

# 第 1 章

## お行儀の良い電気

本章では、先ず基礎知識として伝送線路とは何かを考える。代表的なものとして、平行2線、マイクロストリップ線路、導波管についてそれぞれシミュレーションを行いながら理解する。回路基板上のパターンが伝送線路であり、そしてマイクロストリップ線路としての理解が必要なることを確認する。

回路基板の配線路は、所望の信号を100%先方(負荷側)へ伝える役割を担っているわけですが、これは小学校の理科で学んだ豆電球と乾電池の実験も同じです。「電池の-(マイナス)極から出た電子が電線の中を通過して豆電球に達し、さらに電線を通して+(プラス)極へ帰る」というのが電流だと学びました。電線という線路を伝わる電気は、いわば「お行儀の良い電気」ですが、最近これが果たせなくなって、さまざまな問題が発生するようになってきた、というのです。

この章では、配線路本来の役割を見直し、なぜそれが十分果たせなくなるのか、そのわけを探ります。

### 1-1

### されど平行線

#### ● 平行2線モデル

豆電球と乾電池の実験では2本の電線を使いますが、よりシンプルな電線だけのモデルを図1-1に示します。これは米国Remcom社のXFDTDという3次元任意形状向きの電磁界シミュレータで、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法<sup>1-1)</sup>という解析手法をもとにしています(第9章で解説)。

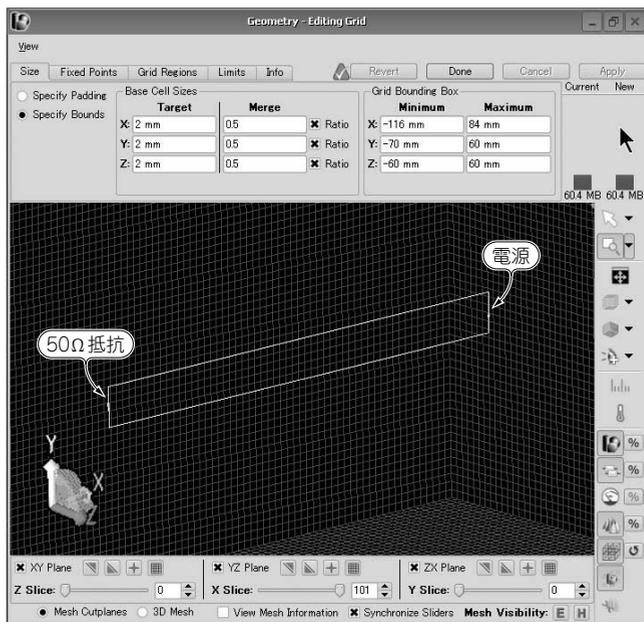


図 1-1 平行2線のCADモデル

手前の先端部に50Ωの抵抗、奥の端に電源(ポート1)を設定。

## ● 豆電球と乾電池モデル

詳しい話は抜きにして、電磁界シミュレーションの結果を順に見ていきましょう。電気回路を構成する三つの要素とは、電源と負荷、そして両者をつなぐ伝送路ですが、乾電池と豆電球、配線は、それらに対応しています。

図 1-2 は、奥の端に電源を設定しており、手前の先端部にある50Ωの負荷抵抗を平行2線でつないでいます。また平行2線の周りに表示されている波紋は、線に垂直な断面の「電界」の強度を表しています。

電界は、物理学では電場ともいいます。また電流の流れは電子の移動として説明されますが、図 1-2 の電源から下側の線路を伝わり、負荷抵抗を通して上側の線路をたどるループ電流を考えます(電流の向きは、電子の発見よりも前に決められたため、電子の移動とは逆向きに定義されている)。

図 1-2 によれば、電界が強い場所は上下の線間ですが、空間にも木の年輪のように広がっているのがわかります。最も強い領域の中心には電流が流れていますが、上下の配線に流れる電流は互いに逆向きであることに注意してください。

図 1-2 には電池も豆電球もないのですが、CADツール(図形描画プログラム)を用いて電気回路の要素として空間に配置したものを「モデル」と呼んでいます。

# 2

第2章

## お行儀の悪い電気

❖  
現実の回路基板上の配線には、曲がりや不均一な部分があり、配線上の電流挙動は複雑になり、周囲の電磁界エネルギーは、配線を離れ電磁波となって空間へと放射されることもある。これはノイズやクロストークを引き起こし、信号の伝送や回路動作に悪い影響与える。  
❖

第1章では、いくつかの伝送線路について調べました。平行2線やマイクロストリップ線路では、電気信号が伝わるときに、その周囲に電磁波がモレている（電磁界が分布している）ことがわかりました。電気が伝わるのは、線間に電圧がかかって回路にループ電流が流れるからですが、伝送線路の周りにできる電界と磁界が電磁エネルギーを伝えるという解釈もできます。

本章では、回路基板の周りの様子をさらに詳しく調べます。多層基板では、線路の導体表面、グラウンド層、電源層の表面には、電流がどのように流れているのか？身近な例をもとに、回路基板の周りを調べてみましょう。お行儀が良かったはずの電気なのに、他の線路へ結合したり空間へ放射するというお行儀の悪い電気に変身する原因も探ります。

### 2-1

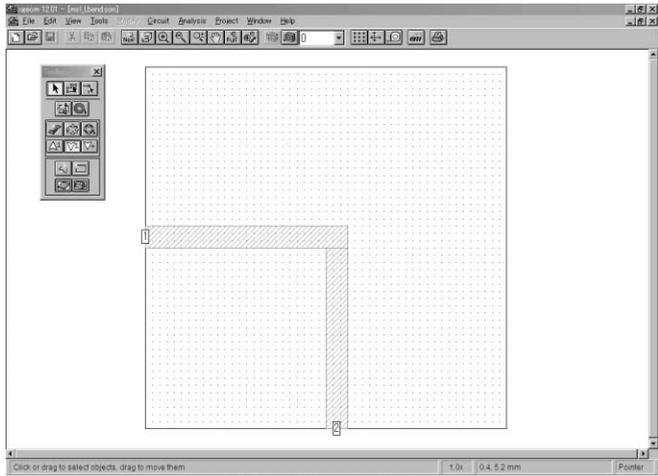
### 線路の曲がり部

#### ● 曲がり部の問題

図2-1は、基板中央部に直角な曲がり部をもつマイクロストリップ線路（以下MSL）を、Sonnet Liteでモデリングしたものです。両端はそれぞれ50Ωの抵抗で終端しており、左側面にある数字の1は、入力端子（ポート1）を示します。

プリント基板の配線パターンに、こういった直角や不連続な曲がり部（とがった

図 2-1 直角な曲がり部を持つマイクロストリップ線路 (ms1\_Lbend.son)  
基板寸法：5×5 mm，線幅：  
0.3 mm，比誘電率：4.6，厚  
さ：0.15 mm.



エッジがあるところ)ができるのはよくあることです。信号の周波数が低い場合には、ほとんど問題とならなかったのですが、パソコンのクロック周波数はGHz(ギガ・ヘルツ)で、デジタル動画を扱う製品などでも、こういった不連続部があると、誤動作を引き起こす可能性が高くなるといわれています。

## ● 表面電流の分布とは

図 2-2 は、図 2-1 の MSL の表面電流分布を真上から表示しています。第 1 章で述べたように、電流の分布は一様ではなく、線路の両縁に沿ったわずかな部分に強い電流が流れていることがわかり、エッジの偏りが見られます。

しかし、直角曲がり部では、単純に両縁に沿って流れるのではなく、複雑な分布が見られます。曲がり部の内側のパスと外側のパスを見くらべると、全長が短い内側よりのパスに強い電流が流れています。また外側のパスでは、直角曲がりの先端はほとんど電流が流れていません。

Sonnet はモーメント法による電磁界シミュレータですが、とくに指定しない場合、導体の厚さはゼロで解きます。3次元CADによるFDTDやTLM法(第9章を参照)でも、金属の内部は全く計算の対象にならず、表面のみを扱います。

線路の金属表面に流れる電流を考えると、金属面は空気と接していますが、この面を「境界面」と呼び、この近くでは媒質の性質が不連続になります。この境界面を無限に薄いと仮定すると、そのときの電磁界の特殊な関係(境界条件ともいう)を用いて、微分方程式の解を求めることができます。

# 3

第 3 章

## そもそも高周波とは何だろう



Sパラメータを利用し、位相角から信号の遅延を計算することや、配線のクロストーク値を調べることにより、伝送線路としての回路基板上の配線を評価する手法を紹介する。電磁界シミュレーションとネットワーク・アナライザによる測定を併用する。線路の特性インピーダンスの意味と評価法についても考察する。



第2章では回路基板のまわりの電磁界を詳しく調べ、配線パターンの直角曲がり部といった線路の不連続部分から空間に電磁エネルギーが放射されやすいことを直感的につきとめました。本章では、高周波で重要なSパラメータについて詳しく学びますが、その数値をどのように評価して役立てるのか、具体的な事例を調べます。

電磁界シミュレータは、信号源や観測点としてのポートを設定して、Sパラメータを求めます。2ポートのデバイスでは $S_{11}$ は入力側の反射係数、 $S_{21}$ は順方向伝達係数ですから、これだけでもおおまかな評価はできますが、Sパラメータの結果からわかることはいろいろあります。

### 3-1

### いまや不可欠となったSパラメータ

#### ● Sパラメータの定義

高周波回路でよく利用されるSパラメータは、散乱パラメータ(Scattering Parameter)の略です。Sパラメータは、入力端子(ポート1)と出力端子(ポート2)をそれぞれ線路の特性インピーダンスで終端し、回路網の伝送特性と反射特性を測定することで得られます。

高周波で電力を伝える線路は、特性インピーダンス $50\Omega$ が標準なので、端子には $50\Omega$ の抵抗器で終端してSパラメータを測定します。

図3-1の $a_1$ と $a_2$ は入射波， $b_1$ と $b_2$ は反射波をそれぞれ表します。このとき，各Sパラメータは，次の式で表されます。

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

ポートがさらに多い場合は，図3-2の $N$ ポートのように， $a_n$ は入射波， $b_n$ は反射波をそれぞれ表します。

2ポートのSパラメータの定義は，次の式で表されます。

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}, \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1}, \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2}, \quad S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

図3-1から， $S_{11}$ はポート1の入射波に対するポート1の反射波の電圧比ですから，これは「反射係数」を表します。また， $S_{21}$ はポート1の入射波に対するポート2の伝送波の電圧比ですから，これは順方向の「伝達係数」を表します。

同様に， $S_{22}$ はポート2の反射係数， $S_{12}$ は逆方向の伝達係数を表します。一般の回路素子は，ポート1とポート2を入れ替えても同等なので可逆性があり，

$$S_{ij} = S_{ji} \quad i, j \text{ はポート番号}$$

が成り立ちます。

また，線路から空間へ電磁エネルギーの放射がないと仮定すれば，Sパラメータ

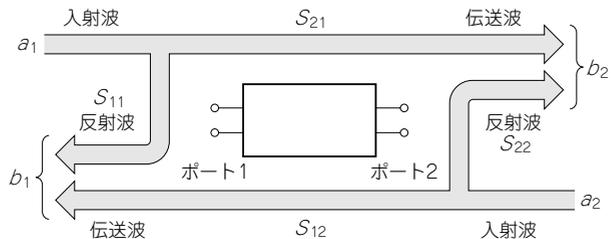


図3-1 2ポートのSパラメータ

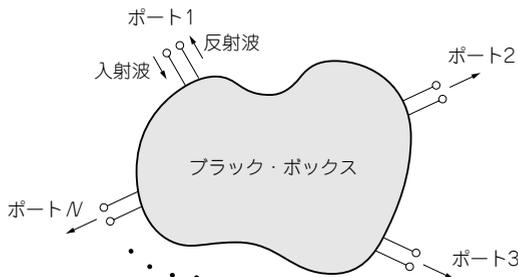


図3-2  $N$ ポートのSパラメータ

## 第4章

## 高周波回路はどこが違うのか

電磁界シミュレータの機能によりSPICEのサブサーキットを自動生成し、すべての結合を含むSPICEモデルを作成し、SPICEシミュレーションを行う。これにより分布定数回路を含めた回路の解析を行う。分布定数回路の $L$ や $C$ の物理的意味も考察する。また、表面電流分布や電磁界分布、放射パターンをビジュアルに紹介する。

第3章では、高周波回路を“数値”で評価するために、特性インピーダンスやSパラメータがどのような役に立つのかについて学びました。普及しているSPICEなどの回路シミュレータも数値で評価する上で有用なので、使い慣れたSPICEと電磁界シミュレータを併用すれば、理解がより深まることでしょう。

電磁界シミュレータにはSPICEのサブサーキットを自動生成するという便利な機能が付くようになりました。本章では、分布定数回路の考え方で高周波回路を理解しながら、具体的な例をもとに、SPICEの活用法も学びます。

## 4-1

## 基板の配線は分布定数回路

## ● SPICEで回路のシミュレーションをする

PSpiceが付属した書籍<sup>4-1)</sup>が出版されるなど(写真4-1)、SPICEが普及しています。SPICEは、高周波回路を分布定数回路として扱うことで、キルヒホッフの法則\*4-1をコンピュータで解くので、回路を抵抗、コンデンサやコイルなどの集中定数で表す必要があります(第3章を参照)。

\*4-1 キルヒホッフの法則は、回路のノード(節点)に流れ込む電流の総和と閉路の電圧の総和に関する法則。



写真4-1 『電子回路シミュレータPSpice入門編』，  
CQ出版社刊  
参考文献4-1).

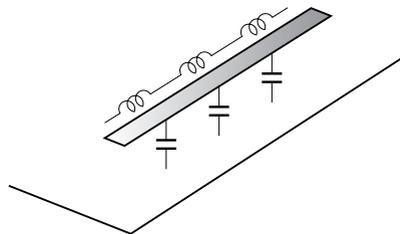


図4-1 分布定数回路として表されるマイクロ  
ストリップ線路

また、同じ回路部分を何度も使うときには、サブサーキットという一つのユニットとして名前を付けておくことができます<sup>42)</sup>。

基板上の伝送線路部分は、図4-1に示すように分布定数回路として考えられますから、複雑な線路をサブサーキットとして表して、他の回路素子とつないでいくことができれば便利です。

動作周波数が低いアナログ回路は、SPICEのシンプルな「集中定数モデル」でも、良い答えが得られます。しかし、周波数が高くなると、抵抗器は抵抗ではなくなり、インダクタンスとキャパシタンスとして振る舞います。また、基板のグラウンド層や電源層、回路を構成している各要素間の電磁結合は複雑になります。

### ● プリント基板上の回路は伝送線路として扱う

基板上の配線は、先に述べた分布定数回路として考えられ、伝送線路として扱わなければなりません。伝送線路は遅延を生じ、適切に終端されていないと信号のバ

# 5

第 5 章

## 高周波と不要輻射の密接な関係

❖

回路基板の周囲の電磁界について考察する。基板上の回路パターンのインピーダンス不整合やベタ・グラウンドに設けられたスリットによる不要輻射の発生について電磁界シミュレーションにより考察する。また、電波吸収の方法や電磁シールドの効果について検証する。

❖

第4章では、電磁界シミュレータでSPICEのサブサーキットを出力して、分布定数回路の $C$ や $L$ の物理的な意味を考えることで、高周波回路がより深く理解できることを学びました。本章では、シミュレーションで得られるビジュアルな情報である表面電流分布や電磁界分布、放射パターンを調べます。基板周辺の電磁界分布や、空間を移動する電磁界を調べることで、基板全体からの不要輻射の元を見つける手順を学びます。

### 5-1

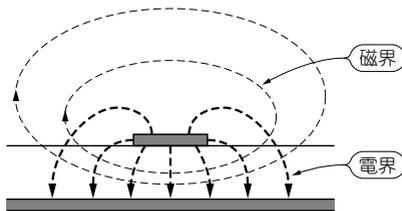
### 基板の配線上の電流

#### ● インピーダンス整合の必要性

CPUのクロック周波数が高くなるにつれて、従来の両面プリント配線板ではさまざまな問題が生じてきました。

第1章でも学んだように、もともと両面プリント配線板の配線パターンはインダクタンスと考えられるので、特性インピーダンスを一定に保つことができません。また、第3章でも学んだとおり、線路のインピーダンスと整合(マッチング)がとれていないと、そこで信号が反射してしまい、送出した信号の一部が戻ってしまいます。

そこで、配線の下にグラウンド・プレーンを置いた、いわゆるマイクロストリッ



例：20～110Ω    近似式の例：

$$Z_0 = 30 \ln \left[ 1 + \frac{4h}{W_0} \left\{ \frac{8h}{W_0} + \sqrt{\left( \frac{8h}{W_0} \right)^2 + \pi^2} \right\} \right]$$

$h$ ：誘電体厚

$W_0$ ：線幅（線厚ゼロの等価幅）

図5-1 マイクロストリップ線路 (MSL) の特性インピーダンス

プ線路 (MSL) の構造を使用するようになってきました。

このMSLの特性インピーダンスは、図5-1に示すように、線路幅 $W$ と誘電体の厚さ $h$ 、誘電体の比誘電率 $\epsilon_r$ によって決まりますから、接続するデバイスのインピーダンスと配線のインピーダンスを整合させる設計が理想的です。

## ● MSLのシミュレーション

図5-2は、直線のMSLの周りの電界ベクトルを示しています。このシミュレーションでは、配線の両端を50Ωの抵抗で終端していますが、MSLの寸法が50Ωの特性インピーダンスになるように設計されていれば、入力信号は出力側の負荷で気持ちよく100%消費されて、まったく反射のない理想的な伝送線路といえます。

有線のイーサネットLANの同軸ケーブルは、両端に50Ωの終端抵抗器がつけてあり、パケット・データが反射して戻ってこないようになっていますが、終端抵抗器がはずれるとデータ・パケットが両端で反射し合って、LAN上のコンピュータは、すべて動かなくなります。

## ● 基板のベタ・グラウンド面上の電流

ベタ・グラウンド (ベタ一面のグラウンド板) に注目すると、配線路の電流パターンを投影したように強い電流が流れていることがわかります。電流の向きは、線路とグラウンドでは逆になっており、グラウンドの電流をリターン電流ともいいます。

第2章でも述べたように、電磁界シミュレータでは導体の厚さがゼロの表面に分布する電流を扱うので、これを表面電流と呼び、単位はA/m (アンペア・パー・メートル) を使います。

この表面電流分布は、グラウンド面の両縁まではカラー・グラフィックスの水色がだんだん濃くなって、縁部では電流が極めて弱いことを示す濃い青色になっています。細かく調べると、縁に沿ったわずかな幅の領域では、むしろ水色がかった、より強い電流も認められることがあり、グラウンドの表面電流分布は一様ではない

# 6

第 6 章

## 差動線路を理解する

❖

基板上の配線にストリップ線路やデュアル・ストリップ線路の差動線路構造を用いることにより、クロストークや共通・モード・ノイズの発生を改善することができる。電磁界シミュレーションを行いながらそのメカニズムと問題点について詳細に検討する。マイクロストリップ線路と動作比較を行う。

❖

携帯電話の基板は新たな機能が追加されるたびに小型・薄型化が進み、配線もますます細くなっています。接近した複数の配線は、周波数によっては電磁的な結合（クロストーク）が強くなることは第3章で学びました。マイクロストリップ線路はベタ・グラウンドを共用するので、本質的にグラウンドを介して電磁結合しやすい構造とも言えます。そこでグラウンドを個別に分けた配線と信号線のペア線が使われるようになり、差動線路とも呼ばれていますが、その元祖は第1章に登場した平行2線です。

本章では、差動線路を電磁界シミュレーションすることで、なぜクロストークが改善されるのかを調べます。また、差動線路は万能薬なのか、いかなる場合も期待通りの効果が得られるのかも探ります。

### 6-1

### 差動線路とは

#### ● 差動線路の配線構造

差動伝送線路の配線構造は、図6-1に示すような3種類が代表的です。

また両面基板で図6-2のような互いに逆相の信号ペアを用いる線路を、差動（ディファレンシャル）ペア線路と呼んでいます。

第1章から第5章に登場したマイクロストリップ線路(MSL)は、帰路を共通のグ

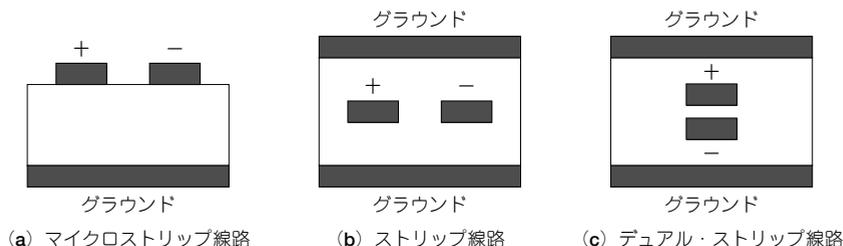


図6-1 差動線路の代表的な配線構造

十と一の記号は、電流が互いに逆向きであることを示す。

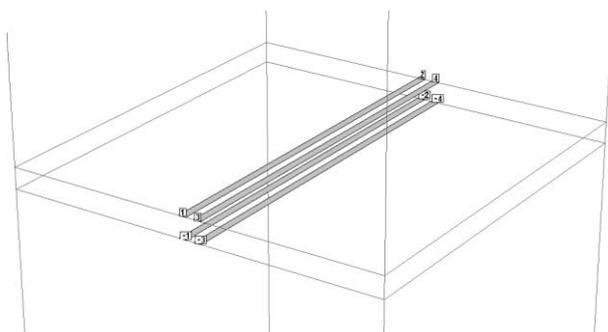


図6-2 差動(スタックト・ペア)線路のモデル (spl.son)  
両面基板で互いに逆相の信号ペアを配線。Sonnetによるモデル。

ラウンドとするシングルエンド信号伝送ですが、グラウンド幅が十分であれば往復の信号電流は振幅が等しくなります(向きは逆)。これをノーマル・モード電流と呼んでいますが、信号線の電流と帰路の電流から放射される電磁波は互いに打ち消し合うので、不要輻射は小さくなります。

ノーマル・モード電流はディファレンシャル・モード電流とも呼ばれていますが、差動(ディファレンシャル)線路系の電流と区別するときには、あえてノーマル・モード電流と呼んでいます。

## 6-2

## 差動線路は万能薬か

### ● 差動線路とクロストーク

差動線路はクロストークの低減に効果があるといわれています<sup>6-1)</sup>。そこで、まず図6-3のような同じ基板材料を用いた二つの線路をシミュレーションして、クロストークを比較してみます。

# 第 7 章

## 高周波の常識になったEMC設計



筐体の開口部から放出される、あるいは内部に侵入する電磁波が引き起こす電磁妨害、電磁干渉といった問題について、電磁界シミュレータを使いさまざまな角度から検討を行う。これらの知見からEMC設計の具体策を探る。また、近年利用が始まりその効果に注目が集まるノイズ抑制シートや電波吸収体についても調べる。



第6章では、差動線路のメリットについて学びましたが、配線のレイアウト次第では基板周囲の電磁界が空間に放射されることもあります。高周波回路基板を収める金属ケースは多くの周波数で共振します。デバイスに供給している電気エネルギーが元凶ですが、外部にある装置の電磁エネルギーが、ケースに開いている放熱用の隙間を通して入り込んで共振するということが十分考えられます。またこの隙間から電磁波が外部にもれて放射することから、出荷基準を満たさないという問題も起こっています。本章では、こういったEMI（電磁妨害または電磁干渉）の問題も含め、電磁界シミュレーションがEMC（電磁両立性）の評価や改善に果たす役割と可能性についても探ります。

### 7-1

### EMCって何？

#### ● EMCの定義

EMC (Electro Magnetic Compatibility：電磁両立性) は、IEEE (米国電気電子学会) の電気・電子の辞典には、「人工システムが、電磁環境を汚染し他に妨害を与えるような不要電磁エネルギーを放出することも、また同時に電磁環境の影響を受けることもなく、その性能を十分に発揮できる能力」と説明されています<sup>7-1)</sup>。

「EMCとは、電磁波に対する環境問題である」という、さらっとした説明もありま

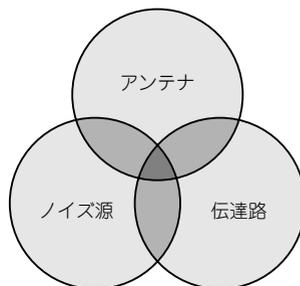


図7-1 EMCの三つの基本要素

す<sup>7-2)</sup>。また、ポット(魔法瓶)の熱との対比で、「電磁波(熱)を出さないものは、入りにくい、電磁波(熱)を入れないものからは、出にくい。これがコンパチビリティ(双方向性または両立性)だ!」という説明もあります<sup>7-3)</sup>。さらに、電磁波をよく受けるものは、反対に電磁波をよく出す。つまり、よい受信アンテナは、そのままよい送信アンテナとして使える<sup>7-4)</sup>。これがEMCというわけです。

高周波回路のEMC設計において重要なのは、図7-1に示す三つの要素です<sup>7-5)</sup>。基板上の高周波「ノイズ源」から、配線や他の導体を「伝達路」として、意図しない「アンテナ」に至った電磁エネルギーが放射されるというのがEMCの基本要素です。

EMIでは、回路の構成物が、それら本来の目的に反した働きをしてしまうところに問題があり、三つの要素をきれいに取り出して個別に対処できないという特徴があります。

小型・軽量化のニーズで、回路実装の集積度が非常に高くなりました。そして回路素子はより微弱な電力で動作するように設計されるため、隣接する電気機器から放射される電磁エネルギーの影響をますます受けやすくなっています。また電気・電子機器などの人工システムの用途は、いまやわれわれの生活になくてはならない重要なものとなり、心臓ペース・メーカの電磁波障害をはじめとして、電磁環境の問題が社会に及ぼす影響も大きくなっています。

このように電磁環境と人工システムが両立できる性質をEMC(電磁両立性)と呼び、人工システムの電磁環境に対するサセプティビリティ(周囲の電磁環境に対する感受性)を低下させて、イミュニティ(imunity:電気・電子機器の電磁環境に対する妨害排除能力)を高め、電磁障害を抑制することが極めて重要です。

## ● EMC問題のモデル

EMC問題では、信号源からの放射だけではなく、多層プリント回路の伝送線路や基板の端部の共振による放射、あるいは層間の開口部からの放射など、複雑な形

## 第 8 章

## すべての道はアンテナに通ず

❖

お手本のないアンテナを新たに設計するために電磁界シミュレータは必須である。電磁波の発見の歴史、その直後に始まったアンテナの歴史と基本形を学んだ後、パッチ・アンテナの電磁界シミュレーションを行う。また、アンテナの動作解析手法を学び、評価・検討を行い、設計の手助けとする。ノイズ放射のもとである「意図しないアンテナ」についても考え、EMC設計とのつながりを理解する。

❖

第7章では、EMC設計の意義を学び、電磁界シミュレーションでEMI問題の解決を図る事例を追体験しました。ノイズ放射のもとを捜すと、そこには意図しないアンテナがあり、ノイズを送信すると同時に、外部から到達する同じ周波数のノイズを受信するアンテナとしても働くことがわかりました。

アンテナといえば、テレビやFM放送受信用の八木アンテナを思い浮かべるかもしれません。また、ワイヤレス端末に使われている棒状のダイポール・アンテナやモノポール・アンテナもよく見かけます。本章では、究極の電磁界問題ともいえる「アンテナ」について学び、「高周波の世界」の心髄に迫ります。

## 8-1

## 空間という名の伝送線路

## ● 変位電流の発見

イギリス(スコットランド)の物理学者、ジェームス・クラーク・マクスウェル(1831~1879年)は、「電流によって電線の回りに磁界が生じる」ときに、電流が流れる電線を切り開いて、そこに2枚の導体板による平行平板コンデンサを接続したらどうなるか考えました。

第2章でも述べたように、彼は、特に電流が流れているときのコンデンサの周り

について考えました。極板の間は空間で電子の移動はないので電流は流れません。そうなると磁界がコンデンサの部分だけとぎれていることになりますが、それでは不自然です。そこでマクスウェルは、**図8-1**のように極板間にも電流と同じように磁界が発生するとしたのです。マクスウェルは、何も無い電極間にも「磁界を発生させる何か」があると考えました。

電流が流れている間は、コンデンサ内では電極に貯まる電荷が変化しています。そして電荷が貯まるにつれて、クーロンの発見した力が強くなり、電界の強さが変化しています。つまり、彼の捜していた「何か」とは、「電界の強さが変化する」ということでした。

このことから、磁界が発生するのは電流の周りだけではなく、「変化する電界」の周りにも磁界が発生することがわかったのです。

この仮想的な電流は、彼によって「変位電流」と名づけられ、導体内の電流(伝導電流)と一緒にこれを電流とすれば、電流はすべての場所で連続であるという方程式が生まれました。

## ● マクスウェルによる電磁波の予言

マクスウェルは、師と仰いだファラデーの電磁誘導「変化する磁界が電界を生む」

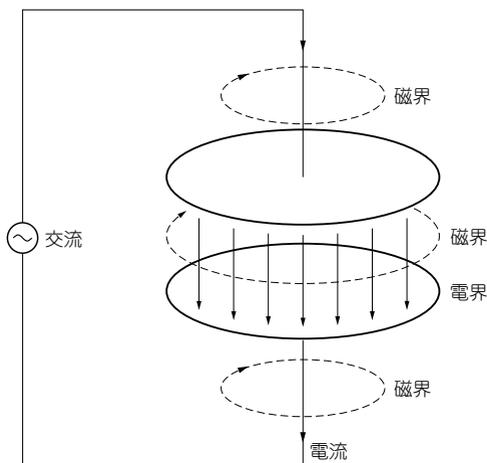


図8-1 変位電流の発見  
「変化する電界」のまわりにも磁界が発生することを発見した。

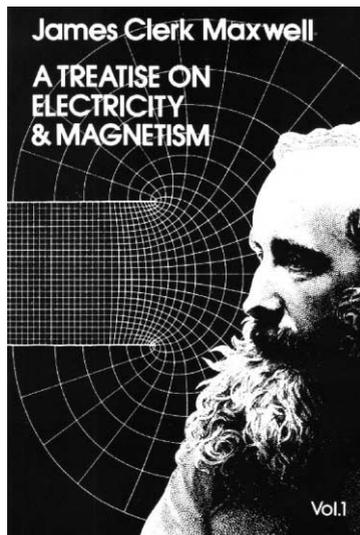


写真8-1 マクスウェルの肖像と電気力線  
[参考文献8-1]の表紙]

## 第9章

## 電磁界シミュレータのしくみと活用法

近年多くの電磁界シミュレータが発売され利用されているが、それらについて解析のしくみや機能の特徴、活用法についてまとめる。解析手法により、周波数領域の代表であるモーメント法と、時間領域のFDTD法やTLM法について整理し、特徴や活用方法のポイントを考える。加えて、精度や誤差についても触れる。

1980年代の後半に商用化された電磁界シミュレータは、いまや世界の多くの技術者が独自に開発しており、製品の種類は数えきれません。ソフトウェアは、いうまでもなく人間がつくるので、それぞれの製品には特徴があります。筆者らは、20年の間に何社かの開発者と個人的に親しくなり、製品のコンセプトや苦労話を聞くうちに、共通した使い方のポイントや計算精度、結果の妥当性チェックなど、多くの体験を独自にまとめるに至りました。

本章では、各章で使った電磁界シミュレータについて、そのしくみや活用のポイントをまとめます。また、いくつかの種類について、それぞれの特徴を比較しています。

## 9-1

## 電磁界シミュレータでできること

電磁界シミュレータは、基板や電気機器をCAD入力するだけで、マクスウェルの方程式を使って電磁界を高精度で解いてくれます。しかし答えの数値やグラフィックスが得られるだけなので、なぜそうなるのか？という理由は、本書のさまざまな事例に照らし合わせて考察することが重要です。

電磁界シミュレータで得られる結果を表9-1にまとめます。