

**非絶縁型同期整流方式降圧 DC-DC 電源  
基本シミュレーション回路  
リファレンスガイド**

**RD047-RGUIDE-01**

---

**東芝デバイス&ストレージ株式会社**

## 目次

<b>1. はじめに</b> .....	<b>3</b>
<b>2. 非絶縁型同期整流方式降圧 DC-DC 電源概要</b> .....	<b>5</b>
2.1. 電源仕様 .....	5
2.2. 回路構成 .....	5
<b>3. シミュレーション動作検証結果</b> .....	<b>7</b>
<b>4. 使用素子概要</b> .....	<b>11</b>
4.1. TPH6R003NL .....	11
4.2. TPH2R903PL .....	11
<b>5. シミュレーション回路使用方法</b> .....	<b>12</b>

## 1. はじめに

情報通信機器や家電をはじめ、ほとんどの電気機器の内部回路は直流（DC）電圧で動作しています。そのため、交流（AC）電圧で供給される商用電力で直接動作させることはできず、AC電圧からDC電圧に変換し供給する必要があります。

このAC電圧からDC電圧に変換するものがAC-DC電源です。機器内の各負荷の電源仕様によっては、AC-DC電源より供給されるDC電圧をその仕様に応じてDC電圧に更に変換する必要があります。

このようにDC電圧からDC電圧へ変換を行うものがDC-DC電源です。図1.1に、機器における電源ライン構成例を示します。負荷に応じて複数の電源ラインがあり、AC-DC電源より供給される出力電圧や、その出力電圧を更にDC-DC電源を介して異なるDC電圧へ変換する場合があります。

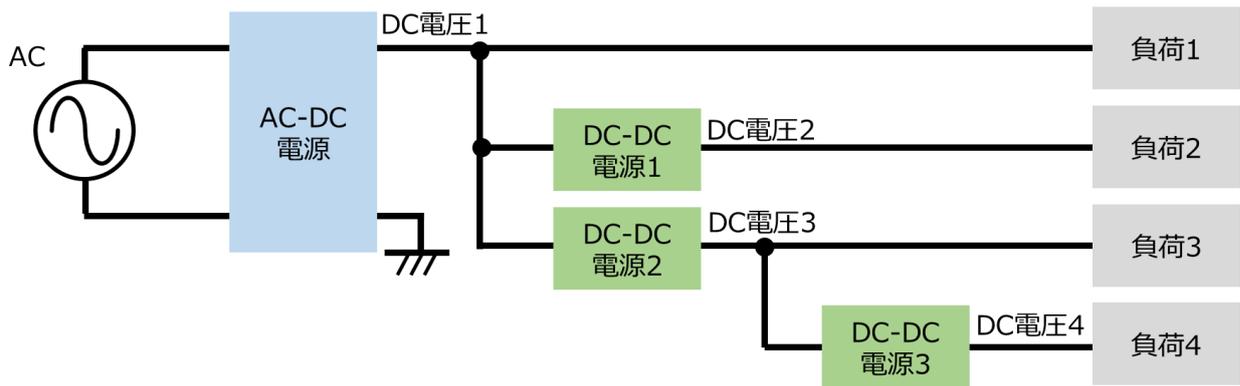


図 1.1 機器における電源ライン構成例

DC電圧からDC電圧へ変換する方式には、大きく分けてシリースレギュレート方式とスイッチングレギュレート方式（以下、シリース方式とスイッチング方式）の2種類があります。本ドキュメントは、DC-DC電源で主流であるスイッチング方式を取り扱います。スイッチング方式は、スイッチング素子のオン/オフ時間を調整し所望の電圧を生成するもので、シリース方式に比べ制御回路が複雑になりますが、一般にシリース方式よりも損失を少なくできます。

スイッチング方式には、トランスを介し入力側と出力側が絶縁された絶縁型DC-DC電源と、入力側と出力側が絶縁されていない非絶縁型DC-DC電源があります。本ドキュメントは非絶縁型DC-DC電源を取り扱います。

非絶縁型DC-DC電源はインダクター、スイッチング素子、整流用ダイオードで構成され、スイッチング素子を数百kHz程度の周波数でスイッチングさせ、入力DC電圧を所望のDC電圧で出力します。入力電圧に対して、(a)低い電圧を生成する降圧型電源、(b)高い電圧を生成する昇圧型電源、(c)低い電圧または高い電圧のいずれかを生成する昇降圧型電源の3種類があります。各電源の基本構成を図1.2に示します。ダイオード通電時の損失削減を目的にダイオードの代わりにMOSFETを使用したものを同期整流方式と呼びます。また、降圧型の非絶縁型DC-DC電源は、Buckコンバーターと呼ばれることもあります。

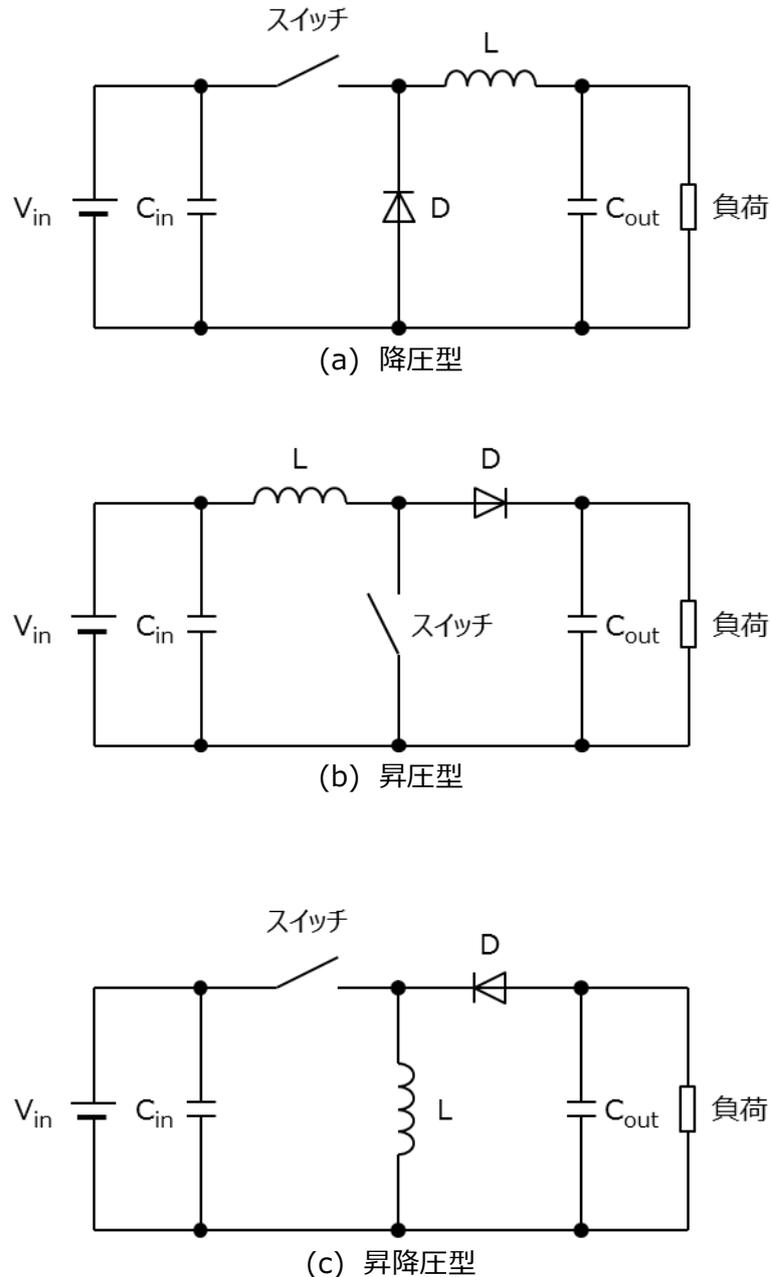


図 1.2 非絶縁型 DC-DC 電源回路ブロック例

本ドキュメントでは、入力電圧よりも低い電圧を生成する降圧型電源で、整流部にダイオードに代わり MOSFET を使用した同期整流方式電源を扱います。同期整流方式はダイオード整流方式と比べ、制御が複雑になり、MOSFET 駆動回路の追加が必要となりますが、高負荷時の効率向上が図れるため出力電流の大きな電源では主流となっています。この非絶縁型同期整流方式降圧 DC-DC 電源の動作を理解いただくために、基本シミュレーション回路 (RD047-SPICE-01) を当社 Web 上で提供しています。

本ドキュメントでは、このシミュレーション回路の概要、使用方法などを解説していきます。シミュレーション回路を動作させるためには、Cadence<sup>®</sup>社の OrCAD<sup>®</sup> Capture 及び PSpice<sup>®</sup> A/D ツールが必要となります。また、本シミュレーション回路及びドキュメントは OrCAD<sup>®</sup> 17.2 に基づき作成されています。

## 2. 非絶縁型同期整流方式降圧 DC-DC 電源概要

基本シミュレーション回路 (RD047-SPICE-01) は、40 W 出力の非絶縁型同期整流方式 DC-DC コンバーターを構成しています。

### 2.1. 電源仕様

本ドキュメントで説明する DC-DC 電源の仕様は、以下の通りです。

- ・入力電圧： 12 V
- ・出力電圧： 5 V
- ・出力電力： 40 W
- ・動作周波数： 300 kHz
- ・インダクター電流リップル変動率： 40 %
- ・出カインダクター： 3.3  $\mu$ H

### 2.2. 回路構成

図 2.1 に OrCAD<sup>®</sup> 上で動作するシミュレーション回路を示します。これは、非絶縁型同期整流方式の DC-DC 電源であり、主に DC-DC コンバーター部、PWM コントローラー部で構成されています。パワー部のローサイドは MOSFET を用いた同期整流方式の回路となっています。PWM コントローラーは基本回路を実現するために用意した MOSFET ゲートドライバー内蔵の汎用コントローラーです。ハイサイド MOSFET は「TPH6R003NL」を、ローサイド MOSFET は「TPH2R903PL」を例として使用しています。

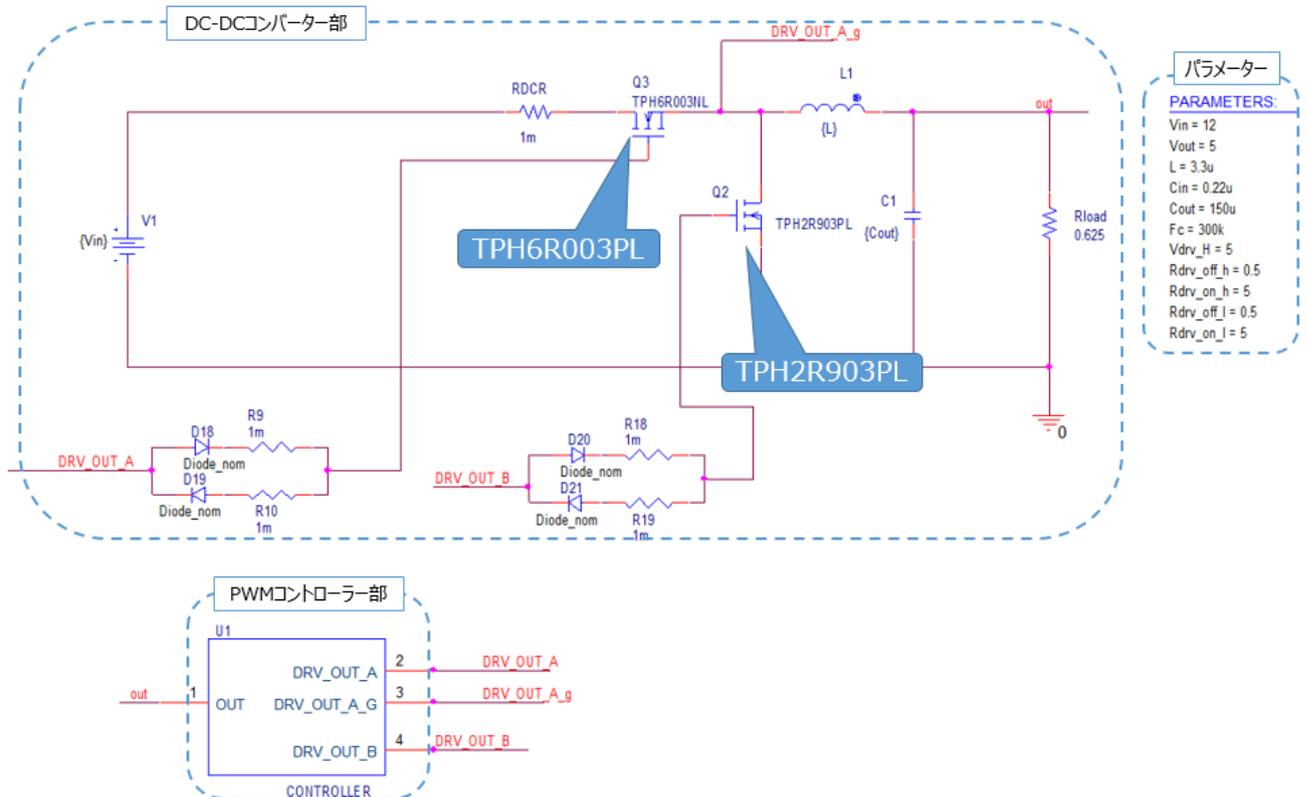


図 2.1 40W 非絶縁型同期整流方式降圧 DC-DC 電源シミュレーション回路

## ハイサイド MOSFET の選定

ハイサイド MOSFET (TPH6R003NL :  $V_{DSS}=30\text{ V}$ ,  $I_D=38\text{ A}$ ) は以下の観点で選定しています。

### (1) 素子耐圧

入力電圧=12 V であるので、スイッチング時のサージ電圧を考慮し耐圧 30 V 以上の素子を選定。

### (2) 電流定格

入力電流が最大となるのは、最大出力電力時です。最大出力電力=40 W 時の変換効率を 85 % とすると最大入力電力は 47.1 W となります。最大出力電力時にハイサイド MOSFET に印加される電流の平均値は約 3.9 A となります。そこで電流定格 8 A 以上でピーク電流定格が 16 A 以上の素子を選定。

## ローサイド MOSFET の選定

ローサイド MOSFET (TPH2R903PL :  $V_{DSS}=30\text{ V}$ ,  $I_D=70\text{ A}$ ) は以下の観点で選定しています。

### (1) 素子耐圧

入力電圧=12 V であるので、スイッチング時のサージ電圧を考慮し耐圧 30 V 以上の素子を選定。

### (2) 電流定格

入力電流が最大となるのは、最大出力電力時です。最大出力電力=40 W 時です。ローサイド MOSFET のオン期間はスイッチング周期の 7/12 程度ですので、最大出力電力時にローサイド MOSFET に印加される電流の平均値は約 4.7 A となります。そこで電流定格 9 A 以上でピーク電流定格が 18 A 以上の素子を選定。

## インダクターの選定

インダクターの選定方法について説明します。本シミュレーション回路におけるインダクターのインダクタンス値は、電源仕様である下記項目を用いて計算により求めることができます。

- ・ 入力電圧 :  $V_{in}$  (V)
- ・ 出力電圧 :  $V_{out}$  (V)
- ・ スwitching 周波数 :  $F_c$  (Hz)
- ・ 出力電流 :  $I_{out}$  (A)
- ・ インダクターインダクタンス :  $L$  (H)
- ・ インダクター電流リップル変動率 :  $\Delta I_L$  (%)

インダクター電流のリップル変動率 ( $\Delta I_L$ ) は、以下の式で表されます。

$$\Delta I_L = \left( \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \times \frac{V_{out}}{V_{in} \times F_c} \right) \div I_{out} \times 100$$

インダクターの電流リップルが最大となるのは、出力電流が最大の時であるので、電源仕様より入力電圧 ( $V_{in}$ ) = 12 V、出力電圧 ( $V_{out}$ ) = 5 V、スイッチング周波数 ( $F_c$ ) = 300 kHz、出力電流 ( $I_{out}$ ) = 8 A、インダクター電流リップル変動率 ( $\Delta I_L$ ) = 40 % を上記式に代入すると、インダクターインダクタンス ( $L$ ) は、3.04  $\mu\text{H}$  と算出されます。そこで今回は設定値として 3.3  $\mu\text{H}$  のインダクターを選定します。

実際の設計においては、インダクターは直流重畳特性によりインダクタンス値が変動します。直流重畳特性によりインダクタンス値が低下した状態で、上記計算値の値を確保できる部品を選定してください。

### 3. シミュレーション動作検証結果

ここではシミュレーション回路における各部の動作シミュレーション波形を図 3.1 ( (1) ~ (2) ) のそれぞれのポイントで示します。

(1) 非絶縁 DC-DC 電源 (Buck コンバーター方式) 基本動作 (「ハイサイド MOSFET ドレイン-ソース間電圧・ドレイン電流、ローサイド MOSFET ドレイン-ソース間電圧・ドレイン電流、出力インダクター電流」)

(2) DC-DC 電源としての「出力電圧・電流」

実際に回路モデルを使用する際には、図 3.1 以外の部分についても波形を表示させることが可能です。波形の表示方法については第 5 章で記述します。

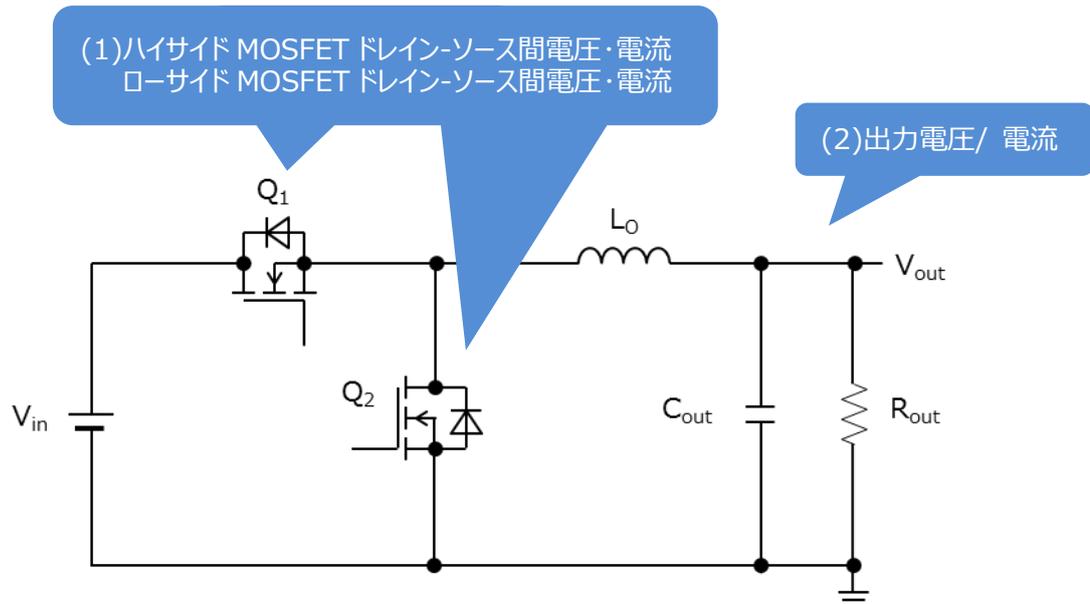


図 3.1 シミュレーション波形測定ポイント一覧

### (1) Buck コンバーター方式基本動作

図 3.2 を使用して、Buck コンバーター方式の基本動作を説明します。

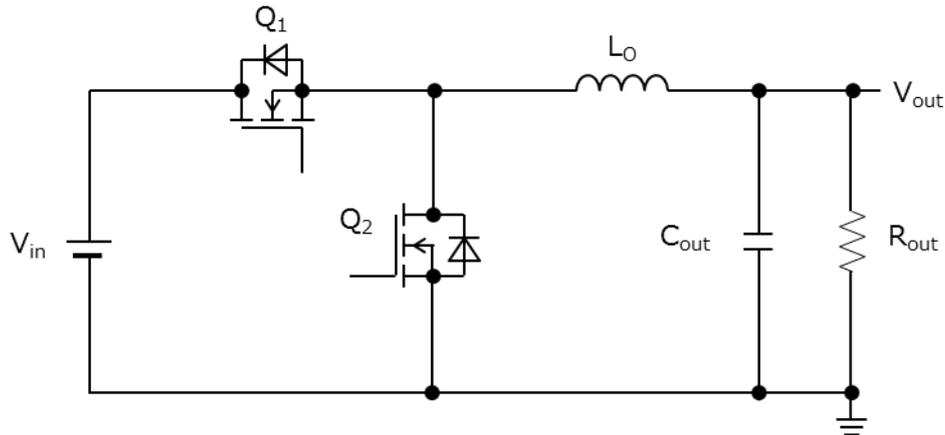


図 3.2 Buck コンバーター回路

ハイサイド MOSFET を  $Q_1$ 、ローサイド MOSFET を  $Q_2$ 、出カインダクターを  $L_O$  とします。また、 $Q_2$  のドレイン・ソース間ボディダイオードを  $D(Q_2)$  とします。一般的に、Buck コンバーター方式は、 $Q_1$  を一定の周波数で動作させて、デューティ比 ( $D=T_{on}/T$ ) を可変する PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) 制御を用いて、

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T} \times V_{in}$$

$T$  : 1 周期の時間 (s)

$T_{on}$  : ハイサイド MOSFET のオン時間 (s)

で決定される電圧が出力されます。

以下に各期間の動作概要を記します。

#### a. $Q_1$ オン、 $Q_2$ オフ

$Q_1$  がオンすると、出カインダクター  $L_O$  には  $V_{Lo} = V_{in} - V_{out}$  の電圧が印加されて、

$$i_{Lo(on)} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L_O} \times T_{on}$$

で決定される電流が直線的に増加して流れ、 $C_{out}$  を充電し出力電流  $I_{out}$  を供給します。このとき、 $L_O$  には磁気エネルギーが蓄えられます。

また、 $Q_1$  がオンした瞬間には、 $Q_2$  の出力容量  $C_{oss}$  を充電するにパルス状の電流が流れます。

#### b. $Q_1$ オフ、 $Q_2$ オフ

$Q_1$  と  $Q_2$  が同時にオン状態となって流れる貫通電流を防止するために、 $Q_1$  と  $Q_2$  がともにオフとなるデッドタイム期間です。この期間では、 $L_O$  に蓄えられていたエネルギーが  $D(Q_2)$  を経由して環流することで  $I_{out}$  を供給します。

### c. Q<sub>1</sub> オフ、Q<sub>2</sub> オン

Q<sub>2</sub> がオンとなり、D(Q<sub>2</sub>)に流れていた環流電流は、Q<sub>2</sub> のソースからドレインに向かって流れて I<sub>out</sub> を供給します。Q<sub>2</sub> がオンすることにより、この期間の導通損失は I<sub>D</sub><sup>2</sup> × R<sub>DS(ON)</sub> となり、ダイオードの導通損失 V<sub>F</sub> × I<sub>F</sub> に対して小さくすることができます。また、この期間で L<sub>O</sub> には、

$$i_{L_{O(off)}} = \frac{-V_{out}}{L_O} \times T_{off}$$

で決定される電流が直線的に減少して流れます。

### d. Q<sub>1</sub> オフ、Q<sub>2</sub> オフ

b.と同様に貫通電流防止のためのデッドタイム期間です。この期間では、環流電流が D (Q<sub>2</sub>) を経由して流れます。

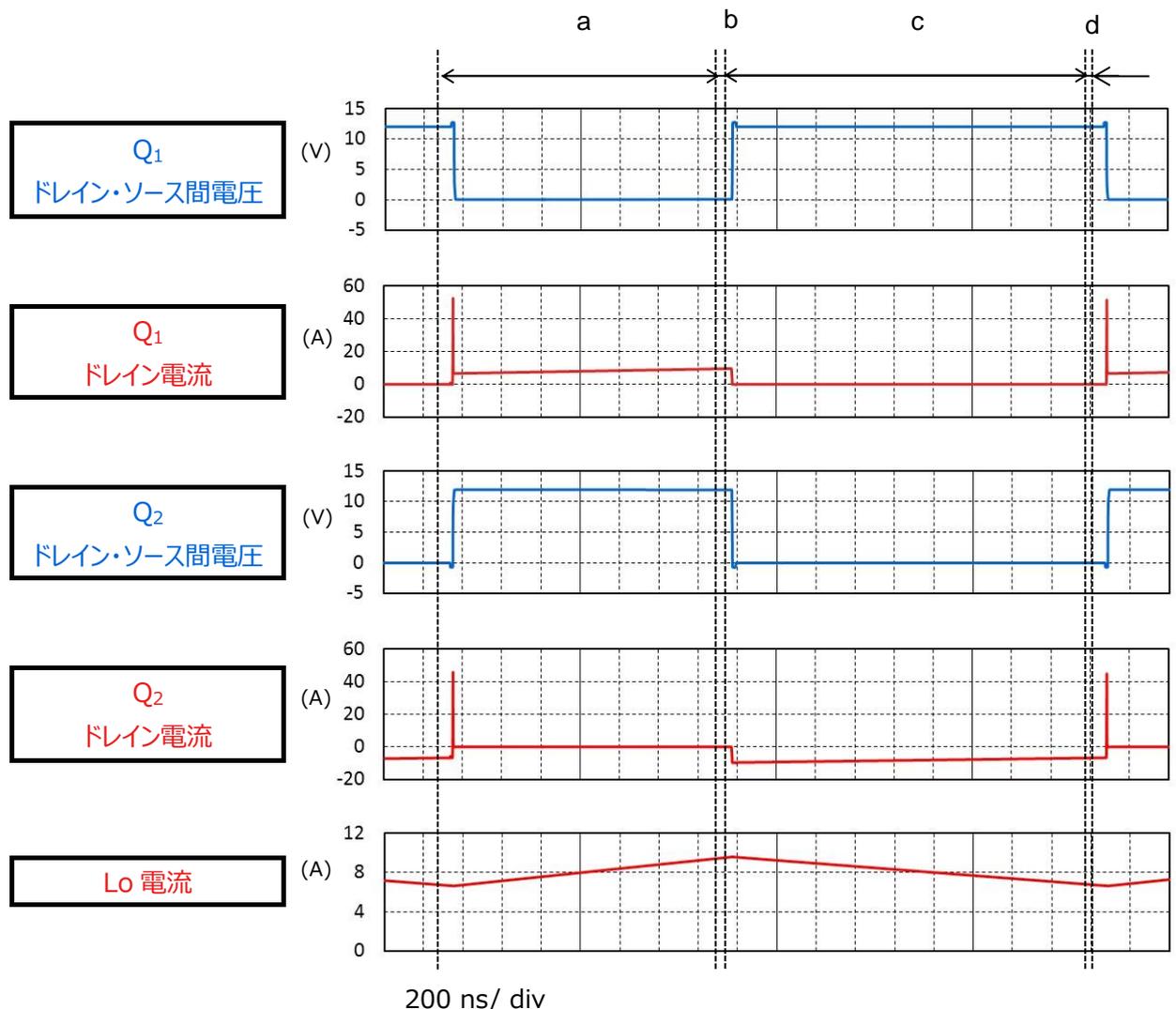
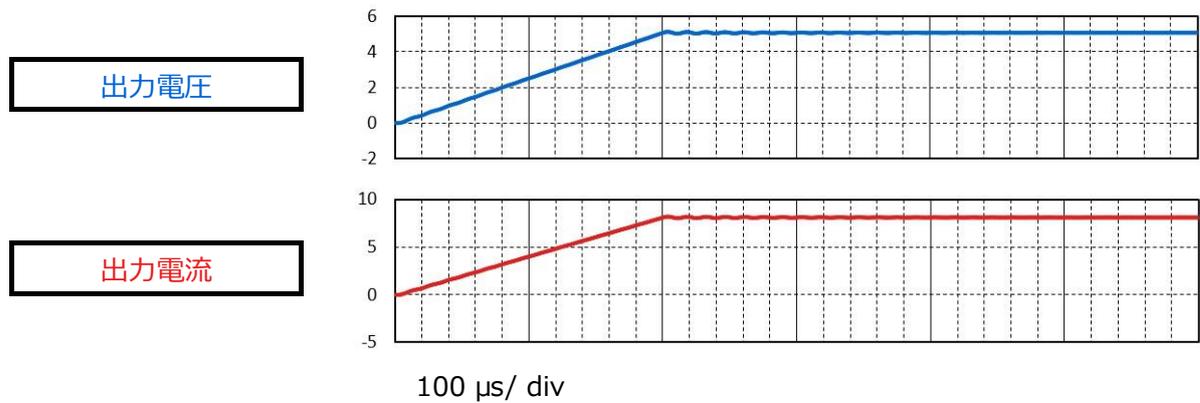


図 3.3 ハイサイド側 MOSFET、ローサイド側 MOSFET のドレイン・ソース間電圧、ドレイン電流と出カインダクター電流

**(2) DC-DC 電源としての「出力電圧・電流」**

図 3.4 に本電源回路の出力電圧・電流波形を示します。本電源回路では、ソフトスタート期間を設けて 1 ms 後に設定電圧・電流で安定していることが分かります。

**図 3.4 出力電圧・電流波形**

### 4. 使用素子概要

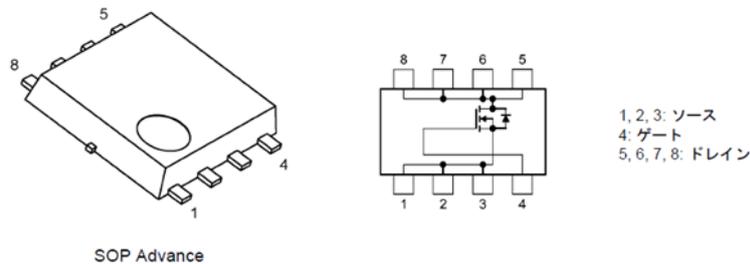
本回路に PSpice<sup>®</sup>モデルを組み込んで検証している当社製品の概要を紹介します。

#### 4.1. TPH6R003NL

##### 特徴

- $V_{DSS}=30\text{ V}$ ,  $I_D=38\text{ A}$
- 高速スイッチング
- 小さいゲート入力電荷量 :  $Q_{SW}=4.3\text{ nC}$  (標準)
- 低いオン抵抗 :  $R_{DS(ON)}=6.8\text{ m}\Omega$  (標準) ( $V_{GS}=4.5\text{ V}$ )
- 低い漏れ電流 :  $I_{DSS}=10\text{ }\mu\text{A}$  (最大) ( $V_{DS}=30\text{ V}$ )
- 取り扱いが簡単なエンハンスメントタイプ :  $V_{th}=1.3\sim 2.3\text{ V}$  ( $V_{DS}=10\text{ V}$ ,  $I_D=0.2\text{ mA}$ )

##### 外観と端子配置



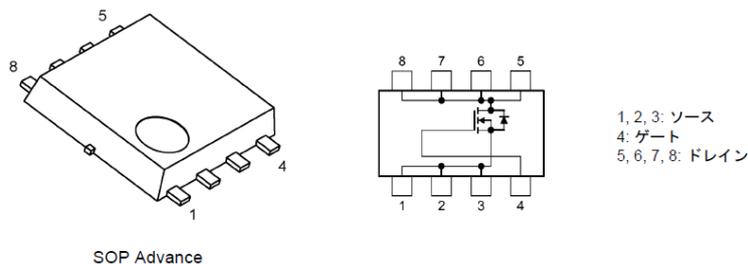
幅 6.0 × 長さ 5.0 × 高さ 0.95 (mm)

#### 4.2. TPH2R903PL

##### 特徴

- $V_{DSS}=30\text{ V}$ ,  $I_D=70\text{ A}$
- 高速スイッチング
- 小さいゲート入力電荷量 :  $Q_{SW}=5.6\text{ nC}$  (標準)
- 小さい出力電荷量 :  $Q_{OSS}=17\text{ nC}$  (標準)
- 低いオン抵抗 :  $R_{DS(ON)}=2.1\text{ m}\Omega$  (標準) ( $V_{GS}=10\text{ V}$ )
- 低い漏れ電流 :  $I_{DSS}=10\text{ }\mu\text{A}$  (最大) ( $V_{DS}=30\text{ V}$ )
- 取り扱いが簡単なエンハンスメントタイプ :  $V_{th}=1.1\sim 2.1\text{ V}$  ( $V_{DS}=10\text{ V}$ ,  $I_D=0.2\text{ mA}$ )

##### 外観と端子配置



幅 6.0 × 長さ 5.0 × 高さ 0.95 (mm)

## 5. シミュレーション回路使用方法

本シミュレーション回路では、実際の仕様に沿った動作や、回路定数に応じた変化を検証するために、OrCAD<sup>®</sup> Capture 上で各種パラメータを自由に変更し、動作解析をすることが可能です。以下では実際にシミュレーションを行う際のパラメータ設定方法、動作解析方法について説明します。本シミュレーション回路は、「RD047-SPICE-01」をダウンロードしフォルダ内の OPJ ファイル (.opj) を開くことで立ち上がります。

### パラメータ設定の方法

シミュレーション回路で設定可能なパラメータの一覧を表 5.1 に示します。パラメータ設定部の変数をダブルクリックすると、図 5.1 に示す「Display Properties」ウインドウが表示されますので、その中の「Value」値を変更してください。

表 5.1 パラメータ設定部で設定可能な変数一覧

変数名	単位	説明
Vin	V	入力電圧
Vout	V	出力電圧
L	H	インダクターインダクタンス
Cin	F	入力コンデンサ容量
Cout	F	出力コンデンサ容量
Fc	Hz	スイッチング周波数
Vdrv_H	V	MOSFET 駆動電圧
Rdrv_off_h	$\Omega$	ハイサイド MOSFET ゲートドライバー内部抵抗(オフ側)
Rdrv_on_h	$\Omega$	ハイサイド MOSFET ゲートドライバー内部抵抗(オン側)
Rdrv_off_l	$\Omega$	ローサイド MOSFET ゲートドライバー内部抵抗(オフ側)
Rdrv_on_l	$\Omega$	ローサイド MOSFET ゲートドライバー内部抵抗(オン側)

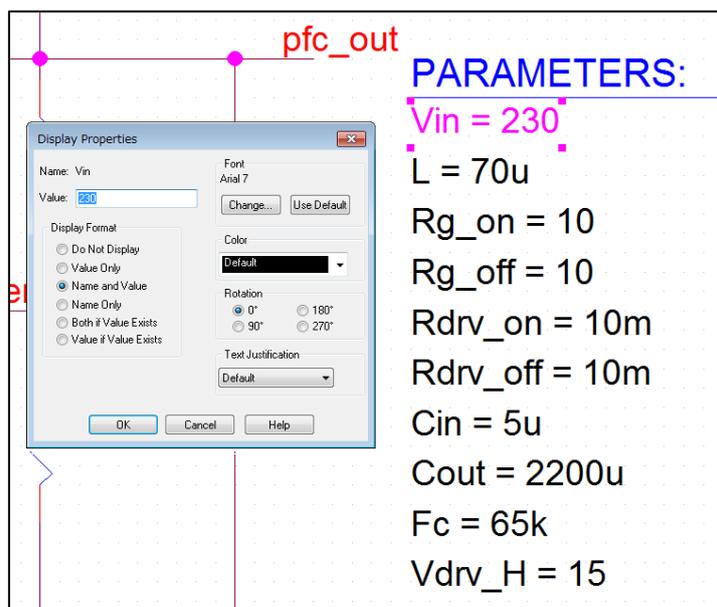


図 5.1 パラメータ設定画面

### 解析設定の方法

本シミュレーション回路のシミュレーション実行手順を下記に説明します。

- (1) OrCAD<sup>®</sup> Capture メニューバー上の「PSpice」-「New Simulation Profile」をクリックすると、図 5.2 に示す「New Simulation」ウインドウが表示されます。任意のプロファイル名を指定し、「Create」をクリックしてください。

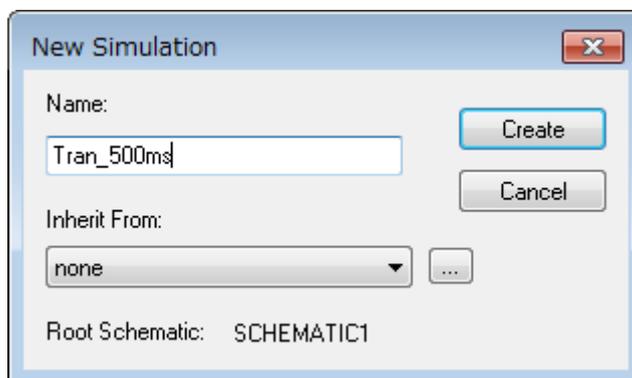


図 5.2 「New Simulation」画面

- (2) 1.の手順後、図 5.3 に示す「Simulation Settings」ウインドウが表示され、各種解析設定が可能になります。まずは「Analysis」タブにて解析方法の設定を行います。「Analysis Type」は「Time Domain (Transient)」を指定してください。「Run To Time」で解析終了時間を指定し、「Maximum Step Size」にて解析における最大刻み幅を指定してください。

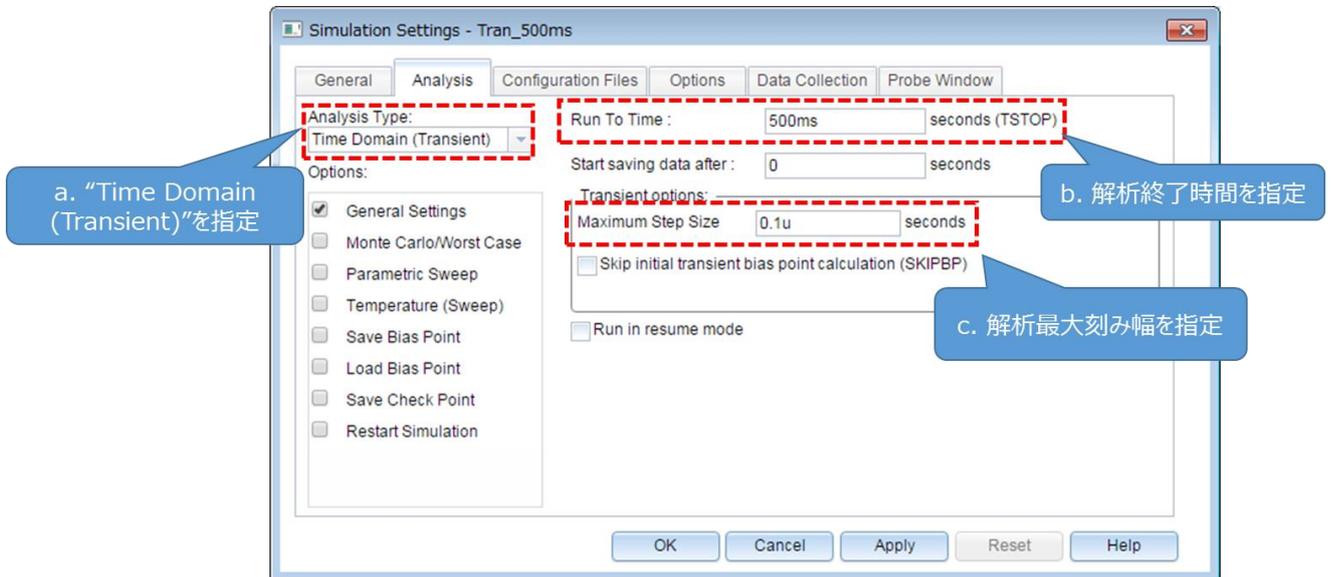


図 5.3 「Simulation Settings」-「Analysis」画面

- (3) 「Options」タブにて解析オプションの設定を行います。本モデルでのシミュレーションにおいては、図 5.4 に示すように「Analog Simulation」-「Auto Converge」-「AutoConverge」にチェックを入れ、自動収束機能を有効にすることを推奨します。

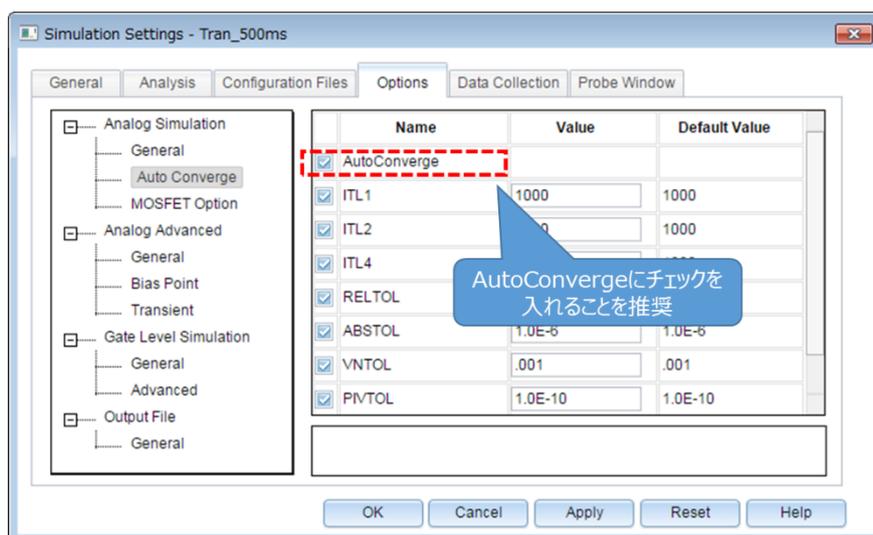


図 5.4 「Simulation Settings」-「Options」画面

- (4) 上記設定が完了したら、「OK」をクリックし、「Simulation Settings」ウインドウを閉じてください。  
 (5) OrCAD® Capture メニューバーの「PSpice」-「Run」でシミュレーションを実行します。PSpice® A/D が自動で起動し、シミュレーションが実行されます。

### 結果確認方法

シミュレーション完了後の結果確認方法について説明します。PSpice<sup>®</sup> A/D 画面上に結果波形を表示する方法として、2通りの方法があります。下記に各方法の手順について説明します。

#### 方法 1. ネット名を指定した結果表示

- (1) グラフウィンドウのグラフ枠外を右クリック後、「Add Trace」を選択してください。(図 5.5)
- (2) 「Add Traces」画面から表示する波形を選択します。電圧波形の場合には V(ネット名)、電流波形の場合には I(素子名)を選択してください。(図 5.6)
- (3) 選択後、「OK」をクリックすることで結果波形が表示されます。(図 5.7)

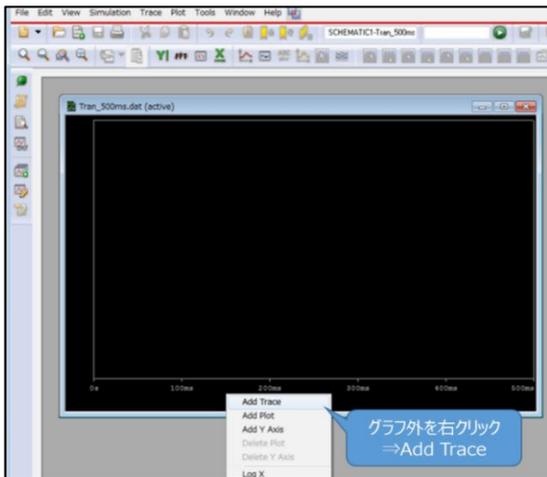


図 5.5 グラフウィンドウ

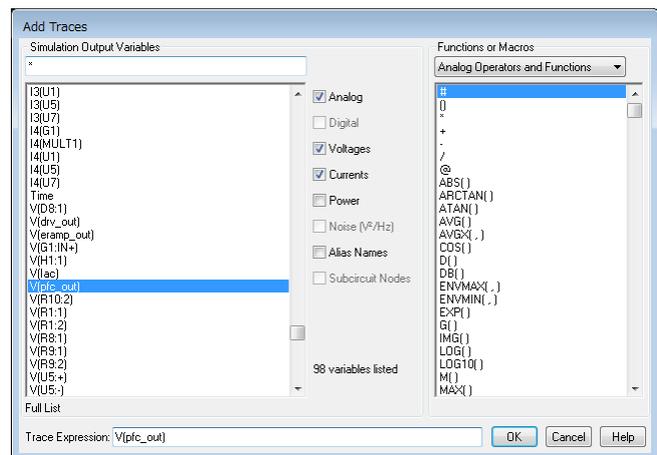


図 5.6 「Add Traces」画面

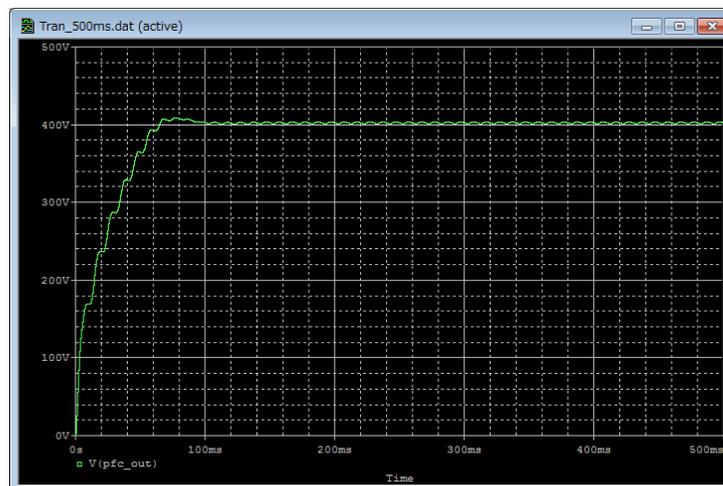


図 5.7 結果波形表示 (例：出力電圧波形)

### 方法 2. Marker 機能を使用した結果表示

- (1) OrCAD<sup>®</sup> Capture メニューバーの「PSpice」-「Markers」から、表示させる波形に応じて Marker 種類を選択します。(図 5.8)
- (2) シミュレーション回路上の波形測定ポイントに Marker を配置します。(図 5.9)
- (3) PSpice<sup>®</sup> A/D のグラフウィンドウに結果波形が表示されます。(図 5.10)

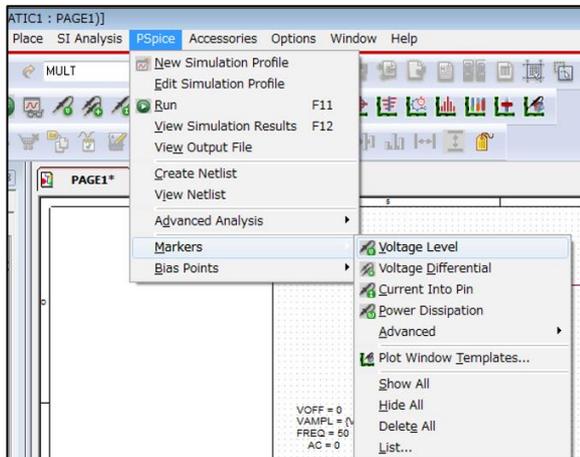


図 5.8 Marker 種類選択画面

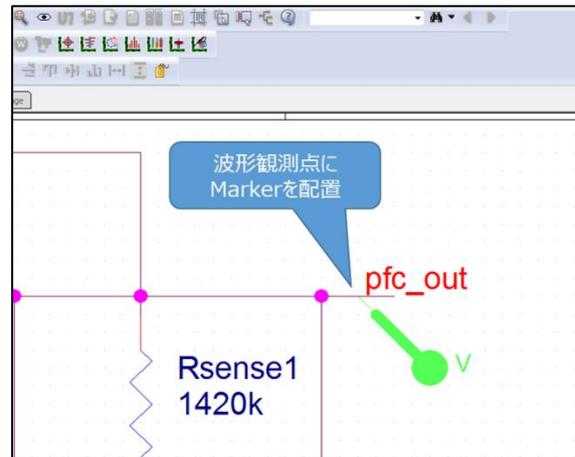


図 5.9 回路上への Marker 配置

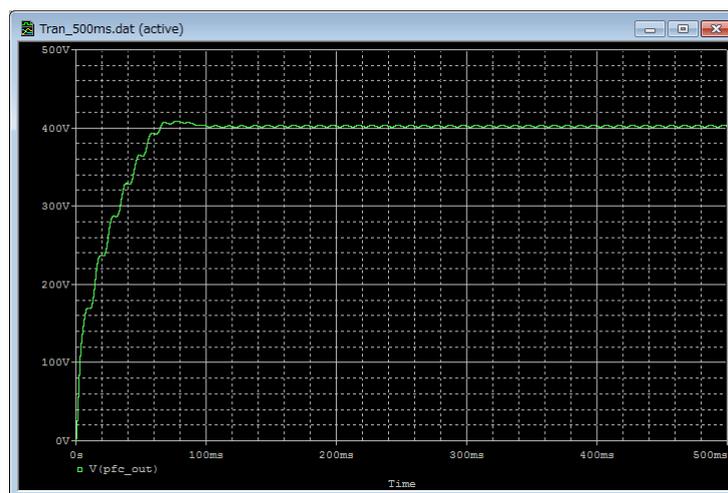


図 5.10 結果波形表示(例：出力電圧波形)

※Cadence、Cadence ㊦、OrCAD、PSpice および OrCAD ㊦は Cadence Design Systems, Inc.の米国 またはその他の国における商標または登録商標です。

## ご利用規約

本規約は、お客様と東芝デバイス&ストレージ株式会社（以下「当社」といいます）との間で、当社半導体製品を搭載した機器を設計する際に参考となるドキュメント及びデータ（以下「本リファレンスデザイン」といいます）の使用に関する条件を定めるものです。お客様は本規約を遵守しなければなりません。本リファレンスデザインをダウンロードすることをもって、お客様は本規約に同意したものとみなされます。なお、本規約は変更される場合があります。当社は、理由の如何を問わずいつでも本規約を解除することができます。本規約が解除された場合は、お客様は、本リファレンスデザインを破棄しなければなりません。またお客様が本規約に違反した場合は、お客様は、本リファレンスデザインを破棄し、その破棄したことを証する書面を当社に提出しなければなりません。

### 第1条 禁止事項

お客様の禁止事項は、以下の通りです。

1. 本リファレンスデザインは、機器設計の参考データとして使用されることを意図しています。信頼性検証など、それ以外の目的には使用しないでください。
2. 本リファレンスデザインを販売、譲渡、貸与等しないでください。
3. 本リファレンスデザインは、高低温・多湿・強電磁界などの対環境評価には使用できません。
4. 本リファレンスデザインを、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用しないでください。

### 第2条 保証制限等

1. 本リファレンスデザインは、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
2. 本リファレンスデザインは参考用のデータです。当社は、データおよび情報の正確性、完全性に関して一切の保証をいたしません。
3. 半導体素子は誤作動したり故障したりすることがあります。本リファレンスデザインを参考に機器設計を行う場合は、誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。また、使用されている半導体素子に関する最新の情報（半導体信頼性ハンドブック、仕様書、データシート、アプリケーションノートなど）をご確認の上、これに従ってください。
4. 本リファレンスデザインを参考に機器設計を行う場合は、システム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断して下さい。当社は、適用可否に対する責任を負いません。
5. 本リファレンスデザインは、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
6. 当社は、本リファレンスデザインに関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をせず、また当社は、本リファレンスデザインに関する一切の損害（間接損害、結果的損害、特別損害、付随的損害、逸失利益、機会損失、休業損、データ喪失等を含むがこれに限らない。）につき一切の責任を負いません。

### 第3条 輸出管理

お客様は本リファレンスデザインを、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用してはなりません。また、お客様は「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守しなければなりません。

### 第4条 準拠法

本規約の準拠法は日本法とします。