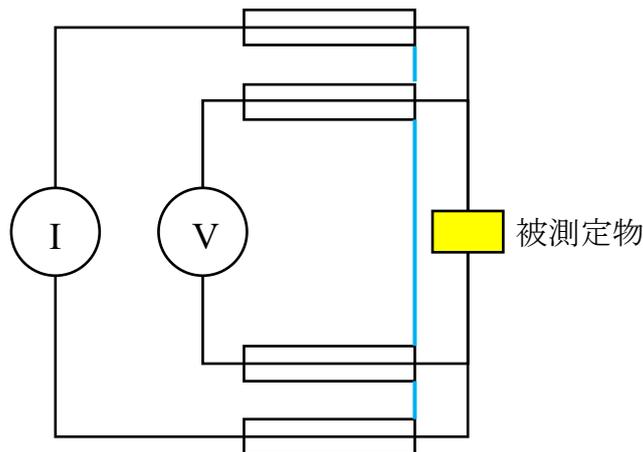


測定器

【インピーダンスアナライザに求められる要件】

- ・広い周波数帯域 **10mHz ~ 100MHz**
→ 1台ではカバーできない
- ・**逆掃引**(高周波数→低周波数)が可能
- ・**測定点毎の積算**(平均化)が可能
- ・広いインピーダンス測定範囲 → **四端子(対)法***



*四端子対法の回路図

(インピーダンス測定ハンドブック 2003年11月版, p40, Agilent Technologies より抜粋、加筆)

Solartron 製
1260



10μHz ~ 32MHz

Keysight Technologies 製
E4990A



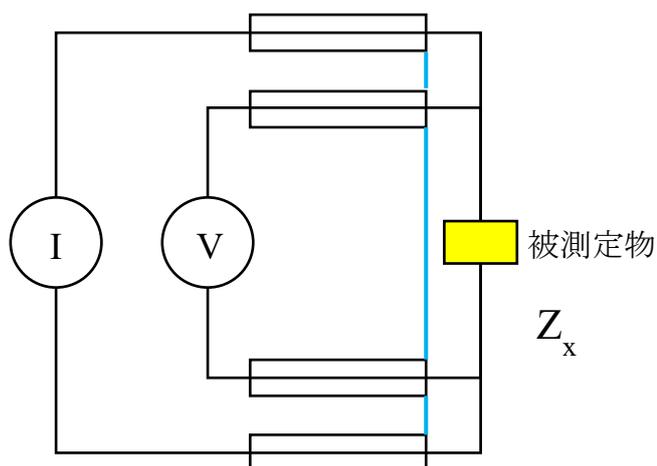
20Hz ~ 120MHz

《注》測定器写真は Solartron 社および Keysight 社カタログより

測定器

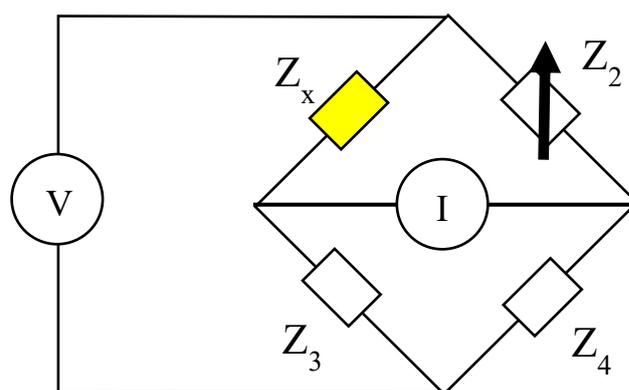
	Solartron 1260	Keysight E4990A
周波数帯域	10 μ Hz ~ 32MHz	20Hz ~ 120MHz
測定方式	周波数応答解析(FRA)法 ¹⁾	自動平衡ブリッジ法 ²⁾
校正・補正	なし	ケーブル長校正、 open-short-load 補正
(対数)掃引	正、逆	正、逆
測定点毎の積算	Auto Integration ; 3 回 or 時間	回数
四端子(対)法	可 (O,I,H,L)	可 (Hc,Lc,Hp, Lp)

1) FRA(Frequency Response Analysis)



$$\text{インピーダンス} \quad Z_x = \frac{\text{電圧 } V}{\text{電流 } I} \quad [\Omega]$$

2) 平衡ブリッジ



$$\text{インピーダンス} \quad Z_x = \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_4} \quad [\Omega]$$

測定器本体性能と 測定システムの正しく測定可能な範囲

【測定器本体性能とは】

同軸ケーブルや測定治具を装着していない状態での性能を指す。

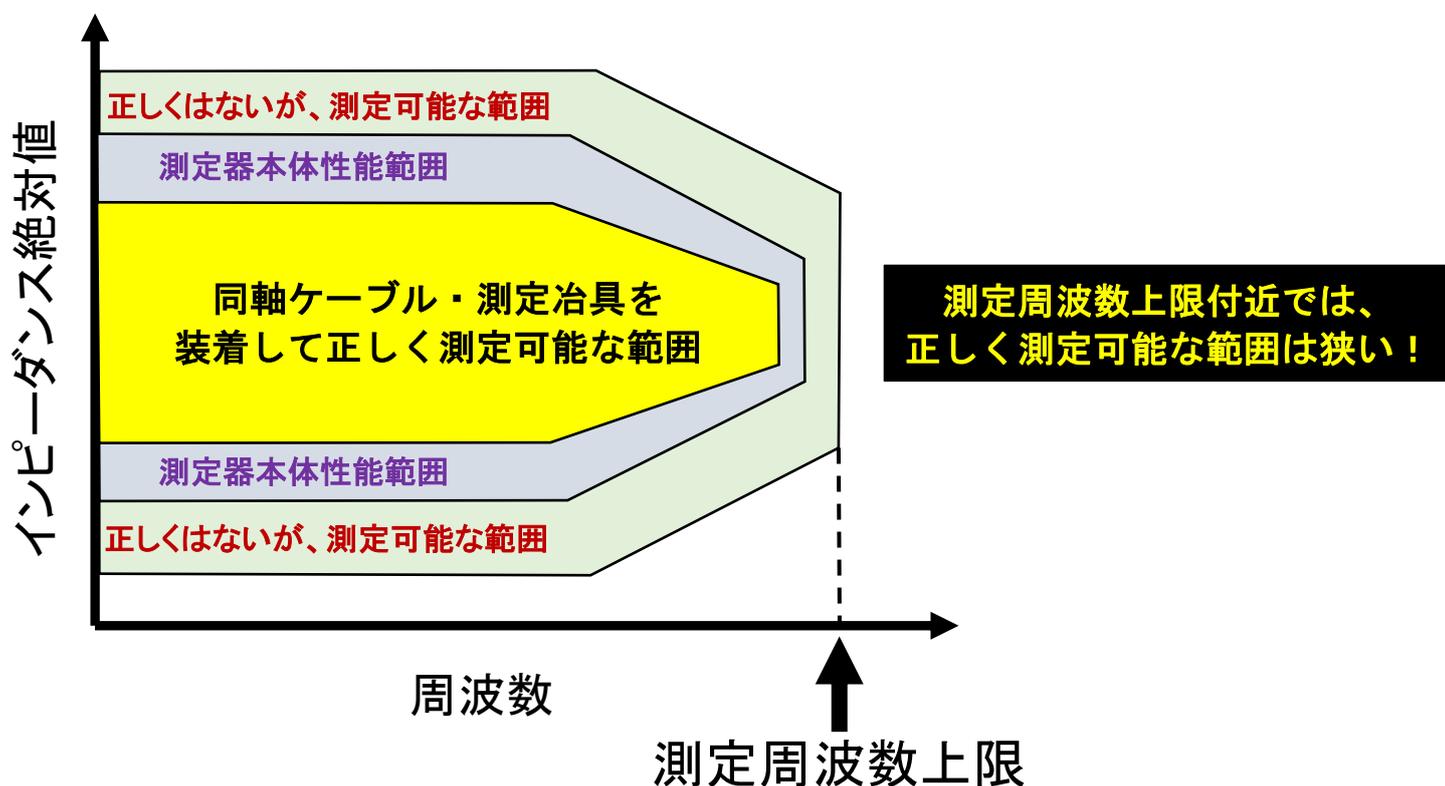
《例》 Solartron 1260 の場合の”精度 1°&1%”の範囲

100mΩ ~ 1MΩ @ 100kHz

1Ω ~ 100kΩ @ 1MHz

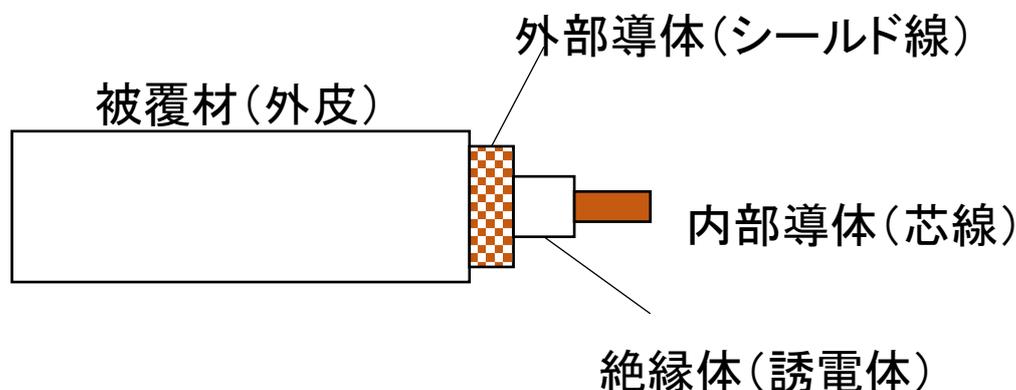
10Ω ~ 10kΩ @ 10MHz

なし @ >10MHz



★測定器本体性能を凌駕することはできない！
同軸ケーブルや測定治具を装着することにより、
正しく測定可能な範囲は狭まる！
※特にインピーダンス値の測定下限に注意！

同軸ケーブル



インピーダンス測定によく用いられる 2 種類

★JIS 規格(日本); **3D-2V**

絶縁体の外径	特性インピーダンス	絶縁体の種類	外部導体
3mm	D ; 50Ω C ; 75Ω	2 ; PE(ポリエチレン)	V ; 一重編組 W ; 二重編組

◎外皮の色 **3D-2V(50Ω) ; 灰色** vs 3C-2V(75Ω) ; **黒色**

《注》映像受信用に 3C-2V が使用される。

★MIL 規格*(アメリカ) ; **RG-58A/U**

* ; Military Specification and Standards

Radio Frequency Coaxial Cable <u>General Purpose</u>	型式	付加記号	一般用途
	58 ; 50Ω 59 ; 75Ω	制定順(A,B,...)	U; Universal

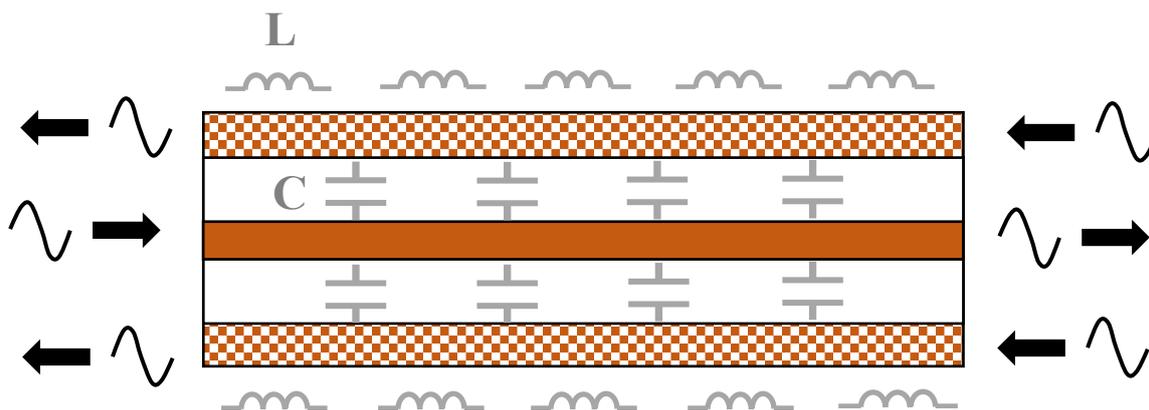
◎外皮の色 いずれも黒色

インピーダンス測定には特性インピーダンス 50Ω の同軸ケーブルを使用する !

同軸ケーブル

特性インピーダンス Z_0

《同軸ケーブル縦断面》



L; コイルのリアクタンス C; コンデンサのキャパシタンス

◎外部導体(シールド線)には帰還電流が流れる!

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega]$$

【参考】インピーダンス Z

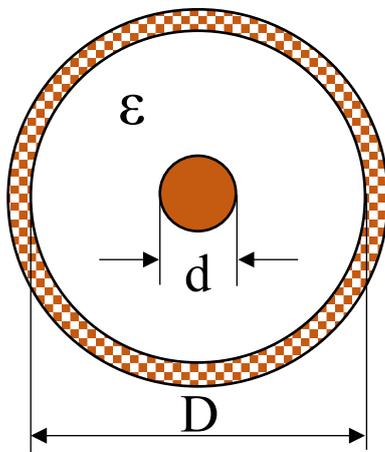
$$Z = \frac{\overset{\text{電圧}}{V}}{\underset{\text{電流}}{I}} \quad [\Omega]$$

同軸ケーブルの特性インピーダンス Z_0 (50Ω) は揃える!

同軸ケーブル

特性インピーダンス Z_0

《同軸ケーブル断面》



ϵ ; 誘電率

ϵ_0 (真空誘電率) \times ϵ_r (比誘電率)*

PE(ポリエチレン) $\epsilon_r \sim 2$

PI(ポリイミド) $\epsilon_r \sim 3$

テフロン $\epsilon_r \sim 2.2$

* 材料により周波数依存性あり

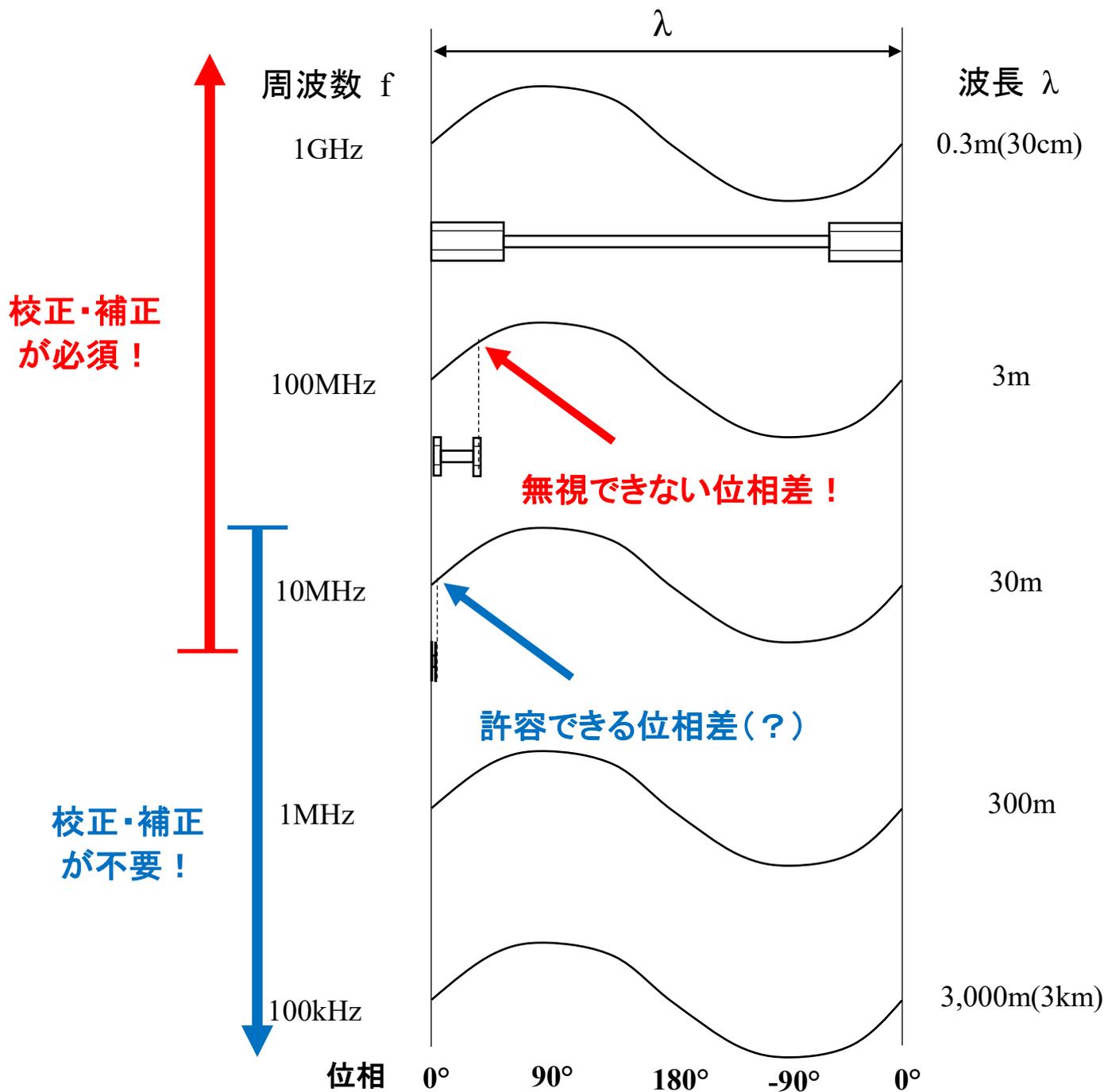
d ; 内部導体外径

D ; 外部導体内径(誘電体外径)

$$Z_0 \sim \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log_{10} \frac{D}{d} \quad [\Omega]$$

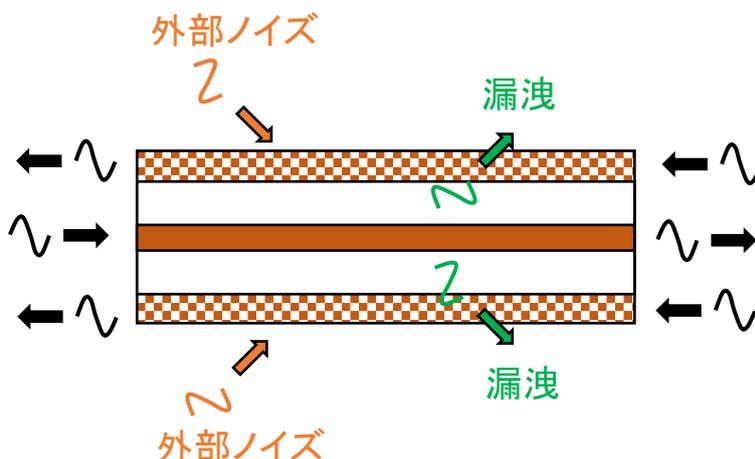
同軸ケーブル

周波数毎の波長で規格化した時の同軸ケーブル(0.3m)の見え方



同軸ケーブル

外部導体の役割とコネクタ



◎外部導体は、高周波数帯域において内部導体からの漏洩および外部からのノイズを遮蔽している。

◎外部導体には、帰還電流が流れる。

Bayonet Neill Concelman

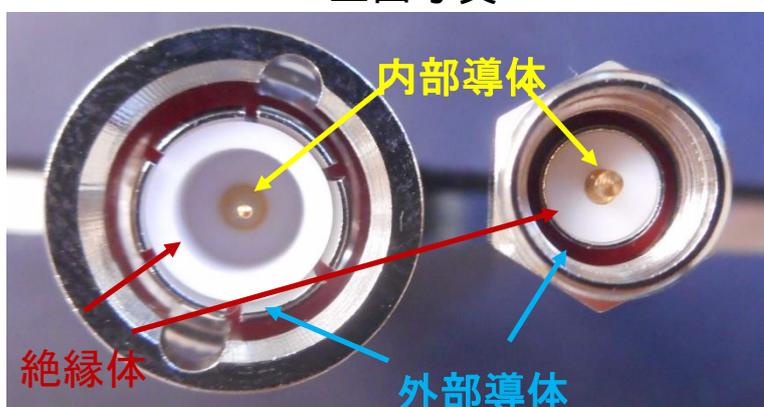
(Baby-series N Connector, British Naval Conconnector など)

Sub Miniature Type A

同軸ケーブルの接続用コネクタ(左;BNC 右;SMA)

側面写真

正面写真



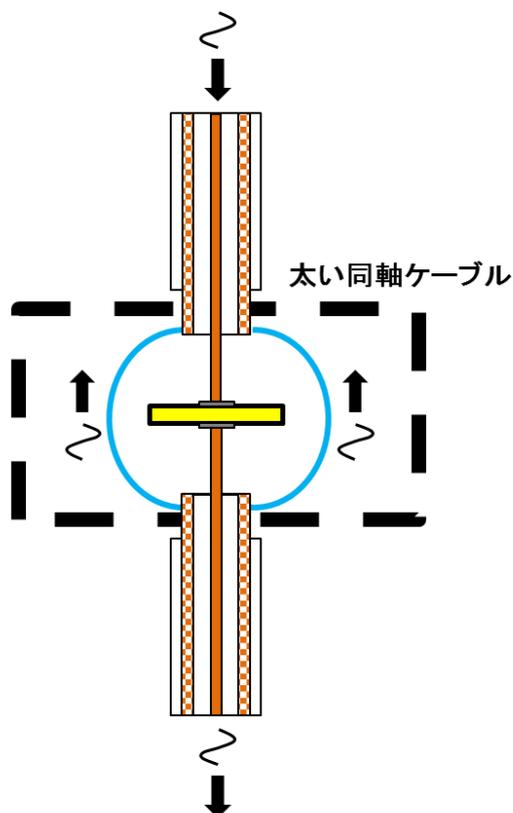
※同軸ケーブルとコネクタの特性インピーダンスは揃える。

測定治具

【測定治具に求められる要件】

- ・温度可変 **-50℃ ~ 300℃ * ~ 800℃(燃料電池用材料)**
*; 絶縁体としてポリマーが使用可能な最高温度
 → **外部冷却+ヒーター内蔵式**、循環ガス加熱冷却式など
- ・ガス雰囲気制御可能(真空引き+ガス置換)
 → 測定治具容器は**密閉式** かつ **ガス導入・排出口**付
- ・電磁的に遮蔽 → 測定治具容器は**金属製**
- ・四端子対法適用可 → **真空電流導入端子** 4個**
**; 真空状態の機器内部への電気信号授受のために真空壁に取り付けた同軸タイプの真空部品
- ・同軸ケーブルを試料直近まで配し、**帰還電流経路**も試料直近に配す。
- ・グローブボックス内での作業可能

測定治具内部のイメージ図

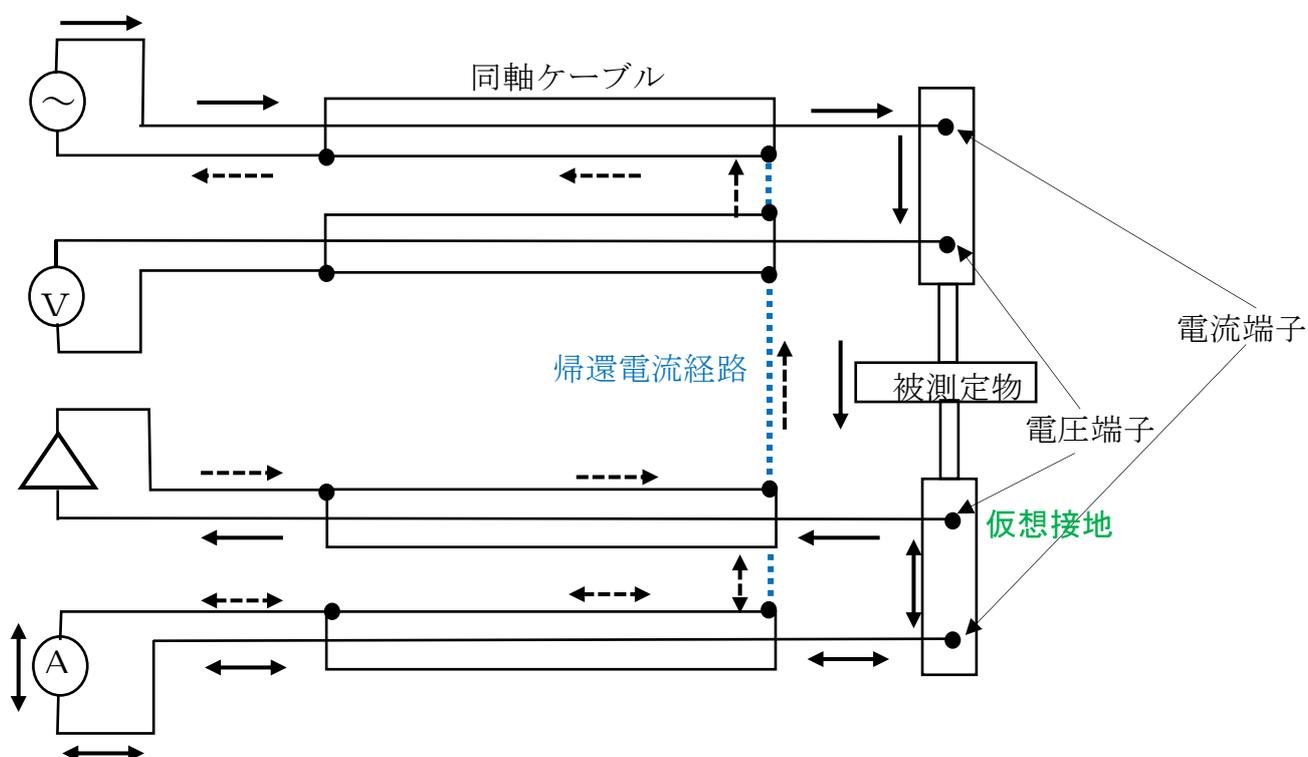


《注》この図は二端子対法であり、四端子対法ではない！

測定治具

四端子対法の回路図

(インピーダンス測定ハンドブック 2003年11月版, p40,
Agilent Technologies より抜粋、加筆)

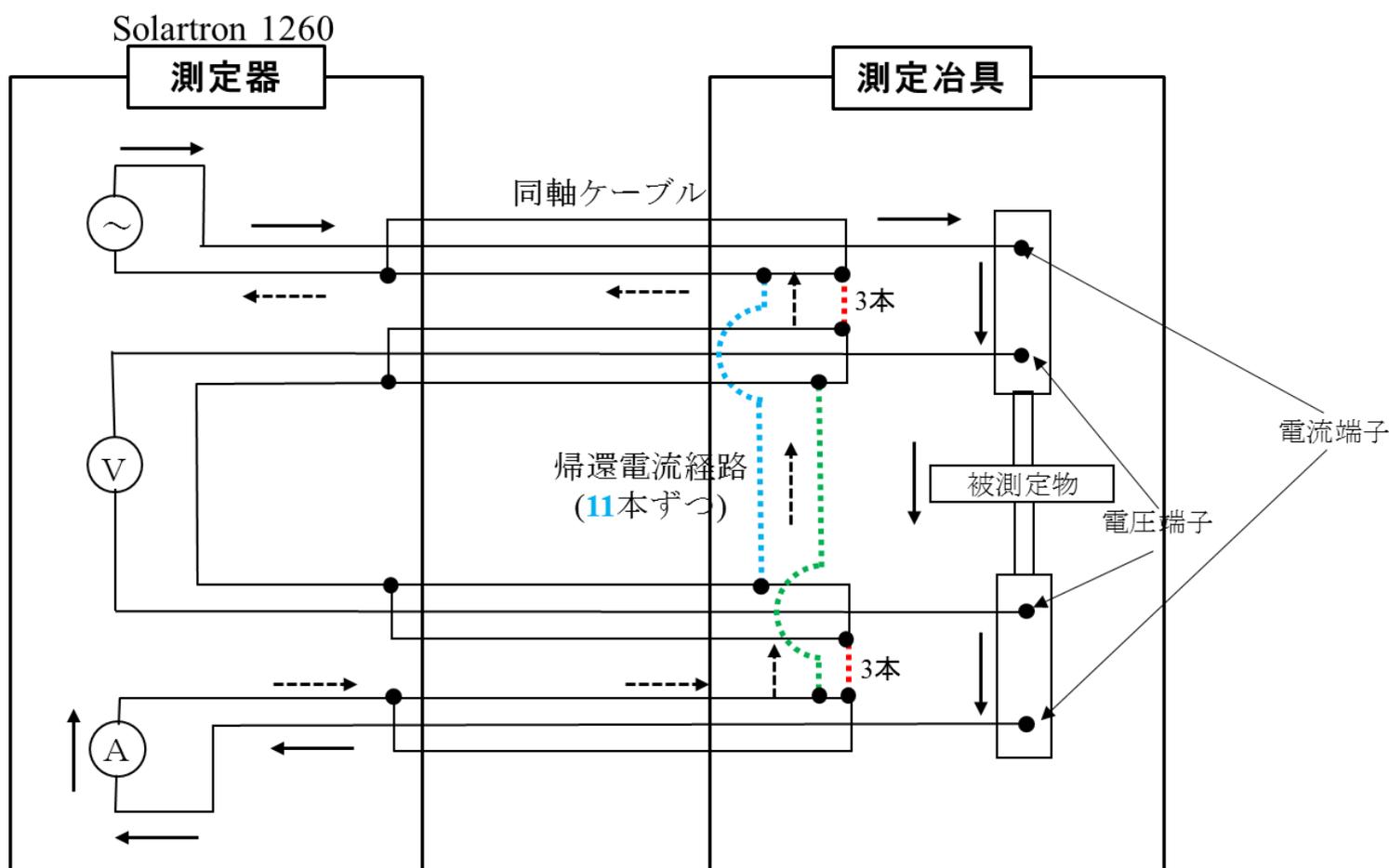


**4本の同軸ケーブルとも被測定物直近まで配置され、
帰還電流経路も被測定物直近に配置される。**

測定治具

【Solartron および Keysight 両方に適合する配線】

《注》測定器は Solartron1260 で図示している。



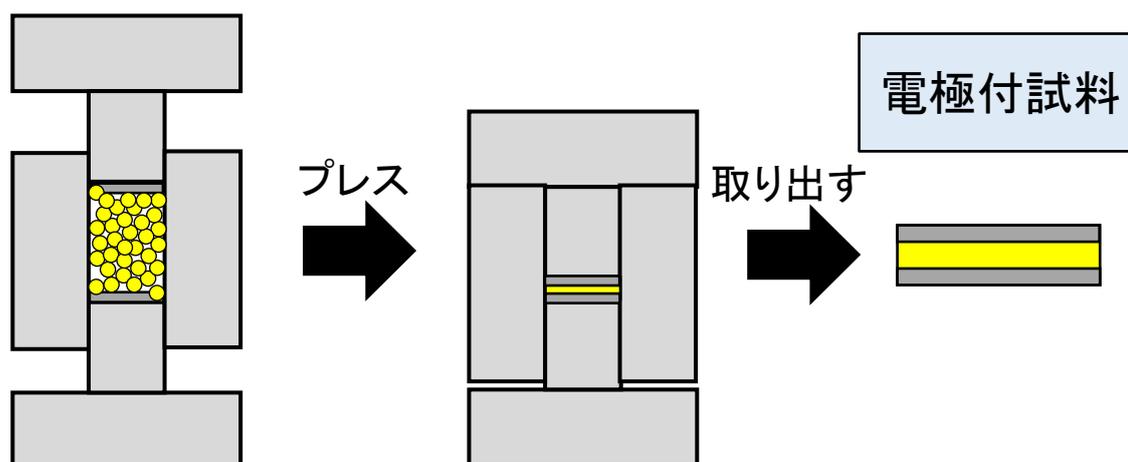
帰還電流経路は 11 本の電線が被測定物を取り囲む (30°ずつ) ように配置される。

電極付試料

(i) 粉体試料

金属箔や金属粉などの導電性材料と一緒にプレス

《例》 電極材料; In 箔、Li 箔、金粉など



(ii) バルク試料

・試料表面に導電性材料のペーストを塗布する。

《例》 カーボンペースト、銀ペーストなど

・試料表面に柔らかい導電性材料を圧着する。

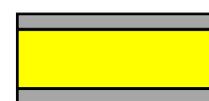
《例》 Li 箔など

・気相法により試料表面に導電性材料を成膜する。

《例》 導電性材料 ; 金、白金、カーボン、Li など

気相法 ; 真空蒸着法(抵抗加熱、スパッタ、EB など)

電極付試料



(iii) 電極サイズと試料厚み

★試料毎にインピーダンス値を基に決めてやる必要あり！

高伝導度材料 → 小さな電極、厚い試料(>1mm^t)

低伝導度材料 → 大きな電極、薄い試料(<1mm^t)

【注意】電極は試料端面全面に作製する！

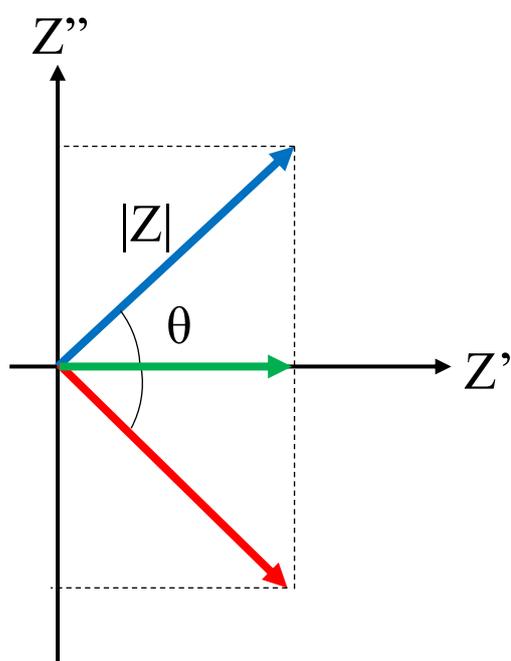
インピーダンス測定結果のグラフ化

$$Z = \overset{\text{実部}}{Z'} + \overset{\text{虚数単位}}{j} \overset{\text{虚部}}{Z''}$$

$$Z' = |Z| \overset{\text{位相}}{\cos\theta}$$

$$Z'' = |Z| \sin\theta$$

$$j^2 = -1$$



$$Z = 2\pi j f L$$

$\theta > 0$; インダクタンス成分 (L [H])

※電気化学測定ではインダクタンス成分は出現しない...

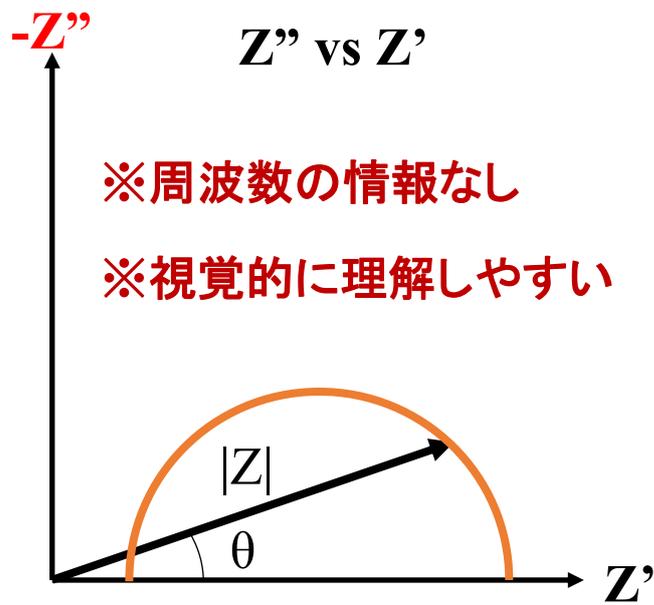
$\theta = 0$; 純抵抗成分 (R [Ω]) $Z = R$

$\theta < 0$; キャパシタンス成分 (C [F])

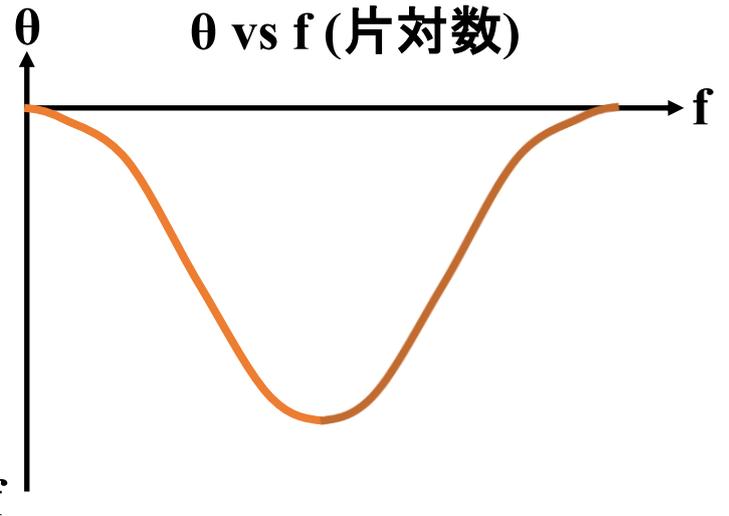
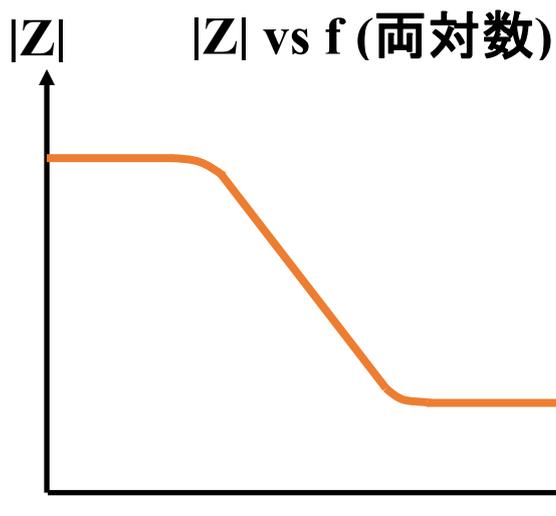
$$Z = \frac{1}{2\pi j f C}$$

インピーダンス測定結果のグラフ化

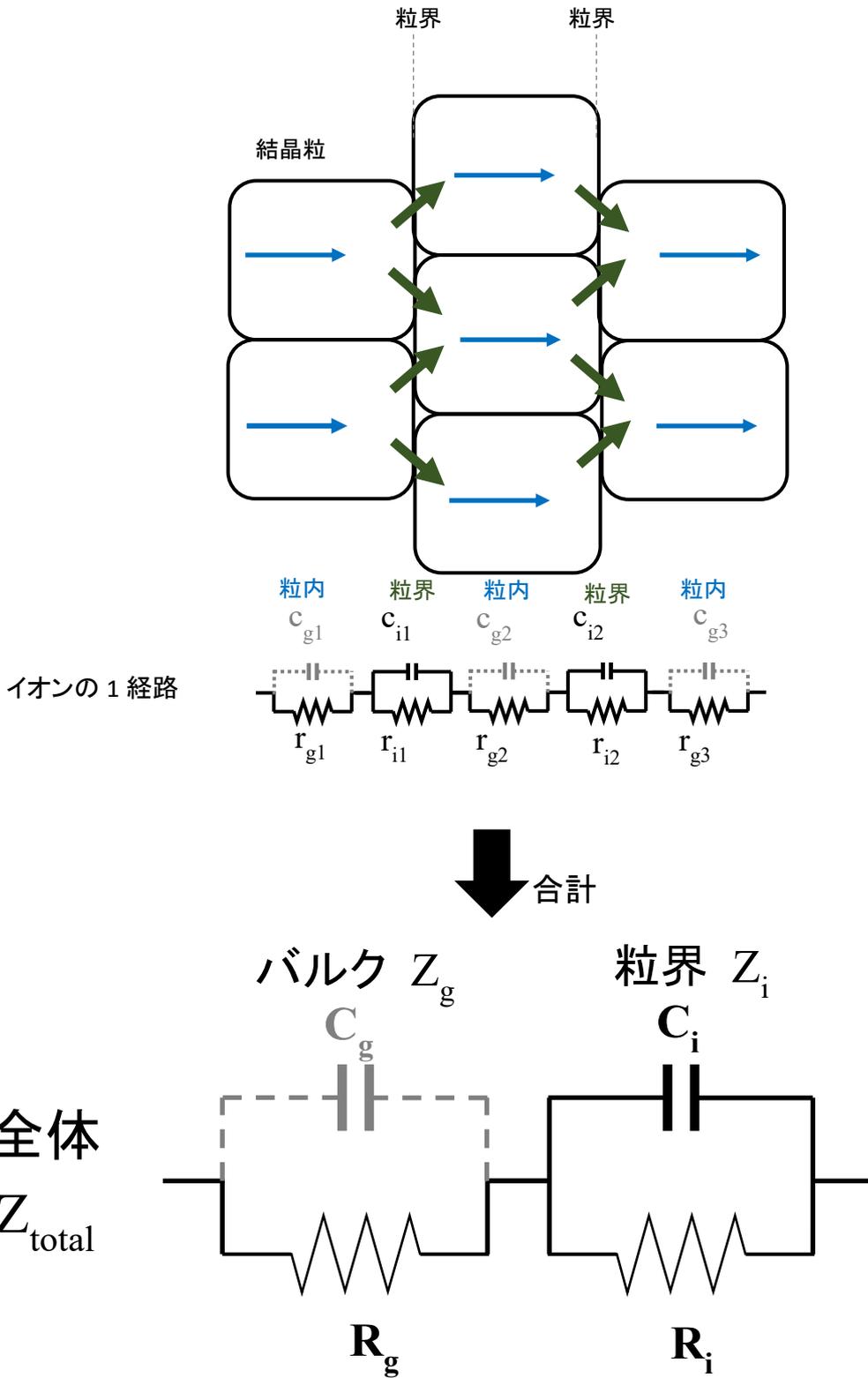
Nyquist 線図



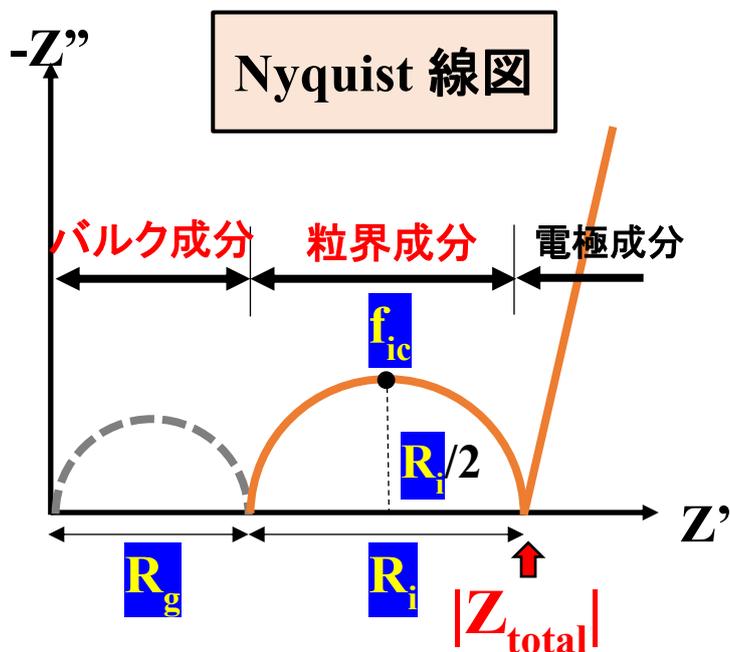
Bode 線



インピーダンス測定結果のグラフ化



インピーダンス測定結果のグラフ化



全伝導率

$$\sigma \left[\frac{\text{S}}{\text{cm}} \right] = \frac{1}{|Z_{\text{total}}| \left[\Omega \right]} \times \frac{t \left[\text{cm} \right]}{S \left[\text{cm}^2 \right]}$$

試料厚み
電極面積

$$C_i = \frac{1}{R_i \times 2\pi \times f_{ic}}$$

- 半円弧の両端(節)と頂点に着目する。
- 頂点周波数 f_c の差が充分ない場合には半円弧同士が重なった歪んだ円弧となる。

★インピーダンス測定結果から、下記がわかる。

バルク成分 → 物質自体の良し悪し

粒界成分 → 成形性の良し悪し