

# IGBT モジュール開発におけるデバイス・回路・熱の連携シミュレーション技術

Integrated Simulation Technology Combining Device, Circuit and Thermal Behavior in IGBT Module Development

山田 昭治 YAMADA Shoji

池田 晴信 IKEDA Harunobu

仲村 秀世 NAKAMURA Hideyo

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの設計において、小型化、高効率化、低ノイズ化などの要求を満足するため、シミュレーションによる事前解析の重要性が増している。富士電機では、従来、IGBT モジュールの構成要素ごとに行っていたデバイスや熱のシミュレーションを、回路シミュレーションをベースにして連携させ、モジュール全体の解析ができる連携シミュレーションを構築した。これにより、従来に比べて、熱特性で約 10% から約 5% に、電気特性で約 40% から約 10% に誤差が低減した精度の高いシミュレーションを実現している。

To meet the various demands for insulated gate bipolar transistor (IGBT) module design such as miniaturization, high efficiency, and low noise, the importance of preanalysis through simulation has increased. Heretofore, Fuji Electric has performed device and thermal simulations separately for each component of IGBT module; now we have linked these simulations with a circuit simulation as a base, and established an integrated simulation that enables analysis of the IGBT module as a whole. Through this we have improved the accuracy of simulations from approximately 40% to 10% for electrical properties and from approximately 10% to 5% for thermal properties, as compared to previous simulations.

## 1 まえがき

近年、地球温暖化は大きな社会問題となっており、それを防止するために太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及や、エネルギーを効率的に利用するパワーエレクトロニクス技術のいっそうの普及が、世の中で広く期待されている。これらの普及には、キーデバイスであるパワー半導体製品の果たす役割が非常に大きい。

富士電機では、この期待に応えるため、産業、自動車、情報電源を中心としたエネルギー分野に、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールなどの各種パワー半導体製品をラインアップしている。IGBT モジュールでは、小型化、高効率化、低ノイズ化などの要求が高まっている。これらの要求を総合的に満足する最適設計や、製品開発期間の短縮が求められる中、シミュレーションによる製品の事前解析が重要性を増している。

## 2 IGBT モジュールの開発におけるシミュレーション

IGBT モジュールは、IGBT や FWD (Free Wheeling Diode) といった半導体チップおよび半導体チップを実装するパッケージで構成されている。図 1 に、この IGBT モジュールの開発で使用するシミュレーションを示す。

### 2.1 従来のシミュレーション

IGBT や FWD チップの開発ではプロセスやデバイスのシミュレーションを行い、パッケージの開発では熱や応力のシミュレーションを行うというように、従来は対象を IGBT モジュールの各構成要素に限定してシミュレーションを行っていた (図 1 (a))。

また、シミュレーション間の連携もチップの開発においてはプロセスとデバイスのシミュレーションの連携、パッケージの開発においては熱と応力のシミュレーションの連携<sup>(1)</sup>というように、IGBT モジュールの各構成要素の中だけに限定されていた。

### 2.2 連携シミュレーション

小型化、高効率化といった IGBT モジュールに要求さ

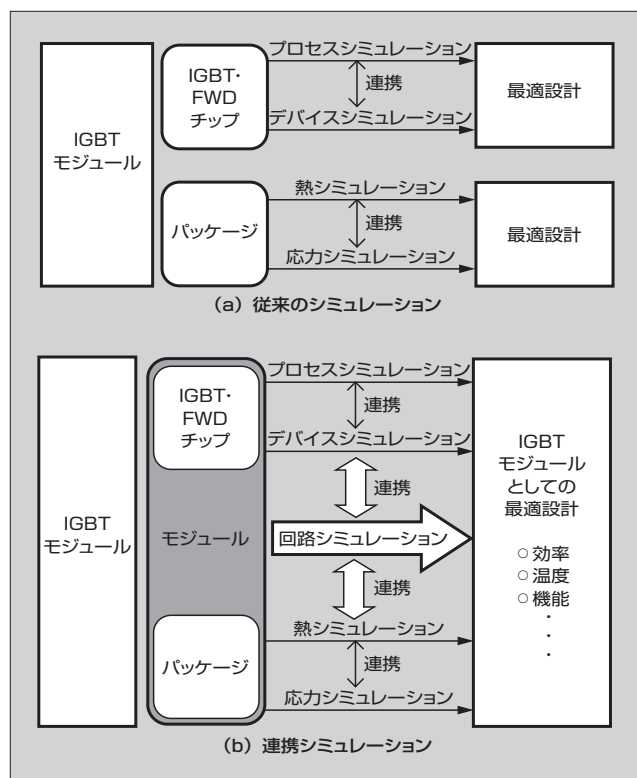


図 1 IGBT モジュール開発におけるシミュレーション

れる特性の向上には、IGBT や FWD チップの特性とパッケージの特性が相互に密接に影響する。そのため、各要素を最適設計したにもかかわらず、IGBT モジュールを評価したときに要求項目を満足できないこともある。

そこで、各要素のシミュレーションを連携し、IGBT モジュール全体の要求特性を事前に解析することが必要になってくる。富士電機ではこの課題を解決するために IGBT モジュール全体の特性を解析できる連携シミュレーションの構築に取り組んできた。

図 1 (b) に、構築した連携シミュレーションを示す。IGBT モジュールの電気特性を解析する回路シミュレーションをベースに、各要素の解析に用いるシミュレーションを連携して、IGBT モジュール全体の解析を行う連携シミュレーションを構築した。

本稿ではその一例として、デバイスシミュレーションと回路シミュレーションとの間、および回路シミュレーションと熱シミュレーションとの間の連携について述べる。

### ③ デバイスシミュレーションと回路シミュレーションの連携

#### 3.1 概要

デバイスシミュレーションでは、半導体デバイスのプロセスフローに基づきデバイスの構造モデルを構築し、デバイスの電気特性を解析する。また、回路シミュレーションでは、これらの半導体デバイスの回路シミュレーション用モデルを用いて IGBT モジュールの電気特性を解析する。

この回路シミュレーション用 IGBT モデルには、一般的に回路シミュレータの標準 IGBT モデルや等価回路モデルが使用されている。これらのモデルのパラメータ値は、特性を決定するデバイス構造やデバイス内部の電子およびホールの挙動とは無関係に、デバイスごとに波形フィッティングから決定していたため精度の向上が難しかった。

一方、デバイス構造を基にしたモデルとして、Hefner モデルや Kraus モデルが提案されているが、これらのモデルは過去の IGBT 構造を対象としており、現在のトレンチゲート構造の IGBT には合致しない。

上述の課題を解決するため、デバイス構造やデバイス内部の挙動をパラメータ値に反映させ、かつトレンチゲート構造の IGBT に合致した新たな IGBT モデルを構築した。この IGBT モデルのパラメータをデバイスシミュレーションの結果から導出することで、デバイスシミュレーションと回路シミュレーションの連携を実現している。

#### 3.2 デバイスシミュレーション

図 2 に、デバイスシミュレーション用 IGBT モデルの例を示す。プロセスフローに基づき形成される IGBT の構造および Si 内部の不純物分布がモデル化されている。

図 3 に、デバイスシミュレーションの解析結果の例を示す。デバイスシミュレーションでは IGBT の電流・電圧特性だけでなく、内部の挙動（電子・ホールの分布や電界分

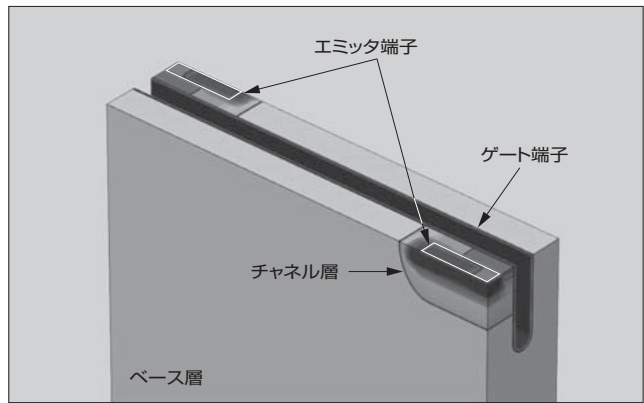


図 2 デバイスシミュレーション用 IGBT モデルの例

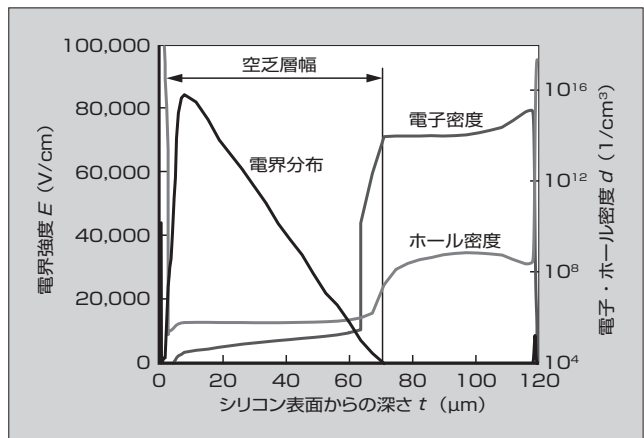


図 3 デバイスシミュレーションによる解析結果の例

布) を解析できる。これらの結果を使用して、回路シミュレーション用 IGBT モデルのパラメータ値を導出する。

#### 3.3 回路シミュレーション

図 4 に、構築した回路シミュレーション用 IGBT モデルを示す。この IGBT モデルは、Kraus モデルをベースにした等価回路モデルであり、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) モデル (MOS)、ダイオードモデル (D1, D2)、端子間容量モデル (CGC, CCE, CGE), および電流源モデル (I1, I2) で構成されている。

この端子間容量モデルおよび電流源モデルのパラメータ

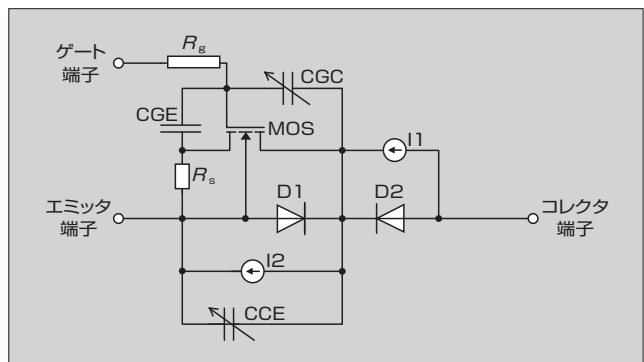


図 4 回路シミュレーション用 IGBT モデル

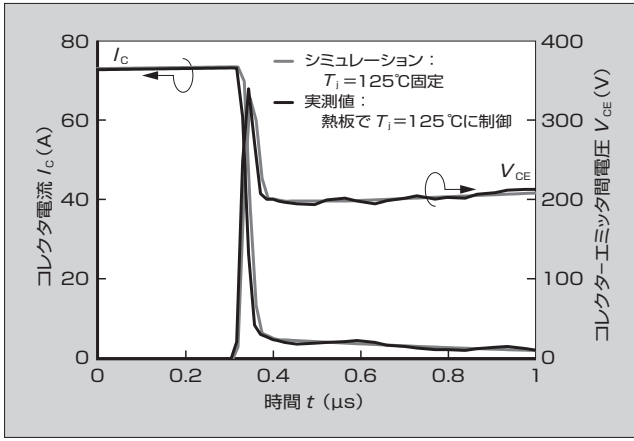


図5 チップ温度固定時のIGBTチップ単独でのターンオフ波形

値に、3.2節のデバイスシミュレーションの結果を反映する。例えば容量モデルの容量値は、図2のデバイスシミュレーション用モデルから抽出されるデバイス構造、および図3のデバイス内部の電界強度分布から求められる空乏層幅を使用して導出する。

図5に、チップ温度固定時のIGBTチップ単独でのターンオフ波形を示す。IGBTチップ単独で測定したターンオフ波形 ( $T_j=125^\circ\text{C}$ ) と、図4のモデルを使用して回路シミュレーションで解析した結果との比較である。ターンオフ損失の誤差は約8%であり、従来の標準IGBTモデル使用時の誤差30%に比べ精度が向上した。

このように、回路シミュレーション用のIGBTモデルを使用することで、デバイスシミュレーションの結果を反映させた回路シミュレーション、および回路シミュレーションで検討したIGBTモデルのパラメータ値をフィードバックさせたデバイスシミュレーションが可能になる。

#### 4 回路シミュレーションと熱シミュレーションの連携

##### 4.1 概要

IGBTモジュールのパッケージの開発では過渡熱シミュレーションを行っている。従来は、発熱源をチップからの発熱（チップ発熱）のみとし、さらにその値をデバイス動作中は一定としていた。

実際は、IGBTモジュールでは、ボンディングワイヤや

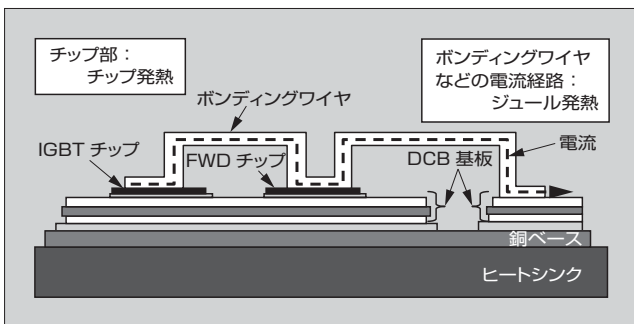


図6 IGBTモジュールにおける発熱源

DCB基板などパッケージの電流経路も発熱源（ジュール発熱）となる（図6）。また、チップ発熱も回路動作やパッケージ構造、周囲温度条件などに影響を受ける。これらの影響を考慮して精度良くチップ温度を解析するためには、回路シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせた解析が必要となる。

##### 4.2 回路シミュレーション

回路シミュレーションでは、3.3節のIGBTモデルを用いて、各チップでの発熱量およびパッケージに流れる電流値を求める。この結果を熱シミュレーションに反映させる。

##### 4.3 熱シミュレーション

図7は熱シミュレーション用の解析モデルである。本モデルにおいて、チップ発熱と、ボンディングワイヤなどに流れる電流によるジュール発熱を考慮している。

図8に、考慮する発熱源を変えて連続動作させたときの熱シミュレーションの結果を示す。チップ発熱のみの場合にはチップ表面の温度が上昇し（図8(a)）、ジュール発熱のみの場合にはボンディングワイヤおよび主端子の温度が上昇している（図8(b)）。両方とも発熱する場合には、ジュール発熱によるボンディングワイヤ部の温度上昇の影響を受けて、チップ発熱のみの場合に比べチップ表面の温度がさらに上昇している（図8(c)）。

#### 5 連携シミュレーションによるIGBTモジュール全体の特性解析

これまでに述べたシミュレーションを連携し、IGBTモジュール全体の特性を解析した。この連携解析は、次の手順で行う。

まず、回路シミュレーションでIGBTモジュールを過渡的に動作させたときの解析を各温度で実施する。この解析結果から、熱シミュレーションへの入力データとして、各温度でのチップ発熱量と電流値の平均値を自動で計算し、次にこの入力データを使用して、熱シミュレーションでIGBTモジュールの温度解析を行う。

図9に、この連携シミュレーションを使用して連続動作させたときのIGBTモジュール内のIGBTチップ温度の解

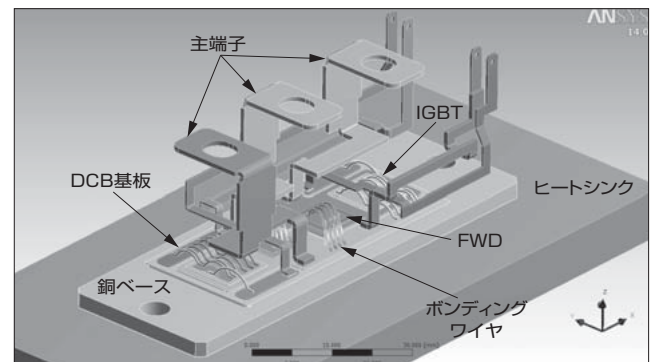


図7 熱シミュレーション用IGBTモジュールモデル

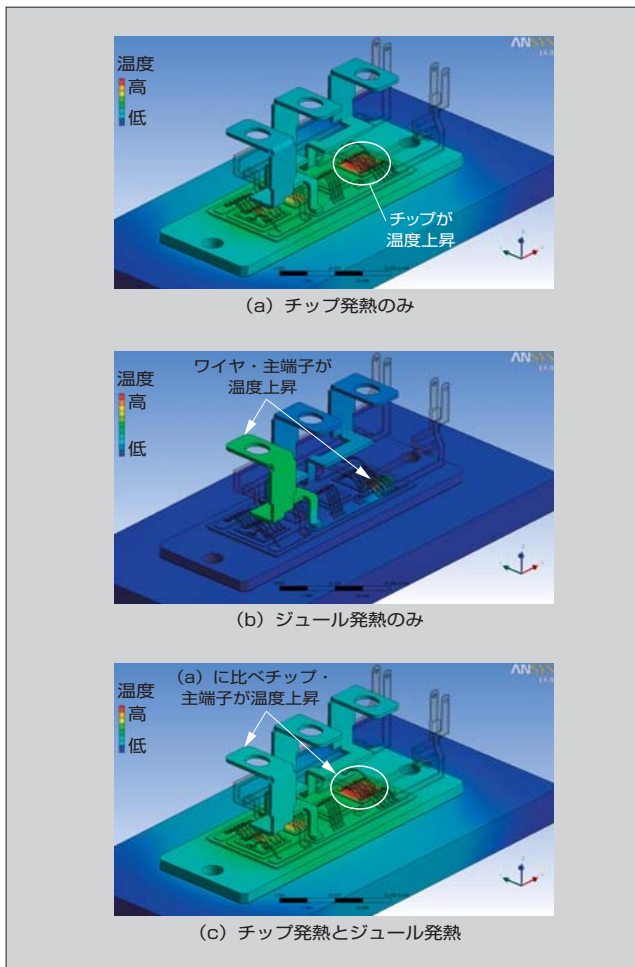


図8 熱シミュレーションによる解析結果の例

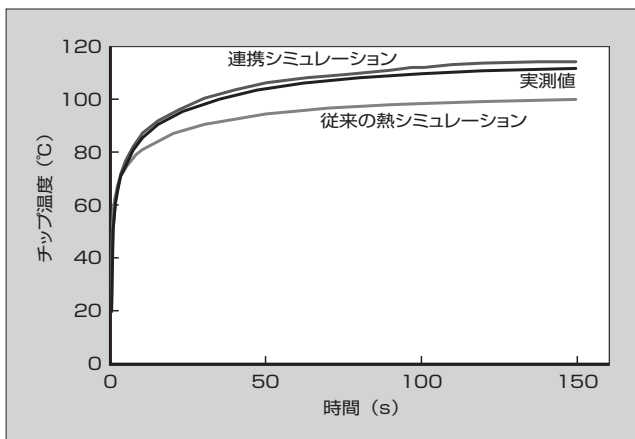


図9 IGBT モジュール内のIGBT チップ温度

析結果を示す。従来行っていた一定のチップ発熱だけを考慮した熱シミュレーションに比べ、実測値との誤差が約10%から5%以下に低減している。今後、さらなる実測値との誤差低減のため、複雑な冷却フィンの構造を考慮した解析を検討する。

図10に、時間150s時点でのIGBTモジュールのターンオフ特性を比較した結果を示す。3.3節で述べたIGBTチップモデルでのターンオフ損失の誤差低減と、熱シミュレーションでのIGBTチップ温度の誤差低減が反映された

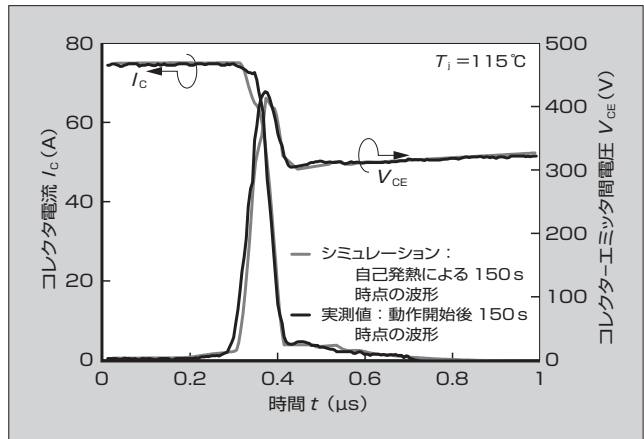


図10 自己発熱による温度上昇を考慮したIGBTモジュールのターンオフ波形(時間150s時点)

結果、実測との誤差を従来の約40%から約10%に低減できた。

上述のように、回路シミュレーションと熱シミュレーションを連携させることで、IGBTモジュール全体の特性が高精度に解析できた。

## 6 あとがき

本稿では、IGBTモジュールの連携シミュレーションについて述べた。この連携シミュレーションにより、IGBTチップの熱特性とIGBTモジュール全体の電気特性について従来に比べて高精度な解析が可能になった。

今後は、今回構築した連携シミュレーションを基に、IGBTモジュールにICなどを組みこんだIPM(Intelligent Power Module)などに対象を広げる。さらに、ノイズシミュレーションやSPICEシミュレーションなど、ほかのシミュレーションとの連携を図ることで高度な設計環境を構築し、パワー半導体の最適設計や開発期間短縮に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 山田教文ほか. パッケージシミュレーション技術による熱設計精度の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.179-182.
- (2) 山田昭治ほか. IGBTデバイスの電気特性解析用モデルによる設計精度の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.174-178.
- (3) 岡田有功ほか. インバータシミュレーションプログラムの開発(その2). 電力中央研究所報告, 研究報告: R07016.



山田 昭治

パワー半導体素子のCAE, CAD技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体開発統括部デバイス開発部。電気学会会員。



**池田 晴信**

パワー半導体素子の CAE, CAD 技術の開発に従事。現在, 富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体開発統括部デバイス開発部。



**仲村 秀世**

MEMS 機器の研究開発, パワー半導体用パッケージの開発に従事。現在, 富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センター。







\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。