

# 医用工学概論

## 第8回 電子回路

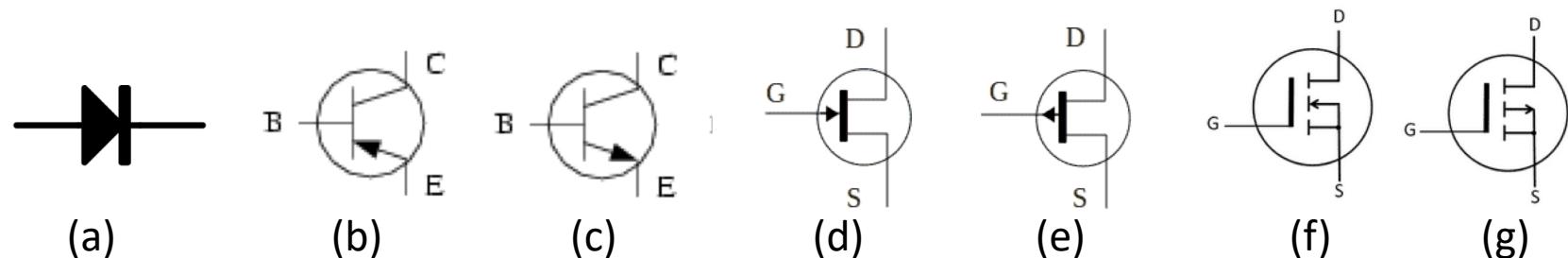
# 前回の復習

能動素子      ダイオード      : 整流 作用を持つ  
                 トランジスタ    : 増幅 作用を持つ

バイポーラトランジスタ

電流 で電流を制御      入力インピーダンスが 低い  
FET(電界効果トランジスタ)

電圧 で電流を制御      入力インピーダンスが 高い



(a) ダイオード (b) pnpトランジスタ (c) npnトランジスタ (d) nチャンネルJFET  
(e) pチャンネルJFET (f) nチャンネルMOSFET (g) pチャンネルMOSFET

# 電子回路

## 前回の内容

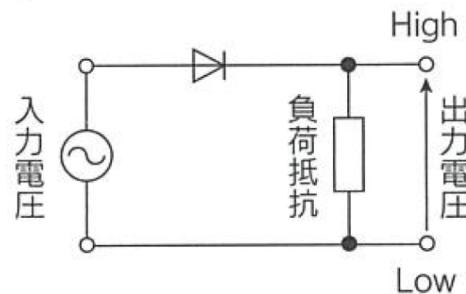
- ・半導体
- ・ダイオード
- ・トランジスタ

## 今回の内容

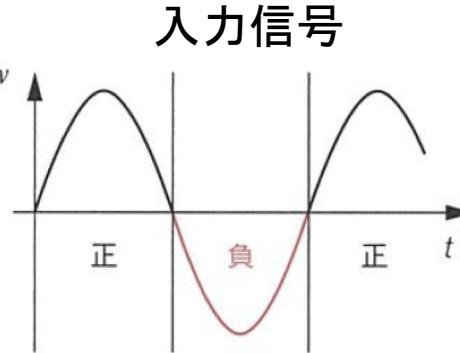
- ・整流回路
- ・増幅度、増幅回路
- ・フィルタ回路
- ・オペアンプ

# 整流回路

## 半波整流回路



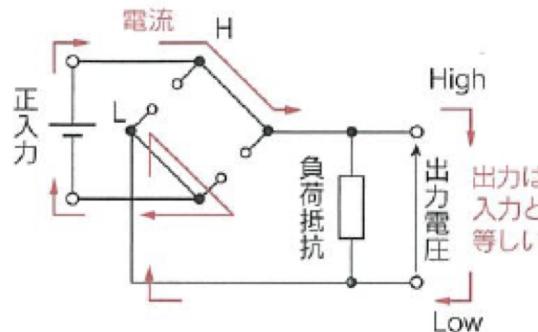
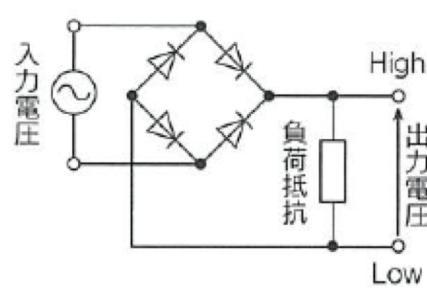
入力信号



半波整流

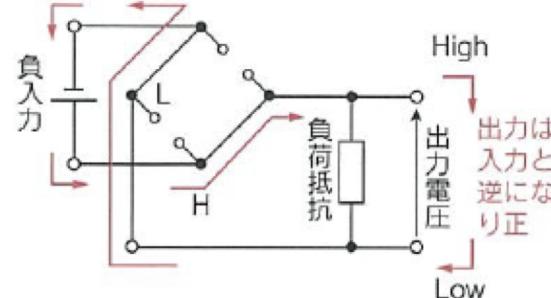
全波整流

## 全波整流回路



a ダイオードブリッジ型全波整流回路

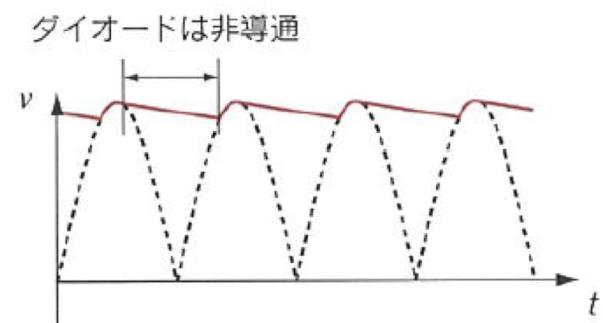
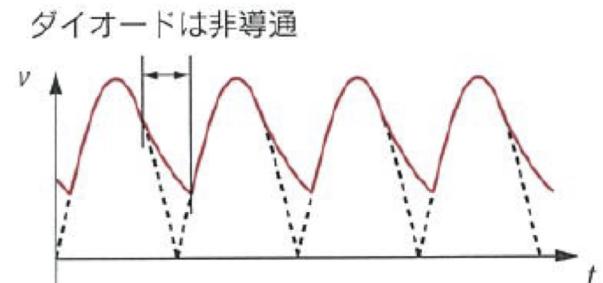
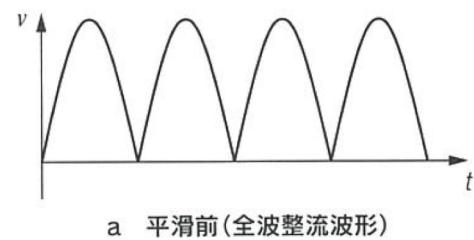
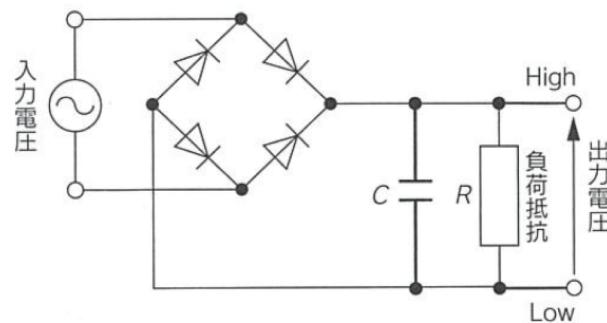
b 入力が正の時間帯の等価回路



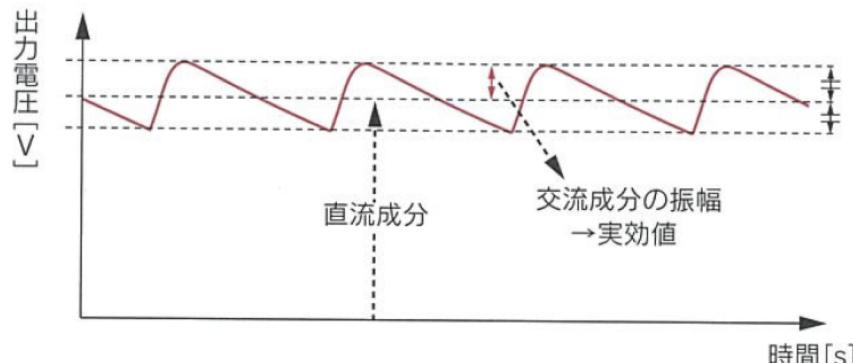
c 入力が負の時間帯の等価回路

# 平滑回路

## 整流平滑化回路



リップル率：平滑化の良さ

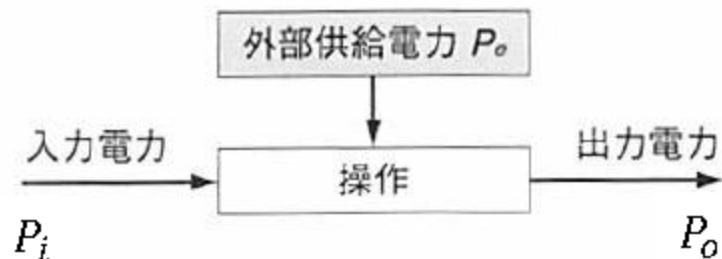


$$\text{リップル率} \gamma = \frac{\text{交流成分(実効値)}}{\text{直流成分}}$$

教科書 P. 72, 73

# 増幅

増幅とは、**微弱**（エネルギーの小さい）な入力信号を  
**外部供給電力**によって、**大きな**出力信号にするための操作

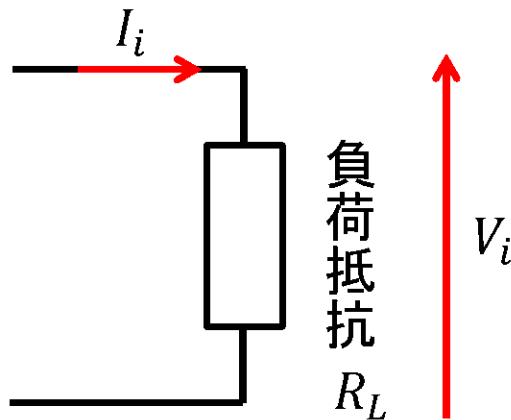


増幅度とは、**入力電力**に対する**出力電力**の**倍率**

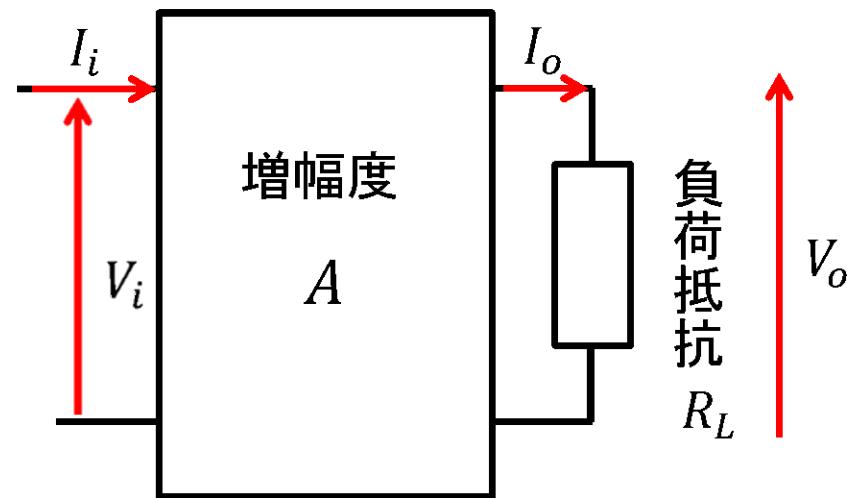
$$\text{増幅度 } A = \frac{P_o}{P_i}$$

# 増幅器

插入前



插入後



負荷に供給される電力

$$P_i = V_i I_i = \frac{V_i^2}{R_L} = I_i^2 R_L$$

$$P_o = V_o I_o = \frac{V_o^2}{R_L} = I_o^2 R_L$$

$$\text{増幅度 } A = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o^2}{V_i^2} = \frac{I_o^2}{I_i^2}$$

# 増幅度と利得

増幅度はレンジが広いため、**対数表示** で表すことがある。

$$10^a = A \quad a = \underline{\log_{10}} A \text{ [B]}$$

常用対数

単位は、ベル。通常は、  
10倍した[dB]（**デシベル**）  
が用いられる。

増幅度のデシベル表示 = 利得

$$10 \log_{10} A = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} = 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i} = 20 \log_{10} \frac{I_o}{I_i}$$

電圧利得が何dBのとき、  
電力増幅度が何倍かを表にしています

電圧増幅度      電流増幅度

（注）増幅度(A)とデシベル（電圧増幅）

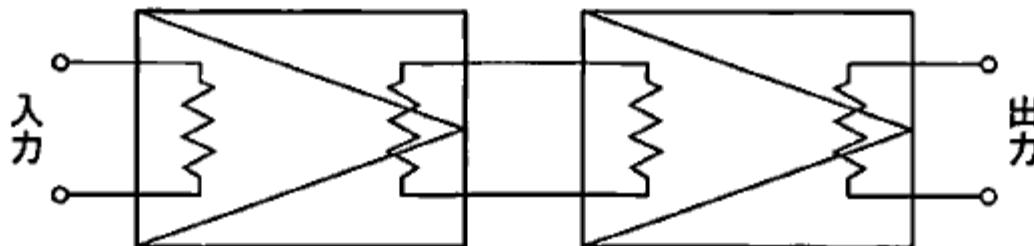
増幅度	1.4( $\sqrt{2}$ )	1.995	3( $\sqrt{10}$ )	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
dB	3	6	10	20	40	60	80	100	120

# 増幅度の計算例

増幅度が何倍のとき、  
電圧利得が何dBかを計算しています

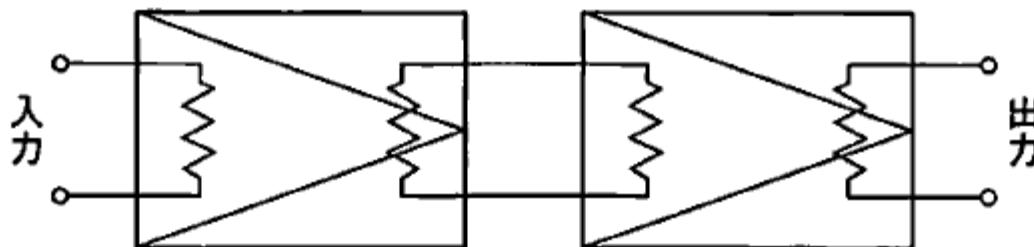
$$2\text{倍} \times 5\text{倍} = 10\text{倍}$$

$$(0.3\text{B}) 3\text{dB} + (0.7\text{B}) 7\text{dB} = (1\text{B}) 10\text{dB}$$



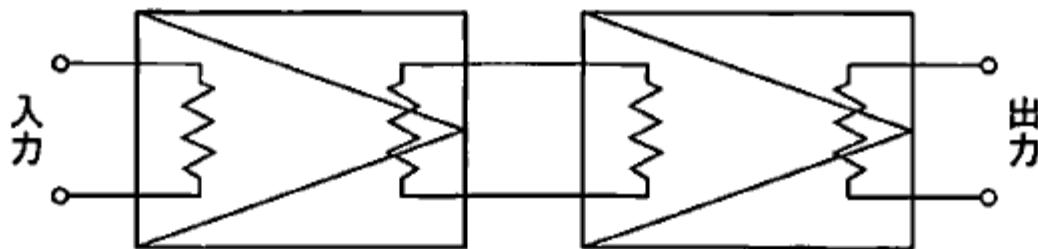
$$100\text{倍} \times 1,000\text{倍} = 100,000\text{倍}$$

$$(2\text{B}) 20\text{dB} + (3\text{B}) 30\text{dB} = (5\text{B}) 50\text{dB}$$

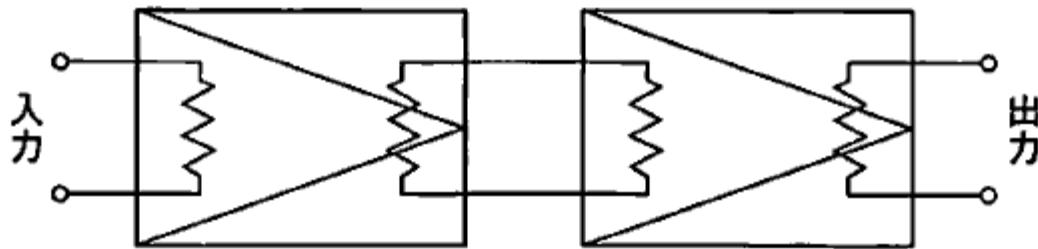


# 増幅度の計算例

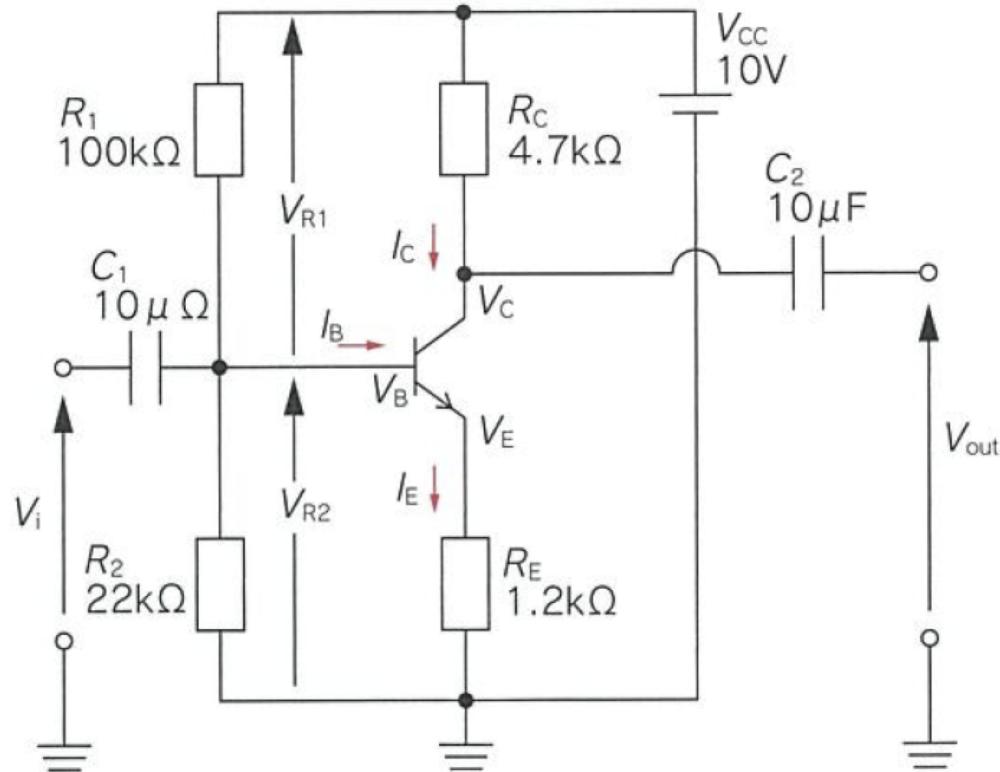
$$\begin{array}{r} 1/2\text{倍} \\ -3\text{dB} \end{array} \times \begin{array}{r} 1/5\text{倍} \\ -7\text{dB} \end{array} = \begin{array}{r} 1/10\text{倍} \\ -10\text{dB} \end{array}$$



$$\begin{array}{r} 1/100\text{倍} \\ -20\text{dB} \end{array} + \begin{array}{r} 1,000\text{倍} \\ 30\text{dB} \end{array} = \begin{array}{r} 10\text{倍} \\ 10\text{dB} \end{array}$$



# トランジスタを用いた増幅回路



〈各素子の役割〉

$C_1$  :  $V_{in}$  に含まれる交流成分のみを通過 (直流成分を遮断) させる.

$R_1, R_2$  : B-E 間 pn 接合に順バイアスを加えるために  $V_{CC}$  を分圧する.

$R_E$  :  $I_E = \frac{V_B - 0.6}{R_E}$ ,

$V_B$  に応じて  $I_C$  ( $\doteq I_E$ ) を制限する.

$R_C$  :  $V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$ ,

$I_C$  に応じて  $V_C$  が決まる.

$C_2$  :  $V_C$  に含まれる交流成分のみを通過させて  $V_{out}$  を得る.

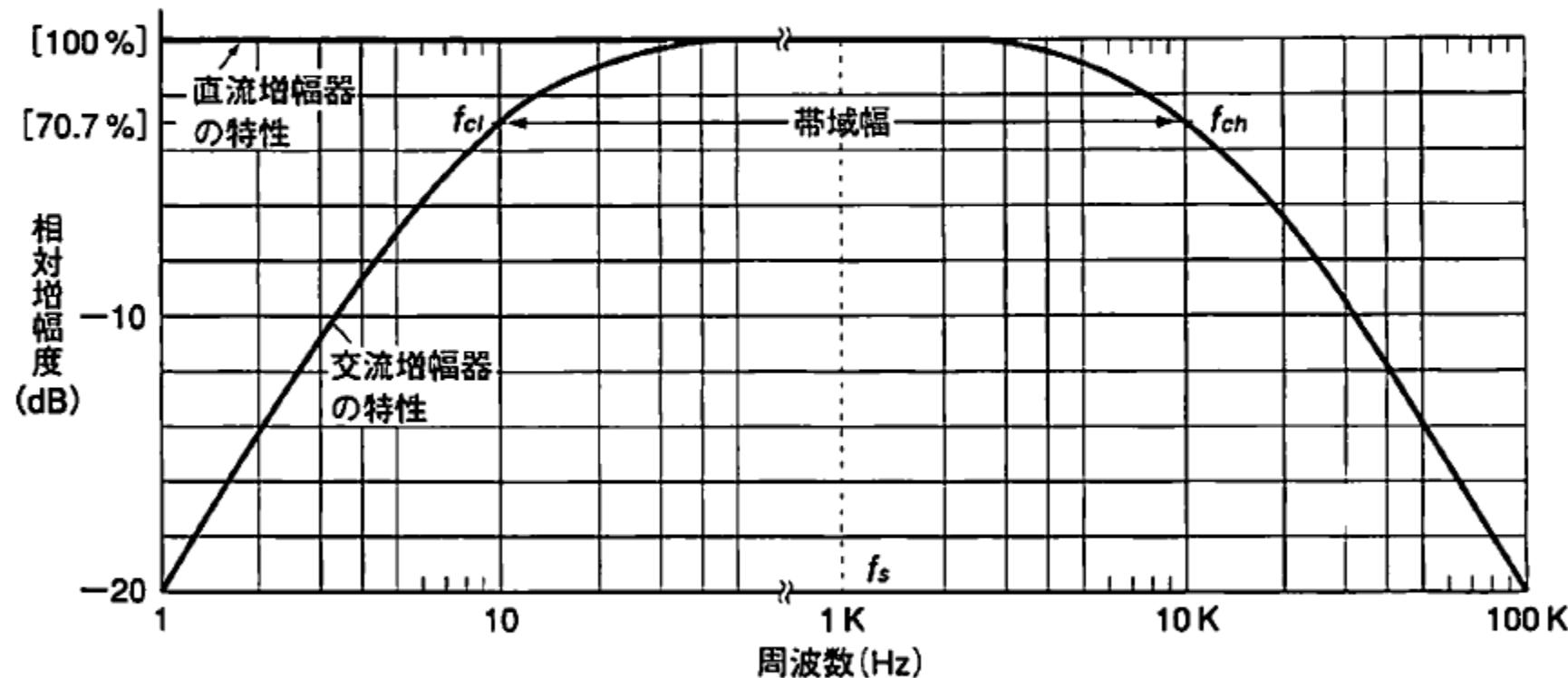
$$\text{電圧増幅率 } A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_C}{R_E}$$

# 生体信号の特性

生体信号の周波数の例	電気血圧計 心電計 微小電極用增幅器	0～数十Hz 0.05～100Hz 0～20kHz
生体信号の大きさの例	脳波	数～数百 $\mu$ V
組織のインピーダンスの例	皮膚抵抗 細胞膜抵抗	数k $\Omega$ 数十M $\Omega$

# 増幅器の周波数特性

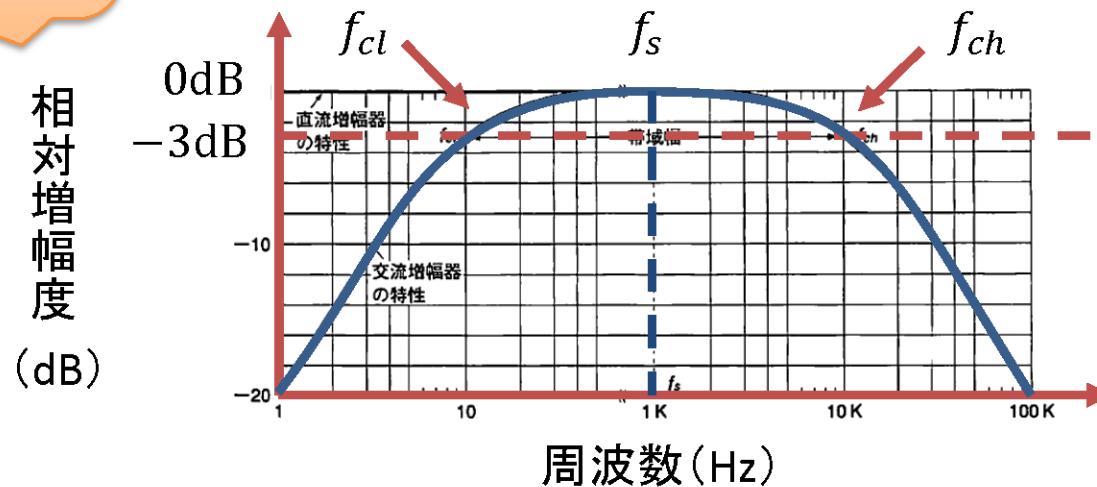
一般的に、増幅度は入力信号の **周波数** に依存する。



広い周波数で増幅度が高いほど、増幅器内部からの **雑音** が大きくなる。

基準周波数  
 $f_s$ を0dBとした時  
の増幅度

# 周波数特性



## 遮断周波数

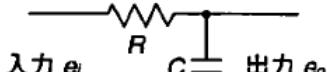
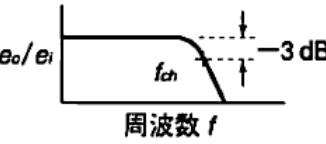
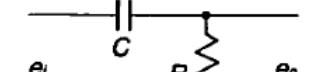
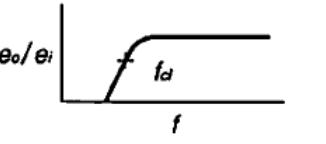
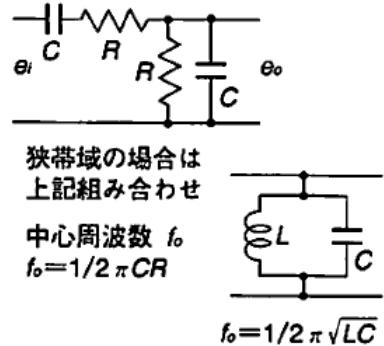
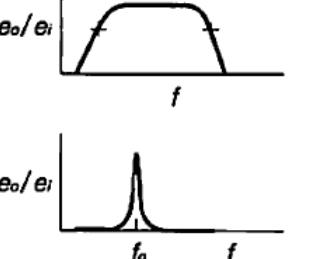
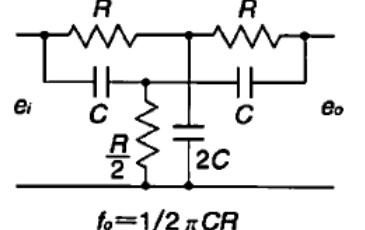
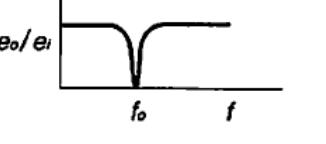
電力増幅度が平坦部に対し、半分（-3dB）になる周波数  
(電圧増幅度は $1/\sqrt{2}$ 倍, 70.7%)

## 帯域幅

低域遮断周波数  $f_{cl}$  と高域遮断周波数  $f_{ch}$  の間  
(Low cut-off) (High cut-off)

帯域幅外での増幅は、信号を **歪ませて** しまうため、生体信号の特性（周波数）  
によって、適切な増幅器を用いる必要がある。

# 濾波(フィルタ)回路

種類	簡単な回路	周波数特性
低域濾波器 (LPF) 〔高域遮断〕	 入力 $e_i$ $R$ $C$ 出力 $e_o$ 積分回路 $f_{ch} = 1/2\pi CR$	 周波数 $f$
高域濾波器 (HPF) 〔低域遮断〕	 $e_i$ $C$ $R$ $e_o$ 微分回路 $f_d = 1/2\pi CR$	 周波数 $f$
帯域濾波器 (BPF)	 狭帯域の場合は上記組み合わせ 中心周波数 $f_o$ $f_o = 1/2\pi CR$ $f_o = 1/2\pi\sqrt{LC}$	 周波数 $f$
帯域除去器 (BEF)	 $f_o = 1/2\pi CR$	 周波数 $f$

直流 に近い(低周波)信号に制限する回路

交流信号 に制限する回路

低域遮断周波数  $f_{cl} = \frac{1}{2\pi CR}$

時定数

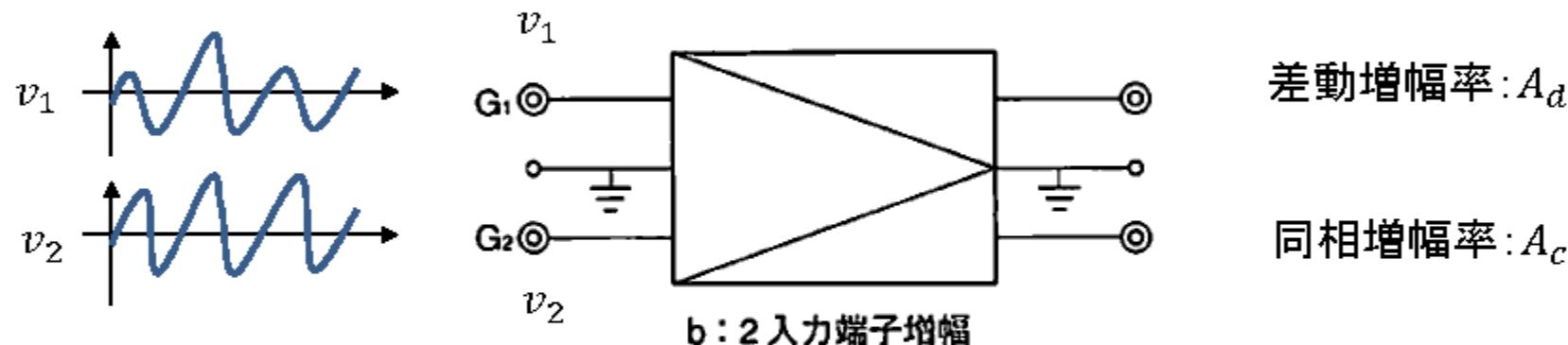
特定の帯域 に制限する回路

特定の帯域以外に制限する回路  
(商用交流によるノイズ除去)

# 差動増幅器

2つの入力端子(+端子とー端子)を持つ増幅器

2つの入力信号の差分を一定係数で増幅する



差動入力  $\Delta v = v_d = (v_1 - v_2)/2$

同相入力  $v_c = (v_1 + v_2)/2$

出力

$$v_o = A_d v_d + A_c v_c$$

差動出力

(作動利得)

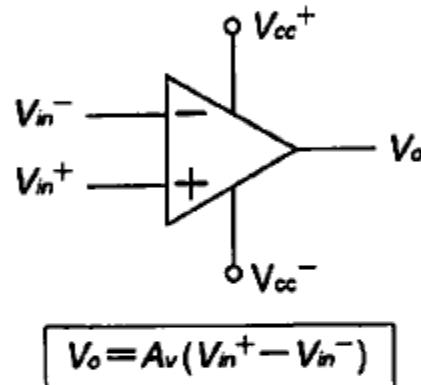
同相出力

(同相利得)

同相除去比(弁別比)  $CMRR = \frac{A_d}{A_c}$

# オペアンプ

オペアンプ(演算増幅器)は、‘性質の良い’増幅器



$V_{cc}^+$ ,  $V_{cc}^-$ : 電源接続端子  
 $V_{in}^+$ ,  $V_{in}^-$ : 差動入力端子  
 $V_o$ : 出力端子  
 $A_v$ : 電圧増幅率

入力インピーダンス 大  
(入力電流が流れ込まない)

出力インピーダンス 小

ほぼ理想的な性質を持つ(直流)増幅器として扱うことができる。

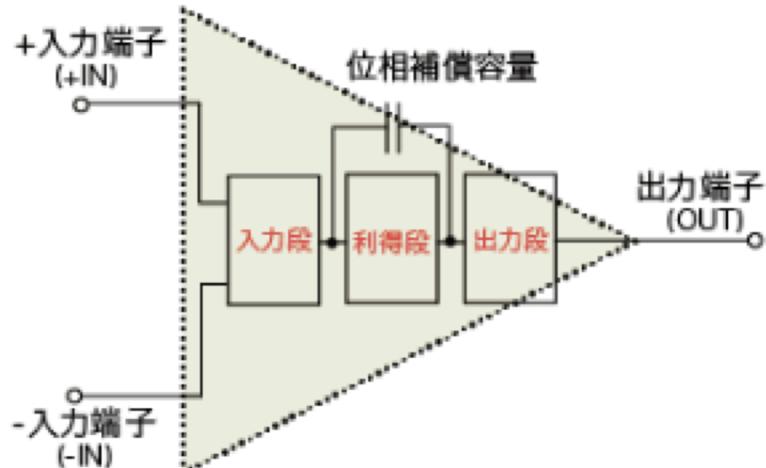
出力電圧  $V_o = A_v(V_{in}^+ - V_{in}^-)$

↑ 増幅度が非常に 大きい ( $A_v \approx \infty$  とみなせる).

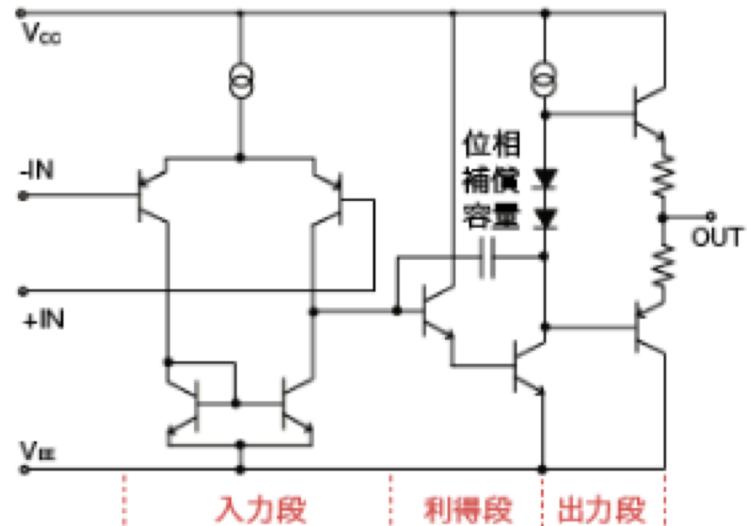
Imaginary short

出力電圧が有限値だとすれば、差動入力は  $V_{in}^+ - V_{in}^- \approx 0$  とみなせる。

# オペアンプの構造



【一般的なオペアンプの内部回路構成】



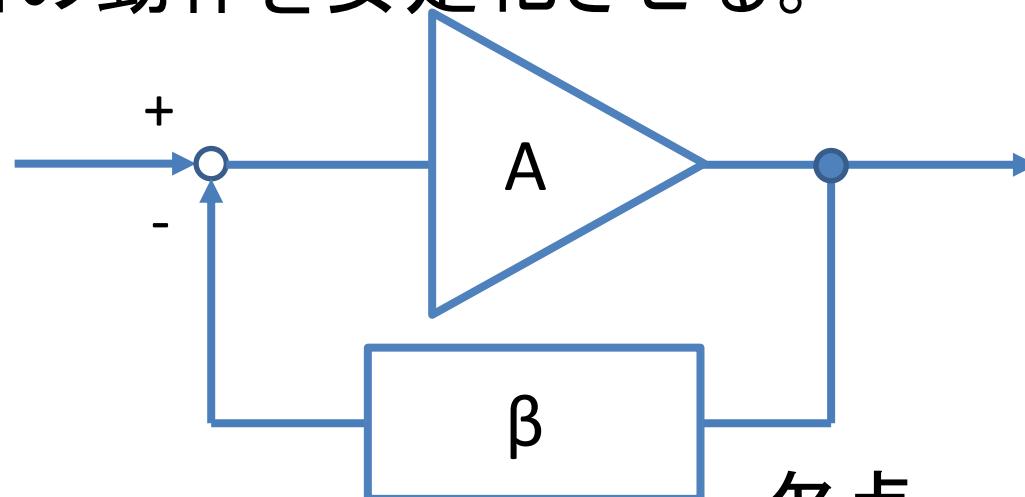
【BA4558内部等価回路】

[回路構成 | オペアンプとは？ | エレクトロニクス豆知識 | ローム株式会社](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/opamps/op_what2)

[https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/opamps/op\\_what2](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/opamps/op_what2)

# 負帰還回路

出力を **フィードバック(帰還)** させることで、  
増幅回路の動作を安定化させる。



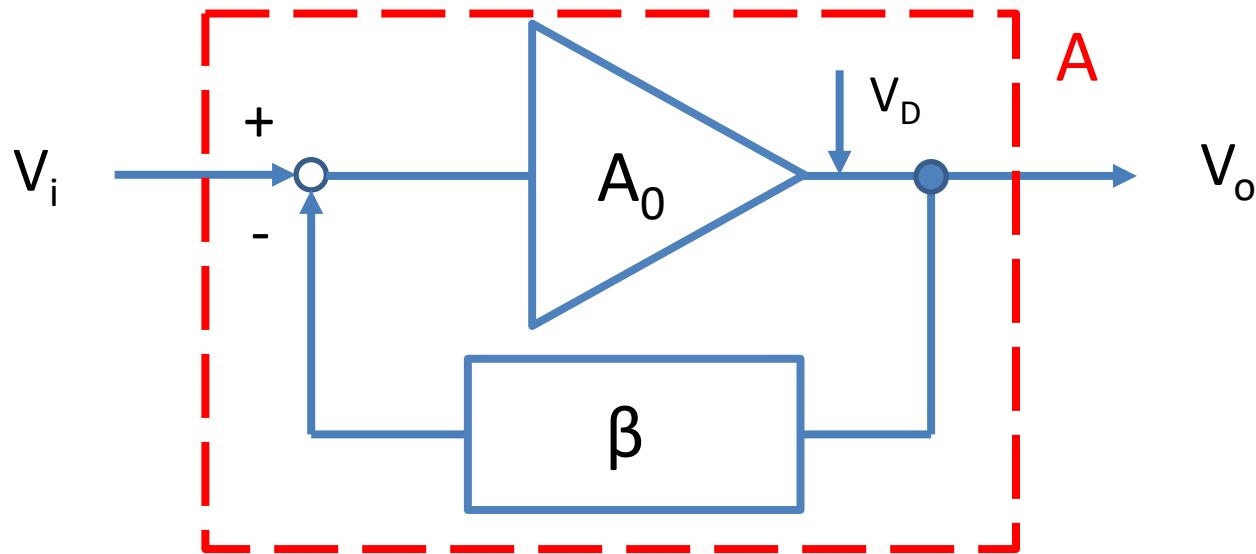
## 利点

- ・安定な周波数帯域が広がる
- ・増幅度の決定が容易になる
- ・外乱に強くなる

## 欠点

- ・発振しやすい

# 負帰還による安定化



オペアンプの増幅度 $A_0$ が十分に大きければ、

- ・増幅度 $A = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \approx \frac{1}{\beta}$  増幅度が **帰還率 $\beta$**  によって決まる
- ・ $V_o = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} V_i + \frac{1}{1 + \beta A_0} V_D \approx \frac{1}{\beta} V_i$  外乱はほぼ無視できる

# 負帰還増幅による特性の改善

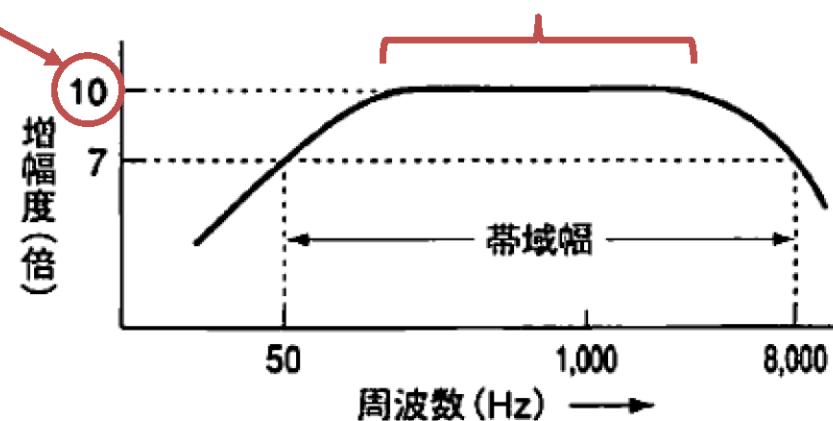
## 周波数特性 の改善

負帰還により、実効増幅度は小さくなる。



a : 負帰還をかける前の周波数特性

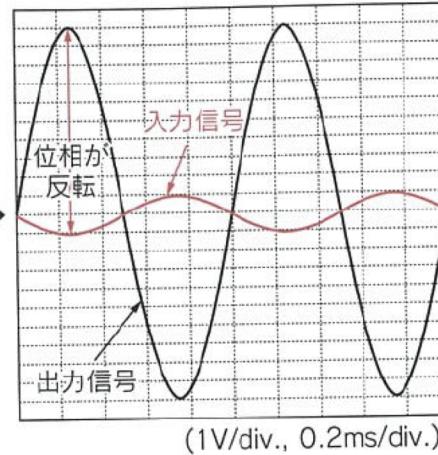
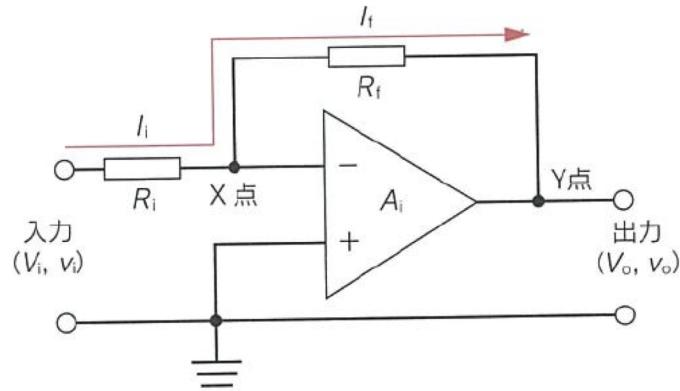
入力信号の周波数に対して、増幅度の変化が小さい。



b : 負帰還をかけた場合の周波数特性

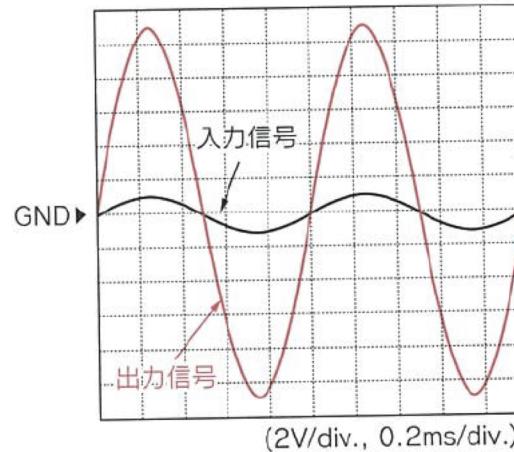
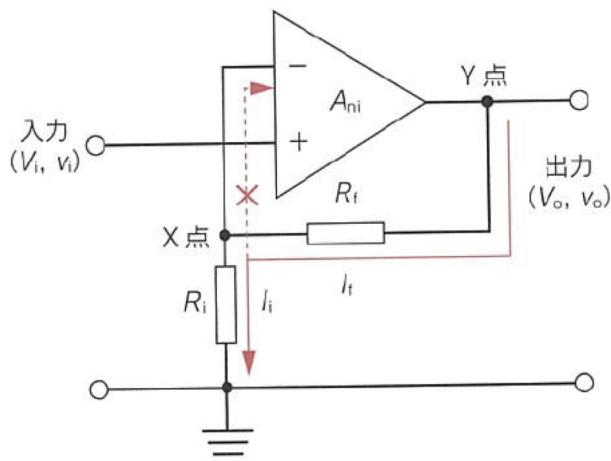
# オペアンプによる増幅回路

反転増幅回路：入力信号の位相を180度ずらして増幅



$$v_o = -\frac{R_f}{R_i} v_i$$

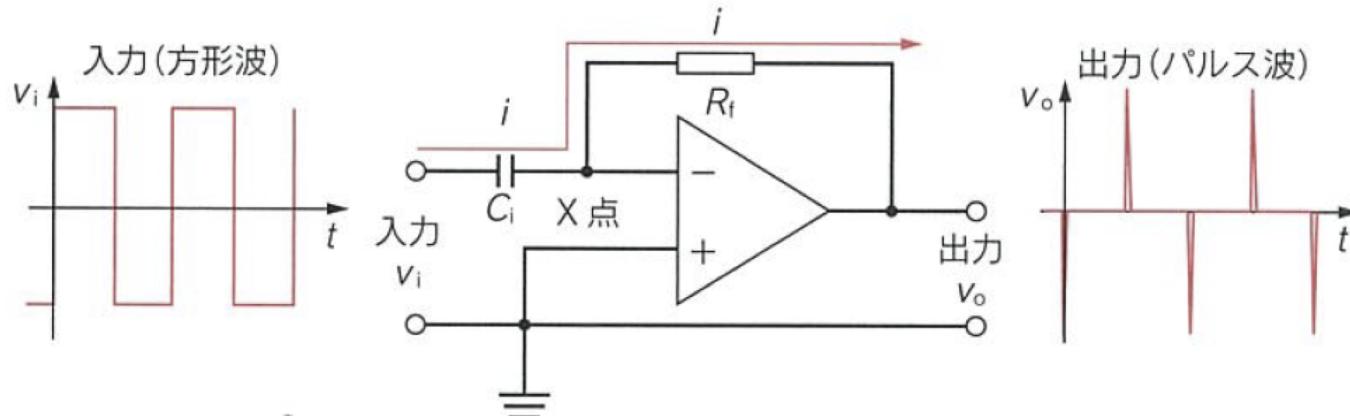
非反転増幅回路：入力信号の位相を変えずに増幅



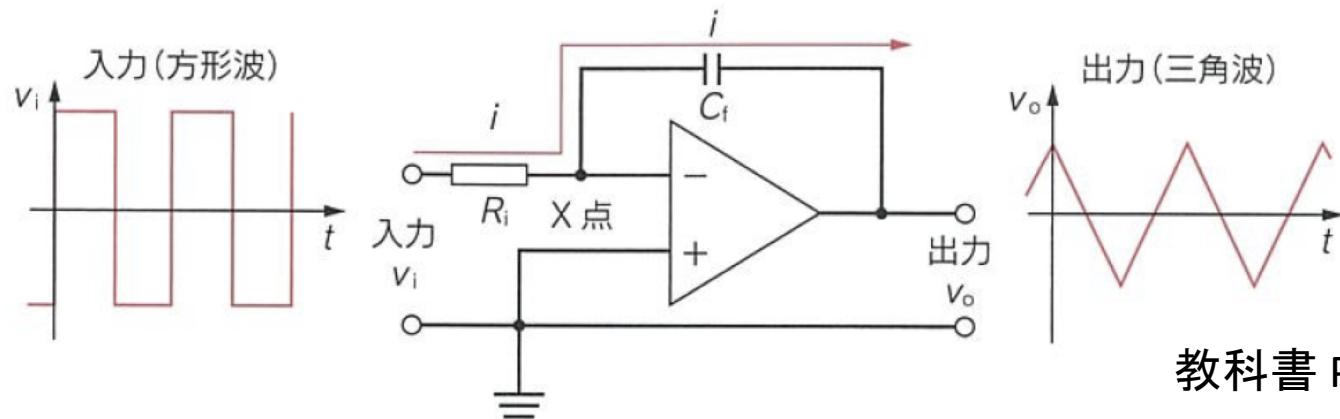
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) v_i$$

# オペアンプによる演算回路

**微分回路**：入力波形の微分を出力



**積分回路**：入力信号の積分を出力



# オペアンプの応用回路

- ・ボルテージフォロワ

入力信号と全く同じ波形を出力する(1倍の非反転増幅)。

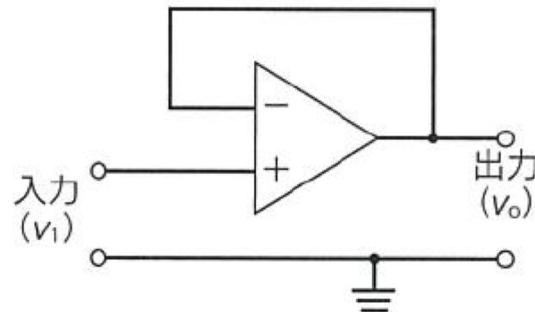
- ・加算回路

入力波形の加算を出力する。

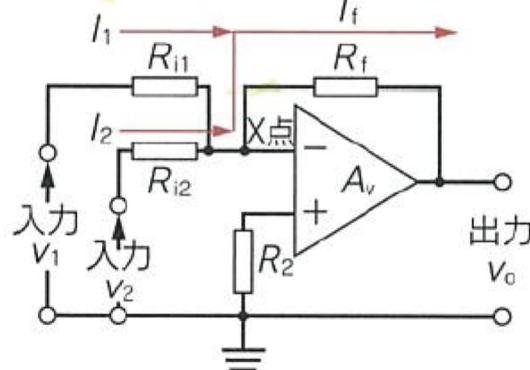
- ・比較回路(コンパレータ)

入力と基準電圧を比較する。

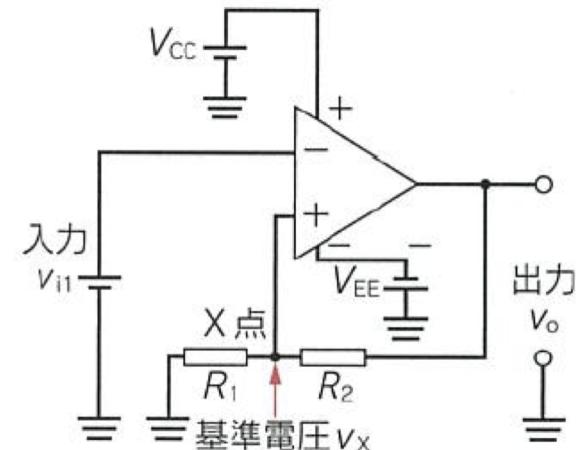
教科書 P. 79



a ボルテージフォロワ

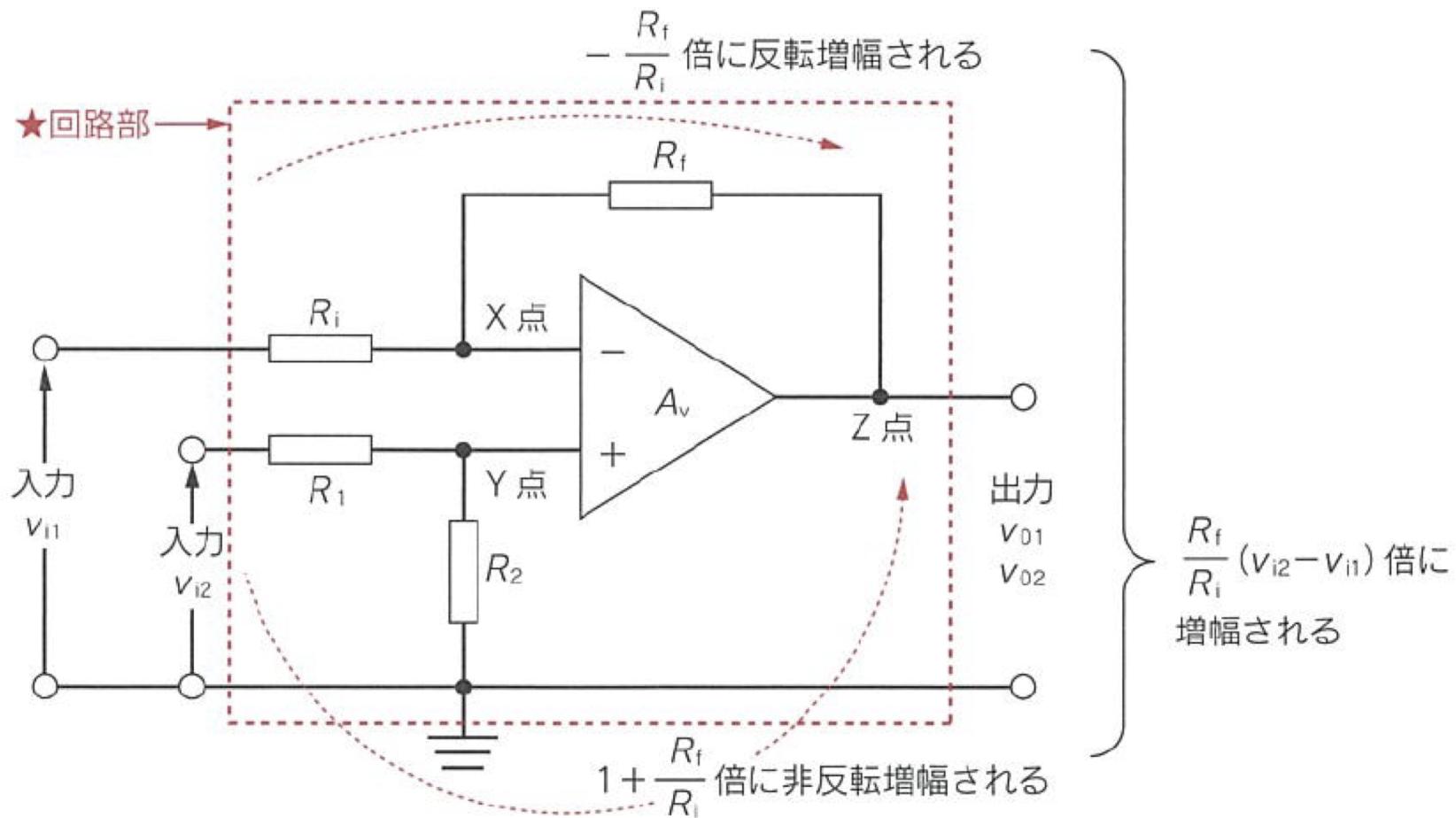


b 加算回路



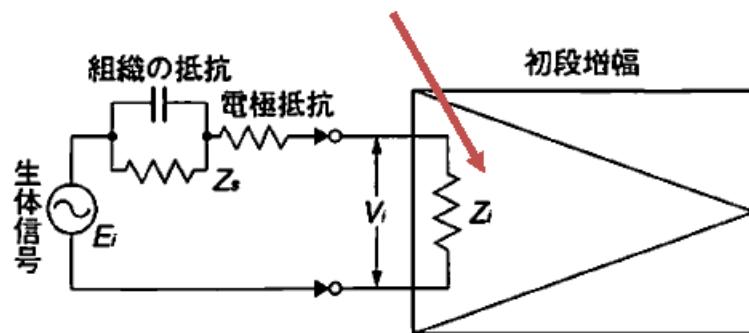
c 比較回路  
(非反転増幅型)

# 差動増幅回路

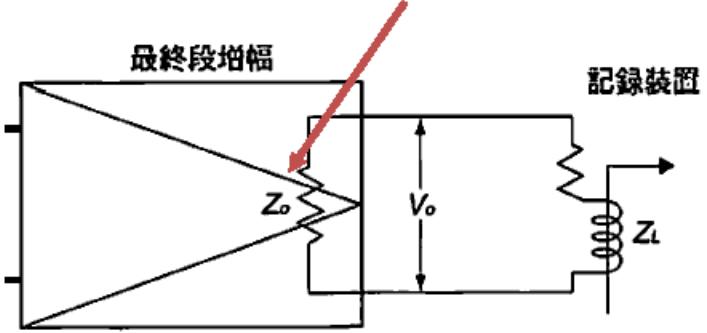


# 増幅器を用いた生体計測

入力インピーダンス  $Z_i$



出力インピーダンス  $Z_o$



生体信号  $E_i$  は **微弱** であり、また、組織のインピーダンス  $Z_s$  は **大きく**、時間的にも変化する。



入力インピーダンス  $Z_i$  を大きくして、増幅器への入力信号が  $V_i \approx E_i$  となるようにする。  $\Leftrightarrow$  (入力電流を小さくする)

記録装置(メータ)に **最大電力** を供給するために **インピーダンス整合**を行う。



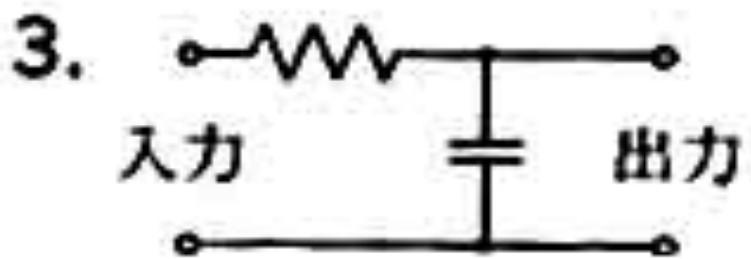
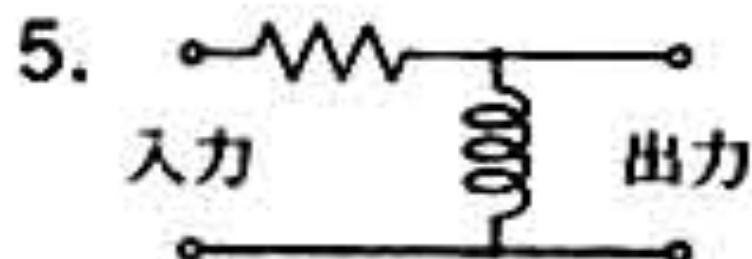
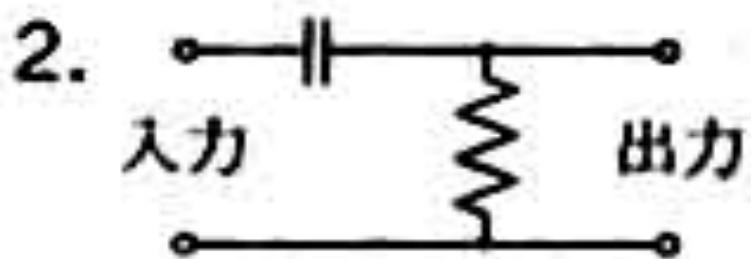
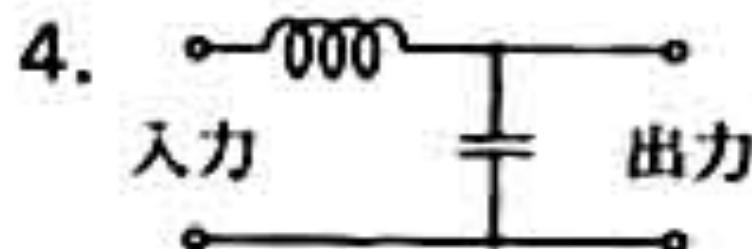
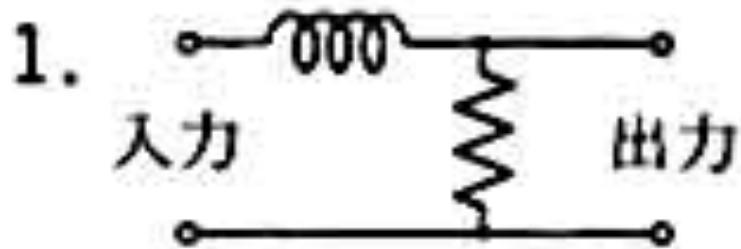
出力インピーダンス  $Z_o$  が記録装置のインピーダンス  $Z_L$  に **近い** 値にする。

# 練習問題

60 dB と 20 dB の増幅器を直列に接続したときの全利得はどれか。

1. 40 dB
2. 60 dB
3. 80 dB
4. 120 dB
5. 1,200 dB

低域遮断フィルターとして働く回路はどれか。  
2つ選べ。



問 102 ☆☆

(既出問題)

ダイオードについて正しいのはどれか。

- a ダイオードは一般に整流器、検流器に使用される。
  - b トンネルダイオードには増幅作用がある。
  - c シリコンやガラスは半導体である。
  - d 発光ダイオードは光をあてると明るさに応じてダイオードを流れる電流が変化する。
  - e 定電圧ダイオードは安定化直流電源の基準電圧をつくる時に利用される。
- 1. a, b, c
  - 2. a, b, e
  - 3. a, d, e
  - 4. b, c, d
  - 5. c, d, e