

令和元年度
集積回路設計技術
次世代集積回路工学特論

PLL設計の基礎

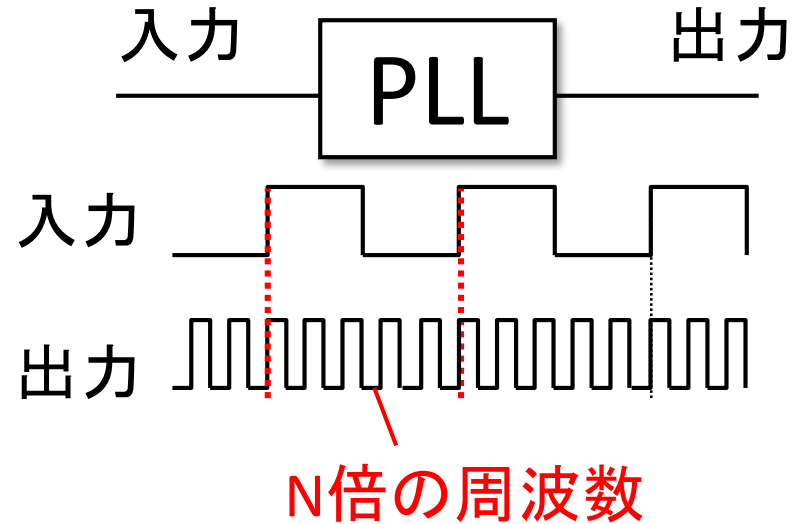
元澤 篤史

(atsushi.motozawa.kx@renesas.com)

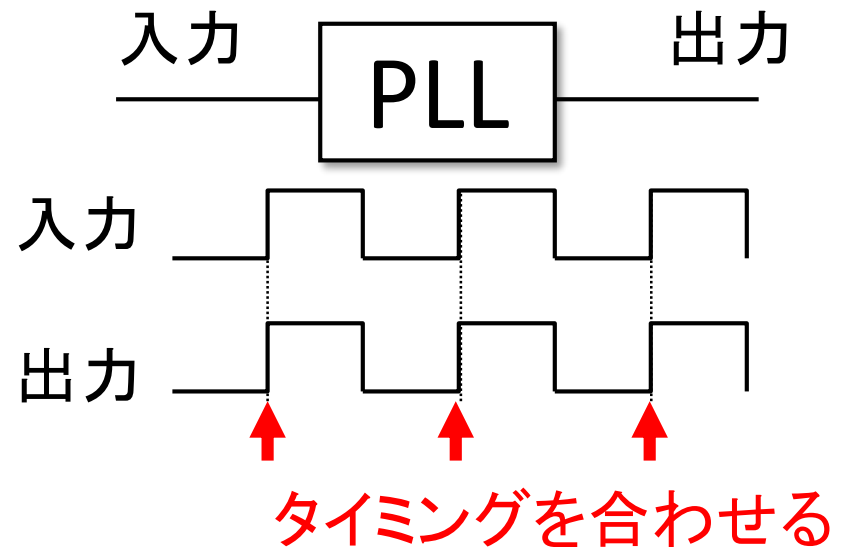
PLL(Phase Locked Loop)とは

■基本機能

入力周波数のN倍の出力周波数を生成する。



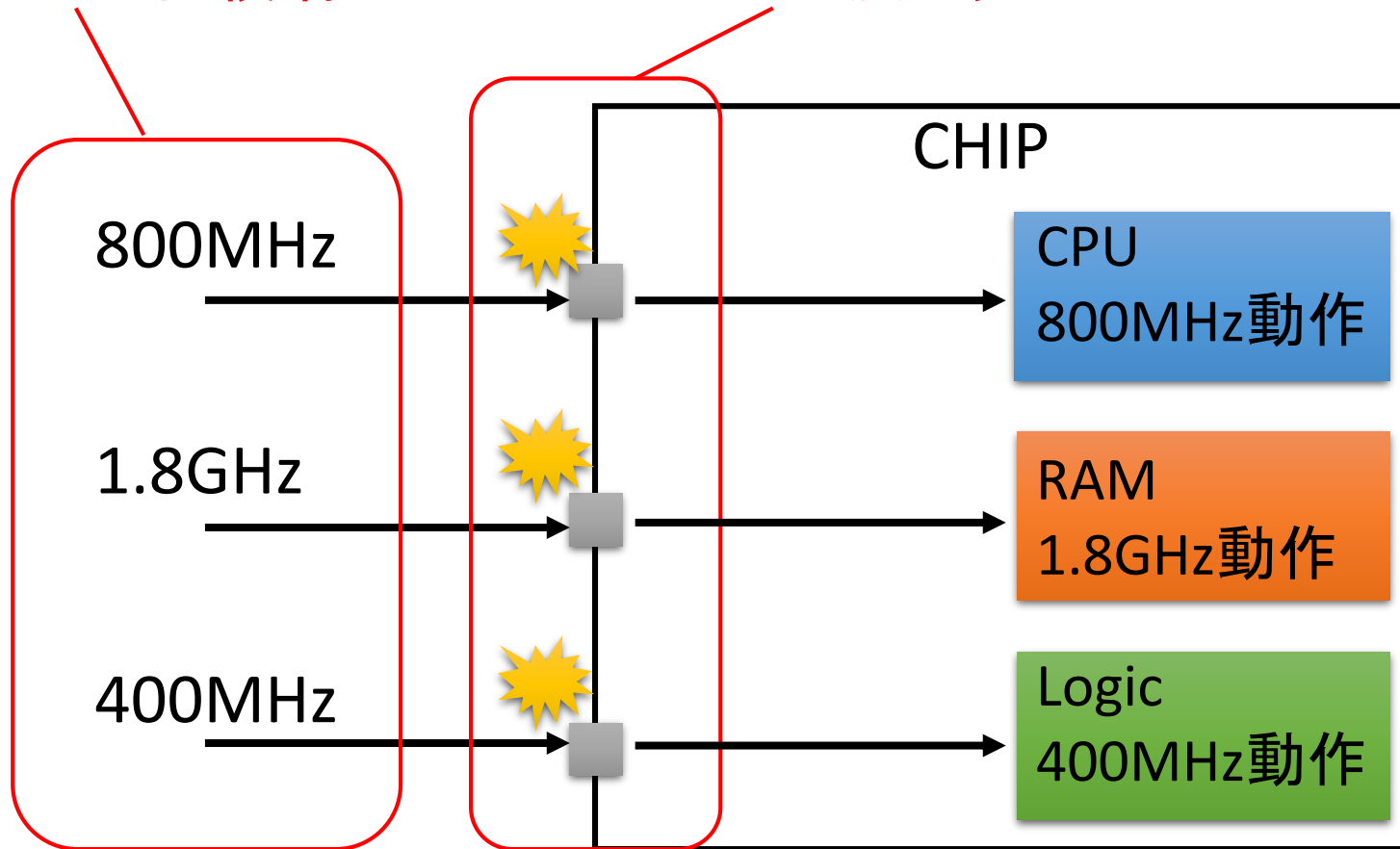
入力クロックと出力クロックの位相を同期させる。



PLLがチップ内にないと。。。

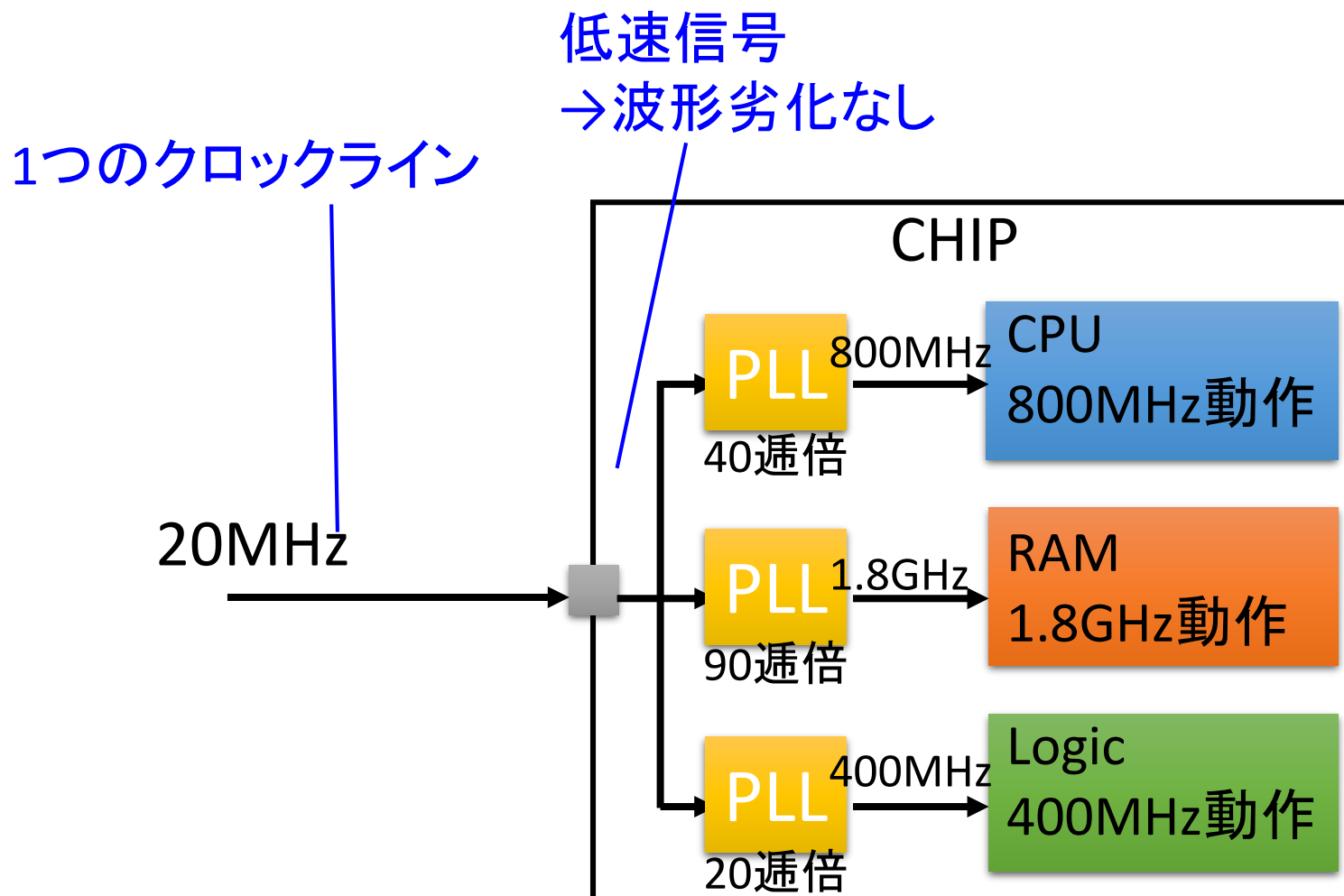
ボード上の複数のクロック
→クロストーク
→ボード面積増

高周波信号
→反射
→波形劣化



PLLの用途

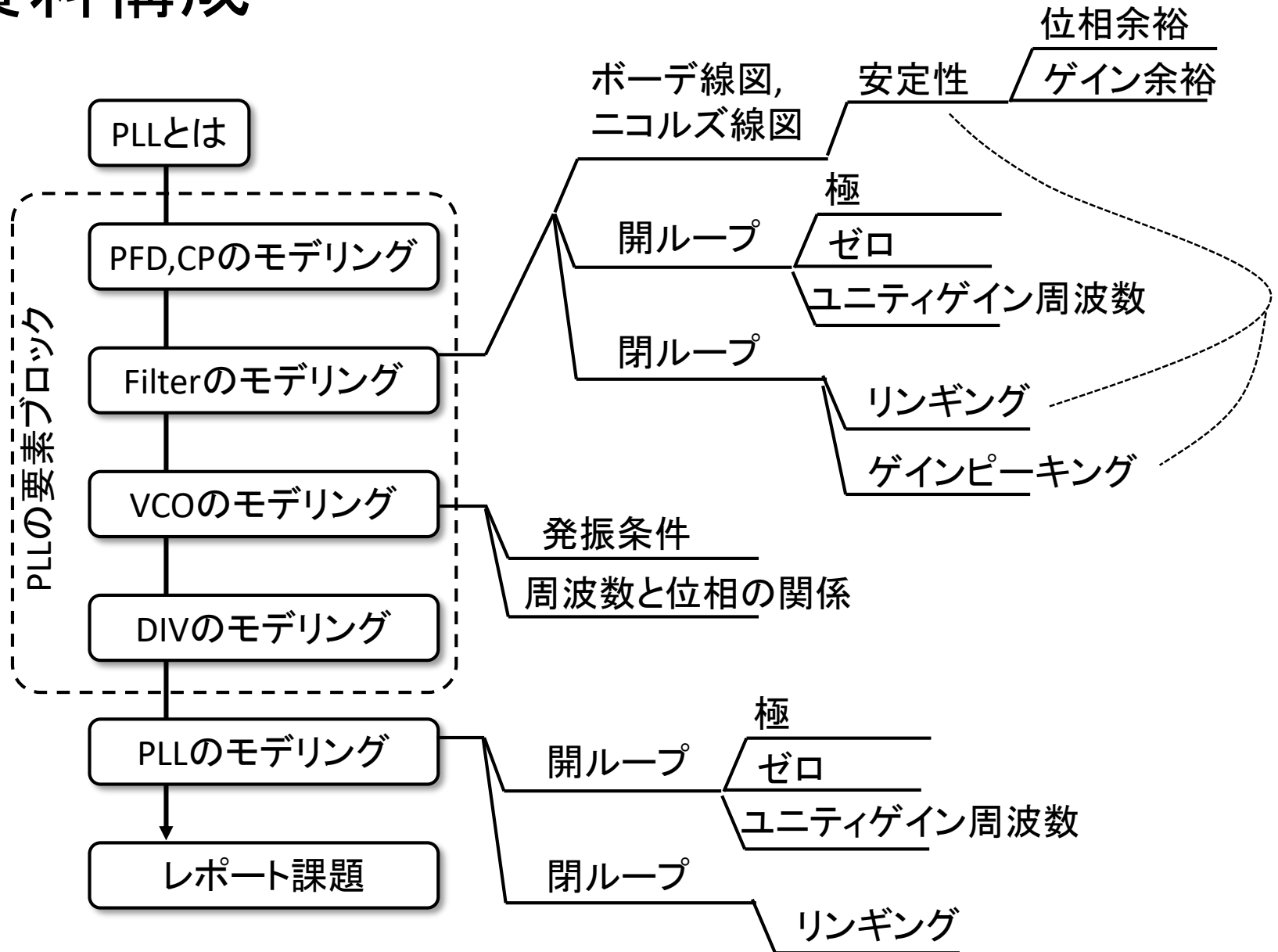
PLLをチップ内に搭載



本講義で学べる事

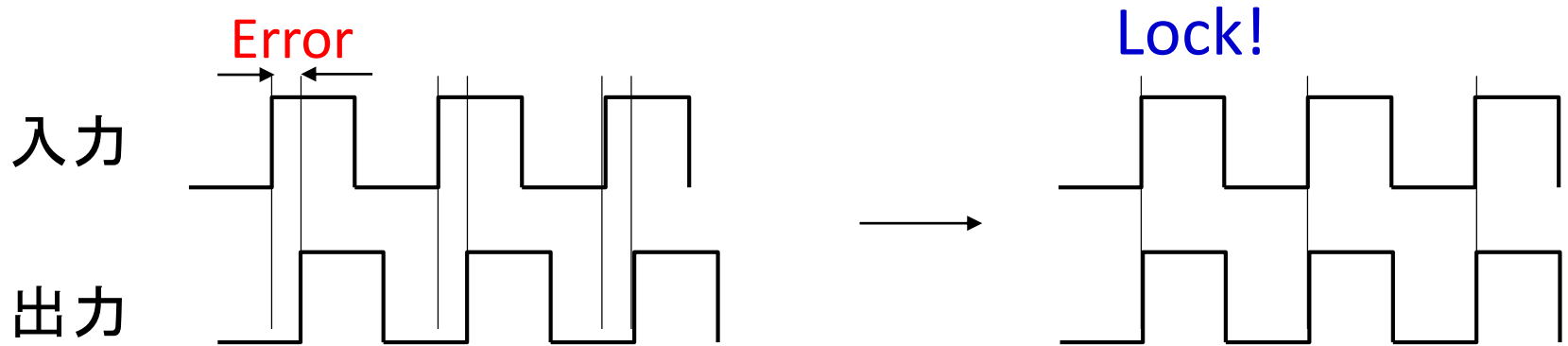
- (1) PLLの基本動作と要素回路ブロックの理解
- (2) PLLのモデリング法
- (3) PLLのシステム設計の基礎

資料構成



PLLの構成要素

- 発振器
- 誤差検出器
- 負帰還ループ



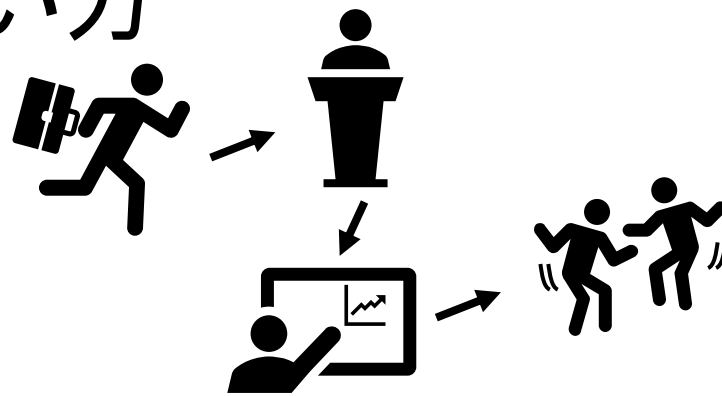
お気に入りの時計の使い方



自宅



電波時計、正確



外出



お気に入り、ずれる

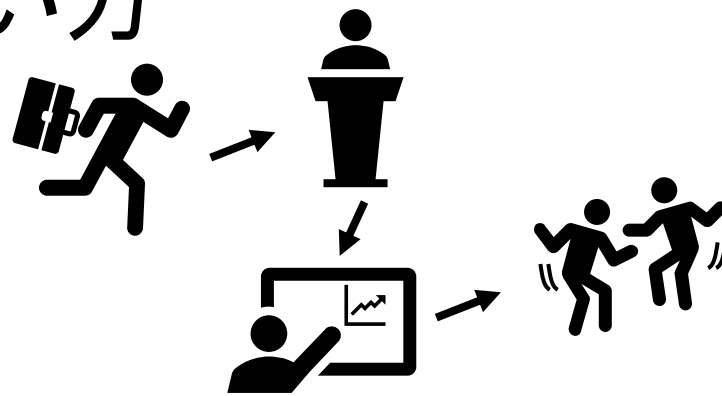
お気に入りの時計の使い方



自宅



電波時計、正確



外出



お気に入り、ずれる

- ・ずれのチェック、時間合わせ
- ・週に1回くりかえす

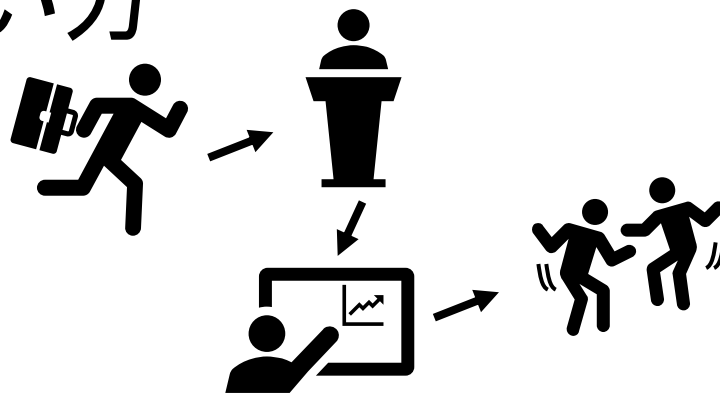
お気に入りの時計の使い方



自宅



電波時計、正確



外出

発振器



お気に入り、ずれる

誤差検出

・ずれのチェック、時間合わせ

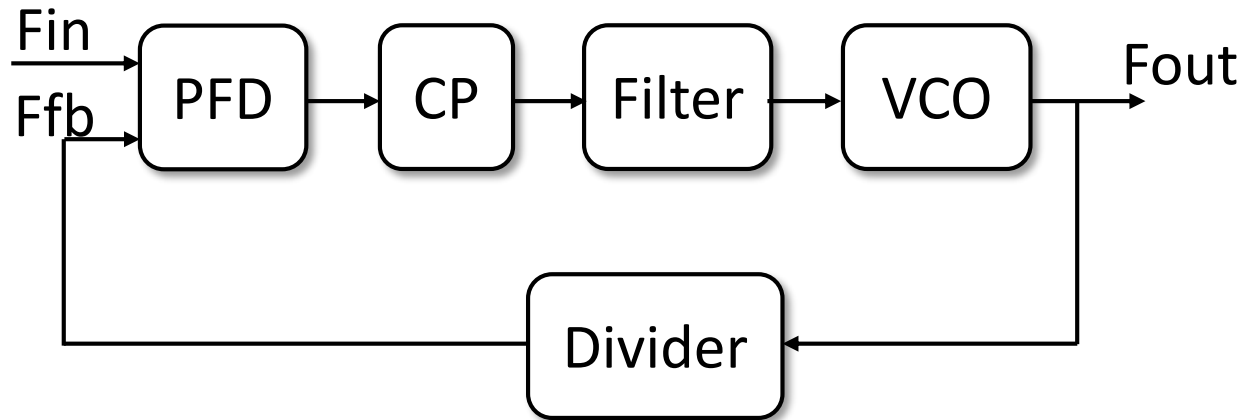
帰還ループ

・週に1回くりかえす

主なPLLの要求特性

- 面積
- 消費電力
- 入力周波数範囲
- 出力周波数範囲
- ジッタ
- ロックタイム

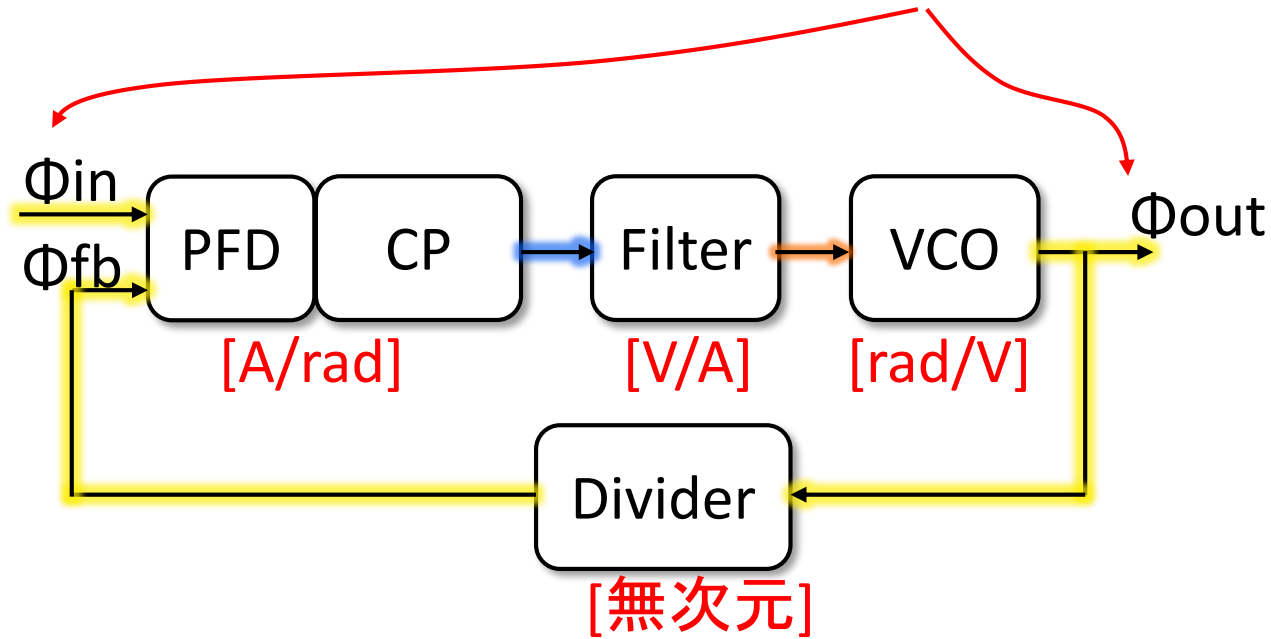
PLLのブロック図



- PFD(Phase frequency detector)
 - 入力CLK F_{in} と帰還CLK F_{fb} の位相及び周波数の誤差を検出する。
- CP(Charge pump)
 - 検出された誤差量に応じた電流を出力する。
- Filter
 - VCO制御電圧生成と安定性確保。
- VCO(Voltage-controlled oscillator)
 - 入力電圧に応じた周波数で発振する。
- Divider
 - 入力周波数を分周する。

信号線のドメイン

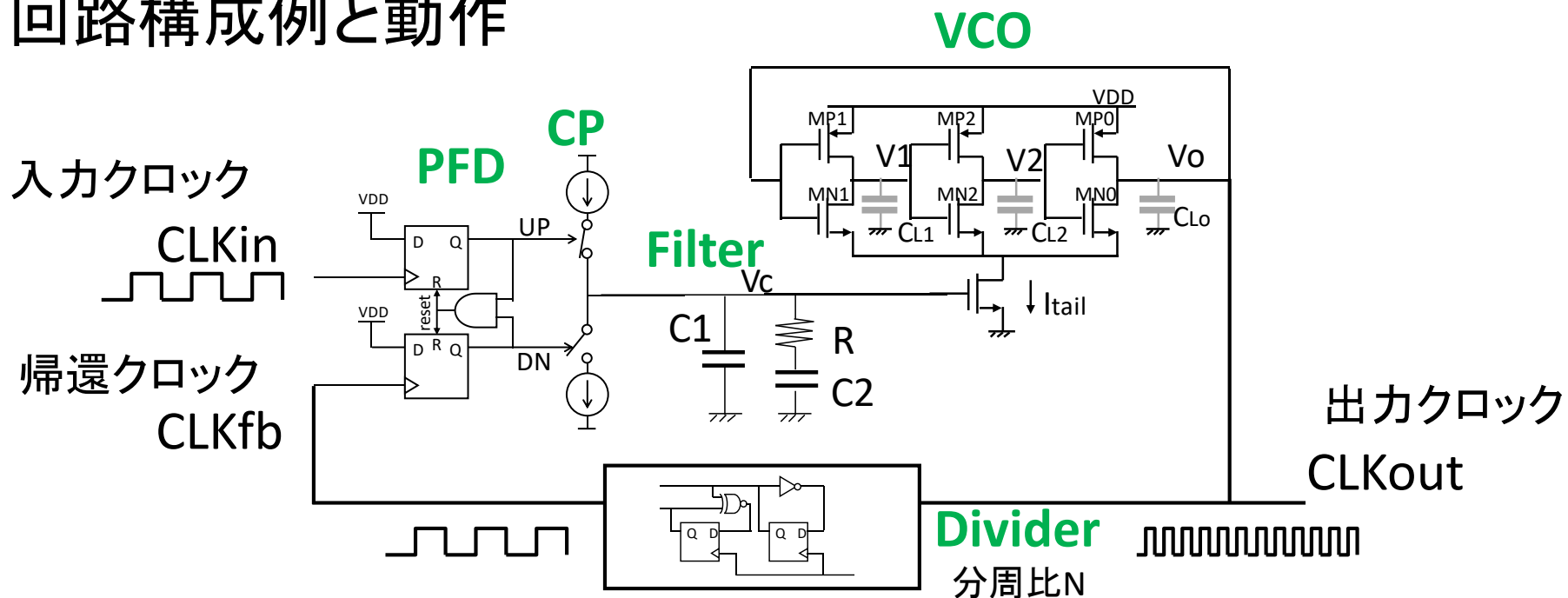
入出力は周波数ドメインではなく、
位相ドメインであることに注意！



- 位相[rad]
- 電流[A]
- 電圧[V]

PLLのループには複数の
ドメインが含まれる。

回路構成例と動作



(i) 入力周波数 > 帰還周波数

- ・PFDが周波数誤差を検知
- ・CPがfilterに電流を流し込む
- ・Vc電位が上昇し、出力周波数が高くなる。

(ii) 入力周波数 < 帰還周波数

- ・PFDが周波数誤差を検知
- ・CPがfilterから電流を引き抜く
- ・Vc電位が低下し、出力周波数が低くなる。

(i), (ii)の状態を繰り返して出力周波数が収束していく。収束後は下記が成り立つ。

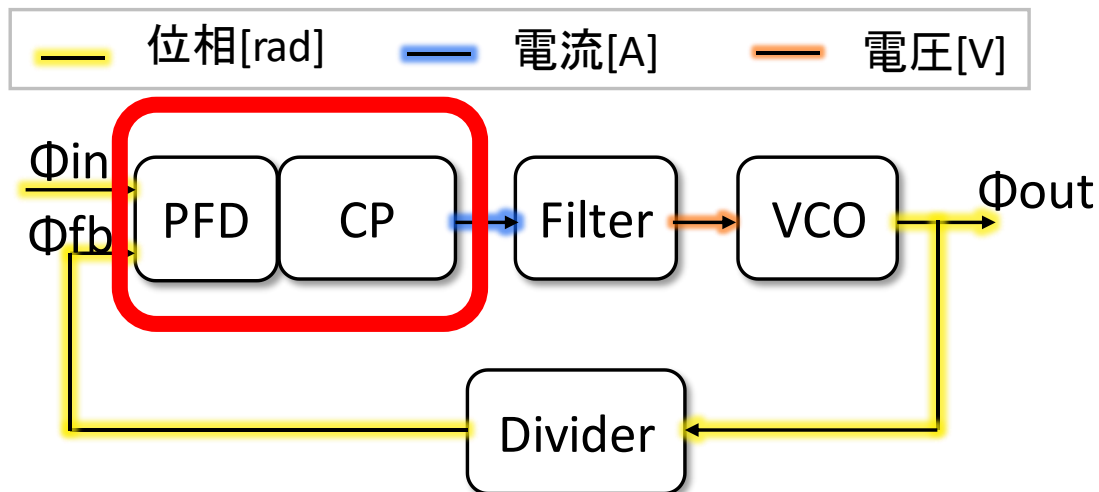
$$f_{in} = f_{fb}$$

$$f_{out} = N f_{in}$$

位相/周波数比較器(PFD)と チャージポンプ(CP)のモデリング

PFDが入力位相 Φ_{in} と帰還位相 Φ_{fb} の
差を検出する。
CPはその検出された位相差に応じた
電流を生成する。

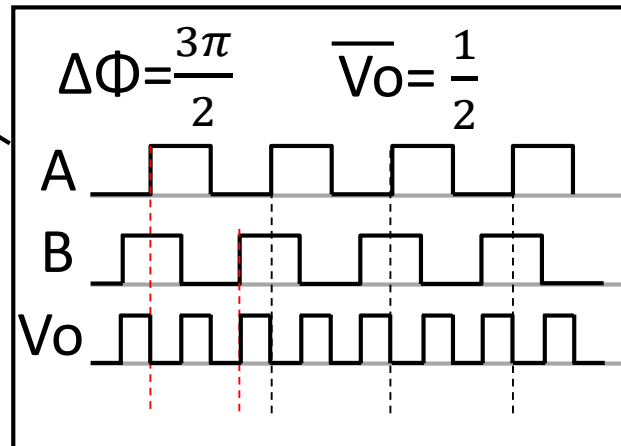
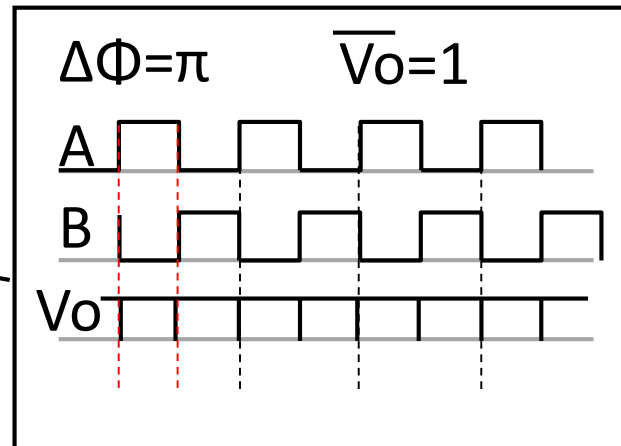
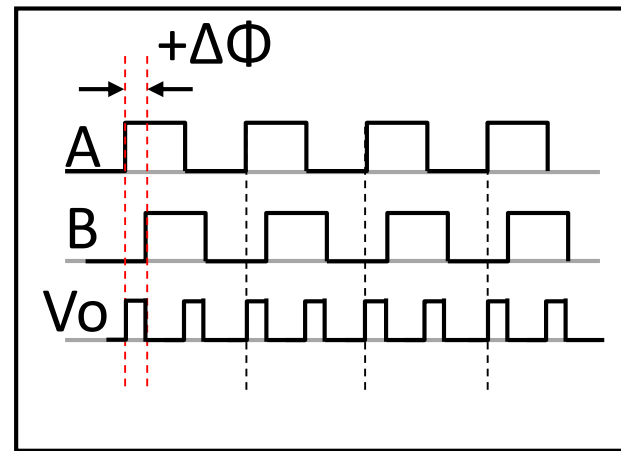
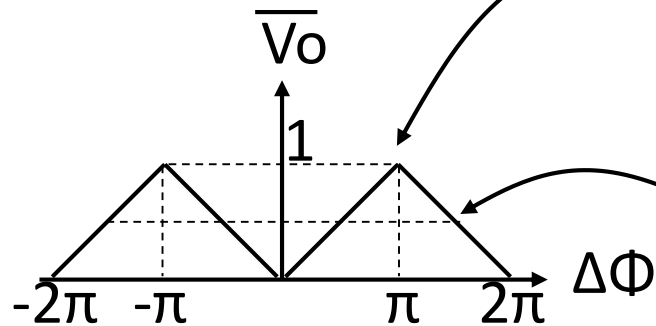
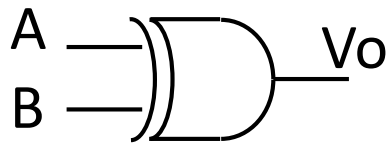
*PFDは周波数検出も行う。



位相検出器

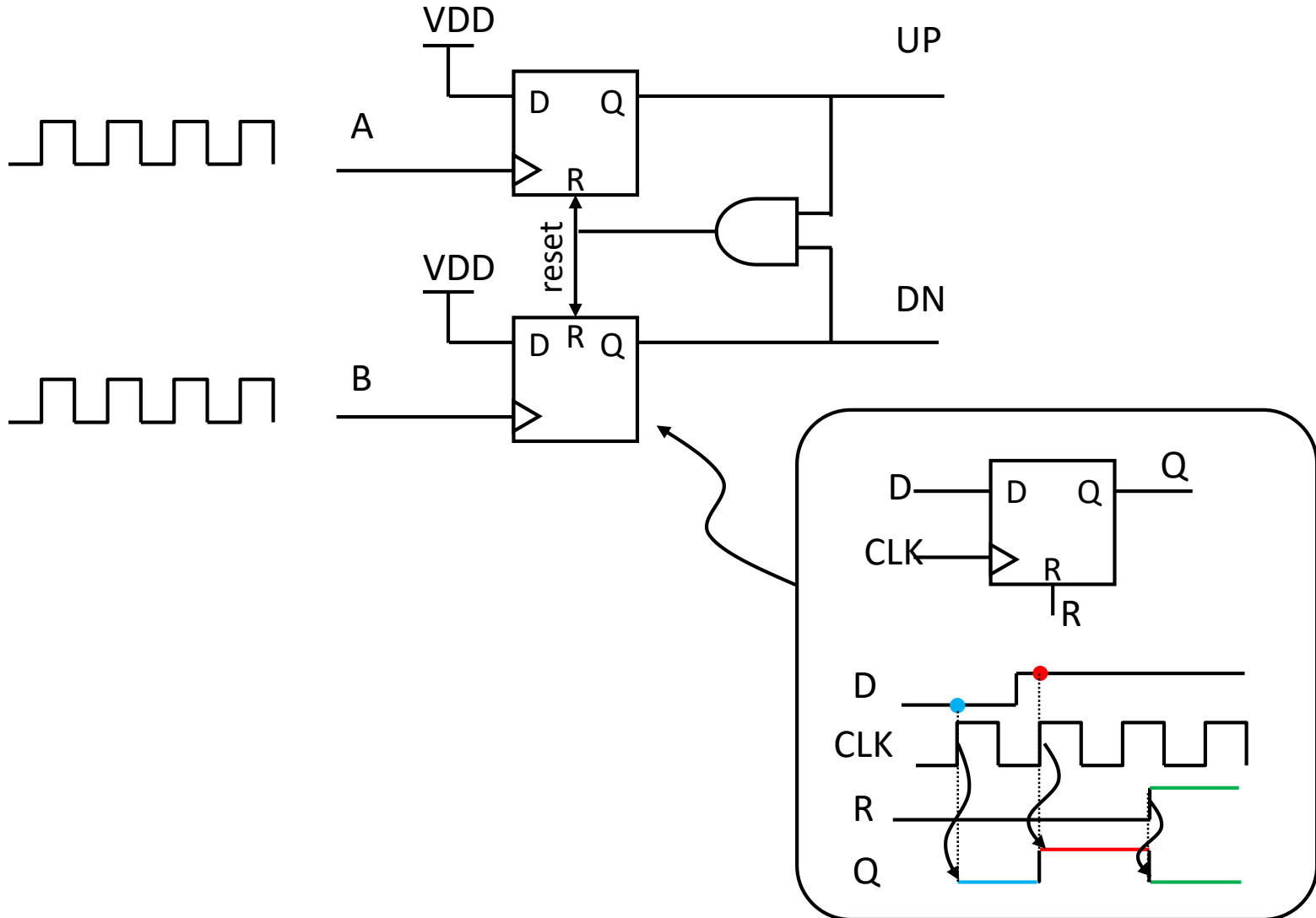
XOR

- シンプルな構成
- 周波数比較が行えない



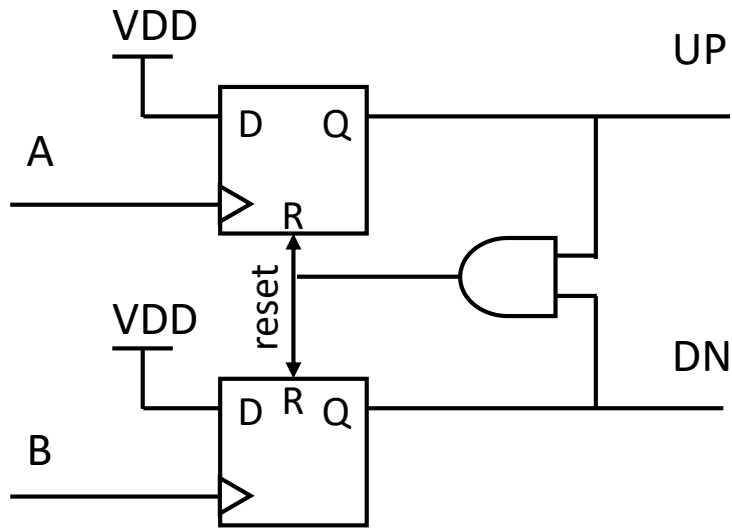
位相/周波数検出器(PFD)

- 位相と周波数検出が行える。



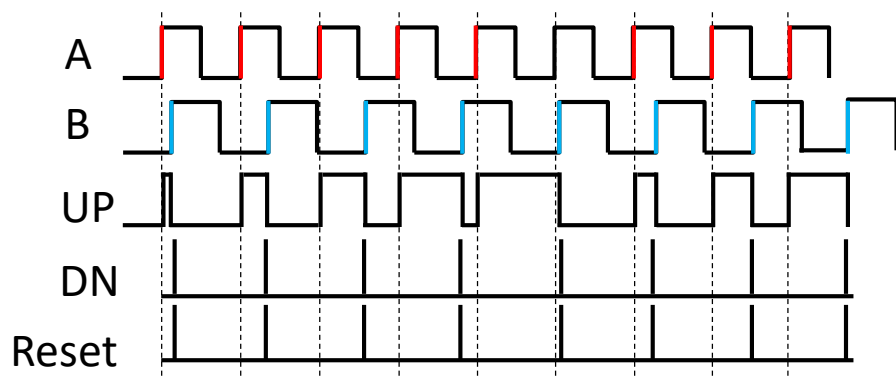
位相/周波数検出器(PFD)

周波数検出



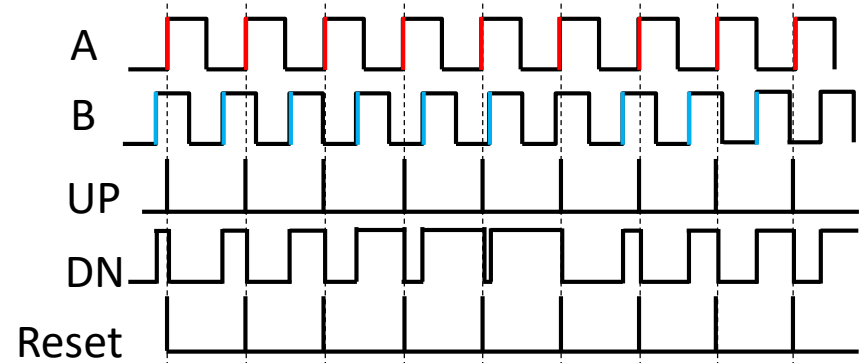
$$\omega_A > \omega_B$$

$$\overline{V_{UP}} > 0, \overline{V_{DN}} = 0$$



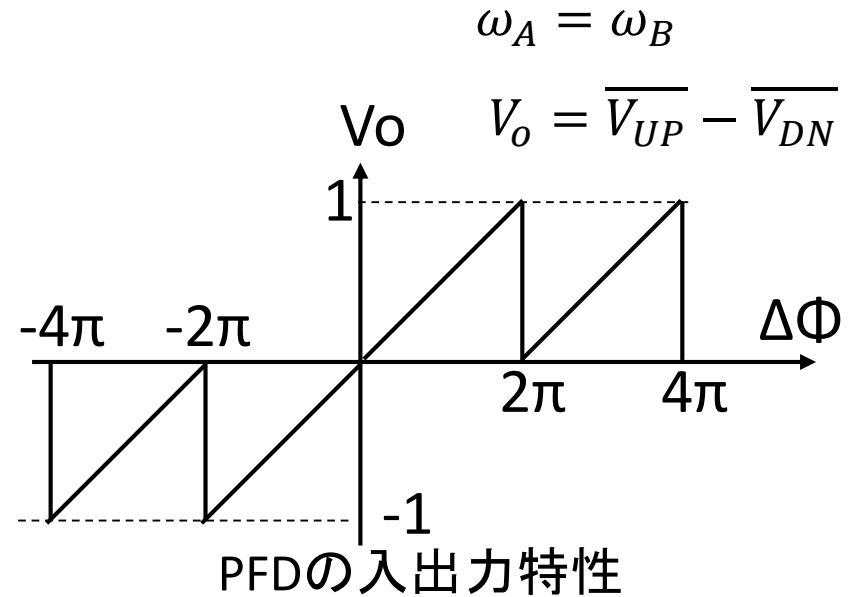
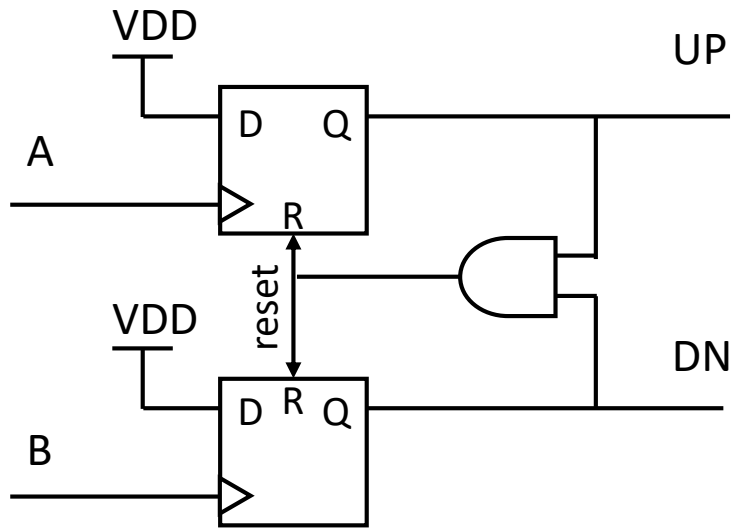
$$\omega_A < \omega_B$$

$$\overline{V_{DN}} > 0, \overline{V_{UP}} = 0$$



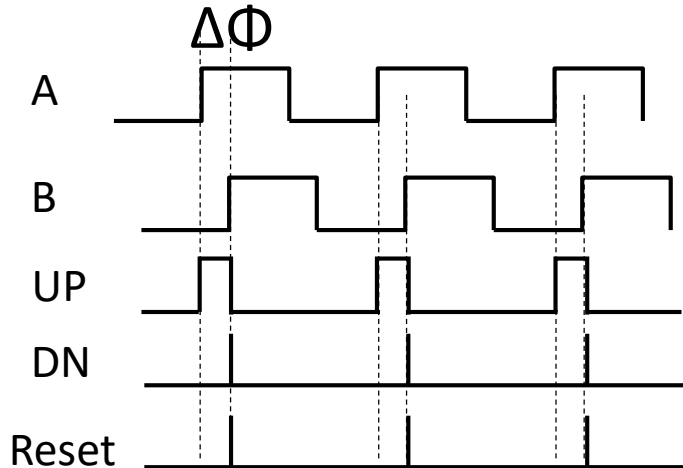
位相/周波数検出器(PFD)

位相検出

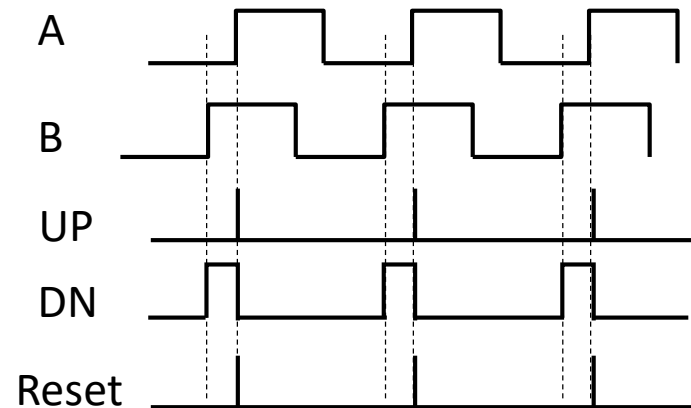


$\omega_A = \omega_B$

$\Delta\Phi$ が正 $\overline{V_{UP}} > 0, \overline{V_{DN}} = 0$

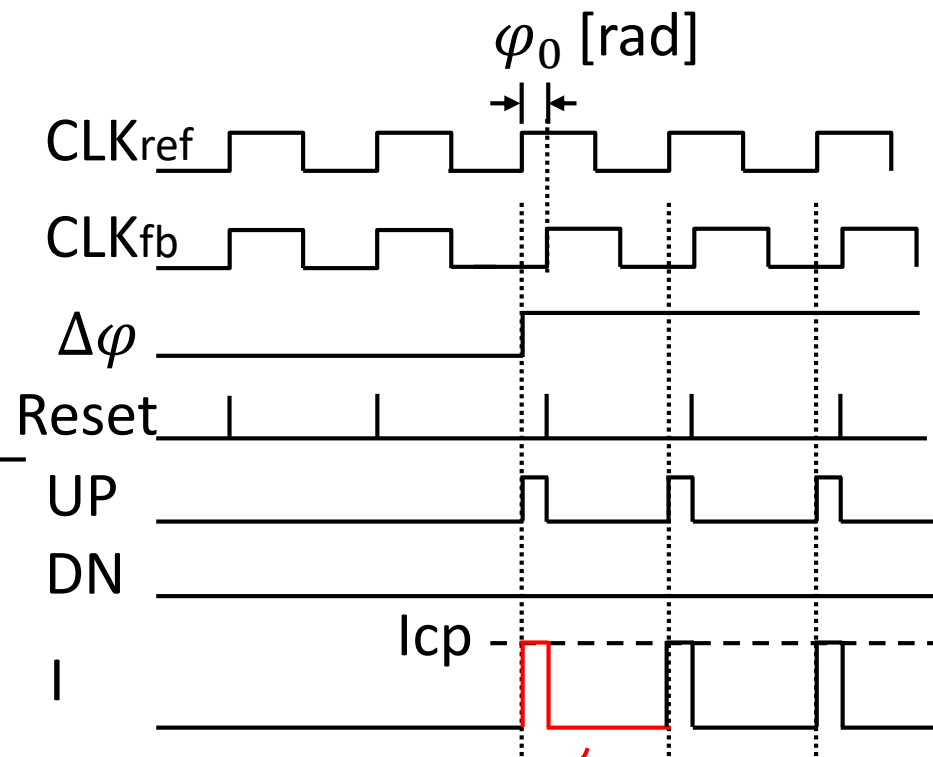
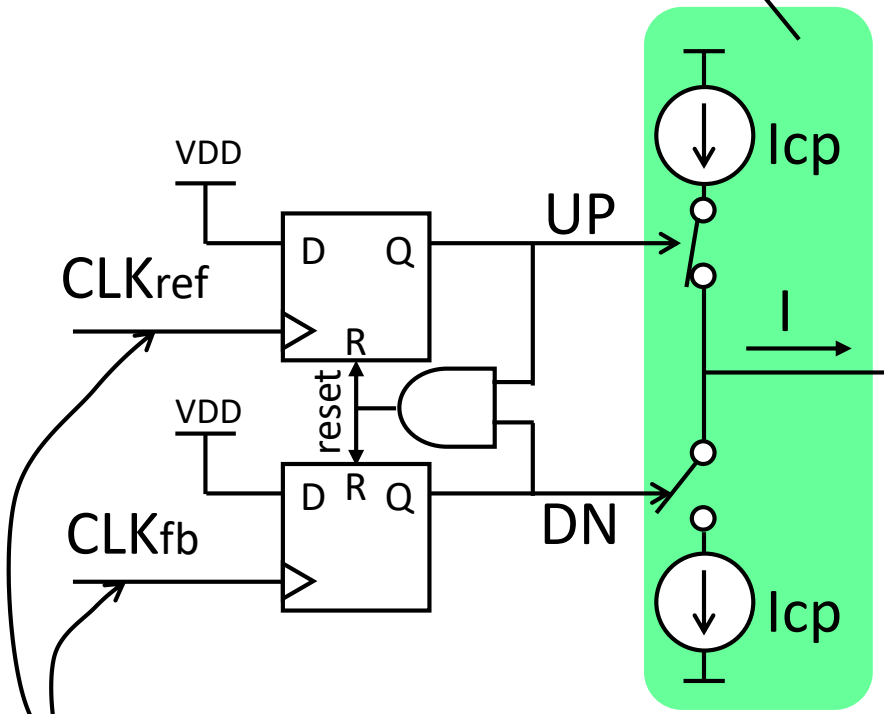


$\Delta\Phi$ が負 $\overline{V_{DN}} > 0, \overline{V_{UP}} = 0$



PFD + CP (チャージポンプ)

チャージポンプ:
 入力のパルスに応じて電流を出力する。

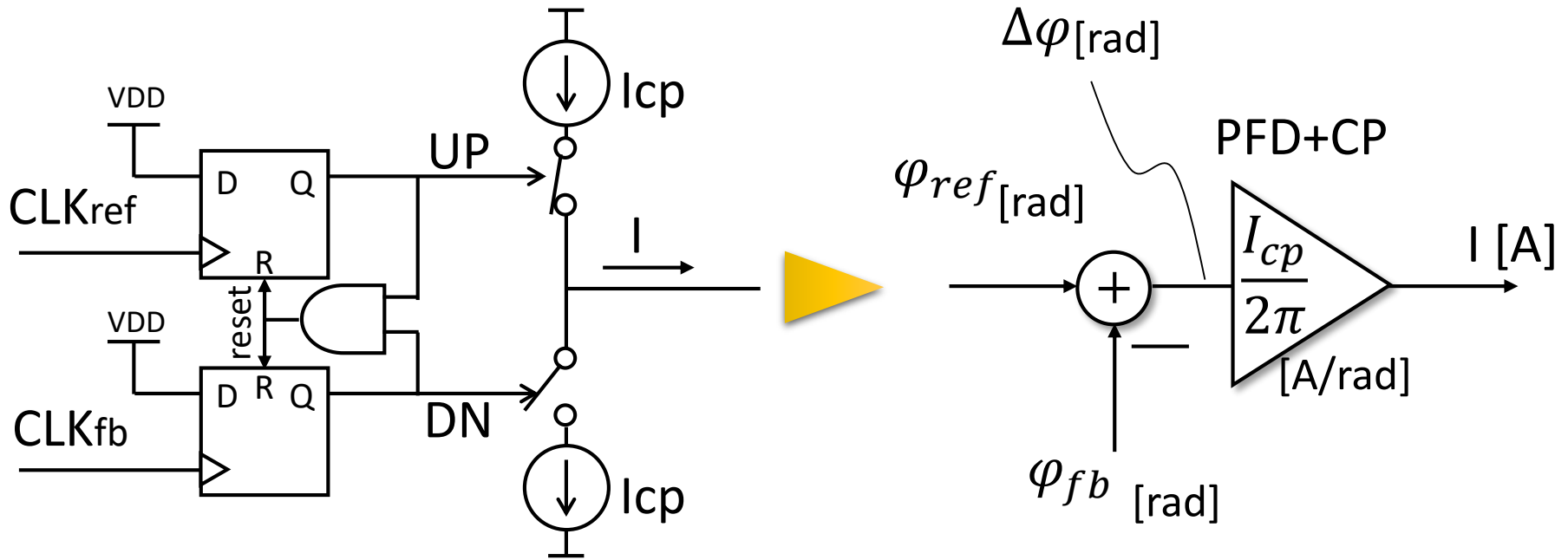


位相差 $\Delta\phi = \varphi_0$ [rad]

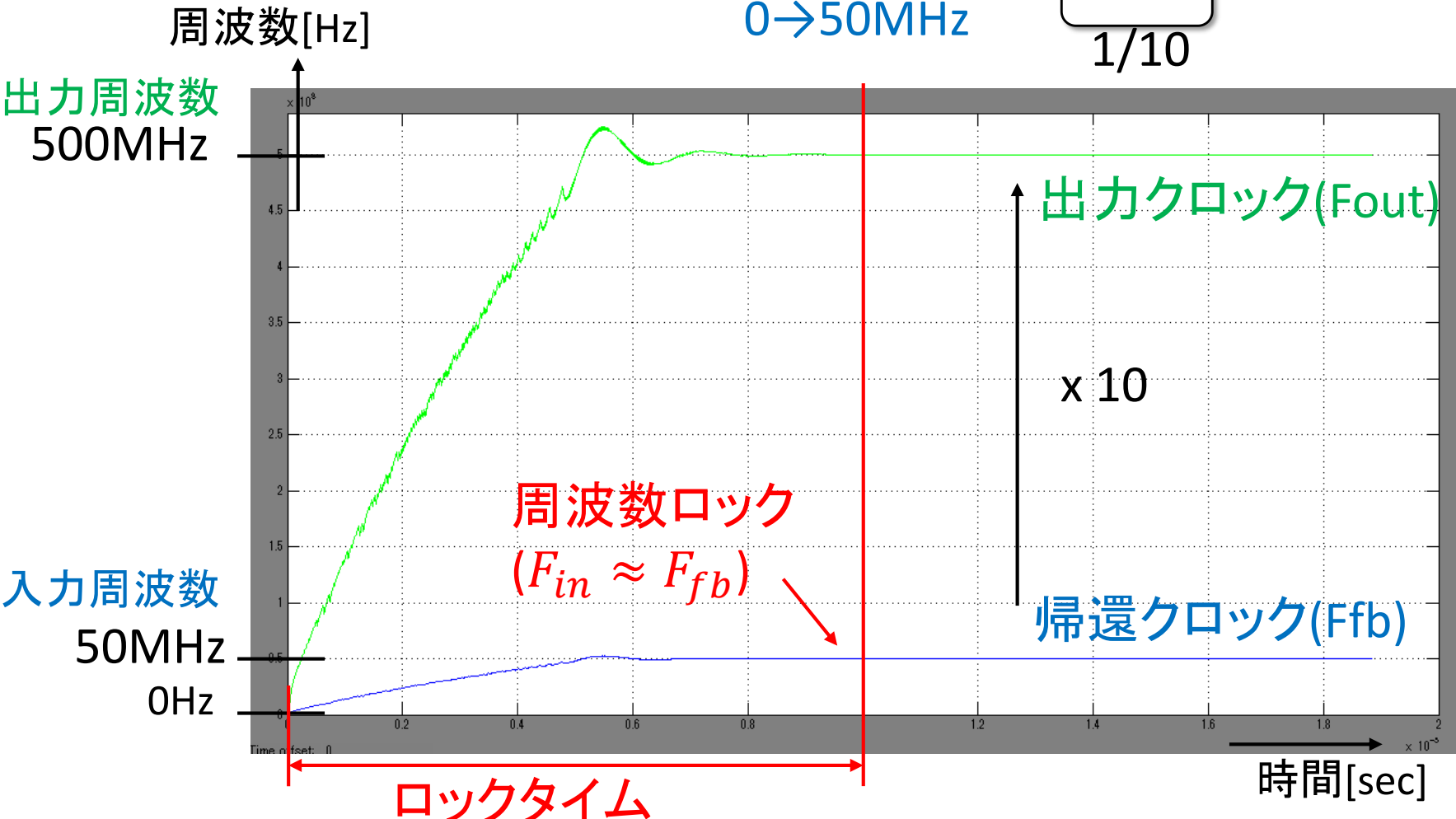
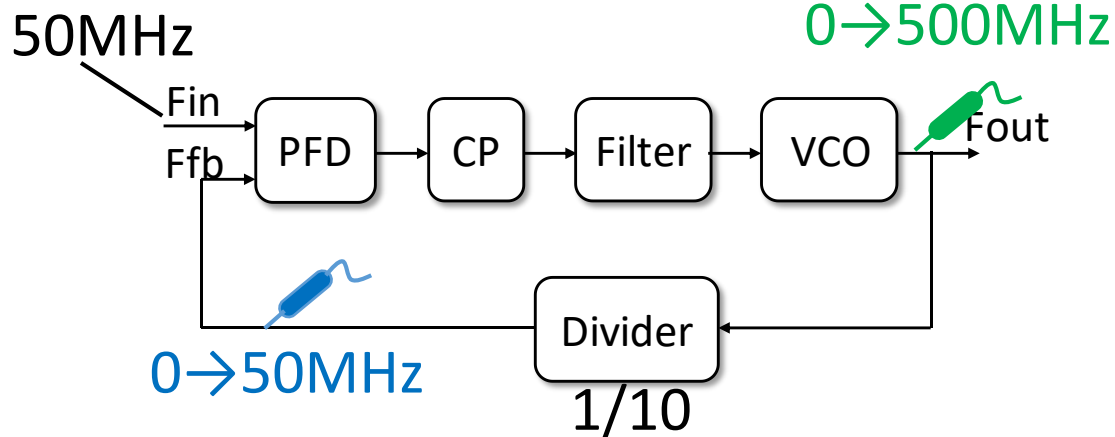
平均電流は $\frac{\varphi_0}{2\pi} I_{cp}$ [A]

PFD+CPの伝達関数は $\frac{I}{\Delta\phi} = \frac{I_{cp}}{2\pi}$ [A/rad]

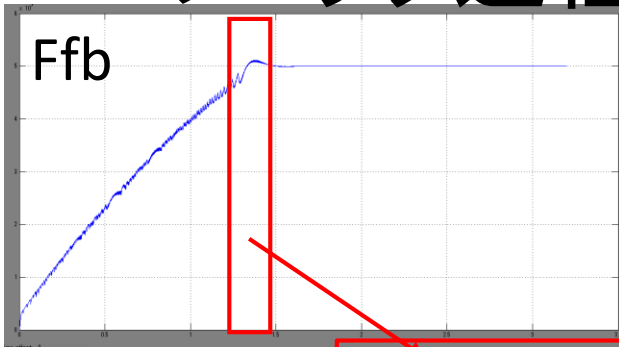
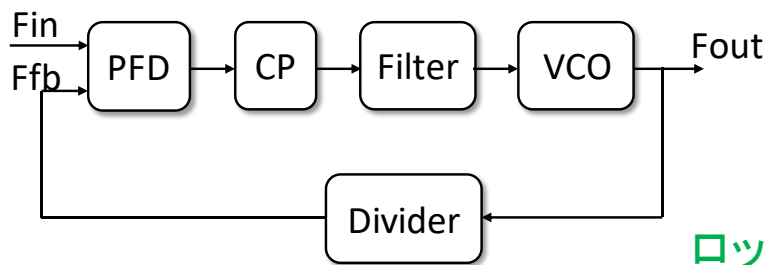
PFDDとCPのモデリング



PLLの 周波数ロック過程

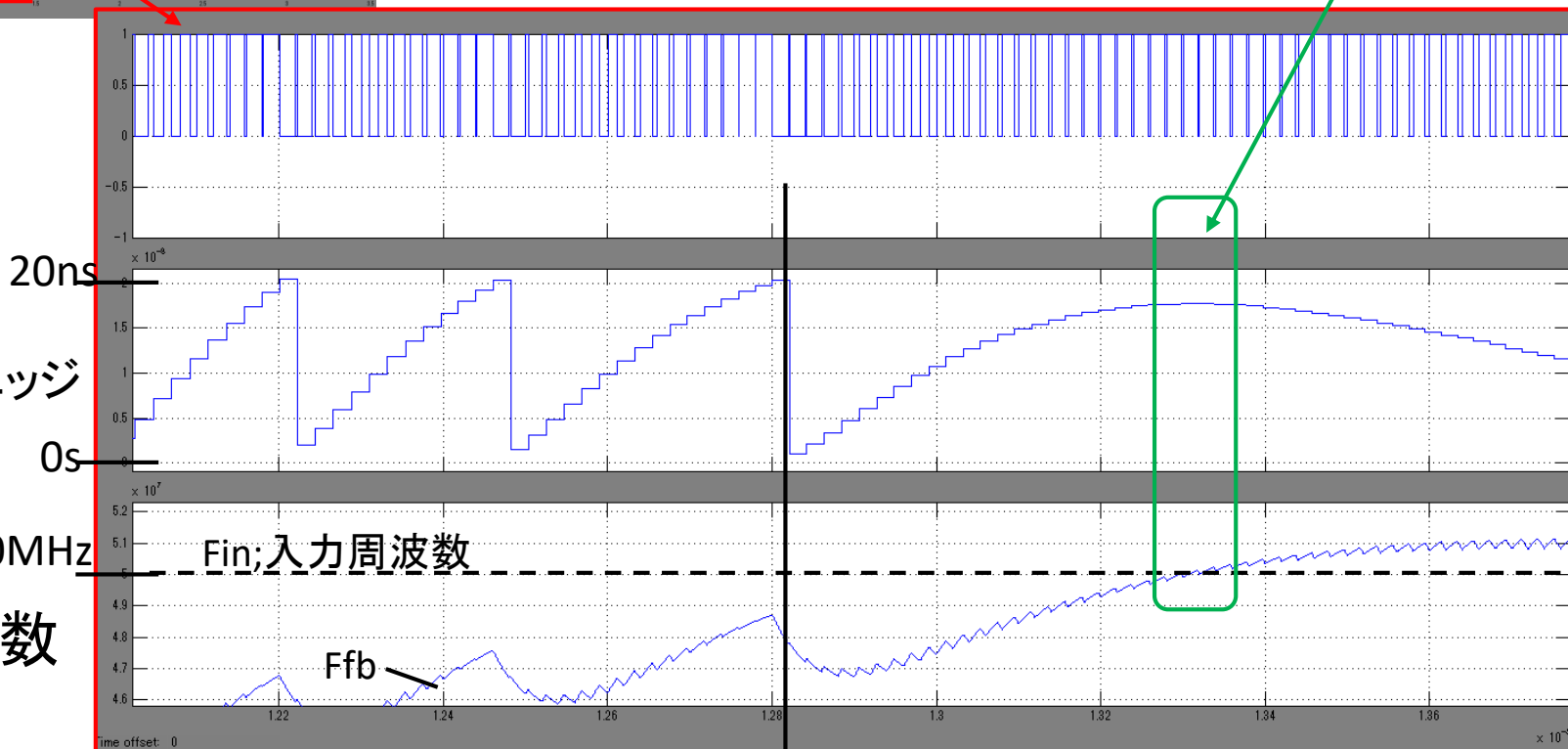


PLLのロック過程



ロック過程において
Ffb=Finの時、その両者の
位相差は約 $1/Fin[s]$

CP出力

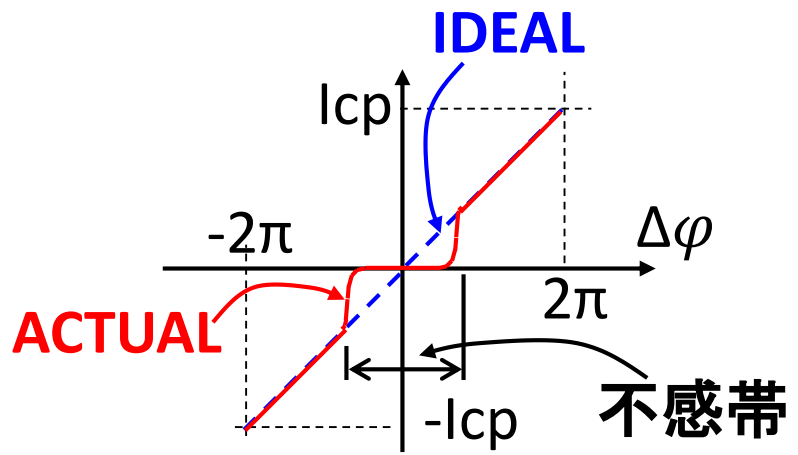
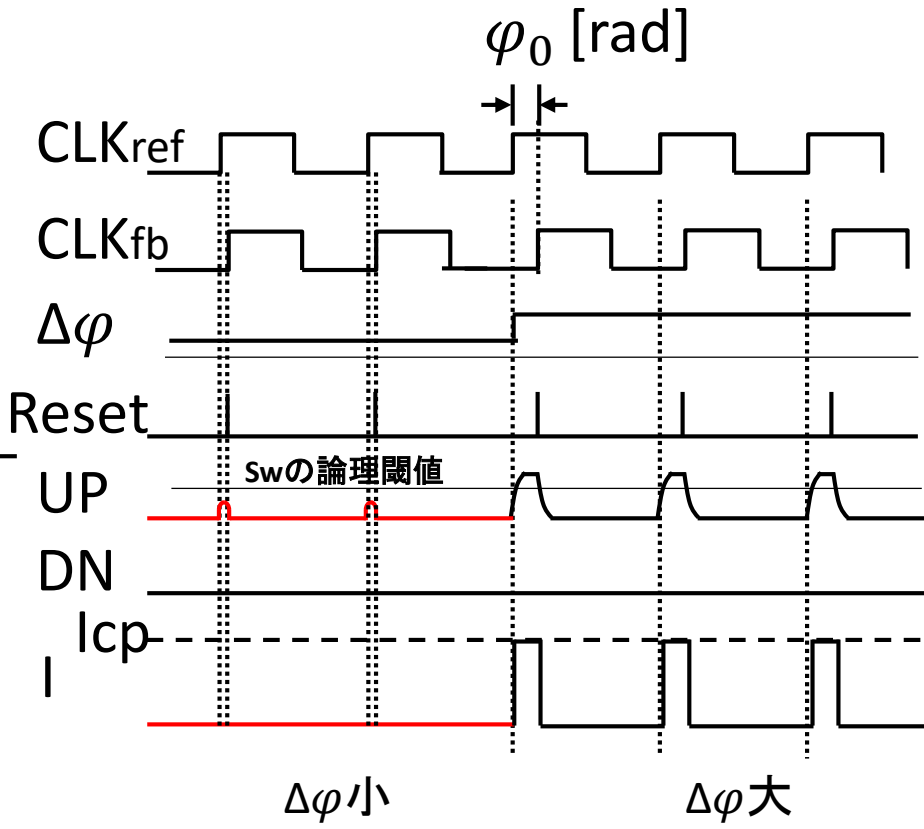
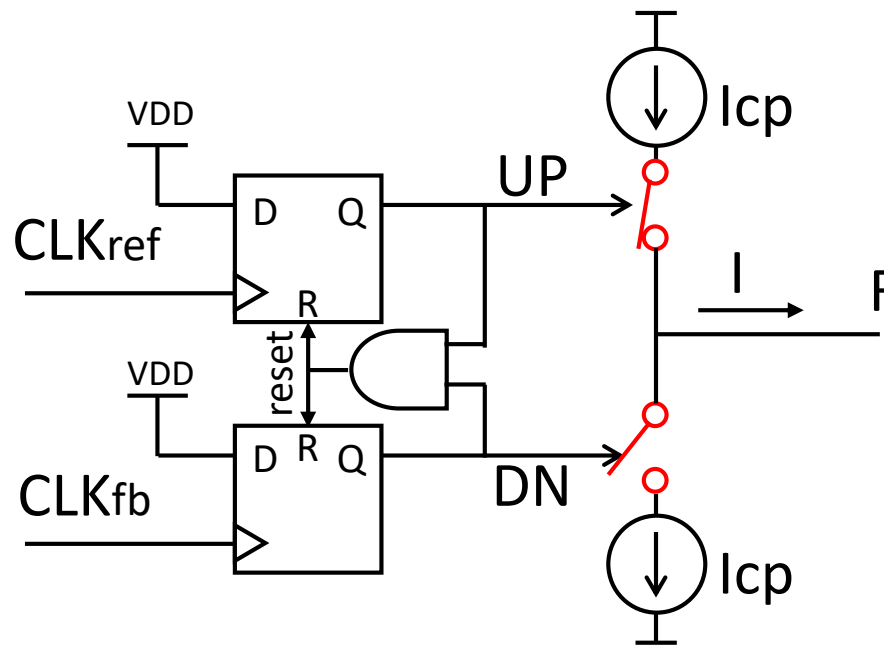


周波数検出

位相検出

PFD

微小位相差時の不感帯

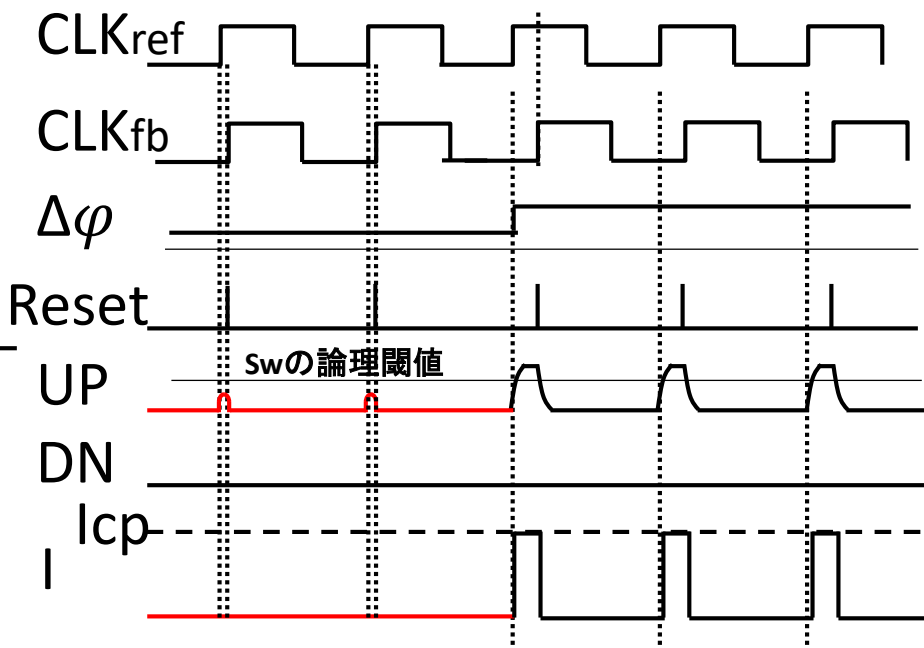
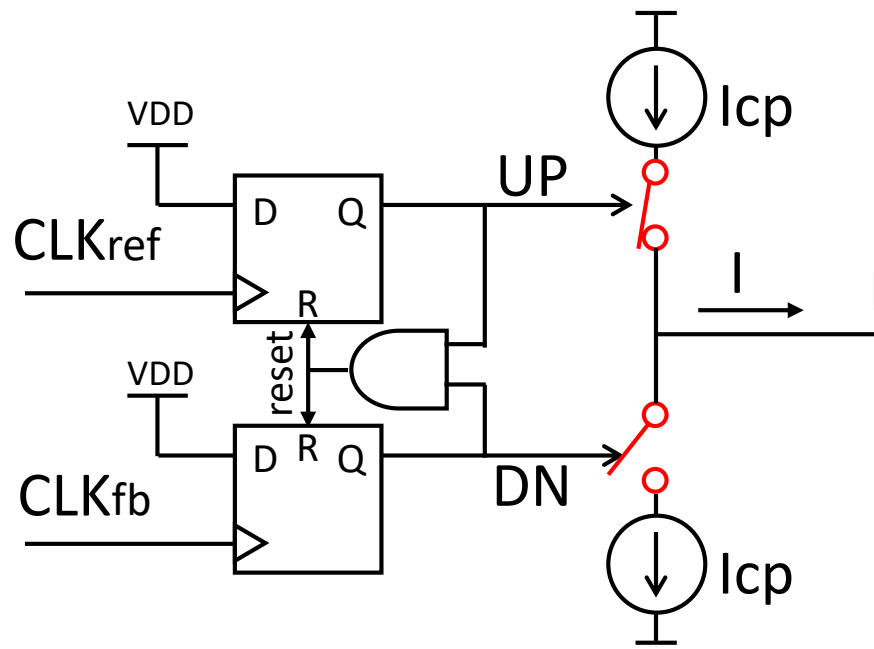


PFD+CPの入出力特性

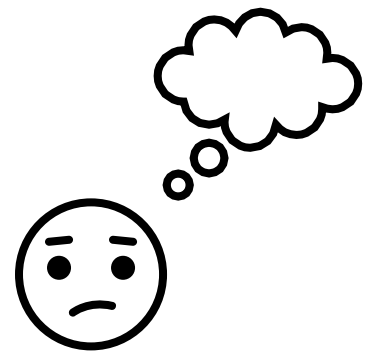
位相差が微小の場合、
CPのSWをONできない
(寄生容量の影響)

↓
不感帯

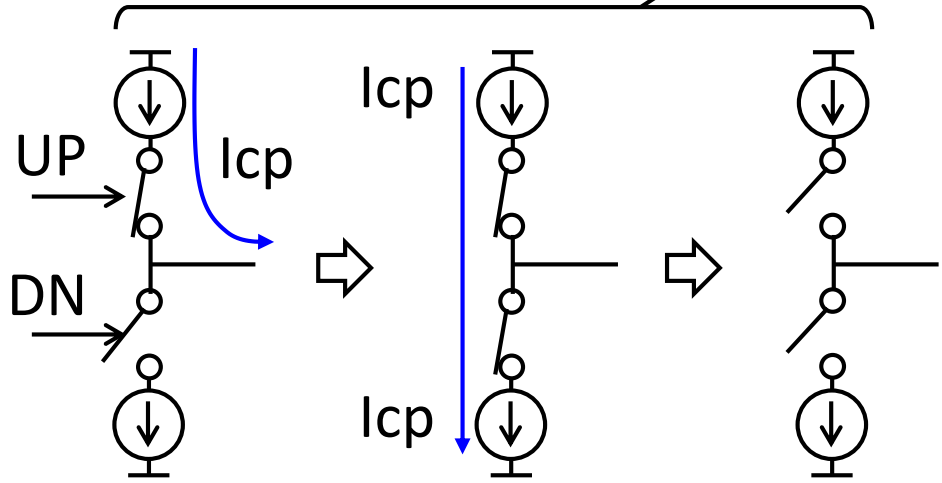
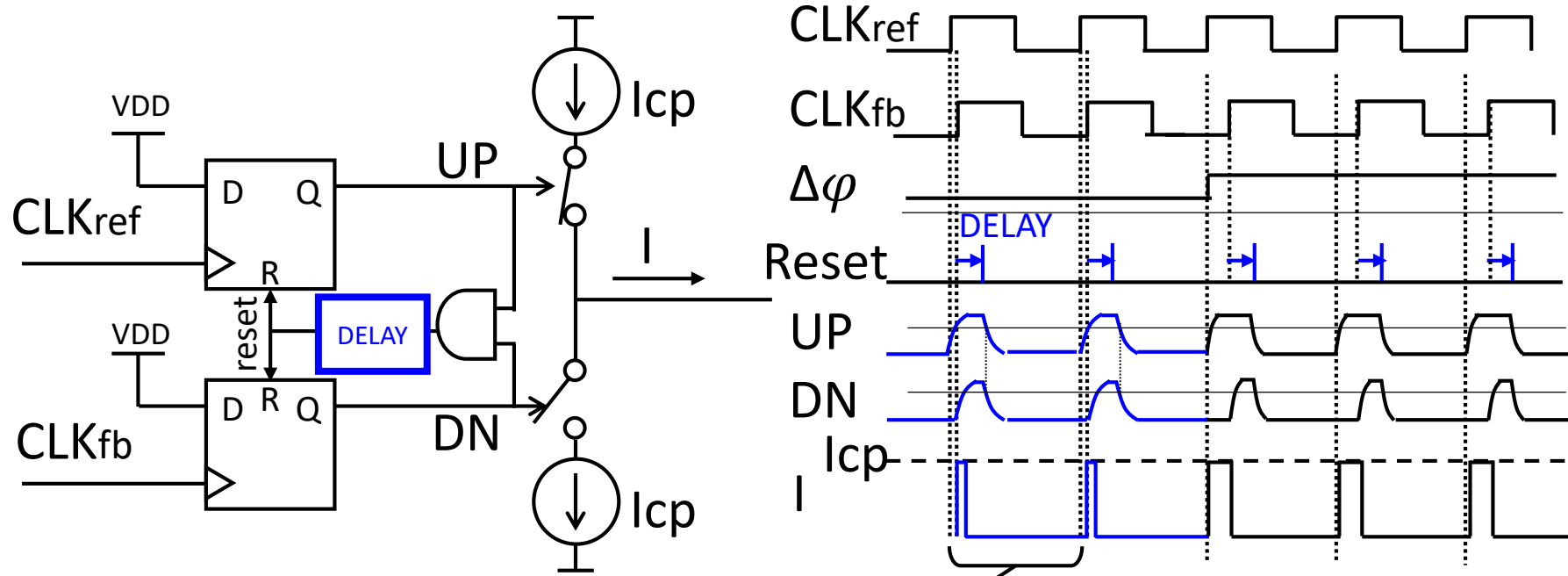
不感帯の対策は？



DELAY



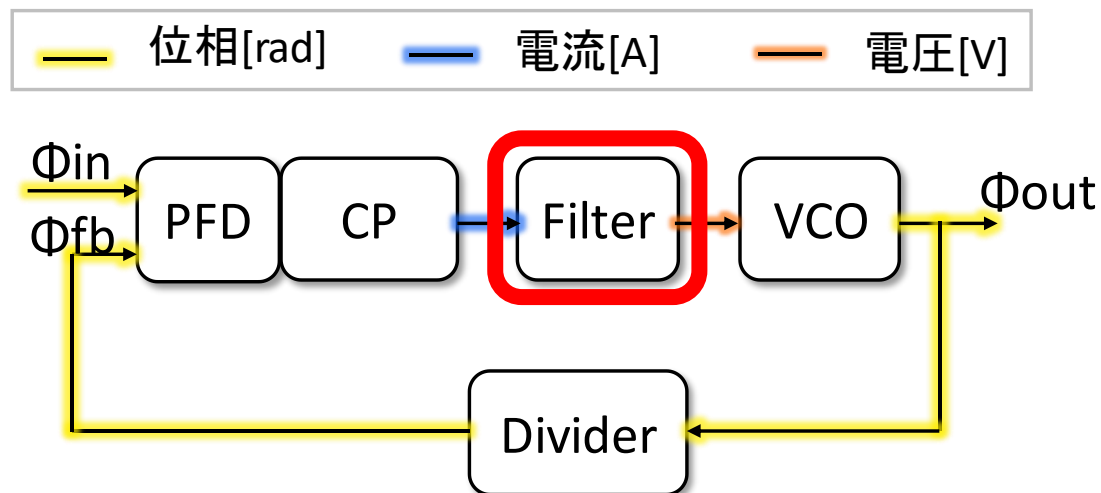
不感帯の対策は？



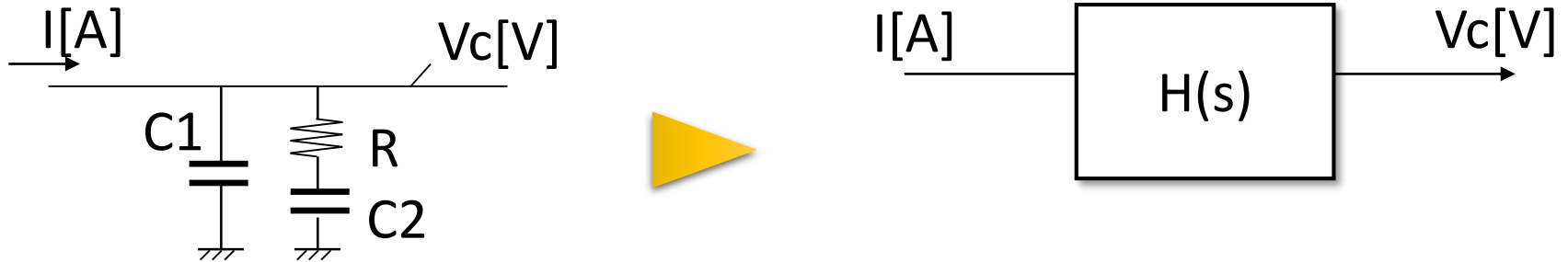
UP側とDN側の電流源間のミスマッチに注意

Filterのモデリング

フィルタへの入力はCPからのパルス電流。
出力は電圧。
出力電圧がVCOの発振周波数を制御する。
フィルタの役割は信号の平滑化と安定性確保。



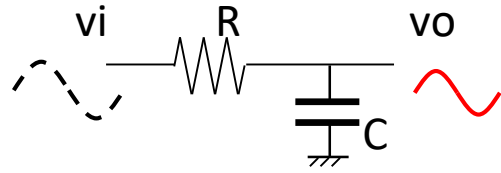
Filter (Lag-lead filter)



$$V_c = \frac{1}{s(C_1 + C_2)} \cdot \frac{sRC_2 + 1}{sR \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + 1} \cdot I$$

$$H(s) = \frac{V_c}{I} = \frac{1}{s(C_1 + C_2)} \cdot \frac{sRC_2 + 1}{sR \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + 1}$$

ボード線図：系の周波数特性(利得、位相)を把握するためのグラフ

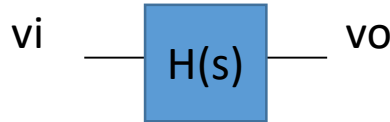


伝達関数:

$$\frac{v_o}{v_i} = H(s) = \frac{1}{sRC + 1}$$

振幅ゲイン: $\frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$

位相遷移: $-\tan^{-1}(\omega RC)$



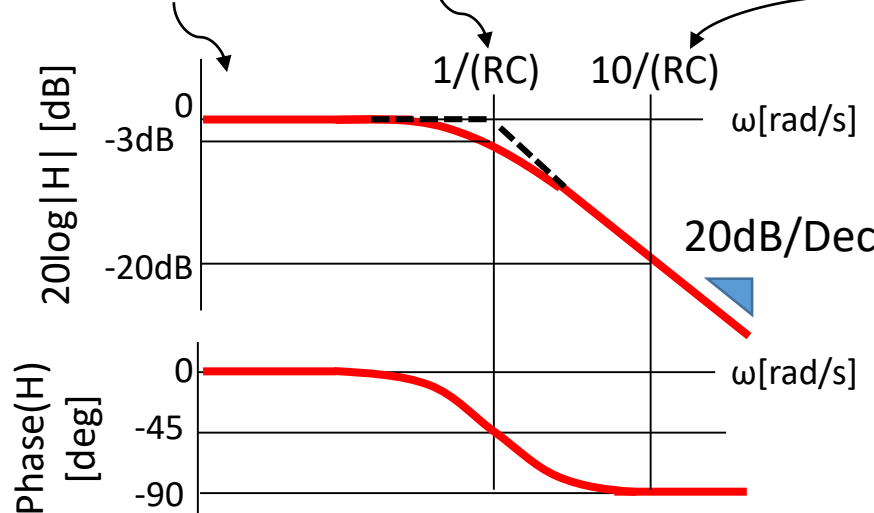
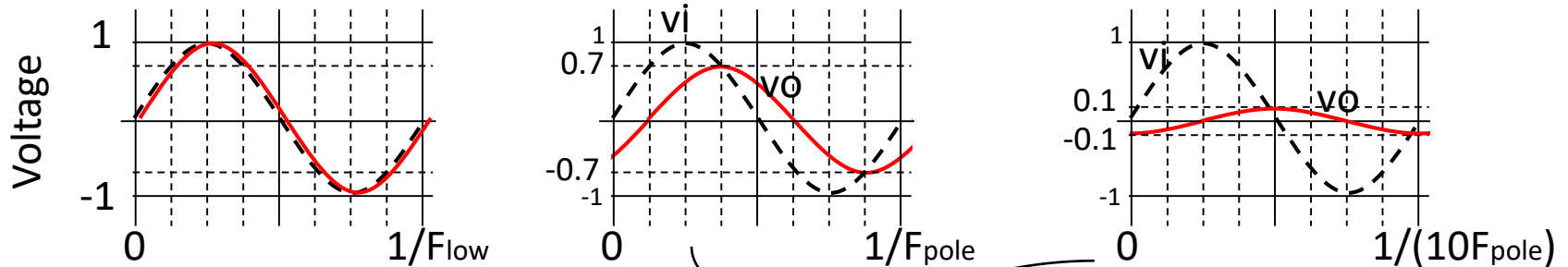
入力角周波数:
[rad/s]

低

$1/(RC)$

極 (Pole)

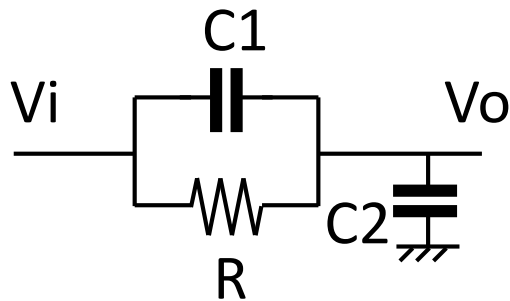
$10/(RC)$



- ・極: $1/(RC)$ [rad/s]
- ・1つの極 90° シフト
- ・ゲイン傾斜 20dB/dec

※目安: 極周波数のx10で
 90° 回転

極とゼロ点



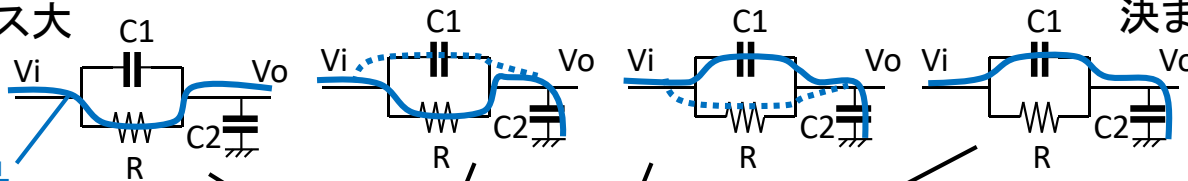
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{s + \frac{1}{RC_1}}{s + \frac{1}{R(C_1 + C_2)}}$$

ゼロ点 \bigcirc $-\frac{1}{RC_1}$

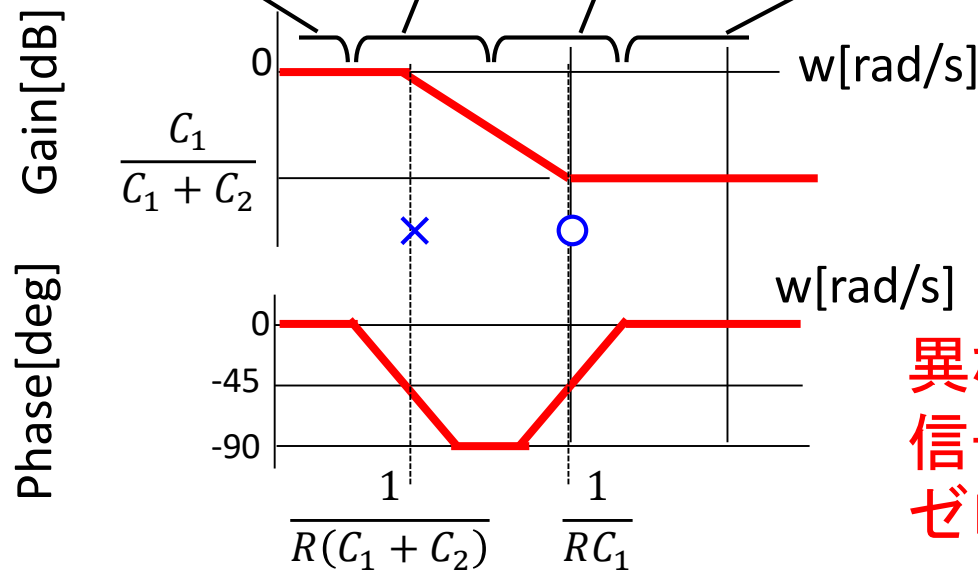
極 \times $-\frac{1}{R(C_1 + C_2)}$

容量のインピーダンス大

信号

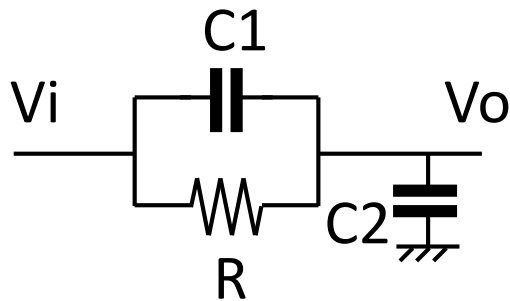


容量でゲインが決まる



異なる位相回転の信号同士の合流でゼロができる。

極とゼロ点



$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{s + \frac{1}{RC_1}}{s + \frac{1}{R(C_1 + C_2)}}$$

ゼロ点 $-\frac{1}{RC_1}$

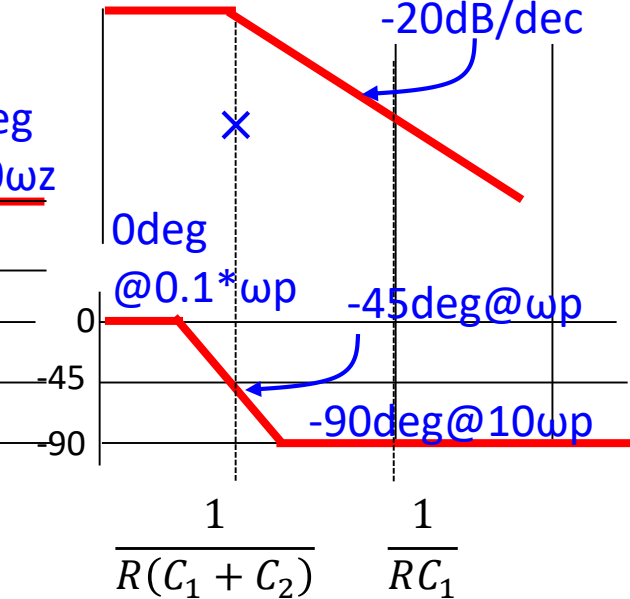
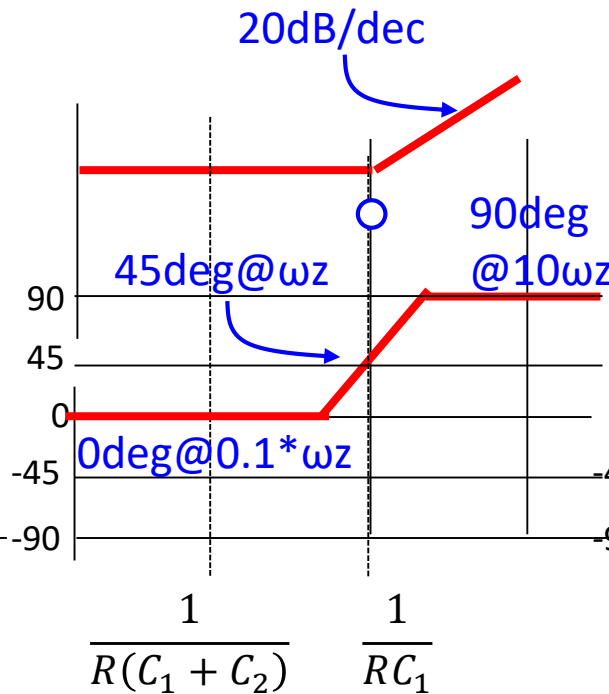
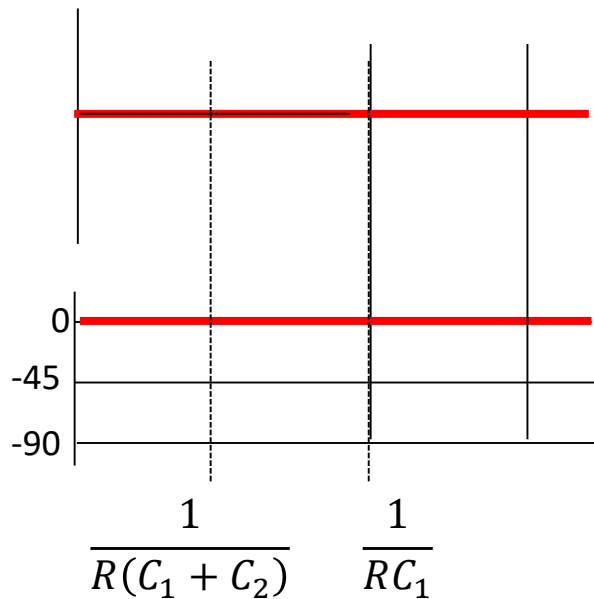
極 $-\frac{1}{R(C_1 + C_2)}$

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

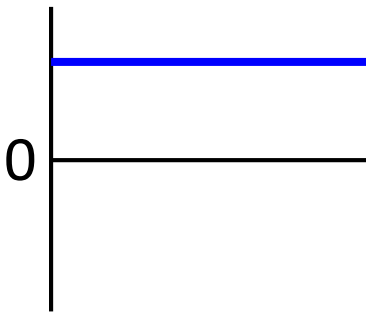
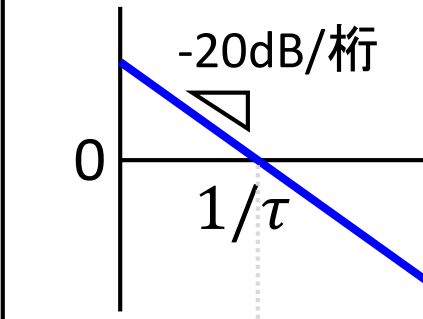
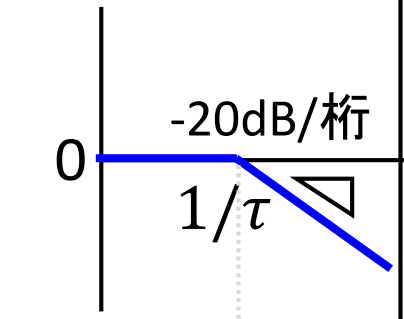
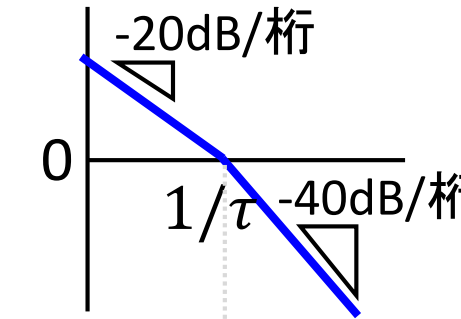
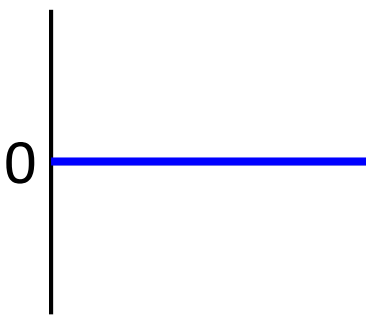
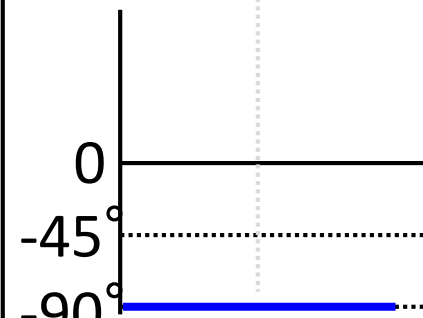
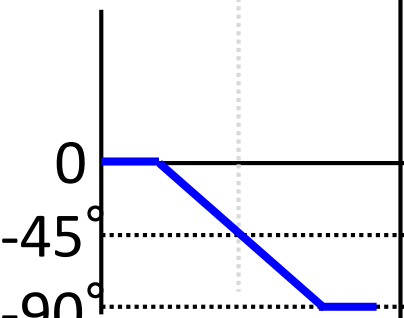
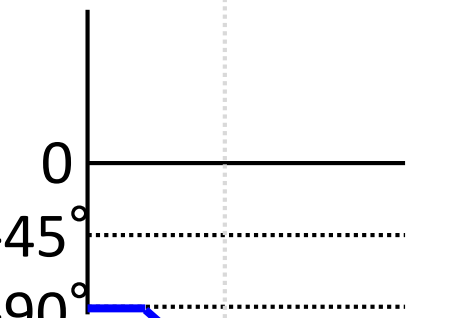
$$s + \frac{1}{RC_1}$$

$$\frac{1}{s + \frac{1}{R(C_1 + C_2)}}$$

Gain



ボード線図

名称	比例	完全積分	1次遅れ	完全積分と1次遅れ
伝達関数	K	$\frac{1}{\tau s}$	$\frac{1}{\tau s + 1}$	$\frac{1}{s(\tau s + 1)}$
ゲイン曲線				
位相曲線				

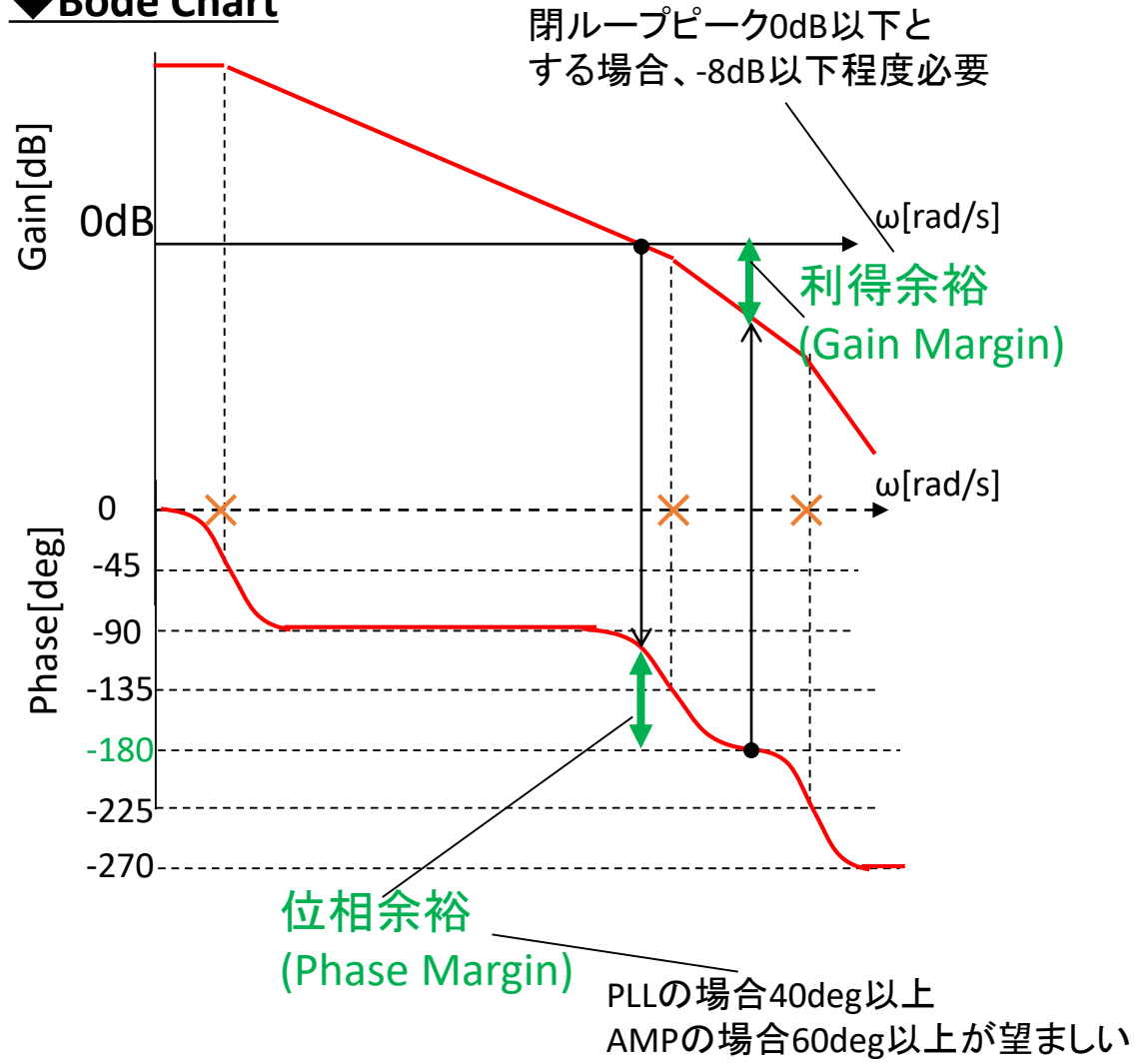
ボード線図

名称	2次遅れ	位相進み	1次HPF	無駄時間
伝達関数	$\frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1}$ $\tau_2 < \tau_1$	$\frac{s}{\tau s + 1}$	e^{-ts}
ゲイン曲線				
位相曲線				

位相余裕、利得余裕

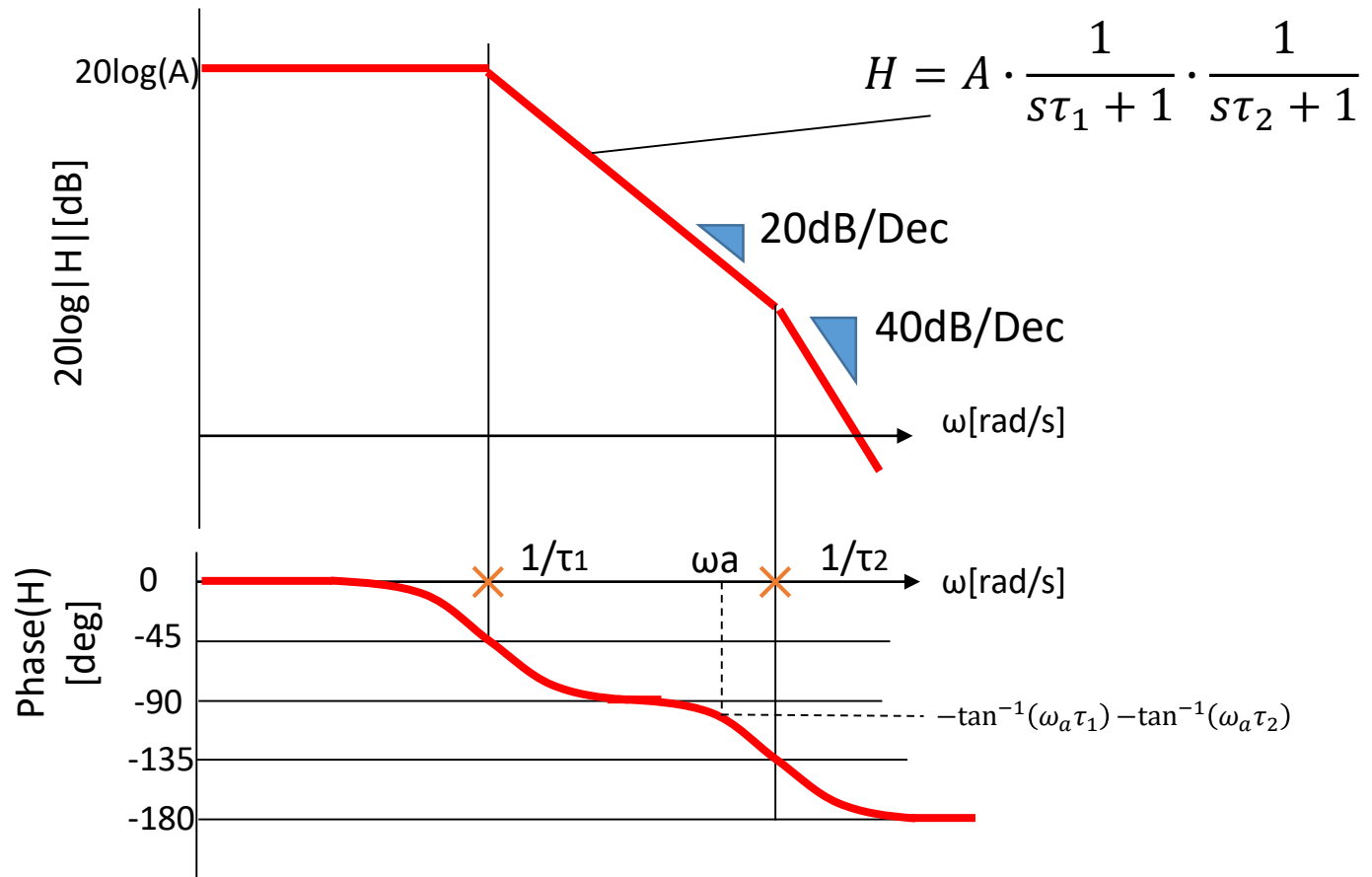
- ★位相余裕: [0dB利得時の位相]と[-180°]の差
- ★利得余裕: [-180° の時の利得]と[0dB]の差

◆Bode Chart



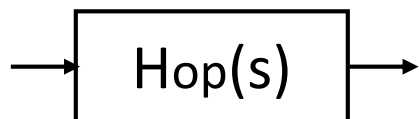
複数極の位相回転

- ・極のみがN個→ $90 \cdot N$ [deg]位相が回転する。
- ・任意の周波数 ω_a の位相遅れは次式
$$-\tan^{-1}(\omega_a \tau_1) - \tan^{-1}(\omega_a \tau_2)$$

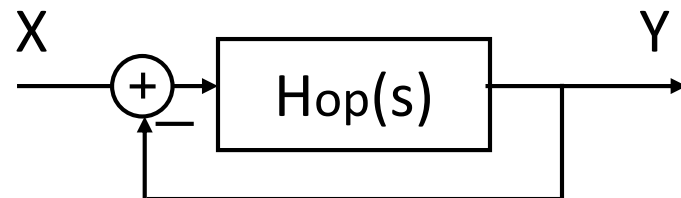


開ループと閉ループ

【開ループ】



【閉ループ】



$$H_{clsd} = \frac{Y}{X} = \frac{H_{op}}{1 + H_{op}}$$

開ループ、閉ループの伝達関数をそれぞれ次のようにおく。

$$H_{op} = |H_{op}|e^{j\varphi}$$

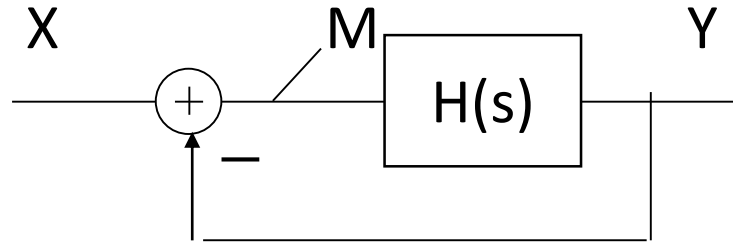
$$H_{clsd} = |H_{clsd}|e^{j\alpha}$$

$(|H_{op}|, \varphi)$, $(|H_{clsd}|, \alpha)$ は下記のように書ける。

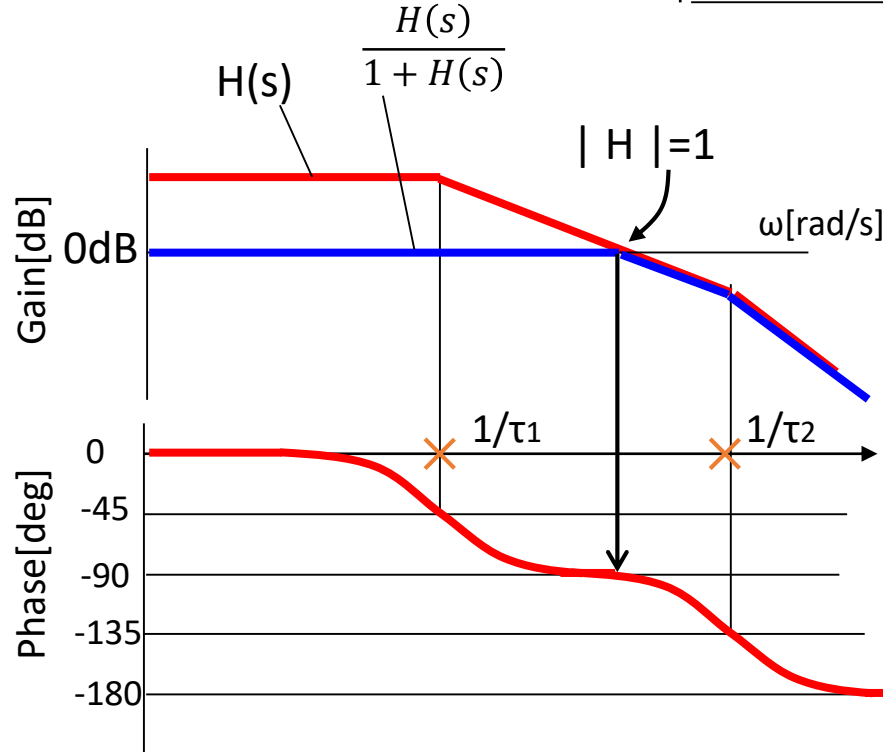
$$|H_{clsd}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{|H_{op}|} \cos \varphi + \frac{1}{|H_{op}|^2}}}$$

$$\alpha = -\tan^{-1} \left(-\frac{\sin \varphi}{|H_{op}| + \cos \varphi} \right)$$

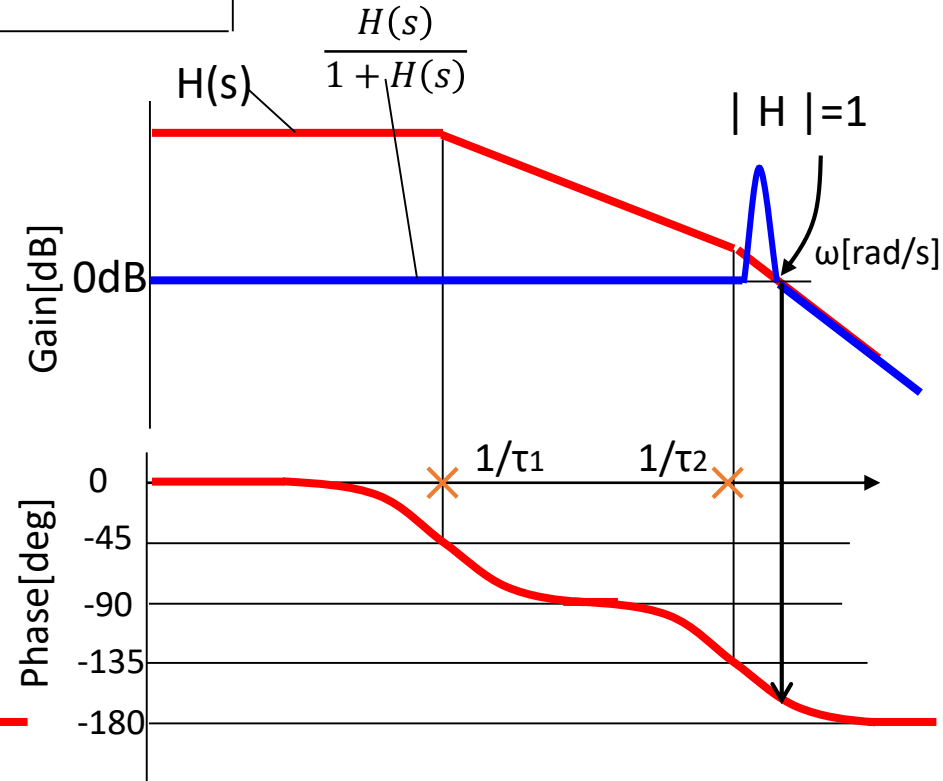
安定性



— 開ループ
— 閉ループ



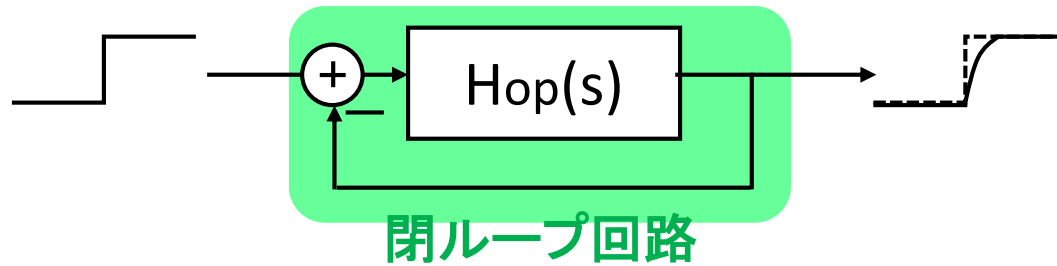
ピーク無。
閉ループは安定



開ループ特性で-180degとなる周波数と利得1の周波数が近い

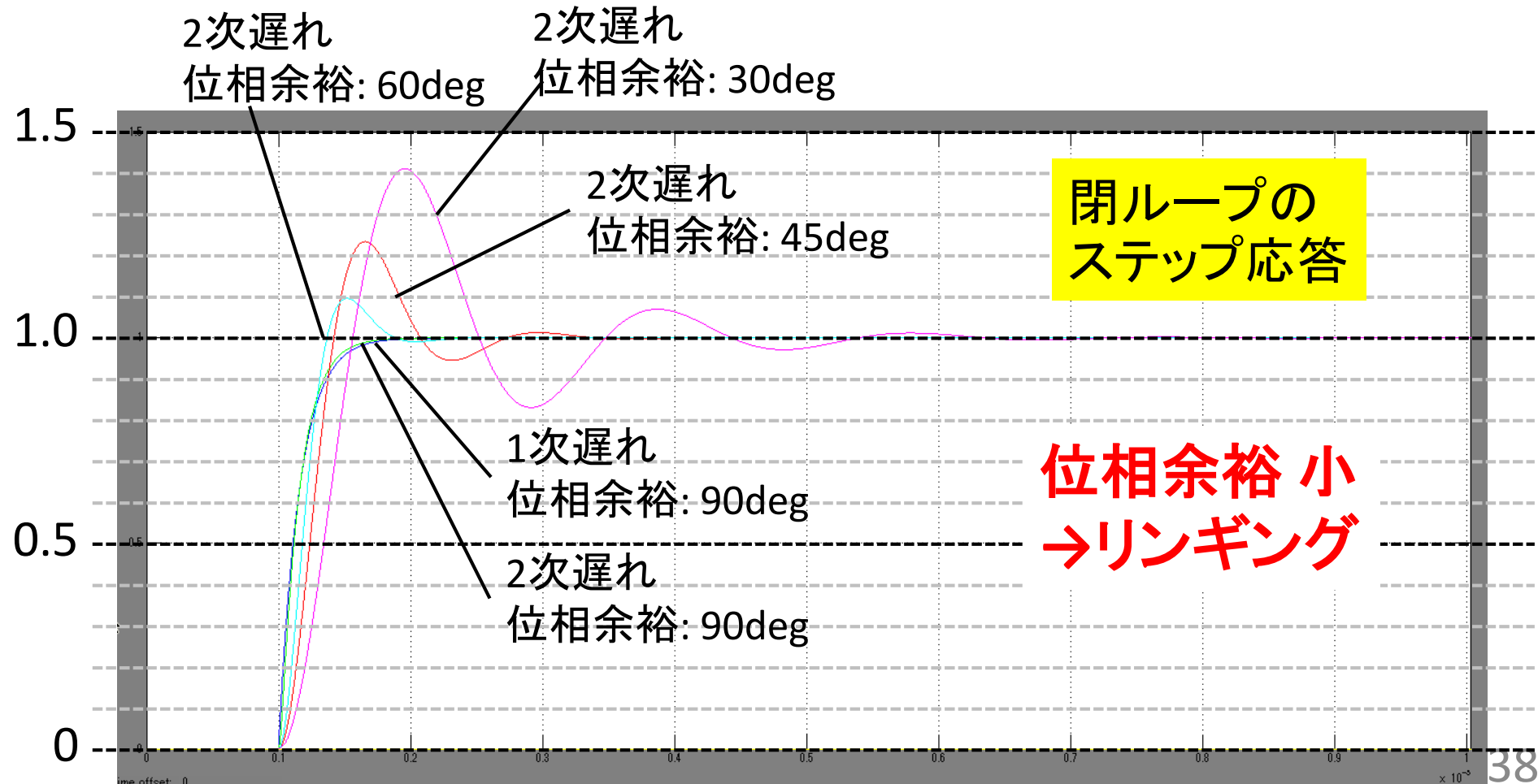
ピークあり。
閉ループは不安定

安定性と閉ループのステップ応答



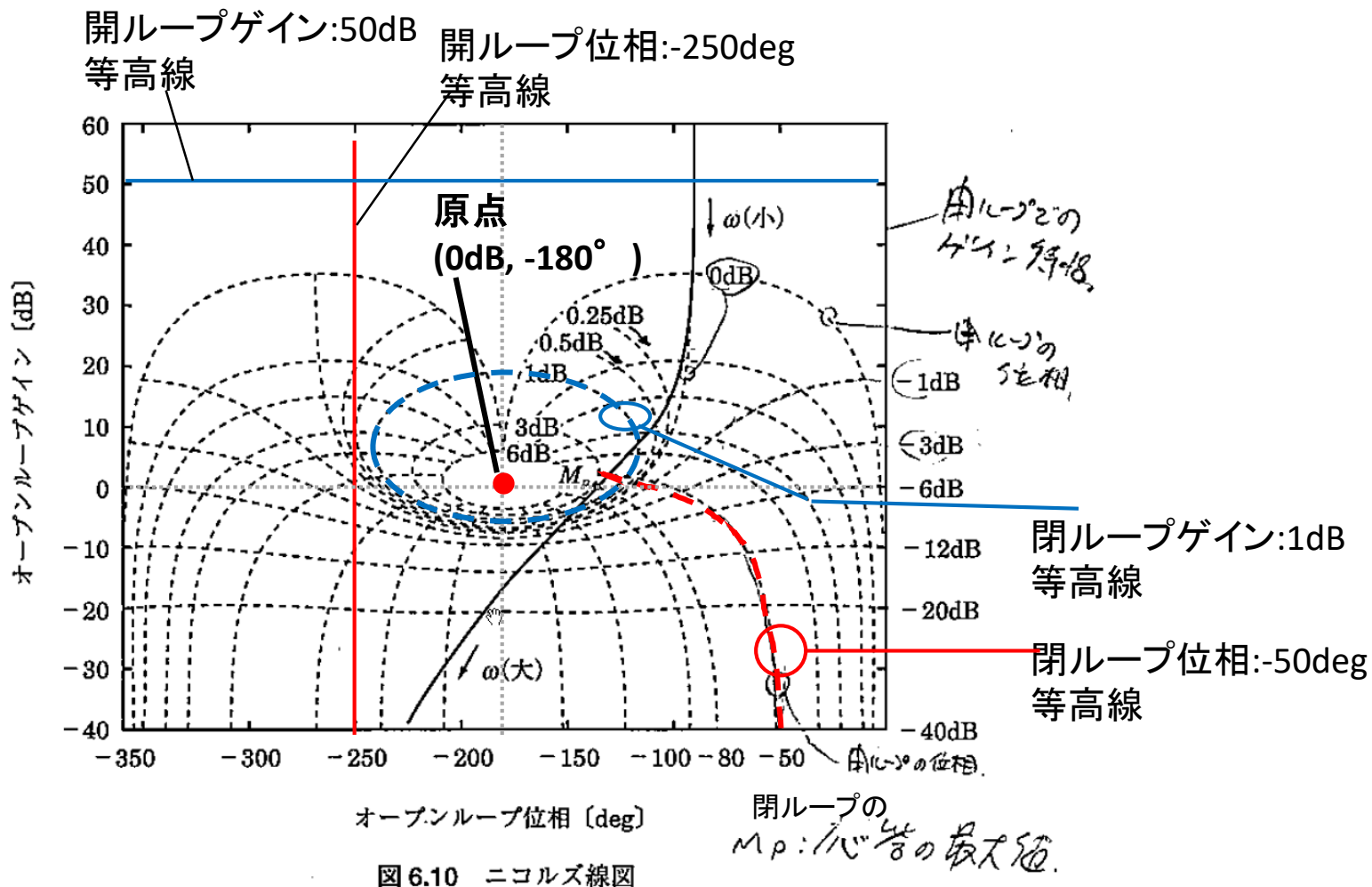
Hop(s)

1次遅れ	2次遅れ
$\frac{1}{\tau s + 1}$	$\frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$



ニコルズ線図

- 開ループ、閉ループのゲイン/位相特性が読み取れる
- ナイキスト線図の(-1, j0)はニコルズ線図では(0dB, -180deg)に投影される



ニコルズ線図

原点が軌跡の左側に位置する場合は安定

利得余裕

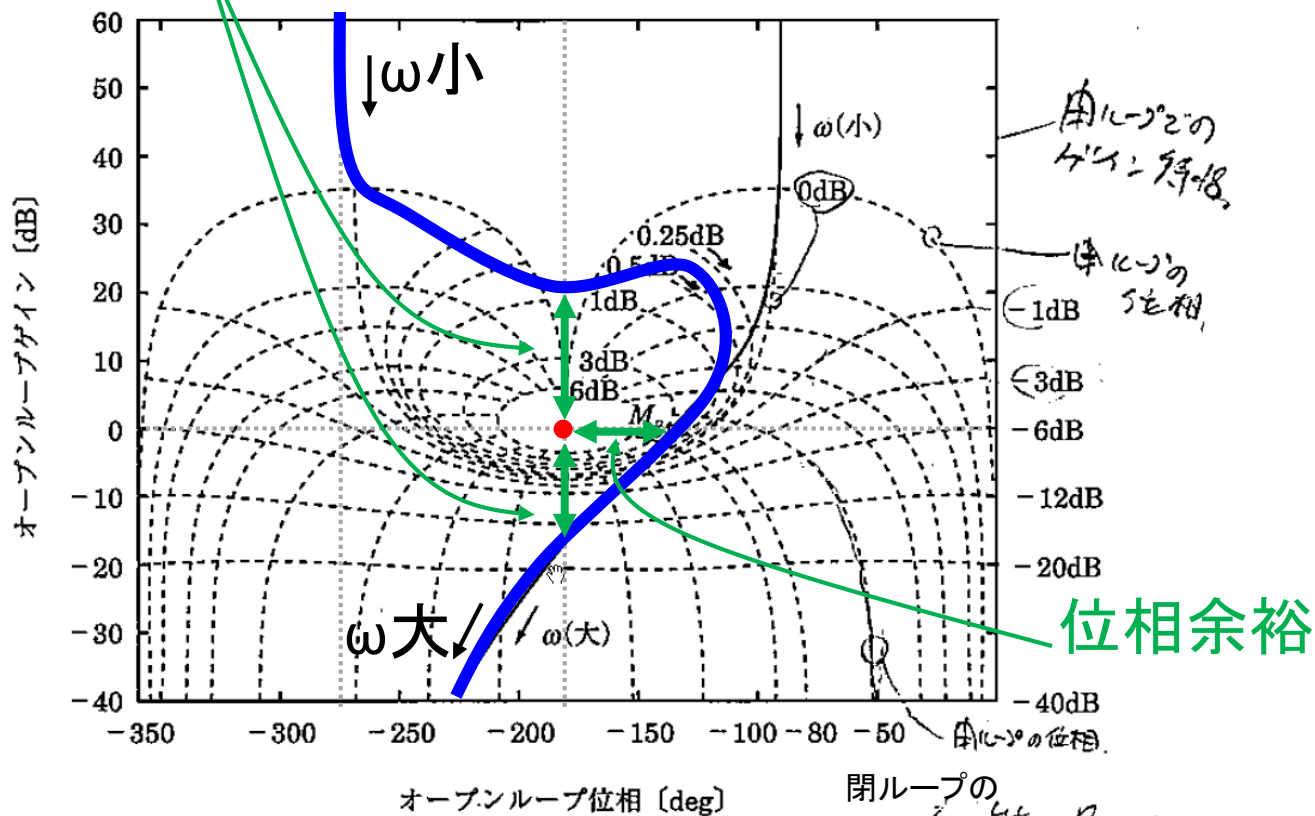


図 6.10 ニコルズ線図

ボード線図とニコルズ線図;

安定

$$\frac{A}{s\tau + 1}$$

安定

$$\frac{A}{(s\tau_1 + 1)(s\tau_2 + 1)}$$

安定

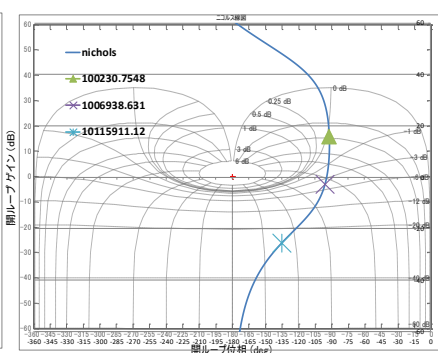
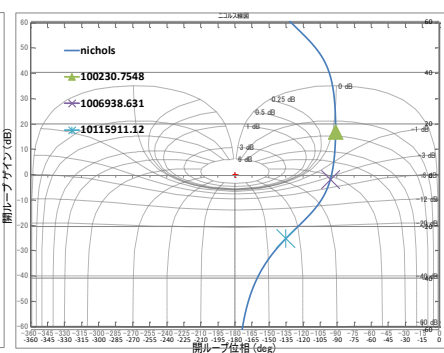
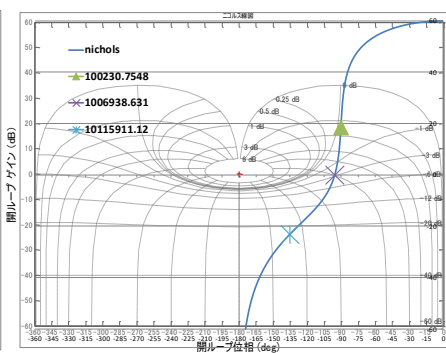
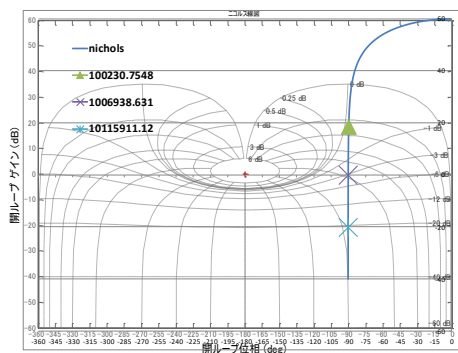
$$\frac{A}{s^2} \frac{s\tau_2 + 1}{s\tau_1 + 1}$$

安定

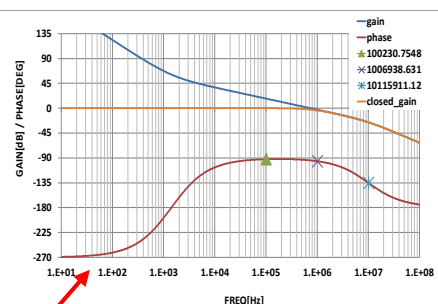
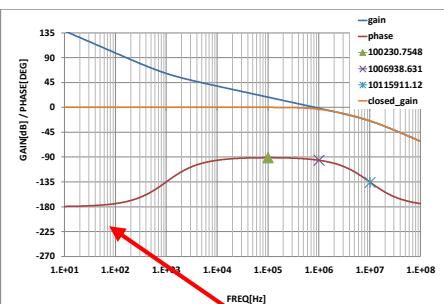
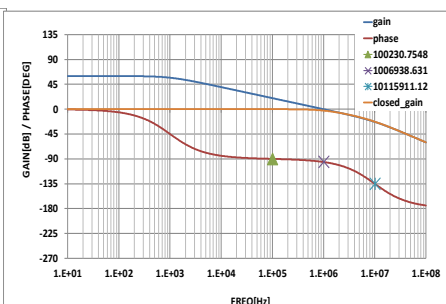
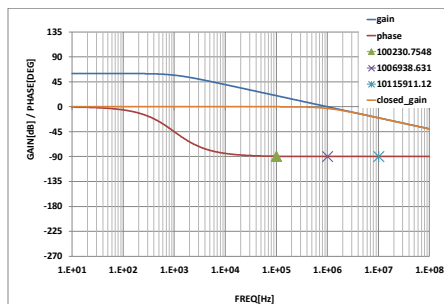
$$\frac{A}{s^3} \frac{(s\tau_2 + 1)^2}{s\tau_1 + 1}$$

開ループ
特性

ニコルズ線図



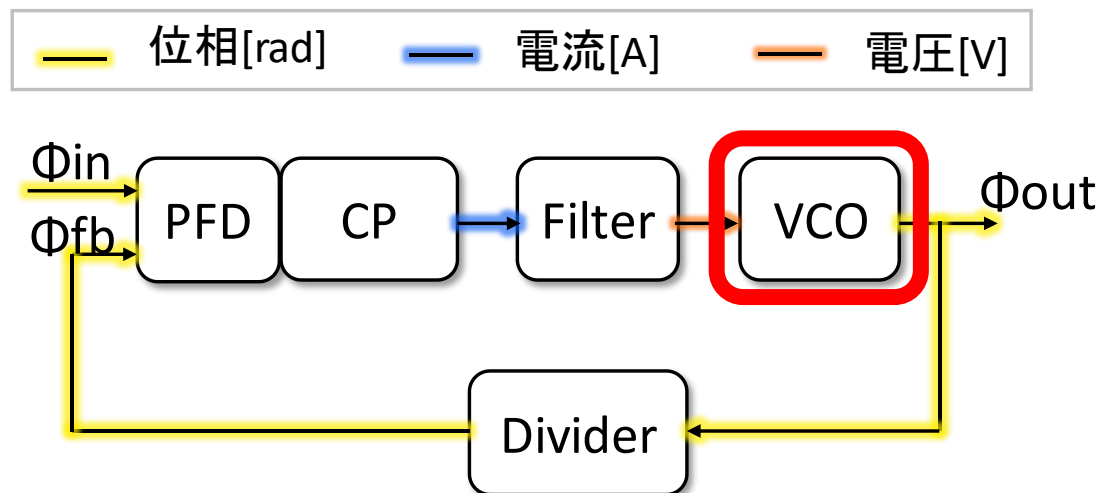
ボード線図



位相が-180degでも
利得があれば安定!

発振器のモデリング

VCOの発振周波数は入力電圧で制御される。
ただ、PLLのループ特性の解析においては、
VCOの出力は位相[rad]であるので注意。



バルクハウゼンの発振条件

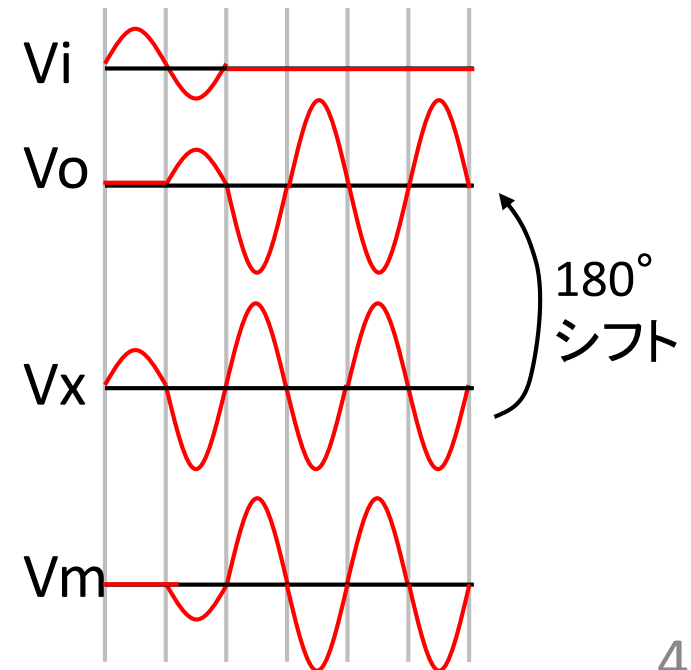
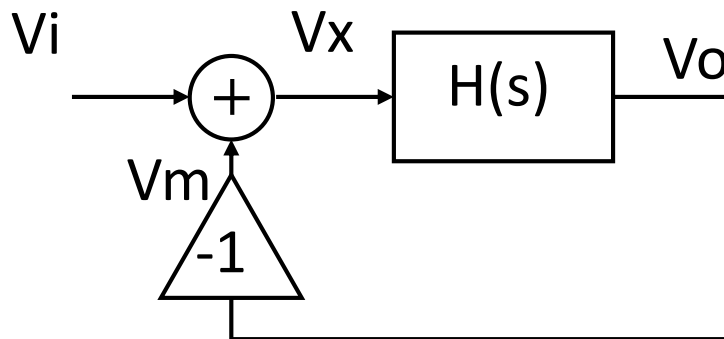
ω_0 において下記の2つの条件を満たすとき、
発振が持続する。

位相シフト条件

$$\angle H(j\omega_0) = 180^\circ$$

利得条件

$$|H(j\omega_0)| \geq 1$$



位相と振幅

$$H(s) = G \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right) \cdots \left(1 + \frac{s}{\omega_{zn}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right) \cdots \left(1 + \frac{s}{\omega_{pm}}\right)}$$

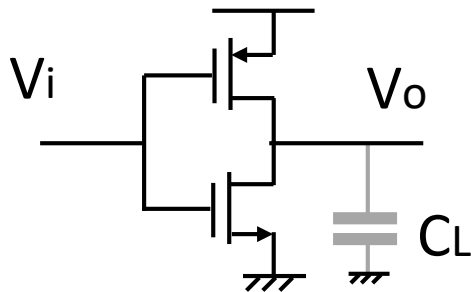
ω_0 での利得は

$$\begin{aligned} 20 \log |H(j\omega_0)| &= 20 \log |G| + 20 \log \left| 1 + j \frac{\omega_0}{\omega_{z1}} \right| + \cdots + 20 \log \left| 1 + j \frac{\omega_0}{\omega_{zn}} \right| \\ &\quad - 20 \log \left| 1 + j \frac{\omega_0}{\omega_{p1}} \right| - \cdots - 20 \log \left| 1 + j \frac{\omega_0}{\omega_{pm}} \right| \\ &= 20 \log |G| + 10 \sum_{k=1}^n \log \left(1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_{zk}} \right)^2 \right) - 10 \sum_{k=1}^m \log \left(1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_{pk}} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

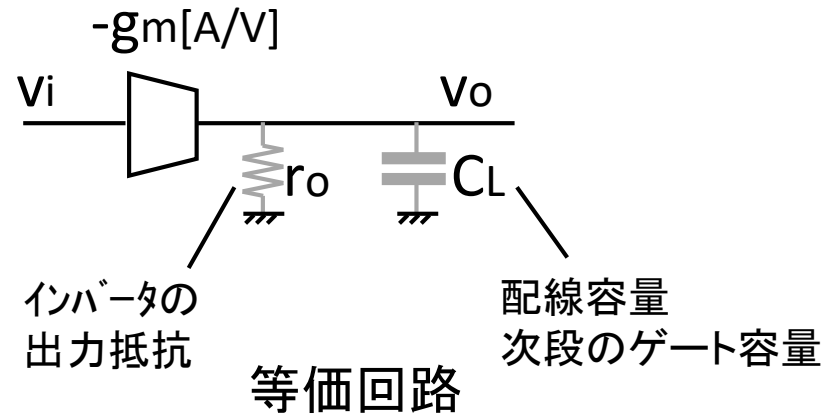
ω_0 での位相は

$$\begin{aligned} \angle H(j\omega_0) &= \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\omega_{z1}} + \cdots + \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\omega_{zn}} - \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\omega_{p1}} + \cdots + \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\omega_{pm}} \\ &= \sum_{k=1}^n \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\omega_{zk}} - \sum_{k=1}^m \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\omega_{pk}} \end{aligned}$$

インバータ1段の利得と位相



1段のインバータ回路



入出力伝達関数 $H_{inv}(s)$ は

$$H_{inv}(s) = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m r_o}{1 + r_o C_L s}$$

直流利得は $g_m r_o$

ω_0 での利得は

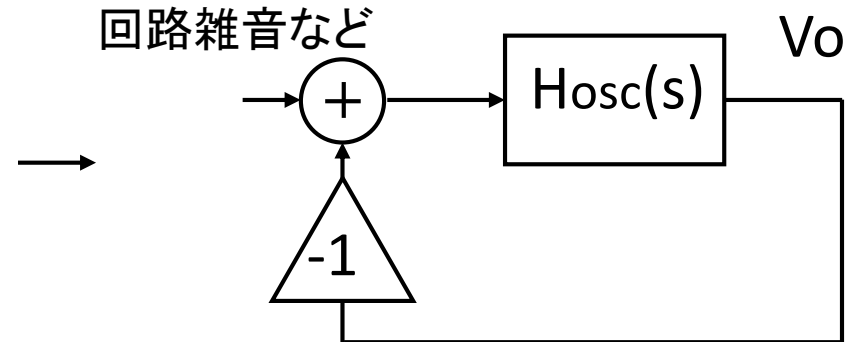
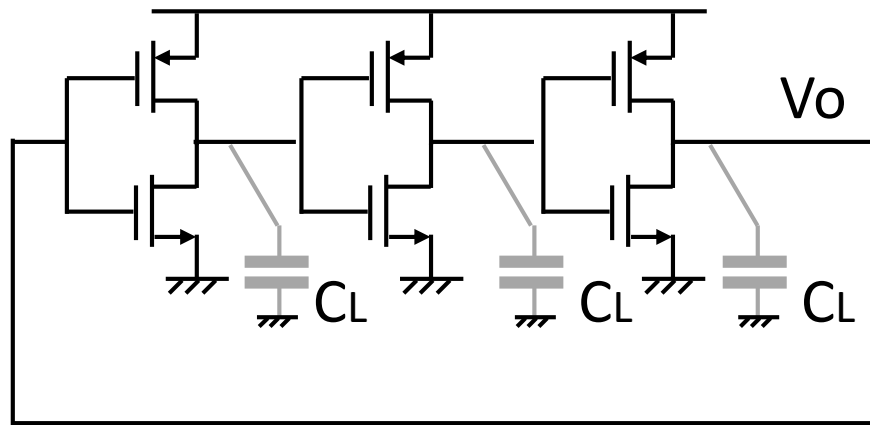
$$|H_{inv}(j\omega_0)| = \frac{g_m r_o}{\sqrt{1 + (r_o C_L \omega_0)^2}}$$

ω_0 での位相は

$$\angle H_{inv}(j\omega_0) = -\tan^{-1}(r_o C_L \omega_0)$$

* 位相シフトは $\tan^{-1}(r_o C_L \omega_0)$ といえる。

3段リング発振器



3段の直列インバータのループ利得は

$$(H_{inv}(s))^3 = -\left(\frac{g_m r_o}{1 + r_o C_L s}\right)^3 = -H_{osc}(s)$$

$$H_{osc}(s) \equiv \left(\frac{g_m r_o}{1 + r_o C_L s}\right)^3$$

従って、3段リング発振器は右図のように描くことができる。

$H_{osc}(s)$ 利得と位相シフトは、

利得 $\left(\frac{g_m r_o}{\sqrt{1 + (r_o C_L \omega)^2}}\right)^3$

位相シフト

$$3 \tan^{-1}(r_o C_L \omega)$$

3段リング発振器の発振周波数

バルクハウゼンの発振条件より $H_{osc}(s)$ の位相シフトが 180° の時に発振が起こる。その時の周波数 ω_{osc} とすると、

$$\tan^{-1}(r_o C_L \omega_{osc}) = \frac{\pi}{3}$$

$$r_o C_L \omega_{osc} = \sqrt{3}$$

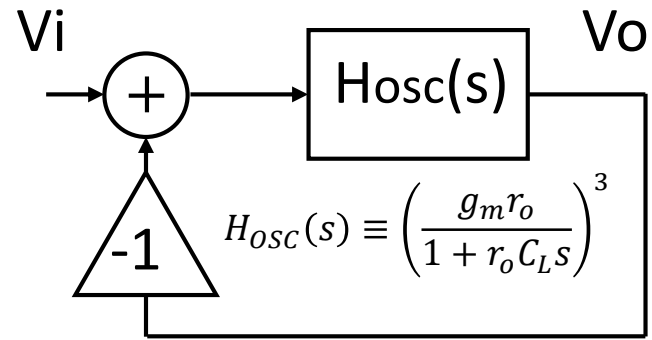
$$\therefore \omega_{osc} = \frac{\sqrt{3}}{r_o C_L} \quad [\text{rad/s}]$$

利得条件より

$$\left(\frac{g_m r_o}{\sqrt{1 + (r_o C_L \omega_{osc})^2}} \right)^3 = \left(\frac{g_m r_o}{2} \right)^3 \geq 1$$

従って、3段リング発振器はインバータの直流利得 $g_m r_o$ が2より大きい時に発振する。

小信号発振周波数



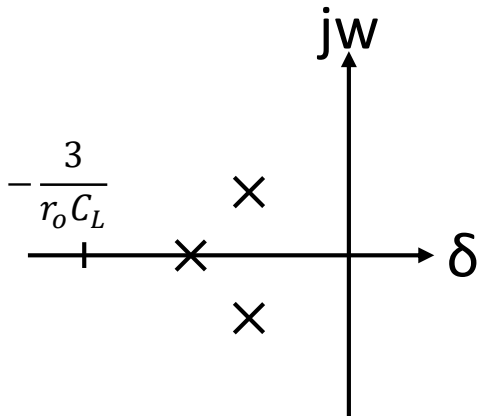
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{H_{OSC}(s)}{1 + H_{OSC}(s)}$$

$$= \frac{(g_m r_o)^3}{(1 + r_o C_L s + g_m r_o)[(1 + r_o C_L s)^2 - (1 + r_o C_L s)g_m r_o + (g_m r_o)^2]}$$

$$\omega_{p1} = -\frac{(g_m r_o + 1)}{r_o C_L}$$

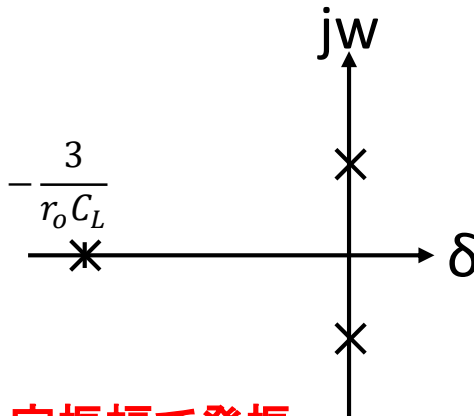
$$\omega_{p2,3} = \frac{1}{r_o C_L} \left[\frac{g_m r_o (1 \pm j\sqrt{3})}{2} - 1 \right]$$

(i) $0 < g_m r_o < 2$



発振なし

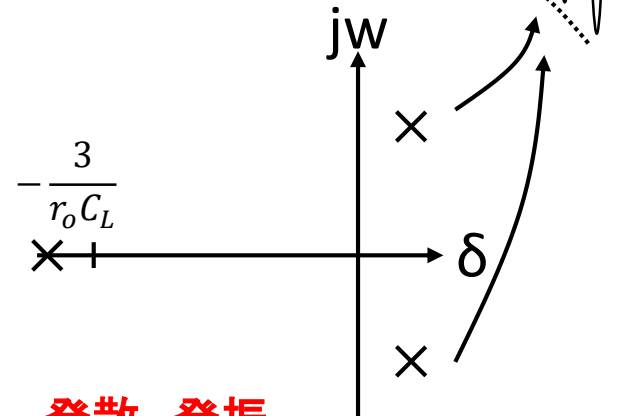
(ii) $g_m r_o = 2$



一定振幅で発振

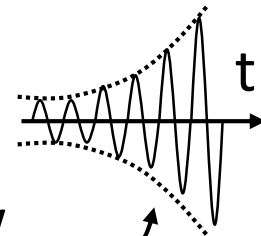
$$\omega_{OSC} = \frac{\sqrt{3}}{r_o C_L}$$

(iii) $g_m r_o > 2$

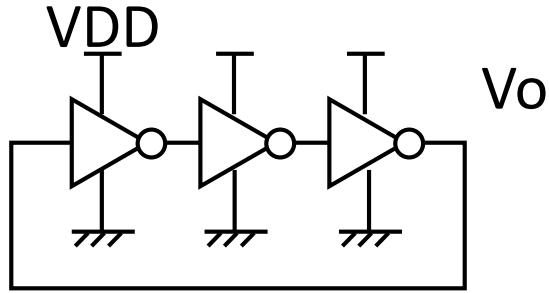


発散、発振

$$\omega_{OSC} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{g_m}{C_L}$$



大信号発振

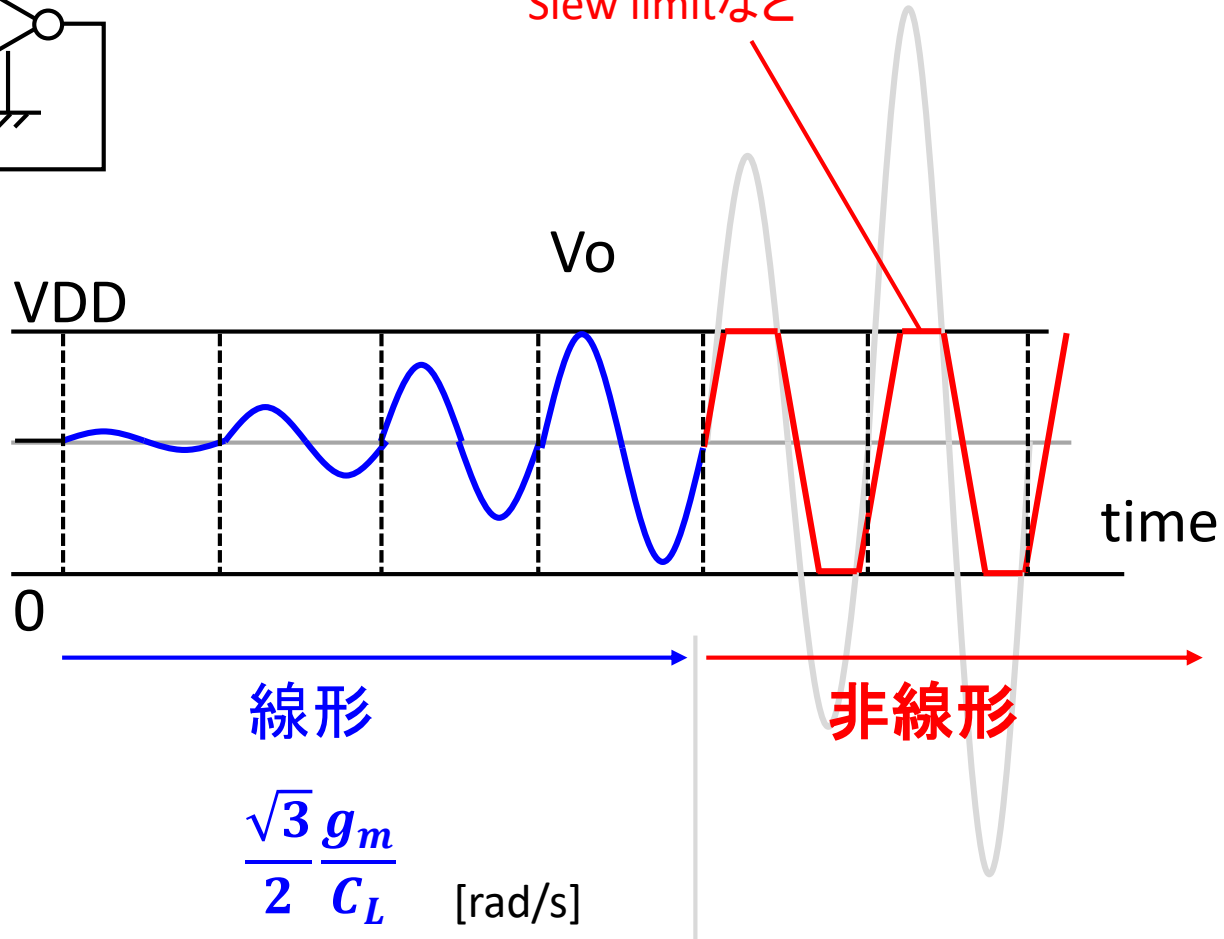


下記の影響(制限)により非線形動作となる。

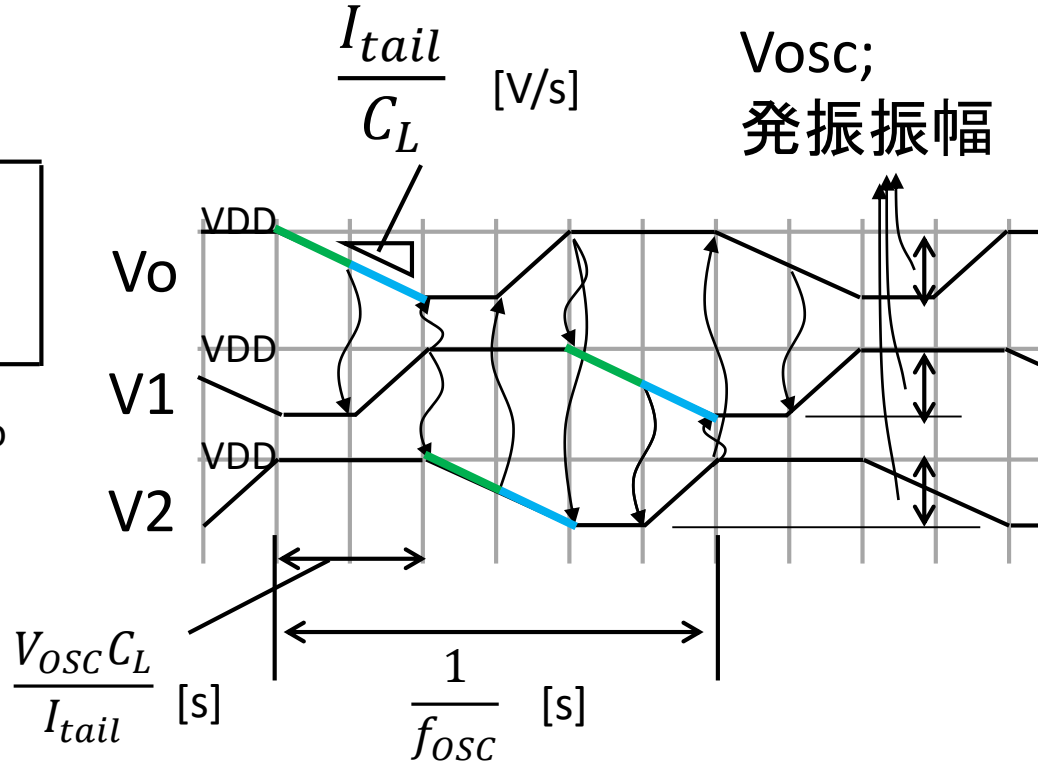
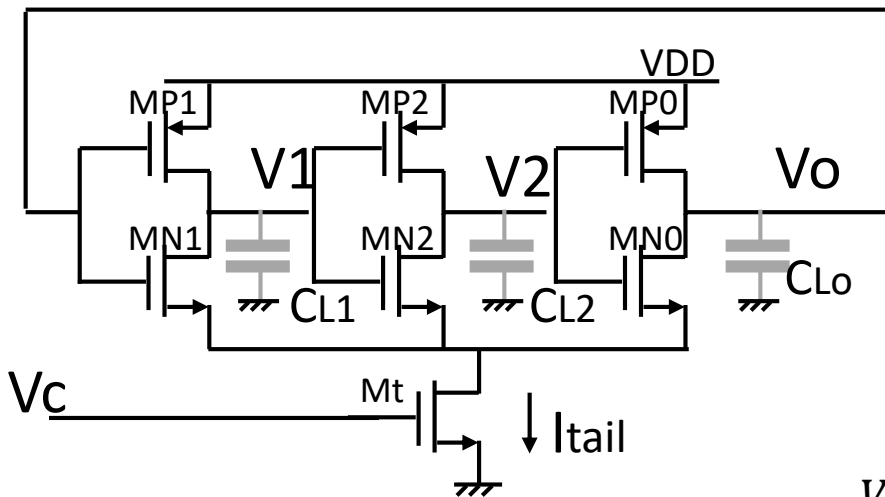
電源電圧範囲

素子の線形動作範囲

Slew limitなど



電圧制御発振器 (Voltage-controlled oscillator; VCO)



制御電圧 V_c で
発振周波数 f_{osc} を調節。

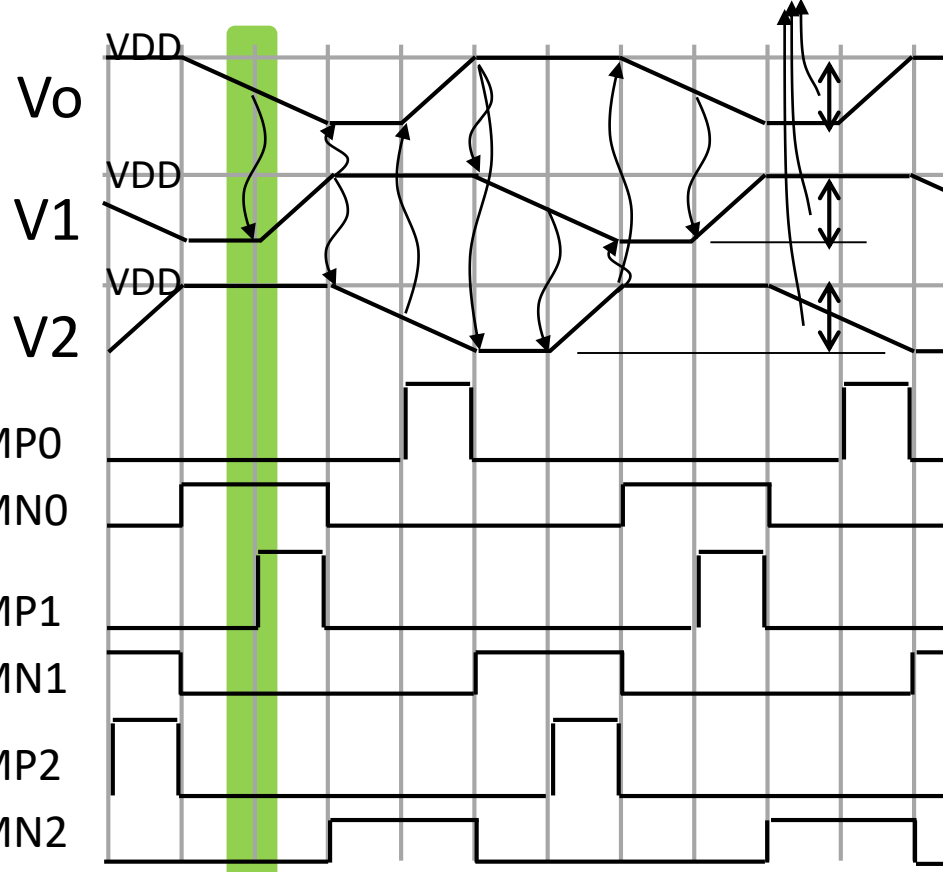
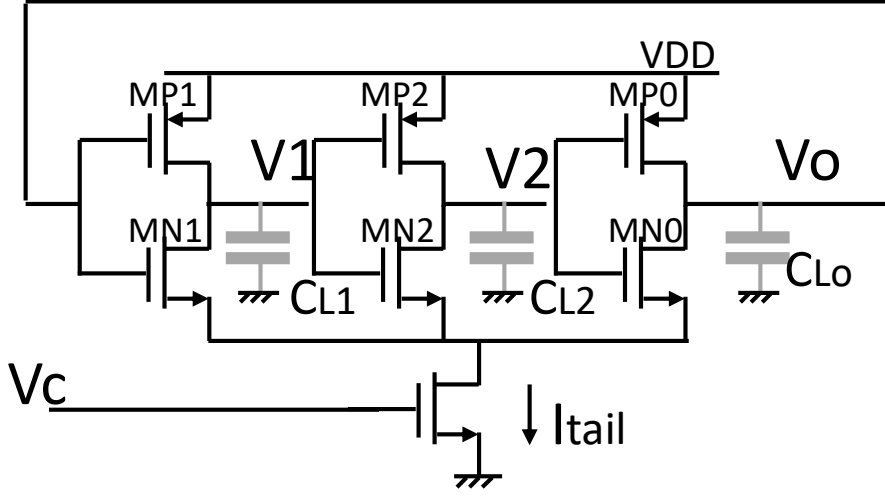
$$\omega_{osc} = 2\pi \frac{I_{tail}}{\underbrace{3V_{osc}C_L}_{\text{段数}}} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_t (V_c - V_{th})^2 \frac{2\pi}{3V_{osc}C_L} \text{ [rad/s]}$$

$C_L = C_{lo} = C_{L1} = C_{L2}$

発振周波数は V_c で調節できる。

電圧制御発振器 (Voltage-controlled oscillator; VCO)

V_{osc} ; 発振振幅



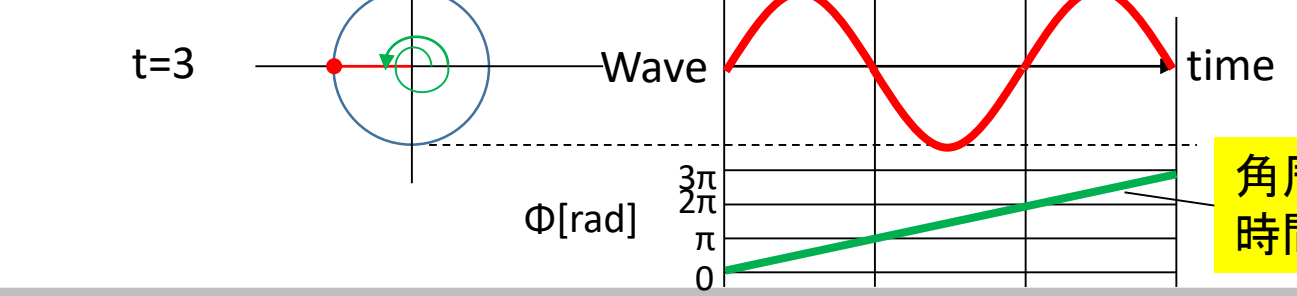
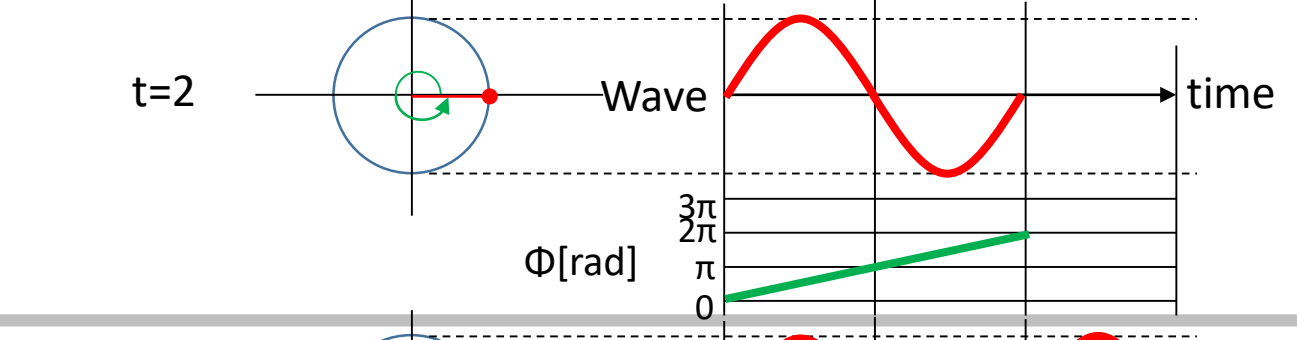
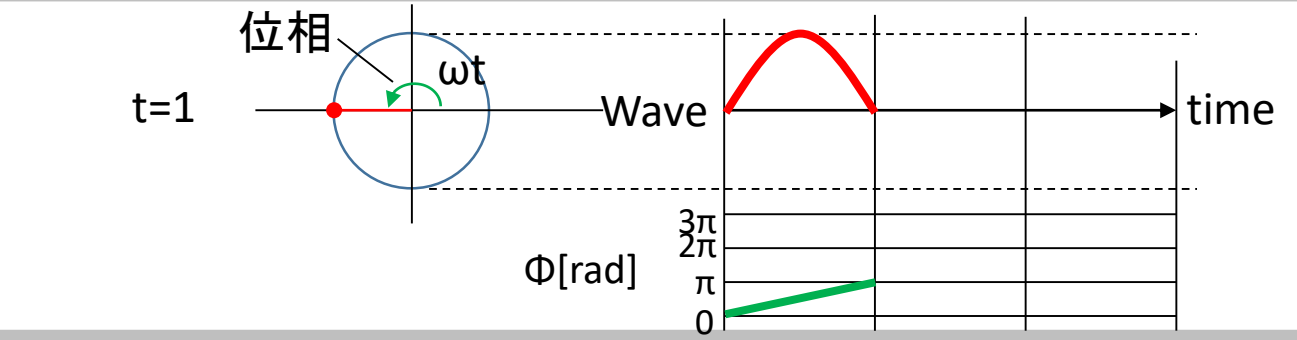
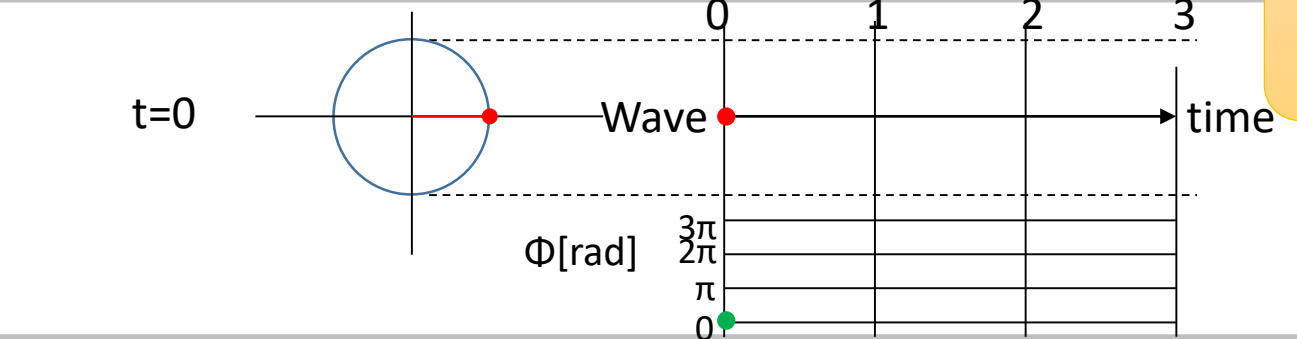
①

V_o が低下しMP1がON.
 電流がVDDからMP1を介してCL1へ流れる。
 V_1 電位は上昇を始める。
 I_{MP2} はゼロ \Rightarrow MP2の V_{ds} が0Vのため。
 I_{MN2} もゼロ \Rightarrow MN2の V_{gs} が V_{th} より低い為

①

周波数と位相の関係

Signal: $\text{Sin}(\omega t)$
 $\omega = \pi$ [rad/s]



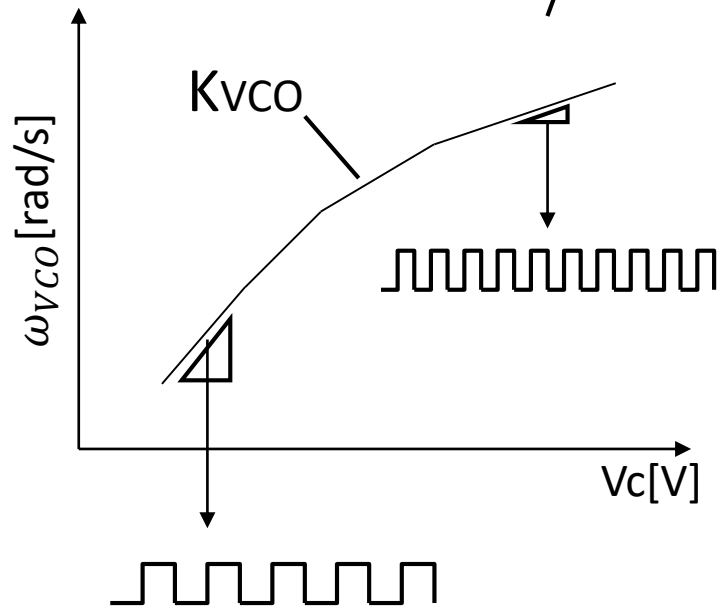
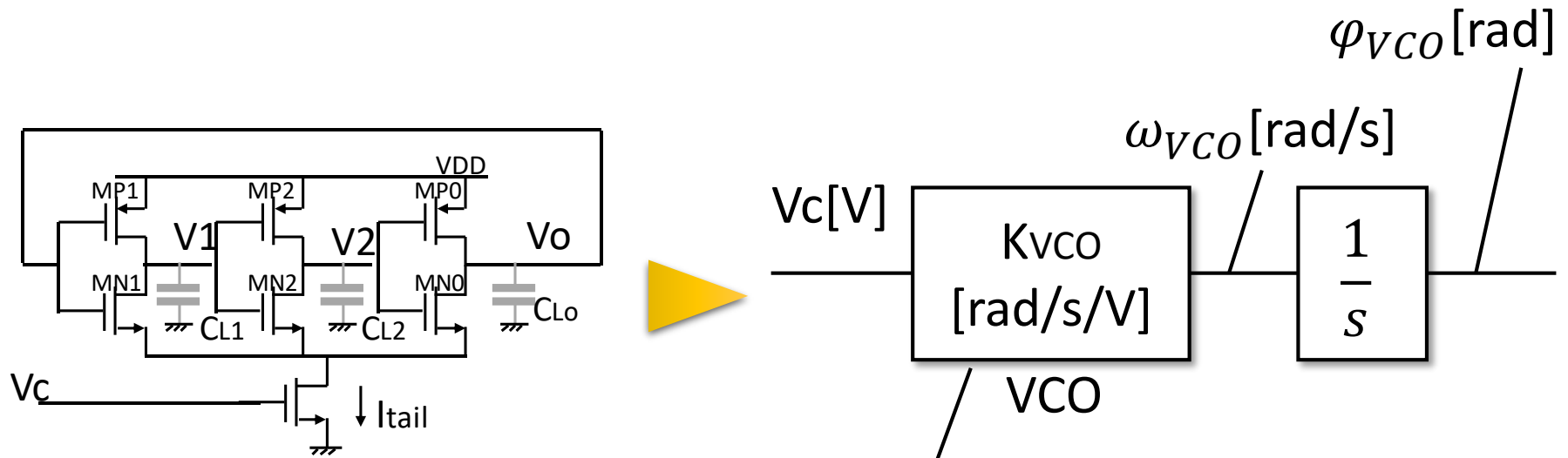
$$\phi = \int \omega dt$$

[rad]

位相は周波数の
積分値

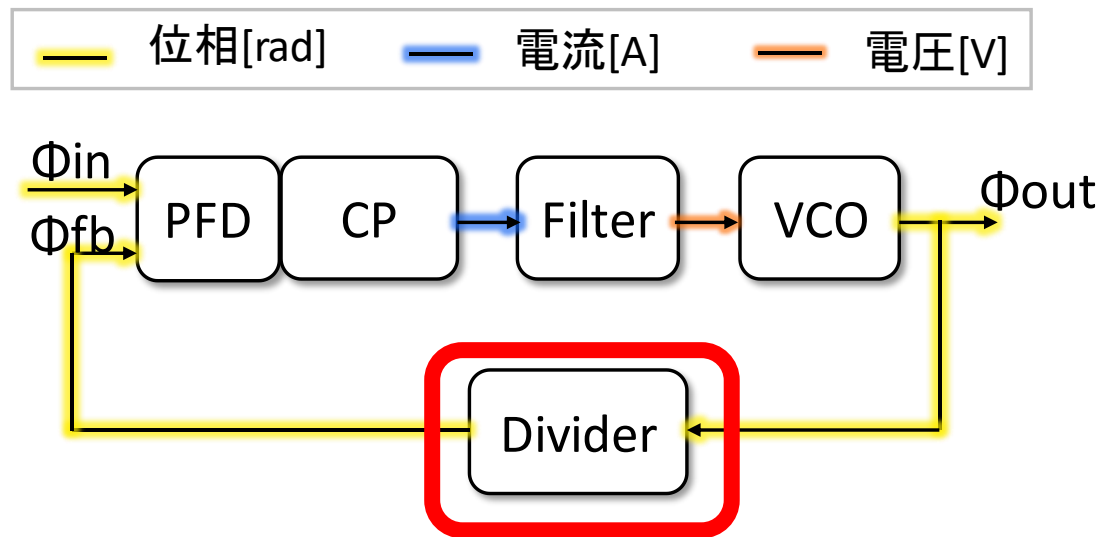
角周波数 ω の
時間積分

VCOのモデル化



分周器(ディバイダー)のモデリング

発振器の周波数を分周して
PFDに伝える。

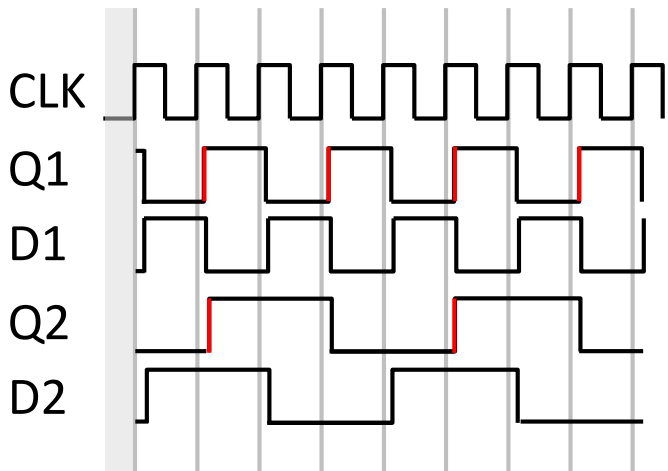
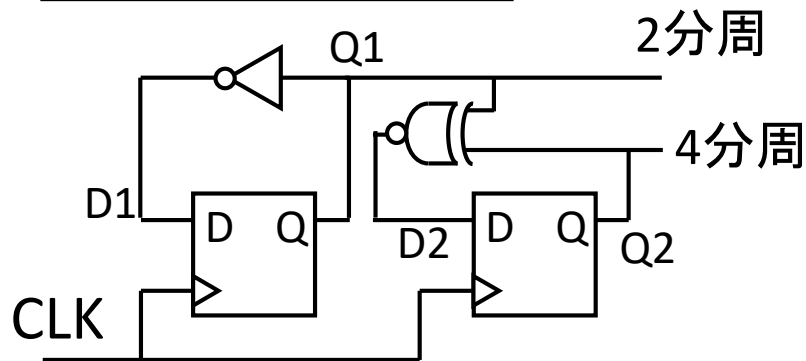


分周回路(ディバイダー, カウンタ)

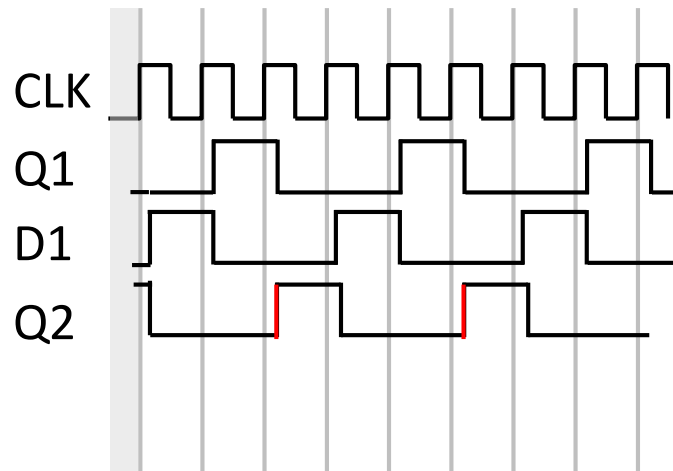
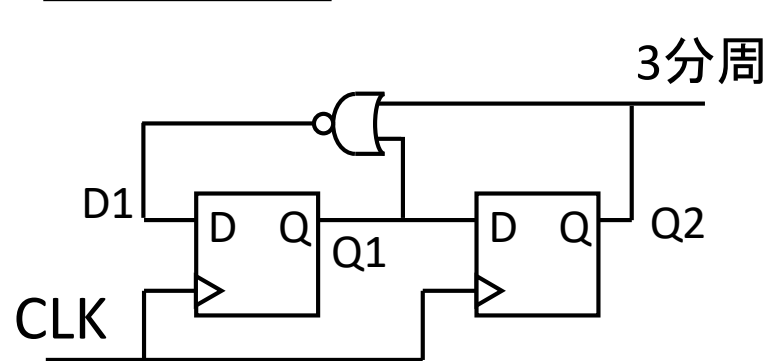
- ・FF(フリップフロップ)を用いて構成される。

■ 回路構成例

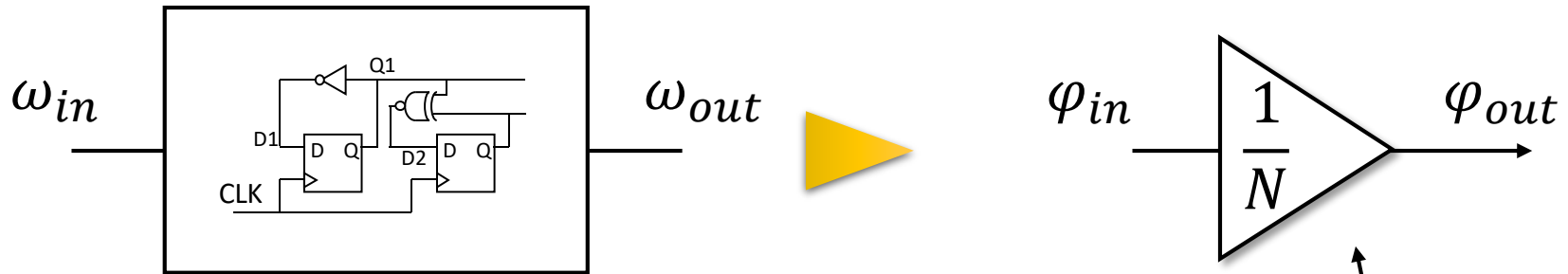
2分周/4分周回路



3分周回路



分周回路のモデリング



分周比 N

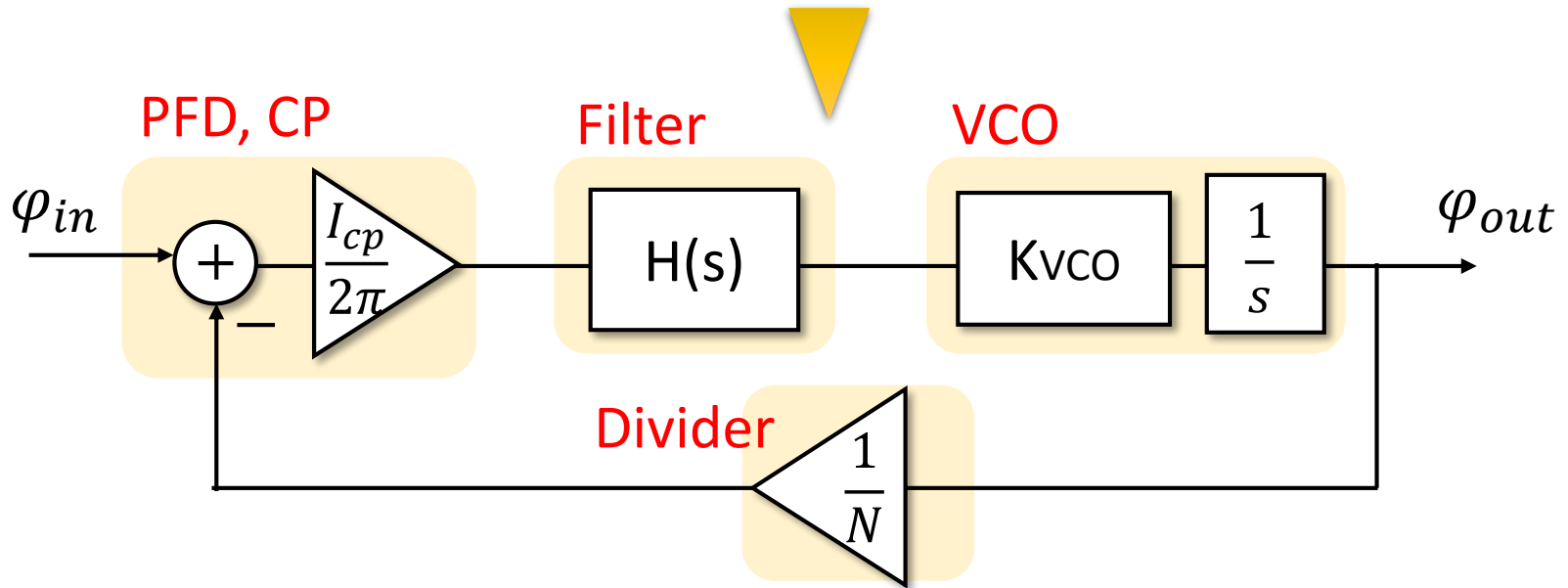
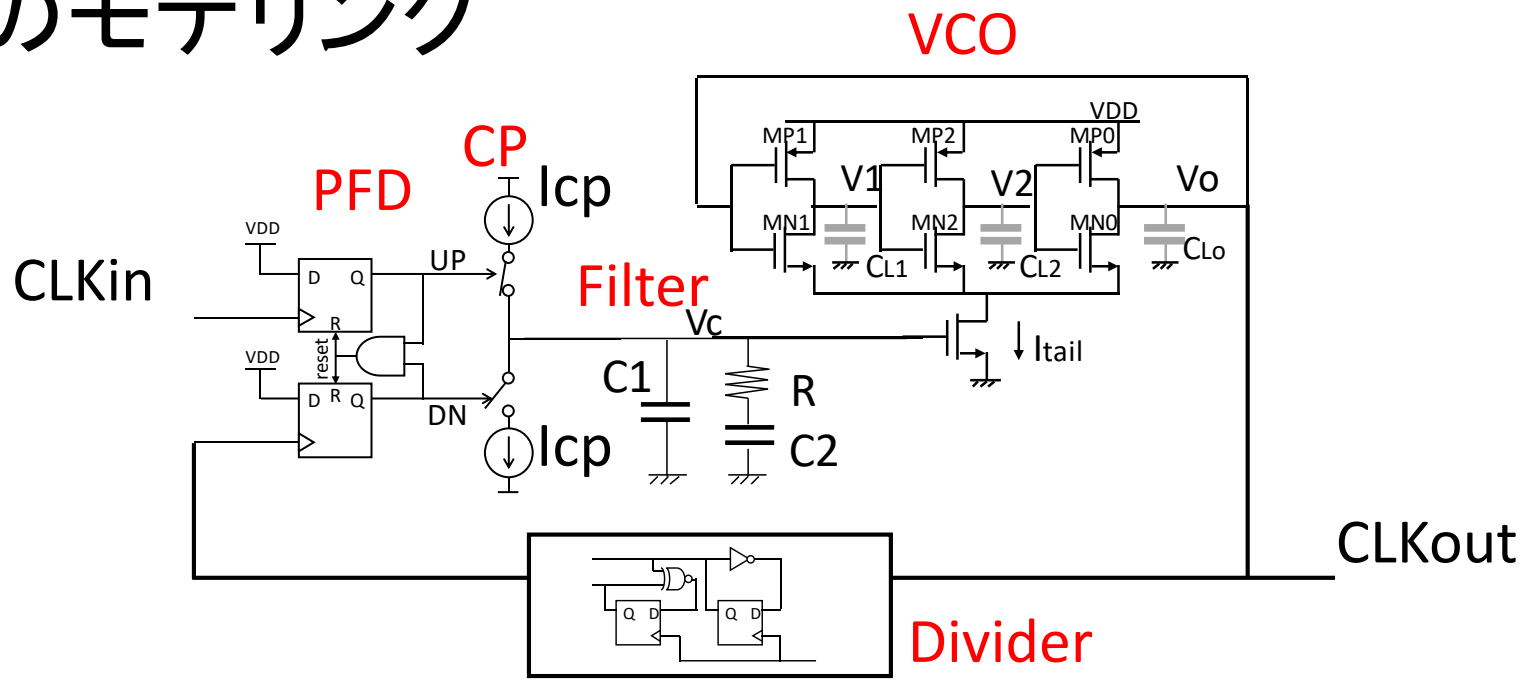
$$\omega_{out} = \frac{1}{N} \omega_{in}$$

位相を考えると

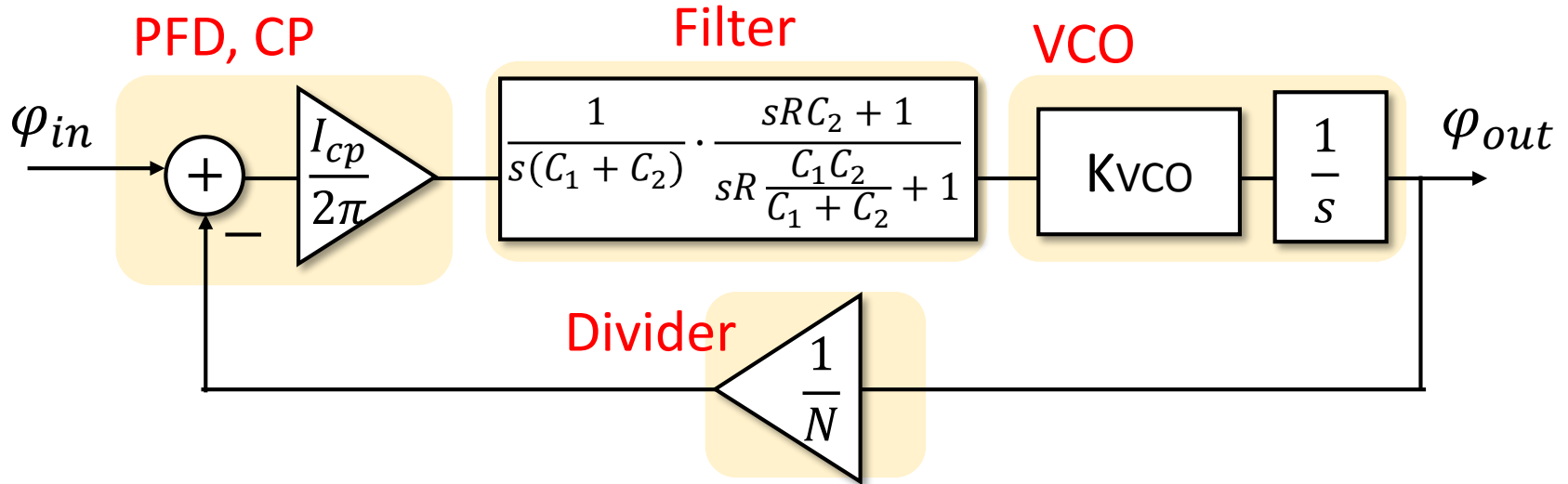
$$\int_0^t \omega_{out} dt = \frac{1}{N} \int_0^t \omega_{in} dt$$

$$\varphi_{out} = \frac{1}{N} \varphi_{in}$$

PLLのモデリング



PLLの開ループゲイン



$$H_{op} = \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{s^2} \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{sRC_2 + 1}{sR \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + 1}$$

重根
極 0,

$$\frac{1}{R \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$$

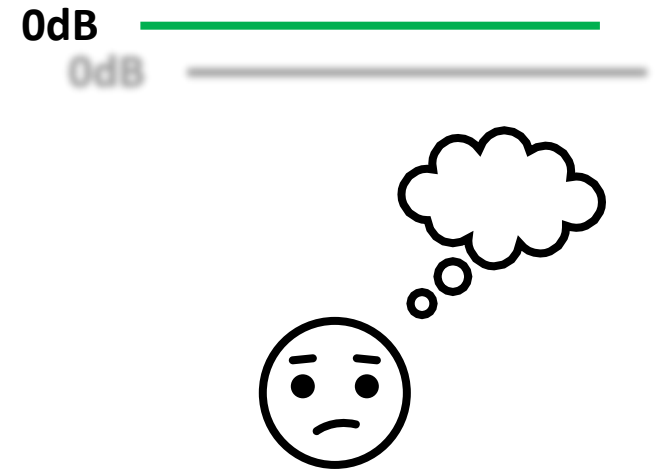
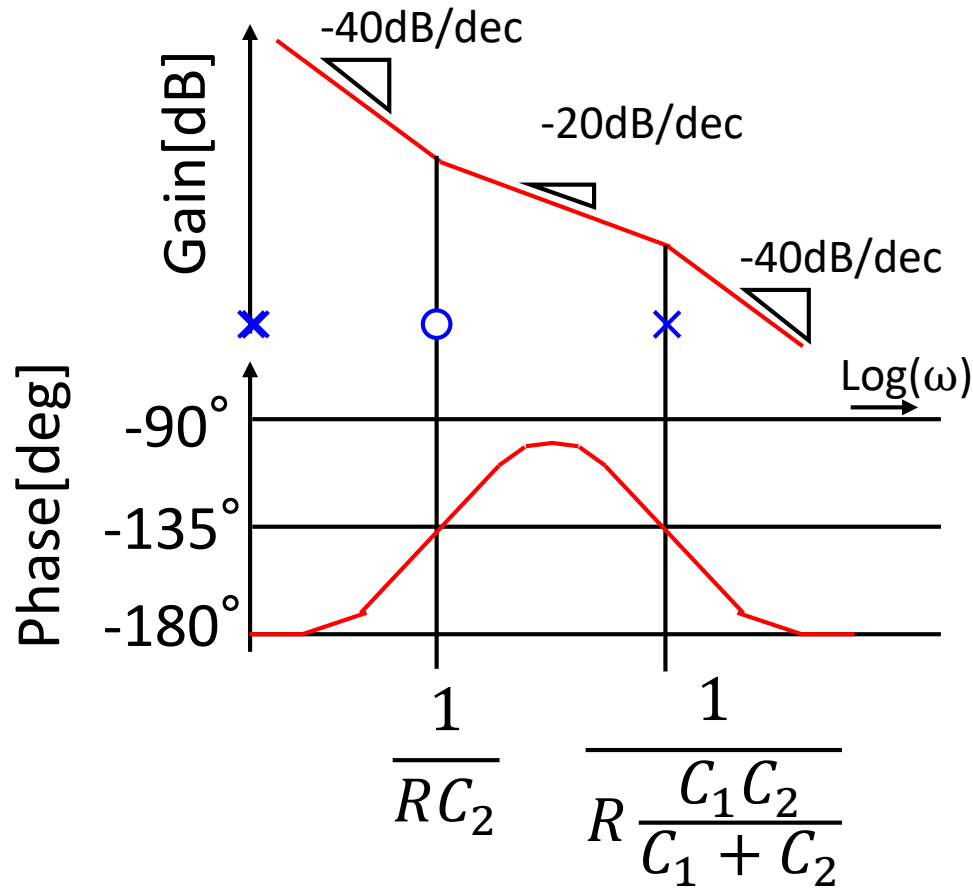
制御電圧平滑化

ゼロ

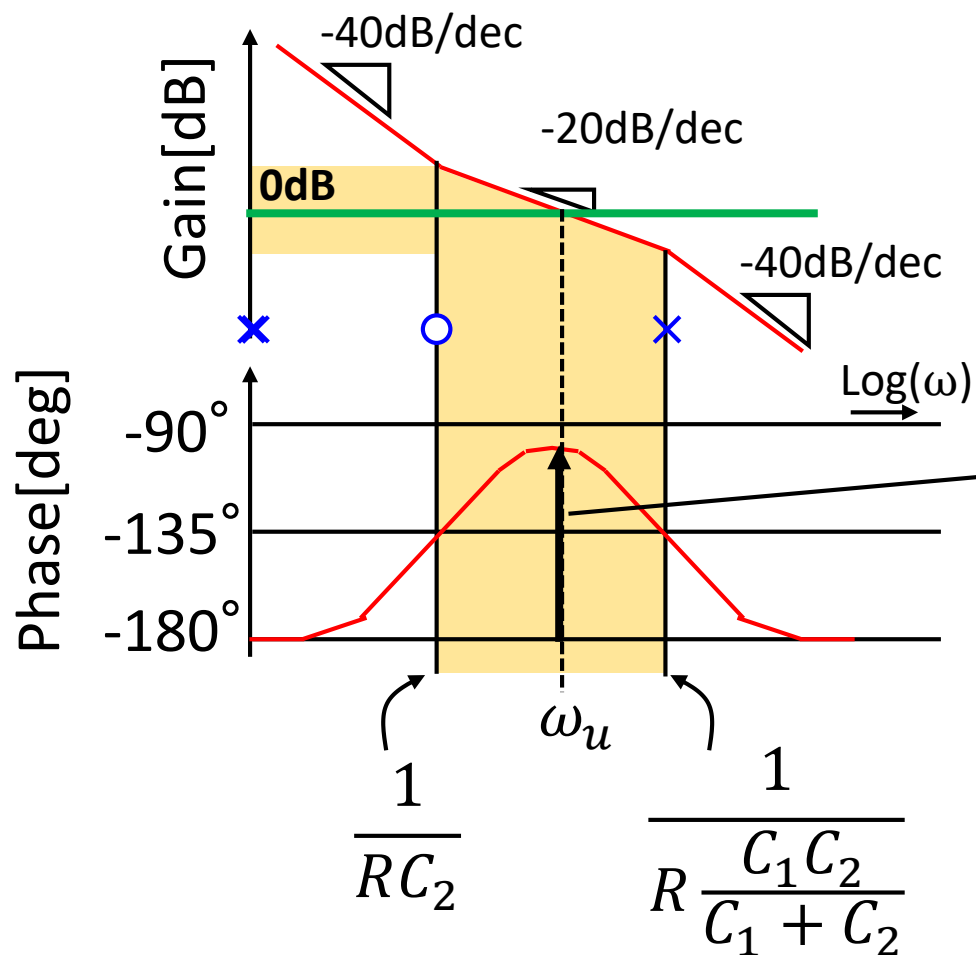
$$\frac{1}{RC_2}$$

安定性確保

どこに0dBラインを置いたらよいか？



どこに0dBラインを置いたらよいか？

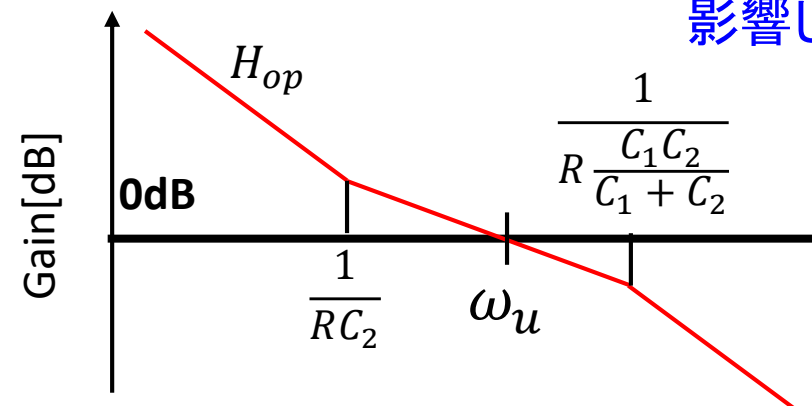


ユニティゲイン周波数 ω_u は安定性確保のためにゼロ点と極の間に設計する。

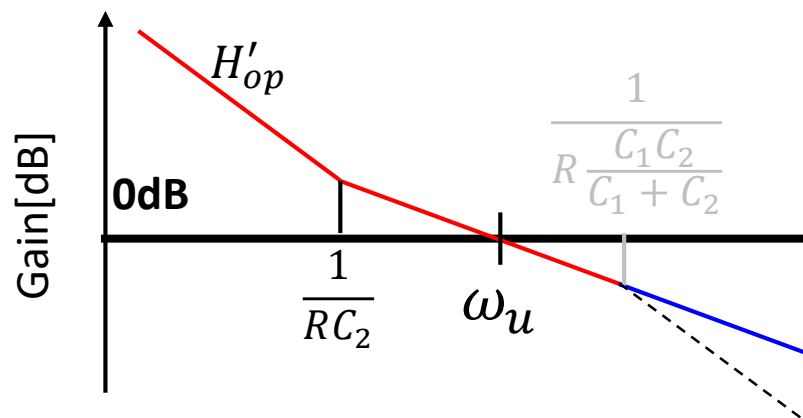
位相余裕

ユニティゲイン周波数の概算

高周波の極は
Hopと0dBの交点に
影響しない



$$H_{op} = \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{s^2} \frac{sRC_2 + 1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1}{sR \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + 1}$$



$$H'_{op} = \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{s^2} \frac{sRC_2 + 1}{C_1 + C_2}$$

$$\omega = \omega_u$$

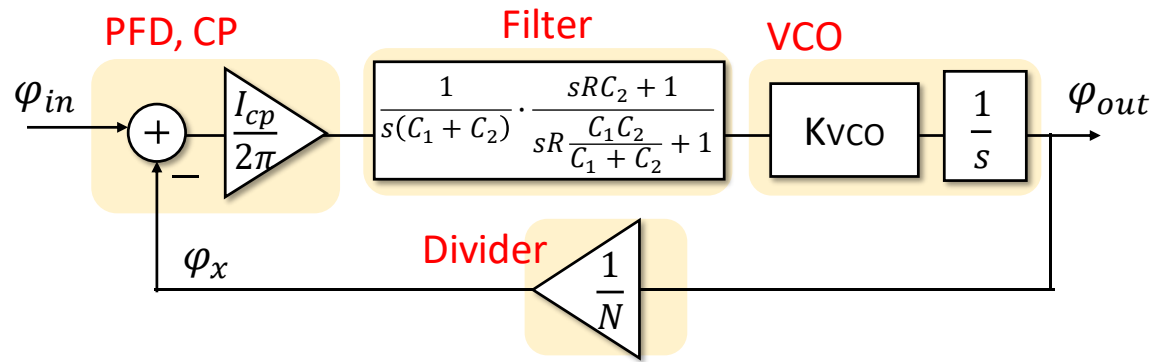
$$|H'_{op}| = 1$$

$$j\omega_u RC_2 + 1 \approx j\omega_u RC_2$$

$$|H'_{op}| = 1 \approx \left| \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{j\omega_u} \frac{RC_2}{C_1 + C_2} \right|$$

$$\omega_u \approx \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{RC_2}{C_1 + C_2} \quad [\text{rad/s}]$$

PLL特性まとめ



開ループ
伝達関数

$$H_{op} = \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{s^2} \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{sRC_2 + 1}{sR \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + 1}$$

閉ループ
伝達関数

$$H_{cl_x} = \frac{\varphi_x}{\varphi_{in}} = \frac{H_{op}}{1 + H_{op}}, \quad H_{cl} = \frac{\varphi_{out}}{\varphi_{in}} = \frac{N\varphi_x}{\varphi_{in}} = N \cdot H_{cl_x}$$

帯域

$$\omega_u \approx \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{RC_2}{C_1 + C_2} \quad [\text{rad/s}]$$

極

$$0, \quad \frac{1}{R \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \quad [\text{rad/s}]$$

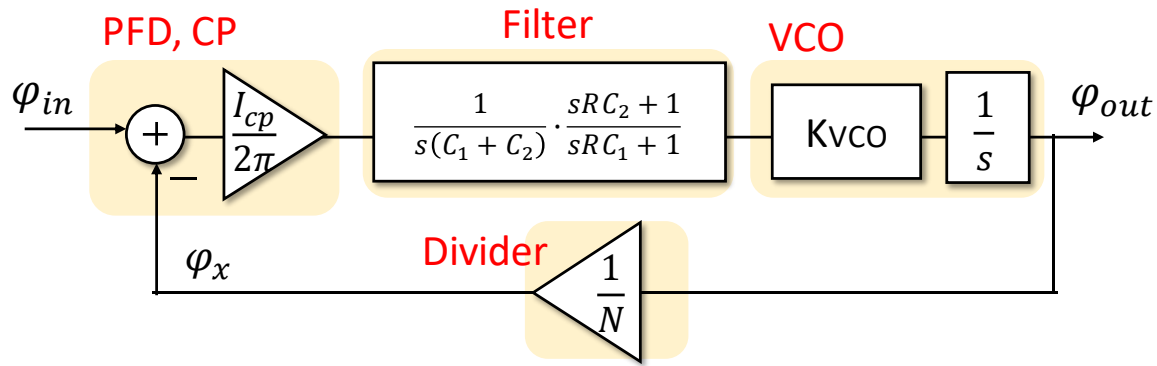
ゼロ

$$\frac{1}{RC_2} \quad [\text{rad/s}]$$

PLL特性まとめ

C_2 が $20C_1$ 以上の場合

$$\frac{C_1}{C_2} \ll 1, \quad \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx C_1$$



開ループ
伝達関数

$$H_{op} = \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{s^2} \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{sRC_2 + 1}{sRC_1 + 1}$$

閉ループ
伝達関数

$$H_{cl_x} = \frac{\phi_x}{\phi_{in}} = \frac{H_{op}}{1 + H_{op}}, \quad H_{cl} = \frac{\phi_{out}}{\phi_{in}} = \frac{N\phi_x}{\phi_{in}} = N \cdot H_{cl_x}$$

帯域

$$\omega_u \approx \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} R \quad [\text{rad/s}]$$

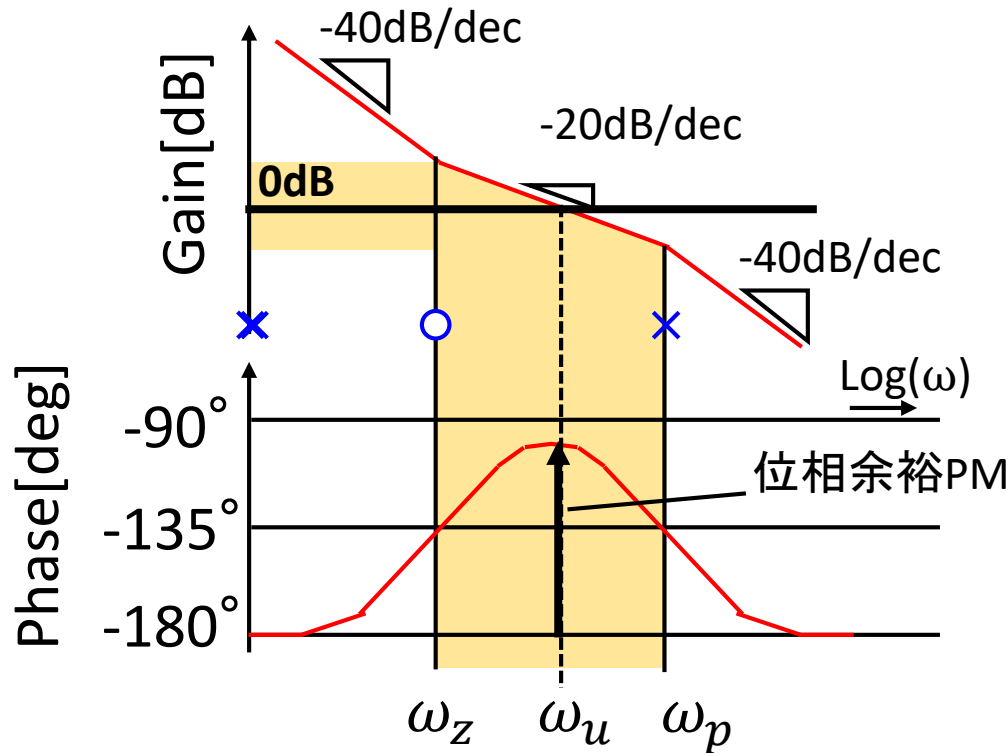
極

$$0, \quad \frac{1}{RC_1} \quad [\text{rad/s}]$$

ゼロ

$$\frac{1}{RC_2} \quad [\text{rad/s}]$$

極、ゼロから位相を求める



$$H_{op} = \frac{K_{VCO} I_{cp}}{2\pi N} \frac{1}{s^2} \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{s\tau_z + 1}{s\tau_p + 1}$$

$$\left(\begin{array}{l} \tau_z = \frac{1}{\omega_z} \\ \tau_p = \frac{1}{\omega_p} \end{array} \right)$$

ω_u での位相は, $\angle H(j\omega_u) = \tan^{-1} \frac{\omega_u}{\omega_z} - \tan^{-1} \frac{\omega_u}{\omega_p} - \pi$

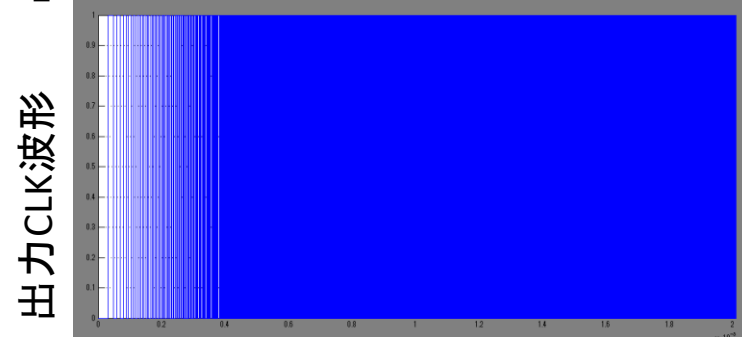
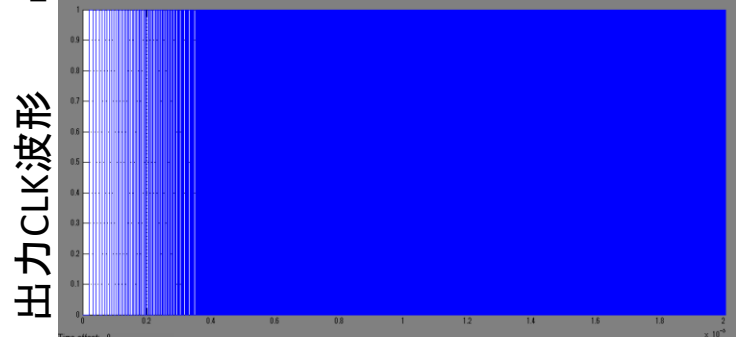
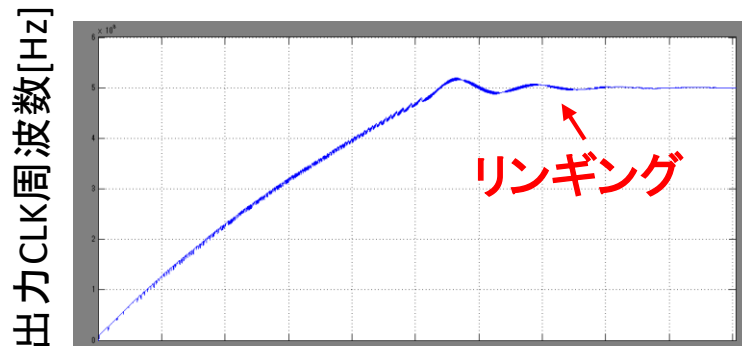
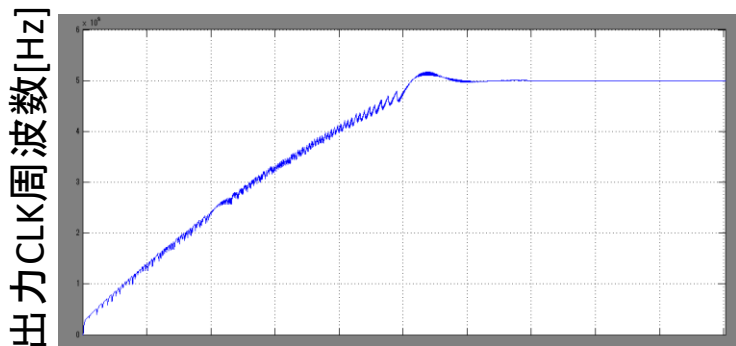
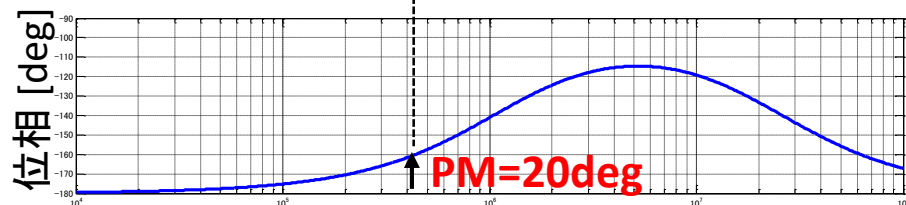
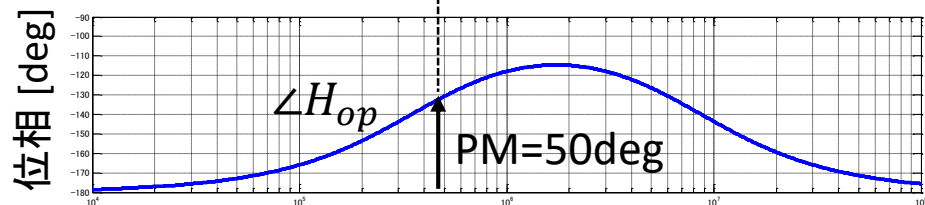
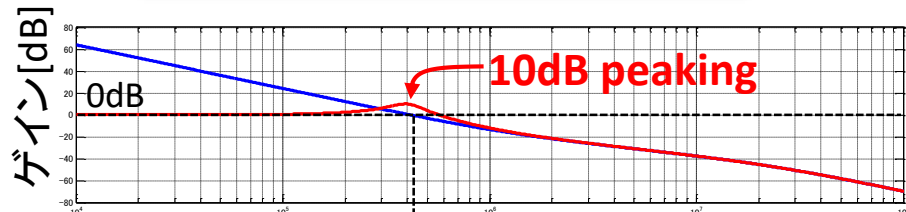
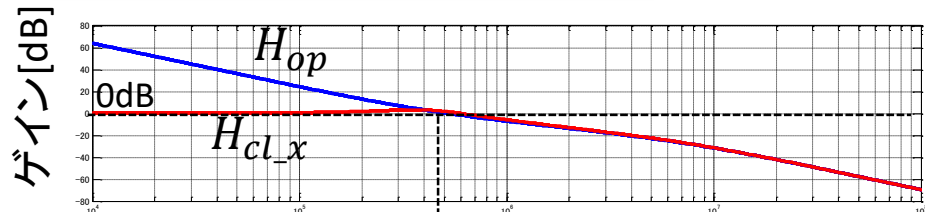
位相余裕PMは, $PM = \tan^{-1} \frac{\omega_u}{\omega_z} - \tan^{-1} \frac{\omega_u}{\omega_p} \quad [\text{rad}]$

$$= \left(\tan^{-1} \frac{\omega_u}{\omega_z} - \tan^{-1} \frac{\omega_u}{\omega_p} \right) \frac{180}{\pi} \quad [\text{deg}]$$

位相余裕とPLL出力

位相余裕=50deg

位相余裕=20deg



レポート課題

下記条件を満たすように
PLLのパラメータR, C1, C2, Icpを机上設計してください。

1. 位相余裕 60° 以上
2. $C1+C2 < 200\text{pF}$ かつ **$C1 > 1\text{pF}$**
3. $1\mu\text{A} < I_{cp} < 100\mu\text{A}$
4. $\omega_u > 2\pi * 500k$ [rad/s]

ただし、 $K_{vco} = 1.396\text{G}$ [rad/s/V]、 $N = 10$ とする。

レポートへは下記を含めてください。

1. 設計方針、過程
2. 設計結果
(R, C1, C2, Icp, 位相余裕, ω_u)
3. 本日の感想

備考

位相余裕が高い→安定

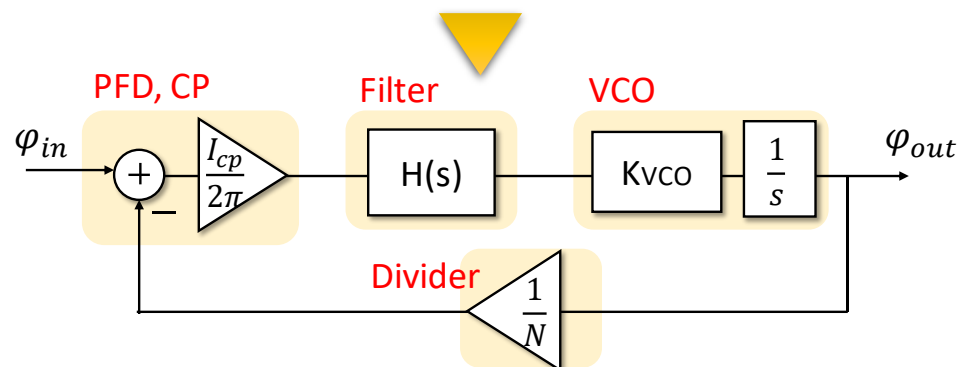
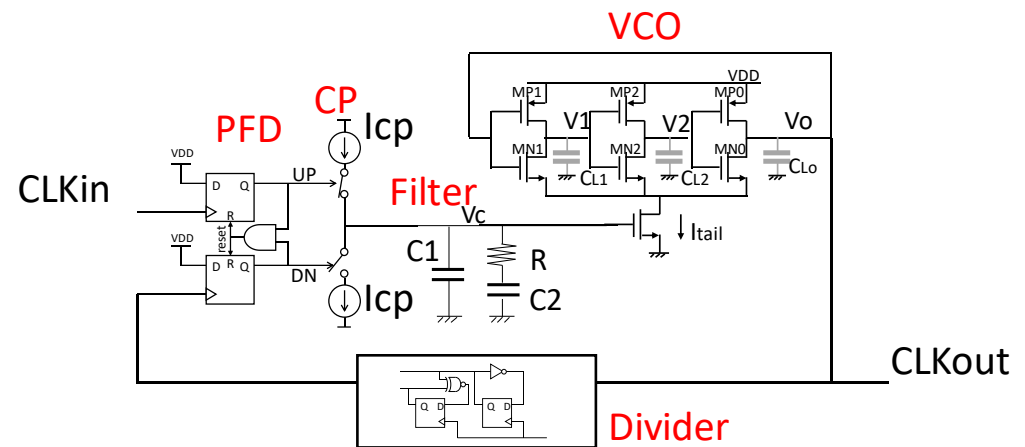
容量が小さい→小面積

Icpが小さい→低消費電力

ω_u が高い(*)→VCOノイズ抑制

*入力クロックのノイズが大きい場合は低い ω_u が必要となる。

#	Name	Note
1	Kvco	VCOゲイン
2	N	逡倍数
3	Icp	チャージポンプ電流
4	C1	フィルタ定数
5	C2	フィルタ定数
6	R	フィルタ定数



用語

- PLL: Phase-locked loop
- CLK: Clock
- PFD: Phase frequency detector
- CP: Charge pump
- VCO: Voltage-controlled oscillator
- DIV: Divider
- LPF: Low pass filter
- HPF: High pass filter
- FF: Flip-flop
- PM: Phase margin

参考文献

- [1]黒田忠広 監訳, Behzad Razavi 著「アナログCMOS集積回路の設計, 応用編」丸善, 2003年
- [2]松澤昭 著「アナログRF CMOS集積回路設計, 基礎編」培風館, 2010年
- [3]明石一, 今井弘之 著「詳解 制御工学演習」共立出版, 1981年
- [4]野波健蔵, 西村秀和 著「MATLABによる制御理論の基礎」東京電機大学出版局, 1998年
- [5]湯山俊夫 著「デジタルIC回路の設計」CQ出版, 1986