

## 新しいアンテナをつくるときに考えること

東京工業大学 工学院 教授 **ひろかわ じろう**  
**広川 二郎**



### 1. はじめに

今回、編集事務局から新しいアンテナにかかる理論、材料、製作技術、使用法・要求条件の観点から原稿を書いてほしいとの依頼を受けた。本稿では、これらの観点に関する私見を述べる。筆者自身、長年、導波管型平面アンテナの研究をしており、新しい動作のアンテナの研究、低損失な材料、新しい製作技術のアンテナへの適用を行っており、そこでの経験に基づき述べる。

### 2. 理論

時々、アンテナで大きい受信電力を広い範囲で実現できないかといわれる。アンテナでは、その面積に対して実現できる利得（一方向に電力をどれだけ集中できるかを表す数値）には限界があり、また、アンテナのビーム幅はアンテナの大きさにほぼ反比例する。上記を実現するには、アンテナのビーム幅を細くして切替あるいは走査して使うか、アンテナのビーム幅は広くしてアンテナへの入力電力を大きくする必要がある。アンテナには理論限界があり、それを越えたことはできないので、そのことをきちんと理解したうえで、考えていく必要がある。

昨今、使用される周波数が高い方へ移動している。周波数が高くなると、一般に、広い周波数帯域が使用でき、多くの情報を送ることができる。しかし、周波数が高くなると、低い周波数のときと同じ受信電力を得ようとするには、アンテナの電気的大きさ（物理的大きさを周波数で決まる波長で割ったもの）を大きくする必要がある。一点から等方的に電力が広がる場合の、その点からある距離の位置での電力密度は周波数によらず一定である。アンテナの受信電力は、その電力密度とアンテナ面積の積となるが、低い周波数のときと同じアンテナ面積を得るには、周波数が高くなり波長が短くなっているため、アンテナの電気的大きさを大きくしなければならない。これも理論限界の一つといえよう。

アンテナは1890年代のヘルツの実験に始まり、長い歴史がある。アンテナ理論はほぼ確立されているといえよう。ただ、同じ現象を違う観点でみることで、新しいアンテナの実現につながることは考えられる。新しいアンテナではないが、同じアンテナを違う使用法に用いることで、展開を

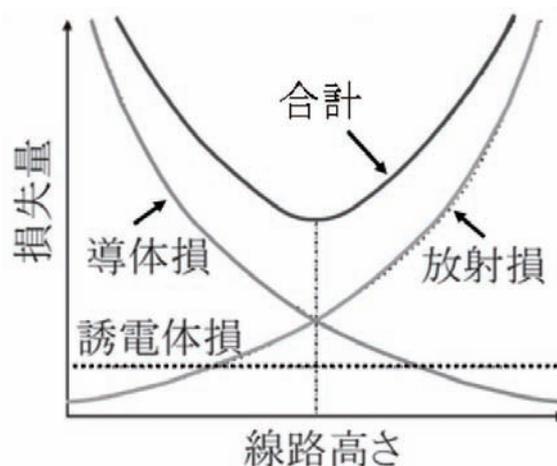
図った例として、私の研究室で検討した2次元モノパルス回路一体型導波管スロットアレーアンテナ<sup>[1]</sup>がある。当初モノパルス回路本来の使い方である、アンテナ正面方向に和パターンと差パターンを形成し2つのパターンの受信レベル差から方向を推定する回路としての利用を想定していたが、同じアンテナ2つを非遠方界領域で対向させ通信させると多重伝送が同時に行えることが分かった<sup>[2]</sup>。ちなみに、モノパルス回路による多くのビームは正面方向に電波を放射せず、伝送距離が長くなるにつれてこれらのビームが離れていくため、前述の多重伝送では遠方界領域では使用できない理論限界がある。

### 3. 材料

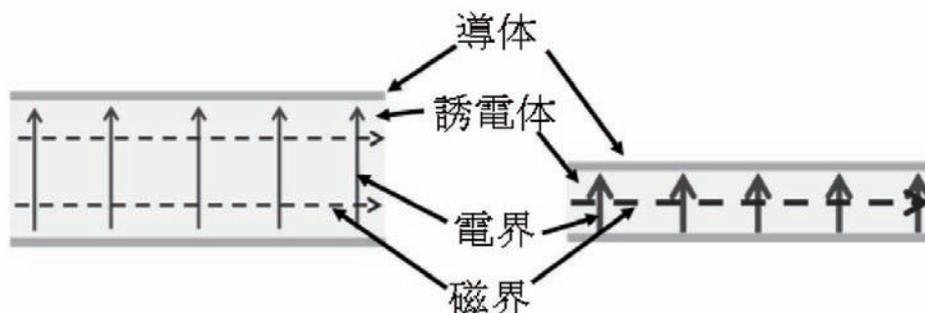
アンテナを構成する材料は主に導体と誘電体である。昨今、メタマテリアルなど波長に対して極めて小さい構造が用いられ、周波数が高くなると、損失が大きくなる。そこで、材料の損失に関する基本的な考えを以下にまとめておく。

図1に、給電線路の損失を示す。横軸は線路の高さ、縦軸は損失量を表す。一般に、誘電体損は線路の高さによらずほぼ一定であり、導体損は線路の高さが小さくなると大きくなる。これは以下のように説明できる。

図2に、高さの異なる2つの平行平板導波路を給電線路の例として示す。ここでは、線路の幅は高さに対して十分



■ 図1. 給電線路の損失



■ 図2. 高さの異なる給電線路

大きく、端部効果は無視する。左側は高さが大きい場合であり、右側は高さが小さい場合である。誘電体損は誘電体内の電界強度に誘電体の体積をかけたものである。例えば、高さを半分になると電界強度は2倍になるが体積は半分になるので、それらをかけたものは変わらないことになる。一方、導体損は導体表面の磁界強度に導体面積をかけたものである。例えば、高さを半分になると、導体面積は変わらないが、磁界強度は2倍になる。よって導体損は線路の高さにほぼ反比例することになる。また、マイクロストリップ線路のような開放型給電線路の場合には、線路を曲げたり分岐したりする際に放射や誘電体内に電波が伝搬する。これらの損失をまとめて放射損という。一般に放射損は線路の高さが大きくなると大きくなる。開放型給電線路の場合にはこれら3つの損失の和になり、図2に示すようにある高さで極小値をもつ。以上をまとめると、誘電体はどのように用いても誘電体損は避けられないので、材料の損失そのものを減らす必要がある。導体の場合は、もちろん材料の損失そのものを減らす必要があるが、導体上を電流が流れると損失になる。特に狭い間隔の複数の導体の間を電波が伝搬すると大きな損失になる。

周波数が数十GHzと高くなってくると、材料の形成法によっても特性が変わってくる。PTFE基板の表面に用いる銅箔の種類を、電解銅箔と圧延銅箔で変えると導電率の周波数特性にも違いが生じる。電解銅箔は、誘電体基板の表面を少し荒らしたところにメッキにより銅膜を形成する。一方、圧延銅箔は銅箔を圧着して形成する。圧延銅箔の方が、電解銅箔よりも導電率が高くなる。また、導電率は周波数が高くなるにつれて小さくなる。すなわち損失は大きくなる。周波数が高くなることで波長が短くなり、同じ荒れに対する影響が大きくなり損失が増えるためである。

また、数十GHz以上の高い周波数では、誘電体の比誘電率や損失を表す誘電正接、導体の導電率などの材料定

数の値そのものが、低い周波数とは異なってくる。これらを測定する方法としては、平行平板で両端を短絡した円形誘電体共振器を用いるもの<sup>[4]</sup>、波長に対して十分大きな円形誘電体共振器を用いて材料定数の周波数を測定するもの<sup>[5]</sup>などがある。

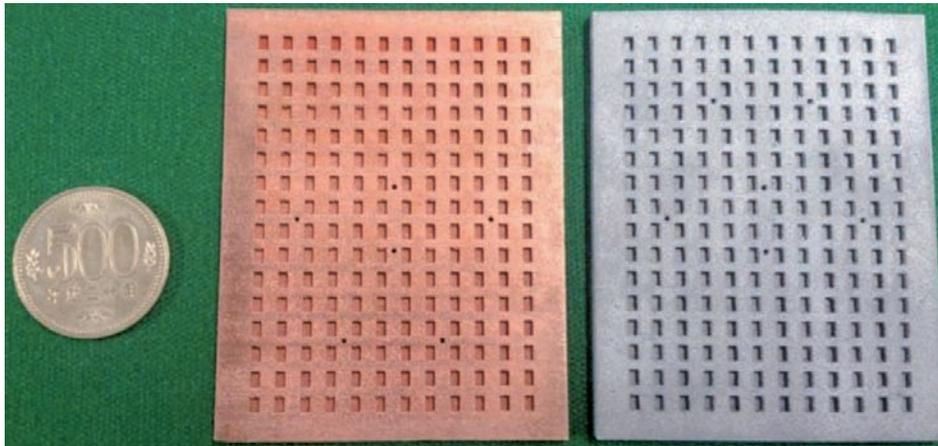
## 4. 製作方法

製作方法は日々進化しており、一般に必要な個数に適した製作方法は異なる。本章では、筆者が研究している導波管型平面アンテナの製作方法を中心に述べる。

製作方法には、機械加工、射出成型、エッチング、メッキ、3Dプリンタなど数限りなくある。導波管の製作方法には、引き抜き、放電加工、電鋳、切削などがあり、接合方法には、圧着、ねじ止め、接着、はんだ付け、ロウ付け、拡散接合などがある。

前章で述べたように誘電体を用いると誘電体損を避けることはできない。アンテナの規模が大きくなると材料による損失が顕著になる。そのような場合には、誘電体を用いない中空の導波管アンテナが望ましい。中空導波管構造は、従来製作が複雑で民生用にはほとんど普及していない。そこで、簡易な方法での実現が望まれている。

筆者は、図3に示すような積層薄板拡散接合による中空導波管アンテナを検討している<sup>[6]</sup>。導波路パターンが異なる複数の薄板をエッチングし、それらを積層して加圧加温真空下で拡散接合し、中空導波管アンテナを実現する。拡散接合は複数の金属を真空中高温加圧し分子の拡散により電氣的結合を得るものである。水冷式のヒートシンクとしてステンレスを用いてパイプ構造を構成するのによく使われているとのことである。ステンレスは銅に比べ約7倍導体損が大きいので、筆者は無酸素銅、あるいは軽量化のためアルミ合金を用いている。アンテナではホーンアンテナの製作に使われていた例がある<sup>[7]</sup>。60GHz帯16x16素子アン



■図3. 金属粉末レーザープロセスを用いた導波管アンテナ (左: 無酸素銅, 右: アルミ合金)

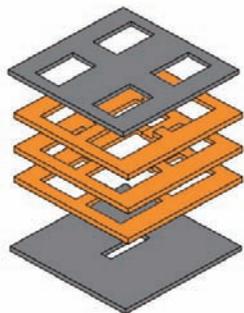
テナにおいて、83.6%の高いアンテナ効率を得ている<sup>[6]</sup>。また、導体損失は0.3dBと小さい。厚さ0.2mmの銅薄板を用いたエッチングでは20 $\mu\text{m}$ 程度の寸法ばらつきがある。また、薄板積層時にはノックピンによる位置決めを行うが若干の位置ずれがおこる。この寸法ばらつきと位置ずれの効果を等価的にアンテナの寸法誤差に置き換えて解析し、実験値と設計値の違いを説明できる場合がある。現在では汎用電磁界シミュレータにより複雑な3次元構造でも解析できるので、製造法に再現性があれば説明できる。

導波管アンテナの軽量化のために、プラスチックで成形し、その表面をメッキで形成する方法がある。前章でも述べたが、メッキの付きをよくするために、プラスチック表面を荒らす場合があり、メッキが薄い場合には、その荒れが損失になることがある。ニッケルなど鉄系の材料は比透磁率が高いため導体損失が大きいので、周波数が高いときには、金など導電率の大きい材料で覆うような場合もある。また、温度変化による形状変化も考える必要がある。自動車

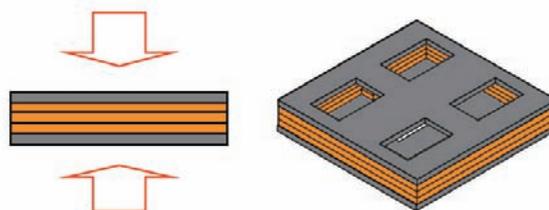
レーダなどでは-40度から85度の広い温度範囲をカバーする必要がある。形状変化による動作周波数の変化、温度変化の繰り返しによる材料の収縮の繰り返しのためにメッキがはがれるなどの問題がある。

最近では、3Dプリンタを用いたアンテナ製作が数多く検討されている。プラスチック材料を用いた場合には、かなり表面の平滑性の良いものが製作でき、数十GHz以上の高い周波数で使用されつつある。図4に、金属粉末レーザープロセスを用いた60GHz帯導波管アンテナを示す。左側が無酸素銅、右側はアルミ合金を用いたものである。金属粉末レーザープロセスは、直径10~38 $\mu\text{m}$ の粉末を約30 $\mu\text{m}$ の厚さに敷き、レーザを照射して溶解固結させている。これを繰り返して3次元構造を形成する。図4をみると分かるが、表面に荒さが残っている。粉末直径を小さくすれば荒さは減るが、粉末自身が凝集しやすく扱いにくいとのことである。表面の荒さは研磨等で除けるが内部ではそれができない。筆者が行った60GHzでの12x16素子アレーアンテナ試作では

#### 1. 薄板エッチング



#### 2. 拡散接合 加圧加温真空



■図4. 積層薄板拡散接合

荒さによる特性劣化が大きいですが、小規模な8x8素子アレーアンテナをAlSi10Mgの金属粉レーザ溶着により15GHzで製作した例があり、それでの材料損失は0.2dB程度である<sup>[6]</sup>。

## 5. アンテナ構成

アンテナは、一般に給電線路と放射素子の組合せで構成される。組合せに関しては、周波数帯、作りやすさ、損失等を考慮しなくてはならない。例えば、マイクロストリップアンテナとマイクロストリップ線路は金属箔付き誘電体基板のエッチング等で同時に構成できる。

電磁波の現象は長さが原則自由空間波長で規格化した値が同じであれば同じ現象になる。周波数が $n$ 倍になれば、長さを $\frac{1}{n}$ 倍にすれば同じ現象（スケール則）になる。これは誘電率、導電率などの材料定数が周波数依存性を持たないことが前提であるが、実際には周波数依存性がある。また、数十GHz以上の高い周波数では、物理寸法が小さくなるので、スケール側を適用できない形状パラメータがある。例えば、スロットアンテナにおける金属板の厚さなどである。さらに、単にアンテナの構成を考えるだけでなく、アクティブデバイスとの接続や、大規模アレーアンテナでの近傍界測定、小型アンテナでの放射効率測定なども含めた評価法も検討する必要がある。

## 6. おわりに

新しいアンテナの実現には、アンテナの電気設計だけでなく、材料、評価法、製造方法等における諸問題の解決が必要である。これらも日々進化しており、アンテナ特性向上につながっている。異分野との連携、広い範囲の知識の習得がますます重要になってくると考えられる。

## 参考文献

- [1] X. Xu, J. Hirokawa, and M. Ando, "Plate-laminated Waveguide Monopulse Slot Array Antenna with Full-corporate-feed in the E-band," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 100, no. 4, pp. 575-585, Apr. 2017.
- [2] K. Tekkouk, J. Hirokawa, and M. Ando, "Multiplexing Antenna System in the Non-Far Region Exploiting Two-dimensional Beam Mode Orthogonality in the Rectangular Coordinate System," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 66, no. 3, pp. 1507-1515, Mar. 2018.
- [3] T. H. Tran, Y. She, J. Hirokawa, K. Sakurai, Y. Kogami, and M. Ando, "Evaluation of Effective Conductivity of Copper-Clad Dielectric Laminate Substrates in Millimeter-Wave Band using a Whispering Gallery Mode Resonator," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 92, no. 12, pp. 1504-1511, Dec. 2009.
- [4] Y. Kobayashi, and M. Katoh, "Microwave Measurement of Dielectric Properties of Low-Loss Materials by the Dielectric Rod Resonator Method," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* vol. 33, no. 7, pp. 586-592, July 1985.
- [5] H. Tamura, Y. Kogami, and K. Matsumura, "Improvement of the Relative Permittivity Evaluation with a Whispering-Gallery Mode Dielectric Resonator Method," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 86, no.8, pp.1665-1671, Aug. 2003.
- [6] Y. Miura, J. Hirokawa, M. Ando, Y. Shibuya, and G. Yoshida, "Double-Layer Full-Corporate-Feed Hollow-Waveguide Slot Array Antenna in the 60GHz-Band," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 59, no. 8, pp. 2844-2851, Aug. 2011.
- [7] R.W. Haas, D. Brest, H. Mueggenburg, L. Lang, and D. Heimlich, "Fabrication and performance of MMW and SMMW platelet horn arrays," *Intl. J. of Infrared and Millimeter Waves*, vol.14, no.11, pp.2289-2294, Jan. 1993.
- [8] T.-H. Chio, G.-L. Huang, and S.-G. Zhou, "Application of Direct Metal Laser Sintering to Waveguide-Based Passive Microwave Components, Antennas, and Antenna Arrays," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 632-644, 2017.