

# 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

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。

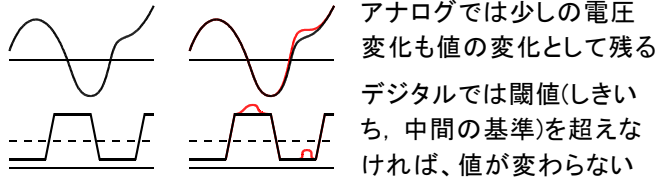
回路に「精度」が要求される

アナログ: 「比例関係」に非常に気を使う

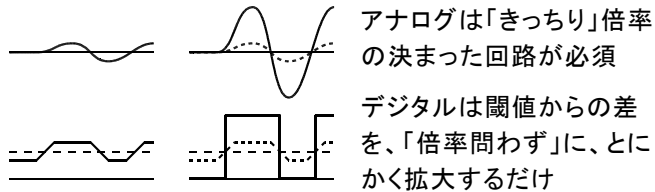
デジタル: とにかく振り切れればよい

## 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「きっちり」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。

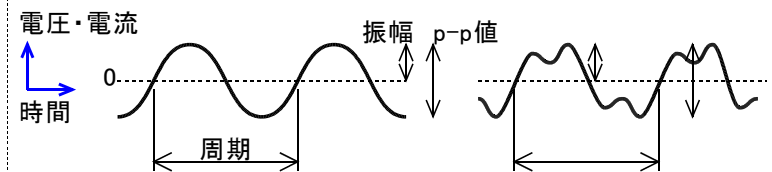
### ・いわゆる電流

- (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 =  $1 \div \text{周期}$
  - 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

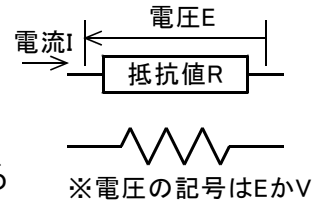
$$E[V] = R[\Omega] I[A]$$

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



## 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

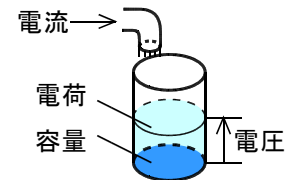
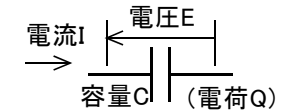
$$Q[C] = C[F] V[V]$$

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

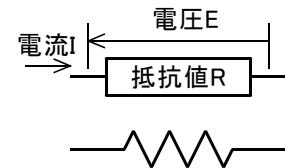


## アナログ回路の基礎知識（法則）

### ○ オームの法則

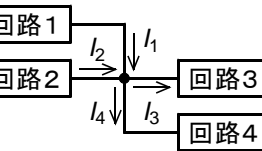
$$E = RI$$

※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。



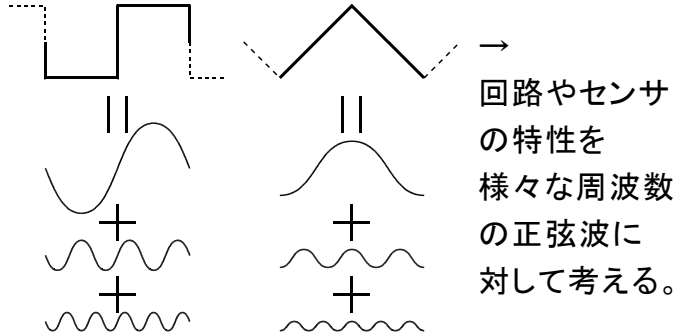
$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

※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

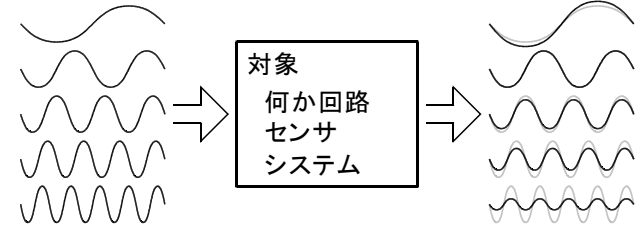
数学的にはフーリエ級数・変換と呼ばれる原理



## 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？

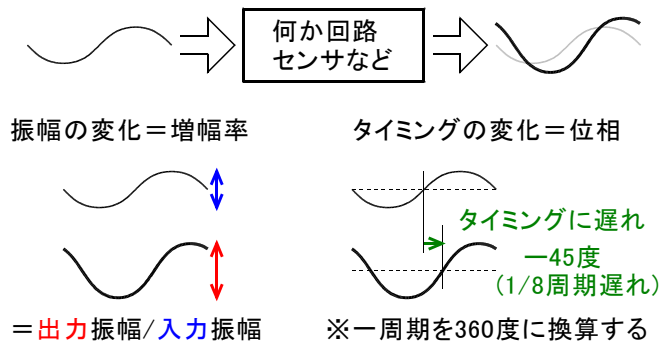


周波数によって信号の大きさが変わる、など  
※正弦波をいれて同じ周波数の正弦波が出る＝「線形」が一般的に用いられる回路、センサの前提（対義：非線形）

## 周波数特性という考え方

### ○ 正弦波応答

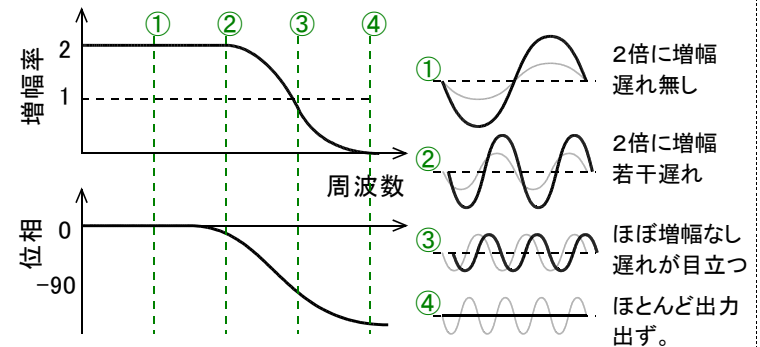
正弦波をいれて変わるところ：増幅率と位相



## 周波数特性という考え方

### ○ 周波数特性（周波数応答）

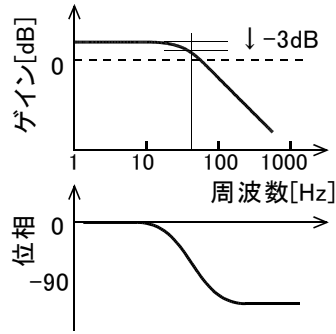
周波数に対する 増幅率と位相の関係



## 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)

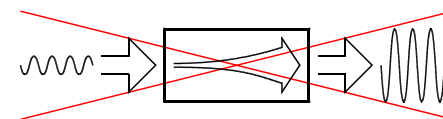
#### ◇ ノイズ除去

- ・フィルタ

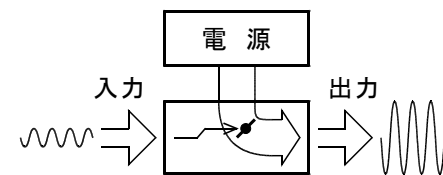
## 増幅回路

### ○ 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

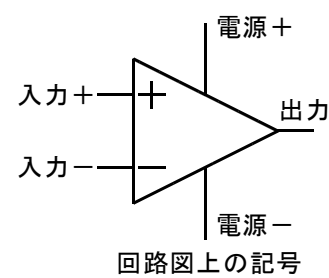
- ・ 一定の増幅率で増幅する 例: 10倍
- ・ 正負(増減方向)が同じ/反転
- ・ 基準点が0[V] / 適当な定電圧 例: 2.5V基準

#### ◇ 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



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。

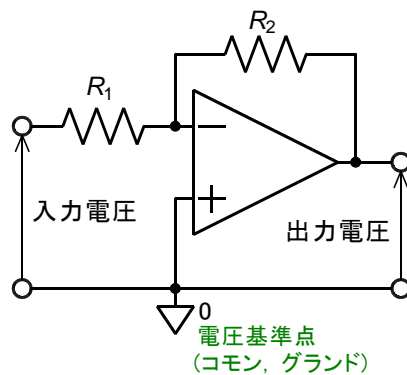
特徴:

- ・ 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:

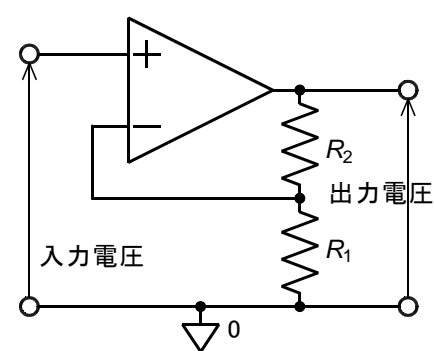
$$\text{出力電圧} = -(R_2/R_1) \text{入力}$$

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<sub>1</sub>]の電流が流れてしまう

## 増幅回路

### ○ 非反転増幅回路



動作:

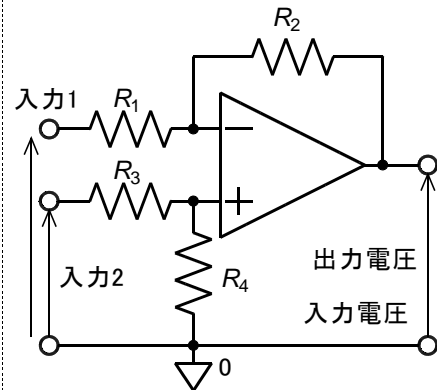
$$\text{出力電圧} = (1 + (R_2/R_1)) \text{入力}$$

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<sub>2</sub>を直結, R<sub>1</sub>をなくした回路もある  
(ボルテージフォロウ)
- ・ なぜか採用例が多くない

## 増幅回路

### ○ 差動増幅回路



動作:

$$R_3 = R_1, R_4 = R_2$$

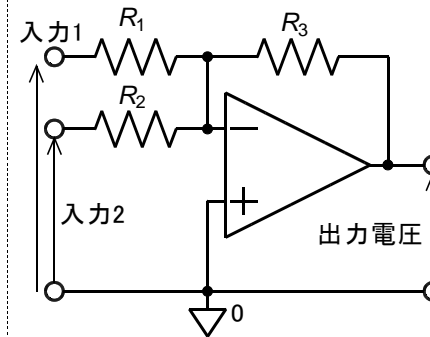
$$\text{出力電圧} = (R_2/R_1) \times (\text{入力2} - \text{入力1})$$

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:

$$\text{出力電圧} = -(R_3/R_1)\text{入力1} - (R_3/R_2)\text{入力2}$$

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

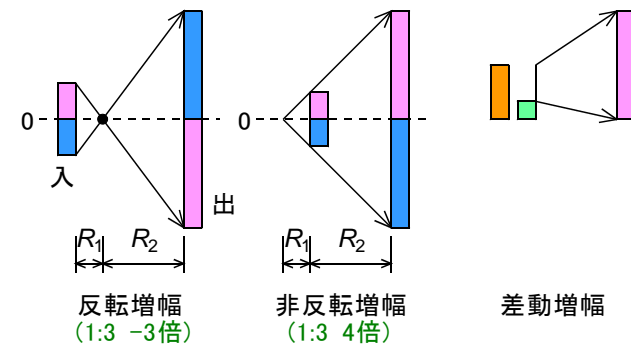
#### ◇ オペアンプと抵抗

- ・ 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10k~100kΩ程度に。

## 増幅回路

### ○ ここまでのまとめと補足

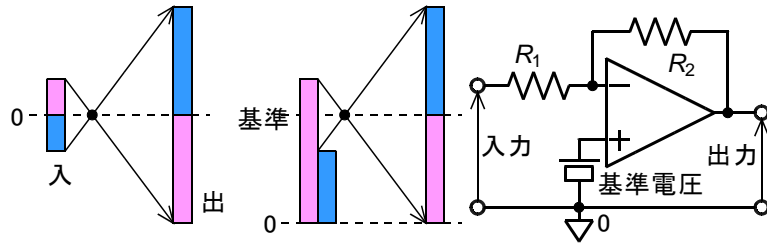
#### ◇ 増幅の範囲のイメージ



## 増幅回路

基準電圧  $V_0$  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

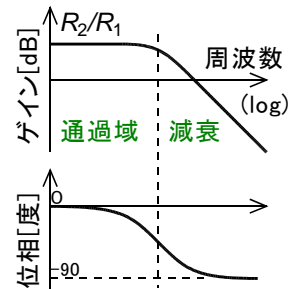
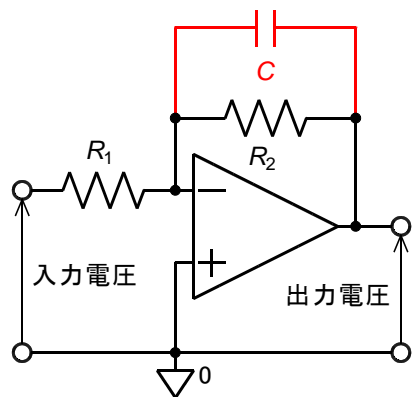
- ・不要な信号(雑音:ノイズ)を除去する。

#### ◇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

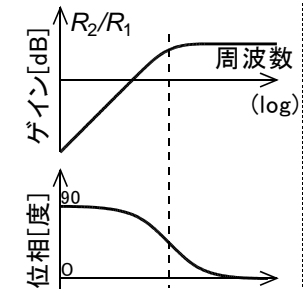
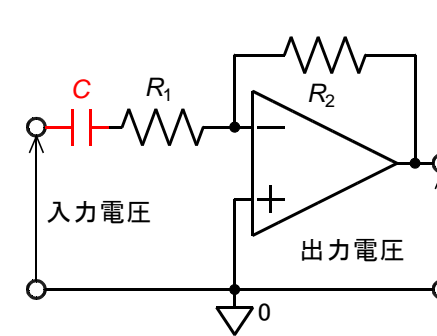
### ○ 1次ローパスフィルタ



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→デジタル変換の歪み予防。
  - ・コンデンサーつの並列追加で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

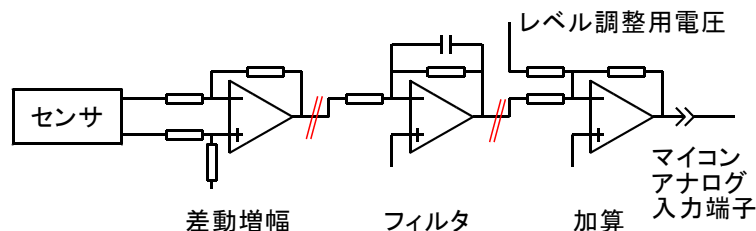
### ○ フィルタ回路の注意

- ・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

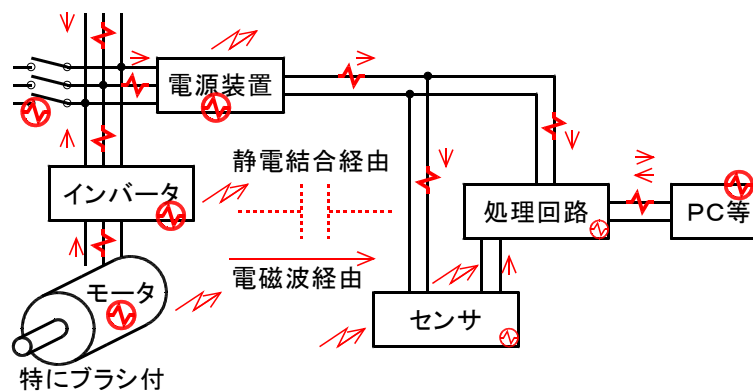
## アナログ信号の扱い

### ○ 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）



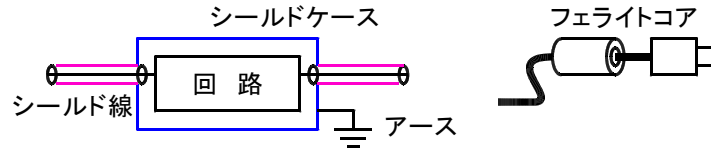
## アナログ信号の扱い

### ○ 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

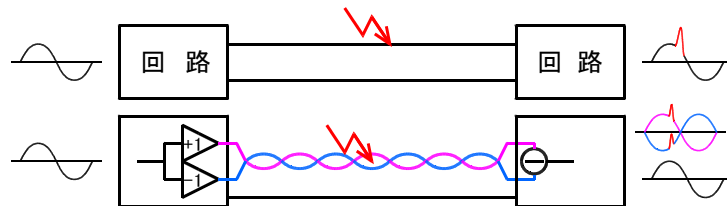
※簡易的にはコイルの代わりに小抵抗



- ・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

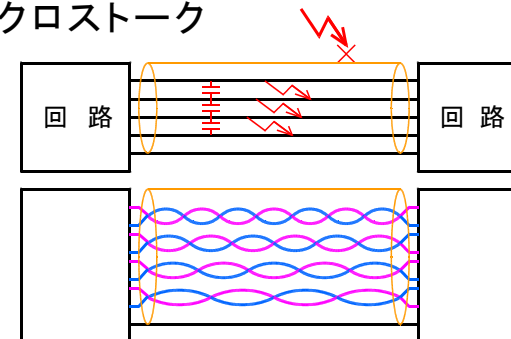
### ○ ツイストペア・差動伝送



- ・細かくねじった1対2本の信号線で
- ・同時に正( $x+1$ )と負( $x-1$ )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

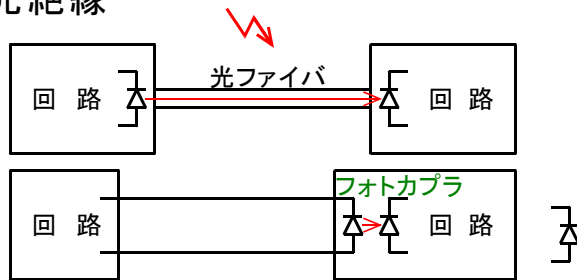
### ○ クロストーク



- ・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: 1kΩ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。テスタなど。

## 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  
上限近くでみると波形がなまる。  
→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？

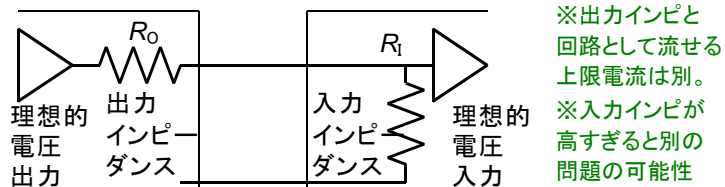
#### ◇ 測定器のサンプリング

- ・デジタルオシロなどは変換時の  
「サンプリング」に関わる問題がある。  
(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



- 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、 $R_1 / (R_0 + R_1)$  に小さくなる。
- 一般に  $R_0$ : 小さいほどよい  $R_1$ : 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～

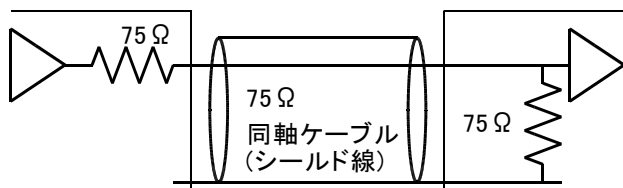
注意点:

- ・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)。