

車載ディスクリート半導体の MBD 取り組みのご紹介 アプリケーションノート

概要

本資料は、東芝デバイス&ストレージ株式会社が取り組む MBD (Model Based Development) の概略や特長について記述したアプリケーションノートです。

これは参考資料です。本資料での最終機器設計はしないでください。

目次

概要	1
目次	2
1. 背景.....	4
1.1. MBD が必要とされる理由.....	4
2. MBD 概略.....	5
2.1. MBD とは？	5
3. 各種モデルのご紹介.....	6
3.1. 電気モデル	6
3.2. 熱モデル.....	6
4. 東芝の車載 MBD 取り組みの特長.....	7
4.1. 縮退技術が必要な背景	9
4.1.1. 原因 1：電気とメカの時間応答性の差.....	9
4.1.2. 原因 2：SPICE シミュレーションの計算時間	9
4.2. Accu-ROM™とは.....	10
4.2.1. Accu-ROM™ 技術	10
STEP1：メカプラントモデルの縮退	10
STEP2：MOSFET モデルの縮退	11
STEP3：縮退モデルを使ってシミュレーション	11
4.2.2. Accu-ROM™ 技術による計算時間の効果.....	12
5. 用語集	13
製品取り扱い上のお願い.....	15

図目次

図 1.1 車載半導体が注力するテーマ「CASE」 4

図 2.1 MBD 検証プロセスの概略図 5

図 4.1 EPS プラントモデル実施例 7

図 4.2 テーブルモデル 回路モデル比較結果 7

図 4.3 自動車右折時のシミュレーション結果 8

図 4.4 計算時間が長くなる要因 9

図 4.5 メカプラントモデルの縮退イメージ図 10

図 4.6 MOSFET モデルの縮退 11

図 4.7 縮退モデルを使ったシミュレーション 11

図 4.8 モデル縮退効果 12

表目次

表 3.1 車載 SPICE モデル群と暗号化一覧 6

表 5.1 用語集 13

1. 背景

1.1. MBD が必要とされる理由

近年、自動車業界では 100 年に一度の変革とも言われている新しい潮流として、図 1.1 に示す CASE (Connected, Automated/Autonomous, Shared & Service, Electric) と呼ばれる技術トレンドが注目されています。「Connected」では、車載 Ethernet や IVI(In-Vehicle Infotainment)に代表される自動車の IoT(Internet of Things)化。「Automonomous」では、ADAS (Advanced Driving Assistant System)に代表される自動運転に向けた技術革新。「Shared」では、「MaaS」 (Mobility as a Service) と呼ばれる次世代の概念として、車は所有するものから新しいサービス業態の変革。「Electric」では、カーボンニュートラル化に向けた課題解決として、車載パワー半導体を始め多くの電子部品を搭載する電気自動車の普及が進んでいます。

このように環境課題への対応や自動化や利便性・快適性を高める技術トレンドがある一方でシステムが大規模かつ複雑化し、高度な安全性や信頼性を担保する為の膨大な検証が課題となっています。限られたリソースの中でシステム全体の検証が困難となりつつあります。例として、ある製品が仕様を満たさなかった場合、セットメーカーと部品メーカーの双方にとって後戻りが生じ、開発期間やコストの増加を招くことにもなります。そこで、近年では自動車業界全体でモデルやシミュレーションを活用した効率的な開発手法として MBD(Model Based Development)の導入が進んでいます。

車載用半導体が注力するテーマ



図 1.1 車載半導体が注力するテーマ「CASE」

2. MBD 概略

2.1. MBD とは？

MBD(Model Based Development)とは、開発初期段階よりモデルを活用した開発手法です。

MBD 導入のメリットは、主に下記の 3 つが挙げられます。

- (1) 大幅な後戻りの低減
- (2) 試作回数の削減
- (3) 設計資産の活用による効率化

図 2.1 に MBD の開発フローとして広く知られる V 字プロセスによる開発フローを示します。左アームに示されるモデル主体の設計プロセスと、右アームに示される実機主体の検証プロセスに加えて、各開発初期の設計段階でフロントローディングと言われるモデル主体のシミュレーションによる検証が繰り返し行われます。それにより設計段階の工数が増える傾向にある一方で、仕様との不一致に対する対策を設計初期段階で講じることができる為、性能目標に対する開発初期段階の完成度が上がります。

その結果、実機検証ではじめて問題が発覚し大幅な後戻りが発生するリスクを低減することが出来ます。加えて、シミュレーションを行うことにより実機による試作回数も低減でき、これにより開発期間が短くなることで競争力のある製品開発が期待できます。また、MBD による設計資産も構築できます。よって、次期製品の開発でも設計資産を活用することで更なる効率化や開発期間の短縮が期待できます。

当社が MBD 実現に向けた役割を考えると、第 1 に顧客であるセットメーカー・ユニットメーカーに「動く仕様書」として設計環境で動作するモデルを提供することが求められます。具体的な取り組みとして、顧客設計環境の様々なツールに対応したデバイスモデルとして、SPICE モデルや熱モデルを提供しています。第 3 章では、その詳細について紹介します。

ディスクリート半導体はシステムレベルでの上位設計段階では理想半導体として扱われることが多く、上流のセットメーカーやユニットメーカーで行われる MBD と、下流の部品メーカーの MBD では、モデル粒度の側面ではギャップがあるのが現状です。例としてハード検証の段階で高耐圧・大電流を扱うパワー半導体で熱やノイズがシステムへ及ぼす影響が問題となるケースが多く、課題となります。

そこで、当社はそれを改善する取り組みとして、車載パワー MOSFET の熱設計や EMI (電磁干渉) ノイズ検証が可能となる独自の縮退技術による解析方法を提案しています。第 4 章ではその取り組みを紹介します。

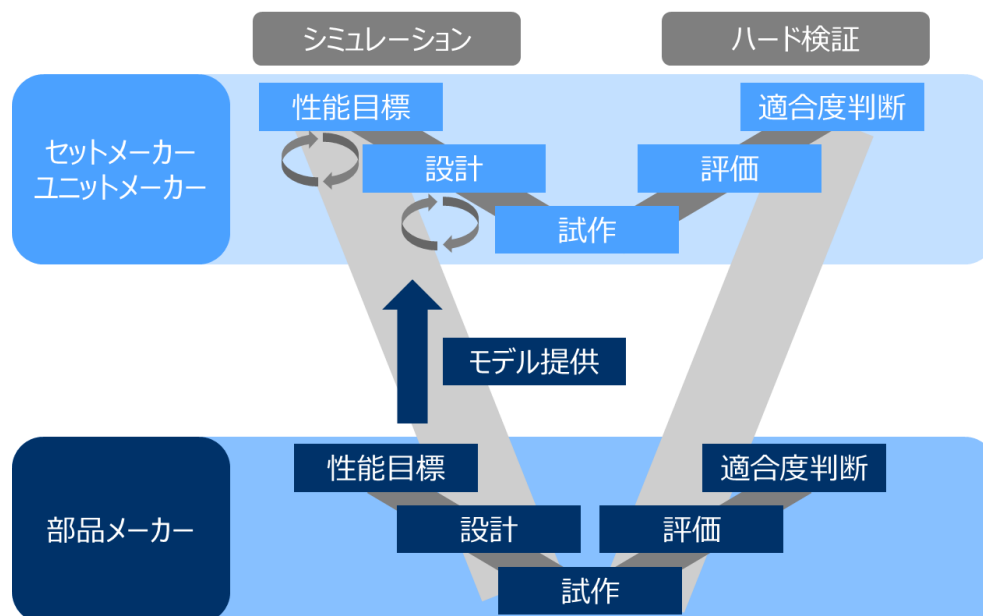


図 2.1 MBD 検証プロセスの概略図

3. 各種モデルのご紹介

この章では当社車載ディスクリート半導体製品として提供している電気モデル、熱モデルや各種ツールへの対応について示します。

3.1. 電気モデル

当社では、車載ディスクリート半導体製品の電気モデルとして、2種類の粒度の Spice モデルを準備しています。ひとつは、計算速度が短くファンクションチェックに適した G0 モデルです。

もうひとつは、MOSFET 製品に対して当社が独自で開発した G2 モデル(高精度 SPICE モデル)です。G2 モデルは BSIM3 をベースとしたマクロモデル形式で作成されており、極力少ない素子数と連続的な任意の関数を用いた非線形素子を用いて対象となる素子の電気特性を表現しています。その結果、従来のマクロモデルのデメリットであるノード数の増加による回路シミュレーションの収束性や計算速度の低下を可能な限り抑えているなどの特長があります。さらに I_D - V_{DS} カーブの高電流領域特性や非線形性のある容量特性の再現性に優れており、実測に近い高精度なシミュレーションを可能にしています。また、パッケージの寄生成分も考慮されており、スイッチング時に発生するリンギングや EMI 解析が可能です。

G2 モデルの詳細は下記のアプリケーションノートより参照できます。

(アプリケーションノート)

[MOSFET SPICE モデルグレード](#)

当社では各種シミュレーションツールに対応した SPICE モデルを提供しております。具体的には表 3.1 に示す PSpice® と LTspice® 用モデルに加えて、SIMetrix™ モデル、ELDO モデルも Web 公開をはじめました。当社 SPICE モデルグレードに応じた暗号化の有無について表 3.1 に表します。

表 3.1 車載 SPICE モデル群と暗号化一覧

デバイス種	PSpice®	LTspice®	SIMetrix™	ELDO
MOSFET(G0)	非暗号化	暗号化	暗号化	暗号化
MOSFET(G2)	暗号化	暗号化	暗号化	暗号化
Diode	非暗号化	暗号化	暗号化	暗号化
Bipolar	非暗号化	暗号化	暗号化	暗号化
IPD (Intelligent Power Device)	暗号化	暗号化	—	—

3.2. 熱モデル

ディスクリートパワー半導体では MOSFET を中心に熱シミュレーションに適する簡易 CFD (Computational Fluid Dynamics) モデルの WEB 公開を開始しました。この簡易 CFD モデルを熱流体解析ツールで使用することで、三次元の温度分布や流速の挙動を可視化したシミュレーション結果を得ることができます。モデルのファイル形式は、ISO 規格の STEP 形式ですので、多くの 3D CAD ツール間で互換性があり、さまざまな熱流体解析ツールで使用可能です。

一緒に提供する物性値と合わせてご利用いただくことで、PCB 基板やヒートシンクに当社製品を搭載した際の熱シミュレーションが可能となります。

簡易 CFD モデルの詳細内容については下記アプリケーションノートより参照いただけます。また解析目的に応じ、個別要求に応じたモデルについては弊社営業窓口までお問い合わせください。

(アプリケーションノート)

[簡易 CFD モデルアプリケーションノート](#)

4. 東芝の車載 MBD 取り組みの特長

この章では MBD の取り組みとして当社独自の Accu-ROM™ (Accurate Reduced-Order Modeling : 精度保持縮退モデリング) 技術を紹介します。

図 4.1 に示す自動車の EPS (Electric Power Steering) システムを例に解説します。左側は自動車の EPS システムをブロック図に示します。ここでは各ブロックごとに数式やテーブルで定義されたテーブルモデルで表記されています。

動作の一例としてハンドルを回した際にトルク信号が赤枠のトルクアシストブロックへ伝わり、必要なモーター回転速度が計算され、モーターが動く構成となっています。より高精度なシミュレーションをするために、実際の回路構成である三相インバーターモデル (回路モデル) に置き換えて、使用する MOSFET を G2 モデルにしたのが図 4.1 の右側となります。

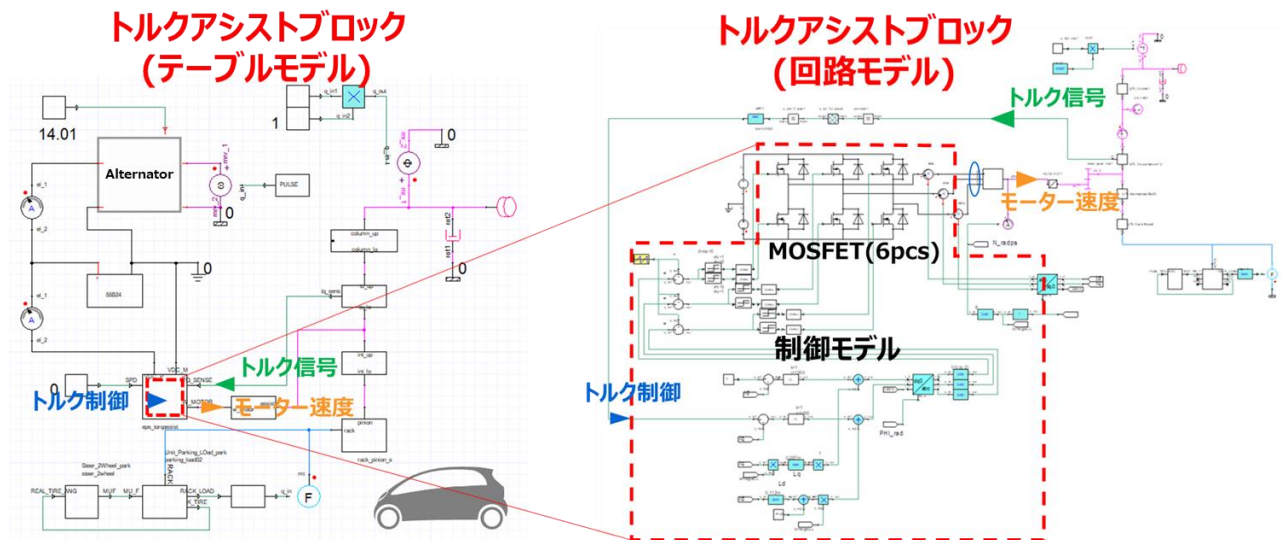


図 4.1 EPS プラントモデル実施例

これらのモデルを使って、それぞれシミュレーションした結果が図 4.2 となります。図 4.2 の上側がテーブルモデル、下側が回路モデルの結果です。

どちらも全体的に同じ振る舞いをしていますが、インバーターの出力電流 (モーター電流) を見ると、回路モデルの場合、インバーター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ります。このようにモデルを詳細化していくと、機能や性能といった仕様の確認だけでなく、より詳細な実動作を確認することが可能になります。

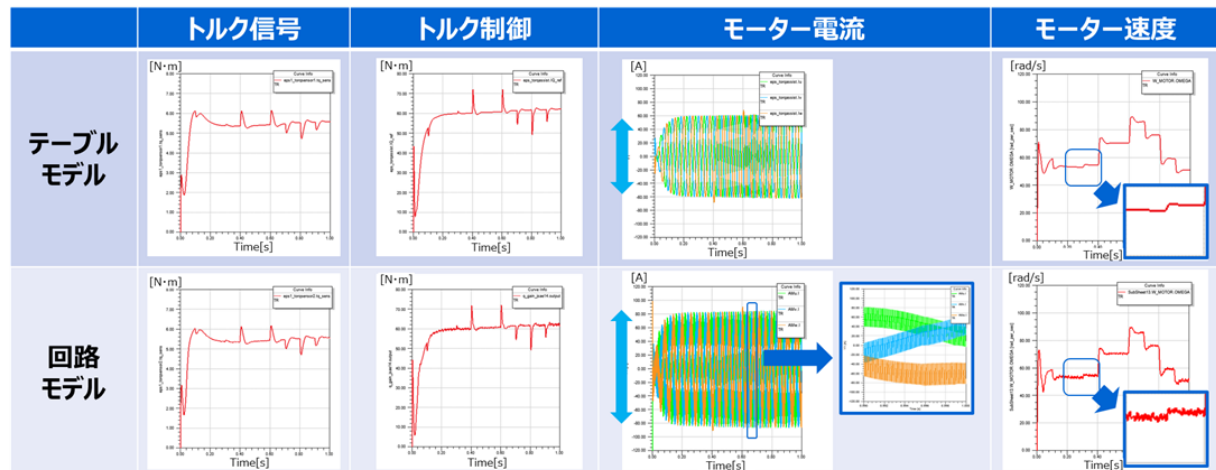


図 4.2 テーブルモデル 回路モデル比較結果

回路モデルを用いて詳細な検証が可能になると、システムの熱成立性の検証や EMI ノイズなどの観測がシミュレーション上で可能となります。図 4.3 は自動車が右折したときを例に挙げたものです。

ハンドルを 3 秒間右に回し、3 秒間かけて元に戻す設定です。モーター回転速度を見ると、前半 3 秒間はモーターがプラスに回転し、後半 3 秒間は反対に回転していることが分かります。

この時、MOSFET のジャンクション温度は動作に合わせて上昇し続けます。図 4.3 の⑥では最もノイズを発したタイミングにおける伝導 EMI ノイズを示します。

具体的な熱検証の算出方法は、MOSFET に流れる電流と電圧値から発熱量を算出し、算出値を熱源とした周辺の熱回路モデルを回路モデルへ追加することで熱検証を可能としています。伝導 EMI ノイズでは CISPR 25(注 1)で規定された LISN (Line Impedance Stabilization Network) 回路を回路モデルへ追加することで実現しております。

このように熱検証や伝導 EMI ノイズの解析は、テーブルモデルでは表現することができず、高精度な G2 モデルを用いた回路モデルをベースに、LISN 回路を追加することで実現しており、回路モデルの必要性が分かります。

ただし、ここで問題となるのが計算時間です。熱やノイズの検証ができないながらも、同じ動作をテーブルモデルで検証すると 3 時間で終わるものが、回路モデルにすることで 32 時間 51 分かかります。

注 1 : CISPR 25 (国際無線障害特別委員会規格 25)

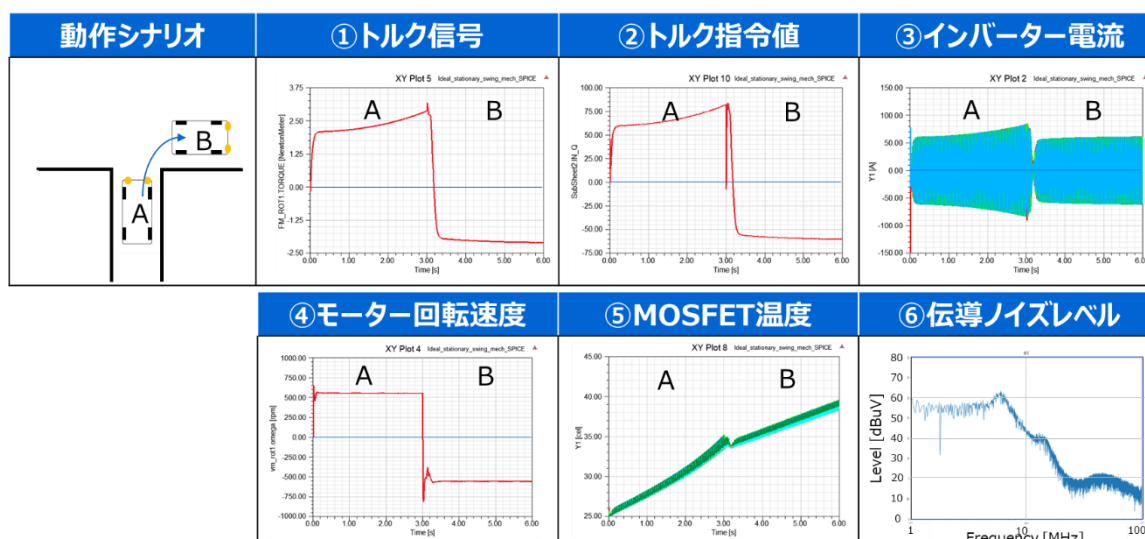


図 4.3 自動車右折時のシミュレーション結果

4.1. 縮退技術が必要な背景

前述のように車載システム全体の特性検証を実施する場合、解析モデルが大規模となり、熱やノイズまで取り込んだシミュレーションをすることは解析時間が長くなり現実的ではありませんでした。そのためパワーMOSFETを扱う場合、理想的なスイッチとして扱われることが多いことから、熱やノイズの見積りの精度が得られず、実機検証の際の後戻りの要因ともなっています。

解析が困難となる原因としては、全体的な回路規模が大きいことに加え、2つの原因が考えられます。

4.1.1. 原因 1 : 電気とメカの時間応答性の差

原因の1つ目は、各ブロックの応答時間の差にあります。例えば図4.4に示すメカプラントのモデルは、 μs 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ーは、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ります。このため、インバーター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ります。

原因① : 電気とメカの時間応答性の差

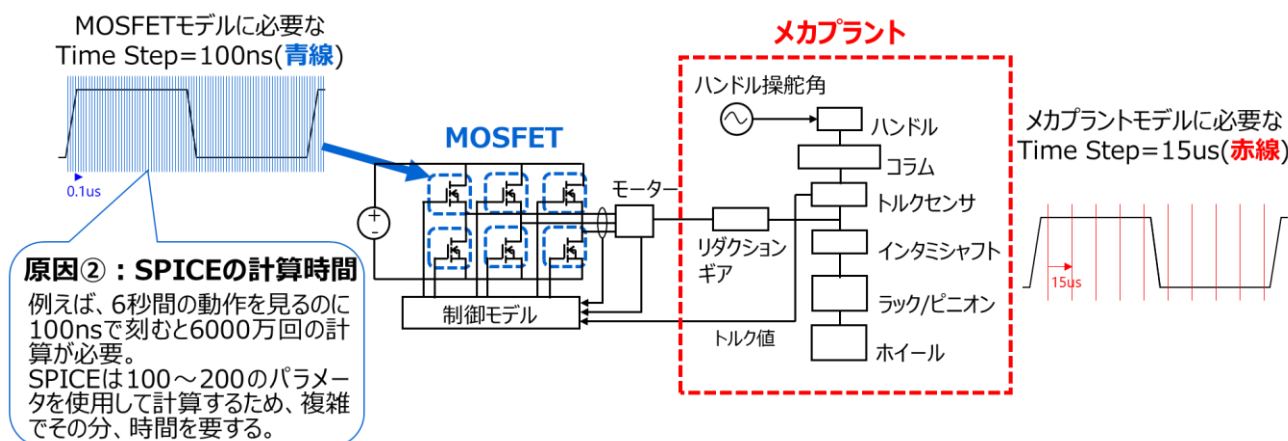


図 4.4 計算時間が長くなる要因

4.1.2. 原因 2 : SPICE シミュレーションの計算時間

もう1つの原因は、MOSFETモデルに使用するSPICEの計算時間にあります。SPICEは、通常100～200個のパラメーターを使用して計算するため、通常の波形確認であれば気にならないのですが、システム検証での使用となると、今回のケースでは6秒間の動作をタイムステップ100nsで刻むと6000万回計算を繰り返すことになるため、その分時間を要することになります。

このような理由から、メカプラントのモデルを扱うシミュレーションでは、シミュレーション時間の観点からG2モデルを扱うことができず、理想スイッチとして扱われることが多いため、解析精度を犠牲にせざるを得ない状況がありました。

4.2. Accu-ROM™とは

当社では、従来困難であった熱特性と EMI ノイズを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) 技術を開発したのでご紹介します。

4.2.1. Accu-ROM™ 技術

この章では、Accu-ROM™技術が行っている解析内容について解説します。

当社の Accu-ROM™ 技術では、MOSFET の G2 モデルで表現できる過渡応答特性を自動縮退させ、シミュレーションまで自動化するものです。

STEP1 : メカプラントモデルの縮退

最初に図 4.5 に示すようにメカプラントモデルを縮退します。上述のとおり、MOSFET とメカプラントでは応答時間に大きな差があります。そのためメカプラント全体の振舞いを見たい場合は、MOSFET の詳細な動きは必要とせず、タイムステップもスイッチの状態が分かれば十分です。そこでまず MOSFET モデルをスイッチのオンとオフが表現された簡易スイッチモデルとし、タイムステップを粗くして計算します。

今回のインバーター回路はスイッチング周波数が 6.5kHz(1 周期 153.85 μ s)であったため計算刻みはその 1/10 の 15 μ s とします。こうしてメカプラント全体の特性が抽出できます。

その後、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します。トルク源には抽出したメカプラント全体へ必要なトルク変動特性をつなげます。また、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、メカプラント全体で必要なトルクを発生するための制御指令値とつなげます。これによりメカプラント全体の特性を表現したモデルができます。

MOSFETを簡易モデルにして、Time Step=15usでメカモデル特性を模擬・抽出

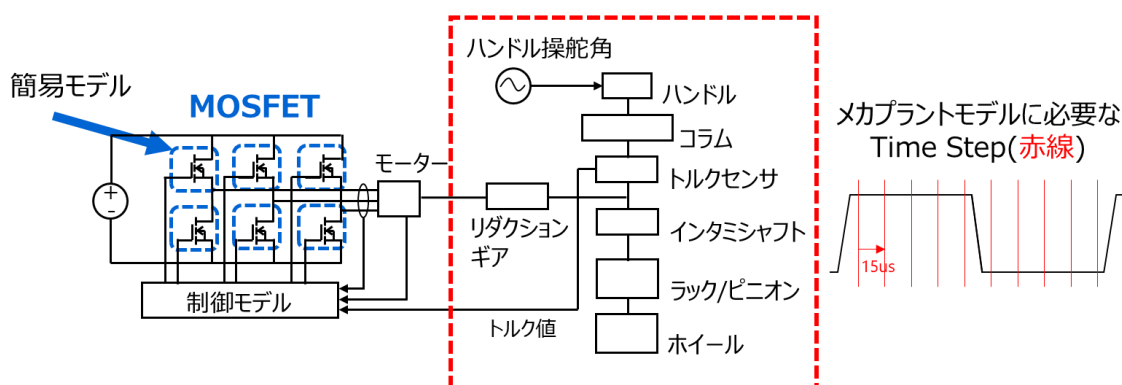


図 4.5 メカプラントモデルの縮退イメージ図

STEP2 : MOSFET モデルの縮退

次に図 4.6 に示すように MOSFET モデルの縮退をします。MOSFET の振舞いを見たい場合、タイムステップを細かくする必要がありますが、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関わらず同じ振舞いを示します。そこで、モーターにトルク源をつなぎ、MOSFET を G2 モデルにし、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します。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ます。この負荷トルクとスイッチング損失の関係性をテーブル化して VHDL-AMS^(注2)モデルを作成し、SPICE モデルから置き換えます。

注 2 : VHDL-AMS (Very-High Speed IC Hardware Description Language - Analog and Mixed Signal) モデル

負荷トルク値をスイープさせ、SPICEモデルを使って負荷トルクと損失量の関係を求め、VHDL-AMSモデルを作成する。

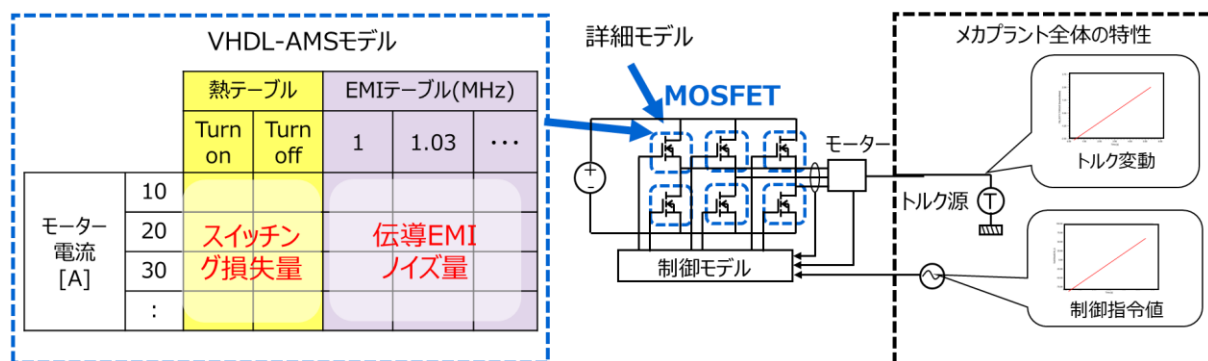
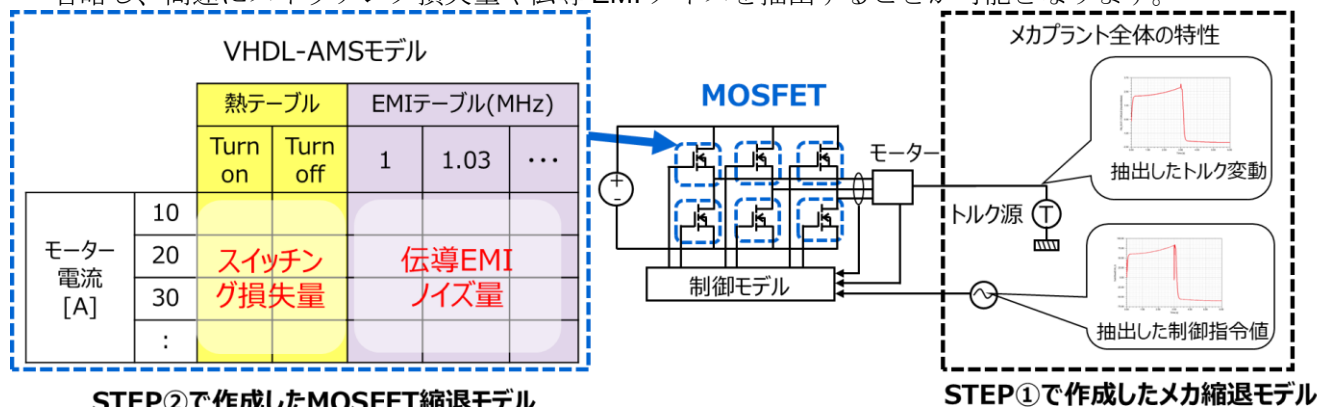


図 4.6 MOSFET モデルの縮退

STEP3 : 縮退モデルを使ってシミュレーション

最後に、図 4.7 に示すように STEP1 と STEP2 で作成した縮退モデルに置き換えて、Time Step を細かく刻み、特性検証を行ないます。動作するシナリオに合わせ、システム動作で発生するメカプラント全体に必要な負荷トルク値を見て、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や伝導 EMI ノイズを抽出することが可能となります。



STEP②で作成したMOSFET縮退モデル

STEP①で作成したメカ縮退モデル

図 4.7 縮退モデルを使ったシミュレーション

4.2.2. Accu-ROM™ 技術による計算時間の効果

図 4.8 に Accu-ROM™ 技術を用いることによる効果を示します。縮退技術を適用した場合の解析精度は、縮退する前とほぼ同等に再現でき、遜色のないものとなっています。一方、解析時間は 32 時間近く要していたところ、本技術適用により 3 時間 27 分と約 1/10 まで短縮することが出来ました。Accu-ROM™ は熱やノイズ解析に最適な高精度でかつ高速なシミュレーション技術として、Ansys® Twin Builder™ へ組み込み済みです。

今すぐ試したい方は下記リンクよりアクセスください。

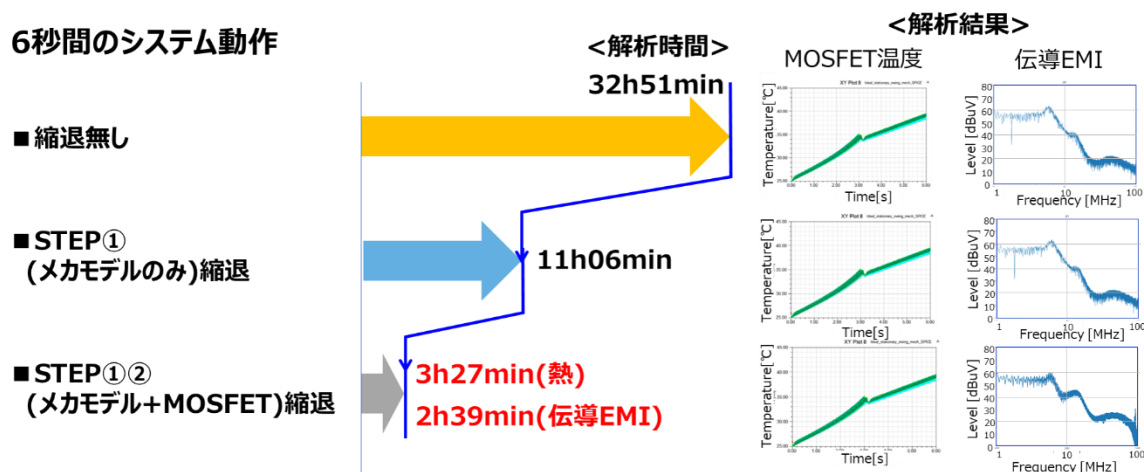


図 4.8 モデル縮退効果

[Accu-ROM™ 技術 on Ansys® Twin Builder™ のインストール方法と使い方 | 東芝デバイス&ストレージ株式会社 | 日本 \(semicon-storage.com\)](https://www.semicon-storage.com)

今回は EPS をモチーフとした Accu-ROM™ による熱解析や伝導 EMI ノイズ解析について紹介しました。今後は、xEV などのアプリケーションへの展開も検討しております。

5. 用語集

表 5.1 用語集

用語	正式用語	カテゴリー	要約
MBD	Model Based Development	設計手法	設計工程でコンピューター上に作成する「モデル」を活用することで、部品試作やテストにかかる時間やコストを減らそうとする開発手法。
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis	回路シミュレーター	電子回路のアナログ動作をシミュレーションするソフトウェア。電子部品や回路を表現するためのモデル言語であり、主にアナログ回路をシミュレートする汎用回路解析プログラムです。
PSpice®		商用 SPICE シミュレーター	Cadence 社の SPICE シミュレーター。回路検証が可能です。
LTspice®		商用 SPICE シミュレーター	Analog Devices 社が無償提供する SPICE シミュレーター。回路検証が可能です。
SIMetrix™		商用 SPICE シミュレーター	SIMetrix Technologies 社の独自 SPICE シミュレーター。収束性の良い回路検証が可能です。
ELDO		商用 SPICE シミュレーター	Siemens EDA 社の独自 SPICE エンジン回路。
Xpedition AMS		システムシミュレーター	Siemens EDA 社のシステムシミュレーター、ELDO という独自 SPICE が組み込まれている。
Twin Builder™		システムシミュレーター	ANSYS 社の汎用システム・シミュレーター。構造・機構・流体・熱・電気など、複数の物理現象をまたがるマルチフィジックス解析が可能。
VHDL-AMS	Very-High Speed IC Hardware Description Language-Analog and Mixed Signal	モデル言語	電気や熱、メカニカルな動作などアナログ的な挙動と、マイコンなどデジタル的な挙動の双方を表すことができるモデル言語のこと。

簡易 CFD モデル	Computational Fluid Dynamics	熱流体解析ツール	熱シミュレーションに適する簡略化した CFD モデルです。この簡易 CFD モデルを熱流体解析ツールで使用する事で三次元の挙動の可視化したシミュレーションが可能です。
EMI	Electro Magnetic Interference	EMC	電気／電子機器の動作に伴い発生した電磁波が、他の機器の動作を妨害すること

* Accu-ROM™ は、東芝デバイス&ストレージ株式会社の商標です。
* その他の社名・商品名・サービス名などは、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- ・ 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- ・ 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- ・ 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- ・ 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- ・ 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- ・ 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- ・ 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- ・ 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- ・ 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- ・ 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>