

# IoT, AI 導入に向けてデジタル化する パワーエレクトロニクス

高宮 真

東京大学

🔑 パワーエレクトロニクス, IoT, AI, デジタル, ゲート駆動回路

## 1. はじめに

日本のパワーエレクトロニクス産業が将来も生き残るためには「良いモノを安く」という従来の競争軸とは異なる競争軸でアジア諸国と戦う必要がある。その競争軸の一つが本稿で述べる「パワーエレクトロニクス 2.0」である。IoT と AI を内包した「パワーエレクトロニクス 2.0」により作り手とユーザが直結し、パワーエレクトロニクス機器から生成される大量のデータを生かした「ユーザごとに個別対応し進化し続けるパワーエレクトロニクス」が実現し、ユーザ価値を最大化できる。これにより、パワーエレクトロニクスのビジネス形態を従来モノの売り切り型からサービス料徴収型へ変革すれば、日本のパワーエレクトロニクス産業が将来も生き残ることができると考えている。

## 2. 2040 年のパワーエレクトロニクスを想像する

「パワーエレクトロニクス 2.0」が創る未来の姿をイメージしていただくために、EV を題材として 2040 年のパワーエレクトロニクスの未来の物語を以下で示す。

朝、あなたのスマホに EV サービス会社からアップデート依頼の通知が届きました。

アップデートすると、EV の走行を制御するパラメータ（例えばモータ駆動回路のパラメータ）がインターネットを介して自動更新されました。

EV サービス会社ではあなたの EV を含め、世界中の数百万台の EV の走行に関するセンサデータを収集し、AI でビッグデータ解析を行うことにより、EV の電費や信頼性を向上させるより良いパラメータを地域ごと、季節ごと、ユーザごとなどさまざまな階層で定期的に提供しています。そのおかげで 5 年前の EV 購入時より EV の電費が 10% 向上しました。

EV サービス会社には月会費 2,000 円を支払っていますが、このサービスに入ったことで車検が不要となったので、お得感があります。さらに私の EV には多数のセンサが内蔵されており、センサデータの履歴から AI を使った故障予知サービスも提供してくれているので、以前よりも安心感が増しました。

スマホや PC のように、モノを売ってから、インターネットを介してソフトウェアを更新することにより、モノが陳腐化せずに最新機能を維持できるビジネス形態がゲーム機や車などさまざまな分野へ広がっている。さらに、月会費を払って利用するサブスクリプションサービスも広がっている。例えば、乗用車の自動運転の分野では、無線通信を経由して車載ソフトウェアを更新する OTA (Over The Air) 技術を用いたサービスビジネスの導入がテスラ社を筆頭として推進されている<sup>(1)</sup>。

従来の「良いモノを安く大量に販売する」というビジネスではアジア諸国に勝てないので、日本・欧米企業が生き残るために「サービス料徴収型ビジネス」への転換を急いでいると考えられる。今は日本が強いパワーデバイスとパワーエレクトロニクス機器も、従来どおりの「高性能で高信頼なモノを作る」という路線のままでも良いのであろうか？ 筆者は、パワーデバイス・パワーエレクトロニクス機器の分野でもアジア諸国に対して日本企業が生き残るために「サービス料徴収型ビジネス」への転換が必要と考えている。

しかし、パワーデバイスに関して「サービス料徴収型ビジネス」をするためには何をすれば良いのだろうか？ さすがに、アップデートするだけで、シリコンのパワーデバイスが GaN のパワーデバイスに置き換わるようなことは実現できない。そこで、筆者が提唱するのがパワーエレクトロニクス 2.0 のコンセプトである。

## 3. IoT と AI を内包しデジタル化したパワーエレクトロニクス 2.0 の概念

図 1 に IoT と AI を内包しデジタル化したパワーエレクトロニクス 2.0 の概念を示す。表 1 に従来のパワーエレクトロニクスとパワーエレクトロニクス 2.0 の比較を示す。「サービス料徴収型ビジネス」を導入するためには、IoT×AI×パワーエレクトロニクスの三つを掛け算した「パワーエレクトロニクス 2.0」が必須技術となる。なぜなら、IoT がもたらす変革の本質は作り手とユーザを直結することで、ユーザが実際にどのように使っているのかを知り、今までにない次元のサービスを提供する点にあるからである。そこに AI が加わることで、ユーザごとに個別

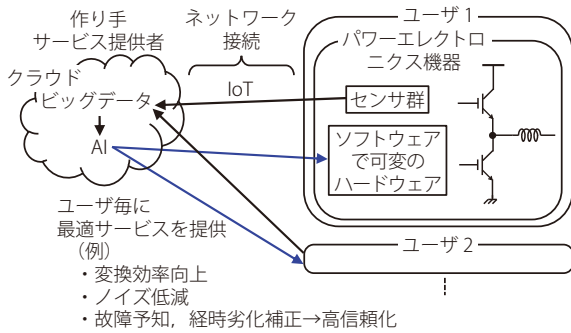


図1 IoTとAIを内包しデジタル化したパワーエレクトロニクス2.0の概念

表1 従来のパワーエレクトロニクスとパワーエレクトロニクス2.0の比較

	従来のパワーエレクトロニクス	パワーエレクトロニクス2.0
ビジネス	モノの売り切り	サービス料徴収型
競争軸	良いモノを安く	ユーザごとのニーズに応じて個別サービスを提供
キーワード	高性能、高信頼	IoT, AI, デジタル化
ユーザの利用実態	知らない	作り手がユーザと直結し把握 (IoT) + 分析 (AI)
ハードウェア	固定	ソフトウェアで特性可変
性能	全ユーザ共通で購入時がピーク	ユーザごとに進化し続ける

対応するパワーエレクトロニクスがユーザ価値の最大化を図れるようになる。その先には第2章で述べた使い込むほど機能・性能が高まる「ユーザごとに個別対応し進化し続けるパワーエレクトロニクス」がある。「パワーエレクトロニクス2.0」を構成するキー技術は

- (1) IoT向けのセンサ群とネットワーク接続
  - (2) ソフトウェアで特性を変えられるデジタル化されたハードウェア
  - (3) ビッグデータに基づくAI技術
- の三つである。以下では(2)(3)に関する研究事例を紹介する。

#### 4. デジタル化されたパワーエレクトロニクスの例：デジタルゲート駆動回路

「パワーエレクトロニクス2.0」に向けたソフトウェアで特性を変えられるデジタル化されたハードウェアの研究事例として、ゲート駆動回路をデジタル化することで実現されるパワーエレクトロニクス機器の低損失で低ノイズな駆動方法について述べる。

##### 4.1 パワーエレクトロニクス2.0におけるゲート駆動回路の重要性

図2に示すように、ゲート駆動回路とは、コントローラ

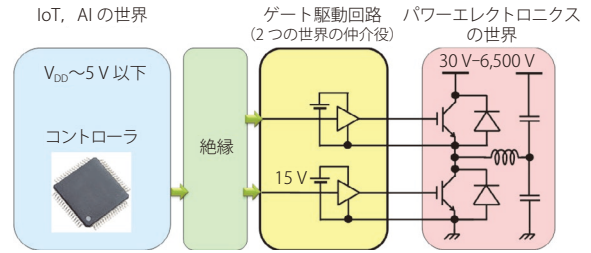


図2 ゲート駆動回路の役割

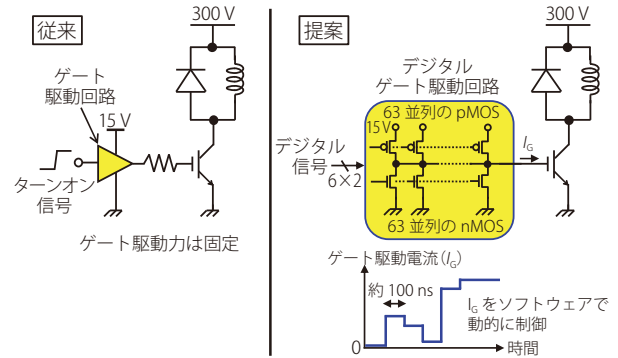


図3 従来のゲート駆動回路と提案のデジタルゲート駆動回路

ラからの5V振幅のオンオフ信号を15V振幅に増幅してパワーデバイスのゲート端子を駆動することによりパワーデバイスのオンオフを制御する回路である。ゲート駆動回路は、5V以下の電源電圧で動作するIoT、AIの世界と、30V以上で動作するパワーエレクトロニクスの世界を仲介する重要な役割を担っている。ゲート駆動回路をインテリジェント化できれば、IoT、AIの世界からパワーデバイスを直接操ることが可能になり、パワーデバイスレベルまでソフトウェアで更新することが可能なパワーエレクトロニクス2.0の世界を実現することができる。

##### 4.2 提案するデジタルゲート駆動IC

今回、ゲート駆動回路をデジタル化したICを開発した。図3に従来のゲート駆動回路と提案のデジタルゲート駆動回路を示す。一つのパワーデバイスに入る信号が1bitから多ビットに増えた点に革新性がある。従来のゲート駆動回路ではゲート駆動力が固定なのでパワーデバイスのスイッチングノイズとスイッチング損失の間にトレードオフ関係があった。これに対して、提案するデジタルゲート駆動ICは、パワーデバイスのターンオン/オフ期間中にソフトウェア制御でゲート駆動電流を約100nsごとに6bitのデジタル信号で64通りに変化させることができる<sup>(2)</sup>。ゲート波形を本ICで最適に制御することによりスイッチングノイズとスイッチング損失のトレードオフ関係を打破することができる。

図4に試作したデジタルゲート駆動ICを定格600V、

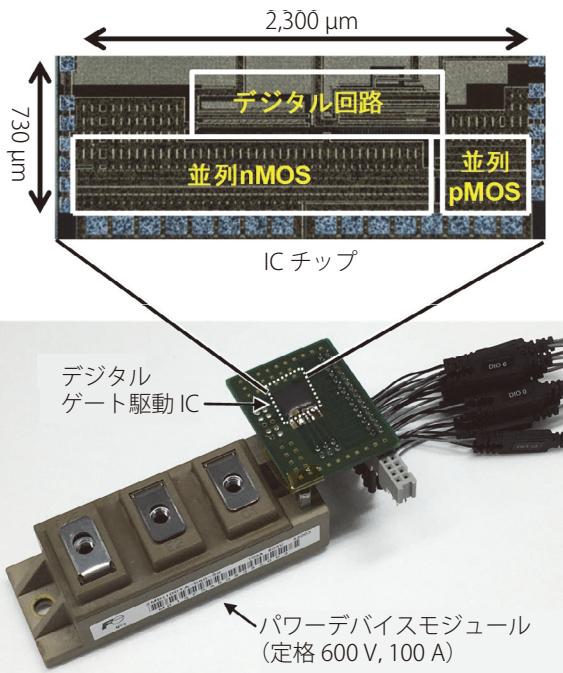


図4 試作したデジタルゲート駆動IC<sup>(3)</sup>

100 A のパワーデバイスモジュールに取り付けた写真を示す。300 V、50 A におけるパワーデバイスのターンオンのスイッチング測定を 2,000 ~ 3,000 回繰り返して、ゲート駆動電流を決定する 6 bit の最適デジタル信号を組み合わせ問題最適化アルゴリズムで自動探索した<sup>(2)</sup>。図 5 に示すように、提案のデジタルゲート駆動 IC は従来のゲート駆動回路に比べ、スイッチング損失<sup>そろ</sup>揃いでスイッチングノイズを 37% 低減、スイッチングノイズ揃いでスイッチング損失を 47% 低減することに成功した<sup>(3)</sup>。

#### 4.3 デジタルゲート駆動回路のインパクト

ゲート駆動回路のデジタル化によるインパクトは以下のとおりである。

- (1) ソフトウェアで特性を変えられるので、汎用性が高い
- (2) デジタルゲート駆動回路のパラメータの最適化はソフトウェアを使って自動的に行えるので、誰でも利用できる
- (3) 最適化の目的関数をソフトウェアで書き換えるだけで、ユーザごとに異なるさまざまなニーズに対応できる

(1) に関して、本 IC はソフトウェアでゲート駆動電流を変えられるので、汎用性が高く、定格や種類が異なるパワーデバイスを同一の IC で駆動することができる<sup>(2)</sup>。また、最適ゲート波形のパラメータはパワーデバイスの負荷電流・温度に依存する<sup>(4)</sup>ので、負荷電流・温度変動に応じてパラメータを常時最適化する制御を考えている。将来

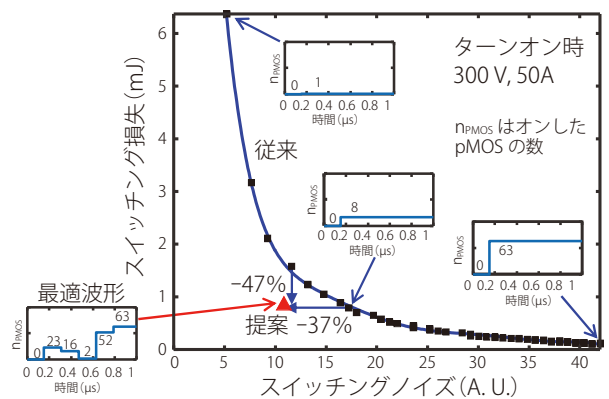


図5 従来と提案のデジタルゲート駆動回路の特性比較<sup>(3)</sup>

的には、パワーデバイスの製造ばらつきや経時劣化をセンサとデジタルゲート駆動回路で自動補正することによる低コスト化や高信頼化が期待される。

(2) に関して、専門家でなくてもデジタルゲート駆動のメリットを享受できる。

(3) に関して、EMI 規格を満たしつつスイッチング損失を最小化するゲート波形の自動最適化<sup>(5)</sup>やスイッチング損失揃いで特定周波数帯の EMI を低減するゲート波形の自動最適化<sup>(6)</sup>に成功しており、新たなニーズを開拓中である。

## 5. AI 技術のパワーエレクトロニクスへの適用事例

「パワーエレクトロニクス 2.0」に向けたビッグデータに基づく AI 技術の研究事例として、機械学習を用いたパワーデバイスの劣化推定について述べる。

パワーデバイスの経時劣化の一つとして、パワーデバイスのボンディングワイヤ剥がれ問題がある。図 6 に示すように、パワーデバイスが長年動作し高温と低温間の温度サイクルを繰り返すと各種材料の線膨張係数の差によりボンディングワイヤが徐々に剥がれて<sup>(7)</sup>、最終的には断線してしまう。剥がれに伴うエミッタ抵抗上昇を検知できれば、パワーエレクトロニクス機器が故障する前にユーザに故障を予告することができるので、ユーザにとってメリットは大きい。しかし、エミッタ抵抗は非常に低抵抗 (mΩ 程度) であるので、パワーエレクトロニクス機器の実動作中に定期的にモニタすることは困難である。

そこで、比較的低電圧 (例えば 15 V) で計測が容易なパワーデバイスのゲート電圧波形を計測し、ゲート電圧波形から機械学習を用いて測定が困難なエミッタ抵抗を推定することに挑戦した。具体的には、図 7 に示すように、機械学習を用いてゲート電圧波形からパワーデバイスの信頼性を決める重要な四つのパラメータ (エミッタ抵抗、コレクタ電流、接合温度、しきい値電圧) を推定した<sup>(8)</sup>。機

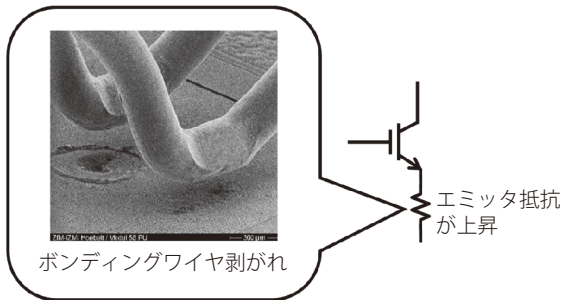


図6 パワーデバイスのボンディングワイヤ剥がれ問題<sup>(7)</sup>

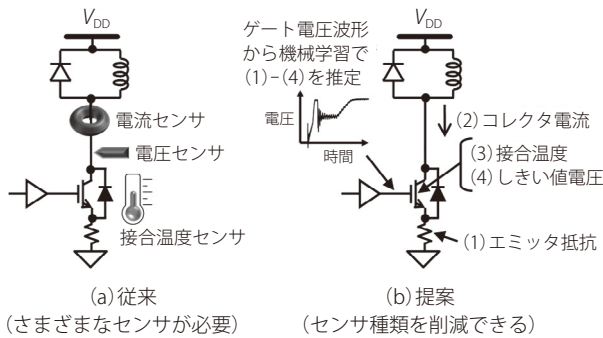


図7 従来と提案のパワーデバイスの劣化推定手法<sup>(8)</sup>

機械学習のアルゴリズムとしては画像認識の分野で著名な畳み込みニューラルネットワークの原型である LeNet5 を改造して用いた。回路シミュレーションと実測の両面からパラメータ推定を行った。回路シミュレーションでは四つのパラメータを変化させながら 11 万個のゲート電圧波形を

用意し、機械学習とそれを用いたパラメータ推定を行った。その結果、コレクタ電流、接合温度、しきい値電圧推定の正解率は 100%、エミッタ抵抗推定の正解率は 98.3% であった。

実測でも同様に、パワーデバイスの二つのパラメータ (エミッタ抵抗、コレクタ電流) を変化させながら 6,600 個のゲート電圧波形を実測し、機械学習とそれを用いたパラメータ推定を行った。その結果、コレクタ電流推定の正解率は 100%、エミッタ抵抗推定の正解率は 99.5% と十分に高い精度が得られた。

以上より、本研究では AI 技術によって、計測しやすい物理量 (ゲート電圧波形) から計測しにくい複数種類の物理量 (エミッタ抵抗、コレクタ電流、接合温度、しきい値電圧) を推定し、パワーデバイスの劣化推定に使えることを示した。

## 6. おわりに

日本のパワーエレクトロニクス産業が将来も生き残る手段として、「パワーエレクトロニクス 2.0」はキーの競争軸の一つとなりうる。しかし、「パワーエレクトロニクス 2.0」の世界を実現するためには、AI、IoT、回路、デバイス、センサ、IC、ソフトウェアなど広範囲な分野で解くべき技術課題が山積している。「パワーエレクトロニクス 2.0」の実現を目指す同志を募集中である。

## 文 献

- (1) 「走行機能、ソフトで更新 トヨタ・日産が導入」, 日本経済新聞, 2021 年 2 月 9 日
- (2) K. Miyazaki, S. Abe, M. Tsukuda, I. Omura, K. Wada, M. Takamiya, and T. Sakurai : "General-Purpose Clocked Gate Driver IC With Programmable 63-Level Drivability to Optimize Overshoot and Energy Loss in Switching by a Simulated Annealing Algorithm", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.53, No.3, pp.2350-2357 (2017)
- (3) M. Takamiya, K. Miyazaki, H. Obara, T. Sai, K. Wada, and T. Sakurai : "Power Electronics 2.0 : IoT-Connected and AI-Controlled Power Electronics Operating Optimally for Each User", The Institute of Electrical Engineers of Japan, 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Sapporo, pp.29-32 (2017)
- (4) T. Sai, K. Miyazaki, H. Obara, T. Mannen, K. Wada, I. Omura, M. Takamiya, and T. Sakurai : "Load Current and Temperature Dependent Optimization of Active Gate Driving Vectors", IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE), Baltimore, USA, pp.3292-3297 (2019)
- (5) R. Morikawa, T. Sai, K. Hata, and M. Takamiya : "Automatic Generation of Gate Driving Vectors for Digital Gate Drivers to Satisfy EMI

Regulations", IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE), Detroit, USA, pp.4931-4936 (2020)

- (6) R. Morikawa, T. Sai, K. Hata, and M. Takamiya : "New Gate Driving Technique Using Digital Gate Driver IC to Reduce Both EMI in Specific Frequency Band and Switching Loss in IGBTs", 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IP-EMC2020-ECCE Asia), Nanjing, China, pp.644-651 (2020)
- (7) J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, and R. D. Doncker : "Semiconductor Power Devices", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2011)
- (8) K. Miyazaki, Y. Lo, A. K. M. M. Islam, K. Hata, M. Takamiya, and T. Sakurai : "CNN-based Approach for Estimating Degradation of Power Devices by Gate Waveform Monitoring", IEEE International Conference on IC Design and Technology (ICICDT), Suzhou, China, pp.104-107 (2019)



高宮 真

たかみや・まこと (正員)

2000 年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年、日本電気(株)入社。2005 年 東京大学准教授。2019 年より東京大学生産技術研究所教授。集積パワーマネジメントの研究に従事。