第８章　発振回路

信号を生成する回路

発振回路の役割と動作原理

8.1 発振回路の基礎

電子回路の機能分類

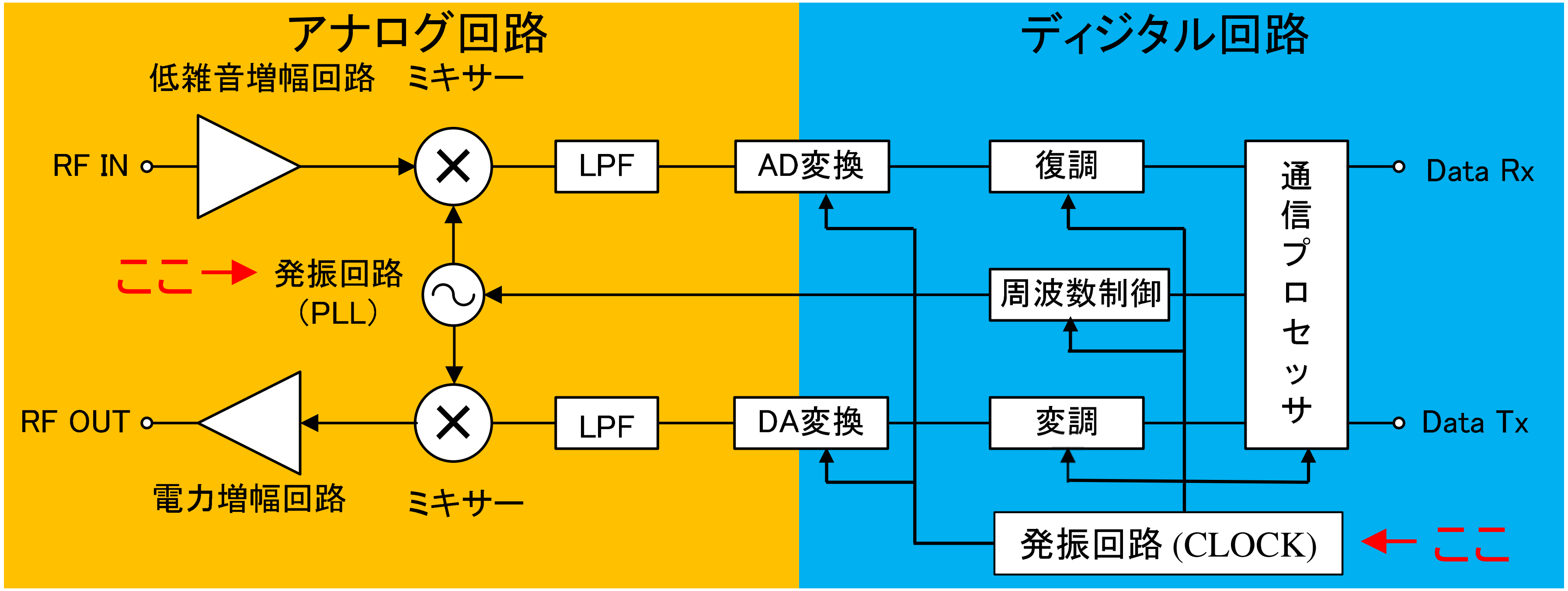
交流信号→交流信号
||
信号処理回路
(Signal processing circuit)

直流→交流信号
||
発振回路
(Oscillator)

交流→直流（整流）
直流→交流（インバータ）
直流→直流（電圧変換）
||
電源回路
(Power supply)

発振回路の使用例

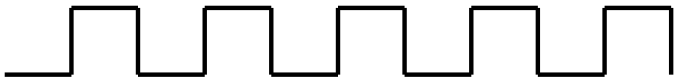
無線通信器の構成例



- PLL(Phase locked loop)
  - 発振回路の周波数をディジタル値により決定する回路
  - 周波数は基準信号の定数倍（ディジタル値）になる
- Clock
  - 基準信号の定数倍の周波数の矩形波
  - 離散時間回路（ディジタル回路、ADC、DAC）の動作に必要

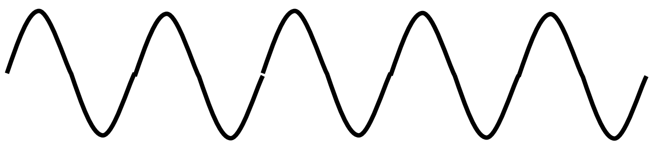
発振回路の役割

- 同期のためのクロック(Clock)の生成
  - ディジタル回路、ADC、DACなどにおいて、データ更新やサンプリングのタイミングを決める同期信号



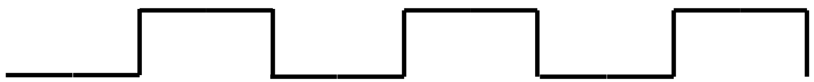
（高周波）

- 無線通信のためのキャリア(Carrier)の生成
  - 無線通信で送信する搬送波（キャリア）信号
    - キャリアの周波数や位相を変化させることにより情報が送られる



（高周波）

- 周波数を制御するための基準信号(Reference signal)の発生
  - クロックやキャリアの周波数を正確に制御するための信号
    - クロックやキャリアと基準信号と同期させることにより周波数精度を高める

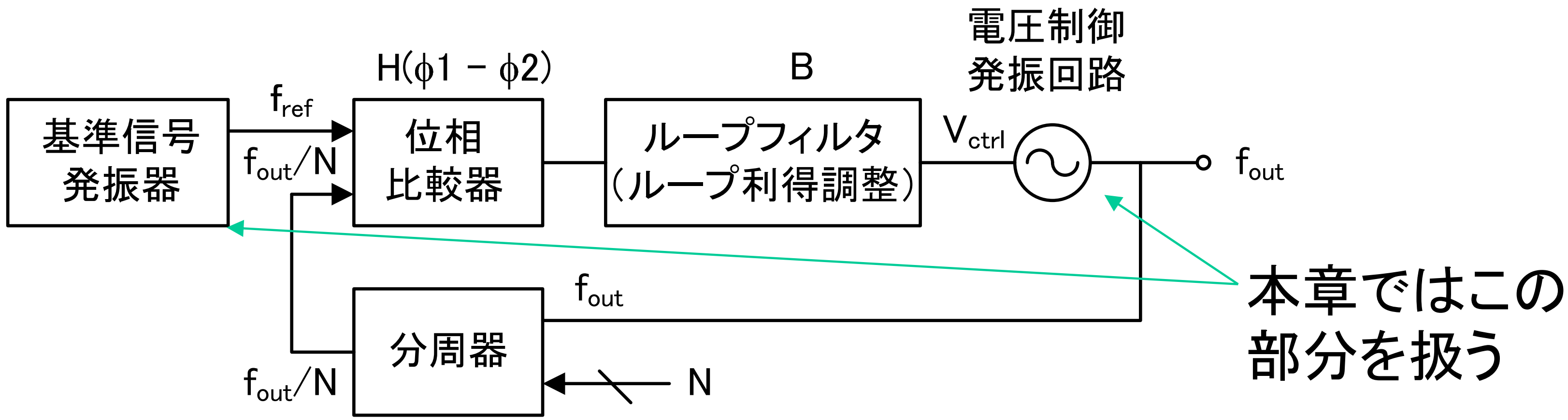


（～300MHz、高精度）

周波数のディジタル制御

発振回路は温度や電源電圧の影響を受けやすいので、周波数または周期の情報をフィードバックして、正確な周波数の信号を作る。

PLL(Phase locked loop)による周波数制御の例

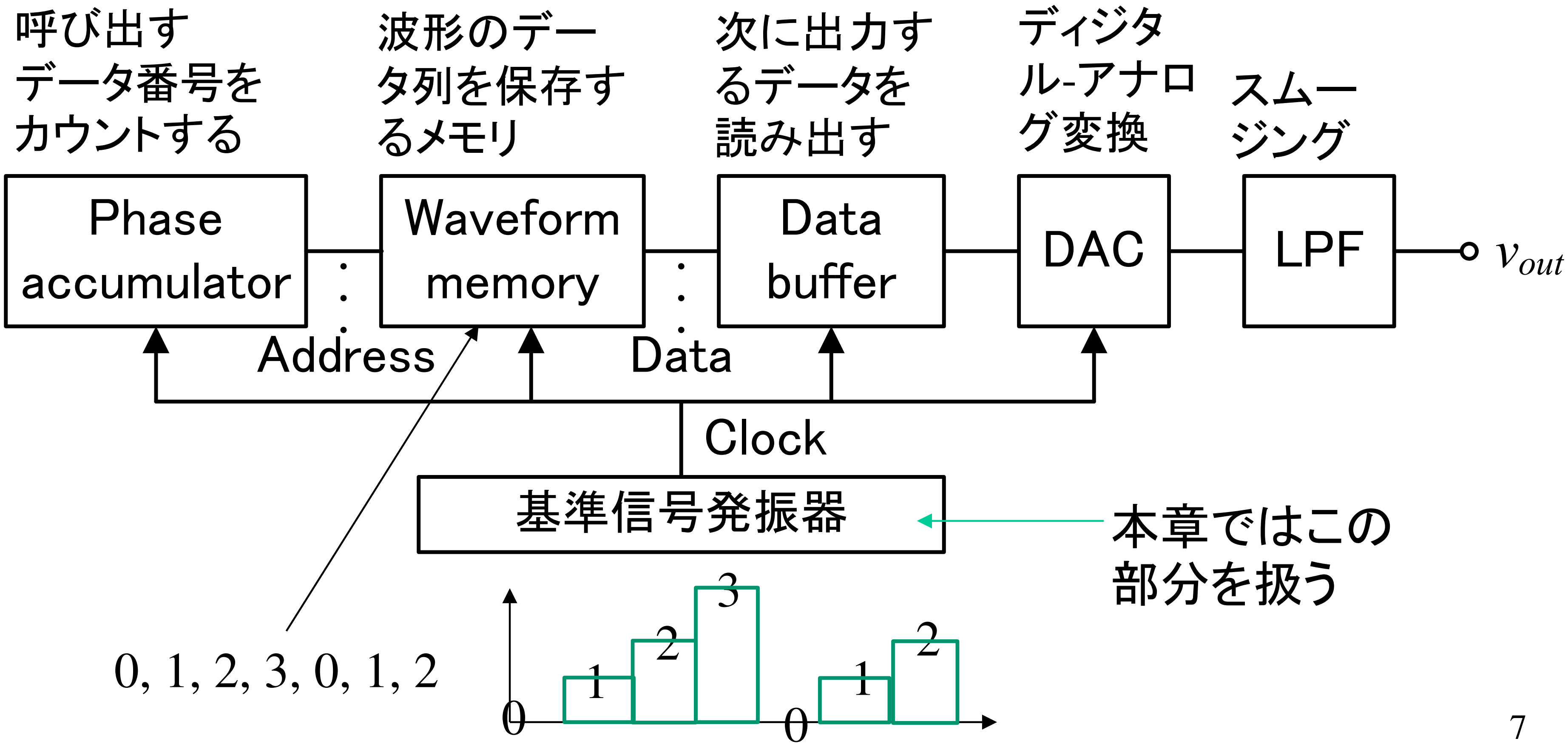


基準信号発振器	周波数精度の高い発振回路。
位相比較器	波形の位相ずれに比例した直流電圧を出力。
電圧制御発振回路	直流電圧で周波数を制御する発振回路。
分周器	周波数を1/N倍する(Nはディジタル値)。

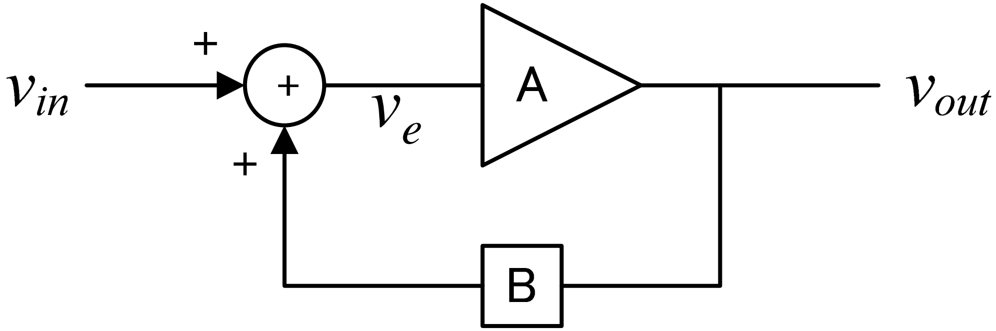
波形のディジタル制御

波形データによっていろいろな波形を作ることができる。周波数が低い場合は、ソフトウェアでも実現可能。

DDS(Direct Digital Synthesizer)による波形制御の例



正帰還回路の性質



$$\begin{cases} v_{out} = Av_e \\ v_e = v_{in} + Bv_{out} \end{cases} \Rightarrow v_{out} = \frac{A}{1-AB} v_{in}$$

AB = 1のとき、$v_{in} = 0V$ でも $v_{out} \neq 0V$

ABが複素数のとき、$\mathrm{Im}[AB] = 0$ $\mathrm{Re}[AB] = 1$

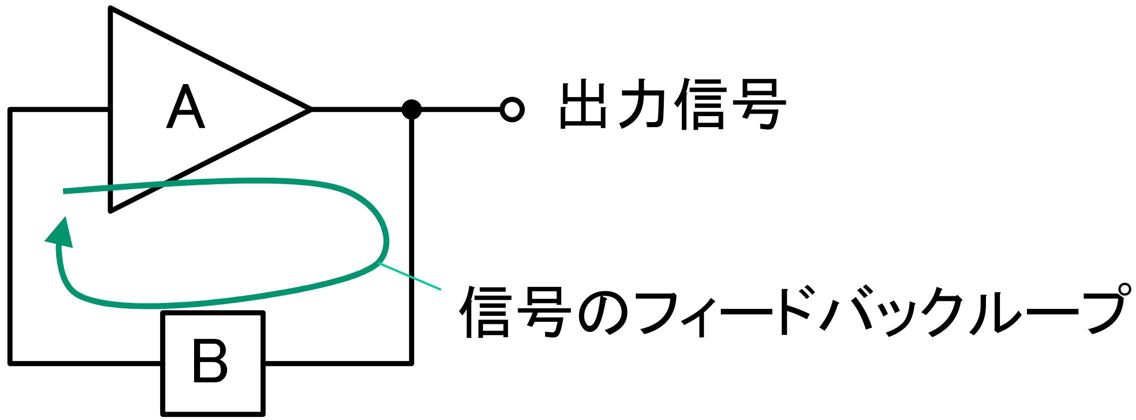
ループ利得ABに対して

$$\begin{cases} \text{位相条件：} \quad \mathrm{Im}[AB] = 0 \\ \text{振幅条件：} \quad \mathrm{Re}[AB] = 1 \end{cases}$$

⇒ この条件が両方成り立つとき、入力信号がなくても出力信号が現れる。

発振条件

入力信号はない。



正帰還回路が発振条件を満足すると、入力が無くとも出力に信号が現れる。

- 交流で発振条件を満足→発振(微小振動が繰り返し増幅され振幅増大)
- 直流で発振条件を満足→双安定(一定の電圧が出る)

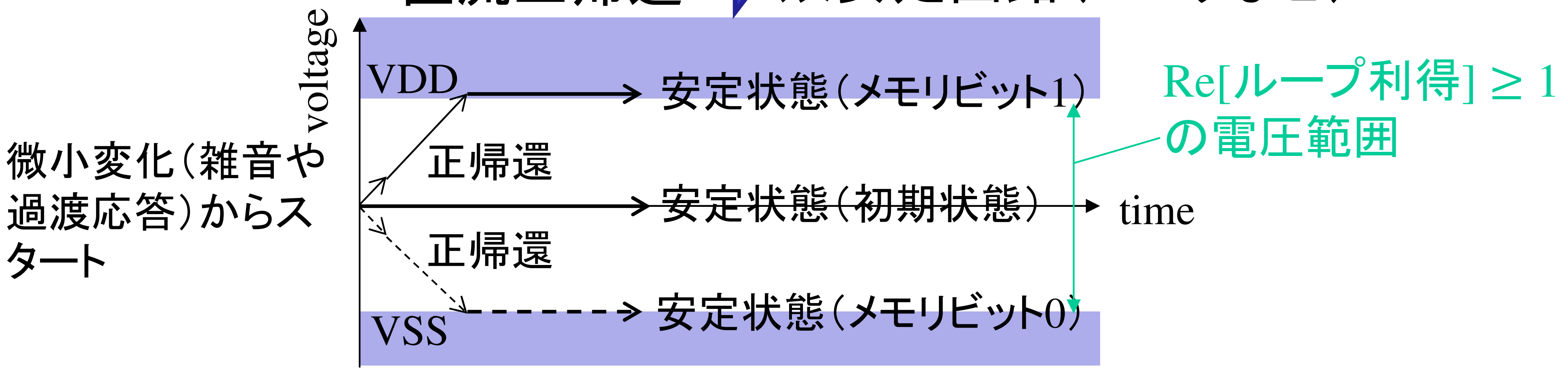
発振条件

1. 位相条件 $\mathrm{Im}[AB] = 0$ (同位相の信号をフィードバック)
2. 振幅条件 $\mathrm{Re}[AB] \geq 1$ (振幅が増加しながらフィードバック)

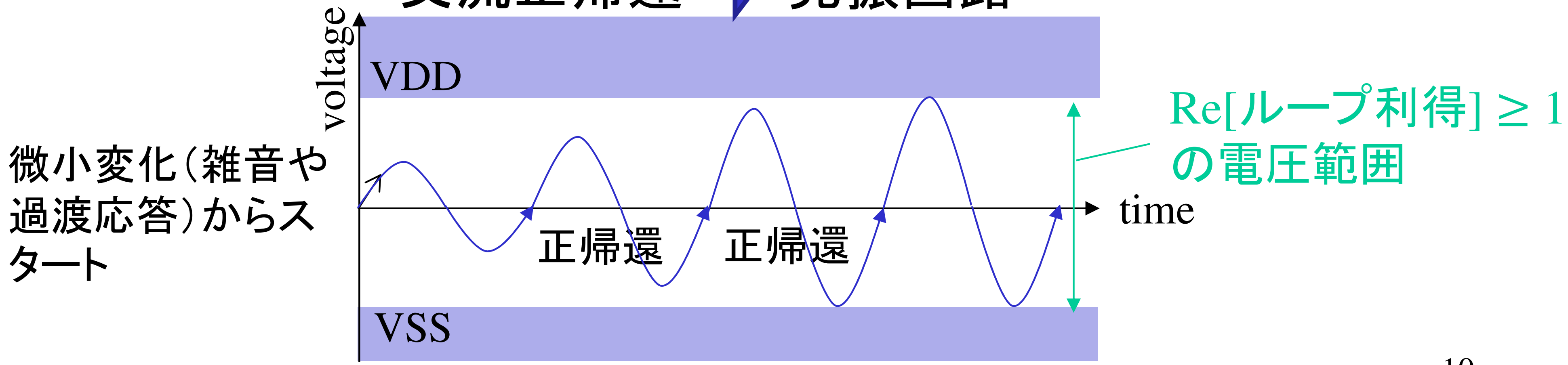
(参考) 出力が発生する条件は等式で表されるが、振幅が時間とともに増大する、上記の発振条件(振幅条件が不等式)により最大振幅での発振が可能。

2種類の正帰還回路

直流正帰還 ➡ 双安定回路(メモリなど)



交流正帰還 ➡ 発振回路



（重要）発振条件の別の表現

位相条件（周波数条件）

$$\mathrm{Im}[G_{loop}] = 2\pi n \quad \Rightarrow \quad \angle G_{loop} = \arctan\frac{Im[G_{loop}]}{Re[G_{loop}]} = 2\pi n$$

$n = 0, 1, 2 \cdots$

または $\dfrac{Im[G_{loop}]}{Re[G_{loop}]} = 0$

位相条件により発振周波数（の候補）ω_{osc}が決まる。

振幅条件（電力条件）

$$\mathrm{Re}[G_{loop}] \geq 1 \quad \Rightarrow \quad G_{loop}(\omega = \omega_{osc}) \geq 1$$

振幅条件から、ω_{osc}において発振が起こるための増幅器の必要利得が求められる。

発振周波数の選択方式

いつも同じ一定の周波数で発振させるためには、特定の周波数だけを選択して正帰還させる必要がある。

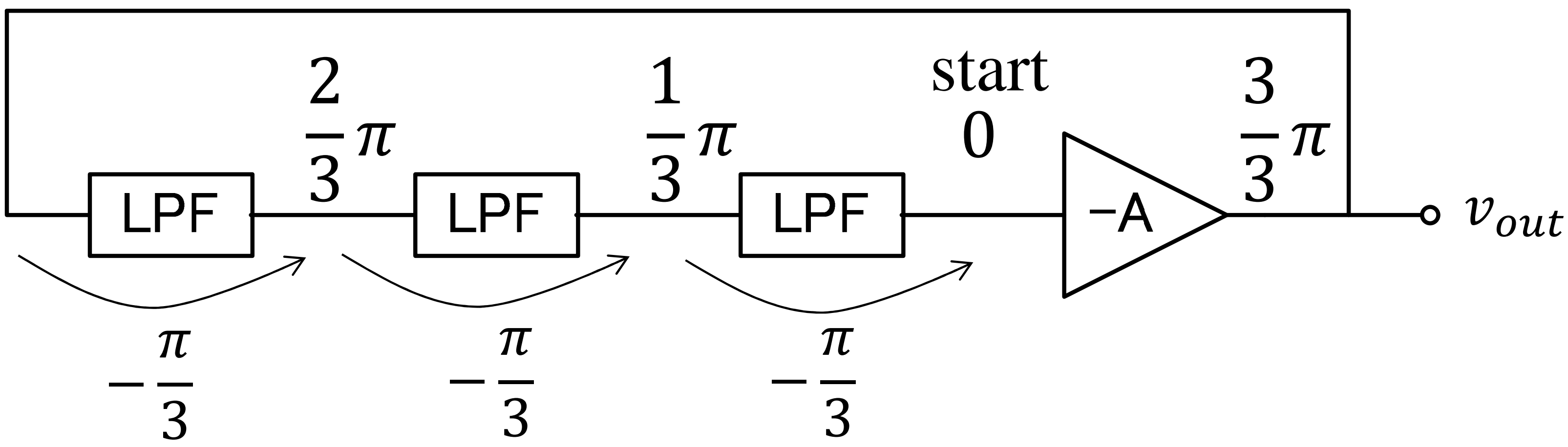
回路方式	回路例	周波数選択方法
移相型発振回路	HPF(High-pass filter)型	RCフィルタによる位相変化
	LPF(Low-pass filter)型	
	リングオシレータ	増幅器の位相特性
周波数ブリッジ	ウイーンブリッジ発振回路(Max Wien)	Band pass filterによる周波数選択
	ツインT型	
LC共振回路	コルピッツ発振回路 (Edwin Henry Colpitts)	LC共振
	ハートレー発振回路 (Ralph Vinton Lyon Hartley)	
弛張発振	タイマーIC 無安定マルチバイブレータ	RC充放電の時定数

簡便な低周波発振器

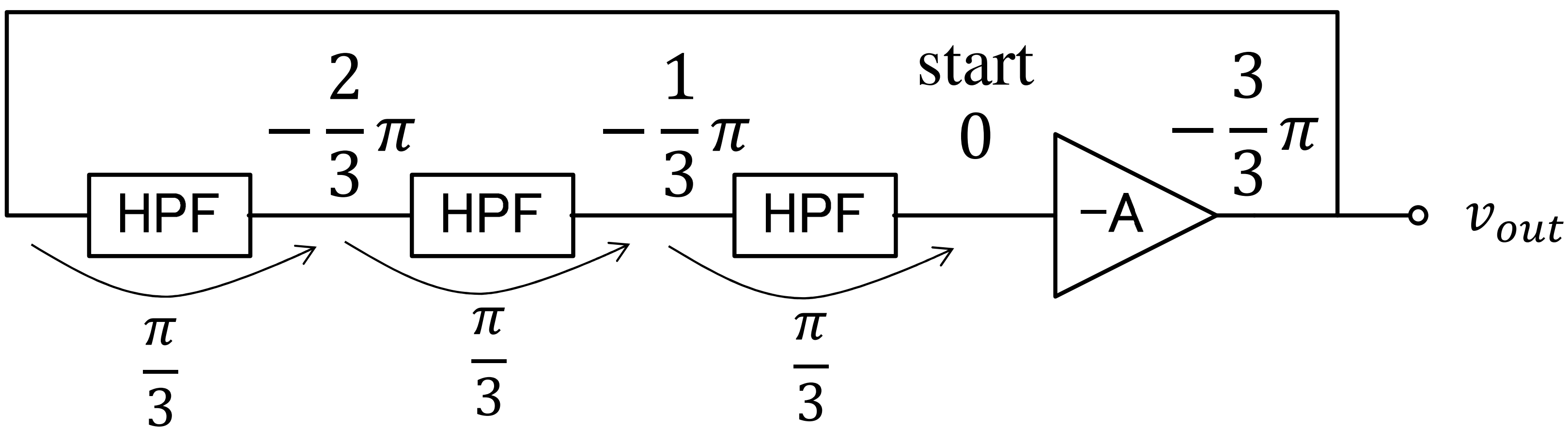
8.2 移相型発振回路

移相型発振回路(Phase shift oscillator)の動作原理

遅れ移相型発振回路

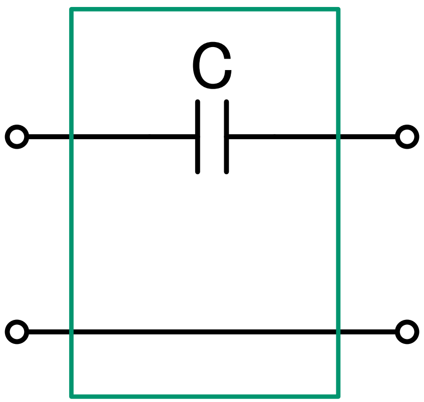


進み移相型発振回路

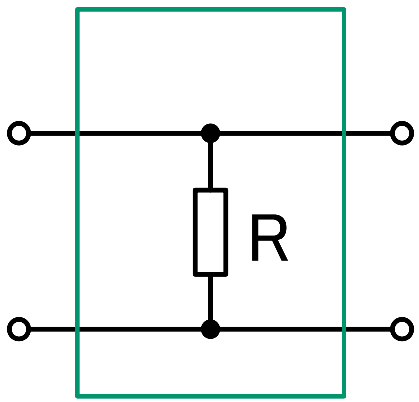


移相回路の設計(HPF型)

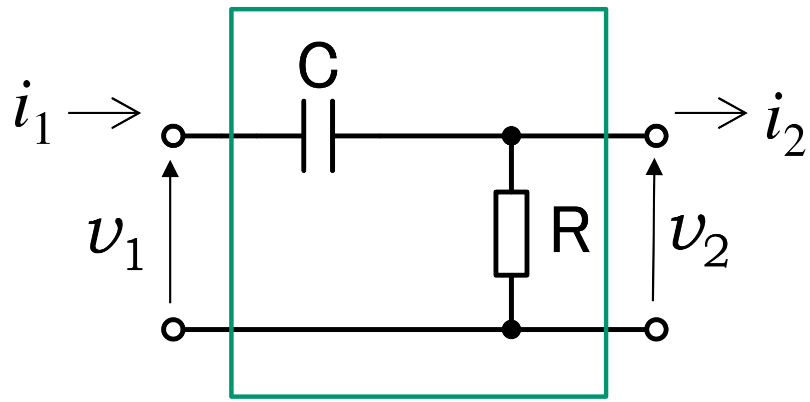
RC HPFの特性をF行列で表す $\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix}$



$$\begin{pmatrix} 1 & \dfrac{1}{sC} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \dfrac{1}{R} & 1 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} 1 & \dfrac{1}{sC} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \dfrac{1}{R} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \dfrac{1}{sCR} & \dfrac{1}{sC} \\ \dfrac{1}{R} & 1 \end{pmatrix}$$

1段の1次HPFで最大90度の位相変化→3段以上必要

3段移相回路の設計（HPF型)

$$\begin{pmatrix} A^{(3)} & B^{(3)} \\ C^{(3)} & D^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^3 = \begin{pmatrix} A^3 + 2ABC + BCD & A^2B + ABD + B^2C + BD^2 \\ A^2C + ACD + BC^2 + CD^2 & ABC + 2BCD + D^3 \end{pmatrix}$$

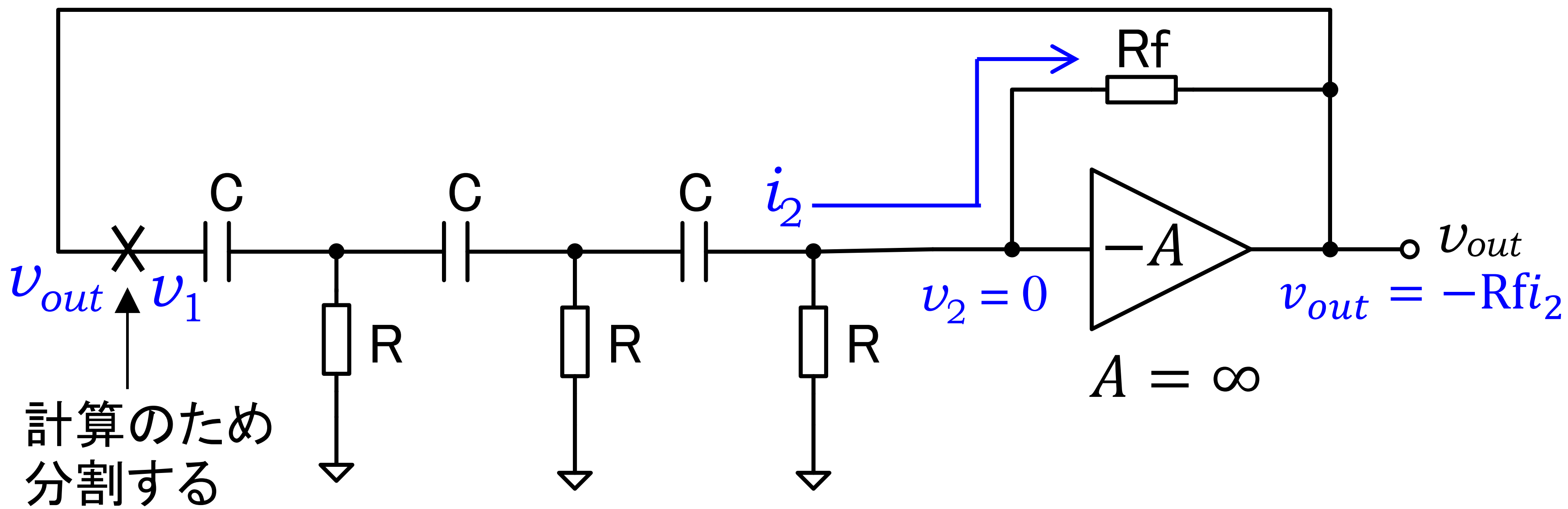
$$\uparrow$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \dfrac{1}{sCR} & \dfrac{1}{sC} \\ \dfrac{1}{R} & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^{(3)} & B^{(3)} \\ C^{(3)} & D^{(3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_2 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} A^{(3)} = 1 + \dfrac{6}{sCR} + \dfrac{5}{s^2C^2R^2} + \dfrac{1}{s^3C^3R^3} & （i_2 = 0 \text{ の場合に使用）} \\ B^{(3)} = \dfrac{3}{sC} + \dfrac{4}{s^2C^2R} + \dfrac{1}{s^3C^3R^2} & （v_2 = 0 \text{ の場合に使用）} \end{cases}$$

移相型発振回路($v_2 = 0$の場合)

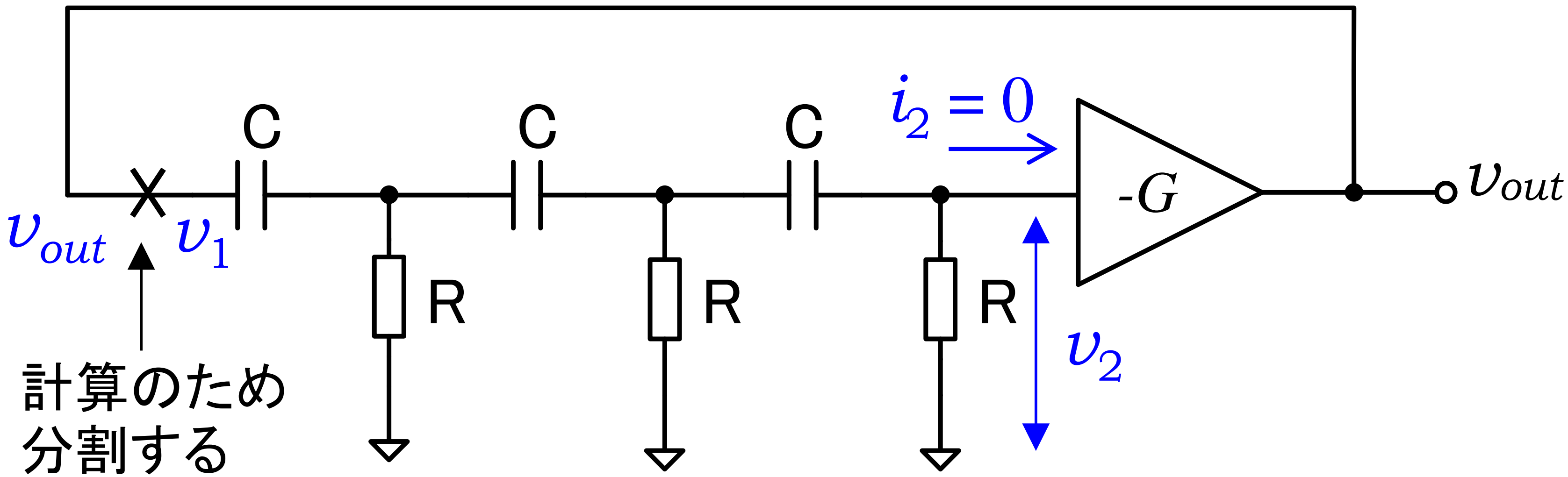


$$G_{loop}(j\omega) = \frac{v_{out}}{v_1} = \frac{i_2}{v_1}\frac{v_{out}}{i_2} = \frac{-\mathrm{Rf}}{B^{(3)}} = \frac{\mathrm{Rf}}{\frac{4}{\omega^2 C^2 R} - j\left(\frac{1}{\omega^3 C^3 R^2} - \frac{3}{\omega C}\right)}$$

$v_2 = 0$ より

$$\begin{cases} \angle G_{loop} = -\arctan\dfrac{1 - 3\omega^2 C^2 R^2}{4\omega C R} = 0 \text{（位相条件）} \\ G_{loop}(\omega = 1/\sqrt{3}CR) = \dfrac{\mathrm{Rf}}{12R} \geq 1 \text{（振幅条件）} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \omega = \dfrac{1}{\sqrt{3}CR} \\ \dfrac{Rf}{R} \geq 12 \end{cases}$$

移相型発振回路($i_2 = 0$ の場合)



$$G_{loop}(j\omega) = \frac{v_{out}}{v_1} = \frac{v_2}{v_1}\frac{v_{out}}{v_2} = \frac{-G}{A^{(3)}} = \frac{-G}{1 - \frac{5}{\omega^2 C^2 R^2} + j\left(\frac{1}{\omega^3 C^3 R^3} - \frac{6}{\omega CR}\right)}$$

$i_2 = 0$ より

$$\begin{cases} \angle G_{loop} = -\arctan\dfrac{1 - 6\omega^2 C^2 R^2}{\omega CR(\omega^2 C^2 R^2 - 5)} = 0 \text{（位相条件）} \\ G_{loop}\left(\omega = 1/\sqrt{6}CR\right) = \dfrac{G}{29} \geq 1 \text{（振幅条件）} \end{cases}$$

⇨

$$\begin{cases} \omega = \dfrac{1}{\sqrt{6}CR} \\ G \geq 29 \end{cases}$$

課題8．1

1. LPF移相型発振回路の周波数条件と電力条件を求めよ。$Z_{in} = \infty$の電圧増幅回路を使用する場合と、電流-電圧変換回路を使用する場合のそれぞれについて求めること。

課題8．２

1. 次スライドの移相型発振回路について、発振条件から、発振周波数(Hz)と発振するために必要なR4の値の範囲を計算して、レポートに示せ。
2. 次スライドのシミュレーションを実施し、回路図とV(OUT), V(N2), V(N3), V(N4)の波形をレポートに添付せよ。
3. 発振周波数(Hz)と出力電圧のRMS(V)を求めて、レポートに記載せよ。また、発振周波数(Hz)の計算値に対する誤差率を示せ。
4. .tran ディレクティブの、Time to start saving data を0sに変更して、波形が、動作開始から990msの時点で定常状態になっているか確認せよ。
5. R4 = 113kΩのときとR4 = 109kΩのときの波形をレポートに添付せよ。
   – R4 = 113kΩのとき出力電圧の振幅が時間と共に減少する場合は、R4を少し大きめ（例えば、115kΩ）にすること。
6. R4 = 109kΩのとき、発振が持続しない理由について説明せよ。

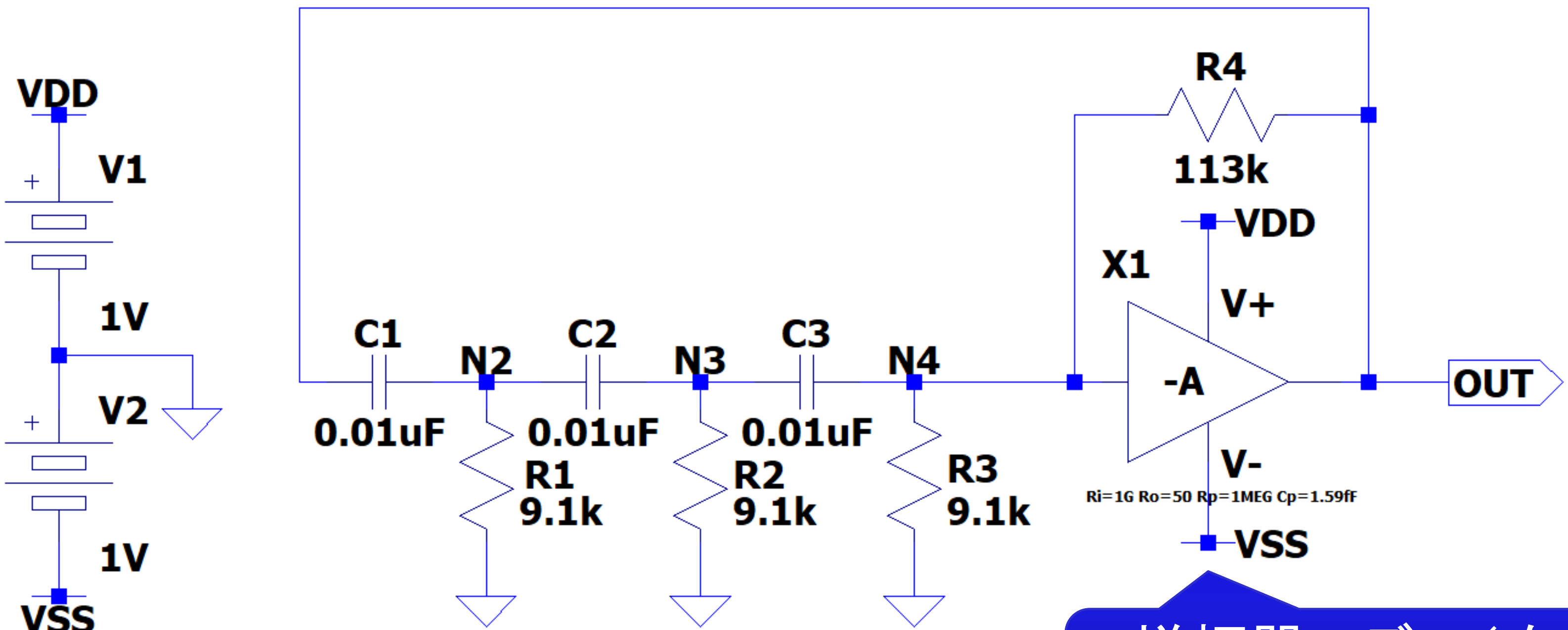
回路図

.ic で初期値設定
（次々スライド参照）

```
.ic V(OUT)=0.1V
.tran 0 1000ms 990ms
;tran 0 1000ms 0ms
.meas tran Tosc trig V(OUT)=0V rise=7 targ V(OUT)=0V rise=8
.meas tran Vrms RMS V(OUT) trig V(OUT)=0V rise=1 targ V(OUT)=0V rise=8
```

発振周期(s)の測定

出力のRMS(V)の測定

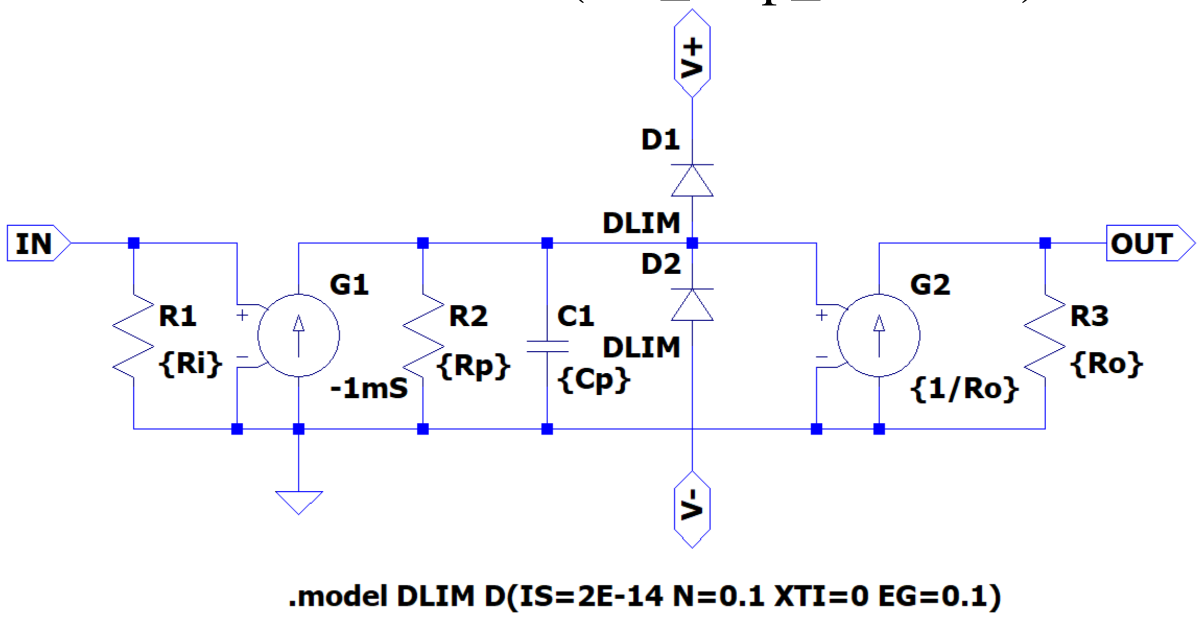


増幅器モデル（次ページ参照）

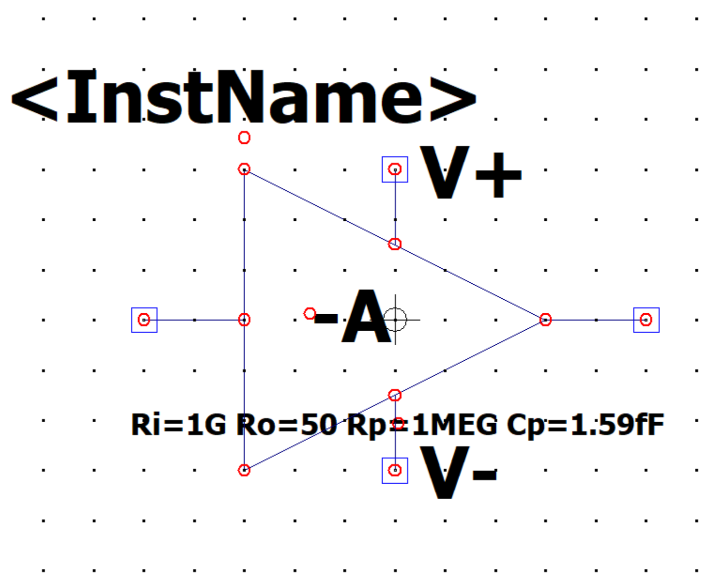
振幅が飽和する増幅器モデル

- 実際の増幅器では、出力電圧の振幅に限界がある
- 発振回路のシミュレーションでは、出力電圧の振幅を制限した動作モデルかトランジスタ回路が必要

動作モデル(inv_amp_limit.asc)



シンボル(inv_amp_limit.asy)



（重要）TRAN解析の初期値設定

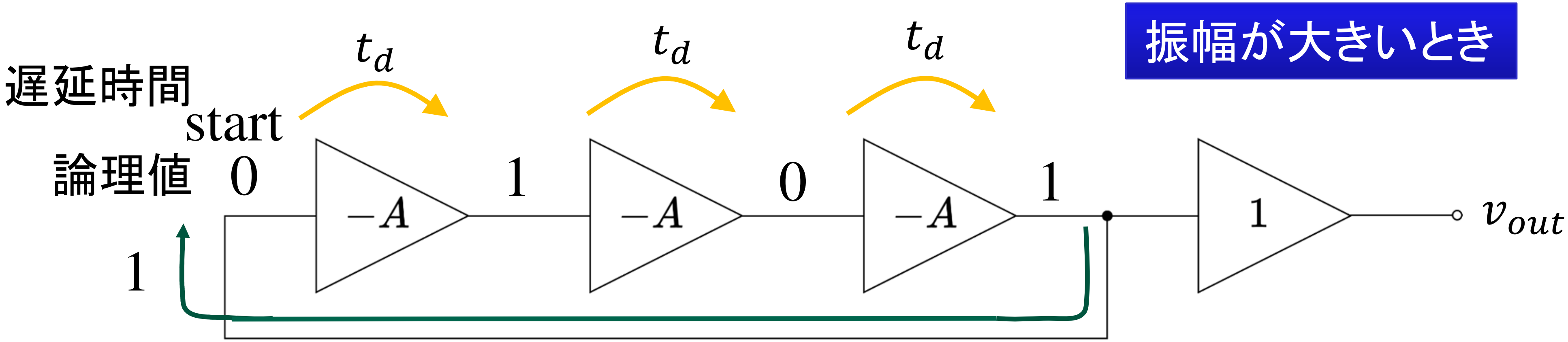
- 発振の開始条件
  - 発振回路は、入力信号がないため、発振を開始するためのトリガを必要とする（直流バイアスを加えただけで発振していない状態も回路方程式の解の一つである）
  - 現実の回路では、電源の投入による過渡応答や雑音などがトリガとなって、発振振幅が時間とともに大きくなっていく
- シミュレーションで発振を開始させる方法(.ic)
  - 過渡応答解析では、雑音がないため（AC解析では雑音を計算できる）、意図的にトリガーを加えないと発振しない
  - トリガーの代用として、初期値を設定し、バイアス電圧やバイアス電圧から外れた値にすることにより、発振を開始させる
  - 初期値を与える場所と値によって、定常状態への到達時間が異なるため、シミュレーション終了時間を十分に長く設定することにより、定常状態になるまで発振波形を（減衰しないか）確認する必要がある

簡便な高周波発振器

8.3 リングオシレータ

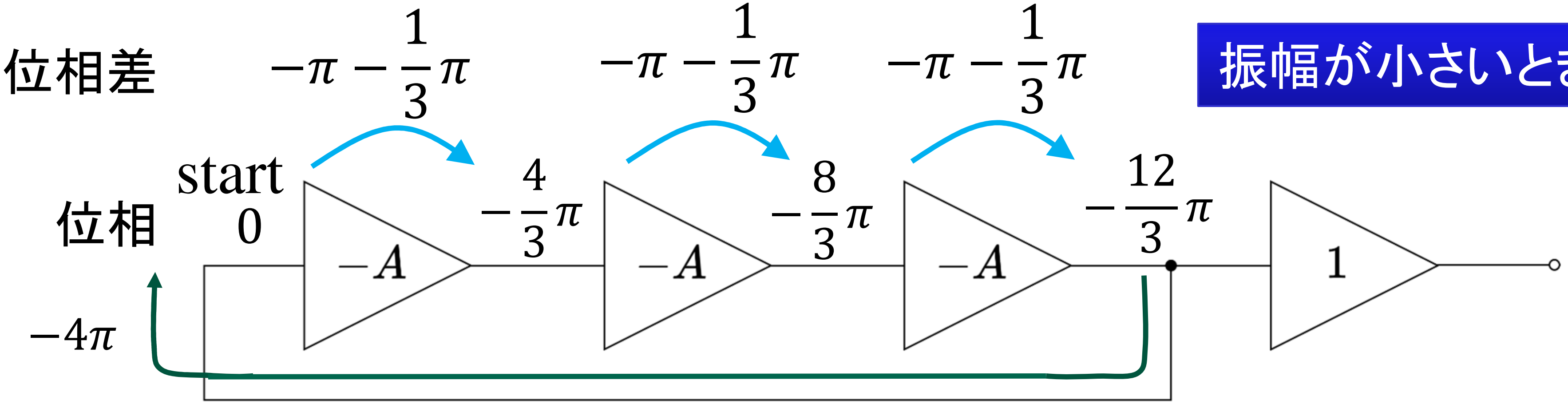
リングオシレータの動作原理

振幅が大きいとき



発振周期　$T = 2 \cdot 3t_d \longrightarrow$ 発振周波数　$f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{6t_d}$

振幅が小さいとき

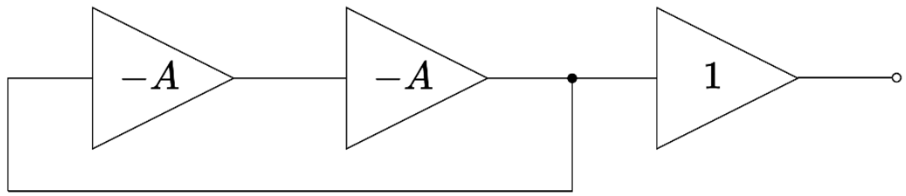


発振周波数は増幅器の位相が$-(4/3)\pi$となる周波数

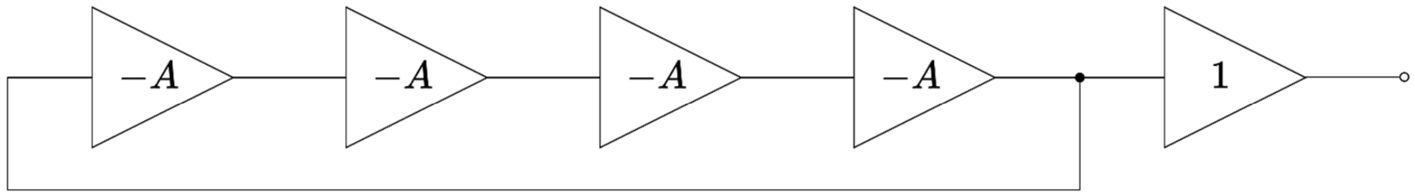
クイズ

(A) ~ (C)の回路のうち発振するのはどの回路か。

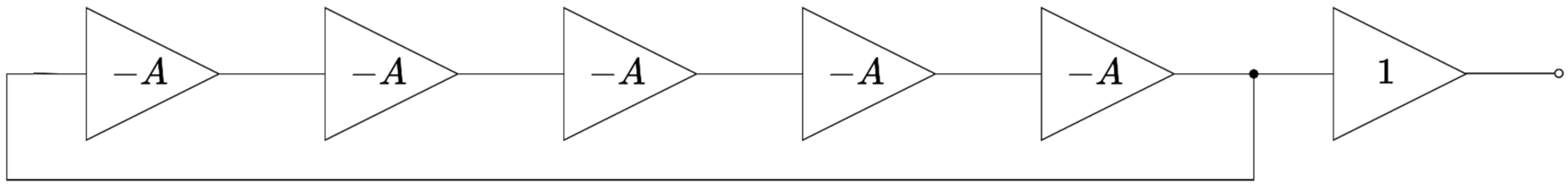
(A)



(B)



(C)



リングオシレータの発振条件

増幅器の特性が下記$A(j\omega)$で与えられるとき、

$$A(j\omega) = -\frac{A_0}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_c}}$$

$$G_{loop}(j\omega) = A(j\omega)^3$$

$$= -\frac{A_0^3}{1 - 3\left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)^2 + j\left\{3\left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right) - \left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)^3\right\}}$$

$$\begin{cases} 3\left(\dfrac{\omega_{osc}}{\omega_c}\right) - \left(\dfrac{\omega_{osc}}{\omega_c}\right)^3 = 0 \text{（位相条件）} \\ |A(j\omega_{osc})|^3 \geq 1 \text{（振幅条件）} \\ |A(j\omega_{osc})| = \dfrac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\omega_{osc}}{\omega_c}\right)^2}} = \dfrac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\sqrt{3}\right)^2}} \geq 1 \end{cases}$$

⇨

$$\omega_{osc} = \sqrt{3}\omega_c$$
$$A_0 \geq 2$$

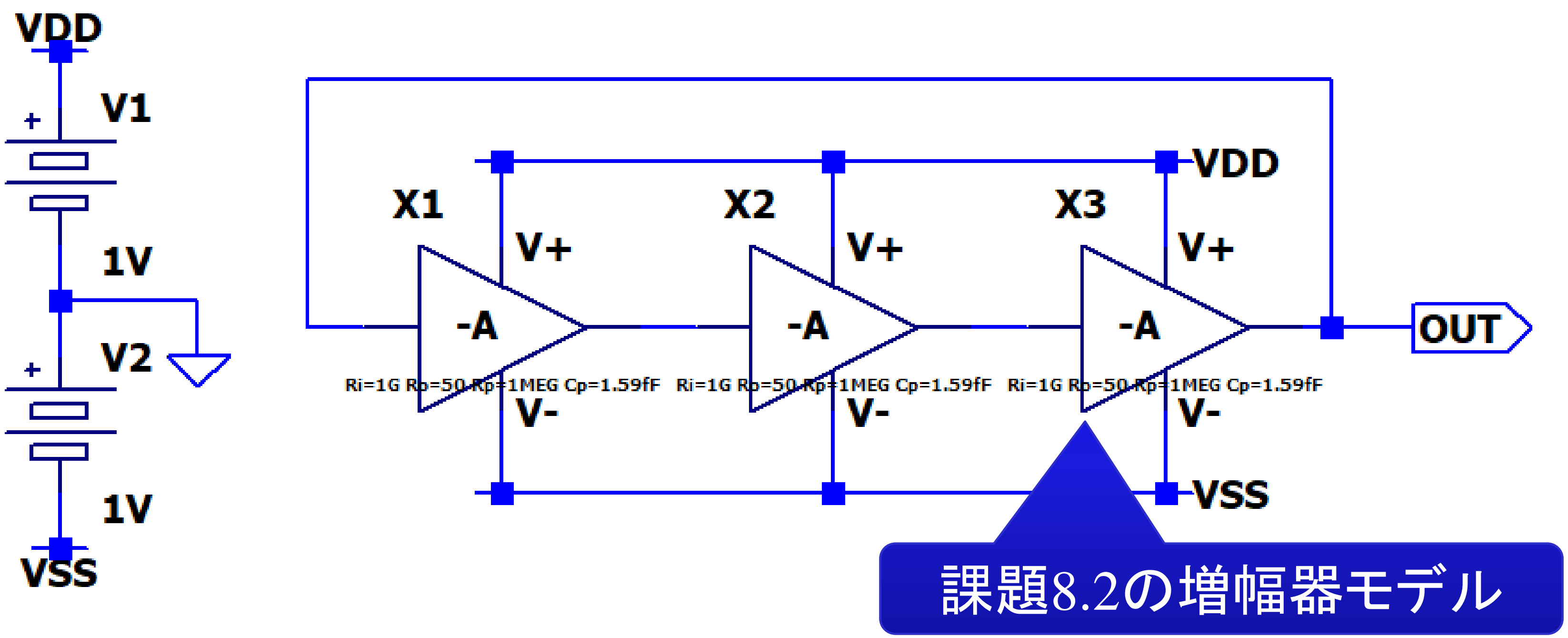
課題８．３

1. 次ページのリングオシレータのTRAN解析を行い、0.8ns～1nsの発振波形をレポートに貼り付けよ。
2. リングオシレータの発振波形は、矩形波に近い形となる。高速フーリエ変換(FFT)により、出力波形のスペクトラムを表示し、レポートに貼り付けよ。
   – .options plotwinsize=0 を追加（結果のデータ圧縮を禁止）
   – .options numdgt=15 を追加（倍精度演算を使用）
   – 終了時間を増やす（10ns以上）
   – シミュレーションが終わったら、グラフを右クリック View – FFT。変換する変数を選んでOKをクリック（Number of data point samples in time の上下カーソルで増やしておくとFFTがきれいになるが、時間がかかる）
3. 発振周波数と振幅のRMSを求めよ。
4. 発振周波数から、増幅回路の遅延時間を求めよ。

リングオシレータの発振回路のシミュレーション

トリガーとなる外乱（雑音や温度変動）の代替として、初期値を設定する。

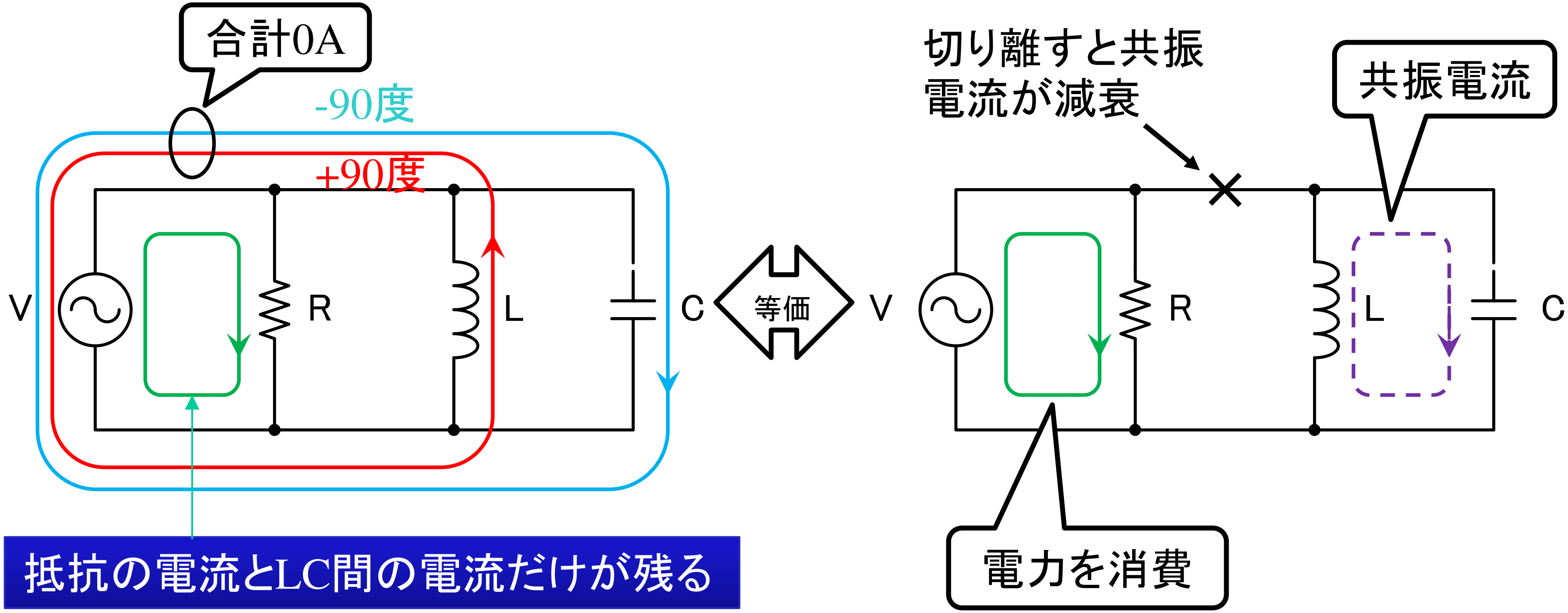
```
.ic V(OUT)=-0.1V
.tran 0 1ns 0.8ns
.meas tran Tosc trig V(OUT)=0V rise=7 targ V(OUT)=0V rise=8
.meas tran Vrms RMS V(OUT) trig V(OUT)=0V rise=1 targ V(OUT)=0V rise=8
```



周波数精度の高い高周波発振器

8.4 LC発振回路

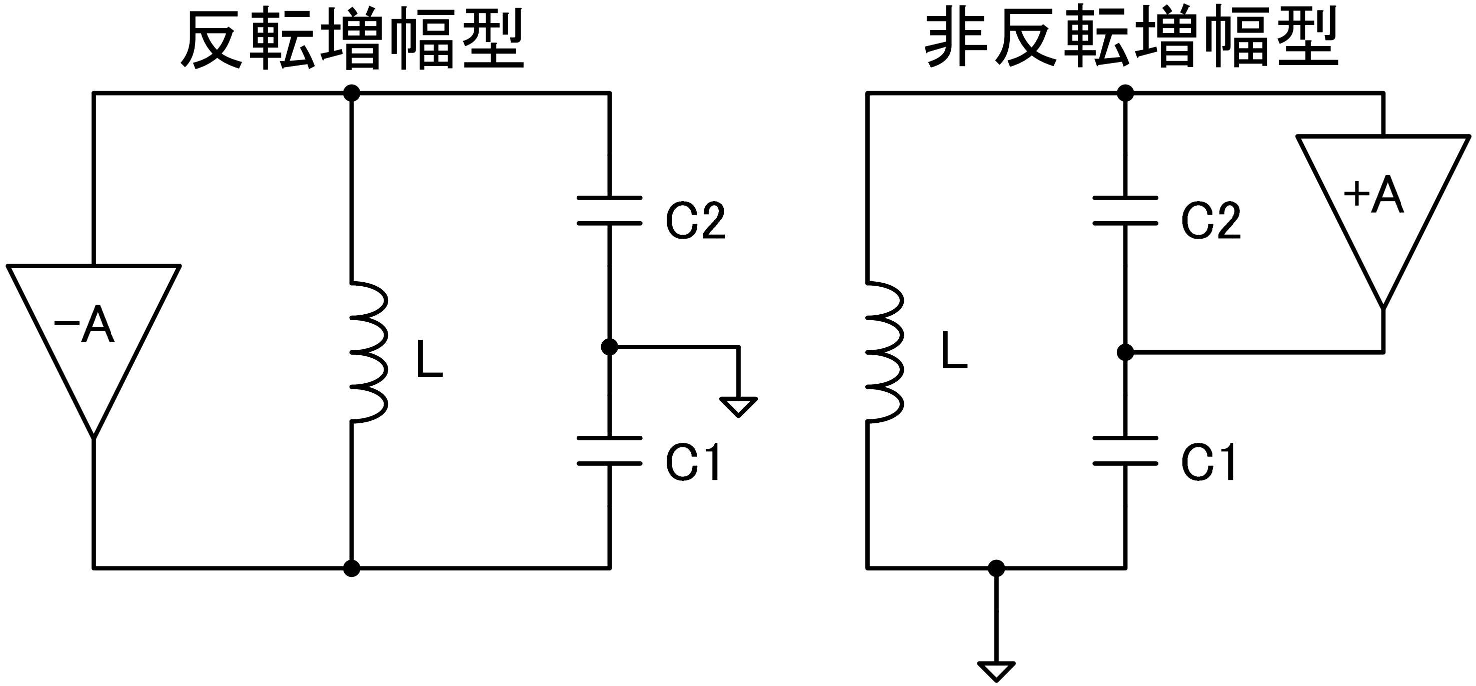
LC並列共振



Lの電流とCの電流は、位相が180度ずれている。共振周波数では振幅が等しくなり打ち消しあうため、交流電圧源とLC共振回路は独立している。本来は、交流電源がなくても電場エネルギーと磁場エネルギーを交互に交換しているため、共振電流は流れ続ける。しかし、実際のLやCには電力損失があり、電源がないと共振電流は短時間で減衰してしまう。

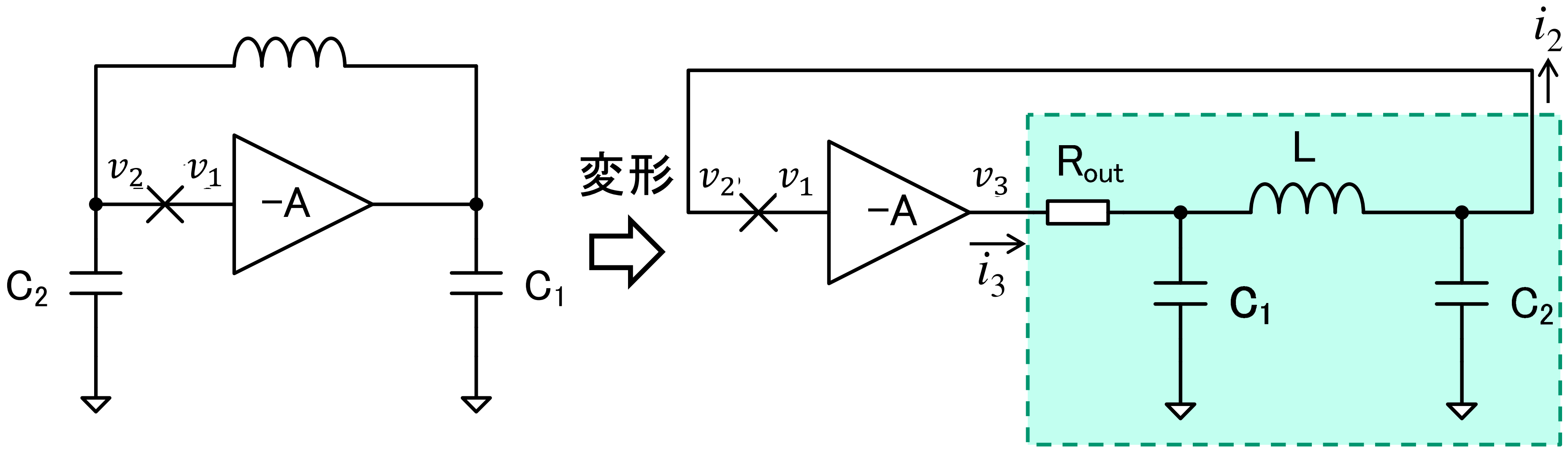
コルピッツ発振回路(Colpitts oscillator)

LC発振回路は、減衰した共振電流を増幅回路で補償してLC回路の共振を持続させる。増幅回路の入力、出力、GNDの3端子が必要なので、Cを2個に分割して3端子にする。



（参考）Lを2個に分割した発振回路をハートレー発振回路(Hartley oscillator)と呼ぶ。

コルピッツ発振回路の発振条件（反転増幅）1



$$\begin{pmatrix} v_3 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{res} & B_{res} \\ C_{res} & D_{res} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_2 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

$i_2 = 0$（増幅器の入力インピーダンス＝∞）

$$\begin{cases} v_3 = A_{res} v_2 \\ v_3 = -A v_1 \end{cases} \Rightarrow \quad G_{loop} = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{A}{A_{res}}$$

（参考）フィードバックループに抵抗成分がないと周波数に対して位相が0または2π（途中がない）となるため、増幅器の出力抵抗をR_{out}とおいた。

コルピッツ発振回路の発振条件（反転増幅）２

共振回路のF行列からループ利得を求めると、

$$\begin{pmatrix} A_{res} & B_{res} \\ C_{res} & D_{res} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{out} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ sC_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & sL \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ sC_2 & 1 \end{pmatrix}$$

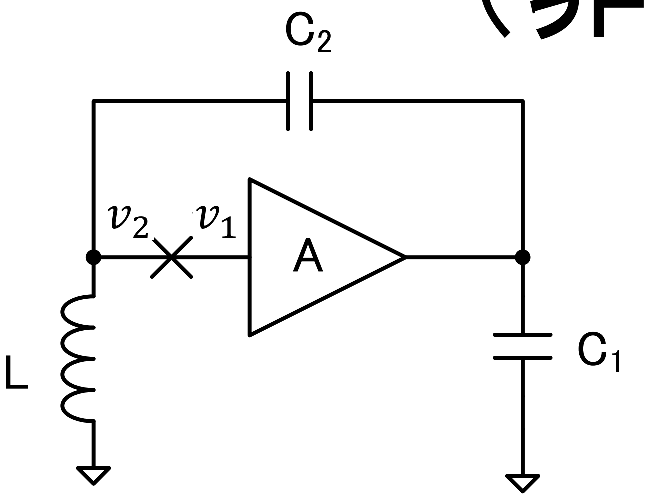
$$\xrightarrow{s=j\omega} \begin{pmatrix} (1-\omega^2 LC_2) - j\omega R_{out}(C_1 + C_2 - \omega^2 LC_1C_2) & R_{out}(1-\omega^2 LC_1) + j\omega L \\ j\omega(C_1 + C_2 - \omega^2 LC_1C_2) & 1-\omega^2 LC_1 \end{pmatrix}$$

$$G_{loop}(j\omega) = -\frac{A}{A_{res}} = \frac{-A}{(1-\omega^2 LC_2) - j\omega C_1 C_2 R_{out}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \omega^2 L\right)}$$

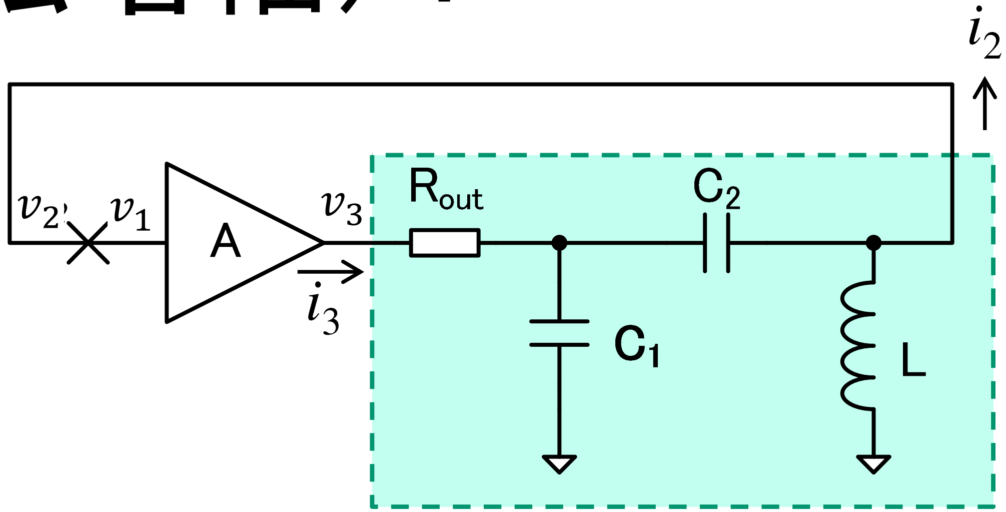
$\mathrm{Im}\left[G_{loop}\right] = 0$ より $\qquad \omega_{OSC} = \sqrt{\frac{1}{L}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)}$

$\mathrm{Re}\left[G_{loop}\right] \geq 1$ より $\qquad \frac{-A}{1-\omega_{OSC}{}^2 LC_2} \geq 1 \;\Rightarrow\; A \geq \frac{C_2}{C_1}$

コルピッツ発振回路の発振条件（非反転増幅）1



変形



$$\begin{bmatrix} v_3 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{res} & B_{res} \\ C_{res} & D_{res} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$i_2 = 0$（増幅器の入力インピーダンス＝∞）

$$\begin{cases} v_3 = A_{res} v_2 \\ v_3 = A v_1 \end{cases} \Rightarrow \quad G_{loop} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{A_{res}}$$

コルピッツ発振回路の発振条件（非反転増幅）２

共振回路のF行列からループ利得を求めると、

$$\begin{pmatrix} A_{res} & B_{res} \\ C_{res} & D_{res} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{out} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ sC_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \dfrac{1}{sC_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \dfrac{1}{sL} & 1 \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow{s=j\omega} \begin{pmatrix} \left(1 - \dfrac{1}{\omega^2 LC_2}\right) - j\dfrac{R_{out}}{\omega LC_2}(C_1 + C_2 - \omega^2 LC_1C_2) & \left(1 + \dfrac{C_1}{C_2}\right) R_{out} + \dfrac{1}{j\omega C_2} \\ -j\dfrac{1}{\omega LC_2}(C_1 + C_2 - \omega^2 LC_1C_2) & 1 + \dfrac{C_1}{C_2} \end{pmatrix}$$

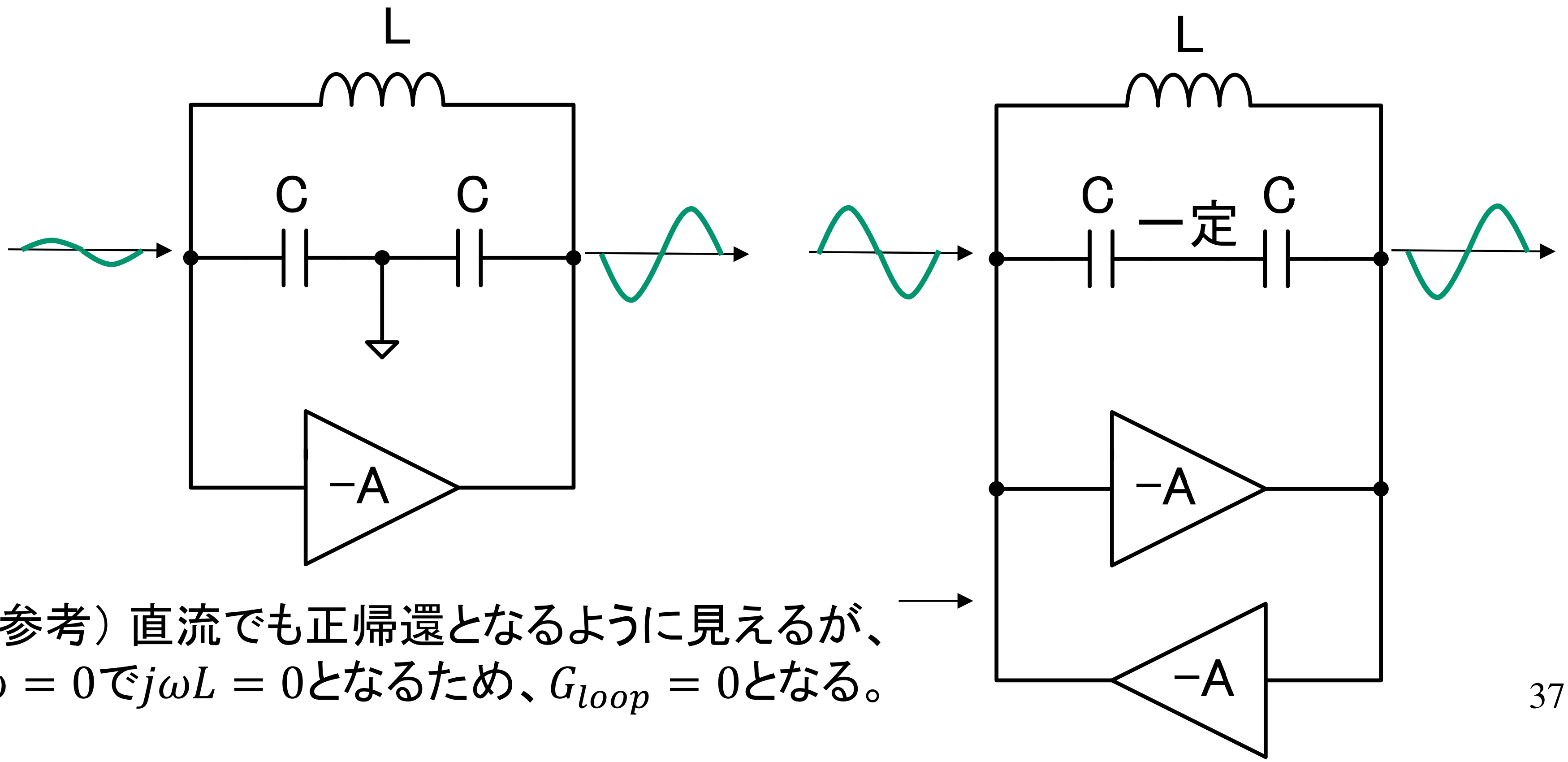
$$G_{loop}(j\omega) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{\left(1 - \dfrac{1}{\omega^2 LC_2}\right) - j\dfrac{R_{out}}{\omega LC_2}(C_1 + C_2 - \omega^2 LC_1C_2)}$$

$\mathrm{Im}\left[G_{loop}\right] = 0$ より $\quad \omega_{osc} = \sqrt{\dfrac{1}{L}\left(\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}\right)}$

$\mathrm{Re}\left[G_{loop}\right] \geq 1$ より $\quad \dfrac{A}{1 - \dfrac{1}{{\omega_{OSC}}^2 LC_2}} \geq 1 \quad \Rightarrow \quad A \geq \dfrac{C_2}{C_1 + C_2}$

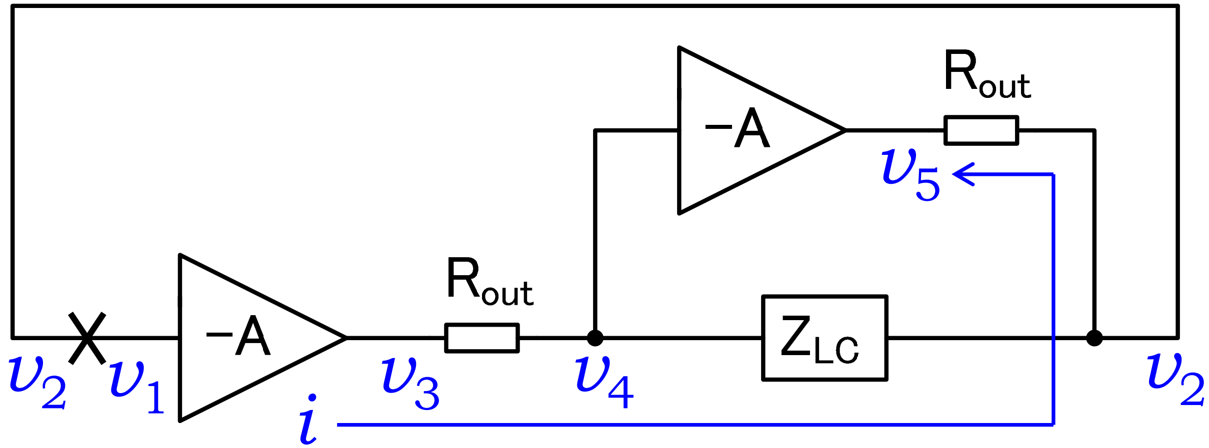
差動型LC発振回路

増幅回路の入力と出力の振幅は大きく異なるので、GNDに対してC1とC2の電圧が非対称な振動となる。増幅回路を2個使用して、両側の振幅を揃えると、C1 = C2 のとき、C1とC2の接続点電位は常に一定となり、GNDに接続する必要がなくなる（Cは1個でもよい）。



（参考）直流でも正帰還となるように見えるが、
$\omega = 0$で$j\omega L = 0$となるため、$G_{loop} = 0$となる。

差動型LC発振回路の発振条件1



$$Z_{LC} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

$$\begin{cases} v_4 = v_3 - R_{out} i = -A v_1 - R_{out} i \\ v_2 = v_5 + R_{out} i = -A v_4 + R_{out} i \\ v_4 - v_2 = Z_{LC} i \end{cases} \Rightarrow G_{loop} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A\left(A - \frac{R_{out}}{Z_{LC}}\right)}{1 + (2 + A)\frac{R_{out}}{Z_{LC}}}$$

差動型LC発振回路の発振条件2

$$Z_{LC} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

$$\frac{R_{out}}{Z_{LC}} = -j\omega \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega^2 \frac{L}{R_{out}}}$$

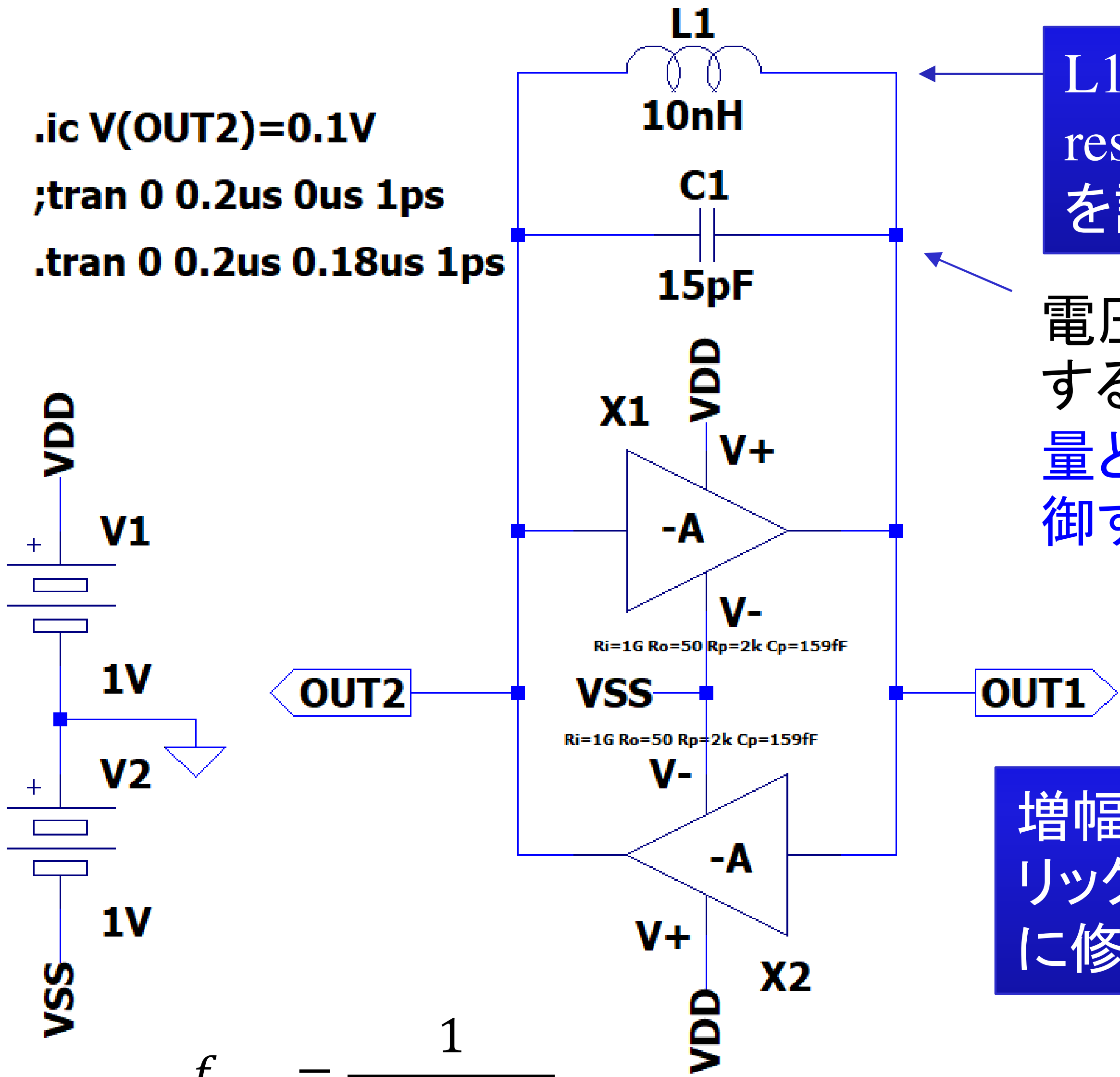
$\mathrm{Im}\left[G_{loop}\right] = 0$ より $\frac{R_{out}}{Z_{LC}} = 0$ ⇨ $\omega_{OSC} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$\mathrm{Re}\left[G_{loop}\right] \geq 1$ より $A^2 \geq 1$ ⇨ $|A| \geq 1$（共振回路に損失がない場合）

課題８．４

1. 次スライドのLC発振回路の発振周波数を解析式により求めよ。
2. 0～0.2usおよび0.18us～0.2usの時間範囲でシミュレーションを行い、それぞれの時間範囲に対するOUT1とOUT2の波形を提出せよ。
   – 課題7.2の出力振幅に制限のある増幅器モデルを使用する。ただし、Rp, Cpの値は、次ページの値に変更して使用すること。
3. 時間0.18us～0.2usのシミュレーションで得られた出力波形の発振周波数(Hz)と振幅のRMS(V)を求めよ。
   1. RMS値は、.measコマンドを用いるか、グラフの変数名の上で、CREL + 左クリックして求めることができる。
4. 解析式と回路シミュレーションで求めた発振周波数の相対誤差を求めよ。

差動型LC発振回路の例1



L1を右クリックして、Series resistance = 0.5（直列抵抗）を設定する。

電圧制御発振器として使用する場合は、C1は可変容量として、発振周波数を制御する。（ここでは固定）

増幅器のパラメータを右クリックして、Rp=2k Cp=159fF に修正する。

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1C1}}$$

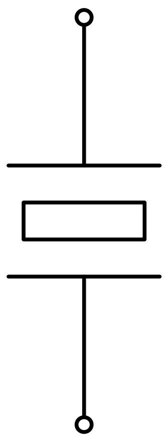
基準信号発振器

8.5 水晶発振回路

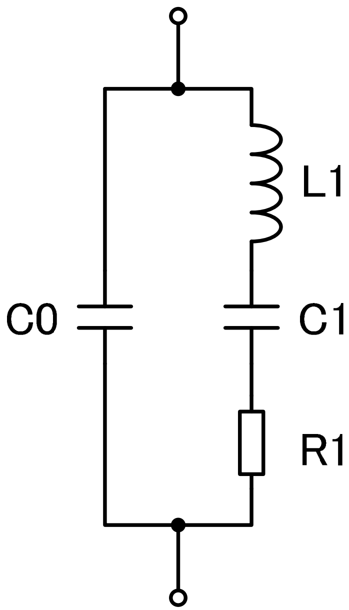
水晶振動子(Quartz crystal unit)

高精度で安定性の良い基準信号周波数を発生させることができる。水晶の圧電効果により特定周波数で共振が起こることを利用。他の応用としてはジャイロセンサなどがある。

外観



Symbol



等価回路

水晶振動子は2つの共振周波数を持つ

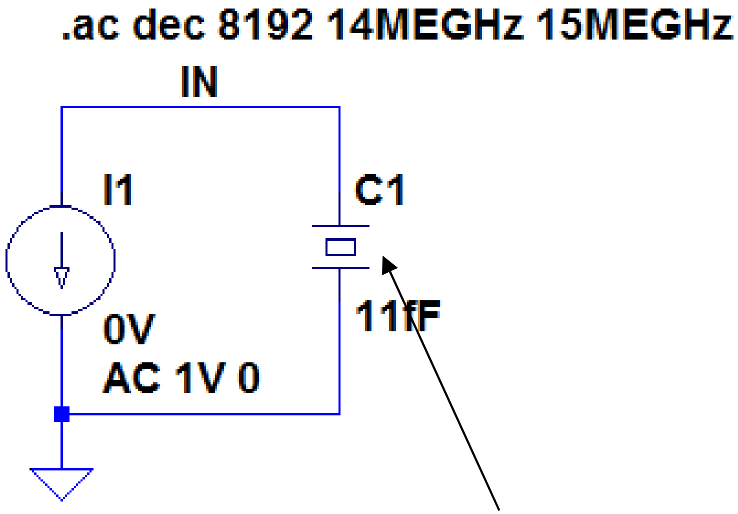
直列共振 $$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1C1}}$$

並列共振 $$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1\frac{C0C1}{C0+C1}}}$$

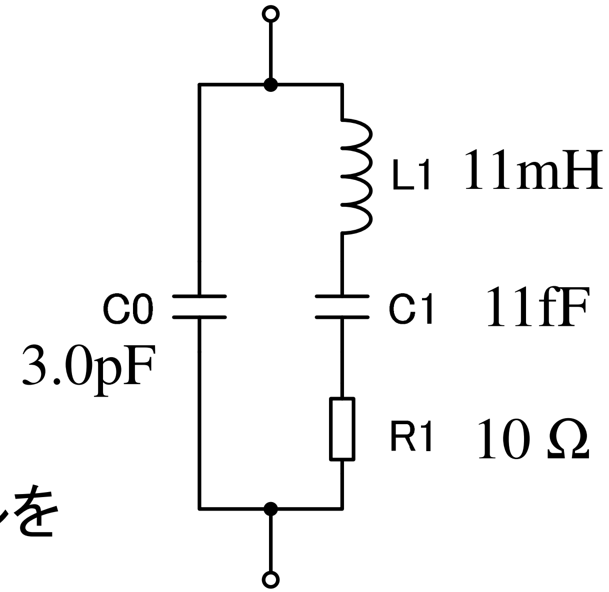
水晶振動子のQはLC回路に比べて非常に大きい（L1/R1が大きい）

$$Q = \frac{2\pi L1}{R1} f_s$$

水晶振動子の等価回路パラメータ



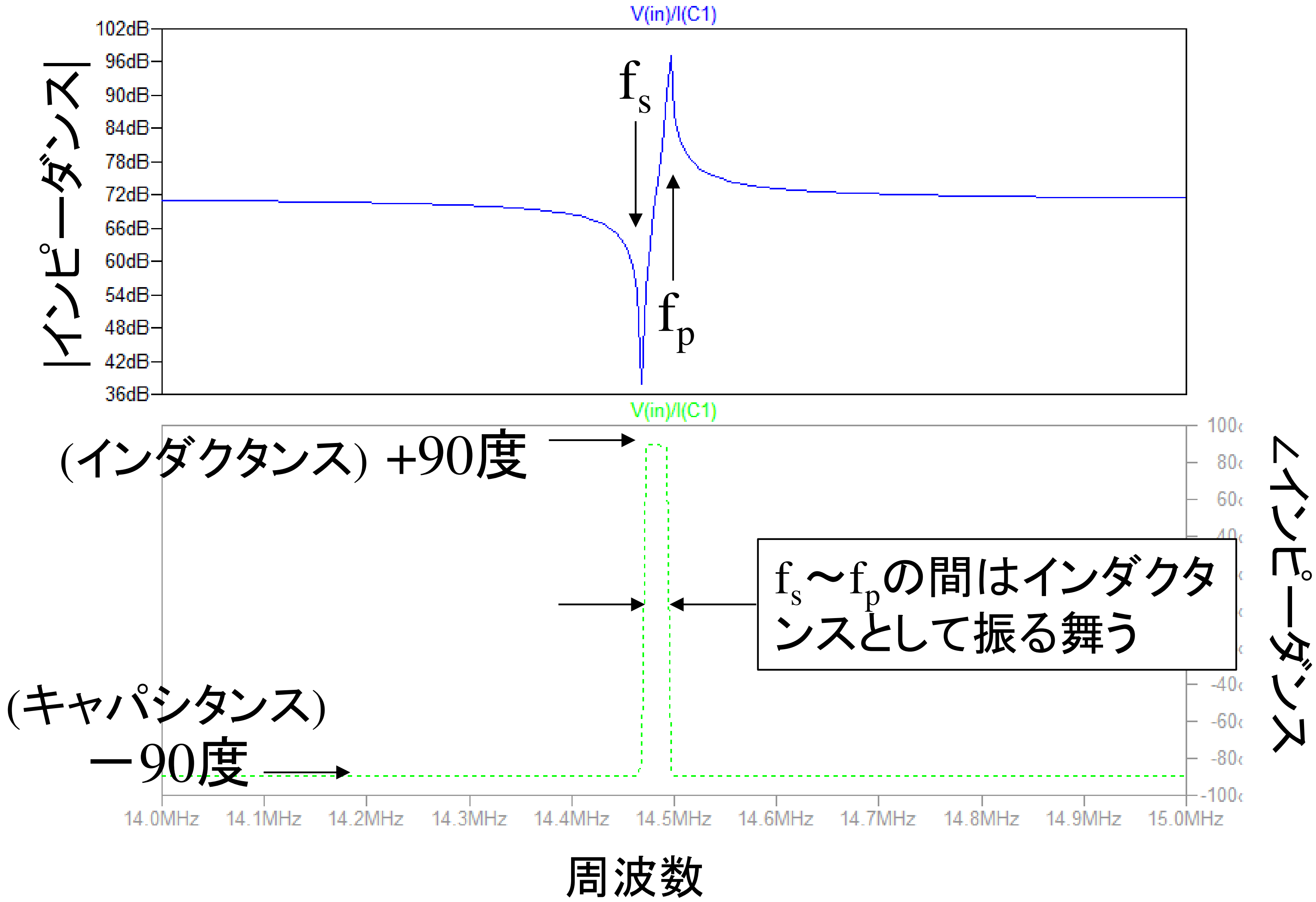
14MHz 水晶振動子のパラメータ例



Component - [Misc] - xtal のシンボルを
使用 → 右クリックで下記の値を入力

Capacitance = 11fF（C1に相当）
Equiv. Series Resistance = 10ohm（R1に相当）
Equiv. Series Inductance = 11mH （L1に相当）
Equiv. Parallel Capacitance = 3.0pF（C0に相当）

水晶振動子の周波数特性



振動子の種類

分類	誤差	特長
MEMS振動子（シリコン振動子）	10^{-3}	数GHz, LSI内に集積化
セラミック振動子	10^{-3}	200kHz～数100MHz, 圧電セラミック使用, 安価
水晶振動子 水晶発振器（発振回路込みのモジュール） SPXO (Simple packaged) TCXO (Temperature compensated) OCXO (Oven controlled)	10^{-5}~10^{-6} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-9}	数10kHz~数100MHz, 非常に高精度な周波数. 水晶を使用しており高価

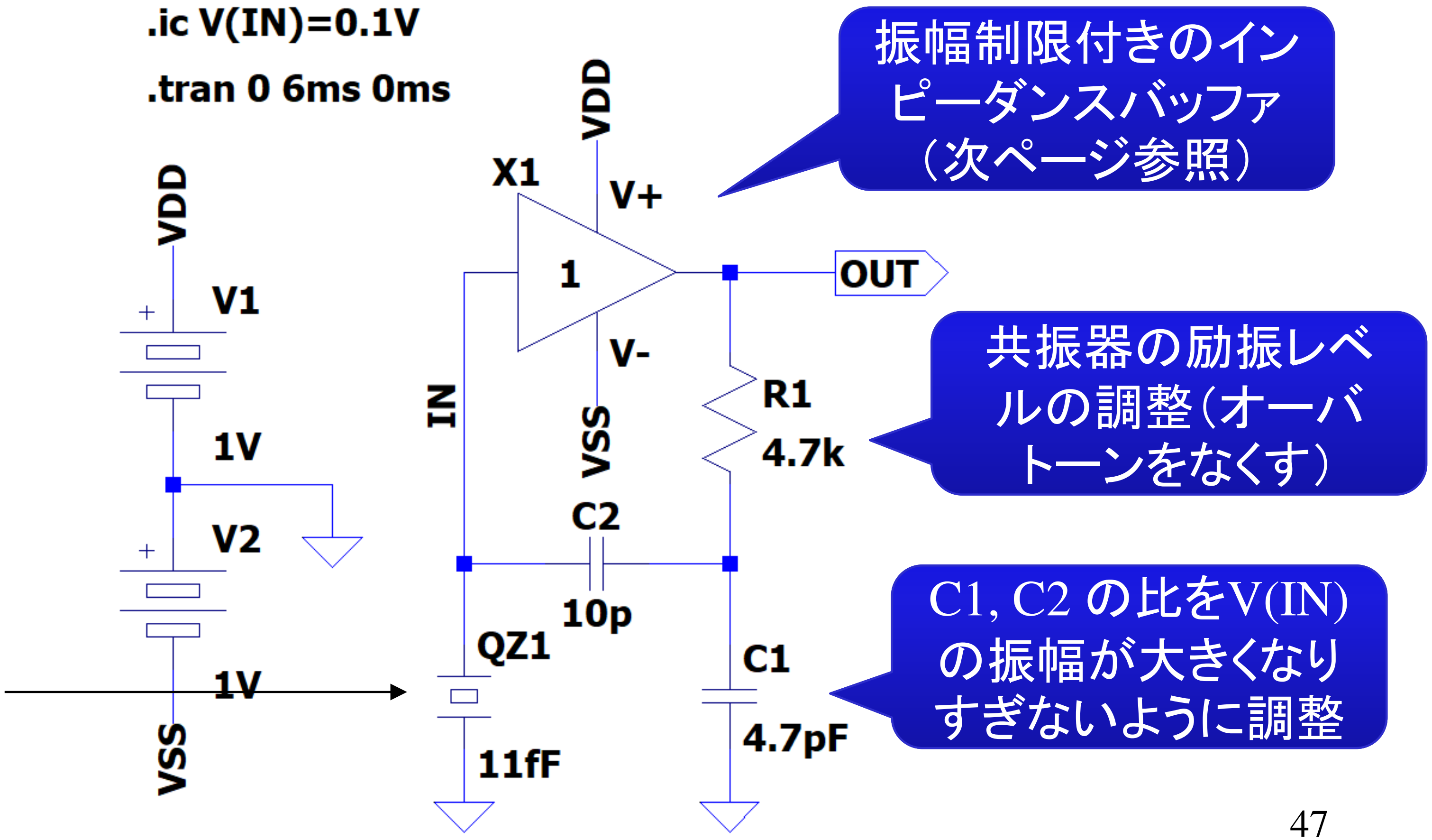
オーディオ用
- 22.5792MHz (44.1kHz ×2^9倍)
- 5.644MHz (44.1kHz ×2^7倍)

RTC(Real-time clock)用
- 32.768kHz (= 2^{15} Hz)

水晶発振器外観

水晶発振回路(Crystal Oscillator)

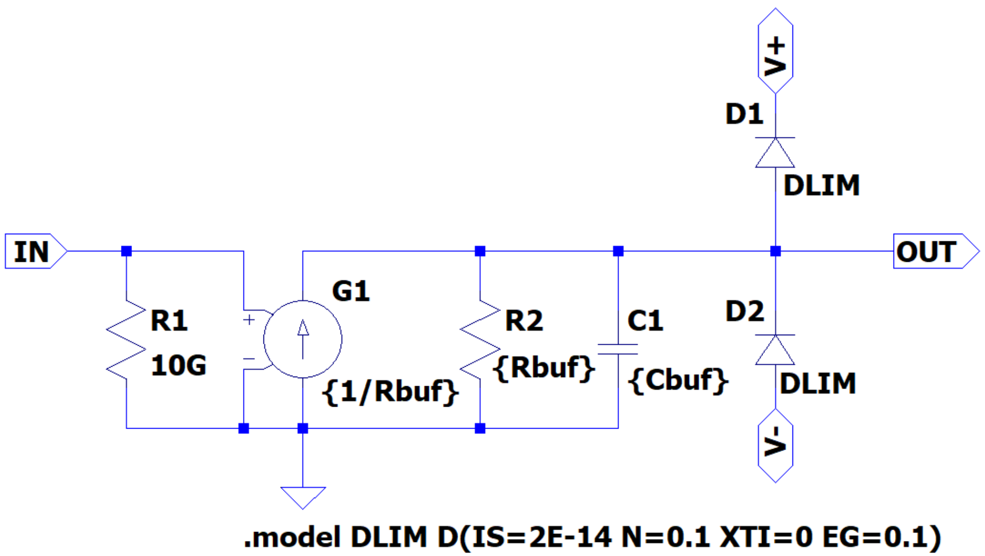
水晶振動子は狭い周波数範囲でQ値の大きなインダクタンスとして働くため、正確な周波数で発振が可能。



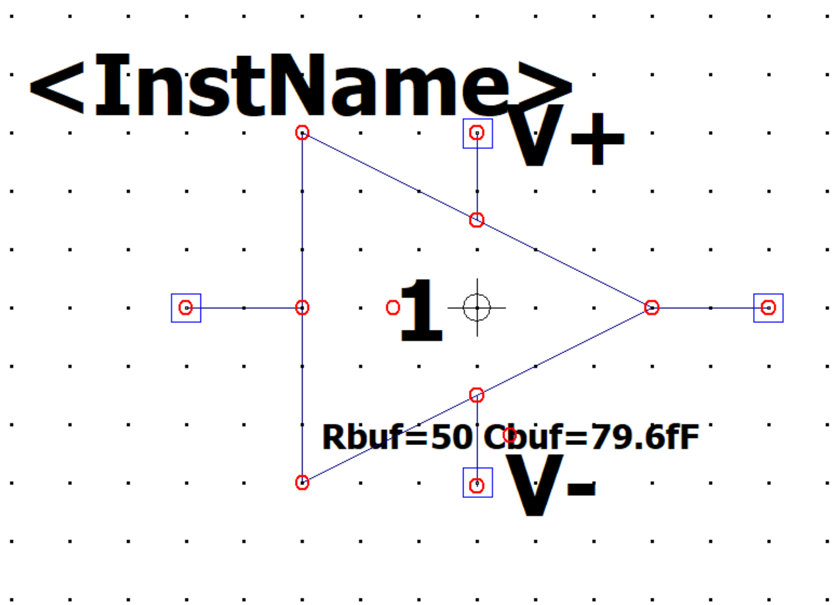
コルピッツ発振回路のインダクタンスの代わりに水晶振動子を使用。

出力振幅制限付きバッファのモデル

動作モデル(inv_amp_limit.asc)



シンボル(inv_amp_limit.asy)



課題８．５

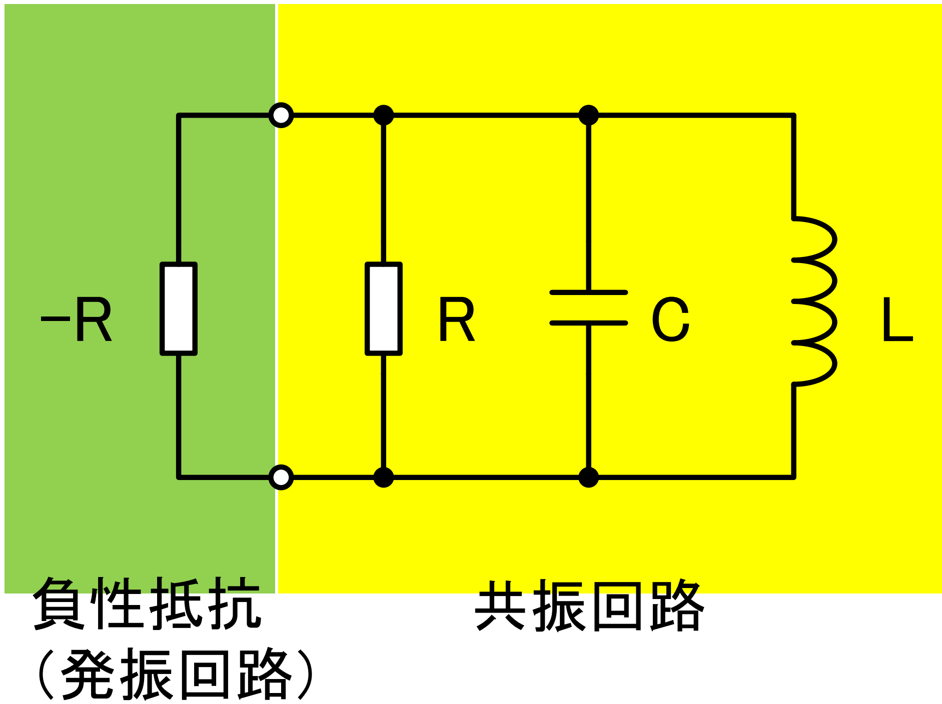
1. 前スライドの水晶発振回路について、0ms〜6msおよび5.999ms〜6msの時間範囲でシミュレーションを行い、INとOUTの波形をレポートに貼り付けよ
   – 増幅器のモデルとして次スライドの回路を使用すること
   – 水晶発振回路は、振幅が成長するまでに長い時間がかかる。定常状態になるまで気長に待とう
2. 5.999ms〜6msのシミュレーションで得られた出力波形の発振周波数と振幅を求めよ
   – 水晶振動子は、品番毎に公称周波数が決まっているが、C1, C2, C3によっても少し変化するので、正確な周波数を出力するためには微調整が必要である

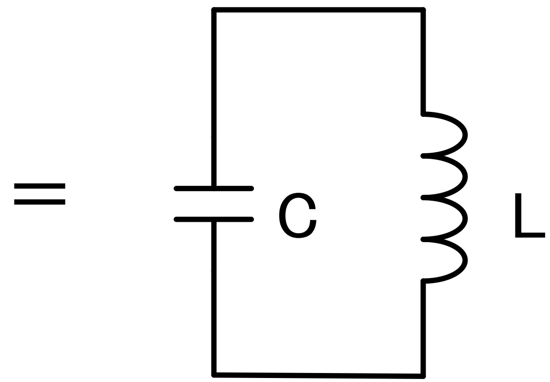
負性抵抗による発振の考え方

8.6 発振の安定性

負性抵抗による発振の考え方

発振回路は、正帰還により振動を繰り返すと考えることもできるが、共振回路に負性抵抗を挿入し、正の抵抗を打ち消しているという考え方もできる。Rは、配線抵抗やトランジスタの抵抗などを表し、電力を消費して振動を減衰させる。-Rは、Rで消費された電力を補うための負性抵抗を表す。



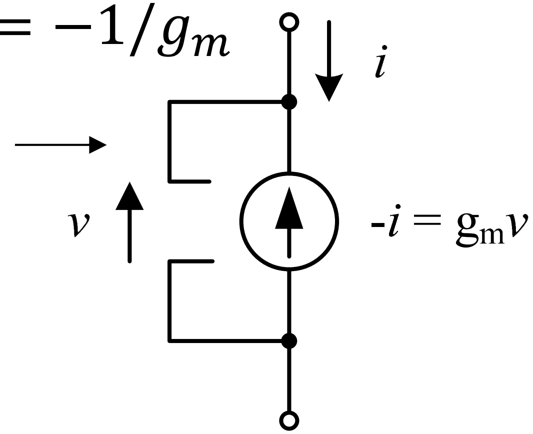


減衰のない完全な共振回路
（振動が減衰しない）

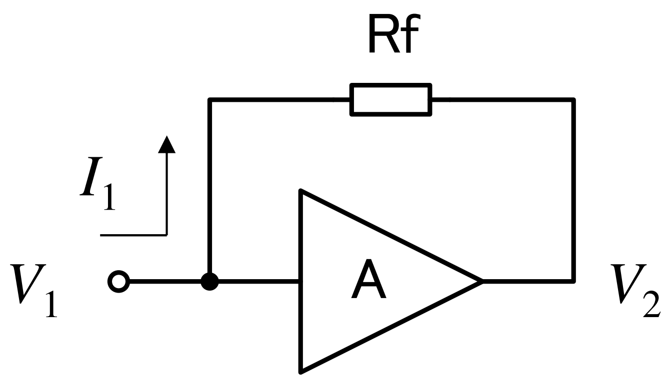
負性抵抗の実現方法

1. 負の相互コンダクタンスを持つ電圧制御電流源回路
   – 正帰還をかけた増幅器を利用
2. 微分負性抵抗を持つ半導体デバイス
   – 量子力学的効果を利用（マイクロ波～テラヘルツ波）
      • Gunnダイオード（電子の有効質量が電流により変化する現象を利用）
      • 共鳴トンネルダイオード（量子力学的トンネリング確率が電圧により変化する現象を利用）
   – 物質の相転移を利用
      • 金属-絶縁体転移
      • アモルファス-結晶転移
   – 半導体素子内部の正帰還を利用
      • サイリスタ（pnpn接合）など

$$R = \frac{v}{i} = -1/g_m$$



増幅器による負性抵抗の例



負性抵抗 -R に電圧を加えると、消費電力が負になる。消費電力が負とは、電力を発生することに相当する。
電圧を加えると、電流が逆流するように正帰還のかかった回路は、負性抵抗と見なせる。（増幅器を動作させるため電力が必要）

増幅回路の入力インピーダンスが非常に大きいと仮定すると

$$\begin{cases} V_2 = AV_1 \\ V_1 - V_2 = \mathrm{Rf} I_1 \end{cases}$$

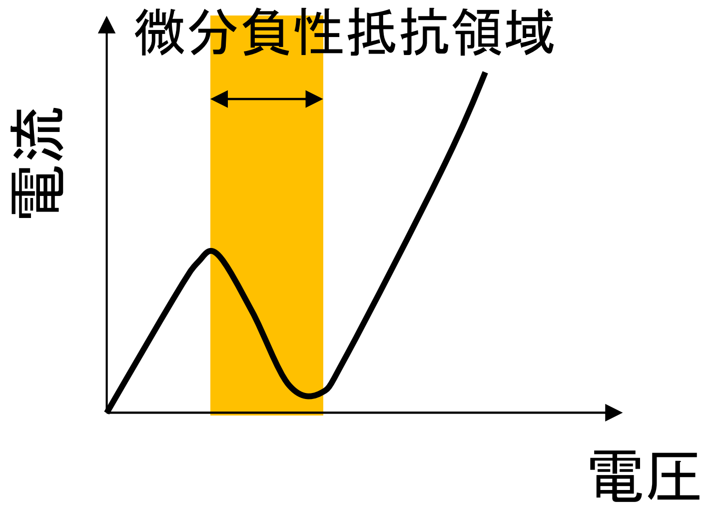
$$V_1 - AV_1 = \mathrm{Rf} I_1$$

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = -\frac{\mathrm{Rf}}{A-1}$$

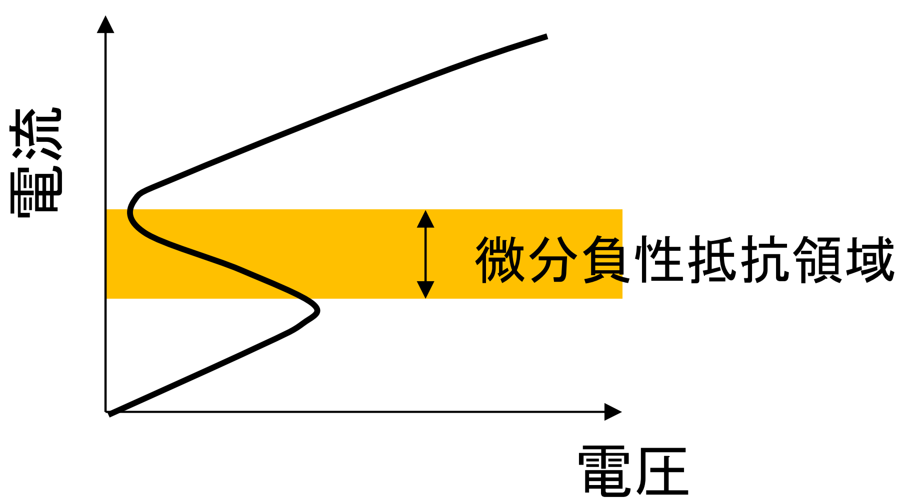
A >1 のとき $Z_{in} < 0$ となる

微分負性抵抗(NDR)の例

電力供給無しに、負性抵抗を作ることは、エネルギーを無限に発生させることを意味する。従って、I-V特性の第2、第4象限の負性抵抗（真の負性抵抗）を実現する方法は見つかっていない。負性抵抗を持つ半導体デバイスは、第1、第3象限の中で直流バイアス電圧を印加して、微分負性抵抗（傾きが負の領域）を利用する。微分負性抵抗電圧源と負荷を繋ぐだけで発振可能。

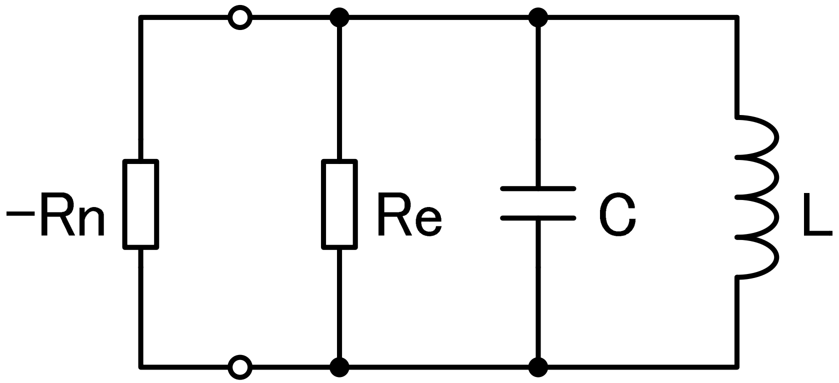


N字型微分負性抵抗



S字型微分負性抵抗

発振余裕度（発振の安定性）



負性抵抗の考え方は、発振の安定性を評価する場合にも使われる。

- 負性抵抗　$-Rn$
- 共振回路の実効抵抗 Re

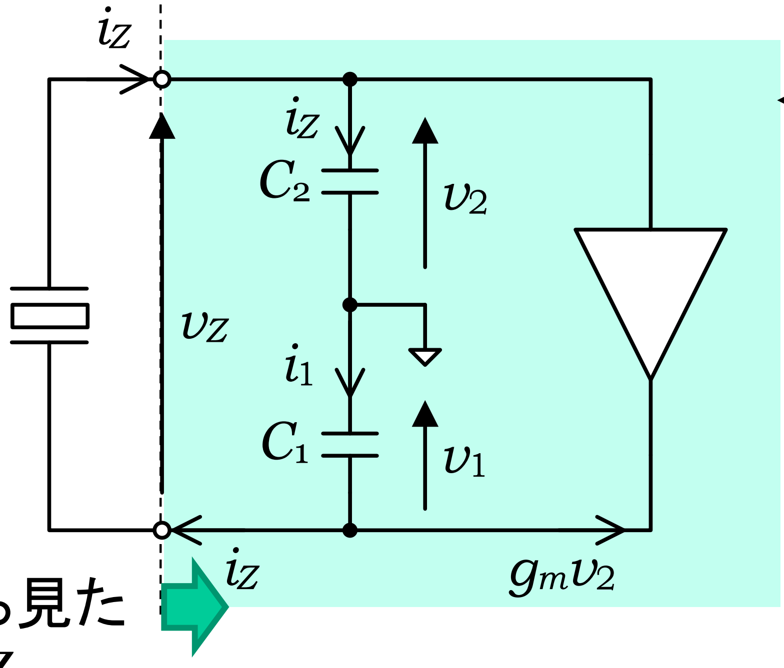
（Reは有効電力を消費するインピーダンスの実数成分）

発振余裕度　$\mathrm{M_{OSC}} = \dfrac{R_n}{R_e} \geq 1$　のとき発振が持続する

（実際には余裕を設けて、$\mathrm{M_{OSC}} = 5 \sim 10$ 以上にする）

発振余裕度が小さいと、素子の特性ばらつきや温度変化により、発振が止まるため、実用回路を作る際には M_{osc} の確認が必要。

水晶発振回路の負性抵抗の見積り1



← 負性抵抗発生部分

$$v_2 = \frac{1}{j\omega C_2} i_z$$

$$v_1 = \frac{1}{j\omega C_1} i_1 = \frac{1}{j\omega C_1}(i_z + g_m v_2)$$

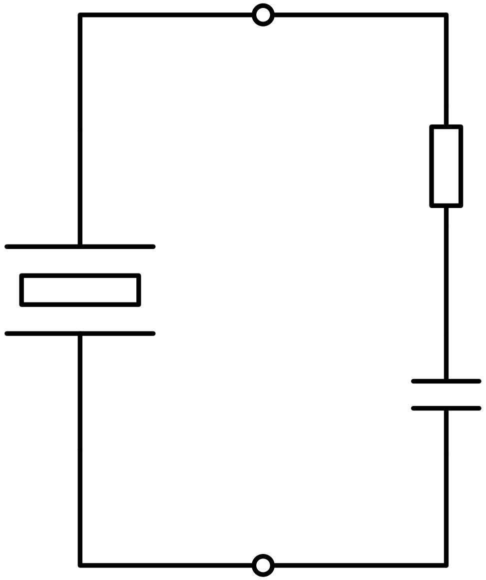
水晶振動子から見た
インピーダンスZ

$$v_z = v_1 + v_2 = \frac{1}{j\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) i_z + \frac{g_m}{j\omega C_1} v_2 = \frac{1}{j\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) i_z + \frac{g_m}{j\omega C_1}\frac{1}{j\omega C_2} i_Z$$

$$Z = \frac{v_z}{i_z} = -\frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2} + \frac{1}{j\omega}\left(\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}\right) \equiv -R_n + \frac{1}{j\omega C_L}$$

負性抵抗

水晶発振回路の負性抵抗の見積り2



$$-R_n = -\frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2}$$

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

R_nの正確な見積もりは難しいので、次ページのように回路シミュレーションで求める。

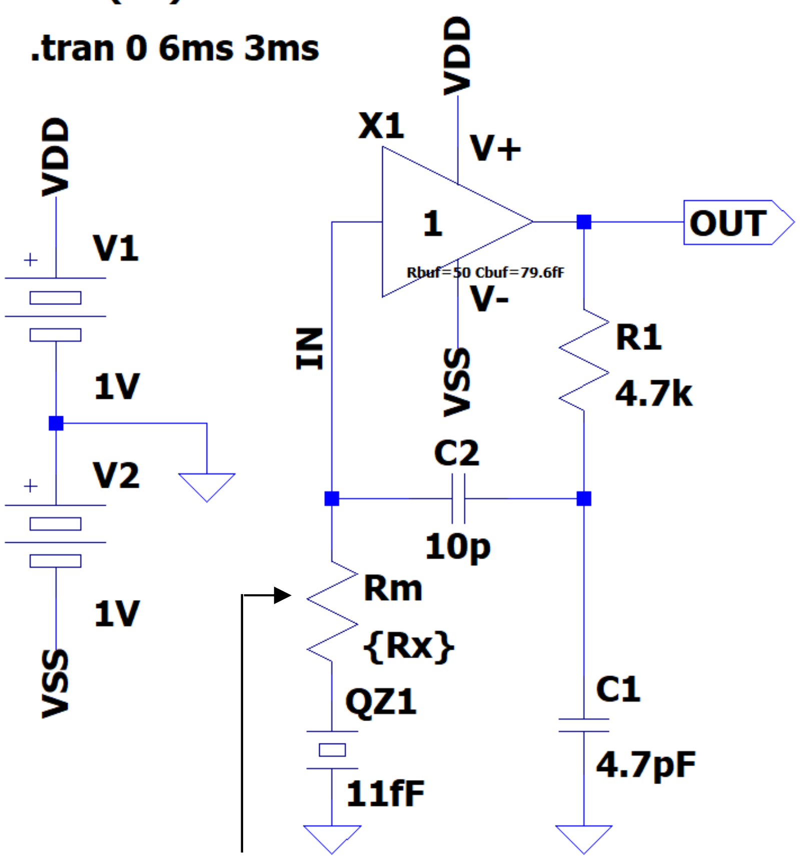
負性抵抗により表した水晶発振回路の等価回路

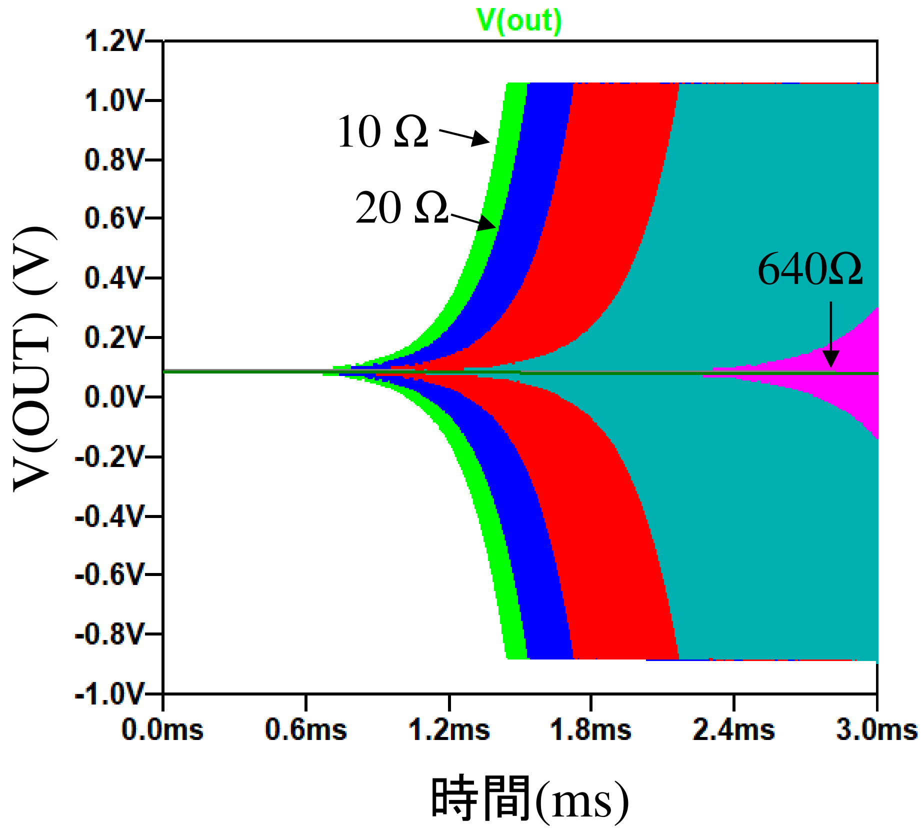
負性抵抗の測定方法

.step param Rx list 10 20 40 80 160 320 640

.ic V(IN)=0.1V

.tran 0 6ms 3ms



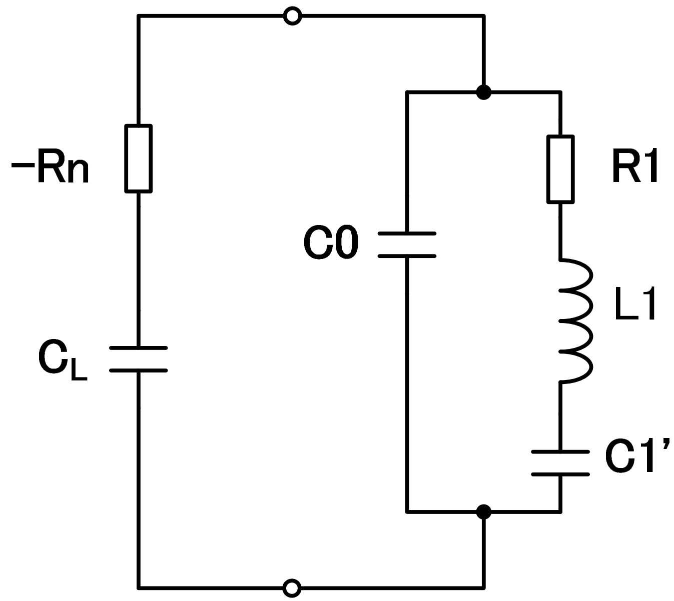


発振が起こらなくなるRmの値を求める(この例では640Ω)

$|R_n| = Rm + Re$（Reは水晶振動子の抵抗成分）

発振余裕度の計算

Re は、共振回路内の抵抗成分に相当。ただし、C_Lの影響で、直列共振時(L1, C1'が共振)の全消費電力は、C_Lがない場合に比べて大きくなる。この場合のReは下記のように求められる。



水晶振動子内の損失

$$Re = \mathrm{R1}\left(1 + \frac{\mathrm{C0}}{\mathrm{C_L}}\right)^2 = 10\left(1 + \frac{3.0\mathrm{pF}}{3.2\mathrm{pF}}\right)^2 \ \Omega$$

実験のために挿入した損失

$$Rm = 640\Omega$$

負性抵抗

$$R_n = Rm + Re = 678\Omega$$

発振余裕度

$$M_{OSC} = \frac{R_n}{Re} = 18.0$$

もし、発振余裕度が不足しているようなら、C_L(C1, C2) を小さくする。

第8章のまとめ

- 発振回路の役割
  - クロックを発生
  - キャリアを発生
  - 基準信号（正確な周波数）を発生
- 正帰還回路の発振条件
  - 位相条件（周波数条件ともいう）→発振周波数を決定
  - 振幅条件（電力条件ともいう）→増幅器の利得を決定
- 発振回路の例
  - 移相型発振回路（RC回路による位相変化を利用）
  - リングオシレータ（増幅器の位相変化を利用）
  - LC発振回路(Colpitts oscillator, Hartley oscillator)（LC共振を利用）
  - 水晶発振回路（LC共振器を水晶振動子に置き換え）
- 発振余裕度
  - LC発振回路、水晶発振回路の安定性（デバイスのばらつきや環境変動に対する耐性）は、発振余裕度（負性抵抗の大きさ）で評価できる