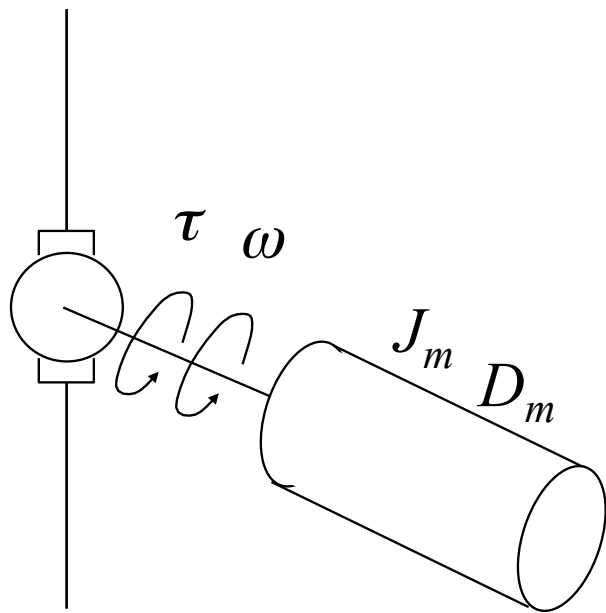


パワーエレクトロニクス講義資料 第9回チョツパによるDCモータ駆動

担当: 古橋武

furuhashi@cse.nagoya-u.ac.jp



τ : モータのトルク (回転力) [Nm]

ω : モータの回転数 [rad/s]

J_m : 回転子の慣性モーメント [Nms²/rad]

D_m : 回転子の摩擦係数 [Nms/rad]

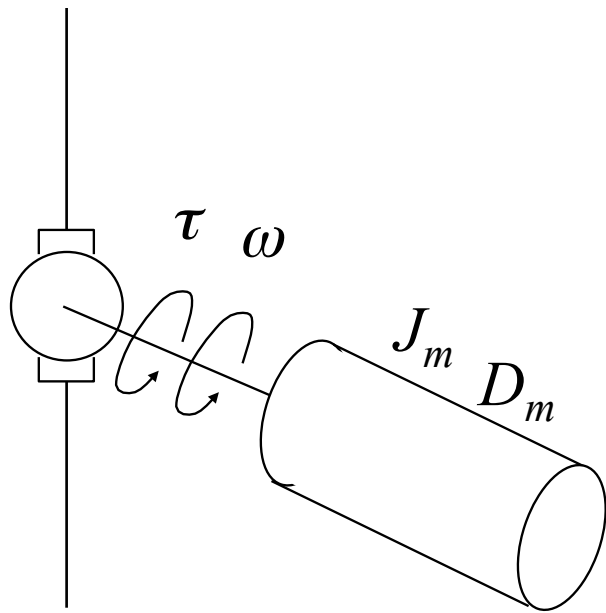
τ_L : 負荷トルク

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + D_m \omega = \tau - \tau_L \quad (7.11)$$

図7.13 負荷

$\tau - \tau_L = T$ (一定), $t = 0$ で $\omega = 0$ とすると

$$= \frac{T}{D_m} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad \tau : \text{時定数}$$



τ : モータのトルク (回転力) [Nm]

ω : モータの回転数 [rad/s]

J_m : 回転子の慣性モーメント [Nms²/rad]

D_m : 回転子の摩擦係数 [Nms/rad]

τ_L : 負荷トルク

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + D_m \omega = \tau - \tau_L \quad (7.11)$$

図7.13 負荷

$\tau - \tau_L = T$ (一定), $t = 0$ で $\omega = 0$ とすると

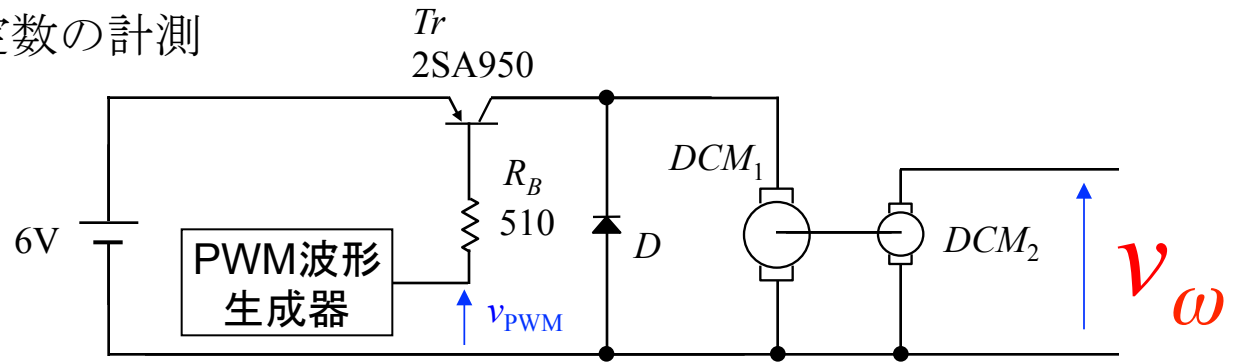
$$\omega = \frac{T}{D_m} \left(1 - \exp\left(-\frac{D_m}{J_m} t\right) \right)$$

$$= \frac{T}{D_m} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad \tau : \text{時定数}$$

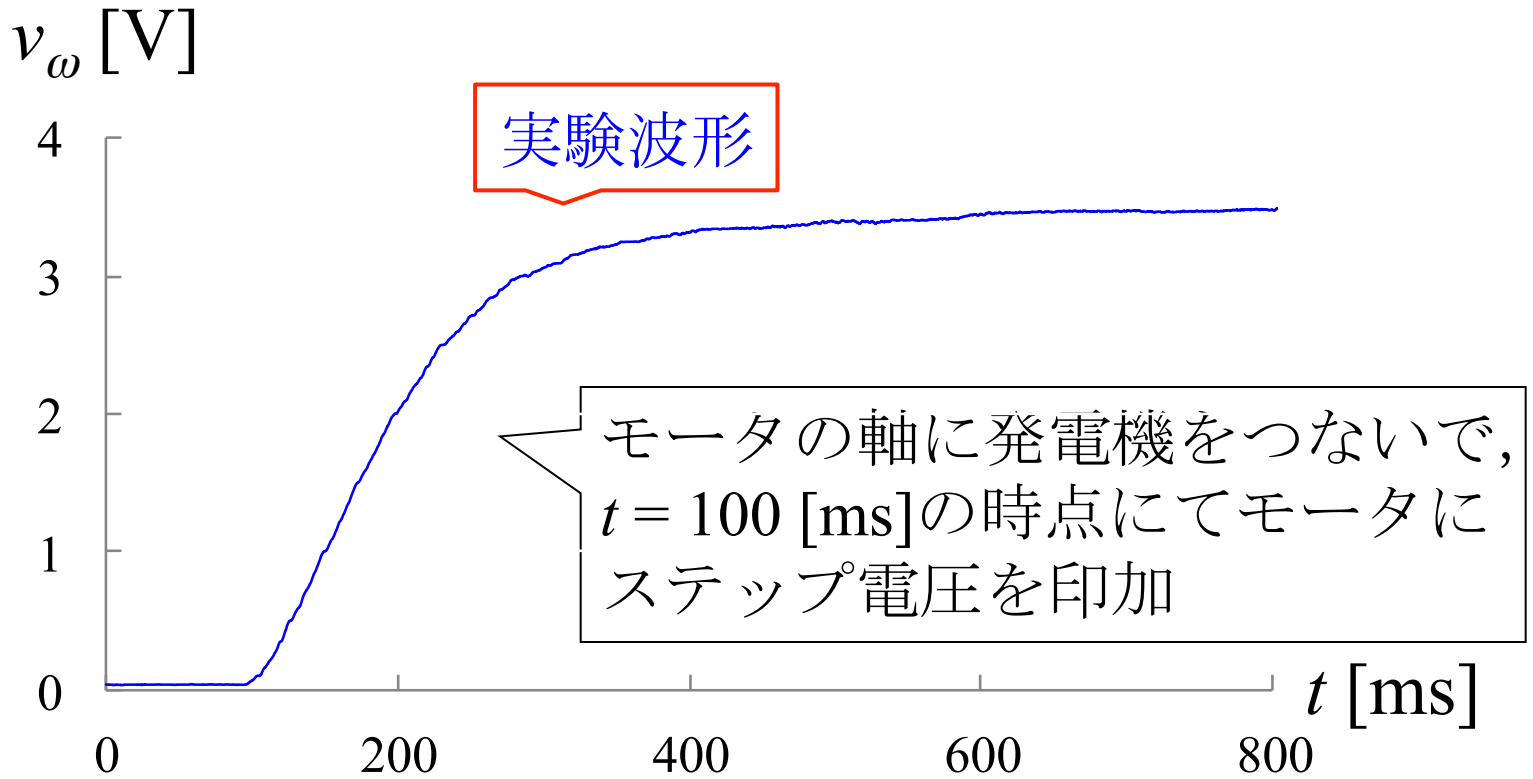
DCモータの機械的時定数の計測

マブチモータ

RF-270RH



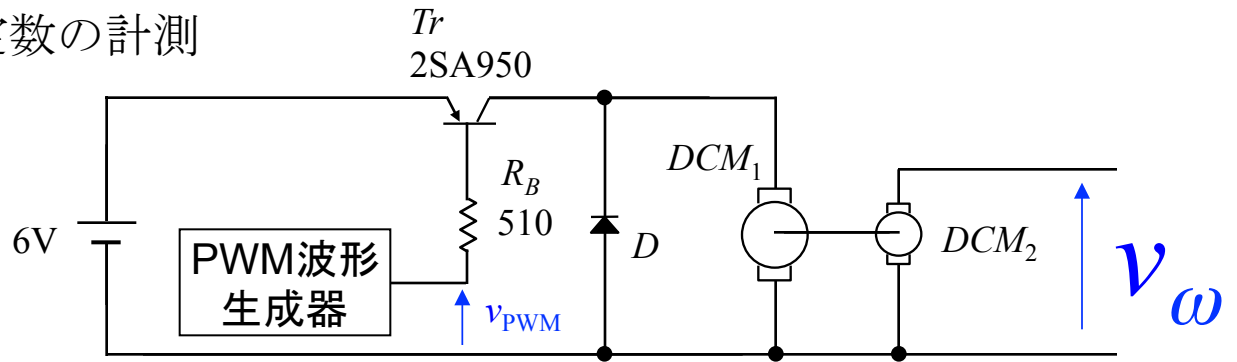
$$v_{\omega} = K_e \omega : \text{電気起電力}$$
$$K_e : \text{起電力定数}$$



DCモータの機械的時定数の計測

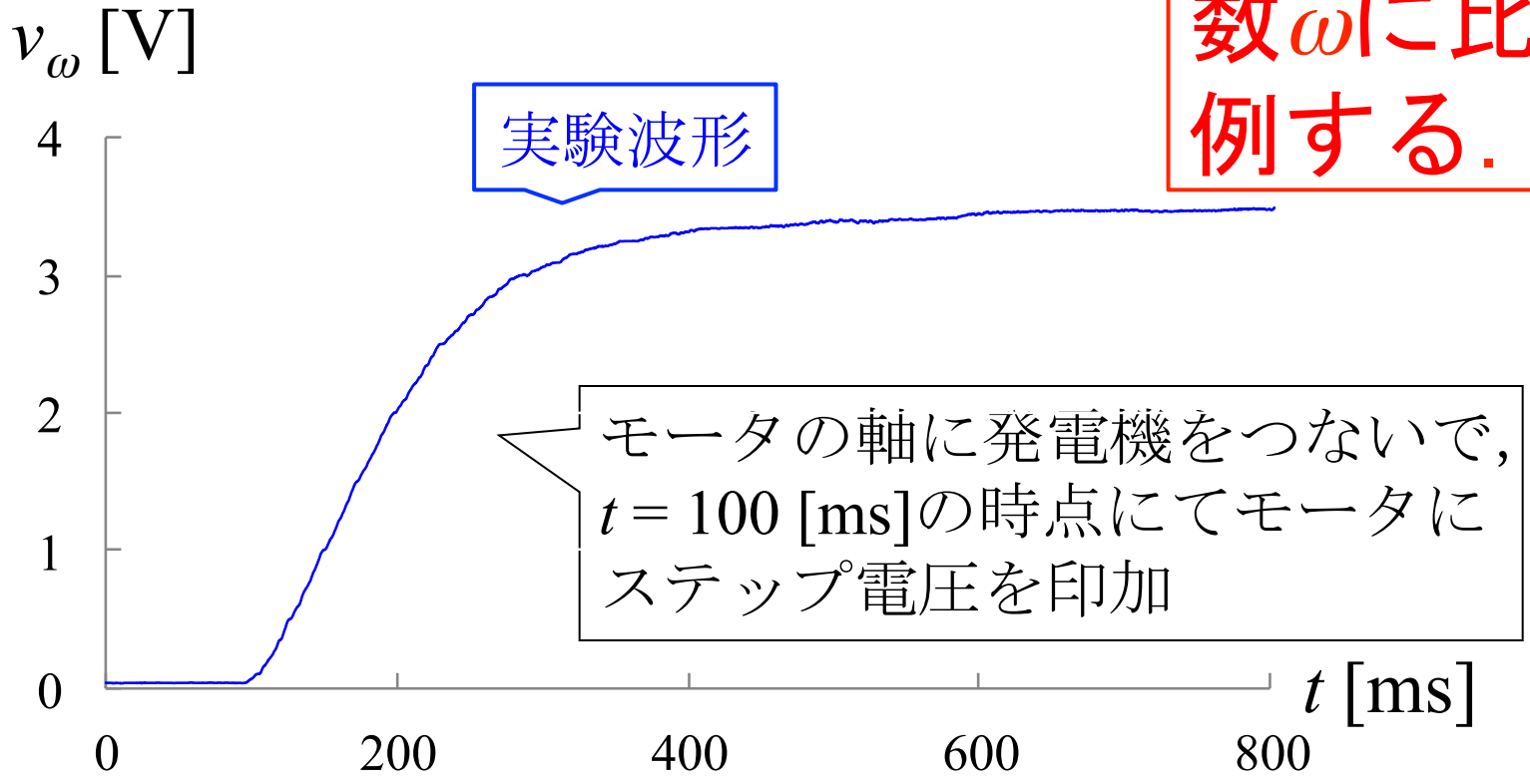
マブチモータ

RF-270RH



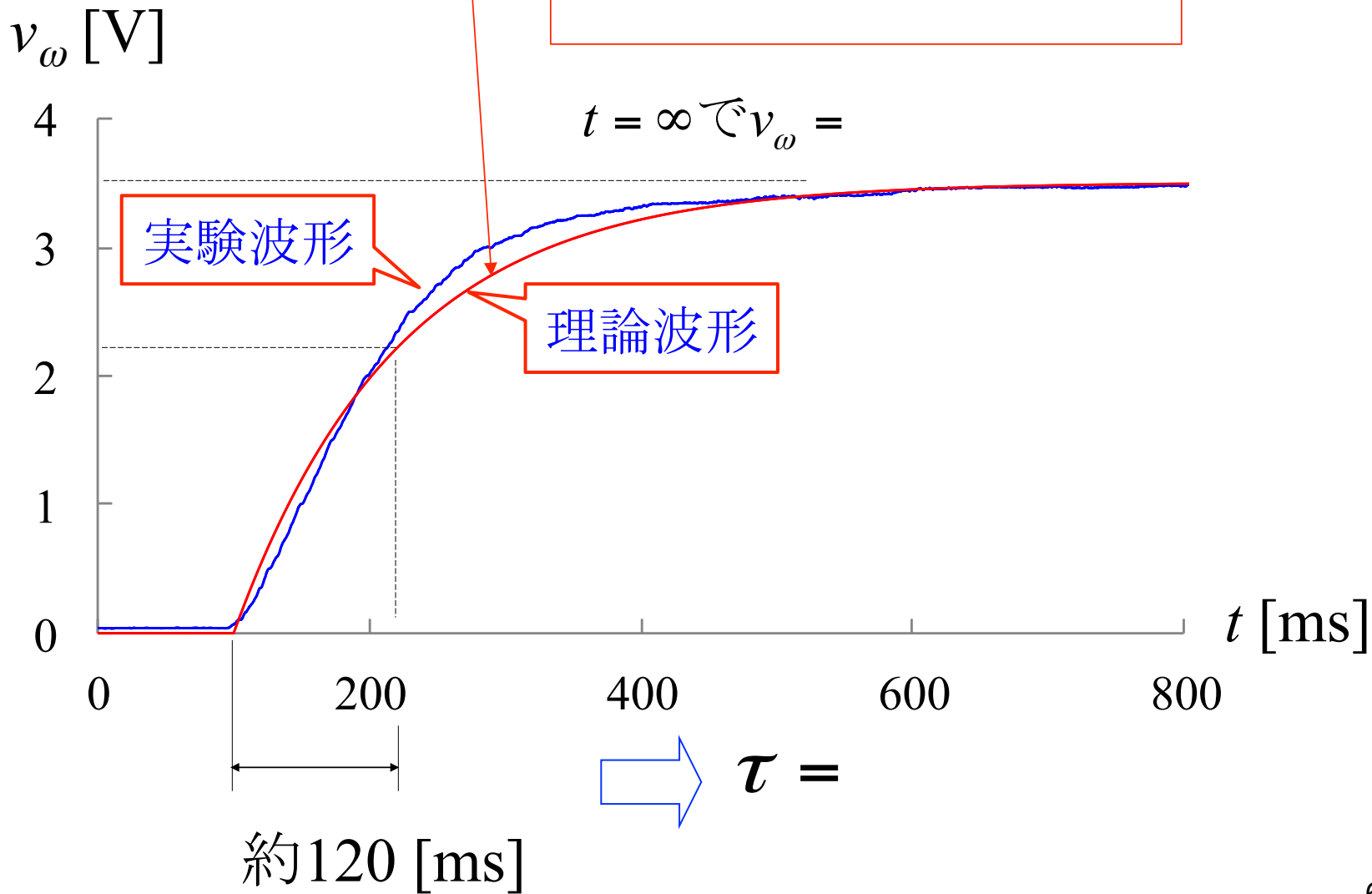
$v_\omega = K_e \omega$: 電気子起電力
 K_e : 起電力定数

v_ω は回転数 ω に比例する。



モータの機械的時定数の近似
マブチモータ

$$v_{\omega} = K_e \frac{T}{D_m} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \text{ において}$$



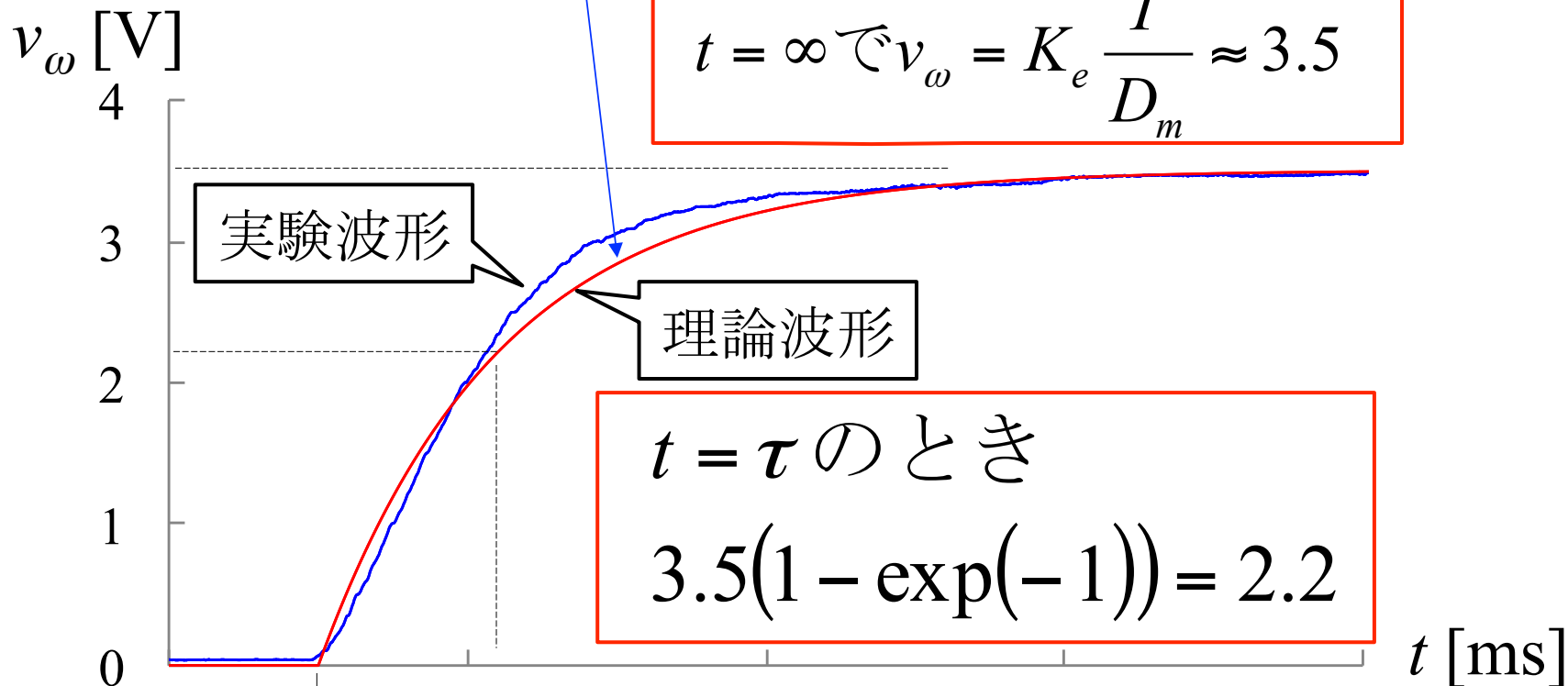
機械系の時定数

モータの機械的時定数の概略値
マブチモータ

$$v_{\omega} = K_e \frac{T}{D_m} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \text{ において}$$

$$t = \infty \text{ で } v_{\omega} = K_e \frac{T}{D_m} \approx 3.5$$

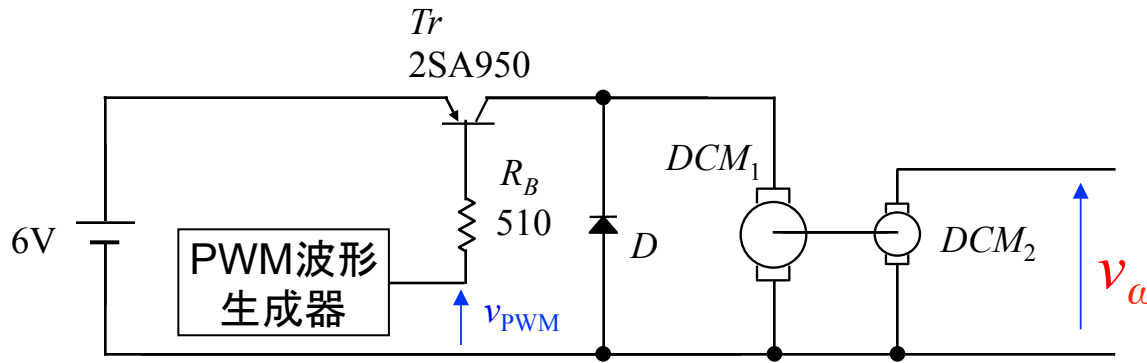
$$t = \tau \text{ のとき} \\ 3.5(1 - \exp(-1)) = 2.2$$



約120 [ms]

$$\tau = \frac{J_m}{D_m} = 120 \text{ [ms]}$$

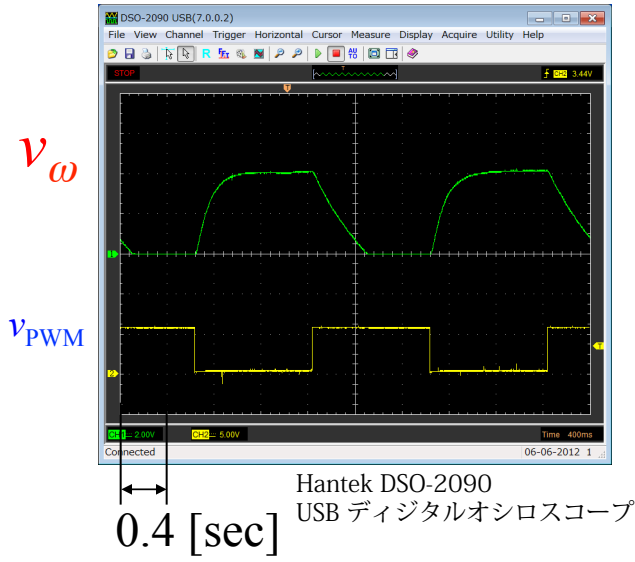
機械系の時定数



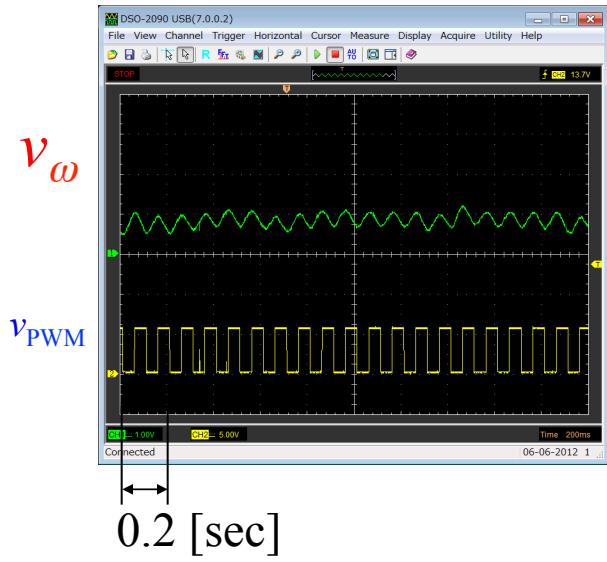
モータの回転は断続的

モータの回転は連続的であるが波打っている。

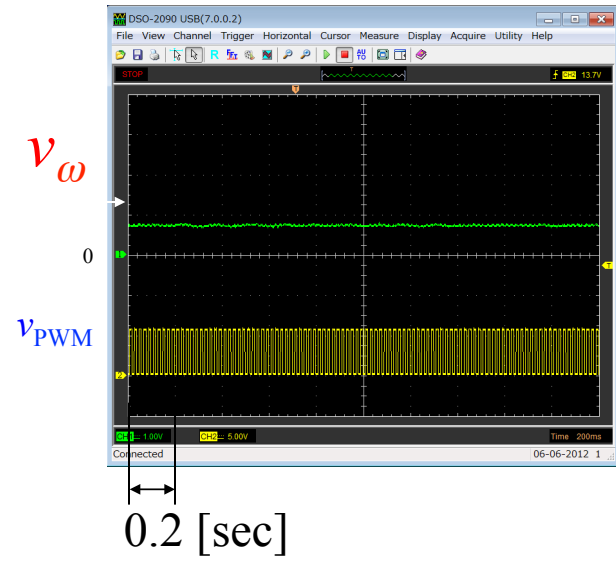
モータの回転は連続的で波打ちも小さい。



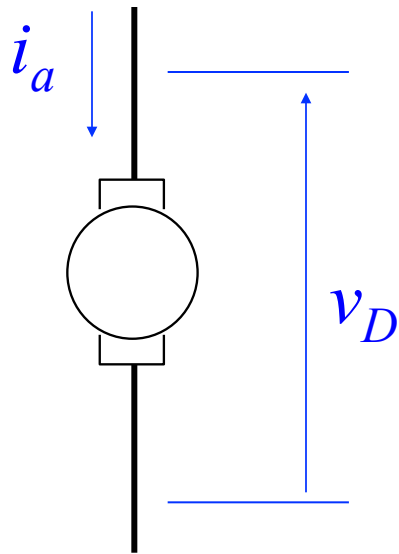
$f_{sw} = 0.5 \text{ [Hz]}$
 $(2[s] \gg 120[ms])$



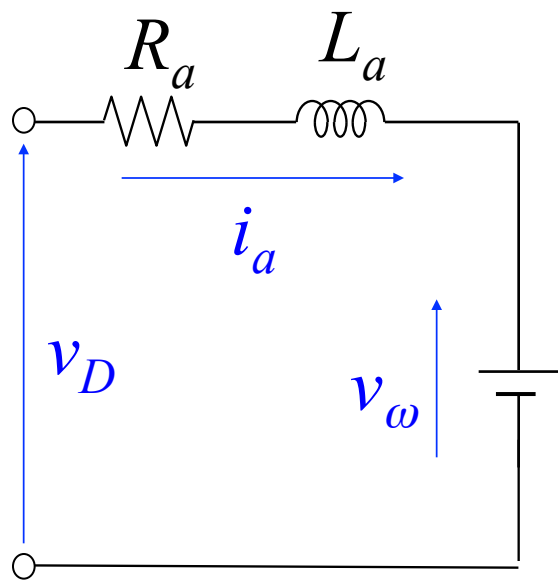
$f_{sw} = 10 \text{ [Hz]}$
 $(100[ms] \approx 120[ms])$



$f_{sw} = 50 \text{ [Hz]}$
 $(20[ms] \ll 120[ms])$



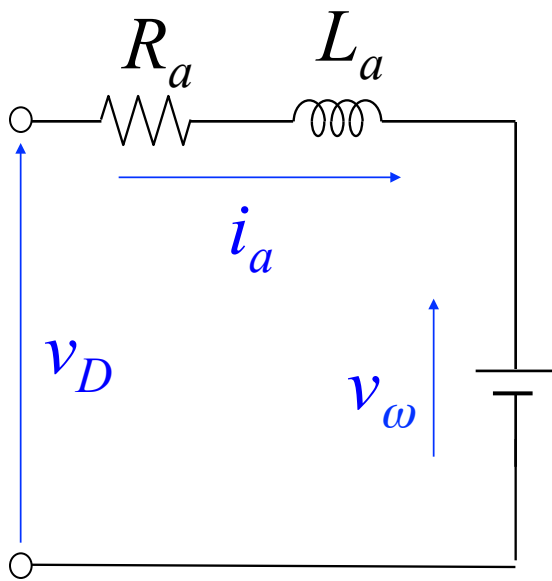
v_D : モータの印加電圧[V]
 I_a : 電機子電流[A],
 R_a : 電機子抵抗[Ω],
 L_a : 電機子インダクタンス[H],
 v_ω : 電機子起電力[V],



$$L_a \frac{d i_a}{d t} + R_a i_a = v_D - v_\omega \quad (7.9)$$

$v_\omega = K_e \omega$: 電機子起電力
 K_e : 起電力定数

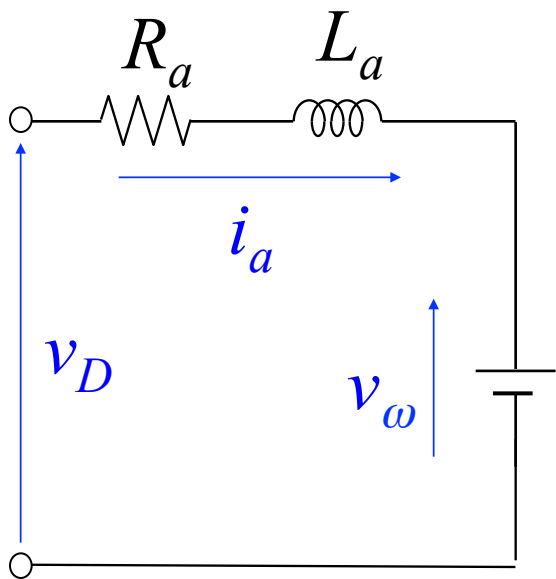
図7.12 DCモータの等価回路



$$L_a \frac{d i_a}{d t} + R_a i_a = v_D - v_\omega \quad (7.9)$$

$v_D - v_\omega = E$ (一定), $t = 0$ で $i_a = 0$ とすると

$$= \frac{E}{R_a} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad \tau: \text{時定数}$$



$$L_a \frac{d i_a}{d t} + R_a i_a = v_D - v_\omega \quad (7.9)$$

$v_D - v_\omega = E$ (一定), $t = 0$ で $i_a = 0$ とすると

$$i_a = \frac{E}{R_a} \left(1 - \exp\left(-\frac{R_a}{L_a} t\right) \right)$$

$$= \frac{E}{R_a} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad \tau: \text{時定数}$$

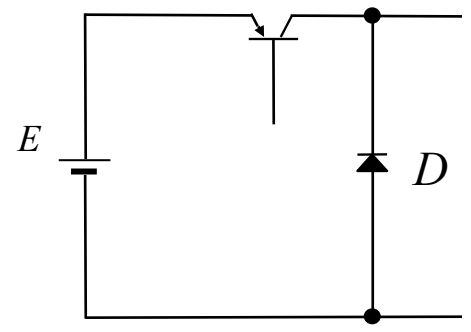
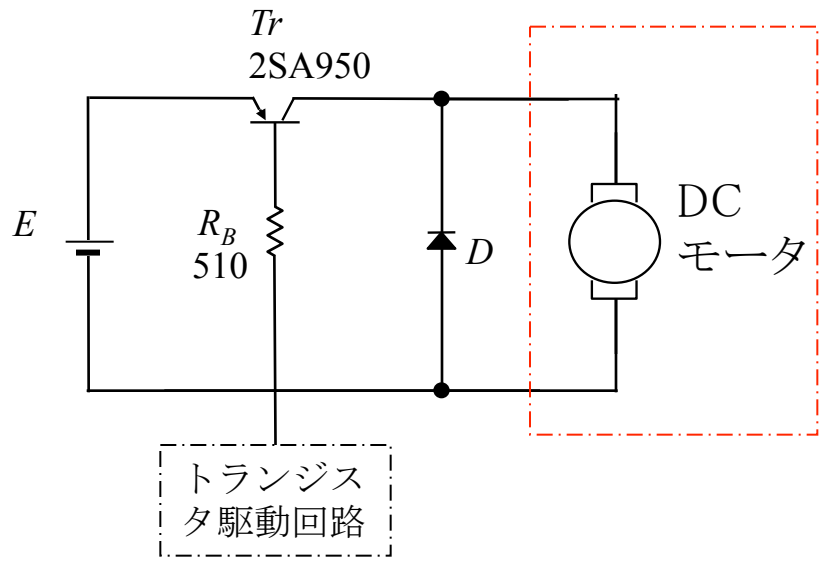


図7.13 降圧チョッパ+DCモータの等価回路

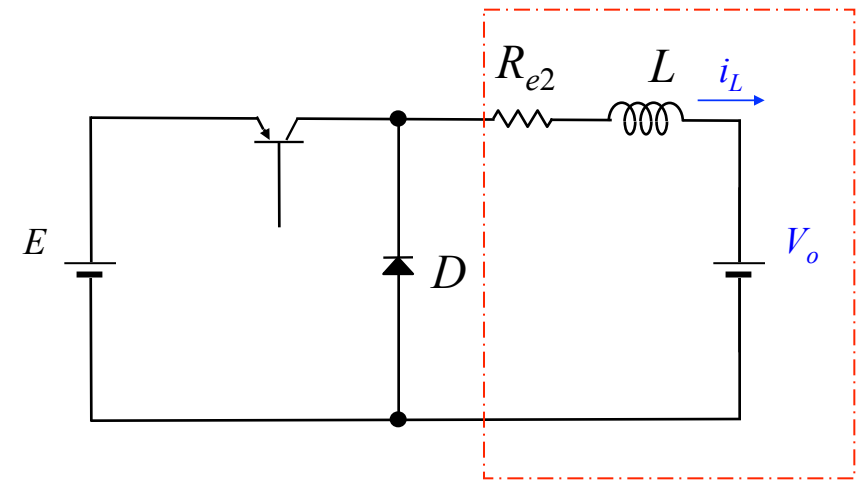
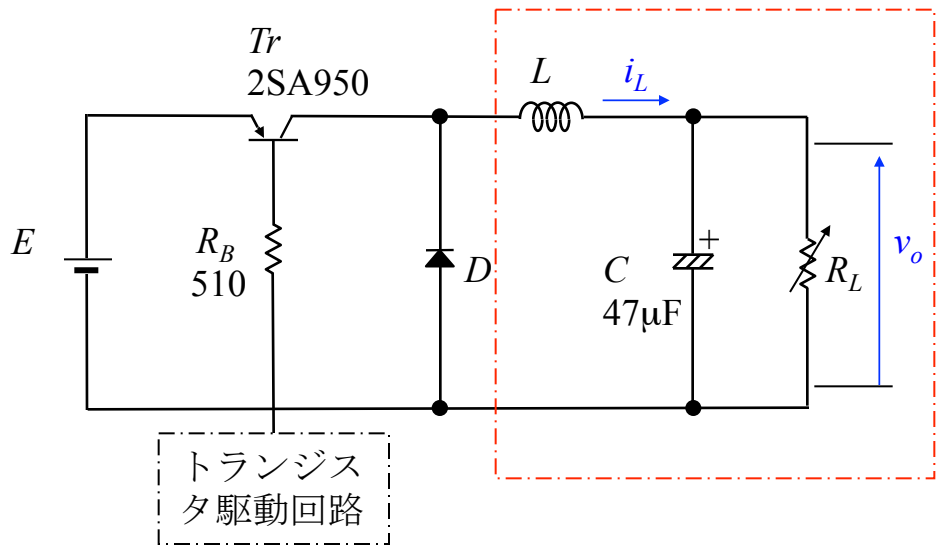


図4.13 降圧チョッパ回路の等価回路

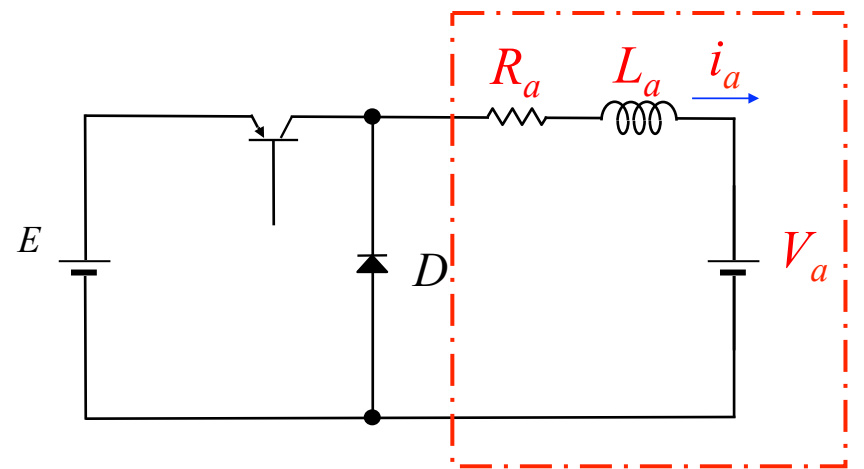
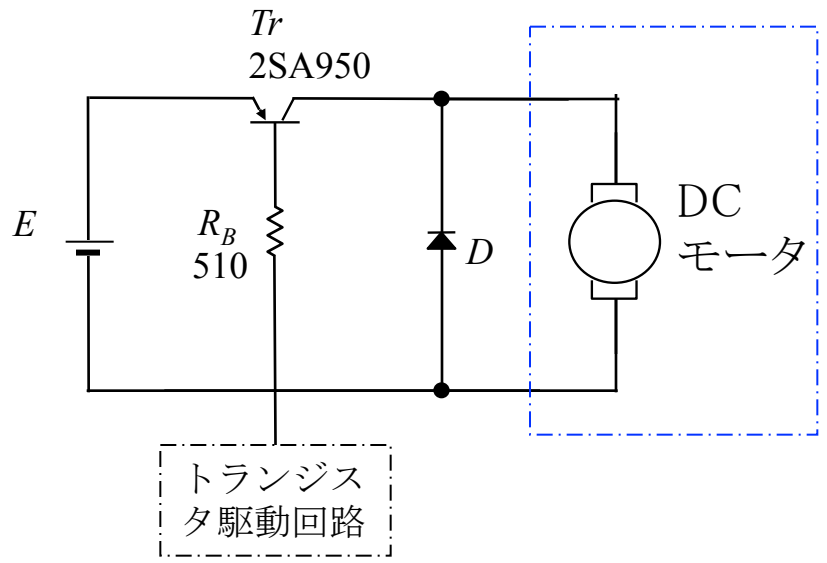


図7.13 降圧チョッパ+DCモータの等価回路

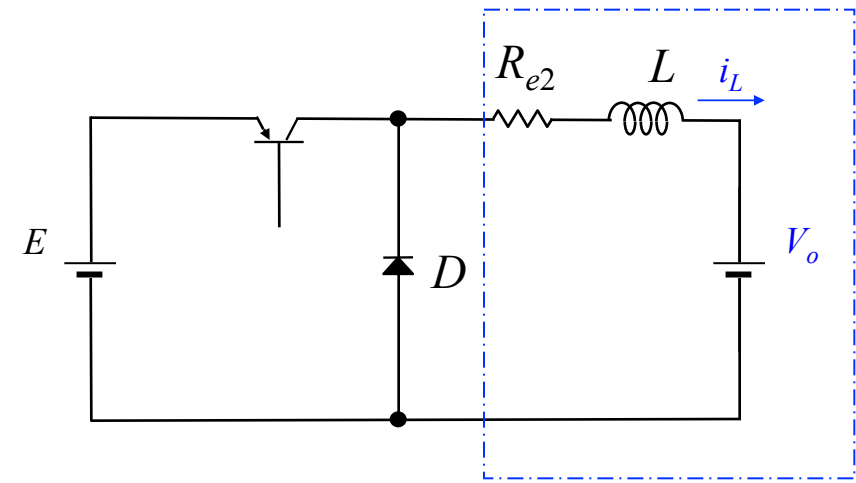
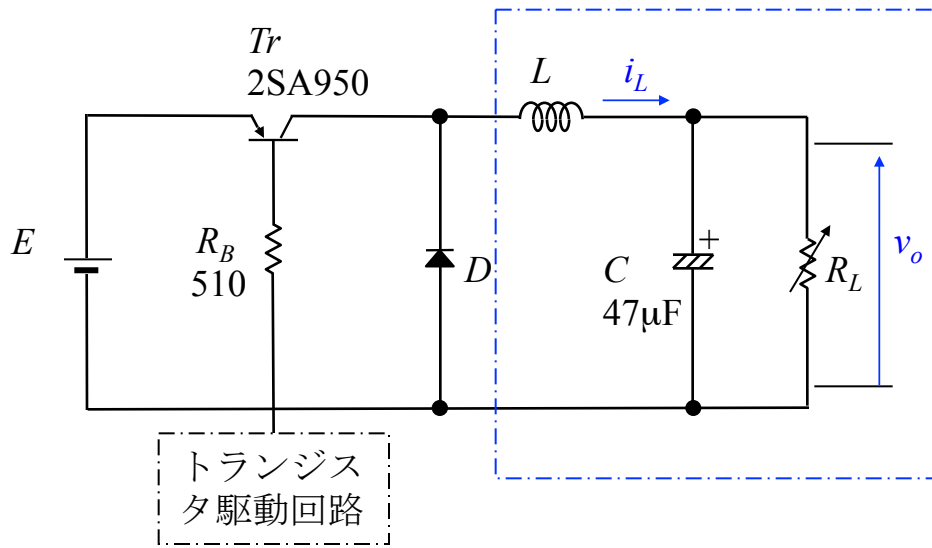
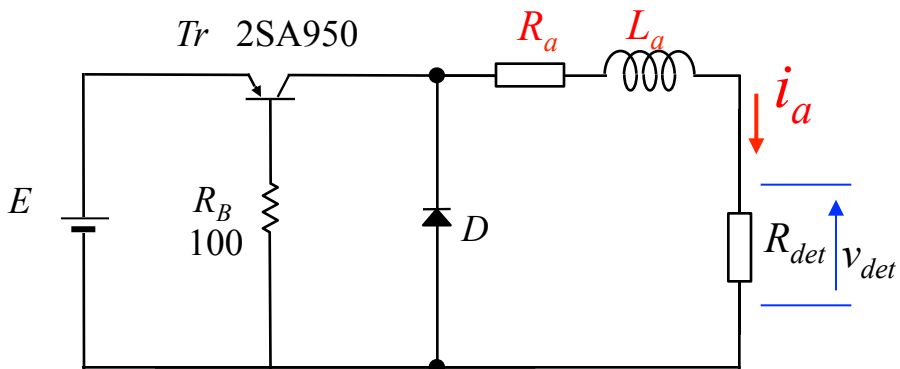


図4.13 降圧チョッパ回路の等価回路

DCモータの電気回路の時定数の例

マブチモータ



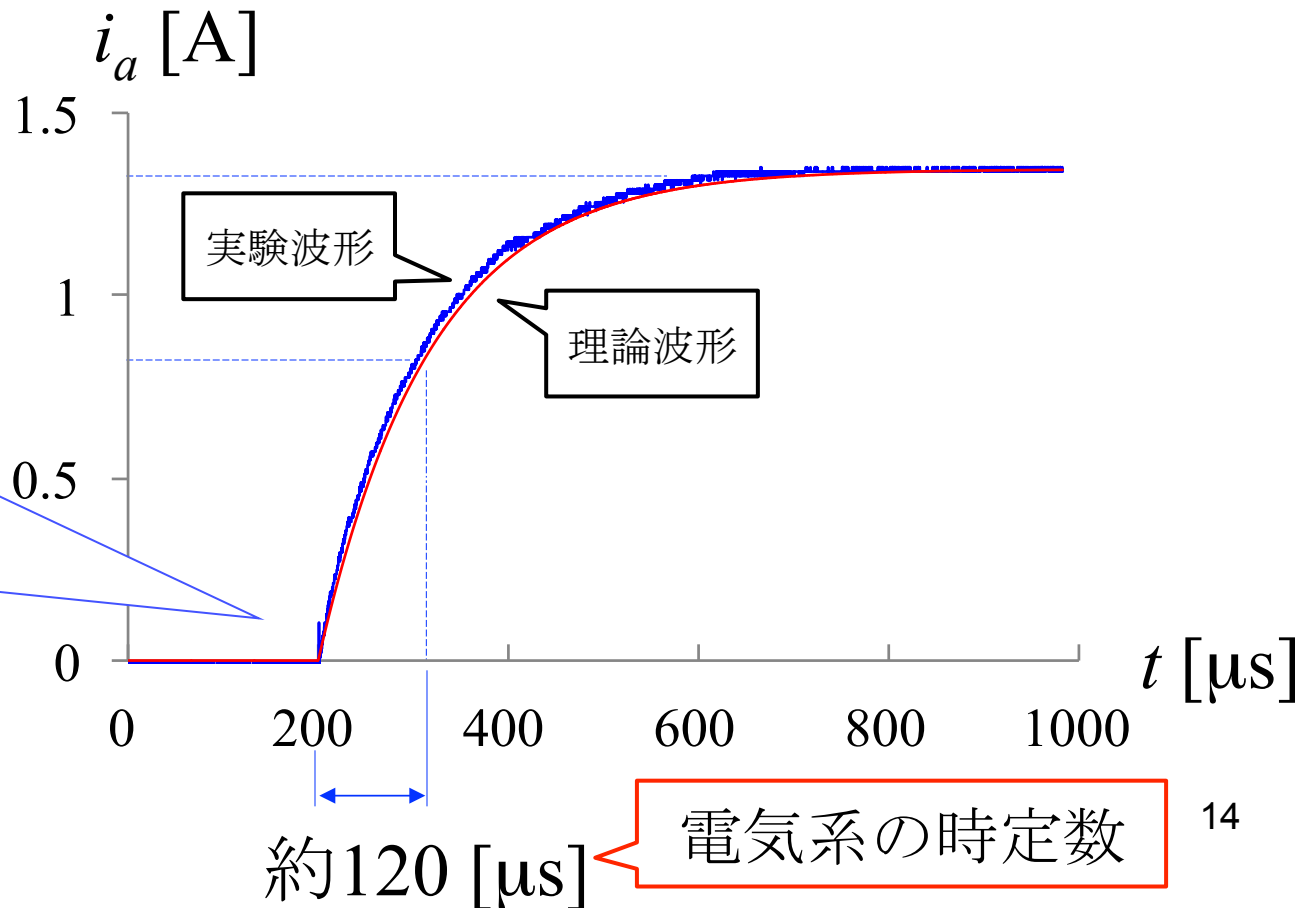
電気系抵抗: $R_a = 1.25 \text{ } [\Omega]$

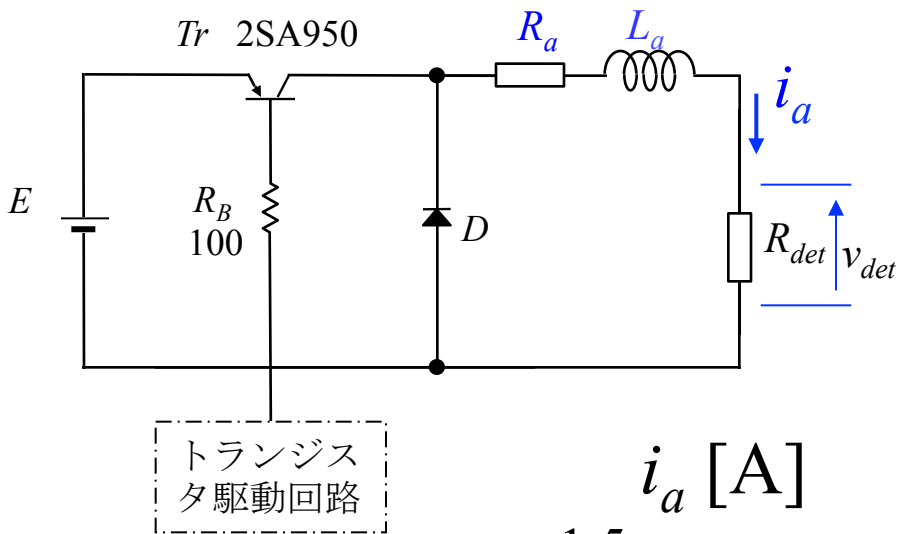
電機系電流検出用抵抗: $R_{det} = 1.2 \text{ } [\Omega]$

$$i_a = I_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right)$$

トランジスタ駆動回路

モータの軸を手でつまんで回転を止めて、 $t = 0.2 \text{ } [\text{ms}]$ の時点にてモータにステップ電圧を印加





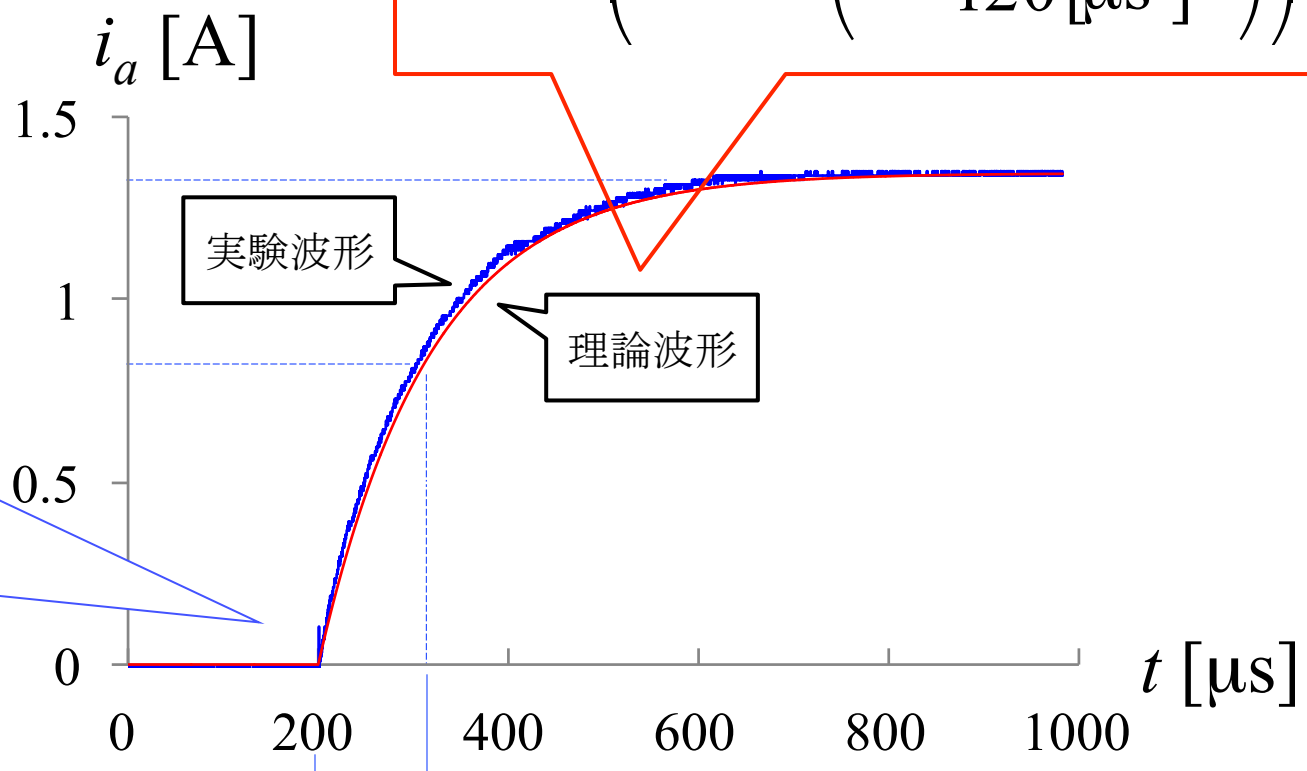
電気子抵抗 : $R_a = 1.25 \text{ } [\Omega]$

電機子電流検出用抵抗 : $R_{det} = 1.2 \text{ } [\Omega]$

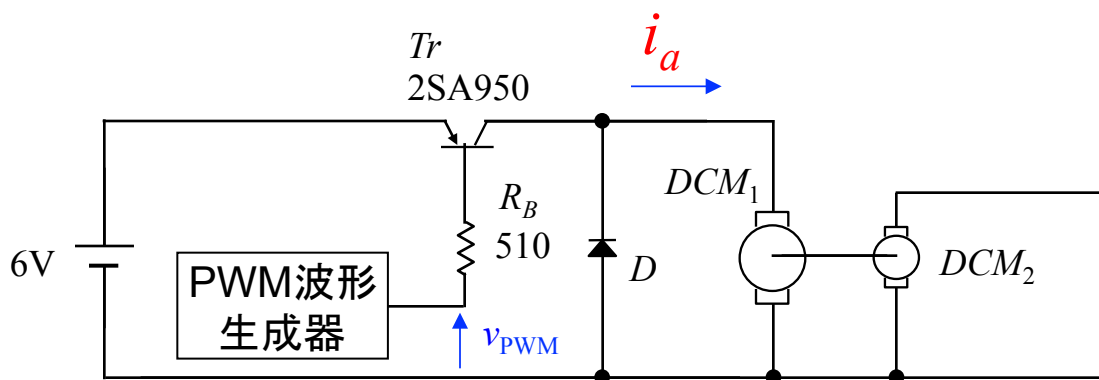
$$i_a = I_0 \left(1 - \exp\left(\frac{t - t_0}{\tau} \right) \right)$$

$$= 1.35 \left(1 - \exp\left(- \frac{t - 200 \text{ } [\mu\text{s}]}{120 \text{ } [\mu\text{s}]} \right) \right)$$

モータの軸を手でつまんで回転を止めて、 $t = 0.2 \text{ } [\text{ms}]$ の時点にてモータにステップ電圧を印加



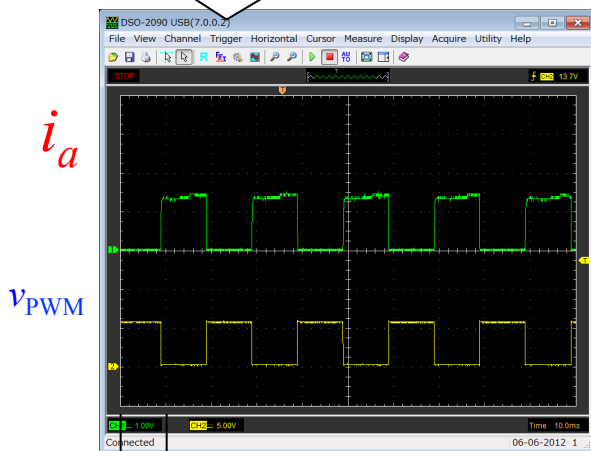
約 $120 \text{ } [\mu\text{s}]$ 電気系の時定数



モータの回転は安定していても、電機子電流は断続的

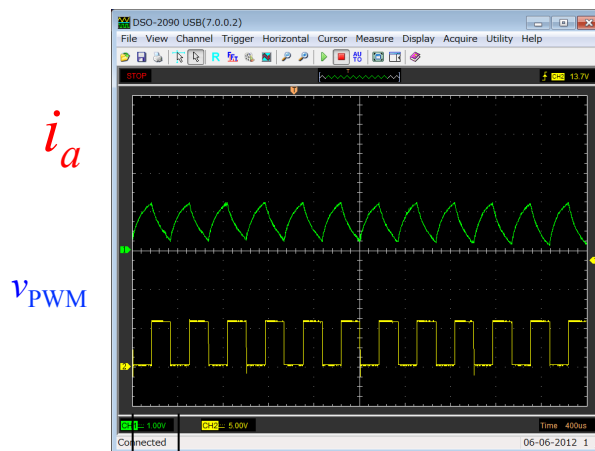
電機子電流は連続的であるが波打っている。

電機子電流は連続的で波打ちも小さい。

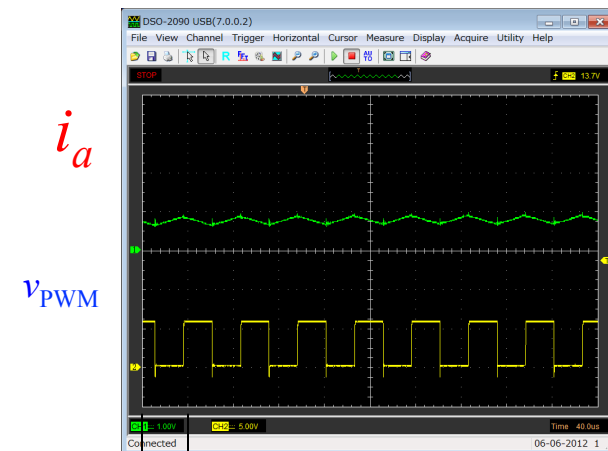


Hantek DSO-2090
USB デジタルオシロスコープ

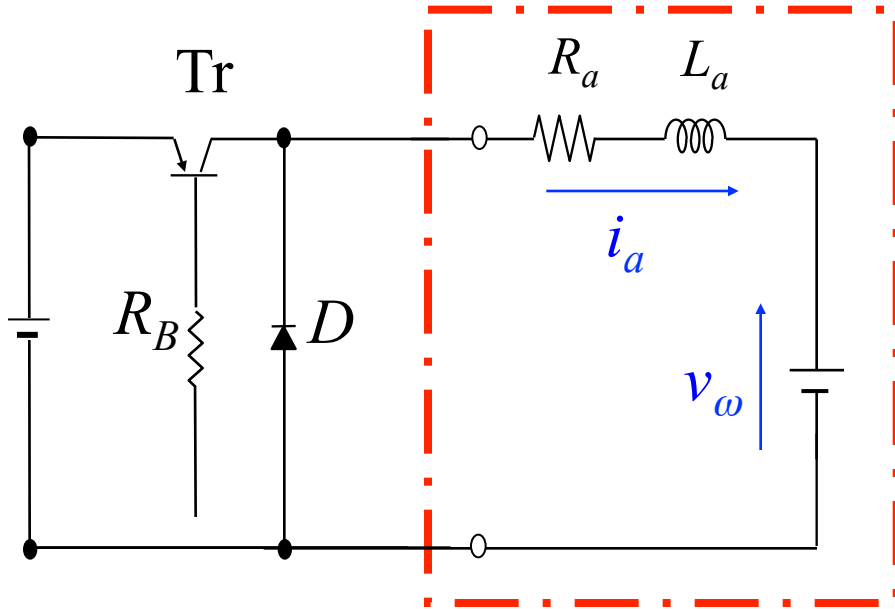
10 [msec]
 $f_{sw} = 50$ [Hz]
(20[ms] >> 120[μs])



0.4 [msec]
 $f_{sw} = 3$ [kHz]
(333[μs] > 120[μs])



40 [μsec]
 $f_{sw} = 20$ [kHz]
(50[μs] < 120[μs])

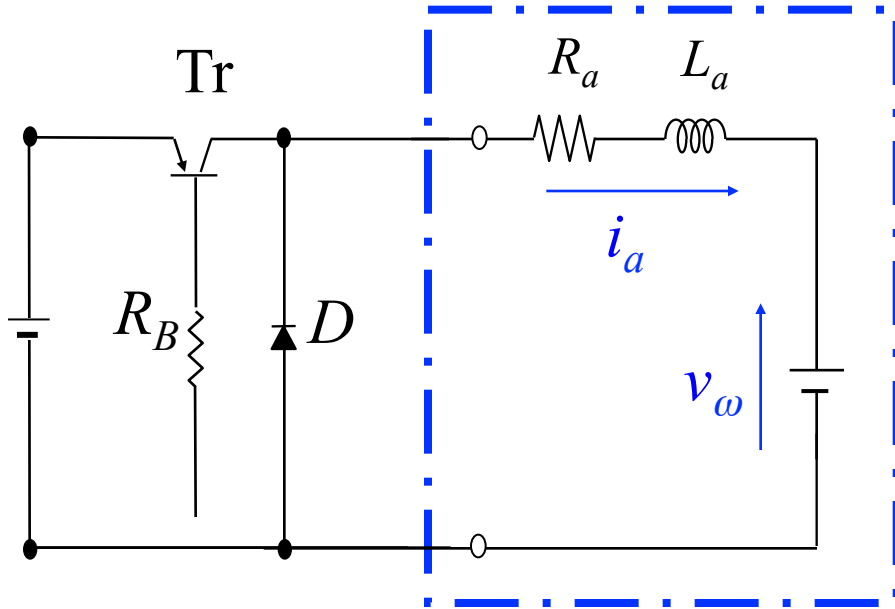


Trのスイッチング周期 T_{sw}
 電気系の時定数 $\tau = L_a / R_a$

$$L_a = 0.3 \text{ [mH]}$$

$$R_a = 1.3 \text{ [\Omega]}$$

$$\tau = R_a / L_a = 0.23 \text{ [ms]}$$



Trのスイッチング周期 T_{sw}
 電気系の時定数 $\tau = L_a / R_a$

$$T_{sw} \ll \tau$$

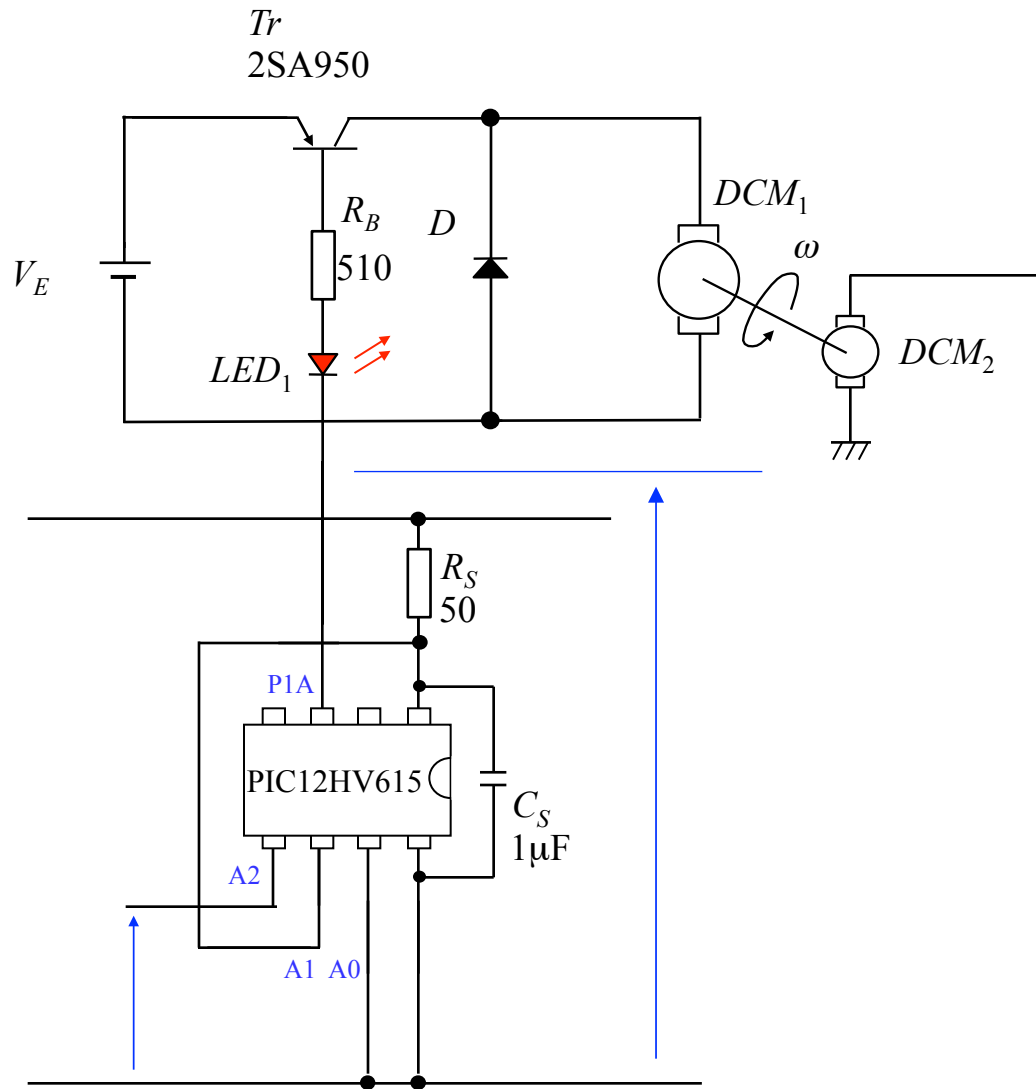
$$L_a = 0.3 \text{ [mH]}$$

$$R_a = 1.3 \text{ [\Omega]}$$

$$\tau = R_a / L_a = 0.23 \text{ [ms]}$$

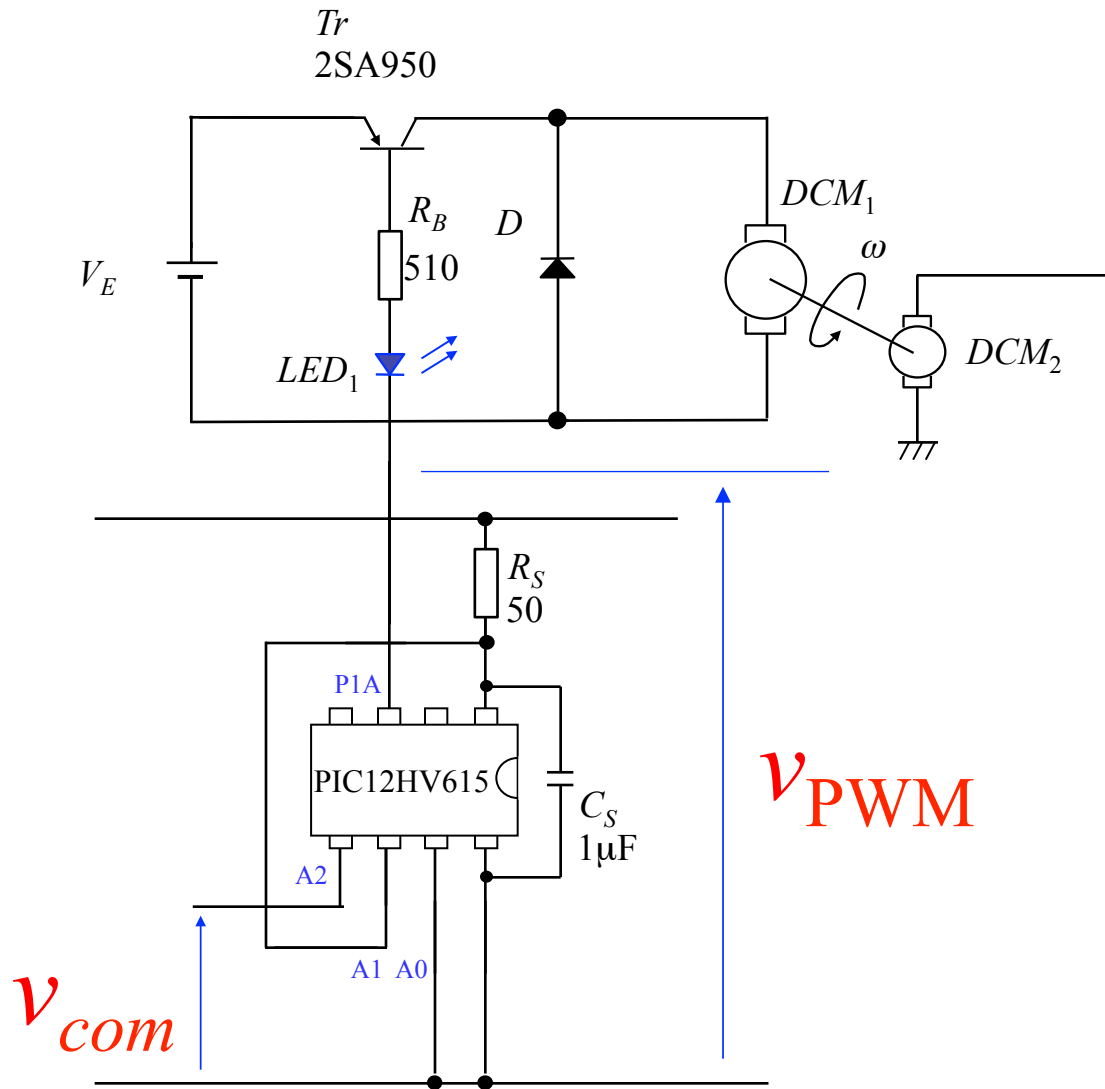
$$T_{sw} = 0.08 \text{ [ms]}$$

$$\rightarrow f_{sw} = 12.5 \text{ [kHz]}$$



A1 A0 = 10: モータドライブモード
P1A = 12.5kHzPWM出力

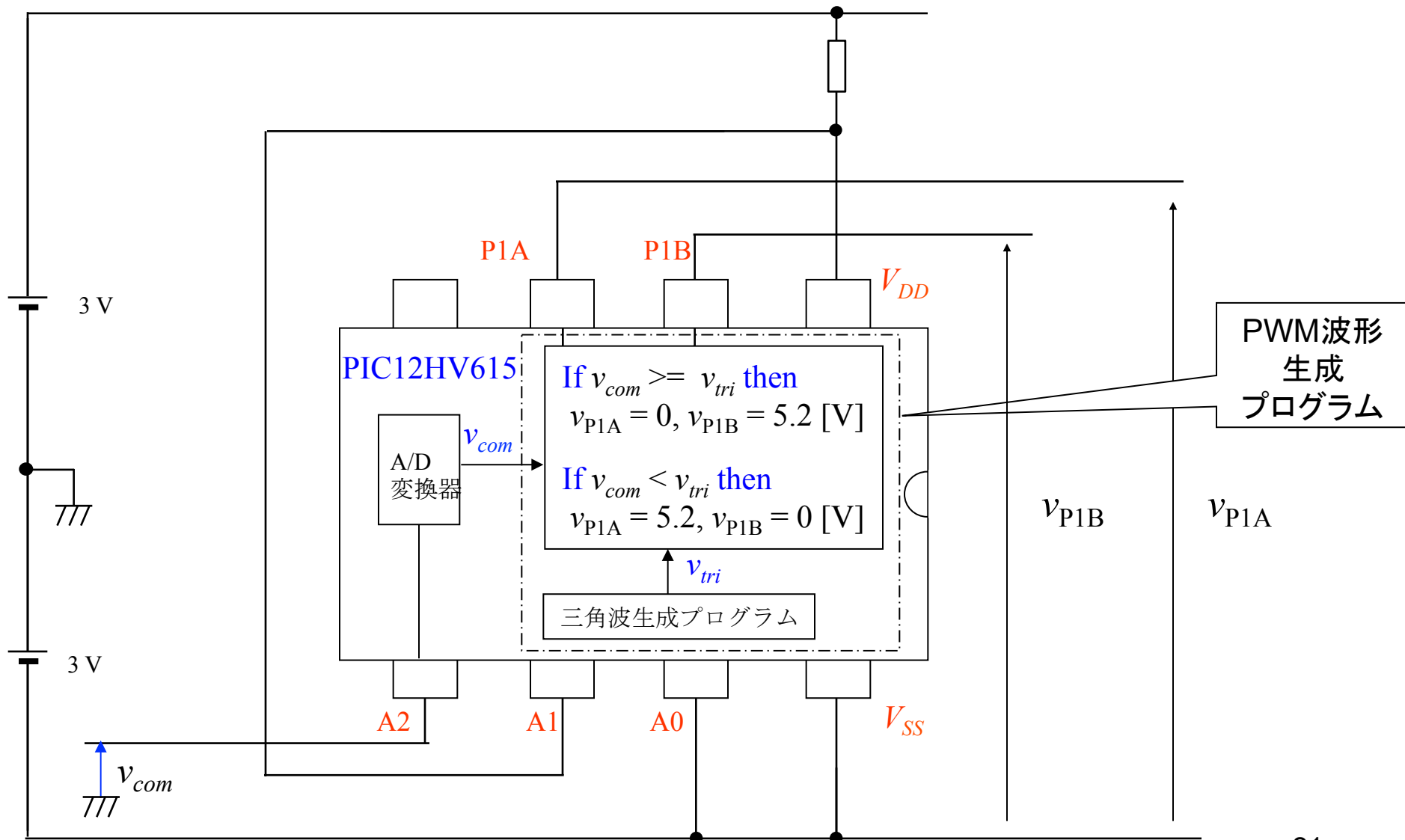
降圧チョッパ回路によるDCモータ駆動



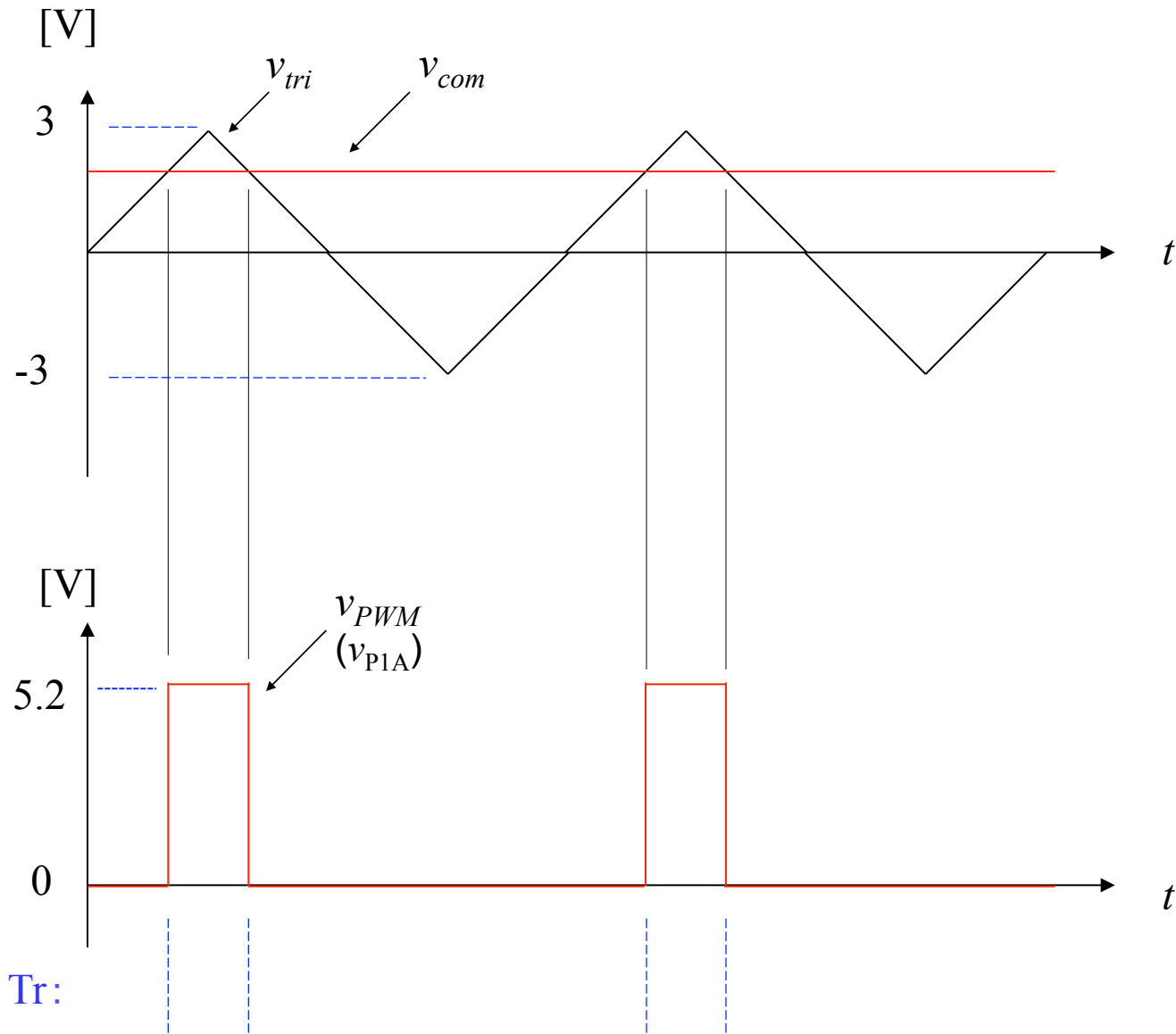
A1 A0 = 10: モータドライブモード
 P1A = 12.5kHzPWM出力

降圧チョッパ回路によるDCモータ駆動

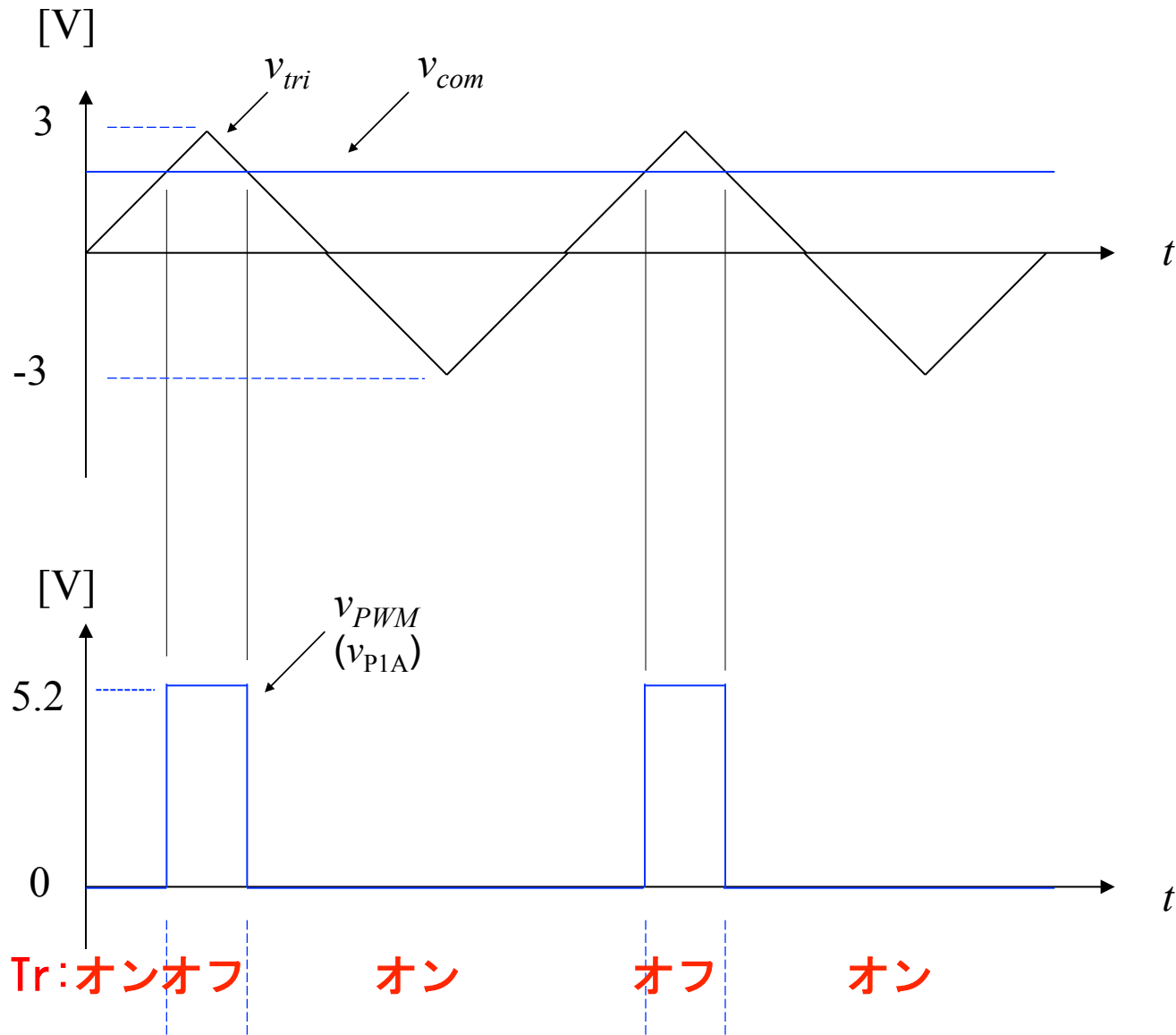
参考 (マイコンの中身) (図は A1 A0 = 10 : モータドライブモード, $f_{\text{PWM}} = 12.5\text{kHz}$)



マイコンがやっていること



マイコンがやっていること



P制御回路

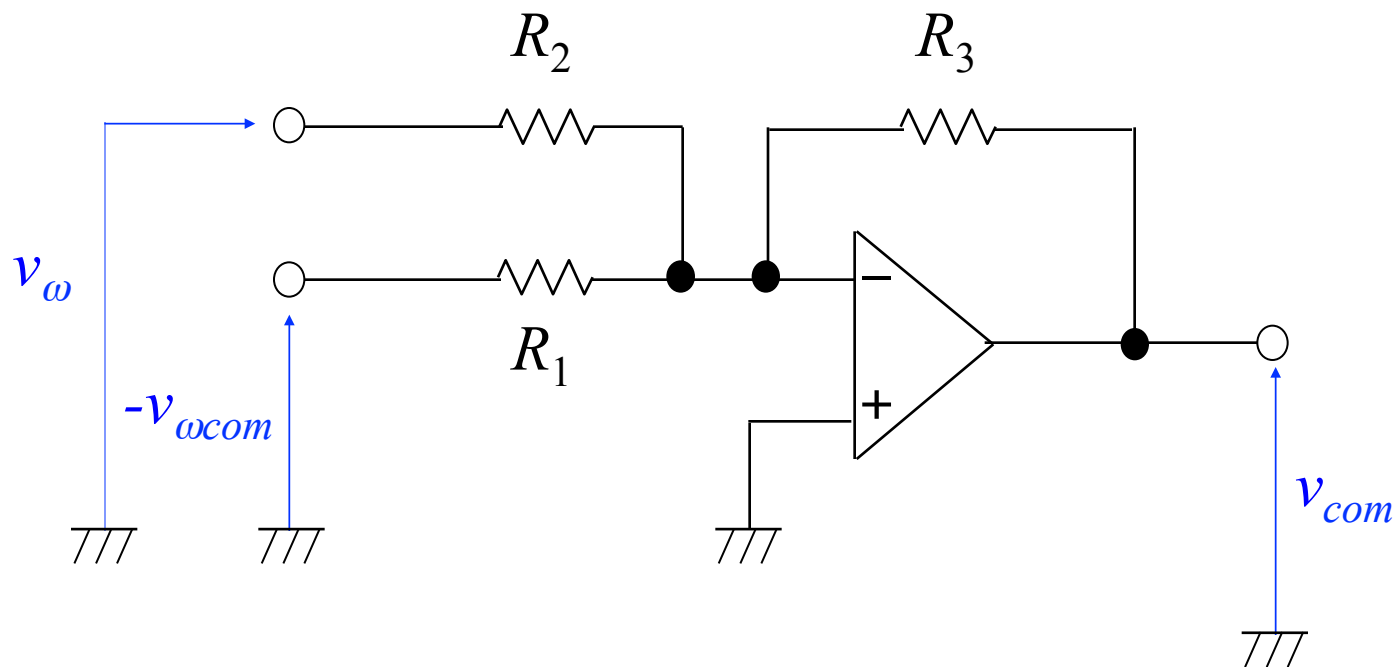


図7.10 オペアンプによるP制御回路

P制御回路

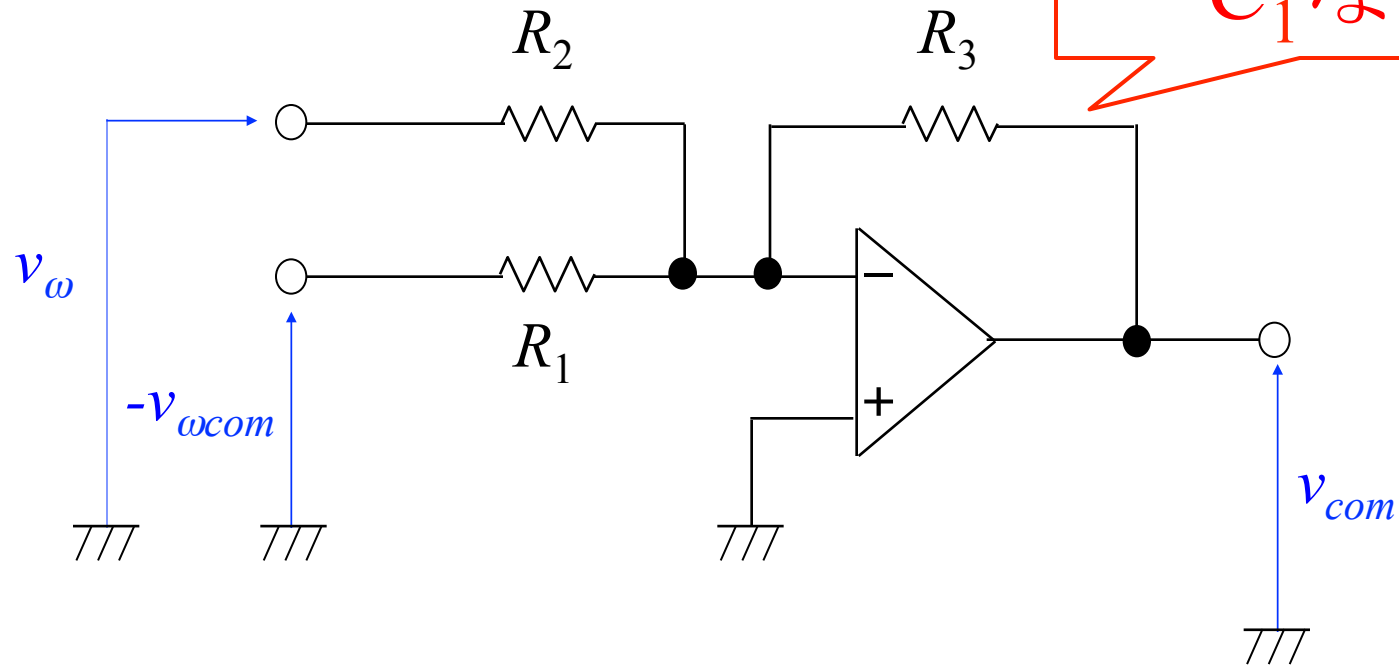


図7.10 オペアンプによるP制御回路

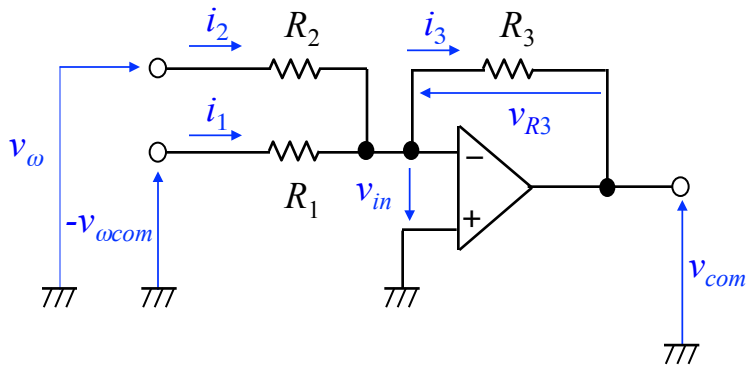


図7.10 オペアンプによるP制御回路

$$v_{in} = 0 \text{より} \quad i_1 = \quad , \quad i_2 =$$

$$R_{in} = \infty \text{より} \quad i_3 =$$

$$v_{R3} = R_3 i_3, \quad v_{com} = -v_{in} - v_{R3} \text{より}$$

$$v_{com} =$$

$$R_1 = R_2 \text{とすると}$$

$$v_{com} =$$

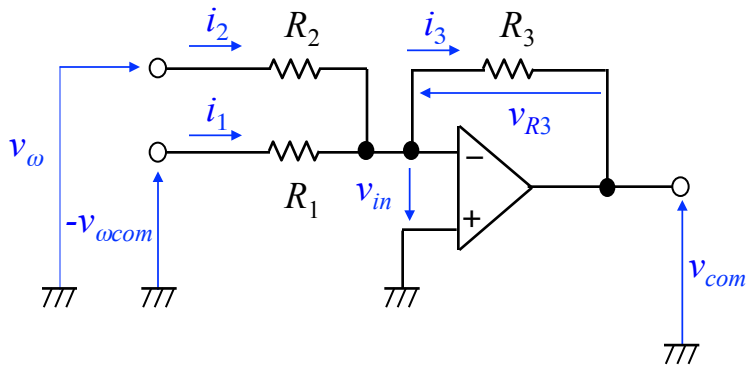


図7.10 オペアンプによるP制御回路

$$v_{in} = 0 \text{より} \quad i_1 = \frac{-v_{\omega com}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_{\omega}}{R_2}$$

$$R_{in} = \infty \text{より} \quad i_3 = i_1 + i_2$$

$$v_{R3} = R_3 i_3, \quad v_{com} = -v_{in} - v_{R3} \text{より}$$

$$v_{com} = \frac{R_3}{R_1} v_{\omega com} - \frac{R_3}{R_2} v_{\omega}$$

$R_1 = R_2$ とすると

$$v_{com} = \frac{R_3}{R_1} (v_{\omega com} - v_{\omega}) = \underline{K_P} (v_{\omega com} - v_{\omega})$$

比例ゲイン

PI制御回路

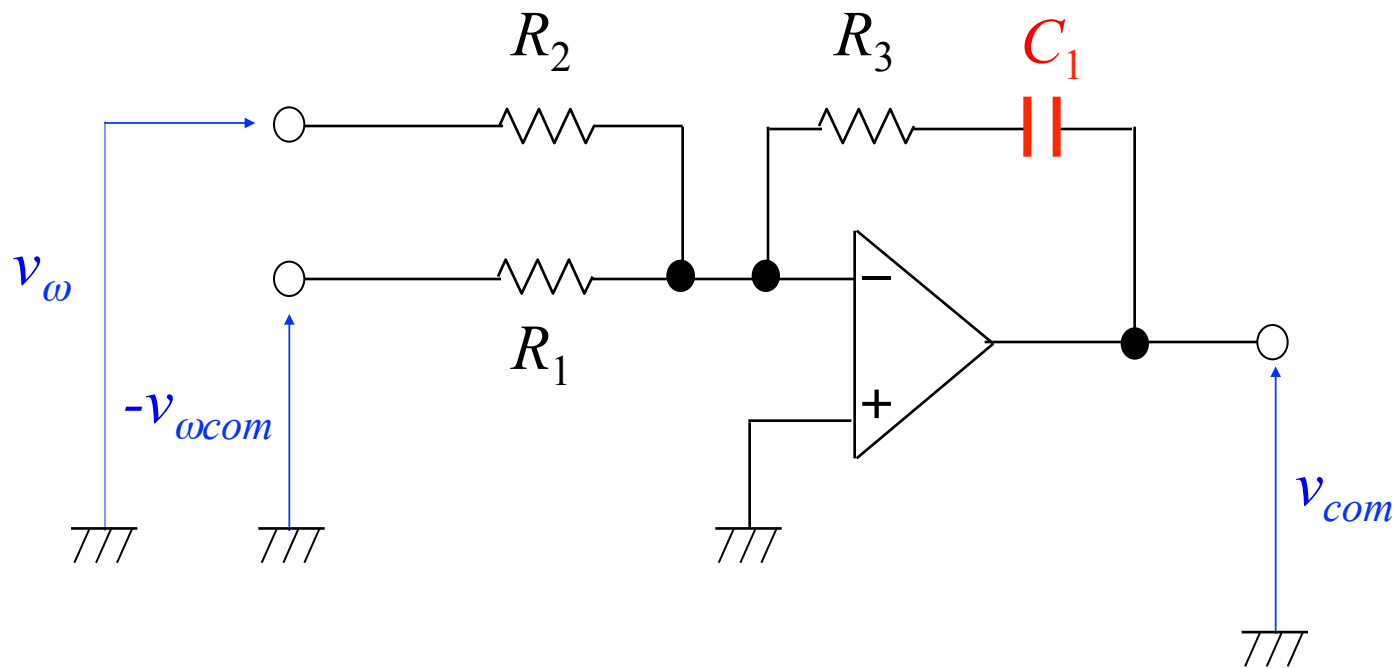
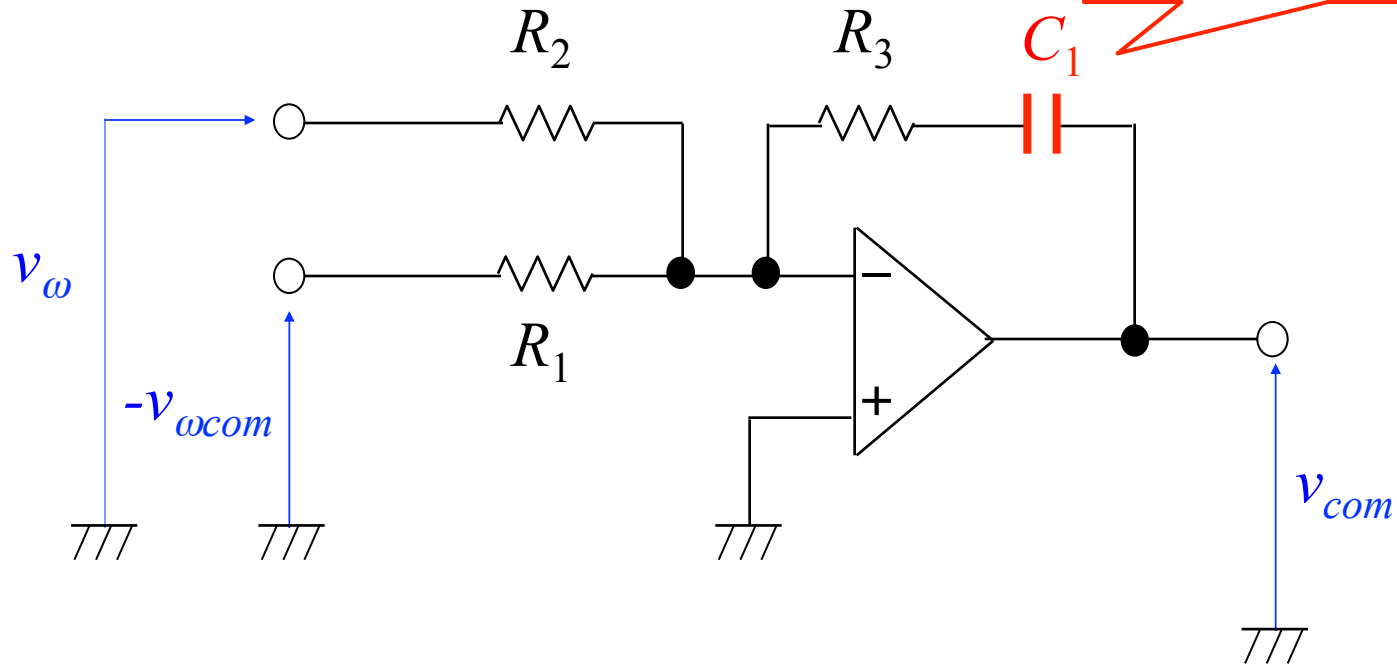


図7.19 オペアンプによるPI制御回路

PI制御回路



コンデンサ
 C_1 あり

図7.19 オペアンプによるPI制御回路

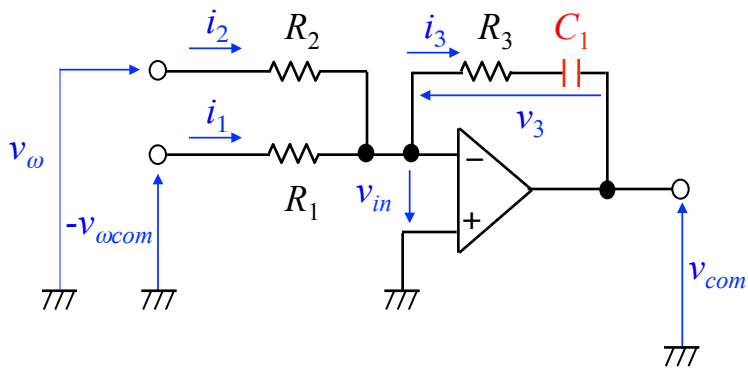


図7.10 オペアンプによるPI制御回路

$$v_{in} = 0 \text{ より } i_1 = \frac{-v_{\omega com}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_{\omega}}{R_2}$$

$$R_{in} = \infty \text{ より } i_3 = i_1 + i_2$$

$$v_3 =$$

$$v_{com} = -v_{in} - v_3 \text{ であり, また, } R_1 = R_2 \text{ とすると}$$

$$v_{com} = \frac{R_3}{R_1} (v_{\omega com} - v_{\omega}) + \frac{1}{R_1 C_1} \int (v_{\omega com} - v_{\omega}) dt$$

$$(7.32)$$

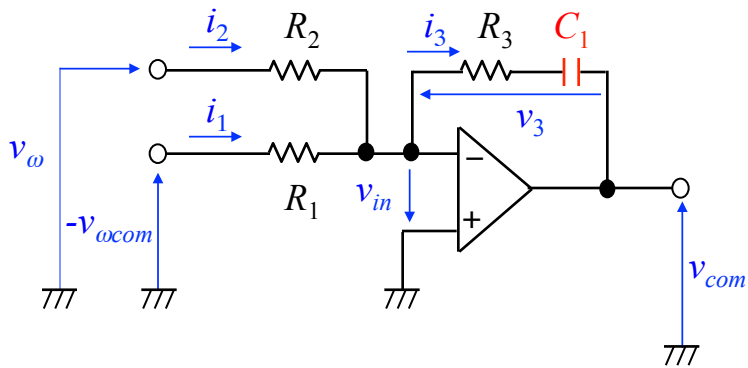


図7.10 オペアンプによるPI制御回路

$$v_{in} = 0 \text{より} \quad i_1 = \frac{-v_{\omega com}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_{\omega}}{R_2}$$

$$R_{in} = \infty \text{より} \quad i_3 = i_1 + i_2$$

$$v_3 = R_3 i_3 + \frac{1}{C_1} \int i_3 dt$$

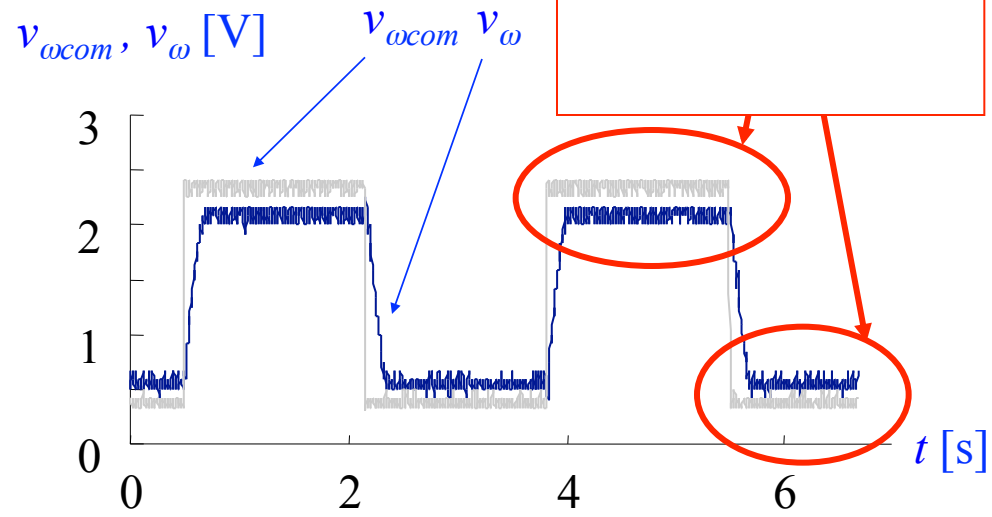
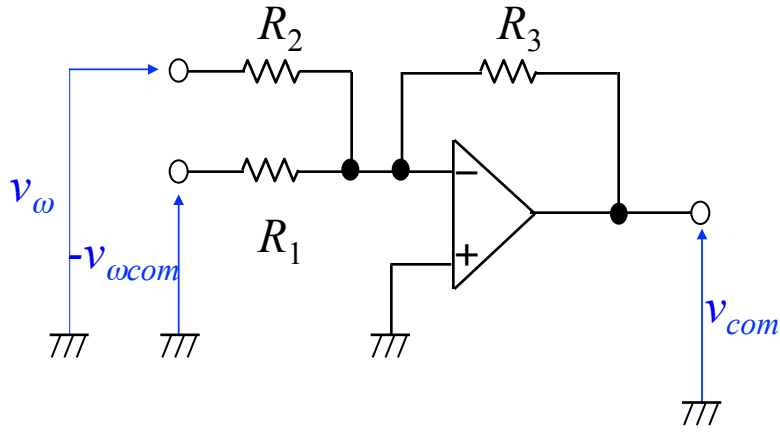
$v_{com} = -v_{in} - v_3$ であり、また、 $R_1 = R_2$ とすると

$$v_{com} = \frac{R_3}{R_1} (v_{\omega com} - v_{\omega}) + \frac{1}{R_1 C_1} \int (v_{\omega com} - v_{\omega}) dt$$

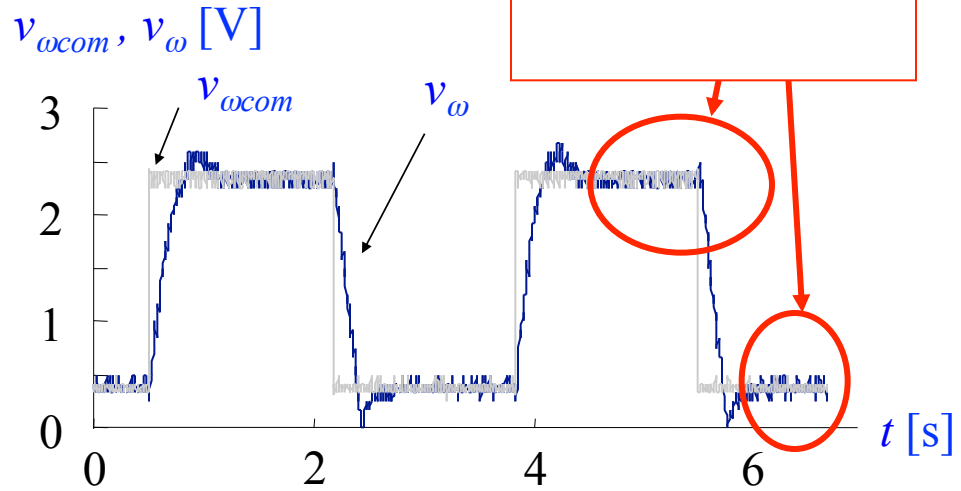
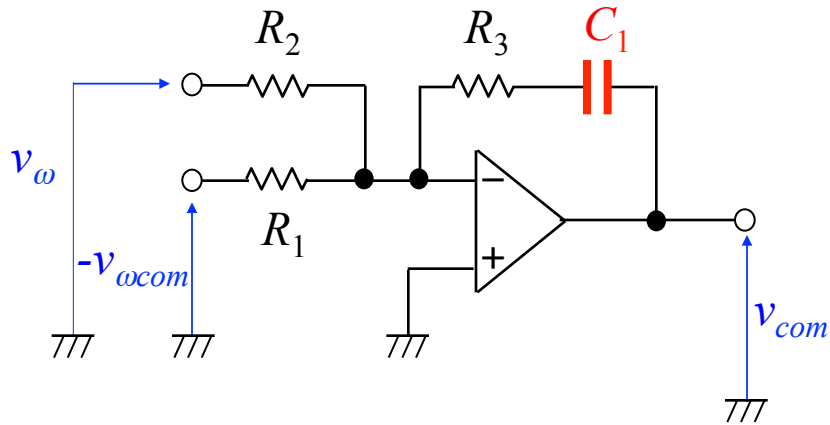
$$= \underline{K_P} (v_{\omega com} - v_{\omega}) + \underline{K_I} \int (v_{\omega com} - v_{\omega}) dt \quad (7.32)$$

比例ゲイン

積分ゲイン

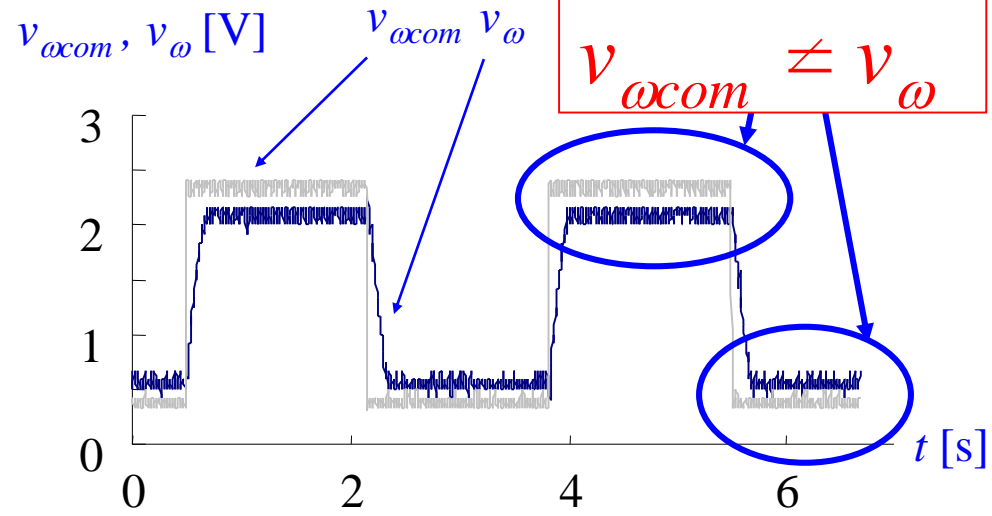
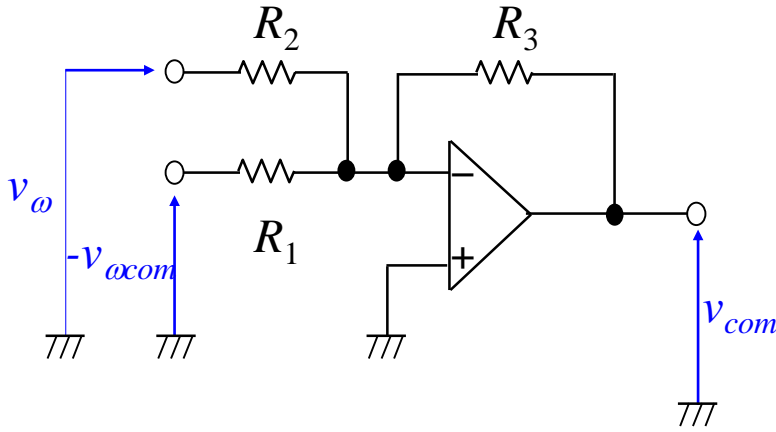


P制御回路

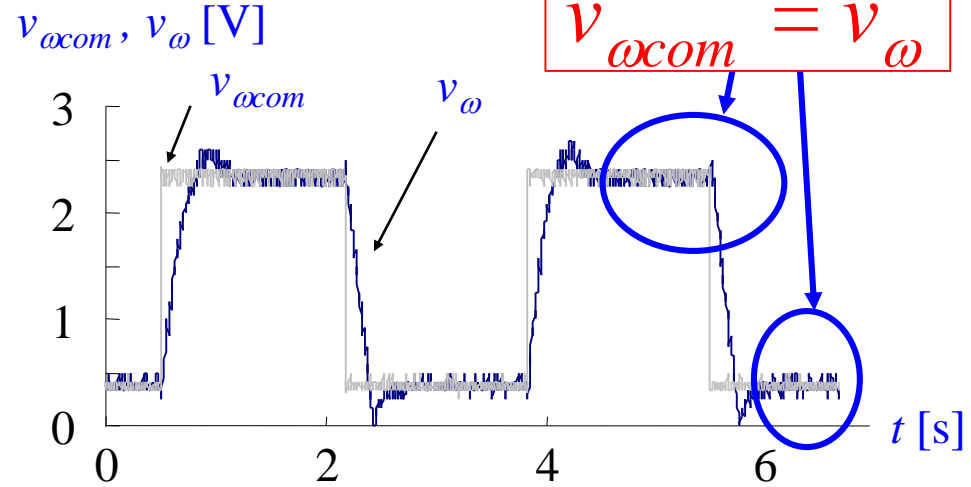
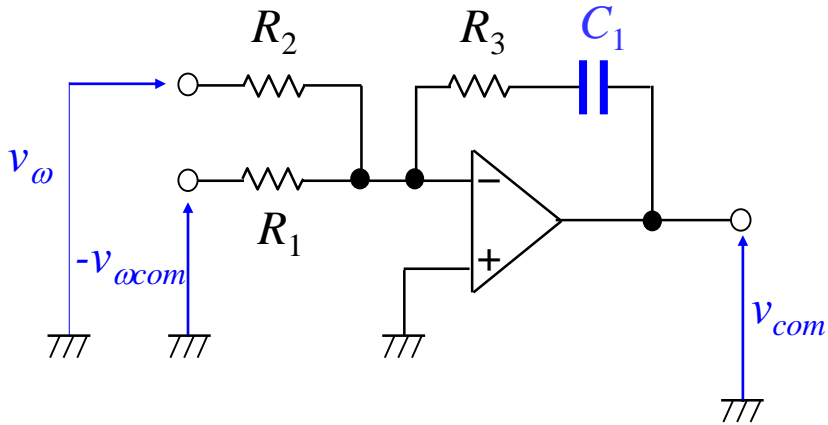


PI制御回路

図7.12 PI制御回路によるDCモータの制御結果



P制御回路



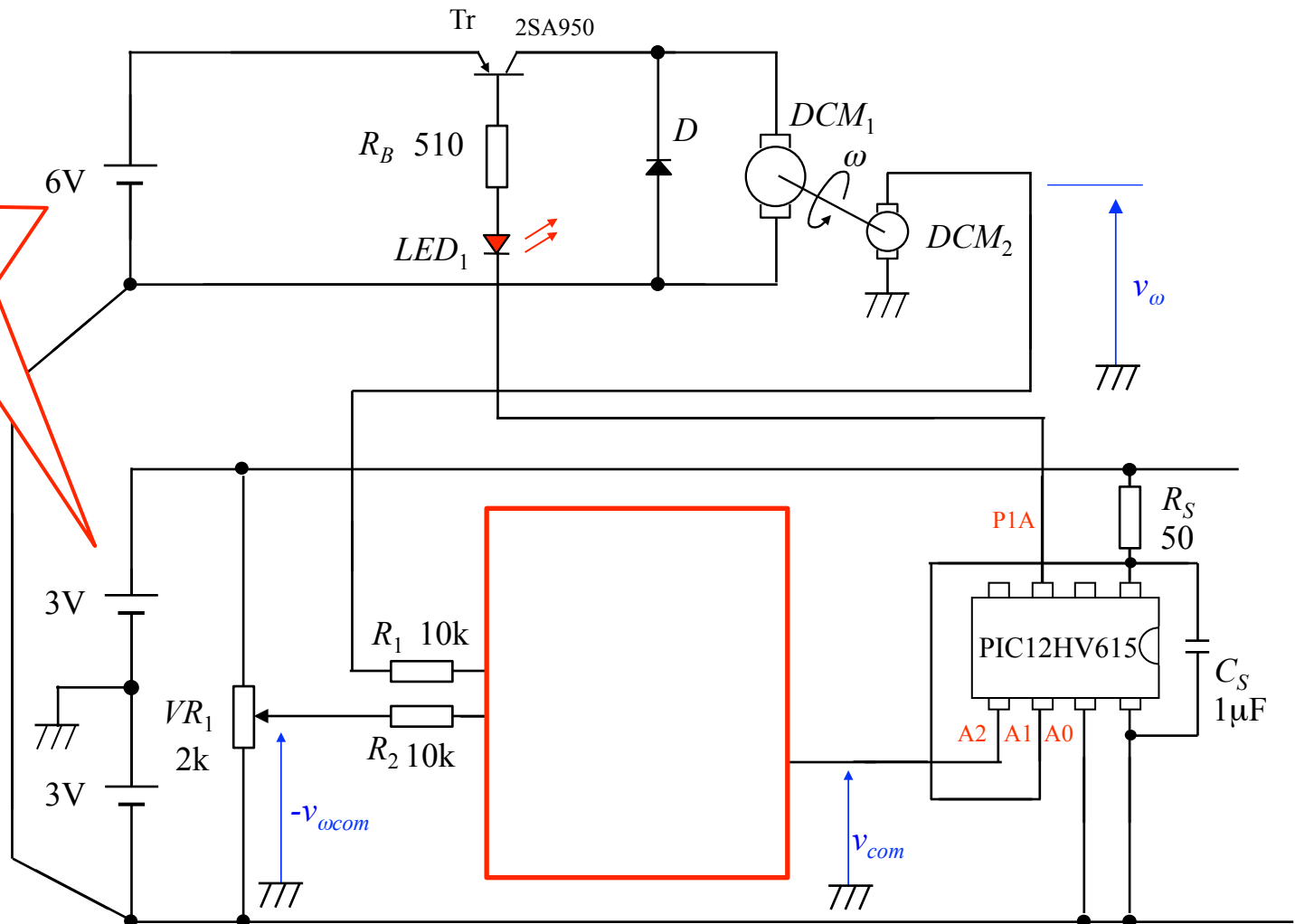
PI制御回路

図7.12 PI制御回路によるDCモータの制御結果

STEP7 製作課題 降圧チョッパ回路によるDCモータの回転数制御

一点鎖線で囲まれた部分にオペアンプによるPI制御回路を設計・製作せよ。ただし、比例ゲイン $K_p = 5$, 積分ゲイン $K_I = 1000$ の回路構成とせよ。また、オペアンプの電源は ± 3 [V]とせよ。

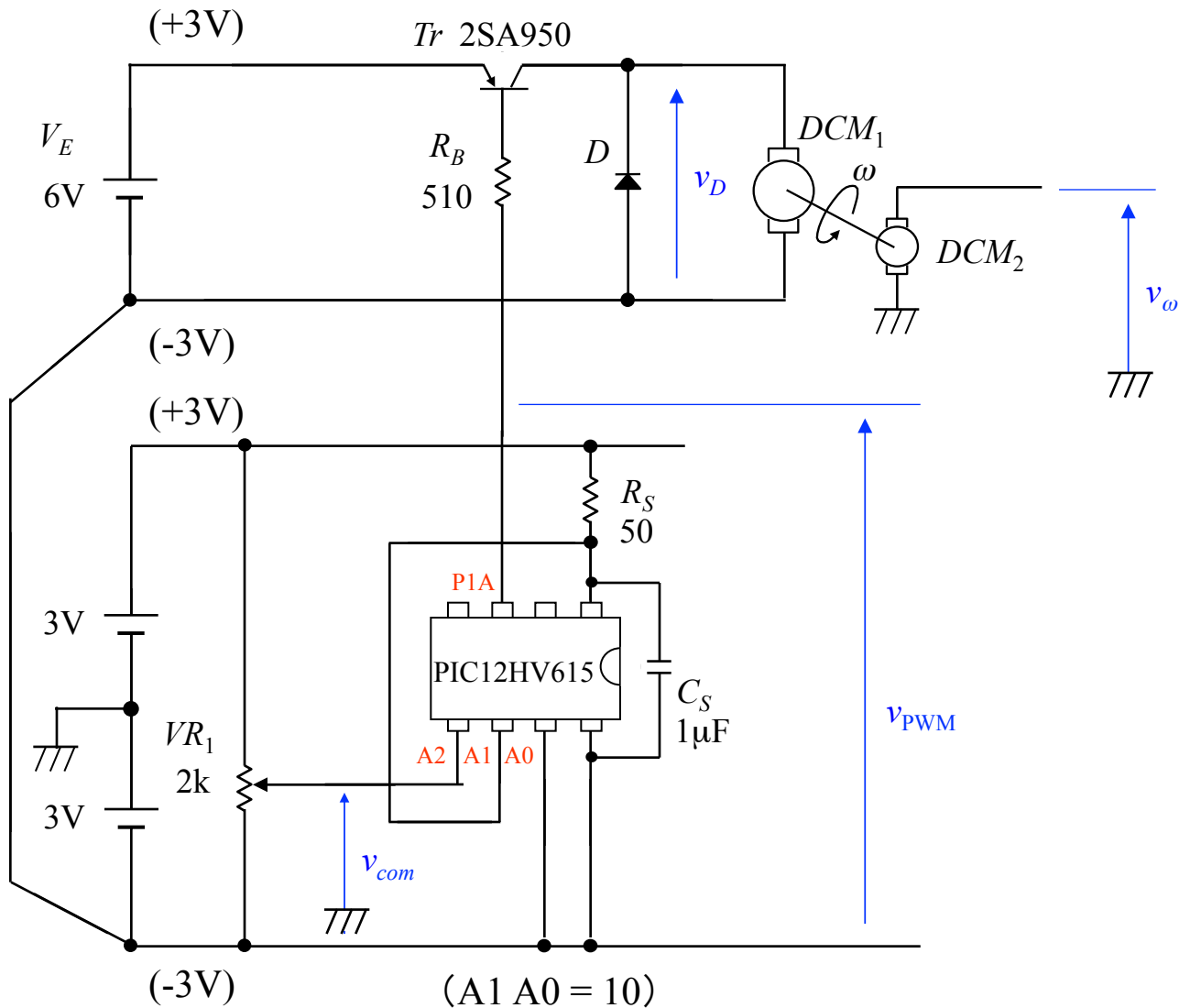
モータ用電源とマイコン用電源を別々にする。マイコンがモータノイズで誤動作しないようにするため。



(A1 A0 = 10)

Step7 レポート課題

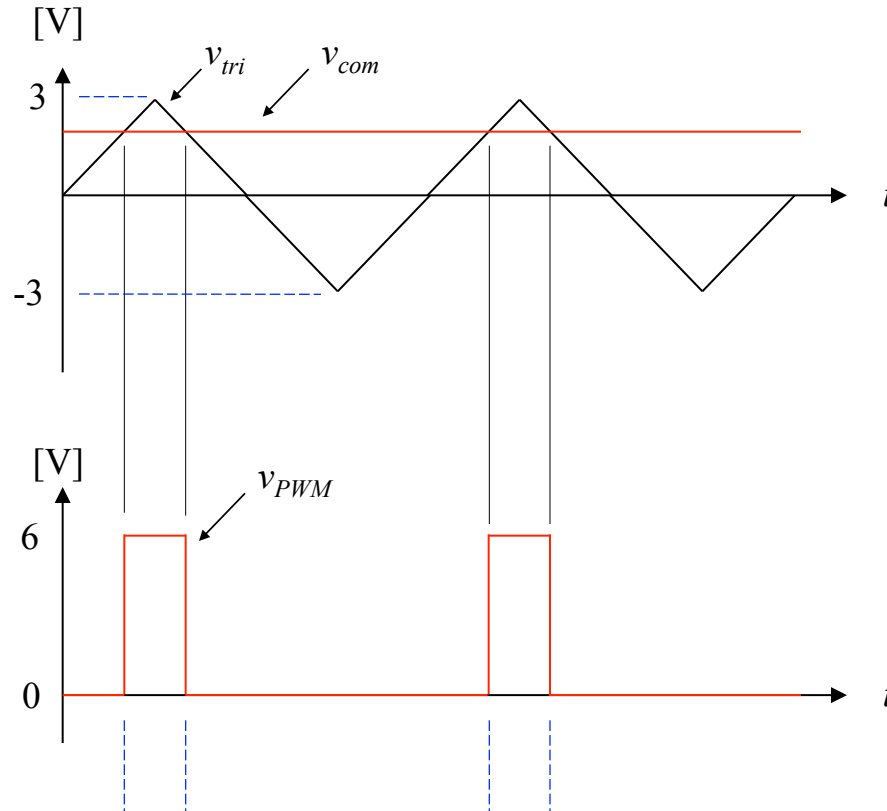
- (1) 下図において、 v_{com} を大きくするとモータの回転数が上昇する理由を、次ページの問いに従って答えよ。



Step7 レポート課題(1) つづき

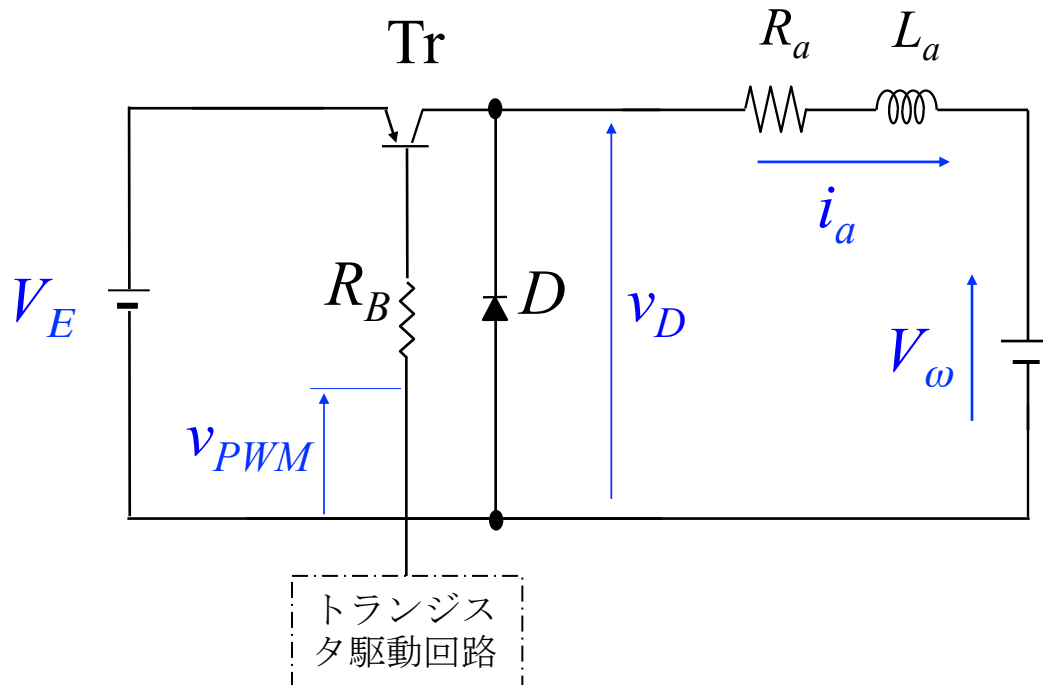
下図はマイコンの中におけるPWM波形生成の仕組みを示す. 三角波 v_{tri} と指令電圧 v_{com} の大小関係によりマイコンの出力電圧 v_{PWM} が図示のように決定されている.

- (a) 電圧指令値 v_{com} と三角波電圧 v_{tri} の大小とトランジスタTrのオン/オフの関係を記せ.
- (b) v_{com} の大小と次の2つの値の大小の関係を記せ.
- 1) ダイオードの両端電圧 v_D の平均値
 - 2) モータの回転数 v_ω



Step7 レポート課題(2)

通流率 $\delta=2/3$ のときの降圧チョッパによるDCモータ駆動回路の指令電圧 v_{com} , トランジスタ駆動電圧 v_{PWM} , ダイオード両端電圧 v_D , 電機子電流 i_a の各波形を求めよ. ただし, 電源電圧 $V_E = 6$ [V], 三角波電圧のピーク値 $V_p = 3$ [V], 電機子抵抗 $R_a = 2$ [Ω], 電機子インダクタンス $L_a = 400$ [μ H], モータの(直流)逆起電力 $V_\omega = 2$ [V], スイッチング周期 $T_{sw} = 50$ [μ s] (スイッチング周波数 $f_{sw} = 20$ [kHz]) とする.



例題4.7 参照