RCポリフェーズフィルタの解析

高次フィルタ伝達関数、
寄生容量･抵抗の影響の解析

群馬大学電気電子工学部

学籍番号　99305107　山口　宣

指導教官　　小林　春夫　教授

発表内容

- 研究目的
- RCポリフェーズフィルタの役割
- RCポリフェーズフィルタの
  伝達関数導出とそのナイキスト線図
- 寄生容量・負荷容量の影響
- 寄生抵抗の影響
- まとめ

研究目的

●RCポリフェーズフィルタの設計理論を確立する。

● そのために

・1, 2, 3 ,4段RCポリフェーズ・フィルタの
伝達関数を導出する。

・寄生容量・負荷容量の影響を解析する。

RCポリフェーズ・フィルタの特徴

- 複素入出力信号を扱う、
  複素アナログ・バンドストップ・フィルタ
- 抵抗R, 容量C から構成される受動回路
- 携帯電話等の無線トランシーバー・
  アナログ・フロントエンドのキーコンポーネント
  - I, Q 信号発生
  - イメージ信号除去

  に使用。

・現時点での問題点

従来は高次フィルタの解析式が得られていない。

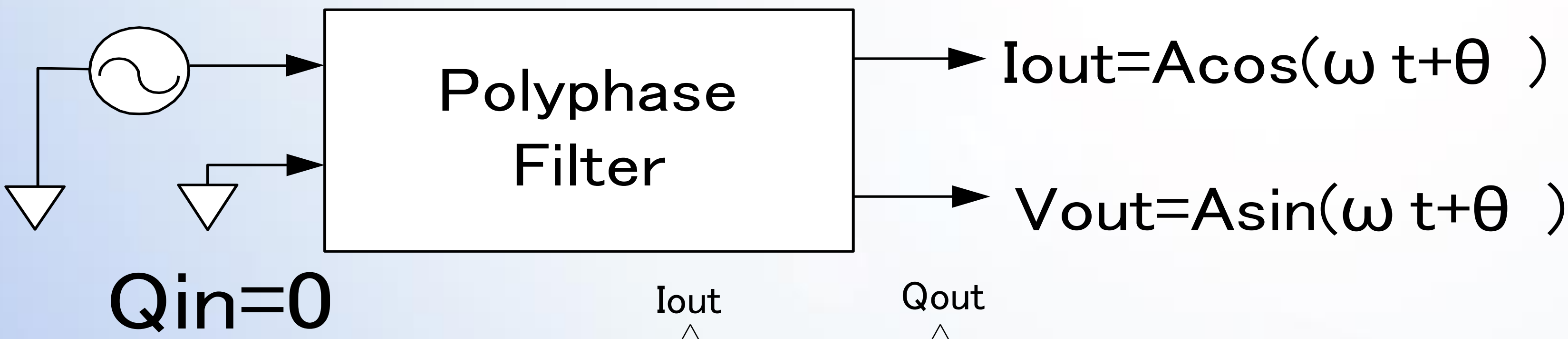
→回路シミュレーションにより

試行錯誤的に設計・解析

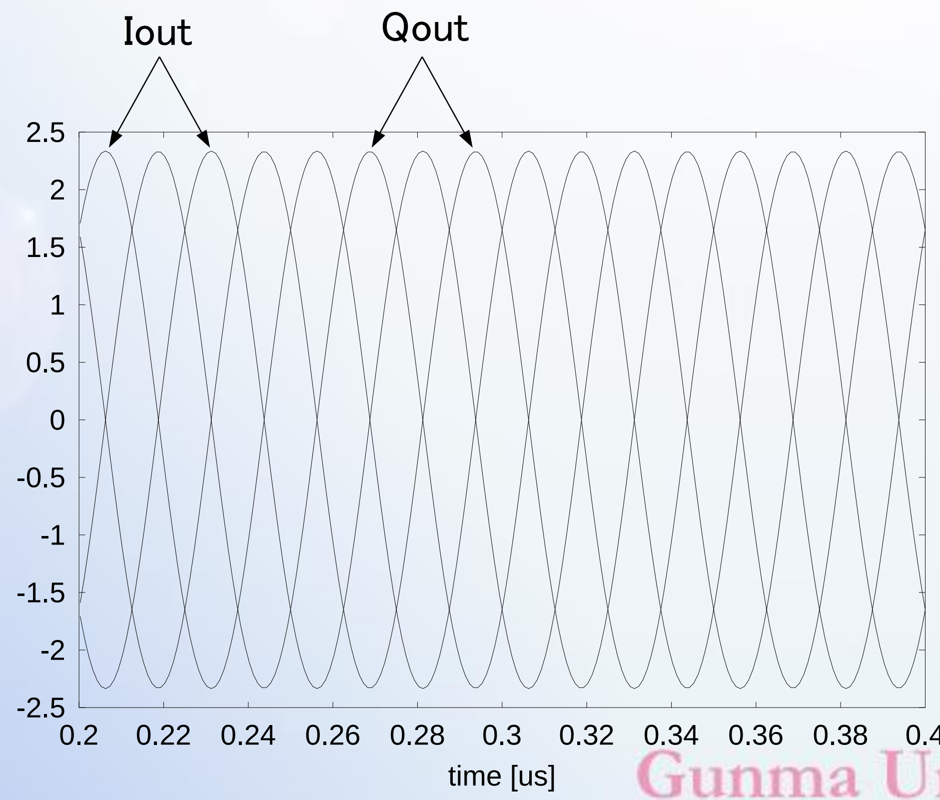
RCポリフェーズフィルタの役割

単一入力信号からのI, Q信号発生

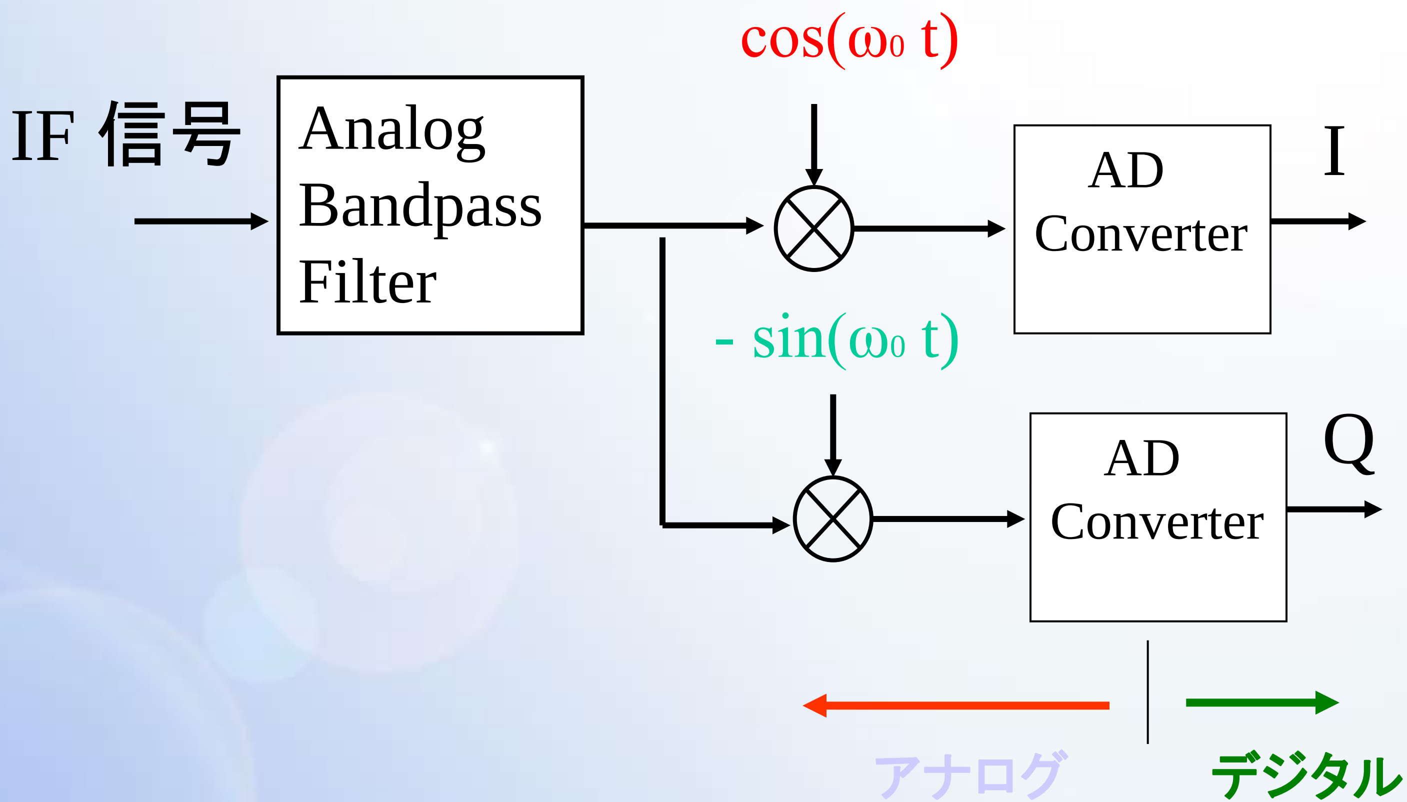
Iin=cos(ω t)



$$\omega = \frac{1}{R_1 C_1}$$

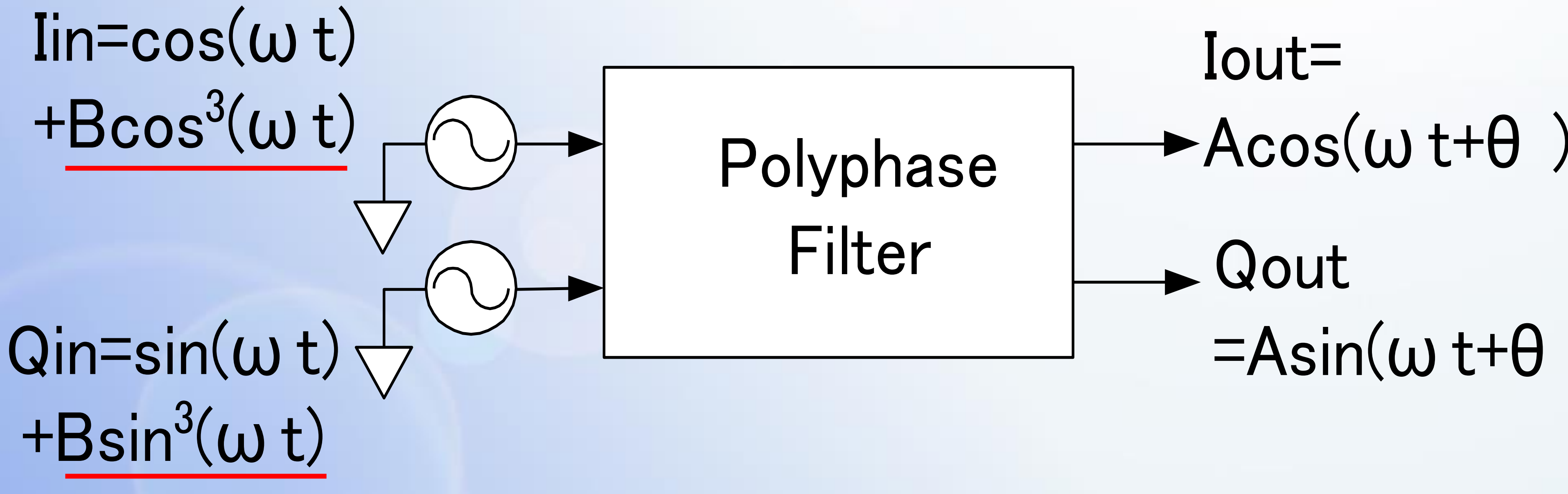


受信回路と cosine, sine 信号

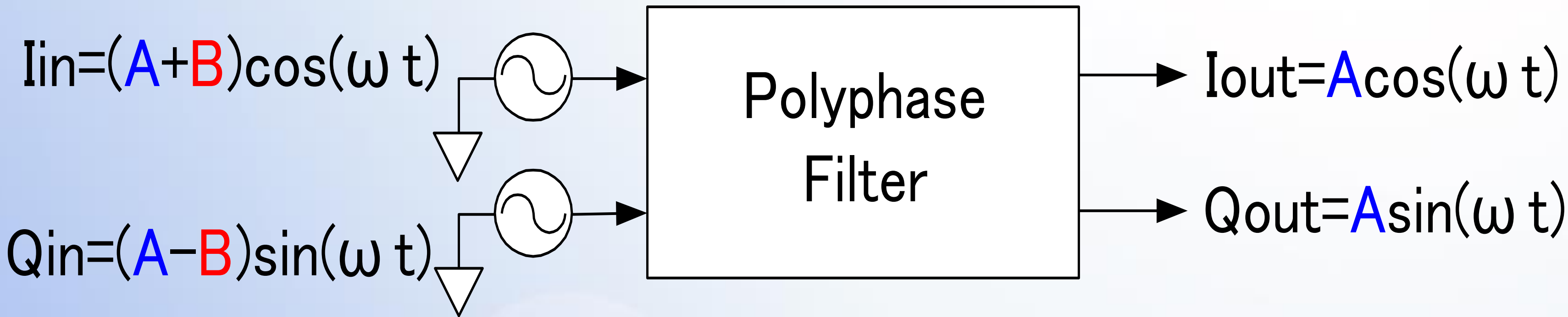


純粋な I, Q 信号発生

二つの入力信号の三次高調波を除去



イメージ信号除去フィルタ



$$\underline{A}e^{j\omega t} + \underline{B}e^{-j\omega t} \longrightarrow \underline{A}e^{j\omega t}$$

信号成分　イメージ成分　　　信号成分

RCポリフェーズフィルタの

伝達関数の導出

RCポリフェーズフィルタの伝達関数

- 複素フィルタ
- 複素入力 $Vin(j\omega) = Iin(j\omega) + j \cdot Qin(j\omega)$
- 複素出力 $Vout(j\omega) = Iout(j\omega) + j \cdot Qout(j\omega)$
- 伝達関数 $G(j\omega) = \dfrac{Vout(j\omega)}{Vin(j\omega)}$

一次回路での伝達関数の導出

$$I_{in}(t) = I_{in+}(t) - I_{in-}(t)$$

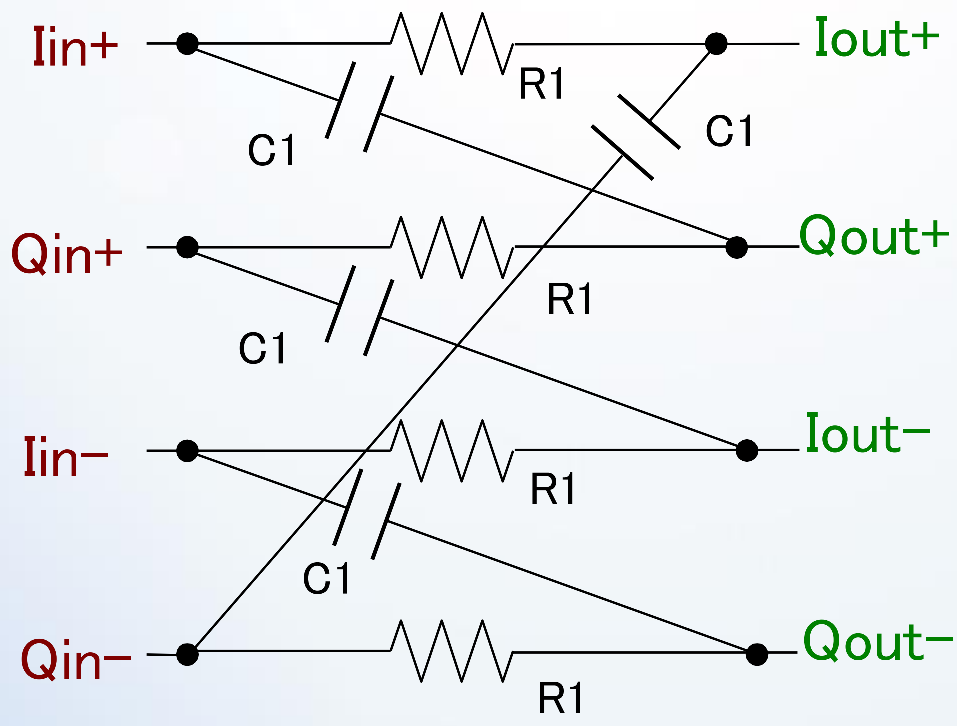
$$Q_{in}(t) = Q_{in+}(t) - Q_{in-}(t)$$

$$I_{out}(t) = I_{out+}(t) - I_{out-}(t)$$

$$Q_{out}(t) = Q_{out+}(t) - Q_{out-}(t)$$

$$V_{in}(t) = I_{in}(t) + jQ_{in}(t)$$

$$V_{out}(t) = I_{out}(t) + jQ_{out}(t)$$

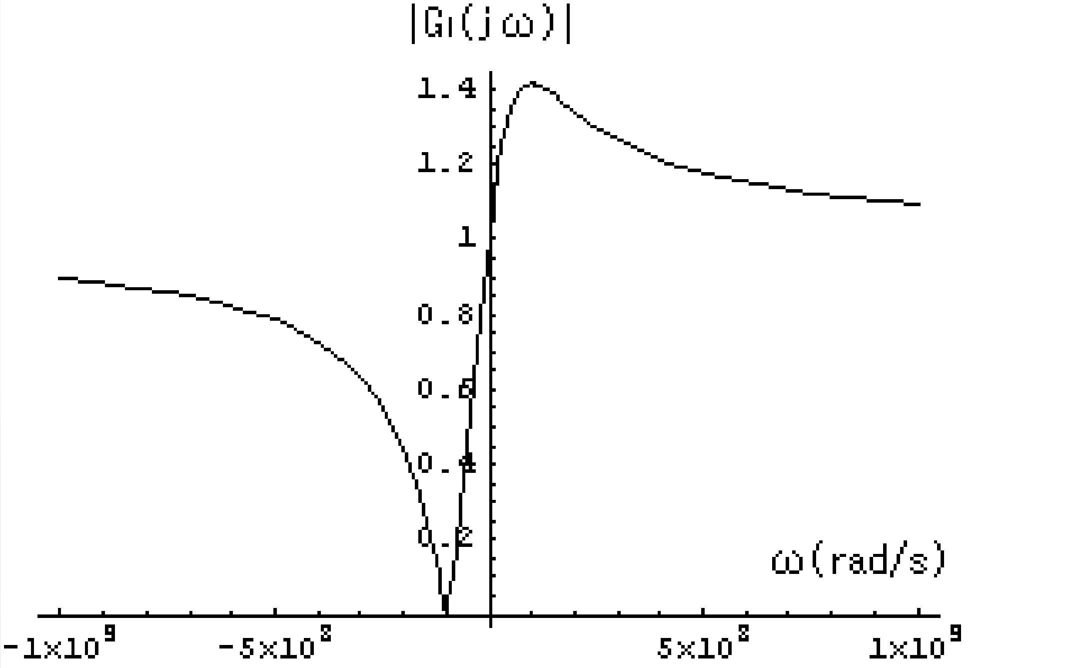


一次回路の伝達関数

ゲイン $|G_1|$

- 伝達関数

$$G_1(j\omega) = \frac{1+\omega RC}{1+j.\omega RC}$$



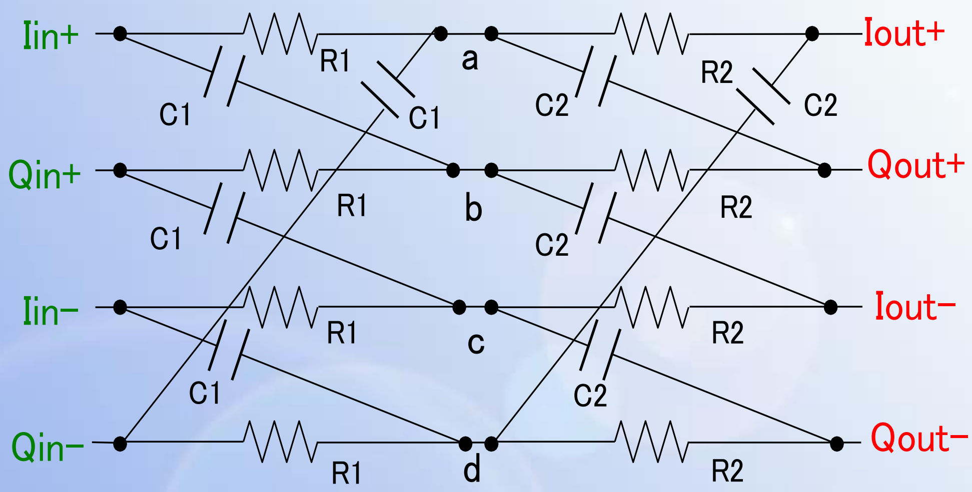
$$\omega = -\frac{1}{RC}$$ のゼロ点を持つ

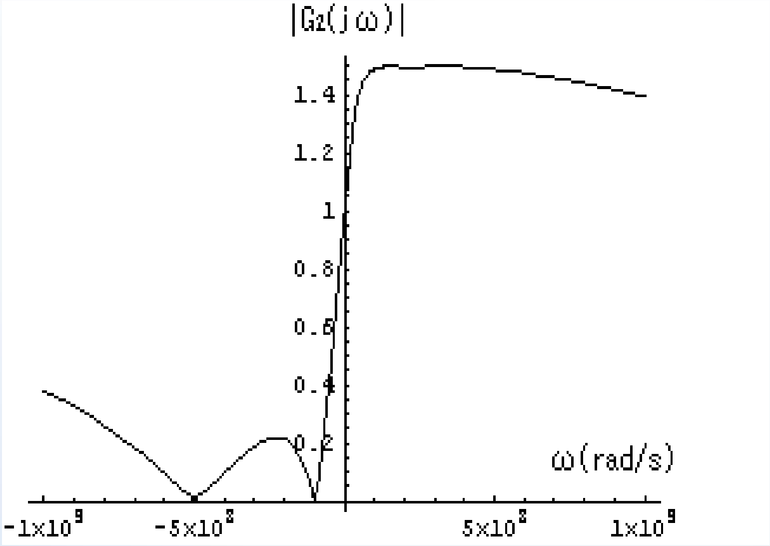
二次回路の伝達関数導出

- 伝達関数

$$G_2(j\omega)=\frac{(1+\omega R_1C_1)(1+\omega R_2C_2)}{1-\omega^2R_1C_1R_2C_2+j\omega(C_1R_1+C_2R_2+2R_1C_2)}$$

ゲイン$|G_2|$

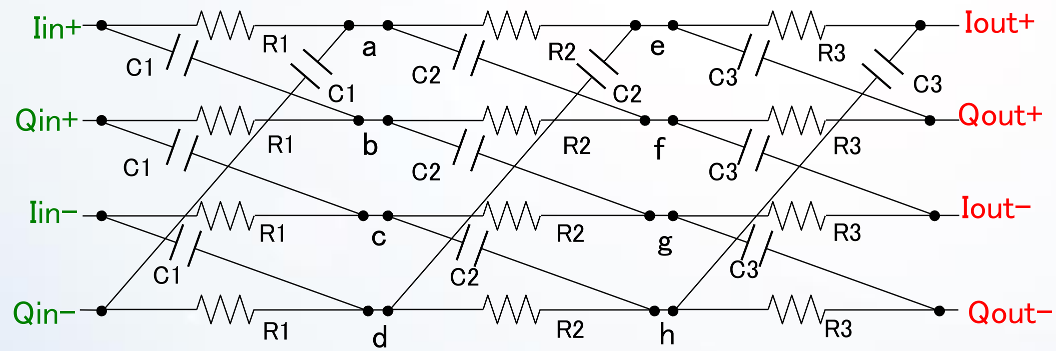




$$\omega=-\frac{1}{R_1C_1},-\frac{1}{R_2C_2}$$ のゼロ点を持つ

三次回路の伝達関数導出

$$G_3(j\omega) = \frac{N_3(j\omega)}{D_{3R}(\omega) + jD_{3I}(\omega)}$$



$$N_3(j\omega) = (1+\omega R_1C_1)(1+\omega R_2C_2)(1+\omega R_3C_3)$$

$$D_{3R}(\omega) =$$

$$1-\omega^2[R_1C_1R_2C_2 + R_2C_2R_3C_3 + R_1C_1R_3C_3 + 2R_1C_3(R_2C_2 + R_2C_1 + R_3C_2)]$$

$$D_{3I}(\omega) =$$

$$\omega[R_1C_1 + R_2C_2 + R_3C_3 + 2(R_1C_2 + R_2C_3 + R_1C_3)] - \omega^3R_1C_1R_2C_2R_3C_3$$

三次回路のゲインと位相

•ゲイン

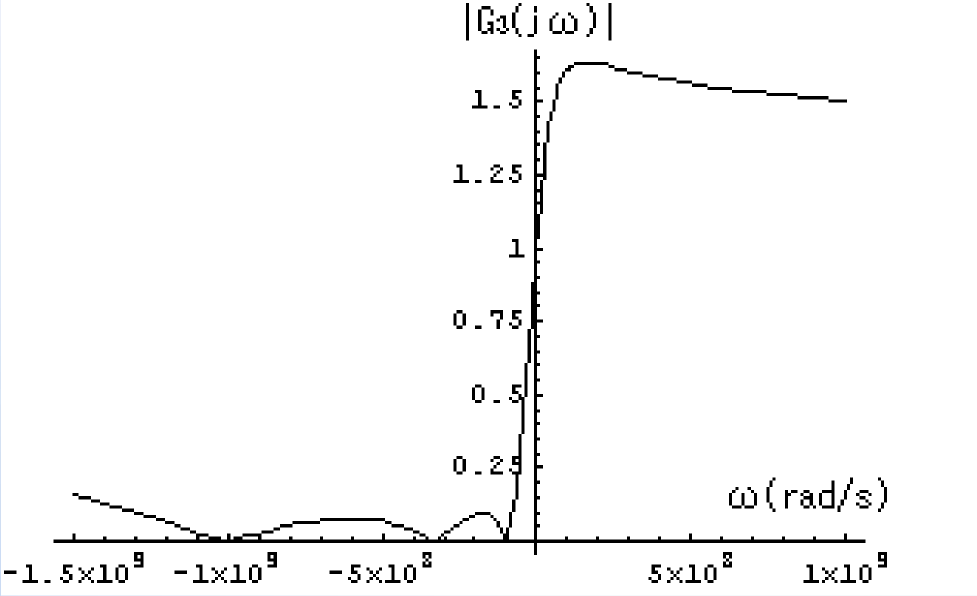
$$\left|G_3(j\omega)\right| = \frac{\left|N_3(j\omega)\right|}{\sqrt{D_{3R}(j\omega)^2 + D_{3I}(j\omega)^2}}$$

•位相

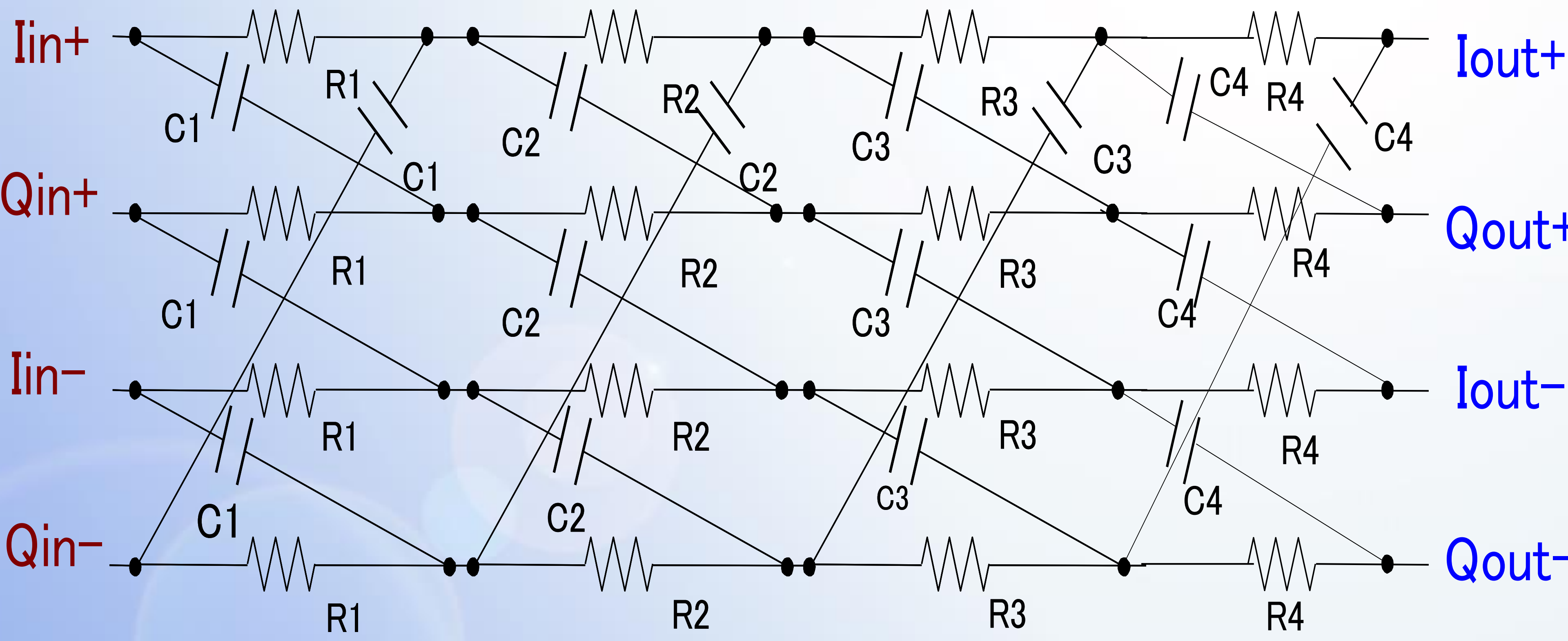
$$\angle G_3(j\omega) = -\arctan\left(\frac{D_{3I}(j\omega)}{D_{3R}(j\omega)}\right)$$

$$\omega = -\frac{1}{R_1C_1}, -\frac{1}{R_2C_2}, -\frac{1}{R_3C_3}$$

のゼロ点を持つ



四次回路の伝達関数



四次回路の伝達関数導出

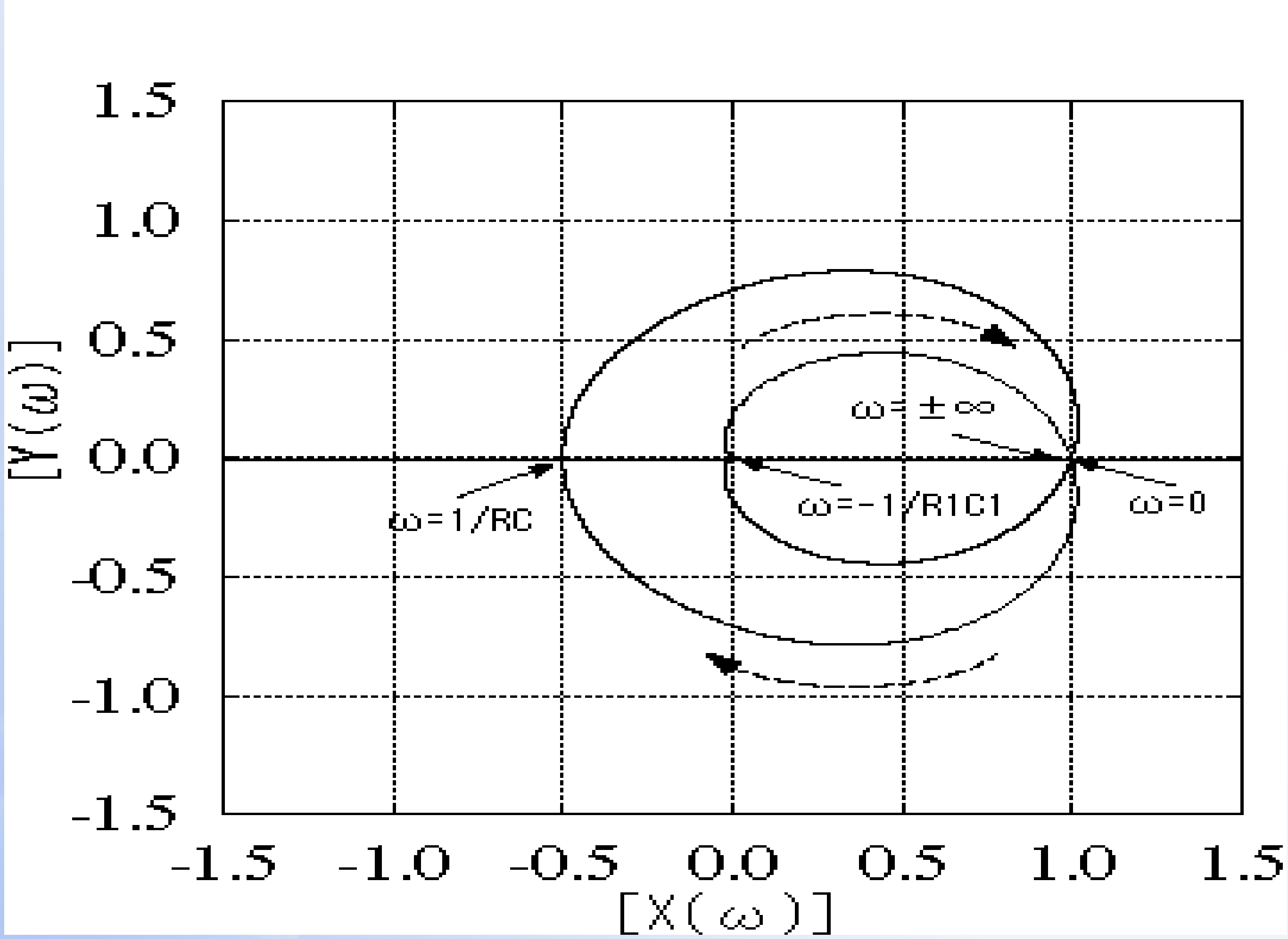
$$G_4(j\omega) = \frac{N_4(j\omega)}{D_{4R}(\omega) + jD_{4I}(\omega)}$$

$$N_4(j\omega) = (1+\omega R_1C_1)(1+\omega R_2C_2)(1+\omega R_3C_3)(1+\omega R_4C_4)$$

$$\begin{aligned} D_{4R}(\omega) = 1-\omega^2[& R_1R_2(C_1C_2+2C_1C_3+2C_1C_4+2C_2C_3+2C_2C_4)+ \\ & R_2R_3(C_2C_3+2C_2C_4+2C_3C_4)+R_3R_4C_3C_4+ \\ & R_1R_3(C_1C_3+2C_1C_4+2C_2C_3+4C_2C_4+2C_3C_4)+R_1R_4(C_1C_4+2C_2C_4+2C_3C_4) \\ & +R_2R_4(C_2+2C_3)C_4]+\omega^4R_1R_2R_3R_4C_1C_2C_3C_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{4I}(\omega) = \omega[& R_1C_1+R_2C_2+R_3C_3+R_4C_4+2R_1C_2+2R_1C_3+2R_1C_4+ \\ & 2R_2C_3+2R_2C_4+2R_3C_4]-\omega^3[R_1R_2R_3(C_1C_2C_3+2C_1C_2C_4+2C_1C_3C_4+2C_2C_3C_4)+ \\ & R_2R_3R_4C_2C_3C_4+R_1R_2R_4(C_1C_2C_4+2C_1C_3C_4+2C_2C_3C_4)+R_1R_3R_4(C_1C_3C_4+2C_2C_3C_4)] \end{aligned}$$

四次回路のナイキスト線図

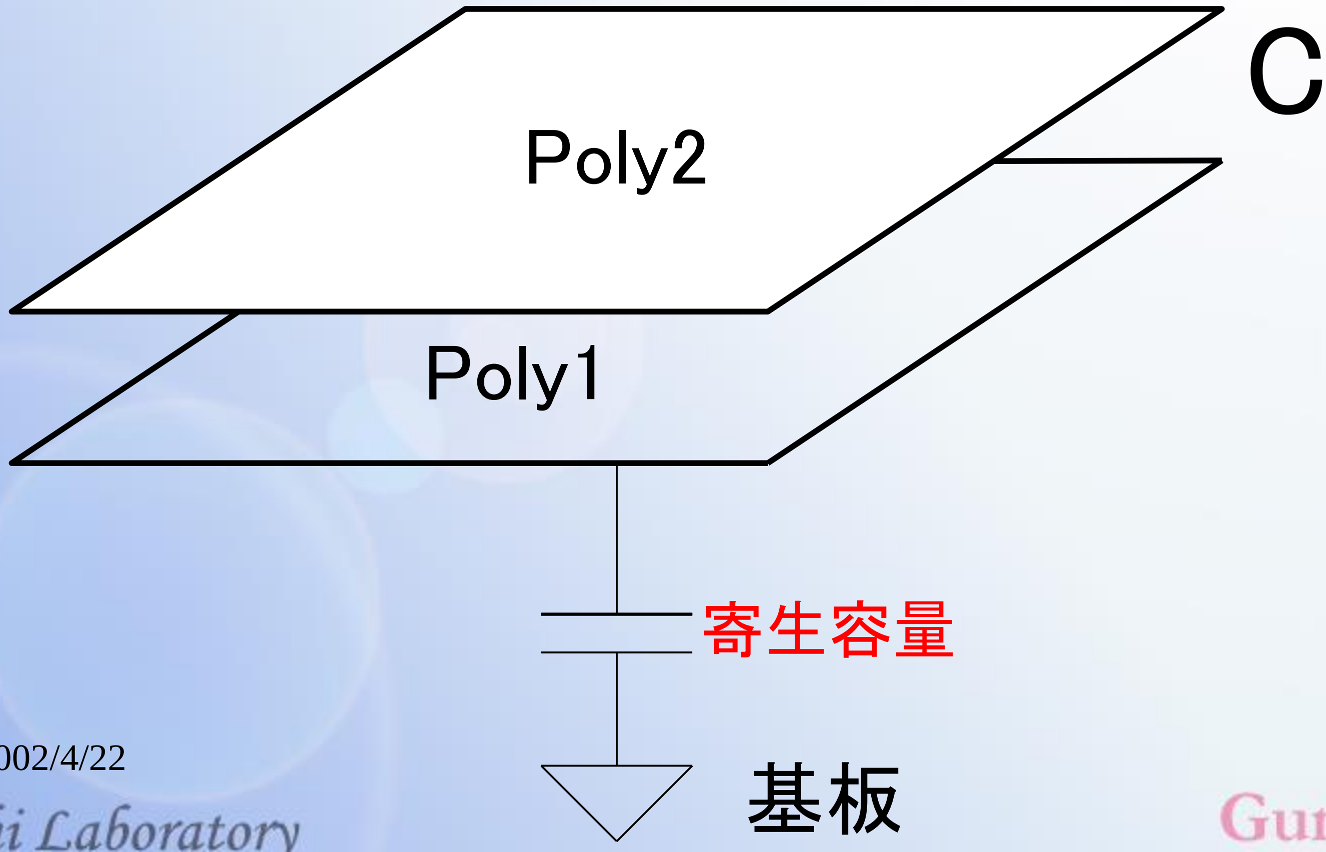


・$R_1C_1 = R_2C_2 = R_3C_3 = R_4C_4$　・$Y = 0$で対称

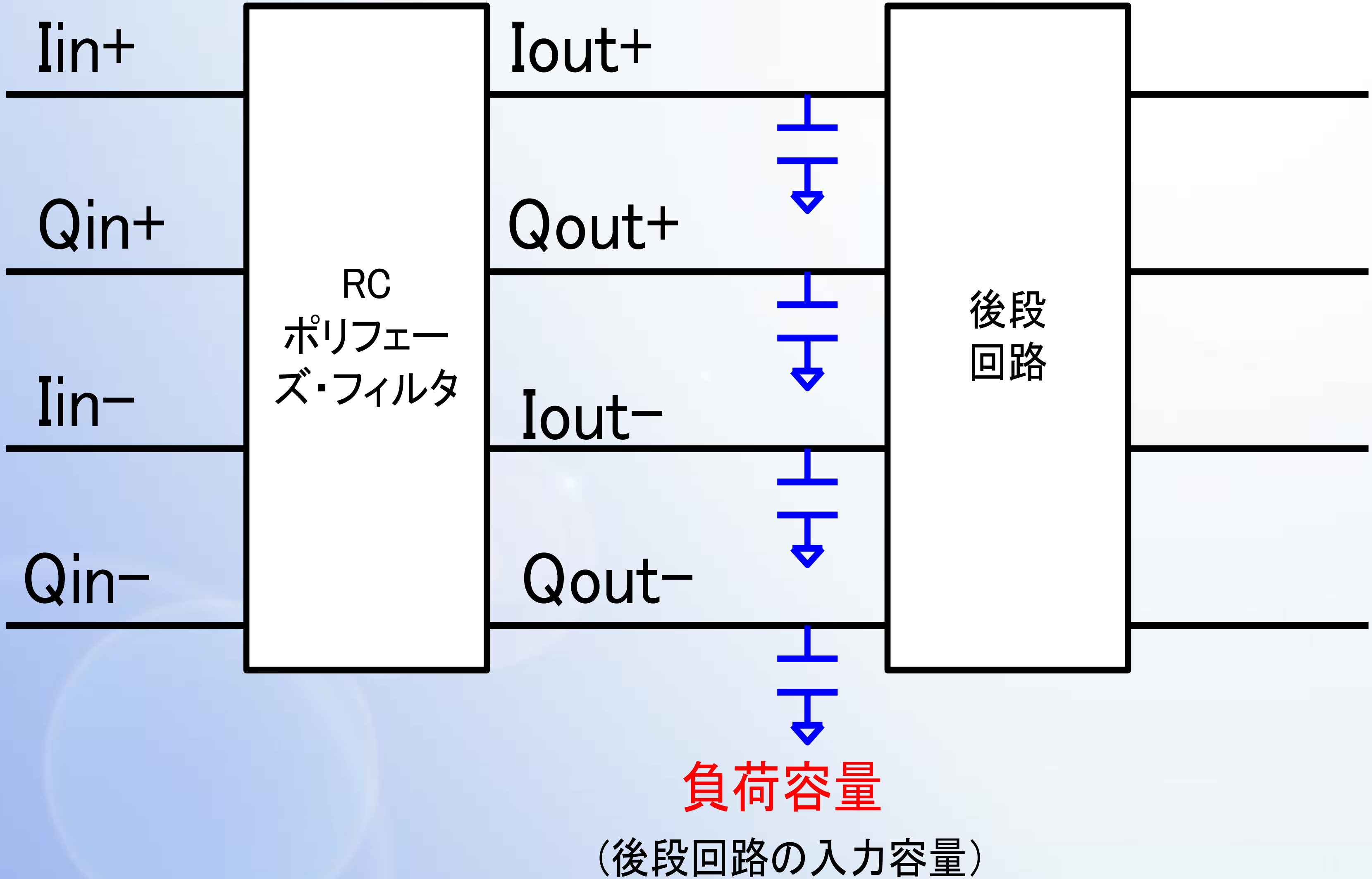
寄生容量･負荷容量の
伝達関数への影響

集積回路内でのRCポリフェーズ・フィルタの実現

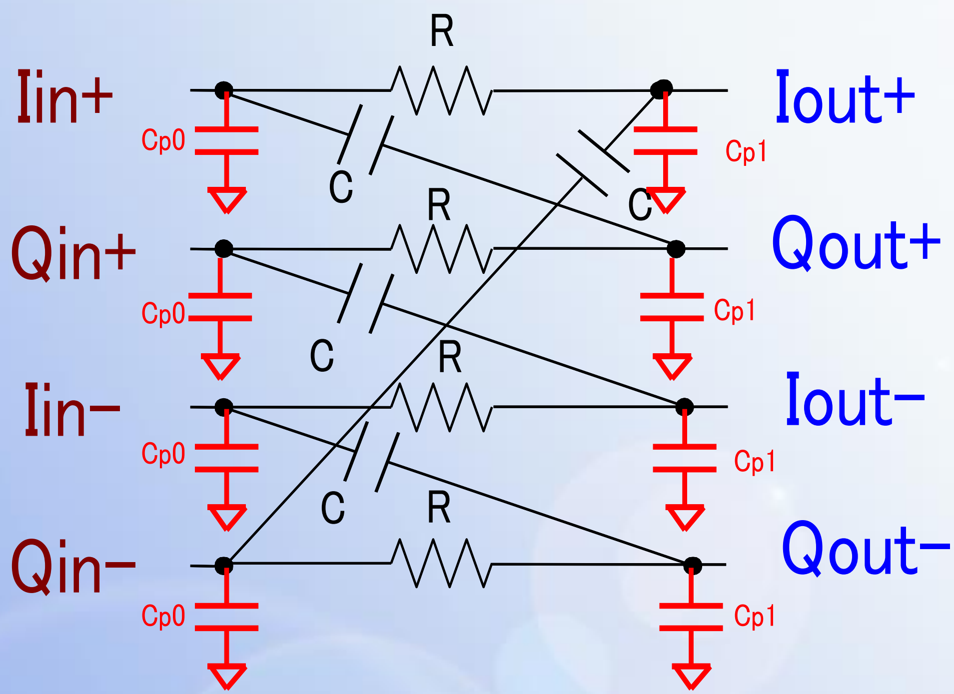
・容量Cの実現→基板への寄生容量を伴う



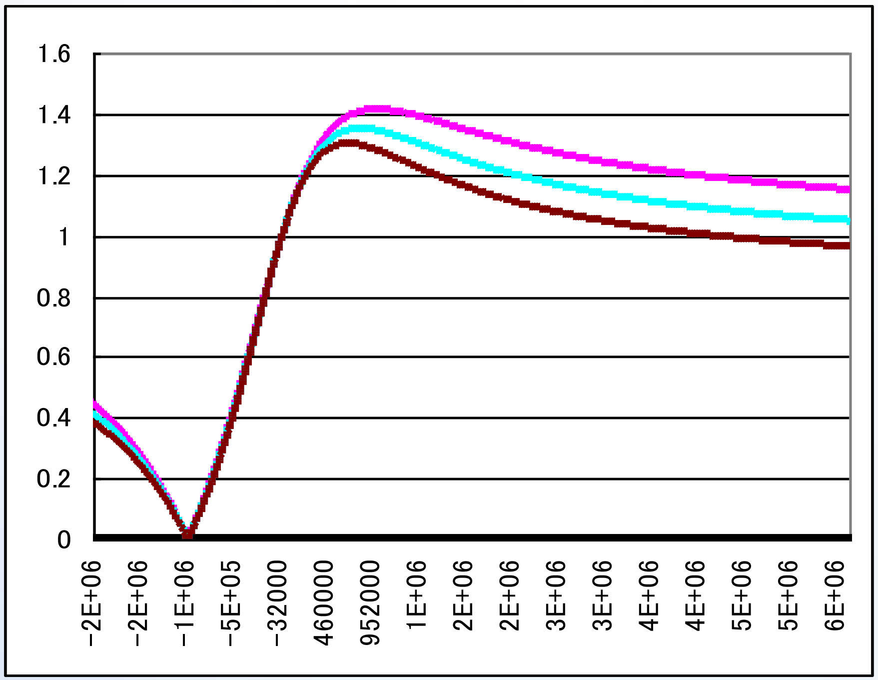
負荷容量の影響


Iin+
Qin+
Iin−
Qin−
RC
ポリフェーズ・フィルタ
Iout+
Qout+
Iout−
Qout−
後段
回路
負荷容量
(後段回路の入力容量)

一次回路での 寄生容量を考慮した伝達関数



ゲイン

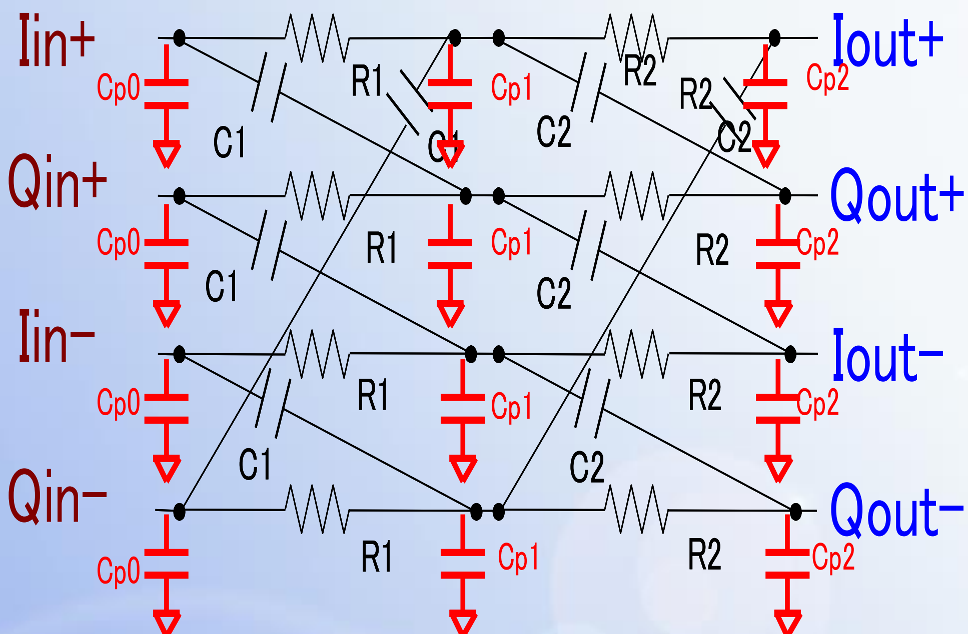


ω

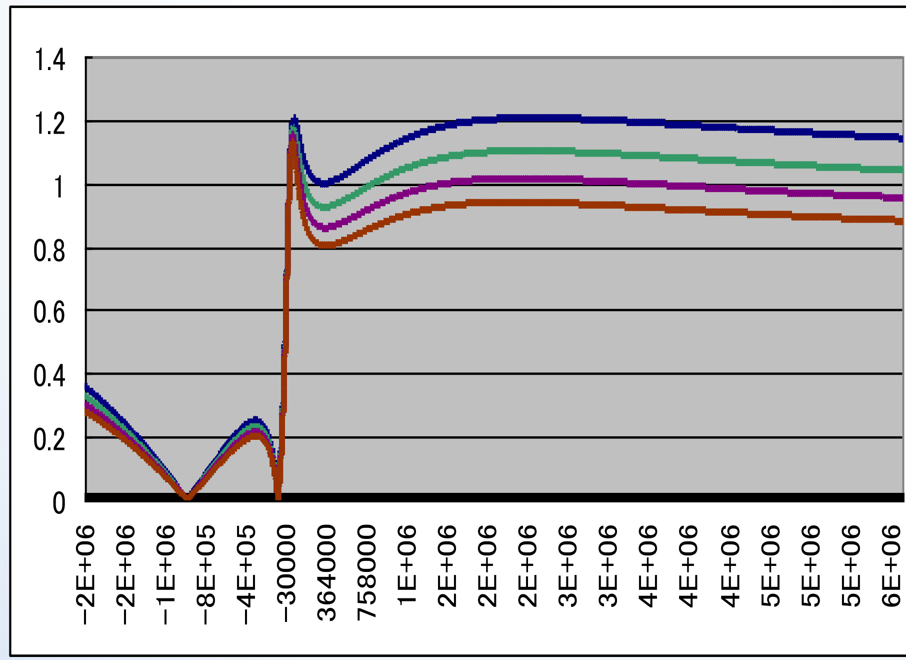
伝達関数

$$G_{p1}(j\omega)=\frac{1+\omega R_1 C_1}{1+j\omega R_1(C_1+\underline{C_{p1}})}$$

二次回路での
寄生容量を考慮した伝達関数



ゲイン



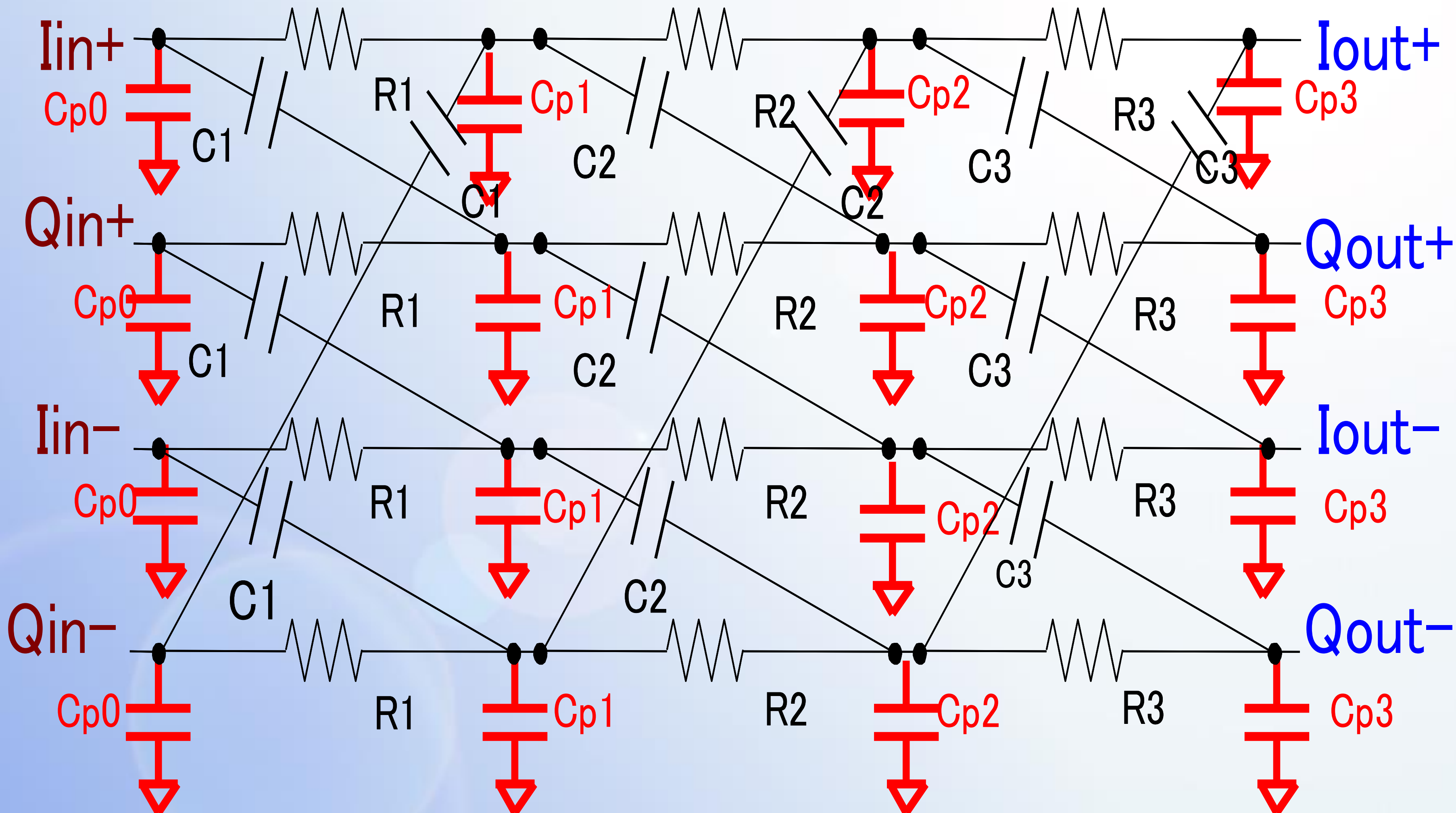
ω

伝達関数

$$G_{p2}(j\omega)=\frac{(1+\omega R_1C_1)(1+\omega R_2C_2)}{D_{p2}(j\omega)}$$

$$\boxed{D_{p2}(j\omega)=1-\omega^2R_1R_2[C_1C_2+C_1\underline{C_{p2}}+C_2(\underline{C_{p1}}+\underline{C_{p2}})+\underline{C_{p1}C_{p2}}]+j\omega[R_1(C_1+2C_2+\underline{C_{p1}}+\underline{C_{p2}})+R_2(C_2+\underline{C_{p2}})]}$$

三次回路での
寄生容量を考慮した回路



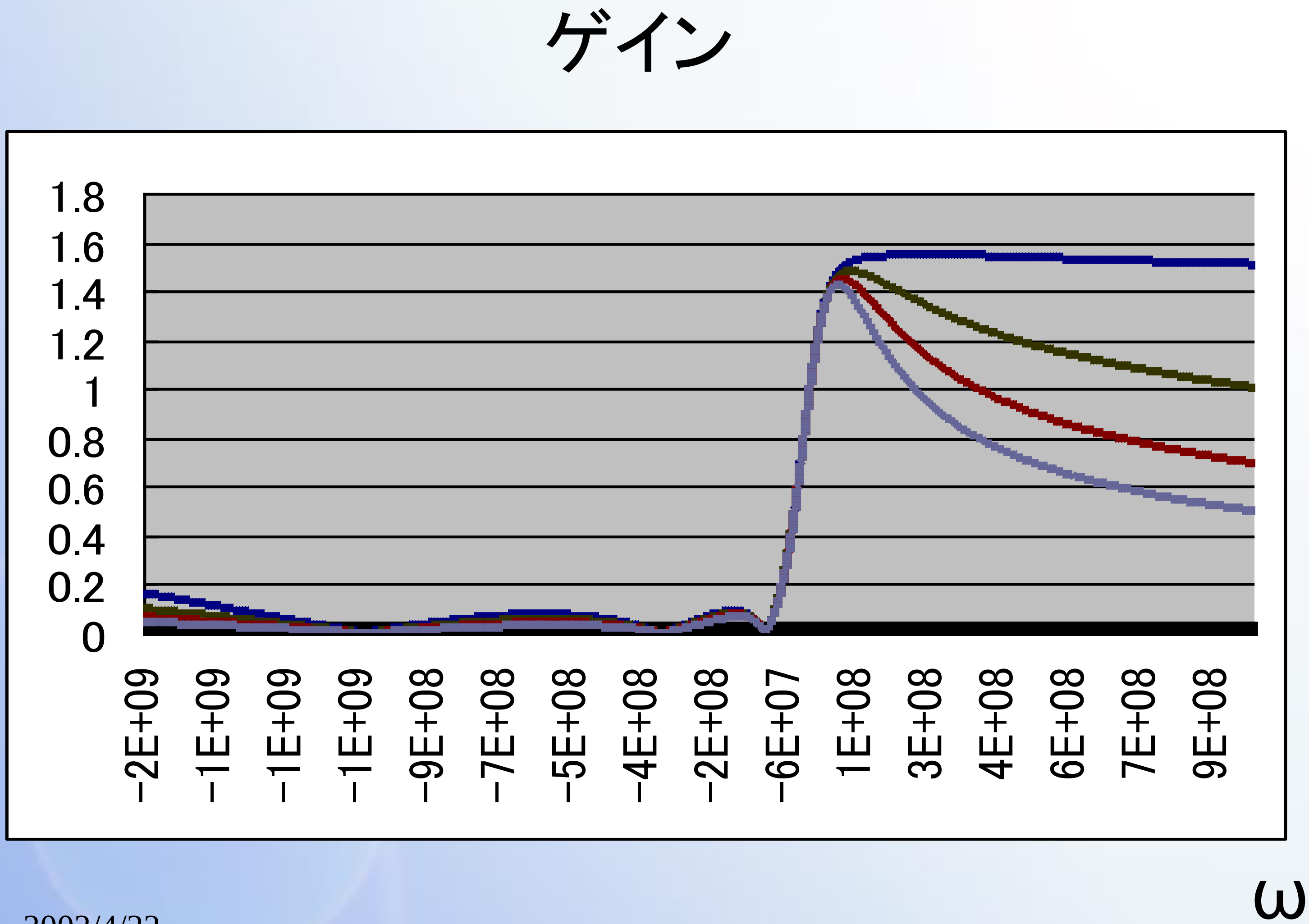
三次回路での 寄生容量を考慮した伝達関数

$$G_{p3}(j\omega)=\frac{(1+\omega R_1C_1)(1+\omega R_2C_2)(1+\omega R_3C_3)}{D_{p3R}(\omega)+jD_{p3I}(\omega)}$$

$$\begin{aligned}D_{p3R}=1-\omega^2\Big[&R_1R_2\big(C_1C_2+2C_2C_3+2C_1C_3+C_1(C_{p2}+C_{p3})+C_2(C_{p1}+C_{p2}+C_{p3})+2C_3C_{p1}\\&+C_{p1}(C_{p2}+C_{p3})\big)+R_2R_3\big(C_2C_3+C_2C_{p3}+C_3(C_{p2}+C_{p3})+C_{p2}C_{p3}\big)\\&+R_1R_3\big(C_1C_3+2C_2C_3+C_1C_{p1}+2C_2C_{p3}+C_3(C_{p1}+C_{p2}+C_{p3})+(C_{p1}+C_{p2})C_{p3}\big)\Big]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{p3I}(\omega)=\omega\big[&R_1(C_1+2C_2+2C_3)+R_2(C_2+2C_3)+2R_3C_3+R_1C_{p2}+R_2(C_{p2}+C_{p3})+R_3C_{p3}\big]\\&-\omega^3R_1R_2R_3\big[C_1C_2C_3+C_1C_2C_{p3}+C_1C_3(C_{p2}+C_{p3})+C_2C_3(C_{p1}+C_{p2}+C_{p3})\\&+C_1C_{p2}C_{p3}+C_2(C_{p1}+C_{p2})C_{p3}+C_3C_{p1}(C_{p2}+C_{p3})+C_{p1}C_{p2}C_{p3}\big]\end{aligned}$$

三次回路での寄生容量を考慮したときのゲイン特性のグラフ



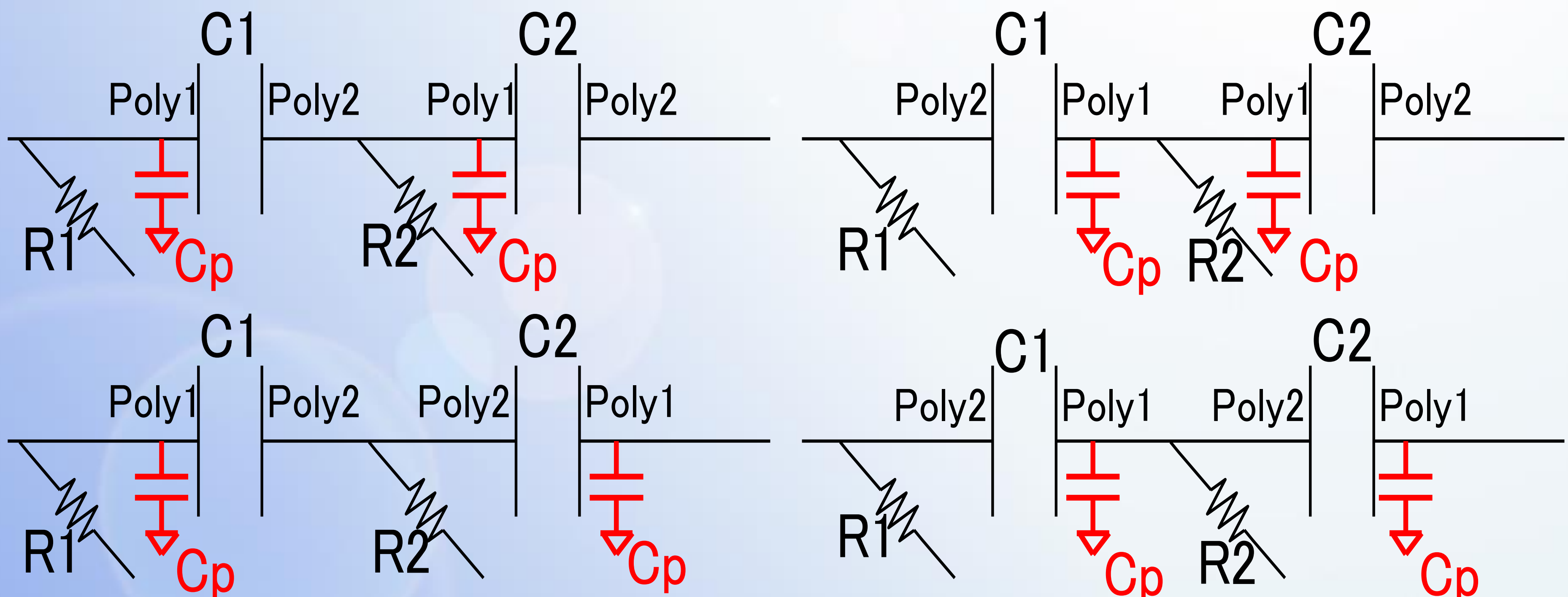
寄生容量による影響

ゼロ点には寄生容量の影響がない

$\omega \to \pm\infty$ に伴いゲイン｜G｜が減衰する

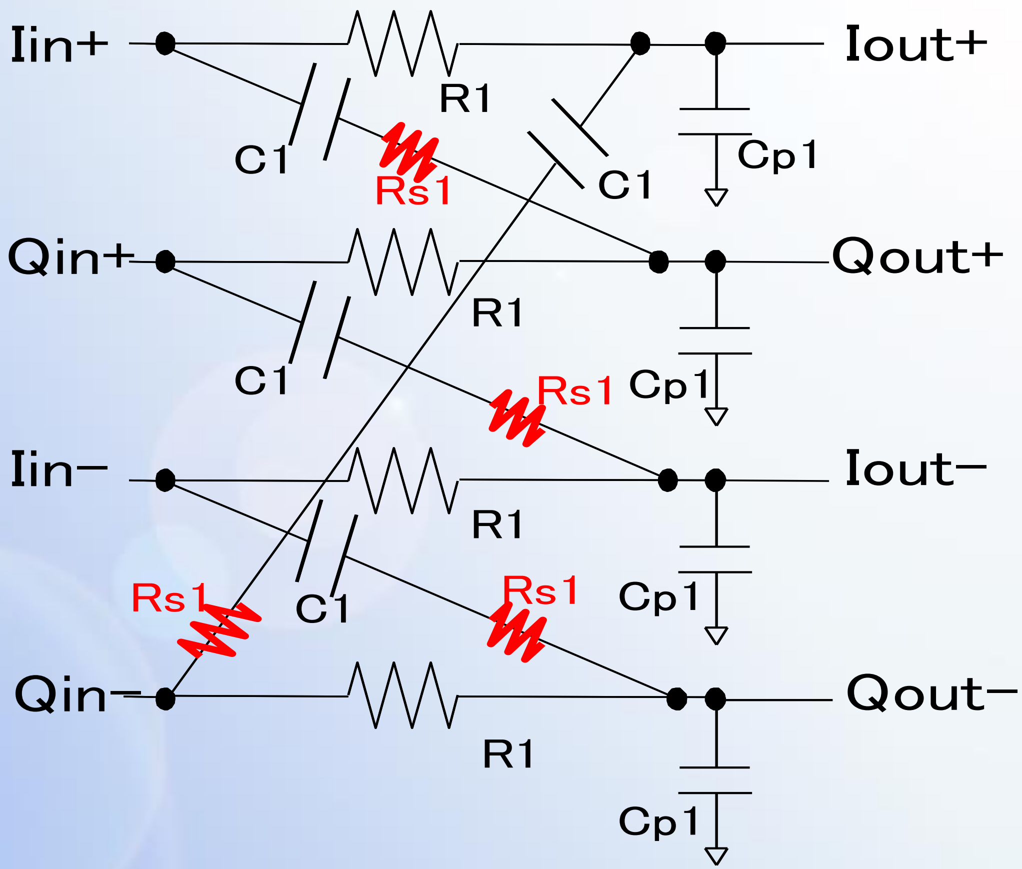
- 寄生容量を考慮した伝達関数の導出

→容量とPolyとの関係で、
適切な容量実現法が数値計算で求められる。



寄生抵抗・容量の影響

一次回路での寄生抵抗･容量を考慮したRCポリフェーズフィルタ

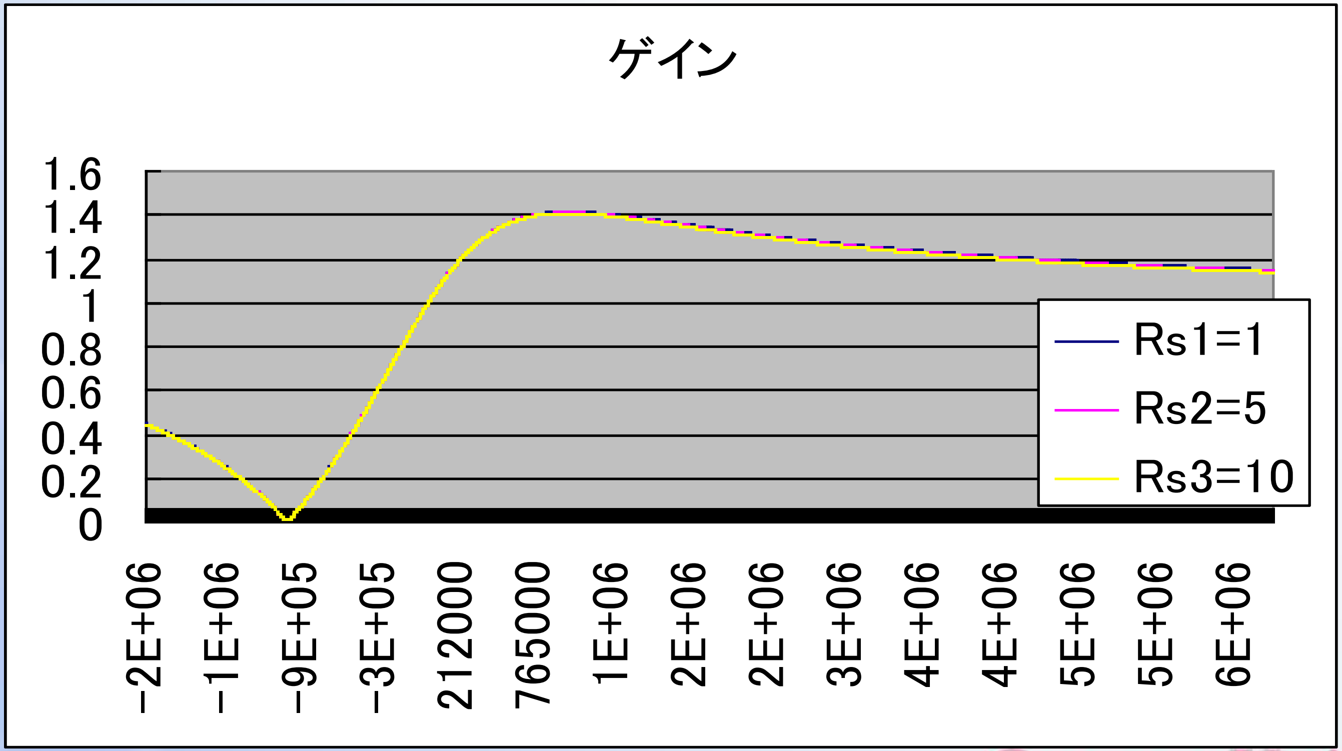


一次回路での寄生抵抗･容量を考慮した伝達関数とゲイン

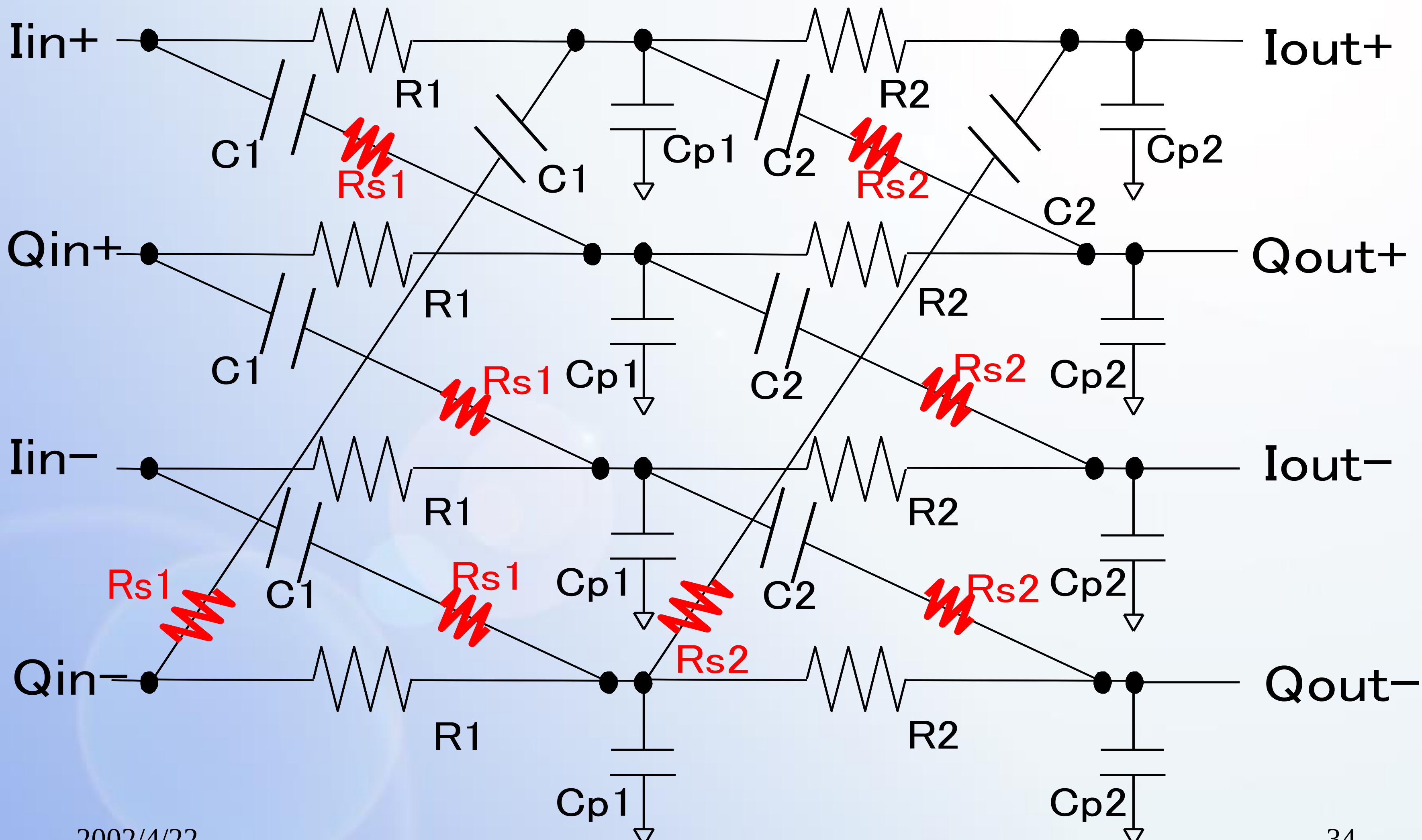
伝達関数

$$G=\frac{1+\omega C_1 R_1+j\omega C_1 \underline{R_s}}{1-\omega^2 C_1 C_{p1} R_1 \underline{R_s}+j\omega\left(C_1 R_1+C_1 \underline{R_s}+C_{p1} R_1\right)}$$

ゲイン



二次回路での寄生抵抗・容量を考慮したRCポリフェーズフィルタ



二次回路での寄生抵抗･容量を考慮した伝達関数

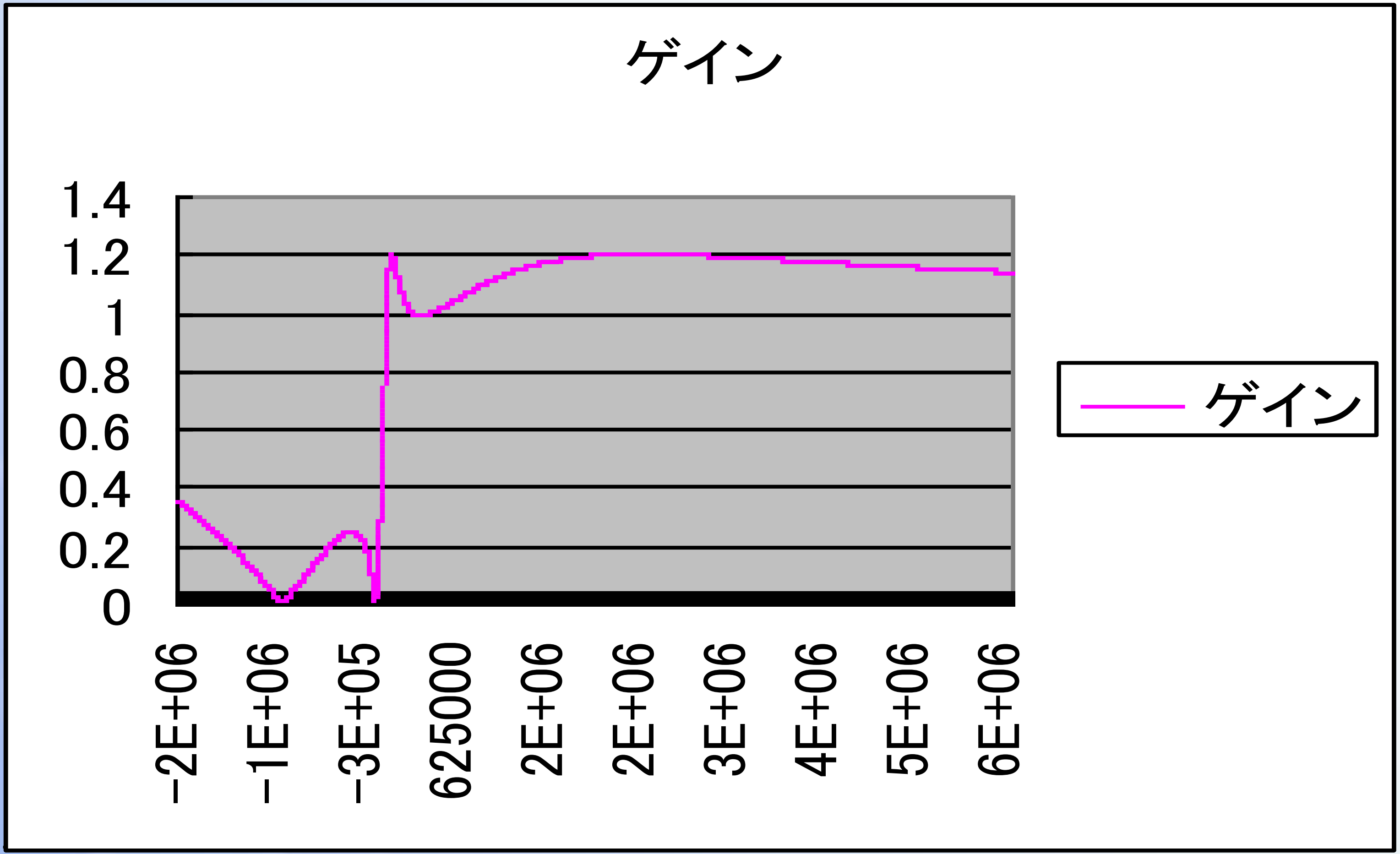
$$G = \frac{N_{PS2}(\omega)}{D_{PS2R}(\omega) + jD_{PR2I}(\omega)}$$

$$N_{PS3} = (1+\omega R_1C_1)(1+\omega R_2C_2) - \omega^2 R_{s1}R_{s2}C_1C_2 + j\left[\omega(R_{s1}C_1 + R_{s2}C_2) + \omega^2 C_1C_2(R_1R_{s2} + R_2R_{s1})\right]$$

$$D_{PS3R} = 1 - \omega^2\left[R_1R_2\left(C_1C_2 + C_1C_{p2} + C_2(C_{p1}+C_{p2}) + C_{p1}C_{p2}\right) + R_{s1}C_1C_{p1} + 2R_{s1}C_1C_{p2} + 3R_{s1}C_1C_2 + R_{s2}C_1C_2 + R_{s2}C_2C_{p1} + 2R_{s2}C_2C_{p2}\right] - \omega^4 R_1R_2R_{s1}R_{s2}C_1C_2C_{p1}C_{p2}$$

$$D_{PR2I} = \omega\left[R_1(C_1 + 2C_2 + C_{p1} + C_{p2}) + R_2(C_2 + C_{p2}) + R_{s1}C_1 + R_{s2}C_2\right] - \omega^3\left[C_1C_2\left(R_1R_2R_{s1}(C_{p1}+C_{p2}) + R_1R_{s1}R_{s2}(C_{p1}+C_{p2}) + R_2R_{s1}R_{s2}C_{p2}\right) + C_{p1}C_{p2}(R_{s1}C_1 + R_{s2}C_2)\right]$$

二次寄生抵抗･容量を考慮した、ゲイン



まとめ

- 1, 2, 3,4段のRCポリフェーズフィルタ回路の伝達関数を陽に導出した。

→ 「回路シミュレーション」ではなく「式」でフィルタ設計・解析が可能になった。

- 寄生容量・負荷容量の影響を調べた。

→ ・ゼロ点が影響されない

・容量Cの適切な実現が検討可能

- 寄生抵抗の影響を調べた。

→ ゼロ点がなくなる