

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  
 第4回

C04/Rev.1.01

# 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

C04 アナログ信号の基礎 Page. 2 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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

C04 アナログ信号の基礎 Page. 3 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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

C04 アナログ信号の基礎 Page. 4 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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

C04 アナログ信号の基礎 Page. 5 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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。

C04 アナログ信号の基礎 Page. 6 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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  $\mu V$  ~) 数  $mV$  ~ 十数  $V$  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  $pA$  ~) 数  $\mu A$  ~ 数十  $mA$  (~ 数百  $mA$ )  
 電圧のあるところ、電気が流れる。

C04 アナログ信号の基礎 Page. 7 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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)

C04 アナログ信号の基礎 Page. 8 基礎からのメカトロニクスセミナー

## 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

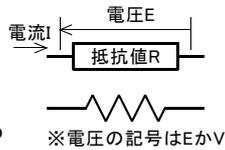
$$E[V] = R[\Omega] I[A]$$

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



※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

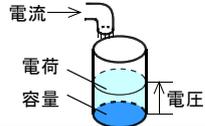
$$Q[C] = C[F] V[V]$$

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

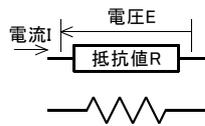


## アナログ回路の基礎知識 (法則)

### ○ オームの法則

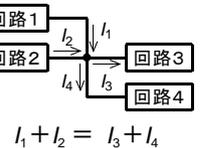
$$E = RI$$

※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。

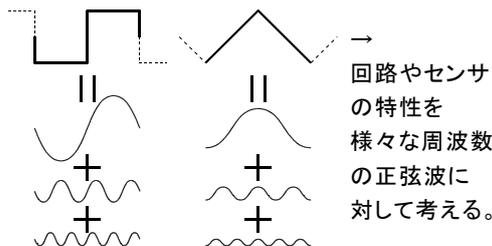


※矢印を書く向きによる。逆向きなら電流は負の値となる。

## 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

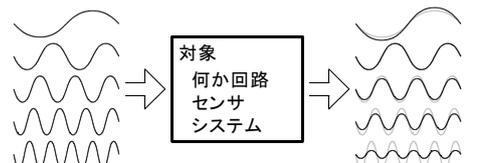
数学的にはフーリエ級数・変換と呼ばれる原理



## 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?



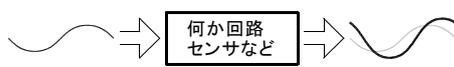
周波数によって信号の大きさがかわる、など

※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

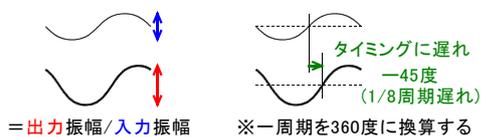
### ○ 正弦波応答

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

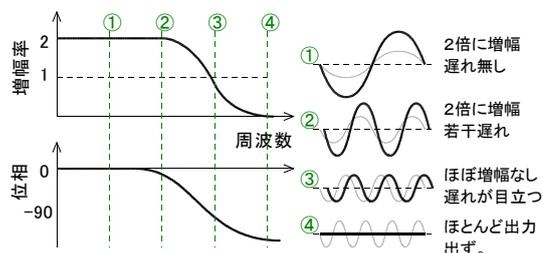
タイミングの変化 = 位相



## 周波数特性という考え方

### ○ 周波数特性 (周波数応答)

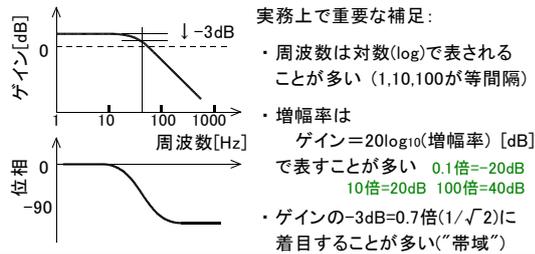
周波数に対する 増幅率と位相の関係



## 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



## 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

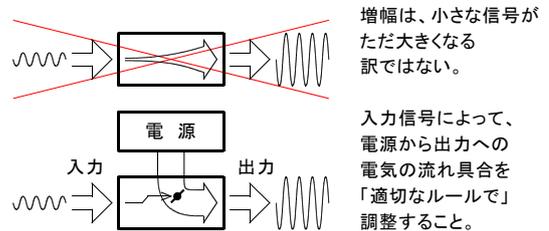
### ○ デジタル化する前の処理

- ◇ 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「うちの小槌」ではない



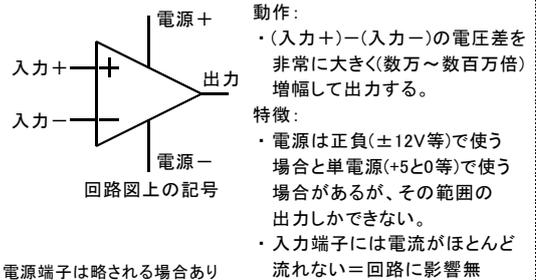
## 増幅回路

### ○ 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)  $\text{数V} \sim \text{数十V}$ ,  $\pm$
  - ・出力電流の制限 (回路仕様が主因)  $\text{数mA} \sim \text{数十mA}$
  - ・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)  $\text{数十kHz} \sim \text{MHz}$

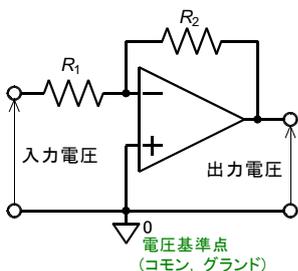
## 増幅回路

### ○ アナログ回路で良く使われるオペアンプ



## 増幅回路

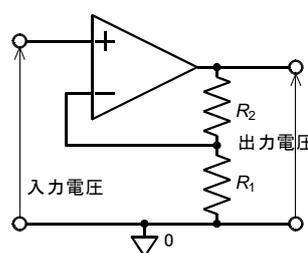
### ○ 反転増幅回路



- 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

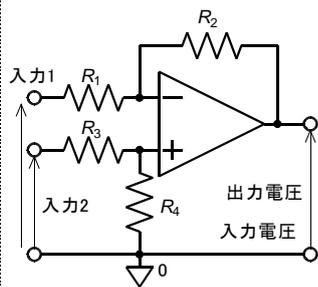
### ○ 非反転増幅回路



- 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:

$$R_3 = R_1, R_4 = R_2$$

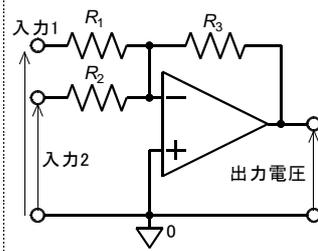
$$\text{出力電圧} = (R_2/R_1) \times (\text{入力2} - \text{入力1})$$

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。
- ・入力は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

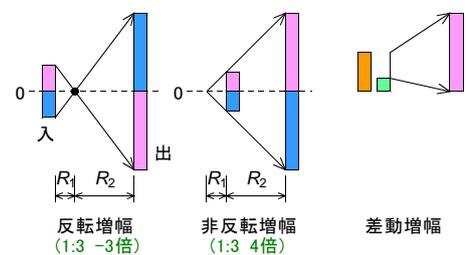
#### ◇ オペアンプと抵抗

- ・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

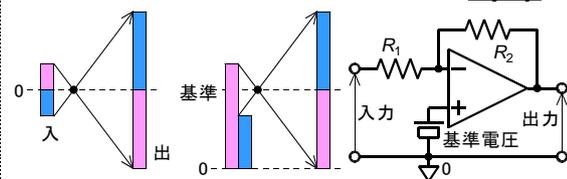
### ○ ここまでのまとめと補足

#### ◇ 増幅の範囲のイメージ



## 増幅回路

### ○ 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

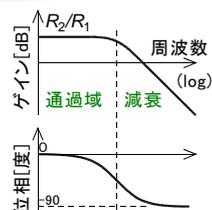
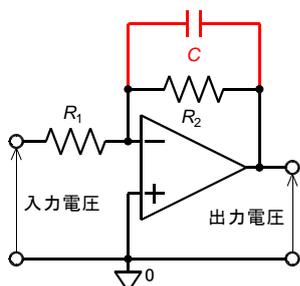
- ・不要な信号(雑音:ノイズ)を除去する。

#### ◇ 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

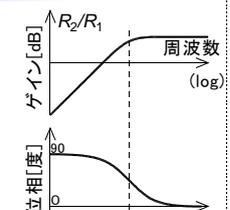
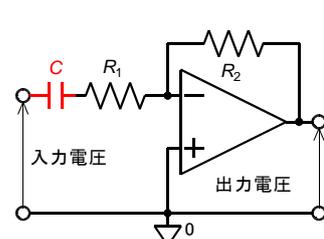
### ○ 1次ローパスフィルタ



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

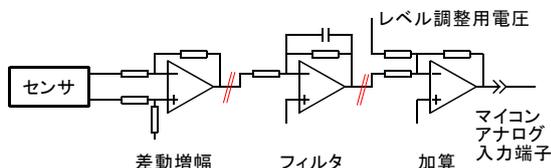
### ○ フィルタ回路の注意

- ・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

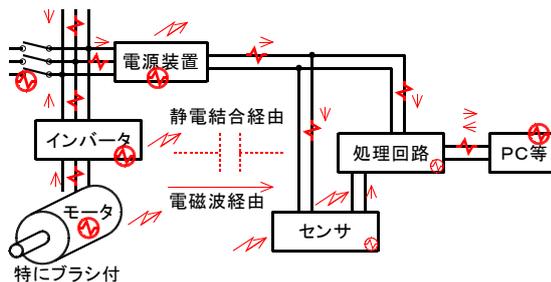
## アナログ信号の扱い

### ○ 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)
  - ・回路内の部品 (抵抗) (スイッチング回路)

## アナログ信号の扱い

### ○ ノイズ (不要な・好まれざる信号全般)



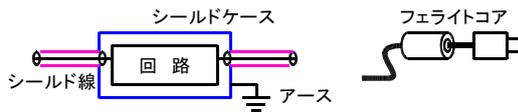
## アナログ信号の扱い

### ○ 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

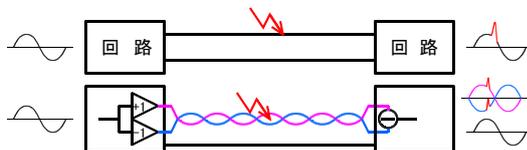
※簡易的にはコイルの代わりに小抵抗



- ・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

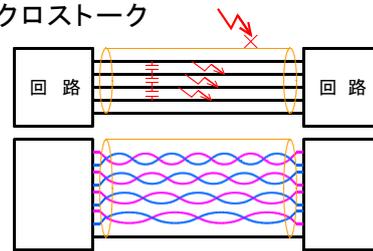
### ○ ツイストペア・差動伝送



- ・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

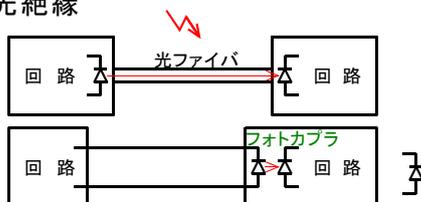
### ○ クロストーク



- ・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witching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？

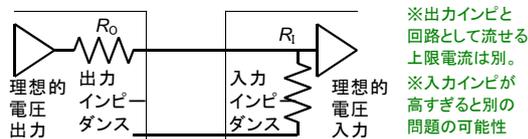
#### ◇ 測定器のサンプリング

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

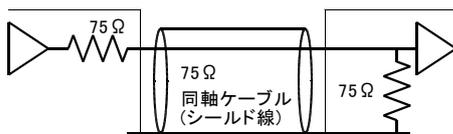
注意点:

- ・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 $\Omega$ と50 $\Omega$

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 $\Omega$ (?C-2V): 映像信号に多い テレビアンテナなども  
50 $\Omega$ (?D-2V): 無線機、計測器

## アナログ信号のetc

### ○ 75 $\Omega$ と50 $\Omega$

注意点:

- ・75 $\Omega$ , 50 $\Omega$  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 $\Omega$ (昔のアンテナ線)、100 $\Omega$ (100BASE-TX)  
90 $\Omega$ (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)。