

スロット・ホーン・アンテナの UHF 帯への応用

Slot-horn Antenna and Its Application to UHF Band

御子 柴 晃 一*
Kôichi Mikoshiba

石 川 一 徳*
Kazunori Ishikawa

須 藤 昭 雄*
Akio Sudô

要 旨

ホーン・アンテナはマイクロ波帯で、測定用アンテナまたはパラボラアンテナの一次ふく射器として広く利用されている。この場合は開口角度が小さくホーンの長さの長いものであるが、ここでは開口角度が大きくホーンの長さの短い場合を論じており、この場合の半値角、F/B 比の設計法を示している。

プローブ励振によるインピーダンス特性も比較的広く、V. S. W. R 1.05 以内に 700 Mc 帯で比帯域 10% は容易にとれ、利得もコナレフレクタ程度は容易に得られる。

1. 緒 言

電磁ホーン・アンテナについてはすでに多くの検討が行なわれ、いまさらあらためて述べることはないが、その特長を生かして、UHF 帯に利用することはあまり行なわれていない。UHF 帯では波長が長くなるために電磁ホーンのような利得の最適設計は実用的でなくあまり意味をもたない。したがって開口角の比較的大きな、ホーンの長さの短い場合の指向性が必要となる。同軸で方形導波管を励振するスロット・ホーン・アンテナは M. Rateau 氏⁽¹⁾らが UHF-TV および FM 用として報告しておりフランスでは実用化されている。

従来のホーン・アンテナは開口角が比較的小さく、ホーンの長さは短くとも 2~3 波長のものが使われている⁽²⁾。このため開口面の分布も扇形導波管の電磁界を用いて指向性計算を行ない、主ローブは良く一致することが知られているが、広角度指向性は正しい計算が行なわれていなかった。最近、サブローブ・レベルの低いアンテナの研究に伴い、サブローブを含めた広角度指向性を回折理論を用いて計算する方法が確立されてから^{(3),(4)} ホーン・アンテナについてもかなり正確に計算されている⁽⁵⁾。これらもホーン長の長い場合であって、長さが 1 波長以下では数値計算が困難になるため報告されていない。このため、本論文では実験的にホーン長が 1 波長より小さな場合の指向性、特に半値角、F/B 比などについて検討を行っている。

Rateau 氏⁽¹⁾らの方形導波管の給電方法は入力インピーダンス特性を広くするために T 形励振を用いており、V. S. W. R 1.1 以内に 500 Mc 帯で比帯域 30% 程度カバーできることが報告されている。筆者らは励振を最も簡単なプローブで行ない 700 Mc 帯で実用上十分なインピーダンス帯域のとれることを明らかにした。

2. 方形ホーン・アンテナからの推定と問題点

ここで問題にするスロット・ホーン・アンテナの構造を図 1 に示す。励振はプローブで行ない、E 面、H 面扇形ホーンおよび角すい形ホーンを考える。

開口面アンテナで指向性を最大にするには等位相、等振幅の開口面分布を与えれば良いことはよく知られている。むやみに開口面を大きくしても、その開口面における電界、磁界の振幅、位相分布を乱してしまえば開口面を大きくする意味がない。図 1 に示したホーンの開口面における位相差は x 軸からずれるにつれ遅

れてくる。この遅れの最大幅 δ_0 はホーンの頂点から点波源がでていると考え行路差から

$$\delta_0 = \frac{\rho}{\cos \phi} - \rho \quad \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに ρ は ρ_E または ρ_H で頂点からのホーンの長さ、 2ϕ は $2\phi_E$ または $2\phi_H$ でホーンの開口角である。

この遅れ δ_0 を大きくとれば開口面が大きくなったとしても指向性を改善することができない。いままでの実験結果から、ホーンの最適指向性を与える寸法は E 面で $\delta_0 = 0.25\lambda$ 、H 面で $\delta_0 = 0.4\lambda$ とされている⁽²⁾。この最適寸法を E 面の場合について、導波管の E 面の幅 b をパラメータとして求めたのが図 2 であり、UHF 帯のように波長の長いところで使用するときには、ホーン長 (l) はそう大きくとることができないことから、開口角の小さいところはあまり有効ではないことがわかる。できるだけ簡単な小形のアンテナを実現する場合には図 2 で与えられるものよりホーン長は短かなものとなり、ここでもこの場合を問題にしている。位相差が (1) 式で与えられるのはホーン長が数波長以上の場合であって、開口角が大きく、しかもホーン長がたかだか一波長程度の場合にはもはや (1) 式での位相差は適用できなくなると考えられる。

単一指向性を規定する要素としては半値角、第一の零点間の角度、F/B 比 (指向性の前後比) などがあり、使用目的によってほかにサイド・ローブ・レベルなどがあるが、ここでは半値角と F/B 比を主体に考える。

初めに半値角であるが、ホーンアンテナの場合には、半値角と開口面との関係は一般的には求められておらず、最適ホーンアンテナについて

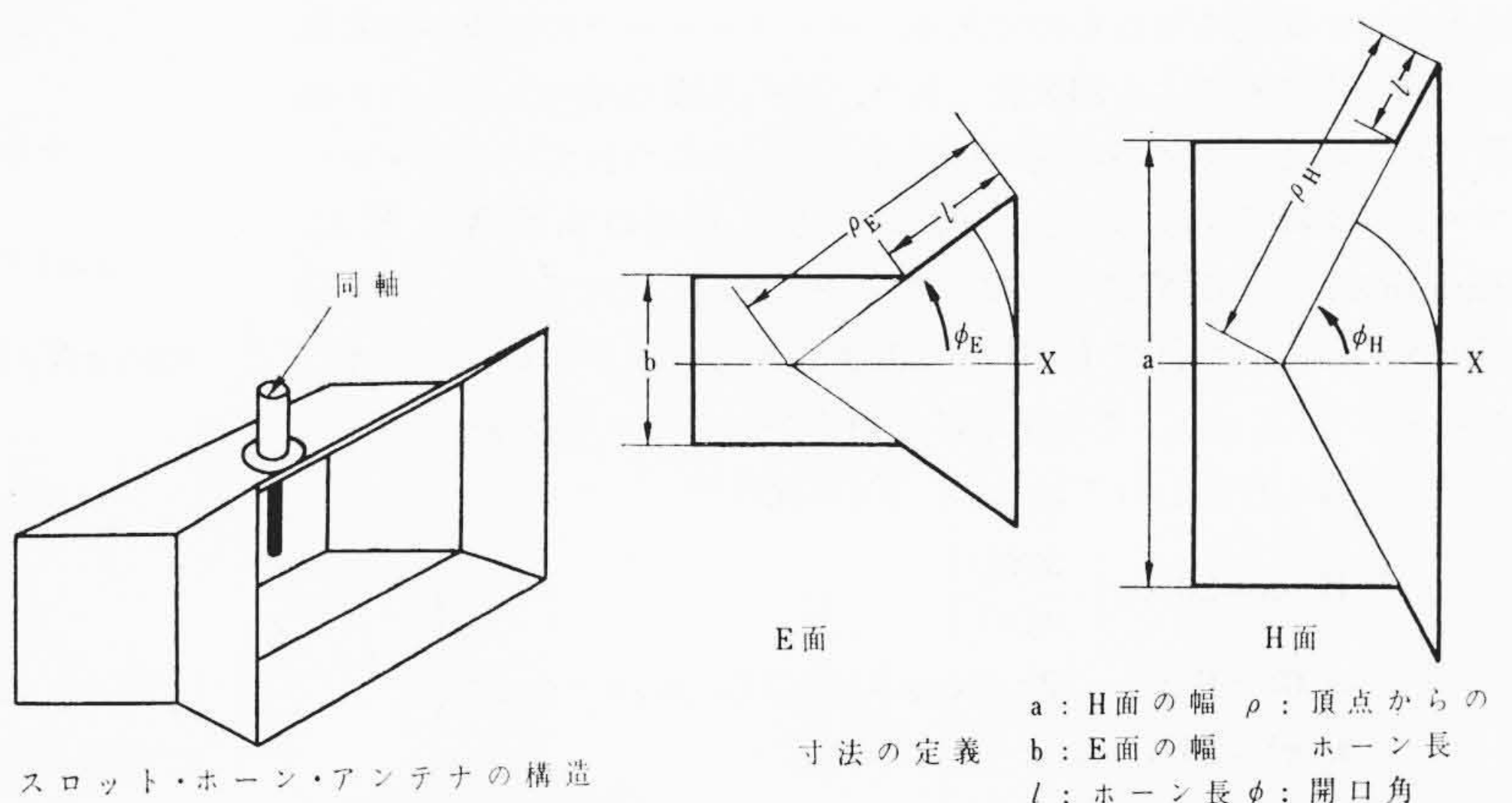


図1 スロット・ホーン・アンテナの構造

* 日立電線株式会社日高工場

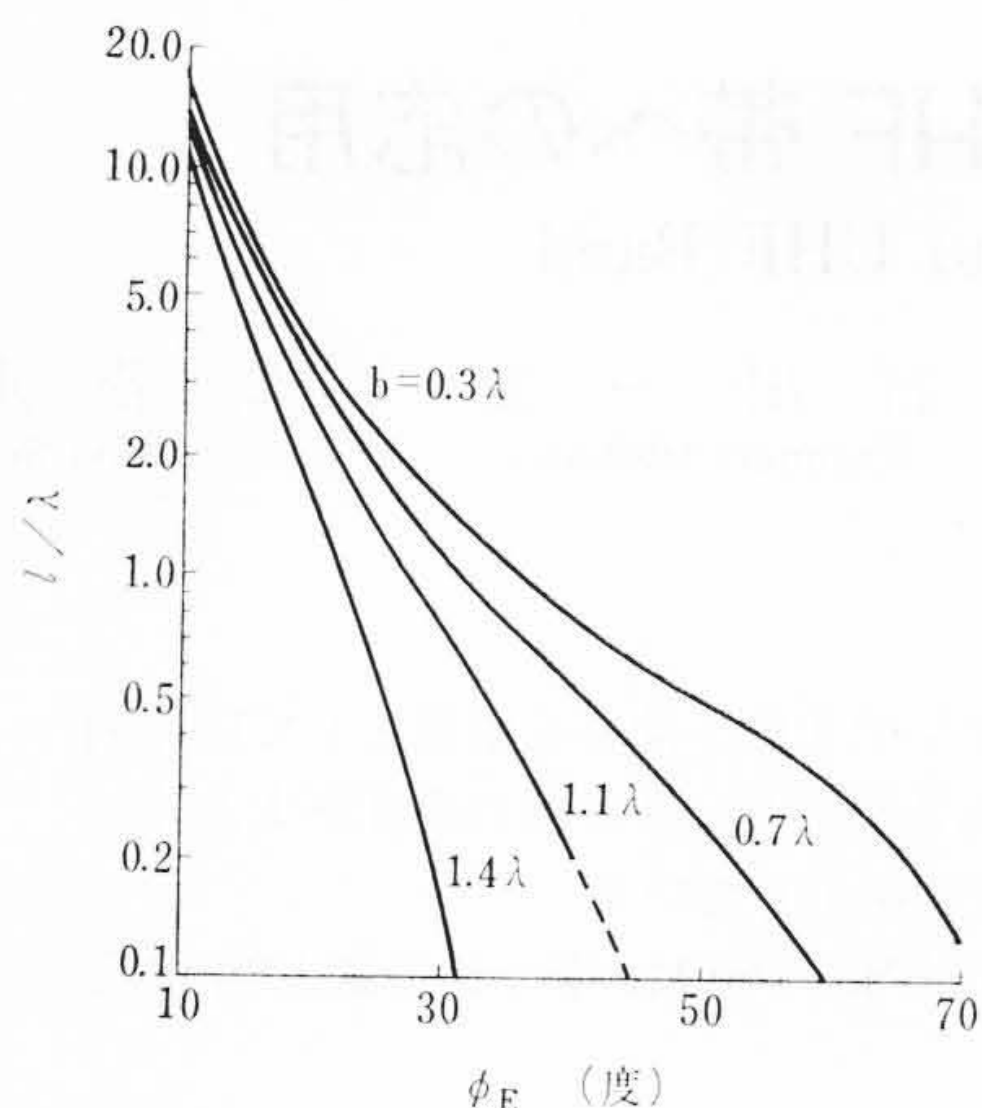
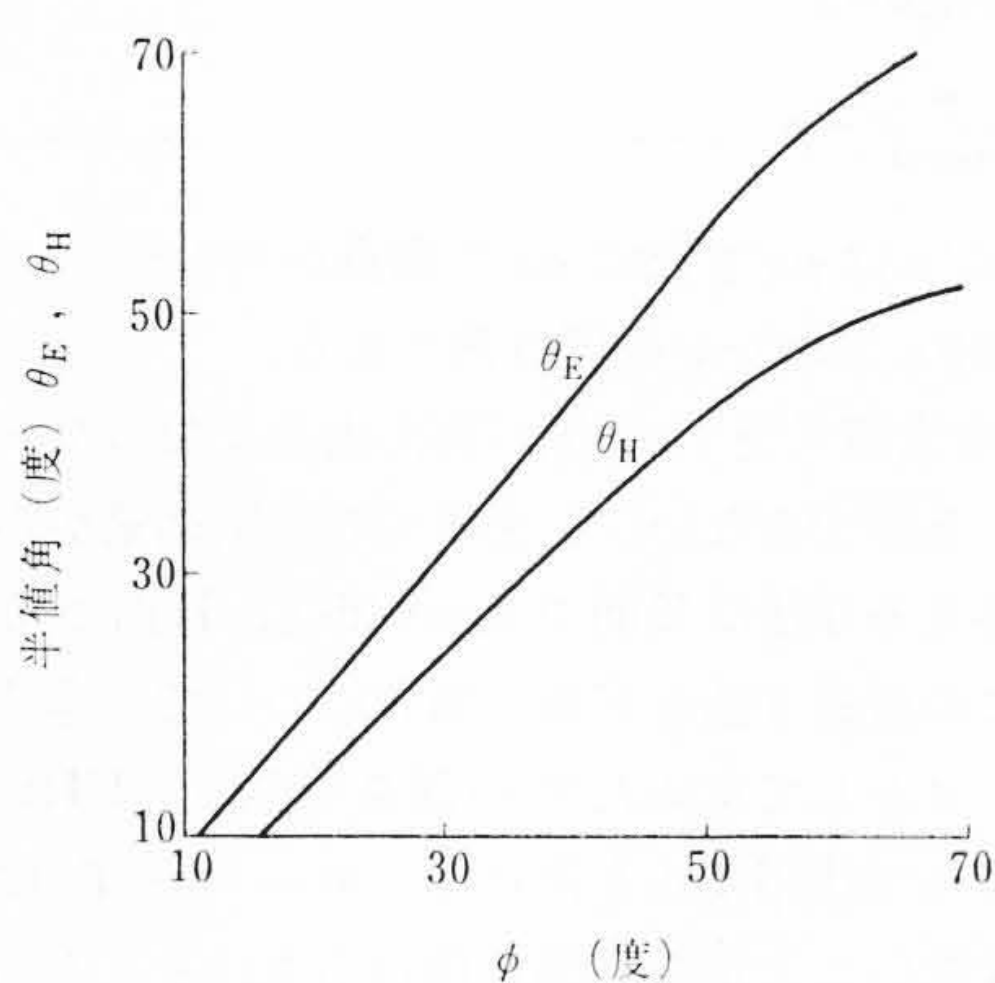
図2 位相差 $\delta_0=0.25\lambda$ となる開口角と e 

図3 最適設計時の開口角と半値角

$$\left. \begin{aligned} \theta_E &= \frac{56}{A_{E\lambda}} \text{ (度)} \\ \theta_H &= \frac{67}{A_{H\lambda}} \text{ (度)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

と与えられる。ここに θ_E : E面の半値角, θ_H : H面の半値角, $A_{E\lambda}$: 自由空間波長で示すE面の開口面, $A_{H\lambda}$: 自由空間波長で示すH面の開口面である。(2)式から開口角と半値角の関係を求めると図3となり比較的広い範囲にわたって半値角を変えることができる。実際的には必ずしも最適設計ができないので半値角を(2)式で求めるのは妥当ではない。この点は実験的に確認する必要がある次節で検討する。

F/B比はホーン長(l)が短くなると悪化することが予想され、実用上特に問題になるものである。バック・ローブの形成される原因は開口面の端による回折波であり、特にE面の端によるものが顕著である。このことから開口角が大きくなるにつれてバック・ローブ・レベルは低下することが予想される。最近の J. S. Yu, R. C. Rudduck 氏らの研究によればこのことが確認されており、開口角が大きくなるにつれて F/B 比は改善される様子がわかる。図4はこれを示している。この文献にも頂点からのホーン長 ρ_E が 1λ 以下では計算が行なわれていない。F/B比は⁽⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} [F/B]_{dB} &= 20 \log \left| \frac{u(0)}{u(\pi)} \right| \\ u(0) &= \text{Exp}[-j2\pi\rho_E \cos \phi_E] + 2V_B(\rho_E, \pi - \phi_E, 2) \\ u(\pi) &= 2V_B(\rho_E, 2\pi - \phi_E, 2) \end{aligned} \right\} (3)$$

ここに V_B は回折の項で

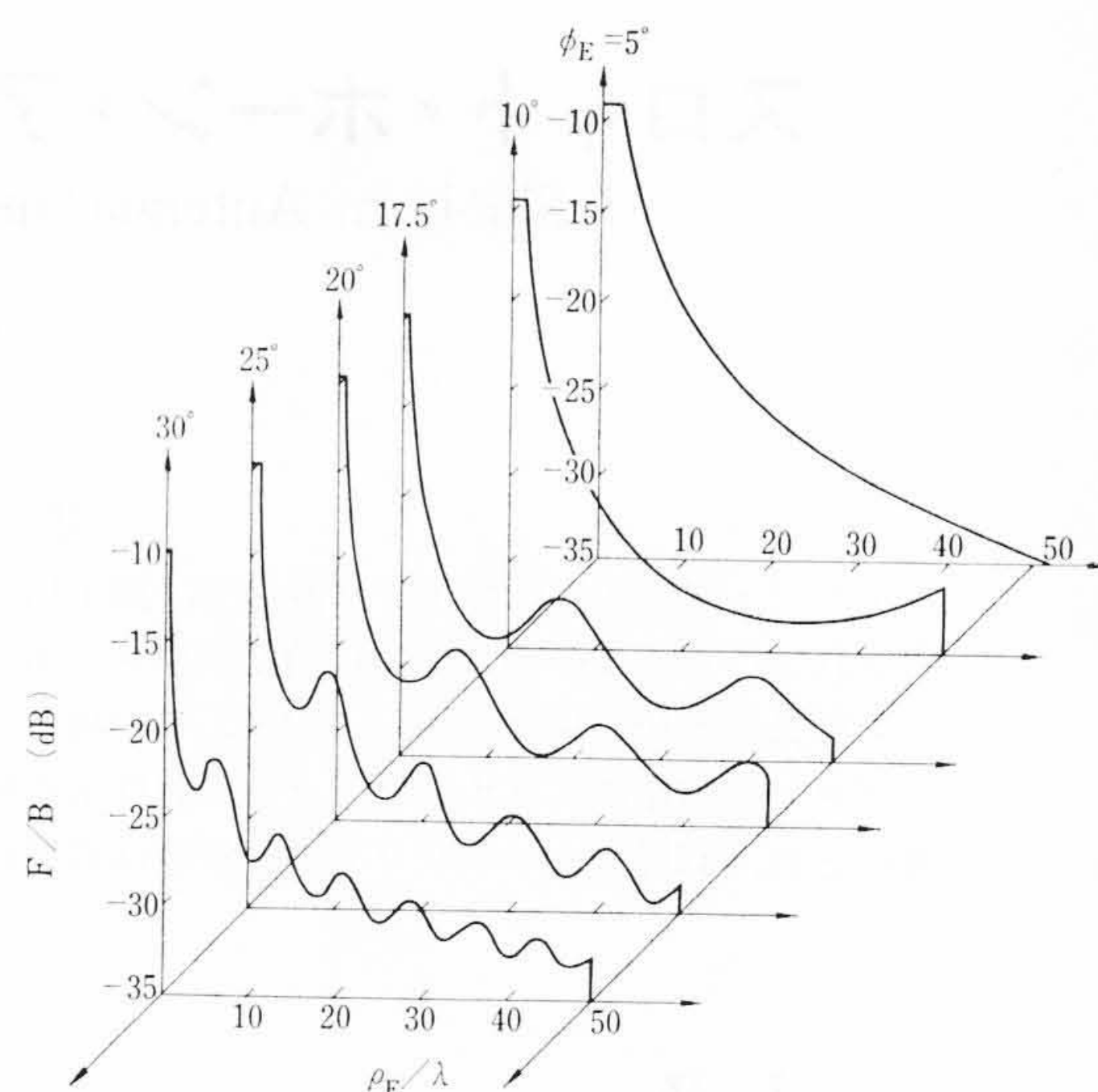


図4 開口角, ホーン長さと F/B (文献(5)より転載)

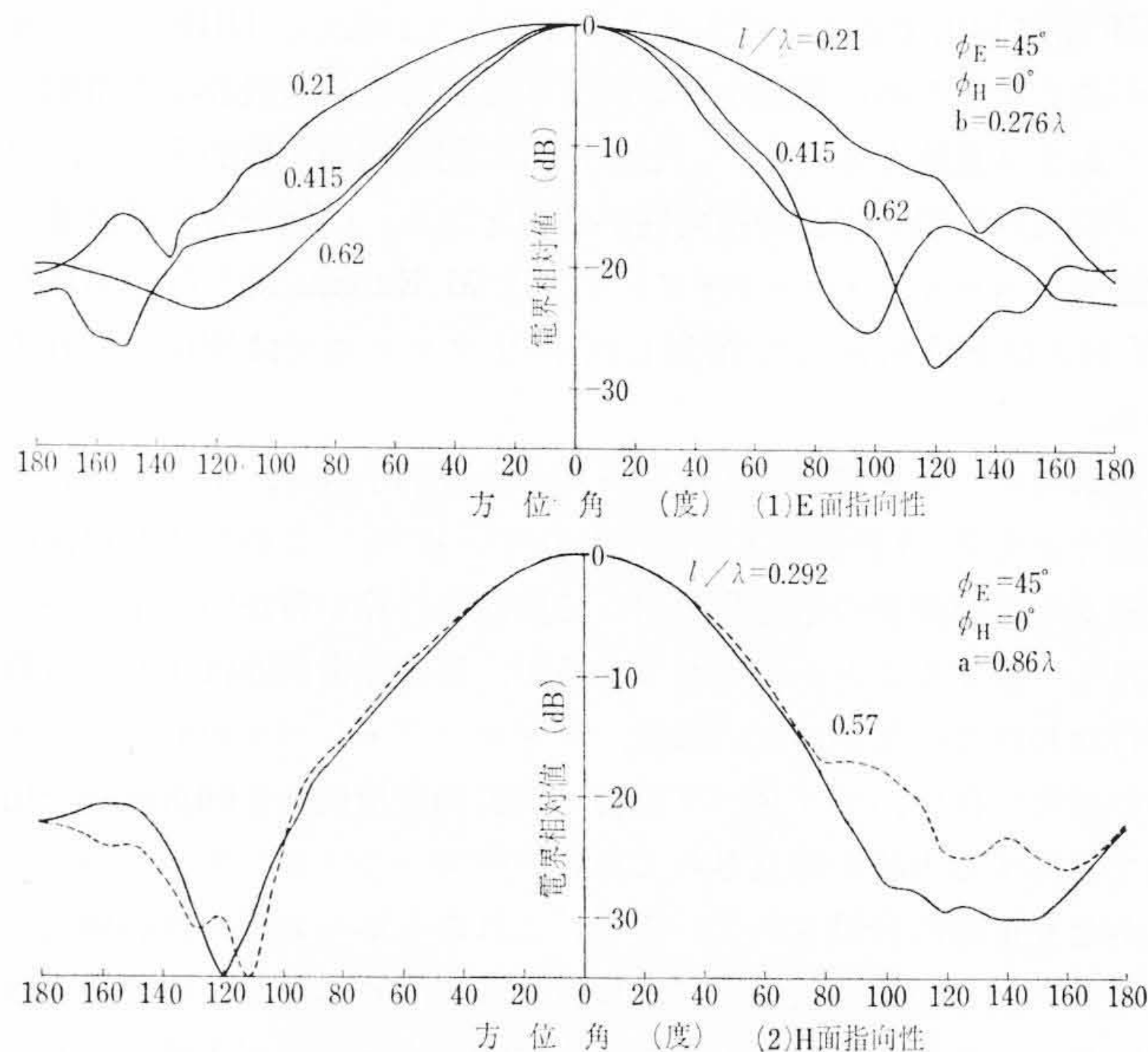


図5 ホーン長の短い場合の指向性

$$\left. \begin{aligned} V_B(\rho, \phi, n) &= \frac{\text{Exp}\left(j\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{\sin \frac{\pi}{n}}{n}\right)}{\sqrt{\pi}} \\ &\times \left\{ \frac{2 \left| \cos \frac{\phi}{2} \right| \text{Exp}(jK\rho \cos \phi)}{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\phi}{n}} \int_{\sqrt{aK\rho}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right. \\ &\quad \left. + (K\rho \text{ の大きな場合には無視できる高次項}) \right\} \dots\dots\dots (4) \\ a &= 1 + \cos \phi \end{aligned} \right\}$$

特に $aK\rho \gg 1$ では(4)式は

$$V_B(\rho, \phi, n) = \frac{\text{Exp}\left[-j\left(\frac{\pi}{4} + K\rho\right)\right]}{\sqrt{2\pi K\rho}} \left(\frac{\sin \frac{\pi}{n}}{n \left(\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\phi}{n} \right)} \right) \dots\dots\dots (5)$$

となり, $K\rho$ の小さい場合には(4)式の評価がむずかしくなるために計算は行なわれていないが, $K\rho$ が大きくなるにつれて V_B は小さくなり F/B 比はよくなる。 $K\rho_E$ の小さい場合については次節で実験的に求めている。

3. ホーン長の短い場合の実験による検討

3.1 半 値 角

ホーン長の短いホーン・アンテナの指向性の一例を図5に示す。この指向性は2節で述べたように、 a, b, ϕ, l のとり方によりかなり自由に変えることができるが、最適設計以外での半値角を与える式がないために設計にさいし不便である。このためここではこの場合の実験式を求めている。(2)式の半値角との比較でE, H面の半値角を図6に示す。図6(1)は a, b を固定にし、ホーン長 l を変えた場合であり、開口角が30度、60度でもほぼ同様な結果である。図6(2)は開口角、ホーン長を決め開口面積を $356 \times 773 \text{ mm}^2$ と固定し半値角の周波数特性を求めたものである。どちらの場合も実線が(2)式で与えられる半値角であり、E面の値がこれから小さいほうにずれており、H面についてはほぼ一致しているといえる。E面に対してはホーン長が長くなるにつれて(2)式の値に近くなるが、この程度のホーン長に対しての半値角と開口面との実験式として

$$\left. \begin{aligned} \theta_E &\simeq \frac{50}{A_{E\lambda}} \quad (\text{度}) \\ \theta_H &\simeq \frac{67}{A_{H\lambda}} \quad (\text{度}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

を得る。均一な分布をもつ長方形開口面の半値角が $51/A_\lambda$ (度)であるから、E面についてはほぼ均一な分布をしていると考えてもよい。

3.2 F/B 比

F/B比はE面の端による回折が主体となることから、E面の開口角60, 90, 120度について実験を行なっている。この場合のバック・ローブとして原則的には方位角180度であるが、 180 ± 20 度でバック・ローブより大きなローブのある場合には、この値を用いている。この結果を図7に示す。これから開口角が60度より90度、さらに90度より120度のほうがF/Bは改善されている。

F/Bを20dB以上とるためには ρ_E/λ は0.7以上、開口角が60度では0.9以上となる。

3.3 利 得

ペンシル・ビームの利得はE面およびH面の半値角から

$$G = 10 \log \frac{41253}{\theta_H \theta_E} - 2.15 \quad [\text{dB}] \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。これはダイポールに対する利得である。サブローブのレベルが大きくなると利得は(7)式より低下する。(7)式から求めた利得の周波数特性は図8に示すとおりである。これからコーナ・レフレクタ・アンテナよりやや小さな寸法で同程度の利得が得られることがわかる。最適寸法で開口角を小さくして、ホーンの長さ(ρ)を十分長くすれば、利得20dB程度は容易に実現できるが、ホーンの長さを短くした場合には、利得増大の方法は方形導波管のE面、H面の幅 a, b を大きくするほうが効果的である。

図1に示した中心励振の場合には、H面の幅は 1.5λ よりやや小さいところまで大きくできる。これ以上大きくすれば TE_{30} モードが発生しビームは大きくわけて利得をあげることができなくなる。またE面もたかだか 0.5λ 程度となる。これらはいずれも TE_{01} モード以上の高次モードの発生をおさえることから規定される寸法である。

これらのほかの高利得化の方法として

- (1) ボックス・ホーン
- (2) リッジ導波管の応用
- (3) 誘電体による分布の改善

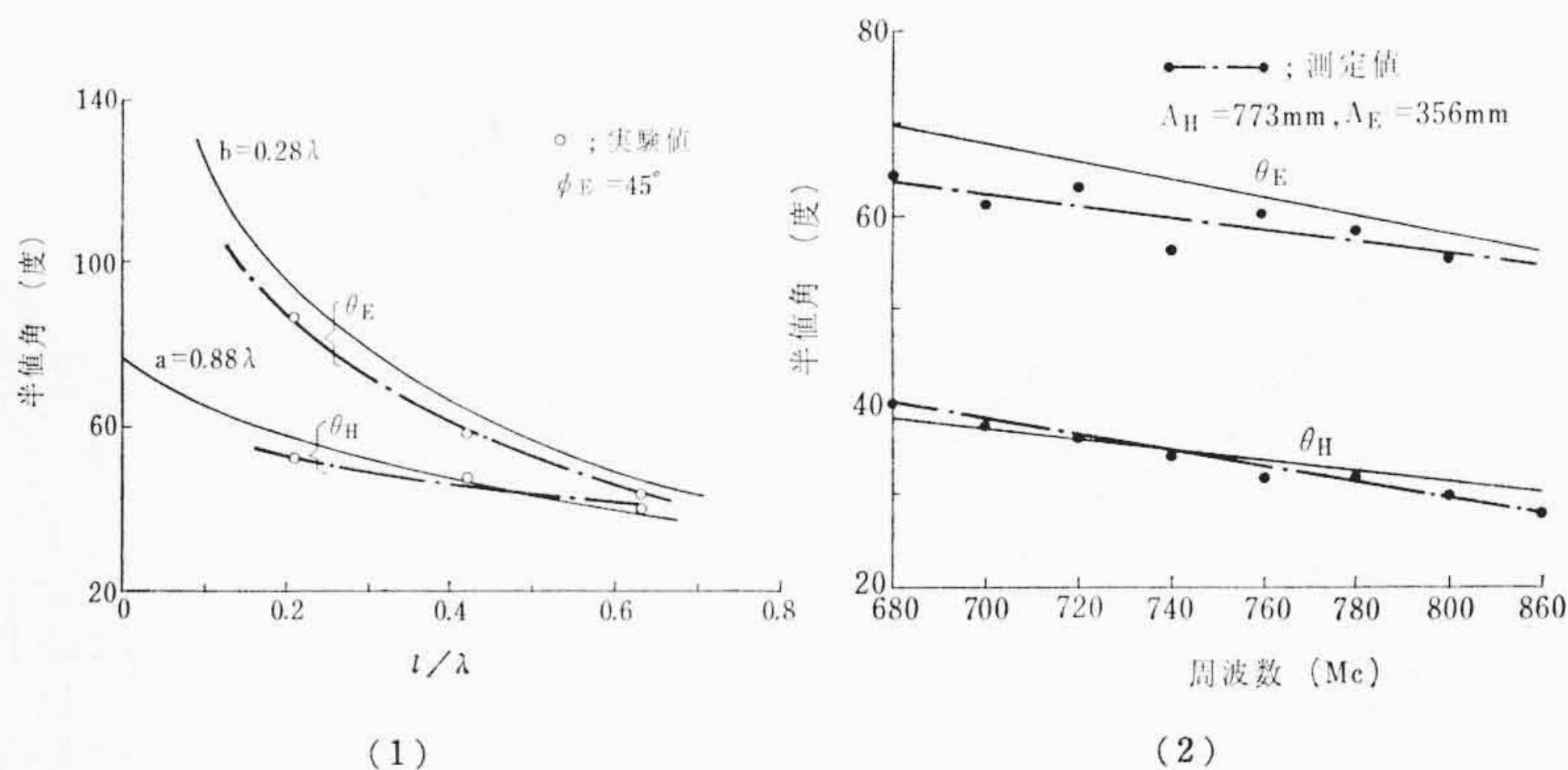


図6 開口面と半値角

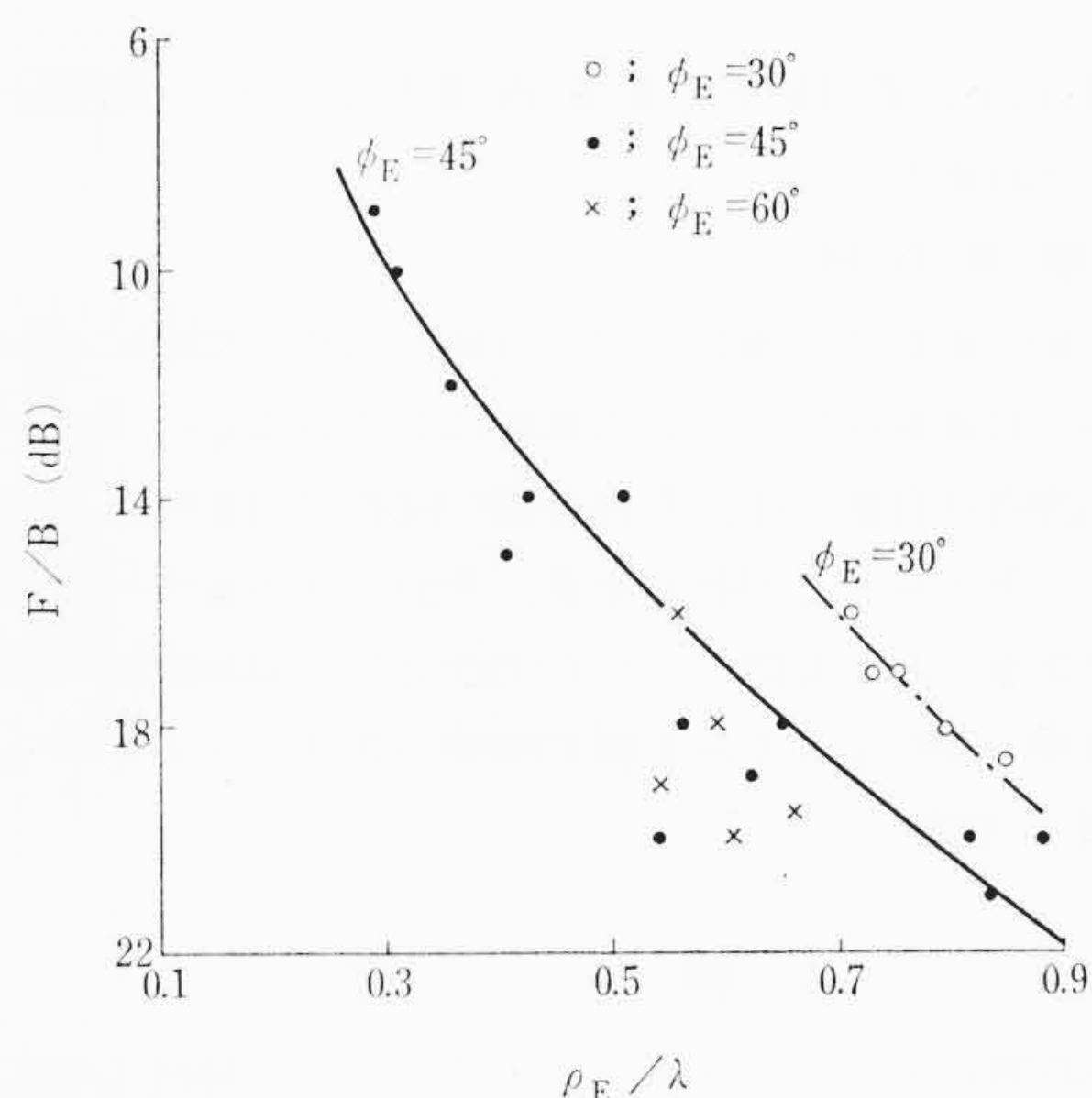


図7 開口角ホーン長さと F/B (実験値)

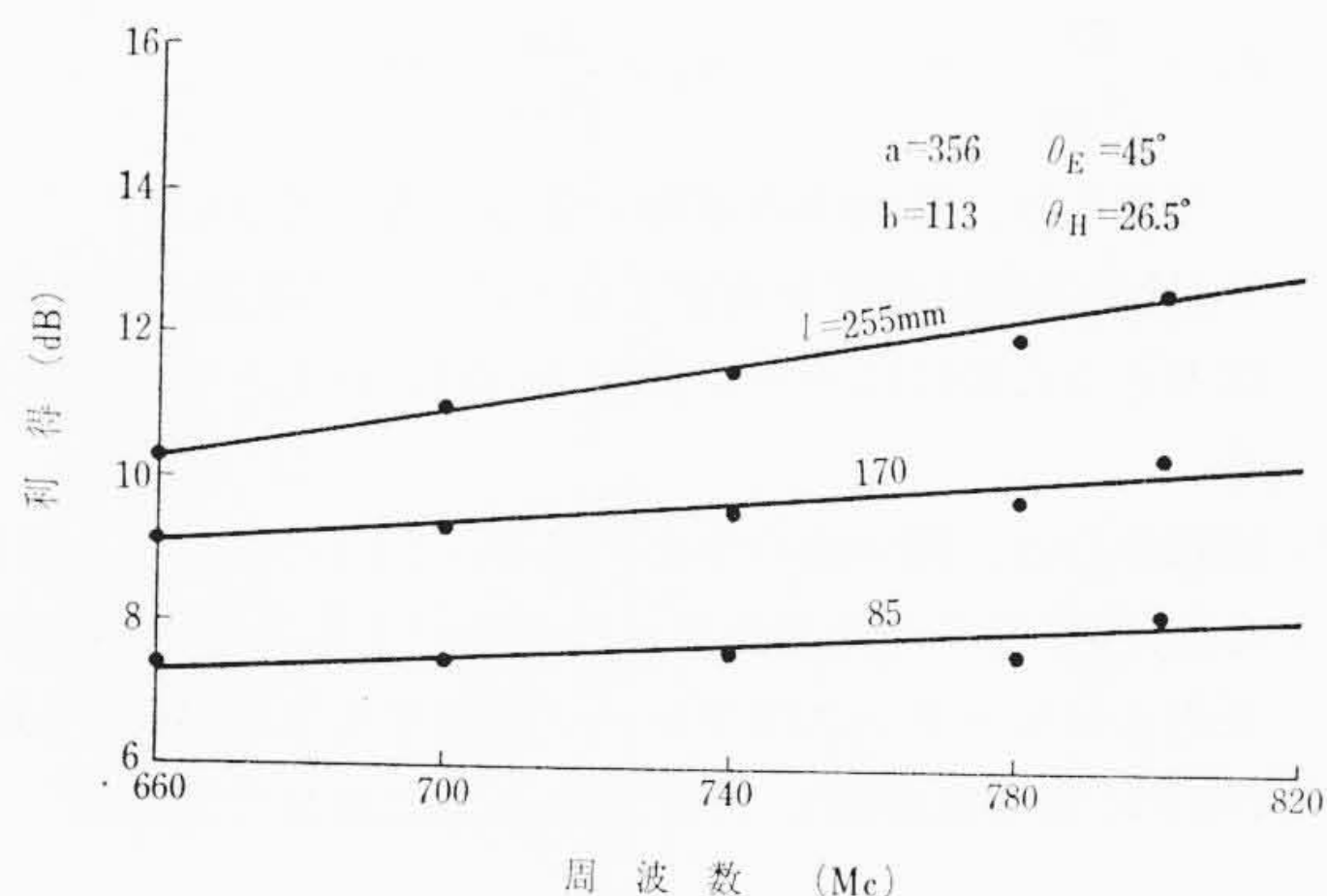


図8 利得の周波数特性の一例

などがある。

図6(2)に導波管のH面が 1.5λ に近い場合の半値角を示しているがほぼ30度となっている。この場合開口角、ホーン長によってもかなり変わってくる。

3.4 位 相 特 性

ホーンの遠方での位相指向性の測定結果から位相の中心はほぼ開口面の中心にあることがわかる。これはホーンが短いために開口面での位相分布が比較的一様になっているものと考えられる。

3.5 インピーダンス特性

文献(1)では広帯域化するためにT形変換器を用いているが、筆者らはアンテナをできるだけ単純化するために、プローブ励振を行なっている。プローブ励振法は導波管系では帯域が狭いとされているが、スロット・ホーン・アンテナの励振法としては必ずしも不満足なものでなく、700 Mc帯で図9に示すような結果が得られ、V.

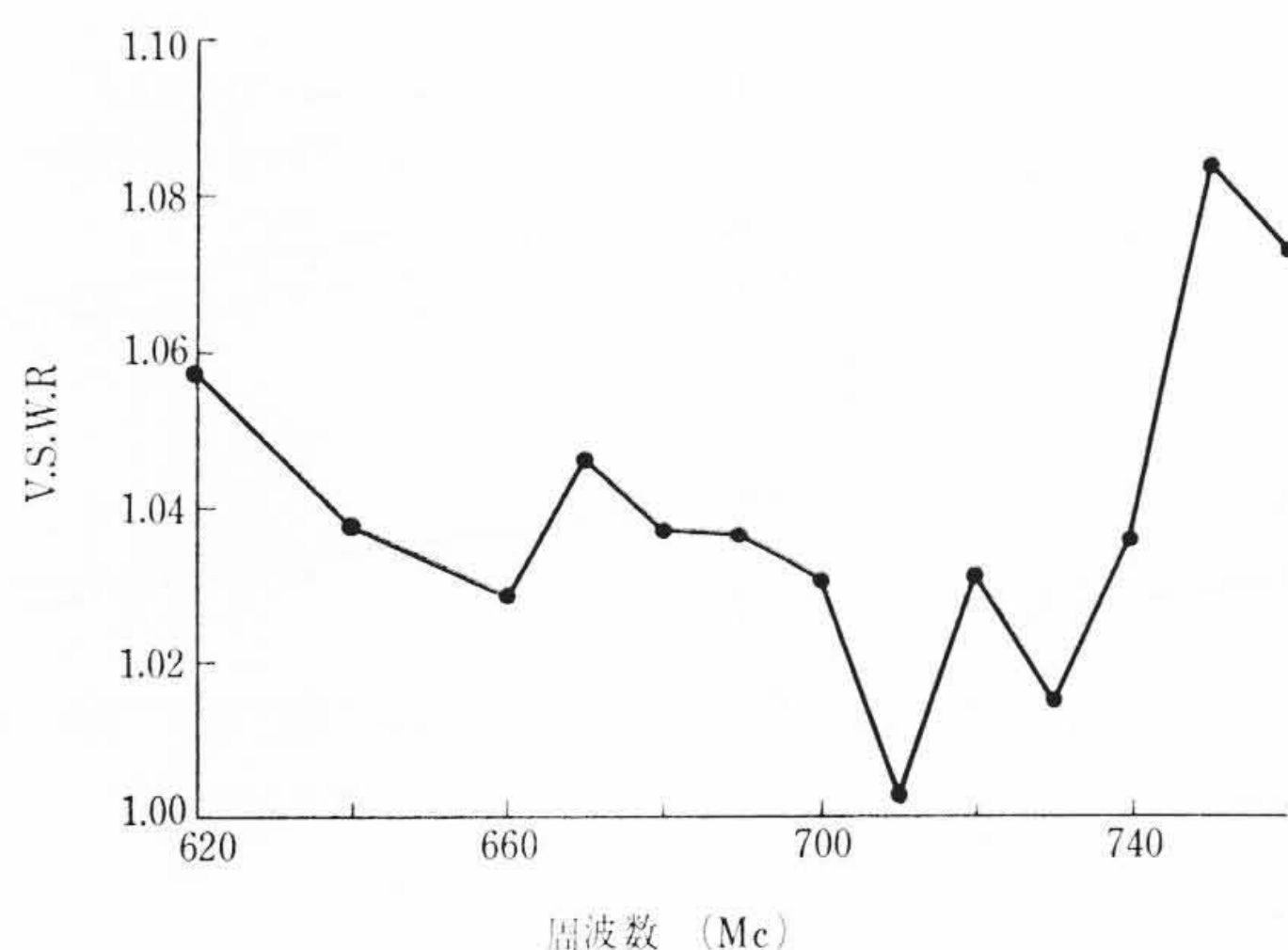


図9 入力インピーダンス特性

S. W. R 1.05 以下に約 110Mc, V. S. W. R 1.10 以下に 160Mc の特性を持つことがわかる。

3.6 合成指向性

テレビなどに应用する場合には、合成指向性が問題にされるが、ここでは特に合成指向性について検討はしていない。合成を行なう場合特に E 面内の合成では、E 面の端の回折のほかに、合成するための他のアンテナによる回折がきき、目的とする以外に大きなサブローブができる。これを防ぐ一つの方法として副反射板の使用があり、これの用い方にもよるが比較的效果があることがわかる。この一例を図 10 に示す。

4. 結 言

ホーン長の短いスロット・ホーン・アンテナの特性を要約すると次のようになる。

(1) 半値角は

$$\theta_H = \frac{67}{A_{H\lambda}} \text{ (度)}, \quad \theta_E = \frac{50}{A_{E\lambda}} \text{ (度)}$$

で与えられ、E 面はほぼ均一分布と考えてよい。

(2) F/B 比は開口角度が大きくなるにつれて改善され、20 dB 以上とるためにはホーン長 ρ を 0.7λ 以上とする必要がある。

(3) 位相中心は、開口面の中心にあり、(1)の結果からと合わせて、開口面での位相分布はほぼ均一であることがわかる。

(4) 入力インピーダンスはプローブ励振でも V. S. W. R 1.05 に 700 Mc 帯で比帯域を 10% とすることは容易である。

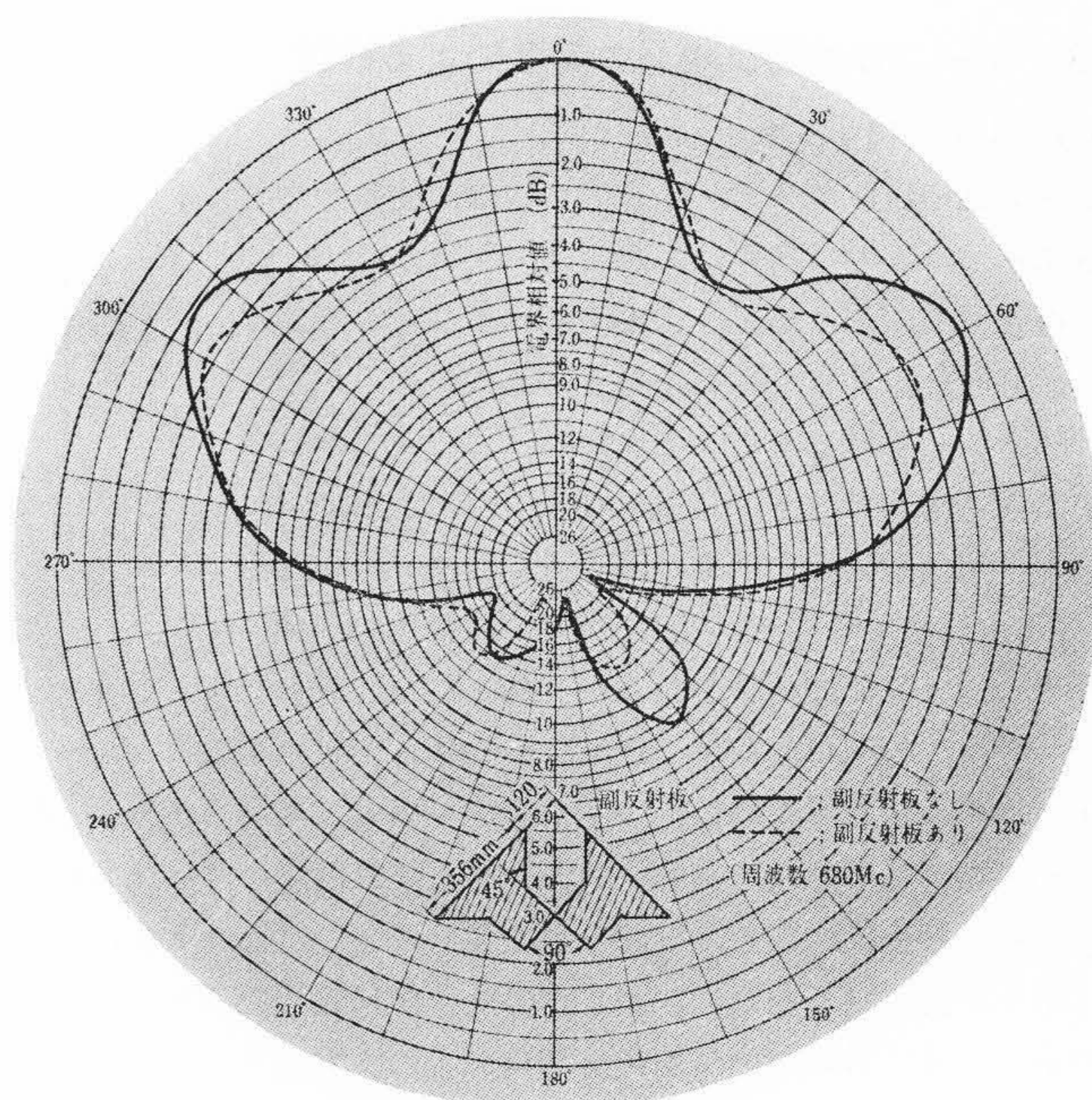


図10 90度配置合成指向性の一例

以上のほかに合成の問題もあるが本論文では詳細は省略した。本論文がこの種のホーンの設計の参考になれば幸いである。

終わりに有益なご意見を賜ったNHK放送技術研究所無線研究部、遠藤主任研究員、およびご指導、ご協力くださった各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) M. Rateau: "Les Antennes-Panneaux à Fentes" L'onde Électrique. Nov. 1964.
- (2) J. D. Kraus: "Antennas". McGraw-Hill Book Company, Inc. New York. (1950)
- (3) B. Ye. Kinber: "Diffraction at the Open End of a Sectoral Horn" Radio Engr. and Electronic Physics. 7-10. p. 1620 (Oct. 1962)
- (4) Y. Ohba: "On the Radiation Pattern of a Corner Reflector Finite in Width" I.E.E.E. Trans on Antennas and Propagation. AP-11, 2. p. 127. (March 1963)
- (5) J. S. Yu, R. C. Ruddack and L. Peters, Jr.: "Comprehensive Analysis for E-plane of Horn Antennas by Edge Diffraction Theory" I.E.E.E. Trans on Antennas and Propagation. AP-14. 2. p. 138. (March, 1966)