

TR-O-0041

48

光空間制御アレーアンテナの励振分布と放射特性

小西 善彦

1991. 9. 15.

ATR光電波通信研究所

Abstract

本報告は、素子アンテナに給電するマイクロ波信号の励振振幅位相分布を、光学フーリエ変換と O/E 変換を用いて光領域で生成・制御する光空間制御アレーアンテナに関して、レーザー光源として固体レーザーの一種であるレーザーダイオード励起 Nd:YAG レーザを 2 台使い、差周波で所要のマイクロ波信号を得る 2 レーザモデルの励振分布および放射特性を検討したものである。

第 1 章では、本研究の背景について述べる。

第 2 章では、2 レーザモデル光空間制御アレーアンテナの構成を示し、イメージマスクとして円形開口ピンホールマスクを用いた場合の励振分布と指向性を理論的に求める。

第 3 章では、まずレーザーダイオード励起 Nd:YAG レーザをレーザー光源として用いる 2 レーザモデル実験系を示し、円形開口ピンホールイメージマスクをフーリエ変換レンズの光軸上に配置しイメージマスク開口径を変化させた場合の励振分布実験を報告する。さらに、励振分布実測値を用いて放射特性を計算により評価し、イメージマスク開口径に対応したビーム形状を有する放射パターンが得られることを明らかにする。

第 4 章では、イメージマスクをフーリエ変換レンズの光軸と直交する面内で移動させた場合の励振分布と放射パターンを検討し、イメージマスク移動量に対応した位相勾配が励振分布に発生し、イメージマスクの移動によりビーム走査が実現できることを確認する。

第 5 章では、まとめとして、本研究で得られた結果について総括する。

光空間制御アレーアンテナの励振分布と放射特性

小西 善彦

目次

1. まえがき	2
2. 光空間制御アレーの励振分布と指向性	3
3. マスク開口径と励振分布, 放射特性との関係	6
3.1 実験系の構成	6
3.2 励振分布実験結果	8
3.3 放射特性	17
4. ビーム走査実験	24
4.1 イメージマスク移動時の励振分布	24
4.2 ビーム走査特性	31
5. むすび	39

1. まえがき

フェーズドアレーアンテナは、従来、主にレーダシステム用に用いられてきたが、近年、衛星搭載用アンテナなどの通信用アンテナへの使用が考えられている⁽¹⁾⁽²⁾。これは、フェーズドアレーでは、リアルタイムでのビーム走査や、複雑な形状のビーム形成が可能のためである。

衛星搭載用アンテナなどの多素子アレーアンテナにフェーズドアレーを適用する場合、素子アンテナ数の増加に伴って、可変移相器や、電力分配器、伝送線路、制御信号線などからなるビーム形成回路 (BFN) が大きく、かつ複雑になる傾向がある。そのため、BFN の大きさ、および重量の軽減が重要となる。また、BFN を高速に制御することも必要である。さらに、BFN と、他の電子機器との間の電磁干渉の軽減も問題となる。これらの問題を解決するために、光ファイバ伝送技術などの光技術をマイクロ波 BFN に応用することが提案され、種々の形式の光制御アレーアンテナが検討されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

これらの光制御アレーの一形式として、各素子アンテナに給電するマイクロ波信号の励振振幅位相分布を、光学フーリエ変換と O/E 変換を用いて光領域で生成・制御する光空間制御アレーアンテナが提案されている⁽⁵⁾。このアレーでは、所要のアンテナ放射パターンの形状に対応した光開口分布を有するイメージマスクの位置と大きさを変えることにより、各素子アンテナの励振振幅位相を、同時に、かつ一括して制御することができる。そのため、このアレーは、コンタクトビームなどの所要の成形ビームを、迅速、かつ容易に形成できる方法と考えられる。

この形式のアレーとして、先に発振周波数差が所要のマイクロ波周波数に設定されたふたつのレーザ光源を用いる“2 レーザモデル”を提案し⁽⁶⁾、周波数 1.54GHz において励振振幅分布実験を行なった⁽⁷⁾。この実験では、レーザ光源として波長 1.3 μm 帯の DFB レーザダイオード (DFB-LD) を用いた。レーザダイオードは、小形軽量で、かつ駆動電流により発振周波数が容易に制御できるという利点があるが、線幅が 10MHz 程度あり、位相雑音も通常のマイクロ波発振器に比べ非常に大きい。そのため、励振振幅はほぼ所要の実測値が得られるが、励振位相の測定は難しかった。

ここでは、DFB-LD よりも線幅が狭く、発振周波数も安定な LD 励起 Nd:YAG レーザをレーザ光源として用い、励振振幅だけでなく、励振位相の検討も行なう。まず、円形開口ピンホールイメージマスクをフーリエ変換レンズの光軸上に配置し、イメージマスク開口径を変化させた場合の励振分布および放射特性を検討する。そして、イメージマスク開口径に対応したビーム形状の放射パターンが実際に得られることを明らかにする。つぎに、ピンホールイメージマスクをフーリエ変換レンズの光軸と直交する面内で移動させた場合の、励振分布および放射特性について実験的に検討する。まず、イメージマスクを移動させた場合について検討する。そして、マスク移動量に対応した位相勾配が励振分布に発生し、マスク移動によりビーム走査が行なわれることを確認する。

2. 光空間制御アレーの励振分布と指向性

図1は、2レーザモデル光空間制御アレーアンテナの構成を示す。ここで、アレーはXY平面上の平面アレーアンテナとし、素子アンテナは N 素子と仮定する。レーザ光源 No.1 (Laser1) から放射された光ビームは、イメージマスクを透過し、コンタドビームなどの所要のビーム形状の光ビームとなる。そしてこのビームは、フーリエ変換レンズ (FT レンズ) によりフーリエ変換される。なお、フーリエ変換を行なうため、イメージマスクはFT レンズの焦点面に置かれている。一方、レーザ光源 No.2 (Laser2) からの光ビームは、所要のビーム幅の平面波に調整され、参照光として用いられる。FT レンズの出力光 (フーリエ変換光) P_1 と参照光 P_2 は、ビーム合成器により混合され、FT レンズのもう一方の焦点面に置かれた光ファイバアレーにより空間的にサンプリングされる。そして、各素子アンテナに給電されるマイクロ波信号が、各フォトダイオード (PD) のヘテロダイン検波出力として取り出される。アンテナ放射パターンは、アンテナ励振分布のフーリエ変換結果として与えられるので、このアレーでは、イメージマスク透過光の形状とアンテナ放射パターンとが一意に対応する。また、2レーザモデルでは、所要のマイクロ波周波数をふたつのレーザ光源の差周波で与えるので、レーザ光源の発振周波数を適当に設定することで、マイクロ波周波数を容易に変更することが可能である。

図1のアレーにおいて、イメージマスクとして円形開口のピンホールマスクを想定する。また、ピンホールイメージマスクは、図2に示すように、FT レンズの光軸を原点としFT レンズの焦点面にある直角座標系 (x_0, y_0) 上に位置するものとする。マスク開口分布を一様分布、参照光の振幅分布をガウス分布とするならば、光ファイバアレーでサンプリングされる励振分布 $A(x, y)$ は、次式により与えられる。

$$A(x, y) = \alpha e^{-\beta[(x-x')^2+(y-y')^2]} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{r_0}{F}(x \cos \phi_0 + y \sin \phi_0)} \cdot \frac{2J_1(u)}{u} \quad (1)$$

$$u = \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{D}{F} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

ただし、 (x, y) は、FT レンズの光軸を原点とし、この光軸と直交する光ファイバアレー端面の直角座標系、 (r_0, ϕ_0) は図2に示すピンホールイメージマスクの中心の、原点からの距離と x_0 軸からなす角度、 (x', y') は参照光 P_2 の光軸の、FT レンズの光軸に対する x, y 方向のずれの値、 J_1 は1次のベッセル関数、 λ_0 はフーリエ変換光 P_1 の波長、 D はピンホールイメージマスクの開口径、 F はFT レンズの焦点距離、 α, β は実数定数を表す。式(1)より、変数 u はマスク開口径 D とFT レンズ焦点距離 F との比 D/F に比例する。そのため励振振幅分布の3dB幅 (ピーク振幅レベルから3dB低い点の幅) やナル幅は、 D/F が増加すると減少する。特に、参照光が均一分布の場合 (式(1)の $\beta=0$) には、3dB幅およびナル幅は D/F に反比例する。また、イメージマスクをFT レンズの光軸から移動させると、その移動量 (r_0, ϕ_0) に対応する直線状の位相勾配が励振分布 $A(x, y)$ に発生する。

つぎに、図1のアレーの放射指向性 $F(\theta, \phi)$ は、次式で与えられる。

$$F(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N f_i(\theta, \phi) \cdot A(x_i, y_i) \cdot e^{jk_m(X_i \cos \phi + Y_i \sin \phi) \sin \theta} \quad (3)$$

ただし N は素子アンテナ数、 (X_i, Y_i) は素子アンテナ # i の XY 座標、 (θ, ϕ) は極座標系、 $f_i(\theta, \phi)$ は素子アンテナ # i の指向性、 $k_m = 2\pi/\lambda_m$ はマイクロ波の波数、 λ_m はマイクロ波の波長である。また、 $A(x_i, y_i)$ は素子アンテナ # i に接続された光ファイバ [端面の座標 (x_i, y_i)] によりサンプリングされる励振分布、すなわち素子アンテナ # i の励振分布であり、式 (1) により与えられる。

ここで、図1の光ファイバアレーの各光ファイバの配列と、平面アレーアンテナの素子アンテナ配列が相似形の場合には、イメージマスク移動量 (r_0, ϕ_0) ($r_0 \geq 0, -\pi < \phi_0 \leq \pi$) と放射パターンのビーム走査角 (Θ, Φ) との間には、以下の関係が与えられる。

$$\begin{aligned} \Theta &= \sin^{-1} \left(\frac{mr_0}{F} \right) \quad (0 \leq \Theta \leq \pi/2) \\ \Phi &= \phi_0 \pm \pi \quad (-\pi < \Phi \leq \pi) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、

$$m = \frac{d_x/\lambda_o}{d_{aX}/\lambda_m} = \frac{d_y/\lambda_o}{d_{aY}/\lambda_m} \quad (5)$$

ここで、 d_x, d_y は光ファイバの x, y 方向の配列間隔、 d_{aX}, d_{aY} は素子アンテナの X, Y 方向の配列間隔である。また、光ファイバアレーおよびアレーアンテナが、各々 x, X 方向のリニアアレーの場合には、式 (4), (5) は次式で表される。

$$\Theta = -\sin^{-1} \left(\frac{mx_0}{F} \right) \quad (-\pi/2 \leq \Theta \leq \pi/2) \quad (6)$$

$$m = \frac{d/\lambda_o}{d_a/\lambda_m} \quad (7)$$

ただし、 x_0 はイメージマスクの x_0 軸方向の移動量、 d および d_a は各々光ファイバ、素子アンテナの配列間隔である。式 (4), (6) 共、 θ 方向のビーム走査角 Θ は、イメージマスク移動量 r_0 または x_0 と FT レンズ焦点距離 F との比 $r_0/F, x_0/F$ に比例している。

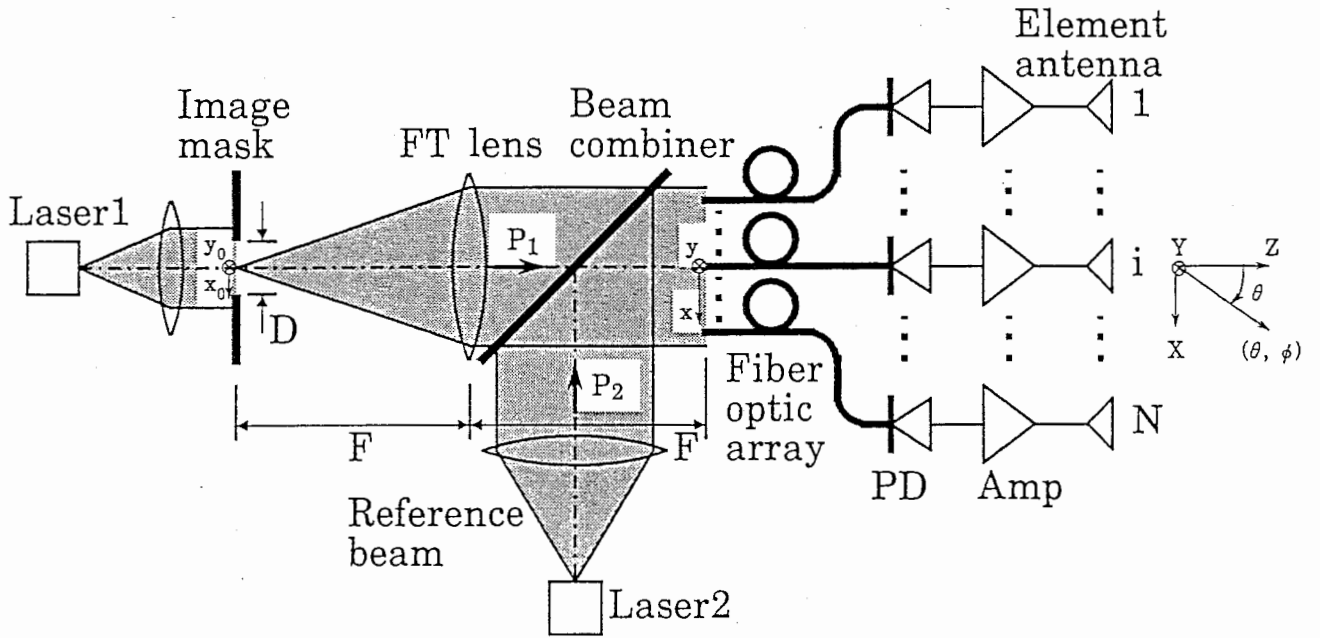


図 1: 2 レーザモデル光空間制御アレーアンテナ

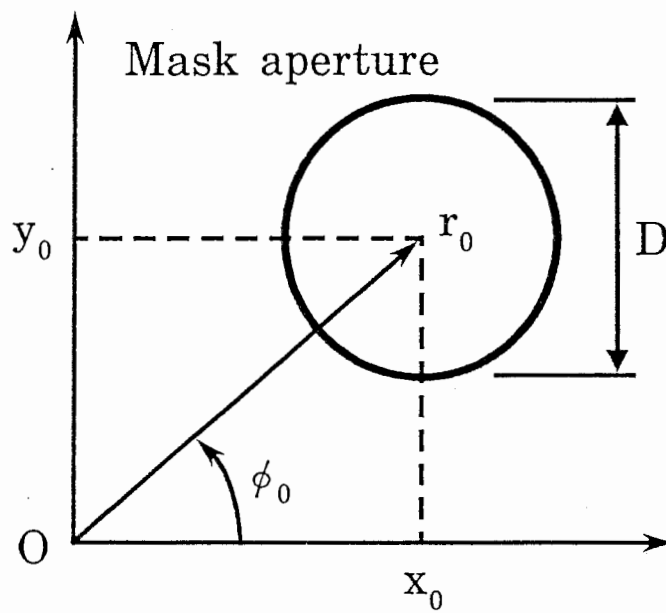


図 2: ピンホールイメージマスクの配置

3. マスク開口径と励振分布，放射特性との関係

3.1 実験系の構成

図3に，2レーザモデル実験系の構成図を示す．先の実験 citeKonishi2 では，レーザ光源 (Laser1,Laser2) としてDFB-LDを用いたが，ここでは，発振波長 $\lambda_0 = 1.319\mu\text{m}$ 帯のLD励起Nd:YAGレーザを用いる．これはYAGレーザの線幅が約4kHzとLDより非常に狭く，発振周波数も安定なので，励振位相の安定化が図れるためである．また，先の実験⁽⁷⁾では，LDの出力電力が約1mWと小さいため，フーリエ変換光と参照光とを光ファイバ分配器で混合していた．しかし，YAGレーザの出力が約10mWと大きく，励振分布の測定ダイナミックレンジに余裕がとれるので，ここでは，フーリエ変換光と参照光を空間で混合し，実験系を図1のモデルに近づけている．図3の実験系において，Laser1から空間に放射された光ビームは，偏波面を調整された後，レンズにより開口径 $D = 30, 50, 75, 100\mu\text{m}$ のピンホールイメージマスクに集光される．そして，イメージマスクを透過した光ビームは，焦点距離 $F = 80\text{mm}$ のFTレンズによりフーリエ変換される．一方，Laser2からの光ビームは，2枚のレンズを用いてビーム径を拡大した後，参照光として上記のフーリエ変換光と混合される．混合されたふたつの光ビームは，円筒マイクロレンズ付き光ファイバ1, 2により空間的にサンプリングされ，PDでのヘテロダイン検波により周波数 $f_m = 1.54\text{GHz}$ の信号が取り出される．なお，PD2の出力は振幅位相の基準として用いる．マイクロ波励振分布は，光ファイバ1を x 軸に沿って間隔 d で1次元走査しながら測定する．

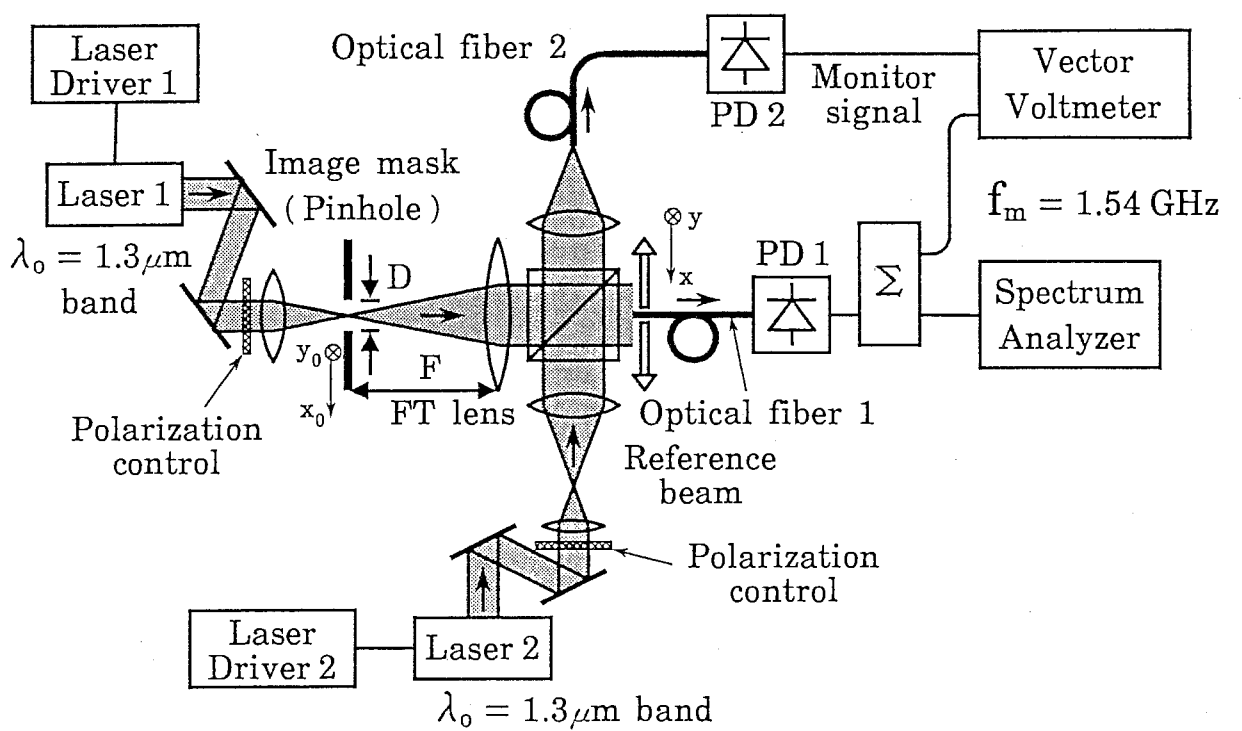
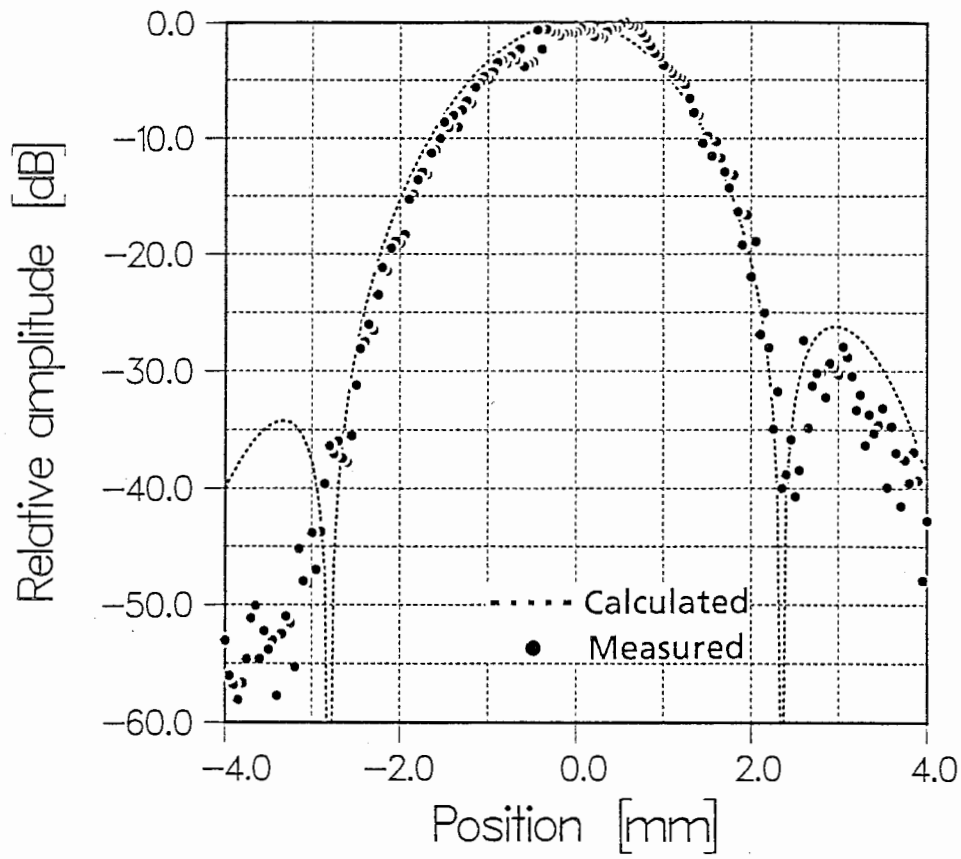


図 3: 2 レーザモデル実験系

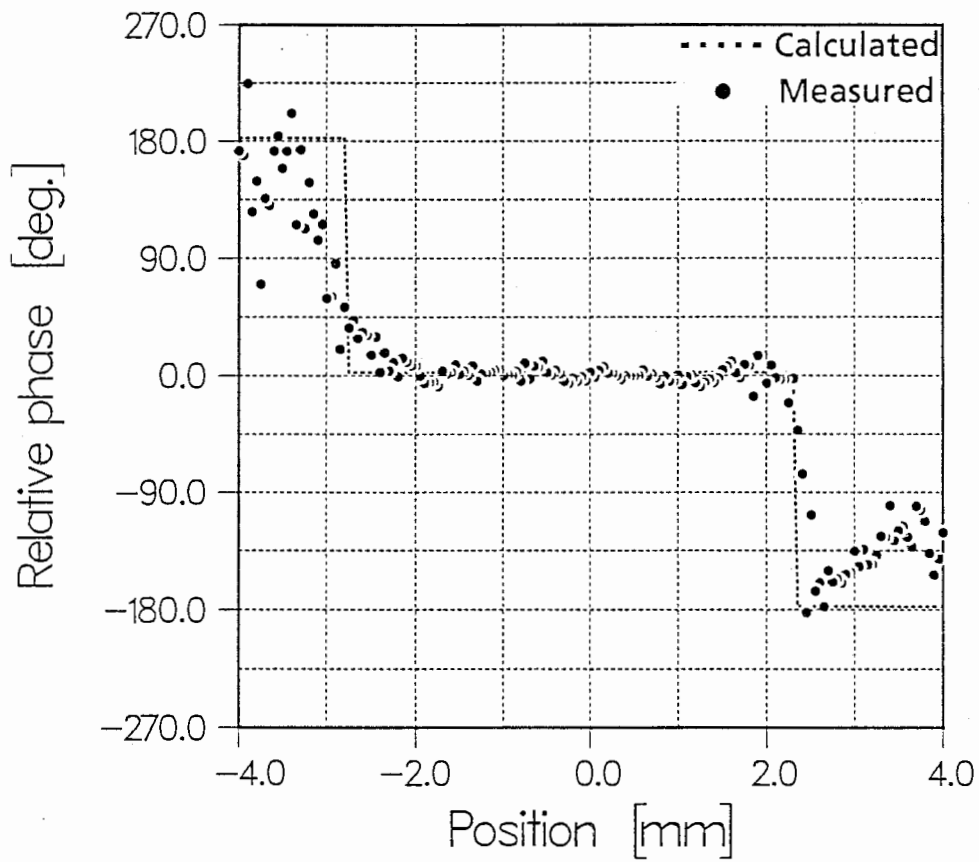
3.2 励振分布実験結果

図4は、マスク開口径 $D=50\mu\text{m}$ でのマイクロ波励振分布実験結果を示す。また、図5, 6は各々、光電力計で測定したフーリエ変換光分布 (マスク開口径 $D=50\mu\text{m}$)、および参照光分布である。なお、図4の“Calculated”は、図6の参照光実測値をガウス分布に最小2乗近似し、式(1)により求めた計算値である。また、図5の“Theoretical”は、フーリエ変換光理論値、図6の“L.M.S.”は、参照光実測値のガウス分布近似を示す。図4(a)のマイクロ波振幅分布は、実測値、計算値共左右非対称である。特に実測値は、サイドローブが片側にしかなく、一方の側はショルダになっている。計算値が非対称なのは、図5, 6に示すように、フーリエ変換光の光軸と参照光の光軸とがずれているためである。一方、実測値の非対称性は、図5のフーリエ変換光実測値にも表れており、マスク開口分布の乱れや、FTレンズなどの光学系の収差によるものと考えられる。しかし、メインローブおよび片側のサイドローブに関しては、ほぼ計算値に対応した振幅分布が得られている。図4(b)の位相分布実測値にはばらつきがあるが、メインローブの領域では、誤差 5.5°rms のほぼ一様な位相分布が得られている。また、サイドローブ領域の位相については、ショルダの側は連続的に変化する位相分布となっている。しかしサイドローブのある側は、計算値との誤差は大きい、メインローブの位相とほぼ 180° 反転した値が得られている。サイドローブ領域での計算値と実測値の誤差の増大は、励振振幅がメインローブ領域に比べ小さいのと、フーリエ変換光、参照光共、光軸からのずれが大きくなるので、光学系の収差が増大するためと考えられる。図7-9は、マスク開口径 $D=30, 75, 100\mu\text{m}$ でのマイクロ波励振分布である。図7(a)より、 $D=30\mu\text{m}$ の場合には、振幅分布実測値と計算値に大きなずれがある。これは、図10のイメージマスク拡大図からわかるように、 $D=30\mu\text{m}$ のマスクの加工状態が他のマスクに比べて悪く、開口径 D が $30\mu\text{m}$ より大きく見えているからと思われる。図8(a), 9(a)に示す $D=75, 100\mu\text{m}$ での励振振幅分布は、 $D=50\mu\text{m}$ (図4(a)) の場合と同様に、片側のサイドローブはショルダになっているが、メインローブおよびもう一方のサイドローブは、計算値にほぼ対応した実測値が得られている。図7(b)-9(b)に示す励振位相分布についても、メインローブ、およびサイドローブの位相実測値は、計算値とほぼ対応した分布が実測されている。

図11は、マスク開口径 D を変えた時の励振振幅分布の3dB幅と、マスク開口径 D とFTレンズ焦点距離 F との比 D/F との関係、図12は、振幅分布の最大サイドローブレベルと D/F との関係を示す。各図より、マスク開口径 $D=30\mu\text{m}$ の3dB幅の実測値と計算値は上記の理由により一致していない。しかしその他の場合の3dB幅および最大サイドローブレベルの実測値は、計算値とほぼ一致しており、3dB幅はマスク開口径 D とFTレンズ焦点距離 F との比 D/F が大きくなると減少する。



(a) 振幅分布



(a) 位相分布

図 4: $D=50\mu\text{m}$ の場合のマイクロ波励振分布実験結果

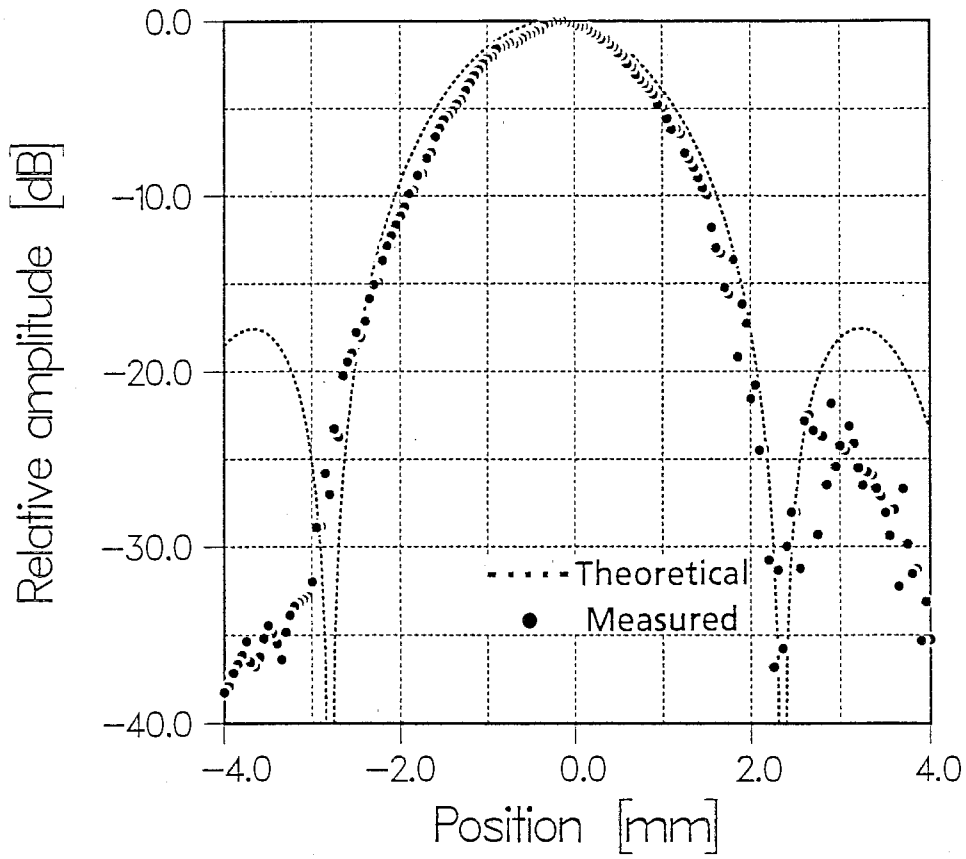


図 5: $D=50\mu\text{m}$ の場合のフーリエ変換光分布

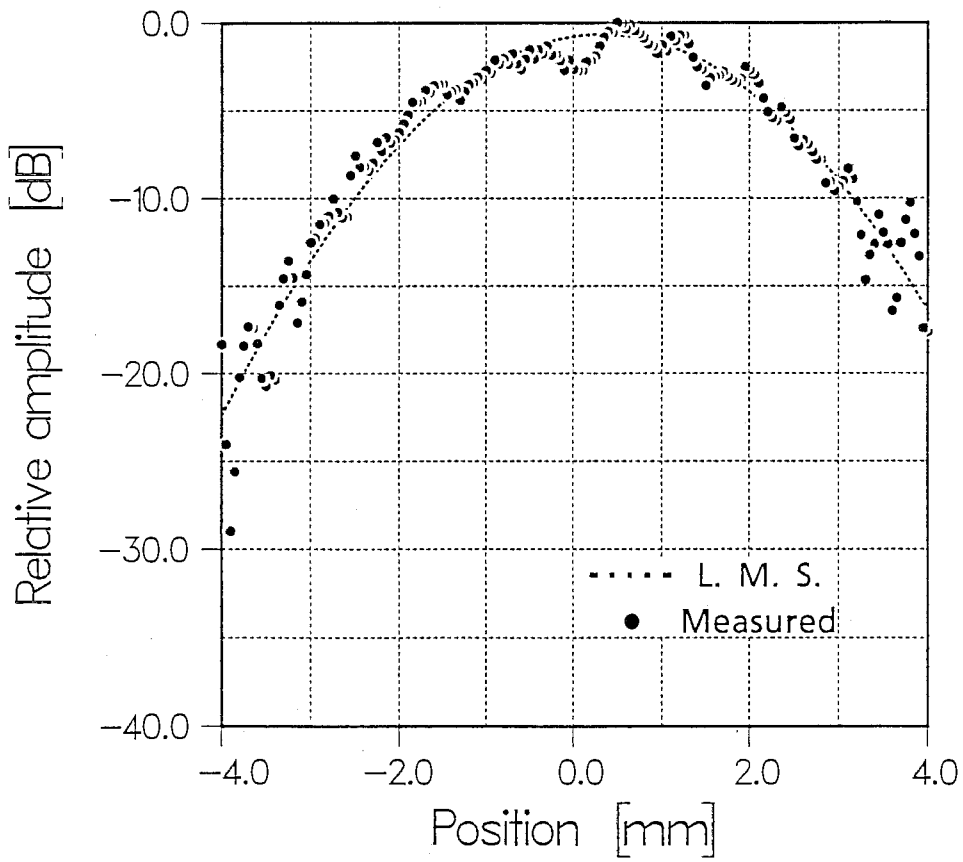
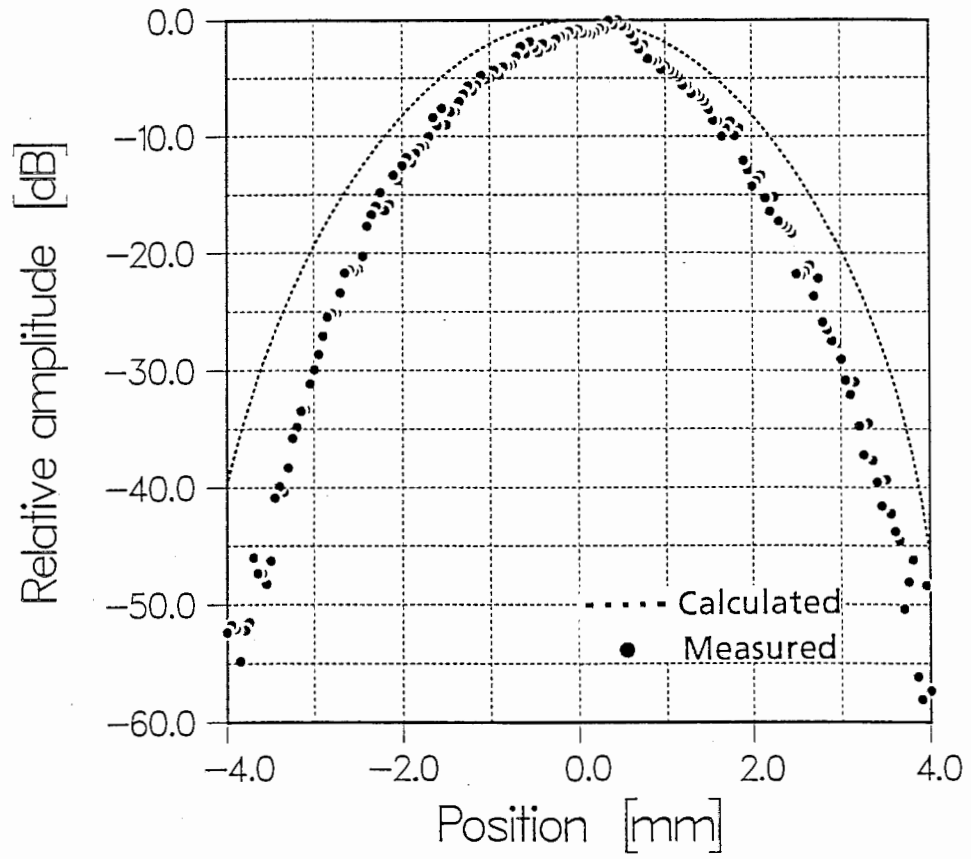
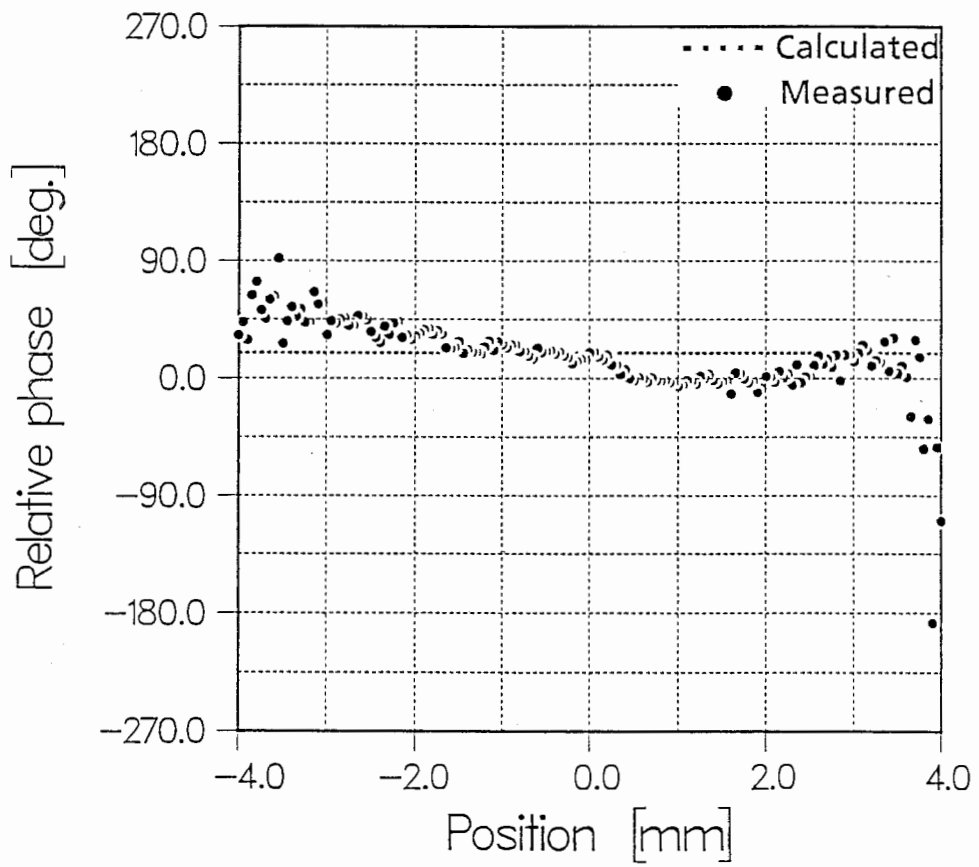


図 6: 参照光分布

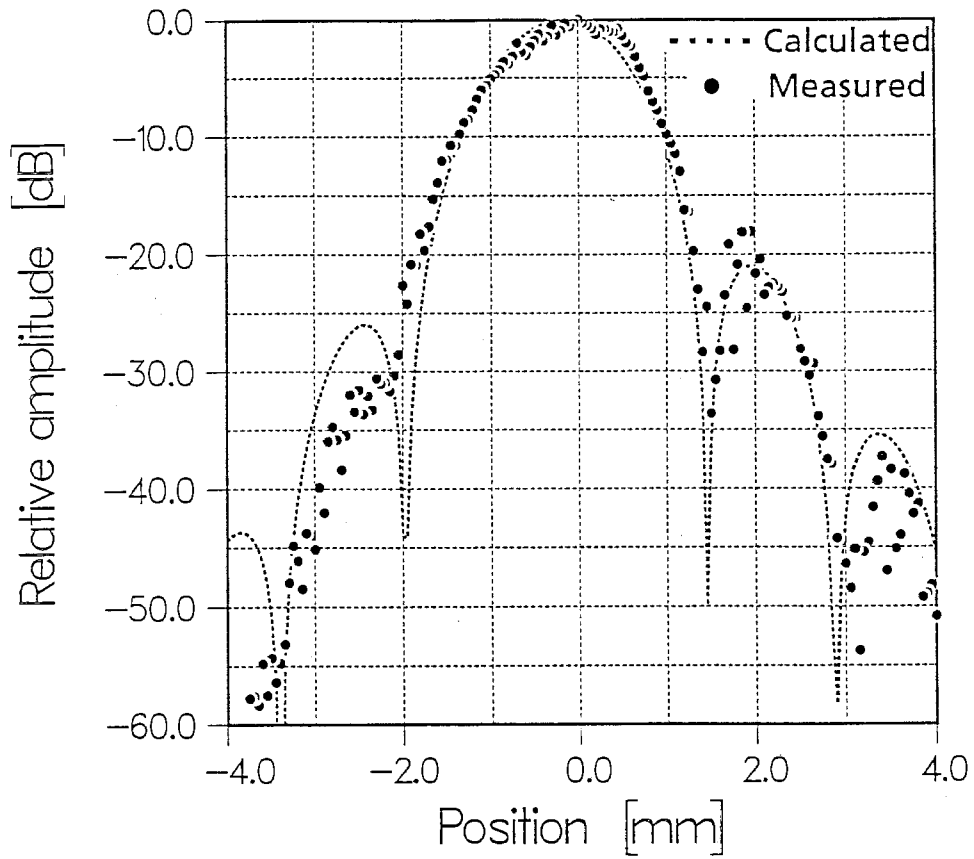


(a) 振幅分布

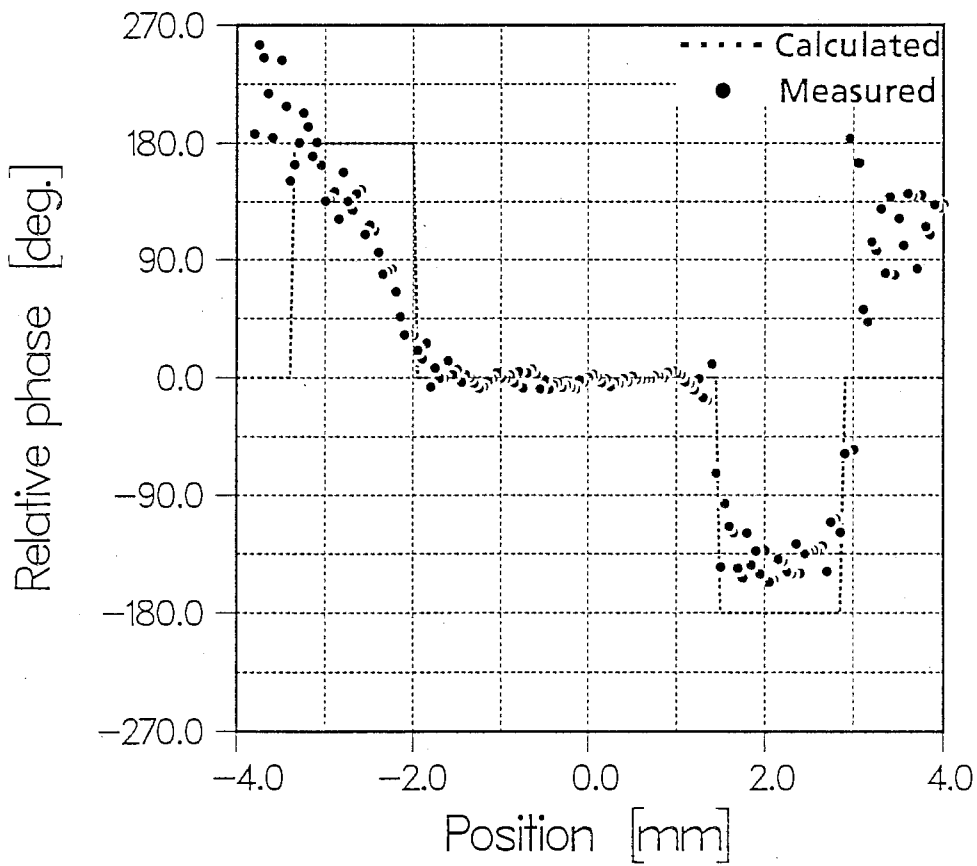


(a) 位相分布

図 7: $D=30\mu\text{m}$ の場合のマイクロ波励振分布実験結果

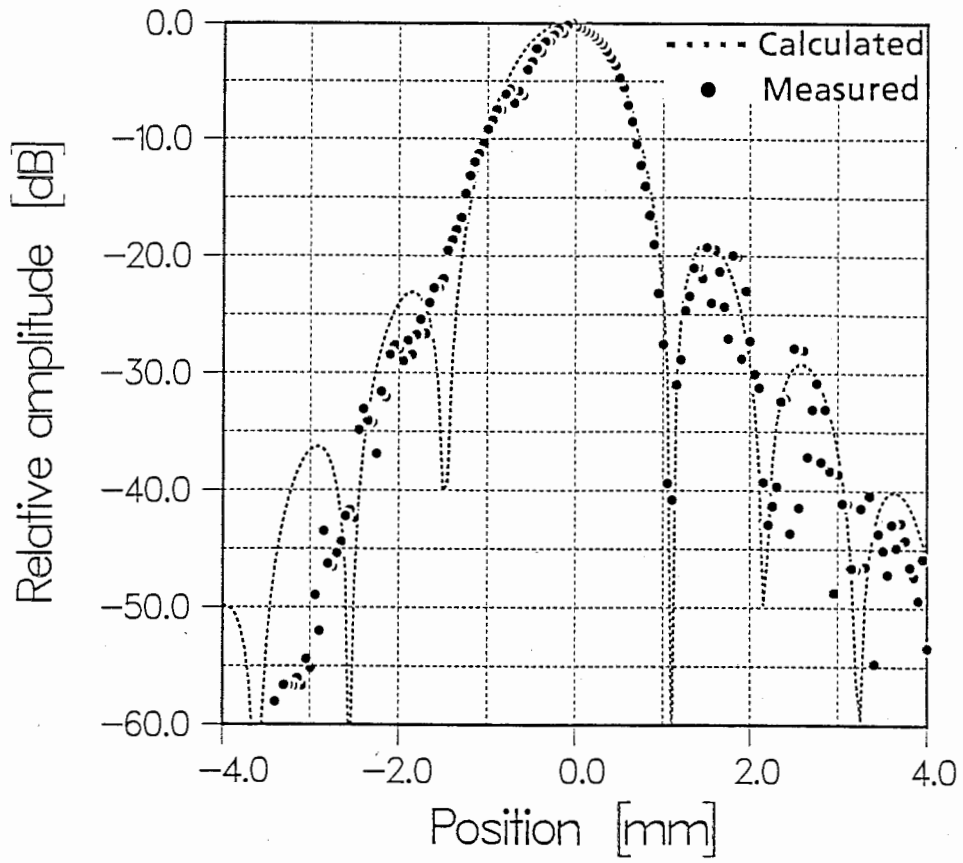


(a) 振幅分布

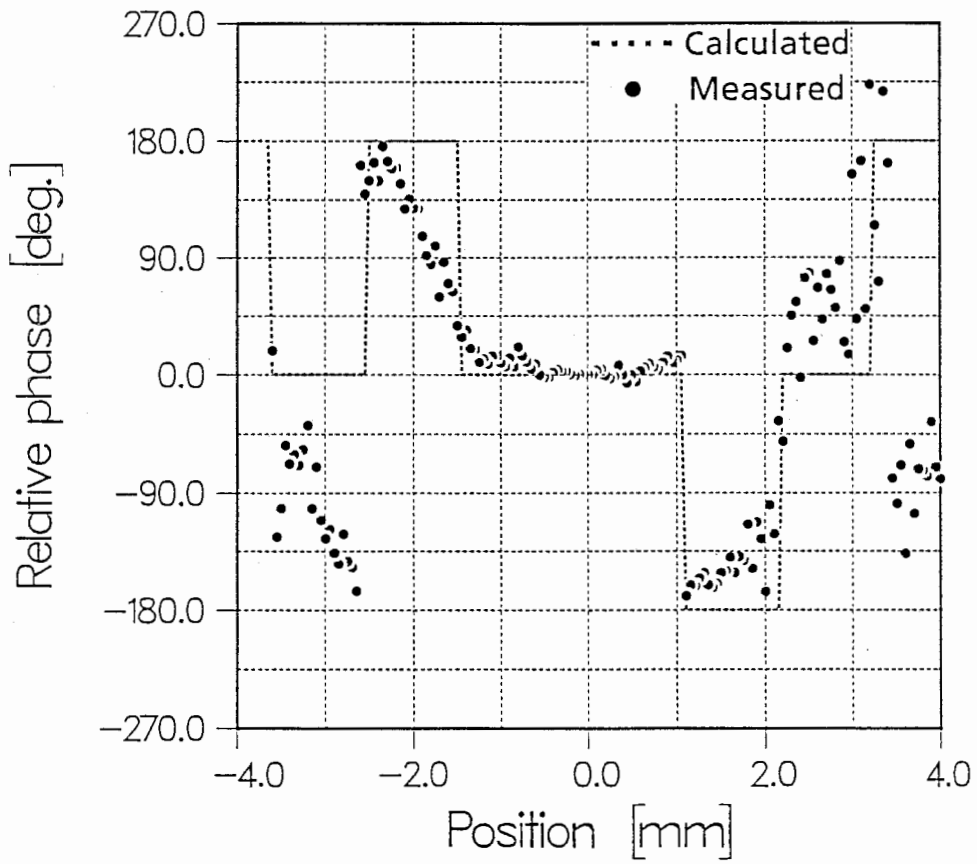


(a) 位相分布

図 8: $D=75\mu\text{m}$ の場合のマイクロ波励振分布実験結果

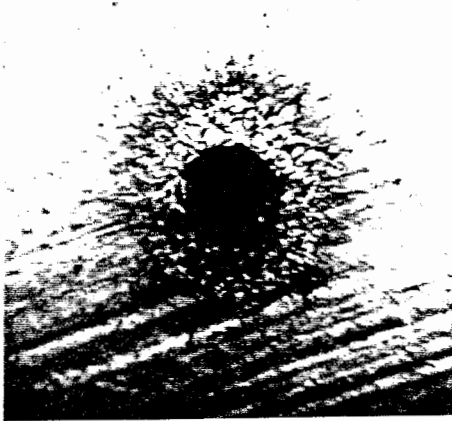
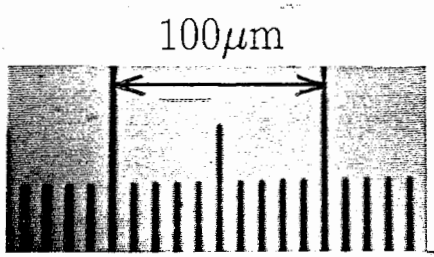


(a) 振幅分布

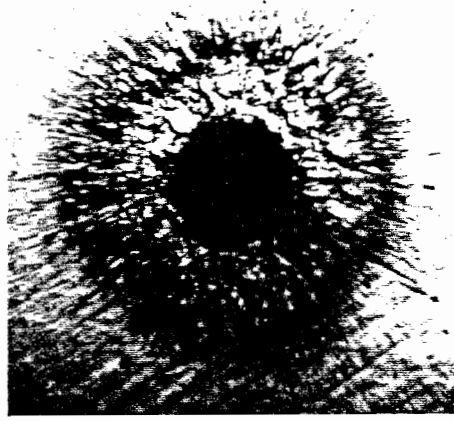


(a) 位相分布

図 9: $D=100\mu\text{m}$ の場合のマイクロ波励振分布実験結果



(a) $D=30\mu\text{m}$



(b) $D=50\mu\text{m}$



(c) $D=75\mu\text{m}$



(d) $D=100\mu\text{m}$

図 10: ピンホールイメージマスクの拡大図

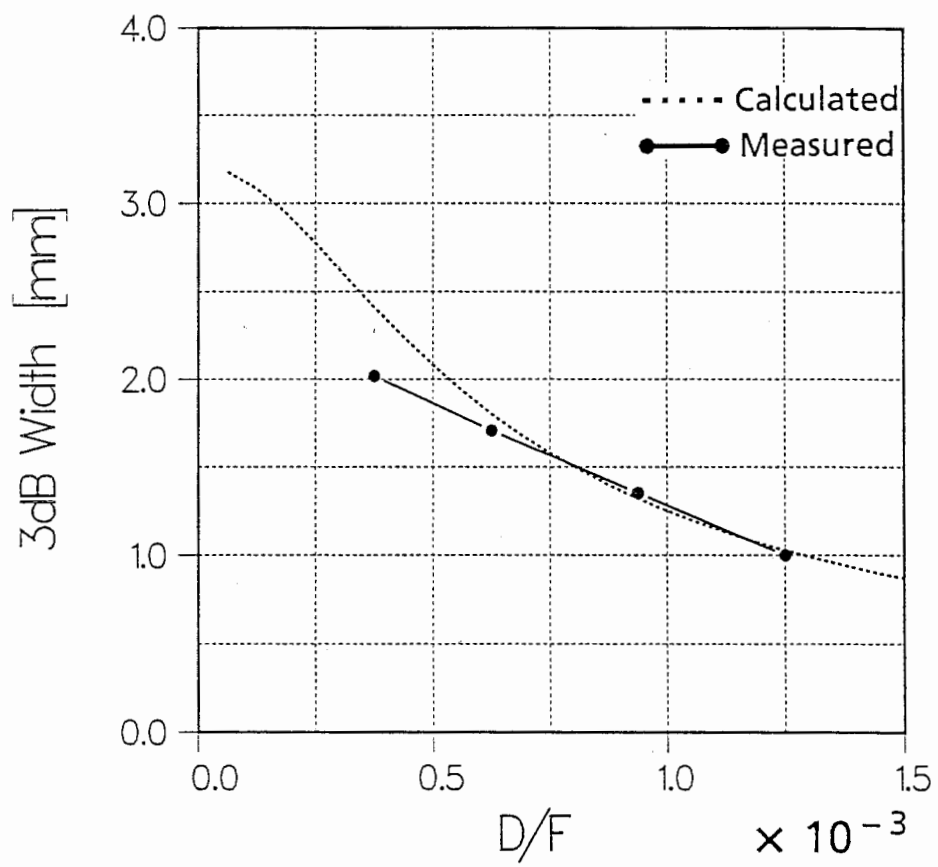


図 11: 励振分布の 3dB 幅と D/F との関係

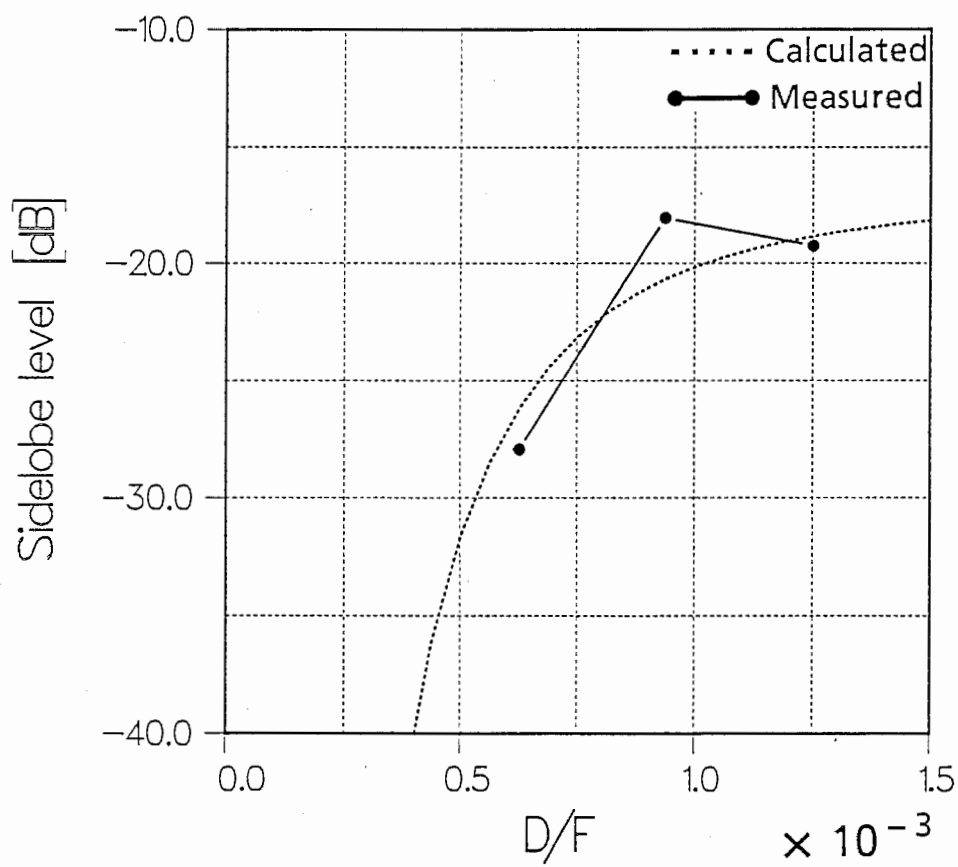
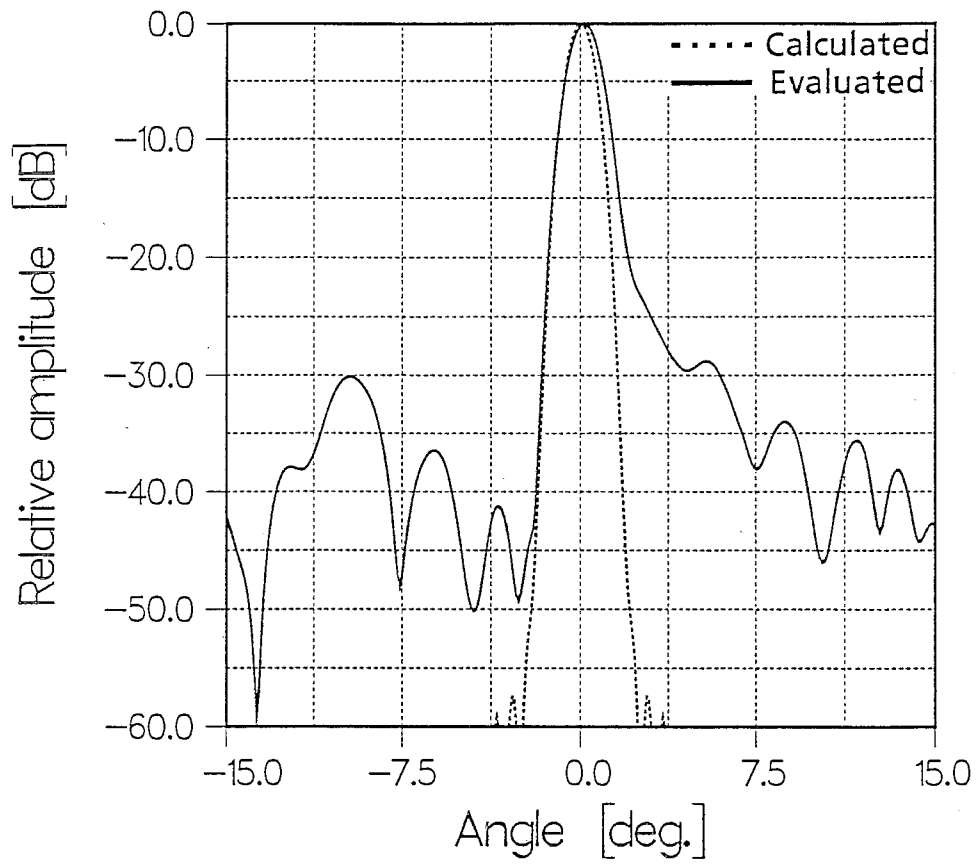


図 12: 励振分布の最大サイドローブレベルと D/F との関係

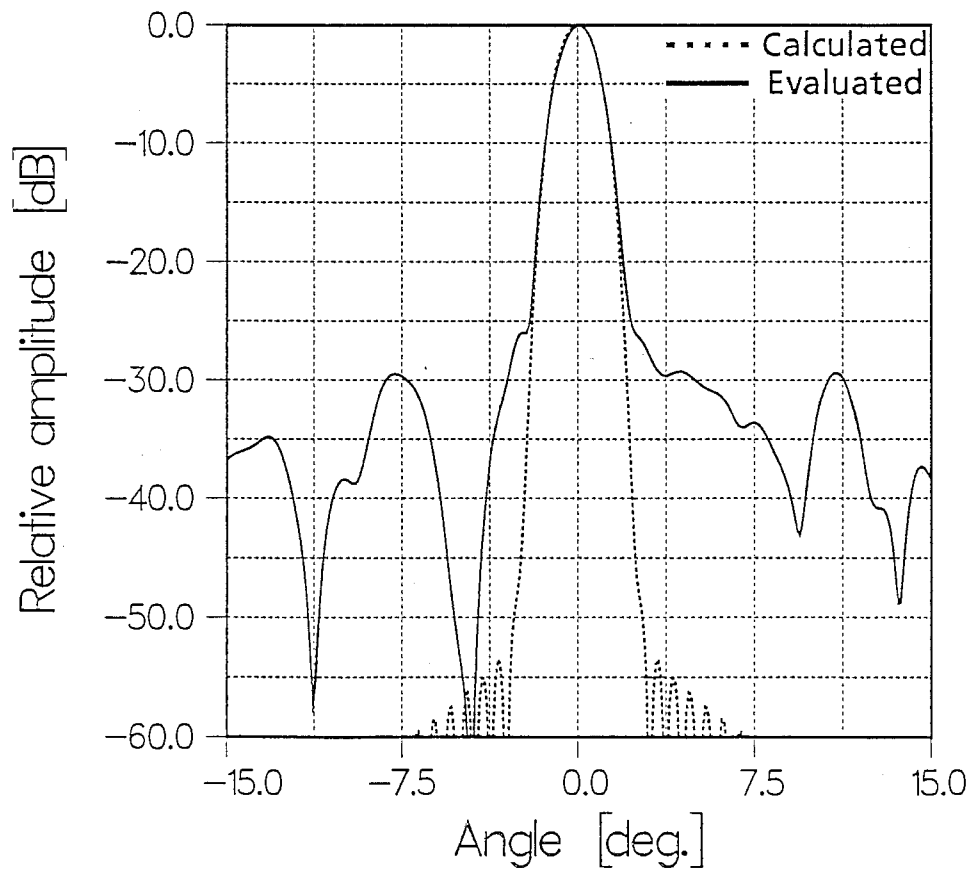
3.3 放射特性

ここでは、実測した励振振幅位相分布を用いて放射パターンを計算し、放射特性の検討を行なう。なお、計算に用いたアレーは、素子アンテナ間隔を半波長 $\lambda_m/2$ に固定したりニアアレーとし、素子アンテナは点波源と仮定する。図 13(a) - (d) は、イメージマスク開口径 $D=30, 50, 75, 100\mu\text{m}$ 、光ファイバサンプリング間隔 $d=50\mu\text{m}$ の時の放射パターンを示す。この場合、前節で示した励振分布の測定範囲が $x=\pm 4\text{mm}$ なので、素子アンテナ数 N は 161 素子である。なお、各図中、“Evaluated” は励振分布実測値を用いて求めた放射パターン評価値、“Calculated” は図 4, 7-9 に示した励振分布計算値を用いて計算した値である。各図において、放射パターン評価値のサイドローブレベルが計算値より高く、 $-25 - -30\text{dB}$ ある。これは、前節で示した励振振幅実測値のばらつきや分布の非対称性、および、励振位相実測値のばらつきによるものと考えられる。また、メインビームに関しても、マスク開口径 $D=50\mu\text{m}$ については、評価値と計算値は良く一致しているが、 $D=30\mu\text{m}$ では評価値のビームは計算値より広く、 $D=75, 100\mu\text{m}$ では、ビーム中央部の形状が非対称になっている。 $D=30\mu\text{m}$ の場合は前節でも示したように、使用したピンホールイメージマスクの開口径が $30\mu\text{m}$ より大きく見えるためと思われる。また、 $D=75, 100\mu\text{m}$ の場合については、マスク開口径が大きいため、マスク中心部に光ビームが集中し、マスク開口分布が一様分布となっていないためと考えられる。これらの問題点はあるが、図 13 より、励振振幅位相分布実測値を用いて放射パターンが形成できることが確認できる。

図 14 は、光ファイバサンプリング間隔 d を $50, 100, 150, 200, 250, 300\mu\text{m}$ とした場合の放射パターンのビーム幅と D/F との関係、図 15 は、放射パターンの 10dB 幅と D/F との関係、図 16 は利得と D/F との関係、図 17 は放射パターンの最大サイドローブレベルと D/F との関係を示す。励振分布の測定範囲が固定されているので、サンプリング間隔 d を大きくすると素子数が減り、アレー開口径が小さくなる。そのため、図 14 のビーム幅と、図 15 の 10dB 幅は、評価値、計算値とも、サンプリング間隔 d に比例して大きくなっている。図 14 のビーム幅評価値は、マスク開口径 D を大きくすると、計算値より小さくなっていく。これは、前述したように、マスク中央に光ビームが集中し、マスク開口分布が一様分布からずれているためと考えられる。しかし、メインビーム全体の形状はマスク開口径でほぼ決まるため、図 15 の 10dB 幅評価値は、マスク開口径 $D=30\mu\text{m}$ の場合を除き、ほぼ計算値に近い値が得られている。図 16 に示す利得評価値についても、10dB 幅と同様に、ほぼ計算値に近い値となっている。一方、図 17 は、サンプリング間隔 d を変えた場合にも -25dB 程度あり、計算値より非常に高い。これは、マスク開口分布や参照光分布の乱れ、および光学系の収差によるアレー励振分布の乱れによるものであり、今後検討の必要がある。

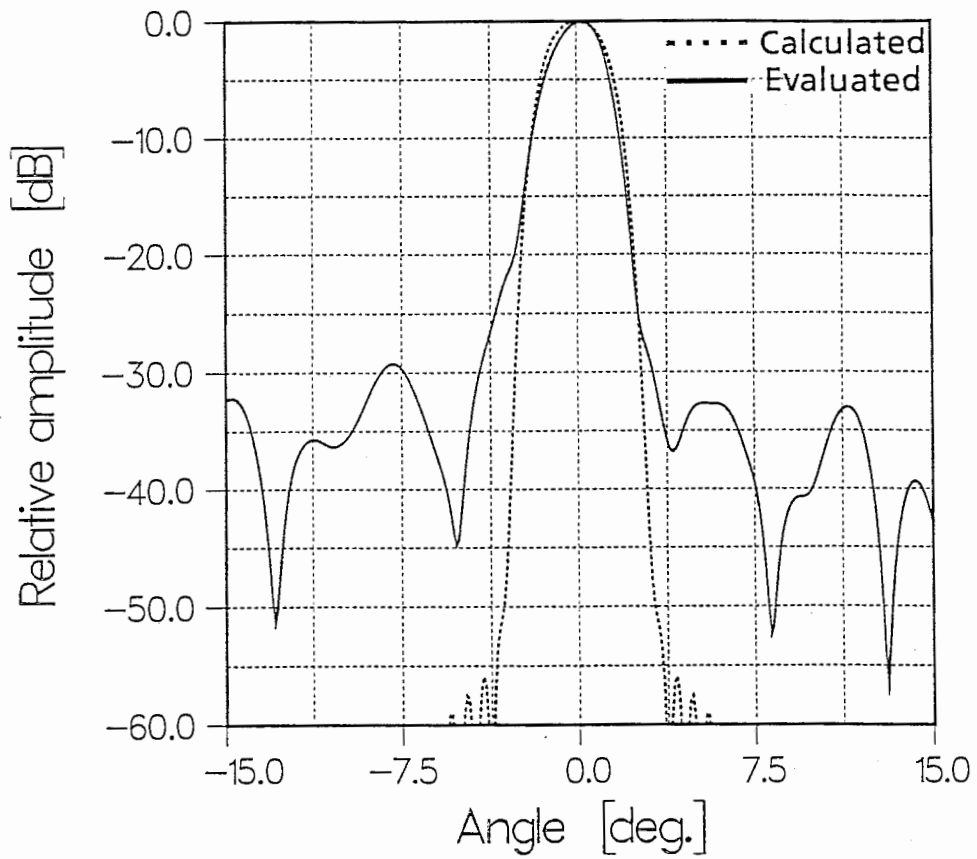


(a) $D = 30 \mu\text{m}$

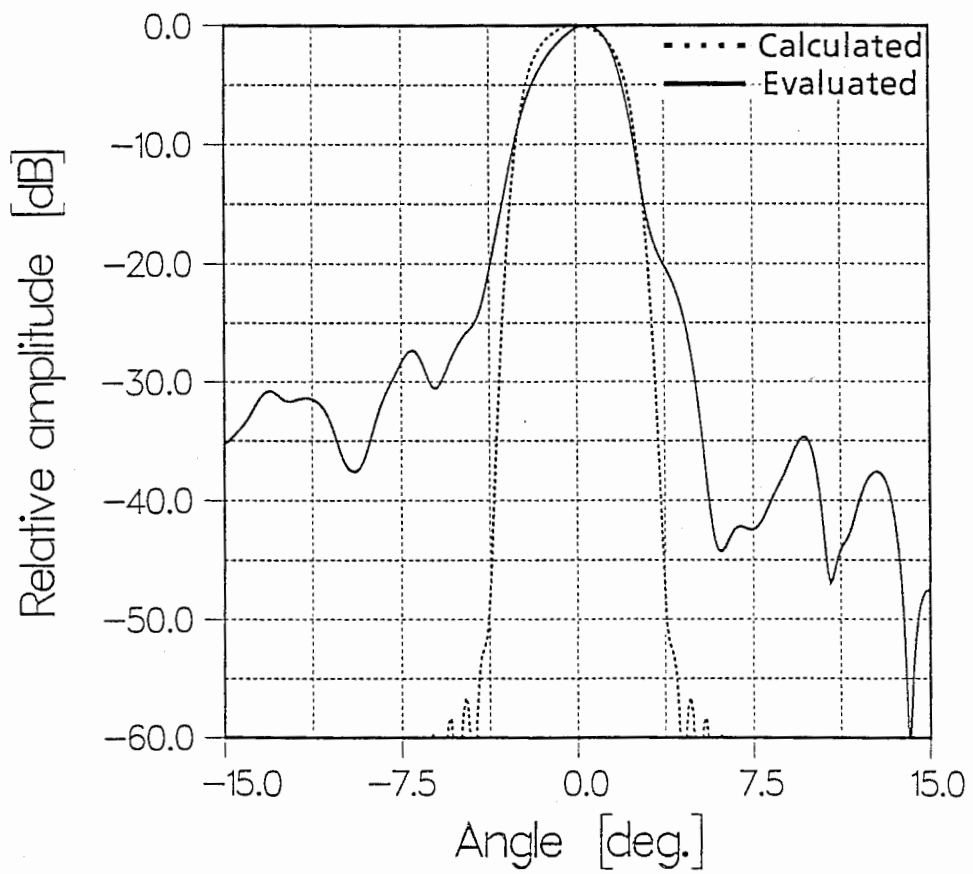


(b) $D = 50 \mu\text{m}$

図 13: 放射パターン計算結果 (1)



(c) $D=75\mu\text{m}$



(d) $D=100\mu\text{m}$

図 13 放射パターン計算結果 (2)

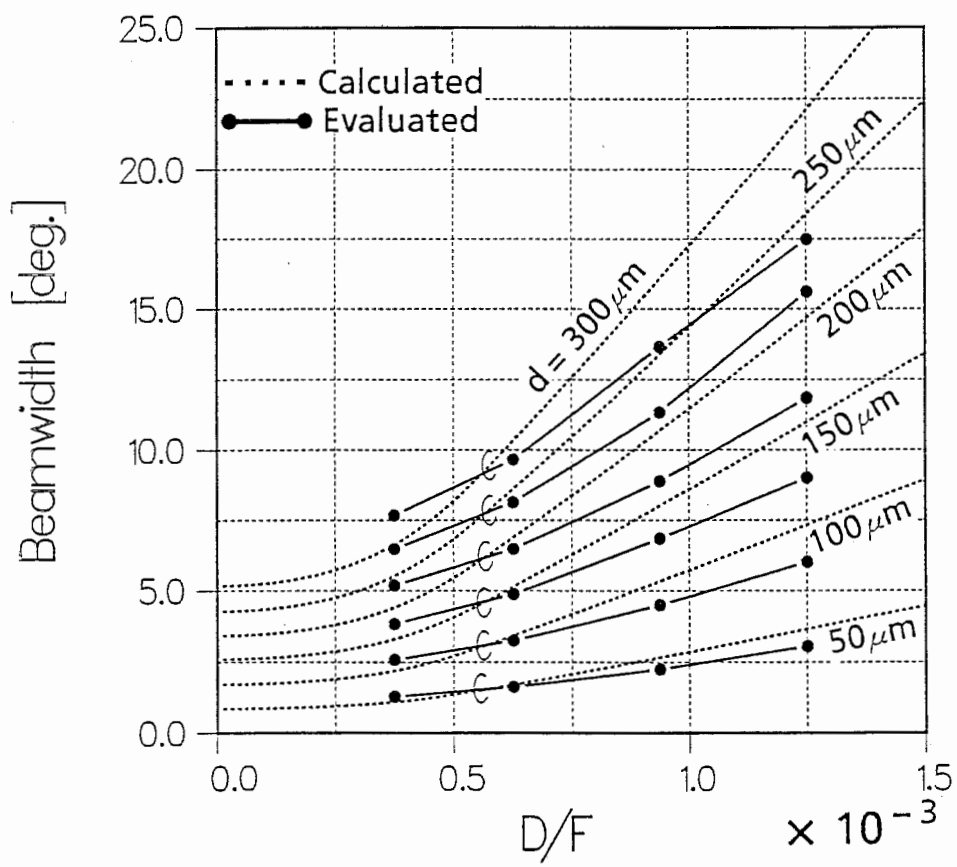


図 14: ビーム幅と D/F との関係

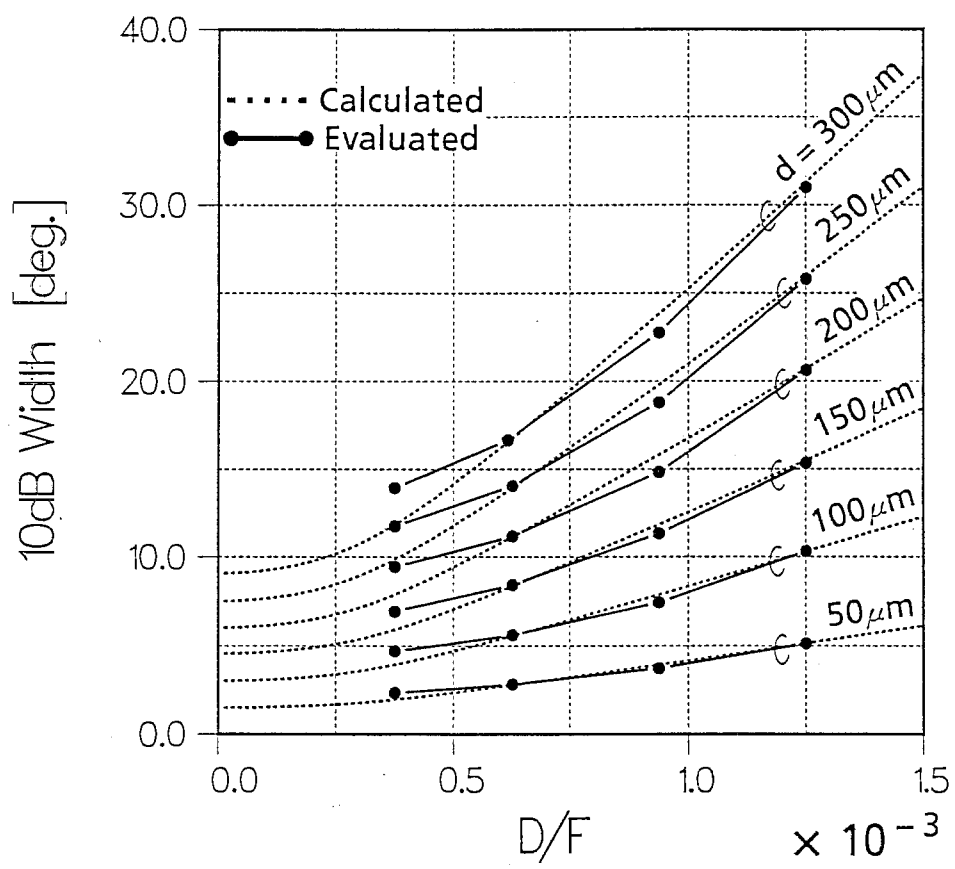


図 15: 10dB 幅と D/F との関係

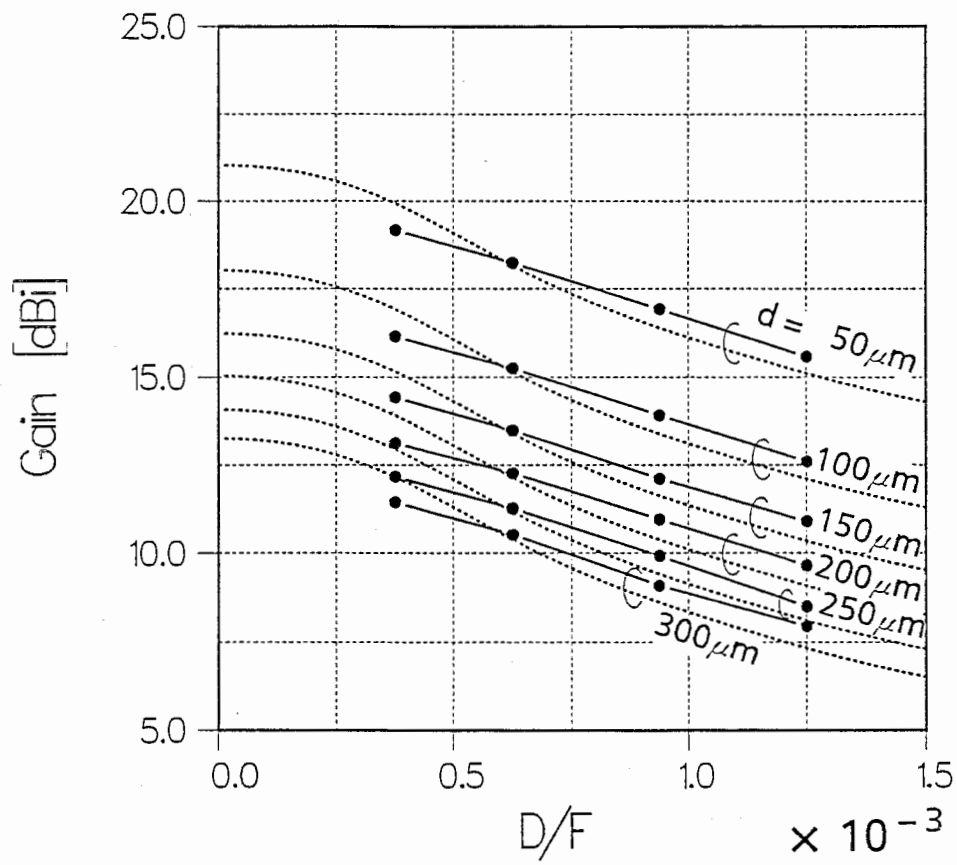


図 16: 利得と D/F との関係

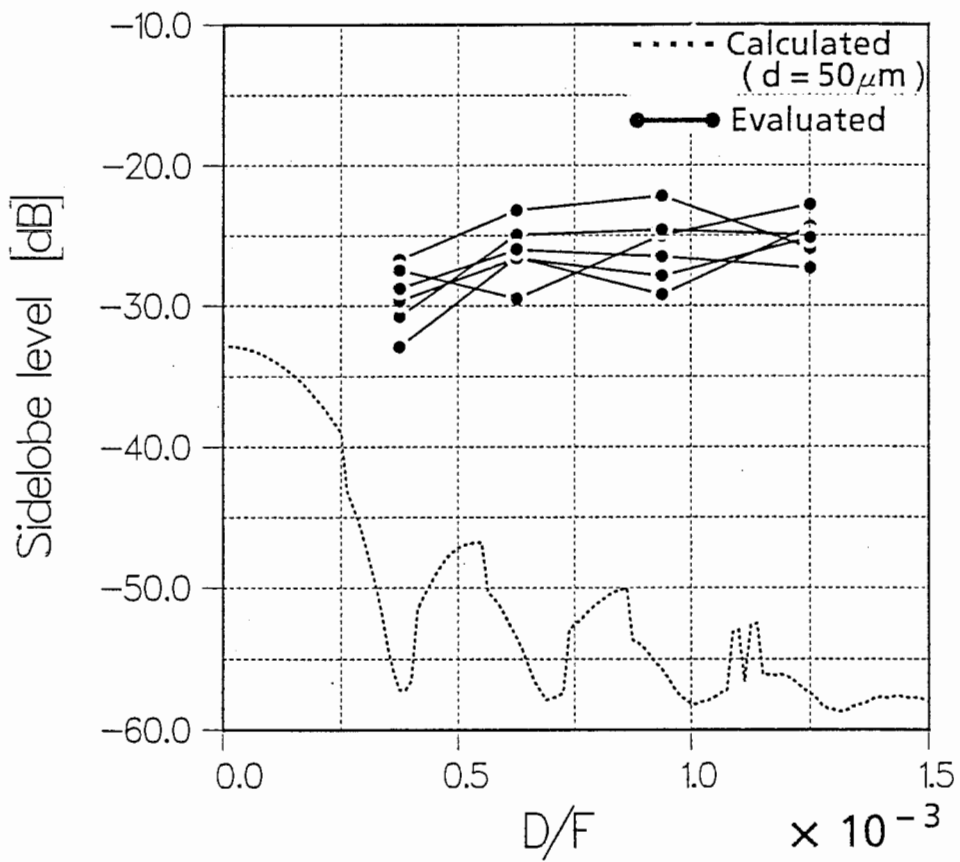


図 17: 最大サイドローブレベルと D/F との関係

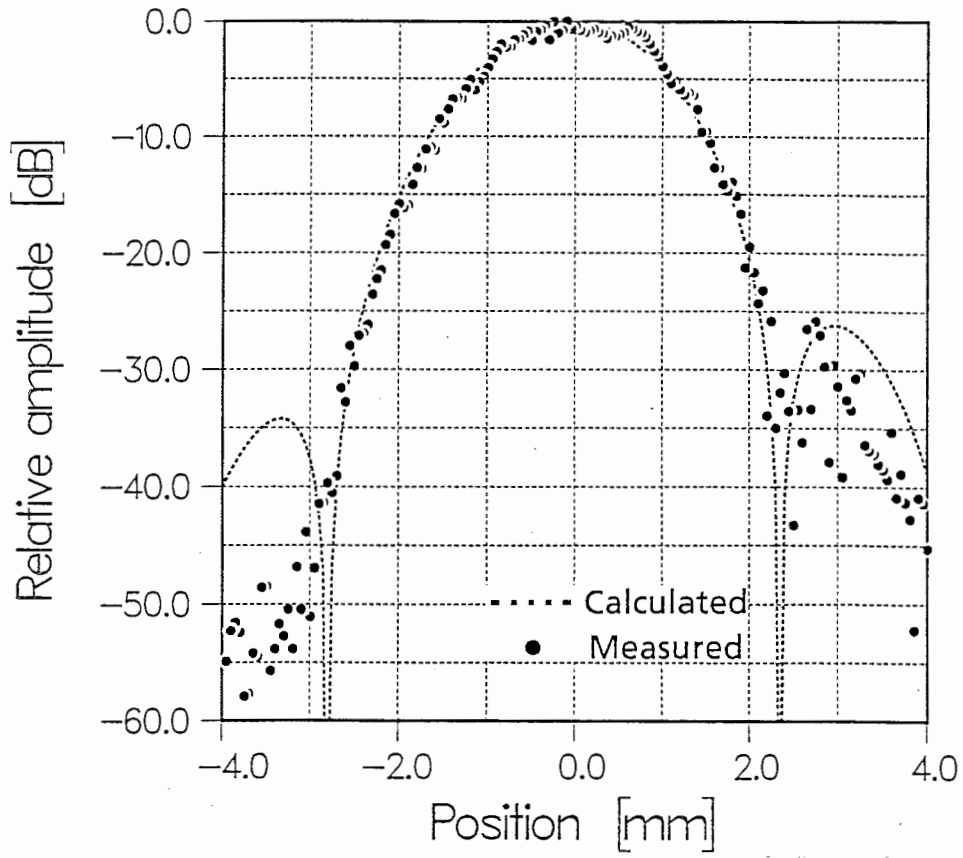
4. ビーム走査実験

4.1 イメージマスク移動時の励振分布

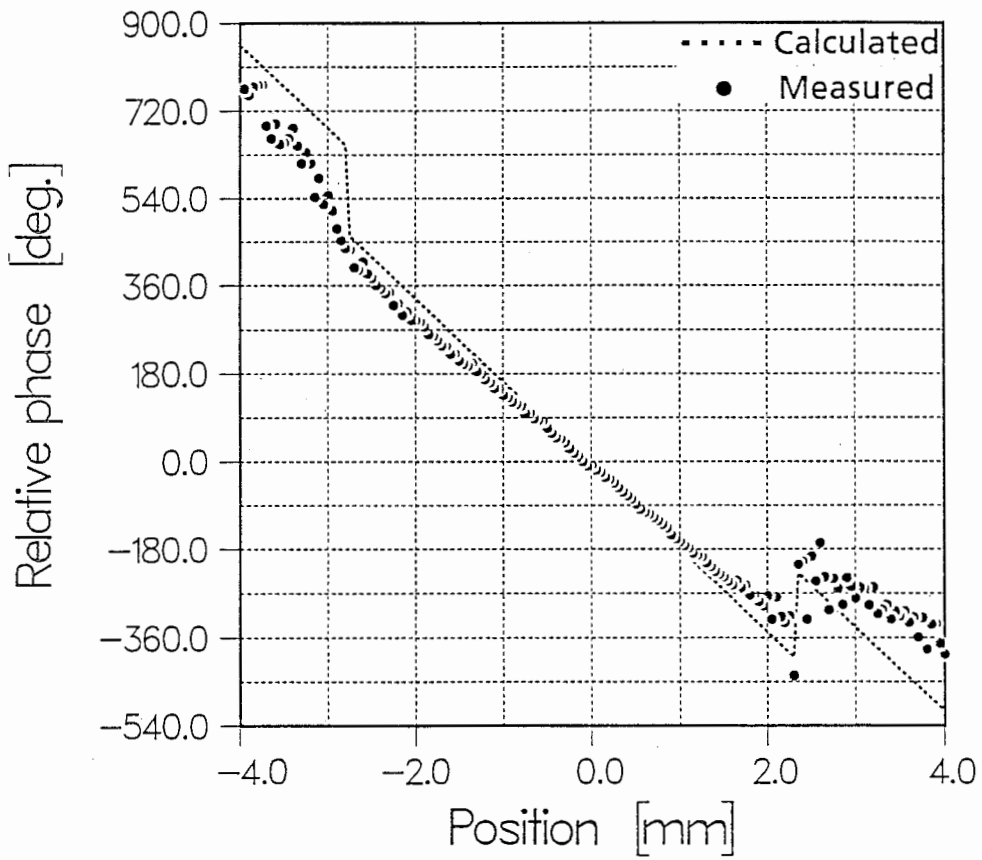
ここでは、円形開口ピンホールイメージマスクを FT レンズの光軸と直交する面内で移動させた場合の励振分布を検討する。実験系としては、図 3 に示した実験系のピンホールイメージマスク開口径を $D=50\mu\text{m}$ に固定して用いる。そして、この実験系においてピンホールイメージマスクをマイクロメータ (最小目盛 $10\mu\text{m}$) を用いて図 1 の x_0 軸方向に移動量 $x_0=0, \pm 25, \pm 50\mu\text{m}$ 移動させ、各移動量 x_0 に対して、 x 軸上の励振分布を測定する。

図 18-20 は、マスク移動量 $x_0=-50, 0, 50\mu\text{m}$ での励振分布実験結果を示す。なお、各図中の“Calculated”は、前章同様、図 6 に示した参照光実測値をガウス分布に最小 2 乗近似し、式 (1) より求めた励振分布計算値である。各図 (a) の振幅分布の実測値と計算値は、前章と同様に左右非対称である。特に、実測値は、どの場合もサイドローブが片側にしかなく、一方の側はシヨルダになっている。しかし、マスク移動量 x_0 を変化させた場合にも、ほぼ同じ形状の振幅分布が得られており、メインローブおよび片側のサイドローブについては、ほぼ計算値に対応した実測値となっている。計算値が非対称なのは、前章の場合と同様に、フーリエ変換光の光軸と参照光の光軸がずれているためである。また、実測値の非対称性も、マスク形状に起因するマスク開口分布の乱れや、FT レンズやビーム合成器に存在する収差のためと考えられる。これは、マスクを移動した場合にも同様な振幅分布が得られることから理解できる。各図 (b) の位相分布実測値に関しては、理論値との間に誤差があるが、メインローブ領域では、ほぼ直線状に変化する分布が得られている。また、サイドローブのある側は、どの場合もメインローブの位相とほぼ 180° 異なる位相値が得られている。 $x_0=-50\mu\text{m}$ の場合 (図 18(b)) の位相実測値の勾配と計算値の勾配がずれているのは、マスク移動量 x_0 をマイクロメータを用いて設定する際の設定誤差と考えられる。

図 21 は、マスク移動量 x_0 を変えた時の励振振幅分布の 3dB 幅と、マスク移動量 x_0 と FT レンズ焦点距離 F との比 x_0/F との関係、図 22 は振幅分布の最大サイドローブレベルと x_0/F との関係、図 23 は位相分布の勾配と x_0/F との関係を示す。図 21 の 3dB 幅実測値は、計算値より 0.1mm 程小さい。しかし、マスク移動量 x_0 を変化しても計算値とよく対応している。図 22 の最大サイドローブレベルも、ばらつきはあるが計算値とほぼ対応した実測値が得られている。図 23 の位相勾配実測値と計算値に関しては、マスク移動量 $x_0 < 0$ の時に誤差が大きい。しかし、誤差量は $5-8\mu\text{m}$ 程度のマスク移動量に相当し、前述したマスク移動量設定におけるマイクロメータの設定誤差と考えられる。

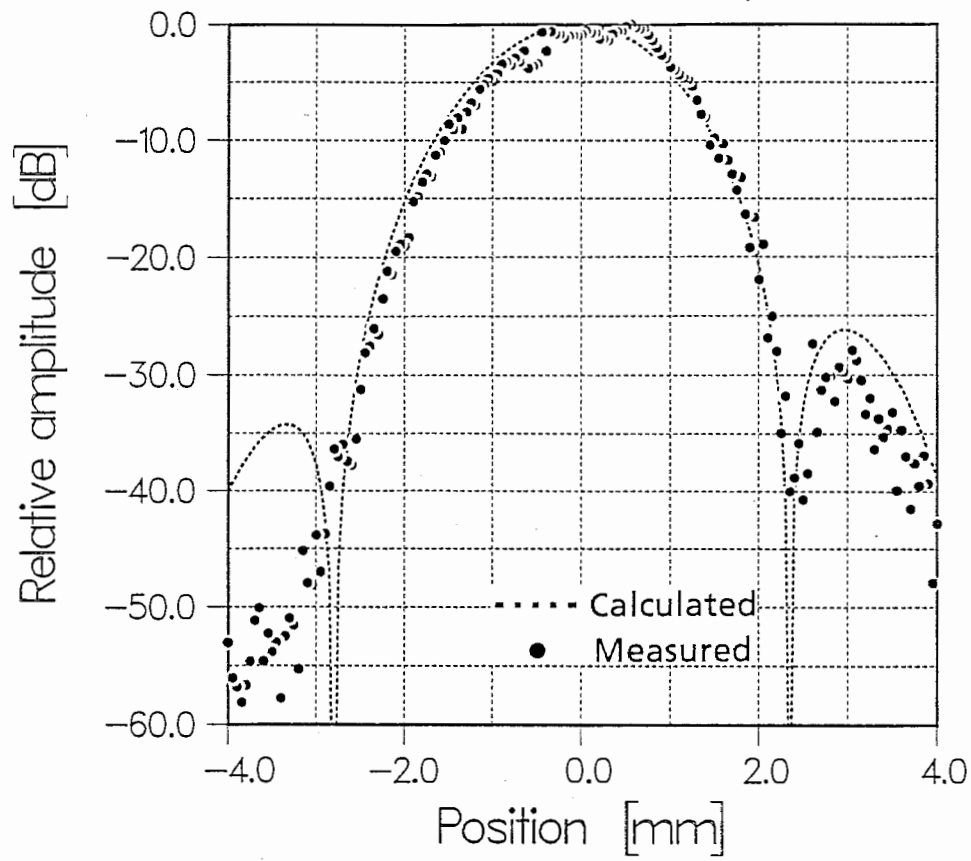


(a) 振幅分布

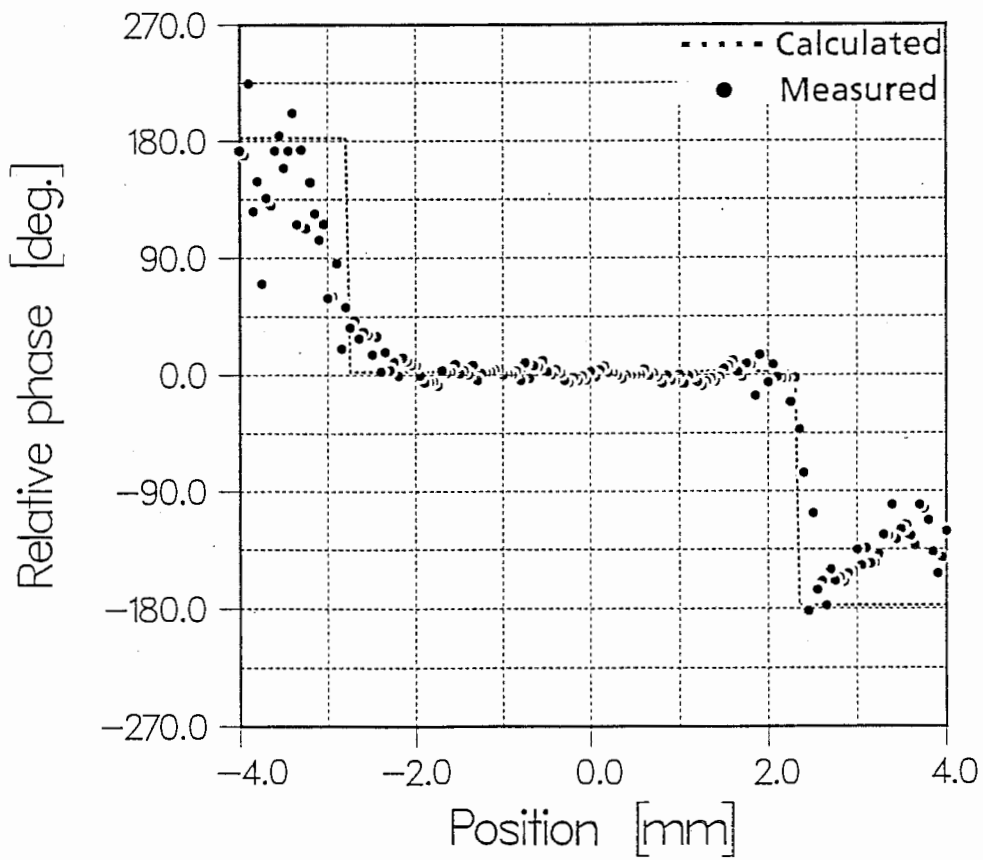


(b) 位相分布

図 18: $x_0 = -50 \mu\text{m}$ の場合の励振分布実験結果

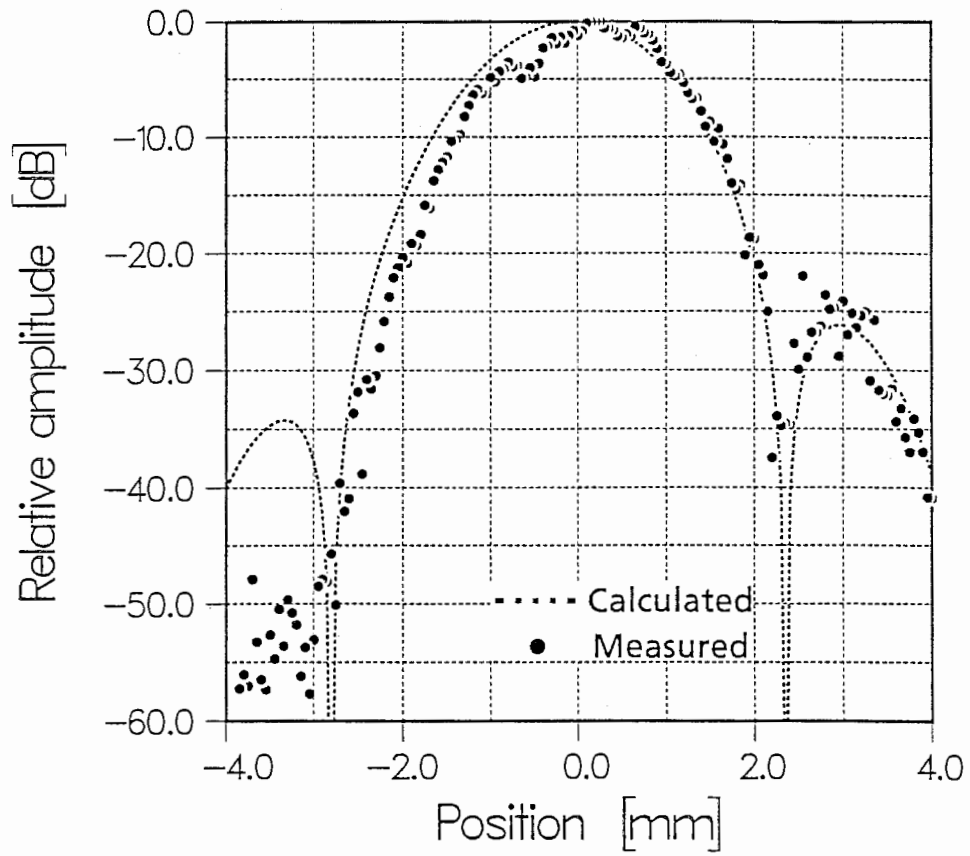


(a) 振幅分布

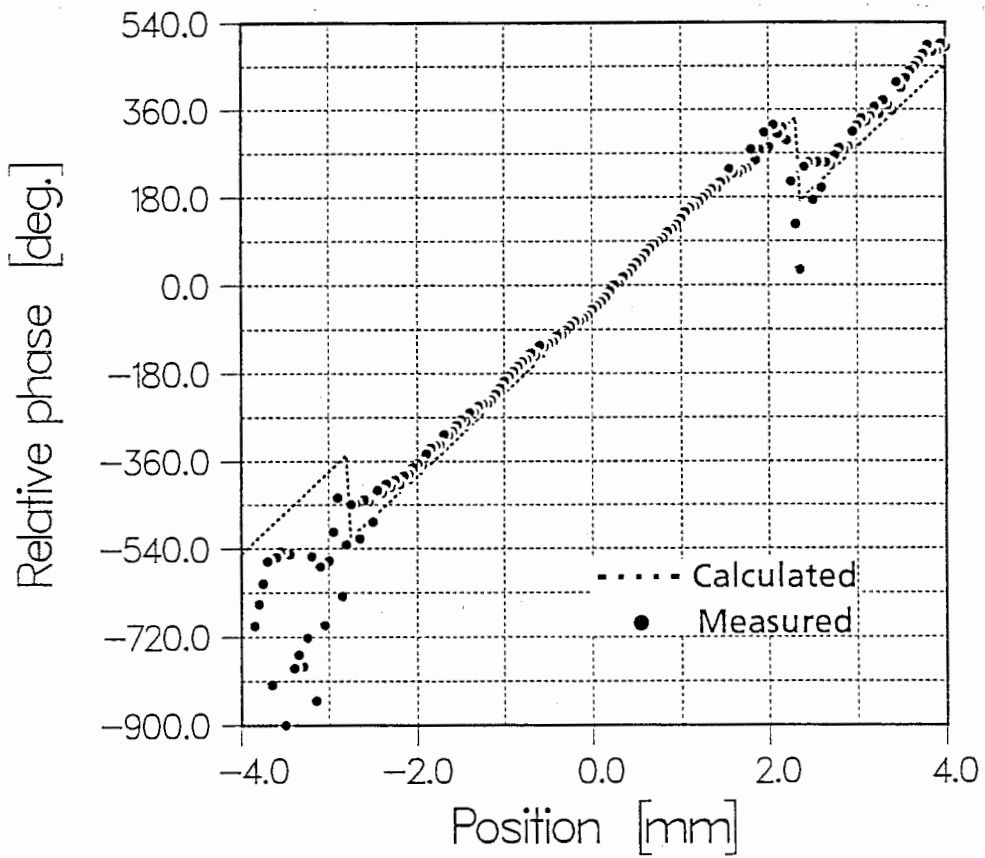


(b) 位相分布

図 19: $x_0=0\mu\text{m}$ の場合の励振分布実験結果 (図 4 参照)



(a) 振幅分布



(b) 位相分布

図 20: $x_0=50\mu\text{m}$ の場合のマイクロ波励振分布実験結果

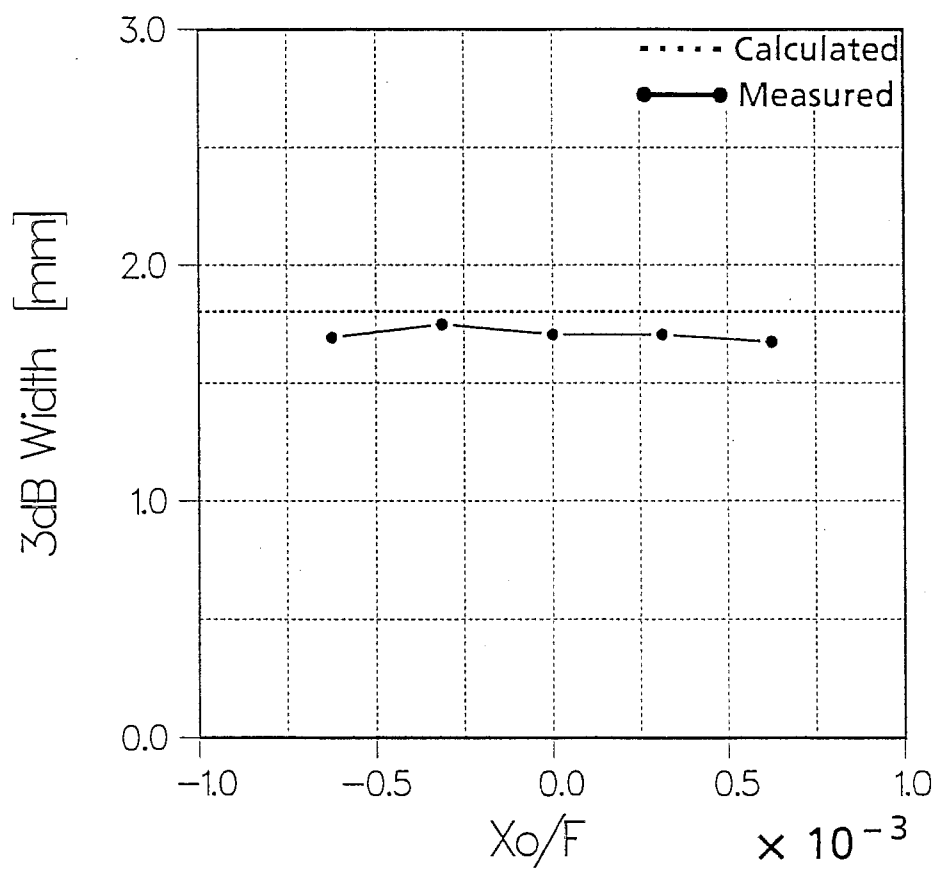


図 21: 励振分布の 3dB 幅と x_0/F との関係

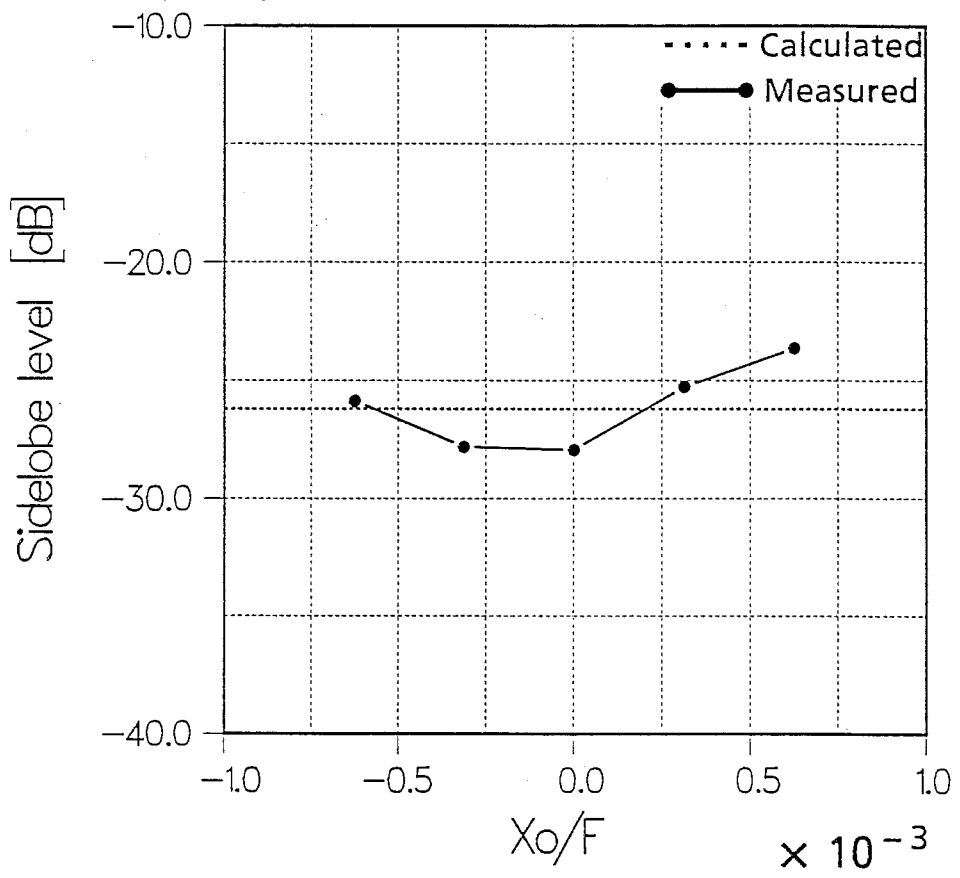


図 22: 励振分布の最大サイドローブレベルと x_0/F との関係

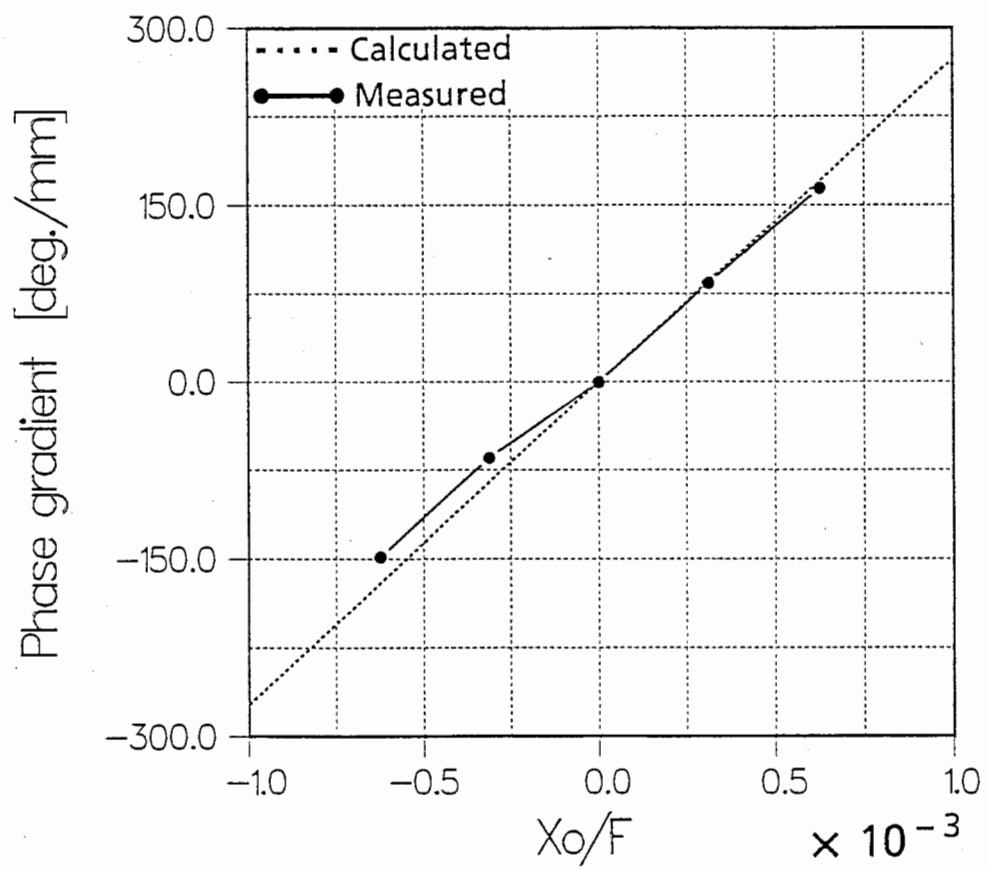
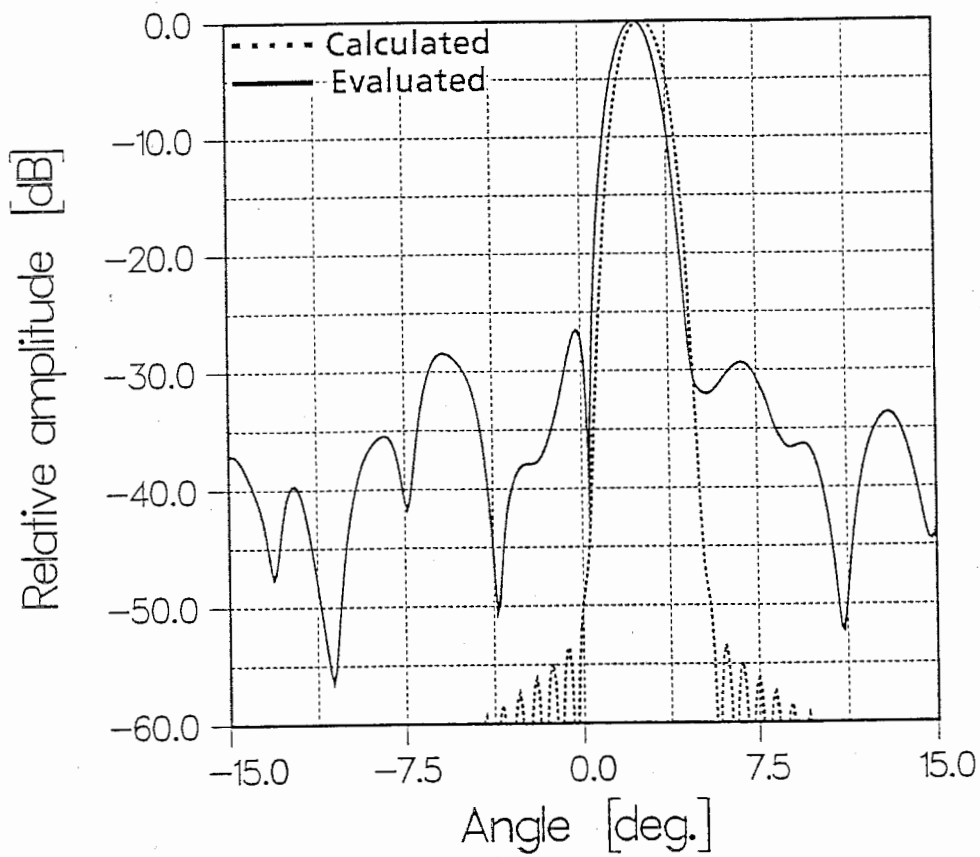


図 23: 励振分布の位相勾配と x_0/F との関係

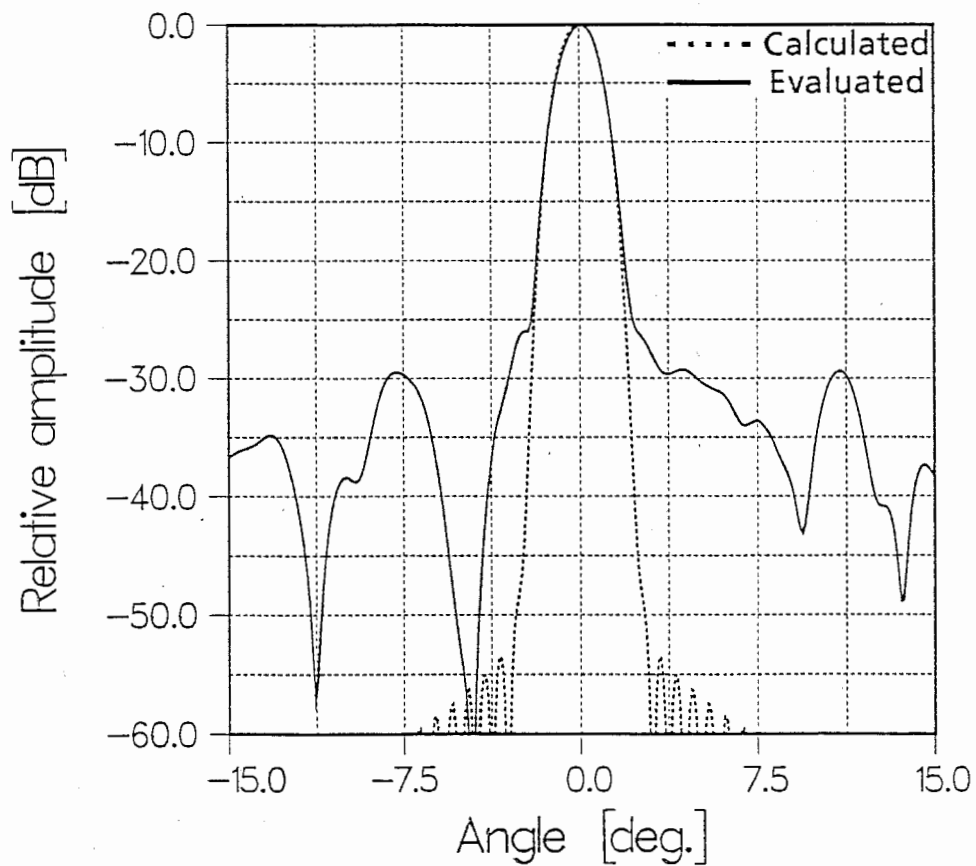
4.2 ビーム走査特性

ここでは、イメージマスクを移動させた場合の励振振幅位相分布を用いて放射パターンを計算し、ビーム走査特性の確認を行なう。計算に用いるアレーは、前章と同様に素子アンテナ間隔を半波長 $\lambda_m/2$ に固定したリニアアレーとし、素子アンテナは点波源と仮定する。また、素子アンテナ数 N も 161 素子である。図 24(a) - (c) は、イメージマスク移動量 $x_0 = -50, 0, 50 \mu\text{m}$ 、光ファイバサンプリング間隔 $d = 50 \mu\text{m}$ の時の放射パターンを示す。なお、各図中、“Evaluated” は励振分布実測値を用いて求めた放射パターン評価値，“Calculated” は図 18 - 20 に示した励振分布計算値を用いて計算した値である。励振振幅実測値にはばらつきや分布の非対称性があり、励振位相実測値にもばらつきがあるため、各図の放射パターン評価値のサイドローブレベルは、マスクを移動させた場合にも高く、 $-20 - -25 \text{dB}$ ある。また、 $x_0 = -50 \mu\text{m}$ の場合 (図 24 (a)) のメインビーム評価値の指向方向と計算値の指向方向とは、 0.36° ずれている。これは前節で示したように、実験におけるイメージマスク移動量の設定に誤差があったためである。しかし、 $x_0 = 0, 50 \mu\text{m}$ の場合 (図 24(b),(c)) のメインビームの評価値と計算値とはよく対応しており、サイドローブレベルは高いが、イメージマスクの移動によりビーム走査ができることがわかる。

図 25 は、光ファイバサンプリング間隔 d を $50, 100, 150, 200, 250, 300 \mu\text{m}$ とした場合の放射パターンのビーム走査角と x_0/F との関係、図 26 は放射パターンのビーム幅と x_0/F との関係、図 27 は放射パターンの 10dB 幅と x_0/F との関係、図 28 は利得と x_0/F との関係、図 29 は放射パターンの最大サイドローブレベルと x_0/F との関係を示す。式 (6), (7) より、サンプリング間隔 d を大きくすると倍率 m が d に比例するので、図 25 のビーム走査角は、評価値、計算値とも d に比例して大きくなる。また、励振分布の測定範囲が固定されているので、サンプリング間隔 d を大きくすると素子数 N が反比例して減少し ($d = 50 \mu\text{m}$ では $N = 161, d = 300 \mu\text{m}$ では $N = 27$)、アレー開口径が小さくなる。そのため、図 26 のビーム幅と、図 27 の 10dB 幅も、サンプリング間隔 d に比例して大きくなっている。図 25 のビーム走査角の評価値と計算値には、マスク移動量 $x_0 < 0$ の時にずれがある。これは、前述したようにマスク移動量の設定誤差のためであるが、サンプリング間隔 d が大きくなると、指向誤差も大きくなってしまう。たとえば、 $d = 300 \mu\text{m}$ の場合指向誤差が約 2° あるが、これをたとえば 0.5° 以内にするためには、式 (6), (7) よりマスク移動量の設定精度を $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 程度にする必要がある。一方、 $x_0 \geq 0$ では、評価値と計算値はよく対応しており、マスク移動量の設定誤差に注意すれば、マスク移動量 x_0 とサンプリング間隔 d の調整により、所要のビーム走査角を設定できることがわかる。図 26 のビーム幅評価値、および図 27 の 10dB 幅評価値も、サンプリング間隔 d を大きくすると、計算値との誤差が増大する。これは、 d を大きくすると素子数 N が減少し、励振分布誤差の影響を受けやすくなるためである。しかし、ビーム幅、10dB 幅共、評価値と計算値とはほぼ対応した値が得られている。図 28 に示す利得についても、ほぼ計算値に近い評価値となっている。一方、図 29 の最大サイドローブレベルは、マスク移動量 x_0 およびサンプリング間隔 d を変えた場合にも $-20 - -30 \text{dB}$ 程度あり、計算値より非常に高い。

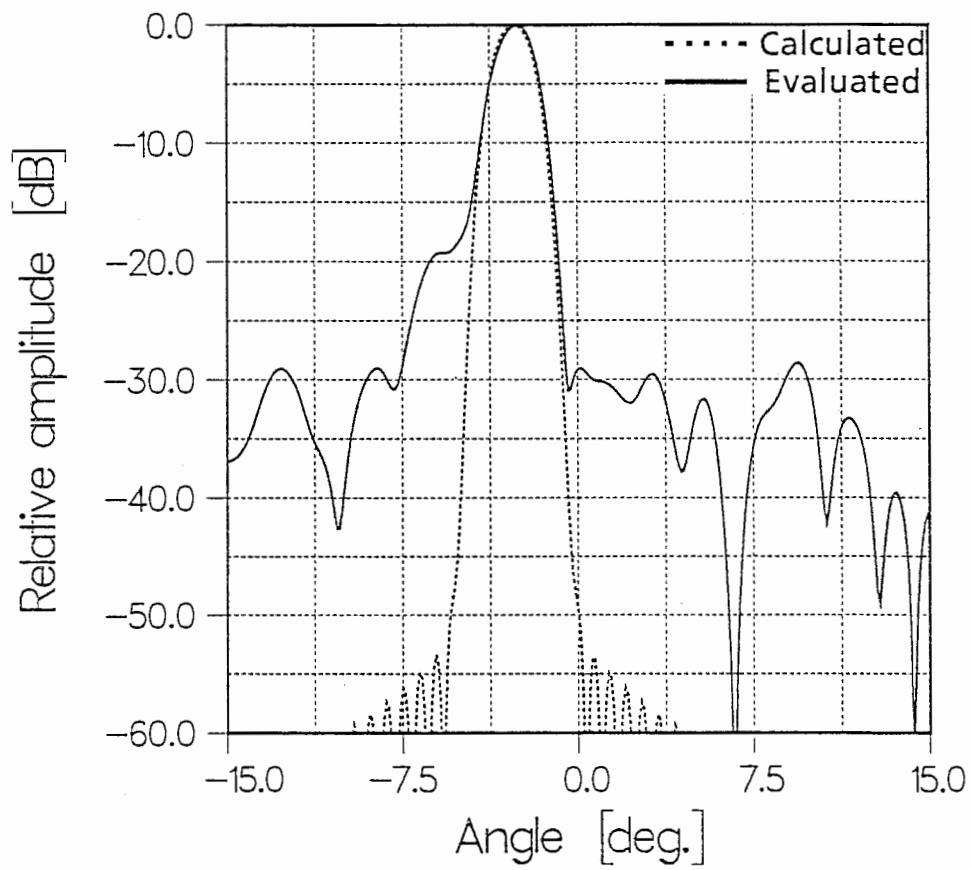


(a) $x_0 = -50 \mu\text{m}$



(b) $x_0 = 0 \mu\text{m}$ (図 13(b) 参照)

図 24: 放射パターン計算結果 (1)



(c) $x_0=50\mu\text{m}$

図 24: 放射パターン計算結果 (2)

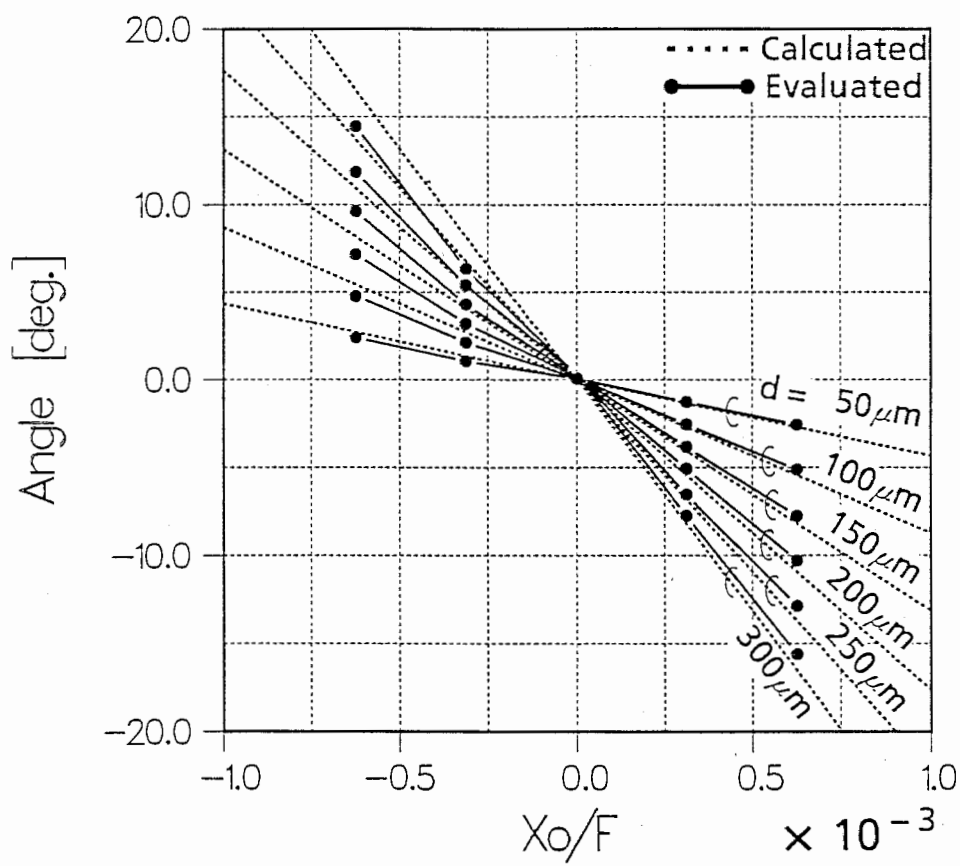


図 25: ビーム走査角と x_0/F との関係

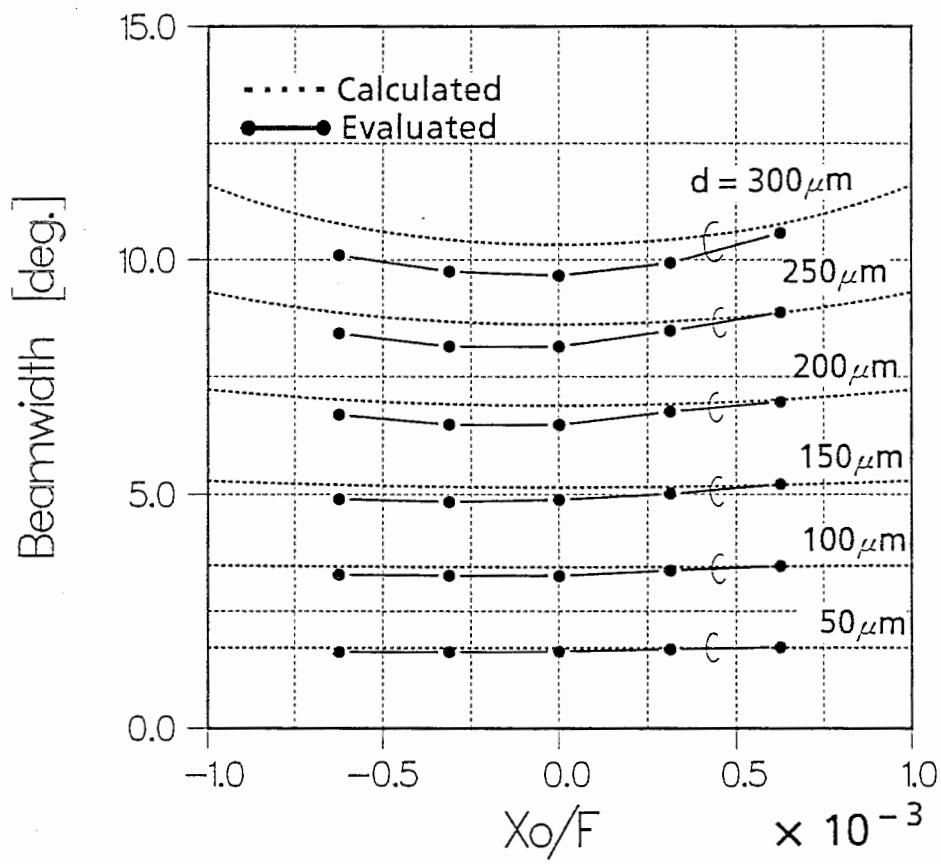


図 26: ビーム幅と x_0/F との関係

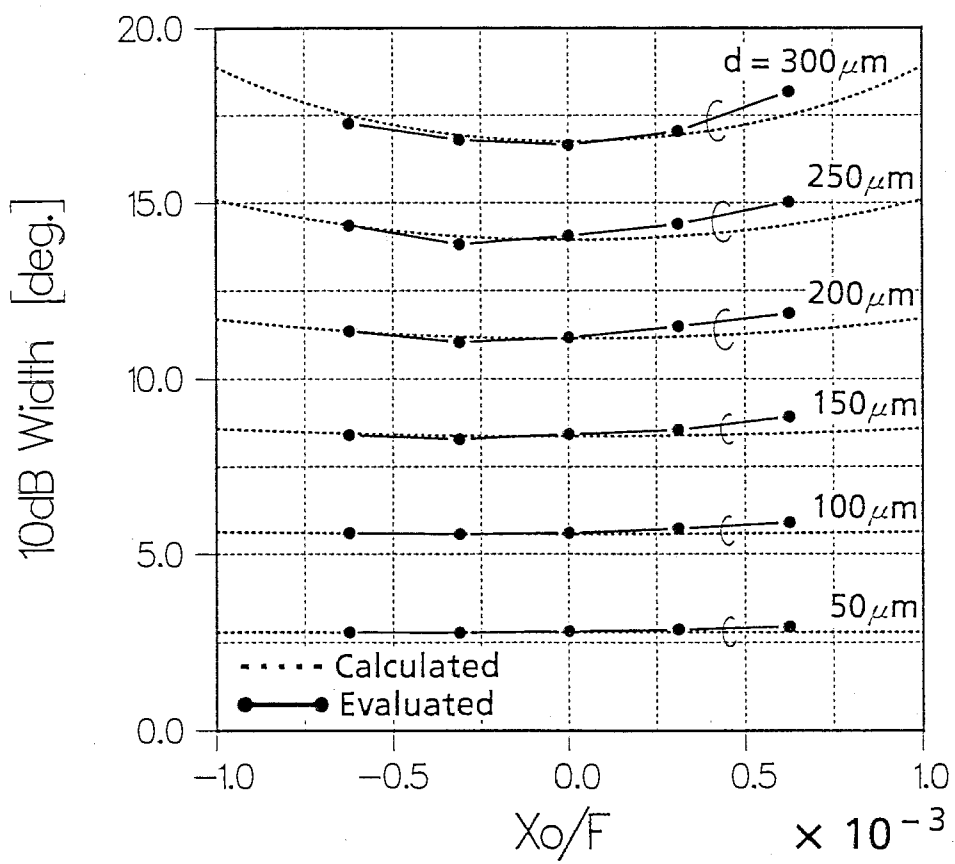


図 27: 10dB 幅と x_0/F との関係

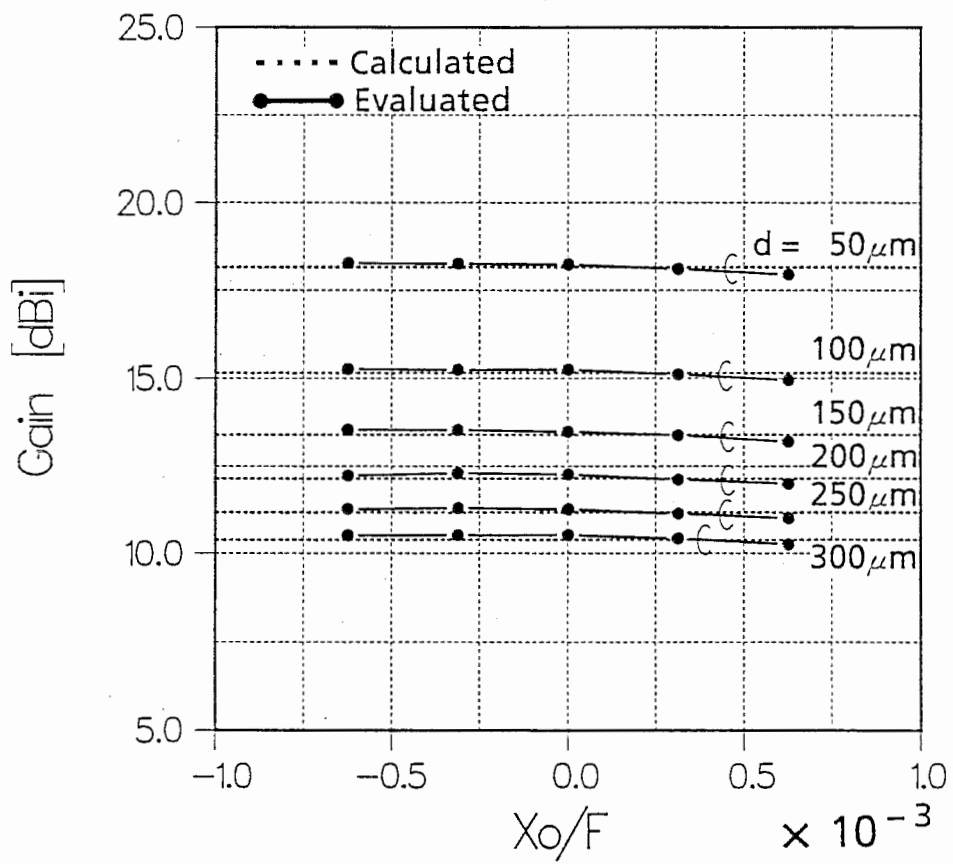


図 28: 利得と x_0/F との関係

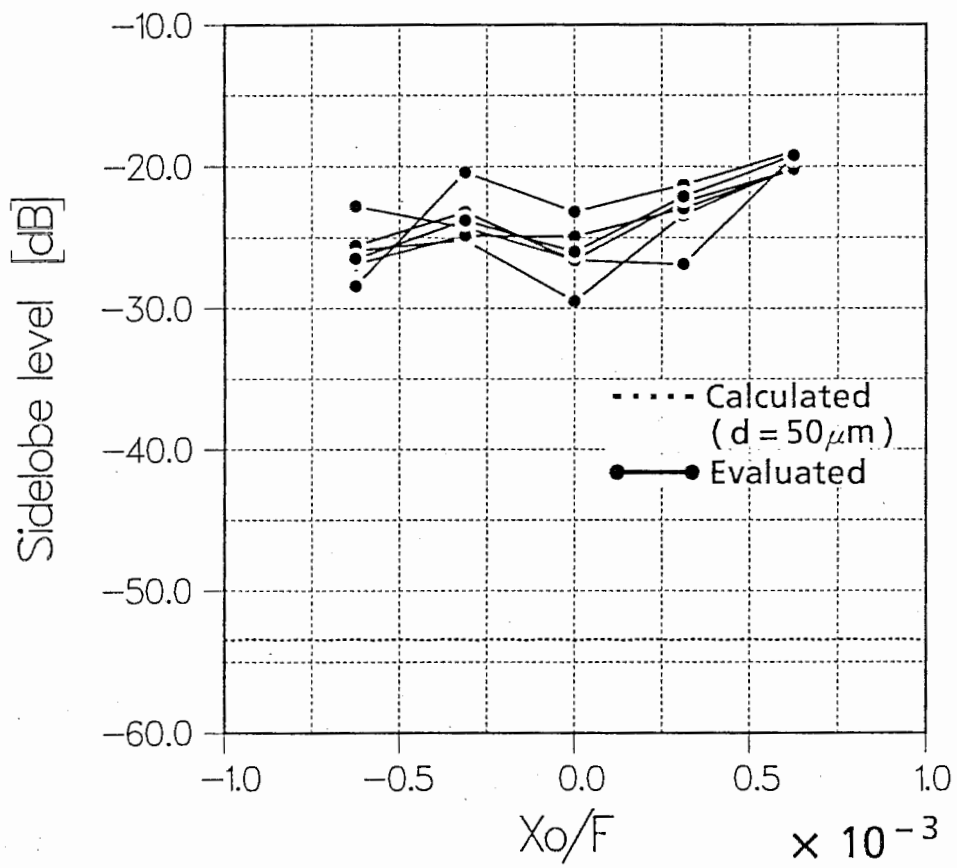


図 29: 最大サイドローブレベルと x_0/F との関係

5. むすび

2 レーザモデル光空間制御アレーアンテナに関して、レーザ光源としてLD 励起 Nd:YAG レーザを用い、円形開口イメージマスクをフーリエ変換レンズの光軸上に配置し開口径を変化させた場合と、イメージマスクをフーリエ変換レンズの光軸と直交する面内で移動させた場合の、励振分布と放射特性とを実験的に検討した。その結果、LD 励起 Nd:YAG レーザを用いることにより励振振幅だけでなく励振位相も安定した分布が得られることがわかった。マスク開口径を変化させた場合、励振振幅にはばらつきや非対称性があり、励振位相にもばらつきが見られる。そのため放射パターンのサイドローブレベルが高く、メインビームにも乱れがあるが、マスク開口径に対応したビーム形状のパターンが得られることが明らかになった。また、イメージマスクを移動させた場合、励振振幅をほとんど変化させずに、励振位相に所要の位相勾配をつけられるので、ほぼ計算値どおりのビーム走査ができることが確認できた。今後の課題としては、励振分布誤差について検討するとともに、2次元放射パターンや、成形ビームの形成について検討を行なう必要がある。

参考文献

- (1) T. Morooka, K. Kawabata, M. Ueno, T. Chiba, R. Kawashima, W. Bornemann and W. J. English, "A direct radiating array antenna with frequency reuse multiple contoured beams", 1987 AP-S Intl. Symp. Digest, pp. 183-186.
- (2) E. Rammos and T. Jones, "A multiple access payload for data relay applications using separate transmit/receive active arrays", 1990 AP-S Intl. Symp. Digest, pp. 698-701.
- (3) W. Charczenko, M. Surette, P. Matthews, H. Klotz and A. R. Mickelson, "Integrated optical butler matrix for beam forming in phased array antennas", SPIE, vol. 1217, pp. 196-206 (Jan. 1990).
- (4) W. Ng, A. Walson, G. Tangonan, I. Newberg and J. J. Lee, "Wideband fiber-optic delay network for phased array antenna steering", Electronics Letters, 25, 21, pp. 1456-1457 (1989).
- (5) G. A. Koepf, "Optical processor for phased-array antenna beamformation", SPIE, vol. 477, pp. 75-81 (May, 1984).
- (6) Y. Konishi, W. Chujo, H. Iwasaki and K. Yasukawa, "Techniques for antenna sidelobe suppression and laser power reduction in optically controlled array antenna", SPIE, vol. 1217, pp. 26-34 (Jan. 1990).
- (7) 小西, 中條, 藤瀬, "光制御アレーアンテナの励振分布と放射特性", 信学技報, A-P90-102 (1991-01).