

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

C05/Rev 1.0

第5回

# アナログ信号の コンピュータへの取り込み

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

---

## ○ アナログ信号のコンピュータへの取り込み

### テーマ1: アナログデジタル変換の基礎知識

- ・ AD変換の概念と原理
- ・ AD変換周辺回路の知識

### テーマ2: AD変換の注意点

- ・ サンプリング定理
- ・ 誤差に対する理解
- ・ 変換回路構成に関する理解

# イントロダクション

---

## ○ アナログとデジタル

### 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→デジタル変換が必要か？

計測対象がアナログ

～メカトロには計測が不可欠～

- ・対象そのもの：速度、温度、明るさなど
- ・センサ：「電気的変化に変える」だけ

最終的にはデジタル

～コンピュータ処理・記録・制御～

- ・アナログに比べて再現性のある  
柔軟な処理

# イントロダクション

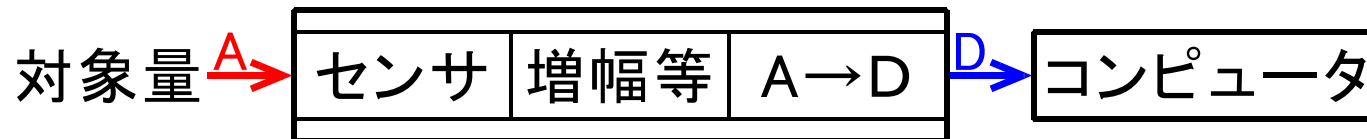
## ○ アナログ→デジタルの構成例



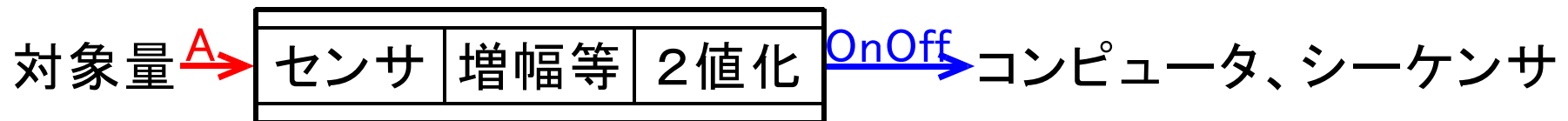
基本形：全ての要素が個別



アナログ部完結 + AD内蔵マイコン



AD内蔵のデジタル出力センサ



条件設定・判断を入れたOn/Off出力型

# アナログデジタル変換の基礎知識

## ○ AD変換のために知っておくべきこと

### ◇ ハード面

- ・ AD変換とは
- ・ AD変換の入力特性（アナログ側）
- ・ AD変換の出力特性（デジタル側）
- ・ 基準電圧
- ・ サンプルホールド/トラックホールド
- ・ アナログスイッチ

# アナログデジタル変換の基礎知識

## ○ AD変換のために知っておくべきこと

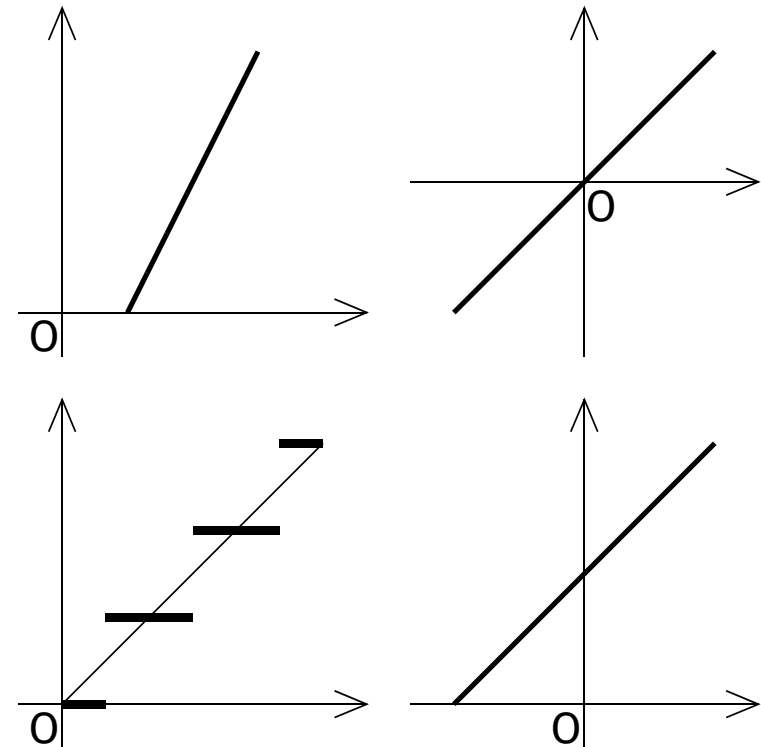
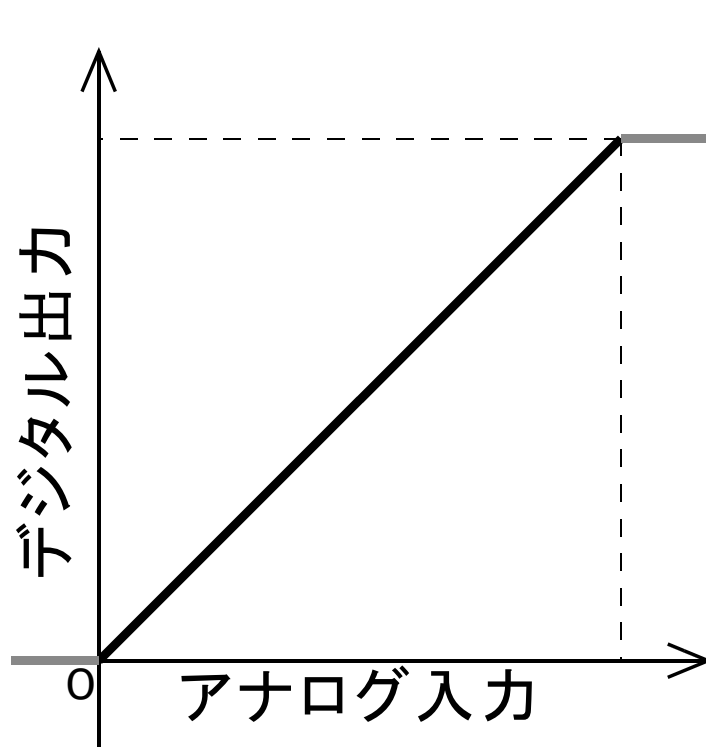
### ◇ 非ハード面

- ・ AD変換された信号の特性
- ・ 変換タイミング
- ・ 多チャンネル変換
- ・ AD変換の選定方法

※変換方式、変換原理は知っていて損は  
※ないが、実務上は気にならない。

# アナログデジタル変換とは

## ○ 信号のデジタル化



- ・ 一般に比例、一次関数の関係を持つ(グラフで直線)。
- ・ 入力電圧範囲と出力値でいくつかの形式がある。
- ・ 拡大するとデジタル側の「とびとび」が見える。



# アナログデジタル変換とは

## ○ 変換の細かさ（分解能, ≠精度）

### ◇ AD変換の分解能はビット数で表記

8bit	256段階	39 mV (10Vレンジ)
10bit	1024	0.98 mV
12bit	4096	0.24 mV
16bit	65536	0.015 mV
24bit	1700万	0.060 $\mu$ V

※電圧は、アナログ入力範囲が0～10Vの場合の

※デジタル値1あたりに相当する電圧幅

ここまでの「アナログの性能」を出せますか？

# アナログデジタル変換とは

## ○ 変換の意味

アナログ入力の範囲(部品や回路の仕様)に対して  
(入力値 - 下限) / (上限 - 下限) × 2<sup>(ビット数)</sup>  
が出力される(※デジタルの形式違いあり)。

逆に、

変換値 / 2<sup>(ビット数)</sup> × (上限 - 下限) + 下限

で元の電圧が分かる。 ※下限=0が多い

例: 0~5V, 8bit, に3Vを入力

$$(3-0)/(5-0) \times 256 = 153.6 \rightarrow 154$$

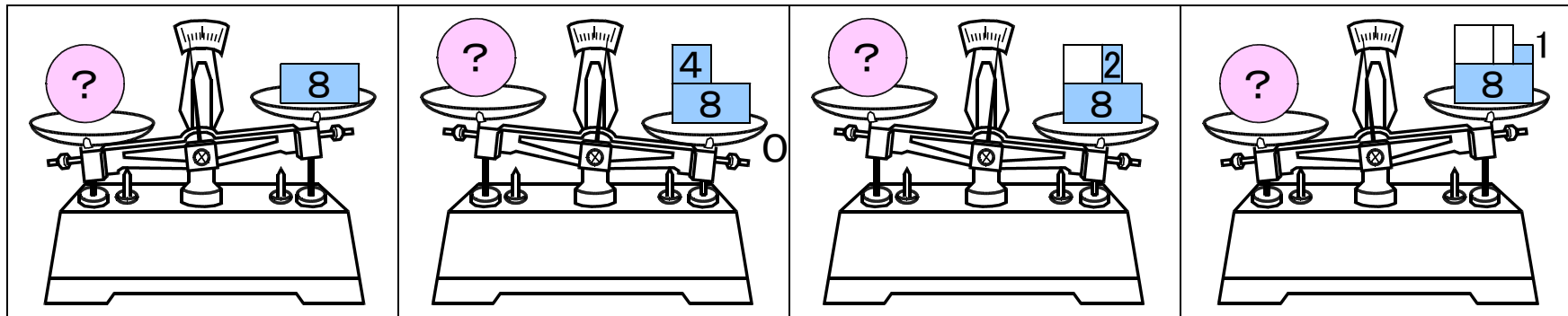
$$154/256 \times (5-0) + 0 = 3.01V$$

# アナログデジタル変換とは

## ○ 変換方式

### ◇ 逐次比較式

- ・ 現在の方式の主流。
- ・ 上皿天秤による質量の測定方法と類似。



8より大きい

→8+?

8+4より小さい

→+4は除去

8+2より小さい

→+2は除去

8+1より大きい

→結果8+1=9

# アナログデジタル変換とは

## ○ 変換方式

### ◇ 逐次比較式

- ・ 現在の方式の主流。
- ・ 上皿天秤による質量の測定方法と類似。
- ・ 変換に時間がかかる（ビットあたり）。  
& 変換中は入力に変化すると困る。
- ・ 「分銅」の精度が重要。  
※「分銅」としてDA変換器を内蔵
- ・ 回路の規模が小さい。

# アナログデジタル変換とは

---

## ○ 変換方式

### ◇ フラッシュ式

- ・ 多くの基準を用意しておき、同時に比較。  
→ 比較結果からデジタル値を生成。
- ・ 高速だが規模が大きくなりやすい。

### ◇ 二重積分式

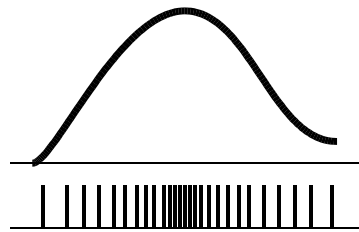
- ・ コンデンサへの充放電を利用(時間計測)。
- ・ 低速な一方でノイズ耐性は高い。
- ・ テスタ、パネルメータ等で使用される(た?)。

# アナログデジタル変換とは

## ○ 変換方式

### ◇ $\Delta$ - $\Sigma$ 式 (デルタシグマ)

- ・  $\Delta$   $\Sigma$  変調と呼ばれる回路を使用。



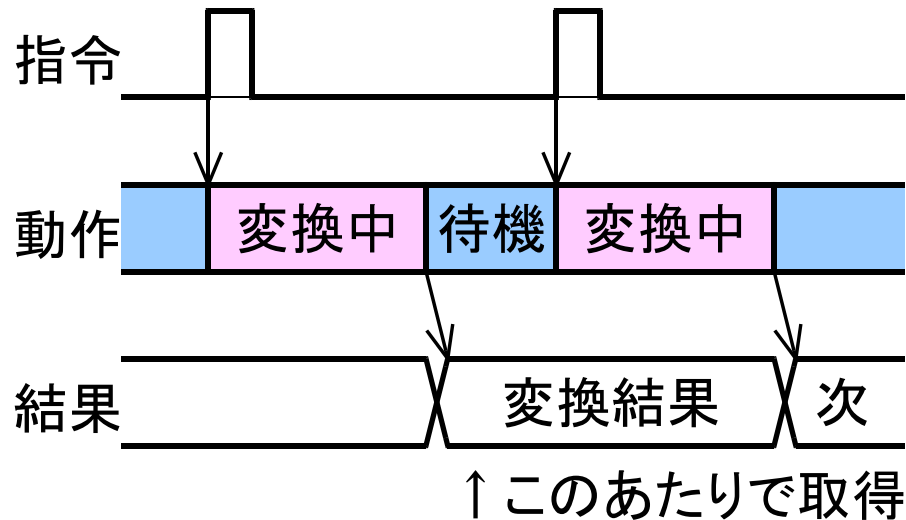
- ・ まず, アナログ入力に対応した, 1ビットのパルス列に変換される。

(電圧が高いほど"1"が増える)

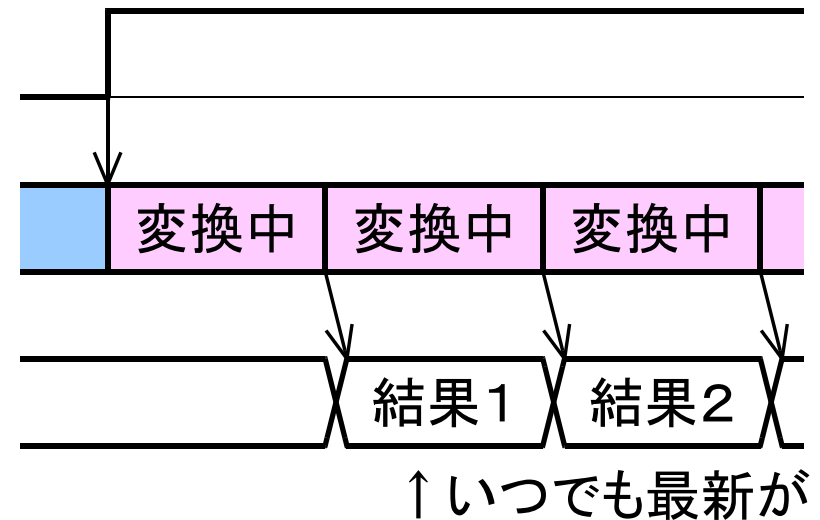
- ・ デジタル信号処理で1ビットのパルス列を多ビットのデジタル値に変換する。
- ・ 処理技術の発達とともに普及が進む。

# アナログデジタル変換とは

## ○ 動作タイミング（単発/連続変換）



指示したタイミングで入力を変換する。結果は変換時間後に得られる。



常に変換し続ける。いつ値を得ても直前の変換値が得られるので、使いやすい。

# AD変換の入力特性

---

## ○ 一般的項目

### ◇ 入力電圧範囲

- ・ 通常はGND(0V)～電源電圧を厳守。  
これと別に有効な入力範囲がある。

### ◇ 周波数特性

- ・ 周波数が高くなるほど：  
実質的な分解能がビット数より落ちる。  
ノイズやひずみが増加する。

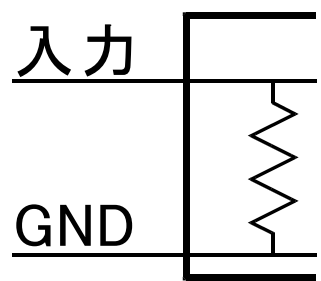


# AD変換の入力特性

※直前の回路の出力抵抗を低くすることが重要

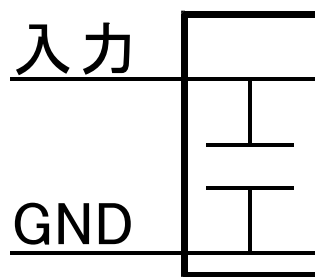
## ○ 入力回路特性

### ◇ 入力抵抗（入力インピーダンス）



- ・ 入力に並列に入っていると見なせる抵抗。
- ・ 前段の回路の出力抵抗との関係で、大きさの誤差が生じる原因。

### ◇ 入力容量



- ・ 同、コンデンサ
- ・ 前段の回路の出力抵抗との関係で、誤差、周波数特性、遅延の影響がでる。

# AD変換の出力特性

---

## ○ 出力信号の方式

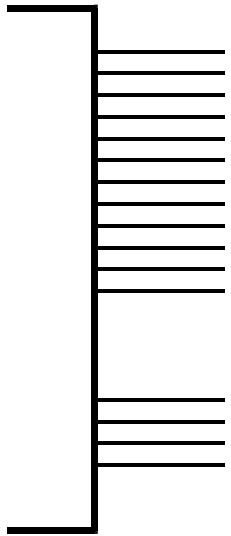
- ◇ マイコン内蔵型/パソコン内蔵/USB接続
  - ・ 最初からマイコンに内蔵されており、AD変換の接続を考慮する必要は無い。
  - ・ 一般に、特定のアドレスのデータを読むだけで変換結果が得られる。
  - ・ パソコン用はデバイスドライバ経由で変換値が直接得られる。

# AD変換の出力特性

## ○ 出力信号の方式（回路自作、外付け）

### ◇ パラレル型 / CPUバス型

- ・ 変換値がそのまま数本～十数本の信号線で出力される。
- ・ CPUに直結して使うためのバス制御信号を持つものも多い。
- ・ 変換開始や終了信号も専用の端子が用意されている。
- ・ 配線が多い/動作確認しやすい。



# AD変換の出力特性

## ○ 出力信号の方式（回路自作、外付け）

### ◇ シリアル型

- ・ CPU、マイコン等と、数本の信号線での通信を行って、結果の出力や動作設定を行う。
- ・ 接続する線が少なくて済む。しかし、
- ・ 通信方法を理解する必要がある。
- ・ 通信速度が足かせになり得る。
- ・ 動作状況を確認しにくい。

# AD変換の出力特性

## ○ 出力信号の方式（回路自作、外付け）

### ◇ シリアル型の主要な方法

- ・ SPI型 4線(有効/無効, クロック, 入力, 出力)で通信する。比較的扱いやすい。
- ・ I2C型 2線(クロック, データ)で通信する。  
多数のデバイスを並列接続できる。  
データ線は入出力を切り替えるため、  
多少難。専用回路を持つマイコンは多い。
- ・ その他

# AD変換の周辺回路

## ○ 基準電圧源 (Vref)

### ◇ AD変換の**変換の基準**

- ・ 変換レンジの最大値を決定する。

例) 基準電源4.096V

→12bitだとデジタル値1が1mVになる

- ・ 変換そのものの基準

→基準電源の変動が変換値の変動に

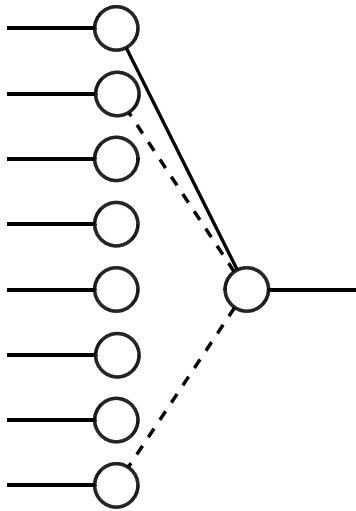
- ・ 近年は内蔵されていることが多いが、  
外付けすることもできる。

# AD変換の周辺回路

## ○ アナログスイッチ / マルチプレクサ

### ◇ 信号の切替

- ・ 複数の入力チャンネルを持つAD変換器の入力部にある**スイッチ回路**。
- ・ マルチプレクサは、たとえば8本の入力から1本を選ぶような回路。

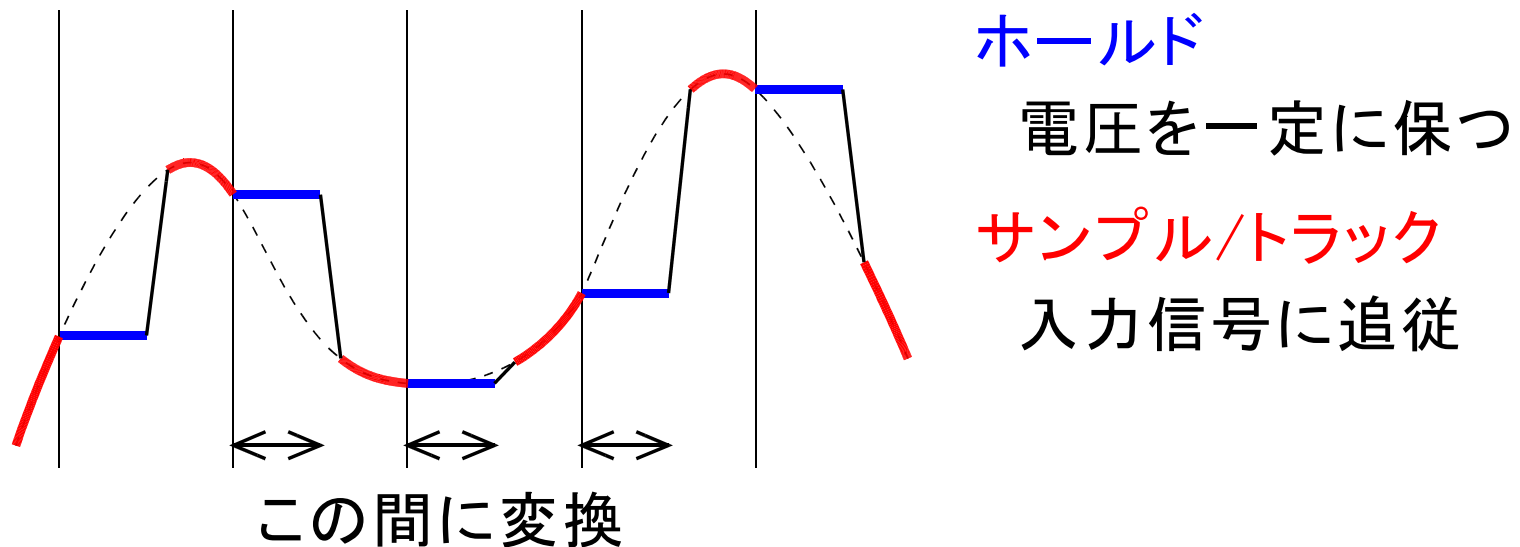


# AD変換の周辺回路

## ○ サンプルホールド（トラックホールド）

### ◇ 変換中の信号電圧の固定

- ・ AD変換(特に逐次比較)は、変換中に入力を一定電圧に保つ必要がある。





# AD変換の周辺回路

## ○ AD変換の電源回路 (IC, 組込マイコン)

### ◇ AD変換単体

- ・ **単電源**で動くものが多いが、**正負の電源**を必要とするものもある。

### ◇ 組込マイコン

- ・ マイコンと**共通の電源**で動くものが多いが、マイコンのノイズなどの影響を受けやすくなる(一般にデジタルの電源は“汚い”)。

**別端子**(AVCC, AGNDなど)を持つ場合が多い。

# 今回の目的

---

## ○ アナログ信号のコンピュータへの取り込み

テーマ1: アナログデジタル変換の基礎知識

- ・ AD変換の概念と原理
- ・ AD変換周辺回路の知識

テーマ2: AD変換の注意点

- ・ サンプリング定理
- ・ 誤差に対する理解
- ・ 変換回路構成に関する理解

# サンプリング定理

○ 入力はサンプリング周波数の1/2まで

◇ サンプリング

・ 値を取り込むこと。(≒AD変換の実施)

◇ サンプリング周波数 ( $f_s$ )

・ 1秒あたりのAD変換の回数

・  $1/(\text{サンプリング周期 } T_s)$

※ 一般にAD変換は一定時間間隔で行う。

例) CDは44.1kHz

※ 人間の可聴域 $\sim 20\text{kHz}$ は $44.1\text{kHz}/2$ より小さい

# サンプリング定理

---

○ 入力はサンプリング周波数の1/2まで

◇ サンプリング定理

・ サンプリング周波数の1/2の周波数の入力信号までしか、正しく取り込めない。

・ 逆に取り込みたい信号の最大周波数の倍以上の周波数でサンプリングする必要がある。

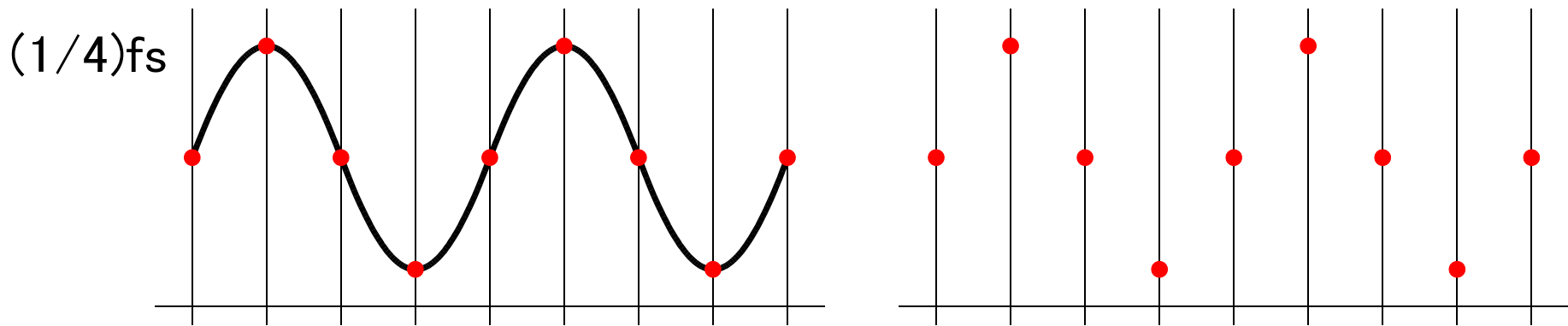
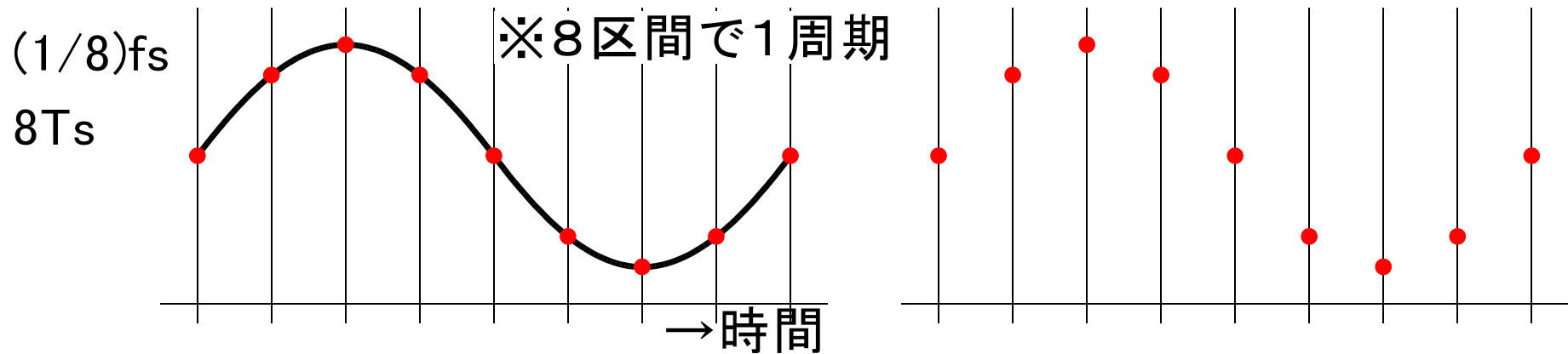
※実践的には最低で4倍、なるべく10倍

※高調波(2,3,4..倍の成分)に注意

# サンプリング定理

## ○ 波形例

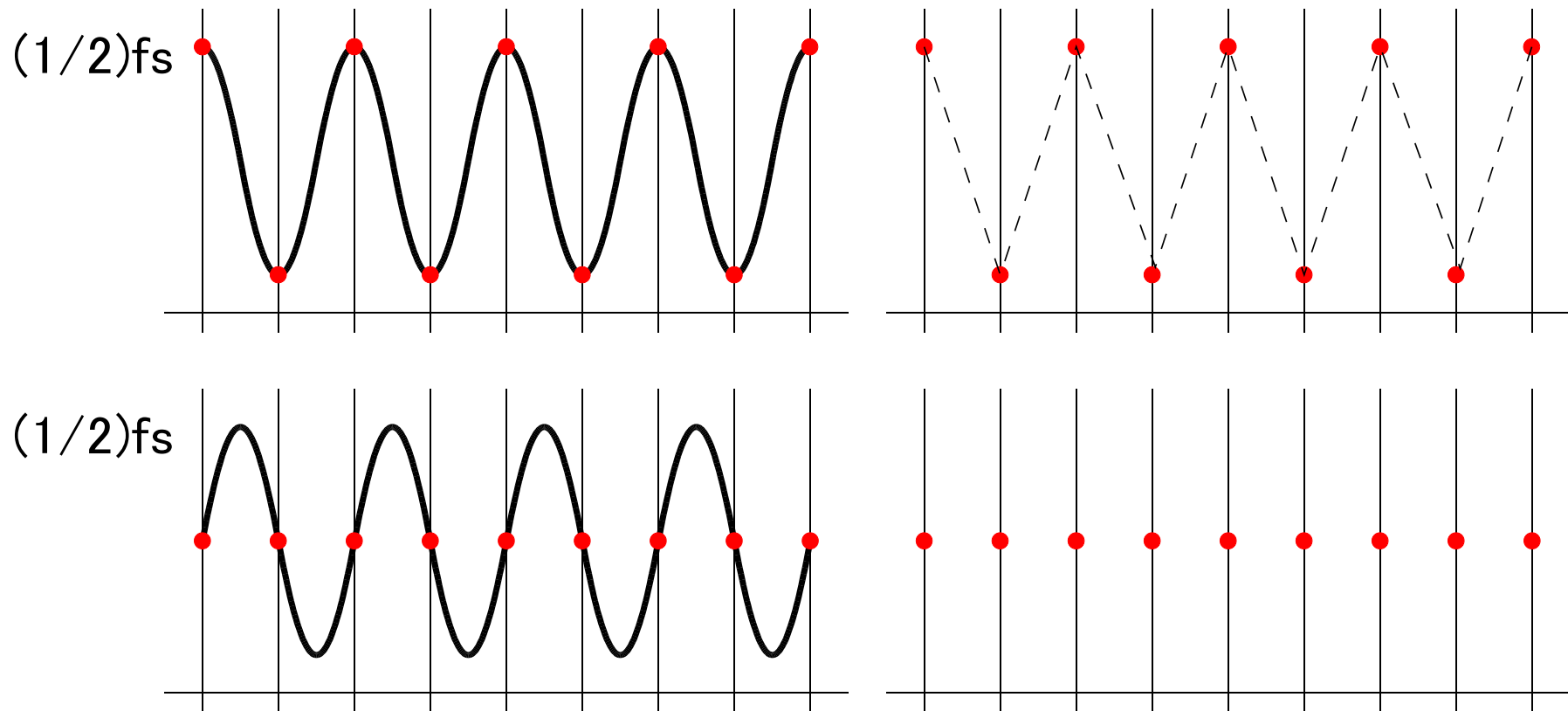
◇ それらしく取得できる



# サンプリング定理

## ○ 波形例

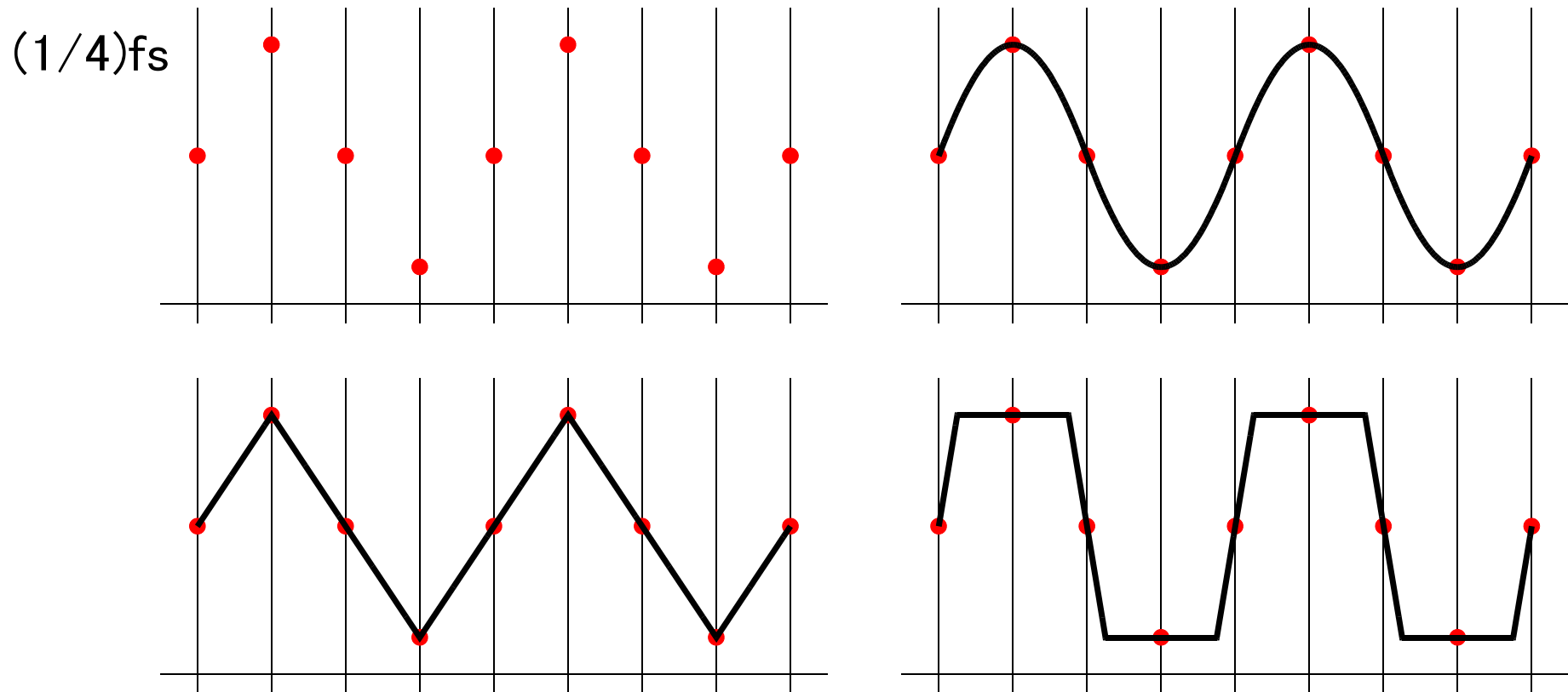
### ◇ 定理に抵触する入力



# サンプリング定理

## ○ 波形例

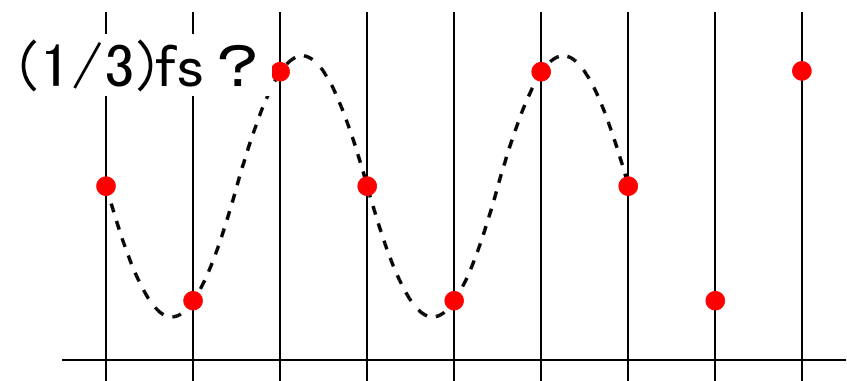
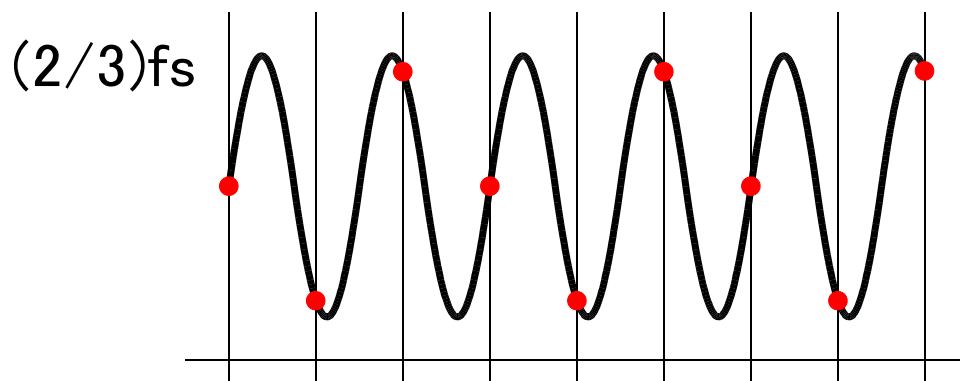
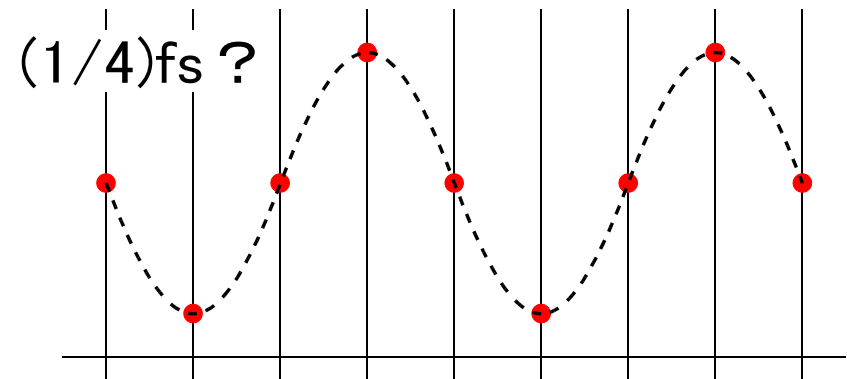
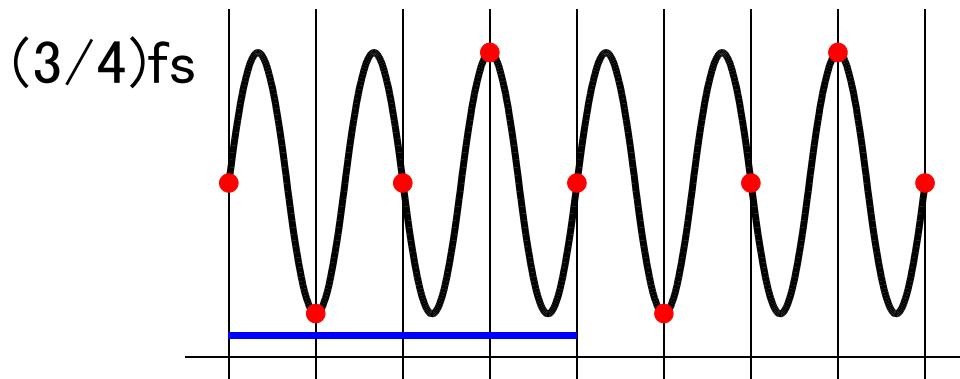
◇ 基本波は抵触しないが高調波が問題



# サンプリング定理

## ○ 波形例

### ◇ 定理に抵触している入力





# サンプリング定理

○ 入力はサンプリング周波数の1/2まで

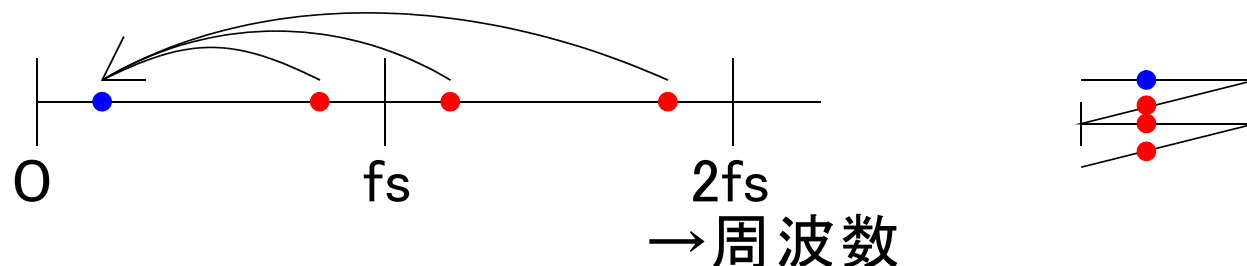
◇ サンプリング定理を無視すると

・「測れない」ではなく「偽信号」ができる。

→ 折り返しひずみ (エイリアシング)

・  $f=(1/2)f_s \sim f_s$  の周波数の信号をいれると、  
 $f_s-f$  の周波数になる。

$(3/4)f_s \rightarrow (1/4)f_s$ 、 $(2/3)f_s \rightarrow (1/3)f_s$

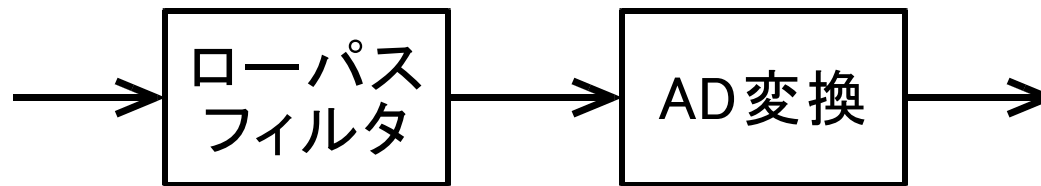


# サンプリング定理

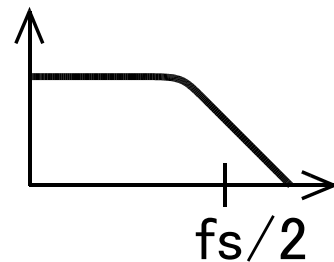
## ○ サンプリング定理の対策

### ◇ アンチエイリアシングフィルタ

- ・ AD変換の前にローパスフィルタ回路を置き、影響の出る成分を減らしておく。



ローパスFは  
第4回参照



※現実的にはフィルタで完全にカットできないので、ある程度は妥協することになる。

# サンプリング定理

---

## ○ 余談

### ◇ 身の回りのサンプリング定理的現象

- ・ 自動車のCMでホイールが止まったり逆回転したりする。(カメラのコマ数:約30Hz)
- ・ 蛍光灯の下で扇風機の羽根に変な回転を感じる。(蛍光灯は100Hzで点滅)

### ◇ サンプリング定理の活用

- ・ 敢えて点滅する光で観測して、静止した時の点滅周波数を確認: ストロボスコープ

# AD変換の精度

## ○ AD変換の誤差の表記

### ◇ 単位 : LSB

- ・ Least Significant Bit = 最下位ビット  
変換結果の「1」に相当する大きさ。
- ・ 誤差の大きさの表記に使用される単位。

### ◇ 単位 : dB

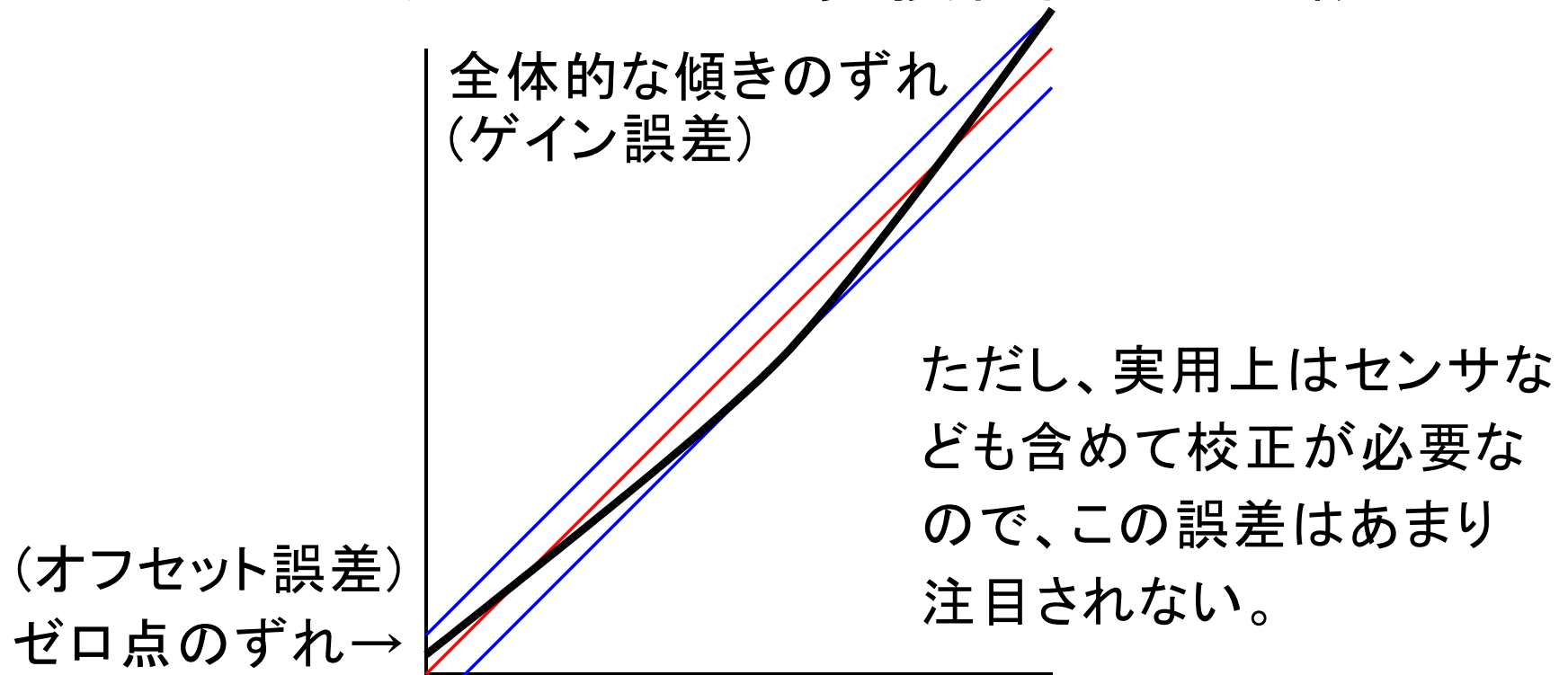
- ・ ひずみやノイズのSN比(信号/ノイズ)などを表すときに使用する単位。
- ・ 原理的に1ビットあたり6dB程度が基準。

# AD変換の精度

## ○ AD変換の誤差

### ◇ 絶対精度

- ・ 文字通り理想的な変換特性からの誤差



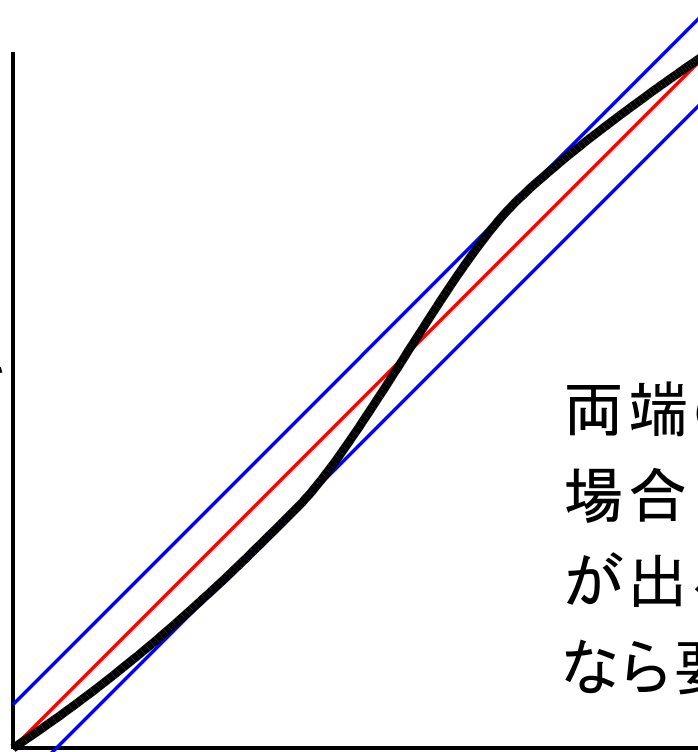
# AD変換の精度

## ○ AD変換の誤差

◇ 相対精度、非直線性 (relative accuracy, INL)

・ 始点終点間のたわみ具合

始点終点を結ぶ線を  
基準にする

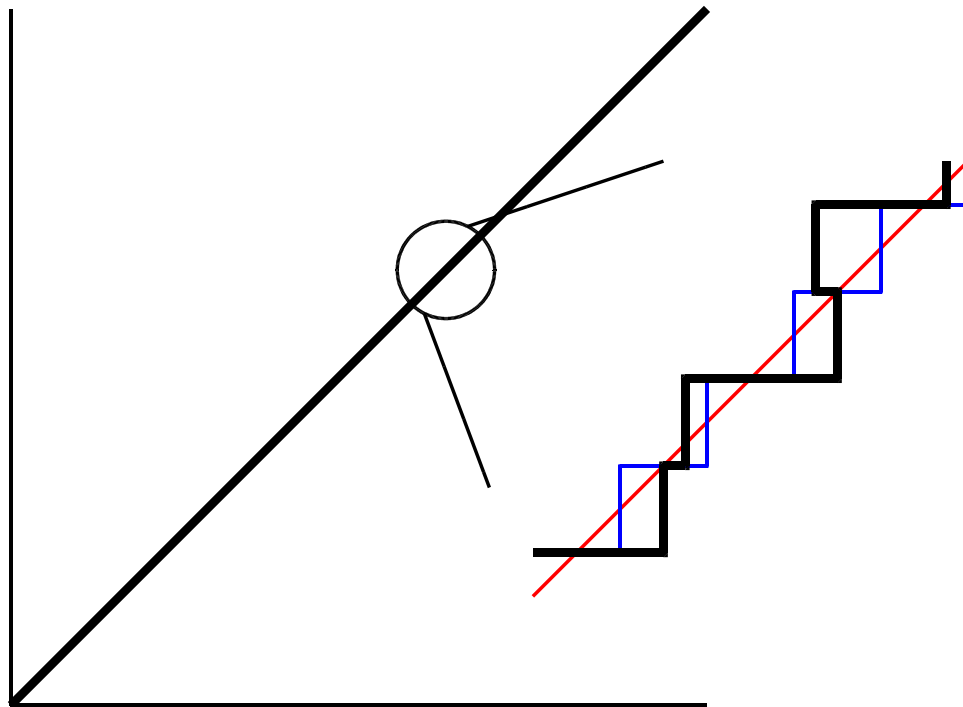


両端の校正を信じて使う  
場合は、この誤差の影響  
が出るので、精度が必要  
なら要注意の特性。

# AD変換の精度

## ○ AD変換の誤差

- ◇ 微分直線性 (differential nonlinearity, DNL)
  - ・隣接する変換間の単調増加性



本来はデジタル値に対応するアナログ値は1LSB分 (レンジ/ $2^{\text{ビット数}}$ )ずつ単調に増加するはずが、1段の幅が変わったり、逆転する(単調で無くなる)場合がある。

# AD変換の精度

## ○ AD変換の誤差の表記

- ◇ 絶対誤差・相対誤差・微分直線性
  - ・データシート(性能表)に記載。
  - ・いくらビット数が多くとも、微分直線性が1LSBを超えると性能が目減り。
- ◇ ノイズ、ひずみ (SNR, SINADなど)
  - ・周波数が高くなるとこれらの数値が悪化する → 性能が目減りする。

=ビット数が全てではない。



# 多チャンネルADの回路構成

## ○ 多チャンネル入力のみ

「8チャンネルの変換ができる」は  
「同時に変換できる」とは限らない

- ・ 大抵の多チャンネル仕様のAD変換IC、  
変換装置/基板、AD内蔵マイコンは  
同時には変換できない。

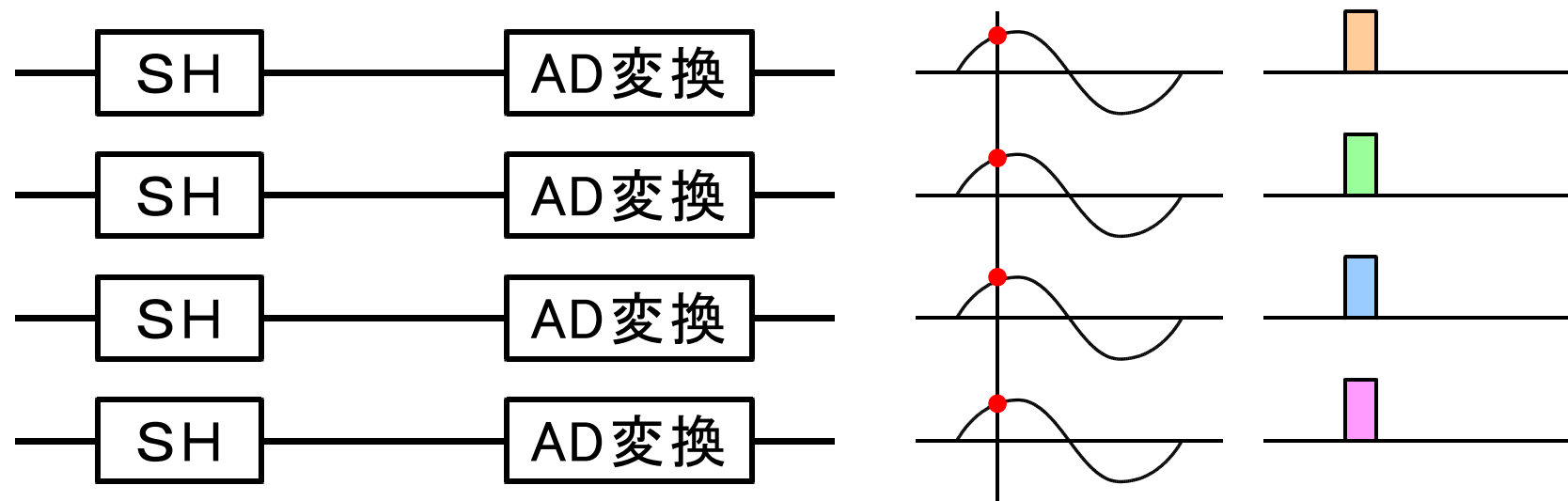
→ タイミング重視の計測では要注意

その理由は？

# 多チャンネルADの回路構成

## ○ 回路構成1

※SH=サンプルホールド回路

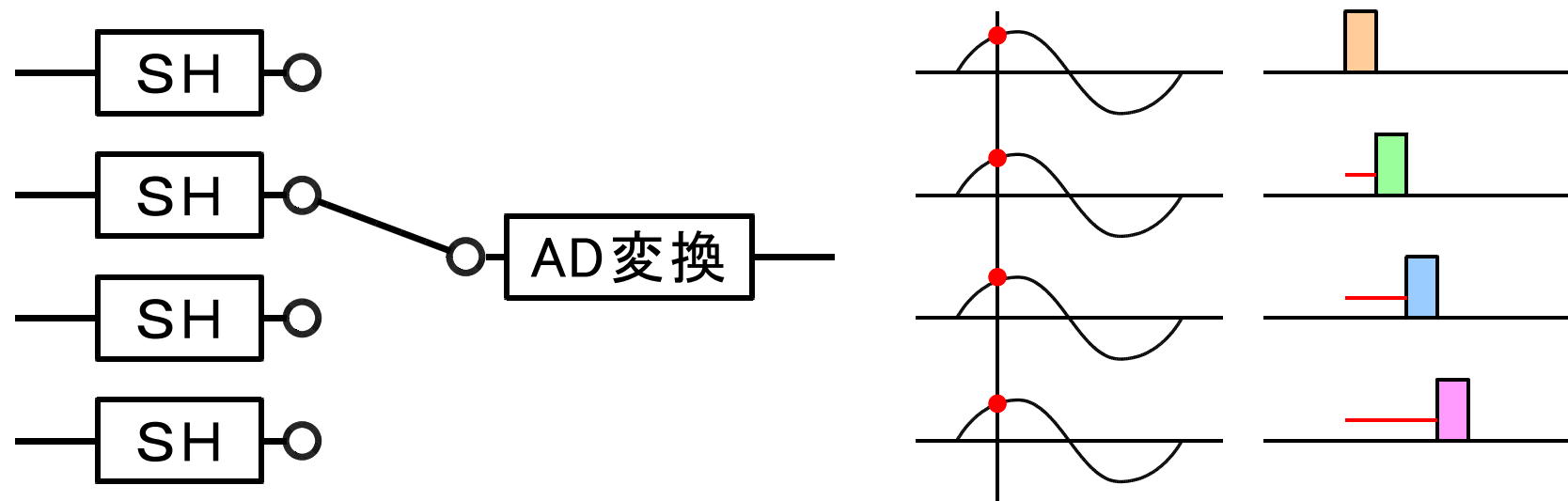


すべてがチャンネル数だけ用意されているので、  
同時変換が可能で、かつ変換速度は落ちない。  
理想的だが高価。

# 多チャンネルADの回路構成

## ○ 回路構成2

※SH=サンプルホールド回路



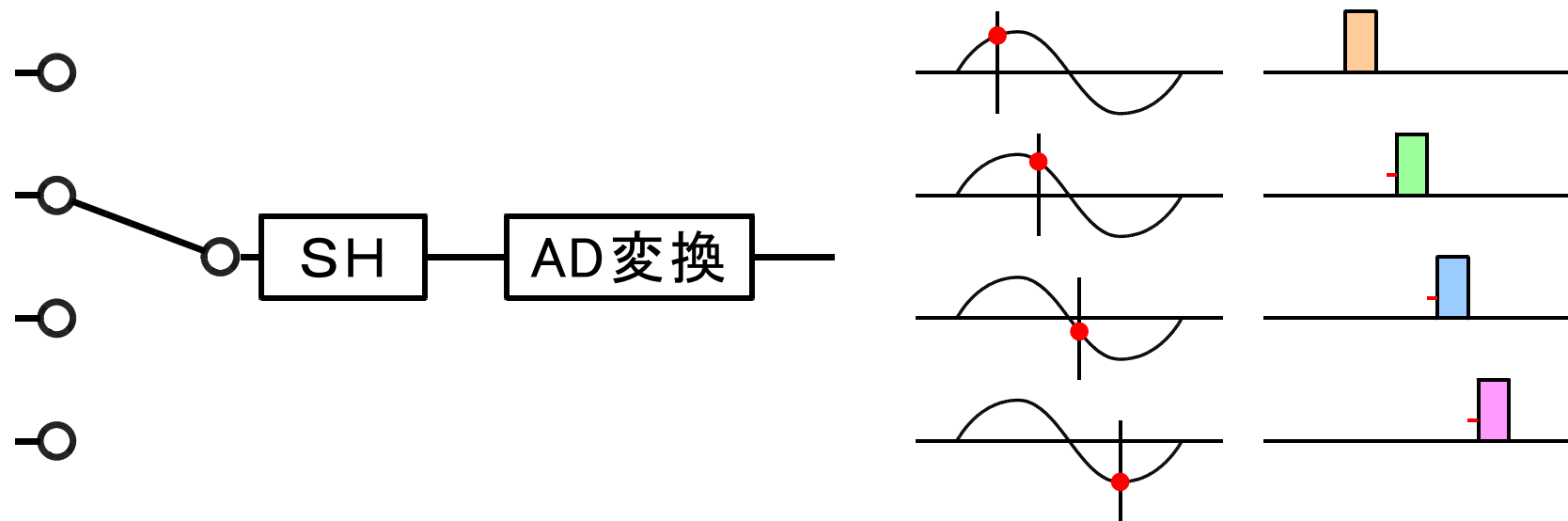
ホールド回路がチャンネル数あり、同時にホールド  
=サンプリングして、順次変換。

変換速度はチャンネルが増えると落ちるが、  
同時計測は可能。

# 多チャンネルADの回路構成

## ○ 回路構成3

※SH=サンプルホールド回路



標準セット(SH+AD)が1組しかなく、マルチプレクサで入力を切り替えるだけ。同時にホールドもできない。また切替にホールド準備の時間(サンプル期間)も必要となり、さらに速度が落ちる。

# 多チャンネルADの回路構成

## ○ 実際のAD変換部

### ◇ ほとんどが「3」

- ・ 大抵の多チャンネルAD変換のは、AD本体とSHを1組しか持たない  
→ 同時計測ができない。
- ・ 比較的高価なボード等では「1」のタイプがある。(変換速度も落ちない)
- ・ 「2」のタイプの実物は見覚えがない。

# AD変換の選定

---

## ○ 電気的特性

### ◇ 分解能（ビット数）

- ・どこまで細かく変換したいか。
- ・センサや回路の分解能は十分か。
- ・過剰でもかまわない(コストのみ)。
- ・精度にも注意。

### ◇ 入力レンジ

- ・入力範囲は手頃か。
- ・どのような回路を設計すれば良いか。

# AD変換の選定

---

## ○ 電気的特性

### ◇ 電源要求 (AD変換IC, マイコンなど)

- ・ 単一電源で動くかどうか。

例) 5V単一,  $\pm 5V$

- ・ 基準電源は内蔵しているか。

※今は内蔵が一般的で、外付けは避けてよい

# AD変換の選定

## ○ 時間的特性

### ◇ 変換速度

- ・ 目立つカタログ値は「1チャンネル」のとき。
- ・ nチャンネルにすると、 $(1/n)$ より遅くなる。  
※チャンネル間切替などの時間のため
- ・ 「最速値」なので、もちろん表記よりも遅く変換できる。(過剰でもOK)  
ただし、実際に無駄に高速変換するとデータ量の増大などを招くので、適切な速度を決定する必要有。



# AD変換の選定

---

## ○ 時間的特性

◇ 「厳密な同時計測」が必要か

- ・ 必要ならADを多数並べる構成も検討。
- ・ ただし、制御などにおいては、本当に同時計測が必要なことはあまりない。

※対象の動作に比べれば十分に頻度の高い計測制御が必須なため、変換タイミングのずれが結果に与えるような実装であることがむしろ問題になることが多いため。

# AD変換の選定

---

- デジタル信号の形式（変換ICの場合）
  - ◇ パラレルか、シリアルか
    - ・ シリアルは配線本数削減には便利だが、信号タイミングを理解する必要有り。
  - ◇ 使い方の確認
    - ・ 変換開始やチャンネル選択の方法。
    - ・ 信号を出力させる方法。  
(大抵は出力の有効・無効の制御線がある)

# AD変換の選定

---

## ○ 接続の方法（製品の場合）

### ◇ 内蔵か外付けか

- ・ 内蔵：PCI, PCIeなボード
- ・ 外付け：箱

### ◇ インターフェイス方法

- ・ USB
- ・ その他

※USBは仕様上、1msの遅れは出るので、制御で用いる場合には注意が必要。

# AD変換の選定

---

## ○ 変換方式

◇ 一般に、自動的に決まる

- ・ 速度、ビット数の仕様を策定して、品種選定を行うと、その結果として方式が決まる。

※多くの場合は逐次比較、多ビットで $\Delta \Sigma$ 、

※高速でフラッシュなど

# まとめ

---

## ○ アナログ→デジタル変換

- ・ アナログ値に比例したデジタル値が得られる。
- ・ 入力につなぐ回路の設計においては、AD変換の入力特性に注意する必要がある（入力抵抗、容量）。

# まとめ

---

## ○ 変換と時間

- ・ サンプリング定理に注意する。  
場合によっては偽の信号を得る危険性がある。(折り返しひずみ、エイリアシング)
- ・ 一般的な多チャンネルADは、同時変換できるわけではない。  
また、多チャンネルで変換するときの速度の低下に注意する。