

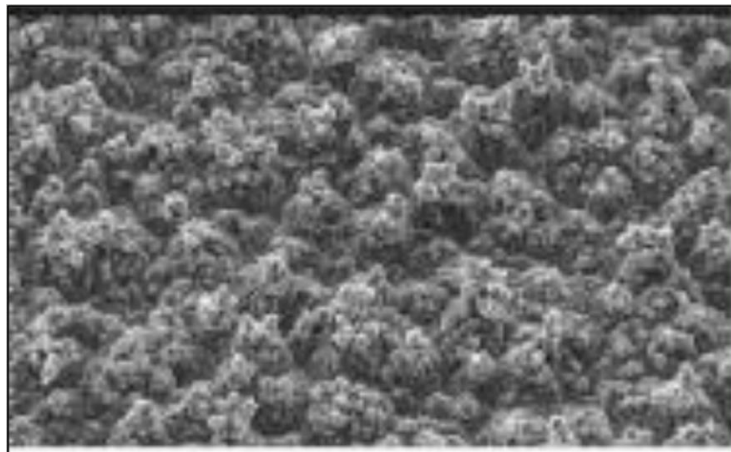
Polar Si9000e の Huray 粗化モデルに Cannonball スタックの原理を適用

表面粗化処理に起因する信号損失をシミュレーションするための Hammerstad モデルと Groisse モデルに加えて、Polar Si9000e 2017 以降のバージョンには Huray モデルが追加されました。(Huray snowball とも言います)。

アプリケーションノート [AP8155](#) に表面粗化をモデル化するための Hammerstad と Groisse について記述しているためここでは Huray モデルについてのみ扱います。

このアプリケーションノートでは、Cannonball モデル*1 を利用した、Si9000e の Huray 粗化処理モデルに必要な入力パラメータを製造元のデータシートのみを使用してシミュレーションすることに焦点を当てて解説します。

背景として：近年 Huray モデル**2 は、データレート（単位時間に伝送[処理]されるビット数）が継続的に増加するためシミュレーションの精度向上に最適で一般的によく使用されるようになりました。Huray モデルでは、表面粗化に起因する損失を、現実世界をベースにした物理学的に解くことを可能とします。Huray モデルは、「Snowball（雪玉）」のようなボール形と一緒に積み重ねられてピラミッド形状を形成している状態で不均一な分布をしていることに基づいた考え方によって成り立っています。



画像提供 Circuit Foil Luxembourg 社

電磁波解析を用いて、重ね合わせたボール構造の全損失を計算することができます。損失は表面粗化された部分の表面積に比例するため、粗さ補正係数（KSRH）は Huray**2 によって解析的に解くことができます。

（損失は距離に比例することから、粗化されて凸凹している部分の表面積を解いて信号伝送距離を導くことで計算）

計算式 1

$$K_{SRH}(f) = \frac{A_{matte}}{A_{flat}} + \frac{3}{2} \sum_{i=1}^j \frac{\left(\frac{N_i \times 4\pi r_i^2}{A_{flat}} \right)}{\left(1 + \frac{\delta(f)}{r_i} + \frac{\delta^2(f)}{2r_i^2} \right)}$$

Where:

$K_{SRH}(f)$ = Huray モデルに基づく表面粗化に起因する、周波数の関数としての粗さ補正係数；

A_{matte}/A_{flat} = 平坦な表面と比較したつや消し表面の相対面積；

r_i = メートル単位での i 番目のサイズの銅球（スノーボール）の半径；

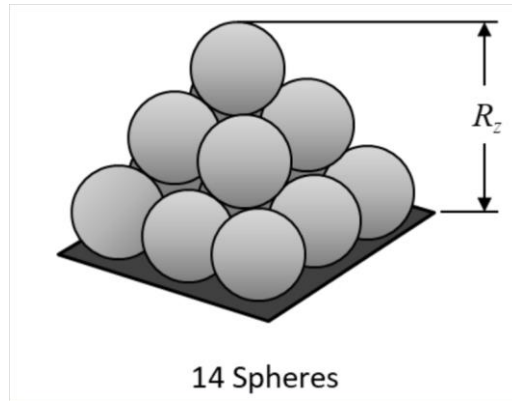
N_i / A_{flat} = 平方メートル当たりの単位の i 番目のサイズの銅球の数；

$\delta(f)$ = 表皮厚，メートル表示の周波数関数

理論的には、走査型電子顕微鏡（SEM）写真の詳細な分析によってパラメータを抽出することにより、表面粗化の正確な Snowball モデルを構築できます。しかし実際には、そのような機器を持たない企業がほとんどで一般的に応用することができません。仮に走査型電子顕微鏡（SEM）が利用可能であったとしても、正確な結果を得るためには、ボールサイズ、ボールの数、ギザギザ形状を測定しデータ化する必要があります。

このような理由から Cannonball model が利用されるようになりました。同じ大きさのボールのキュービッククローズパッキングの概念を利用して、Huray モデルとしてのパラメータ ボールの半径（ r_i ）、平面タイル面積（ A_{flat} ）は、メーカーのデータシート* 1 に掲載されている粗さのパラメータを使って推定できます。

損失が、粗化によって大きくなる表面積（表面を粗化することで表面積が増える）に比例することを前提とすれば、Cannonball model を使用して、表面粗化を表すことができます。以下の図に示すように、正方形のタイルベース上に積み重ねられたボールの 3 列 x3 列を考えます。9 つのボールは一番下の段にあり、4 つボールは 2 番目の段にあり、1 つのボールは一番上にあります。キャノンボールスタックの高さは、銅箔メーカーのデータシートで公開されている 10 ポイント平均の粗さである R_z 値となります。



画像提供 Lamsim Enterprise 社

Cannonball モデルは $A_{matte} / A_{flat} = 1$ の比率を前提としていて、14 のボールとしてボールの半径は次のように想定して近似値をとることができます：

計算式 2

$$r \approx \frac{R_z}{16.73}$$

Where: R_z は、銅箔メーカーのデータシートに掲載されている 10 点平均粗さ法による粗さの値である。

そして、正方形平面ベースの面積は：

計算式 3

$$A_{flat} = (6r)^2$$

例：Cannonball モデルの適用方法を証明する最善の方法は、実際のテスト例の詳細を示すことです。*1 のオフセットストリップラインの形状とデータシートのパラメータを表 1 にまとめました。

PCB は、Isola FR408HR 材料および逆処理された (RT) $35 \mu m$ の銅箔。FR408HR 3313 材料の 10GHz における誘電率 (D_k または Er) および誘電正接 (D_f または $Tan \delta$) は、Isola のデータシートを参考にしました。

FR408HR コアラミネートに使用されるデフォルトの銅箔は、OakMitsui 社の MLS、Grade 3、伸び制御された RT ホイルです。

これらの概念を利用したシミュレーションとカタログから得られるパラメータによって得た結果と、実際の測定結果との整合を検証

表 1 製造業者のデータシートおよび設計目標値から求めた得られたテスト基板のパラメータ。

Parameter	FR408HR / RTF
<i>Dk Core/Prepreg</i>	3.65/3.59 @10GHz
<i>Df Core/Prepreg</i>	0.0094/0.0095 @ 10GHz
<i>R_z Drum side</i>	3.175 μ m
<i>R_z Matte side before Micro-etch</i>	5.715 μ m
<i>R_z Matte side after Micro-etch</i>	4.443 μ m
Trace Thickness, <i>t</i>	31.730 μ m
Trace Width, <i>w</i>	11 mils (279.20 μ m)
Core thickness, <i>H1</i>	12 mils (304.60 μ m)
Prepreg thickness, <i>H2</i>	10.6 mils (269.00 μ m)
GMS trace length	6 in (15.23 cm)

- 最初に、Si9000e 画面の下部にある "無損失伝送線路インピーダンス計算"タブを開いて、次に offset stripline 1B1A を選択します。 エッチファクターは $W2 = W1 \cdot T1$ 以上になるように設定してください。
(以下の例の単位はミル)

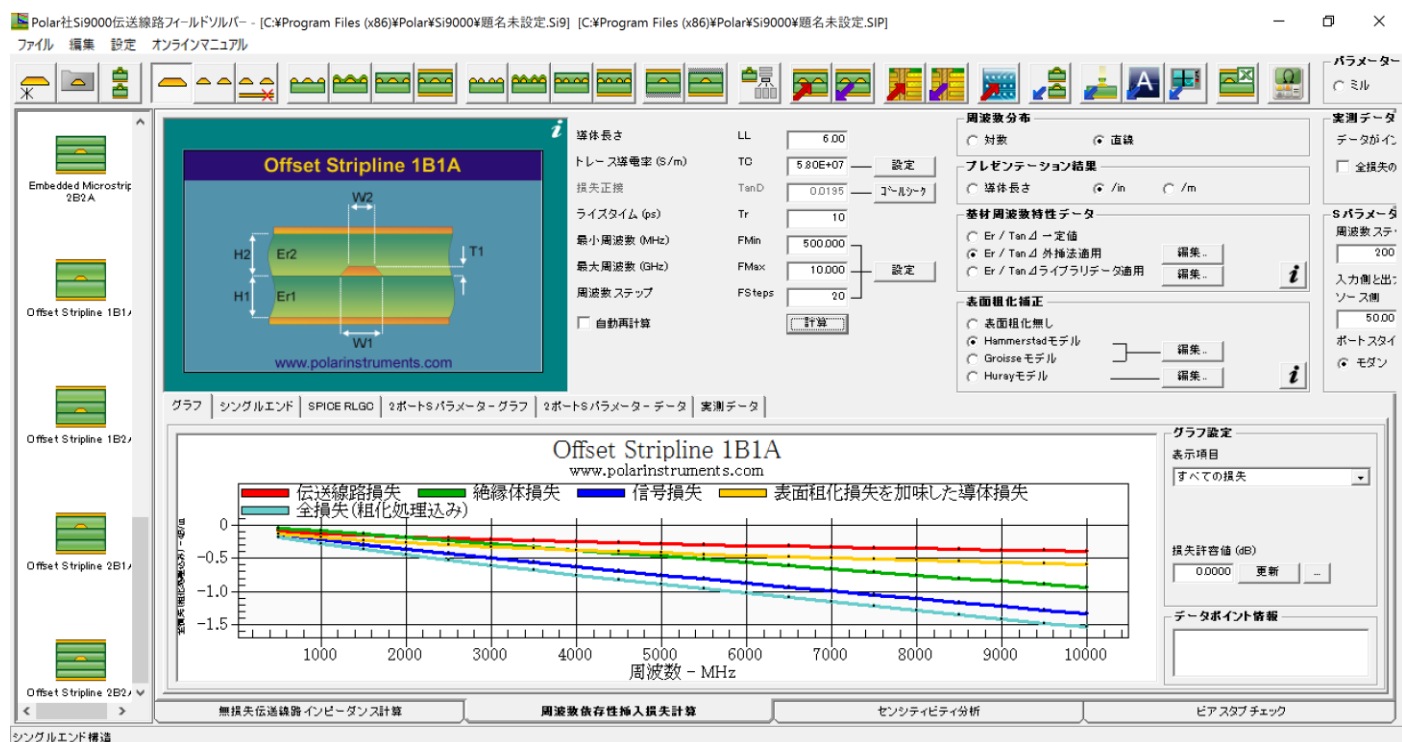
無損失伝送線路インピーダンス計算

パラメータ	公差	最小値	最大値	計算
H1	12.0000	0.0000	12.0000	計算
Er1	3.6500	0.0000	3.6500	計算
H2	11.8000	0.0000	11.8000	計算
Er2	3.5900	0.0000	3.5900	計算
W1	11.0000	0.0000	11.0000	計算
W2	9.8800	0.0000	9.8800	計算
T1	1.2000	0.0000	1.2000	計算
インピーダンス Zo	50.22	50.22	50.22	計算

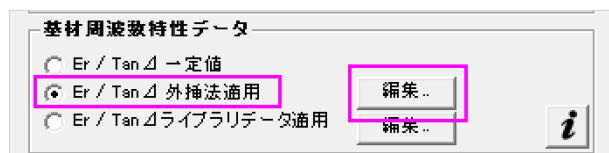
日本語
ATOK 2015
入力方式を切り替えるには、Windows キー + Space キーを押します。

2. 次に“周波数依存性挿入損失計算”タブを開きます。

線長を入力し、導電性と周波数レンジを入力します。

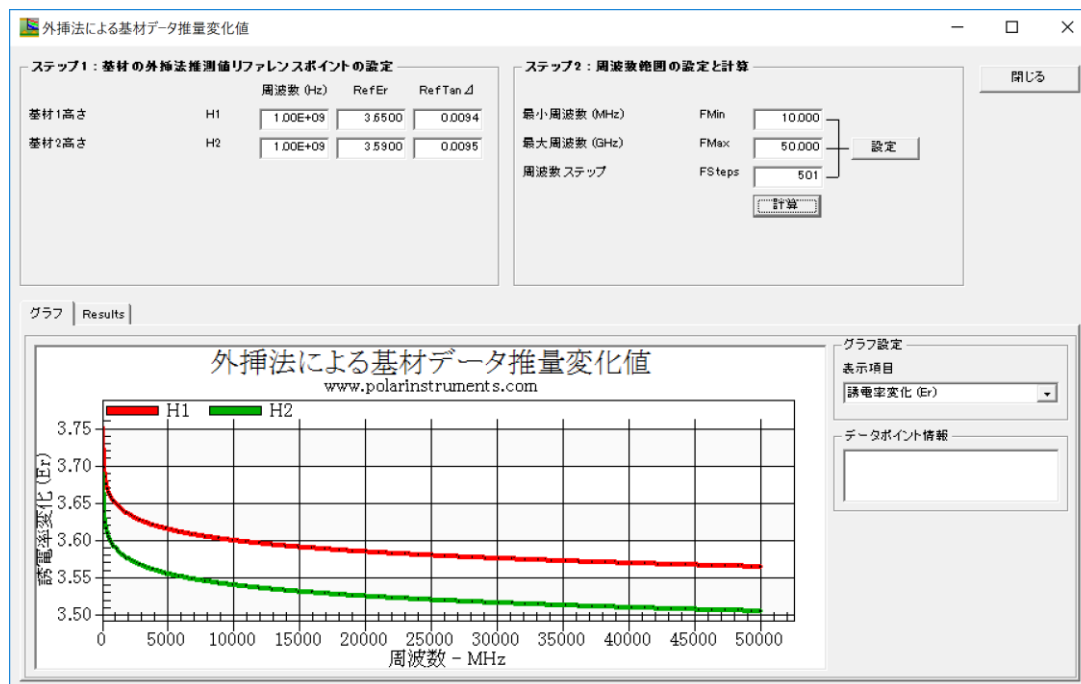


3. 基材周波数特性データの” Er / Tan Δ 外挿法適用にチェックを入れ編集ボタンを押します。

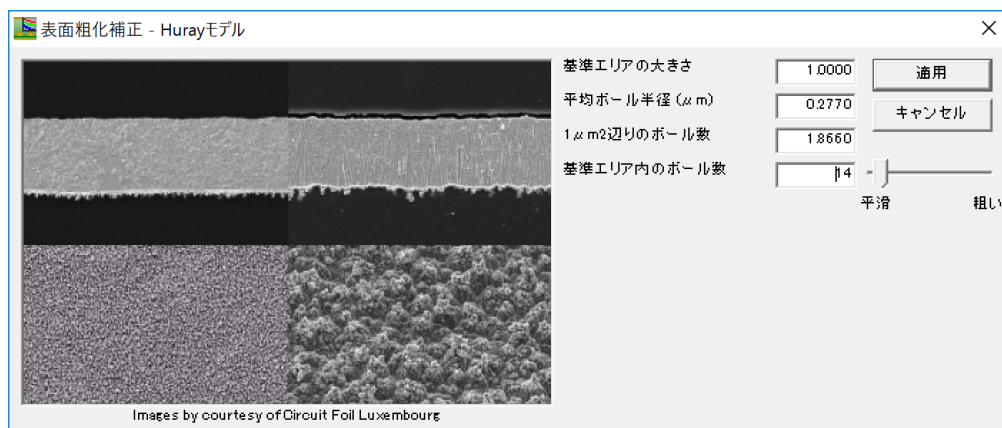
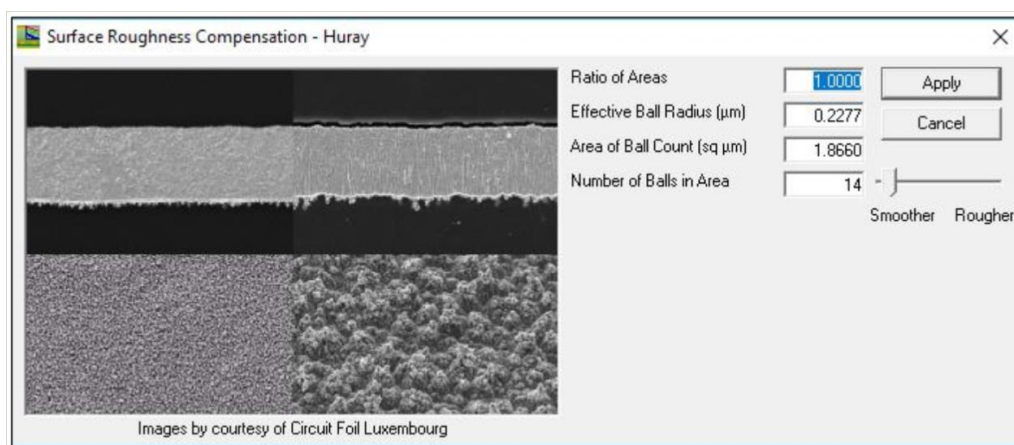


以下のウィンドウがポップアップします

計算ボタンを押すと、周波数ドメインで Dk 値を表示します。 閉じるボタンでメイン画面に戻ります。



4. 周波数依存性挿入損失計算ウィンドウの「表面粗化補正」セクションで、「Huray」にチェックを入れ選択し、「編集」をクリックすると、以下のポップアップウィンドウが表示されます。「Ratio of Areas 基準エリアの大きさ」は Huray の計算式 1 の A_{matte}/A_{flat} であり、Cannonball モデルでは粗化ベースの相対的な面積が完全に平坦な面であると仮定しているため、1.00 となります。



表層のマイクロストリップ構造では、誘電材料に接着する銅箔の粗化、通常でいうところのつや消し面を考慮する必要があります。しかし、内層ストリップラインの構造では、銅箔のつや消し面側と光沢面側の両面の粗化を考慮する必要があります。粗化の状態はそれぞれの面で異なるので、最初に光沢面とつや消し面のボールの半径を別々に計算してから、「Effective Ball Radius 平均ボール半径」の入力するための平均値を取る必要があります。

Thus:

$$r_{drum} \approx \frac{R_{z_drum}}{16.73} \approx \frac{3.175\mu m}{16.73} \approx 0.190\mu m$$

レジスト処理前に、通常銅箔表面に酸化処理またはマイクロエッチング処理が施されます。処理後一般的には $50\mu\text{inch}$ ($1.27\mu\text{m}$) の銅が除去されます。基板メーカーの製造工程プロセス制御によっては、これは $70\text{-}100\mu\text{inch}$ ($1.78\text{-}2.54\mu\text{m}$) になることもあります。マイクロエッチング処理中に銅箔表面の一部が除去されるため、厚さが $175\mu\text{inch}$ ($4.443\mu\text{m}$) の場合、つや消し面の表面粗化カタログ値から $50\mu\text{inch}$ だけ差し引く必要があります。

Thus:

$$r_{matte} \approx \frac{R_{z_matte}}{16.73} \approx \frac{4.443\mu m}{16.73} \approx 0.266\mu m$$

“Effective Ball Radius 平均ボール半径”:

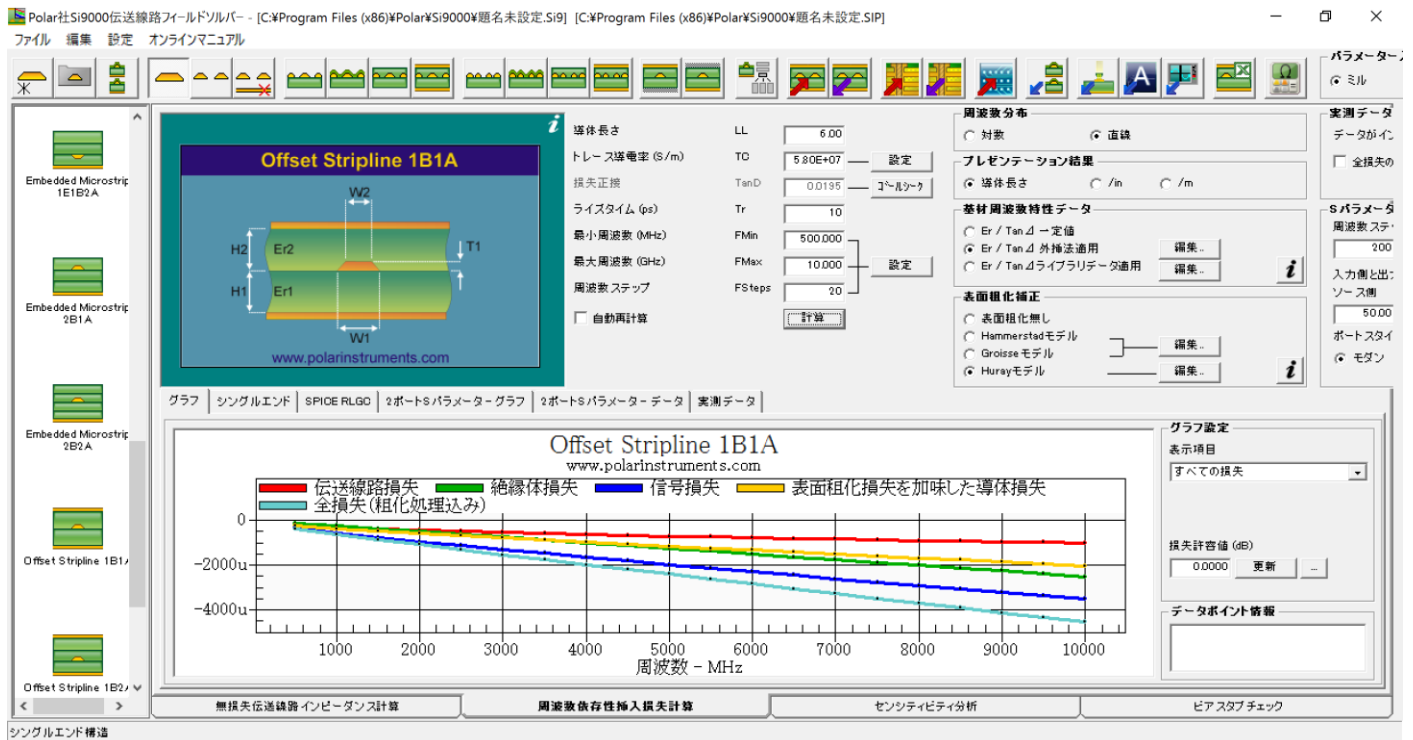
$$\approx \frac{r_{matte} + r_{drum}}{2} \approx \frac{0.266\mu m + 0.190\mu m}{2} \approx 0.2277\mu m$$

5. 次の計算 “Area of Ball Count $1\mu\text{m}^2$ 当りのボール数”:

$$A_{flat} \approx (6 \times 0.2277\mu m)^2 \approx 1.866\mu m^2$$

6. 最後に Cannonball モデルでは、「Number of Balls in Area : 基準エリア内のボールの数」に 14 を入力します。

7. すべての情報を入力したら、「適用」ボタンを押してメイン画面に戻ります。「計算」ボタンをクリックすると、以下の結果が表示されます。

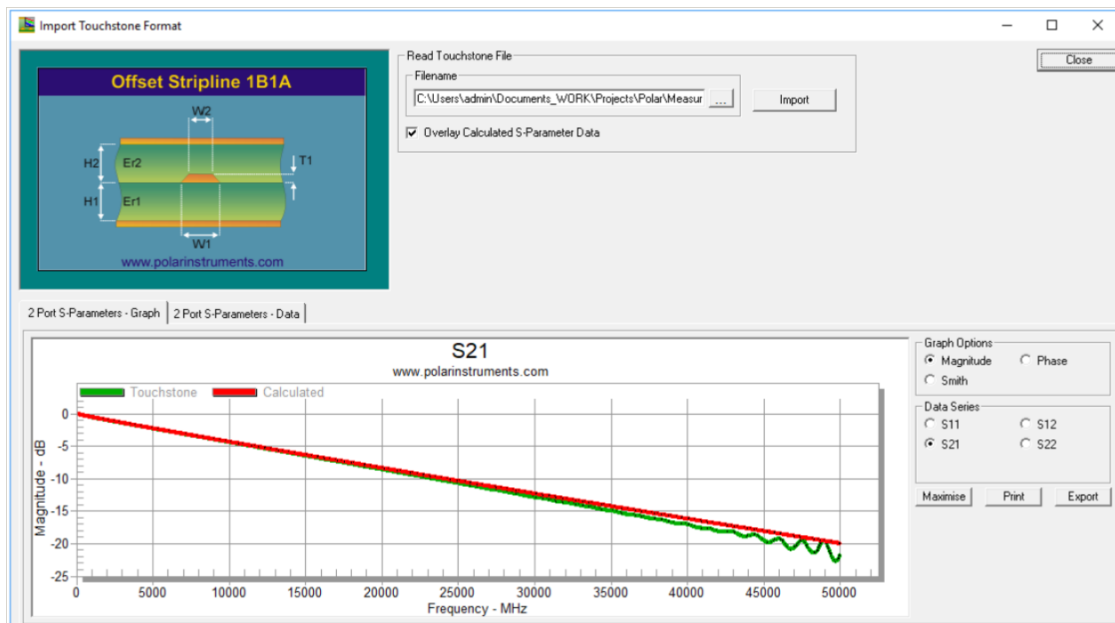


Si9000e メイン画面にシミュレーションの結果が表示されます。

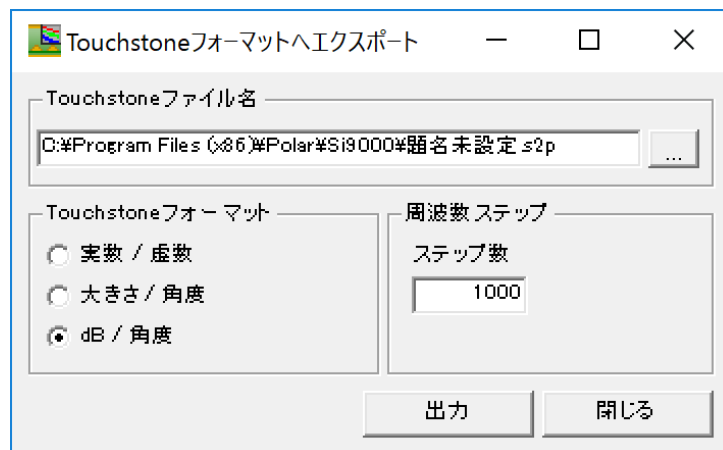
上から順に、赤は導体損失と黄色は表面粗化損失です。緑が誘電体損失で、青が全損失、ライトブルーが表面粗化損失を含めた全損失です。

測定した Touchstone®フォーマットのファイルがある場合は、メイン画面の「ファイル」ドロップダウンメニューから「Touchstone をインポート...」を選択して、シミュレーション結果とインポートした損失測定結果を比較できます。下の図では、S21 のシミュレーション結果と測定データを重ね合わせて示しています。 見て分かるように、材料メーカーのデータシートのカatalog値を使用するだけで、シミュレーションと測定値の相関を確認できます。

※Touchstone は、1984 年に設立された EEsof 社（現在は、Keysight 社の事業部の 1 つで Keysight EEsof EDA と呼ばれる）が開発した高周波回路シミュレータの名前で、このシミュレータ用の [S パラメータ](#)を保存するための ASCII テキストファイルのフォーマットが Touchstone フォーマットである。Touchstone というシミュレータはなくなったが、n ポートデバイスの特性を表わすパラメータを ASCII テキストファイルで保存するためのフォーマットとして、Touchstone フォーマットが業界の事実上の標準になっている。



メイン画面の「ファイル」メニュータブの下にある「Touchstone へエクスポート ...」を選択すると、シミュレーション結果を Touchstone 形式で保存できます。



Bert Simonovich, Lamsim Enterprises, 2017

参考:

*1 Simonovich Bert 著「キャノンボールスタック原理を用いた導体表面粗さのモデリングのための実用的方法」、ホワイトペーパー社

**2 Huray, P. G. (2009) “The Foundations of Signal Integrity (シグナルインテグリティの基礎)”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA., 2009

Polar Application Note AP8195

lamsimenterprises.com polarinstruments.com