

ラジアルラインスロットアンテナの低サイドローブ化

高橋 応明<sup>†</sup> 中川 幸彦<sup>†</sup> 安部 實<sup>†</sup>

Low Sidelobes for Radial Line Slot Antennas

Masaharu TAKAHASHI<sup>†</sup>, Yukihiko NAKAGAWA<sup>†</sup>, and Minoru ABE<sup>†</sup>

あらまし 衛星放送受信に開発されたラジアルラインスロットアンテナ (RLSA) は円形の平面アレーアンテナである。1層構造 RLSA はスロットの長さ、位置等の最適化により、アンテナ効率 80%以上を実現し市販化されている。RLSA の応用の一例として、マイクロ波回線等への使用を考え低サイドローブ化の検討を行った。RLSA はマルチモードの導波管構造を用いているため、導波管内の内部電磁界を乱さないように設計する必要がある。本論文では、励振振幅にテイラー分布を応用した設計法を示すとともに、例として開口径 50 cm (12 GHz)、第 1 サイドローブレベル-25 dB、効率 60%以上のアンテナを試作し、低サイドローブ化とアンテナ効率 65%を実現したので報告する。

キーワード ラジアルラインスロットアンテナ、平面アンテナ、導波管アレー、サイドローブ、テイラー分布

1. まえがき

ラジアルラインスロットアンテナ (RLSA) [1] は、非共振スロットを用いた進行波型の導波管型平面アレーアンテナ [2] で、衛星放送受信に開発された。図 1 に 1 層構造 RLSA の構造図を示す。2 枚の導体円板によって構成されており、中央から給電された電力が、導体板間に挟まれた空間を外周方向に放射状に進行する。このとき、上部導体板 (スロット板) に設けられたスロットより電波が放射される。正面方向において同位相の円偏波が放射されるよう二つのスロットが対となりハの字を構成し、それが螺旋状に配置されている。現在、1 層構造 RLSA [3] はスロットの長さ、間隔、位置等の最適化により一様開口面分布が実現されており、アンテナ効率 80%以上を実現している [4]。RLSA を種々の用途に応用するため、偏波共用化 [5]、広帯域化 [6]、ビームチルト化 [7] や半導体エッチング装置 [8] 等が提案されている。近い将来、韓国でも衛星放送が開始され日本との電波干渉が起こることが予想される。また、RLSA を加入者無線系用アンテナや 60 GHz 屋内無線 LAN [9] 等に応用する場合、他の通信との干渉を避けるためにサイドローブを抑制する必要がある。そこで本論文では、RLSA の低サイドローブ化の

実現を目的とする。他の平面アンテナと比較して特に周波数が高くなるに従い、RLSA は導波管構造を用いているため低損失な給電回路を構成できるうえ、構造が非常に簡単で調整箇所も少なく、生産性が高いという優位性がある。

サイドローブを抑制する方法としてテイラー分布 [10] やチェビシェフ分布がよく知られているが、そのまま RLSA に適用することはできない。その原因は第一に RLSA はきれいな円筒波として給電したいので、中央部にスロットの配置できない領域が存在する。第 2 に、マルチモードの導波管構造を用いているため、導波管内の内部電磁界を乱さないようにスロットの結合量には上限を設ける必要があり、開口面分布に制約が生じることとなる。

本論文では、マルチモード導波路を用いた RLSA を低サイドローブ化するために、テイラー分布を応用した励振振幅を与える設計法を示すと共に、例として試作が簡単にできる周波数 12 GHz、開口径 50 cm の試作アンテナで、第 1 サイドローブレベル-25 dB、効率 60%以上を目指して設計し、低サイドローブ化とアンテナ効率 65%を実現したので報告する。

2. 低サイドローブ設計

現在、RLSA は径方向に位相分布を一様にするのが可能なので、今回は励振振幅分布のみを対象に考える。RLSA は上部導体板上に多数のスロットが配置さ

<sup>†</sup> 武蔵工業大学電子通信工学科, 東京都  
Department of Electronic and Communication Engineering,  
Musashi Institute of Technology, Tokyo, 158, Japan

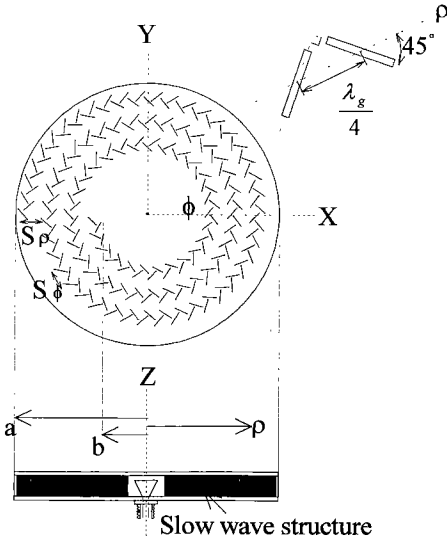
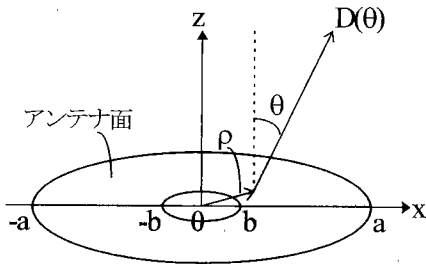


図1 ラジアルラインスロットアンテナの構造図  
Fig. 1 Structure of RLSA.



a : アンテナ半径  
b : 中央ブロッキング部半径

図2 座標系  
Fig. 2 Coordinate system.

れているので、実際には波源の振幅分布は離散的なものであるが、連続波源分布と仮定し低サイドローブ設計を行う。図2に示すように  $xy$  面上の半径の円形開口上の座標を  $(\rho, \phi)$  とする。

高効率で低サイドローブレベルを実現する開口面波源分布として、テイラー分布 [10], [12] は従来よく用いられている。テイラーの指向性は

$$f(u) = \frac{2J_1(u)}{u} \cdot \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} \frac{1 - (u/u_n)}{1 - (u/\lambda_n)}$$

$$u = ka \sin \theta$$

となる。ここで、 $J_1$  は1次のベッセル関数、 $u_n, \lambda_n$  は次式で与えられる。

$$u_n = \frac{\bar{n}\pi\sqrt{(n-1/2)^2 + A^2}}{\sqrt{(\bar{n}-1/2)^2 + A^2}} \quad (n=0, 1, 2, \dots, \bar{n}-1)$$

$$J_1(\lambda_n) = 0 \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots)$$

ここで  $A$  はサイドローブレベルに対応し、 $\bar{n}$  は波源の自由度 (移動する零点の個数) に対応する。今回、サイドローブレベルは  $-25 \text{ dB}$  ( $=1/\cosh A$ ) を考えるので、アンテナ効率が良い  $\bar{n}=5$  のテイラー指向性を検討する [12]。

### 2.1 ブロッキングを考慮した設計

テイラー分布をもとにRLSA上での励振振幅を考える。RLSAは中央から給電しているため、導波路の内部電力密度が中央部で高くなっており、中心近傍にスロットを設けた場合、管内電磁界の軸対称性が乱れる性質をもっている [11]。それゆえ、内部電磁界の軸対称性を保つために、中心部にスロットを配置しない領域を設けている (以下、中央ブロッキング部と呼ぶ)。この中央ブロッキング部が存在するので、RLSAの開口面設計はカセグレンアンテナと同様に考えることができる [12]。

開口径  $2a$  でテイラー分布を設計し中央ブロッキング部の領域を取り除くと、サイドローブが上昇してしまう。そこで、このサイドローブの上昇を見込んで所望のサイドローブレベルより低い (約  $-30 \text{ dB}$ ) テイラー分布を求め、中央ブロッキング部 ( $2b$ ) の励振を取り除く。このようにして、所望のサイドローブ  $-25 \text{ dB}$  を実現する。

RLSAはスロットを非共振の長さで使用している。共振長で使用した場合、マルチモード導波路であるため、管内の電磁界分布が乱れ正常に動作しない。スロットの結合量はアンテナ外周部では限界であり、これ以上スロットを長くしても、逆に放射量は減少する [13]。このまま開口径  $50 \text{ cm}$  のRLSAを設計したとしても、スロットから放射しきれずにアンテナ外周で損失となる電力が約  $30\%$  も存在することとなり、かなりアンテナ効率が悪いものとなる。この終端損失は、アンテナの構造 (導波路厚、誘電率等) で決まるスロットの最大結合量、アンテナ開口径、励振振幅分布と密接に関連しており、開口径を大きくした場合、この終端損失は減少しアンテナ効率は改善される。

そこで、開口励振振幅を上げて放射電力を増やすことを考える。ここで一定の比率で励振振幅を増やすことが考えられるが、先にも述べたようにアンテナ外周部ではスロットの結合量は最大となっており、外周部の振幅を増加することはできない。効率を改善し、か

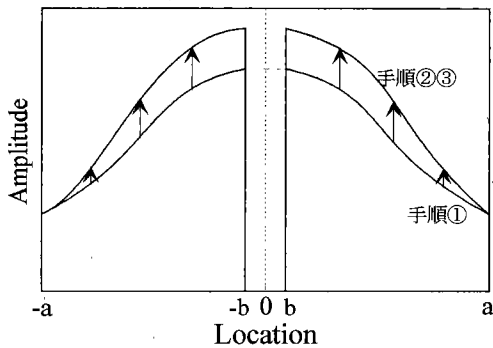


図3 励振振幅分布 (概念図)  
Fig.3 Amplitude distribution (concept).

つ第一サイドローブレベルの上昇を防ぐには、図3に示すように終端部の振幅値は固定したままアンテナ中央部周辺が高くなるよう、開口面上で増加量を変化させた励振振幅分布にする必要がある。

今回は見通し良く設計するため、次のような手順で励振振幅分布の最適化を行った。

- (1) 所望のサイドローブレベルで設計 (初期値)。
- (2) 第1サイドローブレベルを下げたテイラー分布を求める。
- (3) (2)の分布でアンテナ終端部の振幅値を(1)と同一にする。
- (4) 指向性・アンテナ効率を求める。
- (5) アンテナ効率が最大になるよう(2)~(4)を繰り返す。
- (6) 終了。

手順(2)の低めに設計したサイドローブレベルと、手順(3)の振幅分布を開口面上で均一に増加させてアンテナ外周終端部での振幅値を一致させることによるサイドローブレベルの上昇とが相殺され、結果的に、第1サイドローブレベルは変わらずアンテナからの放射電力を増やすことができる。図4に、このときの励振振幅分布を示す。補正前のテイラー分布と比べ、補正後はアンテナ中央部周辺で振幅値が大きくなっており、その分電波が放射されることがわかる。また、その連続波源分布における指向性を図5に示す。図より若干ビーム幅が広がるが、第1サイドローブレベルはあまり変化していないことがわかる。以上のような手順で設計することで、第1サイドローブを上昇させずにアンテナ効率の改善が期待できる。

## 2.2 スロット配置

今回は、開口径 50 cm (12 GHz)、第1サイドローブ

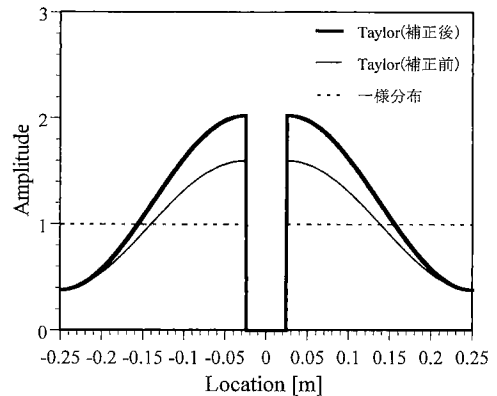


図4 励振振幅分布  
Fig.4 Amplitude distribution.

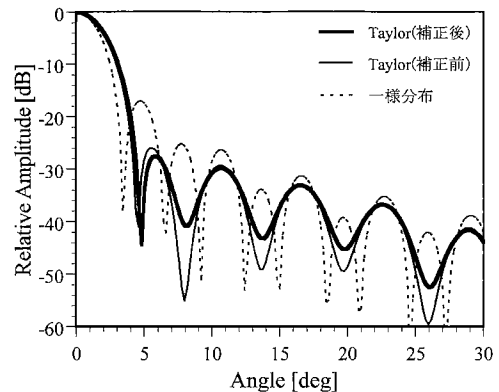


図5 指向性 (理論値)  
Fig.5 Theoretical radiation pattern (Aperture antenna).

レベル-25 dB、効率60%以上の試作アンテナを設計する。ここまでは、連続波源分布で議論してきたが、実際のRLSAはアレーアンテナである。RLSAを設計するには、連続波源のテイラー分布によって求めた励振振幅を実現するスロット配置を求める必要がある。マルチモードの導波路上にあるすべてのスロットを解析するのは[11]、アンテナを設計するうえで効率が悪い。そこで、RLSAのスロット解析には、次のような導波管モデルを用いて行われている。導波管の上面の広壁にはスロットを配置し、両側の狭壁を磁壁とした周期構造モデルをモーメント法により解析する。これにより、あるスロット長・スロット間隔で配置されたスロットペアの放射電界、軸比、反射量等を求めることができる[3],[4]。この解析から、所望の励振振幅分布を実現するスロット長を決定する。図6に実際に解

析したスロット長の分布を示す。従来の一様振幅分布では、中央給電のため中心に近いほど内部電力密度が高くなるので、中央近辺ではスロットは短く弱結合、外側にいくにつれてスロット長を長く強結合にして、一様振幅分布を実現している。これと比べて、テイラー分布では振幅分布が中央で強く、外側にいくに従い弱くなるので、図のように一様開口分布と比べ、内側でスロット長が長い分布になる。位相分布に関しては、従来の設計と同様に、スロット長が異なることによる導波管内の位相変化とスロットからの放射位相の変化を考慮し、スロットの径方向間隔を変えて配置し一様とする。

補正後の連続波源分布とアレー分布の各指向性の比

較を図7に示す。また、アレー配置設計における他の諸特性についても表1にまとめて示す。ここで終端損失とは、導波路内を電力が中央から進行し、スロットから電波が放射されていった結果、アンテナ終端まで放射されずに残ってしまった電力を示す。また、アンテナ効率率は図1においてスロット板の直径 ( $2a=50$  cm) を開口面として求めてある。補正後のテイラー分布はこの終端損失が非常に少なくなっており、励振振幅分布を補正することでアンテナ効率、終端損失、XPDが改善されている。ここで、終端損失の減少した分、アンテナ効率が改善されないのはビーム幅が広がるためである。また、補正後では全スロット数が減少する。これは励振振幅を増すため全体にスロット長を

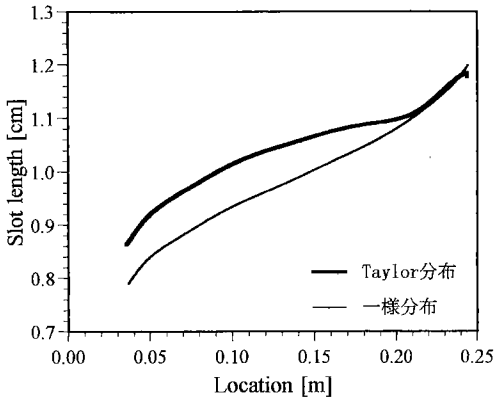


図6 スロット長分布  
Fig. 6 Slot length distribution.

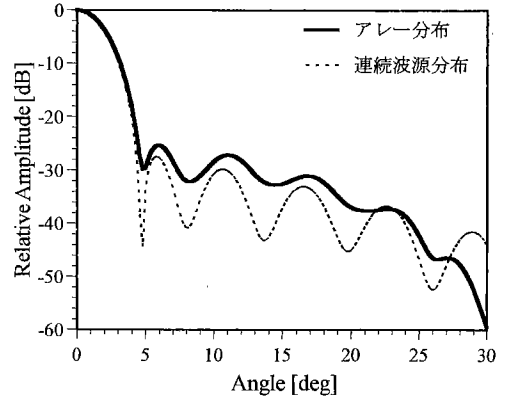


図7 指向性  
Fig. 7 Theoretical radiation pattern (array antenna).

表1 アンテナ諸特性  
Table 1 Theoretical antenna characteristics.

	一様分布	テイラー(補正前)	テイラー(補正後)
第1サイドロープレベル [dB]	-18.1	-25.3	-25.3
利得 [dB]	34.6	32.9	34.1
アンテナ効率 [%]	73.5	48.8	64.5
半値幅 [deg.]	3.1	3.5	3.7
終端損失 [%]	14.5	32.9	0.8
XPD [dB]	80.3	68.9	75.9
スロット数 [個]	1808	1922	1804

開口径:50cm 導波路厚:3mm 誘電率:1.5 周波数:12GHz

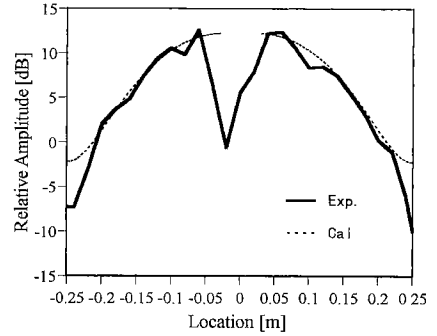
長くしているのので、スロットによる摂動が大きく、スロット間隔が広がり全体のスロット数が減少している。アレー分布の方がサイドローブレベルが若干高くなっているが、連続波源分布で計算したものとよく一致しており、開口径が50 cm以上であれば連続波源分布を基に設計を行ってもほぼ同一の特性が得られる。

### 3. 実験結果

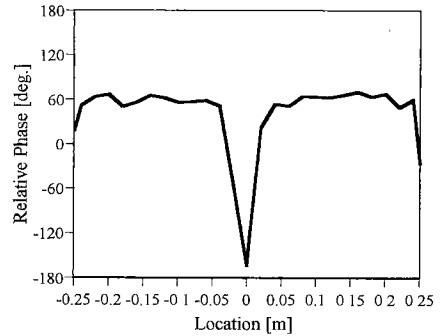
この設計法の妥当性を確認するために、アンテナを試作し測定を行った。試作アンテナは、アンテナ直径を50 cm、中央ブロッキング部の直径を5 cm、設計周波数を12 GHzとした。導波路内部に挿入する誘電体の誘電率は1.5、厚さは3 mmのものを用いた。

図8にアンテナのリターンロスを示す。設計周波数近傍で-15 dB以下で、スロットからの反射は十分に抑えられている。ネットワークアナライザのTime Gate機能を用いることにより、この反射の大半が中央給電部からのものであることが確認でき、従来のRLSAと同様に中央給電部の構造を改良することで-20 dB以下に改善することができる。図9にアンテナの開口分布を示す。プローブとアンテナの相互結合等の影響を考慮しアンテナ開口面上約 $2\lambda$  [14]の所を円形導波管を用いて、右旋偏波成分を測定した結果である。振幅、位相共、アンテナ中央部ではスロットが配置されていないため乱れているが、その他の部分は設計通り動作している。アンテナ外側終端部( $\pm 0.25$  m)近辺で振幅が落ちているのはアンテナ端部の回折のためである。図10にアンテナの指向性を示す。電波暗室の大きさの制約によりフレネル指向性(距離7 m)

である。第1サイドローブレベルは約-30 dBと、設計値の-25 dBより落ちているが、その分ビーム幅が広がっている。これは開口振幅分布の結果(図9)を見て



(a) Amplitude



(b) Phase

周波数 12 GHz

図9 開口分布

Fig.9 Measured aperture distribution.

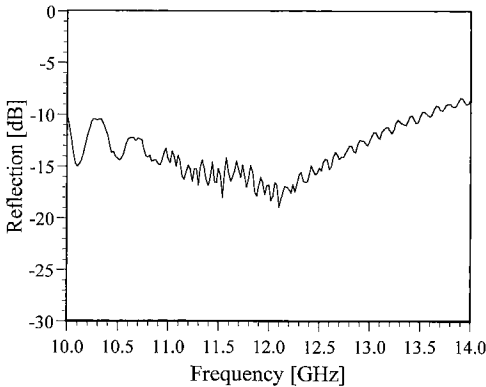


図8 リターンロス

Fig.8 Measured reflection.

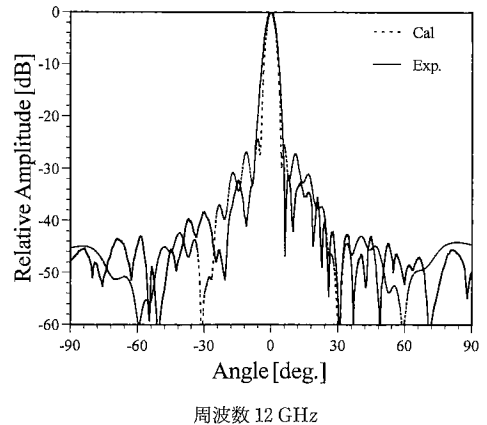


図10 アンテナ指向性

Fig.10 Measured radiation pattern.

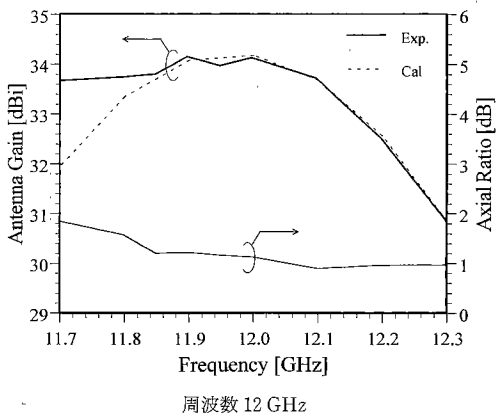


図 11 アンテナ利得  
Fig. 11 Measured antenna gain.

もわかるとおり、アンテナ外側の振幅が端部効果（回折）のため設計値より低いのが原因である。第 1 サイドロープレベルの周波数特性は、周波数帯域 500 MHz (4%) で約 2 dB 劣化する。指向性パターンが完全に対称でない原因は、スロットが螺旋配置であるために、励振に偏りが生じるからであり [11]、既に提案されている同心円配列 RLSA により改善される [15]。図 11 にアンテナ利得の周波数特性を示す。理論値はスロットの励振分布を導波路解析から求めたものであり [4]、螺旋配置による導波路内部の電磁界分布の乱れの影響や端部の回折効果などは考慮されておらず、中央プロッキング領域の界分布は存在しないものとして求めている。周波数の低いほうで若干ずれてはいるが、理論値とよく一致している。また、軸比も 1 dB 程度と良好である。設計周波数 12 GHz で、利得 34.1 dBi、アンテナ効率 65% を実現した。以上の結果から、ほぼ設計どおり動作しており、設計自体の有効性が確認できた。

#### 4. むすび

本論文では、RLSA の低サイドロープ化の検討を行った。RLSA はマルチモードの導波管構造を用いているため、導波管内の内部電磁界を乱さないように設計をする必要がある。また、放射効率が開口分布により変わるため、アンテナ効率が良くなるようにテイラー分布を応用した設計法を示した。開口径 50 cm (12 GHz) のアンテナを試作し、第 1 サイドロープレベルが約 -30 dB、アンテナ効率 65% を実現した。実験結果からも設計どおり動作しており、この設計法が有効であることが確認できた。既に提案されている同心円配

列 RLSA に応用することにより特性の改善が期待できる。RLSA はマルチモードアンテナであるために、物理的に幾つかの制限があるものかなり自由な励振設計ができ、この他にもコセカントビーム等の応用が可能である。

アンテナの製作・実験にあたり御協力頂いた東京工業大学、後藤・安藤研究室の方々に心から感謝致します。

#### 文 献

- [1] 後藤, 山本, “ラジアル線路を利用した円偏波スロットアンテナ,” 信学技報, AP80-57, 1980.
- [2] M. Ando, K. Sakurai, N. Goto, K. Arimura, and Y. Ito, “A radial line slot antenna for 12GHz satellite TV reception,” IEEE Trans. Antennas&Propag., vol. AP-33, no. 12, pp. 1347-1353, 1985.
- [3] M. Takahashi, J. Takada, M. Ando, and N. Goto, “A slot design for uniform aperture field distribution in single-layered radial line slot antennas,” IEEE Trans. Antennas&Propag., vol. AP-39, no. 7, pp. 954-959, 1991.
- [4] M. Takahashi, J. Takada, M. Ando, and N. Goto, “Characteristics of small aperture single-layered radial line slot antennas,” IEE Proceeding, vol. 139, Pt. H, no. 1, pp. 79-83, 1992.
- [5] M. Takahashi, M. Ando, N. Goto, Y. Numano, M. Suzuki, Y. Okazaki, and T. Yoshimoto, “Dual circularly polarized radial line slot antennas,” IEEE Trans. Antennas&Propag., vol. AP-43, no. 8, pp. 874-876, 1995.
- [6] T. Yamamoto, M. Takahashi, M. Ando, and N. Goto, “Enhancement of band-edge gain in radial line slot antennas using the power divider-A wide-band radial line slot antenna-,” IEICE Trans. Commun., vol. E78-B, no. 3, pp. 398-406, 1995.
- [7] M. Takahashi, M. Yoshiie, and M. Abe, “Basic design of beam tilting radial line slot antennas,” 1995 IEEE AP-S International Symposium, pp. 1384-1387, 1995.
- [8] 山本, 安藤, 後藤, 石井, 高橋, 堀池, “ラジアルラインスロットアンテナを用いたプラズマエッチング装置,” 1995 ソサエティ大会, B-27, 1995.
- [9] 山本, 安藤, 後藤, 高橋, “60GHz 帯ラジアルラインスロットアンテナの一考察,” 平 4 信学総大, B-104, 1996.
- [10] T. T. Taylor: “Design of circular apertures for narrow beamwidth and low side lobes,” IRE Trans. Antennas&Propag., AP-8, no. 1, pp. 17-22, (1960)
- [11] M. Takahashi, M. Ando and N. Goto: “An analysis of the rotational symmetry of the inner field of radial line slot antennas,” IEICE Trans. Commun., vol. E77-B, no. 10, pp. 1256-1263, 1994.
- [12] 後藤, 渡辺, “与えられたサイドロープレベルを持つカセグレンアンテナの最大効率,” 信学論 (B), vol. J61-B, no. 5, pp. 321-326, May 1978.
- [13] 高田, 高橋, 安藤, 後藤, “ラジアルラインスロットアンテナのスロットセットの散乱状態,” 信学論 (B), vol. J76-B-II, no. 2, pp. 96-104, Feb. 1993.

- [14] G. E. Evans, "Antenna measurement techniques," Artech House, Chapter6, 1990.
- [15] M. Ueno, S. Hosono, M. Takahashi, K. Sakurai, M. Ando, N. Goto, and Y. Yoshida, "Slot design of a concentric array radial line slot antenna with matching slot pairs," IEICE Trans. Commun., vol. E79-B, no. 1, pp. 70-76, 1996.

(平成7年11月20日受付, 8年2月22日再受付)



高橋 応明 (正員)

平元東北大・工・電気卒。平6東工大大学院博士課程了。同年武蔵工大助手, 現在, 同講師。衛星放送受信用アンテナ, 小型アンテナ等の研究に従事。工博。IEEE 会員。



中川 幸彦 (学生員)

平7武蔵工大・工・電子通信卒。現在, 同大大学院修士課程在学。



安部 實 (正員)

昭40武蔵工大・工・電子通信卒。同年武蔵工大助手。昭43電通大大学院修士課程卒。昭44武蔵工大講師。同助教授を経て, 現在, 同教授。回折電磁界の解析, 磁流アンテナの研究に従事。工博。IEEE 会員。