

AP 研ワークショップ

基礎から理解する
小形アンテナの動作原理

金沢工業大学

野口 啓介

目次

目次	ii
第1章 まえがき	1
1.1 小形アンテナとは	2
1.2 小形アンテナに求められる特性	5
1.3 テキストの構成	8
参考文献	9
第2章 放射の基礎	11
2.1 アンテナからの放射	11
2.1.1 マクスウェルの方程式	11
2.1.2 ポテンシャル	12
2.1.3 微小電気・磁気ダイポールからの放射	14
2.1.4 電磁界の距離特性	17
2.1.5 指向性, 利得および放射効率	19
2.2 アンテナと回路	21
2.2.1 アンテナのインピーダンス	21
2.2.2 直列・並列共振回路	24
2.2.3 Q 値と帯域	25
2.2.4 回路と電磁界	27
2.2.5 ポインティングの定理	30
参考文献	37
第3章 アンテナ特性と Q 値	39
3.1 小形アンテナの特性	39
3.1.1 インピーダンスと帯域	39
3.1.2 利得と放射効率	40
3.1.3 ダイポールおよびループの Q 値と放射効率	41

3.2	下限 Q 値	46
3.2.1	Chu 球と近似下限 Q 値	46
3.2.2	McLean による下限 Q 値	50
3.3	インピーダンス特性による Q 値	52
3.4	アンテナサイズと利得	54
3.5	近年の Q 値に関する研究動向	55
参考文献		57
第 4 章	代表的な小形アンテナと Q 値	59
4.1	無負荷 Q と負荷 Q および外部 Q	60
4.2	インピーダンス整合と整合回路	61
4.3	逆 L アンテナ	63
4.4	ノーマルモードヘリカルアンテナ	71
4.5	メアンダラインアンテナ	77
4.6	マイクロストリップアンテナ	92
4.7	板状逆 F アンテナ	98
4.8	小形アンテナの比較	100
参考文献		103
第 5 章	広帯域化とマルチバンド化	105
5.1	下限 Q 値と従来の研究例	105
5.2	直列共振型アンテナの広帯域化とマルチバンド化	106
5.3	並列共振型アンテナの広帯域化とマルチバンド化	111
5.4	ILA の設計例	114
5.5	E 形パッチアンテナの設計例	121
参考文献		131
第 6 章	あとがき	137
付録 A	球波動関数	139
付録 B	Legendre の多項式	145

第1章

まえがき

マクスウェルの電磁方程式が1864年に確立されてから150年が過ぎる。この間、電磁波の放射や送受信について多くの議論が行われ、電磁波と電気信号との変換器であるアンテナについては特に通信分野で大きく発展してきた。現在では移動通信システムが社会インフラの一つとして重要な位置を占め、爆発的に普及した移動通信端末での主要な素子として小形アンテナは必要不可欠なものとなった。

現在の移動通信端末は、スマートフォンに代表されるように小型・薄型であり、アンテナについては筐体に内蔵することが必須である。移動通信に用いられる周波数はそのシステムによってさまざまであるが、送受信間距離が数百メートル以上に渡る多くのシステムでは3 GHz以下である*1。さらにその端末のサイズは100~150 mm以下、おおよそ3 GHzの1波長以下となる。そのような端末に内蔵する小形アンテナは筐体のサイズに比べて十分小さくする必要があり、波長に比べて10分の1から50分の1以下のサイズまで小型化しなくてはならない。アンテナは原理的に電磁流の変化をもとに電磁波と信号との変換を行う装置であるので、電磁流が変化するための物理的サイズが必要である。しかしながら、システムが多様化するに伴い、アンテナに割り当て可能な面積あるいは体積が小さくなり、アンテナとしての動作を維持しながらも、できる限りアンテナを小さくしなくてはならない。このようにアンテナ設計者・研究者の力量が問われる状況ではあるが、その困難を克服するヒントは電気磁気学や分布定数回路をはじめとする基礎理論にあり、古くて新しい学問として小形アンテナの理論を整理することは有用と考えられる。

本ワークショップでは、「基礎から理解する小形アンテナの動作原理」をテーマに、共振型の小形・平面アンテナの理論を整理すると共に、広帯域化、マルチバンド化の理論、解析、設計法について取り扱う。小形・平面アンテナ全般について取り上げ、主として共振型の小形・平面アンテナに着目する。はじめに小形アンテナの理論限界について述べ、小形・平面アンテナのインピーダンス特性、放射特性を示し、広帯域化、マルチバンド化を検討する上で重要と

*1 2020年の東京オリンピックを目標に検討されている第5世代移動通信システムではより高い周波数を用い、システムの高度化が図られている。

なる共振周波数，放射抵抗， Q 値について説明する．広帯域化，マルチバンド化に有効な手段として複合モードを取り上げ，アンテナ上に生じるモードについて説明する．各モードとインピーダンス特性，放射特性との関係について論じ，広帯域化，マルチバンド化のための設計法について述べる．

1.1 小形アンテナとは

小形アンテナは，スマートフォンに代表されるモバイル無線端末に搭載され，電波による情報の出入り口の役目を果たす装置として広く使用されている．一般に「小形」と言った場合には何か基準になるものに対して小さい形状寸法のことを指して使われるが，モバイル無線端末に用いられる小形アンテナは寸法そのものが小さいだけでなく，使用周波数の波長に対しても小さい電氣的小形アンテナである．モバイル無線端末だけでなく，IoT (Internet of things) に向けてあらゆる機器に無線機能が設けられ，電波の送受信をつかさどるデバイスとして電氣的小形アンテナはますます重要性を増してきている*2．

小形アンテナの歴史は古く，図 1.1 に示されるようにマルコーニ (G. Marconi) の無線通信実験までさかのぼり，1896 年に初めて電磁波による無線通信が実施された後，1900 年初頭には逆 L アンテナが開発されている [1]．逆 L アンテナはモノポールアンテナの導体部を途中で折り曲げ，容量装荷を行った電氣的小形アンテナの一つであり，現在広く普及している逆 F アンテナの原型である．実に 110 年以上も昔に小形アンテナは開発されていたことになる．逆 L

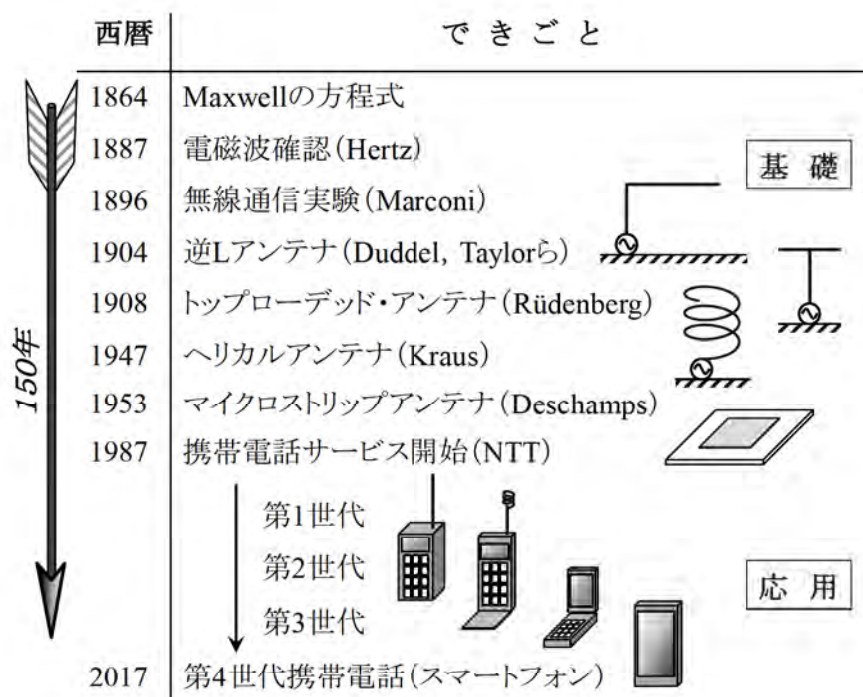


図 1.1 小形アンテナの基礎から応用の歴史

*2 「小形アンテナ」は固有名詞として「小形」を用い，その他の用語については「小型」を使用する．

アンテナの他にも、頂部負荷アンテナ（トップローデッド・アンテナ）が同時期に開発されている。この他、線状導体による小形アンテナは様々な形状が考えられており、導体をらせん状に巻いたヘリカルアンテナ、ジグザグ状に折り曲げたメアンダラインアンテナなどがある。プリント基板を用いたアンテナは1950年代に考案され、製作のしやすさ、コスト低減、アレー化の容易さなどの観点から平面アンテナであるマイクロストリップアンテナが広く開発された[2]-[6]。

日本のモバイル無線通信は、1979年から始まった自動車電話がさきがけとなって発展してきたが[7]、そのような無線通信システムの発展とともに小形アンテナの研究開発は常に続けられている。1987年のNTTによる携帯電話サービス開始以来、第1世代から第4世代携帯電話システムまでに、携帯電話に設けられるアンテナは目覚ましい発展を遂げた。第1世代では主にモノポール形状のホイップアンテナが使用され、筐体から突出したアンテナが設けられていたが、研究開発が進むにしたがって筐体に内蔵した小形アンテナが主流となった。スマートフォンに至っては、複数の小形アンテナを筐体に内蔵することによってMIMOなどのシステム的な技術を活用し高速な無線通信を可能にしている。

アンテナのサイズは使用周波数の波長を基準にして分類され、図1.2に示すような形状のものがある。図1.2には地板付きの小形アンテナを多く挙げているが、地板を設けないダイポール形状のものも多数実用化されている。先に示した逆Lアンテナ（ILA）やノーマルモード・ヘリカルアンテナ（NMHA）など、線状導体を用いた地板上の小形アンテナは、地板によって生じるイメージ（影像）を利用することによって約4分の1波長の導体長^{*3}で共振する。一方マイクロストリップアンテナ（MSA）や板状逆Fアンテナ（PIFA）は板状導体の寸法が半波長または板状導体端部の2辺の長さの和が約4分の1波長のときに共振する。

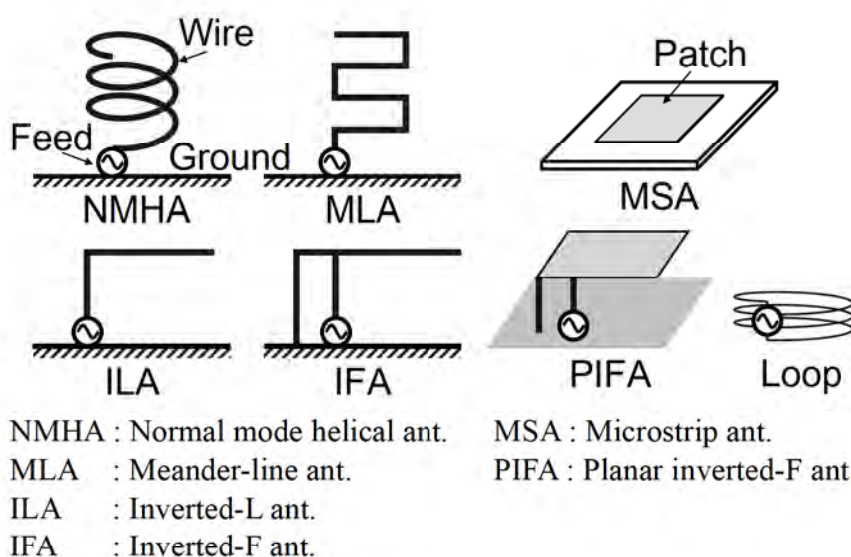


図 1.2 各種の小形アンテナ

^{*3} 密巻の場合は4分の1波長より長い。

小型化の工夫としては、共振長を持たせるための線状導体および板状導体の変形の外、誘電体、磁性体などの材料による工夫、さらにはメタマテリアルによるアプローチがある。材料による小型化は高い比誘電率、透磁率の材料を用いること、左手系の伝送線路の応用があるが、一般に損失が大きく、放射効率や利得の向上が課題である。

小型化の限界については従来より多くの議論がなされ、その研究対象の中心となるのは Q 値に関連する内容である。小型化の限界は、与えられたアンテナの大きさによって決まる最大の特長、すなわちアンテナの帯域、利得、放射効率の関係を意味する。アンテナの Q 値は放射によって消費される電力に対する蓄積電力の比で表され、一般にその値は小さい方がよい。つまりアンテナから流出する放射エネルギーが非放射エネルギーよりも大きい方が望ましく*4、下限 Q 値をいかにして得るかが課題となる。従来、小形アンテナの Q 値と特性に関する検討は H. A. Wheeler や L. J. Chu らによって行われ、ラジアン球の概念と球波動関数を用いた検討が行われた [8][9]。近年、小形アンテナへの注目が高まるとともに Q 値に関する多数の論文が発表されている [10][11]。

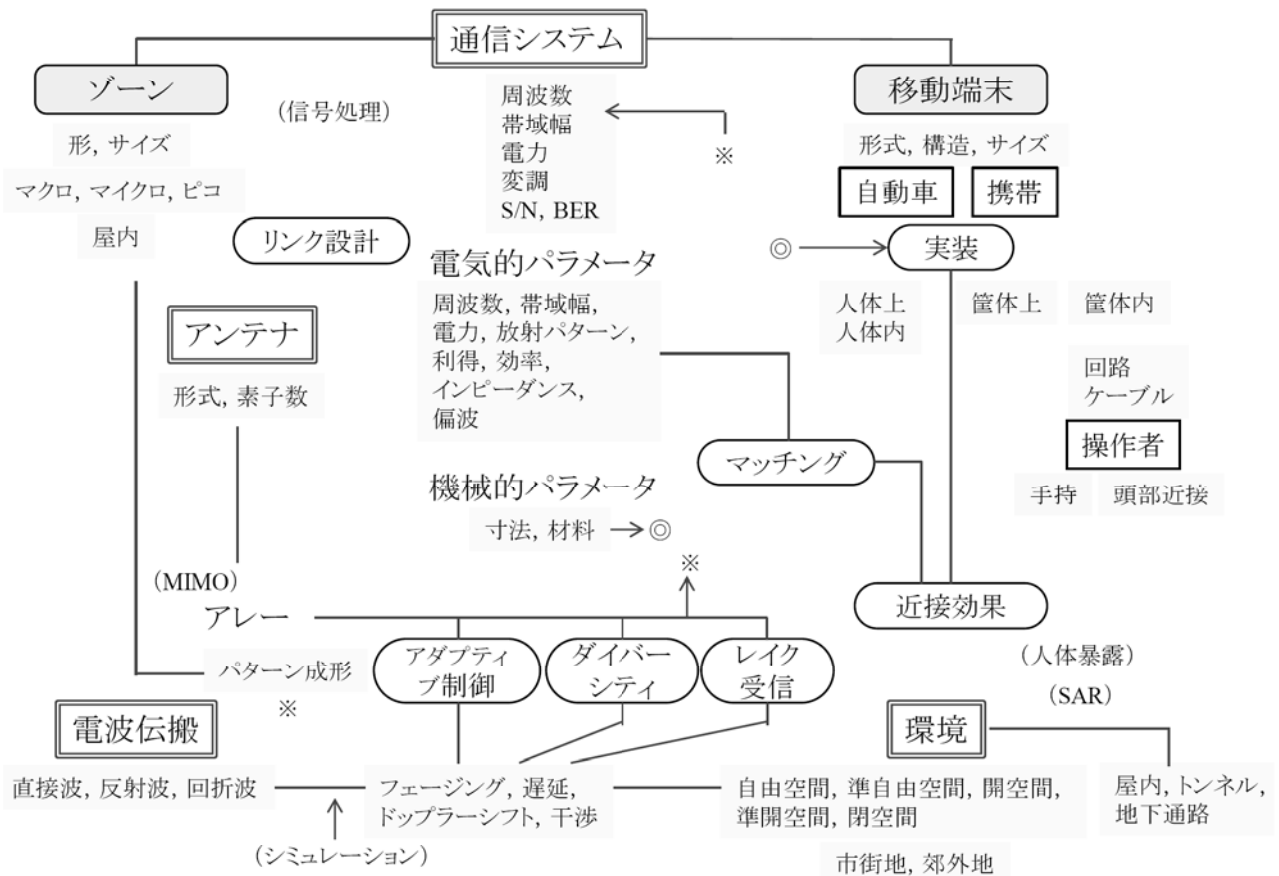


図 1.3 携帯電話用アンテナの設計チャート [7]

*4 エネルギーと電力の単位はそれぞれ [J] (ジュール) と [W] (ワット) であり, [W] は仕事率 [J/s] を表す。

1.2 小形アンテナに求められる特性

小形アンテナは空間と回路との間を接続する装置であるために、電波の送受信を効率よく行うための放射特性と回路特性が求められる。携帯電話用アンテナを例にとると、図 1.3 に示すように様々な要因を検討する必要がある [7]。たとえば放射特性に関しては指向性、放射効率、人体への影響 (SAR) などへの配慮が必要とされ、回路特性では整合、インピーダンス帯域、他の回路との結合などを考慮しなくてはならない。実装の観点からは携帯電話の筐体に内蔵可能なサイズであるだけでなく、基板への接続の容易性、コスト、耐久性なども考える必要がある。今後、携帯電話のようなモバイル端末だけでなく、IoT に向けた多くの機器にアンテナを内蔵する時代が到来すると予想され、システムに応じた多くの要因をクリアする必要がある。

前述のように、小形アンテナへの要求はサイズをできるだけ小さくする一方、送受信に関わる特性は良好でなくてはならない。また、機器への組込みが必要な場合にはアンテナ近傍の回路、他のアンテナとの結合などを考慮する必要がある。素子としてのアンテナだけでなく、システムとしてのアンテナ系全体を検討しなくてはならない。

アンテナの電力は、図 1.4 に示すように、アンテナ近傍の蓄積電力、ジュール熱などの損失電力、アンテナから遠方に到達する放射電力の各成分からなる。これらのうち主として情報のやり取りに用いられるものは放射電力であり、その強度はアンテナからの距離の 2 乗に反比例して減衰する。蓄積電力は共振、すなわち電流や磁流を振動させるために必要なリアクタンス成分であり、アンテナを小型化するにしたがって放射電力よりも大きくなる成分である。損失電力は導体、誘電体、磁性体などによって構成されるアンテナ構造物による熱損失であり、これも放射に寄与しない成分であるので、放射電力に比べてできるだけ小さいほうが好ましい。アンテナの Q 値は放射および損失電力に対する蓄積電力の割合であり、小さい Q 値を得るには蓄積電力が小さく、放射電力が大きくなる必要がある。

アンテナの Q 値とサイズとの関係は、Chu がモデル化したように [9]、アンテナの物理的最



図 1.4 アンテナによって生じる電力

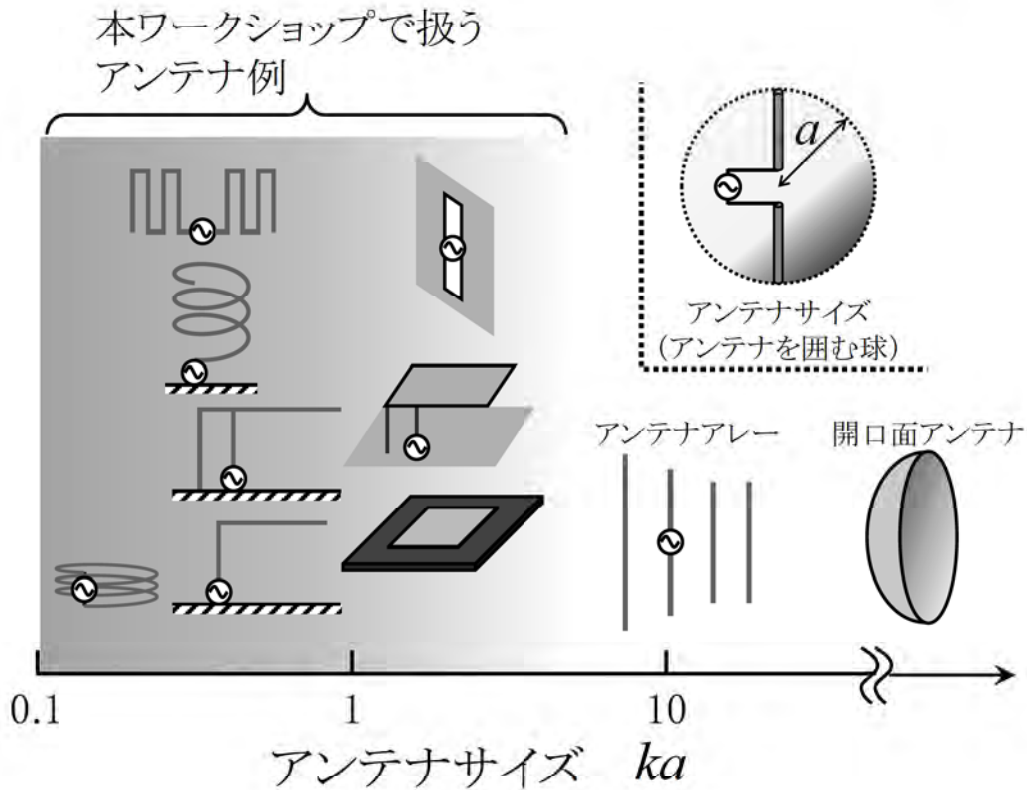


図 1.5 小形アンテナのサイズ

大寸法を直径とする球を用い、その電氣的サイズで表されてきた。ここで電氣的サイズとは球の半径 a と波数 k ($k = 2\pi/\lambda$, λ は波長) との積 ka で表され、 ka に対する Q 値がいくつになるかによって小型化の割合が評価される。ただし、Chu や J. S. McLean[12] による球状のアンテナモデルにおいて、球内での蓄積電力をゼロと仮定していること、共振回路で扱う Q 値とは異なる定義によって論じられていることなど、実際の小形アンテナの特性との違いが大きいことが指摘されている。なお、小型化の指標については必ずしも Q 値のみではなく、帯域と効率との積や、直交 2 偏波への対応、複数周波数への対応などの機能の数で見た指標など、いくつかの指標が存在し、システムに応じた多角的な見方が必要である。

電氣的なアンテナサイズ ka を横軸に取り、代表的なアンテナ例を図示したものを図 1.5 に示す。小形アンテナのサイズについての定義は様々なものがあり、必ずしも確立した定義はないが、Wheeler がラジアン長 (radian length) として定義した $1/2\pi$ にもとづく $ka \leq 1$ が通常用いられている [8]。波長で見れば約 $\lambda/6$ に相当する。S. R. Best によれば、小型化した線状アンテナの放射抵抗値が、 $0.5ka$ に相当する長さの直線状ダイポールまたはモノポールアンテナの放射抵抗値に近づくことから、妥当な電氣的小形アンテナの定義は $ka \leq 0.5$ となる半径 a の球で囲まれるアンテナであるとしている [13]。さらに藤本らによれば、アンテナの寸法に対して特性や機能の数が多いアンテナを機能的な小形アンテナ、アンテナ寸法の一部が電氣的な小型に制約されたアンテナを寸法制約付小形アンテナ、物理的な実寸法が小さいアンテナを物

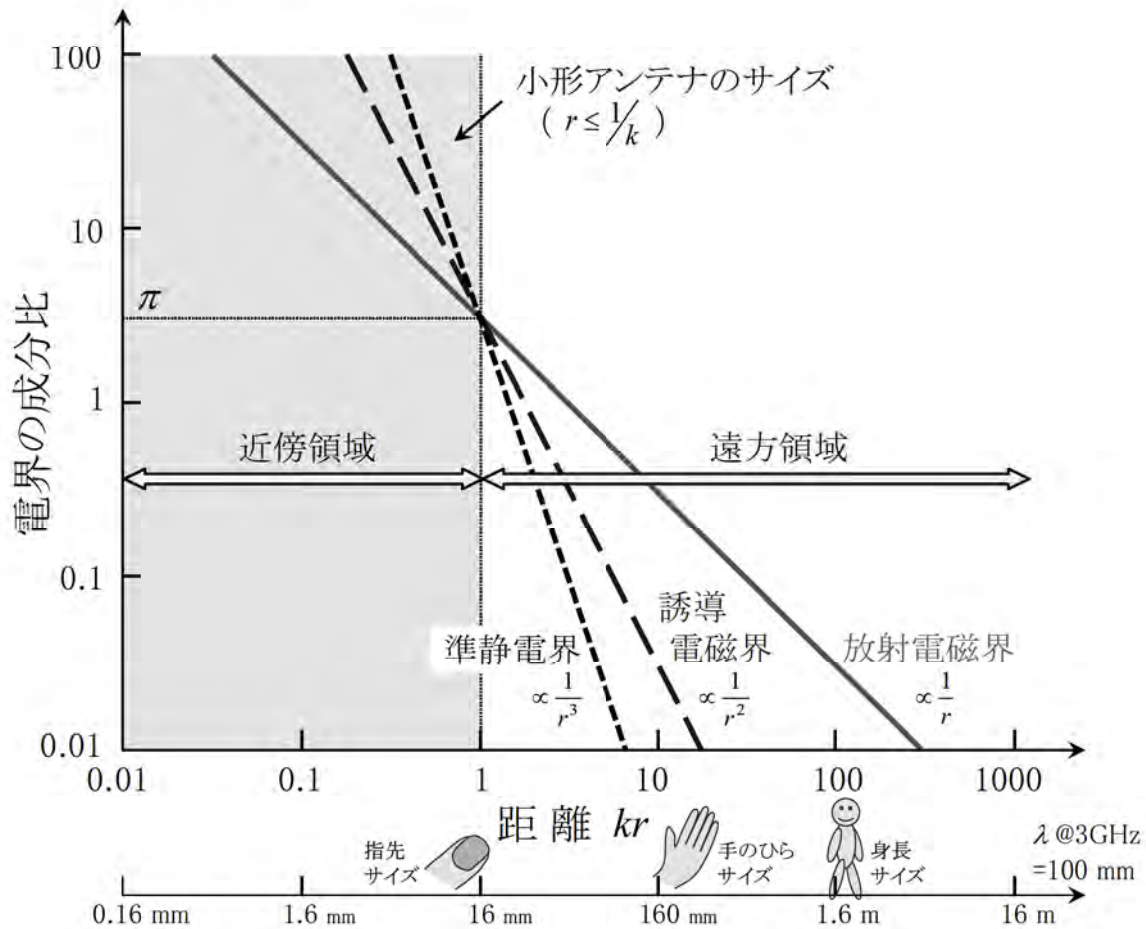


図 1.6 電界の距離特性

理的な小形アンテナとして、電気的小形アンテナを含めて4つの分類を示している [10][11].

システムに応じて様々な小形アンテナが提案されているが、アンテナの最大寸法を $ka \leq 1$ または 0.5 以下にするには何らかの工夫が必要である。例えば線状アンテナであれば、その導体長をほぼ $\lambda/4$ に維持してヘリカルやメアンダライン状にすることによって小型化を図る。板状逆 F アンテナ (PIFA) であれば、板状導体にスリットを設けたり、磁性体を導体下部に設置したりすることで小型化されている。本ワークショップでは主に $ka \leq 1$ のサイズの小形アンテナを取り扱う。

先に述べたように、小形アンテナの場合にはアンテナ近傍に蓄えられるエネルギーに相当する蓄積電力が放射電力に比べて大きくなる。微小電気ダイポールから求まる電界の距離特性を図 1.6 に示す。ここでは横軸にアンテナからの距離 (kr) を取り、縦軸に電界の成分比を取っている。微小電気ダイポールによる電磁界はアンテナからの距離に応じて準静電界、誘導電磁界、放射電磁界に分けられ、 $kr < 1$ の領域では準静電界の成分が最も大きく、 $kr = 1$ において3つの成分が等しくなり、 $kr > 1$ の領域では放射電磁界の成分が最も大きくなる。一般にアンテナからの距離に応じて界の距離特性は近傍領域、フレネル領域、遠方領域に分けられるが、小形アンテナの場合にはアンテナのサイズが波長に比べて小さいために位相差によるフレ

ネル領域は極めて小さくなり、ほとんど存在しない [1]。アンテナのサイズを感覚的に捉えるために、図 1.6 にはもう 1 つの横軸を設け、周波数 3GHz での実寸法を記載した。アンテナからの距離が $1/k$ 以下に相当する近傍領域は 10 mm 程度で指先サイズに相当し、手のひらサイズよりも大きくなると遠方領域に相当することが分かる。

1.3 テキストの構成

各章の構成について述べる。

本テキストは図 1.7 に示すように 6 章で構成し、第 2 章では小形アンテナの特性を理解するうえで必要となる基礎事項を示し、電磁波の放射の基礎、アンテナと回路について説明する。

第 3 章では小形アンテナの Q 値を扱い、その定義と下限 Q 値およびその関連事項について説明する。

第 4 章では代表的な小形アンテナを扱い、その特性について詳細に示す。小型・平面化の手法として逆 L、ヘリカル、メアンダライン、マイクロストリップ、板状逆 F の各種アンテナを扱い、その放射抵抗、 Q 値、得られる帯域などを理論値とともに示す。

第 5 章は、小形アンテナの広帯域化、マルチバンド化について扱い、複合モードによる広帯域化、マルチバンド化（2 周波共用化）の方法を説明する。折返し構造をもつ小形アンテナ、スタブを内蔵する小形アンテナを扱い、その等価回路による広帯域化、マルチバンド化の例を示す。

第 6 章はあとがきであり、本テキストの総括として第 2 章から第 5 章までの要点をまとめる。ワークショップ当日は第 3 章以降について説明するので、それまでに第 2 章までの内容を学習いただきたい。

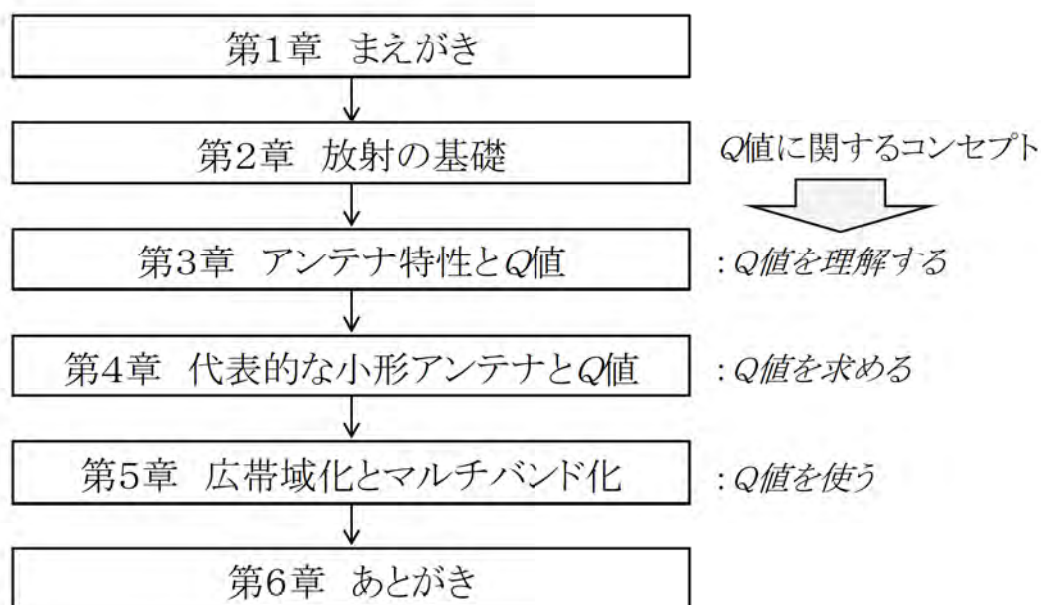


図 1.7 テキストの構成

第2章

放射の基礎

電気磁気学から明らかなように、電界や磁界の源、すなわち波源は一般的に電流である。通常、導体に電流が流れることにより空間に電磁界が生じ、放射が発生する。アンテナからの放射を考えると、図 2.1 に示すように、アンテナの構造物である導体に電流が流れ、そこを波源として空間に電界と磁界が生じる。

第2章では、放射の基礎としてマクスウェルの方程式をはじめ、波源からの寄与を数学的に表現するために必要となるポテンシャルについて示し、波長に比べて十分小さい微小電気・磁気ダイポールによる放射について述べる。アンテナの特性として利得、放射パターンなどの基礎事項を説明するとともに、アンテナの回路特性についてはインピーダンス、帯域、 Q 値などの基本的なパラメータについて説明する。

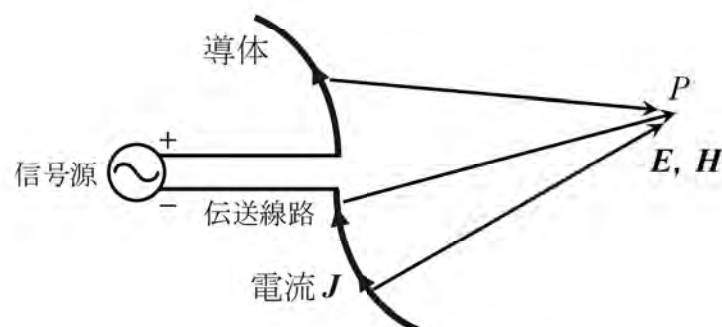


図 2.1 アンテナからの放射

2.1 アンテナからの放射

2.1.1 マクスウェルの方程式

アンテナからの放射を考えるうえでマクスウェル (J. C. Maxwell) の方程式は重要である。ここでは小形アンテナに関連して整理しておく [1][2]。

基礎電磁量として電荷密度 ρ [C/m³]、電流密度 \mathbf{J} [A/m²]、電界強度 \mathbf{E} [V/m]、磁界強度

第3章

アンテナ特性と Q 値

アンテナの物理的寸法，たとえば長さ ℓ のダイポールアンテナを波長 λ に比べて小さくしていくと，第2章に示したように，アンテナの放射抵抗 R は $(\ell/\lambda)^2$ に比例して急速に小さくなるのに対し，リアクタンス X は ℓ/λ に反比例して大きくなる．アンテナの放射については，小型化に伴って利得は小さくなり，放射効率も低下する．ここではアンテナの回路特性と放射特性のアンテナ寸法に対する変化に着目し，比帯域幅や Q 値の理論限界について示す．

3.1 小形アンテナの特性

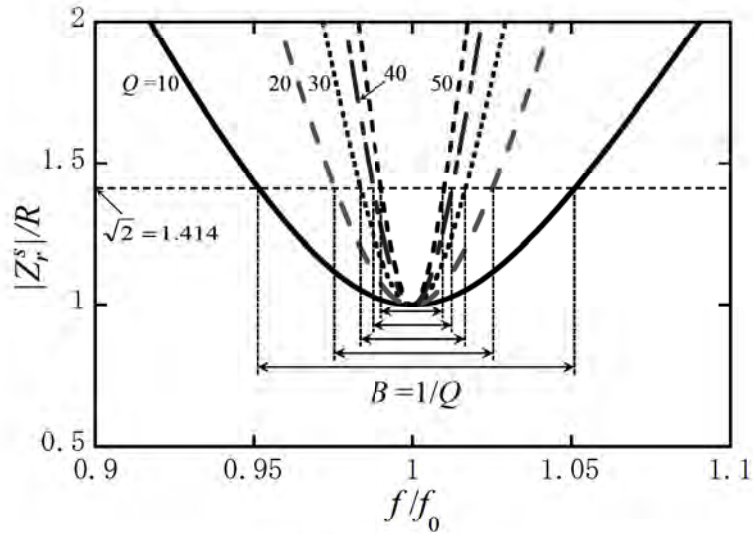
3.1.1 インピーダンスと帯域

直列共振回路と並列共振回路の放射インピーダンス Z_r^s ， Z_r^p は，2.2.2 節に示したように規格化周波数 f/f_0 を用いてそれぞれ次式のように表せる．

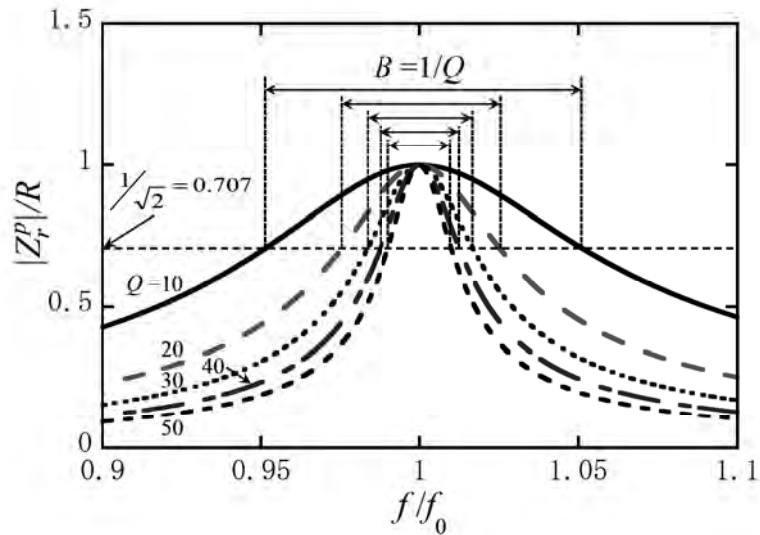
$$Z_r^s = R + jRQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \quad (3.1)$$

$$Z_r^p = \left\{ G + jGQ \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right\}^{-1} \quad (3.2)$$

これら2つのインピーダンスの周波数特性を図3.1(a)および図3.1(b)に示す．いずれのグラフにおいても抵抗 $R = 1/G$ で規格化したインピーダンスを表している．帯域を規定する半値幅は抵抗とリアクタンスが等しくなる周波数において得られ，直列共振回路のインピーダンスでは $|Z_r^s|/R = \sqrt{2}$ ，並列共振回路では $|Z_r^p|/R = 1/\sqrt{2}$ における下限周波数と上限周波数の範囲が比帯域幅 $B = 1/Q$ に相当する．グラフから分かるように Q 値が大きくなるにしたがって急激に帯域が狭くなる．図3.1(a)，図3.1(b)のグラフでは， $f/f_0 = 1$ を中心に軌跡が左右対称になっているように見えるが， Q 値が小さい場合には対称とはならず B の中心が $f/f_0 = 1$ に一致しないことに注意する．



(a) 直列共振回路



(b) 並列共振回路

図 3.1 直列・並列共振回路の規格化インピーダンス

3.1.2 利得と放射効率

小形アンテナの放射パターンは、図 3.2 に示されるように、立体的にはドーナツ形状のパターンを持ち、 z 軸を含む垂直面で 8 字指向性、 x 軸および y 軸を含む水平面で無指向性となり、その最大利得は 1.5 に近づくことが知られている。アンテナの寸法を波長に比べて小型にしていくと利得が 1.5 の一定値に近づくことから、超指向性 (Super gain) アンテナとして分類される [1]。

小形アンテナの動作利得 G_w は、指向性利得 G_d 、放射効率 η および給電点での反射係数 Γ

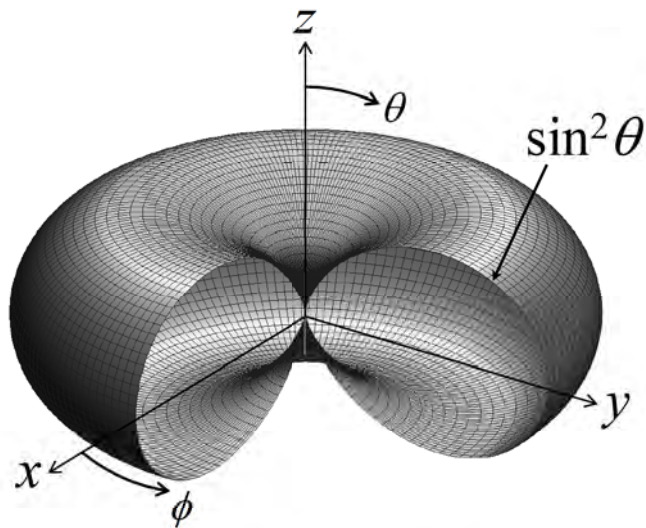


図 3.2 小形アンテナの放射パターン

を用い、第 2 章に示したように、以下の式で表される。

$$G_w = \eta(1 - |\Gamma|^2)G_d \quad (3.3)$$

これより、小形アンテナの指向性利得 G_d が 1.5 に近づく場合、動作利得 G_w は放射効率 η または反射係数 Γ に依存する。放射効率と Q 値との関係は、以下のように表すことができる。

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_L} = \frac{Q}{Q_r} \quad (3.4)$$

ここで、 R_r 、 R_L はそれぞれ放射抵抗、損失抵抗を表し、 Q 、 Q_r はそれぞれ損失を含む Q 値、放射の Q 値である。 Q_L を損失の Q 値とすると、 Q 、 Q_r および Q_L の関係は以下のように表せる。

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_L} \quad (3.5)$$

具体的な Q_L の物理的意味は、アンテナの放射電力以外の熱損失、すなわち導体損、誘電体損、表面波損である。

3.1.3 ダイポールおよびループの Q 値と放射効率

基本的な小形アンテナとして、その寸法が波長に比べて十分小さいダイポールアンテナとループアンテナの Q 値について求める。ダイポールおよびループアンテナのモデルを図 3.3 に示す。ダイポールは全長を l 、円柱導体の半径を a とする。ループアンテナについてはループ半径を b 、円柱導体の半径をダイポールと同様、 a とおく。波長に対して十分短い長さを持

3.2 下限 Q 値

アンテナの寸法に対し，取りうる最小の Q 値は下限 Q 値と呼ばれ，理論限界値の議論がなされてきた．アンテナの小型化に関する理論限界値について初めて論じたのは H. A. Wheeler であり，1947 年までさかのぼる [4]．Wheeler は Q 値の逆数に相当する放射電力係数 (Radiation power factor, RPF) を扱い，円筒の形状を仮定した微小電気ダイポールおよび微小磁気ダイポールの等価回路を示し，最終的には半径 a の球状ヘリカルについて $RPF = (ka)^3$ ，すなわち $Q = 1/(ka)^3$ となることを示した [5]．しかしながら Wheeler による Q 値の導出は正確さに欠ける点があり，より厳密な導出方法で L. J. Chu や J. S. McLean らが下限 Q 値を求めている．

Chu による TM_{n0} モードは球波動関数を用いて表される [6]．また，McLean による TM_{n0} モードも同様に球波動関数をもとに求められている [7]．ここでは Chu および McLean による電磁界を表す式と下限 Q 値について示す．

3.2.1 Chu 球と近似下限 Q 値

Chu はアンテナの物理的な最大寸法を，図 3.7 に示すようにアンテナを取り囲む半径 a の球 (以下，Chu 球と呼ぶ) で表し，球表面から離れた任意の点 P における電磁界をその球の表面からの寄与として扱った．ここで球内部の蓄積エネルギーはゼロと仮定され，球外部の蓄積エネルギーと放射エネルギーが扱われる．Chu はアンテナから生じる TM_{n0} および TE_{n0} モードに対する電磁界を球波動関数を用いて表現し，等価回路を用いて級数表現した Q 値を求めた．この Q 値の扱いは，級数を用いていることから厳密解とは見なされず，近似として扱われている．Chu によれば，球波動関数の直交性から，Chu 球の外部の全エネルギーは各モードにおける球波動の複素電力の和で表すことができる．したがって空間の波動インピーダンス

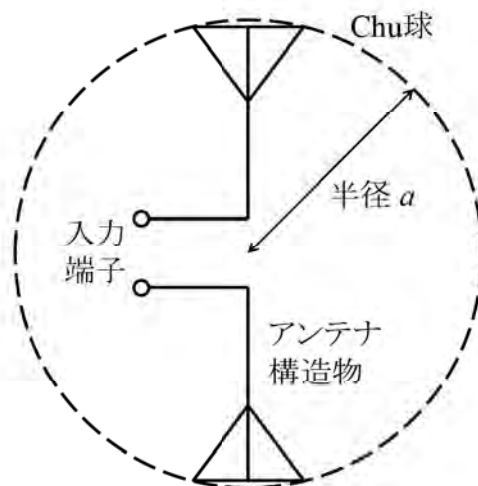


図 3.7 Chu 球

第4章

代表的な小形アンテナと Q 値

放射の基礎となる微小電気・磁気ダイポールの Q 値と放射効率について第3章に示した。ここではより具体的な小形アンテナを扱い、線状導体で構成された電気的小形アンテナと、プリント基板などで構成する平面アンテナを取り上げる。電気的小形アンテナとしては、逆Lアンテナ、ノーマルモードヘリカルアンテナ、メアンダラインアンテナを扱い、それらのインピーダンス特性、 Q 値、放射効率などを説明する。平面アンテナとしてマイクロストリップアンテナを取り上げ、 Q 値を用いたアンテナ特性について述べる。

図4.1にChu球内に示した代表的なアンテナを示す。3.2節において説明した下限 Q 値は、Chu球内部に蓄積エネルギーがないものとして求められており、実際のアンテナの Q 値とは異なる。図4.1に示すように、ダイポールやループアンテナはアンテナ構造物そのものに正負の電位が加えられるが、モノポールや逆Lアンテナなど、地板を有するアンテナはそのイメージを利用しており、Chu球とアンテナの関係は図のように表せる。図中ではアンテナ素子のみの大きさをChu球で規定しているが、地板が有限の場合には地板そのものが放射に重要な効

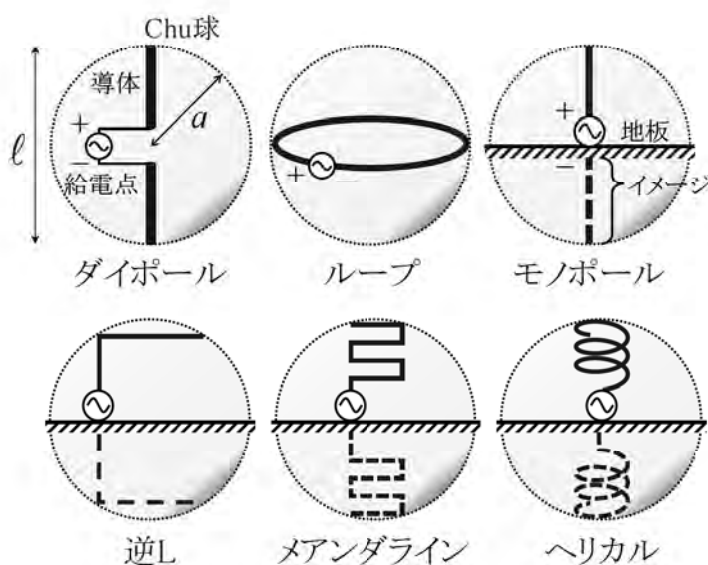


図 4.1 Chu 球とアンテナ

果を与えるため、地板として動作する構造物の大きさによって規定する必要がある。ここではアンテナのみに着目して説明する。

4.1 無負荷 Q と負荷 Q および外部 Q

一般的に、アンテナの Q 値は無負荷 Q により論じられる。しかし回路との接続を考えた場合には、回路の Q 値、すなわち外部 Q の影響を受け、アンテナと回路を合わせた Q 値として負荷 Q を扱う必要がある。アンテナの Q 値を Q_r 、回路の Q 値を Q_{ext} 、負荷 Q 値を Q_{load} とすれば、これらの関係は次式で表される。

$$\frac{1}{Q_{load}} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (4.1)$$

いま、図 4.2 に示すように、アンテナに内部抵抗 R_g を持つ電源を接続した場合を考える。アンテナの放射抵抗を R_r とすると、結合係数 β は

$$\beta = \frac{R_g}{R_r} \quad (4.2)$$

と表される。 $\beta = 1$ の場合を臨界結合といい、すなわち $R_r = R_g$ であって、この場合の Q_{load} は

$$Q_{load} = \frac{Q_r}{2} = \frac{Q_{ext}}{2} \quad (4.3)$$

となる。したがって完全にインピーダンス整合が取れている場合、アンテナと電源回路の系全体では負荷 Q が Q_r または Q_{ext} の半分の値となって、見かけ上、 Q 値が下がったように見える。

$\beta > 1$ のときを過結合、 $\beta < 1$ のときを疎結合といい、一般の β については

$$Q_r = (1 + \beta)Q_{load} \quad (4.4)$$

$$Q_{ext} = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)Q_{load} \quad (4.5)$$

と表すことができる [1][2].

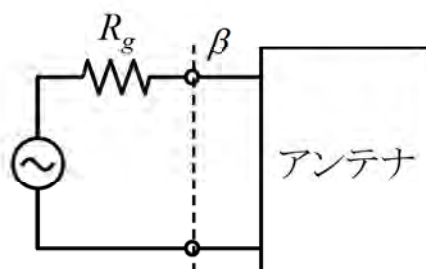


図 4.2 アンテナと電源回路

示している。また、高さ h が小さくなるに従って Q 値は大幅に大きくなり、900MHz の周波数では h が 2 分の 1 になると Q 値は約 3 倍の値となる。

4.8 小形アンテナの比較

前節までに示した 4 つのアンテナ（方形 MSA を除く、地板上に設けた ILA, NMHA, MLA および PIFA）について Q 値に関する比較を行う。ここでは共振周波数が 1GHz の小形アンテナを設計し、その数値解析から求めたインピーダンス特性を用い、 Q 値および帯域について評価する。小形アンテナはモーメント法によりモデル化し、完全導体により構成した。各アンテナの緒元について以下に示す。表 4.2 についてインピーダンス特性を図 4.51 に示す。インピーダンス軌跡から分かるように、いずれのアンテナも典型的な特性を示し、PIFA を除く 3 つのアンテナは直列共振特性をもち、マーカで示した 1GHz での抵抗値は小さく、 0Ω に近い。

このインピーダンス特性を用い、式 (3.64) により Q 値の周波数特性を計算した。その結果を図 4.52 に示す。これより、いずれのアンテナも周波数が高くなるに従って Q 値が下がる傾向にあり、共振周波数の 1GHz では ILA が最も Q 値が小さく、NMHA が最も大きい値を示している。

つぎにアンテナを囲む球、すなわち Chu 球を考え、その半径を a_s としてアンテナサイズ

表 4.2 小形アンテナの緒元

種類	高さ h [mm]	その他のパラメータ [mm]	Chu 球の半径 a_s [mm]
ILA	25.0	長さ $L=50$, 導体半径 $a=0.5$	35.4
NMHA	12.0	直径 $d=10.9$, $a=0.5$, ターン数 $N=3$ 回	13.2
MLA	13.5	幅 $w=26.9$, $a=0.5$, 段数 $N=6$ 段	19.0
PIFA	14.4	長さ と 幅 $L=W=28.8$, $\ell_f=1.1$, $a=0.5$	24.9

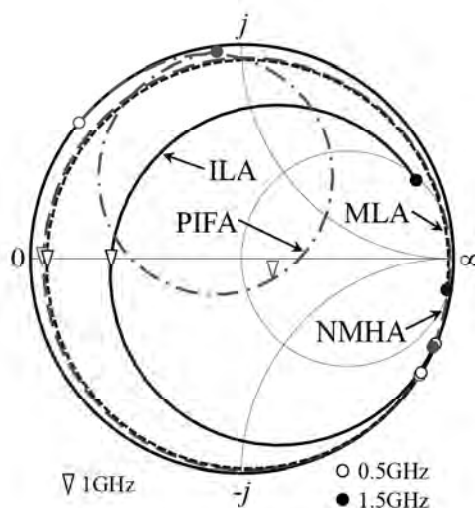


図 4.51 4 種類のアンテナのインピーダンス特性

第5章

広帯域化とマルチバンド化

前章までに説明した単一共振のインピーダンス特性をもつアンテナについて広帯域化またはマルチバンド化を行うには、通常給電部に整合回路を設ける必要がある。一方、アンテナ自身に整合機能を持たせるとともに広帯域化ができれば、アンテナとは別に整合回路を設ける必要はなくなり、放射効率を高めることにもつながる。アンテナの構造物に何らかの方法を用いて複数の共振、すなわち複合モードを発生させることができれば、アンテナ自身による整合ができ、広帯域化およびマルチバンド化が可能となる。複合モード励振にはいくつかの方法が挙げられるが [1]、小形・平面アンテナの広帯域化に有効なものとしては直列・並列共振の組み合わせによる研究例が多く、その原理としては放射インピーダンスのリアクタンス成分を非放射インピーダンスによって打ち消す方法に基づいている。

複合モードは、放射インピーダンスに対し相補的なインピーダンスを付加することによって発生させることができる。具体的には直列共振の放射インピーダンスに対し、並列共振のインピーダンスを結合させる。放射インピーダンスが並列共振の特性を持つ場合には、直列共振のインピーダンスを結合する。その結合インピーダンスをアンテナ構造物とは別にアンテナの給電部に設ければ、それは整合回路ということになる。しかし整合回路を設けた場合、その大きさが問題になるとともに損失も増加し、結局は効率を低下させることになる。したがってアンテナの構造物の中に結合インピーダンスを何らかの方法を用いて発生する必要がある。その方法として、非励振素子、分岐素子（ブランチ）、スリット装荷、折返し構造などがある。

ここでは、はじめに Sievenpiper らによるサーベイ論文にもとづき、これまでに発表された論文における提案アンテナの $B\eta$ 積と Q 値について示す。次に直列共振型アンテナと並列共振型アンテナのそれぞれに対する複合モード励振による広帯域化とマルチバンド化（2周波共用化）の方法について説明する。

5.1 下限 Q 値と従来の研究例

Sievenpiper らによる論文 [2] において、アンテナサイズ ka に対する比帯域幅と放射効率との積 ($B\eta$ 積) が示され、IEEE の論文 (IEEE Transactions on Antennas and Propagation)

に掲載された110件の小形アンテナについて $B\eta$ 積が求められ、その理論値との比較が行われている。ここで、 $B\eta$ 積は

$$B\eta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{ka} + \frac{1}{n(ka)^3} \right)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}Q} \quad (5.1)$$

と表される。式中の a は、図5.1に示されるように、アンテナを囲む球の半径であり、 n は TM, TE のモード数 ($n=1$ または 2) を表す。

図5.2に、論文[2]に掲載されている $B\eta$ 積のグラフを示す。図中に式(5.1)による計算値(以下、 $B\eta$ 計算値と記す)と Linear タイプの小形アンテナを扱った論文[3]~[18]より Sievenpiper らが算出した $B\eta$ 積をプロット(以下、 $B\eta$ プロットと記す)している。ここで Linear タイプの小形アンテナとは、ダイポールアンテナと同様に直線偏波を生じるアンテナを指しており、地板上に設けられた垂直偏波を生じる小形アンテナもこの範疇に含まれている。この図より $B\eta$ 計算値に比べ、すべての $B\eta$ プロットは小さい値を持ち、アンテナサイズ ka が1を超える領域においても $B\eta$ プロットは $B\eta$ 計算値に必ずしも近い値を持たないことが分かる。これらの $B\eta$ プロットのうち、比較的 $B\eta$ 計算値のカーブに近い値を持つアンテナは2重共振の特性を持つアンテナであり、式(5.1)において $n=2$ に対応する $B\eta$ 積に相当するものと考えられる。

図5.2をもとに、式(5.1)を使って Q 値を算出した。その値を図5.3に示す。この図よりプロットされた Q 値が下限 Q 値のカーブに沿って分布し、下限 Q 値を下回る値とならないことが分かる。

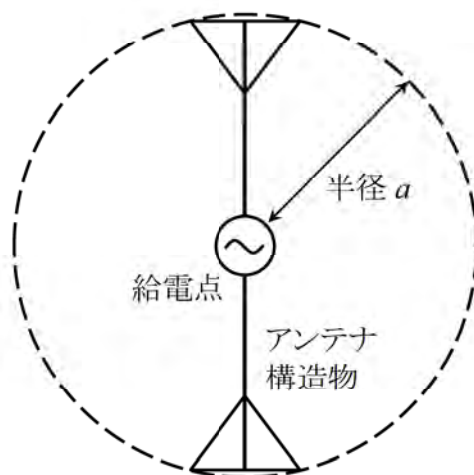


図5.1 半径 a の球に囲まれるアンテナ

5.2 直列共振型アンテナの広帯域化とマルチバンド化

直列共振型アンテナに対する複合モード励振は多くのアンテナ形状に対して行われており、整合板付き容量装荷モノポールアンテナ[19]、逆Lアンテナ(ILA)[20][21]、ノーマルモード

第6章

あとがき

本テキストは小形アンテナの動作原理を理解することをねらいに、共振型の小形・平面アンテナの理論を整理し、広帯域化、マルチバンド化の理論と設計について説明した。第2章では放射の基礎を扱い、マクスウェルの方程式から求まる微小電気・磁気ダイポールからの放射について示し、アンテナの回路特性に関連する等価回路、 Q 値と帯域、ポインティングの定理などを整理した。

第3章ではアンテナ特性と Q 値をテーマに、小形アンテナにおけるインピーダンス、帯域、利得や放射効率などの理論限界値を説明し、電気・磁気ダイポールに相当するダイポールアンテナ及びループアンテナの Q 値と放射効率、下限 Q 値、 Q 値の算出方法について説明した。

第4章では、代表的な小形アンテナとして線状アンテナである逆Lアンテナ、ノーマルモードヘリカルアンテナ、メアンダラインアンテナを取り上げ、さらに平面アンテナであるマイクロストリップアンテナと板状逆Fアンテナを扱い、それら小形・平面アンテナの共振周波数、放射抵抗、 Q 値について詳述した。

第5章は前章までの内容を踏まえた広帯域化とマルチバンド化について扱い、複合モード励振の一つとして直列共振特性と並列共振特性を組み合わせることによる広帯域化と2周波共用化について説明した。

最後に本テキストを執筆するにあたり、アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ（第61回、第62回）実行委員会の皆様に心より感謝申し上げます。