

医用工学概論

第8回 電子回路

今回の内容

- 整流回路

ダイオードを使った回路の例

- 増幅回路

増幅度、利得、トランジスタを使った回路の例

- フィルタ回路

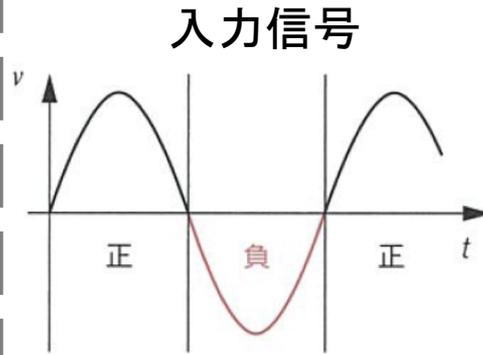
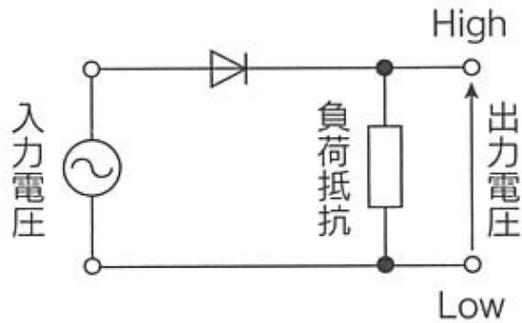
特定の周波数のみ通過(またはカット)する回路

- オペアンプ

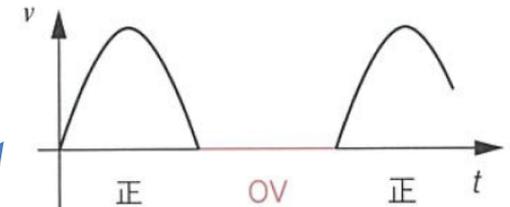
性能の良い増幅器、差動増幅、回路の例

整流回路

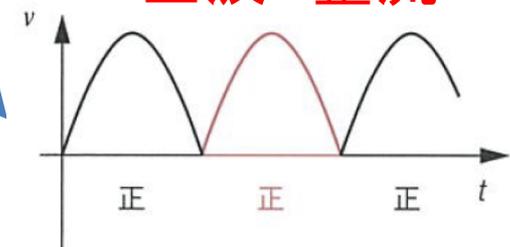
半波 整流回路



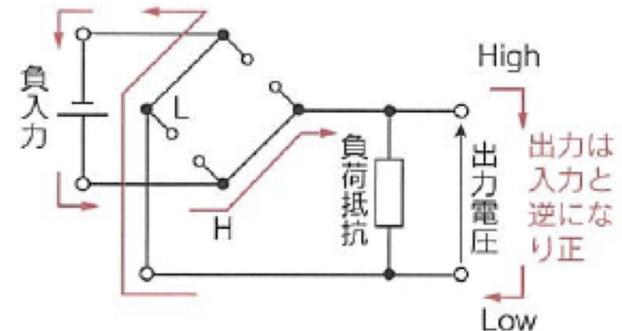
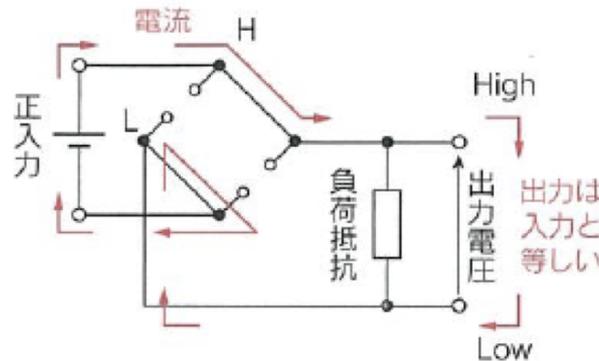
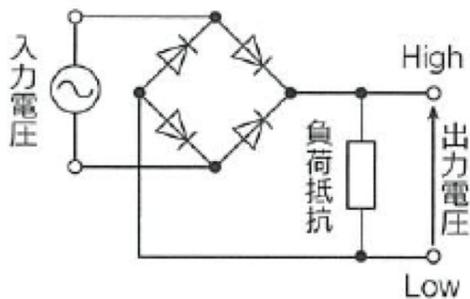
半波 整流



全波 整流



全波 整流回路



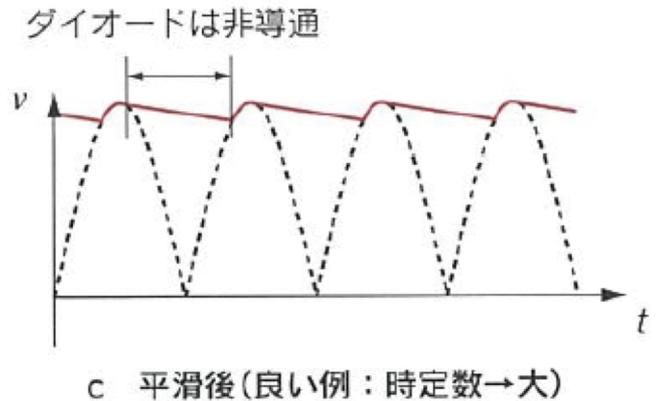
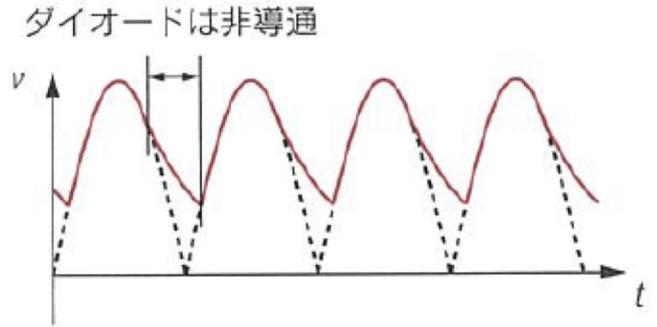
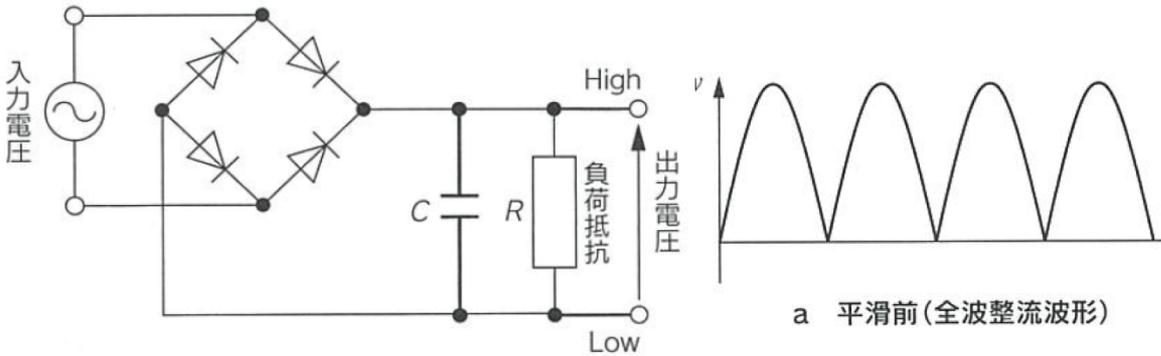
a ダイオードブリッジ型全波整流回路

b 入力が正の時間帯の等価回路

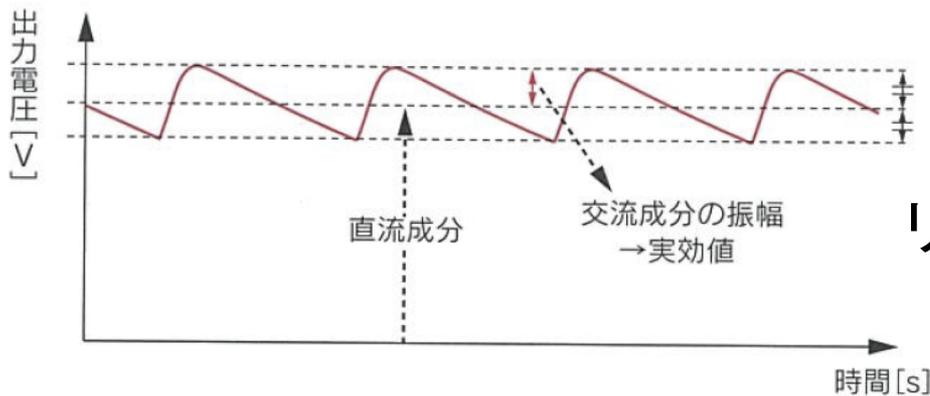
c 入力が負の時間帯の等価回路

平滑回路

整流平滑化 回路



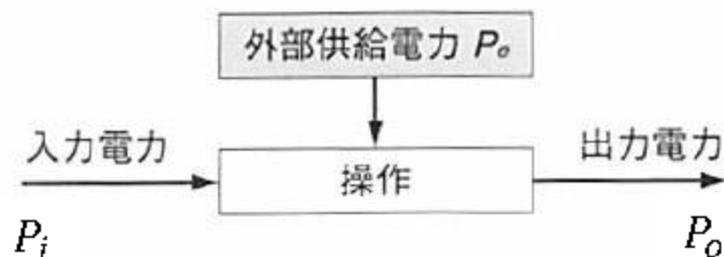
リップル 率 : 平滑化の良さ



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

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

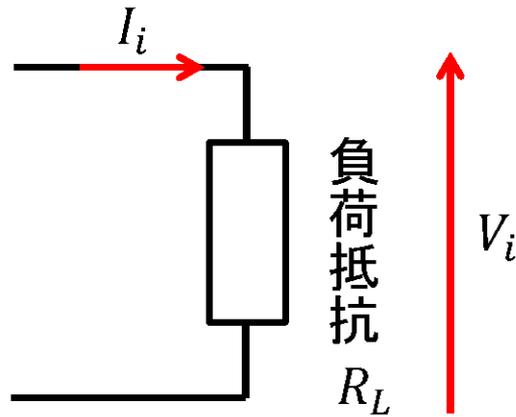


増幅度とは、**入力電力** に対する **出力電力** の **倍率**

$$\text{増幅度 } A = \frac{P_o}{P_i}$$

増幅器

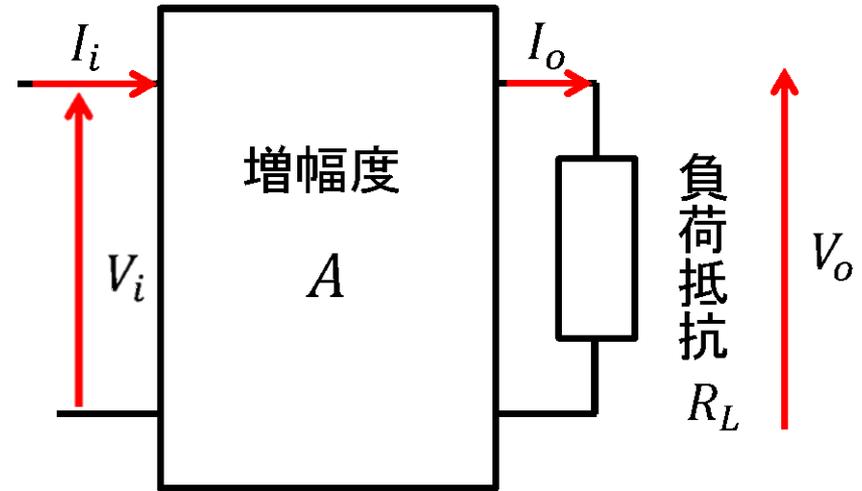
挿入前



負荷に供給される電力

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

挿入後



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

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

増幅度と利得

増幅度はレンジが広いいため、**対数表示** で表すことがある。

$$10^a = A$$

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

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

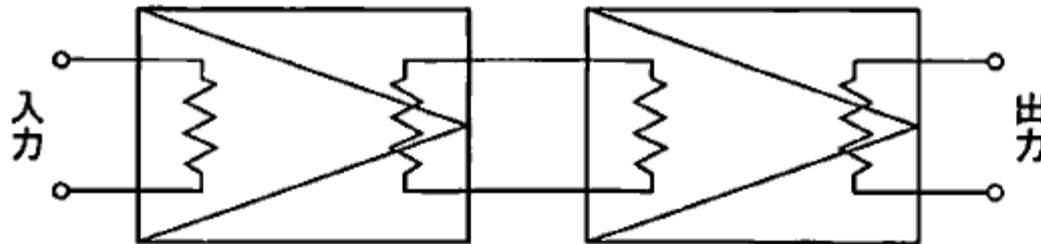
(注) 増幅度(A)とデシベル [電圧増幅]

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

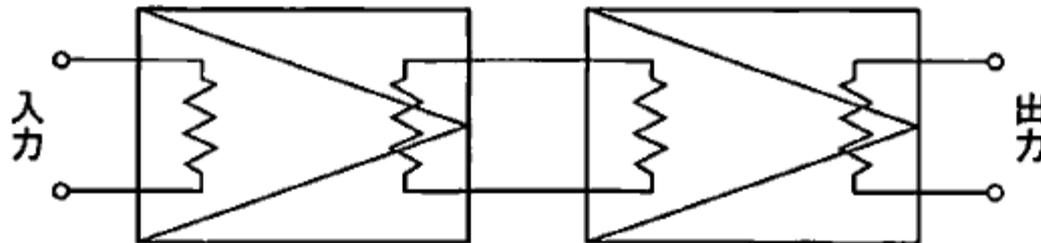
増幅度の計算例

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

$$\begin{array}{rcccccc} 2\text{倍} & \times & 5\text{倍} & = & 10\text{倍} \\ (0.3\text{B})\ 3\text{dB} & + & (0.7\text{B})\ 7\text{dB} & = & (1\text{B})\ 10\text{dB} \end{array}$$

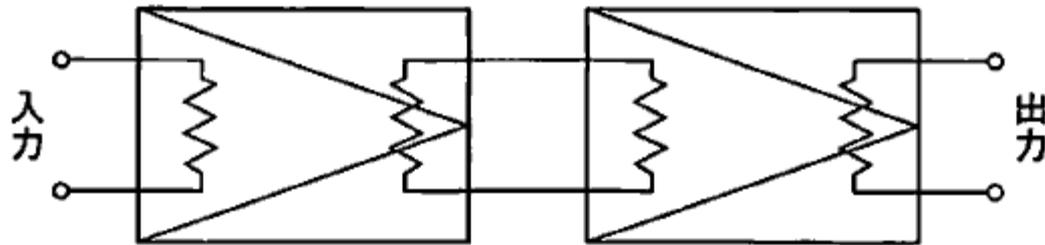


$$\begin{array}{rcccccc} 100\text{倍} & \times & 1,000\text{倍} & = & 100,000\text{倍} \\ (2\text{B})\ 20\text{dB} & + & (3\text{B})\ 30\text{dB} & = & (5\text{B})\ 50\text{dB} \end{array}$$

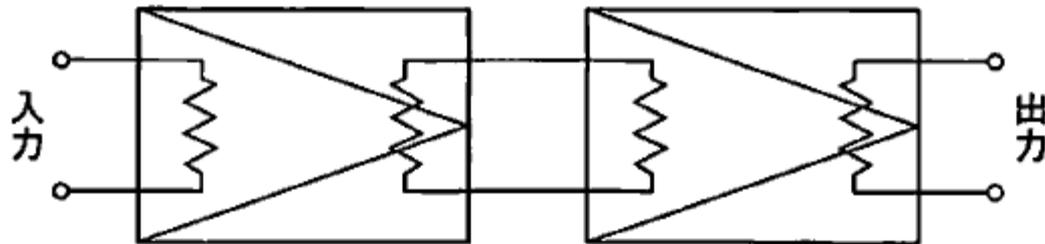


増幅度の計算例

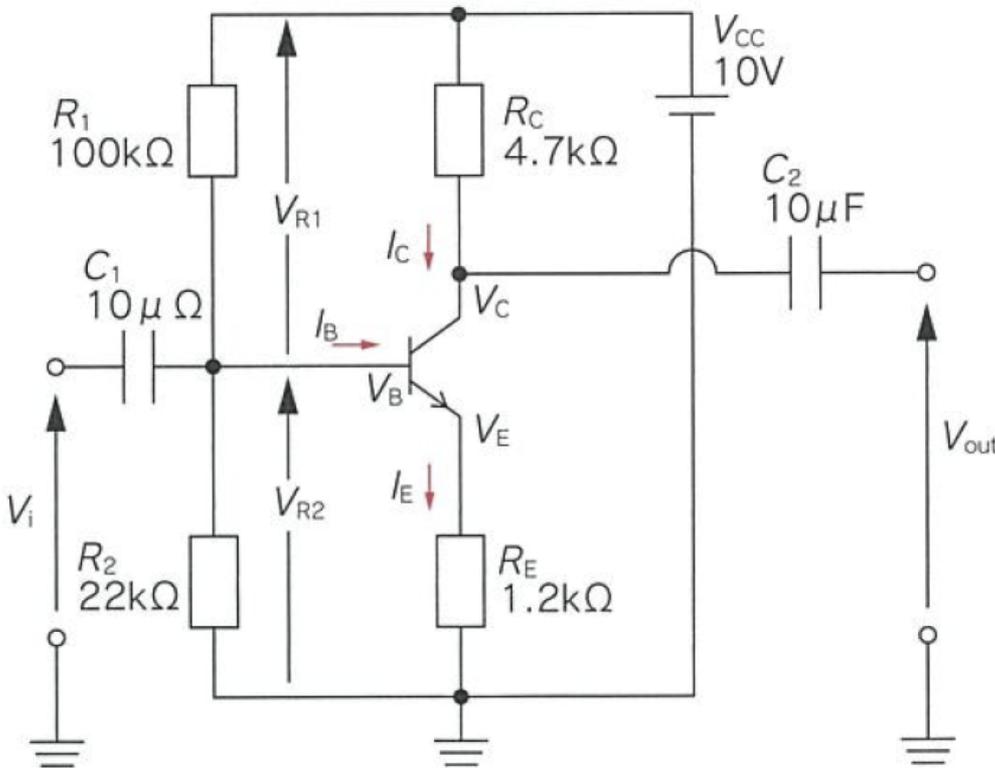
$$\begin{array}{ccccccc} 1/2\text{倍} & \times & 1/5\text{倍} & = & 1/10\text{倍} \\ -3\text{dB} & + & -7\text{dB} & = & -10\text{dB} \end{array}$$



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



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 $I_C (\approx I_E)$ 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.

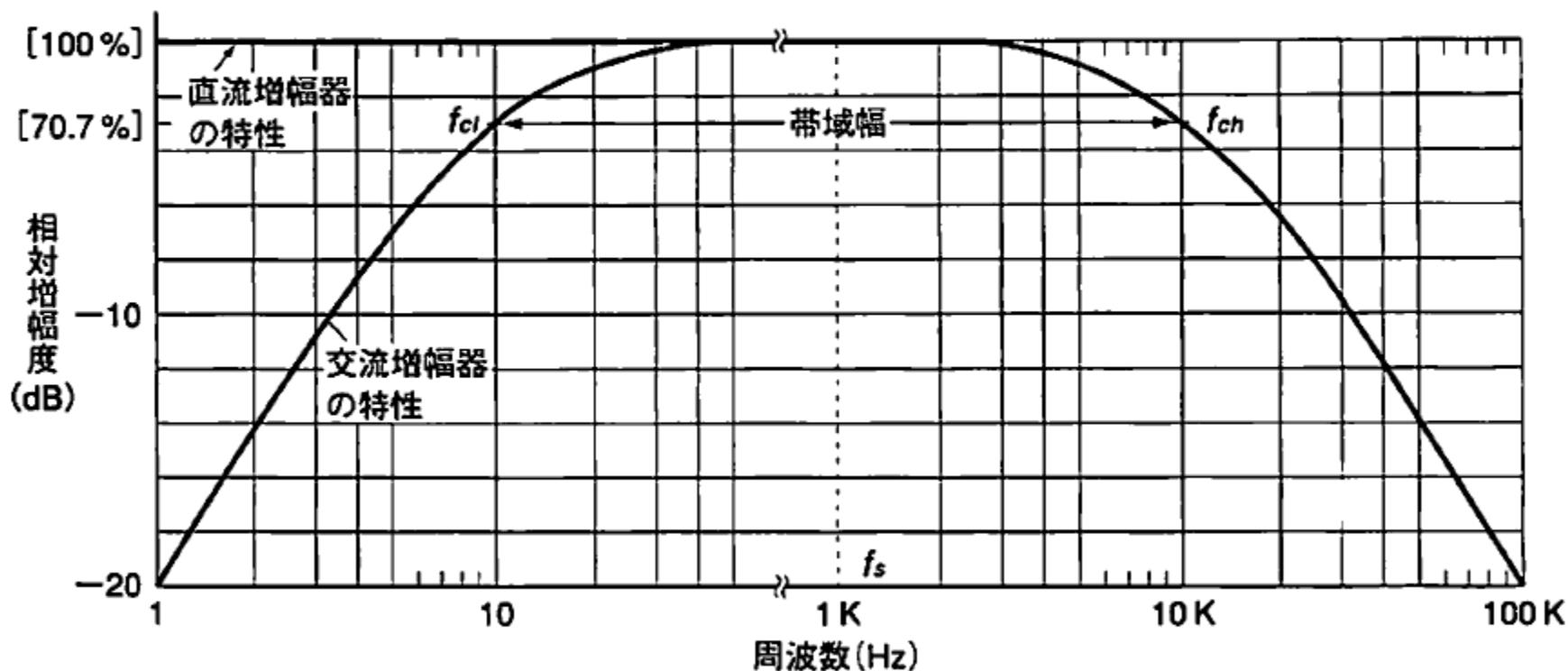
$$\text{電圧増幅率 } A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_C}{R_E}$$

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 微小電極用増幅器	0~数十Hz 0.05~100Hz 0~20kHz
生体信号の大きさの例	脳波	数~数百 μV
組織のインピーダンスの例	皮膚抵抗 細胞膜抵抗	数k Ω 数十M Ω

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。

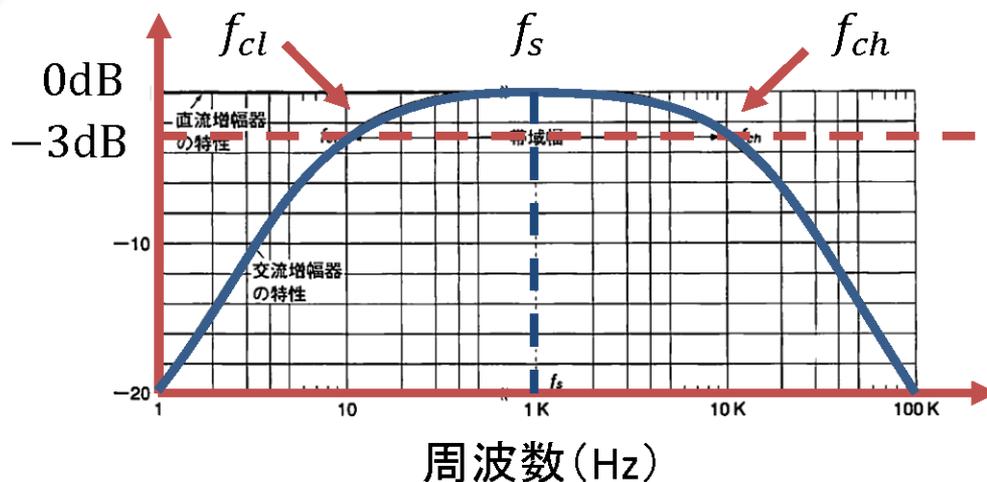


広い周波数で増幅度が高いほど、増幅器内部からの **雑音** が大きくなる。

基準周波数
 f_s を0dBとした時
の増幅度

周波数特性

相对増幅度
(dB)



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%)

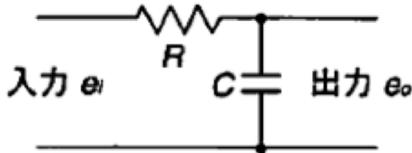
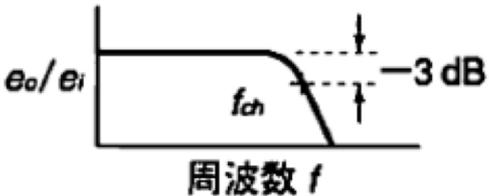
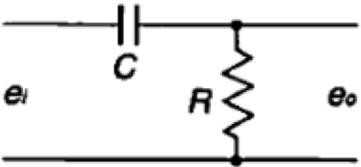
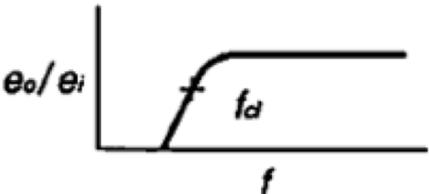
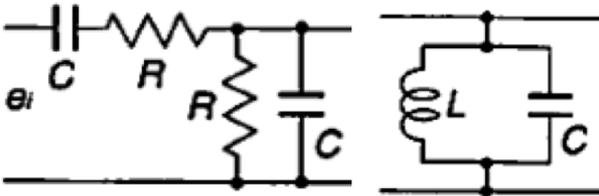
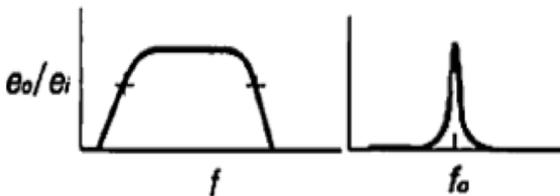
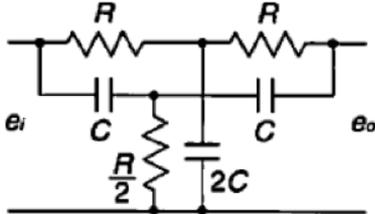
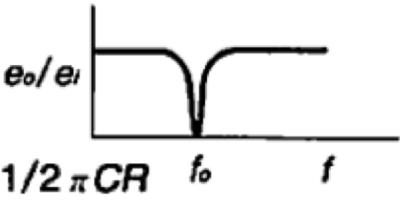
帯域幅

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。

フィルタ回路

特定の **周波数** の信号のみカット(または通過)させる

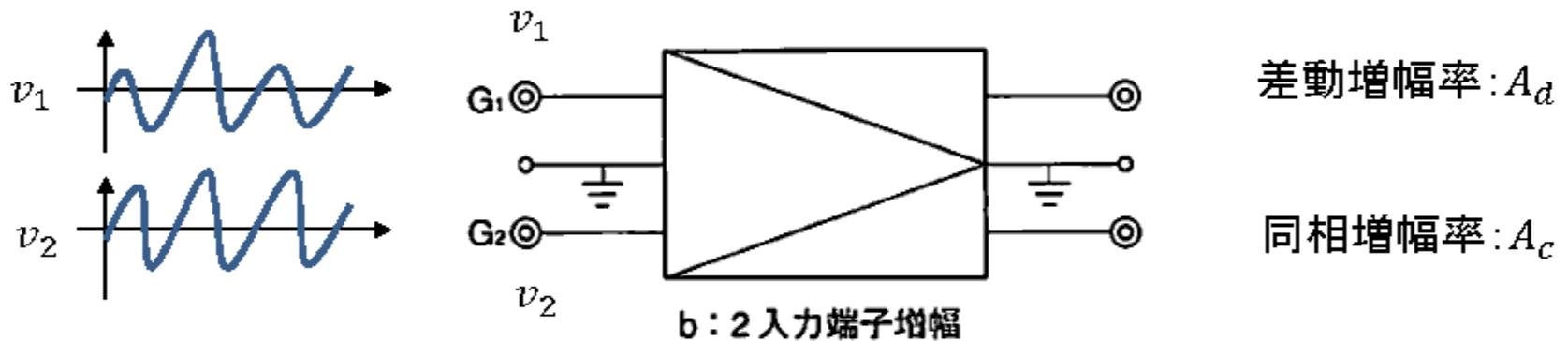
<p>ローパスフィルタ、 (低域通過回路、 高域遮断回路、RPF) 高周波を除去</p>	 <p>入力 e_i 出力 e_o</p> <p>積分回路 $f_{ch} = 1/2\pi CR$</p>	 <p>周波数 f</p>
<p>ハイパスフィルタ、 (高域通過回路、 低域遮断回路、HPF) 低周波を除去</p>	 <p>微分回路 $f_{cl} = 1/2\pi CR$</p>	 <p>周波数 f</p>
<p>バンドパスフィルタ、 (帯域通過回路、 BPF (band pass filter)) 特定周波数を通過</p>		 <p>周波数 f</p>
<p>バンドストップフィルタ、 (帯域除去回路、 BEF (band elimination filter)) 特定周波数を除去</p>		 <p>周波数 f</p> <p>$f_o = 1/2\pi CR$</p>

- RC方式の場合、遮断周波数には **時定数CR** が関係する

差動増幅器

2つの入力端子(+端子と-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 $v_c = (v_1 + v_2)/2$

同相除去比(弁別比) $CMRR = \frac{A_d}{A_c}$

出力

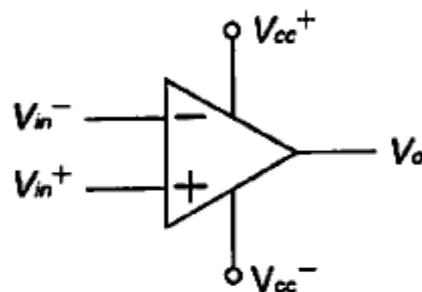
$$v_o = A_d v_d + A_c v_c$$

差動出力
(作動利得)

同相出力
同相利得

オペアンプ

オペアンプ(演算増幅器)は、**性質の良い**増幅器



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

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。

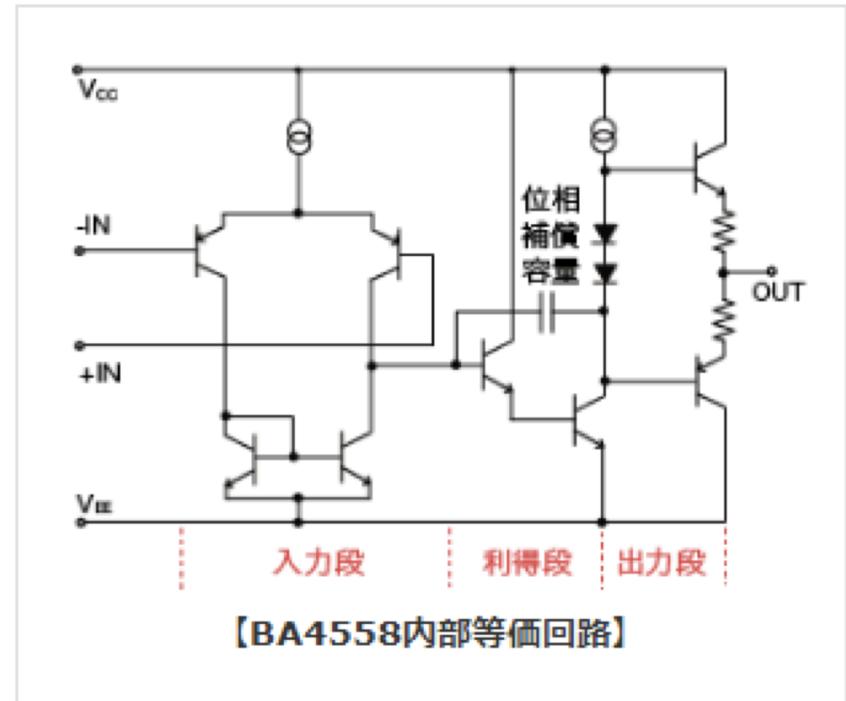
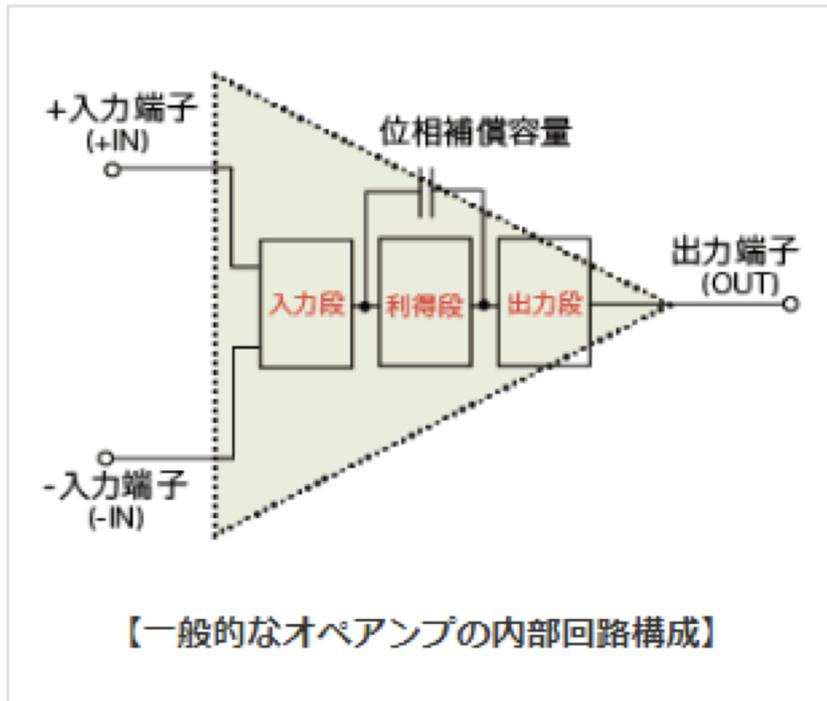
増幅度が非常に **大きい** ($A_v \approx \infty$ とみなせる)。

出力電圧 $V_o = A_v(V_{in}^+ - V_{in}^-)$

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

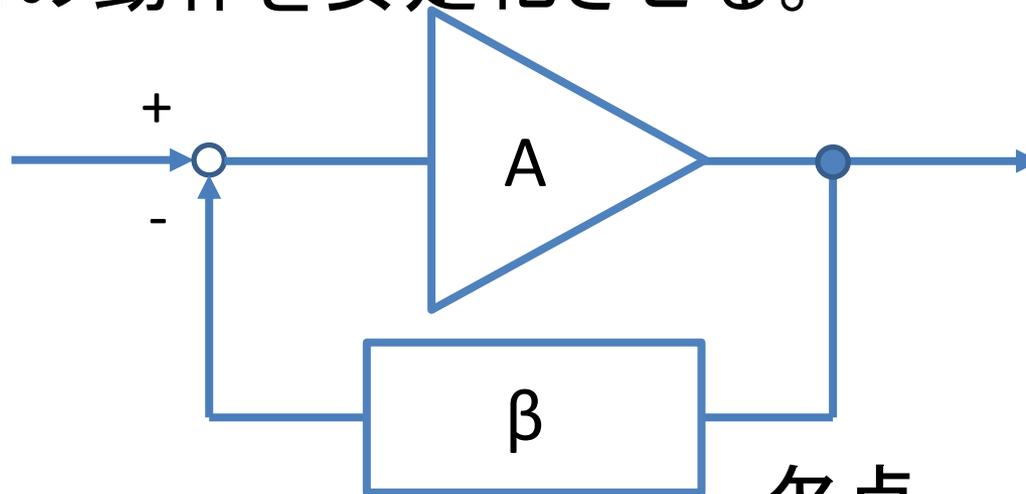


[回路構成 | オペアンプとは? | エレクトロニクス豆知識 | ローム株式会社](https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/opamps/op_what2)

https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/opamps/op_what2

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。



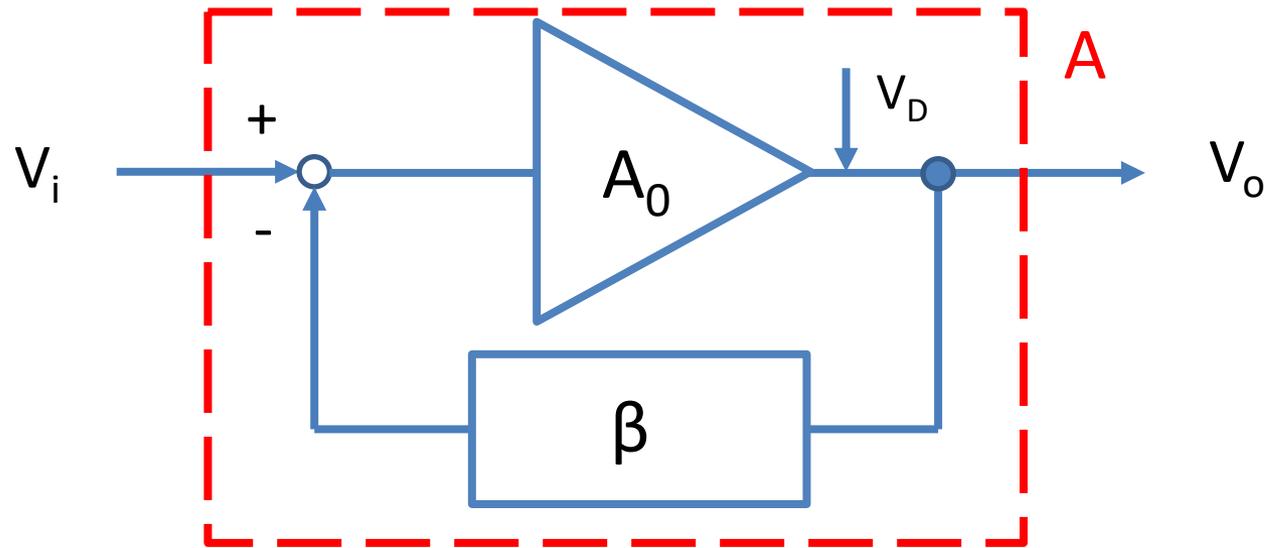
利点

- ・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



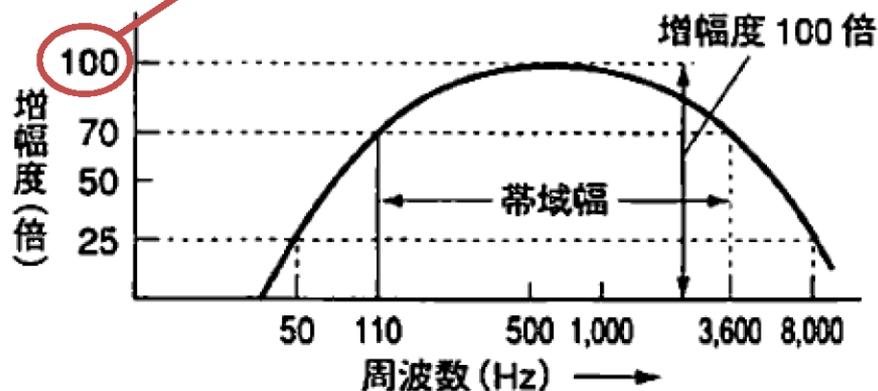
オペアンプの増幅度 A_0 が十分に大きければ、

- 増幅度 $A = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \approx \frac{1}{\beta}$ 増幅度が **帰還率 β** 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

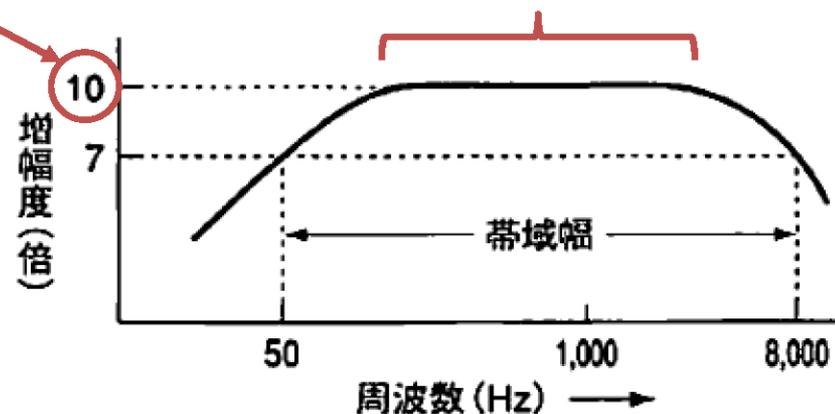
周波数特性 の改善

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

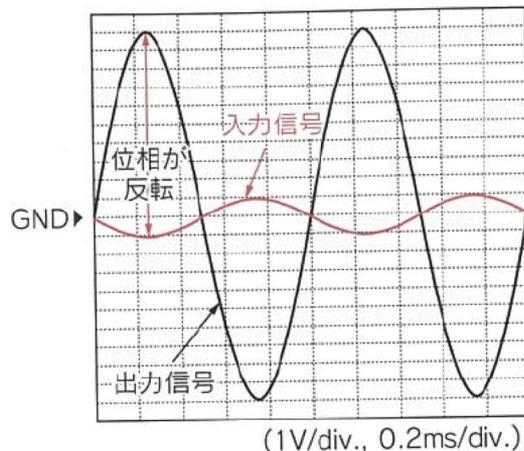
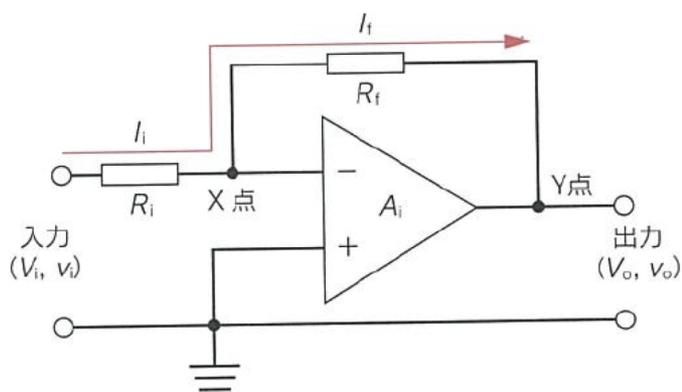
入力信号の周波数に対して、増幅度の変化が小さい。



b: 負帰還をかけた場合の周波数特性

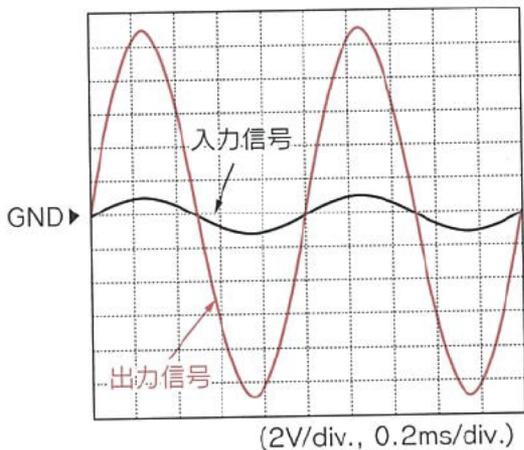
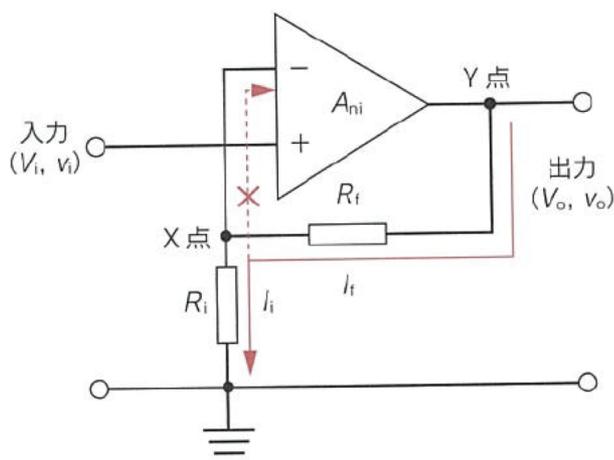
オペアンプによる増幅回路

反転増幅回路：入力信号の位相を180度ずらして増幅



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

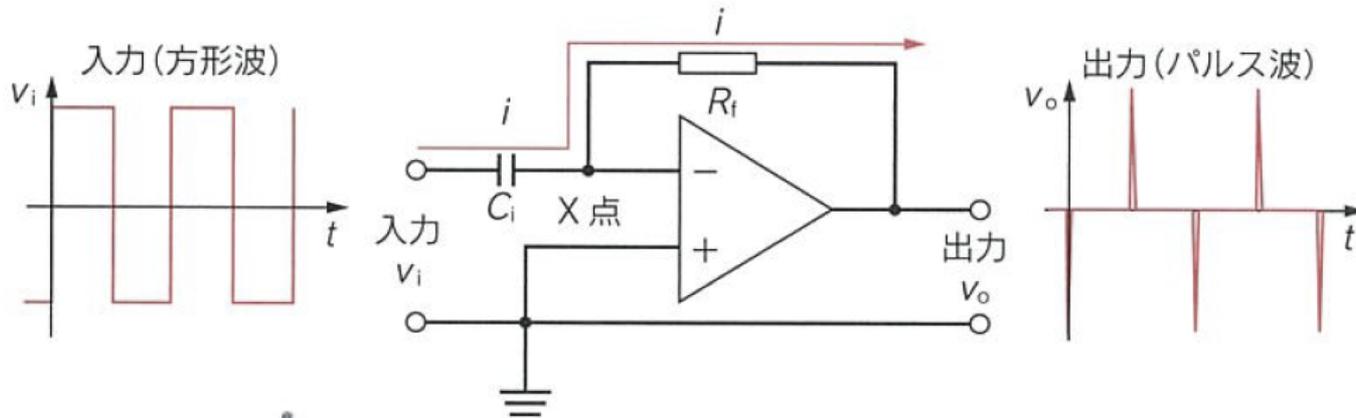
非反転増幅回路：入力信号の位相を変えずに増幅



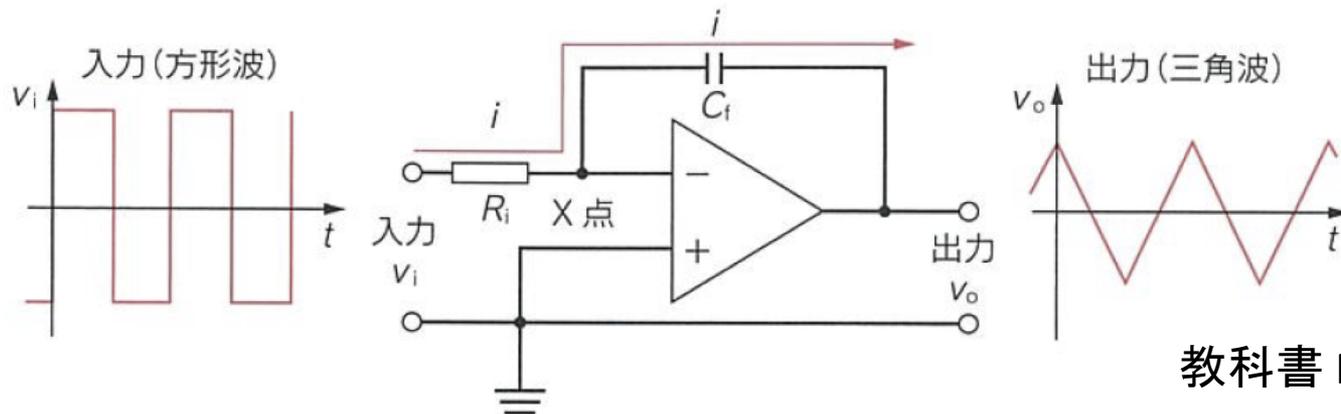
$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) v_i$$

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)。

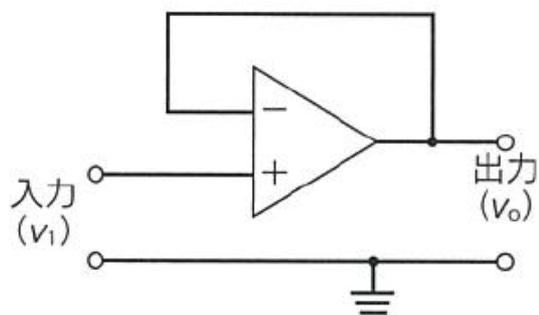
- 加算回路

入力波形の加算を出力する。

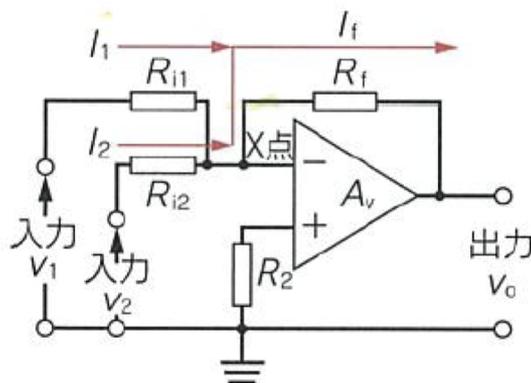
- 比較回路(コンパレータ)

入力と基準電圧を比較する。

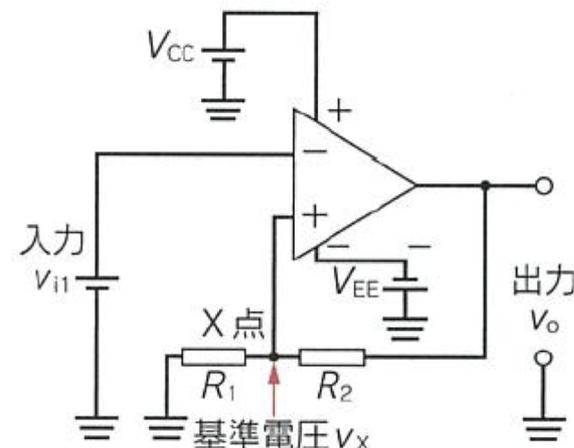
教科書 P. 79



a ボルテージフォロワ

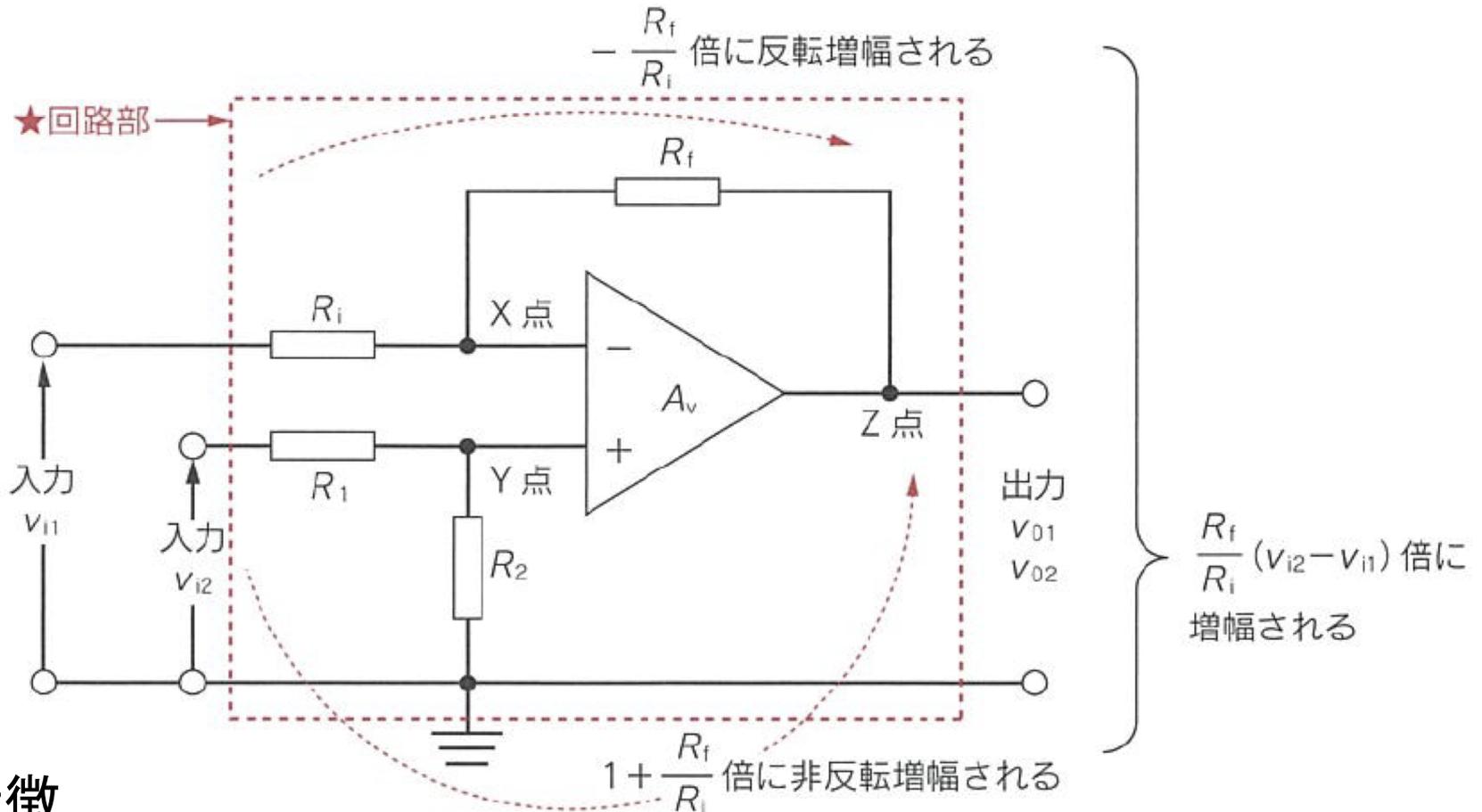


b 加算回路



c 比較回路
(非反転増幅型)

差動増幅回路



特徴

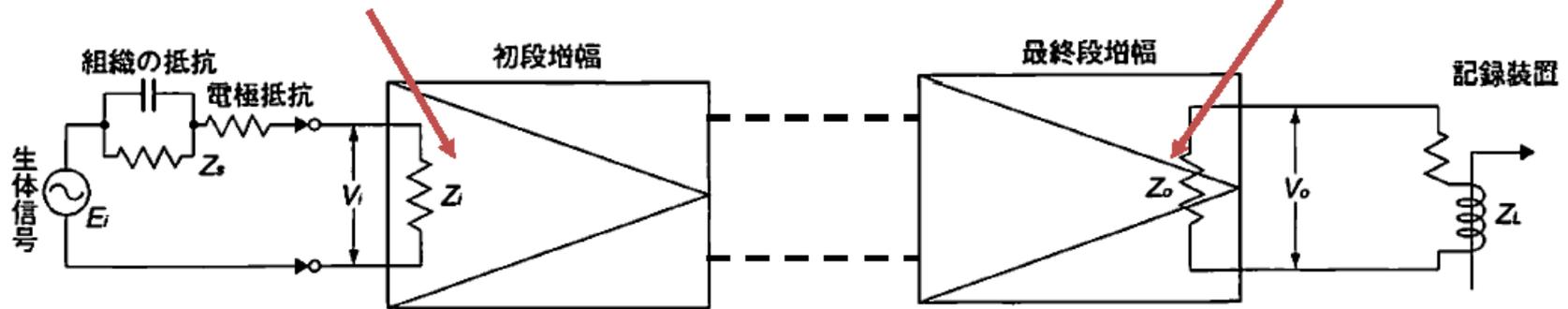
- ・ **電位差** を増幅可能
- ・ **供給電源電圧** の変動に対して安定
- ・ **直流バイアス** を除去し、信号のみを増幅可能

教科書 P. 80

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。↔ (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。