



電子情報技術産業協会技術レポート

Technical Report of Japan Electronics and Information Technology Industries Association

JEITA EDR-7101

**電子デバイスモデル仕様書標準化の
必要性調査報告**

**Report on a study of the need for standardization
of model specifications for electronic devices**

2023年3月制定

作成

半導体標準化専門委員会

Semiconductor Standardization Committee

発行

一般社団法人 電子情報技術産業協会

Japan Electronics and Information Technology Industries Association

目 次

ページ

まえがき	
序文	1
1 適用範囲	1
2 引用規格	1
3 用語, 定義及び略語	1
3.1 用語及び定義	1
3.2 略語	2
4 背景と目的	2
4.1 背景	2
4.2 目的	2
5 実施内容	3
5.1 概要	3
5.2 シミュレーション作業プロセスに想定されるシナリオ及びリスク	3
5.3 実証実験題材	4
5.4 実証実験シナリオ	5
6 結果	7
6.1 想定シナリオから分かったモデル要件①—設計情報に基づくモデル選定	7
6.1.1 モデルの使用用途が不明確	7
6.1.2 モデル仕様書に端子リード成分有無の情報記載がない	7
6.1.3 モデル仕様書にトランジスタコンパクトモデル種類の情報記載がない	8
6.1.4 モデル仕様書に S-parameter 形式モデルの周波数範囲の情報記載がない	8
6.1.5 モデル仕様書に使用する回路シミュレータの種類の情報記載がない	9
6.1.6 モデル仕様書に使用する回路シミュレータのバージョン情報の記載がない	9
6.1.7 モデル仕様書にモデル容量特性有無の情報記載がない	10
6.1.8 モデル仕様書に前提条件 (ゲートドライバ抵抗有無) の情報記載がない	11
6.1.9 モデル仕様書に寄生インダクタンスモデルの種類の情報記載がない	11
6.1.10 モデル仕様書に負荷インダクタンスモデルの種類の情報記載がない	12
6.2 想定シナリオから分かったモデル要件②—解析設定条件	12
6.2.1 モデル使用者が電磁界シミュレータのメッシュ数の設定を誤る	12
6.2.2 モデル使用者が電磁界シミュレータの解析領域の設定を誤る	13
6.2.3 モデル使用者が電磁界シミュレータの解析周波数範囲の設定を誤る	14
6.2.4 モデル使用者が異なる種類の電磁界シミュレータを使用する	15
6.3 想定シナリオから分かったモデル要件③—解析結果考察	16
6.3.1 モデル仕様書に解析結果の波形確認方法の情報がない	16
6.4 想定外シナリオから分かったモデル要件	17
6.4.1 モデル仕様書に等価回路に寄生成分の記載がない	17
6.4.2 モデル仕様書に実測結果観測位置の記載がない	19
6.4.3 モデル仕様書に入力信号の仕様情報がない	19

6.5 実証実験から得られたシミュレーション実施時の留意事項（参考）	19
6.5.1 基板の実装部品の配置及び寸法の情報について	20
6.5.2 基板・実装部品の物性情報	20
6.5.3 基板 S-parameter 形式モデルのポート名の情報について	21
6.5.4 基板 S-parameter 形式モデル使用時のデバイスモデルの接続方法について	21
6.5.5 基板の波形観測点の情報について	23
6.5.6 S-parameter 形式モデルの周波数範囲の外挿について	23
6.6 モデル仕様書に定義すべき項目の考察	24
7 まとめと今後の課題	29
7.1 まとめ	29
7.2 今後の課題	29
附属書 A（参考）集積回路実証実験	30
A.1 実証実験の概要	30
A.2 題材	30
A.3 実証実験方法	30
附属書 B（参考）MOSFET スイッチング回路実証実験	32
B.1 実証実験の概要	32
B.2 題材	32
B.3 検証シナリオ	33
B.4 各シナリオのシミュレーション条件	33
附属書 C（参考）IGBT ダブルパルス回路実証実験	35
C.1 実証実験の概要	35
C.2 題材	35
C.3 検証シナリオ	37
C.4 各シナリオのシミュレーション条件	37

まえがき

この技術レポートは、一般社団法人 電子情報技術産業協会（**JEITA**）半導体システムソリューション技術委員会/デバイスモデル **DX** 推進 **SC**/モデル要件 **WG**/規格ガイドライン **TG** が作成したものである。

この規格は、著作権法によって保護されている著作物であるため、許可なくこのレポートの一部又はすべてを複製・転載することを禁止する。

この技術レポートは、その一部が工業所有権（特許権、実用新案権、意匠権など）に抵触する可能性に関係なく制定されている。一般社団法人 電子情報技術産業協会は、このような工業所有権に係る確認について、責任はもたない。

この技術レポートは、**JEITA TSC-16**（電子情報技術産業協会規格類の作成基準）の様式によって作成してある。

電子情報技術産業協会技術レポート

電子デバイスモデル仕様書標準化の 必要性調査報告

Report on a study of the need for standardization of model specifications for electronic devices

序文

近年、半導体を用いるシステムの複雑化、高信頼化や開発コスト削減、開発期間短縮のため、シミュレーション技術を活用する仮想設計の実用化が推進されている。仮想設計では目的に応じたシミュレーションモデルが必要である。半導体・電子部品ベンダが提供する電子デバイスモデルは、回路シミュレーション等に用いられる。これらのモデルは各ベンダ独自の分類方法で Web サイトに公開される無償モデルや機密保持契約 NDA を要する限定モデルである。これらのモデルは次の課題がある。①欲しいモデルがタイムリーに提供されていない。②十分な種類が提供される状態になっていない。③モデル使用者の使用目的に応じたモデルかどうか不明。例えば、モデルが入手困難な場合や、入手できた場合でも目的に適するかわからず動作確認が必要な場合がある。具体的には、温度や電圧に依存する特性及びパッケージ成分包含の不明点や、3D 構造に関する情報提供の少なさ等の課題がある。したがって、モデルが円滑に提供されること、及びモデル使用者が使用目的への適合性を判断できる情報を提供することが、課題解決の糸口と考えられる。

本技術レポートは、上記課題のうち、シミュレーション目的に適するか判断するために必要な情報を、具体的な事例を用いて調査実証し、モデル仕様書作成及びその標準化の必要性について提案するものである。

1 適用範囲

この技術レポートは、回路シミュレータで使用する、受動素子、半導体素子、集積デバイス等の電子デバイスのシミュレーションモデル、基板構造を電磁界シミュレーションにより抽出した基板モデル、及びそれらを使用するシミュレーションに適用される。

2 引用規格

引用規格なし。

3 用語、定義及び略語

3.1 用語及び定義

a) モデル

回路シミュレータで使用する、受動素子、半導体素子、集積デバイス等の電子デバイスのシミュレーションモデルの省略呼称。

b) モデル作成者

モデルを作成又は提供する法人又は個人。

c) **モデル使用者**

モデルを使用する法人又は個人。

d) **モデル仕様**

モデルが表現する機能特性や使用する際の前提条件など。

e) **モデル要件**

モデル仕様の構成要素。

f) **モデル仕様書**

モデル仕様を文書にしたもの。

3.2 **略語**

a) **マイコン**

マイクロコントローラ

b) **ADC**

Analog-to-Digital Converter

c) **FFT**

Fast Fourier Transform

d) **S-parameter**

Scattering parameter

e) **SPICE**

Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

4 **背景と目的**

4.1 **背景**

現在、半導体・電子部品ベンダが提供するモデルは、モデル使用者が使用適否を判断するための情報が不足している場合がある。このため、モデル使用者は自身のシミュレーション対象においてモデルの使用目的への適合性を判断できず、検証作業に時間がかかる状況が発生している。

また、この情報不足から、モデルに関する技術知見レベルによっては、扱い方に相違が生じてしまい、シミュレーション結果に齟齬が発生するという問題もある。仮想設計の実用化のためには、これらの問題が解決されることが必要であり、具体的には、温度や電圧に依存する特性といったモデルが表現する機能特性や、パッケージ成分やデバイス内部の 3D 構造が反映されたモデルであるかなどのモデルを使用する際の前提条件が記載されたモデル仕様書の活用が有用であると考えられる。

4.2 **目的**

仮想設計に必要となるモデルの円滑な提供と、使用目的に対する適合性を判断できる情報提供手段として、要件が記載されたモデル仕様書が有用であると考えられる。そのモデル仕様書の必要性を調査するために、モデル仕様書に定義すべき具体的な項目を調査し、それらの実証実験を実施する。

5 実施内容

5.1 概要

シミュレーションでは、モデルに対する情報不足や技術不足があった場合に様々な問題が発生する状況とリスクが予想される。そこで、シミュレーション作業の各プロセスにおいて、情報不足や技術不足があった状況のシナリオ及びリスクを想定し、実際にシミュレーションを行うことによってそれらを検証する。

検証に当たり、複数の回路題材を選定し想定シナリオ及びリスクを用意した。検証では想定シナリオに沿って、情報不足や技術不足のある場合とない場合のシミュレーションを行い、両者の結果を比較することによって、各シナリオで想定した情報不足や技術不足の影響度合いを評価する。また、参考として、実証実験から得られたシミュレーション実施時の留意事項をまとめる。

最後に、評価結果に基づいてモデル仕様書に記載すべき項目を考察し、モデル仕様書作成及びその標準化の必要性を提案する。

5.2 シミュレーション作業プロセスに想定されるシナリオ及びリスク

モデルを使用した一般的なシミュレーションプロセスとモデル使用時に想定されるシナリオ及びリスクを図1に示す。プロセスは設計情報に基づき必要なモデルを選定するシミュレーションプロセス1、検証内容に適した解析設定を決めるシミュレーションプロセス2、及び解析結果を分析するシミュレーションプロセス3の、三つのプロセスで構成される。

シミュレーションプロセス1では、モデル作成者がモデル作成時に、意図した使用用途が不明確な場合やモデル仕様の機能特性や前提条件が不明確な場合に期待するシミュレーション結果を得られない、というシナリオ及びリスクが考えられる。

シミュレーションプロセス2では、モデル使用者が不適切なシミュレーション条件を設定した場合に期待するシミュレーション結果を得られない、というシナリオ及びリスクが考えられる。

シミュレーションプロセス3では、シミュレーション結果の評価方法が不明確な場合はシミュレーション結果を適切に考察できない、というシナリオ及びリスクが考えられる。

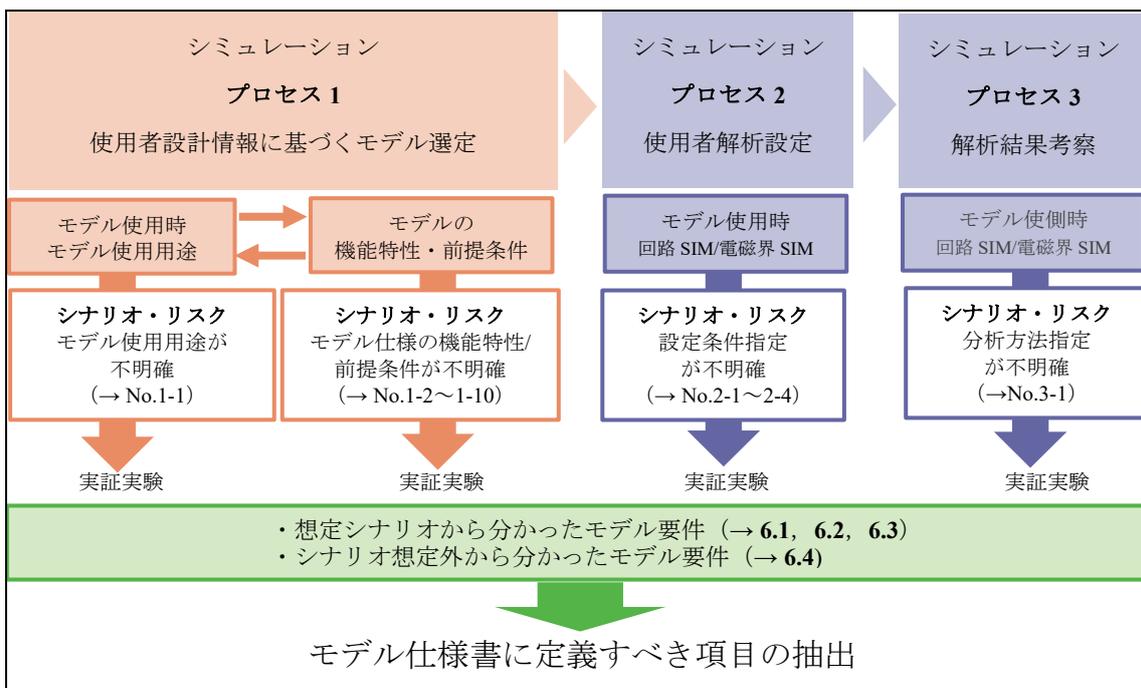


図1—シミュレーションプロセスから想定したシナリオ及びリスクの検証手順

5.3 実証実験題材

実証実験では、JEITA デバイスモデル DX 推進 SC 参加各社から得た実際の製品設計におけるモデル使用時の課題を集約し、評価特性を端的に表現する回路を題材として選定した。表 1 に実証実験に用いた三つの題材を示し、図 2、図 3、図 4 に題材に用いた検証回路図を示す。それぞれの題材において、期待する情報が備わっている場合と、情報不足がある場合のシナリオを作成し実際にシミュレーションを行った。各題材の詳細は**附属書**に記載する。

表 1—実証実験題材

No.	回路	評価特性	詳細
1	集積回路	ADC 入力特性	附属書 A を参照
2	MOSFET スイッチング回路	スイッチングノイズ特性	附属書 B を参照
3	IGBT ダブルパルス回路	スイッチング波形サージ	附属書 C を参照

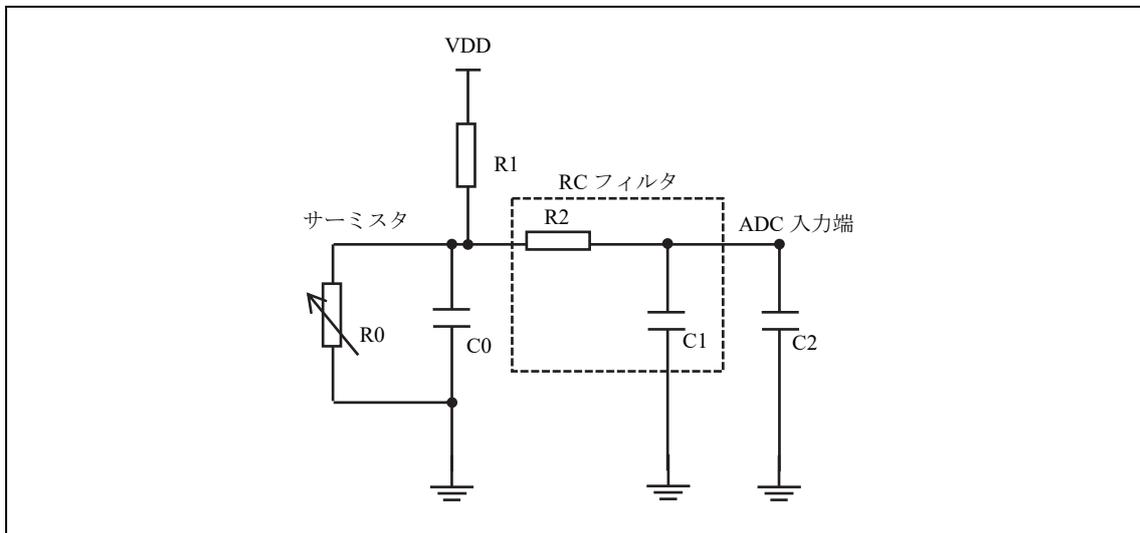


図 2—集積回路の題材

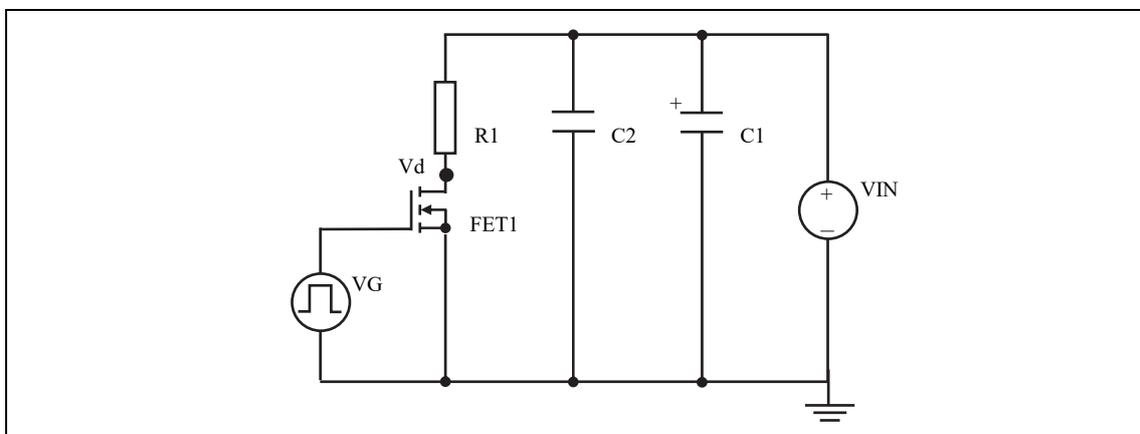


図 3—MOSFET スイッチング回路の題材

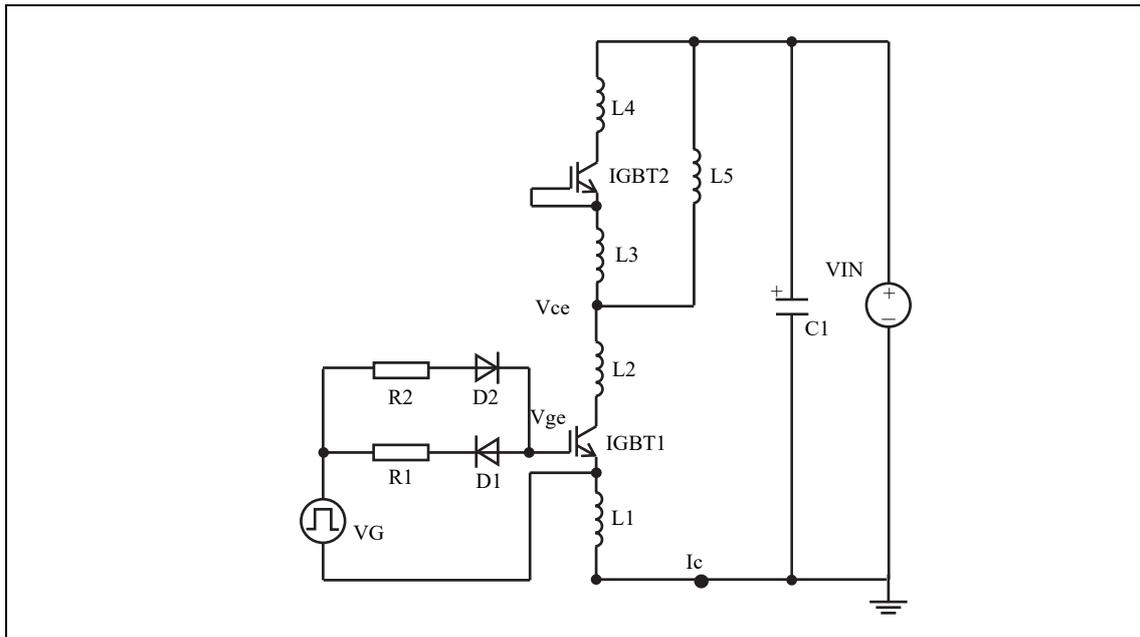


図 4—IGBT ダブルパルス回路の題材

5.4 実証実験シナリオ

実証実験で用意した想定シナリオ及びリスクの内容を表 2 に示す。

表 2—実証実験シナリオ

シナリオ No.	シミュレーションプロセス	想定シナリオ	想定リスク	実証実験内容	題材	実証実験結果
1-1	プロセス 1 設計情報に基づく モデル選定	モデルの使用用途が不明確。	モデル使用者に必要な十分な機能・精度のモデルが提供されず、期待するシミュレーション結果を得られない。	使用用途に対する認識ずれにより生じるモデルの機能や精度の差異を確認する。	集積回路	6.1.1 参照
1-2		モデル仕様書に端子リード成分有無の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	パッケージの端子リード成分ありとなしのモデルを用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	MOS FET 回路	6.1.2 参照
1-3		モデル仕様書にトランジスタコンパクトモデル種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	コンパクトモデルに BSIM3 を使用したモデルと MOS3 を使用したモデルを用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	MOS FET 回路	6.1.3 参照
1-4		モデル仕様書に S-parameter 形式モデルの周波数範囲の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	S-parameter 形式モデルの周波数範囲が広帯域のモデルと狭帯域のモデルを用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	MOS FET 回路	6.1.4 参照
1-5		モデル仕様書に使用する回路シミュレータの種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	異なる回路シミュレータでシミュレーションを実施し、結果の差異を確認する。	MOS FET 回路	6.1.5 参照

表2—実証実験シナリオ（続き）

シナリオ No.	シミュレーションプロセス	想定シナリオ	想定リスク	実証実験内容	題材	実証実験結果
1-6		モデル仕様書に使用する回路シミュレータのバージョン情報の記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	シミュレータのバージョン依存により、サポートしている/していないモデル形式を用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	IGBT回路	6.1.6 参照
1-7		モデル仕様書にモデル容量特性有無の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	IGBT モデルの容量特性を実測と合わせ込んだモデルと合わせ込んでいないモデルを用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	IGBT回路	6.1.7 参照
1-8		モデル仕様書に前提条件（ゲートドライバ抵抗有無）の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、スイッチング特定の判断を誤る。	テストベンチ回路にゲートドライバのゲート抵抗がある場合とない場合を用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	IGBT回路	6.1.8 参照
1-9		モデル仕様書に寄生インダクタンスモデルの種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	IGBT のリードフレーム+バスバーのモデルに対して、理想インダクタンスモデルと電磁界シミュレータで求めた S-parameter 形式モデルを用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	IGBT回路	6.1.9 参照
1-10		モデル仕様に負荷インダクタンスモデルの種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	モータコイル+ケーブルのモデルに対して、理想インダクタンスモデルと電磁界シミュレータで求めた S-parameter 形式モデルを用意し、回路シミュレーション結果の差異を確認する。	IGBT回路	6.1.10 参照
2-1	プロセス2 解析設定条件	モデル使用者が電磁界シミュレータのメッシュ数の設定を誤る。	適切なシミュレーション条件を設定できず、モデル作成者のシミュレーション結果が再現できない。	電磁界シミュレータのメッシュ数を変えて S-parameter 形式モデルを生成し、回路シミュレーションでモデル特性の差異を確認する。	MOS FET回路	6.2.1 参照
2-2		モデル使用者が電磁界シミュレータの解析領域の設定を誤る。	適切なシミュレーション条件を設定できず、モデル作成者のシミュレーション結果が再現できない。	電磁界シミュレータの解析領域を変えて S-parameter 形式モデルを生成し、回路シミュレーションでモデル特性の差異を確認する。	MOS FET回路	6.2.2 参照
2-3		モデル使用者が電磁界シミュレータの解析周波数範囲の設定を誤る。	適切なシミュレーション条件を設定できず、ノイズ特性の判断を誤る。	電磁界シミュレータの解析周波数範囲を変えて S-parameter 形式モデルを生成し、回路シミュレーションでモデル特性の差異を確認する。	MOS FET回路	6.2.3 参照
2-4		モデル使用者が異なる種類の電磁界シミュレータを使用する。	同等の結果を得るためのシミュレーション条件を設定できず、シミュレータの種類でシミュレーション結果が異なる。	異なる電磁界シミュレータで生成した基板 S-parameter 形式モデルを用意し、回路シミュレーション結果モデル特性の差異を確認する。	MOS FET回路	6.2.4 参照
3-1	プロセス3 解析結果考察	モデル仕様書に解析結果の波形評価方法の情報記載がない。	シミュレーション結果を適切に考察できない。	シミュレーション結果分析時の FFT の Time Span と Window Function の設定を変更して、結果の差異を確認する。	MOS FET回路	6.3.1 参照

6 結果

6.1 想定シナリオから分かったモデル要件①—設計情報に基づくモデル選定

6.1.1 モデルの使用用途が不明確

(シナリオ：No.1-1, 題材：集積回路)

実証実験の結果、今回の基本動作検証及びノイズ検証の使用用途には、複雑なマイコンモデルは必要なく、容量1個のマイコンモデルで十分な検証結果が得られることが分かった。使用用途の認識合わせ有無による提供モデルの違いの例を図5に示す。モデル選定・モデル授受の際に十分な使用用途の認識合わせが行われない場合、必要以上に複雑なモデルが提供されやすい。モデル作成者は、モデル使用者の潜在的ニーズを推測し、広範囲に満たそうとするためである。反対に、認識ずれによりモデル使用者が必要とする機能特性が不足することも懸念される。そのため、モデル仕様書には、作成したモデルの使用用途を明示する必要がある。また、モデル使用者は、モデル作成依頼時の認識ずれを防止し、使用用途や必要とする機能特性を的確にモデル作成者へ伝えるため、今後、モデルの要求仕様書を整備する必要があることが分かった。

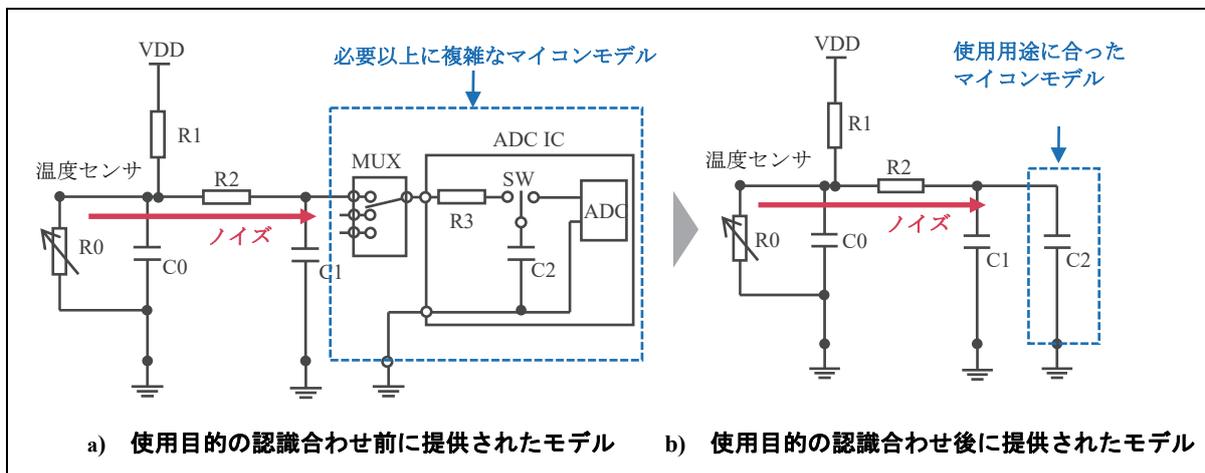


図5—使用用途の認識合わせの有無による提供モデルの違い

6.1.2 モデル仕様書に端子リード成分有無の情報記載がない

(シナリオ：No.1-2, 題材：MOSFET スイッチング回路)

MOSFET モデル内に、MOSFET デバイスのパッケージのリードに相当するインダクタンス成分が含まれる場合と含まれない場合で、過渡解析結果に差異が見られた(図6参照)。モデル内のリード成分の有無が、評価回路のインダクタンスの増減につながり、反共振の周波数が変動する。リードのインダクタンス成分がない場合(図6 中青線)、反共振の周波数は高くなる。シミュレーションを行う上で、モデル仕様書にデバイスのパッケージのリード成分が含まれているか否かの情報の記載が必要である。

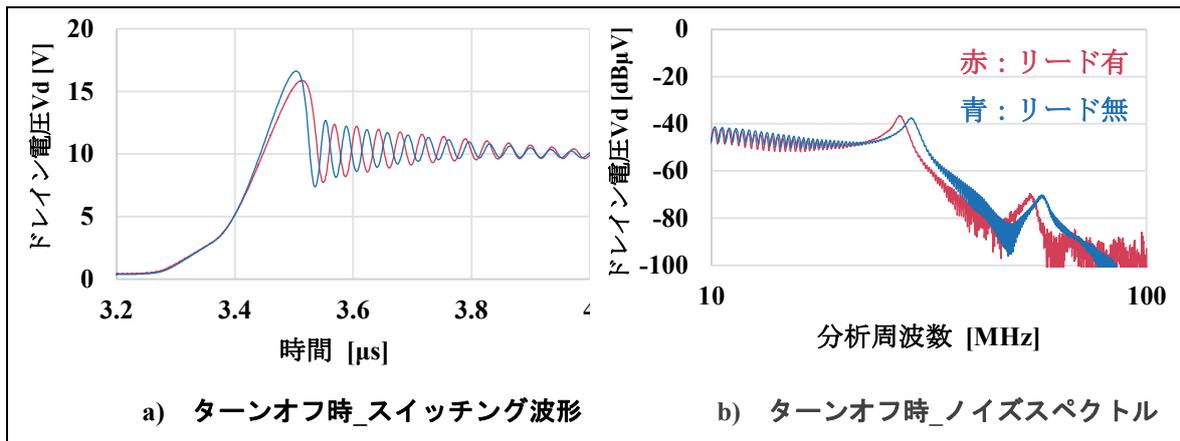


図 6—端子リード成分有無によるシミュレーション結果

6.1.3 モデル仕様書にトランジスタコンパクトモデル種類の情報記載がない

(シナリオ：No.1-3, 題材：MOSFET スイッチング回路)

トランジスタのコンパクトモデルに BSIM3 を使用したモデルと MOS3 を使用したモデルでは、シミュレーション結果に差異が見られた (図 7 参照)。トランジスタのコンパクトモデル精度の違いによりターンオフ後のスイッチング波形に差異が生じる。今回の差は、MOS3 モデルは ON 抵抗を低くモデル化されていたため生じた。静特性の違いが動特性の結果の違いとなって現れており、モデル仕様書には、使用するコンパクトモデルの種類の情報、及びシミュレーション目的に対して十分な精度をもっているか確認できる情報 (実測相関 (対実測及び/又は対データシート値)) の記載が必要である。

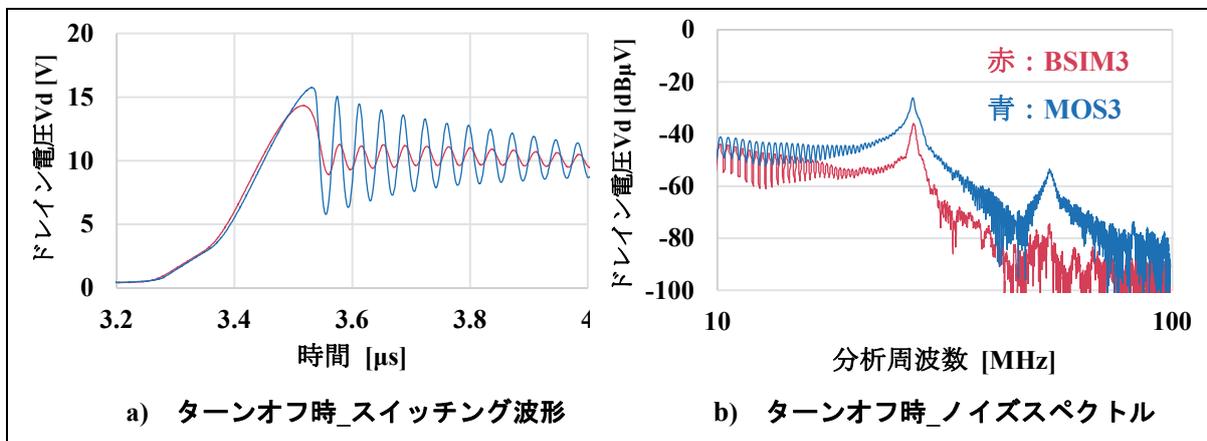


図 7—トランジスタコンパクトモデル違いによるシミュレーション結果

6.1.4 モデル仕様書に S-parameter 形式モデルの周波数範囲の情報記載がない

(シナリオ：No.1-4, 題材：MOSFET スイッチング回路)

周波数範囲の異なる S-parameter 形式モデルではシミュレーション結果に差異が見られた (図 8 参照)。帯域が狭い (図 8 中赤線) と高周波成分が欠落するため、リングングが小さい。電子デバイスモデルに S-parameter 形式モデルを使用する際は、モデル仕様書にモデル形式及びその周波数範囲の情報が必要である。さらに、電子デバイスモデルを S-parameter 形式モデルにすることで DC レベルが正しく取れない場合があることに注意が必要であることが分かった。

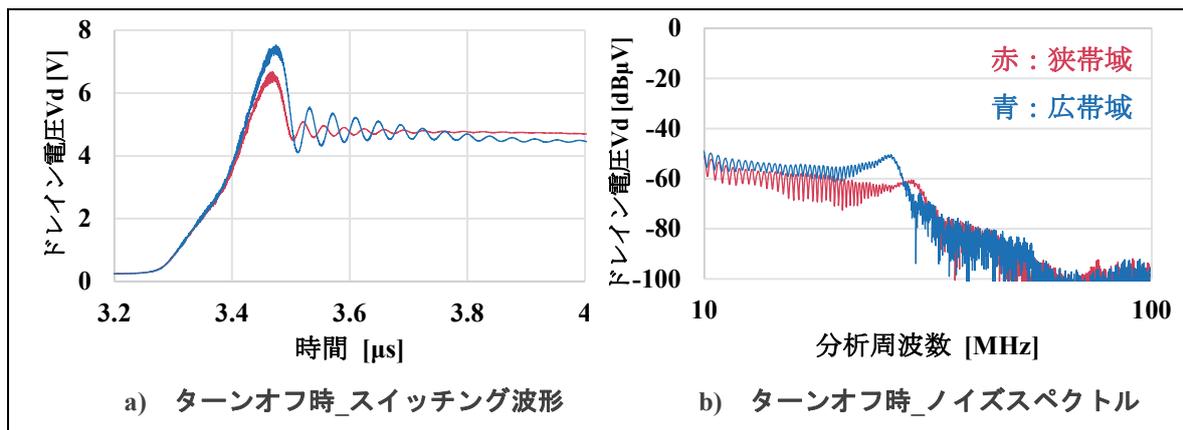


図 8—周波数範囲の異なる S-parameter 形式モデル使用時のシミュレーション結果

6.1.5 モデル仕様書に使用する回路シミュレータの種類の情報記載がない

(シナリオ：No.1-5, 題材：MOSFET スwitching回路)

同一の回路に対して、同様の解析条件を設定しても、使用する回路シミュレータによってデフォルト設定が異なるため、結果に差異が見られた (図 9 参照)。モデル使用者はツールによって結果が変わることを理解して使用する必要がある。また、モデル仕様書には、モデル特性として回路シミュレーション結果を記載する際に、検証に用いたツールのバージョン、及びその設定条件も明示する必要がある。

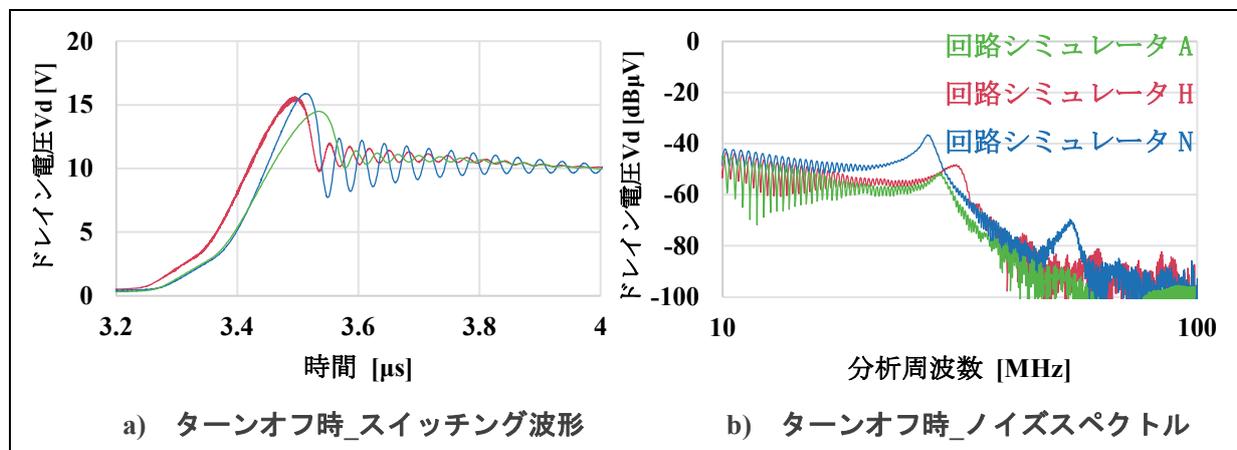


図 9—回路シミュレータを変更したシミュレーション結果

6.1.6 モデル仕様書に使用する回路シミュレータのバージョン情報の記載がない

(シナリオ：No.1-6, 題材：IGBT ダブルパルス回路)

シミュレータのバージョン依存により、サポートしている/していないモデル形式を用意した結果、シミュレーション結果に差異が見られた (図 10 参照)。モデルが対応していないツールバージョン (図 10 中赤線) で解析すると、モデルパラメータの算出式違いにより特性が変化しリング周波数に影響を及ぼした。モデル仕様書には、モデル特性としてシミュレーション結果を記載する際に、検証に用いたツールのバージョンを併記する必要がある。

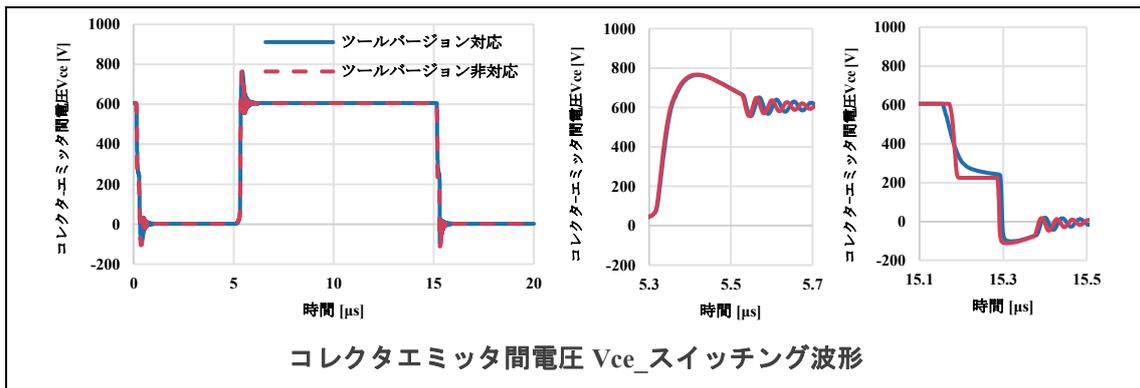


図 10—異なるシミュレータバージョンによるシミュレーション結果

6.1.7 モデル仕様書にモデル容量特性有無の情報記載がない
(シナリオ : No.1-7, 題材 : IGBT ダブルパルス回路)

IGBT モデルにおいて、容量特性を合わせ込んだモデルと合わせ込んでいないモデルとではシミュレーション結果に差異が見られた (図 11 参照)。容量特性をフィッティングしたモデル (図 11 中青線) ではリングングが表現できているが、容量特性をフィッティングしていないモデル (図 11 中赤線) ではリングングが発生していない。さらに、オン/オフ時のスルーレートが変化するため、損失計算結果が大きく変化することが確認できる。モデル仕様書には、モデル化対象の容量特性、及び実測相関 (対実測及び/又は対データシート値) に容量特性の再現有無を記載する必要がある。

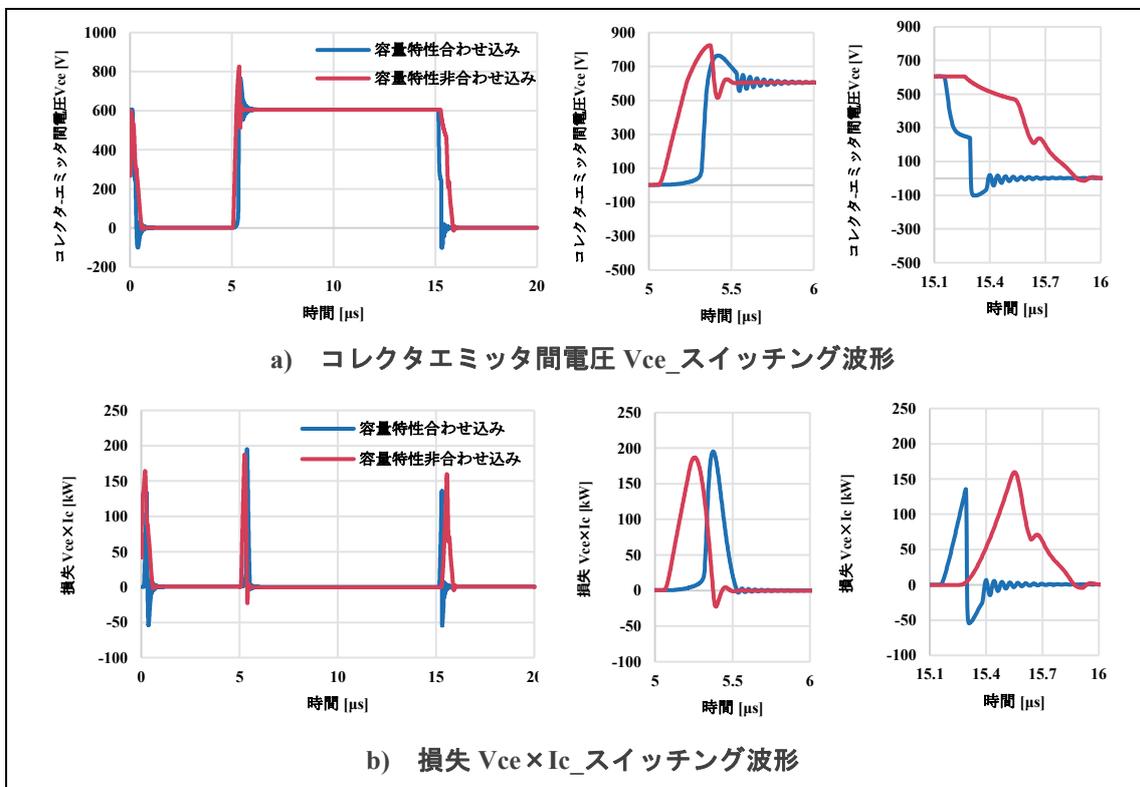


図 11—容量特性の合わせ込み有無によるシミュレーション結果

6.1.8 モデル仕様書に前提条件（ゲートドライバ抵抗有無）の情報記載がない
（シナリオ：No.1-8，題材：IGBT ダブルパルス回路）

テストベンチ回路にゲートドライバ抵抗がある場合とない場合では立ち上がり時間に 110ns の差があり、シミュレーション結果に差異が見られた（図 12 参照）。これは、ゲートドライバ抵抗を付けず、ゲート端子に理想電源を直付けした場合、CR による信号遅延が発生せずに IGBT が ON/OFF する。このため、出力波形の立ち上がり/立ち下がりの遅延時間に大きく影響することになる。ゲートドライバの抵抗値はスイッチング特性を決める重要な要素であり、モデル仕様書には、モデルの前提条件となる、検証用テストベンチ回路図及びゲートドライバの抵抗値の情報を記載する必要がある。

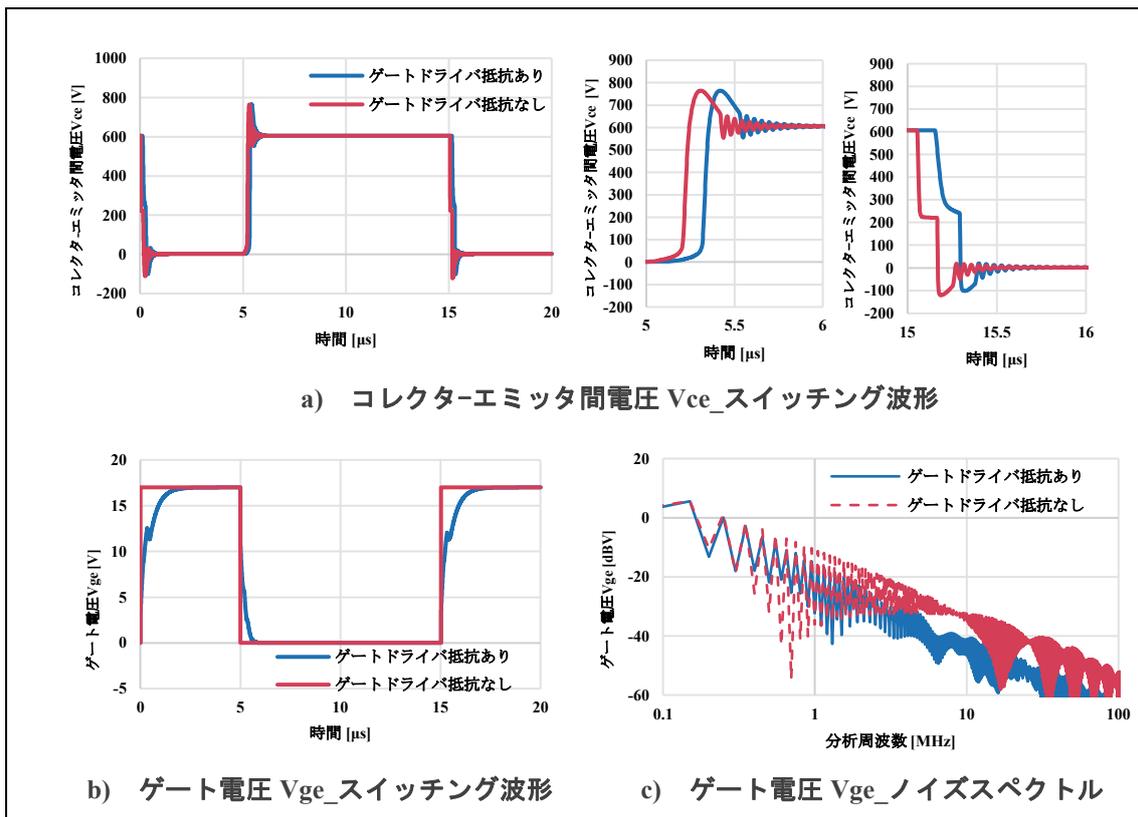


図 12—前提条件（ゲートドライバ抵抗）の有無によるシミュレーション結果

6.1.9 モデル仕様書に寄生インダクタンスモデルの種類の情報記載がない
（シナリオ：No.1-9，題材：IGBT ダブルパルス回路）

IGBT のリードフレーム+バスバーの寄生インダクタンスモデルを理想定数から高周波数特性をもつ S-parameter 形式モデルに変更するとシミュレーション結果に差異が見られた（図 13 参照）。構造形状に起因する寄生成分が付加されることで周波数特性が変化する。ベアチップを用いる場合は、モデル使用者が使用するリードフレーム構造に起因した周波数特性の影響が現れることに注意する必要がある。モデル仕様書には、モデル形式及び実測関連（対実測及び/又は対データシート値）の記載が必要である。

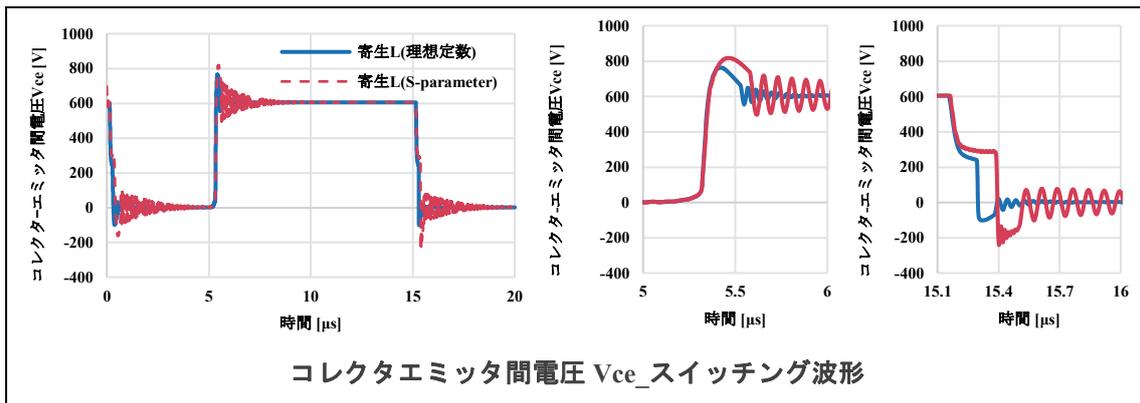


図 13—寄生インダクタンスモデルの差異シミュレーション結果

6.1.10 モデル仕様書に負荷インダクタンスモデルの種類の情報記載がない
(シナリオ：No.1-10, 題材：IGBT ダブルパルス回路)

モータコイル+ケーブルの負荷インダクタンスモデルを理想定数から実測 S-parameter 形式モデルに変更すると、リングング周波数に変化が見られた (図 14 参照)。スイッチング後のリングング波形の傾向に違いがみられる。

時間軸波形の傾向を分析する際には、波形分析に必要な詳細度に応じて負荷モデルの粒度 (理想定数, S-parameter 形式など) を選定する必要があることが分かった。モデル仕様書には、モデル形式及び実測相関 (対実測及び/又は対データシート値) の記載が必要である。

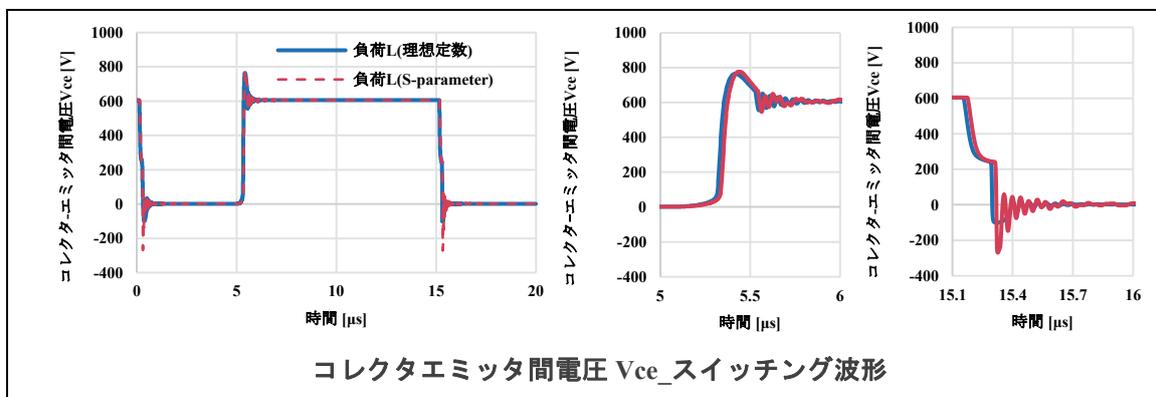


図 14—負荷インダクタンスモデルの差異によるシミュレーション結果

6.2 想定シナリオから分かったモデル要件②—解析設定条件

6.2.1 モデル使用者が電磁界シミュレータのメッシュ数の設定を誤る
(シナリオ：No.2-1, 題材：MOSFET スイッチング回路)

電磁界シミュレータのメッシュ数をデフォルト設定から-15%及び+20%に変更して生成した S-parameter 形式モデルを回路シミュレーションで特性を確認した結果、結果の差異は見られなかった (図 15 参照)。メッシュ数で差が出ないようにツールで最適化等の工夫がなされていると考えられる。これにより、本題材の基板モデルに関しては、モデル使用者は電磁界シミュレータのメッシュ数については厳密な注意を払わなくてもよいことが分かった。なお、本シナリオからモデル仕様書に反映すべき事柄は特になかった。

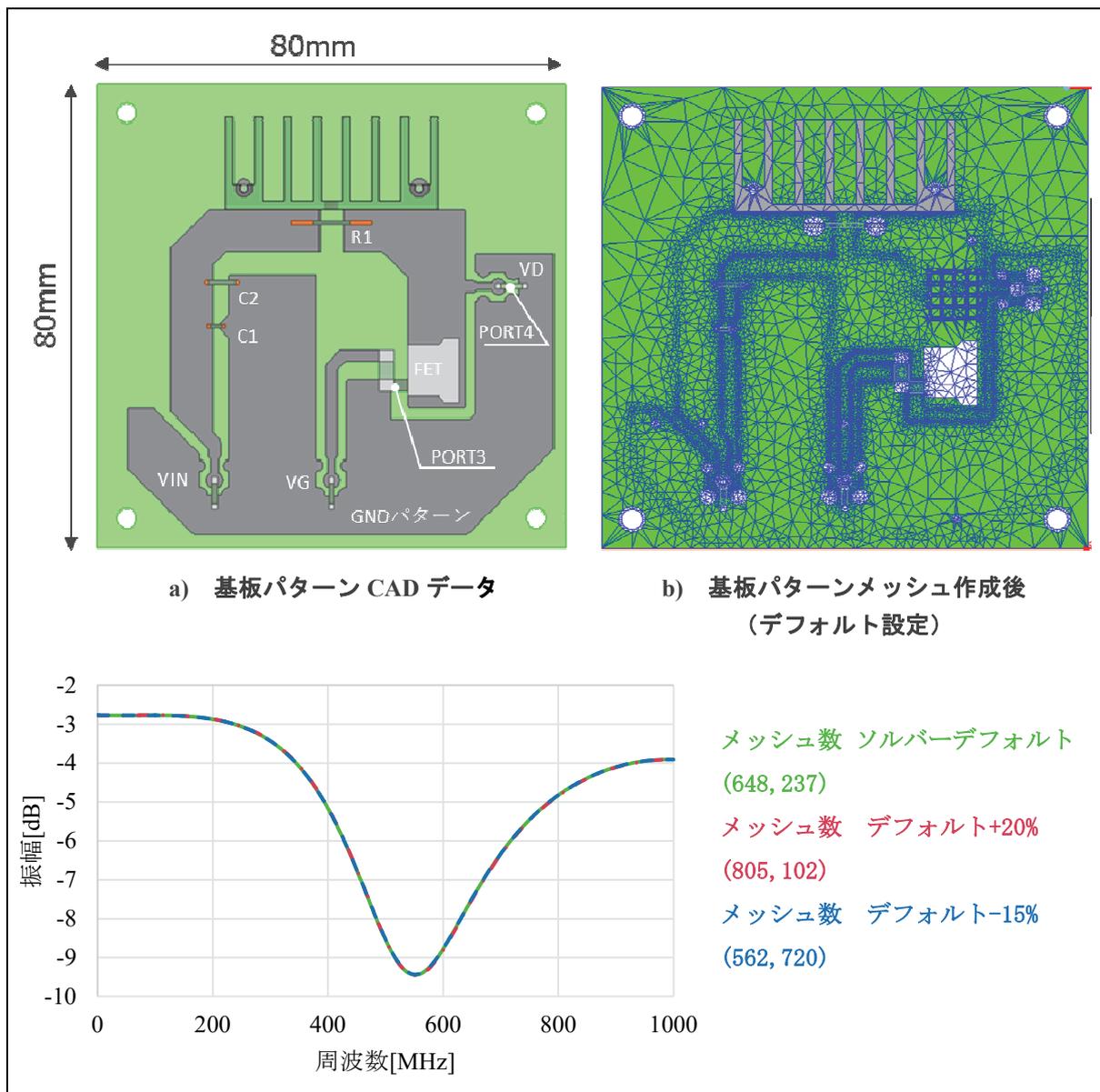


図 15—電磁界モデルメッシュ数を変更した場合のシミュレーション結果 (伝達特性 S34)

6.2.2 モデル使用者が電磁界シミュレータの解析領域の設定を誤る

(シナリオ : No.2-2, 題材 : MOSFET スイッチング回路)

今回の検証に用いたシミュレータの場合、ツールベンダ推奨の解析領域は、解析最大周波数の $\lambda/4$ 以上 (1GHz の場合 $\lambda/4=75\text{mm}$) であった。推奨値に基づき $\lambda/4$ 以上解析領域を確保している解析条件 $\pm 100\text{mm}$ 及び $\pm 1000\text{mm}$ 時では同等の結果が得られることが確認できた (図 16 参照)。解析領域の推奨値はシミュレータの解法や境界条件によって変化するため、モデル使用者は使用する電磁界シミュレータと解析対象に応じた適切な解析領域を確保する必要があることが分かった。なお、本件は電磁界シミュレータの使用方法に関する注意事項のため、本シナリオからモデル仕様書に反映すべき事柄は特になかった。

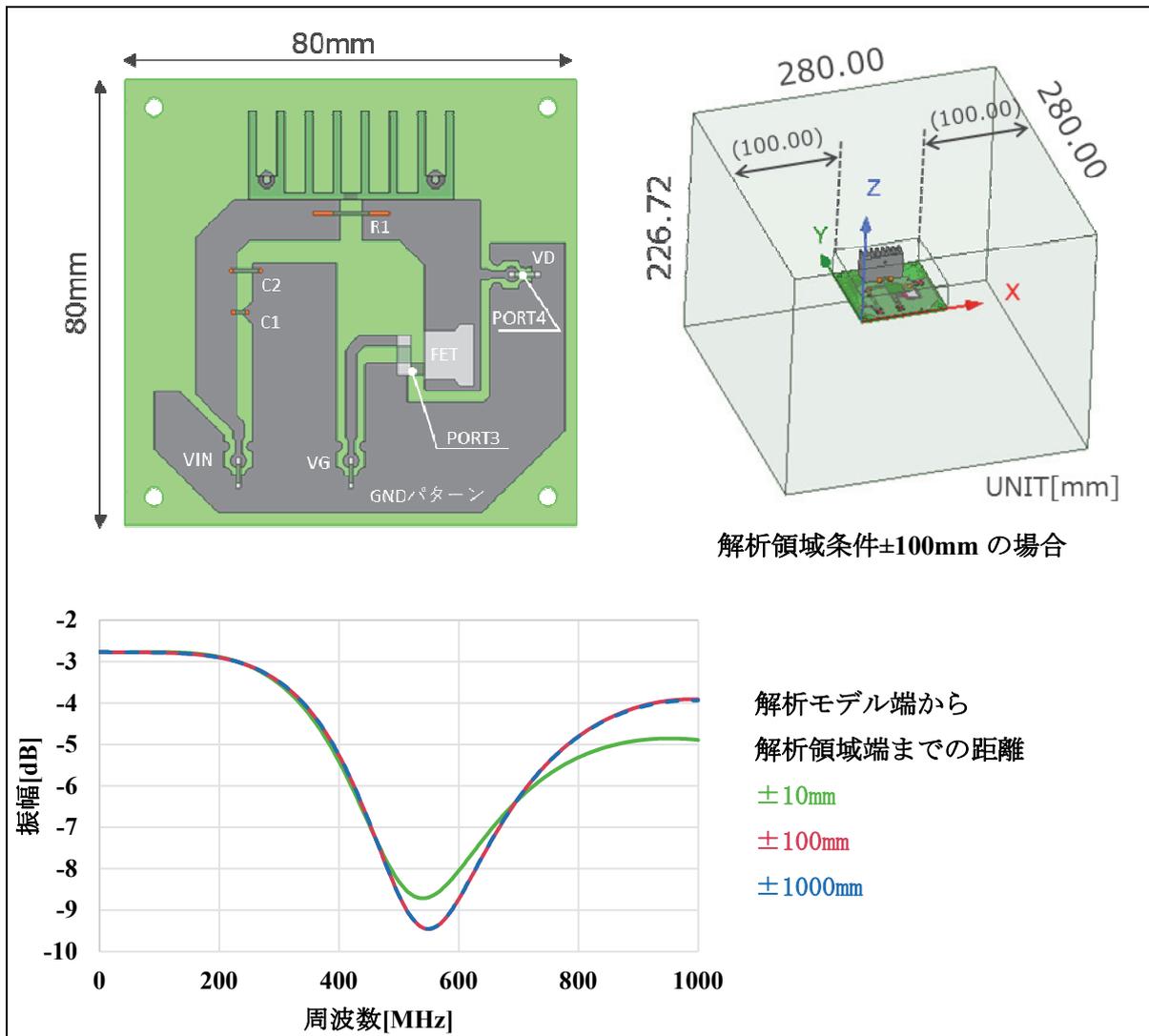


図 16—電磁界モデル解析領域を変更した場合のシミュレーション結果（伝達特性 S34）

6.2.3 モデル使用者が電磁界シミュレータの解析周波数範囲の設定を誤る (シナリオ：No.2-3、題材：MOSFET スイッチング回路)

電磁界シミュレータの解析周波数を広帯域と狭帯域でそれぞれ解析して取得した S-parameter 形式モデルを用いて回路シミュレーションを行ったところ、結果に差異が見られた。狭帯域の S-parameter 形式モデルは過渡波形でリングングが小さくなる。狭帯域の S-parameter 形式モデルは高周波成分が抜け落ちたためと考えられる。結果を図 17 に示す。

これにより、モデル使用者は電磁界シミュレータの解析周波数範囲に注意を払う必要があることが分かった。具体的には、周波数分析結果に含めたい周波数成分に必要な周波数範囲の目安として Knee 周波数 $f_{knee} = 0.5/T_r$ を用いるとよい。ここで、 T_r は電圧時間軸波形の立ち上がり時間であり、電圧変化の 10～90%にかかる時間を表す。なお、本件は電磁界シミュレータの使用方法に関する注意事項のため、本シナリオからモデル仕様書に反映すべき事柄は特になかった。

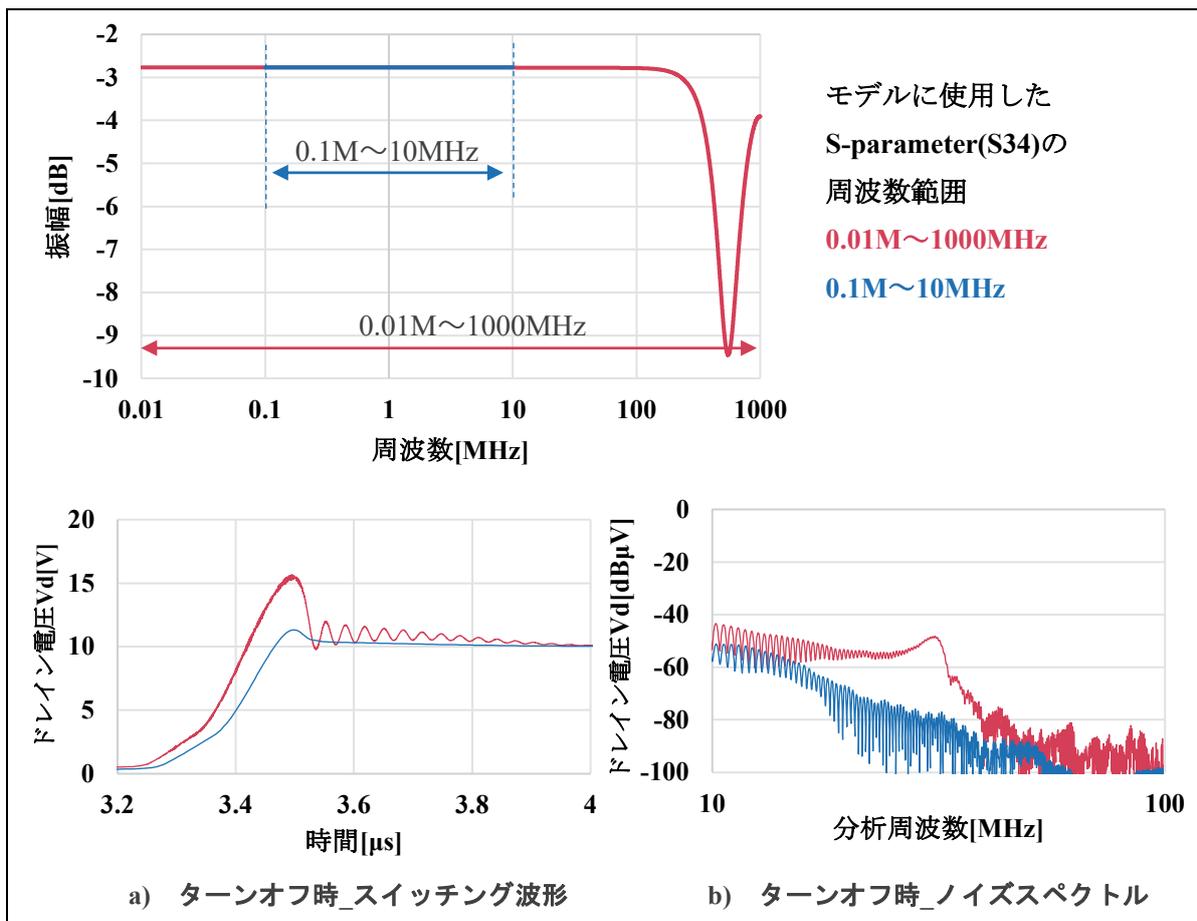


図 17—電磁界モデル解析周波数範囲を変更したシミュレーション結果

6.2.4 モデル使用者が異なる種類の電磁界シミュレータを使用する (シナリオ : No.2-4, 題材 : MOSFET スイッチング回路)

同じ CAD データ・3D 構造の情報を使用した場合でも、電磁界シミュレータを変更するとシミュレーション結果に差異が見られた (図 18 参照)。各シミュレータのデフォルト設定は、解析時間と解析精度のバランスが異なるために必ずしも同じ結果にはならないと考えられる。モデル使用者はツールによって結果が変わることを理解して使用する必要がある。また、シミュレーション結果を他者と共有する際には、検証に用いたツール名及びバージョンを明示する必要があることが分かった。なお、本件は電磁界シミュレータの使用方法に関する注意事項のため、本シナリオからモデル仕様書に反映すべき事柄は特になかった。

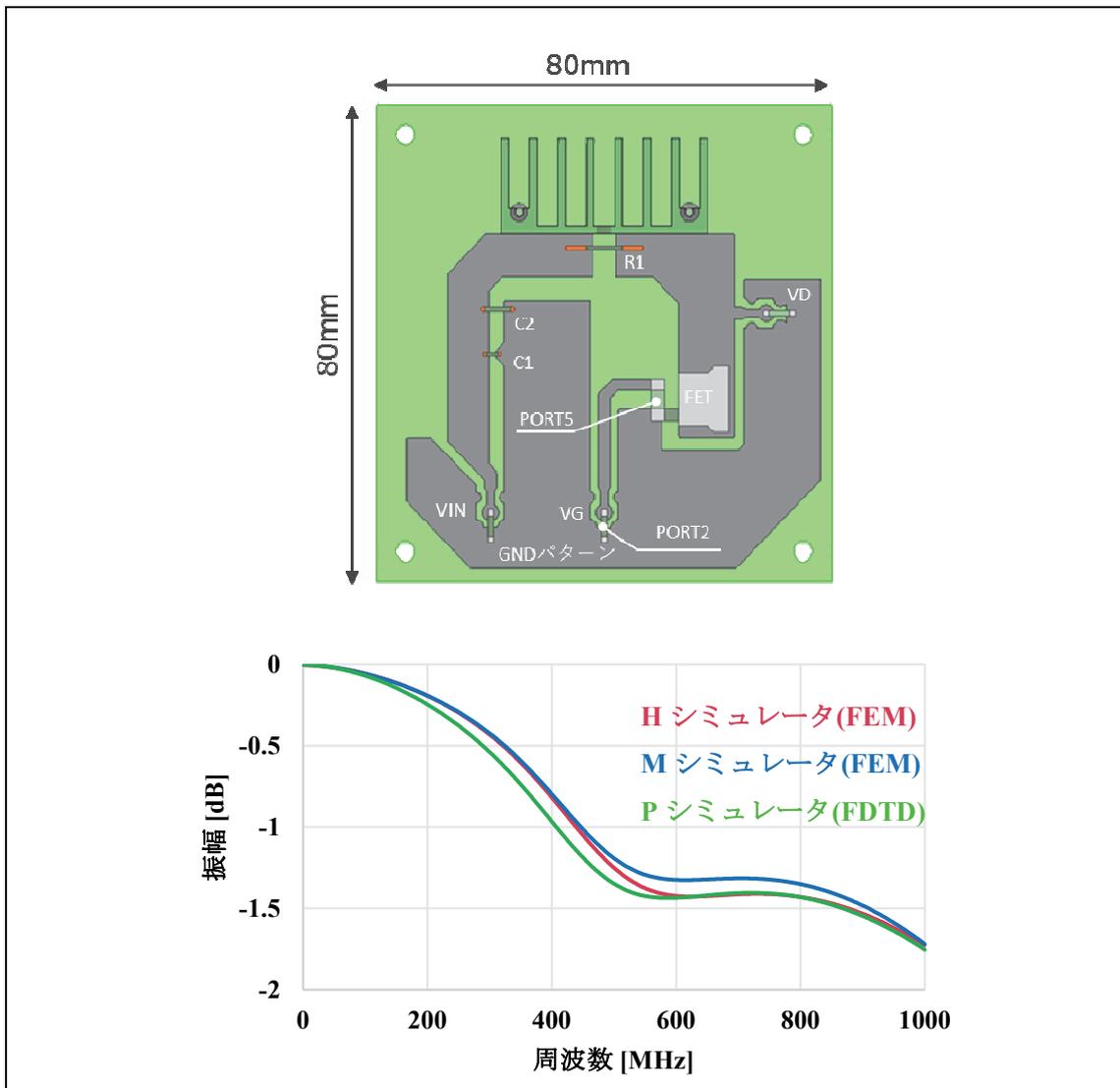


図 18—電磁界シミュレータを変更したシミュレーション結果（伝達特性 S22）

6.3 想定シナリオから分かったモデル要件③—解析結果考察

6.3.1 モデル仕様書に解析結果の波形確認方法の情報がない

（シナリオ：No.3-1、題材：MOSFET スイッチング回路）

シミュレーション結果を分析する際、解析結果の波形確認方法に対する情報がない場合、モデル使用者により FFT の条件設定が異なり結果評価に差異が生じることが分かった。FFT に用いる時間波形の Time Span を $40\mu\text{s}$ とした場合と $5\mu\text{s}$ とした場合を比較した（図 19 a）参照）。FFT 結果（図 19 b）参照）を比較すると、10dB 程度の差が生じていることが確認できる。さらに、FFT を実行する際の Window Function を変更した場合の結果を比較した（図 19 c）、（図 19 d）参照）。FFT 結果に 10dB 程度のレベル差が生じるとともに、ノイズレベルの変動状態が異なる結果が確認でき、FFT は条件設定により分析周波数スペクトルのレベルが変化することが分かる。モデル仕様書の実測相関（対実測及び/又は対データシート値）には、FFT の分析に用いた Time Span と Window Function を記載する必要がある。

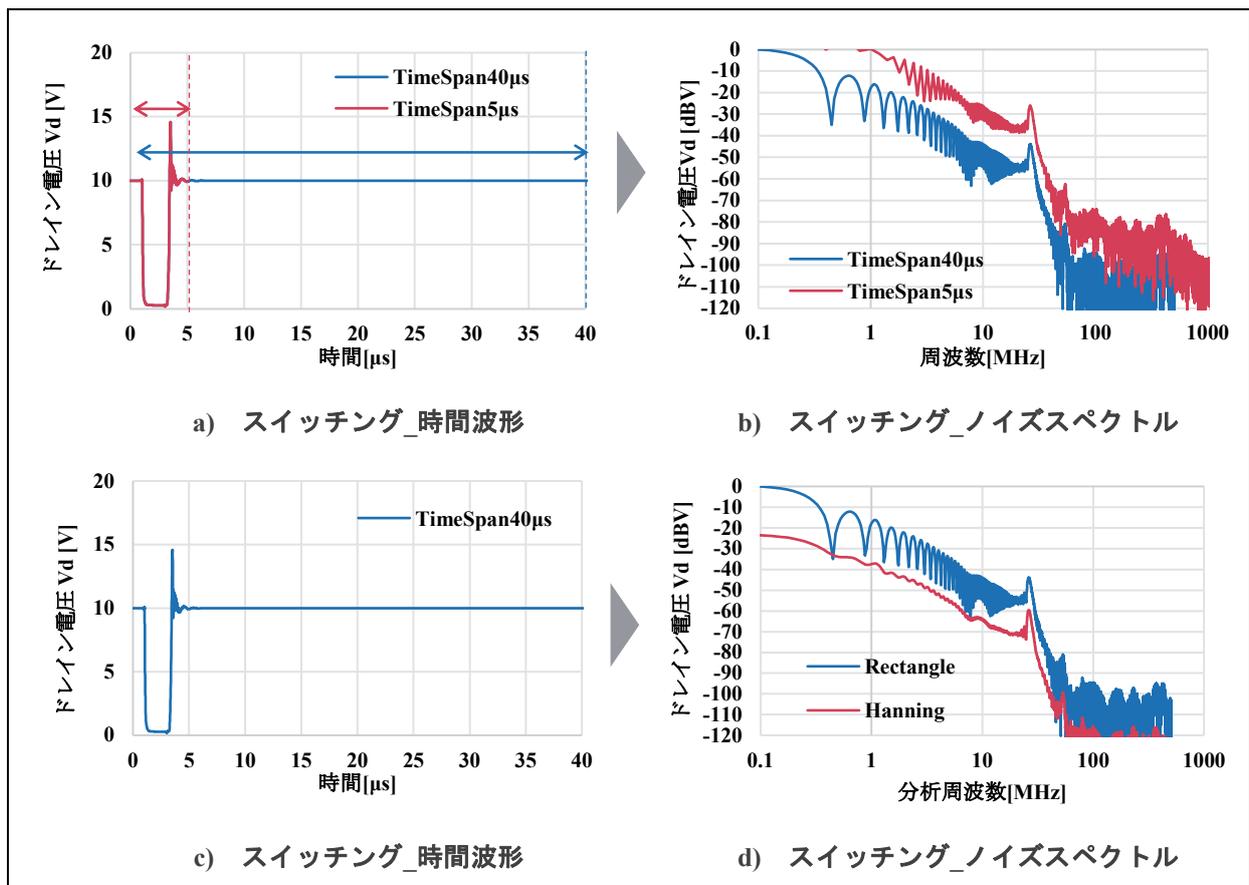


図 19—回路シミュレーション結果分析における FFT の設定条件

6.4 想定外シナリオから分かったモデル要件

今回の実証実験を通じ、想定したシナリオ・リスク以外の要因でシミュレーション結果に差異が生じた事例がある。それらのシナリオ・リスクから分かったモデル要件を示す。

6.4.1 モデル仕様書に等価回路に寄生成分の記載がない

(題材：MOSFET スイッチング回路)

モデル使用者が電子デバイスモデルを用いる場合、モデルの等価回路図に寄生成分が記載されているとモデルの周波数特性に対する理解が深まる。モデル使用者が電子デバイスモデルの仕様を理解できるように、モデル仕様書には、電子デバイスモデルの等価回路図が記載されることが望ましい (図 20 参照)。

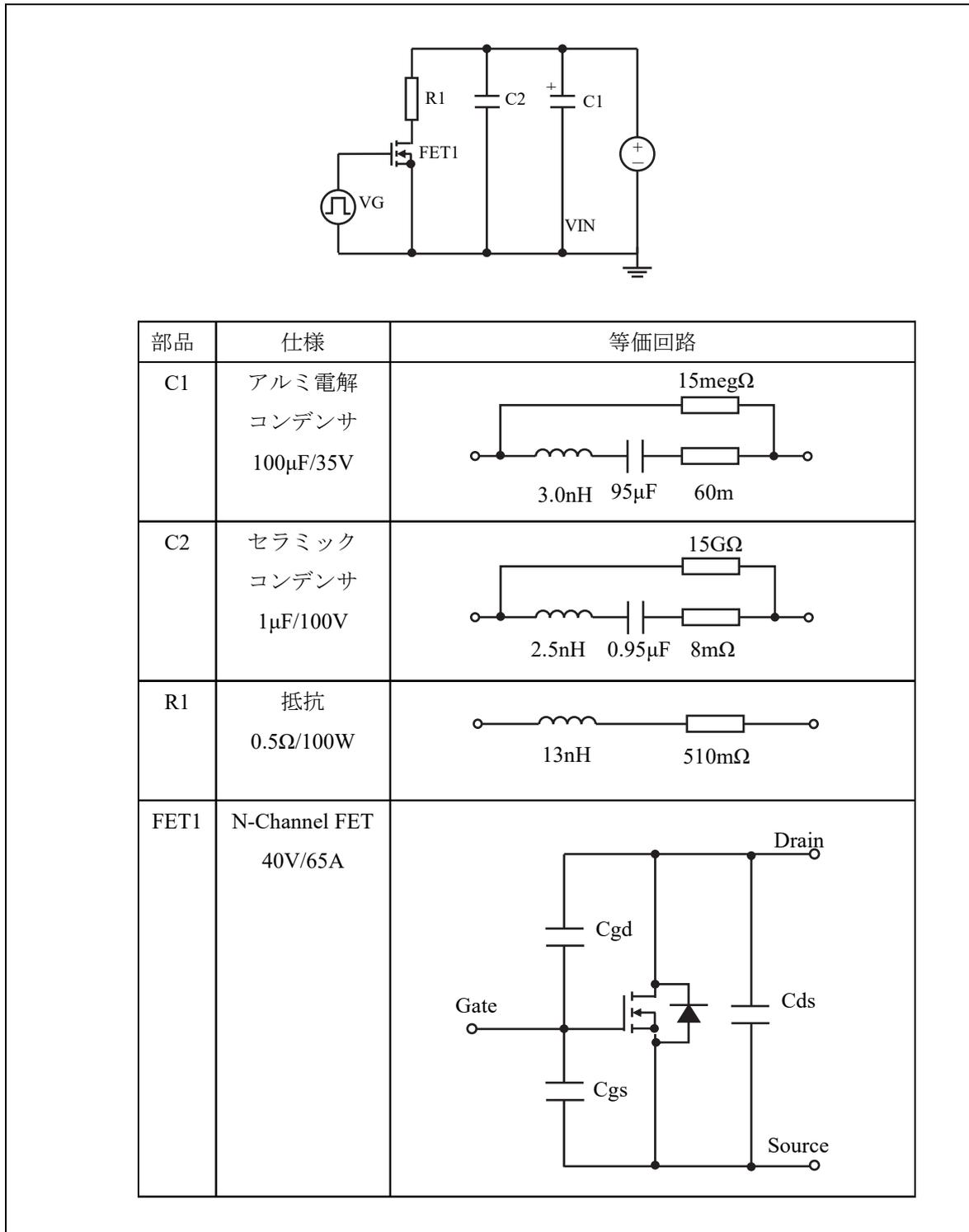


図 20—電子デバイスモデルの等価回路表現例

6.4.2 モデル仕様書に実測結果観測位置の記載がない

(題材：MOSFET スイッチング回路)

実証実験では、シミュレーション結果を実測と対比させる場合、回路図とプローブ位置情報だけでは計測位置を誤ってしまい、シミュレーションと実測で齟齬が生じることがあった。モデル仕様書には、検証用テストベンチの情報として、基板の計測位置を対応付けた回路図を記載しておくことが望ましい(図 21 参照)。

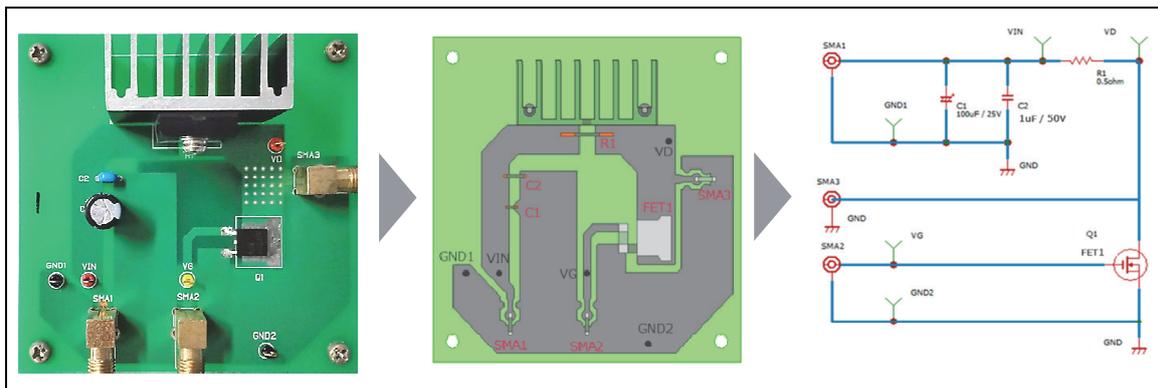


図 21—基板の計測位置及び等価回路表現例

6.4.3 モデル仕様書に入力信号の仕様情報がない

(題材：MOSFET スイッチング回路)

実証実験では、回路シミュレーションを実施する際、入力信号波形の詳細仕様の情報がないため、モデル使用者が正しい設定でシミュレーションを実施できないことがあった。モデル使用者の解析条件設定間違いを防止するために、モデル仕様書の検証用テストベンチの情報には、入力信号の波形仕様が記載されている必要があることが分かった(図 22 参照)。

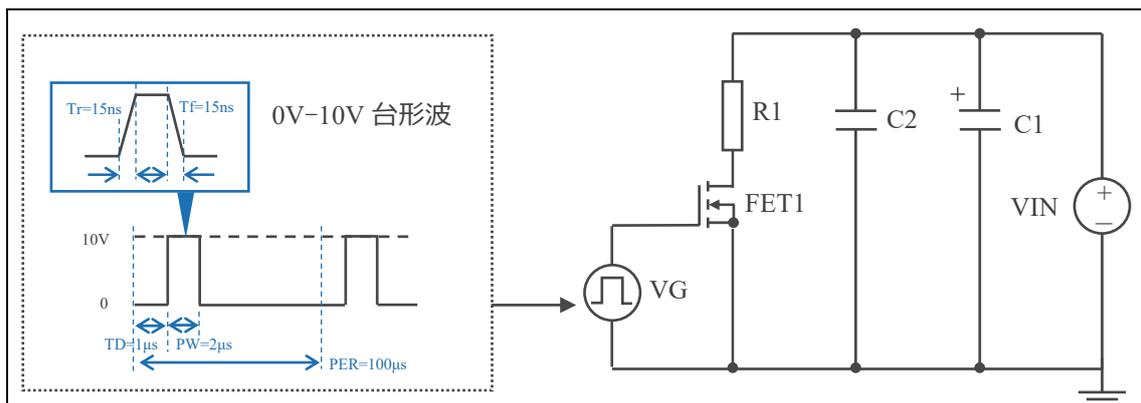


図 22—入力信号波形仕様の表現例

6.5 実証実験から得られたシミュレーション実施時の留意事項(参考)

今回の実証実験を通じ、想定したシナリオ・リスク以外の要因でシミュレーション結果に差異が生じた事例がある。今後仮想設計を行う上で留意すべき事柄として、得られた知見を記載する。

6.5.1 基板の実装部品の配置及び寸法の情報について

(題材：MOSFET スイッチング回路)

基板モデル抽出のための電磁界シミュレーションを実施する際、実装部品表や CAD データの部品情報に加えて、部品の配置位置及び構造寸法に関する情報を用いて実装部品を正確に構成することが必要であることが分かった。このため、電磁界シミュレーション用の CAD データを他者と共有する場合は、基板の設計情報を忠実に反映できるように、実装部品の配置及び寸法の情報を明示する必要があることが分かった (図 23 参照)。

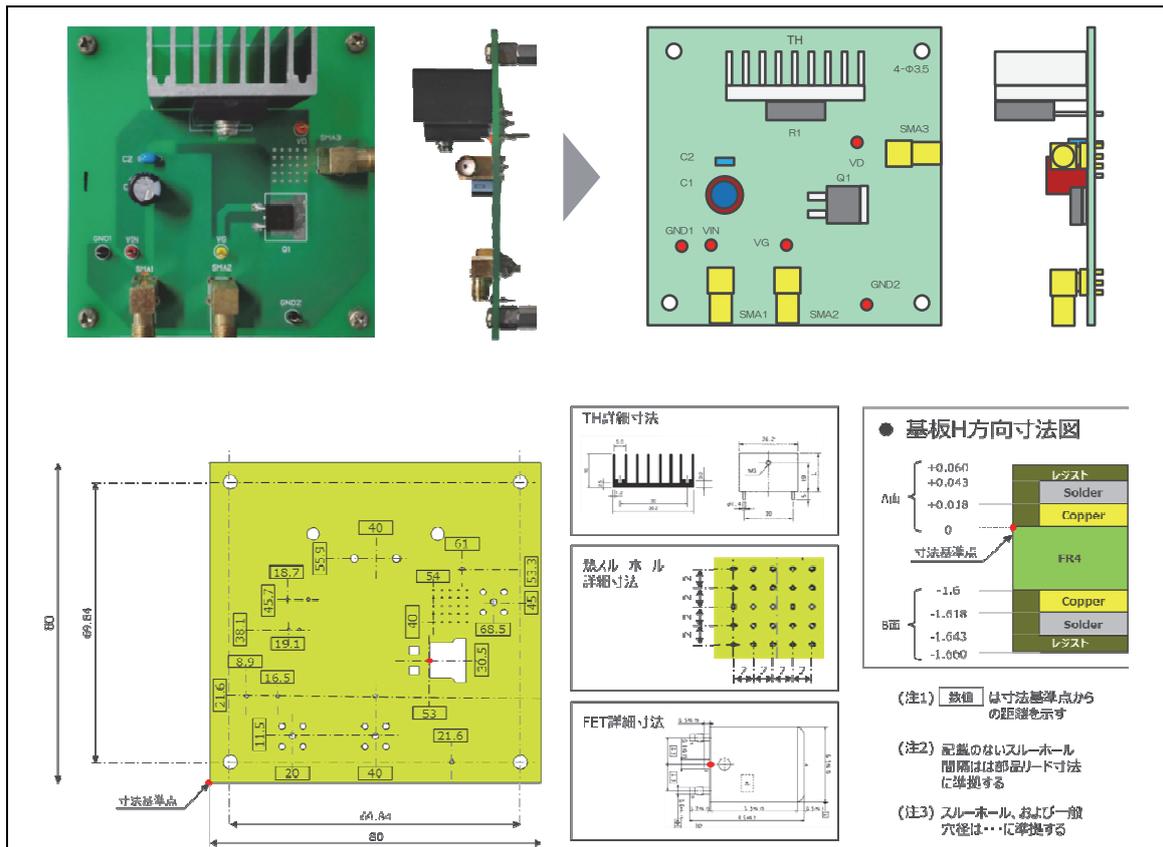


図 23—基板の実装部品配置及び寸法の表現例

6.5.2 基板・実装部品の物性情報

(題材：MOSFET スイッチング回路)

実証実験では、基板モデル抽出のための電磁界シミュレーションを実施する際、構成する部品の物性が明確でないため、誤った物性を定義し結果に差異が生じることがあった。このため、電磁界シミュレーション用の CAD データを他者と共有する場合は、解析に使用した各部品の物性を明記する必要があることが分かった (表 3 参照)。

表 3—電磁界シミュレーションで使用する物性の表現例

Part	Relative Permittivity	Relative Permeability	Bulk Conductivity	Dielectric Loss Tangent	Magnetic Loss Tangent	e.g.
LAND_*	1	0.999991	58,000,000	0	0	Copper
LEAD_*	1	0.999991	58,000,000	0	0	Copper
RESIST_*	3.6	1	0	0	0	Epoxy
FR4	4.4	1	0	0.02	0	FR4
HEATSINK	1	1.000021	38,000,000	0	0	Al
PIN*	1	4,000	10,300,000	0	0	Iron
PORT_*	1	1	7,000,000	0	0	Solder
SOL_*	1	1	7,000,000	0	0	Solder
TH_*	1	1	7,000,000	0	0	Solder
REGION	1	1	0	0	0	vacuum

[S/m]

6.5.3 基板 S-parameter 形式モデルのポート名の情報について

(題材：MOSFET スイッチング回路)

実証実験では、電磁界シミュレーションで基板モデル（S-parameter 形式）を抽出し、それをを用いた回路シミュレーションを実施する際、基板 S-parameter 形式モデルのポート名と電磁界シミュレーション上のポート位置の対応情報がないため、回路接続ができずシミュレーションを実施できないことがあった。このため、シミュレーション結果を他者と共有する際には、モデル使用者が間違いなくネットリストを作成できるように、基板 S-parameter 形式モデルに Port 名を明示する必要があることが分かった（図 24 参照）。

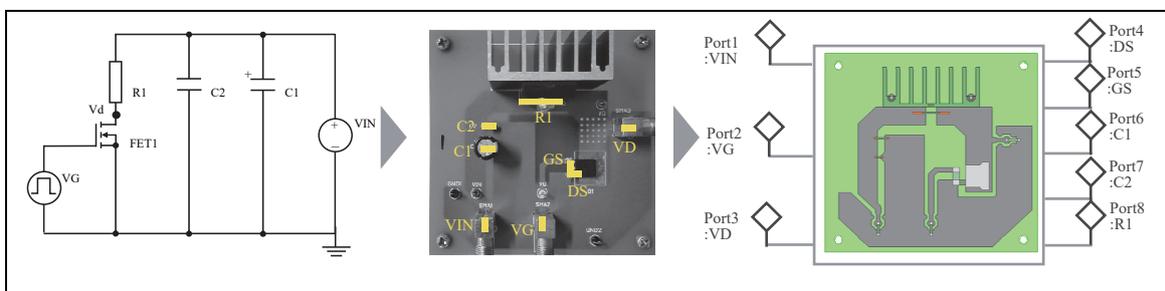


図 24—基板 S-parameter 形式モデルのポートの表現例

6.5.4 基板 S-parameter 形式モデル使用時のデバイスモデルの接続方法について

(題材：MOSFET スイッチング回路)

実証実験では、電磁界シミュレーションで基板モデル（S-parameter 形式）を抽出し、それをを用いた回路シミュレーションを実施する際、基板モデルの 1 Port に 2 端子素子の電子デバイスモデルを接続させる場合に、適切に回路接続ができずシミュレーションを実施できないことがあった。電磁界/回路シミュレーションの GND 電位の扱いについて、DC～低周波を想定した回路シミュレーションを実施する場合、GND パターンはパターン上のどの位置でも同電位であると仮定した理想 GND を採用する。一方、高周波を想定した電磁界シミュレーションを実施する場合は、パターン構造に高周波特性を変化させる寄生成分が有り、GND パターン上の 2 点間で電位差が生じる（図 25 a）、（図 25 b）参照）。このため、基準電位及び GND 電位の回路接続で問題が生じる場合がある。

基板 S-parameter 形式モデルの Port には、基準側端子-信号側端子間の電位・電流の関係が示されている。よって、回路シミュレーション上で、基板 S-parameter 形式モデルの 1 Port に 2 端子素子の電子デバイスモデルを接続させる場合は、一般的に、電子デバイスモデルの基板 S-parameter 形式モデルの Port に接続する端子の反対側の端子を基準電位に接続させる必要がある。このとき、各端子の基準電位は任意に取ることができるため、フローティングノード発生による回路シミュレーションの収束しにくさを回避するためにも、各基準電位側に理想 GND に接続させて解析を実施する（図 25 c）参照）。その場合、電子デバイスモデルは一見理想 GND 電位（ $V=0$ ）に接続されているように見えるが、実際には、基板 S-parameter 形式モデルの Port の電位差は、パターン構造による電位差及び GND 電位を基準とした電子デバイスモデルに生じる電位差を重畳した電位差が適用されることになるため、図 25 b）及び図 25 d）は等価な解析となる。

上記の知見を用いることにより、回路接続ができて適切な回路シミュレーション結果を得られることができた。

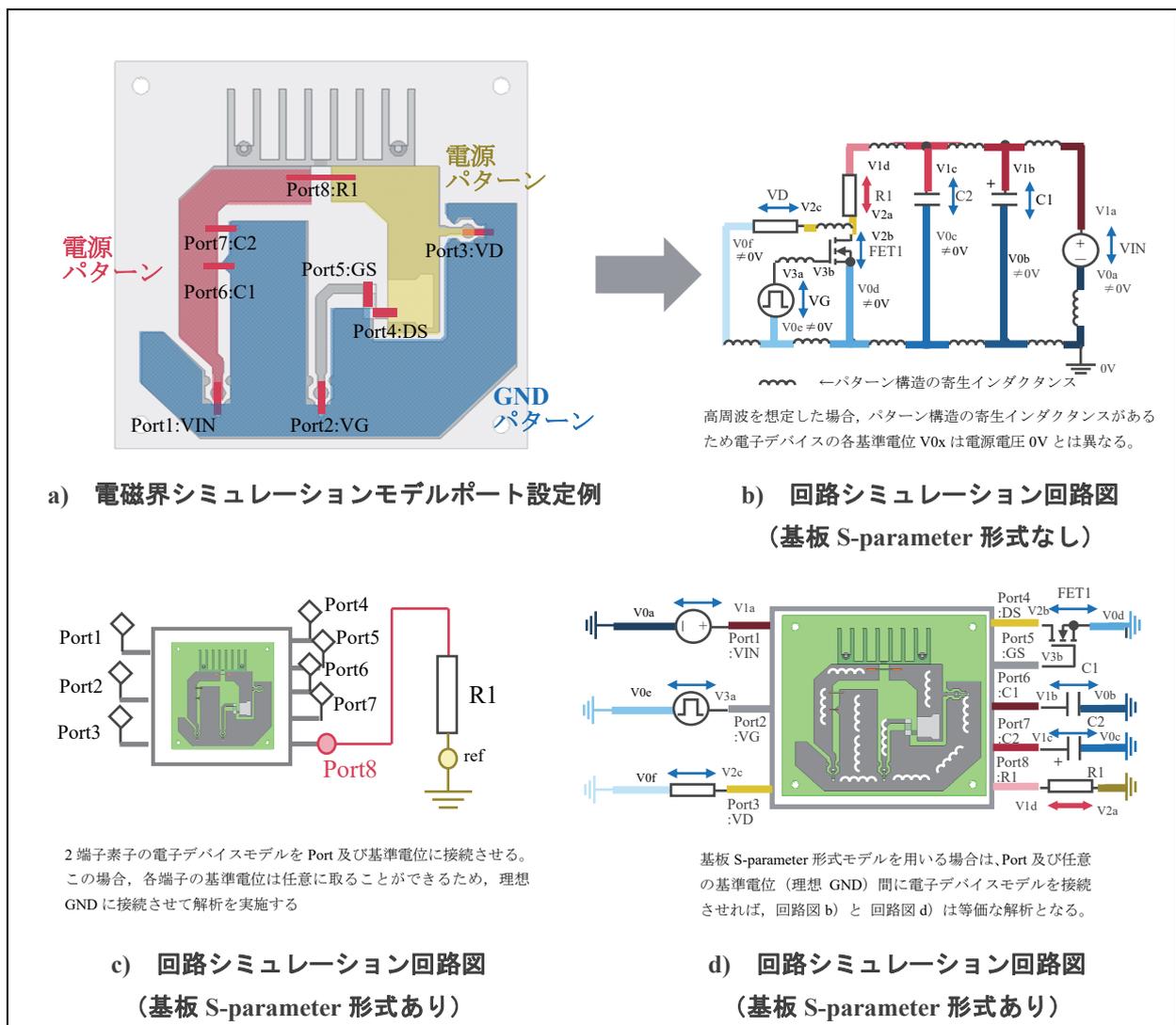


図 25—基板 S-parameter 形式モデル使用時のデバイスモデルの接続方法

6.5.5 基板の波形観測点の情報について

(題材：MOSFET スイッチング回路)

実証実験では、電磁界シミュレーションで基板モデル（S-parameter 形式）を抽出し、それをを用いた回路シミュレーションを実施する際、その基板モデルと回路図との接続情報がないため、解析結果を再現できないことがあった。このため、シミュレーション結果を他者と共有する際には、テストベンチ情報に波形観測点を明示する必要があることが分かった（図 26 参照）。

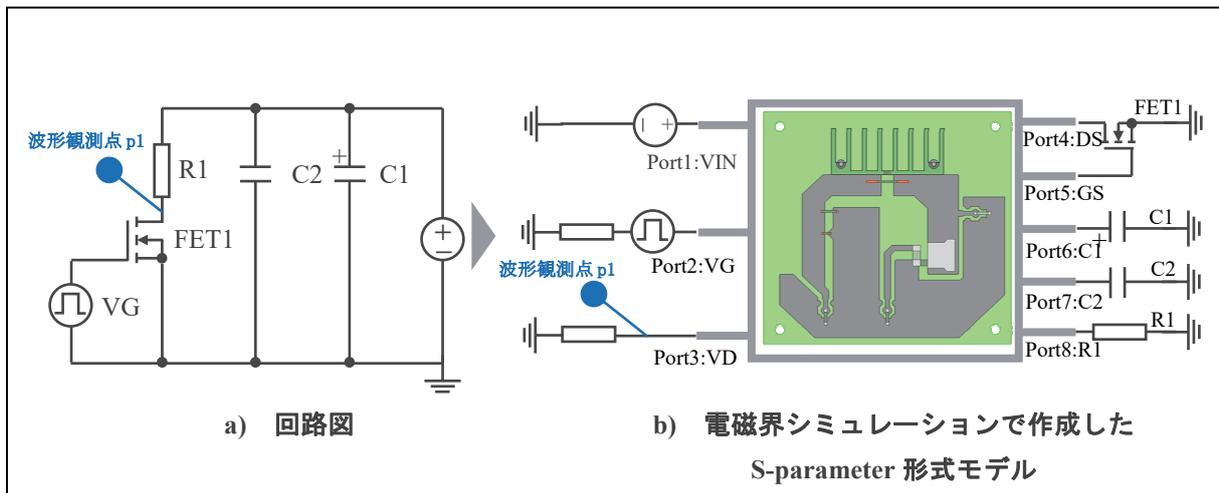


図 26—波形観測点の表現例

6.5.6 S-parameter 形式モデルの周波数範囲の外挿について

(題材：MOSFET スイッチング回路)

回路シミュレーションに S-parameter 形式モデルを用いる場合、S-parameter がもつ周波数範囲外でシミュレーションを実施すると結果が大きく異なることが分かった（図 27 参照）。S-parameter 形式モデルに記載されている周波数範囲外で使用すると、シミュレータが外挿した値が用いられ、等価回路モデルから大きく乖離することに注意が必要であることが分かった。

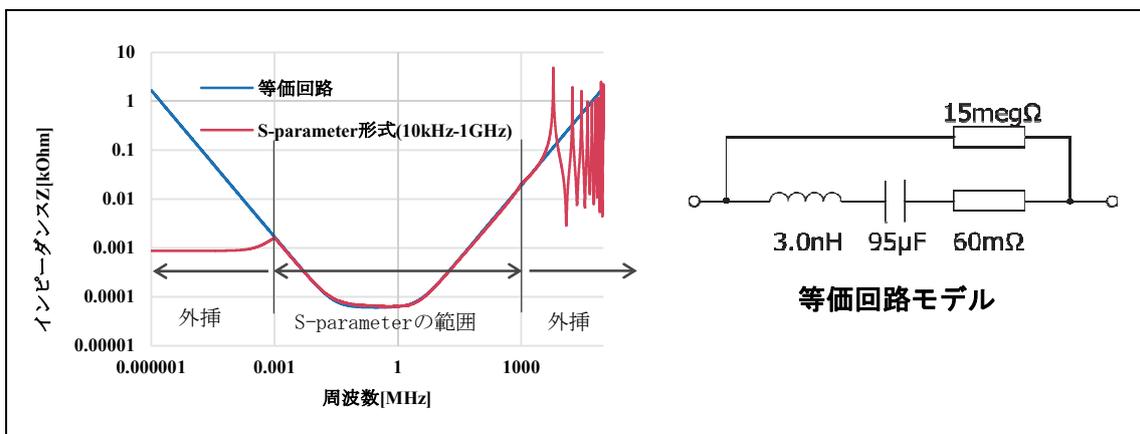


図 27—S-parameter 形式モデルの周波数範囲と利用時の注意点

6.6 モデル仕様書に定義すべき項目の考察

シミュレーションプロセスの各過程において、シナリオごとにどのような設計上の問題を引き起こすかをいくつかの題材を用いて実証し、モデル仕様書に定義すべき具体的な項目を考察した。得られた結果を要約して表 4 に示す。また、現在検討中のモデル仕様書の記載例を図 28、図 29 に示す。ここで、表 4 中の注釈**は、図 28、図 29 記載例の該当項目を示す。これらにより、モデル使用者は、目的を満たしたモデルの選定と妥当なシミュレーション結果を得るためには、モデルに含まれる特性が明示されたモデル仕様書を用いることが効果的であり、仮想設計に必要なモデルの流通と実用化を加速するためには、モデル仕様書を標準化することが必要であることが確認できた。

表 4—モデル仕様書に定義すべき項目の一覧

シナリオ No.	シミュレーションプロセス	想定シナリオ	想定リスク	実証実験結果	参照する実証実験結果	モデル仕様書に定義すべき項目
1-1	プロセス 1 設計情報に基づくモデル選定	モデルの使用用途が不明確。	モデル使用者に必要な十分な機能・精度のモデルが提供されず、期待するシミュレーション結果を得られない。	6.1.1 参照	容量 1 個のマイコンモデルで十分な検証結果が得られた。十分な使用用途の認識合わせが行われない場合、必要以上に複雑なモデルが提供されやすい。反対に、機能特性が不足することも懸念される。	モデルの用途**1
1-2		モデル仕様書に端子リード成分有無の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	6.1.2 参照	リードのインダクタンス成分の有無でシミュレーション結果に差異が見られた。モデル内のリード成分の有無が、評価回路のインダクタンスの増減につながり、反共振の周波数変動する。	パッケージ寄生成分**2
1-3		モデル仕様書にトランジスタコンパクトモデル種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	6.1.3 参照	コンパクトモデルに BSIM3 を使用したモデルと MOS3 を使用したモデルでは、モデル精度の違いによりターンオフ後のスイッチング波形に差異が見られた。	コンパクトモデルの種類**3、実測相関（対実測及び/又は対データシート値）**4
1-4		モデル仕様書に S-parameter 形式モデルの周波数範囲の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	6.1.4 参照	S-parameter 形式モデルが狭帯域の場合、高周波成分が欠落しリンギングが小さくなる結果となった。	モデル形式**5、周波数範囲**6
1-5		モデル仕様書に使用する回路シミュレータの種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	6.1.5 参照	同一の回路に対して、同様の解析条件を設定しても、使用する回路シミュレータによってデフォルト設定が異なるため、結果に差異が見られた。	使用回路シミュレータ**7
1-6		モデル仕様書に使用する回路シミュレータのバージョン情報の記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	6.1.6 参照	モデルが対応していないツールバージョンを使用すると、モデルパラメータの算出式違いにより特性に変化が生じてリンギング周波数に影響を及ぼした。	ツールのサポートバージョン及びその設定条件**8

表 4—モデル仕様書に定義すべき項目の一覧（続き）

シナリオ No.	シミュレーションプロセス	想定シナリオ	想定リスク	実証実験結果	参照する実証実験結果	モデル仕様書に定義すべき項目
1-7		モデル仕様書にモデル容量特性有無の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	6.1.7 参照	容量特性を実測と合わせ込んだモデルと合わせ込んでいないモデルでは、シミュレーション結果に差異が見られた。容量特性をフィッティングしたモデルではリンギングが表現できているが、容量特性をフィッティングしていないモデルではリンギングが発生しない。	モデル化対象の容量特性**9, 実測相関(対実測及び/又は対データシート値) **4
1-8		モデル仕様書に前提条件(ゲートドライバ抵抗有無)の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、スイッチング特定の判断を誤る。	6.1.8 参照	テストベンチ回路にゲートドライバのゲート抵抗がない場合、信号遅延が発生せず、出力波形の立ち上がり/立ち下がりの遅延時間に大きく影響する解析結果となった。	検証用テストベンチ及びゲートドライバの情報**10
1-9		モデル仕様書に寄生インダクタンスモデルの種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	6.1.9 参照	IGBT のリードフレームの寄生インダクタンスモデルを理想定数から高周波数特性をもつ S-parameter 形式モデルに変更するとシミュレーション結果に差異が見られた。構造形状に起因する寄生成分が付加されることで周波数特性が変化する。	モデル形式**5, 実測相関(対実測及び/又は対データシート値) **4
1-10		モデル仕様に負荷インダクタンスモデルの種類の情報記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定の判断を誤る。	6.1.10 参照	モータコイル+ケーブルの負荷インダクタンスモデルを理想定数から実測 S-parameter 形式モデルに変更すると、リンギング周波数に変化が見られた。	モデル形式**5, 実測相関(対実測及び/又は対データシート値) **4
2-1	プロセス 2 解析設定条件	モデル使用者が電磁界シミュレータのメッシュ数の設定を誤る。	適切なシミュレーション条件を設定できず、モデル作成者のシミュレーション結果が再現できない。	6.2.1 参照	電磁界シミュレータのメッシュ数をデフォルト設定から-15%及び+20%に変更して生成した S-parameter 形式モデルを回路シミュレーションで特性を確認した結果、結果の差異は見られなかった。	特になし。
2-2		モデル使用者が電磁界シミュレータの解析領域の設定を誤る。	適切なシミュレーション条件を設定できず、モデル作成者のシミュレーション結果が再現できない。	6.2.2 参照	ツールベンダ推奨値に基づき $\lambda/4$ 以上解析領域を確保している解析条件 $\pm 100\text{mm}$ と $\pm 1000\text{mm}$ 時では同等の結果が得られることが確認できた。	特になし。

表 4—モデル仕様書に定義すべき項目の一覧（続き）

シナリオ No.	シミュレーションプロセス	想定シナリオ	想定リスク	実証実験結果	参照する実証実験結果	モデル仕様書に定義すべき項目
2-3		モデル使用者が電磁界シミュレータの解析周波数範囲の設定を誤る。	適切なシミュレーション条件を設定できず、ノイズ特性の判断を誤る。	6.2.3 参照	電磁界シミュレータの解析周波数を広帯域と狭帯域でそれぞれ解析して取得した S-parameter 形式モデルを用いて回路シミュレーションを行ったところ、結果に差異が見られた。狭帯域の S-parameter 形式モデルは過渡波形でリングングが小さくなる。	特になし。
2-4		モデル使用者が異なる種類の電磁界シミュレータを使用する。	同等の結果を得るためのシミュレーション条件を設定できず、シミュレータの種類でシミュレーション結果が異なる。	6.2.4 参照	同じ CAD データ・3D 構造の情報を使用した場合でも、各電磁界シミュレータのデフォルト設定が異なるため、シミュレーション結果に差異が見られた。	特になし。
3-1	プロセス 3 解析結果考察	モデル仕様書に解析結果の波形評価方法の情報記載がない。	シミュレーション結果を適切に考察できない。	6.3.1 参照	シミュレーション結果を分析する際、FFT の Time Span / Window Function の設定を変更すると、結果に差異が生じることが分かった。	実測相関（対実測及び/又は対データシート値）**4 に FFT 分析に用いた Time Span と Window Function を記載。
4-1	想定外シナリオから分かったモデル要件	モデル仕様書に等価回路に寄生成分の記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	6.4.1 参照	モデルの等価回路図に寄生成分が記載されているとモデルの周波数特性に対する理解が深まる。	等価回路の情報**11
4-2		モデル仕様書に実測結果観測位置の記載がない。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	6.4.2 参照	シミュレーション結果を実測と対比させる場合、回路図とプローブ位置情報だけでは計測位置を誤ってしまう、シミュレーションと実測で齟齬が生じることがあった。	検証用テストベンチ及び観測点の情報**12
4-3		モデル仕様書に入力信号の仕様情報が無い。	期待するシミュレーション結果を得られず、ノイズ特定及び損失特性の判断を誤る。	6.4.3 参照	回路シミュレーションを実施する際、入力信号波形の詳細仕様の情報が無いため、モデル使用者が正しい設定でシミュレーションを実施できないことがあった。	検証用テストベンチ及び入力信号波形**13

JEITA		電子デバイスシミュレーションモデル仕様書		No. <input type="text"/>						
製品型番*	IXXXXXX	メーカー*	I社							
モデルファイル名*	KXXXXXX.lib									
モデルバージョン	1.00	仕様書バージョン	1.00							
モデル作成者	M社	仕様書作成者*	M社							
モデル作成日	2020 年 11月 4日	仕様書作成日*	2021 年 3月 17日							
No.	項目	内容								
1	モデルの概要	環境温度25℃限定モデルです。パッケージの寄生成分は含まない。								
2	デバイス種*	IGBT								
3	モデル用途**1	<input checked="" type="checkbox"/> 回路シミュレーション <input type="checkbox"/> EMIシミュレーション <input type="checkbox"/> EMSシミュレーション	その他							
4	モデル形式* **5	SPICE								
5	モデル化対象* **9	Ic-Vce								
		Ic-Vge								
		Cies/Coes/Cres-Vce								
		If-Vf(Diode)								
		switching characteristics {Tr/Tf, Td(on)/Td(off)}								
6	温度依存	<input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 無	範囲	25	℃	~	25	℃	参照図	
7	電圧依存	<input checked="" type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無	範囲		V	~		V	参照図	図2
8	電流依存	<input checked="" type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無	範囲		V	~		V	参照図	図2
9	周波数依存**6	<input type="checkbox"/> 有 <input checked="" type="checkbox"/> 無	範囲		kHz	~		GHz	参照図	
10	コーナー	コーナー種類	Typ							
11	パッケージ寄生成分**2	含まない	推奨実装時成分				mm相当			
12	素子数	12	必ずしも実際と一致しない							
13	使用コンパクトモデル**3	BSIM3, GP-BJT, UCB-Di	バージョン	BSIM3v3.2, -, -						
14	等価回路*11	図 1								
15	リファレンス	<input checked="" type="checkbox"/> 測定値 <input type="checkbox"/> データシート値 <input type="checkbox"/> 測定値&データシート値	図 2							
16	実測相関**4	図 2								
17	測定条件	測定方法	パルスIV測定, L負荷ハーフブリッジSW測定							
		測定機器	パワー・デバイス・アナライザ: -, オシロスコープ: - 電源: -, パルス発生装置: -							
		測定条件	SW: 25℃, Vcc=600V, Ic=300A, Vge=0/+17V							
		その他								
18	検証用テストベンチ**12,13	詳細は付図参照(L負荷ハーフブリッジ回路) Rgon/Rgoff=7/2.8Ω**10								
19	シミュレータ**7	A社シミュレータ	バージョン**8	2020R2						
20	シミュレーション条件	解析種類	DC解析, AC解析, TR解析							
		解析パラメータ	付図参照							
		入力信号	付図参照							
		出力信号	付図参照							
		出力演算	付図参照							
21	使用上の注意									

JEITA ED-XXX 電子デバイスシミュレーションモデル仕様書作成規格準拠仕様書テンプレートVer.0.2 *は必須項目

図 28—現在検討中のモデル仕様書記載例

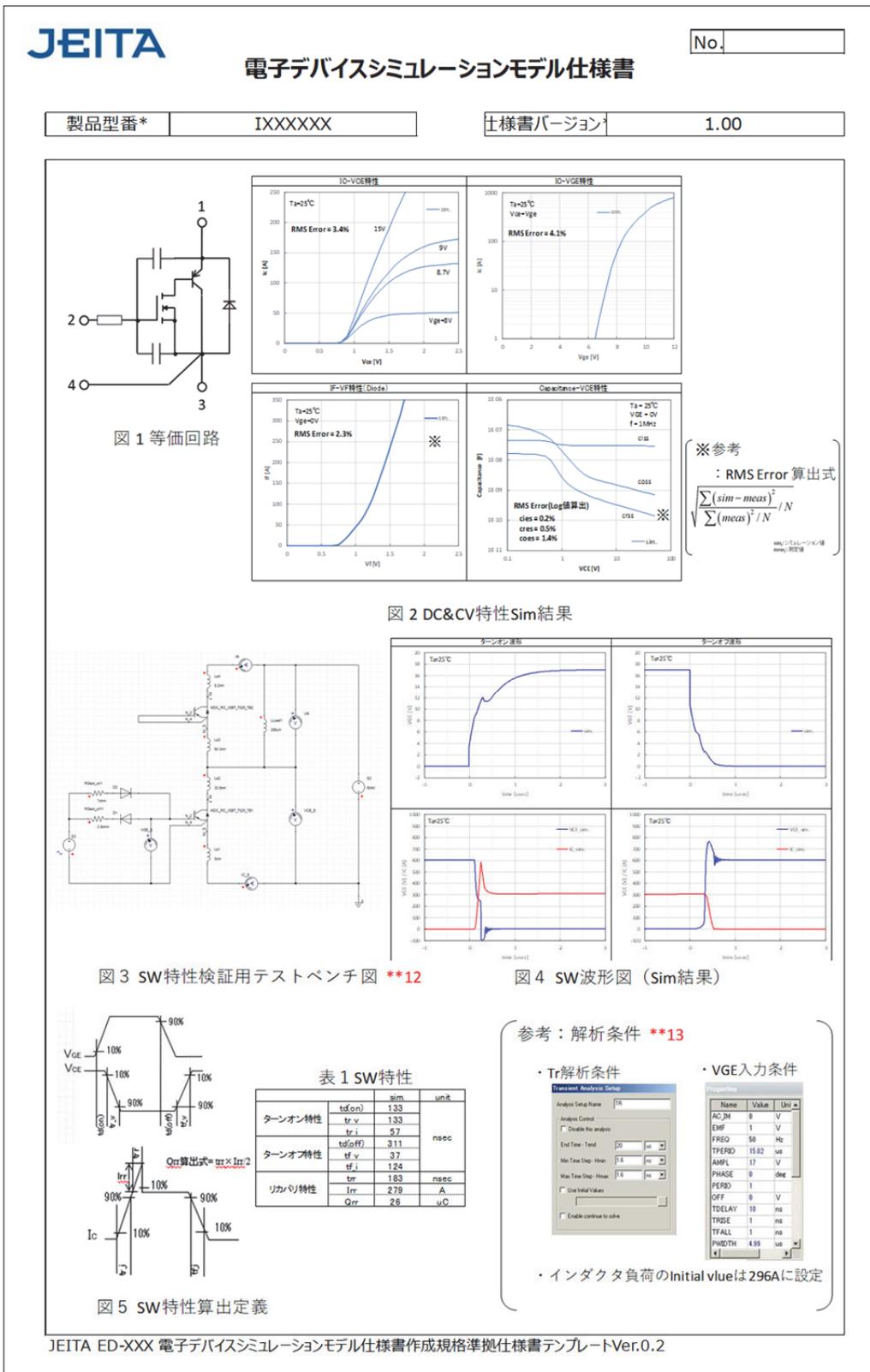


図29—現在検討中のモデル仕様書記載例（付図）

7 まとめと今後の課題

7.1 まとめ

モデル仕様書に記載すべき具体的ないくつかの項目を、実証実験を通して抽出できた。モデル使用者は、目的を満たしたモデルの選定と妥当なシミュレーション結果を得るためには、モデルに含まれる特性が明示されたモデル仕様書を用いることが効果的であり、仮想設計に必要なモデルの流通と実用化を加速するためには、モデル仕様書を標準化することが必要であることが確認できた。

7.2 今後の課題

モデル仕様書の標準化に向けて、モデル仕様書作成規格を整備し、モデル使用者が必要としている情報をモデル作成者が正しくモデルに盛り込むことのできる標準仕様の策定を進めていく必要がある。

また、仮想設計をさらに加速させ、モデル使用者が目的に適するモデルを入手するには、使用用途に対してミスマッチのないモデルの要求仕様書を整備する必要がある。合わせて、仮想設計に必要なモデルの流通及び実用化のための流通アーキテクチャの在り方も検討していく。

附属書 A (参考) 集積回路実証実験

A.1 実証実験の概要

モデル使用者がマイコンの ADC 端子に接続するフィルタ特性を評価する場合に、モデル及びモデル仕様の情報の有無に伴うシナリオ及びリスクを想定し、実際にシミュレーションを行うことによってそれらを検証する。

A.2 題材

マイコンのアナログ入力端子への経路のノイズ耐性を検証するため、マイコンの ADC 端子を題材として、端子にノイズを印加したシミュレーションを実施する。具体的には、**図 A.1** に示すように、温度センサと RC フィルタをマイコンの ADC 端子に接続した回路に対してノイズ注入を行い、その挙動を確認する。

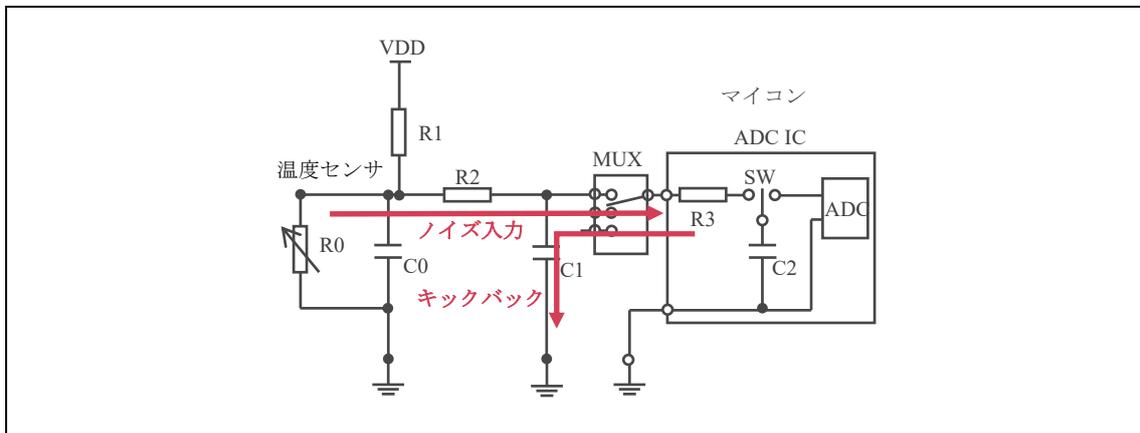


図 A.1—集積回路の題材

A.3 実証実験方法

表 A.1 と表 A.2 のようにシミュレーション項目を設定した。基本動作検証の二項目及びノイズ検証の一項目を実施する。ノイズ検証については、**図 A.2** に示す経路でノイズが印加された場合を想定する。シミュレーション実施の際には、マイコンやサーミスタのモデルの粒度について検討を行い、検証用途に対して必要十分なモデルを選定する。今回の場合、容量 1 個のマイコンモデルで十分な検証が可能かどうか確認する。

表 A.1—基本動作検証項目リスト

目的（大項目）	目的（小項目）	実施内容	周波数	モデル
基本動作検証	ADC の基本機能の確認	DC 解析 サーミスタで生じた電圧をマイコン端でモニタする。	0Hz	マイコン：容量 1 個 サーミスタ：抵抗 1 個
	ADC の電気特性の確認	過渡解析 サーミスタの抵抗値を時間変動させた際のマイコン端電圧をモニタする。	1Hz～10Hz 100Hz	マイコン：容量 1 個 サーミスタ：可変抵抗 1 個

表 A.2—ノイズ検証項目リスト

目的（大項目）	目的（小項目）	実施内容	周波数	モデル
ノイズ検証	ノイズ試験 (フィルタ動作確認)	過渡解析 サーミスタに電圧ノイズを印可してマイコン端電圧をモニタし、ノイズがフィルタで減衰する様子を確認する。	10Hz ～300MHz	マイコン：容量 1 個 サーミスタ：抵抗 1 個 ※300MHz を超える高周波においては、配線やパッケージの寄生成分も必要となることに注意。

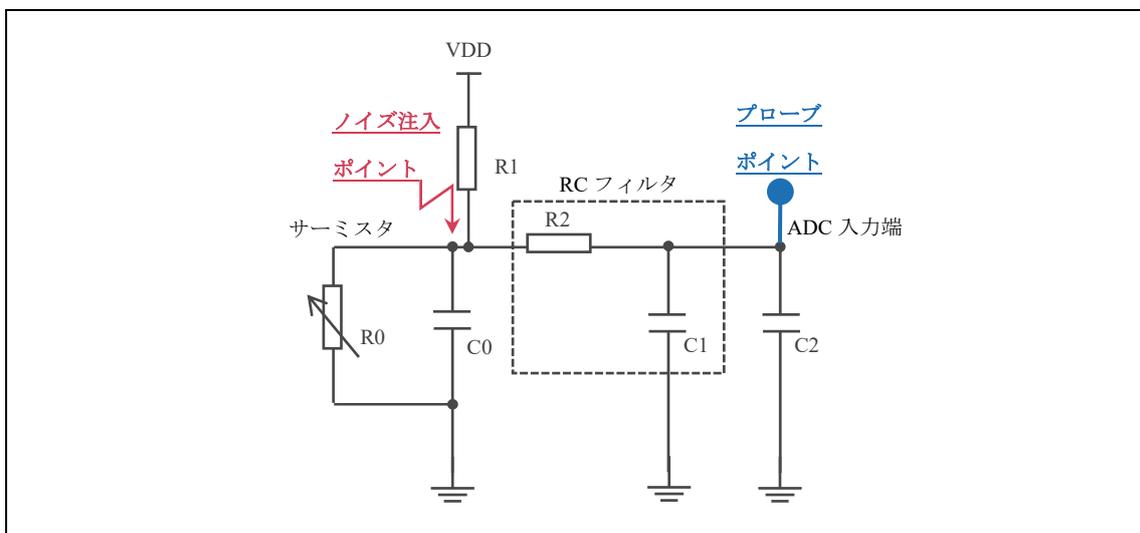


図 A.2—実証実験方法

附属書 B (参考) MOSFET スイッチング回路実証実験

B.1 実証実験の概要

モデル使用者が MOSFET のスイッチングから生じるノイズ特性を評価する場合に、モデル及びモデル仕様の情報の有無に伴うシナリオ及びリスクを想定し、実際にシミュレーションを行うことによってそれらを検証する。

B.2 題材

スイッチングデバイスから生じるラジオノイズの影響を検証するため、**図 B.1** に示す MOSFET を用いた回路を使用する。評価対象の MOSFET (FET1) のドレイン端子に負荷抵抗 (R1) を接続し、電源安定化容量 (C1) 及びリンギング抑制容量 (C2) をそれぞれ電源-GND 間に接続する。MOSFET のゲート電圧と電源電圧の GND は共通とした。電源電圧 (VIN) を DC=10V とし、ゲート電圧 (VG) を周波数 500Hz, Duty 0.1%, 振幅 0-10V, Tr/Tf=15ns/15ns とした。MOSFET のスイッチング波形を確認するため、FET1 のドレイン端子の電圧 (Vd) を観測する。また、電磁界シミュレーションにおける基板の寄生成分の抽出には、**図 B.2** に示す基板のパターン及び構造を使用した。

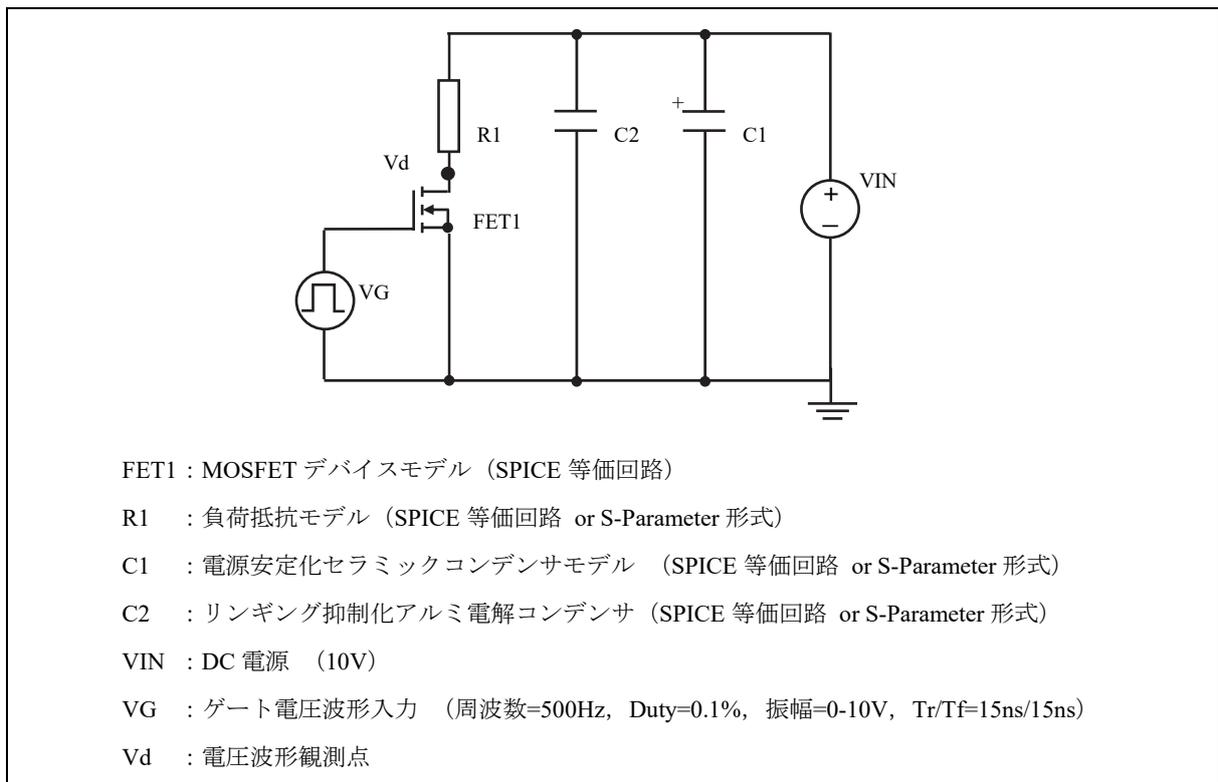


図 B.1—MOSFET スイッチング回路の題材

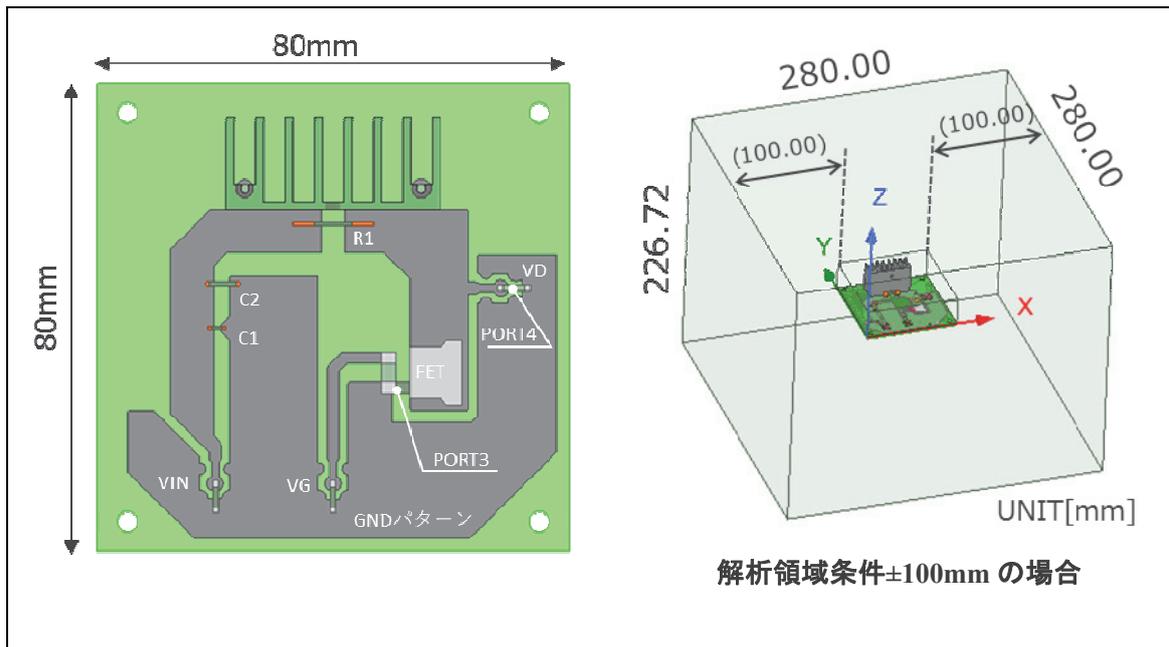


図 B.2—基板のパターン及び構造

B.3 検証シナリオ

a) 回路シミュレーション

シナリオ B1 (No.1-2) パッケージ (端子リード) 成分有無の影響

シナリオ B2 (No.1-3) トランジスタコンパクトモデル種類の差異の影響

シナリオ B3 (No.1-4) S-parameter 形式モデルの周波数範囲の差異の影響

シナリオ B4 (No.1-5) シミュレータの種類の差異の影響 (回路シミュレータ A/H/N)

シナリオ B5 (No.3-1) シミュレーション結果分析時の FFT 設定の差異の影響

(Time Span : 40 μ s/5 μ s, Window Function : Rectangle/Hamming)

b) 電磁界シミュレーション (基板モデルの寄生成分の抽出)

シナリオ B6 (No.2-1) メッシュ数の設定の差異の影響

シナリオ B7 (No.2-2) 解析領域の設定の差異の影響

シナリオ B8 (No.2-3) 解析周波数範囲の設定の差異の影響

シナリオ B9 (No.2-4) シミュレータの種類の差異の影響

(電磁界シミュレータ H(FEM)/M(FEM)/P(FDTD))

B.4 各シナリオのシミュレーション条件

回路シミュレーションに使用したモデルパラメータの組合せを表 B.1 に示す。部品の基準モデルに対し、「パッケージ (端子リード) 成分の有無」「トランジスタコンパクトモデルの種類」「S-parameter 形式モデルの周波数範囲」の影響を確認するためのモデルを準備した。

表 B.1—回路シミュレーションに使用するモデルパラメータ

モデルの パラメータ		シナリオ		基準 モデル	パッケージ (端子リード) 成分の有無 B1 (No.1-2)	トランジスタ コンパクト モデルの差異 B2 (No.1-3)	S-parameter 形式の 周波数範囲の差異 B3 (No.1-4)	
		リードあり	—					
抵抗 (R1)	SPICE	リードあり	—	○		○		
		リードなし	—		○			
	S-parameter	リードあり	狭帯域				○	
			広帯域					○
コンデンサ (C1, C2)	SPICE	リードあり	—	○		○		
		リードなし	—		○			
	S-parameter	リードあり	狭帯域				○	
			広帯域					○
FET (FET1)	SPICE	リードあり	BSIM3	○			○	○
		リードなし	BSIM3		○			
		リードあり	MOS3			○		
基板モデル	S-parameter	—	基準モデル	○	○	○	○	○

電磁界シミュレーションの設定パラメータの組合せを表 B.2 に示す。基板の基準モデルに対し、「メッシュ数の設定」、「解析領域の設定」、「解析周波数範囲の設定」の影響を確認するためのパラメータを準備した。

表 B.2—電磁界シミュレーションに使用するパラメータ

モデルのパラメータ		シナリオ		基準基板 モデル	メッシュ数の設定 B6 (No.2-1)		解析領域の 設定 B7 (No.2-2)	解析周波数範囲の 設定 B8 (No.2-3)	
		リードあり	—						
メッシュ数	1 : ソルバーデフォルト			○			○	○	○
	2 : デフォルト-15% (性能優先)				○				
	3 : デフォルト+20% (精度優先)					○			
解析領域	±10mm						○		
	±100mm			○	○	○			○
	±1000mm							○	
計算周波数 範囲	広帯域 0.01MHz~1GHz			○	○	○	○	○	
	狭帯域 0.1MHz~10MHz								○

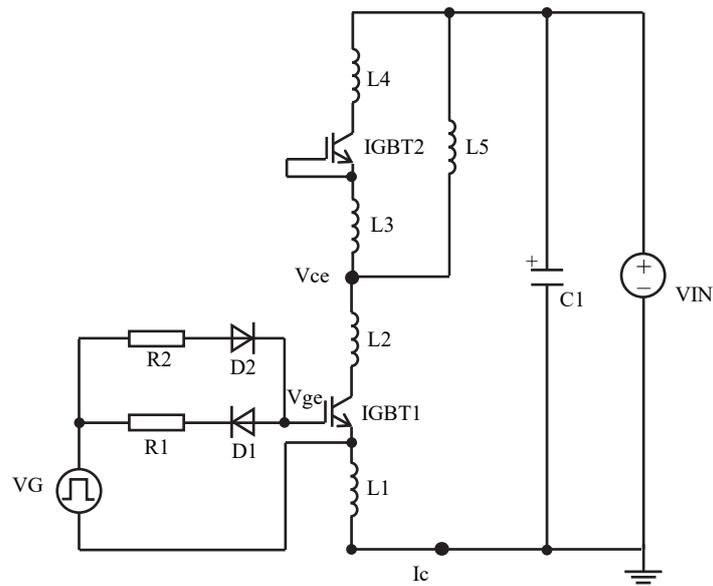
附属書 C (参考) IGBT ダブルパルス回路実証実験

C.1 実証実験の概要

モデル使用者が IGBT のダブルパルス試験を想定したシミュレーションを実施する場合に、モデル及びモデル仕様の情報の有無に伴うシナリオ及びリスクを想定し、実際にシミュレーションを行うことによってそれらを検証する。

C.2 題材

パワーデバイスのダブルパルス試験を想定したシミュレーションを実施するため、IGBT デバイスを用いた図 C.1 に示す回路を使用する。IGBT のハイサイド側並列にモータコイル+ケーブル分の負荷インダクタンス (L5) を配置し、フィルムコンデンサの電源安定化容量 (C1) を電源-GND 間に接続する。ここで、IGBT はパッケージ中にリードフレームを用いて電源ライン及び GND ラインと接続されており、ハイサイド及びローサイドのコレクタ側及びエミッタ側をそれぞれリードフレーム+バスバーの寄生インダクタンス (L4, L3, L2, L1) で接続する。本題材では、ローサイド側のスイッチングを確認するため、ハイサイド側ゲート端子とエミッタ端子を短絡させる。ローサイド側ゲート端子にゲート信号を入力する。ゲートドライバ抵抗として (R1, R2) 及びダイオード (D1, D2) を接続してある。電源電圧 (VIN) を DC=604V とし、ゲート電圧 (VG) を Period=15.02 μ s, delay=10ns, Pulse width=4.99 μ s, 振幅=0-17V, Tr/Tf=1ns/1ns を印加した。IGBT のスイッチング波形サージを確認するため、ローサイド側のコレクターエミッタ間電圧 (Vce), ゲートエミッタ間電圧 (Vge), コレクタ電流 (Ic) を観測する。



- IGBT1, IGBT2 : IGBT デバイスモデル (SPICE 等価回路)
- L1, L2, L3, L4 : IGBT リードフレーム+電流検出用バスバー モデル (理想素子 or RLCG 回路)
- R1, R2, D1, D2 : ゲートドライバ抵抗モデル (理想素子)
- L5 : モータコイル+ケーブル モデル (理想素子 or S-Parameter 形式)
- C1 : フィルムコンデンサモデル (理想素子)
- VIN : DC 電源 (604V)
- VG : ゲート電圧波形入力
(Period=15.02 μ s, delay=10ns, Pulse width=4.99 μ s, 振幅=0-17V, Tr/Tf=1ns/1ns)
- Vce : コレクターエミッタ間電圧観測点
- Vge : ゲートエミッタ間電圧観測点
- Ic : コレクタ電流観測点

図 C.1—IGBT ダブルパルス回路の題材

C.3 検証シナリオ

a) 回路シミュレーション

シナリオ C1 (No.1-6) シミュレータのバージョンの差異の影響
(シミュレータのバージョン依存により、サポートしている/していないモデル形式を用意)

シナリオ C2 (No.1-7) IGBT モデルの容量特性の差異の影響

シナリオ C3 (No.1-8) IGBT モデルの前提条件の差異 (ゲートドライバ抵抗の有無) の影響

シナリオ C4 (No.1-9) 寄生インダクタンスモデル成分 (リードフレーム+バスバーモデル) の差異の影響

シナリオ C5 (No.1-10) 負荷インダクタンスモデル成分 (モータコイル+ケーブルモデル) の差異の影響

C.4 各シナリオのシミュレーション条件

表 C.1 に、各シナリオの回路シミュレーションに使用したモデルパラメータの組合せを示す。部品の基準モデルに対し、「シミュレーションのバージョンの差異」「IGBT モデルの容量特性の差異」「IGBT モデルの前提条件の差異 (ゲートドライバ抵抗の有無)」「寄生・負荷インダクタンスモデルの成分の差異」の影響を確認するためのモデルを準備した。

表 C.1—各シナリオのモデルのパラメータ

モデルの パラメータ				シナリオ					
				基準 モデル	シミュ レータの バージョン の差異 C1 (No.1-6)	IGBT モデルの 容量特性の 差異 C2 (No.1-7)	IGBT モデルの 前提条件の 差異 (ゲート ドライバ抵抗 の有無) C3 (No.1-8)	寄生インダク タンスモデル 成分 (リード フレーム+バ スバーモデ ル) の差異 C5 (No.1-9)	負荷インダク タンスモデル 成分 (モータ コイル+ケー ブルモデル) の差異 C5 (No.1-10)
半 導 体	IGBT (IGBT1, IGBT2)	SPICE	シミュレータ バージョン1用	○		○	○	○	○
			シミュレータ バージョン2用		○				
			容量特性 合わせ込みあり	○	○		○	○	○
			容量特性 合わせ込みなし			○			
R	ゲートドラ イバ抵抗 (R1, R2, D1, D2)	理想定数	抵抗あり	○	○	○		○	○
			抵抗なし				○		
L	リード フレーム+ バスバー (L1, L2, L3, L4)	理想定数	1GHz 値	○	○	○	○		○
			RLGC					○	
	モータ コイル+ ケーブル (L5)	理想定数	推定値	○	○	○	○	○	
			S-parameter 形式						○
C	フィルム コンデンサ (C1)	理想定数	公称値	○	○	○	○	○	○

一般社団法人 電子情報技術産業協会が発行している規格類は、工業所有権（特許，実用新案など）に関する抵触の有無に関係なく制定されています。

一般社団法人 電子情報技術産業協会は、この規格類の内容に関する工業所有権に係る確認について、責任はもちません。

JEITA EDR-7101

2023年3月発行

発行 一般社団法人 電子情報技術産業協会
事業推進戦略本部 事業推進部
〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-1-3
TEL 03-5218-1050(代表)

印刷 株式会社 オガタ印刷
〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 1-5-6
TEL 03-3264-3456

禁 無 断 転 載

（この規格類の全部又は一部を転載しようとする場合は、発行者の許可を得て下さい。）