

## Chapter 5                      Metalization and Dielectric Loss

---

この章では、金属導体の損失と誘電体層の損失について説明します。誘電体ブリックについては、331 ページの第 20 章 “Dielectric Bricks” をご覧ください。また、Sonnet の損失モデルの理論的な特徴や、実際にユーザの回路に損失を割り当てる方法、そして金属ライブラリと誘電体ライブラリの使用方法について説明します。金属導体の損失については以下に説明します。誘電体の損失については、91 ページの “Dielectric Layer Parameters” をご覧ください。

Sonnet Software 社の社長で創業者である Dr. James Rautio の金属導体の損失についての詳しい説明を含んだ論文もご覧になることができます。これは、[www.sonnetsoftware.com/support/publications.asp](http://www.sonnetsoftware.com/support/publications.asp) の中から入手できます。

## Metalization Loss

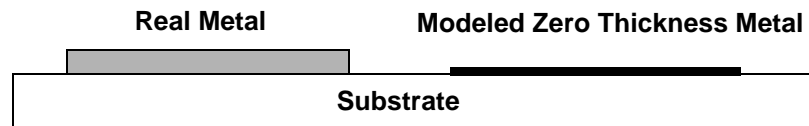
金属導体の損失は、Circuit  $\Rightarrow$  Metal Types を選択してオプションされる Metal Types ダイアログボックスで設定します。損失を回路の金属部分や上部カバー、グラウンド導体に割り当てられます。壁面はいつも完全な導体であると仮定されます。

1種類の金属導体のみが、あるレベルに使えると思われがちですが、実際は異なる金属導体（つまり異なる損失）をすべてのレベルに組み合わせて使用することができます。例えば、同じレベル上で金のトレースの横に薄膜フィルムの抵抗を置くことができます。

Sonnet では、グローバルライブラリを使用して、金や銅のように予め定義した金属導体を使うことができます。グローバルライブラリは、ご自身の金属導体の種類も同様に定義することができます。また、ローカルな金属ライブラリというものがあり、これは一個人のためや、ユーザ間で共有するために作成することができます。

### Sonnet's Loss Model

Sonnet の金属導体の損失モデルは、 $\Omega/\text{sq}$  で測定された表面インピーダンスの概念を使います。この概念は Sonnet の *em* のようなプレーナ EM シミュレータで使われており、実際の 3 次元の金属導体を 2 次元でモデリングすることができます。



この概念についてあまりご存じでない方は、**Fields and Waves in Communication Electronics** ( Simon Ramo, John R. Whinnery and Theodore Van Duzer, John Wiley & Sons, New York, 1965) のような古典的な教科書をご覧ください。

この技法は実際の 3 次元の金属導体の損失をかなり正確にモデリングすることができますが、金属導体の厚さによって変化する電磁界の分布はモデリングできません。この近似値は、線路の幅や線路の間隔、そして誘電体の厚さに対して、金属導体

## Chapter 5 Metalization and Dielectric Loss

の厚さが小さい時に有効となります。金属導体の実際の 3 次元の影響がある場合は、317 ページの第 19 章の “Thick Metal” で説明している Thick Metal Model の金属タイプを使って考えなくてはならないでしょう。

いくつかの電磁界解析では、“摂動的な”アプローチで損失を扱う方法を使っています。これは、あらゆる電流が無損失の場合と同様に流れると仮定することを意味します。この近似は、低損失の金属導体（良導体）の場合には有効なのですが、薄膜抵抗（高損失）においては、損失のある場合の電流と無損失の場合（ショート回路）の電流は大きく異なるために、前述のような摂動的なアプローチは失敗します。*Em* による損失の解析は摂動的なものではありませんので 100 オーム/sq の抵抗素材を 0.004 オーム/sq の良導体と同じように解析することができます。Sonnet の損失解析はまた、電氣的に薄い（低周波）導体と電氣的に厚い（高周波）導体の間の変化も正確にモデリングします。Sonnet で使用されているこの理論についての詳細は 419 ページの “Sonnet References” の参考文献 [18] をご覧ください。Sonnet のモデリングで実際に使用されている式については、426 ページの参考文献 [85] をご覧ください。

別の観点から損失を見ると、良導体の表面インピーダンスは実部と虚部が等しい値を持っています。この無効表面インピーダンスは、物理的に、電流が導体表面に近づくにつれて生じる表面インダクタンスの増加に起因します。この表面リアクタンスは Sonnet の損失のモデルに含まれています。この表面リアクタンスは  $R_{RF}$  に含められます。この影響は小さいのですが、あるケースでは非常に重要になります。

無損失の金属導体で誘電体のある回路の解析では、メモリ容量が半分になり、処理時間は約 2 倍速くなります。従って、最も簡単な近似は、無損失のシミュレーションを試みることです。初期の段階の設計において、これは非常に有効です。

### Problems In Determining Metal Loss

Sonnet の損失モデルは、正確な値が使われている場合には、大変正確なものになります。しかし実際には、容易に説明できない多くの金属導体の損失の特徴があります。例えば、表面の粗さ、金属の純度、金属の孔などは容易には測定できませんし、損失モデルにすべて含まれてしまいます。更に、Sonnet を含んだほとんどのソフトウェアのパッケージでは、金属の損失を決定するすべてのパラメータを入力することはできません。多くのユーザーは、手はじめに理想的な値を使い、自分の“現実世界”の損失を少し加

えたいでしょう。しかし一体どの程度、理想のモデルに 加えればよいのでしょうか？この質問には容易には答えられませんが、次の節でこの問題に取り組んでいます。

Sonnet のような EM 解析ツールには、更に損失の問題が存在します。その問題は、プレーナ EM ツールが金属導体を厚さゼロとして取り扱っていることに原因があります。これは、導体の上部と底部に違いがないことを意味します。ある回路では、例えばストリップ線路は、電流について見ると導体の上部を流れる電流と、底部を流れる電流は対称になっています。この場合は、厚さゼロのモデルは有効です。

マイクロストリップのような他の回路では、電流は等しく分布しないので、等価ストリップ線路の回路より損失が大きくなってしまいます。上部と底部の電流の比率がわかっているれば、より正確な損失モデルをつくれます。すべてのプレーナ回路は、金属の損失を計算するためにこの値を見積もるか、またはユーザがその情報を入力することが必要です。この種の回路では、ユーザが回路上での測定値を持っていないと、その電流比率の正確な値を知るのは困難です。これらの場合には、すべての電流が導体の片側を流れると仮定すると、“最悪ケース”の損失の結果となってしまいます。これは、前述した損失の他の特徴（金属の孔など）を無視することによって生じる“最悪ケース”の損失を補う傾向があります。

### Determining Good Input Values

正確な損失値を決める最良の方法は、所望の金属導体のシリアルな構造を作成し、測定することです。その構造は測定誤差が解析結果に著しく影響しないように、損失に対して十分にセンシティブなものでなくてはなりません。その後で、Sonnet で同じ構造を解析し、算出された損失値が測定値と同じ値になるまで損失値を調整します。うまくいくまで何回か繰り返すことになるかもしれませんが、同様の回路にその値を使うことができます。損失のパラメータに測定値を効果的に使用することができます。

### Creating Metal Types

Sonnet で図形に損失を割り当てるには、まず損失パラメータを入力して金属タイプを定義し、次にその金属タイプを回路に描いた図形に割り当てます。前の節では、Sonnet の損失モデルの値を決める方法を説明しました。この節では、金属タイプの作り方を説明し、Metal Editor ダイアログボックスで 사용되는損失モデルについて述べます。

Metal Editor ダイアログボックスでは、金属タイプの損失の定義を入力することができます。損失の入力には 5 つの方法があります。Normal、Resistor、Rd./Ref、General そして Sense です。以下に異なる損失モデルについてと、新しい金属タイプの入力方法を説明します。ここでの説明はシンプルな単独の導体のマイクロストリップ線路とストリップ線路の図形を想定して行います。

ユーザは各損失モデルの詳細を読む必要はありません。そのかわり、ここではご自分でお使いになりそうな損失モデルについて慣れてください。ほとんどのユーザは“Normal”だけで十分です。Sonnet ではすべての方法で同じ損失モデルを使いますが、ユーザがどのモデルを選ぶかは、ご自分が実際の金属タイプについて知っているパラメータによります。

#### Normal

Normal な金属タイプでは、体積導電率、金属の厚さ、電流比を使って、その損失を決めます。

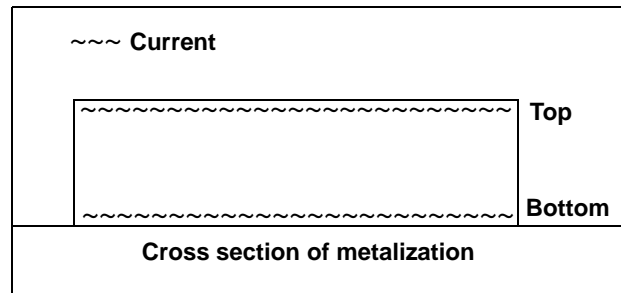
---

**NOTE:**

金属の厚さは、損失の計算に使用されるだけです。これは回路の実際の金属導体の厚さを変えません。回路の金属導体は、相変わらず厚さゼロでモデリングされます。

---

Sonnet では厚さゼロの金属で回路をモデリングしますが、実際の回路では、金属厚があります。下図のように、より高い周波数の電流は金属の縁のまわりの薄膜上を流れます。電流比は金属の上部を流れる電流と下部を流れる電流の比率です。



厚さゼロのモデルには側面がありません。従って、これらのパラメータから変換する時には、側面を流れる電流は無視されます。ある回路の、例えばストリップ線路では、金属の上部を流れる電流の半分と、下部を流れる電流の半分は対称となっています。この場合、電流比は1です。上部を流れる電流を、下部を流れる電流の2倍にすると、電流比は2になります。その回路で測定された値を得なければ、正確な電流比の値を知ることができません。すべてのプレカリカルは、金属の損失を計算するために、このplanの値を見積もらなくてはなりません。Sonnetのこの特定のモデルでは、この値を入力することができます。可逆的な値は同じ影響を持つということにご注意ください。つまり、0.5は2.0と同じ損失ということになります。

### Resistor

抵抗として使いたい金属を定義するには、この金属タイプを選択する時に表示されるRdc抵抗入力ボックスに $\Omega/\text{sq}$ の単位で、DC電気抵抗を入力します。この損失モデルを使うには、この抵抗値が調べたい周波数範囲に渡って、一定であるべきです。

### Rdc/Rrf

この方法では、2つの値、つまり  $R_{DC}$  と  $R_{RF}$  を入力することができます。1つめのパラメータ、 $R_{DC}$  は、低周波数における損失を定義します（導体の厚さは表皮の厚さよりも十分薄くなっています）。驚くことに、他の電磁界解析では  $R_{DC}$  を 0 と仮定することによって、低周波数での損失をしばしば 0 にすることがあります。

2つめのパラメータは、表皮効果係数  $R_{RF}$  です。 $Em$  は高周波数での  $\omega\mu / \sigma$  の値を算出するために、この数値を周波数（単位は Hz）の平方根に掛けます。

$R_{DC}$  と  $R_{RF}$  の方程式は、次のとおりです。

$$R_{DC} = 1/(\sigma t)$$

$$r_F = \text{Skin effect coefficient} = \sqrt{(\pi\mu)/\sigma}$$

ここで  $\sigma$  は体積導電率で単位は mhos/meter、 $t$  は金属導体の厚みで単位は meter、そして  $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m です。 $R_{DC}$  と  $R_{RF}$  の代表的な値は、それぞれ 0.004、 $3e-7$  です。おかしい損失の結果が得られてしまった場合、特に  $R_{RF}$  の指数部をチェックしてください。

$Em$  は電氣的に薄い導体（低周波数）と電氣的に厚い導体（高周波数）との遷移を正確にモデル化します。 $R_{DC}$  から  $R_{RF}$  へ遷移する周波数は、 $R_{DC}/R_{RF}$  の平方になっています。この周波数や、その付近の比較的狭い帯域では、両係数は非常に重要になります。表皮効果係数 ( $R_{RF}$ ) が 0.0 に設定されると、 $R_{DC}$  の値はすべての周波数に渡って使用されます。これは、抵抗ではよくあるケースです。

上の  $R_{RF}$  の式では、全電流は導体の片側だけを流れると仮定しています。これはいくつかのマイクロストリップ回路では、よい近似です。しかし、電流が実際には両側に流れる場合は、これは損失については、悲観的な値になってしまいます。この式は、他の構造用に修正されるべきです。例えば、ストリップ線路は導体の上部と底部の両方に同じ振幅の電流を持ちます。この場合、 $R_{DC}$  はそのまま、 $R_{RF}$  の値は 2 で割るべきです。

## Sonnet User's Guide

---

例えば、銅の導電率 ( $\sigma$ ) は  $5.8E+7$  Mhos/m で、これは  $R_{DC} = 0.006 \text{ } \Omega/\text{sq}$  ( $t = 3 \text{ } \mu\text{m}$ ) で、マイクロストリップの  $R_{RF} = 2.6E-7$  となります。実際には、銅や他の金属の体積導電率は、実験値と同じではないので、上で計算したような数字は実際の結果よりも低くなる傾向があります。以下の表には、よく使用される金属を上のを式を使って計算した値を載せました。

**Properties of Commonly Used Metals**

Metal	$\sigma$ (S/M)	RDC ( $\Omega/\text{sq}$ ) $t = 1 \text{ } \mu\text{M}$	RDC ( $\Omega/\text{sq}$ ) $t = 1 \text{ mil}$	RRF ( $\Omega\text{Hz}^{-1/2}/\text{sq}$ ) “Skin Effect” (microstrip)
Aluminum	3.72e7	0.027	1.1e-3	3.3e-7
Brass	1.57e7	0.070	2.5e-3	5.0e-7
Copper	5.80e7	0.017	6.8e-4	2.6e-7
Gold	4.09e7	0.024	9.6e-4	3.1e-7
Nichrome	1.00e6	1.000	3.9e-2	2.0e-6
Silver	6.17e7	0.016	6.4e-4	2.5e-7
Tantalum	6.45e6	0.155	6.1e-3	7.8e-7
Tin	8.70e6	0.115	4.5e-3	6.7e-7

### General

この損失係数は、上の  $R_{dc}/R_{rf}$  の項で述べた金属導体の抵抗値を含んでいます。General な損失の定義は、表面リアクタンス  $X_{dc}$  とインダクタンス  $L_s$  から構成される金属導体リアクタンスも含みます。

表面リアクタンス  $X_{dc}$  は  $\Omega/\text{sq}$  で設定されます。 $Em$  はすべての周波数で同じリアクタンス値を用います。



## Chapter 5 Metalization and Dielectric Loss

最近まで実用上関心があったのは表面抵抗の実数部だけ、すなわち純粋な損失だけでした。しかし、超伝導体が高周波数で使用されるようになると、表面リアクタンスが重要なレベルに達します。“キティックインダクタンス”として知られる超伝導現象は、 $I_{cR}$  の損失なく電子の速度を遅くします。これは表面インダクタンスとしてモデル化できます。

表面インダクタンスの効果は、 $\epsilon_{\text{eff}}$  を大きくします。すなわち、伝搬速度を遅くするのです。普通の導体では、 $\epsilon_{\text{eff}}$  は  $\epsilon_{\text{rel}}$  よりも決して大きくなりません。しかし超伝導体では、これはもはや成立しません。この普通でない現象は、基板の厚さが薄くなるほど顕著になります。

表面インダクタンス  $L_s$  は project editor で Circuits  $\Rightarrow$  Metal Types を選択してオープンする Metal Types ダイアログボックスの中で設定されます。このパラメータはより高い周波数の表面リアクタンスを使います。

$L_s$  の値を得る方法では、次の3通りの方法をお勧めします。一次の近似は金属導体が完全導体であると仮定することです。

$$R_{DC} = 0 \qquad R_{rf} = 0 \qquad L_s = 0$$

このモデルは中くらいの周波数 (150 GHz 以下) や、London 理論による侵入の深さよりはずっと大きな、中くらいの回路寸法で使えます。

次の方法は、中くらいの周波数ではまだ有効ですが、キティックインダクタンスによる効果を含むモデルをつくることです。キティックインダクタンスは温度の関数で次のように算出されます。

$$R_{DC} = 0 \qquad R_{rf} = 0 \qquad L_s = \mu_0 \lambda_L(T)$$

ここで

$$\mu_0 = 4\pi(10^{-7}) \text{ H/m}$$

$$\lambda_L(T) = \lambda_0 / (\sqrt{1 - (T/T_C)^4}) \quad \text{London depth of penetration at temp.}$$

$$\lambda_0 = \text{London depth at } T = 0 \text{ meters}$$

$$T_C = \text{Critical (Transition) Temperature in degrees Kelvin}$$

3 番めのモデルは、高周波の効果または小さなサイズの回路による効果であることを説明するのに使われるべきです。この場合、表面抵抗は  $\omega^2$  に比例し、支配し始めます。次のモデルが考えられます。抵抗は周波数の 2 乗の関数です。Sonnet は現在ではこれを行なう方法を持っていません。ですから広い範囲に渡って解析をしているのであれば、次の式を使って各周波数で別のプロシミュレーションを持つ必要があります。<sup>1</sup>

$$R_{rf} = 0$$

$$R_{DC} = \frac{1}{2} \omega^2 \mu_0^2 (\lambda_L(T))^3 \sigma_N (\eta_n / (\eta_n + \eta_s))$$

$$L_s = \mu_0 \lambda_L(T)$$

ここで

$$\omega = 2\pi f \text{ radians/sec}$$

$$\sigma_N = \text{Conductivity of the superconductor in its normal state (Mhos/m}^3\text{)}$$

$$\eta_n = \text{Normal state carrier density (1/m}^3\text{)}$$

$$\eta_s = \text{Superconducting state carrier density (1/m}^3\text{)}$$

$$\mu_0 \text{ and } \lambda_L(T) \text{ are as defined above}$$

- 
1. Shen, Z. Y., "High-Temperature Superconducting Microwave Circuits," Boston, 1994, Artech House.

## Chapter 5 Metalization and Dielectric Loss

超電導の表面インダクタンス、 $Z_s$  は Sonnet では次の式を用いてモデル化されます。

$$Z_s = R_{DC} + j \cdot (\omega L_s + X_{DC}) \quad \text{for } |L_s| > 0.0$$

### Sense

*Em* は電流の分布を解きます。しかし、時には電流ではなく電界を見たい時もあるでしょう。“センスメタル” と呼ばれるものを使うと電界を見ることができます。センスメタルは、接線方向の電界を見たい場所に置かれた矩形の導体パッチです (Sonnet では法線方向の電磁界を見ることはできません)。

センスメタルについての詳細は、397 ページの第 25 章 “Viewing Tangential Electric Fields” をご覧ください。

### Thick Metal

Thick metal には、体積導電率と金属導体の厚さの 2 つのパラメータを入力します。この thick metal の損失は Normal な金属タイプと同様に計算されますが、この場合、厚さは Current Ratio を入力する必要がなくなるということが異なります。

Thick metal の詳細は、324 ページの第 19 章 “Thick Metal” をご覧ください。

### How to Create a Metal Type

金属タイプをつくるには、次のように行います。

- 1 **Project editor のメニューから Circuit ⇒ Metal Types を選択します。**

Metal Types ダイアログボックスが画面に表示されます。

- 2 **Metal Types ダイアログボックスの Add ボタンをクリックします。**

Metal Editor ダイアログボックスが画面に表示されます。

**3 Type ドロップ リストから所望の損失 モデルを選択します。**

ほとんどのユーザは Normal を選択すべきでしょう。選択された種類が入力されると、テキスト入力ボックスが更新されます。

**4 適切なテキスト入力ボックスに損失のパラメータを入力します。**

これらのパラメータについての詳細は、前の節の損失のモデルについての記述をご覧ください。

**5 Name テキスト入力ボックスに、所望の金属タイプ の名前を入力します。**

この名前が Metal Types ダイアログボックスに表示され、回路に金属を指定する時に使用されます。このステップはオプションです。

**6 上向き及び下向き矢印で、金属タイプ の充填パターンを選びます。**

回路に表示されたこの金属タイプの図形は、その種類を区別するために指定された充填のパターンで表示されます。

**7 OK ボタンをクリックして Metal Editor を閉じ、新しい金属タイプを追加します。**

新しい金属タイプが Metal Types ダイアログボックスに表示されます。

**8 OK ボタンをクリックして Metal Types ダイアログボックスを閉じ、この変更事項を適用します。**

これで新しい金属タイプの入力は終了です。

## Metal Libraries

Sonnet では 2 種類の金属ライブラリを使用できます。グローバルとローカルです。金属ライブラリは、プロジェクトで使用される金属タイプの標準的な定義を含んでいます。グローバルライブラリとローカルライブラリには、実質的な差はありません。この名前は、どのように使用されるかということによってつけられています。グローバルライブラリは通常、設計者のグループが使うための標準的な金属を集めた幅広いライブラリです。

## Chapter 5 Metalization and Dielectric Loss

---

Sonnet によって用意されたデフォルトのグローバルライブラリがあり、これにはよく使われるいくつかの金属の定義が含まれています。グローバルライブラリのデフォルトの場所は、<Sonnet Directory>/data/library です。ここで <Sonnet Directory> は、お使いの Sonnet ソフトウェアがインストールされているディレクトリです。この場所を使うか、または別の場所にこのライブラリを保存することができます。

ローカルライブラリは通常、ユーザ独自の金属の定義のライブラリとして使われます。このライブラリはユーザの選んだ場所に格納されます。これらのライブラリへの入力を追加したり、編集したり、削除するには、Metal Editor ダイアログボックスを使います。

### Using a Metal from a Metal Library

金属ライブラリにある金属タイプを回路で使うには、次のように行います。

**1 Project editor のメニューから Circuit ⇒ Metal Types を選択します。**

Metal Types ダイアログボックスが画面に表示されます。このダイアログボックスで、プロジェクトの金属タイプの追加、編集、削除ができます。

**2 プロジェクトに金属タイプを入力するために、Add ボタンをクリックします。**

これにより Metal Editor ダイアログボックスがオープンされ、金属タイプを定義したり、自分のライブラリから金属タイプを入力することができます。



### TIP

---

Metal Types ダイアログボックスの Library ボタンをクリックすると、自分の金属ライブラリの内容を編集できますが、そのライブラリからプロジェクトへ金属タイプを追加することはできません。これは Metal Editor ダイアログボックスの中で行います。

---

**3 Metal Editor ダイアログボックスの Select Metal from Library ボタンをクリックします。**

Metal Library ダイアログボックスが画面に表示されます。

- 4 **Metal Library ダイアログボックスの適切なラジオボタンをクリックして、Local Library か、Global Library を選択します。**

新しいライブラリファイルを選択したい場合は、このラジオボタンの右にある Specify ボタンをクリックします。そうすると、browse ウィンドウが開いてファイルを選択することができます。ライブラリの設定については、88 ページの “Setting Up a Metal Library” をご覧ください。

ライブラリが選択されると、そのライブラリの金属タイプのリストがダイアログボックスに表示されます。

- 5 **所望の金属タイプのエントリをクリックして、それを選択します。**

そのエントリは青色で強調表示されます。

- 6 **Metal Library ダイアログボックスの OK ボタンをクリックします。**

これにより金属タイプが選択され、ダイアログボックスが閉じます。今、Metal Editor テキスト入力ボックスには、ユーザの選んだライブラリの金属タイプの名前と損失のパラメータが含まれています。これらのパラメータの変更は金属ライブラリのパラメータには影響を与えませんが、ユーザの作成している金属タイプのパラメータに影響を与えるだけです。

- 7 **ご希望であれば、Pattern フィールドの上向き或いは下向き矢印をクリックして、この金属タイプの画面表示パターンを変えることができます。**

金属に割り当てられたデフォルトのフィールドでよければ、このステップはとばしてください。

- 8 **Metal Editor ダイアログボックスの OK ボタンをクリックします。**

Metal Editor ダイアログボックスが閉じられ、今ライブラリから選択された金属タイプのエントリが Metal Types ダイアログボックスのリストに表示されます。

- 9 **Metal Types ダイアログボックスの OK ボタンをクリックし、このダイアログボックスを閉じて変更事項を適用します。**

これで金属ライブラリからの金属の追加が終了します。

### Editing a Metal Library

ユーザの金属ライブラリからのエントリの追加、編集、削除は、Metal Library ダイアログボックスを使います。金属ライブラリの編集は、次のように行います。

**1 Project editor のメニューから Circuit ⇒ Metal Types を選択します。**

Metal Types ダイアログボックスが画面に表示されます。このダイアログボックスでプロジェクトの金属タイプを追加、編集、削除を行います。

**2 Library ボタンをクリックして 金属ライブラリを編集します。**

これにより Metal Library ダイアログボックスがオープンされ、金属ライブラリを作成したり、それらを編集することができます。

**3 Metal Library ダイアログボックスの中の適切なライブラリボタンをクリックし、Local Library か Global Library を選択します。**

新しいライブラリファイルを選択したい場合は、所望のファイルを見つけるために、ライブラリの右の Specify ボタンをクリックします。ライブラリの設定については、88 ページの “Setting Up a Metal Library” をご覧ください。

ライブラリが選択されると、そのライブラリの金属タイプのリストがダイアログボックスに表示されます。

**4 金属タイプを選択するために、Add ボタンをクリックします。**

Metal Editor ダイアログボックスがオープンされます。

**5 Metal Editor ダイアログボックスの中で所望の名前と損失のパラメータを入力し、OK ボタンをクリックして新しい金属をライブラリに追加します。**

将来のプロジェクトで使用されるために、この金属タイプがライブラリの中で使用可能になりました。現在のプロジェクトで金属タイプを使用したい場合は、プロジェクトにそのライブラリの金属を金属タイプとして追加する必要があります。

厚さのパラメータは、ユーザのライブラリに金属タイプを定義する時にはオプションなものです。回路で使うために金属タイプをプロジェクトに追加する場合には、厚さのパラメータは必要なフィールドです。

**6 既にある金属を編集するために、そのエントリをクリックしてそれを選択し、次に Edit ボタンをクリックします。**

金属タイプの現在の名前とパラメータが表示された、Metal Editor ダイアログボックスがオープンされます。

**7 所望の変更を行うために、OK ボタンをクリックします。**

Metal Editor ダイアログボックスが閉じられ、金属タイプの入力行で変更事項が更新されます。

**8 ユーザーの金属タイプリストから金属タイプを削除するために、Metal Library ダイアログボックスの中の Metal Type をクリックしてこれを選択し、次に Delete ボタンをクリックします。**

これでタイプリストからこの金属タイプが削除されます。金属タイプがプロジェクトに追加されて、使用されている場合は、タイプリストからその金属を削除しても、プロジェクトで使用されている金属タイプには何も影響はないことをご注意ください。この金属タイプは他のプロジェクトのタイプリストとしては使用できませんが、現在のプロジェクトにはまだ存在しています。

これで金属タイプリストの編集は終了です。

### Setting Up a Metal Library

グローバル、またはローカルの新しいタイプリストを作成するには、次のように行ないます。

**1 Project editor のメインメニューから Circuit ⇒ Metal Types を選択します。**

Metal Types ダイアログボックスが画面に表示されます。このダイアログボックスで、プロジェクトで使う金属タイプの追加、編集、削除を行います。

**2 金属タイプリストを編集するために Library ボタンをクリックします。**

これにより Metal Library ダイアログボックスが開かれ、金属タイプリストを作成したり編集することができます。

**3 Metal Library ダイアログボックスの My Library、または Global Library ラジオボタンをクリックして、作成したいタイプリストの種類を選択します。**

タイプリストが選択されるとタイプリストにある金属タイプのリストがダイアログボックスに表示されます。

**4 新しいタイプリストを作成するために、選択したタイプリストのラジオボタンの右にある Specify ボタンをクリックします。**

Browse ウィンドウが画面に表示されます。



**5 Browse ウィンドウを使って新しい金属ライブラリのアクションとファイル名を指定します。**

新しい金属ライブラリのデフォルトの名前は、metal-library.txt です。ライブラリファイルに別の名前をつけたい場合は、ファイル名のエントリを編集します。

**6 所望のアクションが指定されたら、browse ウィンドウの OK ボタンをクリックします。**

Browse ウィンドウが閉じられ、エントリのない金属ライブラリのファイルが、今指定したアクションで作成されます。Metal Library ダイアログボックスの残りのエントリを使ってこの金属ライブラリのエントリを作成します。金属ライブラリの編集についての詳細は、86 ページの “Editing a Metal Library” をご覧ください。

### Via Loss

Via の損失は、金属の図形とほとんど同じ方法で実現されています。違うところは、via は 3 次元のオブジェクトで、図形は 2 次元であるところだけです。従って、Sonnet の via の損失モデルは、わずかに近似が使われます。通常は既存の via がついている図形の損失を使い、via の図形は独自の損失特性を持っています。Via の図形に損失を割り当てるには、via の図形を除外し、次に Modify ⇒ Via Properties を選択します。Via Properties ダイアログボックスの中で、Via Loss ドロップリストからその via の図形の金属タイプを選択します。かなり正確に via の損失を解析するには、図形の損失について前述したのと同じ測定方法を使うべきです。

### Setting Losses for the Box Top and Bottom (Ground Plane)

金属タイプをボックスの上部と底部に割り当てることによって、ボックスの上部と底部に損失を設定します。ボックスの上部と底部は、回路の図形や via の図形で金属導体を使用するのと同じ金属タイプを使用します。更に Sonnet には Top と Bottom の金属に使用することのできる 2 つの特別な金属タイプがあります。Free Space (自由空間) と Waveguide Load (導波管の負荷) です。これらの種類の使用方法と使用する理由については、第 21 章の “Antennas and Radiation” をご覧ください。

ボックスの Top と Bottom の金属に金属タイプを割り当てるには、project editor のメニューから Circuit ⇒ Box Settings を選択します。画面に表示された Box Settings ダイアログボックスの中で、所望の金属タイプを上部には Top Metal ドロップリストから、底部には Bottom Metal ドロップリストから選択します。

## Dielectric Loss

基板が実際に周波数に依存しない導電率と（または）損失正接を持つと仮定する Sonnet の誘電損失の計算はほとんど正確です。当社のウェブサイトには、ユーザーがどのような電磁界シミュレータ（または測定システム）でも実行できる、損失のある導体のベンチマークを掲載しています。当社のウェブサイト [www.sonnetsoftware.com](http://www.sonnetsoftware.com) の Products 欄の Benchmarking をご覧ください。

Sonnet では誘電損失は、解析の始めの段階で計算されます。Sonnet で使う方式は導波管モードの合計を計算することから始まります。正確な解決法には、モードの無限の合計が必要ですが、Sonnet はこの合計を適当な値で打ち切ります（この打ち切りは誤差の元にはなりません）。ですから、各モードで損失のある誘電体がある場合、計算には実数のみではなく、複素数を含みます。これは、離散関数ではなく、連続関数です。従って、誘電損失の計算は正確であると考えられます（コンピュータの計算精度にのみ制限されます）。

考えられる誤差の原因は、導電率が周波数によって変わらないという仮定にあります。すべての実際の誘電体は、周波数に依存した損失（他よりは幾分小さい）があります。Sonnet には 2 つのパラメータ Loss Tan（損失正接）と Diel Cond（誘電体導電率）があり、この周波数依存を調整します。Sonnet が全体の損失を算出するのに使う式は 92 ページの "Dielectric Layer Loss" に掲載されています。より複雑な周波数依存のある誘電体がいくつかありますが、この式は大抵の誘電体に使えます。もちろん、ユーザーが誘電体の周波数依存性を知っている必要があります。もし、周波数の関数で損失を測定する方法（または信用できる公表されたデータ）をお持ちで、またそれがお使いの周波数帯域を超えても一定であるなら、誘電損失はおそらく誤差の原因にはならないでしょう。しかし、公表されたデータにはよく注意してください。そのデータがお使いの周波数帯域以外でも有効であるか確認してください。

### Dielectric Layer Parameters

Project editor で Circuits  $\Rightarrow$  Dielectric Layers を選択し、Dielectric Layers ダイアログボックスの Above、Below、Edit ボタンをクリックして、以下の値を変えると、誘電率と誘電体層の損失を設定することができます。これにより Dielectric Editor ダイアログボックスがオープンされて、以下の値を編集することができます。

- **Erel:** 比誘電率 ( $\epsilon_r$ )。比率 ( $\epsilon'/\epsilon_0'$ )、ここで  $\epsilon'$  は誘電体層の材質の誘電率の実数部分、 $\epsilon_0'$  は自由空間の誘電率。比率は無次元です。
- **Dielectric Loss Tan:** 誘電損失正接。比率 ( $\epsilon''/\epsilon'$ )、ここで  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 、 $\epsilon$  は誘電体層の材質の複素誘電率。比率は無次元です。
- **Diel. Cond:** 誘電体導電率、 $\sigma$ 、ここで  $\sigma$  はメートルあたりのジ-メクス単位の誘電体導電率。
- **Mrel:** 誘電体層の材質の比透磁率 ( $\mu_r$ )。
- **Magnetic Loss Tan:** 誘電体層の材質の磁気損失正接。

誘電体層に指定する最後のパラメータは、Z 方向の分割です。この値は Dielectric Layers ダイアログボックスの Z Parts ボタンをクリックしてオープンされる、Z Partitions ダイアログボックスの中で変更することができます。

- **Z-Partitions:** Z-partitioning パラメータは、誘電体層の Z 方向の分割の数をコントロールする設定です。このパラメータが Dielectric Layer ウィンドウで指定されても、その層の誘電体ブリックに影響を与えるだけです。ある特定の層のこの値を変えても、その層にブリックがなければ影響を与えません。その層に複数のブリックがあると、それらのブリックの Z 方向のサブセクションの数は同じ数になります。

Z 方向でサブセクションの数が多ければ多いほど（よい結果が出ます）、正確な解析となりますが、解析時間と必要メモリもかなり多くなります。

### Dielectric Layer Loss

*Em* は上記のパラメータを使って、次の式で誘電体層の材質の全実効誘電正接を計算します。

$$\tan \delta = (\text{Loss Tan}) + \frac{(\text{Diel Cond})}{\omega(\text{Erel})\epsilon_0}$$

ここで、 $\omega$  は角周波数（ $\omega = 2\pi f$ 、 $f$  は周波数 (Hz)）です。 $\tan \delta$  は周波数依存の項と周波数に依存していない項の両方を持っていることを覚えておいてください。

上の  $\tan \delta$  の関係式は、導電率との関係として次のように表わされます。

$$\text{Total Effective Cond} = (\text{Loss Tan})\omega(\text{Erel})\epsilon_0 + (\text{Diel Cond})$$

両方の式とも同じ式です。どちらも *em* が入力された誘電体のパラメータを使って、どのように誘電体層の損失を計算するかを表わしています。

これらのパラメータの設定については、project editor のオンラインヘルプの “Circuit  $\Rightarrow$  Dielectric Layers” をご覧ください。

### How to Create a New Dielectric Layer

新しい誘電体層をつくるには、次のように行います。

- 1 **Project editor のメインメニューから Circuit  $\Rightarrow$  Dielectric Layers を選択します。**  
Dielectric Layers タブが画面に表示されます。
- 2 **Dielectric Layers タブの Add ボタンの Above または Below をクリックします。**  
Dielectric Editor タブが画面に表示されます。

**3 適切なテキスト入力ボックスに誘電体のパラメータを入力します。**

これらのパラメータについては、91 ページの “Dielectric Layer Parameters” の損失のテーブルをご覧ください。

**4 Name テキスト入力ボックスに、所望の誘電体の材質名を入力します。**

Dielectric Layers ダイアログボックスにこのプロパティの名前が表示され、回路の層に使用される誘電体の材質を識別するために使われます。

**5 Thickness テキスト入力ボックスに、所望の誘電体の厚さを入力します。**

この値も Dielectric Layers ダイアログボックスの中で編集することができます。

**6 OK ボタンをクリックして、Dielectric Editor を加えず、新しい誘電体層を追加します。**

Dielectric Layers ダイアログボックスの中に、新しい層が表示されます。

**7 Dielectric Layers ダイアログボックスの OK ボタンをクリックしてこれを加えず、変更事項を適用します。**

これで新しい誘電体層入力は終了です。

### Dielectric Libraries

誘電体ライブラリには、ユーザの誘電体層で使用される誘電体の材質の標準的な定義が含まれています。Sonnet では 2 種類の誘電体ライブラリを使用できます。グローバルとローカルです。2 つのライブラリには、実質的な差はありません。この名前はどのように使用されるかということによってつけられています。

---

**NOTE:** 誘電体ライブラリの材質は誘電体プロパティには使用できず、誘電体層にのみ使用できます。

---

グローバルライブラリは通常、設計者のグループが使うための標準的な金属を集めた幅広いライブラリです。Sonnet によって用意されたデフォルトのグローバルライブラリがあり、これには誘電体の材質の定義が含まれています。

グローバルライブラリのデフォルトのロケーションは、<Sonnet Directory>/data/library です。ここで <Sonnet Directory> は、お使いの Sonnet ソフトウェアがインストールされているディレクトリです。このロケーションを使うか、または別のロケーションにこのライブラリを保存することができます。

ローカルライブラリは通常、ユーザ独自の誘電体の材質の定義のライブラリとして使われます。このライブラリはユーザの指定したロケーションに格納されます。これらのライブラリへの入力を追加したり、編集したり、削除するには、Dielectric Editor ダイアログボックスを使います。

### Using a Dielectric Material from a Dielectric Library

誘電体ライブラリにある誘電体の材質を回路で使用するには、次のように行います。

**1 Project editor のメニューから Circuit ⇒ Dielectric Layers を選択します。**

Dielectric Layers ダイアログボックスが画面に表示されます。このダイアログボックスで、プロジェクトの誘電体層の追加、編集、削除を行います。

**2 既に存在する誘電体層をクリックして、これを選択します。**

新しい図形プロジェクトには、常に 2 つのデフォルトの誘電体層があります。

**3 Above または Below ボタンをクリックして、プロジェクトに誘電体層を追加します。**

これにより Dielectric Editor ダイアログボックスがオープンされ、誘電体層を定義したり、その誘電体層にライブラリから誘電体の材質を入力することができます。

ここでは Edit ボタンをクリックして、Dielectric Editor ダイアログボックスの中に、今選択された誘電体層をオープンすることもできます。誘電体層は、今選択された誘電体層の上、または下に追加されます。



### TIP

---

Dielectric Layers ダイアログボックスの Library ボタンをクリックすると、自分の誘電体ライブラリの内容を編集できますが、そのライブラリからプロジェクトへ誘電体の材質を追加することはできません。これは Dielectric Editor ダイアログボックスの中で行います。

---

- 4 Dielectric Editor ダイアログボックスの Select Dielectric from Library ボタンをクリックします。

Dielectric Library ダイアログボックスが画面に表示されます。

- 5 Dielectric Library ダイアログボックスの適切なライブラリ ボタンをクリックして、My Library または Global Library を選択します。

新しいライブラリファイルを選択したい場合は、このライブラリ ボタンの右にある Specify ボタンをクリックします。そうすると、browse ウィンドウがオープンしてファイルを選択することができます。ライブラリ の設定については、97 ページの “Setting Up a Dielectric Library” をご覧ください。

ライブラリ が選択されると、そのライブラリ の誘電体の種類のリストが ダイアログボックスに表示されます。

- 6 所望の誘電体の材質をクリックし、これを選択します。

エントリが強調表示されます。

- 7 Dielectric Library ダイアログボックスの OK ボタンをクリックします。

これで誘電体の材質が選択され、ダイアログボックスはクローズします。Dielectric Editor のテキスト入力ボックスには、選択したライブラリからの誘電体の材質名と損失のパラメータが表示されます。

- 8 Thickness テキスト入力ボックスに、その誘電体層に所望の厚さを入力します。

Dielectric Layers ダイアログボックスの中で、誘電体層の厚さを編集することもできます。

- 9 Number of Copies テキスト入力ボックスに、コピーしたい数を入力します。

この入力フィールドを使って一度に複数の誘電体層を入力することができます。各誘電体層は、ここで指定された厚さを持ち、同じ損失のパラメータとなります。

- 10 Dielectric Editor ダイアログボックスの OK ボタンをクリックします。

Dielectric Editor ダイアログボックスはクローズされ、入力されたばかりの誘電体のエントリが Dielectric Layers ダイアログボックスのリストに表示されます。

- 11 Dielectric Layers ダイアログボックスの OK ボタンをクリックしてこれを加え、変更事項を適用します。

これでライブラリからの誘電体の材質を使って誘電体層を追加することは終了です。

### Editing a Dielectric Library

Dielectric Library ダイアログボックスを使って、誘電体ライブラリからのエントリの追加、編集、削除を行います。誘電体ライブラリの編集は次のように行います。

- 1 Project editor のメニューから Circuit ⇒ Dielectric Layers を選択します。

Dielectric Layers ダイアログボックスが画面に表示されます。このダイアログボックスで、プロジェクト外の誘電体の材質の追加、編集、削除を行います。

- 2 Library ボタンをクリックして、誘電体ライブラリを編集します。

これにより Dielectric Library ダイアログボックスがオープンされ、誘電体ライブラリを作成したり、編集することができます。

- 3 Dielectric Library ダイアログボックスの適切なラジカルボタンをクリックして、My Library または Global Library を選択します。

新しいライブラリファイルを選択したい場合は、このラジカルボタンの右にある Specify ボタンをクリックします。そうすると、browse ウィンドウがオープンしてファイルを選択することができます。ライブラリの設定については、97 ページの “Setting Up a Dielectric Library” をご覧ください。

ライブラリが選択されると、そのライブラリの誘電体の種類のリストがダイアログボックスに表示されます。

Sonnet にはデフォルトのグローバルライブラリが用意されており、この中によく使用される誘電体の材質が含まれています。

- 4 誘電体の材質を追加するために、Dielectric Editor ダイアログボックスの中の Add ボタンをクリックし、所望の材質名と損失のパラメータを入力します。次に OK ボタンをクリックして新しい誘電体の材質をライブラリに追加します。

これでライブラリの中でこの誘電体の材質が使えるようになり、プロジェクト外で使用できます。



## Chapter 5 Metalization and Dielectric Loss

---

- 5 既に存在する誘電体を編集するためにそのエントリをクリックしてこれを選択し、次に Edit ボタンをクリックして所望の変更を行い、OK ボタンをクリックします。

Dielectric Editor ダイアログボックスが閉じられ、誘電体の材質の入力行の変更事項が更新されます。

- 6 誘電体ライブラリから誘電体の材質を削除するために、Dielectric Library ダイアログボックスの中でその材質名をクリックしてこれを選択し、次に Delete ボタンをクリックします。

これでライブラリからこの誘電体の材質が削除されます。その誘電体の材質がプロジェクトに追加されて、使用されている場合は、ライブラリからその材質を削除しても、プロジェクトで使用されている誘電体の材質には何も影響はありません。この誘電体の材質は他のプロジェクトのライブラリとしては使用できませんが、現在のプロジェクトにはまだ存在しています。

これで誘電体ライブラリの編集は終了です。

### Setting Up a Dielectric Library

グローバルまたはローカルの新しい誘電体ライブラリを作成するには、次のように行います。

- 1 Project editor のメニューから Circuit ⇒ Dielectric Layers を選択します。

Dielectric Layers ダイアログボックスが画面に表示されます。このダイアログボックスでプロジェクトで使う誘電体の材質の追加、編集、削除ができます。

- 2 誘電体ライブラリを編集するために、Library ボタンをクリックします。

Dielectric Library ダイアログボックスが開き、誘電体ライブラリを作成したり編集することができます。

- 3 Dielectric Library ダイアログボックスの My Local または Global ラジオボタンをクリックして、作成したいライブラリの種類を選択します。

ライブラリが選択されると、ライブラリにある誘電体の材質のリストがダイアログボックスに表示されます。

- 4 新しいライブラリを作成するために、選択したライブラリのラジオボタンの右にある Specify ボタンをクリックします。

Browse ウィンドウが画面に表示されます。

- 5 この browse ウィンドウを使って、新しい誘電体ライブラリのファイルのアクションとファイル名を指定します。

新しい誘電体ライブラリのデフォルトの名前は die-library.txt です。ライブラリファイルに別の名前をつけたい場合は、ファイル名のエントリを編集します。

- 6 所望のアクションが指定されたら、browse ウィンドウの OK ボタンをクリックします。

Browse ウィンドウが閉じられ、エントリのない誘電体ライブラリのファイルが、今指定したアクションで作成されます。Dielectric Library ダイアログボックスの残りのフィールドを使ってこの誘電体ライブラリのエントリを作成します。誘電体ライブラリの編集についての詳細は、86 ページの “Editing a Metal” をご覧ください。