

# 集積回路システム工学

## インピーダンス測定

群馬大学理工学研究院 電子情報部門  
客員教授 青木 均

# 講義の目的

- 能動・受動素子, ケーブル, 回路など多くの特性評価に重要な測定項目であるインピーダンスを学習する
- インピーダンスの測定原理を知る
- インピーダンス測定器の原理を知る
- 主な測定物に対する測定用治具, 測定法について学ぶ

# 学習の流れ

- 準備—電子計測の基本
- はじめに(インピーダンスとは)
- インピーダンスの基本
- インピーダンス測定器と測定原理
- 測定ケーブルの接続とテスト治具
- 測定誤差と誤差補正
- インピーダンス測定の実際

# 準備-電子計測の基本

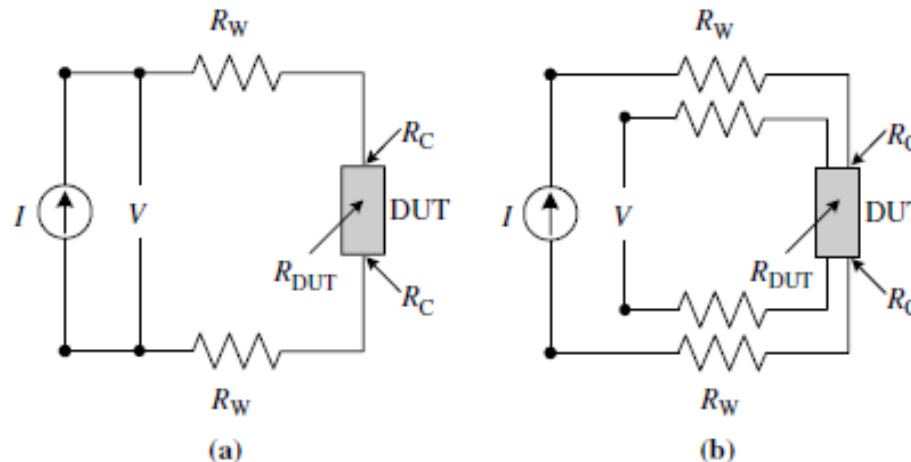
## 直流測定

2プローブ(端子)対4プローブ(端子)接続

$$R_T = V/I = \underbrace{2R_W + 2R_C}_{\text{誤差}} + R_{DUT}$$

誤差

2端子接続 Full Kelvin接続

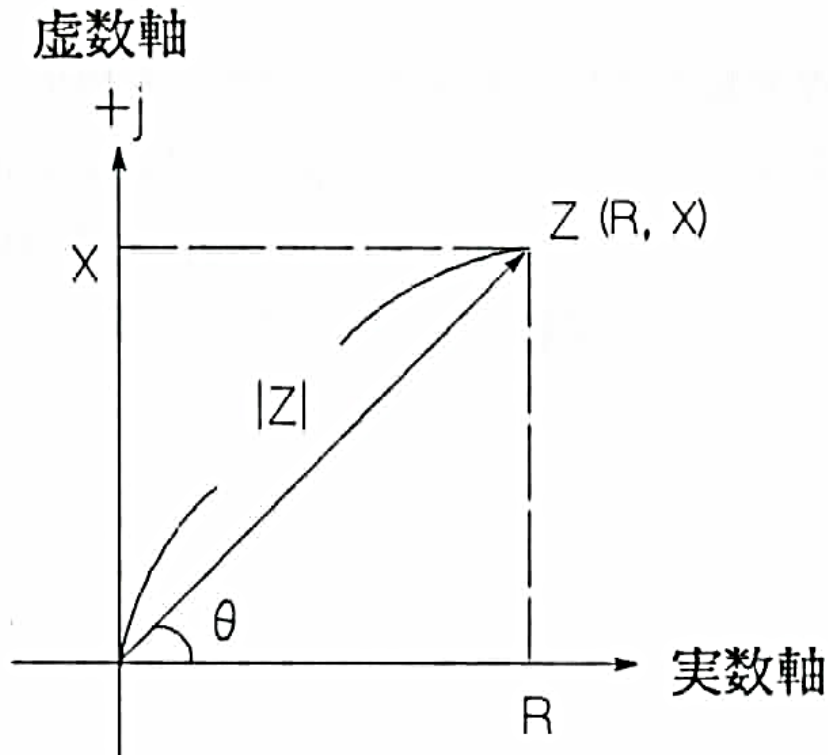


# はじめに(インピーダンスとは)

- 電子回路, 電子部品, 電子材料の特性評価に使用する重要なパラメータ
- インピーダンス( $Z$ )は, ある周波数における部品や回路に流れる交流電流を妨げる量で, 数学的には複素平面上のベクトル量

# インピーダンスの基礎

# 複素ベクトル平面



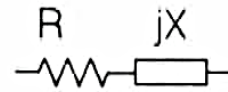
$$Z = R + jX = |Z| \angle \theta$$

$$\begin{cases} R = |Z| \cos \theta \\ X = |Z| \sin \theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \\ \theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \end{cases}$$

# L,C直列・並列等価回路表現

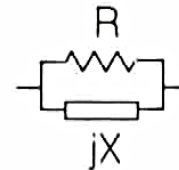
実数部と虚数部が直列の場合



$$Z = R + jX$$

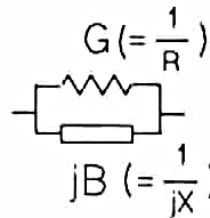
(インピーダンスだと扱いやすい)

実数部と虚数部が並列の場合



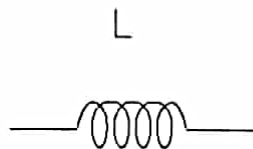
$$Z = \frac{jRX}{R + jX} = \frac{RX^2}{R^2 + X^2} + j \frac{R^2X}{R^2 + X^2}$$

(インピーダンスだと複雑になる)



$$Y = G + jB$$

(アドミタンスの方が扱いやすい)



インダクタ

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= \omega L$$

C

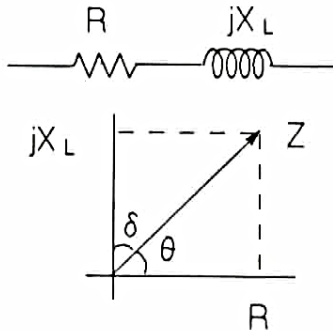


コンデンサ

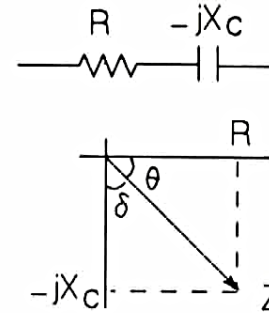
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$
$$= \frac{1}{\omega C}$$



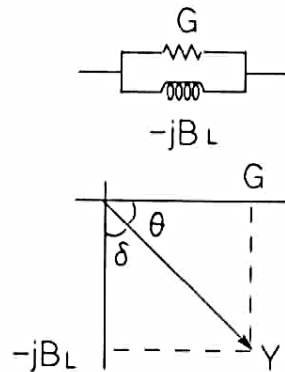
# インピーダンスとアドミタンス表現



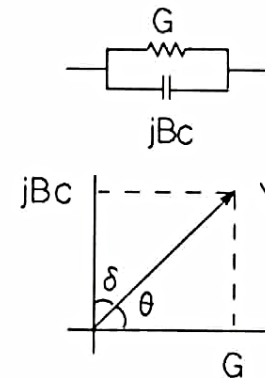
(a) インピーダンス平面上の誘導性ベクトル



(b) インピーダンス平面上の容量性ベクトル



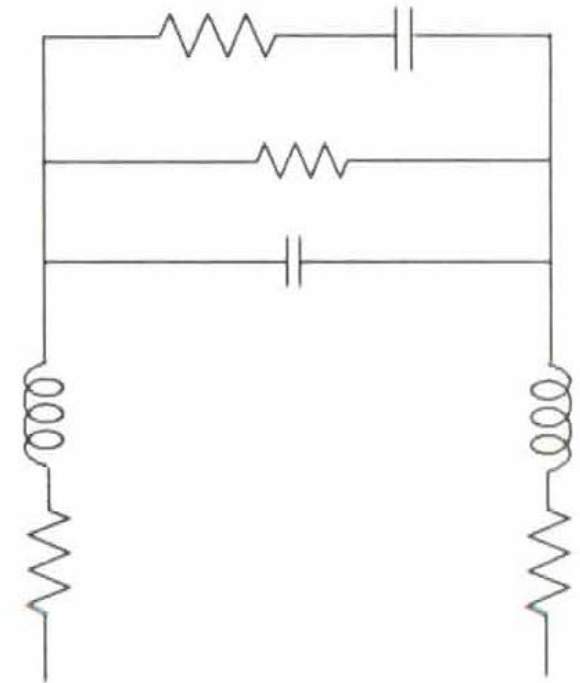
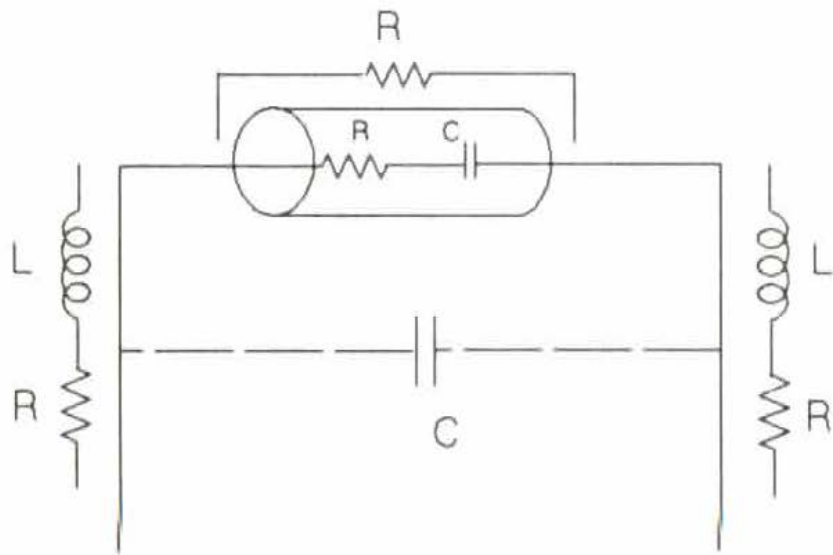
(c) アドミタンス平面上の誘導性ベクトル



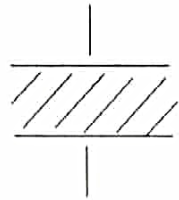
(d) アドミタンス平面上の容量性ベクトル

$$Q = \frac{1}{D} = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_L}{R} = \frac{-X_C}{R} = \frac{-B_L}{G} = \frac{B_C}{G}$$

# 寄生成分を含むコンデンサ等価回路

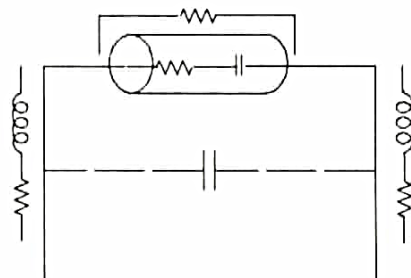


# コンデンサの理論値・実効値・表示値



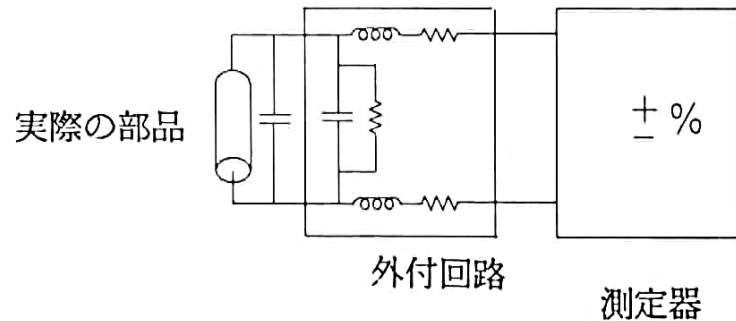
$$C = K \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

(a) 理論値



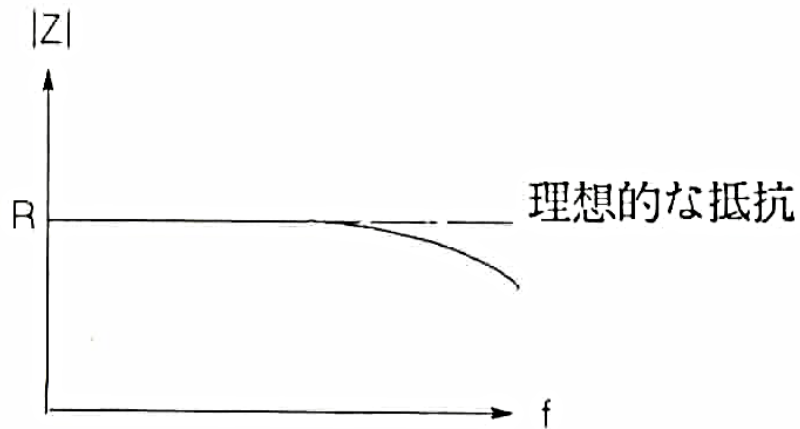
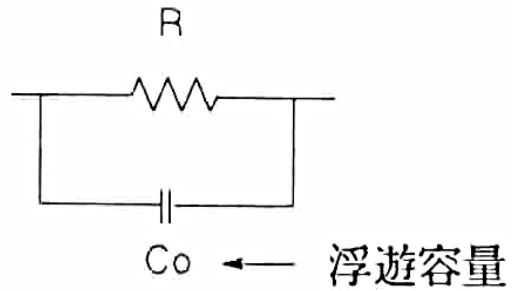
実際のコンデンサ

(b) 実効値

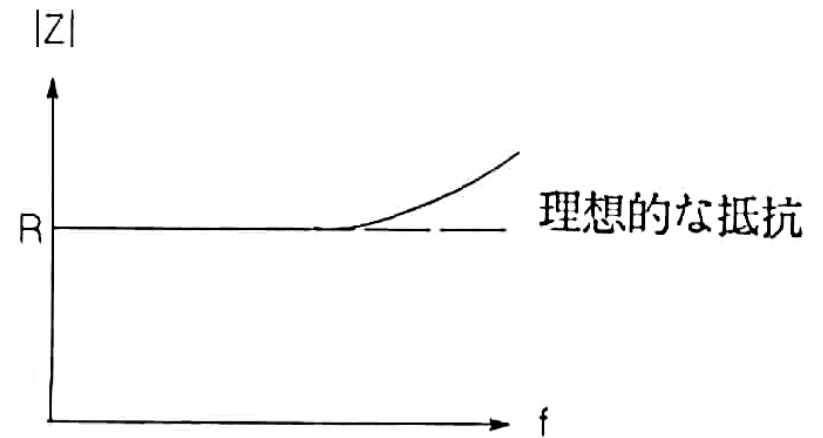
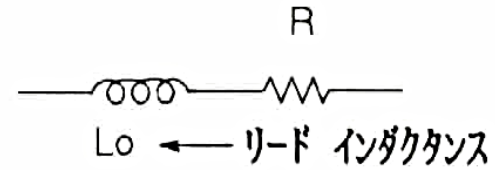


(c) 表示値

# 抵抗の周波数特性

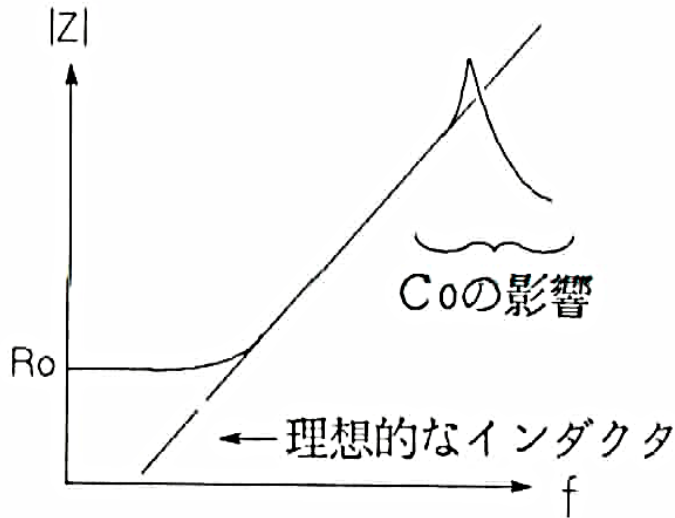
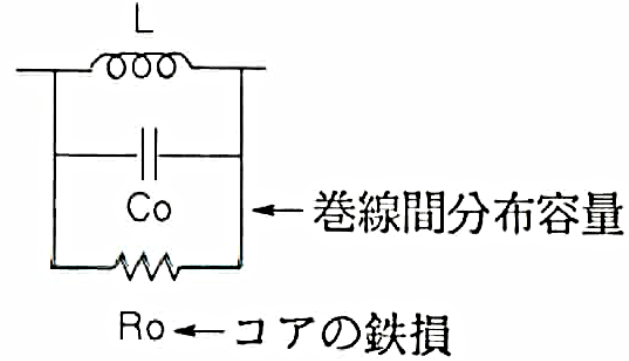
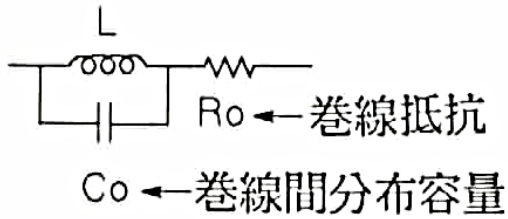


(a) 高抵抗

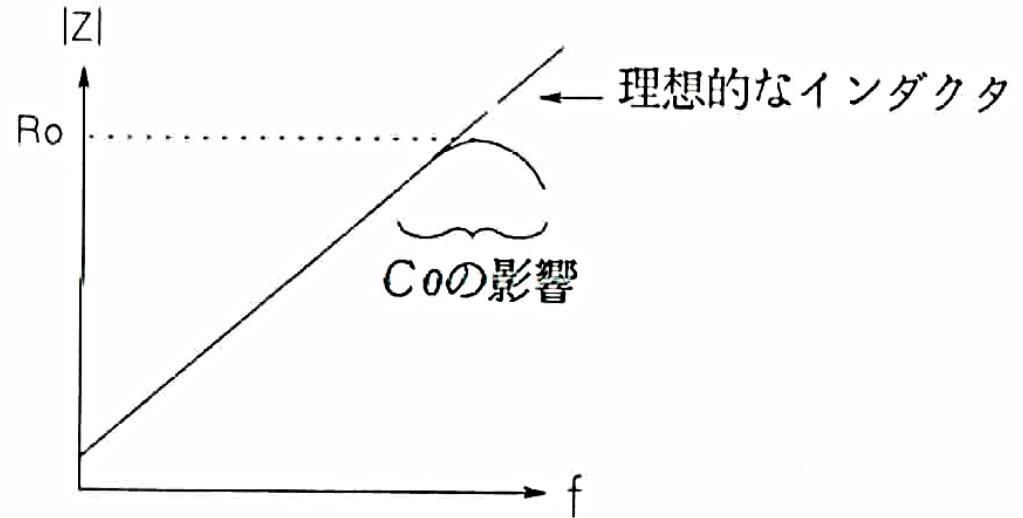


(b) 低抵抗

# インダクタの周波数特性

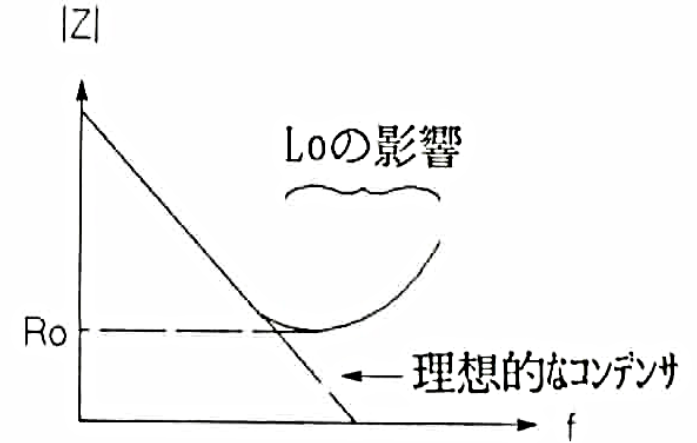
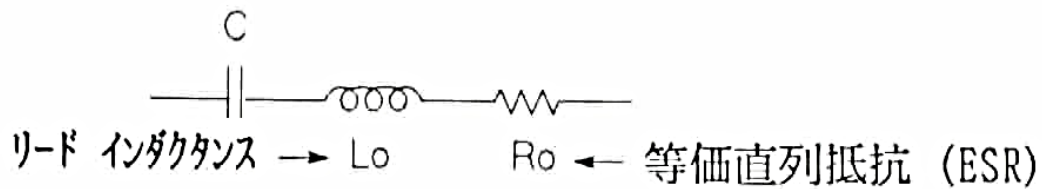


(a) 一般的なインダクタ

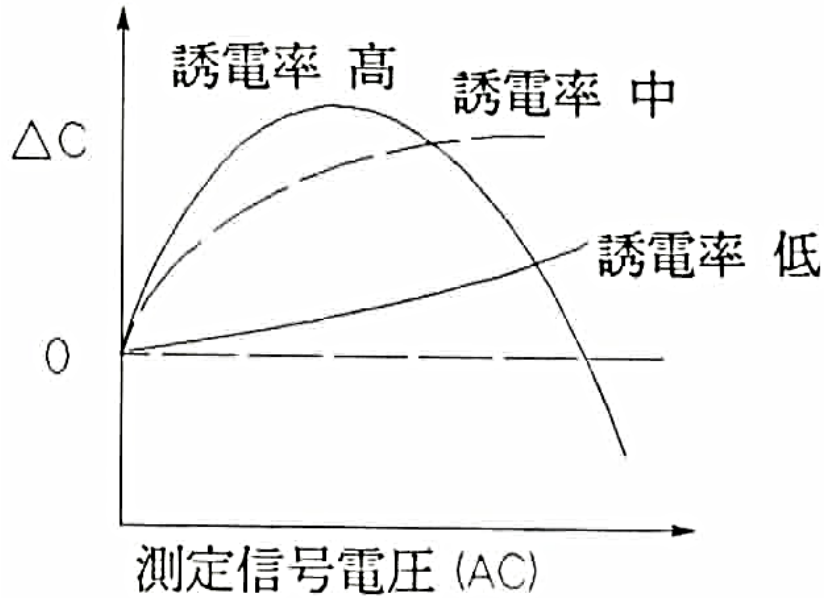


(b) 鉄損の大きいインダクタ

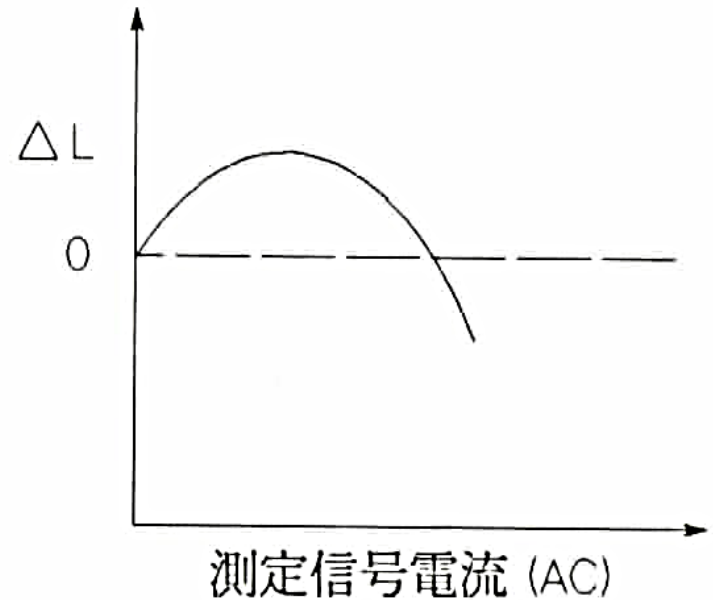
# コンデンサの周波数特性



# L, Cの測定信号レベル

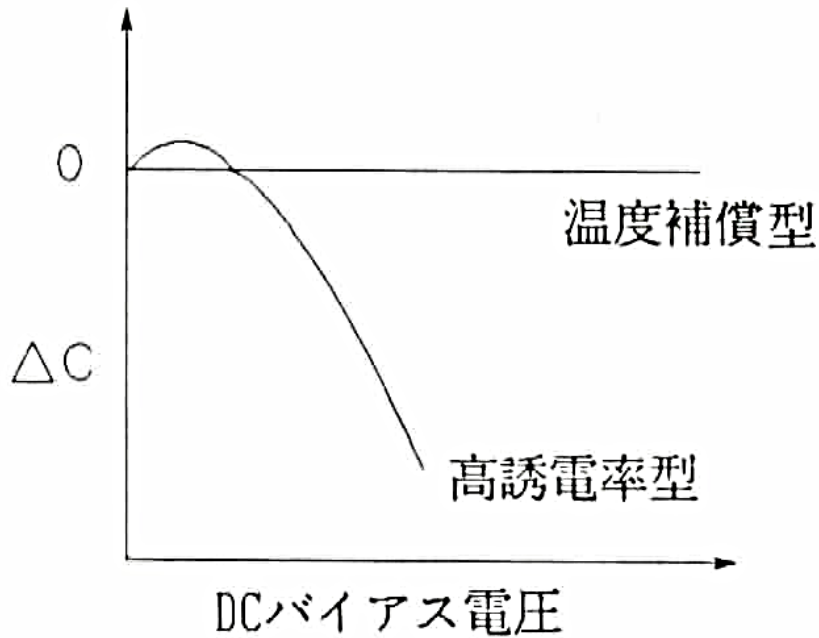


(a) セラミック・コンデンサの  
測定信号電圧依存性

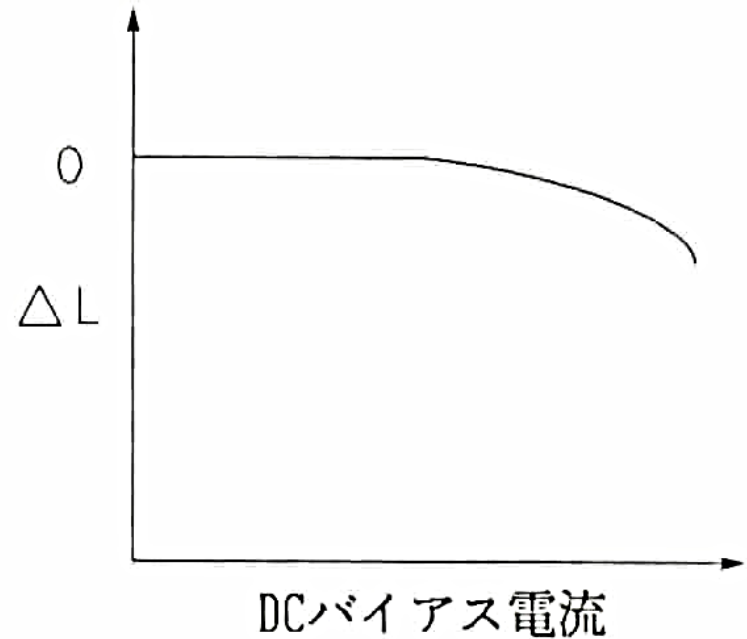


(b) コア入りインダクタの  
測定信号電流依存性

# L, CのDCバイアス依存性



(a) セラミック・コンデンサの  
DCバイアス電圧依存性



(b) コア入りインダクタの  
DCバイアス電流依存性

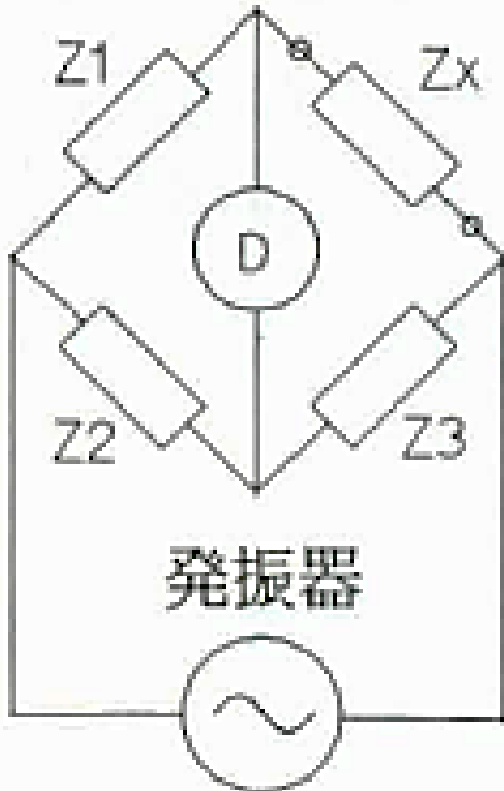


# インピーダンス測定器と測定原理

# インピーダンス測定方法

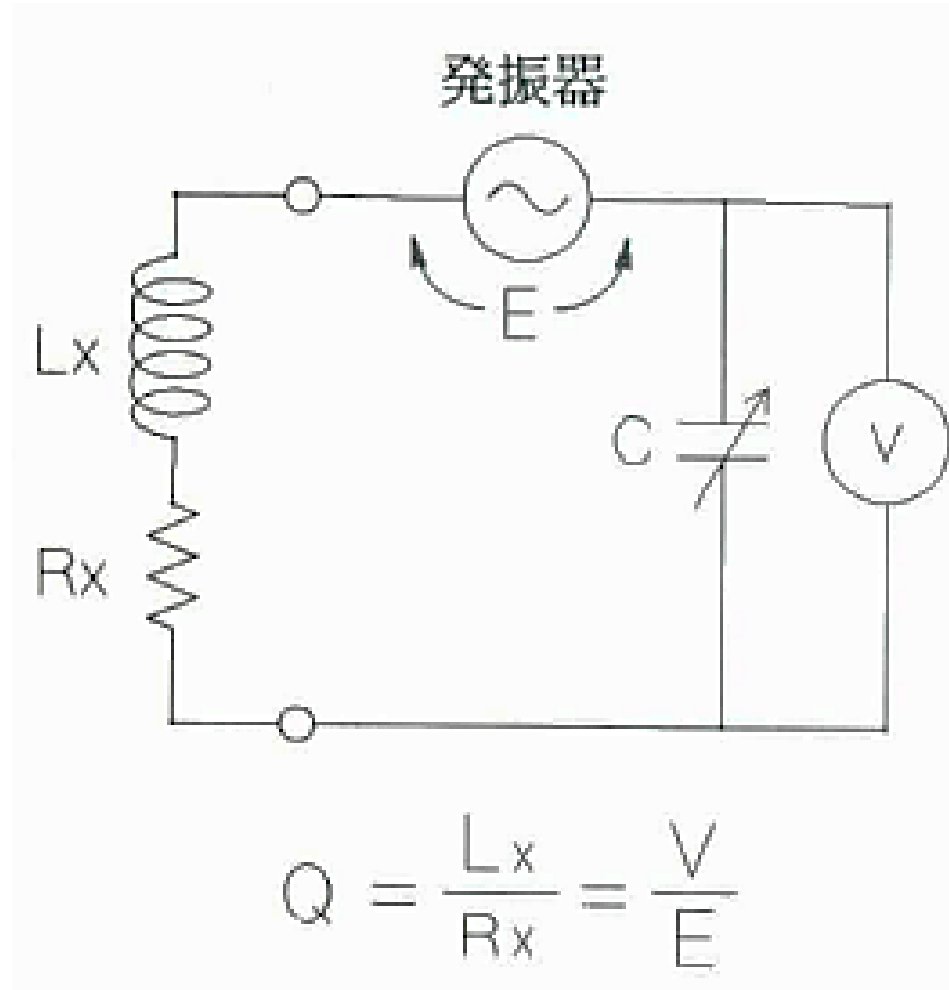
- ブリッジ法
- 共振法
- I-V法
- ネットワーク解析法
- 時間領域ネットワーク解析法
- 自動平衡ブリッジ法

# ブリッジ法

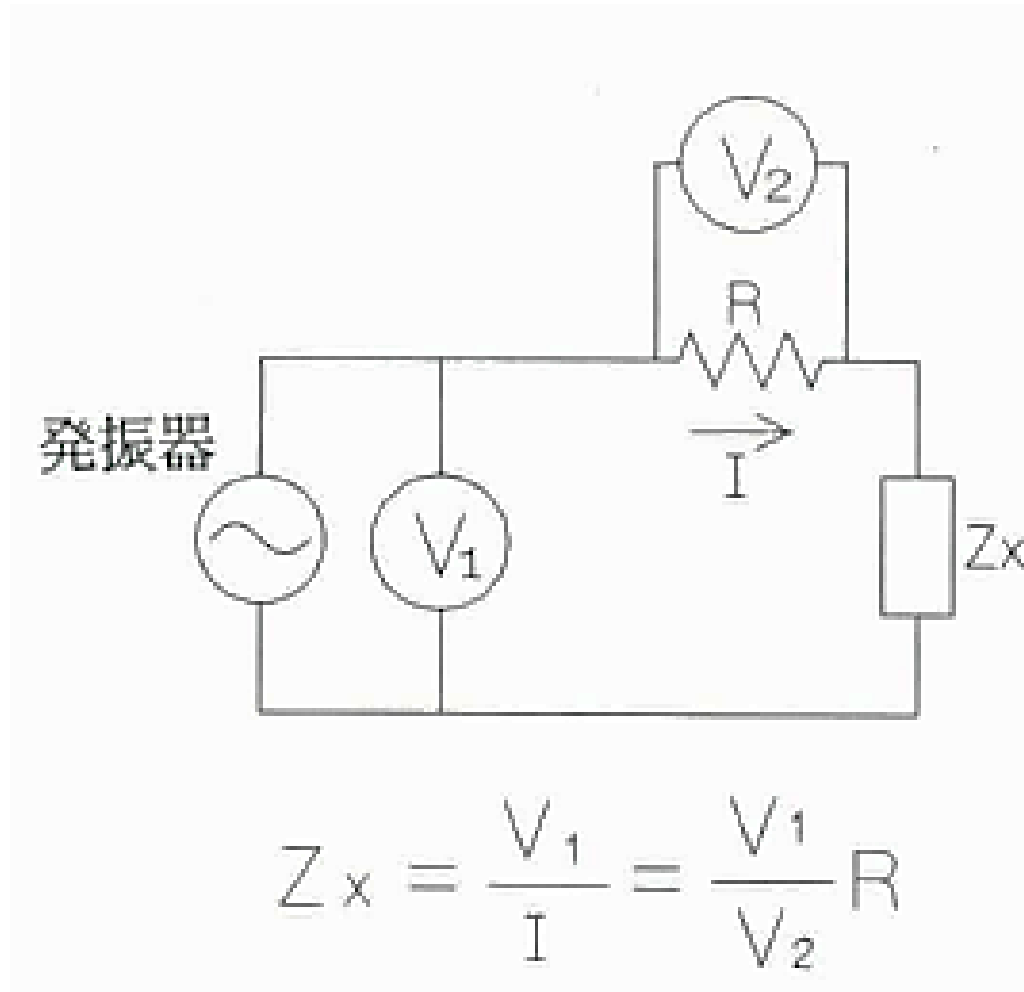


$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

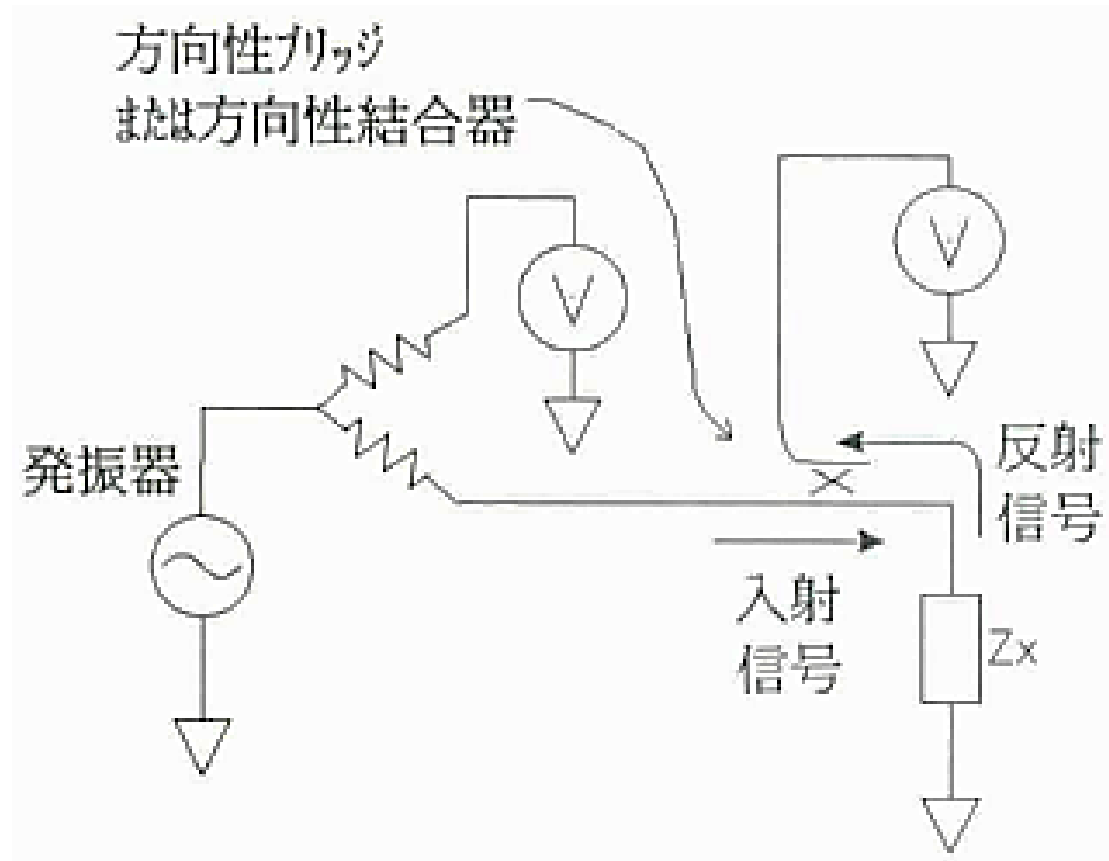
# 共振法



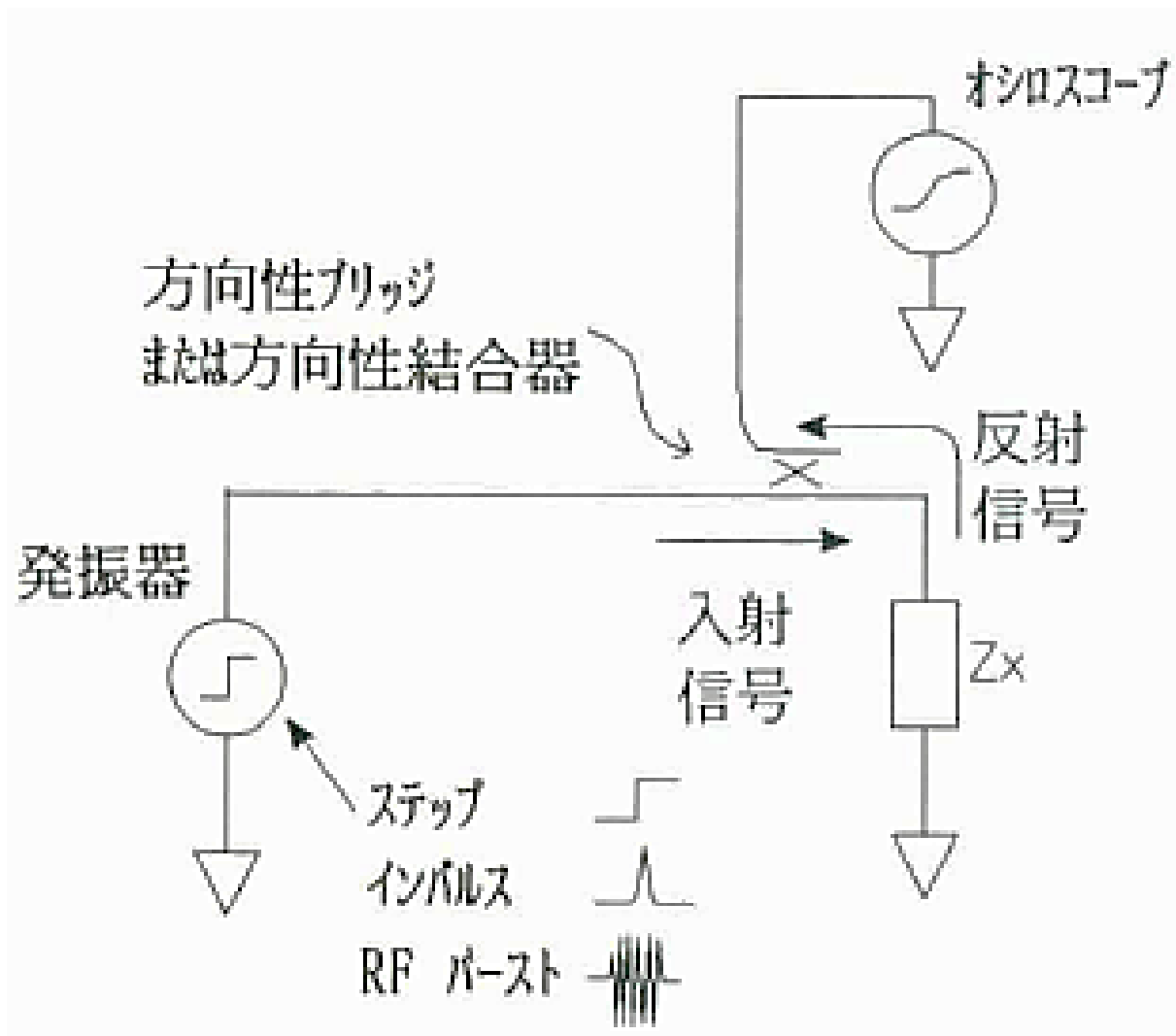
# I-V法



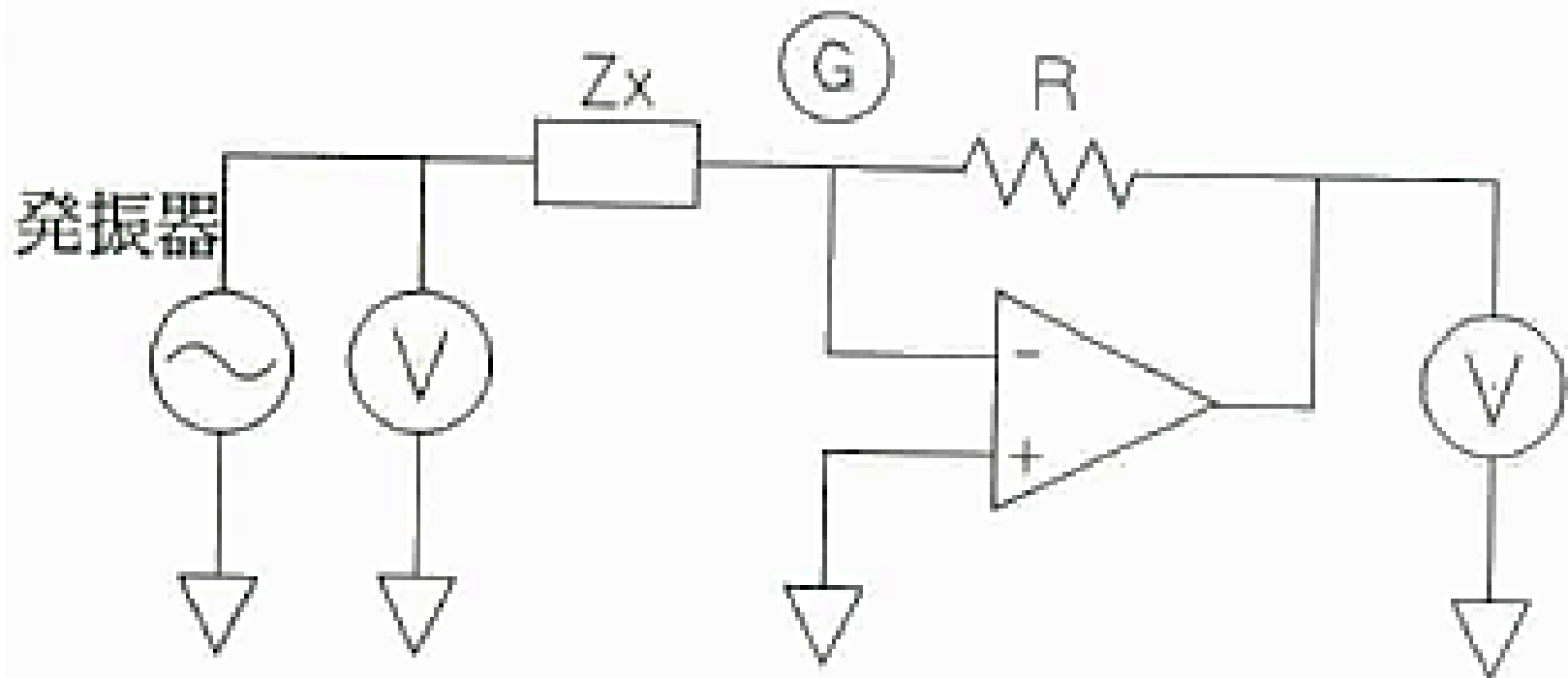
# ネットワーク解析法



# 時間領域ネットワーク解析法

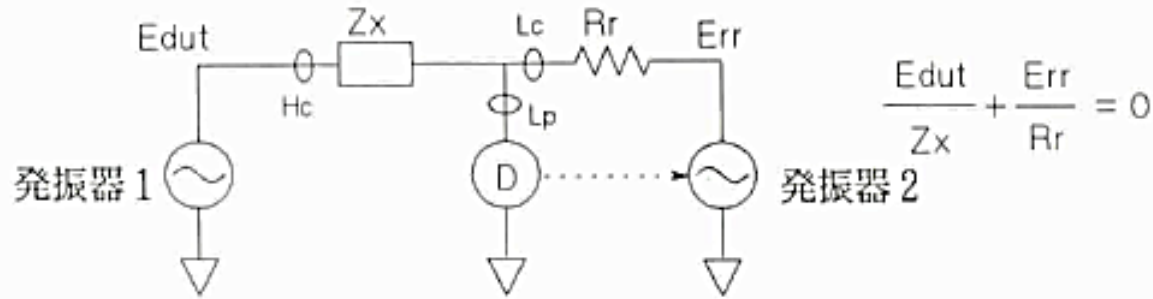


# 自動平衡ブリッジ法

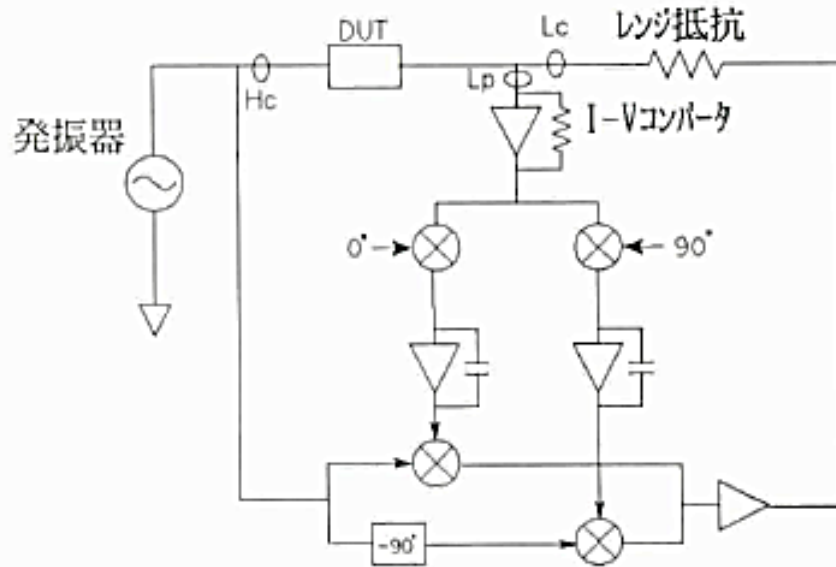




# 自動平衡ブリッジの原理



(a) 自動平衡ブリッジの動作理論

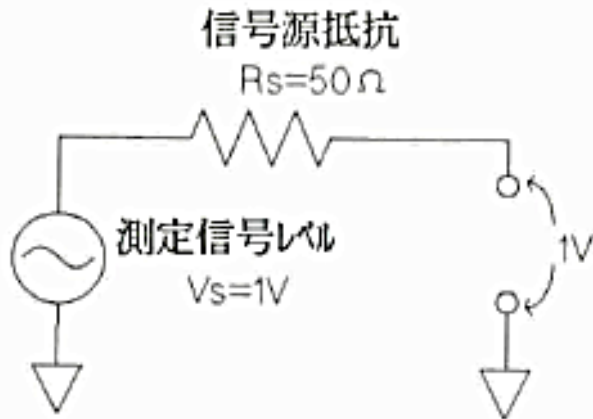


(b) ブロック図

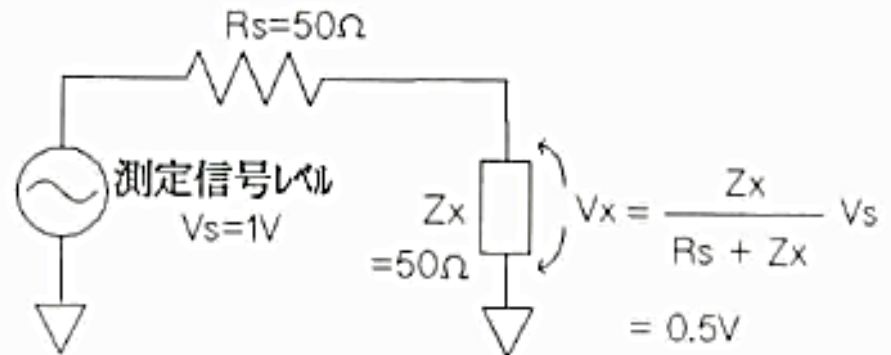
# インピーダンス測定法の長所・短所

測定法	長 所	短 所
ブリッジ法	高確度 (0.1%程度) 複数の測定器で広い 周波数をカバー	バランス操作が必要 1台では狭い周波数 範囲しかカバーでき ない
共振法	高Qでの測定確度良 好 (10%程度)	チューニング操作が必要 インピーダンス測定確度が 良くない
I-V法	片線が接地された試 料でも測定できる ケーブル測定に最適	測定周波数がケーブル内 のトランスによって制 限される
ネットワーク 解析法	高周波まで測定可能	周波数範囲を変える たびに校正が必要 インピーダンス測定範囲が 狭い
時間領域 ネットワーク 解析法	高周波まで測定可能 インピーダンス対距離の表 示ができる	インピーダンス測定確度が 良くない
自動平衡 ブリッジ法	1台で広い周波数を カバー 広いインピーダンス測定 範囲で測定確度が 良い	高周波までカバーでき ない

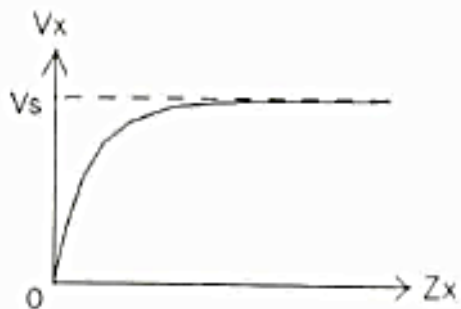
# 測定信号レベル



(a) UNKNOWN端子が開放状態のとき

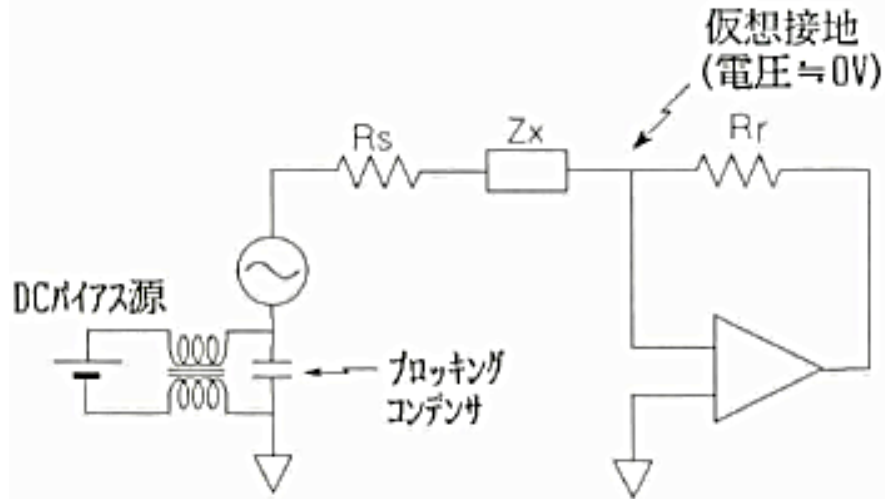


(b) UNKNOWN端子にDUTが接続されているとき

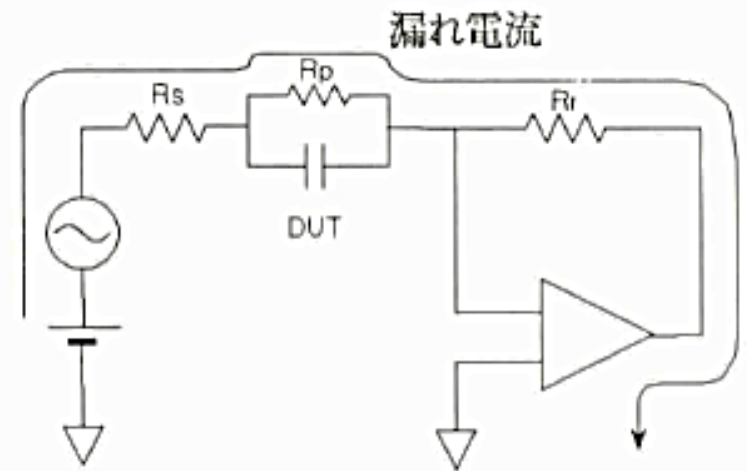


(c)  $Z_x$ と $V_x$ の関係

# DCバイアス

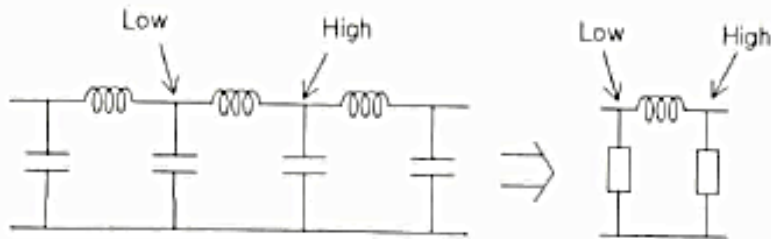


(a) DCバイアス印加回路の簡単なブロック図

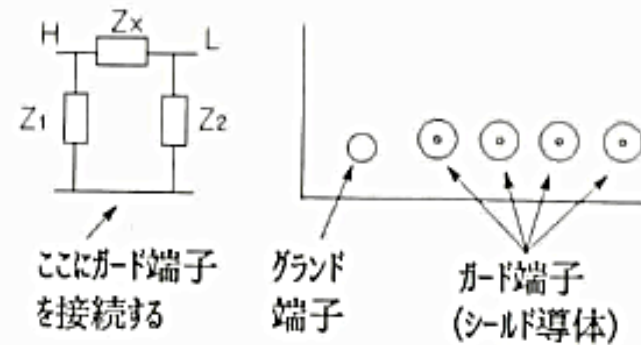


(b) DUTのDC抵抗 ( $R_p$ ) が低いと、設定したDCバイアス電圧がDUTに印加されない。

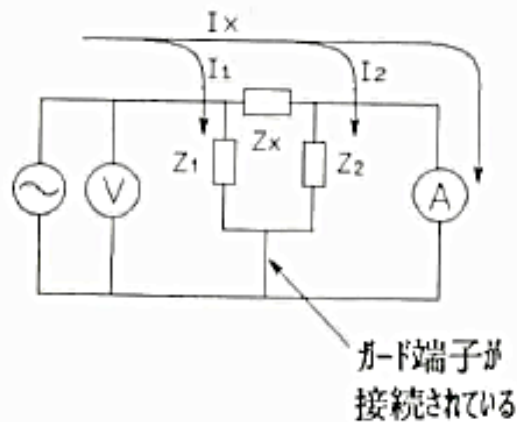
# ガード機能(端子)について



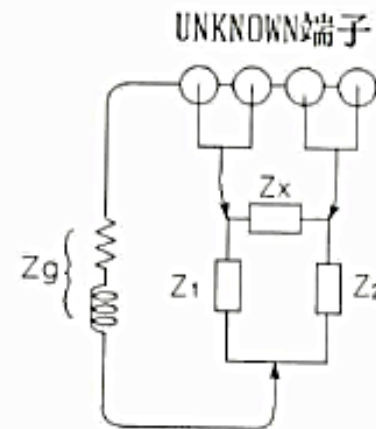
(a) 回路中の部品の測定例



(b) ガード端子の接続方法



(c) 測定電流の流れ

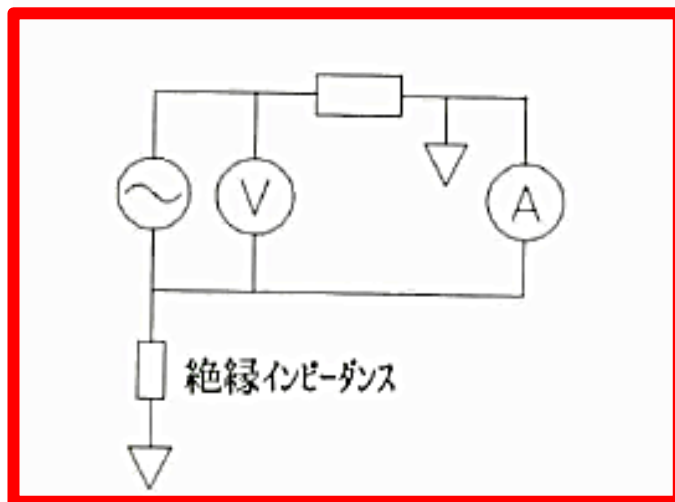
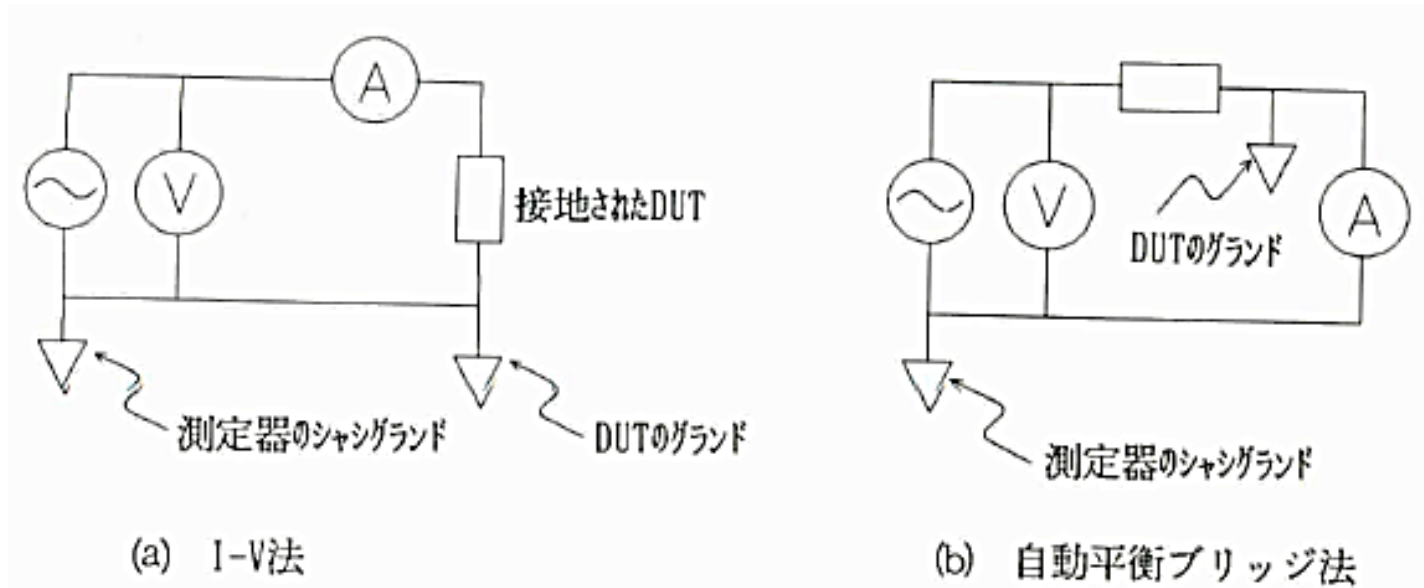


(d) ガード効果を弱める  
ガードインピーダンス $Z_g$

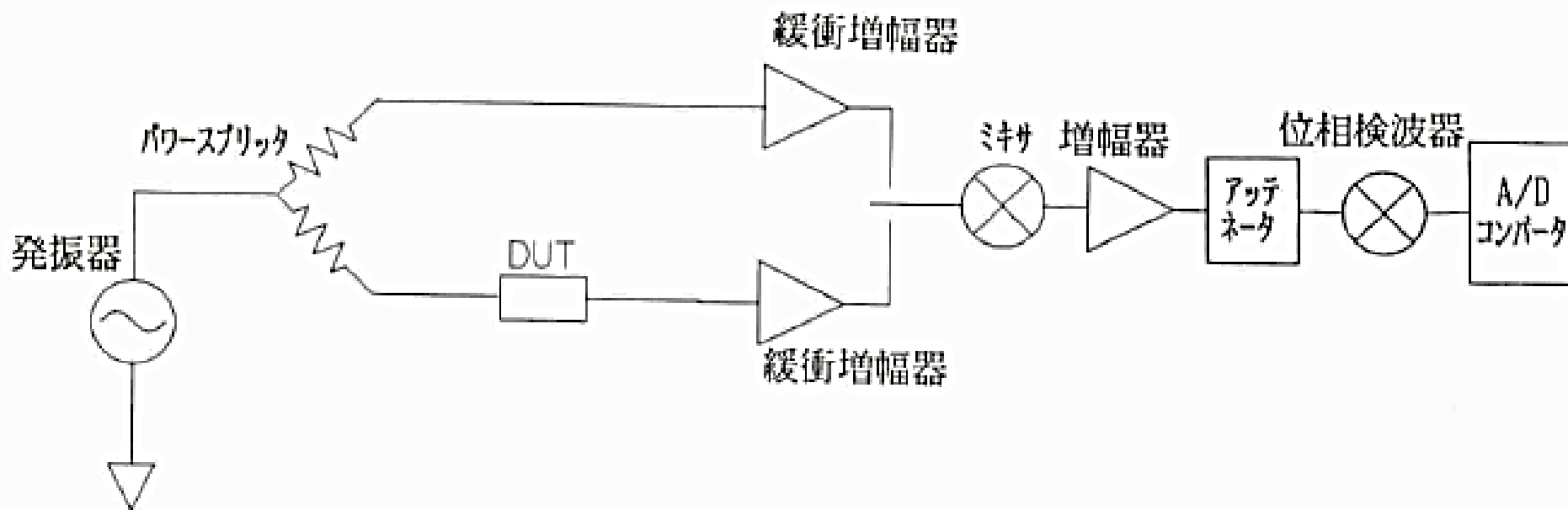
# 片線接地測定

- 通常インピーダンス測定は、フローティングによる平衡測定である
- 増幅器などの回路測定では、片線接地測定が必要となる
- 可能な測定法としては、I-V法かネットワーク解析法に限られる

# 片線接地されたDUTのI-V測定法



# 片線接地されたDUTのネットワーク解析法



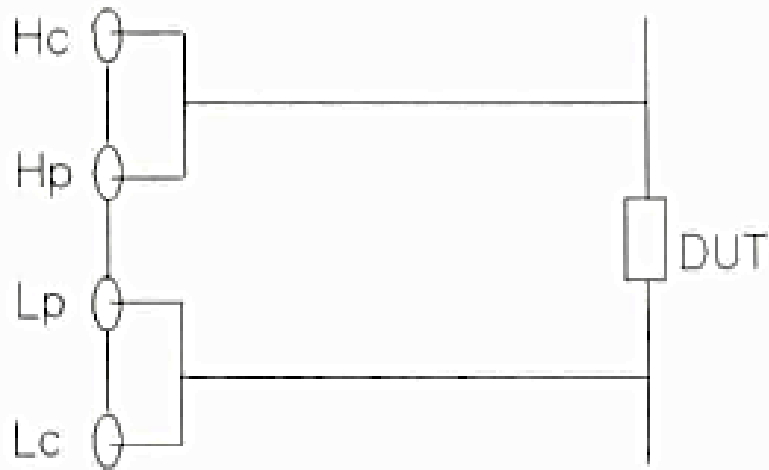


# 測定ケーブルの接続方法

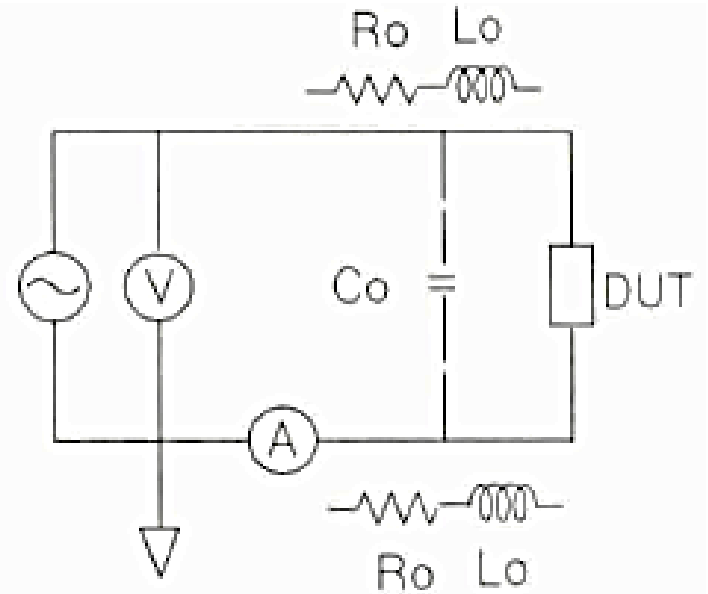
# インピーダンス測定接続の種類

- 2端子法
- 3端子法(シールドド2端子法)
- 4端子法(ケルビン接続)
- 5端子法(シールドド4端子法)
- 4端子対(4TP)法

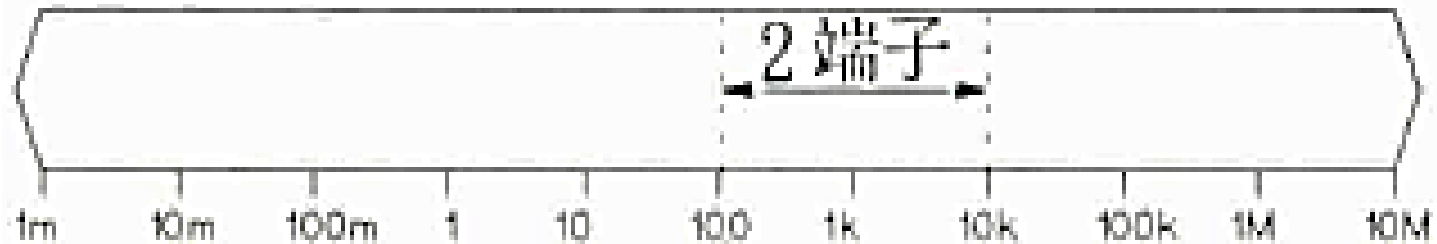
# 2端子法



(a) 2端子法の接続方法



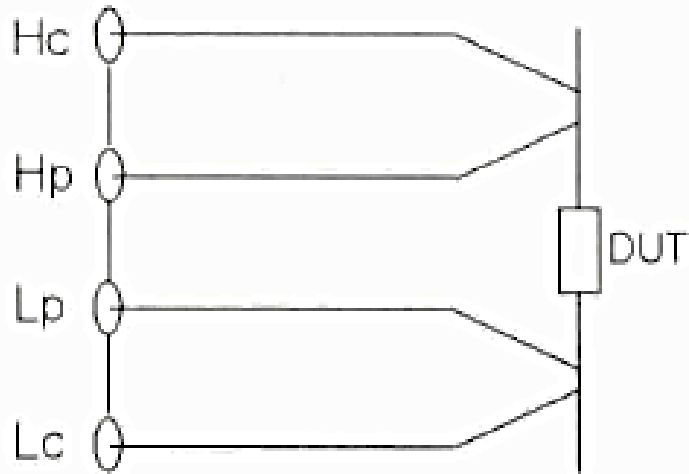
(b) 概要図



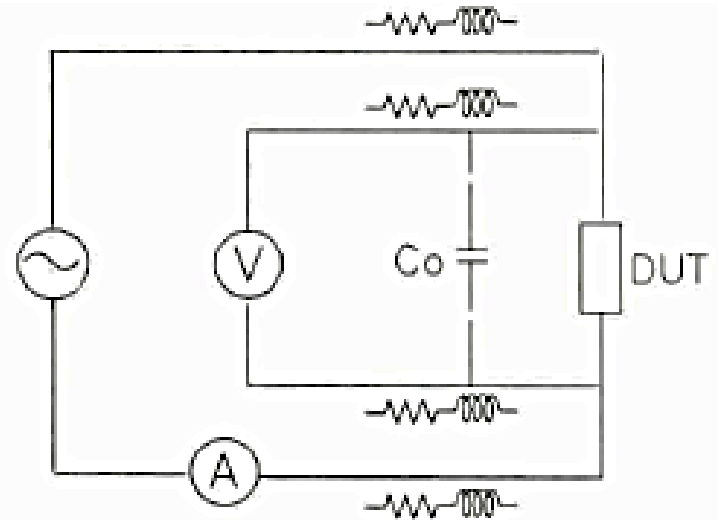
測定範囲



# 4端子法(ケルビン接続)



(a) 4端子法の接続方法

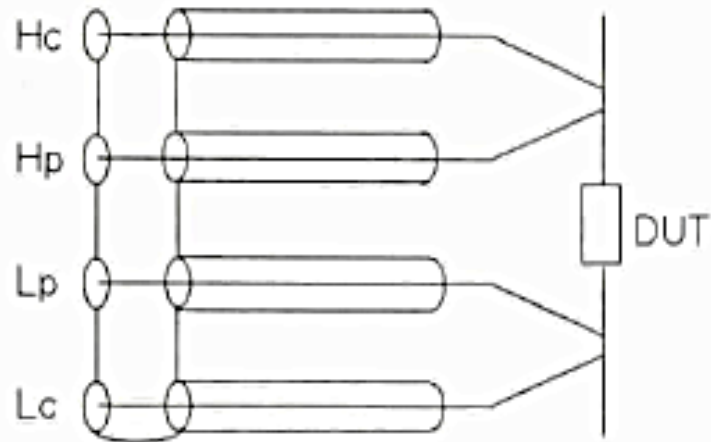


(b) 概要図

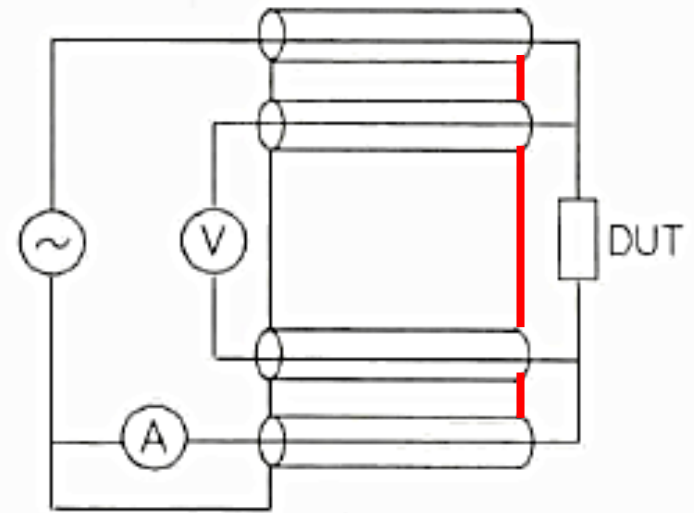


測定範囲

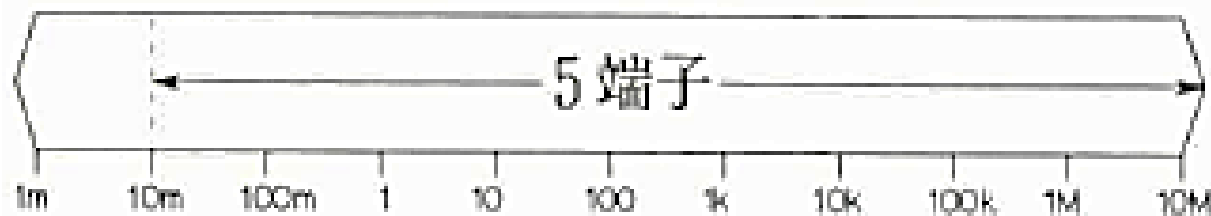
# 5端子法(シールドド4端子法)



(a) 5端子法の接続方法

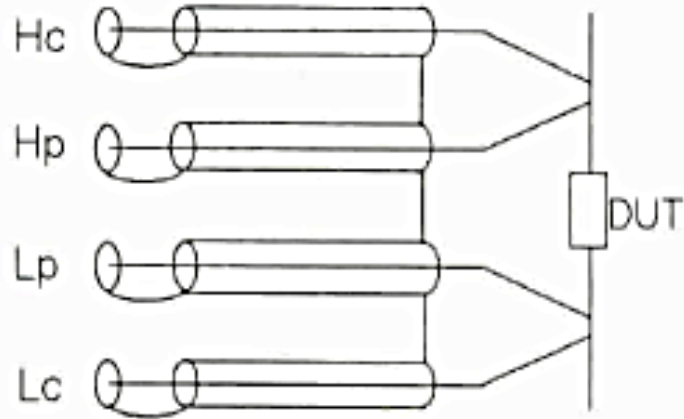


(b) 概要図

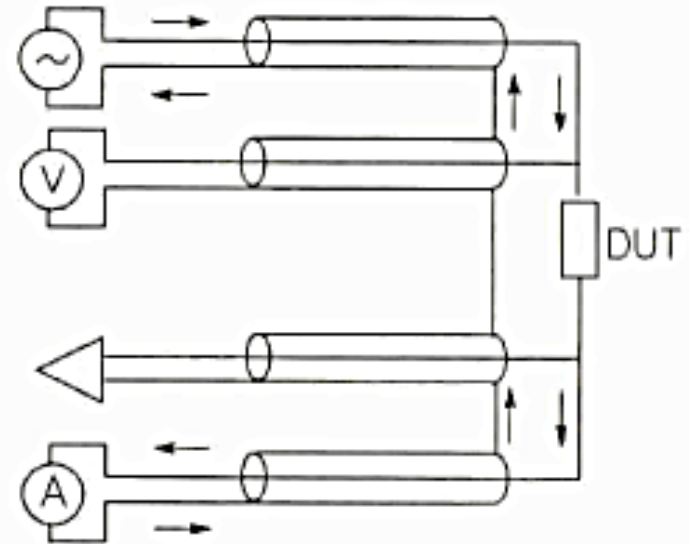


測定範囲

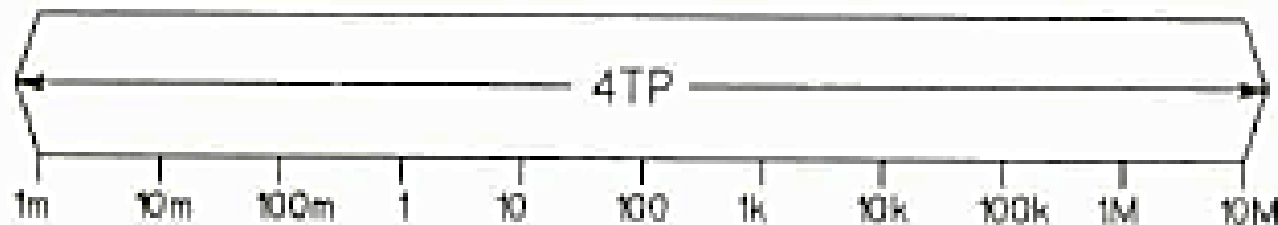
# 4端子対(4TP)法



(a) 4端子対法の接続方法

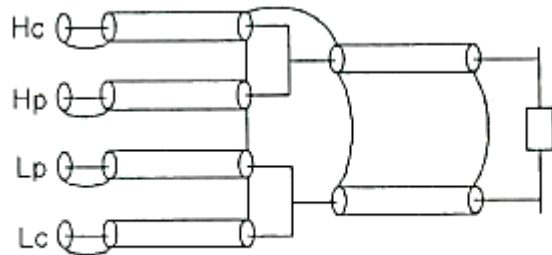


(b) 概要図

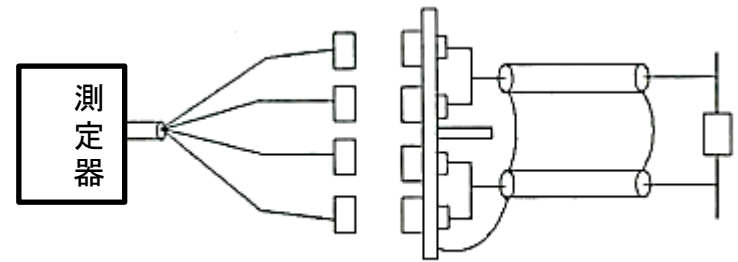


測定範囲

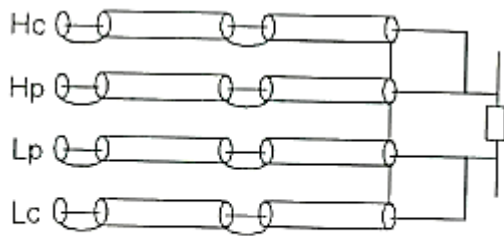
# 実際の結線方法



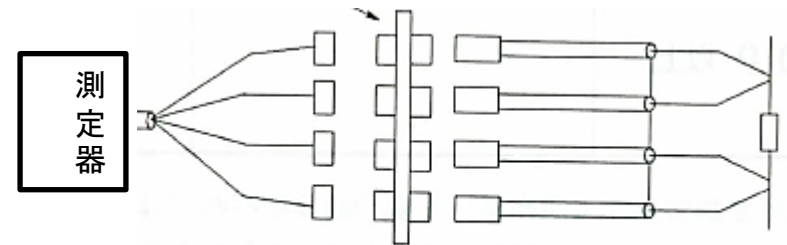
(a) シールドド 2 端子延長ケーブル接続方法



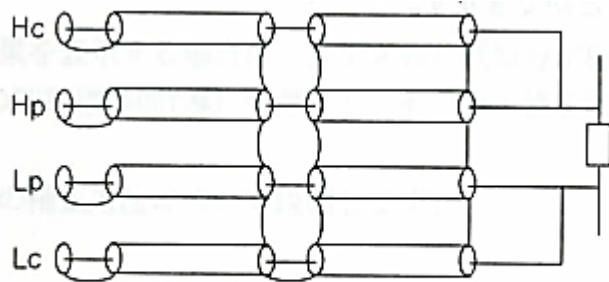
(b) シールドド 2 端子での延長例



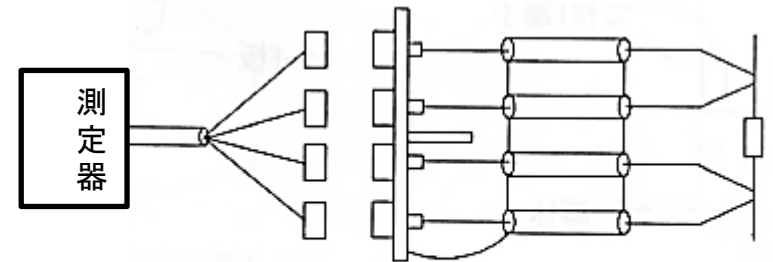
(a) 4 端子対延長ケーブル接続方法



(b) 4 端子対での延長例



(a) シールドド 4 端子延長ケーブル接続方法



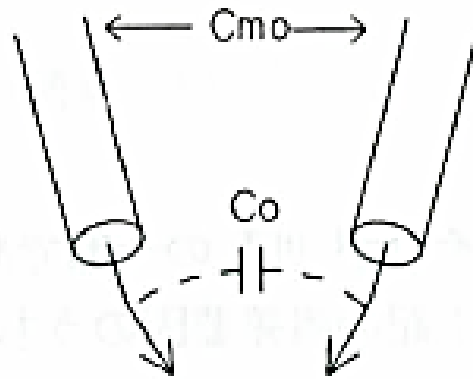
(b) シールドド 4 端子での延長例



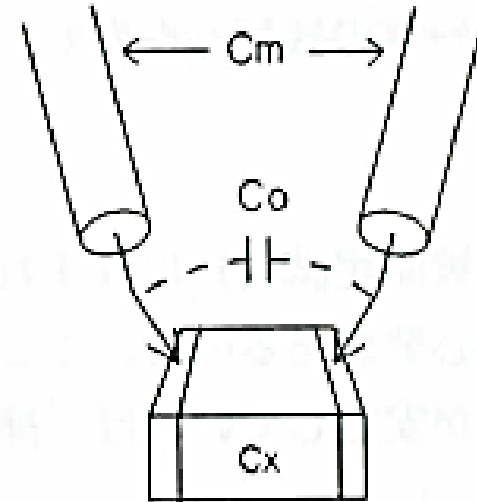
# 測定系の校正方法について

- オフセット補正
  - 残留インピーダンスのただ一つの成分にのみ有効
- OPEN/SHORT補正
  - 短絡・開放により単純等価回路にできるとき有効
  - ほとんどのインピーダンス測定器で使用
- OPEN/SHORT/LOAD補正
  - 複雑な残留成分が存在
  - 未知の4端子対ケーブルで延長されているとき

# オフセット補正



$$C_o = C_{mo}$$

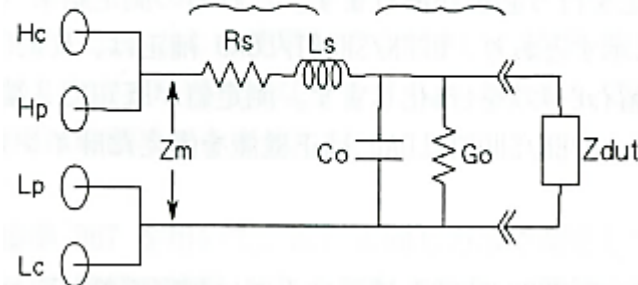


$$\therefore C_x = C_m - C_{mo}$$

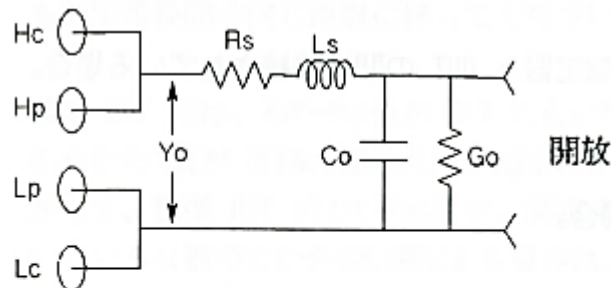
# OPEN/SHORT補正

テストフィクスチャの残留分

残留インピーダンス( $Z_s$ ) 浮遊アドミタンス( $Y_o$ )



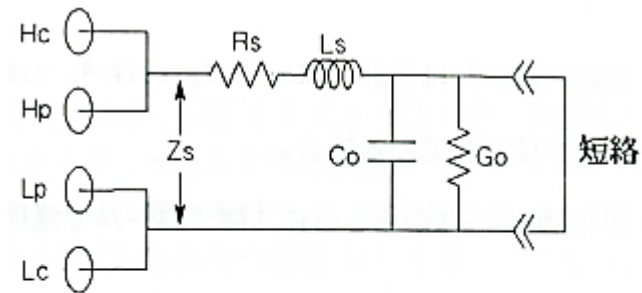
(a) テストフィクスチャの残留分



$$Y_o = G_o + j\omega C_o$$

$$(R_s + j\omega L_s \ll \frac{1}{G_o + j\omega C_o})$$

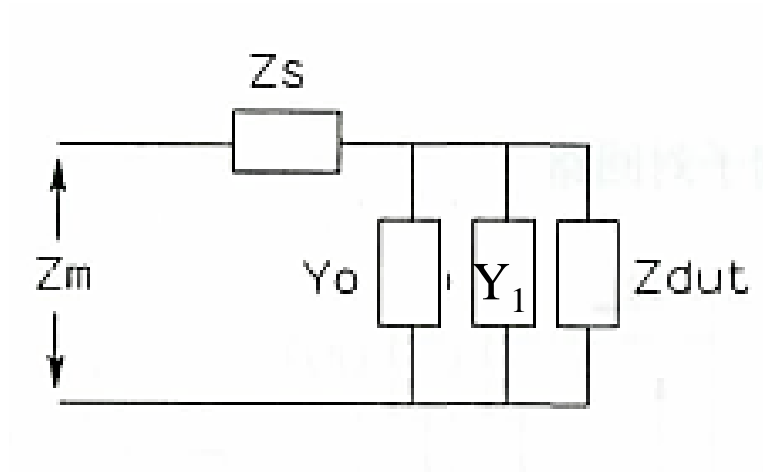
(b) OPEN補正データ測定



$$Z_s = R_s + j\omega L_s$$

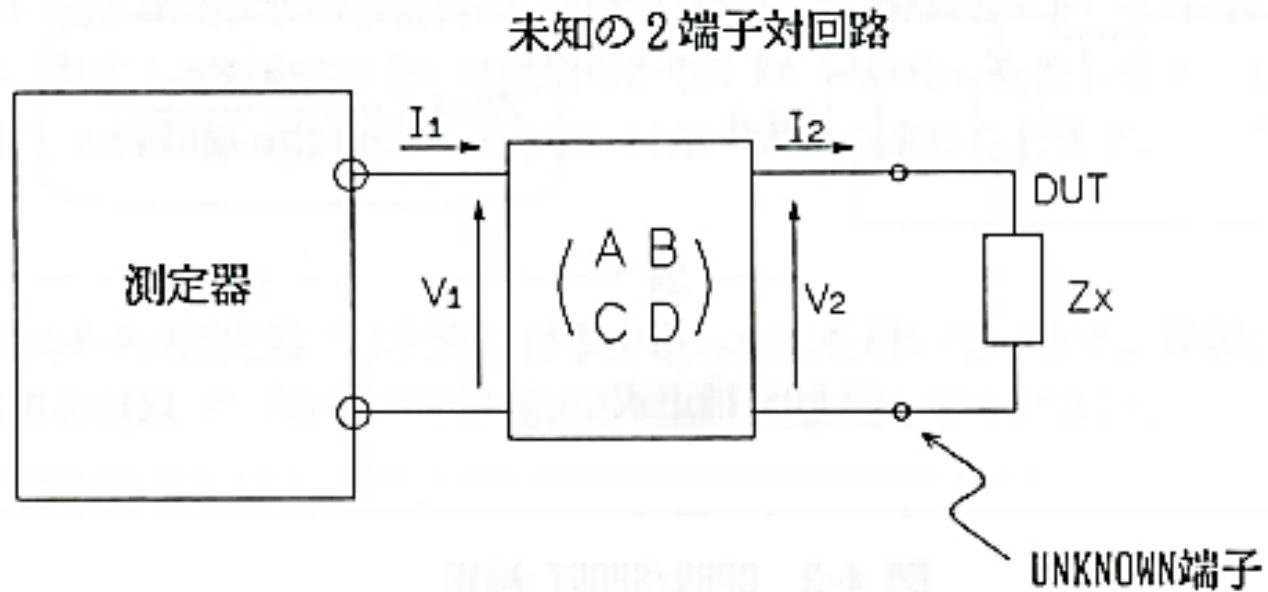
(c) SHORT補正データ測定

# 補正式は？



$$Z_{dut} = ?$$

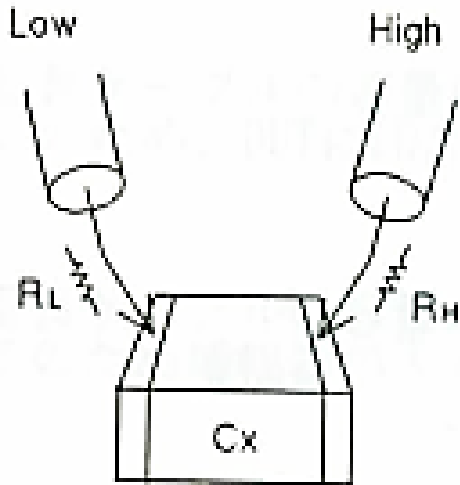
# OPEN/SHORT/LOAD補正



ネットワークアナライザの校正で使用される,  
エラーマトリックスで考察する

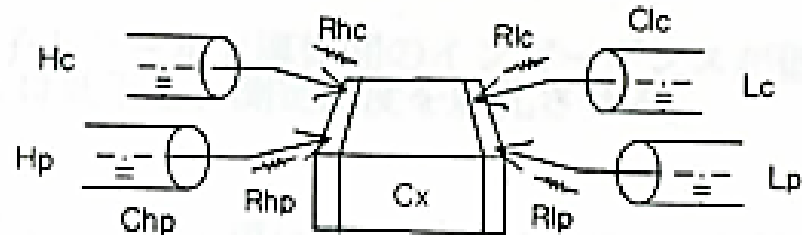
# 接触抵抗による測定誤差

- DUTのリード線や測定プローブのコンタクト端子に接触抵抗が存在
- 2端子法, 4端子法などの測定接続法によって影響が異なる



$$D_{\text{error}} = \omega C_x (R_L + R_H)$$

【2端子法】



RhpとChpによる誤差

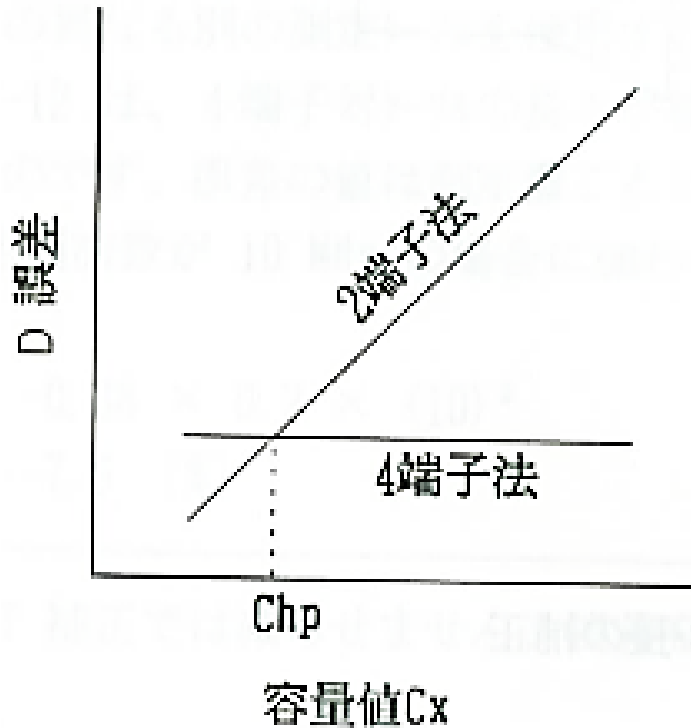
$$\begin{aligned} \text{振幅誤差} & \quad \frac{1}{\sqrt{1 + \omega C_{hp}^2 R_{hp}^2}} - 1 \\ \text{位相誤差} & \quad \omega C_{hp} R_{hp} \text{ (rad)} \end{aligned}$$

RlpとClpによる誤差

$$D_{\text{誤差}} = -\omega (C_{hp} R_{hp} + C_{lp} R_{lp})$$

【4端子法】

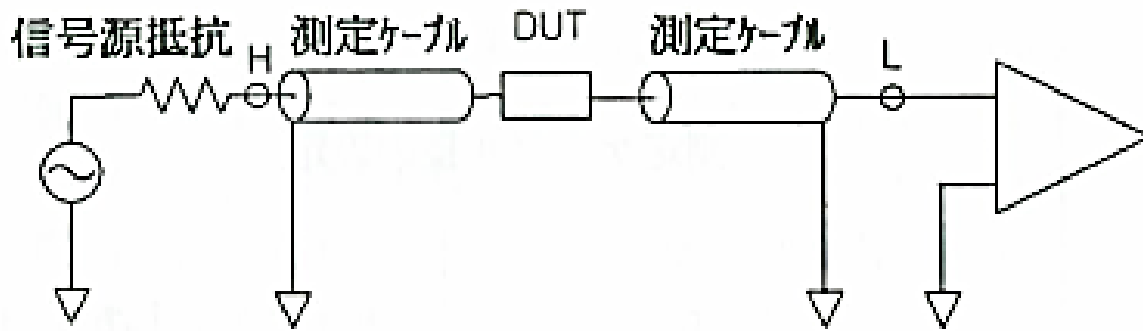
# 2端子法, 4端子法の接触抵抗誤差



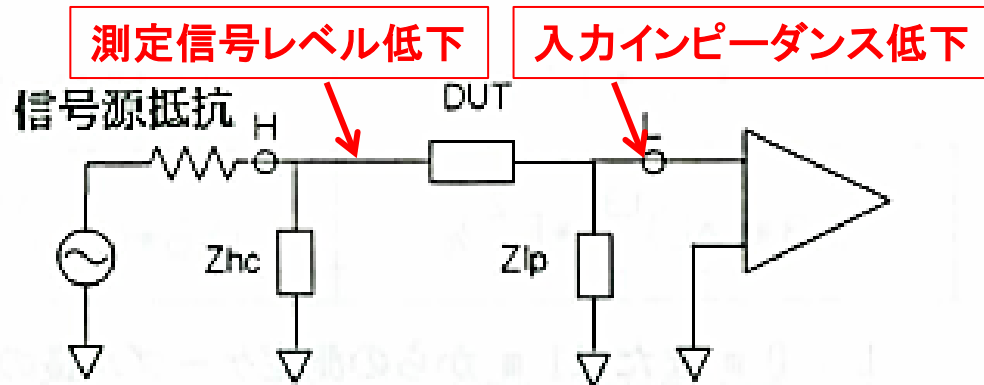
仮に $R_H=R_L=R_{hp}=R_{lc}$ で $C_{hp}=C_{lp}$ である時,  
 $C_x=C_{hp}$ の時に2端子法と4端子法での  
誤差が等しくなる.

つまり, 2端子法はDUTの容量が  
測定ケーブルの容量( $C_{hp}$ または $C_{lc}$ )より  
小さいときに適している.

# ケーブル長による測定誤差



(a) 延長ケーブルを接続した時の測定回路の概要図



$Z_{hc}$ ,  $Z_{lp}$ の容量によって、シールド間のインピーダンスが低下して、測定確度が低くなる



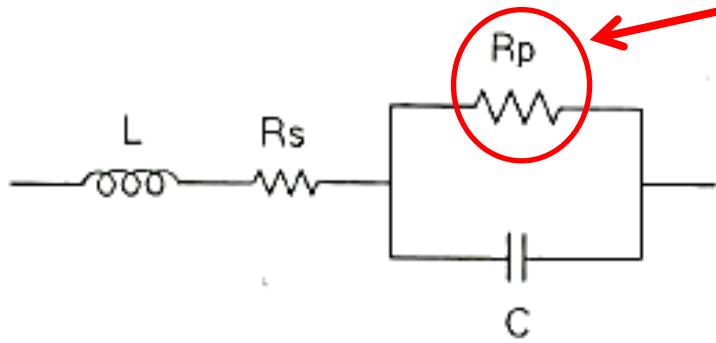
# インピーダンス測定の実際

# 測定物(DUT)の例

- 測定物(DUT)の例
- コンデンサの測定
- インダクタの測定
- 抵抗測定
- ダイオードの測定
- MOSFETの測定
- シリコンウエハー容量測定
- 増幅器の測定
- ケーブルの測定

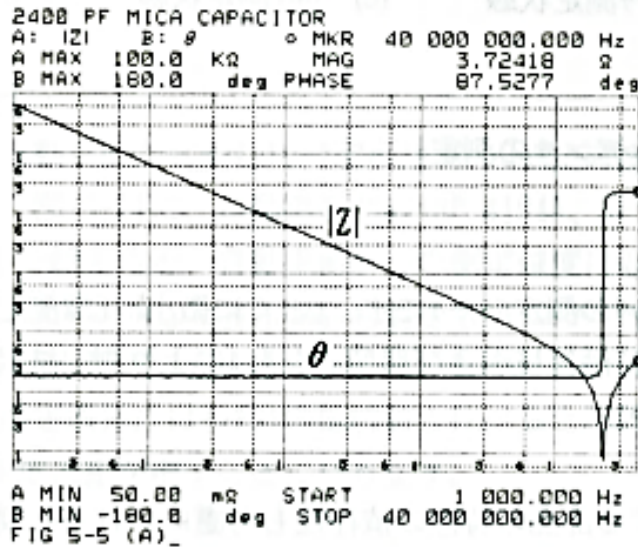
# コンデンサの測定

小さい容量の場合にのみ影響

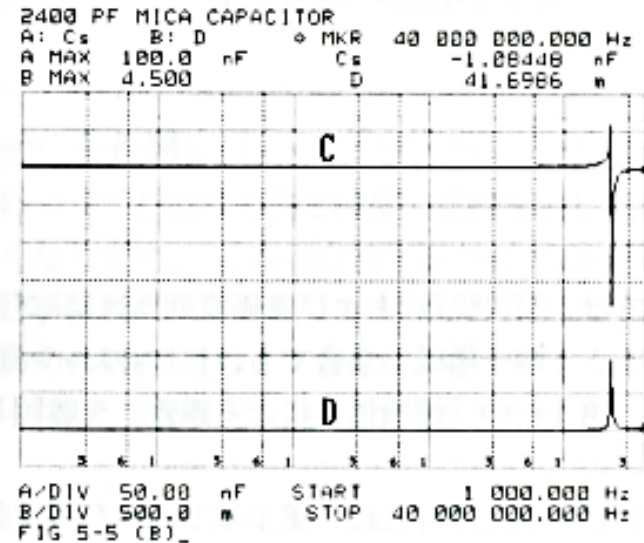


$$Z = \underbrace{R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2}}_{\text{実数部 (R)}} + j \underbrace{\frac{\omega L - \omega^2 R_p^2 C + \omega^3 R_p^2 L C^2}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2}}_{\text{虚数部 (X)}}$$

(a)

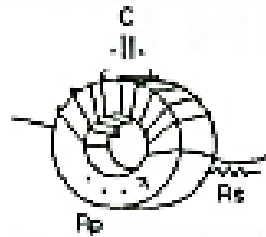
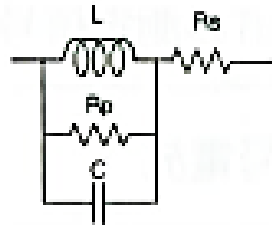


(b)

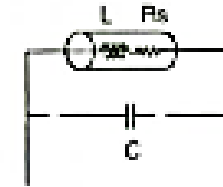
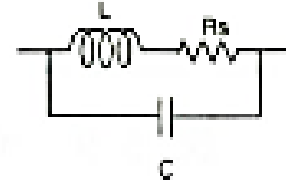


コンデンサの周波数特性例

# インダクタの測定



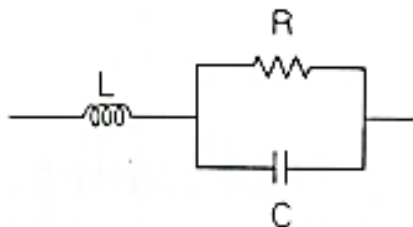
(a) 高インダクタ



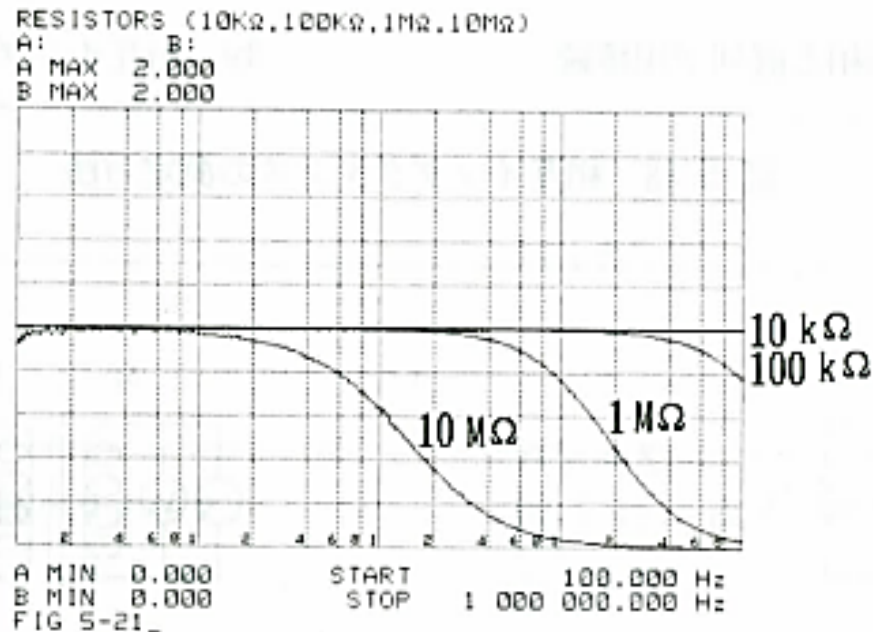
(b) 微小インダクタ

インピーダンス測定器の電源は定電圧源であり、インダクタは測定電流依存性があるため、信号源抵抗により測定結果が変わってしまう。特に (a) 高インダクタは大きい。

# 抵抗測定



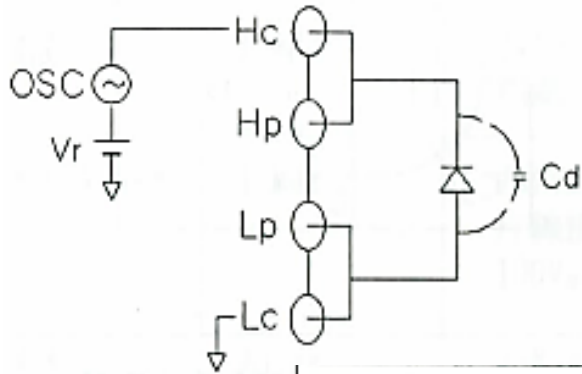
$$Z = \underbrace{\frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}}_{\text{実数部 (実効抵抗値)}} + j \underbrace{\frac{\omega L - \omega^2 R^2 C + \omega^3 R^2 L C^2}{1 + \omega^2 R^2 C^2}}_{\text{虚数部 (X)}}$$



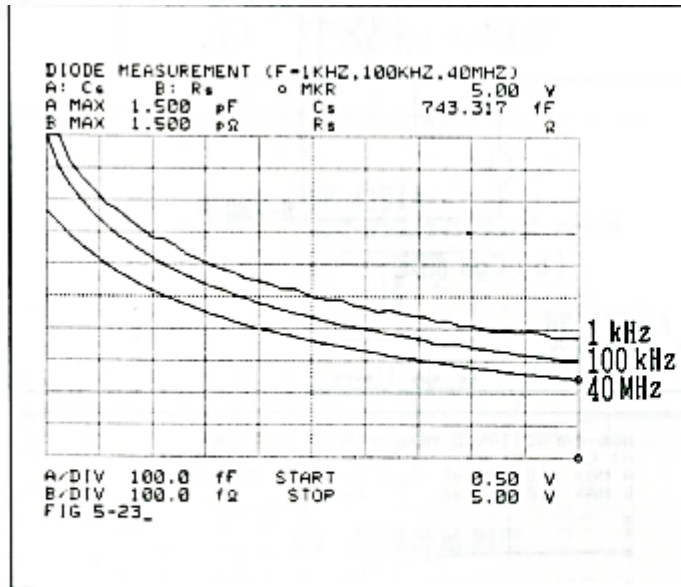
1MHz以上の高周波回路で使用する場合には、実効抵抗値が減少する。

抵抗測定では、テスト治具のOPEN/SHORT補正必要（高抵抗ではOPEN、低抵抗ではSHORTが重要）！ ←なぜか???

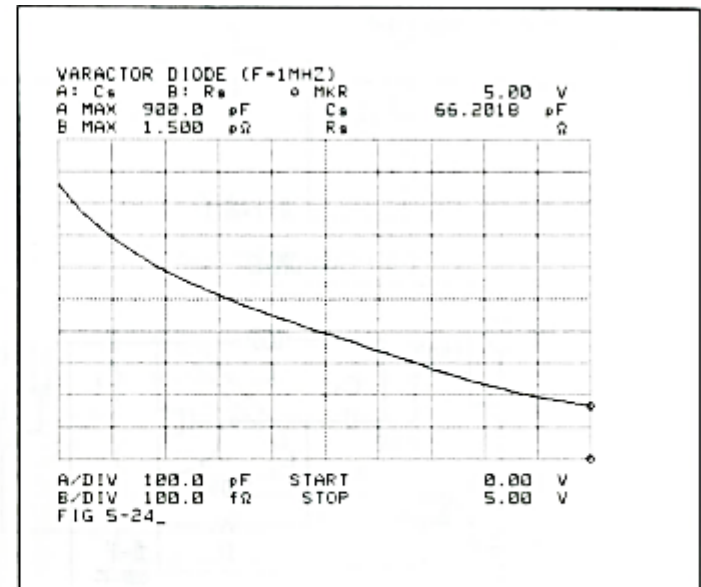
# ダイオードの容量測定



順方向にバイアスをかけると  
測定結果はどうなっていくか???

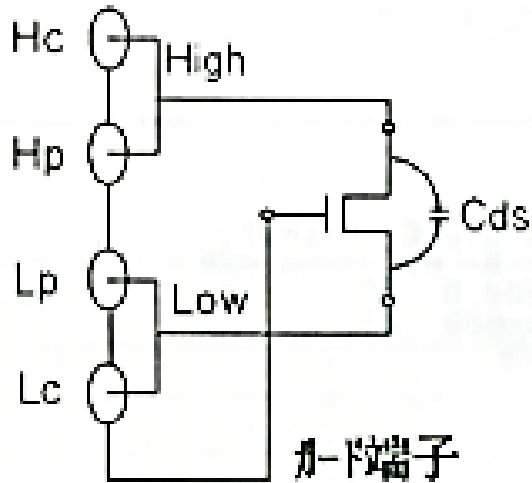
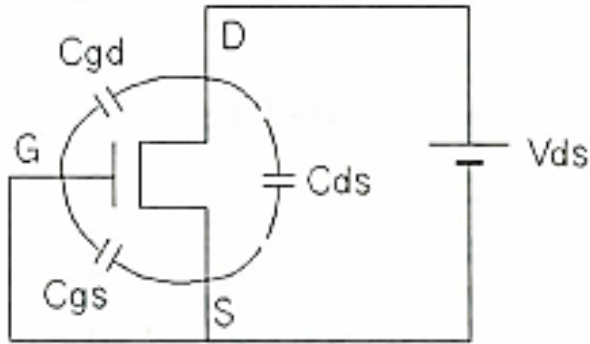


接合容量対逆バイアス  
電圧特性の測定例

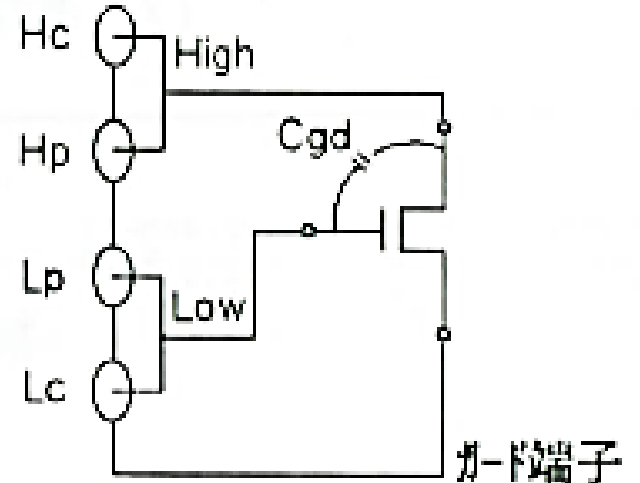


可変容量ダイオードの  
C-V特性

# MOSFETの測定

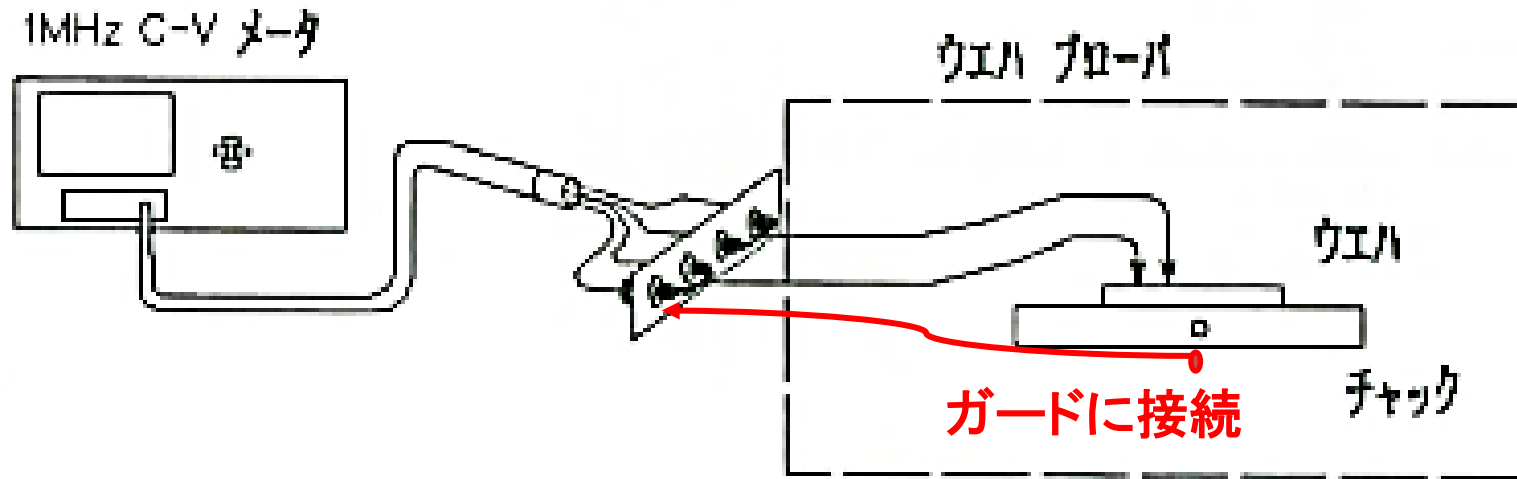


Cds測定



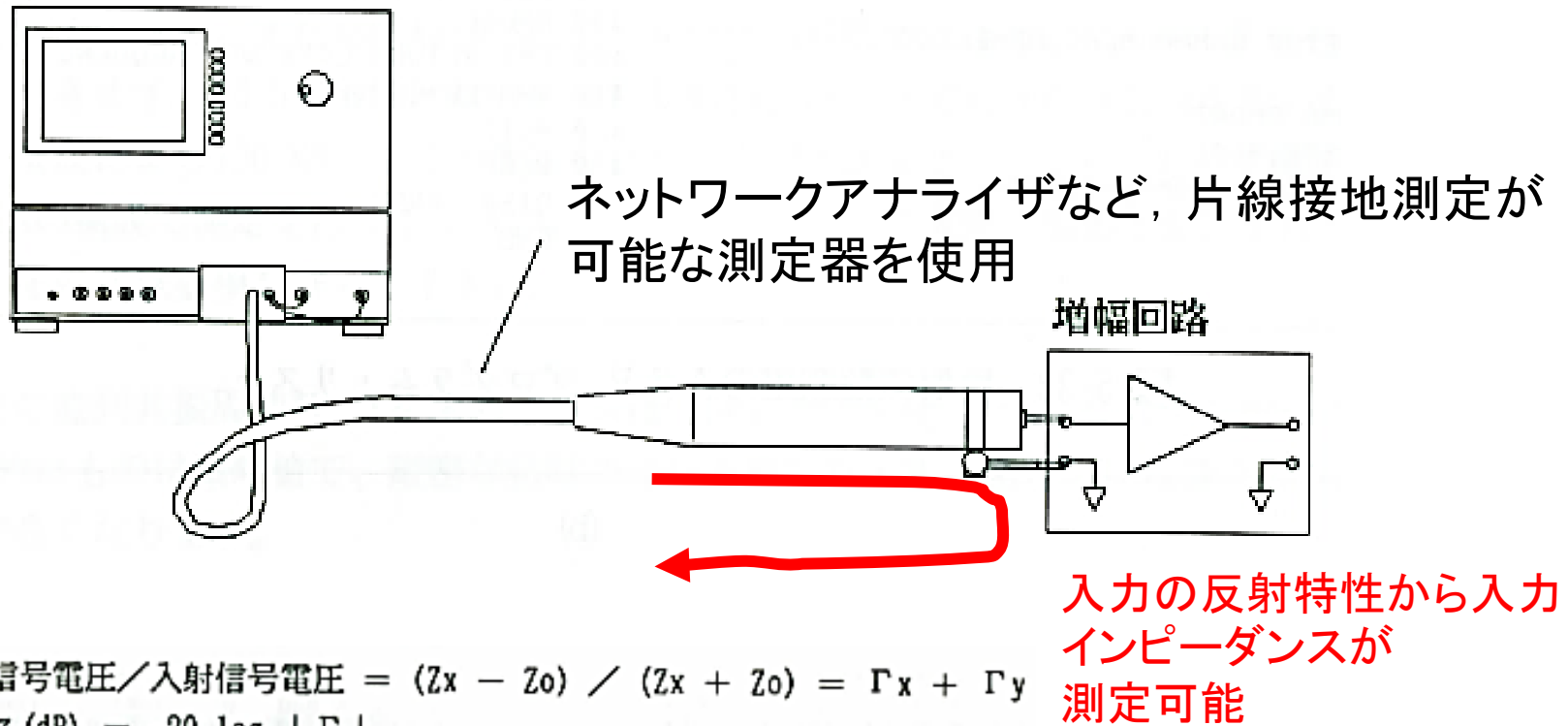
Cgd/Cgs測定

# シリコンウエハー容量測定





# 増幅器の測定



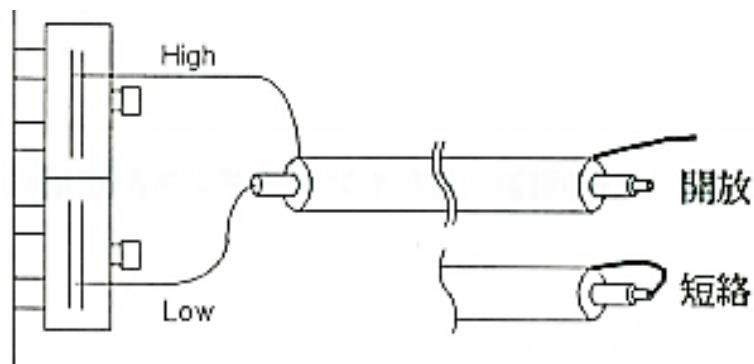
$$\Gamma = \text{反射信号電圧} / \text{入射信号電圧} = (Z_x - Z_0) / (Z_x + Z_0) = \Gamma_x + \Gamma_y$$
$$\text{リターンロス (dB)} = -20 \log |\Gamma|$$

ここで、

- $\Gamma$  : 反射係数
- $\Gamma_x$  :  $\Gamma$  の実数部
- $\Gamma_y$  :  $\Gamma$  の虚数部
- $Z_x$  : 入出力インピーダンス測定値
- $Z_0$  : 特性インピーダンス

# ケーブルの測定

- ケーブル測定で用いられるパラメータには、特性インピーダンス、 $Z_0$ 、単位長さあたりの容量 $C$  (pF/m)、伝搬定数 $\alpha$  (dB/m)などがある



特性インピーダンス ( $Z \angle \theta$ ):

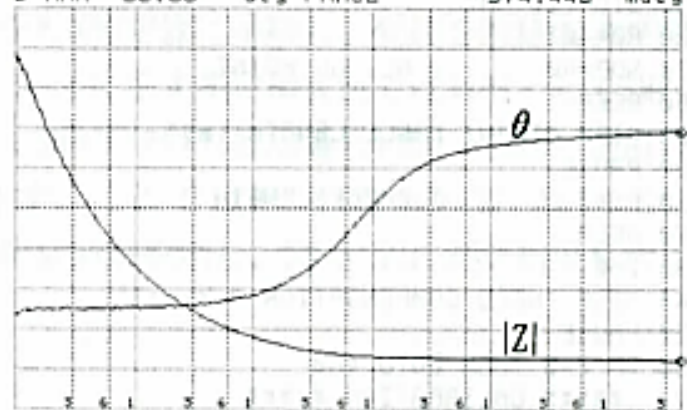
$$|Z| = \sqrt{|Z_{op}| \cdot |Z_{st}|} \quad (\Omega)$$

$$\theta = \frac{\theta_{op} + \theta_{st}}{2} \quad (\text{deg})$$

ここで、 $Z_{op} \angle \theta_{op}$ : 開放時のインピーダンス

$Z_{st} \angle \theta_{st}$ : 短絡時のインピーダンス

COAXIAL CABLE CHARACTERISTIC IMPEDANCE  
 A: |Z| B:  $\theta$  MKR 40 000 000.000 Hz  
 A MAX 1.800 K $\Omega$  MAG 58.6371  $\Omega$   
 B MAX 30.00 deg PHASE -574.448 mdeg



A/DIV 200.0  $\Omega$  START 100.000 Hz  
 B/DIV 10.00 deg STOP 40 000 000.000 Hz  
 Z-50 $\Omega$

減衰定数 ( $\alpha$ ) と位相定数 ( $\beta$ )

$$\alpha = \frac{1}{2L} \text{LN} \sqrt{\frac{(1+R)^2 + X^2}{(1-R)^2 + X^2}} \times 8.6859 \quad (\text{dB/m})$$

$$\beta = \frac{1}{2L} \left( \pi - \arctan \frac{R+1}{X} + \arctan \frac{R-1}{X} \right) \quad (\text{rad/m})$$

# 復習問題

1. P44の等価回路から $Z_{\text{dut}} =$  を求める
2. P53の抵抗測定では、テスト治具のOPEN/SHORT補正必要（高抵抗ではOPEN, 低抵抗ではSHORTが重要）！←なぜか???
3. P54ダイオードの順方向にバイアスをかけて、インピーダンスメータで容量を測定すると、結果はどうなっていくか。図を書いてください。

