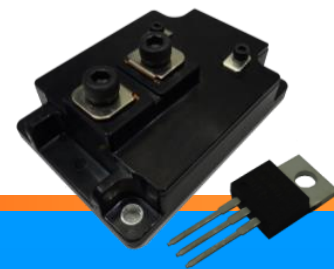




*Modeling Design Technology*



# パワーデバイスのモデル標準化

～パワーデバイスのシミュレーションに関する課題の抽出～

2017.3.10(金)

株式会社モーデック

西嶋哲也

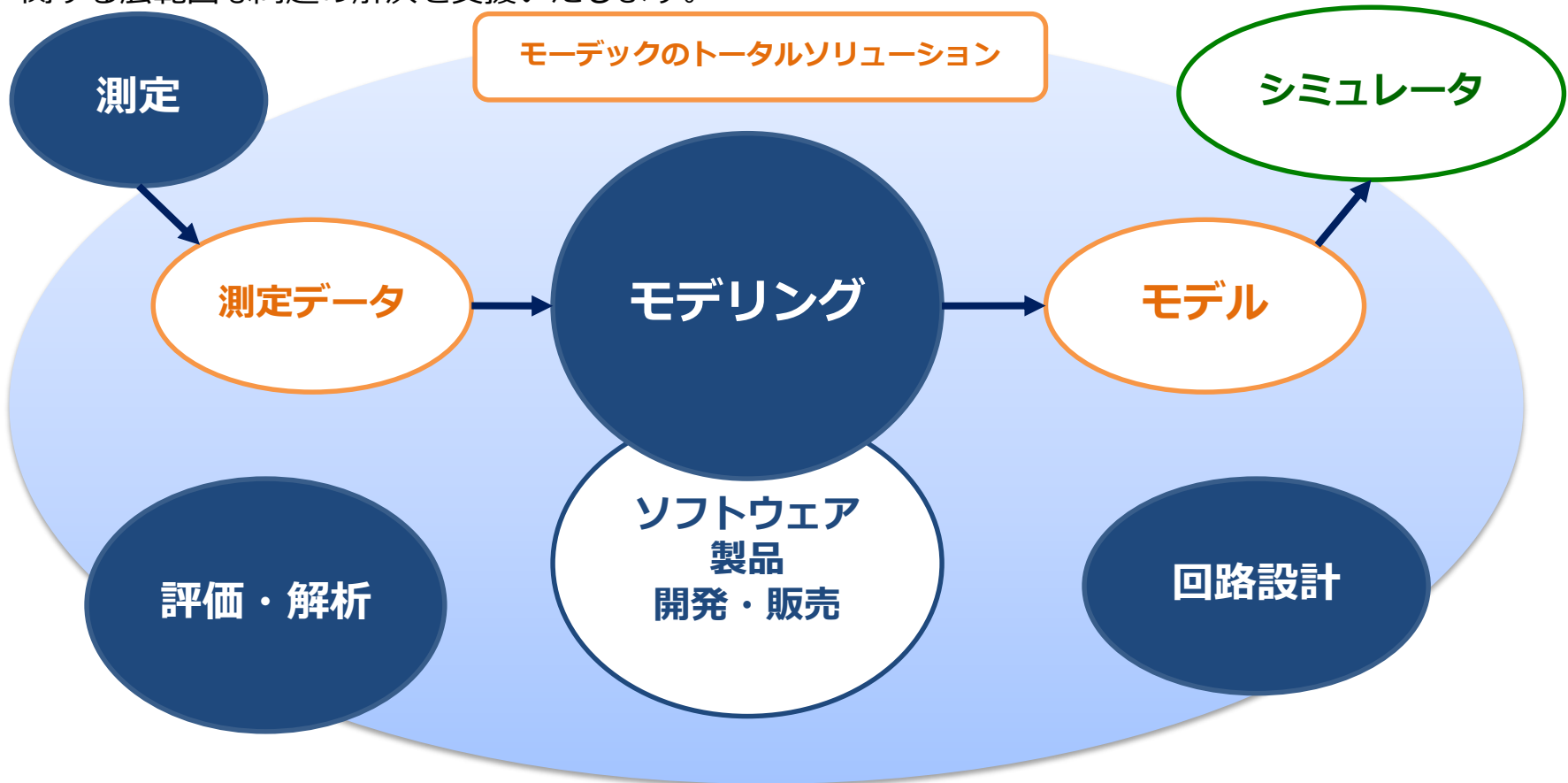
- 株式会社モーデック：会社紹介
- シミュレーションモデルの精度について
- 近年のパワーデバイスの特徴
- シミュレーションモデル作成時の課題
- シミュレーションに関する課題
- まとめ

会社名	株式会社 モーデック
所在地	<p>■ 本社・T&amp;Mセンター 〒192-0081 東京都八王子市横山町25-6 八王子横山町ビル</p> <p>■ イノベーションセンター・プロジェクトセンター 〒192-0081 東京都八王子市横山町5-15 三井生命八王子ビル</p>
代表者	代表取締役 畠末政憲
役員	<p>常務取締役 川原康雄</p> <p>取締役 鈴木康夫、末永敏男、島田寛之</p>
従業員	25名
設立	2002年 7月
資本金	5,000万円
加入団体	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子情報通信学会(IEEE)</li> <li>(一社)日本電子デバイス産業協会 (NEDIA)</li> <li>(社)電子情報技術産業協会 (JEITA)</li> <li>(株)CDC研究所</li> <li>(独)産業技術総合研究所 NMIJ計測クラブ</li> </ul>
事業内容	<p>(1) 測定受託、測定支援、測定システム開発サービス</p> <p>(2) SPICE電子部品のSPICEモデル作成サービス</p> <p>(3) 半導体・パッシブデバイスモデリング/SPICEパラメータ抽出サービス</p> <p>(4) FAB PDK検証/回路設計支援・解析・検証/ノイズ対策支援サービス</p> <p>(5) (1)～(4)に関連する技術コンサルティング</p> <p>(6) (1)～(4)に関連するソフトウェアツールの開発・販売</p> <p>(7) 電気・電子・半導体分野に特化した翻訳サービス</p>

**MoDeCH**  
Modeling Design Technology



- 多くのエレクトロニクス製品メーカーが、開発プロセスにおいて、フロントローディングに注力しています。効果的なフロントローディングを実現する最適なソリューションが、モデルベースシミュレーションです。モーデックでは、パワーエレクトロニクス、アナログ（RF/ミリ波）、高速デジタルなどの分野において、測定・評価・解析、モデリング、シミュレーション、回路設計、回路検証、ノイズ対策に関する広範囲な問題の解決を支援いたします。



- パワーデバイス用のモデルは、用途によって高精度の要求が高まる

簡単・高速

複雑・詳細

## 理想スイッチモデル

- ON時短絡、OFF時開放とするレベル



## 半導体システムモデル

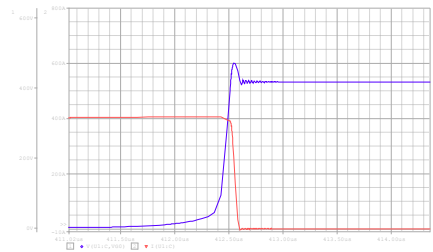
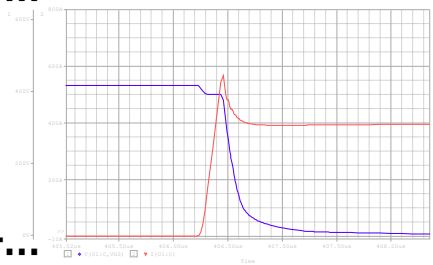
- 静特性を考慮した非線形抵抗として表現するレベル
  - Diode/ BJT/ GTO/ Thyristor/ MOSFET/ JFET/ IGBT...

## 半導体デバイスモデル

- 動特性や熱、物理的な特性を考慮するレベル
  - Diode/ BJT/ GTO/ Thyristor/ MOSFET/ JFET/ IGBT...

## SPICE互換モデル

- SPICE-3f5に互換の素子モデル
  - Diode / BJT / Lossy Tline / VC, IC switch
  - MOSFET (SPICE3 Level1-6, BSIM1~4, EKV, JFET)



## Compact Model :

**Si-MOSFET** : HiSIM-HV (高耐圧、LDMOS対応、CMC標準モデル)

**IGBT** : HiSIM-IGBT (HiSIMコンソーシアム会員の国内企業が使用可能)  
シミュレータ独自モデル

**Diode** : HiSIM-Diode (HiSIMコンソーシアム会員の国内企業が使用可能)

**PBT** : MEXTRAM, HICUM (CMC標準モデル)

**GaN-HEMT** : Angelov-GaN

ベンダー独自モデル (X-parameter、Cardiffなど)

## SPICE Macro Model :

**Si-MOSFET / SiC-MOSFET** : アナログビヘイビア、Level3、BSIMベースのサブサーキットモデル

**IGBT** : BSIM3 (Level3) +SGP+UCB Diodeベースのサブサーキットモデル

**Si-Diode / SiC-diode** : UCB Diodeベースのサブサーキットモデル

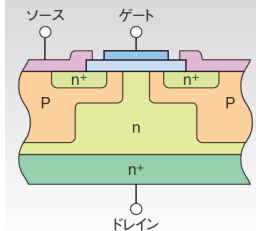
**IPD** : アナログビヘイビアサブサーキットモデル

**GaN-HEMT** : アナログビヘイビア、等価回路ベースのサブサーキットモデル

**Thermal** : RCベースサブサーキットモデル

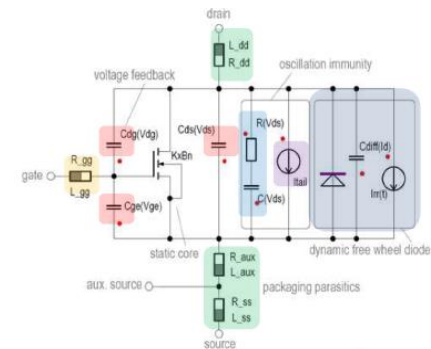
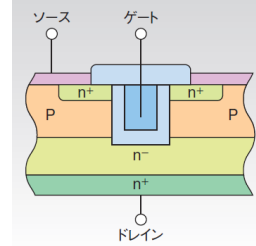
### DTMOS

スーパー Junction 構造

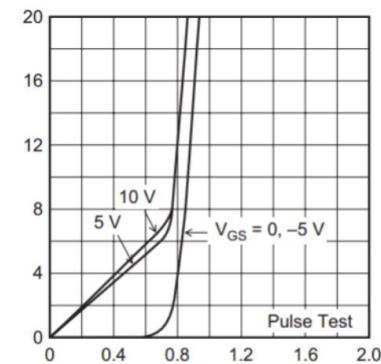
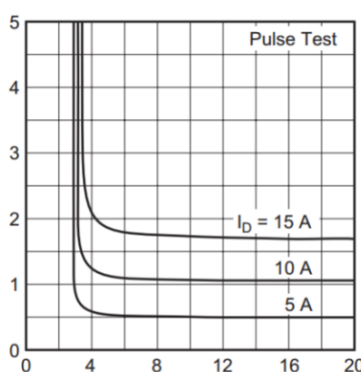
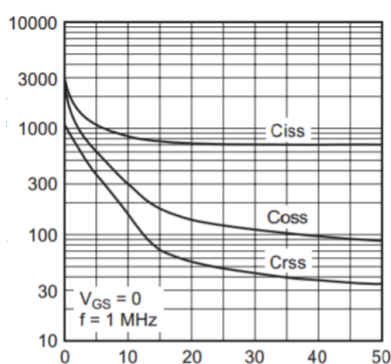
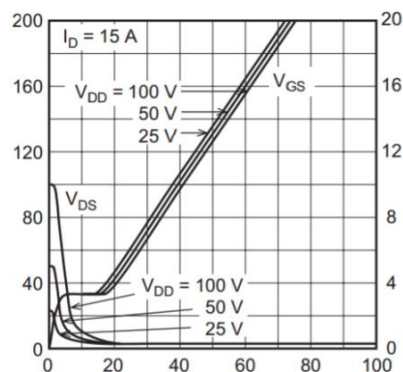
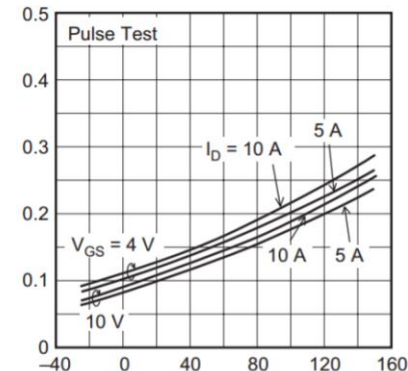
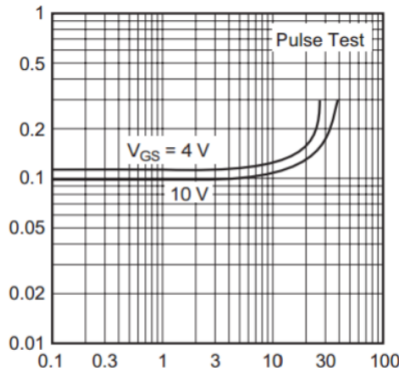
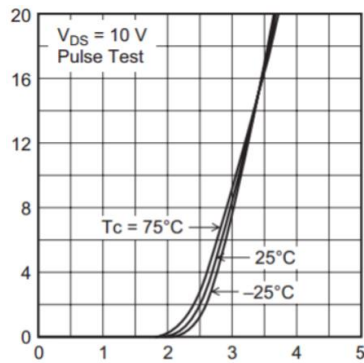
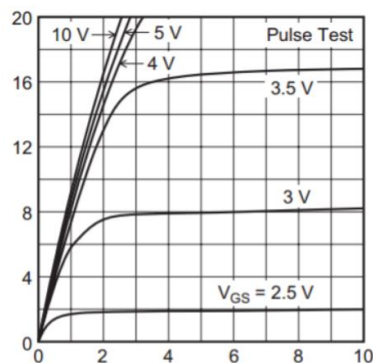


### U-MOS

トレンチ形構造



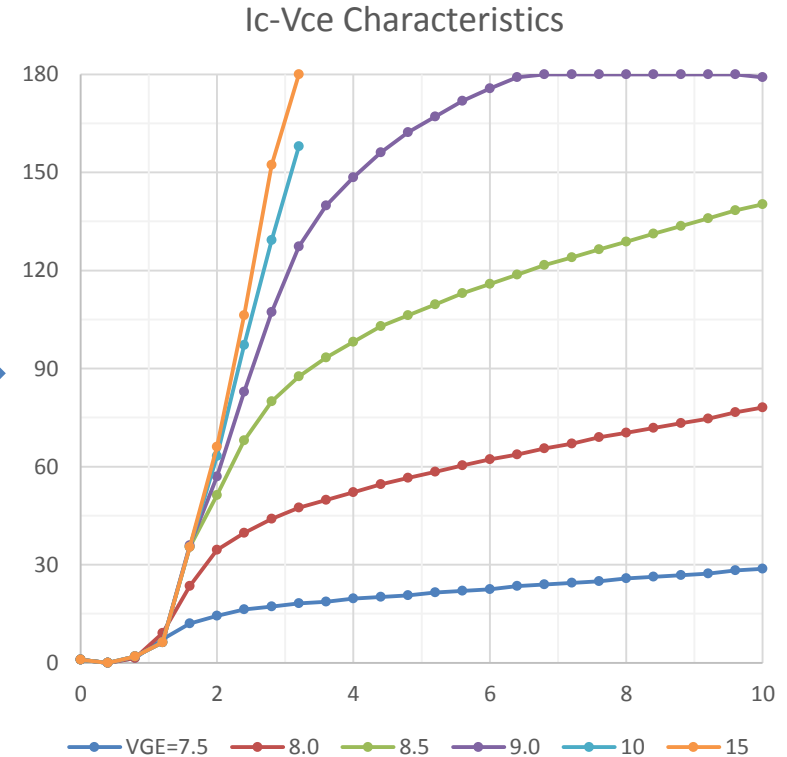
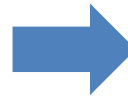
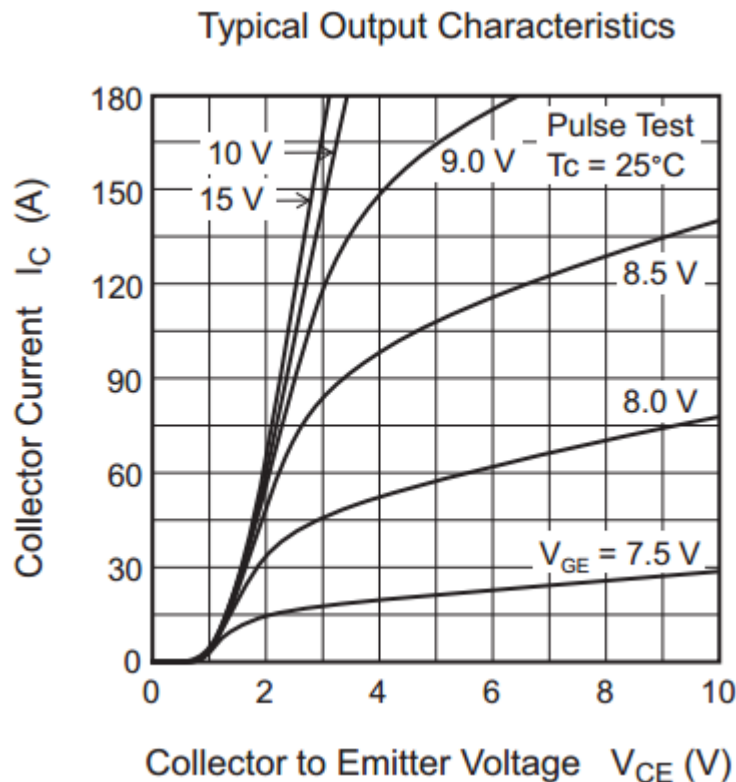
## データシートに記載されている各特性例



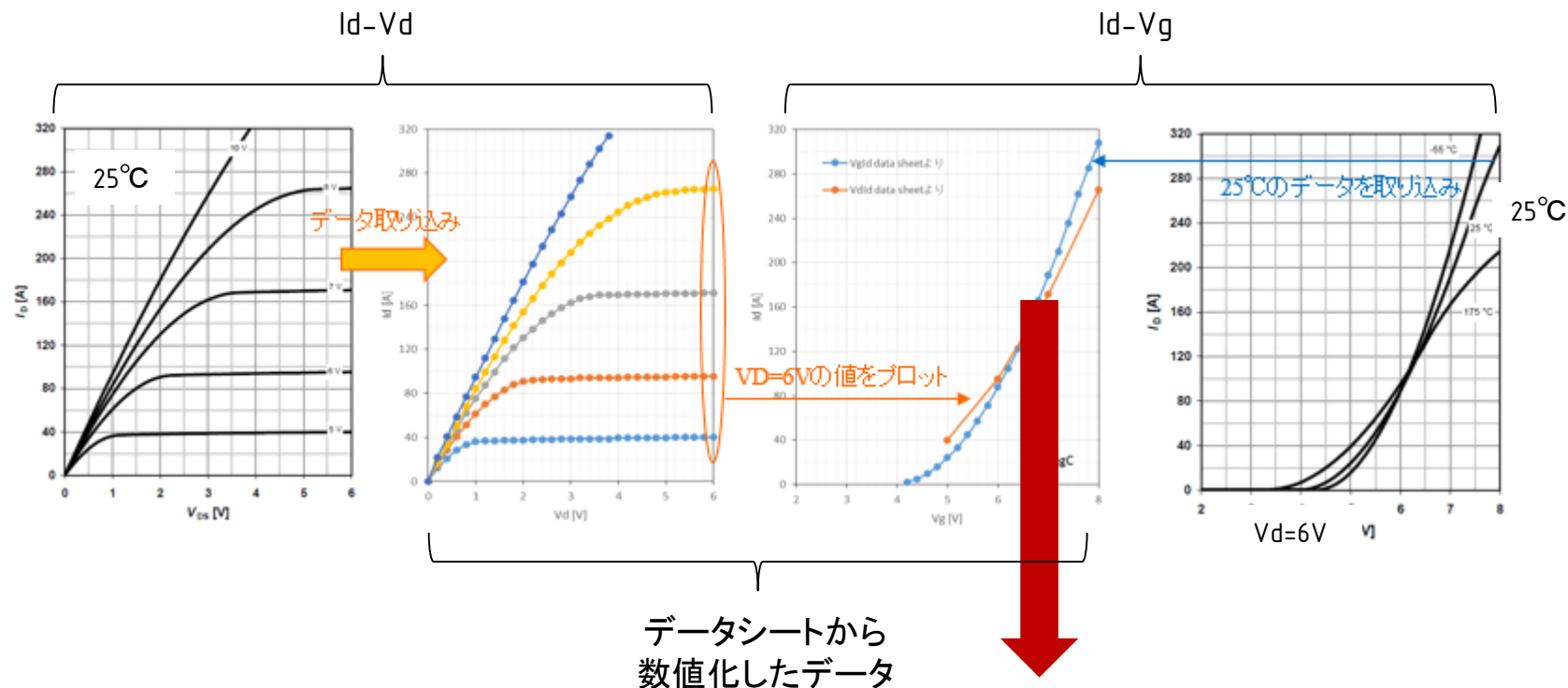
データシートからモデル作成する場合に合わないことがある？

## ● モデル作成の準備

- データシート記載の特性をモデル作成のリファレンスとして数値データにする

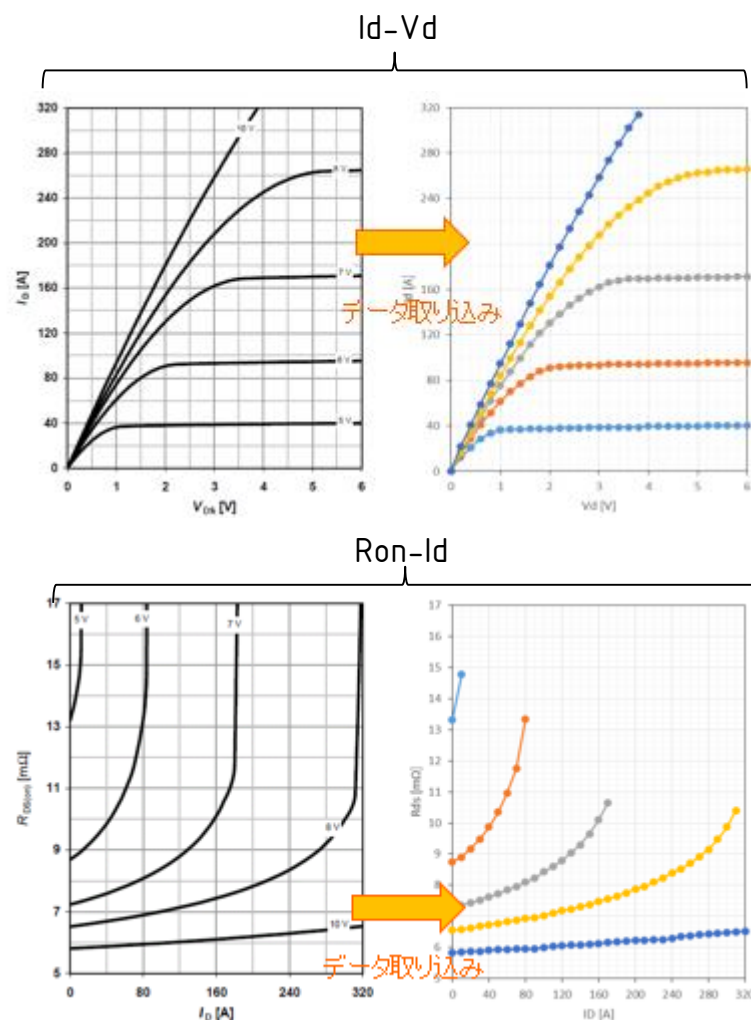


- Id-VdとId-Vg特性間の検証例



Id-Vd特性とId-Vg特性の値に不一致があり  
特性間に矛盾が見受けられる

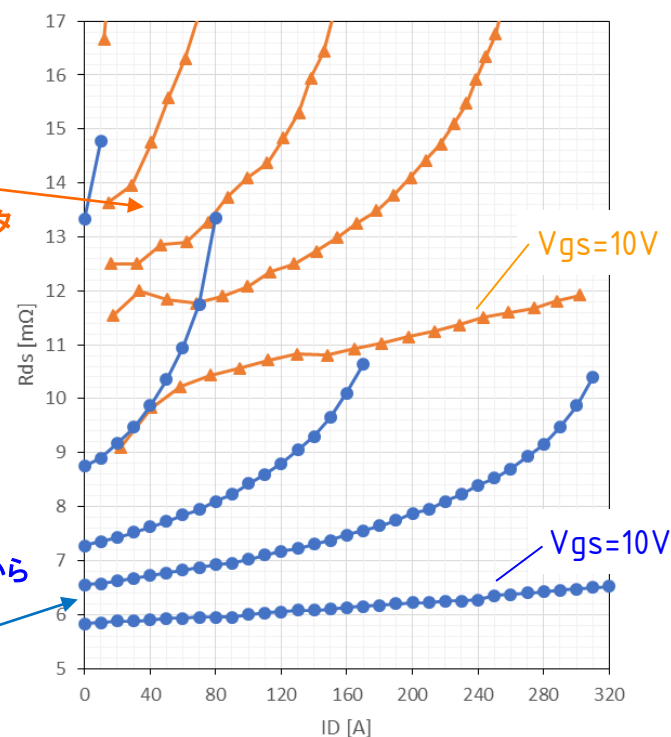
## Id-VdとRon-Id特性間の検証例



データシートから数値化したデータにより  
IdとRon妥当性の評価

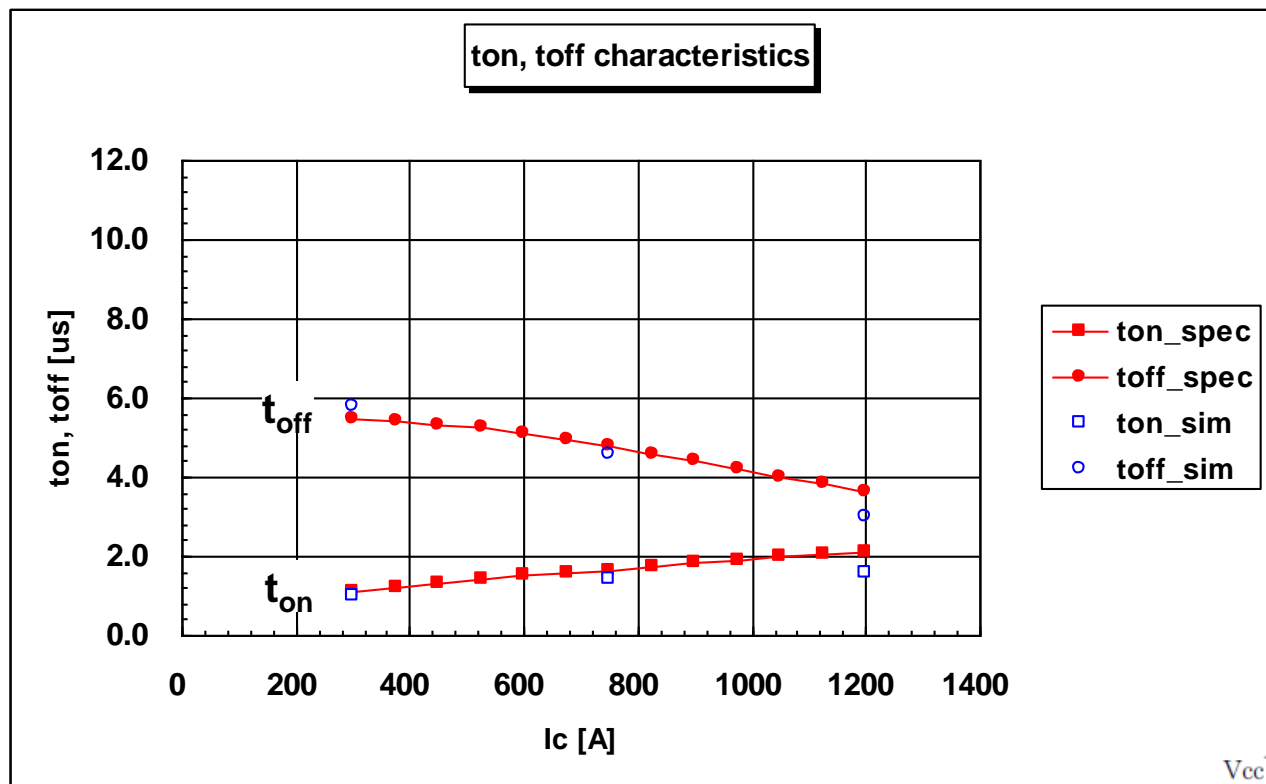
Id-Vd数値データ  
からRonの計算  
( $R_{on} = V_d / I_d$ )

Ron-Id特性図から  
数値化したもの



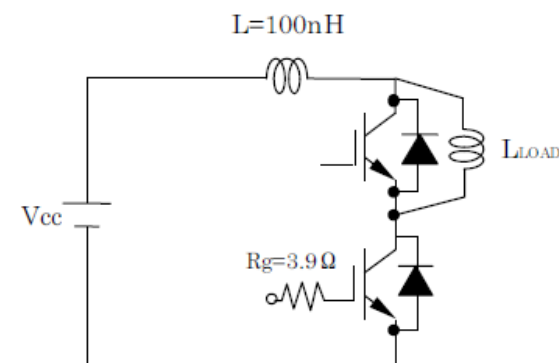
$R_{DS(on)}$	$V_{GS}=10V, I_D=80A$	-	6.2	7.4	mΩ
		min.	typ.	max.	

## • スwitchング（ターンオン, ターンオフタイム）特性検証結果例

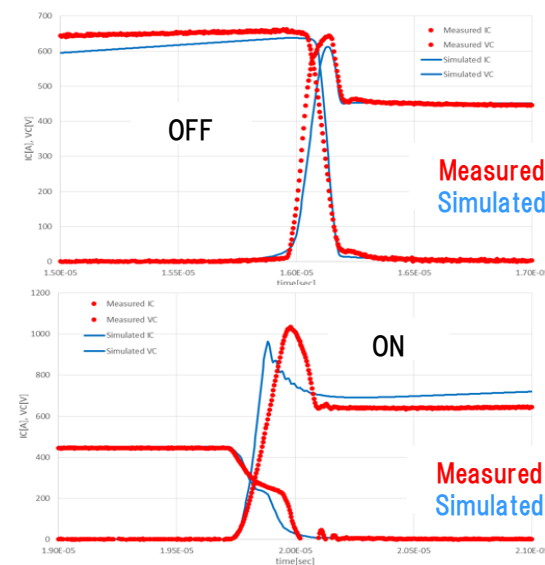
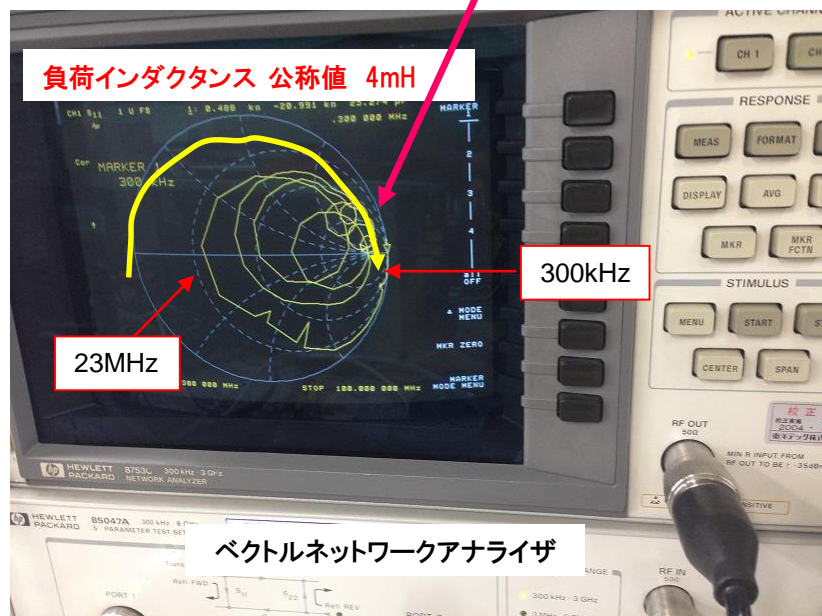
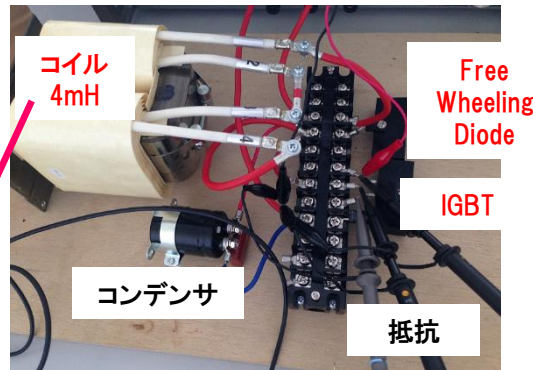
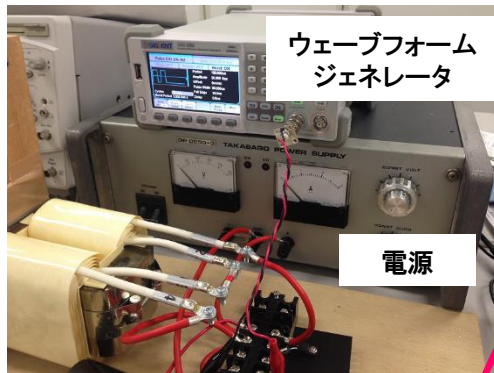


$T_C=125^{\circ}\text{C}$   
 $L_S=100\text{nH}$   
 $L_{\text{LOAD}}=200\text{nH}$   
 $V_{CC}=1650\text{V}$   
 $R_G=3.9\Omega$   
 $V_{GE}=\pm 15\text{V}$

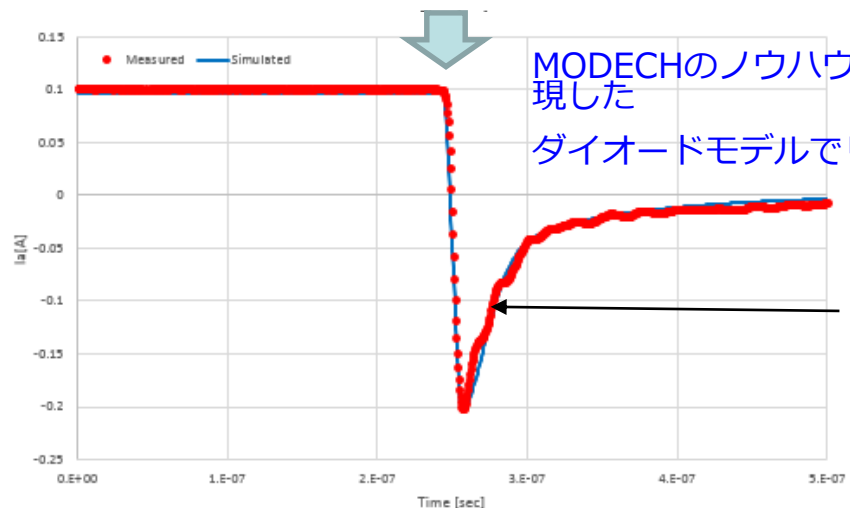
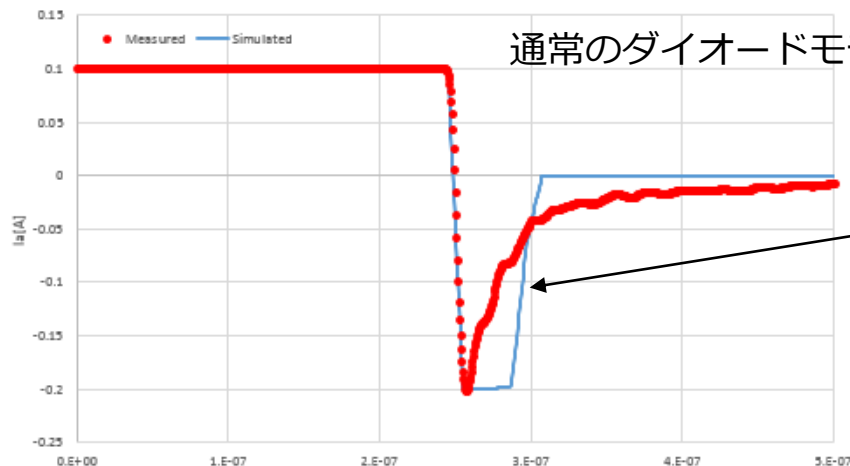
スイッチングテスト回路



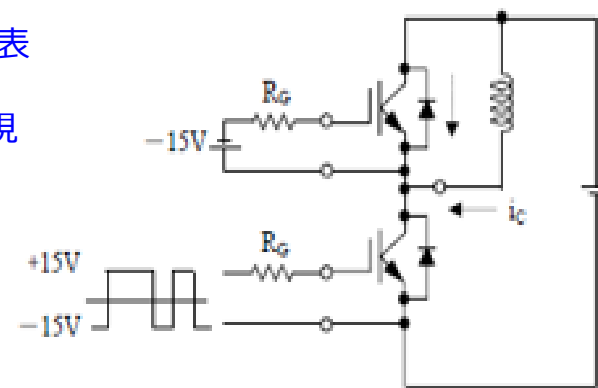
- スイッチング特性を実測とシミュレーション結果を検証



## ダイオードのリカバリ特性の実測とシミュレーション結果検証



負荷電流を転流させるためのダイオード  
(FWD : Free Wheeling Diode)



- **特にスイッチング特性は、実測を行うことでモデルの精度が向上**
- **課題**
  - モデルの精度を上げるには、測定環境を用意し実測が必要なる。その一方で測定工数が増えることで1デバイスあたりのモデリング費用が高くなる。
  - 設計者がシミュレーション用モデルの入手性が悪く、セットメーカーの費用負担が増える。
  - これらの背景からシミュレーション環境構築のためのイニシャル費が増える
  - シミュレーションを活用する敷居を高くし、シミュレーションの利用シーンが広がらない
- **課題解決のために**

データシートに記載されている特性と情報を標準化することで、高精度なモデルの作成工数削減により、入手性を向上し利用シーンを増やすことが可能、



LPB-SC(MDL\_WG)  
パワーデバイス仕様書検討TG 活動

- データシートの記載内容で着目する特性

- 対象デバイス：Si-MOSFET / SiC-MOSFET / IGBT / GaN-HEMT
  - Ron、パルスIV特性
  - 容量特性、ゲートチャージ、駆動容量 (Qgd) 、Ron・Qgd性能指標
  - スwitchング特性： td(on)、tr、td(off)、tf 測定回路と条件の情報
  - ダイオード逆回復特性



- ガイドラインの要旨

- 対象デバイス（パワーMOSFET）
  - Id-Vd と Id-Vg 特性間で矛盾が無いこと
  - Id-Vd と Ron-Id 特性間で矛盾が無いこと
  - CV特性 と ゲートチャージ特性は必ず記載があること
  - スwitchング特性 (測定回路・条件、波形を明記する)
  - ダイオードの逆回復特性 (測定回路・条件、波形を明記する)

- パワーデバイスのモデリングと検証
  - ターゲットデバイスとデータシートについて

品名	種類	概要
RJU60C6SDPQ-A0	DIODE	600V, 25A 高速リカバリダイオード
RJS6005WDPK	DIODE	600V, 30A SiCショットキーバリアダイオード
RJK5015DPK	MOSFET	Nch 500V, 25A Si高速パワースイッチング
NP75P04YLG	MOSFET	Pch -40V, 70A 大電流スイッチング用
NP45N06PUK	MOSFET	Nch 60V 45A 大電流スイッチング用
RJP60F5DPM	IGBT	600V, 40A 高速パワースイッチング
RJH65T47DPQ-A0	IGBT	650V, 45A 力率改善

**RENESAS** Data Sheet

**NP45N06VUK, NP45N06PUK**

45 A – N-channel Power MOS FET  
Application: Automotive

Rev.1.00  
Nov 20, 2012

**Description**  
Products are N-channel MOS Field Effect Transistors designed for high current switching applications.

**Features**  
• Low on-state resistance  
•  $r_{DS(on)} = 9.6\text{ m}\Omega\text{ MAX.}$  ( $V_{GS} = 10\text{ V}$ ,  $I_D = 23\text{ A}$ )  
•  $C_{iss} = 1690\text{ pF}$  TYP. ( $V_{GS} = 25\text{ V}$ )  
• Designed for automotive application and AEC-Q100 qualified

**Ordering Information**

Part No.	Lead Plating	Packing	Package
NP45N06VUK-E1-AY *1	Pure Sn (Pb)	Tape 2500 phreel	Taping (E1 type)
NP45N06VUK-E2-AY *1		Tape 800 phreel	Taping (E2 type)
NP45N06PUK-E1-AY *1			Taping (E1 type)
NP45N06PUK-E2-AY *1			Taping (E2 type)

\*1 Pb-free (This product does not contain Pb in the external electrode)

**Absolute Maximum Ratings (T<sub>A</sub> = 25°C)**

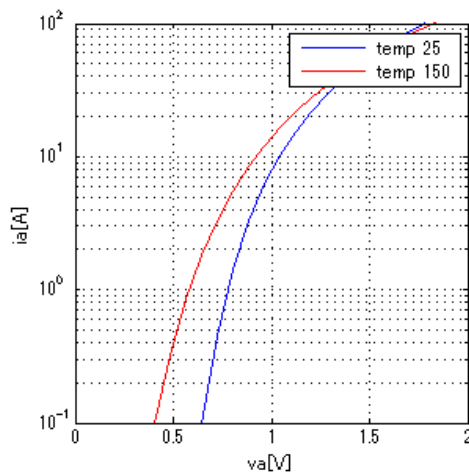
Item	Symbol	Rating	Unit
Source Voltage (V <sub>GS</sub> = 0 V)	V <sub>GS</sub>	60	V
Source Voltage (V <sub>GS</sub> = 0 V)	V <sub>DS</sub>	±20	V
Current (DC) (T <sub>C</sub> = 25°C)	I <sub>DS(on)</sub>	±45	A
Current (pulsed) *1	I <sub>DSM</sub>	±135	A
Power Dissipation (T <sub>C</sub> = 25°C)	P <sub>D</sub>	75	W
Power Dissipation (T <sub>C</sub> = 25°C)	P <sub>D1</sub>	1.2	W
Power Dissipation (T <sub>C</sub> = 25°C)	P <sub>D2</sub>	1.8	W
Temperature	T <sub>J</sub>	175	°C
Temperature	T <sub>stg</sub>	-55 to +175	°C
Gate Avalanche Current *2	I <sub>AS</sub>	19	A
Gate Avalanche Energy *2	E <sub>AS</sub>	36	mJ

\*1 T<sub>C</sub> = 25°C, P<sub>DS</sub> ≤ 10 μs, Duty Cycle ≤ 1%  
\*2 R<sub>θJA</sub> = 25 °C, V<sub>GS</sub> = 20 V → 0 V

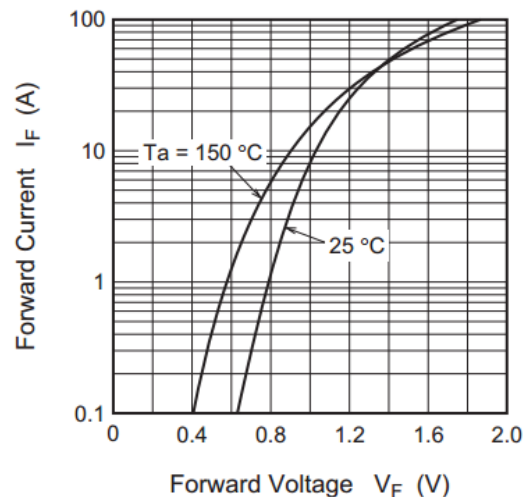
**Thermal Resistance**

Item	Symbol	Rating	Unit
Thermal Resistance to Case	R <sub>θJA</sub>	2.00	°C/W
Thermal Resistance to Ambient	R <sub>θJA</sub>	125	°C/W
Thermal Resistance to Ambient	R <sub>θJA</sub>	83.3	°C/W

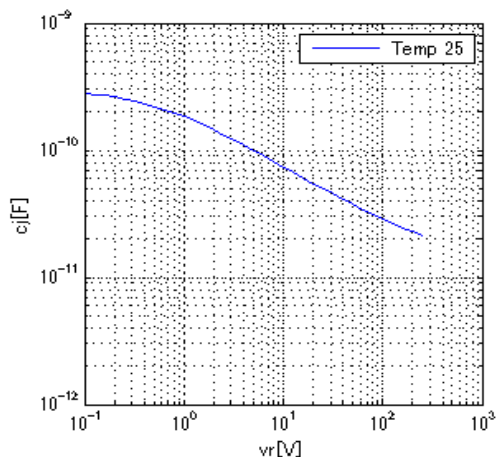
- 順方向特性 (IF-VF)



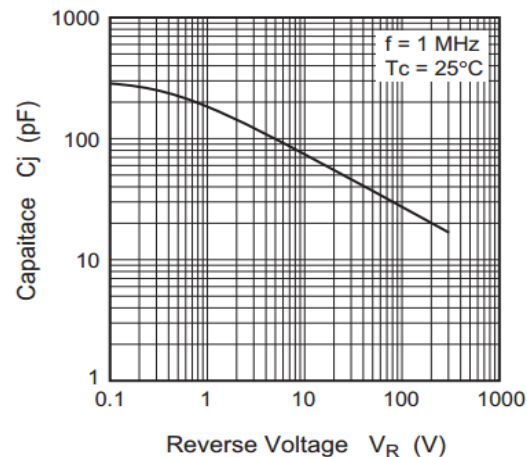
Forward Current vs. Forward Voltage (Typical)



- 容量特性



Capacitance vs. Reverse Voltage (Typical)



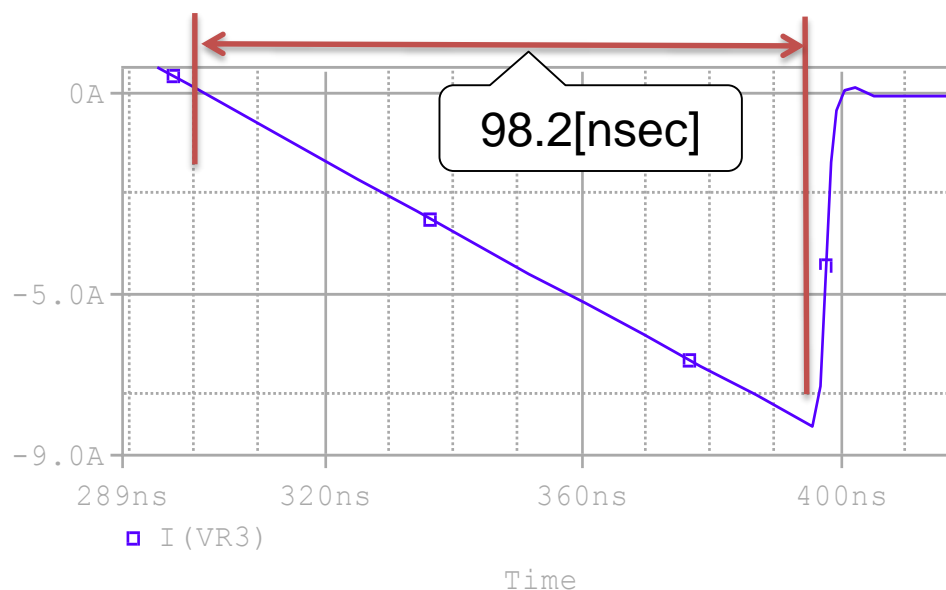
## ● 逆回復時間特性

このデータシートには測定回路の記載なし

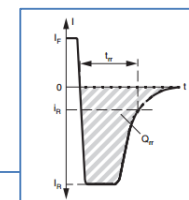
### Electrical Characteristics

(Ta = 25°C)

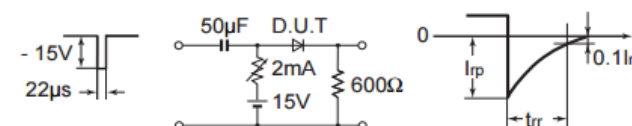
Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Test conditions
Forward Voltage	VF	—	1.4	2.0	V	I <sub>F</sub> = 50 A
Reverse current	IR	—	—	25	μA	V <sub>R</sub> = 600 V
Reverse Recovery Time	trr	—	100	—	ns	I <sub>F</sub> = 30 A, di/dt = -100 A/μs



ダイオードの逆回復時間の評価方法には、IF-IR測定や、di/dt法と併せてデータシートに試験回路がある場合など様々。

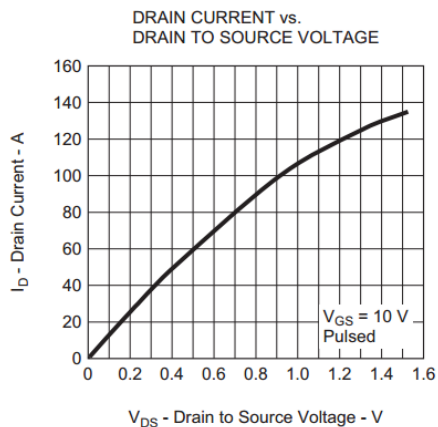
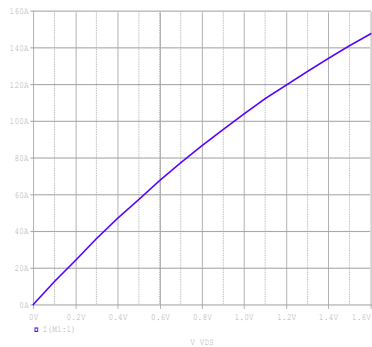


逆回復時間(trr)試験回路  
Reverse recovery time(trr) test circuit



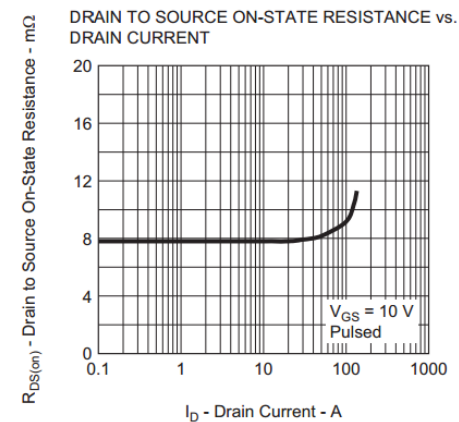
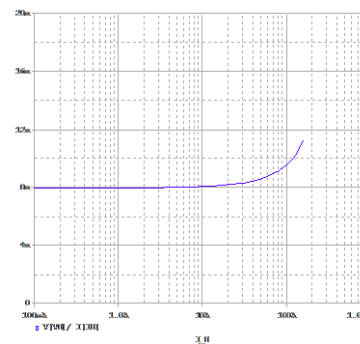
## Id-Vds, Id-Vgs特性

Simulated

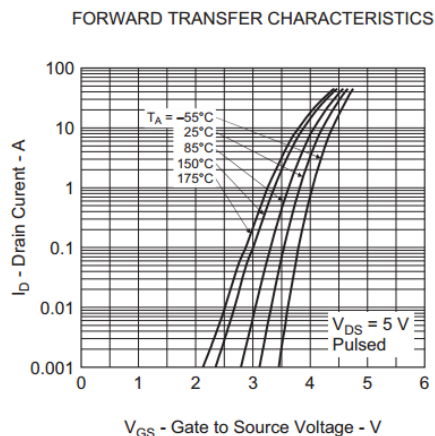
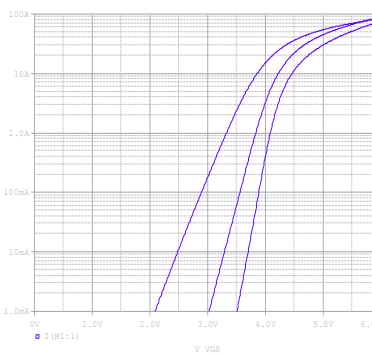


## Rds(on), If-Vsd特性

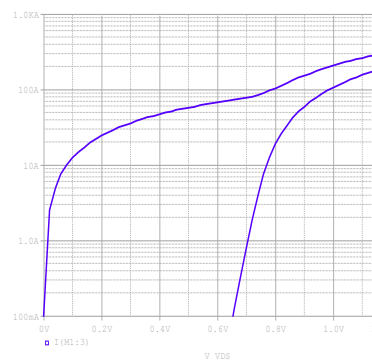
Simulated



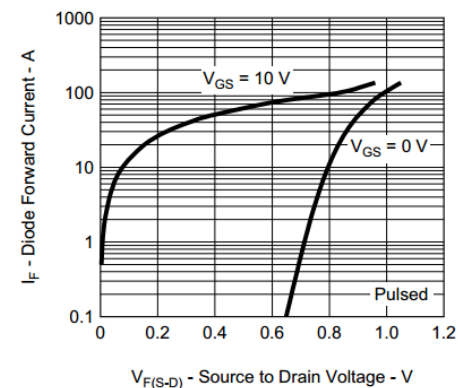
Simulated



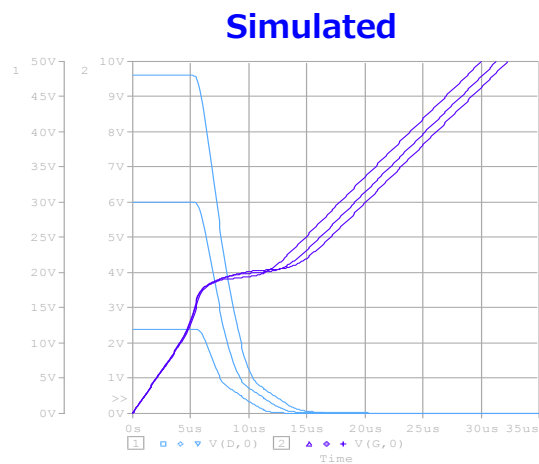
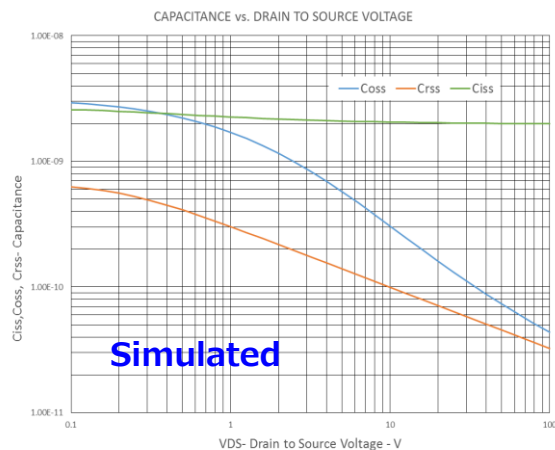
Simulated



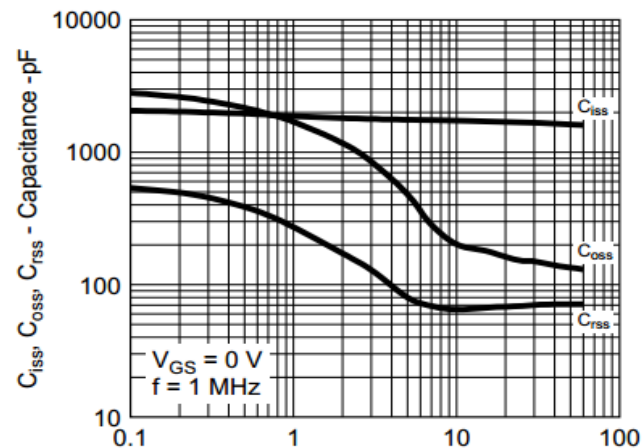
SOURCE TO DRAIN DIODE FORWARD VOLTAGE



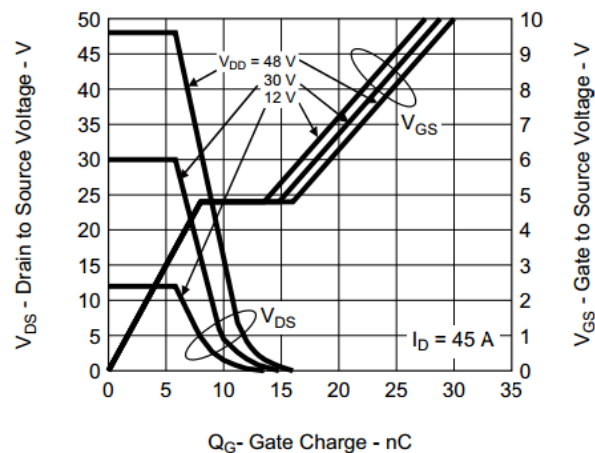
## • C-Vds,Vgs/Vds-Qg特性



CAPACITANCE vs. DRAIN TO SOURCE VOLTAGE

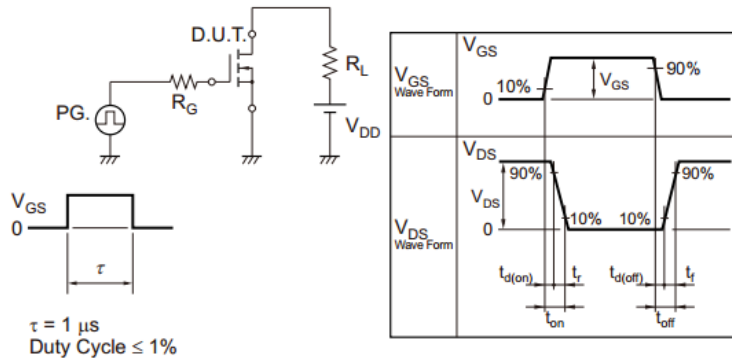


DYNAMIC INPUT/OUTPUT CHARACTERISTICS

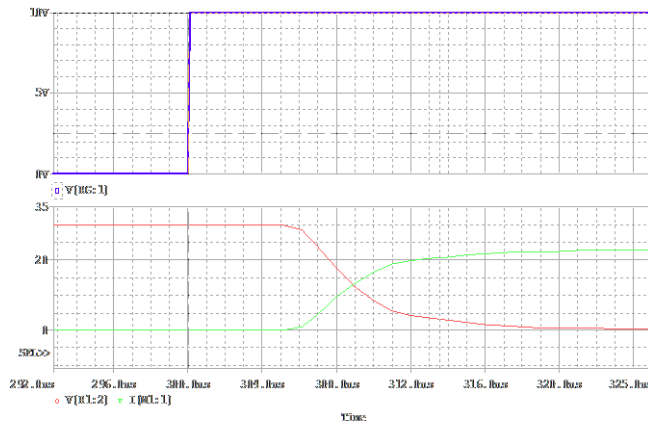


## • スイッチング波形の妥当性が確認できない

### TEST CIRCUIT 2 SWITCHING TIME



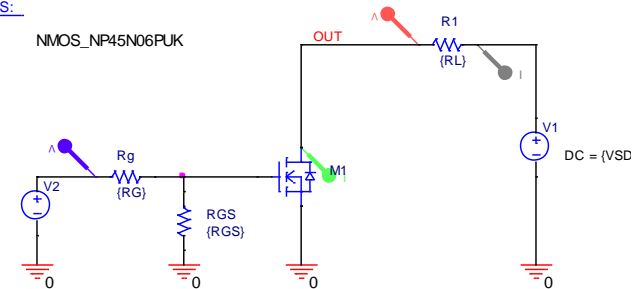
$t_{d(on)}$	—	15	40	ns	$V_{DD} = 30 \text{ V}$ , $I_D = 23 \text{ A}$ $V_{GS} = 10 \text{ V}$ $R_G = 0 \Omega$
$t_r$	—	5	20	ns	
$t_{d(off)}$	—	37	80	ns	
$t_f$	—	3	10	ns	



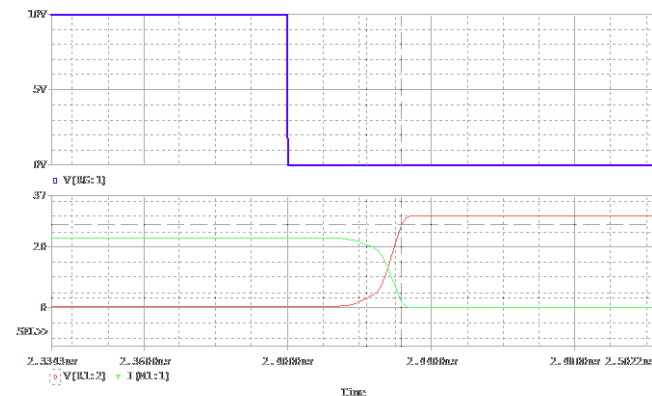
### Switching characteristics

#### PARAMETERS:

$V_{SD} = 30$   
 $V_G = 10$   
 $R_L = 1.3$   
 $R_G = 1 \text{ m}$   
 $R_{GS} = 1 \text{ g}$



	データシート	Simulated
$t_{d(on)}$	15ns	6.4ns
$t_r(on)$	5ns	23.9ns
$t_{d(off)}$	37ns	2.82ns
$t_f(off)$	3ns	24ns



# パワーデバイスに関する規格調査

## • IEC規格の調査

- パワー半導体関連のIEC規格情報について、SC47E/WG3国内委員会より、以下の情報を入手
  - IEC 60747-2 Rectifier diodes
  - IEC 60747-3 Signal, switching and regulator diodes
  - IEC 60747-6 Thyristors
  - IEC 60747-7 Bipolar transistors
  - **IEC 60747-8 Field-effect transistors**
  - IEC 60747-9 Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)
  - IEC 60747-15 Isolated power semiconductor devices
- **IEC規格内には、パワー半導体の測定に関する規定がありそう**



### Measuring methods

- 1 General
- 2 Alternative methods of measurement
- 3 Measurement accuracy
- 4 Protection of devices and measuring equipment
- 5 Thermal conditions for measuring methods
- 6 Accuracy of measuring circuits

# まとめ

- 現状のパワーデバイス用のモデリング精度を確認
- データシートの記載内容に不一致例を確認
- ガイドラインの要旨をリストアップした
- 各デバイスのIEC60747企画の内容確認が必要
  - － (Ron、パルスIV特性、容量特性、ゲートチャージ特性、スイッチング特性、ダイオード逆回復特性)

## 今後の活動

- － IEC 60747-8 (MOSFET)記載内容とモデルの精度の因果関係を調査
- － データシート記載で追加情報の新たなガイドライが必要であれば継続検討する (JEITA規格にするかどうか)
- － デバイスメーカ様の協力を得て、モデルの精度実現に貢献
- － パワーデバイスモデリング技術セミナー