#### アンテナ測定に関する基礎

#### Fundamental Technologies for Antenna Measurement

石井 望<sup>↑</sup> 飴谷 充隆<sup>‡</sup> Nozomu ISHII<sup>↑</sup> and Michitaka AMEYA<sup>‡</sup>

\*新潟大学 : 産業技術総合研究所

#### 概要

アンテナ性能を測定することは性能を担保することや適法性の観点から必須の技術である。ここではア ンテナ測定の基礎と、近傍界遠方界変換の基礎について述べる。

電波を使用した無線システムでは、アンテナの観点からは、給電線路からアンテナに効率よく電力が供 給されているのか、アンテナから空間へ設計通りに放射されているのかが定量的な評価基準となる。ア ンテナ測定基礎編では、測定に関わるアンテナ諸元を復習した後、測定における人的要素、同軸ケーブ ル、測定機器の設定などのアンテナ測定技術の基本となる事項を紹介する。続けて、電気長補正、不平 衡電流対策を含めて、ネットワークアナライザを用いたアンテナのインピーダンス測定を解説する。ま た、パターン・利得測定について、測定上の留意点を含めて解説する。さらに、S パラメータ法、光リ ンクシステムを利用した測定、放射電力測定についても簡単に紹介する。

アンテナの放射パターンは、無線システムの通信エリア設計にきわめて重要な要素である。アンテナの放射パターン測定法のうちの、2次元上の直交する近傍電界から遠方界の放射パターンを算出する方法が近傍界遠方界変換法(Near-field to Far-field Transformation)である。本講座の後半では、近傍界遠方界変換法の基礎理論と、被測定アンテナとプローブアンテナ、VNAを用いた二次元Sパラメータ測定からアンテナの放射パターンを求めるための定式化と、具体的な測定手順について、平面走査の場合を比較しながら、解説を行う。

#### Abstract

Antenna measurement is mandatory to certify of antenna performance or warranty of legality. Basic antenna measurement technology and near-field to far-field transformation are explained in this tutorial.

From the antenna's point of view, quantitative evaluation criteria are whether power is efficiently supplied from the line to the antenna and whether the power is radiated from the antenna to the space as designed. In the basic antenna measurement section, the fundamentals of antenna measurement, including human factors, will be introduced. Then, impedance measurement of antennas using a network analyzer, including electrical length compensation, will be explained. Pattern and gain measurements will be discussed, including points to keep in mind during measurements.

The radiation pattern of an antenna is an extremely important factor in the design of the communication area of a wireless system. The near-field to far-field transformation method is a method of measuring the radiation pattern of an antenna that calculates the far-field radiation pattern from orthogonal nearby electric fields in two dimensions. In the second half of the course, the basic theory of the near-field to far-field transformation method, the formulation and measurement procedures for determining the radiation pattern of an antenna from two-dimensional S-parameter measurements using the antenna under test, a probe antenna, and a VNA will be explained, comparing the planar scanning case and the cylindrical scanning case.

## アンテナ測定に関する基礎講座

ーアンテナ測定に関する基礎-ー放射指向性測定のためのアンテナ近傍界計測の基礎-

### 石井 望<sup>+</sup> 飴谷 充隆<sup>‡</sup> Nozomu ISHII<sup>†</sup> Michitaka AMEYA<sup>‡</sup> 十新潟大学 +産業技術総合研究所

1

《MWE2024 基礎講座》

# アンテナ測定に関する基礎

#### 石井 望 (新潟大学)

#### 2024年11月29日(金)

※ 基礎編の図の近くの『図2.1 [p.67]』などの表記は、文献[1]の図番号とページに 対応します。



### 惣 アンテナ測定のカテゴリー (アンテナ測定絵巻)



【出典】[3] 山口 良, 黒川 悟, 飴谷 充隆, アンテナ計測技術最前線 ~5G, Beyond 5Gに向けて~ A・P研ワークショップ アドバンスドワイヤレスシリーズ AWS-11, 2021年7月16日実施





【出典】[1] 石井 望, アンテナ基本測定法, コロナ社, 2012.







- 第1章:アンテナ測定技術の基礎
   アンテナ測定の際の心構え、ケーブル・コネクタの扱い、
- 第2章:インピーダンス測定
  - VNAを用いたインピーダンス測定, 電気長補正, イメージ法, 不平衡電流とバラン
- 第3章:パターン・利得測定
  - 遠方界条件, パターン測定とその誤差要因, 比較(置換)法
- 第4章:応用測定
  - 放射電力測定, 放射効率測定

## 第1章 アンテナ測定技術の基礎

2.1 測定技術における人的要素2.2 同軸ケーブル





# 1.1 測定技術における人的要素



### 🞾 測定技術のスキルを向上させるために

・アンテナ測定の位置づけ

- アンテナが仕様通りに設計・製作されたかを確認する

- アンテナ測定の際の心構え
  - アンテナ,その周囲での電磁波の振る舞いを理解する
  - アンテナ測定技術を習熟する
    - 集中し、細心の注意をして、測定に取り組む
    - 測定の基礎や原理に忠実に, 手順どおりに
    - <u>機器の故障, コネクタの破損を起こさない</u>
    - 困ったら自分で解決せず,周囲の熟練者に聞く!
- 想定外の測定結果に遭遇したら
  - 本テキストを読み返し、思い当たる原因を確認する
  - 実験パラメータの一つだけを変えて、<u>対照実験</u>を行う









- 静電気放電とそのダメージ
  - 同軸ケーブルの内導体と外導体の間において静電気放電を起こさないように 注意すること。保護回路(ヒューズ)が働き,機器本体が使用できなくなる。
- 対策
  - 着衣
    - 静電気を帯びやすい毛糸や
       化学繊維の衣服の着用を避ける
  - 静電気除去
    - 金属などに触って体内の静電気を逃がす
    - ・リストストラップ(写真)
    - •静電気対策マット(写真)



⊠2.1 [p.67]





# 2.2 同軸ケーブル



- 測定用の同軸ケーブルの特性インピーダンス: 50Ω
  - 放送用は75Ωのものが利用されるが、混用しないように注意されたい。
  - 型番に5D2VのようにDが含まれる場合は50Ωであり、3C2VのようにCが含まれる場合が75Ω である。型番はケーブルに記載されていることが多い。
- 代表的な測定用の同軸ケーブル
  - フレキシブルケーブル



⊠2.3(a) [p.69]







### 💯 同軸ケーブル [2/2]

• 極端な曲率のフレキシブルケーブルおよびセミリジッドケーブルの減衰特性の例



第2章 インピーダンス測定

2.1 VNAを用いたインピーダンス測定
2.2 電気長補正
2.3 イメージ法

2.4 ケーブルにおける不平衡電流対策





# 2.1 VNAを用いたインピーダンス測定



- 1. VNAにおいて反射校正(キャリブレーション) を行う
- 2. 校正を行った参照面*P*からAUT\*のポート*P'* までの経路長  $\Delta l$ を求め,対応する位相シフト量  $\Delta \theta = 2\beta l$ の補正,すなわち,電気長補正を行う
- 3. AUTを接続してインピーダンス測定を行う

\*AUT: Antenna Under Test



インピーダンス測定は, AUT が近接した 散乱体からインピーダンスに対して影響 を受けない範囲で実施する。



- テストポートケーブル・延長ケーブル使用
  - PC-3.5とSMAコネクタとの接続においては、アダプタを挿入するなどして、PC-3.5コネクタが破 損しないように慎重に行う。
  - 減衰の大きい延長ケーブルを用いる、あるいは、延長ケーブルが長いと、反射係数の大きさに 対する不確かさが増す。
- コネクタ接続・アダプタの使用
  - 接続は、手順にしたがって、しっかりと行う。
  - 接続のゆるみは、リターンロスが0dBを上回るなどの物理的にあり得ない 結果につながる。
- ・
   か射の確認
  - アンテナの放射方向に手や金属板をかざした際、リターンロスあるいは スミスチャート上の反射係数が変化する。
- 半田付けの確認
  - 半田が一瞬液体状に流れるように接着させる。





# 2.2 電気長補正

## 2.2.1 電気長補正の概念

ᅇ 電気長補正の概念 [1/2]

参照面の移動

$$S_{11}(P') = S_{11}(P) \underbrace{e^{j_2 \beta \Delta l}}_{\text{$\dot{0}$ dage t}}$$
 (3.1)







- 電気長
  - 経路長を自由空間内で伝搬する長さに換算した量

$$\Delta l_e = \sqrt{\varepsilon_r} \Delta l = \sqrt{\varepsilon_r} (\nu \Delta t) = c \Delta t \qquad (3.10)$$

同軸ケーブルの内外導体間に 充填された誘電体の比誘電率

- 位相変化量

$$\Delta \theta = 2\beta_0 \Delta l_e = 2\frac{\omega}{c}(c\Delta t) = 2\omega \Delta t \qquad (3.11)$$

- 参照面の移動は electrical delay Δt で決まる

$$S_{11}(P') = S_{11}(P)e^{j2\omega\Delta t}$$
(3.12)







## 3.2 電気長補正

## 3.2.2 VNA時間領域機能を用いた電気長補正

### ᅇ 時間領域機能を用いた電気長補正 [1/5]

- フーリエ逆変換 [VNAの時間領域機能]
  - 周波数領域のデータ ⇒ 時間領域応答

$$s_{11}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{11}(\omega) e^{j\omega t} d\omega = 2 \int_{0}^{\infty} \operatorname{Re} \left[ S_{11}(\omega) e^{j\omega t} \right] df$$
(3.14)

- 離散化(数値積分)

$$s_{11}(t) \approx \frac{2\Delta f}{N+1} \sum_{i=0}^{N} \operatorname{Re}[S_{11}(\omega_i)e^{j\omega_i t}]$$
 (3.15)

- 時間分解能,エリアジング効果に注意してサンプリング周波数 Δf およびサンプリング数 N を 決める。0.05-20.05 GHzの 801 ポイントの周波数データの場合
  - 時間分解能:  $\Delta t_{resolution} = 25 \text{ psec}, \Delta l_{resolution} = 7.5 \text{ mm}$
  - 繰り返し周期:  $\Delta t_{\text{observable}} = 20 \text{ nsec}, \Delta l_{\text{observable}} = 6.0 \text{ m}$
- 電気長補正
  - 時間領域応答から, electrical delay Δt を推定する
    - 参照面における不連続で反射が生じることを利用する

### 🔊 時間領域機能を用いた電気長補正 [2/5]



### ᅇ 時間領域機能を用いた電気長補正 [3/5]

• 40 mm モノポールアンテナ(延長ケーブルなし)における電気長補正





# 2.3 イメージ法による測定





(a) イメージ法の原理

(b) イメージ板の上に設置されたアンテナ

入力インピーダンス

$$Z_{in} = 2Z_{in}^{image} = 2\frac{V}{I} \qquad (3.20')$$
  
RL = -20 log<sub>10</sub>  $\left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \neq \text{RL}^{image} = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in}^{image} - Z_0}{Z_{in}^{image} + Z_0} \right| \qquad (3.22')$ 





🕺 イメージ板の大きさ



【出典】[5] 道下, 新井, "有限地板上モノポールアンテナのFDTD解析", 信学技報, A·P99-112, pp.45-50 (1999) 基礎編-27



# 2.4 ケーブルにおける不平衡電流対策

## 2.4.1 不平衡電流の影響



• 不平衡電流の存在



- 外導体の外側に流れる不平衡電流による影響
   入力インピーダンス,放射パターン
- バラン(balun)による不平衡電流の阻止
  - <u>bal</u>ance/<u>un</u>balance

 $I_b$ : 平衡電流  $I_u$ : 不平衡電流

## 💯 ケーブルによる多重反射 [1/2]



繰り返し周波数 Δ*f* とケーブル長 Δ*l* の関係

$$\Delta l = \frac{c}{2\Delta f \sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (3.24)$$

### 💯 ケーブルによる多重反射 [2/2]





# 2.4 ケーブルにおける不平衡電流対策

2.4.2 バラン



⊠3.19 [p.129]

Z<sub>ant</sub>

 $\bigvee I_u = 0$ 

/open

С

D



(a) シュペルトップ型バラン

(b) 等価回路

 $I_b$ 

h

Lu

 $I_u$ 

 $\lambda_0/4$ 

А

В

short

•インピーダンス変成比 1:1

•帯域幅10%程度







(a) シュペルトップ型バランの例

【出典】[4] 高橋応明, "無線ICタグ用アンテナの基礎", アンテナ・ 伝搬における設計・解析手法ワークショップ36 (2008)










(a) λ/4同軸バラン

(b) 等価回路

**・インピーダンス変成比** 1:1

•帯域幅10%程度

第3章 パターン・利得測定

3.1 測定環境

3.2 パターン測定

3.3 利得測定





## 3.1 測定環境

## 3.1.1 遠方界条件と測定レンジ



- 遠方界条件
  - 送信アンテナからの電磁波が、AUT\*に平面波として入射すること



• AUT最大径 D と遠方界条件を満たす最小距離 R<sub>min</sub>

D	0.707λ <sub>0</sub>	1.0λ <sub>0</sub>	1.5λ <sub>0</sub>	2.0λ <sub>0</sub>	5.0λ <sub>0</sub>	10λ <sub>0</sub>
$\lambda_0/D$	1.414	1	0.667	0.5	0.2	0.1
$R_{\min}$	1.0λ <sub>0</sub>	2.0λ <sub>0</sub>	<b>4</b> .5λ <sub>0</sub>	8.0λ <sub>0</sub>	$50\lambda_0$	$200\lambda_0$
R <sub>min</sub> at 900 MHz	33.2 cm	66.4 cm	1.49 m	2.66 m	16.6 m	66.4 m
$R_{\min}$ at 2.0 GHz	15.0 cm	30.0 cm	67.5 cm	1.20 m	7.50 m	30.0 m
$R_{\min}$ at 5.8 GHz	5.2 cm	10.3 cm	23.3 cm	41.4 cm	2.58 m	10.3 m

\*AUT: Antenna Under Test



- 自由空間, 遠方界条件を満たす環境
  - 周囲からの反射および散乱を避ける
  - 周波数,アンテナの規模により,屋外・屋内のレンジを選択
- 屋外:地面反射の影響を低減するレンジ構成
  - ハイレベルレンジ
  - グランドレベルレンジ
  - スラントレンジ
- 屋内: 電波暗室の使用
  - 大規模アンテナ:コンパクトレンジ,近傍界測定
  - <u>中小規模アンテナ:電波暗室</u>



## 3.1 測定環境

## 3.1.2 電波暗室







図4.1.[p.139]





(b) くさび形

### ② 電波暗室の形状とクワイエットゾーン



• クワイエットゾーン

- 直接波に対する反射波および散乱波の比があるレベル以下(例えば-40dB以下)となる領域



## 3.1 測定環境

## 3.1.3 送受信装置

#### ⑦ 送受信装置に求められる基本仕様

- パターン測定
  - 振幅測定:  $|S_{21}|^2$  or 受信電力の測定(最大値で規格化)
  - 位相測定:  $\angle S_{21}$ の測定(位相差)
- •利得測定
  - 比較法(置換法):  $|S_{21}|^2$  の比 or 受信電力比の測定
  - 2/3アンテナ法: |S<sub>21</sub>|<sup>2</sup> or 送信電力に対する受信電力の比の測定











・標準ホーンアンテナ



・標準ダイポールアンテナ



※標準アンテナは、通常利得校正値がメーカー等より供給されている

・ダブルリッジガイドホーンアンテナ



・クワッドリッジドガイドホーンアンテナ





# 3.2 パターン測定

## 3.2.1 2次元パターン

#### 💯 2次元パターン(パターン断面)

- 仰角パターン(elevation pattern)
  - 球座標系で  $\phi$ を固定して、 $\theta$ を変化させる
  - 大円断面 (great circle cut)ともいう
- 方位角パターン(azimuth pattern)
  - 球座標系で $\theta$ を固定して,  $\phi$ を変化させる
  - 円錐断面(conical cut)ともいう



#### AUTに対する座標設定とパターン断面





- Azポジショナ
  - 方位角を変えながら、回転部に設置された AUTを回転させる

- Polポジショナ
  - 送信アンテナの偏波面を回転させる







 $\circ$ 

#### 💯 ポジショナの回転方向と観測角(*θ, φ*)の回転方向

• 送信側にAUTを取り付けた場合の観測角の回転方向



• 受信側にAUTを取り付けた場合の観測角の回転方向



### 💯 ダイポールアンテナのE面およびH面パターン [1/2]

• *x* 軸に沿ってダイポールアンテナが配置されている場合

図4.11[p.153]



(a) E面パターン

(b) H面パターン

### 💯 ダイポールアンテナのE面およびH面パターン [2/2]

z軸に沿ってダイポールアンテナが配置されている場合

図4.12[p.153]





(a) E面パターン

(b) H面パターン



# 3.2 パターン測定

### 3.2.3 誤差要因

#### 💯 パターン測定における誤差要因

- 解析解 or 電磁界シミュレータによる結果と一致しない理由
  - 1. 解析モデルが実際のAUTを忠実に再現していない



この不一致を解決することで、パターン測定における誤差要因を特定し、測定精度を改善することができる

### 💯 角度の相違 [1/2]

- AUT(位相中心)の配置
  - ポジショナの回転軸上に配置
  - 回転軸が複数ある場合, 回転軸の交点に配置
  - クワイエットゾーンの中心に配置
- 回転軸, 仰角, 直線偏波のチルト角に関する位置合わせ
  - AUTの水平度
    - •水準器の利用
  - 垂直軸からの角度
    - 大型分度器
  - AUT設置の際の人為的な誤差要因の軽減
    - マークをつけるなどして, 位置情報の客観的評価
    - 揺れ防止対策



AUTの取り付け例



水準器

### 💯 角度の相違 [2/2]

- 送信アンテナとAUTの位置関係
  - 同一平面にあること
    - 床面から同じ高さに送信アンテナとAUTの中心を設定
  - 高さ調整
    - 発泡スチロール(比誘電率1に近い支持材料)
  - 軸合わせ
    - ・レーザーポインタ、レーザー墨だし装置の利用
- 支持棒の軸ずれチェック(右図)
- 交さ偏波パターンはこれらの位置合わせに 極めて敏感に反応する





- 同軸ケーブルの引き回しが深刻な影響を与える場合
  - 1. アンテナの電気的な寸法が小さい場合
  - 2. アンテナの指向性利得が小さく、全方向性あるいは等方性に近いパターンを示す場合
  - 3. アンテナが平衡系であるにもかかわらず,バランを使用していない場合
  - 4. 端末アンテナ試験用ポートにケーブルを接続して測定する場合

→ 端末アンテナの構造的非対称性より非所望電流が流れることがある

 イメージ法を利用した場合の問題点
イメージ板が十分に大きくない場合、不平衡電流が イメージ板のAUT側に流れ込み、イメージ板の エッジ部分から回折波が放射し、パターンを乱す。



AUT



#### • ケーブル配線の基本

(a) 主偏波と同じ向きに配線しない

- (b) ポジショナ回転軸に沿って配線し, 直下で垂直にする
- (c) 影響のない遠方でケーブルの向きを変える



図4.16[p.160]

### 💯 周囲環境からの反射 [1/2]

- AUTの出力には直接波以外に反射波の影響が加わる
  - <u>AUTをクワイエットゾーンに置く</u>

(電波暗室6面に張られた電波吸収体からの反射波をあるレベル以下に保つため)

- ポジショナ, マウントからの反射の影響を電波吸収体で 極力抑える



【出典】[6] H. Okada et al.: "RCS measurement and PO simulation of a scale model rocket," Proc. ISAP2008, Taipei, Taiwan, pp.1306-1309 (2008)

turntable covered with absorbing material

added absorbers

⊠4.17[p.162]

基礎編-61

#### 💯 周囲環境からの反射 [2/2]

- 反射点を特定するポイント
  - <u>事前予測と測定結果の違い</u>
  - 対称構造アンテナのパターン測定値の非対称性
  - 反射点と思われる地点の反射量を大きくしたり,小さくしたりする
    - 反射量を大きくするように、金属板を置く
    - 反射量を小さくするように、電波吸収体を置く
  - アンテナを傾けることで、アンテナの向きに依存した反射であるか否かを判断
- 時間領域応答波形の利用
  - 直接波と間接波の経路長の違いを時間軸上で特定する
    - 送信アンテナとAUTの間の距離を変化させて、経路長が変化する反射点と変化しない 反射点より、間接波が生じている原因を探る



## 3.3 利得測定

## 3.3.1 比較法 (置換法ともいう)



- 1.5GHz以下
  - 標準ダイポールアンテナ
- 1.5GHz以上









公称値24dBi のVバンド標準ホーンアンテナ3つを用いて、拡張3アンテナ外挿法にて測定した結果

【出典】飴谷: private communication

#### 💯 比較法による直線偏波アンテナの利得測定 [1/2]



## 第4章 応用測定

#### 4.1 放射電力測定

全球面走査法,変調プローブアレー法,ランダムフィールド法

4.2 放射効率測定

球面走査法, ウィラー法





## 4.1 放射電力測定

## 4.1.1 球面走査法

### ② TRPと球面積分

EIRP (effective isotropic radiated power)
アンテナに供給される電力 P<sub>t</sub> と利得 G の積

$$EIRP = P_t G \quad [W] \tag{1.91}$$

• TRP (total radiated power)

$$P_{\text{TRP}} = \frac{1}{4\pi} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} \text{EIRP}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \qquad (5.1)$$
$$= \frac{1}{4\pi} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} [\text{EIRP}_{\theta}(\theta, \phi) + \text{EIRP}_{\phi}(\theta, \phi)] \sin \theta d\theta d\phi$$



(5.2)

\*EUT: Equipment Under Test

• 球面積分の離散化

$$P_{\text{TRP}} \approx \frac{\pi}{2N_{\theta}N_{\phi}} \sum_{i=2}^{N_{\theta}} \sum_{j=1}^{N_{\phi}} [\text{EIRP}_{\theta}(\theta_{i}, \phi_{j}) + \text{EIRP}_{\phi}(\theta_{i}, \phi_{j})] \sin \theta_{i} \qquad (5.4)$$





## ② TRPの測定例 [2/3]

• Notebook PC with Pseudo-TX

2.45GHz antenna



5GHz antenna





Dual band oscillator (2.4GHz & 5GHz) built in PC
## ② TRPの測定例 [3/3]

#### ・角度分割数とTRPの関係(2.412GHz)

Ν	24	60	144	264	612	2520	<b>表</b> 5.1〔p.184〕
$\Delta \theta = \Delta \phi \text{ [deg]}$	45	30	20	15	10	5	
$P_{\mathrm{TRP}}$ [dBm]	6.45	6.48	6.65	6.73	6.76	6.79	
角度刻みを1	15度以下	にすれば	ばTRPは-	十分に収	東する		

・2.412GHzにおける3Dパターン





# 4.2 放射効率測定

## 4.2.2 ウィラー法

### 🞾 ウィラー法による放射効率測定の原理



## 🞾 ウィラー法による放射効率の測定例



直方体状のシールドキャップで覆った状態

#### ᅇ 文献リスト、著者紹介(基礎編)

[1] 石井望, アンテナ基礎測定法, コロナ社, 2011.

[2] 石井 望, "測定の基礎," A・P研ワークショップ 基礎講座 KK-24 資料, 2024.

- [3] 山口 良, 黒川 悟, 飴谷 充隆, "アンテナ計測技術最前線 ~5G, Beyond 5Gに向けて~," A・P研ワ ークショップ アドバンスドワイヤレスシリーズ AWS-11 資料, 2021.
- [4] 高橋応明, "無線ICタグ用アンテナの基礎," A・P研ワークショップ アンテナ・伝搬における設計・解 析手法ワークショップ WS36 資料, 2008.
- [5] 道下, 新井, "有限地板上モノポールアンテナのFDTD解析," 信学技報, A·P99-112, pp.45-50, 1999.
- [6] H. Okada et al. : "RCS measurement and PO simulation of a scale model rocket," Proc. ISAP2008, Taipei, Taiwan, pp.1306-1309, 2008.

[7] 渡辺, 中島, 重野, 新井, "全球面及び部分球面走査による小型無線機の全放射電力測定," IEICE ACT研 資料, ACT2008-13, pp.6-11, 2008.

著者:石井 望(いしい のぞむ) 新潟大学工学部 准教授, nishii@eng.niigata-u.ac.jp