



# マイクロストリップ・フィルタのしくみを調べる(その2)

## —— GABMAC (測定と計算結果の一致) ——

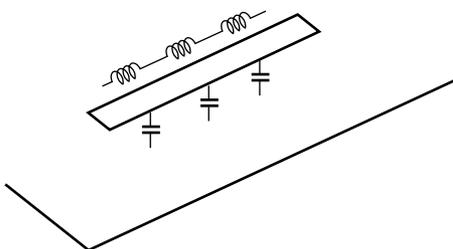
小暮裕明

本連載では、「電磁界解析ソフトで何がわかるか」をテーマに、さまざまな事例を詳しく調べてきました。コンピュータを使ったシミュレーションは模擬実験とも言えます。電気的な自然現象をどのように模擬するかで、さまざまな方法が編み出されています。周波数が比較的低い領域では、抵抗、コイル、コンデンサなどを組み合わせた回路を構成して、オームの法則やキルヒホッフの法則に基づく連立方程式をコンピュータによって解く方法が用いられます。一方、高周波の世界になると、リード線などのC成分やL成分が見えてくるようになり、シンプルなマイクロストリップ線路も集中定数素子を連ねた等価回路で表現する必要があります。ところで、開発現場では依然として測定結果が最重要視されています。これは、「自然現象をそのまま測っている」からにはかなりません。一方、コンピュータによるシミュレーションはあくまでも模擬実験ということで、全面的には信用されないこともあります。そこで今回は、本連載を終了するにあたり、前回と同じマイクロストリップ・フィルタを例にとって、「測定」と「シミュレーション」の結果の違いについて比較し、相互の誤差について詳しく考察します。(筆者)

### 1 GABMAC (測定と計算結果の一致)

#### ●シミュレーションには誤差がある

シミュレーションは模擬実験と訳されます。コンピュー



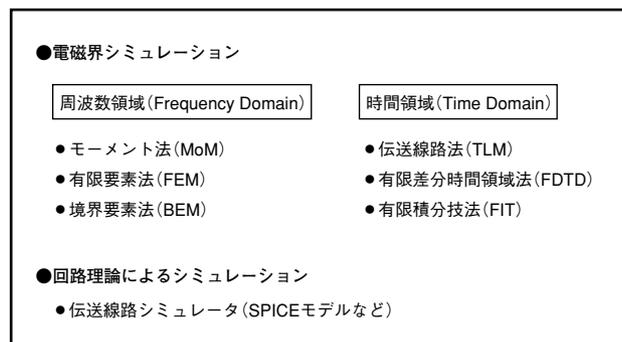
〔図1〕プリント基板上の配線

マイクロストリップ構造などの配線は分布定数回路と考えられ、伝送線路として扱わなければならない。

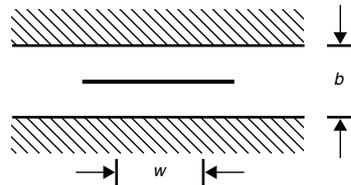
タで電気的な自然現象を模擬するために、これまでさまざまな解析手法が開発されてきました(本誌1999年1月号, pp.27-38の連載第1回を参照)。SPICEシミュレータもその一つですが、これは抵抗やコンデンサ、コイルなどの集中定数による回路を、キルヒホッフの法則を用いてコンピュータで解くプログラムです(本誌1999年3月号, pp.145-151の連載第2回を参照)。これまでSPICEシミュレータは、主に動作周波数が比較的低いアナログ回路のシミュレーションに用いられてきました。高周波になると抵抗は単なる抵抗ではなくなり、インダクタンスやキャパシタンスを持ちます。そのため、SPICEシミュレータで高周波を扱うには、より複雑な等価回路モデルを作成する必要があります。

高周波で用いられるマイクロストリップ線路などの基板は、図1に示すような分布定数回路と考えられます。また、実際の回路を構成している各要素間の電磁的な結合も等価的にモデリングする必要があり、基板のグラウンド層や電源( $V_{cc}$ )層の金属導体自体から不要輻射が発生することもあります(本誌1999年9月号, pp.147-152の連載第3回を参照)。

その後、これらすべての電磁的な現象を含んだシミュレーションを行うツールとして、マクスウェルの方程式をコンピュータで離散的に解く電磁界解析ソフトウェアが開発されました(図2)。解こうとするデバイスの寸法や材質を



〔図2〕コンピュータによるシミュレーションのさまざまな手法



【図3】  
誤差の評価に用いる、50Ω  
の特性インピーダンスを持つ  
ストリップ線路の断面図  
 $b = 1.0\text{mm}$   $w = 1.4437\text{mm}$   
 厚さ = 0  
 線路長 =  $\lambda/4$  (4.9965 at 15.0GHz)  
 $\epsilon_r = 1.0$

伝わるふるまいをシミュレーションするわけですから、細かく離散化するほど計算の精度も高くなります。しかし、同時に使用メモリ量も増えますから、実用的な程度で妥協しなければなりません。

いずれにしてもデジタル・コンピュータで解くのですから、どこまで細かく分けても誤差はなくなりません。そこで、実際の回路を使って測定した結果と、シミュレーションによって得た結果を比べることが重要なのです。これを表すことばとして“GABMAC”があります。これは Good Agreement Between Measured And Calculated の頭文字を並べたもので、直訳すると「測定と計算結果の良い一致」という意味です。

電磁界解析ソフトウェアを使い始めようとするユーザにとっては、GABMAC が得られることで、自分のモデルが正しく、またソフトウェアの使いかたもまちがっていないと判断できます。一方、ソフトウェアを提供するベンダ側は、GABMAC が得られた多くの結果を公表することで、販売しているソフトウェアの計算精度をアピールできることとなります。

それでは測定と計算結果が完全に一致した場合、手放しで喜んでよいのでしょうか。無限の離散化はできませんから、より細かく離散化すれば真の値に近づくものの、真の値そのものは得られないと言えます。つまり有限の離散化によって得た結果と(測定誤差がないという前提で)測定値がピッタリ重なってしまった場合、実はその原因こそ追求しなければならぬということです。

### ●誤差の定義

「このソフトウェアは実測値とどの程度合いますか?」と

いう質問をよく受けます。このとき質問者は、測定によって得られた値を真の値(あるいはそれに近い値)としてグラフにプロットし、ソフトウェアが計算した値を重ねたとき、両者のズレを誤差としてイメージしているようです。

特に、アンテナや前回のマイクロストリップ・バンドパス・フィルタ(本誌2003年3月号, pp.127-133の連載第25回を参照)のように、共振現象を伴う回路では、共振周波数やパス・バンドのズレによって直感的に誤差を評価できそうです。

それでは均一な構造のマイクロストリップ線路やストリップ線路では、誤差をどのように評価すればよいのでしょうか。計算値が真の値から何パーセント異なっているかを示すパーセント誤差は、次の式で求めることができます。

$$\text{パーセント誤差} = 100 \times (\text{計算値} - \text{真の値}) / \text{真の値} \quad (1)$$

アンテナの共振周波数の場合は式(1)が使えます。しかし、例えば図3のようなストリップ線路で、 $S_{11}$ の結果を式(1)に適用すると、真の値(ストリップ線路の $S_{11}$ の理論値)はゼロとなり、パーセント誤差は不定となってしまいます。

そこで、このような伝送線路の誤差を、特性インピーダンスの誤差と、位相定数の誤差で評価する方法が提案されました(本誌2000年4月号, pp.88-97の連載第4回を参照)。

この線路の特性値の理論値は、

$$S_{11} \text{の大きさ} = 0.0$$

$$S_{21} \text{の位相角} = -90 \text{度}$$

です。特性インピーダンスの誤差はほぼ $S_{11}$ における誤差として現れるので、式(1)を使わず、解析の結果、 $S_{11}$ の大きさとして0.01026が得られた場合、1.026%の誤差と考えます。

また $S_{21}$ の位相角として-89.999度が得られた場合、位相定数の誤差はほぼ $S_{21}$ の誤差として現れるので、0.001%の誤差と考えられます。これらの誤差は相殺されることも考えられますが、最大の誤差として、両者の和である約1.027%と評価することにします。

### ●真の値を得る方法

誤差はモデルを離散化する程度によって決まります。Sonnet<sup>注1</sup>を使った図3のストリップ線路の解析では、線路幅を16に分割したとき、約1%の誤差になりました。Sonnetでは、このパーセント誤差を、離散化したサブセクション数の関数として、以下の式で表現できると報告されています<sup>1)</sup>。

注1: Sonnet Lite のホームページのURLは「<http://www.sonnetusa.com/jp/>」。