

2005年度秋期実用マイクロ波講座

**無線機設計におけるRF技術のすべて**

2005年 9月～12月

松下電器産業(株) 上野 伴希(工学博士)

## 研修アジェンダ

1. システム設計概要
2. 低雑音アンプ(LNA)その1
3. 低雑音アンプ(LNA)その2
4. ミクサ
5. ローカル発振器
6. 変復調その1
7. 変復調その2
8. パワーアンプ(PA)
9. その他の回路
10. ダイレクトコンバージョンRX / TX

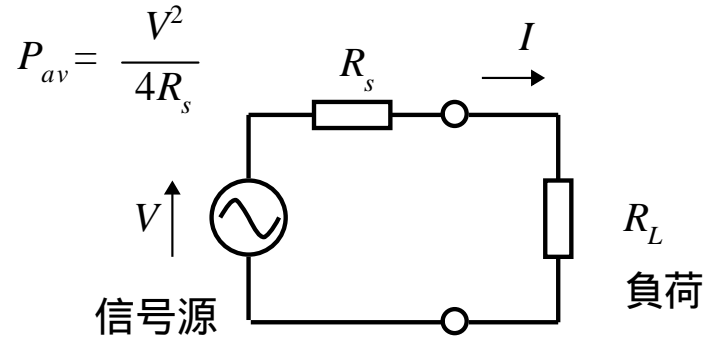
## 2. 低雑音アンプ(LNA)その1 - 基本設計

2005年 9月14日(水)

1. インピーダンス整合の原理
2. Sパラメータ
3. スミスチャート
4. インピーダンス整合の基礎回路
5. 同時共役整合
6. アンプ回路設計実例ノウハウ
7. ノイズマッチ

# インピーダンス整合 (設計基礎)

## 有能電力と反射係数



負荷消費電力は

$$P_L = R_L \left( \frac{V}{R_s + R_L} \right)^2$$
$$= \frac{V^2}{4R_s} \left( 1 - \left( \frac{R_L - R_s}{R_L + R_s} \right)^2 \right)$$
$$= P_{av} (1 - |r|^2)$$

$P_{av}$ : 有能電力

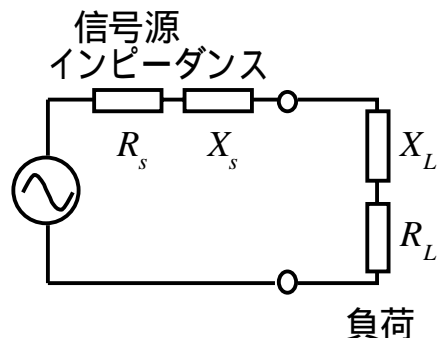
$r$ : 反射係数

$r = 0$ : 反射なし

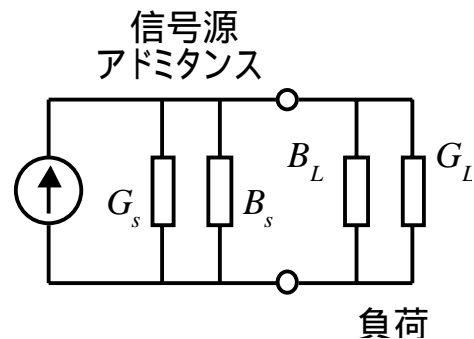
$$R_L = R_s$$

# インピーダンス整合 (設計基礎)

## 共役整合とは

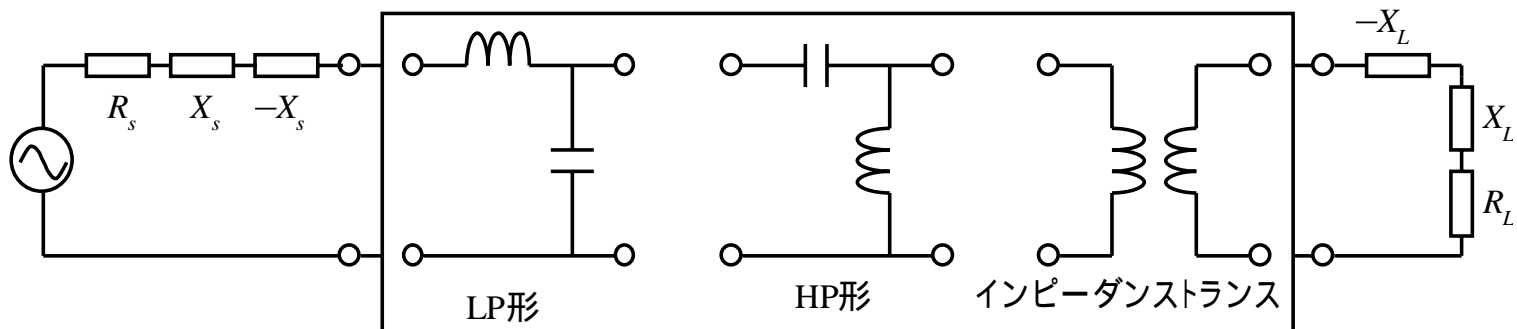


$$Z_s = Z_L^*$$



$$Y_s = Y_L^*$$

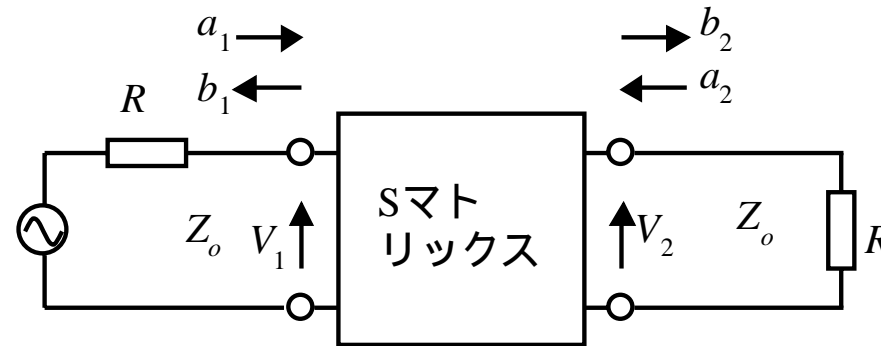
## 整合回路の基本素子



# Sパラメータ

## Sパラメータの定義

2ポート回路特性をSマトリックスで表現



$$Z_o = R$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$V_1 = v_1^+ + v_1^-$$

$$V_2 = v_2^+ + v_2^-$$

$v^+$  ; 入射波電圧

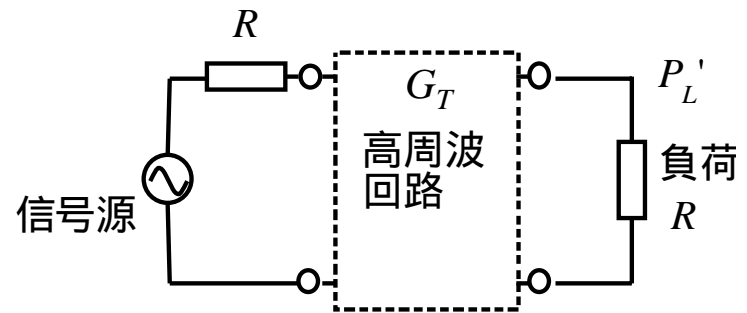
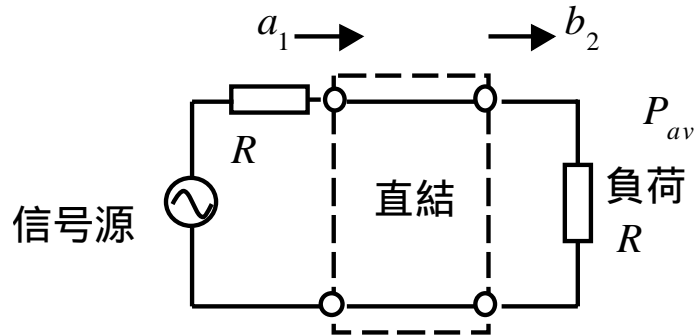
$v^-$  ; 反射波電圧

$$a_1 = \frac{v_1^+}{\sqrt{Z_o}} \quad b_2 = \frac{v_2^-}{\sqrt{Z_o}}$$

$$b_1 = \frac{v_1^-}{\sqrt{Z_o}} \quad a_2 = \frac{v_2^+}{\sqrt{Z_o}}$$

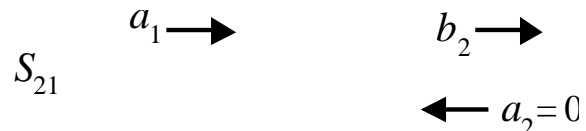
# Sパラメータ

## Sパラメータの意味



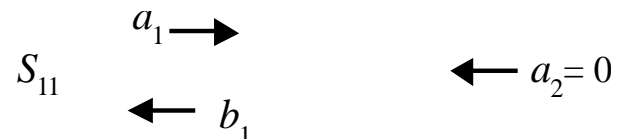
$S_{21}$ ; (トランスデューサ) 電力利得

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$$



$S_{11}$ ; 入力反射係数 (入力インピーダンス)

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

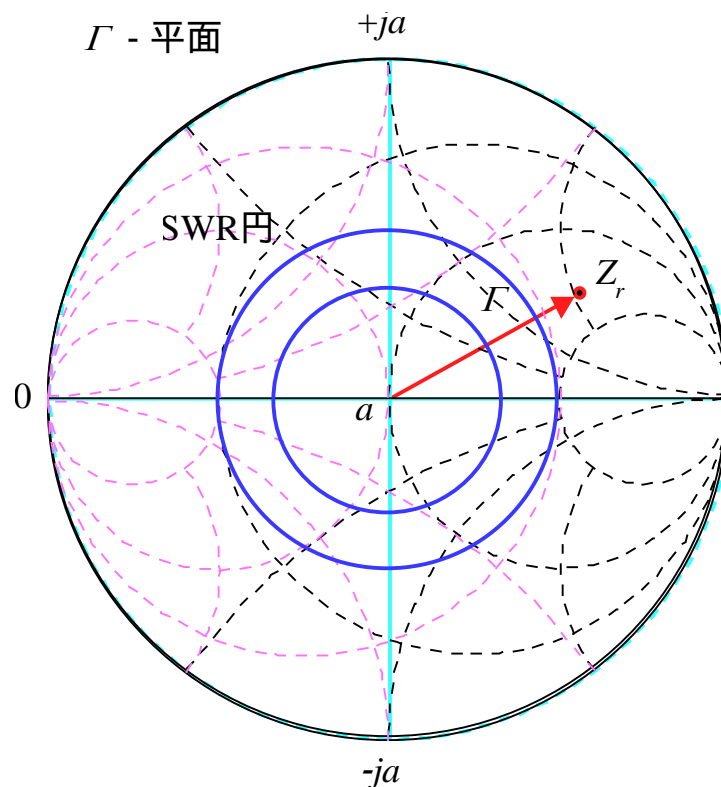


# スミスチャート

## スミスチャートとは

1. (複素数) 反射面
2. それにインピーダンス座標を加えたもの
3. アドミタンス座標追加可能
4. SWR円座標追加可能

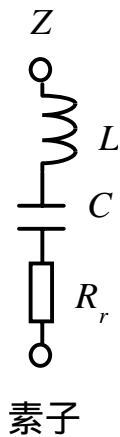
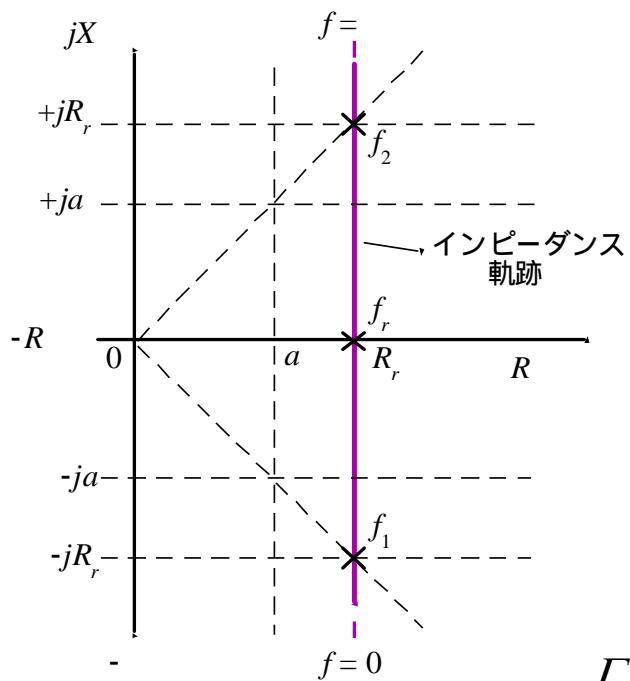
$$\Gamma = \frac{Z_r - Z_o}{Z_r + Z_o}$$





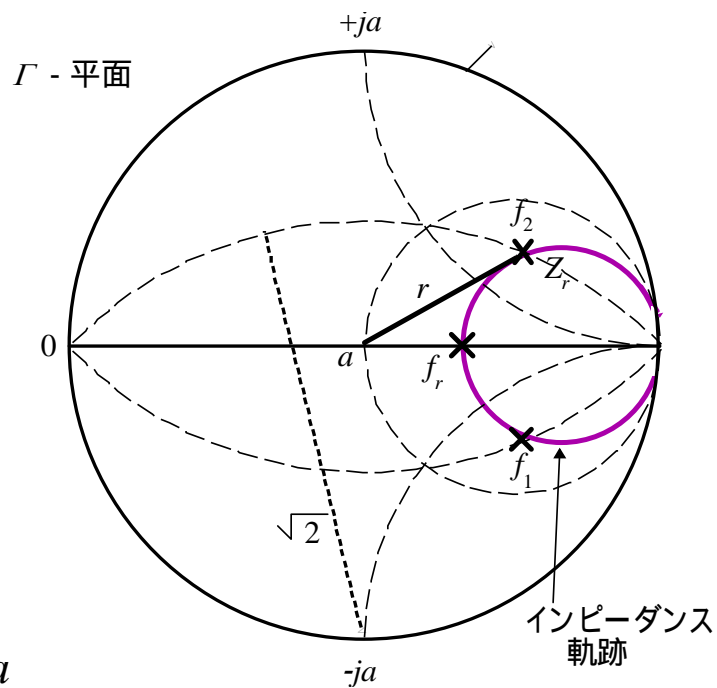
# スミスチャート

## インピーダンスの1次変換



1次変換

$$\Gamma = \frac{Z_r - a}{Z_r + a} = 1 - \frac{2a}{Z_r + a}$$



# スミスチャート

## スミスチャートは反射係数面

$$\Gamma = \frac{Z_r - a}{Z_r + a}$$

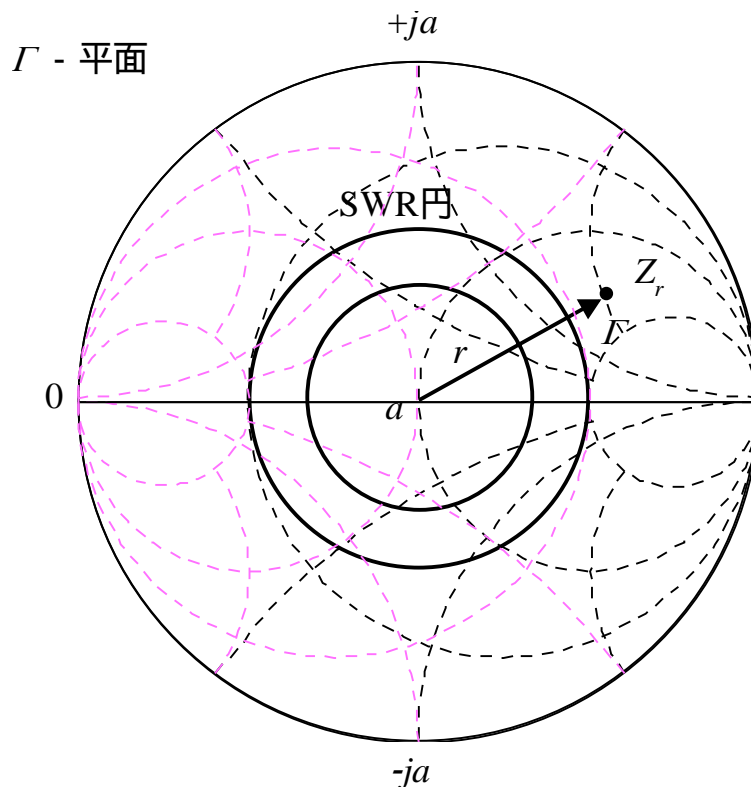
反射係数一定の軌跡はSWR円

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$Z_r$   $1/Y_r$ を代入するとアドミタンスチャート

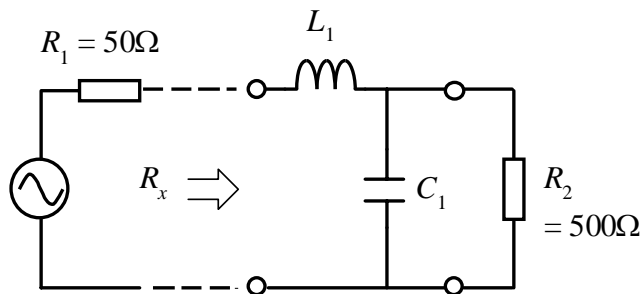
$$\Gamma = \frac{Z_r - a}{Z_r + a} = \frac{1/Y_r - a}{1/Y_r + a} = -\frac{Y_r - 1/a}{Y_r + 1/a}$$

インピーダンス (VSWR) と周波数帯域？

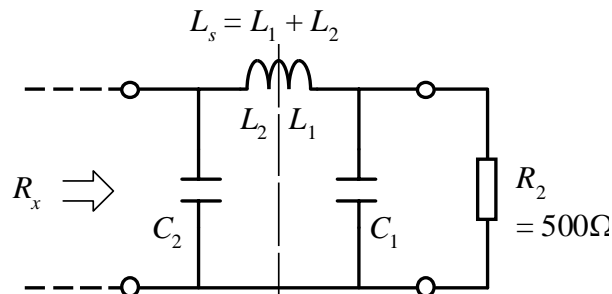


# インピーダンス整合の基本回路

## 整合回路と基本素子



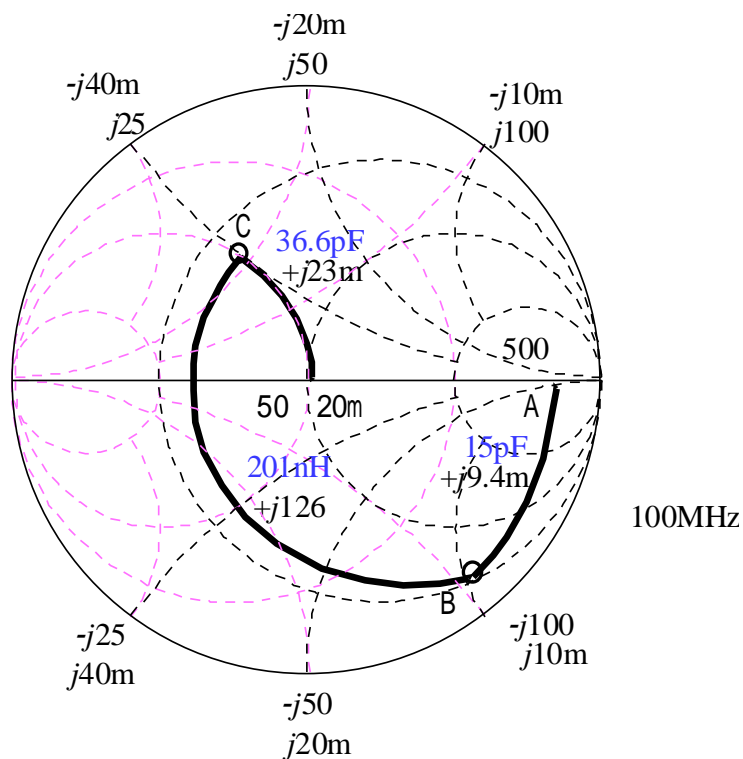
L-セクション



-セクション

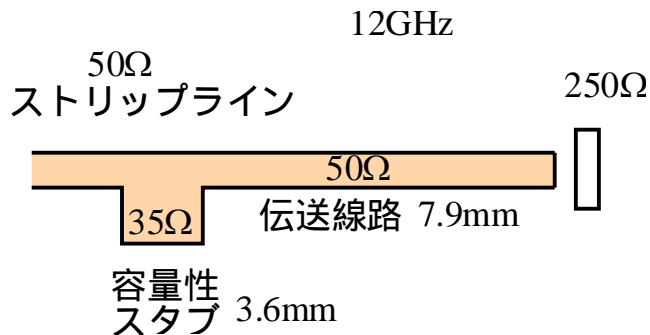
インピーダンスの推移

セクションの例



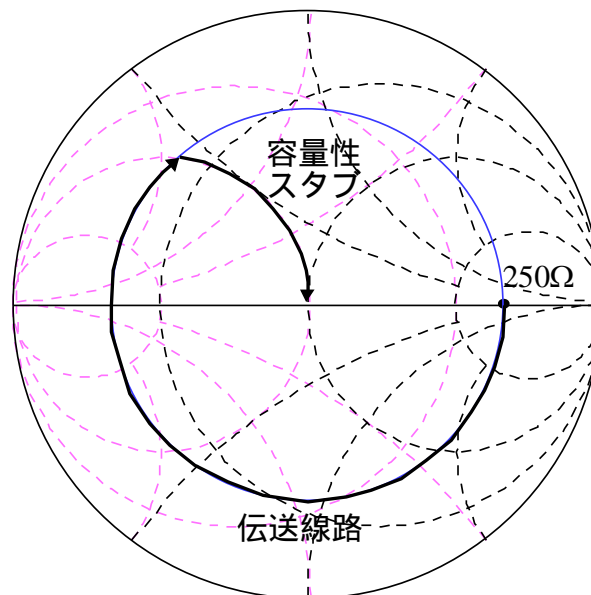
# インピーダンス整合の基礎回路

## 分布定数線路



伝送線路 + 容量性スタブ

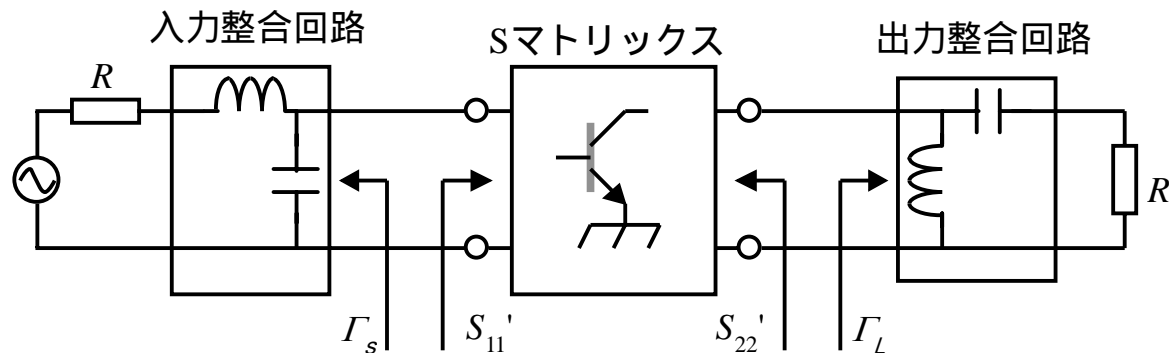
インピーダンスの推移



# 同時共役整合

## トランジスタ増幅回路の整合

整合 共役インピーダンス 共役反射係数



$$S_{11}' = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}$$

$$S_{22}' = S_{22} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s}$$

共役整合の条件  $S_{11}'^* = \Gamma_s$   $S_{22}'^* = \Gamma_L$  より, 式が解ける

$$\Gamma_s^* = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}$$

$$\Gamma_L^* = S_{22} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s}$$

# 同時共役整合

## トランジスタの同時共役整合

共役整合の条件

$$\Gamma_s = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad \Gamma_L = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2}$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |D|^2 \quad B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |D|^2$$

$$C_1 = S_{11} - DS_{22}^* \quad C_2 = S_{22} - DS_{11}^*$$

$$D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

(トランスデューサ) 利得

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|(1 - S_{11}\Gamma_s)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{21}S_{12}\Gamma_s\Gamma_L|^2}$$

安定係数

$$K = \frac{1 + |S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12}|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{21}S_{12}|} > 1$$

最大有能利得

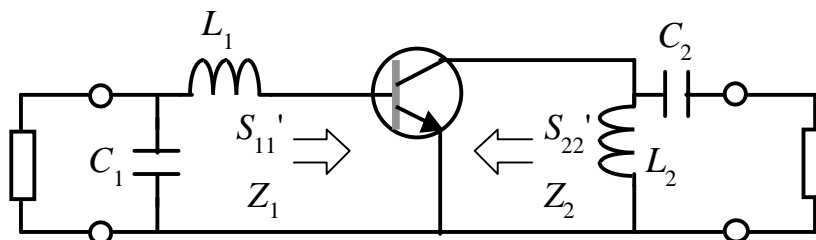
$$G_{\max} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \left( K - \sqrt{K^2 - 1} \right)$$

# 同時共役整合

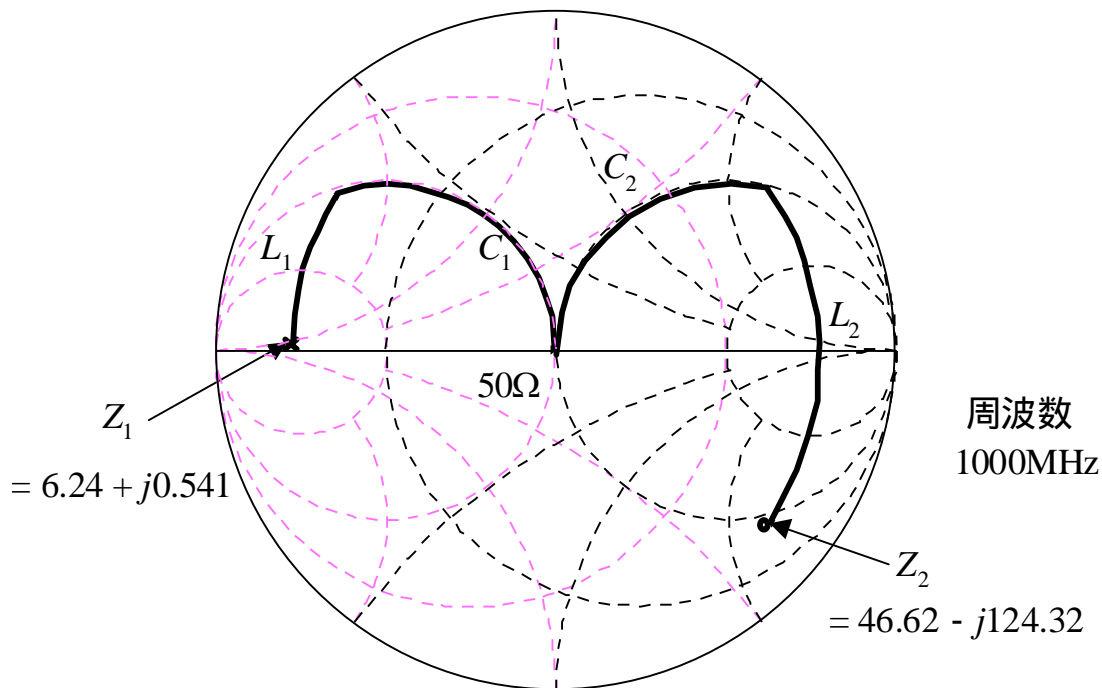
## 整合の実際

$$K > 1$$

2SC3356



$$Z_i = Z_o \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$



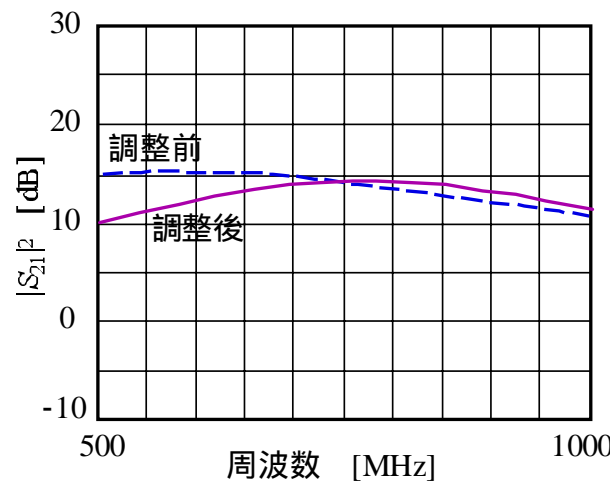
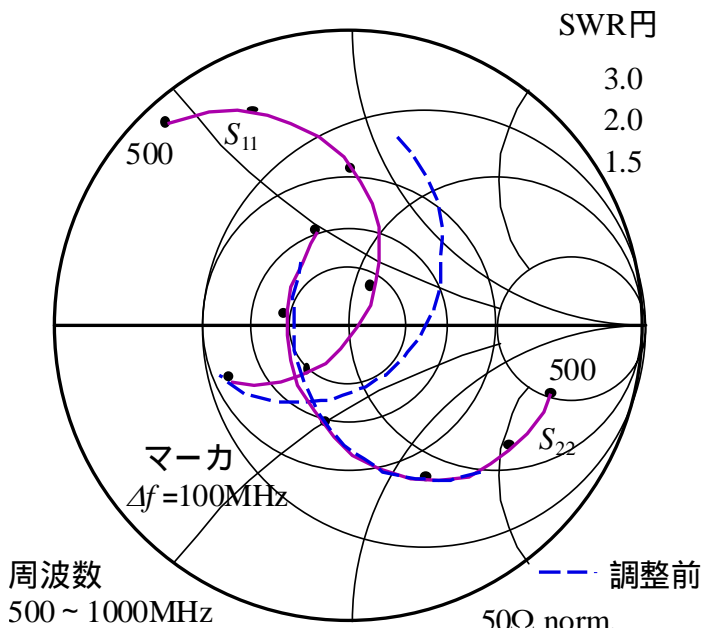
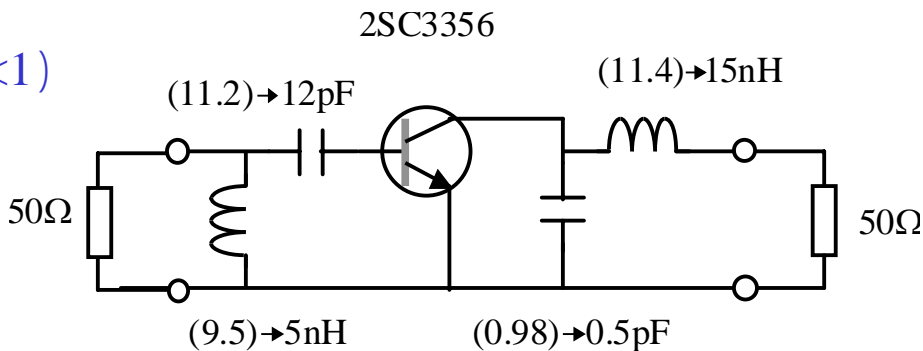
# アンプ回路設計実例ノウハウ

ユニラテラル ( $S_{12} = 0$ ) を仮定

$$S_{11}' = S_{11} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad S_{22}' = S_{22} + \frac{S_{21}S_{12}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s}$$

2SC3356, 800MHzでの設計 ( $K < 1$ )

シミュレーションの活用

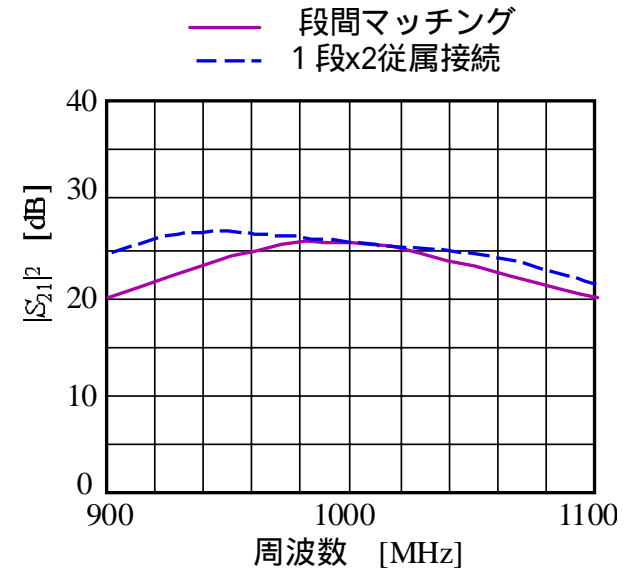
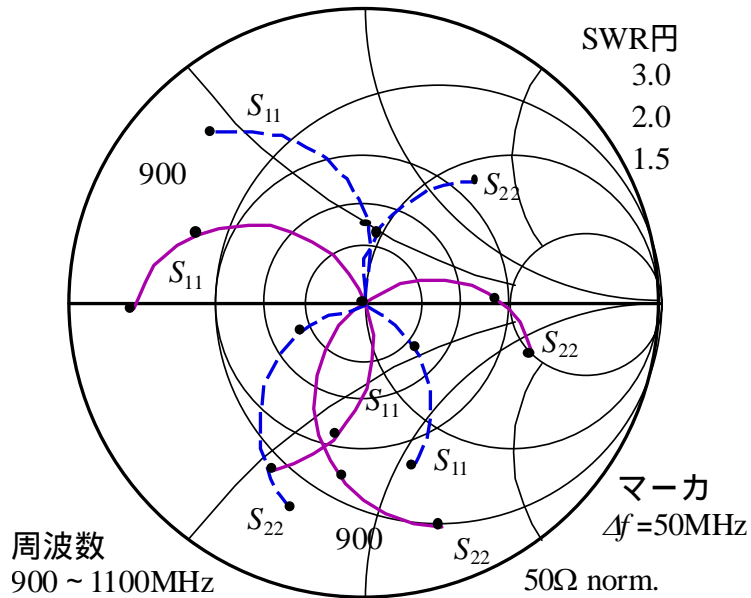
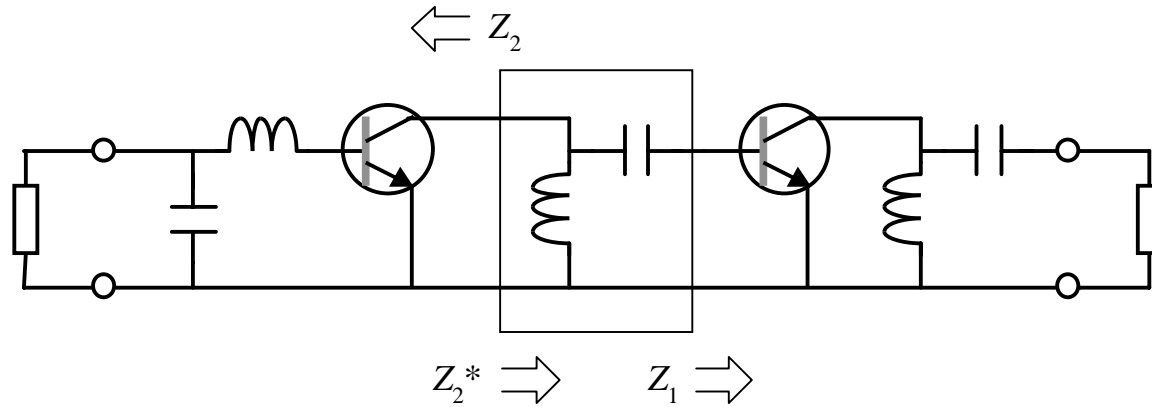




# アンプ回路設計実例ノウハウ

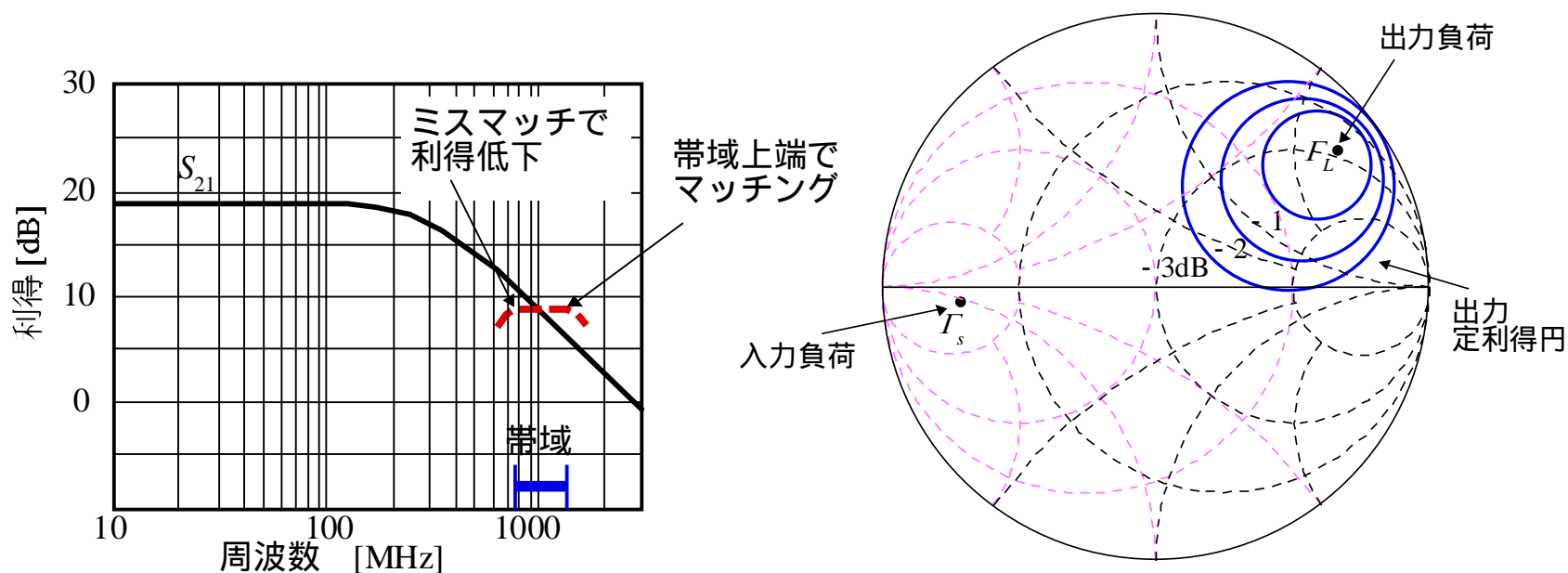
## 段間の整合

### 段間直接整合



# アンプ回路設計実例ノウハウ

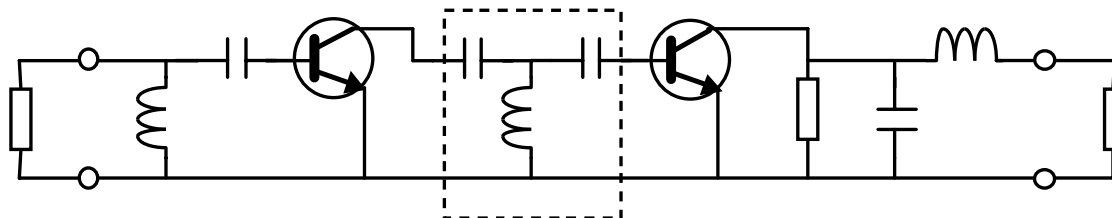
## 広帯域増幅回路の設計 ミスマッチングを利用



1段 - 入力整合, 出力回路ミスマッチング

シミュレーション設計がよい

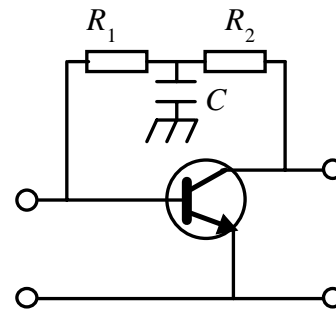
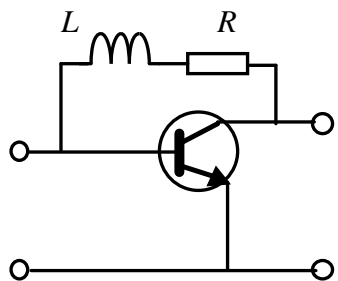
複数段 - 入力出力整合, 段間回路ミスマッチング



# アンプ回路設計実例ノウハウ

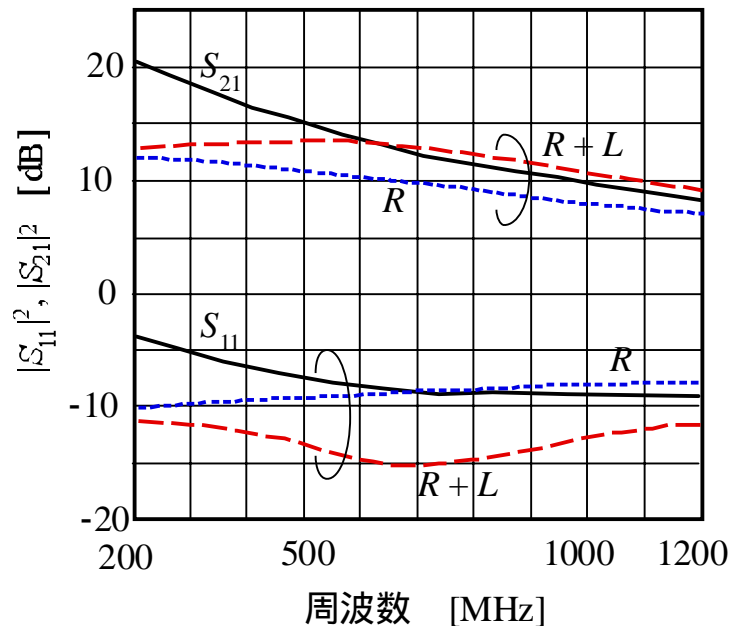
## 広帯域増幅回路の設計

## フィードバック回路



$R = 200$     $L = 40\text{nH}$

特性

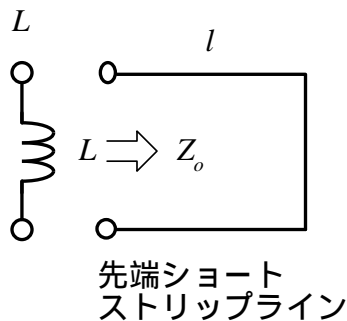


トランジスタ  
2SC3356

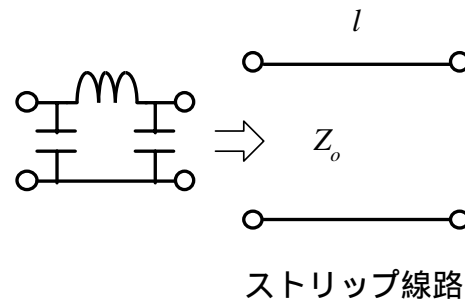
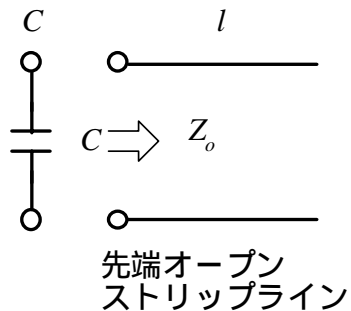
- TrのSパラメータ
- - - 負帰還回路 R
- . - 負帰還回路 R+L

# アンプ回路設計実例ノウハウ

## 分布定数回路によるマッチング

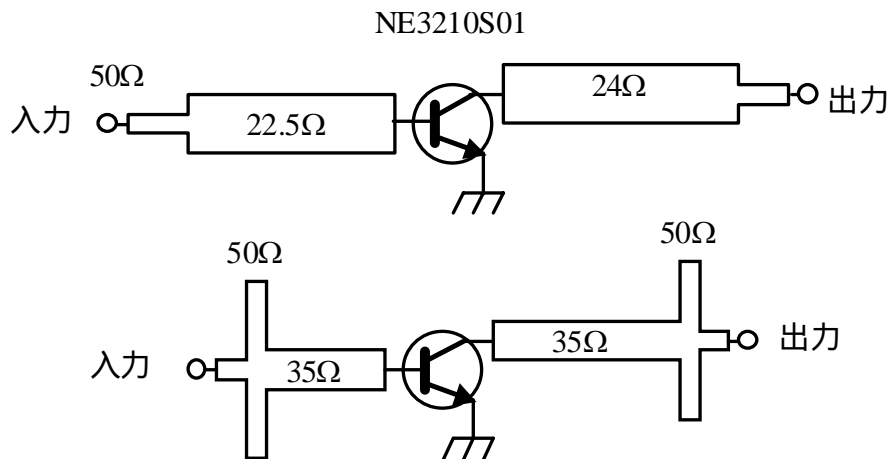


シャント素子



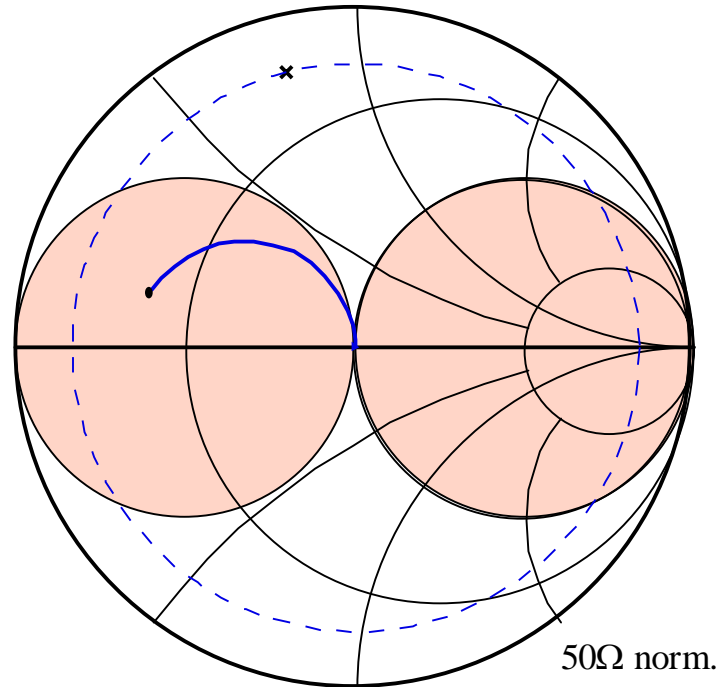
シリーズ素子

## 回路パターン



# アンプ回路設計実例ノウハウ

## シリーズ伝送線路によるマッチング



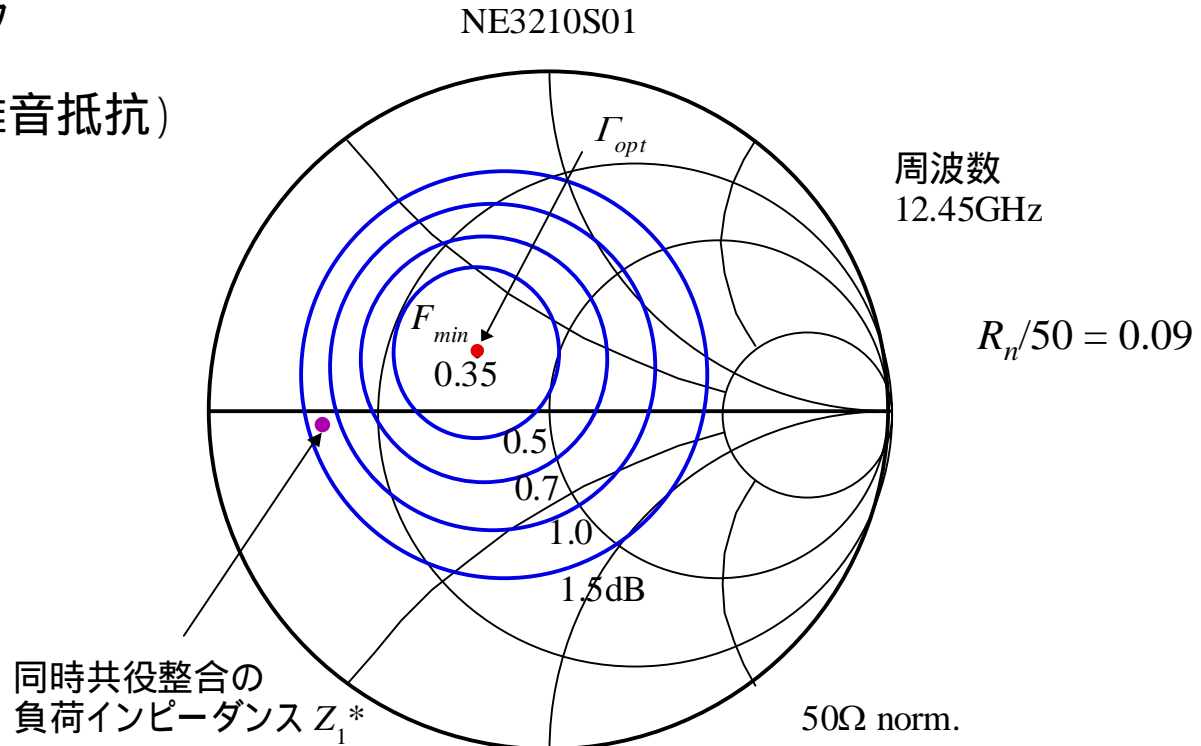
スミスチャート上のインピーダンス変化

# ノイズマッチ

## NF最良点となる入力負荷インピーダンス

メーカー提供のデータ

$\Gamma_{opt}$ ,  $F_{min}$ ,  $R_n/50$  (雑音抵抗)

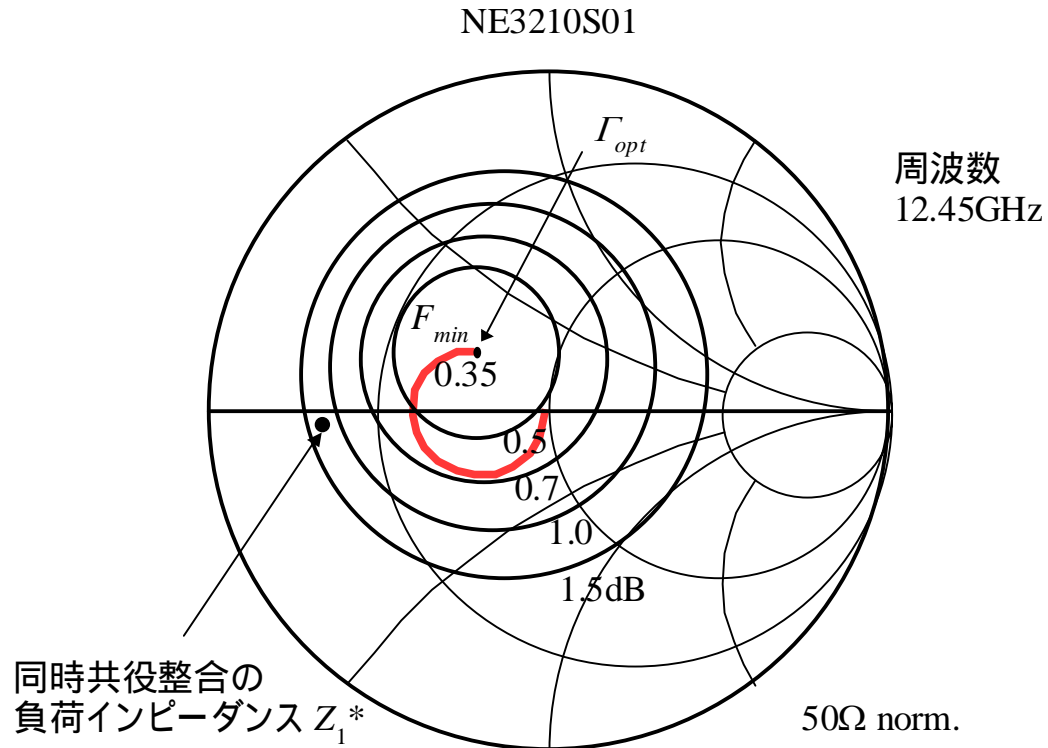


入力負荷インピーダンスをどこに合わせる？

出力負荷整合はシミュレーションで

# ノイズマッチ

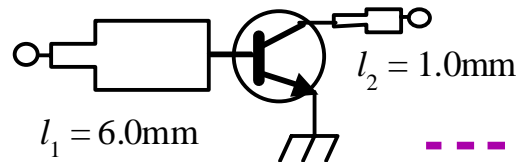
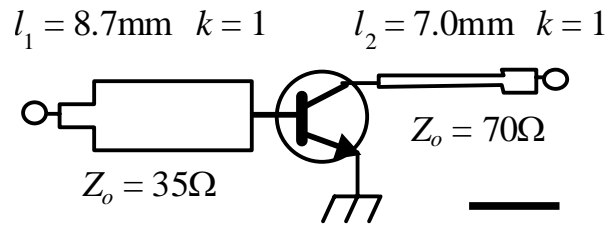
ノイズマッチを僅かにずらす



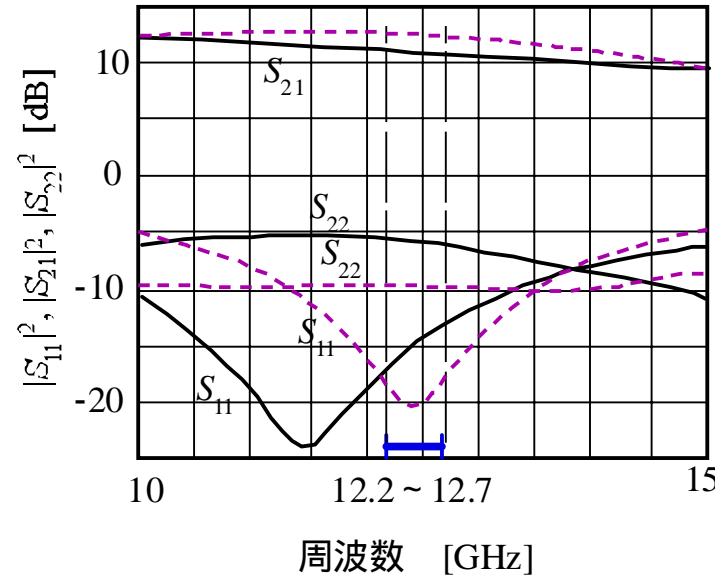
# ノイズマッチ

## NFと入力SWRの妥協設計

### ノイズマッチ



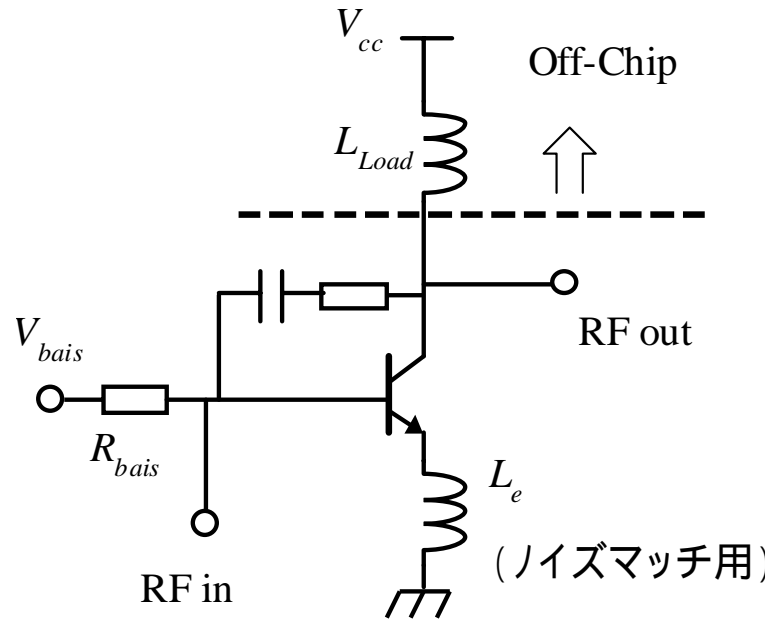
### 妥協設計





# ノイズマッチ

## RF-ICの例



(例)  $L_e = 0.15\text{nH}$ ,  $5.8\text{GHz}$ , SiGe  $0.35\mu\text{プロセス}$