

2023年3月29日

# AD変換器の高周波入力、高速サンプリングと 変換精度

群馬大学 小林春夫

# Agenda

1. 概要
2. 問題
3. 解説と解答
4. まとめ

# 1. 概要

## AD変換器の高周波入力、高速サンプリングと変換精度

AD変換器は IoTシステム、通信システム、車載システム等でのキーデバイスです。高性能AD変換器の設計を行うためにその性能劣化の要因を知る必要があります。

キーワード:

AD変換器、トラックホールド回路、有効ビット、高周波入力ジッタ、アパーチャ時間、高速サンプリング、整定時間

## 2. 問題

次の文書の空欄（ ）に入る正しい言葉の組み合わせを①～④の中から選びなさい。

多くの場合AD変換器の有効ビット数は入力周波数が高いと（ ア ）ことが多い。また同じ入力周波数の場合、サンプリング周波数が高いと有効ビット数が（ イ ）ことが多い。

- ① ア：小さくなる イ：小さくなる
- ② ア：同じである イ：小さくなる
- ③ ア：大きくなる イ：小さくなる
- ④ ア：大きくなる イ：大きくなる

### 3. 解説と解答 (1)

次の文書の空欄 ( ) に入る正しい言葉の組み合わせを①～④の中から選びなさい。

多くの場合AD変換器の有効ビット数は入力周波数が高いと ( ア ) ことが多い。また同じ入力周波数の場合、サンプリング周波数が高いと有効ビット数が ( イ ) ことが多い。

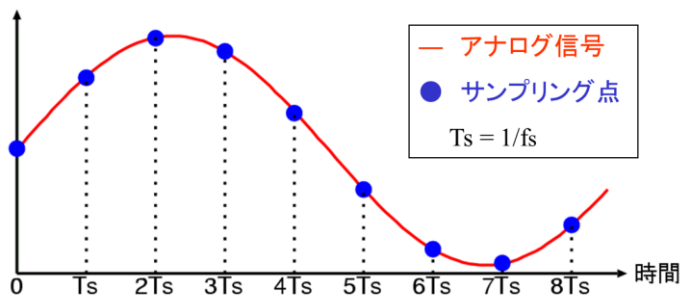
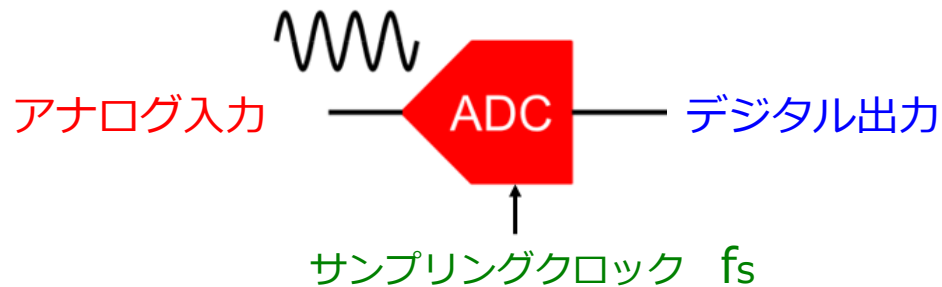
- ① ア : 小さくなる イ : 小さくなる
- ② ア : 同じである イ : 小さくなる
- ③ ア : 大きくなる イ : 小さくなる
- ④ ア : 大きくなる イ : 大きくなる

← 正解

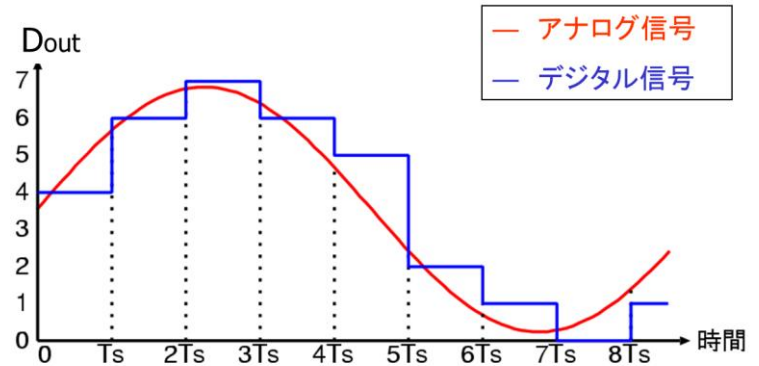
# 3. 解説と解答 (2)

# AD変換器とは

Analog-to-Digital Converter: ADC  
アナログ信号をデジタル信号に変換する回路



サンプリング



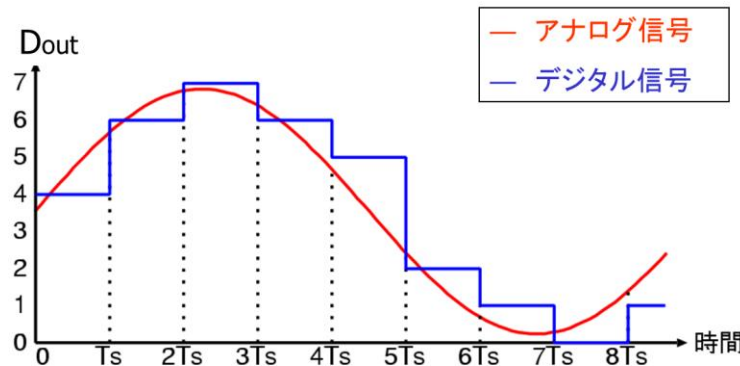
量子化

### 3. 解説と解答 (3)

## ADCの分解能と有効ビット

0~7 の8レベル

$2^3$  → 3-bit 分解能



0~255 の256レベル

$2^8$  → 8-bit 分解能

0~1023 の1024レベル

$2^{10}$  → 10-bit 分解能

0~65535 の65536レベル

$2^{16}$  → 16-bit 分解能

理想のADC： 分解能が高い（レベル数が多い）

→ 変換精度が良い

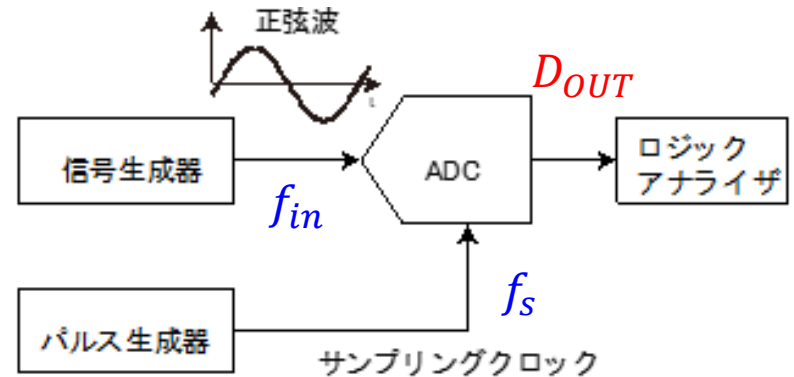
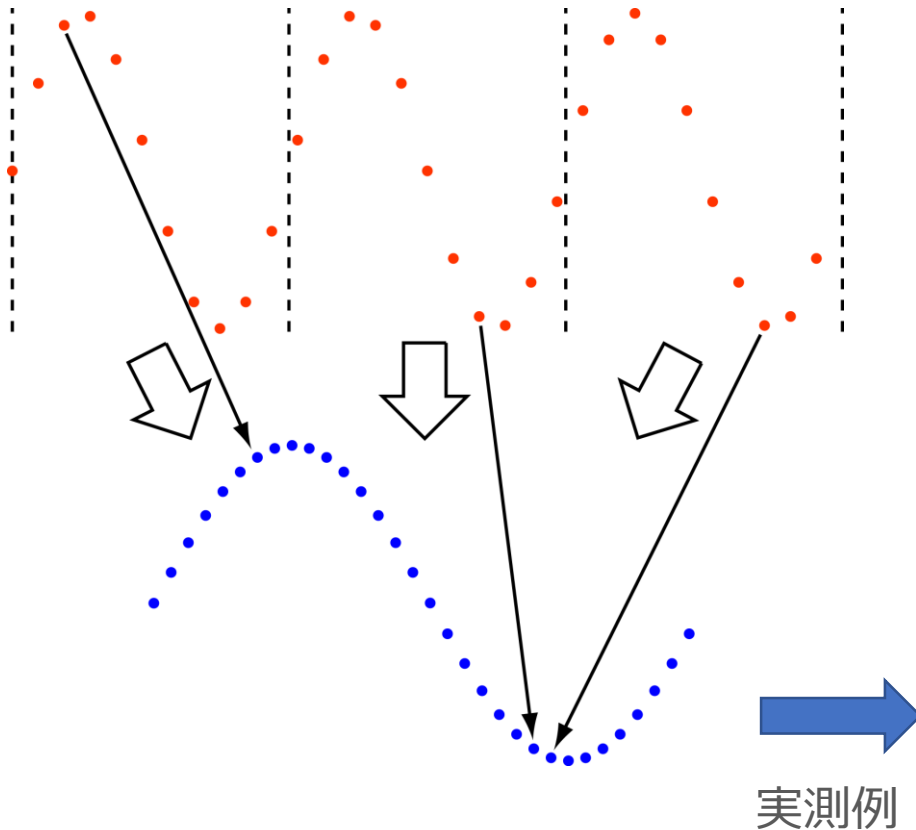
実際のADC： 様々な誤差要因で変換精度が劣化

有効ビット： 実際のADCの実力の分解能（ビット数）

### 3. 解説と解答 (4)

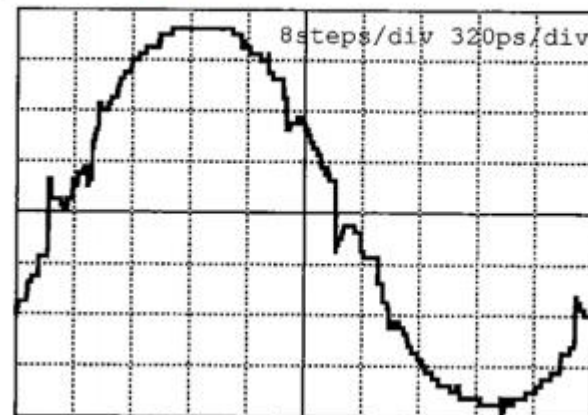
## ADCの有効ビットが小さくなるとは？

ADC出力データ  $D_{OUT}$  の並び替えによる波形再構成



ADC 出力  $D_{OUT}$

高速サンプリングによる出力再構成データの劣化





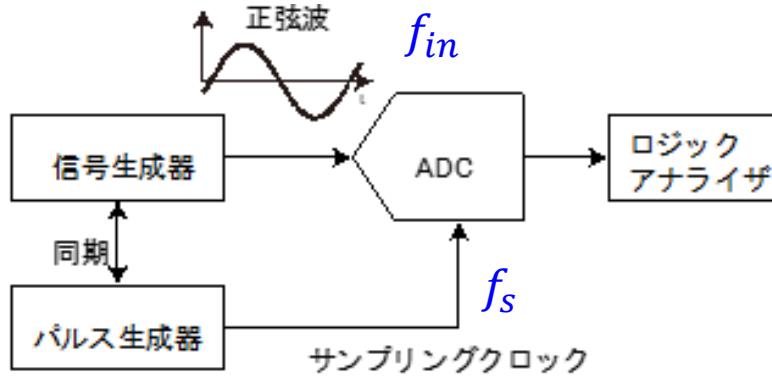
## 4. 解説と解答 (5)

入力信号が高周波化すると有効ビットが劣化する要因

- ① サンプリングクロックジッタの影響が大きくなる
- ② 有限アパーチャ時間の影響が大きくなる
- ③ トラックホールド回路のトラックモードのときの有限帯域の影響が大
- ④ トラックホールド回路のホールドモードのときの寄生容量を通して 入力信号が出力信号（ホールド電圧）に漏れるなど

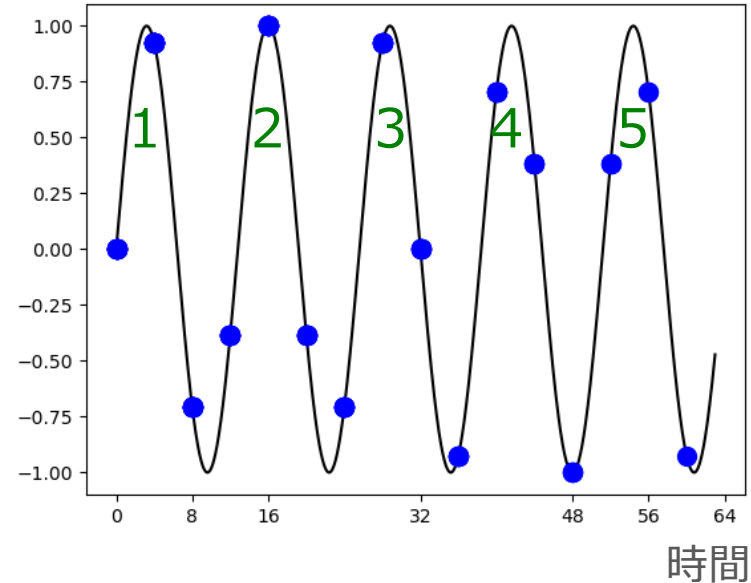
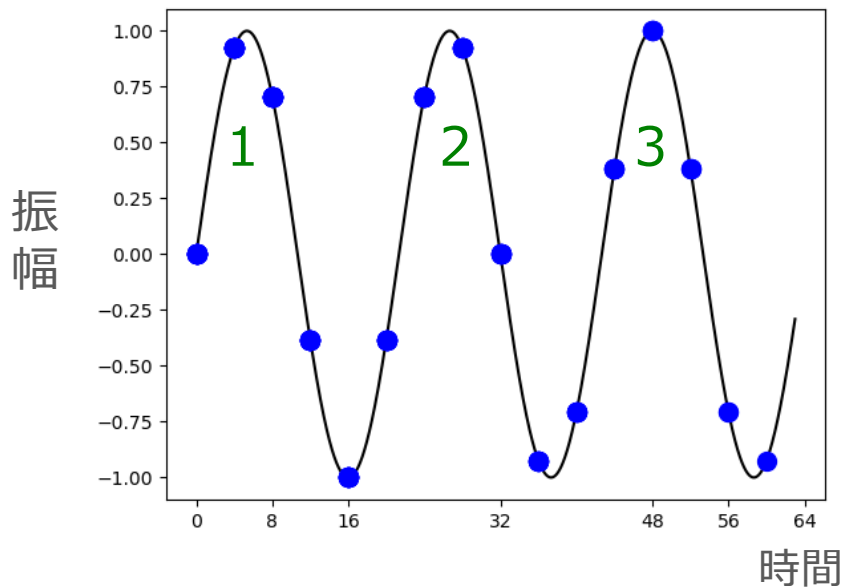
# 3. 解説と解答 (6)

## 高周波入力とは



$f_{in}$  小  $\Rightarrow$  低周波入力

$f_{in}$  大  $\Rightarrow$  高周波入力



## 3. 解説と解答 (7)

入力信号が高周波化すると有効ビットが劣化する要因

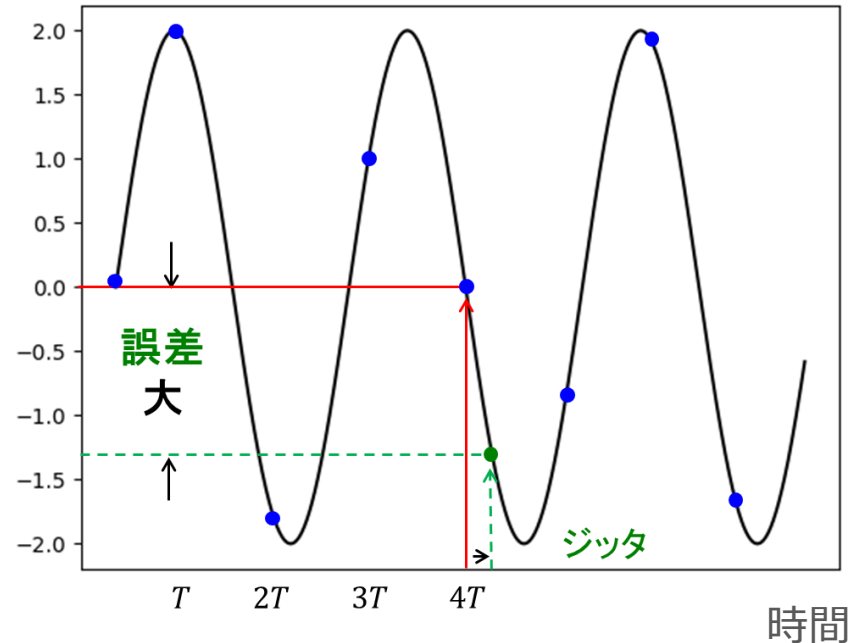
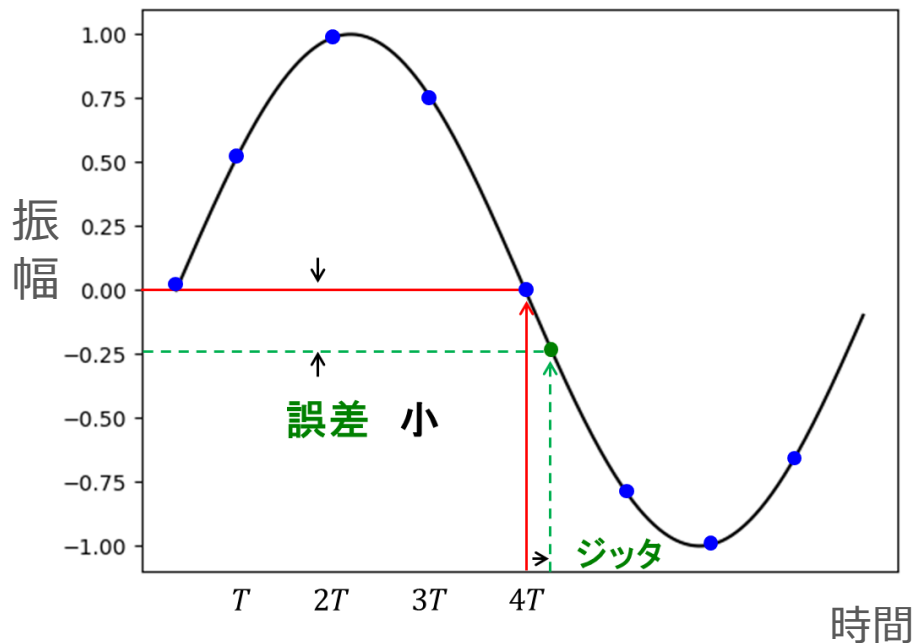
- ① サンプリングクロックジッタの影響が大きくなる
- ② 有限アパーチャ時間の影響が大きくなる
- ③ トラックホールド回路のトラックモードのときの有限帯域の影響が大
- ④ トラックホールド回路のホールドモードのときの寄生容量を通して 入力信号が出力信号（ホールド電圧）に漏れるなど

# 3. 解説と解答 (8)

## サンプリングジッタの影響

$f_{in}$  小 → 低周波入力

$f_{in}$  大 → 高周波入力



同じサンプリングタイミングの誤差 (横軸の誤差)  
→ 高周波入力では大きな振幅誤差 (縦軸の誤差)

## 3. 解説と解答 (9)

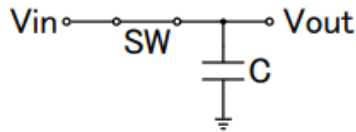
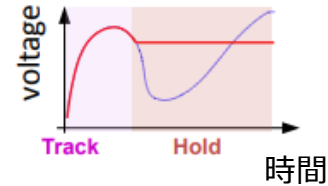
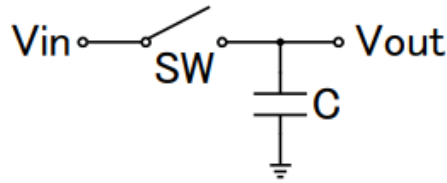
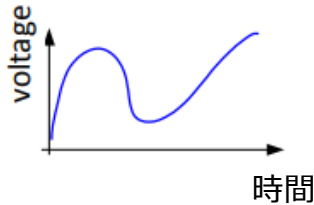
入力信号が高周波化すると有効ビットが劣化する要因

- ① サンプリングクロックジッタの影響が大きくなる
- ② 有限アパーチャ時間の影響が大きくなる
- ③ トラックホールド回路のトラックモードのときの有限帯域の影響が大
- ④ トラックホールド回路のホールドモードのときの寄生容量を通して 入力信号が出力信号（ホールド電圧）に漏れるなど

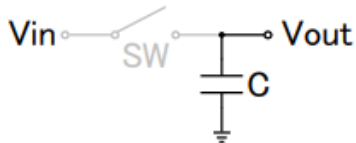
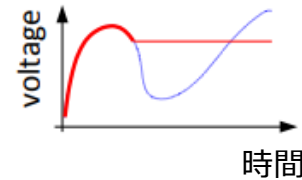
# 3. 解説と解答 (10)

## サンプリング回路と有限アパーチャ時間

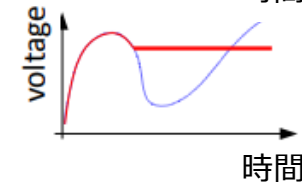
### サンプリング回路



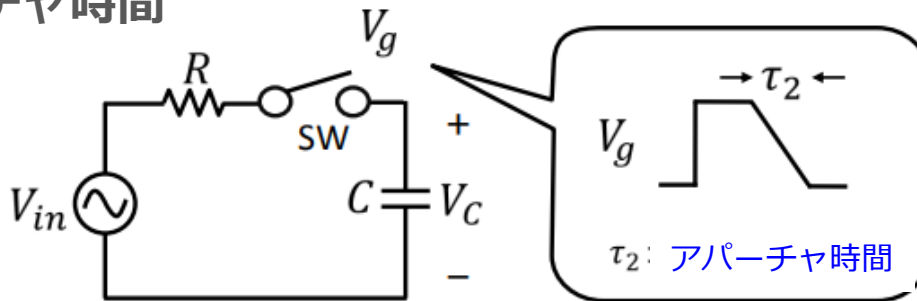
- SW: ON
- $V_{out}(t) = V_{in}(t)$
- **トラックモード**



- SW: OFF
- $V_{out}(t) = V_{in}(t_{OFF})$
- **ホールドモード**



### 有限アパーチャ時間



### 3. 解説と解答 (11)

## 有限アパーチャ時間による高周波信号の減衰

カメラ：有限シャッター時間



↓ 動いている物体



写真がブレる

サンプリング回路：  
有限アパーチャ時間



↓ 高周波信号



サンプリングされた信号は  
減衰する

### 3. 解説と解答 (12)

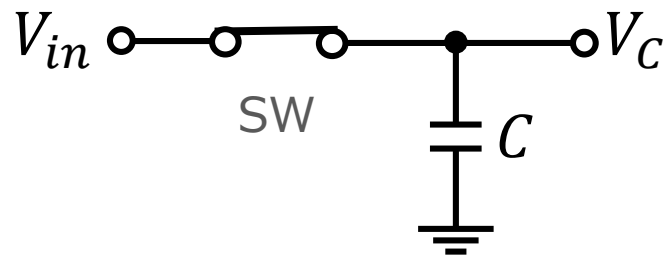
入力信号が高周波化すると有効ビットが劣化する要因

- ① サンプリングクロックジッタの影響が大きくなる
- ② 有限アパーチャ時間の影響が大きくなる
- ③ トラックホールド回路のトラックモードのときの有限帯域の影響が大
- ④ トラックホールド回路のホールドモードのときの寄生容量を通して 入力信号が出力信号（ホールド電圧）に漏れるなど

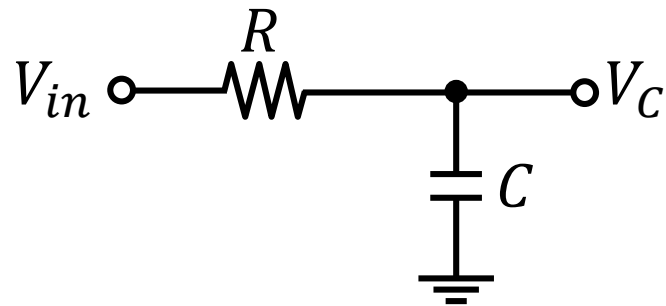


### 3. 解説と解答 (13)

## トラックホールド回路の トラックモードのときの 有限帯域の影響



トラックモード時の  
等価回路



RCローパスフィルタとなり高周波信号が減衰

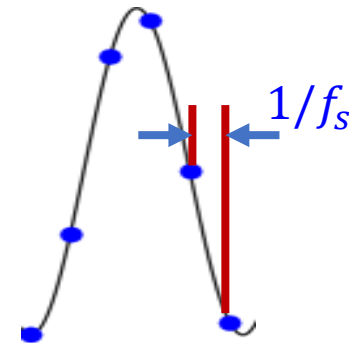
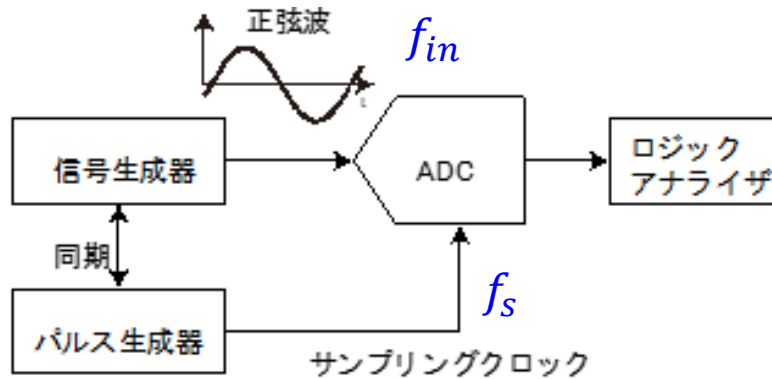
## 3. 解説と解答 (14)

サンプリングクロックが高周波化すると有効ビットが劣化する要因

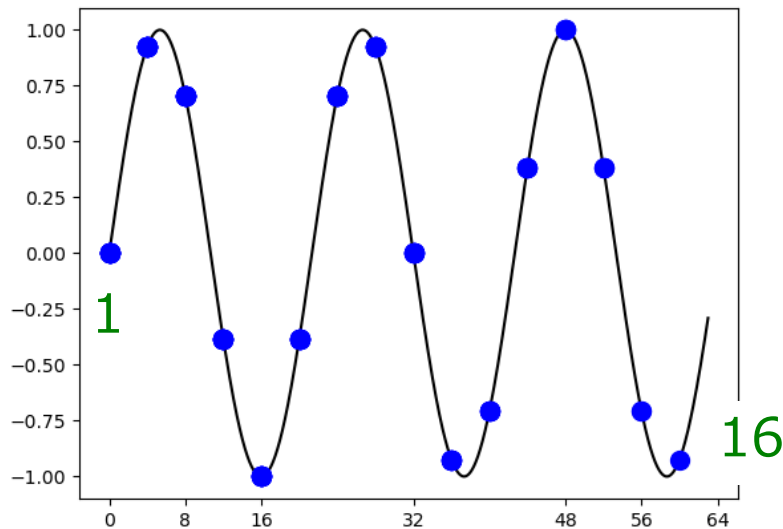
- ① サンプリング周期が短くなると ステップ入力の際等の  
トラックホールド回路出力の整定が(1/2 LSB 以内に)できない
- ② 内部 DAC 出力の整定が(1/2 LSB 以内に) できない
- ③ コンパレータが (2つの入力差が小さいと) その出力が  
サンプリング周期内にロジックレベルにまで達しない確率が増加
- ④ クロックに同期したノイズ (コンパレータキックバックノイズ、  
デコーダ部のクロック ノイズ等) が整定しないで 次の動作に  
入ってしまう

# 3. 解説と解答 (15)

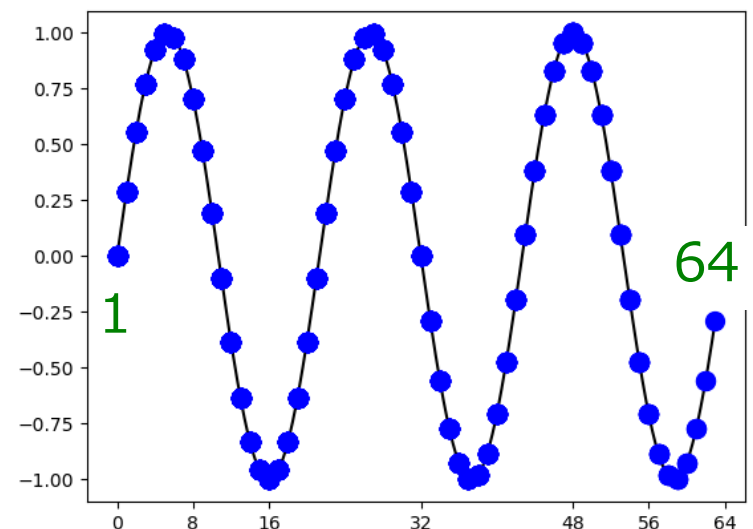
## 高速サンプリングとは



$f_s$  小  $\Rightarrow$  低速サンプリング



$f_s$  大  $\Rightarrow$  高速サンプリング



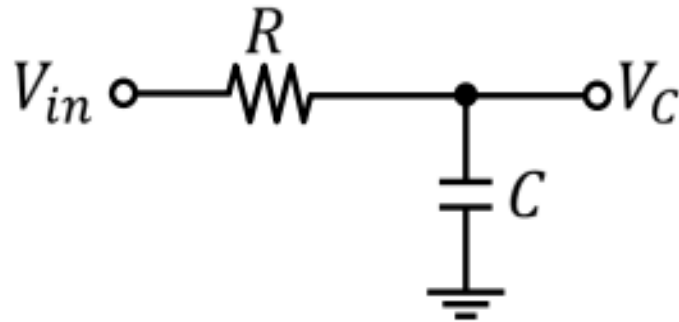
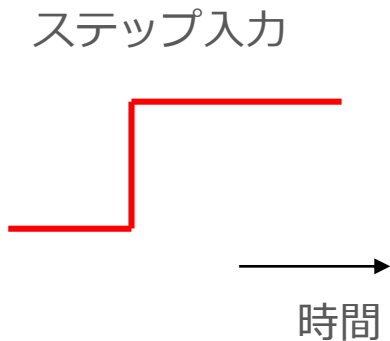
### 3. 解説と解答 (16)

サンプリングクロックが高周波化すると有効ビットが劣化する要因

- ① サンプリング周期が短くなると ステップ入力の際等の  
トラックホールド回路出力の整定が(1/2 LSB 以内に)できない
- ② 内部 DAC 出力の整定が(1/2 LSB 以内に) できない
- ③ コンパレータが (2つの入力差が小さいと) その出力が  
サンプリング周期内にロジックレベルにまで達しない確率が増加
- ④ クロックに同期したノイズ (コンパレータキックバックノイズ、  
デコーダ部のクロック ノイズ等) が整定しないで 次の動作に  
入ってしまう

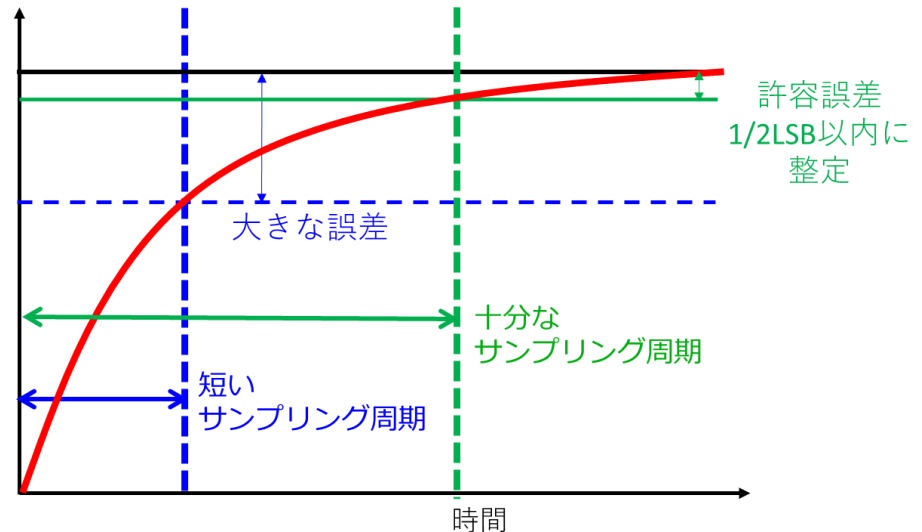
### 3. 解説と解答 (17)

## サンプリング周期と 整定時間



ステップ応答

出力電圧  $V_C$



### 3. 解説と解答 (18)

次の文書の空欄 ( ) に入る正しい言葉の組み合わせを①～④の中から選びなさい。

多くの場合AD変換器の有効ビット数は入力周波数が高いと ( ア ) ことが多い。また同じ入力周波数の場合、サンプリング周波数が高いと有効ビット数が ( イ ) ことが多い。

- ① ア : 小さくなる    イ : 小さくなる
- ② ア : 同じである    イ : 小さくなる
- ③ ア : 大きくなる    イ : 小さくなる
- ④ ア : 大きくなる    イ : 大きくなる

← 正解

## 4. まとめ

### AD変換器の高周波入力、高速サンプリングと変換精度

AD変換器は高速サンプリングを行い 高周波信号を入力すると変換精度は劣化する。

高周波信号ではサンプリングクロックジッタ、有限アパーチャ時間等により誤差が増大する。高速サンプリングでは回路が整定する前に次のデータの変換をおこなってしまい誤差が大きくなる。

高性能AD変換器の設計においてはこれらの誤差要因を見つけ解決していく必要がある。