

1994年11月18日

石田（實）記念財団研究助成金  
研究発表会資料

## 漏れ波の集束／発散方法とその応用

大寺 勲（東北工業大学）

# 1. はじめに

電磁波伝送に用いられる伝送線路は、線路に沿って周期的あるいは連続的に不連続を与えると漏れ波を発生する。代表的な漏れ波伝送線路としては、軸方向にスロットを切った方形導波管（以下、簡単に“スロット導波管”と呼ぶ）があり、また、最近では、ミリ波用伝送線路として提案された非放射型誘電体線路（NRDガイド）を利用した漏れ波NRDガイド<sup>(1)</sup>などがある。

このような漏れ波伝送線路は、単一モードで励振した場合、一方向に鋭いビームを放射する漏れ波アンテナとしてよく知られている。この漏れ波アンテナからの放射を幾何光学的に述べると、漏れ波伝送線路から線路の軸に対して“等しい角”，すなわち平行に光線が射出されると解釈できる。従って、この射出光線の“等角性”に着目すれば、漏れ波伝送線路自体を“等角らせん”形に湾曲させることで、全ての光線を等角らせんの極に集束、または極から発散するように漏れ波線路から射出させることができる。このように、漏れ波伝送線路を機械的に湾曲させるという極めて単純な方法によって、漏れ波の集束/発散が可能となる。

本報告では、このような考え方にに基づき、等角らせん形曲り漏れ波伝送線路（以下、“曲り漏れ波線路”と呼ぶ）からの漏れ波の集束/発散について簡単に述べ、更に、発散形曲り漏れ波線路の広角照射アンテナへの利用の可能性について検討する。

## 2. 曲り漏れ波線路による漏れ波の集束と発散

### 2.1 基本的な構成と放射電界

図1に座標系を示す。曲り漏れ波線路はx-y面内にあり、等角らせんは焦点Oを原点とする直交座標(x, y)ならびに極座標(ρ, φ)で各々、次のように表示できる。

$$\rho = \rho_0 \exp(-\phi \cot \Theta_0)$$

$$\xi = \sec \Theta_0 (\rho_0 - \rho)$$

$$x = \rho \cos \Phi$$

$$y = \rho \sin \Phi \quad (1)$$

$$\Phi = \phi + \Phi_0$$

$$\Theta_0 = \begin{cases} \theta_0; \text{集束形構造} \\ \pi - \theta_0; \text{発散形構造} \end{cases}$$

但し、 $\Phi_0$ はx軸と光軸とのなす角（オフセット角）、 $\theta_0$ は光線の射出角（漏れ角）、 $\rho_0$ は光軸上の動径の長さ（等価的な焦点距離）、 $\xi$ は等角らせんと光軸との交点を原点とする等角らせんに沿った座標を表わす。また、焦点から漏れ波線路の両端を見た角 $2\phi_0$ は開口角を与える。このとき、漏れ波線路の長さを $\xi_0$ とすれば、等角らせんは、 $\{\theta_0, \phi_0, \rho_0\}$ 、あるいは $\{\theta_0, \phi_0, \xi_0\}$ など3個のパラメータの組み合わせによって一意的に決まる。

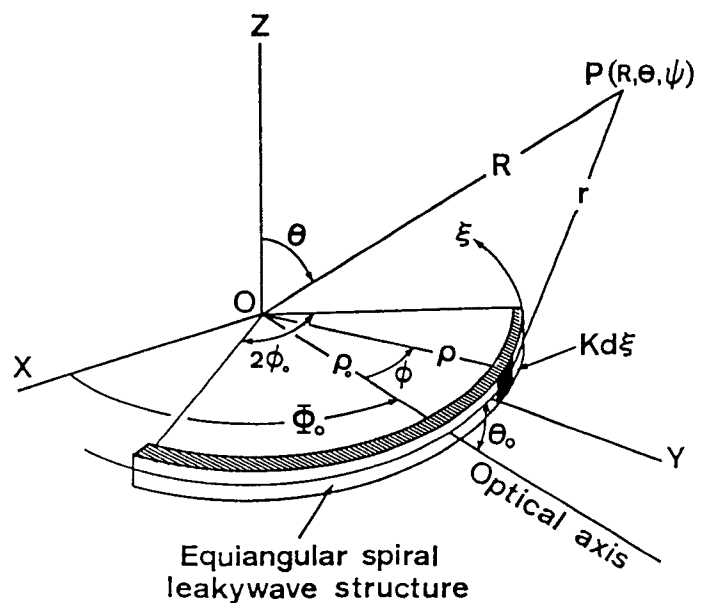


図1 座標系

$\theta_0$  は、漏れ波線路の位相定数  $\beta$  と自由空間波数  $k$  から、 $\theta_0 \sim \cos^{-1}(\beta/k)$  に  
よって近似的に得られる。一方、等角線は  $\theta_0 = \pi/2$  で半径  $\rho_0$  の円に、 $\theta_0 = 0$   
で光軸を含む半直線に退化し、前者はブロードサイド放射に、後者はエンドファイ  
ア放射に各々対応する。

スロット導波管や漏れ波NRDガイドなどでは漏れ波として寄与するのは主とし  
て伝送方向に平行な電界成分をもたないTE波である。従って、スロットや誘電体  
ストリップに沿った電界成分  $E_s(\xi)$  と等価な  $\xi$  方向の磁流を仮定し、この等価磁  
流素子  $Kd\xi$  を放射素子として、曲り漏れ波線路からの放射電界は次式で近似的に  
与えられる<sup>(2), (3)</sup>。

$$E(R, \theta, \psi) = \frac{jk}{2\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} E_s(\xi) \exp(-jkr) r^{-1} L d\xi \quad (2)$$

但し、 $\xi_1$  と  $\xi_2$  はスロットの始端と終端であり、 $L$  と  $r$  は次式で与えられる。

$$L = L_R i_R + L_\theta i_\theta + L_\psi i_\psi \quad (3)$$

$$L_R = \rho \sin\Theta_0 \cos\theta / r$$

$$L_\theta = \{R \sin(\psi - \Phi + \Theta_0) - \rho \sin\Theta_0 \sin\theta\} / r$$

$$L_\psi = -R \cos(\psi - \Phi + \Theta_0) \cos\theta / r$$

$$r = \{R^2 - 2R\rho \sin\theta \cos(\psi - \Phi) + \rho^2\}^{1/2} \quad (4)$$

なお、以下では、光軸を  $y$  軸 ( $\Phi_0 = \pi/2$ ) にとり、励振周波数を10GHzとして議論  
している。

## 2.2 曲りスロット導波管の集束特性<sup>(2), (3)</sup>

スロット導波管をTE<sub>10</sub>モードで励振した場合、最も支配的な摂動モードである  
TE<sub>10, slot</sub>だけを考慮すれば、スロット上の電界分布  $E_s$  を、

$$E_s(\xi) = C \exp\{-(\alpha + j\beta)\xi\} i_z \quad (5)$$

と近似することができる。ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  は曲りスロット導波管の減衰定数と位相  
定数、 $C$  はTE<sub>10, slot</sub>モードの励振効率や入力電力などで決まる係数である。

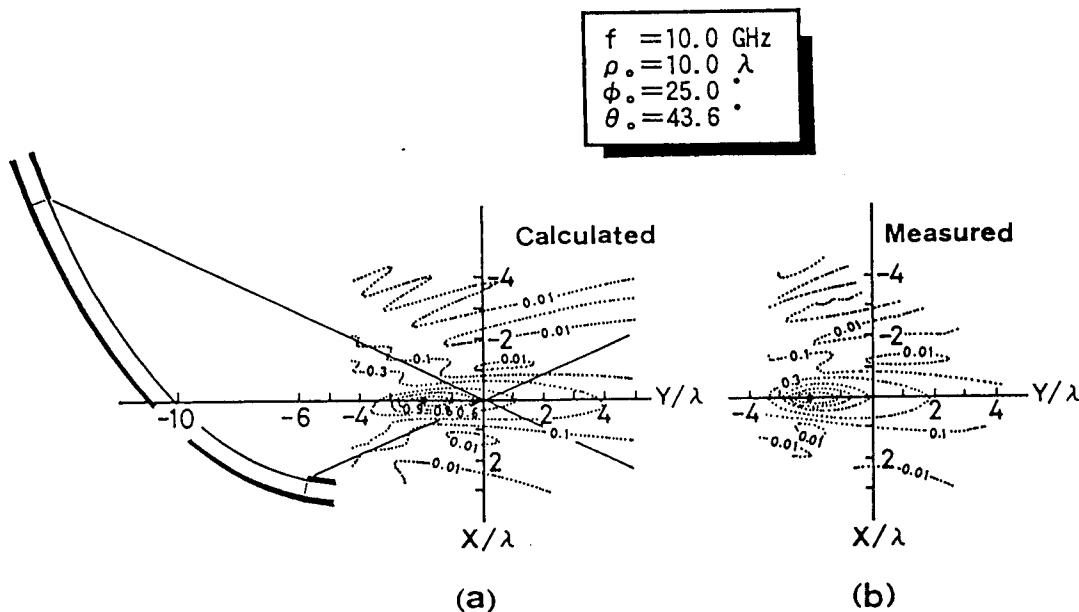


図2 集束形曲りスロット導波管の焦点近傍電界強度分布

射出角 $\theta_0$ は励振周波数やスロット幅で決まるが、不要モードである $TE_{0, slot}$ モード<sup>(4)</sup>を抑制し、また $\beta$ を求める際の計算誤差を小さくするためにスロット幅を0.5mmとしている。この場合、周波数10.0GHzで $\theta_0$ は $\sim 43.6^\circ$ となる。

図2(a)に焦点近傍における $x-y$ 面内の電界強度分布の計算例を示す。電界強度は最大点(●)で1になるように規格化してあり、焦点で交差する2本の実線は幾何光学的陰の領域の境界を示す。強度の大きい楕円形の領域、および焦点の両側の零点(null)は、円形開口で回折される収束球面波の焦点近傍における強度分布<sup>(5)</sup>に対応したものである。しかし、曲りスロット導波管の場合は、二つの零点が光軸 $y$ に関して非対称であるなど、構造自体の非対称性によって変形している。また、放射電界強度の最大点も焦点から曲りスロット導波管側にシフトしているが、これは収束光学系において“焦点移動”として知られているものである<sup>(6), (7)</sup>。

また、10GHzでの測定結果を図2(b)に示す。焦点移動や零点位置の非対称性など、計算結果と同じ特徴を示している。図3は光軸上並びに $x$ 軸上の電界強度の計算結果と測定結果である。電界強度最大点の幾何光学的焦点からのずれ、すなわち焦点移動は計算結果、測定結果ともにほぼ2.0波長程度である。

図4に焦点近傍における放射電界の等位相面を示す。曲りスロット導波管の等位相面の形状は、零点が $x$ 軸上(収束光学系での焦平面)にないことを除けば、光軸近傍で等位相面が光軸にほぼ垂直であること、しかも僅かながら速波様となっているなど、軸対称光学系に見られるものと同様の性質<sup>(5)</sup>をもっている。

図5に焦点近傍における $x-y$ 面内でのポインティングベクトルの方向を示す。概して電磁エネルギーは曲りスロット導波管側から幾何光学的焦点 $O$ に向かって流れ込み、焦点の極く近傍で光軸に平行になり、そして再び焦点から流れ出すように拡散して行く。また、零点( $E_0=0$ )近傍のエネルギー流を細かく計算してみると、図に示すように零点を中心に渦状に流れることが分かる。これらの結果は、放射電界の等位相面パターンにおいて、エネルギー流の方向を位相面に垂直であると仮定した場合と矛盾しない。

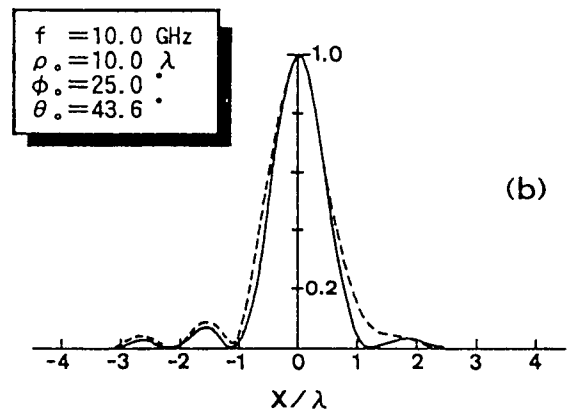
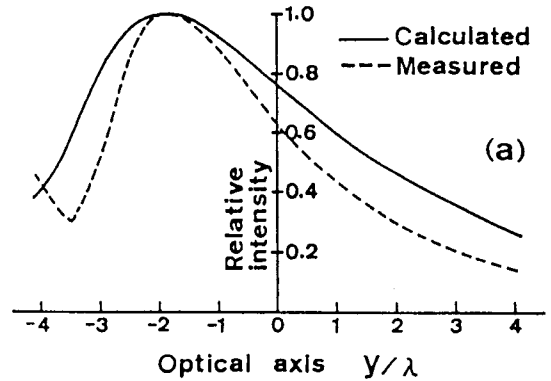


図3 光軸( $y$ 軸)上と焦点( $x$ 軸)上の電界強度分布

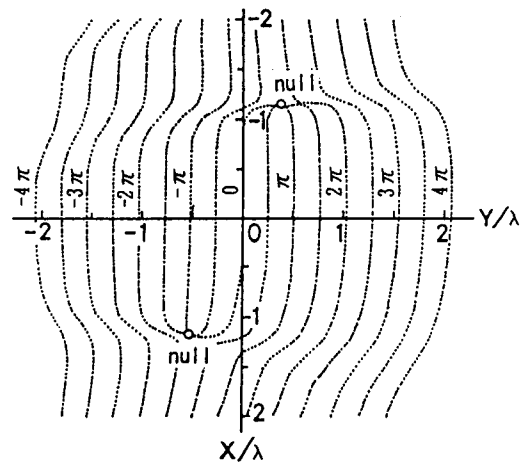


図4 焦点近傍における放射電界の等位相面分布

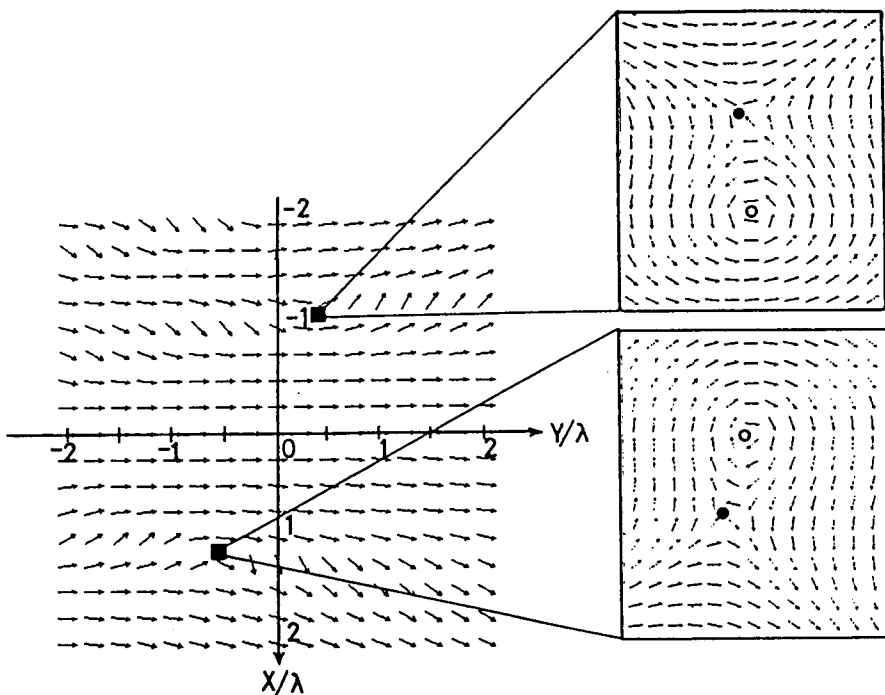


図5 焦点近傍における  $x y$  面 (H面) 内の Poyntingベクトル

### 2.3 曲りスロット導波管の発散特性

一般に、集束特性については、前節で述べたように電界強度分布が集束領域で特徴的な性質をいくつかもつので、電界強度分布に関する諸特性によって明確に評価できる。一方、発散特性に関しては、電界強度だけでなく発散電磁界の位相の振舞いを知る必要がある。しかし、精密な位相の測定は困難であるから、ここでは主として位相中心を数値的に考察することで等角ら線形曲りスロット導波管の発散特性を検討する。

ホーンアンテナのように主平面での位相分布が光軸に対称である場合には、放射電界等位相面の光軸上での曲率中心によって位相中心を議論できる<sup>(8)</sup>。しかし、等角ら線形曲り構造のような非対称性をもつ構造では光軸上での曲率中心が必ずしも光軸上にあるとは限らないので、曲率中心とは異なる位相中心の定め方が必要となる。

本節では、以前に位相中心評価の一方法として提案した位相誤差を最小にする位相中心の定め方<sup>(8)</sup>を用いて、 $x y$  面 (H面) における位相特性を評価する。すなわち、放射界の方位角座標の所定の範囲で、基準となる光軸上の位相と放射界の任意の点での位相との差の2乗が最小となるような、光軸上に中心をもつ円を求め、この円の中心を位相中心と定めている。

曲りスロット導波管の等価焦点距離  $\rho_0$  を

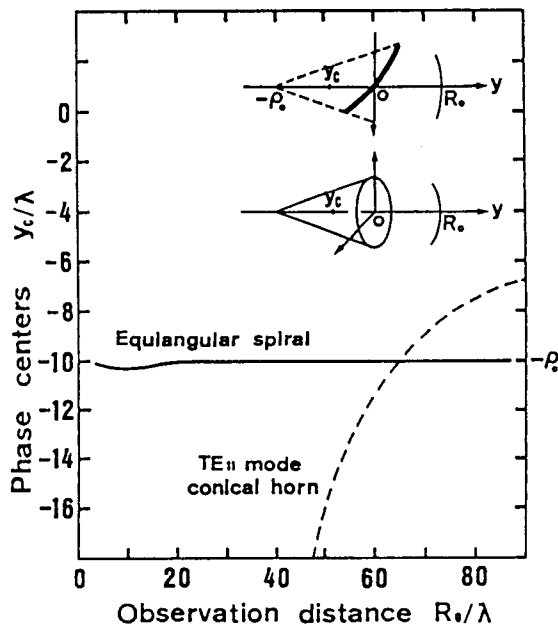


図6 発散形曲りスロット導波管の観測距離に対する位相中心 ( $y_c$ ) の変位 ( $\rho_0 = 10\lambda, 2\phi_0 = 60^\circ$ )

10λ, 開口角2φ<sub>0</sub>を60°とし, 位相誤差評価のための方位角の範囲を開口角2φ<sub>0</sub>に等しくとった場合の計算例を図6に示す. 比較のため, 等価開口半径ρ・tanφ<sub>0</sub>と等しい開口半径をもつTE<sub>11</sub>モード励振円形電磁ホーンのH面位相中心<sup>(8)</sup>・<sup>(9)</sup>も与えた.

電磁ホーンでは放射界のフレネル領域で位相中心が大きく変化するが, 曲りスロット導波管では観測点がかなり接近しても原点から僅かしか変位しない. しかも, 15波長以上離れば位相中心は殆ど原点, すなわち幾何光学的焦点と一致してしまう. この結果は, 例えば曲りスロット導波管を反射鏡アンテナの給電に利用するような場合に, 少なくともH面に関してはホーン給電のように位相中心を考慮する必要がないことを示唆している<sup>(10)</sup>.

### 3. 発散形曲り漏れ波線路の広角照射アンテナへの応用

一般に, 漏れ波アンテナは低プロファイルであることや給電線路との適合性がよいなどの優れた特長をもっている. 更に, 大きな特徴として周波数によって放射ビームの方向が変化する周波数走査性ももつが, この性質は周波数走査を目的としないときにはむしろ短所となる. しかしながら, 曲り漏れ波線路を広い角度範囲を照射するための広角照射アンテナとして利用する場合は, この漏れ波アンテナ特有の周波数の影響もそれほど問題とはならないと考えられる.

本報告ではこの点に着目し, 曲り漏れ波線路を用いて, 広い角度範囲を一様に照射するアンテナ, つまり, 広角照射アンテナを提案している. そして, その放射特性を数値的に検討することにより, その基礎的な設計資料を示した.

光軸をy軸に取った場合, 十分遠方では, 等角ら線漏れ波線路からのH面放射電界は式(2)~(4)からから次のように与えられる.

$$E(R, \psi) = \frac{jk \exp(-jkR)}{4\pi R} \int_{\xi_1}^{\xi_2} E_s(\xi) \exp\{jk\rho \sin(\psi - \phi)\} \cos(\psi - \phi - \theta_0) d\xi \quad (6)$$

このアンテナの放射パターンは主平面内で広い半値幅をもつが, 漏れ波線路固有の電界強度分布の非均一性によって非対称となる. 本報告では主に, このパターンの半値幅と非対称性によって放射特性を評価する.

放射パターンの非対称性は主として漏れ定数αと漏れ波線路長ξ<sub>0</sub>とに依存し, 一方, 半値幅は開口角2φ<sub>0</sub>に依存する. 以下では, これらの各パラメータがパターンの半値幅や非対称性にどのように寄与するのかを数値的に検討した.

#### (1) 放射パターン例

図7に放射パターンの計算例を示す. 振幅パターンは, 漏れ波線路上の一様

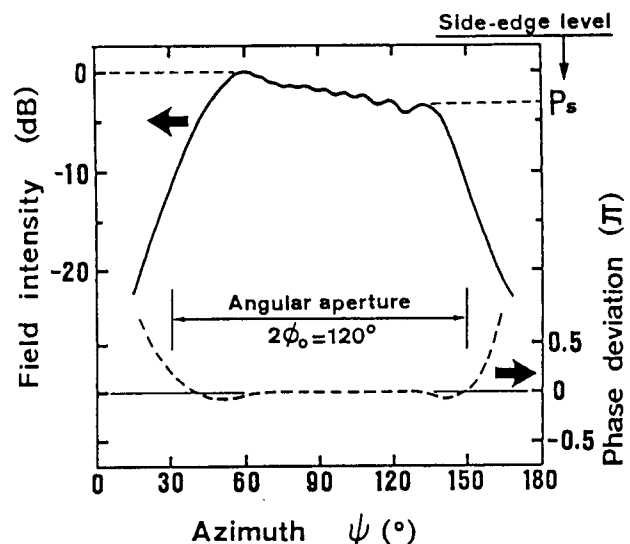


図7 発散形漏れ波構造のH面放射パターン(θ<sub>0</sub>=70°, αξ<sub>0</sub>=6.8dB)

でない電界強度分布に対応して非対称となる。非対称性の主なものはパターン上部の傾斜であるから、本報告では、パターン端部での相対的な放射電界強度を表わす“サイドエッジレベル(Side-Edge Level; 図中の $P_s$ )”を導入し、このパラメタを用いて、パターンの非対称性を評価する。例えば、 $P_s < -3\text{dB}$ では半値幅が急激に減少し、広角照射アンテナとしての性能を劣化させるから、 $P_s$ は本アンテナの重要な特性の一つと考えられる。

また、リップル成分も放射特性に影響するが、 $\pm 1.5\text{dB}$ 以内と小さく、以下では特に議論はしない。

一方、位相パターンはアンテナ開口角 $2\phi_0$ の範囲内ではほぼ一様である。これは2・3の位相中心の検討結果からも容易に説明できる。

### (2) 漏れ定数と線路長との積 [ $\alpha \xi_0$ ]の影響

放射効率に関係した $\alpha \xi_0$ は、漏れ波アンテナの重要なパラメータの一つである。図8に、開口角 $2\phi_0 = 90^\circ, 150^\circ$ の場合の半値幅 $\Theta_H$ とサイドエッジレベル $P_s$ に対する $\alpha \xi_0$ の効果を示す。

半値幅は $\alpha \xi_0$ には殆ど依存せず、ほぼ開口角だけで決まる。一方、 $P_s$ は主に $\alpha \xi_0$ に依存し、 $\alpha \xi_0$ の増加と共に減少する。従って、 $P_s > -3\text{dB}$ のパターンを得るには $\alpha \xi_0$ の大きさに制限があり、図の計算例では、 $2\phi_0 = 90^\circ$ で $\alpha \xi_0 \sim 8.5\text{dB}$ 、 $2\phi_0 = 150^\circ$ で $\alpha \xi_0 \sim 10\text{dB}$ である。

### (3) 開口角 $2\phi_0$ の影響

本アンテナの場合、放射パターンの半値幅は開口角に直接関係する。 $\alpha \xi_0$ を一定とし、開口角を変化させたときの半値幅を計算し、図9に示す。半値幅は開口角と共にほぼ直線的に増加す

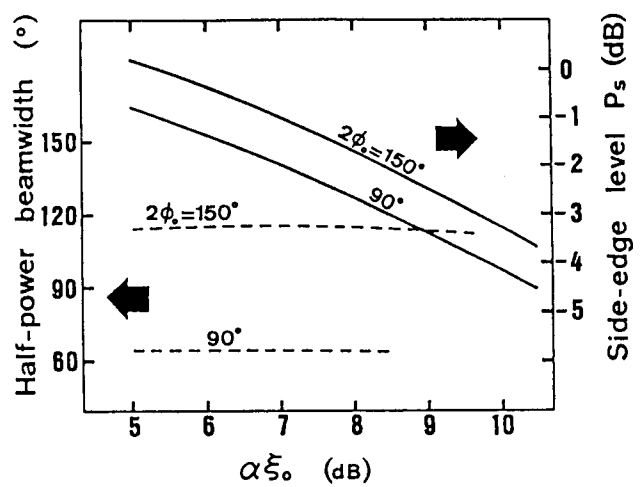


図8 漏れ定数×線路長[ $\alpha \xi_0$ ]による半値幅 $\Theta_H$ と $P_s$ の変化

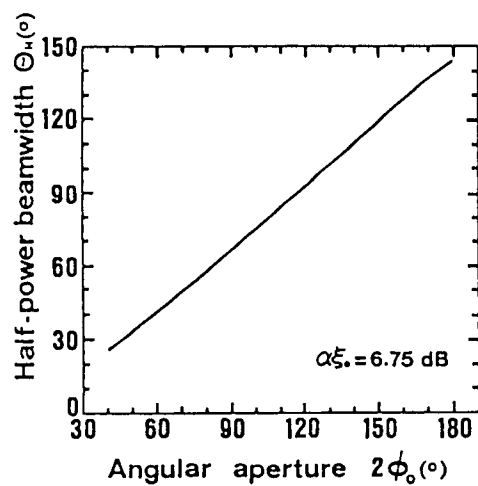


図9 開口角 $2\phi_0$ と半値幅 $\Theta_H$ の関係

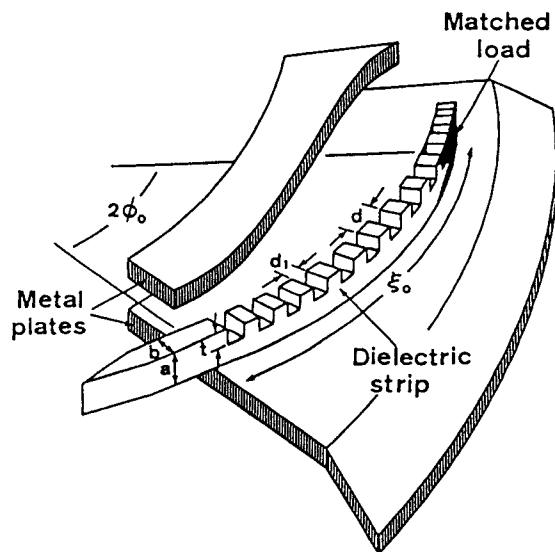


図10 被測定用曲り漏れ波NRDガイドアンテナ

るが、その上限は $\alpha \xi$ 。によって決まる。 $\alpha \xi$ 。を小さくし開口角 $2\phi$ 。を大きくすれば、半値幅を増加できるが、前述したように放射効率が減少する。従って、各パラメータは、半値幅、サイドエッジレベル、および放射効率を考慮して選ぶことになる。

#### (4) 実験結果

図10に示すような曲り漏れ波NRDガイドアンテナを製作し、周波数10GHzで測定した。

誘電体ストリップとしては、長さ約300mmのノッチ列つきストリップ(高さ13.8mm, 幅12.6mm, ノッチ幅4.2mm, ノッチ列の周期6.0mm, ノッチ深さ5.0mm)を、また、誘電体材料としてはテフロン(比誘電率 $\epsilon_r \sim 2.0$ )を使用した。

等角線のパラメータを決めるにはストリップに沿った伝搬定数を知る必要がある。ここでは誘電体ストリップに沿って測定した電界強度分布からこれを求めた。図11は、この漏れ波NRDガイドの位相定数 $\beta$ と漏れ定数 $\alpha$ の測定結果である。この測定結果を考慮し、 $\theta_0 = 71^\circ$ ,  $\alpha \sim 20 \text{ dB/m}$ ,  $\xi_0 \sim 10\lambda$ としてアンテナを構成した。開口角 $2\phi$ 。は誘電体ストリップの曲げ方で自由に選べるが、 $2\phi_0 = 72^\circ$ と $126^\circ$ の2例について測定した。

図12(a)にH面パターンの測定結果を示す。リップル成分は計算値より少し大きくなったが、半値幅は計算値とほぼ一致し、ストリップの曲げ、すなわち開口角を大きくすることで半値幅を増加できることが実証できた。また、 $\alpha \xi$ 。は一定であるから、サイドエッジレベルにも大きな差は生じなかった。

図12(b)はE面パターンの測定結果である。E面には約 $18.5^\circ$ のフレアを付けてある。測定結果はE面扇形ホーンの計算値とほぼ一致する。従って、E面フレアの選び方でH面ファンビームアンテナも可能である。

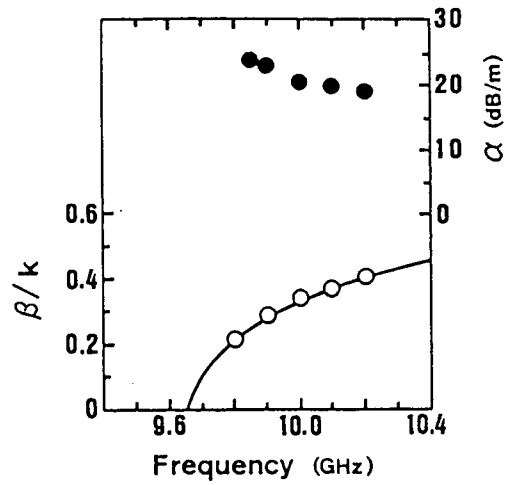


図11 曲り漏れ波NRDガイドの伝搬定数( $a=13.8\text{mm}$ ,  $b=12.6\text{mm}$ ,  $d=6.0\text{mm}$ ,  $d_1=4.2\text{mm}$ ,  $t=5.0\text{mm}$ )

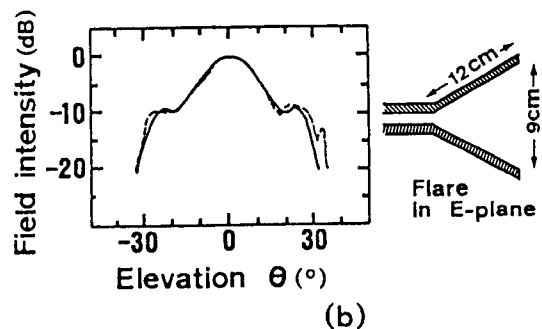
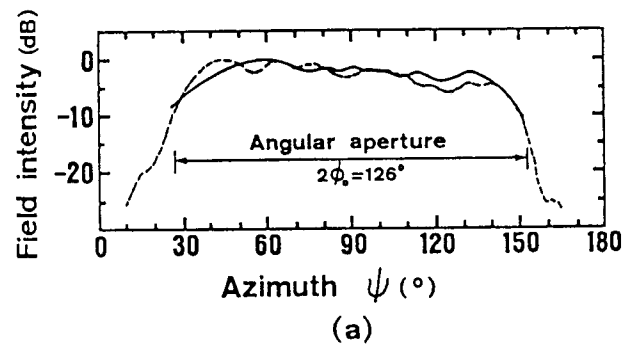
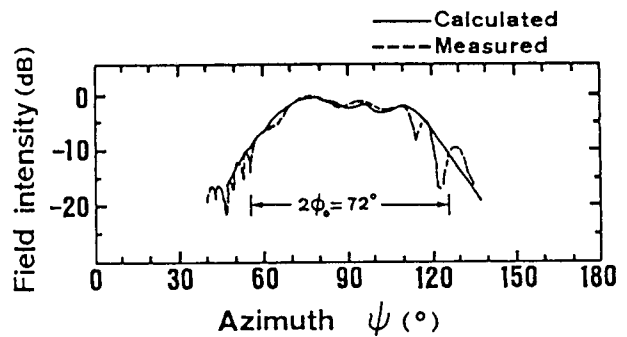


図12 曲り漏れ波NRDガイドアンテナの(a)H面パターンと(b)E面パターン



## 4. む す び

漏れ波線路を等角ら線形に湾曲させるだけの極めて簡便な方法で、漏れ波を集束および発散させ得ることを示した。

また、この曲り漏れ波線路を利用した広角照射アンテナを提案し、その放射特性について数値的に検討し、基礎的な設計資料も得た。更に、漏れ波線路として漏れ波NRDガイドを利用した10GHzでの測定により、所望の照射角が得られることも示した。

本報告ではスロット導波管や漏れ波NRDガイドを例に、周波数10GHzで検討したが、得られた結果はより高い周波数で任意の漏れ波線路を使用しても本質的には変わらない。従って、今後、いろいろな分野でミリ波が利用されるようになると、ペンシルビームのみならず種々の角度範囲を照射できるアンテナなども必要になって来ると考えられる<sup>(1)</sup>から、このような場合、本報告の結果はミリ波帯での広角照射アンテナ開発の際の一設計法として役立つものと考えている。

今後、種々の漏れ波線路を用いて、より高い周波数で検討を進めて行きたいと考えている。

**謝 辞** 本研究を行なうにあたり、石田(實)記念財団より研究助成金を頂きましたことに対し、関係各位の皆様深く感謝の意を表します。また、御指導御助言頂きました東北工業大学・氏家宏教授、東北大学・米山務教授に深謝いたします。

### 参 考 文 献

- (1) 米山 務：“非放射性誘電体線路を用いたミリ波集積回路”，信学論(C-I)，J73-C-I，No. 3，pp. 87-94(1990-03)。
- (2) I. Ohtera：“Focusing properties of a microwave radiator utilizing a slotted rectangular waveguide”，IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-38，no. 1，pp. 121-124(Jan. 1990)。
- (3) 大寺 勲，氏家 宏：“等角ら線形軸方向スロット方形導波管のマイクロ波集束特性”，信学論(B-II)，J74-B II，No. 2，pp. 55-63(1991-02)。
- (4) 伊藤精彦，鈴木道雄，松本 正：“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，No. 5，pp. 231-237(1970-05)。
- (5) M. Born and E. Wolf：“Principles of Optics, Sec. VIII”，Pergamon Press(1975)。
- (6) Y. Li and E. Wolf：“Focal shifts in diffracted converging spherical waves”，Opt. Commun., 39, 4, pp. 211-215(Oct. 1981)。
- (7) M. P. Givens：“Focal shifts in diffracted converging spherical waves”，Opt. Commun., 41, 3, pp. 145-148(April 1982)。
- (8) 大寺 勲，氏家 宏：“円すいホーンアンテナの位相中心”，信学論(B)，58-B，No. 2，pp. 76-83(1975-02)。
- (9) I. Ohtera and H. Ujiie：“Nomographs for phase centers of conical corrugated and TE<sub>11</sub>-mode horns”，IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-23，no. 6，pp. 858-859(Nov. 1975)。
- (10) 大寺 勲，氏家 宏，米山 務：“曲りスロット導波管給電放物鏡アンテナ”，信学論(B-II)，J76-B II，No. 2，pp. 86-95(1993-02)。
- (11) 米山 務，上瀧 實：“ミリ波を用いた総合交通管制システム”，信学会誌，Vol. 75，No. 12，pp. 1322-1325(1992-12)。