

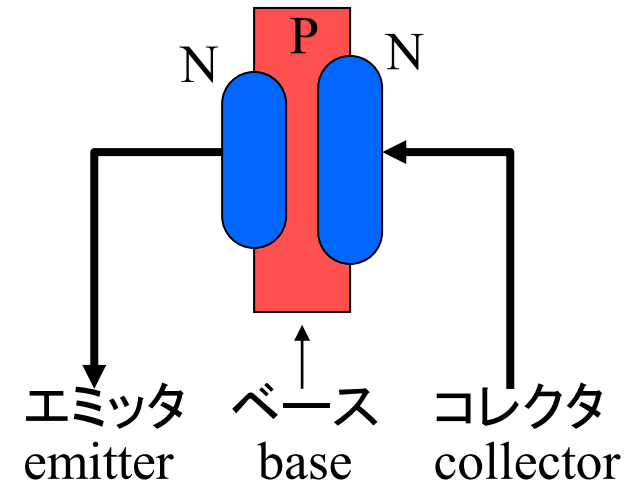
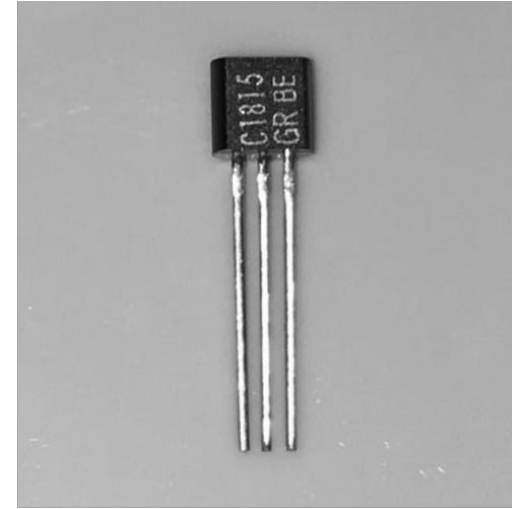
# 電気電子回路

## 第5回：バイポーラトランジスタ

bipolar junction transistor (BJT)

# バイポーラトランジスタ

- 半導体 (Ge、Si など) の純結晶に、微量のP型不純物を含む領域と微量のN型不純物を含む領域を「PNP」または「NPN」の順に形成したもので、中央の端子を流れる電流により、両端を流れる電流の大きさを制御できる
- 1951年に完成された計算機 UNIVAC I で使用された
- 動作電圧、小ささ、寿命など、あらゆる面で真空管より優れており、電池で動作するラジオなど、電気製品に革新をもたらした



# 今週の目標

- バイポーラトランジスタの仕組みと動作原理を理解する
  - npn型とpnp型、3つの端子(ベース、エミッタ、コレクタ)
- バイポーラトランジスタの主要な特性を理解する
  - $I_E = I_{E0} \left( e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right)$  教科書(6.3)式
  - $I_C \approx \alpha_0 I_E$  教科書(6.1)式
    - $\alpha_0$  はベース接地電流増幅率(0.9~0.99程度)
  - $I_C \approx \beta_0 I_B$  教科書(6.21)式
    - $\beta_0 \equiv \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}$  はエミッタ接地電流増幅率(10~400程度)
  - $V_{BE} \approx 0.6 \sim 0.7 [\text{V}]$
- バイポーラトランジスタを用いたエミッタ接地増幅回路の動作を理解する

# バイポーラトランジスタの概略構造

p-type region    n-type region    triple layer structure    semiconductor device

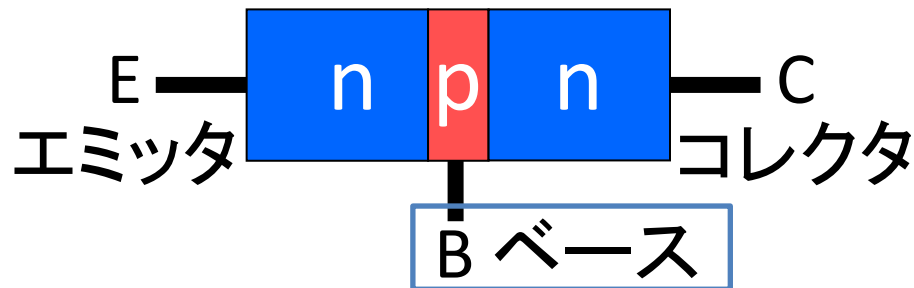
- p型領域とn型領域の3層構造をした半導体素子

- npnトランジスタ : p型領域の両側に n型領域を接合
- pnpトランジスタ : n型領域の両側に p型領域を接合

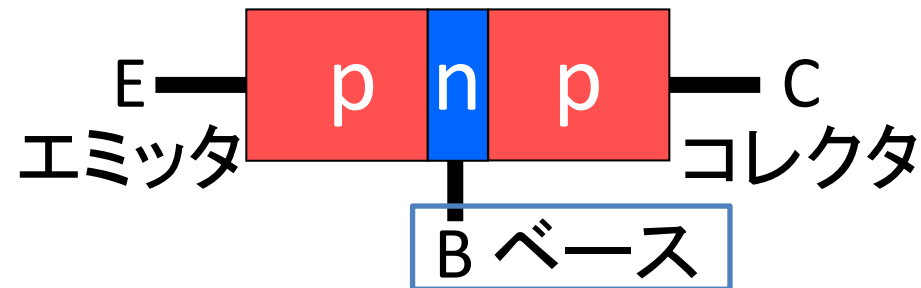
terminal

- 3つの端子が付けられている

- ベース (base: B): 直訳は「基板」
- エミッタ (emitter: E): 直訳は「放出するもの」
- コレクタ (collector: C): 直訳は「回収するもの」

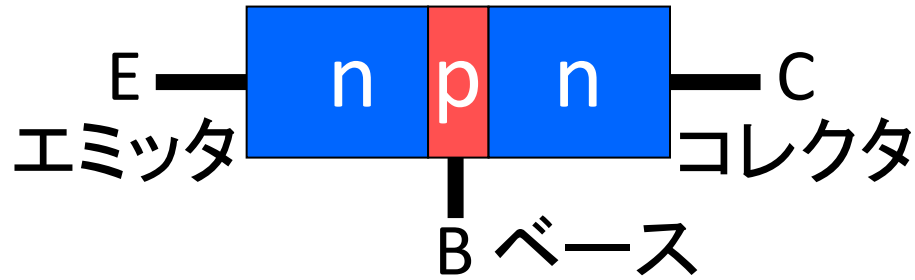


npnトランジスタ

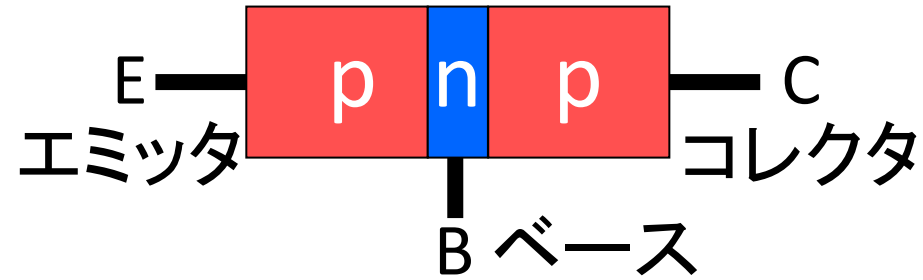


pnpトランジスタ

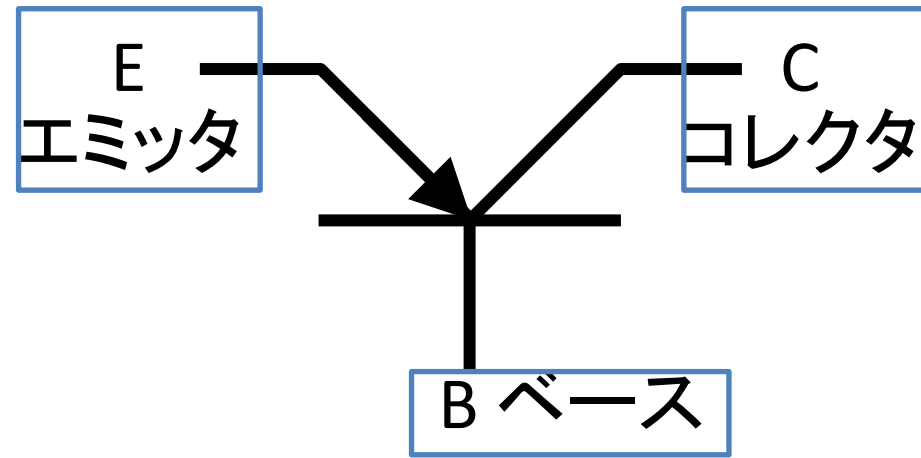
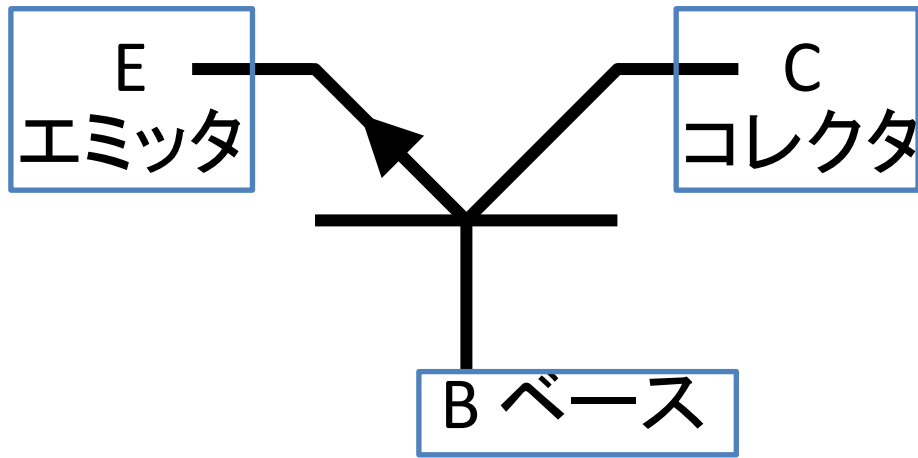
## 回路図記号



npnトランジスタ



pnpトランジスタ

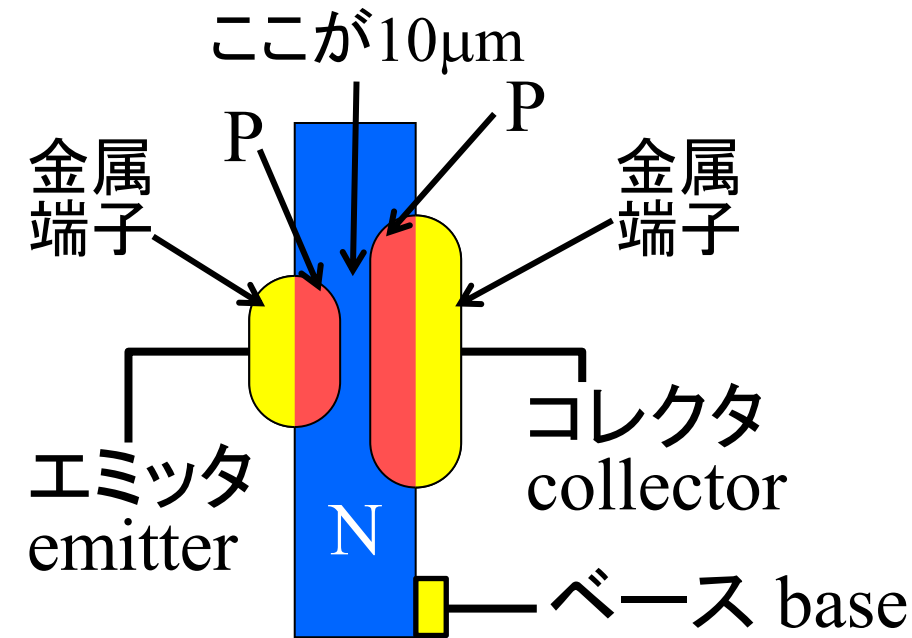


矢印はベース-エミッタ間のPN接合(ダイオード)の向きを表す

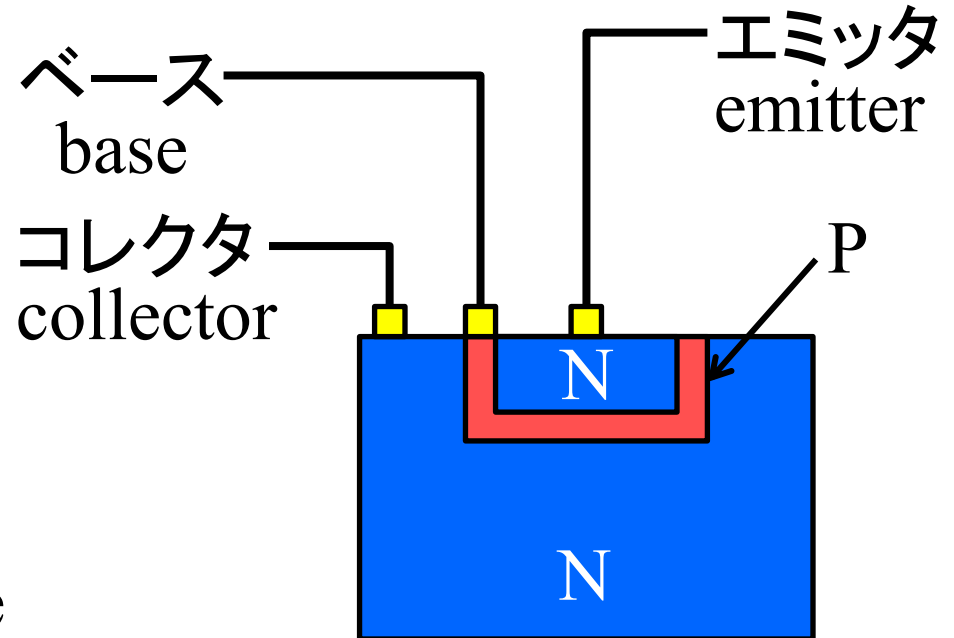
The arrow indicates the direction of PN-junction between base and emitter.

# 実際の構造

- ベースは薄くしてある(例えば $10\mu\text{m}$ 程度)
- エミッタで放出したキャリアをコレクタが効率よく回収できるように、コレクタの方を大きめにしている



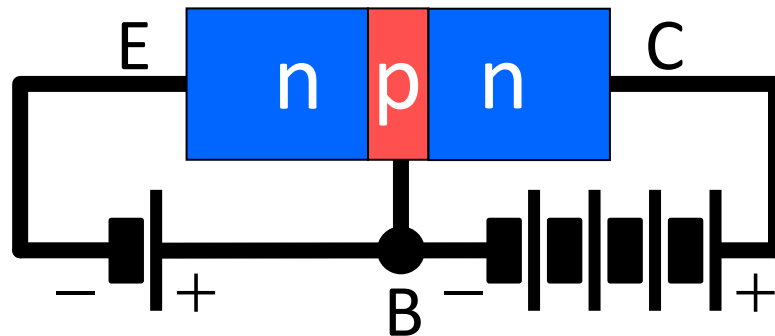
合金型: 初期の製造法。ベースは文字通り「基板」だった。



プレーナ型: その後主流になった製造法。

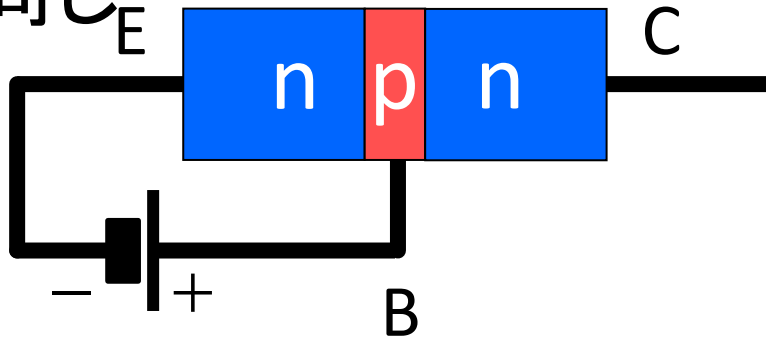
# common-base circuit ベース接地回路の動作

- バイポーラトランジスタの動作原理は下図の「ベース接地回路」で説明されることが多い
  - 半導体内部の動作原理が分かりやすい
  - 但し、実際の応用では「エミッタ接地回路」や「コレクタ接地回路（エミッタフォロワ）」が使われることが多い
- 以下、npn型トランジスタを例として説明する
  - pnp型は電圧・電流の向きや「電子」と「正孔」が全て逆



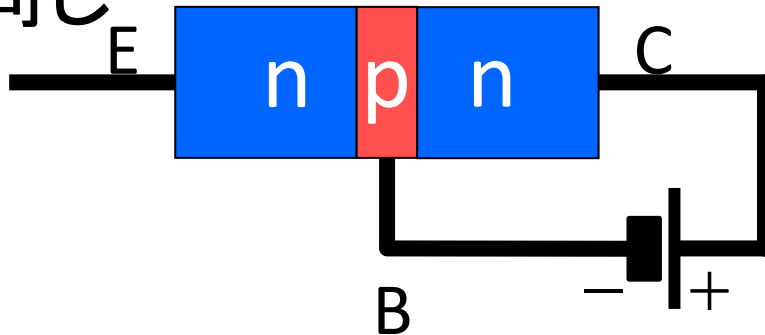
# B-E間やB-C間はダイオード

- コレクタに何も接続しなければ、B-E間はダイオードと同じ



$$I_E = I_{sE} (e^{\frac{q}{kT} V_{BE}} - 1)$$

- エミッタに何も接続しなければ、B-C間はダイオードと同じ



$$I_C = I_{sC} (e^{\frac{q}{kT} V_{BC}} - 1)$$
$$= I_{sC} (e^{-\frac{q}{kT} V_{CB}} - 1)$$

逆バイアスなのでほとんど流れない

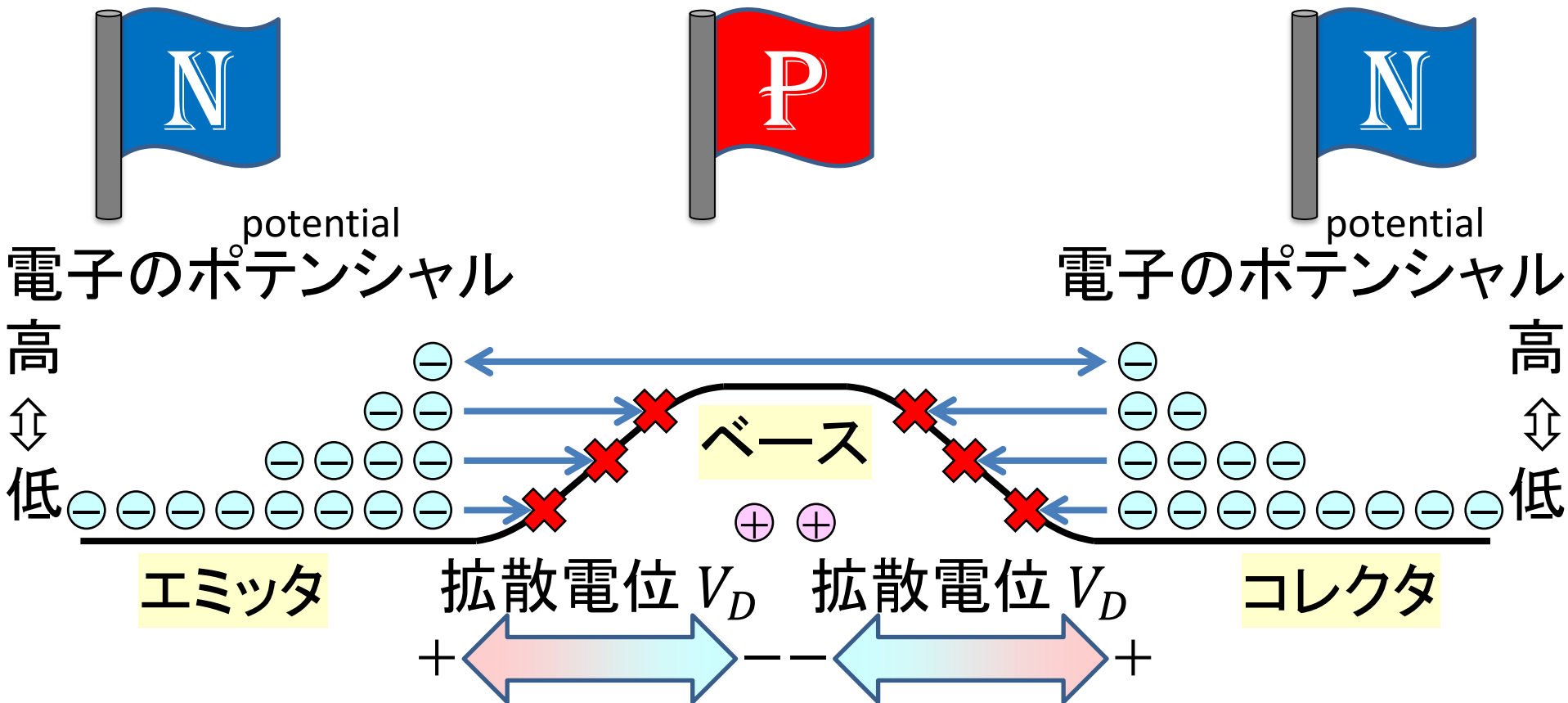


# 外部から電圧をかけていない時の npnトランジスタの電子のエネルギー準位

energy level

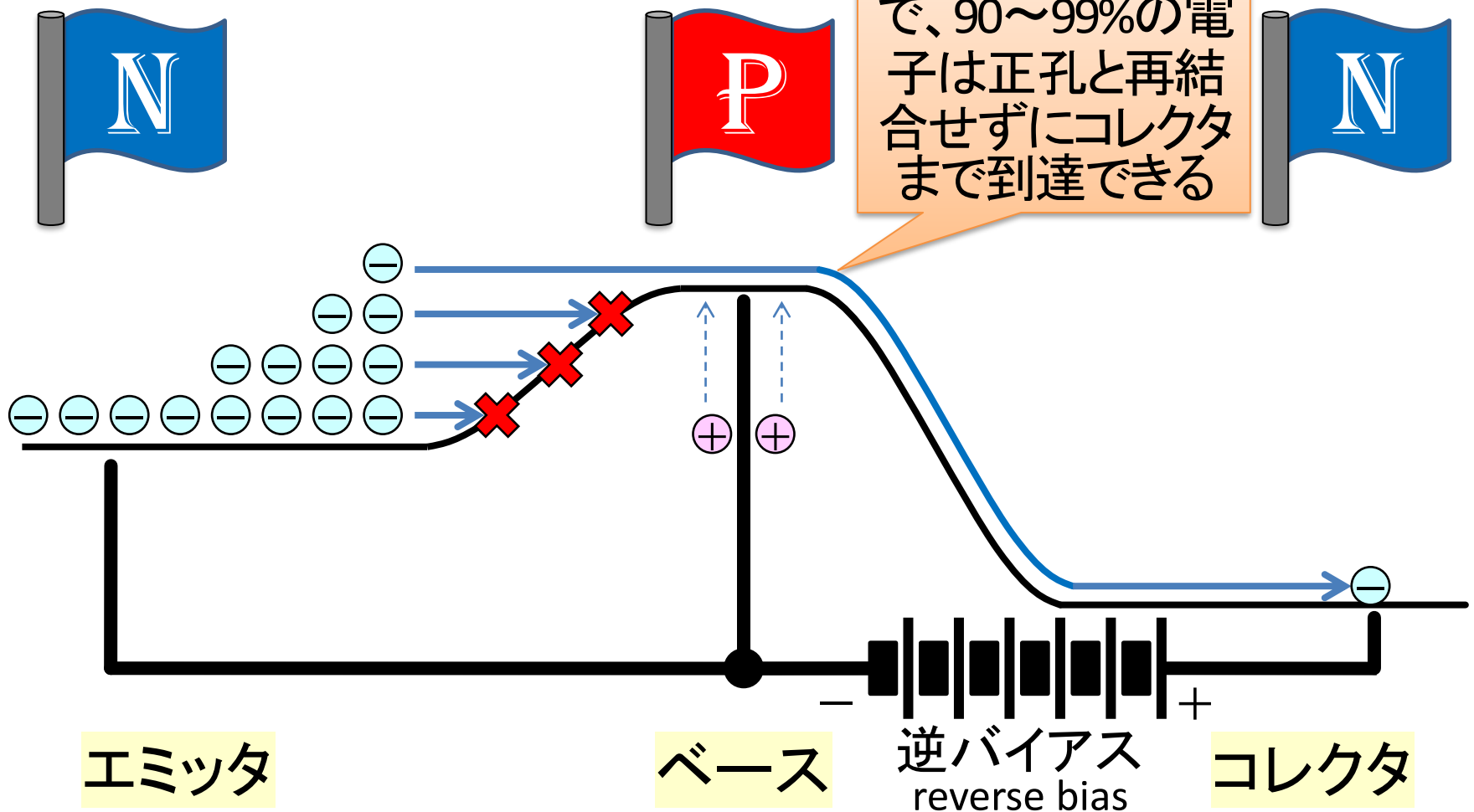
## npnトランジスタの電子のエネルギー準位

- エネルギーが高いごく一部の電子を除き、pn接合面を越えられない



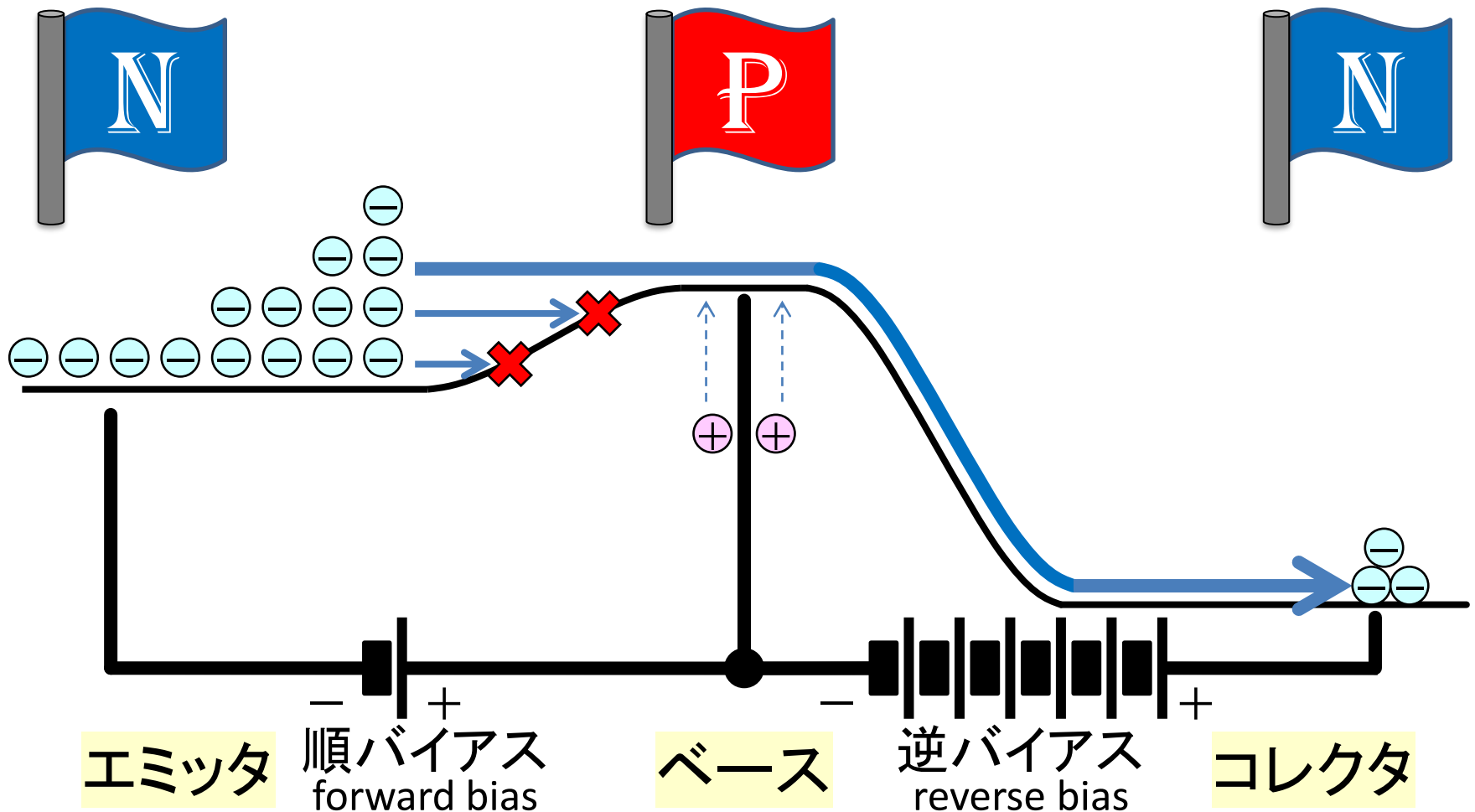
# ベース-コレクタ間に 逆バイアスをかけてみる

- エミッタから pn 接合を越えてベースに到達した電子がコレクタ側に転がり落ちてくるようになる



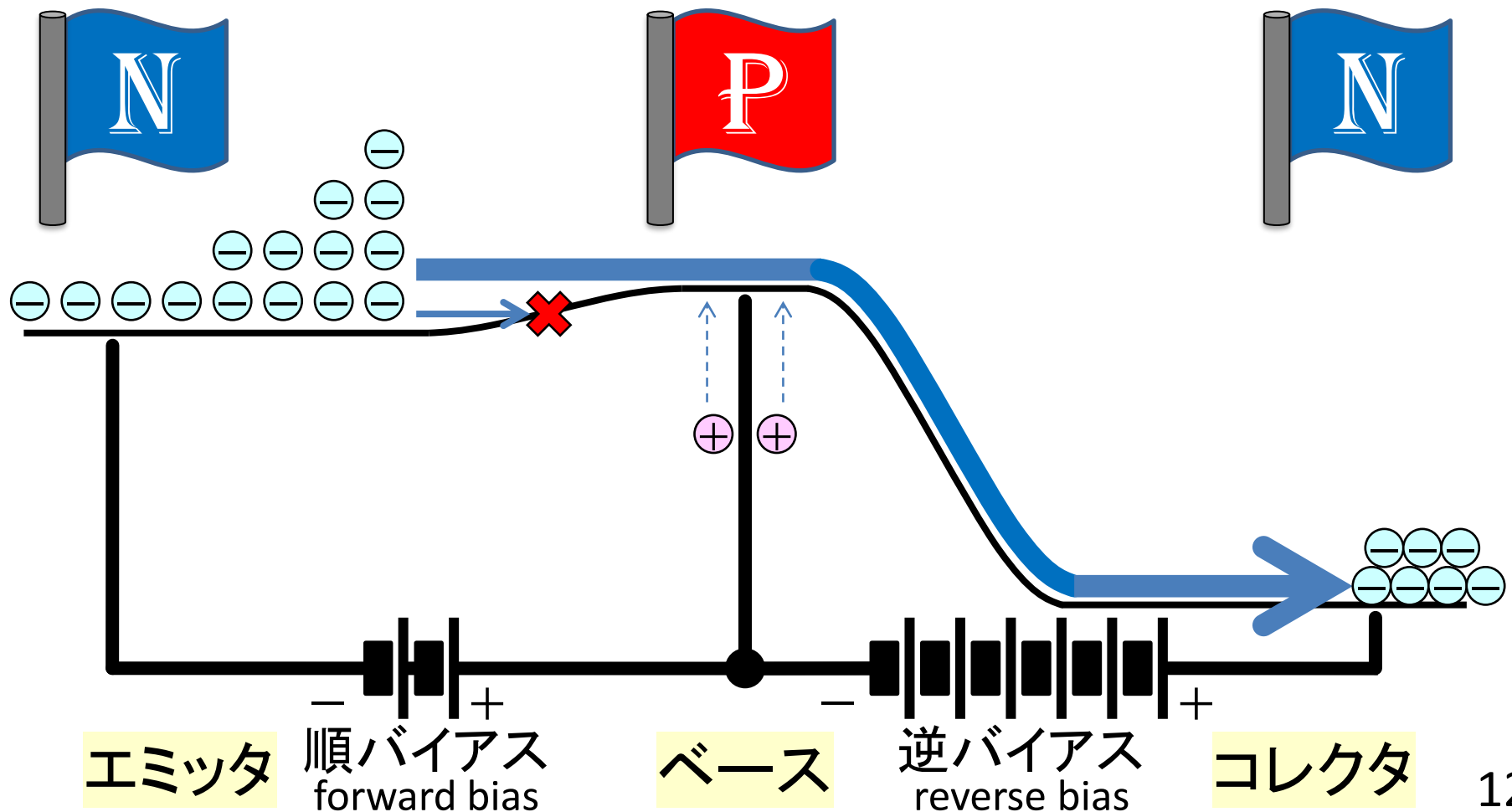
# エミッターベース間に 少し順バイアスをかけてみる

- ベース—エミッタ間の微妙な電位変化がコレクタ電流に大きく反映される



# エミッターベース間に もう少し順バイアスをかけてみる

- ベース—エミッタ間の微妙な電位変化がコレクタ電流に大きく反映される



# ベース-エミッタ間電圧とエミッタ電流の関係

- エミッタ電流は、ダイオードと同様に、以下の式で与えられる

$$I_E = I_{E0} \left( e^{\frac{q}{kT} V_{BE}} - 1 \right)$$

$I_{E0}$  : ベースエミッタ間飽和電流

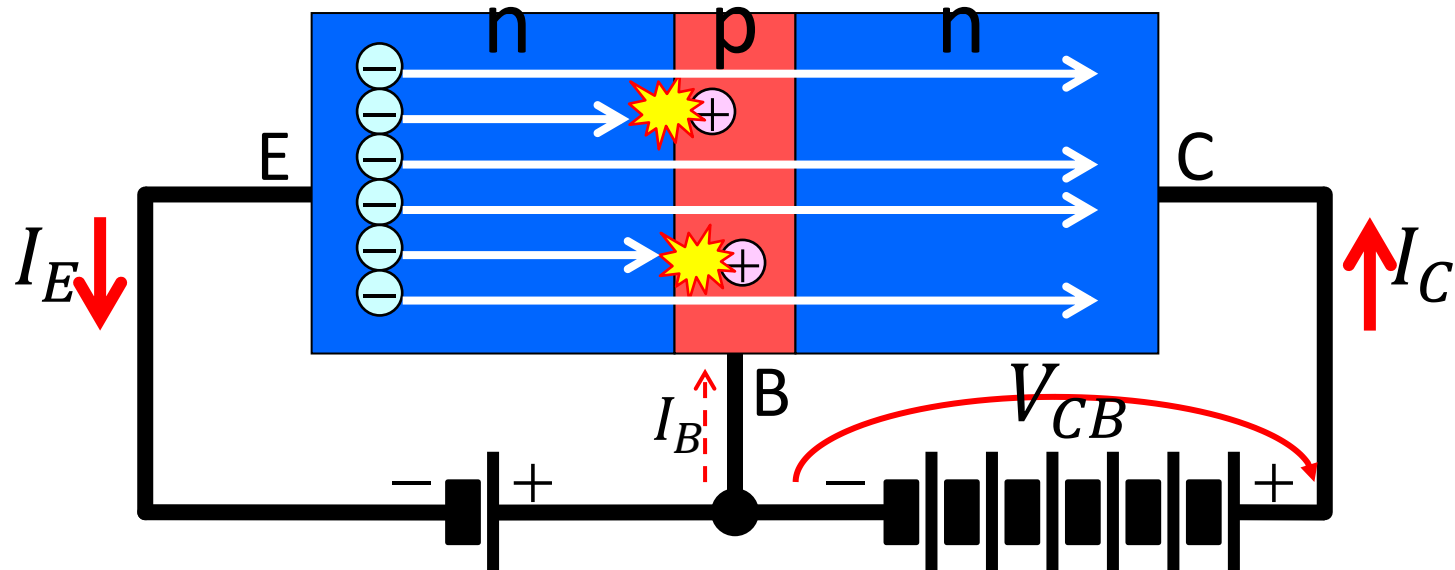
$q$  : 電子の電荷 ( $1.60 \times 10^{-19} [\text{C}]$ )

$k$  : ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$ )

$T$  : 絶対温度

# エミッタ電流とコレクタ電流の関係

- エミッタからベース領域に到達した電子の
  - 一部はベース内の正孔と再結合する
  - 残りの大半は、ベース領域を通過してコレクタに到達する
- コレクタ電流とエミッタ電流の関係はほぼ  $I_C = \alpha_0 I_E$  に従う ( $V_{CB}$  を変えても  $\alpha_0 (\approx 0.9 \sim 0.99)$  はほぼ一定)
  - $\alpha_0$  を **ベース接地電流増幅率** という (common-base current gain)



# ベース接地回路のまとめ

- ベース-エミッタ間電圧  $V_{BE}$  とエミッタ電流  $I_E$  の関係

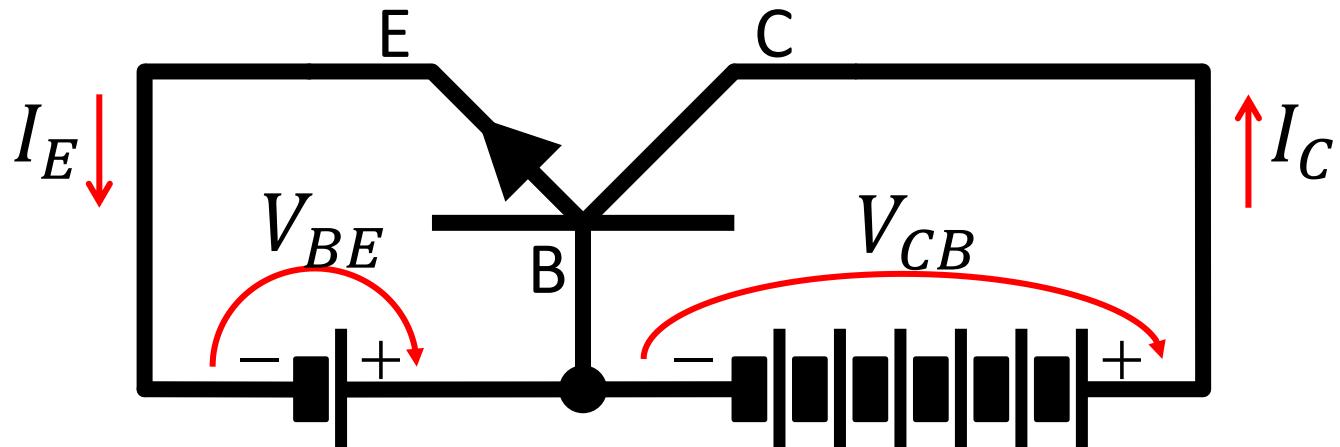
$$I_E = I_{E0} (e^{\frac{q}{kT} V_{BE}} - 1) \quad (\text{教科書(6.3)式})$$

- エミッタ電流  $I_E$  とコレクタ電流  $I_C$  の関係

$$I_C = \alpha_0 I_E \quad (\text{教科書(6.1)式})$$

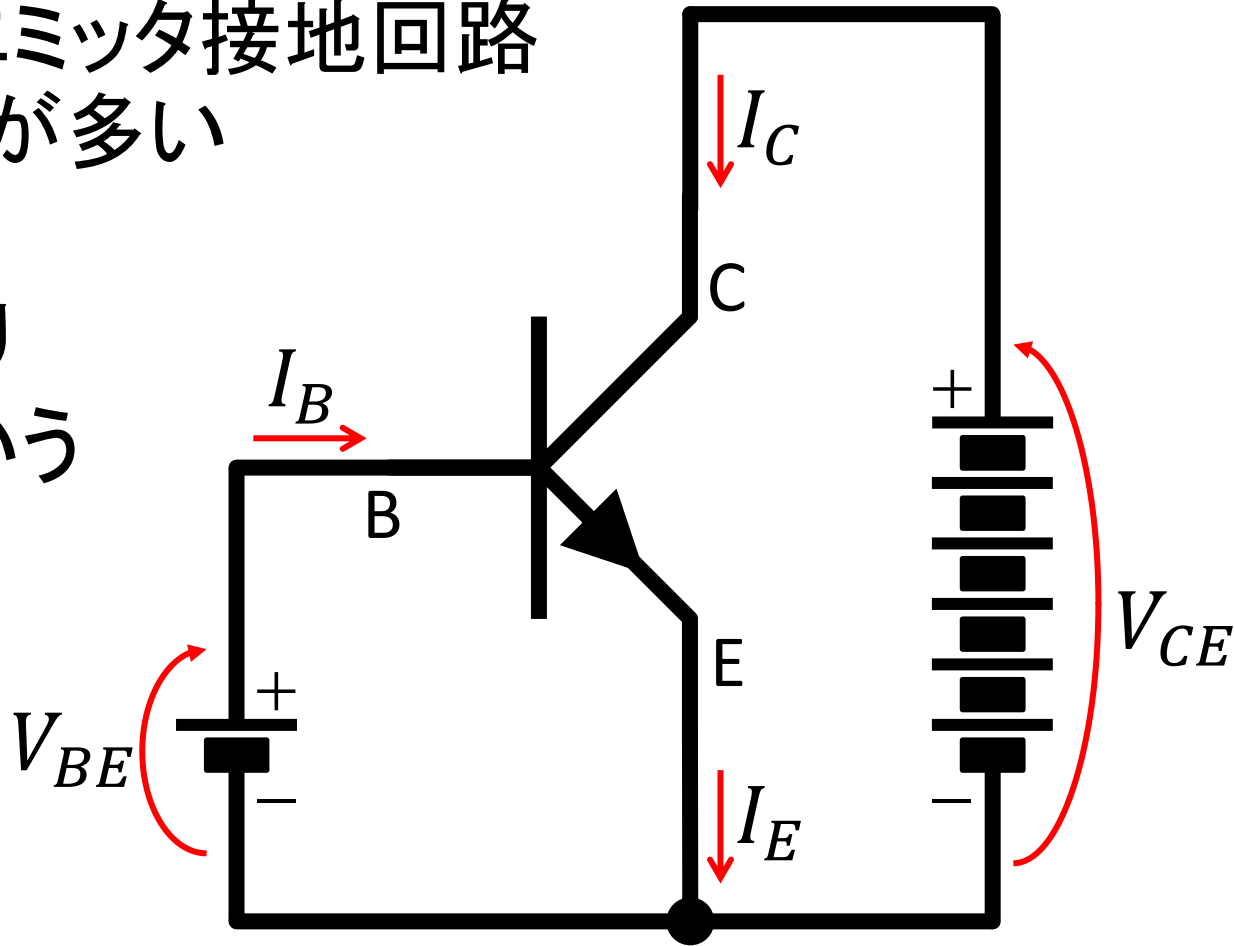
$\alpha_0 (\approx 0.9 \sim 0.99)$  はベース接地電流増幅率という

但し、 $V_{CB}$  が小さい時や負(順バイアス)の時は、ベース-コレクタ間のpn接合がダイオードとして機能する



# common-emitter circuit エミッタ接地回路

- 実際には右のエミッタ接地回路が使われることが多い
- $I_C = \alpha_0 I_E$  と  
 $I_E = I_C + I_B$  より  
 $I_C = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} I_B$  という  
関係が成り立つ
- $\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}$  と  
おけば  
 $I_C = \beta_0 I_B$
- $\beta_0$  を **エミッタ接地電流増幅率** という (common-emitter current gain)  
-  $\beta_0$  と書く代わりに  $h_{FE}$  と書くことも多い





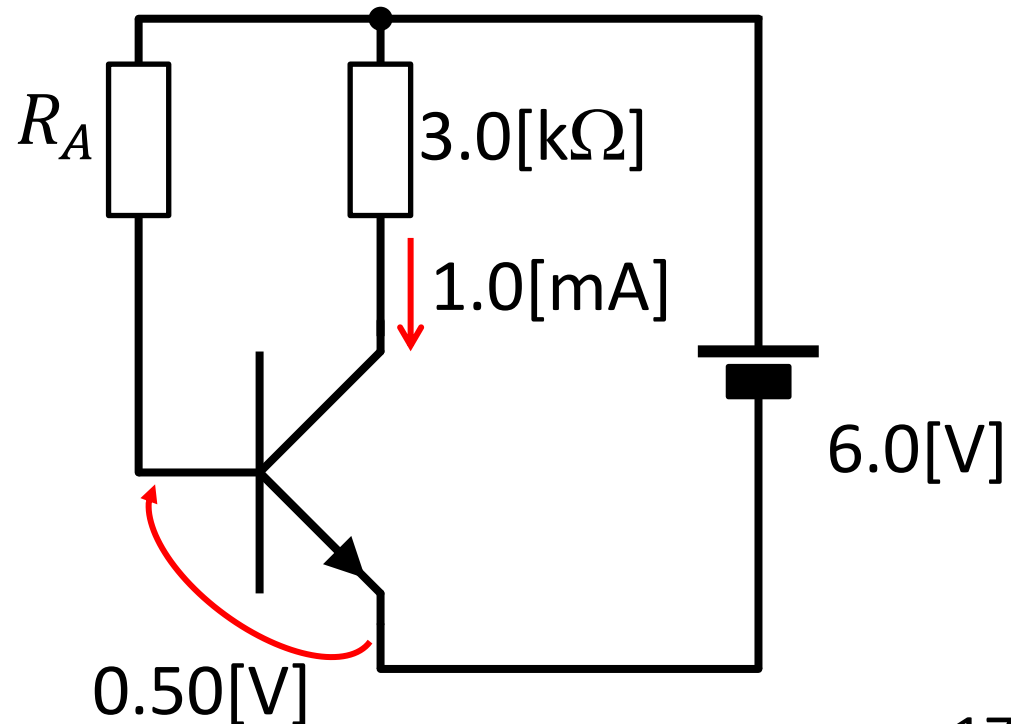
# 例題 1

自分でやってみよう！

- 下の回路は「固定バイアス回路」と呼ばれる。このコレクタ電流が  $1.0[\text{mA}]$  となるよう、抵抗  $R_A$  の値を決めよ。但し、このトランジスタの  $h_{FE}$  は 200、 $V_{BE}$  は  $0.50[\text{V}]$  とせよ。

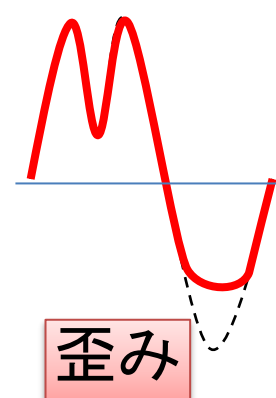
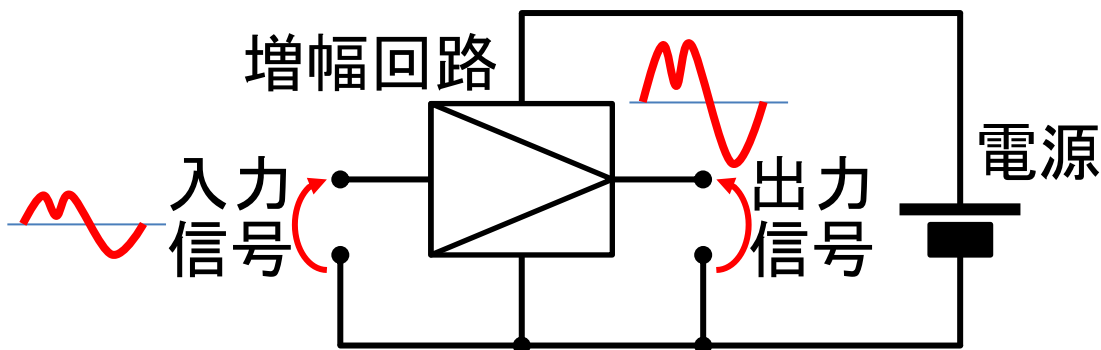
## 【解答】

- $R_A$  の電圧は  $5.5[\text{V}]$
- $R_A$  の電流は  $5.0[\mu\text{A}]$
- よって  $R_A = 1.1[\text{M}\Omega]$



# 増幅回路(amplifier) (教科書第8章)

- 変動量が小さい信号電圧(あるいは電流)に対し、変動量を大きくした交流信号電圧(あるいは電流)を出力する回路(無線機器、オーディオ機器等で必要)
  - 増幅度(gain): 出力の振幅が入力の振幅の何倍になったか(大きい方が良い)
  - 歪み(ひずみ: distortion): 出力の波形と入力波形の違い(少ない方が良い)
  - 雑音(noise): 入力信号と関係ない信号が加わること(少ない方が良い)



# バイポーラトランジスタの増幅回路

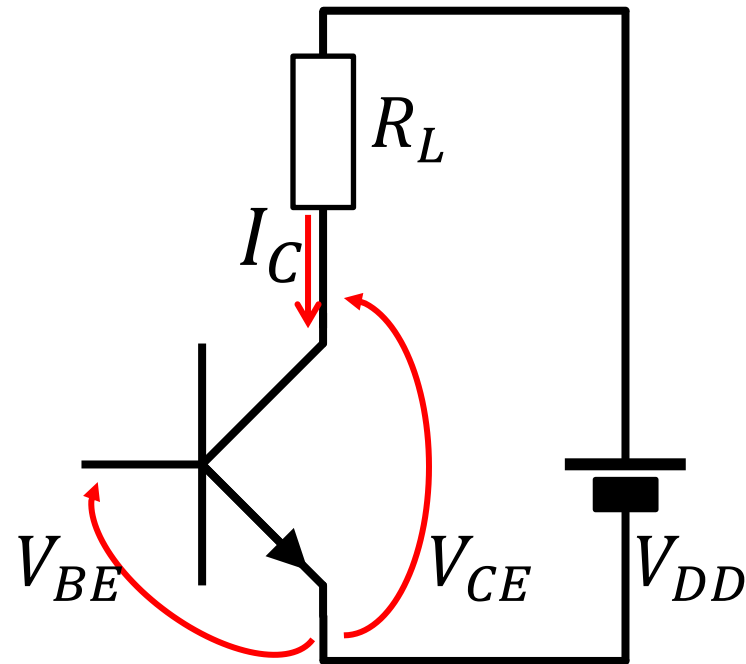
- エミッタ接地回路は**ベース電圧の小さな変化によりコレクタ電流が大きく変化する**
- 下の回路で  $V_{BE}$  と  $V_{CE}$  の関係を求めよう

$$I_C \approx I_E = I_{E0} \left( e^{\frac{q}{kT} V_{BE}} - 1 \right)$$

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

但し、 $V_{CE}$  が負になることはない

( $I_C$  の値は  $\frac{V_{DD}}{R_L}$  で頭打ちになる)

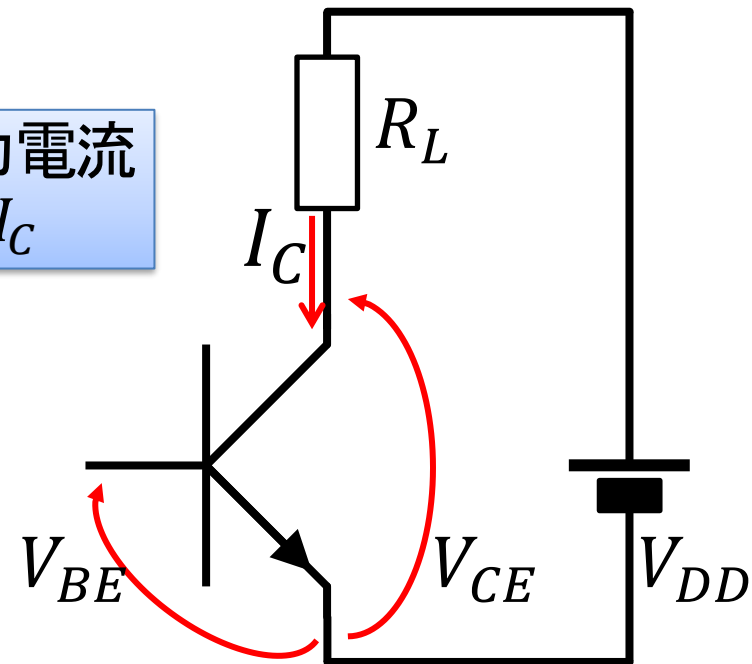
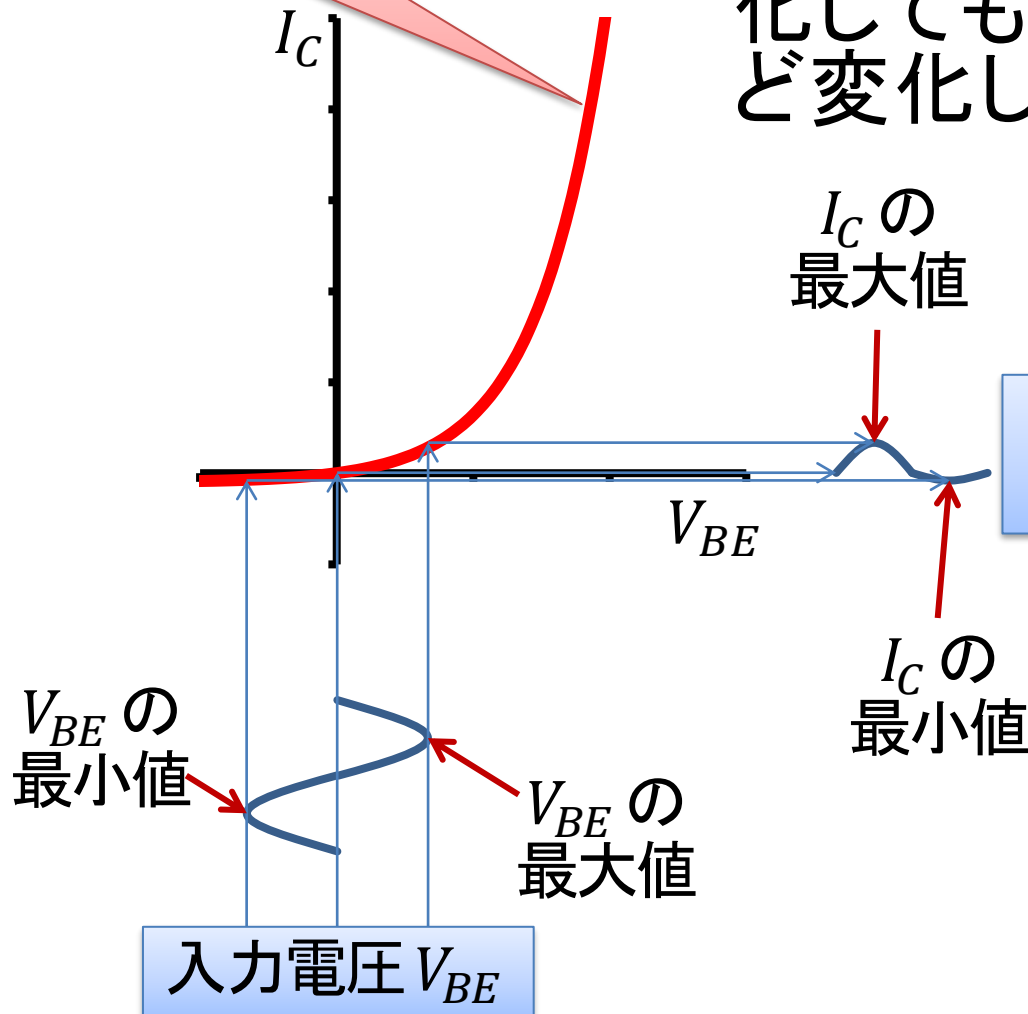


# ベース電圧の変化とコレクタ電流の変化

## (1) バイアス無しの場合

$V_{BE}$ と $I_C$ の関係 $I_C \approx I_{E0}(e^{\frac{q}{kT}V_{BE}} - 1)$ を表すグラフ

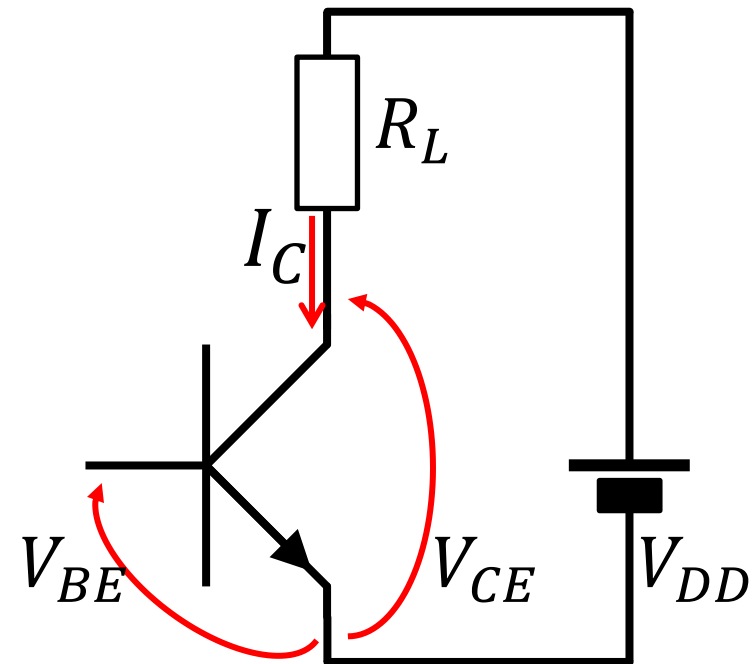
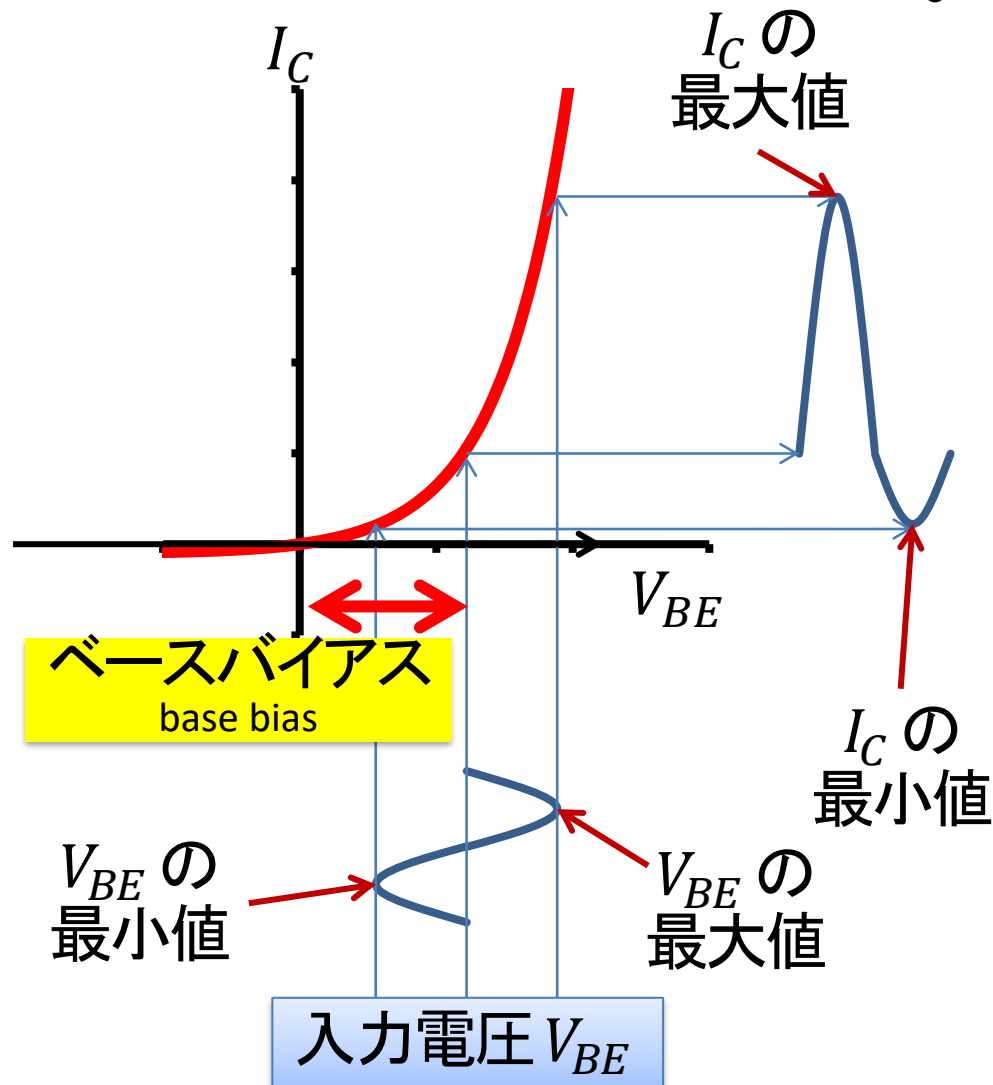
- ベース電圧  $V_{BE}$  が 0V 近傍で変化しても、コレクタ電流はほとんど変化しない



# ベース電圧の変化とコレクタ電流の変化

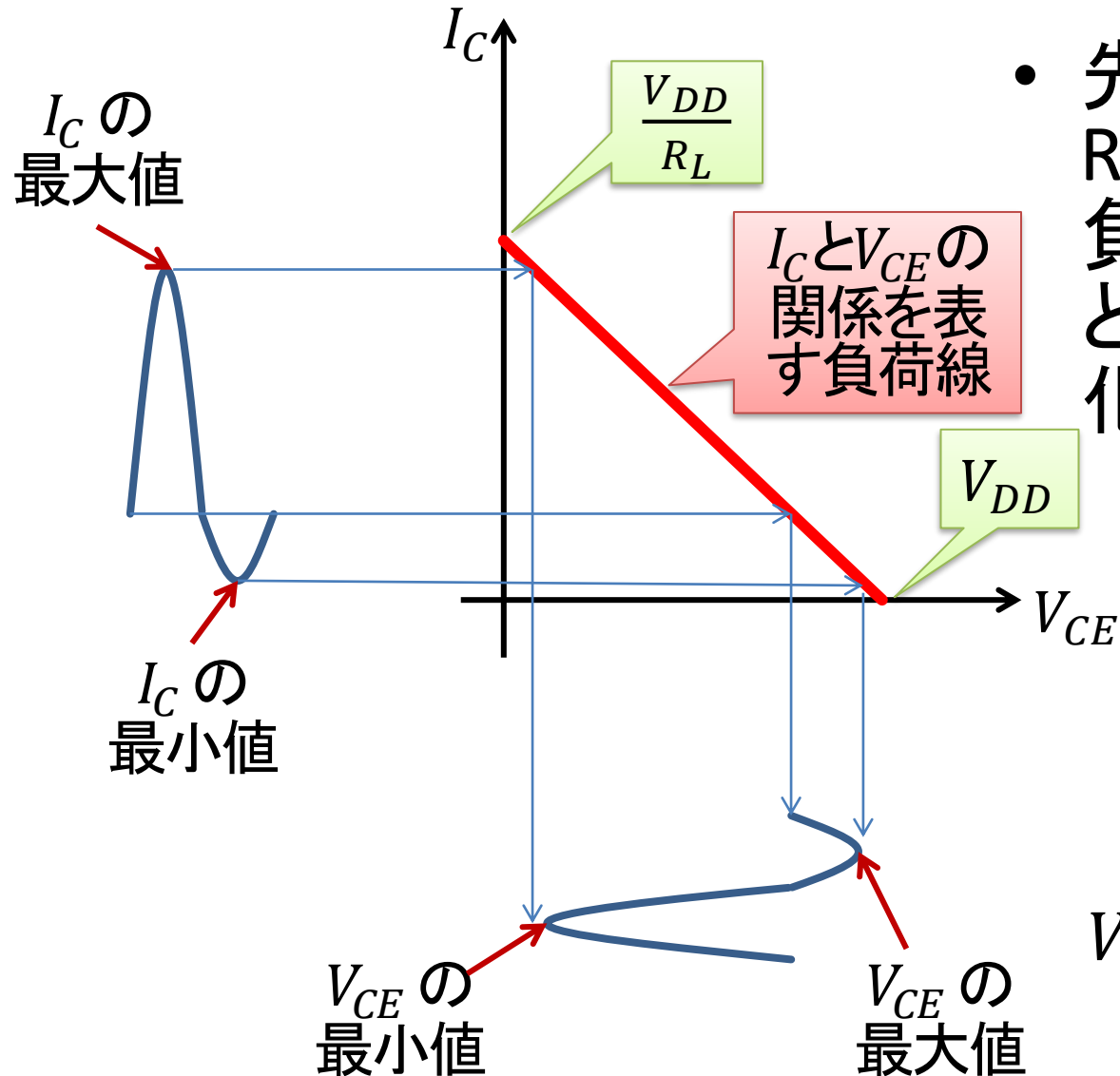
## (2) バイアス有りの場合

- 信号の中心電圧を図のように少しずらすと、大きな振幅に増幅されたコレクタ電流が得られる

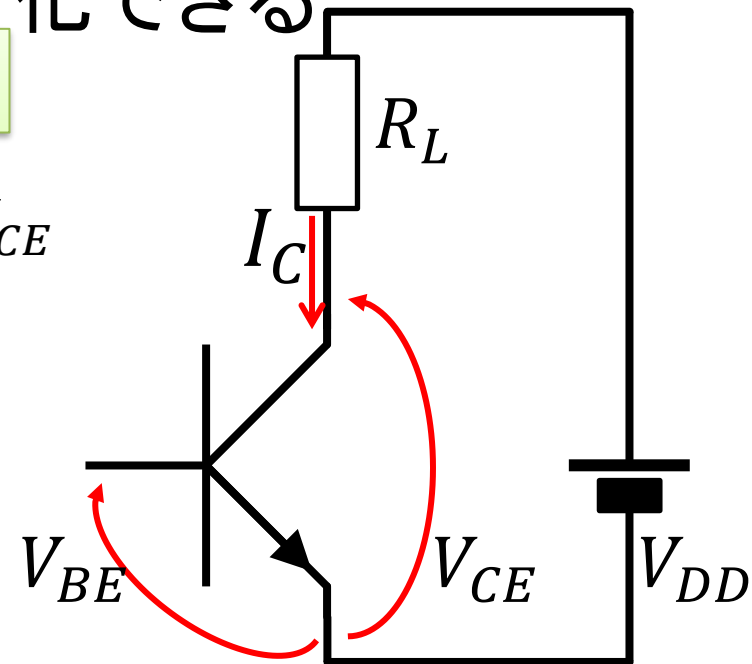


# コレクタ電流の変化とコレクタ電圧の変化

## (1) 適正な負荷のとき

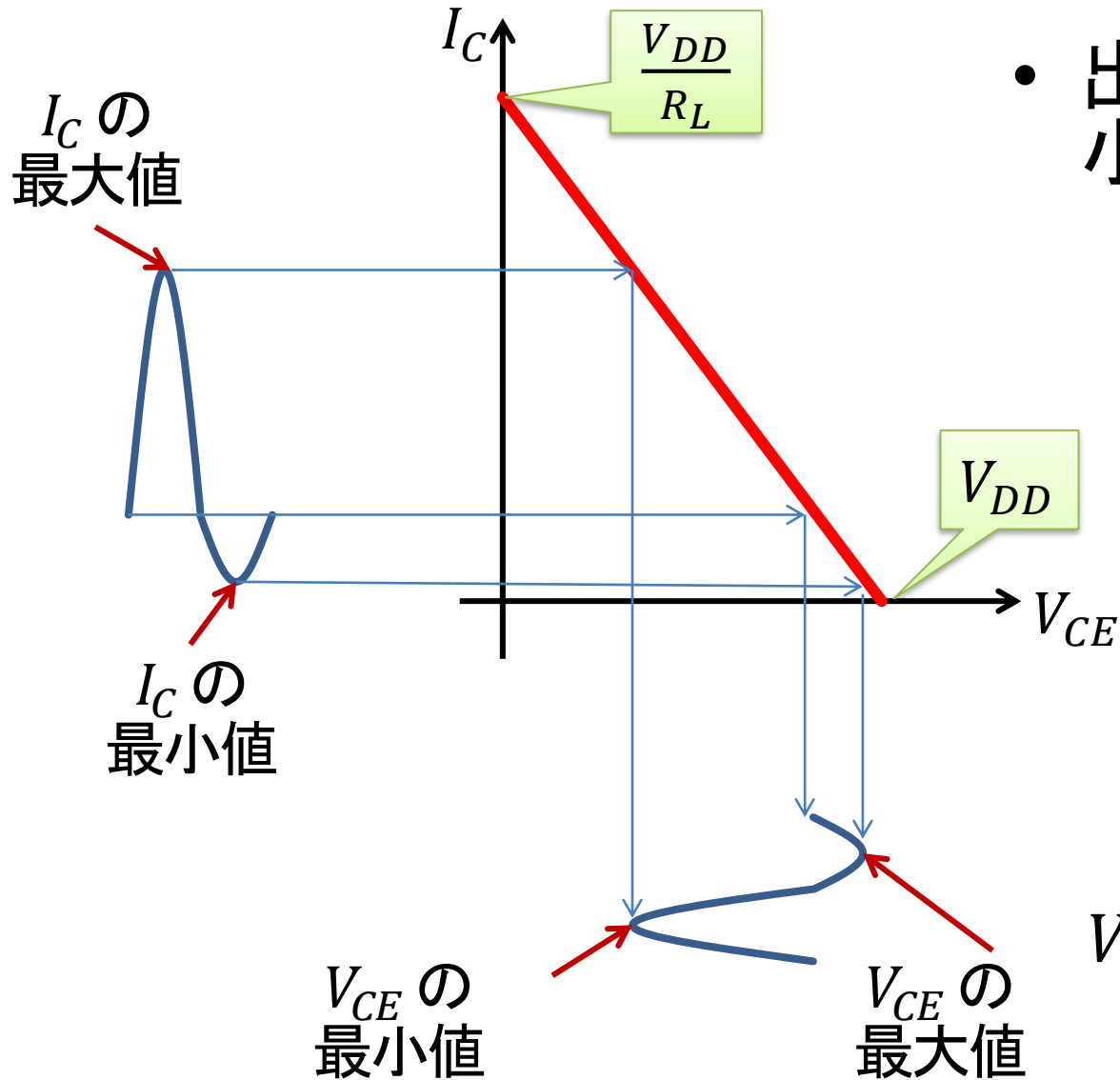


- 先週のダイオードのRD回路で登場した負荷線を使うと、 $I_C$  と  $V_{CE}$  の関係が視覚化できる

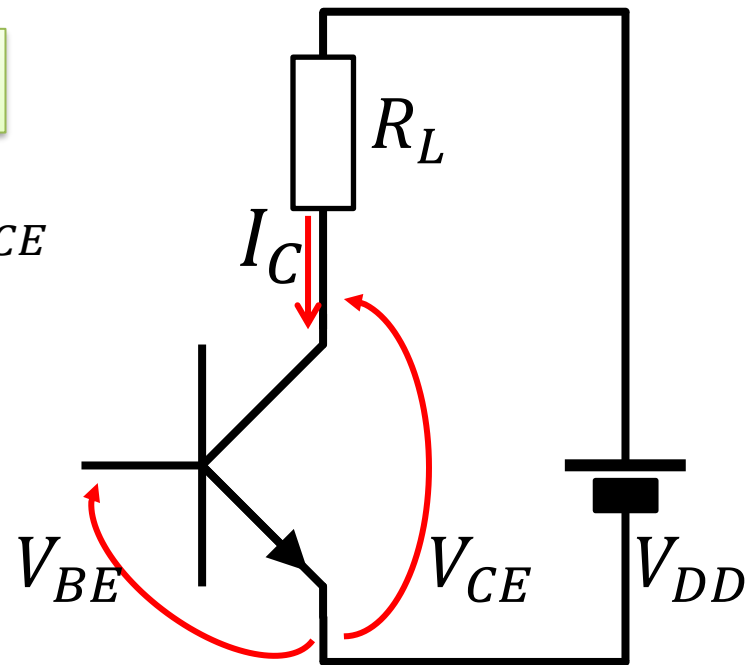


# コレクタ電流の変化とコレクタ電圧の変化

## (2) $R_L$ が小さすぎるとき



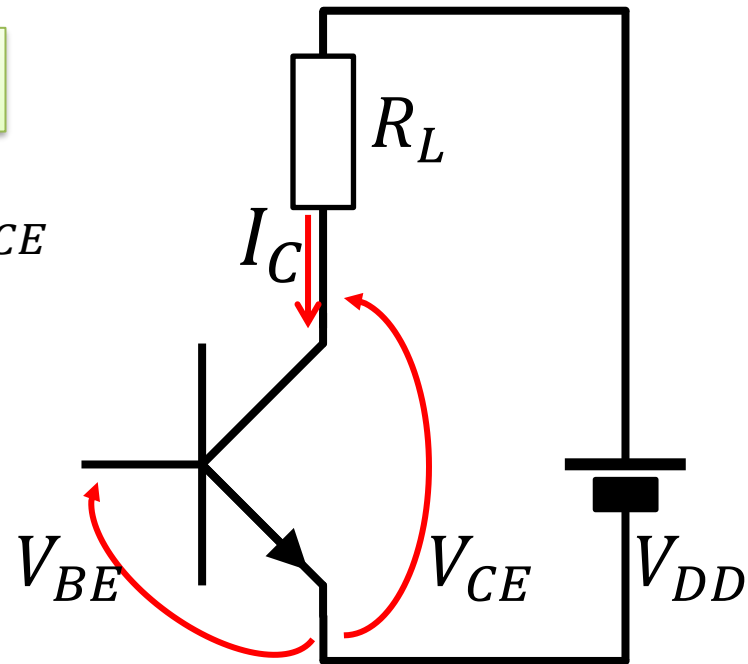
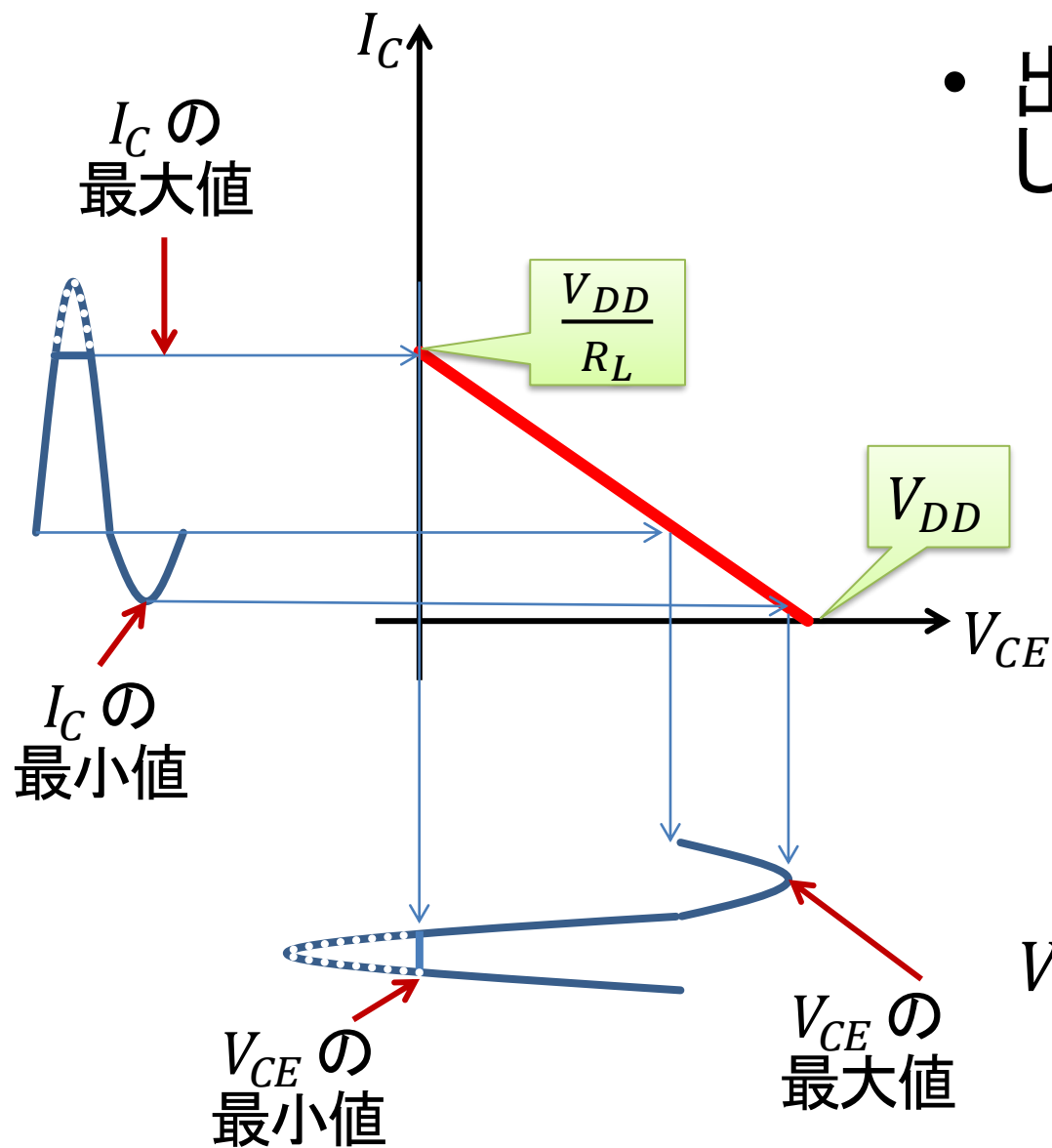
- 出力電圧の振幅が小さくなってしまう



# コレクタ電流の変化とコレクタ電圧の変化

## (3) $R_L$ が大きすぎるとき

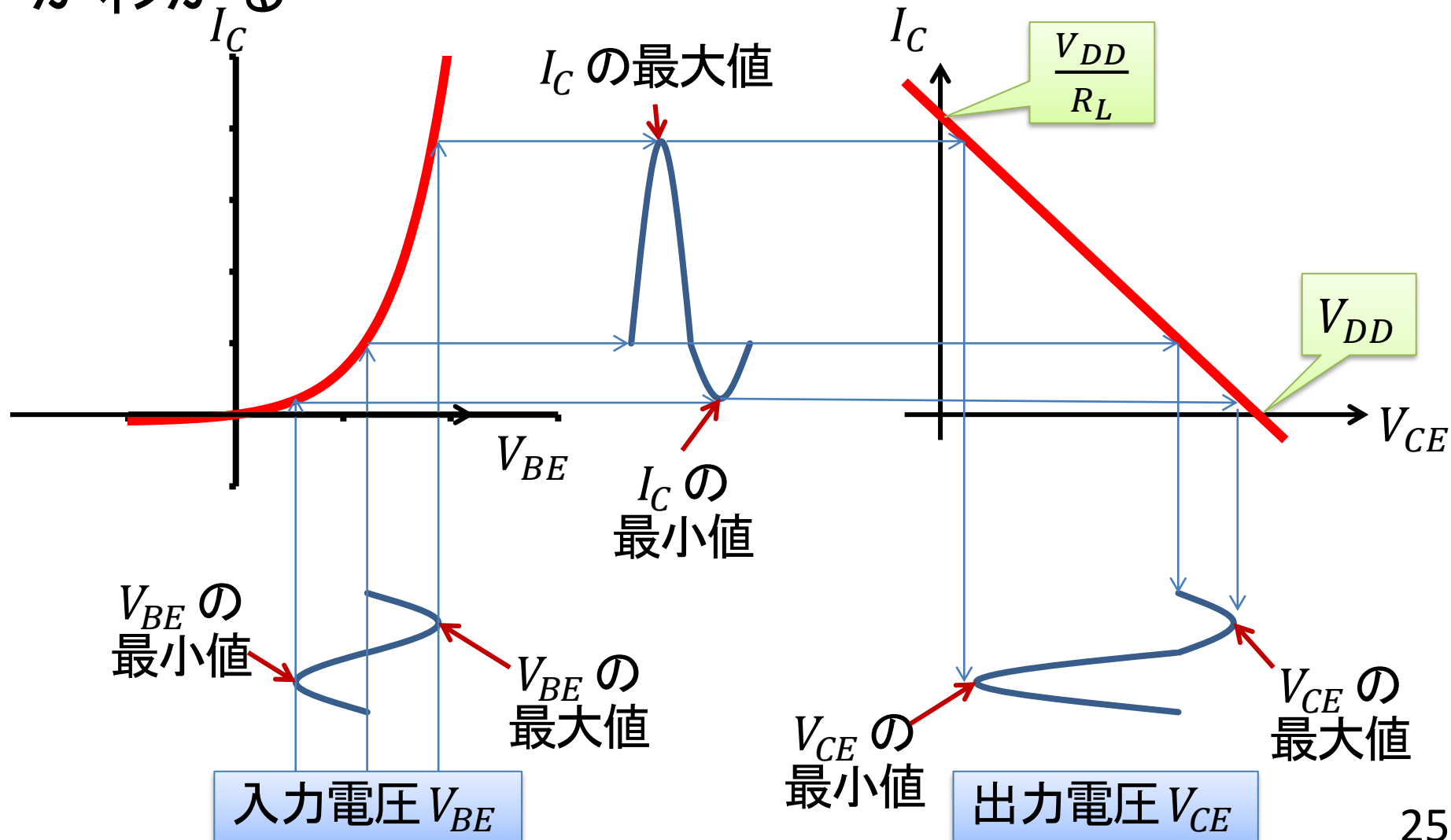
- 出力電圧が<sup>saturate</sup>飽和してしまう





# エミッタ接地増幅回路の特性のまとめ

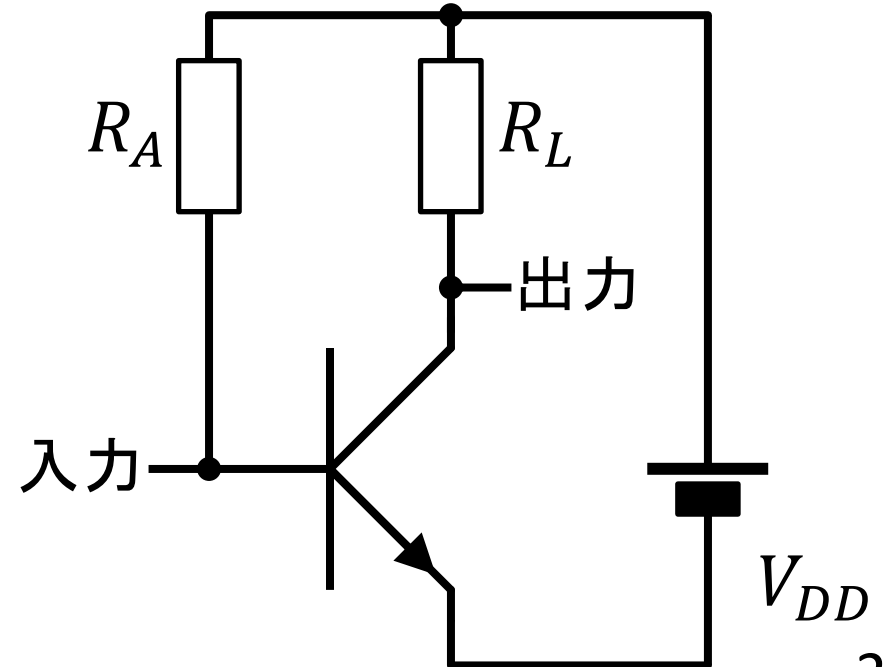
- 2つの静特性のグラフを使うと、 $V_{BE}$  と  $V_{CE}$  の関係がわかる



# エミッタ接地増幅回路

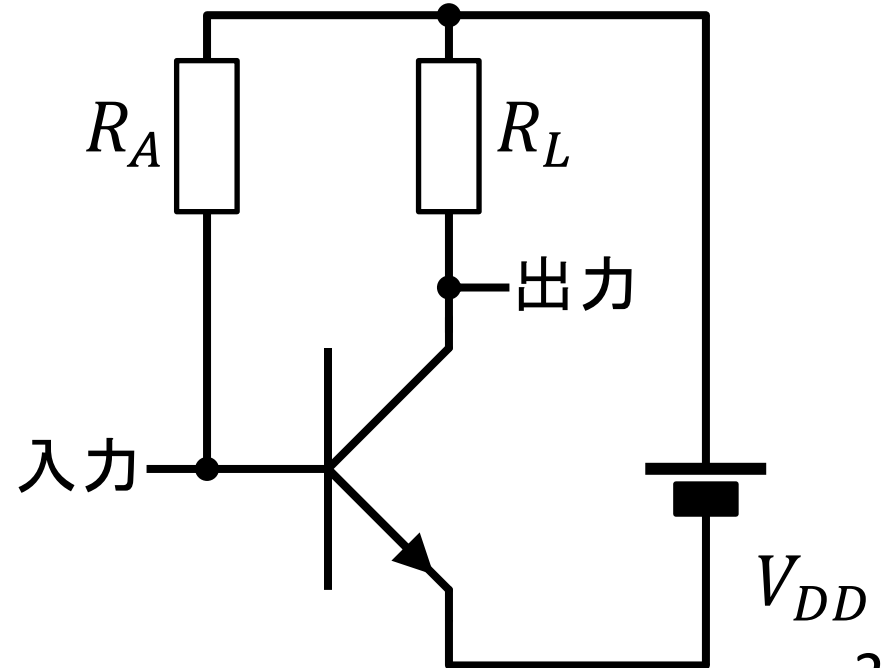
## (1) 固定バイアス回路(fixed bias)

- ベースを適切な電位に保つため、図のように  $R_A$  を加えた回路を **固定バイアス回路** という



# 固定バイアス回路の問題点

- 温度が上昇するとコレクタ電流が増加する
  - $R_L$  が大きい場合、出力が飽和してしまう
  - $R_L$  が小さい場合、コレクタ電流増加によりトランジスタが発熱し、更に温度上昇してしまう( **熱暴走** )  
thermal runaway



# エミッタ接地増幅回路

## (2) 電流帰還バイアス回路 (voltage divider bias)

- コレクタ電流が一定になるように工夫した回路

温度が上昇

$\Rightarrow I_C \approx I_E$  が増加

$\Rightarrow V_E = I_E R_E$  が増加

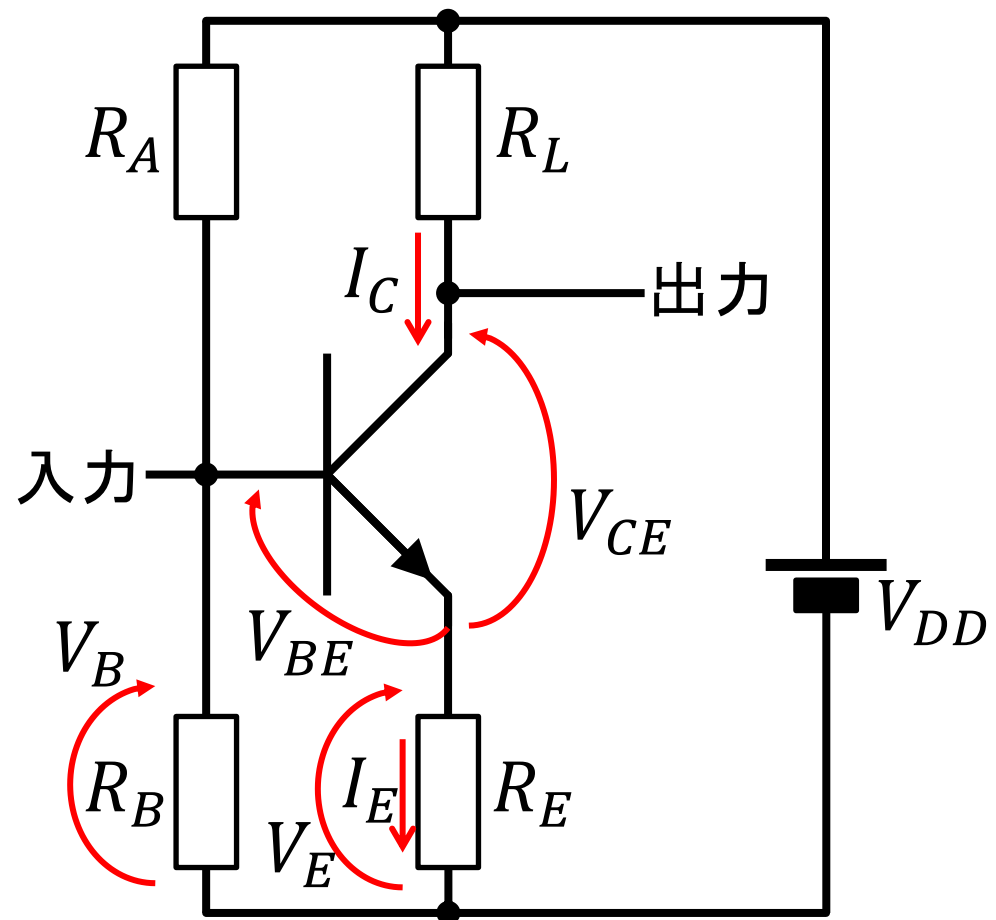
$\Rightarrow V_{BE} = V_B - V_E$  が減少

$\Rightarrow I_C$  が減少

※ ベース電流は微小

なので  $V_B \approx \frac{R_B}{R_A + R_B} V_{DD}$

は変化しないのがミソ



## 例題2

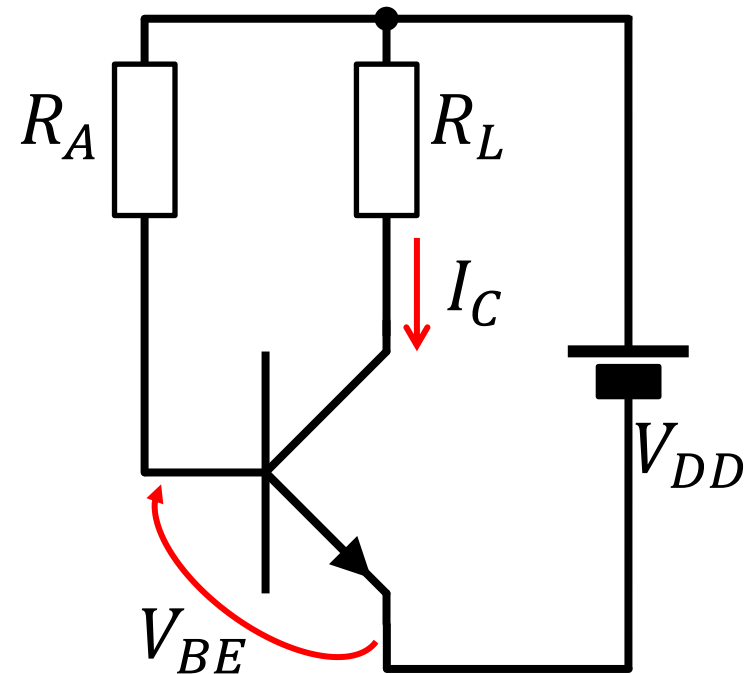
自分でやってみよう！

- 下の回路のコレクタ電流  $I_C$  を求めよ。但し、 $R_A$  は  $390[\text{k}\Omega]$ 、 $R_L$  は  $2.2[\text{k}\Omega]$ 、 $V_{DD}$  は  $5.0[\text{V}]$  とし、このトランジスタの  $h_{FE}$  は  $100$ 、 $V_{BE}$  は  $0.60[\text{V}]$  とせよ。

【解答】

- $R_A$  の電圧は  $4.4[\text{V}]$
- $R_A$  の電流は  $11[\mu\text{A}]$
- よって  $I_C = 1.1[\text{mA}]$

備考：念のため  $R_L$  の電圧を計算してみると  $2.5[\text{V}]$  であり、コレクタの電位（動作点）は  $V_{DD}$  のちょうど  $\frac{1}{2}$  になっていることがわかる



# 例題3

自分でやってみよう!

- 下の回路の  $I_C$  を求めよ。但し、 $R_A$  は  $18[\text{k}\Omega]$ 、 $R_B$  は  $5.1[\text{k}\Omega]$ 、 $R_E$  は  $430[\Omega]$ 、 $R_L$  は  $2.2[\text{k}\Omega]$ 、 $V_{DD}$  は  $5.0[\text{V}]$  とし、このトランジスタの  $h_{FE}$  は  $100$ 、 $V_{BE}$  は  $0.60[\text{V}]$  とせよ。

【題意に沿った解答】

- オームの法則より

$$V_E = I_E R_E$$

$$V_B = I_{RB} R_B$$

$$V_{DD} - V_B = I_{RA} R_A$$

- KVLより

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

- KCLより

$$I_{RA} = I_{RB} + I_B$$

- トランジスタの性質より

$$I_E = I_C + I_B = (h_{FE} + 1) I_B$$

①

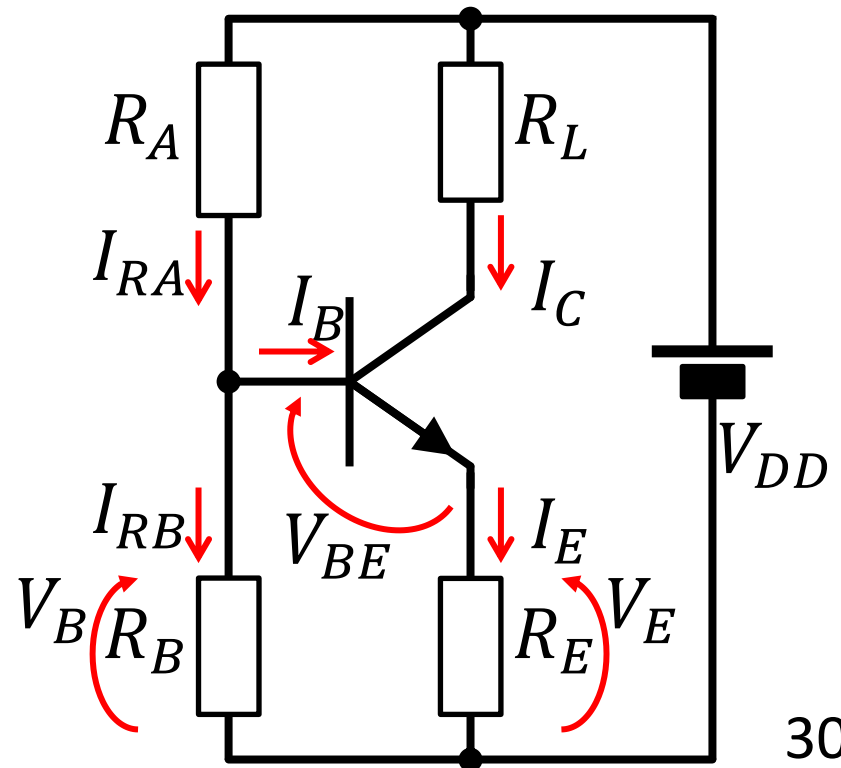
②

③

④

⑤

⑥



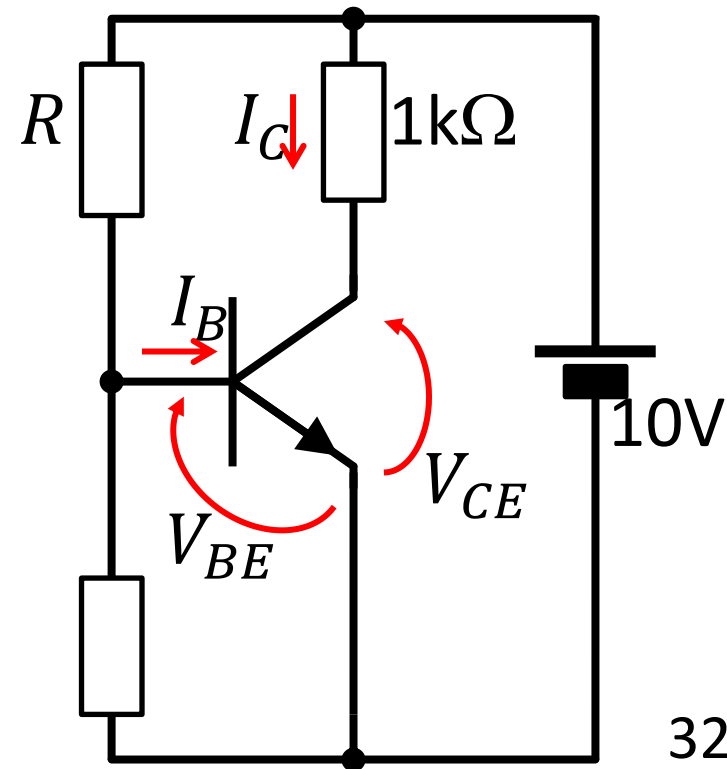
# 例題3の計算手順例

- 以下の3式を他の3式に代入する
  - ④  $V_B = V_E + 0.6$
  - ⑤  $I_{RA} = I_{RB} + I_B$
  - ⑥  $I_E = 101I_B$
- 得られた以下の3式から更に $V_E$ を消去する
  - ①'  $V_E = 43.43I_B$
  - ②'  $V_E + 0.6 = 5.1I_{RB}$
  - ③'  $5.0 - (V_E + 0.6) = 18(I_{RB} + I_B)$
- 頑張って $I_{RB}$ も消去すると、 $I_B = 0.011[\text{mA}]$ を得るので、 $I_C = h_{FE}I_B = 1.1[\text{mA}]$ を得る
- これでは計算量が多すぎるので、次頁の問題を考えてみよう

## 例題4

自分でやってみよう！

- 図の回路において、直流負荷線( $I_C$ と $V_{CE}$ の関係を表す線分)の中央に動作点を設定し、また、 $R$ に流れる電流を $I_B$ の20倍とする。動作点におけるコレクタ電流 $I_C$ と $R$ を求めよ。ただし、直流電流増幅率 $h_{FE} = 100$ 、 $V_{BE} = 0.6V$ とする。
- ヒント:「直流負荷線( $I_C$ と $V_{CE}$ の関係を表す線分)の中央に動作点を設定し」とは、「 $V_{CE}$ が電源電圧10Vの半分(5V)になるよう設定し」という意味である。



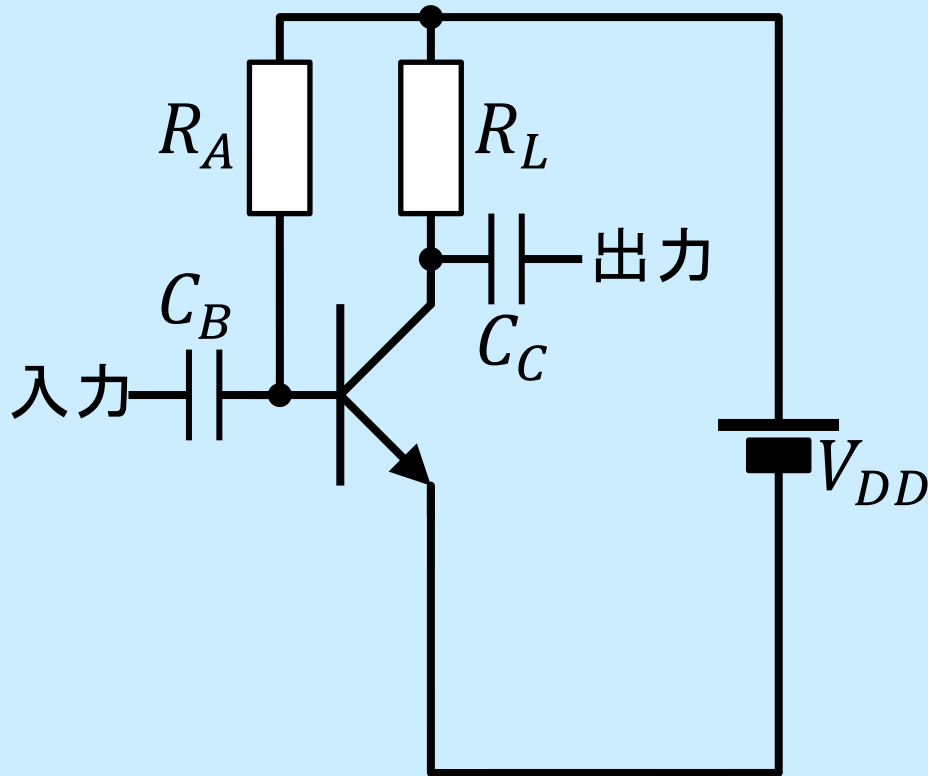


# 例題4の解説

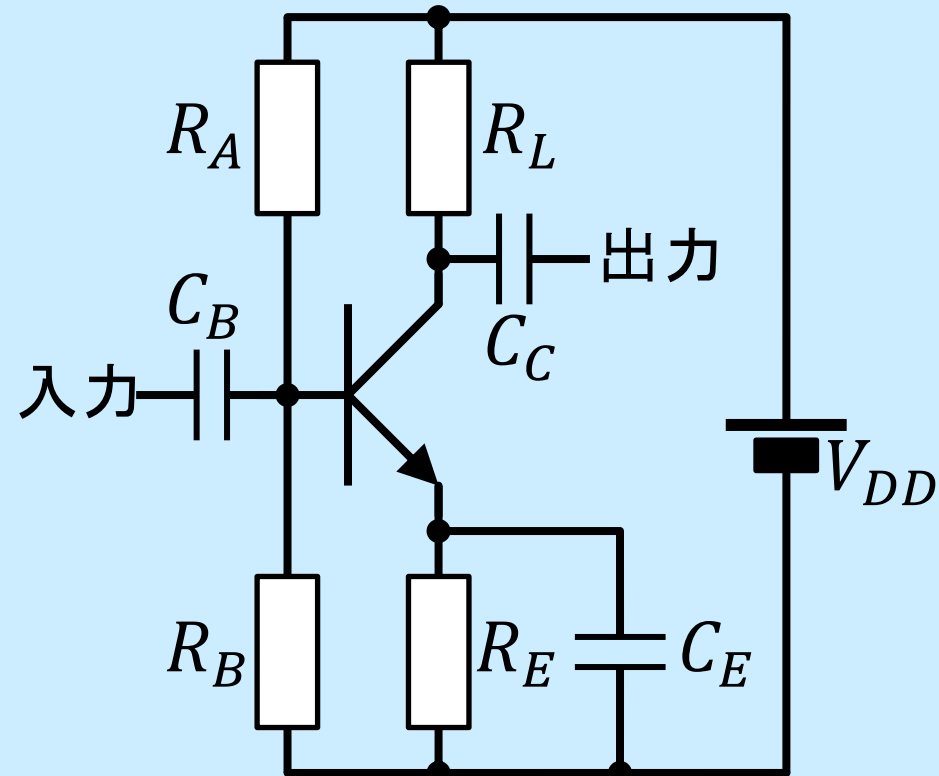
- $V_{CE} = 5[V]$  なら、コレクタ抵抗 ( $1[k\Omega]$ ) の両端の電圧も  $10 - 5 = 5[V]$  の筈なので、 $I_C = 5[mA]$
- $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 0.05[mA]$ 、題意より  $R$  を流れる電流はその20倍の  $1[mA]$  であり、 $R$  の両端の電圧は  $10 - V_{BE} = 9.4[V]$  なので、 $R = 9.4[k\Omega]$
- 電流帰還バイアス回路の  $R_E$  を取り除けば、このような楽勝問題が容易に作成できる
- **しかし、この回路は電流帰還バイアス回路と違い、熱暴走を防ぐ効果は全く無い**
  - 「典型的な設計ミス」として記憶すべき回路である！
- 但し、温度の影響を受けやすい性質を逆に利用し、「温度センサー」として活用する余地はあるかも...

# 〔参考〕実際の増幅回路

- 下図のようにコンデンサを入れるのが普通です
- 興味のある諸君は、コンデンサを学んでから教科書8章を精読してみてください



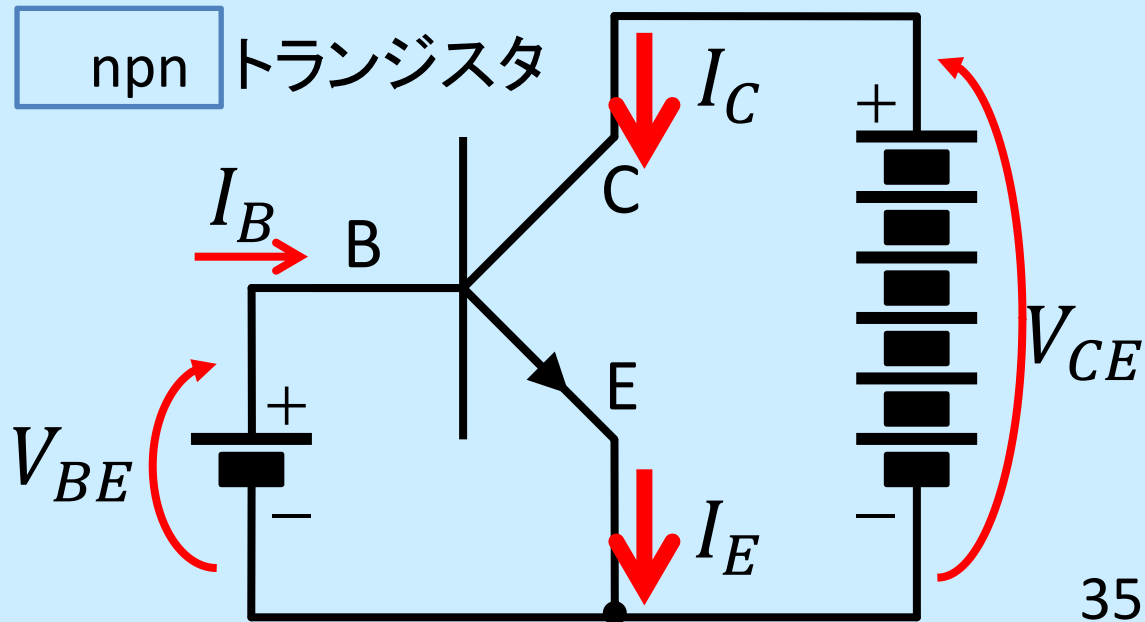
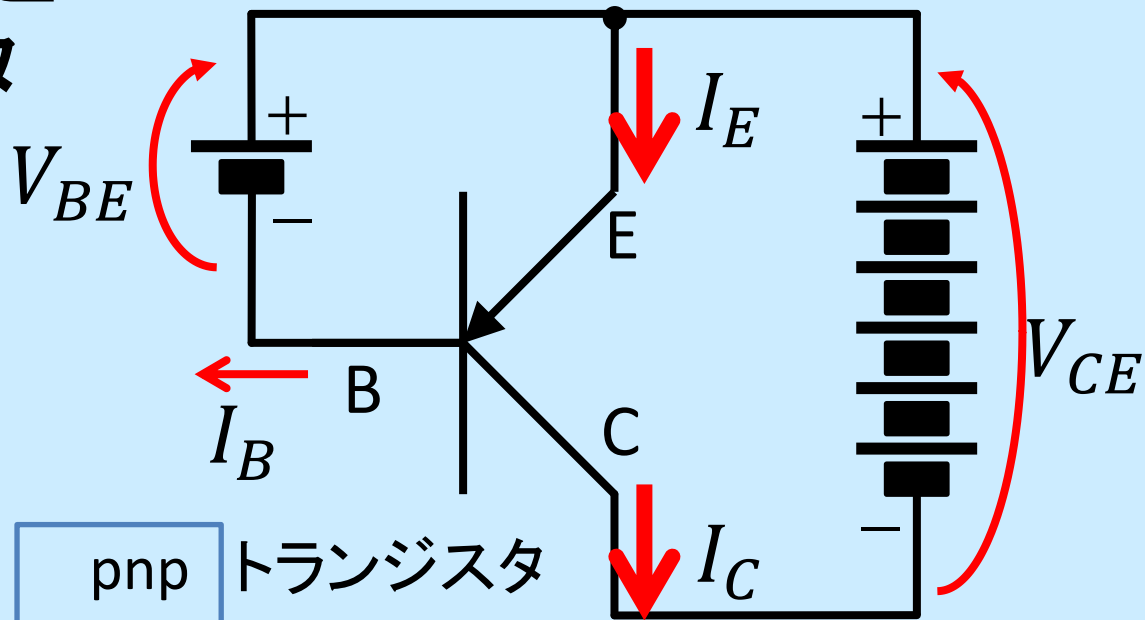
実際の固定バイアス回路



実際の電流帰還バイアス回路 34

# npnトランジスタと pnpトランジスタ

- 時間の都合で  
pnpトランジスタ  
の説明はほとん  
どしなかった
- npnトランジスタ  
と比べると、電圧  
や電流の向きが  
正反対であるこ  
とを除いて同じ



# 今週のまとめ

- バイポーラトランジスタの原理、特性を学んだ
  - エミッタ電流はベース電圧の指数  $I_E = I_{E0}(e^{\frac{q}{kT}V_{BE}} - 1)$
  - ベース接地電流増幅率  $I_C = \alpha_0 I_E$  ( $\alpha_0 \approx 0.9 \sim 0.99$ )
  - エミッタ接地電流増幅率  $I_C = \beta_0 I_B$  ( $\beta_0 \approx 10 \sim 400$ )
  - ダイオードと同様の性質  $V_{BE} \approx 0.6 \sim 0.7[\text{V}]$
- ラジオなどのアナログ信号増幅で使われるエミッタ接地増幅回路について学んだ
  - 静特性のグラフを用いて入力振幅から出力振幅を求める方法
  - ベースバイアスの必要性
  - 負荷抵抗の適切な値
  - 最も単純な固定バイアス回路(熱暴走の危険あり)
  - 温度変化に頑強な電流帰還バイアス回路

# バイポーラトランジスタの位置づけ

- バイポーラトランジスタは真空管を駆逐し、1960～1970年代によく使われた
- しかしその後は電界効果トランジスタ(FET)に主役の座を譲ることになる
  - これについては次週に扱う
- 最近、バイポーラトランジスタはあまり使われていないので、授業で扱うかどうか迷った
- とは言っても、未だにバイポーラトランジスタは理系エンジニアの必修事項だと考えられているらしいので、勉強しておくのも無駄ではないと思う
  - 例題1と例題4は国家公務員試験の過去問である(平成26年度工学No.103と平成22年度理工I No.103)

# 電気電子回路(第5回)講義は これで終わりです

質問: [support\\_eecra@sl.is.ritsumei.ac.jp](mailto:support_eecra@sl.is.ritsumei.ac.jp)

直接返信する場合と、まとめてmanaba+に掲示する場合があります。ご了承ください。