

## は し が き

---

本書は、電磁波動がアンテナからどのように放射あるいは励起され、これが大気中のように開かれた3次元空間、あるいは導波管で代表されるような1次元または2次元の導波作用をもついわゆる伝送路によってどのように伝搬、伝送されるかを理解し、これを実際に応用するために必要な基礎について記述している。主として大学の電気系学部学生のための教科書として書かれたものであるが、大学院の学生や一般技術者が基礎固めのための学習書、参考書としても使用できると考えている。本書を読むための予備的学力としてはベクトル解析を数学的基礎としたマクスウェルの電磁気学を想定しているが、これについては本書においても復習の意味を含め第1章の電波伝送工学の基礎においてある程度詳しく記述している。その他の数学的基礎については、その都度本文中あるいは付録に記述してあるので特別に必要なはない。また、数学的にやや高度と思われる箇所は講義時間数や学生個々の学力に応じて取捨選択し、前に進んでかまわない。

内容としては第1章の電波伝送工学の基礎の後、第2章ではアンテナからの放射の基礎理論とアンテナの基礎について述べ、第3章では伝送路に沿う導波伝送の理論とその応用の基礎、第4章では自由空間、大地上、大気中における開いた空間での電波伝送と伝搬の基礎的事項について述べている。

繰返しになるが、本書は個々の題目について実的な結果を提供するのが目的ではない。基礎的な原理や概念を明らかにし、種々の現象を定量的に把握し、応用するための基礎を身につけることに主眼を置いている。そのために、理論に重点が置かれ、時としてかなり数学的にならざるをえなかったが、これは止むをえなかったと考えている。しかし、それらの物理的意義や本質的な考え方についての記述には十分意を用いたつもりである。

終りに、著者らが永く御指導を賜り、本書の執筆についても深く影響を受けた東北大学教授虫明康人、西田茂穂の両先生に深謝の意を表すものである。また、コロナ社編集部中俣寛氏、山口陽氏ならびに研究室の佐藤せつ子嬢には編集、原稿整理、校正上大変お世話になった。あわせて厚く感謝の意を表す次第である。

1981 年 1 月

著 者

# 目 次



## 電波伝送工学の基礎

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 1.1   | マクスウェルの方程式と境界条件      | 1  |
| 1.1.1 | 連 続 の 式              | 1  |
| 1.1.2 | マクスウェルの方程式           | 2  |
| 1.1.3 | マクスウェルの方程式の物理的意味     | 3  |
| 1.1.4 | 境 界 条 件              | 5  |
| 1.1.5 | 電磁エネルギーとポインティングベクトル  | 7  |
| 1.2   | マクスウェルの方程式の解法        | 9  |
| 1.2.1 | ベクトル波動方程式            | 9  |
| 1.2.2 | ポテンシャルとヘルツベクトル       | 11 |
| 1.2.3 | 平 面 波                | 15 |
| 1.2.4 | ベクトル波動関数             | 21 |
| 1.2.5 | 源がある場合のマクスウェルの方程式の解法 | 27 |
| 1.3   | 電磁界の積分解              | 32 |
| 1.3.1 | 放 射 条 件              | 32 |
| 1.3.2 | 電磁界の積分解              | 33 |
| 1.3.3 | ポテンシャルとヘルツベクトルの積分解   | 35 |
| 1.3.4 | 電磁界の可逆定理             | 38 |
|       | 演 習 問 題              | 39 |



## 電波の放射とアンテナ

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 2.1   | 電磁流源からの放射             | 41 |
| 2.1.1 | 素電流（電気ダイポール）からの放射     | 41 |
| 2.1.2 | 微小ループ電流（磁気ダイポール）からの放射 | 43 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 2.1.3 | 遠方放射界 .....                  | 44  |
| 2.1.4 | 電磁界の双対性 .....                | 45  |
| 2.2   | 開口面電磁界分布からの放射 .....          | 50  |
| 2.2.1 | ホイゲンス・フレネルの原理 .....          | 50  |
| 2.2.2 | 大きな有限開口面からの放射 .....          | 51  |
| 2.2.3 | フレネル領域とフラウンホーファー領域 .....     | 54  |
| 2.3   | 放射に関する諸定数・関数 .....           | 57  |
| 2.3.1 | 指向性と指向性利得 .....              | 57  |
| 2.3.2 | アンテナのインピーダンス .....           | 60  |
| 2.3.3 | アンテナの利得 .....                | 64  |
| 2.3.4 | ベクトル実効長, その他のアンテナパラメータ ..... | 66  |
| 2.3.5 | 散乱断面積とレーダ方程式 .....           | 75  |
| 2.4   | アンテナ素子 .....                 | 79  |
| 2.4.1 | 柱状アンテナ .....                 | 79  |
| 2.4.2 | 円形ループアンテナ .....              | 88  |
| 2.4.3 | 進行波形アンテナ .....               | 91  |
| 2.4.4 | 八木・宇田アンテナ .....              | 96  |
| 2.4.5 | 板状アンテナ .....                 | 99  |
| 2.4.6 | 開口面アンテナ .....                | 102 |
| 2.5   | アンテナアレイ .....                | 111 |
| 2.5.1 | 等間隔均一直線アレイ .....             | 111 |
| 2.5.2 | 不均一・不等間隔直線アレイ .....          | 114 |
| 2.5.3 | アレイアンテナの利得 .....             | 115 |
| 2.5.4 | アレイアンテナの指向性合成 .....          | 120 |
| 2.5.5 | フェイズドアレイ .....               | 125 |
| 2.5.6 | アダプティブアレイアンテナ .....          | 128 |
| 2.5.7 | 電波天文用アレイアンテナ .....           | 129 |
|       | 演習問題 .....                   | 131 |



## 電 波 伝 送 路

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 3.1   | 電波伝送路の基礎 .....    | 137 |
| 3.1.1 | 伝送路解析の数学的基礎 ..... | 138 |
| 3.1.2 | 伝送波の分類 .....      | 139 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 3.2   | TEM 波伝送路                 | 140 |
| 3.2.1 | TEM 波伝送路の電磁界             | 140 |
| 3.2.2 | TEM 波伝送路の基本式と一次定数        | 141 |
| 3.2.3 | 基本式の解と二次定数               | 142 |
| 3.2.4 | TEM 波伝送路の諸特性             | 144 |
| 3.2.5 | ストリップ線路                  | 148 |
| 3.3   | マイクロ波伝送路                 | 150 |
| 3.3.1 | 方形導波管                    | 150 |
| 3.3.2 | 円形導波管                    | 154 |
| 3.3.3 | 導波管の伝送電力とモードの直交性         | 157 |
| 3.3.4 | 導波管の減衰定数                 | 159 |
| 3.3.5 | 空洞共振器                    | 162 |
| 3.4   | 導波管の接続と結合                | 165 |
| 3.4.1 | モード電圧, モード電流, モードインピーダンス | 165 |
| 3.4.2 | 導波管の接続と散乱行列              | 168 |
| 3.4.3 | 結合伝送路                    | 173 |
| 3.5   | 表面波と漏れ波                  | 176 |
| 3.5.1 | 誘電体スラブ伝送路と表面波            | 176 |
| 3.5.2 | 中空伝送路と漏れ波                | 180 |
| 3.5.3 | 周期構造に沿う電磁波               | 183 |
| 3.6   | ビーム導波路                   | 186 |
| 3.6.1 | ビーム導波路の概略                | 186 |
| 3.6.2 | ビームモードとその電磁界             | 187 |
| 3.6.3 | ビーム導波路の諸性質               | 189 |
| 3.7   | 光波伝送路                    | 191 |
| 3.7.1 | 光ファイバの概略                 | 191 |
| 3.7.2 | ステップインデックス形光ファイバの特性方程式   | 192 |
| 3.7.3 | 光ファイバの伝送モード              | 195 |
| 3.7.4 | しゃ断周波数                   | 197 |
| 3.7.5 | 伝送モードの電磁界                | 198 |
| 3.8   | マイクロ波電力伝送路               | 200 |
| 3.8.1 | 概説                       | 200 |
| 3.8.2 | 円形導波管の電力容量               | 201 |
|       | 演習問題                     | 204 |



## 電波の空間伝送

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 4.1 自由空間中の伝送 .....           | 206 |
| 4.1.1 基本伝送損 .....            | 206 |
| 4.1.2 フレネル領域内の電磁波電力伝送 .....  | 207 |
| 4.2 大地上の伝搬 .....             | 210 |
| 4.2.1 平面波の反射と屈折 .....        | 210 |
| 4.2.2 電波の回折 .....            | 212 |
| 4.2.3 ツェンネックの表面波 .....       | 215 |
| 4.2.4 地上波の伝搬 .....           | 217 |
| 4.3 大気中の伝搬 .....             | 221 |
| 4.3.1 層状不均質大気中の伝搬理論 .....    | 221 |
| 4.3.2 修正屈折率と地球等価半径 .....     | 228 |
| 4.3.3 ダクト伝搬 .....            | 231 |
| 4.3.4 大気中伝搬の減衰 .....         | 233 |
| 4.4 電離大気中の伝搬 .....           | 235 |
| 4.4.1 磁気プラズマの誘電率 .....       | 235 |
| 4.4.2 磁気プラズマ中の平面波の伝搬 .....   | 237 |
| 4.5 電波の不規則伝搬 .....           | 241 |
| 4.5.1 不規則変動の種類 .....         | 241 |
| 4.5.2 大気の乱れによる伝搬の不規則変動 ..... | 242 |
| 4.5.3 不規則変動の統計的表示 .....      | 245 |
| 4.5.4 ダイバーシティ受信 .....        | 250 |
| 演習問題 .....                   | 251 |

## 付 録

## 演習問題解答

## 参 考 文 献

## 索 引



# 電波伝送工学の基礎

## 1.1 マクスウェルの方程式と境界条件

### 1.1.1 連続の式

電磁界 (electromagnetic field) の基本法則の一つに、電荷 (electric charge) の不生不滅を表す電荷の保存則がある。この法則を数学的に表現するために、図 1.1 のように任意の閉曲面  $S$  で囲まれた領域  $V$  の内部に密度  $\rho(\mathbf{r})$  [C/m<sup>3</sup>] ( $\mathbf{r}$  は位置ベクトル) の電荷分布があり、そこから密度  $\mathbf{J}$  [A/m<sup>2</sup>] の電流 (electric current) が  $S$  を通って外部に流れ出ている場合を考える。電荷の保存則から、流出する全電流は  $V$  に含まれる全電荷の時間的減少率に等しいから、つぎの関係式が成り立つ。

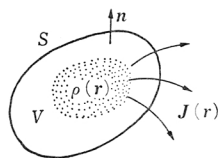


図 1.1 電荷の保存則

$$\int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = - \frac{d}{dt} \int_V \rho dv \quad (1.1)$$

ただし、 $\mathbf{n}$  は  $S$  の外向き単位法線ベクトルである。

ガウスの定理 (付録参照) を使って、上式の左辺を体積分に変形すれば次式が得られる。

$$\int_V \left( \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dv = 0 \quad (1.2)$$

この式は任意の領域  $V$  で成り立つから、被積分関数はつねに零でなければな

らず，結局次式が導かれる．

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.3)$$

これは電荷の保存則を微分形式で表したもので，流体力学からの類推で連続の式 (equation of continuity) とよばれる．連続の式は次項で述べるマクスウェルの方程式と共に電磁気学の基礎となる重要な式の一つである．

### 1.1.2 マクスウェルの方程式

電界強度 (electric field strength) を  $\mathbf{E}$  [V/m]，磁界強度 (magnetic field strength) を  $\mathbf{H}$  [AT/m]，電気変位 (electric displacement) を  $\mathbf{D}$  [C/m<sup>2</sup>]，磁束密度 (magnetic flux density) を  $\mathbf{B}$  [T] とすれば，マクスウェル (Maxwell) の方程式は

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (1.5)$$

と表される．上式の発散をとり，ベクトル恒等式  $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{a} = 0$  と連続の式を使えば，次式が得られる．

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D} - \rho) = 0 \quad (1.7)$$

これらの式は  $\nabla \cdot \mathbf{B}$  と  $\nabla \cdot \mathbf{D} - \rho$  が時間的に不変な一定値であることを示すが，電磁界の初期条件を考えるとその値は零でなければならない．したがって，次式が成り立つ．

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.9)$$

この2式はマクスウェルの方程式の一部としてこれに含めることもあるが，式 (1.4)，(1.5) と連続の式から誘導できる点に注目すべきである．

マクスウェルの方程式は独立な二つの式からなる連立微分方程式で，五つの未知関数  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{J}$  を含むから，これが解けるためには未知関数の間に

さらに三つの関係式が必要である。最も簡単な場合として、媒質が線形(linear)で等方性 (isotropic) のときには、関係式

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}, \quad \mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} \quad (1.10)$$

が成り立つ。ただし、 $\epsilon$  [F/m],  $\mu$  [H/m],  $\sigma$  [S/m] は媒質の誘電率 (dielectric constant), 透磁率 (permeability), 導電率 (electric conductivity) であり,  $\mathbf{J}_0$  はなんらかの原因で外部から印加された一次電流源である。式 (1.10) は構成方程式 (constitutive equation) あるいは媒質方程式とよばれる。非線形媒質では  $\epsilon, \mu, \sigma$  が  $\mathbf{E}, \mathbf{B}$  の関数となり, 構成方程式は複雑になる。また, 非等方性 (異方性) 媒質では媒質定数  $\epsilon, \mu, \sigma$  などが2階のテンソル量となる。結晶あるいは静磁界が印加されたプラズマやフェライトがその例である。

荷電粒子の運動を伴うような場合には, 以上の諸式のほかに, 電磁力を表す式が必要である。運動する荷電粒子に作用する力は, 粒子の速度が小さい非相対論の範囲でつぎのように与えられる。

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.11)$$

ただし,  $q$  は粒子の電荷,  $\mathbf{v}$  はその速度であり, 力  $\mathbf{F}$  はローレンツ力 (Lorentz's force) とよばれる。

### 1.1.3 マクスウェルの方程式の物理的意味

マクスウェルの方程式を積分の形に書きかえると物理的意味の把握が容易になる。図 1.2 のように, 閉曲線  $C$  とそれで囲まれた曲面  $S$  を考える。  $C$  をまわる向きを定め, その向きに右ねじをまわしたとき, ねじの進む向きに  $S$  の単位法線ベクトル  $\mathbf{n}$  をとる (右ねじの法則)。

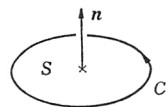


図 1.2 閉曲線  $C$  で囲まれた曲面  $S$

まず, 式 (1.4) を  $S$  の上で面積分して次式を得る。

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{n} dS = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1.12)$$

左辺をストークス (Stokes) の定理 (付録参照) で線積分に変形すれば

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1.13)$$

となる。ただし、 $\mathbf{ds}$  は閉曲線  $C$  に沿う線素ベクトルである。電界  $\mathbf{E}$  の線積分は閉曲線  $C$  に沿う起電力  $V[\text{V}]$  であり、磁束密度  $\mathbf{B}$  の面積分は曲面  $S$  を貫く磁束  $\Phi[\text{Wb}]$  に等しい。したがって、式 (1.13) は

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.14)$$

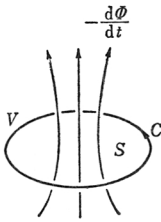


図 1.3 ファラデーの  
電磁誘導の法則

となり、これはよく知られたファラデーの電磁誘導の法則 (Faraday's law of induction) である (図 1.3)。すなわち、マクスウェルの方程式 (1.4) はファラデーの法則を微分形式で表現したものにはかならない。

同様に式 (1.5) を曲面  $S$  にわたって面積分し、ストークスの定理を使って変形すればつぎのようになる。

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1.15)$$

左辺の線積分は閉曲線  $C$  に沿う起磁力  $F[\text{AT}]$  であり、右辺の面積分はそれぞれ曲面  $S$  を貫く電流  $I[\text{A}]$  と誘電束  $\Psi[\text{C}]$  である。これより、式 (1.15) は

$$F = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.16)$$

となり、導電流のほかにも誘電束の時間的変化率も磁気作用をもつことがわか

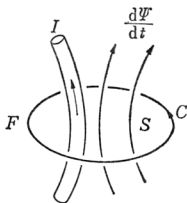


図 1.4 アンペア-マクスウェルの法則

る。誘電束の時間的変化率は変位電流 (displacement current) とよばれ、マクスウェルによって導入されたものである。これにより、マクスウェルは直流電流の磁気作用を表すアンペアの法則を拡張し、時間的に変化する電磁界にも適用できるようにした。この意味で式 (1.16) をアンペア-マクスウェルの法則とよぶ (図 1.4)。マクスウェルの方程式 (1.5) はこの法則を

微分形式で表したものである。

このように、マクスウェルの方程式は電磁気学の基本現象であるファラデー

の法則とアンペール-マクスウェルの法則を数学的に表現したものである。時間的に変化する電界は変位電流となって磁界を誘起し、その磁界はファラデーの法則に従って電界を誘起する。この過程を繰り返して、電磁界が波動として伝搬するのであるが、その際、変位電流が中心的な役割を果たす。変位電流は電磁気学における最も重要な電気量の一つである。

#### 1.1.4 境界条件

二つの異なる媒質が不連続的に接している境界面で電磁界が満足すべき条件について説明する。このような条件を電磁界の境界条件 (boundary condition) という。

いま、図 1.5 のように媒質定数が  $\varepsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  の媒質 (I) と  $\varepsilon_2, \mu_2, \sigma_2$  の媒質 (II) の境界面にまたがって辺の長さが  $\Delta l, \Delta t$  の方形閉路  $C$  をとる。閉路  $C$  で囲まれた面  $S$  は境界面に垂直で、その単位法線ベクトルを  $\mathbf{n}_0$  とする。また、媒質 (II) から媒質 (I) に向かう境界面の単位法線ベクトルを  $\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{n}_0$  と  $\mathbf{n}$  に直交する単位接線ベクトルを  $\boldsymbol{\tau}$  とする。

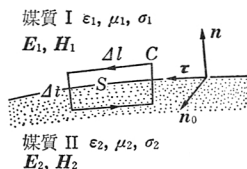


図 1.5 境界面にまたがった微小方形閉路  $C$

マクスウェルの方程式を  $S$  の上で面積分すれば次式が得られる。

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} + \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n}_0 dS = 0 \quad (1.17)$$

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} - \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot \mathbf{n}_0 dS = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}_0 dS \quad (1.18)$$

方形閉路が十分小さいとすれば、上式は

$$(\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) \cdot \boldsymbol{\tau} \Delta l + O(\Delta t) + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n}_0 \Delta l \Delta t = 0 \quad (1.19)$$

$$(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) \cdot \boldsymbol{\tau} \Delta l + O(\Delta t) - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot \mathbf{n}_0 \Delta l \Delta t = \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}_0 \Delta l \Delta t \quad (1.20)$$

と書ける。ただし、 $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$  および  $\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$  はそれぞれ媒質 (I), (II) の電磁界である。また、 $O(\Delta t)$  は  $\Delta t$  と同程度の微小量を意味し、長さ  $\Delta t$  の辺からの寄与を表す。電磁界は無限に大きな値をとることはないから、極限  $\Delta t \rightarrow 0$

で、式 (1.19), (1.20) の左辺第 2 項, 第 3 項は零となる. しかし、式 (1.20) の右辺については、媒質の一方が完全導体であるような場合、電流がその表面に集中して流れるため、極限值

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \mathbf{J} \Delta t = \mathbf{K} \quad (1.21)$$

は零とはならない.  $\mathbf{K}$  [A/m] は面電流密度 (surface current density) とよばれる.

このようにして、極限  $\Delta t \rightarrow 0$  で、式 (1.19), (1.20) は

$$(\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (1.22)$$

$$(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) \cdot \boldsymbol{\tau} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{n}_0 \quad (1.23)$$

となる. 上式に  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{n}_0 \times \mathbf{n}$  を代入して変形すれば

$$\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (1.24)$$

$$\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{K} \quad (1.25)$$

が得られる. 閉路  $C$  の向きは境界面に沿って任意にとれるから、 $\mathbf{n}_0$  の向きも任意で、結局つぎの境界条件が導かれる.

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (1.26)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{K} \quad (1.27)$$

これは異なる 2 種の媒質が接する境界面における電界と磁界の接線成分の関係を表しているが、特に面電流がない場合には電界、磁界の接線成分は境界面で連続となる. また、媒質 (II) が完全導体のときは、 $\mathbf{E}_2 = \mathbf{H}_2 = 0$  であるから、次式が成り立つ.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}_1 = 0 \quad (1.28)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{K} \quad (1.29)$$

境界条件としては式 (1.26), (1.27) で十分であるが、式 (1.8), (1.9) からもしほかの形の条件式を導くことができる. そのため、図 1.6 のように境界面をはさんで断面積  $\Delta S$ 、厚さ  $\Delta h$  の円板状の領域を考え、その内部にわたって式 (1.8), (1.9) を体積分する. 体積分をガウスの定理で面積分に変換し、円板が十分小さいとして計算すれば、

$$(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \cdot \mathbf{n} \Delta S + O(\Delta h) = 0 \quad (1.30)$$

【A】

アイコナール 222  
 —の式 222, 223  
 アンペア・マクスウェルの  
 法則 4  
 アンテナ 41  
 アダプティブ—— 128  
 ベバレージ—— 91  
 ブロードサイド形—— 92  
 エンドファイア形—— 92  
 円形開口面—— 104  
 円形ループ—— 88  
 グレゴリアン—— 108  
 半波長—— 64  
 反射鏡—— 107  
 ヘリカル—— 92  
 方形開口面—— 103  
 ホーンリフレクタ—— 108  
 複反射鏡—— 108  
 1 波長ループ—— 90  
 開口面—— 102  
 カセグレン—— 108  
 漏れ波—— 92, 94  
 折返し—— 134  
 レンズ—— 102, 109  
 リフレクタ—— 102, 107  
 ロッド—— 92  
 スパイラル—— 102  
 スロット—— 92, 99  
 周波数に無関係な—— 102  
 対数周期—— 101  
 定インピーダンス—— 109  
 等方性—— 64  
 超広帯域—— 102  
 ウェーブ—— 91

八木・宇田—— 91, 96  
 自己補対—— 101  
 —の  $G/T$  75  
 —の効率 65  
 —の  $Q$  119  
 —の利得 64  
 —の SN 比 73, 75  
 —の実効長 67  
 —の実効雑音温度 74  
 —温度 74  
 —立体角 75  
 アンテナアレイ 111  
 アプルトン・ハートレーの公式 238  
 アレイアンテナ 115  
 レロトディレクティブ—— 129

【B】

Booker の関係式 100  
 バビネの関係式 131  
 媒質方程式 3  
 バンアッタアレイ 129  
 ベクトル波動関数 22  
 ベクトルモード関数 165  
 ベクトルポテンシャル 11  
 ベクトル実効長 66  
 ベッセル関数 23  
 微分散乱断面積 76  
 ビーム導波路 187, 208  
 ビーム波 187  
 ビーム角 75  
 ビーム効率 75  
 ビームウェスト 189  
 ボアサイト 58  
 ボルン近似 243

部分領域法 86  
 分布定数線路 142  
 —の一次定数 142  
 —の二次定数 144  
 ブロードサイドアレイ 114  
 ブロッキング 109  
 ブリルアン図 183  
 ブルースター角 211

【D】

$\delta$  関数 27, 264  
 $D/U$  比 128  
 dB 正規分布 246  
 だ円偏波 58  
 ダイアデックグリーン関数 27, 32  
 自由空間の—— 79  
 ダイバーシチ 250  
 第 1 種ルジャンドル陪関数 25  
 第 2 種球ハンケル関数 26  
 ダクト伝搬 232  
 電圧定在波比 145  
 電界パターン 57  
 電荷の保存則 1  
 電気分極ポテンシャル 15  
 電気ダイポール 41  
 電気形ポテンシャル 36  
 電波望遠鏡 129  
 電波干渉計 129  
 伝搬定数 17, 143  
 電離圏 235  
 電力パターン 57  
 電力利得 64  
 電力容量 200  
 伝送波 137  
 伝送路 137

## 電磁界に関する双対性

43, 46, 99

導電率 3

導波器 97

動作インピーダンス 127

動作利得 66

動作素子指向性 127

同次ベクトル波動方程式 10

同次ベクトルヘルムホルツ

方程式 11

## 【E】

EH モード 196

EMF 法 83

E面分岐 170

ERP 68

エンドファイアアレイ 114

円偏波 20, 238

円形導波管 154

遠方放射界 44

遠方界 44

遠方領域 54, 56

エネルギー密度 8

## 【F】

ファブリー・ペロー共振器 208

ファラデーの電磁誘導の法則

4

フェイズドアレイ 125

フェルマの原理 223

フェージング 241

ダクト形—— 241

減衰性—— 241

偏波—— 242

回折—— 241

干渉—— 241

K形—— 230, 241

吸収—— 241

選択性—— 242

シンチレーション—— 241

周期性—— 242

跳躍—— 242

——幅 249

——率 249

## 【G】

ガラーキン法 85, 86

ガウスビーム 189

ガウス分布 189, 245

減衰定数 18, 144

偶モード 177

群速度 19

グレーチングローブ 113, 127

グリーン関数の可逆性 28

グリーンの定理 51

## 【H】

Hallén の積分方程式 81

Hansen・Woodyard の条件  
94, 119

HE モード 196

H面分岐 170

波動ベクトル 17

波動インピーダンス 17

配列係数 112

ハイトパターン 221

反射係数 144

反射器 97

反射損 66

半値幅 58

半値角 58

波数ベクトル 17

発散係数 220

平均電力容量 200

平面波 15

変分法 82

変位電流 4

偏波 20

偏波効率 71

ヘルツベクトル 14

電気形—— 15

磁気形—— 15

光ファイバ 191

グレーデッド

インデックス形—— 192

ステップイン

デックス形—— 192

非同次ベクトル波動方程式 10

非同次ベクトルヘルムホルツ

方程式 11

非線形媒質 3

非等方性(異方性)媒質 3

ホーンアンテナ 102, 105

ダイアゴナル—— 107

円すい—— 106

複モード円すい—— 107

角すい—— 106

コルゲート—— 107

扇形—— 106

誘電体装荷—— 107

ホイゲンズ・フレネルの原理  
51

ホイーラ定数 149

ホイストラ電波 240

方形導波管 150

方向性結合器 173

放射インピーダンス 62

放射界 42

放射パターン 57

放射抵抗 62

放射条件 32

補 対 100

負荷 Q 164

不可視領域 113

副ローブ 58

複素平面波 216

複素ポインティングベクトル 9

複素振幅 168

フラウンホーファー領域 54

フレネル 50

——近似 56, 212

——の反射係数 210

——の積分 213

——の透過係数 210

——領域 54, 55, 207

——ゾーン 214

フリスの伝達公式 206

フロケの定理 183

不整合損 66

不等間隔直線アレイ 114

表面波 176

ツェンネックの—— 215  
標準大気 229

【I】

$I_0$  分 布 248  
インコヒーレント 244  
一般化された  
インピーダンス行列 85  
位相パターン 57  
位相速度 19  
位相定数 18, 144

【K】

Kパターン 231  
可 逆 性 64  
可逆定理 38, 70  
開 口 面 50  
開口面合成法 131  
開口(面)効率 73  
回折係数 213  
回折領域 214  
確率分布 249  
確率密度分布 245  
管内波長 153  
干渉領域 214  
可視領域 113  
結合伝送路 173  
結合確率密度関数 246, 247  
結合係数 174  
起 電 力 4  
起電力法 83, 86  
輝度温度 73, 129  
幾何光学近似 222  
幾何光学理論 222  
規格化相互放射抵抗 116  
奇モード 177  
近傍領域 54  
キルヒホッフ・ホイゲンスの  
近似回折理論 212  
キルヒホッフ・ホイゲンスの  
スカラ回折公式 54  
起 磁 力 4  
基準利得 73

コ ア 191  
光学定理 77  
後方散乱 76  
後方散乱断面積 76  
混 成 波 139  
コルヌーの螺旋 213  
交さ偏波 234  
構成方程式 3  
光 速 19  
高周波近似 53  
降雨減衰係数 234  
降雨強度 234  
固 有 値 139  
空洞共振器 162  
空洞共振器の $Q$  163  
空間伝送効率 208  
空間高調波 185  
空間周波数 130  
空間自己相関関数 244  
クラッド 191  
屈折指数 229  
極近傍領域 54  
境界条件 5  
鏡面修整 109  
共振周波数 162  
共相励振 113  
共焦点系 191  
球ベッセル関数 25

【L】

log-normal 分布 246

【M】

$m$  分 布 248  
 $M$  逆 転 231  
マイクロ波電力工学 200  
マイクロストリップ線路 149  
マクスウェルの方程式 2  
盲 域 232  
面電荷密度 7  
面電流密度 6  
メタルレンズ 110  
メートルアンペア 68

ミーの理論 233  
見通し外伝搬 244  
見通し内伝搬 242  
モ ー ド 139  
——アドミタンス 168  
——電圧 165  
——電流 165  
——フィルタ 173  
——インピーダンス 168  
〇—— 239  
モーメント法 84  
モノパルス 128  
漏 れ 波 92, 181, 233  
無限アレイ 126  
無負荷 $Q$  164  
無給電素子 96  
虫明の関係式 101  
無指向性 57

【N】

ナイフエッジ 212  
1/2電力ビーム幅 58  
ノイマンの数 24  
ス ル 58  
入力インピーダンス 61

【O】

オイラーの微分方程式 223

【P】

Pocklingtonの積分方程式 80  
パラボラアンテナ 108  
オフセット—— 108  
パーセバルの等式 123  
パスレングスレンズ 111  
ペンシルビーム 58  
ピーク電力容量 200  
ポインティングベクトル 8

【R】

radio meter 129



葉 片 58  
誘 電 率 3  
誘 電 束 4  
誘電体伝送路 176  
誘 導 界 42  
ユリタリ一行列 170

【Z】

Z 反 射 240  
全断面積 77  
前 後 比 58  
全 反 射 211  
——の臨界角 211  
全方向性 57

前方散乱 76  
全散乱断面積 76  
絶対利得 64  
磁 荷 33  
磁化プラズマ 235  
磁気分極ポテンシャル 15  
磁気ダイポール 43  
磁気形ポテンシャル 37  
磁 気 圏 235  
磁気プラズマ 235  
実効放射電力 68  
実 効 高 68  
実効面積 72  
実効充てん率 149  
自己インピーダンス 63

自己相似 101  
人工誘電体 110  
磁 流 33  
磁 束 4  
自由空間伝送損 207  
自由空間基本伝送損 207  
ゾーニング 110  
上部ハイブリッド共鳴 240  
乗積干渉計 131  
準静電界 42  
受信アンテナの等価回路 69  
受信断面積 71  
受信電力 71  
受信開放電圧 69

— 著者略歴 —

安 達 三 郎

1953 年 東北大学工学部通信工学科卒業  
1958 年 工学博士（東北大学）  
1970 年 東北大学教授（工学部電気工学科）  
1994 年 東北大学名誉教授  
1994 年 東北工業大学教授（工学部通信工学科）  
1998 年 退職

米 山 務

1959 年 東北大学工学部通信工学科卒業  
1964 年 工学博士（東北大学）  
1965 年 東北大学助教授  
1986 年 東北大学教授（電気通信研究所）  
1999 年 東北大学名誉教授  
1999 年 東北工業大学教授  
現在に至る

## 電 波 伝 送 工 学

Electromagnetic Wave  
Transmission Engineering

© Saburo Adachi, Tsukasa Yoneyama 1981

1981 年 2 月 25 日 初版第 1 刷発行  
2007 年 5 月 15 日 初版第 13 刷発行

検印省略

著 者 安 達 三 郎  
仙台市宮城野区鶴ヶ谷 5-18-8  
米 山 務  
仙台市太白区袋原 12-17  
発 行 者 株式会社 コロナ社  
代 表 者 牛 来 辰 巳  
印 刷 所 富士美術印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00123-5

(清文社, 愛千製本所)

Printed in Japan

無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替いたします

