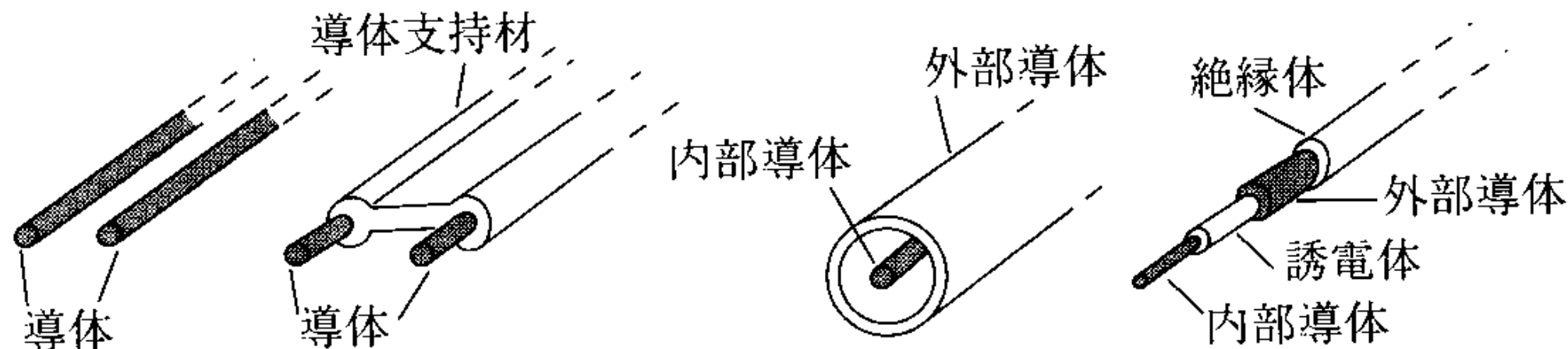


電磁波工学 XIV

高周波回路

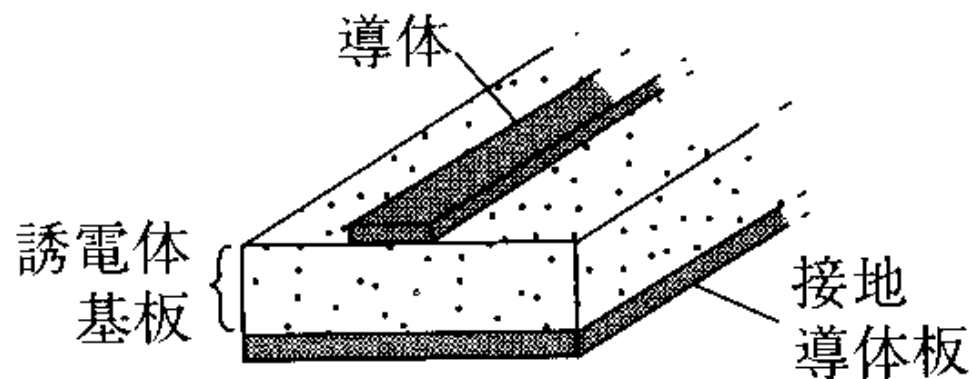
米田仁紀

代表的な伝送線路

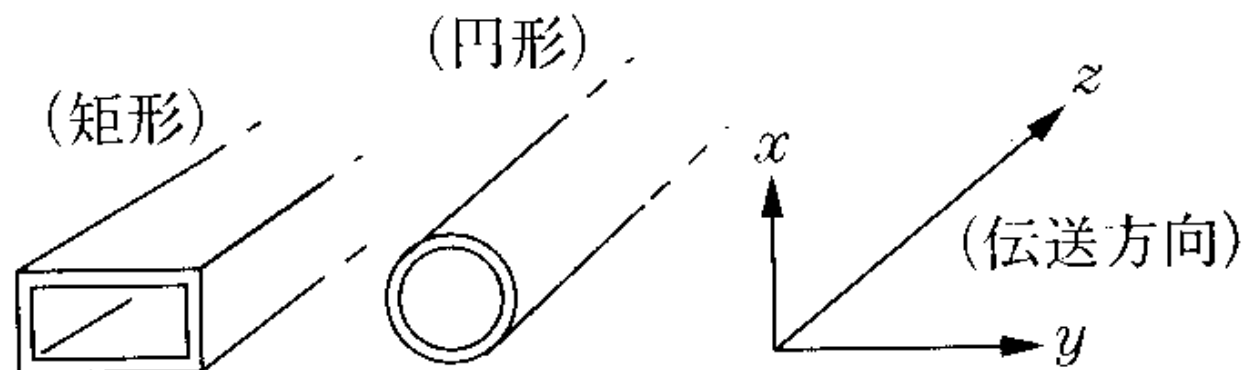


(a) 平行二線式線路

(b) 同軸線路



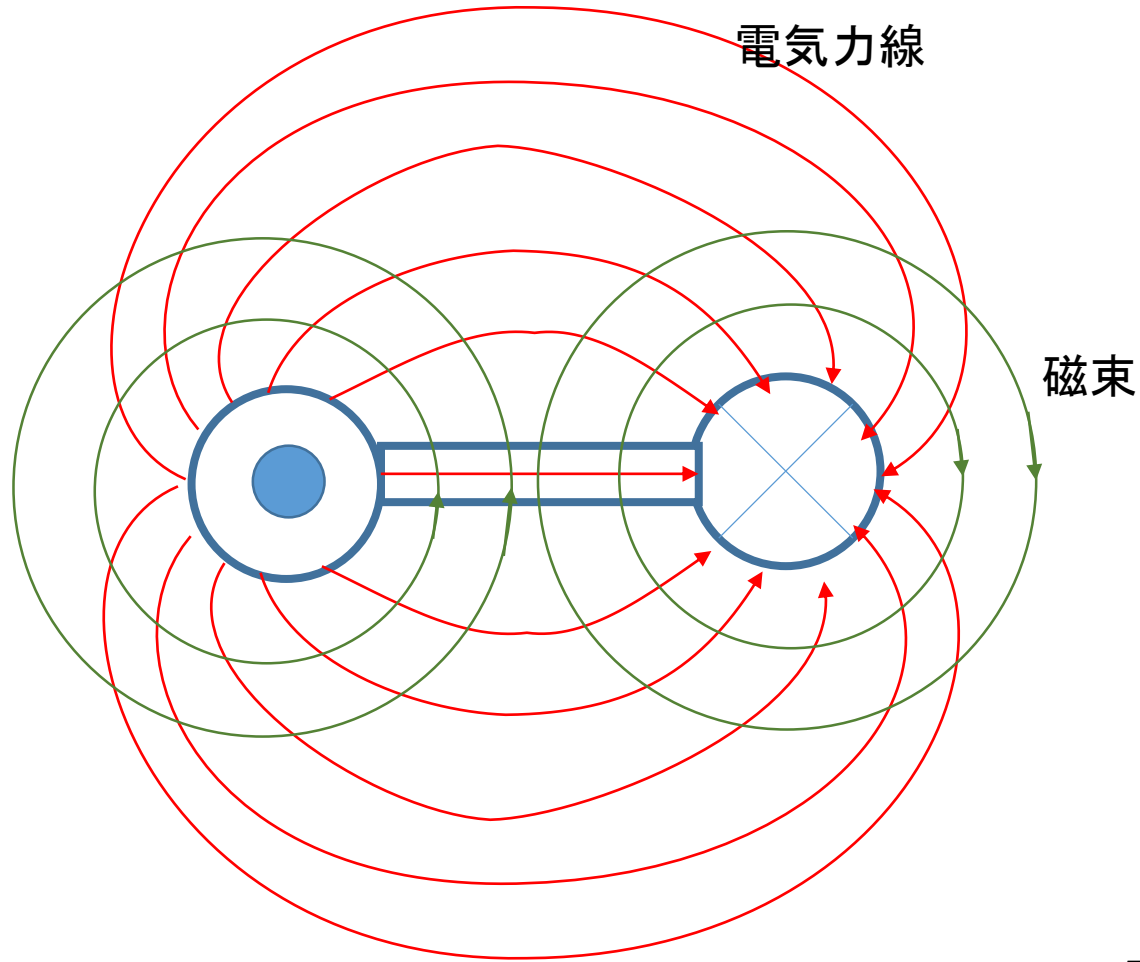
(c) マイクロストリップ線路



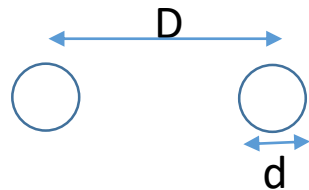
(d) 導波管

※座標系

平行線路



外側に電磁界
=> 混信しやすい
=> 損失しやすい



300Ωリボンフィーダー (透明ポリエチレン)



300Ωリボンフィーダー (一般用)

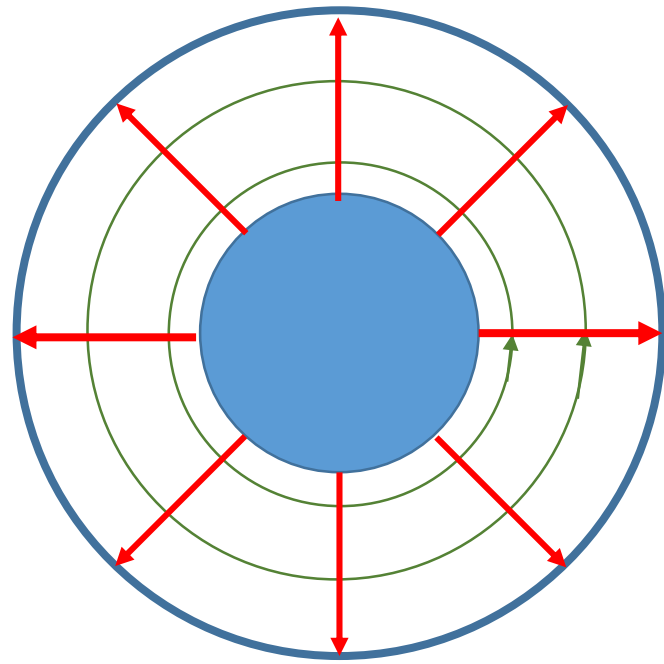


$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \log_e \frac{2D}{d}$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_s \epsilon_0}{\log_e (2D/d)}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi} \log_e \frac{2D}{d} \frac{1}{\pi \epsilon_s \epsilon_0} \log_e \frac{2D}{d}} \\ &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_s \epsilon_0}} \log_e \frac{2D}{d} = \frac{120\pi}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_s}} \log_e \frac{2D}{d} = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_s}} \log_{10} \frac{2D}{d} \end{aligned}$$

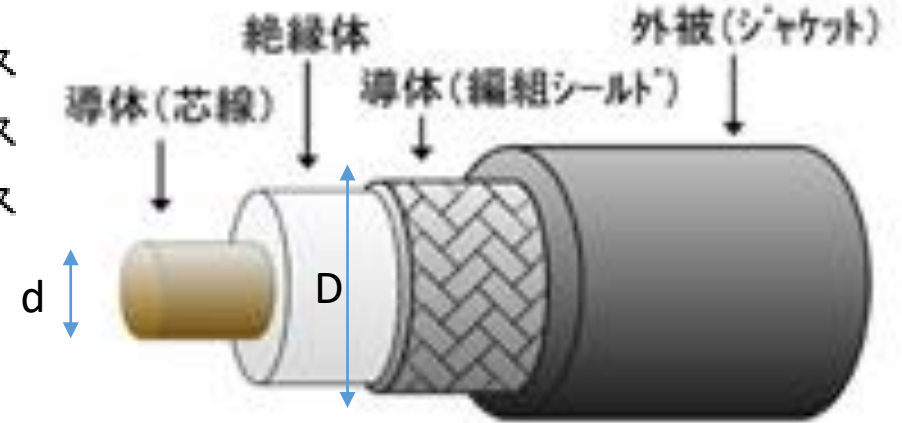
同軸線路



3C-2V

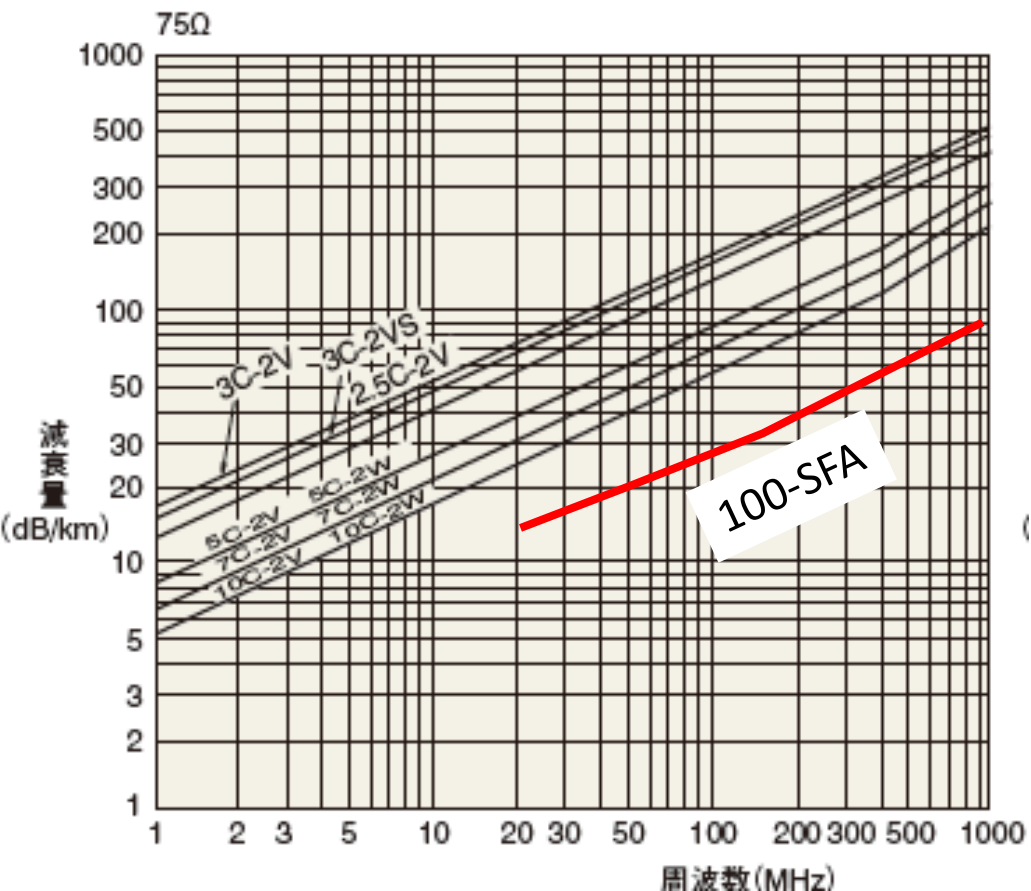
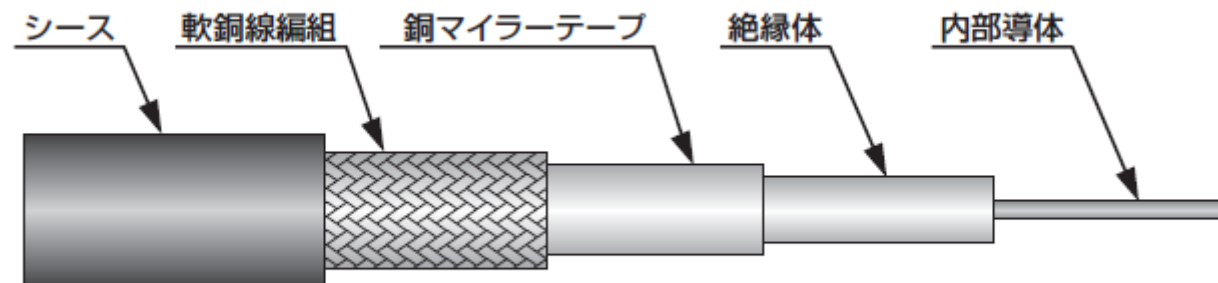
- 【形状記号 (外部導体・シース他)】
 - V: 一重編組外部導体、ビニールシース
 - W: 二重編組外部導体、ビニールシース
 - T: 三重編組外部導体、ビニールシース
 - S: SP 形コネクタ用対応仕様
 - CS: 内部導体銅被銅線
- 【絶縁体記号】
 - 2: PE 充実絶縁
- 【特性インピーダンス記号】
 - C: 75Ω
 - D: 50Ω
- 【絶縁体外径】

同軸ケーブル 外觀図



$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \log_e \frac{D}{d} \quad C = \frac{2\pi\epsilon_s\epsilon_0}{\log_e(D/d)}$$

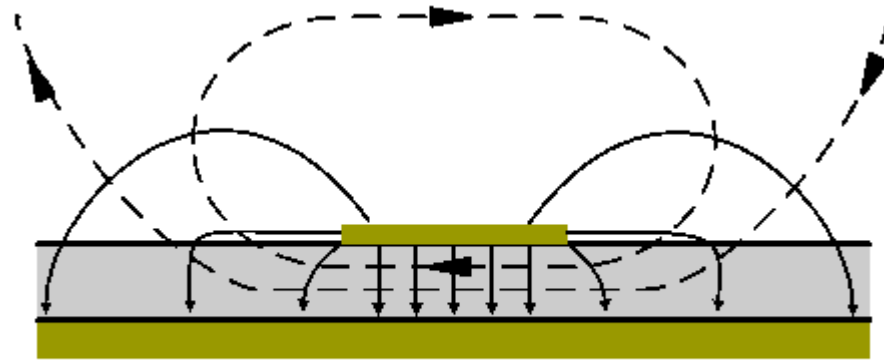
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \log_e \frac{D}{d} \frac{1}{2\pi\epsilon_s\epsilon_0} \log_e \frac{D}{d}} = \frac{120\pi}{2\pi\sqrt{\epsilon_s}} \log_e \frac{D}{d} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_s}} 2.303 \log_{10} \frac{D}{d} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_s}} \log_{10} \frac{D}{d}$$



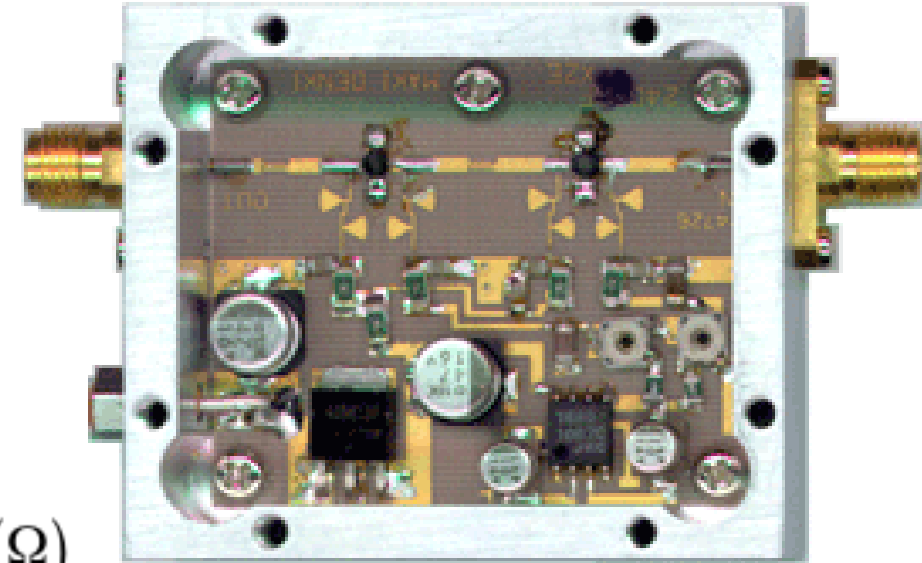
● 特性表 (20°C)

品名	標準減衰量 (dB/km)								
	21MHz	28MHz	50MHz	144MHz	430MHz	900MHz	1,300MHz	1,900MHz	2,400MHz
3.5D-SFA	-	-	-	-	-	250	305	350	420
5D-SFA	27	31	40	64	113	170	210	260	300
8D-SFA	18	20	26	43	74	110	140	190	223
8D-SFA (PE)	18	20	26	43	74	110	140	190	223
10D-SFA	13	15	20	33	59	92	115	150	175
12D-SFA	10.5	12	15.5	27	49	77	98	130	155

マイクロストリップ線路



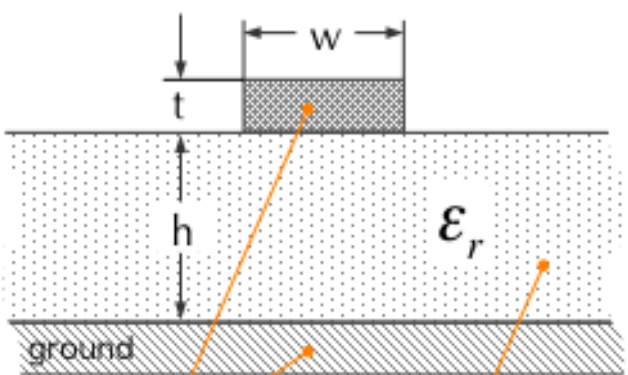
実線-電気力線、破線-磁力線



Reference

※2 B. C. Wadell

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{2} \cdot \sqrt{\epsilon_r + 1}} \cdot \ln \left\{ 1 + B \left[AB + \sqrt{A^2 B^2 + C\pi^2} \right] \right\} \quad (\Omega)$$



導体 conductor 絶縁体 insulator

$$A = \frac{14 + 8/\epsilon_r}{11} \quad B = \frac{4h}{w'} \quad C = \frac{1 + 1/\epsilon_r}{2}$$

$$w' = w + \Delta w'$$

$$\Delta w' = \Delta w + C$$

$$\Delta w = \frac{1}{\pi t} \cdot \ln \left(4e \left(\sqrt{\left(\frac{t}{h} \right)^2 + \left(\frac{1/\pi}{w/t + 1.1} \right)^2} \right)^{-1} \right)$$

マイクロストリップ線路の特徴

- TEM波に近い伝送モード
- 特性インピーダンスは線路幅が広く、厚さが薄く、比誘電率が大きいほど小さくなる
- 周波数が高いほど損失が大きい
- 小型で軽量の電子回路が構成できる。



AppCAD

Your Personal Design Assistant
for RF, Microwave and Wireless Applications

AppCAD Version 4.0.0

マイクロストリップライン インピーダンス計算

Main Menu [F8]

Calculate Z0 [F4]



Z0 = **49.58** Ω

Elect Length = **4.449** λ

Elect Length = **1601.5** degrees

Elect Length = **1333.699** mm (Air Line equiv.)

Delay = **4.449** ns

1.0 Wavelength = **224.783** mm

Vp = **0.750** fraction of c

ε_{eff} = **1.779**

W/H = **3.000**

Dielectric: ε_r = **2.1**

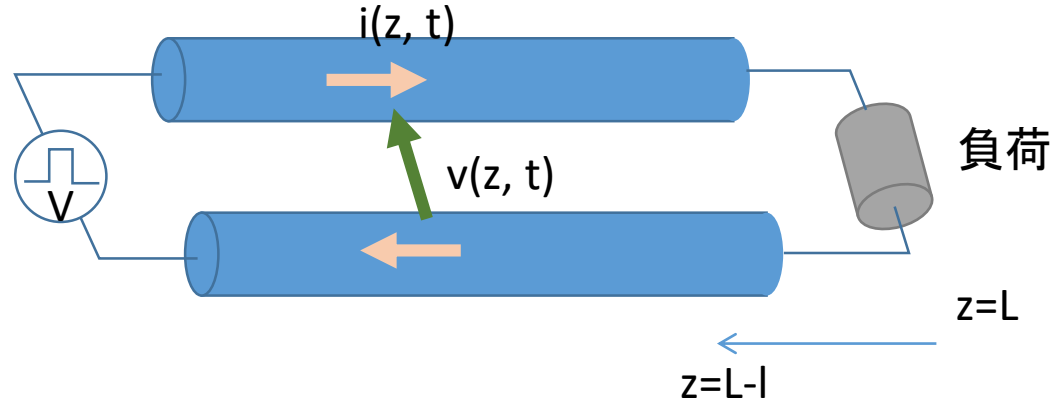
Teflon E (PTFE)

Frequency: **1** GHz

Length Units: **mm**

Normal

[Click for Web: APPLICATION NOTES - MODELS - DESIGN TIPS - DATA SHEETS - S-PARAMETERS](#)



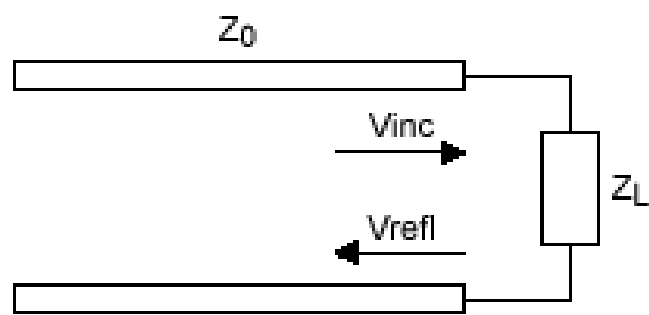
$$Z(l) = \frac{V(l)}{I(l)} = \frac{\cos(kl)V_L + iZ_0 \sin(kl) I_L}{\frac{i}{Z_0} \sin(kl)V_L + \cos(kl)I_L}$$

反射係数は

$$\Gamma(z) = \frac{V_- e^{ikz}}{V_+ e^{-ikz}} = \frac{V_-}{V_+} e^{2ikz}$$

$$\Gamma(l) = \frac{Z(l) - Z_0}{Z(l) + Z_0}$$

インピーダンスマッチング



$$\Gamma_L = \frac{V_{refl}}{V_{inc}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

インピーダンスは複素数

$$Z = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{R + jX}{Z_0} = r + jx$$

正規化した負荷インピーダンス

$$\Gamma_L = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{(Z_L - Z_0)/Z_0}{(Z_L + Z_0)/Z_0} = \frac{Z - 1}{Z + 1} = \frac{r + jx - 1}{r + jx + 1}$$

$$Z = r + jx = \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \left(= \frac{1 + \frac{Z - 1}{Z + 1}}{1 - \frac{Z - 1}{Z + 1}} \right) = \frac{1 + \Gamma_r + j\Gamma_i}{1 - \Gamma_r - j\Gamma_i}$$

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 - \Gamma_i^2}{1 + \Gamma_r^2 - 2\Gamma_r + \Gamma_i^2} \quad x = \frac{2\Gamma_i}{1 + \Gamma_r^2 - 2\Gamma_r + \Gamma_i^2}$$

$$r + r\Gamma_r^2 - 2r\Gamma_r + r\Gamma_i^2 = 1 - \Gamma_r^2 - \Gamma_i^2$$

$$\Gamma_r^2 + r\Gamma_r^2 - 2r\Gamma_r + r\Gamma_i^2 + \Gamma_i^2 = 1 - r$$

$$(1 + r)\Gamma_r^2 - 2r\Gamma_r + (r + 1)\Gamma_i^2 = 1 - r$$

$$\Gamma_r^2 - \frac{2r}{r + 1}\Gamma_r + \Gamma_i^2 = \frac{1 - r}{1 + r}$$

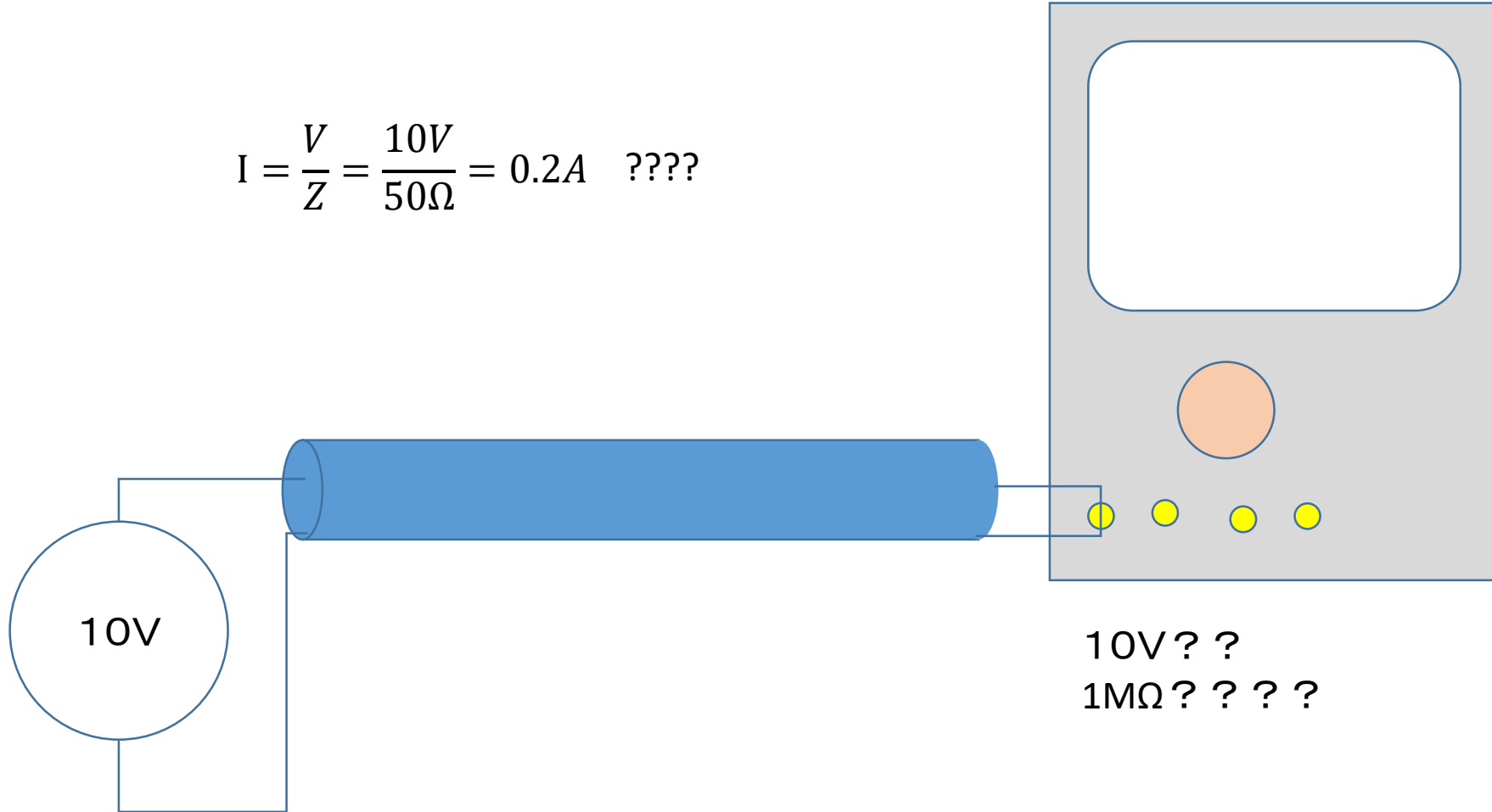
$$\Gamma_r^2 - \frac{2r}{r + 1}\Gamma_r + \frac{r^2}{(r + 1)^2} + \Gamma_i^2 - \frac{r^2}{(r + 1)^2} = \frac{1 - r}{1 + r}$$

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{r + 1}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \frac{1 - r}{1 + r} + \frac{r^2}{(1 + r)^2} = \frac{1}{(1 + r)^2}$$

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{r + 1}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1 + r}\right)^2$$

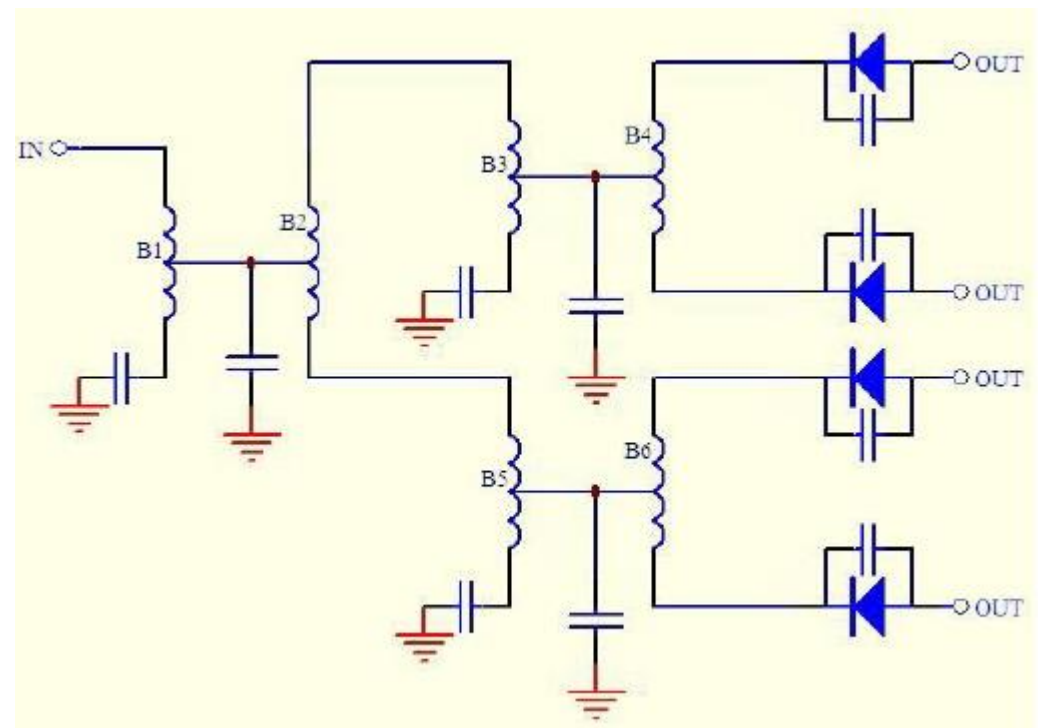
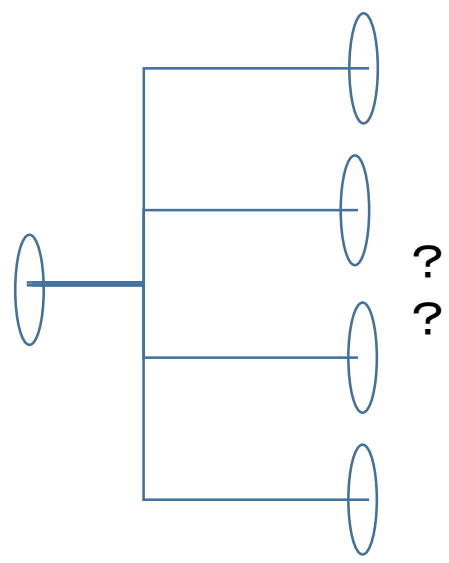
なんで50Ωのケーブル???

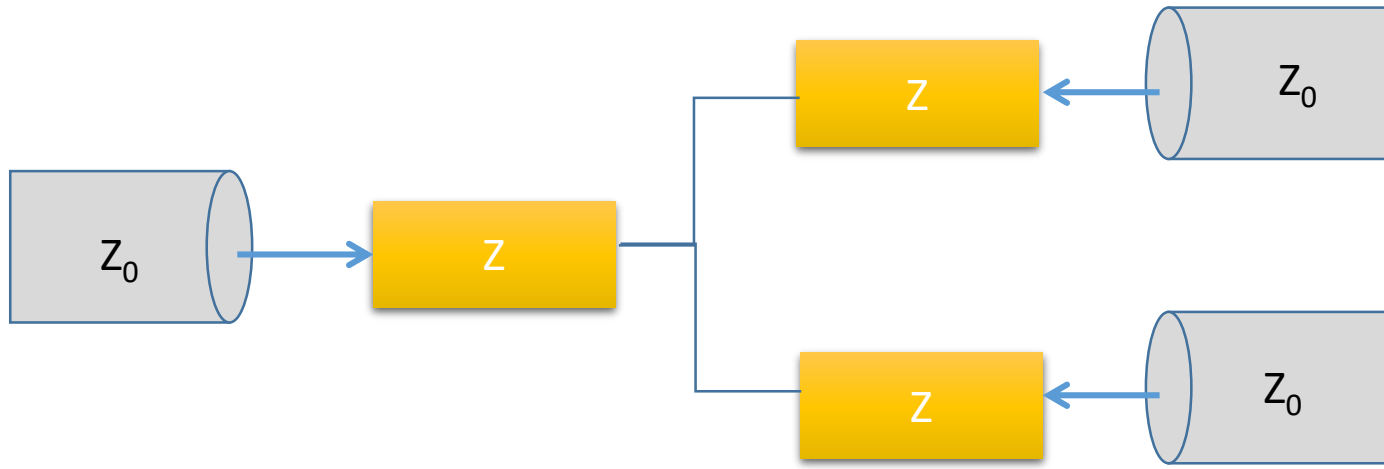
$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10V}{50\Omega} = 0.2A \quad \text{????}$$





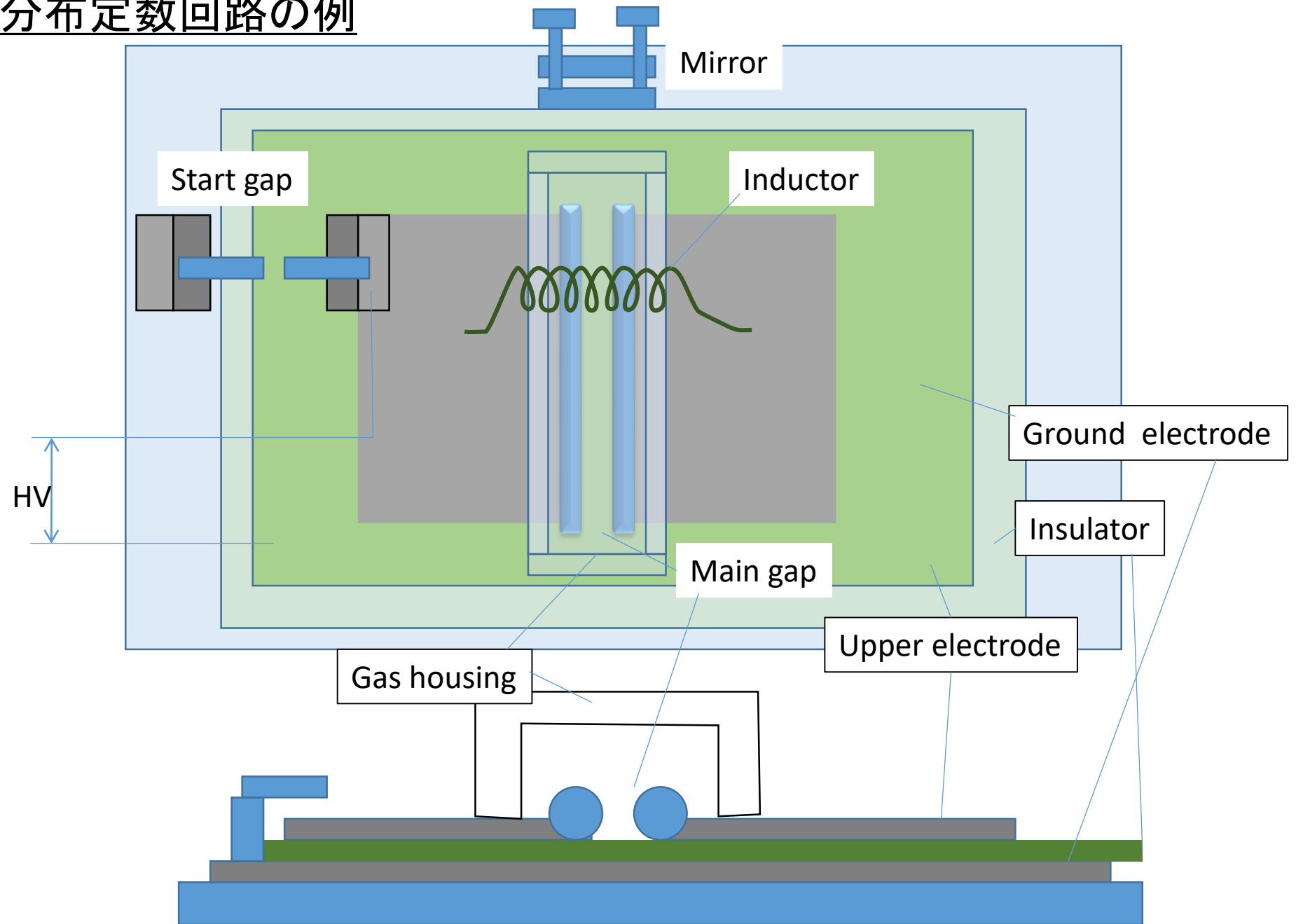
1:4アンテナ分配器(1入力4出力・4分配)





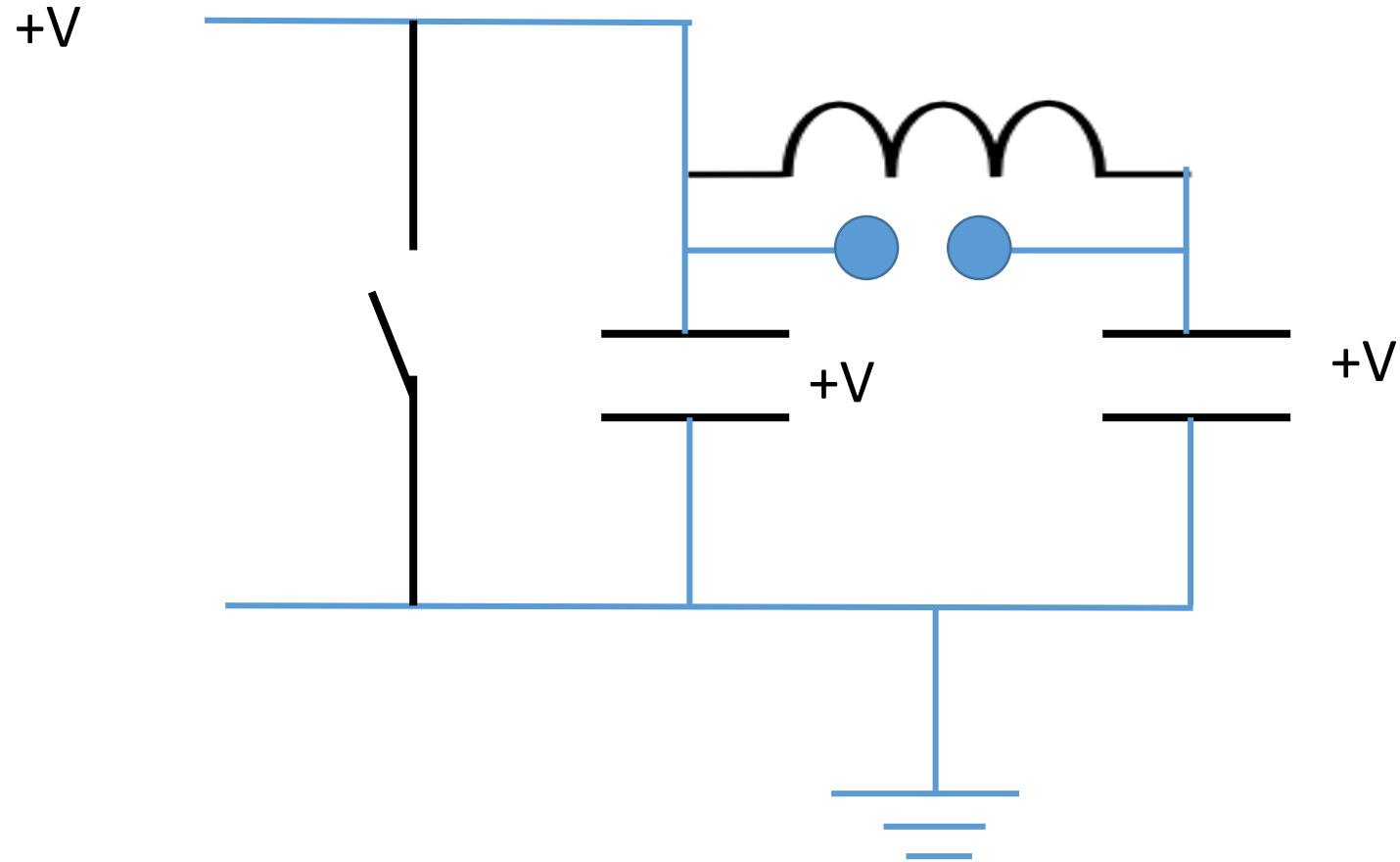
zは??

分布定数回路の例



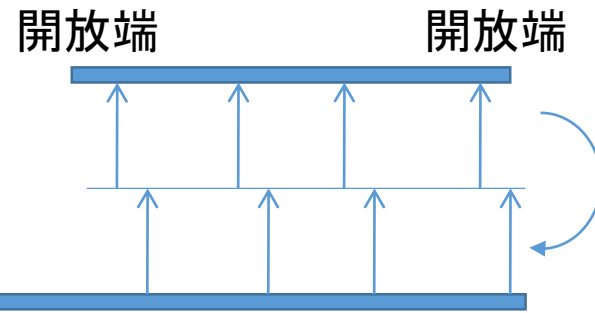
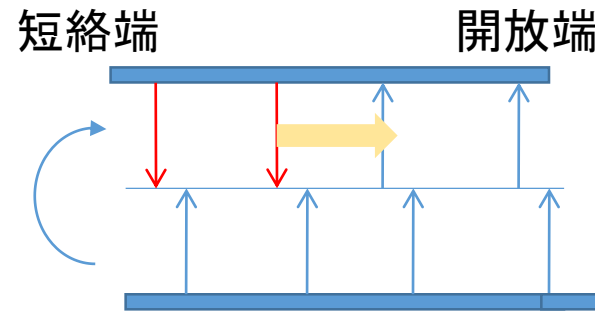
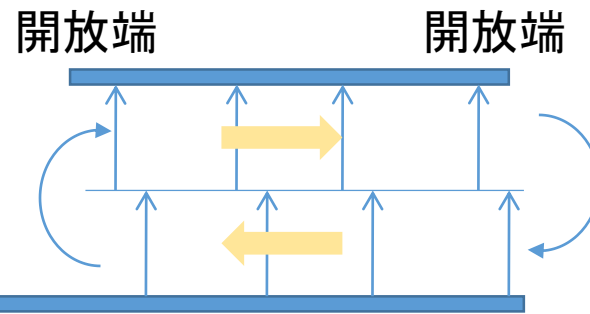
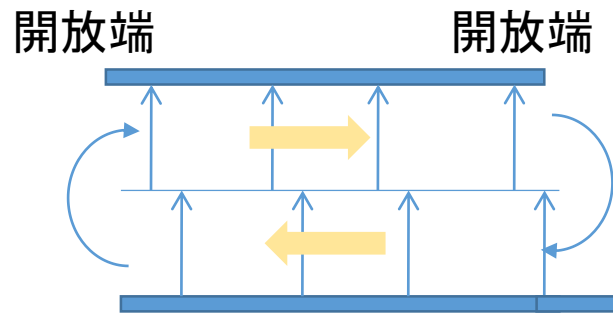
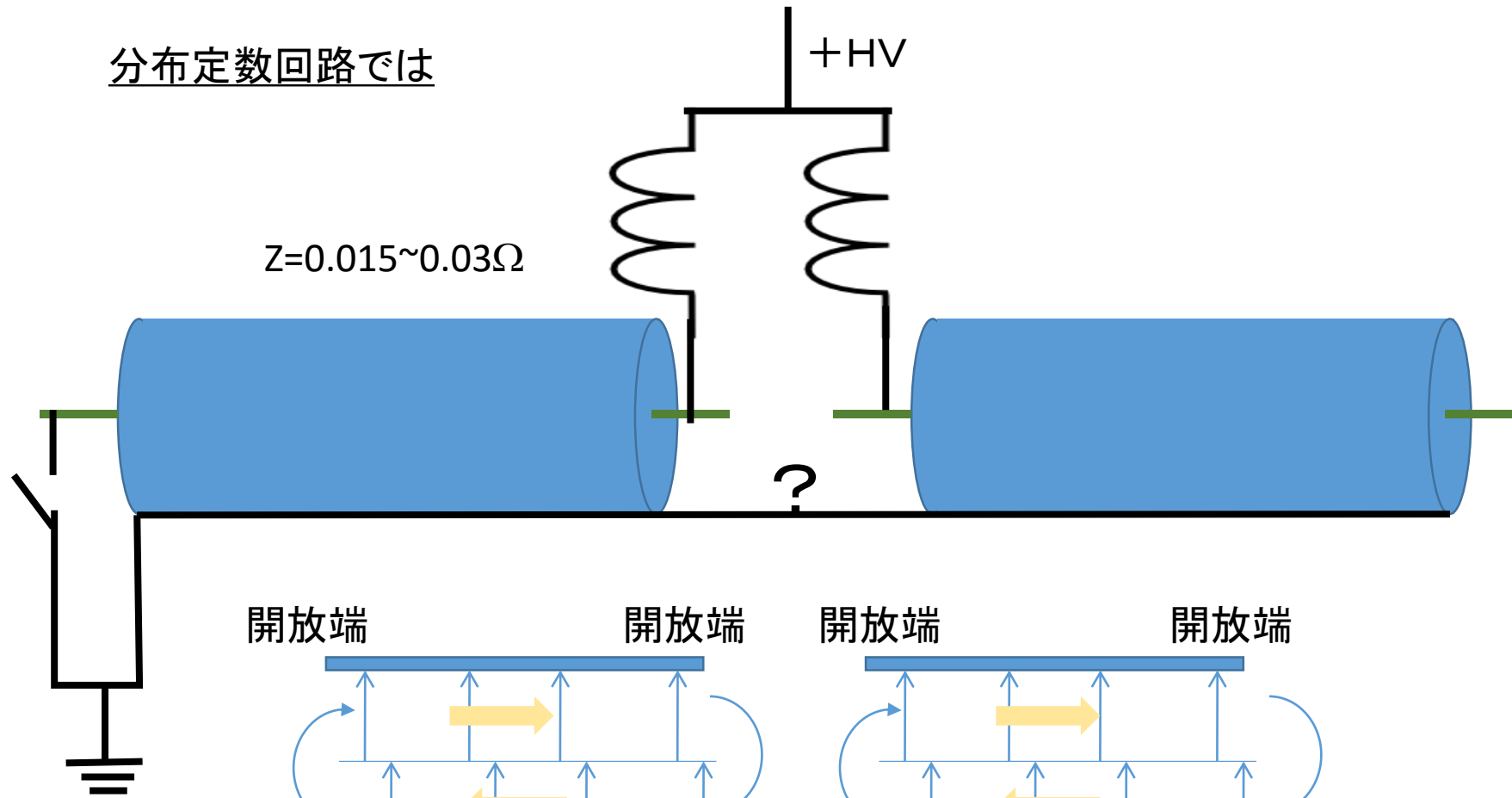
等価回路的には

?



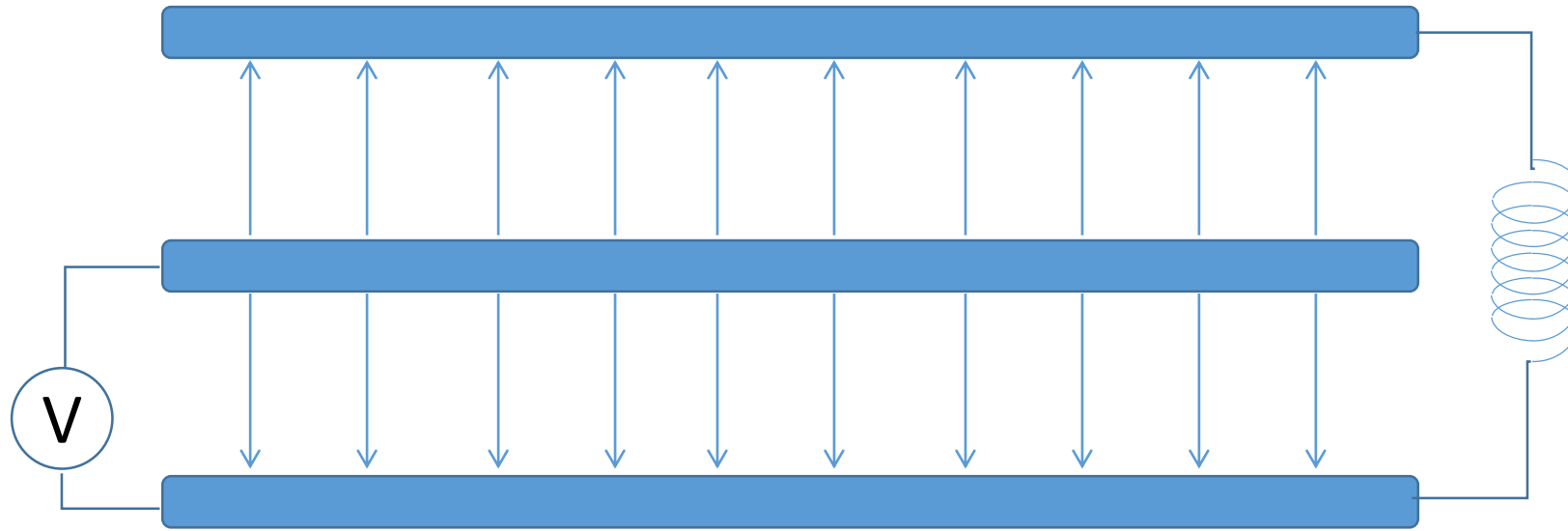
集中定数回路では、こうなるが

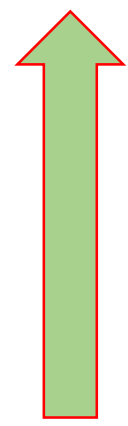
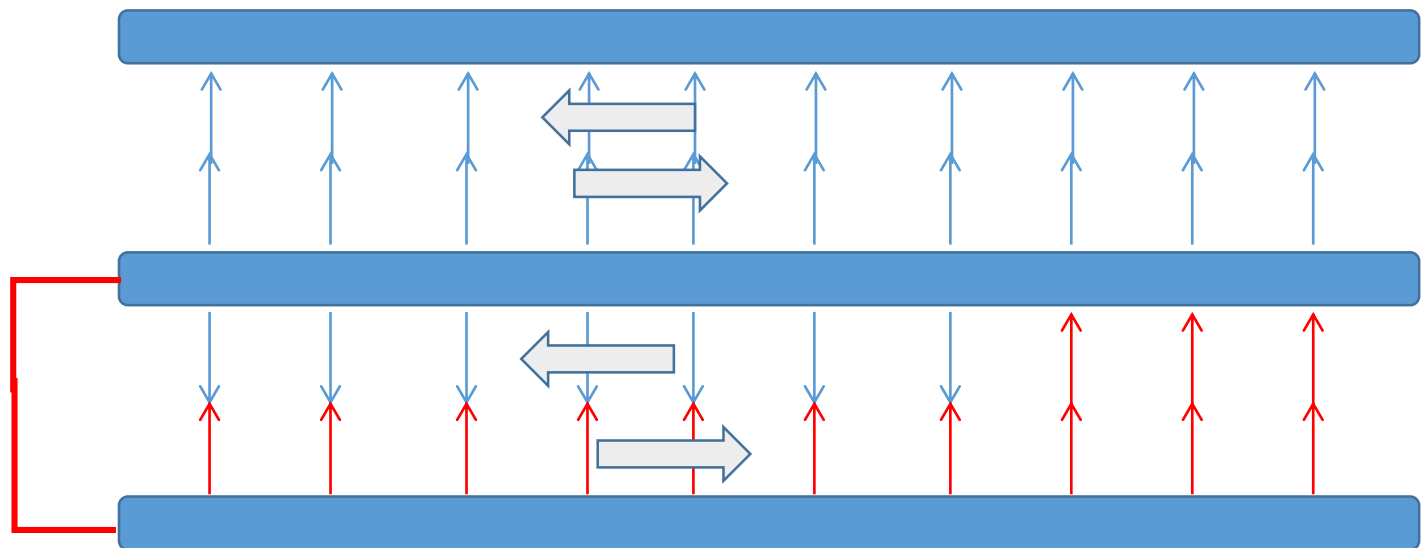
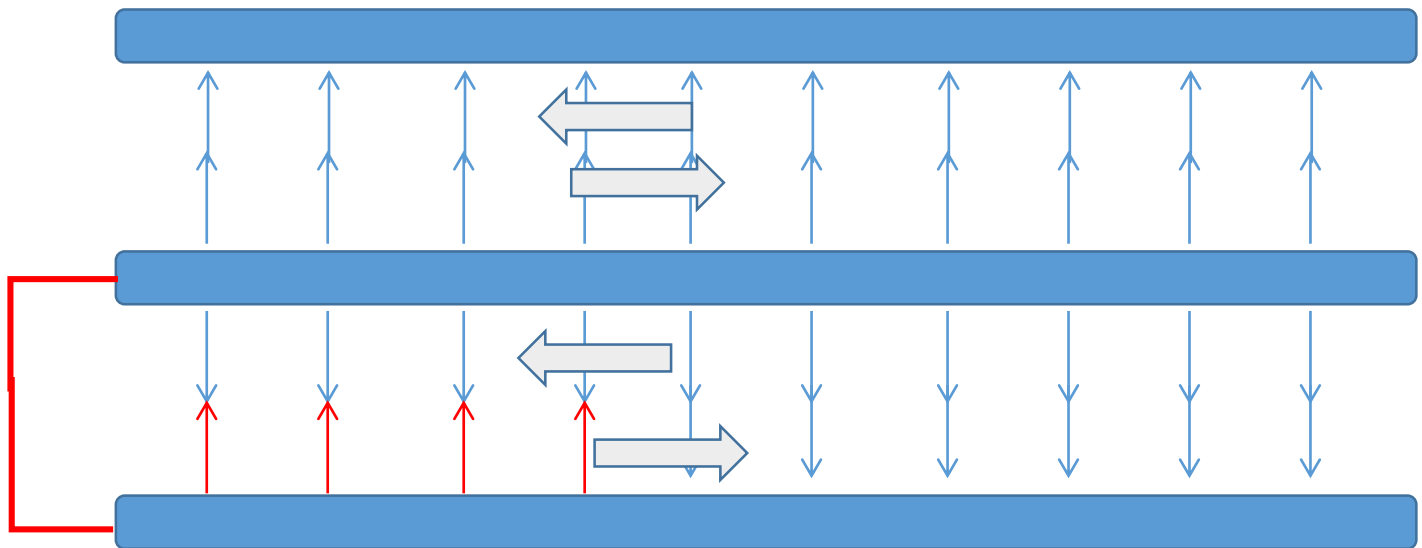
分布定数回路では



パルスライン (ブルームライン・ライン)

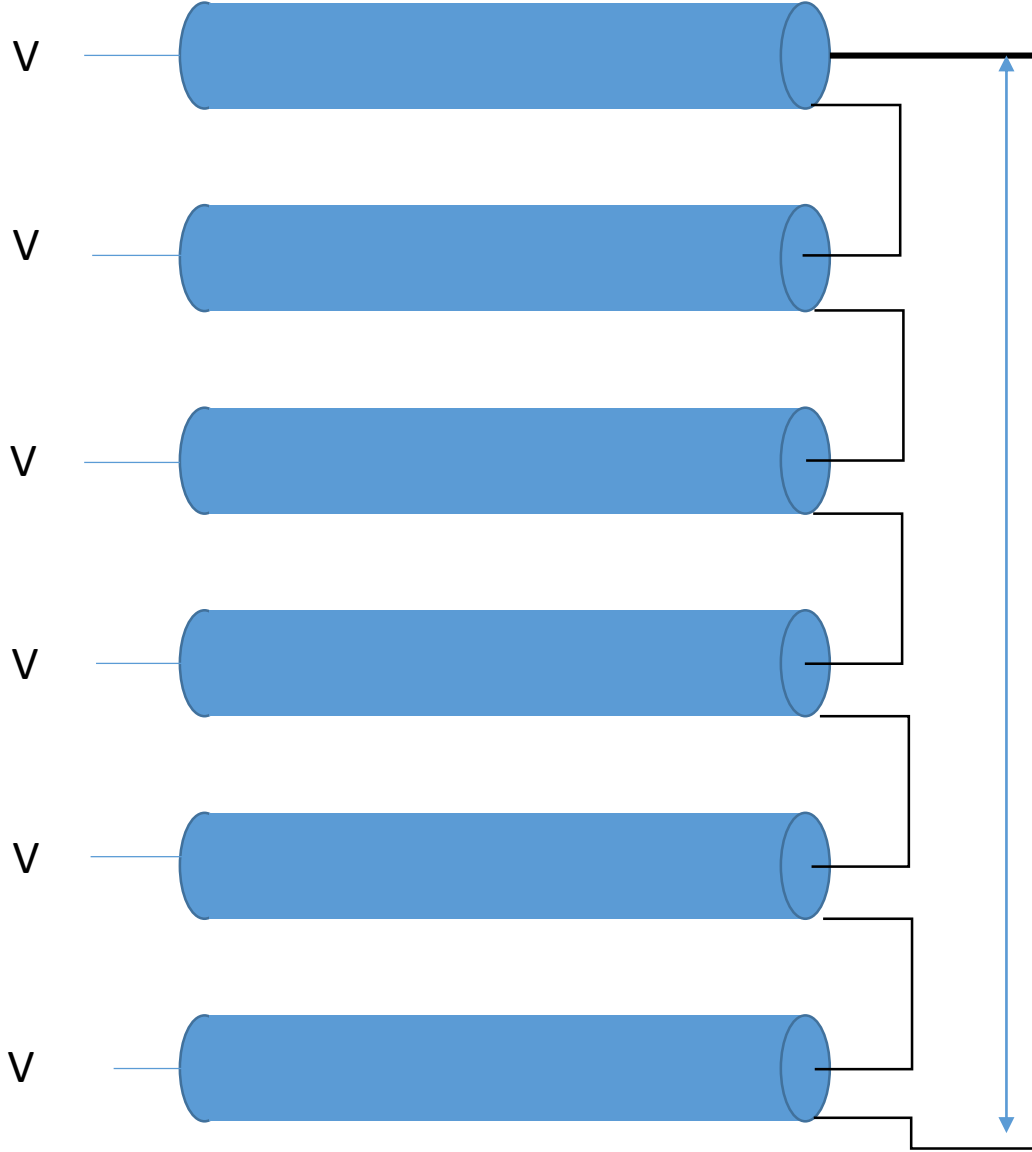
Blumlein transmission line





電圧重畳

電流重畳??



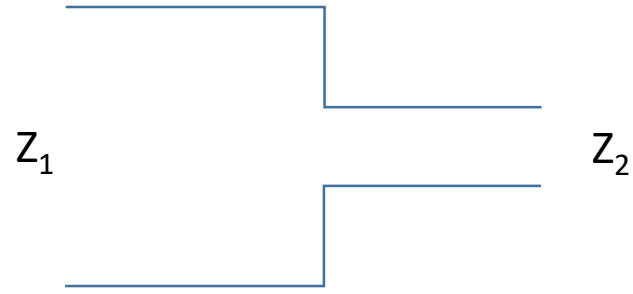
?

6V ???
6Z ???

インピーダンス整合ライン??

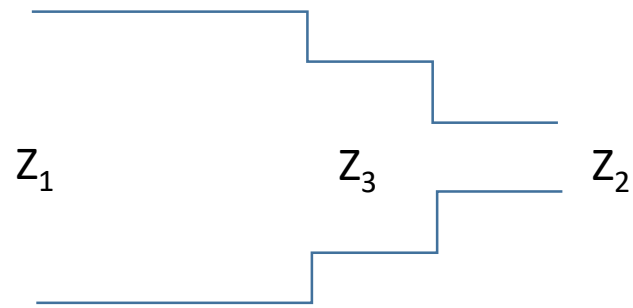
200 => 50 T = 64%

200 => 100 => 50では
T = 79%



$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

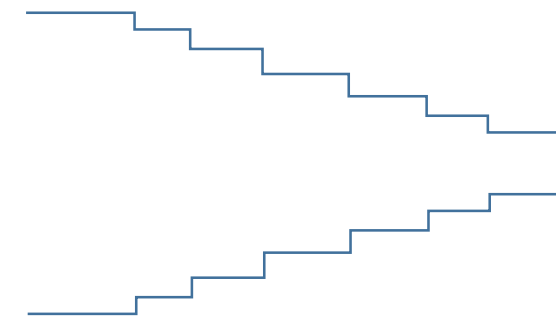
$$T_{energy} = 1 - |r|^2$$



$$r_{13} = \frac{Z_1 - Z_3}{Z_1 + Z_3}$$

$$r_{32} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$$

$$T_{energy} = (1 - |r_{13}|^2)(1 - |r_{32}|^2)$$



?

スミスチャート

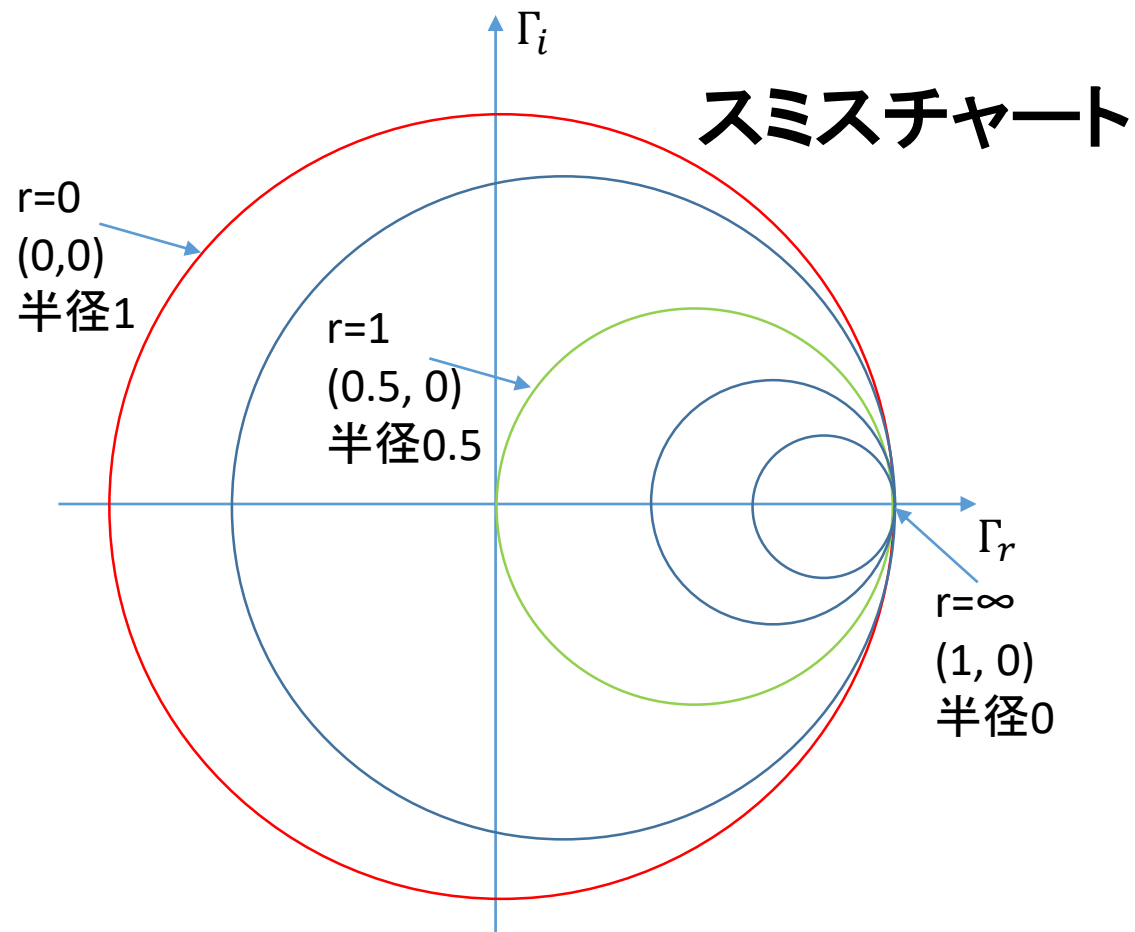
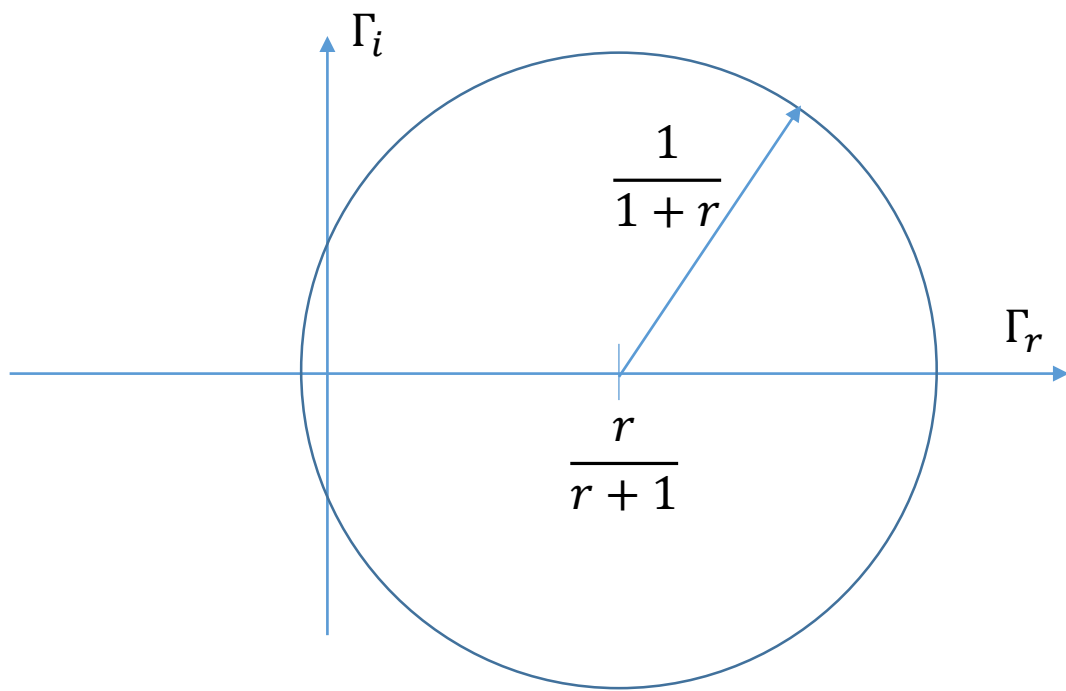
$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{r+1}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2$$

正規化した負荷インピーダンス $Z = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{R + jX}{Z_0} = r + jx$

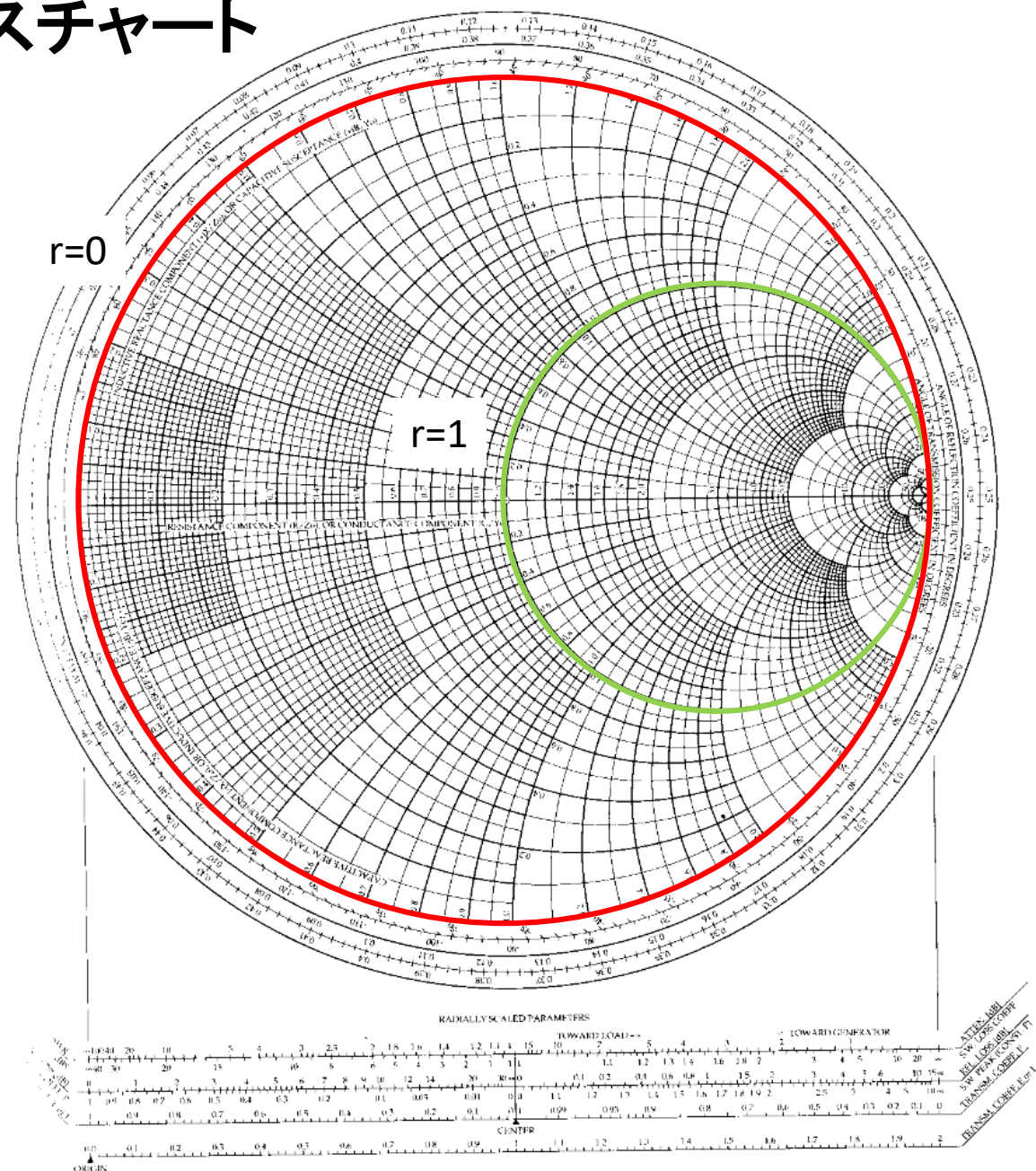
振幅反射係数

$$\Gamma_L = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{r - 1 + jx}{r + 1 + jx} = \frac{r^2 - 1 + x^2 + j((r + 1)x - (r - 1)x)}{(r + 1)^2 + x^2}$$

$$= \frac{r^2 - 1 + x^2}{(r + 1)^2 + x^2} + j \frac{2x}{(r + 1)^2 + x^2}$$



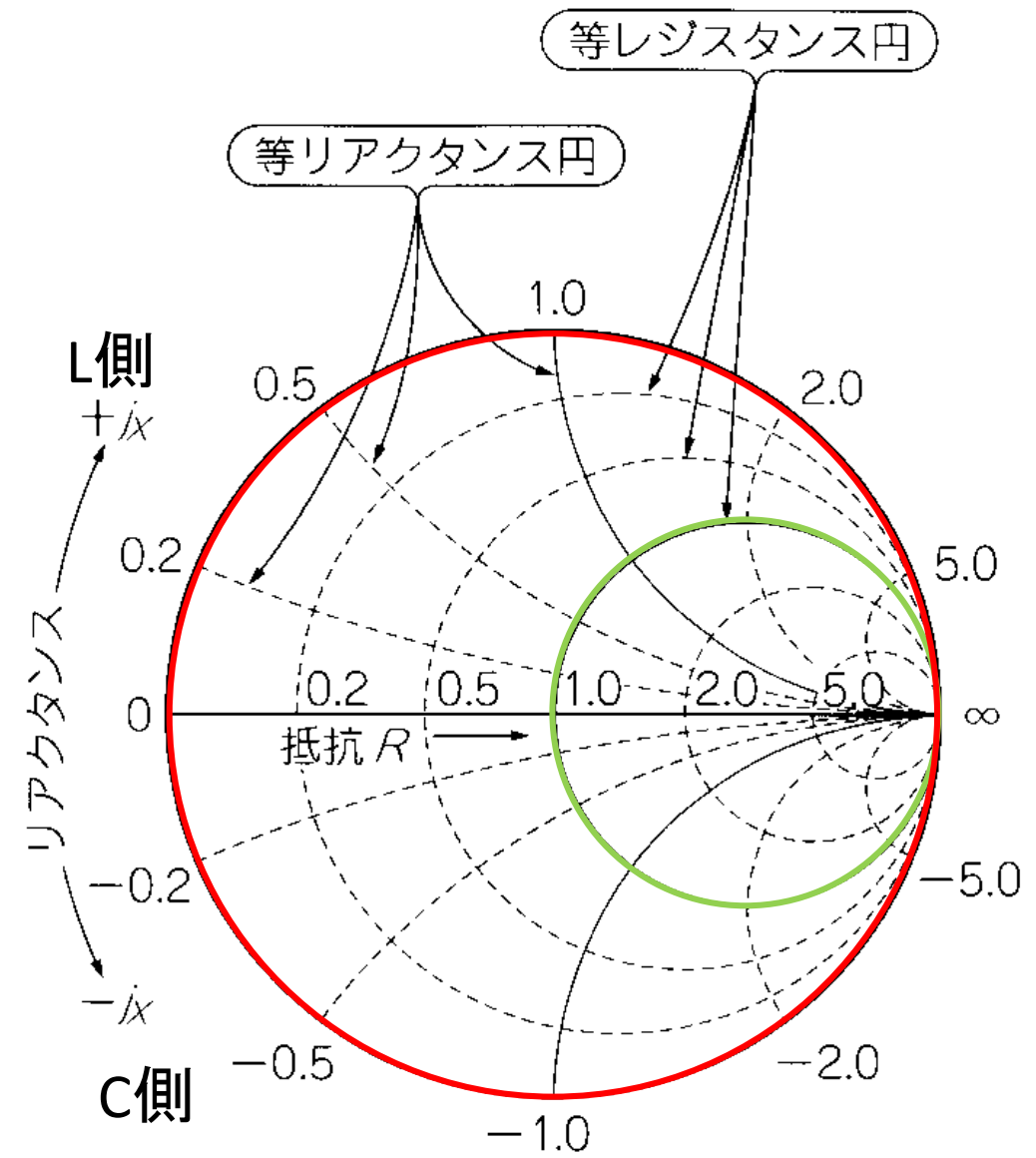
スミスチャート



〈図 4-1〉スミス・チャート

回路や部品のインピーダンスの周波数特性などをプロットして利用する

出典▶http://www.ife.ee.ethz.ch/~ichsc/smith_charts/Black_Magic.pdf

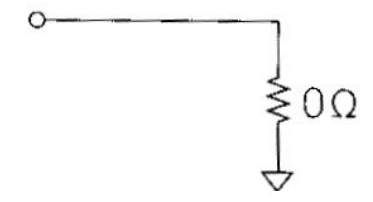


〈図 4-2〉スミス・チャートの見方

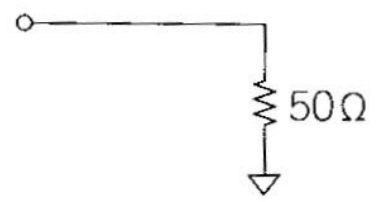
スミスチャート

$Z_0 = 50$

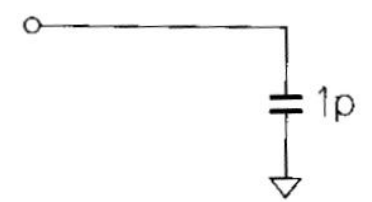
周波数1GHz



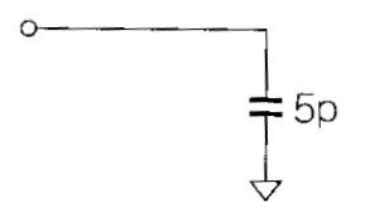
(a) 回路 ①



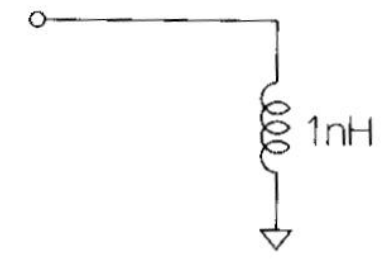
(b) 回路 ②



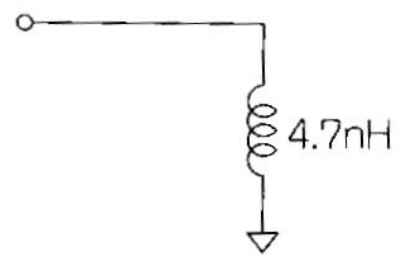
(c) 回路 ③



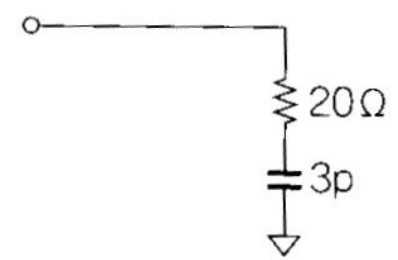
(d) 回路 ④



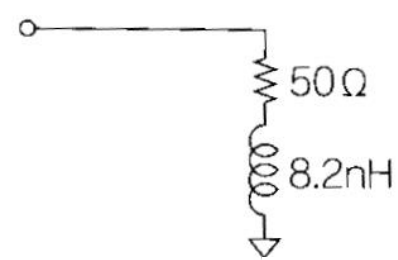
(e) 回路 ⑤



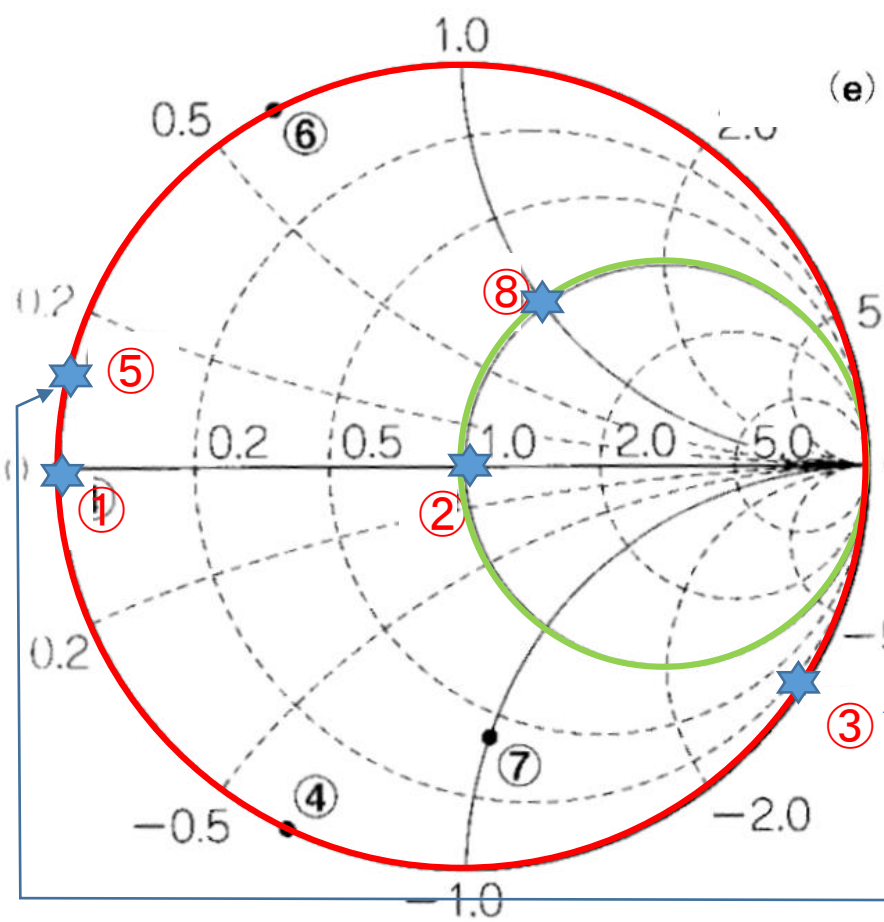
(f) 回路 ⑥



(g) 回路 ⑦



(h) 回路 ⑧



① $z = 0$

② $z = 1$

③
$$Z_L = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{2\pi \times 10^9 \times 1 \times 10^{-12}} = -159j$$

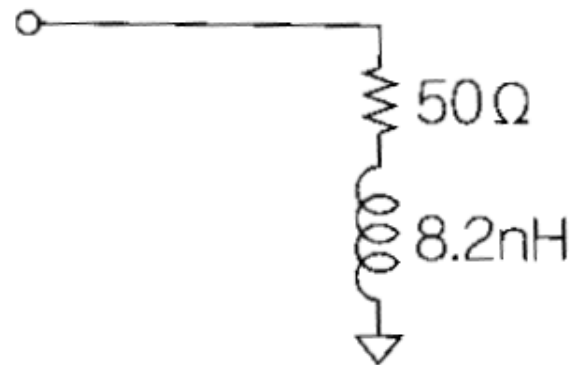
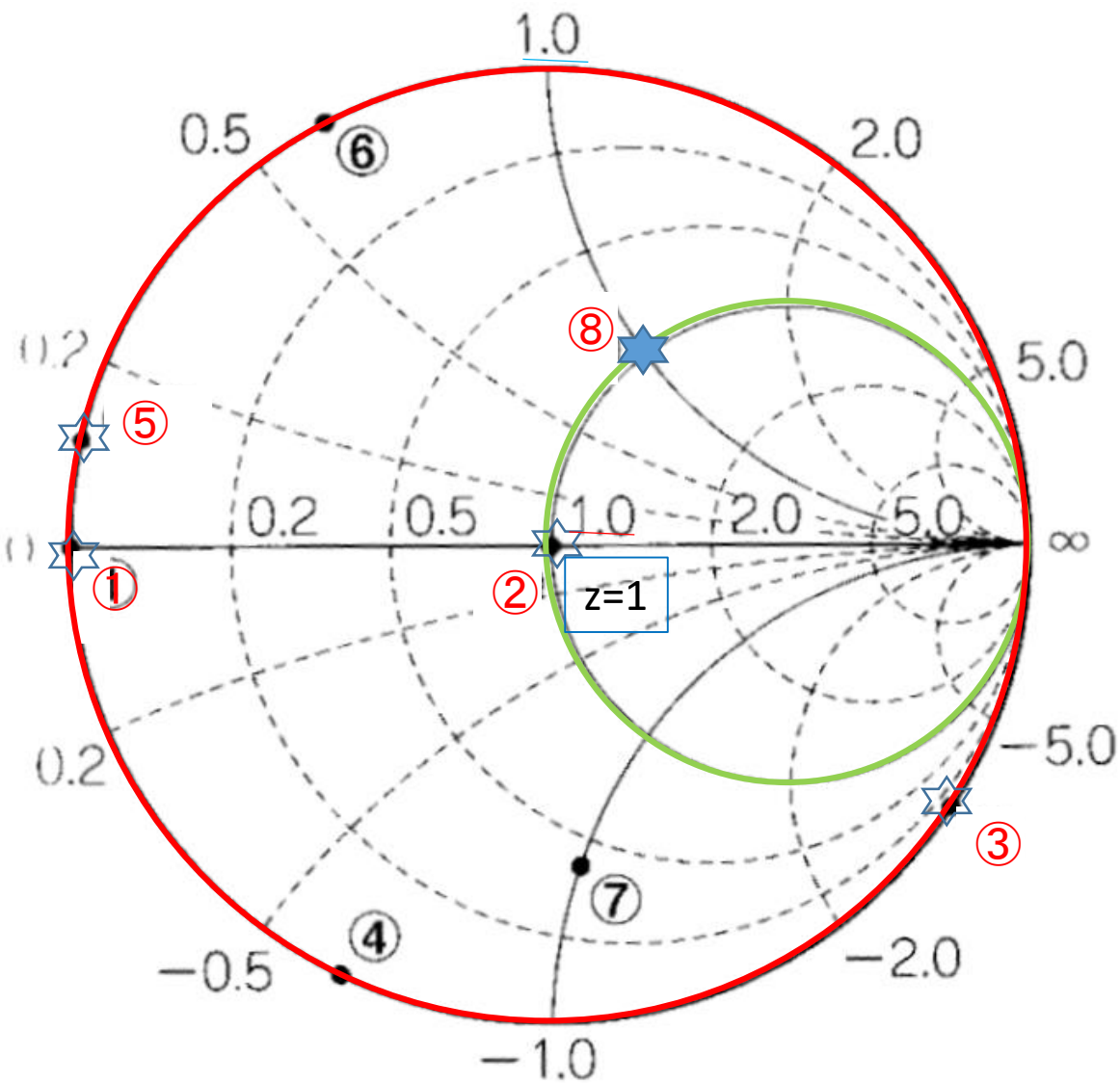
$$Z = \frac{Z_L}{Z_0} = -3.18j$$

⑤
$$Z_L = j\omega L = 2\pi \times 10^9 \times 1 \times 10^{-9}j = -6.28j$$

$$Z = \frac{Z_L}{Z_0} = 0.126j$$

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{r+1}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2$$

スミスチャートの円の中心と半径は
 r (**負荷インピーダンスの実部**)で決定される。

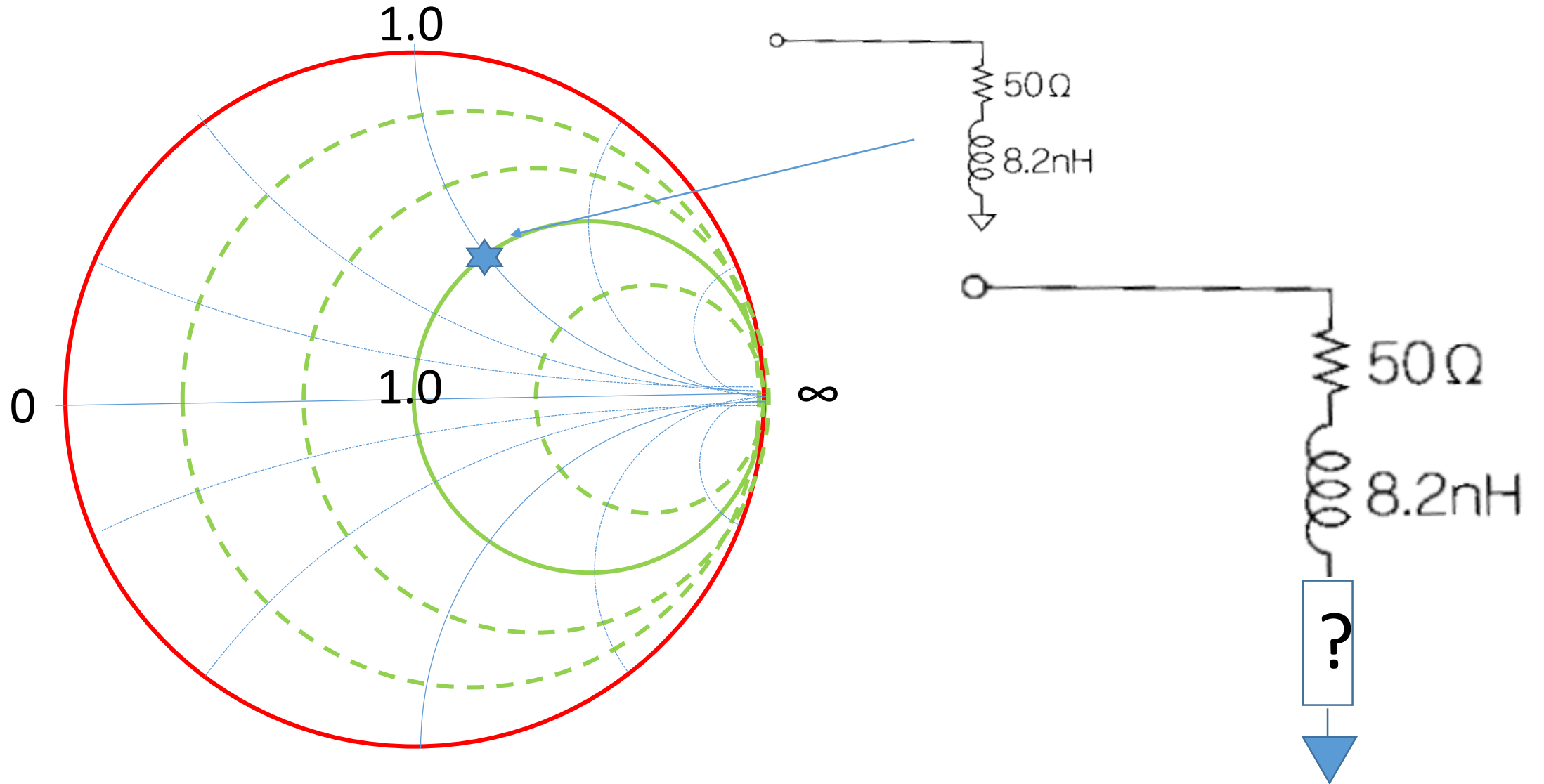


(h) 回路 ⑧

⑧ $Z_L = R + j\omega L = 50 + 2\pi \times 10^9 \times 8.2 \times 10^{-9}j = 50 + 51.5j$

$$Z = \frac{Z_L}{Z_0} = \underline{1} + \underline{1.03}j$$

何をつなげればいい??

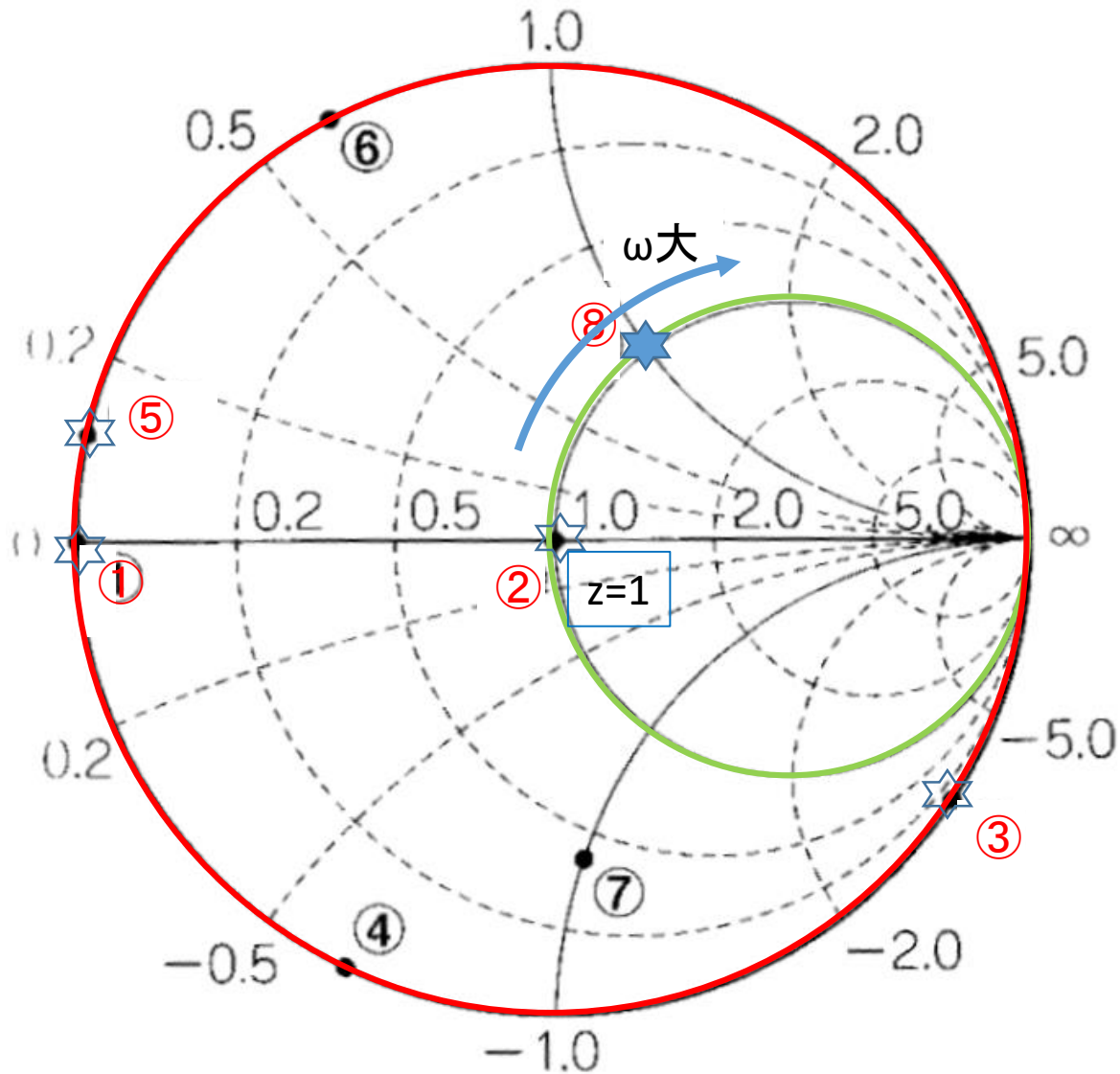


周波数が変わると？

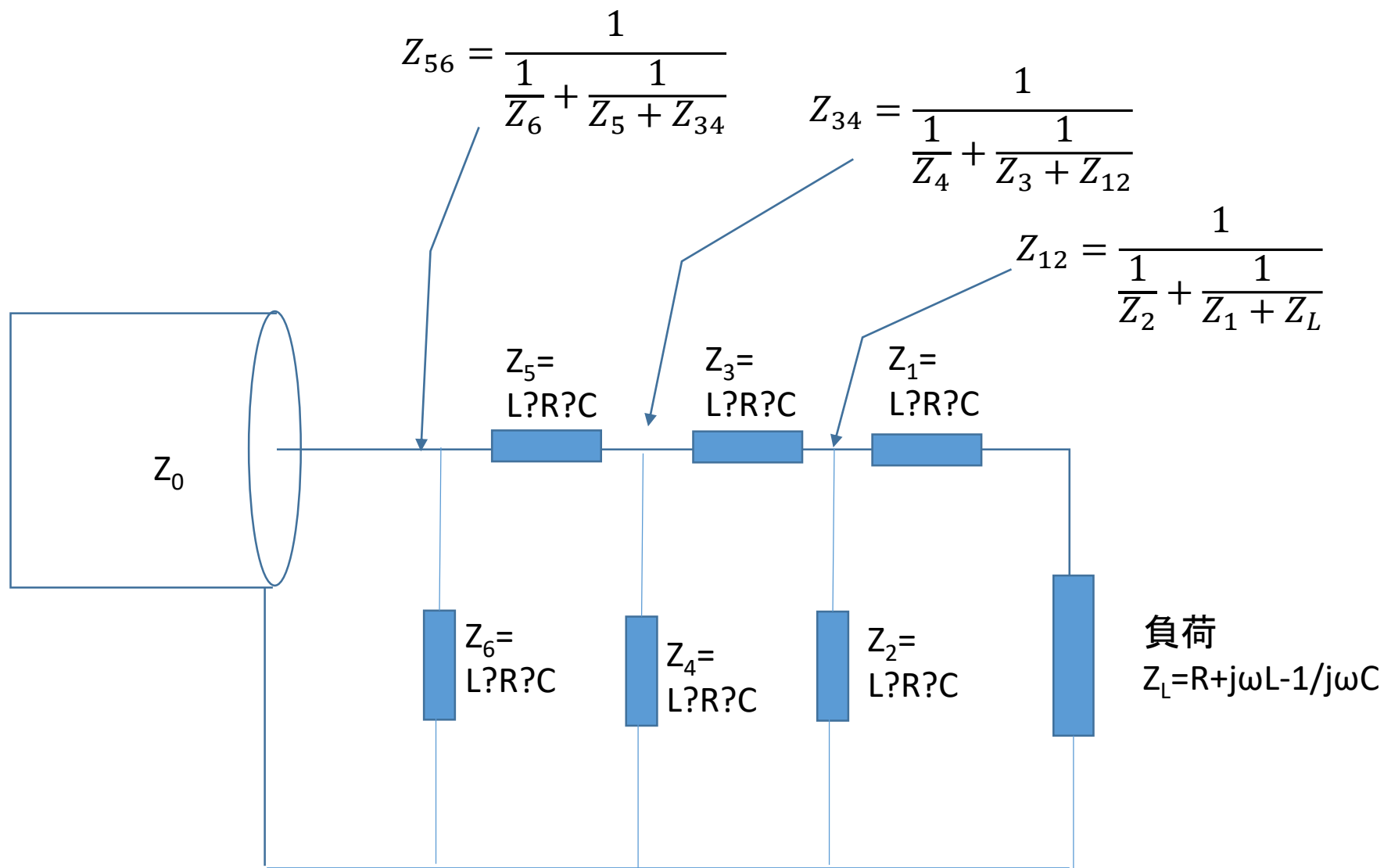
$$\textcircled{8} Z_L = R + j\omega L = 50 + 2\pi \times \omega \times 8.2 \times 10^{-9}j = 50 + A\omega j$$

$$Z = \frac{Z_L}{Z_0} = 1 + A'\omega j$$

等レジスタンス円に沿って移動

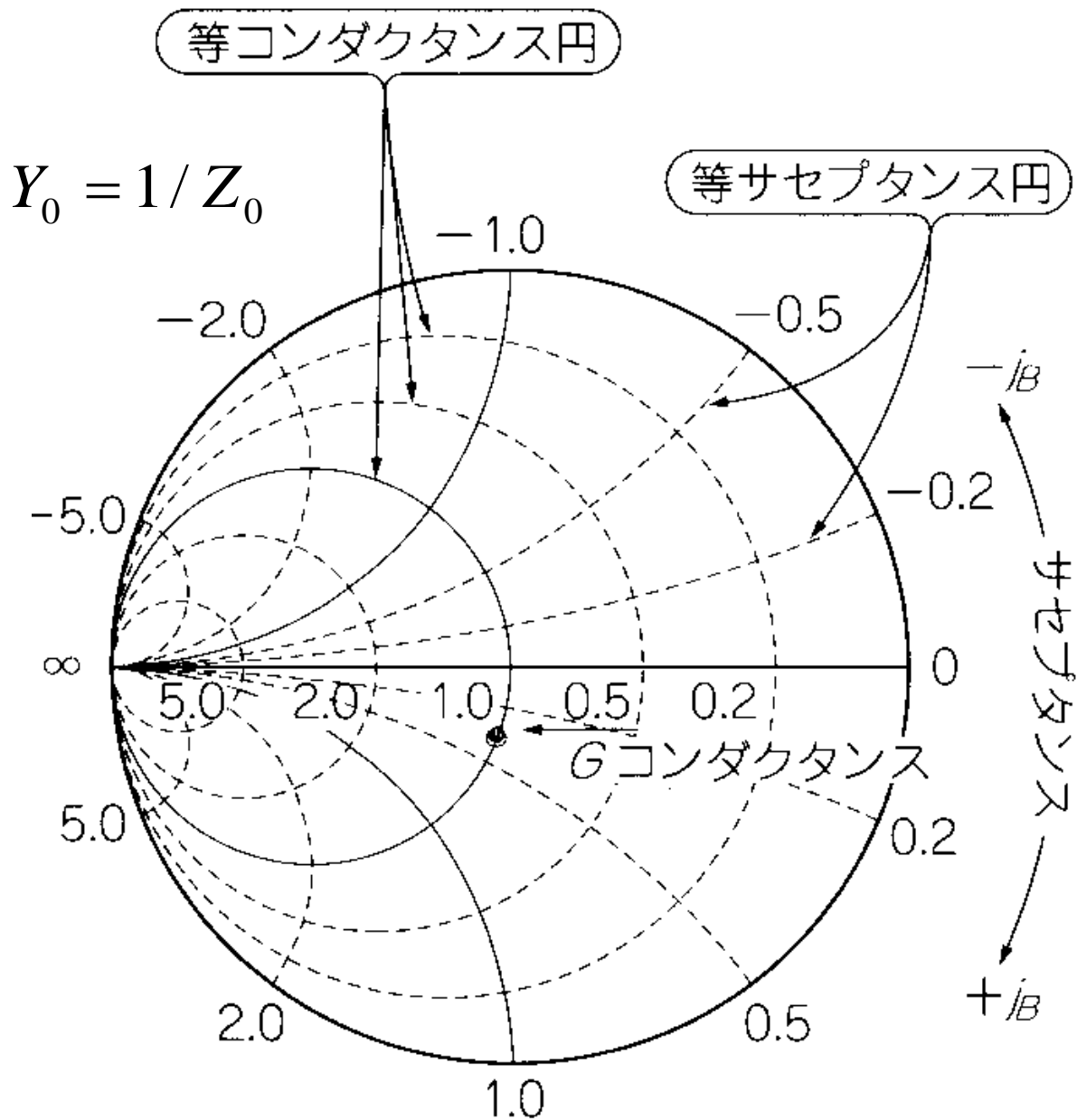


インピーダンスマッチング回路の設計 は、結構大変

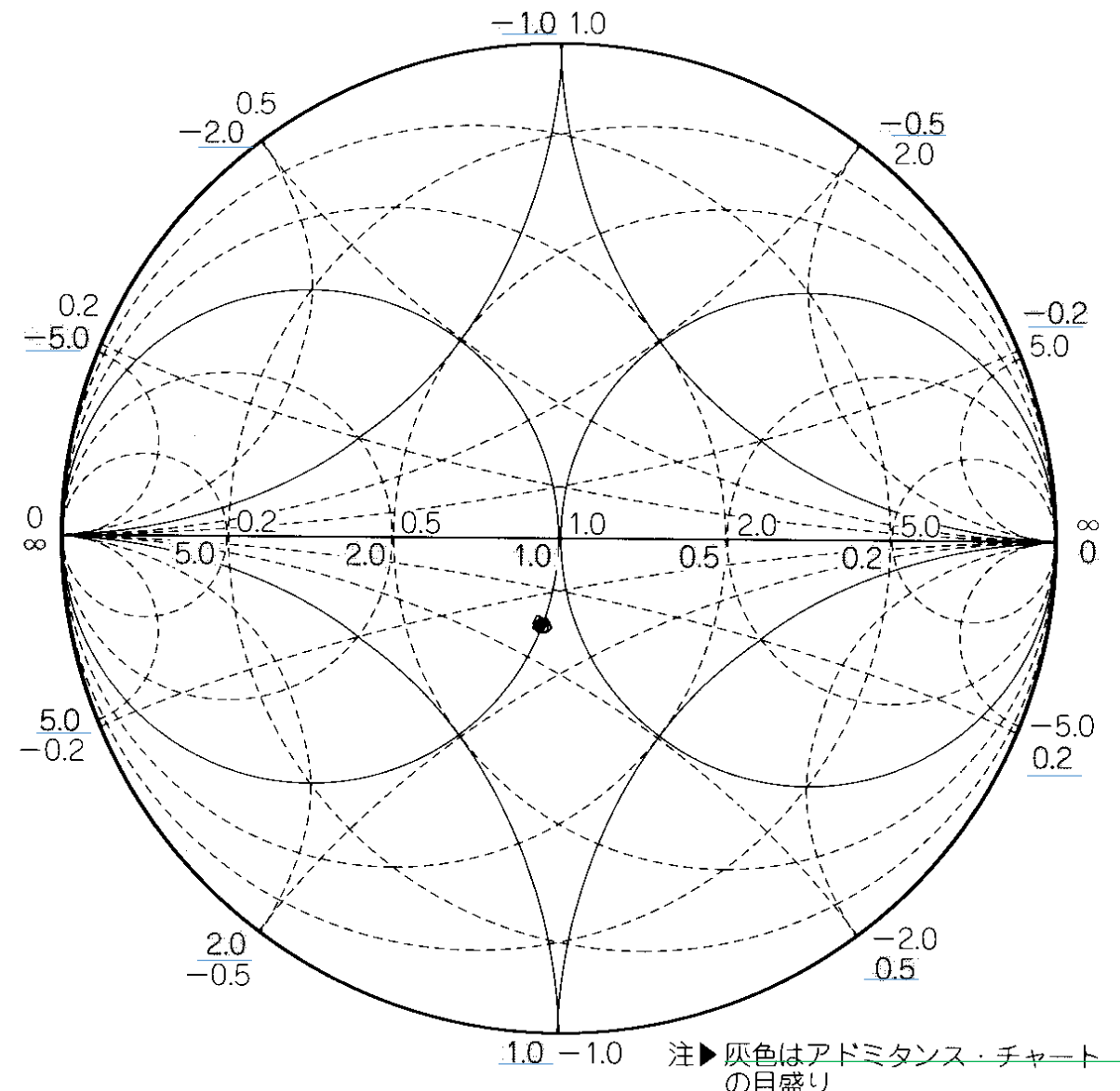


アドミッタンスチャート

並列回路に有用

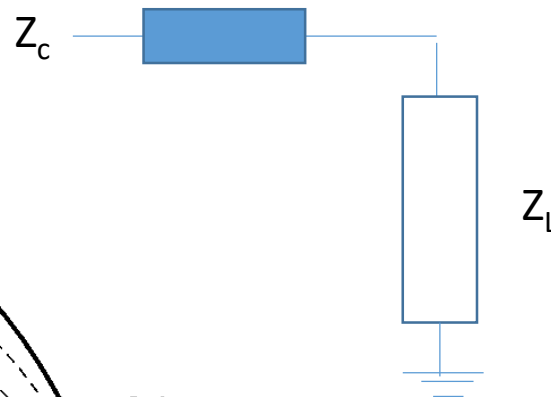
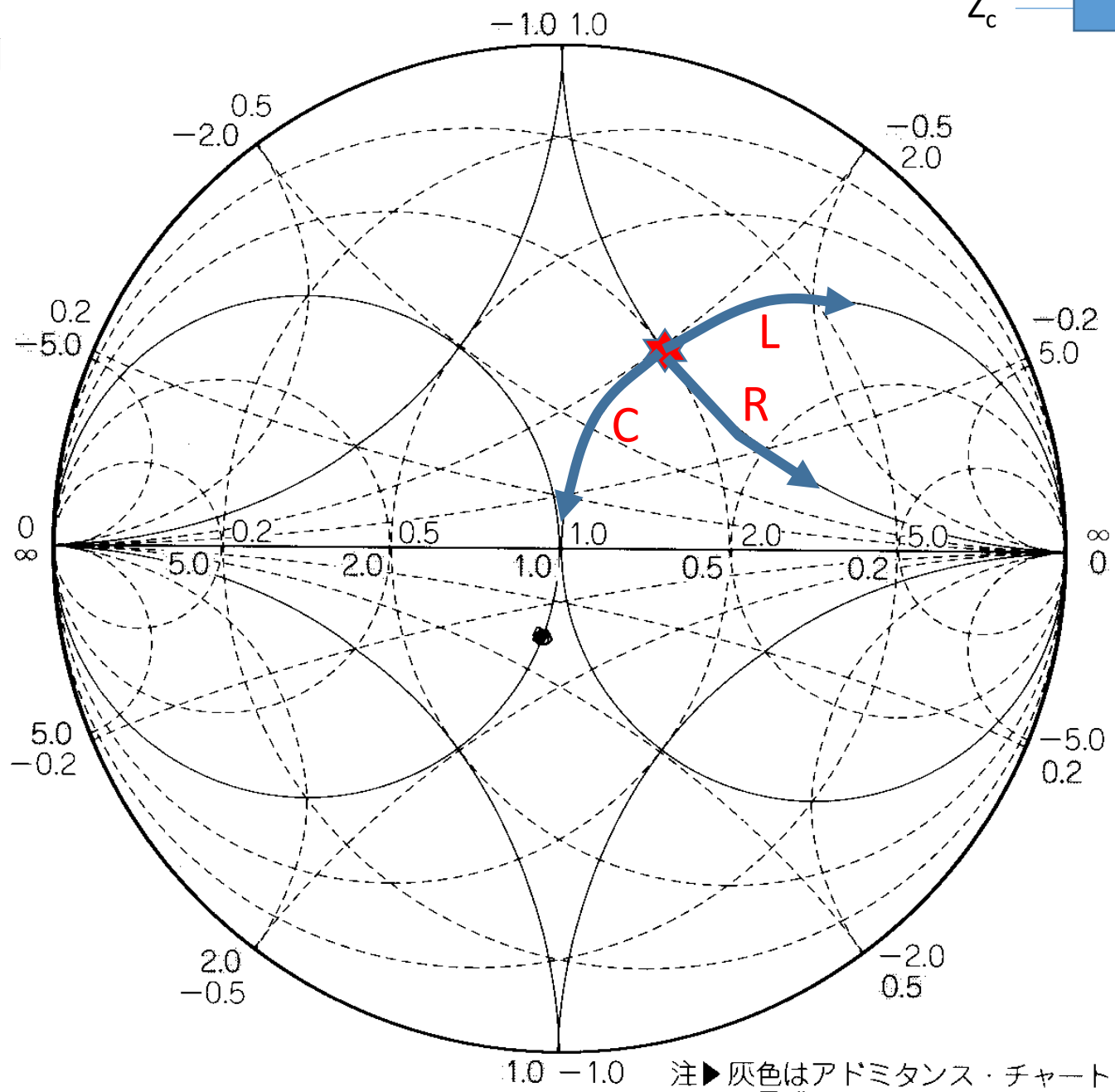


実用的なチャート



直列回路でインピーダンスマッチング

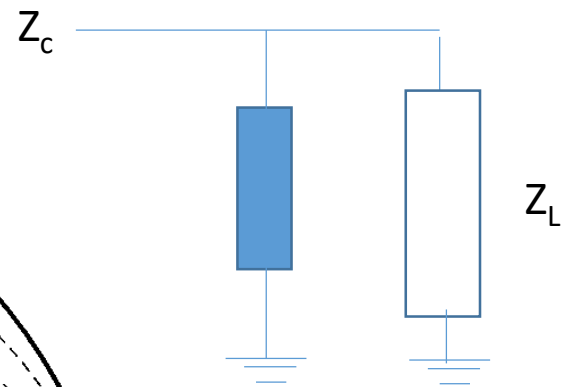
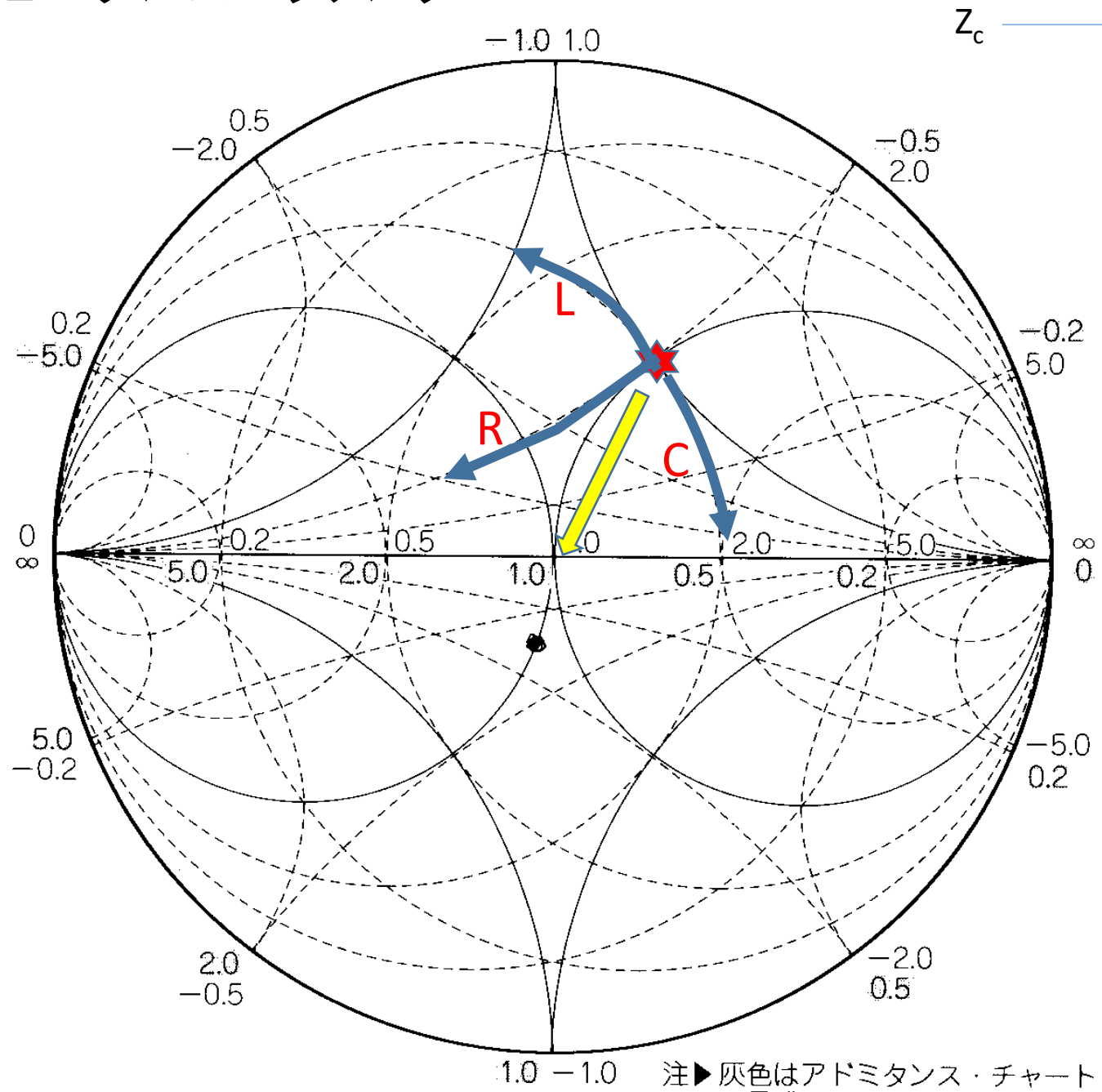
スミスチャート側



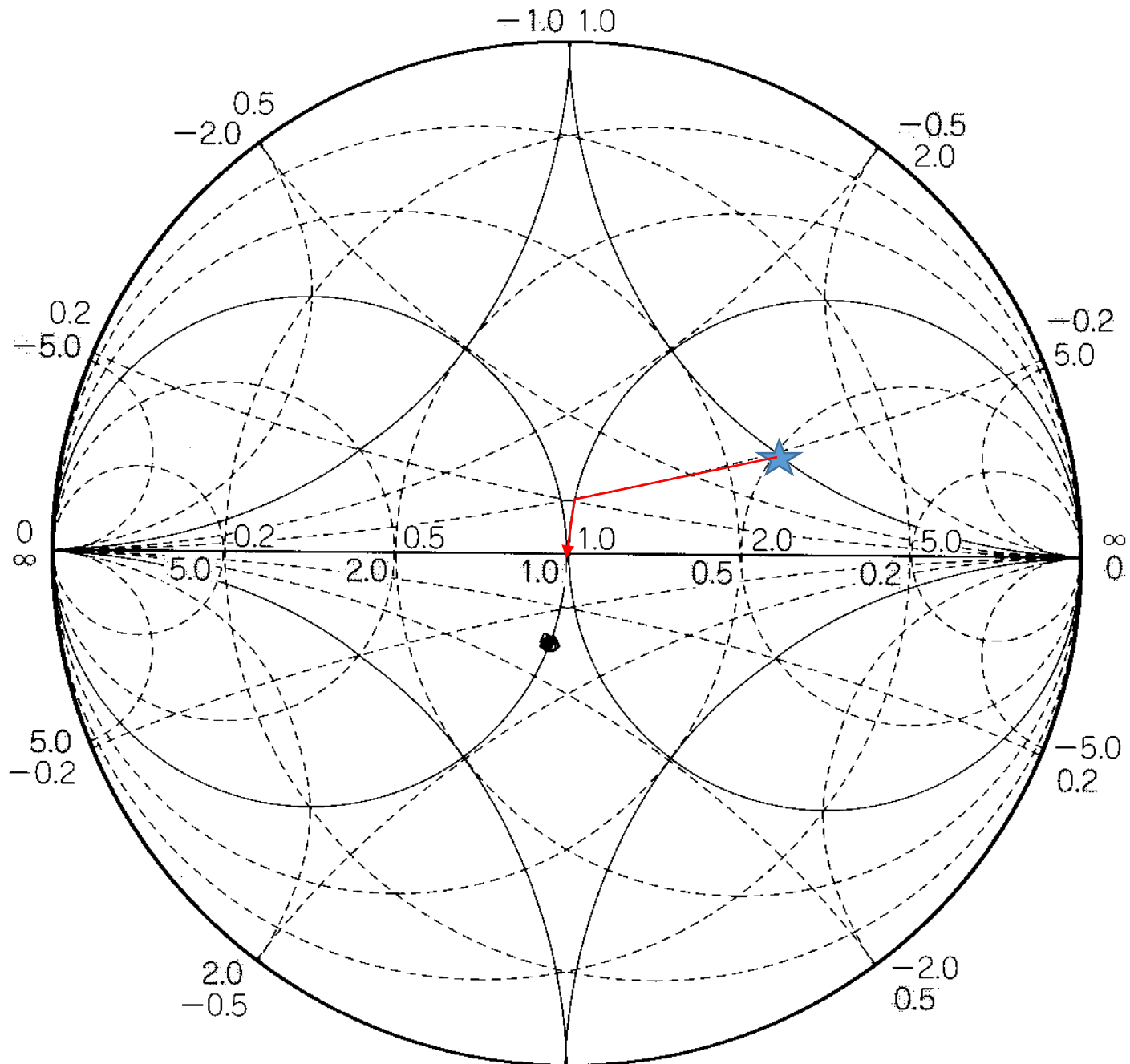
注▶ 灰色はアドミタンス・チャートの目盛り

並列回路でインピーダンスマッチング

アドミタンス側



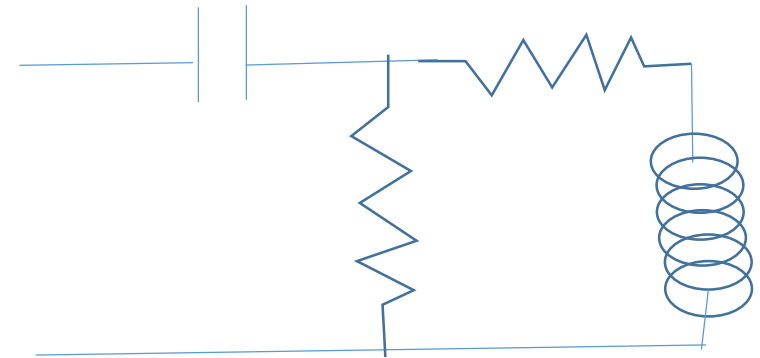
注▶ 灰色はアドミタンス・チャートの目盛り



負荷: 100Ωの純抵抗 + インピーダンス
 で50Ω分のインダクタンス

スミスチャート2.0の円で1.0の外周
 に一致する円弧

入力インピーダンスを $Z_{in} = 50\Omega$ にする
 には?



注▶ 灰色はアドミタンス・チャートの目盛り