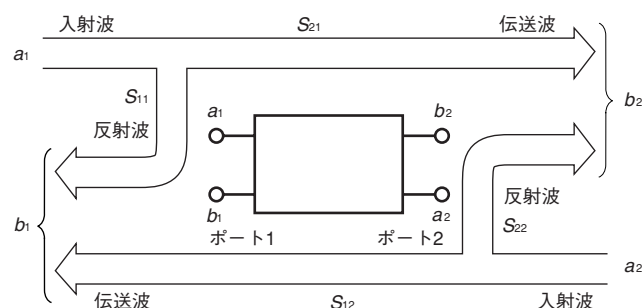


超入門・伝送線路

～ リアリティ・チェックの基礎知識 ～

小暮裕明

読者の方からのご質問やリクエストが多く筆者に届くようになってきました。ほとんどが電磁界シミュレータ賛成派・反対派(?)のご意見に分かれます。反対される場合の危ぐは、「若い技術者はすぐにシミュレーションに走る」、「答えが出たら何の疑いもなく信用する。困ったものだ」といった苦言に集約されます。「電磁界の問題解決は、積分や関数を解いて身につけるものだ」、「このままでは、結果を評価する能力が失われてしまう」という心配も聞きます。筆者が 세미나講師として招かれたときには、毎回この問題についての意見を求められます。著書¹⁾にも書きましたが、電磁界シミュレーションで解析した後は、必ずリアリティ・チェックを怠らないようにします。特定の周波数で電磁界や電流値のピークが現れたときには、その原因を見つけないと、根本的な対策は講じられませんから、結果の数値についての考察は欠かせません。今回からは、解析の結果を評価するうえで必要な“リアリティ・チェック”について学んでいきます。



〔図1〕2ポート伝送路におけるSパラメータ

Sパラメータは、入力端子・出力端子をそれぞれ特性インピーダンスで終端（マイクロ波の世界では50Ωが一般的）し、回路網の伝送線路と反射特性を測定することによって求められる。図は、2ポートの伝送路におけるSパラメータを示している。 a_1 と a_2 は入射波、 b_1 と b_2 は反射波をそれぞれ表しているが、このときSパラメータは次式で表される。

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

S_{11} は入力側の反射係数、 S_{22} は出力側の反射係数、 S_{21} は順方向伝達係数、 S_{12} は逆方向伝達係数である。

1 リアリティ・チェックの必要性

●離散化の落とし穴

初心者によくあるケースですが、電磁界シミュレータで入力したモデルを離散化する際に、細かい導体部分の一部にすき間ができてしまい、これを見落としたまま結果を信用してしまうということがあります。デジタル・コンピュータで解くためには、まずモデル全体の構造を細かいセルあるいはサブセクションと呼んでいる微小部分に分けます¹⁾。ソフトウェア製品にもよりますが、通常セルの寸法と、入力したモデルの寸法にわずかな違いを生じた箇所では、自動的にどちらか近いほうの離散化単位にスナップされ（たぐり寄せられ）てしまいます。これによって、本来、導通していなければならない部分が離れてしまうわけです。

このギャップは、高周波ではコンデンサのようにふるまい、一見導通しているように思えるのですが、DC（直流）や低い周波数の結果をチェックすれば、すぐにモデリングのミスに気づくはずですが、しかし、複雑な形状のモデルでは、あらかじめこういったチェックをしようという姿勢がないと、見落としがちになるでしょう。

また導通している場合でも、たとえば1/2波長の共振器を形成している部分がスナップされることがあります。これによって、当初入力した寸法からわずかにずれて離散化され、予期せぬ誤差を生じているのですが、共振周波数がわずかに変わる点以外は気づきにくいケースの一つです。

新規事業を検討する際や、ベンチャ・ビジネスの立ち上げ前には、本当に事業がうまくいくのかリスク評価などを行います。これをリアリティ・チェックと呼んでいるようですが、小学館『英和中辞典』では「現実直視」と訳されています。文字どおりの意味は、現実性を調べるという意味でしょうが、ここでは、そもそもモデリングの

ミスを見逃していないかを調べることも含めた、事前の真実性のチェックについて考えます。

●なにをチェックすればよいか

それでは、シミュレーション結果の何をチェックすればよいのでしょうか？

(1) 線路のSパラメータ

電磁界シミュレータではSパラメータを出力するようになっていますから、まず最初は反射波や伝送波の程度をチェックします。図1に示すように、1本のマイクロストリップ線路などの2ポートの伝送路では、入力ポート(ポート1)で観測される反射係数(S_{11})をチェックし、非常に小さい値であれば、ほとんど出力側へ伝送されていることがわかります。このとき、出力ポート(ポート2)で観測される順方向伝達係数(S_{21})は、ほぼ1に近づいているはずで

両者の関係は、損失がない線路であれば、エネルギー保存則から、

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$$

が成り立ちます。また回路の可逆性^{注1}から、 $S_{21} = S_{12}$ になります(一般的には $S_{ij} = S_{ji}$)。が、線路の途中に不連続部があり、そこから空間に放射している場合などはこの限りではありません。

通常の信号線路なのに S_{11} の絶対値が大きかった場合は、まず動作周波数前後の広い周波数帯における変化をチェックします。ポートを50Ωで終端した正規化Sパラメータを求めると、線路の特性インピーダンスが50Ωでない設計では、 S_{11} の大きさが周期的に変化します。しかし、もしどの周波数でも S_{11} の大きさが1に近く、 S_{21} が0に近ければ、途中のどこかで微小セルがスナップされて、グラウンドにショートされているかもしれません。

(2) 共振現象

共振現象をシミュレーションする代表格は、アンテナの設計です。ワイヤ系のアンテナのように、線路の長さで共振周波数が決まる場合は、波長の約1/2といったように、電卓で計算した値と比べることでチェックできます。食い違いがあったときには、セルがスナップされていないかどうかを調べます。またセルの寸法が波長の1/10～1/20程度に離散化されているか確認します。粗いセルでは誤差も大きくなります。また解析手法によっては、数%程度低めの周波数になる傾向も見られます。

パッチ・アンテナなど、誘電体層の上にあるアンテナ

は、波長短縮を考慮する必要があるので、単純に波長を電卓で計算するわけにはいきません。教科書にある計算式を使って求めた値と比較します。変形のアンテナでは、ほとんど式が公表されていないので、同寸程度の計算できるタイプのアンテナで検証し、誤差の傾向をつかむとよいでしょう。

回路基板では、グラウンド板の縁部分に波が乗ったり、2枚の導体板(平行平板)にはさまれた領域が共振する場合なども、特定周波数で強い放射が発生します。このように電磁界(電気力線・磁力線)が誘電体層を貫通しているときには、やはり波長短縮を考慮する必要があり、共振周波数の計算に加味しなければなりません。

(3) 周波数ステップ

バンドパス・フィルタのシミュレーションでは、パス・バンド付近のSパラメータのプロットに注目します。また誘電体共振器などを用いたバンド・ストップ(リジェクション)フィルタで、Qの高いシャープなプロットが予想される場合は、周波数領域の解析技法では、周波数ステップが問題になります。粗い周波数刻みでシミュレーションすると、共振点を取りこぼすことがあるからです。

等間隔ではなく、解析中急しゅんな変化が見え始めたあたりで自動的に周波数刻みが細くなるインテリジェント機能を使うなど、見逃さない工夫が必要な場合があります。

時間領域の手法では、過渡応答の結果をフーリエ変換によって周波数領域のデータに変換しますので、取りこぼしはありません¹⁾。

シミュレーションの結果が出たら、まずこれらの項目をチェックし、問題がなければそれぞれ細かい評価に移るとよいでしょう。

2 伝送線路のシミュレーションとリアリティ・チェック

●マイクロ波と伝送線路モデル

20数年前、マイクロ波工学を学んだことです。パラボラ・アンテナや電子レンジの話が聞けると勇んで臨んだ講義は、いきなり「伝送線路方程式」という、平行2

注1：回路網の枝路1に電圧源、枝路2に電流Iが流れている場合、電圧源を枝路2に移しても枝路1に同じIが流れるとき、この回路を相反回路(可逆回路)といい、この定理を相反定理(または可逆定理)という。