

Keysight Technologies

# パワー・エレクトロニクス・テストの 課題とソリューション

Technical Overview



## はじめに

パワーエレクトロニクスという用語には、パーソナルコンピューターに使用されている小さなパワーコンバーターから大規模発電／送電システムまで、さまざまなアプリケーションが含まれています。パワーエレクトロニクスはこれらが正常に機能するために不可欠で、信頼性の高いパワーエレクトロニクス回路を備えることが極めて重要です。さらに、CO<sub>2</sub>の排出量に対する関心の高まりによる代替エネルギー源への移行が進んでいるため、回路の小型化と効率化を求めるニーズがますます増加し続けています。

図1に、さまざまなパワー・エレクトロニクス・アプリケーションを示します。運輸産業を含む多くの業界で電子化がますます進み、内燃機関や油圧アクチュエーターなどの古いテクノロジーが電子回路に置き換えられています。



図1. パワー・エレクトロニクス・アプリケーションの概要

この技術概要では、パワー・エレクトロニクス・システムの概要、直面する課題、問題に対応するために必要なツールを説明します。最後に、この問題に対応できるキーサイト・テクノロジーのソリューションを紹介します。

## パワー・エレクトロニクス・アプリケーションが直面する課題

すべてのパワー・エレクトロニクス・アプリケーションには、ある種の電力変換システムが必要です。このため、世界中の企業がパワー・エレクトロニクス・システムの性能／効率／信頼性を向上させるための取り組みを続けています。電力変換システムは、従来のシステムを置き換える新しいアプリケーションでも使用されています。例えば、化石燃料の消費を削減するために、内燃機関は少しずつハイブリッド／電気機器へと置き換えられています。飛行機の油圧アクチュエーターは電動モーター製のアクチュエーターに置き換えられ、航空機の安全性と信頼性が向上しています。

以下では、代表的なパワーエレクトロニクス回路アプリケーションを紹介し、直面する課題について説明します。

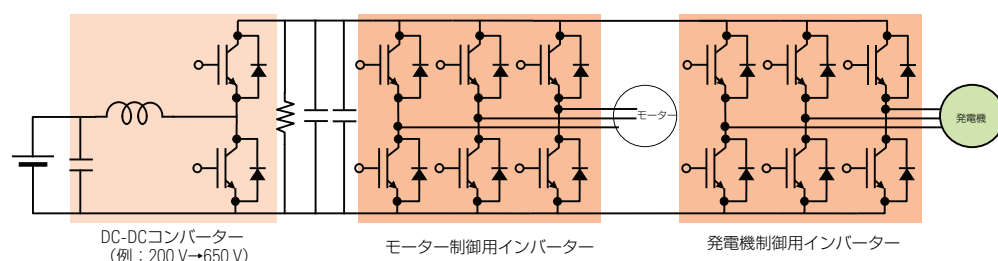


図2. ハイブリッド自動車用パワートレインのブロック図

多くの最新の自動車は、燃料効率の向上のためにハイブリッドのパワートレインを採用しています。ハイブリッドシステムのDC-DCコンバーターは、通常、電動モーター制御用と回生回路用に、1個ずつのインバーター回路を備えています。回生回路は、ブレーキや走行などによって生じた運動エネルギーをシステムのバッテリーに蓄電する電気エネルギーに変換する回路です。このようなインバーター回路は、多くのIGBT（絶縁ゲート・バイポーラー・トランジスタ）、ダイオード、コンデンサ、抵抗、インダクターで構成され、これらのコンポーネントは極めて高い電圧／電流に対応できる必要があります。例えば、一般的な最新ハイブリッド自動車が使用している電圧は最大650 V、電流は200 A以上です。氷点下から高温多湿までのさまざまな動作条件で、コンポーネントの信頼性が保証されることも非常に重要です。障害が1つでも発生すれば運転手や同乗者の重大な怪我につながる恐れがあるからです。

パワートレインで使用するインダクターとコンデンサは一般的に大型で重いので、コンポーネントの重量もエネルギー効率に影響を与える要因になります。動作周波数が高くなるほど小型のコンポーネントを使用できるため、スイッチング回路では、シリコンデバイスよりも高い周波数で動作できるSiC MOSFETやGaN FETなどのワイドバンドギャップ(WBG)半導体の採用がIGBTの代わりに少しずつ増加しています。当然のことながら、パワーデバイスやパワーコンポーネントは重要な部品で、どのような状況でも障害が生じることは許されません。

2番目の例として冷蔵庫用コンプレッサのブロック図を示します。こちらは、AC-DCコンバーターと、ブラシレスDCモーターをドライブするインバーターで構成されています。こちらでは消費電力が最も重要なデザイン要件です。理由は、消費電力が少ないほどエンドユーザーの電気料金を低く抑えられるからです。消費電力を最小にするには、回路に使用する最適なコンポーネントを選択することが重要です。ハイブリッド自動車のパワートレインの場合と同様に、この回路で使用する電圧／電流は比較的高くなります(代表値で200 V/50 A以上)。

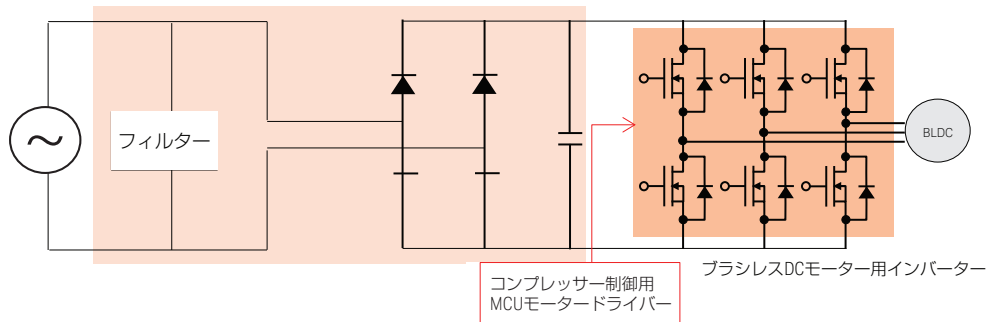


図3. 冷蔵庫用コンプレッサのブロック図

3番目の例として送電用のマルチレベルコンバーターのブロック図を示します。

マルチレベルコンバーターでは直列にスタックされた多くのIGBTを使用して、送電に必要な極めて高い電圧(例：65 kV)を制御します。運輸産業の電化の場合と同様に、現代社会に不可欠な信頼性の高い電力を実現するために、これらの回路は超低温から高温多湿までの環境で機能する必要があります。多くのIGBTモジュールが並列／直列に使用されているので、IGBTモジュールのばらつきが重要な課題になります。モジュールのばらつきによって電流が回路の一部に集中しすぎると、システム全体が故障する可能性があります。

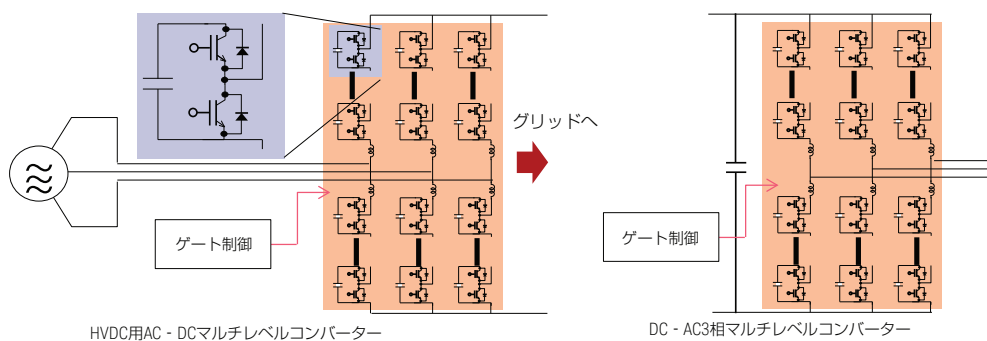


図4. グリッド制御用マルチレベルコンバーターのブロック図

最後の例としてノートPC用のDC電源分配回路のブロック図を示します。

PCは通常、多くのDC-DCコンバーターを用いて主要なコンポーネント(CPU、ロードメモリ、HDDなど)に電源を供給しています。電圧／電流はこれまでに説明した例ほどは高くありませんが、電流密度が非常に高くなる場合があるので、バッテリー寿命を長くするためにパワー損失を最小化する必要があります。そのため、多くのPCメーカーが製品にWBG半導体を使い始めています。

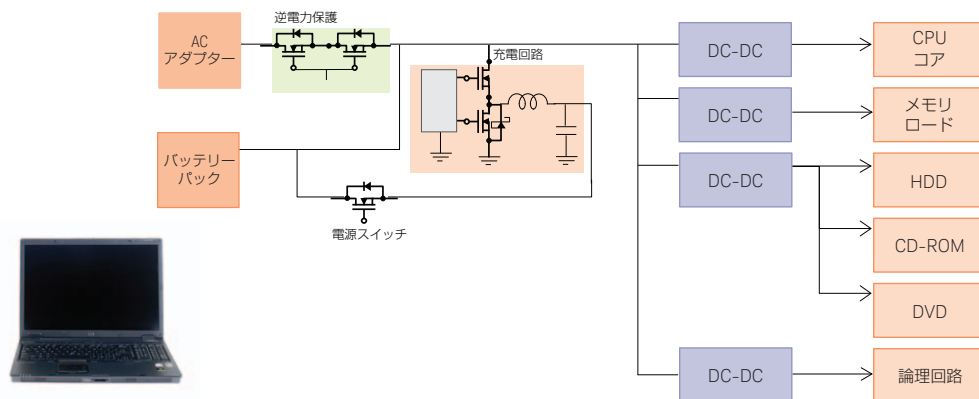


図5. ノートPCのDC電力分配回路のブロック図

さらに、パワーエレクトロニクス製品には偽造コンポーネントが広く出回っているという大きな問題があります。低パワー用の化合物半導体と比較すると、パワーデバイスやパワーコンポーネントでは偽造品または規格を満たさないものを購入してしまうリスクが高くなっています。これは、多くのパワー・デバイス・メーカーが流通在庫からコンポーネントを購入するため、このような流通在庫では偽造コンポーネントが混じることがよくあります。

以下に、パワーエレクトロニクス回路のデザイナーが直面する多くの課題をまとめます。

- 多くのアプリケーションはミッションクリティカルで、どのような環境でも障害が生じることは許されません
- パワー回路は低温でも高温でも機能しなければなりません
- パワー回路コンポーネントは高電流／高電圧／高電力密度で動作します
- 高いエネルギー効率が必要不可欠です
- 小型軽量のモジュールを作成するために、より高い周波数で動作する電力変換器が必要です
- 低パワーコンポーネントと比較すると偽造コンポーネントの問題が非常に大きくなります

## パワー回路デザイナーが行わなければならないことは何でしょうか？

エンジニアは効率／安全性／信頼性の高い電子回路を開発しなければならないので、最終的な回路の特性評価が非常に重要です。したがって、回路全体の効率を評価することが不可欠で、例えば、各回路ノードでの電流波形と電圧波形を検証する必要があります。これを行うには、回路で使用されているパワーデバイスやパワーコンポーネントを詳細に理解する必要があります。これは、特に、パワーデバイス (IGBT、MOSFET など) が回路で使用されている場合に重要です。パワーデバイスの性能によって回路全体の効率／安全性／信頼性が決まるからです。残念なことに、多くの場合、デバイスメーカーが提供しているデータシートの情報だけではこのようなニーズに対応できません。データシートの条件は実際の使用条件と異なる場合が多く、提供されている情報には大きなマージンがあり、デバイスのばらつきに関する情報もありません。以上の理由で、デバイス／コンポーネントメーカーから提供される情報だけを用いて信頼性／効率の高い回路をデザインすることは困難です。

## パワー・コンポーネント・メーカーが行わなければならないことは何でしょうか？

WBGデバイスの使用が増えるとともに、エネルギー効率の向上に対する要求と信頼性／安全性の向上に対するニーズが増えています。このため、パワーデバイス／コンポーネントメーカーは、今までパワー回路デザイナーに提供してきた情報だけでは十分ではないことを理解する必要があります。パワーエレクトロニクス回路デザイナーは、従来の代表的な条件でのパラメータや特性曲線の他に、さまざまな動作温度／電圧／電流で取得したコンポーネントデータが必要です。IVパラメータの他に、ゲート電荷(Qg)、FETの接合容量(Ciss、Coss、Crss)などのデバイス特性も現在では非常に重要になっています。

市場で競争力を維持するためには、パワーエレクトロニクス回路のデザイナーに対してより詳細な特性情報を提供することが重要です。

## テスト上の問題

ここまでの説明に基づいて、以下に、パワーエレクトロニクス回路テストで直面する主要な課題をまとめます。

- 実際の動作条件 (例：可能性のあるサージ電流／周波数／電圧など) でのテスト
- 広い温度範囲にわたる動作の保証
- パワー損失効率の計算に不可欠なデバイスパラメータの測定
- 通常とは異なるテスト手法による偽造コンポーネントの特定
- 負荷／入力変動してもDC - DCコンバーターが安定動作する保証
- 真のデバイス性能を統計的に解析できる十分な数のデバイス／コンポーネントのテスト
- 高調波が回路性能に悪影響を与えないこと
- 国際規格への適合 (例：JDEC、LV、JEITAなど)

パワー・エレクトロニクス・テストには主な段階が2つあります。最初の段階は、コンポーネント・レベルのテスト、2つ目の段階は、パワーコンバーター／インバーターレベルのテストです。次のセクションでは、この両方の段階のテストに使用できるキーサイトのソリューションを紹介します。

パワー・コンポーネント・テスト用のキーサイトのソリューション

図6は、キーサイト・テクノロジーが提供しているコンポーネント・レベルのテスト用のさまざまなソリューションです。






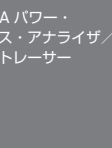





	コンポーネントユーザー (パワー・エレクトロニクス・デザイナー)	コンポーネントメーカー (パワー・デバイス・メーカー)
スイッチング	<div><p>E5061B-3L5 LF-RF ネットワーク・アナライザ</p></div>	<div><p>ダブル・パルス・テスト ・InfiniVisionオシロスコープ ・ファンクション／パルスジェネレーター ・DC電源</p></div>
静特性(IV)	<div><p>B1506A パワーデバイス・アナライザ 主要パラメータ自動測定装置</p></div>	<div><p>B1500A 半導体デバイス・パラメータ・アナライザ</p></div>
CV		<div><p>E4980A LCRメータ</p></div>
Qg		<div><p>B1505A パワー・デバイス・アナライザ／カーブトレーサー</p></div>
コンポーネント	<div><p>N7900シリーズ APS 電源</p></div>	<div><p>E4990A/E4991B インピーダンス・アナライザ</p></div> <div><p>E4980A LCRメータ</p></div>
DC-DC IC	<div><p>B2900A ソース／メジャー・ユニット</p></div> <div><p>N6705A DC電源アナライザ</p></div>	

図6. コンポーネント・レベルのテスト用ソリューション

次のセクションでは、コンポーネント・レベルのテスト用ソリューションを詳細に紹介し、キーサイトのパワーデバイス・アナライザの追加情報を提供します。パワーデバイス・アナライザは、パワーデバイス／コンポーネントレベルのテスト用オールインワン・ソリューションです。

B1506A パワーデバイス・アナライザ 主要パラメータ自動測定装置

B1506A パワーデバイス・アナライザ 主要パラメータ自動測定装置は、製品の効率、安全性、信頼性を最大化するのに役立つフルソリューションです。ブレイクダウン電圧やオン抵抗などのIVパラメータの他、3端子FETの容量、ゲート電荷、パワー損失など、あらゆるパワーデバイス／コンポーネントのパラメータをさまざまな動作条件で評価することができます。



実際の動作条件でのデバイス特性評価

B1506Aは、サブnAレベル～1500 A、 $\mu$ Vレベル～3 kVという広い電流／電圧レンジをカバーしています。そのため、パワーエレクトロニクス回路に使用されているほとんどデバイス／コンポーネントの評価に対応できます。B1506Aの50  $\mu$ sのパルス幅測定機能により自己発熱効果が抑制され、より正確なデバイス特性データが得られます。さらに、B1506Aはデバイスの容量、ゲート抵抗、ゲート電荷の特性など、デバイスのパワー損失を決定するすべての主要パラメータも評価できます。図7は、B1506Aで取得できる代表的なデバイスパラメータです。

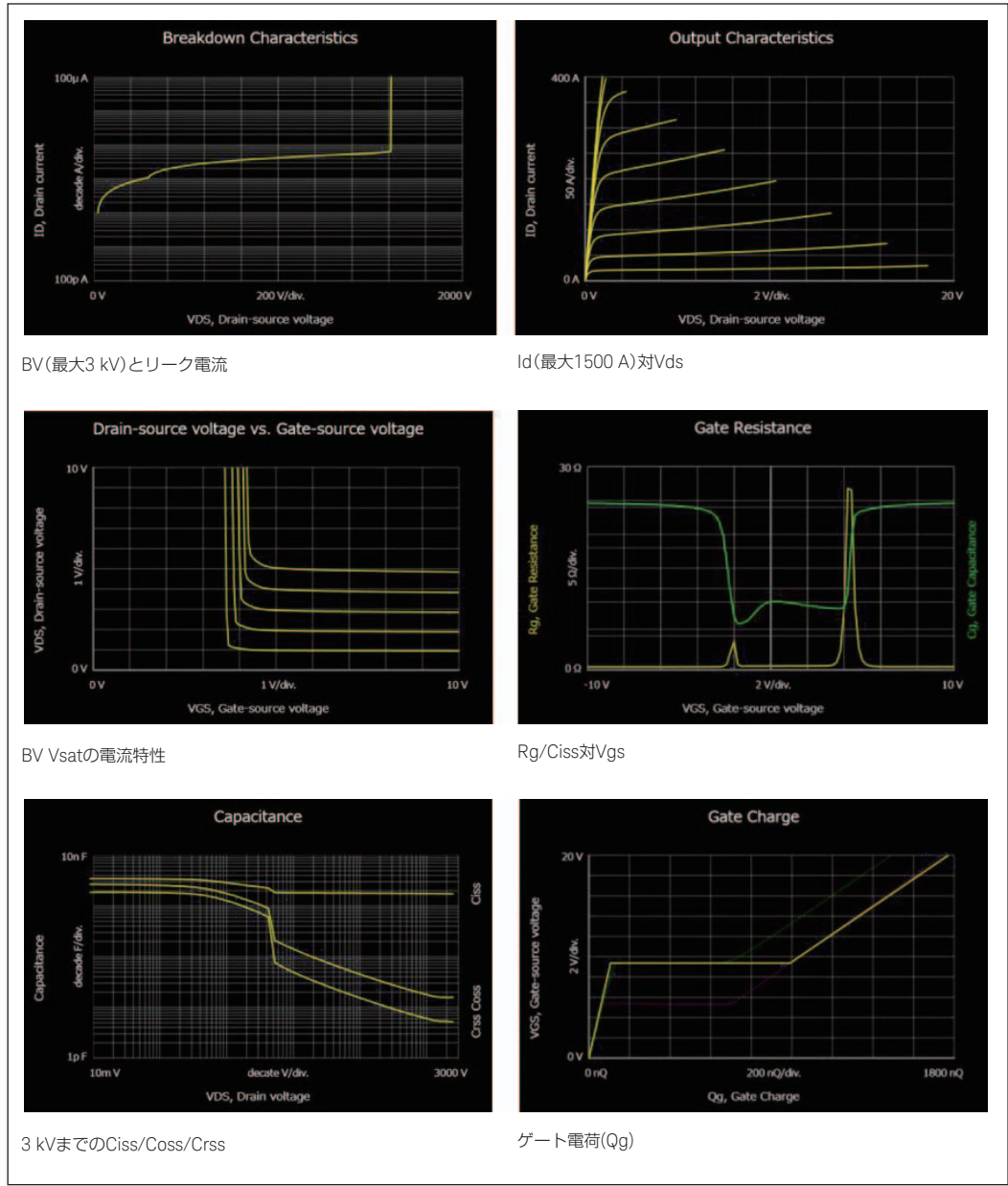


図7. B1506Aで測定できる代表的な特性



SMU(ソース/メジャー・ユニット)アーキテクチャーはB1506Aのコアテクノロジーで、この後で説明する他のデバイス・アナライザにも使用されています。広範囲の電流/電圧を供給し測定する機能を備えながら優れた確度を実現し、電流/電圧の制限値も指定できます。これらはすべて、パワーデバイス特性評価に不可欠な要素です。

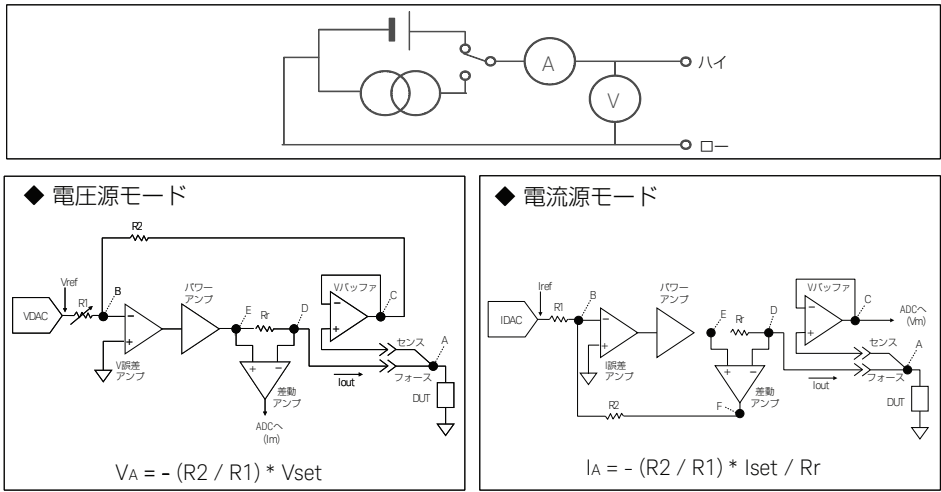


図8. SMUテクノロジー

温度変化に対するデバイス動作の検証

パワー・エレクトロニクス・アプリケーションでは、温度変化に対するデバイス動作の特性評価が重要ですが、これを行うのは容易ではありません。恒温槽は安定するまでに時間がかかる場合があります。テスト機器から恒温槽までのケーブルが長くなるため抵抗/インダクタンスが生じて発振する可能性があります。これに対して、B1506Aは、自動化された使いやすい正確な温度依存測定機能を備え、広い温度範囲(−50 ℃〜+250 ℃)をカバーしています。2種類のソリューションが用意されています。1つのソリューションは業界標準のinTest社のサーモストリーム温度システムをサポートしています。もう1つのソリューションはB1506Aのテストフィクスチャに付属している温度プレート(inTest社からも購入可能)も使用できます(図9参照)。これらのソリューションにより、まる一日かかっていた温度テストを1時間以内に完了することができます(図10参照)。

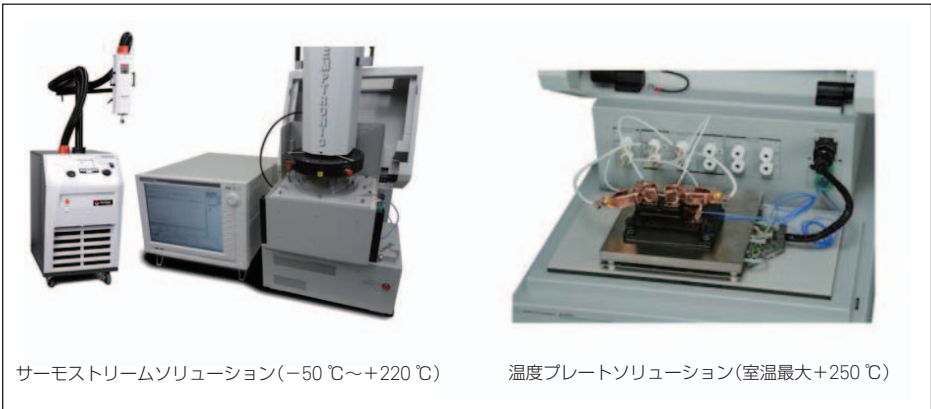


図9. B1506Aがサポートしている温度テストソリューション

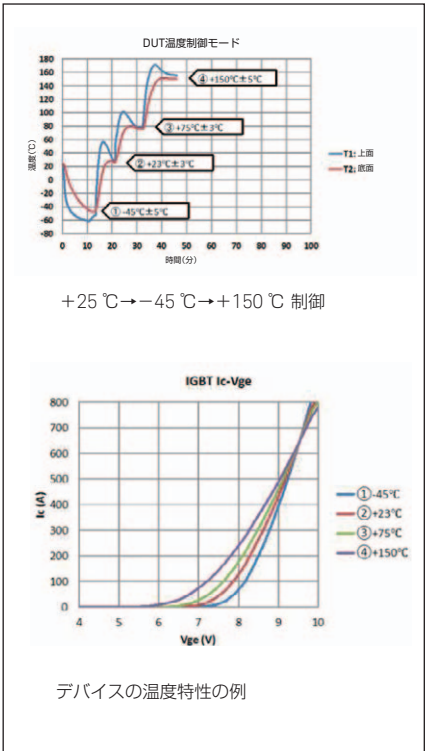


図10. B1506Aで実行した温度依存測定の実例

最適なデバイスの選択による回路効率の最大化

最大の回路性能と効率を実現するには、従来のカーブトレーサーが提供するデータよりも多くのデータが必要です。特に、スイッチング周波数が高くなると、スイッチング損失とドライブ損失がデバイスのパワー損失の大部分を占めるようになります。このことから、デバイスの容量、ゲート抵抗、ゲート電荷の特性評価が非常に重要になります。しかし、これらのパラメータを測定するのは非常に難しいため、多くのエンジニアは測定しようとしません。B1506Aはこの問題を解決するために、自動的にこれらのすべてのパラメータを測定できるだけでなく、抽出パラメータを使用してパワー損失の計算を行う機能も備えています。

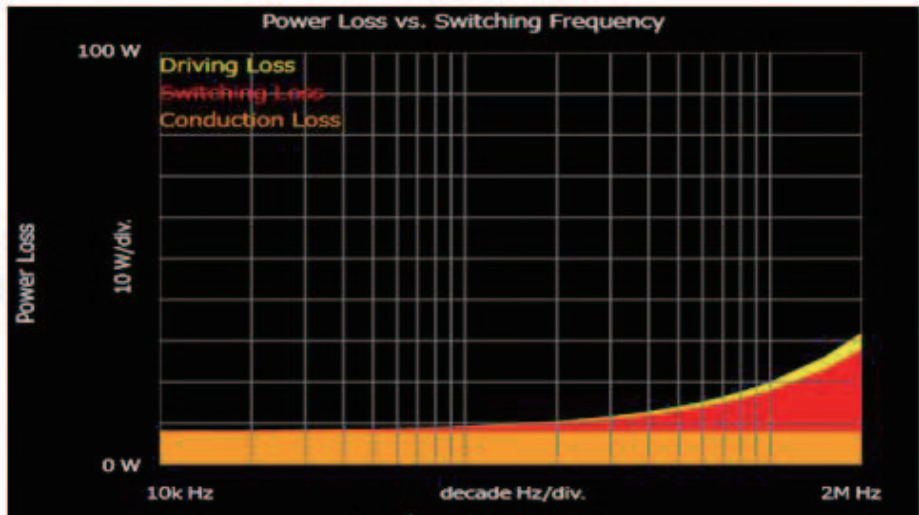


図11. B1506Aが作成したパワー損失対周波数

直感的な自動データシート特性評価

B1506Aのデータシート特性評価モードを使用すれば、専門的なトレーニングを受けなくても誰でも自動的に主要なデバイスパラメータを測定できます。すべての特性をデータシートフォーマットで出力できるので、さまざまな種類のコンポーネントの性能を容易に比較できます。

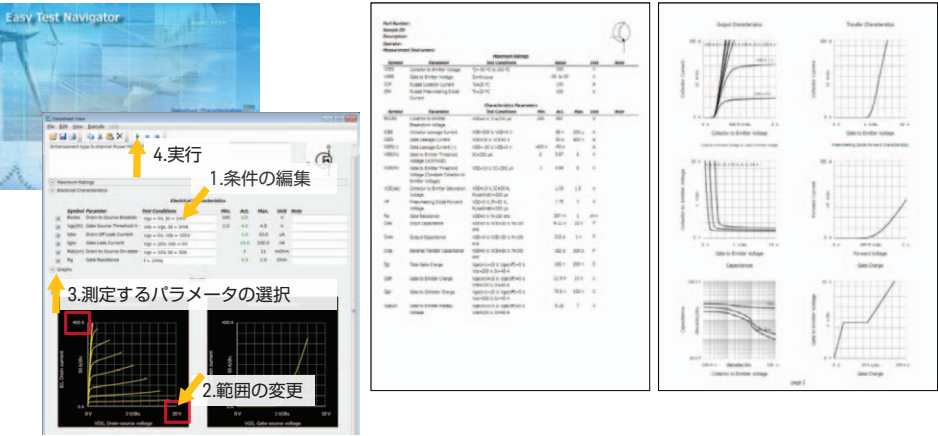


図12. Easy Test Navigatorソフトウェアのデータシート作成機能により、直感的なデバイス／コンポーネントテストを自動的に実行できます

## B1505A パワーデバイス・アナライザ／カーブトレーサー

B1505AはB1506Aよりも柔軟性の高いソリューションで、広い電流／電圧レンジ(最大10 kV)、優れた低電流測定精度、高電圧による中電流測定機能(例: 1.2 kVで500 mA)、GaN電流コラプス・テスト・オプション、3ピン以上の同時測定機能を備えています。B1505Aもオンウエハーデバイスとパッケージデバイスの両方を測定できます。B1505Aはパワー・デバイス・メーカーで広く使用されていますが、GaNパワーデバイスを扱っているパワー・エレクトロニクス・エンジニアにも有用で、4端子IGBTのセンスエミッター電流の測定や、ゲートドライバー用のHVICの特性評価も行えます。



## B1500A 半導体デバイス・アナライザ

B1500Aは、低パワー半導体デバイスを扱うエンジニア／メーカーがデバイス特性を解析したりデバイス製造プロセスを改善するために使用している事実上の標準測定器です。基本的な電流 - 電圧 (IV)、容量 - 電圧(CV)、静的容量 - 電圧(QSCV)などのあらゆる項目を優れた信頼性と再現性で測定できます。さらに、B1500Aは、任意波形発生器(AWG)が内蔵されている独自の波形発生器／高速測定ユニット(WGFMU)モジュールをサポートしています。WGFMUモジュールは任意電圧信号を出力すると同時に、200 MSa/s(5 ns間隔)のサンプリングレートで高速サンプリング測定が行えます。WGFMUモジュールによって、さまざまなストレスが存在するときのデバイスのダイナミック特性が明らかになり、超低信号測定やトランジェント測定も可能です。B1500Aの高速電流測定とQSCV測定機能を使用して界面準位や絶縁膜の信頼性などの一般的なWBGデバイスの問題を評価でき、パワーデバイス開発の初期段階に役立ちます。B1500Aは10スロットのモジュラーアーキテクチャーを採用しているので、測定ニーズの変化に応じて測定モジュールの追加やアップグレードが可能です。



## パワーデバイスのスイッチング特性評価

スイッチング特性はコンポーネント・レベル・テストの重要な要素です。これらのパラメータを評価するために、キーサイトはオシロスコープとパルスジェネレーターの両方を提供しています。

InfiniVision 3000/4000/6000 Xシリーズ オシロスコープは優れた帯域幅と分解能をお手頃な価格で提供しています。また、電流プローブと電圧プローブの両方をサポートしています。81110Aパルスジェネレーターは、車載用コンポーネントの特性評価にも使用できる高速かつ高い電圧パルスを出力できます。

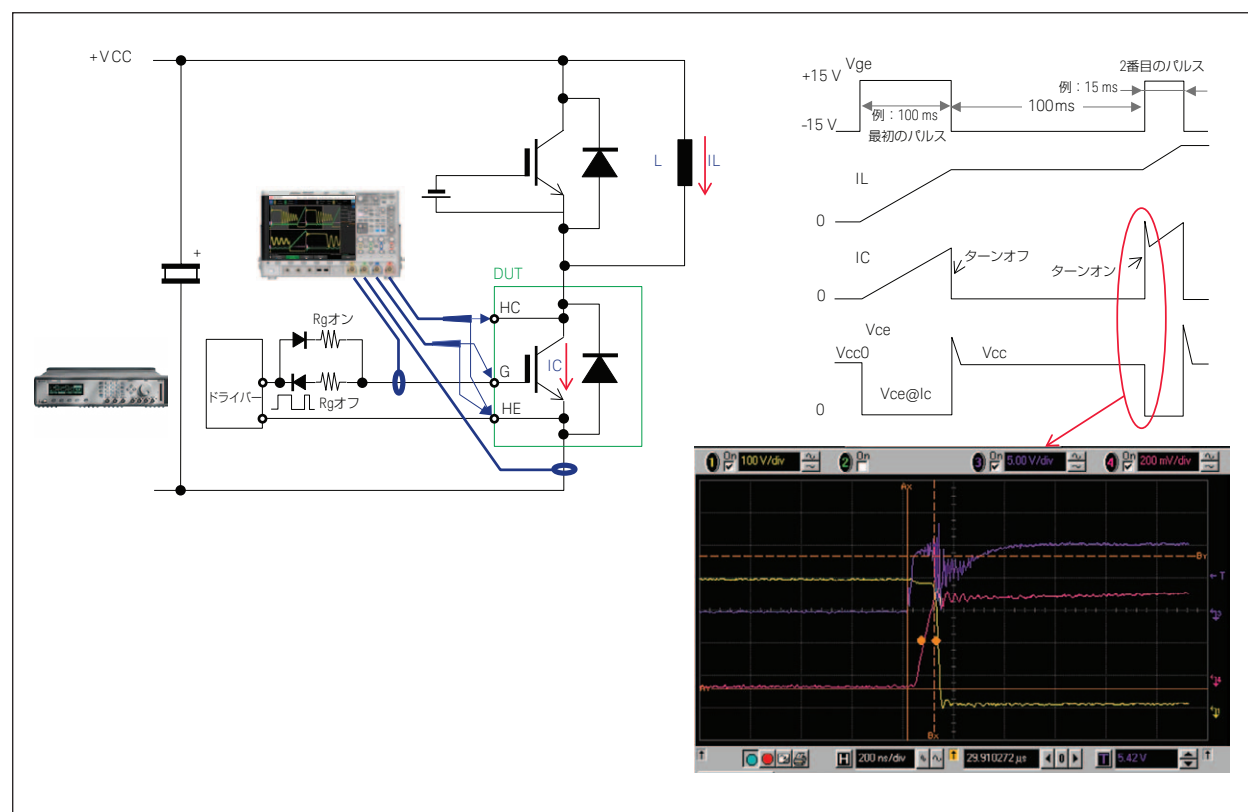


図13. オシロスコープとパルスジェネレーターによるダブル・パルス・テスト回路

さまざまなコンポーネントのテスト(L、C、R、共振器、MEMS)

インダクター、コンデンサ、抵抗、共振器、MEMSなどのパワーコンポーネントは重要なパワーエレクトロニクス回路コンポーネントです。これらの一部は、B1506A パワーデバイス・アナライザを使用してテストできます。1 MHzを超える周波数で特性評価を行う必要がある場合、または、共振器のようなコンポーネントを評価する必要がある場合は、E4990A/E4991B インピーダンス・アナライザを選択するのが最適です。インピーダンス・アナライザはインピーダンス測定用の業界標準測定器で、優れた精度を備え、さまざまな動作条件で現実的な特性を評価できます。測定最大周波数は、E4990Aが30 MHz、E4991Aが1 GHzです。E4991Bオプション007により、シンプルな温度特性評価環境も構築できます。

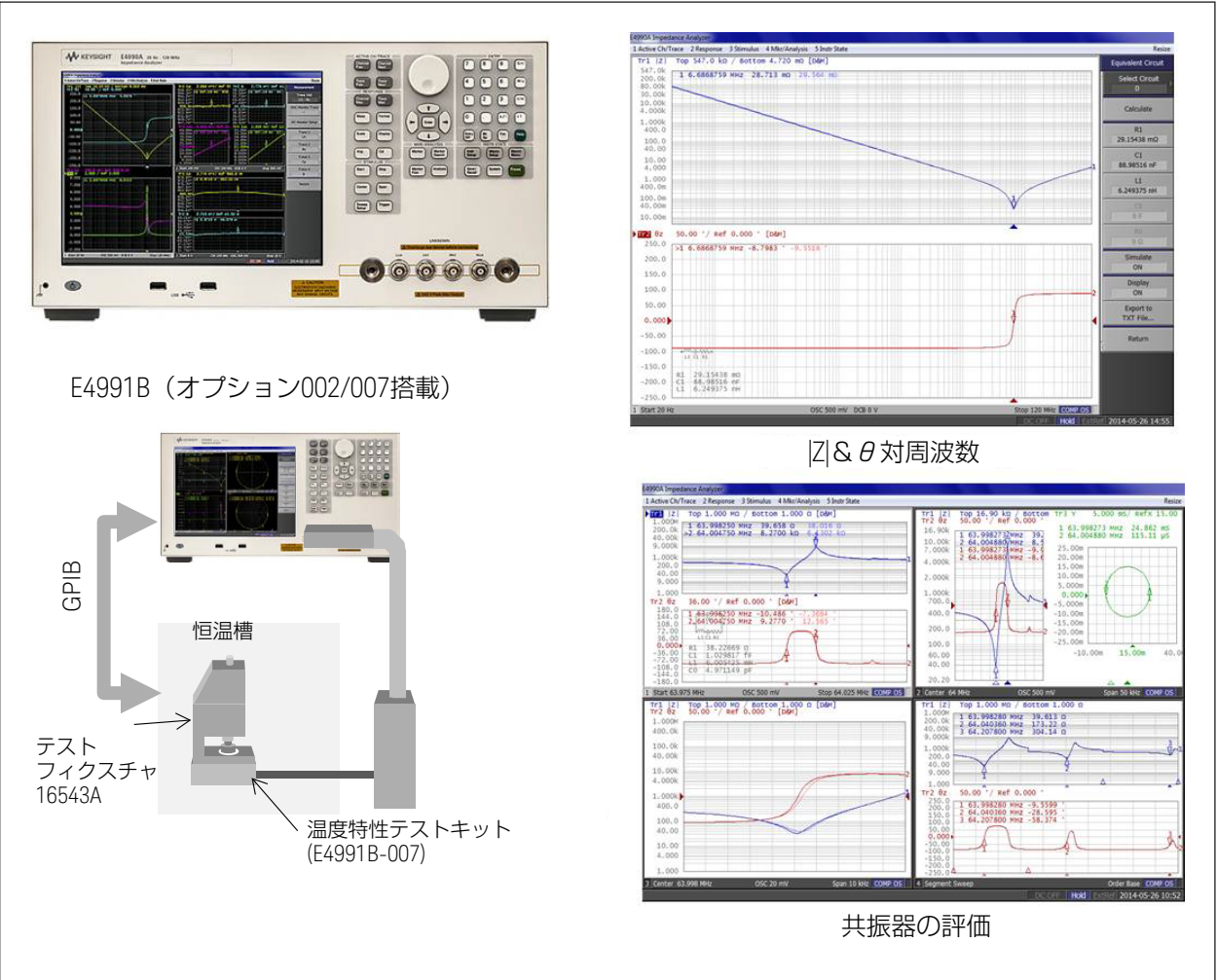


図14. E4990A/E4991Aを用いたコンポーネント特性評価と温度特性評価セットアップの例



バッテリーテスト

従来のバッテリー充電／放電テストではスイッチを使用して充電から放電に切り替えています。しかし、この手法では、実際の動作条件ではありえないタイミング遅延が生じてしまいます。さらに、スイッチング回路でダイオードを使用している場合は、十分な電流を供給できる大きな電源が必要になります。

N7900シリーズ アドバンスド・パワー・システム(ダイナミック対応版)とN7909A電力消費ユニットを使用すれば、電流のソースとシンクの両方が行えるので、この問題を解決できます。つまり、同じポートがDC電源としても電子負荷としても動作するので、ソースとシンクの2つの機能をシームレスに切り替えられます。このソリューションは実際の充電／放電動作をシミュレートするのに最適です。さらに、18ビット相当のデジタイザによって内部抵抗の計算を含む正確な特性評価が可能です。これは、従来の手法では電圧測定確度が足りなかったために不可能だった評価です。



図15. N7900シリーズ電源とN7909Aにより、DC電源と電子負荷をシームレスに切り替えられます。

DC-DCコンバーター IC評価

2チャンネルのベンチトップSMUを使用すれば、DC-DCコンバーターの特性を評価するのに必要な複雑なテストセットアップを簡素化できます。図16は、DC-DCコンバーター ICの負荷変動を評価するための2種類のテストセットアップです。一方は2台のデジタルマルチメータ、2台のDC電源、負荷抵抗を使用していますが、他方は2チャンネルのSMUのみを使用しています。図16には、測定結果の例とテスト回路のブロック図も示されています。

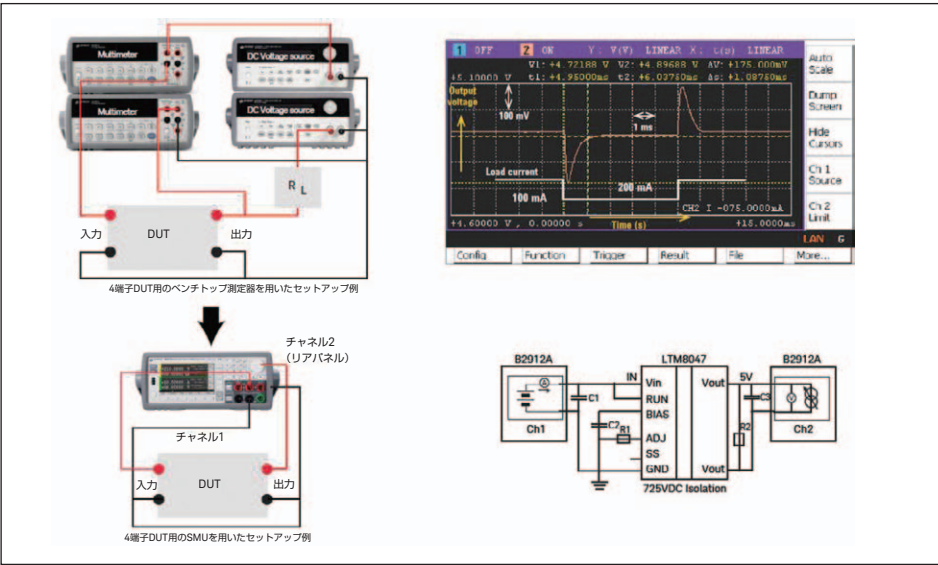


図16. 2チャンネルSMUによって簡素化されたテストセットアップとDC-DCコンバーターのテスト結果

図17は、DC-DCコンバーターの評価を広い電流／電圧レンジで実行できる機能を備えたキーサイトの製品ラインナップです。



**B6780 シリーズ**

- 20 V、3 A
- 4 チャンネルまでモジュール拡張可能
- 2 象限 /4 象限動作
- シームレスレンジ切り替え
- 最大 200 ksa/s のデジタイザ



**B2900A シリーズ**

- 210 V、3 A(DC)/10.5 A(パルス)
- 2 チャンネル
- 4 象限動作
- 100 nV/10 fA 分解能
- 最大 100 ksa/s のデジタイザ



**N7900 シリーズ**

- 最大 2 kW(160 V、200 A)
- 外部 電力消費ユニットによる 2 象限動作
- 最大 200 ksa/s のデジタイザ

図17. DC-DCコンバーター評価用のキーサイト製品

インバーター／コンバーターテスト用のキーサイトのソリューション

キーサイトは、コンポーネントの特性評価用に限らず、パワーエレクトロニクスの基本構成ブロックであるインバーター／コンバーターの特性評価用ソリューションも提供しています。効率的な電力変換回路が不可欠なので、性能を最適化するにはインバーター／コンバーター回路全体を評価できる機能も必要です。さらに、インバーター／コンバーター回路は高い安定性と信頼性を備えていなければならない、電磁波障害(EMI)仕様に適合している必要もあります。

以下の図はキーサイトのソリューションのポートフォリオを示しています。

	製品のデザイン／デバッグ	デザインの検証／認証
効率	<div><p>ダブル・パルス・テスト</p><ul style="list-style-type: none"><li>・ InfiniVision オシロスコープ</li><li>・ ファンクション / パルスジェネレーター</li><li>・ DC 電源</li></ul></div>	<div><p>IntegraVision PA2201A/03A 2ch/4ch パワーアナライザ</p></div>
安定性／信頼性	<div><p>InfiniVision 3000/4000/6000 Xシリーズ オシロスコープ (パワー測定オプション搭載)</p></div>	<div><p>N8937APV/N8957APV 太陽電池アレイシミュレーター</p></div>
EMI	<div><p>E5061B-3L5 LF-RF ネットワーク・アナライザ</p></div>	<div><p>N9010A EXA シグナル・アナライザ (10 Hz ~ 44 GHz)</p></div>

図18. パワー・エレクトロニクス・インバーター／コンバーター・テスト用のキーサイトソリューション

EMIテストで、回路ボードから発生する不要な周波数の信号を検出するには、シグナル・アナライザやスペクトラム・アナライザが有用なツールです。このような信号が検出された場合は、適切な対策(シールドの強化など)が必要です。次のセクションでは、図18に示したインバーター／コンバーターテスト用(EMIテストを除く)の各ソリューションを詳細に説明します。



## インバーター／コンバーター動作の評価

Keysight InfiniVision 3000/4000/6000 Xシリーズ オシロスコープ(パワー測定オプション搭載)は、多くのパワー解析パラメータを解析できる機能を備えています。例えば、電流高調波、突入電流、スイッチング損失、スルーレート、変調、出力リップル、ターンオン／ターンオフ、トランジェント応答、PSRR、効率を測定できます。

製品開発の初期段階で、これらの主要なパラメータを測定して各ノードでの動作を確認できる機能を備えることは非常に重要です。オシロスコープに適切なパルス信号源と電源を組み合わせれば、インバーター／コンバーター機能を評価できる非常に効果的なツールを構築できます。

## 電力効率の評価

パワーエレクトロニクス回路の電力効率を検証するには、Keysight PA2201A/03A IntegraVision パワー・アナライザを選択するのが最適です。PA2201Aは2チャンネルPA2203Aは4チャンネルで電圧／電流／電力を捕捉でき、これらの合計6個の波形を、5 MSa/sのサンプリング、16ビットのデジタイズ、2 MHzの帯域幅、0.05 %の基本確度で同時に表示できます。電圧／電流入力はアースグランド基準で±1000 Vまでフローティングできます。これにより、差動電圧プローブを使用する必要がなくなり、プローブに関する複雑なセットアップや測定誤差を排除できます。各チャンネルに内蔵されている1つの電圧入力と2つの電流シャント入力(2 Arms/50 Arms)とは別に、1つの電流プローブ入力を備えることで最高の柔軟性を実現しています。これにより、使用したい手法を選択して正確かつ信頼性の高い電流測定が可能になります。

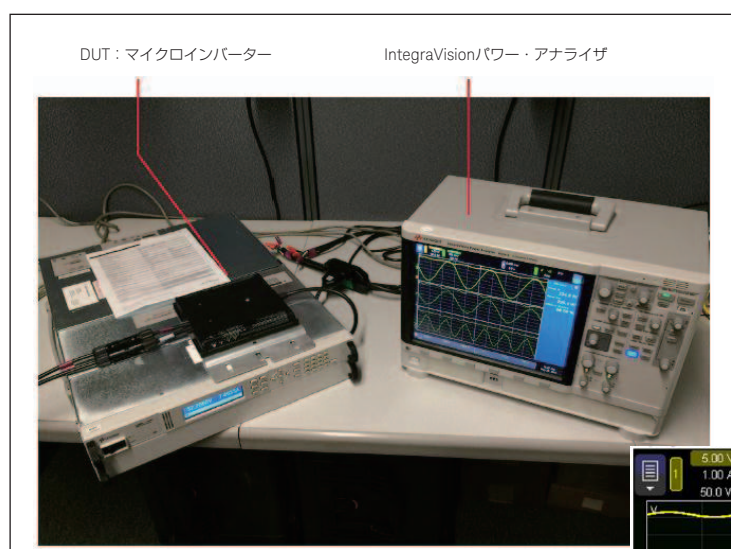


図19. PA2201A IntegraVision/パワー・アナライザによる電力効率測定

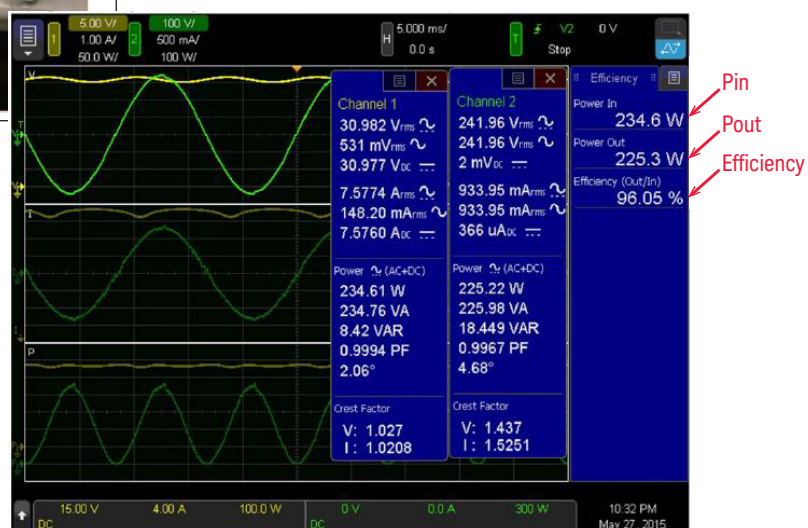


図20. 6つの波形と各電力／効率の測定結果を示すパワー・アナライザのスクリーンショット

DC-DCコンバーターのループ利得評価

DC-DCコンバーターが最新の高速LSIの負荷変動に高速に応答できるようにするためには、フィードバック回路内の応答速度と安定性のバランスを最適化することが重要です。

DC-DCコンバーターのループ利得は、DC-DCコンバーターの負荷変動の安定度を表すのに適した指標です。ループ利得の振幅／位相の周波数特性は、コンバーターの安定度と応答性を表します。位相マージンはループ利得の位相角と0度との差で、利得マージンは位相角が0度のときの周波数におけるループ利得振幅と0 dBとの差です。これらはループ利得安定度の主要なパラメータです。クロスオーバー周波数は、ループ利得が1(=0 dB)と等しくなる周波数として定義され、負荷変動に対する応答速度を表します。

E5061B-3L5 LF-RF ENAシリーズ ネットワーク・アナライザを使用すれば、上記のすべての主要なパラメータと特性を検証できます。

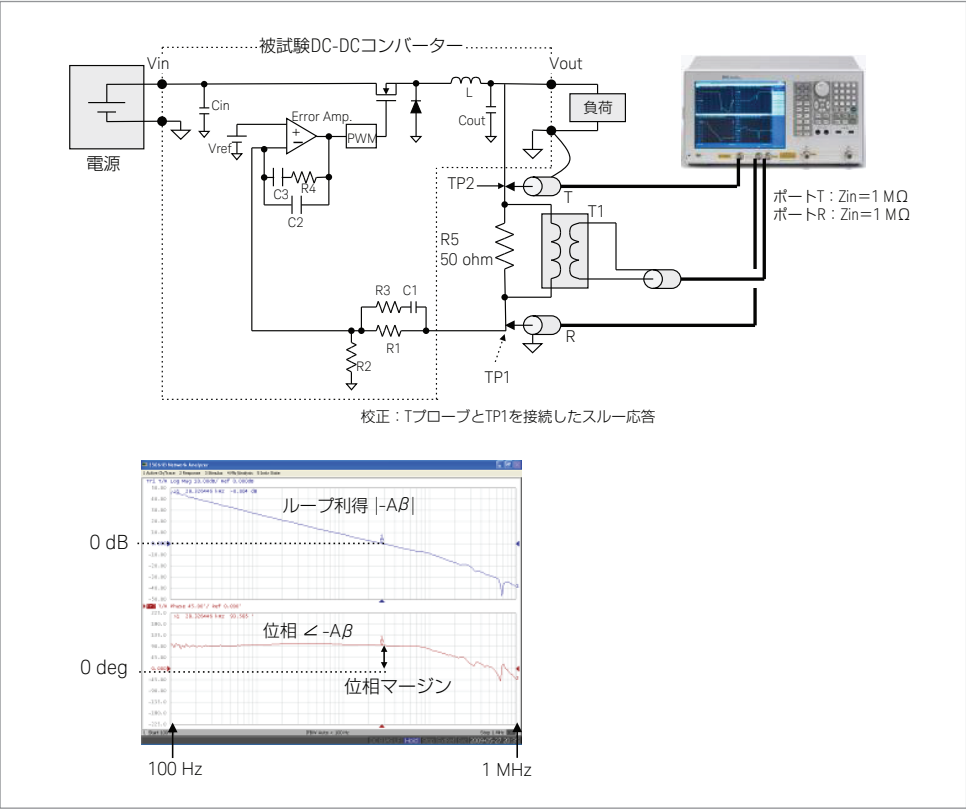


図21. E5061B-3L5を用いたループ利得測定のセットアップと測定結果

## シミュレーターを利用してスイッチング電源の回路設計を効率化

スイッチング電源回路の設計手法では、シミュレーターを活用して、設計品質を高め、手戻りを最小限にすることで、開発期間の短縮を図ります。例えば、シミュレーションを活用することにより、設計の初期段階や基板設計の段階で、回路の動作を予測し、スイッチング波形を適切に制御することで、より高効率な電源を設計できます。また、回路から発生するノイズを予測し、発生原因の分析と対策が実施できれば、EMC対策に要する時間とコストの削減につながられます。

### スイッチング電源回路にはさまざまな課題

スイッチング電源回路にはさまざまな課題があります(図22)。例えば、回路の小型化、電力の変換効率の向上と発熱の抑制、電子機器に装備されるワイヤレスコネクティビティ(Wi-Fi、Bluetooth、LTEなど)に影響を与えないノイズ特性などを挙げられます。

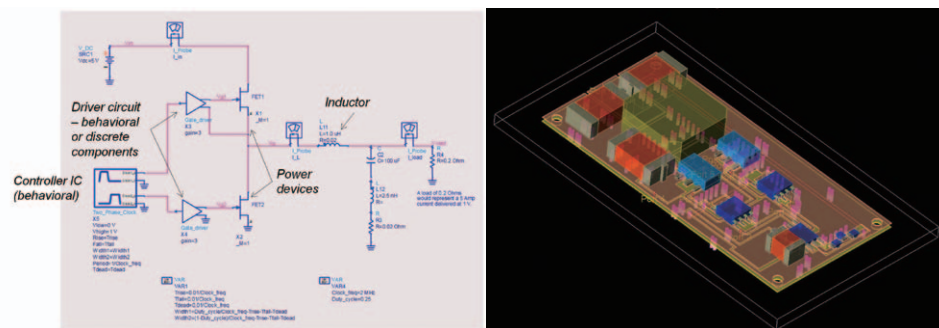


図22. スwitchング電源回路の例

過渡的な応答に対する回路の安定性の確保も課題の1つです。FPGAやプロセッサなどでは、内部の動作に伴って消費電流が大きく変動することがあり、基板を含めてスイッチング電源には優れた過渡応答特性が求められます。

また、高電圧・大電力アプリケーションにおいては、前編で述べたように、SiC、GaNなどのパワーデバイスが使われ始めています。高速なスイッチングが可能になったことで、 $dv/dt$ あるいは $di/dt$ の大きなノードや経路が回路内に生じ、ノイズの原因になっています。

こうした課題に対処するには、コントローラー ICやパワーデバイスなどを適切に選定する、スイッチング周波数やゲートコントロール電圧のスルーレートなどの動作パラメーターを適切に設定する、レイアウト設計で寄生インダクタンスを制御する、といったことが鍵になるでしょう。

ただし、例えば受動部品の小型化を図ろうとスイッチング周波数を高くすると、今度はスイッチング波形の制御が難しくなり、大きなノイズの発生原因になります。最悪の場合は素子が破壊されてしまう可能性があります。また、スイッチング損失が増えて変換効率下がってしまうなど相反する条件も多い。信頼性を保ちつつ要求仕様を満足することが重要です。

電磁界解析を活用してスイッチング電源回路を設計

電源系の設計は難易度が年々高くなっています。スイッチング電源は基本的にアナログ回路のためか、設計や評価(トラブルシュート)は勘や経験に頼りがちになりやすいです。しかし、勘と経験だけではトライ・アンド・エラーを繰り返すことになってしまい、解決までに多大な時間とコストを要してしまいます。

電子計測専門メーカーである我々は、回路にトラブルを抱えた顧客の相談に乗ることが多いです。電子機器の不具合の原因は信号処理回路ではなく電源回路にあった、という事例を少なからず見てきました。

我々が推奨しているのが、回路シミュレーターの活用と電磁界解析ツールを使ったスイッチング電源のシミュレーションです(図23)。設計の早期段階で活用すればノイズを抑えた高効率な電源の実現が図ることができます。また、万が一トラブルが発生した場合に使用すれば、勘に頼らず現象や原因を定量化できます。実際に、応答の速いSiCやGaNなどを使ったスイッチング電源回路の設計において、電磁界解析ツールを活用される顧客は多いです。

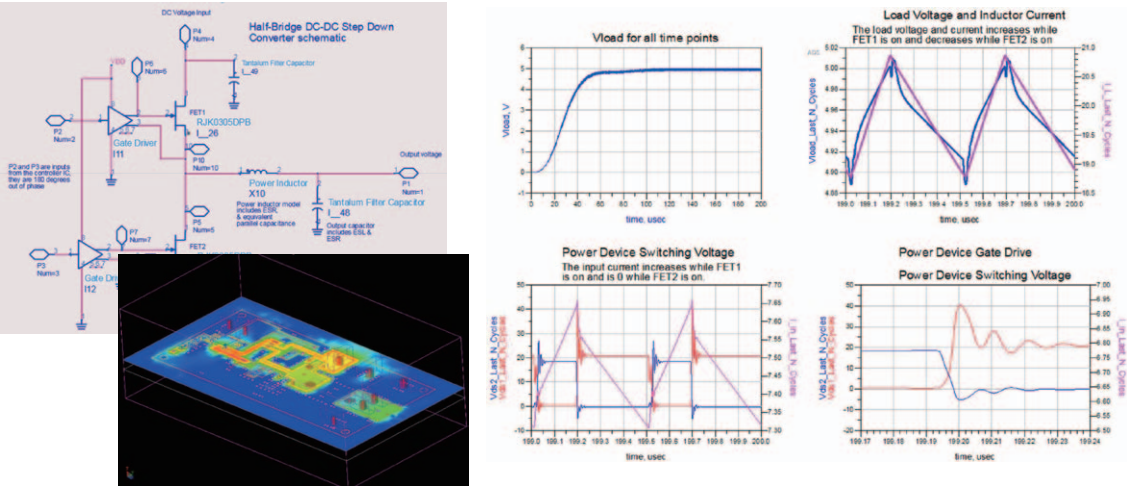


図23. 基板特性を含めた電源系全体の波形シミュレーション例

電磁界解析のメリットは基板の特性を精度よく見積もることができます。電磁界解析の結果を使って回路シミュレーションを実行すれば、基板の特性を含めた挙動を解析でき、電流が集中する箇所や、寄生インダクタンスの存在など、設計上の落とし穴もすぐに見つけることができます。

また、電磁界解析によって得られた基板特性を含めて回路特性を解析することで、回路より生じるノイズを精度よく見積もることができます(図24)。

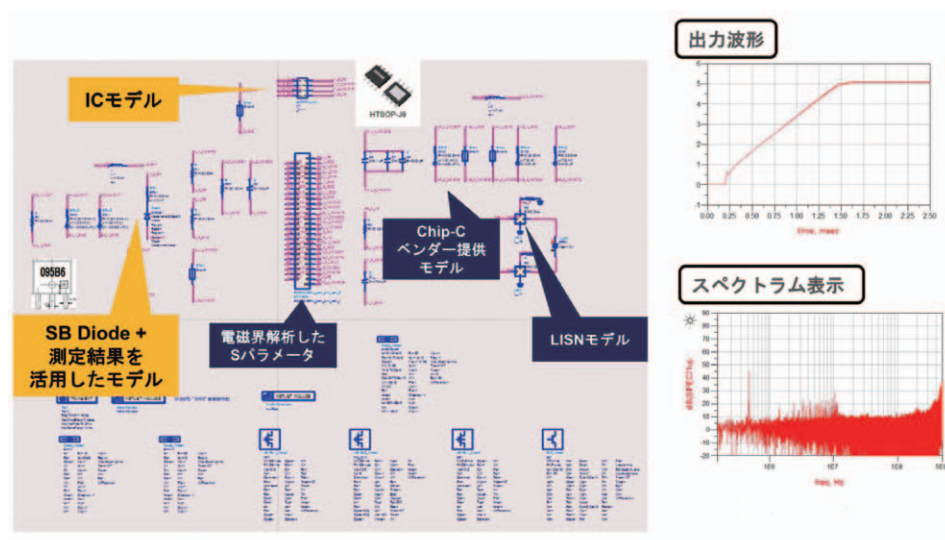


図24. 基板特性を含めたスイッチング電源のノイズシミュレーション例

なお、アナログシミュレーターとして広く使われているSPICE系シミュレーターは、素子レベルを対象にしているため、基板を含む実際の挙動とは隔たりが生じる場合があるが、電源回路の挙動を初期段階で見積もるシミュレーションには十分に活用可能です。

### デバイスモデル生成機能を備えた回路+電磁界の統合解析環境を提供

回路シミュレーターや電磁界解析ツールはいくつかのEDAベンダーから提供されていますが、キーサイト・テクノロジーでは「Advanced Design Systemソフトウェア」(以下「ADS」)を提供しています。ADSは、時間軸や周波数軸での回路シミュレーターと電磁界解析ツールの統合環境であり、電源系の解析のほか、RF、マイクロ波、高速デジタル回路など、さまざまなアプリケーションで利用されています。

ADSの特徴を3点挙げます。1つめは、高周波に対応しているため電流や電圧の急峻な変化も忠実にシミュレーションできる点です。スイッチング電源回路は、スイッチング周波数がkHz～MHzのオーダーでも、高速なスイッチング波形にはGHzオーダーの高調波が含まれる場合もあり、電源系の解析といえども広い周波数帯域に対応している必要があります。



レイアウト特性を考慮したスイッチング回路シミュレーション

2つめは回路シミュレーターと電磁界解析ツールが統合された環境であることです(図25)。急激なスイッチング電流の変化により、実装基板のレイアウトにわずかなインダクタンス成分が寄生しているだけでも大きなノイズを引き起こすことがあります。

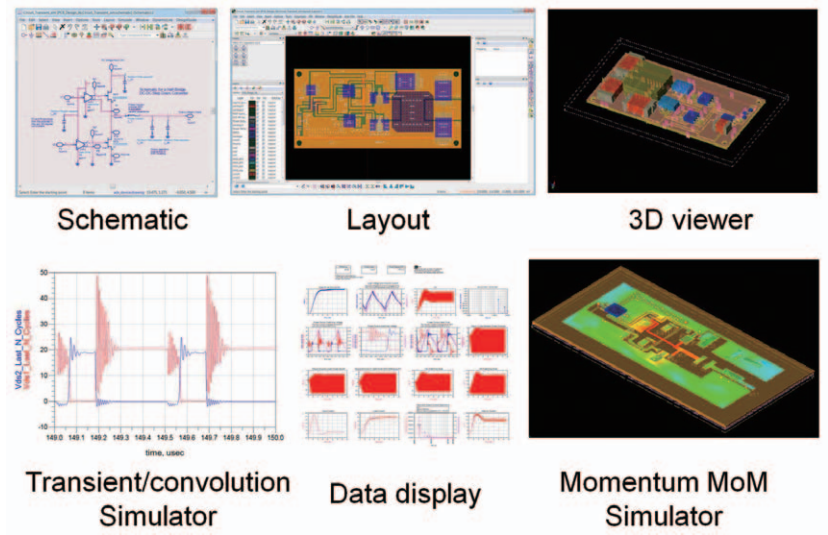


図25. 「Advanced Design System (ADS)」の主な機能

電圧や電流の変化が緩やかなデバイスを利用する際には大きく影響はしませんが、最近のパワーデバイスを利用するスイッチング電源回路では高いスイッチング周波数が使われることにより、電流および電圧ともに急峻に変化するケースが増えています。特にSiCやGaNなどの新しいデバイスの場合、より高速なスイッチング周波数で利用されます。

スイッチング速度の高速化による機器の小型化や消費電力の低減といったメリットを享受するためにはこうした急峻な特性を利用します。ただし、微小なインダクタンスでも大きなノイズを引き起こす(図26)ため、基板レイアウトの寄生インダクタンスを精度よく見積もることが重要です。実測でも特性は得られますが、基板設計用EDAでレイアウトを変更するたびに実際に基板の試作を繰り返さなければならず、その意味でも電磁界解析は有効です。

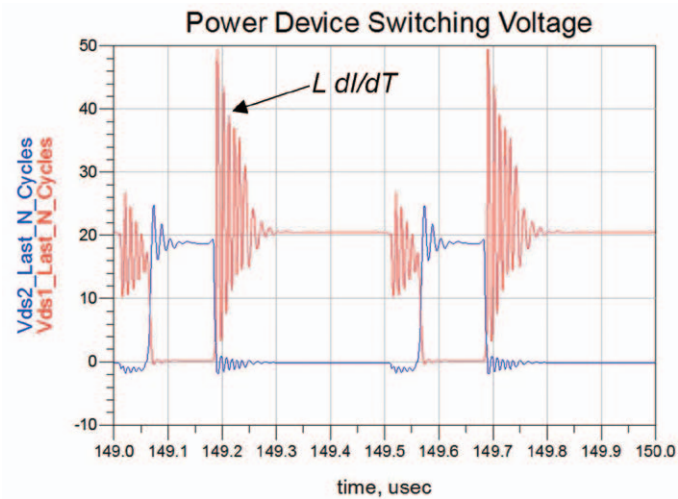


図26. 基板の寄生インダクタンスで発生する過大なノイズの例

なお、基板のレイアウトはADS上でも描画できますが、他社の基板設計用EDAとのリンク機能を備えています。Gerber、DXF、ODB++等など複数のフォーマットで読み込みが可能のため、他の基板EDAや基板メーカーから提供されるレイアウトのデータを活用できます(図27)。

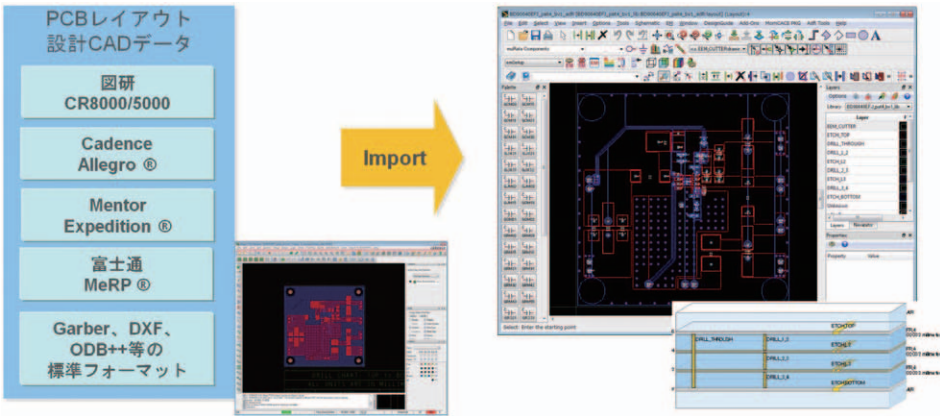


図27. 様々な基板設計用EDAデータの読み込みに対応



## 電磁界解析結果を回路シミュレーションに利用

ADSでは、電磁界解析で得られた基板の特性データを仮想的な部品として回路に反映できるため、基板の特性を含めた回路性能を、簡単かつ精度よく把握することが可能です。さらに電磁界解析から得られる電流密度分布を基板上のレイアウトに重ねて表示することにより、レイアウトのどの部分に電流が集中しているかが画面上で確認でき、レイアウト改善の指針が得られます(図28)。

その具体例を紹介します。レイアウト上の寄生インダクタンスによる電圧ノイズは、次の式で表されます。

$$V(\text{ノイズ}) = L(\text{インダクタンス}) \cdot \frac{di}{dt} (\text{電流の時間変化量})$$

つまり、電流の時間変化量が大きい箇所のインダクタンスを減らせば、ノイズを低減できます。

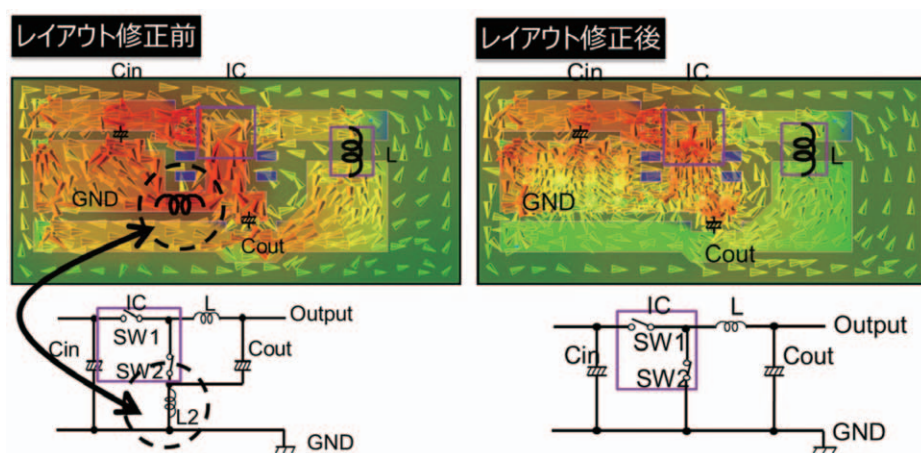


図28. 基板上のレイアウトに流れる電流密度を可視化

例えば、図28左側のレイアウト修正前の電流密度分布を確認すると、SW2とGNDの間の配線に電流が集中して流れている様子が観察できます。その原因は高 $di/dt$ の電流ループ内に存在するインダクタンスと考えられます。そこで、同図右側のレイアウトのように対象箇所の配線にGNDへのビアを追加してインダクタンスを下げたところ、該当箇所の電流密度が減少している様子が観察できました。

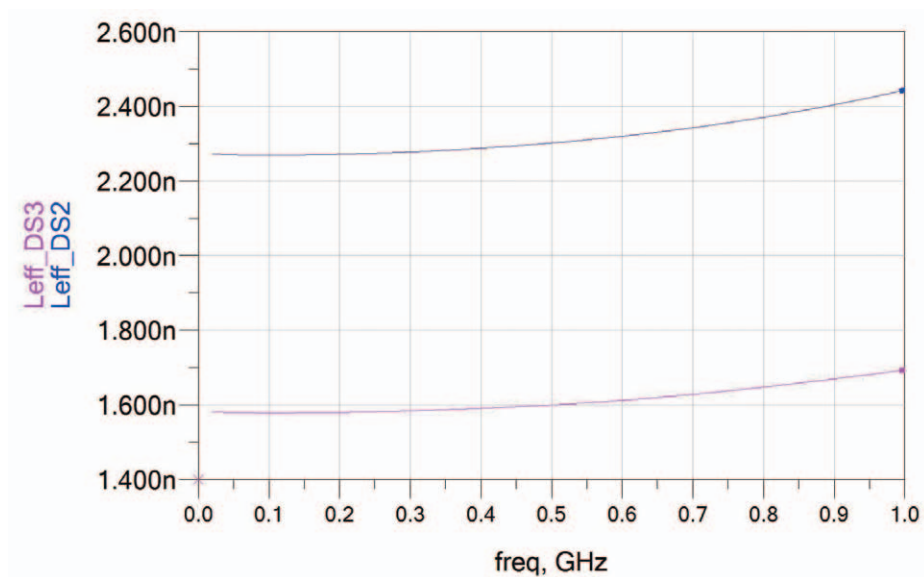


図29. 基板レイアウトの電磁界解析結果から算出したインダクタンス値

該当配線のインダクタンスを電磁界解析結果から算出すると(図29)、図28左側の基板では約2.3nH、図28右側の基板では約1.6nHと、基板レイアウトの修正によってインダクタンスが低減できていることが分かります。各レイアウトでの出力電圧の波形を観察するとノイズの変化を観察でき、図28右側のレイアウトの場合に出力波形のノイズが減少していることが分かる(図30)。

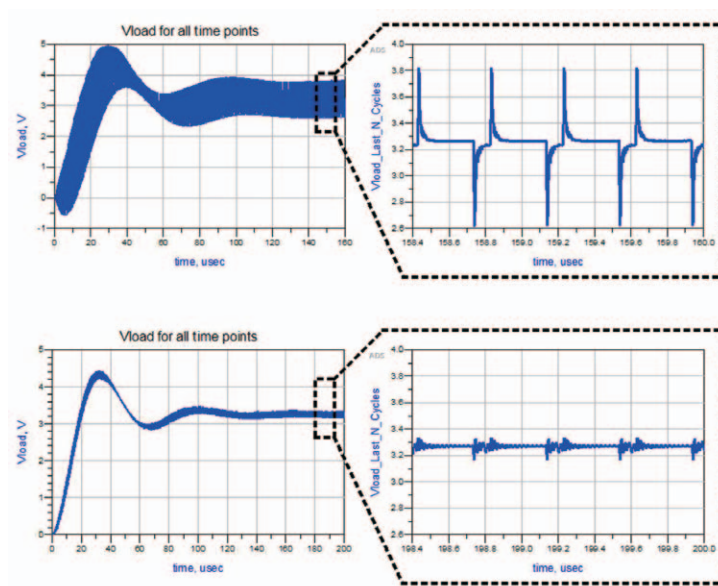


図30. 各レイアウトでの出力波形を観察(上が図29の左、下が図29の右のレイアウトでの結果)

なお、詳しい内容はYoutube上の当社チャンネルの動画で紹介しています。  
(<https://www.youtube.com/watch?v=LwPJi3jyfw0>)

ちなみに、電磁界解析で得られるのは、周波数ごとに特性が記述されたSパラメーターです。スイッチング回路の解析では時間軸の解析波形が得られ、電磁界解析では周波数軸の解析結果が得られます。このため、時間軸の波形解析と組み合わせて解析する際には、電磁界解析の結果を時間軸の特性に変換する必要があります。ここでもADSの利点があります。時間軸解析で周波数軸のデータを利用するための解析ノウハウがADSには搭載されているため、精度の良い結果を得ることができるからです。

### シミュレーション用モデルを自動生成

ADSで回路を設計する際にシミュレーションモデルが必要となるが、Keysight IC-CAPには自動生成する機能も備えています(図31)。シミュレーションの精度は利用するモデルの精度に依るところが大きいです。デバイスの正確なモデルを作成するのはなかなか面倒です。IC-CAPを使えば、前編で紹介した我々の「B1506A(回路デザイン用パワー・デバイス・アナライザ)」でのパワーデバイスの測定データや、ベンダーが提供するデータシートから、ワンクリックに近い簡単な操作で、素子のシミュレーションモデルを生成することができます。

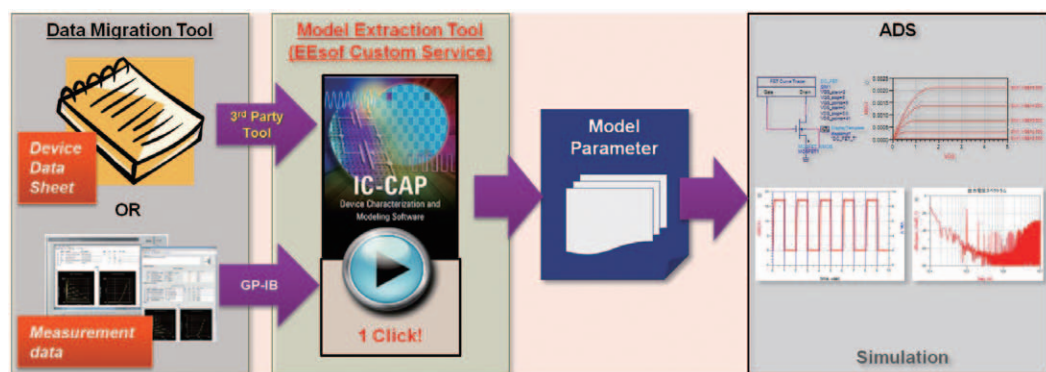


図31. シミュレーションモデルの自動生成機能

パワーデバイスをスイッチング回路に使用する場合、電圧-電流特性だけではなく、電圧-容量特性も重要です。容量特性はスイッチング波形の立ち上がり時間に大きく影響するため、容量特性が正しく表現されていないと電圧波形と電流波形の正確な解析ができず、消費電力の増大につながってしまいます。B1506Aでは電圧-電流特性だけでなく、電圧-容量特性も簡単に測定できます。ADSではそれらのデータを利用し、容量特性も含めた精度の高いシミュレーションモデルを自動生成します。本機能を活用すれば、電源回路の設計者が素子モデルの作成で苦労することなく、シミュレーションを効率的に進められます。

以上のように、パワーデバイスの実環境を想定した条件での特性結果をシミュレーションモデルに展開し、他の部品や基板など実装状態をシミュレーターを活用し動作検証を行うことにより、パワーエレクトロニクス回路の設計・検証を大幅に効率化し、本来の目的であるノイズ問題のない高効率なスイッチング電源回路を開発できます(図32)。

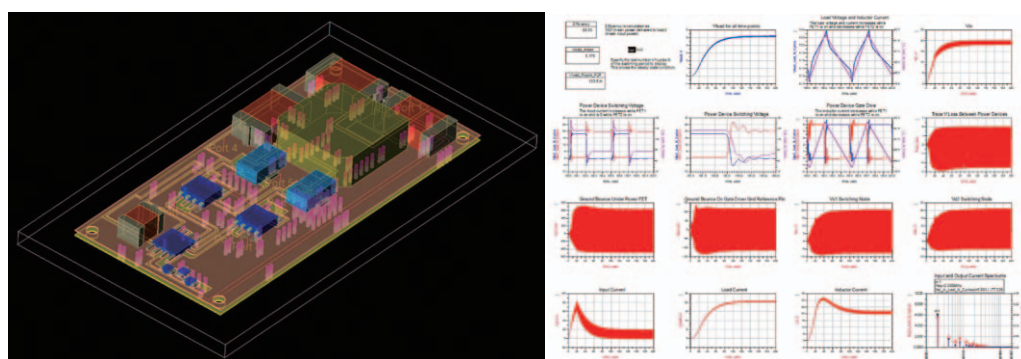


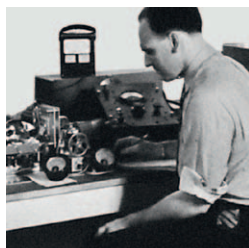
図32. DC-DCコンバーターの解析例

## まとめ

多くのアプリケーションで半導体パワーエレクトロニクスの普及が拡大し続けることにより、パワー・エレクトロニクス・エンジニアやパワーデバイス／コンポーネントエンジニアが対応しなければならない多くの課題が生じています。動作効率の向上と安全性の強化という目標を達成するには、パワーエレクトロニクス回路とパワーコンポーネントに対して、今までに行ってきたテストを超える極めて詳細なテストとシミュレーションを行う必要があります。この技術概要で紹介したように、キーサイト・テクノロジーは、従来のニーズだけでなく最先端のパワーエレクトロニクスのテスト・設計ニーズに対応できるさまざまなソリューションを提供しています。

## ヒューレット・パカードからアジレント、そしてキーサイトへ

キーサイトは、75年以上もの間、電子計測によって未知なる世界を解き明かしてきました。キーサイト独自のハードウェア、ソフトウェア、スペシャリストが、お客様の次のブレークスルーを実現します。Unlocking measurement insights since 1939.



1939

未来

### myKeysight

myKeysight

[www.keysight.co.jp/find/mykeysight](http://www.keysight.co.jp/find/mykeysight)

ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。

DEKRA Certified  
ISO 9001 Quality Management System

[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Keysight Technologies, Inc.  
DEKRA Certified ISO 9001:2015  
Quality Management System

### Keysight Infoline

Keysight Infoline

[www.keysight.com/find/service](http://www.keysight.com/find/service)

測定器を効率よく管理するためのオンラインサービスです。無料登録により、保有製品リストや修理・校正の作業履歴、校正証明書などをオンラインで確認できます。

### 契約販売店

[www.keysight.co.jp/find/channelpartners](http://www.keysight.co.jp/find/channelpartners)

キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。  
お気軽にお問い合わせください。

[www.keysight.co.jp/find/b1506a](http://www.keysight.co.jp/find/b1506a)

## キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

### 計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email [contact\\_japan@keysight.com](mailto:contact_japan@keysight.com)

ホームページ [www.keysight.co.jp](http://www.keysight.co.jp)

記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。