

Sonnetによるアンテナ解析のガイドライン

有限会社ソネット技研

石飛 徳昌

平成30年7月7日

概要

この文書は、電磁界シミュレータ Sonnet をアンテナの解析に使う方に知っておいていただきたいことをまとめたものです。

前半の“程々のアンテナ設計”では“専門がアンテナでないにも関わらず、急いでアンテナを設計したり評価しなければならない”方のために、よく使われるアンテナについての最低限の知識と誤解されがちなトピックをまとめました。最初にアンテナの大きさと放射の関係を説明し、簡単で効果的なアンテナの大きさを示します。続いて放射パターンや整合そして評価方法などアンテナ設計で誤解されがちなトピックと最低限必要な機材を紹介します。もし、アンテナだけでなく“高周波”についても専門外なら、この文書を読む前に“波長による高周波の分類とそれぞれの性質 -高周波に取り組む前に知っておくべき概念-[1]”をお読みいただいたほうが良いでしょう。どちらの文書も Sonnet に依存しない内容ですから、シミュレータをお使いにならないかたにもお薦めします。前半の最後にはより綿密なアンテナ設計を目指す方のために“おすすめの本”をまとめてあります。

後半の“アンテナ解析のガイドライン”では Sonnet に強く依存した内容を扱います。アンテナ解析に適した Sonnet のグレードや、Sonnet を使ってアンテナを解析する場合の設定や操作に関するトピックです。この文書ではアンテナ解析に固有のトピックだけを扱います。その他 Sonnet の基本操作については“SONNET 入門 [2]”に従って自習してください。

目次

第 1 章	程々のアンテナ設計	3
1.1	はじめに	3
1.1.1	前提知識	3
1.1.2	程々の大きさを目指そう	3
1.2	大きさと放射パターン	4
1.2.1	放射パターンシミュレータ	4
1.2.2	大きさと放射パターン	4
1.2.3	放射の角度の鋭さと利得	5
1.2.4	大きな金属の影響と放射パターン	5
1.2.5	方形パッチアンテナと放射パターン	6
1.3	大きさと整合	6
1.3.1	整合しないと何が悪いのか？	6
1.3.2	整合回路を入れれば安心か？	6
1.3.3	大きさと放射抵抗	7
1.3.4	扱いやすい放射抵抗を得る構造	7
1.3.5	アンテナの整合法	8
1.4	アンテナの評価	8
1.4.1	色々な利得	8
1.4.2	利得と通信距離の関係	9
1.4.3	正しい測定は無理	9
1.4.4	実験機材	9
1.5	おすすめの本	10
第 2 章	アンテナ解析のガイドライン	11
2.1	はじめに	11
2.1.1	前提知識	11
2.1.2	対象とするアンテナ	11
2.1.3	対象とする Sonnet のグレードと違い	11
2.2	境界条件-必ず必要な設定	11
2.3	好ましい設定	12
2.3.1	電流密度分布	12
2.3.2	ポートインピーダンス	12
2.3.3	周波数スイープ	15

2.3.4	Number of Cells	16
2.3.5	Speed/Memory	16
2.4	ポート補正	16
2.4.1	De-Embedding とは	16
2.4.2	対象とするアンテナ	17
2.4.3	正しいポート補正	17
2.4.4	De-Embedding しない設定	18
2.5	結果の表示:patvu	20
2.5.1	座標系	20
2.5.2	指向性の計算範囲	20
2.5.3	指向性の表示目盛	21

第1章 程々のアンテナ設計

1.1 はじめに

1.1.1 前提知識

ワイヤレス機器の普及に伴い、アンテナが専門でない会社や部門で、突然アンテナの設計や評価を命じられて途方にくれる方が増えています。この文書はそういった方が限られたリソースでアンテナを設計するための最低限の知識を紹介します。

もし、アンテナだけでなく高周波についても専門外ならば、この文書を読む前に“波長による高周波の分類とそれぞれの性質-高周波に取り組む前に知っておくべき概念-[1]”をお読みください。高周波に取り組む前に知っておくべき重要な概念をまとめてあります。¹

1.1.2 程々の大きさを目指そう

まずはじめにアンテナの大きさと性能の関係を知ってください。図 1.1 には、リング状導体の大きさと放射される電波の強さの理論値です。グラフの横軸は波長に対する大きさの比でプロットされていることに注意してください。高周波やアンテナでは“大きさ”はいつも“波長”と比較して捉えてください。²

このグラフから次の事がわかります。

波長よりずっと小さいアンテナ アンテナと呼ぶには性能が悪すぎます。1/10 に小型化するごとに

¹<http://www.Sonnet.Site/support/tips/rfbasics.pdf> からダウンロードできます。

²半径 $a = 3(\text{mm})$ のリング状導体に $3(\text{mA})$ の電流が流れた場合の 3m 離れた点での電界強度の計算値を文献 [3] “6-6 far-field patterns of circular loop antennas with uniform current.” に従って計算しました。

図 1.1: 電流ループの大きさ a/λ と放射電界の関係

放射は 1/10000 になります。巻こうと、曲げようと、何か新しい構造であろうと、特別な誘電体であろうと、磁性体であろうとどんな方法であろうとも、小さいアンテナのパフォーマンスは非常に悪くなります。

波長と同程度のアンテナ 一般的なアンテナです。アンテナについての様々な理論は、この領域を前提に組み立てられています。大きさの割に放射効率が良く、後述のように放射パターンや整合や評価も簡単です。

波長よりずっと大きいアンテナ 高性能で、放射は強く、大きさが 10 倍になると放射は 10 倍になります。放射パターンを一方方向に鋭く設計したり、通信相手に合わせて動的に変化させる設計も可能です。絶対的な性能に優れますが、大きくなります。放射パターンの制御が設計の主題になります。

市販の小さなチップアンテナを置き換えるほど小さくしたいとか、通信相手に合わせて指向性を変化させるのが目標であれば、この文書を読むよりも 10 ページの“おすすめの本”をじっくり勉強しなければなりません。そうでないならば“波長と同程度の程々の大きさのアンテナ”を目指してください。そうすれば色々なことが楽で速くて安く済みます。

図 1.2: アンテナ放射パターンシミュレータ

1.2 大きさと放射パターン

アンテナの評価では放射パターンが重視されることが多いのですが，“程々の大きさのアンテナ”では放射パターンの評価は重要ではありません。アンテナの構造や，周囲の大きな金属物による放射パターンへの影響をぼんやり定性的に理解しておけば十分です。

1.2.1 放射パターンシミュレータ

図 1.2 はたぶん世界一速くて安いアンテナ放射パターンシミュレータです。これを紙に二枚印刷して重ね，透かして観察してください。

図 1.3 左は，同じアンテナを $\lambda/2$ 隔てて置いた場合です。目を細めてみると放射パターンが見えてきます。上下方向では二つのアンテナからの放射が強めあい，左右方向では打ち消し合っています。この放射パターンは，アンテナの間隔を $0 \sim \lambda/2$ の範囲で変えてもほとんど変わりません。図 1.3 右は，アンテナ間隔を λ にした場合です。放射方向は 4 方向になります。アンテナ間隔を広げると放射方向はさらに多数に別れてゆきます。図 1.4 左は $\lambda/2$ 隔てて置かれた二つの逆相のアンテナの場合を示しています。逆相の場合もアンテナの間隔と放射方向が何個に別れるかの関係は同じですが，放射方向は図 1.3 と違いますね。³

³必ず印刷して実際にやってみてください。どんなコンピュータを使ったシミュレータよりも速くアンテナの放射パターンの変化を実感として把握できます。これと同じ結果を電磁界解析でやると解析時間もかかるし，結果の整理や分析も大変です。

図 1.3: 二つの同相アンテナからの放射

左: $\lambda/2$ 隔てた場合二方向に放射する。右: λ 隔てた場合四方向に放射する。

図 1.4: 二つの逆相アンテナからの放射

左: $\lambda/2$ 隔てた場合二方向に放射する。右: λ 隔てた場合四方向に放射する。

1.2.2 大きさと放射パターン

アンテナの大きさと放射パターンの関係は，アンテナを小さな無数のアンテナの集合と置き換えて，それぞれの小さなアンテナからの放射を図 1.3 と同じ方法で合成すれば判ります。⁴ 図 1.5 には，図 1.1 に対応する放射パターンを示します。⁵ この図からアンテナの大きさと放射パターンの関係がわかります。

波長よりずっと小さいアンテナ 二方向に放射し，その放射パターンはアンテナの大きさや形状にほとんど依存しません。

⁴波長よりずっと大きなアンテナの複雑な放射パターンの設計も，電磁界解析でなく原理的には，この同心円を合成する方法で行われます。

⁵文献 [3] “6-6 far-field patterns of circular loop antennas with uniform current.” より図 “Far-field patterns of loops of 0.1,1,1.5,5, and 8 λ diameter. Uniform in-phase current is assumed on the loops.”

図 1.5: 電流ループの大きさと放射パターンの例
 小さなアンテナは 8 の字だが、大きなアンテナは非常に複雑になる。

波長と同程度のアンテナ 放射方向は二つか四つで、アンテナの大きさや形状で少しだけ変化します。

波長よりずっと大きいアンテナ 放射方向は多数で、アンテナの大きさや形状で激しく変化します。

“程々の大きさのアンテナ”を目指しましょうとお願いしました。それでも、ほとんどの方が“ちょっと小さめ”を望まれるでしょう。そうであれば、“放射パターン”はアンテナの大きさや形状で殆ど変わらず、“放射パターン”について考えなくても済みます。

1.2.3 放射の角度の鋭さと利得

あまり考えなくてもいいですが、大雑把な原則を説明しておきます。

放射パターンが多数のビームに別れている場合、ひとつのビームだけを強力にして他のビームを小さくできれば、特定の方向に強い電波を放射することができます。このとき放射角度が狭いほど特定の方向への利得は高くなります。放射立体角が $1/4$ になると利得は 6dB 向上します。⁶

⁶立体角やその単位 Sr についてわからない場合は数学や、幾何学の教科書で調べてください。それはアンテナや、電磁気学や、ましてシミュレータに関する概念ではありません。

図 1.6: 左:大きな導体に接近したダイポールアンテナ, 中:等価な二つのアンテナ, 右:放射パターンのイメージ

放射立体角 (Sr)	円錐の頂角 (度)	利得 (dBi)
4π (全球)	360	0
2π (半球)	180	+3
$\pi/2$	82.8	+9
$\pi/6$	47.1	+15

アンテナの近くに大きな金属があると、その方向には電波を放射できませんから、金属がない方向への放射が強くなります。次にもう少し詳しく紹介します。

1.2.4 大きな金属の影響と放射パターン

大きな導体にアンテナが接近した様子は、導体を等価なアンテナと置き換えることで理解できます。図 1.6 の左は大きな導体から距離 h を隔てて置かれたダイポールアンテナです。同図の中は、二つの等価なアンテナで置き換えた様子です。二つの等価なアンテナは逆相で、距離 $2h$ 隔てています。 h が小さいと、二つのアンテナは打ち消し合って放射は小さくなります。 $h=\lambda/4$ のとき上述の図式シミュレーションなら放射方向は上下二方向にもっとも強くなります。現実には導体の下側には放射しませんから放射方向は上方向だけで、利得は単体のダイポールアンテナの倍、すなわち $+3dBd = +5dBi$ になります。

図 1.7: 左:方形パッチアンテナ, 中:等価な四つのアンテナ, 右:放射パターンのイメージ

1.2.5 方形パッチアンテナと放射パターン

高周波電流は導体エッジに集中しますから $\lambda/2 \times w$ の大きさの方形パッチアンテナは, 距離 w 隔てた二つのダイポールアンテナと見なすことができます. 図 1.7 の左は高さ h のパッチアンテナで同図の中は, それを等価な四つのアンテナで置き換えた様子です. $h = \lambda/4$ のとき放射方向は上方向に集中し, 利得は単体ダイポールアンテナの4倍, すなわち $+6\text{dBd} = +8\text{dBi}$ になります. しかし h の小さな薄型に設計される場合はこれより小さな利得になります.

1.3 大きさと整合

アンテナに限らず高周波回路では“整合”が重視され, 整合回路の設計法が教科書に説明されています. ところがアンテナの整合では, 他に考えねばならないことがあります.

1.3.1 整合しないと何が悪いのか?

不整合損失 表は 50Ω の回路に様々な負荷抵抗を接続した場合の不整合損失の計算値です. $\text{SWR}=2$ の場合でも不整合による損失はたかが 0.51dB です.⁷ この 0.51dB を問題にする前に, アンテナと (送信側であれ受信側であれ) 無線機の増幅素子との間に接続されているスイッチだのフィルターだの受動回路

⁷ SWR と抵抗値と S_{11} と関係は高周波関係の本で調べてください.

図 1.8: 損失のある整合回路の例

整合回路が無い場合の損失は 1.9dB , $Q = 10$ の整合回路では 0.7dB 程度

の損失について調べてください. もし, アンテナ以外の部分の挿入損失が 3dB も 5dB もあるなら先にそちらを何とかしなければなりません.

負荷抵抗 (Ω)	SWR	S_{11}	不整合損失
3.125, 800	16	-1.1dB	6.5dB
6.25, 400	8	-2.2dB	4.0dB
12.5, 200	4	-4.4dB	1.9dB
25, 100	2	-9.5dB	0.51dB
50	1	$-\infty$	0dB

フィーダ上の定在波 かつてはアンテナと無線機とがフィーダと呼ばれる長いケーブルで接続されていました. フィーダは波長よりずっと長く, フィーダとアンテナの間に不整合があると, フィーダからの不要放射や, 意図しない周波数特性を生じる原因になりました. 携帯機器の場合は, 無線 IC の直ぐ近傍にアンテナを配置するのでそのような心配はありません.

1.3.2 整合回路を入れれば安心か?

整合回路自身の損失 整合回路にも損失があります. 特にチップインダクタの損失は無視できません.

図 1.9: 整合回路の帯域幅の例
整合比の大きな整合回路の帯域は狭い

図 1.8 は 2.45GHz で 50Ω の信号源から 200Ω の負荷への S_{21} 伝送損失を示しています。整合回路がない場合の不整合損失は $S_{21} = -1.9\text{dB}$ です。教科書通りのインダクタとキャパシタで整合回路を構成すれば、この損失は $S_{21} = 0\text{dB}$ に改善できるはずですが、ところが、例えばインダクタの Q を 10 とすると $S_{21} = -0.7\text{dB}$ 程度までしか改善できません。⁸

整合回路の帯域幅 図 1.9 は様々な SWR の負荷に理想的な整合回路を接続したときの S_{11} の周波数特性を示しています。

理論的には如何に大きな SWR の負荷も特定の周波数では整合させることができます。しかし、整合回路の帯域幅は SWR の大きな負荷ほど狭くなります。非常に大きな SWR の負荷では整合回路の帯域が狭く、部品の素子感度が大きく、量産ばらつきを考慮すると整合を諦めなければならなくなります。従って、整合回路がない状態でも、アンテナ自身の SWR はほどほどに低くなければなりません。

⁸“高周波用”とか“整合用”に設計されたインダクタやキャパシタですら、目的の周波数での Q はデータシートに明記されていない場合があります。現実の部品の Q はもっといいかもしれませんが、“小さい部品ほど損失が大きい(つまり Q が低い)”ことを知っておいてください。

図 1.10: ループの大きさ $C_\lambda = 2\pi a/\lambda$ と放射抵抗 R_r の関係

現実的な放射抵抗が得られるのはせいぜい $0.1 \sim 1\lambda$ の範囲

1.3.3 大きさと放射抵抗

アンテナの放射抵抗が(たぶん多くの場合) 50Ω に近ければアンテナ自身の SWR が低いといえます。図 1.10 には図 1.1 と同じ電流ループの放射抵抗を示しています。⁹ 大きさが小さいと放射抵抗は極端に小さく、 SWR は極端に大きな値になります、大きさが大きいと放射抵抗は振動します。アンテナの構造によってはこの傾向は少し変わります。例えばダイポールアンテナであれば、短くなると放射抵抗は極端に大きな値になります。いずれにせよ、小さいアンテナの放射抵抗は極端な値で、 SWR は極端に大きく事実上整合できなくなります。この点でも“程々の大きさのアンテナ”は扱いやすい放射抵抗が得られる場合が多いのです。

1.3.4 扱いやすい放射抵抗を得る構造

整合回路を使わずに、扱いやすい放射抵抗を得て、アンテナ自身の SWR をほどほどに下げる次のような方法があります。

⁹文献 [3] “6-8 radiation resistance of loops”より図 “Radiation resistance of single-turn circular loop with uniform, in-phase current as a function of the loop circumference in wavelength C_λ ”

図 1.11: 多要素子によるアンテナ整合構造
線の本数 N に対してインピーダンスは N^2 になる。

図 1.12: 給電位置によるアンテナ整合構造の例

図 1.11 は UHF RFID のタグでよく使われる方法です。UHF RFID のタグの IC の多くは数 100Ω のインピーダンスなので、そのままでは $\lambda/2$ ダイポールアンテナとは整合できません。そこで図 1.11 のようにアンテナ素子を多条にしたり、各アンテナ素子の太さを不均一にすることで端子からアンテナを見たインピーダンスを高くできます。

アンテナと回路を接続する給電位置を変えることで回路からアンテナを見たインピーダンスを変化させることができます。グランドや、ダイポールアンテナの中心は電位 0 なのでそこからアンテナを見たインピーダンスは 0Ω です。一方アンテナ開放端に近ければ高いインピーダンスになります。給電位置をその間で変化させればインピーダンスを連続的に変化させられます。この方法は図 1.12 のようにダイポールアンテナだけでなく、パッチアンテナや逆 F アンテナでも使われます。

1.3.5 アンテナの整合法

アンテナの整合ではまず、アンテナの大きさを程々の大きさに設定し、その上で、アンテナ自身の構造を工夫し給電点からアンテナを見たインピーダンスを目的のインピーダンスに近づけてください。それでも整合が不十分なら、損失の小さい部品を使って整合回路を設計してください。

1.4 アンテナの評価

アンテナをシミュレーションしたり測定したりした結果をどう評価すればいいのでしょうか？

多くの方が目的周波数での S_{11} に注目しますが、それでは“1.3.2 整合回路を入れれば安心か”で説明した整合回路自身の損失や、アンテナ自身の損失の影響を正しく知ることができません。¹⁰あるいは放射パターンの形に注目する方も多いです。しかし、“1.2 大きさ放射パターン”で説明したようにそれは重要ではありません。

1.4.1 色々な利得

アンテナの利得では多くの表現が混在して使われています。あちこちのカタログや論文からデータの数値だけを比較すると混乱し間違った結論を導くことになるでしょう。

例えば整合損失を含むか含まないか？アンテナへのフィーダを含むか含まないか？特定の偏波成分だけを含む場合と全偏波を含む場合など。それらを一つ一つ調べるよりも、ダイポールアンテナと比較して評価したほうが良いでしょう。

念の為に下記に様々な利得表現の違いについてまとめて置きました。 http://www.Sonnet.Site/support/tips/gains_of_antennas/

¹⁰アンテナ自身の損失についてはこの文書では説明していません。“程々の大きさのアンテナ”の場合は、アンテナ自身の損失が小さく、気にしないで良いからです。“波長よりずっと小さいアンテナ”では、アンテナ自身の損失が非常に大きくなりアンテナ性能を支配する重要項目になります。にもかかわらず S_{11} にはそれが現れません。

1.4.2 利得と通信距離の関係

$\lambda/2$ ダイポールアンテナを基準とするアンテナ利得は dBd という単位で表します。理論的な検討では仮想的な全方位放射アンテナを基準とする dBi という単位もよく使われます。2dBi = 0dBd で変換できます。利得が 6dB 低下する毎に通信距離は半分になりますから、-4dBi = -6dBd のアンテナの通信距離はダイポールアンテナの半分ということになります。

1.4.3 正しい測定は無理

アンテナのシミュレーションはなにやら難しそうですが、測定はもっともっと難しいです。正しい測定は無理と思っても良いかもしれません。

図 1.13 は、正しい測定の一例です。¹¹ このアンテナは図 1.7 のパッチアンテナです。その放射パターンは図 1.5 (a) に示す 8 の字の片側、つまりひとつの山だけが現れるはずで

す。図 1.14 は、悪い測定例です。この測定は図 1.13 の中央 $\pm 90^\circ$ の範囲と同じになるべきですが、放射パターンには小さな多くの山が重なっています。¹²

この放射パターンは図 1.5 (a) に示す 8 の字の片側と図 1.5 (e) に示す複雑な放射とが重なりあってできています。この複雑な放射は波長よりずっと大きな物からしか起こりません。つまりこの測定では、アンテナ以外の何か大きな物からの放射が存在していることが判ります。

“波長よりずっと小さなアンテナ”では放射が弱く、この何かからの放射が支配的になることが珍しくありません。この現象は、たとえ高品質の電波暗室と測定システムでも解決することができず、測定者のスキルに強く依存します。それゆえ測定よりシミュレーションの方が信頼できます。

“程々の大きさのアンテナ”ではアンテナからの放射が大きいため、それほど絶望的な状態にはならな

¹¹ 文献 [4] “5.4 MSA 素子の円偏波励振条件の検討”より図“方形 MSA の円偏波パターンの一例”

¹² これは私自身が若い頃測定したデータです。公開されたデータの中からですら、このような例を見つけることは難しくありません。

図 1.13: 正しい測定の実例 [4]

図 1.14: 良くない測定の実例

いでしょう。

1.4.4 実験機材

精密な測定は無理でも全く実験しないわけにはいきません。安くて直ぐに必要な機材から順に揭げてみました。高価なものは本当に必要になってから考えれば良いでしょう。

アンテナを組み込んだセットと通信システム ほとんどの方が先ず試みるはずで

す。しかし実際の通信状態からアンテナを評価することは、とても難しいです。アンテナ以外の多くの要素の影響をうけますし、通信システムは電波強度の変

化をカバーする二重三重のフィードバック機構を備えていますからアンテナの性能に対して結果がリニアに現れません。通信回路自身に電波強度を表示する診断モードがあれば、それは評価のよい目安になるでしょう。

実験用の部材 測定の基準となる $\lambda/2$ ダイポールアンテナ, 高周波用の小型のコネクタ, アッテネータ, ケーブル類, それらのための専用工具, 実験機の周りを囲む電波吸収材, など。意外に納期がかかる場合があります。

測定用の電波吸収材は, ギザギザの軽いけれど分厚い形状のものがおすすめです。様々な角度で入射する, 広い周波数範囲の電波を吸収します。シート状の薄いものは周波数や電波の入射角度に制限があります。

特定周波数用のスペクトラムアナライザ

900MHz, 2.45GHz, 5.15GHz などのよく使われる周波数に限定した廉価なスペクトラムアナライザがあります。PCのUSBポートに挿入して使う小さなもので, 高機能なソフトウェアが付属しています。¹³

ネットワークアナライザ 応用範囲は広く, アンテナだけでなく高周波部品や回路や実装の評価にも使えます。アンテナ測定では意図しない経路を伝搬してきた電波を取り除いて直接届いた電波だけを取り出すこともできます。高い周波数まで欲張ると高価です。

電波暗室とアンテナ評価システム 非常に高価ですし, 運用にも手間がかかります。レンタルするにも予約が一杯でしょう。最近小型の安いものもあるようですが, 暗室があるからといって正しい測定ができるわけではありません。暗室を導入する前にやるべき事を次に紹介します。

1.5 おすすめの本

この文書の先に進むには, 先ず文献 [5] をおすすめします。アンテナ測定の新しい手法や実務, アンテナ設計に必要な理論もコンパクトに説明しています。

文献 [3] はアンテナについての古典的な教科書です。初版は1957年, 2002年に third edition が出版されています。英文ですが, あらゆる形式のアンテナの動作や設計チャートが豊富で関係ありそうな部分を拾い読みするだけでも有益です。amazon で購入できます。文献 [6] は初版の日本語訳です。残念ながら絶版で入手は難しいです。

アンテナの仕事をするならアンテナに関する話題をひと通りカバーしているハンドブック [7] を手元においておきましょう。その他特定の形式のアンテナについてはパッチアンテナ [4], 広帯域なアンテナ [8], 波長に比べて大きなアンテナ [9] など, それぞれの分野の権威の先生の著書があります。

¹³例えば <http://asashina.ikeriri.ne.jp/development/wispy/> の Wi-Spy シリーズ

第2章 アンテナ解析のガイドライン

	Lite Plus	Basic	Silver Gold	Pro.
整合	○	○	○	○
放射パターン	×	○	○	○
ポート補正	×	×	○	○
多層基板	×	×	×	○

表 2.1: グレードによるアンテナ解析機能の違い

2.1 はじめに

2.1.1 前提知識

“SONNET 入門 [2]” を、実際に Sonnet を操作しながら一通り読んでください。“SONNET 入門”には、Sonnet を使うための操作の殆どが具体的に説明してあります。

2.1.2 対象とするアンテナ

この文書は遠方界アンテナを対象とします。アンテナの大きさが $1/10 \sim 1$ 波長程度の範囲であれば、そのアンテナは遠方界アンテナです。

13.56MHz の RFID タグやワイヤレス電力伝送に使われるアンテナは、おそらく遠方界アンテナではありません。プリント基板の“グラウンド導体”が大きな放射を引き起こしている可能性があり、その可能性を解析する場合は遠方界アンテナとして扱わねばなりません。

2.1.3 対象とする Sonnet のグレードと違い

この文書は、Sonnet Suites V13 の全てのグレードを対象にします。しかし、各グレードによって次のような違いがあります。

放射パターン 表 2.1 に示すように SonnetLite/LitePlus ではアンテナの放射パターンを

計算したり表示したりできません。この機能は patvu というモジュールが実現しています。¹

ポート補正 特にダイポールアンテナや、不完全なグラウンド導体と組み合わされた逆 F アンテナのように、正負の端子がどちらも接地されていないアンテナで問題になります。SonnetLite / LitePlus / Level2Basic では、この補正を“しない”ように設定します。Sonnet Level2Silver / Level3Gold / Professional では、この補正を“しない”設定もできますし、正しく補正することもできます。

層数の制限 Level2Silver 以下では誘電体基板の両面にパターンを構成した層構造のアンテナを扱うことができます。もし表面のコーティングをモデルに含めたいなら少なくとも Level3Gold が必要です。アンテナがより多層構成の何か？の基板に配置されるなら Professional 版が必要になるでしょう。

2.2 境界条件-必ず必要な設定

ここで説明する境界条件の設定はアンテナ解析モデルに必ず必要です。

電磁界解析では解析モデルの周囲を取り囲む壁を“境界”と呼びます。そしてその“境界”が、どこにあって、それが導体なのか？あるいは別の何かなのか？を“境界条件”と呼びます。Sonnet のアンテナモデルで

¹patvu は Sonnet Level2 以上のグレードにデフォルトで付属するオプションです。Sonnet Level2 以上でも patvu が含まれていない構成の場合は、アンテナの放射パターンを計算したり表示したりできません。

図 2.1: 逆 F アンテナでは top,bottom を 1/4 波長程度離す

は境界条件について次の三つの設定を必ず行ってください。

1. **Circuit** - **Box...** で **Box Settings** ダイアログを開き, **Top Metal** と **Bottom Metal** を **Free Space** に設定してください。これによって top と bottom の境界は金属でなく, あたかも電波吸収体が張り付けられたかのように振舞います。
2. **Top Metal** と **Bottom Metal** をアンテナから $\lambda/4$ 程度離してください。現実の電波吸収体と同じく, Sonnet の **Free Space** 境界もアンテナに極端に近づけるとアンテナの動作に影響を与えるので, それを防ぐため $\lambda/4$ 程度の間隔が必要です。この設定は **Circuit** - **Dielectric Layers...** で **Dielectric Layers** ダイアログを開いて行います。
3. 図 2.1, 図 2.2 に示す周囲の 4 面の側面をアンテナから λ 程度離してください。Sonnet ではこの周囲の 4 面を導体以外の材質に設定することはできないので, 影響が無いように遠ざけます。この設定は **Circuit** - **Box...** で **Box Settings** ダイアログを開き, **Sizes** のフレームで囲まれた各項目で行います。

図 2.1 には, 不完全なグランド導体の端に置かれた逆 F アンテナを示しています。このアンテナからは上下左右様々な方向に電波が放射されるので, 上

図 2.2: パッチアンテナでは top だけ 1/4 波長程度離す

の 3 つの設定を全て行わなければなりません。ところが図 2.2 に示すパッチアンテナは, 完全な導体上に置かれ, 電波は上方向だけに放射されます。この場合 **Top Metal** は $\lambda/4$ 離し, **Free Space** に設定しなければなりません, **Bottom Metal** は, パッチアンテナの基板のグランド導体なので, **Free Space** に設定してはいけません。

2.3 好ましい設定

2.3.1 電流密度分布

Sonnet の patvu は, 電流密度分布に基づいてアンテナの放射パターンを計算します。放射パターンを観測する場合は, 電流密度分布が保存されるように設定しておく必要があります。

1. **Analysis** - **Setup** を選ぶ
2. **Analysis Setup** ダイアログで **Compute Currents** にチェックを入れる (図 2.10)
3. **OK** で閉じる

2.3.2 ポートインピーダンス

アンテナのインピーダンスは必ずしも 50Ω とは限りません。 75Ω 系で評価すべき場合もあれば, 例えば

図 2.3: Terminal Setup ダイアログ

$7.2 + j53\Omega$ に設定すべき場合もあります。アンテナの解析モデルからポート側を見た時のインピーダンス、すなわちポートインピーダンスもこれらの条件に合わせて変更する必要があります。²

解析後に設定する

Sonnet では、解析後の結果を表示するときに、ポートインピーダンスを任意の値に設定できます。

1. **emgraph** のメニューから **Graph** - **Terminate** を選びます。
2. 図 2.3 の **Termination Setup** ダイアログでインピーダンスを設定します。この各設定項目は 図 2.4 の等価回路の素子値に対応しています。

解析前に設定する

SonnetLite/LitePlus を除く製品版では、解析前に予めポートインピーダンスを設定することもできます。解析前に設定した場合も、解析後にさらに変更することができます。

²虚数部があるインピーダンスを議論する場合は、アンテナ端子からアンテナ側を見たインピーダンスなのか？それともアンテナ端子から回路側を見たインピーダンスなのか？を明確にしてください。両者は共役の関係にあります。例えば、アンテナ端子からアンテナ側を見たインピーダンスを $7.2 + j53\Omega$ にしたいなら、アンテナ端子から回路側を見たインピーダンスは $7.2 - j53\Omega$ でなければなりません。

図 2.4: ポートインピーダンスの等価回路

1. 図 2.5 のように、ポート上で右クリックし、**port properties** を選びます。

図 2.5: ポートで右クリックして **port properties**

2. 図 2.6 のダイアログでインピーダンスを設定してください。

正しいポート補正とポートインピーダンス

残念なことに 17 ページの“2.4.3 正しいポート補正”で説明した co-calibrated port には、ポートインピーダンスを設定することができません。正しいポート補正をし、しかもポートインピーダンスを解析前に設定したい場合は次の方法で co-calibrated port を設定してください。

1. **Tools** - **Add Port** を選ぶ。
2. 左の端子の位置でクリックする。

図 2.6: Port Properties ダイアログ

図 2.8: Type を Co-calibrated に

図 2.7: Port Properties

図 2.9: General タブを設定

3. 右の端子の位置でクリックする.
4. 番号 [2] の上で右クリックし Port Properties を選ぶ
5. Port Properties ダイアログボックスで, Port Number を -1 に設定して OK ボタンで閉じる
6. 番号 [1],[2] を両方選択してから右クリックし Port Properties を選ぶ (図 2.7)
7. Type を Co-calibrated に変更し, Properties... ボタンをクリック (図 2.8)
8. Calibration Group Properties ダイアログボックスの General タブを設定する. Terminal Width は例えば One Cell, Ground Node Connection は Floating に設定し (図 2.9)

9. Reference Planes タブを選択し, Left と Right の Cal.Length を例えば 10mm に³ 設定し, OK ボタンで閉じる (図 2.19)
10. Port Properties ダイアログボックスで, ポートインピーダンスを任意に設定し, OK ボタンで閉じる. (図 2.8)
11. Analysis - Setup を選びます.
12. Analysis Setup ダイアログで Advanced ボタンを押します.
13. Advanced Options ダイアログボックスで De-Embed にチェックし, OK で閉じます.

³ Cal.Length は $\lambda/10 \sim \lambda/20$ 程度に設定してください.

(図 2.21)

この

- 複数のポートの **Port Properties** ダイアログボックスで **Type** を **Co-calibrated** に選択する方法と
- 17 ページの“2.4.3 正しいポート補正”で説明した **Add Component** - **Port Only** でポート設定する方法

の解析結果は全く同じになります。ただし、前者ではポートインピーダンスを解析前に設定できますが、後者ではできません。一方、後者ではポートに外付けする“部品”の外観形状を設定して、図 2.13 のようにそれらしい表示を見せることができます。

2.3.3 周波数スイープ

Sonnet の **Adaptive Band Synthesis(ABS)** では、上限と下限の周波数を指定するだけで、Sonnet が自動的に最適な解析周波数を判断し最小の時間で解析を終えます。この方法の短所は、“どの周波数で実際に電磁界解析をするか”が、判らないことです。アンテナの評価に必要な放射特性は実際に電磁界解析をした周波数でしか見ることができません。従ってアンテナの解析では電磁界解析を行う周波数を ABS でなく明示指定しなければなりません。

中心周波数を明示指定する

図 2.10 では、まず、特定の周波数で電磁界解析するように指定し、次に広い範囲の周波数スイープを **Adaptive Sweep** で指定しています。これなら、高分解能の S パラメータと、指定周波数での放射特性の両方を得ることができます。この周波数スイープを指定するには次のように操作します。

1. **Analysis** - **Setup** を選ぶ
2. **Analysis Setup** ダイアログで **Analysis Control** を **Frequency Sweep Combinations** に指定する。

図 2.10: single と ABS

3. **Add...** ボタンをクリックし、開くダイアログで **Sweep Type** を **Single Frequency** , **Freq** を中心周波数に指定して **OK** で閉じる。
4. **Add...** ボタンをクリックし、開くダイアログで **Sweep Type** を **Adaptive Sweep(ABS)** , **Start, Stop** を必要な周波数帯に指定して **OK** で閉じる。
5. **ABS** は、一番最後に解析されるよう **Up** , **Down** ボタンで、一番下に配置してください。

Linear Sweep と併用する

Adaptive Sweep(ABS) には、別の短所があります。Box Resonance Frequency より高い周波数領域では **Adaptive Sweep(ABS)** による予測がうまく働かず、誤差を生じたり、解析時間が長くなったりすることです。アンテナの場合には、周波数範囲が非常に広い場合にこの短所が問題を起こす可能性があります。⁴ 解析周波数範囲がせいぜい 1 オクターブなら、この問題は無視しても平気です。1decade 以上の周波数スイープをする場合で、少しの可能性も避けたいなら図 2.11 のように、**ABS** と **Single** と **Linear** を組み合わせた周波数スイープが有効です。

⁴この誤差は図 2.22 に示した誤差よりさらに小さい場合が多いです。

図 2.11: single と linear と ABS

2.3.4 Number of Cells

Circuit - **Box...** で **Box Settings** ダイアログを開き、**X** と **Y** の **Num.Cells** をコンピュータにとって切りの良い値に設定してください。(図 2.12)

もっとも好ましい値は 512, 1024, 2048, 4096 など 2 の階乗です。100 以下なら有意な差はありませんから気にしなくてよいです。しかし 4093(素数) に設定したモデルは 4096($4096 = 2^{12}$) に設定したモデルの何倍かの解析時間がかかるでしょう。⁵

2 の階乗が無理ならディスプレイの解像度に使われる数値も好ましいです。1200, 1280, 1440, 1600 などです。とりあえず、1000, 2000, 1500 などのキリ番に設定しても良いです。

Number of Cells がキリの良い値だったとしても例えば 1024×1024 のモデルと 2048×2048 のモデルの解析時間はおよそ 4 倍違うことを忘れてはいけません。無闇に細かく計算するのは辞めましょう。

⁵これは Sonnet 内部のフーリエ変換の計算時間に関わっています。Number of Cells が 2 の階乗の場合によく知られた非常に早い計算方法 FFT 法で計算します。ところが素数の場合は時間のかかる計算手法を使わざるを得ません。

図 2.12: **Num. Cells** を切りの良い値に

2.3.5 Speed/Memory

SpeedMemory スライドバーは中央をお薦めします。右端に設定すると有意な誤差が生じます。左端に設定しても多くの場合有意な差はありません。大きなグラウンド導体を備えた逆 F アンテナでは、多少メモリ使用量が増えるかもしれません。

2.4 ポート補正

ここで説明する設定は、無視しても多くの場合致命的な問題につながりません。しかし Level2Silver / Level3Gold / Professional 版では厳密な結果が得られますし、それ以外のグレードでは解析速度を少し早めることができます。

2.4.1 De-Embedding とは

測定器をアンテナに接続すると、接続したことで接続点付近に電磁界の乱れが起こり、それが測定結果に誤差を生じます。この補正を、測定の場合には校正と呼びます。電磁界解析でも解析モデルにポートを配置することで生じる電磁界の乱れを補正しなければなりません。この電磁界の乱れは微小な素子が埋め込まれた等価回路で表現できます。Sonnet ではこの補正を“埋め込まれた (Embedded) 素子を取り除く”という意味で De-Embedding”と呼びます。測定器

の校正と Sonnet の De-Embedding は意味も原理もそして失敗する原因も非常によく似ています。⁶

2.4.2 対象とするアンテナ

ダイポールアンテナや、図 2.1 の不完全なグラウンド導体と組み合わせられた逆 F アンテナのように、正負の端子がどちらも接地されていないアンテナで問題が起きます。図 2.2 のパッチアンテナのように安定なグラウンド導体がポートのすぐ近くにある場合には、Sonnet の De-Embedding も測定器の校正も簡単で、問題はありません。その場合は、12 ページの“2.3 好ましい設定”まで読み飛ばしても構いません。

図 2.13: co-calibrated port

2.4.3 正しいポート補正

Sonnet Level2Silver / Level3Gold / Professional は co-calibrated port と呼ぶ特別な port を備えています。⁷ co-calibrated port では給電点付近の構造を反映した正しいポート補正がなされます。図 2.13 は co-calibrated port をダイポールアンテナの port に使ったモデルを示します。左右の導体の間には間隔が空いていて、左右の導体の対向する辺に端子 [1] と [-1] が配置されています。丁度その場所に小さな IC チップがマウントされていて、そのチップのアンテナ端子が左右の導体に接続されていると考えてください。あるいはケーブルの二本の芯線がここに接続されていると考えても良いです。この port を設定するには次の操作をしてください。

図 2.14: General タブを設定

1. Tools - Add Component - Ports Only を選ぶ。
2. Component Properties ダイアログボックスの General タブを設定する。Number of Pors が 2, Terminal Width は例えば One Cell, Ground Node Connection は Floating に設定して OK ボタンで閉じる。(図 2.14)
3. 左の端子の位置でクリックする。
4. 右の端子の位置でクリックする。(図 2.15)
5. 番号 [2] の上で右クリックし Port Properties を選ぶ(図 2.16)

⁶de-embedding の方法はそれぞれの電磁界シミュレータで異なります。いくつかの理論や方法がありますし、精度に疑問のある方法を採用している製品もあります。あるいは全くしない製品もあります。恐るべき事に“全くしない”方法は、取り扱いが一見楽でわかりやすいので、よく使われているようです。

⁷アンテナでは二つの原因で電磁界の乱れが生じます。co-calibration では、二つの原因それぞれに対して De-Embedding することで、この問題を解決しています。2 回 De-Embedding して、一方の結果でさらに他方の De-Embedding の精度を高めるので co-calibration と呼びます。測定の場合は、たとえ電波暗室内で定められた calibration 手順に従っても、一方の原因に対する calibration しかできません。他方の原因はそれ自身を無くす実装の工夫をするしかありません。この実装は測定者の経験と知識に強く依存し、しかも測定値に大きな影響があります。これはアンテナ測定におけるケーブル長依存性、単体評価と実装時の差異、そして解析との不一致の要因になります。

図 2.17: 端子番号を負に変更

図 2.15: 右端子を指定

図 2.18: Component Properties

図 2.16: Port Properties

6. Component Port Properties ダイアログボックスで, Port Number を -1 に設定して OK ボタンで閉じる (図 2.17)
7. Component 上で右クリックし Component Properties を選ぶ (図 2.18)
8. Component Properties ダイアログボックスで, Reference Planes タブを選択し, Left と Right の Cal.Length を例えば 10mm に⁸ 設定し, OK ボタンで閉じる (図 2.19)
9. Analysis - Setup を選びます.

⁸ Cal.Length は $\lambda/10 \sim \lambda/20$ 程度に設定してください.

10. Advanced Options ダイアログボックスで De-Embed にチェックし, OK で閉じます. (図 2.21)

2.4.4 De-Embedding しない設定

SonnetLite / LitePlus / Level2Basic では, co-calibrated port を使用できないので,⁹ De-Embedding しないよう設定します.

図 2.20 は internal port をダイポールアンテナの port に使ったモデルを示します. 左右の導体は接していて, 導体の境界に port[1] が配置されています. 左右の導体の間には表示できないほどに微かな空隙がありこの空隙を挟んで微小なキャパシタが生じます.

⁹ 将来のバージョンでは, Level2/3 でも co-calibrated port が使用できるようになるかもしれません. これまで, Sonnet ではバージョンが上がる度に, 新しい機能は Professional 版に, 古い機能は多少の制限を加えて下位製品にも実装されてきました.

3. 導体が接した境界上でクリックし port を配置します。
4. - を選びます。
5. ダイアログで ボタンを押します。
6. ダイアログボックスで のチェックを外し, で閉じます。(図 2.21)

図 2.19:

¹⁰ Sonnet のデフォルトの設定では, De-Embedding によってこれを補正しようとします。しかし, アンテナ解析の場合の internal port では De-Embedding は正しく行われず, かえって誤差要因になります。そこで次のように De-Embedding をしないように設定した方が良い結果が得られます。

図 2.21: のチェックを外す

図 2.20: internal port の例

1. port を配置する場所に導体を接して配置してきます。
2. - を選びます。

¹⁰このポート構造は Delta Gap Port と呼ばれます。Delta Gap Port は現実には作ることはできませんが, アンテナについてのほとんどの理論解析は Delta Gap Port を前提に行われます。

図 2.22 はデフォルトの De-Embedding した解析結果の一例です。1GHz 付近に $S_{11} > 0$ になる領域があります。これは物理的にあり得ない結果で, De-Embedding により生じた誤差です。この差異が生じるのは, アンテナの中心周波数から離れた一部の領域なので, この De-Embedding しないことそのものが実際に問題になることはあまりありません。しかし図 2.20 と図 2.13 を比較してわかるように を使うと端子間に間隔を空けることができ, このことによる差異はしばしば問題になります。

図 2.22: De-Embedding による誤差の例

図 2.24: $x-z$ 面内指向性は $\phi = 0$, $x-y$ 平面指向性は $\phi = 90$ を指定する

図 2.23: xgeom の直交座標系と patvu の球面座標系の対応)

図 2.25: $x-y$ 面内指向性は, と $\theta = 80$ を指定する

2.5 結果の表示:patvu

$\phi = 80$ 程度に設定すれば良い結果が得られるでしょう。(図 2.25)

2.5.1 座標系

2.5.2 指向性の計算範囲

アンテナの指向性を表示する patvu では球面座標系が用いられます。図 2.23 は, xgeom の直交座標系と patvu の球面座標系の対応を示しています。

patvu のデフォルトでは $\phi = 0$ で, $x-z$ 面内の指向性が, $\phi = 90$ で $y-z$ 面内の指向性が表示されます。(図 2.24)

patvu で に設定すれば, $x-y$ 面内の指向性を表示できます。ただし, は $x-y$ 面内の放射を正しく解析できないので $\phi = 90$ でなく

patvu では, デフォルトでは $\theta = \pm 90$ の範囲の指向性だけを計算します。(図 2.26,2.27) これはパッチアンテナに適しています。

指向性の計算範囲は必要に応じて変更できます。 を選んで “Angles ” をクリックしてください。

図 2.28 では $\theta = \pm 180$ の範囲を計算するよう設定

図 2.26: デフォルトの計算範囲は $\theta = \pm 90$

図 2.28: 計算範囲を $\theta = \pm 180$ に拡大する設定

図 2.27: デフォルトの表示範囲

図 2.29: 表示範囲を拡大すると、 $\theta = \pm 90$ 方向に不自然な値が表示される

し、図 2.29 のように指向性が表示されます。

図 2.29 では $\theta = \pm 90$ に近い部分で指向性が不自然に変化しています。Sonnet ではこのように原理的に $\theta = \pm 90$ 近傍の放射特性は大きな誤差を含みます。

図 2.30 では、この $\theta = \pm 90$ 近傍の放射特性を計算しないように設定してあります。この場合の放射特性は図 2.31 のようにより自然に表示されます。

Graph - Axes で目盛を変更することをおすすめします。この設定では、外側から二番目の円がダイポールの理論値で、円が一つ小さくなるごとに通信距離は半分になります。¹¹(図 2.33)

2.5.3 指向性の表示目盛

同じデータで描かれたグラフでも目盛の選択で得られる情報や感じる印象は変わります。patvu の目盛も、デフォルトの Autoscale でなく図 2.32 のように

¹¹9 ページの 1.4.2

図 2.30: 計算範囲から $\theta \approx \pm 90$ を除外する設定

図 2.31: 不正な方向を除外した表示

図 2.33: 望ましい目盛りの例

図 2.32: 望ましい目盛の設定の例

関連図書

- [1] 石飛徳昌, “波長による高周波の分類とそれぞれの性質,” (有)ソネット技研.
<http://www.SonnetSoftware.co.jp/>
- [2] 石飛徳昌, “Sonnet 入門,” (有)ソネット技研.
<http://www.SonnetSoftware.co.jp/>
- [3] J.D. Kraus, R.J. Marhefka, and B.A. Munk, *Antennas : for all applications*, 3rd ed edition, McGraw-Hill, 2002.
- [4] 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫, 電子情報通信学会, 小形・平面アンテナ, 電子情報通信学会, コロナ社 (発売), 1996.
- [5] 石井 望, アンテナ基本測定法, コロナ社, 2011.
- [6] J.D. Kraus, 谷村 功, 空中線, 近代科学社, 1957.
- [7] 電子情報通信学会, アンテナ工学ハンドブック, 第2版, オーム社, 2008.
- [8] 虫明康人, 電波とアンテナのやさしい話: 超ブロードバンド化の原理の発見, オーム社, 2001.
- [9] 後藤尚久, 電子情報通信学会, 図説・アンテナ, 電子情報通信学会, 1995.