SC回路とは

スイッチトキャパシタ（Switched Capacitor）回路は、スイッチとコンデンサを組み合わせ、抵抗のように電流または電圧を制限する電子回路。集積回路においてコンデンサの比精度は非常に良い（近隣に配置したコンデンサの比が理想に近い）ため抵抗の絶対値に頼る回路等と比較すると、性能ばらつきの小さい回路を量産することができる。

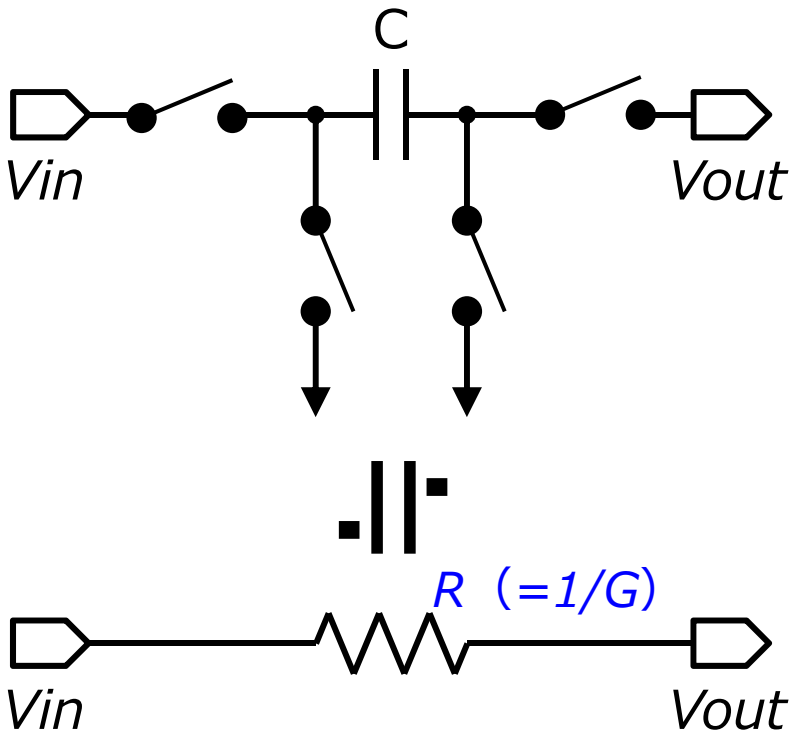
電源電圧を変換する電源回路、AD変換器やフィルタ等の信号処理回路に使用される。電源回路としては、入力電圧より高い電圧を出力するチャージポンプや、AD変換器としては電荷保存則をSC回路で利用したSAR（逐次比較型）AD変換器がある。

SC回路の原理

SC回路はキャパシタの両端にあるスイッチを切り替えながら電荷を転送する。

スイッチのスピードとキャパシタのサイズで転送する電荷量を制御し、

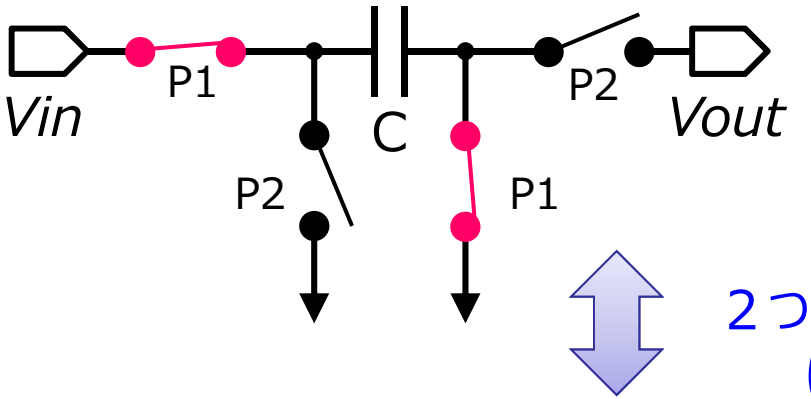
抵抗よりも比精度良く、抵抗と等価な回路を実現できる。



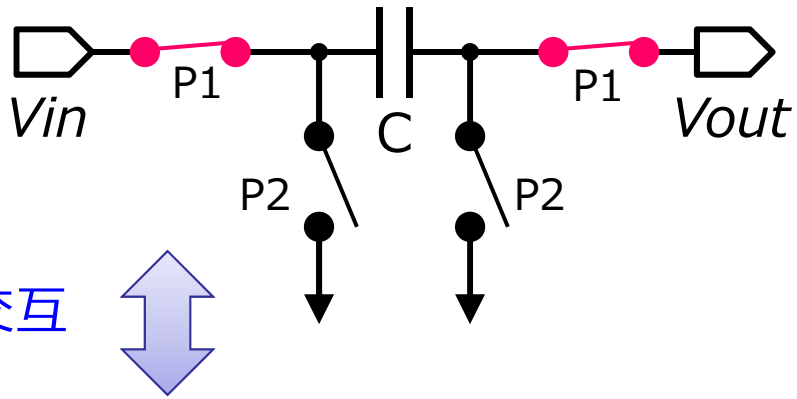
抵抗値R（=1/G）
コンダクタンスG（=1/R）　をスイッチとキャパシタで実現

SC型回路の種類

【クロール型】



【バタフライ型】



２つのモードを交互に繰り返す

$$G(\text{コンダクタンス}) = -C \cdot f \cdot Z^{-1/2} = -\frac{C}{T} Z^{-1/2}$$

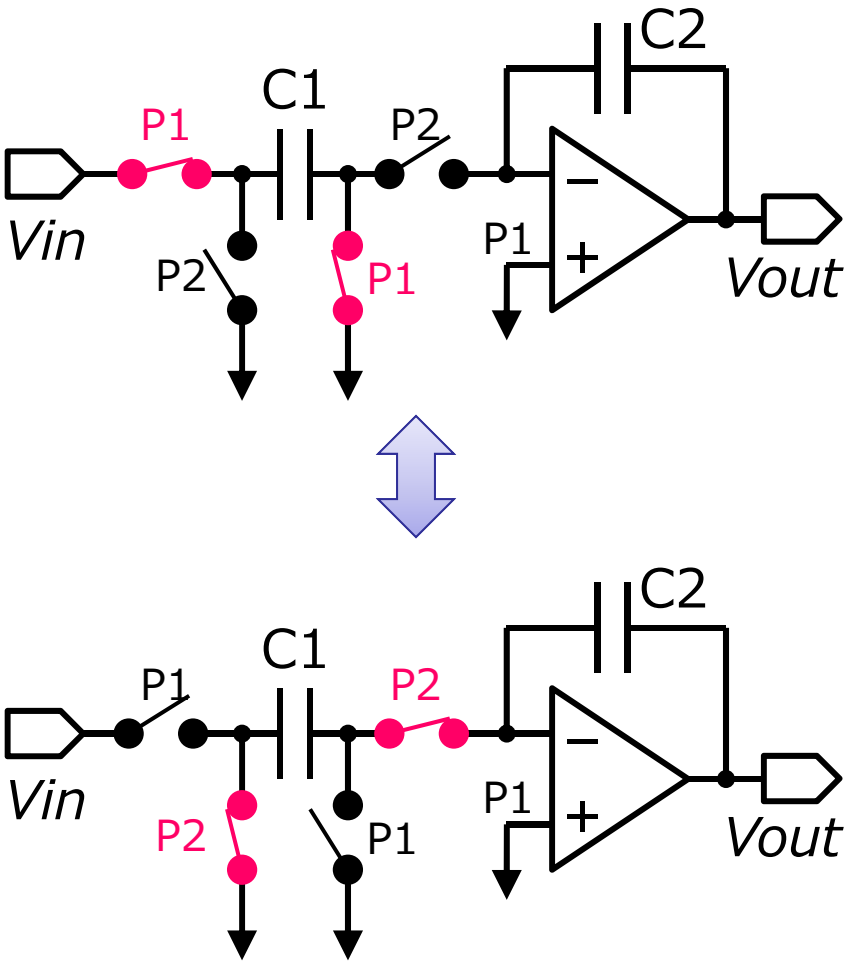
タイミングが半周期($Z^{-1/2}$)遅れる、電荷の符号も反転。
f=スイッチングの周波数、T(周期)=$1/f$

$$G(\text{コンダクタンス}) = C \cdot f = \frac{C}{T}$$

タイミングの遅れは無し、電荷の符号も変わらず。
f=スイッチングの周波数、T(周期)=$1/f$

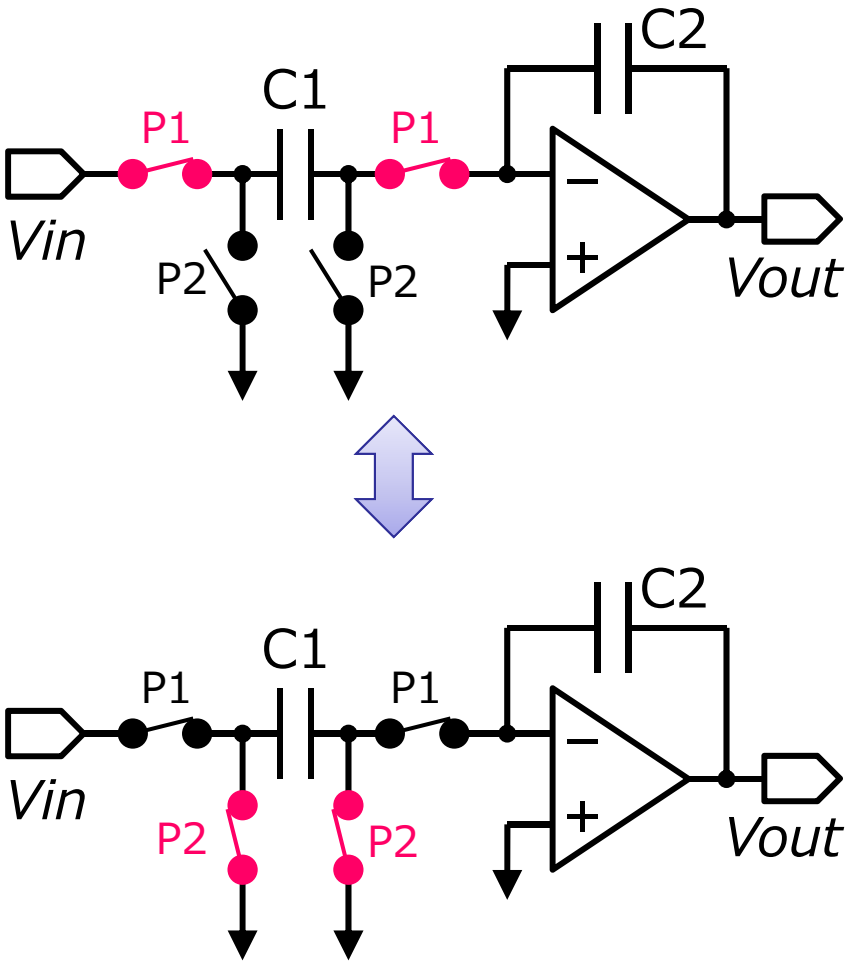
SC積分器

【クロール型】



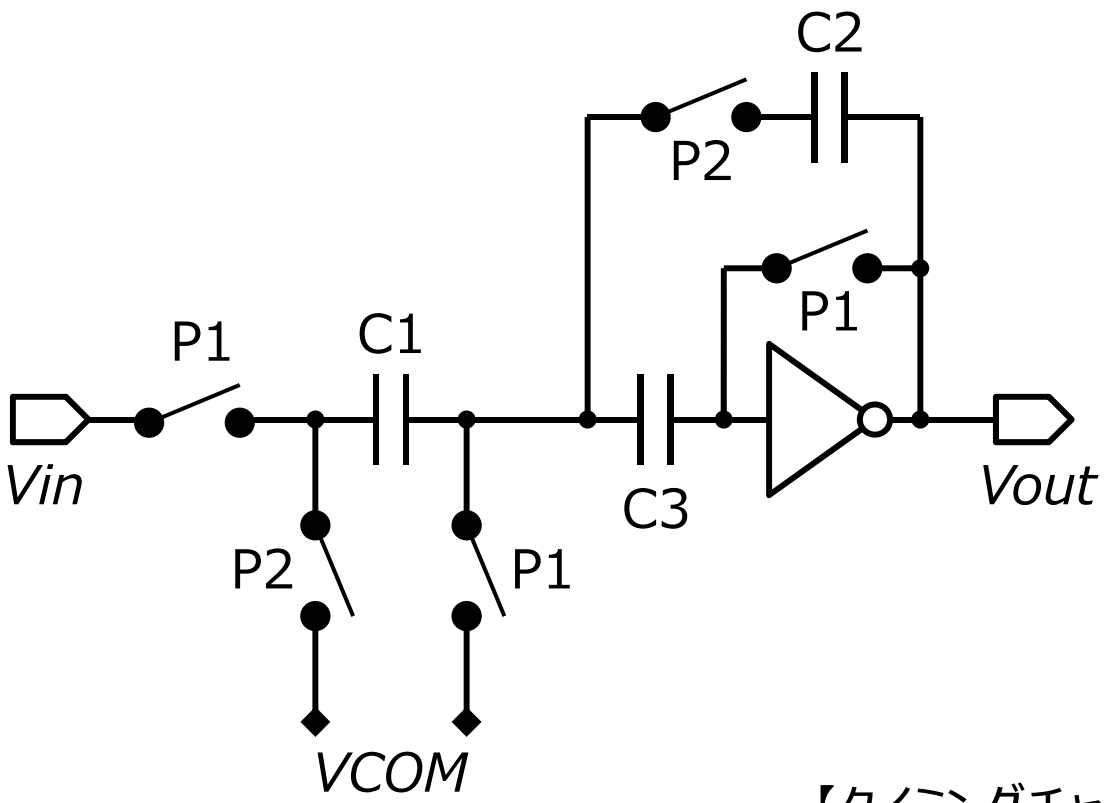
$$H(Z) = -\frac{C1}{C2} \cdot \frac{1}{1 - Z^{-1}}$$

【バタフライ型】

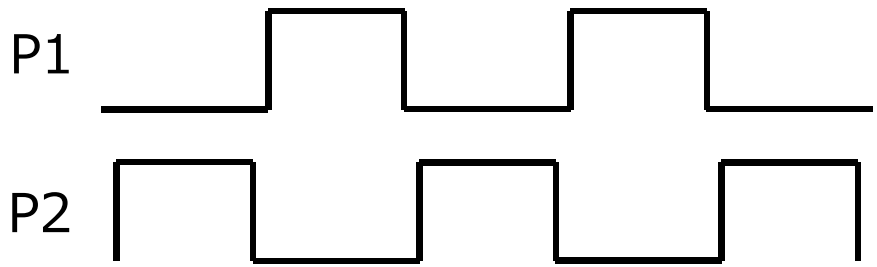


$$H(Z) = \frac{C1}{C2} \cdot \frac{Z^{-1/2}}{1 - Z^{-1}}$$

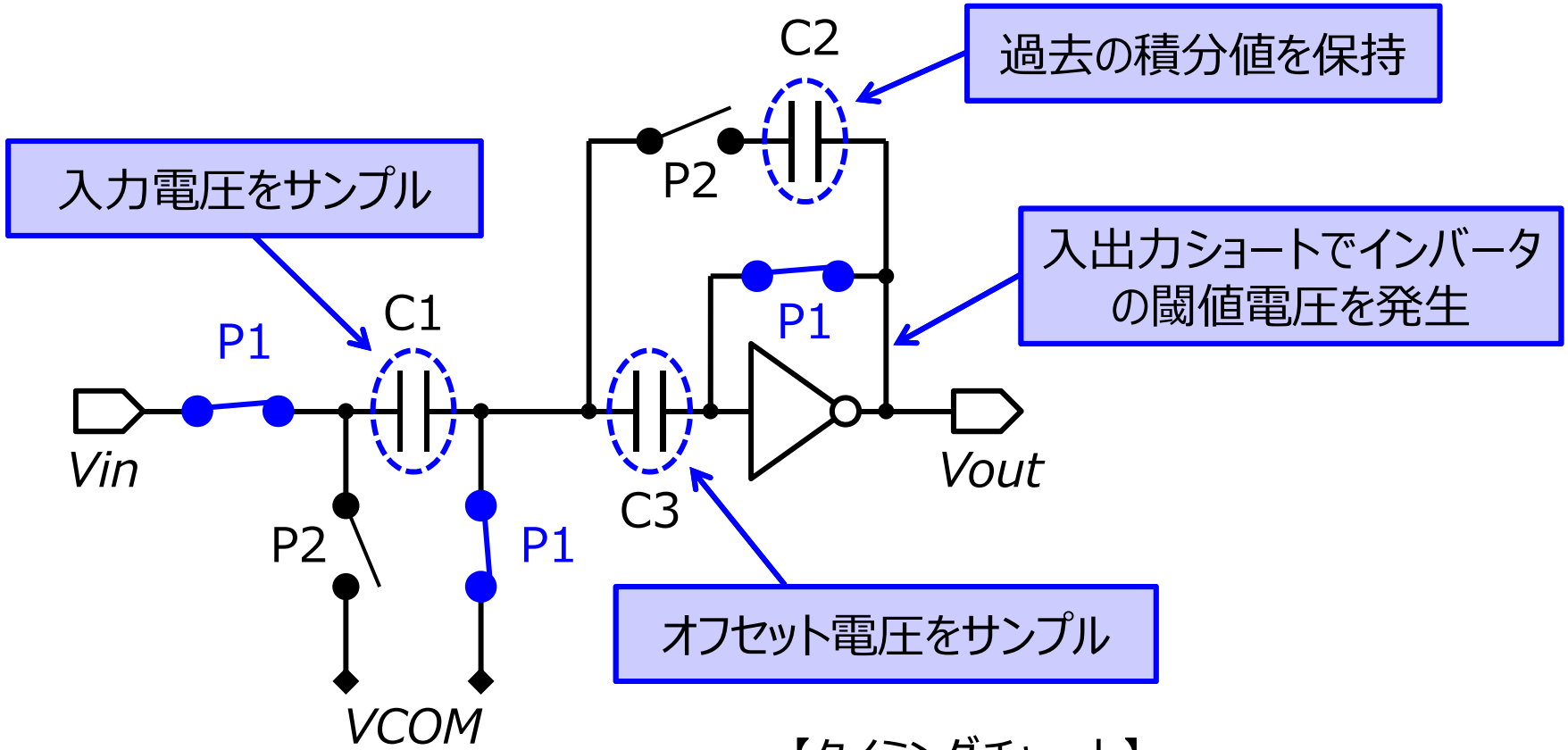
インバーターを使った積分器（クロール型）



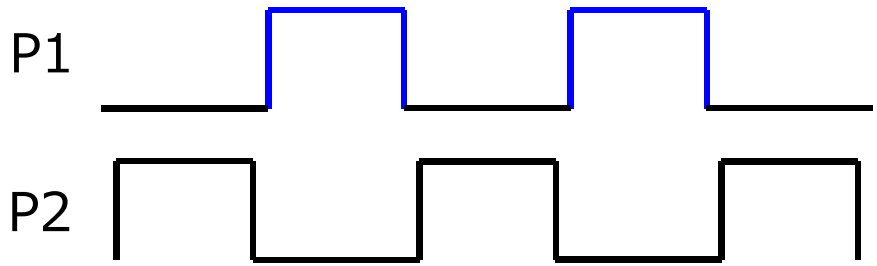
【タイミングチャート】



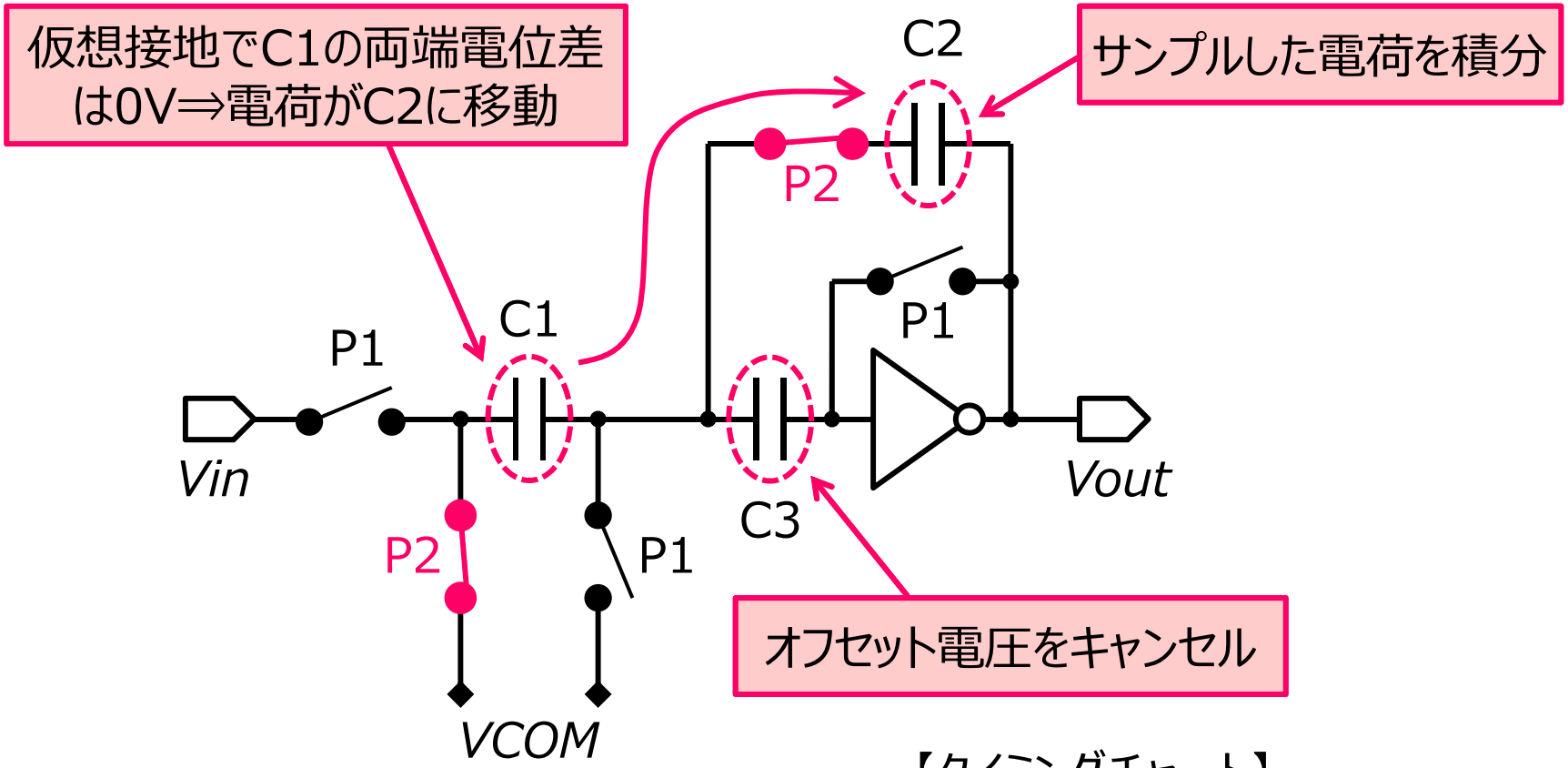
インバーターを使った積分器　サンプルモード



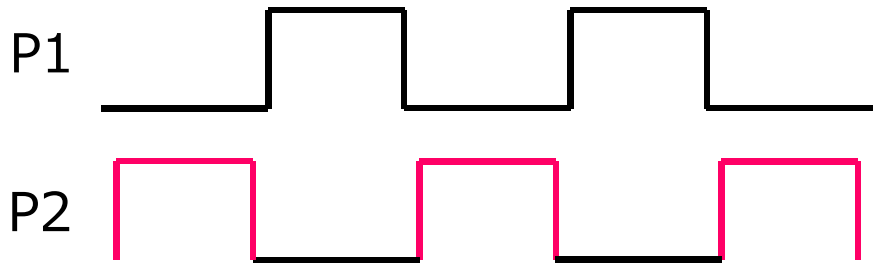
【タイミングチャート】



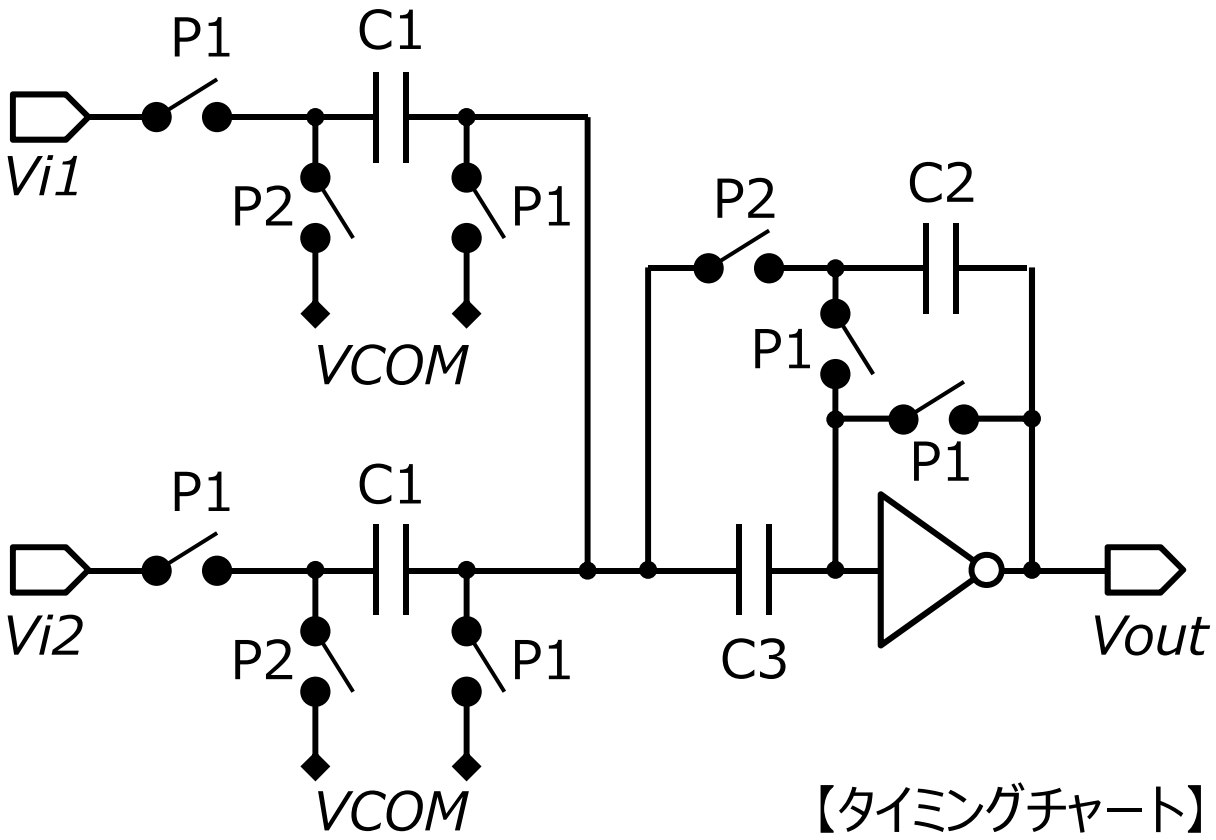
インバーターを使った積分器　積分モード



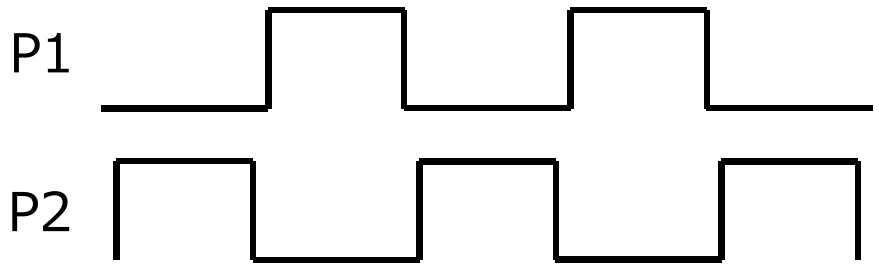
【タイミングチャート】



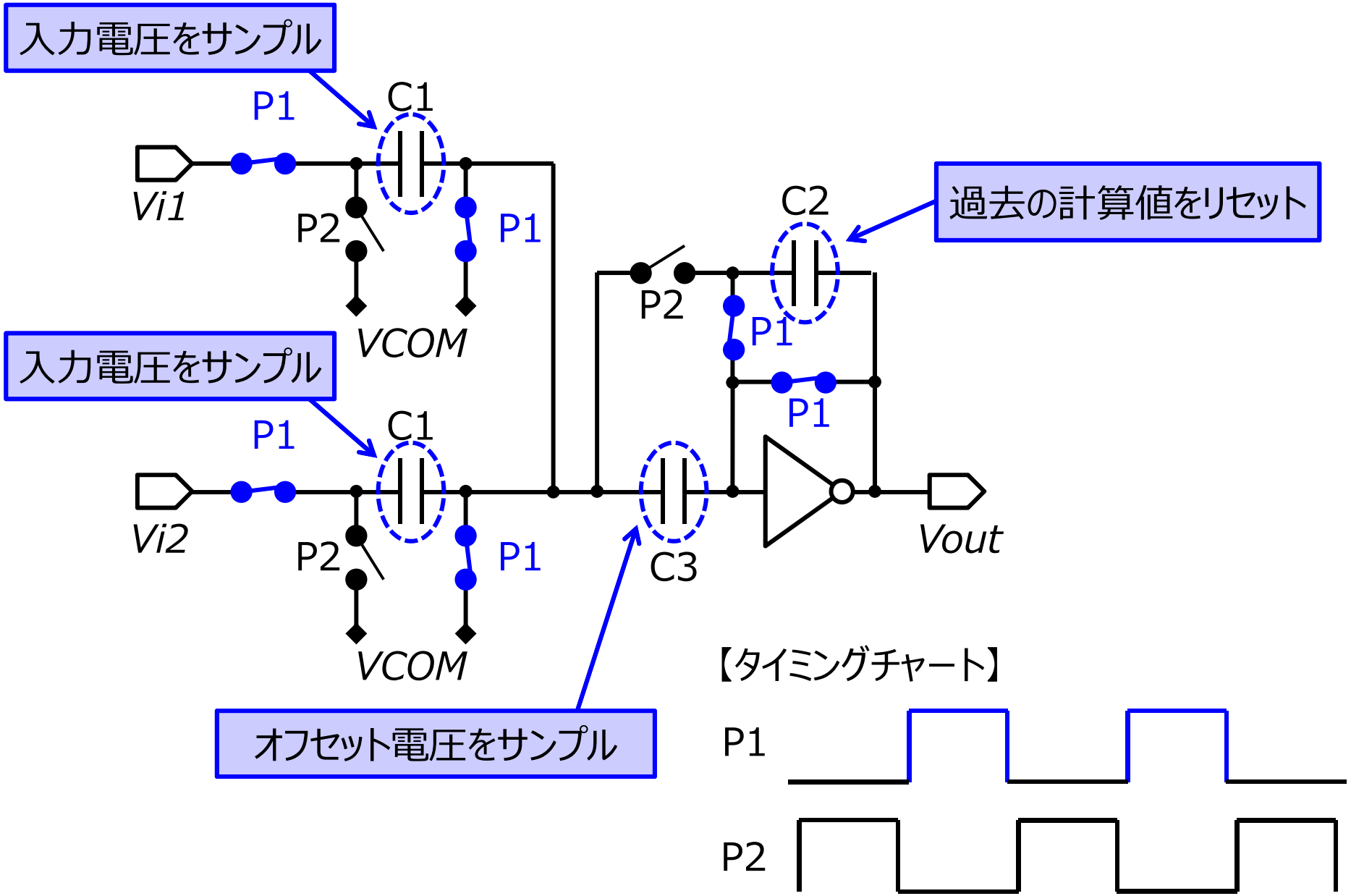
インバータを使った加算器



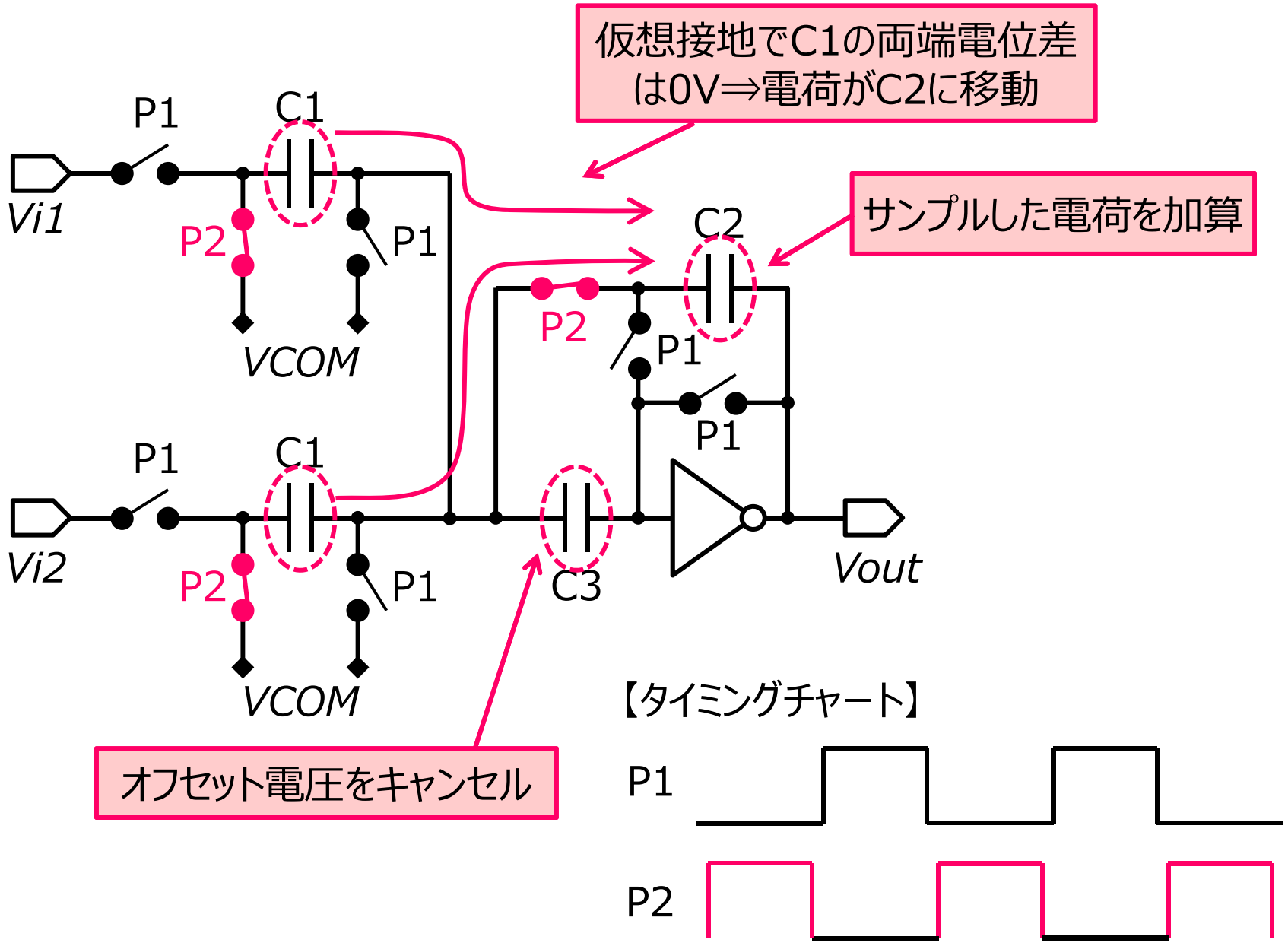
【タイミングチャート】



インバータを使った加算器　サンプルモード



インバータを使った加算器　積分モード



熱雑音

導体内の電子の不規則な熱振動によって生じる雑音

抵抗の熱雑音パワー

$$S_u(f) = 4kTR \quad (V^2/Hz)$$

k=ボルツマン定数(1.38×10^{-23} J/K)
エネルギーと温度を関係づける物理定数
T=絶対温度

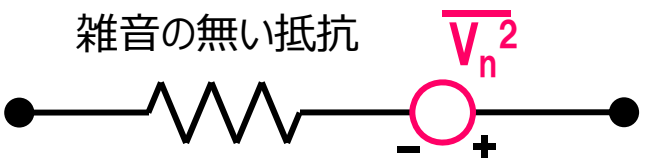
＜特徴＞

・絶対温度に比例

・周波数に依存せず平坦（白色スペクトラム）

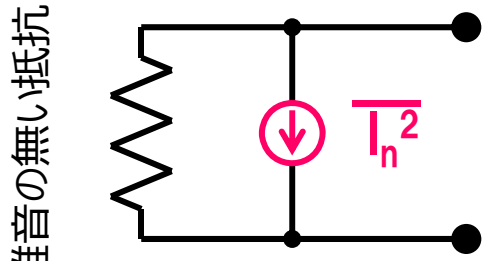
＜雑音の等価回路＞

電圧源で表現



$$\overline{V_n^2} = 4kTR \quad (V^2/Hz)$$

電流源で表現



$$\overline{I_n^2} = 4kT/R \quad (A^2/Hz)$$

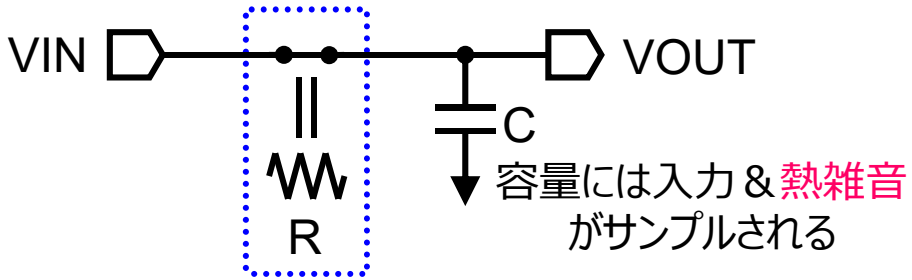
SC回路における熱雑音の影響

スイッチトキャパシタ回路では
熱雑音電力をkT/Cで計算

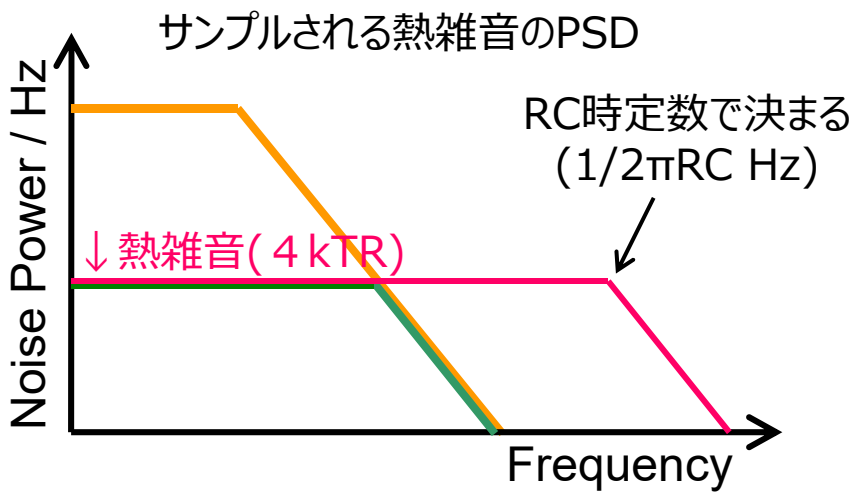
熱雑音は抵抗値に依存
容量は雑音を発生しない

何故熱雑音を導出する式に抵抗値ではなく容量値が存在する？

＜例えばサンプルホールド回路で考える＞



スイッチにはオン抵抗が存在
⇒熱雑音が発生



全帯域を積分した値が熱雑音電力
熱雑音は∞Hzまで存在 ⇒実際はRCがLPFとして働き、高周波はカットされる

オレンジライン　Rを大きくすると高さ*4kTR*が大きくなり、帯域が狭くなる　⇒積分値は変わらない
ミドリライン　Cを大きくすると*4kTR*は変わらず、帯域が狭くなる　⇒積分値は小さくなる

結論：スイッチトキャパシタ回路における熱雑音は抵抗値ではなく容量値で決まる

最小容量値の決め方

容量サイズにはトレードオフの関係がある

容量サイズが小さいと良い点		容量サイズが大きいと良い点
⇒面積が小さくなる ⇒消費電力が小さくなる	⇔	⇒熱雑音(√kT/C)が小さくなる ⇒ばらつきが小さくなる(高比精度)

目標精度を決める

⇒熱雑音を計算し、使用可能な最小容量を導出

⇒Fabが提供するばらつきデータをもとに使用可能な最小容量を導出

} 大きい方の容量サイズを最小サイズに決定

＜例えば16bitのADCを設計する場合＞

・熱雑音はADCのLSBより十分低い必要がある ⇒1/4程度に設定

$LSB/4 = \sqrt{kT/C}$　　T:絶対温度、k:ボルツマン定数(1.38×10^{23})

・ADCの電圧レンジを1V、T=300Kとすると

$(1/2^{16})/4 = \sqrt{(1.38\times10^{23}\times300/C)}$

$C \fallingdotseq 285pF$

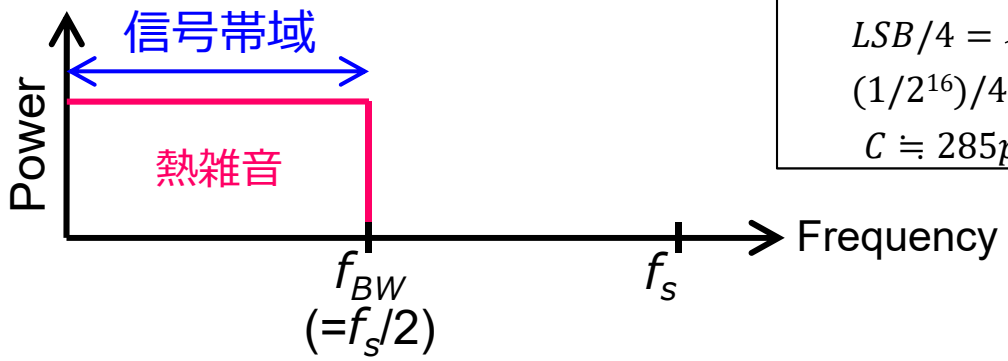
以上より最小容量サイズは285pFとなる

注・・・ばらつきの影響に関しては回路構成に依存するのでここでは省略

オーバーサンプリングする場合

例としてAD変換で考える。通常AD変換は折り返し雑音が発生しないようナイキストの定理に従い、AD変換したい信号帯域(f_{BW})に対してサンプリング周波数(f_s)を2倍以上の周波数に設定する。この時、2倍よりも更に高い周波数でサンプリングすることをオーバーサンプリングと呼ぶ。例えば2倍（OSR=2）でオーバーサンプリングを行うと信号帯域内の熱雑音パワーが半分になる(全熱雑音の値は変わらない)。結果としてSC回路で使用する容量サイズを小さくすることができる。OSRを2倍にすると最小容量値を1/√2に縮小できる。

【ナイキストの場合】



・ADCの電圧レンジを1V、精度=16bit、T=300Kとすると

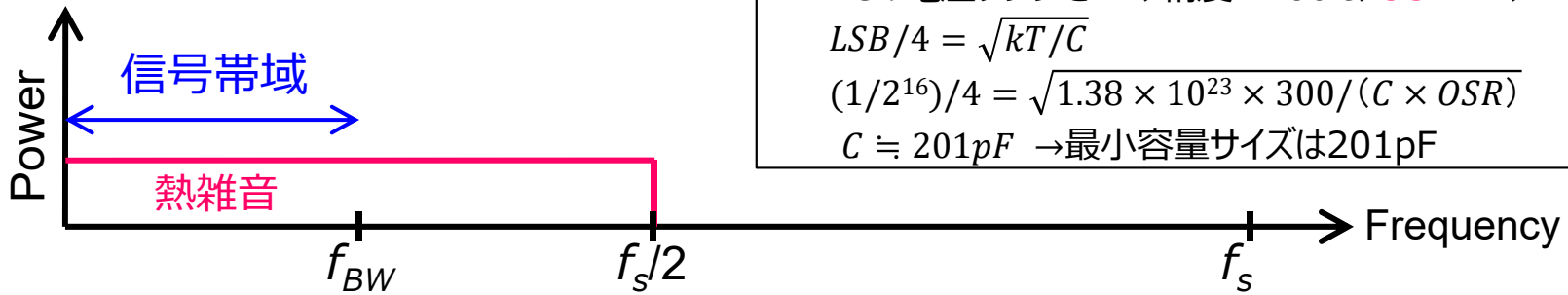
$LSB/4 = \sqrt{kT/C}$

$(1/2^{16})/4 = \sqrt{1.38 \times 10^{23} \times 300/C}$

$C \fallingdotseq 285pF$ →最小容量サイズは285pF

【2倍でオーバーサンプリングした場合（OSR=2）】

☆帯域内の電圧雑音が$\sqrt{1/OSR}$になる



・ADCの電圧レンジを1V、精度=16bit、OSR=2、T=300Kとすると

$LSB/4 = \sqrt{kT/C}$

$(1/2^{16})/4 = \sqrt{1.38 \times 10^{23} \times 300/(C \times OSR)}$

$C \fallingdotseq 201pF$ →最小容量サイズは201pF