

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

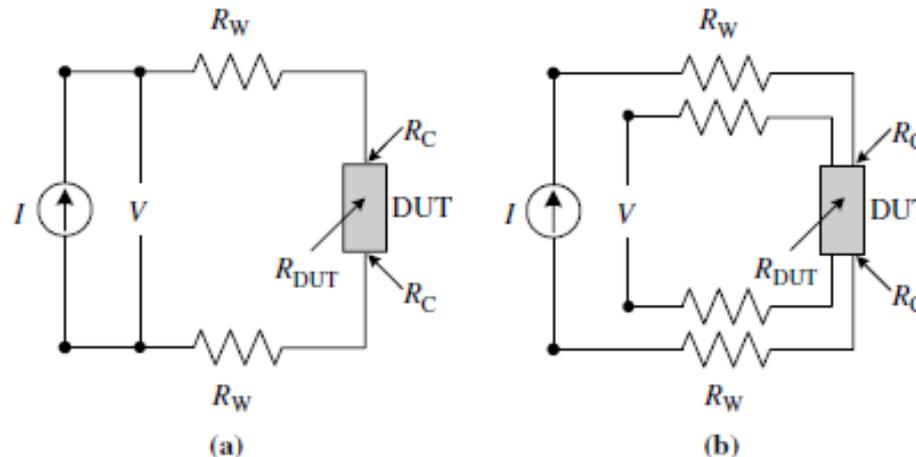
直流測定

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

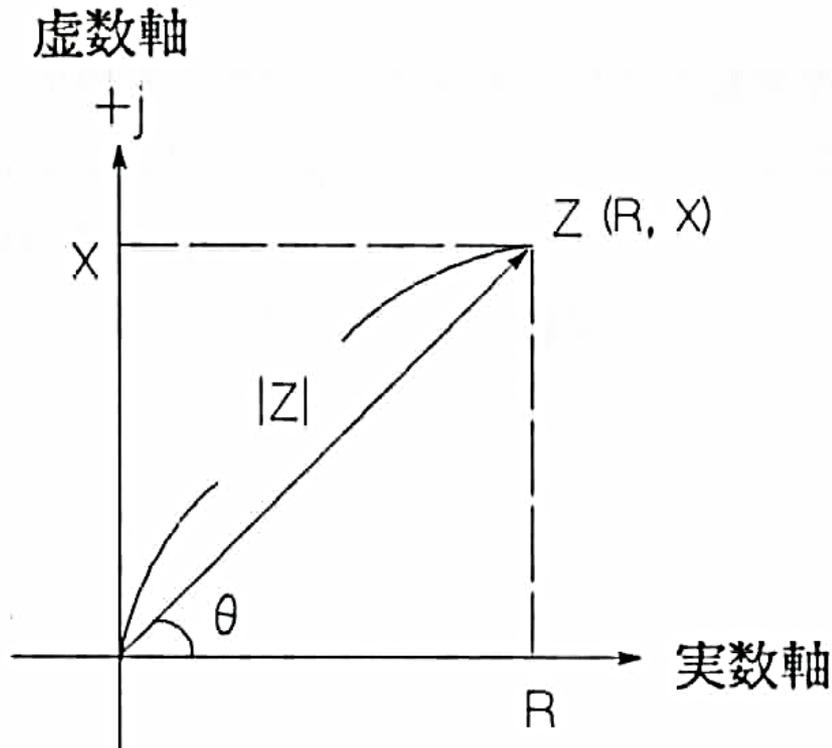


はじめに(インピーダンスとは)

- 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



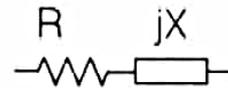
$$Z = R + jX = |Z| \angle \theta$$

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

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

L,C直列・並列等価回路表現

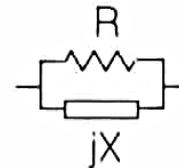
実数部と虚数部が直列の場合



$$Z = R + jX$$

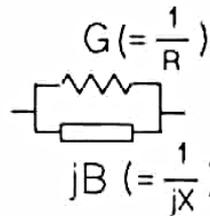
(インピーダンスだと扱いやすい)

実数部と虚数部が並列の場合



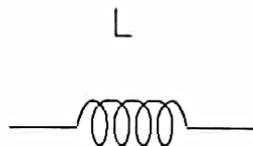
$$Z = \frac{jRX}{R + jX} = \frac{RX^2}{R^2 + X^2} + j \frac{R^2X}{R^2 + X^2}$$

(インピーダンスだと複雑になる)



$$Y = G + jB$$

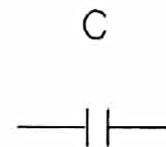
(アドミタンスの方が扱いやすい)



インダクタ

$$X_L = 2\pi fL$$

$$= \omega L$$

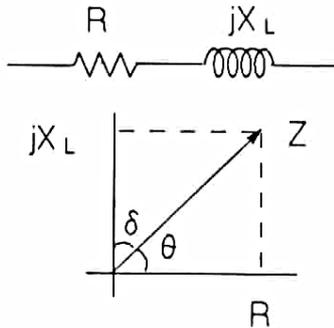


コンデンサ

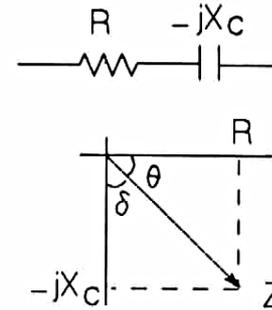
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$= \frac{1}{\omega C}$$

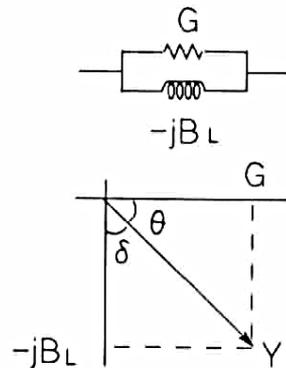
インピーダンスとアドミタンス表現



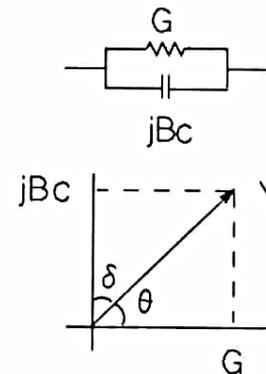
(a) インピーダンス平面上の誘導性ベクトル



(b) インピーダンス平面上の容量性ベクトル



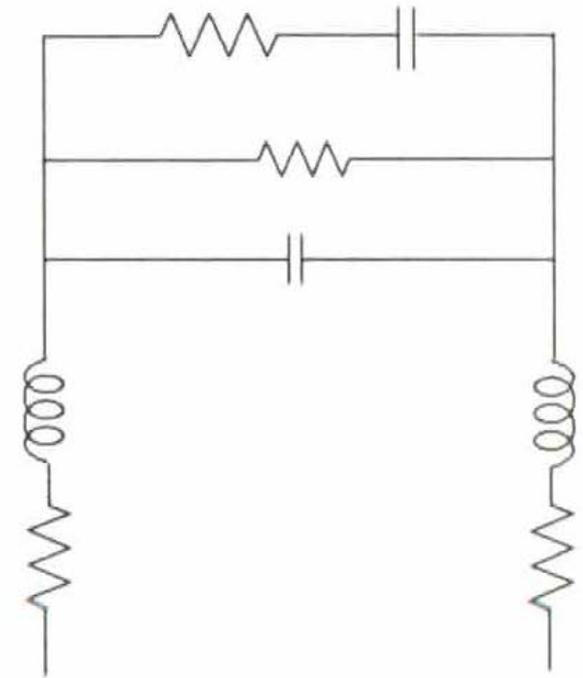
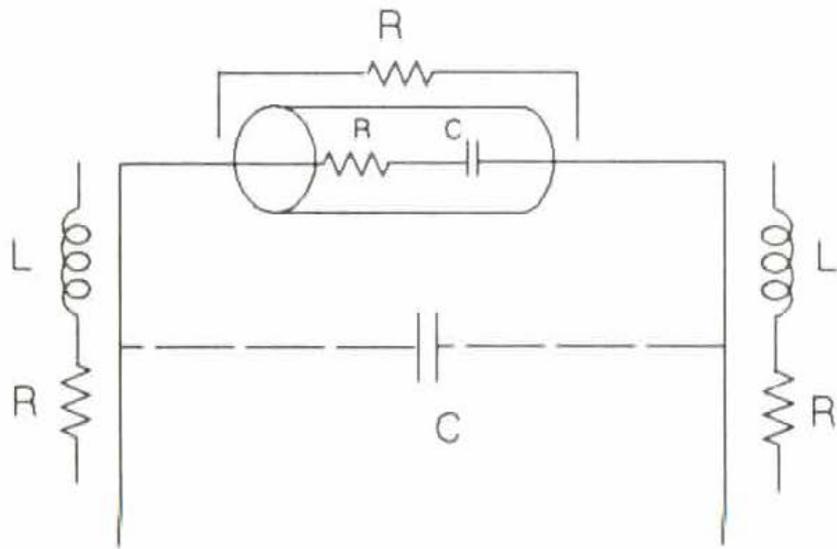
(c) アドミタンス平面上の誘導性ベクトル



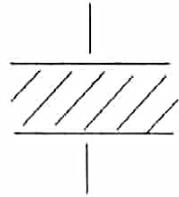
(d) アドミタンス平面上の容量性ベクトル

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

寄生成分を含むコンデンサ等価回路

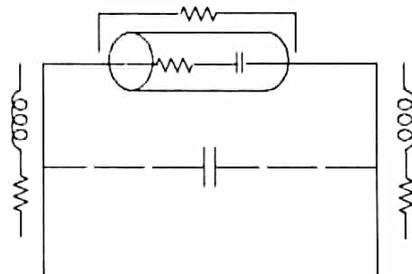


コンデンサの理論値・実効値・表示値



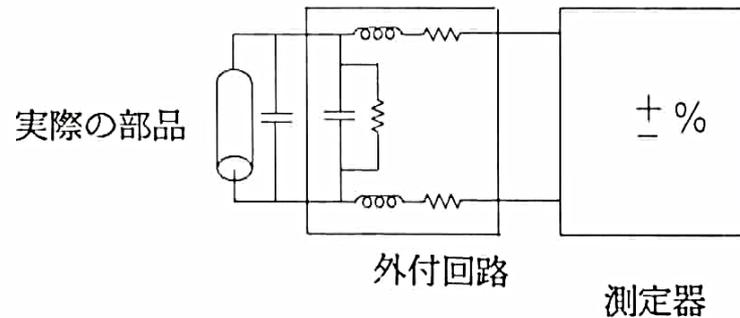
$$C = K \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

(a) 理論値



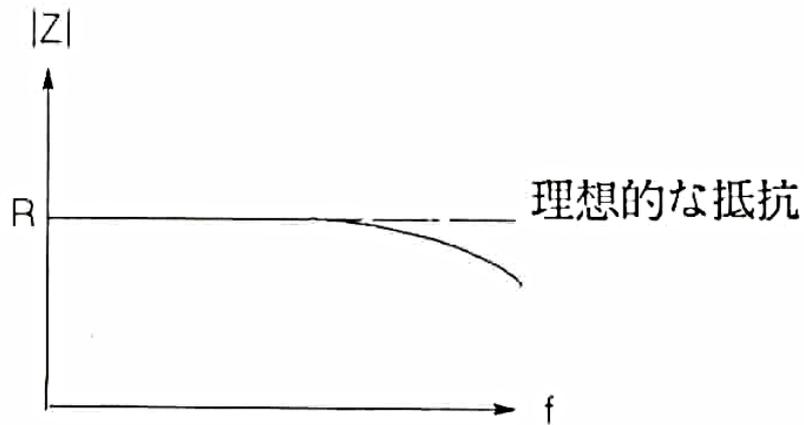
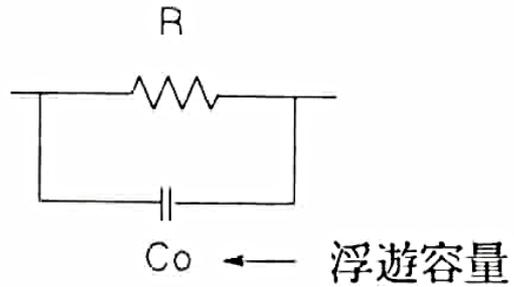
実際のコンデンサ

(b) 実効値

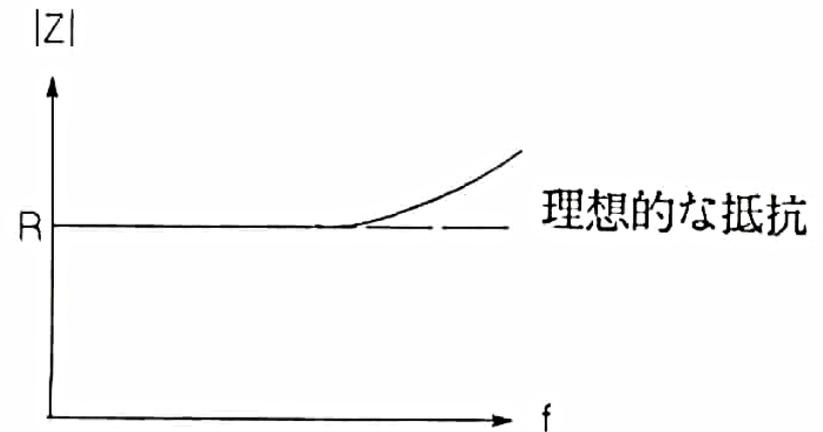
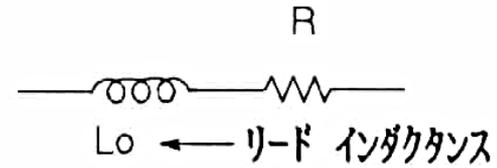


(c) 表示値

抵抗の周波数特性

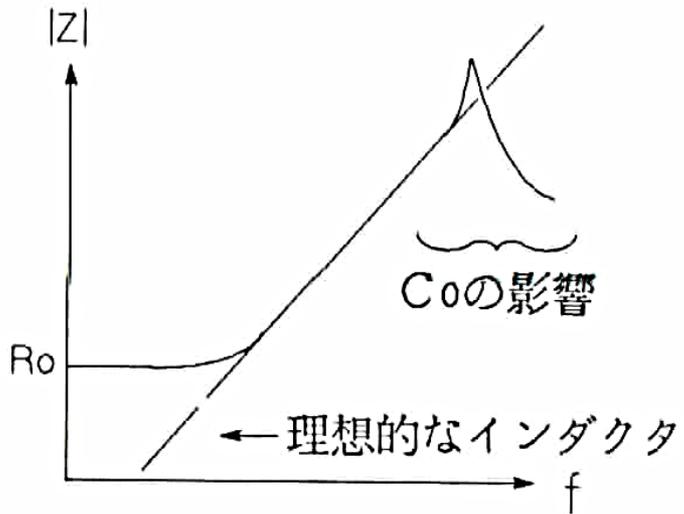
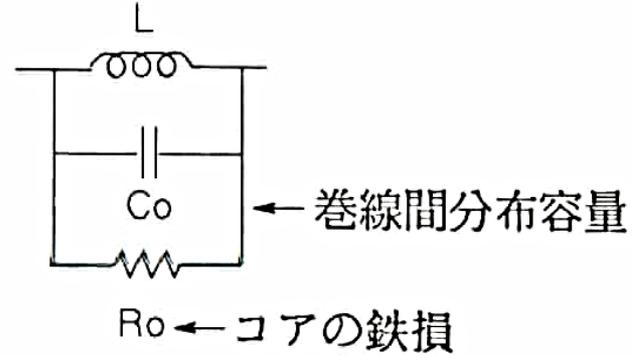
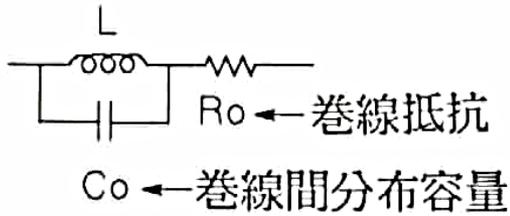


(a) 高抵抗

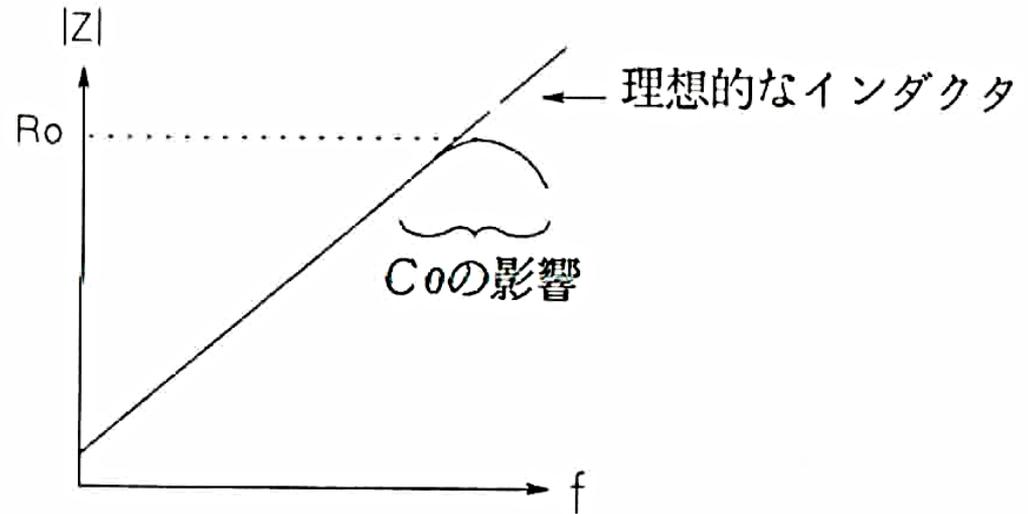


(b) 低抵抗

インダクタの周波数特性

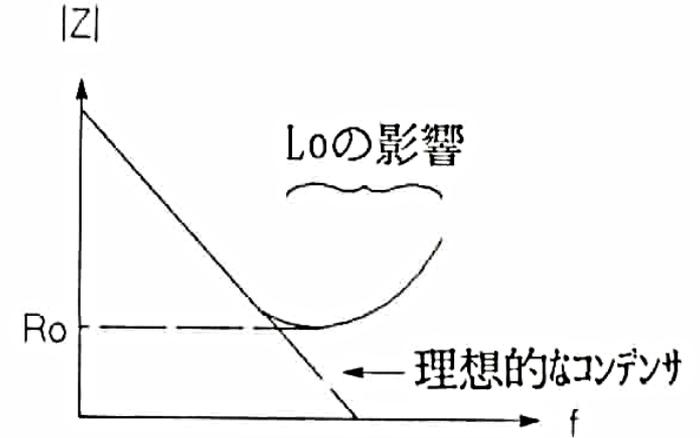
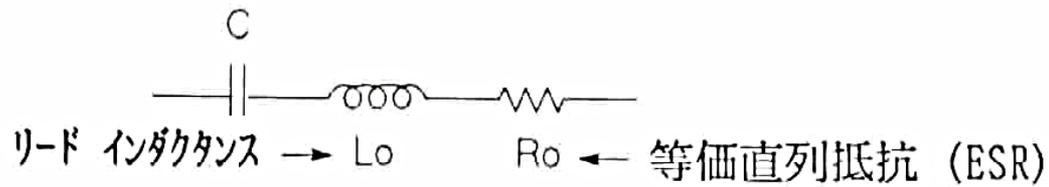


(a) 一般的なインダクタ

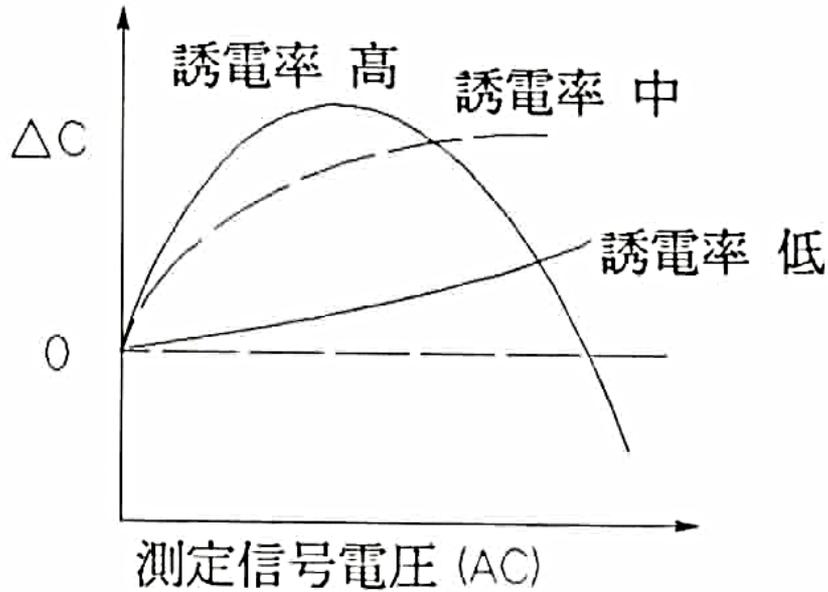


(b) 鉄損の大きいインダクタ

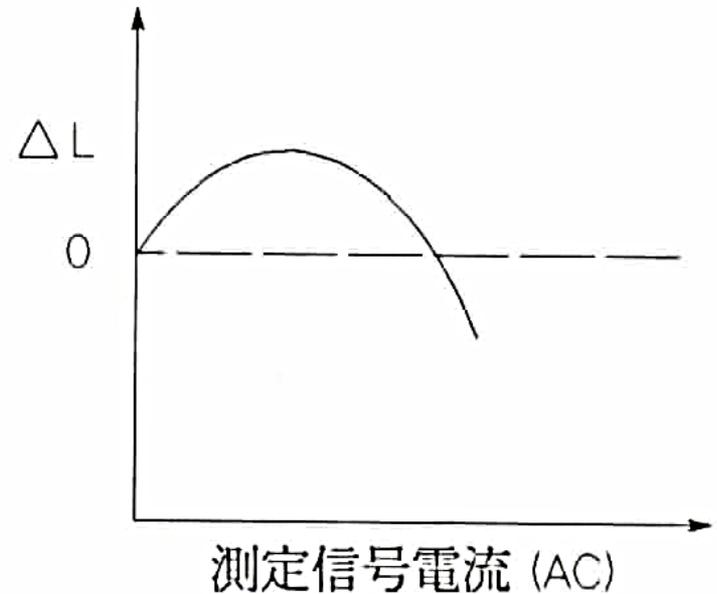
コンデンサの周波数特性



L, Cの測定信号レベル

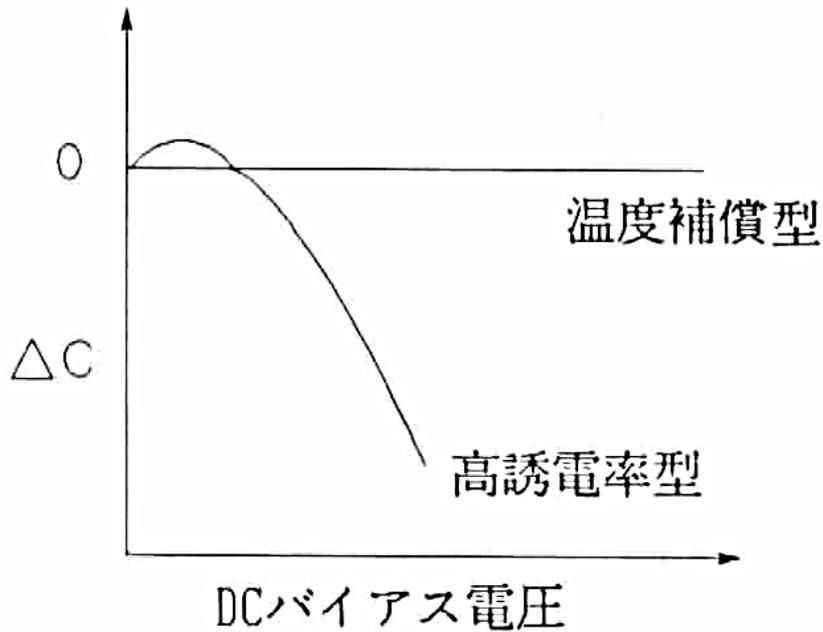


(a) セラミック・コンデンサの
測定信号電圧依存性

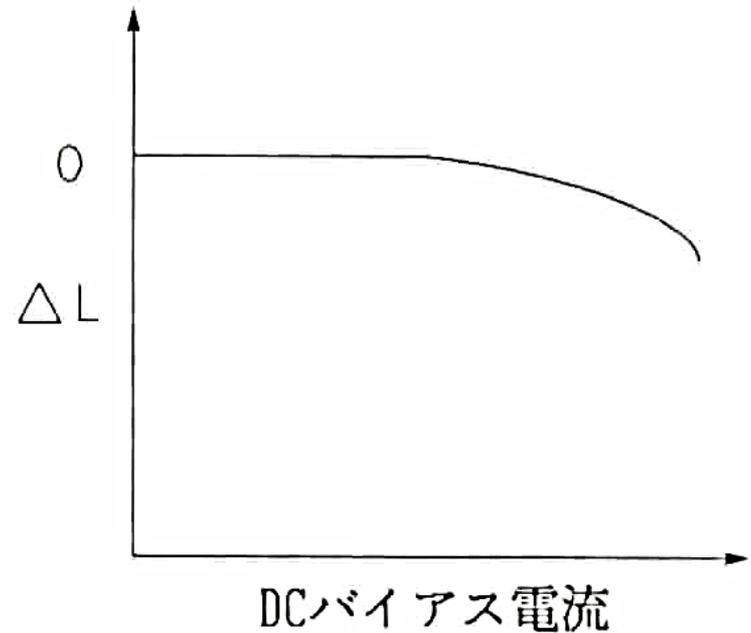


(b) コア入りインダクタの
測定信号電流依存性

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



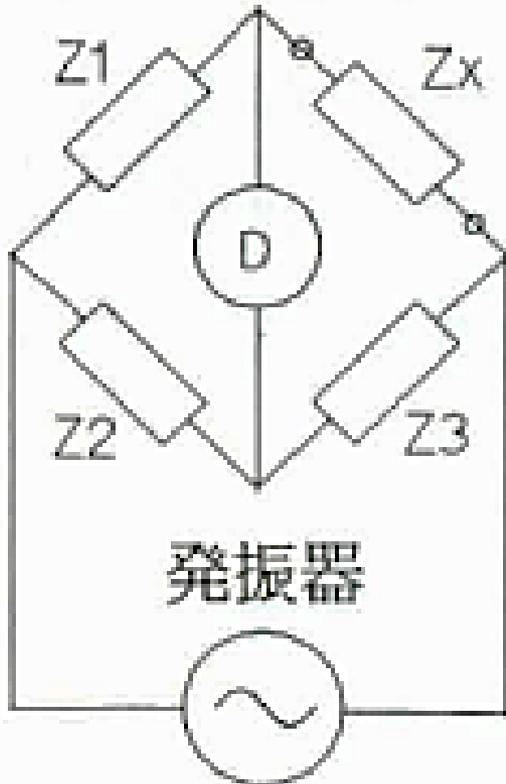
(b) コア入りインダクタの
DCバイアス電流依存性

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

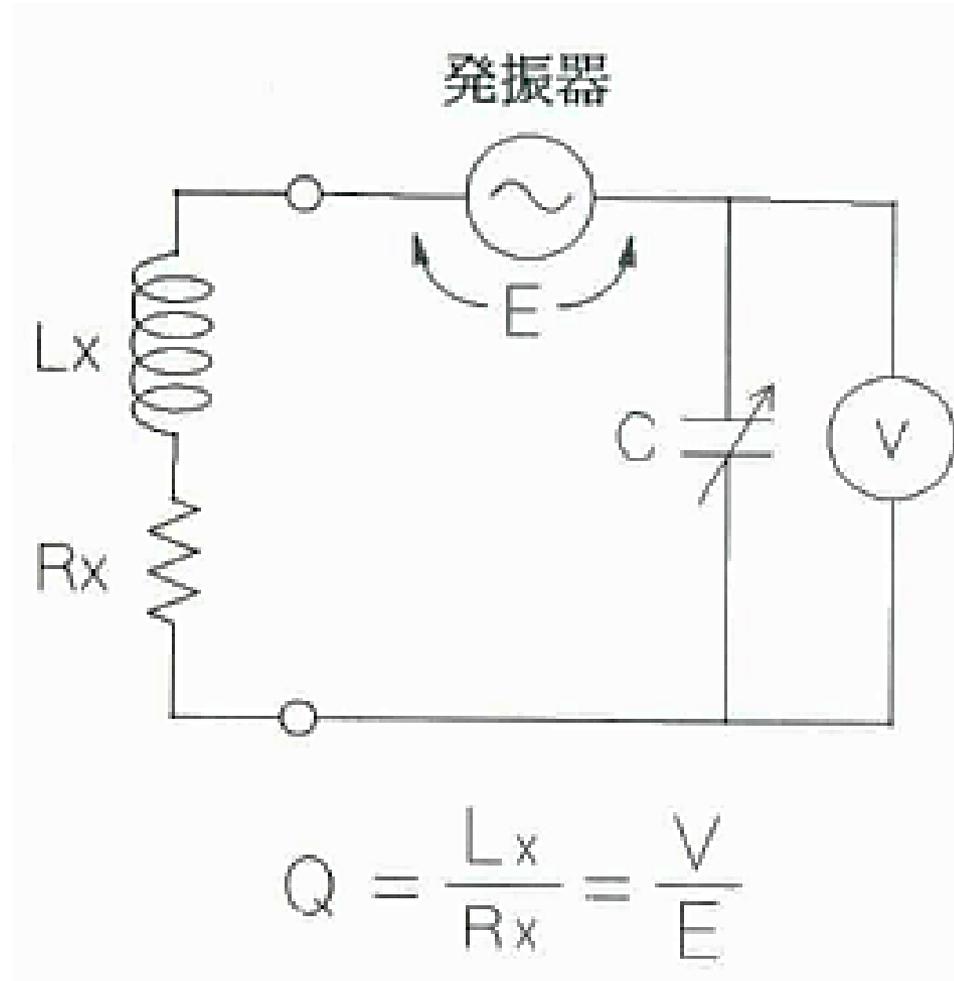
- ブリッジ法
- 共振法
- I-V法
- ネットワーク解析法
- 時間領域ネットワーク解析法
- 自動平衡ブリッジ法

ブリッジ法

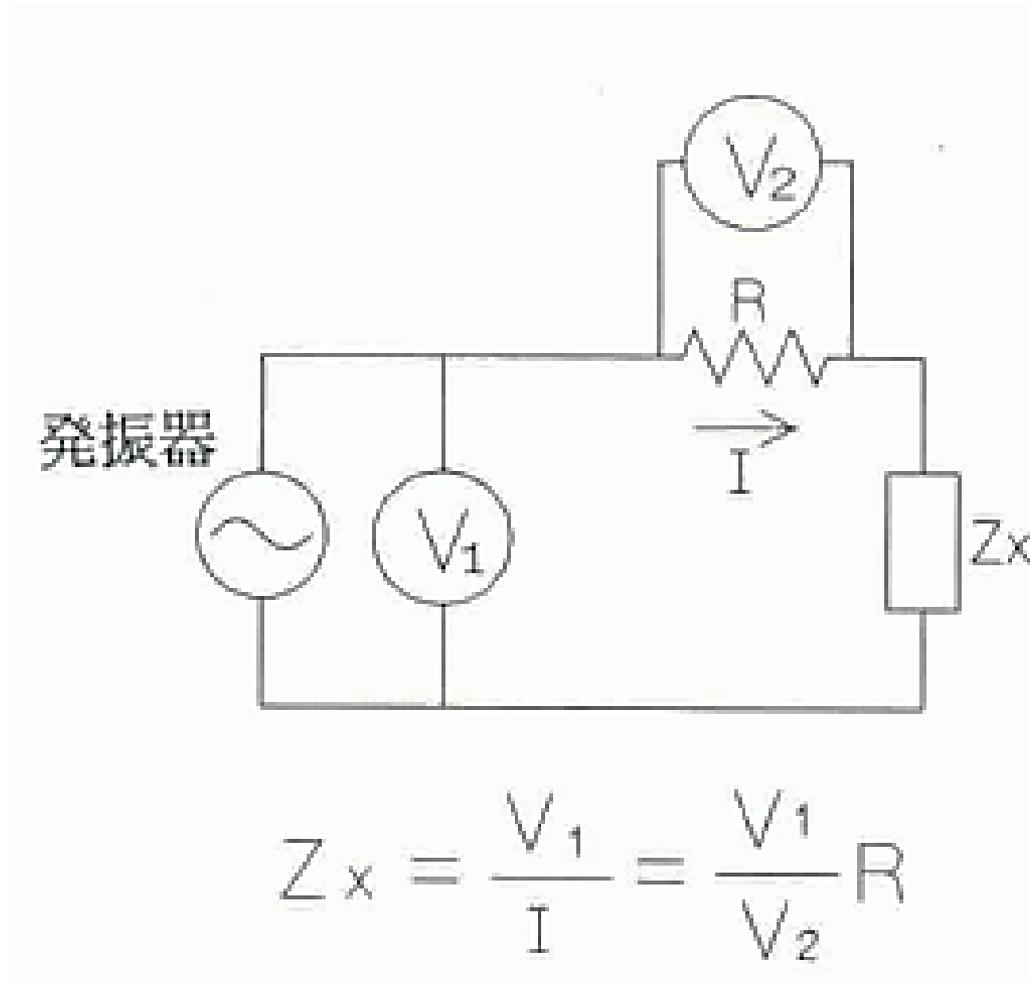


$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3$$

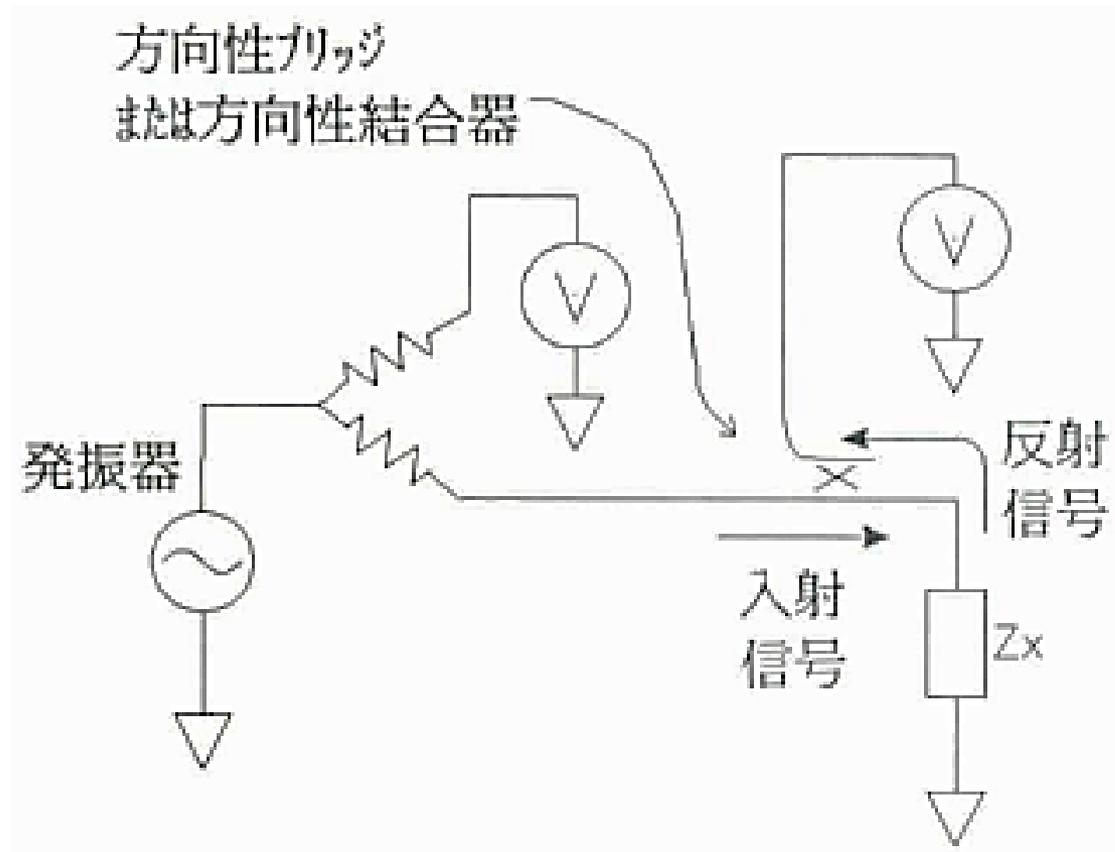
共振法



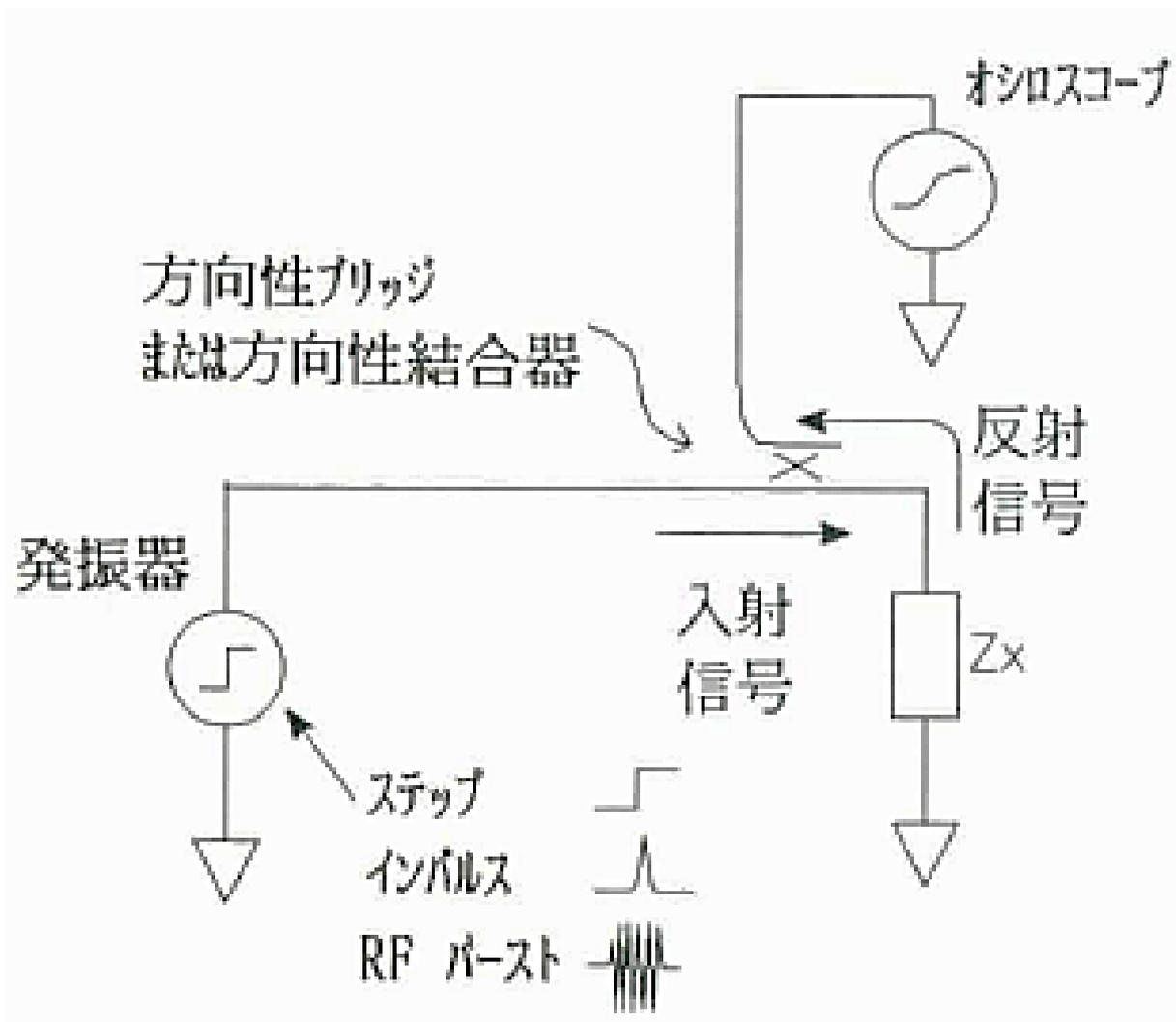
I-V法



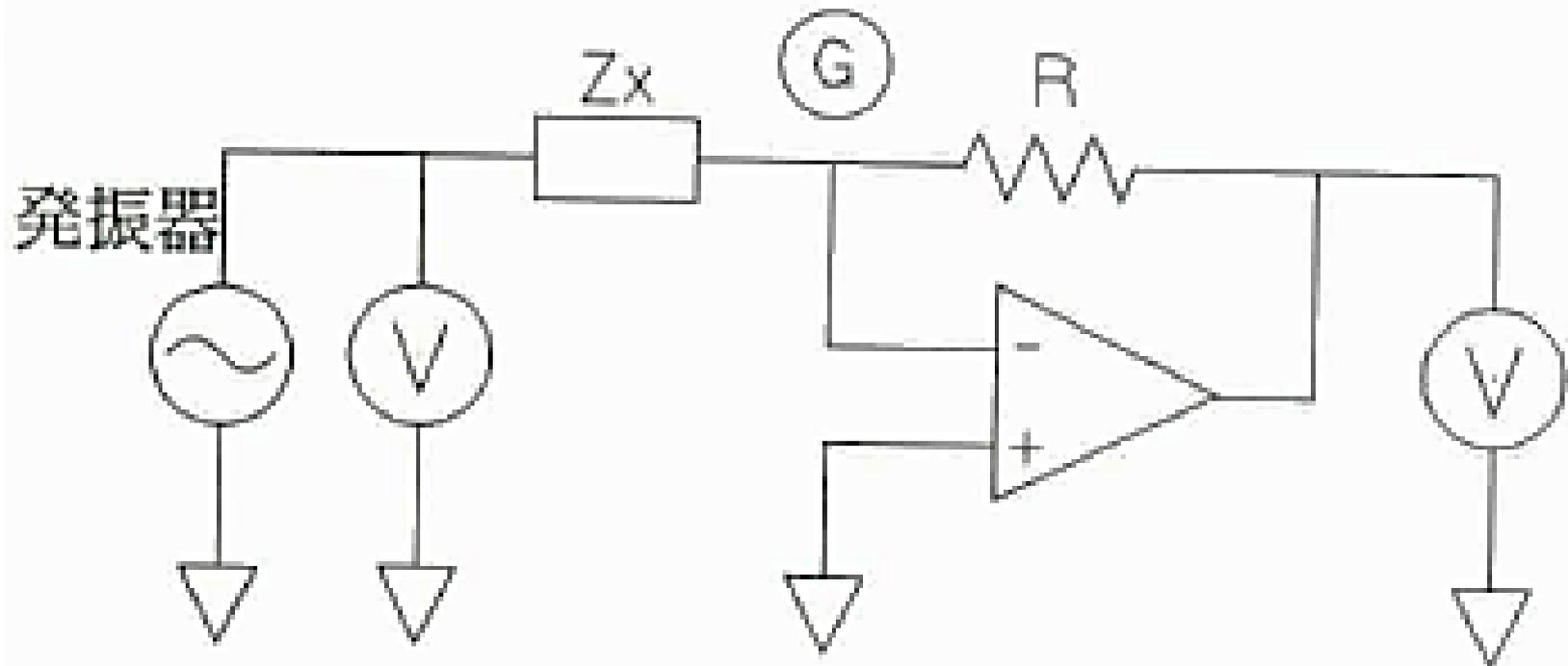
ネットワーク解析法



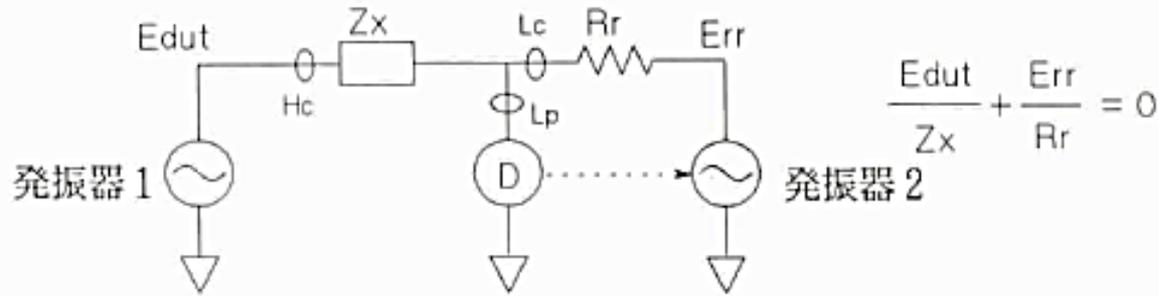
時間領域ネットワーク解析法



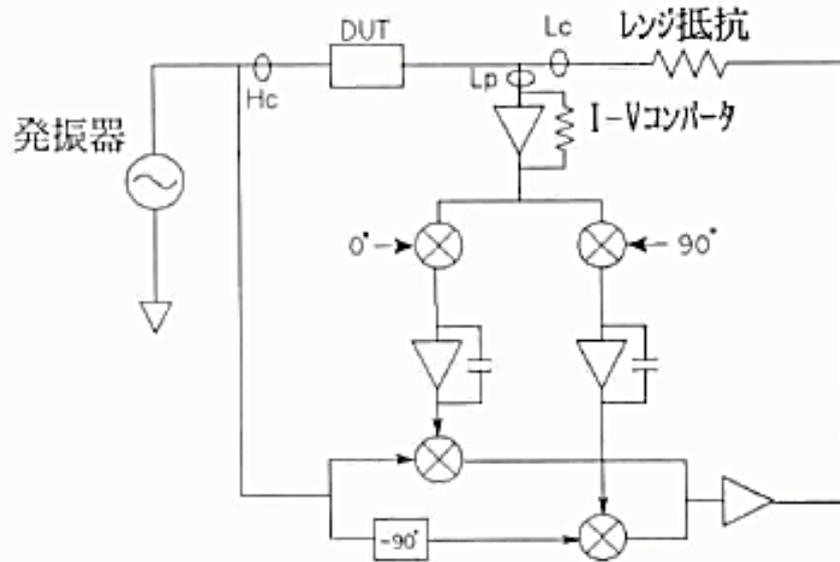
自動平衡ブリッジ法



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

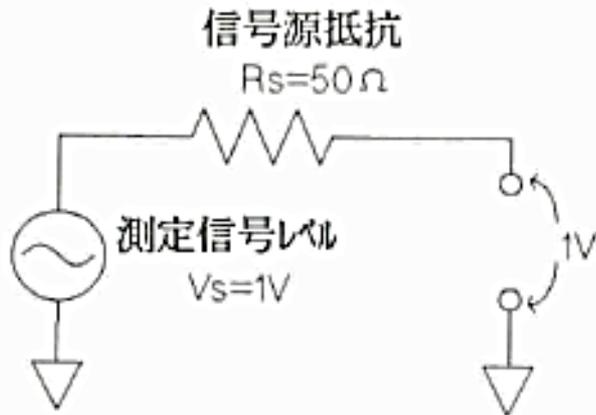


(b) ブロック図

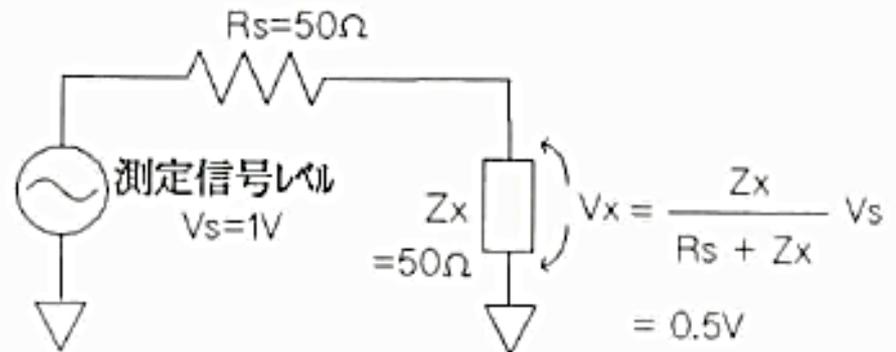
インピーダンス測定法の長所・短所

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

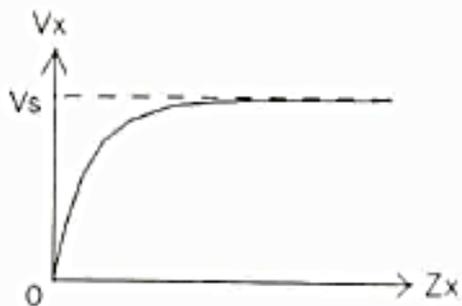
測定信号レベル



(a) UNKNOWN端子が開放状態のとき

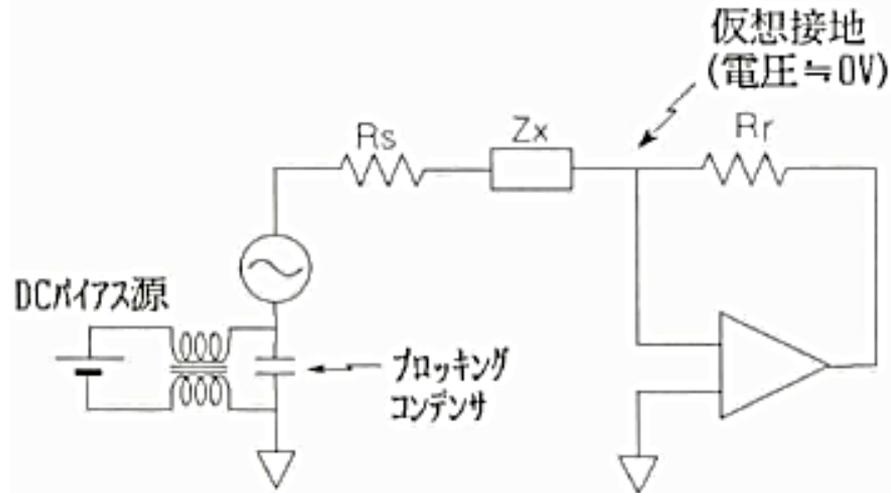


(b) UNKNOWN端子にDUTが接続されているとき

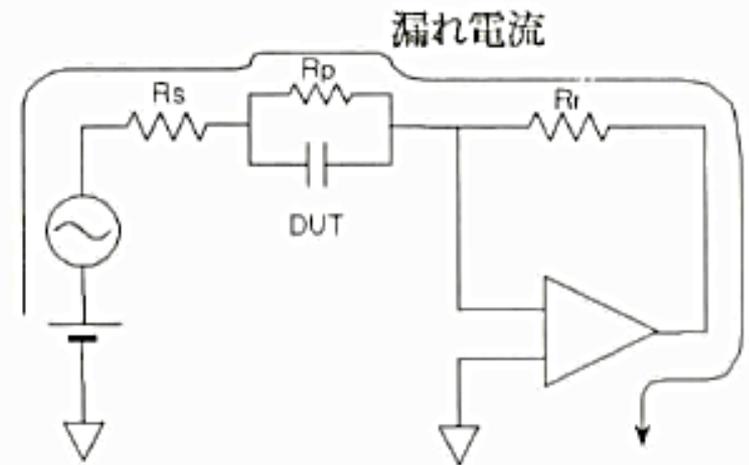


(c) Z_x と V_x の関係

DCバイアス

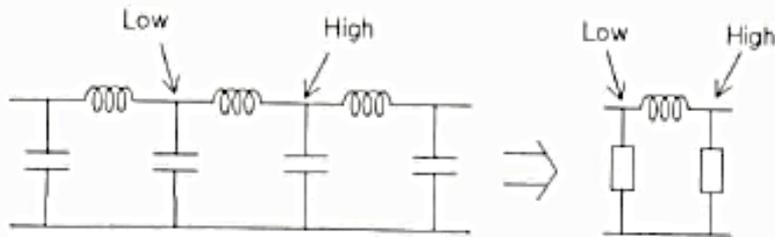


(a) DCバイアス印加回路の簡単なブロック図

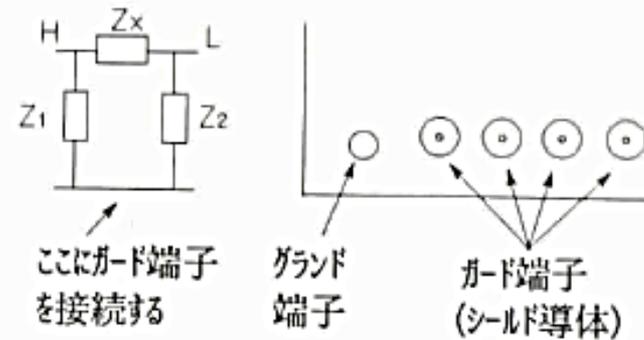


(b) DUTのDC抵抗 (R_p) が低いと、設定したDCバイアス電圧がDUTに印加されない。

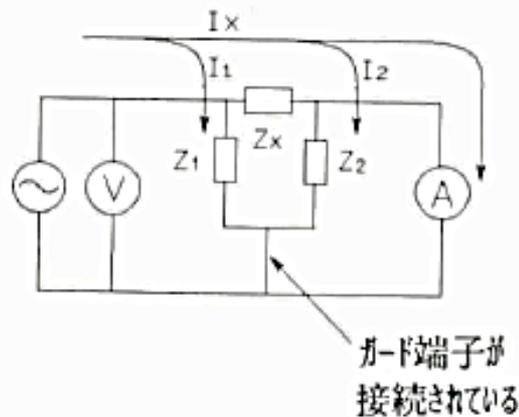
ガード機能(端子)について



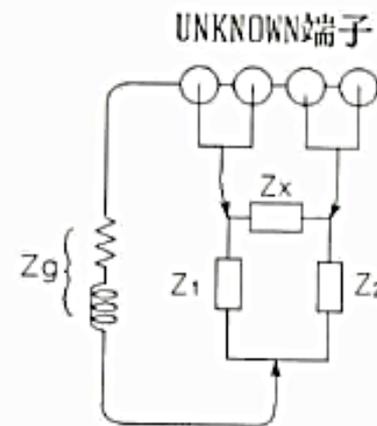
(a) 回路中の部品の測定例



(b) ガード端子の接続方法



(c) 測定電流の流れ

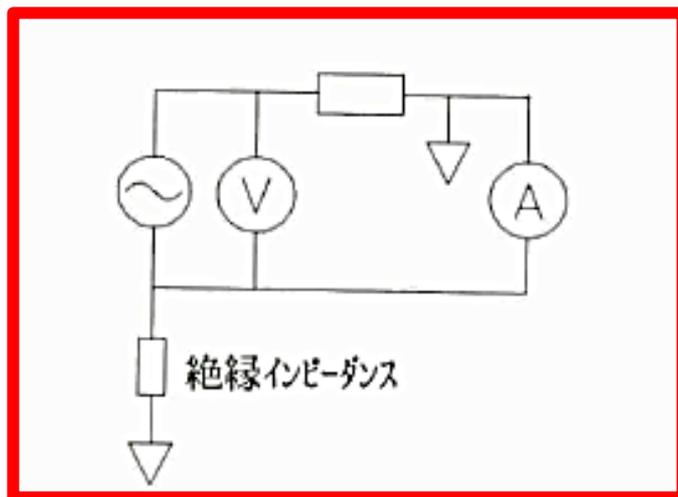
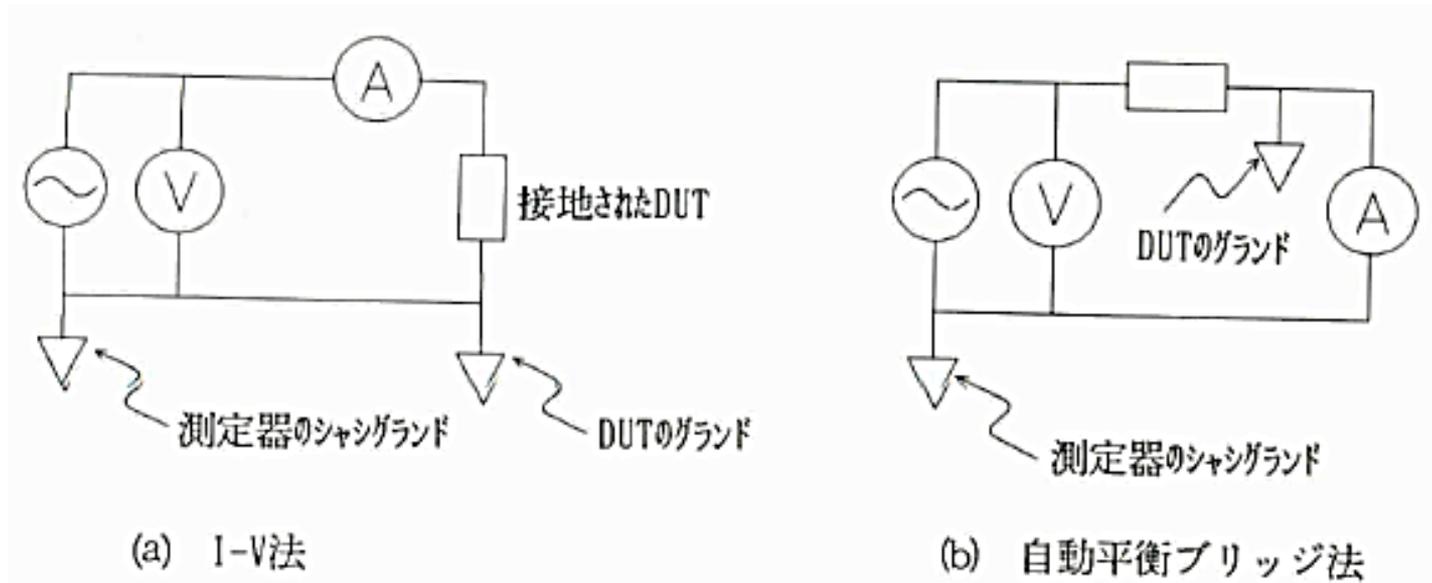


(d) ガード効果を弱める
ガードインピーダンス Z_g

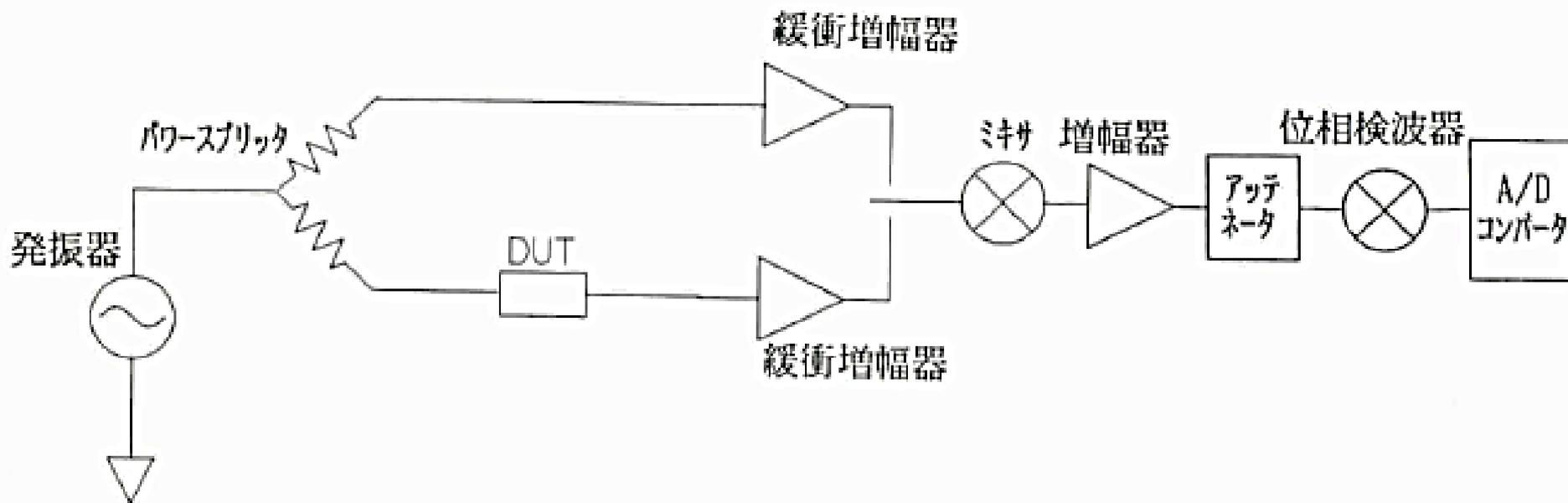
片線接地測定

- 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

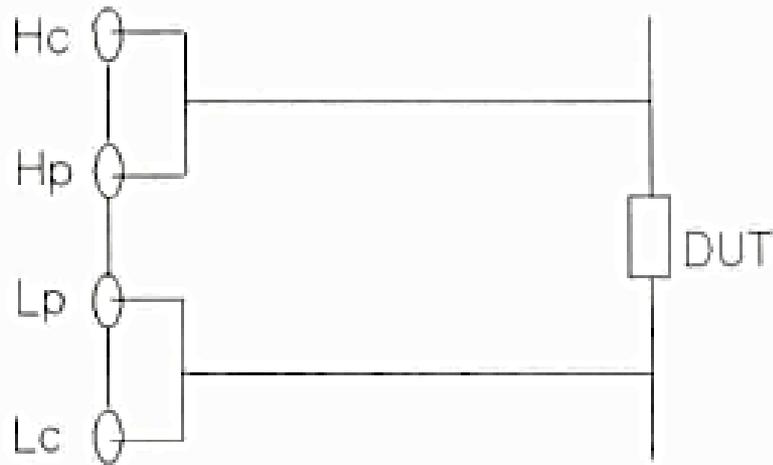


測定ケーブルの接続方法

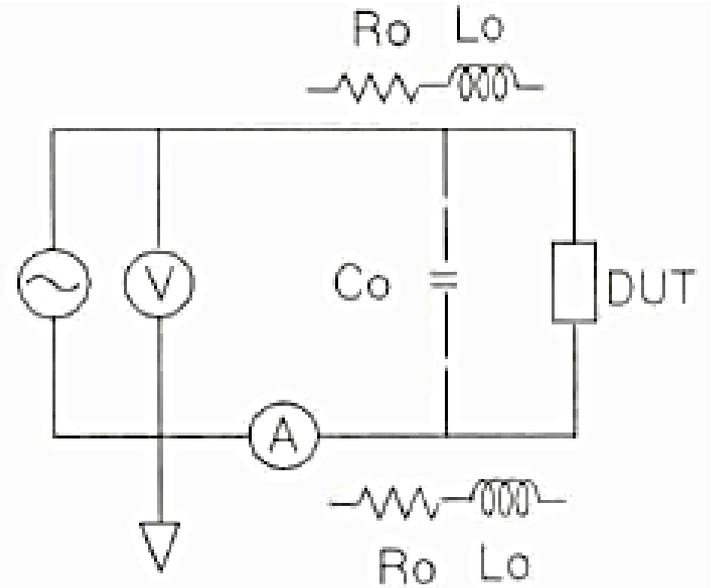
インピーダンス測定接続の種類

- 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

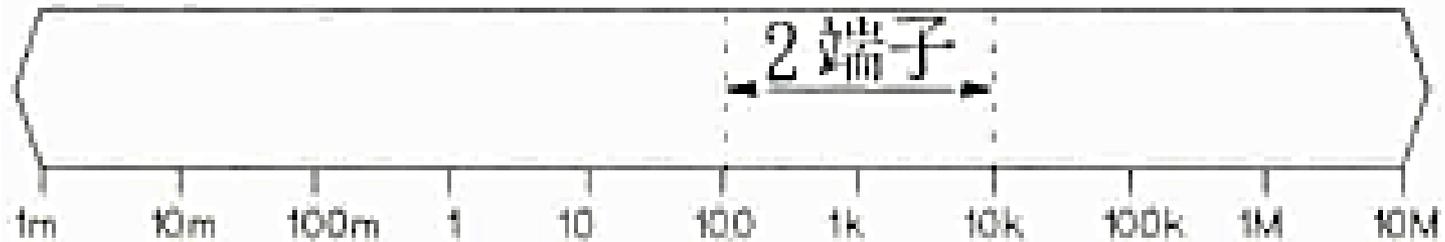
2端子法



(a) 2端子法の接続方法

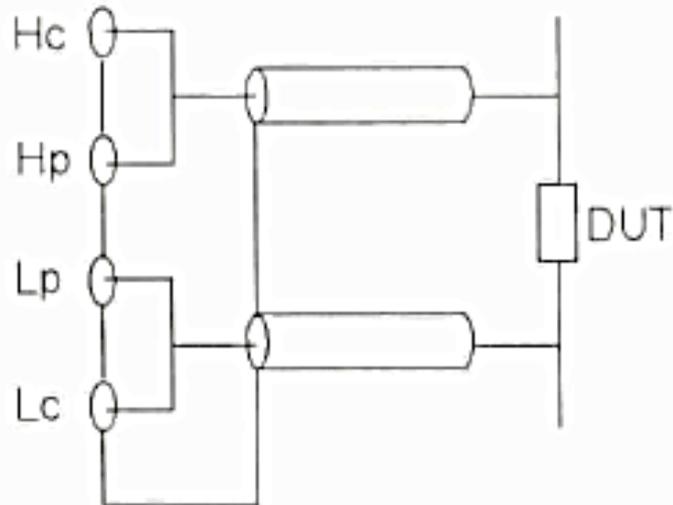


(b) 概要図

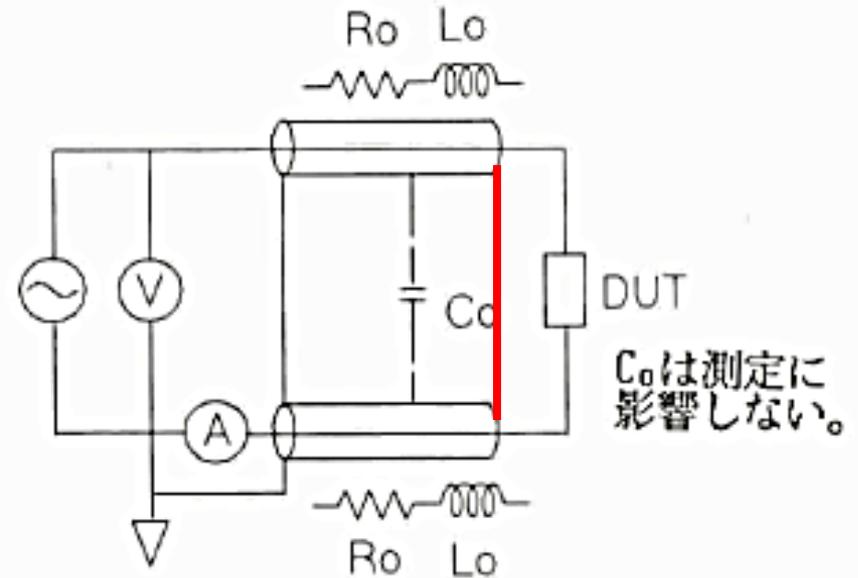


測定範囲

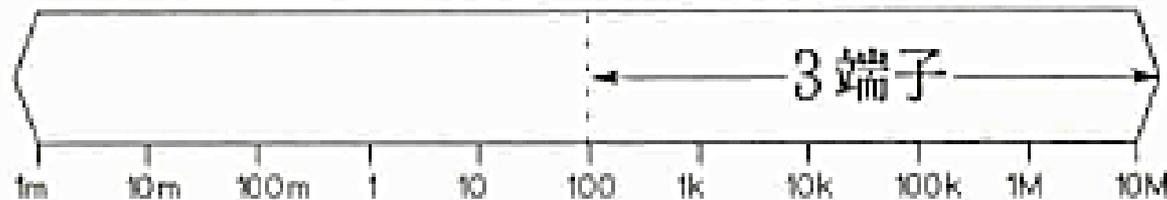
3端子法(シールドド2端子法)



(a) 3端子法の接続方法

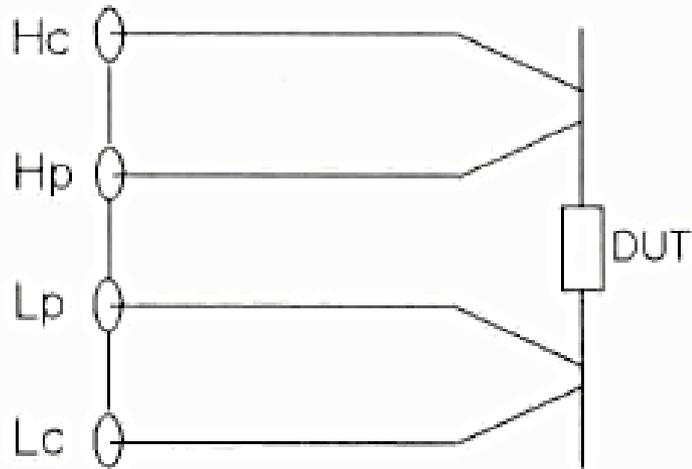


(b) 概要図

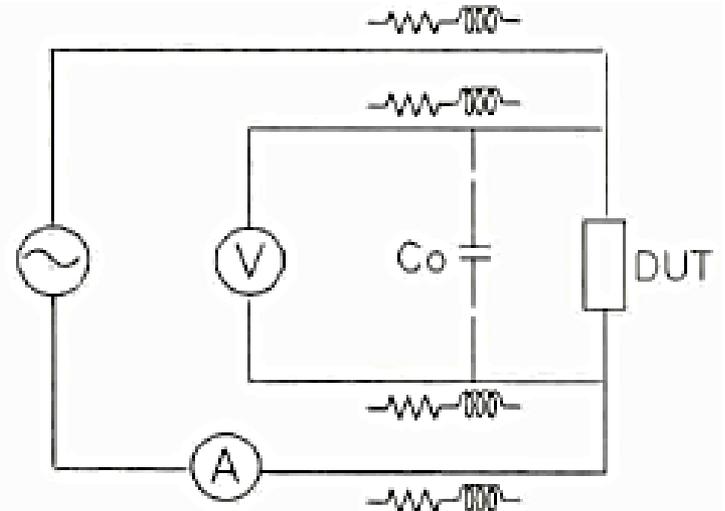


測定範囲

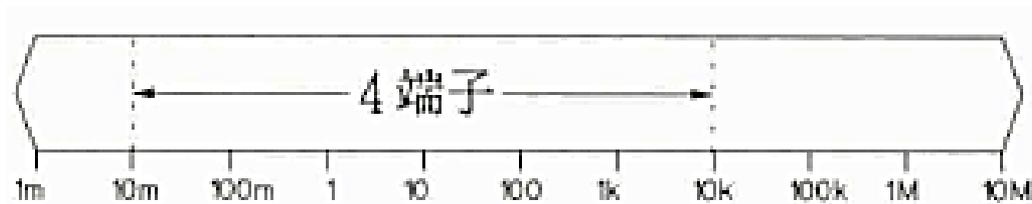
4端子法(ケルビン接続)



(a) 4端子法の接続方法

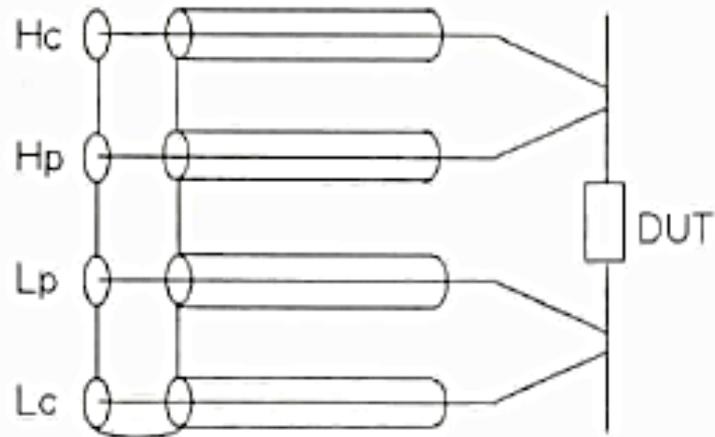


(b) 概要図

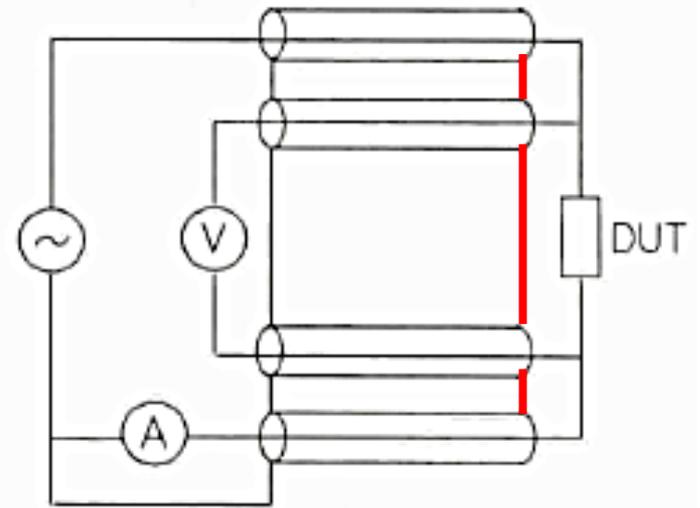


測定範囲

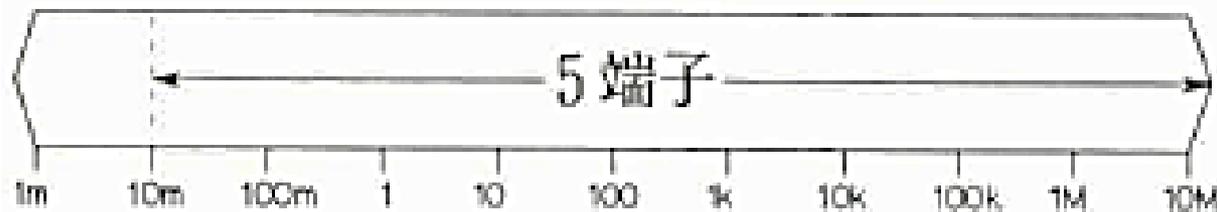
5端子法(シールドド4端子法)



(a) 5端子法の接続方法

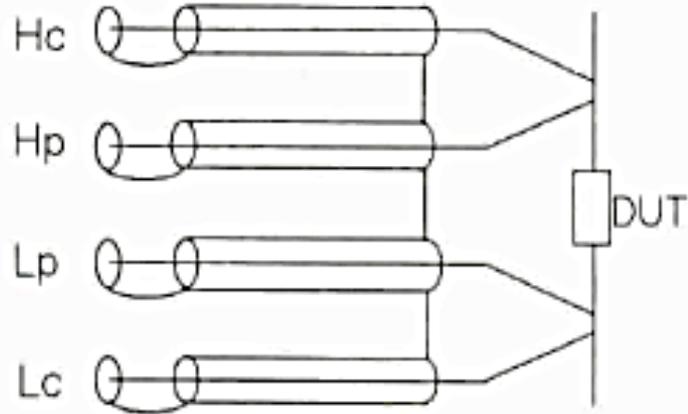


(b) 概要図

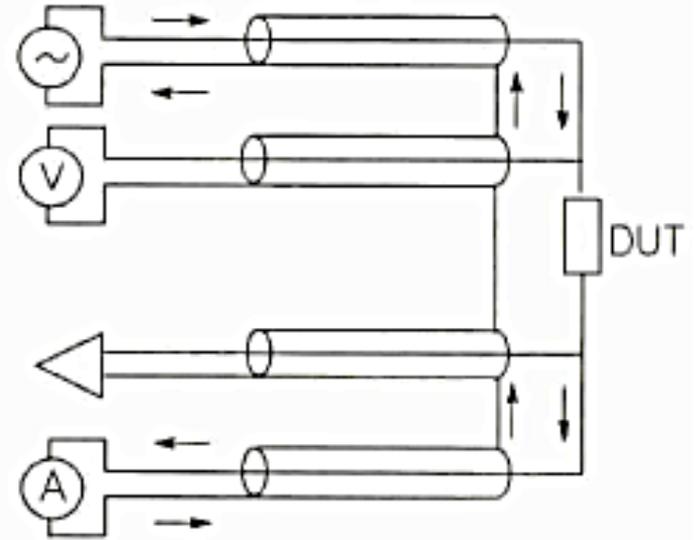


測定範囲

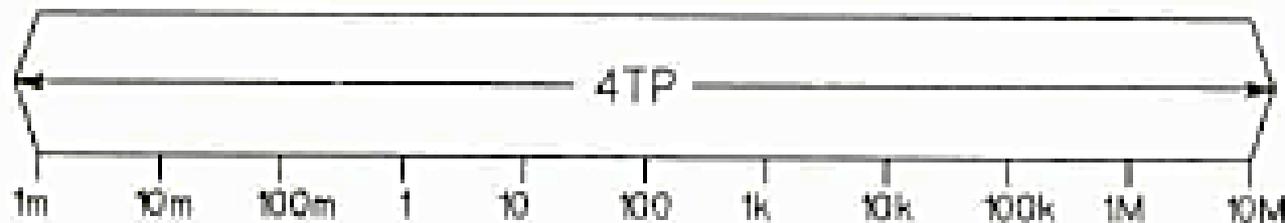
4端子対(4TP)法



(a) 4端子対法の接続方法

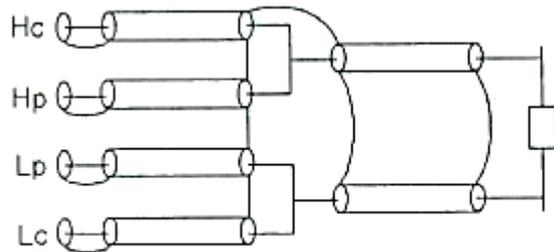


(b) 概要図

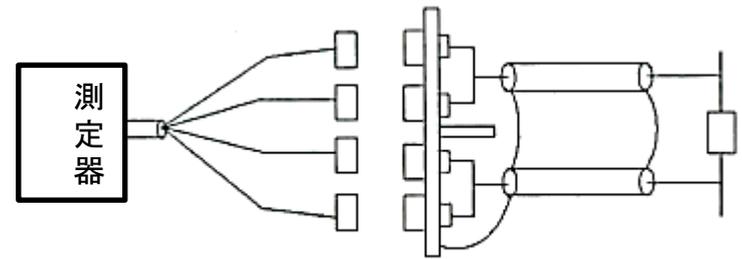


測定範囲

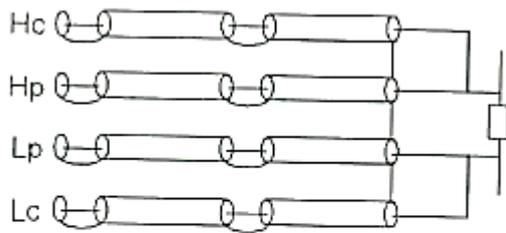
実際の結線方法



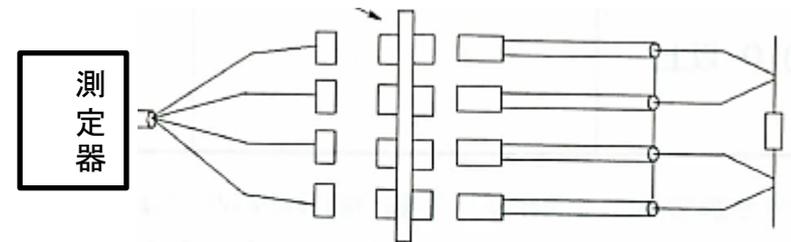
(a) シールドド 2 端子延長ケーブル接続方法



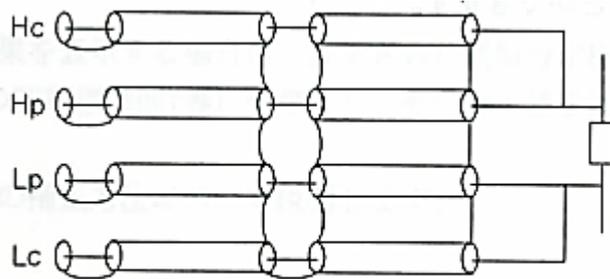
(b) シールドド 2 端子での延長例



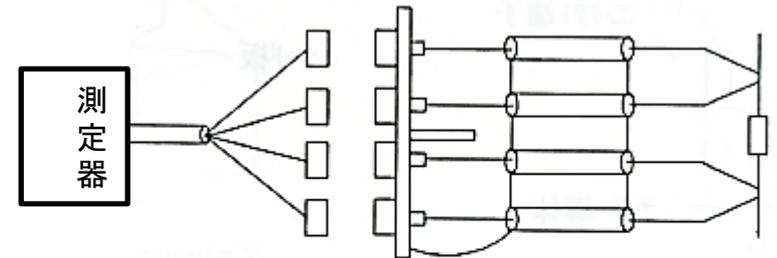
(a) 4 端子対延長ケーブル接続方法



(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

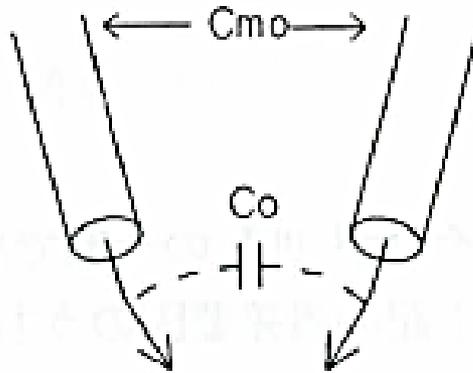


(b) シールドド 4 端子での延長例

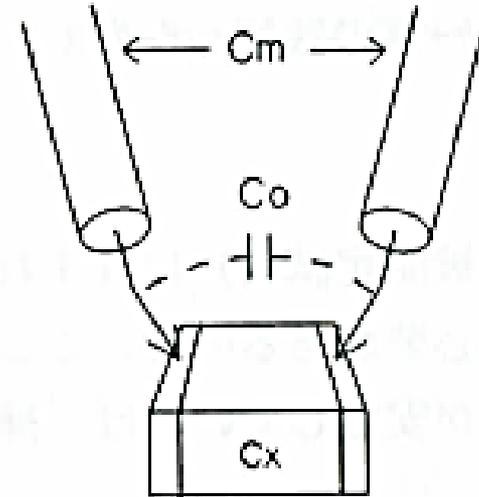
測定系の校正方法について

- 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



$$C_o = C_{mo}$$

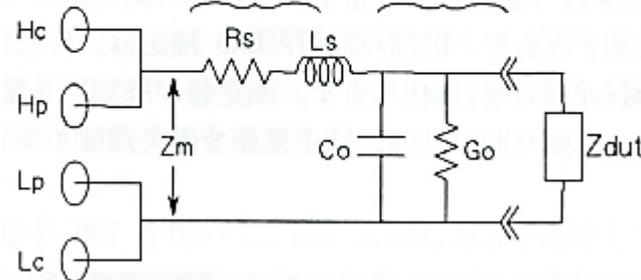


$$\therefore C_x = C_m - C_{mo}$$

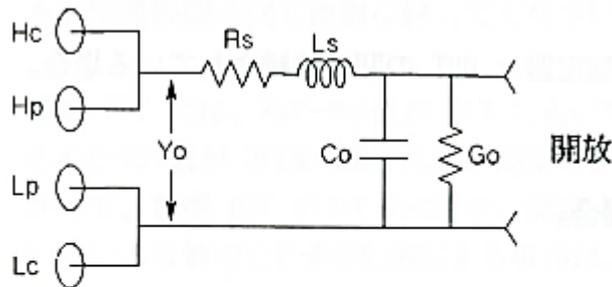
OPEN/SHORT補正

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)



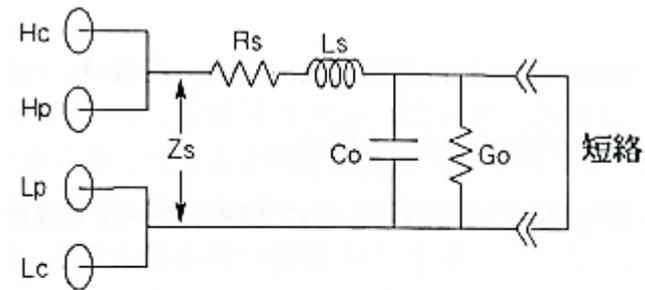
(a) テストフィクスチャの残留分



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

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

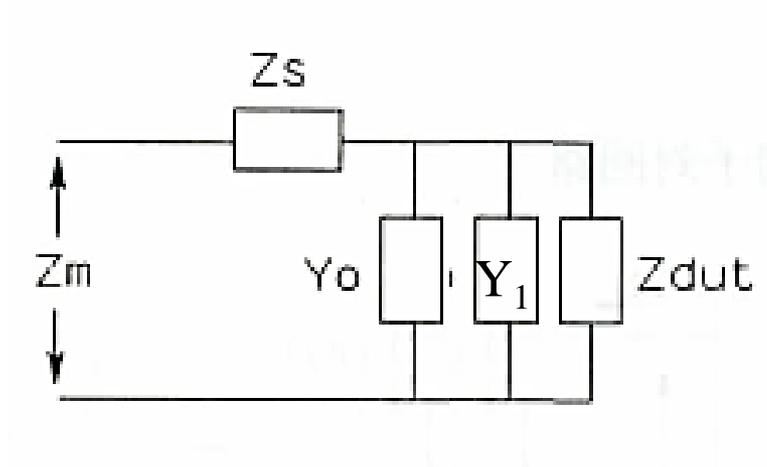
(b) OPEN補正データ測定



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

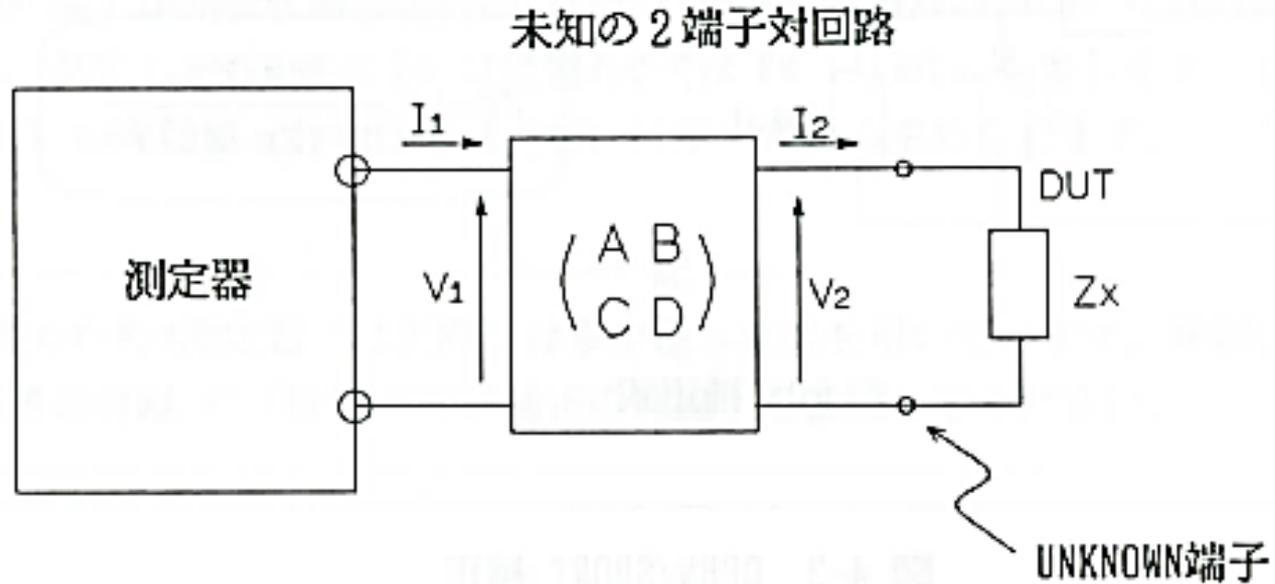
(c) SHORT補正データ測定

補正式は？



$$Z_{dut} = ?$$

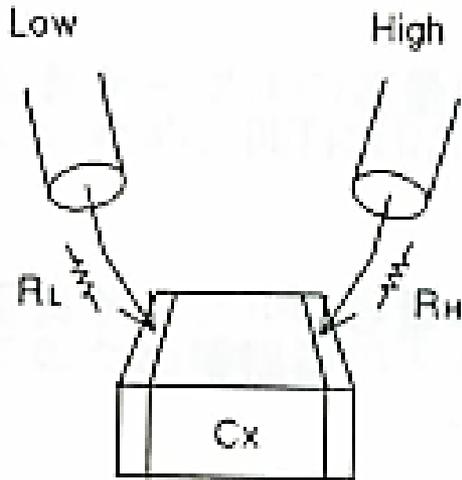
OPEN/SHORT/LOAD補正



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

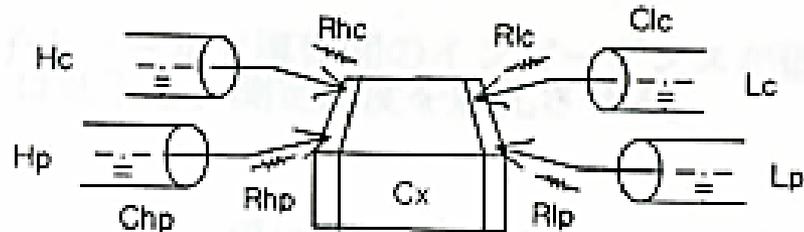
接触抵抗による測定誤差

- 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

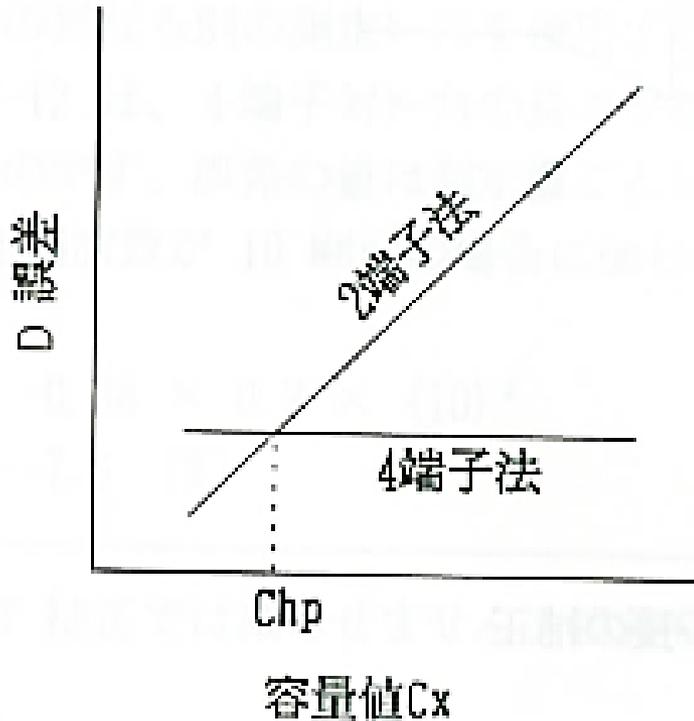
$$\begin{aligned} \text{振幅誤差} & \quad \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 C_{hp}^2 R_{hp}^2}} - 1 \\ \text{位相誤差} & \quad \omega C_{hp} R_{hp} \text{ (rad)} \end{aligned}$$

RlpとClcによる誤差

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

【4端子法】

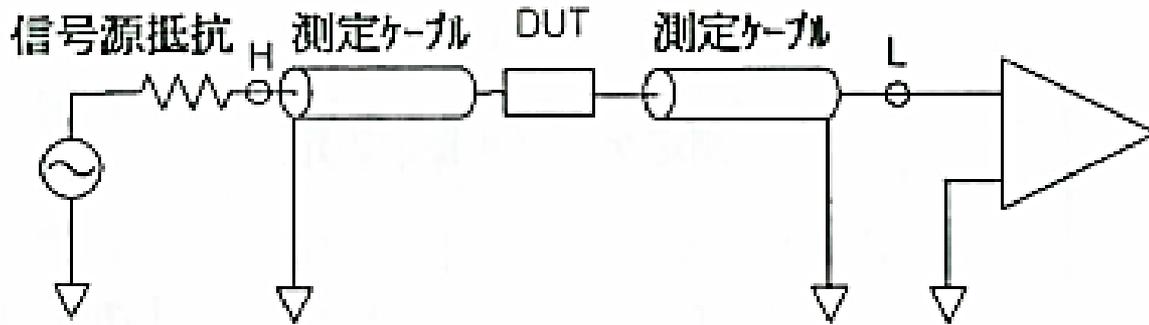
2端子法, 4端子法の接触抵抗誤差



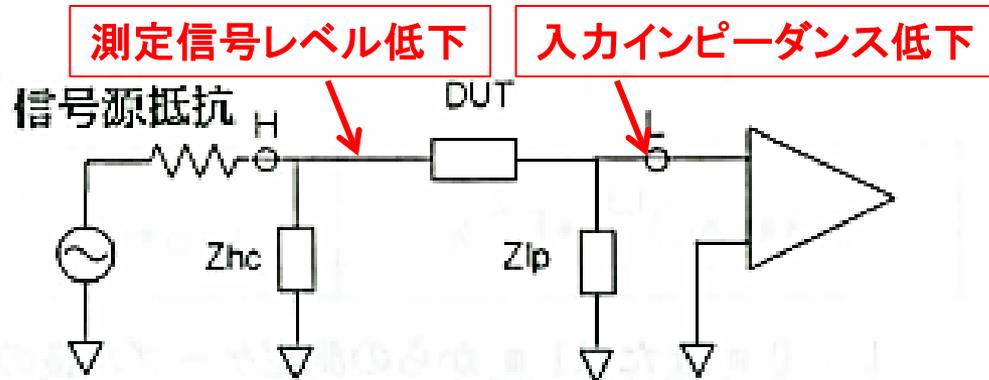
仮に $R_H=R_L=R_{hp}=R_{lc}$ で $C_{hp}=C_{lp}$ である時,
 $C_x=C_{hp}$ の時に2端子法と4端子法での
誤差が等しくなる.

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

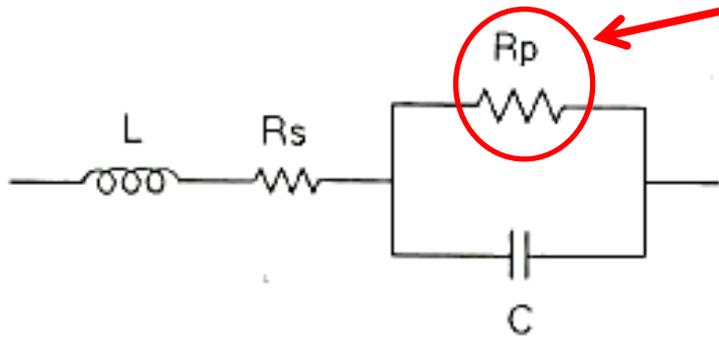
インピーダンス測定の実際

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

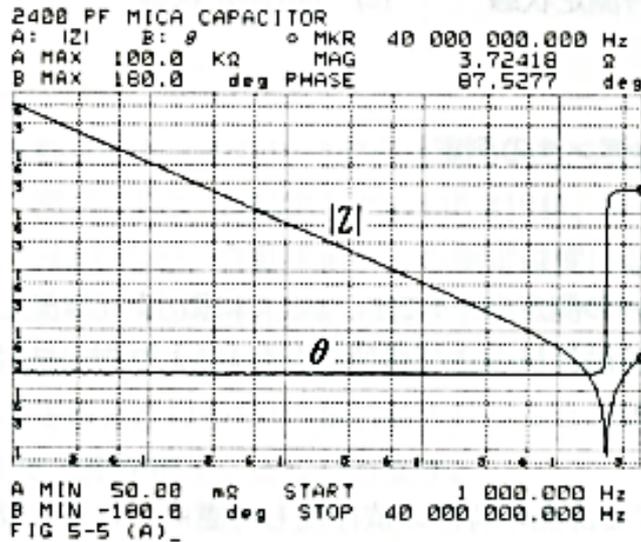
コンデンサの測定

小さい容量の場合にのみ影響

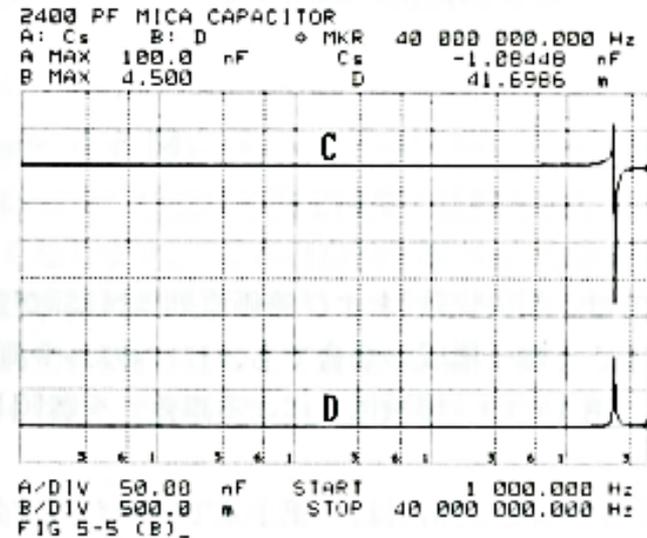


$$Z = \underbrace{Rs + \frac{Rp}{1 + \omega^2 Rp^2 C^2}}_{\text{実数部 (R)}} + j \underbrace{\frac{\omega L - \omega^2 Rp^2 C + \omega^3 Rp^2 LC^2}{1 + \omega^2 Rp^2 C^2}}_{\text{虚数部 (X)}}$$

(a)

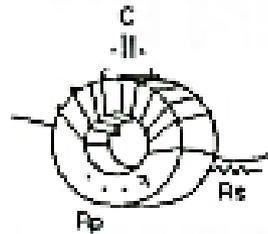
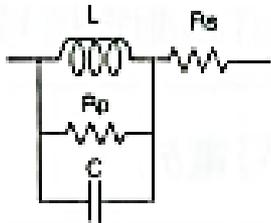


(b)

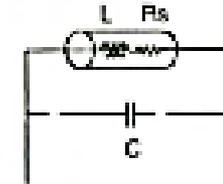
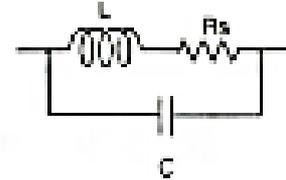


コンデンサの周波数特性例

インダクタの測定



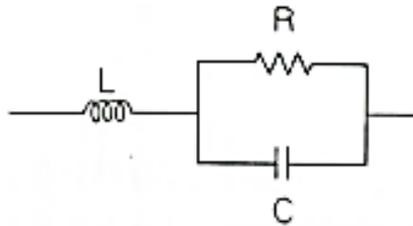
(a) 高インダクタ



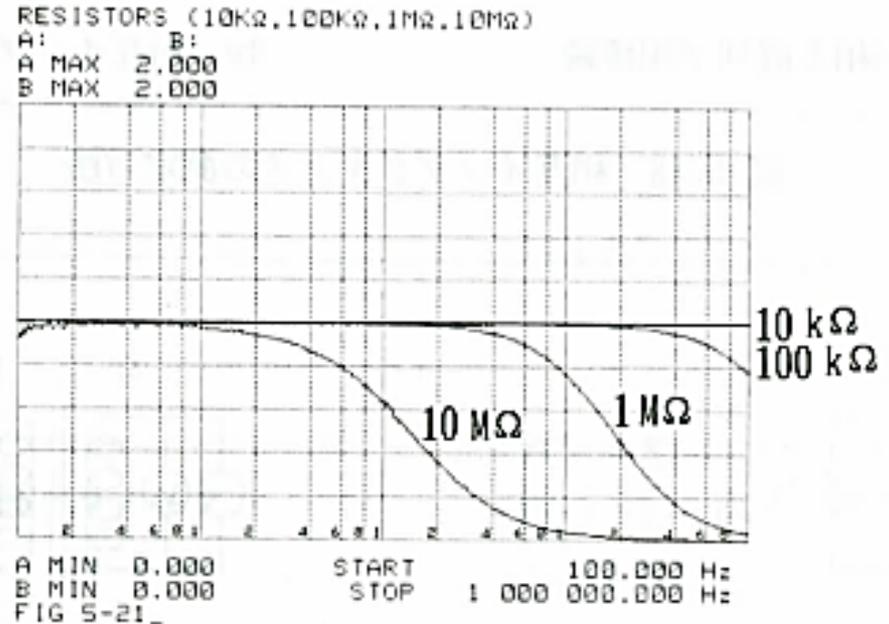
(b) 微小インダクタ

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



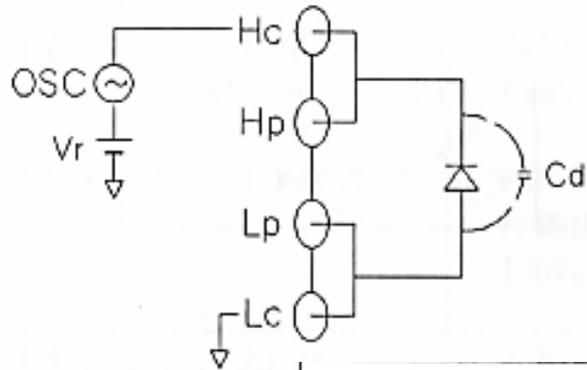
$$Z = \underbrace{\frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}}_{\text{実数部 (実効抵抗値)}} + j \underbrace{\frac{\omega L - \omega^2 R^2 C + \omega^3 R^2 LC^2}{1 + \omega^2 R^2 C^2}}_{\text{虚数部 (X)}}$$



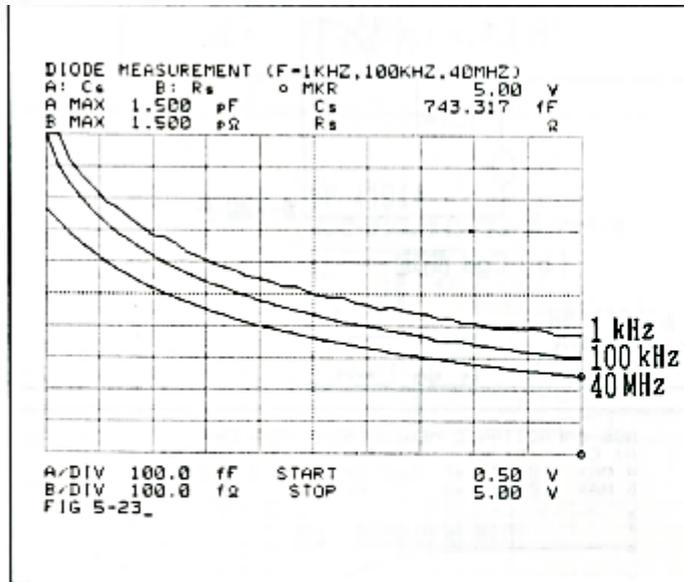
1MHz以上の高周波回路で使用する場合には、実効抵抗値が減少する。

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???

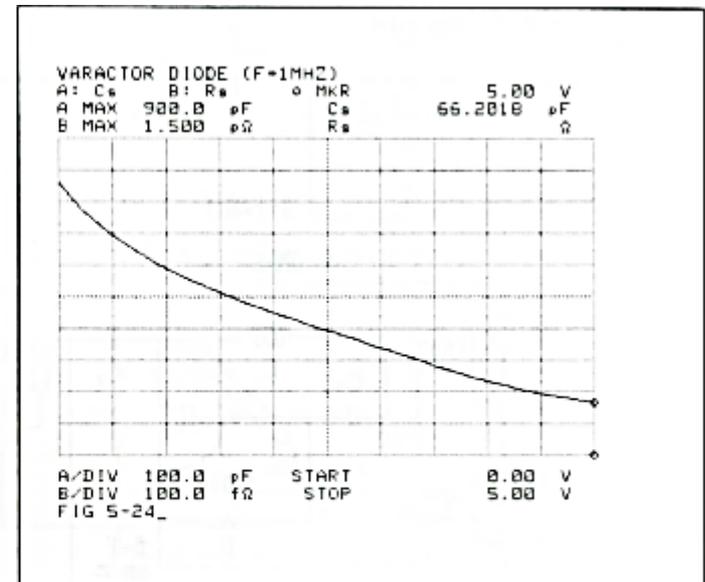
ダイオードの容量測定



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???

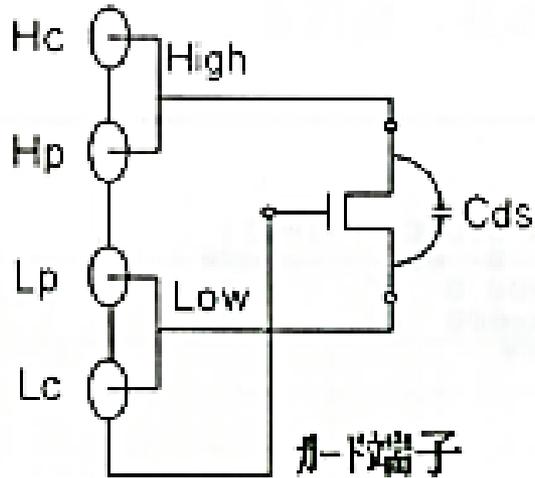
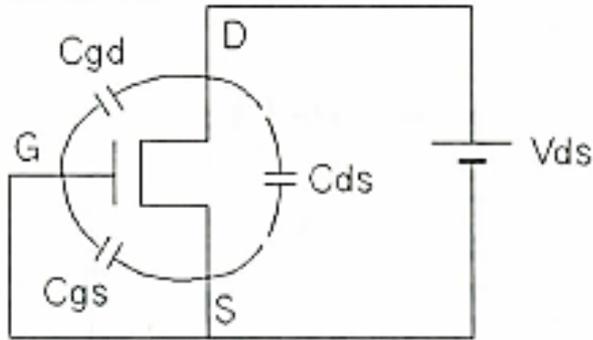


接合容量対逆バイアス
電圧特性の測定例

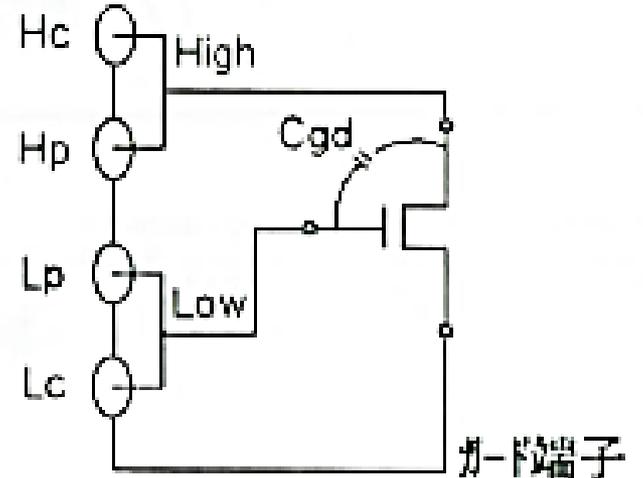


可変容量ダイオードの
C-V特性

MOSFETの測定

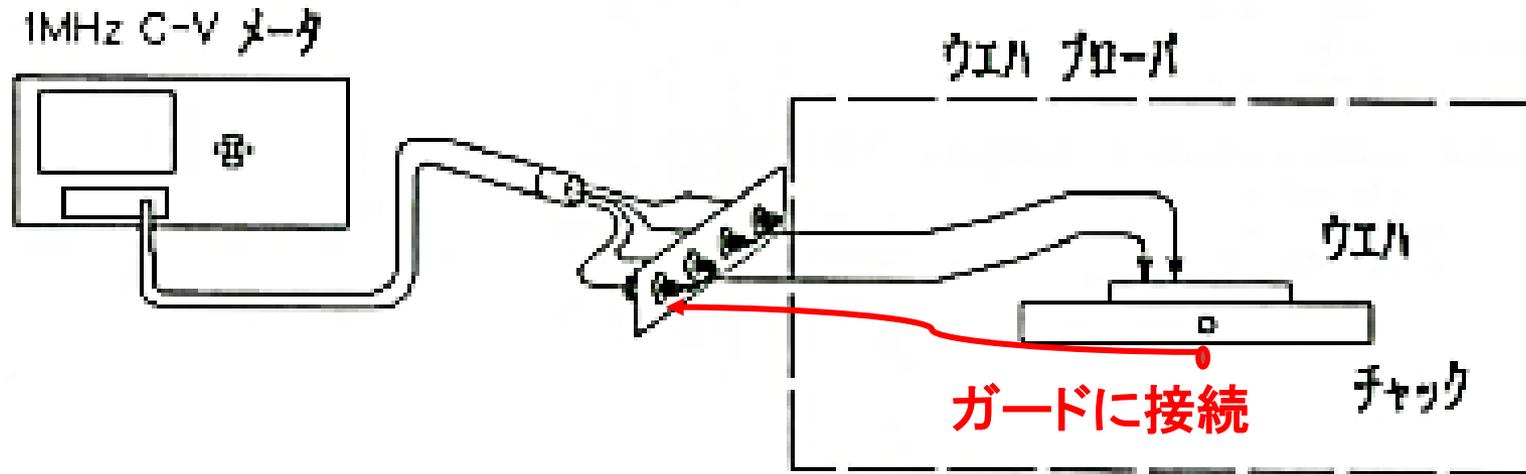


Cds測定

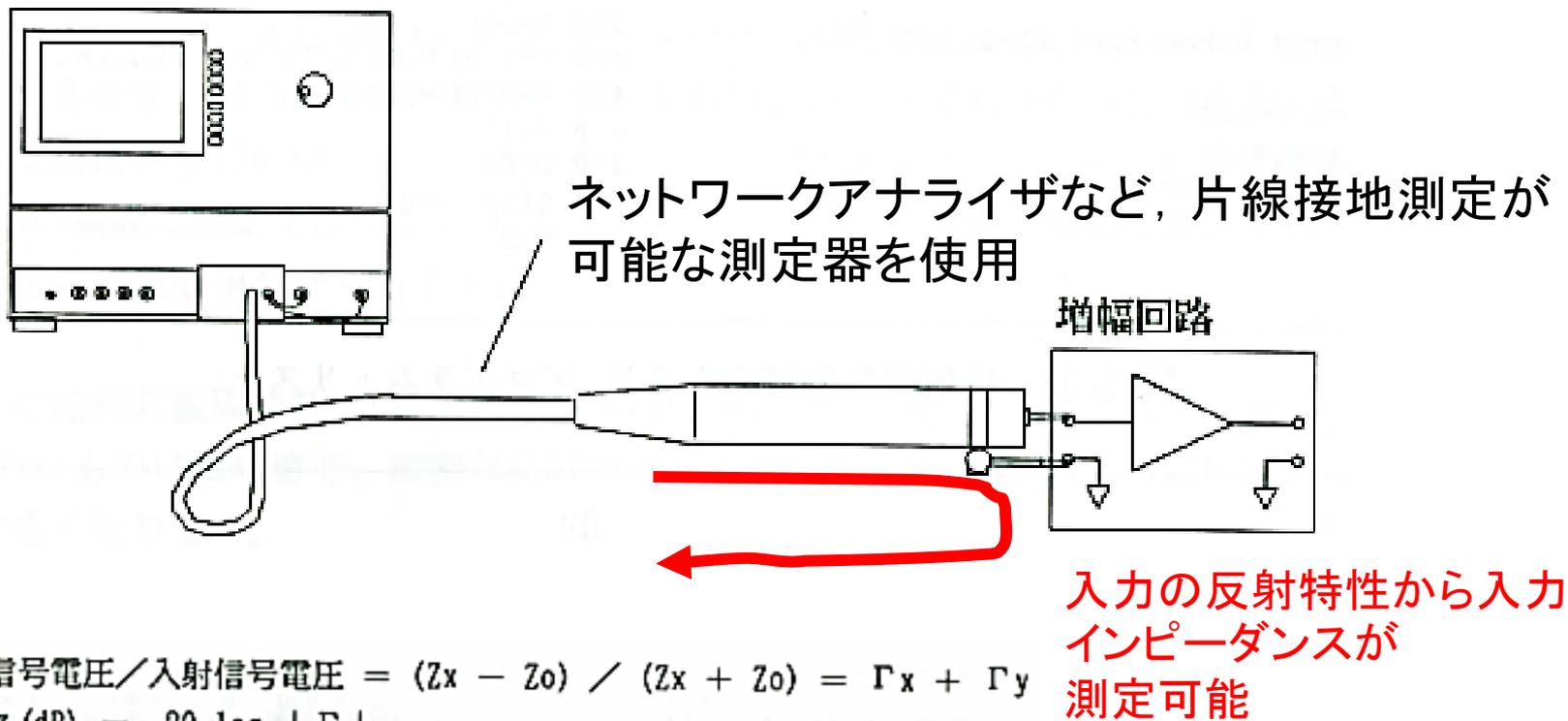


Cgd/Cgs測定

シリコンウエハー容量測定



増幅器の測定



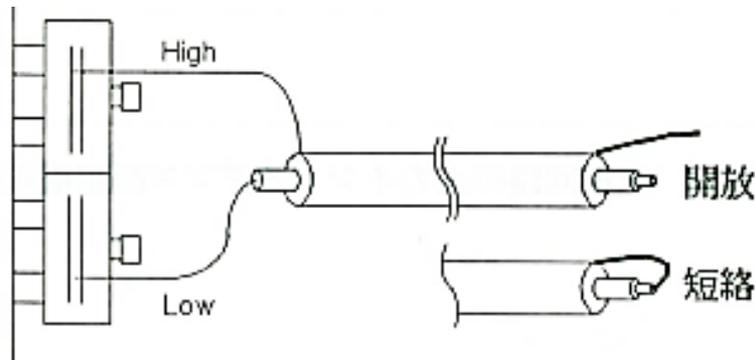
$$\Gamma = \text{反射信号電圧} / \text{入射信号電圧} = (Z_x - Z_0) / (Z_x + Z_0) = \Gamma_x + \Gamma_y$$
$$\text{リターンロス (dB)} = -20 \log |\Gamma|$$

ここで、

- Γ : 反射係数
- Γ_x : Γ の実数部
- Γ_y : Γ 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 α (dB/m)などがある



特性インピーダンス ($Z \angle \theta$):

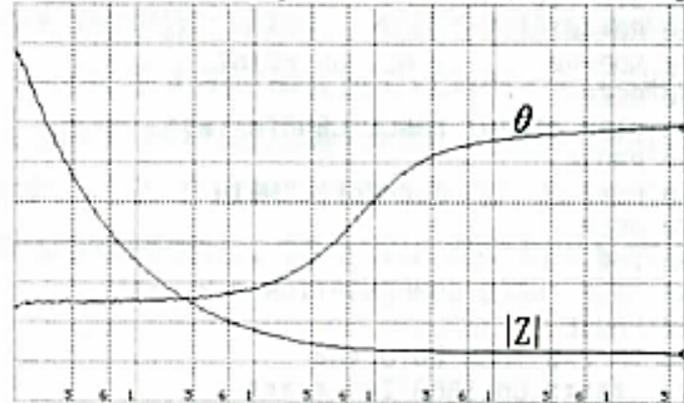
$$|Z| = \sqrt{|Z_{op}| \cdot |Z_{st}|} \quad (\Omega)$$

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

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: θ MKR 40 000 000.000 Hz
 A MAX 1.800 K Ω MAG 58.6371 Ω
 B MAX 30.00 deg PHASE -574.448 mdeg



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

減衰定数 (α) と位相定数 (β)

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

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

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。

