

## 平面アンテナの特色及びその応用技術と展望

羽石 操<sup>†a)</sup>

Technical Features, Applied Technology, and Perspectives of Planar Antennas

Misao HANEISHI<sup>†a)</sup>

あらまし 本論文では代表的な平面アンテナ素子であるマイクロストリップアンテナ（以後、MSA）に着目し、その特色、応用上重要となる基礎技術、ユニークな応用事例及び展望などについて述べる。このMSAは、放射系及び給電系を一体として平面的に構成でき、しかも、軽量、小形、薄形であることから、UHF帯からミリ波帯にかけて、多様な分野において、多様な応用に供されている。また、ここ数年、EBG装荷MSA、多周波共用MSA及び半導体素子装荷MSAなどユニークな応用事例も数多く報告されるようになってきた。したがって、今後の更なる発展が大いに期待されている。

キーワード マイクロストリップアンテナ (MSA), 平面アンテナ, 技術的特色, MSA の応用, 展望

## 1. まえがき

電子機器の最近の趨勢は、小形化、軽量化、薄形化及び、集積化にある。このような動向を反映し、平面アンテナに関する研究が鋭意進められている。また、平面アンテナの代表例であるマイクロストリップアンテナ (Microstrip antenna, 以後 MSA) は、1970年代前半に Munson [1] や Howell [2] らにより軽量、ロープロファイルなアンテナ系として提唱されて以来、今日に至るまで多様な研究がなされている。すなわち、この種のアンテナ系は、UHF帯からミリ波帯にかけて飛翔体を含む、移動体通信用のアンテナ系への応用 [3] ~ [5] をはじめ多様な応用分野を見出しつつある。

一方、平面アンテナ研究の源流、すなわち、マイクロストリップ線路やトリプレート線路を放射系若しくは給電系として用いるアンテナ系に関する研究は、既に半世紀前には行われている。すなわち、この種の研究はストリップ線路の誕生とともに始められ、米国 IRE (現在、IEEE) の論文集の一つである MTT のストリップ線路特集号 (MTT-3, 1955年) には、既にプリント・スロットアンテナや各種線状アンテナ

ナのプリント化 [6] に関する検討結果が報告されている。また、ここ 10 数年は、携帯端末を含む移動体通信の発展に伴い、電子情報通信学会の総合大会などにおいて、MSA を含む平面アンテナ及びこの種のアンテナ系に関連する論文の発表件数が年次とともに飛躍的に増加している。これらのことを裏づけるため、春の総合大会に着目し、そこで最近発表された平面アンテナにかかわる論文の発表件数と西暦の関係を整理した一例を図 1 に示す。いずれにしろ、平面アンテナに関する発表件数は図のように増加の一途をたどっている。同様の傾向は、米国 IEEE のアンテナ分働関係の

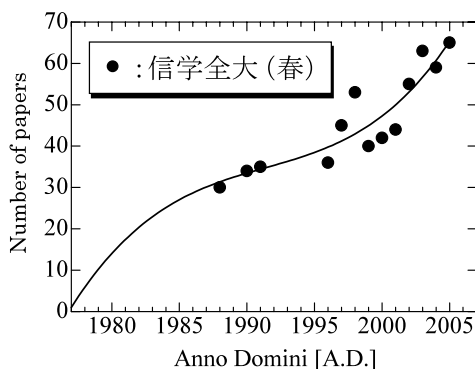


図 1 電子情報通信学会総合大会における平面アンテナ関連の発表件数

Fig. 1 Presented papers of planar antennas in the IEICE general conference.

<sup>†</sup> 埼玉大学工学部電気電子システム工学科, さいたま市

Department of Electrical and Electronic Systems, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, 338-8570 Japan

a) E-mail: haneishi@ees.saitama-u.ac.jp

国際会議の予稿集である IEEE/APS の論文集にも見られる。このように、これら平面アンテナについては、多岐にわたる分野において多様な研究がなされている。

本論文においては、これら各種平面アンテナのうち、国内外において最も精力的に研究が行われている平面アンテナ、すなわち、MSA に対象を絞り記述を行う。

## 2. 平面アンテナの種類及び MSA の特色

ここでは、平面アンテナの種類と MSA の特色について述べる。

### 2.1 平面アンテナの分類

ここに、平面アンテナを大別すると図 2 のように分類可能と考えられる。

すなわち、①方形、円形及びリング状などのマイクロストリップ型共振器（平面回路用共振素子）を放射素子として用いる直線偏波用 MSA（図 2(a)）。②方形または円形 MSA 素子の適切な位置に縮退分離用の摂動素子を装荷して円偏波の波を発生させる円偏波 MSA（図 2(b)）。③ストリップ線路の接地導体に半波長程度のスロットアンテナを構成し、そのスロット単体若しくは、そのアレーを放射器として用いるプリントスロットアンテナ [7]（図 2(c)）。④マイクロストリップ線路の線路導体をクランク状に折り曲げ、その折曲部より電磁波を放射させるライン型プリントアンテナ [8]（図 2(d)）。⑤マイクロストリップ線路若しくは、平面状のレツヘル線路の線路先端部において、その接地導体と線路導体により平面状のダイポールアンテナを構成する、プリントダイポール [9], [10]（図 2(e)）、及び⑥ラジアル導波路（Radial-line）の上部導体板に円偏波を発生させるためのスロット対をスパイラル状に配置するラジアルラインスロットアン

テナ [11] などに分類可能である。これらの各種平面アンテナは、各々興味ある特性を示すので、大学を含め、各種研究機関で鋭意研究が進められている。

### 2.2 MSA 素子の特色

ここに、最も精力的に研究が進められている平面アンテナ、すなわち、図 2(a), (b) に示される MSA 素子の特色を列記すると以下のように整理することができる。

①平面的でコンパクトに構成可能（Low-profile & Compact）、②大量生産に適する（Low-cost）、③素子としての特性が明りょう（設計性に優れる）、④小形化が容易（携帯端末などへの搭載可）、⑤スタック化による広帯域化が容易（多周波共用特性の実現可）、⑥構造的に強固で軽量化も可能（ハニカム基板などの使用、移動体への搭載可）、⑦半導体素子との装着性に優れる（Active 化が容易）、⑧放射系と給電系の一体化可能（MMIC 化が容易）、⑨その他などである。

このようなユニークな特色に注目され、MSA 素子は多様な分野において多様な応用に供されている。

## 3. MSA とその応用技術の基礎

本章では、MSA を多様な分野へ応用する際重要となる基礎技術について述べる。

### 3.1 MSA 素子

MSA 素子は、図 3 に示すように、銅はく付きプリント基板の上に、方形または円形の平面回路用の共振素子を構成し、その共振素子を放射器として用いるものである。また、MSA を含め平面アンテナに供されているプリント基板としては、一般に低誘電率 ( $\epsilon_r = 1.1 \sim 5.0$ ) で、低誘電体損失 ( $\tan \delta = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ ) を有する基板が要求され、テフロンガラスファイバ基板 (PTFE 基板) などがその代表例として挙げられる。一方、軽量化・広帯域化 (低  $Q$  化) などが要求される場合には、ペーパーハニカム基板、または、発泡フォーム基板などとフィルム基板を組み合わせた基板が用いられる [3], [4]。

次いで、MSA の代表的な給電方法を図 3 に示す。ここに、第 1 の給電法は、同軸コネクタやセミリジッドケーブルなどの同軸系の線路を用い基板背面より直結給電するプローブ給電方式（背面同軸給電方式）と呼ばれるものである（図 3(a)）。第 2 の方法は、共平面給電方式であり、これは、放射素子部とストリップ線路などによる給電部を同一平面上に一体として構成するものである（図 3(b)）。この方式は、MSA を素

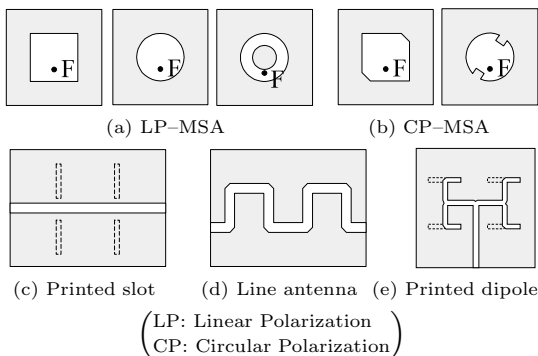


図 2 代表的平面アンテナ素子

Fig. 2 Typical planar antennas.

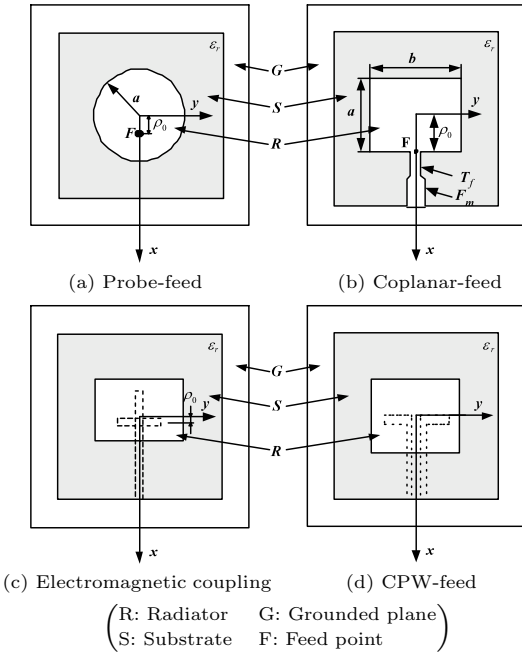


図 3 MSA 素子への代表的給電方式  
Fig. 3 Typical feeding-systems of microstrip antennas.

子とするアレーアンテナの給電系を構成する場合に威力を発揮する．第 3 の方法は電磁結合型給電方式である．これは，MSA 素子の接地導体に電磁結合用のスロットなどによる開口部を設け，この開口部を介して MSA 素子を励振するものである（図 3(c)）．この方式は，耐振動性などに優れた給電法として知られている．第 4 の方法は，MSA 素子の接地導体に給電用のコプレーナ線路（以後，CPW 線路）を構成し，その CPW 線路の線路先端部にスロットを構成し，電磁結合型給電方式により MSA 素子を励振するものである（図 3(d)）．この方式は，給電系にアクティブ素子などを装着する場合には有利である．いずれの場合においても，MSA 素子は，同軸線路，ストリップ線路及び CPW 線路などを含め，多様な給電線路との接続が可能であり，しかも，容易に整合をとることができるため，設計性に優れた放射系とみなすことができる．

### 3.2 円偏波化

移動体通信及び衛星通信の発展に伴い，円偏波アンテナが着目されるようになってきた [12] ~ [15]．これら円偏波アンテナのうち，MSA 素子により円偏波を発生させる手法は，2 点給電方式と 1 点給電方式に大別される．ここに，2 点給電方式は，図 4(a) のように，

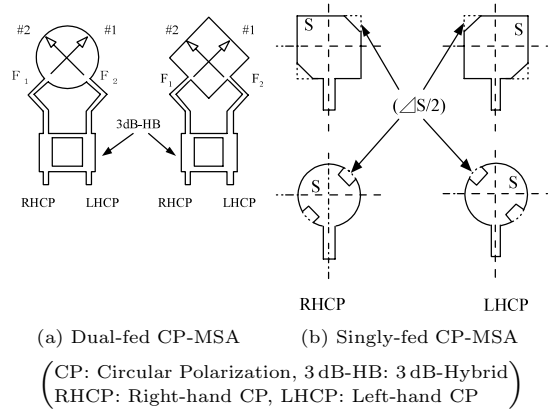


図 4 代表的円偏波素子  
Fig. 4 Typical CP-MSA elements.

空間的に直交する二つの給電点  $F_1$  及び  $F_2$  より MSA を励振するものである．この 2 点給電方式は広帯域特性を示すが，円偏波を発生させるために，3 dB-HB などの外部回路素子が必要となるため，その給電系の構成が容易ではない．次いで，1 点給電円偏波 MSA の動作を図 4(b) の模式図を用いて説明する．ここに，円形及び正方形 MSA に，縮退分離素子 ( $\Delta_s$ ) を装荷すると主モードの縮退が解け，この MSA 素子には空間的に直交する二つのモードが発生する [15]．そこで，摂動量 ( $|\Delta_s/S|$ ) が適切な値に調節されると，二つの直交モードの相対位相は  $+90^\circ$  または  $-90^\circ$  前後の値をとり，この MSA 素子は円偏波アンテナとして作動する．ここに， $\Delta_s$  は図 4(b) に示されるように，正方形または円形 MSA 素子に装荷された切込み部（給電点に対して一般に  $\pm 45^\circ$  方向に装荷）の面積に対応するものである．また， $S$  は切込み部が存在しない通常の MSA の素子面積に対応するものである．すなわち，円偏波を発生させるためには最適な摂動量 ( $|\Delta_s/S|$ ) が存在する．これら最適摂動量の求め方などについては文献 [15] に詳述されている．

### 3.3 広帯域化

MSA 素子は，軽量性，ロープロファイル性など多くの利点を有するが，その周波数特性が一般に狭いといった難点を有している．このため，MSA の広帯域化に関する研究は重要であり，現時点においても盛んに研究が進められている [13] ~ [16]．

MSA の代表的広帯域化技術の一例を図 5 に示す．MSA の帯域幅 ( $B_r$ ) は，一般に， $B_r = \{(\rho - 1)/Q_0\sqrt{\rho}\}$  ( $\rho$ : 所望の定在波比， $Q_0$ : 無負荷  $Q$  値)

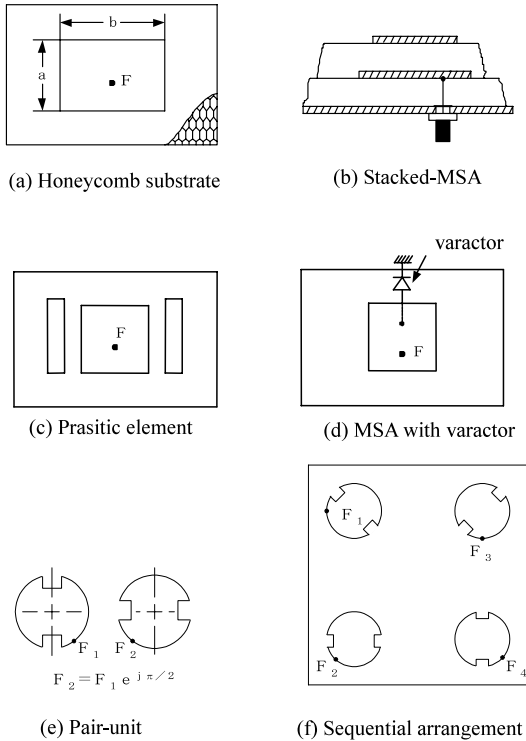


図 5 代表的な広帯域化の手法

Fig. 5 Typical techniques for achieving wideband performance.

として与えられる [15]。したがって、この  $Q_0$  値を下げれば、帯域幅 ( $B_r$ ) を増加させることができる。一方、MSA の  $Q_0$  値は、基板厚さ  $t$  に反比例し、供試基板の  $\epsilon_r$  に比例する。したがって、図 5 (a) に示すように、低誘電率特性を示すペーパーハニカム基板 ( $\epsilon_r \approx 1.2$ ) や発泡フォーム基板 ( $\epsilon_r$  は発泡率により異なるが、通常 1.1 程度の値) とフィルム基板を組み合わせ合わせた基板を用いて MSA を構成すれば低  $Q$  化が可能となり、広帯域化も実現できる。この基板の低誘電率化により、20%程度の帯域 ( $VSWR \leq 2.0$ ) を実現した例も報告されている [14]。一方、代表的な広帯域化の手法としては、図 5 (b) に示されるスタック化、すなわち、MSA 素子を重層構造にすることにより、広帯域特性を実現させる方法 [14], [16] が挙げられる。なお図 5 (c) に示すように、MSA 素子の近傍にパラシティック素子 (寄生素子) を装荷し、相互結合の効果により、共振カーブに摂動を与え、広帯域化を図る方法 [3]、及び図 5 (d) に示すように、MSA 素子の整合点などの適切な位置にバラクタなどの半導体素子を装

荷し、印加バイアス電圧を制御することにより、MSA の共振周波数を制御し、等価的に広帯域化を図る方法などもある [17]。

また図 5 (e), (f) に示すように素子単体としてではなく、2 素子または 4 素子のサブアレーを構成し、軸比などの広帯域化を図る方法もある。この手法は、円偏波 MSA 素子 2 個を用いてペア素子を構成し広帯域化を図る方法 [18] と、MSA 素子の素子回転角とその各々の素子への給電位相をシーケンシャルに制御し、広帯域化を図る方法 [19] に大別されるが、原理的には、両者に顕著な差異はない。いずれの場合も、素子単体の軸比特性に比べ 6~10 倍程度の広帯域化が達成される。

最後に、MSA 素子の代表的帯域改善法であるスタック化について詳述する。このスタック化による帯域特性の改善法に関する研究は、古くから行われている [14], [20], [21]。ここでは、最近に行われたスタック化による帯域改善法の一例について述べる。この方法は、CPW 線路により給電される MSA (以後、CPW-MSA) に着目し、その広帯域化を図ったものである [16]。ここに、供試スタック化 CPW-MSA 素子の基本構成の一例を図 6 (a) に示す。

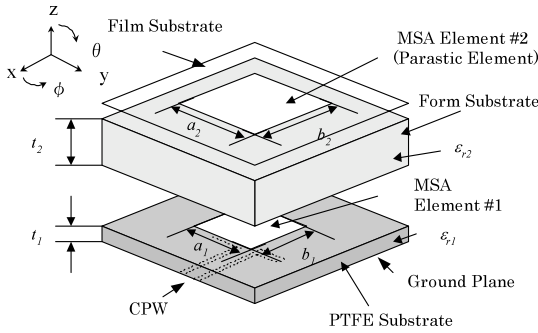
本供試アンテナの  $VSWR$  が 2.0 以下となる帯域幅 ( $B_r$ ) と素子寸法比 ( $a_2/a_1$ ) の関係性を求めたものを、図 6 (b) に示す。図のように素子寸法比を 1.4 前後の値にとれば、25%程度の広帯域化 ( $VSWR \leq 2.0$ ) が実現されることが明らかにされている [16]。

### 3.4 偏波共用化

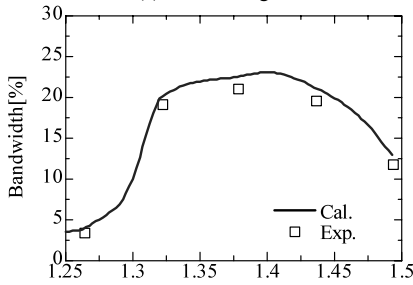
偏波共用特性を示すアンテナ系は、同一の周波数において、垂直偏波と水平偏波または、右旋偏波と左旋偏波の二つの波を同時に利活用することができるため、周波数の有効利用の観点よりかんがみ、有用なアンテナ系と考えられる。本節では、偏波共用平面アンテナの一例として、励振用スロットとして H 型構造のドックボーンスロット (以後、DB-スロット) を用いる DB-スロット励振偏波共用 MSA 素子 (以後、DP-MSA) [22] の基本特性について述べる。

供試直線偏波用 DP-MSA 素子の基本構成を図 7 (a) に示す。これは、テフロンファイバ基板 (PTFE 基板) によりその給電系が構成されている。また、MSA 素子は発泡フォーム基板とフィルム基板により構成されている。

供試 DP-MSA 素子の Port-1 (xz-pl.) におけるリターンロス特性とアイソレーション特性を求めると、



(a) Basic configuration



(b) Typical wideband performance  
 $(a_i=b_i=17.4\text{mm})$   
 $\left[ a_i=b_i=17.4, a_2=b_2=24.0, t_i=1.2, t_2=5.0, \right.$   
 $\left. \text{unit:[mm]}, \epsilon_{r1}=2.6, \epsilon_{r2}=1.08 \right]$

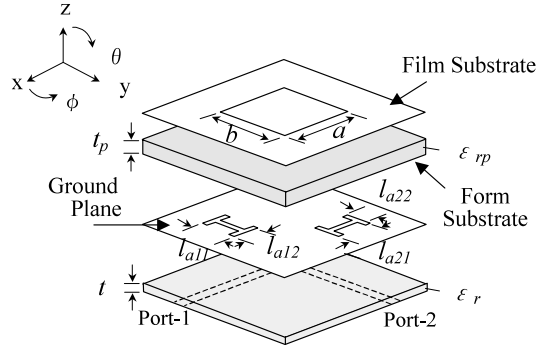
図 6 コプレーナ線路給電スタック化 MSA とその特性  
 Fig. 6 Test CPW-MSA and its performance.

図 7 (b) の結果が得られる．図に示されるように，設計周波数  $f_0$  ( $f_0 = 5 \text{ GHz}$ ) 近傍の周波数領域においては， $-30 \text{ dB}$  程度の良いリターンロス特性が実現された．また，垂直・水平両偏波の偏波分離度に対応するアイソレーション特性も， $f_0$  近傍の周波数領域においては， $-30 \text{ dB}$  以下の良好な特性が得られた．なお，Port-2 ( $yz\text{-pl.}$ ) についても Port-1 と同様に良好な特性が得られている [22]．ここに，図 7 (b) のリターンロス特性において，リターンロスの値が最小となる周波数を本論文では，設計周波数  $f_0$  と定義した．

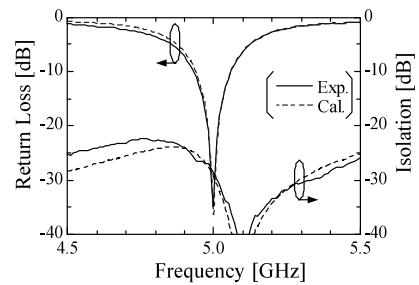
### 3.5 多周波共用化

離れた複数の周波数において，良好なリターンロス特性を示す，いわゆる多周波共用 MSA 素子は将来，移動体通信などのシステムにおいては有効に機能することが予想される．

そこで，典型的な多周波共用平面アンテナの基本構成を図 8 (a) に示す．これは，ひし形形状の MSA 素子に逆 V 字型のスリット (スリット幅  $d$ ，スリット間隔



(a) Basic configuration



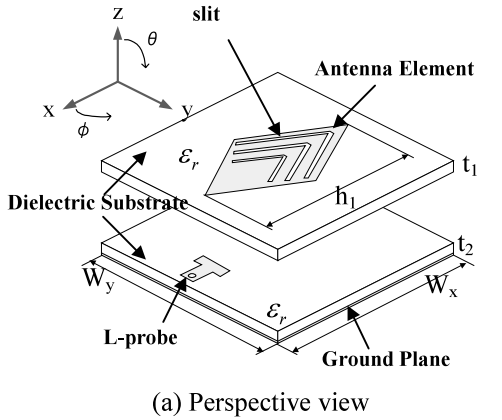
(b) Port-1 ( $E_V$ )

$\left[ a=b=25.8, l_{a11}=l_{a21}=8.0, l_{a12}=l_{a22}=4.0, \right.$   
 $\left. t_p=1.0, t=0.6, l_{s1}=l_{s2}=4.0, \right.$   
 $\left. \text{unit:[mm]}, \epsilon_r=2.6, \epsilon_{rp}=1.08 \right]$

図 7 偏波共用 MSA 素子 (DP-MSA) とその特性  
 Fig. 7 Test DP-MSA and its performance.

$g$ ) を装荷し，T 字型の広帯域 L-プローブにより電磁結合的に励振するものである (以後，RH-MSA) [23]．この RH-MSA 素子においては各々の装荷スリットに対応して固有の電流分布が得られ，それらの各電流経路に対応して複数の固有モードが発生し多周波共用特性が実現される．また，各モードのモード名は，共振周波数  $f_r$  の低い順に，1st モード，2nd モード，3rd モード及び 4th モードと呼ばれる．このように，本アンテナ系においては，装荷される逆 V 字型のスリット素子のスリット数に対応して複数の固有モードを発生させることができるため広帯域な周波数領域において多周波共用化が実現可能となる．

次いで，RH-MSA 素子のリターンロス特性の一例を図 8 (b) に示す [23]．図 8 (b) において， $3.89 \text{ GHz}$  に見られる共振現象は 1st モードの電流分布に対応するものである．また， $4.63 \text{ GHz}$ ， $6.99 \text{ GHz}$  及び  $9.75 \text{ GHz}$  に見られる共振現象は，各々，2nd，3rd 及び 4th モードの電流経路に対応するものである．モードの次数が



$$\left( \begin{array}{l} h_1=23.8, g=0.4, d=0.4, W_x=W_y=60, \\ t_1=t_2=1.2, \text{unit:[mm]}, \epsilon_r=2.6 \end{array} \right)$$

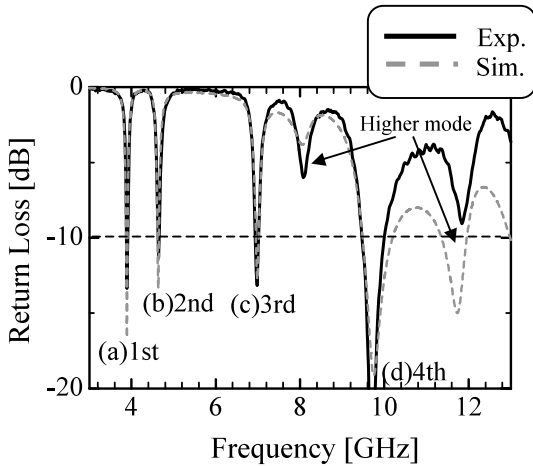


図 8 マルチバンド平面アンテナとその特性

Fig. 8 Test multiband RH-MSA and its performance.

増加するに伴い、各々のモードに対応する電流分布の経路長が短くなるので、図のように、各モードの共振周波数が上昇していく。

### 3.6 小形化

ここでは MSA の小形化についての基本事項について述べる。まず、図 9(a-1) に示す通常の両端開放型 (1/2 波長系) の方形 MSA について考えてみる。ここに、給電点 F の位置が図 9(a-1) のように設定された方形 MSA においては、素子寸法  $a'$  が共振周波数  $f_0$  の値を規定するので、図 9 に示すように素子寸法  $b$  を変え、方形 MSA の小形化を図っても、この  $b$  の値は共振周波数  $f_0$  には顕著な影響を与えない [15]。

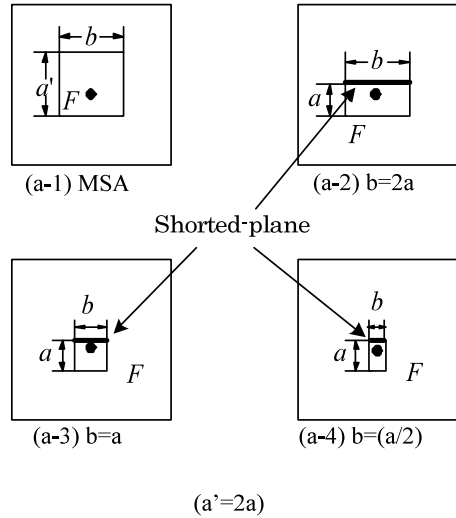


図 9 小形化の手法

Fig. 9 Typical technique for miniaturization.

一方、方形 MSA の素子中央部を短絡した構造の図 9(a-2) に示される (1/4) 波長系の片側短絡型方形 MSA (以後、S-MSA) は、通常の (1/2) 波長系の方形 MSA に比べ、同一共振周波数において、1/2 以下の素子寸法で構成することができる。したがって、小形アンテナとして有望な素子と考えられる [15], [24]。図 9(a-3) に示されるように、 $b = a = (a'/2)$  の素子寸法を有するアンテナ系は通常の方角 MSA に比べ、素子面積比で 1/4 まで小形化されたアンテナ系とみなすことができる。

このように、アンテナ系を小形化する際には、放射効率 ( $\eta$ ) と帯域幅 ( $B_r$ ) の検討が重要となる [24] ~ [26]。そこで、通常の PTFE 基板 ( $\epsilon_r = 2.55$ ,  $\tan \delta = 1.8 \times 10^{-3}$ ) 上に構成される  $b = (a/2)$  なる素子寸法を有する S-MSA (図 9(a-4)) について放射効率  $\eta$  を検討した結果によると、基板厚さ ( $t/\lambda_0$ ) を 0.02 以上の値に設定すれば、70% 程度の放射効率を得られることが示されている [24]。

### 3.7 アレー化

アレーの給電方式の代表例としては並列給電方式と直列給電方式が挙げられる。ここに、並列給電方式は、図 10 に示されるように、2 分配器と、(1/4) 波長インピーダンス変成器  $Z_1, Z_3, Z_5$  などにより構成される。この方式では、主給電点から各 MSA 素子までの電気長が等しくなるので、給電系としての周波数特性が比較的広いといった特徴を有する。このため、多くの場

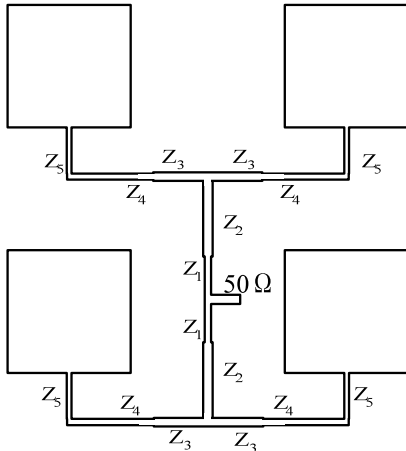


図 10 アレーアンテナの基本ユニット  
Fig. 10 Subarray-unit for array antenna.

合この形式がアレーの給電法として用いられる。更に、図 10 に示す 4 素子サブアレーを複数個用い、かつ、それらのサブアレー間の整合に注意を払いつつそれらのサブアレーを対称配列することにより、多素子 MSA アレーの構成も可能となる。一方、直列給電方式は、マイクロストリップ線路などを給電系に用い、MSA 素子を給電系に対して直列に配列するものである。配列される MSA の素子間隔としては、同相励振条件を実現させるため、通常、線路の伝搬波長に対応する  $\lambda_g$  の値に設定される。この給電方式では、MSA 素子への配列に要する線路長が短くなり、給電損失は低下するが、一般に周波数特性が狭いといった難点を有する。

### 3.8 ビーム成形

近年、急速に発達しつつある移動体通信や無線 LAN などの分野において、指向性を電子的に制御できるアンテナ系の要求が高まりつつある [27], [29]。指向性を電子的に制御する代表的なアンテナとしては、フェイズドアレーアンテナ (Phased Array Antenna) やアダプティブアンテナが挙げられるが、そこでは、高価な移相器や電力制御回路が必要とされ、かつ、その構造が複雑となるため、無線 LAN などの民生用の用途としては不向きなアンテナ系と考えられる。一方、給電用 MSA 素子と可変リアクタンス素子を装荷した無給電 MSA が同一平面上に構成されるビーム成形用のアンテナ (以後、BS-MSAA) [28] ~ [30] は、その構成が極めて簡易であるため最近注目されつつある [29]。このアレーアンテナは、図 11 (a) に示すように主給電 MSA 素子と無給電 MSA を素子間相互結合の効果に

より電磁結合させ、かつ、無給電 MSA に接続される可変リアクタンス素子のリアクタンス成分を電子的に制御することにより、ビーム制御を行うアンテナ系である。

なお、同様な原理を用いるアンテナ系としては、線状アンテナを放射素子とするエスパアンテナ (ESPAR Antenna) があり、それらについても鋭意研究がなされている [27]。

ここに、3 素子一次元 BS-MSAA の基本構成を図 11 (a) に示す。これは、同一平面上に同一素子間隔  $d$  で対称配列 (図は H 面 ( $\phi = 90^\circ$ ) 配列) された同一素子形状の MSA 素子よりなる。この BS-MSAA を用いてビーム成形を行った結果の一例を図 11 (b) に示す [29]。図のように、付加リアクタンスの値を制御することにより、所望のビームが成形可能となる。なお、付加リアクタンス  $X_1$  と  $X_2$  の値の制御は、パラクタダイオードの印加バイアス電圧を制御することによりなされている。また、この付加リアクタンスの制御部、すなわち、パラクタダイオードを含む受動回路はアンテナ部基板背面に構成されている [29]。

## 4. MSA の応用事例

MSA 素子は 2. 及び 3. で述べられたように、ロープロフィール性を含め種々のユニークな特色及びユニークな特性を有している。このため、MSA は素子単体及びそのアレーを含め多様な分野で多様な応用に供されている。Garg らは、それらの各種応用事例を以下のように整理している [31]。すなわち、①衛星受信用アンテナを含む衛星通信用アンテナ、②ドップラレーダを含む多様なレーダシステム、③無線高度計などのアンテナ・サブシステム、④コマンド用及び制御用アンテナシステム、⑤飛翔体搭載用及びテレメトリー用アンテナ、⑥リモートセンシング用及び環境計測用アンテナシステム、⑦給電用素子アンテナ、⑧衛星ナビゲーションシステム用アンテナ、⑨移動体通信用各種アンテナシステム、⑩ Integrated Antenna、⑪ Biomedical Radiator 及び進入防止用アラームシステム、及び⑫その他アンテナシステムなどに分類している。

また、上記の応用を含め、MSA は、その誕生以来、今日に至るまで多様な応用に供されている。これらの多様な応用実績のうち、初期の頃の研究動向は、MSA の応用状況を総合的に総括する上で、座標原点とみなすことができる。そこで、それら初期のころの応用動

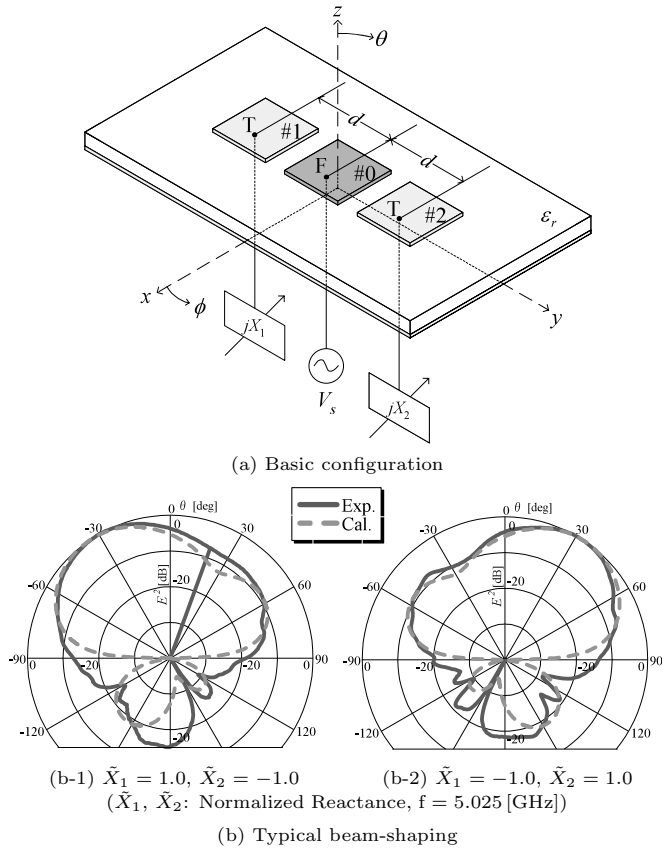


図 11 ビーム成形用平面アンテナ  
Fig. 11 MSA array for beam shaping.

向を整理したものを表 1 に示す。これは、Howell 及び Munson らにより、MSA に関する初期のころの論文が公表されて以来、約 10 年にわたる時期における応用動向 [32] ~ [39] について、整理した内容 [40] の一部である。この表 1 を見ると、MSA は既に初期の研究段階においても、多様な分野において応用されていることが分かる。なお、MSA に関する広範な応用事例については、MSA に関する総合的な解説書、例えば、James らによる「Handbook of Microstrip Antennas」をはじめ、種々の解説書において公表されている [13] ~ [15]。更に、MSA を含む平面アンテナに関する総合的な解説記事も多く報告されている [12], [40] ~ [42]。特に文献 [42] のアンテナシステムに関する特集号においては、MSA の主要な応用分野の一つであるフェイズドアレーに関する多様な応用事例が要領よくまとめられている [43]。また、車載用の MSA に関する応用事例についても、上記特集号においてコンパクトにまとめ

表 1 MSA の初期の頃の応用事例  
Table 1 Applications of an MSA in the early days.

項目	内容	文献
合成開口レーダ	SEASATT 衛星搭載用, L-band	4)
”	地球資源探査衛星搭載用, L-band	34)
ミリ波用	38GHz, (32×32) 素子	39)
ラジオメータ用	低サイドローブ (-25dB 以下)	38)
SPS モジュール	スリット装荷 MSA 素子使用	36)
フェイズドアレー	航空機搭載用, ±60° 走査	5)
”	±30° 走査, L-band	37)
衛星搭載用	マルチビーム(19 ビーム)	32)
移動体搭載用	非励振素子装荷, 3GHz 帯	35)
衛星放送受信用	ベア素子でアレー構成 (32×32 素子)	33)

\* (LP: Linear Polarization, CP: Circular Polarization)

られている [44] ので、MSA の応用事例を整理する際には、それらの論文も参考にすることが望まれる。

なお、MSA 素子及びそのアレーの応用例の一部をここに提示しておく。図 12 は、方形 MSA を素子とする合成開口レーダ [45] の展開図である。また、図 13 は



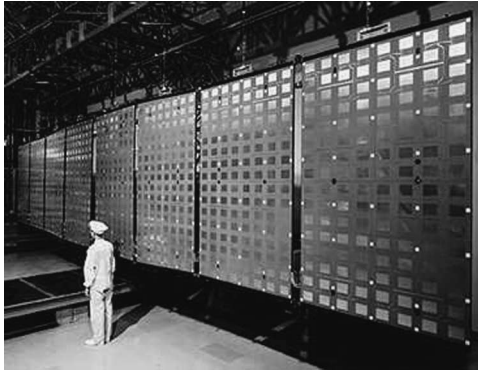


図 12 合成開口レーダ

Fig. 12 Synthetic aperture radar.  
(出典: <http://jaros.or.jp/page-j/sar.html>)

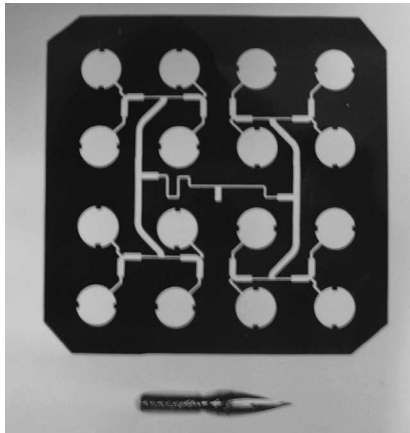


図 13 ペア素子により構成される円偏波 MSA アレー  
Fig. 13 Circularly polarized MSA-array composed of pair-units.

1 点給電円偏波 MSA 素子を用いてペアユニット [18] を構成し、軸比などの広帯域化を図った平面アレーの一構成例である。このような事例を含め、MSA は前述のように、多様な分野で多様な応用に供されており、今後もユニークな成果が期待されている。

### 5. 最近の研究動向及び展望

一方、最近になってフラクタル MSA など、MSA に関するユニークな研究も鋭意着目されるようになってきた。これらユニークな研究事例は、MSA の新たな応用への展望を切り開くものと期待されている。そこで、最近の MSA に関するユニークな研究動向をまとめ、それらの結果を表 2 に示した。この表 2 の内容について、以下に述べる。

表 2 最近の研究動向

Table 2 Recent research trend on an MSA.

項目	内容	文献
EBG 装荷 MSA	表面波および素子間相互結合の抑制など	[46],[47]
フラクタル MSA	小形化またはマルチバンド特性の実現	[48],[49]
GA による MSA 設計	GA により最適形状の決定	[50]
MEMS 素子と MSA の融合	MSA の多機能化	[51]
半導体装荷 MSA	偏波制御など MSA の多機能化	[52]
リフレクトアレー	MSA 素子による平面反射鏡の実現	[53]
スマートスキン(MSA アレー)	MSA 素子によるスマートスキンアレーの実現	[43]
フェーズドアレー	MSA アレーの高性能化	[43]
UWB 用平面アンテナ素子	超広帯域特性の実現	[54]

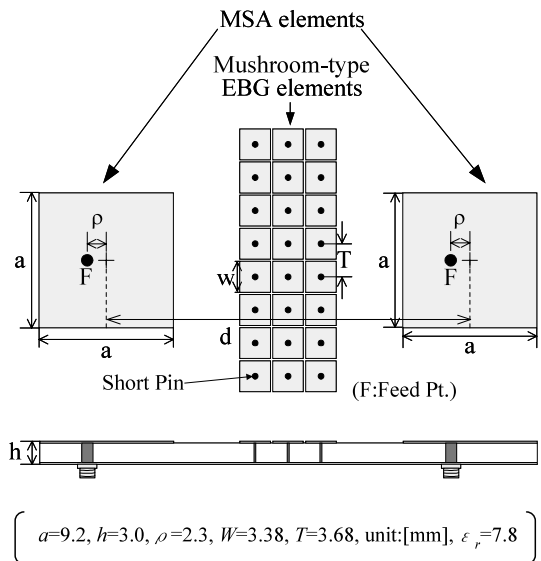
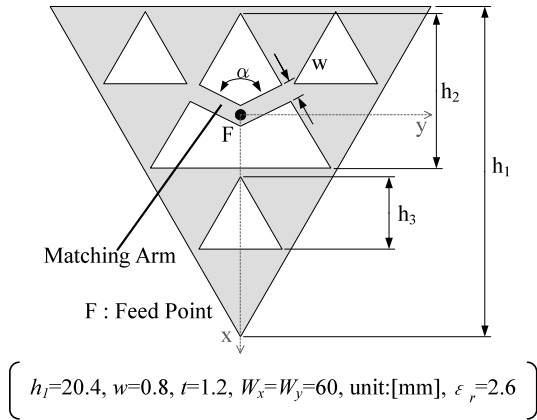


図 14 EBG 装荷 MSA アレー  
Fig. 14 MSA array with EBG elements.

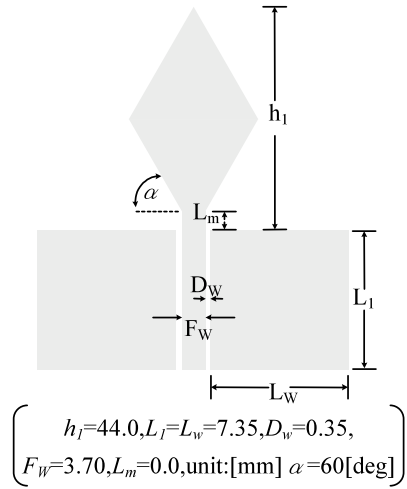
まず、① EBG (Electromagnetic Band Gap Structure) 装荷 MSA について記述する。この EBG 素子は、上下の金属導体に短絡ピンを装荷することにより構成されるマッシュルーム型 EBG [46] と、短絡ピンを装荷することなく MSA 素子と同一平面上に構成される共平面型 EBG [47] に大別される。いずれにしろ、図 14 に示されるように EBG 素子が装着されると表面波などの抑制が可能となり、素子単体としては、背面方向の指向性を改善することができ、アレーとしては、素子間相互結合の抑制などが可能となる。したがって、今後の多方面への応用が期待されてい



$$\left[ h_1=20.4, w=0.8, t=1.2, W_x=W_y=60, \text{unit:[mm]}, \epsilon_r=2.6 \right]$$

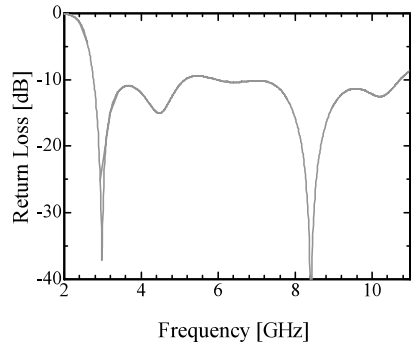
図 15 変型フラクタル MSA 素子  
Fig. 15 Modified fractal MSA.

る。また、②フラクタル構造を有する MSA については、コッホ曲線などにより規定される素子形状を有する MSA を用いて小形化を図るもの [48]、及び、図 15 に示されるように、MSA 素子の内部領域にスロットなどを装荷するシルピンスキーガスケット型の MSA を構成し、マルチバンド化を達成させる研究 [49] などが挙げられる。更に、③広帯域特性または、マルチバンド特性などを示す MSA 素子の最適素子形状を GA (Genetic Algorithm) を用いて決定しようとする研究 [50] なども行われている。また、④ MEMS (Microelectro Mechanical Systems) 素子と MSA 素子を融合させ MSA 素子の高性能化を図る研究も最近鋭意行われている [51]。更に、⑤ MSA 素子に半導体素子を装荷させ、偏波制御 [52] やビーム成形などを行う研究 [29] もなされている。なお、⑥位相制御用のスタブなどを装荷した MSA 素子を同一平面上に配列することにより平面状の等価反射鏡面を構成し、通常の曲面を有する反射鏡と等価な性能を実現させるリフレクタレーに関する研究 [53] なども行われている。また、⑦航空機の翼などの曲面形状を有する複雑な構造物に MSA アレーを構成するいわゆるスマートスキンに関する研究 [43] も興味のもたれるところである。更に、MSA アレーの高性能化の代表的手法であるフェイズドアレーについても、多様な研究がなされている [43]。なお、MSA 素子ではないが、⑧ CPW-線路により給電系が構成される超広帯域モノポール平面アンテナ素子に関する研究も鋭意行われている [54]。このモノポール型平面アンテナ素子の一構成例を図 16 に示す。図のように、CPW-線路により給電系を構成し、



$$\left[ h_1=44.0, L_1=L_w=7.35, D_w=0.35, F_w=3.70, L_m=0.0, \text{unit:[mm]} \alpha=60[\text{deg}] \right]$$

(a) Basic configuration



(b) Simulated  $S_{11}$  [dB] characteristics

図 16 UWB 平面アンテナの一例  
Fig. 16 Typical UWB planar antenna.

かつ、菱形の放射素子を用いることにより、2.5 GHz から 11 GHz にわたりリターンロス  $-10$  dB 以下の広帯域特性が実現されている。

このように、MSA 素子はその誕生以来今日に至るまで、多様な分野において、多様な研究に供されてきた。

また、表 2 に提示したように、今日においてもユニークで多様な研究が鋭意続行されている。したがって、今後ともユニークな研究成果の出現が期待されている。なお、MSA の特性解析にあたっては、平面回路に関する文献 [55], [56] が大きく寄与したことを付記しておく。

## 6. む す び

ロープロファイルであり、軽量であり、かつ、コンパクトに構成可能な平面アンテナ、すなわち、MSA に

着目し、その特色、興味ある応用技術及び展望などについて述べた。この MSA 素子については、表 2 において提示したように、現時点においても、ユニークな研究が鋭意行われている。したがって、この MSA については今後とも多様な応用分野において、ユニークな成果を生み出すことが予想される。

更に、電磁界シミュレータの発展した現時点においては、それらの利活用により、従来、解析不能であった複雑な形状を有する MSA 素子の特性解析も可能となってきた。したがって、今後、よりいっそう興味のある特性を有する MSA の出現が大いに期待されることである。なお、紙面の関係上、関連文献の一部のみを引用するにとどめた。

終わりに、資料提供及び実験などにおいて御協力頂いた関係各位に深甚なる謝意を表します。

#### 文 献

- [1] R.E. Munson, "Comformal microstrip antennas and microstrip phased arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-22, no.1, pp.74-78, Jan. 1974.
- [2] J.Q. Howell, "Microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-23, no.1, pp.90-93, Jan. 1975.
- [3] K.R. Carver and J.W. Mink, "Microstrip antenna technology," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-29, no.1, pp.2-24, Jan. 1981.
- [4] R.J. Mailloux, J.F. McIvenna, and N.P. Kernweis, "Microstrip array technology," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-29, no.1, pp.25-37, Jan. 1981.
- [5] J.S. Yee and W.J. Furlong, "An extremely lightweight fuselage integrated phased array for airborne applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-29, no.1, pp.178-182, Jan. 1981.
- [6] E.G. Fubini, "Stripline radiators," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-3, no.3, pp.149-156, March 1955.
- [7] 中岡快二郎, 伊藤精彦, "マイクロストリップラインスロットアレーアンテナ," *信学論 (B)*, vol.61-B-II, no.11, pp.943-950, Nov. 1978.
- [8] S. Nishimura, Y. Sugio, and T. Makimoto, "Crank-type circularly polarized microstripline antenna," *IEEE APS Int. Symp. Digest*, pp.162-165, 1983.
- [9] I.E. Rana and N.G. Alexopoulos, "Current distribution and input impedance of printed dipole," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-29, no.1, pp.99-105, Jan. 1981.
- [10] W.C. Wilkinson, "A class of printed circuit antenna," *IEEE APS Int. Symp. Digest*, pp.270-273, 1974.
- [11] 安藤 真, 笹沢英生, 西方 聡, 後藤尚久, "ラジアルラインスロットアンテナにおけるスロット設計," *信学論 (B)*, vol.J71-B, no.11, pp.1345-1351, Nov. 1988.
- [12] 伊藤精彦, 手代木扶, "薄形アンテナの現状と動向," *信学論 (B)*, vol.J71-B, no.11, pp.1217-1227, Nov. 1988.
- [13] J.R. James, P.S. Hall, and C. Wood, *Microstrip antenna theory and design*, Peter Peregrinus, 1981.
- [14] J.R. James and P.S. Hall, *Handbook of microstrip antennas*, Peter Peregrinus, 1989.
- [15] 羽石 操, 平沢一紘, 鈴木康夫, 小形・平面アンテナ, 電子情報通信学会, 1998.
- [16] 羽石 操, 落合隆仁, 鈴木淳司, "コプレーナ線路により励振される広帯域 MSA," *信学論 (B)*, vol.J84-B, no.7, pp.1358-1364, July 2001.
- [17] P. Bhartia and I.J. Bahl, "A frequency agile microstrip antenna," *IEEE APS Int. Symp. Digest*, pp.304-307, 1982.
- [18] 羽石 操, 吉田信一郎, "パッチアンテナとそのペア," *信学技報*, AP81-102, Nov. 1981.
- [19] 手代木扶, 中條 涉, "シークンシャルな配列と励振による広帯域円偏波アレーアンテナ," 昭 58 信学総全大, 748, 1983.
- [20] S.A. Long and M.D. Walton, "A dual-frequency stacked circular disc antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-27, no.3, pp.270-273, March 1979.
- [21] 多賀登喜雄, 三島 発, 兼堀綱夫, "UHF 帯マイクロストリップアンテナの広帯域化," 昭 54 信学会総全大, S6-6, pp.254-255, 1979.
- [22] 羽石 操, 今野 恵, 矢作潤一, "ドッグボーンスロットにより励振される偏波共用平面アンテナ," *信学論 (B)*, vol.J85-B, no.6, pp.953-961, June 2002.
- [23] 四戸雄介, 羽石 操, 木村雄一, "スリット装荷ひし形マイクロストリップアンテナとその放射特性," *信学技報*, A-P 2005-12, May 2005.
- [24] 羽石 操, 松井章典, 斉藤作義, "マイクロストリップアンテナの小形化に関する一考察," *信学論 (B)*, vol.J71-B, no.11, pp.1378-1380, Nov. 1988.
- [25] K. Fujimoto, A. Henderson, K. Hirasawa, and J.R. James, *Small antennas*, John Wiley & Sons, 1987.
- [26] 日高一孝, "小形 FM アンテナ," *テレビ誌*, vol.39, no.12, pp.1148-1154, Dec. 1985.
- [27] 秋山 章, 行田弘一, 大平 孝, 安藤 真, "エスパアンテナのビーム及びヌル形成能力に関する数値シミュレーション," *信学論 (B)*, vol.J85-B, no.12, pp.2234-2243, Dec. 2002.
- [28] R.J. Dinger, "A planar version of a 4.0 GHz reactively steered adaptive array," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-34, no.3, pp.423-431, March 1986.
- [29] 浦田育彦, 羽石 操, 木村雄一, "マイクロストリップアンテナにより構成されるビーム可変平面アレーアンテナ," *信学論 (C)*, vol.J87-C, no.1, pp.100-111, Jan. 2004.
- [30] R.J. Dinger, "Reactively steered adaptive array using microstrip patch elements at 4GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-32, no.8, pp.846-856, Aug. 1984.
- [31] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboom, *Microstrip antenna design handbook*, Artech House, 2001.

- [32] 手代木扶, 小室英雄, 中條 涉, 赤石 明, 広瀬晴三, “衛星用 S バンド帯マルチビームアレーアンテナの開発,” 昭 59 信学総全大, S19-10, pp.441-442, 1984.
- [33] 羽石 操, 斉藤作義, 安倍 豊, 皆瀬 淳, 小林周三, “マイクロストリップ円偏波ベア素子を用いた SHF 帯平面アンテナ,” 昭 59 信学総全大, 711, 1984.
- [34] 久田安正, 伊藤康之, 赤石 明, 井村信義, 小野 誠, “合成開口レーダアンテナ系の試験結果,” 昭 59 信学総全大, 802, 1984.
- [35] 堀 俊和, 中嶋信生, “広帯域円偏波マイクロストリップアレー,” 昭 57 信学会光・電波全大, S2-13, pp.315-316, 1982.
- [36] 伊藤精彦, 秋葉康弘, 大鐘文雄, 小川恭孝, “SPS レクテナ素子の整流回路に関する実験とコンピュータシミュレーション,” 昭 59 信学総全大, 741, 1984.
- [37] 大森慎吾, 三浦秀一, 鈴木康夫, 宮野憲明, 千葉胤昭, “円偏波マイクロストリップアンテナを用いた電子走査アンテナ,” 信学技報, A-P81-104, Nov. 1981.
- [38] R.J. Stockton and L. Dod, “Large L-band radiometer array,” IEEE APS Int. Symp. Digest, pp.446-449, 1978.
- [39] M.A. Weiss, “Microstrip antennas for millimeter waves,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-29, no.1, pp.171-174, Jan. 1981.
- [40] 羽石 操, “平面アンテナ,” テレビ誌, vol.38, no.11, pp.976-984, Nov. 1984.
- [41] 西村貞彦, 羽石 操, “プリントアンテナ,” 信学誌, vol.63, no.3, pp.218-224, March 1986.
- [42] K. Sawaya and T. Shiokawa, “Special issue on historical review of antennas systems in Japan,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.3, pp.891-1021, March 2003.
- [43] Y. Konishi, “Phased array antennas,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.3, pp.954-967, March 2003.
- [44] K. Nishikawa, “Land vehicle antennas,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, vol.3, pp.993-1004, March 2003.
- [45] <http://www.jaros.or.jp/page-j/sar.htm>
- [46] F. Yang and Y.R. Samii, “Applications of EBG structures in microwave antenna designs,” Proc. 3rd Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, pp.528-531, Aug. 2002.
- [47] F.R. Yang, K.P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, “A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic-bandgap structure,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.47, no.11, pp.2092-2098, Nov. 1999.
- [48] D.H. Werner and S. Ganguly, “An overview of fractal antenna engineering research,” IEEE Antennas Propag. Mag., vol.45, no.1, pp.40-47, Feb. 2003.
- [49] 多田真他, リド チャヨノ, 四戸雄介, 木村雄一, 羽石 操, “変形フラクタル構造を有するマイクロストリップアンテナの放射特性,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.8, pp.1519-1531, Aug. 2005.
- [50] R. Soontornpipit, M. Furse, and Y.C. Chung, “Miniaturized biocompatible microstrip antenna using genetic algorithm,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.6, pp.1939-1945, June 2005.
- [51] S. Liu, M. Lee, C. Jung, and F.D. Flaviis, “A frequency-reconfigurable CP patch antenna by integrating MEMS switches,” IEEE, APS. Int. Symp., vol.2A, pp.413-416, July 2005.
- [52] F. Yang and Y.R. Samii, “Patch antennas with switchable slots in wireless communication,” IEEE Trans. Antennas Propag. Mag., vol.47, no.2, pp.13-29, April 2005.
- [53] J. Huang and R.J. Pogorzelski, “A Ka-band microstrip reflect array with elements having variable rotation angles,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.46, no.5, pp.650-656, May 1998.
- [54] 前田忠彦, “UWB アンテナ技術: ユビキタス超高速通信のためのアンテナ伝搬・評価技術と展望,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.9, pp.1586-1600, Sept. 2005.
- [55] 許 瑞邦, “マイクロ波平面回路の縮退モードの応用,” 信学技報, MW71-53, Sept. 1971.
- [56] 大越孝敬, 三好旦六, 平面回路, オーム社, 1975 .

(平成 17 年 9 月 30 日受付)



羽石 操 (正員:フェロー)

昭 42 埼玉大・理工・電気卒。昭 44 都立大大学院修士課程了。工博。埼玉大助手、助教授を経て、平 2 同教授。専門は電磁波工学、特に平面アンテナに関する一連の研究。昭 52 本会学術奨励賞受賞。