

もう一度学ぶ電磁気学の世界



第3回

マクスウェル登場

小暮裕明



ボードの記事



ビギナーズ

前回は送電線や配線の周りの電磁界を調べ、「インダクタ(L)的な部分」や「キャパシタ(C)的な部分」が入り混じっている「分布定数回路」であることを示しました。回路図に描く素子は理想的な集中定数としてのLやCですが、高周波では各素子のわずかなリード線にも電気エネルギーや磁気エネルギーが存在し、LやCとして働きます。これこそ回路を電磁気学的に調べる着眼点といえます。そこで今回から100年以上も前に導かれて今なお現役という、マクスウェルの電磁方程式を学ぶことにしましょう。(筆者)

はじめに「電磁波回路」を定義しておきましょう。これは、よく知られているのに辞典に載っていないことばです。そこで、まず、マイクロ波回路について調べてみます。この用語は、次のように説明されています。

「マイクロ波周波数帯では、伝送路は、抵抗・容量・インダクタンスが場所的に分布している線路として描かれる。……中略……マイクロ波帯で用いられる回路(マイクロ波回路)は、この分布定数線路・分布定数回路とトランジスタやダイオードなどの集中定数素子から作られる」⁽¹⁾。

しかし、マイクロ波は周波数が3GHz~30GHzの電磁波を指しますから、マイクロ波回路という呼びかたでは使用する周波数が限定されてしまいます。そこで高周波・マイクロ波回路と言われるようになりました。最近はミリ波帯(30GHz~300GHz)も身近になってきたので、これを加えるとさらに長い名称になってしまいます。そこで本連載では「電磁波を入力、出力とする回路の総称⁽²⁾⁽³⁾」として、「電磁波回路」と呼ぶことにします。

周波数ごとの名称を用いない理由の一つは、これらがマクスウェルの電磁方程式で区別なく表現できるからです。電波は電波法で「300万MHz以下の周波数の電磁波をいう」

と定義されていますが、それより高い周波数の赤外線や可視光線、紫外線、X線、γ線も電磁波です。したがって、光を利用した光波回路も電磁波回路に含まれ、たいへん広い範囲を指すことになります。

具体的な回路としては、マイクロストリップ線路、コプレーナ線路、導波管線路などの導波路や、共振器、方向性結合器などがあります。これらは回路内のデバイスに効率良くエネルギーを伝える役割があるので、非放射系回路としてまとめられます。一方、アンテナはこの反対で、回路から空間へ電磁波を効率良く旅立たせる役割なので、放射系回路としてまとめられます。

また、複雑な構造の回路としては、GaAs(ガリウムヒ素)などを用いて、トランジスタやダイオードなどの能動素子、および抵抗や容量、インダクタンスを一つの集積回路内に組み込んだMMIC^{注1}が開発されています。

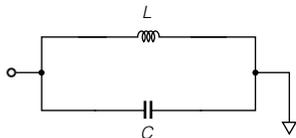
これらのすべてを含むと、電磁波回路は非常に広い範囲の概念と言えますが、「電気工学は電気磁気現象を利用する工学(本誌2003年2月号, pp.119-124の連載第1回を参照)」であることから、本連載でもこれらの回路を共通の電磁界現象としてとらえていくことにします。

電磁波回路によるインダクタL

マイクロストリップ線路の先端をビアでグラウンドへ短絡すると、図1のようなLとCの並列等価回路が得られました(本誌2003年2月号, pp.115-122の連載第2回を参照)。波長に比べて線路長が十分に短い、図2のような先端短絡

注1: Monolithic Microwave Integrated Circuit: モノリシック・マイクロ波集積回路。

図1
マイクロストリップ線路の先端をビアでグラウンドへ短絡したときの等価回路



L と C の並列等価回路になる。

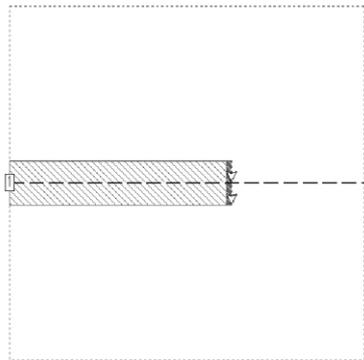


図3 マイクロストリップ線路と先端のビアのモデル

Sonnet Lite によるモデル。

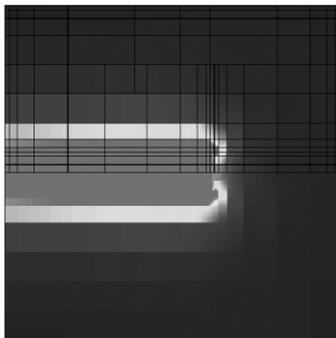


図5 マイクロストリップ線路のグラウンド表面の電流分布(3GHz)

線路を用いて、インダクタ L を作ることができます。ところがこれは分布定数線路なので、 L 的な要素も強いのですが、同時に C 的な要素もあり、これらが混在していると考えられます。

● マイクロストリップ線路が L になるわけ

図3は、前回(連載第2回)使ったマイクロストリップ線路のモデルです^{注2}。先端のにビアがあります(p.134のコラム「マイクロストリップ線路の先端のビアのモデリング」を参照)。

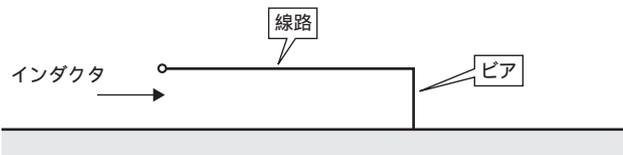


図2 波長に比べて線路長が十分短い先端短絡線路を用いてインダクタ L を作る

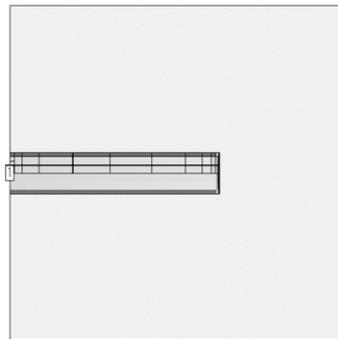


図4 マイクロストリップ線路の線路表面の電流分布(3GHz)

この線路表面とグラウンド表面の電流分布を観察してみます。図4は3GHzにおける線路表面の電流分布で、図5がこのときのグラウンド表面の電流分布です(細線で区切った領域はサブセクションを表している)。このようにポート1に与えた電圧によって、線路、ビア、グラウンドと、ループ状に電流が流れていることがわかります。この経路に着目すれば、これは1回巻きのコイルですから、直感的にインダクタとしてふるまうと考えられるでしょう。

● ミューチップのアンテナを解析する

図6は日立製作所が開発したアンテナ内蔵型ミューチップ^{注3}の外観です。2.45GHz帯用の非接触型ICチップの上部に、3回巻きの微細なコイルを一体形成しています。アンテナは空中線とも呼ばれますから、携帯電話のホイップは文字どおりのアンテナです。

ミューチップのアンテナは、一般の空中線とは異なり、ICにはりついています。形状はスパイラル・インダクタと同じコイルそのものなので、これをアンテナと呼ぶのが適切かどうか分かりませんが、JR東日本のSuica^{注4}や公衆電話のICカードにも、同じような数回巻きのコイルが使われ

注2：セルを0.1mm×0.1mmと、より細かく設定し直している。セルを細かく設定すると、より多くのメモリを使用する。Sonnet Liteでは、登録することで16Mバイトまでのモデルをシミュレーションできるようになる。Sonnet Liteの登録は、ソネット技研のWebサイト(<http://www.sonnetsoftware.co.jp/free/installhow2/index.html>)や、文献(4)(5)の説明を参照のこと。

注3：アンテナ内蔵型ミューチップは、日立製作所が2003年9月に発表した、アンテナを一体形成した2.45GHz帯非接触型ICチップである⁽⁸⁾。