある。価格・調達面での影響も大きいのでよく検討する必要がある。

一方で、視点を回路基板の構成材料として配線材料であるCu箔(めっき)に着目してみる。配線材料としてのCuは、非常に優秀な熱伝導材料でもある。したがって、配線用銅箔の厚さを従来の2倍あるいは3倍にした厚銅基板を利用することで平面(2次元)的に熱をすばやく拡散させて、ヒートスポットを生じさせないように工夫

することができる。しかしながら、厚銅基板においては、厚銅配線をする層の配線密度を高めにくいという注意点もあり設計上配慮する必要がある。

また適用例は少ないものの、基板にあらかじめ穴を開けてそこに金属銅の塊（プレス等で打ち抜き加工したもの）を、基板を製作する途中で圧入打ち込みした技術もある。最終的には、表層の配線と接続する。この例では、比較的大きな発熱量のパワーデバイスも実装でき、金属銅の塊がヒートシンクの役割も果たすため、その放熱効果も大きい。しかしながら、製造における寸法管理が重要なことと、基板全体としては内層のパターンへの配線制約が大きくなるので、製品小型化の同時実現のためには、設計上の工夫が必要となる。

このように基板での熱対策は、製品の小型化とは背反する場合もあるため、それぞれの効果を見積もって、トレードオフの設計が必要となる。そして基板放熱性の向上のためには、ECUの筐体へ最終的に熱を伝えて放熱する必要があるため、筐体との接触部の設計も重要になる。

2.2.2 高放熱デバイスパッケージ

半導体デバイスパッケージへの放熱性向上の取り組みは、リードフレームとそれらを封止するエポキシ樹脂材料の開発になる。Fig. 10は、パッケージの放熱性向上のための構造変化を示す。次に紹介する放熱構造と関連するが、一般的には基板側に設けたサーマルビア経由での放熱に対応したパッケージの裏面側にヒートシンクを設けたものを使っていたが、放熱向上と小型化の両立を狙いパッケージ表面にヒートシンクを設けたパワーパッケージも採用している。

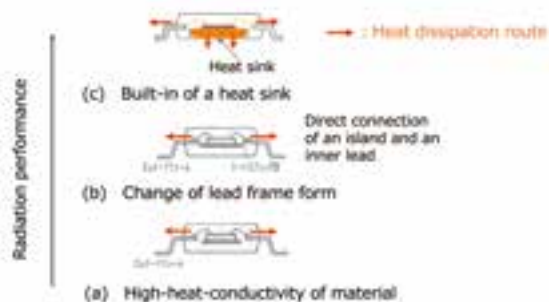


Fig. 10 Heat-dissipation package structure

2.2.3 デバイスパッケージの放熱実装構造

ECU構造で特に工夫したいポイントがこの放熱構造である。エンジンECUでは、リレーやバルブなどアクチュエータ駆動用のパワーデバイスを内蔵するケースが多い。その場合、前項で述べたヒートシンクを内蔵したパワーパッケージと呼ばれる部品を搭載実装する。パッケージの露出したヒートシンク部は、基板上のはんだランドとはんだ付けする。これにより、基板の厚さ方向（垂直方向）に熱を伝える（Fig. 11）。この手法は、民生用製品においても広く採用されている。これで基板まで熱を伝えることはできるが、製品全体として考えると最終的に筐体の外側に熱を放出（民生品ではファン等で排熱するというイメージに近い）する必要がある。そのためには、基板に拡散させた熱をさらに製品の最外郭部に当たる筐体に伝えることが必要となる。Fig. 12は基板の両端を筐体で挟み込んだ例である。この製品では、筐体で挟み込む回路パターン部のCu箔厚さを厚くして熱を伝えやすくしている。この方法では、伝熱経路は電子部品→回路基板→外部金属筐体となる。そこで、さらに放熱経路を短くした例がある（Fig. 13）。この方式では、パワーデバイスと筐体の隙間と放熱ゲルの塗布面積からなる放熱ゲルの量を設計する必要はあるものの設計基板側に放熱のためのサーマルビア等の特別な加工が不要となり、基板の配線効率を高められることができるため小型化との両立が可能となる。

このように、電子製品の放熱設計は、部品、基板、外部筐体全体を考えたトータル設計がポイントとなる。

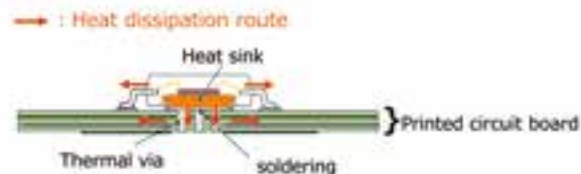


Fig. 11 Mounting structure of a power device package



Fig. 12 Radiation structure from PCB to a case

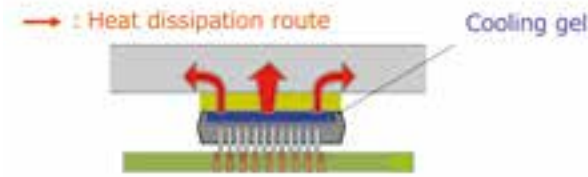


Fig. 13 Direct radiation structure from power device to a case

2.2.4 今後の小型化技術への貢献

エンジン ECU では、これまで小型化に対して主に熱伝導・放熱技術をうまく使いこなすことで小型化を実現してきた。しかしながら、今後も広い車室内空間のニーズと電子製品の進化（新たな電子製品の創出や機能統合）を考えるとさらなる小型化も期待される。そのため我々は、従来の放熱アプローチに加えて、ファンや水冷などの冷却効果の高い技術や耐熱技術を製品価値として受け入れられる手段として準備しておくことや、車両全体での熱マネジメントによるアプローチも考える必要がある。

2.3 ECU 開発期間短縮

エンジン ECU は、前項で述べたように排ガス規制クリアや高出力の両立などの課題を解決するために年々、開発の複雑さを増してきた。一方で市場競争の激化や最近の電動化・自動運転・コネクティッド分野への注力などもあり、さらなる開発期間短縮や開発リソース抑制が望まれている。

ECU の開発期間を短縮するための主なアプローチは 3 つある。開発規模の管理、実物検証後の設計手戻りをなくすための設計品質の向上、ECU の検証工程の自動化である。それぞれについて、我々の取組みを紹介する。

2.3.1 製品開発規模の管理

従来、我々のエンジン ECU は顧客・エンジン仕様などにより要素技術や製品を個別開発してきた。これは、ひとつひとつのニーズに合致させるという面では優れているものの素早い製品開発という観点では課題がある。細かいニーズの違いはあれども、もともと製品の基本機能は同じでエンジンを制御することである。我々は、製品からくるニーズのトレンドと、エレクトロニクス技術の進化（デバイスの微細化やデジタル化、部品の小型化）

のタイミングを考慮して顧客を越えたエンジン ECU の標準的なバリエーションを構築することで、多様なニーズに応えながら素早い開発と低コストでの小型化を実現して車両開発への貢献を目指してきた。その活動では、ECU という製品バリエーションというだけではなく、開発・設計に携わった人の想いもデザインに入れ込んで ABILCORE という名称で商標登録もし、2015 年にはグッドデザイン賞を受賞した⁵⁾。

基本となる ECU 構成を Fig. 14 に示す。製品の小型化と開発規模の適正化を狙い基本機能は、マイコンと内製の最先端半導体プロセスによる高集積 ASIC（電源・入力・出力・通信・マイコン監視ロジックなど）と汎用部品で構成している。さらに ECU を機能拡張する場合は、上位マイコンへの変更、マルチチャンネル出力 IC やディスクリートの入力回路を付けることで実現できる構成 (Fig. 15) となっており、車両カテゴリーなどに分けてラインナップを設定することで ECU とそれぞれに適用する要素技術など開発規模全体を管理できる。

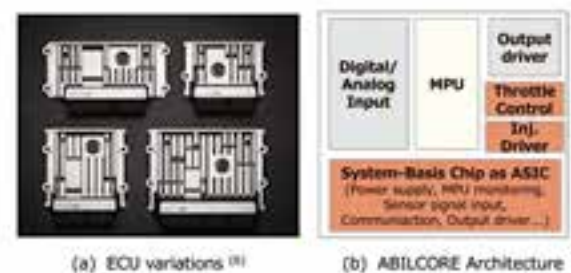


Fig. 14 Engine ECU platform / ABILCORE

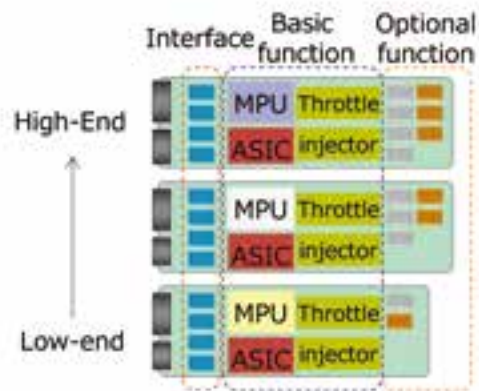


Fig. 15 Design Approach

2.3.2 設計品質の向上

今まで我々は、経験してきたノウハウを設計書やルールなどさまざまな形にして、実際の設計工程・実装工程・検証工程において活用することで設計品質を確保してきた。しかしながら、新たに製品を設計すると必ずしも最適な設計になっていないこともある。それは、多くの設計パラメータや動作条件が複雑に絡み合っているため設計段階では簡単に最適点を見つけられず、たくさんの実機検証において初めてわかることもある。こうなると再設計→試作→検証という大きな手戻りに陥ってしまう。そこでデンソーは、上流での設計品質を上げるためにノウハウとCAD（Computer Aided Design）・CAE（Computer Aided Engineering）を繋げられる環境⁷⁾の構築をはじめている（Fig. 16）。製品の各設計者が持っているノウハウを統一データベースで共有し、CAD・CAEともリンクさせることで適正な検証パターンを選定や、データの一貫活用の実現を目指している。

CAEの活用事例としてSW電源での適用を紹介する。SW電源の回路に、ノウハウとして寄生成分を抽出・挿入してシミュレーションすることで波形の過渡状況を確認でき、さらにレイアウトパターン設計のノウハウもいれて基板上のノイズの状態を確認できるようにした（Fig. 17）。

また、今後の車載ネットワークの拡大、高速化を考えると、車両での通信成立性の早期検証は重要となる。デンソーは、この領域でもワイヤ配線の影響を考慮して通信波形検証を行っている（Fig. 18）。

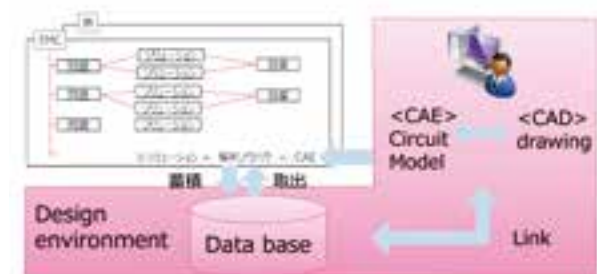


Fig. 16 CAE platform

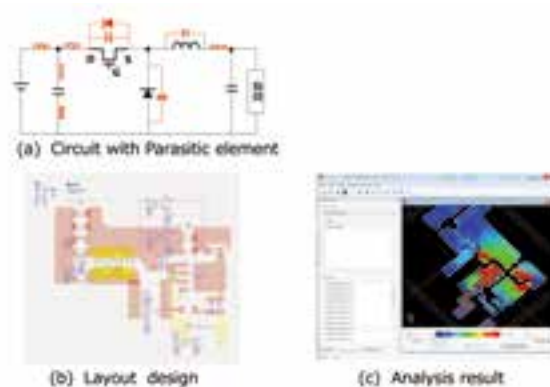


Fig. 17 Analysis of the switching regulator

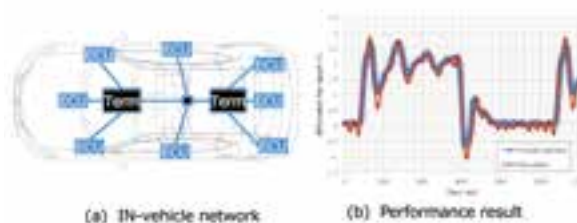


Fig. 18 In-Vehicle network analysis

2.3.3 検証工程の自動化

実機で設計検証をするにあたり、基本機能だけでなく温度や電源電圧などをパラメータにした検証ノウハウもいれて検証項目を定義する。結果として単一機能でも簡単に100パターンを超える検証項目にもなり、従来は優先順位をつけて検証してきた。ここ最近では、オシロスコープを始めとする汎用の計測器や電源などの装置も使い勝手がよくなり、定義した検証項目や条件をプログラミングして装置間を繋げることによって自動計測・自動判定を試みている。さらに、今後は検証条件やプログラミングも自動生成することでさらなる期間短縮への貢献をしていく（Fig. 19）。

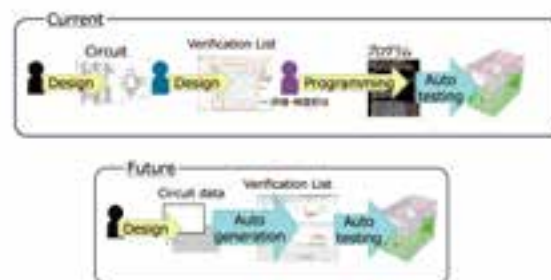


Fig. 19 Auto testing

2.3.4 今後の開発期間短縮への取組み

今後の車両開発は自動運転、電動化、コネクティッドをキーワードに車内外を繋げる大規模な開発となる。そのため車両メーカーも、将来を見据えて自分たちにとって進化しやすい車両プラットフォーム構想を検討している。その結果により、実現するための機能を実装する製品も異なってくることが予想される。つまり ECU 設計者としては、いかなる機能でも早く実装する力が求められる。そのためには、エンジン ECU に限定することなく ECU の設計ノウハウを一元管理したスマートな開発環境のもとで、CAE を駆使して上流での設計品質を固め、実装～検証は自動化技術を使って早く実現することを求められる。我々は、製品に実装する要素技術だけでなく、開発プロセスや開発ツールも積極的に活用することで、高品質な製品をタイムリーに市場投入できるよう努力していく。

3. おわりに

本論文では、デンソールのエンジン ECU を例にわれわれが取り組んできた製品価値を支えるための主な技術としてシステム技術・小型化技術・開発期間短縮について述べた。今後は個々の製品価値を上げる技術の進化はもち

ろんのこと、将来のモビリティ社会の安心・安全を考えると ECU の基盤技術として、セキュリティ・機能安全を実現するための技術や開発プロセスの遵守がより重要になると思われる。我々は、技術・製品の開発を通してモビリティ社会全体に貢献していく。

参考文献

- 1) 株式会社デンソー HP
<https://www.denso.com/jp/ja/products-and-services/electronics/pick-up/e-ecu/>
- 2) A.Ito, M.Kawano and S.Fujita: "ECU Structure Strategy to Detect Lift Timing of GDI Solenoid Injectors with High Precision", SAE technical Paper 2017-01-1628, 2017
- 3) 岩野昌夫:「プラスチックの自動車部品への展開」, 日本工業出版 (2011)
- 4) 加藤光治監修:「図解・カーエレクトロニクス」下巻, 日経 BP 社 (2010)
- 5) GOOD DESIGN AWARD HP
<http://www.g-mark.org/award/describe/42579>
- 6) 株式会社デンソー HP
<https://www.denso.com/jp/ja/news/news-releases/2015/20150930-01/>
- 7) N.TSUCHIYA: "設計者が真に使える CAD/CAE 環境構築への取組み", Keysight World 2018 東京 セミナー ID2G030, 2018-07-13

著者



山本 賢治

やまもと けんじ

エレクトロニクス機器技術 2 部
パワートレイン製品の基盤技術開発に従事



伊藤 淳

いとう あつし

エレクトロニクス製品基盤技術部
パワートレイン製品の基盤技術開発に従事



神谷 有弘

かみや ありひろ

基盤ハード開発部
車載電子製品の実装技術企画開発に従事



土谷 直矢

つちや なおや

基盤ハード開発部
電子製品開発環境の開発業務に従事