

第16章 電源回路

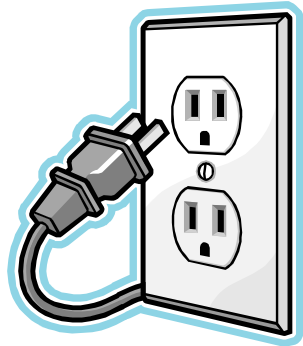
交流-直流の変換と電圧の変換

交流を直流に変換する回路

16.1 整流回路

電源回路の応用例

ACアダプター



コンセントAC電源

60Hz
(トランス)

↓
直流電源

ICカード



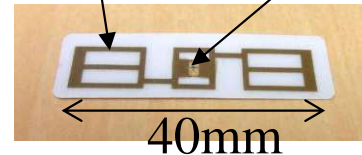
85mm

高周波磁界
13.56MEGHz
(電磁誘導コイル)

↓
直流電源(内部回路用)

ICタグ (RF-IDタグ)

アンテナ RF-IDチップ



電磁波
920MHz/2.4GHz
(アンテナ)

↓
直流電源(内部回路用)

光レクテナ

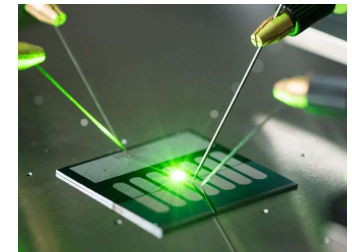


写真: Rob Felt
(Georgia Tech)

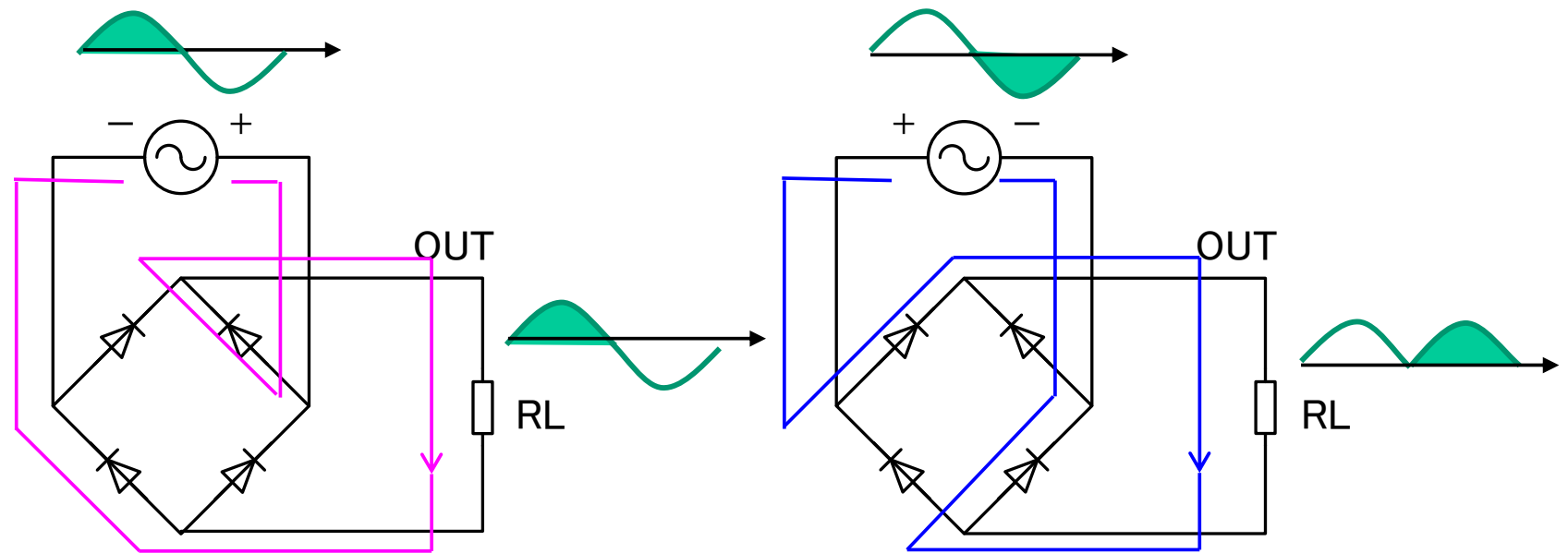
可視光～赤外線
12～700THz
(アンテナ+整流器)

↓
直流電源(充電用)

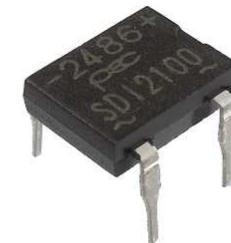
電源回路は一度完成された技術だが、近年は、バッテリーレス集積回路、無線給電（電気自動車、スマートホン充電器、静止衛星発電）、環境エネルギー発電などの先端技術として再開発が進んでいる。

ダイオードブリッジ(Diode bridge)

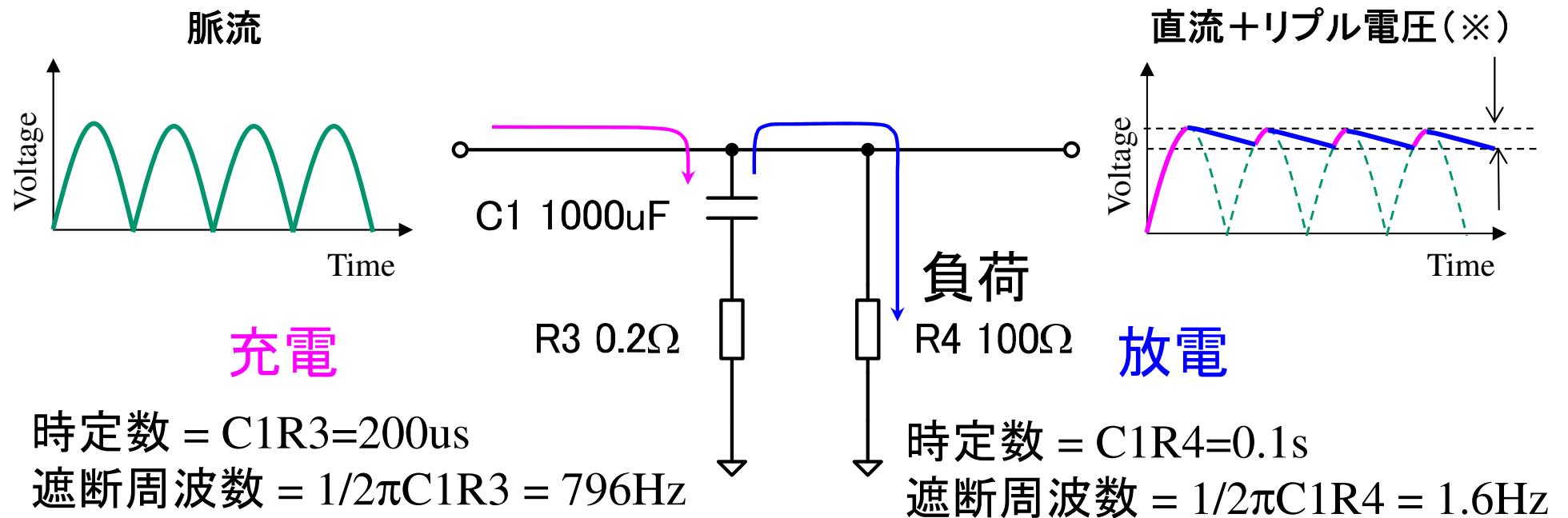
交流から直流を作るために使用される。OUTの電圧は波打っているので脈流と呼ばれる。LPFで平均(平滑とも呼ぶ)して直流電圧にする。



ダイオードブリッジは4本のダイオードを組み合わせて作るか、1パッケージに集積化された4端子の部品を使用する。



平滑回路(Smoothing circuit)

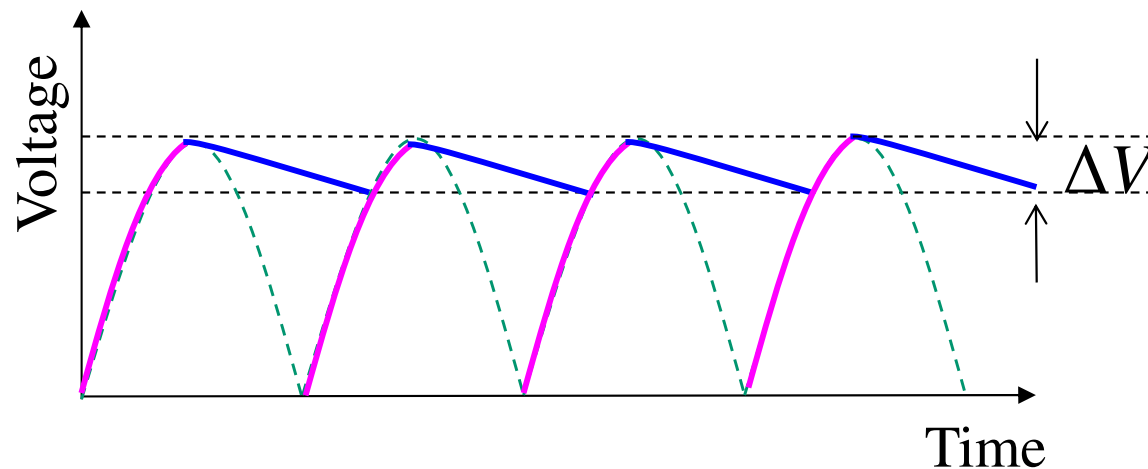


充電は、時定数 = $200\mu s$ で高速に行われるが、放電は時定数 = 0.1s となり、ゆっくり電圧が下がるので、脈流が平滑化される。

※ 出力電圧は、完全な直流ではなく少し波打っている(リップル, Ripple)。これをなくすためには、レギュレータ(後述)が必要。

リップル含有率(リップル率)

出力電圧の変動の大きさを表す指標として、リップル含有率(Ripple factor)が用いられる。



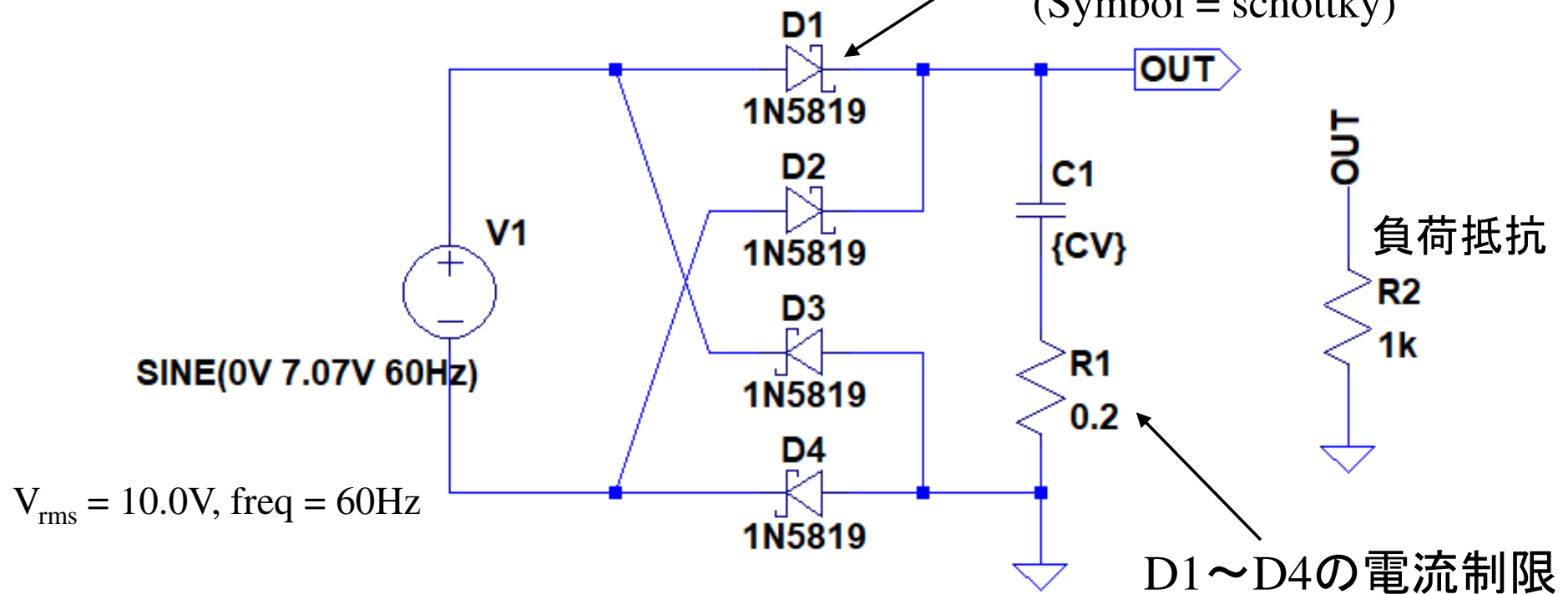
$$\text{リップル含有率 } \gamma = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{DC}^2}}{V_{DC}} \approx \frac{\Delta V}{V_{DC}} = \frac{\frac{\Delta Q}{C}}{V_{DC}} \approx \frac{\frac{V_{DC}}{RL} \frac{T}{2}}{V_{DC}} = \frac{T}{2CRL}$$

ダイオードブリッジのシミュレーション

.step param CV list 330uF 1000uF 3300uF

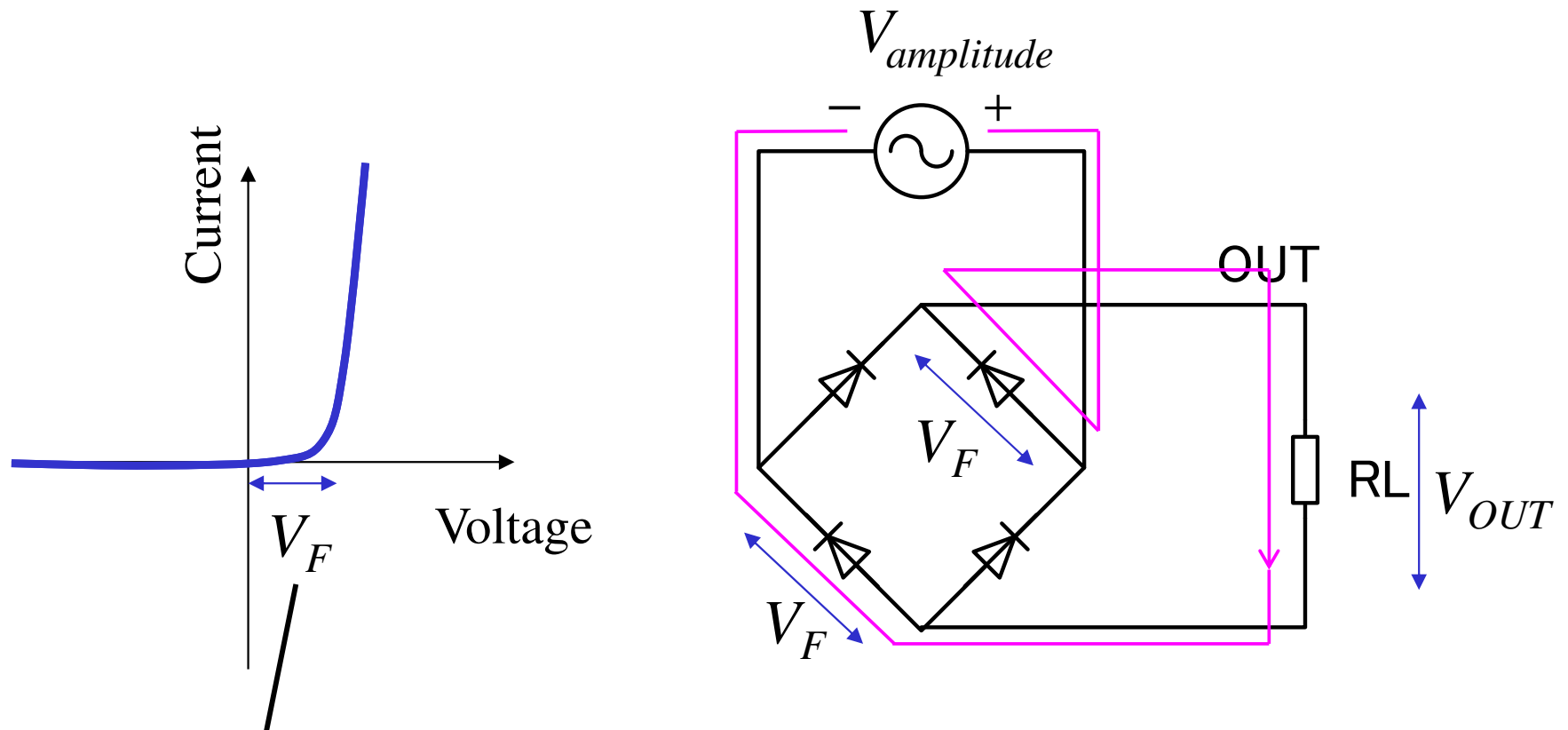
.tran 0 600ms 0ms 1ms

整流用ショットキーダイオード
(Symbol = schottky)



1. C1を変化させたとき、V(OUT)の平均電圧およびリプル電圧がどう変化するか確認すること。

ダイオードによる電圧損失



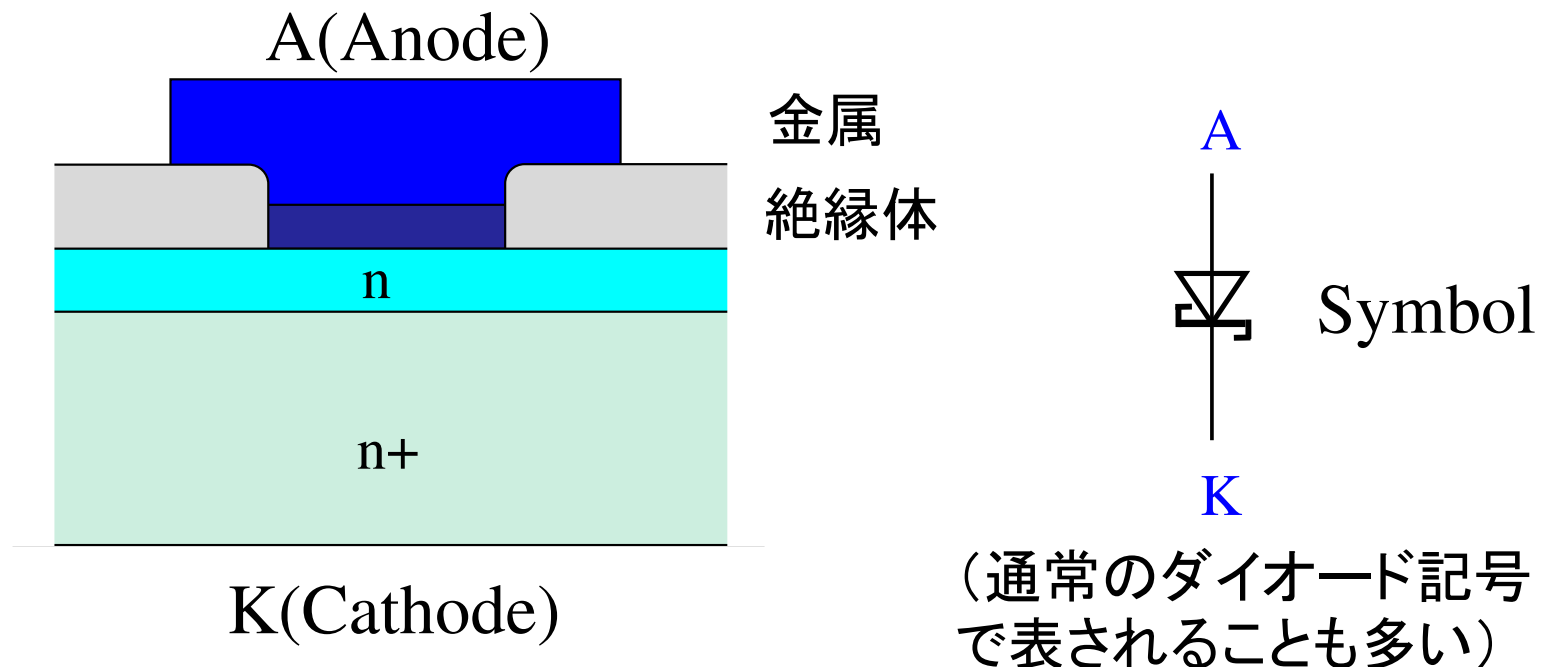
電流が殆ど流れない電圧範囲

$$V_{OUT} = V_{amplitude} - 2V_F$$

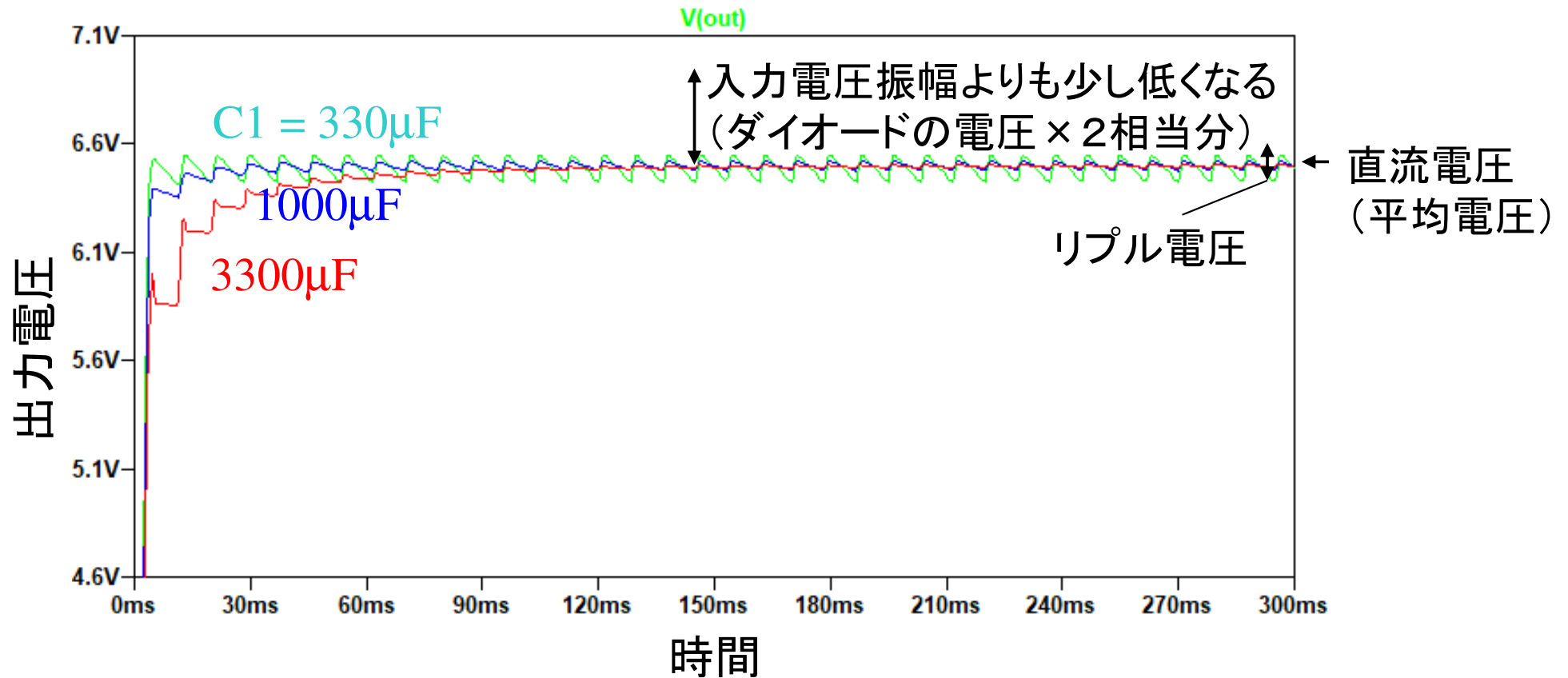
出力電圧は、交流電圧振幅より小さい。

(参考) ショットキーバリアダイオード

シリコンpn接合ダイオードは、 V_F が0.6V程度あるため、電圧損失が大きい。整流用途では、 V_F が0.2V~0.3V程度のショットキーバリアダイオード (Schottky barrier diode) が使用されることが多い。ただし、逆方向の電流が大きいので、リークに注意が必要。



シミュレーション結果



リップル電圧: 出力は完全な直流ではなく多少波打つ。この交流成分の振幅をPeak-to-peakで表した値をリップル電圧という。リップルは、雑音源になるため、電圧を一定にするレギュレータ(後述)を追加する。

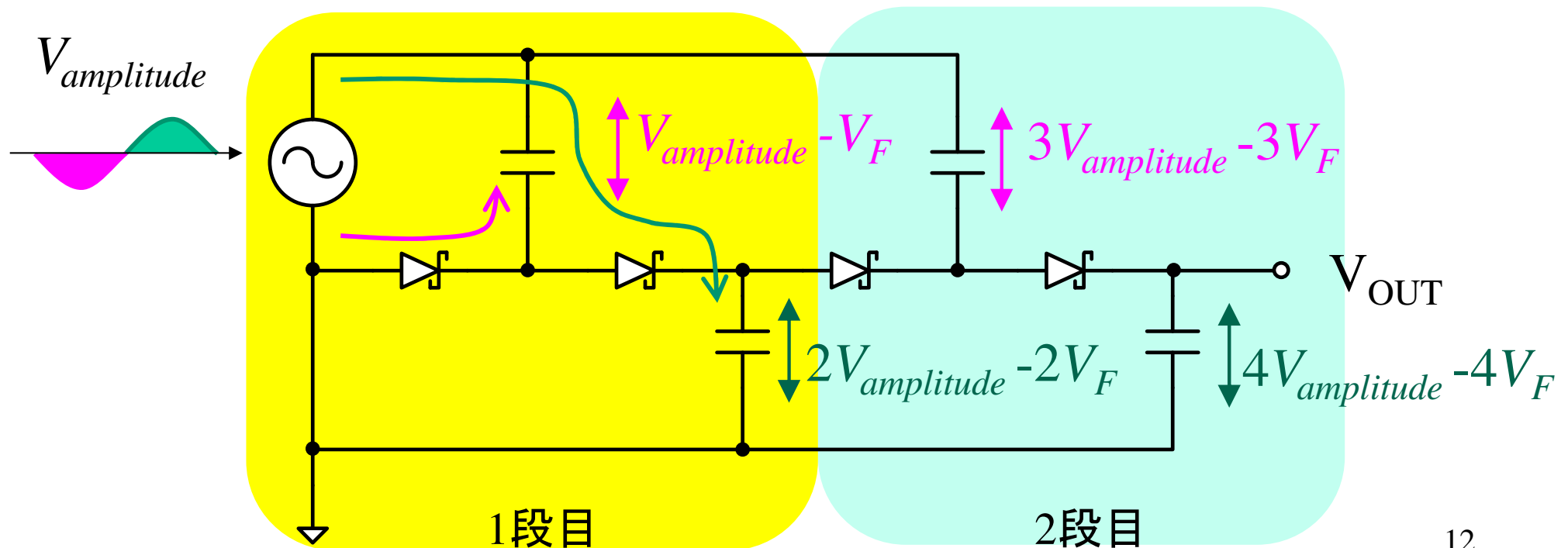
課題16. 1

- スライド7の電源回路について、
C1=1000 μ Fとし、負荷抵抗R2を100 Ω , 1k Ω ,
10k Ω , 100k Ω に変えたとき、平均電圧とリ
プル電圧が何 V_{p-p} になるか調べよ。

(参考) V_{p-p} , V_{rms} などの単位表記は、SI単位ではないが(SI単位では何れもV)、電子工学分野で、慣用的に用いられている表記法である。振幅(V), Peak-to-peak値, RMS値を見分けるために便利なので、本講義では、 V_{p-p} , V_{rms} などを用いる。

倍電圧整流回路(Voltage doubler)

入力電圧よりも高い出力電圧を得る昇圧整流回路が各種考案されている。ここでは、**チャージポンプ**(Charge pump)による(多段)倍電圧整流回路を説明する。



倍電圧整流回路のシミュレーション

UHF帯ICタグに内蔵されているRF-DCコンバータ(※)を市販ディスクリートデバイスで再現してみる。IN, OUT1, OUT2の波形を調べ、それぞれ直流電圧成分が何Vか調べてみよう。

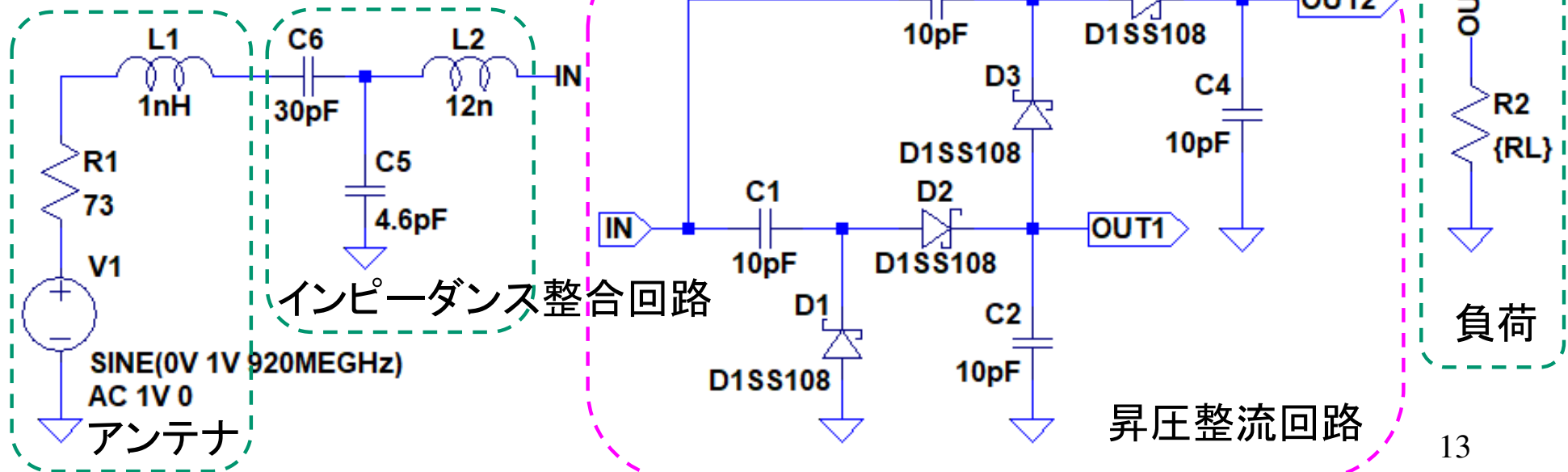
※ 無線通信で使用する周波数帯の交流電力から直流を作る回路。

高周波ダイオードのモデルパラメータ

```
.model D1SS108 D(is=4.86E-5 n=2.105 rs=58.7 cjo=1.62pF vj=2.267 m=0.2857 tt=0.1ns bv=60 ibv=100E-15)
```

```
.step param RL list 20k 50k 2MEG
```

```
.tran 0 500ns 480ns 10ps
```



課題16. 2

1. 前ページスライドの回路のシミュレーションを行い、下記のグラフを作成せよ。
 - OUT1の直流電圧(平均電圧)とRLの関係
 - OUT2の直流電圧(平均電圧)とRLの関係
2. 昇圧段数を3段にしたときの出力直流電圧(平均電圧)とRLの関係をシミュレーションにより求めよ。

16.1節のまとめ

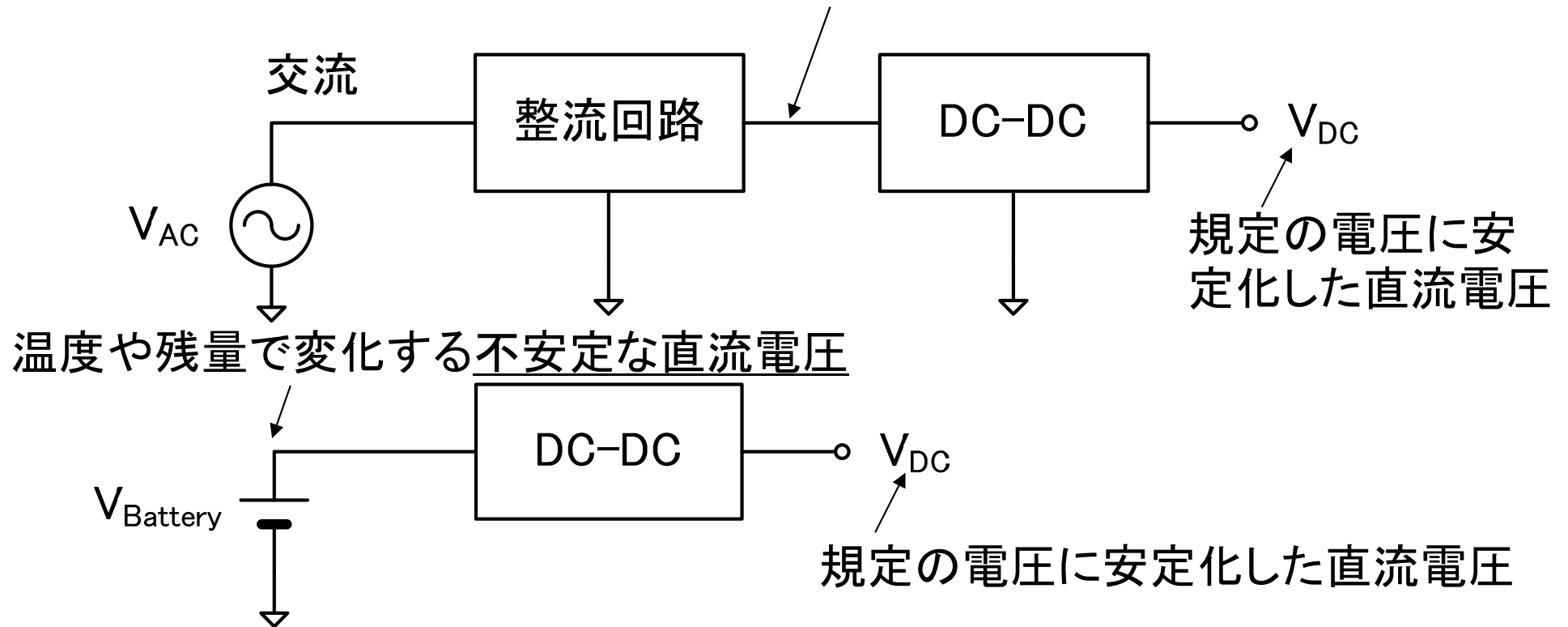
- ダイオードブリッジ
 - 交流から脈流を作る回路。脈流には直流成分が含まれている
 - ダイオードによる電圧損失 = ダイオードの順方向電圧の2倍
- 平滑回路
 - キャパシタへの充電時定数を、交流電圧源の1/4周期よりも十分に短くして、急速に充電させる
 - キャパシタからの放電時定数を、交流電圧源の1/4周期よりも十分に長くして、ゆっくり放電させる
- 倍電圧整流回路
 - キャパシタとダイオードを組み合わせるにより1段当たり入力電圧振幅の約2倍の直流電圧が得られる
 - 倍電圧整流回路を多段接続することにより、低交流電圧から高直流電圧を生成することが可能

直流電圧を既定値に制御する回路

16.2 DC-DCコンバータ

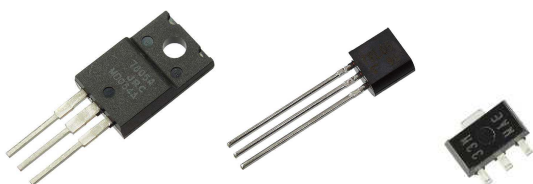
DC-DCコンバータ(DC-DC converter)

入力電圧によって変化する不安定な直流電圧+リップル



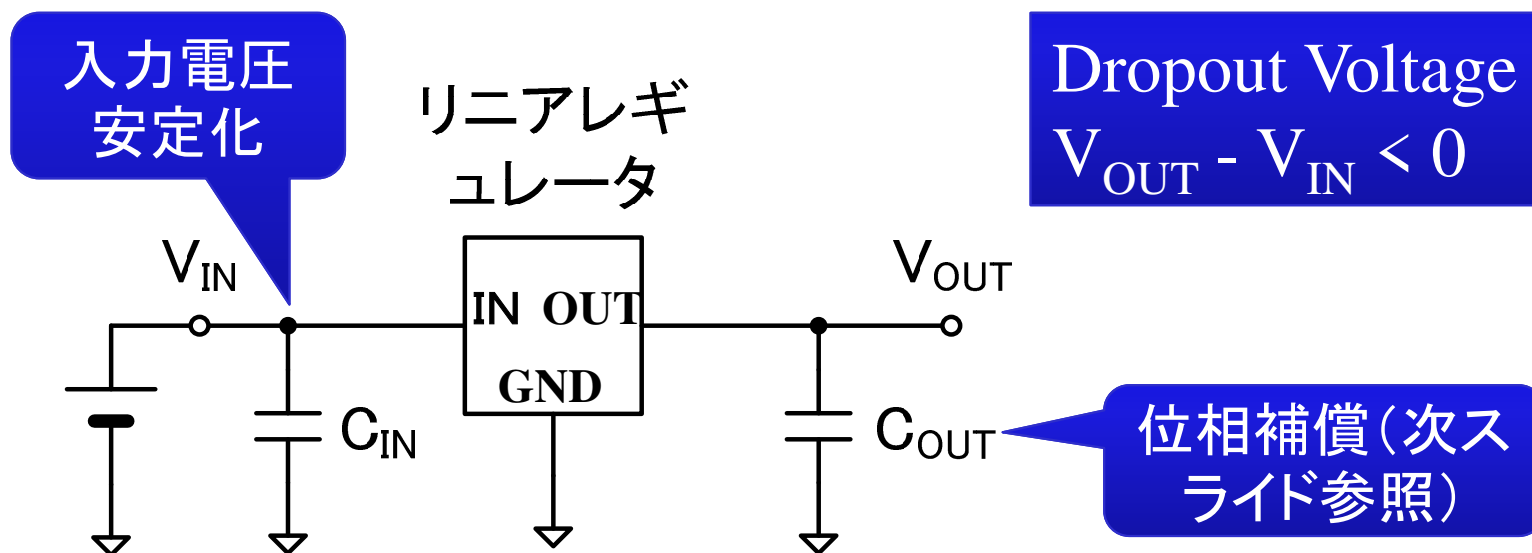
交流電圧や時間変動する直流電圧(電池など)から一定に制御された電圧を出力する。**リニアレギュレータ**と**スイッチングレギュレータ**の方式がある。

リニアレギュレータ(Linear regulator)



3端子レギュレータ

よく使用する直流1.8V, 3.3V, 5.0Vなどを出
力するリニアレギュレータICは、**3端子レ
ギュレータ**の名称で市販されている。特に、
 $V_{IN} - V_{OUT} < 1.0V$ 以下の条件で動作するも
のは、**LDO (Low dropout)**と呼ばれる。

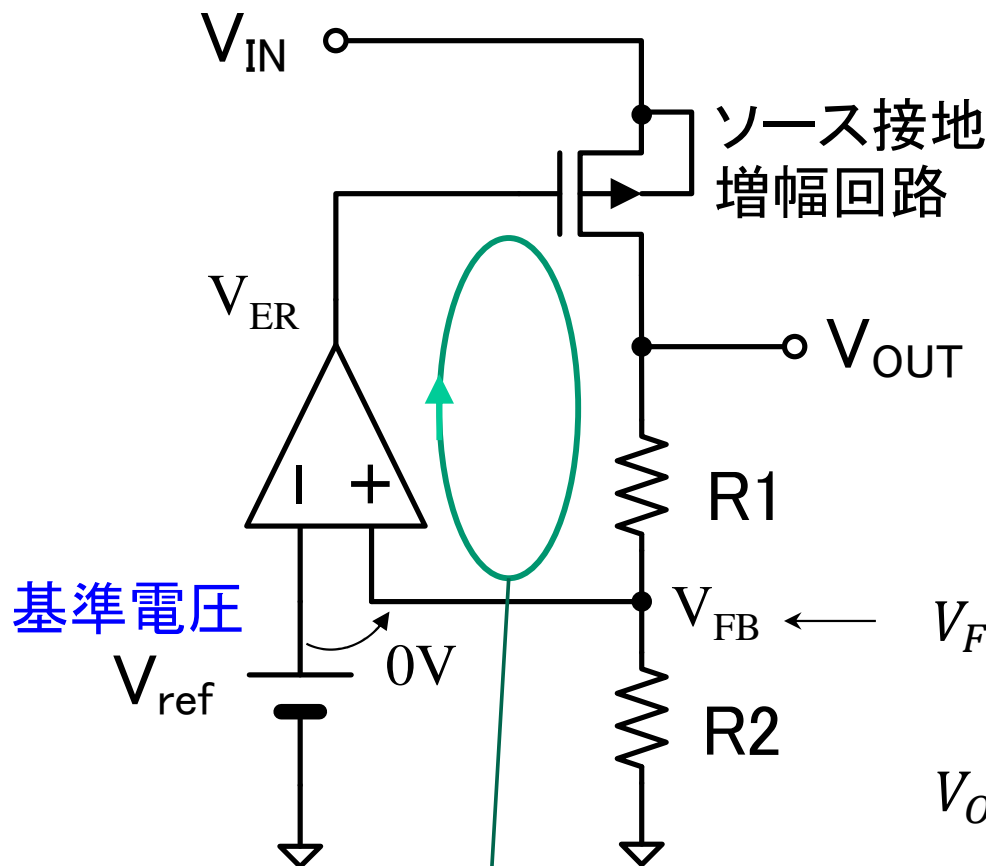


リニアレギュレータの動作

リニアレギュレータには、**シリーズレギュレータ**と**シャントレギュレータ**の回路方式があるが、ここでは、広く普及しているシリーズレギュレータの動作原理を理解する。

動作原理

- ① V_{OUT} が上昇
- ② V_{FB} が上昇
- ③ V_{ER} が上昇
- ④ $|V_{GS}| = |V_{ER} - V_{IN}|$ が減少
- ⑤ V_{OUT} が減少



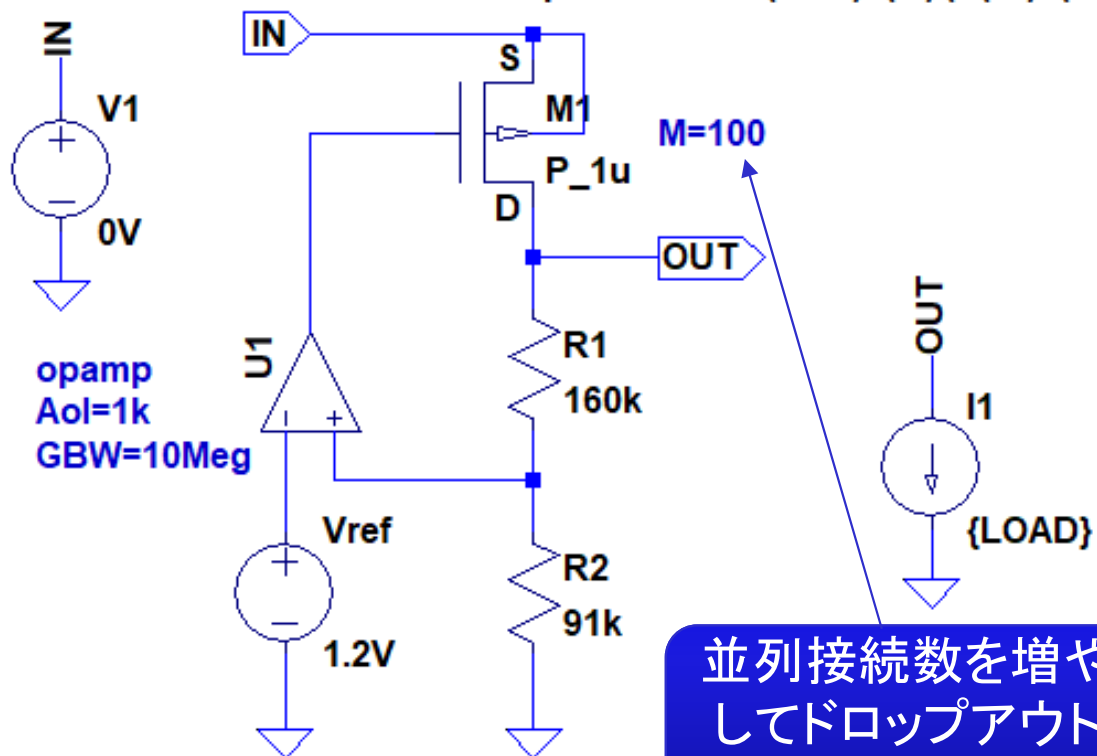
$$V_{FB} = \frac{R2}{R1 + R2} V_{OUT} = V_{ref}$$

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) V_{ref} \quad (V_{IN} \text{に依存しない})$$

NFB (2段増幅なので位相補償が必要)

シリーズレギュレータのシミュレーション

```
.lib cmos.lib
.lib opamp.sub
.dc V1 0V 5V 1mV
.step dec param LOAD 10mA 110mA 10
.meas dc theta find d(V(OUT))/d(V(IN)) at 3.8V
.meas dc output find V(OUT) at 3.8V
.meas dc vdif = find V(IN) - output when V(OUT)=0.998*output
.meas dc Epower find -V(OUT)*I(I1)/(V(IN)*I(V1)) at 3.8V
```

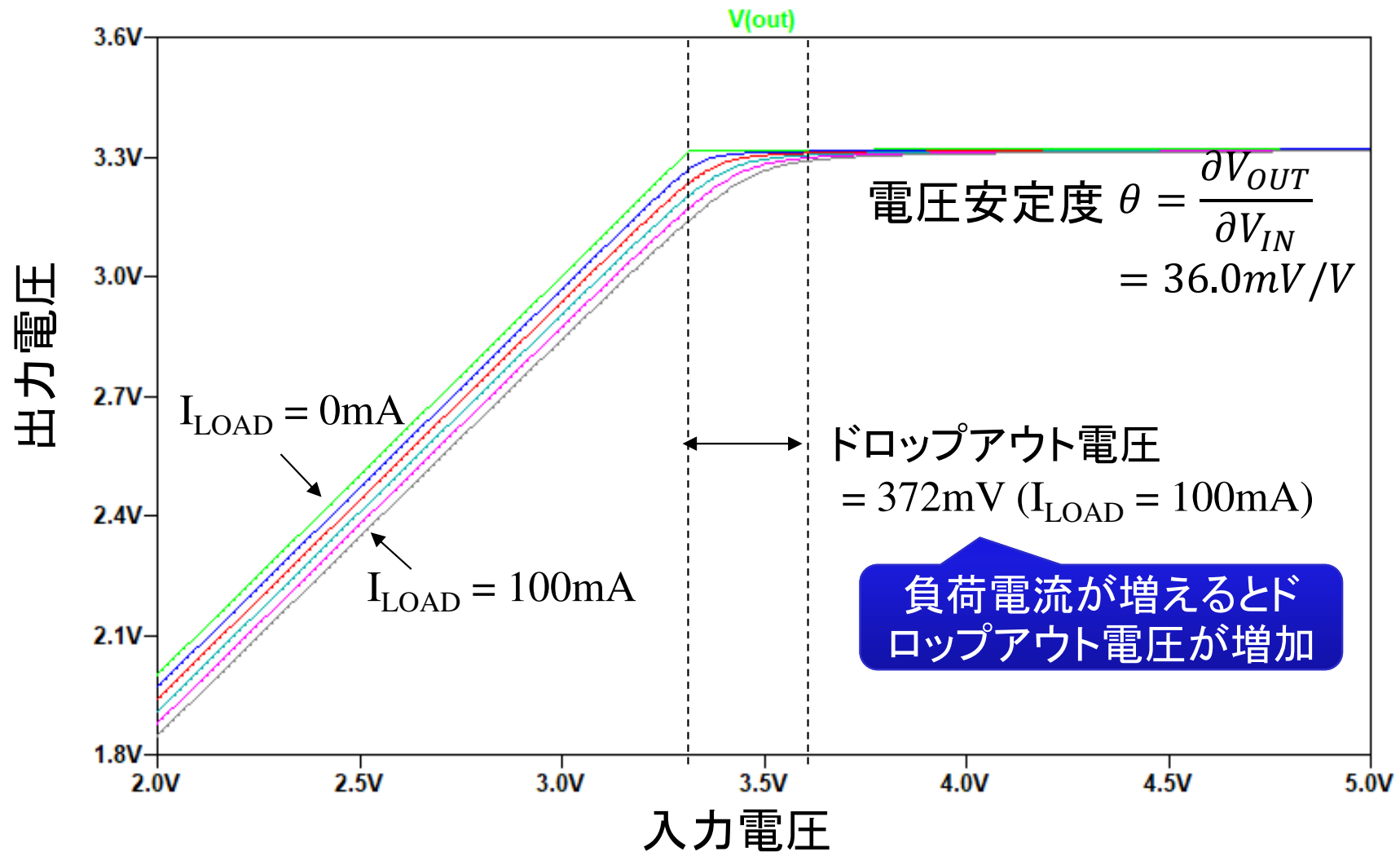


レギュレータの性能指標

- 入力安定度
 - dV_{OUT}/dV_{IN}
- 負荷安定度
 - dV_{OUT}/I_{LOAD}
- ドロップアウト電圧
 - $V_{OUT} - V_{IN-min}$
- 最大出力電流
- 出力電圧の温度係数

並列接続数を増やしてドロップアウト電圧を小さくする

シミュレーション結果



課題16. 3

1. スライド20の回路のシミュレーションを行い、下記の性能を調べよ(.measの測定内容参照)。
 - $V_{IN} = 3.8V$, $I1 = 100mA$ における入力安定度
 - $V_{IN} = 3.8V$, $I1 = 100mA$ における負荷安定度
 - $I1 = 100mA$ におけるドロップアウト電圧
2. 電力効率 η_p – 負荷電流 $I1$ のグラフを作成せよ
 - 電力効率の計算

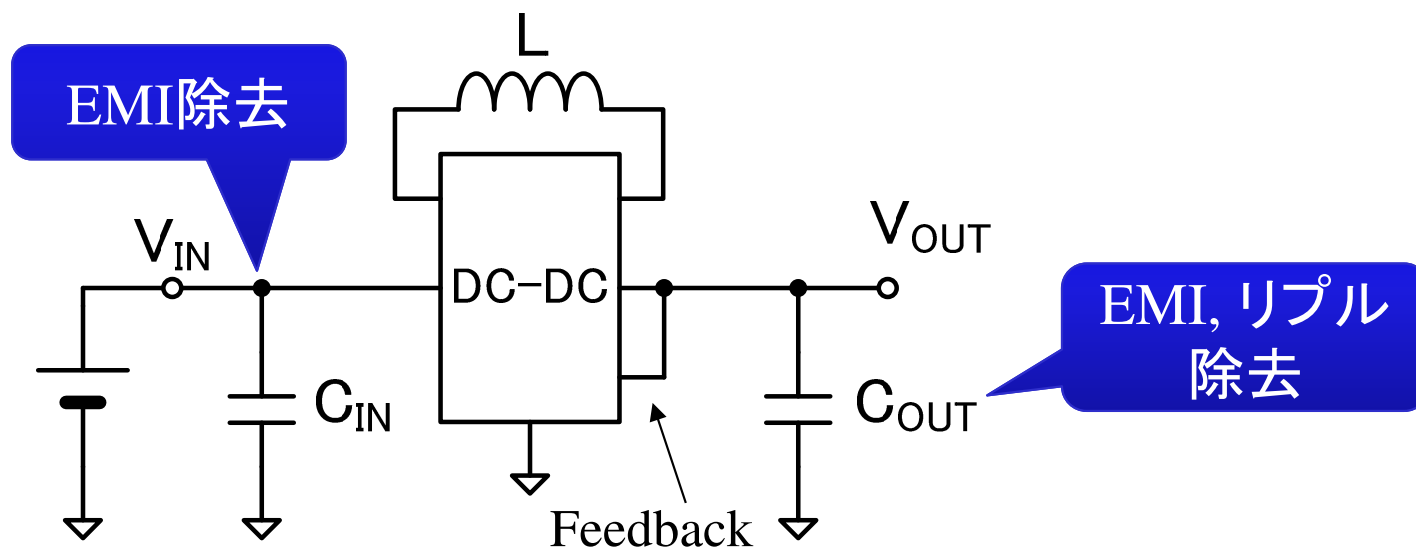
$$\eta_p = - \frac{I(V1)V(V1)}{I(I1)V(I1)}$$

スイッチングレギュレータ (Switching regulator)



DC-DCコンバータ

特に小さい電力損失および少ない発熱でDC電圧を一定に制御する。この方式では、昇圧(入力電圧 < 出力電圧, Boost converter)または降圧(入力電圧 > 出力電圧, Buck converter)、反転(出力 < 0, Inverting converter)が可能。スイッチングレギュレータ用ICは、DC-DCコンバータの名称で市販されている。



(参考) EMC (Electro Magnetic Compatibility)

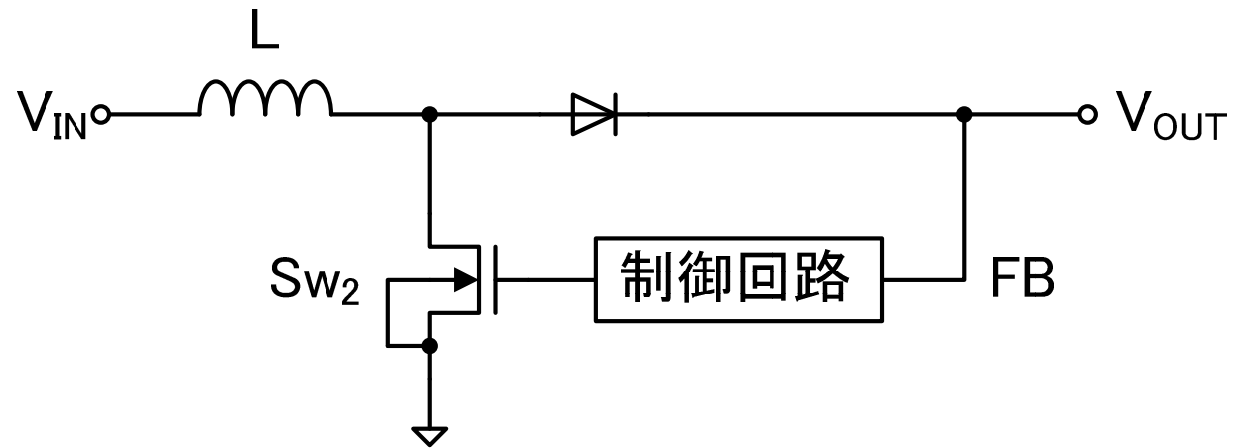
- EMI
 - Electro Magnetic Interference (電磁気妨害)
- EMS
 - Electro Magnetic Susceptibility (電磁気感受)
- EMC
 - Electro Magnetic Compatibility (周囲の電磁雑音に影響しない、されないこと)

スイッチングレギュレータは、EMIの発生源となるため、 C_{IN} 、 C_{OUT} の選定には注意が必要(低ESR, 十分な大きさのキャパシタを使用)。

スイッチングレギュレータの回路構成

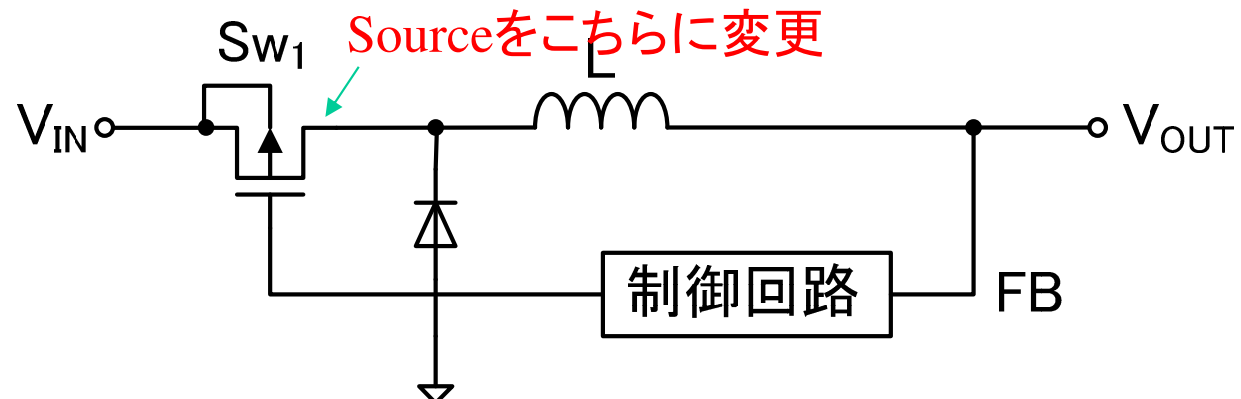
昇圧型(Boost type)

$$V_{IN} < V_{OUT}$$



降圧型(Buck type)

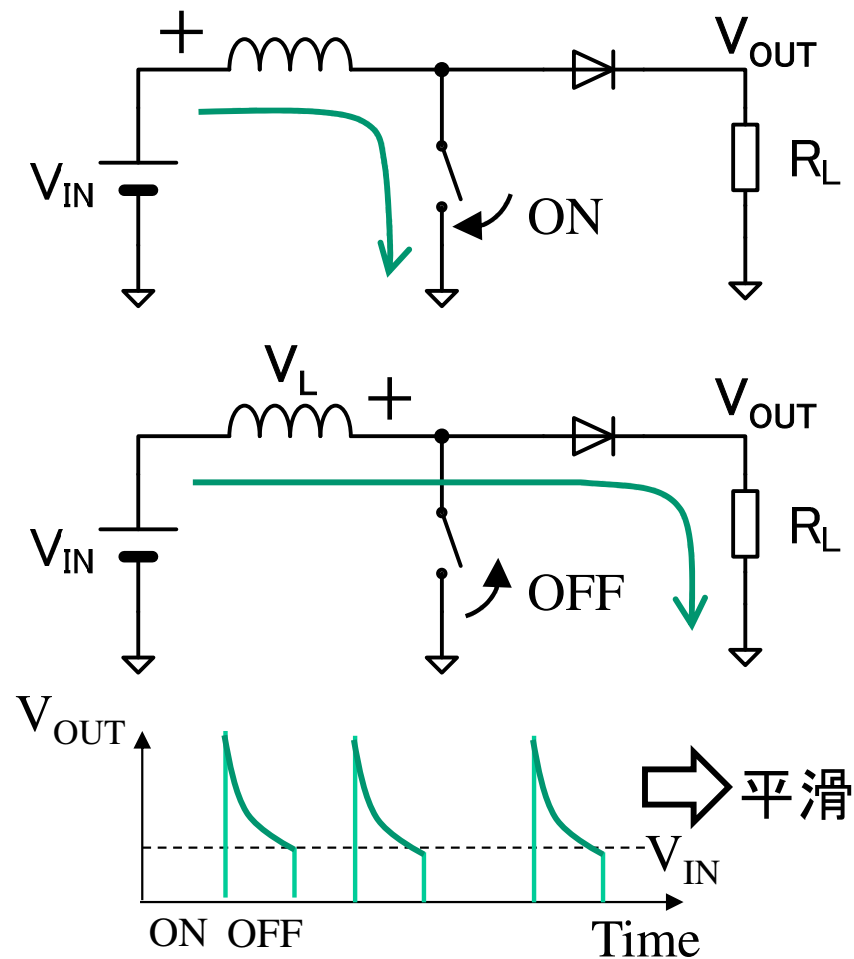
$$V_{IN} > V_{OUT}$$



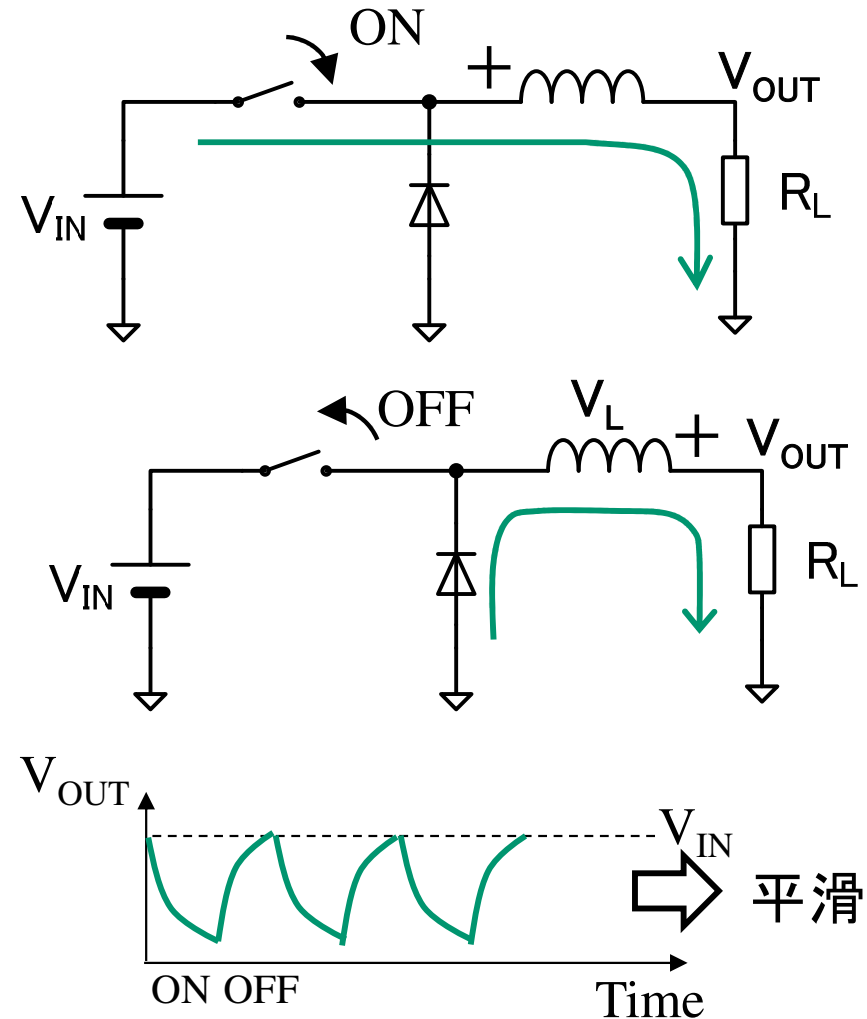
(参考) ダイオードは、フリーホイールダイオード(Free-wheel diode)と呼ばれる。ダイオードの代わりにMOSFETのスイッチを使った方式は同期整流(Synchronous rectification)と呼ばれる。

スイッチングレギュレータの動作

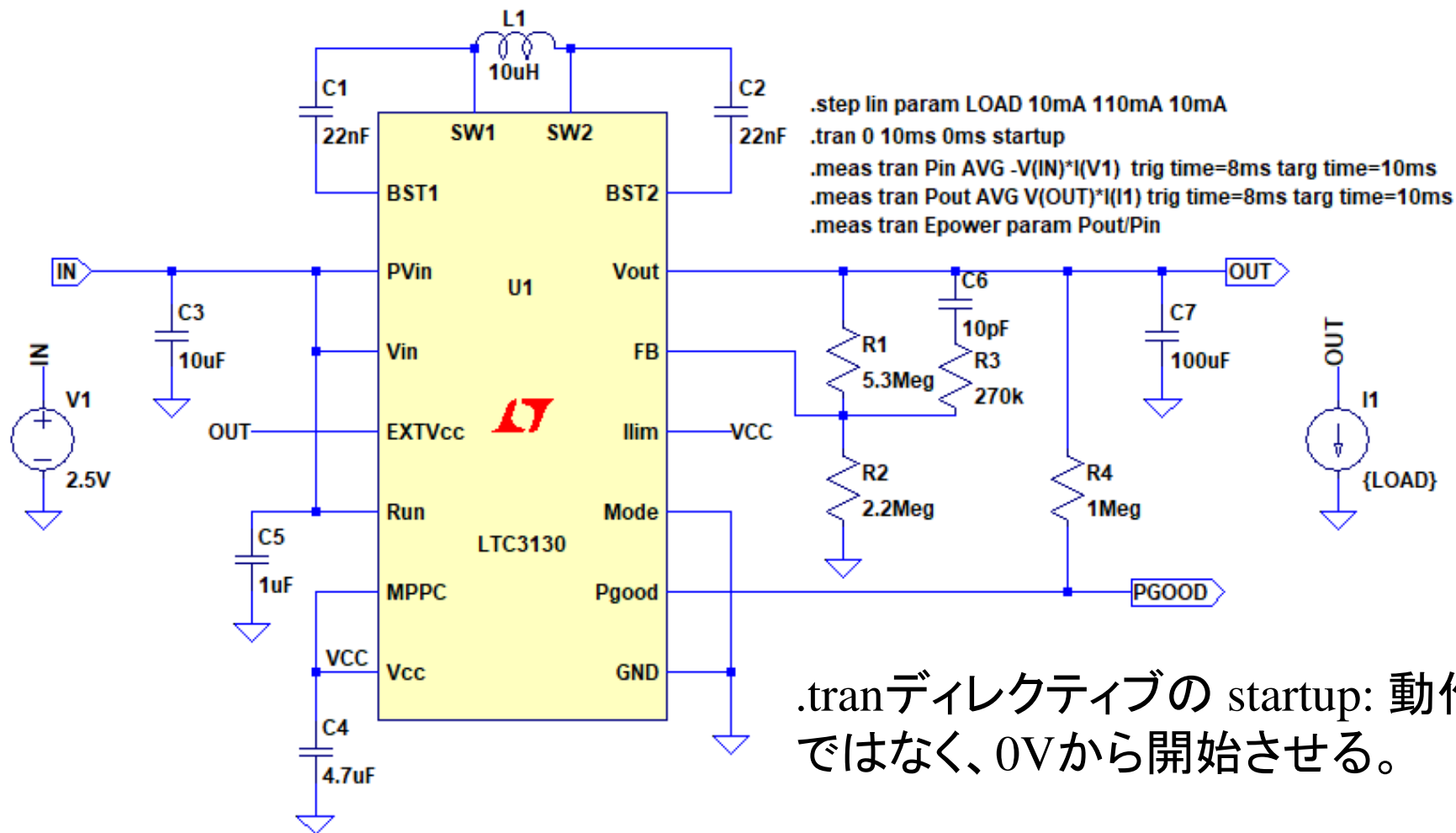
昇圧型



降圧型



昇降圧型スイッチングレギュレータのシミュレーション



.tranディレクティブの startup: 動作点ではなく、0Vから開始させる。

昇降圧型は、昇圧型と降圧型を組み合わせで昇降圧両方に対応したもの。 27

課題16. 4

1. 前スライドの回路のシミュレーションを実施し、
V(OUT), V(VCC), V(PGOOD), I(L1)の波形を示せ
2. 電力効率– 負荷電流のグラフを作成せよ

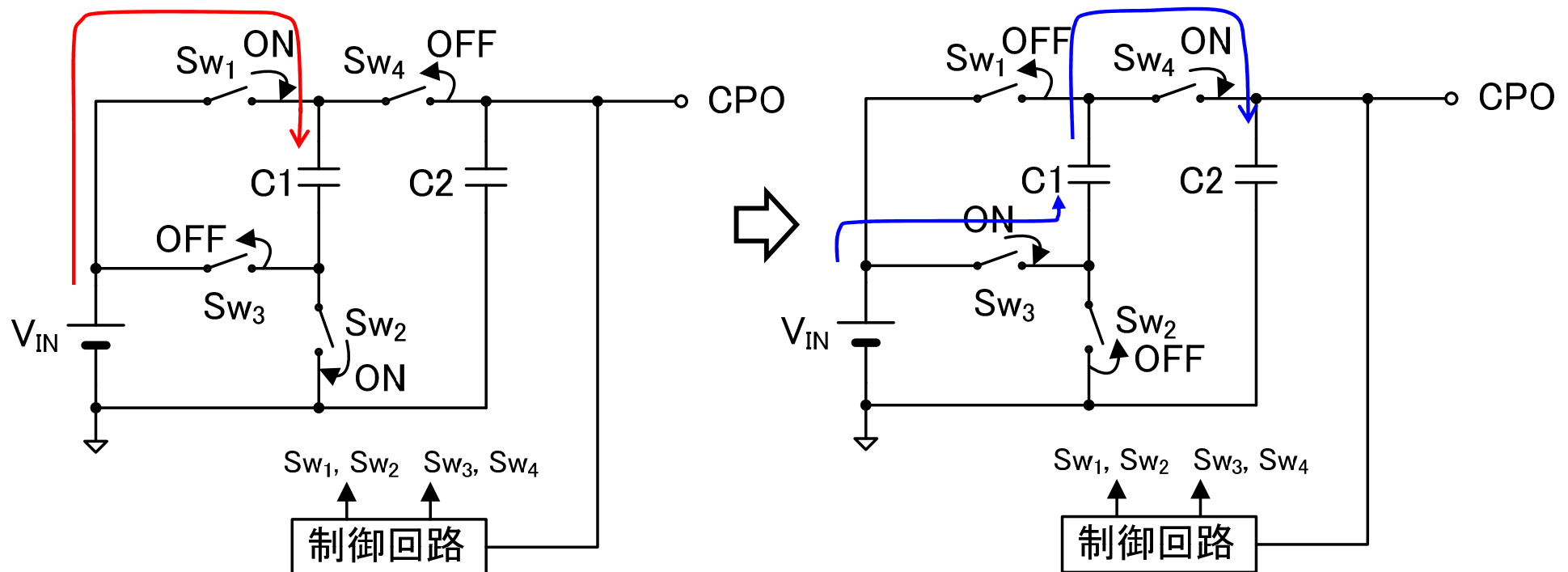
– 電力効率の計算

$$\eta_p = - \frac{\int_0^T I(V1)V(V1)dt}{\int_0^T I(I1)V(I1)dt}$$

- (参考) 直流の変換効率なので、RMS値ではなく平均値を求め、交流電力成分は無視している。
- (注) シミュレーションには時間がかかるので、PCが空いているときに実行すること。

チャージポンプ

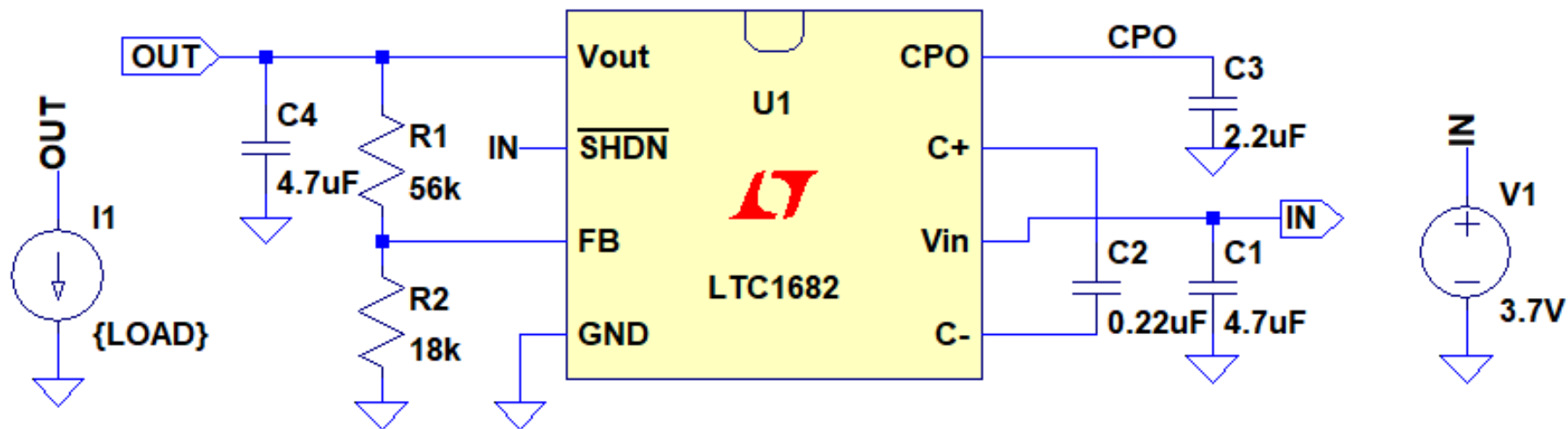
- 倍電圧整流回路と同じ原理で直流電圧を昇圧する。
- インダクターを使用するスイッチングレギュレータよりも低雑音。



チャージポンプのシミュレーション

```
.step param LOAD 0mA 50mA 10mA  
.tran 0 5ms 0ms startup
```

```
.meas tran Pin AVG -V(IN)*I(V1) trig time=4ms targ time=5ms  
.meas tran Pout AVG V(OUT)*I(I1) trig time=4ms targ time=5ms  
.meas tran Epower param Pout/Pin
```



CPOは、チャージポンプの出力(出力電流を流すと出力電圧が変動する)。
OUTは、チャージポンプ+リニアレギュレータの出力(一定に保たれる)。

.tranディレクティブの startup: 動作点ではなく、0Vから開始させる。

課題16. 5

1. 前スライドの回路のシミュレーションを実施し、
V(OUT), V(CPO)の波形を示せ
2. 電力効率– 負荷電流のグラフを作成せよ
電力効率の計算

$$\eta_p = - \frac{\int_0^T I(V1)V(V1)dt}{\int_0^T I(I1)V(I1)dt}$$

(参考) 直流の変換効率なので、RMS値ではなく平均値を求め、交流電力成分は無視している。

16.2節のまとめ

- シリーズレギュレータ
 - MOSFETの V_{DS} を制御し、出力電圧を一定に保つ
 - $V_{IN} > V_{OUT}$ で動作する。 $V_{IN} - V_{OUT}$ の最小値をドロップアウト電圧と呼ぶ
 - ドロップアウト電圧は、負荷電流によって変化する
 - 電力効率 は動作時の $V_{IN} - V_{OUT}$ に比例して低下する
- スイッチングレギュレータ
 - インダクタに流れる電流のON/OFF切り替えによって発生する誘導起電力の発生タイミングを制御して、出力電圧を一定に保つ
 - $V_{IN} > V_{OUT}$ の回路は降圧型(Buck type)と呼ばれる
 - $V_{IN} < V_{OUT}$ の回路は昇圧型(Boost type)と呼ばれる
 - スイッチングレギュレータは、電力効率が非常に高いが、起動に時間がかかることや、EMC対策が必要などの短所もある
- チャージポンプ
 - キャパシタとスイッチ(MOSFET)で、直流電圧を昇圧する
 - 出力電流を流すと電圧が下がるので、リニアレギュレータで一定に保つ 32