

# Fats Sound Laboratory



## Fuzz faceの回路動作解説講座

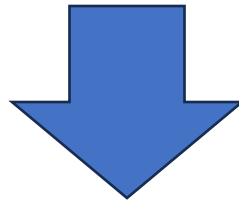
～負帰還とは  
(Current Shunt Feedback)

# Fats Sound Laboratory

様 Confidential

|   | テーマ                              | 内容                                                         | 進捗予定   |
|---|----------------------------------|------------------------------------------------------------|--------|
| 1 | Fuzz Faceの回路構成                   | 負帰還アンプ（Current Shunt Feedback）の回路形式と                       | ～8ページ  |
| 2 | エミッタ接地アンプと<br>バイポーラトランジスタ        | 最も基本的な増幅回路：エミッタ接地アンプの回路形式と、<br>それに必要なバイポーラトランジスタの概要を学ぶ     | ～18ページ |
| 3 | エミッタ接地アンプ                        | 最も基本的な増幅回路：エミッタ接地アンプを学ぶ                                    | ～29ページ |
| 4 | エミッタ接地アンプDC直結と<br>そのデメリット ～負帰還   | エミッタ接地アンプDC直結の問題点、それを解決する負帰還の効能                            | ～32ページ |
| 5 | 負帰還の基礎                           | 負帰還とは何か（4種）、入出力インピーダンスはどう決まるのか？                            | ～38ページ |
| 6 | Fuzz Faceゲインの決まり方、<br>入出力インピーダンス | Fuzz Faceのゲインの決まり方、FuzzFaceの入出力インピーダンスは<br>負帰還によってどう決まるのか？ | ～48ページ |
| 7 | 実際の動作、各ノードの動き                    | ギター信号に対する回路の各ノードの実際の動きを考察                                  | ～49ページ |

**Fuzz face**回路の動作を学ぶ！



名器、素子数も少ない（11個）！  
しかし。。動作は難しい！



Fuzz face

どんな回路がどう動いて歪みサウンドを作るのか？を理解する！

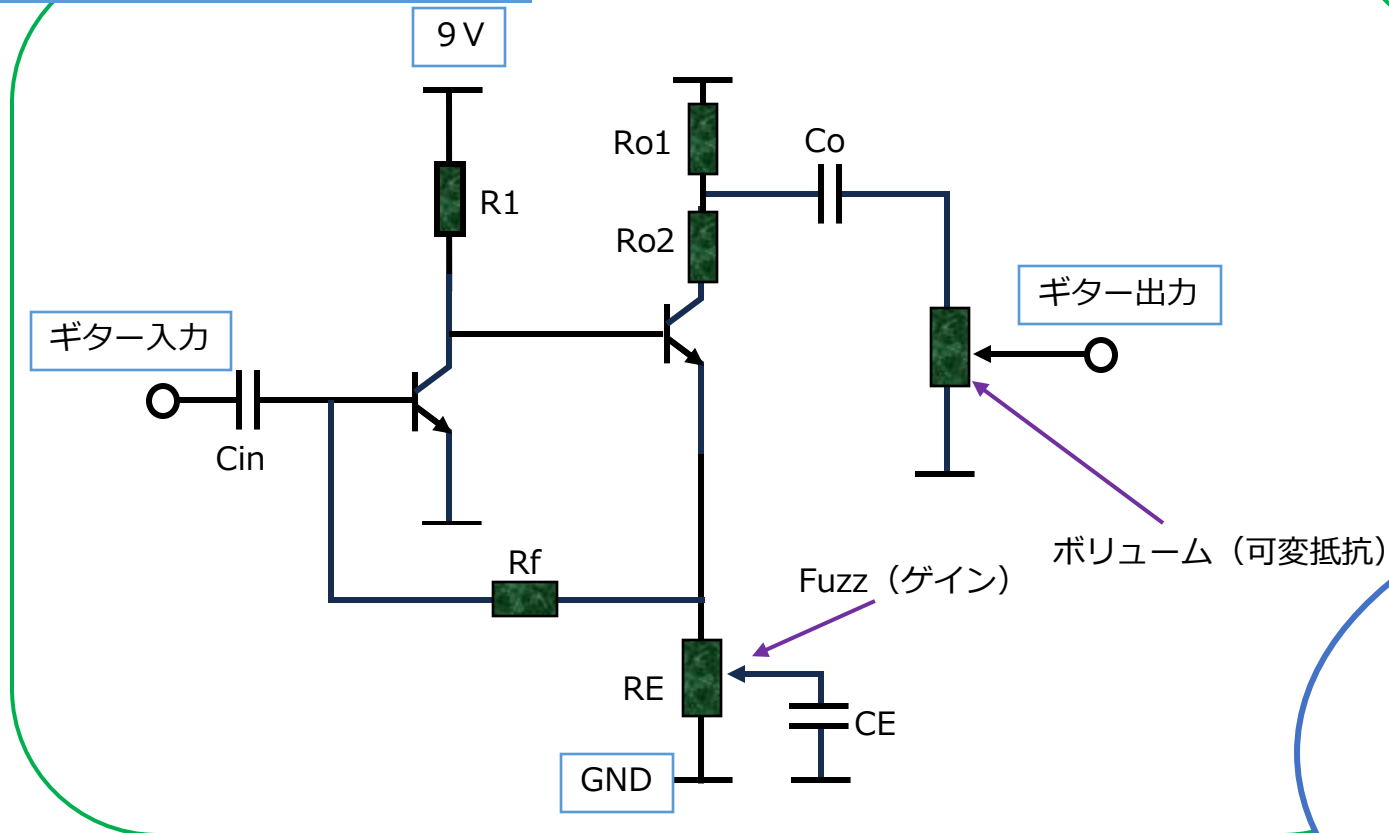
回路はシンプルだけど。。。教科書に載っている、  
**負帰還回路**：Current Shunt Feedback（電流-電流帰還、並列直列帰還）  
そのまま！**これが難しい。。。！**

実際のFuzz faceはPNPゲルマニウムトランジスタですが、  
今回は**NPN（シリコン）**で解説します

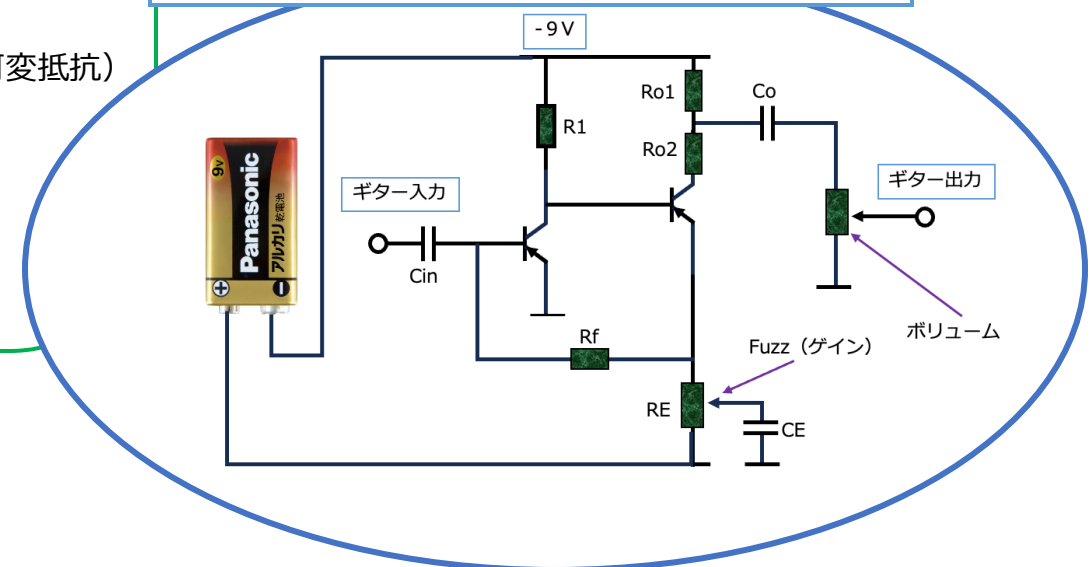
## 【 Fuzz faceの回路 : NPN版 】

# Fats Sound Laboratory

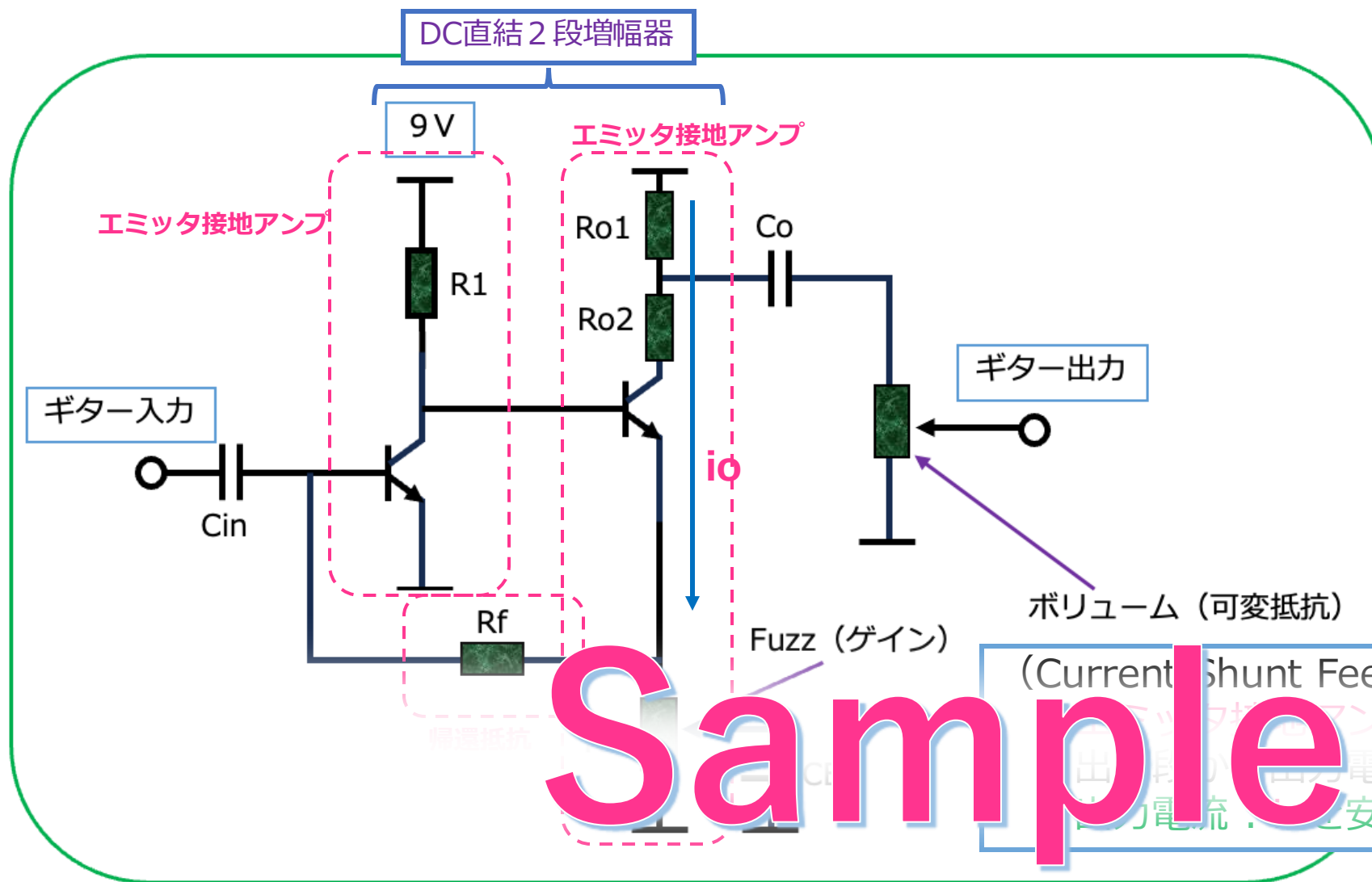
Fuzz face : NPN版 回路図



Fuzz faceオリジナル : PNP版 回路図



これで説明いたします！



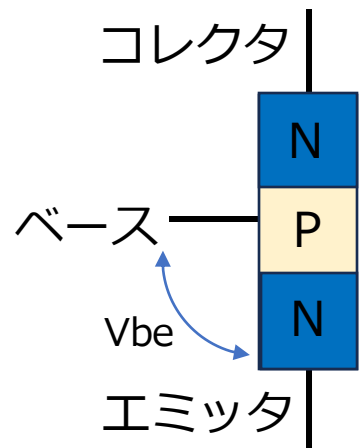
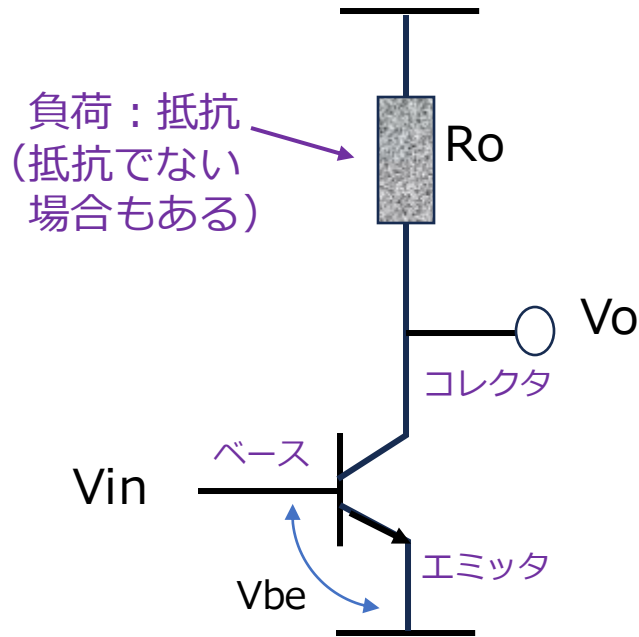
(Current Shunt Feedback)

エミッタ接地アンプのDC直結2段増幅器の出力電流を入力に戻し（負帰還）、出力電流を安定化する！

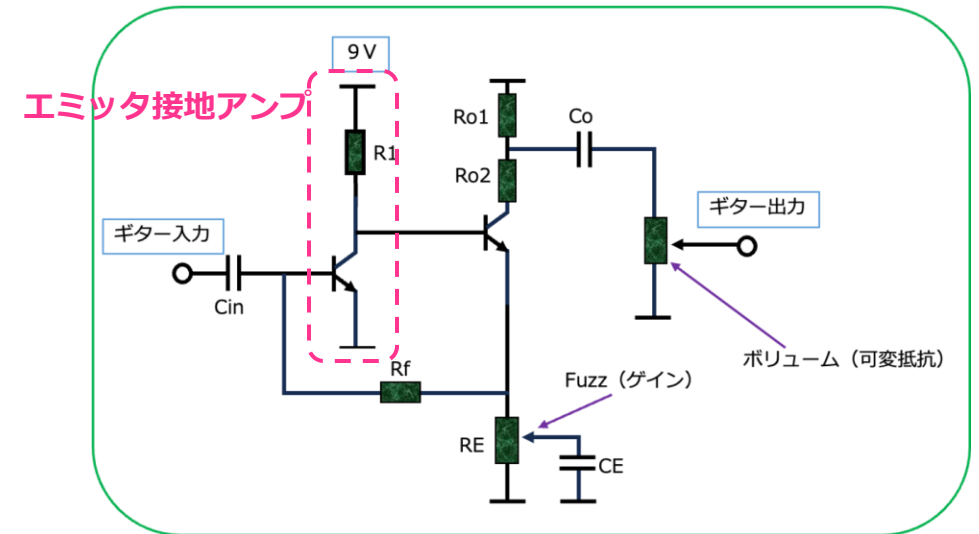
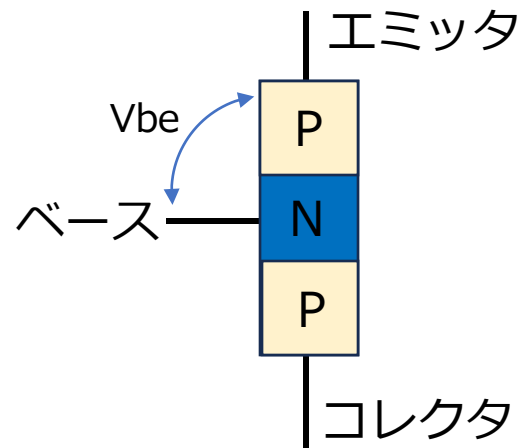
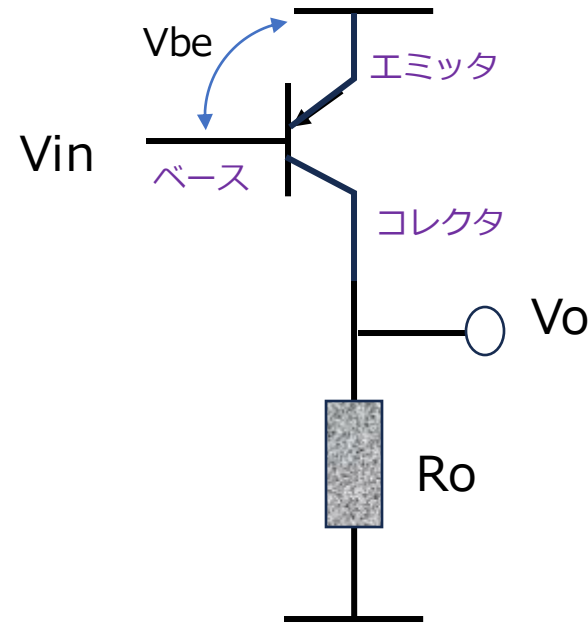
(キーワード) エミッタ接地アンプ、負帰還（電流-電流帰還、並列直列帰還、Current Shunt Feedback)

## 【エミッタ接地アンプ：最も基本的な増幅器】

(NPN Trを使ったエミッタ接地増幅回路)



(PNP Trを使ったエミッタ接地増幅回路)



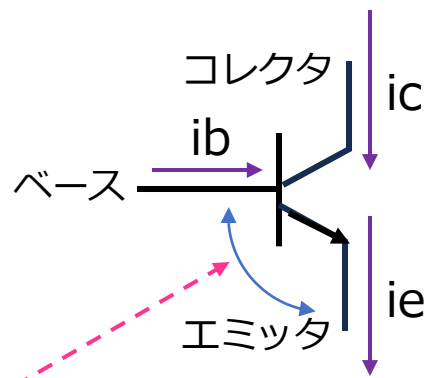
ベースエミッタ電圧： $V_{be}$

(半導体)

N型：キャリアは電子

P型：キャリアはホール

(正孔：電子の抜け殻)



(バイポーラトランジスタ)

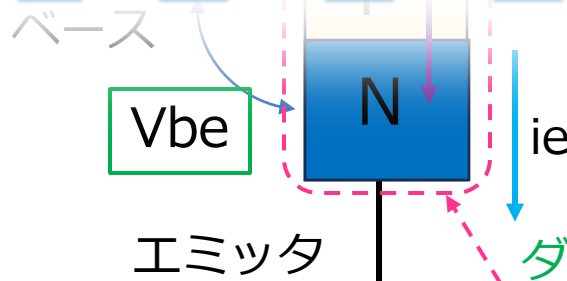
ベースに電流（ベース電流： $i_b$ ）を流すことによって  
コレクタ電流： $i_c$ をコントロールする**電流増幅素子**

**電圧増幅素子ではない！**

⇒しかし、**エミッタベース電圧： $V_{be}$** と**ベース電流、コレクタ電流**  
には**密接な関係**がある！

ベースエミッタ電圧： $V_{be}$

Sample  $i_c$   $i_b$

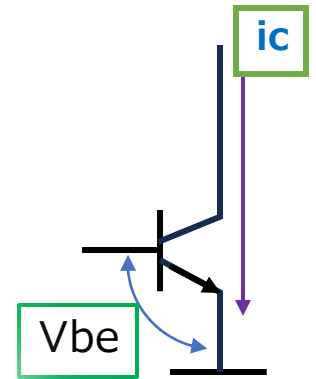
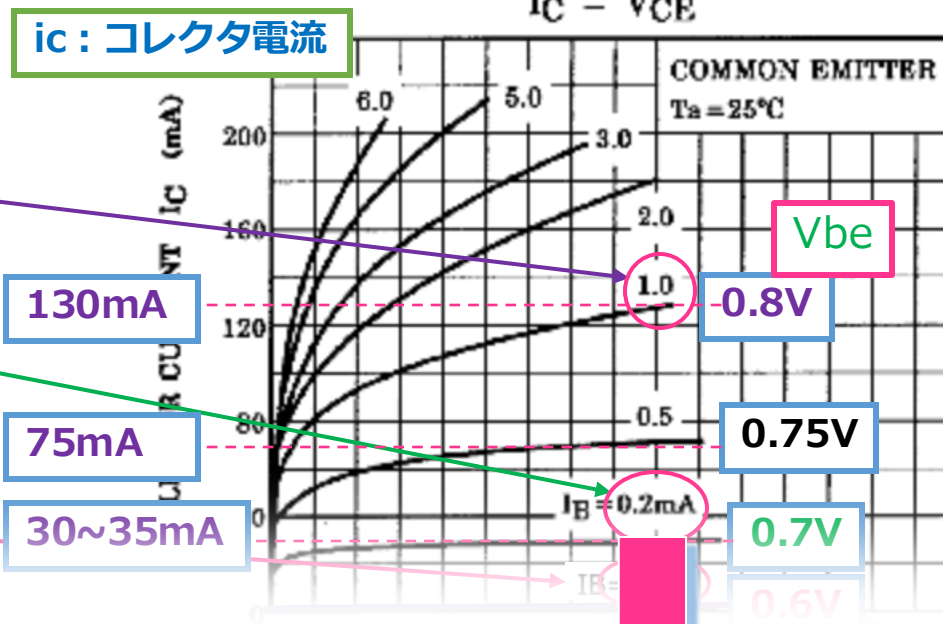
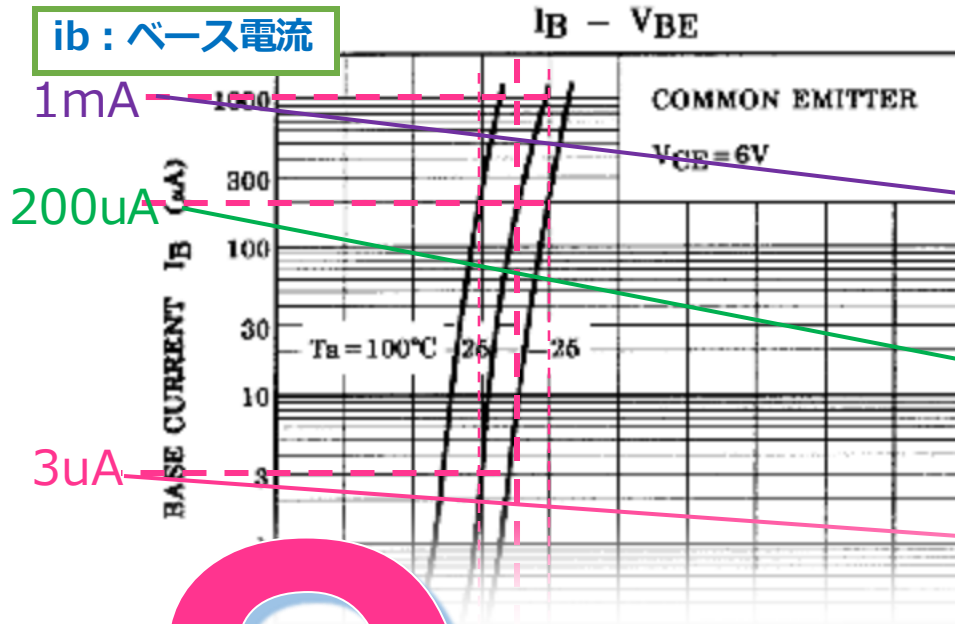


**ダイオード！**  
 **$V_{be} \sim 0.7V$ ！**

# 【エミッタ接地アンプ：バイポーラトランジスタの諸特性】

(Ex. バイポーラトランジスタ：2SC1815の代表特性)

様 Confidential



# Sample

Vbe = 0.7V

コレクタ電流 : ~0 ~ 130mAまでコントロール (増減) できる

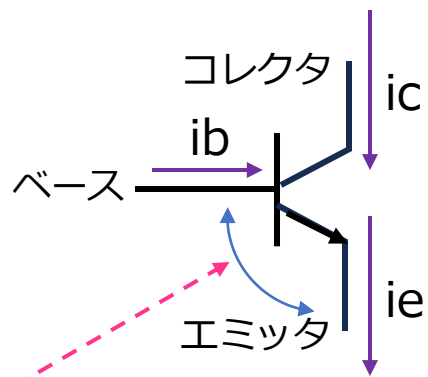
エミッタ電圧

$$V_{be} = V_t \cdot \ln \frac{I_c}{I_s}$$

Vt : 熱電圧

Is : 逆方向飽和電流





(バイポーラトランジスタ)

ベースエミッタ間に電圧： $V_{be}$ を印加して電流（ベース電流： $i_b$ ）を流すことによってコレクタ電流： $i_c$ をコントロールする**電流増幅素子**

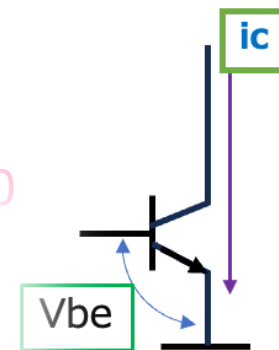
ベースエミッタ電圧： $V_{be}$

$$i_c = h_{fe} \times i_b$$

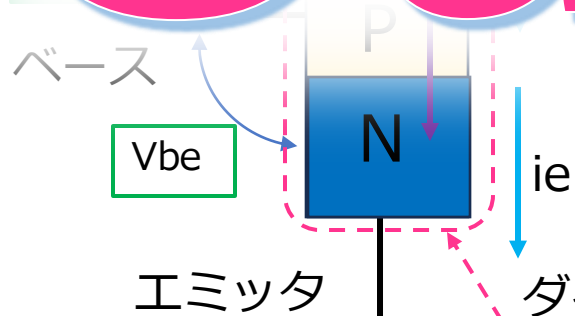
:  $h_{fe} \rightarrow$  電流増幅率

$h_{fe} = 100 \sim 150$

$$i_e = i_c + i_b$$



Sample

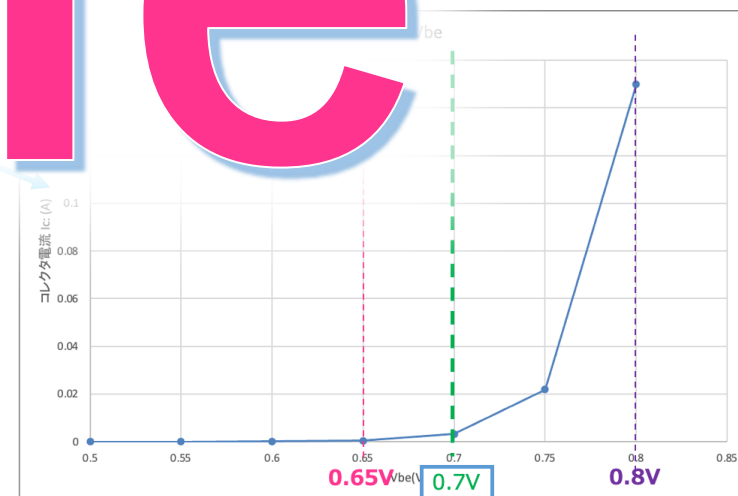


エミッタ

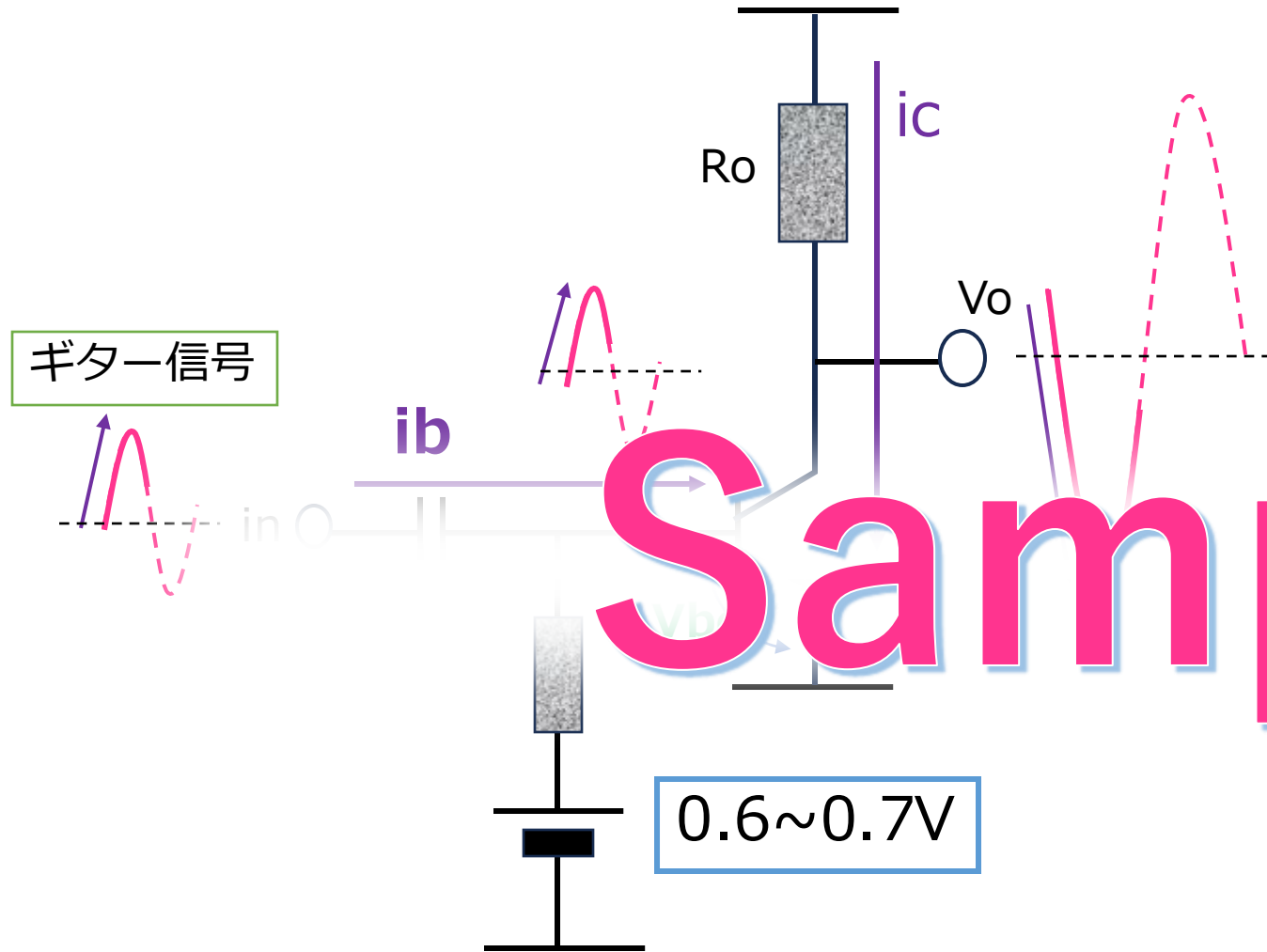
ダイオード！

$V_{be} \approx 0.7V$ ！

$V_t$  : 熱電圧  
 $I_s$  : 逆方向飽和電流



## 【エミッタ接地アンプ：実際の動作】



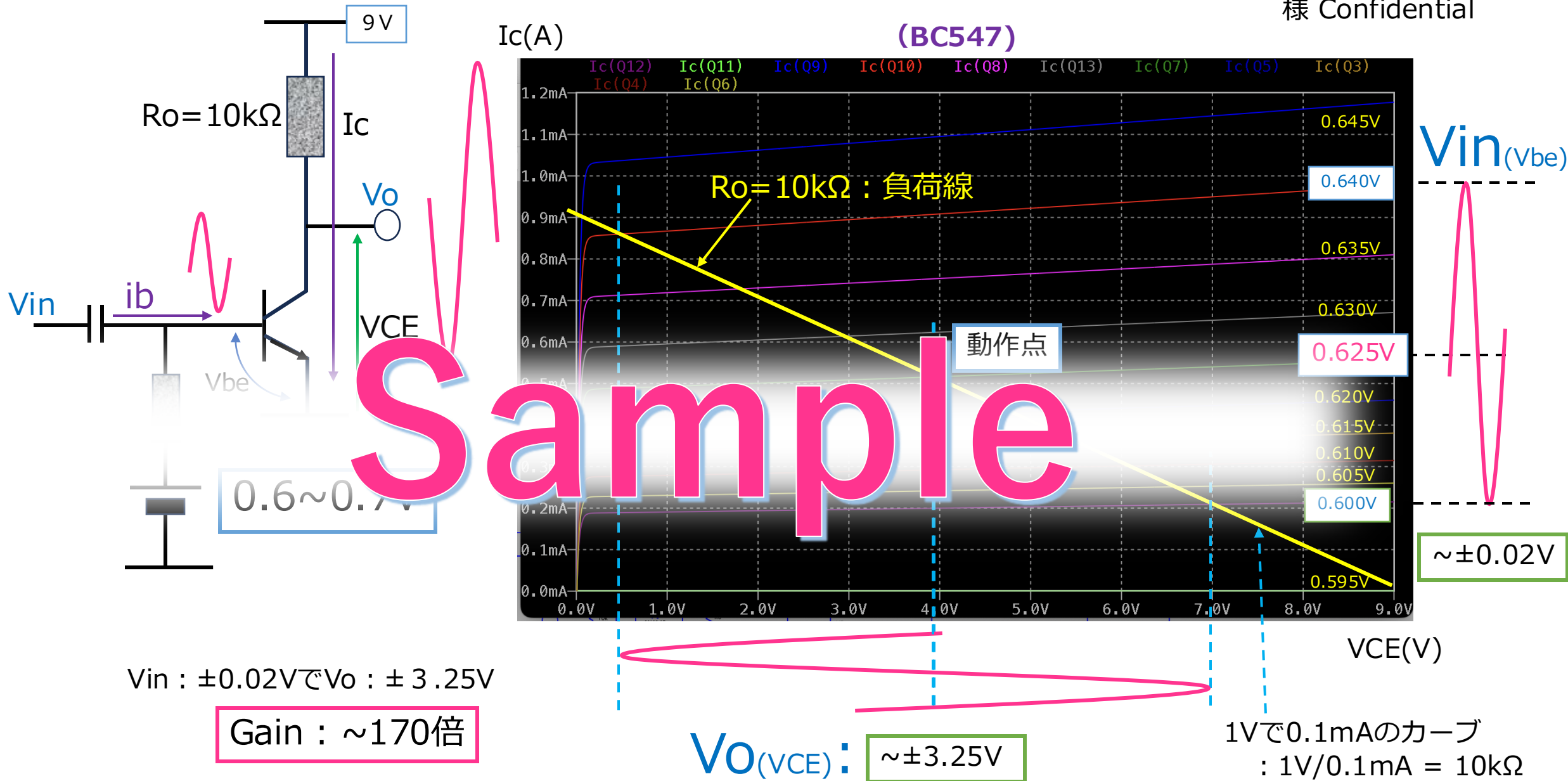
1. ギター信号が上昇する
2. NPN Trのベース電圧も上がろうとする、つまり $V_{be}$ が大きくなり、ベース電流  $i_b$ が増加する
3. ベース電流が増えると、  
 $= h_{fe} \times i_b$   
の関係によってコレクタ電流  $i_c$ が増える  
増えたコレクタ電流  $\times$  負荷抵抗  $R_o$ の  
分だけ負荷抵抗  $R_o$ にかかる電圧が  
増加する
5.  $V_o$ が下がる ( $R_o$ の両端の電圧が大きくなる)

$V_o$ は下側に増幅される

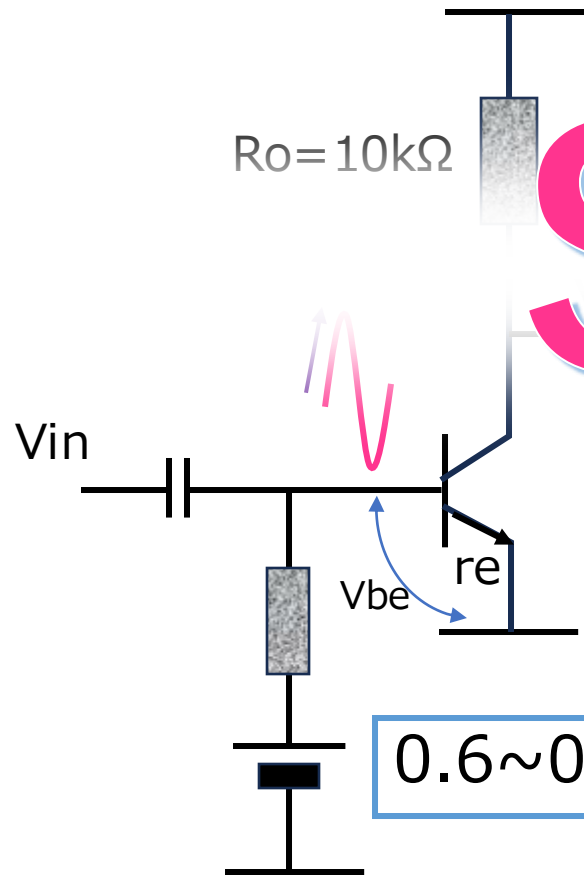
# 【エミッタ接地アンプ：ゲインの決まり方～負荷線】

## Fats Sound Laboratory

様 Confidential



【エミッタ接地アンプ：ゲインの計算による求め方】



Sample

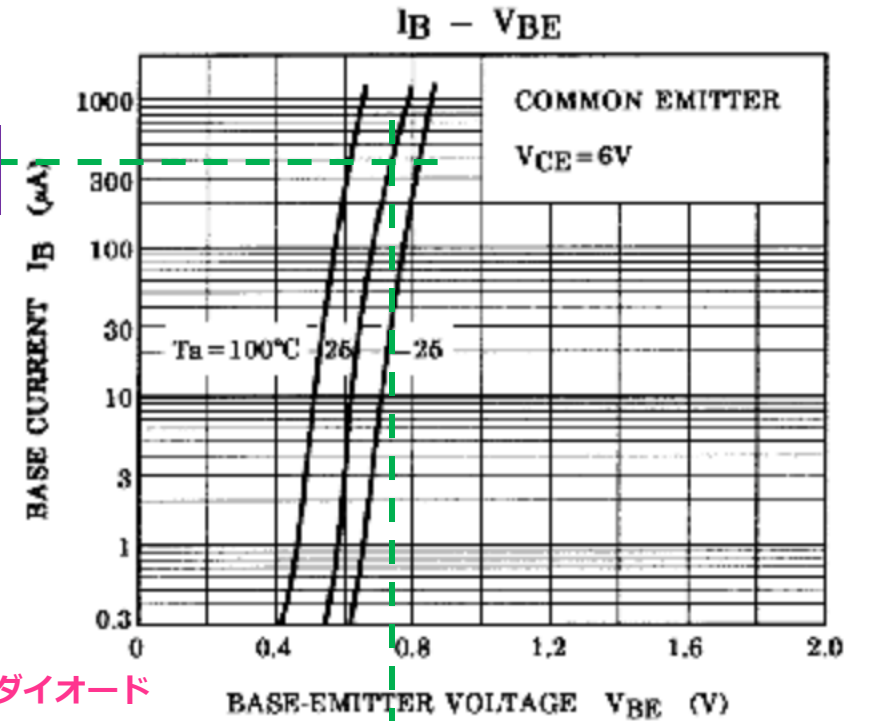
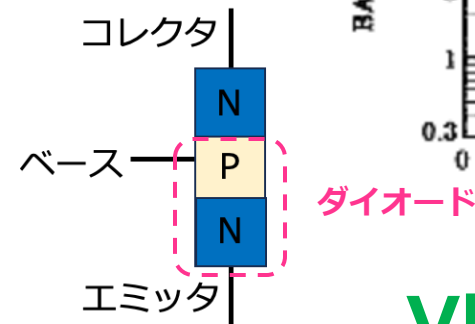
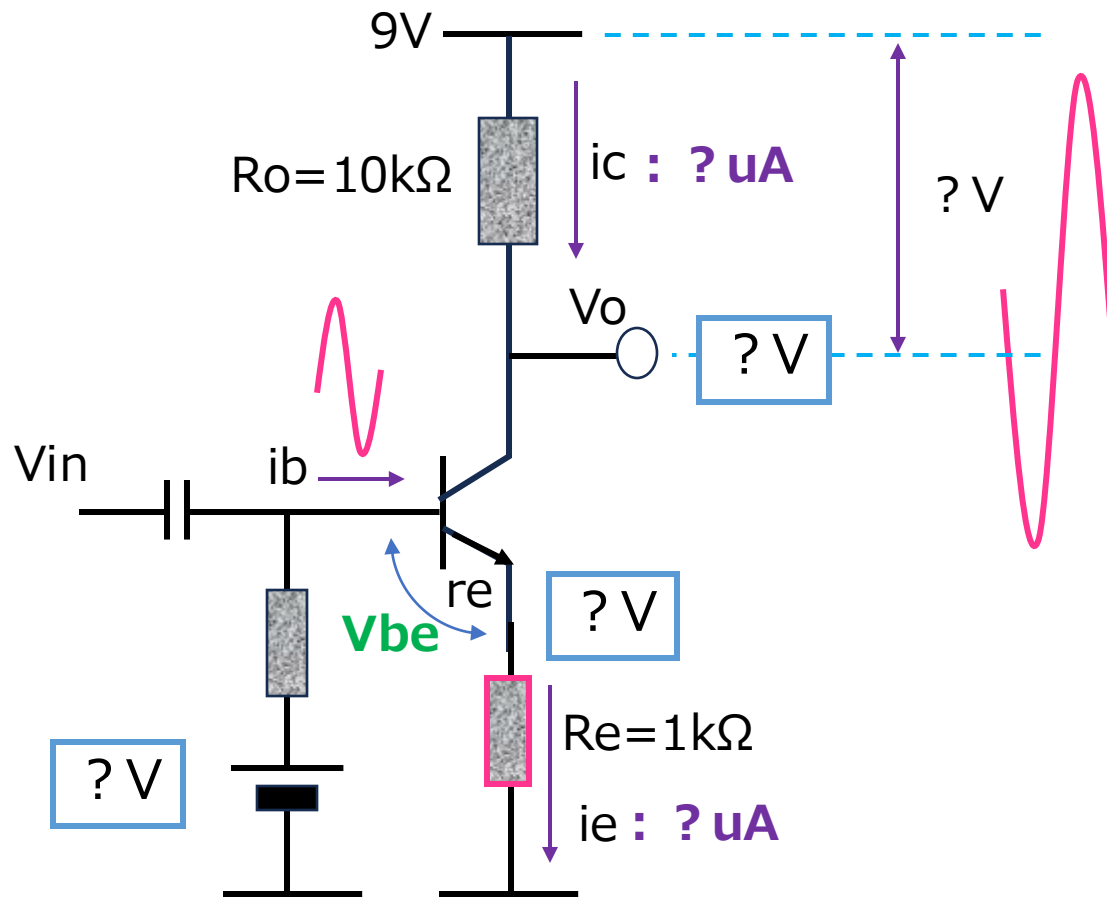
$$g_m = \frac{\partial I_c}{\partial V_{be}} = \frac{I_c}{0.026} = \frac{500\mu A}{0.026} = 19.23 \times 10^{-3}$$

※0.026V：熱電圧@27℃

$$g_m = \frac{1}{r_e}$$

$$\text{Gain : } A_v = -\frac{R_o}{r_e} = -192$$

## エミッタに抵抗：どう動くの？



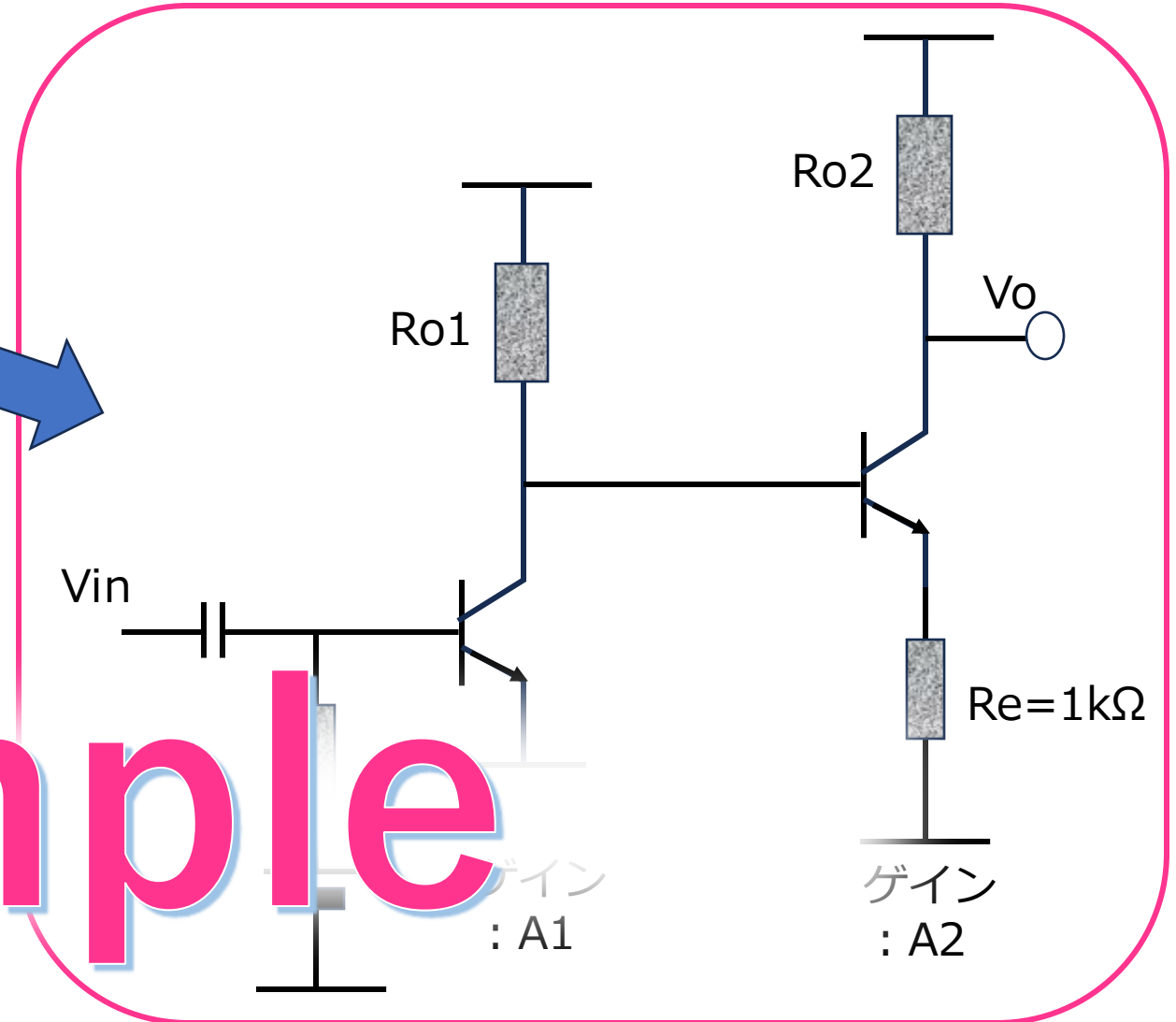
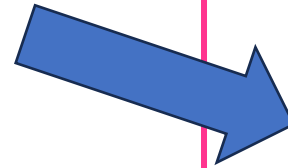
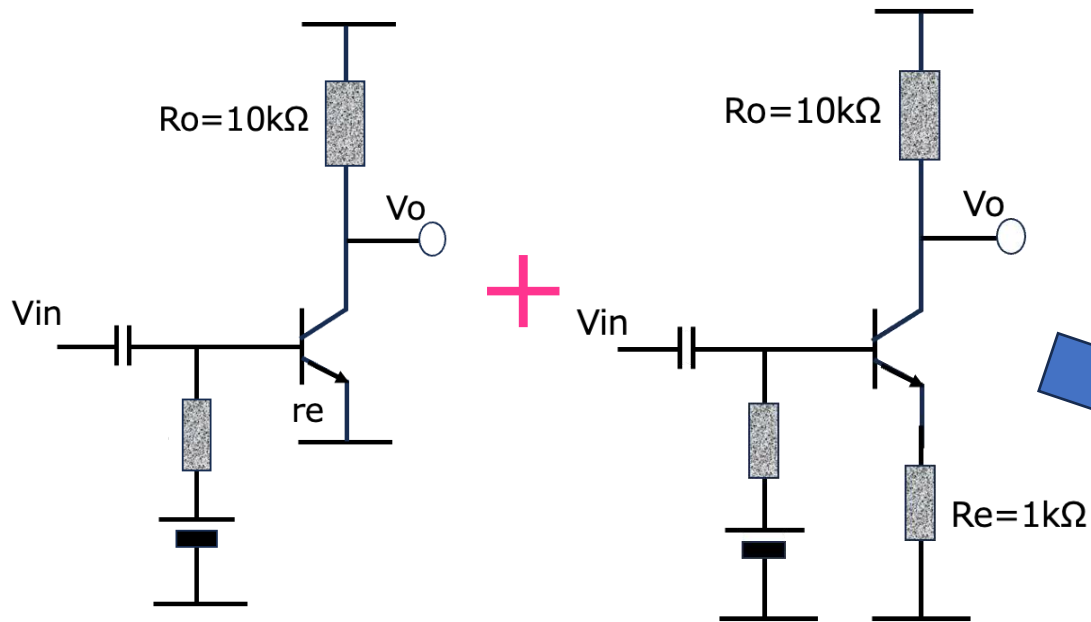
$V_{be} : 0.75\text{V}$

$V_{be} = 0.7 \sim 0.75\text{V}$  : ダイオードの順方向電圧

## 【エミッタ接地アンプ：DC直結 2 段アンプ】

# Fats Sound Laboratory

様 Confidential



ゲインはどれくらいある？

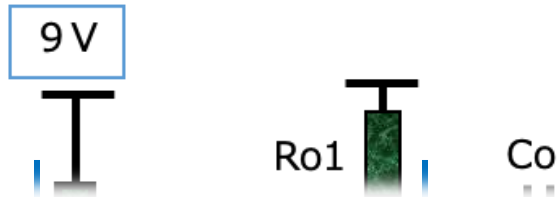
$$\text{Gain : } A_v = \frac{V_o}{V_{in}}$$

$$A1 = 190, A2 = 10$$

$$A_v = 1900 !$$

→ 0.1V 入力で190V !  
0.01V入力で19V !

# Sample



(R1が大きくなったら?)

R1大 → Vo1 下がる → Ve2 下がる

ib 減る  
がる  
る)

# Sample

がる  
(if) 増える

→ ic1 増える → Vo1下がる → Ve2 下がる  
→ Io 減る → Vo 上がる (元に戻る)

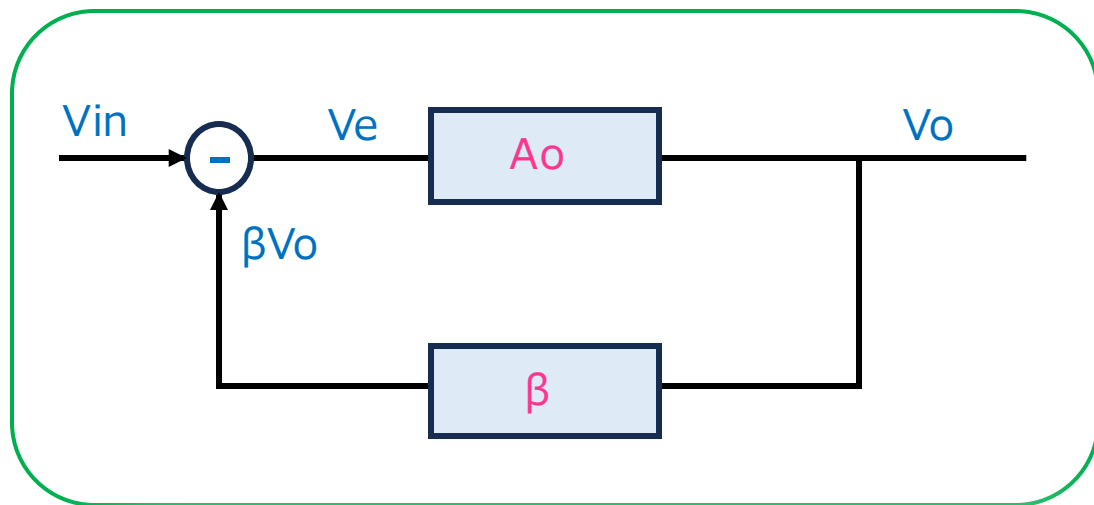


(Current Shunt Feedback)

出力電流  $i_o$  の変化 (電圧に変換) で帰還電流  $i_f$  を増減し  
初段Trのベース電流  $i_b$  を調整する。

その結果、出力電流： $i_o$  が調整され、安定化する！

“元に戻る” : 負帰還！



$A_o$  : アンプのオープンループゲイン

$\beta$  : 帰還率

$A_o \beta$  : ループゲイン

# Sample

$$A_c = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{A_o}{1 + A_o \beta}$$

$$A_c = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1/A_o + \beta} \cong \frac{1}{\beta}$$

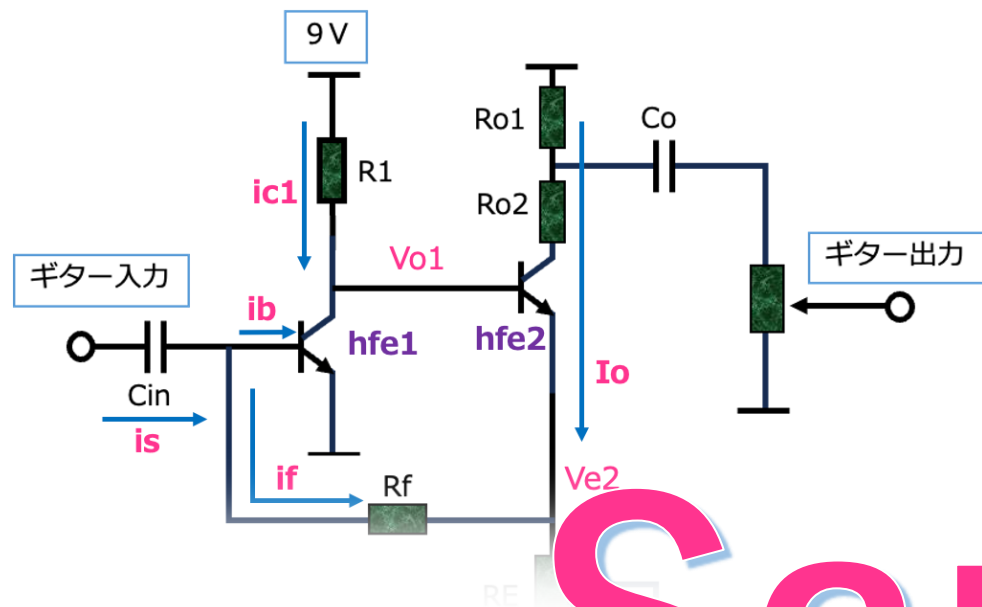
1/β : 負帰還の真骨頂 !



# 【 負帰還の4形式 】

| 形式                  | 帰還内容                | 概念回路 | 解析ツール/パラメータ                               |
|---------------------|---------------------|------|-------------------------------------------|
| 電圧－電圧帰還<br>(直列並列帰還) | 出力電圧を<br>電圧として入力に戻す |      | $I1 = G11V1 + G12I2$ $V2 = G21V1 + G22I2$ |
| 電流－電圧帰還<br>(直列直列帰還) | 出力電流を<br>電圧として入力に戻す |      | $V1 = Z11I1 + Z12I2$ $V2 = Z21I1 + Z22I2$ |
| 電圧－電流帰還<br>(並列並列帰還) | 出力電圧を<br>電流として入力に戻す |      | $I1 = Y11V1 + Y12V2$ $I2 = Y21V1 + Y22V2$ |
| 電流－電流帰還<br>(並列直列帰還) | 出力電流を<br>電流として入力に戻す |      | $V1 = H11I1 + H12V2$ $I2 = H21I1 + H22V2$ |

Fuzz Face



電流ゲイン (Closed Loop)

$$A_c = \frac{i_o}{i_s} = \frac{1}{\beta} = \frac{R_E + R_f}{R_E}$$

1/β : 負帰還の真骨頂 !

Sample

$$A_c = \frac{i_o}{i_s} = \frac{1}{1/A_o + \beta} \cong \frac{1}{\beta}$$

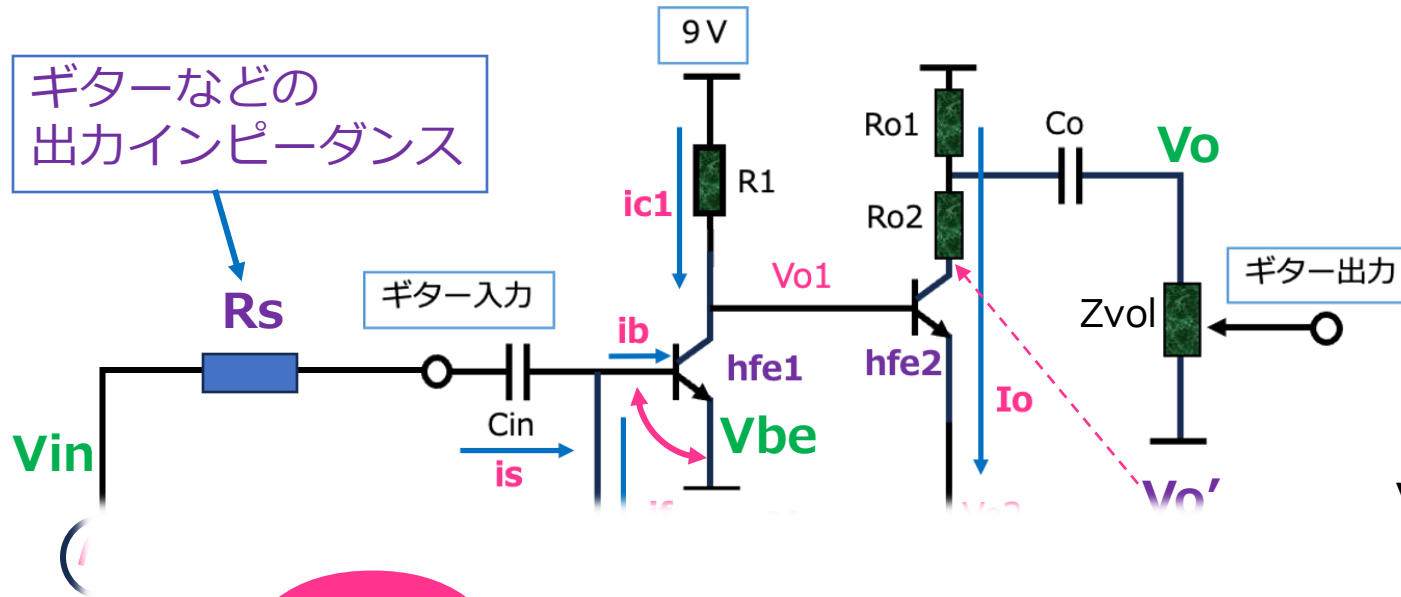
$$\beta = \frac{R_E}{R_f + R_E}$$

Ao : 初段～出力段の  
トータルの電流増幅率

アンプのばらつきの影響を受けない !

負帰還回路のゲインに  
関係していない !  
(抵抗だけ)

【 Current Shunt Feedbackの解析 : 電圧ゲイン 】



$V_{be}$ を一定とすると、入力電流  $I_s$ は

$$I_s = (V_{in} - V_{be}) / R_s$$

交流分のみを考えると、

$$i_s = V_{in} / R_s$$

$$V_o' = i_o \times R_o \quad \text{※ } R_o = R_{o1} + R_{o2}$$

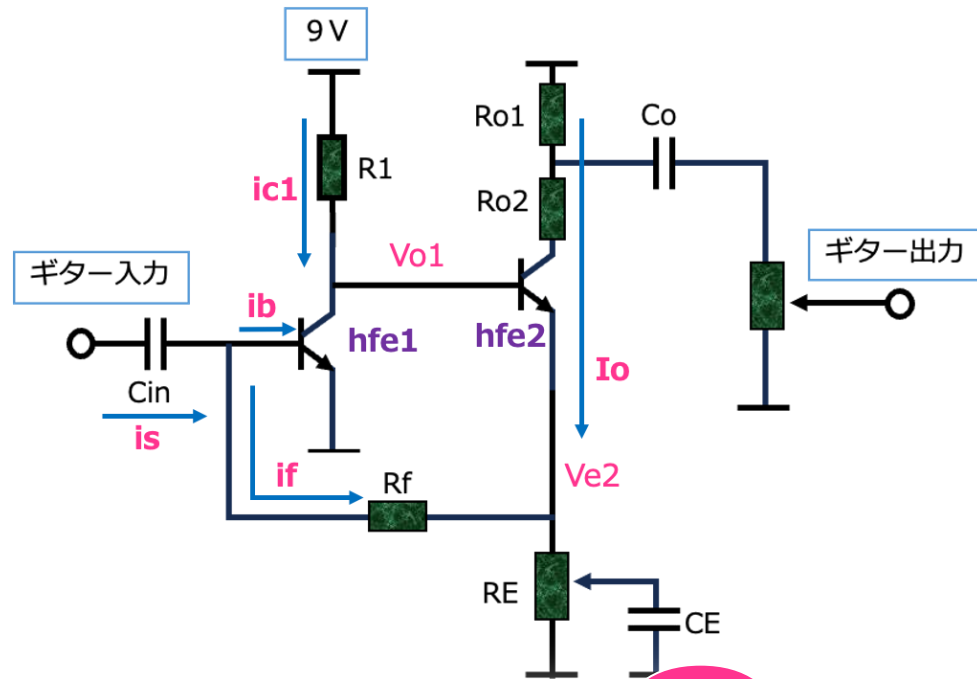
# Sample

$$V_O = \left[ \frac{R_{o2} + (R_{o1} // Z_{vol})}{R_E + R_s} \right] \times V_O$$

$R_E$

$R_s$

【 Current Shunt Feedbackの解析 : ゲインまとめ 】



電流ゲイン (Closed Loop)

$$Ac = \frac{i_o}{i_s} = \frac{1}{\beta} = \frac{RE + Rf}{RE}$$

電圧ゲイン

$$Ac = \frac{i_o}{i_s} = \frac{1}{1/Ao + \beta}$$

$$\beta = \frac{RE}{Rf + RE}$$

Ao : 初段～出力段の  
トータルの電流増幅率

Sample

$\alpha$

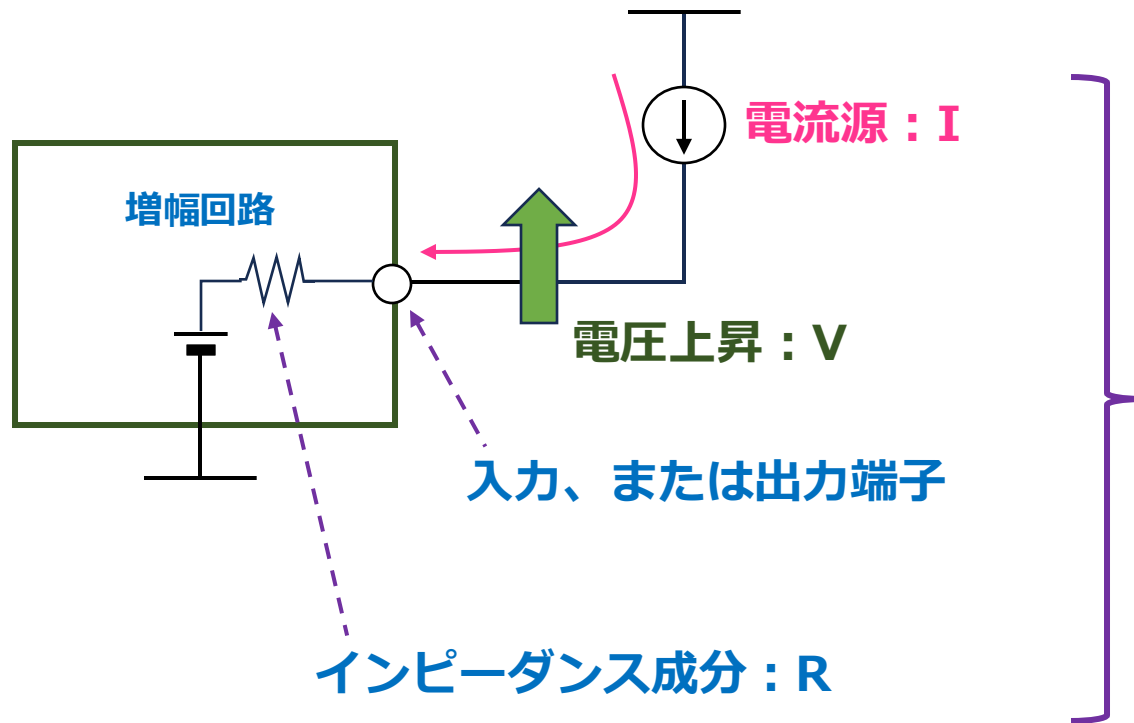
$\alpha$

$$Vo = \left[ \frac{(Ro1 // Zvol)}{Ro2 + (Ro1 // Zvol)} \right] \times Vo'$$

## 【 Current Shunt Feedbackの解析：入出力インピーダンス：インピーダンスの概念 】

### インピーダンス：抵抗成分

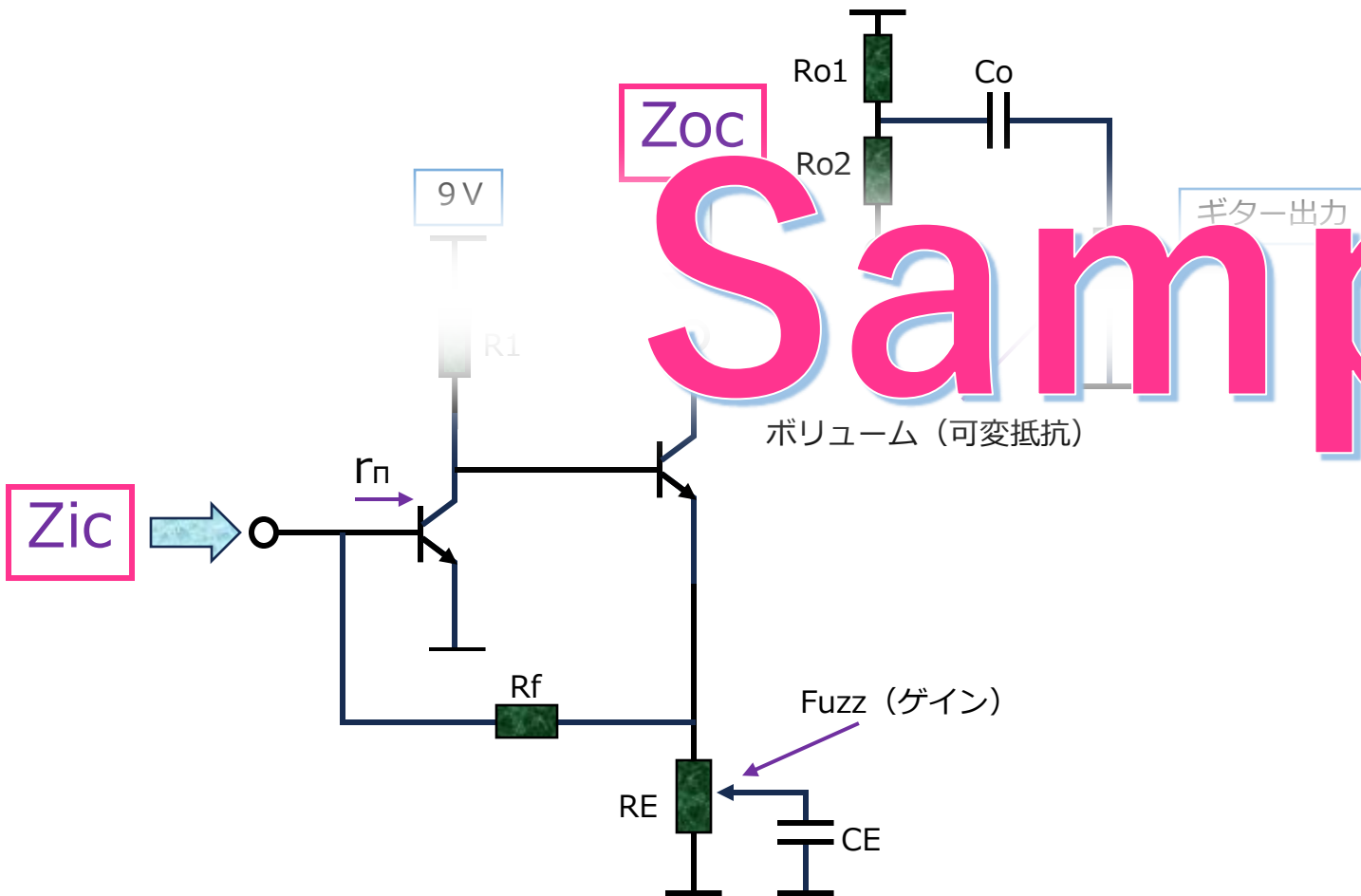
★オームの法則：  $E(\text{電圧、}V) = I(\text{電流}) \times R(\text{抵抗、インピーダンス})$



インピーダンス：抵抗成分とは  
とある端子に電流を流し込んだ時に  
その端子の電圧がどれくらい  
上がるか？の指標！（比率、係数）

$$R = \frac{V}{I}$$

$$(R = \frac{dV}{dI})$$



(入カインピーダンス)

$$Z_{io}$$

$Z_{io}$  : オープンループ時の入カインピーダンス

$A_i$  : オープンループ時の電流ゲイン

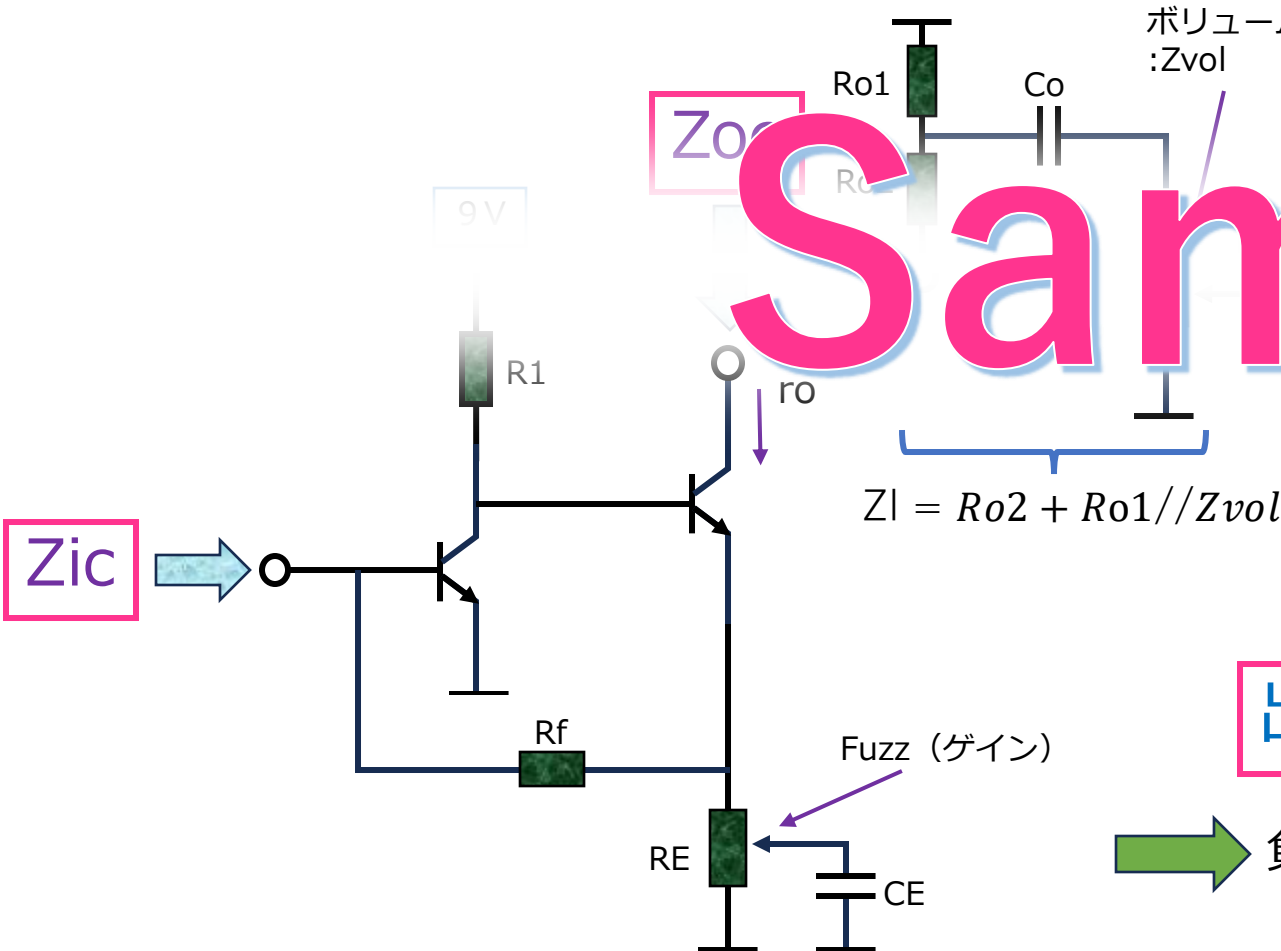
$$\beta = \frac{R_E}{R_E + R_f} : \text{帰還率}$$

$$Z_{io} = r_{\pi} // (R_f + R_E)$$

$$r_{\pi} = h_{fe} \times r_e$$

$$r_e = \frac{0.026}{I_c}$$

入カインピーダンスは小さくなる



(出カインピーダンス：負荷がない場合)

Sample

オープンループ時の出カインピーダンス  
Ai : オープンループ時の電流ゲイン

$$\beta = \frac{RE}{RE + Rf} : \text{帰還率}$$

$$Z_o = \sim r_o(1 + g_m \cdot RE // r_{\pi})$$

出カインピーダンスは大きくなる

★～無限大

負荷：Zl をつなぐと。。。

$$Z_o = Z_{oc} // Z_l \cong Z_l$$

$$Z_l = R_{o2} + R_{o1} // Z_{vol}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_{o2} : 8.2k\Omega \\ R_{o1} : 470\Omega \\ Z_{vol} : 500k\Omega \end{array} \right\} Z_l = 8.67k\Omega$$

無負荷時の出カインピーダンスが極端に大きくなるため、負荷をつなぐと、それが出カインピーダンスとなる。

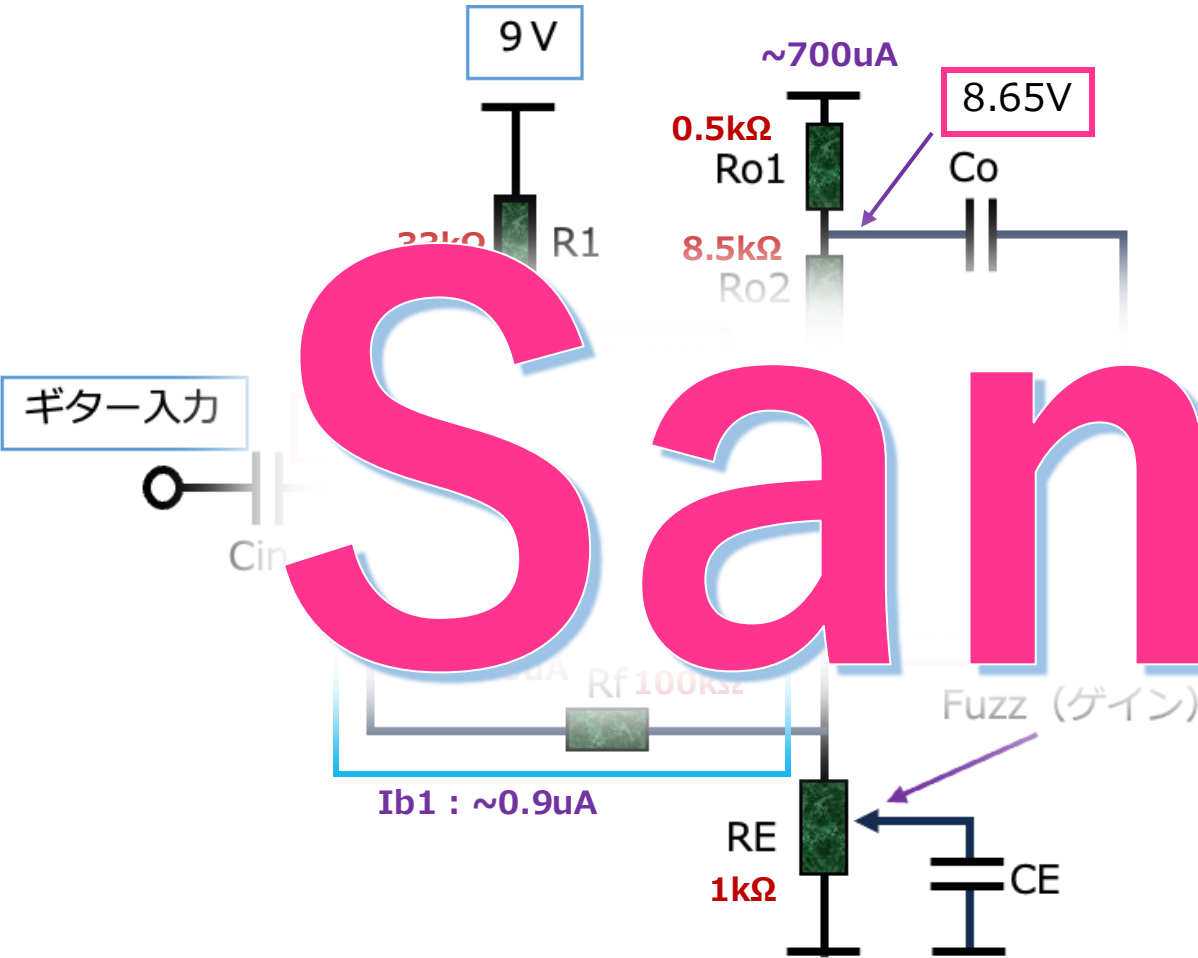
## 【 Fuzz Face 回路動作 : DCバイアス 】

# Fats Sound Laboratory

様 Confidential

- Tr1を動かすために必要なベース電流 :  $i_{b1}$ はどこから来る？
  - ⇒ ギター入力からは来ない (コンデンサ :  $C_{in}$ があるから直流電流は入って来ない)
  - 帰還抵抗 :  $R_f$ を介してTr2から来る !**

• ベース電流  $i_{b1}$  が  $h_{fe}$  倍されてコレクタ電流  $i_{c1}$  と



# Sample

2 段目のコレクタ電流  $i_{c2}$  は  
 $0.69V / 1k\Omega = 690\mu A \sim 700\mu A$

• 2 段目のコレクタ電圧は  
 $9V - \sim 700\mu A \times (8.5k\Omega + 0.5k\Omega) = 2.72V$

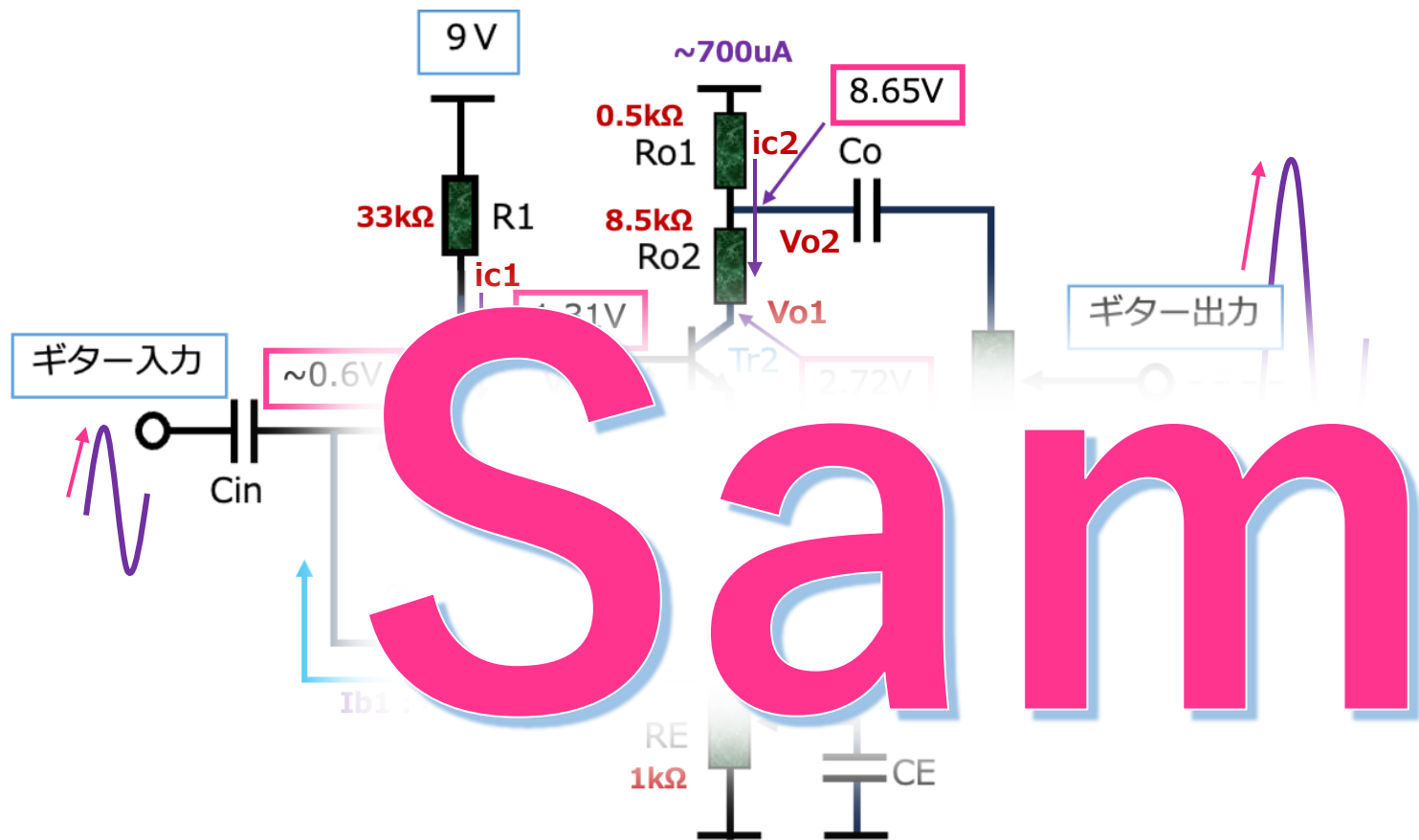
• 出力部の電圧は  
 $9V - 0.5k\Omega \times \sim 700\mu A = 8.65V$



## 【 Fuzz Face 回路動作 】

# Fats Sound Laboratory

様 Confidential



Voは上側に増幅される

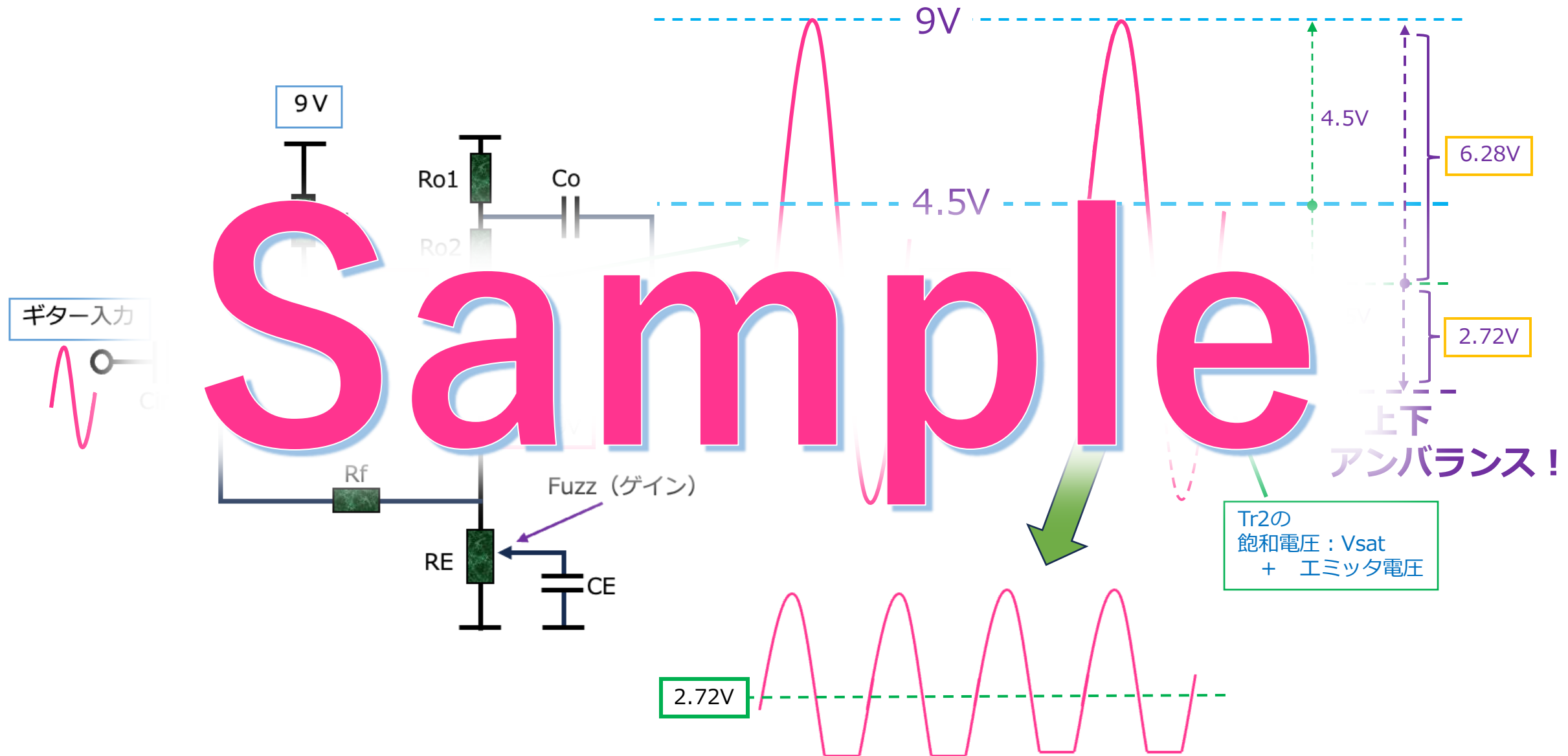
1. ギター信号が上昇する ↗
2. 1段目 NPN Trのベース電圧も上がろうとする、つまりVbeが大きくなり、ベース電流 ib1が増加する
3. ベース電流が増えると、  
 $ic1 = hfe \times ib1$   
の関係に従って1段目コレクタ電流 ic1が増える

4. 1段目のコレクタ電流が増える、2段目のベース電圧も上がる
5. 2段目のベース電圧が上がると、2段目のベース電流 ib2が増える
6. 2段目のベース電流が増えると、2段目のコレクタ電流 ic2が増える
7. 2段目のコレクタ電流が増える、2段目のエミッタ電圧も上がる
8. 2段目 Trのエミッタ電圧が下がった分だけコレクタ電流 ic2が減る
9. このコレクタ電流が減った分、出力 Vo2が上昇する

【 Fuzz Face 回路動作：歪みはどう作られる？ 】

# Fats Sound Laboratory

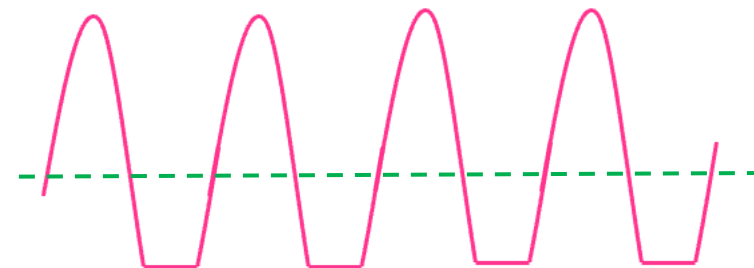
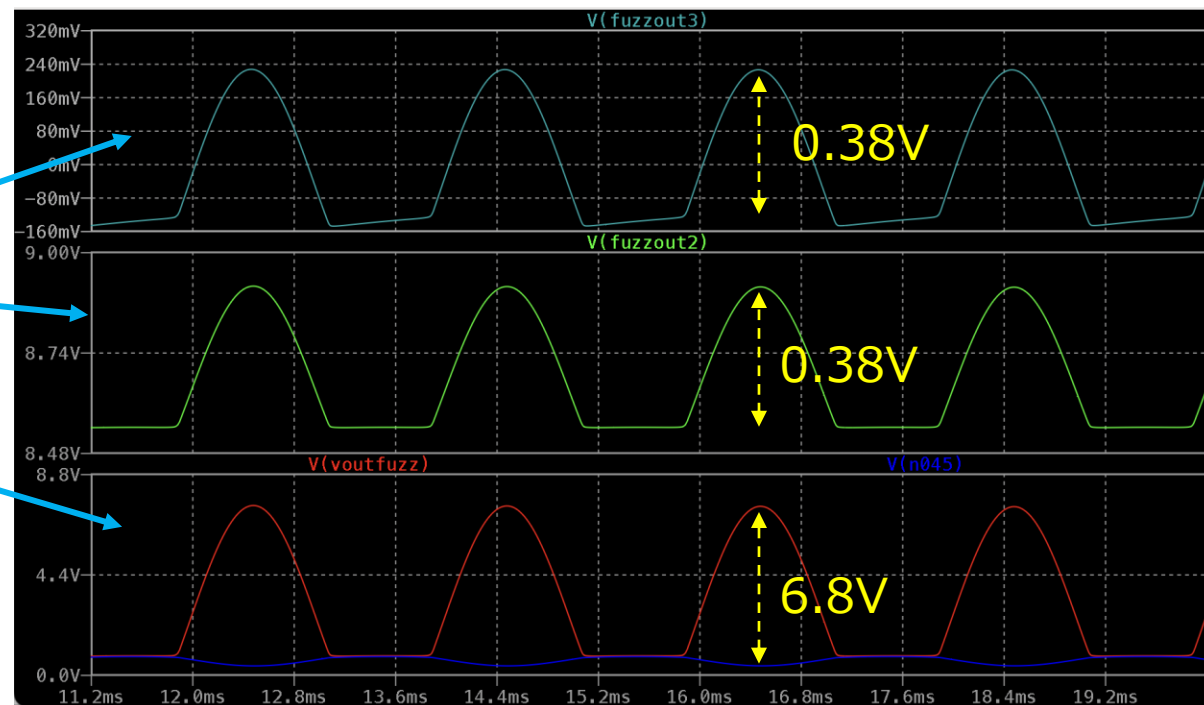
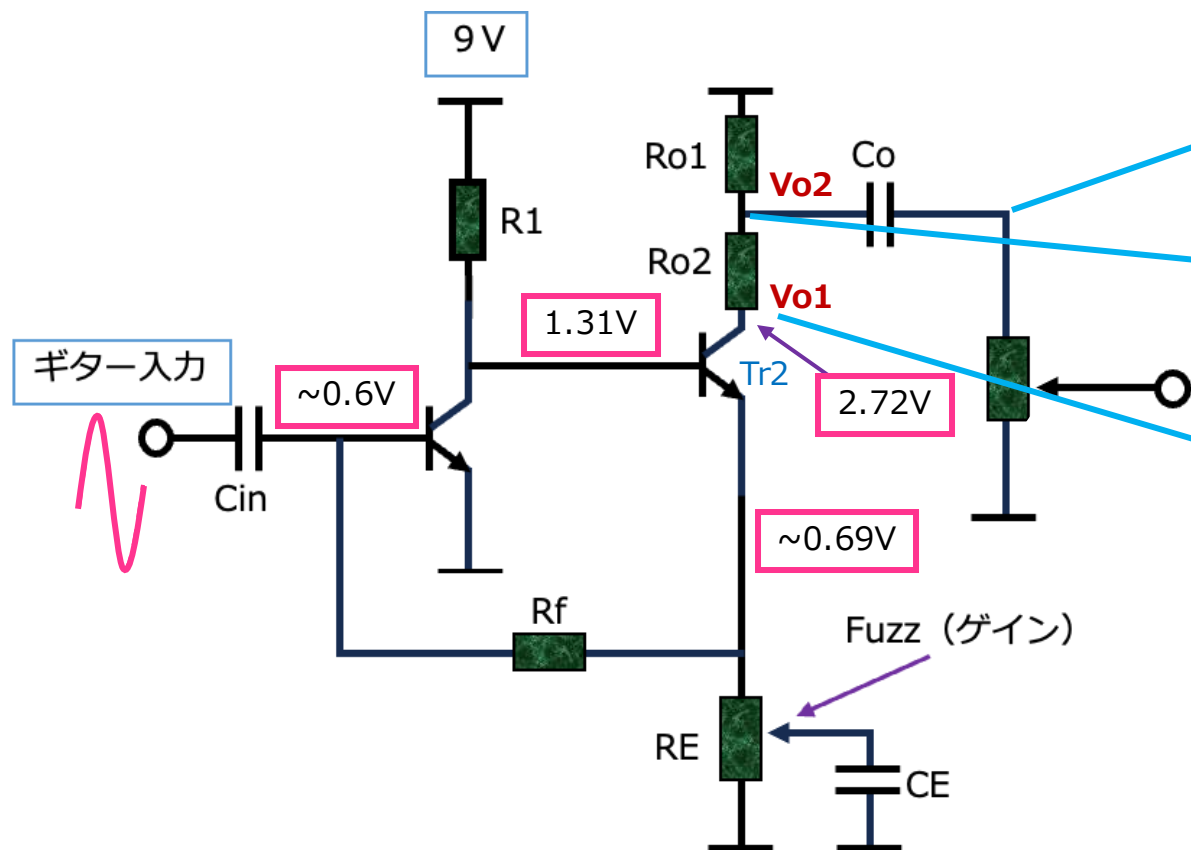
様 Confidential



## 【 Fuzz Face 回路動作：歪みはどう作られる？ 】

# Fats Sound Laboratory

様 Confidential



$$V_{o2} = \frac{R_{o1}}{R_{o1} + R_{o2}} \times V_{o1} = \frac{0.5k\Omega}{0.5k\Omega + 8.5k\Omega} \times 6.8 = 0.38V$$