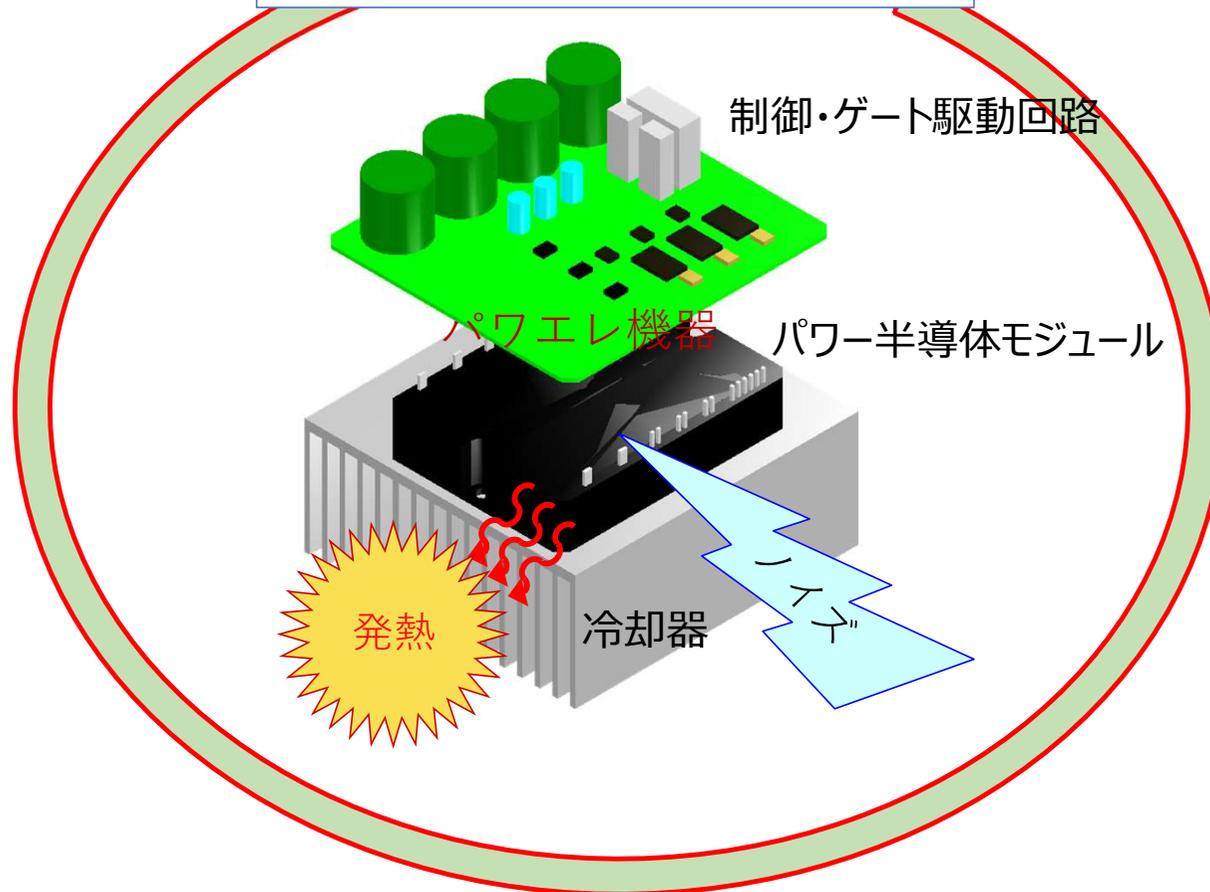


1. パワー半導体デバイスモデルの開発

- ①中嶋, 堀口, 浦壁, 萩原,
「SiC-MOSFET, GaN-HEMTに適用可能なユニバーサルデバイスモデルの開発」,
令和3年電気学会全国大会, WEB17-B2・パワーエレクトロニクスデバイス評価・4-001 (2021)
- ②J. Nakashima, T. Horiguchi, Y. Mukunoki, M. Hagiwara, T. Urakabe and S. Harada,
“Automated Flexible Modeling for Various Full-SiC Power Modules”,
IEEE Transactions on Power Electronics (Early Access), pp. 1-15 (2023)
- ③井口, 原田, 浦壁, 中嶋, 堀口, 椋木,
「温度特性を考慮したGaNデバイスモデルの研究」,
電気学会 電子デバイス/半導体電力変換 合同研究会, EDD-23-037/SPC-23-220, 2023

【目的】 シミュレーション（解析）技術を活用したパワエレ機器の仮想での
製作・検証のための精度良い・使いやすいパワー半導体モデルの構築

シミュレーション（解析）



1. SiCパワー半導体デバイスの I_D - V_{DS} 静特性モデルの構築

モデル化の手法 (@MATLAB)

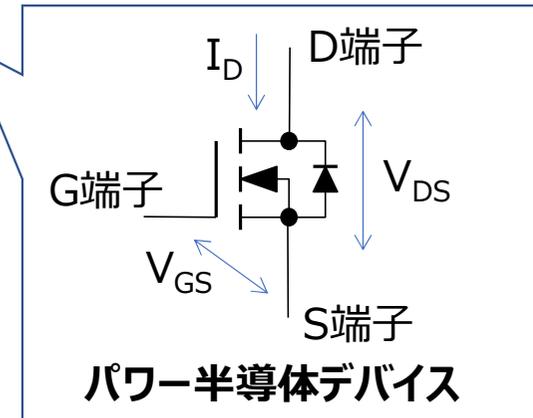
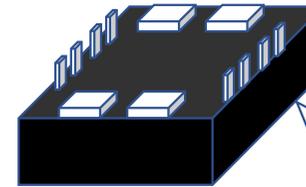
Step.1
実測データ(I_D 対 V_{DS})を取り込み, 各 V_{GS} データに対して
基本モデル式内の変数
F1, F2, F3の値を抽出 (最小二乗法)

Step.2
抽出したF1, F2, F3データを
 V_{GS} の関数としてガウス関数でモデル化

Step.3
F1~3モデルを基本モデル式に置換

パワー半導体モデルの完成

パワー半導体モジュール



$$I_D = F1_{(V_{GS})} \times \tanh\left(F2_{(V_{GS})} \times V_{DS}\right) + F3_{(V_{GS})} \times V_{DS}$$

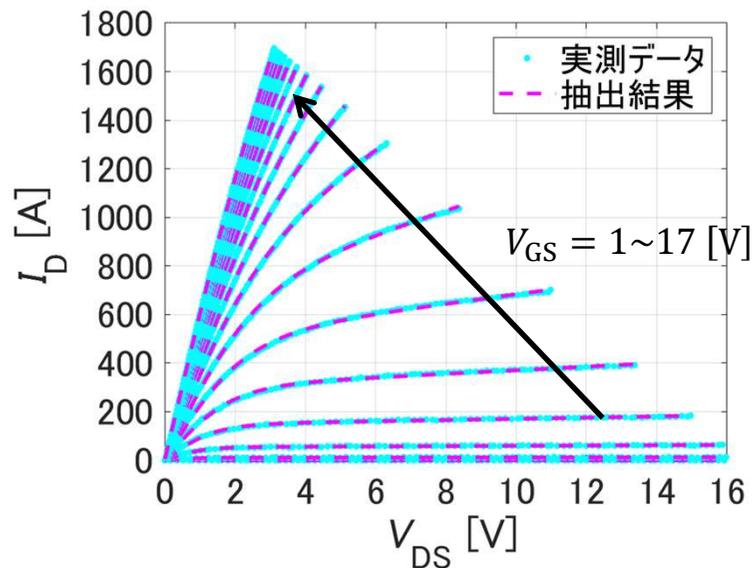
対象データ : 1.2 kV/800AフルSiCモジュール

Step.1

実測データ(I_D 対 V_{DS})を取り込み, 各 V_{GS} データに対して
基本モデル式内の変数
F1, F2, F3の値を抽出 (最小二乗法)

* 基本モデル式と実測データをF1~3でフィッティング

基本モデル式: $I_D(V_{DS}) = f(\mathbf{F1}, \mathbf{F2}, \mathbf{F3}, V_{DS})$
 $= \mathbf{F1} \times \tanh(\mathbf{F2} \times V_{DS} \dots) + \dots$



対象データ: 1.2 kVフルSiCモジュール

Step.2

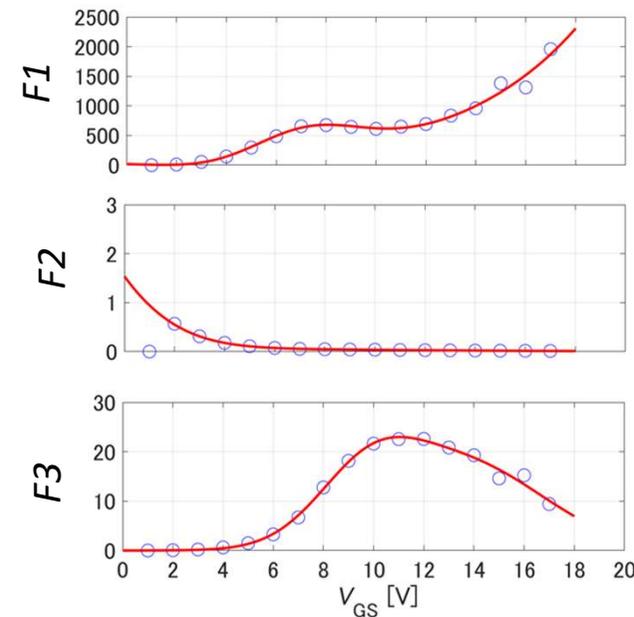
抽出したF1, F2, F3データを
 V_{GS} の関数としてガウス関数でモデル化

$$F1(V_{GS}) = \sum_{i=1}^n A1_i \times e^{-\left(\frac{V_{GS}-B1_i}{C1_i}\right)^2}$$

$$F2(V_{GS}) = \sum_{i=1}^n A2_i \times e^{-\left(\frac{V_{GS}-B2_i}{C2_i}\right)^2}$$

$$F3(V_{GS}) = \sum_{i=1}^n A3_i \times e^{-\left(\frac{V_{GS}-B3_i}{C3_i}\right)^2}$$

$A1_i \sim C3_i$
は定数パラメータ



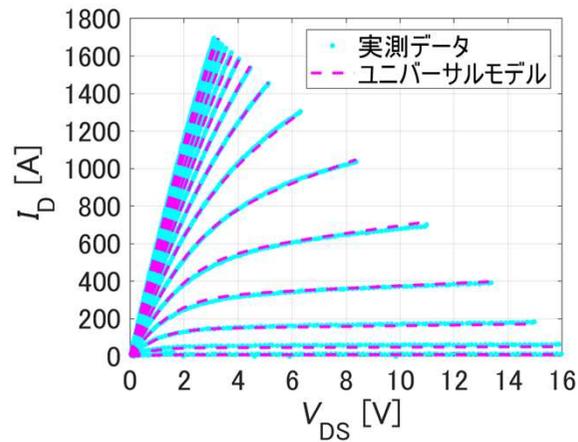
○ 抽出データ
— モデル化結果

Step.3

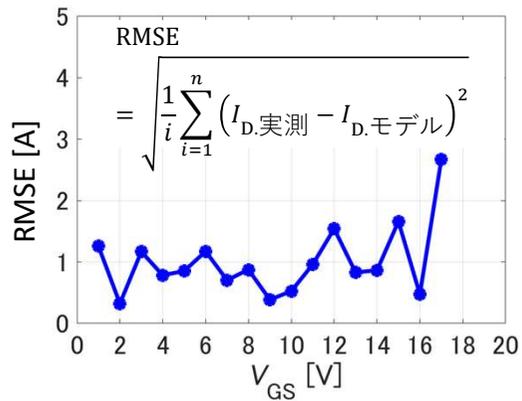
Func1~3モデルを基本モデル式に置換

* パワー半導体デバイスモデルの完成

$$I_{D(V_{DS}, V_{GS})} = f(F1(V_{GS}), F2(V_{GS}), F3(V_{GS}), V_{DS})$$



実測データとモデル比較



実測データとモデルのRMSE

対象データ : 1.2 kVフルSiCモジュール

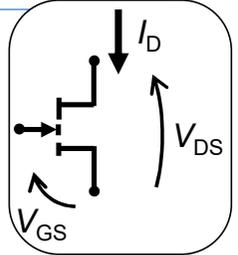
2. GaNパワー半導体デバイスの温度特性考慮の I_D - V_{DS} 静特性モデルの構築

モデル化の手法 (@MATLAB)

Step.1

前記モデル化手法を用いて25°Cモデルを作成

$$I_D = F1_{(V_{GS})} \times \left(2 - e^{\frac{-V_{DS}}{F2_{(V_{GS})}}} \right) \times \tanh \left(-\frac{V_{DS}}{F3_{(V_{GS})}} \right)$$



Step.2

Step1で求めたモデル式に温度項を付加

$$I_D = F_{temp1} \times F1_{(V_{GS})} \times \left(2 - e^{\frac{-V_{DS}}{F2_{(V_{GS})}}} \right) \times \tanh \left(-\frac{V_{DS}}{F3_{(V_{GS})}} \times F_{temp2} \right)$$

Step.3

実測データ(温度毎の I_D 対 V_{DS})を取り込み, 各 V_{GS} , 温度
 T データに対して基本モデル式内の変数
 F_{temp1}, F_{temp2} の値を抽出 (GA法)

Step.4

抽出した F_{temp1}, F_{temp2} データを V_{GS}, T の関数としてモデル化

Step.5

F_{temp1}, F_{temp2} モデルを基本モデル式に置換

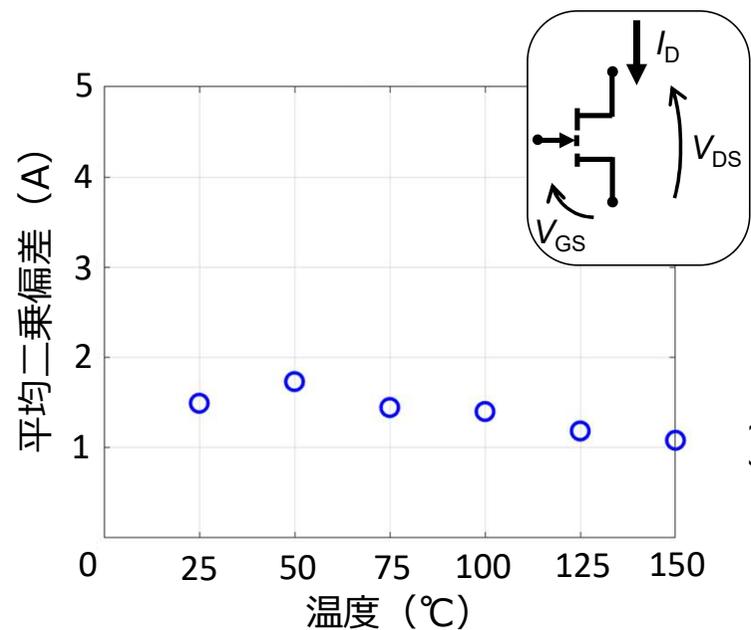
$$I_D = F_{temp1(V_{GS}, T)} \times F1_{(V_{GS})} \times \left(2 - e^{\frac{-V_{DS}}{F2_{(V_{GS})}}} \right) \times \tanh \left(-\frac{V_{DS}}{F3_{(V_{GS})}} \times F_{temp2(V_{GS}, T)} \right)$$

パワー半導体モデルの完成

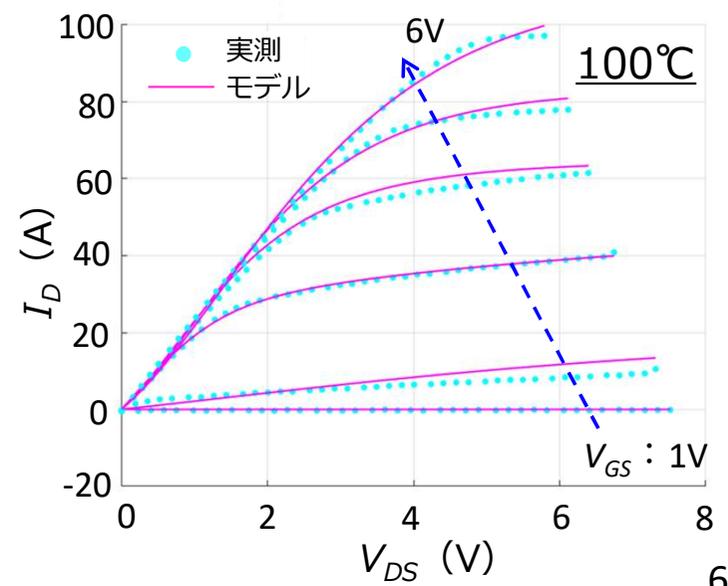
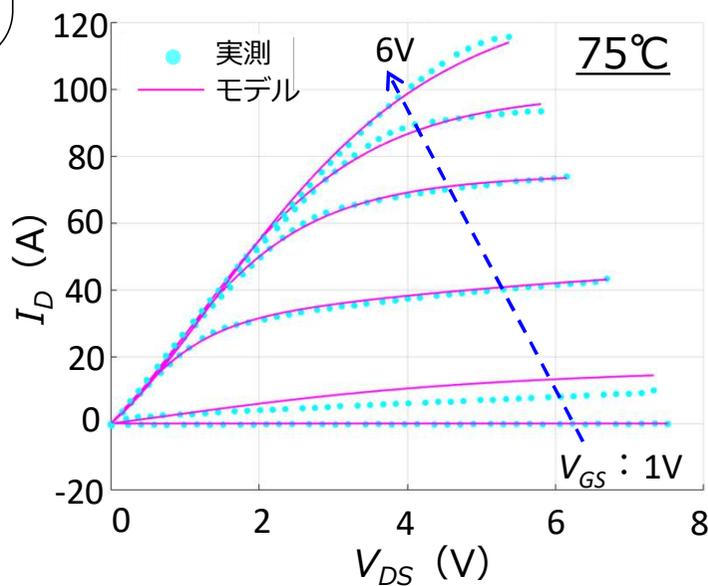
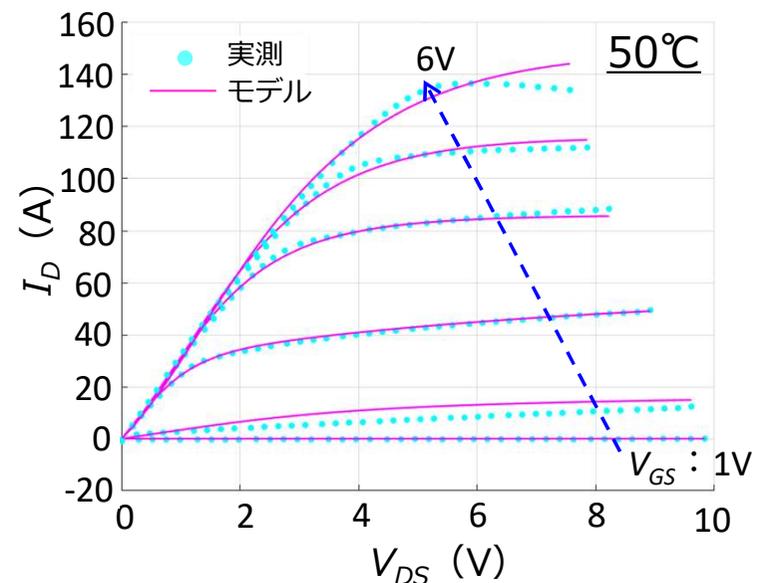
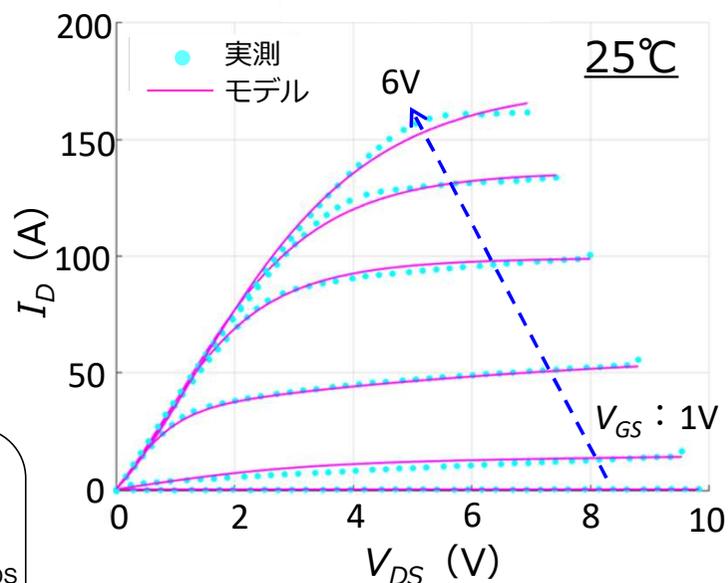
対象データ : GS66516B (650V/60A) GaN-HEMT

GaNパワー半導体デバイス 実測データとモデルの比較

25～150℃の範囲にて、実測
とモデルの平均二乗偏差1.47A
(定格60Aに対して2.5%)

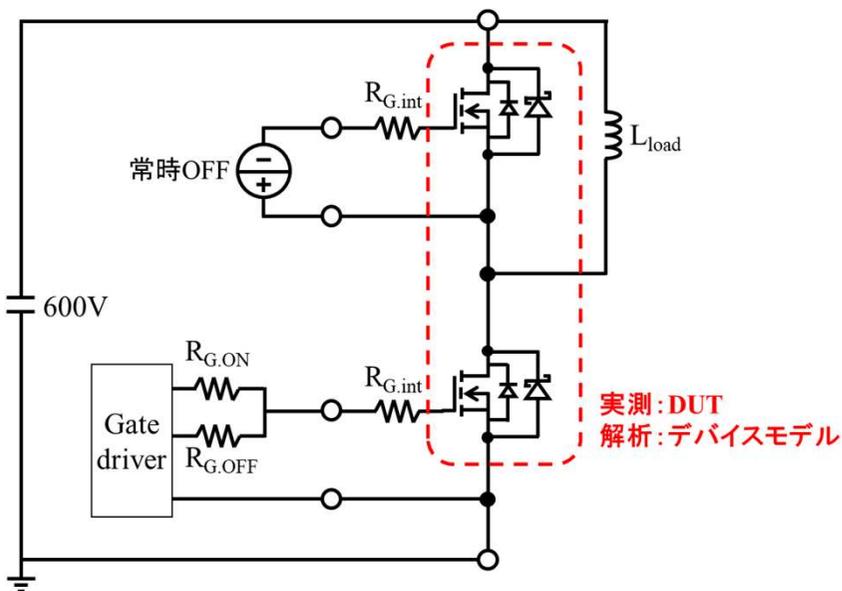


各温度における実測とモデルの
平均二乗偏差



3. SiCパワー半導体デバイスの実測スイッチング波形とモデルの合わせこみ

① 試験回路にて波形を計測



試験回路の構成

④ 焼きなまし法により目的関数を最小化

② 調整パラメータを付加

I_D - V_{DS} モデル, C_{GS} モデル, C_{DG} モデル, ゲート抵抗 ($R_{G.ON}$, $R_{G.OFF}$, $R_{G.int}$)に調整パラメータを付加

③ 調整用の目的関数を設定

実測波形と解析波形の以下の差分を100A~1600A(合計16電流条件)それぞれで計算しRMSE(二乗平均平方根誤差)を計算

- 実測と解析 I_G の絶対誤差のRMSE
- 実測と解析 V_{GS} の絶対誤差のRMSE
- 実測と解析 dI_D/dt の絶対誤差のRMSE
- 実測と解析 dV_{DS}/dt の絶対誤差のRMSE

$$I_{G.ON.RMSE} = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} \{(\Delta I_{G.ON}(@I_D=i \times 100[A]))^2\}}$$

ターンオンとターンオフを考慮し、合計8要素から成る目的関数を設定

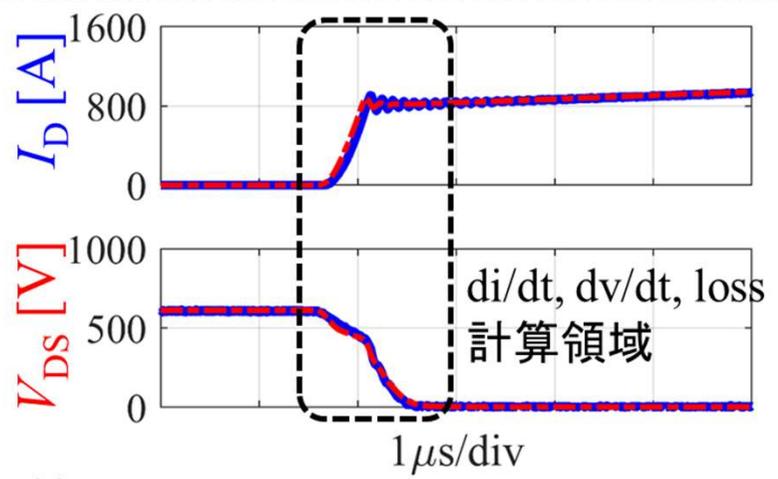
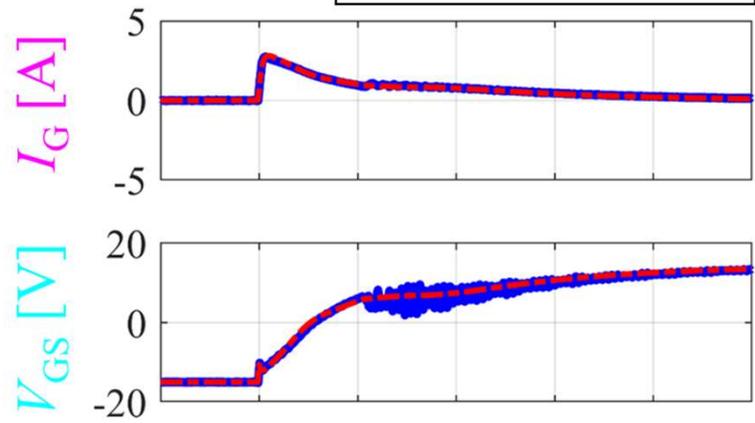
$$f_{obj} =$$

$$I_{G.ON.RMSE} + I_{G.OFF.RMSE} + V_{GS.ON.RMSE} + V_{GS.OFF.RMSE} \\ + \frac{dI_{D.ON}}{dt} RMSE + \frac{dI_{D.OFF}}{dt} RMSE + \frac{dV_{DS.ON}}{dt} RMSE + \frac{dV_{DS.OFF}}{dt} RMSE$$

実測と解析比較 (ターンオン)

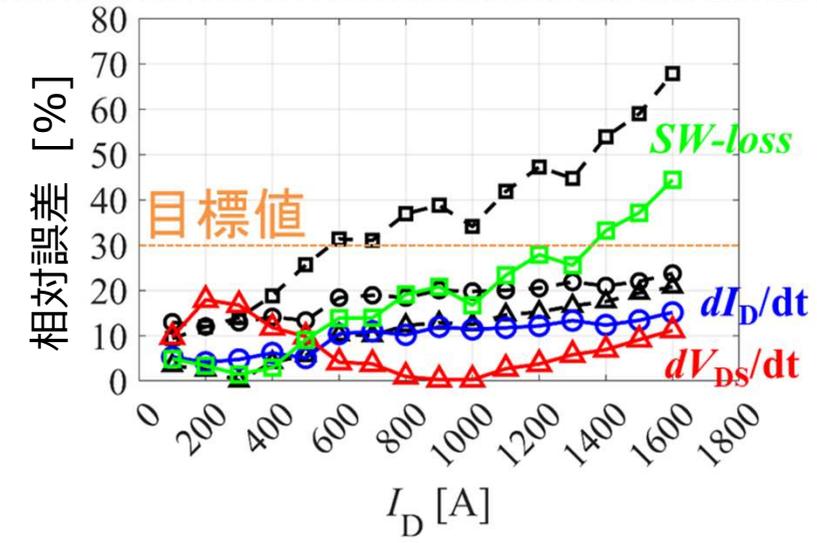
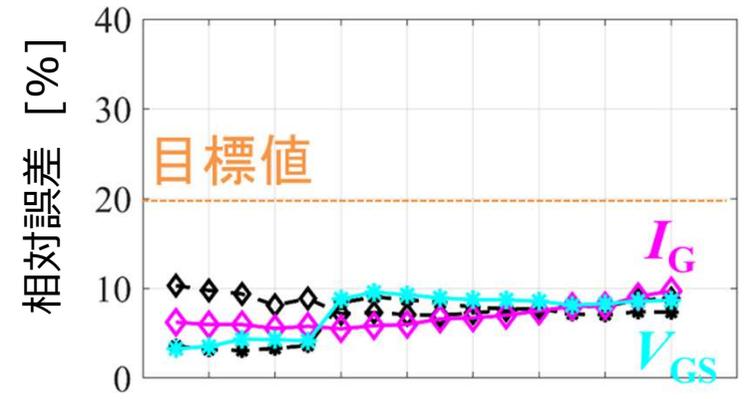
代表波形

— 実測 - - - モデル



定格電流 ($I_D=800A$)

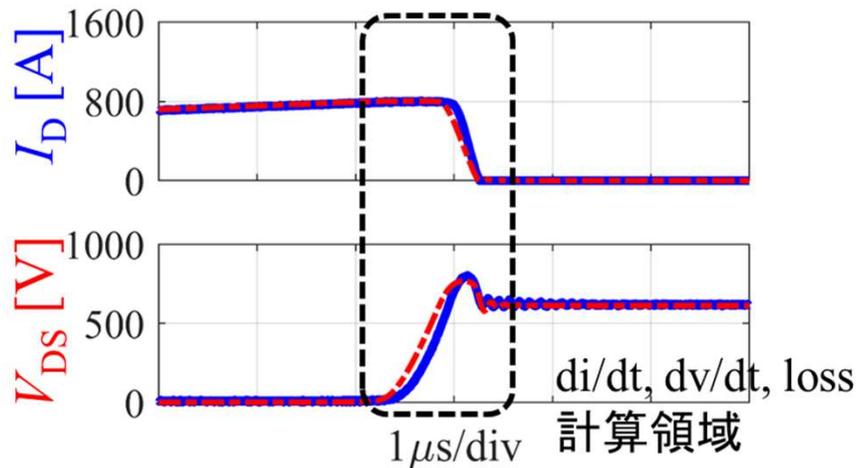
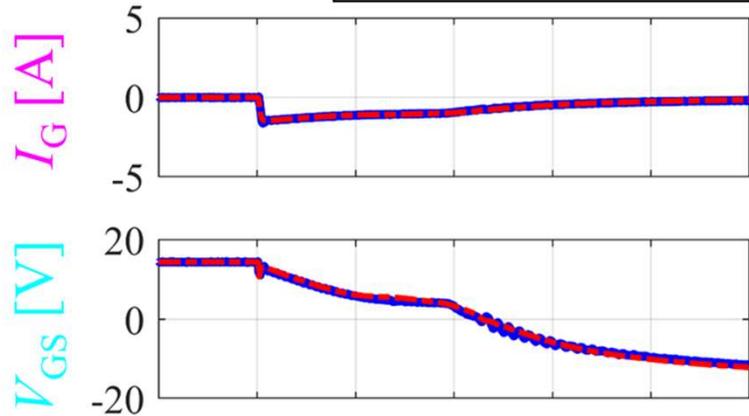
黒 : 調整パラメータ無
色付 : 調整パラメータ有



実測と解析比較 (ターンオフ)

代表波形

— 実測 - - - モデル



40

定格電流 ($I_D=800A$)

黒 : 調整パラメータ無
色付 : 調整パラメータ有

