HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北大におけるスロットアンテナおよびその応用に関する研究
Author(s)	伊藤, 精彦
Citation	北海道大學工學部研究報告, 101, 29-38
Issue Date	1980-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41646
Type	departmental bulletin paper
File Information	101_29-38.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第101号（昭和55年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 101 (1980)

北大におけるスロットアンテナおよびその応用に関する研究

伊藤　精彦*

（昭和55年6月30日受理）

Study on Slot Antenna and its Application in Hokkaido University

Kiyohiko ITOH

(Received June 30, 1980)

Abstract

A slot antenna is a radiating element formed by a slot in a conducting surface. Since the slot antenna was invented by Professor emeritus Asami et al. of Hokkaido University during World War II independently of other countries, many basic works have been done here in Hokkaido University. At present the slot is one of the most basic antennas in Antenna Engineering. This report introduces a state of art review on the slot antenna research and its application in our Univesity. The slot is applicable to many practical cases in which the slot is usually backed by a shallow rectanguar cavity in order to be mounted on the surface of high speed vehicles such as a car,a rocket, and so on. Therefore, in this report, the slot backed by the shallow rectangular cavity is analyzed using the reaction matching method for obtaining the magnetic current distribution on the slot, and also the current induced method for obtaining a far field pattern. Experimental values agree well with the computed results so that our methods adopted here are reasonable and valuable. In this report,antenna systems composed of the slot antenna and wire antennas are also investigated by above-mentioned methods. These systems are applicable to maritime satellite communication and broadcasting satellite individual reception.

1　ま　え　が　き

スロットアンテナは導体面上にあけた細長い溝，すなわちスロット（Slot）またはスリット（Slit）よりなる放射素子である。我国においては浅見（北大工学部名誉教授）博士等のしゃへい箱に細長く切った細げきよりの電波の漏れの共振現象の発見により始まり[1]，現在バビネ・ブッカーの関係あるいはブッカーの関係として知られている

$$z_{slot}\cdot z_{dipole}=\frac{\zeta_0^2}{4},\quad \text{ここで}\ \zeta_0=\sqrt{\kappa_0/\varepsilon_0}=120\pi\ \Omega$$

なる関係も，松本正（北大工学部名誉教授）博士により独自に求められている[4]。その後も、鈴木道雄（北大工学部教授）博士によるスロットアンテナとその給電系であるレッヘル線との結合の影響等の研究[5]，及びこの研究の双対問題とも云うべき，スロット伝送系より電流アンテナを励振

* 電子工学科　電波伝送工学講座

した場合の結合に関する研究が鈴木勝裕博士等[6]により行なわれてきている。また，エネルギー密度アンテナが筆者により発明され[7]，このアンテナの移動体搭載用を目的とした研究のため，薄型空胴付スロットアンテナの実験，理論が検討され，その取り扱いがほぼ解明された[8],[9]。また，基板の有限性による上記空胴付スロットアンテナの指向性への影響等についても明らかにされている。さらに，スロットと非励振ダイポールとの結合を利用し、スロットアンテナの特性を改良する試みもなされ，理論的には解明されている。この報告は，本講座において現在までに明らかにされた，スロットアンテナの特性，理論的取り扱い，その応用等について述べている。

2　エネルギー密度アンテナと薄型空胴付スロットアンテナ

2－1　エネルギー密度受信用スロット・モノポールアンテナ

図1に示すスロット・モノポールアンテナは移動通信における定在波に起因するフェージングの防止を目的として発明されたアンテナである。[7] このアンテナの具体的構造は図2に示されている。すなわち，スロットアンテナは薄型空胴付スロットアンテナ，モノポールアンテナは根本に空胴を装荷したスリーブアンテナとして設計され得る[8]。このアンテナの特徴は，電界に感応するモノポールと磁界に感応する2つのスロットアンテナが互いに直交して配置しているため，それぞれ独立に動作することである。各素子間に結合がないので，指向性はスロット，モノポール固有の指向性が保たれている。したがって，このスロット・モノポールアンテナはアンテナに続く回路を適当に選ぶことにより，エネルギー密度受信[10]やハート形指向性を有する素子[11]として利用可能である。

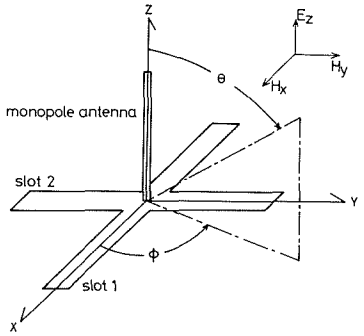


図1　スロット・モノポールアンテナ

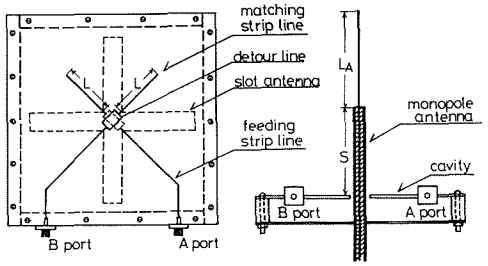


図2　スロット・モノポールアンテナの具体例

2－2　薄型空胴付スロットアンテナ

図2の例からも明らかなように，スロットアンテナは実際の応用にあたって，薄型空胴付で使用される。すなわち薄型空胴付にしてはじめて埋込みアンテナとして，スロットアンテナは使用可能となり，飛行機や自動車などの移動体における風圧・振動・衝撃などに耐え得るアンテナとなる。したがって，実用的立場からは，スロットアンテナは両面放射型により，空間の一方にのみ放射する薄型空胴付スロットアンテナが多く用いられる。このような空胴付スロットアンテナに関しては多くの研究がなされている。解析については，Galejs によって，変分法による解法が示されている[12]。また，伊藤等によっては，導波管の軸方向に切られたスロットの伝搬姿態である漏れ波 $H_{slot,0}$ 波がスロットアンテナの共振主モードであると仮定した設計法[13]，Cockrell による空胴が比較的深い場合の近似計算法[14]などがある。以上に述べた各論文は夫々適用限界を有

しており，空胴付スロットアンテナに現実にもち上る諸要求に対応できるとは云い難かった。すなわち，スロットアンテナは半波長共振時の入力抵抗が数百Ωにも達するため，次節以降に述べるようにオフセット給電法や多点給電法がしばしば採用される。これらの実際の諸要求に答えるために，電流アンテナの解析にRichmondにより開発されたReaction整合法[15]を空胴付スロットアンテナの解析に適用した。

2－3　リアクション整合法による空胴付スロットの解法

図3に示すスロットアンテナに対する定式化はGalejsにより行なわれている[12]。すなわち，図3において，スロット開口面上の$x=h_{mf}$に振幅Iの無限に細い理想的な電源があるとすると，スロット開口面電界$E_y(x,\ y)$を未知関数とする次式のような積分方程式が得られる。

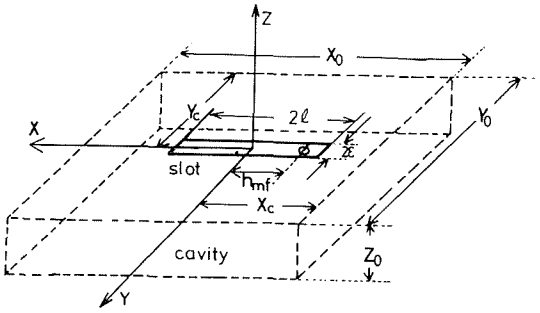


図3　空胴付スロットアンテナ

$$\int\int_{slot} E_y(x',y')K(x,y|x',y')\,dx'\,dy'=I\cdot\delta(x-h_{mf}) \tag{1}$$

ここで，$K=K_i(x,y|x',y')+K_o(x,y|x',y')$

いま空胴内部が比誘電率ε_rの誘導体で満たされているとすると，$k_o=\omega\sqrt{\varepsilon_o\mu_o}$，$k_i=k_o\sqrt{\varepsilon_r}$と置き

$$K_i=\frac{1}{4\pi j\omega\mu_0}\left[k_i^2+\frac{\partial^2}{\partial x'^2}\right]G_i,\quad K_0=-\frac{1}{2\pi j\omega\mu_0}\left[k_o^2+\frac{\partial^2}{\partial x'^2}\right]G_o$$

$$G_i=-\frac{4\pi}{x_o y_o}\sum_{p=0}^{\infty}\sum_{q=1}^{\infty}\frac{\varepsilon_p\varepsilon_q}{\beta_o}\cot\beta_o z_o\sin\beta_x(x+x_o)\cdot\cos\beta_y(y+y_o)\cdot\sin\beta_x(x'+x_o)\cdot\cos\beta_y(y'+y_c)$$

$$G_o=\exp\{-jk_o[(x-x')^2+(y-y')^2]^{\frac{1}{2}}\}/[(x-x')^2+(y-y')^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta_x=q\pi/x_o,\ \beta_y=p\pi/y_o,\ \beta_c^2=k_x^2-\beta_x^2-\beta_y^2,\quad \varepsilon_p=\{1\ for\ p=0\ \ and\ 2\ \ for\ p\neq 0\}$$

ここで，(1)式はいわゆるGalejsの積分方程式である[9]。(1)式にリアクション整合法を適用して，数値計算に適した行列式へと変換して行く。すなわち，スロットを長さΔlを有するN_s個のセグメントに等分割し，このセグメント2個により図4に示すようなN_S-1個の試験微小スロット片を考え

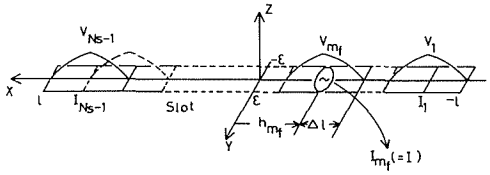


図4　正弦波状電圧分布の微小スロット片

$$\bar{V_n}(x,y)=V_y^n(y)V_x^n(x)$$

とおく。ここで，

$$V_x^n(x)=\{\sin\ k_o(\Delta l-|x-x_m|)/\sin\ k_o\Delta l\ \ for\ \Delta l>|x-h_n|\ and\ 0\ \ \ for\ \Delta l<|x-h_n|\} \tag{2}$$

$V_y^n(y)$はスロットの幅方向の適当な分布関数であり，スロット幅が波長に比し十分小さいときにマックスウェル分布とみなし得る。従って，スロット面上の電界は

$$E_y(x,y)=\sum_{n=1}^{N_S-1}V_n\bar{V_n}(x,y) \tag{3}$$

となる。(2)を(1)に代入することにより，微小スロットの集合として単体のスロットアンテナを表現出来たことになる。この式の両辺に$\int_{-\epsilon}^{\epsilon}\int_{hm-\Delta l}^{hm+\Delta l} V_m(x,y)dxdy$を作用させる。すなわち，図4の任意のm番目とn番目の微小スロット片間のリアクションを取ることにより次式を得る。

$$\sum_{n=1}^{N_s-1}[Y^o_{mn}+Y^i_{mn}][V_n]=I_m;\ m=1,2,\cdots,N_s-1 \tag{4}$$

ここで，

$$\begin{cases} Y^o_{mn}=\int_{-\epsilon}^{\epsilon}\int_{hm-\Delta l}^{hm+\Delta l} dx\,dy\ \ V_{\bar{m}}(x,y)\int_{-\epsilon}^{\epsilon}\int_{hm-\Delta l}^{hm+\Delta l} dx'dy'\cdot V_{\bar{n}}(x',y')K_o(x,y|x',y') \\ Y^i_{mn}=\int_{-\epsilon}^{\epsilon}\int_{hm-\Delta l}^{hm+\Delta l} dx\,dy\ \ V_{\bar{m}}(x,y)\int_{-\epsilon}^{\epsilon}\int_{hm-\Delta l}^{hm+\Delta l} dx'dy'\cdot V_{\bar{m}}(x',y')K_i(x,y|x',y') \end{cases} \tag{5}$$

$I_m=I\cdot\delta_{mf,m}$, $\delta_{i,j}$: *kronecker's delta*

(5)式のY^o_{mn}, Y^i_{mn}は(2)式等を代入することにより陽表現が可能となる[9]。したがって(4)式は次式のように行列表示可能となる。

$$〔Y〕〔V〕=〔I〕 \tag{6}$$

ここで，$[Y]=\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12}\cdots \\ Y_{21} & Y_{22} \\ \vdots & \end{bmatrix}$, $Y^o_{mn}+Y^i_{mn}=Y_{mn}$

$[V]=[V_1,V_2,\cdots]^T$, $[I]=[I_1,I_2,\cdots]^T$, T:転置

上式において〔Y〕は一般化アドミタンス行列，〔V〕は一般化電圧ベクトル，〔I〕は一般化電流ベクトル又は励振ベクトルと呼ばれる。スロットの入力アドミスタンスY_{in}は

$$Y_{in}=I/V_o,\quad V_o=-\int_{-\epsilon}^{\epsilon} dyE(h_{mf},y)=V_{mf}$$

で与えられる。以上の例では1点給電すなわち励振ベクトルの要素が一つについて(すなわちI_m=I)のみ述べたが，一般には多点給電であってもよい。

(a)中央給電の入力インピーダンス

図5は中央給電スロットの入力インピーダンスの計算例で，上述のリアクション整合法による計算値とGalejsの計算値[16]が実験値と比較して示されている。図5よりIの点の近傍については両方とも実験値と良く一致しているが，IIの点については，リアクション整合法の計算値が実測値とよく一致していることが分る。また図5のP点はGalejsの計算法では発散してしまう点である。

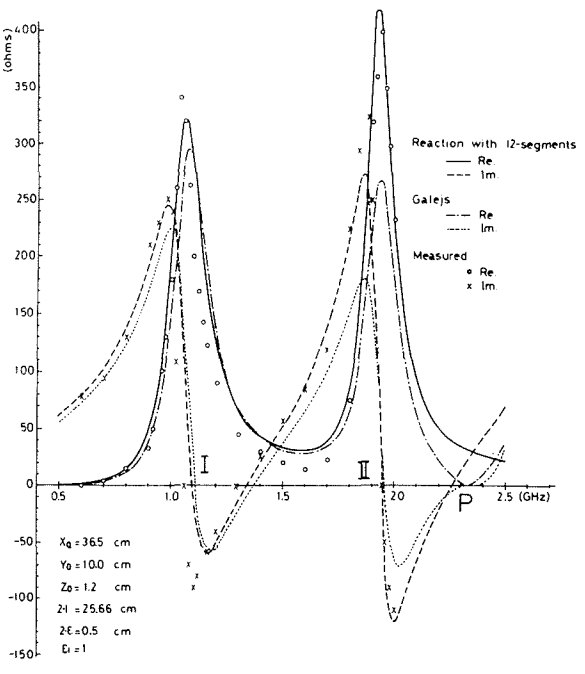


図5 薄型空胴付スロットアンテナの入力インピーダンス

(b)共振点と漏洩波との関係

図3のスロットに垂直な断面にお

ける電界分布はいわゆる $H_{slot,0}$ 波，$H_{slot,01}$ 波等に対応する漏洩波モード[17]のそれと見なすことができる。図6にはこれらのモードの電界分布が示されている。図7にはこれらのモードに対応する半波長，1波長，3/2波長共振点が $H_{slot,0}$ 波の分散曲線との交点にて示されている。図5における I，II点はそれぞれ図7の I，II点に対応している。したがって，図7より，図5に示す空胴付スロットアンテナにおける寸法に対しては $H_{slot,0}$ 波の漏洩波が共振に大きく寄与していることが分る。

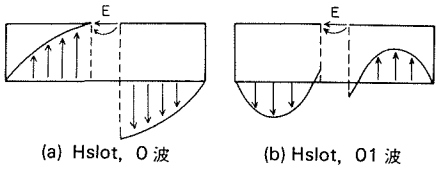


図6　薄型空胴スロットアンテナ上に励振される漏洩波 $H_{slot,0}$ 波と $H_{slot,01}$ 波の電界分布

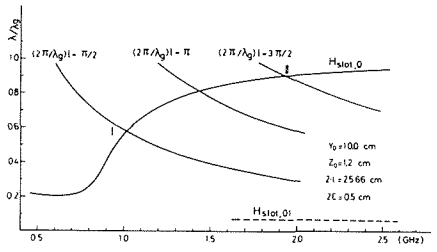


図7　スロットアンテナ上の漏洩波の位相定数

(c)オフセット，多点給電の例

リアクション整合法の特徴の一つは，オフセット給電のみならず複数の励振源で振幅，位相を変えて励振した時の特性も容易に計算出来ることである。図8は給電線を分岐して，スロットを2点で給電した例である。同図ではスロット長 ℓ を変化させた時の入力インピーダンスを d/ℓ をパラメータとして示してある。

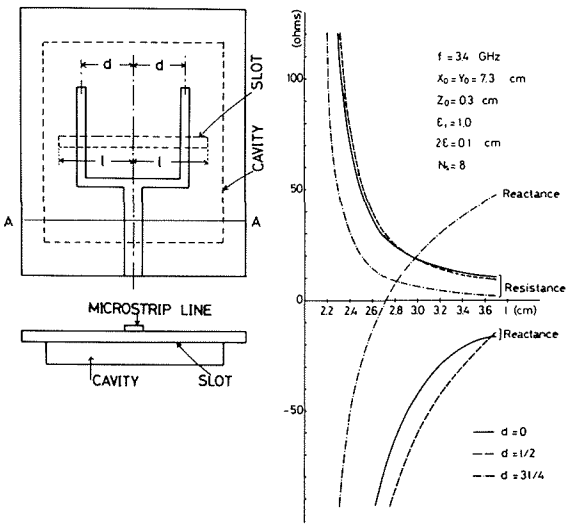


図8　多点給電スロットアンテナ

(d)有限基板の影響

(6)式よりスロット開口上での電界分布が求められれば，指向性，利得等の空中線特性も容易に与えられる。しかしながら，スロットアンテナは有限基板上に埋込まれるのが普通で，その基板の大きさも数波長程度である。このような場合，その指向性は無限大基板のそれと異なることが知られている。有限基板の影響を含めた電力利得を厳密に境界値問題として取り扱うことは極めて困難である。ここでは，ダイポールアンテナについて有限導体板や導体球による反射，回折電界を求めるのに応用され実測値とも一致した結果を与える近似解法，起電流法を採用した[18]。起電流法は「回折あるいは散乱導体の表面に流れる電流は，物体がない場合その点における磁界の物体面に平行な成分の2倍の電流が流れるとして，この電流による放射電界ともとの波源による放射電界との和として電界が表現出来る」という考えに基づき，利得，指向性等を求める方法である。この方法は，回折，散乱導体の全表面から波源が直接見える場合にはかなり精度の良い近似解が得られる。

図9には2種類の有限導体基板につき，E，H両面の指向性を実験値とともに示してある。図より明らかなように，基板が大きいほうが，電界の波状の変動は大きいが全体的に無限大基板

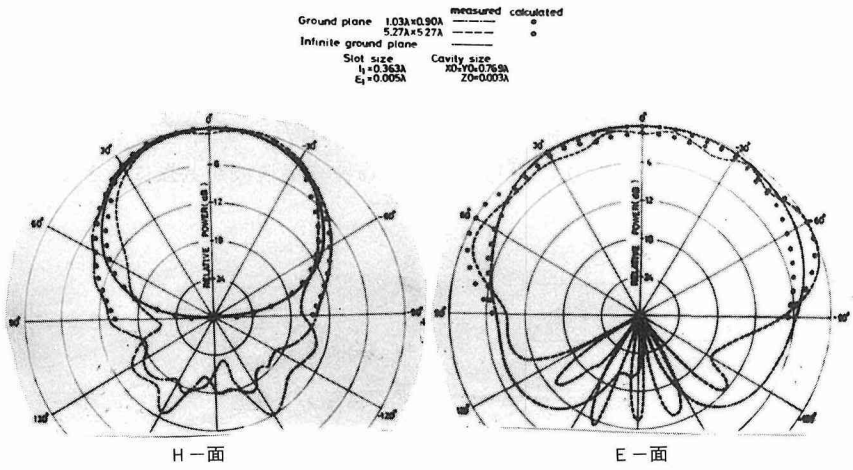


図9　有限基板上のスロットアンテナの指向性

の指向性に近づくことが分る。また，H面指向性は，基板がある程度以上大きくなれば，有限基板を考慮して計算しても結果はそれ程変化しない。これは，E面内ではスロットの指向性は無指向性と考えて良いのに対し，H面内では指向性を持ち，基板上で最小になるので基板の比較的小さな領域にだけ放射界が影響されるにとどまるからと考えられる。

3　スロットアンテナと線状アンテナとの組合せ

3－1　スロットアンテナと線状アンテナの各種の組合せ

ダイポールアンテナやモノポールアンテナのような線状アンテナは電界に比例した受信を行う素子であり表面上の電流がその特性を決定するので電流アンテナともよばれている。このアンテナと相対の関係にあるスロットアンテナは磁界に比例した受信を行う素子で，磁流アンテナともよばれている。これらの電流アンテナと磁流アンテナの組合せにより種々の興味ある特性を有するアンテナを得ることができる。2章に示したスロット・モノポールアンテナもそれらのうちの一つであるが，スロット・モノポールアンテナにおいては，モノポールと2つのスロットの間の相互結合を持たせず，それぞれ独立のアンテナとして機能させていた。これに対し，この章で述べるアンテナにおいては，電流アンテナと磁流アンテナ間に適当な結合を持たせ，電流又は磁流アンテナ単独では特ち得ない特性を得ることができる。例えば図10—(a)はスロットに非励張ユニホールを組合せ，スロットのE，H面の指向性をそろえるなどに利用している[19]。さらに

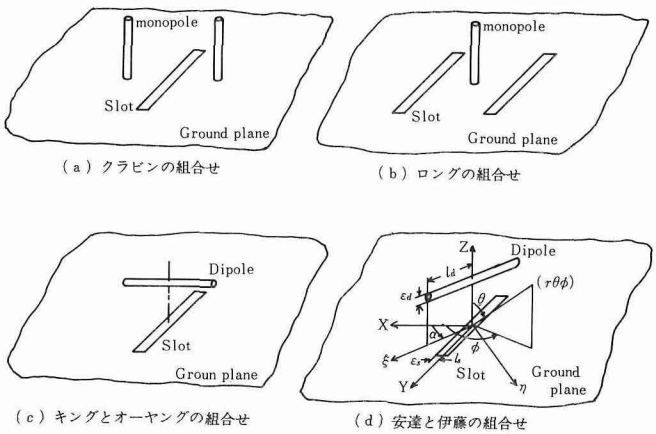


図10　スロットと線状アンテナの各種組合せ

図 10−(b)はユニポールとスロットを適当な位相差で励振することにより等方性に近い放射特性を得るために利用されている[20]。また図 10−(c)に示すスロットと非励振ダイポールを組合せてスロットアンテナの指向性をある程度制御することも可能である[21],[22]。さらに図 10−(d)に示すようにスロット前面に置いたダイポールを地板と平行な面内である角度だけ回転することによる円偏波を得ることが可能となる[23]。

3 − 2　理論的取扱い

前節に述べたアンテナ系の理論的取扱いは，スロットとダイポール系に関しては King 等により[21]，またスロットとモノポール間の結合問題に関しては Papierz 等が解析を行なっている[24]。ここで紹介する解法は上記の論文をふくむ一般的解法であり，かつ以下に示す点でアンテナ工学上取扱いが明解となっている。すなわち，スロットアンテナ（または磁流アンテナ）と線状アンテナ（すなわち電流アンテナ）はそれぞれ，電流源，電圧源で励振されているのが物理的に妥当である。この結果，上記アンテナ系の境界条件からリアクション整合法により回路理論で最も基本的なハイブリッド行列が導びかれスロットと線状アンテナの結合係数を明確に表現し得かつ，従来のアンテナ理論におけるアンテナ間の相互結合と同様に扱い得る。さらにセグメント（微小アンテナ片）数を増加することにより望みの計算精度を得ることができる。

(a)問題の定式化[25],[22]

図 10 に示す各アンテナ系を図 11 のようなアンテナ系に一般化して考えることにする。図に示すように z の正，負の領域より $(\bar{E}_+^i, \bar{H}_+^i)$，$(\bar{E}_-^i, \bar{H}_-^i)$ なる入射波がアンテナ系に入射すると仮定する。ここで，z の正領域は線状アンテナのある領域，z の負領域は自由空間，導波管，空胴等に対応する。これらの入射波が線状アンテナには電流 $\bar{J}$ を，スロット上には $\bar{M}_+$，$\bar{M}_-$ なる磁流を誘導する。（添字の＋，−は z の正負の領域に対応する。）これらの電流，磁流が 2 次波を発生する。また，これらすべての電磁界はマクスウェルの方程式および以下の境界条件を満足する。

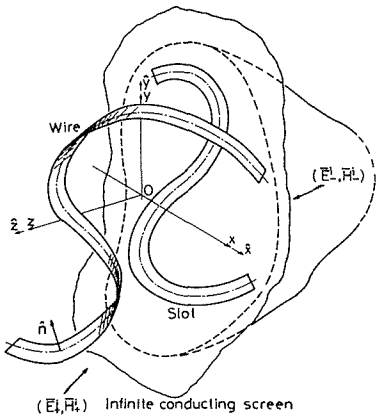


図11　スロットと線状アンテナからなるアンテナ系

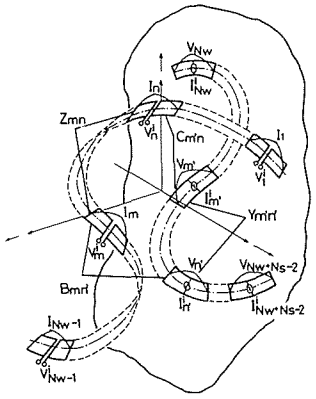


図12　微小アンテナ間の相互関係

線状アンテナ上では，$[\bar{E}_+^s(\bar{J})+\bar{E}_+^s(\bar{M}_+)+\bar{E}_+^i]\times\hat{n}=0$　(7)

スロットアンテナ上では，$[\bar{H}_+^s(\bar{J})+\bar{H}_+^s(\bar{M}_+)+\bar{H}_+^i]\times\hat{z}=[\bar{H}_-^s(\bar{M}_-)+\bar{H}_-^i]\times\hat{z}$　(8)

$\hat{n}$, $\hat{z}$ は線状およびスロットアンテナの表面に対する垂直な単位ベクトルである。さらに，それぞれのアンテナが十分細いと仮定するなら，電流および磁流はそれぞれ軸方向成分のみと仮定出来る。さらに，図 12 に示すようにスロット，線状アンテナを N_s，N_w 個に分割し，2 章と同様のリアクション整合法を適用すると次式の行列表示を得る。

$$\begin{bmatrix} [Z_{mn}][B_{mn'}] \\ [C_{m'n}][Y_{n'n'}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_n] \\ [V_{n'}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_m^i] \\ [I_{m'}^i] \end{bmatrix} \tag{9}$$

上式において，$[Z_{mn}]$ と $[Y_{n'n'}]$ はスロットおよび線状アンテナに対する一般化インピーダンスおよびアドミタンス行列である。$[B_{mn'}]$ と $[C_{mn'}]$ はスロットと線状アンテナ間の相互作用を表わしており，$B_{mn'}$ は m 番目の微小ダイポールと n' 番目の微小磁流アンテナ間の相互結合係数である。また，$B_{mn'}=-C_{n'm}$ も証明され得る。さらに，$[I_m]$，$[V_i]$ は微小ダイポール，スロットの未知電流・電圧ベクトル，$[V_n^i]$ と $[I_m^i]$ は入射波に対応する既知の電圧，電流ベクトルである。したがって，(9)式において，励振法，アンテナの構成を具体的に与えることにより，それぞれのアンテナ上での電流，電圧分布が求められる。これらが与えられれば，2章と同様にアンテナに関する各種の特性を導出可能である。

(b)計算例

○スロットとモノポールアンテナの結合例　図13は図10−(a)に対応するモデルにつき上記の方法により入力インピーダンスを計算したもので，図より明らかなように実験とも良く一致しており，ここで述べた解析法の妥当性を示している[22]。

○スロットとダイポールアンテナの結合例　図14は図10−(c)に対応するモデルにつき，上記の方法と2章で述べた起電流法とを用いて指向性を計算したもので，指向性に関しても実験値と非常に良く一致していることが分る。図より明らかなように非励振ダイポールは反射器としても又導波器としても作用することが分る[22]。

○円偏波発生素子　図15は図10−(d)に対応するモデルにつきその円偏波特性を示したものである。(ここでスロット長$=1.5\lambda$，ダイポール長$=0.44\lambda$，$D=0.106\lambda$，$\alpha=82.55°$) 図15より明らかなように $\theta=0°$ すなわち正面方向では完全な円偏波になっている[23]。

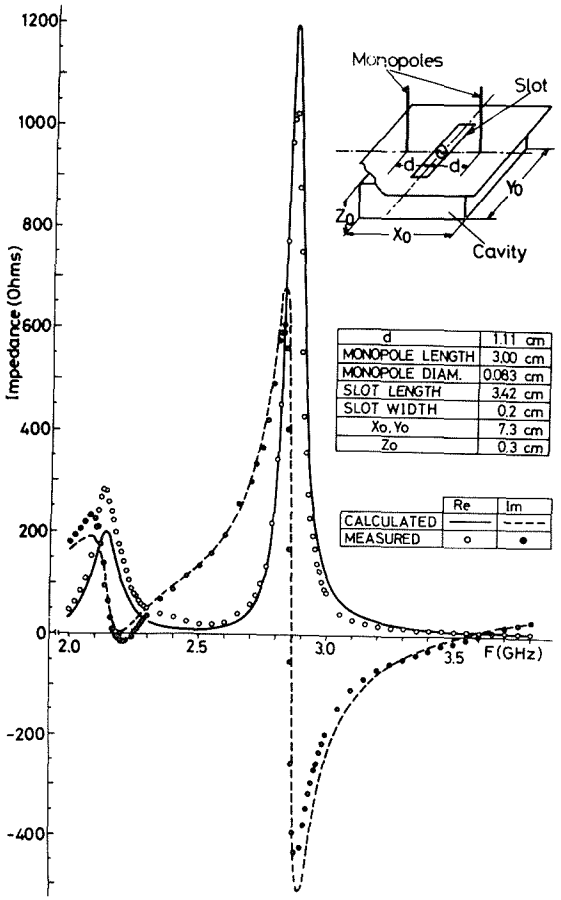
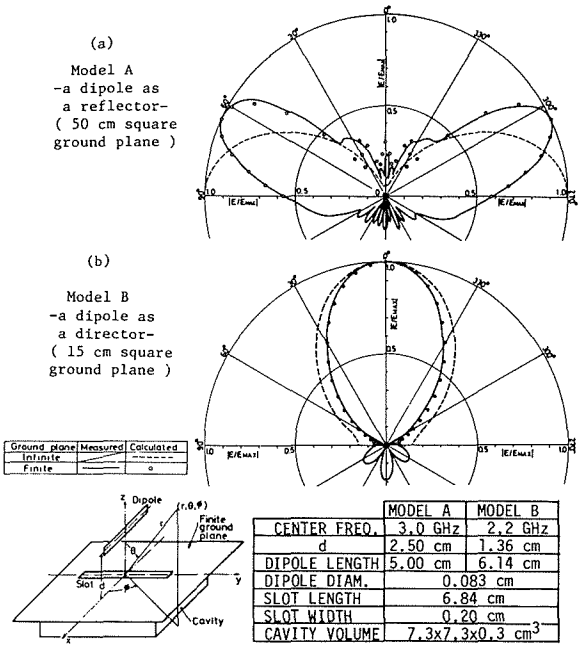


図13　クラビンのモデルの入力インピーダンス



	MODEL A	MODEL B
CENTER FREQ.	3.0 GHz	2.2 GHz
d	2.50 cm	1.36 cm
DIPOLE LENGTH	5.00 cm	6.14 cm
DIPOLE DIAM.	0.083 cm	
SLOT LENGTH	6.84 cm	
SLOT WIDTH	0.20 cm	
CAVITY VOLUME	7.3x7.3x0.3 cm^3	

図14 キングとオーヤングのモデルに対する指向性

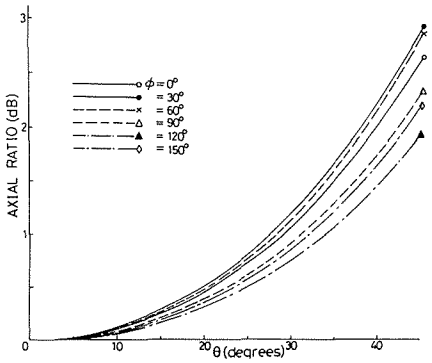


図15 安達と伊藤のモデルに対する円偏波特性（軸比）の計算例

4 む す び

本報告では，スロットアンテナの応用例およびそれにともない研究が進んだ空胴付スロットアンテナの解析法，実験をアンテナ工学上重要なパラメータである入力インピーダンス特性，指向性を中心として紹介した。さらに，スロットと線状アンテナの結合を含んだアンテナ系の解法を示し，スロット導体では得られない興味ある特性があることを示した。放送衛星，海事衛星などとの通信は今後円偏波の方式を用いて行なうことになっている。図 10−(d)に示したような簡単な方法で円偏波が得られるアンテナ系はプリント化技術を応用して多素子化の可能性があることを付言しておく。

参 考 文 献

1) 浅見，松浦，横山：〝極超短波と細隙よりの漏洩現象〟，電学誌，**62**（昭和 17−12），653，p. 762
2) Booker, H. G. : Slot aerials and their relation to complementary wire aerials (Babinet's principle)", J. Inst. Elect. Eng. pt. III A, (April 1946), **93, 4, p. 620**
3) Chen-To-Tai : Dyadic Green's functions in electromagnetic theory, (1971), p. 155 International Text Book Company
4) Matsumoto, T. : "Theory of the slot oscillator", 北大工学部紀要，**8**（昭和 24−03），2，pp. 29〜37
5) 鈴木道雄：〝細隙アンテナと平行二線の結合の影響〟，信学誌，**38**（昭和 30−04）
6) Suzuki, M., Itoh, K., and Matsumoto, T. : "The second kind of Mixed System of electric and magnetic currents-an electric current antenna fed by a magnetic current Transmission line —", 北大工学部研究報告，第 56 号（昭 45−03），pp. 67〜74
7) Itoh, K. : "Energy density antenna apparatus for mobile radio receiver", U. S. Patent 3631500, Mar. 1970
8) Itoh, K., Watanabe, R., and Matsumoto, T. : "Slot-Monopole Antenna System for Energy-Density Reception at UHF", IEEE Trans. Antennas Propag., **AP−27**(July 1979), 4, p. 485

9) 伊藤，原：〝リアクション整合法による空胴付スロットアンテナの解析〟，信学論(B)，**62−B**（昭54−04），4，4，p. 404
10) K. Itoh, and D. K. Cheng : "A Slot-unipole energy density mobile antenna", IEEE Trans. Veh. Technol., ., **VT−21**(May 1972), 3, pp. 59−62
11) Itoh, K. and Cheng, D. K. : "A Novel slots-and-monopole antenna with a steerable cardiod pattern", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, **AES−8** (Mar. 1972), 2, pp. 130−134
12) Galejs, J. : 〝Admittance of a rectangular slot which is backed by a rectangular cavity〟, IEEE Trans. Antenna & Propag.., **AP−11** (Mar. 1963)，2，p．119
13) 伊藤，松本：〝エネルギー密度アンテナ用薄型空胴スロットアンテナの設計理論〟，信学会アンテナ・伝搬研資，A・P 72−31（1972−06）
14) Cockrell, C. R. : "The input admittance of the rectangular cavity-backed slot antenna", IEEE Trans. Antenna & Propag., **AP−24** (May 1976) 3, p. 288
15) Mittra, R. : Computer techniques for electromagnetics". (1973), p. 29 Pergamon Press
16) 徳丸，伊藤：〝空胴付スロットアンテナの解析に有効な一総和公式〟，信学誌(B)，**J 61−B**（昭53−04），6，p. 550
17) 伊藤，鈴木，松本：〝軸方向スロットを切った方形導波管のLeaky waveについて〟，信学論(B)，**53−B**（昭45−05），5，p. 231
18) 関口，他：〝優角コーナレフレクタの指向性〟，信学会アンテナ伝搬研資，A・P 69− 8（1969−05）
19) Clavin, A., et al : "Am improved element for use in array antennas", IEEE Trans. Antennas & Propag., ., **AP−22** (July 1974), 4, p. 521
20) Long, S. A. : 〝A combination of linear and slot antenna for quasi-isotropic coverage", IEEE Trans. Antennas & Propag., **AP−23** (July 1975), 4, p. 572
21) King, R. W. P. and Owyang, G. H. : "The slot antenna with couple dipoles", IRE Trans. Antennas & Propag, **AP− 8** (March 1960)，2，p．136
22) Itoh, K., Shibazaki, I., and Matsunmoto, T. : "Investigation of an antenna system composed of slot and wire antennas", 1978 International Symposium on Antennas and Propag., (Aug. 1978), A−10−5
23) 安達，伊藤：〝非励振ダイポールと結合したスロットによる円偏波の合成〟，信学論(B)，**63−B**（昭55−04），04），4，pp. 363−375
24) Papierz, A. B., Sanzgiri, S. M. and Laxpati, R : "Analysis of Antenna structure with equal E-and H-plane patterns", Proc. Inst. Electr. Eng., **124** (Jan. 1977), 1, p. 25
25) 伊藤，松本：〝スロットアンテナとユニポールアンテナの結合の理論的解析〟，信学技報A・P 75−77（1976−02）又は：〝スロットアンテナとユニポールアンテナ間の相互結合の理論的解析〟，信学論(B)，**61−B**（1978−05），5，p. 391