

Sonnet における周波数依存磁性体のモデリングの例

有限会社ソネット技研 石飛 徳昌 tovy@SonnetSoftware.co.jp

2011年11月1日

概要

磁性材料の一般的な周波数特性について復習し、公開されている測定値を利用する場合に注意すべきことを紹介する。続いて Sonnet のユーザー定義関数をつかって磁性材料の周波数特性を再現するモデルを設定する過程を解説する。

1 磁性体の一般的性質

図1は磁性体の複素比透磁率 $\mu_r^* = \mu_r' + j\mu_r''$ の周波数依存性の一例を示している。これは実在する磁性材料のデータではなく、架空の特性に過ぎない。しかし磁性体の多くはこのような周波数特性を示す。以下に各周波数領域ごとの特徴を説明する。^{*1}

■**実部 μ_r' が大きく一定な領域** 低い周波数領域では実部 μ_r' も虚部 μ_r'' もほぼ一定で、周波数依存性は低い。また、この領域では損失が小さい、つまり $\mu_r' \ll \mu_r''$ なので μ_r を実数と見なして取り扱うことも多い。損失を考慮する必要が生じた場合に

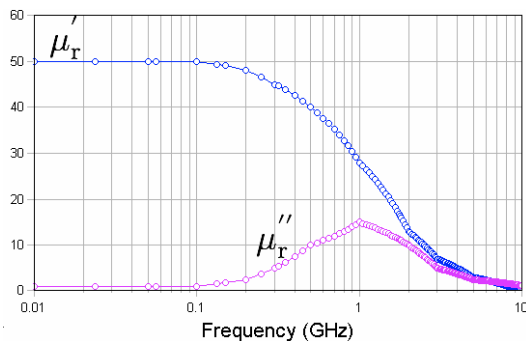


図1 複素比透磁率の周波数依存性の一例

$\tan \delta = \mu_r'' / \mu_r'$ で表現されることが多い。

この領域では大きな透磁率によるインダクタンスの増大や、線路の波長短縮効果を期待して用いられる。

■**虚部 μ_r'' が極大となる領域** 虚部 μ_r'' が極大となる周波数領域では、実部 μ_r' は周波数に対して単調に低下する。実部 μ_r' と虚部 μ_r'' のそれぞれの周波数依存性を把握して応用しなければならない。

この領域では損失を利用してノイズや放射の抑制に用いられる。

■**実部 μ_r' が小さく一定な領域** 非常に高い周波数領域では、実部 μ_r' も虚部 μ_r'' もほぼ一定で、周波数依存性は低い。また、損失 μ_r'' / μ_r' は大きい。

2 透磁率データを利用する場合の注意

図1に示すような数デカードを超える周波数範囲を、単一の測定系で評価することは難しく、公表されているデータですら、しばしば測定に起因すると思われる問題が残されていることがある。それ故、上述の一般的な性質に照らして不自然なデータを手作業で取り除いてから利用する必要がある。そのよ

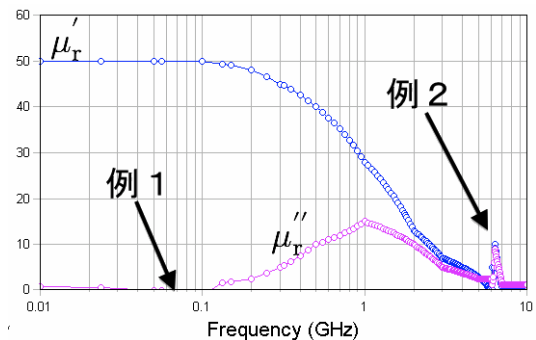


図2 測定に起因すると思われる問題の一例

*1 文献 [1] の Sec.2.4.1 等

うな不自然なデータの例を図2とともに下記に紹介する。

■例1:低い周波数での負の μ_r'' μ_r'' は正の値で無ければならないが、低い周波数領域では0に近い値に収束するケースが多く、数値的な補間処理や測定系の誤差によって負の値が表示されることがある。一方この周波数領域での損失は特定の周波数で別に測定された $\tan \delta$ として与えられることが多い。それゆえ、低い周波数で μ_r'' が負の値であれば、それを誤りとし見なして、 $\mu_r'' = \mu_r' \tan \delta$ を使用したほうが現実的であろう。

■例2:高い周波数での激しい周波数依存性 高い周波数領域では実部 μ_r' も虚部 μ_r'' も比較的小きな値に収束してゆくはずだが、測定値に激しい周波数特性が現れることがある。これは測定系自身が共振していることが原因であることが多いから、そのようなデータは取り除いたほうが良い。

3 周波数依存モデルの作り方

図2の様なデータから上述の不自然なデータを取り除いて図1のような一般的な複素比透磁率のグラフが得られれば、それを Sonnet の電磁界解析モデルに反映させることができる。

Sonnet の電磁界解析モデルに与える数値データのほとんどは、数値でなく変数で置き換えることができる。またその変数は、数値で定義するだけでなく初等関数*2で定義することもできる。そしてその関数の引数として別の変数や解析周波数を使うことができる。それ故、図1のグラフを、周波数を引数とする関数で定義し、その関数を Sonnet の dielectric layer*3の μ_r と $\tan \delta$ として指定すれば良い。

ここでは図1のグラフを表現する関数として、

- 初等関数を使った近似関数
- 数値データを参照する折れ線近似

*2 三角関数や指数対数関数

*3 Sonnet では dielectric layer(誘電体層)と表現しているが、そのパラメータには複素比誘電率と複素比透磁率の両方が指定できる。つまり Sonnet の dielectric layer は誘電体と磁性体を区別していない。

表1 csv ファイルの例

	,1	,2
1e-19	,50	,1
1e6	,50	,1
1e8	,50	,1.2
2e8	,48	,2.5
3e8	,45	,5
5e8	,40	,10
1e9	,28	,15
2e9	,13	,10
3e9	,7	,5
5e9	,3	,2.5
10e9	,1.3	,1.2
1e19	,1	,1

が考えられる。第一の方法は滑らかで自然な関数が得られるが、良い近似を実現する関数を導出する作業がやや煩雑である。第二の方法に相当する関数は Sonnet に最初から用意されているので容易に実現できる。以下では第二の方法を使って解説する。

3.1 テーブルをつくる

まず図1のグラフから数値を読み取って csv ファイルに書き込む。*4ここではファイル名を“Ur.csv”とする。表1は図1から読み取って作った csv ファイルの例である。このファイルを作る上で幾つか注意がある。

- 一行目は“,”で始まり、1,2,3...と続く。
- 二行目以後は周波数で始まり、“,”で区切って μ_r' と μ_r'' が続く
- 周波数依存性の強い領域では多くのデータを与える。
- 二行目に極端に低い周波数、最終行に極端に高い周波数のデータを推測して与えておく

*4 csv ファイルは、シミュレータだけでなくあらゆるデータ処理プログラムで汎用的に使われるファイル形式である。csv ファイルについてよくわからない場合は、身の回りのコンピュータに詳しい人に助けを求めるとよい。

表 1 と図 1 を比較すると、上記の 3 番目の注意点に従って周波数 100MHz から 1GHz の間は 1 デカードあたり 4 点のデータを与えているが、周波数 1MHz から 100MHz の間には 2 点のデータしか与えていないことが判る。また上記 4 番目の注意点に従って表 1 には周波数 10^{-19} Hz と 10^{19} Hz *5 の値が記入されている。もちろんこのデータは完全に推測であるが、これによって極端な周波数の場合にも安定な結果が得られる。

3.2 Sonnet のモデルを準備する

Sonnet のモデルから上記の “Ur.csv” ファイルを呼び出す手順を示す。ここでは一例として “ソネット入門” の “2.4 パラメータスイープと部品-バイアスティー” で解説したモデルを使用する。

1. “ソネット入門”[2] の 2.4 に従ってモデルを準備する。
2. そのファイルと同じフォルダに上の “Ur.csv” を置いておく。

3.3 “Ur.csv” を呼び出す関数を定義する

1. Xgeom でモデルファイルを開く
2. **Circuit** - **Variable List...** でダイアログボックスを開く
3. **New...** でさらに新しいダイアログボックスを開く
4. **Name** に例えば ReUr と入力する
5. **Value or Equation** に `table2("Ur.csv",freq,1)` *6 と入力する*7

*5 コンピュータが扱うことのできる数値の大きさには制限があるから、例えば 10^{99999} を与えると多くのコンピュータは破綻するだろう。 10^{19} は工学的に通常扱う数値より十分大きく、しかも浮動小数点を扱うことのできるほとんどのコンピュータの限界に対して十分余裕がある。

*6 `table2` は csv ファイルの内容を呼び出す Sonnet の関数である。この例では “Ur.csv” ファイルを呼び出して、freq に対応する行の第 1 のカラムの数値を呼び出す。freq の単位は Hz で、対応する freq が存在しない場合は線形補間される。補外はなされない。詳細は Sonnet の online help を参照されたい。(manual には記載されていない。)

*7 もしうまくいってれば **Evaluates to** に数値が表示される。そうでなければ **Can't read Ur.csv** とエラーが

Variable	Value
ReUr	<code>table2("Ur.csv",freq,1)</code>
ImUr	<code>table2("Ur.csv",freq,2)</code>
Ur	<code>sqrt(ImUr^2+ReUr^2)</code>
Utand	<code>ImUr/ReUr</code>

図 3 関数定義の例

6. **OK** でダイアログボックスを閉じる
7. **New...** でさらに新しいダイアログボックスを開く
8. **Name** に例えば ImUr と入力する
9. **Value or Equation** に `table2("Ur.csv",freq,2)` と入力する
10. **OK** でダイアログボックスを閉じる
11. **OK** でさらにダイアログボックスを閉じる

3.4 “Ur.csv” を呼び出す関数を定義する

これで、Sonnet のモデルの中で ReUr と ImUr を使えば解析時の周波数に応じた適切な複素比誘電率の値を csv ファイルを参照しながら呼び出すことができる。ところが、Sonnet では磁性体を μ'_r と μ''_r でなく、 μ_r と $\tan \delta$ で指定しなければならない。そこでその変換関数も定義する。

1. **Circuit** - **Variable List...** でダイアログボックスを開く
2. **New...** でさらに新しいダイアログボックスを開く
3. **Name** に例えば Ur と入力する
4. **Value or Equation** に `sqrt(ReUr^2 + ImUr^2)` と入力する
5. **OK** でダイアログボックスを閉じる
6. **New...** でさらに新しいダイアログボックスを開く
7. **Name** に例えば Utand と入力する
8. **Value or Equation** に `ImUr/ReUr` と入力する
9. **OK** でダイアログボックスを閉じる

現れる。

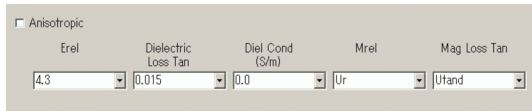


図4 材料定義の例

10. ここで図3のように表示される.
11. **OK**でさらにダイアログボックスを閉じる

3.5 材料定数に指定する

1. **Circuit** - **Dielectric Layers...**でダイアログボックスを開く
2. 比透磁率を指定したい誘電体層をダブルクリックしてさらにダイアログボックスを開く
3. **Mrel**に **Ur** を, **Mag Loss Tan** に **UHand** を指定する. (図4)
4. **OK**でダイアログボックスを閉じる

3.6 解析結果の例

図5に“ソネット入門”記載の解析結果, 図6には基板に比透磁率を指定した場合の解析結果を示す.*8

4 注意

■**異方性** 複素比透磁率の異方性についても有意なデータが得られるなら, 図4で **Anisotropic** にチェックを入れて異方性データを与えることも出来る. もちろんその場合, 表1に異方性を表現するよ

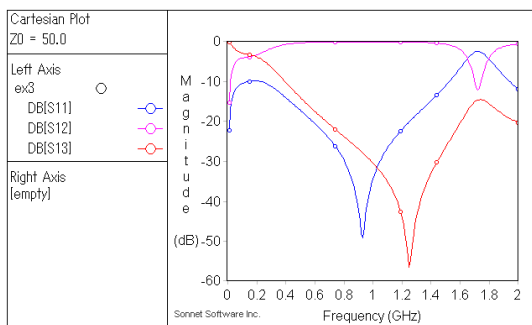


図5 磁性体を含まないバイアスティーの解析結果

*8 この例は磁性体パラメータが結果に影響を与えていることを示す例であって, 磁性体の有益な性質を示すものではない.

うにカラムを拡大し, 関数定義もそれに応じて拡張しなければならない.

■**誘電体ブリック** Sonnet では誘電体ブリックに複素比透磁率を指定することはできない.

■**直流磁界** Sonnet では直流磁界による μ_r^+ , μ_r^- の変化を再現することはできない.

参考文献

- [1] Brian C.Wadell, “Transmission Line Design Handbook,” 1991, Artech House.
- [2] 石飛, “SONNET 入門,” 2011, ソネット技研, <http://www.SonnetSoftware.co.jp/> .

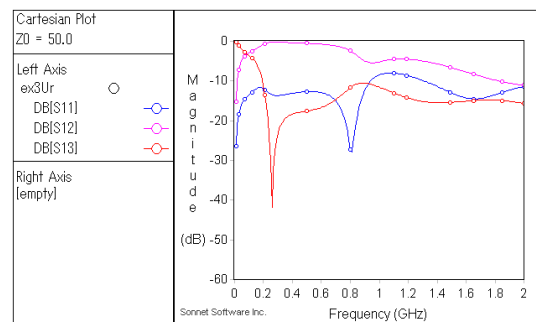


図6 磁性体基板を使ったバイアスティーの解析結果