

# 電子回路が分かるための 回路学復習



菊池久和

1

## 文字使用の約束事



- 電圧は  $V$  または  $E$ 、電流は  $I$  または  $J$
- インピーダンスは  $Z$ 、アドミタンスは  $Y$
- 抵抗は  $R$ 、コンダクタンスは  $G$
- キャパシタンスは  $C$ 、インダクタンスは  $L$ 、など
- 電気回路理論では
  - 振幅やフェーズ表示、演算子表示には大文字をつかう
  - 時間の関数として明記するときには、 $v(t)$ 、 $i(t)$  のように小文字を使用することが多い
  - 角周波数  $\omega$  や  $s$  の関数として明記するときには、 $Z(\omega)$  や  $V(s)$  のように大文字をつかうことが多い。 $(s = j\omega)$
- そのほか、電子回路学では
  - 直流動作量(定数)を  $V$  のように大文字で書く
  - 交流動作量(時間の関数)を  $v(t)$  のように小文字で書く
  - 周波数領域の動作量を  $V(s)$  のように大文字で書く

2

## 回路学では、簡単な事実(知識)を たくさん組み合わせる



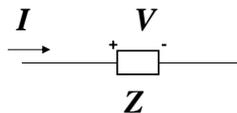
- アドミタンスはインピーダンスの逆数
- キルヒホッフ、オーム則
- 電圧源の内部インピーダンスは0だ
- 電流源の内部インピーダンスは  $\infty$  だ
- テブナンの等価電源
  - テブナンの定理の証明は難しいが...
- ミルマンの定理
- 重ね合わせ
- 周波数が、ある基準(=1)にくらべて高いか、低いかな

3

## Ohmの法則



- インピーダンス  $Z$  の2端子素子に電流  $I$  が流れて発生する電圧降下  $V$  は  $V = ZI$  である。



- 注1 電圧降下の向きは、電流の流れこむ端子をプラスと定義する。
- 注2 アドミタンス  $Y$  はインピーダンス  $Z$  の逆数である。

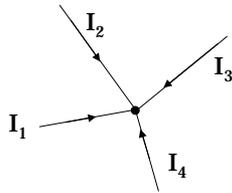
$$Y = \frac{1}{Z} \quad G = \frac{1}{R}$$

4

# Kirchhoffの法則

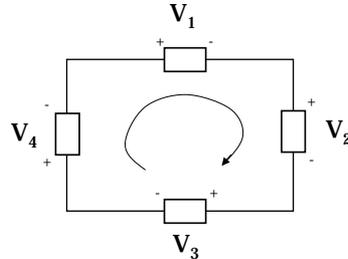


- KCL: 任意の節点に流れこむ電流の総和はゼロである



$$\sum_n I_n = 0$$

- KVL: 任意の閉路を一巡する電位差の総和はゼロである

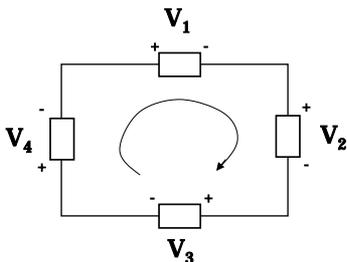


$$\sum_n V_n = 0$$

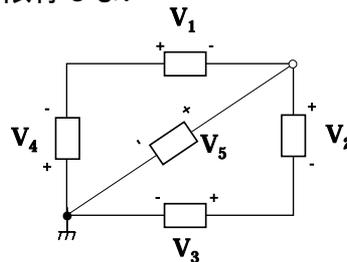
# Kirchhoffの法則 (if you like)



- KVL: 任意の閉路を一巡する電位差の総和はゼロである
- KVLを言い換えると
- 節点間の電位差は経路に依存しない

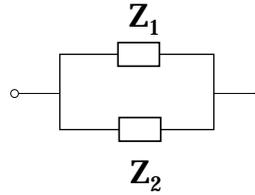
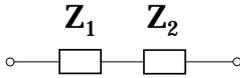


$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 0$$



$$\begin{aligned} V_5 &= V_2 + V_3 \\ &= -V_4 - V_1 \end{aligned}$$

## 直列接続と並列接続



- インピーダンスでかくと

$$Z = Z_1 + Z_2$$

- アドミタンスでかくと

$$Y = Y_1 + Y_2$$

- アドミタンスでかくと

$$\frac{1}{Y} = \frac{1}{Y_1} + \frac{1}{Y_2}$$

- インピーダンスでかくと

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

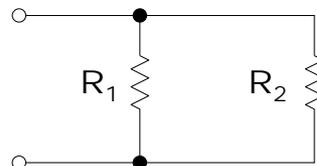
7

## 合成インピーダンスの極限值を答えなさい



$R_1 \rightarrow 0$  のとき

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \lim_{R_1 \rightarrow 0} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



だから、  
0 [ ]

$R_1 \rightarrow \infty$  のとき

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

だから、  
 $R_2$  [ ]



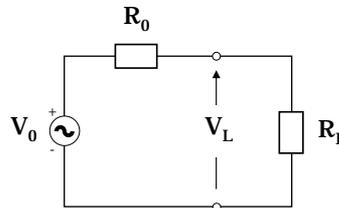
8

理想電圧源の内部インピーダンスはゼロである。  
理想電流源の内部インピーダンスは無限大である。



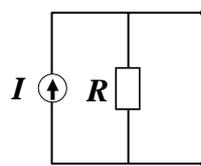
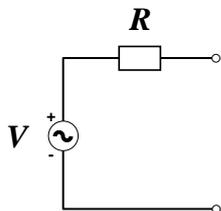
- 証明
- 理想電圧源の内部インピーダンスを  $R_0$  とかくとき、

$$V_L = \frac{R_L}{R_0 + R_L} V_0 = \frac{1}{\frac{R_0}{R_L} + 1} V_0$$



- $R_L$  の大小にかかわらず、 $V_L$  が一定であるためには、 $R_0 = 0$  でなければならない。(証明おわり)

## Theveninの等価電源



- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| ■ 内部インピーダンスは $R$ | ■ 内部インピーダンスは $R$ |
| ■ 開放電圧は $V$      | ■ 開放電圧は $RI$     |
| ■ 短絡電流は $V/R$    | ■ 短絡電流は $I$      |

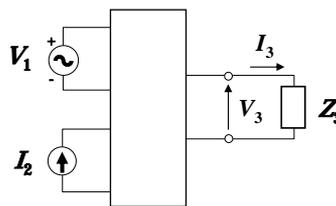
$V = RI$ 、言い換えると  $I = V/R$  ならば  
2つの回路は等価である



# 重ね合わせ



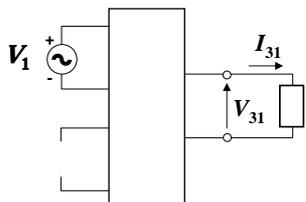
- 任意の回路について、たとえば
- 独立電源が  $V_1$  と  $I_2$  だけであると  
する。
- $Z_3$  を流れる電流や電圧降下は？



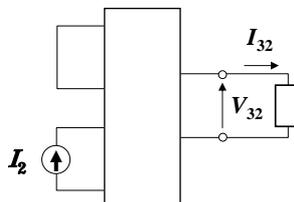
$$I_3 = I_{31} + I_{32}$$

$$V_3 = V_{31} + V_{32}$$

$V_1$  だけを活かしたとき



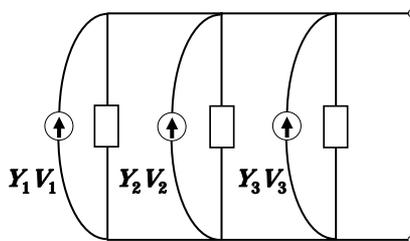
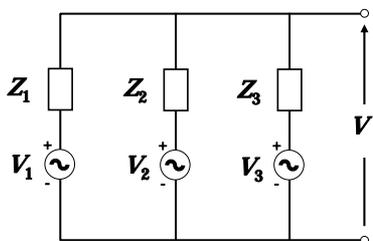
$I_2$  だけを活かしたとき



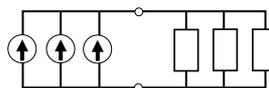
# Millmanの定理



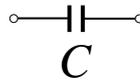
証明 テブナンにより



$$V = \frac{Y_1 V_1 + Y_2 V_2 + Y_3 V_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$



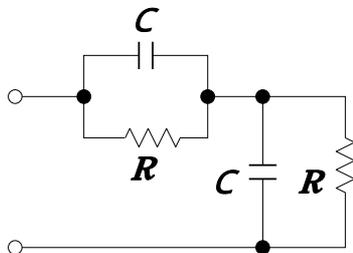
# キャパシタのインピーダンスは



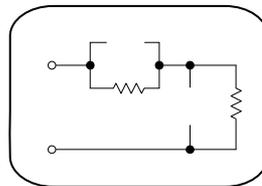
$$Z = \frac{1}{j\omega C} = \begin{cases} \infty & \text{if } \omega = 0 \\ 0 & \text{if } \omega = \infty \end{cases}$$

- 周波数がとても低いとき、開放に等価だ
- 周波数がとても高いとき、短絡に等価だ

# インピーダンスは、次の周波数で どのような値か

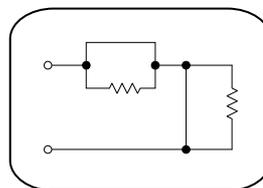


## ■ 直流



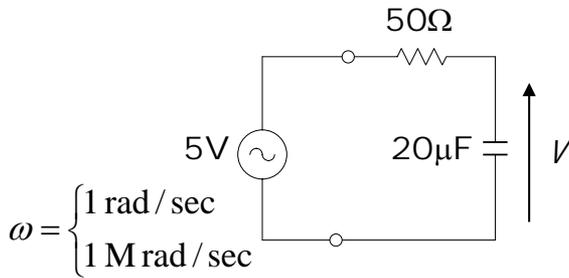
$2R [\Omega]$

## ■ 周波数が十分に高い交流



$0 [\Omega]$

## キャパシタの電圧降下(の概略値) を答えなさい



こたえ

$$V = 5 \times \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$= 5 \times \frac{1}{j\omega CR + 1}$$

時定数は  $CR = 20\mu \times 50 = 1\text{m秒}$  だから

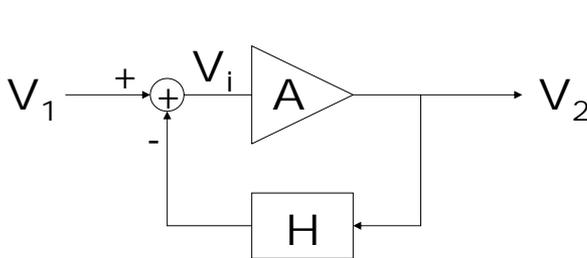
$CR = 10^{-3}$		$CR$		1ならば、 $V = 5$
$CR = 10^3$		$CR$		1ならば、 $V = 0$

15

## なぜ、負帰還はよいか



- Aは増幅回路です。したがって能動回路です
- Hは帰還回路です。受動回路で作ります



$$V_i = V_1 - HV_2$$

$$V_2 = AV_i$$

ゆえに

$$V_2/V_1 = A/(1+AH)$$

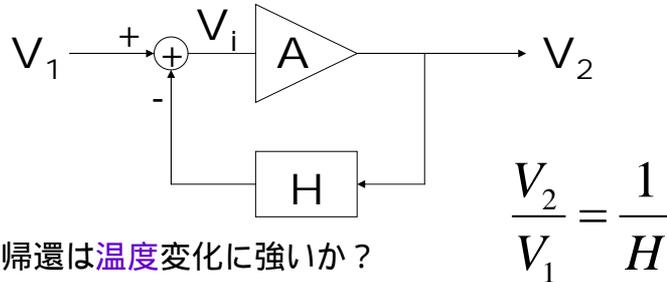
|AH| 1とすると

$$V_2/V_1 = 1/H$$

- ◆ 負帰還回路の特性が受動回路だけで定まる。
- ◆ だから高精度で安定な動作が保証できる。

16

## 負帰還増幅回路の動作は温度変化に対しても安定している。なぜか



- なぜ負帰還は温度変化に強いのか？
- 負帰還回路の特性は受動回路で定まる
  - 能動回路=半導体は温度に敏感だけど
- 受動素子は半導体に比べて温度係数が小さいから

17

## なぜ、モバイル機器には低電圧回路が必要か



- バッテリー消費を抑える必要がある
- さて、容量Cのキャパシタに蓄えられる静電エネルギーは  $E=(1/2)CV^2$
- デジタルICでは電位の高低が1, 0を表わし、スイッチング動作によって状態が変化する。
- つまり、キャパシタの充電と放電がデジタルICの主な消費電力になる。
- 電気エネルギーの単位時間当たりの変化量は、
  - スwitching周波数を f とすれば、
  - 平均的には  $Ef=(1/2)CV^2f$
  - これが単位時間あたりの消費電力です

18



## (つづき) なぜ低電圧回路か



- 消費電力が  $(1/2)CV^2f$
- したがって、低消費電力デジタルICを作るには
  - 回路面積を小さくして容量を小さくする
  - 動作電圧を下げる
  - 動作周波数を下げる
- とくに動作電圧は2乗で効くため、低電圧化の利益が大きい
- 一方、高速動作を望むかぎり、動作周波数を下げることが受け入れがたい

19



## キャパシタに蓄えられる電気エネルギー



- 容量Cのキャパシタの端子間電圧がvのとき、充電電荷は  $q=Cv$ だ
- キャパシタに流れ込む電流をiとかくと、瞬時電力は  $p=vi$ だ
- 電流は単位時間あたりの電荷の変化分だから、 $i=dq/dt=Cdv/dt$
- したがって

$$p = vC \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cv^2 \right)$$

- エネルギーは電力の時間積分だから

$$E = \int p dt = \frac{1}{2} Cv^2$$

20



# klab



おもな内容はウェブにあります

- Google サーチで
  - klab
  - (ケイ エル エイ ビー)と入力する
  - Front Page というウェブサイトが比較的上位に検索される
  - それが研究室のウェブサイトです
- 左カラムにある
  - LECTURES をクリックする