

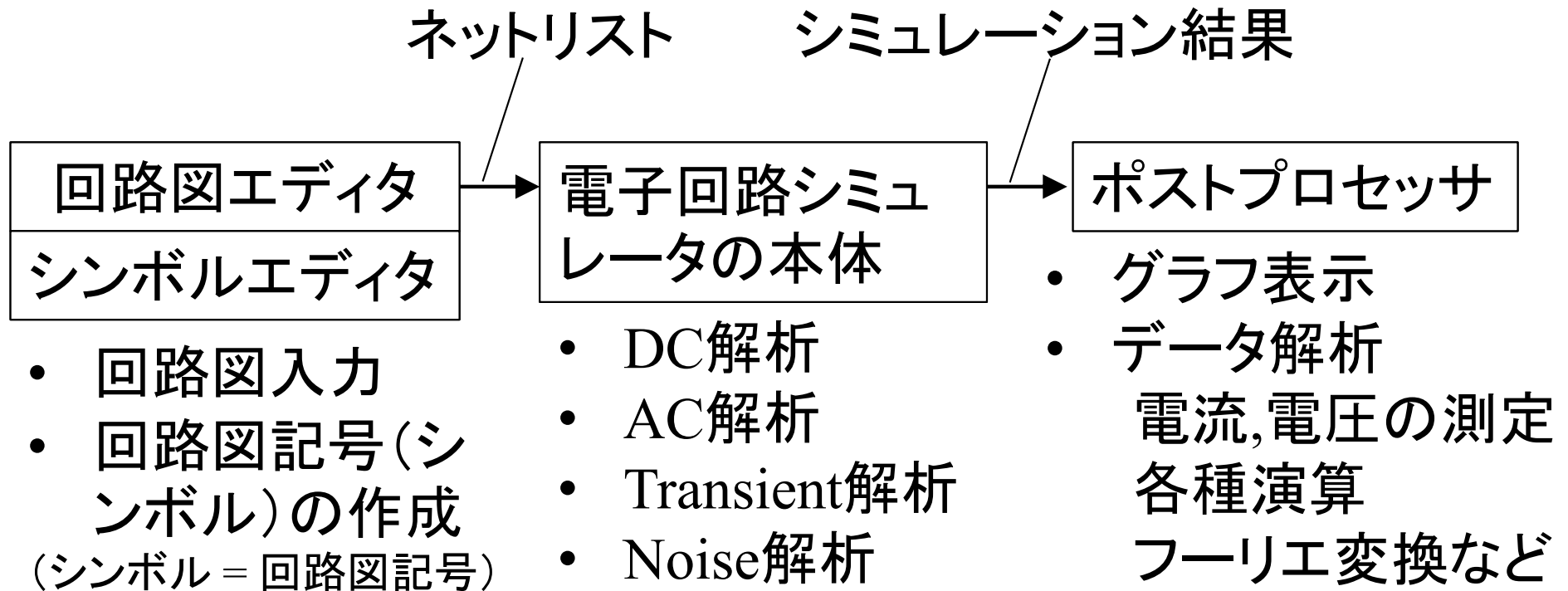
第2章 電子回路シミュレータ

電子回路シミュレータの基礎知識

回路設計の基本的なツールである電子回路シミュレータの仕組みと機能(参考書1-1節参照)

2.1 電子回路シミュレータの機能

電子回路シミュレータの構造と機能



(参考) 電子回路シミュレータの本体は、カリフォルニア大学バークレイ校で開発されたSPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)のソースコードを元に開発されたものが多い。これらの回路シミュレータをSPICE系シミュレータと呼ぶ。この他の回路シミュレータは、非SPICEまたはPost-SPICEシミュレータと呼ばれる。

前スライドの専門用語

Schematic:	回路図 (Schematic diagram, Circuit diagramという用語もあるがSchematicと呼ぶのが普通)
Symbol:	回路記号
Netlist:	ネットリスト (回路図の部品接続情報)
Schematic entry:	回路図入力 (Schematic captureも同義)
Circuit simulator:	電子回路シミュレータ
DC analysis:	DC解析 (または直流解析)
AC analysis:	AC解析 (または小信号交流解析または周波数特性解析)
Transient analysis:	過渡応答解析 (またはトランジェント解析)
Noise analysis:	ノイズ解析 (またはノイズパワースペクトラム解析)
Postprocessor:	ポストプロセッサ (データの可視化処理やフォーマット変換などを行うソフト)

電子回路シミュレータの主な解析機能

実測するとき必要な計測器

解析の種類	得られる特性
DC解析	横軸が電圧または電流の特性(マルチメータ)
AC解析	横軸が周波数の特性(ネットワークアナライザ)
Transient解析	横軸が時間の解析(オシロスコープ)
Noise解析	横軸が周波数、縦軸が雑音電圧密度

- 他の解析に比べて、Transient解析は時間がかかる。トランジスタ数が1000個以上の場合、高性能PCを使用しても、数日かかることが多い
- 回路を設計するためには、色々な解析法を組み合わせる必要がある。初心者はTransient解析だけに頼りがちだが、これでは意図通りに動作する回路を設計できない

デバイスのモデルパラメータ

L, C, R

キャパシタンス $C = 10\text{pF}$

インダクタンス $L = 10\text{nH}$

抵抗 $R = 10\text{k}\Omega$

各デバイスの特性は、最低1個のパラメータで表せる。→ 回路図に書き込んでしまう。

ダイオード

飽和電流 $I_s = 100\text{pA}$

電位障壁 $V_j = 0.65\text{V}$

エミッション係数 $n = 1.2$

ゼロバイアス接合容量 $C_{jo} = 100\text{pF}$

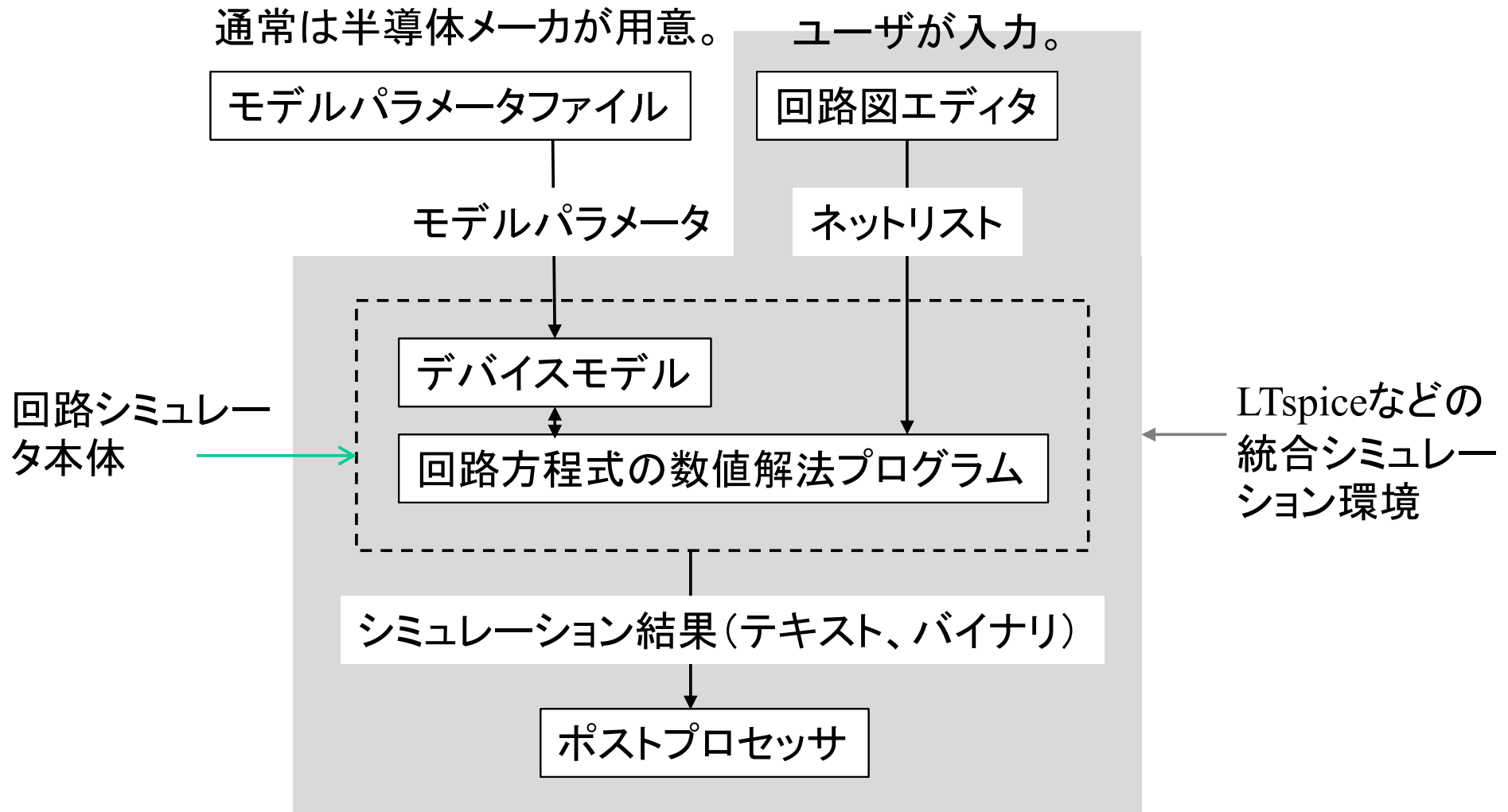
ブレークダウン電圧 $BV = 250\text{V}$

⋮

特性の計算には多くのパラメータが必要。→ **モデルパラメータファイルに記載してインクルード。**

トランジスタの特性計算には、数10個のパラメータが必要。

電子回路シミュレータの処理フロー



デバイスモデル(Device model):

半導体デバイスの特性を表す計算式。

モデルパラメータ(Model parameter):

デバイスモデルに含まれるパラメータ。

電子回路シミュレータの限界

- 電子回路シミュレータでシミュレーションできないケース
 - 温度が時間変化する場合や、部品によって異なる温度になる場合はシミュレーションできない
 - 過電圧、過電流によるデバイスの破損はシミュレーションできない
 - **絶対最大定格** (Absolute maximum rating, デバイスが破損する電圧、電流、電力の限界値) を越えてもシミュレーション上では回路が動作する
 - 実際の回路が故障しないためには、絶対最大定格に対する、マージン(設計余裕度)が必要
- 電子回路シミュレータの精度
 - 半導体デバイスのモデルパラメータの精度に依存している
 - 代入していないパラメータはデフォルト値になる
 - モデルパラメータの正確な推定は難しいため、半導体メーカーが全てのパラメータを提供しているとは限らない

回路シミュレータは現実とは違うことを理解した上で使用する必要がある。

おまけ：回路図の作成方法

- 宿題で使用するLTspiceに回路図エディタが付属しているが、図として、あまりかっこよくないので、学生実験のレポートなどでは、下記のダイアグラム作成ソフトを試してみよう。回路図の他、フローチャート、ネットワークダイアグラムなどもきれいに描けます。
- 使用法の解説ページ
 - <http://jaco.ec.t.kanazawa-u.ac.jp/edu/index.php?draw.io>

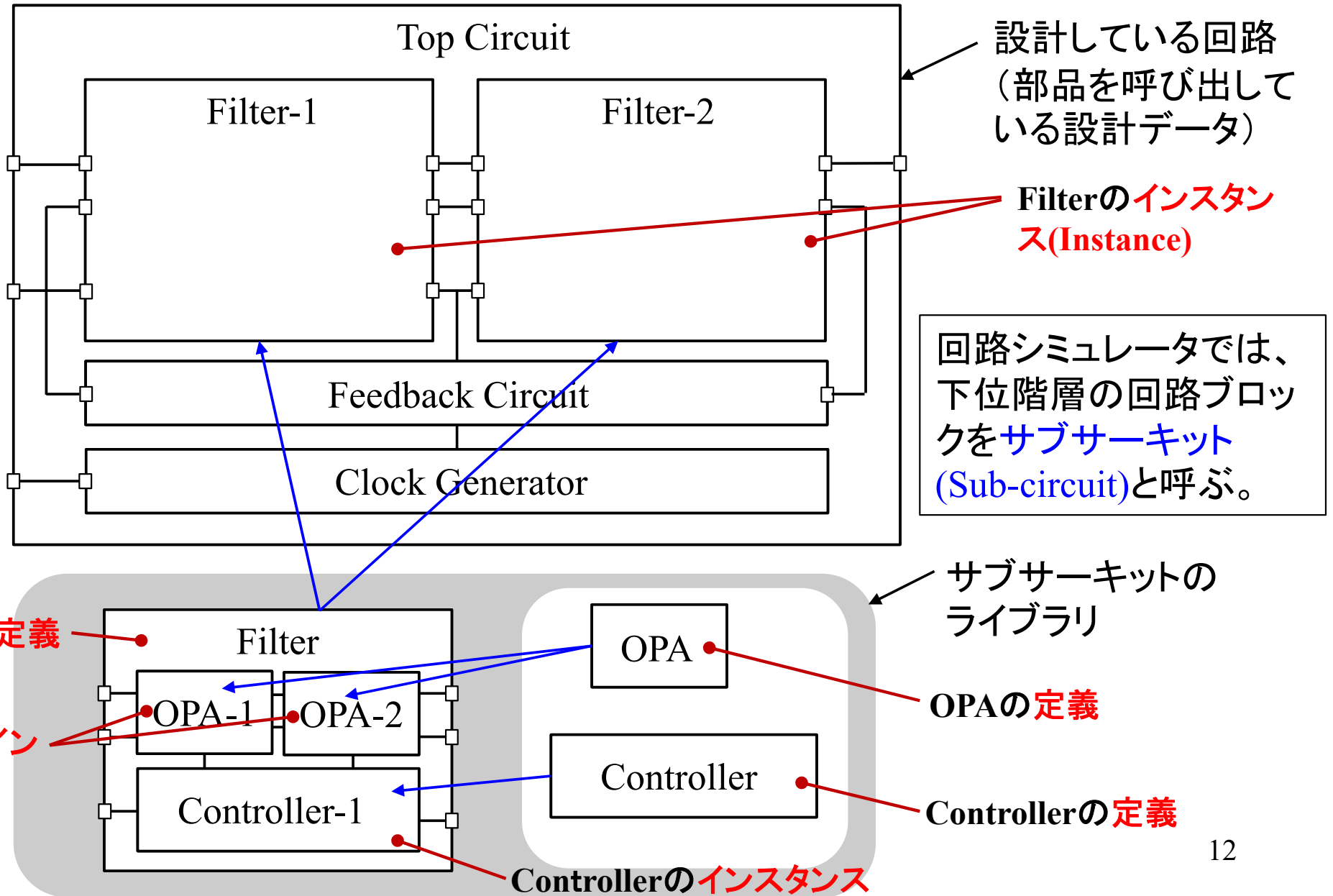
2.1節のまとめ

- 電子回路シミュレータは、回路図エディタ、シンボルエディタ、シミュレータ本体、ポストプロセッサから構成されている
 - 回路図エディタはネットリスト(回路の接続情報)を出力し、回路シミュレータ本体は、ネットリストから回路方程式を作成する
 - シミュレータ本体は、カリフォルニア大学が開発したSPICEをベースとしているものが多い
 - 主な解析機能にはDC解析(直流電圧、直流電流)、AC解析(周波数領域)、Transient解析(時間領域)、Noise解析(周波数領域)などがある
- 回路図の他に、デバイスモデルパラメータが必要
 - デバイス特性の計算のため、モデルパラメータファイルをインクルードする
 - モデルパラメータはデバイス特性の実測値から推定することができるが、デバイスモデルに関する専門知識が必要
 - 値を与えなかったパラメータがある場合、デフォルト値が使用されるためシミュレーション結果が正確ではない

複雑な電子回路を簡単化する方法

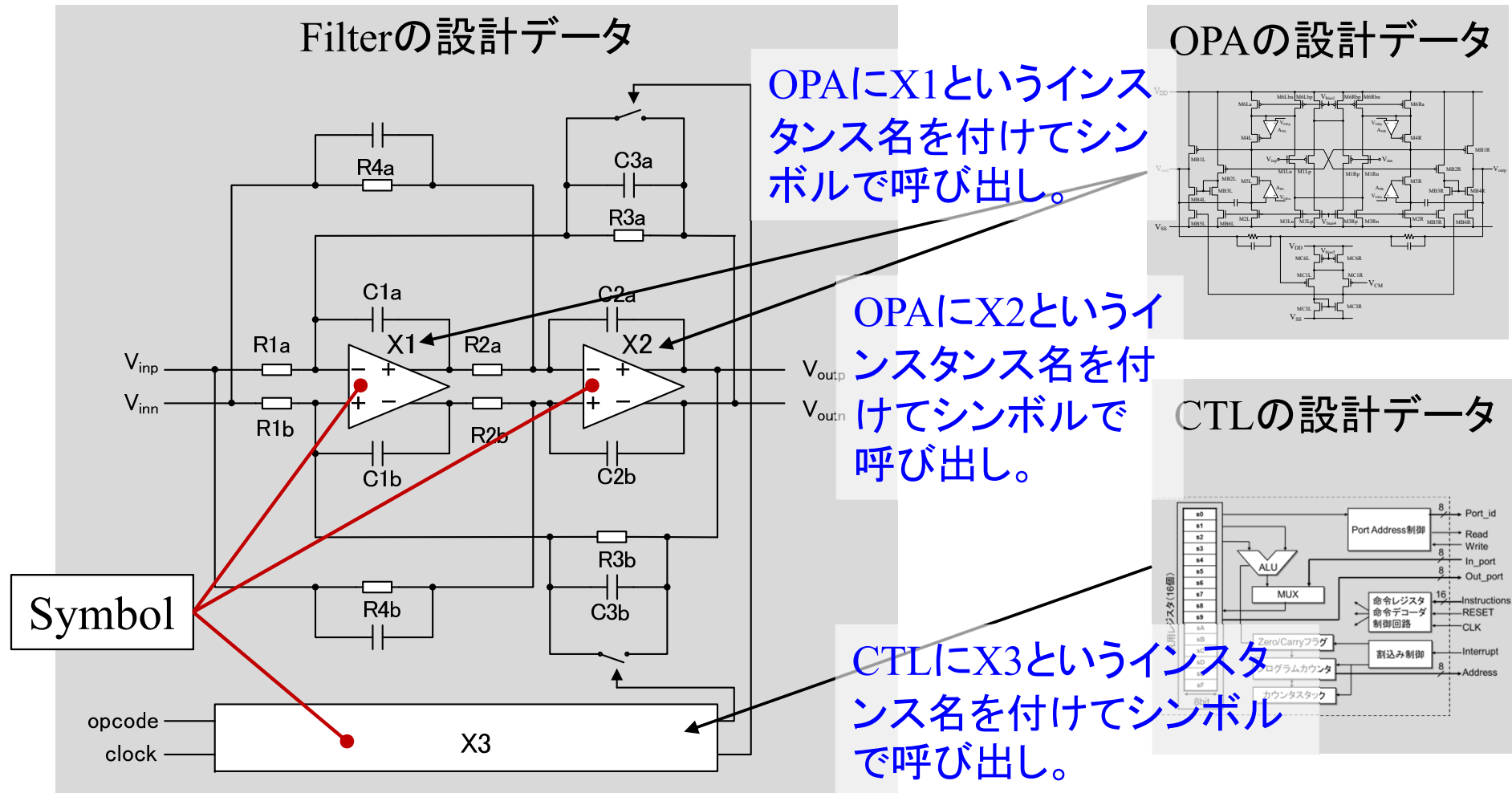
2.2 回路の階層化

回路の階層構造(Hierarchy)



サブサーキットの呼び出し方法

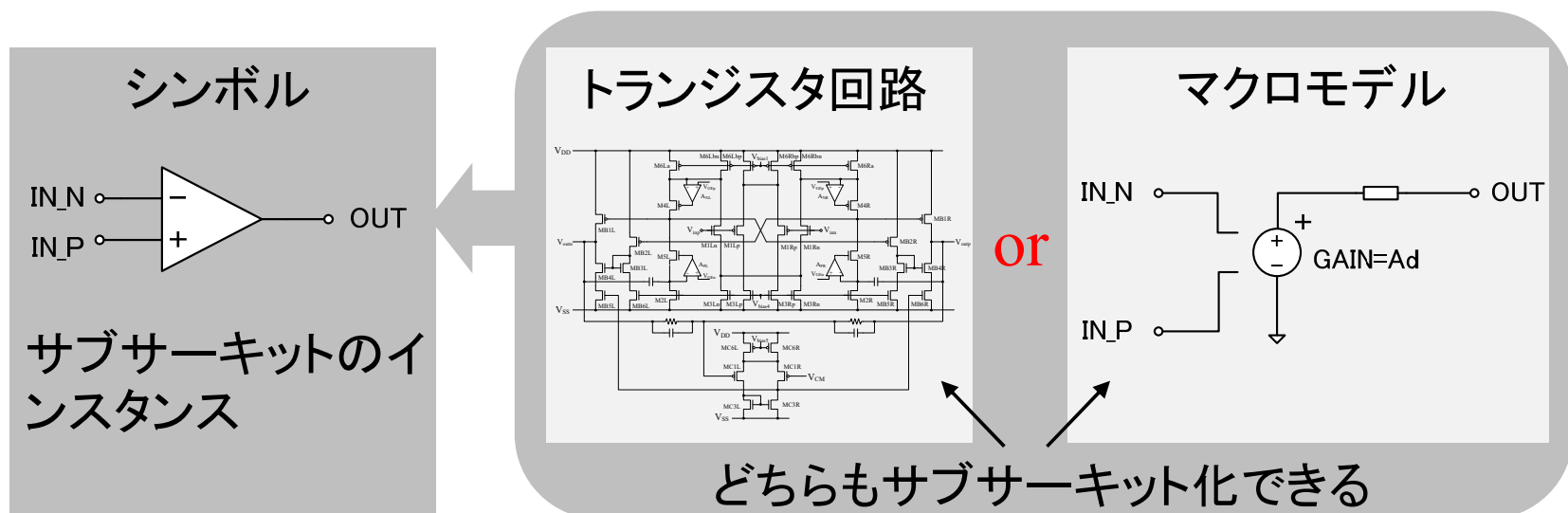
シンボルとして呼び出し ← インスタンス名 (X1, X2, X3) ← 定義 (OPA, CTL)



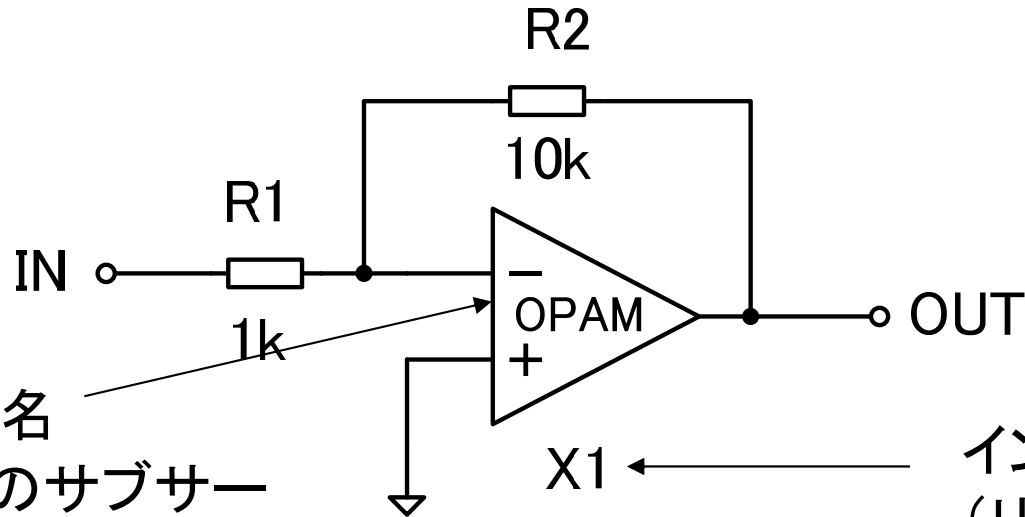
サブサーキットを呼び出すためにはインスタンス名 (リファレンス) とシンボルが必要。

マクロモデル(Macro-model)

- 等価回路や特性計算式で表現したサブサーキットをマクロモデルまたはビヘイビアモデル(Behavior model)と呼ぶ
 - 前ページのFilterのシミュレーションを行う際に、OPAのトランジスタ回路を呼び出してもよいが、OPAに含まれるトランジスタ数が多い場合には、シミュレーションに長い時間がかかる
 - トランジスタ回路の代わりにマクロモデルを使用することで、計算量を大幅に削減することができる



マクロモデルの呼び出し

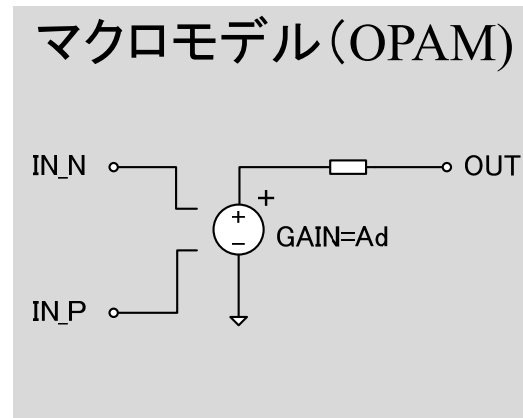
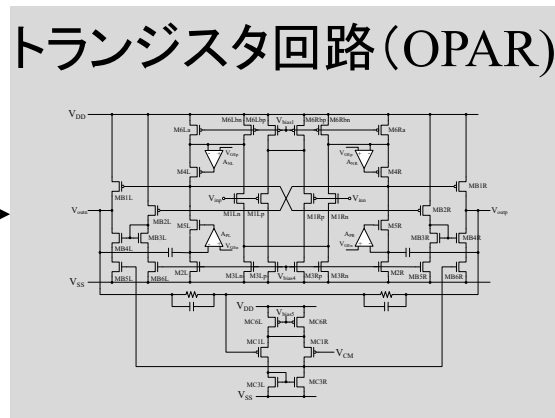


サブサーキット名
(マクロモデルのサブサーキット名を指定した場合)

インスタンス名
(リファレンスとも言う)

高精度 ← どちらか選択 → 計算量少

自分でOPARを設計した場合は、実回路のサブサーキットが使用可能。



通常、半導体メーカーは、マクロモデルのみ提供。

2.2節のまとめ

- 回路を階層設計することにより複雑な回路を簡単に扱える
 - 回路シミュレータは、要素回路をサブサーキットとして定義し、インスタンス化して上位階層に呼び出す仕組みを持っている
 - インスタンスを呼び出すために、インスタンス名(リファレンス)とシンボルを使用する
- サブサーキットの表現にはトランジスタ回路記述とマクロモデルがある
 - トランジスタ回路記述は、トランジスタの特性から計算するため高精度だが、計算時間が長い
 - マクロモデルは、簡単な数式で記述されているので、シミュレーション精度は高くないが、計算時間は短い
 - メーカーの半導体製品は、マクロモデルのサブサーキットが提供されていることが多い
 - トランジスタ回路記述とマクロモデルは、必要に応じて使い分ける

回路図入力～シミュレーション結果の表示まで

2.3 LTSPICEの基本操作

2. 3. 1 初期設定

LTspiceを使いやすくするための準備

初期設定1

Control Panel

Compression Save Defaults SPICE Drafting Options
Operation Hacks! Internet Netlist Options Waveforms

Style/Convention

- Convert ' μ ' to 'u' [*]
- Reverse comp. order

Semiconductor Models

- Default values[*]
- Default libraries[*]

[*] Setting remembered between program invocations.

Reset to Default Values

OK キャンセル ヘルプ

斜め配線を不許可(任意)

Control Panel

Operation Hacks! Internet Netlist Options Waveforms
Compression Drafting Options

Allow direct component ports[*]
Automatically scroll view[*]
Mark text justification and points
Mark unconnected pins
Show schematic grid points[*]
 Orthogonal snap wires

Ortho drag mode[*]
Cut angled wires during drags
Un-do history size: 500
Draft with thick lines[*]
Show Title Blocks[*]
Reverse Mouse Wheel Scroll[*]

Font Properties[*]
Arial
Size[*]: 28
Bold[*]

Color Scheme[*]
Hot Keys[*]

[*] Setting remembered between program invocations.

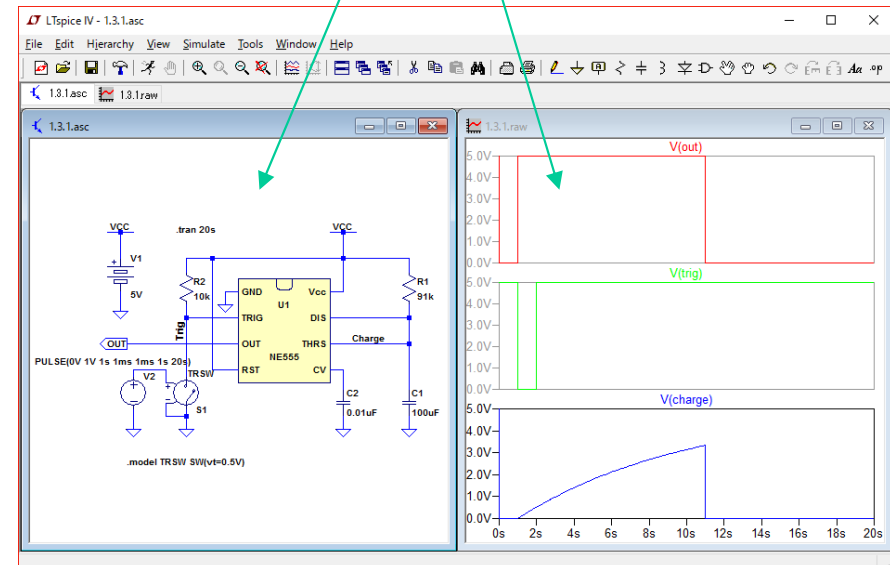
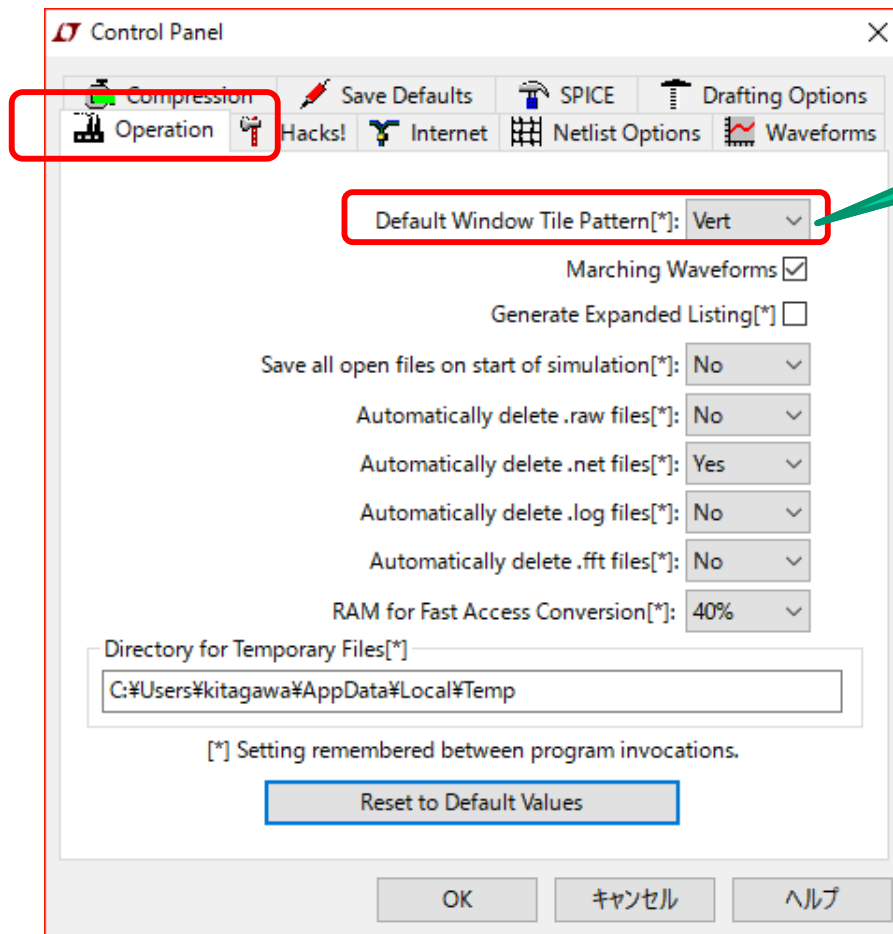
Reset to Default Values

OK キャンセル ヘルプ

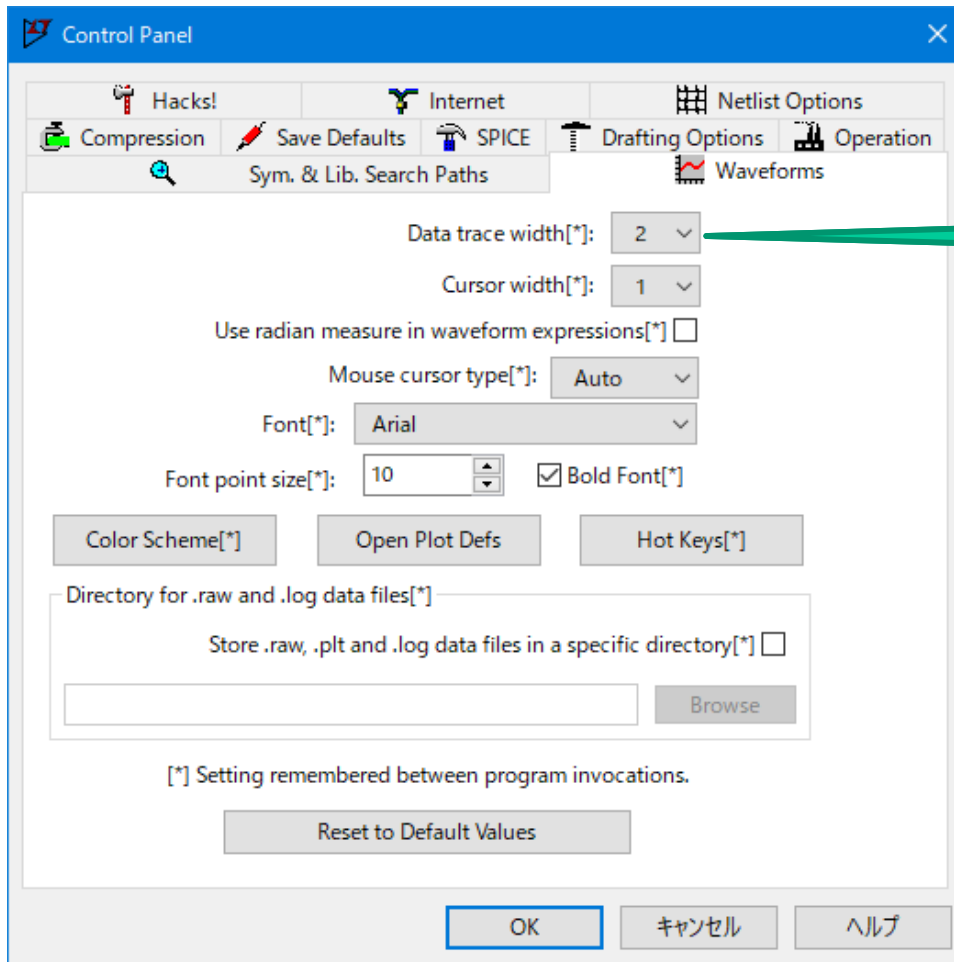
文字化けを防ぐ

初期設定2

回路図とグラフを横に並べて表示(任意)



初期設定3

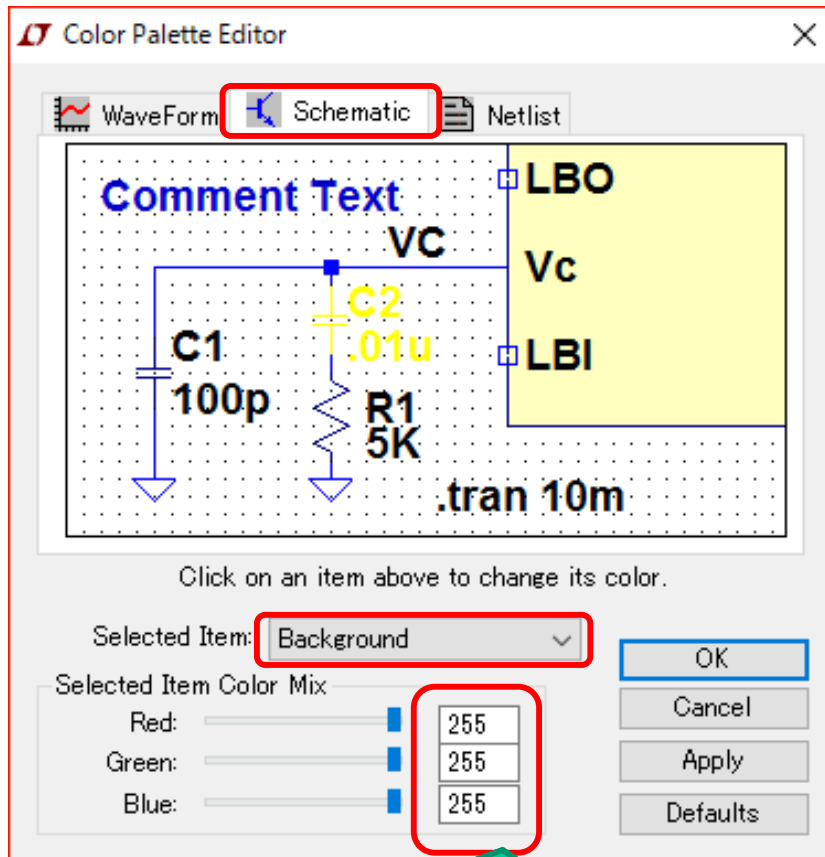


グラフの線の太さを変える

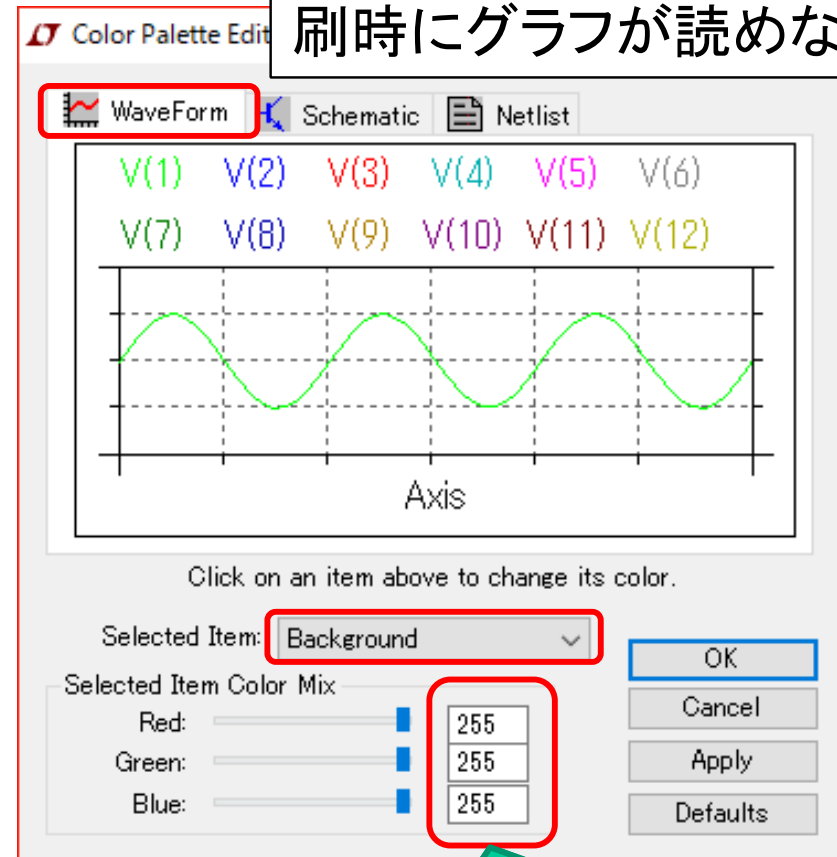
デフォルトでは値が1になっているが、プレゼンやレポートでは細くて見えない。

カラー設定1

グラフの背景が黒だと印刷時にグラフが読めない

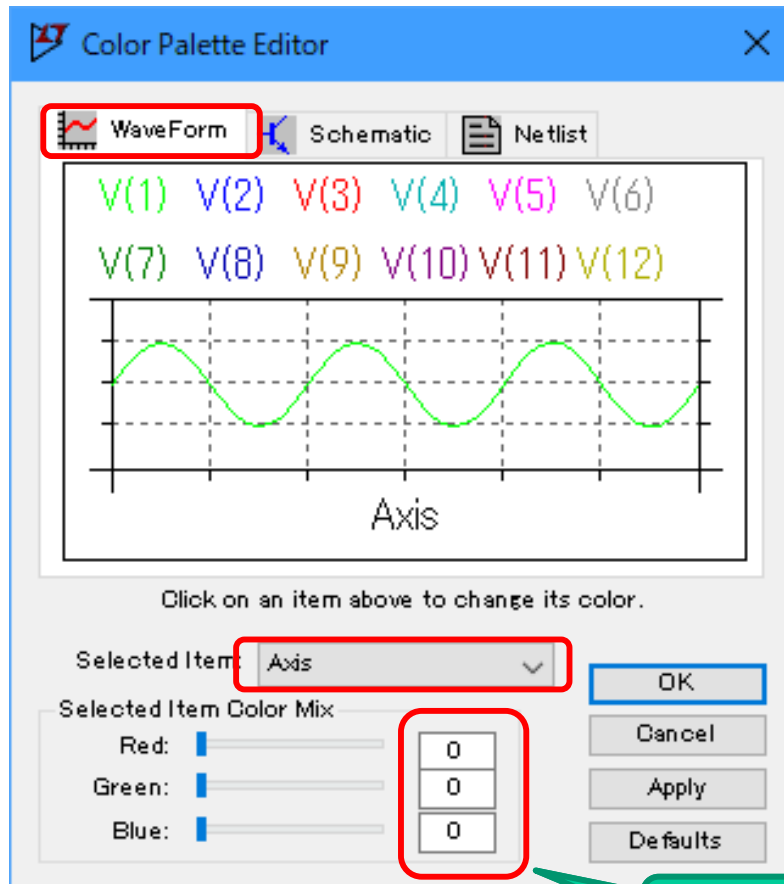


回路図の背景を白に
(任意)



グラフの背景を白に
(必須)

カラー設定2



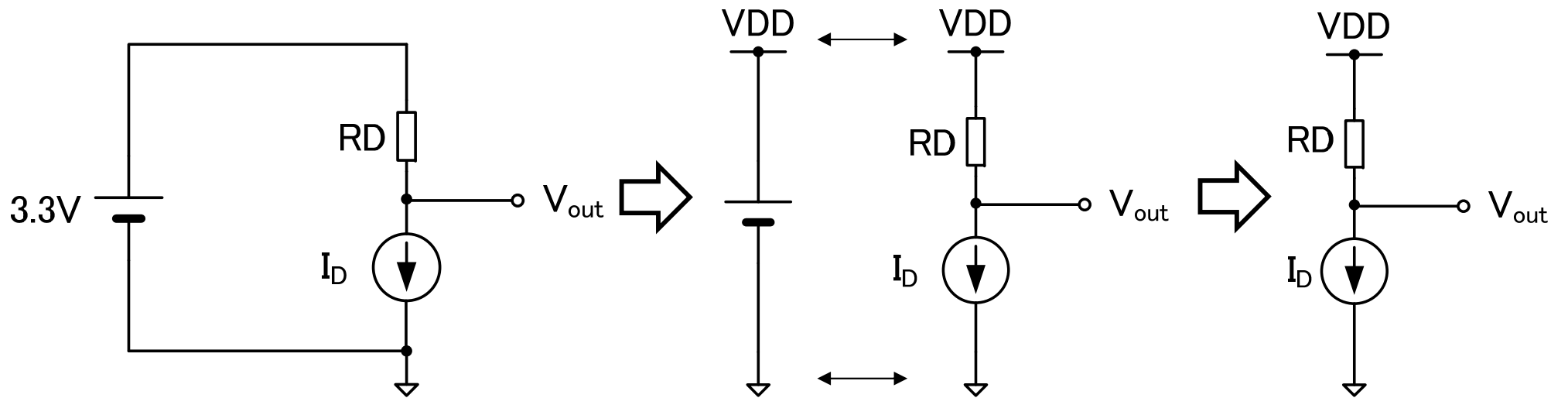
グラフの背景を白にした場合、
軸と目盛り数字を黒にすると、
グラフが読みやすい

グラフの軸を黒に(任意)

2. 3. 2 例題:Lチ力回路

Lチ力回路 = LEDを点滅させる回路

(重要) 電源の省略表記



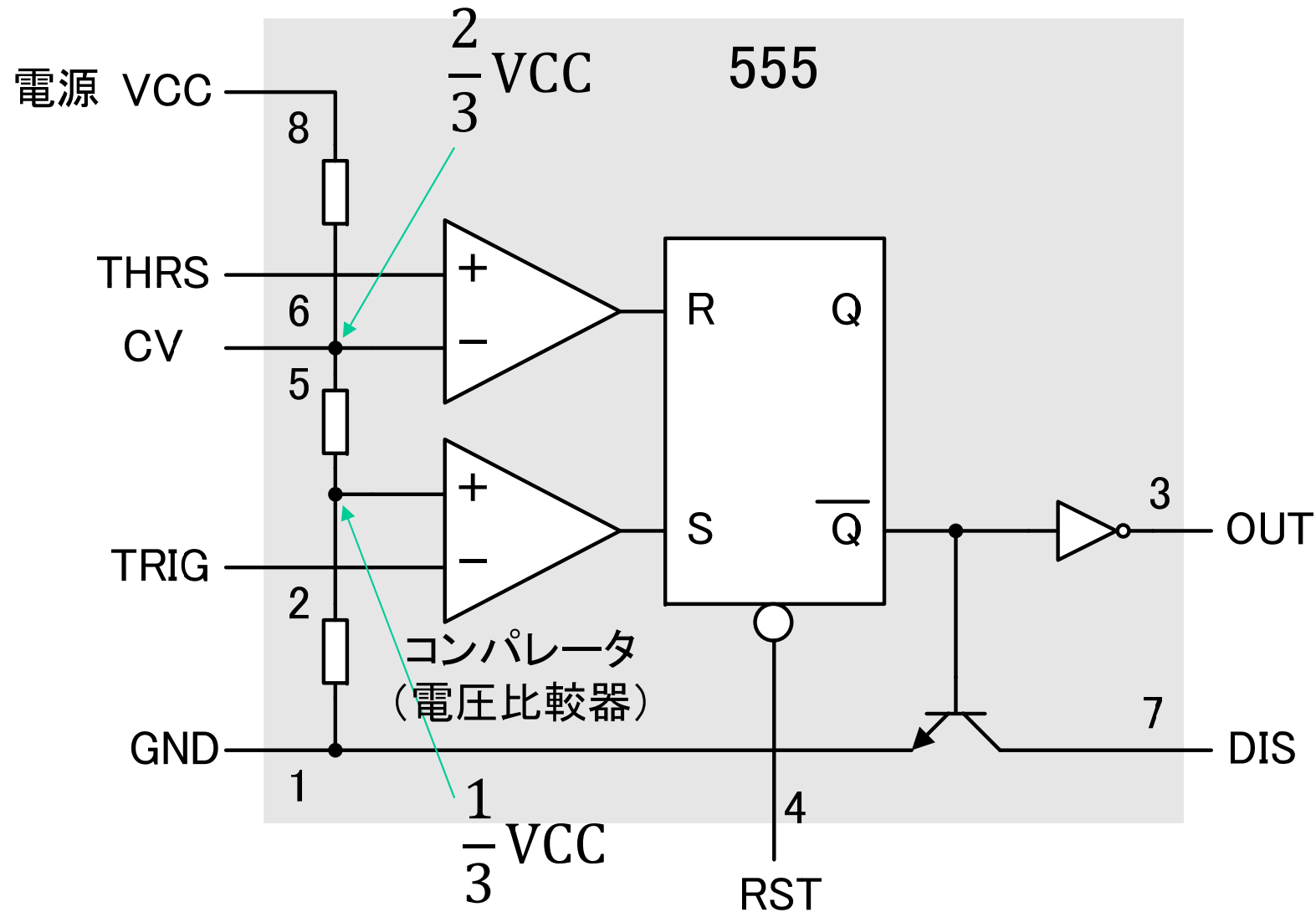
完全な表記

電源配線の省略
(シミュレーション用の表記)

電源配線と電源の省略
(一般の回路図表記)

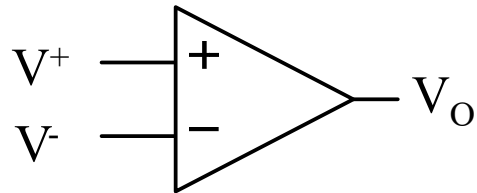
電源の電圧源と電源配線を省略して、電源配線名VDDまたはVCC(負電源の場合はVSSまたはVEE)を付けることにより、回路図を読みやすくする。

NE555 (タイマーIC) の内部回路



NE555の構成要素

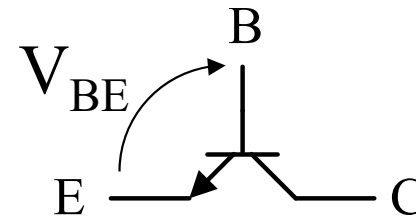
Comparator (電圧比較器)



$$V^+ - V^- \geq 0 \rightarrow V_O = \text{"H"}$$

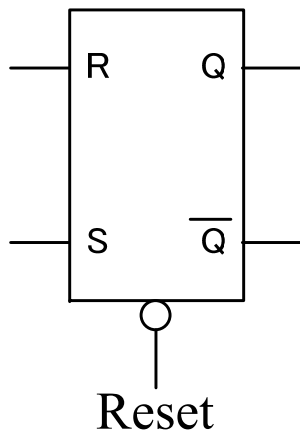
$$V^+ - V^- < 0 \rightarrow V_O = \text{"L"}$$

BJT (Bipolar Junction Transistor)



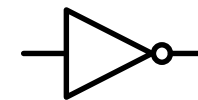
$$V_{BE} \geq 0.6 \rightarrow \text{C-E間がON}$$

RS-FF (Reset-set flip-flop)



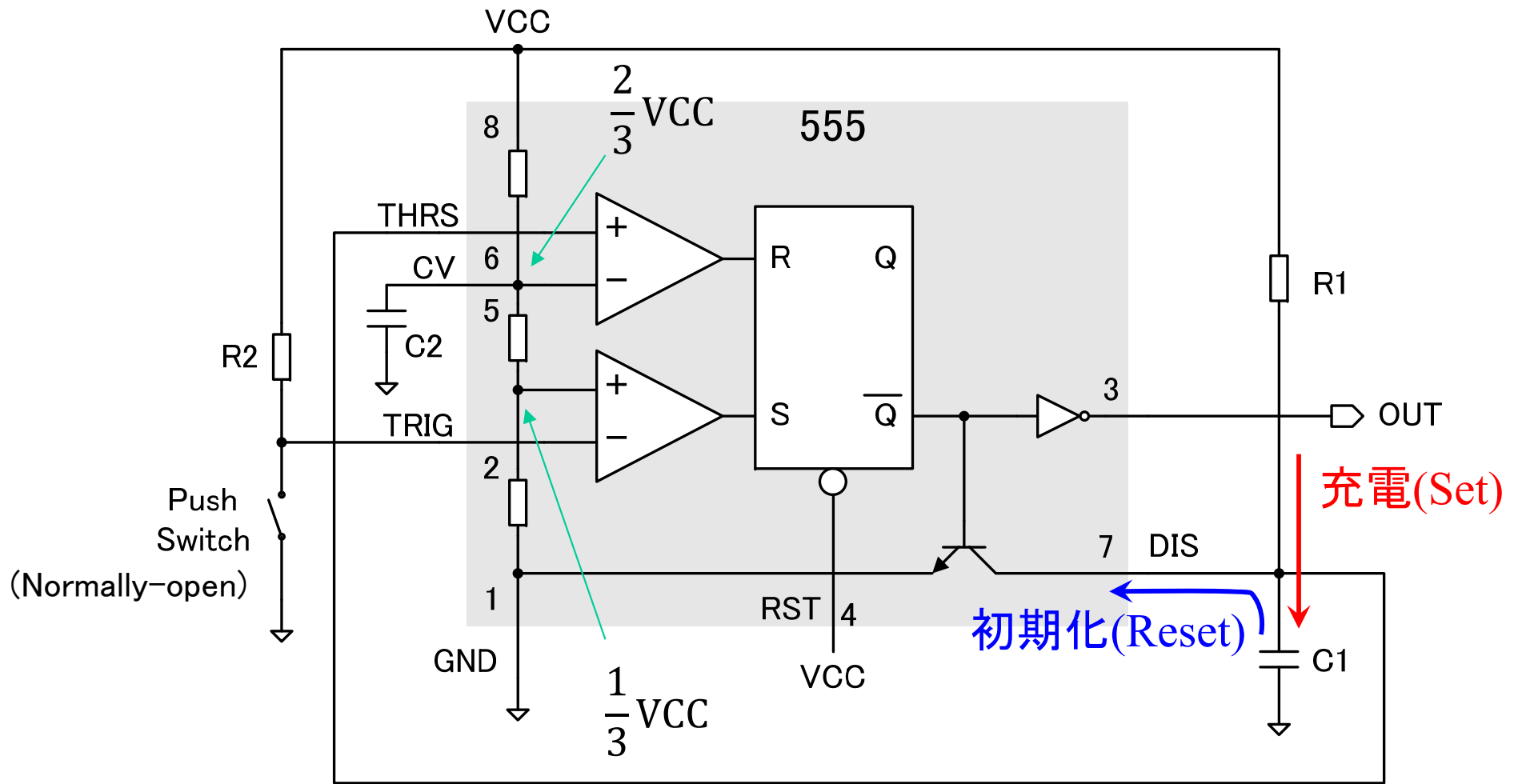
R	S	Q
0	0	Hold
0	1	1
1	0	0

Inverter

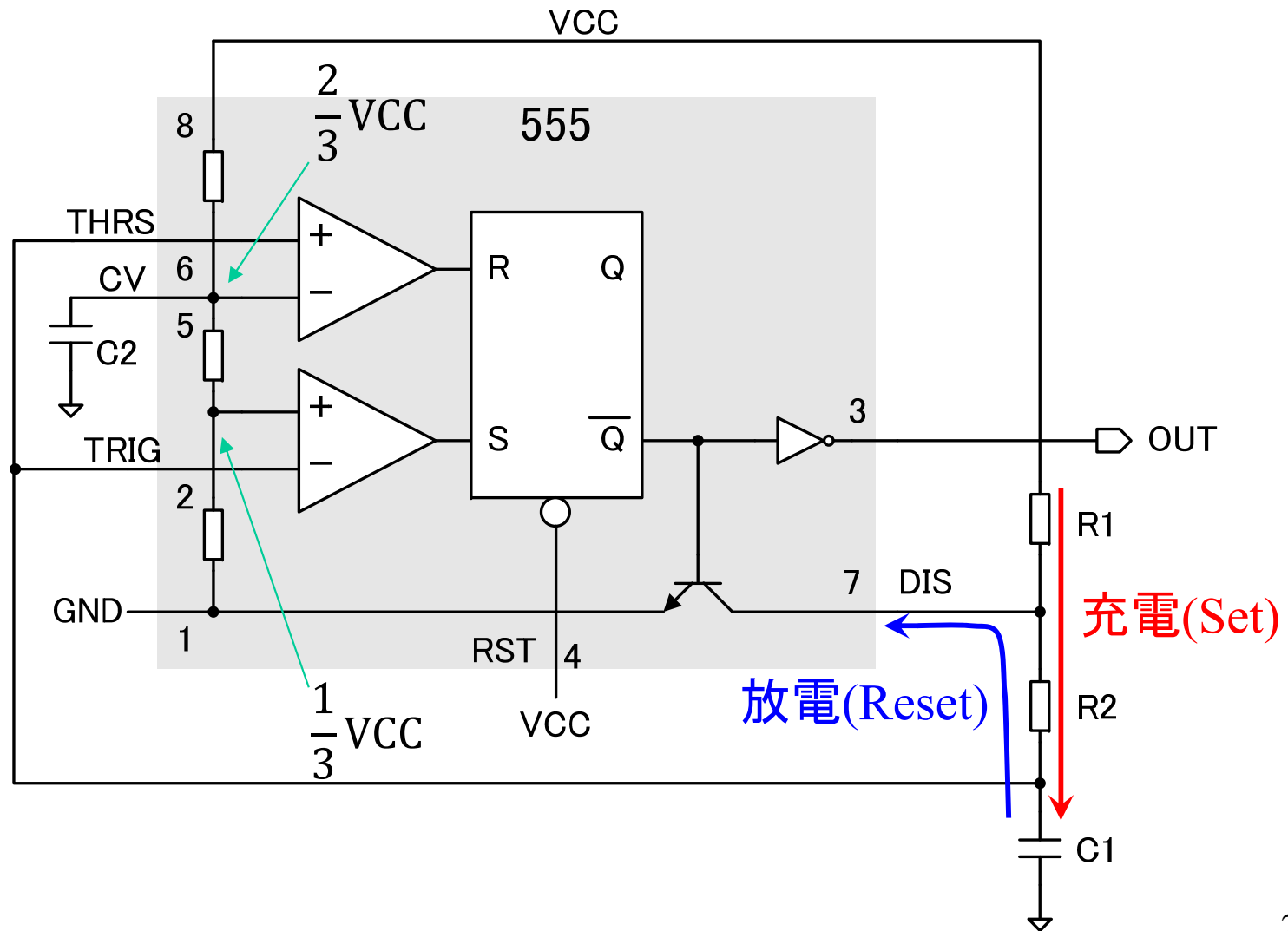


IN	OUT
"L"	"H"
"H"	"L"

NE555を用いたタイマーの例

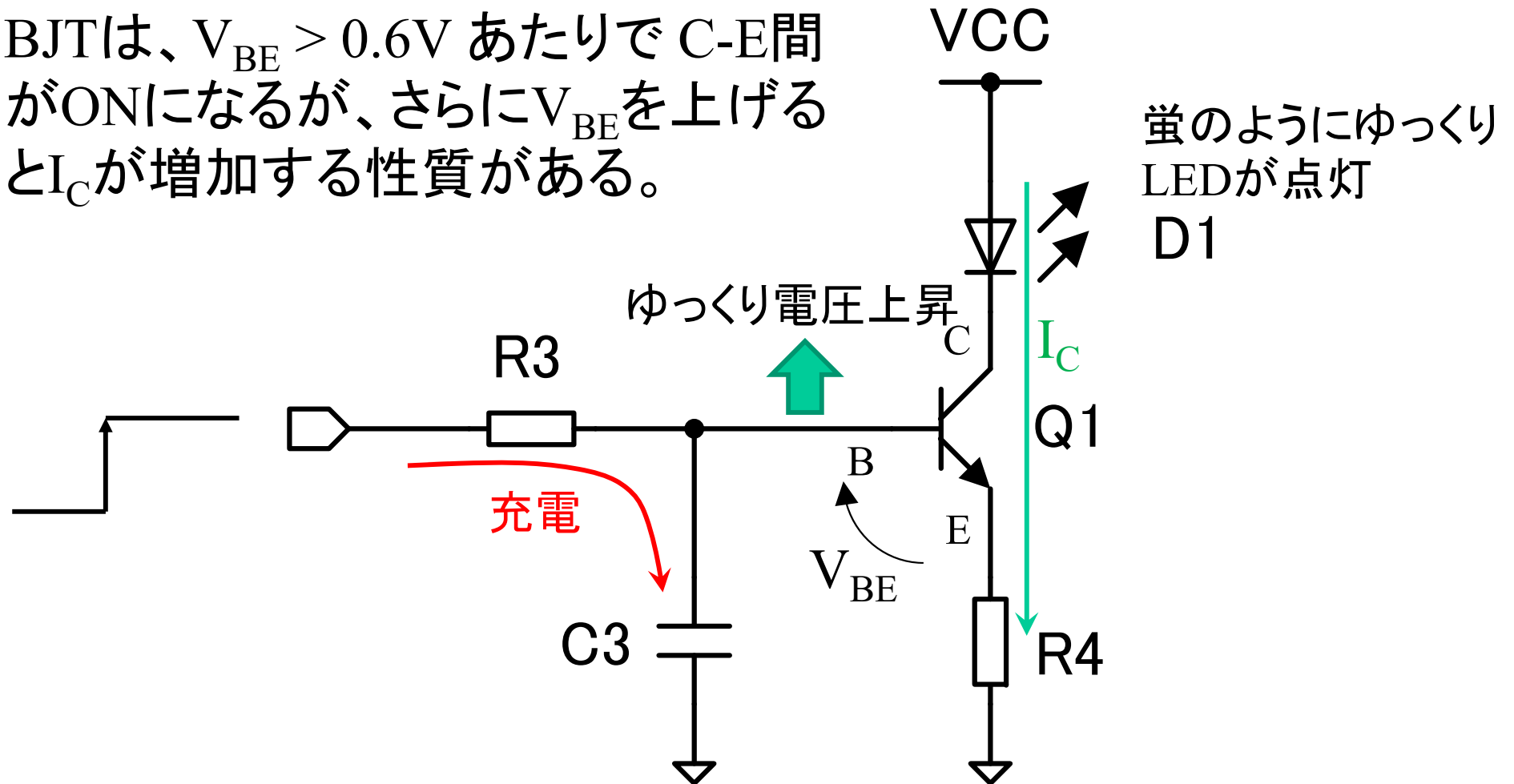


NE555を用いた発振器の例

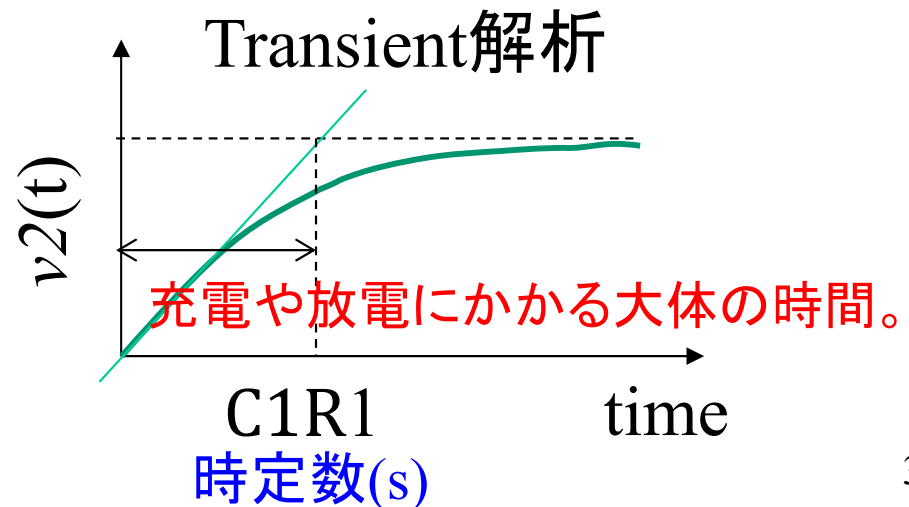
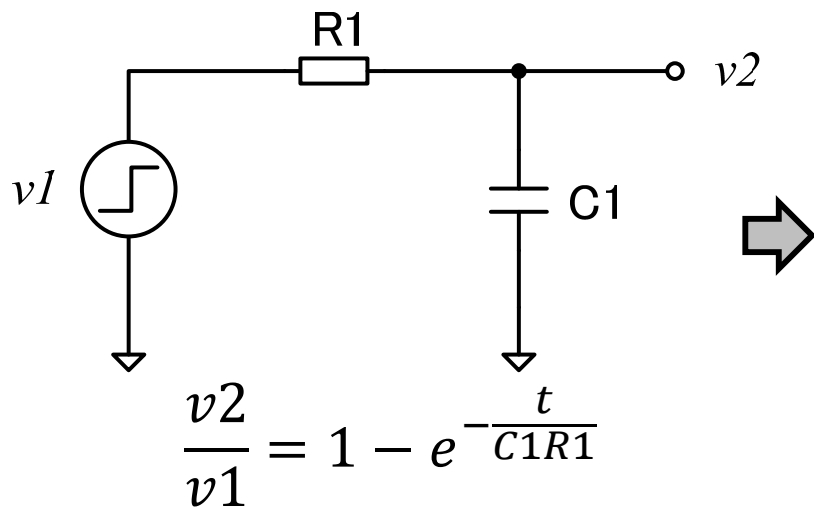
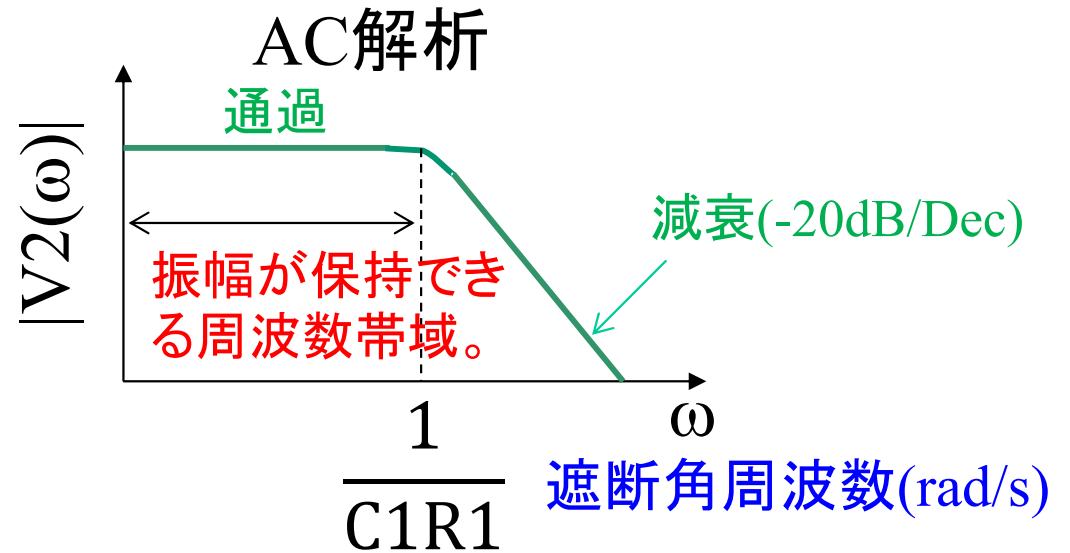
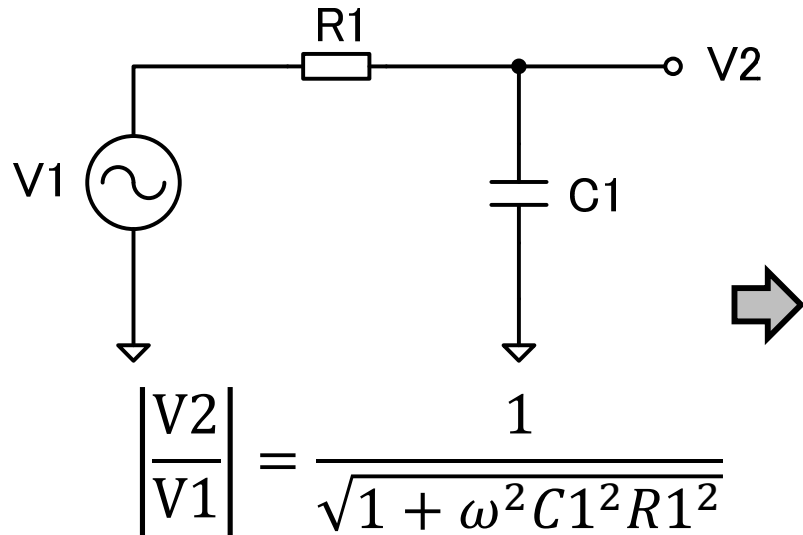


ソフトなLED点灯回路

BJTは、 $V_{BE} > 0.6V$ あたりで C-E間
がONになるが、さらに V_{BE} を上げると
 I_C が増加する性質がある。



(参考) RC回路の特性



回路図の作成

- 参考書2-1を参考にLチカの回路図を入力する
- **注意：** 保存は、ツールバーのディスクアイコンを使用しないで、メニューの[File] - [Save As] を使用すること
 - ツールバーから保存すると、ファイル名がDraft1.ascのようなデフォルト名になってしまい、後でファイルを探せなくなる
 - 回路図ファイルの拡張子は、.ascとなる。回路図ファイルをダブルクリックすると、LTspiceを起動することができる

回路定数の書き方

覚えておこう

1. 定数に単位を付けるとき、数値との間に**スペースを空けない**こと(V, A, F, Hなどの単位は省略可)
 - 例: 100fF(フェムトファラッド), 1mH(ミリヘンリー)
2. **マイクロはuで表す**(※)
3. **メガはMEG, ミリはmとする**
 - SPICE系シミュレータでは大文字と小文字は同じものとして扱われるのでMとmの見分けがつかないため

※ 回路シミュレータ特有の約束だが、回路技術分野では、マイクロを表すためにuが使用されることが多い。

SI接頭辞

SI: International System of Units

- 電子回路で出てくる数値には、非常に小さい値や大きい値が多い
- SI接頭辞を用いて表記を簡略化する(記憶すること)

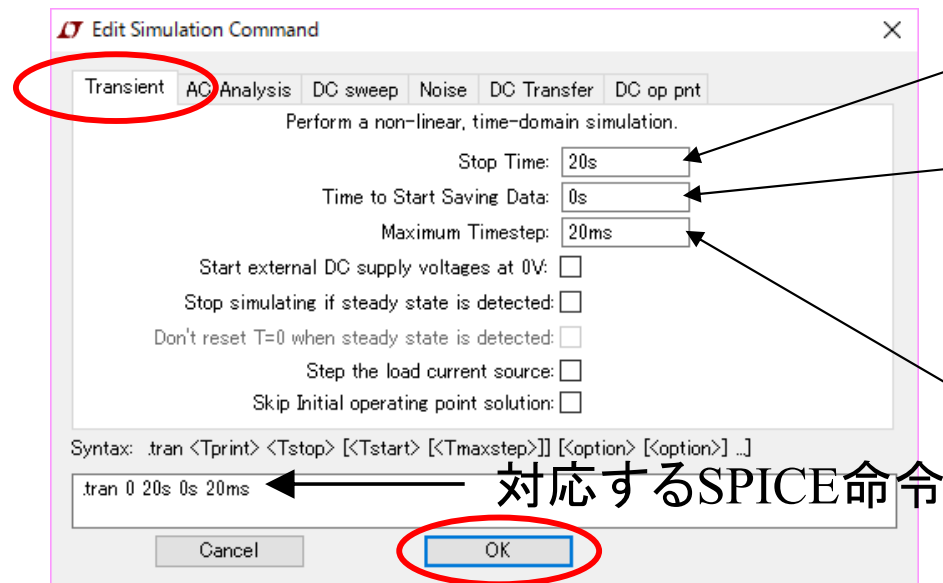
記号	読み方	指数部
PET	ペタ	10^{15}
T	テラ	10^{12}
G	ギガ	10^9
MEG	メガ	10^6
k	キロ	10^3
m	ミリ	10^{-3}
u	マイクロ	10^{-6}
n	ナノ	10^{-9}
p	ピコ	10^{-12}
f	フェムト	10^{-15}

SI接頭辞の練習

1. $1/(1\text{MEG}) = ?$
2. $1/(1\text{m}) = ?$
3. $1/(1\text{u}) = ?$
4. $1/(1\text{n}) = ?$
5. $(1\text{MEG})/(1\text{k}) = ?$
6. $(1\text{k})/(1\text{MEG}) = ?$
7. $1/(1\text{m} \cdot 1\text{m}) = ?$
8. $1/(1\text{n} + 1\text{n}) = ?$

Transient解析（横軸＝時間）の設定

- 回路図エディタの部品や配線がないスペースを右クリック
- Edit Simulation Cmd. を選択
- Transientタブを設定（教科書参照）
- SPICEコマンドの文字列を回路図エディタ画面に配置
- 再びスペースを右クリックし、Runでシミュレーション開始



シミュレーションを終了する時間

データの保存を開始する時間
(定常状態の波形を見たい場合などは、最初の方の結果は必要ないため。)

時間刻み幅の上限(シミュレータは時間刻みを自動調整している。)

課題2. 1(1)

1. NE555を用いたタイマーのスイッチを入れた後、出力OUTが 'H' になり続ける時間 T_1 をR1, C1の式で表せ
2. NE555を用いた発振器の発振周期 T_2 をR1, R2, C1の式で表せ

課題2. 1(2)

3. 参考書2. 1節のLチカ回路のシミュレーションを行い、回路図、結果のグラフをPDFファイルにして提出せよ(ワープロ等に貼り付けて、PDF出力すればよい)
 - 結果のグラフには、I(D1), LEDに加わる電圧, V(BASE), V(TRIG), V(OUT)を示すこと
4. シミュレーション結果から、点灯時間 T_{ON} , 消灯時間 T_{OFF} , 発光周期 T_P を測定し、それぞれの計算値に対する相対誤差(%)を求めよ
 - ただし、 T_{ON} は、V(OUT)が'HIGH'となる時間、 T_{OFF} は、V(OUT)が'LOW'となる時間と定義する。

エクスポート

回路図の出力

回路図エディタで作成した回路図をOfficeソフト等を使用するとき

1. メニュー: Tools → Write to a .emf file
2. 適当なファイル名を付けて保存
3. 保存できる形式はEMF(Enhanced Meta File)のみ

シミュレーションデータの出力

シミュレーション結果(数値)をExcelや他のソフトウェアで使いたいとき

1. 保存したいグラフのウィンドウをクリック
2. メニュー: File → Export
3. 保存したい電圧、電流を CTRLキーを押しながら選択し、OKボタンをクリック
4. ファイル名は、自動的に"回路名.txt"となる(PRN形式)

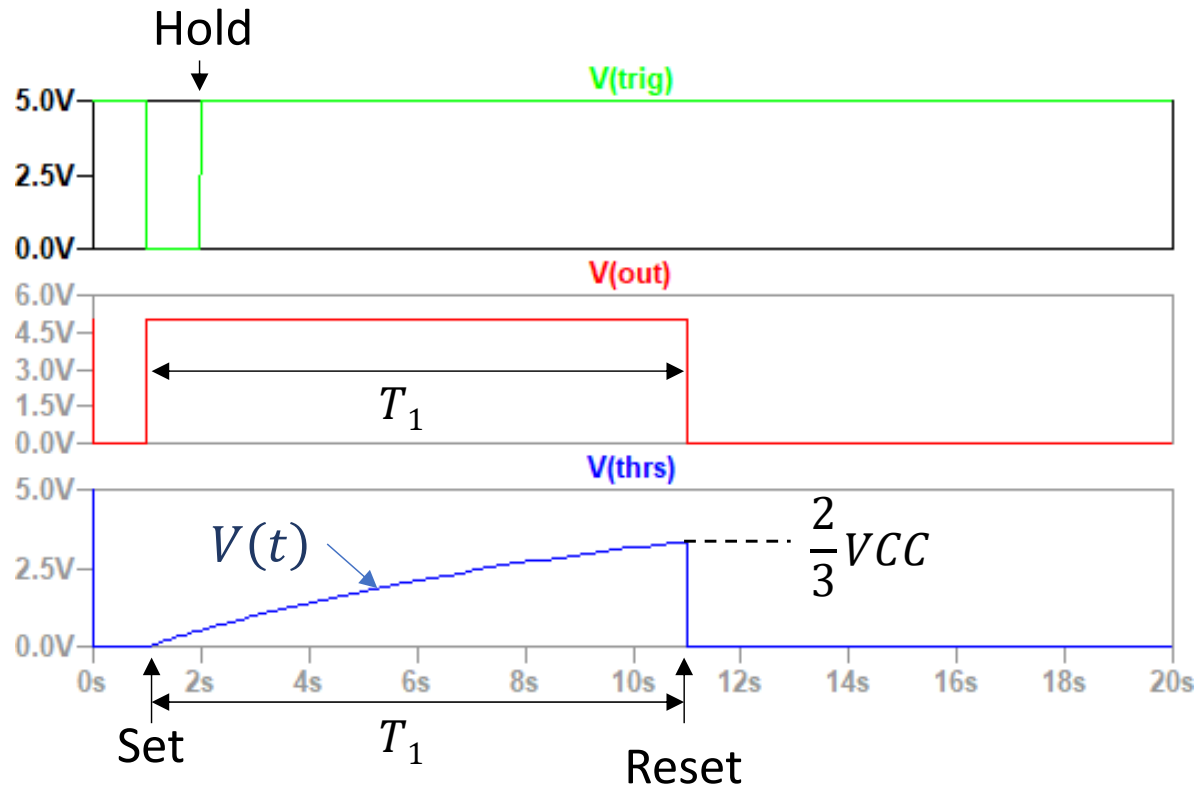
画面のコピー

回路図やグラフをコピーしたいとき

1. 回路図をコピーしたい場合は、回路図のウィンドウをクリック
2. グラフをコピーしたい場合は、グラフのウィンドウをクリック
3. メニュー: Tools → Copy bitmap to Clipboard
4. 貼り付け先でペースト(CTRL + v)を実行

(注意) 表示されているままの形でコピーされるので、予め貼り付け先の大きさに合わせてから実行すること。ビットマップデータなので、後で拡大縮小するときたなくなる。

課題 2. 1 (1) のヒント

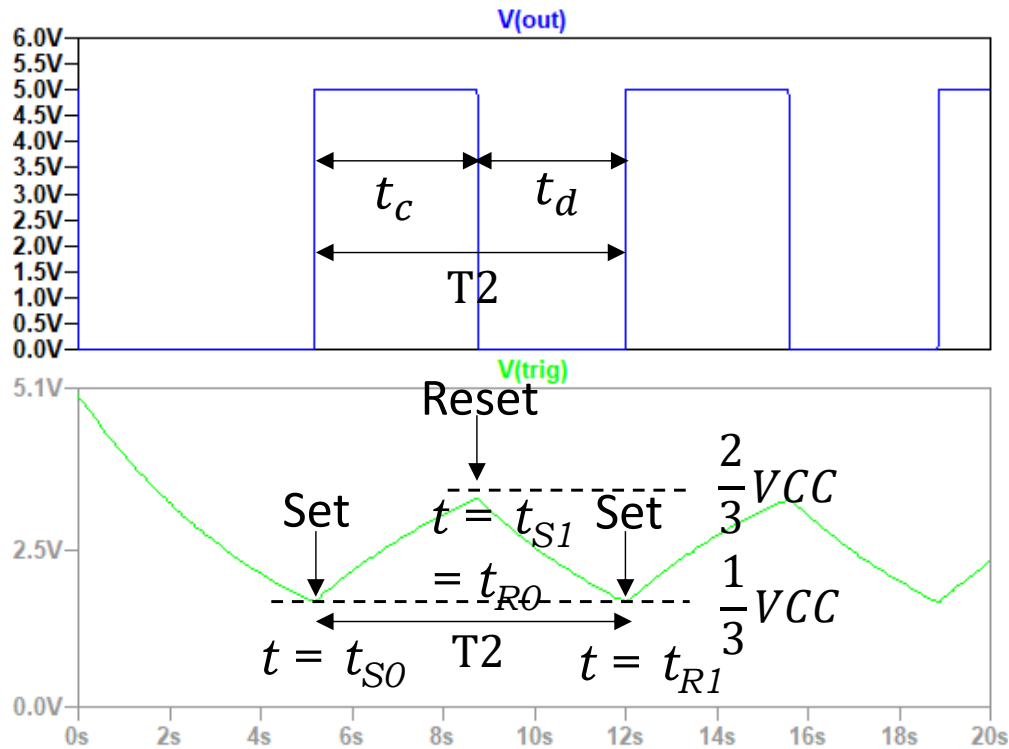


R1, C1回路の充電特性は、 $V(t) = V_{CC}(1 - e^{-\frac{1}{R1C1}t})$

$V(t = T_1) = \frac{2}{3}V_{CC}$ のときRS-FFがResetされ、タイマーは次にスイッチが押されるまで、動作を停止する。

$$V_{CC}(1 - e^{-\frac{1}{R1C1}T_1}) = \frac{2}{3}V_{CC}より、T_1 = R1C1\ln(3)$$

課題 2. 1 (2) のヒント



$R1+R2, C1$ 回路の充電特性は、 $V(t) = VCC(1 - e^{-\frac{1}{(R1+R2)C1}t})$

$R2, C1$ 回路の放電特性は、 $V(t) = VCCe^{-\frac{1}{R2C1}t}$

放電開始時刻 t_{SO} , 放電終了時刻 t_{S1} , 充電開始時刻 t_{RO} , 充電終了時刻 t_{R1}
 (従って、 $t_{S1} = t_{RO}$) として、充電時間 t_c と放電時間 t_d を求める。

$V(t) = VCC$ となる時刻を $t = 0$ とおいて、充電特性の式を用いると、

$$V(t_{S0}) = VCC \left(1 - e^{-\frac{1}{(R1+R2)C1}t_{S0}} \right) = \frac{1}{3}VCC \text{ より、 } t_{S0} = (R1 + R2)C1 \ln\left(\frac{3}{2}\right)$$

$$V(t_{S1}) = VCC \left(1 - e^{-\frac{1}{(R1+R2)C1}t_{S1}} \right) = \frac{2}{3}VCC \text{ より、 } t_{S1} = (R1 + R2)C1 \ln(3)$$

$$\text{充電時間は、 } t_c = t_{S1} - t_{S0} = (R1 + R2)C1 \left\{ \ln(3) - \ln\left(\frac{3}{2}\right) \right\} = (R1 + R2)C1 \ln(2)$$

$V(t) = 0$ となる時刻を $t = 0$ とおいて、放電特性の式を用いると、

$$V(t_{R0}) = VCC e^{-\frac{1}{R2C1}t_{R0}} = \frac{2}{3}VCC \text{ より、 } t_{R0} = R2C1 \ln\left(\frac{3}{2}\right)$$

$$V(t_{R1}) = VCC e^{-\frac{1}{R2C1}t_{R1}} = \frac{1}{3}VCC \text{ より、 } t_{R1} = R2C1 \ln(3)$$

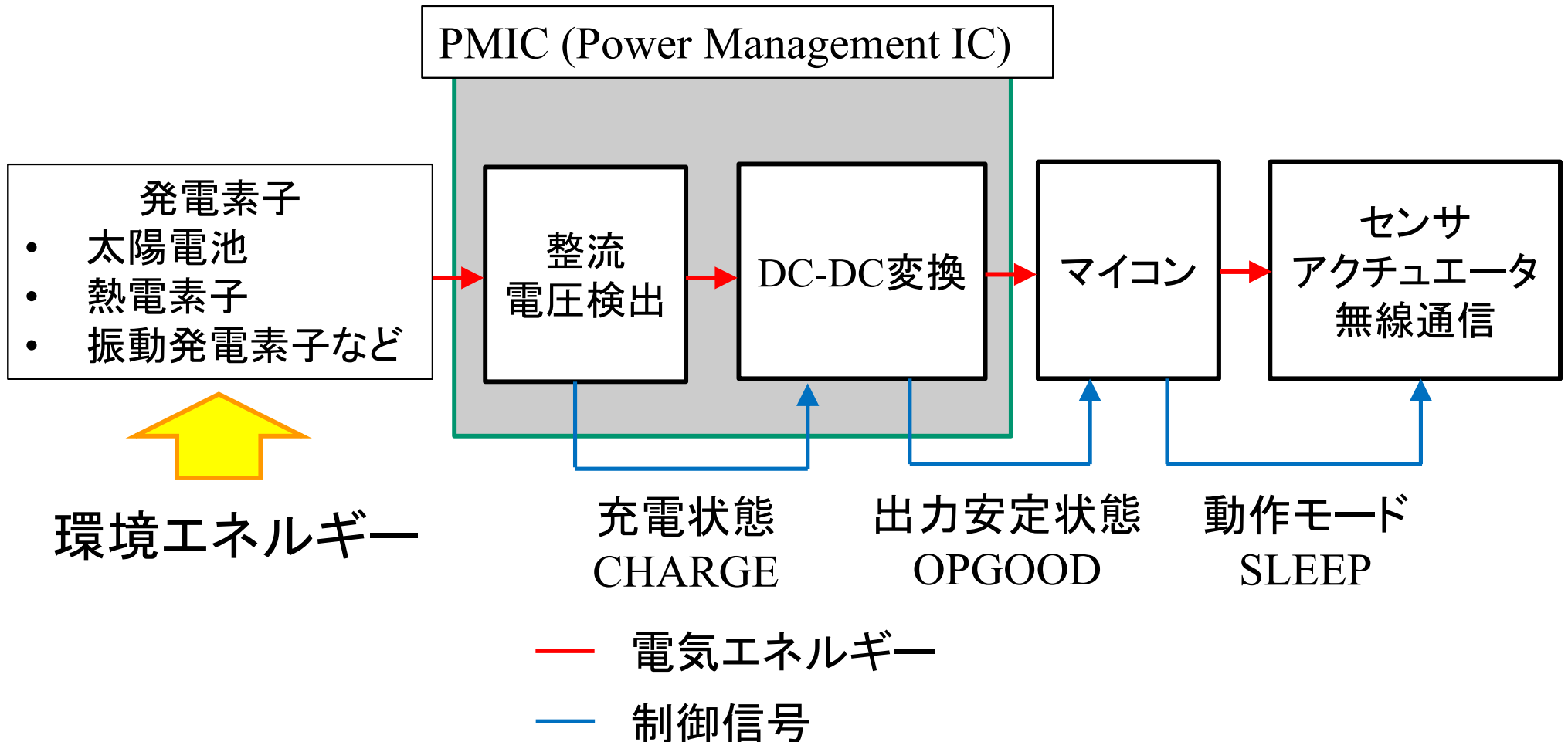
$$\text{放電時間は、 } t_d = t_{R1} - t_{R0} = R2C1 \left\{ \ln(3) - \ln\left(\frac{3}{2}\right) \right\} = R2C1 \ln(2)$$

$$\text{発振周期は、 } T_2 = t_c + t_d = (R1 + 2R2)C1 \ln(2)$$

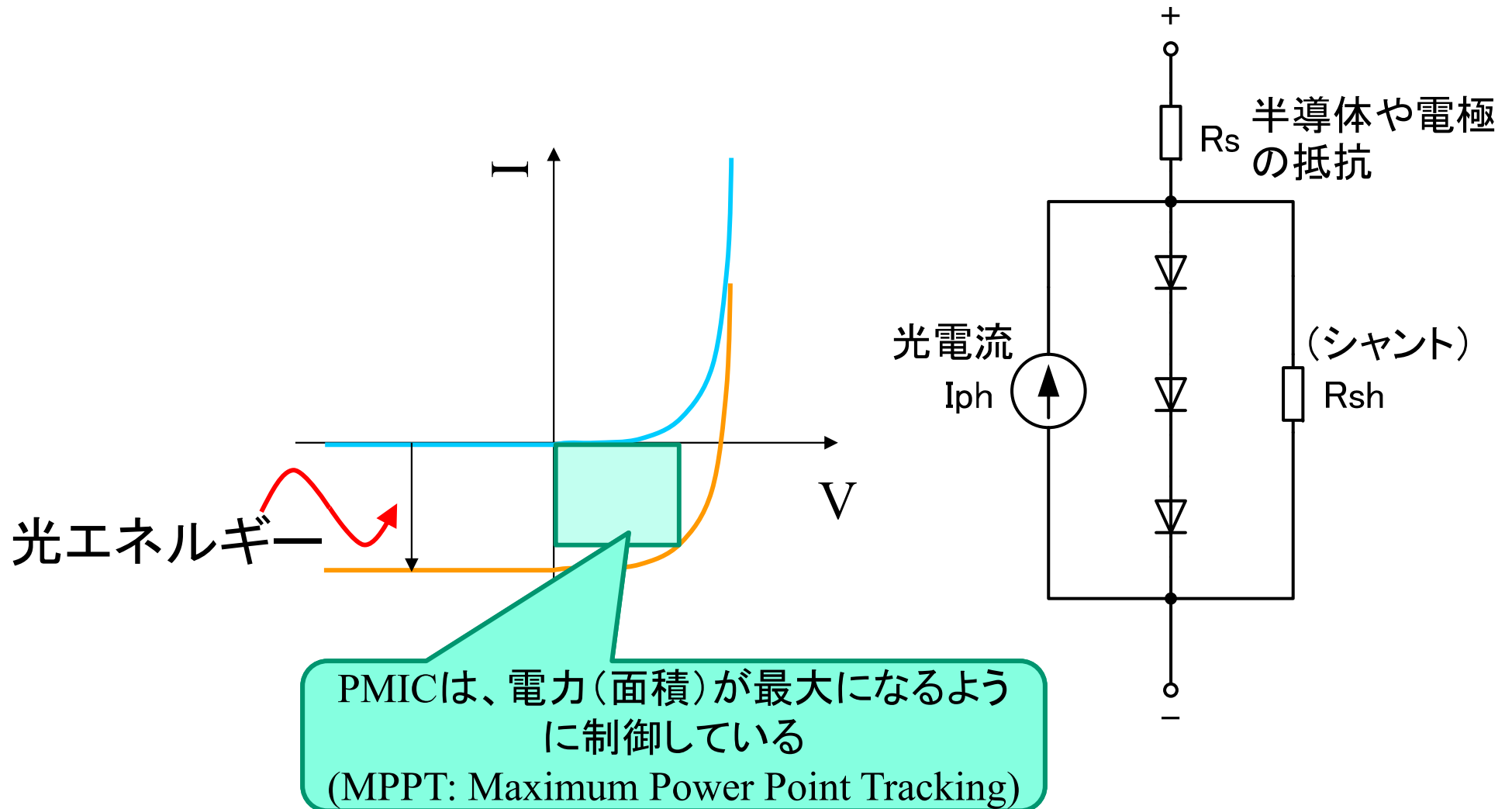
2. 3. 3 例題: エナジーハーベ スティング

エナジーハーベスティング (Energy Harvesting)
= 環境エネルギーの電力への変換

エネルギーハーベスティング回路



太陽電池(Solar cell)の等価回路



太陽電池のモデル

- 発電素子のような特殊な部品は、回路シミュレーション用のモデルが無い場合が多いため、等価回路を作成して、データシートの特性と合わせ込む必要がある
- 参考書3-1またはスライド49を参考に、太陽電池の等価回路を入力する

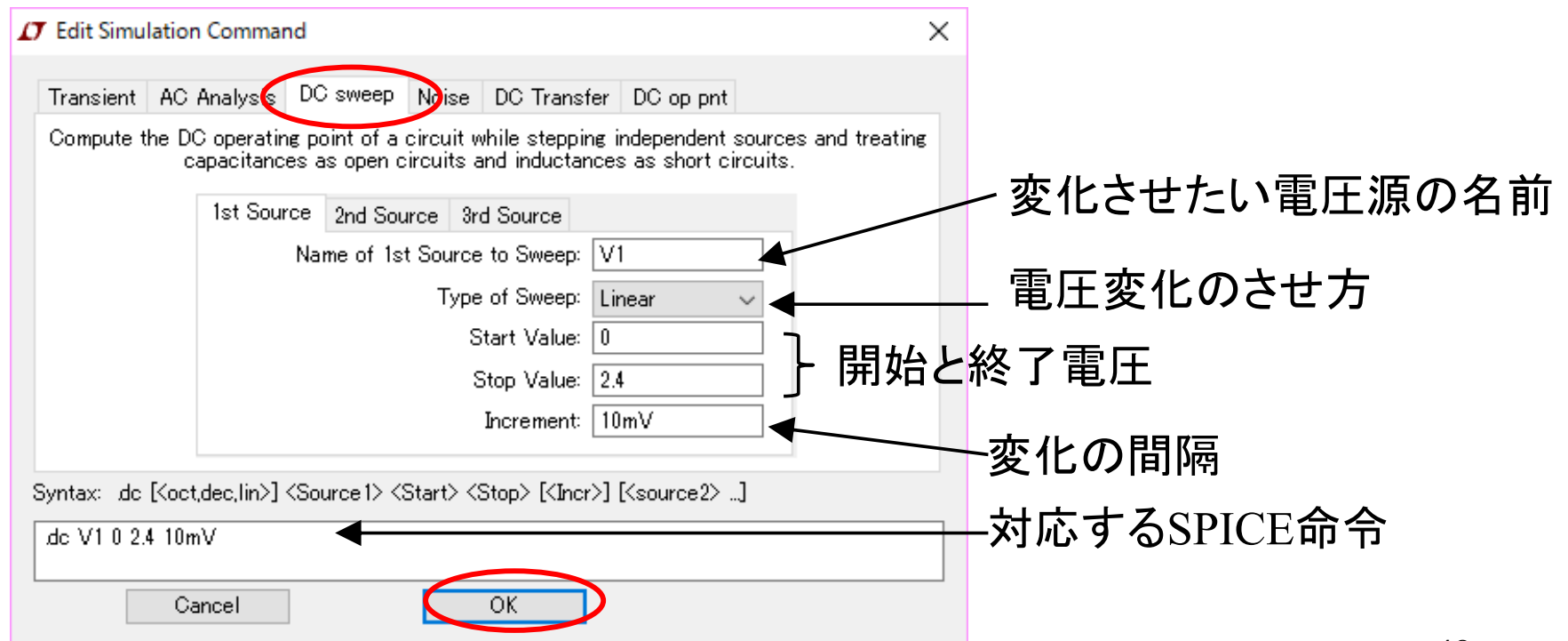
DC解析（横軸=電圧）の設定

回路図エディタの部品や配線がないスペースを右クリック

→ Edit Simulation Cmd. を選択

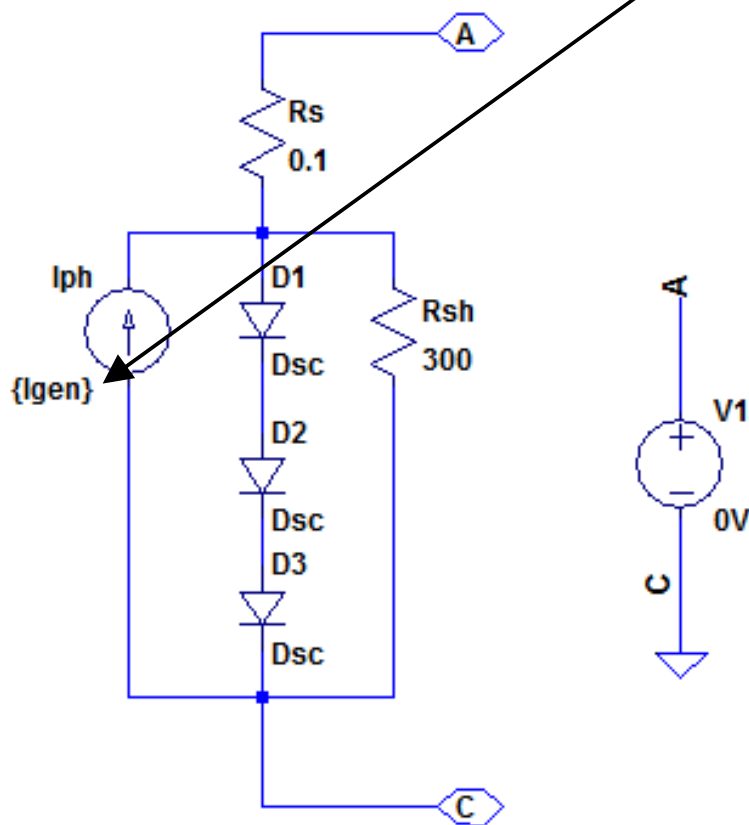
→ SPICE命令の文字列(.dc~)を回路図エディタ画面に配置

→ 再びスペースを右クリックし、Runでシミュレーション開始



パラメータスイープ(Parameter sweep)

```
.dc V1 0 2.4 10mV
.step param Igen list 0mA 100mA 200mA 300mA
.meas dc Pmax max I(V1)*V1
.meas dc Vmax find V1 when I(V1)*v1=Pmax
.meas dc Imax find I(V1) when I(V1)*v1=Pmax
```



.step 命令で変数値を指定する。
変数は、{Igen}のように{}で囲む。

.meas (.measurement) 命令で自動測定を行う。

- Pmax 最大電力
- Vmax 最大電力となる電圧
- Imax 最大電力となる電流

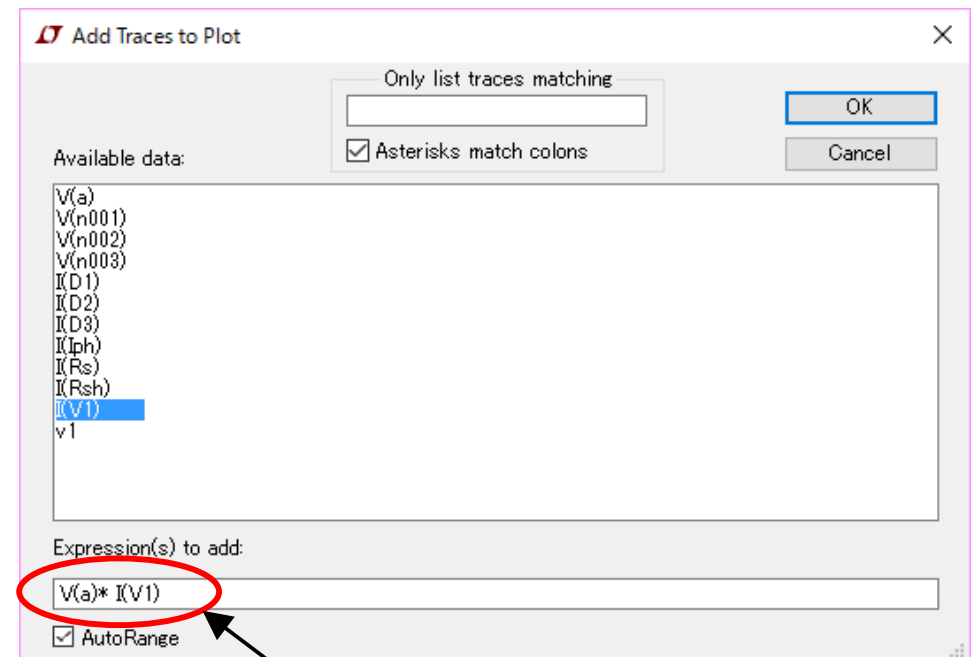
素子値を変化させて特性変化を解析することを**パラメータスイープ**と呼ぶ。

命令(ディレクティブ)の入力は、.opアイコンをクリック。

```
.model Dsc D(Is=80n Rs=0.1 N=1.9)
```

波形演算

- グラフの上で右クリック
- Add Plot Paneを選択
- 追加された空のグラフ枠内を右クリック
- Add Traceを選択
- Expression(s) to add:欄に $V(A)*I(V1)$ を入力
 - ALTを押しながらV1をクリックでも、電力表示できる
- 縦軸の数字をクリックして、Top = 600mW, Bottom=-100mWに変更



求めたい値の計算式を入力

.measの結果の確認

- グラフまたは回路図の上で右クリック
- ポップアップメニューから [View] - [SPICE Error Log] を選択
- SPICE Error Logウィンドウが開き、結果が表示される

```
SPICE Error Log: J:\Lecture\Ec2\2016\cir2016\1.3.4.log
Circuit: * J:\Lecture\Ec2\2016\cir2016\1.3.4.asc
.step igen=0
.OP point found by inspection.
.step igen=0.1
.step igen=0.2
.step igen=0.3

Measurement: pmax
step    MAX(i(v1)*v1)    FROM TO
1       0 0            2.4
2       0.14606        0    2.4
3       0.31804        0    2.4
4       0.496345       0    2.4

Measurement: vmax
step    v1    at
1       0    0
2       1.68 1.68
3       1.78 1.78
4       1.83 1.83

Measurement: imax
step    i(v1) at
1       0    0
2       0.0869406 1.68
3       0.178674  1.78
4       0.271227  1.83
```

Pmax

Vmax

Imax

ネットリスト

- 回路の接続情報を表すデータを**ネットリスト(Netlist)**と呼ぶ
 - 回路図エディタは、回路図をネットリストに変換する
 - 回路シミュレータは、ネットリストに基づき回路方程式を作成する
- LTspiceでシミュレーションを実行すると、拡張子 `.asc` および `.net` というファイルが作成される
 - `*.asc`: 回路図エディタのデータ(ダブルクリックで回路図エディタ起動)
 - `*.net`: ネットリスト(SPICE形式)
- 保存した `*.net` ファイルをテキストエディタで開いてみよう
 - ネットリストは、終了時に削除される(デフォルト設定の場合)
 - ネットリストを保存したい場合は、メニュー: View → SPICE Netlist
 - ネットリストが表示されるので、ネットリスト上を右クリック → Edit as Independent Netlist で保存(この場合は、拡張子 `.sp` となる)

SPICE ネットリストのフォーマット

```
* J:¥Lecture¥Ec2¥2016¥cir2016¥1.3.4.asc  
Iph 0 N001 {Igen}  
Rsh N001 0 300  
Rs A N001 0.1  
V1 A 0 0V  
D1 N001 N002 Dsc  
D2 N002 N003 Dsc  
D3 N003 0 Dsc  
.model Dsc D(Is=80n Rs=0.1 N=1.9)  
.dc V1 0 2.4 10mV  
.step param Igen list 0mA 100mA 200mA 300mA  
.backanno  
.end
```

← 行頭の*はコメント行。

← Rshがノード"N001"とノード"0"の間に接続されている。抵抗値は300Ω。ノード番号'0'は、GND(Ground)を表す。

} .で始まる行はシミュレータに渡す命令行 (SPICE Directive)。

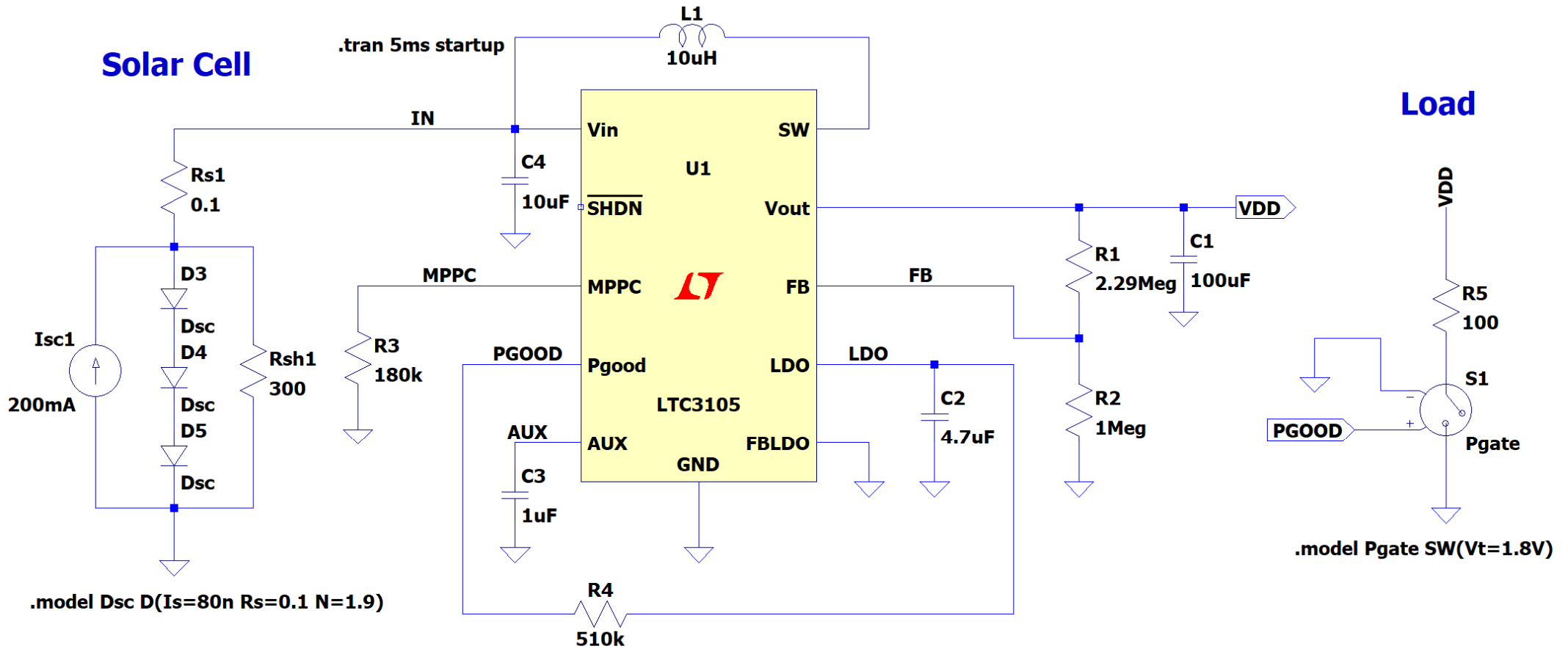
(参考) ネットリストを使う場面

- SPICE ネットリストは標準的なフォーマットなので、他の電子回路シミュレータでも読み込める場合が多い
- シミュレーションエラーが発生したときに、ネットリストが読めると、原因の特定がしやすい
- マイクロマシン、論理回路、プログラム、新型デバイスなどを言語記述によりモデリングし、アナログ回路との混在シミュレーションをする場合にSPICE ネットリストが使用できる

課題2. 2

1. 参考書3-2, 3-3または次ページを参考にして、環境発電回路のシミュレーションを行い、回路図、結果のグラフをPDFにして提出せよ。グラフには、 $V(VDD)$, $V(IN)$, $V(LDO)$, $V(MPPC)$, $V(PGOOD)$, $V(AUX)$, $I(L1)$, $I(R5)$ を示すこと。
 - Transient解析(横軸=時間)の設定方法、回路図のコピー方法、グラフのコピー方法は、本章のp.36, p.40を参考にすること。

Energy Harvesting



2.3節のまとめ

- LTspiceの基本的な使い方
 - デバイス(シンボル)の配置、配線
 - 素子値の設定
 - 半導体デバイスモデルとモデル名の指定
 - 電圧源、電流源の設定
 - 解析の設定(.DC, .TRAN命令の設定)
 - グラフ表示
 - 回路図とシミュレーション結果のエクスポート
- LTspiceの少し高度な使い方
 - .stepによるパラメトリック解析
 - .measによる自動測定
 - 波形演算機能によるシミュレーション結果に対する演算
 - ネットリストの出力