

# 電気・電子計測

## 【第12回】アナログ・デジタル変換 第7章 計測値の変換

<http://cobayasi.com/keisoku/12th/12th.pdf>

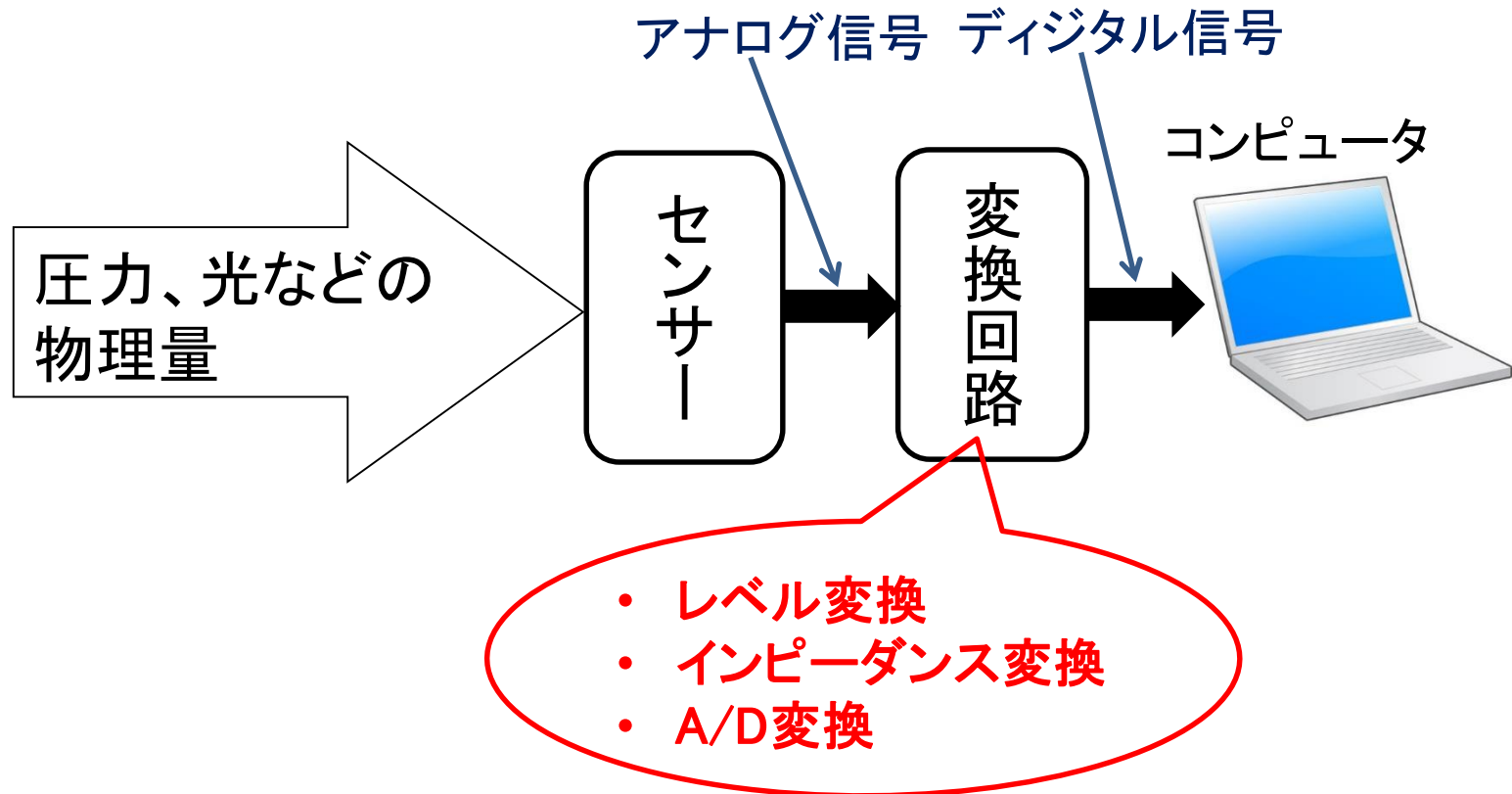
# 今日の学習の要点

## テキストP75～P84

センサで計測した物理量は、アナログ信号で取り出されることが多いので、コンピュータで処理しやすいデジタル信号に変換する必要がある。ここでは、アナログ信号を処理しやすい状態に変換し、デジタル信号に変換する技術について学ぶ

1. アナログ量を変換する方法を知ろう
2. アナログとデジタルの変換の意味を学ぼう
3. D-A変換について学ぼう
4. A-D変換について学ぼう

- 計測した信号は、その後の処理に適した形式に変換する必要がある

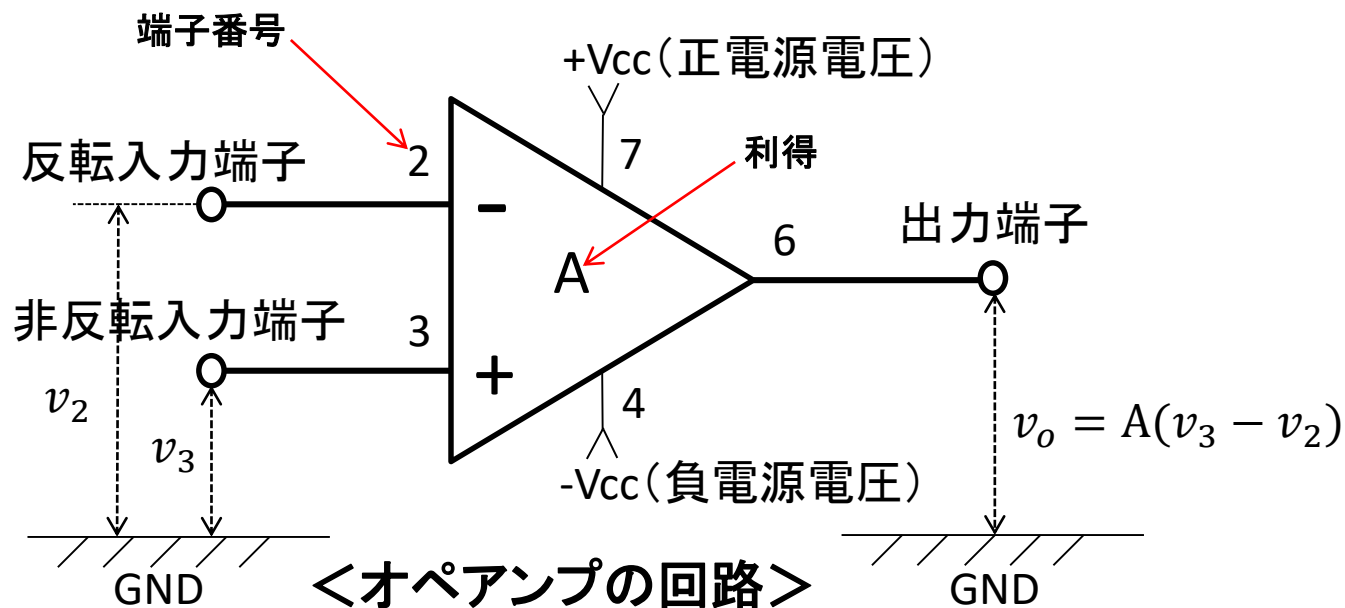


# 1. アナログ量を変換する方法を知ろう

教科書P75-77

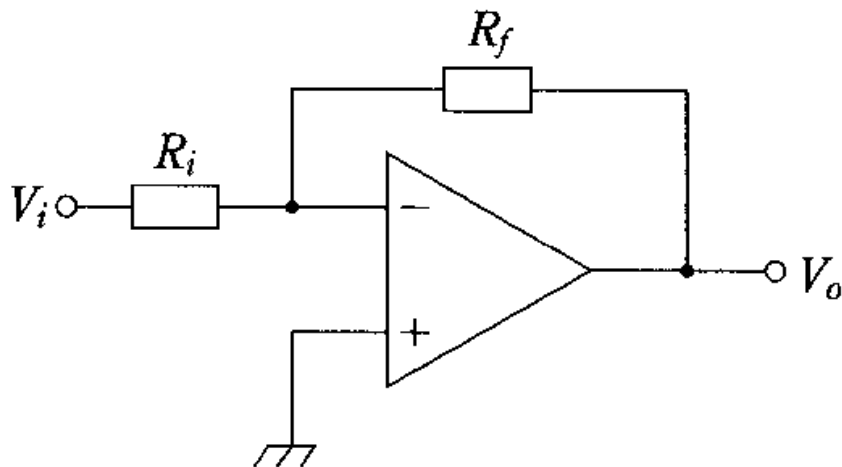
## [1] レベル変換

センサからの微弱なアナログ信号を、計測器やコンピュータで取り扱うことができる大きさの信号に変換する。このことを、**レベル変換**と呼ぶ。レベル変換では、通常オペアンプが使うことが多い。



# <理想的なオペアンプの条件>

- ①利得(電圧増幅度)が無限大 (実際は、 $10^5 \sim 10^{17}$ )
- ②入力インピーダンスが無限大 (実際は、 $10^6 \sim 10^{12} [\Omega]$ )
- ③出力インピーダンスがゼロ (実際は、数十 $[\Omega]$ ~数百 $[\Omega]$ )
- ④応答時間がゼロ (実際は、数 $[\text{ns}]$ ~数十 $[\text{ns}]$ )
- ⑤出力のオフセット電圧がゼロ (実際は、数 $[\text{mV}]$ ~数 $[\mu\text{V}]$ )



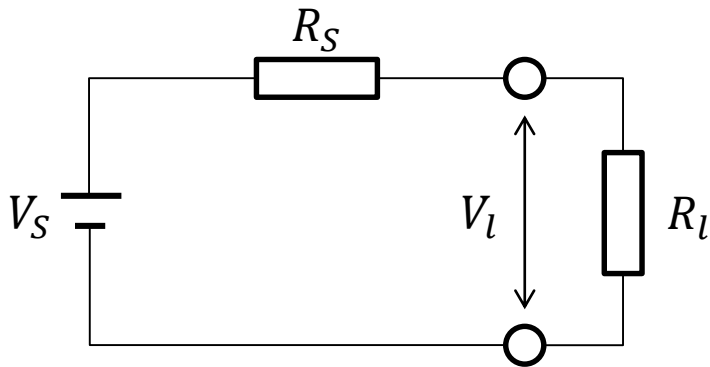
$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i \quad (7 \cdot 2)$$

● 図 7・3 反転増幅回路 ●  
(教科書P76)

## [2]インピーダンス変換

センサの出力インピーダンス(出力側の等価的な内部抵抗 $R_S$ )が大きいと、計測器などの負荷 $R_L$ を接続することによって、回路の出力電圧が小さくなる(分圧による)

このため、オペアンプなどを用いて出力インピーダンスの影響を少なくする必要がある。これを**インピーダンス変換**と呼ぶ。レベル変換回路の1つに、**ボルテージフォロワ回路**がある。



$R_S$ : 出力インピーダンス  
 $R_L$ : 負荷インピーダンス  
 $V_S$ : センサ出力電圧  
 $V_L$ : 回路の出力電圧

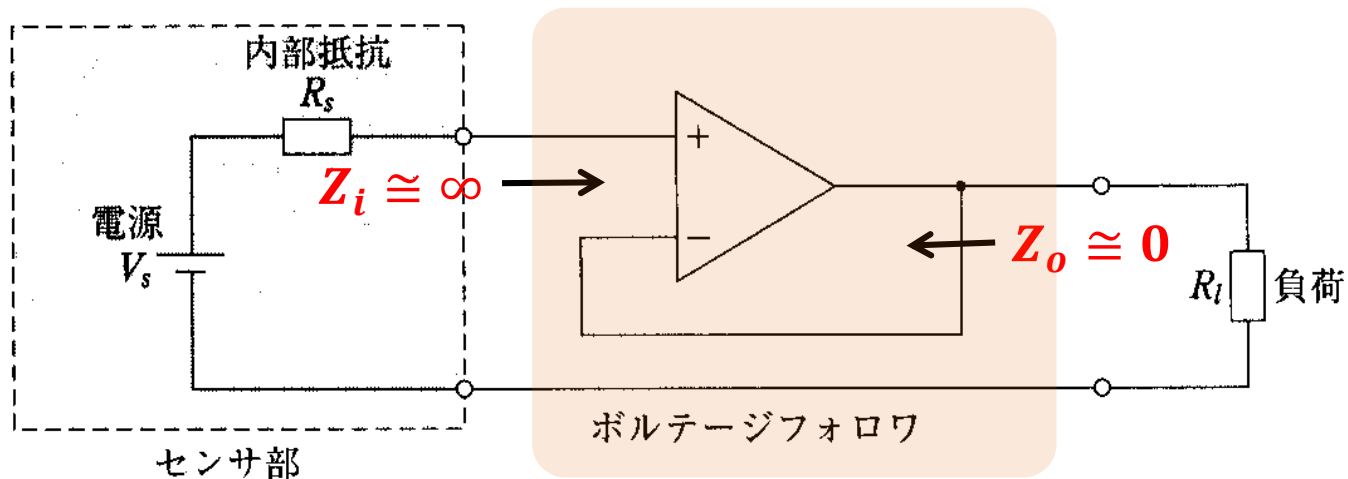
$$V_L = \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S$$

- 出力インピーダンスが大きい( $R_S \gg R_L$ )とき、
$$V_L \cong \frac{R_L}{R_S} V_S$$
- 出力インピーダンスが小さい( $R_S \ll R_L$ )とき、
$$V_L \cong V_S$$

**出力インピーダンス $R_S$ は、小さい方がよい**

センサ部と負荷抵抗 $R_l$ の間にオペアンプを使った増幅率1倍の非反転増幅回路を入れることによって、センサの内部抵抗 $R_s$ (出カインピーダンス)の影響を防ぐことができる

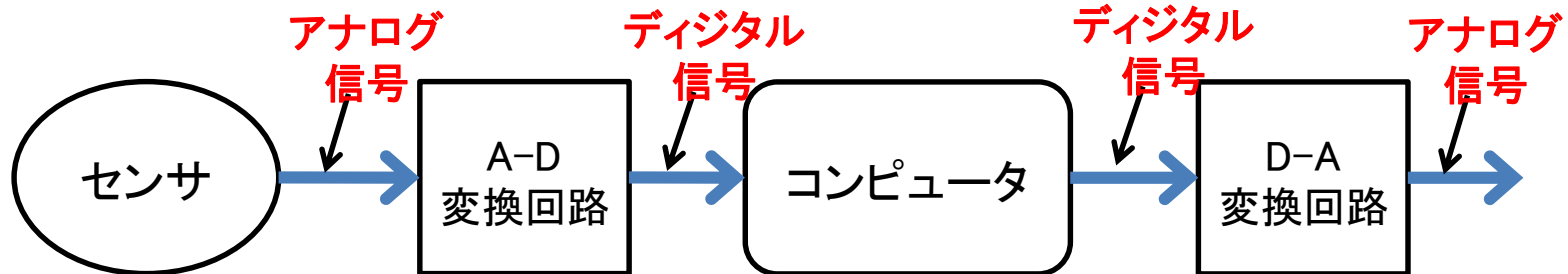
オペアンプの入カインピーダンス $Z_i$ は、ほぼ無限大( $\infty$ )、出カインピーダンス $Z_o$ は、ほぼ零( $0$ )であることから、センサの内部抵抗の影響なく、測定器などの負荷を接続することができる



● 図7・4 ボルテージフォロワによるインピーダンス変換 ●  
(教科書P77)

# 2. アナログとデジタルの変換の意味を学ぼう

教科書P77-78



## ● デジタル量の表現

### 2進数

$$101 \Rightarrow 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 5$$

Callouts for weights: 2の桁の重み (above 2<sup>2</sup>), 1の桁の重み (above 2<sup>1</sup>), 0の桁の重み (above 2<sup>0</sup>)

Callouts for values: 2の桁の値 (below 1), 1の桁の値 (below 0), 0の桁の値 (below 1)

$$b_{n-1}2^{n-1} + b_{n-2}2^{n-2} + \dots + b_02^0 = \sum_{i=0}^{n-1} b_i2^i = N \quad (7 \cdot 4)$$

Callout: 10進数 (above N)



# 2進数 → 10進数の変換

$$101 \Rightarrow 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 5$$

Diagram illustrating the conversion of the binary number 101 to the decimal number 5. The binary digits are 1, 0, and 1, and the powers of 2 are 2<sup>2</sup>, 2<sup>1</sup>, and 2<sup>0</sup>.

Callouts for weights (重み):

- 2の桁の重み (Weight of the 2's place)
- 1の桁の重み (Weight of the 1's place)
- 0の桁の重み (Weight of the 0's place)

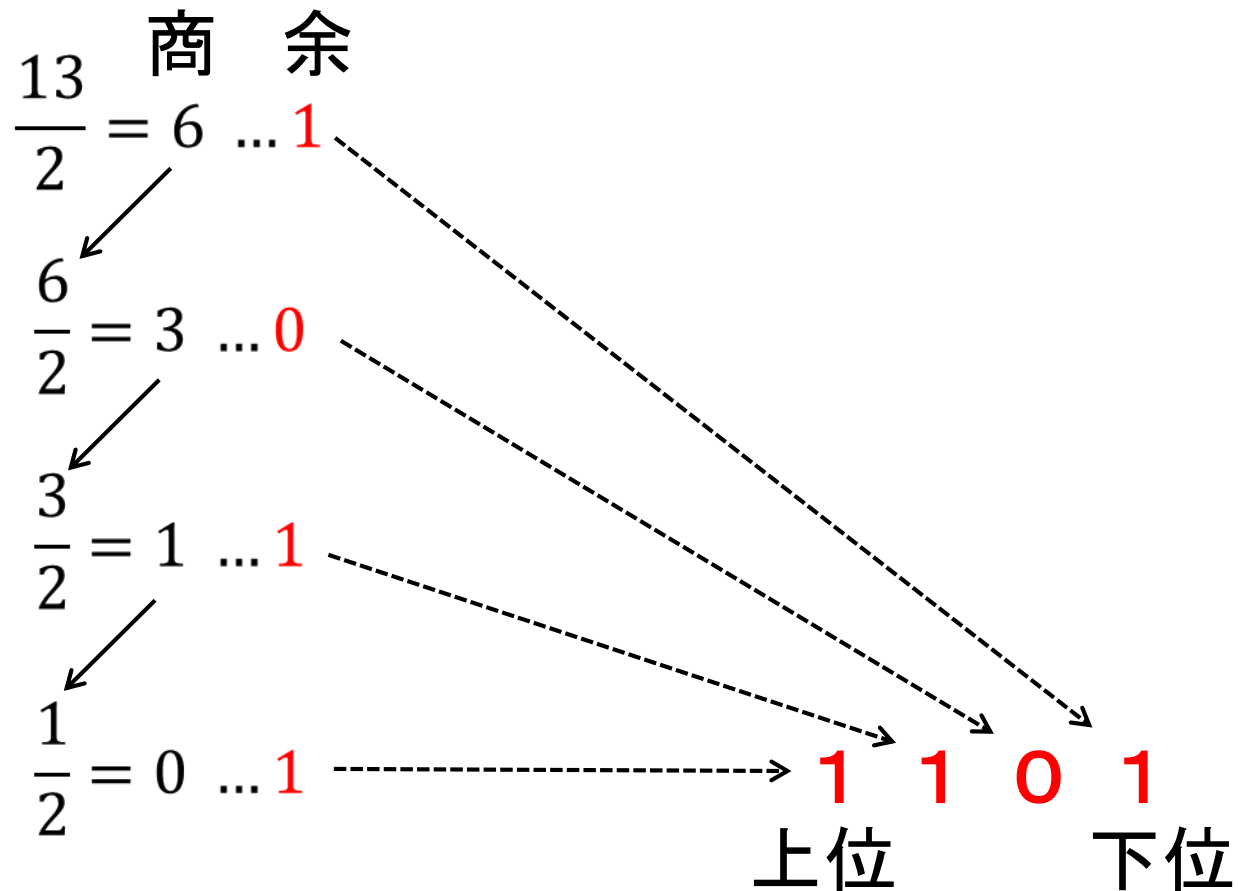
Callouts for values (値):

- 2の桁の値 (Value of the 2's place)
- 1の桁の値 (Value of the 1's place)
- 0の桁の値 (Value of the 0's place)

n桁の値 × n桁の重み + …… + 0桁の値 × 0桁の重み

桁数だけ繰り返す

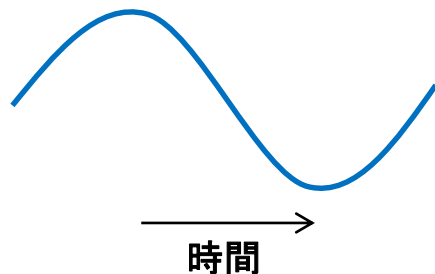
# 10進数 → 2進数の変換



# アナログ(Analog)量とデジタル(Digital)量

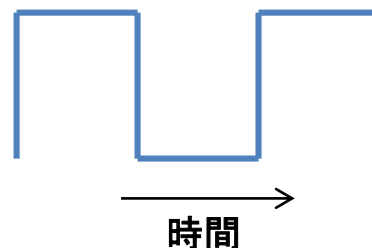
アナログ(データ)

切れ目なく連続した値が続く



デジタル(データ)

途切れ途切れの値が続く

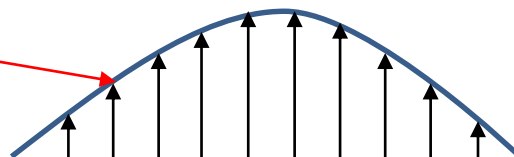


- アナログ信号をデジタル信号にするには、  
3つの過程(標本化、量子化、符号化)がある

<過程1> 標本化(Sampling): 一定間隔で値を取り出す

※取り出す間隔(等間隔)は、標本化(サンプリング)周波数という信号で決まる

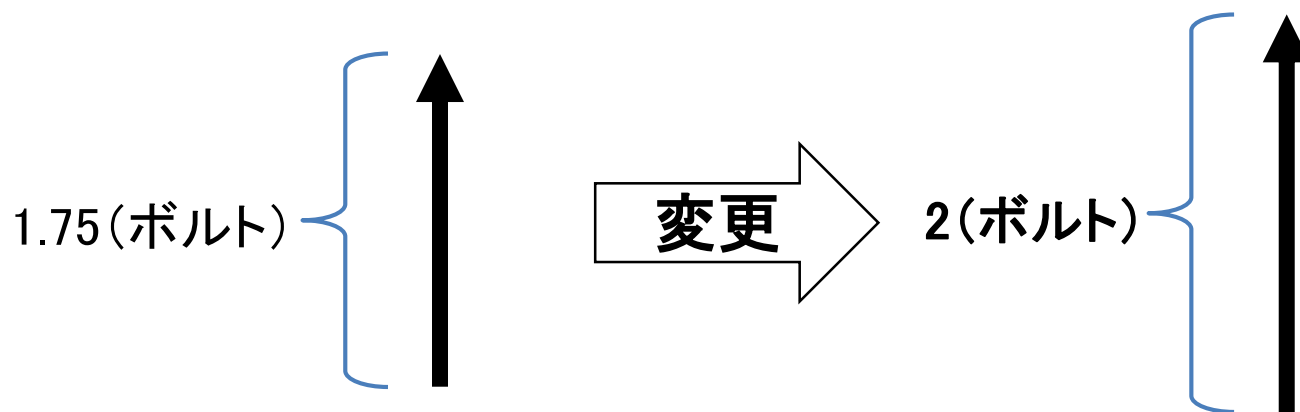
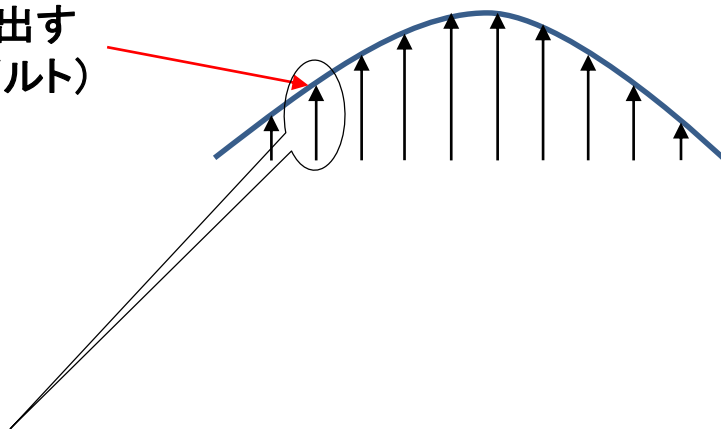
この値を取り出す  
(例えば、1.75ボルト)



<過程2> **量子化 (Quantization)** : 標本化で取り出した値を、  
あらかじめ決めた値(量子化値)にする

※量子化値が多いほど、元のアナログに近くなる

ここの値を取り出す  
(例えば、1.75ボルト)



※量子値(0,1,...,15ボルト)の中で一番近い値に変更する

<過程3> 符号化 ( Coding ) : 量子化した値を、0と1の符号にする

量子化値	符 号
0	0 0 0 0
1	0 0 0 1
:	:
15	1 1 1 1

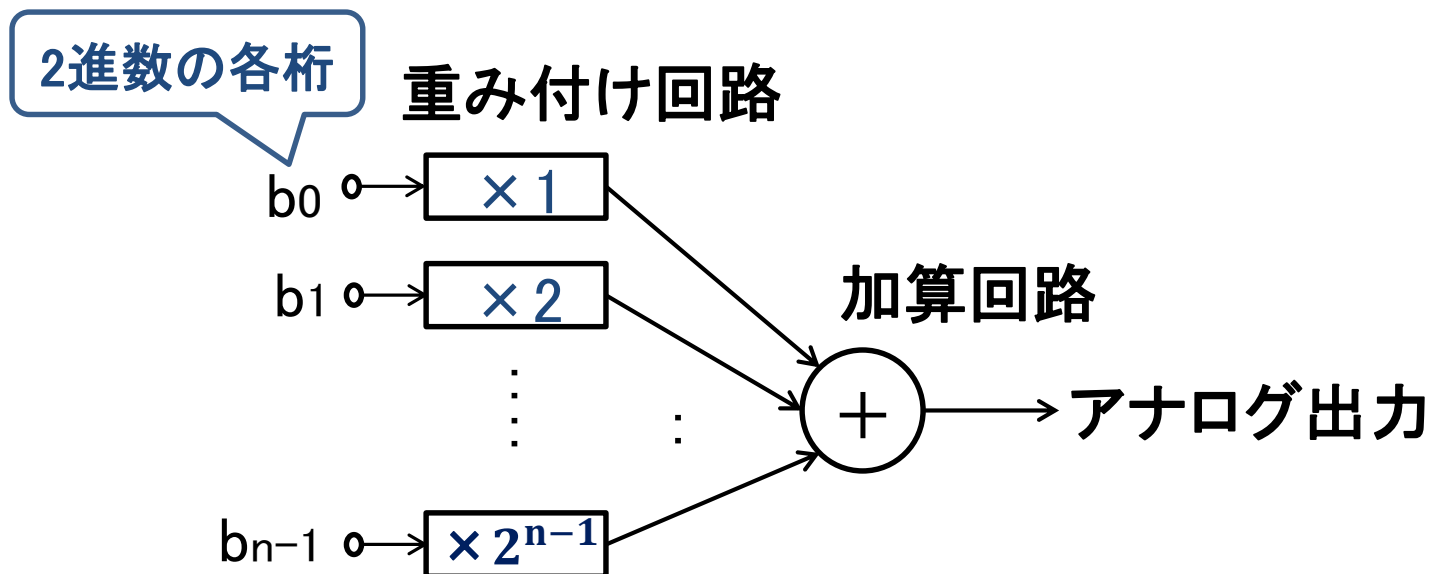
量子値が0~15ならば、符号は4ビット必要

# 3. D-A変換技術

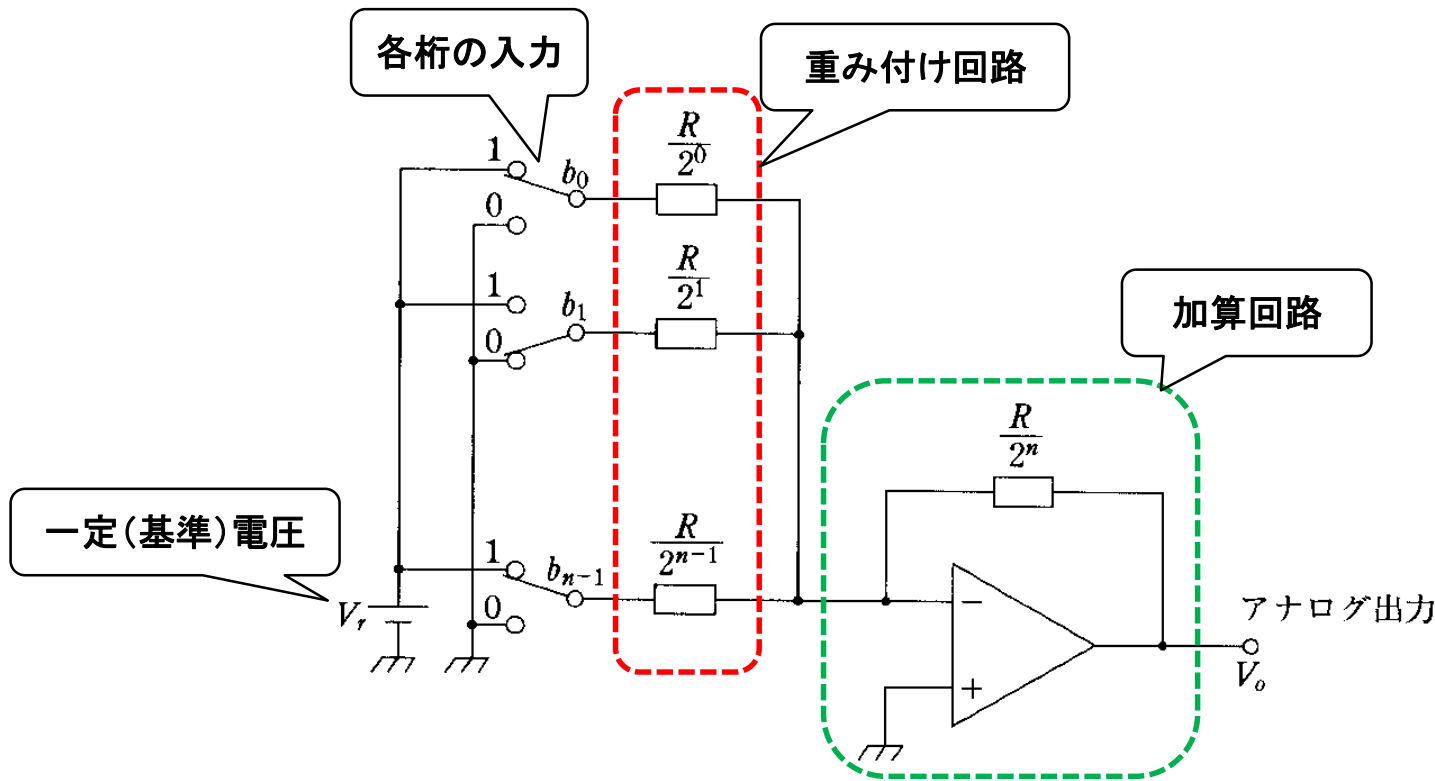
教科書P78-79

## [1]重み付加算方式

2進数の各桁数分の入力( $b_0 \sim b_{n-1}$ )を用意して、重み付け回路(実際は抵抗)で各桁の入力に対して重み(例えば、 $b_0$ の桁ならば1倍)を付けて加算回路で加算する



<重み付け加算方式・D-A変換器 概略図>



● 図 7・5 重み付き加算方式 D-A 変換器 ● (教科書P78)

図7・5において、 $n=4$ (4bits) のとき  
 $b_0$ のみスイッチを”1”(  $b_0=1$  )にした場合のアナログ出力電圧 $V_0$ は

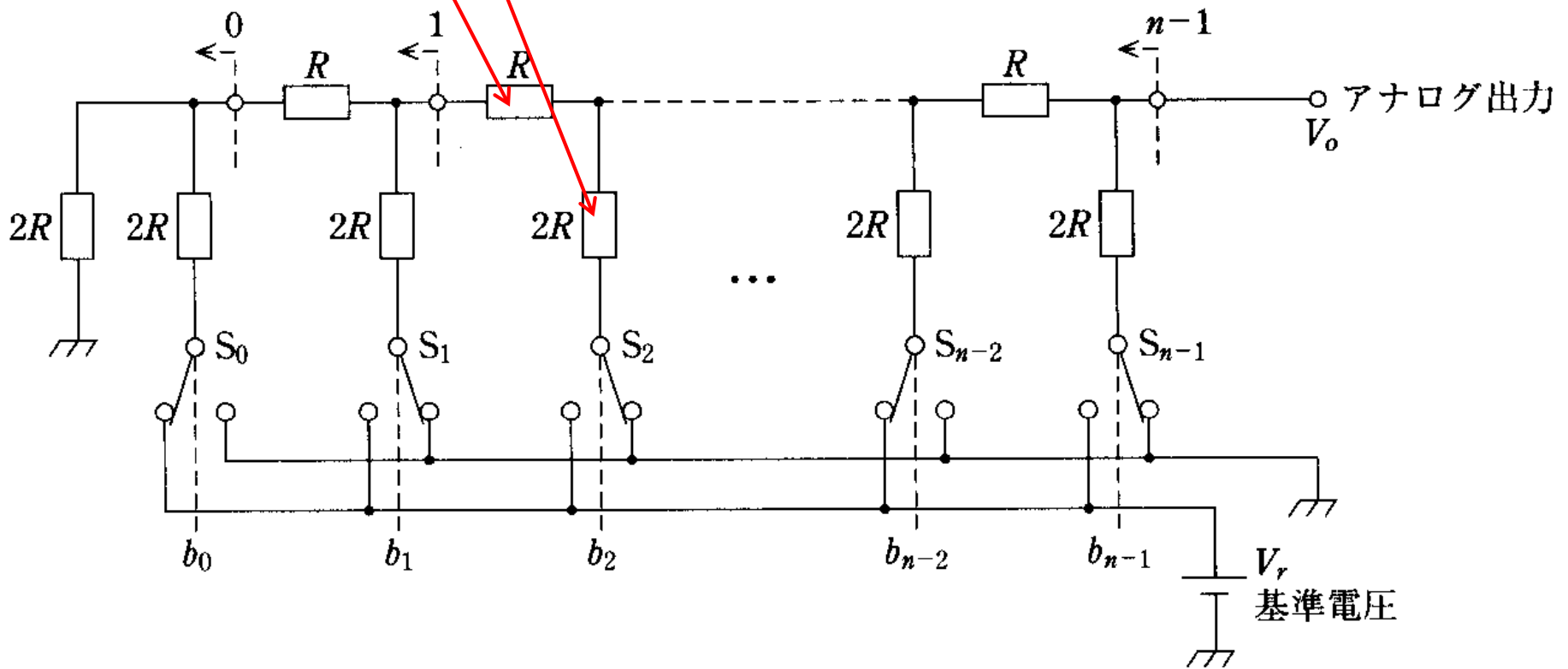
$$V_0 = -\frac{R/2^4}{R/2^0} V_r = -\frac{1}{16} V_r$$

全桁では

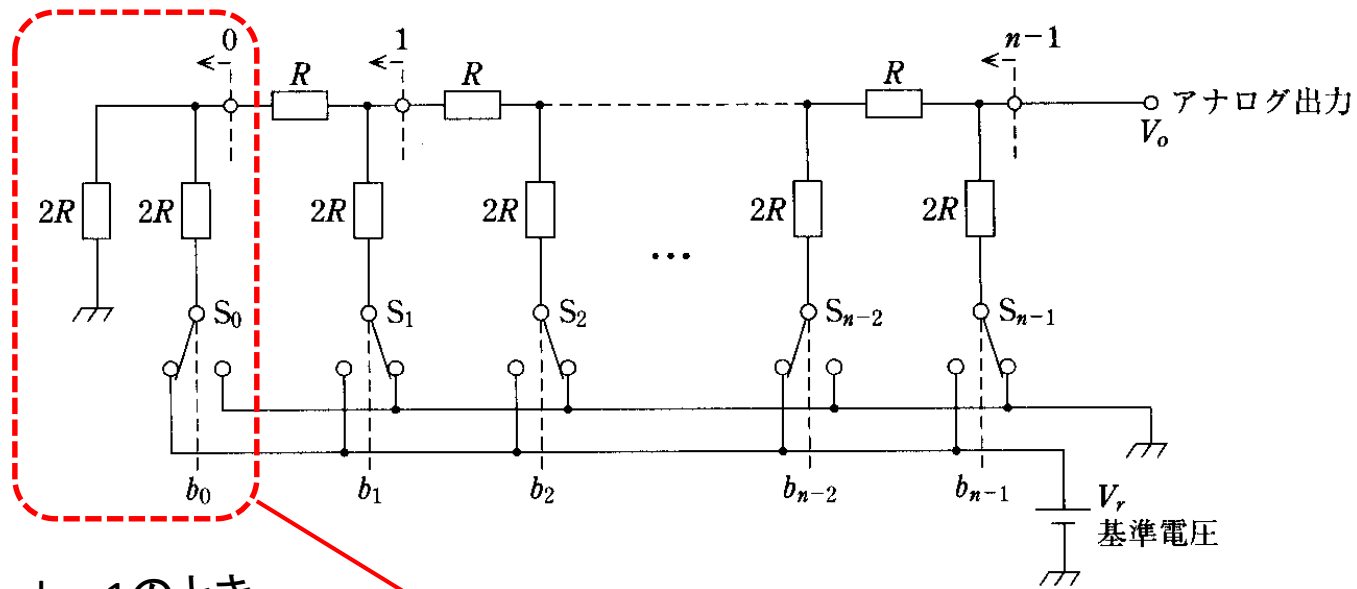
$$V_0 = -\frac{V_r}{2^n} (b_{n-1}2^{n-1} + b_{n-2}2^{n-2} + \dots + b_02^0) \quad (7\cdot5)$$

## [2]はしご形R-2R方式

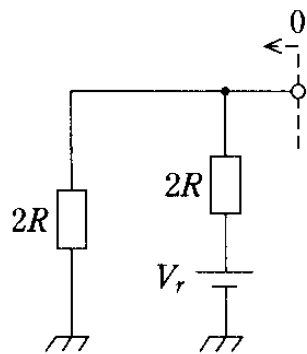
2つの値(Rと2R)の抵抗で構成されているはしご形回路。2種類の抵抗を使用するので、各抵抗の特性がそろっていれば、精度の良いD-A変換回路を実現できる。



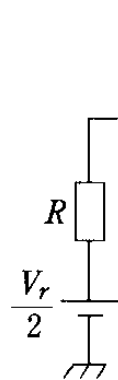




$b_0=1$ のとき

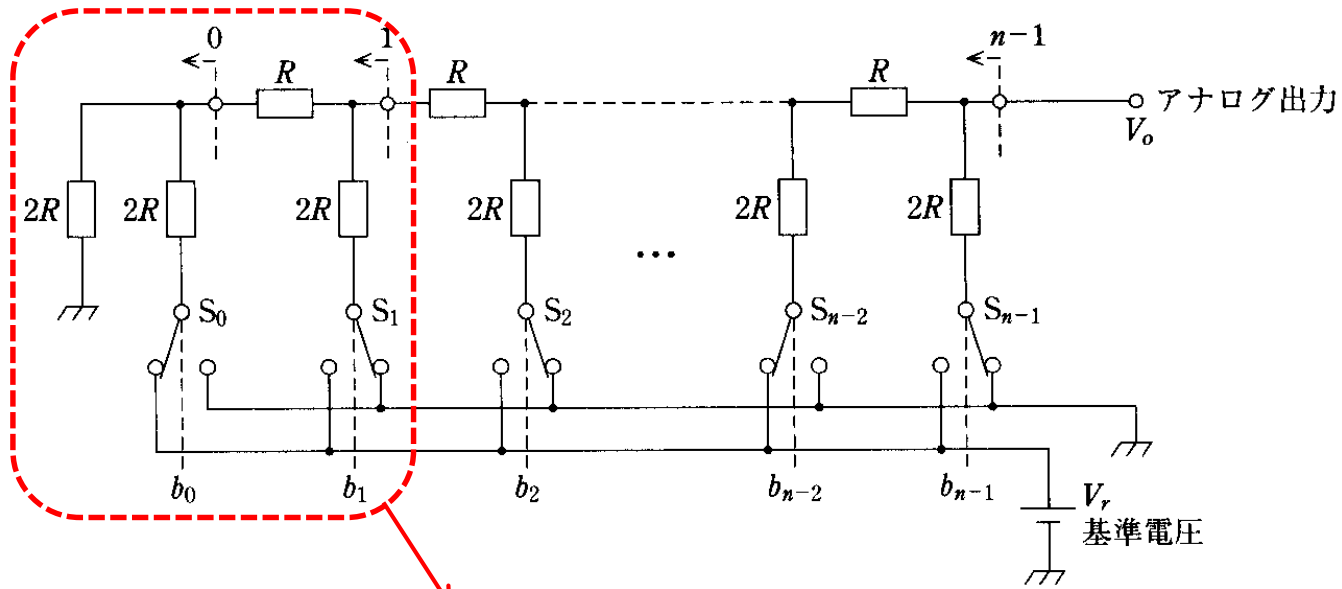


2つの抵抗 $2R$ が並列接続している

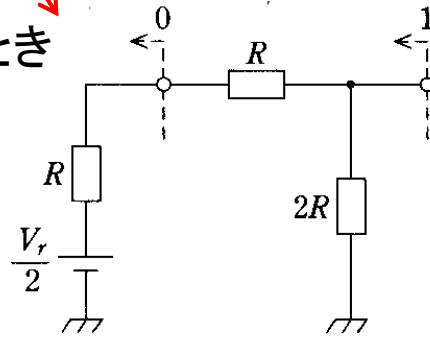


合成抵抗は $R$ で、端子電圧は $V_r/2$

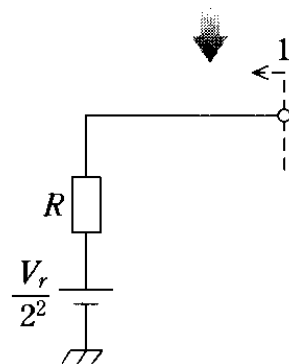
- はしご形 $R-2R$ 方式 $D-A$ 変換回路の動作・その1 ( $b_0=1$ のとき)



$b_0=1, b_1=0$  のとき

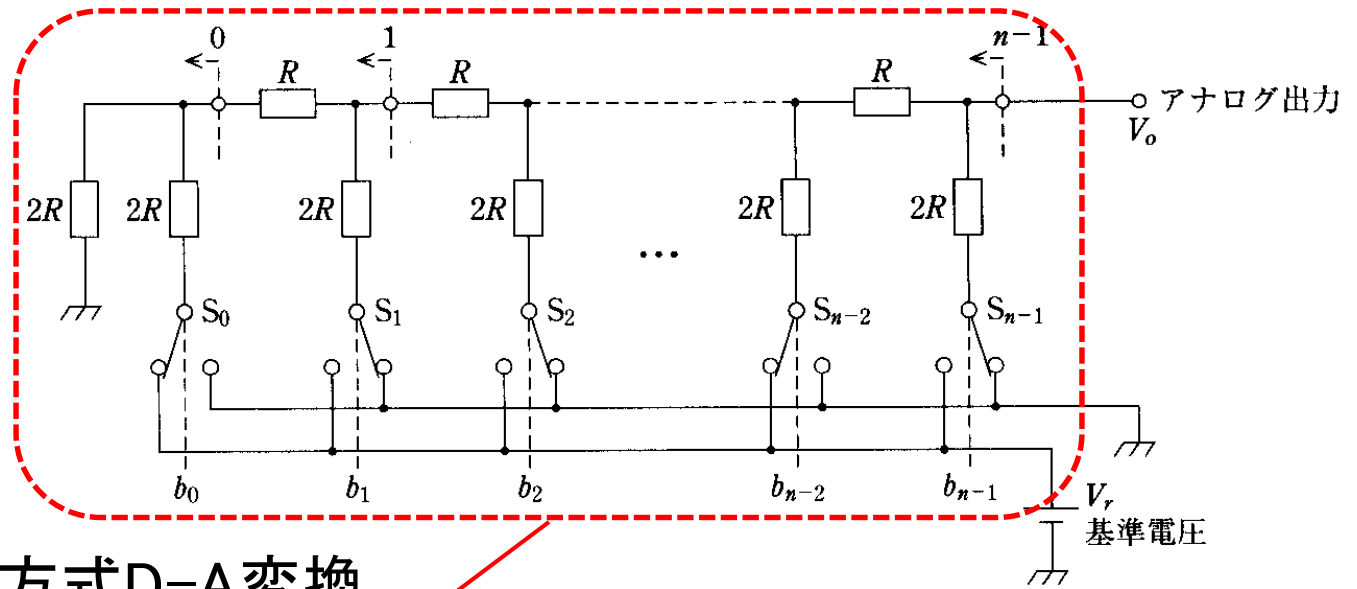


2つの抵抗2Rが並列接続している

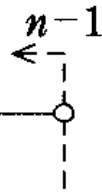


合成抵抗はRで、端子電圧は $V_r/2^2$

- はしご形R-2R方式D-A変換回路の動作・その2 ( $b_0=1, b_1=0$ のとき)



● はしご形R-2R方式D-A変換回路の動作・そのn-1  
( $b_0=1, b_1=0, \dots, b_{n-1}=0$ のとき)



結局、<重ね合わせの理>※から

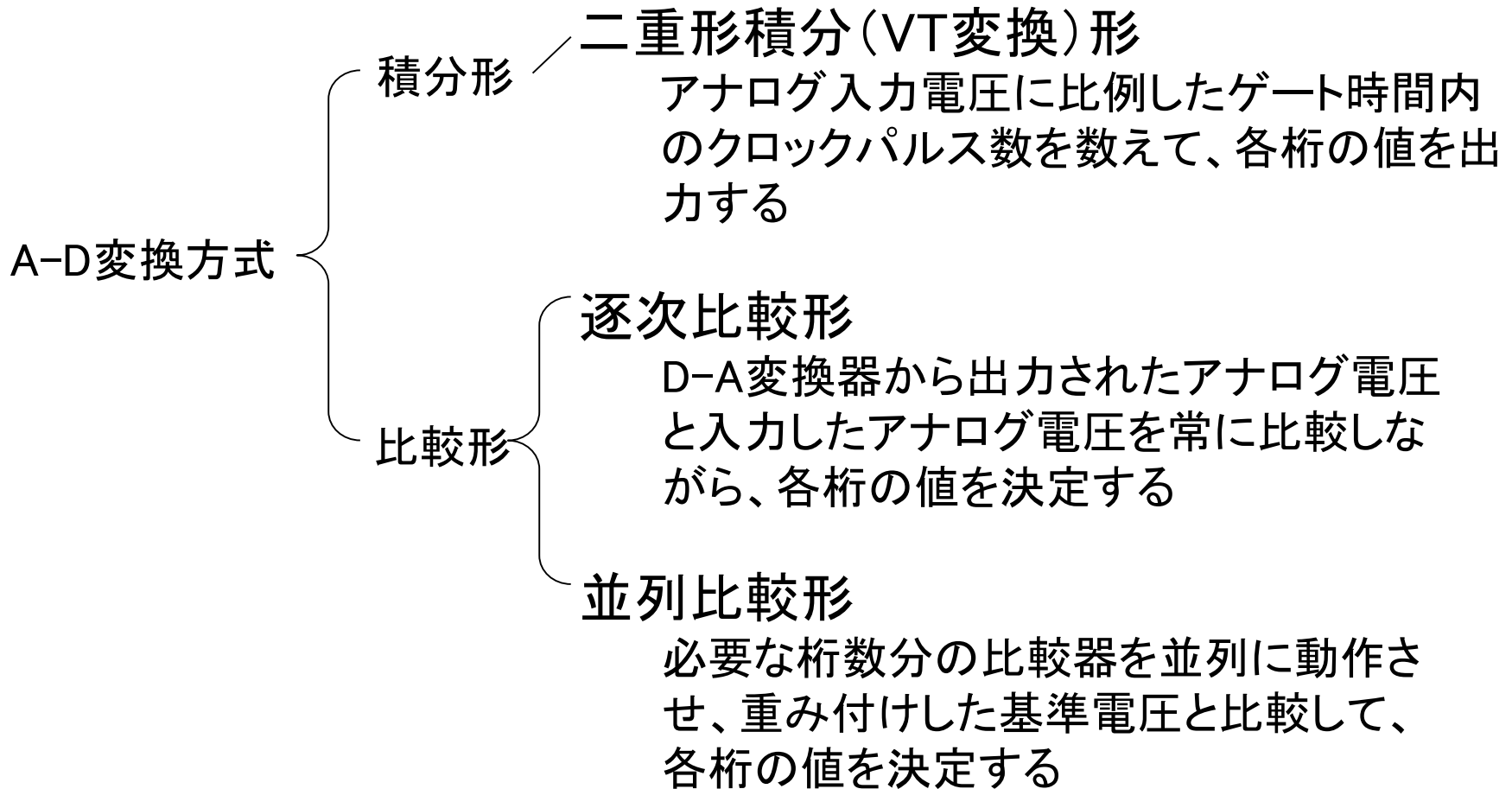
$$V_0 = \frac{V_r}{2^n} (b_{n-1}2^{n-1} + b_{n-2}2^{n-2} + \dots + b_02^0) \quad (7.6)$$

※<重ねの理>

電源を複数持つ線型回路において、任意点の電流および任意点間の電圧は、それぞれの電源が単独に存在していた場合の和に等しい。

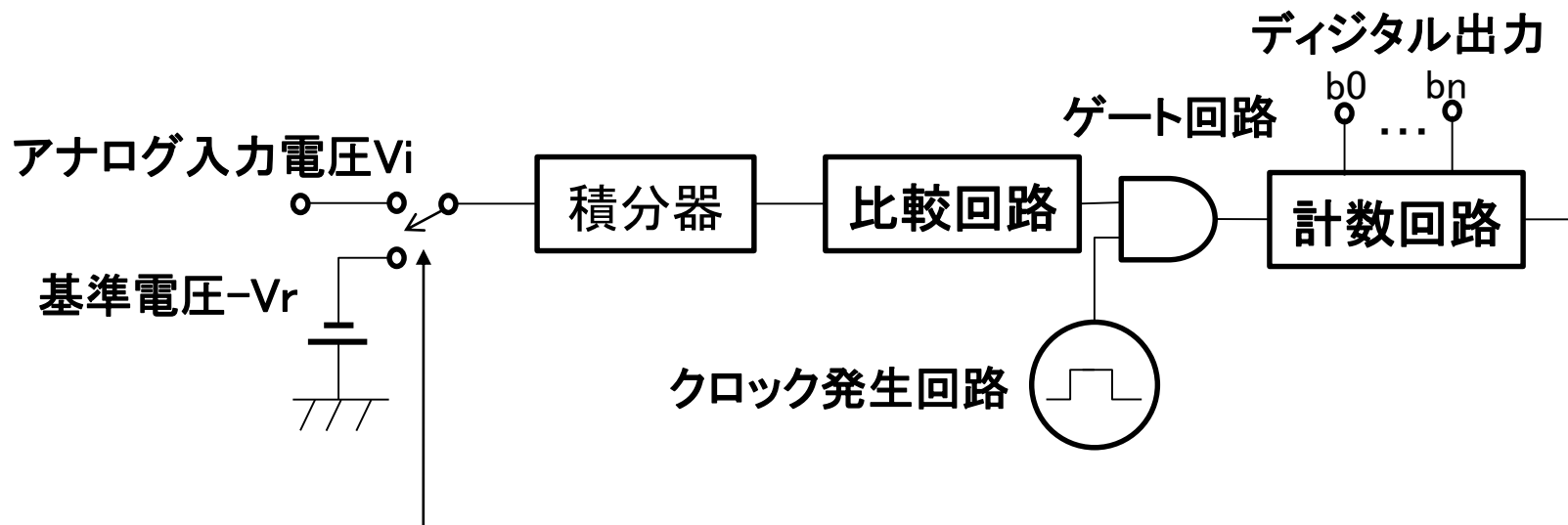
# 4. A-D変換について学ぼう

教科書P80-84

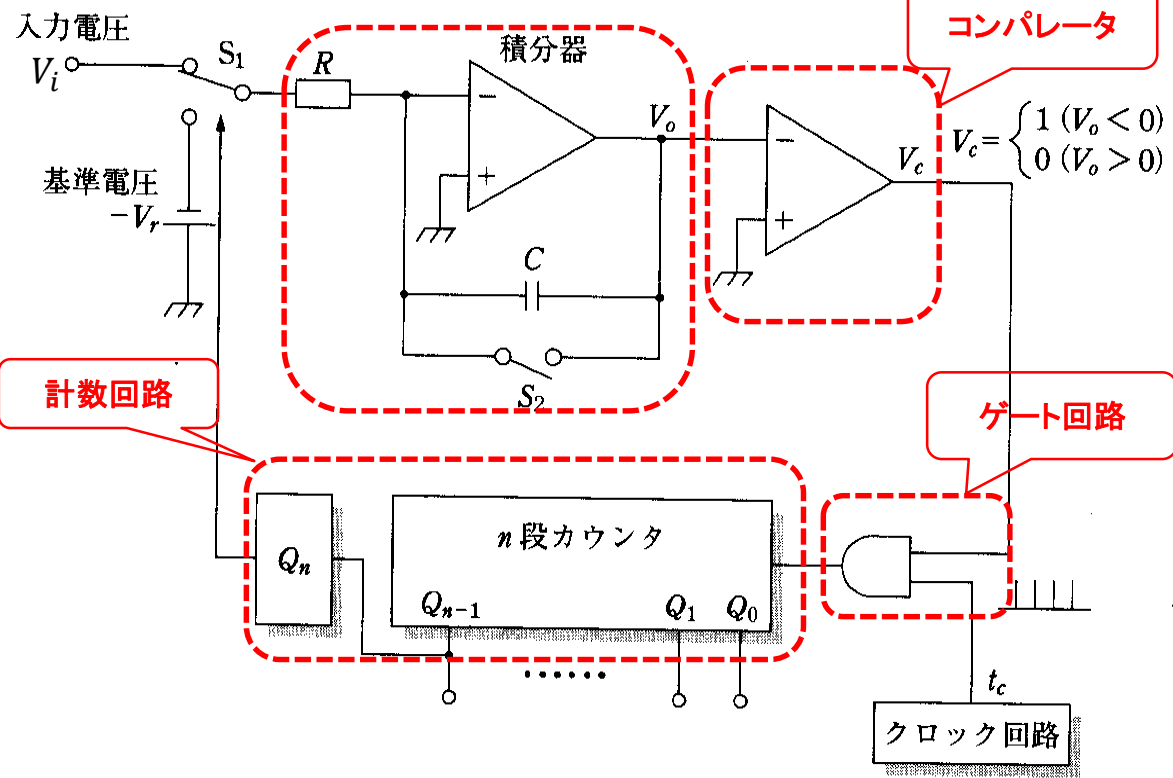


# [1]二重積分形 ( Voltage Time 変換 )

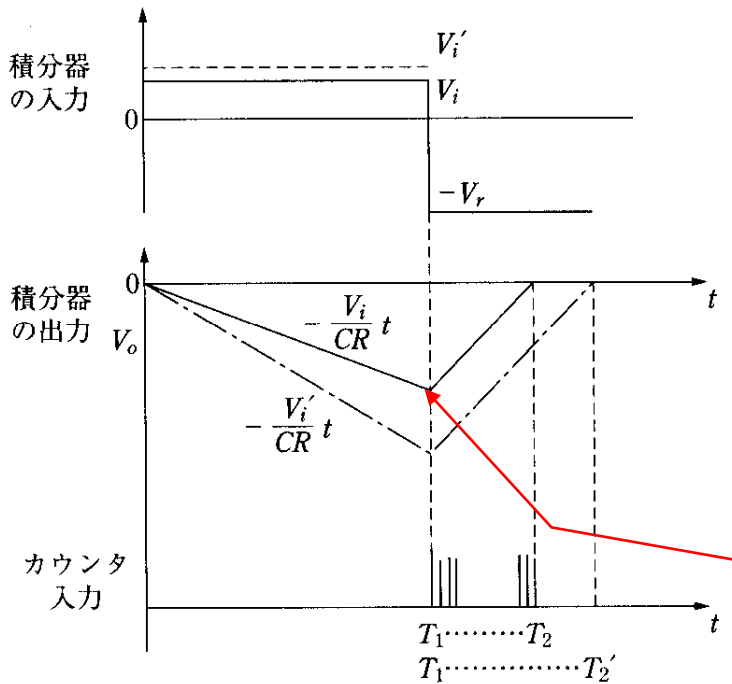
アナログ入力電圧 $V_i$ を積分器で一定時間積分し、比較回路で積分値に比例したゲート時間を作成する。ゲート時間に比例したクロックの数を計数回路(カウンタ)で数えると、デジタル出力 $b_0$ - $b_n$ が得られる。



<二重積分形A-D変換器 概略図>



● 図 7・7 二重積分形 A-D 変換器 ● 教科書P80



S1が上側の接点に接続して、入力電圧 $V_i > 0$ (+のとき)が印加されて時間 $t$ が $T_1$ 経過したとき、積分器の出力電圧 $V_o$ は、

$$V_o(T_1) = -\frac{V_i}{CR}T_1 = -\frac{V_i}{CR}(2^n t_c) \quad (7\cdot7)$$

● 図 7・8 二重積分形 A-D 変換器の各部波形 ● 教科書P81

S1が切り替わり、積分器に基準電圧 $-V_r$ が印加されると、積分器の出力 $V_0=0$ によってコンパレータの出力 $V_c=0$ になって、カウンタが計数を止める

このときの入力電圧 $V_i$ とカウント数 $N$ の関係は、式(7・8)の通り  
 $T_2$ : カウントが止まったときの時間、 $t_c$ : クロックの周期時間

$$\frac{V_i}{CR} T_1 = \frac{V_r}{CR} (T_2 - T_1) \quad (7 \cdot 8)$$

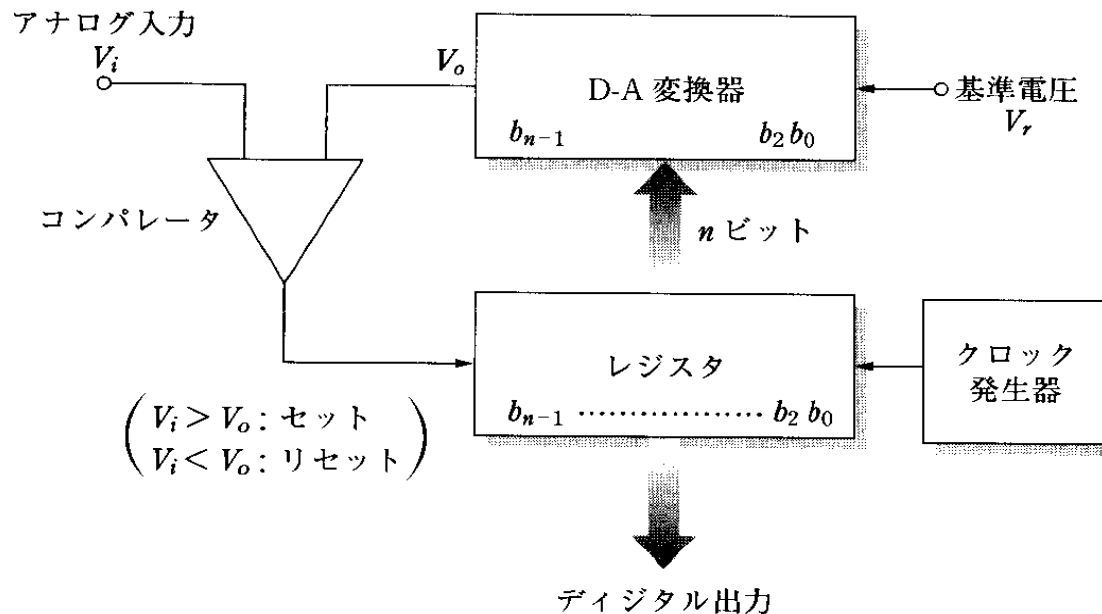
$$T_1 - T_2 = \frac{V_i}{V_r} T_1 = \frac{V_i}{V_r} 2^n t_c = N t_c \quad (7 \cdot 9)$$

$$\therefore N = \frac{2^n}{V_r} V_i \quad (7 \cdot 10)$$

式(7・10)から、コンデンサ $C$ や抵抗 $R$ の値が変化しても、カウント数 $N$ や入力電圧 $V_i$ の関係には、影響しないことがわかる

## [2] 逐次比較形

- ① レジスタの最上位ビット(MSB) $b_{n-1}$ を1にセットする
- ② ①でセットしたデジタル信号をDA変換器でアナログ信号(電圧) $V_0$ に変換し、入力したアナログ信号(電圧) $V_i$ と比較する
- ③ 比較した結果、 $V_i > V_0$ ならば、①でセットしたMSB=1はそのままにする。  
 $V_i < V_0$ ならば、セットしたビットを反転(1→0 ※この操作をリセットと呼ぶ)する。
- ④ 同様な方法を、MSBからLSBに向かってビット毎順番に行い、全ビットが決定したら、これらをデジタル出力信号とする

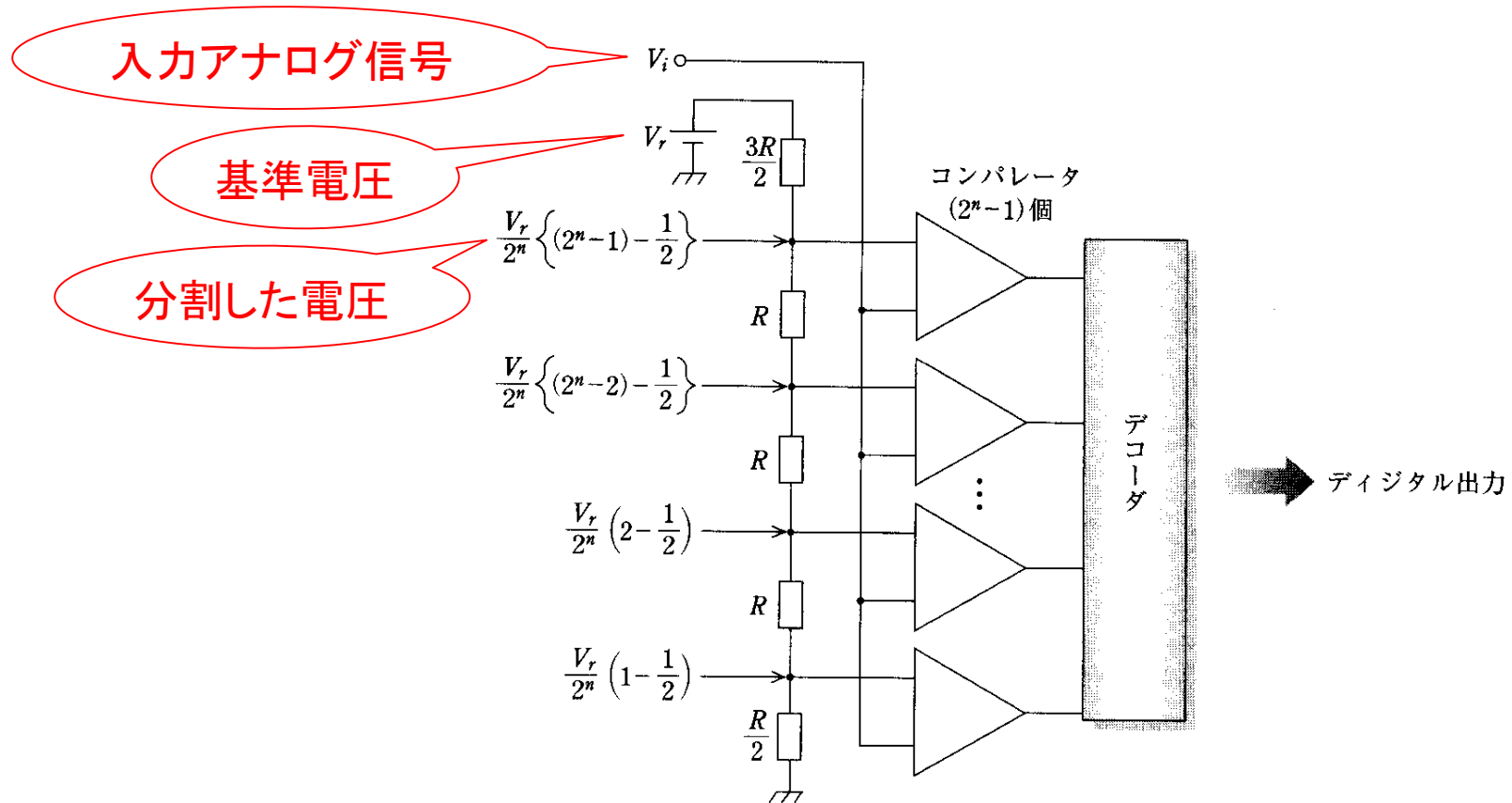


● 図 7・9 逐次比較形 A-D 変換器 ● 教科書 P82



### [3] 並列比較形

桁数分のコンパレータを用意し、入力したアナログ信号(電圧)が、基準電圧 $V_r$ を分割した電圧と一致するかを判定する方式  
コンパレータで、入力アナログ電圧と比較する電圧は、基準電圧を抵抗で分圧して作成する



● 図 7・11 並列比較形 A-D 変換器 ● 教科書 P84

## 【問題1】

センサからの微弱なアナログ信号を、計測器やコンピュータで取り扱える大きさの信号に変換することを何と呼ぶのか？ 次のa.～c.より選べ

- a. インピーダンス変換
- b. A-D変換
- c. レベル変換

## 【問題2】

インピーダンス変換回路として使用する回路を、以下のa.~c.の中から選べ

- a. ボルテージフォロワ回路
- b. オープンコレクタ回路
- c. ボルテージフィードバック回路

### 【問題3】

アナログ信号をデジタル信号に変換する3つの過程を正しい順番に並べよ

- a. 符号化
- b. 標本化
- c. 量子化

1. b.標本化
2. c.量子化
3. a.符号化

## 【問題4】

アナログ信号をデジタル信号に変換する1過程で、「一定の間隔で取り出したアナログ信号の値を、ビット数で決めた値で表す」ことを何と呼ぶか？以下のa.～c.から選べ

- a. 標本化
- b. 量子化
- c. 符号化

## 【問題5】

量子化値=“4”を、3ビットの2進数の符号で表すと？

- a. 101
- b. 100
- c. 010

## 【問題6】

A-D変換器とは、何を何に変換するものか？ 次のa.~  
c.から選べ

- a. アナログ信号を電子データに変換する
- b. アナログ信号をデジタル信号に変換する
- c. ある信号を暗号化した信号に変換する

## 【問題7】

「内部のD-A変換器から出力されたアナログ電圧と入力したアナログ電圧を常に比較しながら、各桁の値を決定する」このような方式のA-D変換器を何と呼ぶか？ 次のa.~c.から選べ

- a. 重み付き方式
- b. はしご形
- c. 逐次比較形



# 本日の提出課題

## 【問題8】

3ビットデジタル信号入力の重み付き加算方式D-A変換器で、 $b_2(\text{MSB})=1, b_1=0, b_0(\text{LSB})=1$ のデジタル信号を入力したときの出力電圧 $V_0[\text{V}]$ を求めよ。ただし、基準電圧は $V_r=-1[\text{V}]$ とする。

【ヒント】式(7.5)を使って出力電圧 $V_0$ を求める

$$\text{式(7.5)} \quad V_0 = -\frac{V_r}{2^n} (b_{n-1}2^{n-1} + b_{n-2}2^{n-2} + \dots + b_02^0) \quad \text{より}$$

$$\begin{aligned} V_0 &= -\frac{-1}{2^3} (1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0) \\ &= \frac{1}{8} (4 + 0 + 1) = \frac{5}{8} = 0.625[\text{V}] \end{aligned}$$