

# 解説

## 小形アンテナ測定技術

Measurement Techniques for Small Antennas

石井 望

### Abstract

ベクトルネットワークアナライザの登場により、小形アンテナの入力インピーダンス測定の精度が向上した。測定器の性能が上がっても、小形アンテナの特性は周囲環境の影響を受けやすいため、その測定には十分に注意を払う必要がある。本稿では、まず小形アンテナ測定において必要とされる基本事項の理解、誤差要因の切り分け、不確かさの重要性について述べる。続いて、VHF/UHF帯からマイクロ波帯で利用されるケーブルやコネクタの取扱いに関する注意事項を列挙する。ベクトルネットワークアナライザを利用したアンテナの入力インピーダンス測定について、電気長補正の方法も含めて概観する。最後に、放射パターン測定並びにその誤差要因について触れる。

キーワード：小形アンテナ、測定、入力インピーダンス、放射パターン

### 1. はじめに

近年、小形アンテナが一体化された無線モジュールが製品として普及しつつあり、無線機能を容易に実装できるようになりつつある。しかしながら、小形アンテナの特性は周囲環境に大きく影響を受けるため、測定における誤差要因が多く、大きな誤差が生じかねない。小形アンテナの測定は古くから行われているが、測定対象により支配的な誤差要因が異なることが多く、古くて新しい問題といえる。

本稿の内容は、このような背景のもとで2010年度に開催されたアンテナ・伝播専門研究委員会主催「アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ（第39回）：アンテナ基本測定技術」（WS-39）において取り扱ったVHF/UHF帯からマイクロ波帯におけるアンテナ測定技術からピックアップした。ワークショップで扱った内容の詳細は文献(1)を参照されたい。

電磁界シミュレータの普及により、小形アンテナは比較的容易に設計できるようになった。得られた特性の妥当性を実験的に確認するために、解析モデルと同じ実験モデルを製作し、インピーダンス並びに放射パターン・

利得を比較する。大抵の場合、シミュレータで得られた数値と実験値は異なる。当然、その差はなぜ生じるかということになる。シミュレーション条件がまずかったのか、それとも実験がまずかったのか、シミュレーション条件を変更して計算し直すことは比較的容易に行えるであろう。しかしながら、実験の場合はどうであろうか。

手順に従い、実験が正しく行われているのかを確認するためにはどうしたらよいのか。まず試みるべきは再度実験を行うことであろう。もし違う結果が得られるのであれば、実験そのものに問題があると考えられる。実験のどの部分に問題があるのかと切り分けなければならないが、この際にアンテナ測定に関する知識が活用されることになる。経験的に測定をつぼを押さえていれば、短時間で解決することができよう。そうでない場合は、測定に熟知した者に問い合わせるか、測定に関する文献・資料を調べることになろう。あるいは、問題点を想定し、その検証を行うための対照実験を行うことで、問題点を切り分ける必要がある。測定結果の検証法はごく当然であり、何を今更という声が聞こえてきそうだが、当たり前のことを的確に実施することこそが、測定スキルを向上させる早道である。

もう一つ大事な点は、測定をつぼを押さえるためにも、基本事項を深く理解することである。教科書を通り一遍で学習するだけでは深い理解は難しい。測定を通して、基本事項の本質を見抜くことである。その域に達すれば、測定対象でどのような現象が生じているか想像で

石井 望 正員：シニア会員 新潟大学工学部福祉人間工学科  
E-mail nishii@eng.niigata-u.ac.jp  
Nozomu ISHII, Member (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.94 No.9 pp.795-800 2011年9月  
©電子情報通信学会 2011

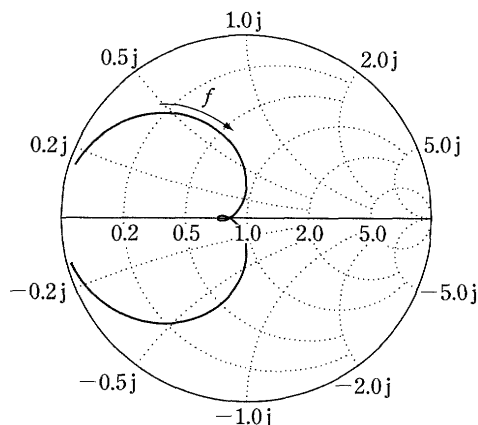


図1 スミスチャート上におけるインピーダンス軌跡の例 ベクトルネットワークアナライザの画面に表示されたスミスチャート上のインピーダンス軌跡を一目見るだけで、接続されたアンテナの共振特性を見抜くことができる。図は、共振周波数が僅かに違う二つの共振による軌跡である。

きるようになろう。アンテナ測定の基本は、伝送線路理論とアンテナ理論である。例えば、アンテナのインピーダンス特性を測定する場合を考えよう。ベクトルネットワークアナライザ (VNA) のスミスチャート画面において、図1のように、二つの円弧の交わる部分で小さな円を描く場合、共振周波数が近接した二つの共振が存在する。この特性は、パッチアンテナにおいて共振周波数が僅かに異なる直交する二つのモードを励振させて円偏波放射を実現する場合に得られる。このような事実を知っていれば、測定器等に表示された測定結果から、どのような現象が生じているかを予測できる。

いうまでもなく、測定の不確かさ<sup>(用語)</sup>についても注意を払う必要がある<sup>(2), (3)</sup>。しかしながら、残念なことに、本会の総合大会・ソサイエティ大会などの学会発表において、シミュレーション値の妥当性を示すために測定値を提示することが多いが、測定値の不確かさについての言及はほとんどない。シミュレーション値と測定値が一致しているから測定に問題ないと主張するのであれば、シミュレーション値の信頼性はどうなるのか、その逆もしかりである。筆者が思うに、測定値を提示する場合はおおよその見積りでも構わないので、測定の不確かさを示すことが発表する上で責務ではないか。測定精度の良いベクトルネットワークアナライザが研究現場に普及し

## 用語解説

**不確かさ (uncertainty)** 測定の結果に付随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ<sup>(1)</sup>。「誤差」の定義は、測定量の「真の値」からの測定された値の差分であるが、「真の値」は測定できない。不確かさにより、測定のばらつきが与えられるので、「真の値」がばらつきの範囲にどの程度の割合で含まれるかを定量的に示すことができる。

たことにより、測定の不確かさに対する関心が薄れてしまったのかもしれない。しかし、測定には厳然として不確かさが存在している。つまり、測定によって「真の値」は得られることはなく、あくまでも測定された値は拡張不確かさにより表現される区間に信頼水準何%で存在し得るとのことなのである。

以降では、まず高周波測定技術の基本として、ケーブル・コネクタの取扱い、VNA 及びその校正法について述べる。アンテナの特性評価は、回路的な側面 (入力インピーダンスなど) 及び空間的な側面 (放射パターン・利得など) に分類できる。回路的な側面に関しては、VNA を用いた入力インピーダンス測定法、電気長補正、不平衡電流による影響について紹介する。空間的な側面に関しては、パターン測定及びその誤差要因と対処法、比較法による利得測定について触れる。

## 2. 高周波測定技術の基本

### 2.1 ケーブルとコネクタ

高周波測定では、被測定アンテナと測定器の間の伝送線路として同軸ケーブルを用いるのが一般的である。同軸ケーブルを扱う際は、まず静電気に注意しなければならない。同軸ケーブルの内導体と外導体の間に静電気放電が生じると、接続先の測定機器を損傷させる、あるいは、その保護回路が動作する恐れがある。一たび保護回路が動作すると、その交換に時間と費用を要することになる。このような静電気放電によるダメージを避けるために、日頃から対策を講じることが賢明である。多くの場合、静電気は測定作業員によって運ばれる。したがって、静電気をためやすい衣服や帽子の着用はしない、機器に触る前に周りの金属板などを触り体表面から静電気を逃がす、リストストラップを用いて体表面の一部を接地する、などの対策を講じるべきである。特に冬場は静電気がたまりやすく、毛糸などの衣服を着用することが多いので、特段の注意を要する。

同軸ケーブルは、大別して、表面がビニールで被覆され、比較的曲げやすいフレキシブルケーブル、外導体が柔らかい銅管である程度の折曲げ可能なセミリジッドケーブルに分類される。フレキシブルケーブルは、アンテナあるいは機器の間の接続に幅広く利用され、セミリジッドケーブルは一度接続したら固定して利用されることが多い。同軸ケーブルは、利用する周波数上限、単位長当りの減衰量などによって、ケーブルの太さや利用するコネクタが異なるので、用途に合うように適切に選択すべきである。また、曲げが直角に近づくると損失が増えるので、なるべく曲げずに使用すべきである。特にフレキシブルケーブルについて、ひもと同じ感覚で引っ張ったりするのは論外であるが、余裕のある引き回しを心掛けるべきである。

ケーブルの端部にはコネクタが取り付けられ、被測定デバイス、測定機器、他のケーブルなどの接続に供される。コネクタも使用するケーブル寸法、周波数帯、測定精度などにより、複数の仕様が存在している。このために、異なる形状のコネクタ間の接続にはアダプタが使用される。しかしながら、複数仕様のケーブル・コネクタで接続された伝送線路の特性はそのうちの最も悪い特性によって制限されることになるので、精度の良い測定を行う際は、精度の悪いケーブル・コネクタを含めるべきではない。

コネクタ接続に関して特に注意すべき点は、SMA コネクタと PC-3.5 コネクタとの接続である。SMA コネクタは安価で、上限が 18~25 GHz とされているため、マイクロ波帯で最もよく利用されているコネクタである。これに対して、PC-3.5 コネクタは VNA などの測定器校正に利用される精密型のコネクタである。これら二つのコネクタは物理的に接続できるように設計されている。しかしながら、SMA コネクタは安価で、工作精度が良くないこともあり、PC-3.5 コネクタと接続すると、PC-3.5 コネクタを破損させることがある。特に、セミリジッドケーブルの内導体を利用して半ば自作した SMA コネクタは要注意である。校正用デバイスの PC-3.5 コネクタが破損すると高精度な校正を行えず、測定精度を悪くする一因となる。このような状況を避けるためには、測定器メーカーでは、SMA コネクタと PC-3.5 コネクタの間に緩衝帯というべき役割を果たすアダプタを挿入して接続することを推奨している。この用途のアダプタとして、両側が PC-3.5 コネクタであるようなアダプタを使用することが多い。すなわち、片側を PC-3.5 コネクタ接続専用とし、もう片側を SMA コネクタ接続専用として利用する。SMA コネクタ接続側の PC-3.5 コネクタが破損したら、アダプタを交換するわけである。一例として、VNA に接続されるポートケーブルの先端は PC-3.5 コネクタであり、SMA コネクタによるこの PC-3.5 コネクタの破損を避けるためには、ポートケーブルの先に PC-3.5 アダプタを接続した上で SMA コネクタを接続するとよい。

次に、コネクタの接続法について述べる。コネクタを接続する際は、まず中心軸を合わせる事が重要である。具体的には、内導体がもう一方の外導体にスムーズに滑り込むように合わせる。このとき、コネクタのナットは滑らかに回っていくはずである。少しでも無理な力がかかっているようであったら、もう一度中心軸合わせをやり直すべきである。またコネクタを接続する際は、コネクタのナット以外は回さない、つまり、デバイス、ケーブル、アダプタを回してはいけない。すなわち、予期せぬ大きなトルクがコネクタにかかることを避けなければならない。そこで、コネクタのナットをどの程度締めるかということであるが、これはトルクレンチを使用

して所定のトルクに達するまで締めることになる。決して、手でギョッと締めてはいけない。ただ、手で緩めることができてはいけない。とはいっても、手で締めざるを得ない場合もあると思われるので、筆者の締め加減を文章で披露しておく<sup>(1)</sup>。

「ナットを滑るように回していき、動かなくなる薄皮一枚のところまで締める、滑るように逆回しができないように、少しだけ、気持ちとして 1° ぐらいまでナットを締める。」

## 2.2 ベクトルネットワークアナライザ

ベクトルネットワークアナライザ (VNA) は 2 ポート回路網の S パラメータを精度良く測定する機器である。小形アンテナの入力インピーダンスは VNA により測定されるのが一般的である。特に VNA に時間領域機能が備わっている場合、周波数領域の複素数データを逆フーリエ変換することにより時間領域におけるインパルス応答を得ることができ、入力インピーダンス測定における参照面決定に威力を発揮する。VNA の測定原理並びに校正 (キャリブレーション) については文献(4)に詳しいので、興味がある方はぜひ参照してほしい。

VNA は専用の校正キットによって測定前に校正を実施するため、機器や接続が理想的でないことによる系統的誤差を除去することができ、精度の良い測定が可能となっている。代表的な校正法としては、短絡・開放・整合負荷・スルーの 4 種類の校正用接続による SOLT 校正法が知られている。校正を行った際は、その校正が正しく機能しているかをチェックする習慣をつけるとよい。例えば、ポート 1 に校正用の短絡あるいは開放を接続したとき、 $S_{11}$  の振幅が 0 dB に近いことを確認する (0.05 dB 以内)。ポート 1 に校正用の整合負荷を接続したとき、 $S_{11}$  の振幅が -30 dB 以下であることを確認する。ポート 1 並びに 2 をスルー接続 (直結) したとき  $S_{21}$  の振幅が 0 dB に近いことを確認する (0.05 dB 以内) などである。

VNA の誤差要因として、系統的誤差のほかに、ランダムな誤差、ドリフト誤差が知られている。ランダムな誤差は IF 帯域幅を小さくしたり、アベレーシング回数を増やしたりすることで小さくできる。ドリフト誤差は周囲温度の変化によることが多いので、再度校正をし直すことで対応する。気温の変化の激しい時期、時間帯の測定ではドリフト誤差と思われる測定のばらつきが生じやすい。また、空調機は間欠的に室温を調整していることがあり、設定温度が必ずしも室温とは限らず、ドリフト誤差の要因となり得る。

### 3. インピーダンス測定

#### 3.1 VNA を用いたインピーダンス測定

小形アンテナの入力インピーダンスは VNA で測定されるのが一般的である。図 2 に示すように、VNA に接続されたテストポートケーブルの先で校正を行い、その先に被測定アンテナを接続し、 $S_{11}$  を測定することにより入力インピーダンス  $Z_{in}$  を求める。

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (1)$$

ここで、 $Z_0$  は給電ケーブルの特性インピーダンスであり、測定用では一般に  $50\Omega$  である。校正後の参照面が被測定アンテナの入力参照面であるとは限らないので、その往復分の位相シフト  $\Delta\theta = 2\beta\Delta l$  を補正しなければならない。この補正を電気長補正という。ここで、校正後の参照面  $P$  と被測定アンテナの入力参照面  $P'$  との間のケーブルの位相定数  $\beta$  とし、その長さを  $\Delta l$  とする。このとき、これら二つの参照面における  $S_{11}$  の間には

$$S_{11}(P') = S_{11}(P)e^{j2\beta\Delta l} \quad (2)$$

の関係がある。

アンテナが面対称の構造であり、給電点はその対称面に含まれる場合、イメージ法が適用できる。対称面を金属接地板に置き換え、接地板で区切られた半分のアンテナのインピーダンス測定を行い、測定されたインピーダンス値を倍にすることで元のアンテナの入力インピーダンスが得られる。

インピーダンス測定を行う際の注意点を述べる。まず、アンテナ給電点とテストポートケーブル間のケーブルによる減衰を極力減らすことが重要である。ケーブル長を短くする、あるいは、減衰の小さいケーブルを選択

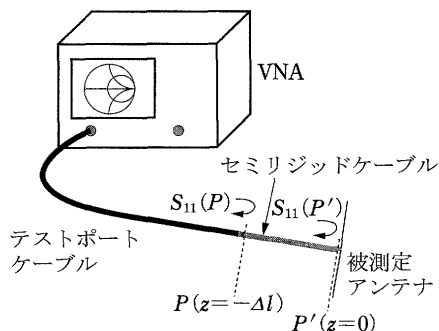


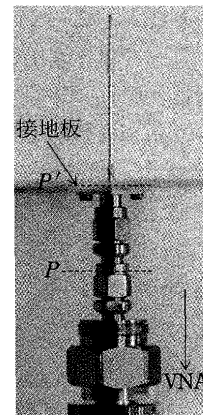
図 2 VNA によるアンテナの入力インピーダンス測定の様式図  
VNA にテストポートケーブルが接続され、その先端におけるコネクタの部分で校正（キャリブレーション）が行われる。アンテナ入力ポートは校正面と異なることが多いので、その電気的遅延を補正して入力インピーダンスを測定する。

することが望ましい。減衰が大きいと、測定される反射係数の大きさは実際の反射係数よりも小さくなり、見かけ上整合が取れたように錯覚しかねない。また、測定の際は何度かコネクタ接続を行うため、接続の緩みにより反射減衰量が 0 dB を上回る、すなわち、入力インピーダンスの実部が負になることがある。受動デバイスである限り、このようなことはあってはならない。コネクタを力づくで締めてはいけませんが、接続に緩みがあってもいけないのである。

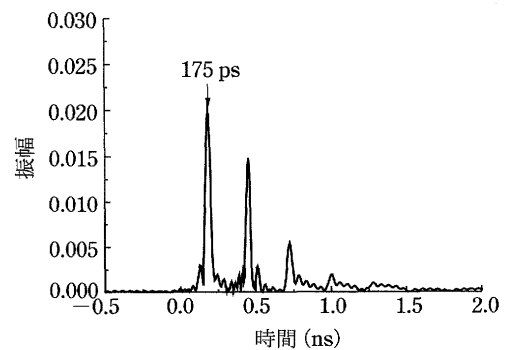
更に、平衡系のアンテナや、小形地導体（きょう体）上の不平衡アンテナに同軸ケーブルを接続する場合など、同軸ケーブルの外導体に不平衡電流が流れる場合は注意を要する。不平衡電流の存在により、ケーブルの配置を変えるだけで入力インピーダンスが変化したり、ケーブルが長い場合には多重反射が生じたりする。この不平衡電流を阻止するために、平衡・不平衡変換を行うバランがよく利用される。

#### 3.2 電気長補正

校正後の参照面  $P$  から被測定アンテナの入力参照面  $P'$  までの所要時間  $\Delta t$  とするとき、位相シフトは



(a) 接地板上に作製された 40 mm モノポールアンテナ



(b) 時間領域インパルス応答

図 3 モノポールアンテナの時間領域インパルス応答 VNA の時間領域機能を用いて、入力インピーダンス測定に欠かせない電気的遅延を推定することができる。電気的遅延の推定が妥当であることは実際の距離と対応させて考えるとよい。

$\Delta\theta=2\omega\Delta t$ で与えられる。ここで、 $\omega$ は角周波数とする。すなわち、電氣的遅延 (electrical delay)  $\Delta t$ を決定することができれば電氣長補正が行える。

被測定アンテナの入力参照面  $P'$  が物理的に開放若しくは短絡に設定できる場合は、VNA をスミスチャート表示にし、電氣的遅延  $\Delta t$  の数値を連続的に変化させ、周波数軌跡が一点に集中するような電氣的遅延  $\Delta t$  を決定すればよい。

電氣的遅延は VNA の時間領域機能を利用して決定することもできる。できる限り正確に電氣的遅延を推定するためには、時間分解能を細かくし、かつ、エリアシング効果を回避する必要がある。このため、周波数範囲を広く選び、測定周波数ポイント数を多くした上で、 $S_{11}$  の周波数データを測定し、逆フーリエ変換することが望ましい。図 3(a) は 40 mm モノポールアンテナを接地板上に製作した例である。接地板下面には、VNA のテストポートケーブル、PC-3.5 アダプタ (PC-3.5 と SMA コネクタ変換用)、アンテナ入力ポートに対応する SMA コネクタがあり、それぞれ接続された状態にある。校正を行った面は図中の  $P$  面であり、アンテナ入力ポートに対応するが接地面の  $P'$  面である。図 3(b) はその時間領域におけるインパルス応答である。この図において、 $P'$  面に対応するのは 175 ps のピークである。この推定の妥当性はこの電氣的遅延  $\Delta t=175$  ps を距離換算することにより確認できる。

#### 4. 放射パターン・利得測定

アンテナの放射特性測定は、アンテナを自由空間に置いた場合と同等の測定レンジで行う。測定系側の送信アンテナあるいは受信アンテナと被測定アンテナの距離  $R$  は遠方界条件  $R \geq 2D^2/\lambda_0$  を満足する必要がある。電氣的な小形アンテナの場合、アンテナ最大径  $D$  が波長  $\lambda_0$

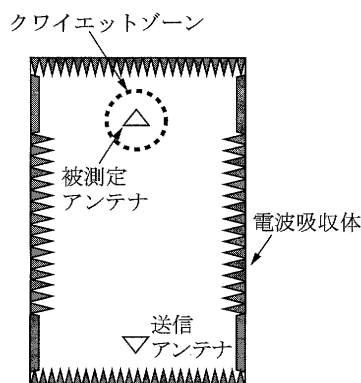


図4 電波暗室の模式図 アンテナの放射特性測定は、シールドルームの6面に電波吸収体を取り付けた電波暗室内で行われる。電波吸収体からの反射の影響を避けるため、クワイエットゾーンと呼ばれる球形の領域に被測定アンテナを設置して測定する。

程度以下であることから、専らシールドルームの6面に電波吸収体を取り付けた電波暗室の中で測定が行われる (図4)。電波暗室とはいえ、その内部の全ての空間で電波吸収体からの反射の影響を無視することはできないので、クワイエットゾーンと呼ばれる球形の領域に被測定アンテナを設置して測定する。

原理的には VNA の  $S_{21}$  測定により放射特性を測定できる。しかしながら、実際には、遠方界条件を満たすように、例えば、送信アンテナと受信側の被測定アンテナを離して配置する必要がある。単なる VNA による  $S_{21}$  測定では、アンテナからのケーブルの引き回しが長くなり、ケーブル損が無視できない。このため、図5に示すように、送信アンテナの近くに信号発生器を設置し、受信側の被測定アンテナの近くに VNA の周波数変換機能 (受信 RF 信号と LO 信号をミキサで混合し、周波数の低い IF 信号に変換する機能、いわゆるヘテロダイン検波の機能) を設置することが多い。IF 信号で使用される周波数帯ではケーブル損は無視できるからである。

アンテナの放射パターンは、アンテナを中心とする球座標系  $(r, \theta, \phi)$  の角度  $\theta, \phi$  の関数として表現できる。放射パターン測定では、 $\theta$  を固定して  $\phi$  を変化させる方位角パターン、 $\phi$  を固定して  $\theta$  を変化させる仰角パターンがよく利用される。電界ベクトルが含まれる E 面パターン、磁界ベクトルが含まれる H 面パターンに着目する場合もある。遠方界では電界と磁界は直交するので、E 面と H 面は直交する。実際にパターンを測定する場合は、アンテナをポジショナと呼ばれる回転台に取り付ける。ポジショナの回転速度、ステップ角度などはポジショナコントローラで制御される。実際の測定では、回転軸が床面に対して垂直なポジショナ、平行なポジショナなどを組み合わせてパターン測定を行う。既成

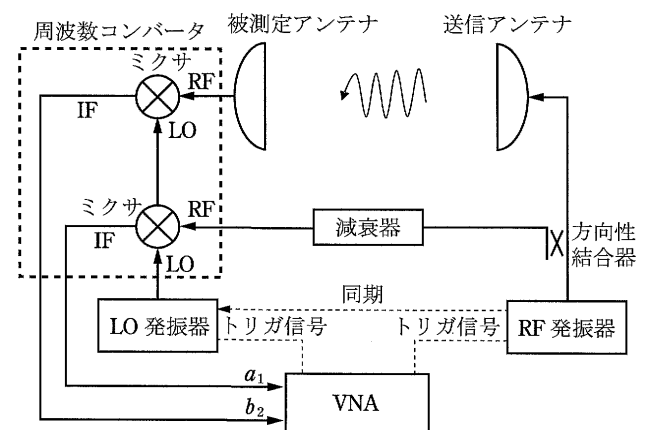


図5 参照信号を利用した VNA による送受信系のブロック図 アンテナの放射特性は VNA の  $S_{21}$  測定を行うことより得られる。送受信アンテナ間の距離が長い場合、RF ケーブルの損失による測定のダイナミックレンジ低減を回避するため、 $a_1$  及び  $b_2$  の検波を一箇所にまとめて測定するオールインワンのネットワークアナライザを用いるのではなく、これらを空間的に分離して検波する送受信系が利用される。

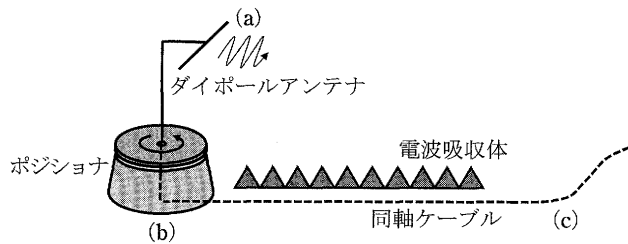


図6 ケーブル配線による誤差要因 アンテナの放射特性はケーブル配線の影響を受けることが多い。それを回避するためには、(a)主偏波と同じ向きに配線しない、(b)ポジショナの回転軸に沿って配線する、(c)影響のない遠方でケーブルを曲げることが基本となる。

のパターン測定用ソフトウェアを利用せず、自分でポジショナを制御する場合には、ポジショナの回転方向と観測角 $(\theta, \phi)$ の回転方向に注意する必要がある。送信側に被測定アンテナを取り付けた場合、観測角 $(\theta, \phi)$ はポジショナと同じ方向に回転する。しかしながら、受信側に被測定アンテナを取り付けた場合、観測角 $(\theta, \phi)$ はポジショナと逆の方向に回転する。測定するごとにこれらの幾何学的な関係を考えるのは勘違いの元であるから、手順を文書にまとめるなどのマニュアル化が望まれる。

パターン測定における代表的な誤差要因は、①角度の相違、②ケーブル配線の影響、③周囲環境からの反射の影響に大別される。

角度の相違に対する対応としては、被測定アンテナの位相中心をポジショナの回転軸上に配置する。送信/受信アンテナと被測定アンテナの中心は床面から同じ高さに設定する。高さ調整には比誘電率が1に近い支持材料(例えば、発泡スチロール)を利用するとよい。軸合わせにはレーザーポインタなどを活用するとよい。

ケーブル配線については、図6に示すように、(a)主偏波と同じ向きに配線しない、(b)ポジショナの回転軸に沿って配線し、直下でケーブルの向きを垂直に変える、(c)影響のない遠方でケーブルの向きを変えることが基本となる。同軸ケーブル自体の取扱いとしては、ケーブルを踏まない、通路用の発泡体の下にケーブルを配線しないことに注意する。また、極端な曲率での引き回しも避けるべきである。これらの要因でケーブルの外導体が破損すると、電磁波漏れが生じ、ケーブルが測定に使用できなくなる。

周囲環境からの反射としては、まず電波暗室壁面等の電波吸収体からの反射が考えられる。この影響を防ぐために、被測定アンテナをクワイエットゾーン内に置くべきである。またポジショナ、マウントなどからの反射の影響は電波吸収体で覆うなどして極力抑える。更に周囲反射がどの部位から生じているか特定したい場合は、反射点と思われる箇所に金属板や電波吸収体を置き、それらがなかった場合の放射パターンと比較するとよい。

利得測定は一般に比較法による。ここでは、被測定ア

ンテナが直線偏波であると仮定する。受信側に被測定アンテナを設置する場合、まず測定系側の送信アンテナと標準アンテナを一直線上に、かつ、偏波の向きが一致するように配置する。標準アンテナとは利得校正済のアンテナであり、1.5 GHz よりも低い周波数では標準ダイポールアンテナが、1.5 GHz よりも高い周波数では標準ホーンアンテナが利用される。このとき、送信アンテナと標準アンテナの間の伝送量 $|S_{21}|$ を測定する。続いて、標準アンテナを被測定アンテナに置換し、送信アンテナと被測定アンテナの間の伝送量 $|S_{21}|$ を測定する。これらの二つの伝送量の違いはアンテナの利得の違いによるので、標準アンテナの利得が既知であれば、被測定アンテナの利得が得られる。誤差要因としては、インピーダンス不整合、偏波不整合、ケーブル損、標準アンテナと被測定アンテナの波源分布の違いが挙げられる。

## 5. おわりに

本稿では、小形アンテナの測定法—ケーブルやコネクタの扱い等の高周波測定の基本、入力インピーダンス及び放射特性に関する測定の概略、誤差要因、その対処法を概観した。ワークショップ(WS-39)の最後に示したスライドの内容を紹介して本稿の締めくくりとしたい。測定の際は、集中し、細心の注意を払い、取り組むこと、また手順通りを忠実にこなすこと、機器の故障やコネクタを破損させないことである。冷静に集中力を保つべきである。困ったら、自分で解決せずに周囲の熟練者に問い合わせる。そして、想定外の測定結果に遭遇したら、本稿を読み返し、思い当たる原因を探り、対照実験により原因を特定する。以上から察して頂けるように、測定の鍵を握るのは、煎じ詰めると、「人にあり」というのが筆者の結論である。

## 文 献

- (1) 石井 望, アンテナ基本測定法, コロナ社, 東京, 2011.
- (2) 計測における不確かさの表現ガイド, 飯塚幸三(監修), 日本規格協会, 東京, 1996.
- (3) 堀部雅弘, “ベクトルネットワークアナライザの測定トレーサビリティ—国際品質規格からの要求と実験データの信頼性—,” 信学誌, vol. 94, no. 4, pp. 329-334, April 2001.
- (4) 藤井勝巳, “周波数領域の信号計測技術 ネットワークアナライザ編,” 信学通誌, no. 14, pp. 60-68, 2010.

(平成 23 年 3 月 28 日受付 平成 23 年 4 月 16 日最終受付)



石井 望 (正員: シニア会員)

平元北大・工・電子卒。平3同大学院修士課程了。同年北大・工・助手、平10新潟大・工・助教授。現在、同大学・工・准教授。博士(工学)。小形アンテナ、損失媒質中におけるアンテナの解析・測定に関する研究に従事。平6年度本会学術奨励賞受賞。著書「アンテナ基本測定法」など。