

車載用パワー半導体の 高速・高精度な熱・ノイズシミュレーション技術

High-Speed, High-Accuracy Simulation Technique to Evaluate Thermal Performance and EMI Noise of Automotive Power Semiconductors

岡野 資睦 OKANO Motochika 伊見 仁 IMI Hitoshi 大藏 巖太郎 OKURA Gentaro

自動車業界では、電動化に伴ってパワー半導体への需要が高まっている。また、車載システムを効率的に開発するために、モデルベース開発 (MBD) 手法を用いたシミュレーションで、システム全体の機能・性能を検証する技術が導入されている。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、車載用としてMOSFET(金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ)などを製品展開しており、デバイス供給とともにシミュレーション用のデバイスモデルも提供している。高度化及び複雑化する車載システムに対応するため、シミュレーションの高精度化に伴う計算時間の短縮が課題であった。そこで、スイッチング動作によるシステムの熱特性とEMI(電磁干渉)ノイズに用途を定め、高精度かつ高速なシミュレーションを可能にするAccu-ROM(Accurate Reduced-Order Modeling: 精度保持縮退モデリング)技術を開発し、MOSFETの選定やスイッチング速度(スルーレート)を決定する際に有効であることを確認した。

In line with the recent trend toward the electrification of automobiles, demand has been increasing in the automotive field for power semiconductors as key devices of in-vehicle systems. With the increasing use of electronic components, the introduction of simulation technologies using model-based development (MBD) methods to verify the functions and performance of overall systems has been rapidly expanding in order to efficiently develop in-vehicle systems.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been promoting the deployment of power semiconductor products including metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) in response to customers' requirements for in-vehicle systems, and supplying not only devices but also device models of MOSFETs for such simulations. Moreover, we have been carrying out simulations of in-vehicle systems using our device models with the objective of offering optimal device models for system-level simulations. We found during this work that it was necessary to resolve the trade-off between accuracy and calculation time. To achieve a balance between high accuracy and high speed, we have now developed the Accu-ROM (accurate reduced-order modeling) technique focusing on the evaluation of thermal performance and electromagnetic interference (EMI) noise in switching operations and confirmed the effectiveness of this approach using the Accu-ROM technique when selecting an optimal MOSFET device and switching speed.

1. まえがき

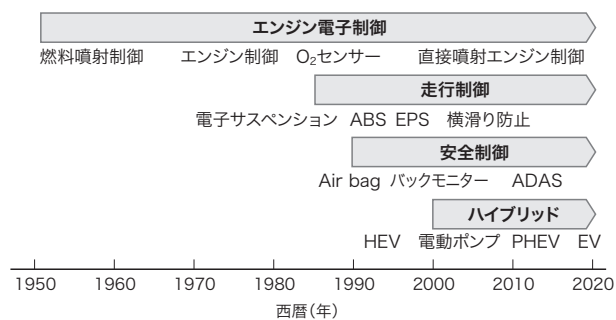
自動車は、当初は内燃機関を動力源とした機械部品の組み合わせであったが、現在では様々な電子機器を取り込んで目覚ましい進化を遂げている。例えば、エンジンは電子制御による効率化で排ガスの環境問題に取り組み、燃費の改善が進んだ。また、走る・止まる・曲がるといった基本性能は、AT(Automatic Transmission)・ABS(Anti-Lock Brake System)・横滑り防止機能・EPS(Electric Power Steering)により、飛躍的に向上している。最近では、自動車本来の性能改善だけでなく、ブレーキなどと連動したADAS(先進運転支援システム)や、内燃機関を搭載しないEV(電気自動車)まで登場している。このように、最新の自動車業界では、電動化を中心に100年に一度と言われる大変革が起こっている。この変革の実現には、車載アプリケー

ションに最適なMOSFETや、IGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)、MCD(Motor Control Driver)など、パワー半導体デバイスの提供が重要な役割を担っている。

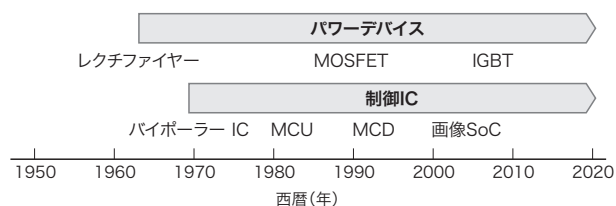
東芝デバイス&ストレージ(株)は、長年培ってきた半導体デバイス技術を基に、半導体チップの高性能化及びユーザーのニーズに合わせた製品開発に取り組んでいる(図1)。

一方、システムが高度化・複雑化し、国際競争が激しい自動車開発において、当社がハード部品を提供してユーザーが試作を繰り返すという従来の設計手法では、仕様が満たさなかった場合、双方にとって後戻りが大きくリソースも膨大となる。そこで、双方で協調した開発の仕組み・効率の向上が急務な状況にある。

現在、経済産業省が提言しているものに“SURIWASE2.0”がある。これは、「自動車産業におけるモデル利用のあり方に関する研究会」から提案された構想で、一般にMBDと呼



(a) 自動車の電動化の歴史



(b) 東芝デバイス&ストレージ(株)の車載半導体デバイスの歴史

O₂:酸素
HEV:ハイブリッド電気自動車
PHEV:プラグインHEV
MCU:Micro Controller Unit
SoC:システムオンチップ

図1. 自動車の電動化と東芝デバイス&ストレージ(株)でのパワー半導体への取り組み

電動化による進化に伴い、最適なパワー半導体デバイスを提供している。

Histories of electrification of automobiles and automotive power semiconductors developed by Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

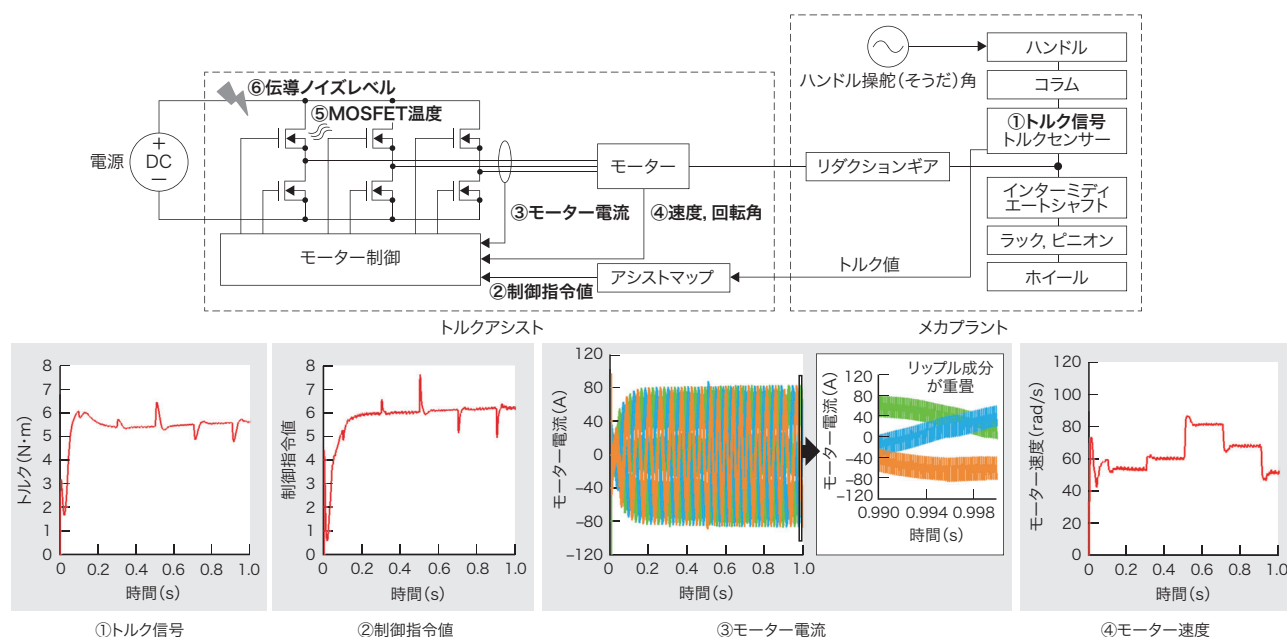
ばれるパーチャルシミュレーションを企業間で実施する開発手法を目指している。当社の汎用ディスクリート製品では、MBDに対応するため、Web上にSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) モデルの標準提供を進めている。MBDによる取り組みは、機能や性能検証だけでなく、活用範囲を広げ、熱やノイズ対策も可能となりつつある。

そこで、今回、ハードウェア部品だけでなくソフトウェア(デバイスモデル)を提供することで、開発の仕組み自体も変えるアプローチとして、計算精度を保ちつつ、計算時間を短縮するAccu-ROM技術を開発した。ここでは、Accu-ROM技術の概要と、それを用いたシミュレーション性能の評価結果について述べる。

2. MBDによる高精度シミュレーション技術

MBDの設計手法は、構想設計段階で、システムを構成する機能やユニットをブロックごとに分け、それぞれのブロック動作を数式やテーブルモデルで表現し、それらをつなげてシステム全体の機能や性能を机上で検証する方法である。一般に、これら検証結果を基にシステム全体の適合性を確認し、各ブロックの要求仕様を定義する。

詳細設計段階では、それらの要求仕様に基づいて各ブロックの設計を行う。仕様を満たしているかを確認する場合



DC:直流

図2. 詳細設計段階でのEPSシステムのブロック図とその特性

トルクアシストブロックを三相インバーター回路モデルに置き換えたもので、モーター電流にスイッチング動作によるリップル成分が重畳されていることが分かる。

Block diagram of electric power steering (EPS) system and its simulated characteristics in detailed design phase

は、対象のブロックを実際の詳細な設計データに置き換えて検証する。例えば、トルクアシストブロックを、設計データである三相インバータ回路モデルに置き換えた詳細モデルで特性を計算したのが、図2である。仕様を満たしている場合、全体的には構想設計段階で検証した結果と同じ振る舞いになるが、インバータの出力電流（モーター電流）を見ると、インバータのスイッチング動作に合わせてリップル成分が重畳されていることが分かる。

このようにMBD手法に基づいてブロック内のモデルを設計フローに合わせて詳細化していくと、機能や性能といった仕様の確認だけでなく、より詳細な実動作に近づけていくことができる。

3. 高精度化と高速化を両立させる縮退技術

ブロック内のモデルを詳細化していくと問題になるのが、膨大な計算時間である。その原因は二つある。一つは、各ブロックの応答時間の差である。例えば、図2に示したEPSシステムのリダクションギアやインターミディエートシャフトなどの機構部品（メカプラント）のモデルは、msオーダーの応答時間であるのに対し、トルクアシストのインバータは、MOSFETのスイッチング動作のためnsオーダーの応答時間となる。このため、インバータの動作に合わせた計算刻みで計算すると、メカプラントは、スイッチングの時間以外は

同じ計算を繰り返すことになる。もう一つの原因は、MOSFETモデルに使用するSPICEの計算時間にある。SPICEは、通常100～200個のパラメータを使用して計算されるため、計算が非常に複雑で、その分だけ時間が掛かる。

一般に、システム動作を検証するには数十秒から数分の振る舞いを観測する必要があるため、これら二つの原因により、検証が終わるまで数日間を要することもある。そこで今回、計算精度を保ちつつ、計算時間を短縮するAccu-ROM技術を開発した。

3.1 メカプラントモデルの縮退

前述のとおり、メカプラントとインバータでは応答時間に大きな差がある。メカプラントの振る舞いだけを見たい場合は、インバータの詳細なスイッチング動作は影響しないので、インバータのモデルは、オンとオフの簡易スイッチモデルで表現され、計算刻みもその状態が分かれば十分である。一方、インバータの振る舞いを見たい場合は、計算刻みを細かくする必要はあるが、モーターに接続される負荷トルクが同じであれば、メカプラントの中身にかかわらず同じ振る舞いを示す。そこでこれらの特性を用い、2段階に分けて縮退する手法として、Accu-ROM技術を開発した。

まず、図2のモデルを用いて、インバータのMOSFETをSPICEモデルから簡易スイッチモデルへ置き換え、計算刻みを粗く設定して計算する。今回のインバータは、ス

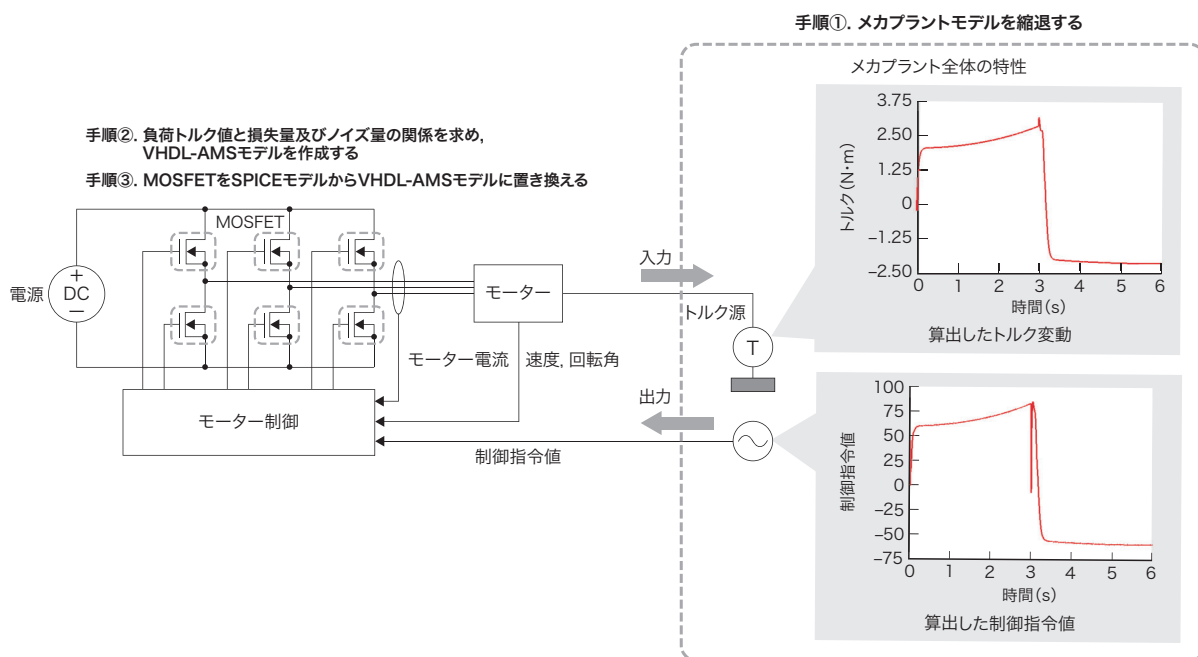


図3. Accu-ROM技術の計算手順

手順①から③を行うことで、高速に熱・ノイズを含むシミュレーションの検証ができる。

Flow of processes for calculation using Accu-ROM technique

スイッチング周波数が6.5 kHz（1周期153.85 μ s）だったため、計算刻みをその1/10の15 μ sとした。この計算により、メカプラント全体の特性を算出する。

次に、図3に示すように、メカプラントモデルを全て削除し、モーターにトルク源を接続、そこに第1段階で算出したメカプラント全体の特性をつなげる。メカプラントから制御モデルへフィードバックする信号は、第1段階で得られた値（制御指令値）を使用した。これにより、高速にインバーターの振る舞いを見るための、メカプラントモデルが出来上がる。

3.2 MOSFETモデルの縮退

MOSFETモデルの計算時間を短縮するため、熱とノイズに特化した縮退モデルを開発した。

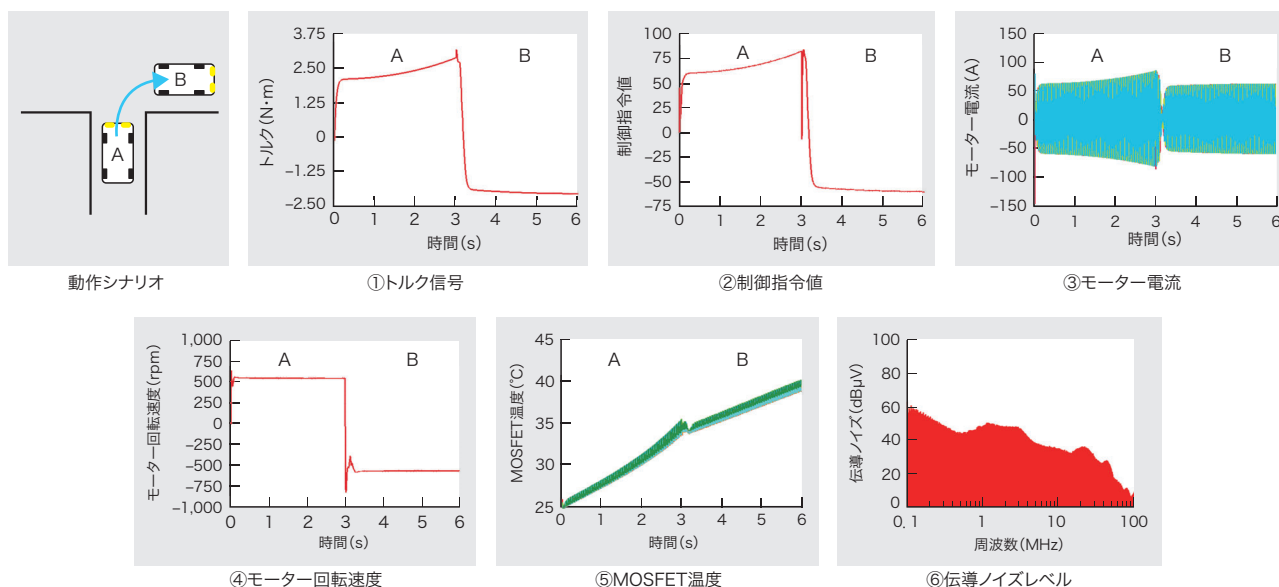
モーターにトルク源をつないだ図3を用いて、MOSFETをSPICEモデルに戻し、計算刻みもスイッチング特性に合わせた細かい値に設定する。この回路を用いて、モーターの仕様範囲内でトルク量を変化させ、負荷トルク値に対するスイッチング損失量とノイズ量をあらかじめ求めておく。

次に、これらの関係をテーブルあるいは回帰式にして組み込んだVHDL-AMS (Very-High Speed IC Hardware Description Language - Analog and Mixed Signal) モデルを作成し、SPICEモデルと置き換える。システム検証では、システム動作で発生する負荷トルク値に合わせ、都度

VHDL-AMSモデルを参照することでSPICEモデルの計算を省略し、高速にスイッチング損失量とノイズ量の算出ができる。

3.3 Accu-ROM技術による計算時間の短縮

Accu-ROM技術を適用した解析結果を、図4に示す。自動車を右折させたときの、EPSシステムの動作検証である。モーター電流及びモーター回転速度は、縮退前のSPICEモデルで計算した場合と同じ挙動を示しており、誤差はMOSFET温度（ジャンクション温度）が1.18 $^{\circ}$ C、ノイズは0.5 dB μ V以内と、高精度にシステム検証できていることを確認した。ここで、MOSFET温度は、そこを流れる電流と電圧値から発熱量を算出し、それを熱源として、周辺熱回路モデルからMOSFETのジャンクション温度として求めた。また、ノイズは、CISPR 25（国際無線障害特別委員会規格 25）で規定されたLISN（Line Impedance Stabilization Network）回路を供給電源につなげ、端子間の電圧をモニタリングする電圧法⁽¹⁾で伝導EMIを求めた。計算時間は、縮退前のSPICEモデルで32時間51分掛かっていたものが、Accu-ROM技術の適用後はメカプラントの特性の算出に10分、詳細解析に3時間17分の合計3時間27分で完了した。これにより、同等の精度を約1/10の計算時間で検証できることが示された。



適用手法	詳細モデル	Accu-ROM技術適用
解析時間	32時間51分	3時間27分

図4. Accu-ROM技術によるEPSシステムの動作検証結果

モーター電流波形、MOSFET温度、及びノイズの全てにおいて、縮退前のSPICEモデルで計算した場合と同じ挙動を示した。

Results of verifications of EPS system using Accu-ROM technique

4. 熱とノイズのトレードオフ検証

一般に、スイッチング動作における発熱とノイズには、トレードオフの関係がある。スイッチング速度が速いとスイッチング損失が抑えられるが、リングングの発生によりノイズは大きくなる。逆に、スイッチング速度が遅いとリングングは抑えられるが、スイッチング損失が大きくなり発熱する。このため、熱とノイズの双方の仕様を満たす条件を導出するには、多くの条件で検証を繰り返す必要がある。そこで、3章で述べた Accu-ROM 技術を用いて検証を行った。

スイッチング速度を変え、MOSFET 温度とノイズを検証した結果を、図5に示す。スイッチング速度が速いと発熱は抑えられるが、ノイズは CISPR 25 における Class5 の規格を満たしておらず、逆に遅いとノイズの規格は満たすが発熱が大きくなっていることが分かる。

これらにより、MBD 手法及び Accu-ROM 技術を用いることで、発熱とノイズを高速に検証することができ、MOSFET の型番選定やその MOSFET を用いたときのスイッチング速度を決める有効な手段になることが分かった。また、発熱と

ノイズの両立が困難な場合は、発熱を抑えるための放熱設計や、ノイズを抑えるためのプリント基板の寄生インダクタンス低減などの指針を策定することもできる。

5. あとがき

熱及びノイズを高速・高精度に検証できる Accu-ROM 技術を開発し、短い計算時間で MBD の活用範囲を広げることができた。

今後は、放熱性が高く低ノイズの MOSFET や、発熱とノイズを両立させるスルーレートコントロールを取り入れた制御 IC などの開発に、この技術を活用していく。また、半導体製品の開発強化にとどまらず、顧客とともに熱やノイズ耐性に優れた ECU (Electronic Control Unit) 製品の開発に貢献していく。

文 献

- (1) CISPR 25 Ed. 4.0: 2016. Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, IEC.

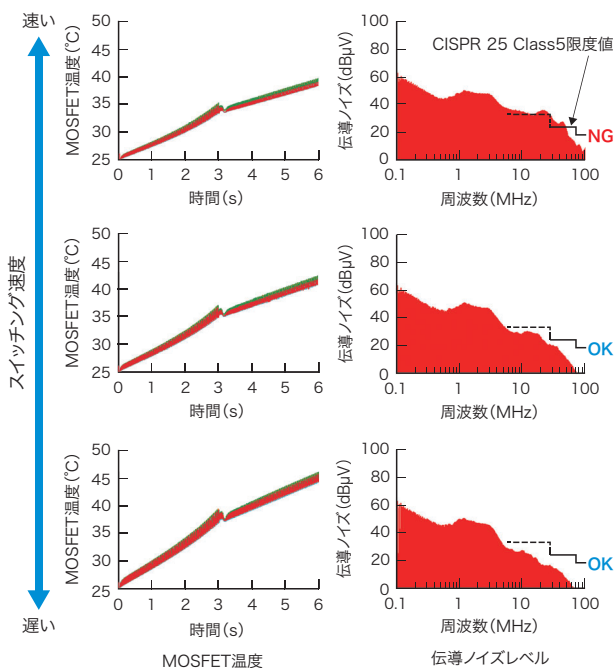


図5. スwitchング速度を変えたときの発熱とノイズの検証結果

スイッチング速度が速いと発熱は抑えられるがノイズは CISPR 25 における Class5 の規格を満たしておらず、逆に遅いとノイズの規格は満たすが発熱が大きくなっていることが分かる。

Results of verifications of heat generation and noise when changing switching speed



岡野 資睦 OKANO Motochika, Ph.D.

東芝デバイス&ストレージ (株) デバイス&ストレージ研究開発
センター パッケージソリューション技術開発部
博士 (工学)
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



伊見 仁 IMI Hitoshi

東芝デバイス&ストレージ (株) デバイス&ストレージ研究開発
センター パッケージソリューション技術開発部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



大蔵 厳太郎 OKURA Gentaro

東芝デバイス&ストレージ (株) 半導体事業部 半導体応用技術
センター 車載・産業応用技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.