

第7章 トランジスタ回路



基本性能

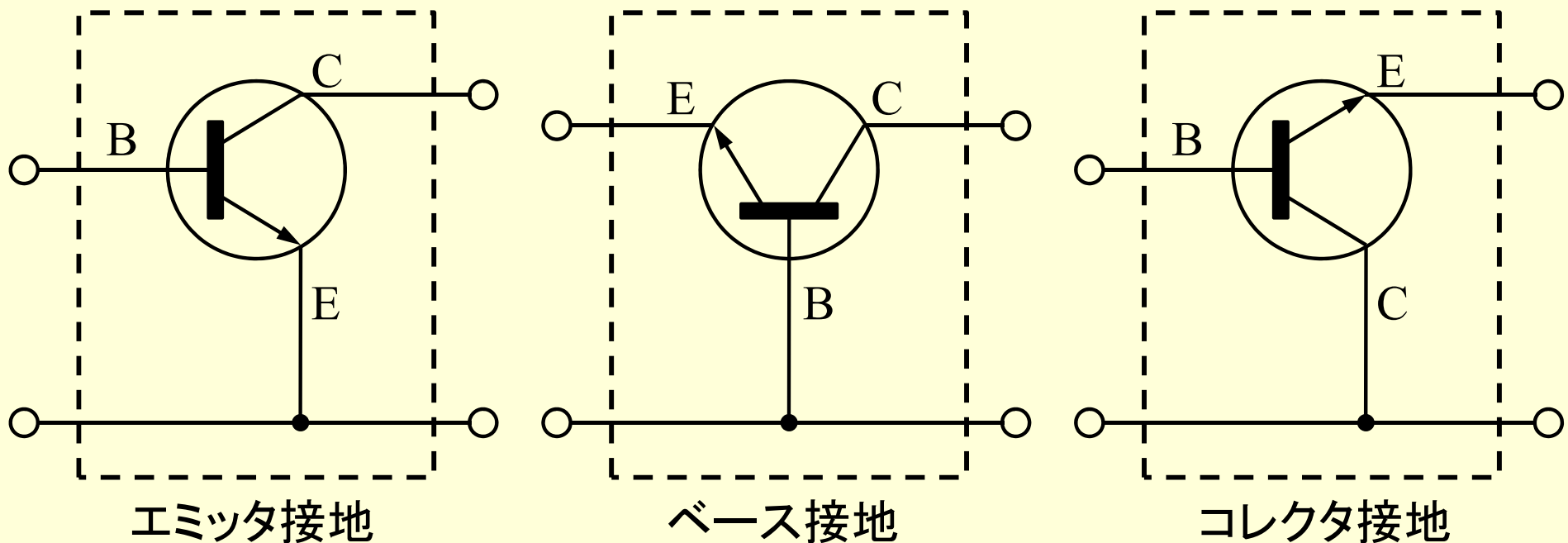


1947年12月23日に発明された
最初のトランジスタ

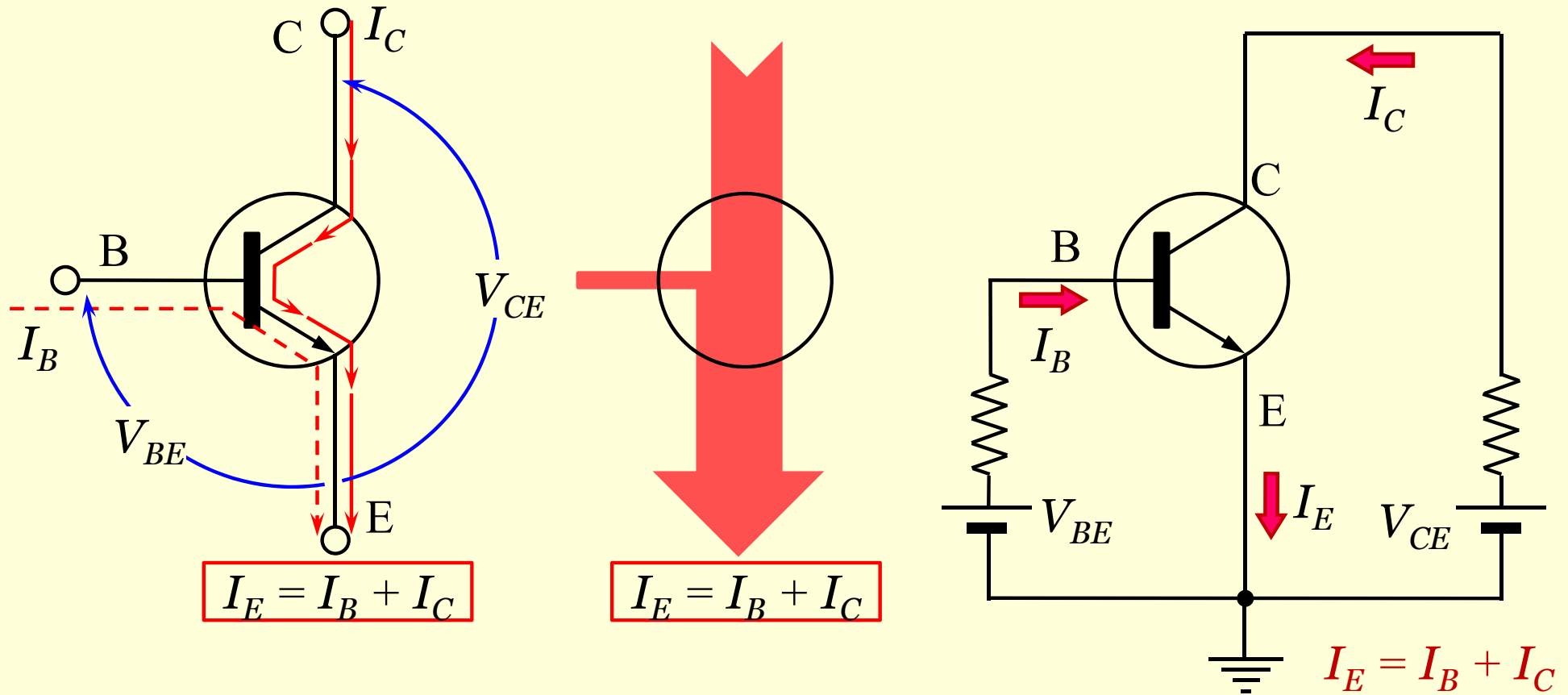
接地方式

一般の回路は必ず端子が対の形になっている。入力回路と出力回路の2つの回路に接続する場合は、合計4つの端子が存在することになり、エミッタ・ベース・コレクタの3極をもつトランジスタは、1極が共通極、それ以外が**入力**、**出力**となる。共通極は一般に接地(グランド)となるため、この電極名から、エミッタ接地、ベース接地、コレクタ接地と呼ばれる。

最も一般的なのは**エミッタ接地**で、この場合は**ベースが入力**、**コレクタが出力**となる。ベース接地ではエミッタが入力、コレクタ接地ではエミッタが出力となる。

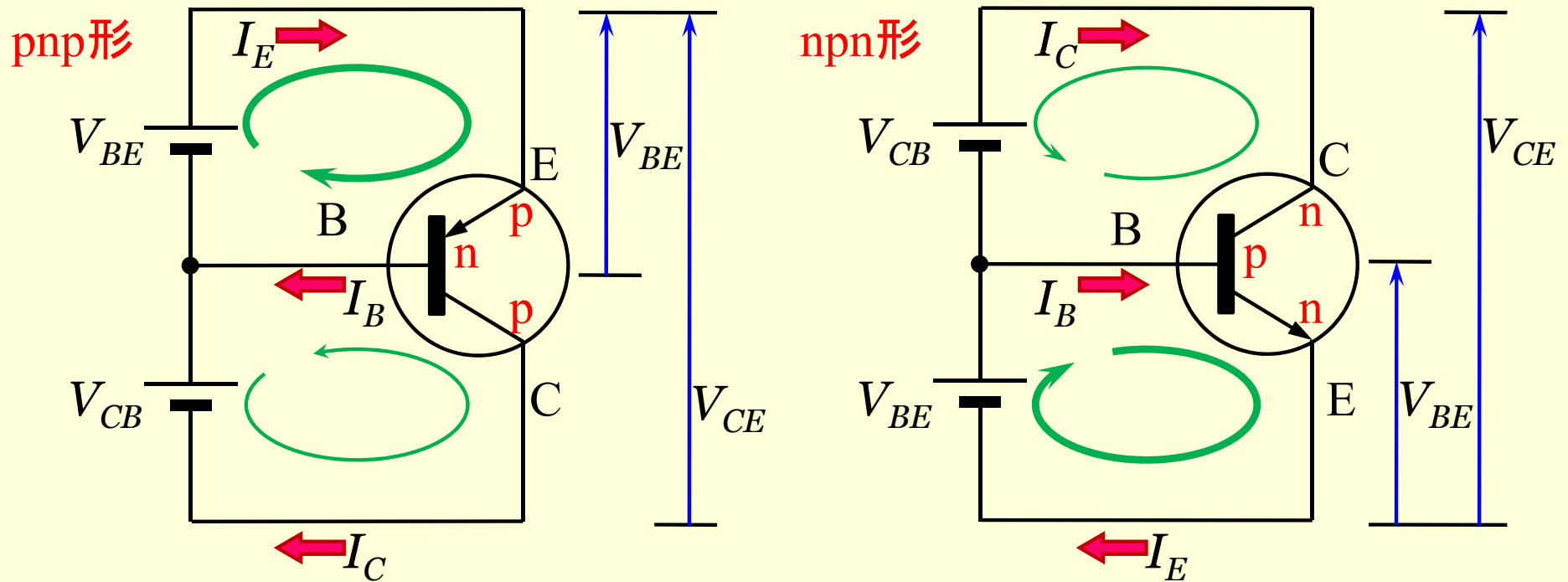


npn形を対象とした電流の流れ方



V_{BE} がない($I_B = 0$)とCB間が逆電圧(逆バイアス)になって電流は流れず、コレクタ電流 I_C はゼロになる。 V_{BE} が存在する($V_{BE} > 0.6V$)とBE間が順電圧となり、ベースからエミッタにホールが移動し、エミッタからベースへ流れた電子の大部分は空乏層を横切ってコレクタまで進む。これがコレクタ電流となる。(電流は電子の流れと逆方向になる)

電圧の加え方と電流の流れ方

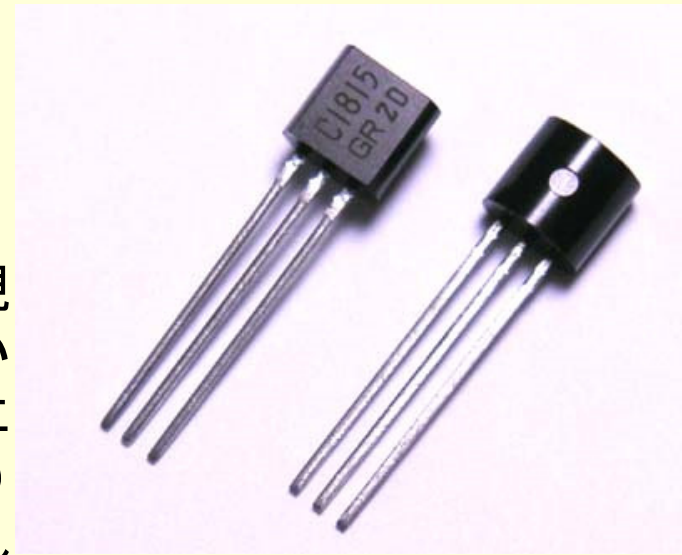


EB間は順方向へ、CB間は逆方向になるように電圧を加える。ベース・エミッタ間がpn接合のpnp形は、トランジスタのエミッタ矢印方向に電流が流れるように電位を加える。この時、BC間は逆電位を加え、コレクタ電流はエミッタへ流れるように構成する。npn形は、電流の流れと電圧のかけ方がpnp形とまったく逆になる。

静特性

JEITA(社団法人 電子情報技術産業協会)の規格ED-4001「個別半導体デバイスの形名」に基づいて、型名と規格がJEITAに登録されている。日本における半導体素子(ここでは3個の電極を持つもの)の型番は、古いJISで以下のようにルール付けられている。

- 2SAxxx PNP型バイポーラトランジスタ 高周波用
- 2SBxxx PNP型バイポーラトランジスタ 低周波用
- 2SCxxx NPN型バイポーラトランジスタ 高周波用
- 2SDxxx NPN型バイポーラトランジスタ 低周波用
- 2SFxxx サイリスタ
- 2SHxxx ユニジャンクショントランジスタ
- 2SJxxx Pch 電界効果型トランジスタ
- 2SKxxx Nch 電界効果型トランジスタ

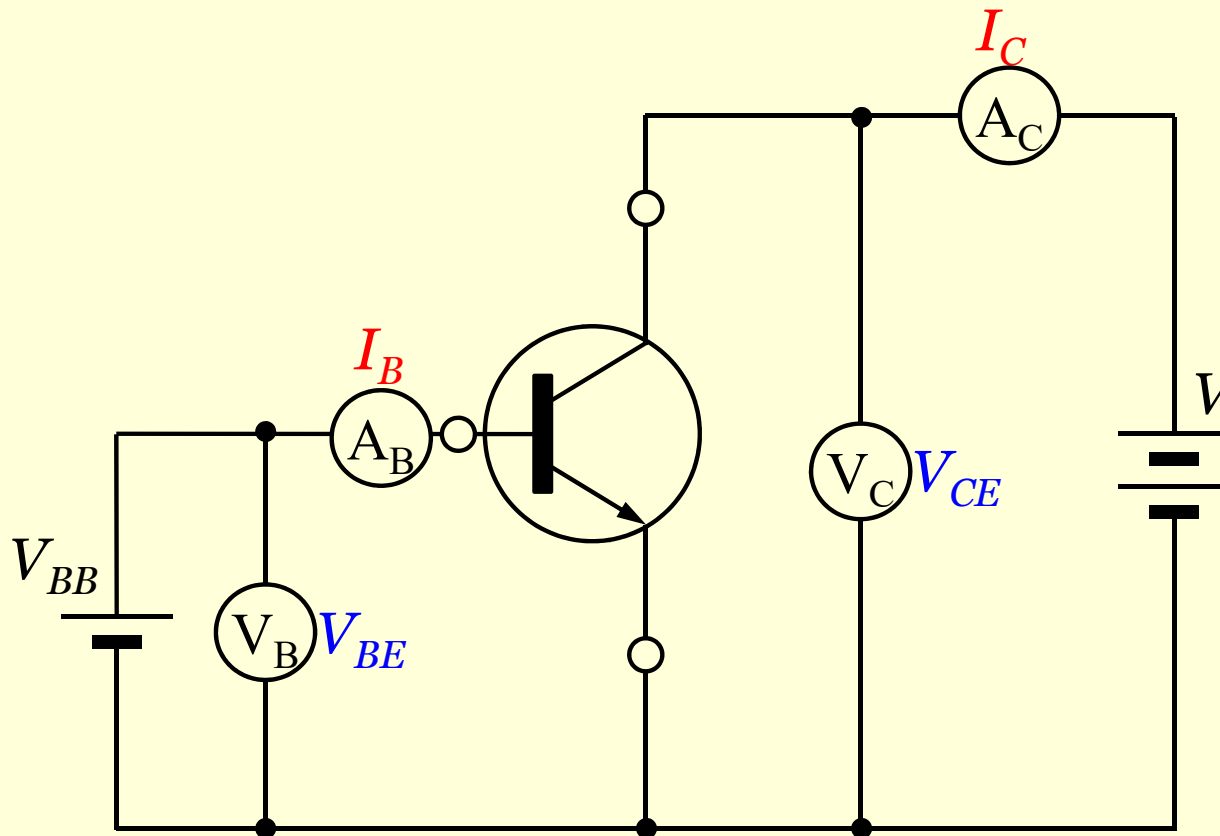


小信号用バイポーラトランジスタの代表格
2SC1815

測定回路

トランジスタを以下のように接続して各部分の電圧と電流を測定し、トランジスタの静特性を調べる。静特性は入力特性 (I_B-V_{BE})、電流伝達特性 (I_C-I_B)、出力特性 (I_C-V_{CE}) の3種類を組み合わせて表現される。

なお、 \textcircled{V} と \textcircled{A} はそれぞれ電圧と電流測定器を表している。



入力特性 ($V_{BE}-I_B$)

V_{CE} を一定にした時の I_B と V_{BE} の関係

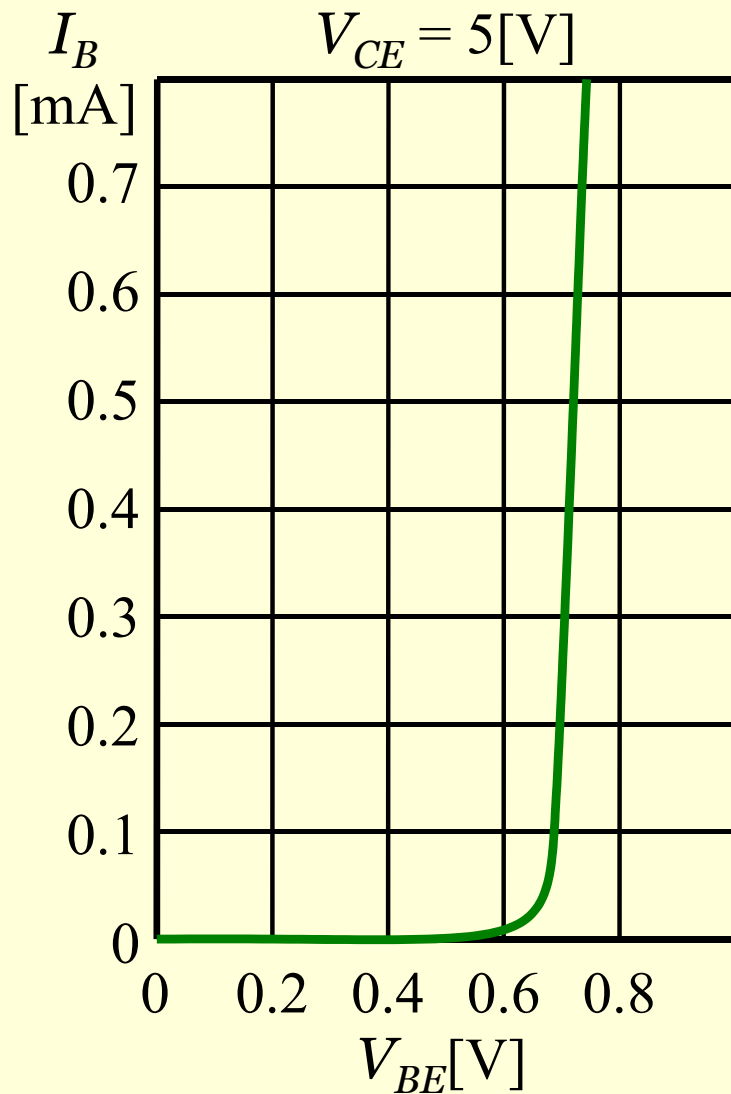
電流伝達特性 (I_C-I_B)

V_{CE} を固定した時の I_B と I_C の関係

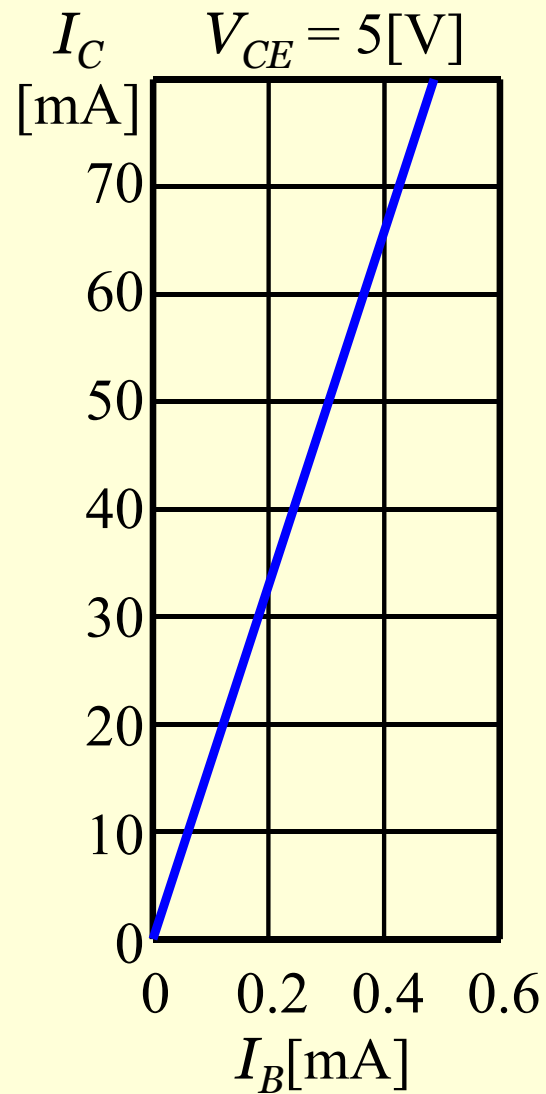
出力特性 ($V_{CE}-I_C$)

ベース電流 I_B を固定した時の $V_{CE}-I_C$ の関係

入力特性、電流伝達特性



入力特性



電流伝達特性

入力特性 ($V_{BE}-I_B$)

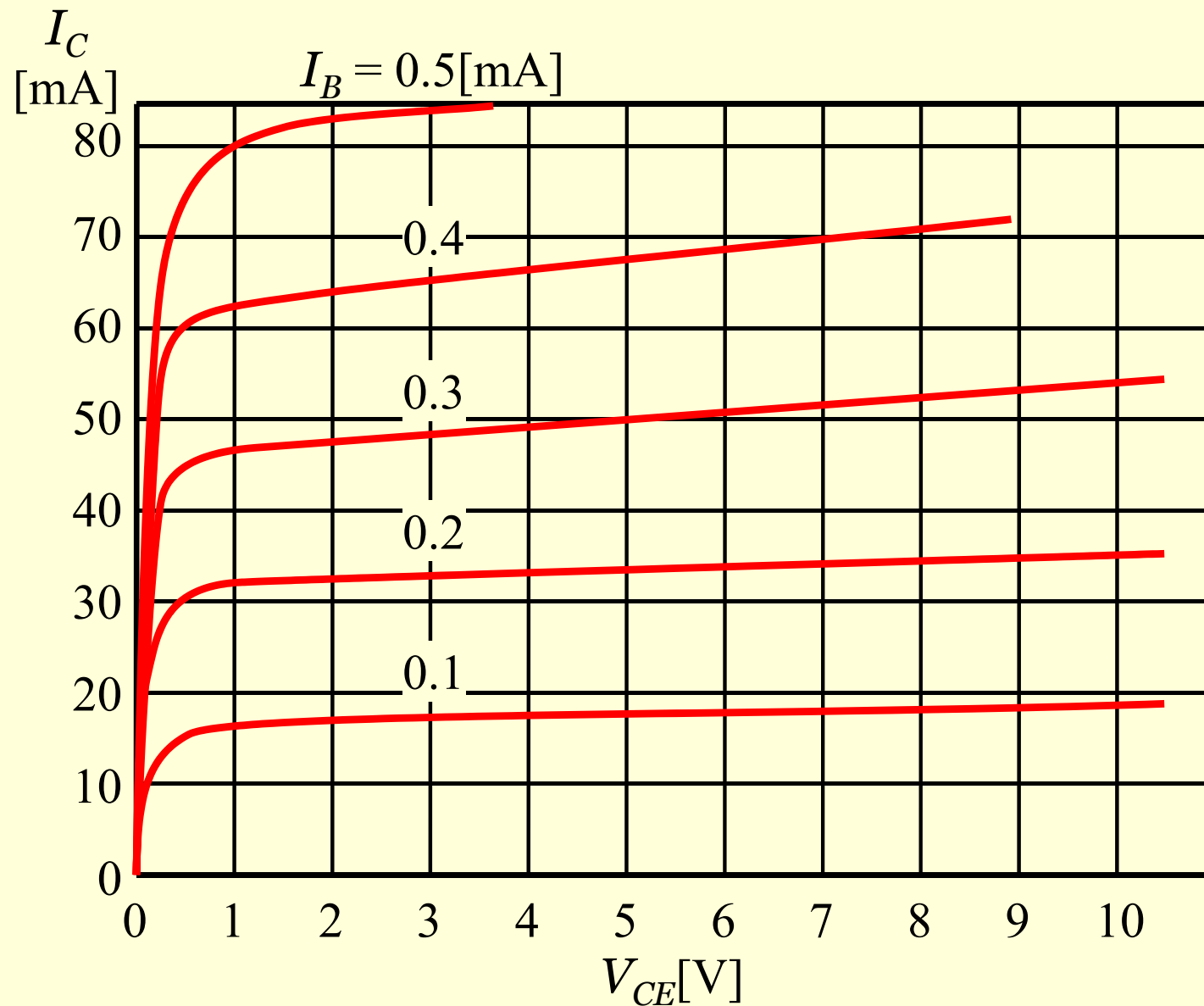
V_{BE} がある値 (約 0.6V) 以上になると I_B は大きく変化する。

電流伝達特性 (I_C-I_B)

特性はほぼ直線となり、直線範囲では比例関係 ($I_C = h_{fe} I_B$) が成立する。

比例定数 h_{fe} をトランジスタ増幅率という。

出力特性



出力特性

出力特性

($V_{CE}-I_C$)

I_B を変化させて同様の測定を繰り返すとこの結果を得る。 I_C は I_B によって大きく変わり、 V_{CE} にはあまり影響を受けない。

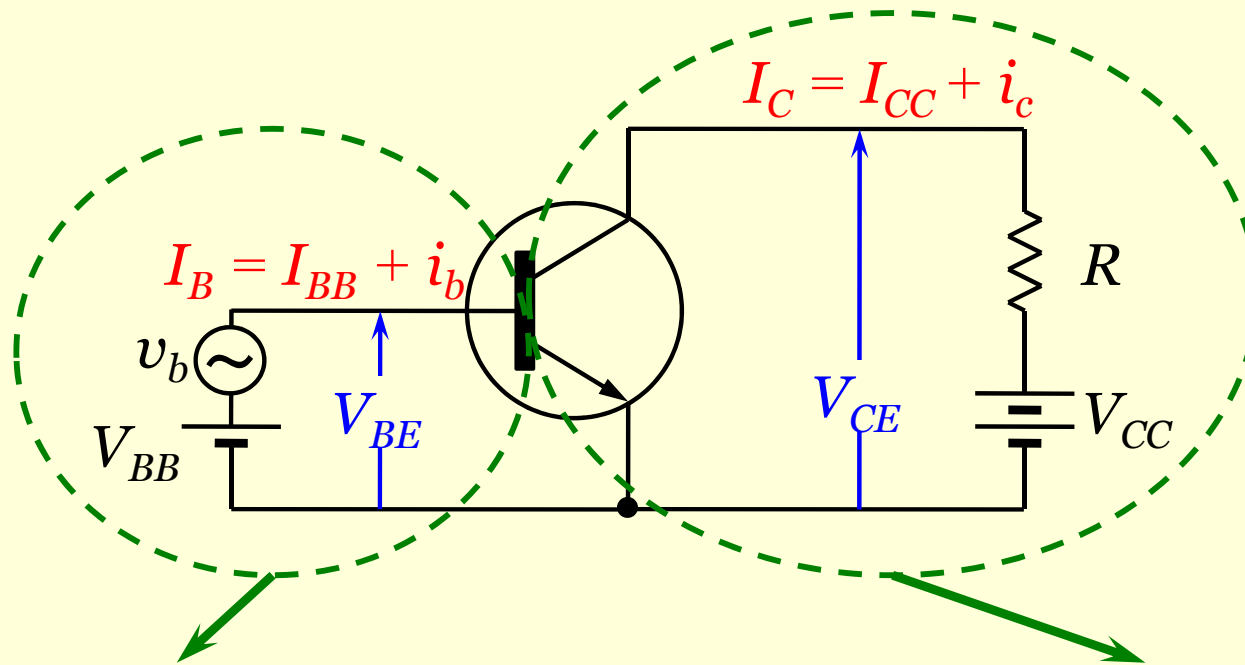
一般にハンドブック等ではエミッタ接地の静特性が示されている。

バイアス回路

トランジスタへ入れる入力信号にどれくらいの電圧と電流を加えるかを定める回路のことをバイアス回路という。トランジスタの各端子には定格内の電位差と電流を設定しないと動作しない。そのため、入力信号をトランジスタが正常動作する電圧に「かさ上げ」(オフセット)し、電流も正常動作するレベルまで加えてやる必要がある。

バイアスをかける方法は大きく分けて3つあり、それぞれ**固定バイアス回路**、**自己バイアス回路**、**電流帰還バイアス回路**という。

バイアス回路の選定



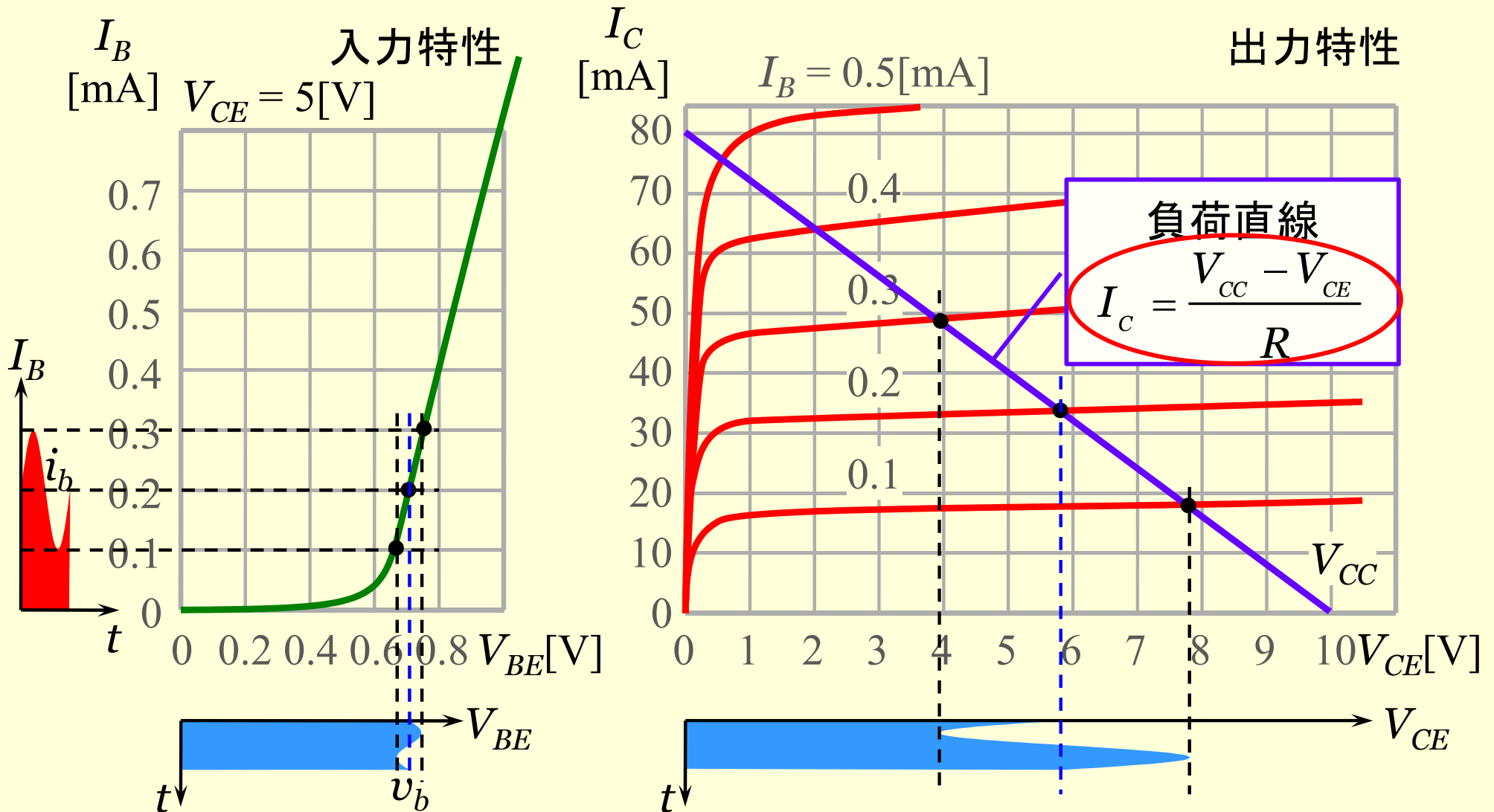
入力部の電圧を静特性の入力特性(ベース電流 I_B とベースエミッタ間電圧 V_{BE} の関係)を考慮して設定する。

※ I_{BB} や I_{CC} は、トランジスタ1個のベース電流 I_B やコレクタ電流 I_C と区別するため、ベース側電源電流、コレクタ側電源電流を指します。 i_b は I_B や I_{BB} に対して小電流であることを示します。

出力部の電圧・抵抗を静特性の出力特性の負荷線(コレクタ電流 I_C とコレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE})を考慮して設定する。この回路では、入力電圧 V_{BE} が出力電圧 $V_{CE} = V_{CC} - RI_C$ に増幅されて出力される。

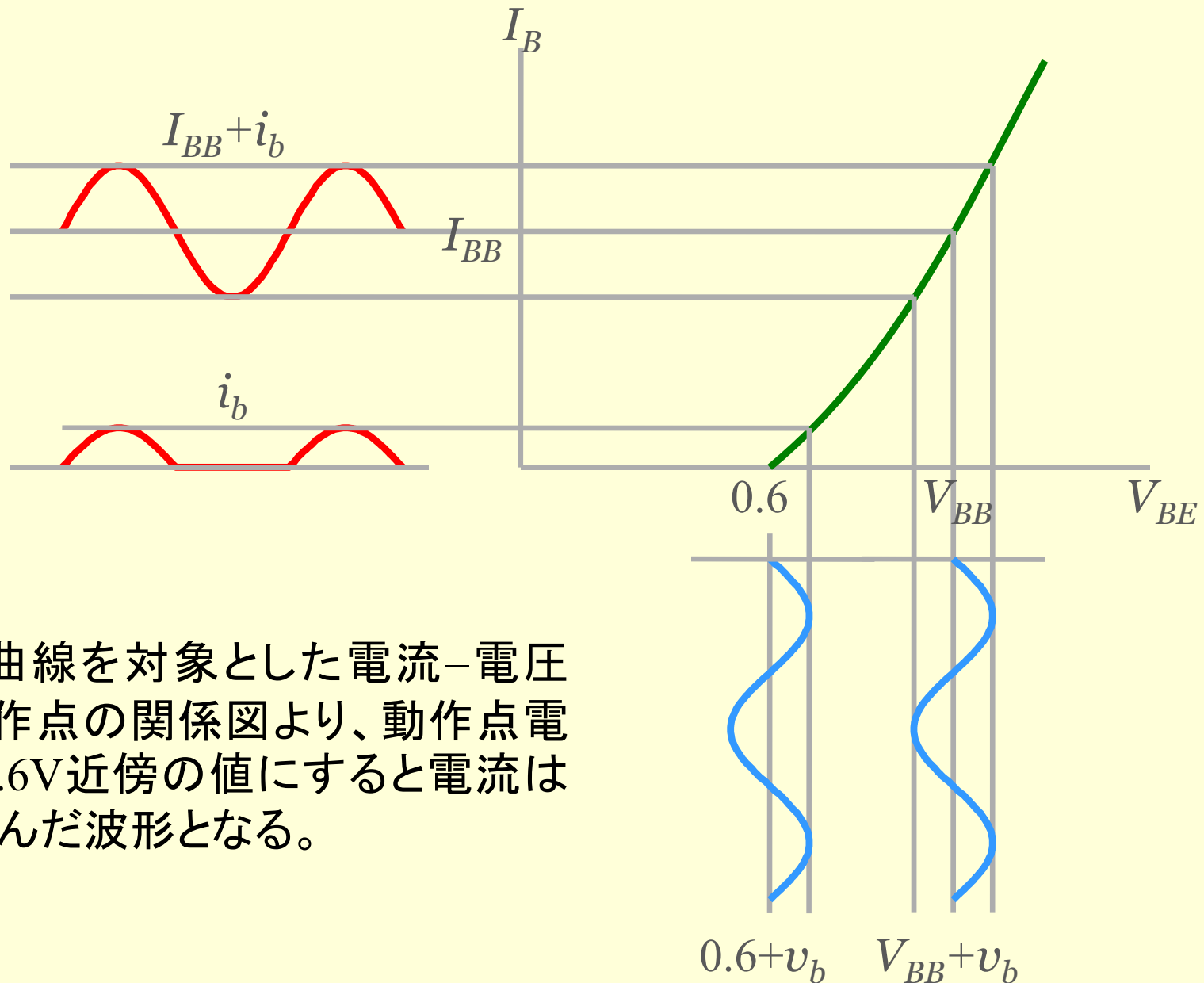
※実際の出力は、 $I_C = h_{fe}I_B$ とコレクタ電流として増幅されるが、一般的に電流より電圧の方が扱いやすいので、負荷抵抗 R を入れる。

トランジスタの入力特性と負荷直線



それぞれの特性をもとに、 I_B が歪まないような V_{BE} を選択して、その動作点を定める。また、出力波形が極力歪みのない対称波形となるように負荷線上の動作点を定める。

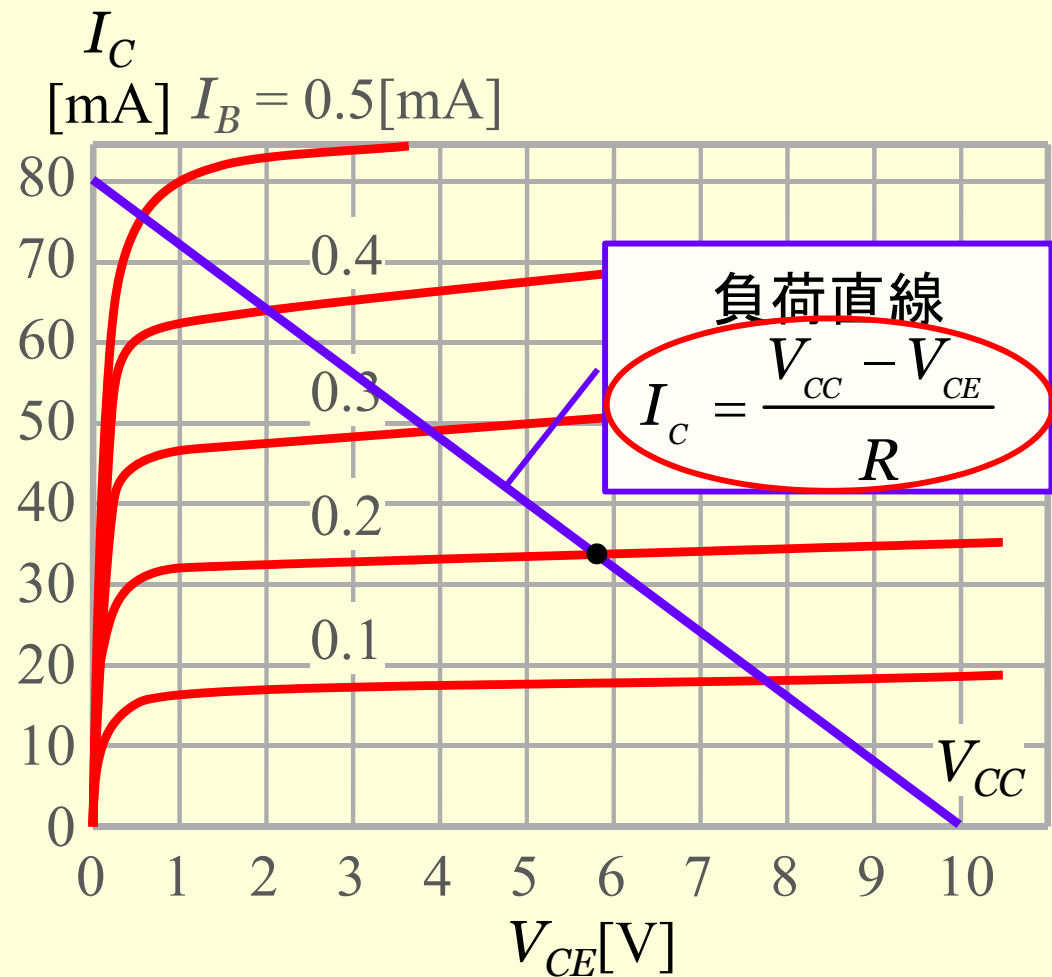
入力特性 ($I_B - V_{BE}$ 曲線) の拡大図



$I_B - V_{BE}$ 曲線を対象とした電流-電圧波形と動作点の関係図より、動作点電圧 V_{BE} を 0.6V 近傍の値にすると電流は片波の歪んだ波形となる。

負荷線と動特性

入力特性で動作点が定まると、その**ベース電流のβ倍のコレクタ電流の流れる点**が負荷線上の動作点となる。そのときのコレクタ・エミッタ間電圧を読みとれば V_{CE} の動作点がわかる。そこで、入力で動作点を中心に信号電圧を加えれば、負荷線上でコレクタ電流の変化する範囲がわかり、その結果 **V_{CE} の変化する幅が決まる**。この V_{CE} の幅が出力電圧となる。表現を変えると、静特性に負荷線を書き込むと、その回路の動特性を示すことになる。例えば入力段で歪みを生じさせないように **I_B を0.2mA**とすると、負荷直線から**動作点電圧 V_{CE} は5.8V**になる。歪みのない**対称出力波形は $5.8 \pm (10 - 5.8)V$** 、すなわち**1.6V ~ 10.0V**の出力電圧となる。このとき、負荷抵抗は **$10V / 33mA = 303\Omega$** になる。



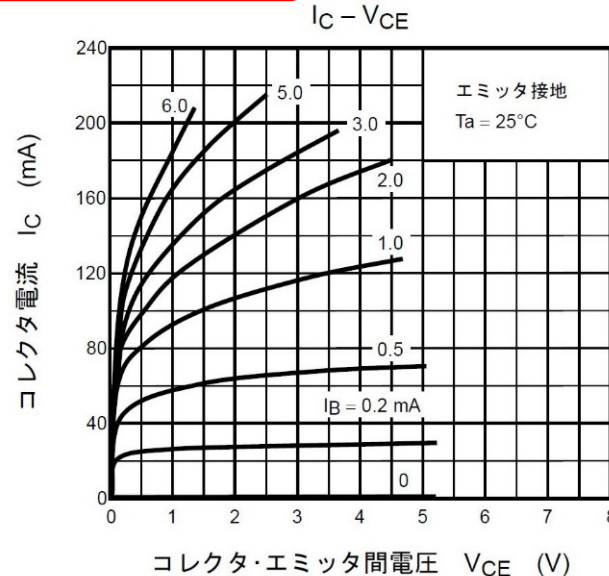
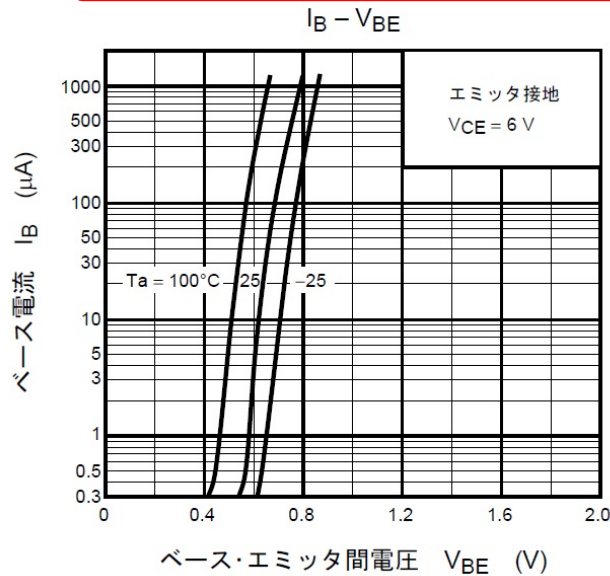
実際の性能

2SC1815

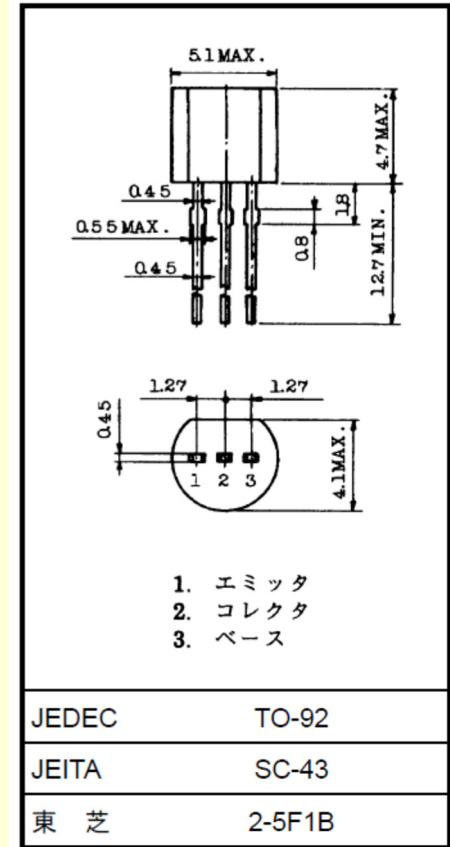
電気的特性 (Ta = 25°C)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタしゃ断電流	I_{CBO}	$V_{CB} = 60\text{ V}, I_E = 0$	—	—	0.1	μA
エミッタしゃ断電流	I_{EBO}	$V_{EB} = 5\text{ V}, I_C = 0$	—	—	0.1	μA
直流電流増幅率	$h_{FE(1)}$ (注)	$V_{CE} = 6\text{ V}, I_C = 2\text{ mA}$	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}	$V_{CB} = 10\text{ V}, I_E = 0, f = 1\text{ MHz}$	—	2.0	3.5	pF
ベース拡がり抵抗	$r_{bb'}$	$V_{CE} = 10\text{ V}, I_E = -1\text{ mA}, f = 30\text{ MHz}$	—	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

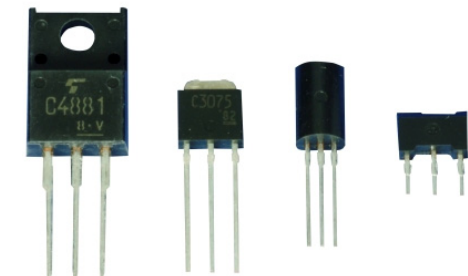
注: $h_{FE(1)}$ 分類 O: 70~140, Y: 120~240, GR: 200~400, BL: 350~700



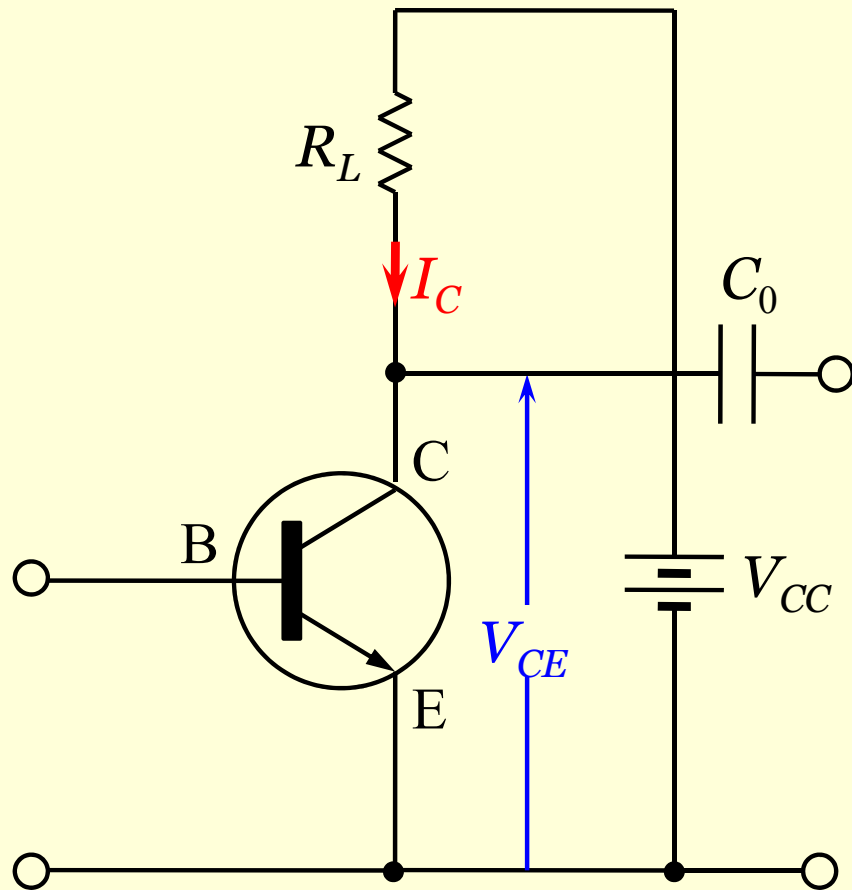
単位: mm



質量: 0.21 g (標準)



出力信号の取り出し方

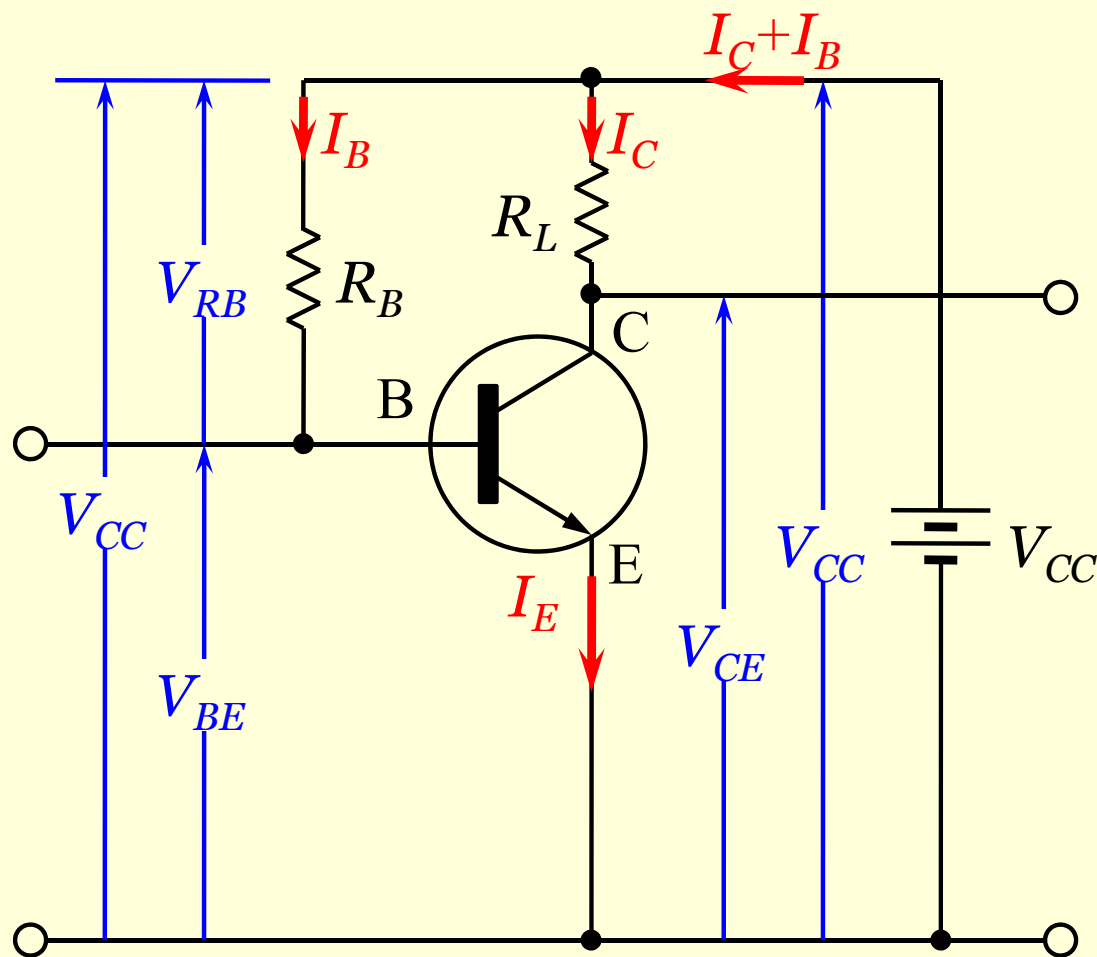


トランジスタ回路ではベース電流の h_{fe} 倍のコレクタ電流が流れ、入力電圧変化はコレクタ電流の変化となる(一般に電流信号より電圧信号のほうが回路として取り扱いやすい)。一般の出力信号は**コレクタの電流変化を負荷抵抗 R_L の両端電圧変化**として得る。なお、**交流分だけを取り出すときはコンデンサ C_0 を接続して直流分を取り除く**。

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_L} - \frac{V_{CE}}{R_L}$$

固定バイアス回路



最も基本的なバイアス回路である。

$$V_{CC} = V_{RB} + V_{BE}$$

$$V_{RB} = I_B R_B$$

なので、

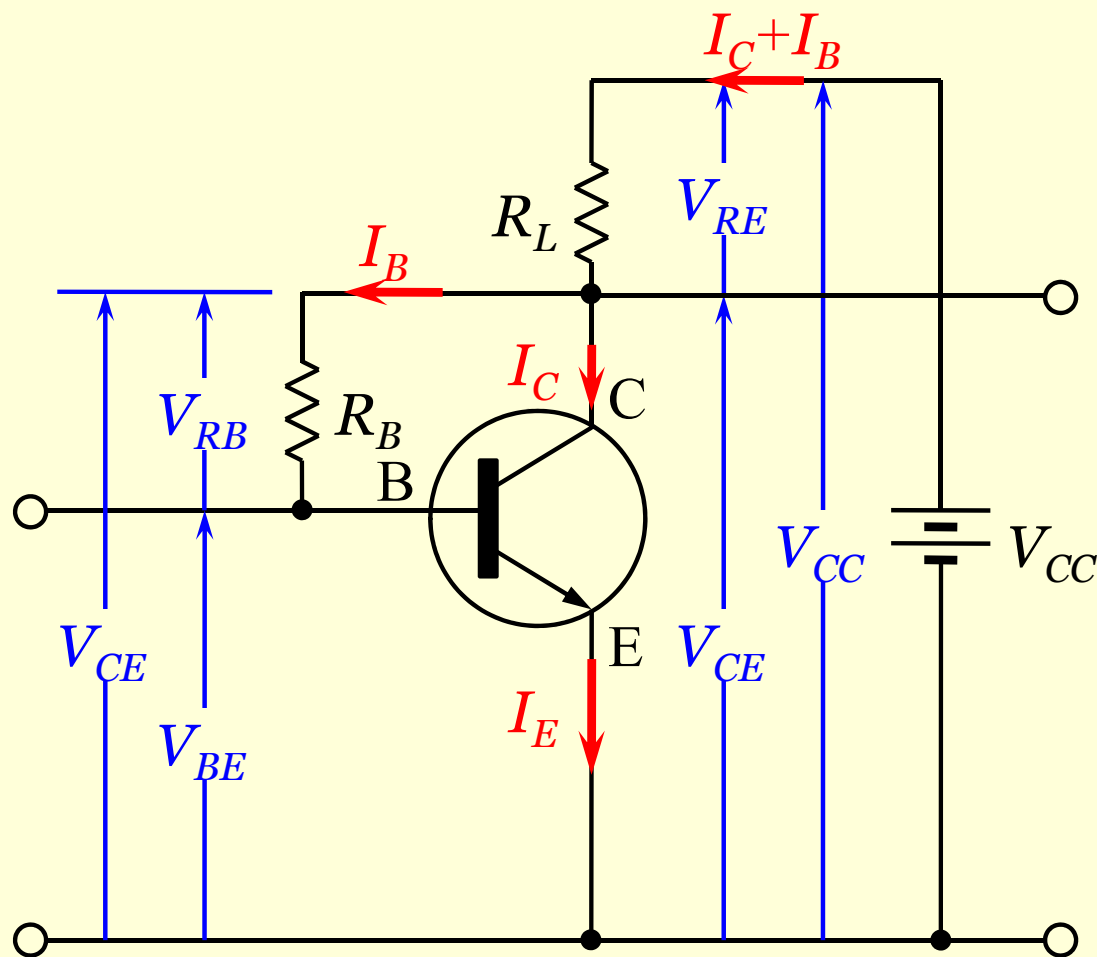
$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE}$$

バイアス電流を I_B とすると、抵抗 R_B は、

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B}$$

となる。

自己バイアス回路



何らかの原因で $I_C + I_B$ が増加すると、 V_{RE} の電圧降下が大きくなるので、 V_{CE} が減少する。 V_{CE} が減少することにより I_B が減少し、 I_C が減少する。

電圧帰還がかかっている
ので、温度変化に対して安
定して動作する。

$$V_{CE} = V_{RB} + V_{BE}$$

R_B の電圧降下を V_{RB} 、バイ
アス電流を I_B とすると、

$$V_{RB} = I_B R_B$$

となり、抵抗 R_B は、

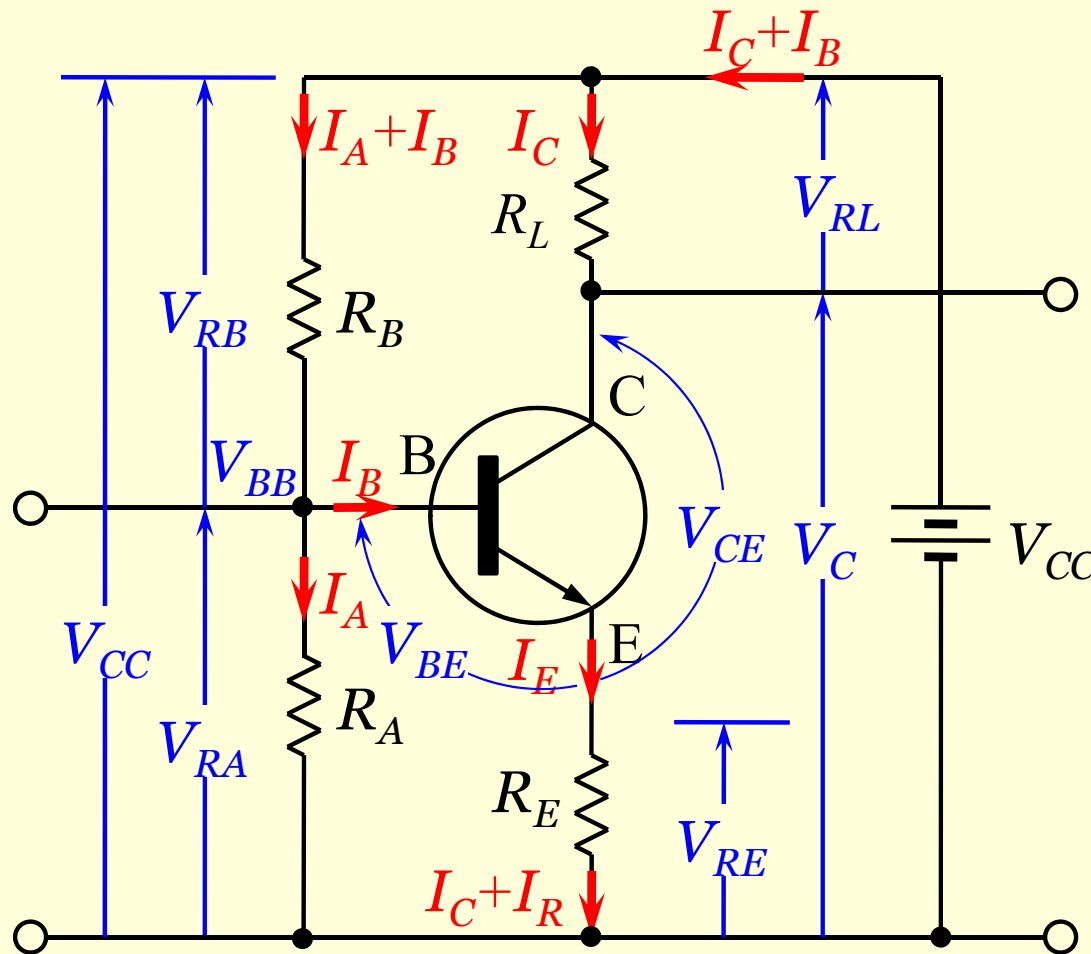
$$R_B = \frac{V_{CE} - V_{BE}}{I_B}$$

となる。変形すると、

$$I_B = \frac{V_{CE} - V_{BE}}{R_B}$$

となる。

電流帰還バイアス回路



この回路はエミッタにも抵抗が接続される。動作点を決めるのは V_{BB} である。

$$V_{BB} = \frac{R_A}{R_A + R_B} V_{CC}$$

R_E の電圧降下を V_{RE} とすると、

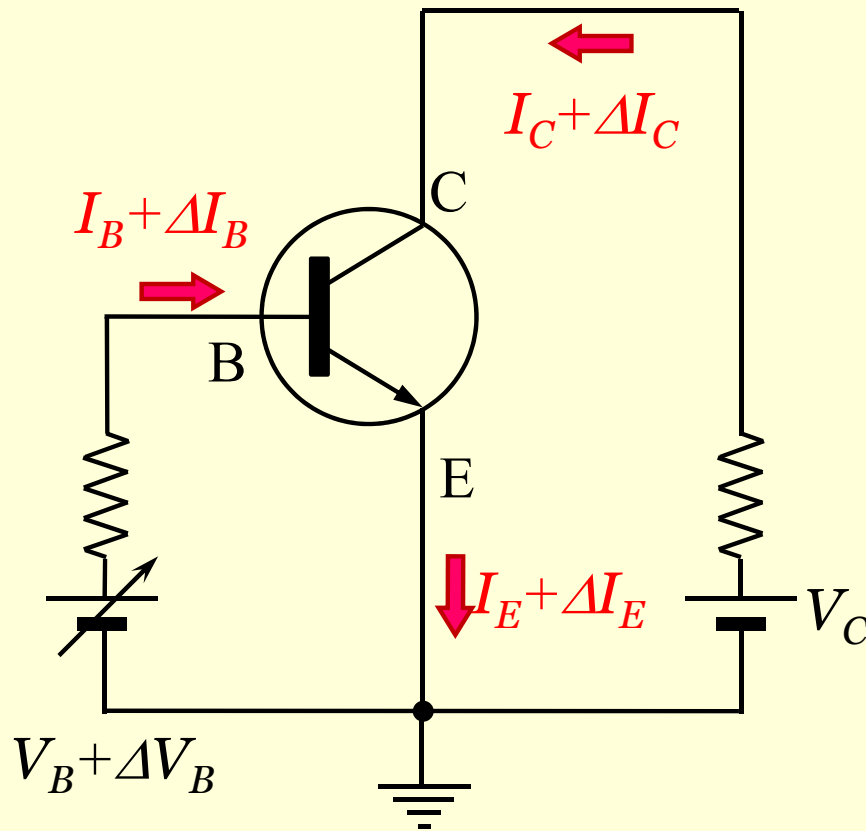
$$V_{BE} = V_{BB} - V_{RE}$$

となる。バイアス電圧は3つの抵抗値 R_A 、 R_B 、 R_E で決まる。

$$\begin{aligned} V_{RE} &= I_E R_E \\ &= R_E (I_C + I_B) \end{aligned}$$

何らかの原因で I_C が増加すると、 V_{RE} の電圧降下が大きくなるので、 V_{BE} が減少する。 V_{BE} が減少することにより I_B が減少し、 I_C が減少する。

増幅動作解析



回路に I_E 、 I_B 、 I_C が流れているとき、 V_B を ΔV_B だけ増やすと、これに伴って I_E 、 I_C も ΔI_E 、 ΔI_C だけ変化する。

$$I_E + \Delta I_E = I_B + \Delta I_B + I_C + \Delta I_C$$

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_C$$

一般のトランジスタでは、ベース内でホールと結合する電子の数が、移動する電子の0.2%~2%程度なので、 I_E 、 I_B 、 I_C の関係は、

$$I_B = 0.002I_E \sim 0.02I_E$$

$$I_C = 0.998I_E \sim 0.98I_E$$

となる。ここで、 I_C / I_B を求めると、

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \approx \frac{I_C}{I_B} = 49 \sim 499$$

となる。