

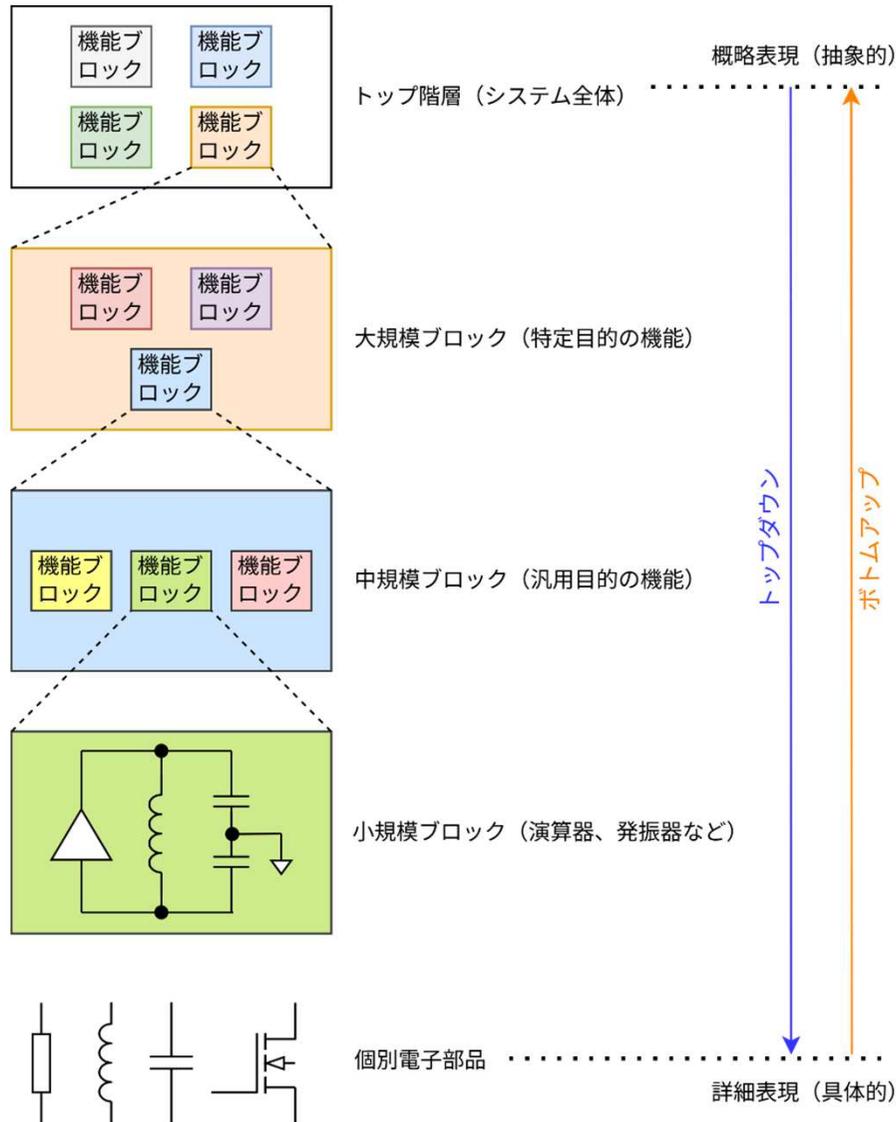
# 第1章 電子回路の基礎知識

回路の基本法則と信号の表現

アナログ回路とデジタル回路

# 1.1 電子回路設計の概要

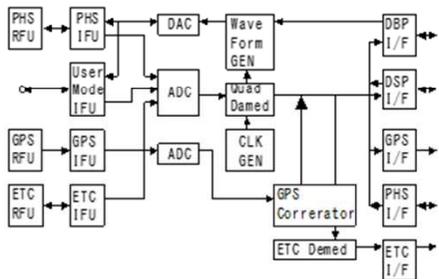
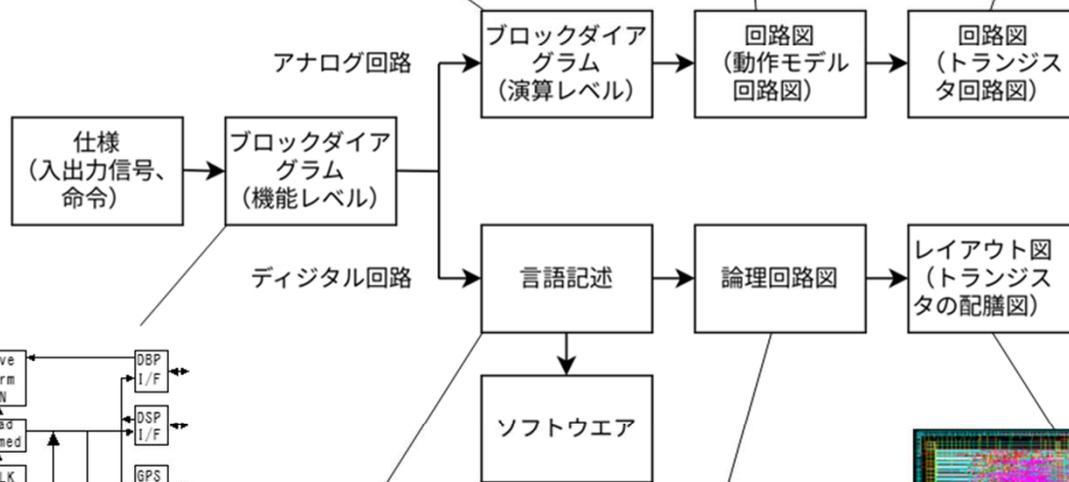
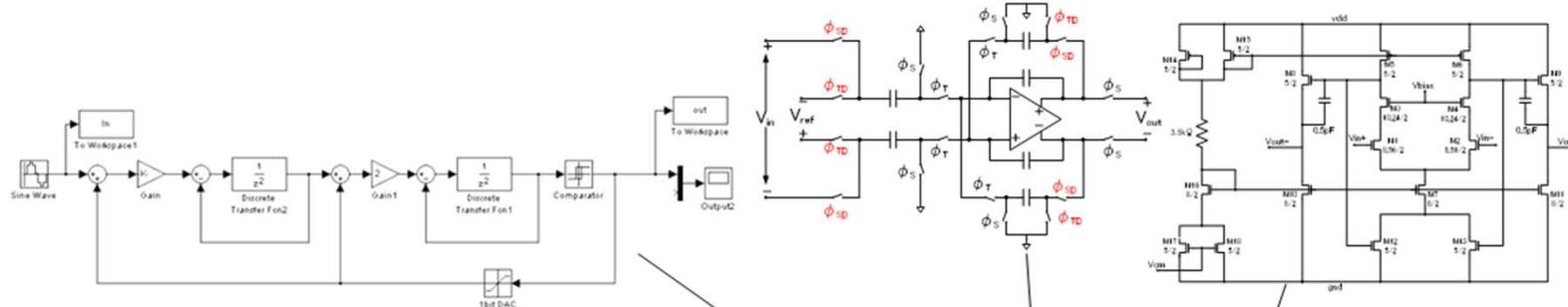
# 電子回路の階層設計



階層: Hierarchy

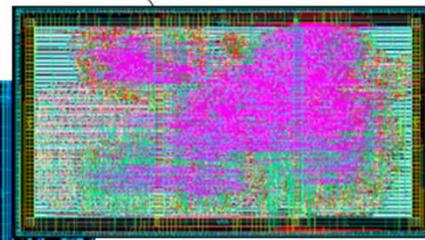
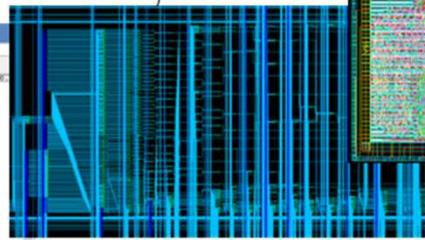
階層設計: Hierarchical design

# アナログ回路とデジタル回路 の設計フロー



```

10107 |
10108 | always @(posedge @DCLK) Group6 <= Abuhub;
10109 | always @(posedge @DCLK) Group6 <= @Abuhub;
10110 | always @(posedge @DCLK) Group6 <= @Abuhub;
10111 | always @(posedge @DCLK or negedge Pdnub6);
10112 |   if (Pdnub6);
10113 |     Group6 <= 1'b0;
10114 |   else;
10115 |     Group6 <= Fuhub6;
10116 |
10117 | always @(posedge @DCLK or negedge @DRESETn);
10118 |   if (@DRESETn);
10119 |     Xgroup6 <= 1'b0;
10120 |   else;
10121 |     Xgroup6 <= @Zuhub6;
10122 |
10123 | always @(posedge @DCLK or negedge @DRESETn);
10124 |   if (@DRESETn);
10125 |     Xgroup6 <= 1'b0;
    
```

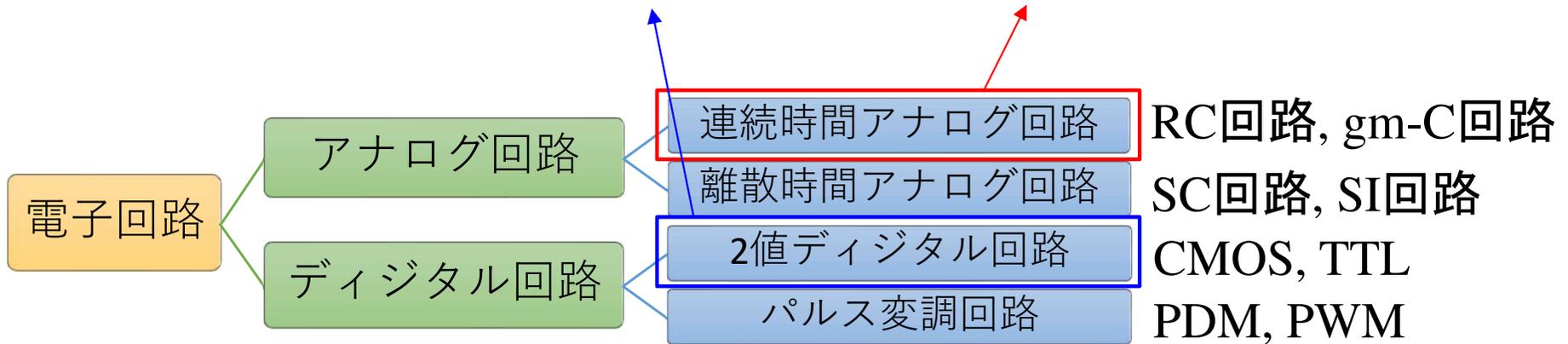


# 電子回路の分類

論理回路A, B

集積回路工学A~D

電子回路及び演習A~D



## 用語

- RC回路: R, C, OPA (演算増幅器) で構成する回路
- gm-C回路: C, OTA (トランスコンダクタンスアンプ) で構成する回路
- SC回路: C, CMOS-Sw (スイッチ), OPA で構成する回路
- SI回路: カレントミラー, CMOS-Sw で構成する回路
- CMOS: MOSFET (MOS電界効果トランジスタ) を用いた回路
- TTL: BJT (バイポーラTr) を用いた回路
- PDM: パルス密度で値を表す回路
- PWM: デューティ比 (1/0の時間比) で値を表す回路

この他にも多様な回路方式がある。

# アナログ回路のイメージ

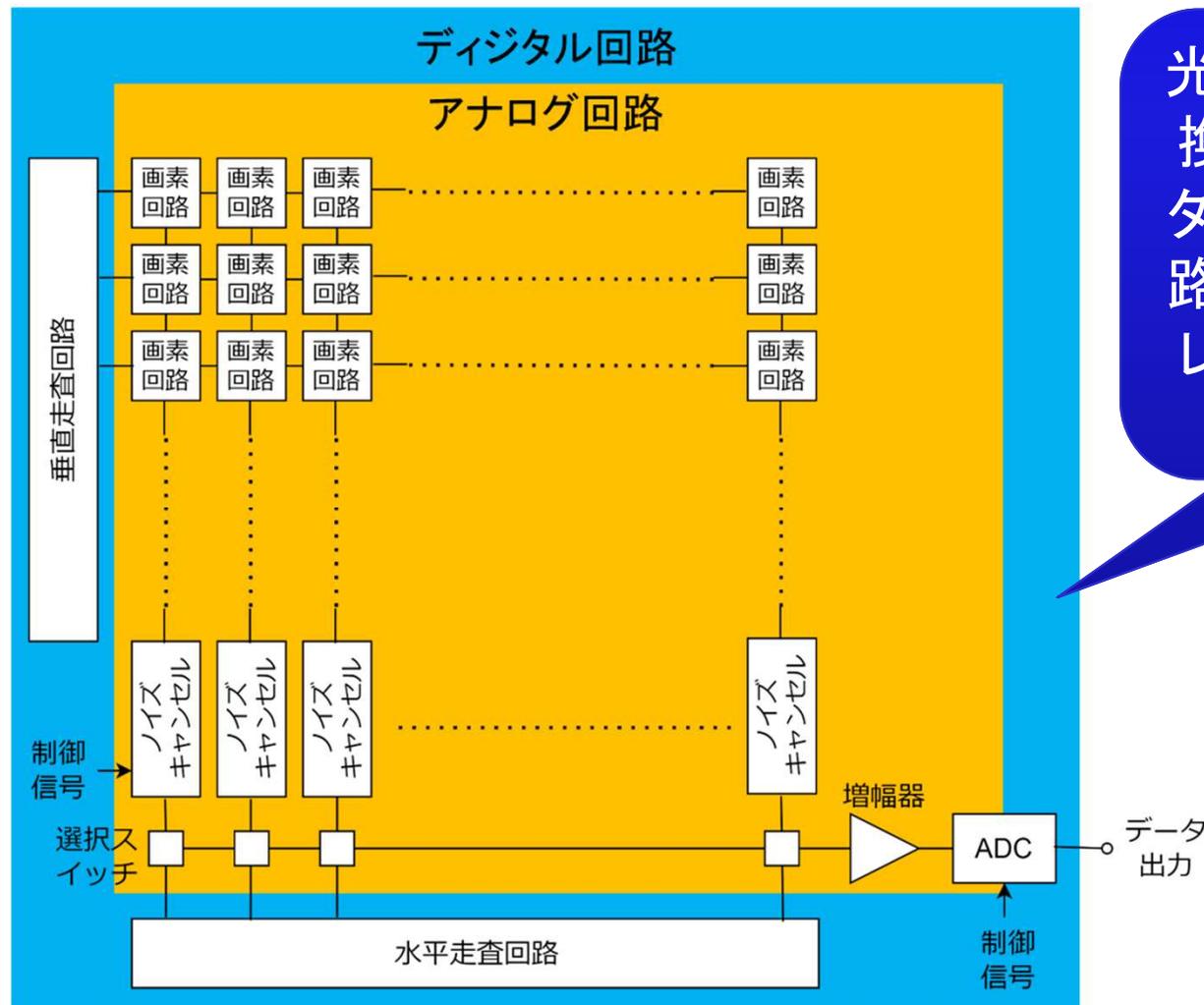
- 曖昧
- 直感的
- 昔っぽい

情報技術教育を受けていない人々のイメージ。

$$\begin{aligned} SNR &= 20 \log \left( \sqrt{\frac{3}{2}} 2^N \right) \\ &\cong 6.02N + 1.76 \quad [\text{dB}] \quad (1.1) \end{aligned}$$

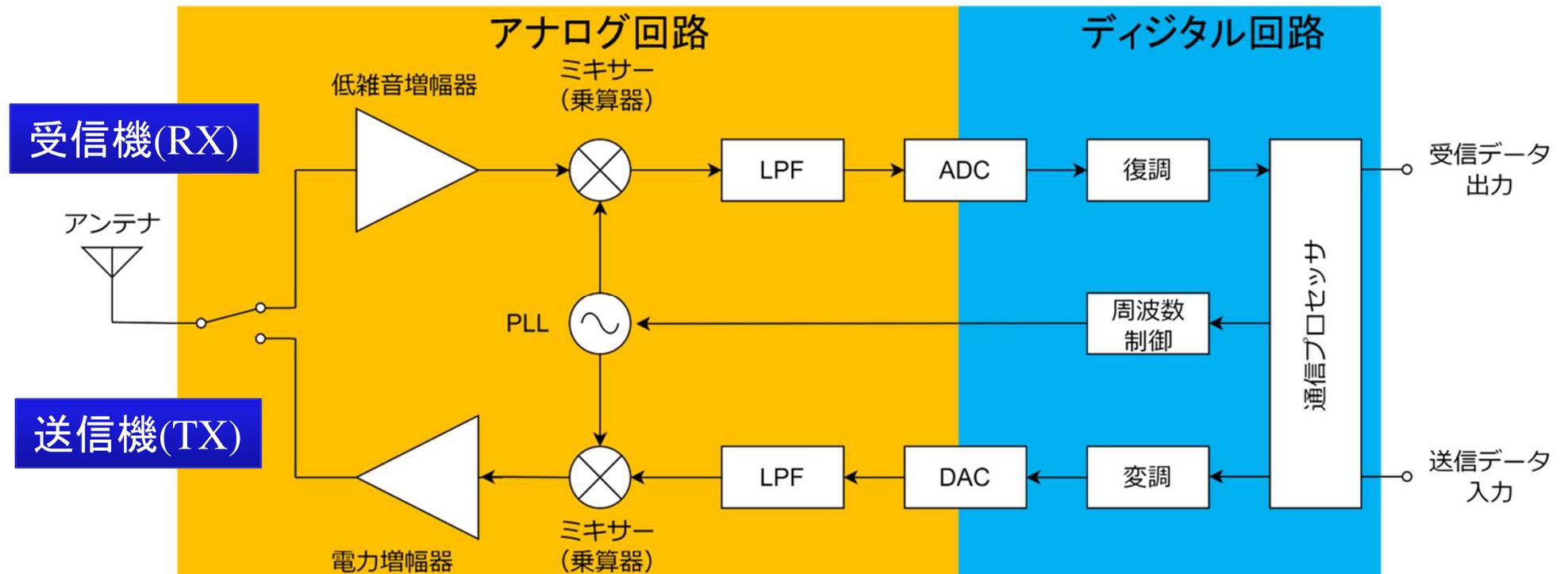
- アナログ回路設計では必要bit数に相当する精度保証が行われる
  - Bit数(デジタル)とSNR(Signal-to-Noise Ratio)(アナログ)の換算式(1.1)
- アナログ回路はガチで理論が重要
  - 最適化手順が複雑なので、理詰めで設計しないと動作しない
  - 設計者の知識により性能差が出る(製品の性能差が出やすい)
- アナログ-デジタルの連携により高機能・高性能な製品が実現される
  - 殆どの機能は片方では実現できない

# イメージセンサのブロックダイアグラム



光(画像)-電気信号変換とアナログ→デジタル変換をアナログ回路が担当。画素のアドレス制御をデジタル回路が担当

# トランシーバのブロックダイアグラム



通信周波数の制御とアナログ↔デジタル変換をアナログ回路が担当。波形の信号処理をデジタル回路が担当

RX: Receiver  
TX: Transmitter

# 1.1節のまとめ

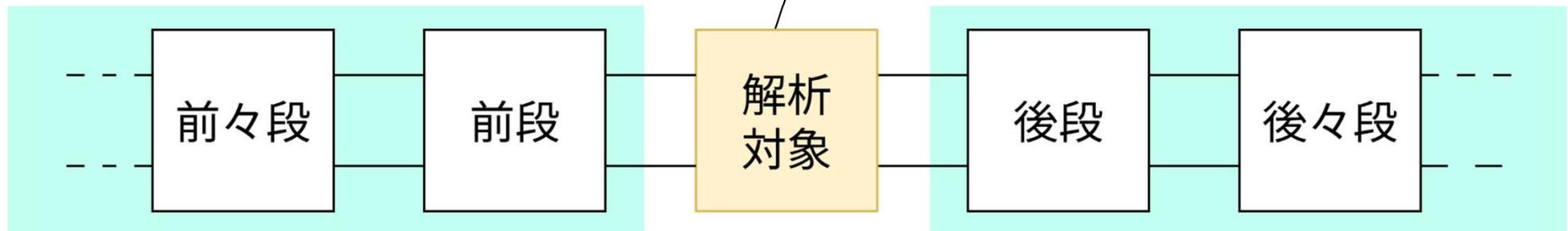
- システムの階層化
  - 小さなブロックに分けて階層化することにより複雑な回路を設計する
  - 階層設計にはトップダウン方式とボトムアップ方式があるが、現在は主にトップダウン方式が使われる
- アナログ回路とデジタル回路は役割が異なる
  - アナログ回路: 高速、低消費電力、新機能
  - デジタル回路: 高精度、高信頼性
  - デジタル回路は主に演算や制御、アナログ回路は主に外部とのインタフェースを担う
  - 原理的にデジタル化できない機能(インピーダンス整合、アンチエイリアシング等)はアナログ回路に実装される
- アナログ回路とデジタル回路の設計フロー
  - アナログ回路: 回路方式が非常に多く、自動化技術が進んでいないので、主に手計算と電子回路シミュレータにより設計する
  - デジタル回路: 高位言語またはHDL(Hardware Description Language)で記述されたコードからCAD(Computer Aided Design)ソフトウェアを用いて自動合成される

回路解析の方法

## 1.2 電子回路の基本定理

# 分割したブロックの設計

前後段の電気的特性によって、解析対象の特性が変化する→他のブロックを全て確定しないと設計できない



出力端子の電気的特性を推定または指定



入力端子の電気的特性を推定または指定

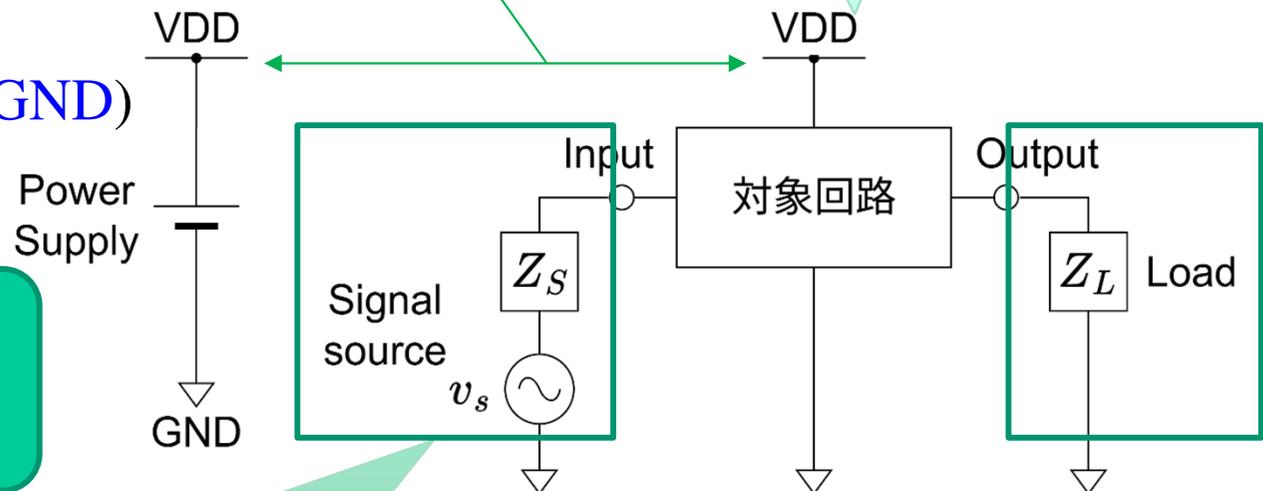
ブロック単独での解析、設計が可能になる

# 電子回路解析に必要な要素

- 電源(Power supply)
- 入力信号(Input signal)
- 出力信号(Output signal)
- 信号源(Signal source)
- 負荷(Load)
- グラウンド(Ground or GND)

同じ名前の配線は繋がっているとす

対象とする回路の特性は $Z_S, Z_L$ の影響を受ける



$Z_S$ は信号源の出カインピーダンスまたは内部インピーダンスと呼ばれる

信号源 ( $v_s, Z_S$ ) = 前段回路の等価回路

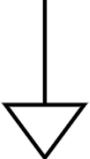
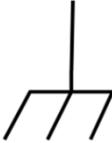
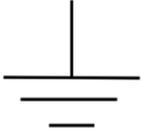
負荷 = 後段回路の等価回路

# (参考) 電圧、電流変数の表記

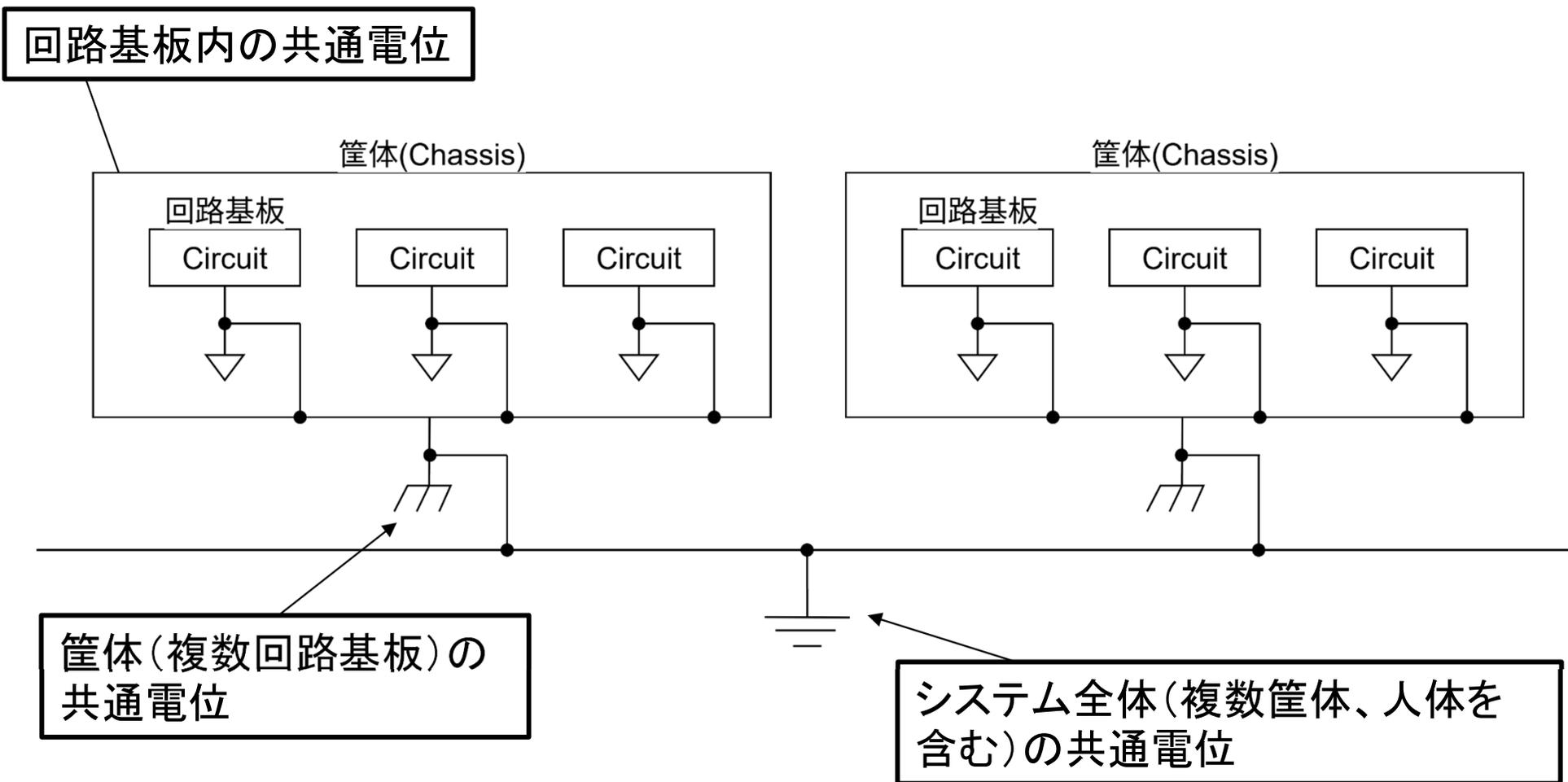
決まりはないが、下記のように使い分けている場合が多い。

表記例	対象	注意点
大文字 $V, I$	直流電圧、直流電流	通常は、直流電圧、直流電流を表すが、複素電圧、複素電流を表す場合もある。
小文字 $v, i$	信号電圧、信号電流	変数は、時間、角周波数、ラプラス変数(後述)など。 直流成分 + 交流成分を重ね合わせた電圧、電流を表す場合もある。

# (参考) グランド、アースの回路 図記号(Symbol)について

回路図記号 (Symbol)	名称	説明
	シグナルグランド	回路基板内の基準電位(共通電位)を表す。
	シャーシグランド またはフレームグランド	シャーシ(筐体)の電位を表す。複数の回路基板をシャーシに接続し、全基板のシグナルグランドを一致させる。
	アース(接地)	地面(近似的に無限遠)の電位を表す。実際には、シャーシをコンセントのアース端子に接続する。複数のシャーシグランドを一致させたり、人体の安全を確保する。

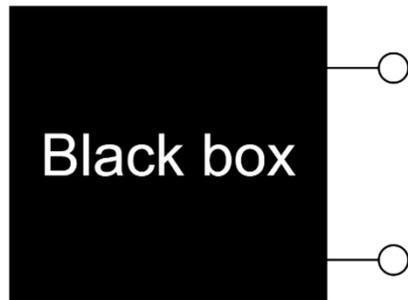
# グラウンド、アース記号の使い分け



# 等価回路の必要性

- 本来、回路解析はシステム全体で行う必要がある
  - 信号源と負荷は、電子回路または電子部品を表している
  - 回路特性は、信号源の $Z_S$ と負荷の $Z_L$ に依存する
  - 信号源と負荷の回路特性も、信号源と負荷から見た信号源と負荷の $Z_S$ と $Z_L$ に依存している
  - 従って、厳密には、システム全体で回路解析をしなければならない
- 等価回路を用いて、回路ブロック毎の解析を行うことができる
  - 回路ブロックに分けてで解析を行うために、信号源と負荷を近似的に簡単な等価回路で表す

# 等価回路(Equivalent circuit)の定理

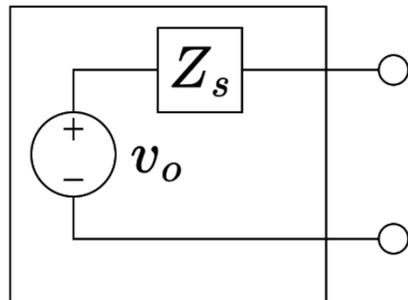


測定

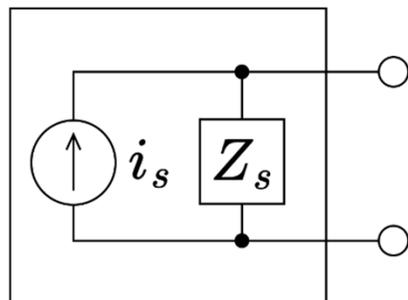


$$\left\{ \begin{array}{l} \text{開放電圧} = v_o \\ \text{短絡電流} = i_s \end{array} \right.$$

||



or



テブナンの定理より

$$Z_s = \frac{v_o}{i_s}$$

ノートンの定理より

$$Z_s = \frac{v_o}{i_s}$$

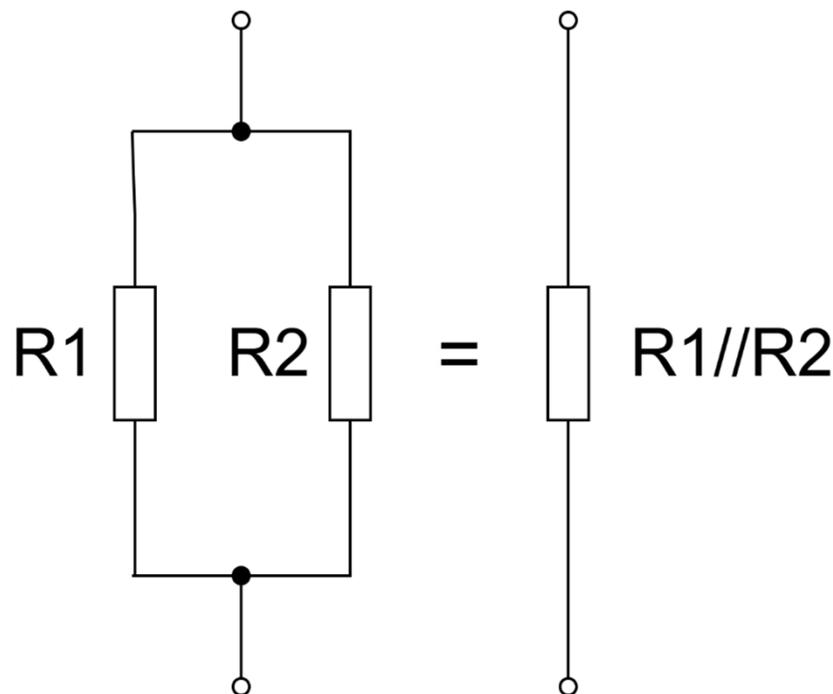
ただし、Black box  
内部の素子のI-V  
特性が全て線形  
の場合に成立

# 課題1.1

- 抵抗、電圧源、電流源からなる回路について、テブナンの定理を証明せよ。

# インピーダンスの並列接続演算

電子回路では、インピーダンスの並列接続を表す演算記号 // を多用するので慣れておこう。



$$R1//R2 = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$$

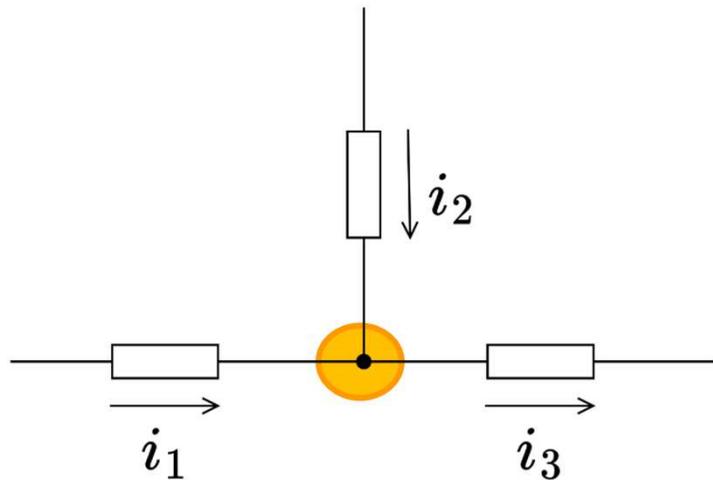
R1, R2のコンダクタンス $G_1, G_2$ を用いると

$$G_1 = \frac{1}{R1}, G_2 = \frac{1}{R2} \quad \text{より}$$

$$R1//R2 = \frac{1}{G_1 + G_2}$$

# 電子回路の基本法則

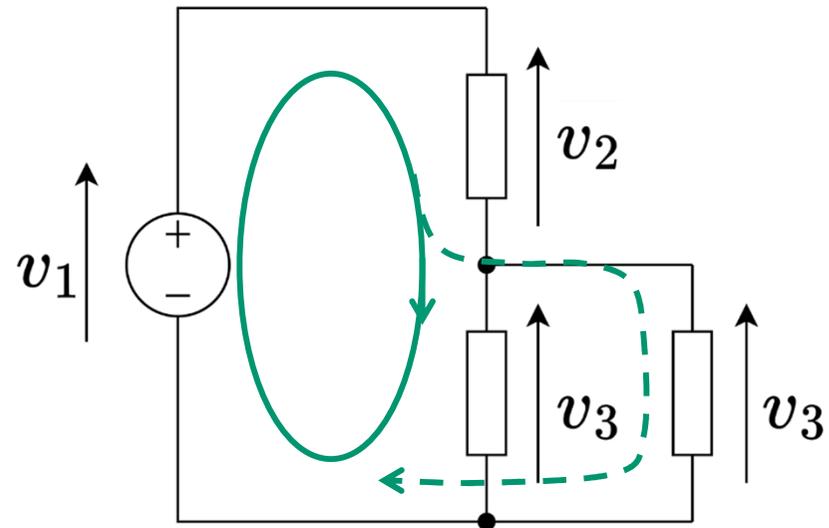
キルヒホッフの電流法則  
(Kirchhoff's Current Law)



$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

(任意のノードに対して成立)

キルヒホッフの電圧法則  
(Kirchhoff's Voltage Law)



$$v_1 - v_2 - v_3 = 0$$

(任意のループに対して成立)

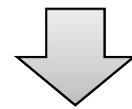
# 課題1.2

- 電気磁気学のガウスの定理とファラデーの法則を用いて、キルヒホッフの電流法則と電圧法則を証明せよ。また、キルヒホッフの電流法則と電圧法則が成り立つための条件を示せ。

# 信号の複素数表示

## オイラーの公式

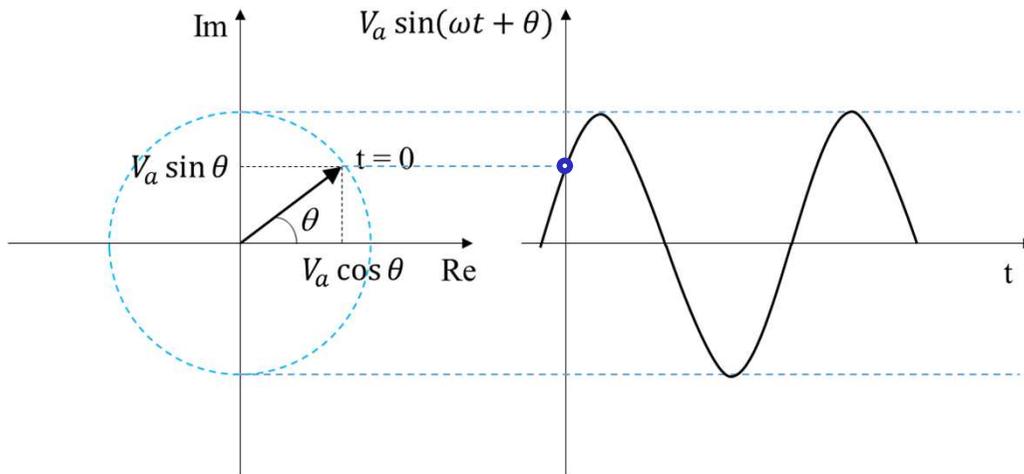
$$V(t) = V_a \{ \cos(\omega t + \theta) + j \cdot \sin(\omega t + \theta) \} = V_a e^{j(\omega t + \theta)}$$



位相  $\theta$  と時間の項  $\omega t$  を分離

$$\begin{aligned} V(t) &= V_a e^{j(\omega t + \theta)} = V_a e^{j\theta} e^{j\omega t} \\ &= V_a \{ \cos\theta + j \cdot \sin\theta \} e^{j\omega t} = \underbrace{V_a \{ \cos\theta + j \cdot \sin\theta \}}_{V_c} e^{j\omega t} \end{aligned}$$

$t = 0$ における振幅と位相を表す複素平面上のベクトル $V_c$  → 電圧(電流)の複素数表示



# 微分・積分演算の簡単化

## 複素数表示された信号

$$V(t) = V_a(\cos\omega t + j \cdot \sin\omega t) = V_a e^{j\omega t}$$

## 時間微分

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V(t) &= \omega V_a(-\sin\omega t + j\cos\omega t) = \omega V_a \left\{ \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \right\} \\ &= \omega V_a e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} = \omega \left( \cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2} \right) V_a e^{j\omega t} = j\omega V(t) \end{aligned}$$

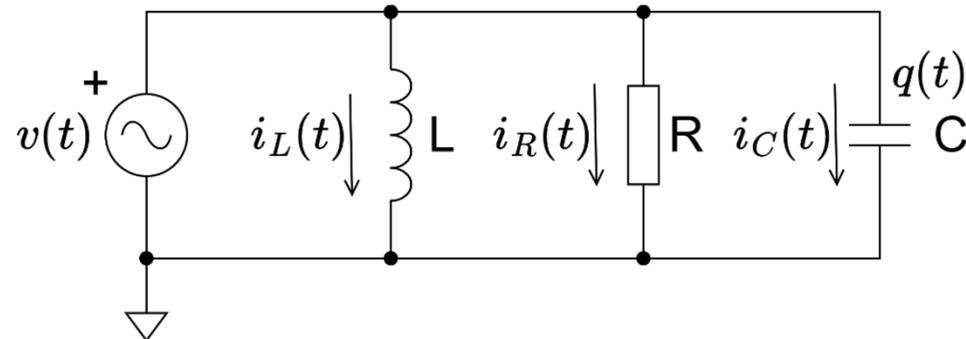
時間微分 ➡ cos, sin関数の位相が90度進む ➡  $j\omega$ を掛ける

## 時間積分

$$\begin{aligned} \int V(t)dt &= \frac{V_a}{\omega}(\sin\omega t - j\cos\omega t) = \frac{V_a}{\omega} \left\{ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \right\} \\ &= \frac{V_a}{\omega} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} = \frac{1}{\omega} \left( \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + j\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right) V_a e^{j\omega t} = \frac{1}{j\omega} V(t) \end{aligned}$$

時間積分 ➡ cos, sin関数の位相が90度遅れる ➡  $j\omega$ で割る

# LRCの電流-電圧特性



$$v(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$v(t) = Ri_R(t)$$

$$v(t) = \frac{1}{C} q(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt$$

※次ページ参照

$$i_R(t) = \frac{1}{R} v(t)$$

$$i_C(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt}$$

複素数表示

$$I_L(t) = \frac{1}{L} \int V(t) dt = \frac{1}{j\omega L} V(t)$$

$I_L$ ,  $V$ の複素数振幅が比例  
( $I_L$ の位相は遅れる)

複素数表示

$$I_R(t) = \frac{1}{R} V(t)$$

$I_R$ - $V$ が比例  
(位相は同じ)

複素数表示

$$I_C(t) = C \frac{dV(t)}{dt} = j\omega CV(t)$$

$I_C$ ,  $V$ の複素数振幅が比例  
( $I_C$ の位相は進む)

# (注意) インダクタの電圧符号

誘導起電力を求める場合は、電圧が電流微分に対して負となる(正極から電流が流れ出る向きを電圧の正方向とする)。

$$e(t) = -L \frac{di_L(t)}{dt}$$

回路方程式を作成する場合は、電圧は電流微分に対して正となる(正極に電流が流れ込む向きを電圧の正方向とする)。

$$v(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

# 回路方程式のラプラス変換

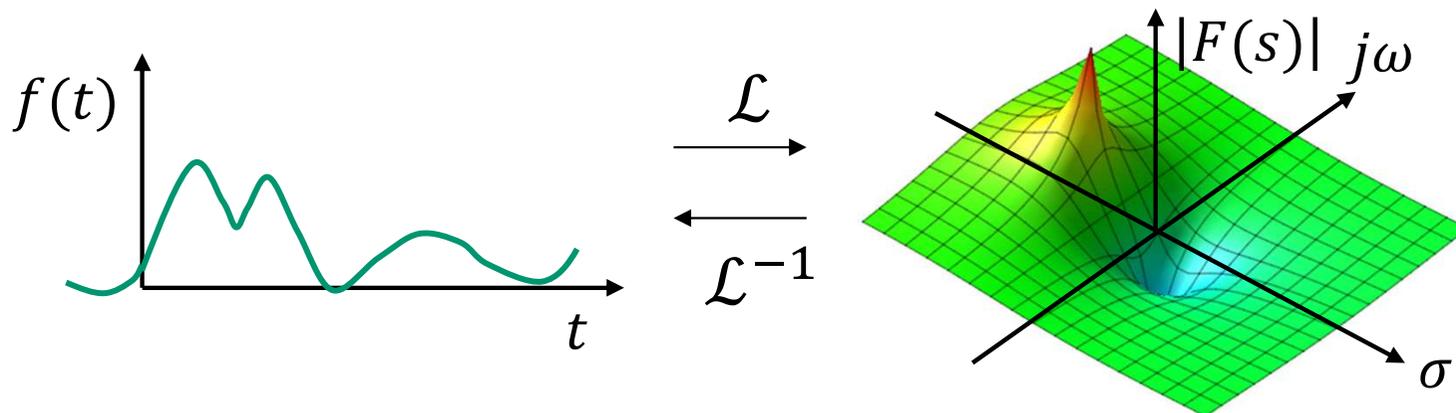
信号の複素数表示による解析は、振幅、周波数、位相が時間変化しない正弦波を入力することが前提となっている。一般の信号波形 $f(t)$ を扱う場合には、ラプラス変換が用いられる。

(注) 正弦波に対する回路の周波数特性を調べる場合もラプラス変換が便利な場合が多い。詳細は後述。

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)u(t)e^{-(\sigma+j\omega)t} dt = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (\text{ラプラス変換})$$

$$s = \sigma + j\omega \quad (\text{ラプラス変数})$$

ラプラス変換は、時間軸の関数 $f(t)$ を複素平面上の複素関数 $F(s)$ に変換する。



# ラプラス変換による微分の簡単化

## 時間微分

$$\begin{aligned}\frac{df(t)}{dt} \xrightarrow{\mathcal{L}} \int_0^{\infty} \frac{df(t)}{dt} e^{-st} dt &= [f(t)e^{-st}]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} f(t) \frac{de^{-st}}{st} dt \\ &= 0 - f(0) - \int_0^{\infty} f(t)(-se^{-st}) dt = -f(0) + s \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \\ &= sF(s) - f(0)\end{aligned}$$

## キャパシタの電流-電圧特性

$$i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} \xrightarrow{\mathcal{L}} I_c(s) = sCV_c(s) - Cv_c(0) = sCV_c(s) - q(0)$$

$sC$ が比例係数となる。ただし、 $t=0$ における電圧 $v_c(0)$ または電荷 $q(0)$ の値が必要。

# ラプラス変換による積分の簡単化

## 時間積分

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^t f(t) dt &\xrightarrow{\mathcal{L}} \int_0^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^t f(t) dt \right\} e^{-st} dt = \left[ \int_{-\infty}^t f(t) dt \left( -\frac{1}{s} e^{-st} \right) \right]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} f(t) \left( -\frac{1}{s} \right) e^{-st} dt \\ &= 0 + \frac{1}{s} \int_{-\infty}^0 f(t) dt + \frac{1}{s} \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = \frac{1}{s} F(s) + \frac{1}{s} \int_{-\infty}^0 f(t) dt\end{aligned}$$

## インダクタの電流-電圧特性

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v_L(t) dt \xrightarrow{\mathcal{L}} I_L(s) = \frac{1}{sL} V_L(s) + \frac{1}{sL} \int_{-\infty}^0 v_L(t) dt = \frac{1}{sL} V_L(s) + \frac{1}{s} i_L(0)$$

$1/sL$ が比例係数となる。ただし、 $t = 0$ における電流 $i_L(0)$ の値が必要。

# クイズ2

前ページ、前々ページの結果を用いて、キャパシタとインダクタの電流-電圧特性を、 $V_L(s) =$  ,  $V_C(s) =$  の形で表せ。

# 素子(Device)の電流-電圧特性 のまとめ

素子	基となる物理法則	時間領域での表現	ラプラス変数での表現	周波数領域での表現
抵抗	オームの法則	$v(t) = R \cdot i(t)$	$V(s) = R \cdot I(s)$	$V(j\omega) = R \cdot I(j\omega)$
インダクタ	ファラデーの法則	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$V(s) = sL \cdot I(s) - Li(0)$	$V(j\omega) = j\omega L \cdot I(j\omega)$
キャパシタ	ガウスの法則	$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$	$V(s) = \frac{1}{sC} I(s) + \frac{v(0)}{s}$	$V(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} I(j\omega)$
半導体デバイス	半導体モデル	I-V特性, C-V特性	小信号パラメータ (小信号等価回路)	小信号パラメータ (小信号等価回路)

充放電特性の解析で有用

過渡応答と定常応答

周波数応答

キャパシタの充放電などの簡単な場合は、ラプラス変換を使うまでもないが、一般的に微分方程式を解くのは難しい。

十分長い時間が経つたとすると定常解が得られる。

正弦波入力に対する定常解が得られる。

# 1.2節のまとめ

- Rの回路方程式は、交流、直流に関係なく解ける
- LRCの回路方程式は、正弦波交流に対して線形方程式であり、周期的な交流波形に対する定常応答が数学的に解ける( $\omega \rightarrow 0$ の極限として直流の解も得られる)
- 一般波形に対する回路の応答(過渡応答と定常応答)を解く場合には、ラプラス変換が用いられる
- 非線形な特性の素子を含む回路方程式は、解析的に解けないことが多い



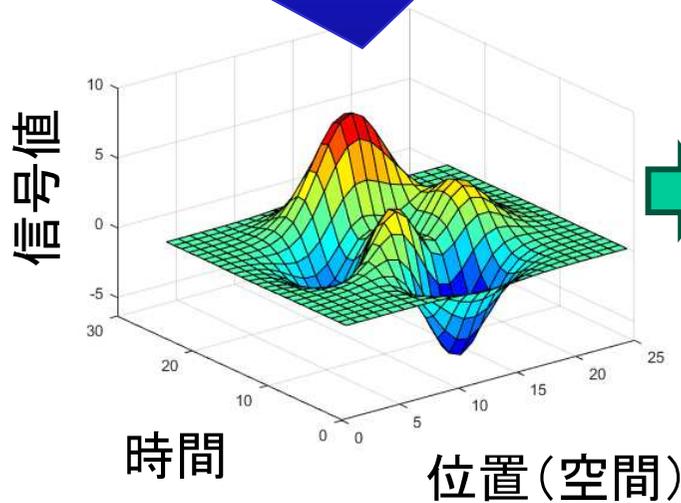
非線形回路方程式を解くためには、近似または数値シミュレーションが必要

周波数成分

## 1.3 信号と誤差

時間、位置の異なる複数の信号をまとめて一つの信号とすることもできる

# 信号とデータ



波形(信号)

変換(電子回路)

信号(Signal)

- 情報の物理表現
- 時間と空間の関数

データ(Data)

- 記号、構造、画像、音声
- 時間と空間の関数とは限らない

信号値を表す物理量の例

周波数  
(角周波数)

位相

振幅

電圧・電流・  
電荷

パルス幅

パルス密度

変換(電子回路)

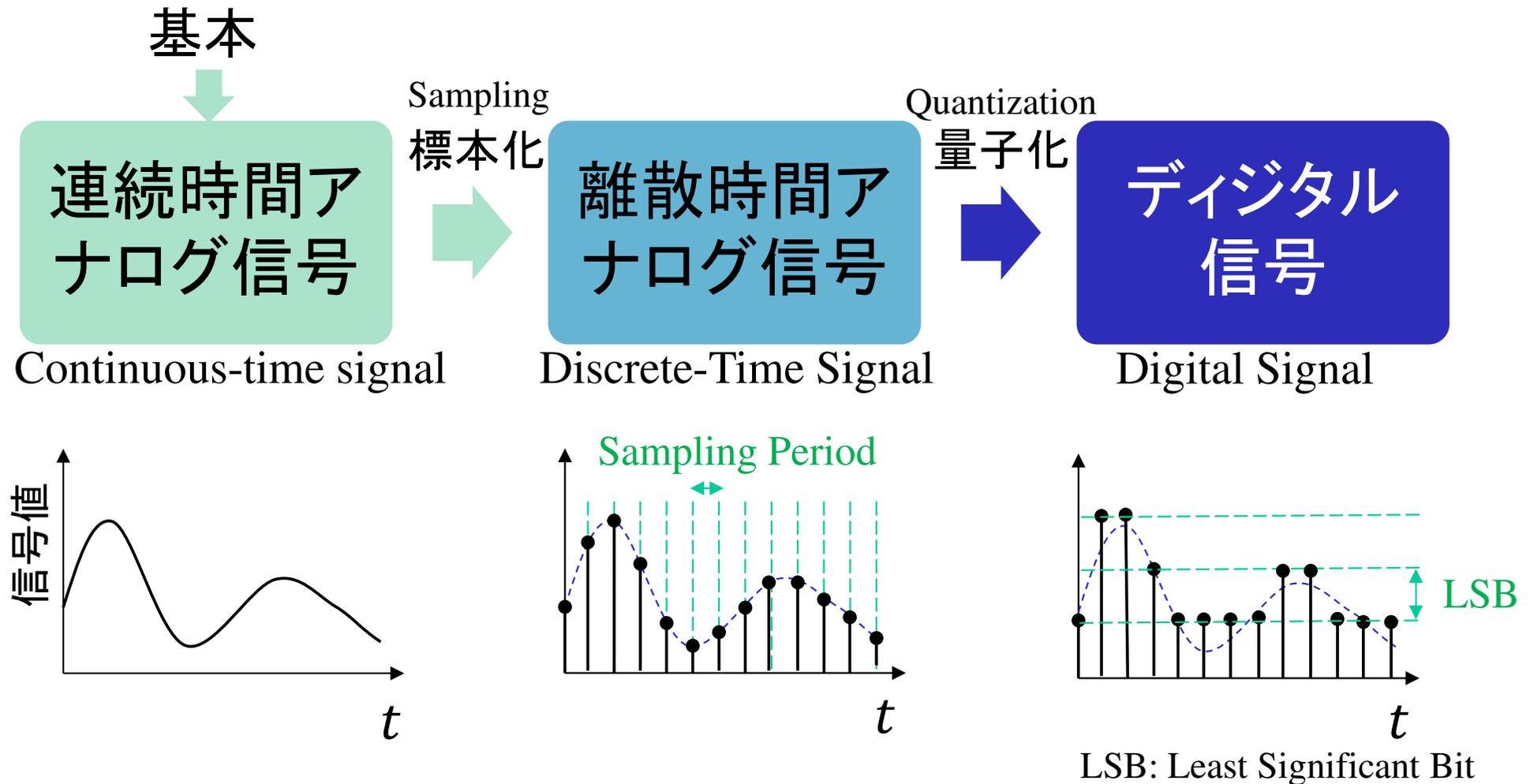
電子回路の入出力変数

# 前スライドの専門用語（要記憶）

Frequency:	周波数
Angular frequency:	角周波数
Phase:	位相
Amplitude:	振幅
Pulse width:	パルス幅
Pulse density:	パルス密度

# 信号の表記方法

信号: 情報を時間 $t$ と空間 $x$ を変数とする物理量 $f(t, x)$ で表したものの。



# 信号の誤差(Error)

- 雑音 (Noise)

- 量子化雑音 (デジタル信号)

- デジタル化 (実数 → 整数) に伴う丸め誤差が原因
    - 信号処理により抑制できる

- 統計的雑音 (アナログ信号)

- 自由電子の運動や密度の統計的揺らぎが原因
    - 原理的に抑制できない

- 歪み (Distortion)

- 非線形歪み

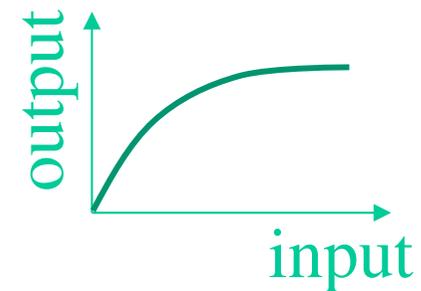
- 入力-出力特性の非線形性によって波形がゆがむ

- 評価指標: 全高調波歪み  $THD$  (Total harmonic distortion) =  $\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$

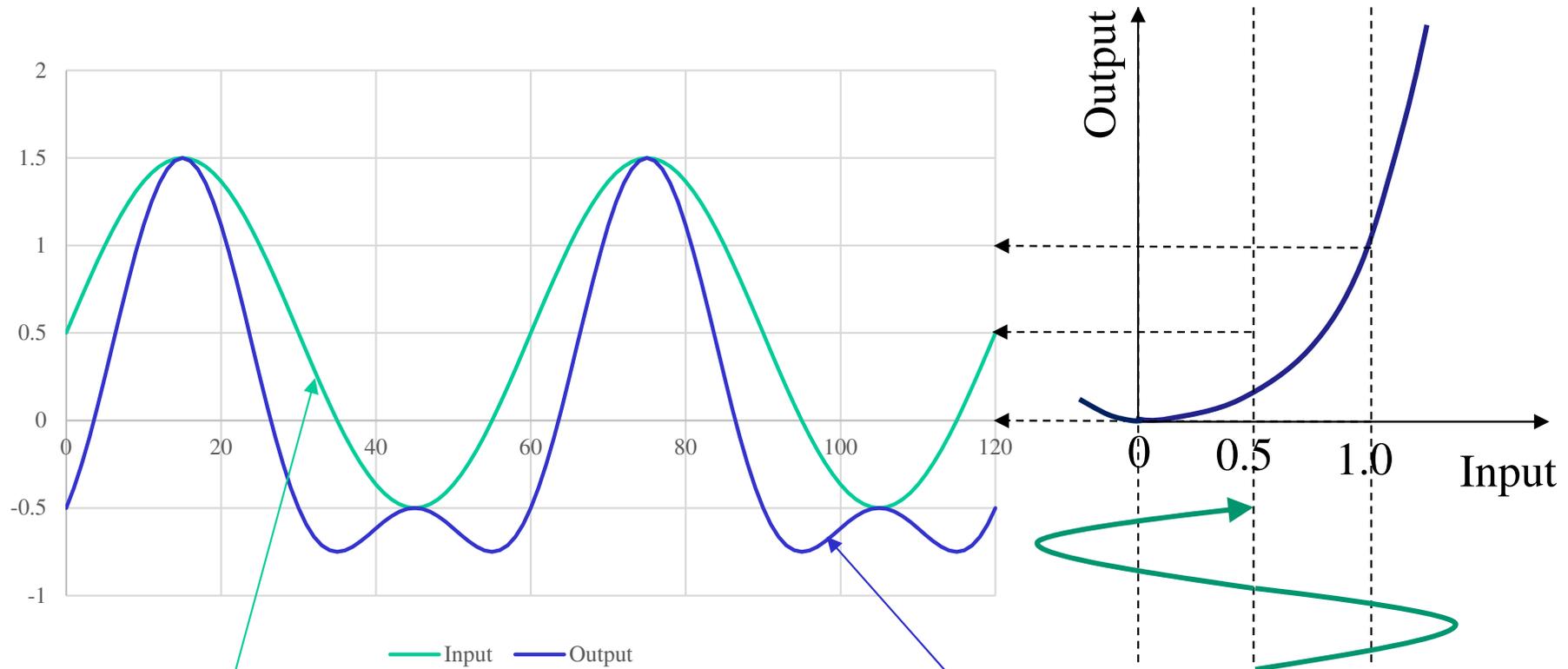
- 位相歪み

- 位相の周波数依存性によって波形が崩れる

- 評価指標: 群遅延  $\tau_G = -\frac{d\theta}{d\omega}$



# 非線形歪み

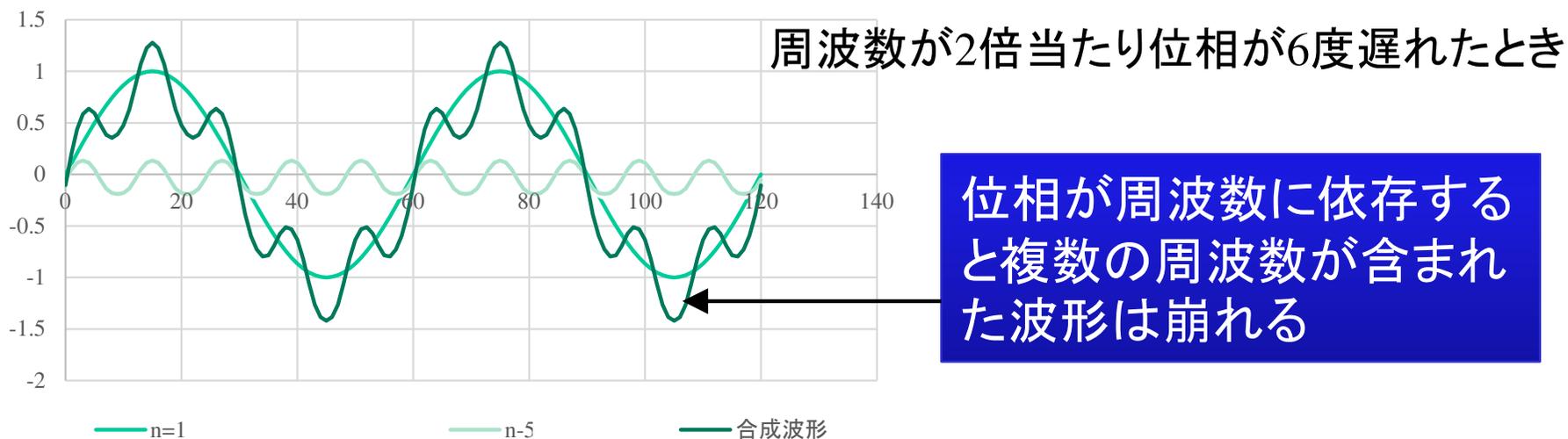
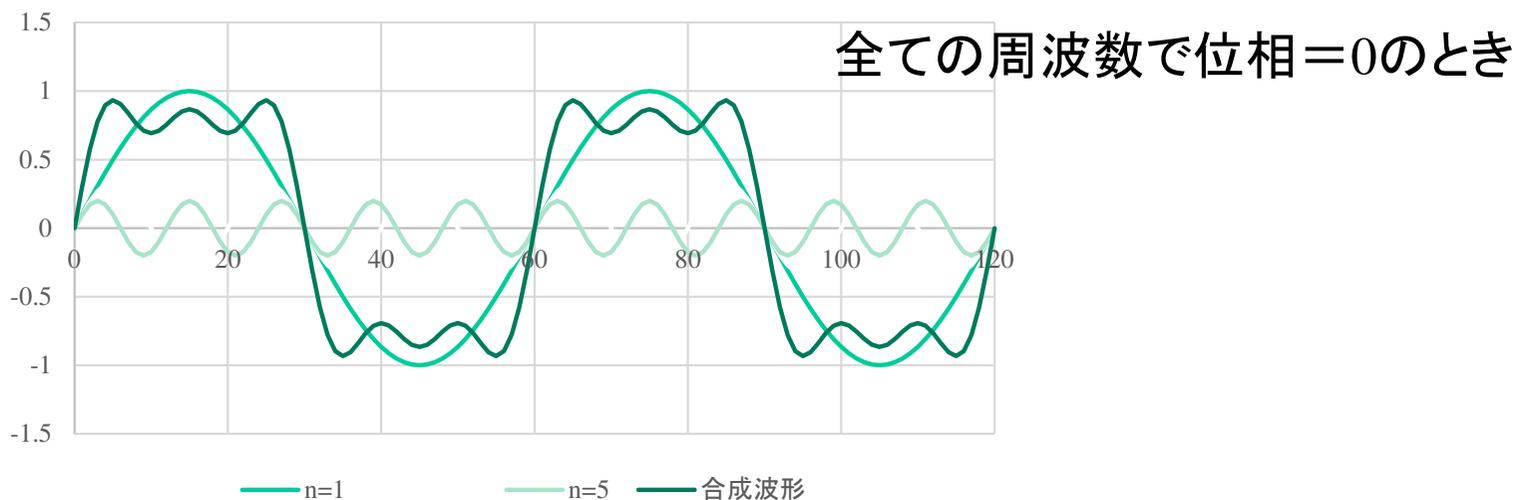


— Input — Output

$$x = \sin \omega t + \frac{1}{2} \rightarrow \boxed{y = x^2 - \frac{3}{4}} \rightarrow y = \sin^2 \omega t + \sin \omega t - \frac{1}{2} = \sin \omega t - \frac{1}{2} \cos 2\omega t$$

非線形特性があると入力と異なる周波数成分(高調波)が発生する

# 位相歪み



# 1.3節のまとめ

- 電子回路では、データを信号（時間と空間の関数）として扱う
  - データの値を、振幅、位相、周波数、電圧値等に割り当てることにより信号の波形が作成できる
  - 信号波形は、時間の関数として表される
    - 複数の信号（複数のポートまたは配線）をまとめて一つの信号と見なすこともできる（2値デジタル回路など）
- 電子回路で信号処理をすると、雑音や意図しない歪みなどの誤差が発生することを考慮する必要がある
  - 雑音には、量子化雑音や統計的雑音（熱雑音など）がある
  - 信号の歪みには、非線形歪みと位相歪みがある