

小形アンテナ測定の基礎 Fundamental Technologies for Small Antenna Measurement

深沢 徹

Toru FUKASAWA

金沢工業大学

Kanazawa Institute of Technology

概要

ここでは比較的小型の無線機に内蔵され、基板に一体化形成されたり、部品のように実装されたり、外部に設置されたりするアンテナも含めて「小形アンテナ」と定義し、小形アンテナ測定の基礎について述べる。アンテナ特性の測定法としては大分すると、測定用の信号を外部から与えるパッシブ測定と、アンテナと無線機を一体化した特性を測定する OTA(Over The Air)測定があるが、ここでは前者に焦点を当てる。

上記小形アンテナへのケーブルの接続法、インピーダンス測定法、放射パターン測定法を示す。小形アンテナ測定ではケーブルへの不平衡電流漏洩が測定結果に大きな影響を及ぼすことが知られている。ここではその影響を示す例を紹介し、測定精度を向上させるための不平衡電流の低減法についていくつか紹介する。

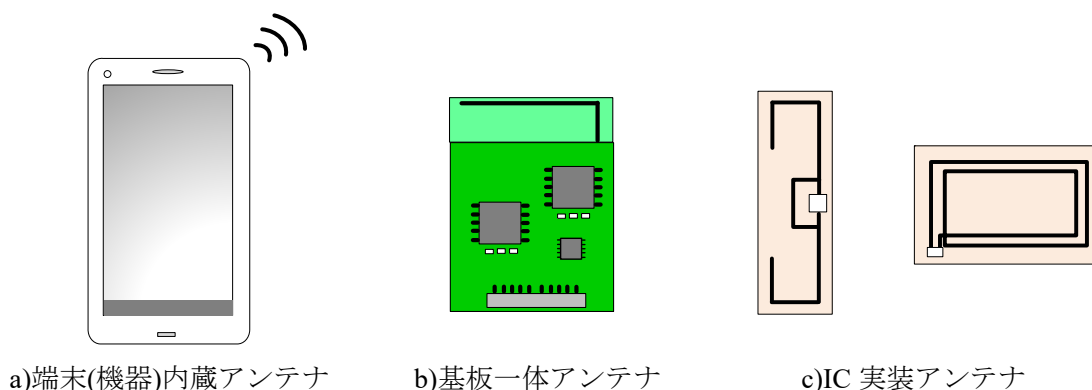


図 測定対象とする小形アンテナの例

Abstract

In this article, the term “small antenna” is defined to include antennas that are built into relatively compact radio devices, integrated into circuit boards, mounted like components, or installed externally. The fundamentals of small antenna measurements are described. Antenna characteristics can be measured using two methods: passive measurements, where test signals are supplied externally, and OTA (Over The Air) measurements, which evaluate the characteristics of an antenna integrated with a radio device. The focus here is on the passive measurement.

Methods for cable connection to small antennas, impedance measurement, and radiation pattern measurement are presented. It is well known that in small antenna measurements, common-mode current leakage on the cable can significantly affect the results. Examples of such effects are introduced, along with several methods for reducing common-mode currents to improve measurement accuracy.

小形アンテナ測定の基本

Fundamentals of Small Antenna Measurement

深沢 徹[†]

Toru FUKASAWA[†]

†金沢工業大学

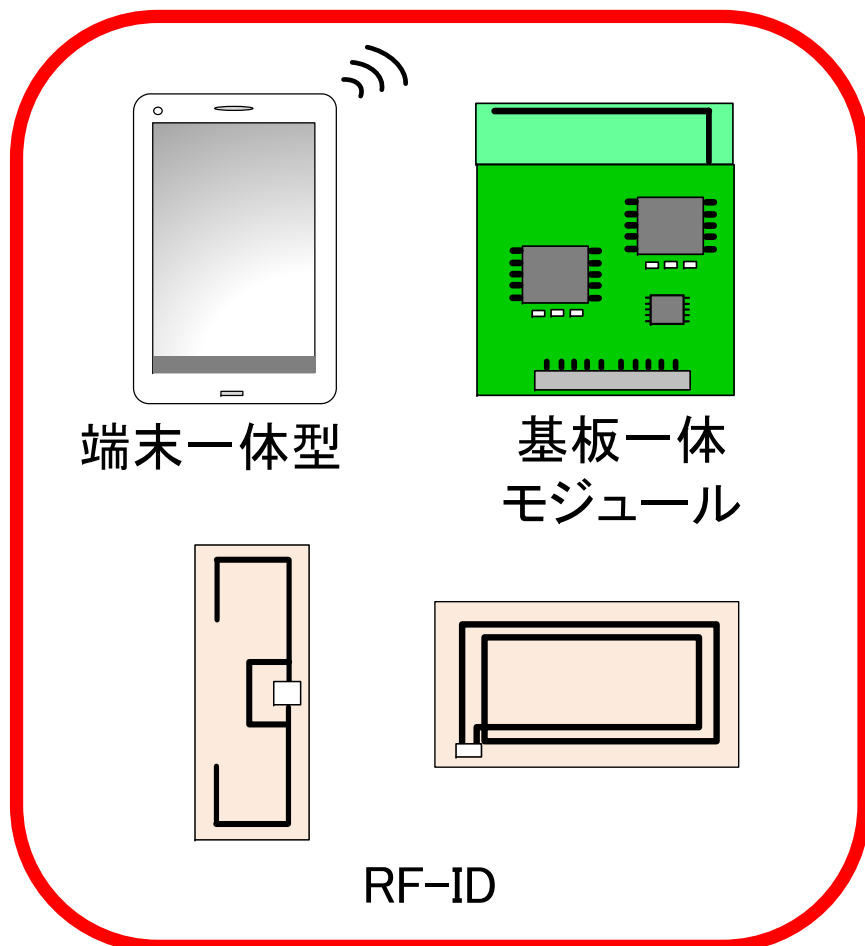
Kanazawa Institute of Technology

fukasawa.toru@neptune.kanazawa-it.ac.jp

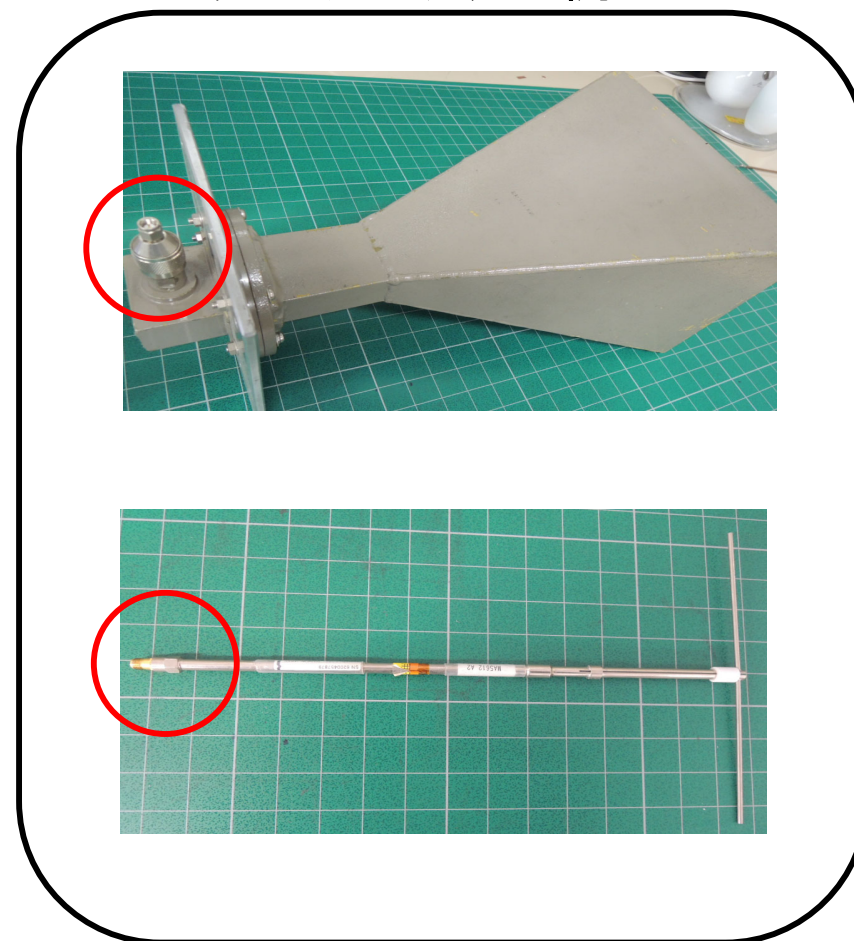
1. 対象とする被測定アンテナの形態と測定項目

- ・対象とするアンテナ→小形アンテナ(機器実装状態、基板一体化)
- ・基板や端末と一体で測定する必要あり

小形アンテナの例



大型アンテナの例



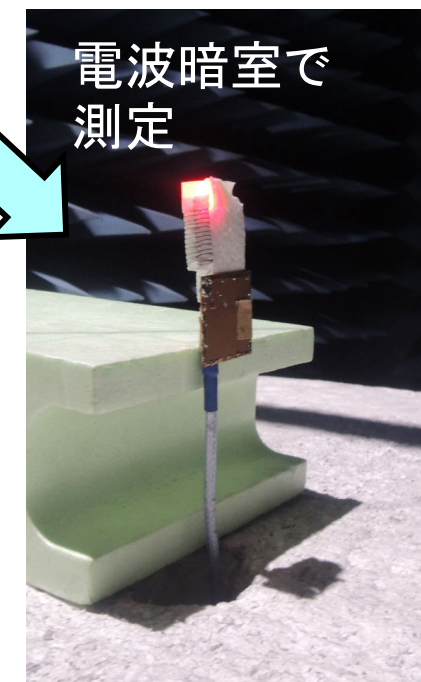
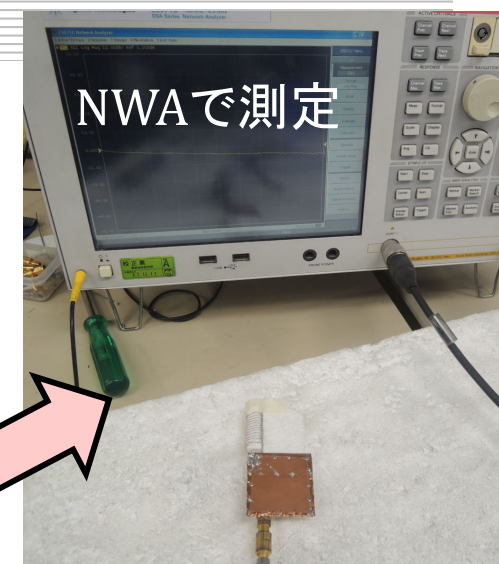
コネクタあり

コネクタ無し

1. 対象とする被測定アンテナの形態と測定項目

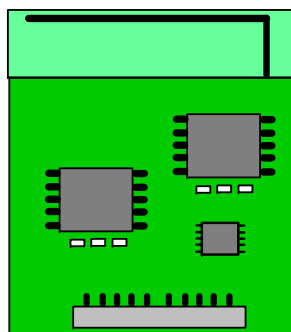
・ここでは下記1、2の項目について説明する

	1次的な指標	2次的な指標
1. 回路としての要素	入力インピーダンス	Q値
	反射特性	
	アイソレーション	相関係数
2. 放射器としての要素	利得	放射効率、総効率 相関係数
	指向性	
	偏波	
3. 端末全体	Total Radiated Power(TRP)	
	Total Isotropic Sensitivity (TIS)	
	Specific Absorption Rate(SAR)	
	Equivalent Isotropically Radiated Power(EIRP)	

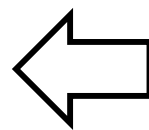


2. ケーブルの接続

- ・測定器に接続されているケーブルを直接アンテナに接続困難
- ・測定器とアンテナの間に延長ケーブルを接続



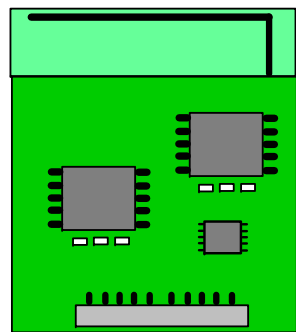
基板一体アンテナ



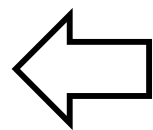
接続困難



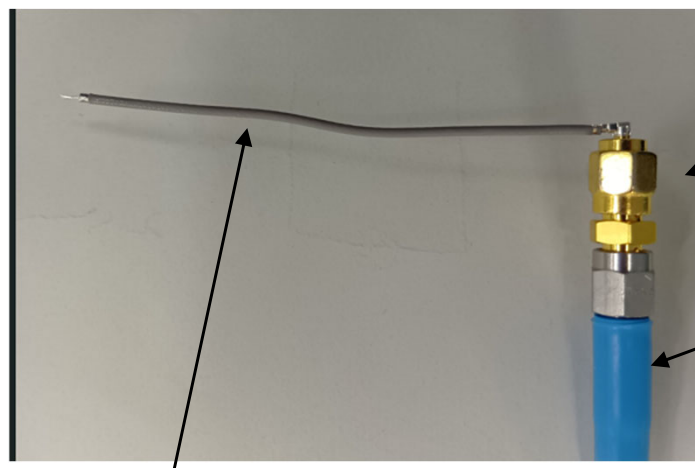
測定ケーブル(SMA)



基板一体アンテナ



接続可能



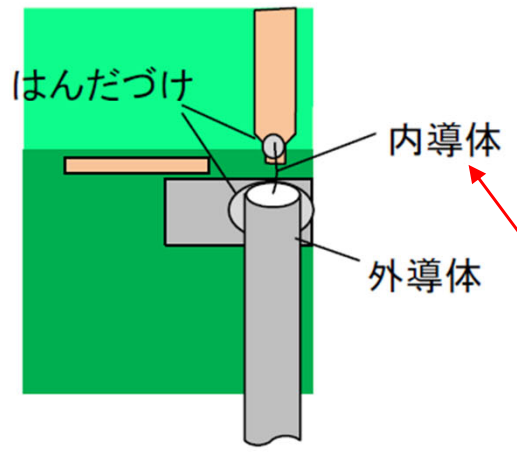
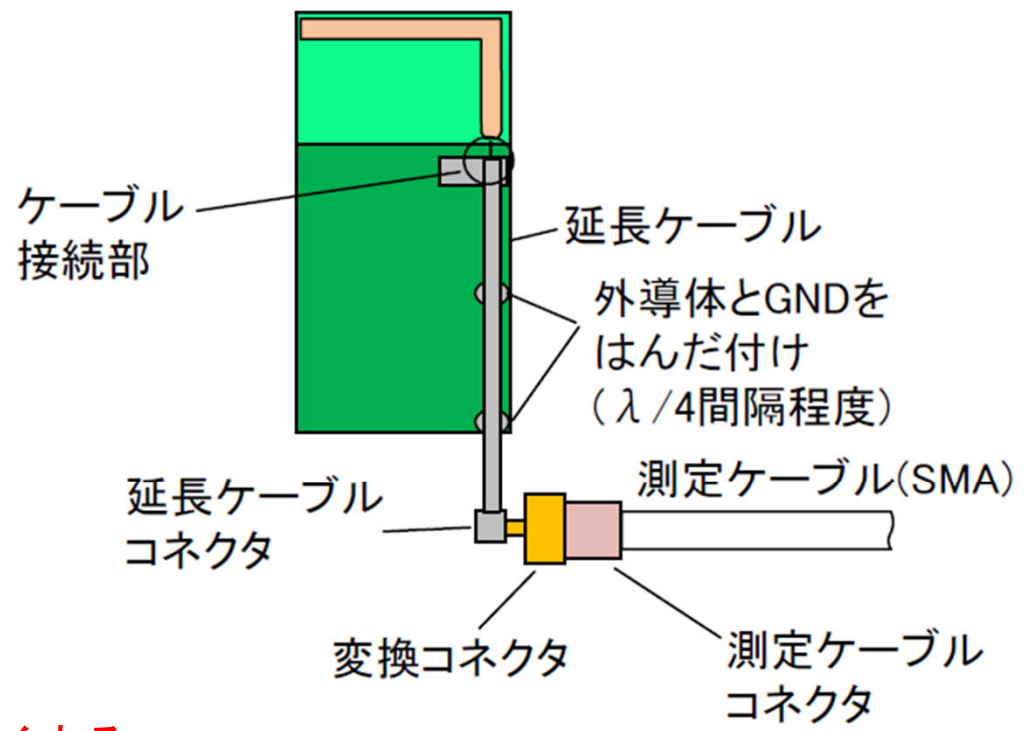
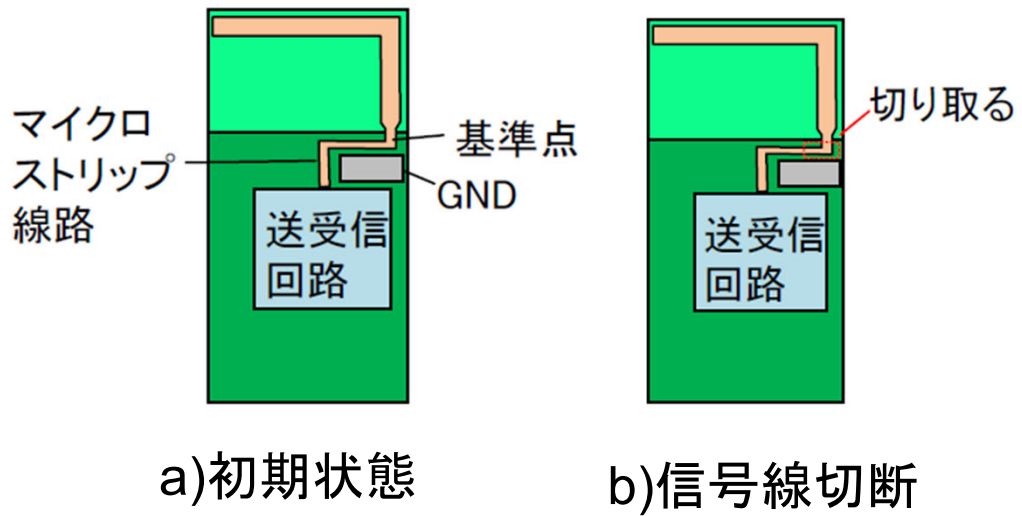
延長ケーブル(U-FL等)

変換コネクタ

測定ケーブル(SMA)

2. ケーブルの接続

・基板一体アンテナの給電線路(マイクロストリップ線路)への延長ケーブル接続例



極力短くする (1mm以下目標)

c) ケーブルの接続 (Cable connection)

d) ケーブル接続全体図 (Overall cable connection diagram)

アンテナへのケーブル接続 (Cable connection to antenna)

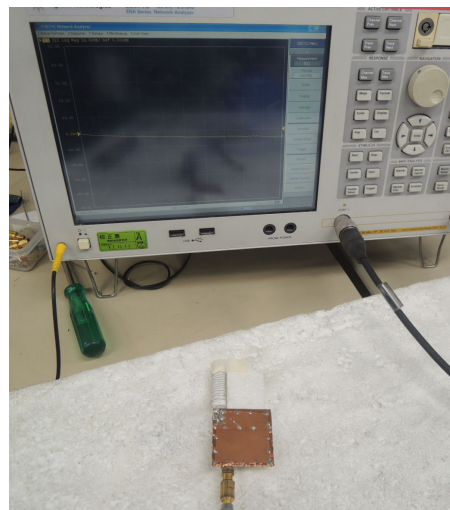
3. 入カインピーダンスの測定法

初期設定

- ・周波数、帯域、測定点の数、IFバンド幅等
- ・IFバンド幅を増やすと雑音は増、掃引速度は減
遅延が大きい線路ではIFバンド幅を狭くする必要あり

基準負荷による校正

測定ケーブルの先端にOPEN, SHORT, LOAD(50Ω)の3種類の基準負荷を接続し、測定器に記憶させる。
そのデータをもとに赤枠内の系統誤差を数値的に取り除く

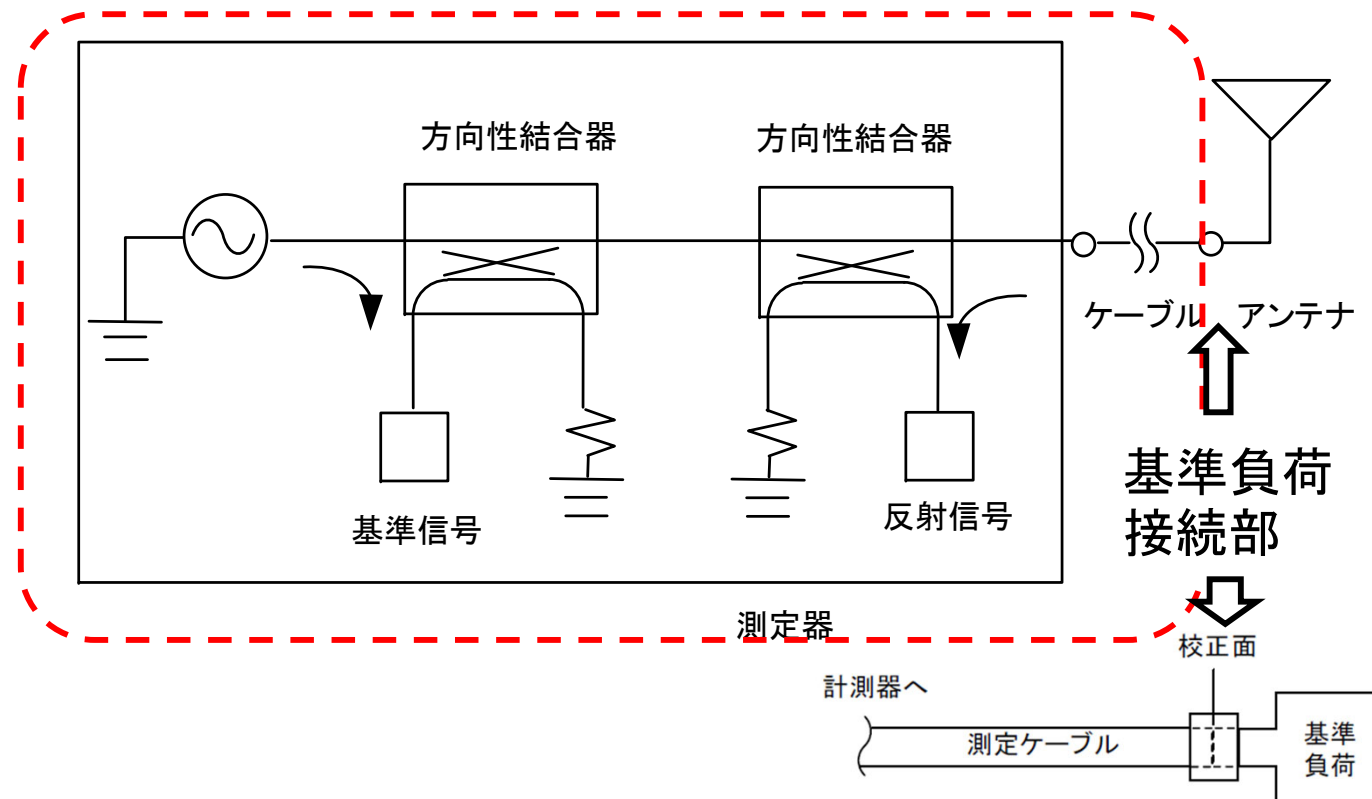


初期設定

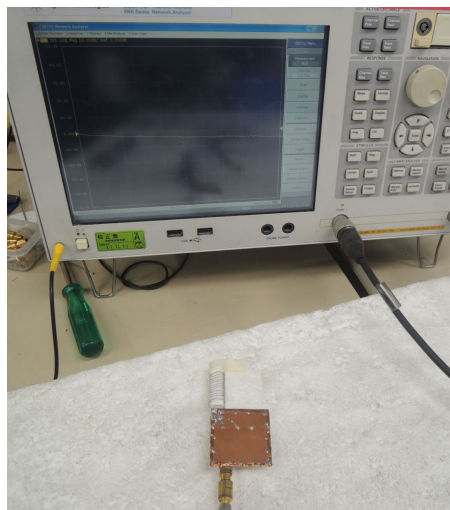
基準負荷による校正

参照面までの電気長補正

測定



3. 入力インピーダンスの測定法



初期設定

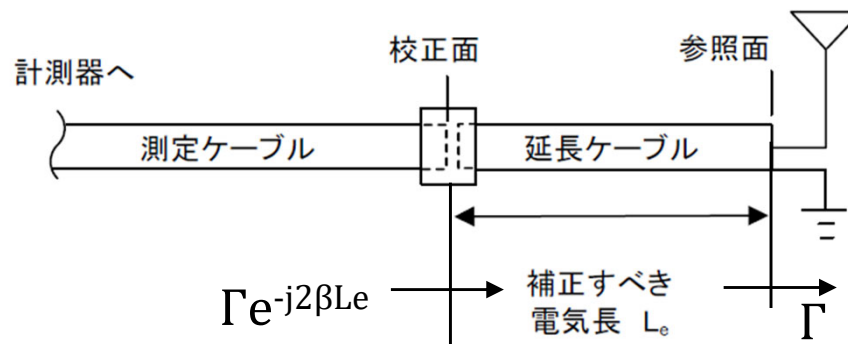
基準負荷による校正

参照面までの電気長補正

測定

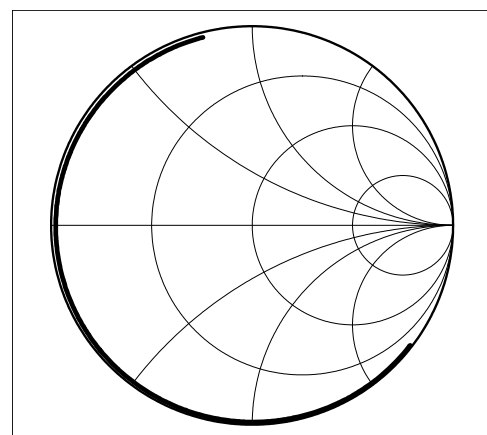
参照面までの電気長補正

インピーダンスの観測位置を校正面から参照面に移動させる。

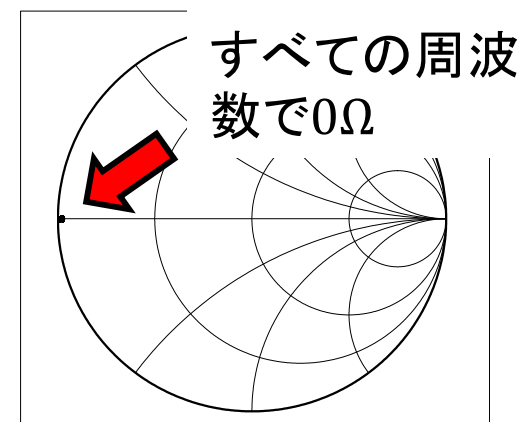


電気長補正:
 $e^{+2j\beta L_e}$ 掛けること

具体的には、延長ケーブルの先端を短絡して、Electrical DelayやPort Extensionの機能を用いる。



補正前



すべての周波数で0Ω

補正後

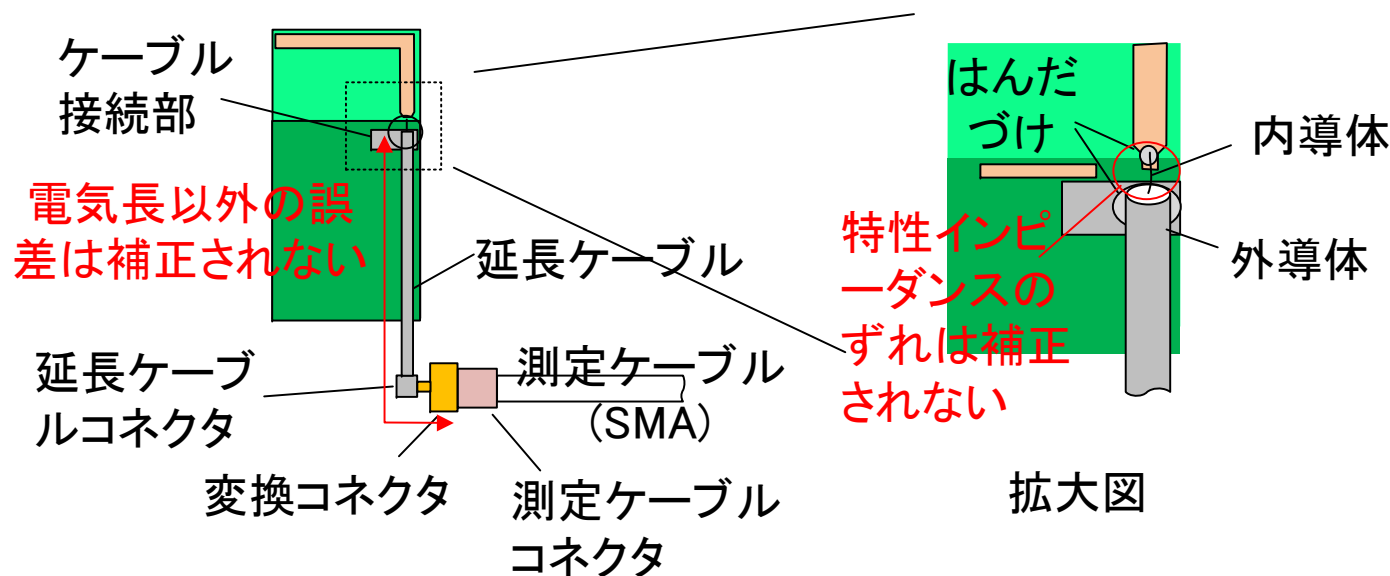
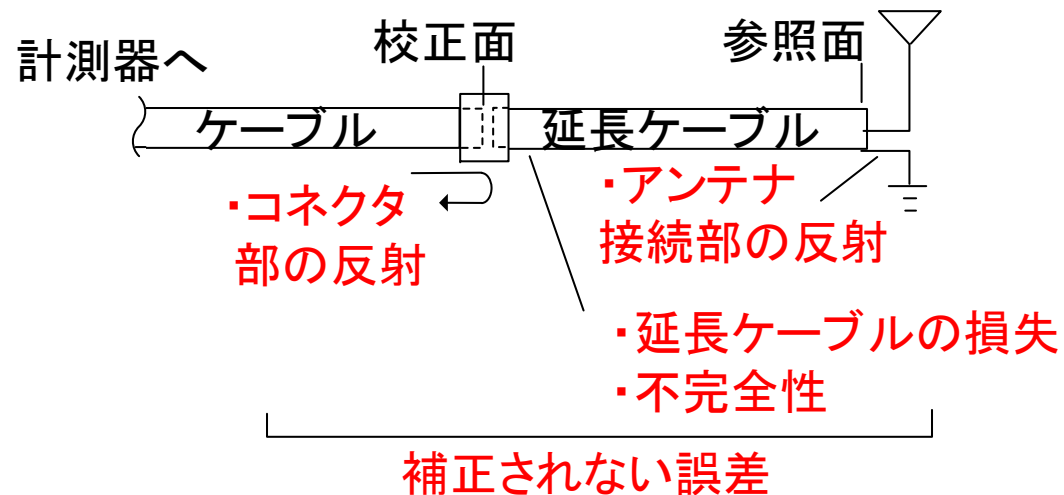
0.2~
0.4GHz

先端短絡した300mmの延長ケーブルの反射特性

3. 入力インピーダンスの測定法

補正されない誤差

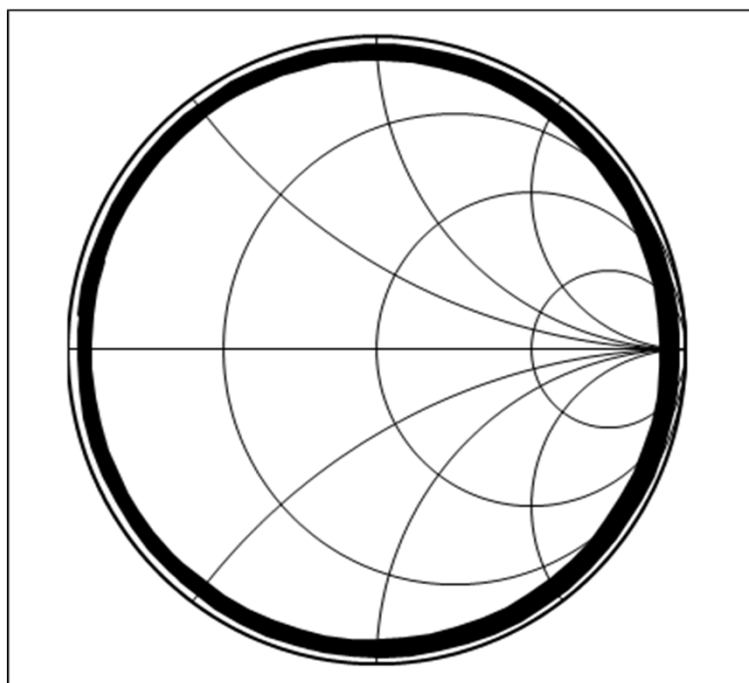
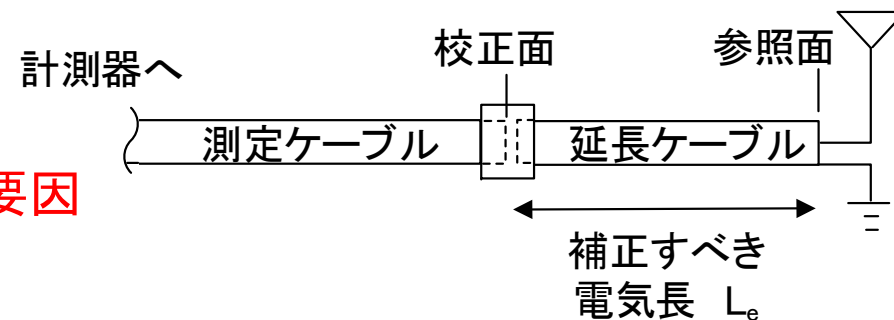
- ・上記手順を用いても補正されない系統誤差を下図にまとめる



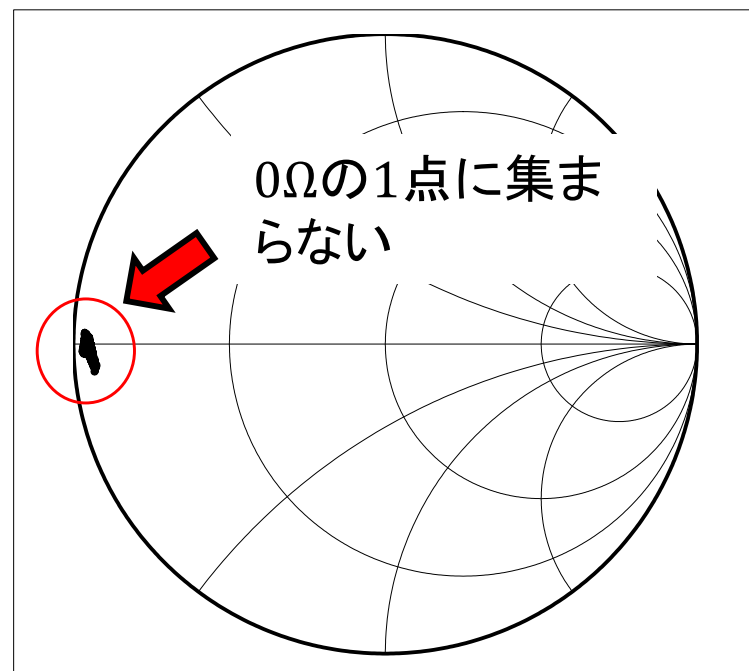
3. 入力インピーダンスの測定法

- ・補正されない誤差の例
- ・電気長補正を実施しても、軌跡が1点に集まらない

→校正面～アンテナ間における誤差が要因



補正前



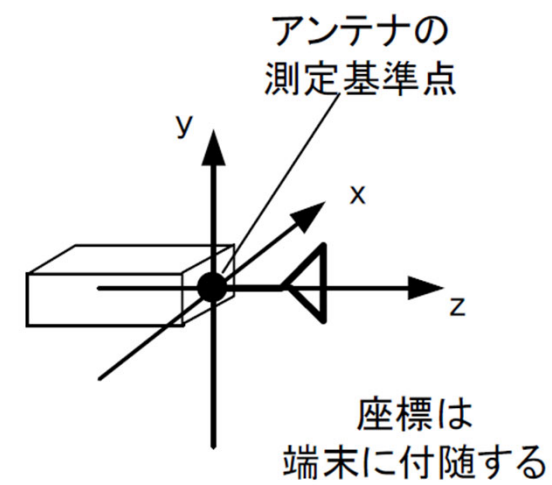
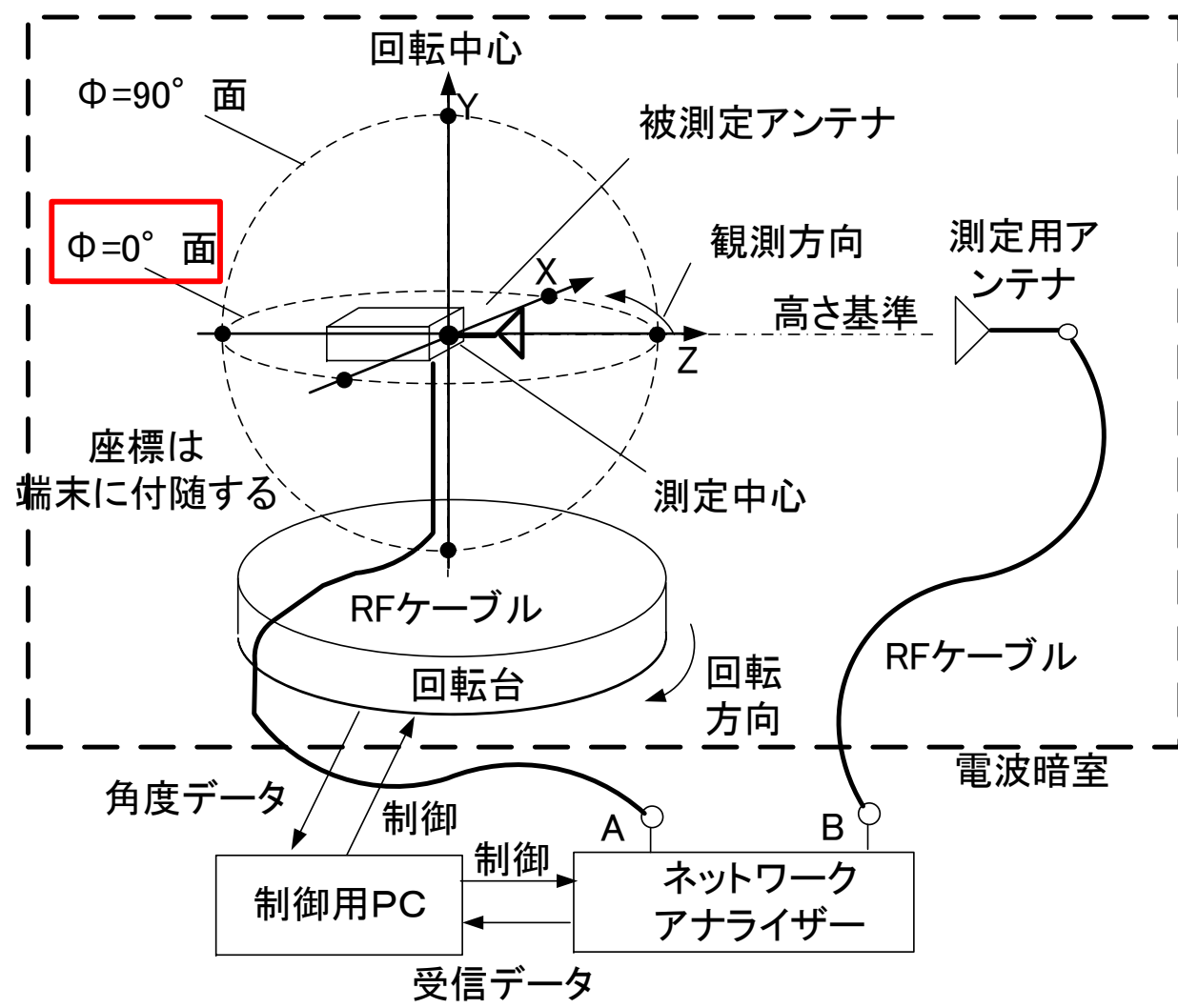
補正後

先端短絡した300mmの延長ケーブルの反射特性(1~5GHz)

4. 放射パターンの測定法

放射パターンの測定系

- ・周囲からの反射波の影響がない環境で測定(電波暗室の利用)
- ・1測定面で2つの偏波 E_θ 、 E_ϕ を測定

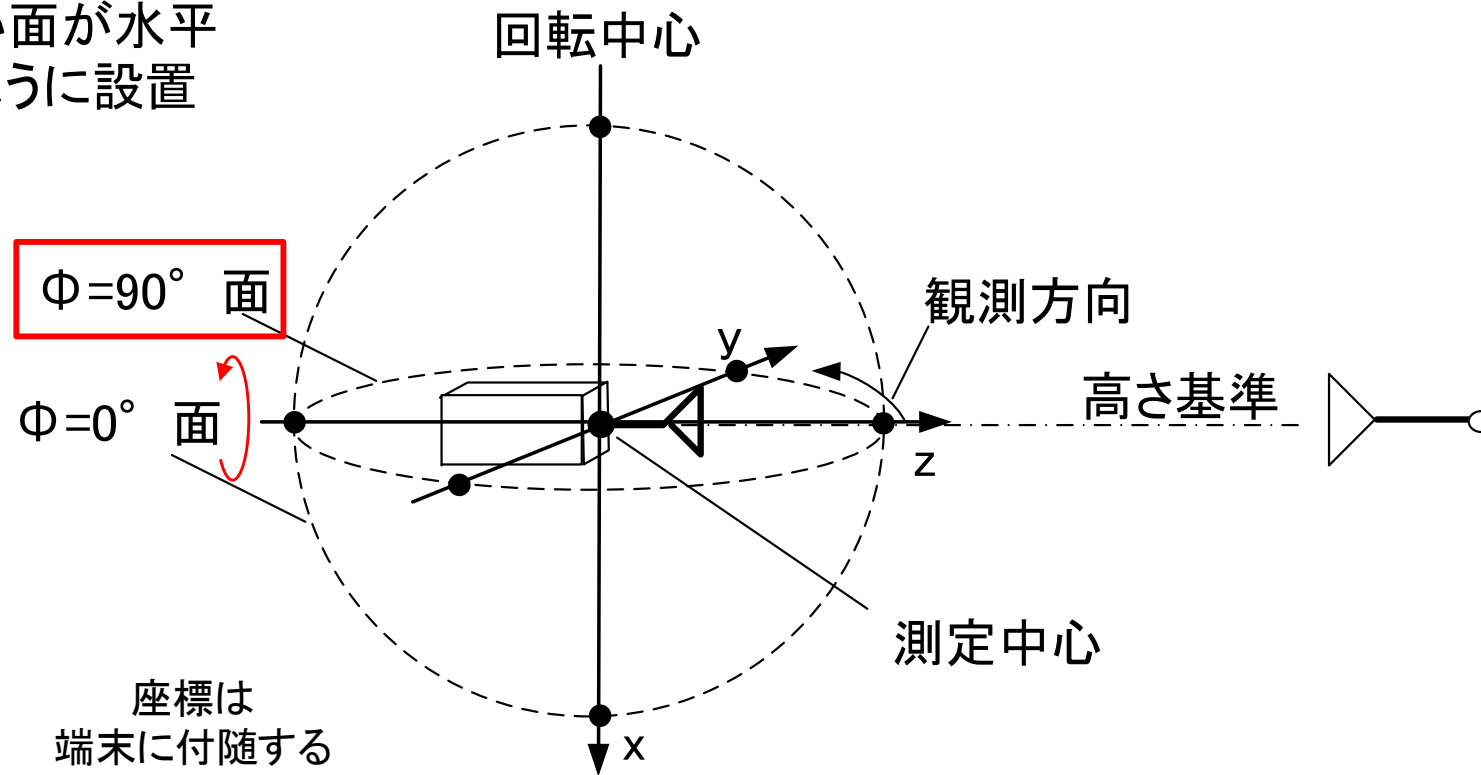


測定系全体(ϕ 固定、 θ 変化の設置例)

4. 放射パターンの測定法

- ・ (θ, ϕ) 方向の二次元的なパターンの測定法
- ・z軸の周りに $\Delta \phi$ 回転させて設置、 θ を変化させて測定。これを繰り返す。
- ・2D測定用の装置も複数あり

測定したい面が水平面になるように設置



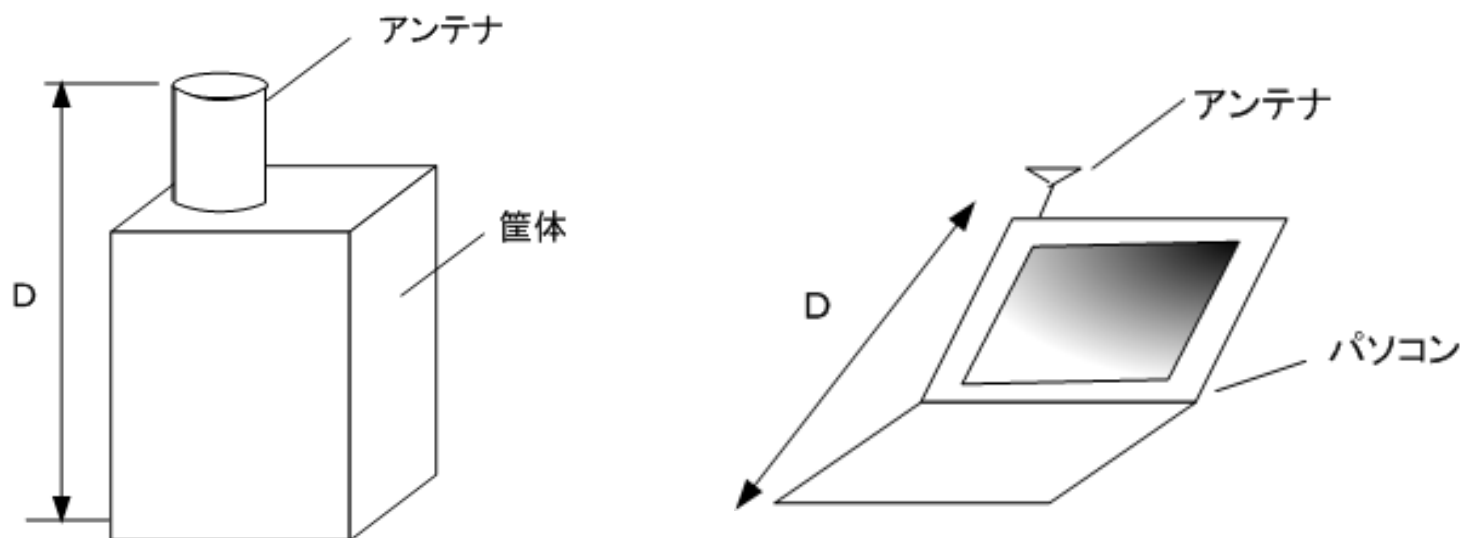
4. 放射パターンの測定法

測定距離

- ・放射パターンは遠方界を測定
- ・被測定アンテナと測定用アンテナを十分離して行う必要あり

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}$$

- ・Dは放射パターンに影響する構造物全体の大きさとする(アンテナ素子の大きさとは異なる)



構造物上のアンテナ設置例

4. 放射パターンの測定法

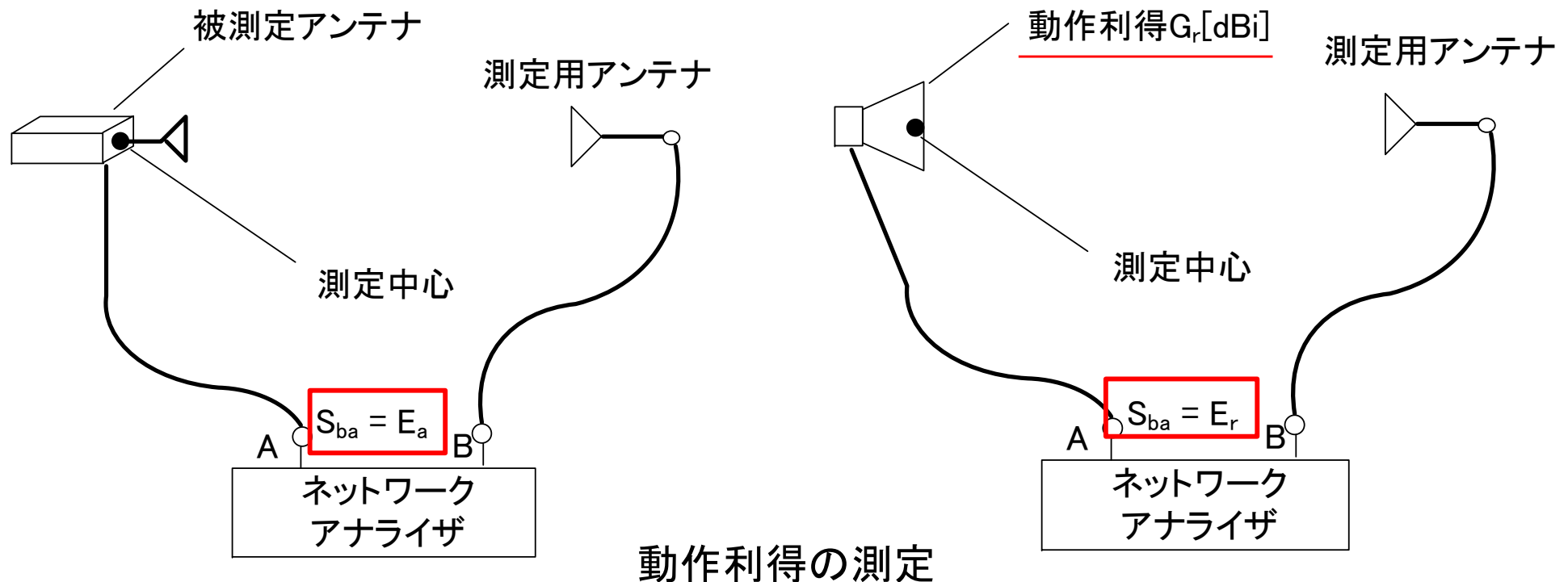
各利得の測定法

- ・放射パターンの測定値を各利得(動作利得 G_w 、絶対利得 G_a 、指向性利得 G_d)に換算
- ・置換法: 利得が既知のアンテナと比較して利得に換算
- ・2つの偏波(θ, ϕ)それぞれについて換算

動作利得

- ・被測定アンテナの通過特性 E_a 、基準アンテナの通過特性 E_r 、基準アンテナの動作利得 G_r を用いて、下式より求まる

$$(G_w)_{\text{dBi}} = (E_a)_{\text{dB}} - (E_r)_{\text{dB}} + (G_r)_{\text{dBi}}$$



4. 放射パターンの測定法

絶対利得

- 被測定アンテナの反射係数を測定して、下式より求める

$$(G_a)_{\text{dBi}} = (G_w)_{\text{dBi}} + M_{\text{dB}}$$

$$M_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - |\Gamma|^2} \right)$$

指向性利得

- 被測定アンテナの効率(後で説明)を測定して、下式より求める

$$(G_d)_{\text{dBi}} = (G_a)_{\text{dBi}} - \eta_{\text{dB}}$$

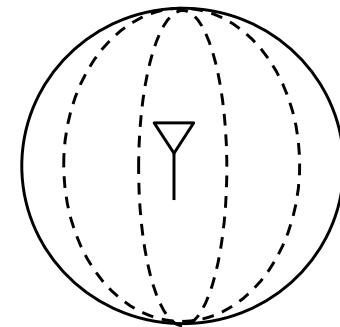
放射効率の算出

- 被測定アンテナの絶対利得を全立体角で取得し、下式のように積分して求める(実際には離散的に取得する)
- 必要あればdBに変換する

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} G_a(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta d\phi$$

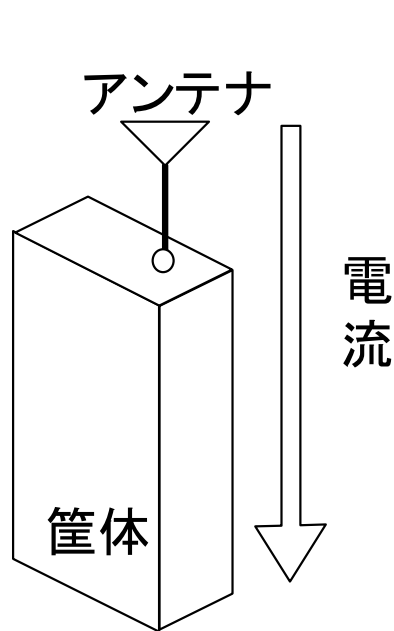
$$G_a(\theta, \phi) = 10 \frac{G_{a\theta}(\theta, \phi)}{10} + 10 \frac{G_{a\phi}(\theta, \phi)}{10}$$

$$\eta_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(\eta)$$

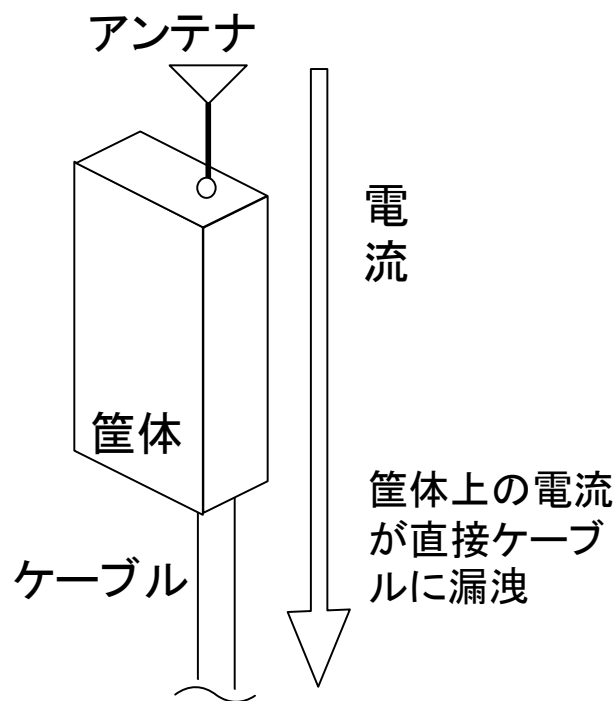


5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

- ・高周波ケーブルは金属製。インピーダンス特性や放射特性に影響を与える。
- ・漏洩電流、結合電流(散乱)により特性が変化(これらの用語は本講座において定義)
- ・漏洩電流は、アンテナに直接接続されたケーブル上を直接伝わる不平衡電流
- ・結合電流は、アンテナから放射された電磁波から2次的に誘起される不平衡電流
- ・測定精度向上のため、これら電流を低減する必要あり

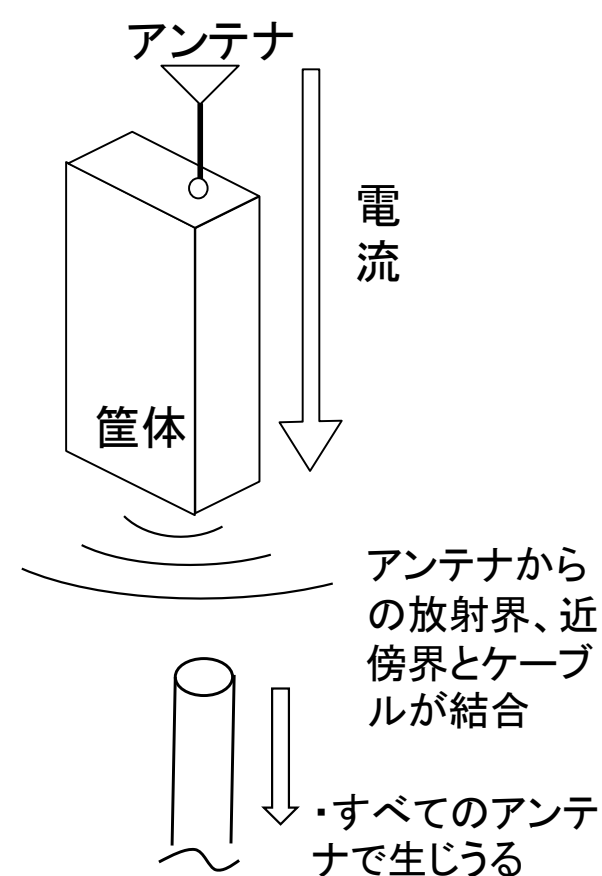


本来の測定モデル



- ・筐体上の $\lambda/4$ アンテナ
- ・ダイポールのバラなし給電等で生じる

漏洩電流



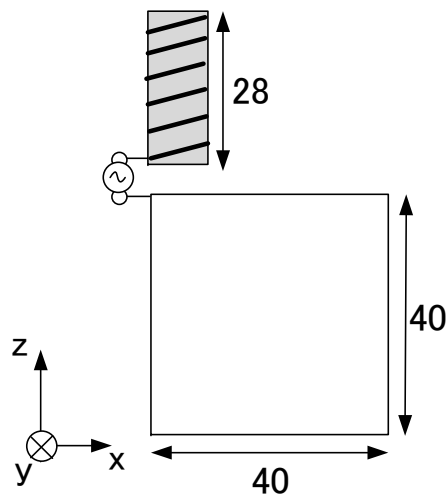
結合電流(散乱)

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

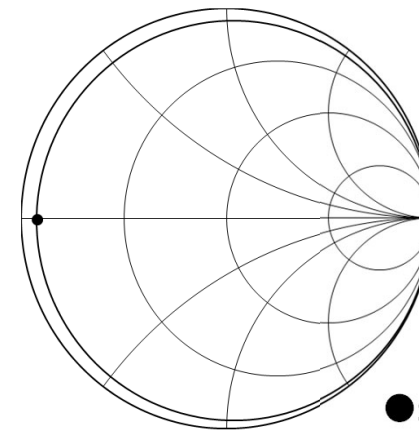
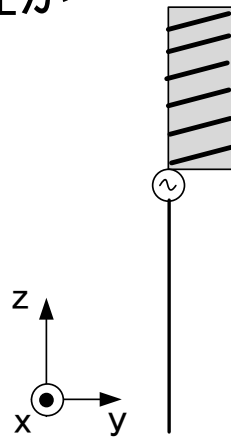
ケーブルの影響を受ける事例(漏洩電流)

- ・315MHz帯のモノポールアンテナにおける漏洩電流の影響をシミュレーションする
- ・全体の大きさ約 $\lambda/20$
- ・漏洩電流の影響により、特性が大きく変化

角柱ヘリカル
($\square 10$ 、ピッチ2)

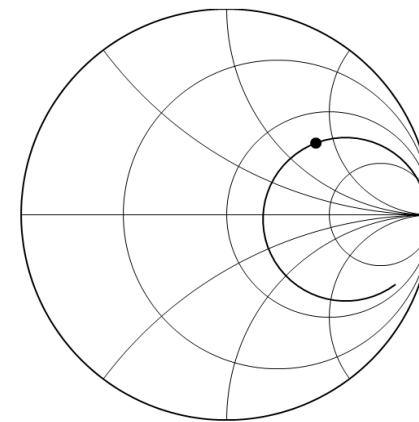
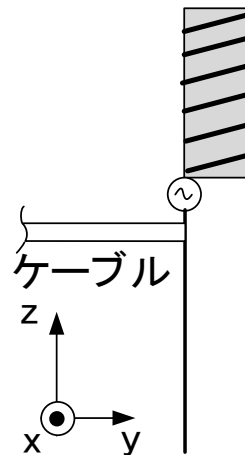


本来の測定モデル

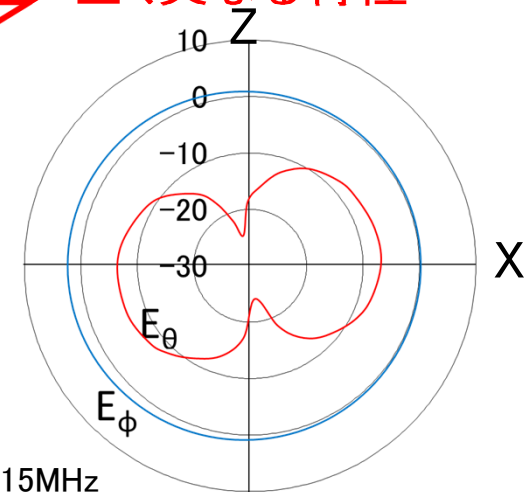
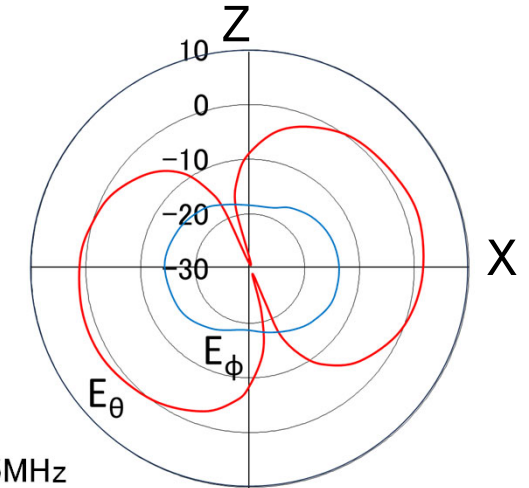


本来測定したい被測定物の特性

全く異なる特性



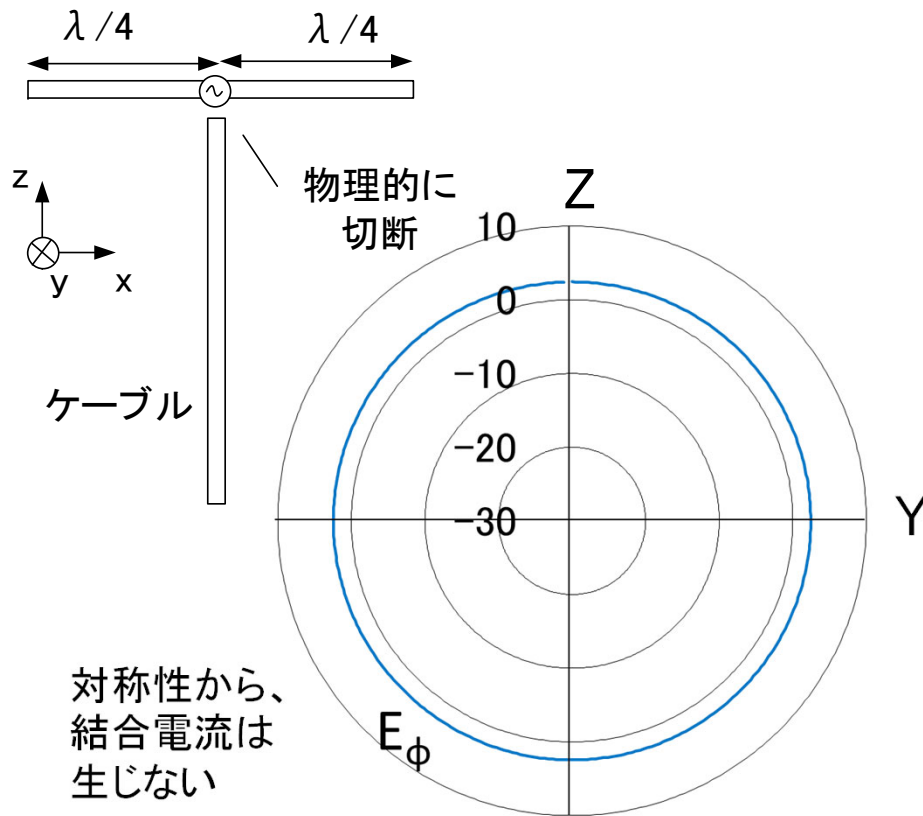
実際に測定される被測定物の特性



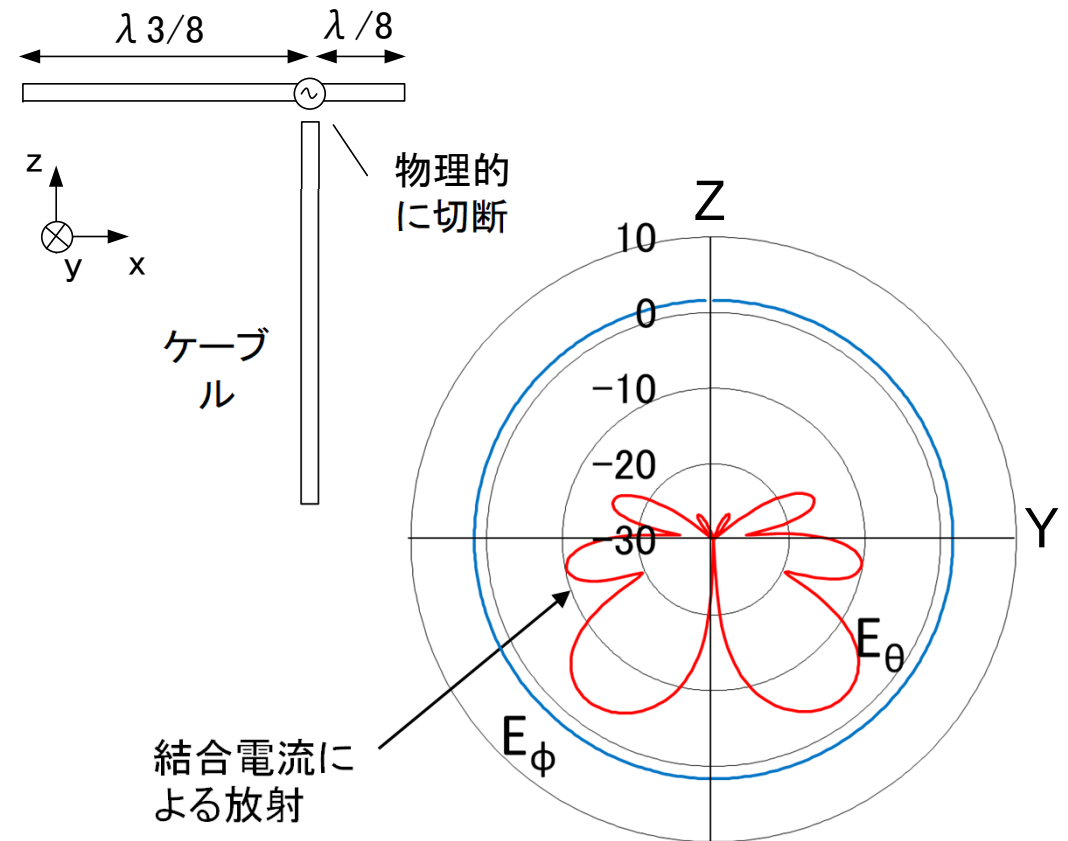
5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

ケーブルの影響を受ける事例(結合電流)

- ・オフセット給電ダイポールにおけるケーブルの結合電流の影響をシミュレーションする
- ・理想的な平衡給電を模擬するため、ケーブルを給電点で物理的に切断
- ・中央給電ダイポールでは、対称性からケーブルに電流が生じない
- ・**オフセット給電ダイポールでは、結合電流が生じ、ケーブル上に電流が誘起される**
- ・スリーブアンテナでも同様な現象あり(テキスト図7.23)



中央給電ダイポール

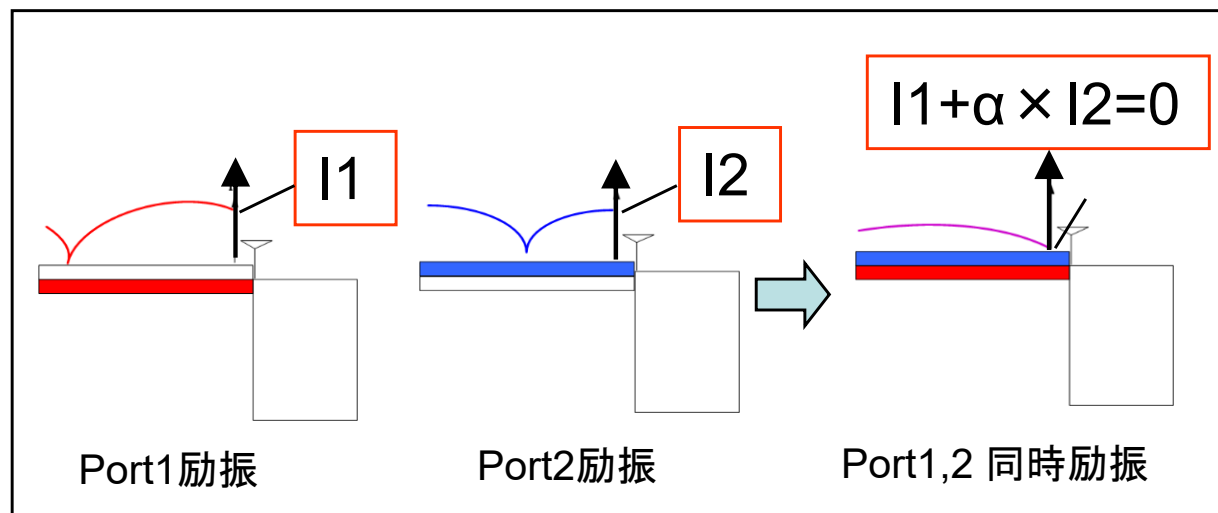
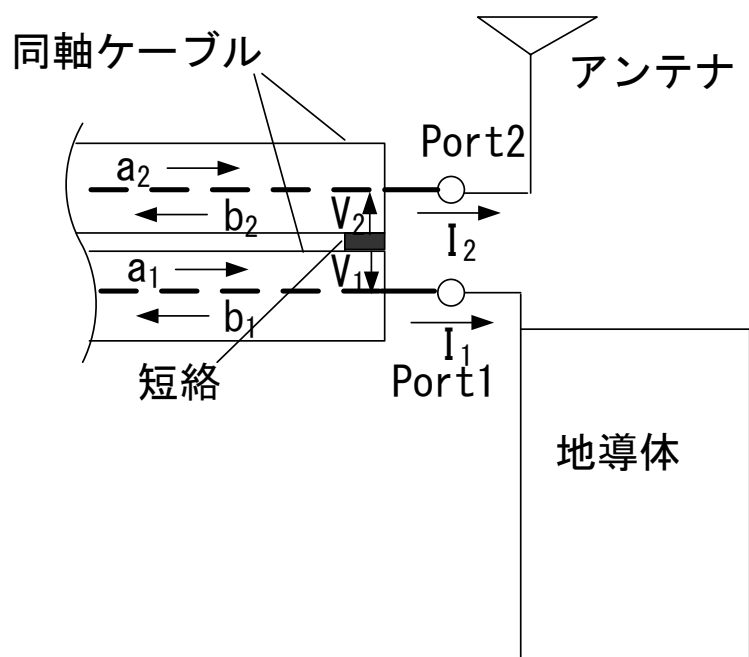


結合電流あり

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

Sパラメータ法

- ・2ポートで測定し、不平衡電流を給電点で0とした時の特性を数値的に抽出
- ・漏洩電流を遮断できる(結合電流には効果なし)
- ・原理的には周波数特性なし(すべての周波数に効果あり)
- ・NWA以外の特別な機器不要



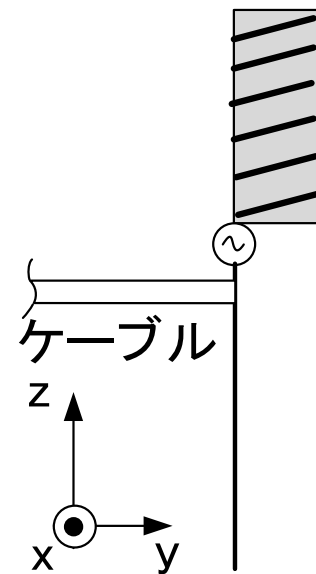
Port1とPort2を

$$\frac{a_2}{a_1} = -\frac{1 - S_{11} - S_{21}}{1 - S_{22} - S_{12}} \equiv \alpha$$

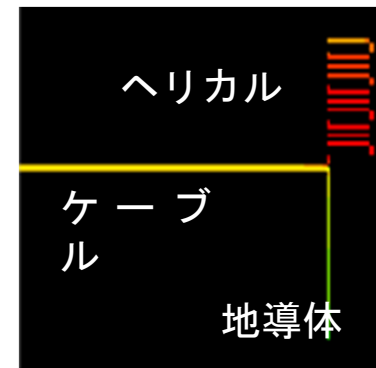
の比で励振すると、漏洩電流 $I=0$ とできる。
この状態で反射特性、放射パターンを測定する

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

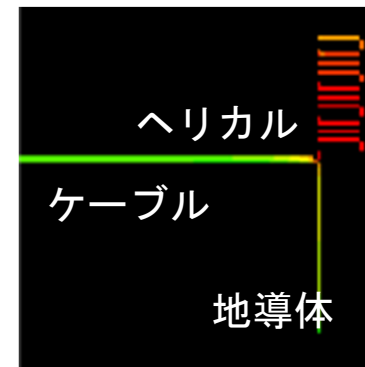
- ・ケーブル上の電流をシミュレーション
- ・ケーブル接続時に比べ、Sパラ法により、ケーブル上の電流は**15~20dB低減**
- ・ケーブル切断と同等
→残存する電流は結合電流と推察



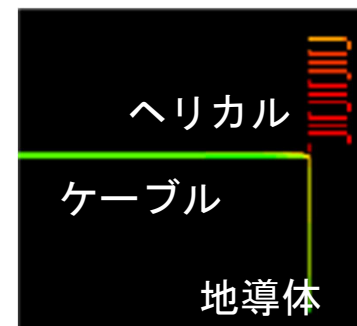
電流観測断面



a)ケーブル接続



b)Sパラメータ法

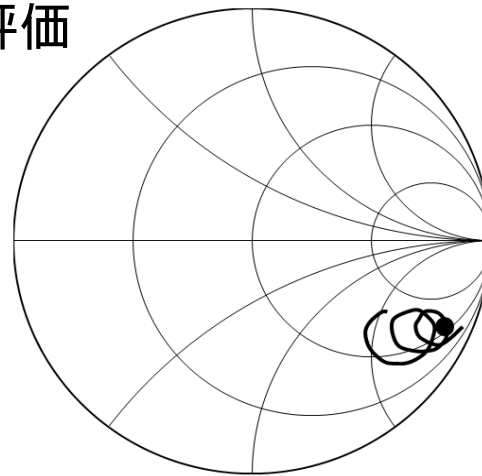
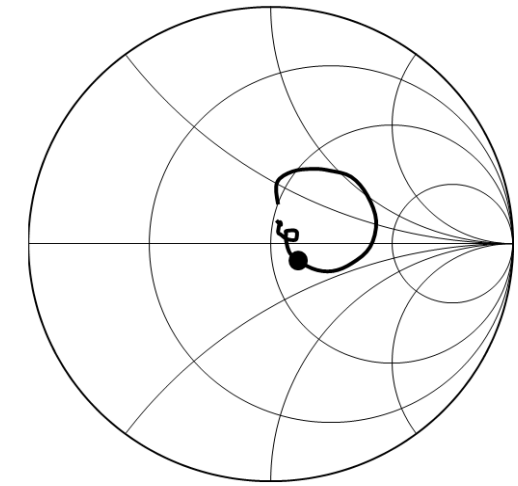
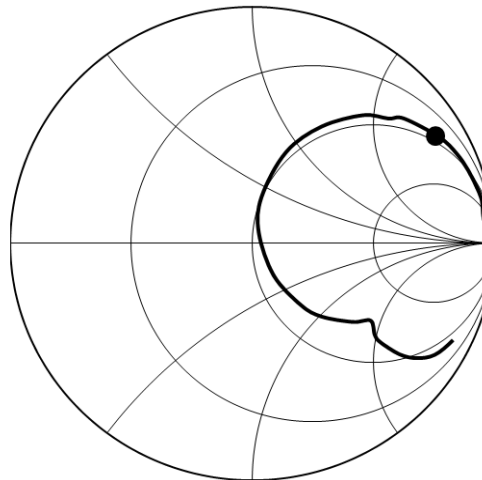
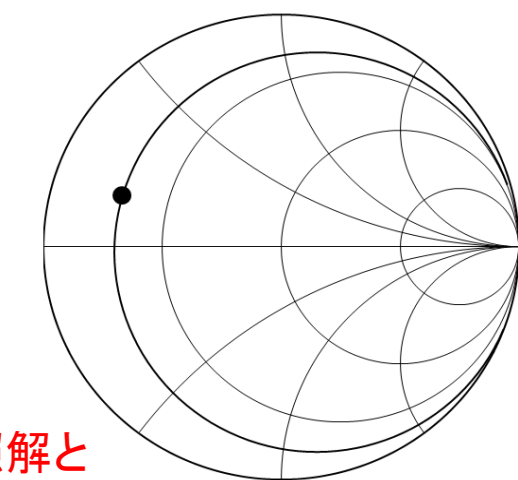


c)ケーブル切断



5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

- ・試作によりインピーダンスを評価
- ・ S_{11} , S_{12} , S_{22} を測定し、 Z_n を抽出
- ・ Z_n は参照会と大まかに一致
- 測定精度改善を確認

a) S_{11} b) S_{12} c) S_{22} 

参照解と
大まかに一致

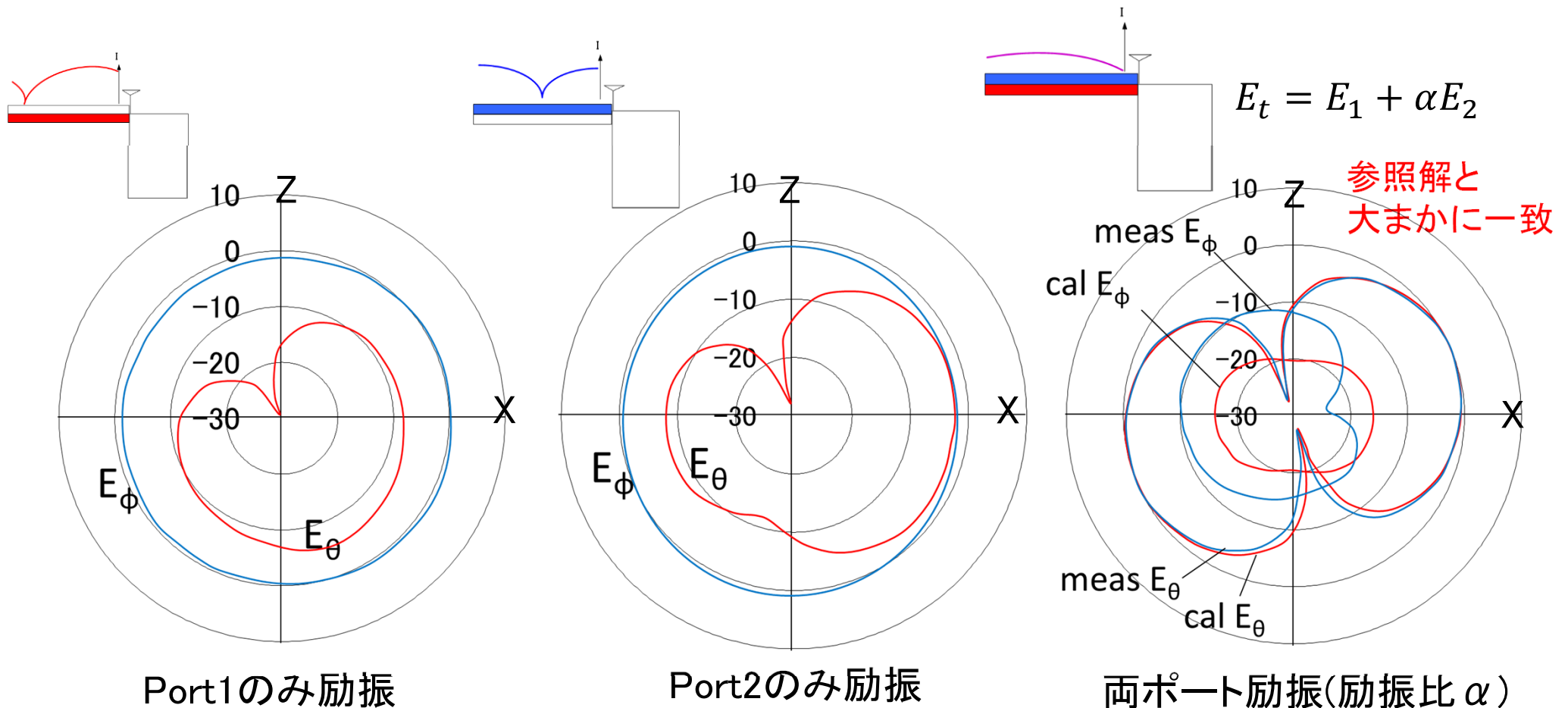
d) Z_n 

試作モデル

Sパラメータ法によるインピーダンス測定結果

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

- ・試作モデルの放射パターンを測定
- ・Port1のみ励振したパターン E_1 、Port2のみ励振したパターン E_2 を比率 α でオフライン合成
- ・参照解と大まかに一致



Sパラメータ法による放射パターン測定結果

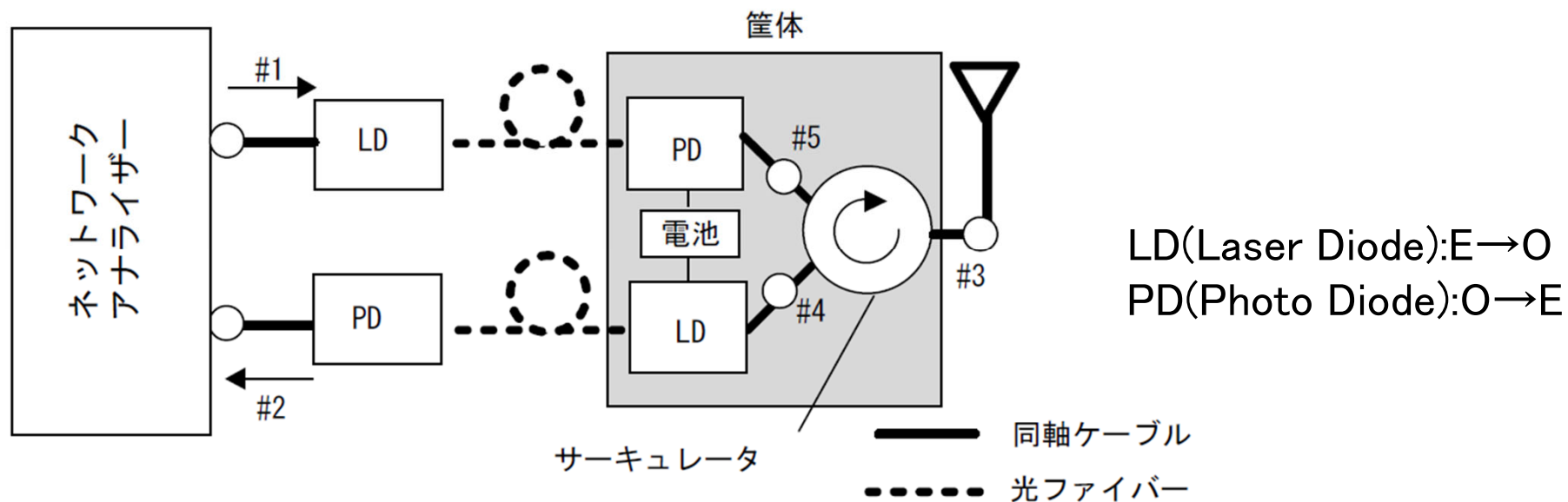
5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

光ファイバーの利用

- ・誘電体の光ファイバーを伝送線路として用いることで漏洩電流、結合電流を除去
- ・E/O、O/E変換機が必要
- ・周波数特性は変換器の性能で決まる

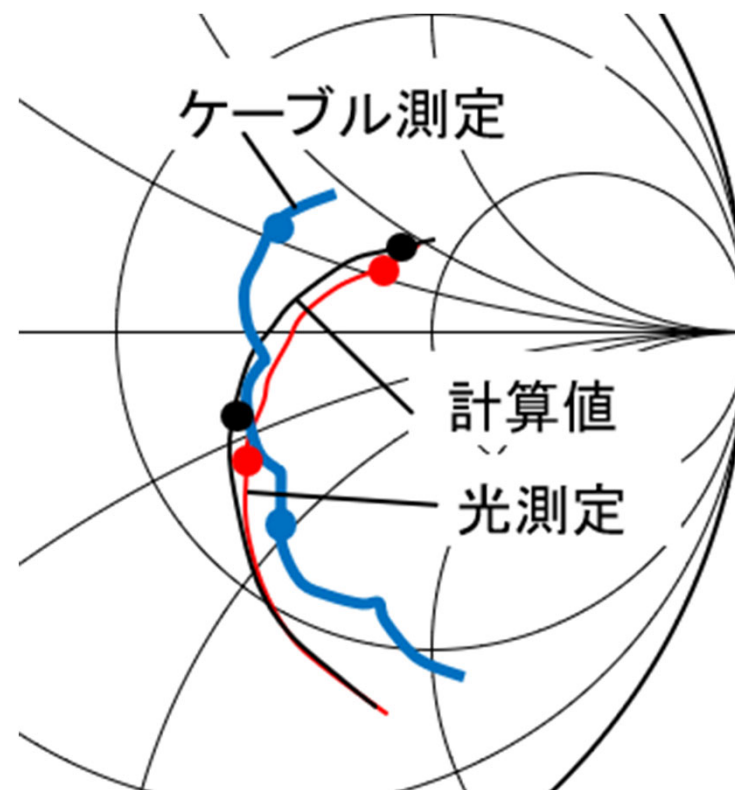
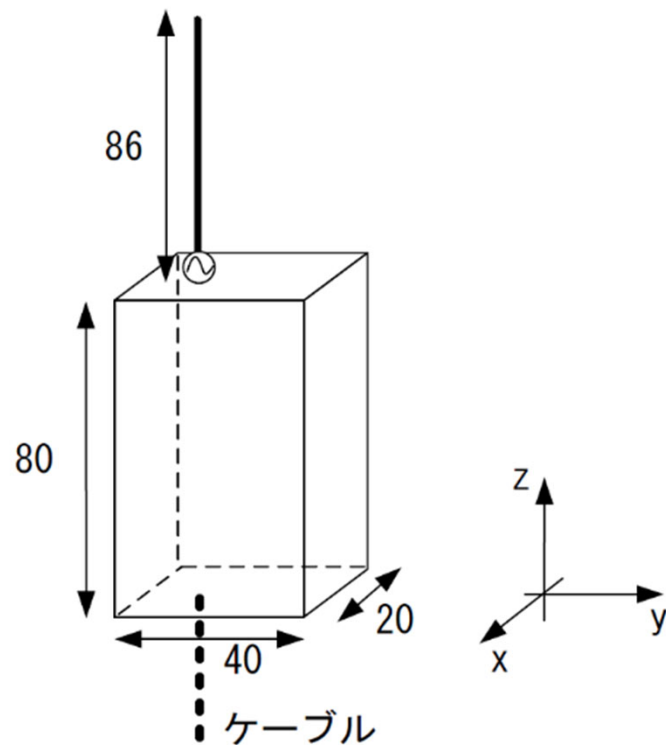
インピーダンス測定系

- ・筐体に接続されるRFケーブルを光ファイバーに置き換え
- ・E/O、O/E変換器の信号は一方通行
 - 入射波と反射波を別系統で伝送(最近の例では1本にする構成もあり)
- ・#3の部分で校正をとることでO/E、E/O変換器を含めた系統誤差を除去



5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

- ・900MHz帯の筐体上モノポールのインピーダンスを測定
- ・ケーブル測定では計算値との差異が大
- ・光測定ではよく一致

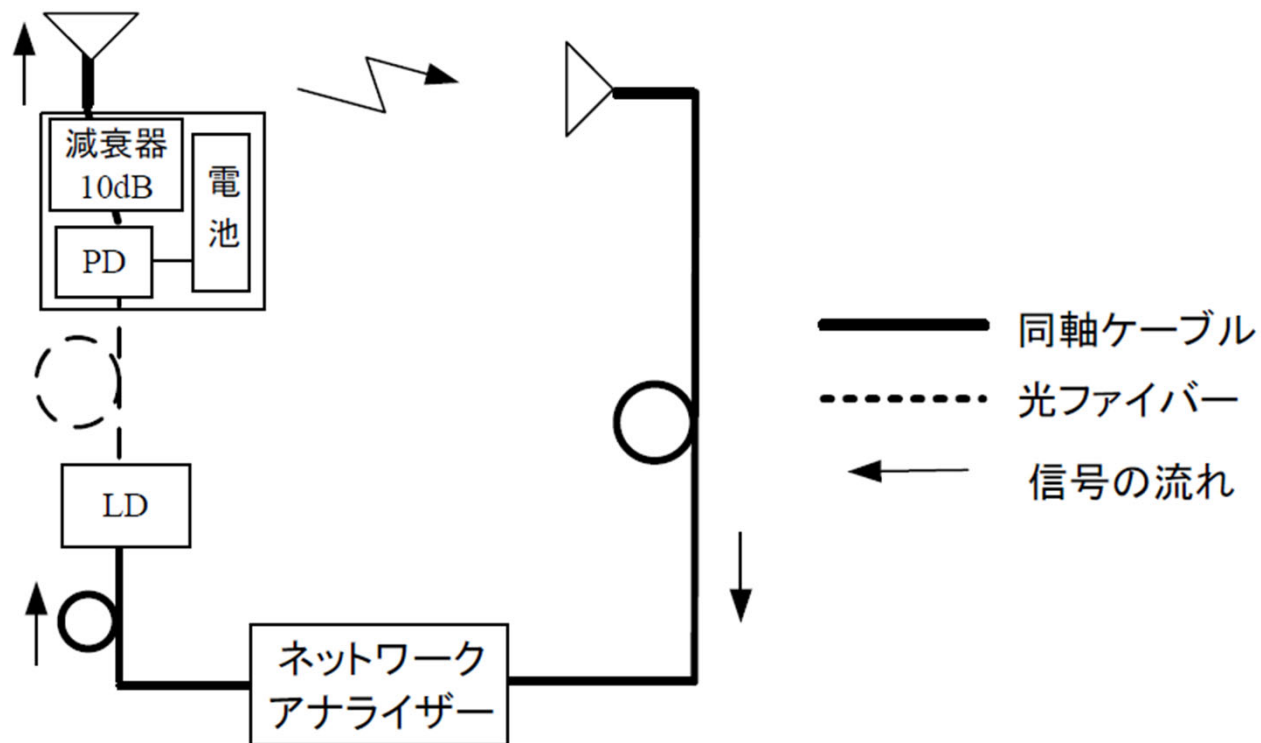


光ファイバー及びRFケーブルを用いたインピーダンス測定結果

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

放射パターン測定系

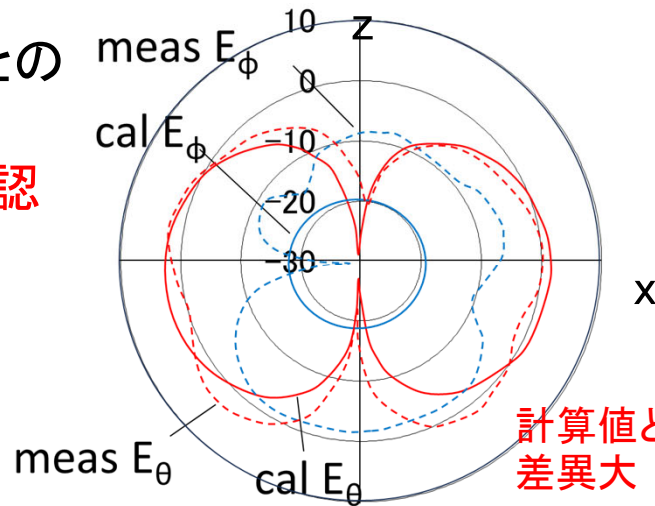
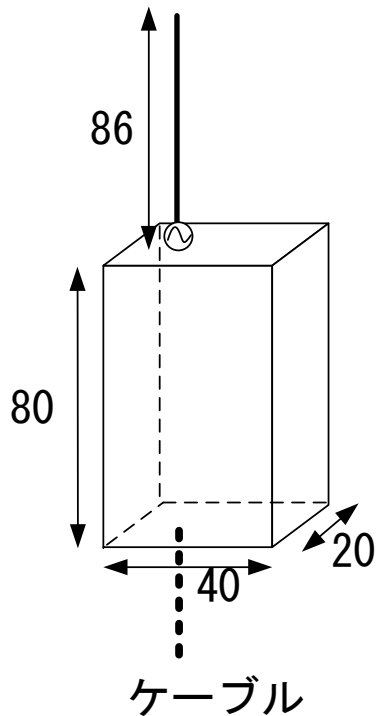
- ・被測定アンテナに接続されるケーブルを光ファイバーに置換
- ・小型O/E変換機(PD)を被測定アンテナに搭載



光ファイバーを用いた放射パターン測定系

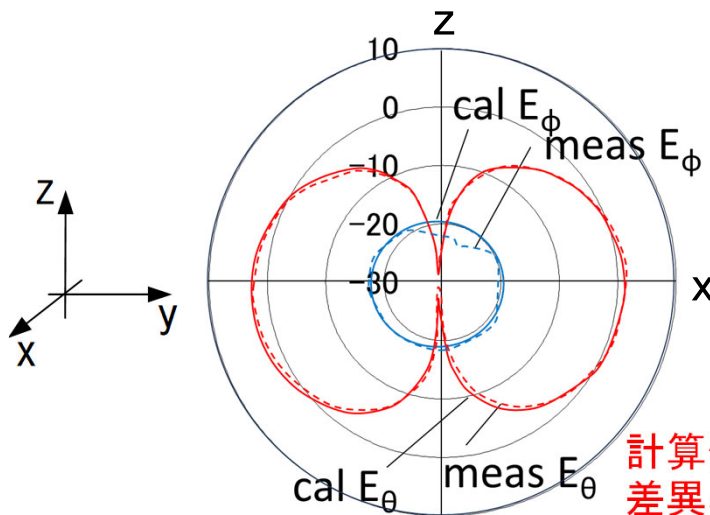
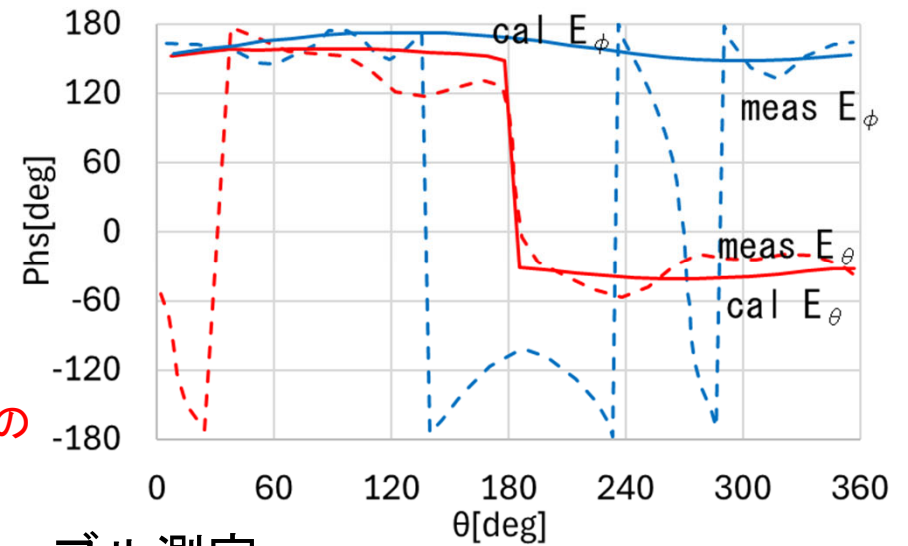
5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

- ・同軸ケーブル測定では
計算値と差異大
 - ・光測定では計算値との
差異小
- 測定精度向上を確認



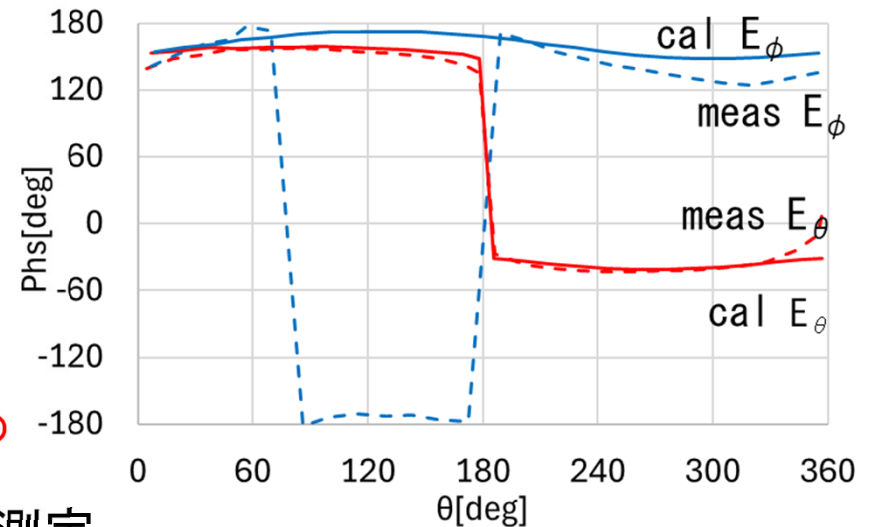
計算値との
差異大

同軸ケーブル測定



計算値との
差異小

光測定

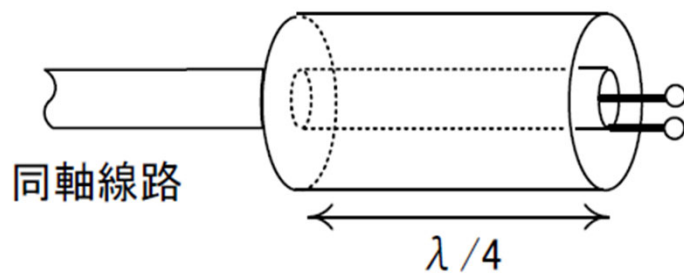


放射パターン測定結果

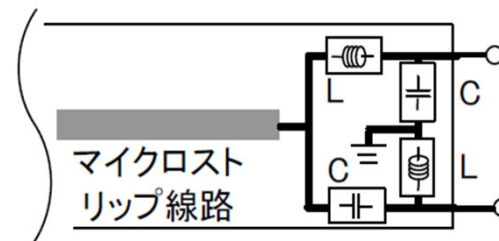
5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

バランの利用

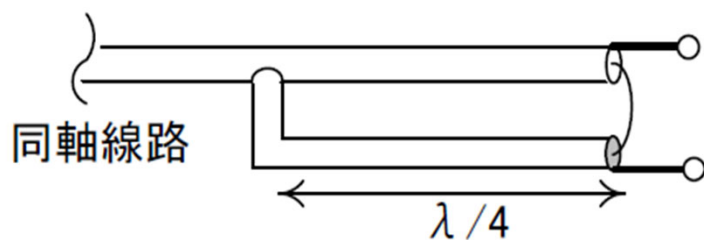
- ・小形アンテナ測定にバランを用いることが有効との報告あり
- ・一部のバランは漏洩電流に効果あり(結合電流には効果なし)
ただし、バランの種類によっては効果のないものがある
- ・数種類のバランに対して漏洩電流遮断効果を評価



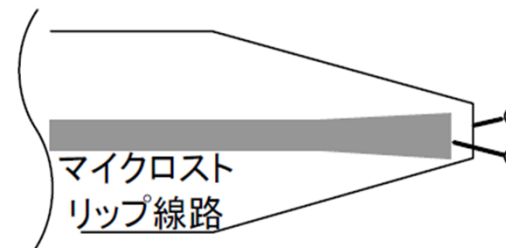
バズーカバラン



集中定数バラン



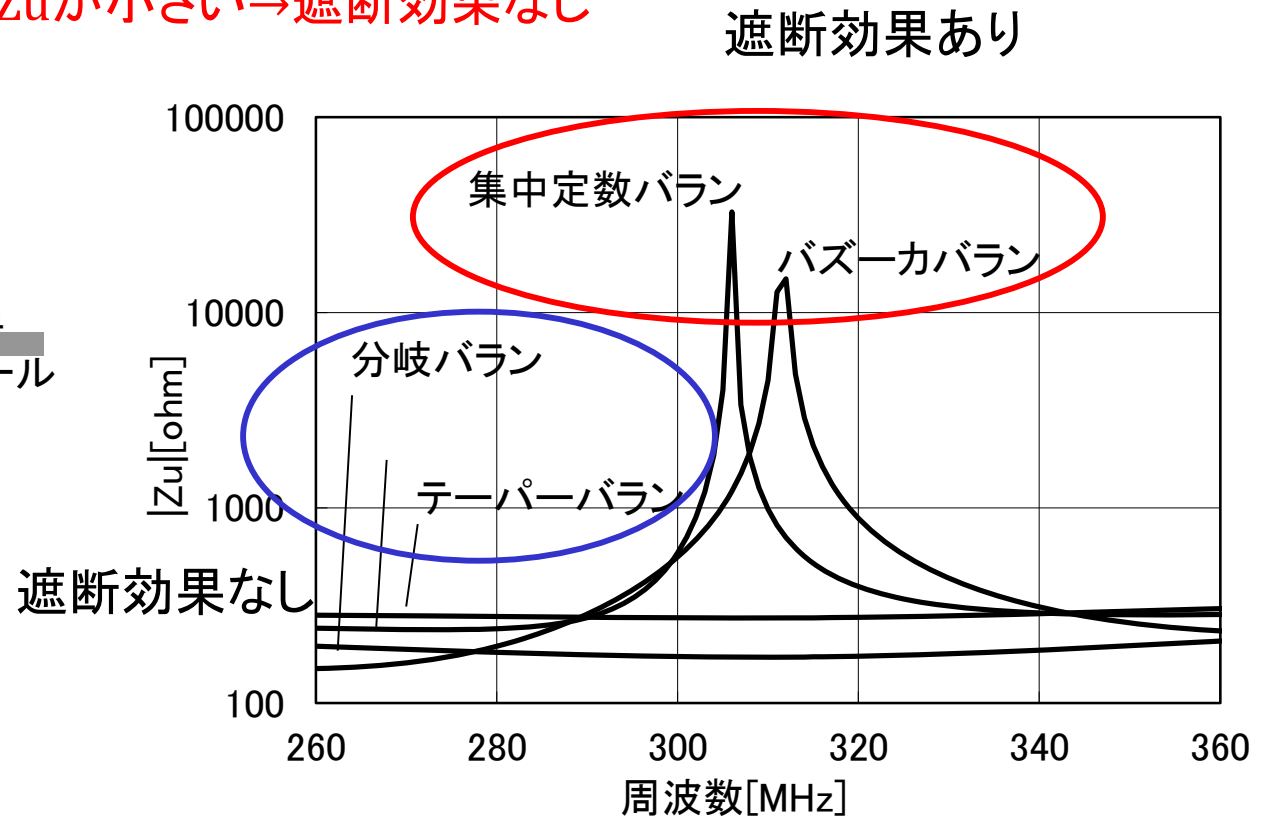
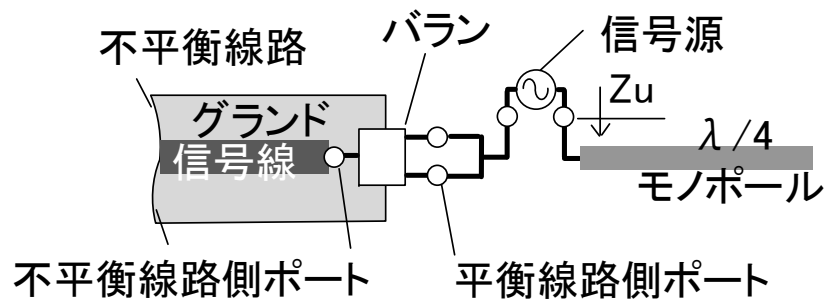
分岐型バラン



テーパバラン

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

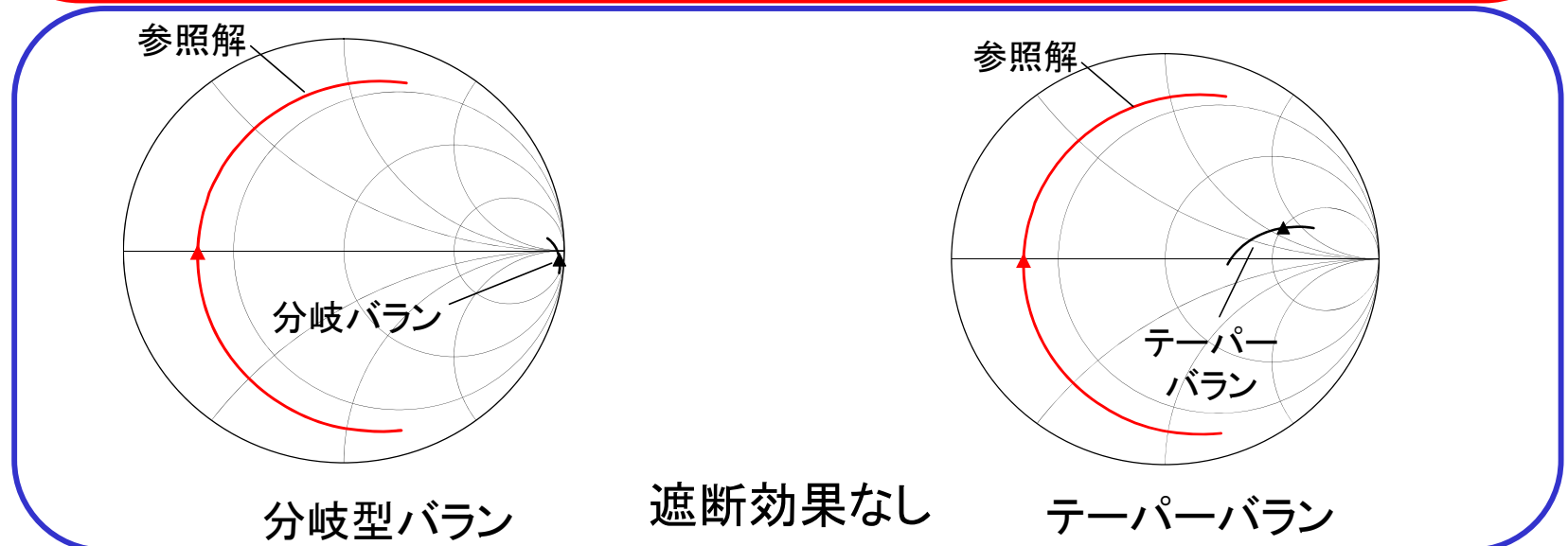
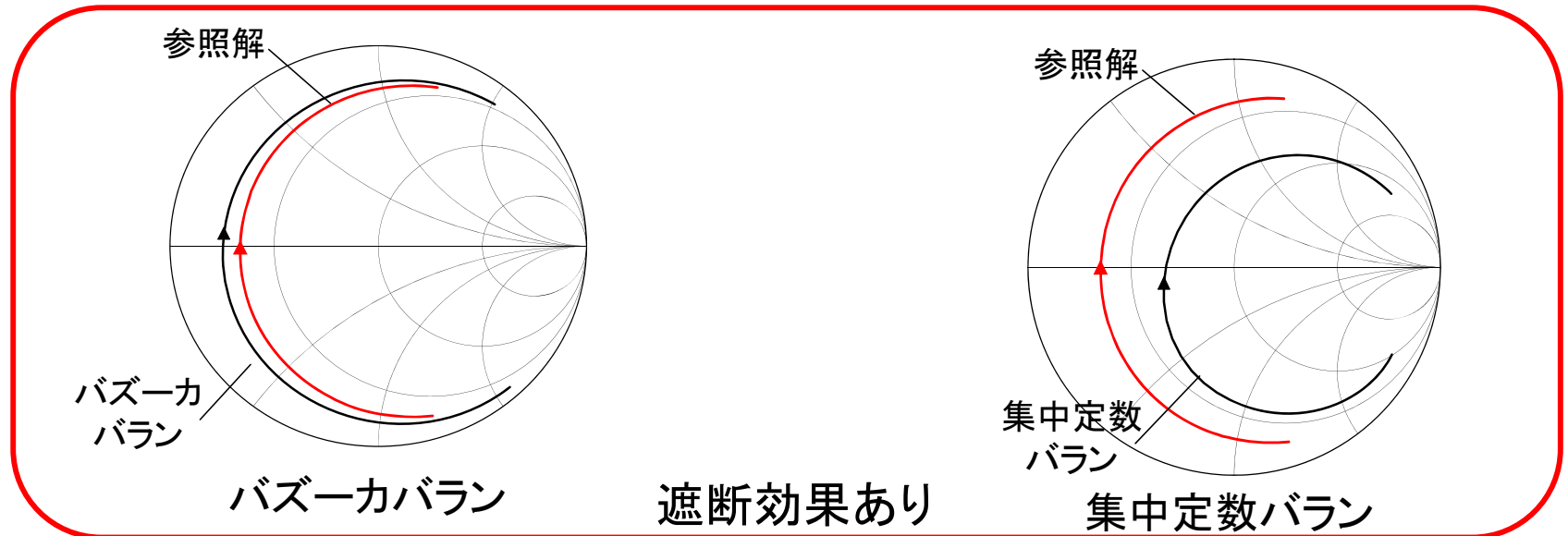
- ・バランの出力側(平衡ポート)を短絡し、モノポールを設置
- ・モノポールの給電点におけるインピーダンス Z_u を観測することで遮断効果を判断(Z_u が大きければ遮断効果あり)
- ・集中定数バラン、バズーカバランは Z_u が大きいの→遮断効果あり
- ・遮断効果には強い周波数特性あり
- ・分岐バラン、テーパバランは Z_u が小さい→遮断効果なし



不平衡電流遮断効果に対するシミュレーションモデルと結果

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

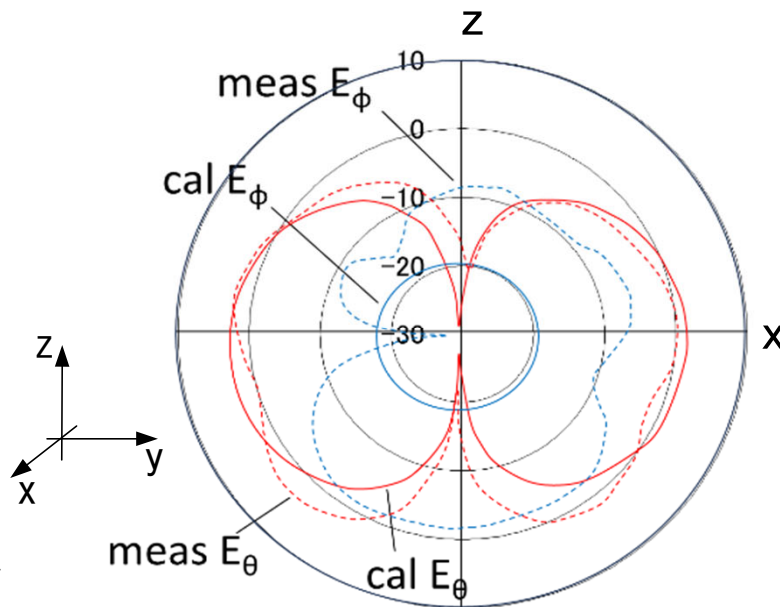
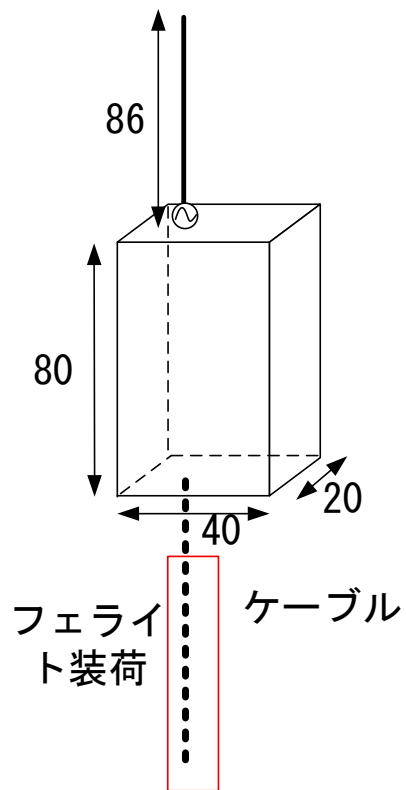
- ・遮断効果をインピーダンス測定により確認
 - ・バズーカ balan、集中定数 balan は効果あり、分岐 balan、テーパ balan は効果なし
- Zuによる結果と一致



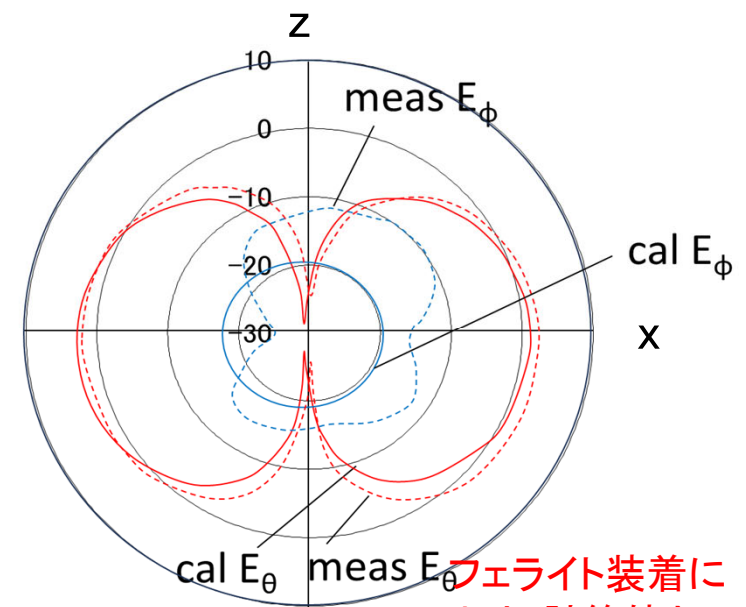
5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

フェライトの利用

- ・フェライトは高い透磁率を有しており、ケーブルに巻くことで、導線の自己インダクタンスが高まり、電流が流れにくくなる
- ・放射パターン測定時にケーブルにフェライトを装荷することで、計算値との一致度が向上
- ・漏洩電流、結合電流に効果あり
- ・漏洩電流遮断に用いると効率低下



フェライトなし



フェライトあり

フェライト装着により、計算値との一致度が向上

フェライトを用いた放射パターン測定

5. 高周波ケーブルの影響とその低減法

- ・ケーブルの影響低減法を下表にまとめる
- ・万能な方法はないが、講師のおすすめはインピーダンス測定はSパラメータ法、放射パターン測定は光ファイバーを用いた方法である

ケーブルの影響低減法のまとめ

	漏洩電流 に対する 効果	結合電流に 対する効果	機材の 影響	インピー ダンス測 定	放射パター ン測定	適用周波 数範囲	その他
Sパラメー タ法	○	×	○	○	△	○	○特別な 機材を必 要としない
フェライト	△	△	△	○	○	△	
光ファイ バー	○	○	△	△	○	○	○ケーブ ル取り回 しが容易
balan	○	×	○	○	○	×	

6. まとめ

- ・小形アンテナ測定の基礎として、機器実装タイプのアンテナ測定法について述べた
- ・測定用のケーブル接続、インピーダンス測定、放射測定の基本的な項目を示した
- ・測定用ケーブルが測定結果に与える影響の例を示し、その低減法についていくつか紹介した