

Bi-static reflector用誘電体電波レンズ

OCHIAI, Noriomi / YAUCHI, Takamasa / 矢内, 崇雅 / 落合, 徳臣

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

7

(開始ページ / Start Page)

21

(終了ページ / End Page)

41

(発行年 / Year)

1970-07

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004235>

Bi-static reflector 用誘電体電波レンズ

教 授 落 合 徳 臣

大学院学生 矢 内 崇 雅

The Dielectric Electromagnetic Wave Lens for Bistatic Reflector

Noriomi OCHIAI, *Professor*

Takamasa YAUCHI, *Graduate student*

Abstract

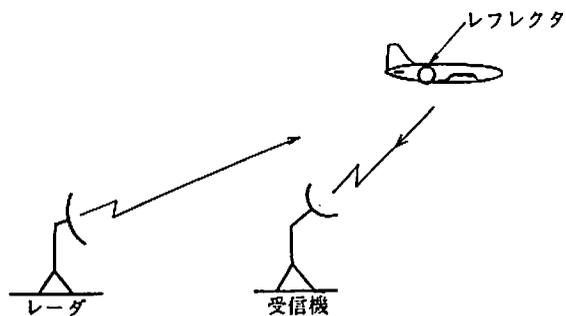
Some studies about bistatic radar reflector in three following cases are described in this paper,

- (1) A defocussed Luneberg lens reflector using standard Luneberg lens
- (2) A modified Luneberg lens reflector
- (3) A omnidirectional bistatic reflector using omnidirectional E.L.O lens

In cases (1) and (2), the similar results in its performance are obtained as that described in Stephen's paper concerning case (1). In case (3), it was ascertained that it is quite within the bounds of possibility to adapt the omnidirectional bistatic reflector in practical purposes.

1. 諸 言

マイクロ波レーダに対して物標からの電波反射強度を増大させるために radar reflector が使用される。普通使用されている reflector 即ち corner reflector, Luneberg lens reflector^{1), 2), 5)}等は平面波が入射すると入射方向に電波を返すような用法—monostatic—である。しかし用途によっては入射波の方向のみならず, ある角度範囲にわたって指定された減少率に従って反射波を分配するような用法—bistatic—もある。前者のものを monostatic reflector といい, 後者のものを bistatic reflector という。後者の実際的な利用面の一例は第1図に示されているように bistatic reflector を装備した小物標とレーダとを結ぶ方向よりはずれた方向からレーダ受信機のみで反射波を受けて



第 1 図

物標の運動諸元を測定する場合がある。この場合反射波を分配する範囲と減少率とを関係づけている式は次の通りである。

$$\sigma(\theta) = \sigma(0) e^{-2r\theta} \dots \dots \dots (1)$$

但し, θ : bistatic angle (立体角), $\sigma(0)$: 物標の monostatic 有効反射面積,
 r : 定数, $\sigma(\theta)$: bistatic angle θ のときの物標の有効反射面積

この(1)式は bistatic reflector を設計する際の要求条件式となる。

本研究においては次の3種類の球状誘電体電波レンズを使用し, bistatic reflector としての特性を与える方法について種々研究を行った。

- (1) 標準型 Luneberg lens
- (2) 変形型 Luneberg lens
- (3) 全方向性 ELO lens

外国においては Kay, Stephen^{2),3)}等が標準型 Luneberg lens を用いて bistatic reflector に関して研究発表しており, 米国においてはすでに実用化されている。しかし変形型 Luneberg lens を使用した bistatic reflector についてはまだ研究発表されていないようである。

変形型 Luneberg lens は一焦点を ∞ に他の一焦点をレンズの内部または外部にあるようにしたものであって, 球状誘電体電波レンズとしての解は Gutman その他が与えている^{1),4)}。例えばレンズ内部に一焦点をもった場合については Gutman が次式で屈折率を与えている。

$$n(r) = (1 + r_1^2 - r^2)^{1/2} / r_1, \quad 0 \leq r \leq 1 \dots \dots \dots (2)$$

但し, r_1 はレンズの中心から焦点までの距離をレンズ半径で規準化したもの
 r は中心からの距離をレンズ半径で規準化したもの

従って各層の誘電率は(2)式で与える屈折率の2乗をとればよい。

本研究においては上記の3種類の誘電体レンズを使用して bistatic reflector としての特性を附与するように研究を行い, その試作品について測定によりその結果を確かめるようにした。

それによると標準型 Luneberg lens と変形型 Luneberg lens を使用した bistatic reflector についてはいずれも, すでに米国で発表された標準型 Luneberg lens を使用した bistatic reflector と同程度の性能を発揮できることを確かめたのでここにその状況を発表することにする。

しかし標準型 Luneberg lens および変形型 Luneberg lens を用いたものでは有効範囲は精々立体角で140°以内である。本研究ではこのような欠点を除き1個で全方向性(立体角360°)の有効範囲を持つ bistatic reflector を得るために, 当研究室で開発した monostatic 用の全方向性 ELO レンズ⁵⁾を使用した bistatic reflector についても研究を行ったので, その研究結果⁷⁾についても発表する。いままで全方向性 bistatic reflector に関しては Richard Huynen⁶⁾が Eaton—Lippmann lens (EL lens) を使用することを提案したことがあるが, 後に述べるような理由によりこのままでは実用化は困難である。従って全方向性 bistatic reflector についてはまだ研究発表

されたものがない状況にあった。

2. 研究経過

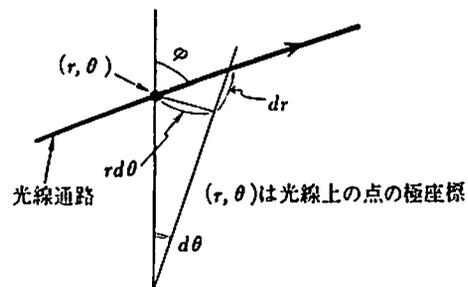
2.1 標準型 Luneberg lens を使用した bistatic reflector (defocused Luneberg lens reflector)

本研究において研究試作を行った bistatic 用球状誘電体電波レンズの3種類のうち defocused Luneberg lens reflector および変形型 Luneberg lens reflector はいずれも標準型 Luneberg lens を基礎として出発しているため、初めに標準型 Luneberg lens 自体の幾何光学的性質を簡単に記述する。

(a) 標準型 Luneberg lens

標準型 Luneberg lens は球状誘電体よりなるもので中心から半径方向への誘電率の分布はその中心からの距離 r のみの関数で表わされる。そのレンズとしての一焦点は ∞ であり、他の一焦点はレンズ表面上にあるような性質を持っている。即ちこのレンズに平面波が到来した場合（波源が ∞ の所にあることに相当）に直径的に反対側にあたるレンズ表面上の一点に（レンズ内では分布屈折率により楕円軌道を描いて）焦点を結ぶことになる。

このような性質を持つ誘電体電波レンズの誘電率の分布を表わす解は次のような Snell の法測の一般式から出発している。



第 2 図

$$n(r) \cdot r \cdot \sin \varphi = K \dots\dots\dots(3)$$

但し、 K は一つの特別な光線に対する定数、 φ は光線の正方向から r の増加する方向への角度

この式は第 2 図を参照して次の微分方程式と等価である。

$$\frac{n(r) \cdot r^2 \cdot d\theta/dr}{[1+(r \cdot d\theta/dr)]^{1/2}} = -K \dots\dots\dots(4)$$

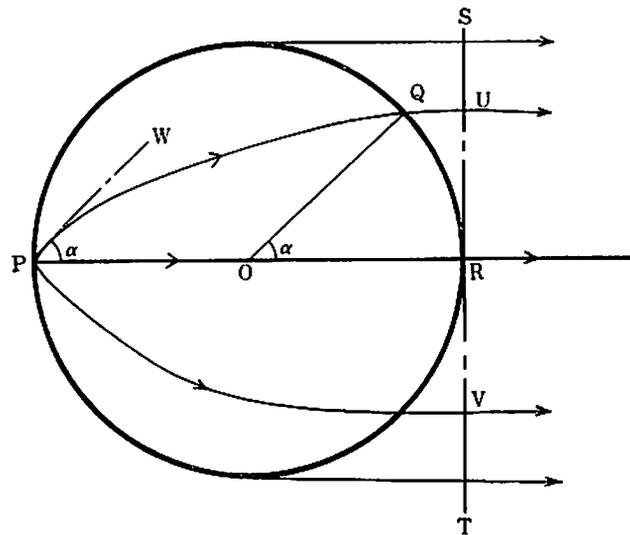
標準型 Luneberg lens の条件として一焦点は ∞ 、他の一焦点はレンズ表面上にある関係を用いて上式を解くと次のような簡単な関係式^{1),9)} が得られる。

$$\epsilon(r) = 2 - r^2 \dots\dots\dots(5)$$

但し、 r : レンズ中心からの距離をレンズ外径で規準化したもの

$\epsilon(r)$: r の点の誘電率で $n(r)$ の 2 乗

(5)式から標準型 Luneberg lens では外周では 1、中心では 2 なる誘電率を持ち、その間は 2 次曲線で表わされる誘電率分布をとることが分かる。この Luneberg lens の幾何光学的性質は次の

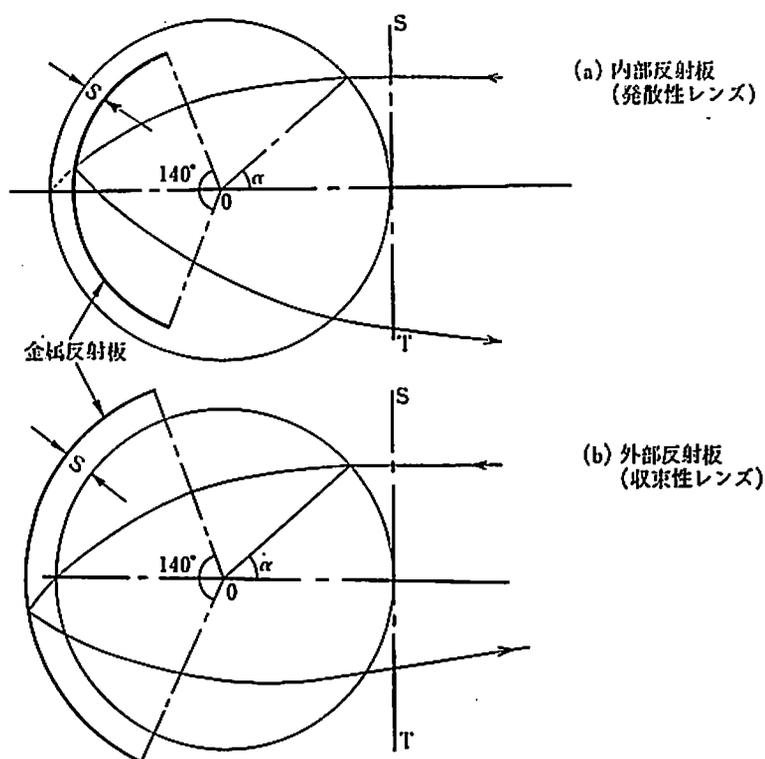


第 3 図

ように説明される。標準型 Luneberg lens への入射平面波はすべてレンズ表面上の一点に焦点を結ぶので、逆に焦点を結ぶ一点から電波を投射した場合には、電波がレンズ開口面をでるときその面上では同位相となる。第3図においてP点は焦点でここから投射された電波は楕円軌道を描いてレンズ内部を通過して開口面STにおいて同位相となる。PWはあるrayが点Pから投射されたときの投射角、Oをレンズ中心とすると角 α でPを出たrayはレンズを出るとき中心軸PRと平行となり、このとき $\angle QOR = \alpha$ となる。このことはすべてのrayについて成立する。すべてのrayが開口面STで同位相になることは、電気的通路長PU, PR, PVが等しいことを表わしている。従って、同位相をなすことは平面波であることと等価である。これが標準型 Luneberg lensの特徴である。従ってこの焦点を結ぶ面即ちレンズ表面に沿うてその面上に金属capを取り付けることによってレンズに入射した平面波をその入射方向に反射させることができる。これはcapを使用することにより広角度（通常立体角 140° 以内）にわたり有効である。このようにして使用されるのが従来ある monostatic 用の Luneberg lens reflector である。

(b) Defocused Luneberg lens reflector [外観第22図参照]

これは米国において研究開発されたもので、標準型 Luneberg lens を使用するが金属capを焦点面（レンズ表面）上におかずに、その内側または外側に移動させることによって off-focus の位置で電波を反射させて bistatic reflector として動作させるようにしたものである。従ってレンズ各部から入射した電波 (ray) は金属板で反射され、開口面STに戻ってくるまでの全電気的通路長は開口面の中心を通過するものを基準とした場合に、開口面の各点により差を生ずる（この電気的通路長に $2\pi/\lambda$ を乗ずれば位相差となる）。第4図は代表的なrayの軌跡を示している。ここで注意すべきことは前に述べた monostatic 用の Luneberg lens reflector の場合には開口面積はレンズの断面積に等しくとることができるが、defocused Luneberg lens reflector の場合には開口面積は若干相違してくる。内部に金属反射板を持つ場合にはレンズより出る反射波は発散性と



第 4 図

なるので有効開口面積はレンズ断面積より若干大となり，外部に金属反射板を持つ場合には収束性になるので有効開口面積はレンズ断面積より若干小となる。その程度は幾何光学的に ray path を検討して遠距離電界に主として影響を与えると考えられる範囲から求めるのがよいと思う。

有効開口面積における電界分布のうち振幅はほとんど一定と見なされる。また位相差の分布は幾何光学的に計算により求められ，しかもその分布に近似した2次曲線を求めることができる。従ってこの有効開口面積における電界分布から次式により2次放射パターンが求められる。

$$g(u) = K \int_0^1 J_0(ur) e^{j\beta r^2} dr \dots \dots \dots (6)$$

但し, $g(u)$: 遠距離の電界パターン (2次放射パターン) $u = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta$

β : 有効開口面積 (円) の中心を基準とした端における位相差

a : 有効開口面積 (円) の半径

θ : bistatic angle

K : 定数

$r = \frac{\rho}{a}$: 有効開口面積 (円) の中心からの距離を a について規準化したもの

ρ : 有効開口面積 (円) の中心からの距離

$J_0(ur)$: 第1種0階 Bessel 関数

この放射パターンが(1)式にあげた bistatic reflector としての要求条件を満足するように off-focus に必要とする間隔 S を決めればよい。

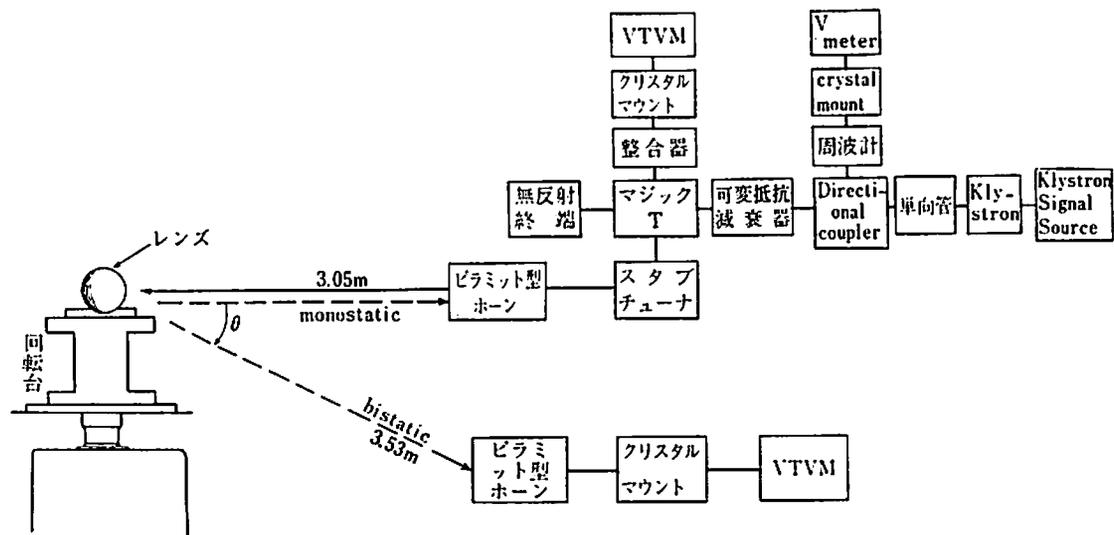
この研究では 7" ϕ の標準型 Luneberg lens を使用して bistatic 特性を附与するように考えた。(1)式にあげた要求条件として普通実用されている状況を考慮して $\gamma=0.58$ として上記のような計算に基づき off-focus の間隔 S を求めた結果、金属反射板をレンズ内部および外部に設けた場合ともに $S=8\text{mm}$ となった。従って測定によってその要求条件を満足できるか否かを検査するようにした。

(c) 試作した defocused Luneberg lens reflector の bistatic 特性

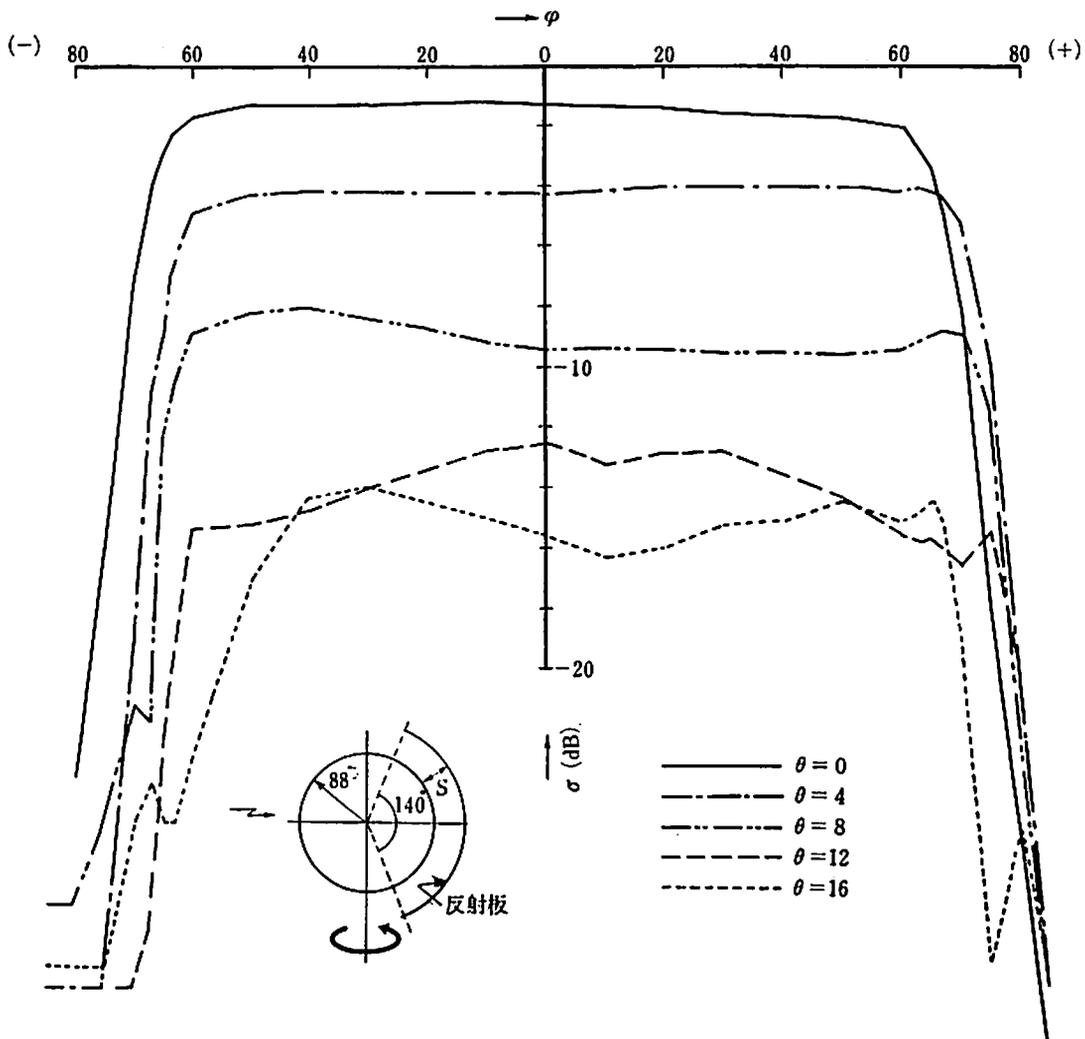
測定装置の配置要領を示すと第5図の通りである。実験は 7" ϕ のレンズを波長 3.2cm で測定した一例をあげることにする。第6図は bistatic angle θ を parameter としてレンズの水平面内での回転角 φ と有効反射面積 σ との関係を示す。第7図はこの測定結果を総合して bistatic angle θ と有効反射面積 $\sigma(\theta)$ との関係を示している。同図で実線で示してあるものは $\gamma=0.58$ にとった要求条件であって、実測値の最小値が概ねこの線より上にあることが要求されている。以上の測定結果を見ると米国で従来発表されているものに比較して同等以上のものであることがわかる。

2.2 変形型 Luneberg lens を使用した bistatic reflector (modified Luneberg lens reflector)

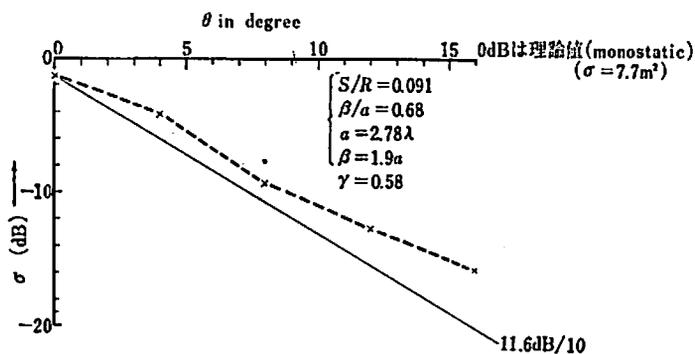
bistatic 用球状誘電体レンズレフレクタについての一連の研究において、この modified Luneberg lens reflector は当研究室で開発したもので諸外国においてはまだ研究発表されていない。従って本研究は bistatic lens reflector の開発を一步前進せしめたものとして価値があると思う。前に 2.1 (b) defocused Luneberg lens reflector のように金属反射板をレンズ表面より内側



第5図 測定装置の配置要領



第6図 7" ϕ defocused Luneberg lens reflector ($S=+8$)



第7図 7" ϕ defocused Luneberg lens reflector ($S=+8\text{mm}$) 反射板外部

またわ外側に移動させずに、レンズ表面上に設け、その代わりに誘電率の分布を変化することによって焦点面をレンズの内側またわ外側に作るようにして実質的には上記と同様の bistatic 特性を持たせ得る筈である。このとき焦点面と金属反射板(レンズ表面に密着)との間隔 S は 2.1 (b) の場合と同様に有効開口面上に、ある位相分布を持った電界分布を与え(但し振幅は殆んど一定

と見なせる), これによる遠距離における電界パターン ((6) 式による) が(1)式にあげた bistatic reflector としての要求条件を満足するようにすればよい。

焦点の位置を移動させるためには誘電率の分布を変化させることによって達成できる。即ち, (4)式の微分方程式を解く場合に, 例えば一焦点をレンズ表面上でなく, その内側に設けようとするときは, $r_0 < 1$ (r_0 はレンズの中心からの距離をレンズ外径で規準化したもの) とし, 他の一焦点は ∞ にあるとする条件を入れれば誘電率の分布を表わす解が得られる。レンズ内部に焦点面を持つようにした bistatic reflector は 2. 1 (b) の defocused Luneberg lens reflector のときレンズの外側に金属反射板を設け場合に対応して, レンズを出た反射波は収束性を示すことになる。なおレンズ内部に焦点を持つような球状誘電体電波レンズの誘電率分布は次式に示すような簡単な形となる。

$$n(r) = (1 + r_1^2 - r^2)^{1/2} / r_1 \dots \dots \dots (7)$$

但し, $n(r)$: r における屈折率

r_1 : 中心から焦点までの距離をレンズ外径で規準化したもの

r : 中心からの距離をレンズ外径で規準化したもの

この(7)式は Gutman の解⁽¹⁾といわれるものである。従って, 本研究においてはレンズ内側に焦点面を持った modified Luneberg lens を設計する場合には(7)式によりその誘電率の分布を計算した。なおこの際焦点面とレンズ表面との間隔 S を決める場合に, bistatic reflector としての要求条件は前と同様に $\gamma = 0.58$ とし, 試作するレンズ直径を前と同様に $7''$ としたので, $S = 8\text{mm}$ としてレンズの誘電率分布を計算した。

次にレンズの焦点面をレンズの外側に設けようとするときは, (4)式の微分方程式を解く場合に, $r_0 > 1$ とし, 他の一焦点は ∞ にあるとする条件を入れれば誘電率の分布を表わす解が得られる。このようにレンズ外側に焦点面を持つようにした bistatic reflector は 2. 1 (b) の defocused Luneberg lens reflector のとき内側に金属反射板を設けた場合に対応して, レンズを出た反射波は発散性を示すことになる。なおレンズ外部に焦点を持つような球状誘電体電波レンズの誘電率分布は次のような数値積分方程式を解いて求めることになる⁽¹⁾。

$$n(\rho) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_{\rho}^1 \frac{\sin^{-1}(K/S)}{(K^2 - \rho^2)^{1/2}} dK\right) \dots \dots \dots (8)$$

但し, $0 \leq \rho \leq 1$ $S \geq 1$

S : レンズの中心から焦点までの距離をレンズ外径で規準化したもの

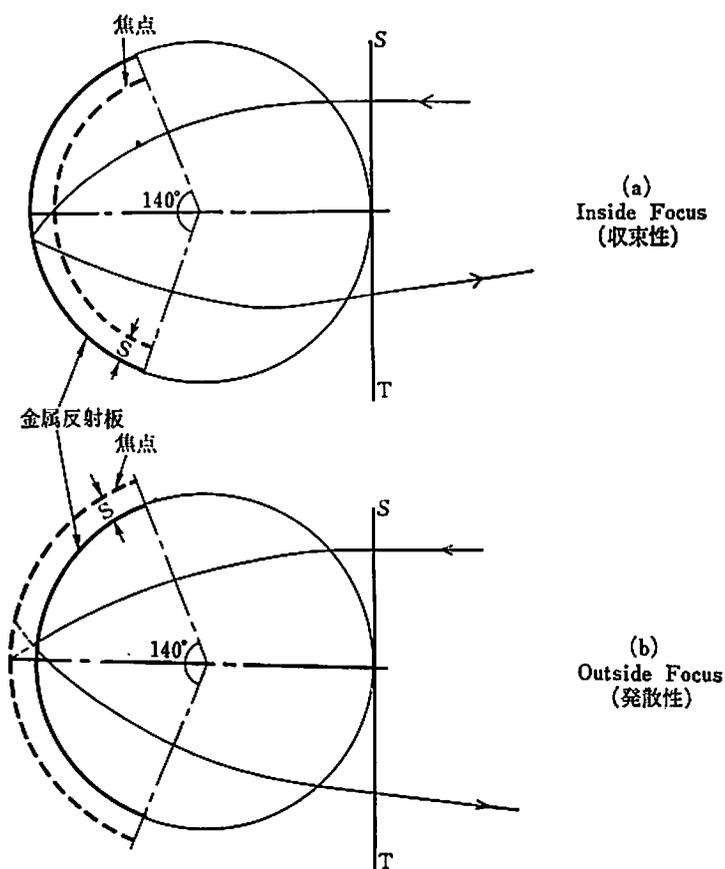
なおレンズの内部または外部に焦点を設けるように屈折率分配を求めた一例は, 第 1 表に示してある。ここでは $r_1 = 0.909$, $r_0 = S = 1.10$ にとった場合である。

modified Luneberg lens reflector において焦点面をレンズ内側またわ外側に設けた場合の代表的な ray の軌跡は第 8 図のようになる。

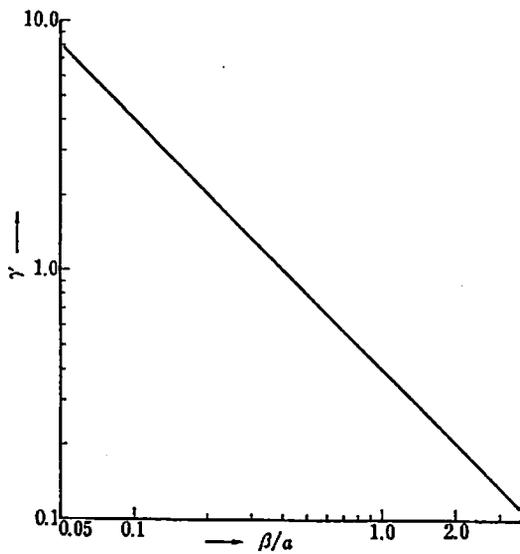
第 1 表

レンズ外径で標準化された レンズ中心からの距離 (r/R)	レンズ内部に焦点の ある場合の屈折率 (n)	レンズ外部に焦点の ある場合の屈折率 (n)
0	1.486	1.360
0.1	1.482	1.356
0.2	1.470	1.348
0.3	1.450	1.334
0.4	1.418	1.313
0.5	1.380	1.285
0.6	1.330	1.248
0.7	1.271	1.200
0.8	1.198	1.144
0.9	1.110	1.078
1.0	1.000	1.000

$r_1=0.909 \quad S=1.10$



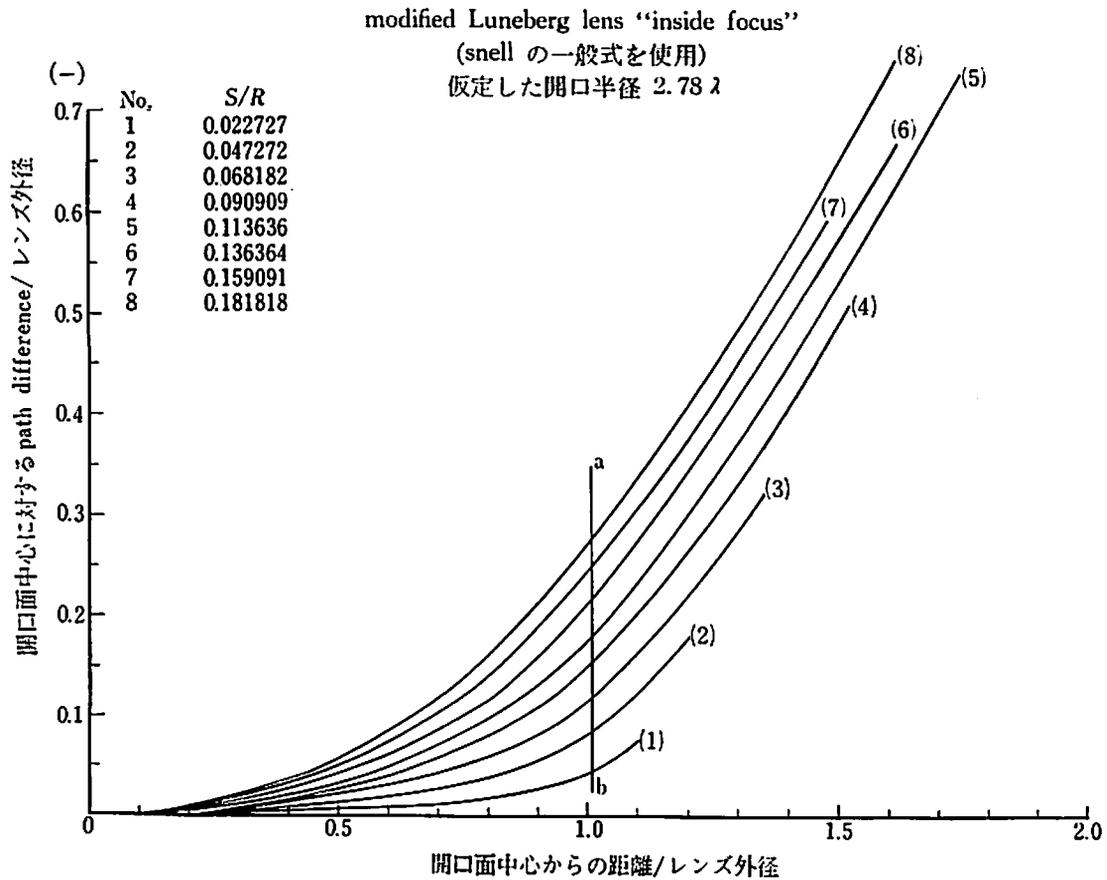
第 8 図



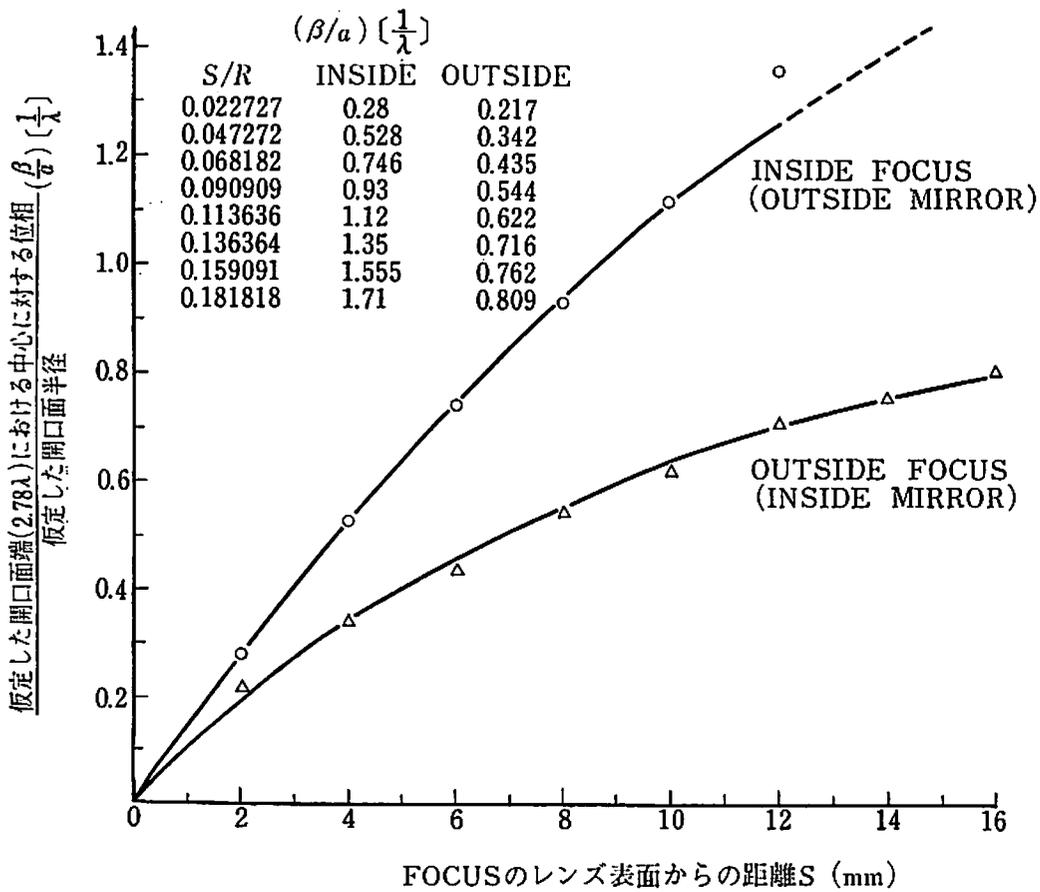
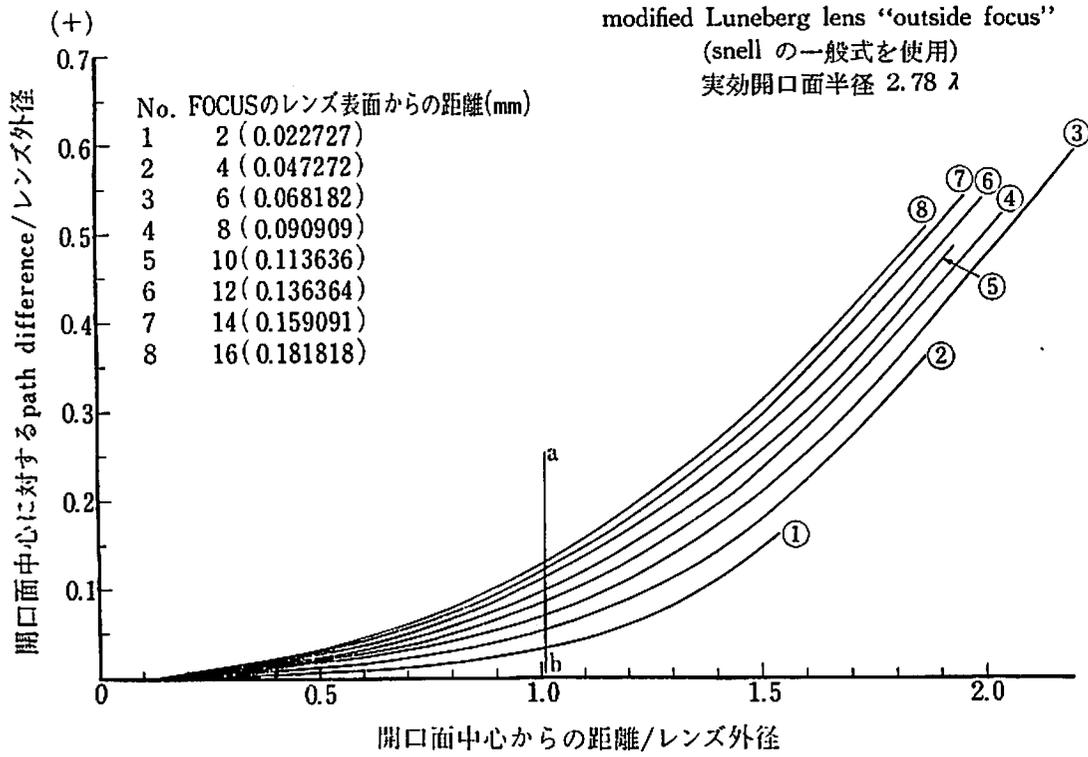
第 9 図

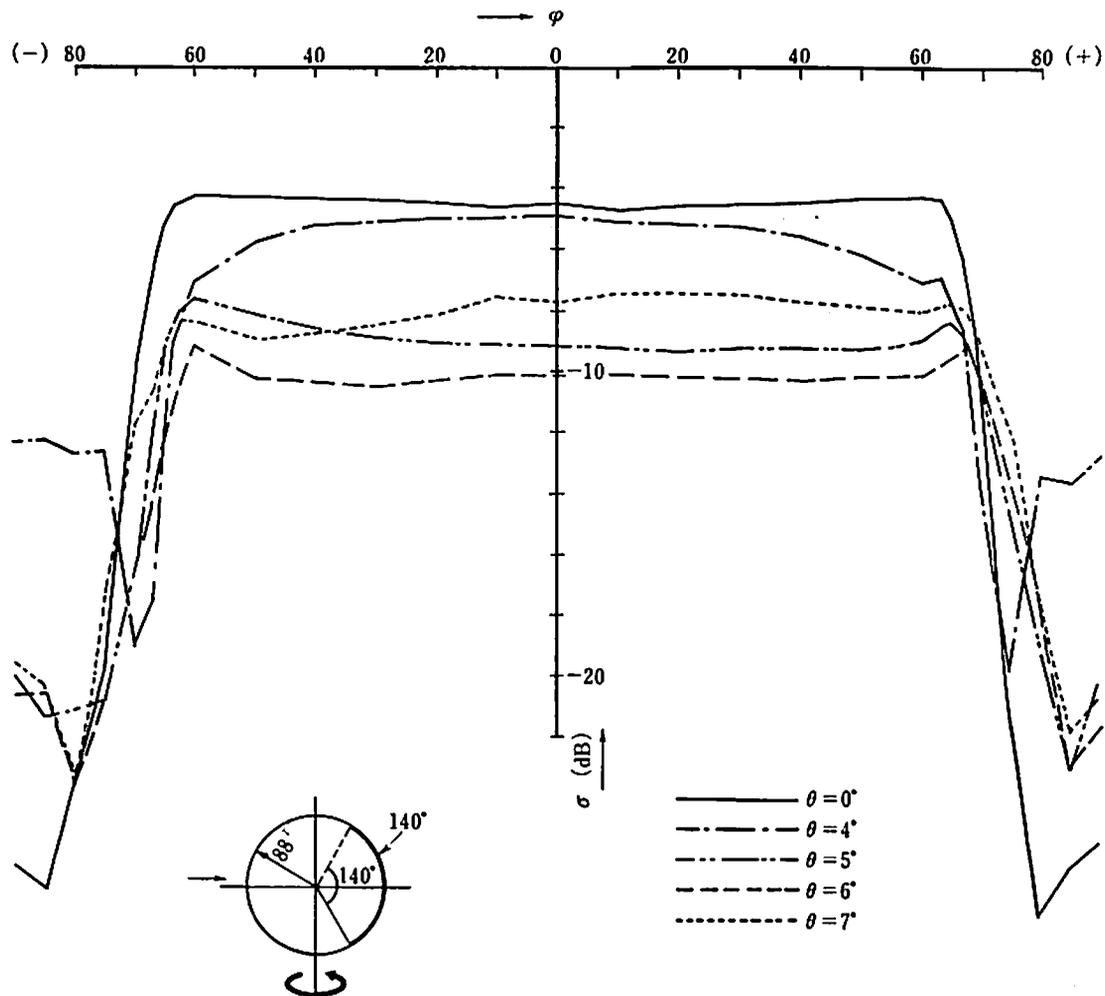
modified Luneberg lens reflector の場合には Stephen が defocused Luneberg lens reflector について行った方法と類似の方法でレンズ有効開口面における電界位相分布 (振幅は一定と見なせる) を求め、それより 2 次パターンを出し、それが bistatic reflector としての要求条件に合致するように S を決めればよい。ここでは bistatic reflector の要求条件にある γ の種々の値に対する電界位相分布 (β/a) の関係 (第 9 図)、開口面における通路差分と開口面中心からの距離の関係 (S/R をパラメータにとる) (第 10 図, 第 11 図)

ならびに β/a に対する焦点面とレンズ表面との間隔 S の関係 (第 12 図) について計算結果をあげる。なお開口面における電界の位相分布についての幾何光学的考察は附録にまとめてある。なおこの種の bistatic lens reflector は容積の増加を伴うこともなく、また機構が簡単などの利点がある。



第 10 図





第13図 7" ϕ Modified Luneberg lens ($r_0=0.909$) による bistatic 特性

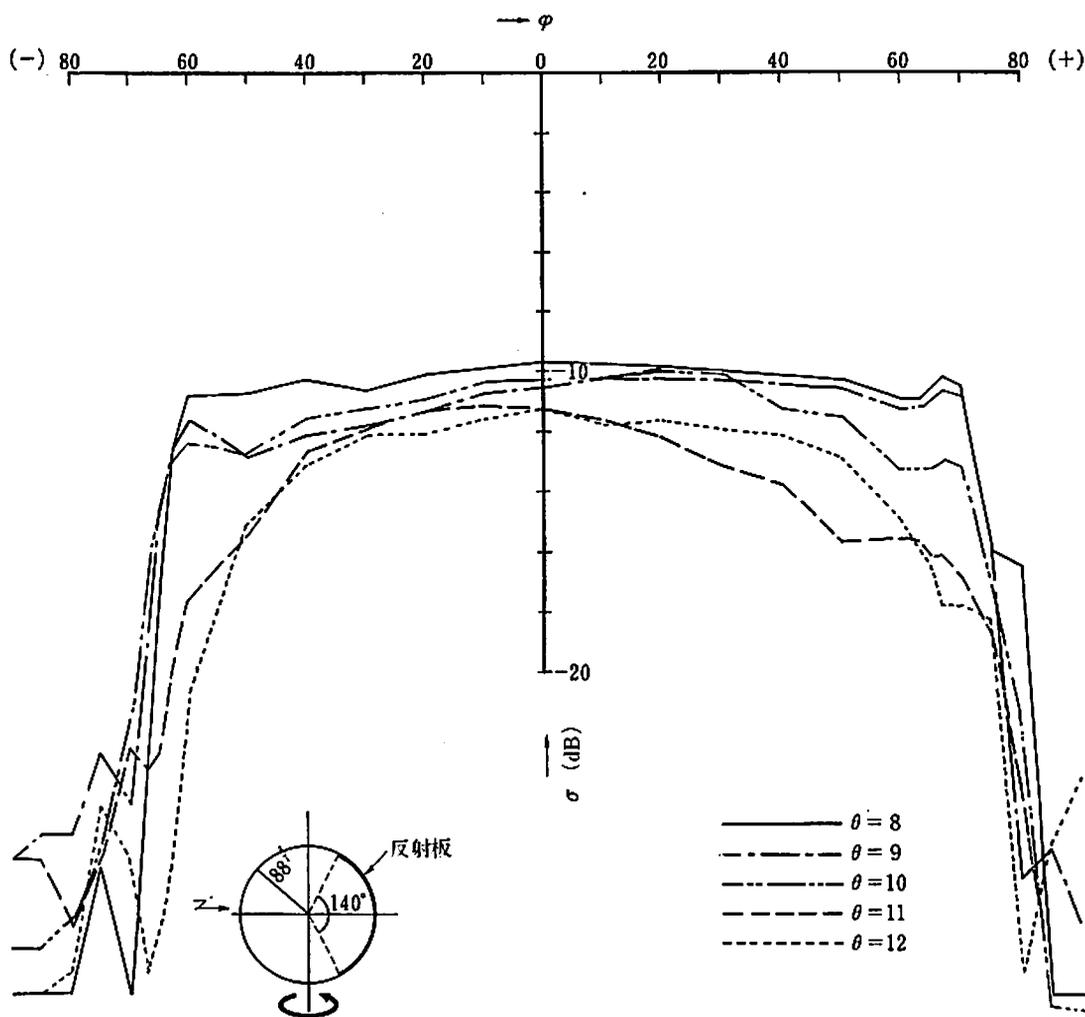
(b) 試作した modified Luneberg lens reflector の bistatic 特性 (外観第22図参照)

レンズ内部に焦点を持った 7" ϕ レンズ ($r_0=0.909$) の一例をあげることにする。測定装置並に測定波長等は 2.1 (c) の場合と同様である。第13図, 第14図は bistatic angle θ を parameter として, レンズの水平面内での回転角 ϕ と有効反射面積との関係を示す。第15図はこの測定結果を総合して bistatic angle θ と有効反射面積 $\sigma(\theta)$ との関係を示している。これらの結果は米国で発表されている defocused Luneberg lens reflector に比べて同等以上の性能を有していることがわかる。

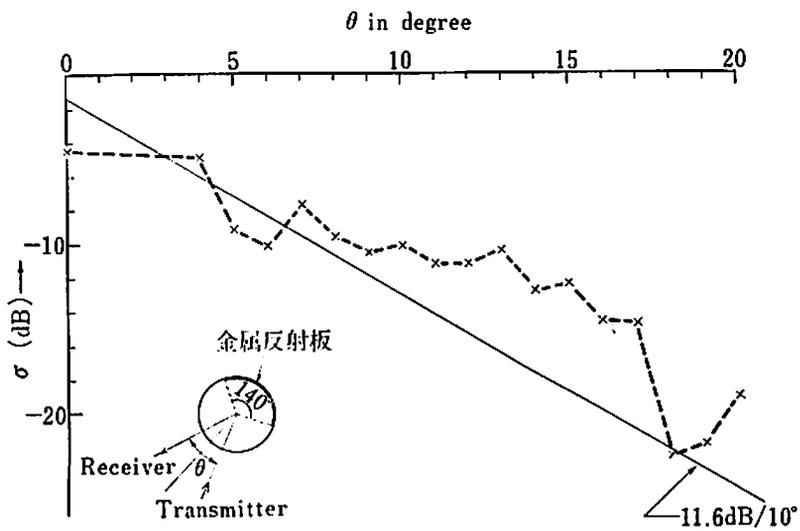
2.3 全方向性 ELO レンズによる bistatic reflector

(a) 全方向性 ELO レンズ

従来ある corner reflector や Luneberg lens reflector では Radar reflector として有効に作動するためには角度 (立体角) 範囲に制限がある。例えば最も広角度の有効範囲を持つとされている Luneberg lens reflector できえ金属反射板の存在によって精々 140° の立体角を持つに過ぎな



第14図 7" ϕ Modified Luneberg lens ($r_0=0.909$) による bistatic 特性



第15図 7" ϕ Modified Luneberg lens ($r_0=0.909$) による bistatic 特性

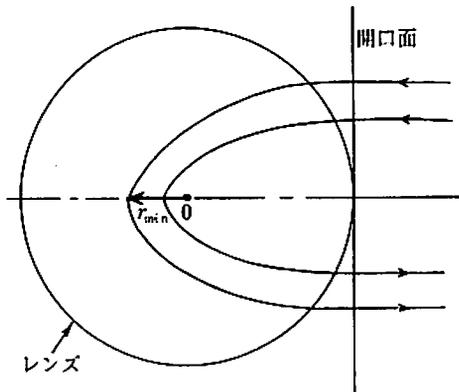
い。従って Radar reflector として全方向に作動させるためにはこれを数個組合せる必要がある。この欠点を除くために1個で全方向性の反射特性を持つような Radar reflector について諸外国でも研究は行われたがまだ実用性のあるものはできていない。

全方向性の反射特性を持つような球状誘電体電波レンズの誘電率分布を得るためには、標準型 Luneberg lens の解と同様に(4)式の微分方程式を解くことによって得られる。但し、この際一焦点は $+\infty$ 、他の一焦点も同じく $+\infty$ という条件を入れて解くとその解は非常に簡単な式となる。

$$n(r) = \left(\frac{2-r}{r} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

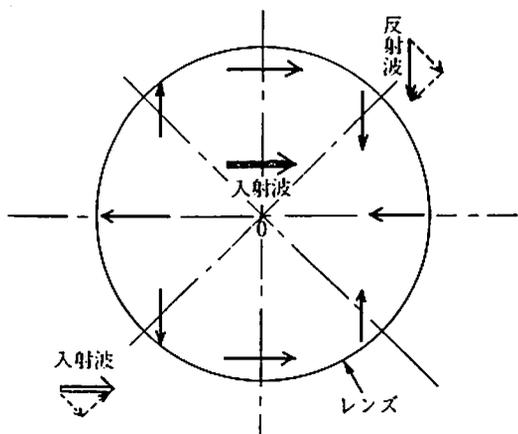
但し、 r : 中心からの距離をレンズ外径で規準化したもの
 $n(r)$: r の点における屈折率

このような式で表わされた誘電率分布を持つ全方向性球状誘電体電波レンズを Eaton—Lippmann lens (以下 EL レンズと仮称する) という。この EL lens の電波軌跡を第16図に示す。なるほどこの EL lens では従来のもののように金属反射板を使用することなしに、図に示すように入射した ray をレンズ内で楕円軌道を描かせて、入射方向にまた戻すようになっているので



第 16 図

全方向性の Radar reflector として動作するようになるが、よく検討して見ると第17図に示すように、入射波は例えば水平偏波であっても、レンズより出てくる波の電界は中心軸0に対する方向により異なり、方向が360°変わることにより、電界ベクトルは丁度2回転した形になっているので、中心軸上にあける遠距離の電界ベクトルの総和は零となる。従って EL lens のままでは monostatic 用の radar reflector としての実用性が乏しく現在は諸外国とも研究が中絶している状態である。



第 17 図

また EL lens は bistatic radar reflector として使用できはしないかという提案が R. Huynen によってなされた⁸⁾。なるほど EL lens は中心軸上では電界ベクトルの総和は零となるが、中心軸上よりはずれた所では電界成分が残ることが推定される。しかし第18図に示すようにレンズから出てくる電波の電界ベクトルを考えると、その合成偏波方向は、観測点を0軸を軸として回転するにともない回転することがわかる。そして受信合成電界ベクトルの方向は

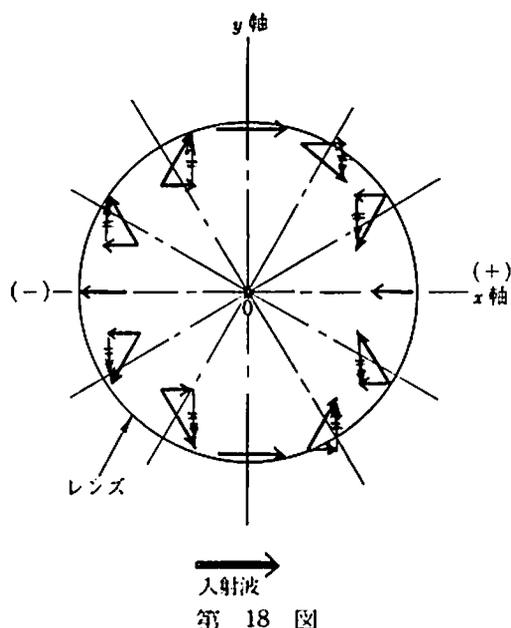
観測点とレンズ中心を含む平面における反射波の方向と一致する。例えば観測点を軸上 (+) 側にとると水平偏波 (入射波と同じ) が得られる。第18図において垂直偏波成分 (y 軸と同じ方向) は打ち消し合っただけで零になることがわかる。このことは観測点がいかなる位置においても成り立つ。従って EL lens は bistatic reflector としても実用面に乏しいことが本研究により認められた。

しかし第17図または第18図を検討してみると、電波の通過する中心を含む大円断面円の r_{min} (第16図参照) の点において、その接平面に平行な偏波成分のみが、その点を通過するとき 180° の位相変化を受けるように何等かの処理を講ずることができれば、レンズより出てくる波の偏波を入射波の偏波とすべて一致させることができる筈である。当研究室では EL lens を形成している誘電体層の間に同心球状に特殊の半導電性皮膜を数多く設けることにより上記のようなことが可能になった。このレンズを仮りに ELO lens と呼んでいる。この ELO lens よりでるすべての反射波電界ベクトルは第19図に示すように入射波電界ベクトルの偏波方向と一致する。現在 ELO lens に使用している皮膜が理想的に作動しているか否かを検討し易いようにレンズ中心部に

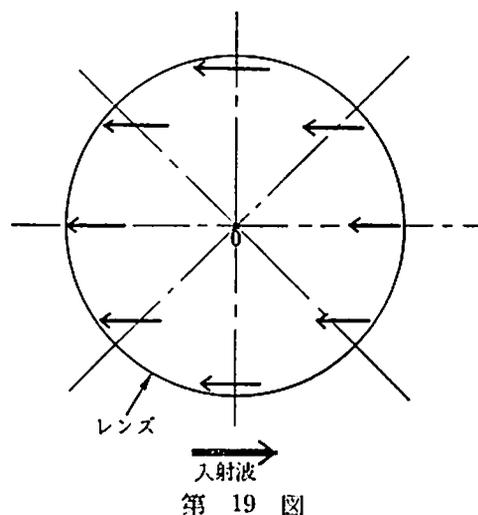
レンズとして作動しない中空部が設けてある。5" ϕ の ELO レンズでは $r=14\text{mm}$ まで中空にしてあるので、これによる有効反射面積の理論的低下は 4.3 dB となる (無損失とした理想的な状態のときの有効反射面積を 0 dB とする)。この ELO lens の monostatic 特性についての測定結果は非常に良い性能を示しており、 360° の範囲において $-5.4 \pm 0.5 \text{ dB}$ であった⁹⁾。

(b) 全方向性 ELO レンズの bistatic 特性

なお ELO レンズを bistatic 用として開発するためにはレンズ球の誘電率分布を変化させて、開口面で所要の電界位相分布を与えるようにすることが必要である。しかし全方向性の bistatic reflector としては現在皆無の状況にあるので、とりあえず monostatic reflector 用として研究中の ELO lens (5" ϕ , $r=14\text{mm}$ までが中空でレンズとして作動しない) を使用し、bistatic の特性を付与できるか否かを検討することにした (ELO lens の外観第22図参照)。

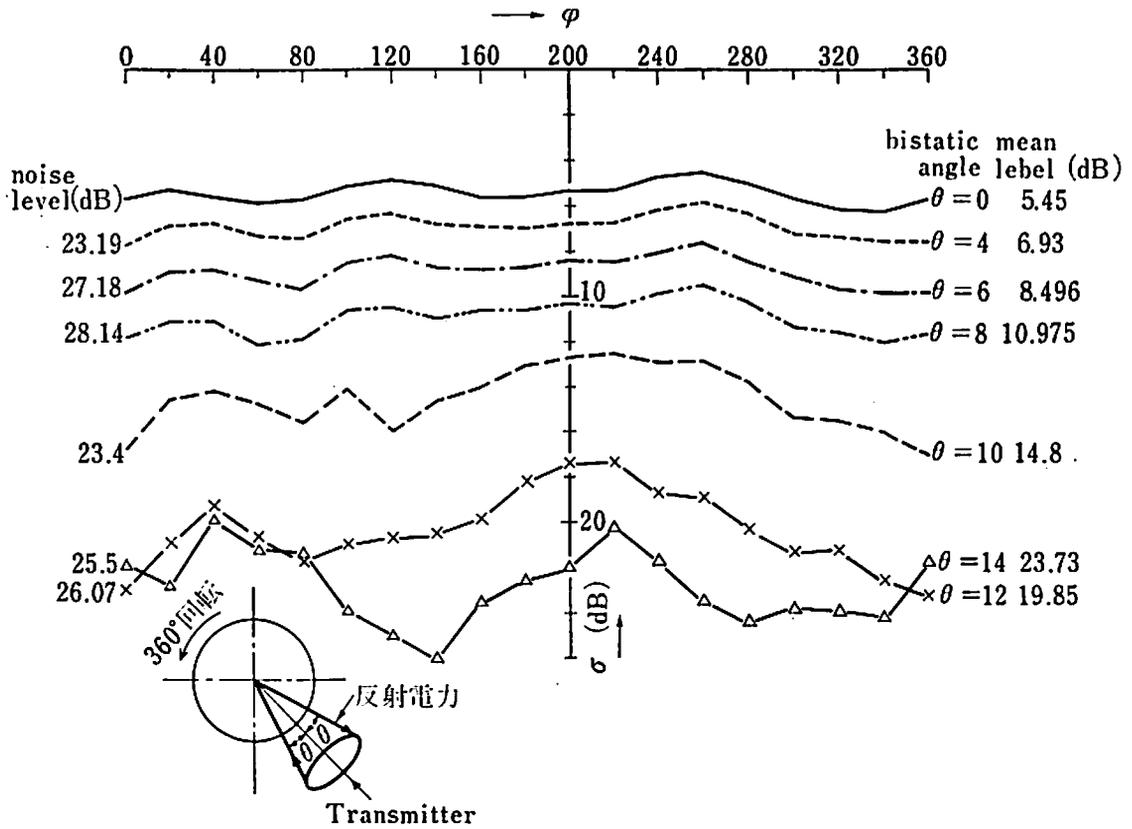


第 18 図

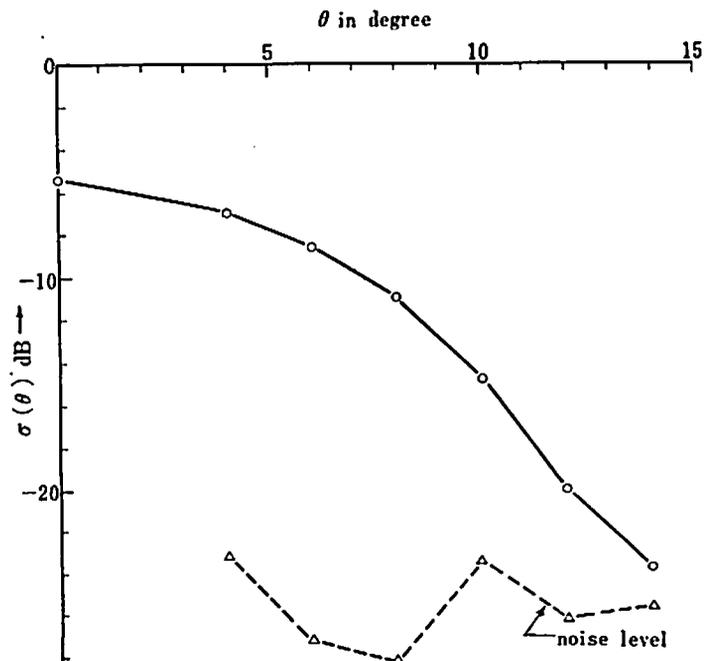


第 19 図

使用周波数は 9375MC ($\lambda=3.2\text{cm}$) の垂直偏波で実験を行った。第20図, 第21図はこの ELO レンズの bistatic 性能試験結果を示している。第20図から bistatic angle θ が 10° 程度までは同じような特性を示しており, 全方向にわたって比較的均一に反射していることが分かる。 $\theta=$



第20図 ELO lens の bistatic 特性 5" ϕ , 垂直偏波



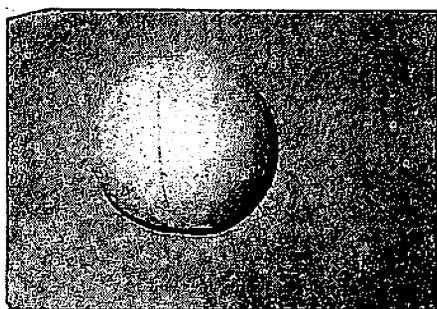
第21図 ELO lens の bistatic 特性 5" ϕ , 垂直偏波

12°, 14°のグラフに比較的凹凸がみられるのはレンズの大きさが 5" ϕ のため反射波の電力レベルが小さく周囲からのノイズによる影響がでてくるために起ると思われる。また受信した電界ベクトルの偏波は常に送信した電界ベクトルと一致していることを確めた。なお $\theta=0$ のとき受信レベルの低下しているのはレンズとして作動しない中空部が設けてあるためである (-5.4 dB に相当)。

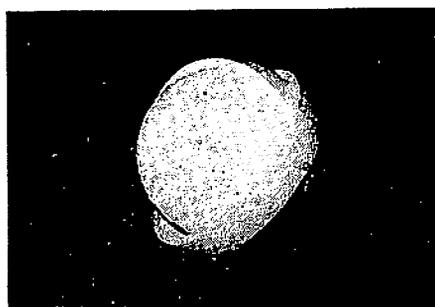
これらの結果から ELO レンズは全方向性 bistatic reflector として有望であり、その方面における応用も可能であることがわかった。

3. 結 言

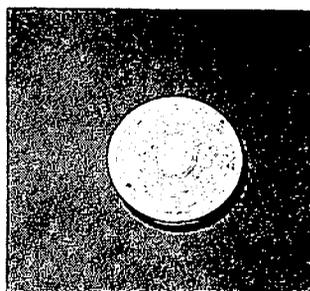
Luneberg lens 並びにその変形型を使用して設計した bistatic reflector は充分実用化し得る結論を得ている。又本研究により全方向性レンズとして ELO レンズを使用すれば全方向性の bistatic reflector が実現し得る見通しが得られたと思う。今後の研究課題は ELO レンズの中空部の縮小と使用条件の要求に応じた bistatic reflector を得るために ELO レンズの誘電率の分布をいかに修正するかということである。



(a) defocused Luneberg lens reflector, 7" ϕ
(金属反射板外側付き)
S=8mm



(b) modified Luneberg lens reflector, 7" ϕ
(焦点面内側, $r_0=0.909$)
分解図



(c) ELO lens, 5" ϕ
断面

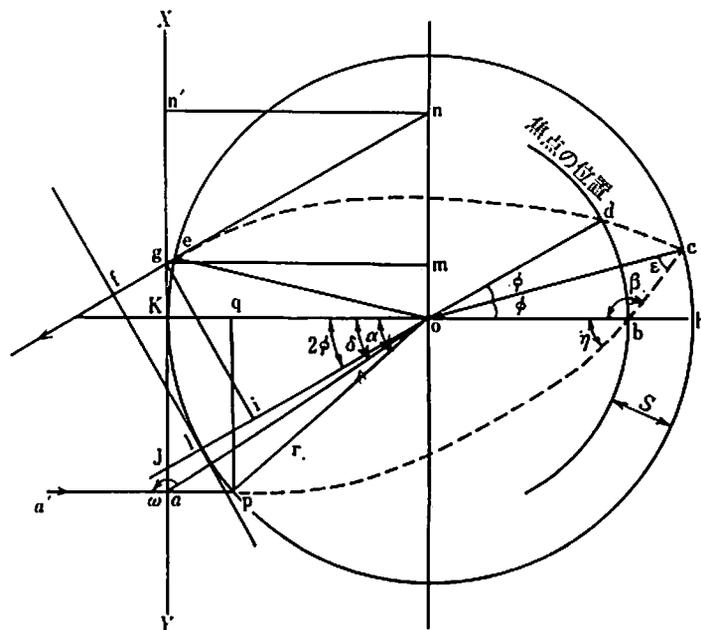
参 考 文 献

- 1) S. P. MORGAN: "General Solution of the Luneberg Lens Problem", JAP, Sept., 1958
- 2) A. F. KAY: "Spherically Symmetric Lens", IRE, Trans on Antennas and Propagation. Jan., 1959
- 3) STEPHEN: "The Luneberg Reflector for Bistatic Radar Enhancement", Ohio University Report 768-8, Aug., 1959
- 4) D. K. CHENG: "Modified Luneberg Lens for Defocussed Source", IRE, Trans on Antennas and Propagation. Jan., 1960
- 5) 落合他: "ルーネベルグレンズの試作並びにその応用について", 電通学会, 航空エレクトロニクス研究会資料, 7月, 1962
- 6) 落合, 古田島: "全方向性球状誘電体電波レンズレフレクタ", 電通学会全国大会, 9月, 1969
- 7) 落合, 矢内: "Bistatic Reflector 用誘電体電波レンズ", 電通学会全国大会, 9月, 1969
- 8) Richard HUYNEN: "Theory and Design of a Class of Luneberg Lenses", Lockheed M. S. D.
- 9) 落合: "新方式の球状誘電体電波レンズの研究について", 法政大学工学部研究集報第5号, 3月, 1968

APPENDIX

1. Modified Luneberg Lens Reflector

1-イ 焦点がレンズの内部にある場合の ray の軌跡



第 A-1 図

図において electrical path length $P=ab=df=Kb$

開口面中心点 K から入る ray に対して他の位置, たとえば, a 点より入る ray との間の path

difference ΔP は

$$\begin{aligned}\Delta P &= ab + bc + cd + df - fg - 2Kh \\ &= P + d_0 + d_0 + P - d_1 - 2(P + S) = 2(d_0 - S) - d_1 \\ &\text{但し, } d_0 = bc = cd \quad d_1 = fg \quad S = bh\end{aligned}$$

レンズに入射する角度を α とする。焦点 b に入射する角度 η は α には等しくない。そこで Snell の法則を用いる。

$$\begin{aligned}n(a) \cdot ao \sin \omega &= n(b) \cdot ob \sin \eta \\ n(a) &\text{ は } a \text{ 点における屈折率} \\ n(b) &\text{ は } b \text{ 点における屈折率}\end{aligned}$$

$n(a) = 1$, b 点における屈折率は Gutman の特解を利用して

$$\begin{aligned}n(r) &= (1 + r_1^2 - r^2)^{1/2} / r_1 \\ &\text{但し, } r_1 \text{ は焦点距離をレンズ外径で規準化したもの} \\ r_1 &= (r - S) / r \quad r^1 = \rho / r \\ &\text{但し, } r \text{ はレンズ半径, } S \text{ はレンズ表面から焦点までの距離} \\ &\quad \rho \text{ はレンズ中心から所望の位置までの距離}\end{aligned}$$

$$n(b) = \left(1 + \left(\frac{r-S}{r} \right)^2 (\rho/r)^2 \right)^{1/2} / \left(\frac{r-S}{r} \right)$$

$$\rho = r - S \quad \text{より} \quad n(b) = \frac{r}{r-S}$$

$$Pq = r \sin \alpha = aK$$

$$ao = (aK^2 + Ko^2)^{1/2} = r(1 + \sin^2 \alpha)^{1/2}$$

$$\therefore r(1 + \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \omega = \left(\frac{r}{r-S} \right) (r-S) \sin \eta$$

$$\tan \delta = r \sin \alpha / r = \sin \alpha$$

$$\omega = \frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) = \pi - \delta$$

$$\sin \eta = (1 + \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \omega = (1 + \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \delta$$

$$\therefore \eta = \sin^{-1} [(1 + \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \delta]$$

$$\beta = \pi - \eta$$

Δobc において

$$\frac{r-S}{\sin \epsilon} = \frac{r}{\sin \eta} \quad \therefore \sin \epsilon = \left(\frac{r-S}{r} \right) \sin \eta$$

$$\phi = \pi - (\beta + \epsilon) = \eta - \epsilon$$

$$\frac{d_0}{\sin \phi} = \frac{r-S}{\sin \epsilon} \quad \therefore d_0 = (r-S) \sin \phi \operatorname{cosec} \epsilon$$

ΔJOK において

$$JO = r \sec 2\phi$$

ΔgJi において

$$\angle Jgi = 2\phi$$

$$\therefore \angle Jgi = \pi - \left(\frac{\pi}{2} \right) - \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) = 2\phi$$

$$\angle foJ = \delta, \quad lo = r, \quad fl = r \tan \delta = gi$$

$$Jg \cos 2\phi = gi = r \tan \delta$$

$$Jg = r \tan \delta \sec 2\phi$$

$$Ji = Jg \sin 2\phi = r \tan \delta \tan 2\phi$$

$$Jl = r \sec 2\phi - r$$

$$li = fg = Ji - Jl = r \tan \delta \tan 2\phi - r(\sec 2\phi - 1)$$

$$= r(\tan \delta \tan 2\phi + 1 - \sec 2\phi) = d_1$$

従って electrical path difference ΔP は

$$\Delta P = 2(r - S) \sin \phi / \sin \epsilon - 2S - r(\tan \delta \tan 2\phi + 1 - \sec 2\phi)$$

開口面上において開口面中心から考えている ray までの距離 d_2 は

$$d_2 = gK = Jg - JK = r \tan \delta \sec 2\phi - r \tan 2\phi$$

この内部に焦点を持つ bistatic 用レンズは収束性を示すため、開口面 XY 上のある同一点を二つ以上の ray が通る可能性があることから、このことをさけるために考えている点をレンズの中心まで移動させ、それを開口面に平行移動する。この修正を施した場合、 ΔP を $\Delta P'$ 、 d_2 を d'_2 とする。

$$\Delta P' = \Delta P - r \sec 2\phi + r$$

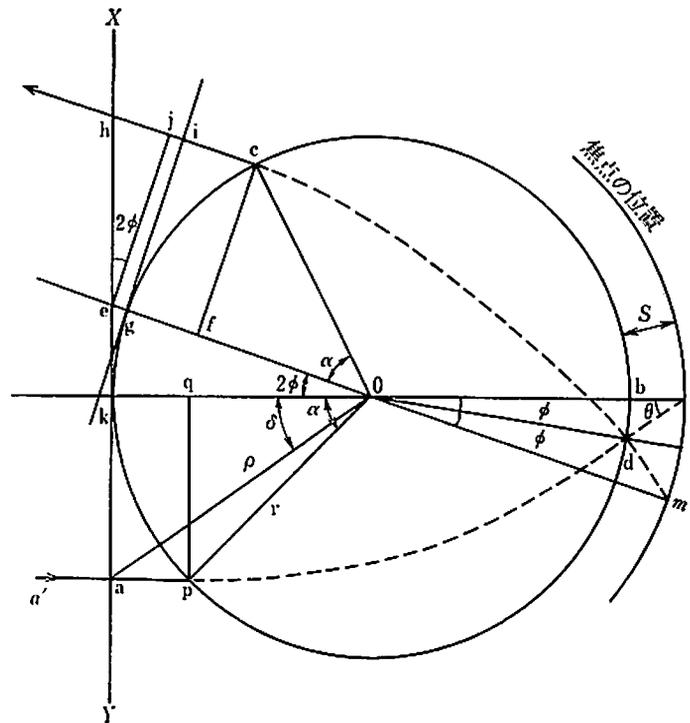
$$= 2(r - S) \sin \phi \operatorname{cosec} \epsilon - 2S - r \tan \delta \tan 2\phi$$

$$d'_2 = d_2 + r \tan 2\phi = r \tan \delta \sec 2\phi$$

故に位相差 ϕ は

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta P' = \frac{2\pi}{\lambda} [2(r - S) \sin \phi \operatorname{cosec} \epsilon - 2S - r \tan \delta \tan 2\phi]$$

1-ロ 焦点がレンズ外部にある場合の ray の軌跡



第 A-2 図

図において electrical path length $P = al = mi = Kl$

a 点で入射する ray は d 点で反射されて、 h で開口面 XY を横切る。 K 点で入射する ray は b 点で反射されて、もとの道を通って K 点で出てくる。中心部の ray に対する他の位置、たとえば a 点で入射する ray の間の path difference ΔP とする。

$$\Delta P = ad + di + ih - 2Kb = 2(S - d_0) + d_1$$

$$\text{但し、} d_0 = dl = dm \quad d_1 = ih$$

ao を ρ とし、レンズの外径を r とする。

Snell の法則より

$$n(a)\rho \sin(\angle a'ao) = n(l)(r+S)\sin\theta \quad (n(a)=n(l)=1)$$

$$Pq = r \sin\alpha = aK$$

$$\tan\delta = \sin\alpha \quad \therefore \delta = \tan^{-1}(\sin\alpha)$$

$$\rho \sin\left(\frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\right) = \rho \sin\delta$$

$$\rho = (r^2 + r^2 \sin^2\delta)^{1/2}$$

$$\therefore r(1 + \sin^2\delta)^{1/2} \sin\delta = (r+S)\sin\theta$$

$$\therefore \theta = \sin^{-1}\left[\left(\frac{r}{r+S}\right)(1 + \sin^2\delta)^{1/2} \sin\delta\right]$$

$\triangle Odl$ より

$$\frac{r+S}{\sin\beta} = \frac{r}{\sin\theta} \quad (\angle Odl = \beta)$$

$$\therefore \sin\beta = \left(\frac{r+S}{r}\right)\sin\theta$$

$\triangle Odl$ より

$$\theta + \phi = \pi - \beta \quad \therefore \phi = \pi - \beta - \theta$$

$$d_0 = r \frac{\sin\phi}{\sin\theta}$$

$$cf = r \sin\alpha = ig = Je$$

$\triangle heJ$ より

$$\angle heJ = 2\phi$$

$$he \cos 2\phi = eJ = r \sin\alpha$$

$$\therefore he = r \sin\alpha \sec 2\phi$$

$$hJ = he \sin 2\phi$$

$$Ji = eg = r \sec 2\phi - r = r(\sec 2\phi - 1)$$

$$hJ = Je \tan 2\phi = r \sin\alpha \tan 2\phi = he \sin 2\phi = r \sin\alpha \tan 2\phi$$

$$\therefore \Delta P = ih + 2S - 2d_0 = hJ + Ji + 2(S - d_0)$$

$$= r \sin\alpha \tan 2\phi + r(\sec 2\phi - 1) + 2(S - r \sin\phi \operatorname{cosec}\theta)$$

開口面 (XY) 中心から考えている ray が反射されて出てくる位置までの距離 (Kh) d_2 は

$$d_2 = he + eK = Je \sec 2\phi + eo \sin 2\phi$$

$$= r \sin\alpha \sec 2\phi + r \sec 2\phi \sin 2\phi$$

$$= r \sec 2\phi (\sin\alpha + \sin 2\phi)$$

故に位相差 ϕ は

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta P = \frac{2\pi}{\lambda} [r \sin\alpha \tan 2\phi + r(\sec 2\phi - 1) + 2(S - r \sin\phi \operatorname{cosec}\theta)]$$