

電子回路講座 第7回

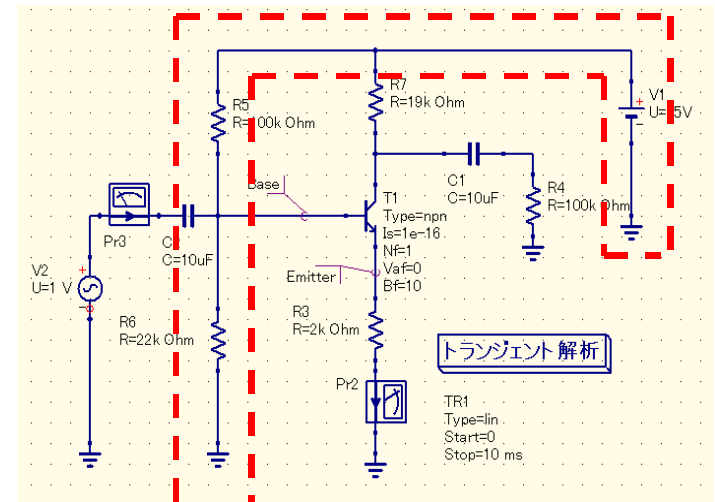
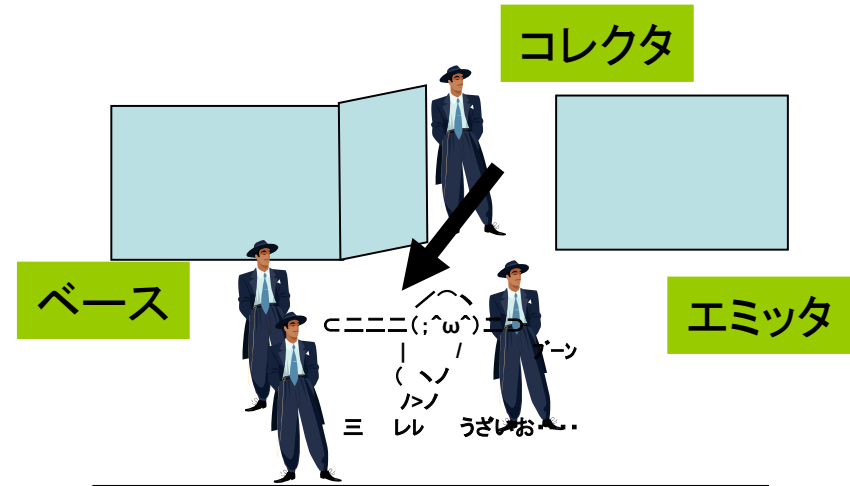
トランジスタの設計

今日の内容

- トランジスタ回路の設計
 - 各部抵抗値をどう定めるか？
 - 増幅回路の仕様
 - 実際の設計

前回の内容

- トランジスタの動作
 - 構造
 - 電流の増幅
- 基本のトランジスタ回路
 - バイアス
 - 各種接地回路



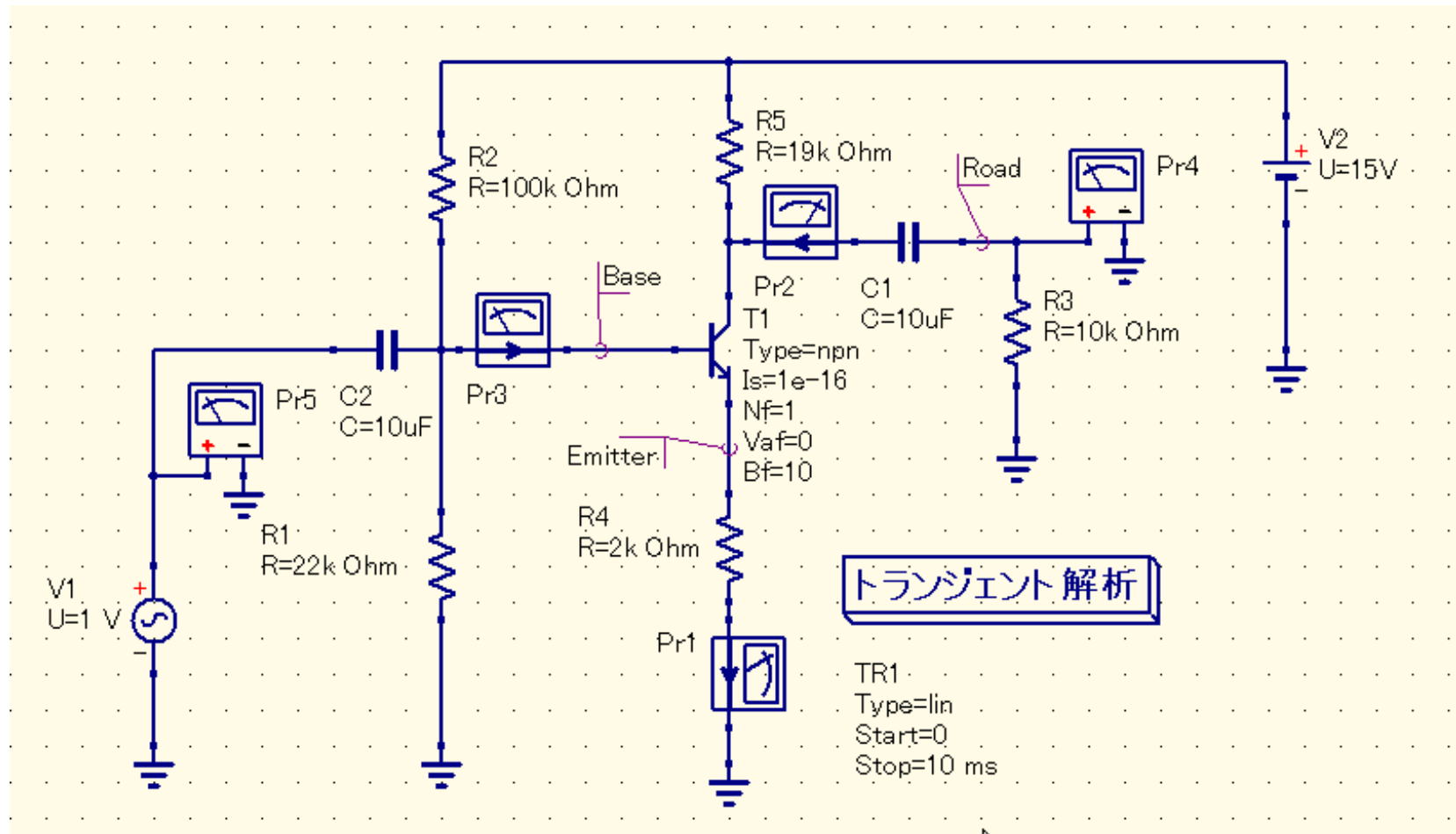
バイアス回路

前回で残った問題

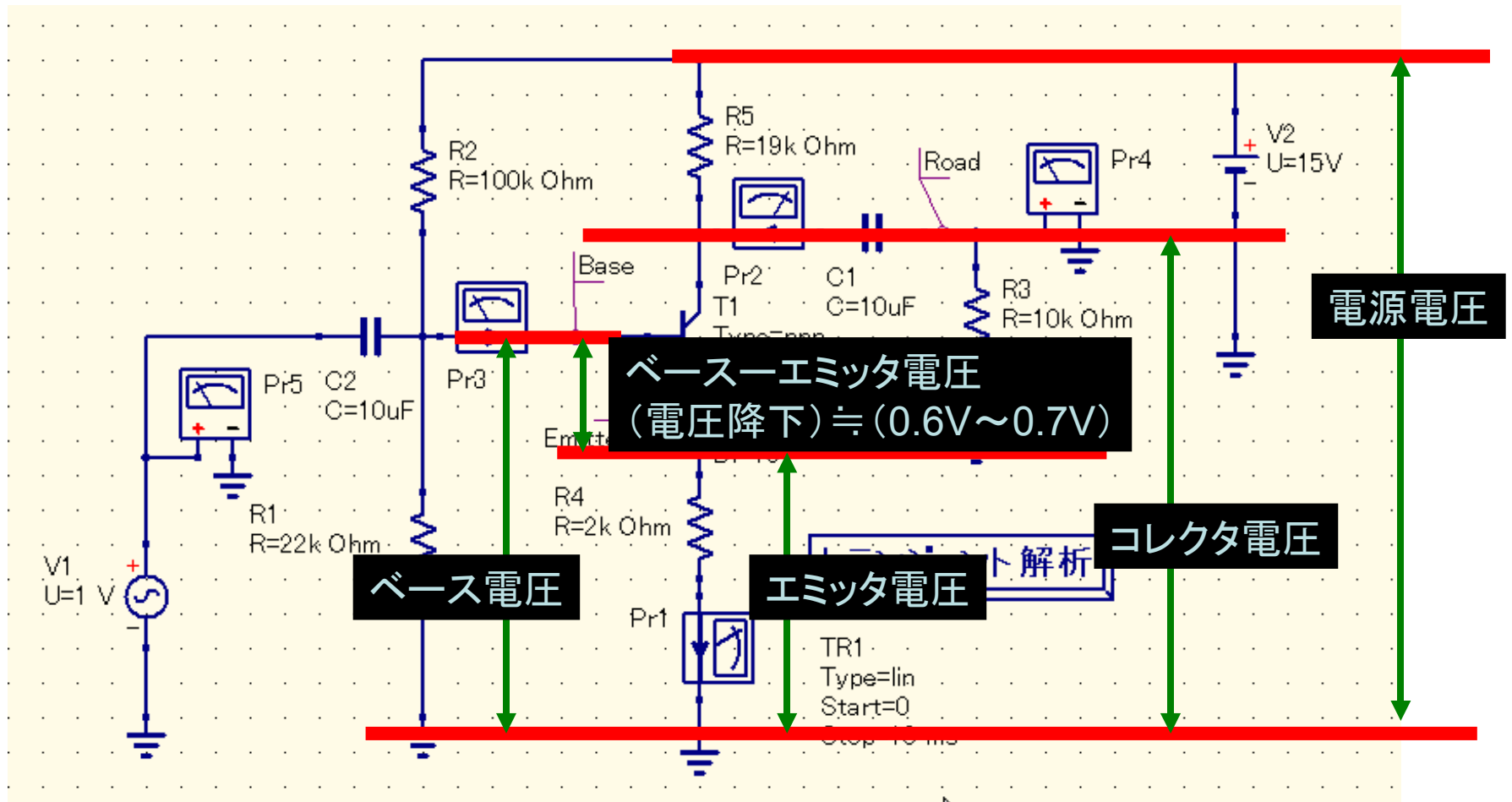
- トランジスタ上下の抵抗は何で必要？
- 各部の抵抗値をどうするの？
- どれぐらい増幅できるの？

- 音はゆがまないの？

各部の電圧の関係

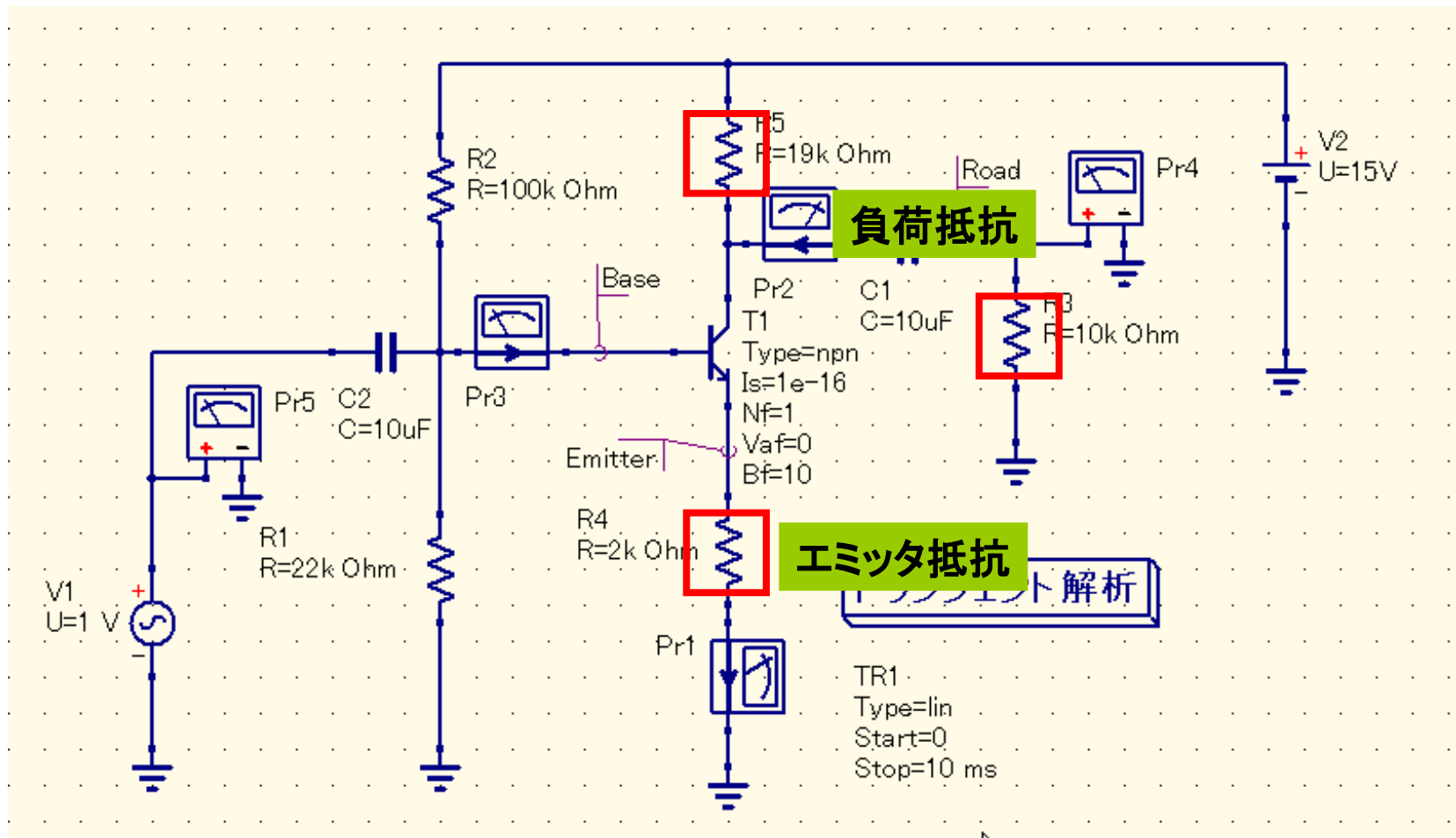


各部の電圧の関係



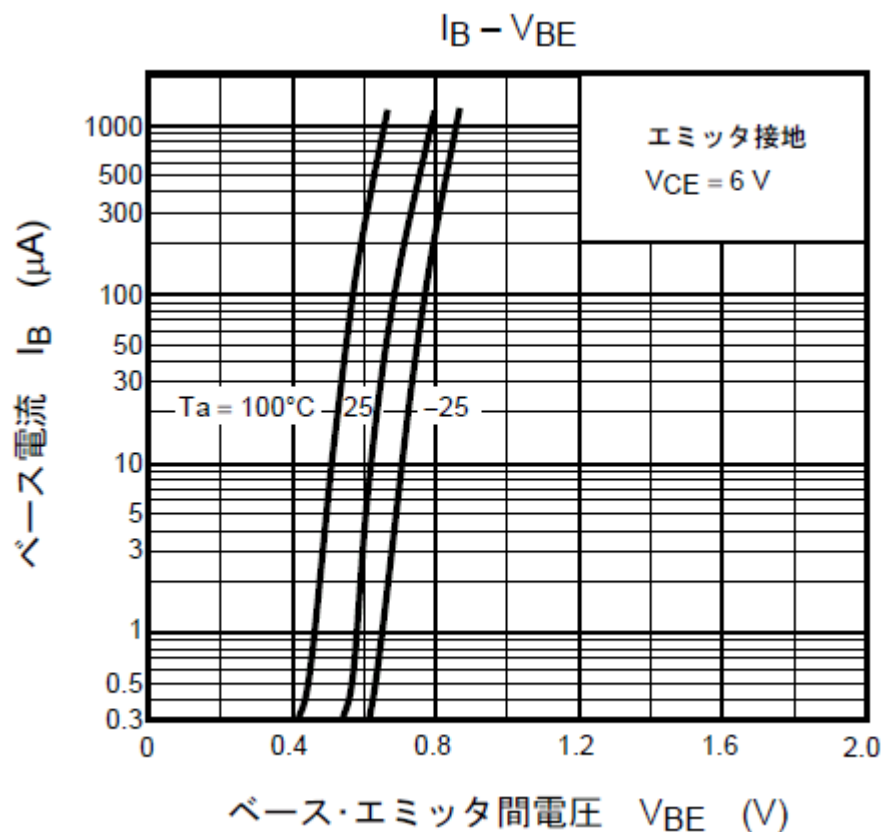
各部の電圧の関係

- これらの抵抗は何故必要？

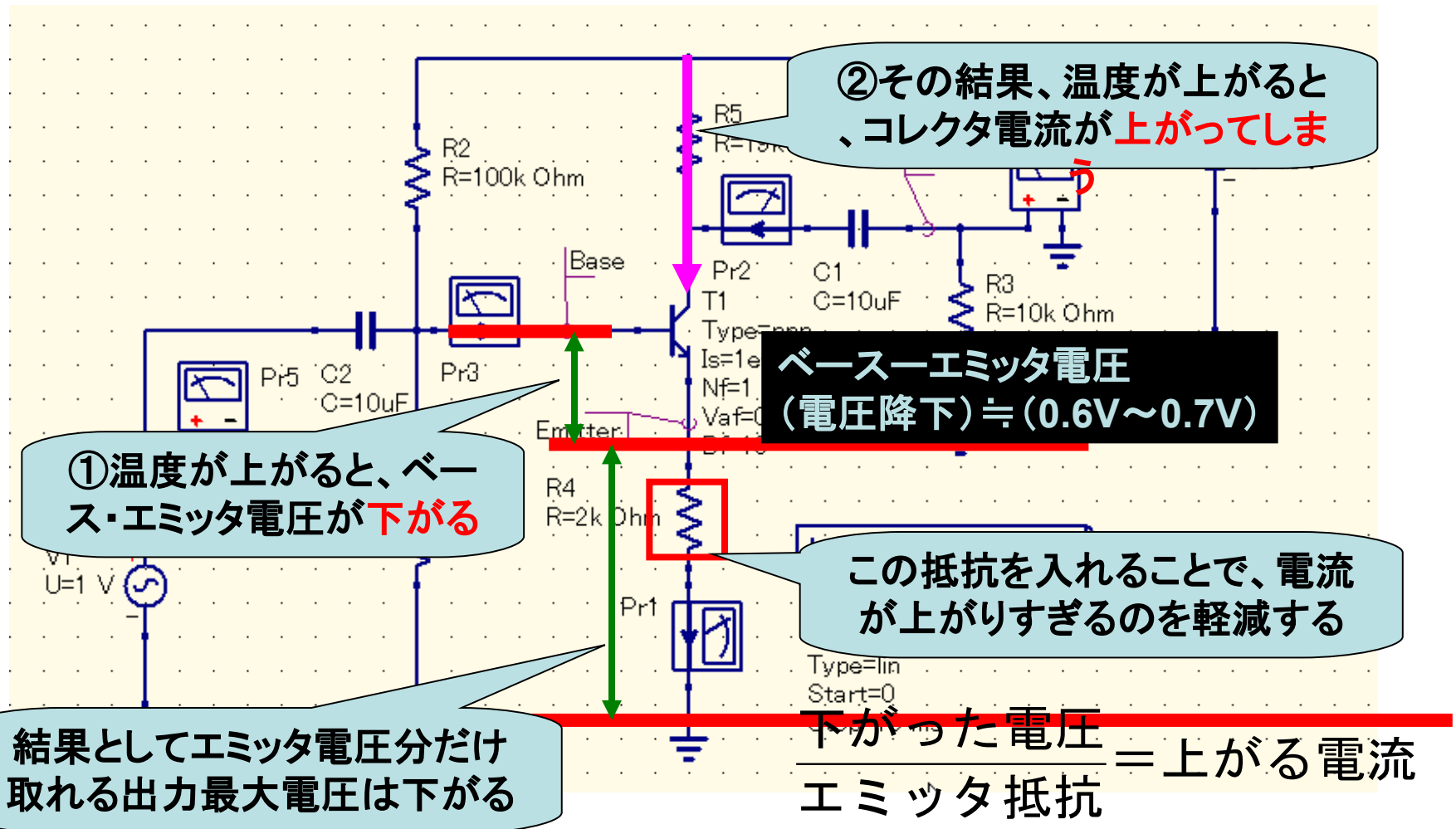


エミッタ電圧・抵抗

- 温度によって、電流増幅率は大きく変わる
- その結果、温度によって同じベース電流でも電圧降下が大きく違う
- 電圧降下分による電流変動を抑えるため、エミッタ抵抗を入れる



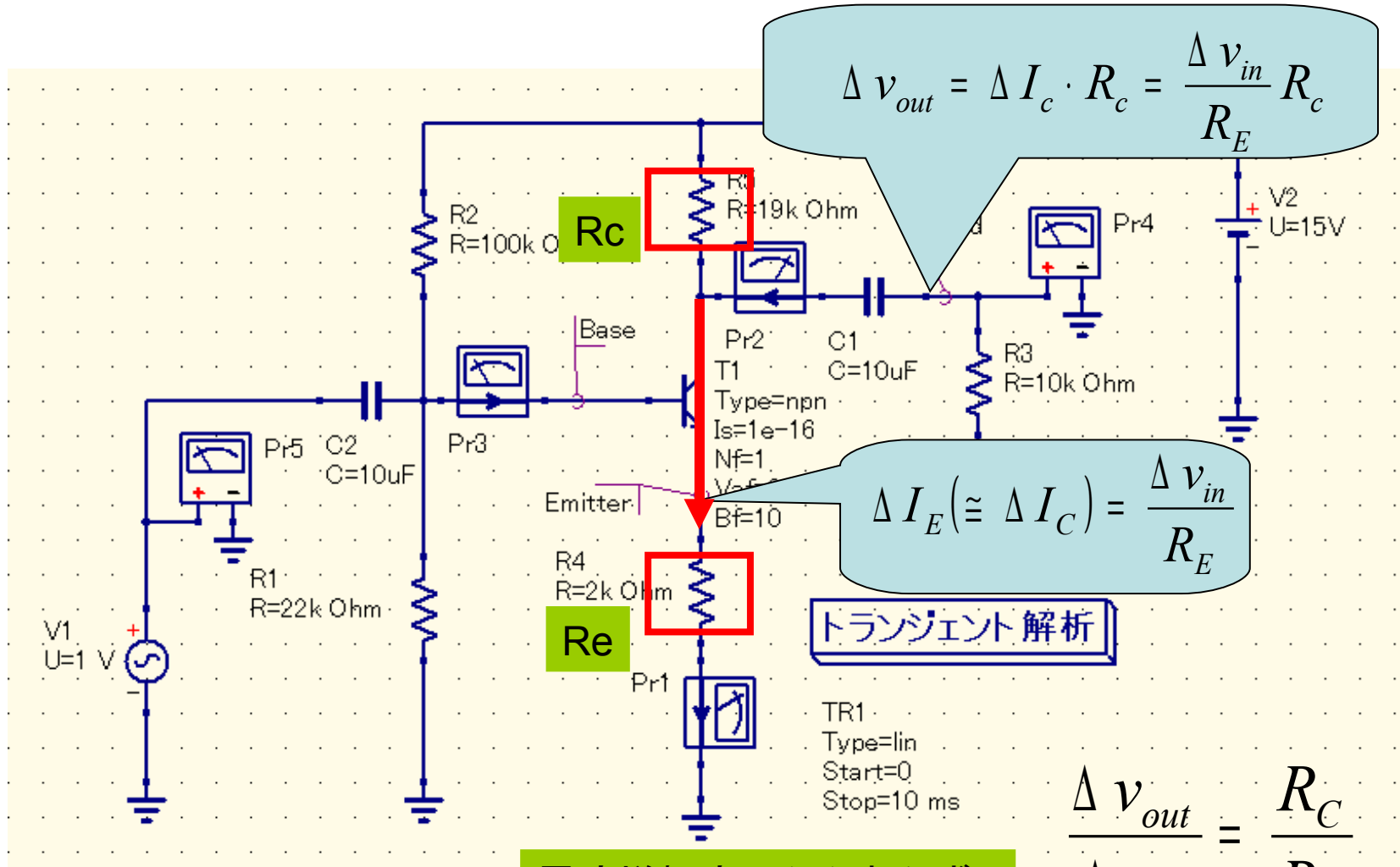
エミッタ抵抗の働き



エミッタ抵抗の働き

- シミュレーターでエミッタ抵抗の効果を確認
(エミッタ接地・温度補償無し)

電圧の増幅度は...



$$\Delta v_{out} = \Delta I_c \cdot R_c = \frac{\Delta v_{in}}{R_E} R_c$$

$$\Delta I_E (\cong \Delta I_C) = \frac{\Delta v_{in}}{R_E}$$

トランジエント解析

TR1
Type=lin
Start=0
Stop=10 ms

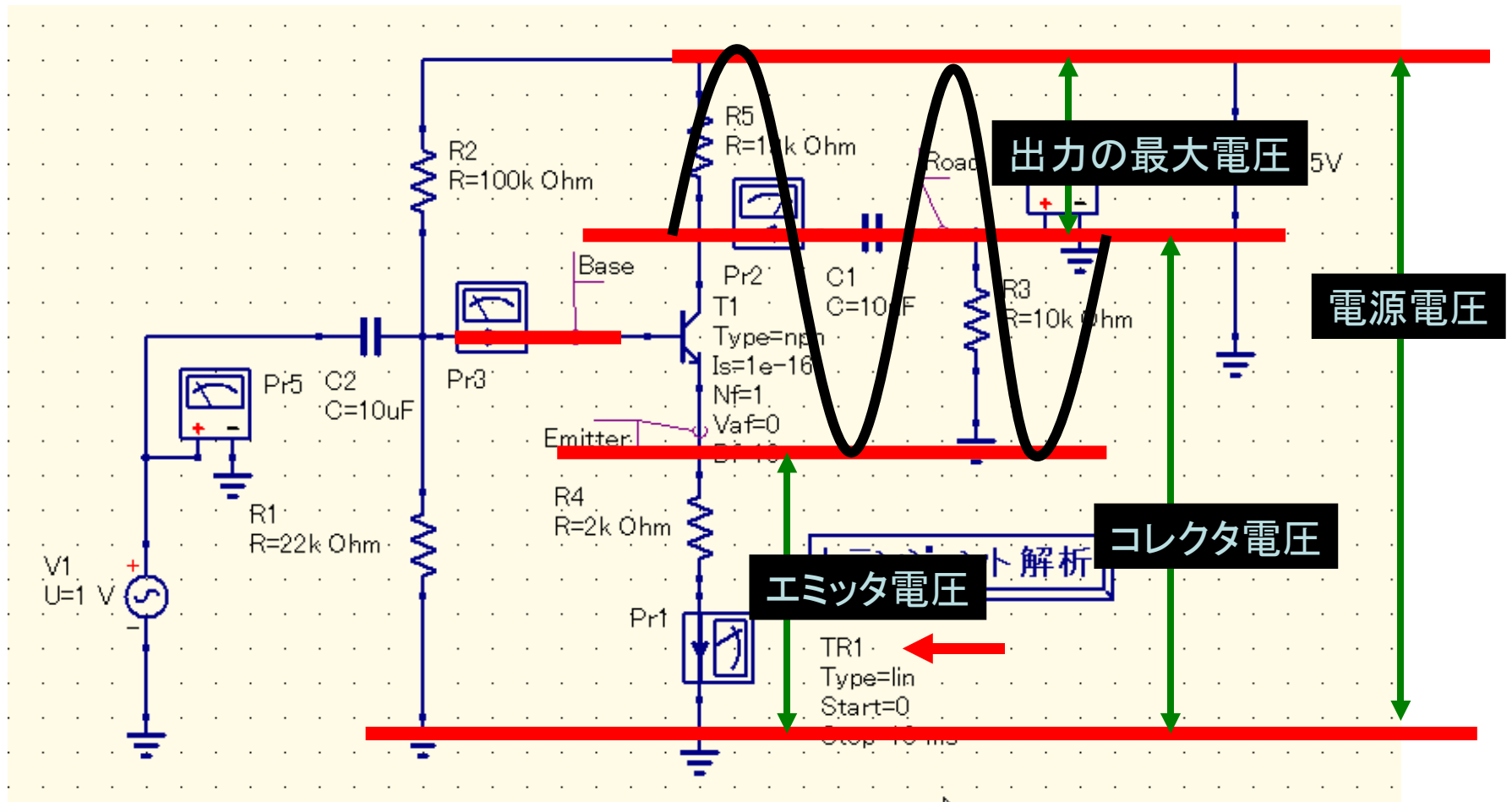
$$\frac{\Delta v_{out}}{\Delta v_{in}} = \frac{R_c}{R_E}$$

電流増幅度にかかわらず、
電圧増幅度はRc/Re

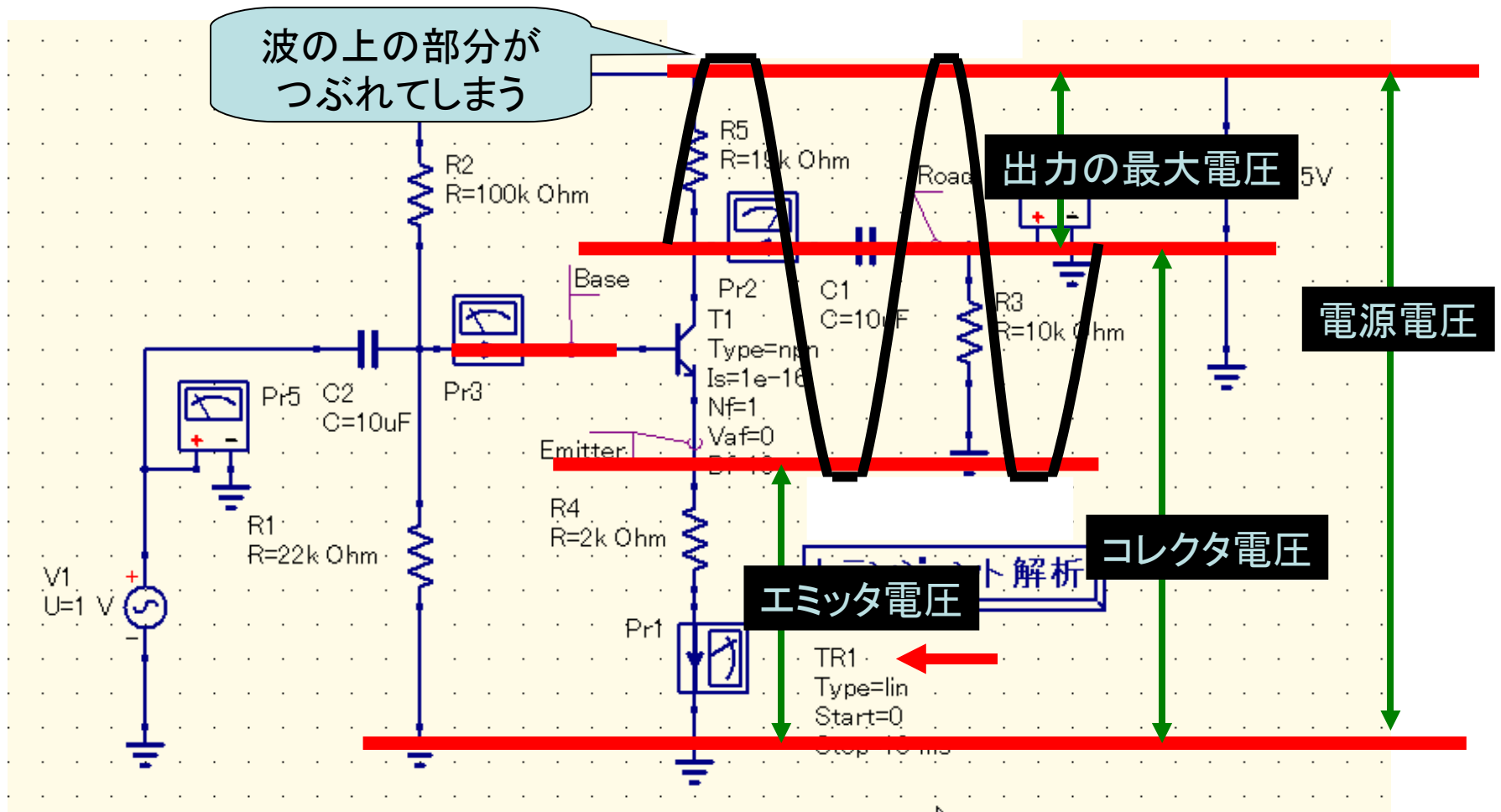
まとめると・・・

- エミッタ電圧によって安定性が変わる
- エミッタ抵抗と負荷抵抗の比によって電圧増幅度が変わる
- じゃあ、負荷抵抗を大小すれば簡単に増幅度が変えられる！？
 - 残念ながら話はそこまで簡単ではない

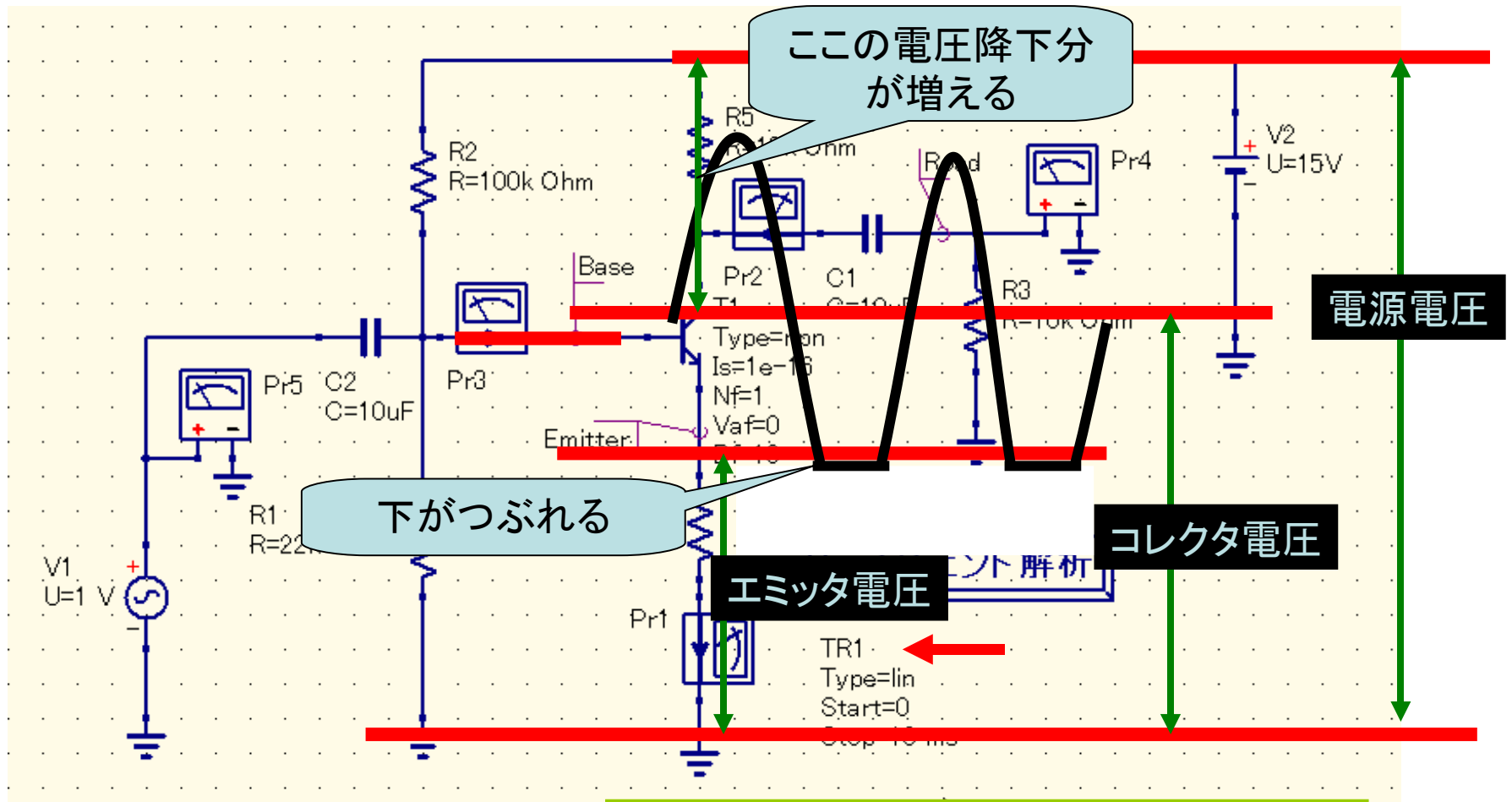
出力信号の電圧



出力信号が大きくなると...



負荷抵抗分が多いと……



後の電源電圧の説明でもう少し詳細を説明

トランジスタの設計

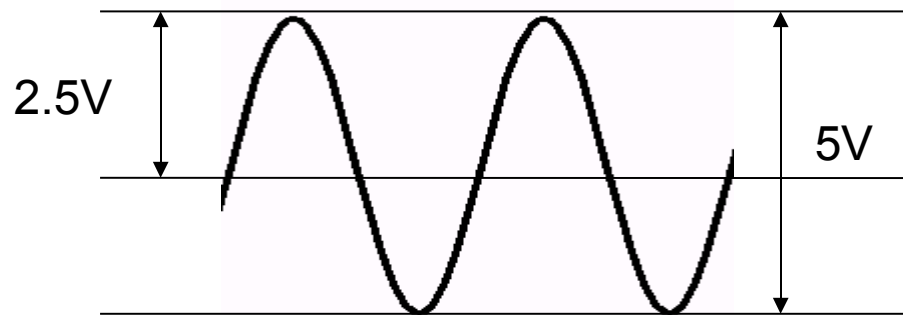
- 設計とは、要求(仕様)に合うように
 - どんな回路の種類にするか決める
 - 回路の各部品を決める
- いろいろな要因が絡み合う
 - 電源電圧を上げるとパワーが出て設計は楽だが、電池のスペースを食う
 - パワーを上げると音がひずむ
 - 熱やその他の環境変化の影響を少なくするには？

トランジスタ設計の流れ

- 回路の種類を決める
 - 今回はトランジスタ1個のエミッタ接地回路縛りで割愛
- 電源電圧を決める
- トランジスタを決める
- 動作点の電流を決める
- 各部の電位を決める
 - エミッタ電位
 - ベース電位(バイアス電圧)
- 以上から、各部の抵抗を決める
- デカップリングコンデンサを決める

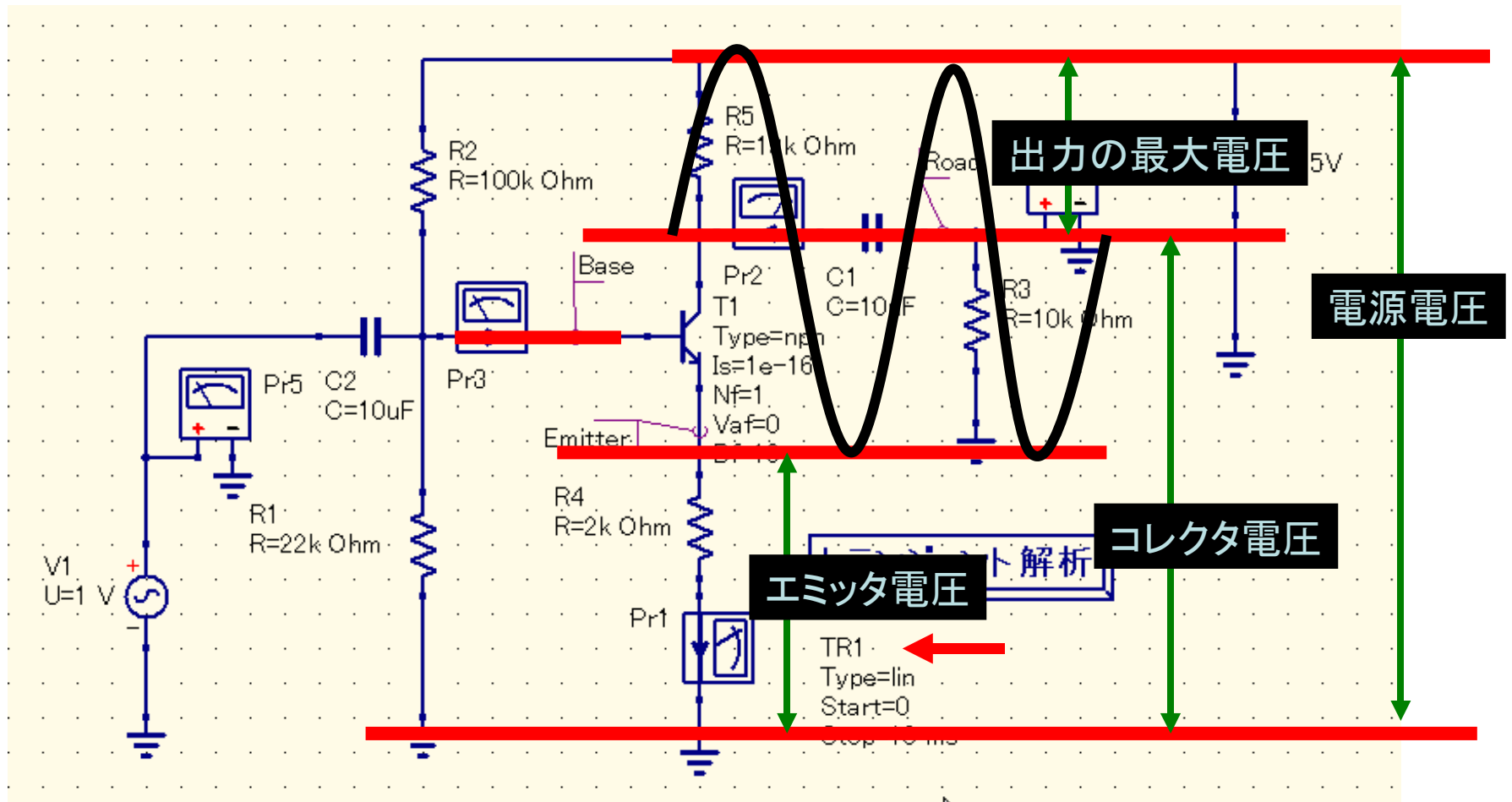
電源電圧

- 前回説明したように、トランジスタは逆方向の電流を通さない
- そのため、すべての波が+の範囲に入ってる必要がある
- 出力を $\pm 2.5V$ にするなら……



- 最低でも5Vは必要
 - 実際はエミッタ電圧も少し上げないといけないので $+1\sim 2V$

出力信号の電圧



電源電圧を決める

- 前述したように、高ければ高いほど余裕はあるが……



余裕を見て携帯オーディオの
電源電圧を12Vにしたお！

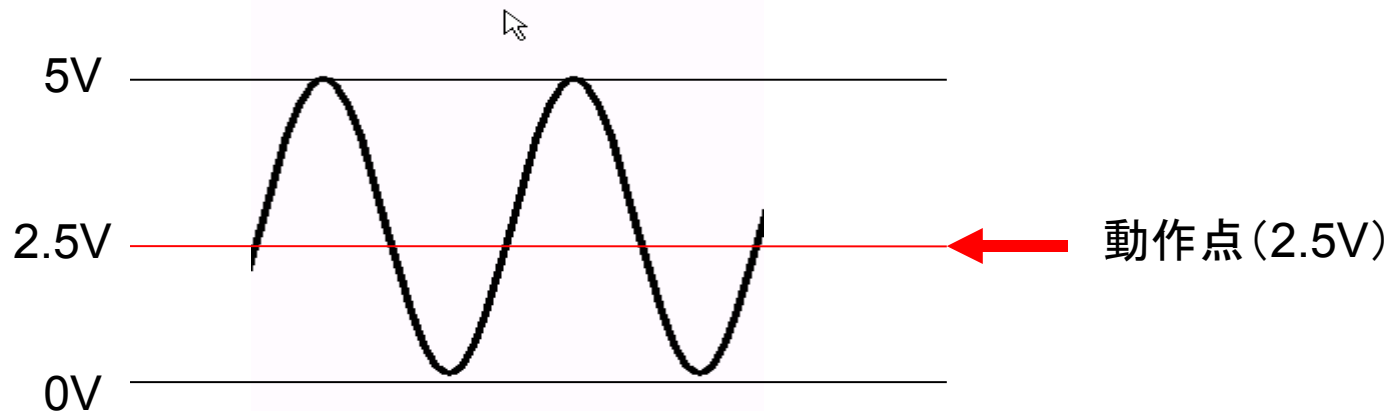
乾電池8個で動くお！



今回は6Vを使います

動作点

- このグラフでの「交流の基準位置」を動作点という
 - 信号を流していないときの電圧・電流
 - 出力電圧のちょうど真ん中あたり
- 動作点は負荷抵抗、エミッタ抵抗、バイアス抵抗で決まる



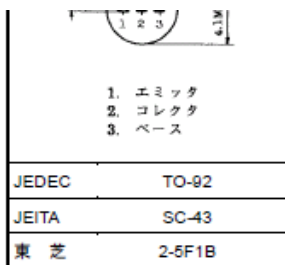
トランジスタを選ぶ

- トランジスタによって、
 - 増幅率が違う
 - 定格電流が違う
 - 周波数や電流・温度特性が違う

トランジスタのデータシート(抜粋)

最大定格 (Ta = 25°C)

項目	記号	定格	単位
コレクタ・ベース間電圧	V _{CB0}	60	V
コレクタ・エミッタ間電圧	V _{CEO}	50	V
エミッタ・ベース間電圧	V _{EB0}	5	V
コレクタ電流	I _C	150	mA
ベース電流	I _B	50	mA
コレクタ損失	P _C	400	mW
接合温度	T _J	125	°C
保存温度	T _{stg}	-55~125	°C



JEDEC TO-92

JEITA SC-43

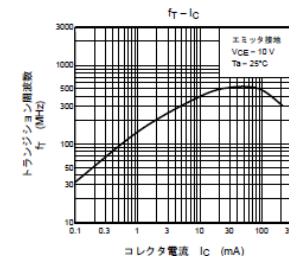
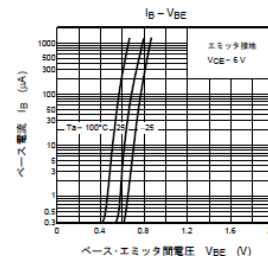
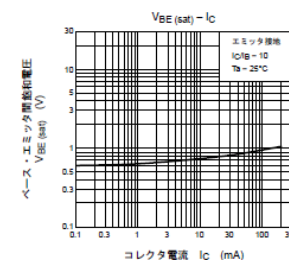
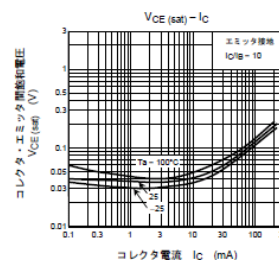
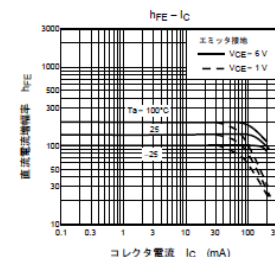
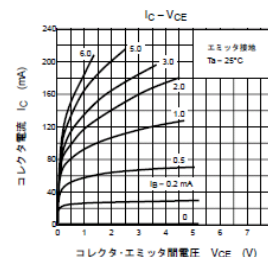
東芝 2-6F1B

質量: g (標準)

電気的特性 (Ta = 25°C)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタしや断電流	I _{CB0}	V _{CB} = 60 V, I _E = 0	—	—	0.1	μA
エミッタしや断電流	I _{EB0}	V _{EB} = 5 V, I _C = 0	—	—	0.1	μA
直流電流増幅率	h _{FE(1)} (注)	V _{CE} = 6 V, I _C = 2 mA	70	—	700	
	h _{FE(2)}	V _{CE} = 6 V, I _C = 150 mA	25	100	—	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	V _{CE(sat)}	I _C = 100 mA, I _B = 10 mA	—	0.1	0.25	V
ベース・エミッタ間飽和電圧	V _{BE(sat)}	I _C = 100 mA, I _B = 10 mA	—	—	1.0	V
トランジション周波数	f _T	V _{CE} = 10 V, I _C = 1 mA	80	—	—	MHz
コレクタ出力容量	C _{ob}	V _{CB} = 10 V, I _E = 0, f = 1 MHz	—	2.0	3.5	pF
ベース拡がり抵抗	r _{bb'}	V _{CE} = 10 V, I _E = -1 mA, f = 30 MHz	—	50	—	Ω
雑音指数	NF	V _{CE} = 6 V, I _C = 0.1 mA, f = 1 kHz, R _G = 10 kΩ	—	1	10	dB

注: h_{FE(1)} 分類 O: 70~140, Y: 120~240, GR: 200~400, BL: 350~700



トランジスタのデータシート(抜粋)

TOSHIBA

2SC1815

東芝トランジスタ シリコンNPNエピタキシャル形 (PCT方式)

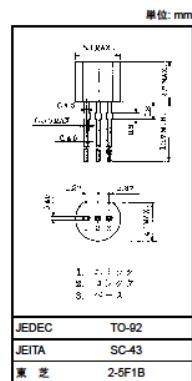
2SC1815

- 低周波電圧増幅用
- 動振段増幅用

- ・ 高耐圧でしかも電流容量が大きい。
: $V_{CE0} = 50\text{ V}$ (最小), $I_C = 150\text{ mA}$ (最大)
- ・ 直流電流増幅率の電流依存性が優れています。
: $h_{FE(2)} = 100$ (標準) ($V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 150\text{ mA}$)
: $h_{FE(1)}(IC) = 0.1\text{ mA}/h_{FE(1)}(IC = 2\text{ mA}) = 0.95$ (標準)
- ・ $P_o = 10\text{ W}$ 用アンプのドライバおよび一般スイッチング用に適しています。
- ・ 低雑音です。: $NF = 1.4\text{ dB}$ (標準) ($f = 1\text{ kHz}$)
- ・ 2SA1015 とコンプリメンタリになります。(O, Y, GR クラス)

最大定格 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

項目	記号	定格	単位
コレクタ・ベース間電圧	V_{CE0}	60	V
コレクタ・エミッタ間電圧	V_{CE0}	50	V
エミッタ・ベース間電圧	V_{EBO}	5	V
コレクタ電流	I_C	150	mA
ベース電流	I_B	50	mA
コレクタ損失	P_C	400	mW
接合温度	T_j	125	$^\circ\text{C}$
保存温度	T_{stg}	-55~125	$^\circ\text{C}$



質量: g (標準)

電気的特性 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタしや断電流	I_{CBO}	$V_{CE} = 50\text{ V}$, $I_E = 0$	—	—	0.1	μA
エミッタしや断電流	I_{EBO}	$V_{EB} = 5\text{ V}$, $I_C = 0$	—	—	0.1	μA
直流電流増幅率	$h_{FE(1)}$ (2線)	$V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$	70	—	700	
	$h_{FE(2)}$	$V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 150\text{ mA}$	25	100	—	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 10\text{ mA}$	—	0.1	0.25	V
ベース・エミッタ間飽和電圧	$V_{BE(sat)}$	$I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 10\text{ mA}$	—	—	1.0	V
トランジション周波数	f_T	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 1\text{ mA}$	80	—	—	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_E = 0$, $f = 1\text{ MHz}$	—	2.0	3.5	pF
ベース抵抗	r_{be}	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_E = -1\text{ mA}$, $f = 30\text{ MHz}$	—	50	—	Ω
雑音指数	NF	$V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 0.1\text{ mA}$, $f = 1\text{ kHz}$, $R_G = 10\text{ k}\Omega$	—	1	10	dB

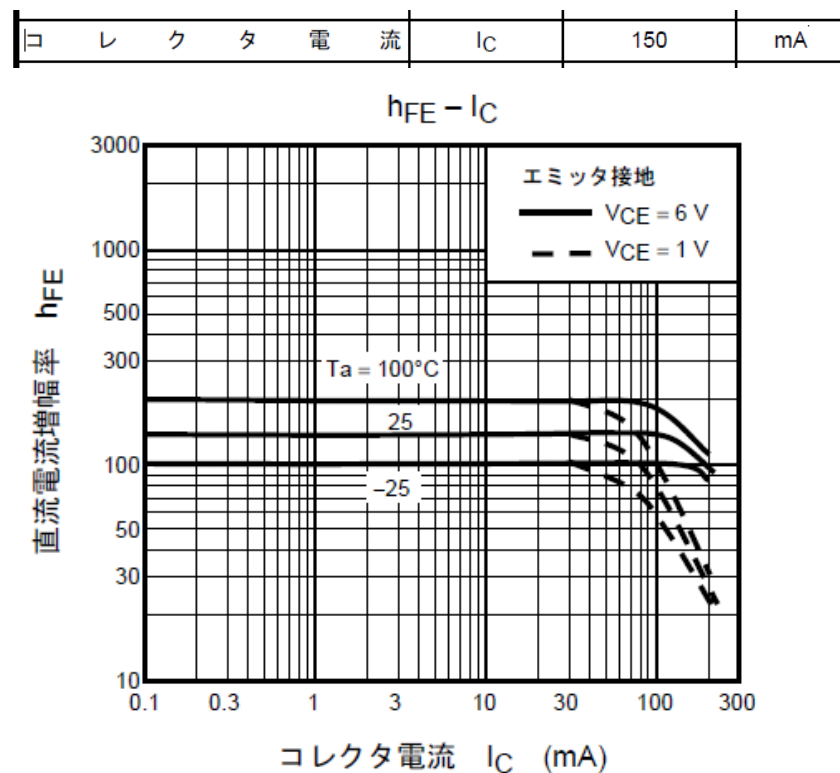
注: $h_{FE(1)}$ 分類 O: 70-140, Y: 120-240, GR: 200-400, BL: 350-700

トランジスタを選ぶ

- トランジスタによって、
 - 増幅率が違う
 - 定格電流が違う
 - 周波数や電流・温度特性が違う
- ……が、
 - 今回の実験のように適当に動くだけならぶっちゃけなんでもよい
 - 安くて数が出ている 2SC1815 を使う

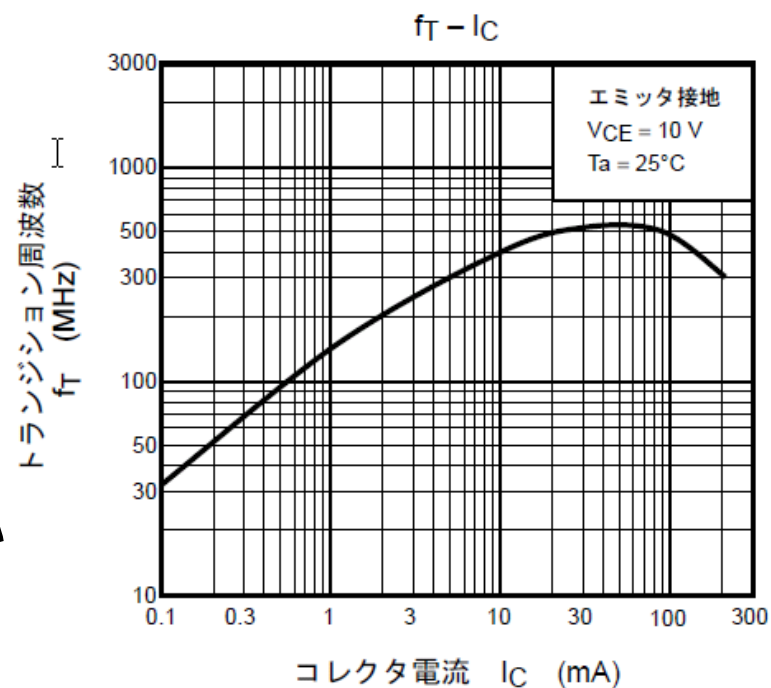
動作点の電流を選ぶ(1)

- 定常時にトランジスタに
(コレクタ・エミッタ間に)
流れる電流を決める
- 定格以内ならどこでも
いいが・・・
 - 安定する場所を使った
方がいい(右図)



動作点の電流を選ぶ(2)

- 使用する周波数によっても違う
- 今回は音声帯(50Hz~20kHz)なので、やっぱり余裕
- つまり今回はどこでもいい
- が、大きな電流には耐電力が大きい抵抗が要るので、小さい方が楽
 - 適当に 1mA にしておく



ここまでのまとめ

- エミッタ接地回路で
- 電源電圧6V
- トランジスタは2SC1815を使い
- 動作点の電流は 1mA

エミッタ電圧・抵抗を選ぶ

- 動作点の電流から、変動を 10°C と 40°C で計算

10°C のときの電圧降下 : 580mV

40°C のときの電圧降下 : 640mV

電流変動を動作点(1mA)の10%にする場合、

$$\frac{60\text{mV}}{0.1\text{mA}} = 600\Omega$$

そのときのエミッタ電圧は

$$600\Omega \times 1\text{mA} = 0.6\text{V}$$

- 以上の計算から、エミッタ抵抗 600Ω (=エミッタ電圧 0.6V)以上にすれば電流変動を10%以下にできる
- 今回は余裕を見てエミッタ電圧を 1V に設定
- その場合のエミッタ抵抗は $1\text{k}\Omega$ ($1\text{V}/1\text{mA}=1\text{k}\Omega$)

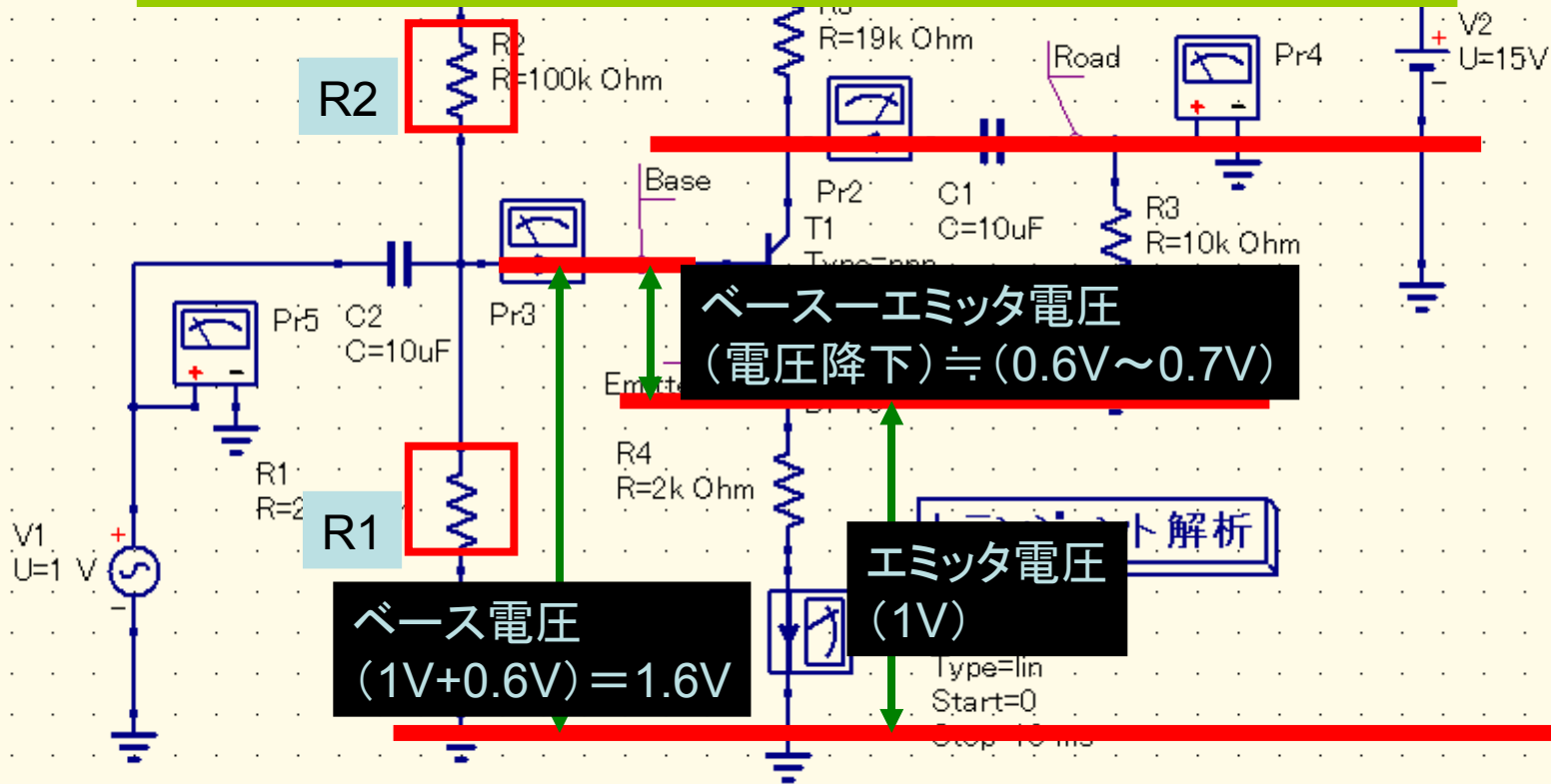
増幅度・負荷抵抗を決める

- 増幅度は負荷抵抗／エミッタ抵抗
- ただし、負荷抵抗を大きくしすぎると下が潰れる
- 今回は増幅度を4倍程度にしてみる

- よって、エミッタ抵抗が $1\text{k}\Omega$ なので、負荷抵抗は $4\text{k}\Omega$ に

バイアス抵抗を決める(1)

エミッタ電圧が1V、電圧降下が0.6Vなので、ベース電圧は1.6V
よって、 $4.4:1.6=R2:R1$ になるようにバイアス抵抗を決める

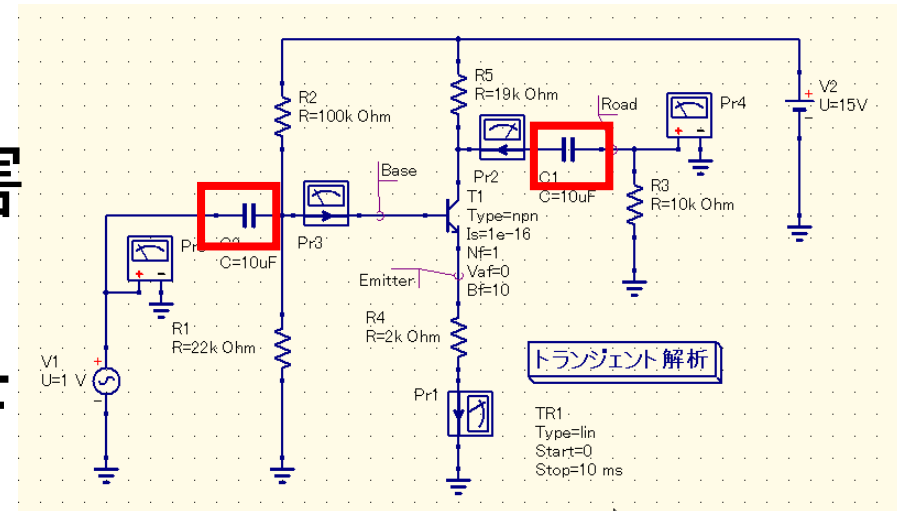


バイアス抵抗を決める(2)

- ベース電流は(動作点 $\div h_{fe}$)だけ流れるので、ベース電流によって影響を受けない程度流す必要がある
 - 2SC1815は $h_{fe}=400$ なので、 $1\text{mA}/400=2.5\mu\text{A}$ の数十倍ぐらい流せばいい
- 0.1mA 流すとして、 $6\text{V}/(R1+R2) > 0.1\text{mA}$
- よって $R1+R2 < 60\text{k}\Omega$
 - $44\text{k}\Omega$ と $16\text{k}\Omega$ 以下
 - 今回は素直に $44\text{k}\Omega$ と $16\text{k}\Omega$ を使う
 - ぴったりの抵抗が無い場合が多いので、妥協して $42\text{k}\Omega$ と $16\text{k}\Omega$ など、臨機応変に

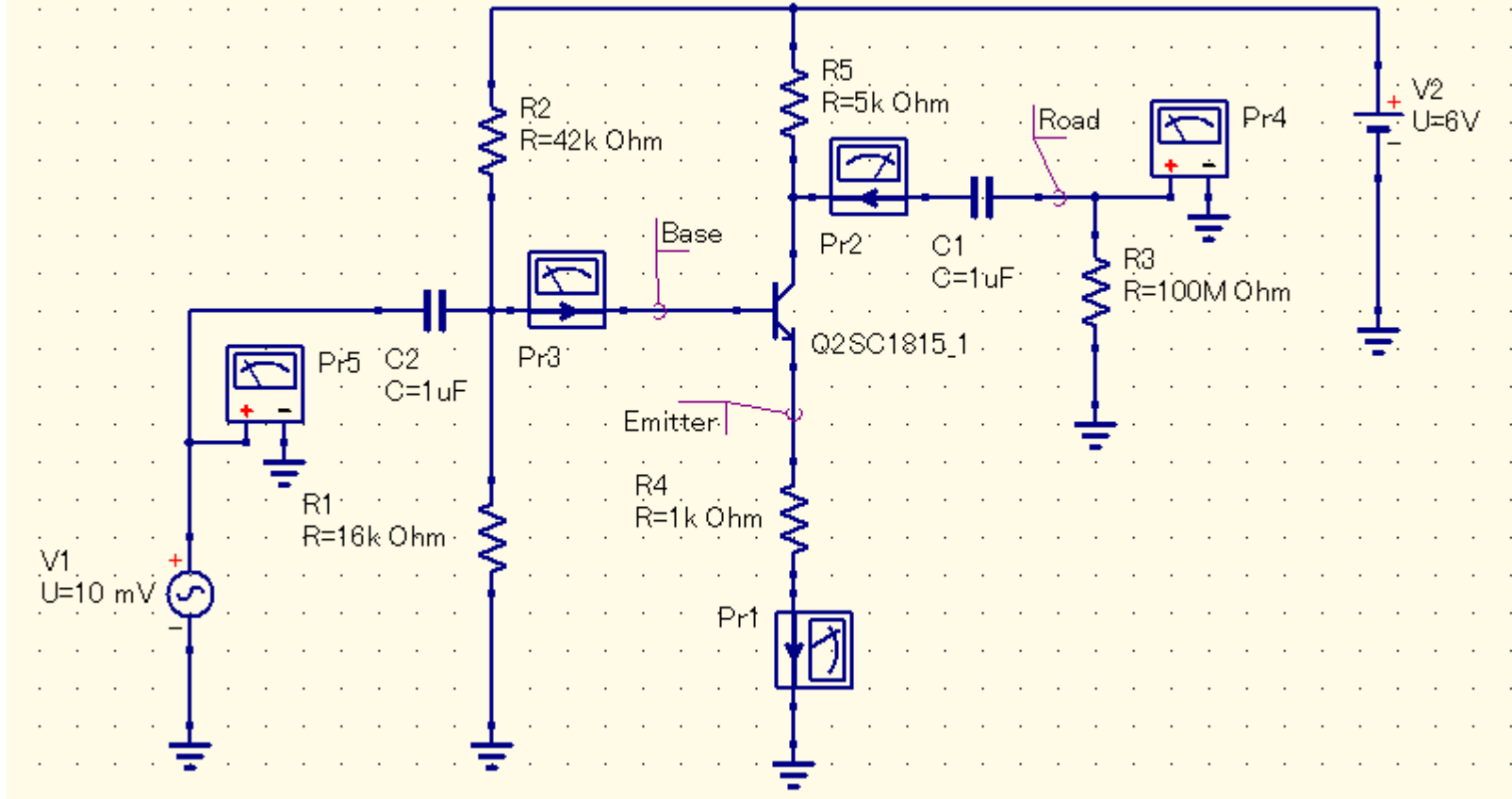
ラスト: デカップリングコンデンサの容量を決める

- コンデンサの回で説明したように、コンデンサは低周波を通さない
- 容量が低いと低音が阻害される
- …が、ここも適当に $1\mu\text{F}$ 程度がつんとつけておく



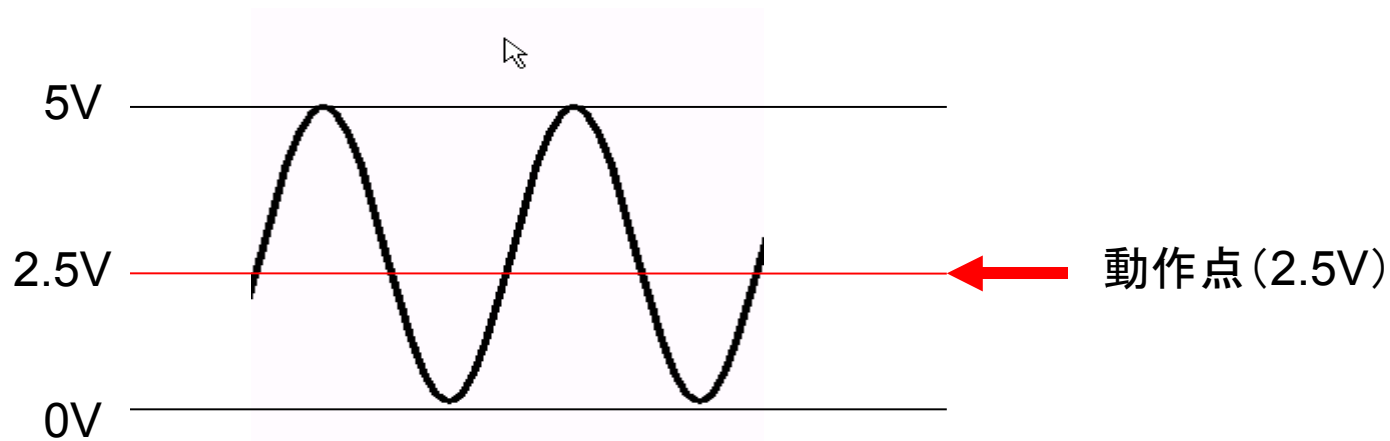
完成！

- シミュレータで動作確認
(エミッタ接地・安定抵抗)



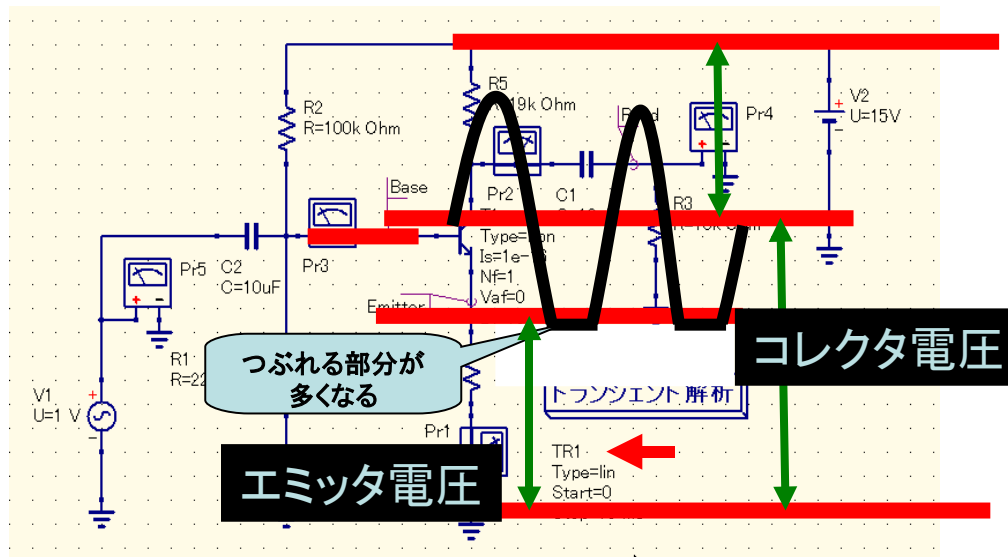
動作点の調整

- 出力を最も大きく取れる場所を選ぶ
- エミッタ電圧が1Vなので、残り5Vの中間、2.5V付近を動作点にすると、大きく範囲が取れる
- バランスをとったまま増幅度を調整する



もうちょっとがんばれないの？(1)

- エミッタ抵抗を固定とすると、負荷抵抗の大小で増幅度が決まるが……
- 負荷抵抗を大きくしすぎると動作点が下に落ちすぎて動作しなくなる
- 折角5Vの空間を取ってもうまく使いきれない



もうちょっとがんばれないの？(2)

- 直流の特性

コレクタ電圧効果 $= I_c \cdot R_c$

エミッタ電圧 $= I_E \cdot R_E$

- 交流の特性

$$\Delta v_{out} = \Delta I_c \cdot R_c = \frac{\Delta v_{in}}{R_E} R_c \quad \frac{\Delta v_{out}}{\Delta v_{in}} = \frac{R_c}{R_E}$$

- 負荷抵抗を大きくしすぎると動作点が下に落ちすぎて動作しなくなる
- コレクタ電位を下げずに、負荷抵抗とエミッタ抵抗の比を上げるそんなムシのいい話は……

もうちょっとがんばれないの？(2)

- 直流の特性

コレクタ電圧 = $I_c \cdot R_c$

エミッタ電圧 = $I_E \cdot R_E$

- 交流の特性

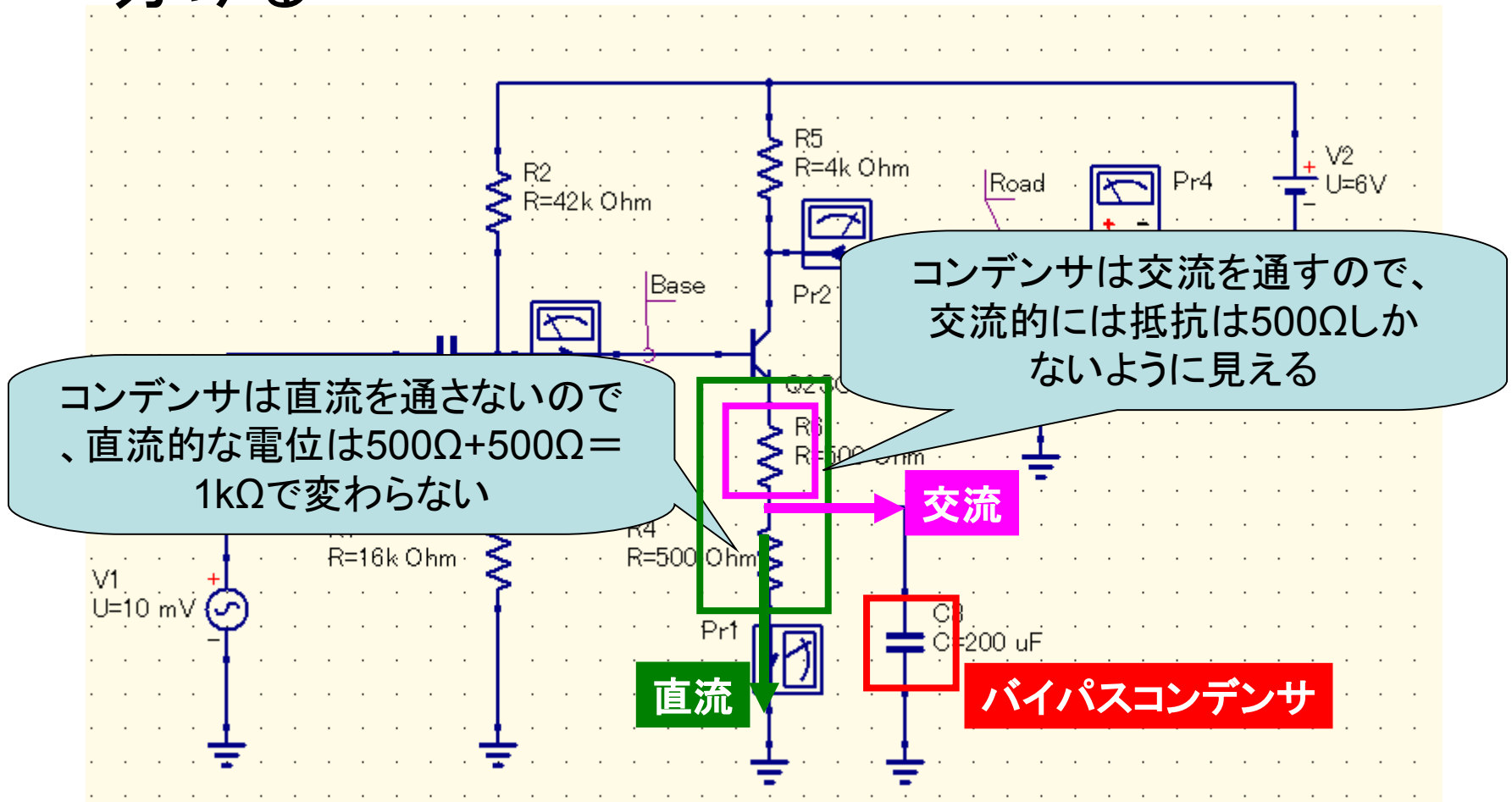
$$\Delta v_{out} = \Delta I_c \cdot R_c = \frac{\Delta v_{in}}{R_E} R_c \quad \frac{\Delta v_{out}}{\Delta v_{in}} = \frac{R_c}{R_E}$$

- 負荷抵抗を大きくしすぎると動作点が下に落ちすぎて動作しなくなる
- コレクタ電位を下げずに、負荷抵抗とエミッタ抵抗の比を上げるそんなムシのいい話は……

→あるんです。

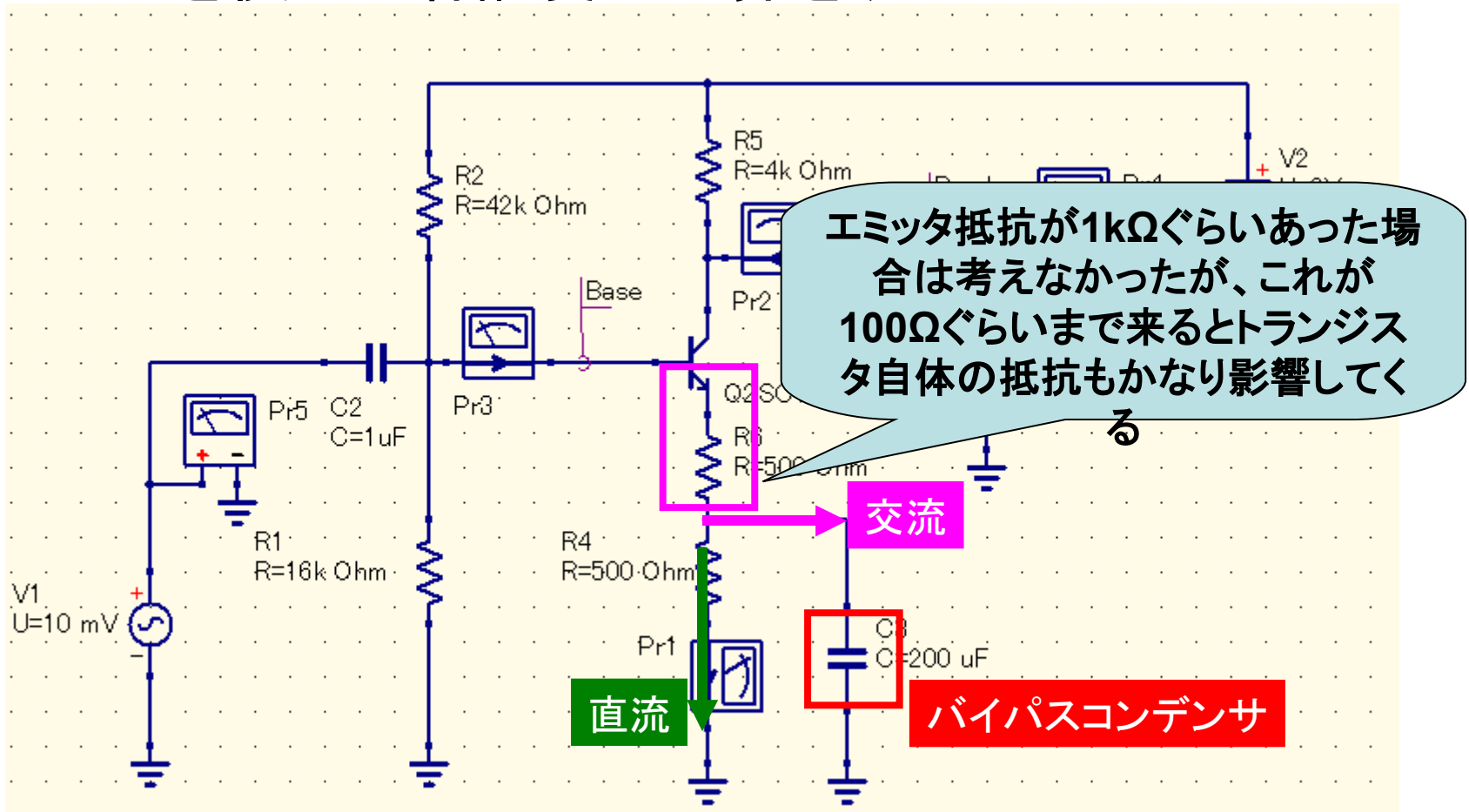
バイパスコンデンサ

- コンデンサを使って、交流と直流の通り道を分ける



どんどん小さくなると...

- トランジスタ自体の抵抗が効いて来る
 - h_{fe} を使って増幅度の計算をする



エミッタ抵抗の交流分が 無いときは・・・

- 電圧増幅度は抵抗自体の入カインピーダンス h_{IE} を計算に入れて、

$$\text{電圧増幅度} = \frac{h_{fe}}{h_{IE}} \cdot R_C$$

となる。(詳細は省略)

- この場合、理論的には電圧増幅度は最大で電流増幅度(h_{fe})まで上がる
 - あくまで理論値、そこまで上がることは少ない

演習問題

- 自分で回路を設計してみよう！
 - 電源電圧15V
 - 2SC1815を使う
 - 動作電流1mA
 - 増幅度10倍
 - 入力は10mV前後
- もうちょっと増幅度をあげたい場合は？

トランジスタ設計の流れ

- 回路の種類を決める
 - 今回はトランジスタ1個のエミッタ接地回路縛りで割愛
- 電源電圧を決める
- トランジスタを決める
- 動作点の電流を決める
- 各部の電位を決める
 - エミッタ電位
 - ベース電位(バイアス電圧)
- 以上から、各部の抵抗を決める
- カップリングコンデンサを決める

ここまで指定

まとめ

- トランジスタ回路の設計
 - 負荷抵抗とエミッタ抵抗
 - 安定性
 - 増幅度
 - 各部の電位の決め方
 - バイパスコンデンサ