

仙台市/仙台市産業振興事業団

ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー

C04/Rev 1.01

第4回

# アナログ信号の基礎

仙台市地域連携フェロー

熊谷正朗

[kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp](mailto:kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp)

東北学院大学工学部  
ロボット開発工学研究室

RDE

# 今回の目的

---

## ○ アナログ信号の基礎

テーマ1: アナログを触る基礎知識

- ・ 抵抗/コンデンサ/コイルと基本法則
- ・ 周波数特性という考え方

テーマ2: アナログ信号の処理回路

- ・ 増幅回路
- ・ フィルタ回路

テーマ3: アナログを触るときの心得

- ・ 信号を劣化させない工夫・回路

# イントロダクション

---

## ○ デジタルとアナログ

### アナログ

- ・ 連続的な値 (1と1.00………1は異なる)
- ・ 世の中のほぼ全ての現象はアナログ

### デジタル

- ・ いくつかの明確に区別できる値に限定  
「0か1か」 (※0/1限定ではない)
- ・ 中間を無視することで  
曖昧さの排除 / 強さ

# イントロダクション

---

## ○ なぜアナログはやっかいなのか？

信号の劣化が起きやすい

～ 電気信号にはノイズがつきもの

アナログ：元の信号に少しでも変動が出ると、それが表している「値」の誤差になってしまう。

デジタル：信号を受けるとき「大きい」「小さい」などで解釈するため、そこそこの変動まで耐えられる。

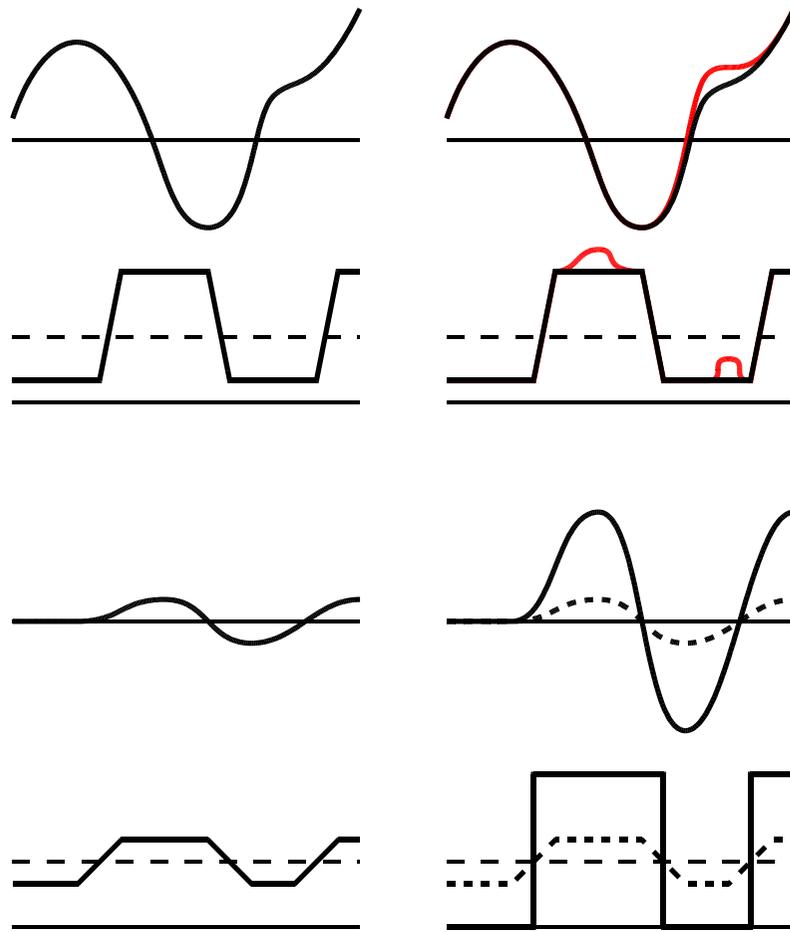
回路に「精度」が要求される

アナログ：「比例関係」に非常に気を使う

デジタル：とにかく振り切れればよい

# イントロダクション

## ○ なぜアナログはやっかいなのか？



アナログでは少しの電圧変化も値の変化として残る  
デジタルでは閾値(しきいち, 中間の基準)を超えなければ、値が変わらない

アナログは「きちり」倍率の決まった回路が必須

デジタルは閾値からの差を、「倍率問わず」に、とにかく拡大するだけ

# イントロダクション

---

## ○ それでもアナログは必要

### ◇ 世の中の現象がアナログだから

- ・ 明るさ、温度、流速など、大半は連続値。  
→ 電気に変換するセンサがアナログ  
※ デジタルな計測法などもある。

### ◇ デジタルも「電気信号＝アナログなもの」

- ・ 速度の速いデジタル信号には、  
アナログの理解が必要なことがある。

# アナログ回路の基礎知識（信号）

## ○ 電圧と電流

### ・いわゆる電圧（電位差）

（数  $\mu\text{V}$  ～）数  $\text{mV}$  ～ 十数  $\text{V}$  を扱う。

一般に「アナログ値」の表現は電圧。

本来は「差」なので2点必要な値だが、

基準点を決めて、一点のみの電圧を表現。

### ・いわゆる電流

（数  $\text{pA}$  ～）数  $\mu\text{A}$  ～ 数十  $\text{mA}$ （～ 数百  $\text{mA}$ ）

電圧のあるところ、電気が流れる。

# アナログ回路の基礎知識（信号）

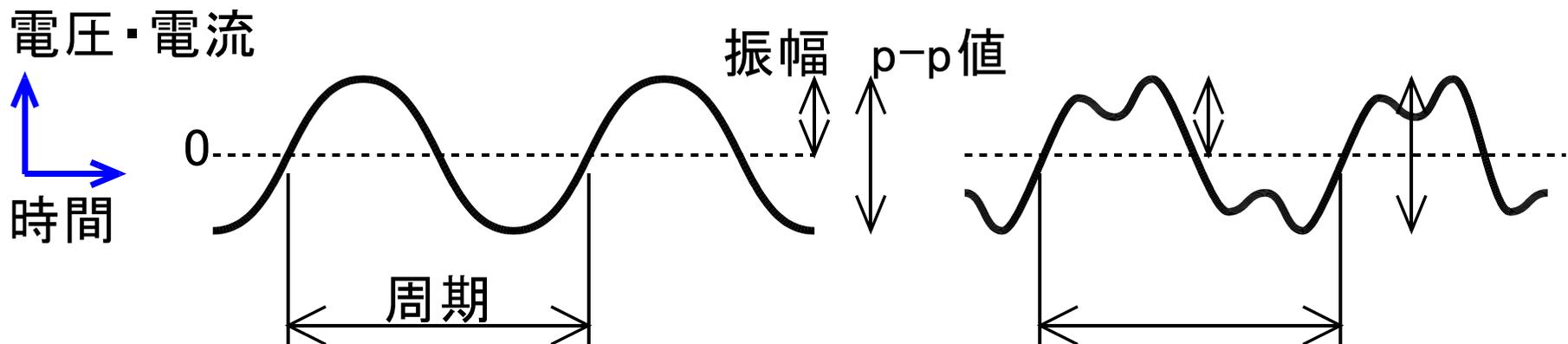
## ○ 電圧と電流の時間変化

- ・ 一般に、時間とともに変化する。
- ・ 周期性(繰り返し)がある場合：

周 期： 繰り返しの時間間隔

周波数： 1秒あたりの繰り返し数 =  $1 \div$  周期

振 幅： 大きさ      別表記：p-p値(ピークトゥピーク)



# アナログ回路の基礎知識（部品）

## ○ 抵抗（抵抗器）

- ・ 電流の流れを制限する部品。
- ・ オームの法則通りに作用する部品、概念。

## ○ オームの法則 単位

$$E[V] = R[\Omega] I[A]$$

電圧 = 抵抗 × 電流

電圧は電流に比例する

電流の正：決めた方向と同じ

電圧の正：正の電流の下流から見た上流側



※電圧の記号はEかV

# アナログ回路の基礎知識 (部品)

## ○ コンデンサ (キャパシタ)

- ・「電気」(電荷)を貯める部品、概念。
- ・信号の周波数が高いほど良く通す。

## ○ コンデンサの法則

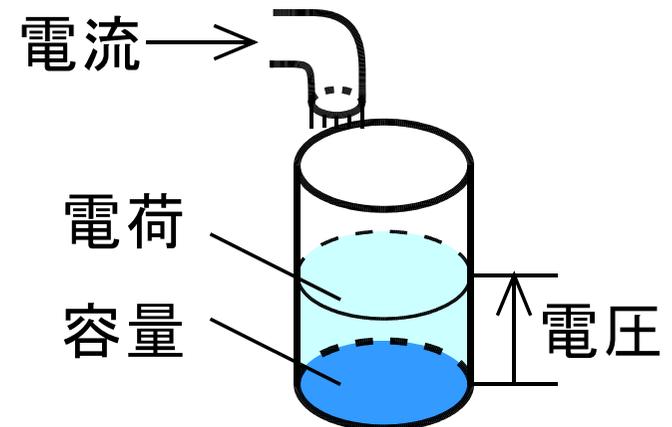
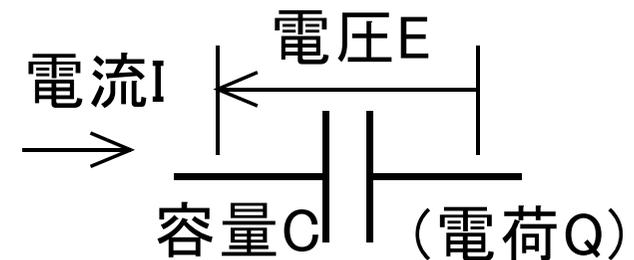
$$Q[C] = C[F]V[V]$$

電荷 = 静電容量 × 電圧

$$Q[C] = I[A]t[s] = \int i(t)dt$$

電荷 = 電流 × 時間

= 電流の時間積分



# アナログ回路の基礎知識（部品）

## ○ コイル（インダクタ）

- ・ 電流を流し続けようとする部品、概念。
- ・ 信号の周波数が高いほど通しにくい。

## ○ コイルの法則

$$V[V] = L[H] (I/t)[A/s]$$

電圧 = 自己インダクタンス × 電流の時間変化

$$v(t) = L di(t)/dt$$

電圧 = 自己インダクタンス × 電流の時間微分



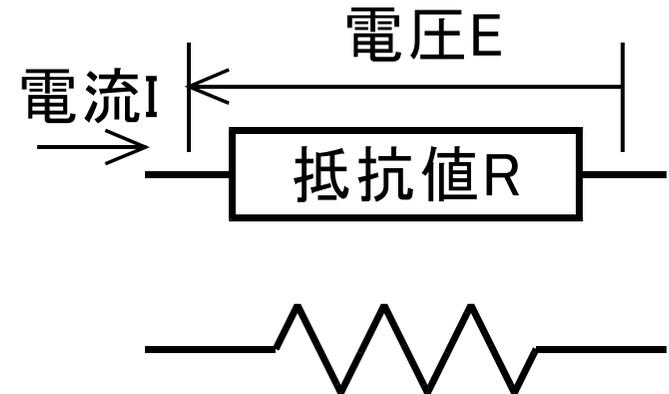
※アナログ信号用回路での登場は少ない

# アナログ回路の基礎知識（法則）

## ○ オームの法則

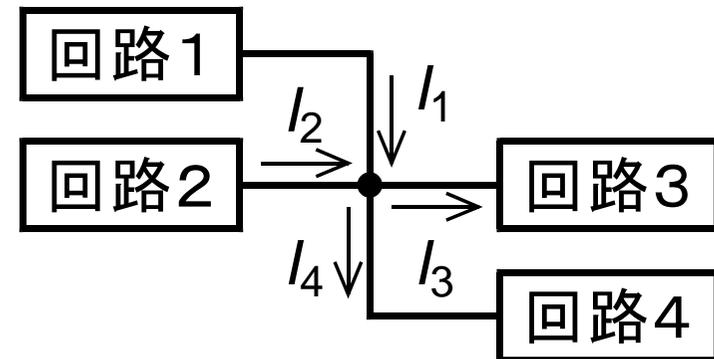
$$E = RI$$

※電流が流れると下流の  
電圧は下がる。



## ○ キルヒホッフの法則(第1)

流れ込む電流の総和は  
流れ出す電流の総和に  
等しい。



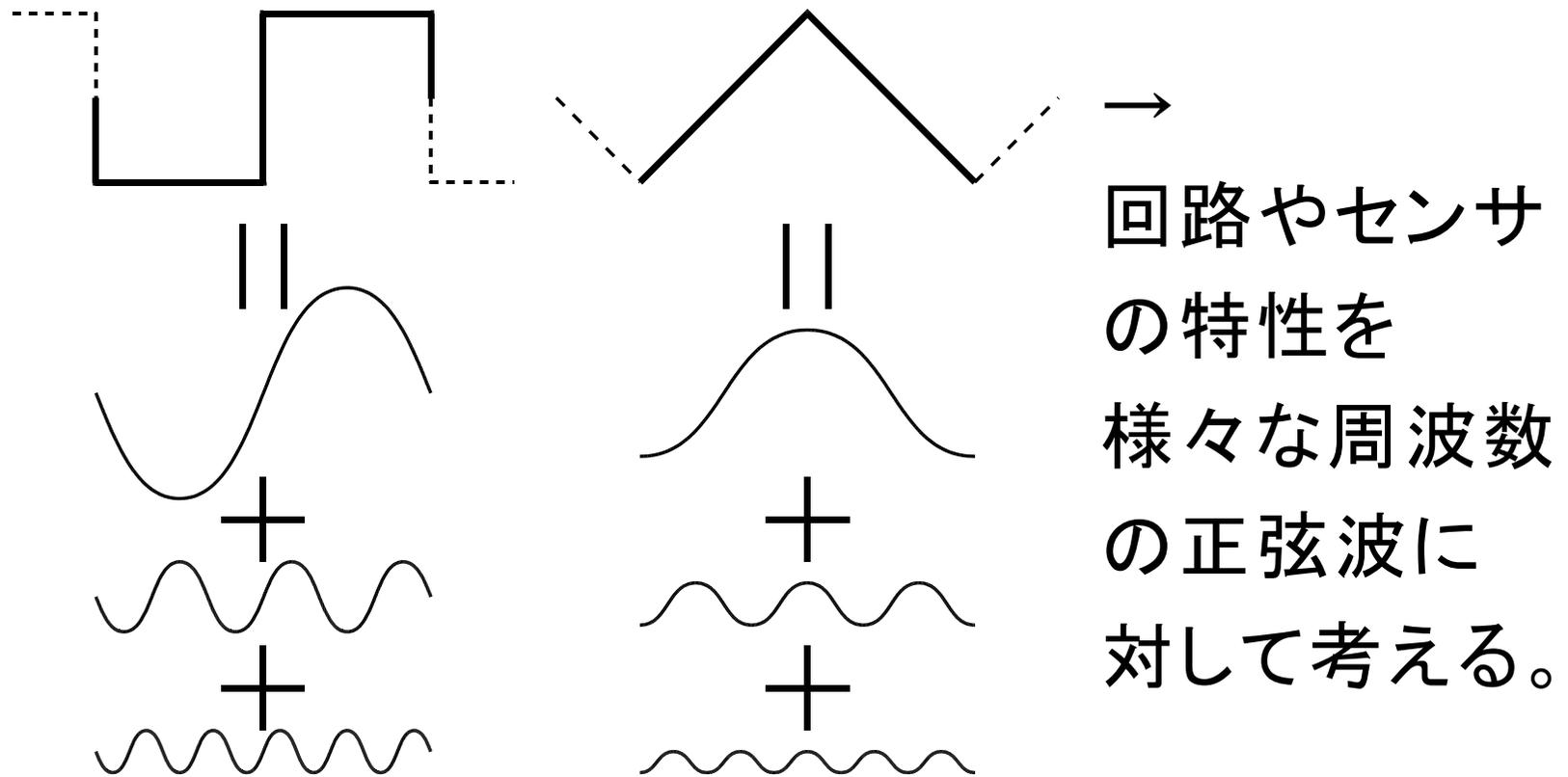
$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

※矢印を書く向きによる。逆向きなら電流は負の値となる。

# 周波数特性という考え方

○ すべての信号は正弦波に分解できる

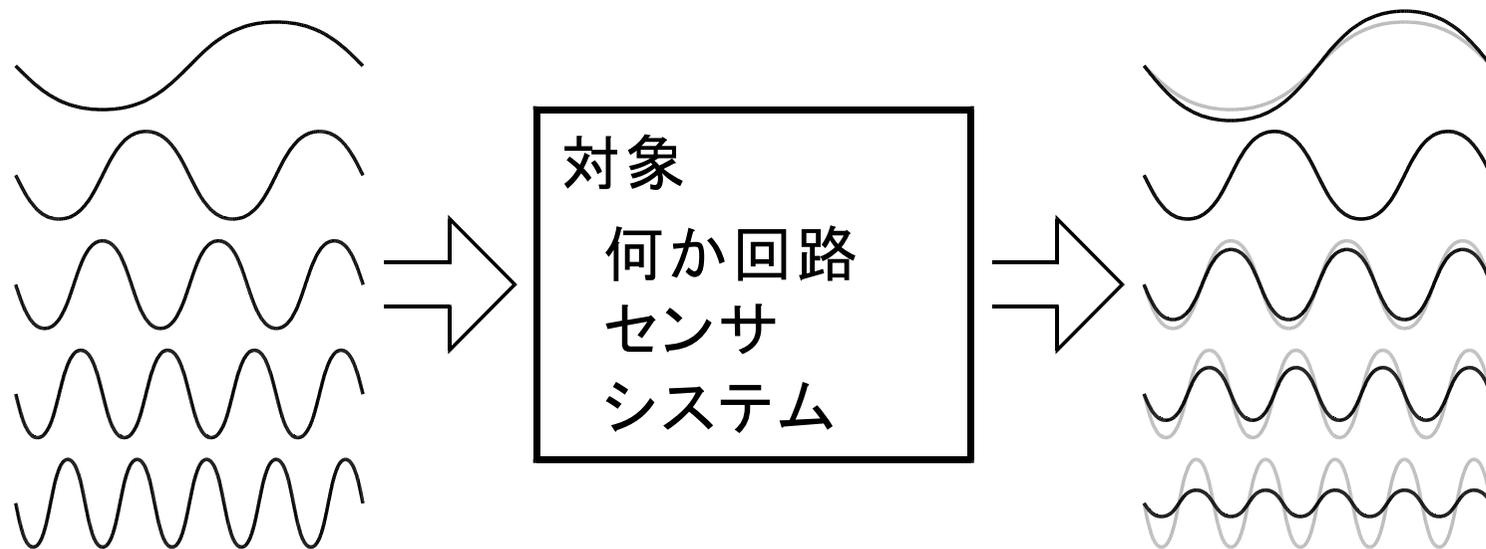
数学的にはフーリエ級数・変換と呼ばれる原理



# 周波数特性という考え方

## ○ 正弦波応答

なにかに、正弦波を入れたら、何が出てくる？



周波数によって信号の大きさがかわる、など

※正弦波をいれて同じ周波数の正弦波が出る＝「線形」が一般的に用いられる回路、センサの前提（対義：非線形）

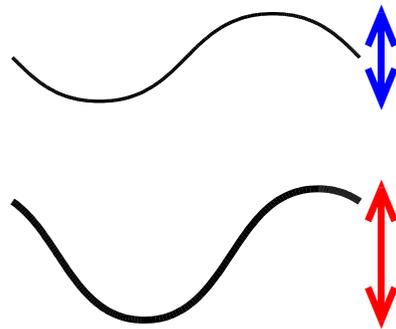
# 周波数特性という考え方

## ○ 正弦波応答

正弦波をいれて変わるところ：増幅率と位相



振幅の変化 = 増幅率



= 出力振幅 / 入力振幅

タイミングの変化 = 位相

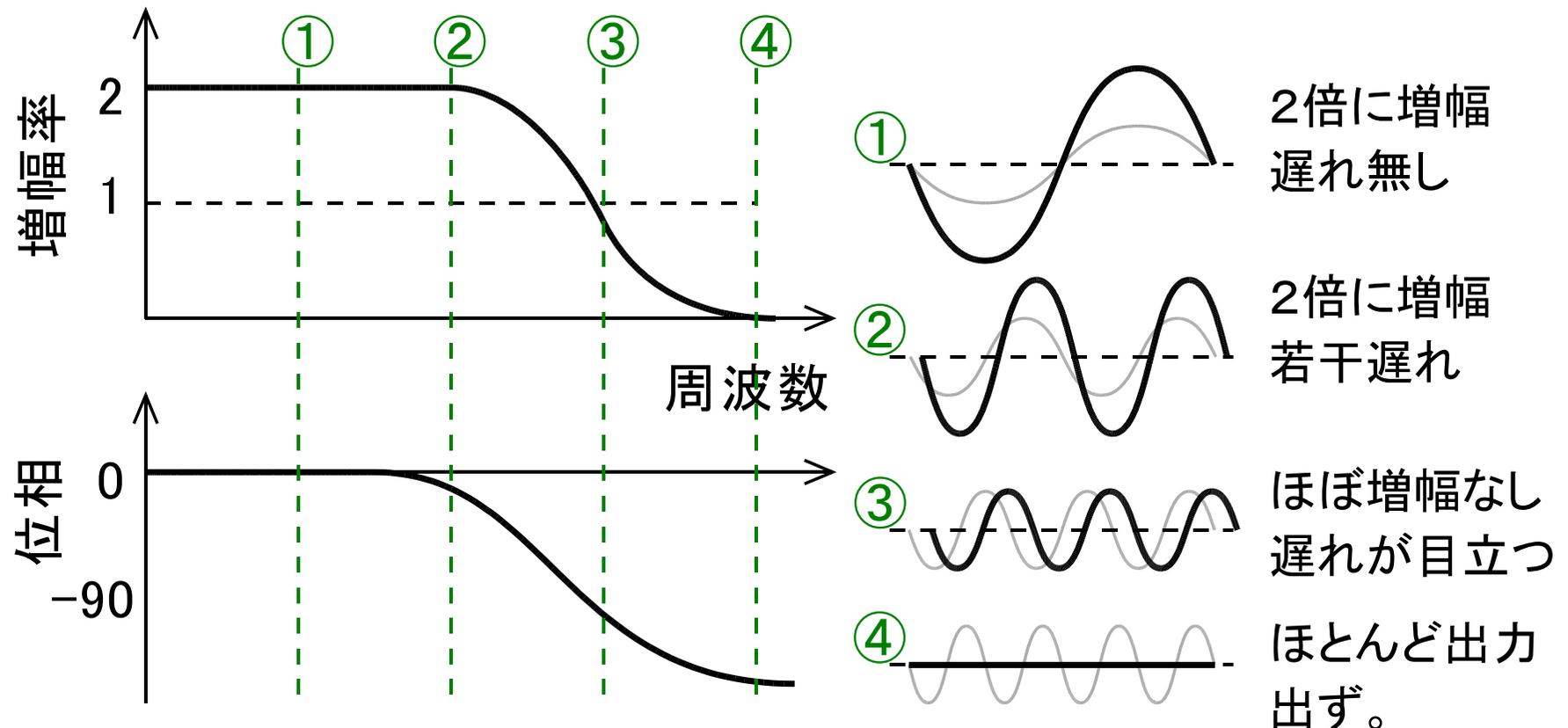


※一周期を360度に換算する

# 周波数特性という考え方

## ○ 周波数特性（周波数応答）

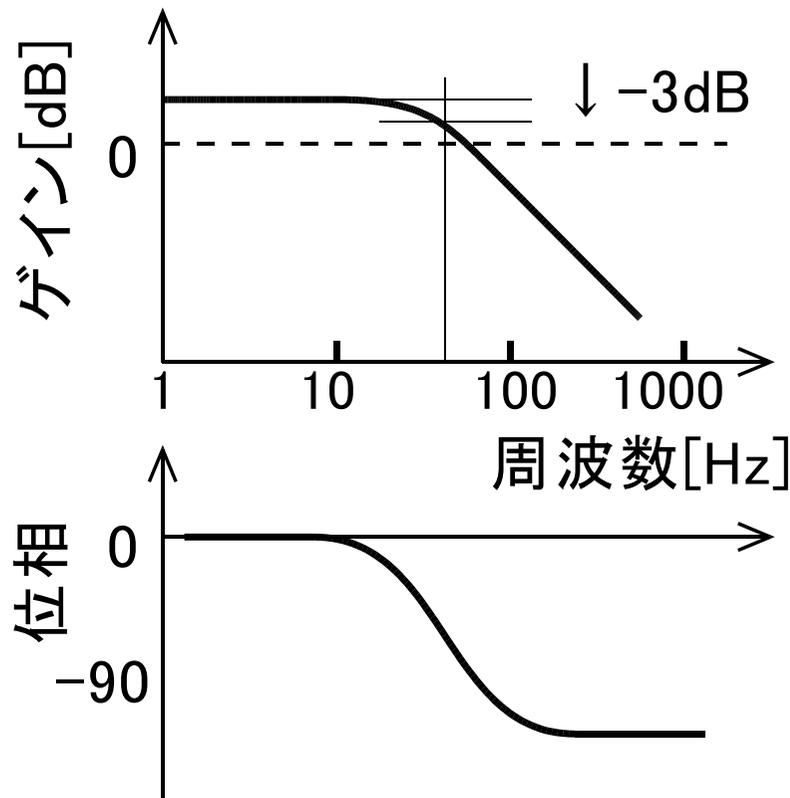
周波数に対する 増幅率と位相の関係



# 周波数特性という考え方

## ○ 周波数特性（周波数応答）

周波数に対する 増幅率と位相の関係



実務上で重要な補足：

- ・ 周波数は対数(log)で表されることが多い (1,10,100が等間隔)
- ・ 増幅率は  
ゲイン =  $20 \log_{10}(\text{増幅率})$  [dB]  
で表すことが多い 0.1倍 = -20dB  
10倍 = 20dB 100倍 = 40dB
- ・ ゲインの-3dB = 0.7倍 ( $1/\sqrt{2}$ ) に着目することが多い(“帯域”)

# 今回の目的

---

## ○ アナログ信号の基礎

テーマ1: アナログを触る基礎知識

- ・ 抵抗/コンデンサ/コイルと基本法則
- ・ 周波数特性という考え方

テーマ2: アナログ信号の処理回路

- ・ 増幅回路
- ・ フィルタ回路

テーマ3: アナログを触るときの心得

- ・ 信号を劣化させない工夫・回路

# アナログ回路でしたいこと

## ○ デジタル化する前の処理

### ◇ 信号の大きさの調整

- ・ 増幅 (振幅の調整)
- ・ レベルシフト (使う電圧幅の変更)

### ◇ 最低限の演算

- ・ 加減算
- ・ 検波/整流 (波形→(特定の)信号振幅)

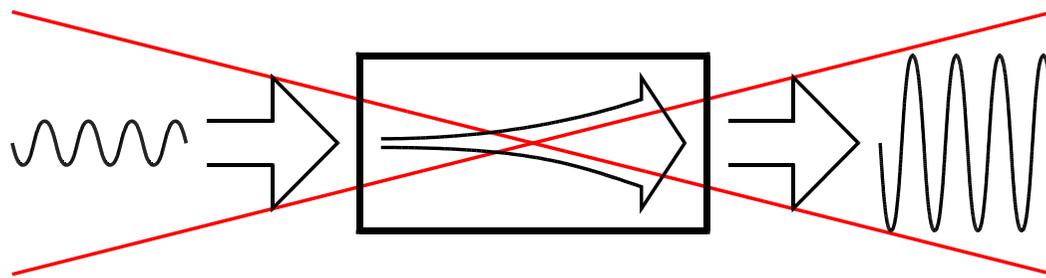
### ◇ ノイズ除去

- ・ フィルタ

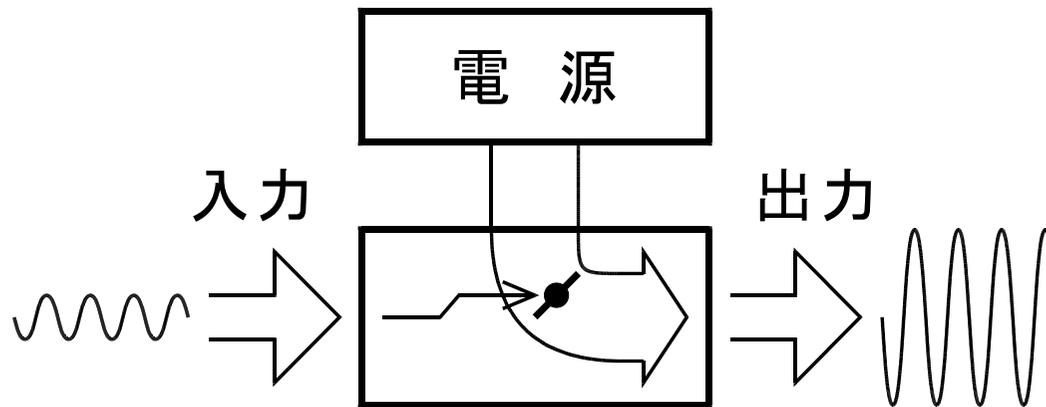
# 増幅回路

## ○ 増幅する、ということ

増幅は「うちでの小槌」ではない



増幅は、小さな信号がただ大きくなる訳ではない。



入力信号によって、電源から出力への電気の流れ具合を「適切なルールで」調整すること。

# 増幅回路

## ○ 典型的な増幅回路の特徴

### ◇ 入力信号と出力信号の関係

- ・ 一定の増幅率で増幅する 例: 10倍
- ・ 正負(増減方向)が同じ/反転
- ・ 基準点が0[V] / 適当な定電圧 例: 2.5V基準

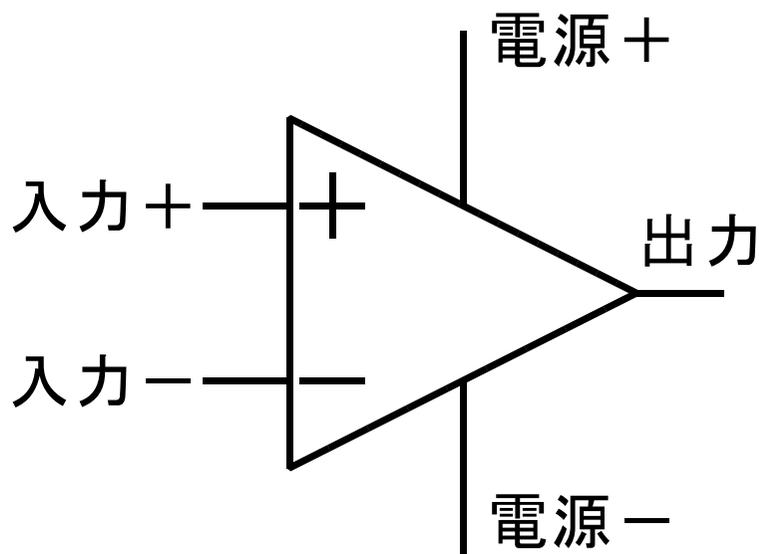
### ◇ 限界/制限

- ・ 出力電圧の制限 (回路仕様 & 電源による) 数V ~ 十数V, ±
- ・ 出力電流の制限 (回路仕様が主因) 数mA ~ 数十mA
- ・ 前段の回路の負担 (入力に何mA流れるか)
- ・ 周波数帯域の限界 (何Hzまで「一定」か)

数十kHz ~ M, GHz

# 増幅回路

## ○ アナログ回路で良く使われるオペアンプ



回路図上の記号

動作:

- ・ (入力+) - (入力-) の電圧差を非常に大きく(数万~数百万倍)増幅して出力する。

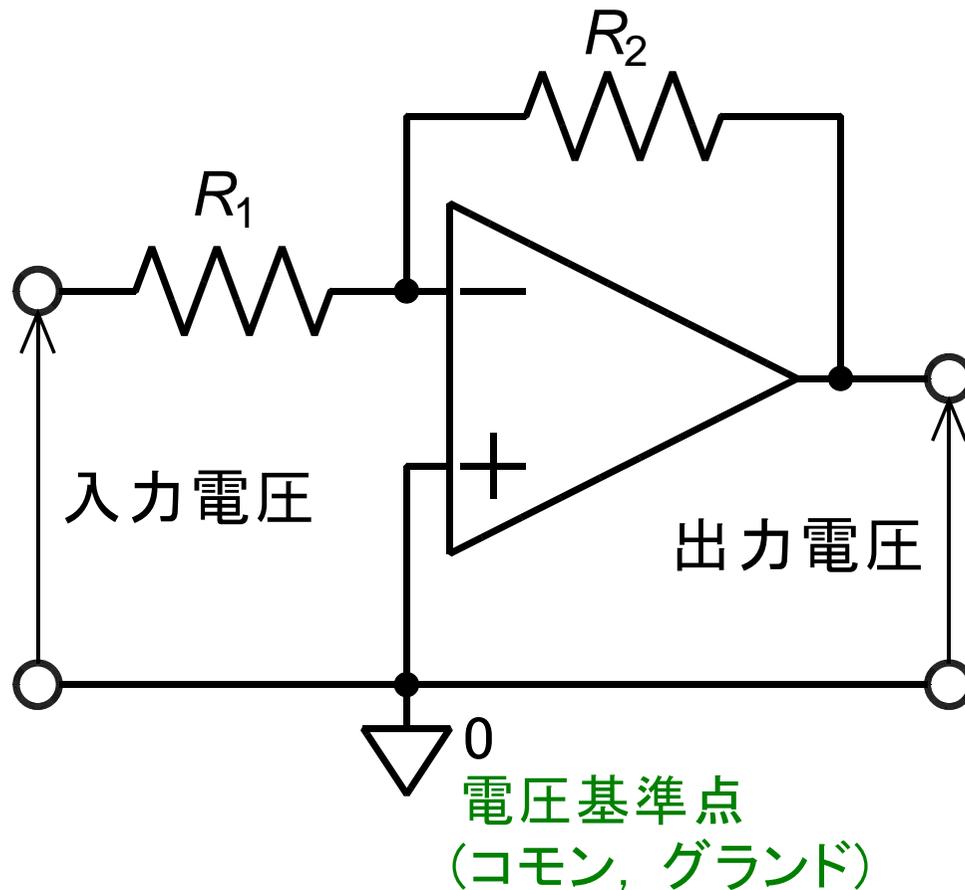
特徴:

- ・ 電源は正負(±12V等)で使う場合と単電源(+5と0等)で使う場合があるが、その範囲の出力しかできない。
- ・ 入力端子には電流がほとんど流れない = 回路に影響無

※電源端子は略される場合あり

# 増幅回路

## ○ 反転増幅回路



動作：

出力電圧

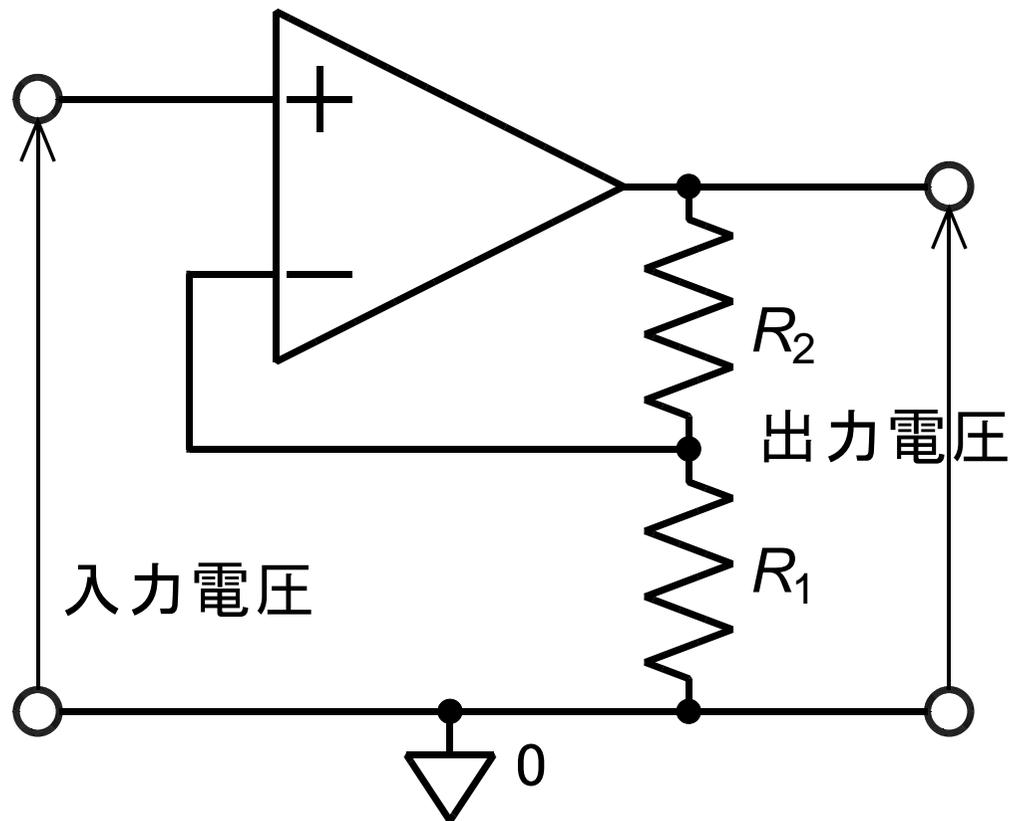
$$= -(R_2/R_1) \text{入力}$$

特徴：

- ・ 電圧の±が逆に  
※メカトロ的には影響少
- ・ 多くのオペアンプ回路の派生元な基本回路
- ・ 入力には[電圧/ $R_1$ ]の電流が流れてしまう

# 増幅回路

## ○ 非反転増幅回路



動作：

出力電圧

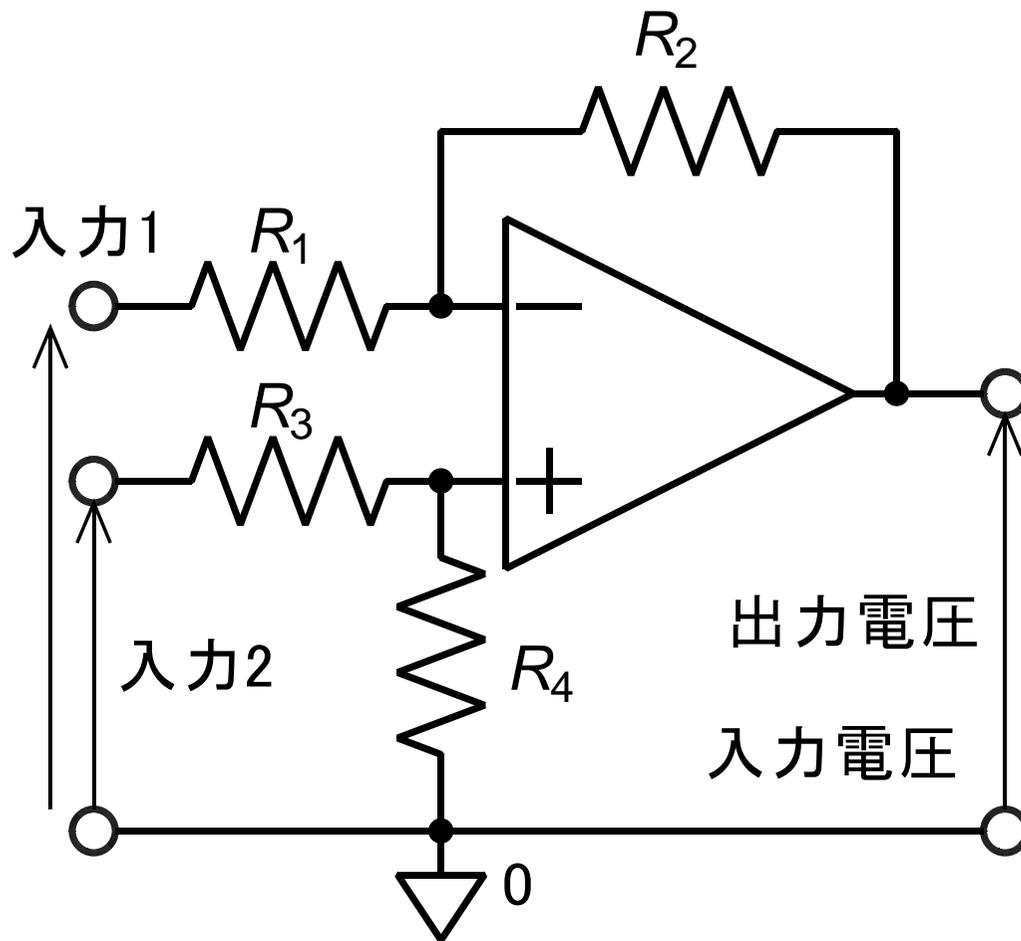
$$= (1 + (R_2 / R_1)) \text{ 入力}$$

特徴：

- ・ 電圧の正負維持
- ・ 入力端子に電流がほとんど流れない
- ・ 1倍未満にはできない
- ・  $R_2$ を直結,  $R_1$ をなくした回路もある  
(ボルテージフォロワ)
- ・ なぜか採用例が多くない

# 増幅回路

## ○ 差動増幅回路



動作：

$$R_3 = R_1, R_4 = R_2$$

出力電圧

$$= (R_2 / R_1) \times$$

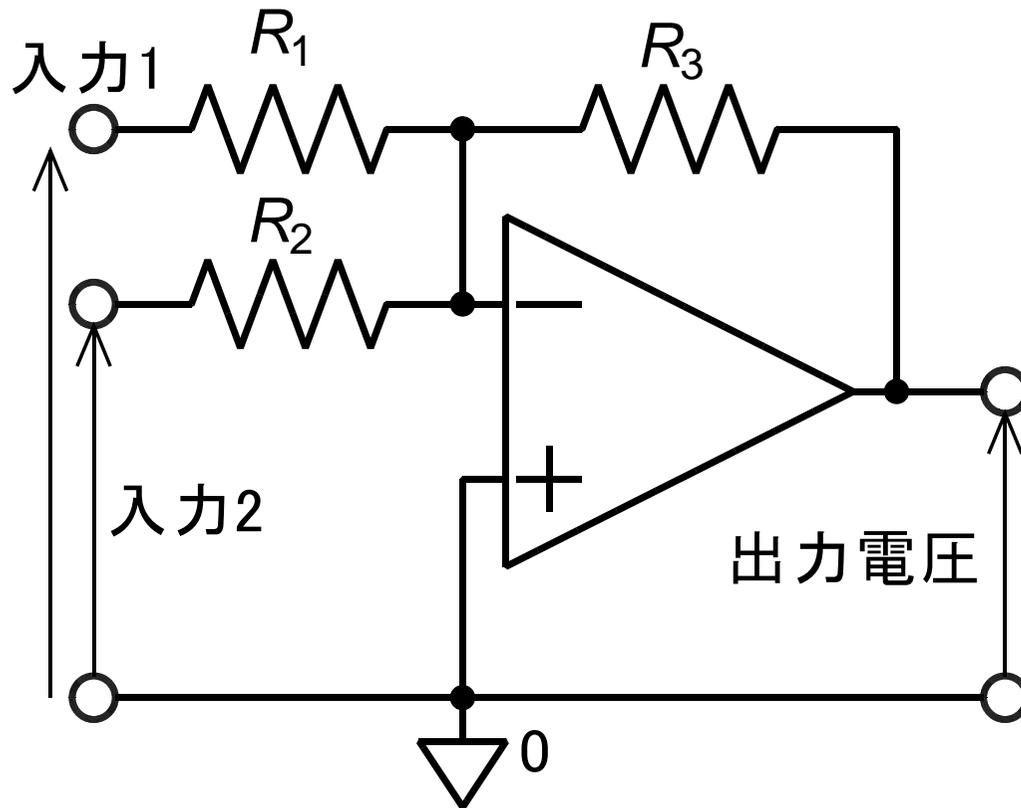
(入力2 - 入力1)

特徴：

- ・ 差を増幅する回路
- ・ センサ信号用に
- ・ 差動信号の受信回路

# 増幅回路

## ○ 加算回路



動作：

出力電圧

$$= -(R_3/R_1) \text{入力1}$$

$$-(R_3/R_2) \text{入力2}$$

特徴：

- ・ 電圧の加算が可能。
- ・ 入力と同じ形で本数をさらに増やせる。
- ・ 反転増幅回路のバリエーションのひとつ。

# 増幅回路

---

## ○ ここまでのまとめと補足

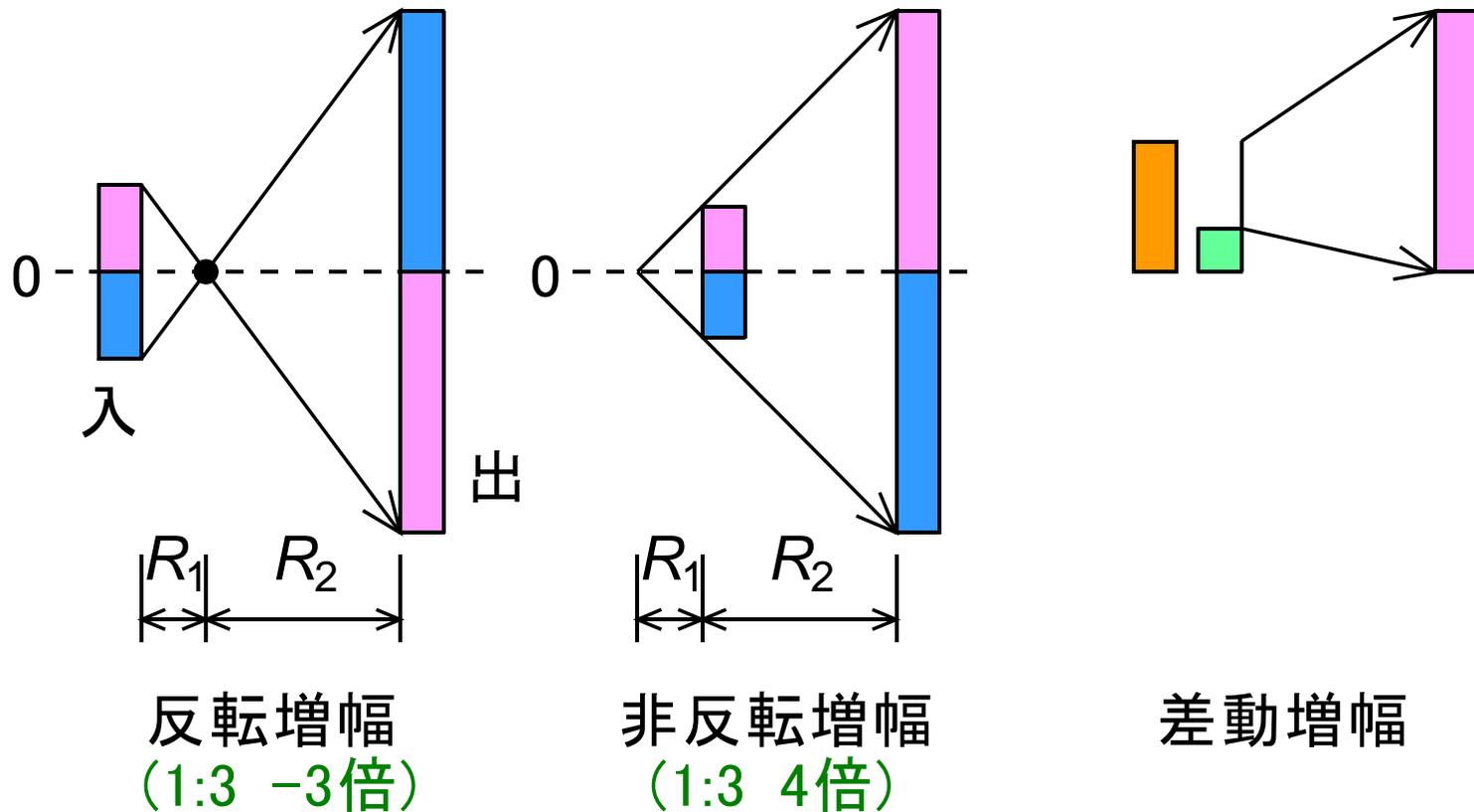
### ◇ オペアンプと抵抗

- ・ オペアンプの性質により、抵抗を若干追加することで精度良い増幅回路が可能。
- ・ 増幅の精度は「抵抗の比」による。
- ・ オペアンプの周りの抵抗を見ると、その回路の意図は概ね読める。
- ・ 使用する抵抗は、オペアンプの出力と一端子を結ぶ抵抗を $10\text{k} \sim 100\text{k} \Omega$ 程度に。

# 増幅回路

## ○ ここまでのまとめと補足

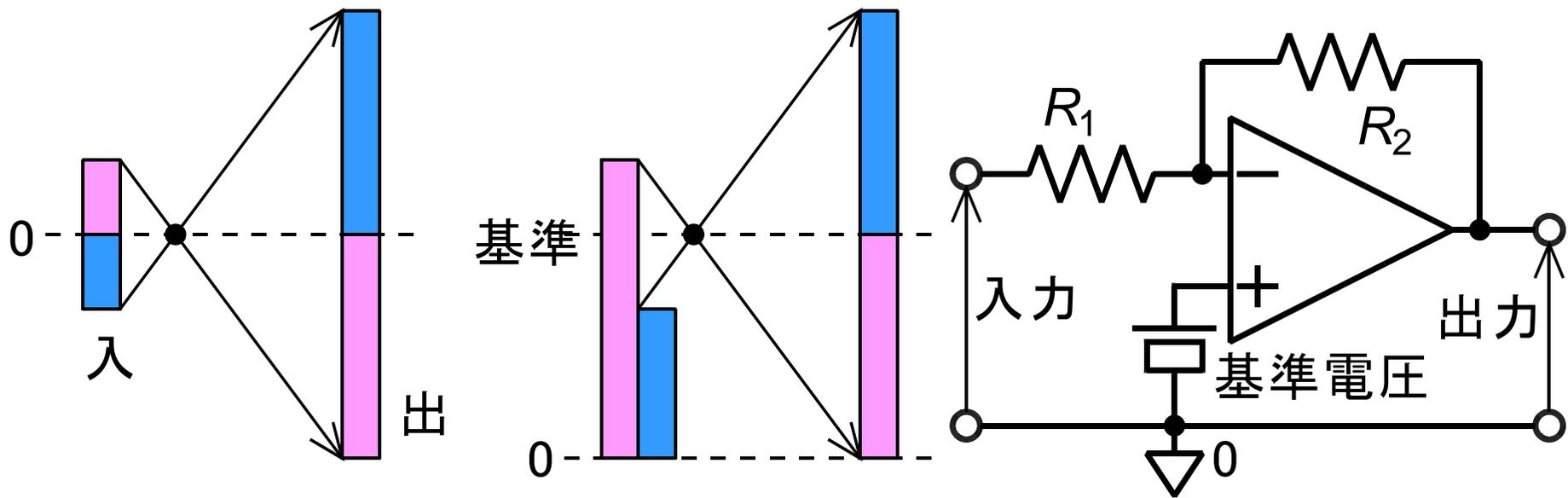
### ◇ 増幅の範囲のイメージ



# 増幅回路

基準電圧  $V_{ref}$  の代用

## ○ 増幅の基準点の変更



- ・ 増幅の基準が「0[V]」でなければならないという決まりはない。
- ・ 基準をつくれれば全て正の電圧で回路が動作。

# フィルタ回路

---

## ○ ある範囲の周波数の信号を通す回路

### ◇目的

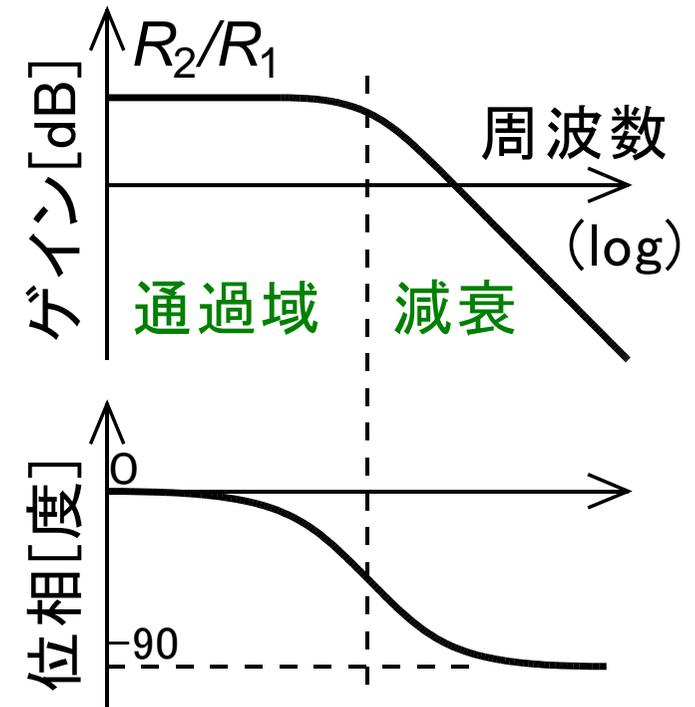
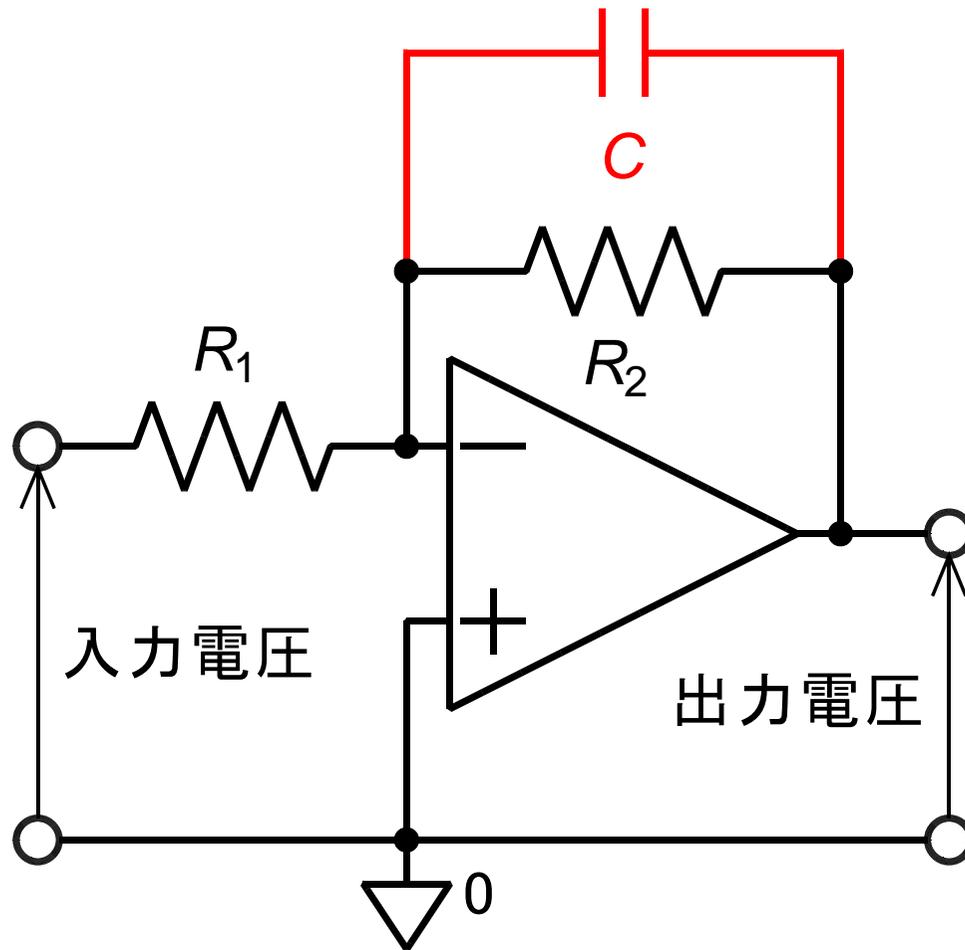
- ・ 不要な信号(雑音:ノイズ)を除去する。

### ◇増幅回路との違い

- ・ 増幅回路は(理想では)すべての周波数の信号を同じ倍率で増幅する。
- ・ フィルタ回路は周波数で増幅率が変化。

# フィルタ回路

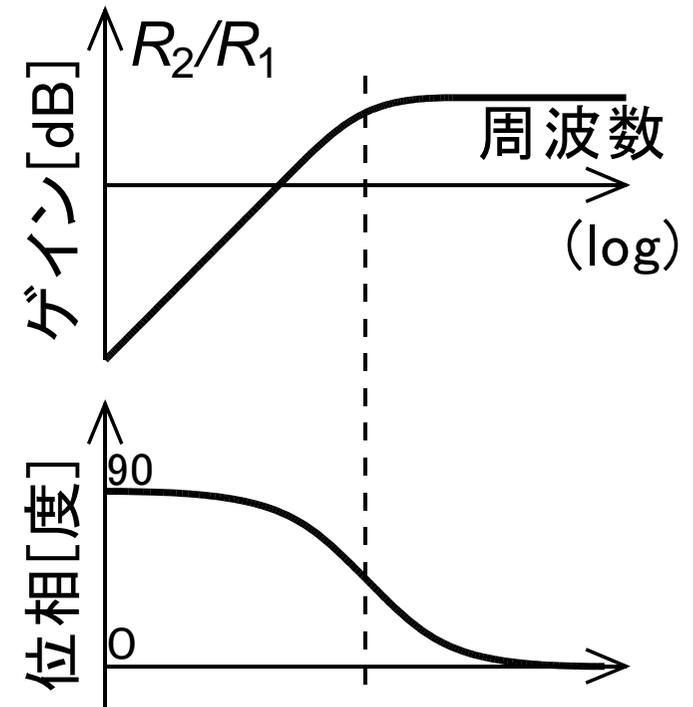
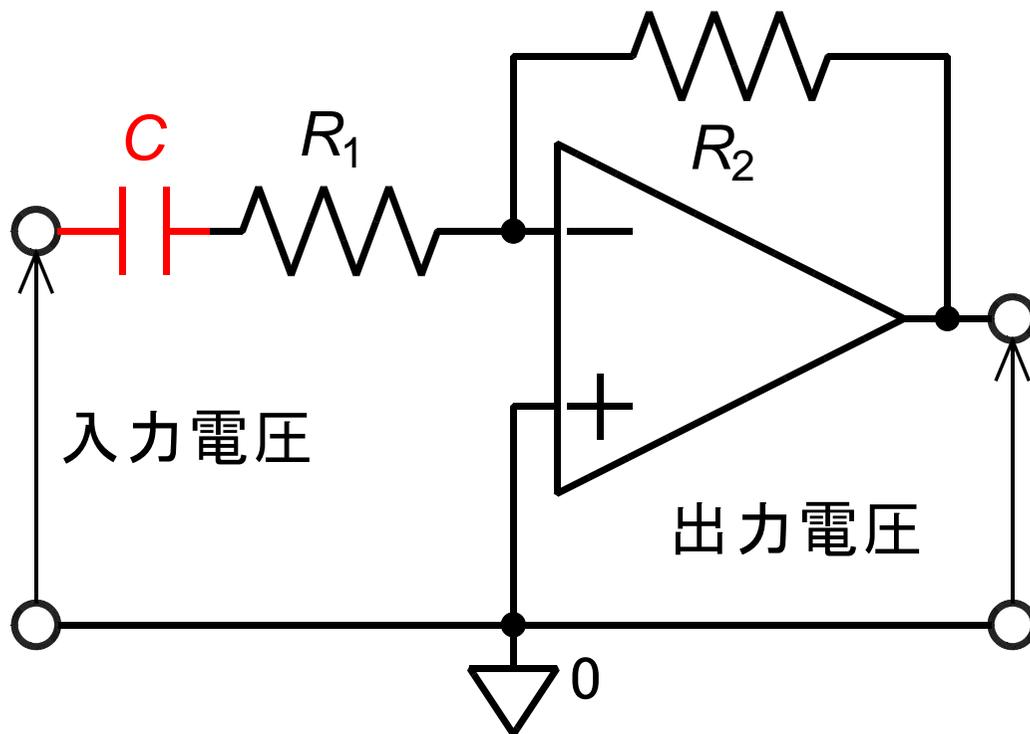
## ○ 1次ローパスフィルタ



周波数  $1/(2\pi R_2 C)$  が下り始めのポイント(-3dB)。そのとき位相は-45度(遅れ)。  
ゲイン傾き: 周波数10倍で増幅率が0.1倍(-20dB)。

# フィルタ回路

## ○ 1次ハイパスフィルタ



周波数  $1/(2\pi R_1 C)$  が変化点。そのとき位相は45度(進み)。

ゲイン傾き: 周波数10倍で増幅率が10倍(20dB)。

# フィルタ回路

---

## ○ 主な用途

### ◇ ローパスフィルタ

- ・ 周波数の高いノイズの除去。
- ・ アナログーデジタル変換の歪み予防。
- ・ コンデンサー一つの並列追加でOK。

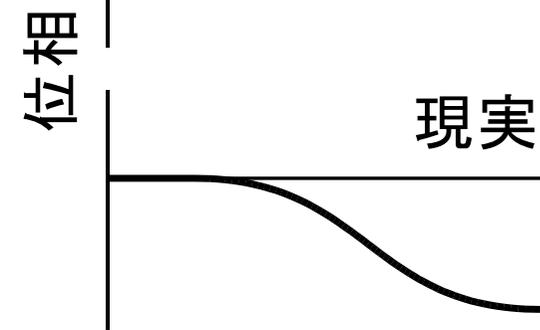
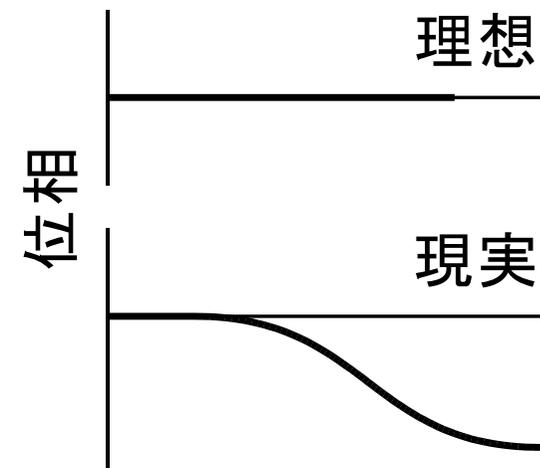
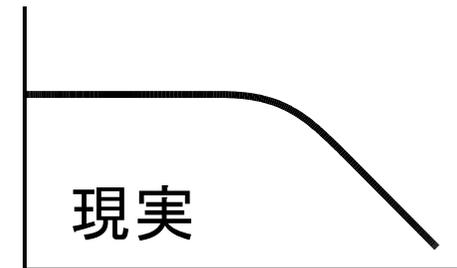
### ◇ ハイパスフィルタ

- ・ 直流分の除去
  - ※交流の増幅のみで良い場合(音声など)
  - ※低周波数に信頼性がない(ゼロドリフト等)

# フィルタ回路

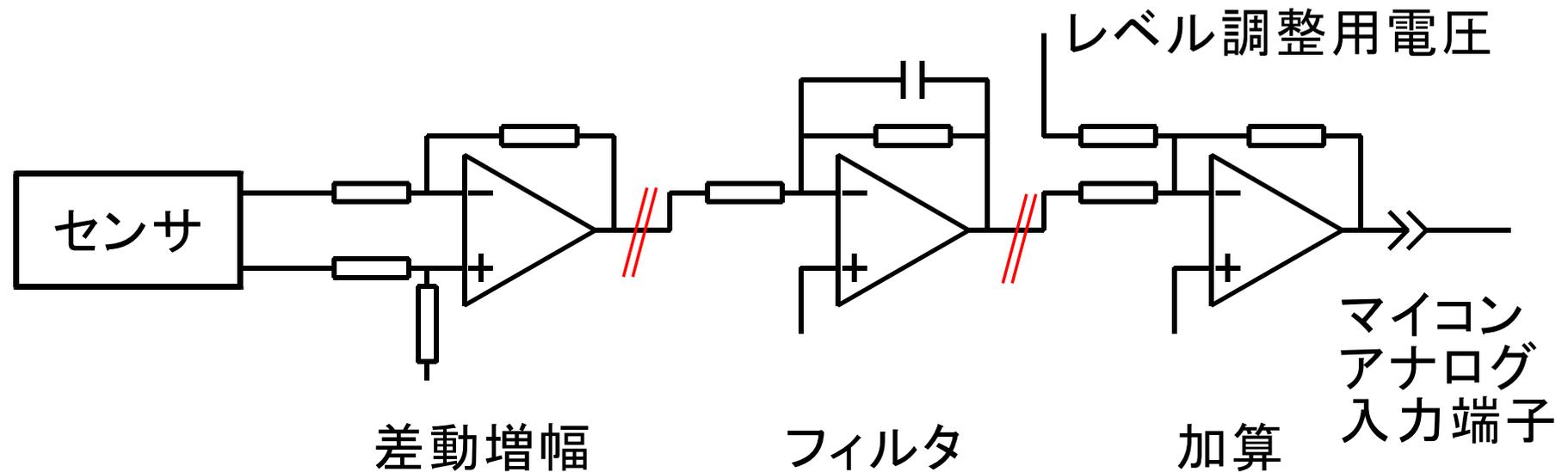
## ○ フィルタ回路の注意

- ・現実のフィルタは「完全な除去」はできない
  - フィルタを過信しない
  - ともかくノイズが入らないように
- ・位相特性がついてくる
  - 信号の遅れに注意
- ・コンデンサの精度は低め
  - 設計とのずれの可能性



# 回路の構成例

## ○ センサ～マイコンの回路構成例



- ・まず、センサの出力を適当な信号に変換しつつ増幅。
  - ・フィルタでノイズを除去しつつ必要なレベルに増幅。
  - ・マイコンのアナログ入力に接続できる電圧範囲に変換。
- と、必要な機能の回路を選んでつなぐことが一般的。

# 今回の目的

---

## ○ アナログ信号の基礎

テーマ1: アナログを触る基礎知識

- ・ 抵抗/コンデンサ/コイルと基本法則
- ・ 周波数特性という考え方

テーマ2: アナログ信号の処理回路

- ・ 増幅回路
- ・ フィルタ回路

テーマ3: アナログを触るときの心得

- ・ 信号を劣化させない工夫・回路

# アナログ信号の扱い

---

## ○ 大前提

- ◇ アナログ信号は、電圧そのものが値
  - ・ 電圧にゴミが混じったら誤差になる。
  - ・ 一度混入したものは、よほど特殊な状況でなければ除去することは不可能。
  
- ◇ 回路は影響を受けやすい
  - ・ 周りの回路からの影響（含：計測装置）
  - ・ 電線を伝わってくる影響
  - ・ 温度や光など環境による影響

# アナログ信号の扱い

## ○ ノイズ（不要な・好まれざる信号全般）

### ◇ 主なノイズの経路

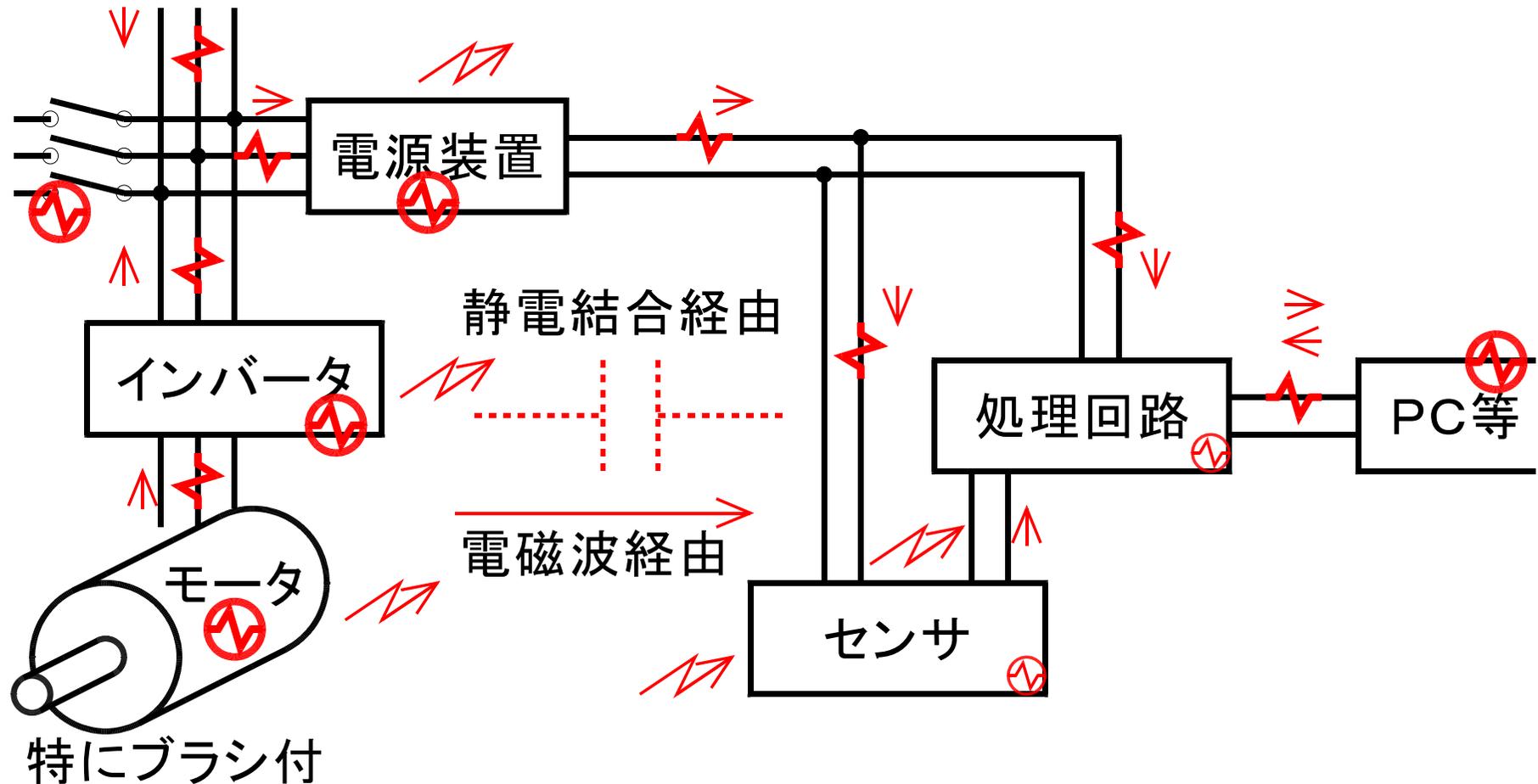
- ・ 電線を伝ってくる（含 電源）
- ・ 空中：静電結合，電磁波

### ◇ 主なノイズの要因

- ・ モータ等の出す火花ノイズ
- ・ 電波（通信電波 / 回路の出す電波）
- ・ 回路内の急激な電流変化（デジタル回路）  
（スイッチング回路）
- ・ 回路内の部品（抵抗）

# アナログ信号の扱い

## ○ ノイズ（不要な・好まれざる信号全般）



# アナログ信号の扱い

---

## ○ ノイズ（不要な・好まれざる信号全般）

### ◇ 主なノイズ対策

#### ・シールド

金属ケース/導電樹脂ケース

シールド線

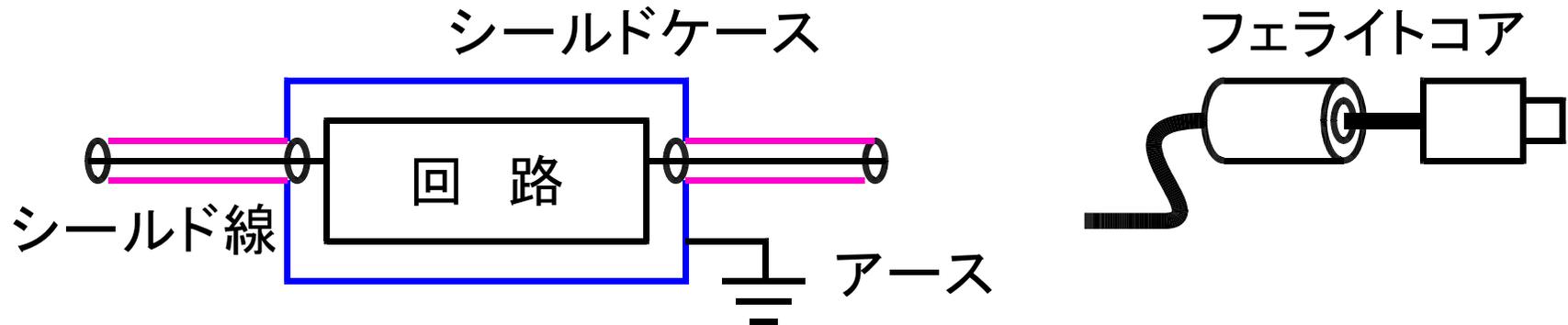
#### ・電源強化、電源フィルタ

#### ・ツイストペア/差動信号

#### ・信号絶縁（光）

# ノイズ対策

## ○ シールド

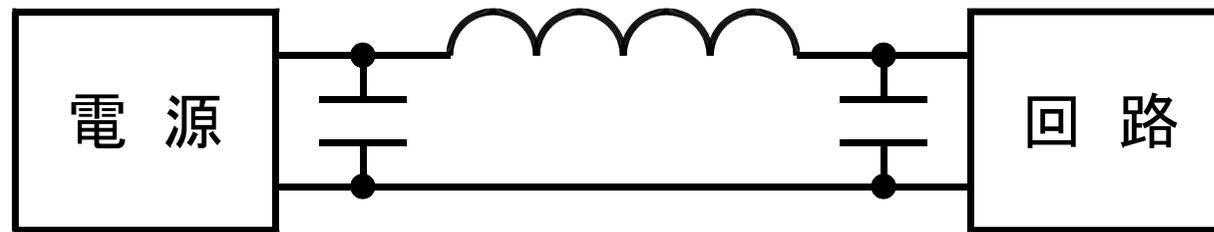


- ・回路と配線にアースに接続したカバーをする。  
→ 外から来るノイズはそこで吸収されてすぐにアースに流れていく。  
※少しのノイズでケースの電位は動かず。
- ・回路がノイズを出さないように、という効果も。

# ノイズ対策

## ○ 電源の工夫

※簡易的にはコイルの代わりに小抵抗



### ・電源からのノイズを低減

大きなコンデンサ (突入電流の問題)

コイルを併用 (大きさ、コスト)

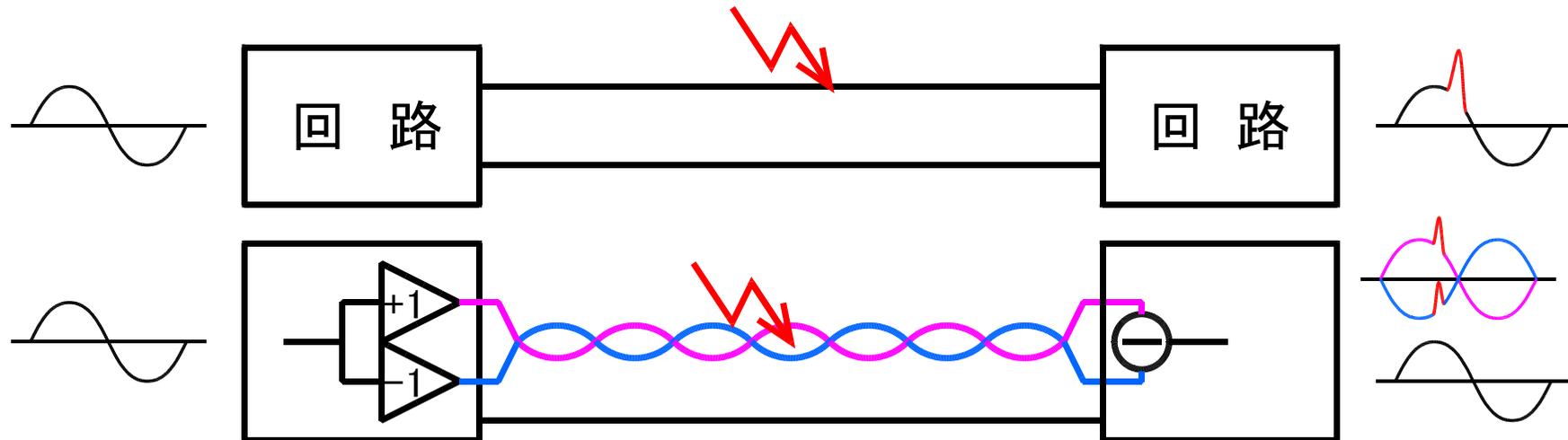
### ・電源そのものを変更

スイッチング電源 → リニアレギュレータ

電池の採用

# ノイズ対策

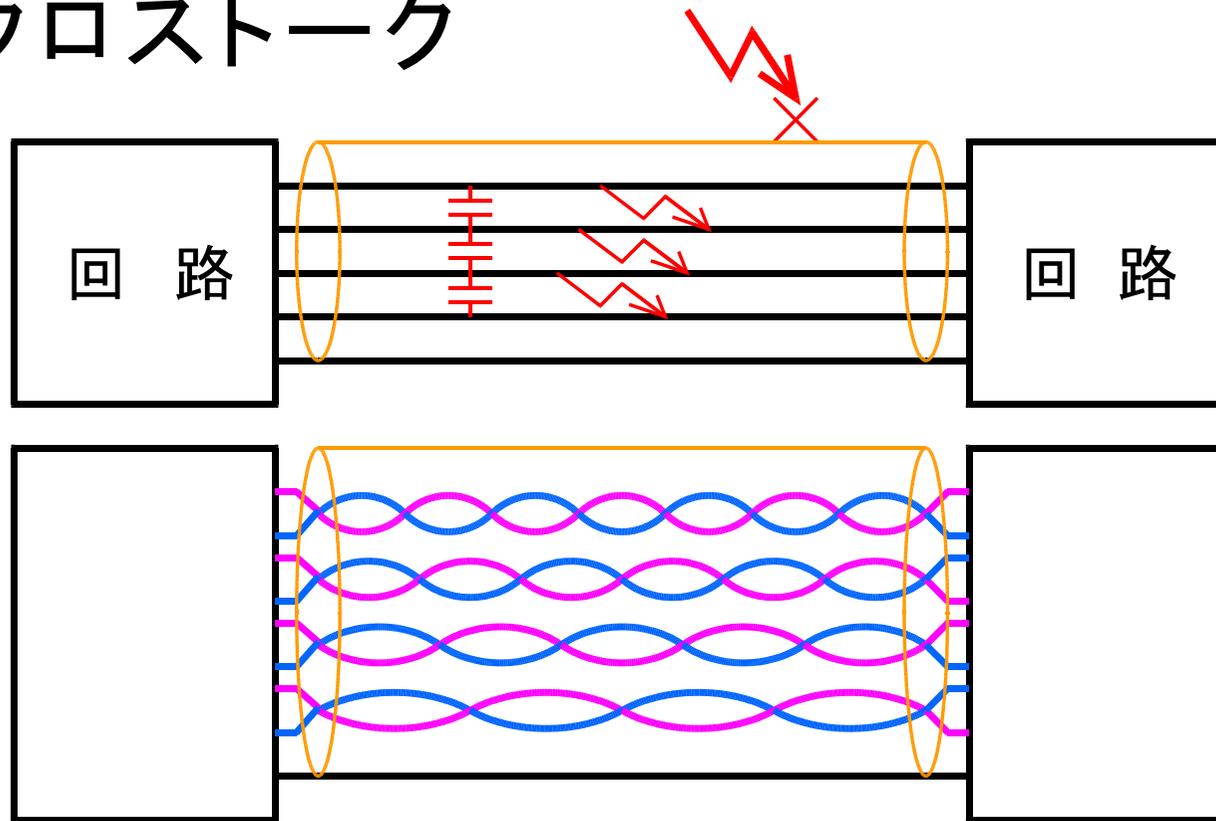
## ○ ツイストペア・差動伝送



- ・細かくねじった1対2本の信号線で
- ・同時に正( $\times +1$ )と負( $\times -1$ )の信号を送り
- ・受け側では差動増幅する 出る電波も低減  
→両方に同時に混じったノイズが消える

# ノイズ対策

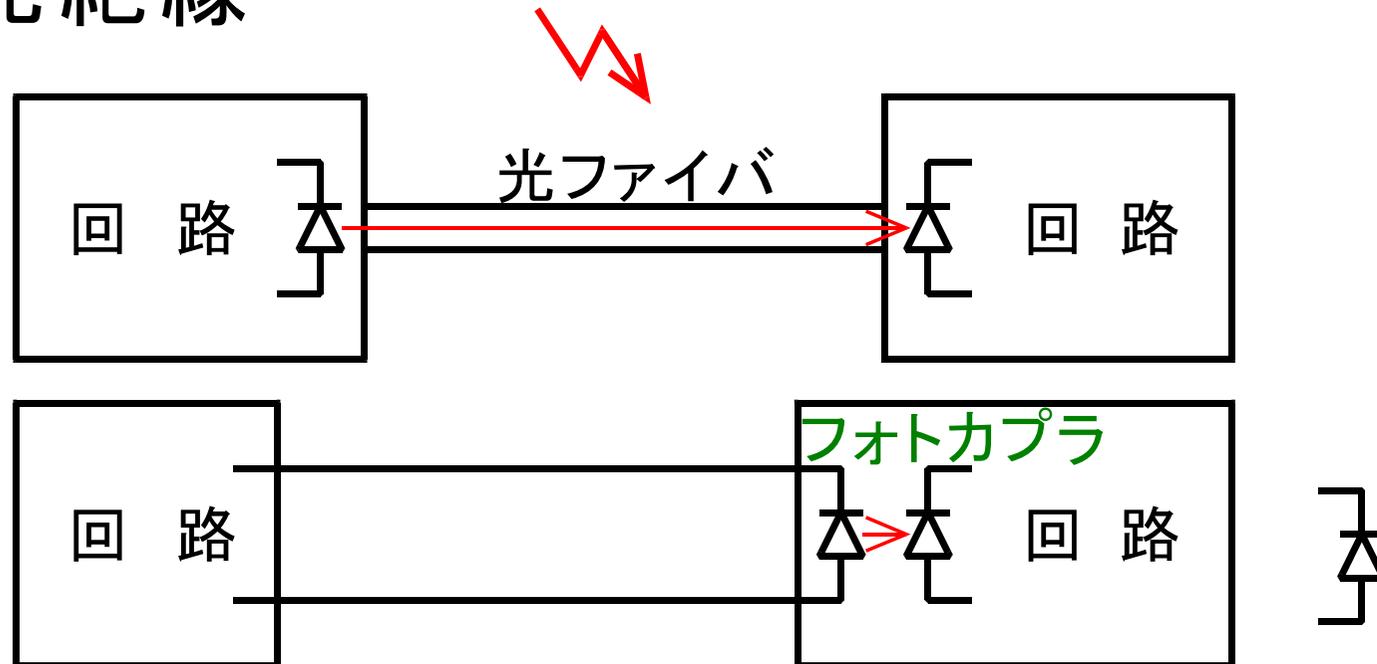
## ○ クロストーク



- ・配線が長いと信号線間で干渉することがある。
- ・この場合もツイストペア差動有効。(ピッチ変える)

# ノイズ対策

## ○ 光絶縁



- ・発光/レーザダイオードとフォトダイオードの組  
→ 一度光にすることで「線を伝わるノイズ」を低減。
- ・デジタルでは容易だが、アナログでは手間。

# ノイズ対策

---

## ○ アナログ信号にノイズを見たら

### 1: ノイズの特性をチェックする

- ・ 目立った周期性はないか？

例) 50Hzおよびその整数倍: 電源由来

数10kHz: インバータ電灯、モータ駆動回路

数100kHz: スイッチング電源、マイコン類

- ・ なにかをオフ/切断すると消えないか？

例) モータ用ドライバ

- ・ ほかのところでも見られないか？

# ノイズ対策

---

## ○ アナログ信号にノイズを見たら

### 2: 混入経路を確定する

- ・似たノイズが回路の電源にないか？  
→ 電源由来の可能性
- ・信号の上流のどこで混入しているか？

### 3: 対策の検討

- ・回路の見直し (根本治療)
- ・フィルタの追加
- ・前述の対策 (対処療法)

# アナログ信号の計測

## ○ 見えている信号は本物？

### ◇ 計測が引き起こすトラブル

- ・ 計測する＝なにかを接続する→影響

例) オペアンプにオシロスコープを繋いだら  
周期的な波が生じた。

→ オシロのプローブ(計測端子・線)のもつ  
容量のせいでオペアンプが発振した。

→ 対策: 1k $\Omega$ くらいの抵抗をプローブの先につけて、それでオペアンプを触る。

※勘違いによる解決の遅れを招きやすい事例

※他の計測器でもありうる。テストなど。

# アナログ信号の計測

## ○ 見えている信号は本物？

### ◇ 測定器の帯域

- ・ オシロスコープで測定できる上限  
(例:帯域20MHz)は「正弦波」の周波数。
- ・ より高い成分を含む矩形波などを  
上限近くで見ると波形がなまる。
  - もともと(回路特性で)予期しない信号波形が出ているのか、観測時になまったのか。
  - 正解は十分すぎる速さのオシロ、だが高価。

# アナログ信号の計測

---

## ○ 見えている信号は本物？

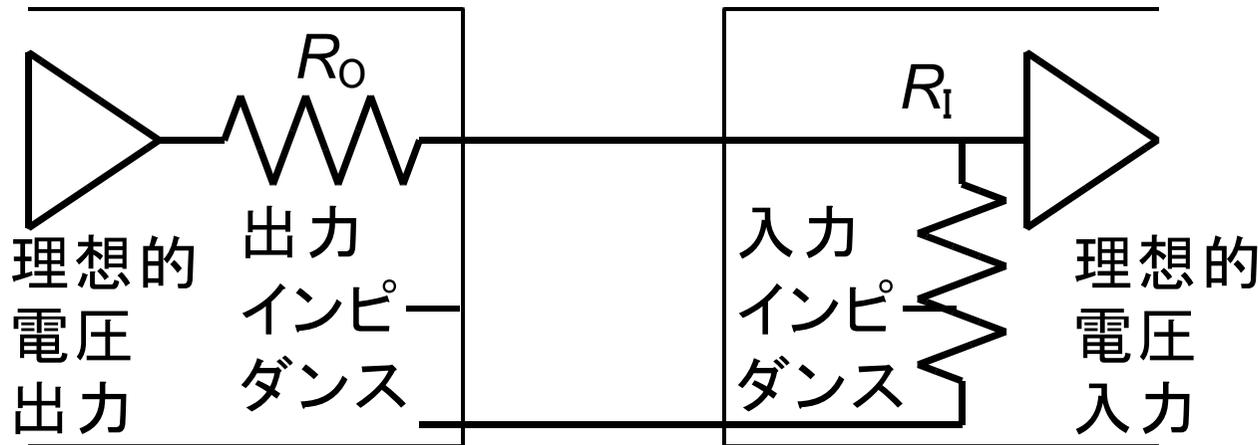
### ◇ 測定器のサンプリング

- ・ デジタルオシロなどは変換時の「サンプリング」に関する問題がある。  
(詳しくは次回)
- ・ 時間レンジによって観測される波形が変わることがある。  
※短時間＝高速の計測が一般に正しい

# アナログ信号のetc

## ○ 入力インピーダンスと出力～

回路の入出力の特性を表す抵抗値



※出力インピと回路として流せる上限電流は別。  
※入力インピが高すぎると別の問題の可能性

理想的電圧出力: どれだけ電流が流れても電圧変わらず。

理想的電圧入力: 電流が流れることなく電圧を受ける。

受け取る電圧は、 $R_I / (R_0 + R_I)$  に小さくなる。

一般に  $R_0$ : 小さいほどよい  $R_I$ : 大きいほどよい

# アナログ信号のetc

---

## ○ 入力インピーダンスと出力～

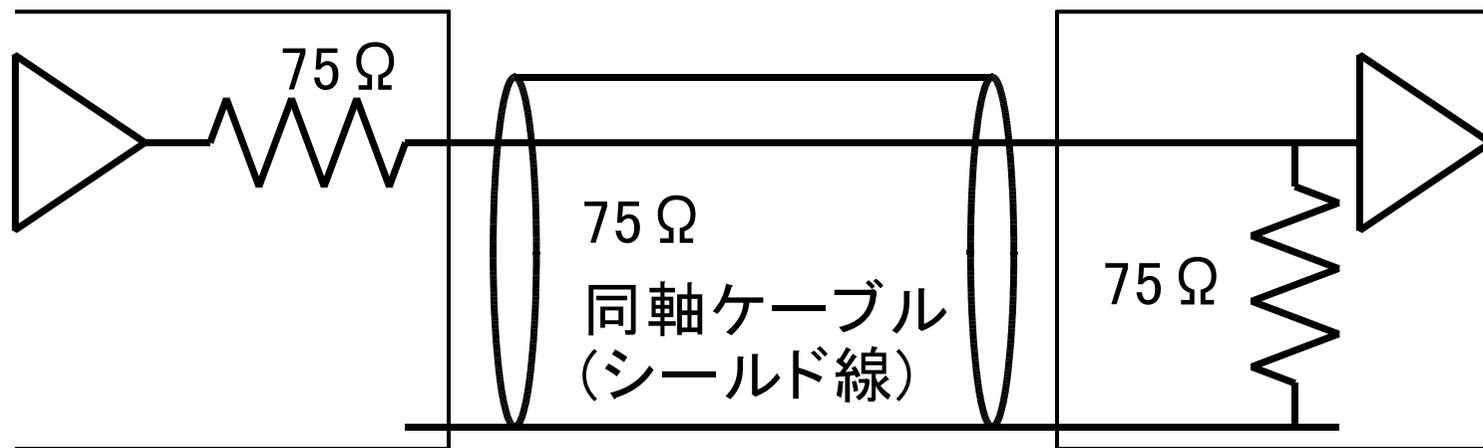
注意点：

- ・ 出力インピーダンスが高い回路(例10k $\Omega$ )  
を受ける回路は、原則として入力も  
高い必要あり。  
＝非反転などオペアンプ直結型
- ・ 入力インピーダンスが低い回路に  
信号を送る場合は出力回路に注意。  
＝許容電流、許容損失

# アナログ信号のetc

## ○ 75 Ω と 50 Ω

高周波数の信号を乱れることなく送る手法。  
(インピーダンスマッチングによる反射防止)



75 Ω (?C-2V): 映像信号に多い テレビアンテナなども

50 Ω (?D-2V): 無線機、計測器

# アナログ信号のetc

## ○ 75 Ω と 50 Ω

注意点:

- ・ 75 Ω, 50 Ω 指定の配線は、似ていても混同しないこと。予期せぬ不具合の危険。
- ・ 「なにか特別な速い信号」と理解する。

補足:

- ・ 同軸でなくとも、インピーダンス指定はある  
例) 300 Ω (昔のアンテナ線)、100 Ω (100BASE-TX)  
90 Ω (USB2.0) など  
= なにか線をただ繋げば良いわけではない

# まとめ

---

## ○ アナログ信号の取り扱い

- ・アナログ信号は、電圧そのものが値であるため、いかにノイズを混入させないかが、重要となる。
- ・様々な機器の取説にある  
シールド線を使うこと  
アースをすること  
ツイストペア線を使うこと  
などはこの対策であって無視できない。

# まとめ

---

## ○ アナログ信号の処理

- ・ オペアンプを用いることで  
増幅  
簡単な演算  
フィルタ

などを行うことができる。

※オペアンプ回路はこの目的が大半

- ・ メカトロ設計では、最低限のアナログ処理にとどめ、デジタル化すると良い(次回)。