

RF
DESIGN SERIES

ギガヘルツ時代の 電波解析教科書

マクスウェルの基本則から数式を用いて解き明かす

佐藤久明 [著]

Hisaaki Sato

超高速
データ通信や
ミリ波レーダ等の
設計・開発に

ご購入はこちら。

<https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/46/46321.html>

CQ出版社

見本

1 第 1 章

静電場

本章では、はじめに静電場の基本則であるクーロンの法則とガウスの法則について説明します。次に、静電場内ではエネルギー保存性が成立すること、エネルギーの考察からポテンシャルという便利な概念が得られ、これから電極間の容量が決まることを示します。また、ポテンシャルに関する方程式としてラプラスの方程式とポアソンの方程式を導きます。

電場は電荷(電子やイオン)から生じます。ほとんどの場合、実際の電場は時間と共に変化しますが、その時間的变化は少なく、時間的に一定、すなわち静的と見なすことができます。準静的と言う場合には、電場は時間とともに早く変化しますが、その空間的分布は静電場とほぼ同じです。静電場の概念は簡単であり、電磁場の記述に必要なベクトル計算に慣れるのに適しています。したがって、静電場と次章の静磁場から話を始めます。

静電場について定量的に述べる前に、その応用例を簡単に紹介します。電子銃やイオン銃は静的問題の良い例であり、これらを設計する場合に電場分布が重要になります。この電子銃は、陰極線オシロスコープ、マイクロ波電子管、電子顕微鏡、電子ビーム・リソグラフィ等に应用されています。

電子回路を構成する多くの部品の電場は、部品の大きさが波長に比べて小さい場合には静電場の式で表すことができます。したがって、容量器、インダクタ、抵抗器、それに半導体ダイオードやトランジスタ等はこのような準静的方法で解析できます。

マイクロ波およびミリ波の集積回路で使用するストリップ線路を含めて、伝送線路は静電場則を用いて計算できます。すなわち、後章で述べるように、伝送線路に沿って構造的変化がない一様系の場合、横断面内の電場はほぼ正確に静電場則どおりになります。

第2章

静磁場

本章では、はじめに静電場の基本則であるアンペアの法則について説明します。次に、回路素子の交差磁束を用いて、その回路のインダクタンスを定義します。また、磁場を計算するときの中間ステップとして、磁気ベクトル・ポテンシャルを導入し、これが満足する微分方程式を導きます。最後に静磁場内のエネルギーについて考え、回路素子の内部インダクタンスについて説明します。

電流と磁場の関係は、電荷と電場の関係より複雑です。このおもな理由は、磁場の源泉となる電流および磁場の測定に用いる電流素子が両方ともベクトル量であり、その方向を考慮に入れる必要があるからです。

動く電荷は電流となり、これが真空内や半導体内を進行するときには磁場はこれに力を及ぼします。そのため、テレビジョンの撮像管や電子顕微鏡、マイクロ波電子管などは、電子ビームの偏向や集束に磁場を使用しています。

コイルは高周波回路のインダクタンスを作るために使用され、その寸法が波長に比べて小さければ、磁場を電流から求めることができます。しかし、周波数が高い場合には容量が巻き線内で分布するため、電流分布は複雑になります。

2.1 静磁場の法則

2.1.1 アンペアの法則

(1) 磁場の概念

前章の静電場の場合と同様に、測定可能な量である力を用いて磁場を定義します。電流から発生する磁力を表す方法が重要なので、まず2つの電流素子の間に働く力から考察します。

3

第 3 章

動的電磁場の方程式

本章では、はじめに電磁場が時間とともに変化する場合の基本則であるマックスウェルの方程式について述べます。これは微分形と積分形があります。次に、この方程式の使用例として、平面波への適用、波動方程式やポインティングの定理の導入、電磁波の良導体内への貫通について調べます。最後に、電磁場が時間とともに変化する場合に重要になる遅延ポテンシャルについて述べます。

これまで静電場と静磁場に関するいろいろな法則について述べてきましたが、時間的に変化する電磁場ではこれらの静的な関係式によって書き表すことができない重要な動的効果が存在します。したがって、この時間的に変化する電磁場の問題を解くためには、さらに完全な公式化が必要になります。

磁場が時間とともに変化すると、ファラデーの法則によって電場が時間的および空間的に変化します。続いて起こる電場の変化は、変位電流を通して磁場を変化させ、以下同様に続きます。エネルギーで言えば、エネルギーは波が進むにつれて電気エネルギーと磁気エネルギーに形を変えます。

時間的に変化する電磁現象についての法則はマックスウェルの方程式として知られており、こうした現象を表すときに中心的な役割を果たします。

3.1 マックスウェルの方程式

3.1.1 ファラデーの法則

(1) 磁場が時間とともに変化するとき誘起される電圧

ファラデーは、回路に交差する磁場が時間と共に変化すると、ある電圧がその回路に誘起されることを実験的に見出しました。この電圧は、回路に交差する磁束の

見本

第4章

回路の電磁理論

本章では、はじめに集中定数回路に関するキルヒホフの電圧と電流の法則と電磁場理論との関係について説明します。次に、丸線内の表皮効果について調べ、回路素子の自己インダクタンスや相互インダクタンスの計算方法について述べます。最後に、回路の大きさが波長と同等の場合に生じる分布効果や遅延効果、回路からの電磁放射について調べます。

電気回路のほとんどの素子は電磁場の波長に比べると小さいので、電磁場は準静的であり、静的分布に近くなります。実際の多くの回路では分布効果が重要になりますが、ほとんどの場合、適当に選んだいくつかの集中素子を用いて表すことができます。しかし、伝送線路のような回路では、この分布効果が主要な効果になるので、これを最初から考慮に入れる必要があります。

前章までの静電場や静磁場についての解説では、インダクタンスや容量という集中定数の概念を導入しました。そして、周波数が高くなると、導体内の表皮効果のために抵抗やインダクタンスがどのように変化するかを述べました。本章では、回路と回路素子を電磁理論の観点から述べます。特に、遅延の概念を導入すると、回路の寸法が波長と同程度の場合には回路からエネルギーが放射され、簡単な形状に対しては放射電力量を計算することができます。

4.1 キルヒホフの法則

4.1.1 キルヒホフの電圧の法則

集中定数回路理論について復習するため、キルヒホフの電圧の法則から話を始めます。この法則は、回路の任意の閉ループを構成する個々の部分の電圧の代数和が

5

第 5 章

伝送線路

本章では、はじめに無損失伝送線路の解析方法を示し、いろいろな負荷状態における反射と透過、インピーダンス変換やアドミッタンス変換、定在波比の概念について説明します。また、伝送線路の図的解法であるスミス・チャートとそのいろいろな使用方法を述べます。最後に、線路が損失性の場合、共振する場合、一様でない場合について考えます。

時間と共に変化する磁場によってファラデーの法則による電場ができ、時間と共に変化する電場によって一般化したアンペアの法則による磁場ができます。この相互関係は、導体境界あるいは誘電体境界に沿っても起こり、このような境界によって導かれる波が伝搬します。この波は、電磁エネルギーを波源から負荷まで導く場合に非常に重要です。また、誘電体導波系や筒状導体の導波系、表面導波系も重要ですが、理解することが簡単で、それ自身が重要な系は2導体伝送線路です。

2導体伝送線路は分布回路と考えることができます。したがって、回路理論と電磁場理論の関係を示すために便利です。この伝送線路の解析結果から、エネルギーの伝搬、不連続部における反射、進行波と定在波および定在波の共振、位相速度および群速度といった概念や、損失が波の性質に及ぼす効果をより一般的な導波系に拡張することができます。

本章で述べる平行2線は伝送線路の代表的な例です。平行2線は、どの横断面でも電場は一方の導体から他方の導体に向い、これによってその面における導体間の電圧が決まります。磁場は導体を囲み、一方の導体の電流と他方の導体の等量反対方向の電流に関係します。電圧と電流の両方が、(もちろん、これらの元になる電場と磁場も)線路に沿う距離の関数です。本章では、以降の2つの節で分布回路理論から伝送線路方程式を導き、さらに回路理論と電磁場理論の関係について述べます。

第6章

平面波

本章では、はじめにマックスウェルの方程式を使用して平面波の性質を調べます。次に、平面波には電場ベクトルの向きに応じて直線偏波、円偏波、楕円偏波といういくつかの種類があることを示します。最後に、平面波が境界面に垂直に入射する場合を解析し、波動伝搬と伝送線路の類似性、誘電体が複数個ある場合に平面波の境界面からの反射について調べます。

平面波は、実際の波動に近い場合が多いのです。例えば、送信機から遠く離れた無線波は曲がりかほとんどなく、平面波に近似することができます。さらに複雑な電磁波は、平面波を重ねたものと見ることができ、この意味で平面波はすべての波動問題の基礎になります。この近似があてはまらない場合でも、本章で述べる波動の伝搬や反射についての考え方は、一般的な波動問題を理解する助けになります。このような問題に対して、前章で述べた伝送線路の解析方法は非常に役に立ちます。本章の後半では、平面波が媒質境界に垂直に入射する場合の反射の現象について述べます。

6.1 平面波の伝搬

6.1.1 無損失誘電体内の一様平面波

一様平面波については、マックスウェルの方程式を使用する例として第3章で述べました。ここでは、媒質の μ と ε が一定の場合について、平面波の性質をさらに詳しく述べます。一様平面波の場合、2つの方向、例えば x 方向と y 方向の変化は0と仮定し、残りの z 方向を伝搬方向に取ります。この場合、次に示すマックスウェルの方程式、

第7章

境界値問題

本章では、はじめにマックスウェルの方程式から出発して電場と磁場の方程式、ポテンシャルの方程式を導きます。次に、与えられた境界条件を満足するこれらの方程式の解法について述べます。この中に複素関数を用いた等角変換法や積の形の解を仮定した変数分離法があります。また、フーリエ級数やフーリエ積分、ベッセル関数やハンケル関数についても説明します。

これまでに、静的や動的な電磁場問題を解くいろいろな解法について述べてきました。引き続き波の伝搬や共振、放射といった問題について述べていきますが、問題の解を得る一般的な方法についてももう少し詳しく述べる必要があります。本章で述べる方法は、通常、静的問題に関して説明されていますが、この解法は電磁場が時間的に変化する場合にも有効です。

本章で述べる解法の大部分は、境界条件に適合するように微分方程式を解くことです。ある場合には電磁場分布そのものを求めることができますが、別の場合にはこの分布が他のパラメータを求めるための中間段階として使用されます。

本章で述べる一般的な方法の1つは、変数分離法です。これにより直交関数が得られ、これを重畳すると一般的な電磁場分布を表すことができます。この方法を述べるにあたって、円筒座標で必要になるベッセル関数について詳しく説明します。二つ目の方法は、等角変換法です。この方法は2次元問題に限定され、おもにラプラスの方程式を解く場合に用いられます。

第 8 章

導波管

本章では、はじめに一樣導波管内で成立する基礎方程式と波型について説明し、導波管内を伝わる波動の一般式を導きます。次に、各種導波管内の波を励振および受信する方法について説明します。また、導波管内の波動の一般的性質について、TEM波、TM波、ET波に分けて調べます。最後に、遮断周波数以下および遮断周波数付近で波がどのように変化するかを示します。

導波管とは、望む方向に波動が伝搬するように、その方向の横断面内に導電性境界を設ける構造のことです。本章では、この境界が主に管状の場合を扱いますが、境界の一部が無窮遠点にあたり開放されている一樣系もこの中に含めます。直流からミリ波までの広い周波数範囲にわたって2導体線路が用いられており、この中に平行平板導波系があります。周波数が非常に高くなると、この線路は絶縁基板上に置いた金属薄膜の形をしていることが多くなります。マイクロ波やミリ波の周波数範囲(およそ1G~100GHz)では、断面が矩形や円形の金属製導波管が使用されています。

一般に、導波管を解析する場合には電磁場分布に関心もたれますが、重要なことは伝搬定数が周波数と共にどのように変化するかということです。この伝搬定数から波動速度、位相速度、波の減衰や分散性を知ることができます。導波管の中で波動を励振する方法についても説明します。最後に、導波管内の波動の一般的性質を述べます。

第9章

特殊導波系

特殊導波系の中には、伝送路の誘電率とその周囲より高い誘電体導波系、平行平板内で波を径方向に伝える径方向伝送線路、楔形導波管あるいは扇形ホーン、傾斜平板を用いた導波系、2つの円錐を用いた2円錐導波系、矩形導波管の片面あるいは両面にリッジをつけたリッジ導波管、導線をらせん状に巻いたヘリックス、電磁場が系の表面付近に局在化する表面導波系、系の構造に周期性がある周期構造等があります。

まず、誘電体導波系は金属と誘電体の境界以外の境界によって波が導かれることを示しており、光通信用として重要な導波系です。次に、径方向導波系を円筒座標と球座標を用いて説明します。円筒座標を用いた径方向導波系は共振系において重要であり、球座標を用いた径方向導波系はアンテナを解析する場合に重要です。次に、断面がリッジ形の導波系はインピーダンスを整合させたり、ある与えられた横方向寸法に対して遮断周波数を低下させるために用いられています。最後に、位相速度が光速より遅い波を伝送させる導波系について述べます。これは、進行波管において波と電子ビームを相互作用させるためや、電磁エネルギーを表面付近に閉じこめるために使用されています。

本章で述べる導波系は、それ自身が重要であるばかりでなく、多くの重要な原理を示すものでもあります。ある場合には相互性の原理を用いて、電場と磁場を相互に交換することにより、1つの問題の解を別の問題の解として使用する方法を説明します。導波系の遮断条件は横方向の共振条件と同じなので、このことから形状が不規則な導波系を解析するためのいろいろな近似的解法が得られます。周期系の動作を理解するためには、空間高調波が重要になります。

第10章

空洞共振器

◆

本章では、はじめに形状が簡単な共振器として直方体共振器，円筒共振器，球共振器，それにマイクロ波回路やミリ波回路で使用するストリップ共振器について述べます．次に，電子デバイスでよく使用されている狭間隙共振器について Q の測定法と振動法を説明します．最後に，その他の共振器として誘電体共振器を取り上げます．

◆

空洞共振器には，容量器とインダクタを組み合わせた集中素子型や，伝送線路の一部と見られる分布型があります．集中素子型は容量器に電気エネルギーを蓄積し，インダクタに磁気エネルギーを蓄積します．その共振周波数において， $1/4$ サイクルごとにインダクタと容量器の間でエネルギーが交換されます．分布型も $1/4$ サイクルごとに電気エネルギーと磁気エネルギーの間でエネルギーが交換されますが，分布型の場合にはそれぞれのエネルギー型に対して別の部品があるのではなく，同じ領域の中に両方のエネルギーが時間を変えて蓄積されます．

分布共振回路は，伝送線路内の前進波と後進波が加え合わさり生じる定在波の共振を利用するものです．したがって，この回路寸法は波長と同程度になります．いくつかの金属共振器では回路の先端が短絡され，このため，これは定在波を通す伝送線路の一部と見ることができます．マイクロ波回路やミリ波回路で使用するマイクロストリップ線路は，小形軽量の伝送型の共振構造を構成しています．また，誘電体丸棒の伝送構造(第9章9.1節)の一部を用いて，誘電体の円筒共振器を作ることができます．

第11章

マイクロ波回路網

はじめにマイクロ波回路網の公式化について説明します。次に、もっとも簡単な2端子回路網についてその等価回路、回路網定数とその特定方法を求め、一般的な N 端子回路網についてその S パラメータ表示法、方向性結合機器等を例にしてその S パラメータを求めます。最後に、導波系回路網の周波数特性を求めるため、その等価回路について述べ、その回路のパラメータの解析例を示します。

これまで、伝送線路、導波系、共振器といった個々の部分について考えてきました。これらは実際の系の中では連結された状態で使用されるので、このような連結体を取り扱う場合には回路網理論の考え方をを用いるのが便利です。

特に、マイクロ波回路網は、その入力端子と出力端子が導波系型の誘電体領域であると定義します。この例として、伝送線路に結合した共振器〔図 11.1(a)〕、階段状の矩形導波管〔図 11.1(b)〕、マイクロストリップ線路のT形回路〔図 11.1(c)〕、マジック・ティ〔図 11.1(d)〕などがあります。これらは、それぞれ1個、2個、3個、4個の導波系端子を持つマイクロ波回路網です。マイクロ波回路網を考える場合、ある導波系にいろいろな負荷条件を与えたときに別の導波系内の主要モードの動作にのみ関心があり、不連続部付近の電磁場の精密解には関心がないものとします。

マイクロ波回路網は、いくつかの等価回路で表すことができます。この中の電磁場の詳細については記述しません。例えば、図 11.1(b)のマイクロ波2端子回路網は、集中素子の2端子回路網と同様に、T形回路網あるいは π 形回路網で表すことができます。マイクロ波回路網は多くの公式化が可能であり、これらは波動系なのでもっとも便利な公式は、各導波系の中の入射波と反射波を関係づけるものです。これらの公式化については、次節以降で詳しく述べます。

上の例のような素子の組み合わせも、初めに述べた定義を満足するマイクロ波回路網です。本章の目的の一つは、個々の部分の回路網パラメータが既知の場合に、

第12章

アンテナ

はじめにアンテナ電流を用いて電磁場や放射電力を作り出すアンテナを述べます。この中にダイポール・アンテナ、V形アンテナなどがあります。次に、開口内の電磁場から電磁放射するアンテナを考えます。この中に電磁ホーン、共振スロット・アンテナなどがあります。最後に複数のアンテナが一緒に動作するアレー・アンテナ、集積回路用の集積アンテナについて説明します。

電磁放射の一つの物理的イメージは、回路の寸法が波長と同程度の場合、波が回路の一部から他部へ進むときの遅延効果により位相のずれが生じ、回路が短い場合には単に無効性であった誘導効果に実数部が発生することです。この実数部は、回路から放射する電力を表します。この観点から、アンテナとはその大きさが波長と同程度であり、遅延効果が最大になるように設計されたものと言えます。

いくつかのアンテナ(ホーン・アンテナ、パラボラ反射器など)には大きな開口があり、この開口内で電磁場を励振するようにしています。これらに対してはホイヘンスの原理を使用するのが適当であり、この場合、開口内の波の各要素は空間内の波動の源泉になるものと考えます。

アンテナ系を設計する場合、その電場分布、全放射電力、バンド幅、放射効率(投入電力に対する放射電力の比率)といった知識が必要になります。本章では、これらの解析方法について述べます。

本章の大部分は、放射アンテナすなわち送信アンテナに関するものですが、この結果は相互性の原理を用いて受信アンテナにも適用することができます。

ISBN978-4-7898-4632-5

C3055 ¥7200E

CQ出版社

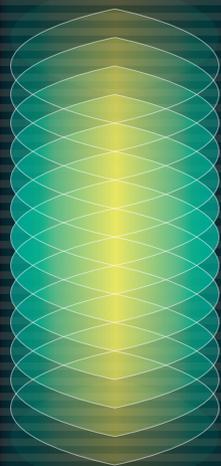
定価：本体7,200円(税別)



9784789846325



1923055072008



電磁波を利用したRFデバイスは、各種通信機器や放送機器をはじめとして、市民生活では携帯電話や電子レンジ、科学分野では宇宙開発やミリ波レーダなど、用途が多岐に広がっています。特に最近では、自動/無人運転技術への応用にも注目が集まっています。

本書は、マクスウェルの方程式など、各種の定理や法則を使ってRF伝送路内での電波現象を解説しました。プリント基板内や空中を伝わるRF信号のふるまいを数学的、物理的に理解することができます。研究、開発に携わる多くのRF技術者にとって一読しておきたい手引書です。理解を深めるため、各解説には関連した練習問題を多数掲載しました。

見本