U. D. C. 621.396.67

機械的ビームチルトを行なったアンテナの指向性

Directivity of Antennas with Mechanical Beam-Tilting

八田 達* Tôru Hatta　石川 一徳* Kazunori Ishikawa　塗田 善啓* Yoshihiro Nurita

内容梗概

最近UHF—TVサテライト局において，相当大きなビームチルトを行なうために，アンテナユニットを機械的に傾けて取り付ける場合が相当多くなっている。このようなアンテナの指向性を考える場合には一般に3次元的考察を必要とし，その取扱いがめんどうになる。筆者らはこの問題を取りあげて理論的に検討した結果，双ループアンテナのように高利得アンテナを用いた場合には比較的容易に近似式を求めることができたのでここに報告する。

1. 緒言

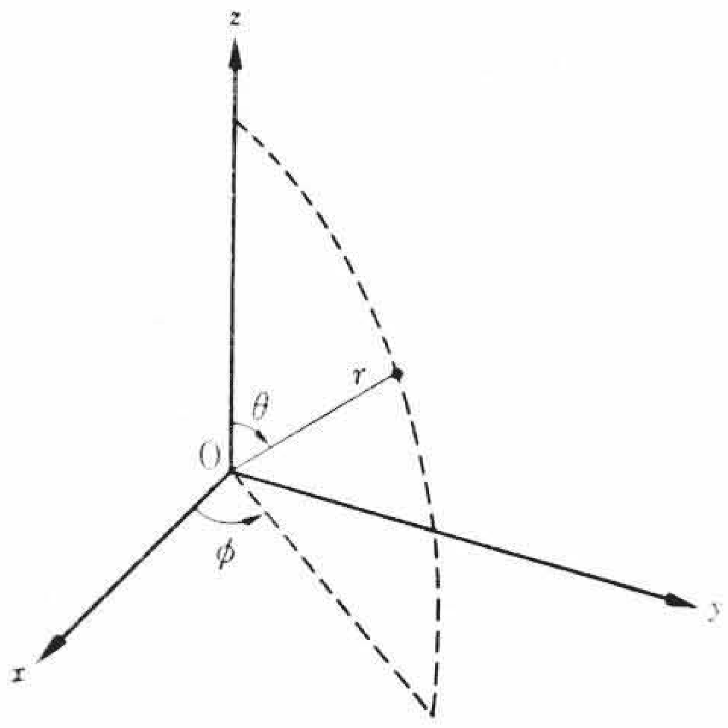
TV放送用のアンテナは，高利得を要求されるため垂直断面内ではかなり鋭い指向性をもっているが，地上の都市をサービスするためビームの方向を水平より若干下側に向けるのが普通である。これはビーム・チルト(Beam-tilt)と呼ばれ，多段スタックのアンテナでは，各段の給電位相を順次に変えてビームの方向を制御する方法がとられている。しかし，最近活発に建設されているUHF—TV放送中継所(テレビサテライト局)では山頂に設けられた送信アンテナにより山麓の都市をサービスするものが多く，チルト角(ビーム方向の角)は大きくなり，3～5度程度になることは珍しくない。また，空中線利得も8～13dB程度を要求されるので，垂直指向性の半値角とビーム・チルト角は同程度になる。特にUHF送信アンテナの場合，これを構成するユニット・アンテナの利得が高い(半値角が小さい)ので，上述した電気的なビーム・チルト法では利得低下をまねく結果となる。しかし，双ループアンテナ(1)(2)のようなダイポール系のアンテナを使用する場合は，ユニット・アンテナを傾斜させることにより任意の方向にビームを向けることができる。このような方法は従来の電気的方法に対して機械的ビームチルト法と呼ばれ最近のサテライト局に盛んに利用される傾向にある。

また，この種のアンテナでは，サービス上の要求から，アンテナの各面ごとにチルト角やスタック段数を変えることが多い。各ユニット・アンテナが傾斜していることを考慮に入れると，このようなアンテナの指向性を平面的に定義することがむずかしくなり，厳密には立体的に考えなければならない。特に，アンテナ各面からの寄与が同程度となるような領域(中間の方角)では現象はかなり複雑になると思われる。筆者らはこの問題について検討を加えた結果，機械的にビームチルトをかけたアンテナの電界を比較的容易に計算する方法を見出したのでここに報告したい。

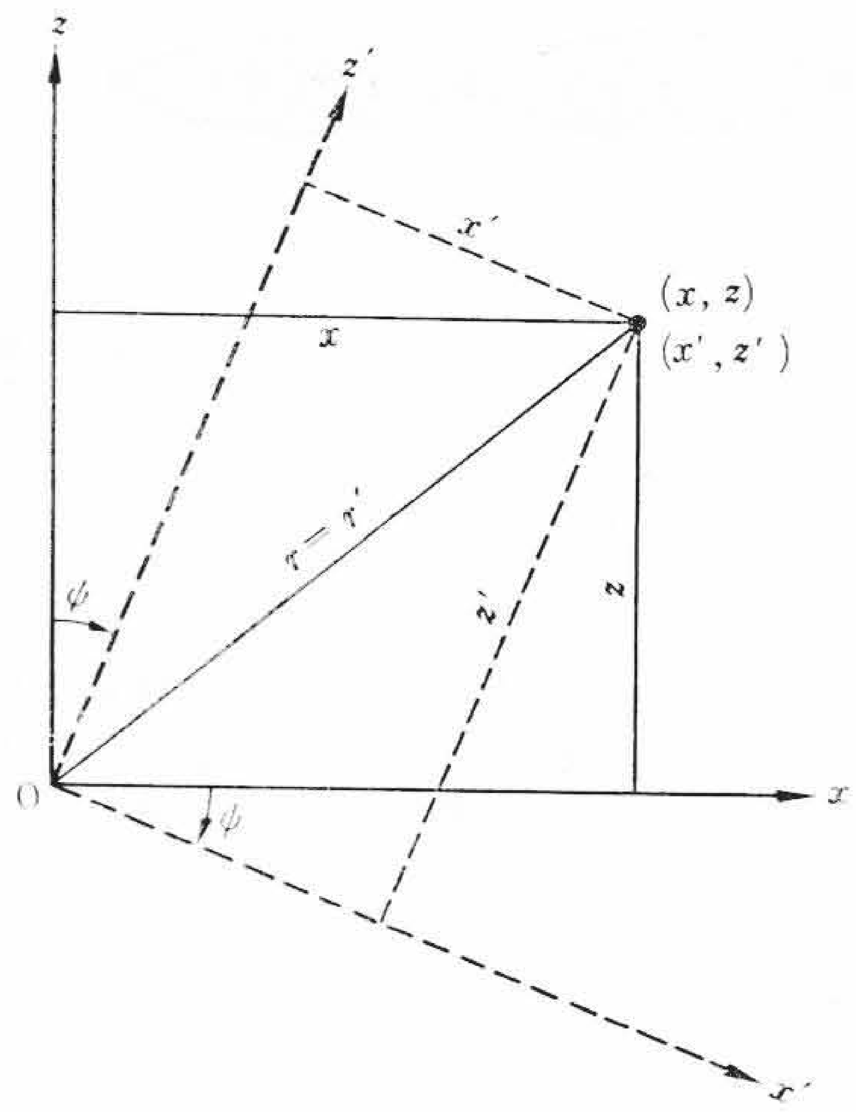
2. 座標の変換

アンテナの指向性は各ユニット・アンテナからの放射電界の重畳によって与えられるが，ユニット・アンテナは鉛直軸に対して傾いているので，その指向性は直立した場合に比べて変化する。最初にこの点を取り上げて検討を加えることとしたい。第1図に示すように直交座標 x, y, z; 球面座標 r, θ, ϕ を定義する。xy 平面は大地に平行，z 軸はこれと垂直である。次に，z 軸を xz 平面内で(y 軸を回転軸として) ψ だけ回転させ，新たに座標系 x', y', z'; r', θ', ϕ' を得たものとする(傾けたアンテナの反射板は $y'z'$ 平面内にある)。

周知のとおり



第1図 球面座標表示



第2図 座標の変換

$$\left.\begin{array}{l} x=r\sin\theta\cos\phi \\ y=r\sin\theta\sin\phi \\ z=r\cos\theta \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\left.\begin{array}{l} x'=r'\sin\theta'\cos\phi' \\ y'=r'\sin\theta'\sin\phi' \\ z'=r'\cos\theta' \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(2)$$

また，第2図から明らかなように，

$$x'=x\cos\psi-z\sin\psi \quad \cdots\cdots(3)$$

$$z'=x\sin\psi+z\cos\psi \quad \cdots\cdots(4)$$

また

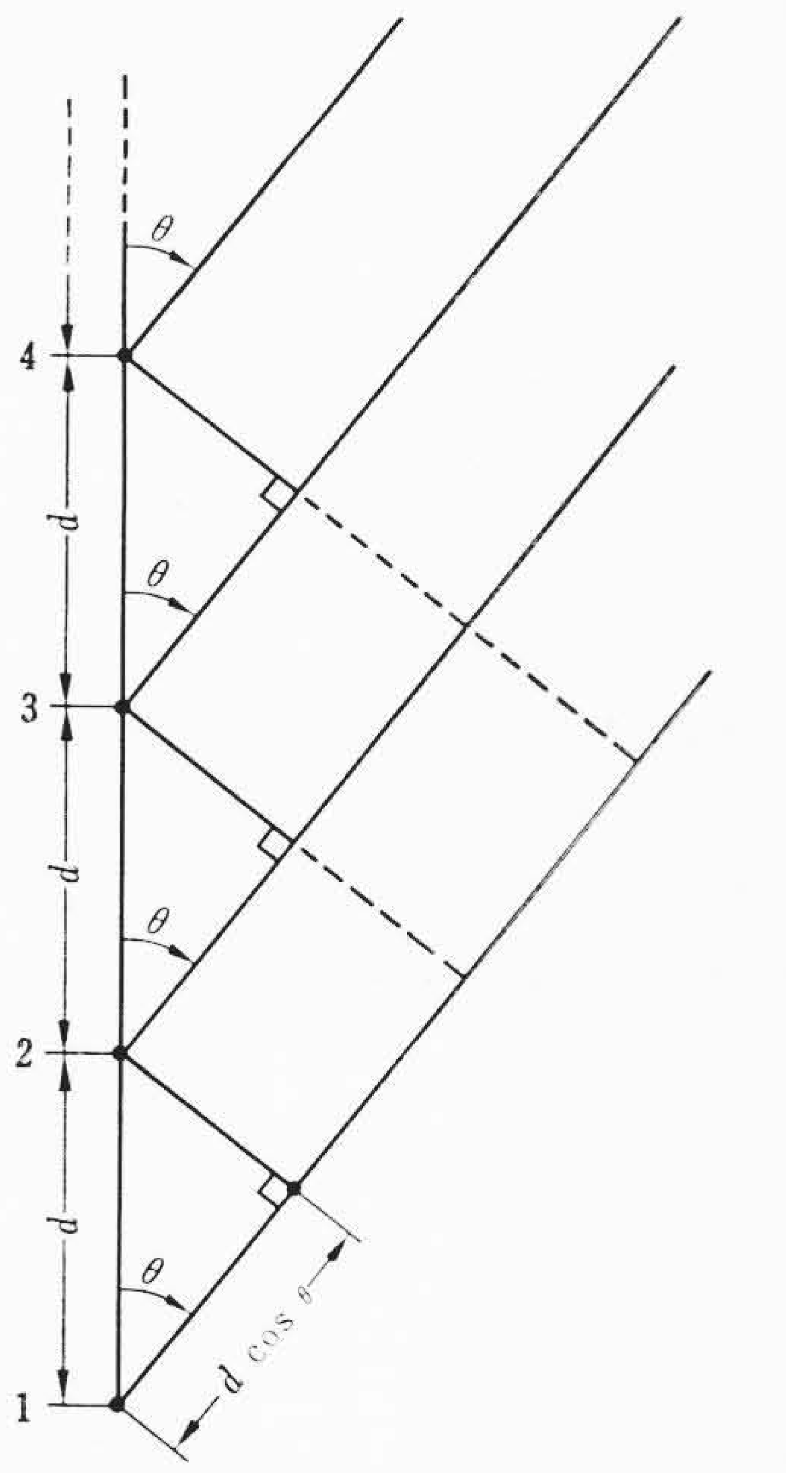
$$r=r' \quad \cdots\cdots(5)$$

$$y=y' \quad \cdots\cdots(6)$$

(1)，(2)より

$$\sin\theta'\cos\phi'=\sin\theta\cos\phi\cos\psi-\cos\theta\sin\psi \quad \cdots\cdots(7)$$

* 日立電線株式会社日高工場



第3図　点　波　源　列

$$\cos\theta'=\sin\theta\cos\phi\sin\varphi+\cos\theta\cos\varphi \quad \cdots\cdots(8)$$

(1), (2)および(6)より直ちに

$$\sin\theta\sin\phi=\sin\theta'\sin\phi' \quad \cdots\cdots(9)$$

が得られる。

(7)～(9)は，このうちの任意の2式が成立すれば，残りの式は自動的に成立することが証明される。与えられたθ, ϕ, φに対して(8)よりθ'が求められ，さらに(7)からϕ'を求めることができる。

3. メインローブ内の近似

ユニット・アンテナの反射板を$y'z'$平面と考える。φの値は普通小さくて，たかだか5°くらいであるから，θ'とθとの差はそれほど大きなものではない。

$$\theta'=\theta+\Delta\theta \quad \cdots\cdots(10)$$

とすれば，$\theta\simeq0$(またはπ)の場合を除き

$$\cos\theta'=\cos\theta-\Delta\theta\sin\theta \quad \cdots\cdots(11)$$

(8), (11)より

$$\Delta\theta=-\varphi\cos\phi \quad \cdots\cdots(12)$$

または

$$\theta'=\theta-\varphi\cos\phi \quad \cdots\cdots(13)$$

が得られる。また，双ループアンテナのような高利得アンテナの場合，メインローブの範囲内ではθ, θ'とも$\pi/2$に近いから

$$\phi\simeq\phi' \quad \cdots\cdots(14)$$

と近似しても大過ない。

(13)において，$\phi=0$とすれば，これは反射板の正面方向に相当し

$$\theta'=\theta-\varphi$$

となる。すなわち，この方向では傾き角φだけθの値がずれると考えてよい。$\phi=\pi/2$とすれば，反射板の真横に相当し

$$\theta'=\theta$$

となる。この方向ではθの値に変化のないことがわかる。

なお，θ, θ'がいずれも小さく，(13)の近似が成立しない場合には，

$$\theta'^2=\theta^2+\varphi^2-2\cos\phi\cdot\theta\varphi \quad \cdots\cdots(15)$$

の関係があることを付言しておく。

特に精度を要求される場合には(7)，(8)を用いなければならないが，実際上問題になる範囲内では(13)および(14)を用いておおむね差しつかえない。いま，ユニット・アンテナの直立した場合の指向性係数を$f(\theta,\phi)$とすれば，このアンテナをφだけ傾けた場合の指向性係数は$f(\theta',\phi')$であるから，上述の関係を利用すれば容易にθ, ϕの関数として$f(\theta',\phi')$の値を求めることができる。

4. n段スタックの場合

つぎに，指向性係数$f(\theta',\phi')$のユニット・アンテナをn段スタックした場合を考える。いま

スタック間隔：d　　　β：$2\pi/\lambda$　(λ：波長)

各段の給電位相：δ

とすれば，この列(Array)の総合指向性係数$F(\theta,\phi)$は，Arrayの理論[3]から次のように与えられる。

$$F(\theta,\phi)=\left(1+e^{j\delta}e^{j\beta d\cos\theta}+e^{j2\delta}e^{j2\beta d\cos\theta}+\cdots\cdots+e^{j(n-1)\delta}e^{j(n-1)\beta d\cos\theta}\right)f(\theta',\phi')$$

$$=e^{j\frac{1}{2}(n-1)\Psi}D(\theta)f(\theta',\phi') \quad \cdots\cdots(16)$$

ここで，$D(\theta)$はArray Factor (配列係数)と呼ばれ

$$D(\theta)=\frac{\sin\frac{1}{2}n\Psi}{\sin\frac{1}{2}\Psi} \quad \cdots\cdots(17)$$

$$\Psi=\frac{2\pi}{\lambda}d\cos\theta+\delta \quad \cdots\cdots(18)$$

から求めることができる。普通のArrayの理論では，この指向性の基準点を列の中心位置までずらせ，(16)の右辺の因子$e^{j\frac{1}{2}(n-1)\Psi}$を除いているが，ここでは後述する理由によって，このままにしておくことにする。すなわち，位相の基準は，この列の最下段のユニット・アンテナから(観測点に)到達した波の位相である。

ここで，

$$\theta=\pi/2+\varphi$$

の方向，すなわち，$f(\theta',\phi')$が最大となる方向で，$D(\theta)$が最大($\Psi=0$)となるためには，(18)から明らかなように，

$$\delta=2\pi\frac{d}{\lambda}\sin\varphi$$

とすればよい。

つぎに，ヌル・フィルイン(Null fill-in)を行なう場合を考えてみる。最も普通に行なわれているのは，多段スタックアンテナを上下に2分し，それぞれに異なった電力を供給する方法である。電力分配比を上半分を1，下半分をkとし，また

$n=2p$　(n：偶　数)

とすれば，この列の複素配列係数$\dot{D}(\theta)$は次のようになる。

$$\dot{D}(\theta)=\sqrt{\frac{2}{1+k}}\left\{\sqrt{k}\left(1+e^{j\Psi}+e^{j2\Psi}+\cdots\cdots+e^{j(p-1)\Psi}\right)+\left(e^{jp\Psi}+e^{j(p+1)\Psi}+e^{j(p+2)\Psi}+\cdots\cdots+e^{j(2p-1)\Psi}\right)\right\}$$

$$=e^{j\{\frac{1}{2}(2p-1)\Psi+\varphi\}}\sqrt{\frac{2}{k+1}}\cdot\frac{\sin\frac{1}{2}p\Psi}{\sin\frac{1}{2}\Psi}\sqrt{1+k+2\sqrt{k}\cos p\Psi} \quad \cdots\cdots(19)$$

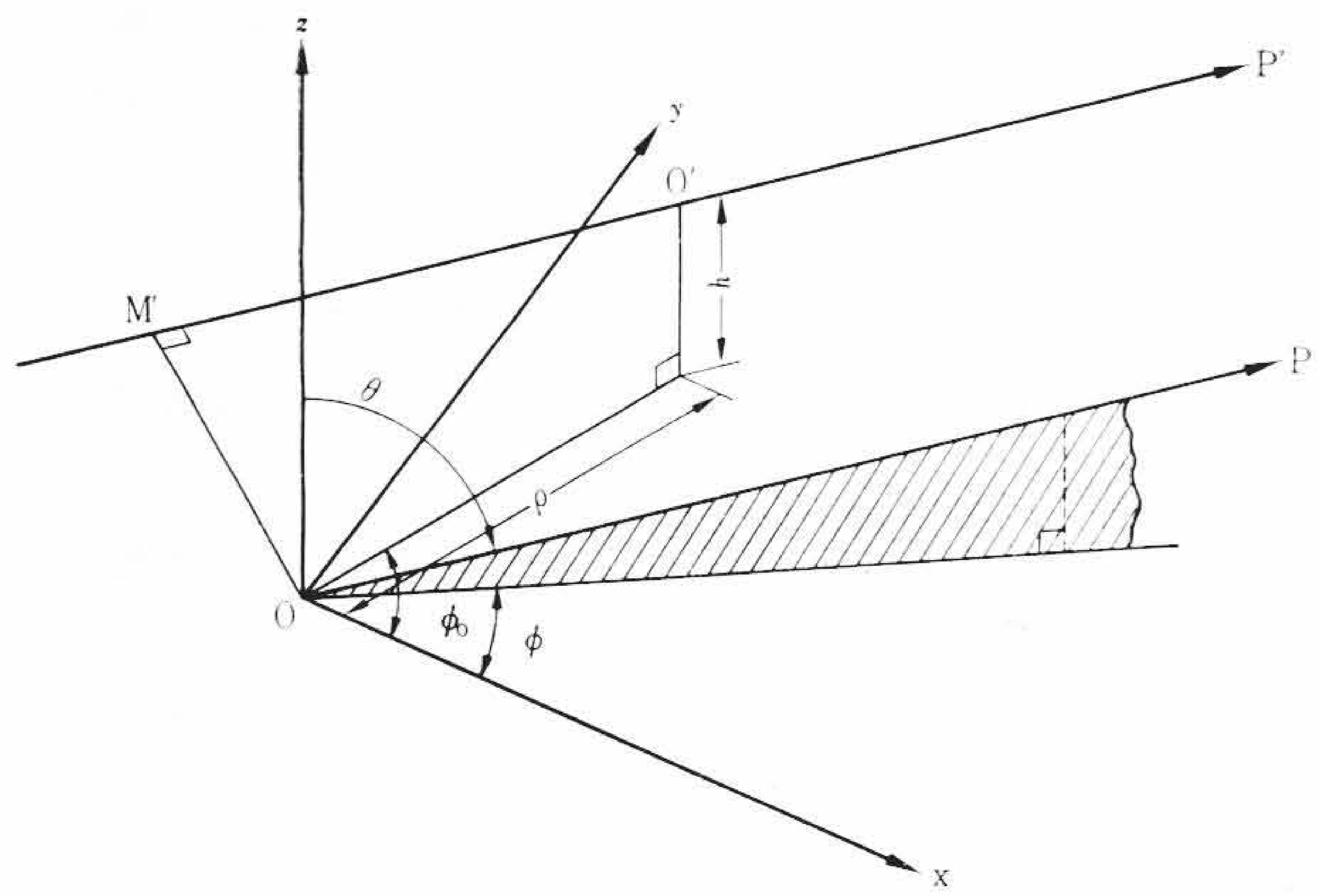
ここで

$$\tan\varphi=\frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}}\tan\frac{1}{2}p\Psi \quad \cdots\cdots(20)$$

このとき総合指向性係数$F(\theta,\phi)$は次のようになる。

$$F(\theta,\phi)=e^{j\frac{1}{2}(n-1)\Psi+\varphi}D'(\theta)f(\theta',\phi') \quad \cdots\cdots(21)$$

$D'(\theta)$は配列係数((17)に相当)で，この場合は次式のようになり，奇数番目の零点が埋められることがわかる。



第4図　空間内の2波源よりの行程差

$$D'(\theta)=\sqrt{\frac{2}{1+k}}\,\frac{\sin\frac{1}{2}p\Psi}{\sin\frac{1}{2}\Psi}\sqrt{1+k+2\sqrt{k}\cos p\Psi}\cdots(22)$$

また，(16)，(21)を比較すれば明らかなように，ヌル・フィルインを行なう場合には，新たに位相量 φ を考慮に入れる必要がある。

5. 空間内の2波源よりの行程差

空間内の異なった2点から放射される電波の干渉を3次元的に取り扱うために次の考察を行なってみる。**第4図**のO, O′は2個の点波源の位置で，O′の位置をOを原点とする円筒座標で表示して，ρ, ϕ_0, h を得たものとする。十分遠方の点Pから観測する場合，O, O′よりの行程差は**第4図**のO′M′で与えられる。(ここで，OP∥O′P′である)付録の(A.2)から明らかなように

$$O'M'=\rho\sin\theta\cos(\phi_0-\phi)+h\cos\theta\cdots\cdots(23)$$

ここで

$\theta=\pi/2$（または $h=0$）

のときは

$O'M'=\rho\cos(\phi_0-\phi)$

となって，平面的な考察に帰着する。

6. 2面配置の一般的取扱い

サテライト局では，サービス上の要求から，アンテナの各面（方向）ごとに，スタックの段数，ビームチルト角を変えることがある。このようなアンテナの指向性は立体的に考えなければならないが，これには次に述べる2面合成が解明されればよい。

いま，アンテナの第1面に n 段，第2面に m 段のユニットアンテナをスタックする場合を考えてみる。まず，第1面の総合指向性係数 $F_1(\theta,\phi)$ を求めるには前章の結果をそのまま利用すればよく

$$F_1(\theta,\phi)=e^{j\frac{1}{2}(n-1)\Psi_1}D_1(\theta)\,f_1(\theta',\phi')\cdots\cdots(24)$$

$$D_1(\theta)=\frac{\sin\frac{1}{2}n\Psi_1}{\sin\frac{1}{2}\Psi_1}\cdots\cdots(25)$$

$$\Psi_1=\frac{2\pi}{\lambda}d_1\cos\theta+\delta_1\cdots\cdots(26)$$

となる。ヌル・フィルインを行なう場合は，(21)，(22)を参照して補正を行なえばよい。

次に，第2面(m段スタック)の場合を考える。原理的には第1面の場合となんら異なるところはないが，これら両面からの放射電界の干渉をは握するためには，両者間の幾何学的な位置関係，給電位相差などに注意しなければならない。取扱いを一般的なものとするために，ユニットアンテナの指向性，スタック間隔などが第1面と異なるものとして取り扱う。いま

$F_2(\theta,\phi)$：　総合指向性係数

$f_2(\theta'',\phi'')$：　ユニット・アンテナの指向性係数

ϕ_2：　ユニット・アンテナの傾き角

δ_2：　各段の給電位相差

O, O′：　それぞれ第1および第2列の最下段ユニット・アンテナの中心位置

ρ,ϕ_0,h：　O′のOを原点とする円筒座標表示

Ψ_{12}：　最下段ユニット・アンテナの給電点で考えた，第1および第2面間の給電位相差

このとき，$F_2(\theta,\phi)$は**第4, 5章**の結果を利用すれば，容易に求められ，

$$F_2(\theta,\phi)=e^{j\left\{\frac{1}{2}(m-1)\Psi_2+\frac{2\pi}{\lambda}(\rho\sin\theta\cos(\phi_0-\phi)+h\cos\theta)+\psi_{12}\right\}}\cdot D_2(\theta)\,f_2(\theta'',\phi'')\cdots\cdots(27)$$

$$D_2(\theta)=\frac{\sin\frac{1}{2}m\Psi_2}{\sin\frac{1}{2}\Psi_2}\cdots\cdots(28)$$

$$\Psi_2=\frac{2\pi}{\lambda}d_2\cos\theta+\delta_2\cdots\cdots(29)$$

となる。

第1面および第2面の合成指向性は(24)，(27)の和として求めることができる。しかし，ここで注意を要することは，(24)，(27)の誘導にあたり，各面にそれぞれ積重ねたユニット・アンテナにいずれも単位の電力を供給するものと考えていることである。しかし，実際にはユニット・アンテナへの供給電力を面ごとにかえてやることがある。いま，第1面に W_1，第2面に W_2 の電力を分配するものとすれば，各ユニット・アンテナへの配分電力は

第1面では　W_1/n

第2面では　W_2/m

である。したがって

$$第1面の放射電界=\sqrt{\frac{W_1}{n}}\cdot F_1(\theta,\phi)$$

$$第2面の放射電界=\sqrt{\frac{W_2}{m}}\cdot F_2(\theta,\phi)$$

となることは明らかで，合成指向性は

$$合成指向性=\sqrt{\frac{W_1}{n}}\cdot F_1(\theta,\phi)+\sqrt{\frac{W_2}{m}}\cdot F_2(\theta,\phi)$$

から計算すればよい。また合成指向性の相対値を問題にするときは

$$合成指向性相対値=F_1(\theta,\phi)+\sqrt{\frac{n}{m}\cdot\frac{W_2}{W_1}}\cdot F_2(\theta,\phi)$$

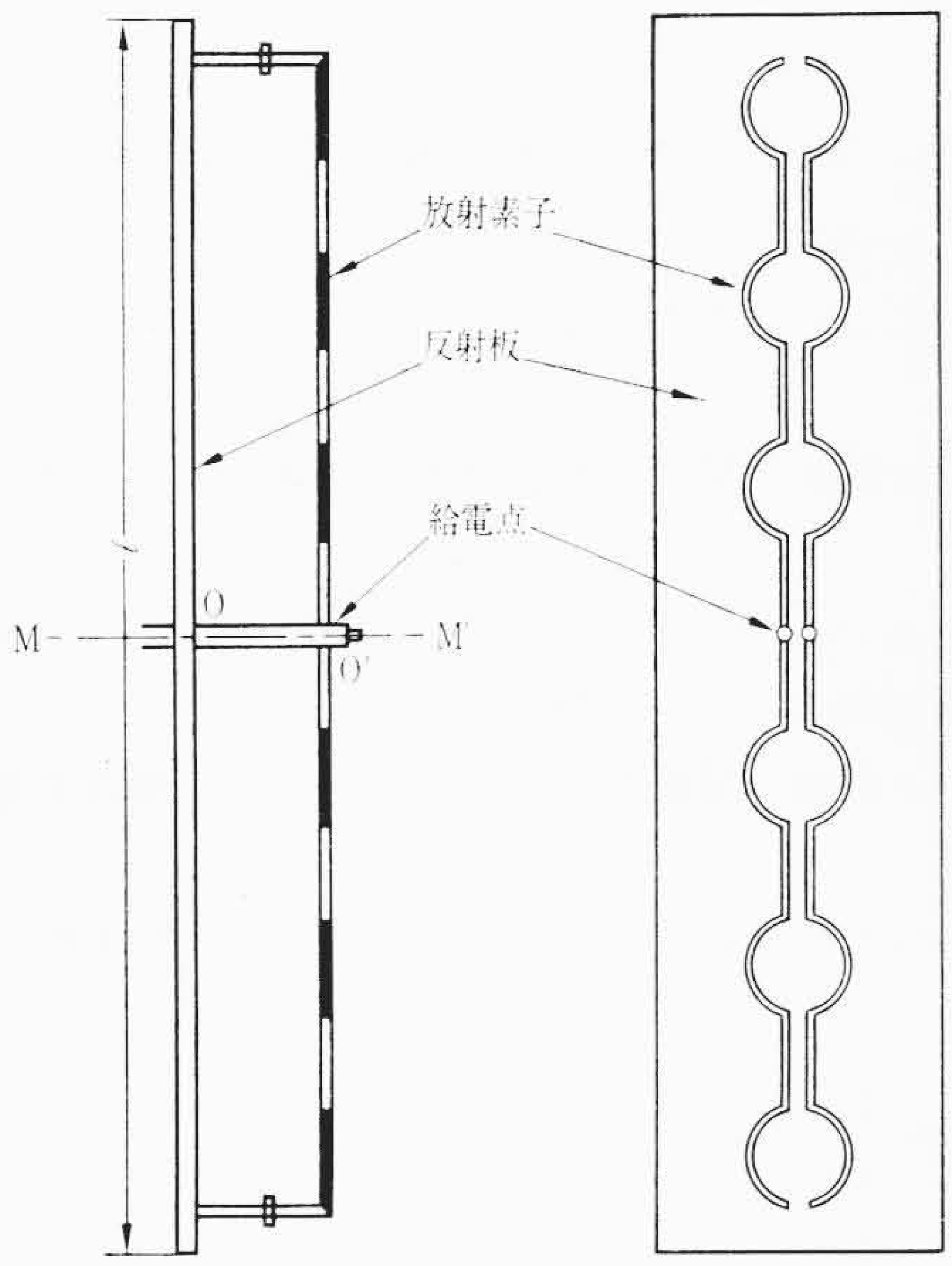
から計算してもよい。

7. 1段2面90度配置

前章の(24)～(29)において

$n=m=1$，$\phi_1=\phi_2=\phi$，$\Psi_{12}=0$，$\phi_0=-135°$，鉄塔幅$=\lambda$

とし，アンテナは**第5図**に示すような双ループアンテナとする。指向性係数$f(\theta,\phi)$は，水平および垂直指向性の積として与えられ，これらは実測により求めることができるが，理論的に計算する場合は文献(2)を参照されたい。次に，ユニット・アンテナの位相の中心をどこにとればよいかを問題にする必要がある。**第5図**の中心線MM′上にあることは直感的にも明らかであるが，反射板からの高さが明らかでない。反射板が無限にひろければ，反射板上のO点とすべきであるが，実際には有限であるからこの考えは無理で，多くの実験



第5図　双ループアンテナの概略図

データ（たとえば位相指向性の測定など）から経験的に定めなければならない。筆者らの経験では，反射板幅が1波長の場合は O′ 点にとるのが最もよいようである。

最初に6素子双ループアンテナの場合について考えてみる。**第4図**の l は約 5λ である。傾斜角 ψ をパラメータとして

$$\theta=\pi/2+\psi$$

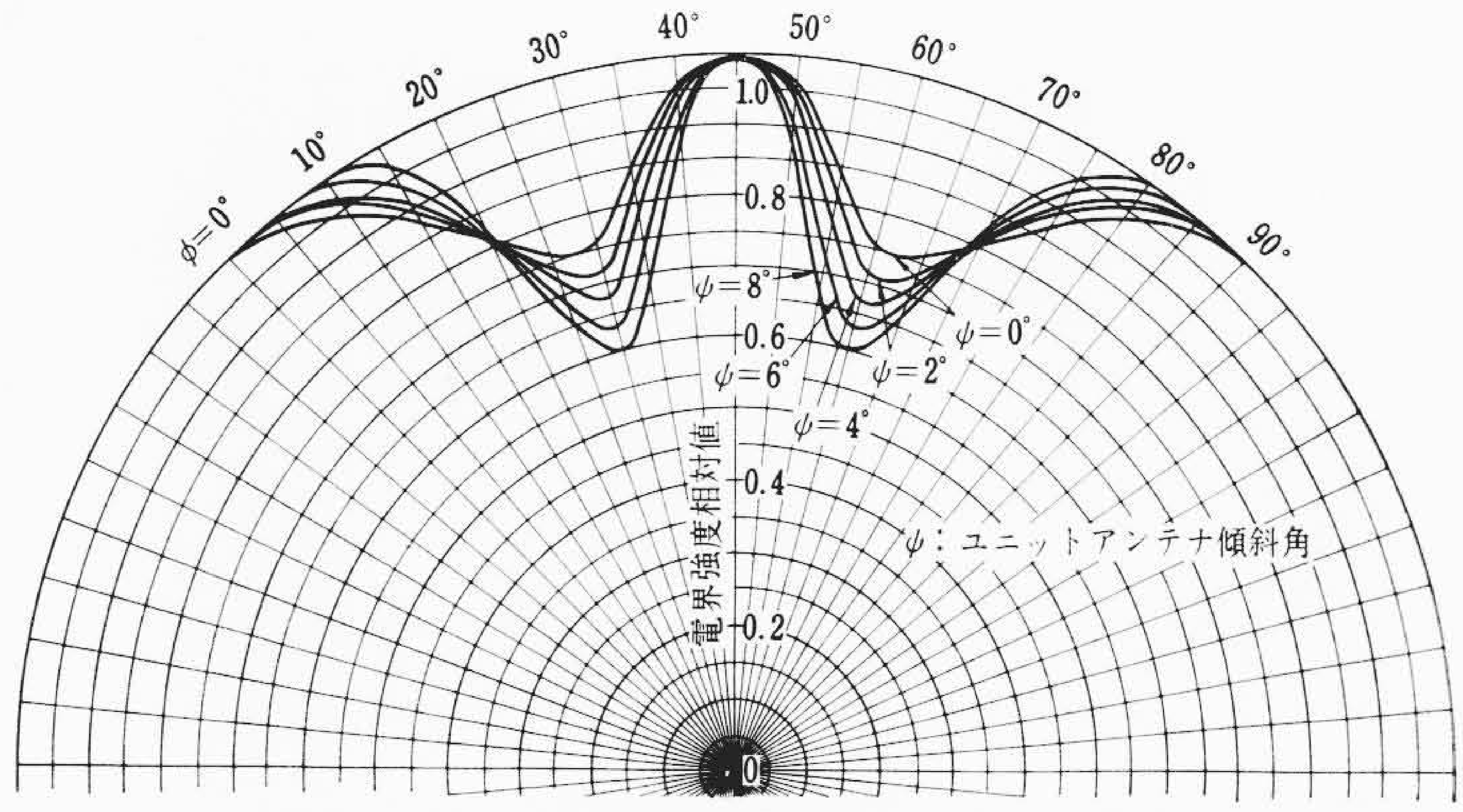
方向の電界を $0^\circ \leqq \psi \leqq 90^\circ$ の範囲で計算したものが**第6図**で，ψ が大きいほど電界偏差が大きくなることがわかる。これは，アンテナを傾斜させるため放射の中心 O′ が鉄塔から遠ざかり，鉄塔幅が増加したこととほぼ等価となるためと考えてよい。**第7図**は実験結果との比較である。また，**第8図**は $\psi=4^\circ$ のときの合成指向性を俯角 $(\alpha=\theta-\pi/2)$ をパラメータとして計算した結果である。

第9図は4素子双ループアンテナ（$l \fallingdotseq 3.25\lambda$）の場合について，**第6図**と同様の計算を行なったものである。6素子の場合よりも電界偏差が小さいのは，l が小さいためと考えてよい。

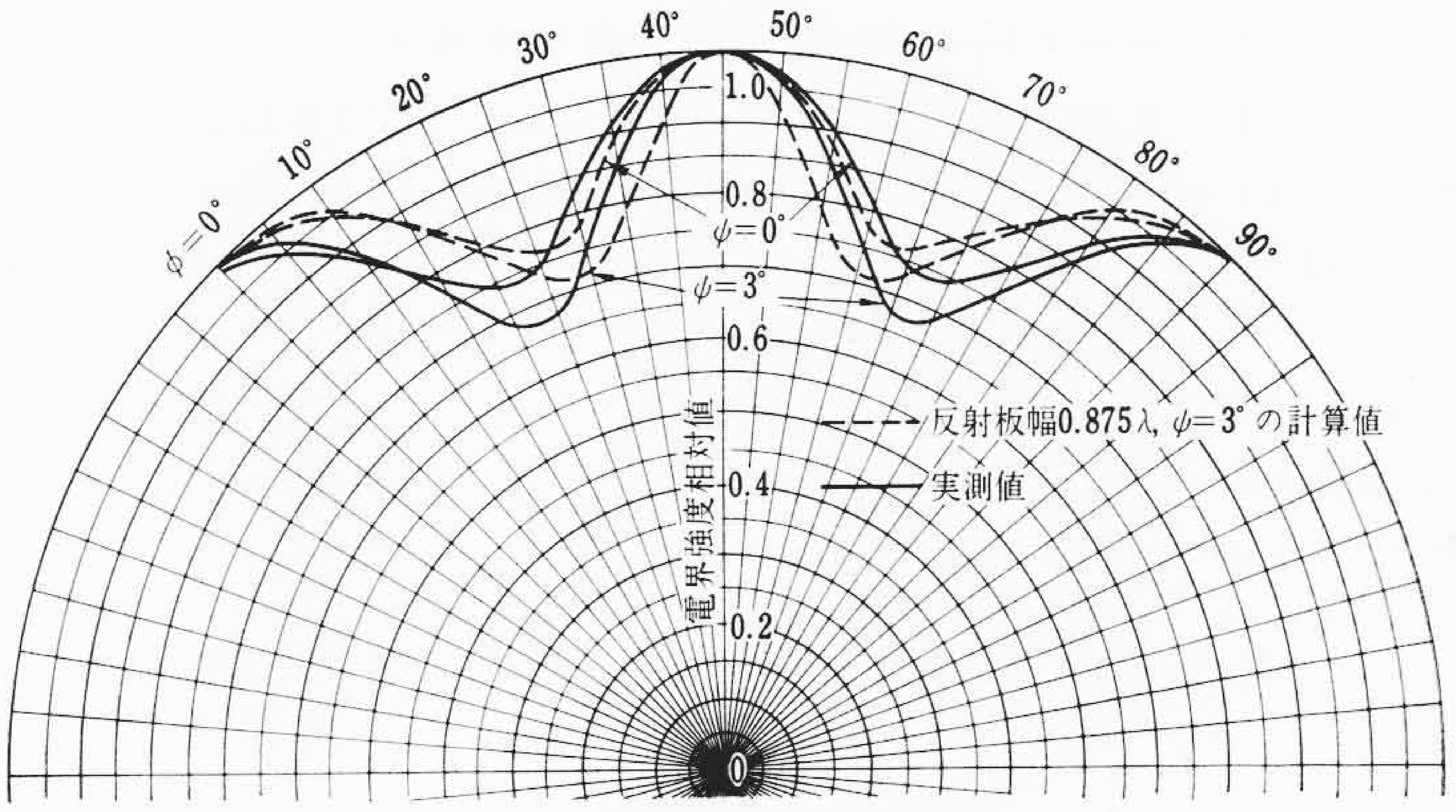
8. n 段 2 面 90 度配置

つぎに，前章で考えた2面配置のアンテナを n 段スタックする場合を考えてみる。このときは前章で考えた1段当たりの指向性に (17) で考えられた $D(\theta)$ を掛け合わせれば容易にアンテナ全体としての指向性を求めることができる。双ループアンテナを使用する場合は，スタック間隔 d は波長に比べて非常に大きいから，$D(\theta)$ の θ に対する変動は $f(\theta', \phi')$ のそれに比較すればはるかに著しい。**第10図**は6素子双ループアンテナ（$\psi=4^\circ$）を4段スタックした場合の $D(\theta)$，$f(\theta', \phi'=0)$ および $D(\theta), f(\theta', \phi'=0)$ を示したものである。第1の零点(First Null Point)以内では $f(\theta', \phi')$ は（θ に対して）大きな変化はなく，$D(\theta)$ のほうが大きくきいていることがわかる。（4素子双ループアンテナのように垂直面内の半値角が大きい場合はいっそう $D(\theta)$ の効果が大きい）

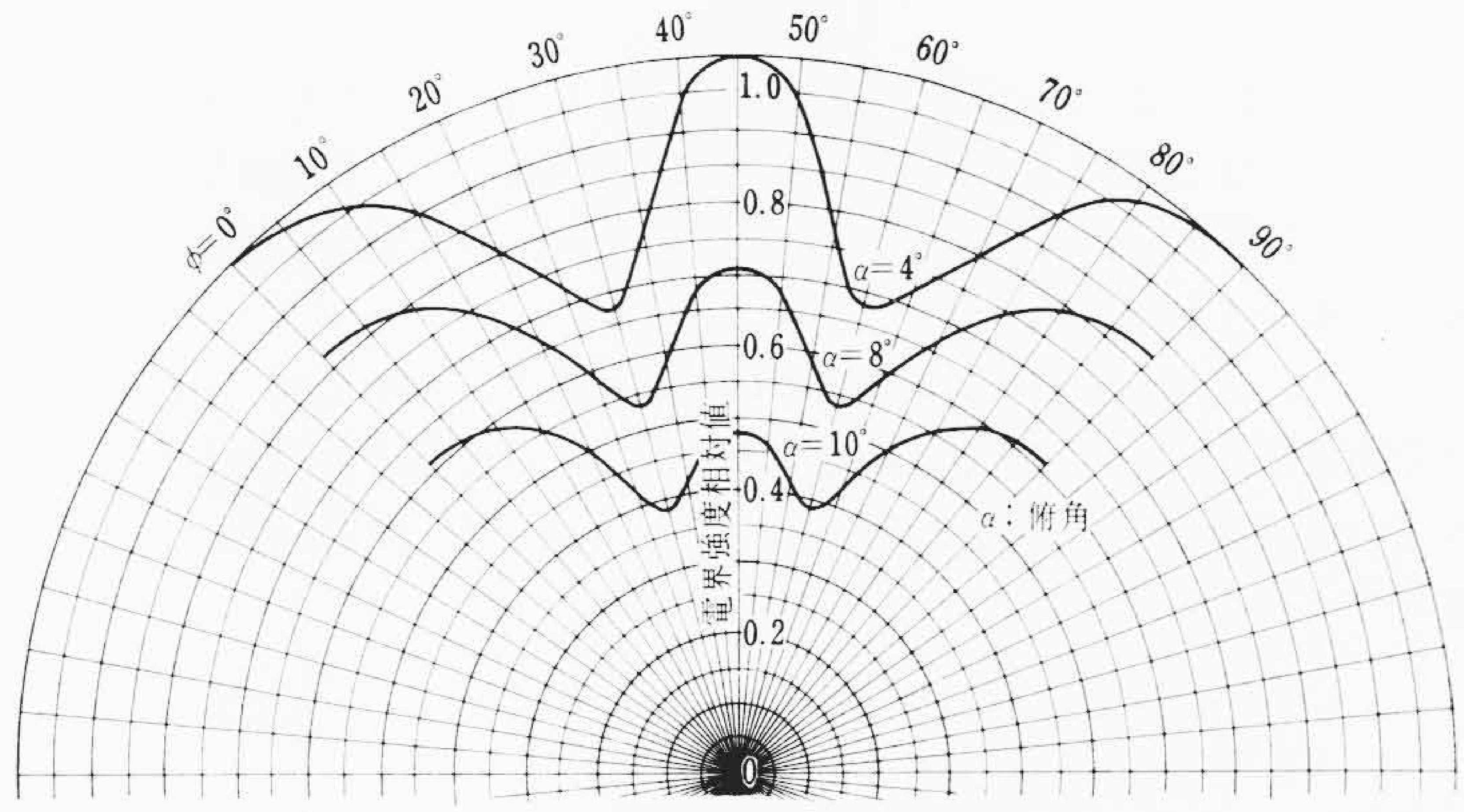
このように，メインローブ内の放射電界は，それぞれ ϕ および θ だけの関数の積として与えられると考えてよいから，普通の送信アンテナのように水平および垂直面の指向性を分離して考えることができる。



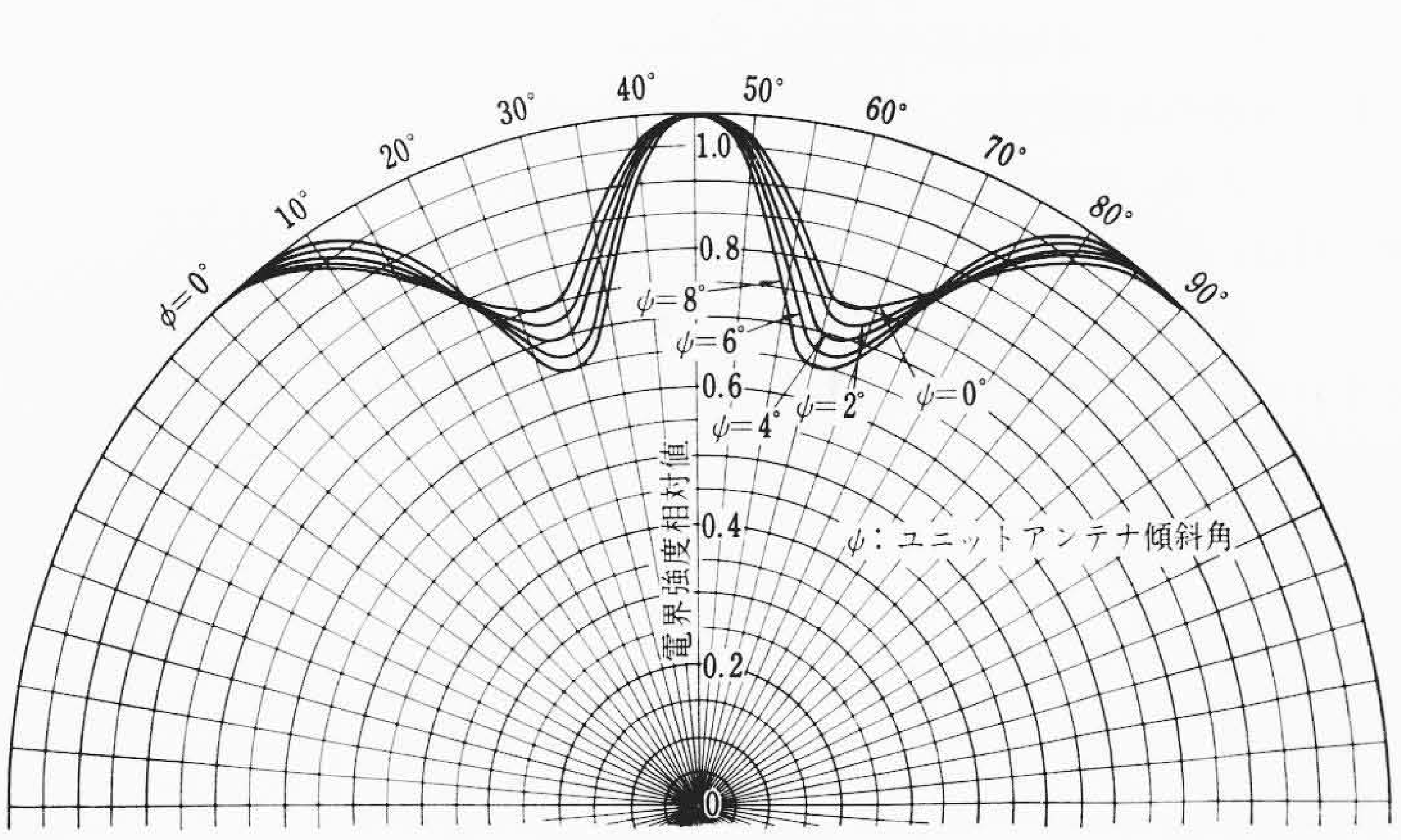
第6図　$n=m=1$ で ψ が変化した場合の 90° 2面配置の合成指向性（6素子）



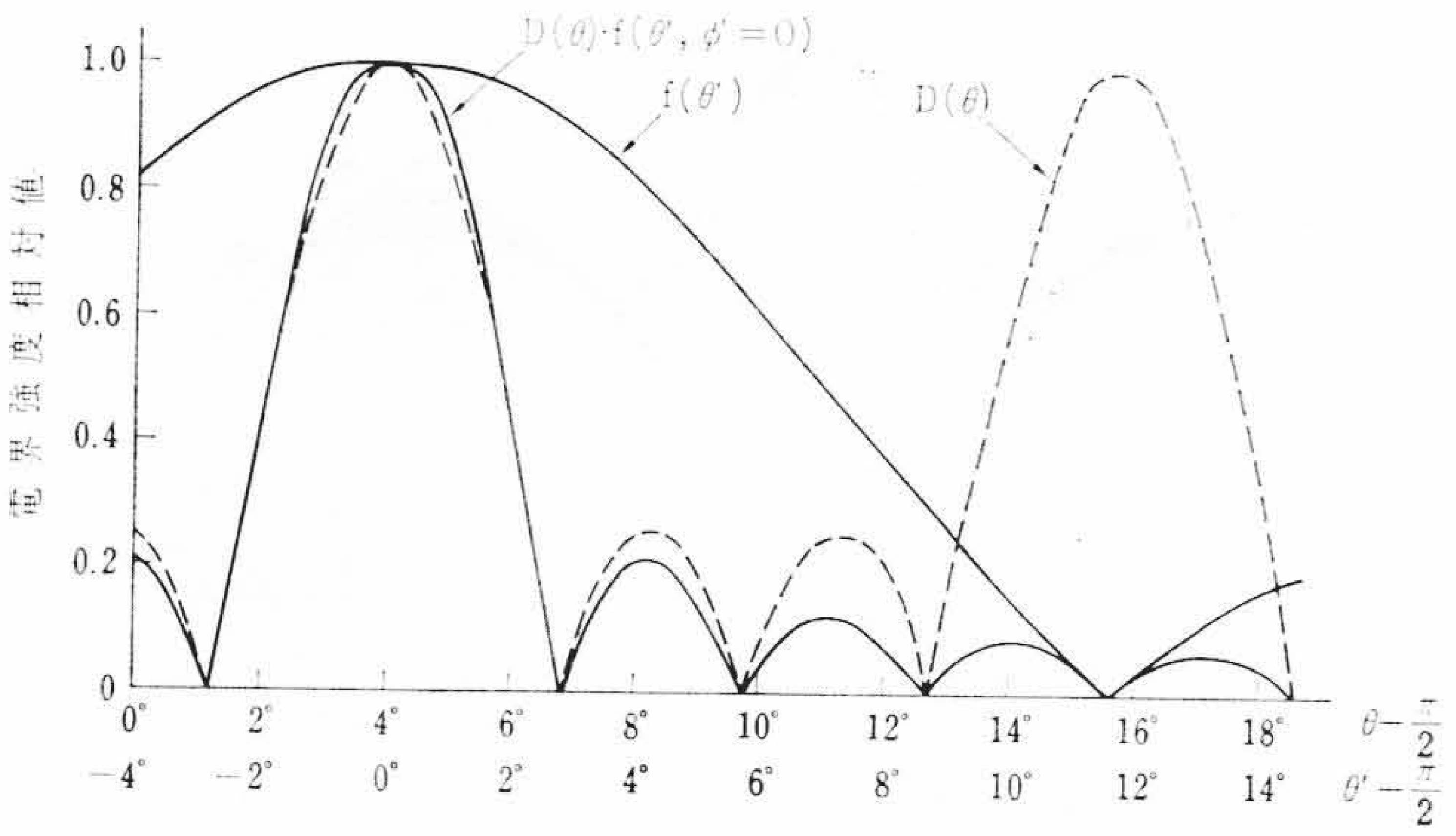
第7図　計算値と実測値の比較（6素子）



第8図　$n=m=1$，$\psi=4^\circ$ で $\alpha=\theta-\pi/2$ をパラメータにした場合の 90° 2面合成指向性（6素子）



第9図　$n=m=1$ で ψ が変化した場合の 90° 2面配置合成指向性（4素子）



第10図　6素子双ループアンテナについて $\phi=4°$, $n=4$ の場合の $D(\theta)$, $f(\theta', \phi'=0)$, $D(\theta)\cdot f(\theta', \phi'=0)$

9.　面ごとにスタック段数が異なる場合

最後に一般の場合を考えてみる。これは(24)および(27)の加算にほかならないが，この際，相互の位相関係に注意することが重要である。(27)の指数関数の肩に見られる $(2\pi/\lambda)\rho\sin\theta\cos(\phi_0-\phi)$ は二つのアンテナ列の水平面内の位置の相違によるものであり，$(2\pi/\lambda)h\cos\theta$ は高さの相違によるものである。このように，(24)，(27)の位相関係は θ により変化することがわかる。特に h に起因する位相差を打ち消すためには

$$\frac{1}{2}(n-1)\frac{2\pi}{\lambda}d_1\cos\theta=\frac{1}{2}(m-1)\frac{2\pi}{\lambda}d_2\cos\theta+\frac{2\pi}{\lambda}h\cos\theta \quad \cdots\cdots(30)$$

すなわち

$$h=\frac{1}{2}\{(n-1)d_1-(m-1)d_2\} \quad \cdots\cdots(31)$$

の関係があればよい。これは，二つのアンテナ列の中心をそろえることにほかならない。しかし，給電系や鉄塔構造などの実装的な問題からこれがむずかしい場合，h に起因して(24)，(27)間に位相差が現われることを考えておかなければならない。

つぎに，各ユニット・アンテナの給電位相について考える。これは分岐給電線の長さの選定に関係する。いま，(31)の関係が満足されているものとして，第2列を第1列よりも Ψ_0 だけ位相を進めて給電するためには

$$\frac{1}{2}(n-1)\delta_1+\Psi_0=\Psi_{12}+\frac{1}{2}(m-1)\delta_2 \quad \cdots\cdots(32)$$

すなわち

$$\Psi_{12}=\Psi_0+\frac{1}{2}(n-1)\delta_1-\frac{1}{2}(m-1)\delta_2 \quad \cdots(33)$$

とすればよい。(同相給電の場合は $\Psi_0=0$) すなわち，第1列の各段の給電位置は，最下段から上段に向かって，

$0,\ \delta_1,\ 2\delta_1,\ \cdots\cdots,\ (n-1)\delta_1$

第2列は，(33)に与えられた Ψ_{12} の値を用いて

$\Psi_{12},\ \Psi_{12}+\delta_2,\ \Psi_{12}+2\delta_2,\ \cdots\cdots,\ \Psi_{12}+(m-1)\delta_2$

とすればよく，また分岐給電線の長さは，上記の関係が満足されるように定めなければならない。

つぎに数値例をあげる。アンテナは6素子双ループアンテナとして，

$\phi_1=2°,\ n=4;\ \phi_2=4°,\ m=2$

とする。俯角 $\alpha=\theta-\pi/2$ をパラメータにとり，電界強度を計算したものが**第11図**右半分，また，左半分は参考のためチルトを行なわない場合の指向性を示した。このように，俯角により指向性が著しくかわることが理解される。

10.　ヌル・フィルインを行なう場合

第4章で述べた方法でヌル・フィルインを行なう場合，両面からの放射電界に φ による位相差が現われることに注意しなければならない。

10.1　スタック段数，間隔，およびチルト角が同一の場合

このときは

$m=n,\ d_1=d_2,\ \delta_1=\delta_2$, したがって $\Psi_1=\Psi_2;\ \varphi_1=\varphi_2$

となって，位相の差はなく，問題にはならない。

10.2　スタック段数，間隔が同一で，チルト角が異なる場合

このときは

$m=n=2p,\ d_1=d_2=d,\ \delta_1\fallingdotseq\delta_2$, したがって $\Psi_1\fallingdotseq\Psi_2;\ \varphi_1\fallingdotseq\varphi_2$

(20)から

$$\tan\varphi_1=\frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}}\tan\frac{1}{2}p\Psi_1 \quad \cdots\cdots(34)$$

$$\tan\varphi_2=\frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}}\tan\frac{1}{2}p\Psi_2 \quad \cdots\cdots(35)$$

また

$$\Psi_2-\Psi_1=\delta_2-\delta_1 \quad \cdots\cdots(36)$$

は明らかである。(36)の値は小さいから，Ψ_1 が $\pi/2$ の奇数倍の近傍を除けば

$$\varphi_2-\varphi_1=\frac{1}{2}p\frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}}\frac{\cos^2\varphi_1}{\cos^2\frac{1}{2}p\Psi_1}(\delta_2-\delta_1) \quad \cdots\cdots(37)$$

としてよい。メインローブの半値角以内では φ_1, $1/2\,p\Psi_1$ が小さいから，

$$\varphi_2-\varphi_1=\frac{1}{2}p\frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}}(\delta_2-\delta_1) \quad \cdots\cdots(38)$$

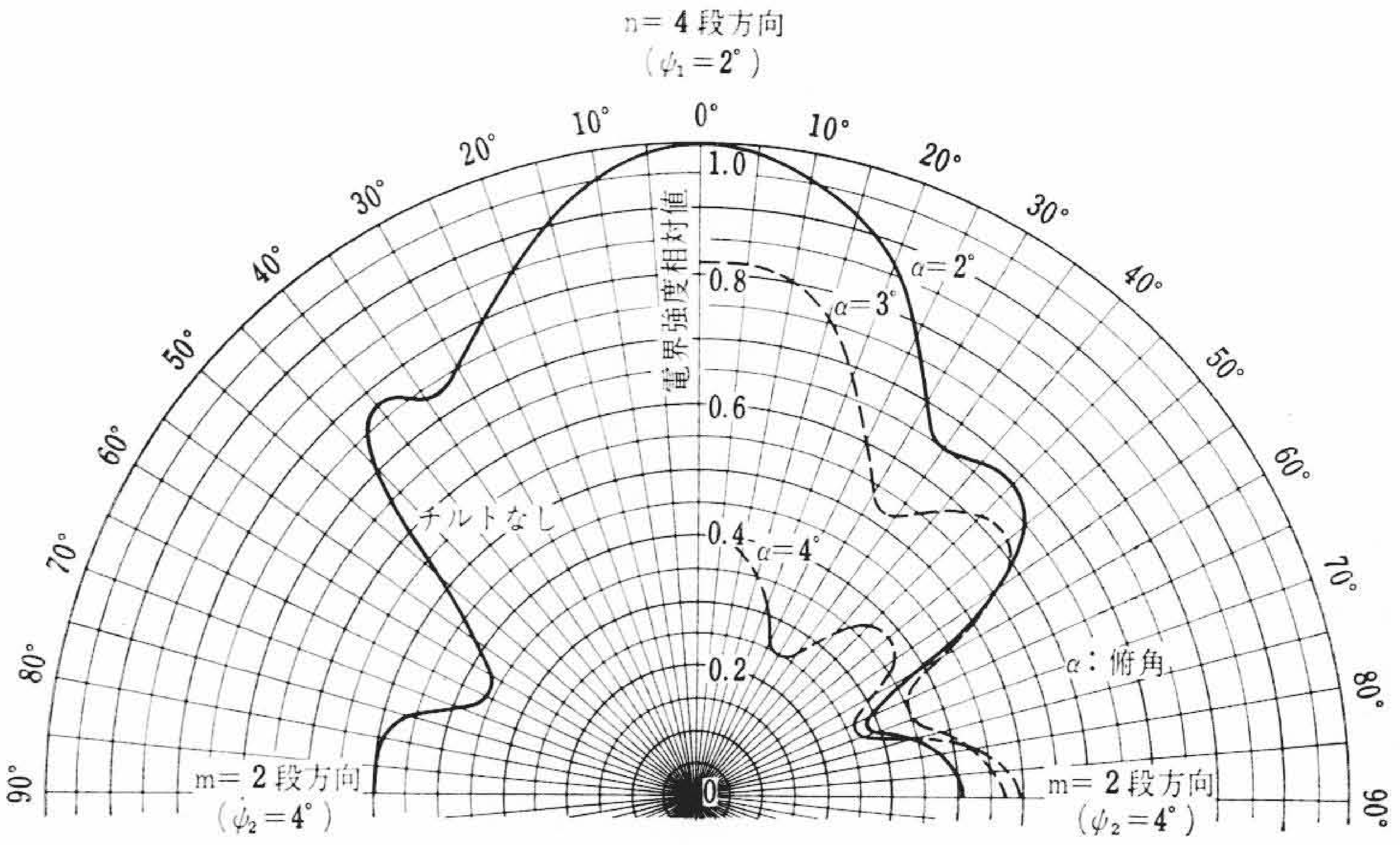
としてよい。

(38)の値は実際には小さいから，大きな問題になることはないが，分岐給電線の長さを適当に選択することによりこの効果を打ち消すことができる。

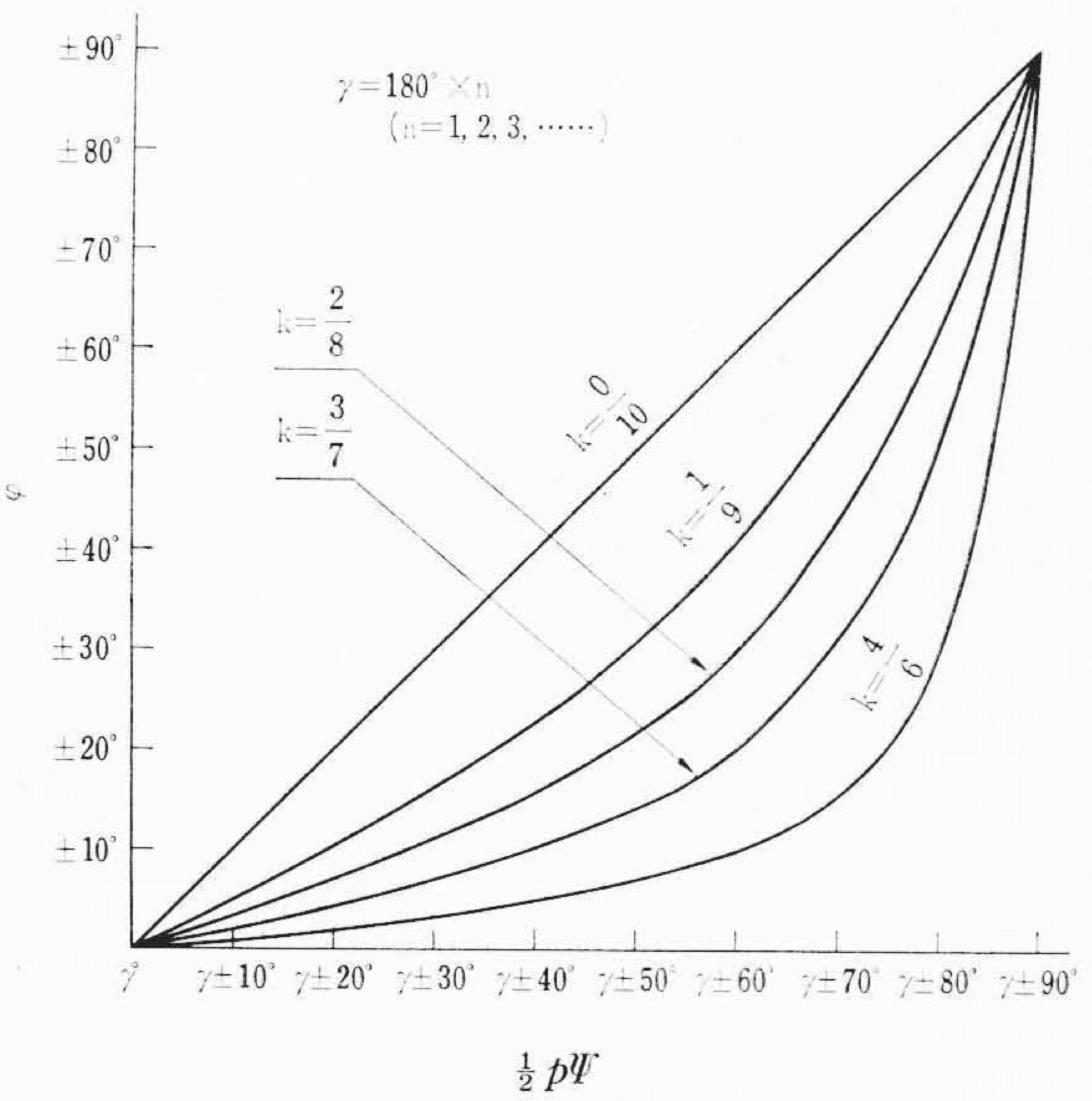
Ψ_1 が $\pi/2$ の奇数倍に近く，(37)の近似が不適当となる場合には，(34)，(35)の逆数について(37)の場合と同様の方法を適用すればよく，

$$\varphi_2-\varphi_1=\frac{1}{2}p\frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\frac{\sin^2\varphi_1}{\sin^2\frac{1}{2}p\Psi_1}(\delta_2-\delta_1) \quad \cdots\cdots(39)$$

となる。



第11図　$\phi_1=2°$, $n=4$, $\phi_2=4°$, $m=2$ で6素子双ループアンテナを90°2面配置した場合の合成指向性



第 12 図　ヌルフィルインのための電力分配によって生ずる位相量 φ と $1/2\,p\Psi$ の関係

10. 3　スタック段数，間隔，チルト角がいずれも異なる場合

このときは，Ψ_1, Ψ_2 が（したがって φ_1, φ_2 も）θ に対して非常に異なった変化をする。しかし，d_1, d_2 が自由に選択できる場合は

$$nd_1 = md_2 \quad \cdots\cdots(40)$$

が満足されるようにスタック間隔を選べば，Ψ_1, Ψ_2 の $\cos\theta$ の係数を等しくすることができるので，問題は簡単となり，前節の応用をほとんどそのまま利用することができる。しかしスタック間隔があまり大きくなるとサイドローブレベルが増加し利得低下をまねくおそれがあるので注意を要する。

(40)の関係をみたすことができない場合はめんどうになるが，メインローブの半値角の範囲内では

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} p_1 \frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \cos\theta + \delta_1 \right) \quad (n = 2p_1) \ldots (41)$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2} p_2 \frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cos\theta + \delta_2 \right) \quad (m = 2p_2) \ldots (42)$$

とおくことができる。したがって h を

$$h = \frac{1}{2} \{ (2p_1 - 1) d_1 - (2p_2 - 1) d_2 \} + \frac{1}{2} \frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}} (p_1 d_1 - p_2 d_2) \quad \cdots\cdots(43)$$

にとれば，2 面からの放射電界の位相差を打ち消すことができる。

さらに広い範囲の θ で考える場合には(20)（または(34), (35)）から求めなければならない。第 12 図は(20)の関係を k をパラメータとして図示したもので，この計算の労をはぶくことができる。

11.　結　　　言

以上，機械的にビームチルトをかけたアンテナの指向性につき検討を加えてきたが，その結論は次のように要約することができる。

（1）　直交座標系において，x および z 軸を，y 軸を回転軸として回転させた場合の座標変換公式を求め，これから傾斜したアンテナの指向性を導く方法を求めた。メインローブの範囲内ではこの計算は非常に簡単となる。

（2）　次に，傾斜したユニット・アンテナをスタックした場合の指向性を Array の理論から求め，さらにこれを 2 面合成した場合の合成指向性の計算式を求めた。

（3）　機械的にビームチルトをかける場合，各ユニット・アンテナは外部へ向かって突きでるので，鉄塔幅が増加したのとある程度等価となり，合成指向性の電界偏差は大きくなる。このとき，等価的な鉄塔幅はユニット・アンテナの中心部で考えればよい。

（4）　2 面合成において，面ごとにスタック段数が同一の場合には，問題は簡単となり，メインローブの範囲内では水平指向性を 2 次的に定義することができる。

（5）　面ごとにスタック段数が異なる場合は，指向性を立体的に考える必要があり，水平指向性を定義することが困難となる。また，このとき，各列の中心を合わせるように配置することが望ましい。これは，両面からの放射電界に位相差（これは俯角により変化する）が現われるのを避けるためである。また，分岐給電線の長さを合理的に決定する方法を求めることができた。

（6）　また，ここで，上下段の電力比をかえてヌル・フィルインを行なう場合は，両面の放射電界の間に複雑な位相差が現われる。これはスタック間隔を調整することによって回避することはできるが，サイドローブが大きくなる可能性がある。また，メインローブの半値角以内で考える場合は，これらの列の高さの相互関係を調節してこれを避けることもできる。

第 4～6 章で述べた Array の理論は必ずしも機械的にビームチルトをかけたアンテナに特有のものではなく，スタック段数，チルト角などが面ごとに異なるアンテナでは常に問題となるものである。しかし，このようなアンテナは過去においてあまり使用されず，最近のサテライト局のアンテナで機械的ビームチルト法とともにさかんに使用されるようになったもので，本稿の中で同時に議論することも意義あることと考える。

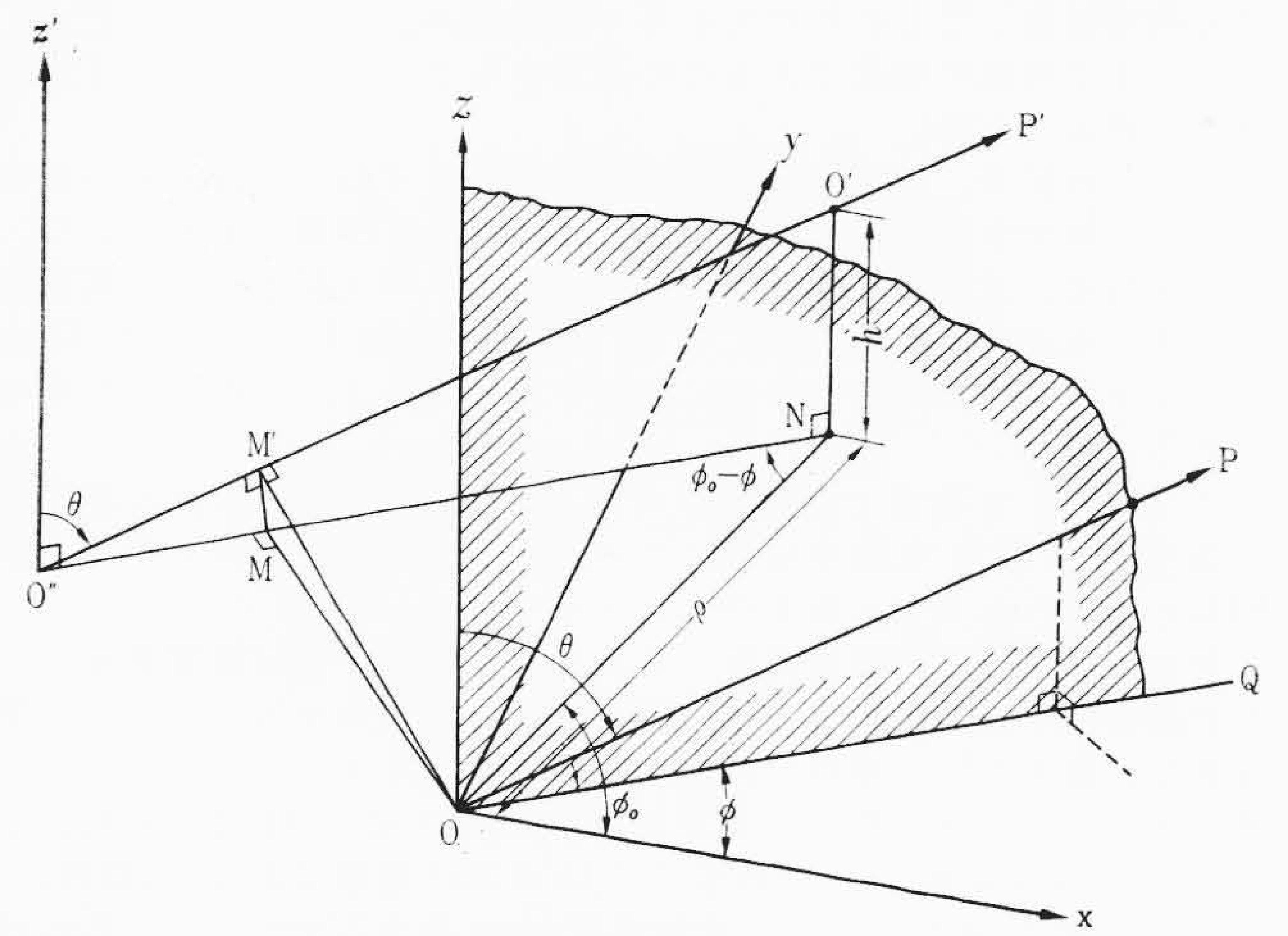
最後に，本研究に対しご指導，ご討論をいただいた NHK 技術研究所遠藤部長および遠藤(幸)主任研究員はじめ，空中線研究室の各位に厚くお礼申し上げる。

参　考　文　献

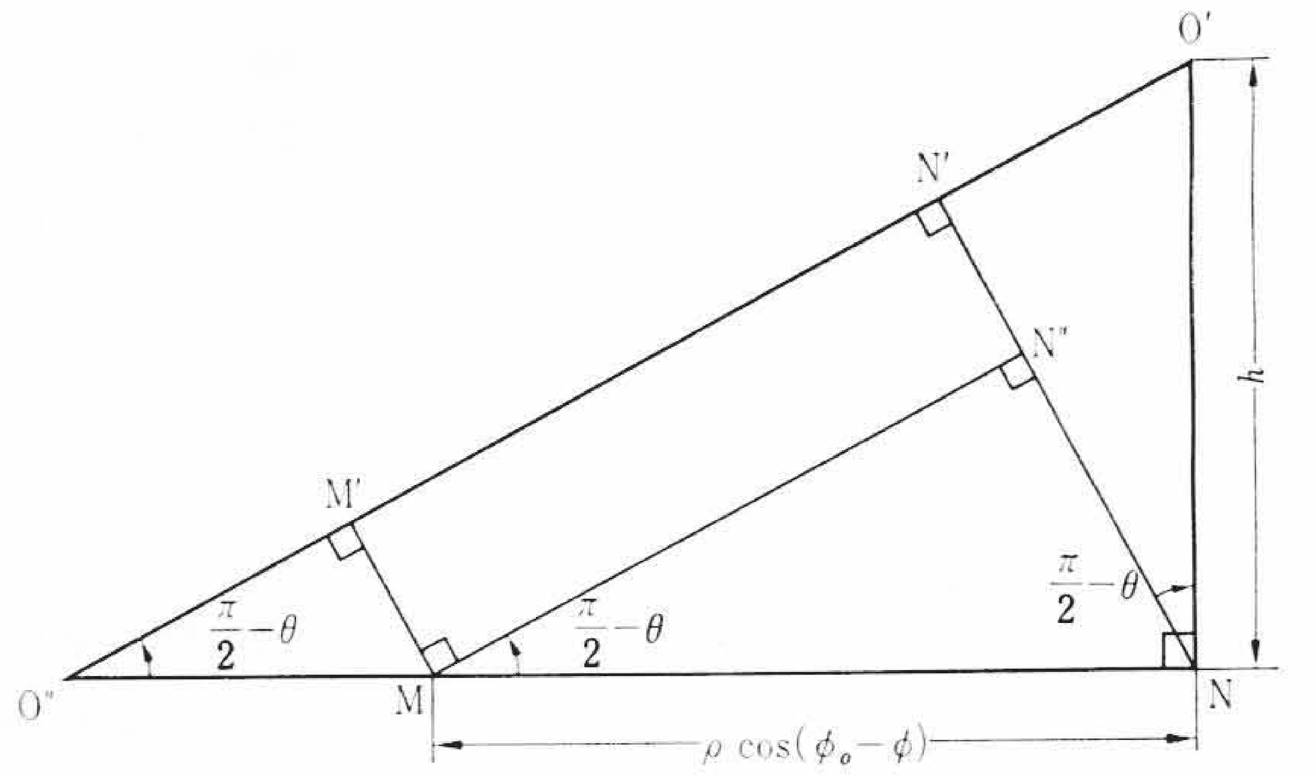
（1）　遠藤ほか：「双ループアンテナ」電気通信学会アンテナ研究会資料（昭 38-9）
（2）　遠藤ほか：「双ループアンテナ」 NHK 技術研究 16, 4, p-193～206（昭 39）
（3）　J. D. Kraus： Antennas, Mc Graw-Hill Book Co., （訳）谷村　功，近代科学社

付　　　録

第 A. 1 図の O, O′ は空間内の異なった 2 個の点波源である。x, y, z は O を原点とする直交座標系，r, θ, ϕ は O を原点，OZ を軸とする球面座標系である。いま，O, O′ から到達する波を十分遠方の点 P



第 A. 1 図　空間内の 2 点からの行程差



第A.2図　O′ M′ の 計 算

$(r=\infty,\theta,\phi)$ から観測するものとすれば O′P と OP とは平行と見なすことができる (Fraunhofer 領域)。O より O′P′ に垂線を下しその足を M′ とすれば O′M′ は O, O′ から P に到達する波の行程差である。次に，O を原点とし，OZ を軸とする円筒座標系を設け，O′ をこの座標で表示して (ρ,ϕ_0,h) を得たものとする。すなわち，O′ より xy 平面に垂線を下し，その足を N とすれば，

$$ON=\rho,\ \angle x\,ON=\phi_0,\ O'N=h$$

である。つぎに，O′M′ の延長と xy 平面との交点を O″ とし，さらに O から NO″ に垂線を下してその足を M とすれば，OM⊥NO″ は明らかである。また，

$$\angle MNO=\angle NOQ=\phi_0-\phi\ \ (\because OQ /\!/ O''N)$$

$$MN=\cos(\phi_0-\phi)ON=\cos\rho(\phi_0-\phi)\ \dots\dots\dots(A.1)$$

ここで，直角三角形 O′O″N を第A.2図のように書き直してみる。この図および (A.1) から明らかなとおり，求める量 O′M′ は次のようになる。

$$O'M'=M'N'+N'O'=\cos\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)MN+\sin\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)NO'$$

$$=\sin\theta\,MN+\cos\theta\,NO'=\sin\theta\cos\rho(\phi_0-\phi)$$
$$+h\cos\theta\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(A.2)$$

Vol. 47　日　立　評　論　No. 10

目　次

発行所　日立評論社　東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座　東京71824番
取次店　株式会社 オーム社書店　東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座　東京20018番

特 許 の 紹 介

特許 第427116号

橋本清隆・越前谷定義

集　塵　装　置

本発明は，電気集じん器のガス出口を，放電電極を有するサイクロンのガス入口に接続したことを特長とする集じん装置に関するものである。

カーボン粒子，酸化亜鉛粒子，ソーダ粒子などのように嵩密度が極めて小さい凝集体となる物質は，電気集じん器で捕集しようとしても帯電凝集したものの密度が高々0.0042のごとく極めて小さく，ガスとほぼ同様の密度であるため沈澱することなくガス中に浮遊し外部へ排出される。

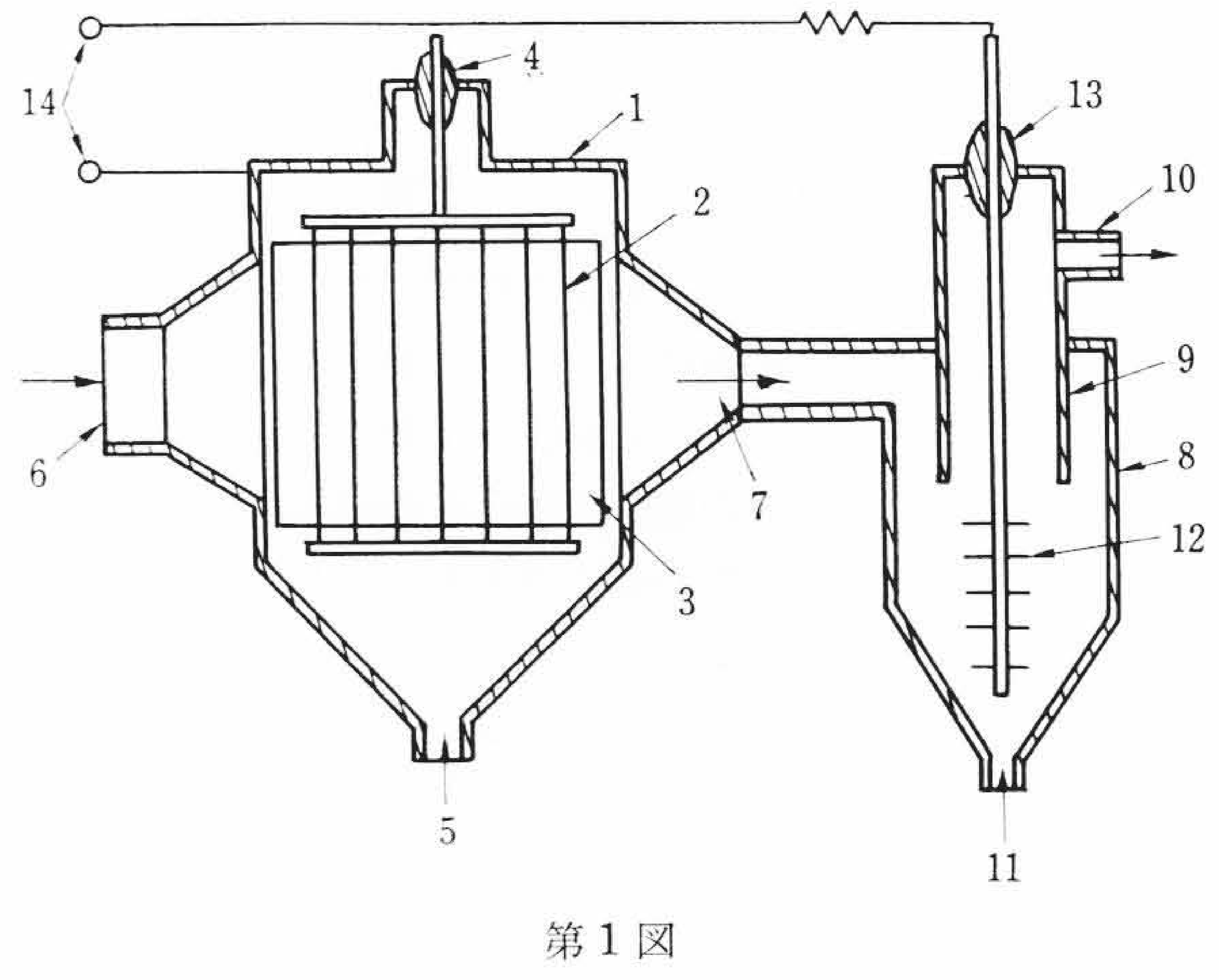
このため従来，カーボン，酸化亜鉛，ソーダなどの嵩密度の極めて小さい粒子を経済的に捕集することは極めて困難とされていた。

本発明は，上記従来困難視されていたカーボン粒子などの嵩密度の小さいものを，図に示すごとく，電気集じん器1と放電電極12を有するサイクロン8とを直列に接続することによって解決したものである。

すなわち，本発明は電気集じん器1で団子状に凝集された嵩密度の小さな凝集体を，さらに放電電極12を有するサイクロン8に送り，このサイクロンにて前記凝集体を器壁に圧着した状態で気流により転回し，造粒して嵩密度を高め，すなわちサイクロン8内に設けられた放電電極によるコロナ放電のイオン流圧力により凝集体をサイクロン8器壁に圧着した状態で気流により転回し，凝集体をガスより重い嵩密度の大きい粒子となさしめサイクロンによりじん塵するものである。

本発明装置を実験の結果，ガス速度 0.8 m/s において集じん率93%とすぐれた集じん率を得ることができた。

なお，図中，2は放電電極，3は集じん電極，4は放電電極2の支持碍管，5はじん粒排出口，6は集じんすべきガス入口，7は電気集じん器1のガス出口で，かつ後段のサイクロンへのガス入口，9はサイクロン8の脱じん気流筒，10はガス出口，11はじん粒排出口，13は放電電極12の支持碍子，14は高圧電源である。（郷古）



第1図