UDC 535.312

光コーナリフレクターの解析

An Anaylisis of Optical Corner Reflector

藤 井 陽 一*・中 嶋 邦 宏*
Yoichi FUJII and Kunihiro NAKAJIMA

コーナリフレクターは，コーナキューブともいわれ，昔から調整の不要な反射鏡として使われているものであるが，最近のレーザーの発達によりレーザーレーダーのリフレクターとして人工衛星その他の飛しょう体に搭載されるようになった．この報告では，光レーダーの立場からその基本的な特性を明らかにすると共に，反射パターンの検討結果について述べリフレクターとしての基礎資料を得るのが目的である．

1. は じ め に

コーナキューブとは端的にいえば，どんな方向の入射光に対してもその反射光の方向を 180° 反転させるものである．レーダーのリフレターとしては非常に便利なものであるが，実際の反射パターンがどのようになるかという問題はそう簡単ではない．実用に当たって考えなくてはならないことは，第1にコーナキューブの反射面は六つの細分された反射面と考えなくてはならないこと．第2にその各々の反射面が，異った角度誤差を持っていることである．したがって細分された反射面は，それぞれ異った方向に回折現象を呈し，遠距離の反射パターンはかなり複雑なものになることが考えられる．以下，コーナキューブの基本的な特性，反射パターンの検討結果について述べる．

2. 反射パターンの測定結果とその考擦

まず，ここではコーナキューブの反射パターンを写真測定してみて，簡単な検討をしてみたい．コーナキューブは，構造的には立方体の一つの角を斜に切り取ったもので図1に示すように三角錐である．ただし，$\overline{AB}=\overline{BC}=\overline{CA}$ である．また面 ABC を除いた三つの面が反射面で適当な反射膜のメッキがしてある．

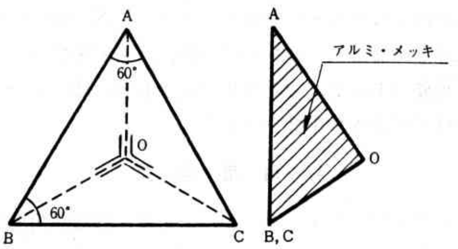


図 1　コーナリフレクターの形状

反射パターンの測定法は，図2に示すように He-Ne レーザー（波長は 0.63 μm）を使って距離（R）の所で写真測定するものである．資料は3個について行ない，材質は BK-7，Al メッキの反射面，辺 $\overline{AB}$ の長さは 60 mm である．R が 100 m までの測定結果は図3に示す．

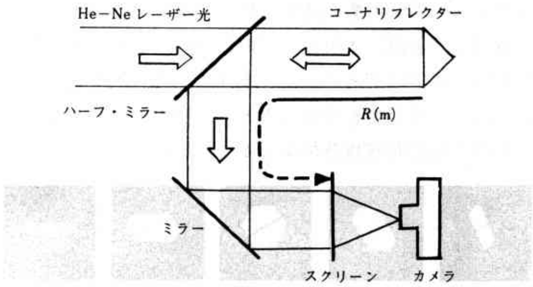


図 2　反射パターンの測定法

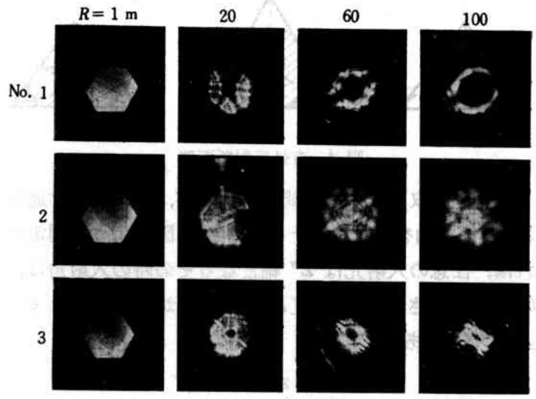


図 3　反射パターンの観測例（同心円は 10mm おきのもの）

図3において，3個のリフレタレーが初め同じようなパターンであったのが，距離が大になるに従い全く異ったものになるのは興味深い．これらの測定結果の解析は後で述べることにして，ここでパターンを決める要素について考えてみたい．

まず R=1 m のパターンを見ると，六角形の反射面であり，コーナキューブの全反射断面積の内一部欠損したものが実際の反射面となっている．すなわち有効反射断面積といったものが考えられる．

リフレターは，三つの反射面からなっているが，これらは互に直角になっており，その直角度の誤差が反射光を決める要素となる．また三つの反射面の接する三つの稜線は，ある有限の幅を持つために厳密には先の有効反射断面積はさらに六つの四角形に分けて考えなくてはならない．というのは，これらの反射面は当然回折現象を起こすからである．写真測定例（図3）で R=1 m の例に

* 東京大学生産技術研究所　第3部

その一部の稜線が見られる．

この他にも，干渉，反射面の反射率，面精度等が考えられるが，以下のところで個々の要素について考察ならびに反射パターンの検討をしてみる．

3. 有効反射断面積

コーナリフレクターは，先にも述べたようにある入射光に対して有効な反射断面を持つ．その形状と面積は反射パターンを決める重要な要素である．反射断面は入射光の方向によって当然変るわけで，ここでは任意の入射光に対する有効反射断面積を計算してみる．

有効断面積は，入射光と反射光とが，ベクトルの方向において逆方向であるという関係と，コーナキューブの頂点に関して点対称であることから簡単に作図できる．その作図及び写真観測例を図4に示す．

(写 真 観 測 例)

(作 図 例)

図 4　有効反射断面積

入射光の取り方が先ず問題であるが，図5に示す通りXYZ 座標軸をとりコーナキューブを図のように固定すれば，任意の入射光は Z'' 軸となりその時の入射角は，θ, φ で表わされる．$\theta=\angle ZPZ''$（又は$\angle X'PX''$），$\varphi=\angle XPX'$ である．

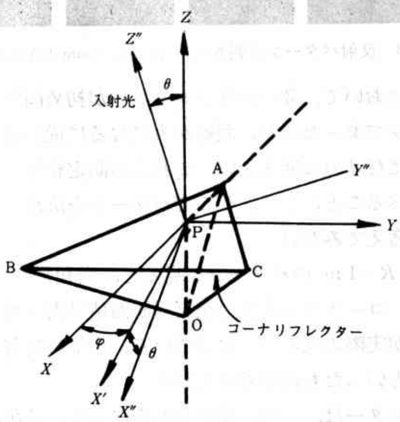


図 5　入射角 θ, φ の表わし方

Z 軸方向の入射のとき $(\theta, \varphi=0)$ の有効反射断面積を S_0，任意の入射角の場合の面積を S とすると，それらは以下の式で求められる．

$$S_0=a^2/2\sqrt{3} \qquad (1)$$

ただし，$a=\overline{\mathrm{AB}}$ である．

S は二つの条件で異なり，S/S_0 は次のようになる．

1)　$\tan\theta\cos(\varphi+2\pi/3)\geq-1/2\sqrt{2}$ では S は ⬡ 形で

$$S/S_0=1/3\cos[4(1-\sqrt{2}\tan\theta\cos\varphi)\times\{1-\sqrt{2}\tan\theta\cos(\varphi-2\pi/3)\}-\{1+2\sqrt{2}\tan\theta\cos(\varphi+2\pi/3)\}^2] \qquad (2)$$

2)　$\tan\theta\cos(\varphi+2\pi/3)\leq-1/2\sqrt{2}$ では S は ◇ 形で

$$S/S_0=4/3\cos\theta(1-\sqrt{2}\tan\theta\cos\varphi)\times\{1-\sqrt{2}\tan\theta\cos(\varphi-2\pi/3)\} \qquad (3)$$

ただし，θ は屈折効果があるので，コーナリフレクターの媒質の屈折率を n とすれば，実際の入射角 θ' と θ，つまり屈折角との関係は

$$\theta=\sin^{-1}(\sin\theta'/n) \qquad (4)$$

となる．

$n=1.5$ として，実際の入射角 θ', φ に対する S/S_0 の値を (2), (3) 式によって求めたものが図6のグラフである．

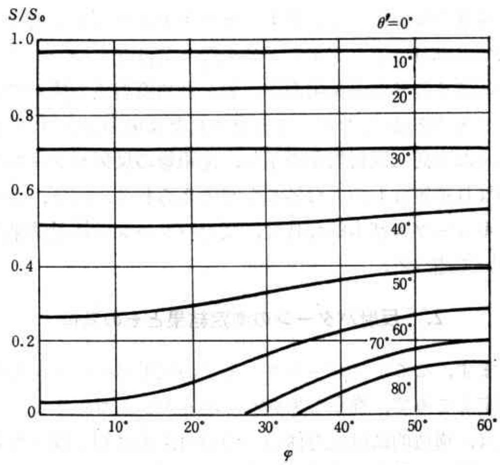


図 6　有効反射断面積の計算値

S/S_0 は，φ が 120° で一周期となって変化する．この結果から φ による変化は，φ, θ があまり大きくないところでは少ないことがわかる．また，S/S_0 の値は θ' でほとんど決まる．この断面積の値は，反射係数の一つとして重要であるが，その形状の変化も後に述べる回折現象の様子に大きな影響を与える．

4. 角 度 誤 差

コーナリフレクターの三つの直角度には当然角度誤差 δ が含まれる．ゆえに入射光と反射光のベクトルの差は 180° に対する誤差，Δ を含むことになる．

そこで，以下角度誤差について，1) Δ の方向余弦ベクトル表示，2) Δ, δ の測定法，3) Δ の反射パターンへの影響等考えることにする．

1) Δ の方向余弦ベクトル表示

一般に，一枚の平面鏡に対する入射光と反射光の関係は，ベクトル表示によると，

$$\boldsymbol{r}=M\boldsymbol{i} \tag{5}$$

である．ただし $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{r}, M, \boldsymbol{n}$ は，

$\boldsymbol{i}=[l_0, m_0, n_0]$ ………入射光のベクトル

$\boldsymbol{r}=[l_1, m_1, n_1]$ ………反射光のベクトル

$\boldsymbol{n}=[a, b, c]$ …………平面鏡の法線のベクトル

$$M=\begin{bmatrix} 1-2a^2 & -2ab & -2ac \\ -2ab & 1-2b^2 & -2bc \\ -2ac & -2bc & 1-2c^2 \end{bmatrix}$$ …反射をあらわす行列

とする．

リフレクターを，図7のような座標系で表わせば，反射光のベクトル表示が，(5)式を使って求まる．それと正しい（誤差のない）リフレクターの場合の反射ベクトルとの差をとれば，180° の誤差 Δ がベクトル表示で求められる．

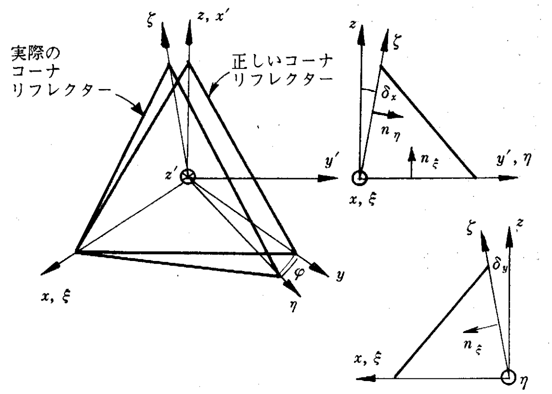


図 7　コーナリフレクターの座標系表示

実際のリフレクターでは，反射光は角度誤差のために一般に六個の各々異ったベクトルを持っている．ただし図示の1と1′面の反射光については，大きさは等しく，符号が逆になる．ゆえに反射光の種類として（図8）のような $\boldsymbol{r}_{1-1'}, \boldsymbol{r}_{2-2'}, \boldsymbol{r}_{3-3'}$ の三つを求めればよい．

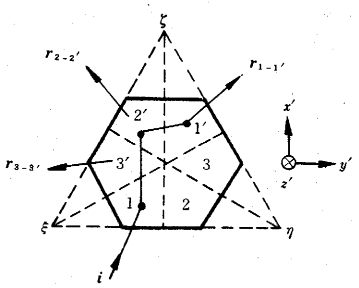


図 8　六つの反射面と反射波ベクトル

コーナキューブの直角度誤差を $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ で表わすと，$\xi\eta$ 面，$\xi\zeta$ 面，$\eta\zeta$ 面の法線のベクトル $\boldsymbol{n}_\zeta, \boldsymbol{n}_\eta, \boldsymbol{n}_\xi$ は次のようになる．

$$\boldsymbol{n}_\zeta=[0, 0, 1] \tag{6}$$

$$\boldsymbol{n}_\eta=[0, \cos\delta_x, \sin\delta_x] \tag{7}$$

$$\boldsymbol{n}_\xi=[\cos\varphi\cos\delta_y, \sin\varphi\cos\delta_y, \sin\delta_y] \tag{8}$$

(6), (7), (8)から，それぞれの反射面の反射行列，M_ζ, M_η, M_ξ が求まり，先の(5)式より $\boldsymbol{r}_{1-1'}$, $\boldsymbol{r}_{2-2'}$, $\boldsymbol{r}_{3-3'}$ は次のようになる．

$$\boldsymbol{r}_{1-1'}=TM_\xi M_\eta M_\zeta T^{-1}\boldsymbol{i}=S_{1-1'}\boldsymbol{i} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{r}_{2-2'}=TM_\eta M_\xi M_\zeta T^{-1}\boldsymbol{i}=S_{2-2'}\boldsymbol{i} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{r}_{3-3'}=TM_\eta M_\zeta M_\xi T^{-1}\boldsymbol{i}=S_{3-3'}\boldsymbol{i} \tag{11}$$

ただし，T, T^{-1} は，x, x' 系の座標変換行列であり次のとおりである．

$$\left.\begin{aligned} T&=\frac{1}{\sqrt{6}}\begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -\sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 \\ -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \\ T^{-1}&=\frac{1}{\sqrt{6}}\begin{bmatrix} -1 & -\sqrt{3} & -\sqrt{2} \\ -1 & \sqrt{3} & -\sqrt{2} \\ 2 & 0 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

(9), (10), (11) 式が，x' 座標系での任意の入射に対する反射光のベクトル表示である．

まず，$\boldsymbol{r}_{1-1'}$ について計算してみると $S_{1-1'}$ については以下のように簡単になる．

$$\begin{aligned} S_{1-1'}&=TM_\xi M_\eta M_\zeta T^{-1} \\ &=T\begin{bmatrix} 1-2(\cos\varphi\cos\delta_y)^2 & -2\cos\varphi\sin\cos^2\delta_y & -2\cos\varphi\cos\delta_y\sin\delta_y \\ -2\cos\varphi\sin\varphi\cos^2\delta_y & 1-2(\sin\varphi\cos\delta_y)^2 & -2\sin\varphi\cos\delta_y\sin\delta_y \\ -2\cos\varphi\cos\delta_y\sin\delta_y & -2\sin\varphi\cos\delta_y\sin\delta_y & 1-2\sin^2\delta_y \end{bmatrix} \\ &\quad\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-2\cos^2\delta_x & -2\cos\delta_x\sin\delta_x \\ 0 & -2\cos\delta_x\sin\delta_x & 1-2\sin^2\delta_x \end{bmatrix} \\ &\quad\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}T^{-1} \end{aligned} \tag{13}$$

(13)式で，一般に，直角度の誤差 $\delta_x, \delta_y, \delta_z \ll \pi/2$，又，$\varphi \sim \delta_z$ であるから

$$\sin\delta\sim\delta,\quad \cos\delta\sim 1,\quad \delta^2\ll 1$$

としてよく，$S_{1-1'}$ は次式のようになる．

$$S_{1-1'}=\begin{bmatrix} -1 & -2/\sqrt{3}(\delta_x-\delta_y+\delta_z) & \sqrt{2}(\delta_y+\delta_y) \\ 2/\sqrt{3}(\delta_x-\delta_y+\delta_z) & -1 & -2/\sqrt{6}(\delta_x-\delta_y-\delta_z) \\ -\sqrt{2}(\delta_x+\delta_y) & 2/\sqrt{6}(\delta_x-\delta_y-\delta_z) & -1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

ゆえに，x' 系座標において入射光を，$\boldsymbol{i}=[l_0, m_0, n_0]$ とすれば，正しいコーナキューブでの反射光 $\boldsymbol{r}_{1-1'}{}^0$ は，$\boldsymbol{r}_{1-1'}{}^0=[-l_0, -m_0, -n_0]$ である．ただし $l_0{}^2+m_0{}^2+n_0{}^2=1$ とする．

以上のことから反射光の誤差を方向余弦ベクトル表示

した $\boldsymbol{\Delta}_{1-1'}$ は，次の(15)式で求められる．

$$\boldsymbol{\Delta}_{1-1'}=\boldsymbol{r}_{1-1'}-\boldsymbol{r}_{1-1'}{}^{0}$$
$$=\begin{pmatrix} -2/\sqrt{3}\,m_0(\delta_x-\delta_y+\delta_z) \\ \quad+\sqrt{2}\,n_0(\delta_x+\delta_y) \\ 2/\sqrt{3}\,l_0(\delta_x-\delta_y+\delta_z) \\ \quad-2/\sqrt{6}\,n_0(\delta_x-\delta_y-2\delta_z) \\ -\sqrt{2}\,l_0(\delta_x+\delta_y) \\ \quad+2/\sqrt{6}\,m_0(\delta_x-\delta_y-2\delta_z) \end{pmatrix} \tag{15}$$

同様な求め方で，$\boldsymbol{\Delta}_{2-2'}$，$\boldsymbol{\Delta}_{3-3'}$ についても行なえば，

$$\boldsymbol{\Delta}_{2-2'}=\begin{pmatrix} -2/\sqrt{3}\,m_0(\delta_x-\delta_y-\delta_z) \\ \quad+\sqrt{2}\,n_0(\delta_x+\delta_y) \\ 2/\sqrt{3}\,l_0(\delta_x-\delta_y-\delta_z) \\ \quad-2/\sqrt{6}\,n_0(\delta_x+\delta_y+2\delta_z) \\ -\sqrt{2}\,l_0(\delta_x-\delta_y) \\ \quad+2/\sqrt{6}\,m_0(\delta_x+\delta_y+2\delta_z) \end{pmatrix} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{\Delta}_{3-3'}=\begin{pmatrix} -2/\sqrt{3}\,m_0(\delta_x+\delta_y-\delta_z) \\ \quad+\sqrt{2}\,n_0(\delta_x+\delta_y) \\ 2/\sqrt{3}\,l_0(\delta_x+\delta_y-\delta_z) \\ \quad-2/\sqrt{6}\,n_0(\delta_x+\delta_y+2\delta_z) \\ -\sqrt{2}\,l_0(\delta_x-\delta_y) \\ \quad+2/\sqrt{6}\,m_0(\delta_x+\delta_y+2\delta_z) \end{pmatrix} \tag{16}$$

となる．

入射光の特別な場合として，$\boldsymbol{i}=[0\ 0\ 1]$，すなわち垂直入射の場合にはは $\boldsymbol{\Delta}$ は次のようになる．

$$\boldsymbol{\Delta}_{1-1'}=\begin{bmatrix} \sqrt{2}\,(\delta_x+\delta_y) \\ 2/\sqrt{6}\,(-\delta_x+\delta_y+2\delta_z) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{\Delta}_{2-2'}=\begin{bmatrix} \sqrt{2}\,(\delta_x+\delta_y) \\ 2/\sqrt{6}\,(-\delta_x+\delta_y-2\delta_z) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

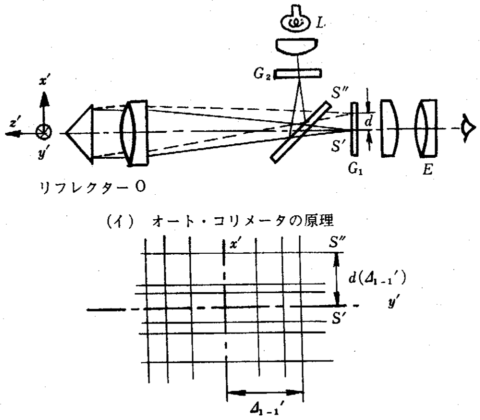
$$\boldsymbol{\Delta}_{3-3'}=\begin{bmatrix} \sqrt{2}\,(\delta_x-\delta_y) \\ -2/\sqrt{6}\,(\delta_x+\delta_y+2\delta_z) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

ここで，Δ は $|\Delta|$ として求められるのは当然であるが，(15)～(17) 式からと，(18)～(20) 式から求めた Δ の値は異ってくる．しかしながら，Δ の値は $\delta\gg1$ であればほとんど δ の値で決まるから，Δ の値のオーダーとしては，(18)～(20)式から求めてよい．

2)　Δ, δ の測定法

$\boldsymbol{\Delta}$ の測定は，図9に示すごとくオート・コリメータにより，$\boldsymbol{\Delta}$ の値が直接得られる．この場合の $\boldsymbol{\Delta}$ は，図示の x', y' 成分ですべて求められるが，ここでは，先の(18)～(20) 式の場合の垂直入射を考え $\boldsymbol{\Delta}$ の測定より δ を求める方法について述べる．

オート・コリメータは，上図に示すごとく G_2(ガラス板) に十字線が刻んであって，測定面からの十字像 S'' から角度誤差 $\boldsymbol{\Delta}$ を直接測れるようになっている．図9の(ロ)には，その側定像を示すがコーナリフレクターの



(イ)　オート・コリメータの原理

(ロ)　リフレクターの測定法

図 9　オート・コリメータによる Δ の測定法

場合には一般に六本の十字線が得られる．

$\boldsymbol{\Delta}$ のこの方法による測定では，$\boldsymbol{\Delta}_{1-1'}$ と $\boldsymbol{\Delta}_{1'-1}$ の判別つまり符号の判別ができない．これには直接反射パターンを観測してみるしかない．その観測例を図10に示す．この例は明らかにパターンが六つに分離されている場合であるが，この分離の度合は距離と共に大きくなって行く．このときの $\boldsymbol{\Delta}_{1-1'}$, $\boldsymbol{\Delta}_{2-2'}$, $\boldsymbol{\Delta}_{3-3'}$ は，その符号のみについて記せば

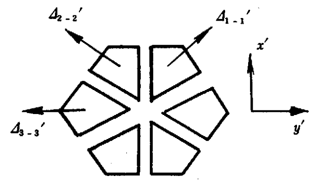


図 10　反射パターンの観測例

$$\boldsymbol{\Delta}_{1-1'}=\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} + \\ + \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{\Delta}_{2-2'}=\begin{bmatrix} + \\ - \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{\Delta}_{3-3'}=\begin{bmatrix} 0 \\ - \end{bmatrix}$$

となる．

この方法で $\boldsymbol{\Delta}$ の符号がわかれば，先の (18)～(20) 式より δ が求められる．

3)　Δ の反射パターンへの影響

入射光が，図11のようにリフレクターの表面に垂直に入射すると，六つの反射面のうちの一つ M_1 について考えれば，単なる平面鏡 M_1'の傾きが入射光に対する垂直面から $\boldsymbol{\Delta}$ であると考えてよい．

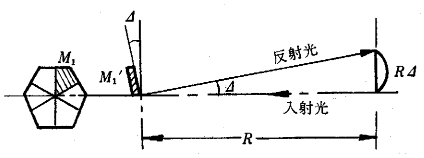


図 11　Δ の反射パターンへの作用

ゆえに距離 R だけ離れた所の像は，$R\Delta$ だけズレが生じる．

Δ の値は六つの反射面について一般には異った値を持

ち，リフレクターの反射パターンを分散させることになる．誤差の少いものでも遠距離になるほどその効果は無視できなくなる．

5. 回 折 効 果

コーナリフレクターは，先にも述べたように三つの稜線が有限の幅を持つために，六つの反射面つまり六つの孔と考えられる．そのためそれらの反射面は個々に回折現象を呈する．この回折現象を厳密に解析しようとすると，その形状が簡単でないこと，また，それらは入射光の角度によっても変化するので複雑な形となる．

ここでは，簡単なために回折孔を円孔とみなして回折の程度，つまりビームの拡がりのオーダーについて検討してみたい．入射光は垂直入射で平面波又パターンの観測点もリフレクターから十分遠い所と考えるとフラウンホーファーの回折理論が使える．

円孔の半径を $r(m)$ とすれば，回折光の強度分布は次のようになる．

$$I=A[2J_1(x)/x]^2 \tag{21}$$

ただし，　A：定数，$K=2\pi/\lambda$，$x=rK\sin\varDelta_d$

$\varDelta_d$：回折角，λ：入射光の波長

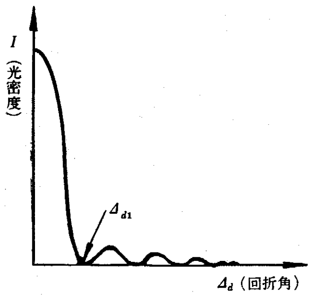


図 12　円孔による回折光密度

I の形は，図 12 のようになり第 1 暗線の回折角を $\varDelta_{d1}$ とすれば，$J_1(x)=0$ から $\varDelta_{d1}$ は求まる．

$$\varDelta_{d1}=1.2\lambda/2r=1.2\lambda/D \tag{22}$$

ただし，D は円孔の直径である．したがって距離 $R(m)$ の所での第 1 暗線の拡がりは半径を $l(m)$ とすれば

$$l=R\varDelta_{d1}=1.2\lambda R/D \tag{23}$$

で与えられる．

6. 反射パターンの解析

以上，主要なコーナリフレクターの基本的特性について検討してきたが，一般的な反射パターンの解析を行なうことはかなりめんどうな手順を要する．それは，リフレクターの反射面が一つの反射面としてではなく六つのなかば独立したものとして作用すること，また回折現象が複雑になること等がその主な原因である．

実用に当たってはもっと細かい解析が必要となると思うが，ここでは最も基本的なことについて検討してみたい，つまり，強度分布の解析という意味ではなくて，個々の基本特性が反射パターンの形状にどのように作用するかということに重点を置いてまとめてみたい．

まず，反射パターンの形状を簡単な次に示すモデルで考えてみる．

(1)　入射波は平面波で垂直入射とする．

(2)　リフレクターは六つの反射面に分かれるが，それらはすべて直径 D の円形と考える．

(3)　六つの反射面による反射波は等しい角度誤差 $\varDelta$ をもち，等間隔で発散する．

(4)　反射パターンの観測はリフレクターから十分遠方で，フラウンホーファーの回折領域で行なう．

このような条件では，反射パターンを回折効果の第 1 暗線で表わすと図 13 のようになる．

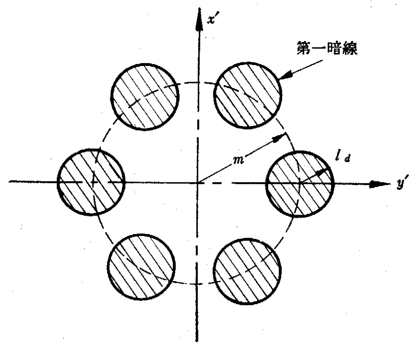


図 13　モデル(円孔)による反射パターン

ここで，m は角度誤差 $\varDelta$ による円孔の回折中心の離心度を表わし，l_d を回折効果による第 1 暗線の半径を表わすとすれば，それらは d_0 を円孔の中心の離心度とすると，

$$m=d_0+R\varDelta,\ \ l_d=R\varDelta_{d1}$$

となる．上式のように本質的に反射パターンの形状は，角度誤差 $\varDelta$ と回折角 $\varDelta_{d1}$ で決まることがわかる．

そこで，$\varDelta$ と $\varDelta_{d1}$ の値が問題となるが図 13 の場合は明らかに $\varDelta>\varDelta_{d1}$ であり $y'z'$ 面の強度分布パターンを考えると図 14 の (イ) の例に相当する．これではレーダーの場合中心部に全くエコーのないパターンでリフレクターとしては不適当である．少くとも図 14 に示す (ロ)(ハ) に相当するパターンであることが必要である．

そのための条件としては，$\varDelta$ と $\varDelta_{d1}$ の関係が少くとも $10\varDelta>\varDelta_{d1}>\varDelta$ でなくてはならない．もちろん，$\varDelta$ は工作

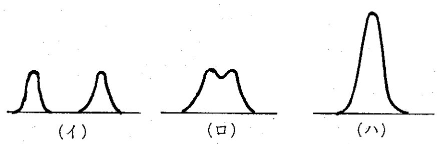


図 14　反射パターンの強度分布の種類

精度によるものであるが，できるだけ小さなものである必要がある．

以上は，モデルについての検討であるが実際のパターンの検討には次のようなことを考えなくてはならない．

（1） 六つの反射面は一般には異った Δ を持つため各々のベクトルでパターンの分散を考えなくてはならない．

（2） 六つの反射面は，正確には四辺形で形状も入射角によって大きく変化する（そのため回折効果の変化は大きく，ビームの拡がりは入射角が大になると非常に大になることを考えなくてはならない）．

次に，最初に図3においてその反射パターンの写真観測例を示したわけであるが，ここでそれらの資料についての Δ の測定結果並びに直角度誤差 δ の算出結果について述べたい．また，回折効果の検討も加えて，反射パターンの解析を簡単にしてみたい．

まず Δ の測定結果は表1に示す．これは垂直入射光の場合で測定法は先に述べた(図9)とおりである．ここ

表 1　Δ の測定結果（単位：秒）

	Δ	$\Delta_{1-1'}$	$\Delta_{2-2'}$	$\Delta_{3-3'}$
No. 1	x'	15	15	0
	y'	10	−5	−18
2	x'	−13	−13	0
	y'	−10	11	16
3	x'	−30	−30	0
	y'	−20	15	33
4	x'	40	40	180
	y'	−135	−65	20

で資料 No. は，1～3が反射パターンの観測例（図3）に相当し，No. 4 は誤差の特に大きな例として測定例に加えたものである．

この測定結果より，Δ, δ の値が (18)～(20) 式より求まり表2に示す．

表 2　表1の測定結果から求めた Δ, δ の値（単位：秒）

	$\Delta_{1-1'}$	$\Delta_{2-2'}$	$\Delta_{3-3'}$	δ_x	δ_y	δ_z
No. 1	18	16	18	5.4	5.4	4.5
2	16.4	17	16	−4.7	−4.7	−5.8
3	36	33	33	−10.7	−10.7	−11.4
4	141	77	207	75	−50	−24

回折角は円孔として考えると先の (22) 式により，D (円孔の直径)＝15 mm にとり，λ (He-Ne レーザー光の波長)＝0.6328 μ とすると

$$\Delta_{d1}=0.05\ \mathrm{m\cdot rad}$$

となる．

これらの結果を用いて，資料 No. 1 について距離 100 m の所での反射パターンの作図をしてみる．

$d_0=7.5$ mm としてやれば Δ の測定結果により図15のようになる．

ここで．D, d_0 の値を簡単に決めることは問題があると思うが，その形状と大きさも観測結果と非常に良く一致しており，反射パターンと基本的特性との関係で考察した結果が間違いでないことがわかった．その他の資

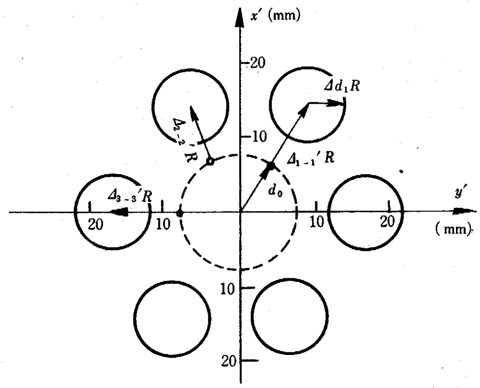


図 15　資料 No. 1 の R＝100m における円孔モデルによる反射パターンの作図結果
(D=15 mm, d_0=7.5 mm, Δd_1=0.05 m・rad)

料についても同じ方法で作図できるが，資料 No. 2, 3 については，R＝100 m の所では Δ の値が収れん方向にあり六つの回折像が重っている．そのため干渉が加わり複雑なパターンとなっていることがわかる．しかしながらいづれの資料も $\Delta>\Delta_{d1}$，つまり角度誤差の方が回折角より3～5倍大きいために，距離 R が十分大きくなるとパターンの分散はまぬがれないことがわかる．

7. おわりに

以上，光コーナリフレクターについてその基本的な特性の主なもの，すなわち，有効反射断面積，角度誤差，回折効果等について検討してきた．その結果，反射パターンを決める要素として最も問題となるのは，反射光の 180° 角度誤差 Δ と回折角 Δ_{d1} の関係であることがわかった，少くとも Δ_{d1} として，$10\,\Delta>\Delta_{d1}>\Delta$ でなくてはならない．

しかしながら実用にあたっては，Δ はなるべく小にすることは言うまでもないが，Δ_{d1} については問題が残る．特に，リフレクター面に対して大きな入射角の場合，回折角は無限に大きくなりコーナリフレクターとしての特性が失われることになる．

リフレクターの実用設計では，利得を上げる意味においても，コーナキューブの多集合体が考えられると思うが，その使用条件により回折効果に対する十分な対策が必要となる．

コーナリフレクターの実用例は外国ではかなりあるが，先日，アメリカの NASA がアポロ 11 号によって，月面にコーナキューブのリフレクターを設置し，精度の高い測距の実験を初めたことは耳新しいことである．コーナキューブの直角度の誤差が 1/3″ と非常に精度が良いのは興味深い．

最後に，日ごろご指導下さった斎藤教授並びに資料を貸与いただいたKK日立製作所島津氏に感謝する．

(1969年8月30日受理)