

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-120

円錐管レンズの設計とその応用

山中龍夫・奥嶋澄男

1967 年 11 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 円錐管レンズの設計とその応用\*

山中 竜夫\*\*・奥 嶋 澄 男\*\*

円錐管または円管内の現象を平行光線によって平行に投影できるような円錐管または円管の外側曲面を与える一般式を導いた。この外側曲面は、ある閉曲線を通して内面の円錐面または円柱面に平行な線織面となるが、この閉曲線は円錐角、管材料の屈折率、管の壁厚、管の内径等によって決まる。これらの各パラメータのうち円錐管レンズまたは円管レンズを設計する場合の共通のレンズ・パラメータを円錐角範囲 12~15 度のものおよび円管レンズのパラメータについて数表を作成した。管材料の屈折率としては、現在使用可能と考えられるほとんど唯一の透明材料“アクリライト”を採用した。これらの数表は、円錐管レンズおよび円管レンズの設計ばかりでなく、これらのレンズを用いて撮影した投影像の解析に必要となる。実際例として、ロケット・ノズル内の二次噴射による衝撃波発生の研究用に試作した、半頂角 15 度のアクリライト製円錐管レンズを紹介し、その製作歪、校正用写真等を示して、円錐管レンズの使用方法について述べる。

## 1. ま え が き

近年二次流体噴射による固体ロケットの推力方向制御 (TVC) の研究が各国で進み、一部実用化されて来た。この TVC においては、二次流体噴射によってロケットのノズル内に発生する衝撃波およびそれに伴うノズル内の流れの“乱れ”の構造がロケットに与える側分力を決定する重要な役割を演ずる。したがって、すぐれた二次噴射による TVC を設計するにあたっては、ノズル内の衝撃波およびそれに伴う“乱れ”の構造を十分に知ることが必要となる。

一般に衝撃波や流れの乱れに関する研究をする場合には、シュリーレンまたはシャドウ撮影等による光学観測を用いることが多い。光学観測は二次元流に対しては、非常に効果的であるが、三次元流、とくにノズルのような円錐管・あるいは円管型風洞のような円管内の現象を三次元的に撮影することは非常にむずかしく、あまり成功した報告がなされていない。これは平行光線が管を横切るときに散乱し(その散乱のしかたは管の壁厚にもよるが、円錐管の場合には円錐角によっても違うので一様でないが)、厳密な意味における光学観測を不可能にしているからである。図 1 は透明円管に平行光線を管軸に垂直に当てた場合の光線の散乱の様態を示す。

このような散乱を防ぐ一方法として、透明壁を有す

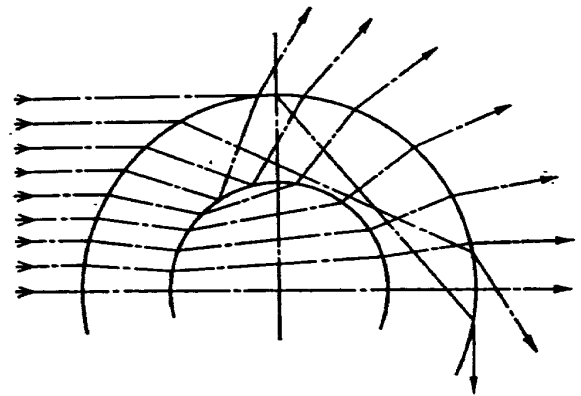


図 1 厚肉円管を通る平行光線の散乱例

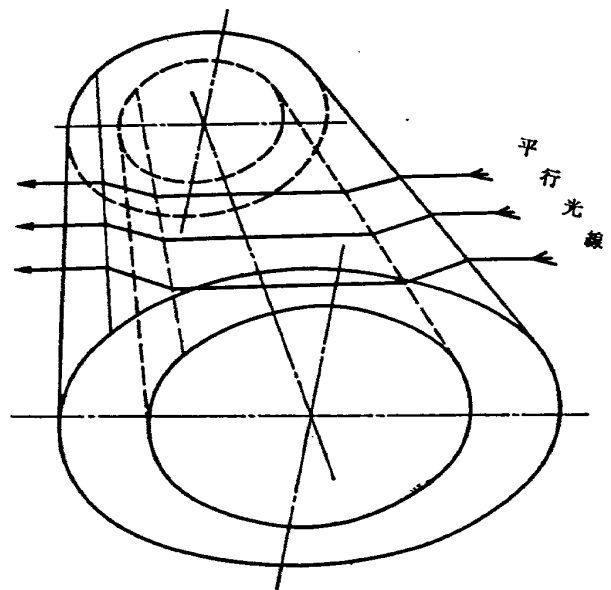


図 2 円錐管レンズを通る平行光線

\* 昭和42年 8 月 12 日受付

\*\* ロケット部

る円錐管または円管で、平行光線が管軸に垂直に進入してから管の外表面と内表面（円錐面または円柱面）で2回の屈折をした後、平行光線として管内を横切り、ふたたび管の内表面（円錐面または円柱面）・外表面で2回の屈折をした後平行に出て行くような外表面を有する円錐管・円管レンズを使うことが考えられる。図2はこのような円錐管レンズを通過する平行光線の模様を示す。このようなレンズは、かつて Jennings<sup>1)</sup>によって試作された報告がある。しかし、彼の試みは円管レンズとしては成功をおさめたが、円錐管レンズとしては曲面の方程式に一部不備なところがあって、結局、不成功に終わった。

Jennings は円錐管を通過する三次元的な光線の通路を軸に垂直面に投影してレンズ方程式を得たが、解析は極めて煩雑であり誤りがある。主著者は Jennings とは違った方法、すなわち微分幾何学の曲面論とベクトル解析を用いて、円錐管レンズの外表面の方程式を内表面の方程式から与える簡単な一般式を導いた。本報告では、まずこの円錐管レンズ方程式をいかにして導いたかを示し、ついで、その方程式にしたがって試作した半頂角 15 度の円錐管レンズの性能試験の結果を報告し、あわせて、ロケットの円錐ノズルとしてよく使用される半頂角範囲 12~15 度の円錐管レンズと半頂角零度の場合、すなわち円管レンズの各パラメータを数表化したものを掲げ、円錐管・円管レンズの設計の便に供することとした。

## 2. レンズ方程式

円錐管軸に垂直に入って来た平行光線が、透明な円錐管壁で2回屈折した後、入射平行光線に平行に出て行くような管外表面の形状を決める関係式を導く。

図3は円錐レンズ方程式の座標系を示す。いま円錐軸上に原点を有する位置ベクトル  $\mathbf{r}$  で内面である円錐面を表わすと

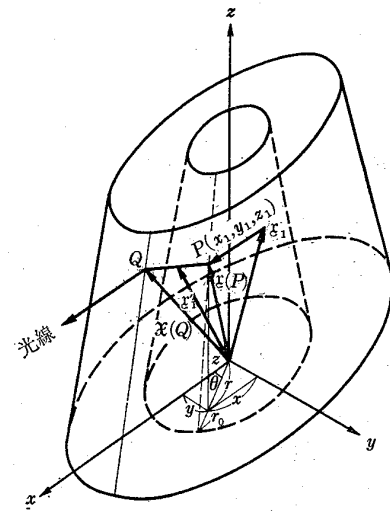
$$\mathbf{r}(x, y, z): \left. \begin{aligned} x &= (r_0 - t \cdot \tan \alpha) \cos \theta \\ y &= (r_0 - t \cdot \tan \alpha) \sin \theta \\ z &= t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  は円錐の半頂角、 $r_0$  は  $z=0$  の  $z$  軸に垂直な切断面における内面の半径、 $t$  および  $\theta$  は媒介変数である。この円錐面の第1基本量は微分幾何学より

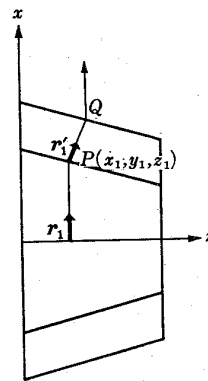
$$\left. \begin{aligned} E &= \mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{e}_\theta = (r_0 - t \cdot \tan \alpha)^2 \\ F &= \mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{e}_t = 0 \\ G &= \mathbf{e}_t \cdot \mathbf{e}_t = 1 + \tan^2 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

および

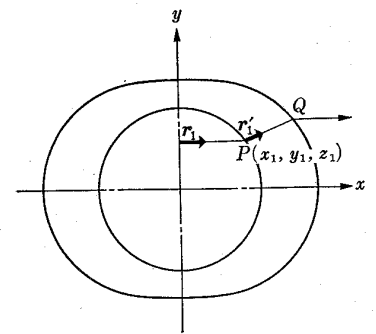
$$g = EG - F^2 = (1 + \tan^2 \alpha) (r_0 - t \cdot \tan \alpha)^2 \quad (3)$$



(a)  $x-y-z$  座標



(b)  $z-x$  座標



(c)  $x-y$  座標

図3 円錐管レンズ座標系

ここで  $\mathbf{e}_\theta$  および  $\mathbf{e}_t$  はそれぞれ  $\theta$  および  $t$  に関する偏微分で、 $\theta$ -曲線、 $t$ -曲線に対する切線ベクトルを表わす。またこの円錐面上の点における単位法線ベクトル  $(\mathbf{e})_N$  は2個の切線ベクトルのベクトル積で表わせる。

$$(\mathbf{e})_N = \frac{1}{\sqrt{g}} (\mathbf{e}_\theta \times \mathbf{e}_t) = \cos \alpha (\cos \theta \cdot \mathbf{i} + \sin \theta \cdot \mathbf{j} + \tan \alpha \cdot \mathbf{k}) \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  はそれぞれ  $x, y, z$  軸方向の単位ベクトルを表わす。

円錐管レンズは当然  $y-z$  面および  $x-z$  面に対して対称であるべきであるから、簡単のために解析は第一象限のみで行う。いま内面の円錐面上の任意の点  $P(x_1, y_1, z_1)$  を通る円錐管内の光線の位置ベクトルを  $\mathbf{e}_1$  で表わすと

$$\mathbf{e}_1(x, y_1, z_1), \quad |x| \leq |r_0 - t_1 \tan \alpha| \quad (5)$$

$P$  点を通過してから透明壁内を通る光線の位置ベクトルを  $\mathbf{e}_1'$  とすれば

$$\left. \begin{aligned} x &= x_1 + l \cdot s \\ \mathbf{r}_1' : y &= y_1 + m \cdot s \\ z &= z_1 + n \cdot s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 $l, m, n$  は  $P$  点で屈折した光線の方向余弦であり、 $s$  は補助変数である。

光線ベクトル  $\mathbf{r}_1$  と  $P$  点における円錐面の法線ベクトル  $[\mathbf{x}(P)]_N$ 、および屈折後の光線ベクトル  $\mathbf{r}_1'$  との間にはスネリウムの法則が成立するから

$$\cos \theta_A = [\mathbf{x}(P)]_N \cdot \mathbf{r}_1 = \cos \alpha \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$\cos \theta_B = [\mathbf{x}(P)]_N \cdot \mathbf{r}_1' = \cos \alpha (l \cos \theta + m \sin \theta + n \tan \alpha) \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{r}_1$  および  $\mathbf{r}_1'$  はそれぞれ円錐管内の単位光線ベクトル  $(1, 0, 0)$  および  $P$  点で屈折後の単位光線ベクトル  $(l, m, n)$  であり、 $\theta_A$  および  $\theta_B$  はそれぞれ円錐面上  $P$  点の法線ベクトルと円錐管内の光線ベクトルとの間の角および同じ法線ベクトルと屈折後の光線ベクトルとの間の角を表わす。またベクトル  $[\mathbf{x}(P)]_N$  と  $\mathbf{r}_1$  および  $[\mathbf{x}(P)]_N$  と  $\mathbf{r}_1'$  で決まる二平面は同一でなければならない条件から、二つのベクトル積  $[\mathbf{x}(P)]_N \times \mathbf{r}_1$  と  $[\mathbf{x}(P)]_N \times \mathbf{r}_1'$  の各成分を比較して、さらに  $l^2 + m^2 + n^2 = 1$  と (8) 式の関係式より

$$\left. \begin{aligned} l(\theta) &= \cos \alpha \cos \theta \cos \theta_B \\ &+ (1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \theta) \left( \frac{1 - \cos^2 \theta_B}{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \theta} \right)^{\frac{1}{2}} \\ m(\theta) &= \cos^2 \alpha \sin \theta \cos \theta \left\{ \frac{\cos \theta_B}{\cos \alpha \cos \theta} \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{1 - \cos^2 \theta_B}{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \theta} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \\ n(\theta) &= \sin \alpha \cos \alpha \cos \theta \left\{ \frac{\cos \theta_B}{\cos \alpha \cos \theta} \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{1 - \cos^2 \theta_B}{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \theta} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

また、レンズ材質の空気に対する屈折率  $n_1$  (波長  $\lambda$  の光) はつぎの式で与えられる。

$$\frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} = n_1 \quad (10)$$

したがって、(7) 式と (10) 式より

$$\cos \theta_B = \frac{(n_1^2 - 1 + \cos^2 \alpha \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}{n_1} \quad (11)$$

$P$  点で屈折した光線  $\mathbf{r}_1'$  がレンズ表面を通過する点を  $Q$  とすれば、点  $Q$  の位置ベクトルを  $\mathbf{x}(Q)$  で表わすと

$$\mathbf{x}(Q) = \mathbf{x}(P) + \delta \cdot \mathbf{r}_1' \quad (12)$$

ここで  $\delta$  は  $\overline{PQ}$  の距離を表わす。

$Q$  点を出た光線は円錐管内の光線ベクトル  $\mathbf{r}_1$  に平行でなければならないから、管の内表面と外表面における光線の屈折率が同一であるときは内表面の  $P$  点の法線ベクトルおよび外表面の  $Q$  点の法線ベクトルはたがいに平行でなければならない。したがって

$$[\mathbf{x}(Q)]_N \times [\mathbf{x}(P)]_N = 0 \quad (13)$$

書き変えると

$$\{[\mathbf{x}(Q)]_\theta \times [\mathbf{x}(Q)]_t\} \times [\mathbf{x}(P)]_N = 0 \quad (13')$$

ベクトルの三重積の法則より

$$\{[\mathbf{x}(P)]_N \cdot [\mathbf{x}(Q)]_\theta\} [\mathbf{x}(Q)]_t - \{[\mathbf{x}(P)]_N \cdot [\mathbf{x}(Q)]_t\} [\mathbf{x}(Q)]_\theta = 0 \quad (13'')$$

(9) 式からわかるようにベクトル  $\mathbf{r}_1'$  は  $\theta$  のみの関数であり、いま

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

と仮定する。 $(\mathbf{r}_1'$  と  $[\mathbf{x}(P)]_N$  は  $\theta$  のみの関数であるから、この仮定は不必要であることが任意回転面管レンズの解析<sup>2)</sup> から証明できる。

(13'') 式は次の微分方程式になる。

$$\frac{d\delta}{d\theta} = -\delta \frac{[\mathbf{x}(P)]_N \cdot (\mathbf{r}_1')_\theta}{[\mathbf{x}(P)]_N \cdot \mathbf{r}_1'} \quad (15)$$

積分して

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\theta)}{\delta_0} &= \frac{l_0 + n_0 \tan \alpha}{l(\theta) \cos \theta + m(\theta) \sin \theta + n(\theta) \tan \alpha} \\ &\times \exp \left\{ - \int_0^\theta \frac{l(\xi) \sin \xi - m(\xi) \cos \xi}{l(\xi) \cos \xi + m(\xi) \sin \xi + n(\xi) \tan \alpha} d\xi \right\} \\ &\quad \left( 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &\text{ は } \theta=0 \text{ の } \delta \text{ の値} \\ l_0 &= \frac{\sin^2 \alpha}{n_1} + \cos \alpha \left( 1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ n_0 &= \sin \alpha \left\{ \left( 1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\cos \alpha}{n_1} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

いままで特定の光線について解析を進めて来たが、任意  $\theta$  について上に述べた議論は成立する。したがって円錐管レンズの外側曲面のベクトル表示はつぎの式で表わされる。

$$\mathbf{x}(\theta, t) = \mathbf{x}(\theta, t) + \delta(\theta) \cdot \mathbf{r}_1'(\theta) \quad (18)$$

直角座標表示ではつぎの式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} X &= (r_0 - t \cdot \tan \alpha) \cos \theta + \delta(\theta) \cdot l(\theta) \\ Y &= (r_0 - t \cdot \tan \alpha) \sin \theta + \delta(\theta) \cdot m(\theta) \\ Z &= t + \delta(\theta) \cdot n(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

したがって、円錐軸を垂直に切断する円錐管レンズの外側曲線 (第一象限部分の曲線) は  $t = Z_0 - \delta \cdot n$  と置いて

$$\left. \begin{aligned} X &= (r_0 - Z_0 \tan \alpha) \cos \theta \\ &\quad + (l(\theta) + n(\theta) \tan \alpha \cos \theta) \delta(\theta) \\ Y &= (r_0 - Z_0 \tan \alpha) \sin \theta \\ &\quad + (m(\theta) + n(\theta) \tan \alpha \sin \theta) \delta(\theta) \\ Z &= Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

(16) 式と (20) 式によって円錐管軸を  $Z=Z_0$  で切断したときの外側曲線の第一象限部分が与えられるが、この四分の一曲線をそれぞれ  $X$  軸,  $Y$  軸に対して 2 回対称に写すことによって得られる閉曲線は求めている円錐管レンズの外側断面閉曲線である。(9) 式および (14) 式の仮定を考えて、母線がこの閉曲線を通して、しかも内面の円錐面に平行である線織面は、平行光線を平行に通過させることのできる円錐管レンズである。 $\alpha=0$  の場合は円管レンズであり、内半径  $r_0$  の円管レンズの外表面および線織面の閉曲線のパラメータはつぎの式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} l(\theta) &= \cos(\theta - \theta_B) \\ m(\theta) &= \sin(\theta - \theta_B) \\ n(\theta) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9-a)$$

$$\cos \theta_B = \frac{(n_\lambda^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}{n_\lambda} \quad (11-a)$$

$$\frac{\delta(\theta)}{\delta_0} = \frac{1}{\cos \theta_B} \exp \left\{ - \int_0^\theta \frac{\sin \xi}{(n_\lambda^2 - \sin^2 \xi)^{\frac{1}{2}}} d\xi \right\} \quad (16-a)$$

### 3. 作表および実際例

方向余弦,  $l, m, n$  および無次元の壁厚関数  $\delta/\delta_0$  は  $\theta$  のみの関数であるから,  $\theta=0 \sim \frac{\pi}{2}$  までのこれらの値を数表にすれば大変便利である。高速電子計算機を用いれば (20) 式の計算は容易であるが、上に述べた四個のパラメータを数表にしておけばレンズを実際に設計する際にも、あるいは撮影された像とレンズ内の実像を座標変換する必要が生じたときなどは、これらの数表は非常に役に立つ。これらのレンズ・パラメータはレンズ材料によってあるいは入射光線の波長によって異なるが、このような非球面レンズの加工には現在アクリライトがほとんど唯一の可能な材料と考えられる。アクリライトについては屈折率はつぎのコーシー (Cauchy) の式<sup>3)</sup>で表わされる。

$$n_\lambda = 1.4779 + \frac{5.0496 \times 10^5}{\lambda^2} - \frac{6.9486 \times 10^{11}}{\lambda^4}$$

$[\lambda: \text{波長 } \text{\AA}]$

波長の違いによる分散を少なくするために、できるだけ単波長の光線を用いるのが良い。本論文の数表では  $5780 \text{\AA}$  のいわゆる“黄線”を光源に使用することを想定して,  $n_\lambda = 1.48698$  を採用した。壁厚関数  $\delta/\delta_0$

は (16) 式からわかるように積分を含んでいる。この積分にはいわゆるシンプソン法則を用い, 1 度の間隔を 10 個に分割して適用した。最大誤差は  $\theta=90^\circ$  において累積されるが、その大きさは

$$E_{\max} = 90 |E_{10}| = 90 \cdot \frac{10 \left( \frac{\pi}{180} \cdot \frac{1}{10} \right)^5}{180} f^{iv}(\xi)$$

ここで

$$f(\xi) = - \int_0^\xi \frac{l(\eta) \sin \eta - m(\eta) \cos \eta}{l(\eta) \cos \eta + m(\eta) \sin \eta + n(\eta) \tan \alpha} d\eta$$

$$\left( 0 < \xi < \frac{\pi}{2} \right)$$

なお円錐半頂角  $\alpha$  に関してはロケットの円錐ノズルに良く使われる  $12 \sim 15$  度の範囲を  $0.5$  度間隔で計算した。また円管レンズの場合も作成し付録 I ~ VIII に示した。

付録 I ~ VIII の作表において 1 度の間隔を 100 個に分割して計算してみた結果は、少数点以下 8 桁まで、10 個に分割した表の数値と変わらない。したがって付録の数表の誤差は  $10^{-8}$  以下と考えて良い。ただし数表は 5 桁までとした。

いままでに述べた円錐レンズの実際例として、著者等が二次噴射によるロケットの TVC 研究用に試作した円錐レンズの性能試験について述べる。材料はアクリライトで、円錐半頂角  $15$  度、レンズ外表面は本論文の式にしたがって研磨された。図 4 はこの実際例を示す。この円錐レンズの寸法は最大内径  $41.14 \text{ m/m}$  軸長  $31.98 \text{ m/m}$ ,  $\delta_0$  は  $10 \text{ m/m}$  である。 $\delta_0$  は強度計算より決められた。円錐レンズ壁には二次噴射用オリフィスを取り付けるネジが加工されてある。

レンズ加工技術に問題点があるので、加工誤差を調べる目的で  $2\text{-m/m}$  四方格子を光源とレンズの間に置いて、レンズから出て来る光線について格子のシャドー撮影を行なった。図 5 がこの工作誤差による散乱

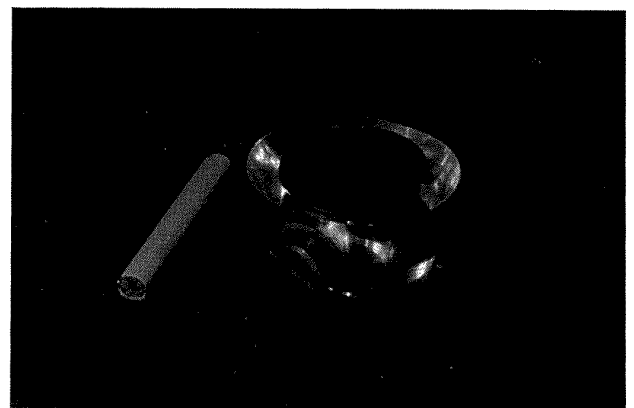


図 4 円錐管レンズ

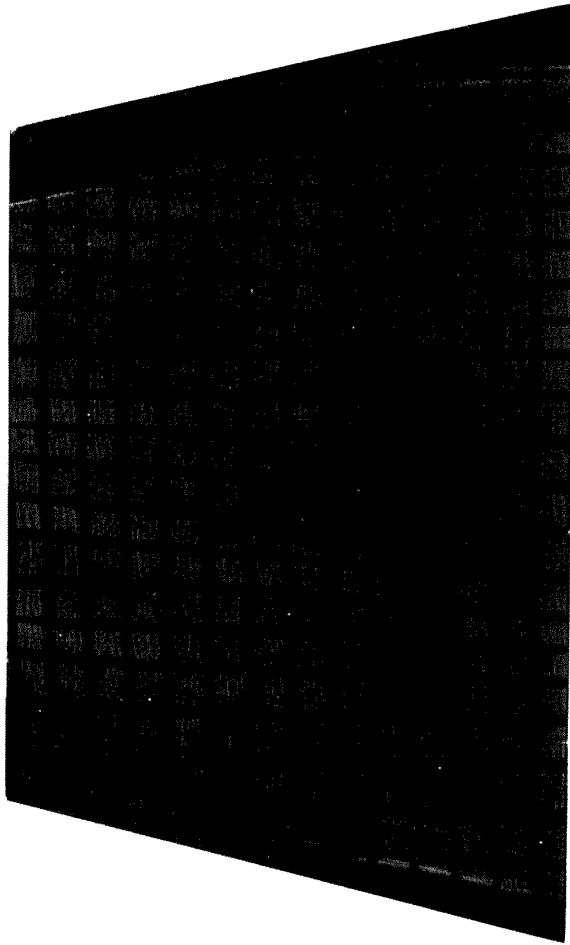


図 5 加工誤差による格子の歪 (2-m/m 四方)

の程度を示す。もしも誤差なく加工されているレンズであれば、円錐管内を通った光線の散乱は存在しないはずである。

(19)式からわかるように、円錐管内の現象と投影された像とは決った関数関係にある。このことは円錐管内の現象がそのまま投影されるのではなく、平行ではあるがある倍率を有することがわかる。この歪は理論上は、 $Y-Z$  面で切断したもう1個のレンズ片側半分を補償用に使えば取り除くことができるが、加工歪があるために実際にはきわめてむずかしい。したがって撮影された像を解析するには (19) 式を用いた座標変換を行なわねばならぬ。しかしながら、このレンズ方程式を実像の投影像に対する陽関数として表示することは困難である。理論的には投影像空間で解析する方が便利である。実像空間で解析をしたい場合にはつぎに述べるような較正写真を用いる実験的方法を採るのが良い。

すなわち、円錐管レンズ内の軸にそってぴったりとはいる、てい形状格子を作る。このてい形状格子を円錐管レンズ軸を含む内面で進入平行光線に垂直に置いてレンズから出て来る光線を用いてシャドー撮影す

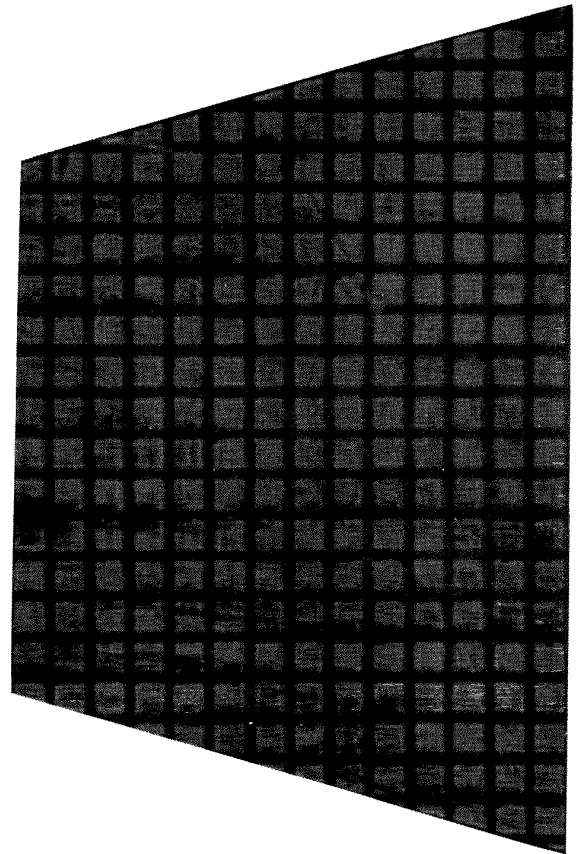


図 6 (a) 2-m/m 四方格子 (実像座標系)

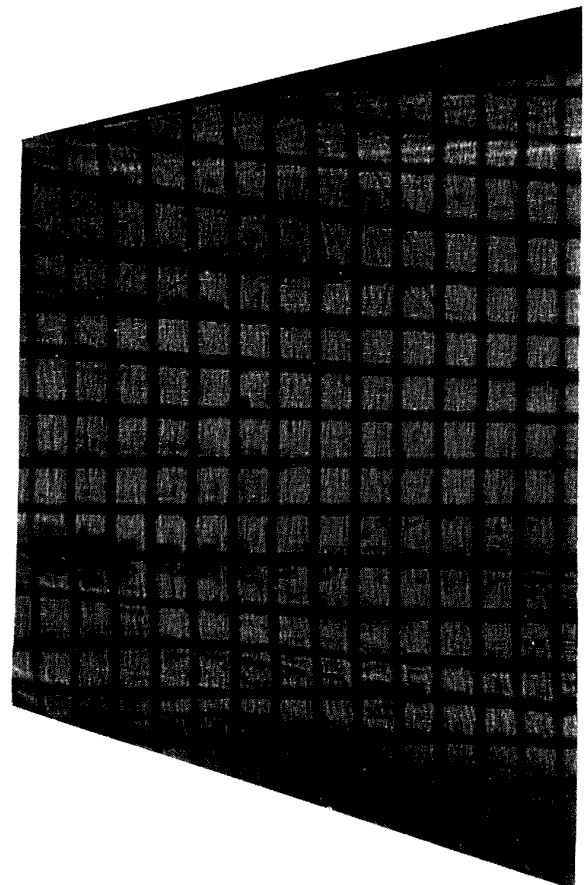


図 6 (b) レンズ内におかれた 2-m/m 四方格子 (投影像座標系)

る。図 6-a は 2-m/m 四方格子をこの試作したレンズ内にぴったりと入るようについてい形にしたもので、レンズを通さないで平行線を当てて撮影した写真である。図 6-b は同じ格子を試作した円錐管レンズ内に入れて、平行光線をレンズに通すことによって得たシャドー写真である。この 2 枚の写真は試作したレンズの実像座標と投影像座標との関係を較正したものに相当する。この較正写真を用いることによって撮影された投影像を実像空間に移すことは容易であり、この場合には工作誤差に影響されることなく厳密な解析が実像空間でできる。また光を通す方向はレンズに関しては  $X-Z$  面のみであるので、レンズ壁を二重にして内側スリーブを回転するようにすれば、あらゆる角度（軸まわり）からの観測も可能となり、円錐管ノズル内の非対称三次元流の三次元的観測もできる<sup>4)</sup>。

#### 4. あ と が き

この研究によって、円錐管内の現象のシャドー撮影が可能であることが実証された。今後はこの試作円錐管レンズを用いて二次流体噴射による TVC の機構を三次元光学観測により明らかにするつもりである。なおレンズ加工技術を向上させることにより、加工歪を少くし、シュリーレン撮影も可能になるような円錐管レンズを試作するよう努力している。本報告の出版が遅れたため、本研究を拡張し任意廻転面管レンズ表面を得る解析が既に著者等によってなされ発表されていることを記し、詳しくは参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

おわりに、本円錐管レンズの研究を進めるに当たり、多くの援助と有益な助言をいただいたロケット部黒田部長ならびにレンズの加工にあたって非常な尽力をいただいた、溝尻光学工業株式会社の方々に対して、深く感謝の意を表する。

#### 文 献

- 1) D.R. Jennings; An Experimental Method for Investigating Three-dimensional Shock Waves, Dissertation, New Mexico State University, New Mexico, 1965.
- 2) T. Yamanaka and H. Azuma; A Method for Observing Phenomena in an Arbitrary Pipe Flowfield of Revolution, J. Spacecraft, Vol. 4, No. 9, 1967, pp. 1272-1274.
- 3) フクリライトの概要; 三菱レイヨン株式会社, 1965年11月改訂, p. 32.
- 4) T. Yamanaka; Shock Waves in a Conical Nozzle Supersonic Flow, Transactions of The

## 付録 I 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$ : 12.0 度屈折率,  $n_1$ : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
0	0.00000	1.00000	0.99760	0.00000	0.06910
1	0.01745	0.99996	0.99759	0.00567	0.06911
2	0.03490	0.99986	0.99754	0.01135	0.06913
3	0.05235	0.99969	0.99745	0.01703	0.06916
4	0.06981	0.99945	0.99734	0.02271	0.06921
5	0.08726	0.99914	0.99719	0.02840	0.06927
6	0.10471	0.99877	0.99700	0.03410	0.06935
7	0.12217	0.99832	0.99679	0.03981	0.06944
8	0.13962	0.99781	0.99653	0.04554	0.06955
9	0.15707	0.99723	0.99625	0.05127	0.06967
10	0.17453	0.99657	0.99592	0.05702	0.06980
11	0.19198	0.99585	0.99557	0.06279	0.06995
12	0.20943	0.99505	0.99517	0.06858	0.07011
13	0.22689	0.99418	0.99474	0.07439	0.07029
14	0.24434	0.99324	0.99428	0.08022	0.07048
15	0.26179	0.99222	0.99377	0.08608	0.07069
16	0.27925	0.99113	0.99323	0.09196	0.07092
17	0.29670	0.98996	0.99265	0.09787	0.07115
18	0.31415	0.98872	0.99202	0.10382	0.07141
19	0.33161	0.98740	0.99136	0.10979	0.07168
20	0.34906	0.98600	0.99066	0.11580	0.07196
21	0.36651	0.98452	0.98991	0.12184	0.07226
22	0.38397	0.98295	0.98912	0.12792	0.07258
23	0.40142	0.98131	0.98828	0.13404	0.07291
24	0.41887	0.97957	0.98740	0.14020	0.07326
25	0.43633	0.97776	0.98647	0.14640	0.07363
26	0.45378	0.97585	0.98550	0.15266	0.07402
27	0.47123	0.97386	0.98447	0.15895	0.07442
28	0.48869	0.97177	0.98339	0.16530	0.07484
29	0.50614	0.96960	0.98226	0.17170	0.07528
30	0.52359	0.96733	0.98108	0.17815	0.07573
31	0.54105	0.96496	0.97984	0.18466	0.07621
32	0.55850	0.96249	0.97854	0.19123	0.07670
33	0.57595	0.95993	0.97718	0.19786	0.07721
34	0.59341	0.95726	0.97576	0.20455	0.07775
35	0.61086	0.95449	0.97427	0.21130	0.07830
36	0.62831	0.95161	0.97272	0.21812	0.07887
37	0.64577	0.94862	0.97110	0.22501	0.07947
38	0.66322	0.94553	0.96941	0.23197	0.08008
39	0.68067	0.94232	0.96765	0.23901	0.08072
40	0.69813	0.93899	0.96581	0.24611	0.08138
41	0.71558	0.93555	0.96389	0.25330	0.08206
42	0.73303	0.93199	0.96189	0.26057	0.08277
43	0.75049	0.92830	0.95981	0.26792	0.08350
44	0.76794	0.92449	0.95764	0.27535	0.08425



$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
45	0.78539	0.92056	0.95537	0.28287	0.08503
46	0.80285	0.91649	0.95302	0.29048	0.08583
47	0.82030	0.91229	0.95056	0.29818	0.08666
48	0.83775	0.90796	0.94800	0.30597	0.08751
49	0.85521	0.90350	0.94534	0.31386	0.08839
50	0.87266	0.89889	0.94256	0.32185	0.08930
51	0.89011	0.89415	0.93967	0.32993	0.09024
52	0.90757	0.88926	0.93667	0.33812	0.09120
53	0.92502	0.88423	0.93354	0.34641	0.09219
54	0.94247	0.87906	0.93028	0.35480	0.09321
55	0.95993	0.87373	0.92688	0.36330	0.09427
56	0.97738	0.86826	0.92335	0.37190	0.09535
57	0.99483	0.86263	0.91968	0.38062	0.09646
58	1.01229	0.85686	0.91585	0.38945	0.09761
59	1.02974	0.85093	0.91187	0.39839	0.09879
60	1.04719	0.84484	0.90773	0.40744	0.10000
61	1.06465	0.83861	0.90343	0.41660	0.10124
62	1.08210	0.83222	0.89894	0.42588	0.10252
63	1.09955	0.82567	0.89428	0.43527	0.10383
64	1.11701	0.81897	0.88943	0.44478	0.10518
65	1.13446	0.81212	0.88439	0.45440	0.10657
66	1.15191	0.80511	0.87915	0.46414	0.10799
67	1.16937	0.79795	0.87370	0.47399	0.10945
68	1.18682	0.79065	0.86803	0.48395	0.11094
69	1.20427	0.78319	0.86214	0.49402	0.11247
70	1.22173	0.77559	0.85601	0.50420	0.11405
71	1.23918	0.76785	0.84965	0.51449	0.11566
72	1.25663	0.75997	0.84304	0.52488	0.11730
73	1.27409	0.75195	0.83618	0.53538	0.11899
74	1.29154	0.74381	0.82905	0.54597	0.12072
75	1.30899	0.73554	0.82165	0.55666	0.12249
76	1.32644	0.72715	0.81398	0.56743	0.12430
77	1.34390	0.71864	0.80601	0.57829	0.12615
78	1.36135	0.71002	0.79774	0.58923	0.12804
79	1.37880	0.70130	0.78917	0.60025	0.12997
80	1.39626	0.69249	0.78029	0.61133	0.13194
81	1.41371	0.68358	0.77109	0.62247	0.13395
82	1.43116	0.67460	0.76155	0.63366	0.13601
83	1.44862	0.66554	0.75168	0.64489	0.13810
84	1.46607	0.65642	0.74146	0.65616	0.14024
85	1.48352	0.64724	0.73089	0.66746	0.14241
86	1.50098	0.63802	0.71996	0.67877	0.14462
87	1.51843	0.62876	0.70866	0.69008	0.14688
88	1.53588	0.61947	0.69699	0.70138	0.14917
89	1.55334	0.61016	0.68494	0.71267	0.15150
90	1.57079	0.60084	0.67250	0.72392	0.15387

## 付録 II 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 12.5 度屈折率,  $n_2$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	$l$	$m$	$n$
0	0.00000	1.00000	0.99746	0.00000	0.07202
1	0.01745	0.99996	0.99738	0.00567	0.07203
2	0.03490	0.99986	0.99733	0.01134	0.07205
3	0.05235	0.99969	0.99725	0.01701	0.07209
4	0.06981	0.99945	0.99713	0.02270	0.07214
5	0.08726	0.99914	0.99698	0.02838	0.07221
6	0.10471	0.99877	0.99680	0.03408	0.07229
7	0.12217	0.99832	0.99658	0.03979	0.07238
8	0.13962	0.99781	0.99632	0.04551	0.07249
9	0.15707	0.99722	0.99604	0.05124	0.07262
10	0.17453	0.99657	0.99571	0.05699	0.07276
11	0.19198	0.99584	0.99536	0.06275	0.07291
12	0.20943	0.99505	0.99496	0.06854	0.07308
13	0.22689	0.99418	0.99453	0.07434	0.07327
14	0.24434	0.99323	0.99406	0.08017	0.07347
15	0.26179	0.99222	0.99356	0.08602	0.07368
16	0.27925	0.99112	0.99302	0.09190	0.07392
17	0.29670	0.98995	0.99243	0.09781	0.07416
18	0.31415	0.98871	0.99181	0.10375	0.07443
19	0.33161	0.98739	0.99115	0.10971	0.07471
20	0.34906	0.98598	0.99044	0.11572	0.07500
21	0.36651	0.98450	0.98969	0.12175	0.07532
22	0.38397	0.98294	0.98890	0.12783	0.07565
23	0.40142	0.98129	0.98806	0.13395	0.07600
24	0.41887	0.97956	0.98718	0.14010	0.07636
25	0.43633	0.97774	0.98625	0.14630	0.07674
26	0.45378	0.97583	0.98527	0.15255	0.07714
27	0.47123	0.97384	0.98425	0.15884	0.07756
28	0.48869	0.97175	0.98317	0.16518	0.07800
29	0.50614	0.96957	0.98204	0.17158	0.07846
30	0.52359	0.96730	0.98085	0.17802	0.07893
31	0.54105	0.96493	0.97961	0.18453	0.07942
32	0.55850	0.96246	0.97831	0.19109	0.07994
33	0.57595	0.95990	0.97695	0.19771	0.08047
34	0.59341	0.95723	0.97552	0.20439	0.08103
35	0.61086	0.95445	0.97404	0.21114	0.08160
36	0.62831	0.95157	0.97249	0.21795	0.08220
37	0.64577	0.94859	0.97087	0.22483	0.08282
38	0.66322	0.94549	0.96917	0.23178	0.08346
39	0.68067	0.94228	0.96741	0.23881	0.08412
40	0.69813	0.93895	0.96557	0.24591	0.08481
41	0.71558	0.93551	0.96365	0.25309	0.08552
42	0.73303	0.93194	0.96165	0.26035	0.08625
43	0.75049	0.92826	0.95956	0.26769	0.08701
44	0.76794	0.92445	0.95739	0.27511	0.08780

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
45	0.78539	0.92051	0.95512	0.28262	0.08861
46	0.80285	0.91645	0.95276	0.29022	0.08944
47	0.82030	0.91225	0.95031	0.29791	0.09030
48	0.83775	0.90792	0.94775	0.30569	0.09119
49	0.85521	0.90345	0.94508	0.31357	0.09211
50	0.87266	0.89885	0.94231	0.32154	0.09305
51	0.89011	0.89410	0.93942	0.32961	0.09402
52	0.90757	0.88922	0.93641	0.33778	0.09503
53	0.92502	0.88419	0.93327	0.34606	0.09606
54	0.94247	0.87901	0.93001	0.35444	0.09712
55	0.95993	0.87369	0.92662	0.36292	0.09822
56	0.97738	0.86822	0.92309	0.37151	0.09934
57	0.99483	0.86260	0.91941	0.38021	0.10050
58	1.01229	0.85682	0.91559	0.38902	0.10169
59	1.02974	0.85090	0.91161	0.39795	0.10292
60	1.04719	0.84482	0.90747	0.40698	0.10418
61	1.06465	0.83858	0.90316	0.41612	0.10547
62	1.08210	0.83219	0.89868	0.42538	0.10680
63	1.09955	0.82565	0.89402	0.43476	0.10817
64	1.11701	0.81896	0.88917	0.44424	0.10957
65	1.13446	0.81211	0.88413	0.45384	0.11101
66	1.15191	0.80511	0.87889	0.46356	0.11249
67	1.16937	0.79796	0.87344	0.47338	0.11401
68	1.18682	0.79066	0.86777	0.48332	0.11556
69	1.20427	0.78321	0.86189	0.49337	0.11716
70	1.22173	0.77562	0.85577	0.50352	0.11879
71	1.23918	0.76788	0.84941	0.51379	0.12046
72	1.25663	0.76001	0.84281	0.52415	0.12218
73	1.27409	0.75200	0.83595	0.53462	0.12393
74	1.29154	0.74387	0.82883	0.54518	0.12573
75	1.30899	0.73561	0.82143	0.55584	0.12757
76	1.32644	0.72722	0.81376	0.56658	0.12945
77	1.34390	0.71873	0.80580	0.57741	0.13137
78	1.36135	0.71012	0.79755	0.58832	0.13334
79	1.37880	0.70141	0.78899	0.59930	0.13534
80	1.39626	0.69261	0.78012	0.61035	0.13739
81	1.41371	0.68372	0.77093	0.62145	0.13949
82	1.43116	0.67475	0.76141	0.63261	0.14162
83	1.44862	0.66570	0.75155	0.64380	0.14380
84	1.46607	0.65659	0.74135	0.65504	0.14601
85	1.48352	0.64743	0.73079	0.66629	0.14827
86	1.50098	0.63822	0.71988	0.67756	0.15057
87	1.51843	0.62897	0.70860	0.68883	0.15292
88	1.53588	0.61969	0.69695	0.70010	0.15530
89	1.55334	0.61040	0.68491	0.71134	0.15772
90	1.57079	0.60109	0.67250	0.72255	0.16018

## 付録 III 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 13.0 度屈折率,  $n_\lambda$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
0	0.00000	1.00000	0.99718	0.00000	0.07496
1	0.01745	0.99996	0.99717	0.00566	0.07496
2	0.03490	0.99986	0.99711	0.01133	0.07498
3	0.05235	0.99969	0.99703	0.01700	0.07502
4	0.06981	0.99945	0.99691	0.02268	0.07508
5	0.08726	0.99914	0.99676	0.02836	0.07514
6	0.10471	0.99877	0.99658	0.03406	0.07523
7	0.12217	0.99832	0.99636	0.03976	0.07533
8	0.13962	0.99781	0.99611	0.04548	0.07544
9	0.15707	0.99722	0.99582	0.05120	0.07557
10	0.17453	0.99657	0.99550	0.05695	0.07572
11	0.19198	0.99584	0.99514	0.06271	0.07588
12	0.20943	0.99504	0.99474	0.06849	0.07605
13	0.22689	0.99417	0.99431	0.07429	0.07625
14	0.24434	0.99323	0.99384	0.08012	0.07645
15	0.26179	0.99221	0.99334	0.08596	0.07668
16	0.27925	0.99111	0.99279	0.09184	0.07692
17	0.29670	0.98994	0.99221	0.09774	0.07718
18	0.31415	0.98870	0.99159	0.10367	0.07745
19	0.33161	0.98737	0.99092	0.10964	0.07774
20	0.34906	0.98597	0.99021	0.11563	0.07805
21	0.36651	0.98449	0.98947	0.12167	0.07838
22	0.38397	0.98292	0.98867	0.12774	0.07872
23	0.40142	0.98127	0.98784	0.13385	0.07908
24	0.41887	0.97954	0.98695	0.14000	0.07946
25	0.43633	0.97772	0.98602	0.14619	0.07986
26	0.45378	0.97581	0.98504	0.15243	0.08028
27	0.47123	0.97381	0.98401	0.15872	0.08071
28	0.48869	0.97173	0.98293	0.16506	0.08117
29	0.50614	0.96955	0.98180	0.17144	0.08164
30	0.52359	0.96727	0.98061	0.17788	0.08213
31	0.54105	0.96490	0.97937	0.18438	0.08265
32	0.55850	0.96243	0.97807	0.19094	0.08318
33	0.57595	0.95986	0.97670	0.19755	0.08374
34	0.59341	0.95719	0.97528	0.20422	0.08431
35	0.61086	0.95442	0.97379	0.21096	0.08491
36	0.62831	0.95154	0.97224	0.21777	0.08553
37	0.64577	0.94855	0.97062	0.22464	0.08617
38	0.66322	0.94545	0.96892	0.23159	0.08684
39	0.68067	0.94224	0.96716	0.23861	0.08753
40	0.69813	0.93891	0.96531	0.24570	0.08824
41	0.71558	0.93546	0.96339	0.25287	0.08898
42	0.73303	0.93190	0.96139	0.26012	0.08974
43	0.75049	0.92821	0.95930	0.26745	0.09053
44	0.76794	0.92440	0.95713	0.27486	0.09135

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta^\circ$	l	m	n
45	0.78539	0.92046	0.95486	0.28236	0.09219
46	0.80285	0.91640	0.95250	0.28995	0.09305
47	0.82030	0.91220	0.95004	0.29763	0.09395
48	0.83775	0.90787	0.94748	0.30540	0.09487
49	0.85521	0.90340	0.94481	0.31326	0.09582
50	0.87266	0.89880	0.94204	0.32122	0.09680
51	0.89011	0.89406	0.93915	0.32928	0.09782
52	0.90757	0.88917	0.93614	0.33744	0.09886
53	0.92502	0.88414	0.93300	0.34570	0.09993
54	0.94247	0.87897	0.92974	0.35406	0.10103
55	0.95993	0.87365	0.92635	0.36253	0.10217
56	0.97738	0.86818	0.92281	0.37111	0.10334
57	0.99483	0.86256	0.91914	0.37979	0.10454
58	1.01229	0.85679	0.91531	0.38858	0.10578
59	1.02974	0.85086	0.91133	0.39749	0.10705
60	1.04719	0.84479	0.90719	0.40650	0.10836
61	1.06465	0.83856	0.90289	0.41563	0.10971
62	1.08210	0.83217	0.89841	0.42487	0.11109
63	1.09955	0.82564	0.89375	0.43422	0.11251
64	1.11701	0.81895	0.88890	0.44368	0.11396
65	1.13446	0.81210	0.88386	0.45326	0.11546
66	1.15191	0.80511	0.87862	0.46295	0.11699
67	1.16937	0.79796	0.87317	0.47276	0.11857
68	1.18682	0.79067	0.86751	0.48267	0.12018
69	1.20427	0.78323	0.86163	0.49269	0.12184
70	1.22173	0.77564	0.85551	0.50282	0.12353
71	1.23918	0.76792	0.84916	0.51305	0.12527
72	1.25663	0.76005	0.84256	0.52339	0.12705
73	1.27409	0.75206	0.83571	0.53383	0.12887
74	1.29154	0.74393	0.82859	0.54436	0.13074
75	1.30899	0.73568	0.82121	0.55499	0.13264
76	1.32644	0.72731	0.81354	0.56570	0.13460
77	1.34390	0.71882	0.80559	0.57650	0.13659
78	1.36135	0.71023	0.79735	0.58737	0.13863
79	1.37880	0.70153	0.78880	0.59831	0.14071
80	1.39626	0.69274	0.77994	0.60933	0.14284
81	1.41371	0.68386	0.77076	0.62039	0.14501
82	1.43116	0.67490	0.76125	0.63151	0.14722
83	1.44862	0.66587	0.75141	0.64267	0.14948
84	1.46607	0.65677	0.74122	0.65386	0.15178
85	1.48352	0.64762	0.73068	0.66508	0.15413
86	1.50098	0.63843	0.71979	0.67631	0.15652
87	1.51843	0.62919	0.70853	0.68754	0.15894
88	1.53588	0.61993	0.69690	0.69876	0.16142
89	1.55334	0.61065	0.68489	0.70996	0.16393
90	1.57079	0.60136	0.67250	0.72112	0.16648

## 付録 IV 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 13.5 度屈折率,  $n_\lambda$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
0	0.00000	1.00000	0.99696	0.00000	0.07789
1	0.01745	0.99996	0.99694	0.00566	0.07790
2	0.03490	0.99986	0.99689	0.01132	0.07792
3	0.05235	0.99969	0.99681	0.01699	0.07796
4	0.06981	0.99945	0.99669	0.02266	0.07802
5	0.08726	0.99914	0.99654	0.02834	0.07809
6	0.10471	0.99877	0.99635	0.03403	0.07817
7	0.12217	0.99832	0.99613	0.03973	0.07828
8	0.13962	0.99780	0.99588	0.04544	0.07840
9	0.15707	0.99722	0.99559	0.05117	0.07853
10	0.17453	0.99656	0.99527	0.05691	0.07868
11	0.19198	0.99583	0.99491	0.06267	0.07885
12	0.20943	0.99504	0.99451	0.06844	0.07903
13	0.22689	0.99416	0.99408	0.07424	0.07923
14	0.24434	0.99322	0.99361	0.08006	0.07945
15	0.26179	0.99220	0.99311	0.08590	0.07968
16	0.27925	0.99110	0.99256	0.09177	0.07993
17	0.29670	0.98993	0.99198	0.09767	0.08020
18	0.31415	0.98869	0.99135	0.10360	0.08048
19	0.33161	0.98736	0.99069	0.10956	0.08079
20	0.34906	0.98596	0.98998	0.11555	0.08111
21	0.36651	0.98447	0.98923	0.12158	0.08145
22	0.38397	0.98290	0.98844	0.12764	0.08180
23	0.40142	0.98125	0.98760	0.13375	0.08218
24	0.41887	0.97952	0.98671	0.13989	0.08257
25	0.43633	0.97770	0.98578	0.14608	0.08298
26	0.45378	0.97579	0.98480	0.15231	0.08341
27	0.47123	0.97379	0.98377	0.15860	0.08387
28	0.48869	0.97170	0.98269	0.16493	0.08434
29	0.50614	0.96952	0.98155	0.17131	0.08483
30	0.52359	0.96724	0.98036	0.17774	0.08534
31	0.54105	0.96487	0.97912	0.18423	0.08587
32	0.55850	0.96240	0.97781	0.19078	0.08643
33	0.57595	0.95983	0.97645	0.19738	0.08701
34	0.59341	0.95716	0.97503	0.20405	0.08760
35	0.61086	0.95438	0.97354	0.21078	0.08822
36	0.62831	0.95150	0.97198	0.21758	0.08887
37	0.64577	0.94851	0.97036	0.22445	0.08954
38	0.66322	0.94541	0.96866	0.23138	0.09023
39	0.68067	0.94219	0.96689	0.23839	0.09094
40	0.69813	0.93886	0.96505	0.24548	0.09168
41	0.71558	0.93542	0.96313	0.25264	0.09245
42	0.73303	0.93185	0.96112	0.25988	0.09324
43	0.75049	0.92817	0.95903	0.26720	0.09406
44	0.76794	0.92435	0.95686	0.27460	0.09490

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
45	0.78539	0.92042	0.95459	0.28209	0.09577
46	0.80285	0.91635	0.95223	0.28966	0.09667
47	0.82030	0.91215	0.94977	0.29733	0.09760
48	0.83775	0.90782	0.94720	0.30509	0.09856
49	0.85521	0.90336	0.94454	0.31294	0.09954
50	0.87266	0.89875	0.94176	0.32089	0.10056
51	0.89011	0.89401	0.93886	0.32893	0.10161
52	0.90757	0.88913	0.93585	0.33708	0.10269
53	0.92502	0.88410	0.93272	0.34532	0.10380
54	0.94247	0.87892	0.92946	0.35367	0.10495
55	0.95993	0.87360	0.92606	0.36212	0.10613
56	0.97738	0.86814	0.92253	0.37068	0.10734
57	0.99483	0.86252	0.91885	0.37935	0.10859
58	1.01229	0.85675	0.91503	0.38812	0.10987
59	1.02974	0.85083	0.91105	0.39701	0.11119
60	1.04719	0.84476	0.90691	0.40600	0.11255
61	1.06465	0.83853	0.90260	0.41511	0.11394
62	1.08210	0.83215	0.89812	0.42433	0.11537
63	1.09955	0.82562	0.89346	0.43366	0.11684
64	1.11701	0.81893	0.88862	0.44310	0.11835
65	1.13446	0.81210	0.88358	0.45266	0.11990
66	1.15191	0.80511	0.87834	0.46232	0.12149
67	1.16937	0.79797	0.87289	0.47210	0.12313
68	1.18682	0.79068	0.86724	0.48199	0.12480
69	1.20427	0.78325	0.86135	0.49198	0.12651
70	1.22173	0.77567	0.85524	0.50209	0.12827
71	1.23918	0.76795	0.84890	0.51229	0.13007
72	1.25663	0.76010	0.84230	0.52260	0.13192
73	1.27409	0.75211	0.83546	0.53301	0.13381
74	1.29154	0.74400	0.82835	0.54351	0.13574
75	1.30899	0.73575	0.82097	0.55410	0.13772
76	1.32644	0.72739	0.81331	0.56478	0.13974
77	1.34390	0.71892	0.80537	0.57554	0.14181
78	1.36135	0.71034	0.79714	0.58638	0.14392
79	1.37880	0.70165	0.78860	0.59729	0.14608
80	1.39626	0.69287	0.77975	0.60826	0.14828
81	1.41371	0.68401	0.77058	0.61929	0.15053
82	1.43116	0.67506	0.76109	0.63037	0.15282
83	1.44862	0.66604	0.75126	0.64149	0.15516
84	1.46607	0.65696	0.74109	0.65264	0.15755
85	1.48352	0.64783	0.73057	0.66382	0.15997
86	1.50098	0.63864	0.71970	0.67500	0.16245
87	1.51843	0.62942	0.70846	0.68619	0.16496
88	1.53588	0.62018	0.69685	0.69737	0.16752
89	1.55334	0.61091	0.68486	0.70852	0.17012
90	1.57079	0.60163	0.67250	0.71964	0.17277

## 付録 V 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 14.0 度屈折率,  $n_\lambda$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	$l$	$m$	$n$
0	0.00000	1.00000	0.99672	0.00000	0.08083
1	0.01745	0.99996	0.99671	0.00565	0.08084
2	0.03490	0.99986	0.99666	0.01131	0.08087
3	0.05235	0.99969	0.99657	0.01698	0.08091
4	0.06981	0.99945	0.99645	0.02265	0.08096
5	0.08726	0.99914	0.99630	0.02832	0.08104
6	0.10471	0.99876	0.99612	0.03401	0.08113
7	0.12217	0.99832	0.99590	0.03970	0.08123
8	0.13962	0.99780	0.99564	0.04541	0.08136
9	0.15707	0.99722	0.99536	0.05113	0.08150
10	0.17453	0.99656	0.99503	0.05687	0.08165
11	0.19198	0.99583	0.99467	0.06262	0.08183
12	0.20943	0.99503	0.99428	0.06839	0.08202
13	0.22689	0.99416	0.99384	0.07418	0.08222
14	0.24434	0.99321	0.99337	0.08000	0.08245
15	0.26179	0.99219	0.99287	0.08584	0.08269
16	0.27925	0.99109	0.99232	0.09170	0.08295
17	0.29670	0.98992	0.99173	0.09760	0.08323
18	0.31415	0.98867	0.99111	0.10352	0.08352
19	0.33161	0.98735	0.99044	0.10947	0.08384
20	0.34906	0.98594	0.98973	0.11546	0.08417
21	0.36651	0.98445	0.98898	0.12148	0.08452
22	0.38397	0.98288	0.98819	0.12754	0.08489
23	0.40142	0.98123	0.98735	0.13364	0.08528
24	0.41887	0.97950	0.98646	0.13978	0.08568
25	0.43633	0.97767	0.98553	0.14596	0.08611
26	0.45378	0.97576	0.98455	0.15219	0.08656
27	0.47123	0.97376	0.98352	0.15847	0.08703
28	0.48869	0.97167	0.98243	0.16479	0.08751
29	0.50614	0.96949	0.98130	0.17116	0.08802
30	0.52359	0.96721	0.98011	0.17759	0.08856
31	0.54105	0.96484	0.97886	0.18408	0.08911
32	0.55850	0.96237	0.97755	0.19062	0.08968
33	0.57595	0.95979	0.97619	0.19721	0.09028
34	0.59341	0.95712	0.97476	0.20387	0.09090
35	0.61086	0.95434	0.97327	0.21060	0.09154
36	0.62831	0.95146	0.97171	0.21739	0.09221
37	0.64577	0.94847	0.97009	0.22425	0.09290
38	0.66322	0.94536	0.96839	0.23117	0.09362
39	0.68067	0.94215	0.96662	0.23817	0.09436
40	0.69813	0.93882	0.96478	0.24525	0.09512
41	0.71558	0.93537	0.96285	0.25240	0.09592
42	0.73303	0.93181	0.96085	0.25962	0.09674
43	0.75049	0.92812	0.95875	0.26693	0.09758
44	0.76794	0.92430	0.95658	0.27433	0.09846



$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
45	0.78539	0.92037	0.95431	0.28180	0.09936
46	0.80285	0.91630	0.95194	0.28937	0.10029
47	0.82030	0.91210	0.94948	0.29702	0.10126
48	0.83775	0.90777	0.94692	0.30477	0.10225
49	0.85521	0.90331	0.94425	0.31261	0.10327
50	0.87266	0.89870	0.94147	0.32054	0.10432
51	0.89011	0.89396	0.93857	0.32857	0.10541
52	0.90757	0.88908	0.93556	0.33670	0.10653
53	0.92502	0.88405	0.93242	0.34493	0.10768
54	0.94247	0.87888	0.92916	0.35326	0.10887
55	0.95993	0.87356	0.92576	0.36170	0.11009
56	0.97738	0.86809	0.92223	0.37024	0.11134
57	0.99483	0.86248	0.91855	0.37889	0.11264
58	1.01229	0.85671	0.91473	0.38765	0.11397
59	1.02974	0.85079	0.91075	0.39651	0.11533
60	1.04719	0.84473	0.90661	0.40549	0.11674
61	1.06465	0.83850	0.90230	0.41457	0.11818
62	1.08210	0.83213	0.89782	0.42377	0.11966
63	1.09955	0.82560	0.89316	0.43308	0.12118
64	1.11701	0.81892	0.88832	0.44250	0.12275
65	1.13446	0.81209	0.88328	0.45203	0.12435
66	1.15191	0.80511	0.87805	0.46167	0.12600
67	1.16937	0.79797	0.87261	0.47142	0.12769
68	1.18682	0.79070	0.86695	0.48128	0.12942
69	1.20427	0.78327	0.86107	0.49125	0.13119
70	1.22173	0.77570	0.85497	0.50132	0.13301
71	1.23918	0.76799	0.84862	0.51150	0.13488
72	1.25663	0.76015	0.84203	0.52178	0.13679
73	1.27409	0.75217	0.83519	0.53215	0.13874
74	1.29154	0.74406	0.82809	0.54262	0.14074
75	1.30899	0.73583	0.82072	0.55318	0.14279
76	1.32644	0.72748	0.81308	0.56383	0.14488
77	1.34390	0.71902	0.80514	0.57455	0.14702
78	1.36135	0.71045	0.79692	0.58536	0.14920
79	1.37880	0.70178	0.78839	0.59623	0.15144
80	1.39626	0.69301	0.77956	0.60716	0.15371
81	1.41371	0.68416	0.77040	0.61815	0.15604
82	1.43116	0.67523	0.76093	0.62919	0.15841
83	1.44862	0.66623	0.75111	0.64027	0.16083
84	1.46607	0.65716	0.74096	0.65138	0.16330
85	1.48352	0.64804	0.73046	0.66251	0.16581
86	1.50098	0.63887	0.71960	0.67365	0.16837
87	1.51843	0.62967	0.70839	0.68479	0.17097
88	1.53588	0.62043	0.69680	0.69593	0.17362
89	1.55334	0.61118	0.68484	0.70703	0.17631
90	1.57079	0.60192	0.67250	0.71811	0.17904

## 付録 VI 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 14.5 度屈折率,  $n_\lambda$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
0	0.00000	1.00000	0.99647	0.00000	0.08378
1	0.01745	0.99996	0.99646	0.00565	0.08379
2	0.03490	0.99986	0.99641	0.01131	0.08382
3	0.05235	0.99969	0.99633	0.01697	0.08386
4	0.06981	0.99945	0.99621	0.02263	0.08392
5	0.08726	0.99914	0.99606	0.02830	0.08399
6	0.10471	0.99876	0.99587	0.03398	0.08409
7	0.12217	0.99832	0.99565	0.03967	0.08420
8	0.13962	0.99780	0.99540	0.04538	0.08432
9	0.15707	0.99721	0.99511	0.05109	0.08447
10	0.17453	0.99655	0.99479	0.05682	0.08463
11	0.19198	0.99583	0.99442	0.06257	0.08481
12	0.20943	0.99502	0.99403	0.06834	0.08501
13	0.22689	0.99415	0.99360	0.07413	0.08522
14	0.24434	0.99320	0.99312	0.07994	0.08545
15	0.26179	0.99218	0.99262	0.08577	0.08570
16	0.27925	0.99108	0.99207	0.09163	0.08597
17	0.29670	0.98991	0.99148	0.09752	0.08626
18	0.31415	0.98866	0.99086	0.10344	0.08657
19	0.33161	0.98733	0.99019	0.10938	0.08689
20	0.34906	0.98593	0.98948	0.11537	0.08723
21	0.36651	0.98444	0.98873	0.12138	0.08760
22	0.38397	0.98287	0.98793	0.12744	0.08798
23	0.40142	0.98121	0.98709	0.13353	0.08838
24	0.41887	0.97947	0.98620	0.13967	0.08880
25	0.43633	0.97765	0.98527	0.14584	0.08925
26	0.45378	0.97574	0.98428	0.15206	0.08971
27	0.47123	0.97374	0.98325	0.15833	0.09019
28	0.48869	0.97164	0.98217	0.16465	0.09070
29	0.50614	0.96946	0.98103	0.17102	0.09123
30	0.52359	0.96718	0.97984	0.17744	0.09177
31	0.54105	0.96481	0.97859	0.18391	0.09235
32	0.55850	0.96233	0.97728	0.19045	0.09294
33	0.57595	0.95976	0.97592	0.19704	0.09356
34	0.59341	0.95708	0.97449	0.20369	0.09420
35	0.61086	0.95430	0.97299	0.21041	0.09487
36	0.62831	0.95142	0.97144	0.21719	0.09556
37	0.64577	0.94842	0.96981	0.22403	0.09627
38	0.66322	0.94532	0.96811	0.23095	0.09701
39	0.68067	0.94210	0.96634	0.23794	0.09778
40	0.69813	0.93877	0.96449	0.24501	0.09857
41	0.71558	0.93532	0.96256	0.25215	0.09939
42	0.73303	0.93176	0.96056	0.25936	0.10024
43	0.75049	0.92807	0.95846	0.26666	0.10112
44	0.76794	0.92425	0.95628	0.27404	0.10202

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
45	0.78539	0.92032	0.95401	0.28151	0.10296
46	0.80285	0.91625	0.95165	0.28906	0.10392
47	0.82030	0.91205	0.94918	0.29670	0.10492
48	0.83775	0.90772	0.94662	0.30443	0.10594
49	0.85521	0.90325	0.94394	0.31226	0.10700
50	0.87266	0.89865	0.94116	0.32018	0.10809
51	0.89011	0.89391	0.93827	0.32819	0.10921
52	0.90757	0.88903	0.93525	0.33631	0.11037
53	0.92502	0.88400	0.93212	0.34452	0.11156
54	0.94247	0.87883	0.92885	0.35284	0.11279
55	0.95993	0.87351	0.92546	0.36126	0.11405
56	0.97738	0.86805	0.92192	0.36978	0.11535
57	0.99483	0.86244	0.91824	0.37841	0.11669
58	1.01229	0.85667	0.91442	0.38715	0.11806
59	1.02974	0.85076	0.91044	0.39600	0.11947
60	1.04719	0.84469	0.90630	0.40495	0.12093
61	1.06465	0.83848	0.90199	0.41402	0.12242
62	1.08210	0.83211	0.89751	0.42319	0.12395
63	1.09955	0.82558	0.89286	0.43248	0.12552
64	1.11701	0.81891	0.88801	0.44187	0.12714
65	1.13446	0.81208	0.88298	0.45138	0.12880
66	1.15191	0.80511	0.87775	0.46099	0.13050
67	1.16937	0.79798	0.87231	0.47072	0.13225
68	1.18682	0.79071	0.86665	0.48055	0.13404
69	1.20427	0.78329	0.86078	0.49049	0.13587
70	1.22173	0.77573	0.85468	0.50053	0.13775
71	1.23918	0.76804	0.84834	0.51068	0.13968
72	1.25663	0.76020	0.84176	0.52093	0.14165
73	1.27409	0.75223	0.83492	0.53127	0.14367
74	1.29154	0.74414	0.82783	0.54170	0.14574
75	1.30899	0.73592	0.82047	0.55223	0.14785
76	1.32644	0.72758	0.81283	0.56284	0.15001
77	1.34390	0.71913	0.80491	0.57353	0.15222
78	1.36135	0.71057	0.79669	0.58429	0.15448
79	1.37880	0.70191	0.78818	0.59513	0.15679
80	1.39626	0.69316	0.77936	0.60602	0.15914
81	1.41371	0.68432	0.77022	0.61697	0.16154
82	1.43116	0.67541	0.76075	0.62797	0.16400
83	1.44862	0.66642	0.75096	0.63900	0.16650
84	1.46607	0.65737	0.74082	0.65007	0.16904
85	1.48352	0.64826	0.73034	0.66116	0.17164
86	1.50098	0.63911	0.71951	0.67225	0.17428
87	1.51843	0.62992	0.70831	0.68335	0.17696
88	1.53588	0.62070	0.69675	0.69443	0.17970
89	1.55334	0.61146	0.68481	0.70549	0.18248
90	1.57079	0.60222	0.67250	0.71652	0.18530

## 付録 VII 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 15.0 度屈折率,  $n_1$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
0	0.00000	1.00000	0.99623	0.00000	0.08674
1	0.01745	0.99996	0.99621	0.00565	0.08675
2	0.03490	0.99986	0.99616	0.01130	0.08677
3	0.05235	0.99969	0.99607	0.01695	0.08682
4	0.06981	0.99945	0.99596	0.02261	0.08688
5	0.08726	0.99914	0.99581	0.02828	0.08696
6	0.10471	0.99876	0.99562	0.03396	0.08705
7	0.12217	0.99831	0.99540	0.03964	0.08717
8	0.13962	0.99780	0.99514	0.04534	0.08730
9	0.15707	0.99721	0.99485	0.05105	0.08745
10	0.17453	0.99655	0.99453	0.05678	0.08761
11	0.19198	0.99582	0.99417	0.06252	0.08780
12	0.20943	0.99502	0.99377	0.06828	0.08800
13	0.22689	0.99414	0.99334	0.07407	0.08822
14	0.24434	0.99320	0.99287	0.07987	0.08847
15	0.26179	0.99217	0.99236	0.08570	0.08872
16	0.27925	0.99107	0.99181	0.09156	0.08900
17	0.29670	0.98990	0.99122	0.09744	0.08930
18	0.31415	0.98865	0.99059	0.10335	0.08961
19	0.33161	0.98732	0.98993	0.10929	0.08995
20	0.34906	0.98591	0.98921	0.11527	0.09031
21	0.36651	0.98442	0.98846	0.12128	0.09068
22	0.38397	0.98285	0.98766	0.12733	0.09108
23	0.40142	0.98119	0.98682	0.13342	0.09149
24	0.41887	0.97945	0.98593	0.13955	0.09193
25	0.43633	0.97763	0.98500	0.14572	0.09239
26	0.45378	0.97571	0.98401	0.15193	0.09286
27	0.47123	0.97371	0.98298	0.15819	0.09336
28	0.48869	0.97162	0.98189	0.16450	0.09389
29	0.50614	0.96943	0.98075	0.17086	0.09443
30	0.52359	0.96715	0.97956	0.17728	0.09500
31	0.54105	0.96477	0.97831	0.18374	0.09559
32	0.55850	0.96230	0.97700	0.19027	0.09621
33	0.57595	0.95972	0.97563	0.19685	0.09684
34	0.59341	0.95704	0.97420	0.20350	0.09751
35	0.61086	0.95426	0.97271	0.21020	0.09820
36	0.62831	0.95138	0.97115	0.21698	0.09891
37	0.64577	0.94838	0.96952	0.22382	0.09965
38	0.66322	0.94528	0.96782	0.23072	0.10041
39	0.68067	0.94206	0.96604	0.23770	0.10121
40	0.69813	0.93872	0.96419	0.24476	0.10203
41	0.71558	0.93528	0.96227	0.25189	0.10287
42	0.73303	0.93171	0.96026	0.25909	0.10375
43	0.75049	0.92802	0.95816	0.26638	0.10466
44	0.76794	0.92420	0.95598	0.27375	0.10559

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n
45	0.78539	0.92026	0.95371	0.28120	0.10656
46	0.80285	0.91619	0.95134	0.28874	0.10755
47	0.82030	0.91200	0.94887	0.29637	0.10858
48	0.83775	0.90767	0.94631	0.30409	0.10964
49	0.85521	0.90320	0.94363	0.31190	0.11073
50	0.87266	0.89860	0.94085	0.31981	0.11186
51	0.89011	0.89386	0.93795	0.32781	0.11302
52	0.90757	0.88898	0.93494	0.33590	0.11422
53	0.92502	0.88395	0.93180	0.34410	0.11545
54	0.94247	0.87878	0.92854	0.35240	0.11671
55	0.95993	0.87347	0.92514	0.36080	0.11802
56	0.97738	0.86801	0.92160	0.36931	0.11936
57	0.99483	0.86240	0.91792	0.37792	0.12074
58	1.01229	0.85664	0.91410	0.38664	0.12216
59	1.02974	0.85073	0.91012	0.39546	0.12362
60	1.04719	0.84466	0.90598	0.40440	0.12512
61	1.06465	0.83845	0.90167	0.41344	0.12666
62	1.08210	0.83208	0.89719	0.42259	0.12824
63	1.09955	0.82557	0.89254	0.43185	0.12987
64	1.11701	0.81890	0.88770	0.44122	0.13153
65	1.13446	0.81208	0.88267	0.45070	0.13325
66	1.15191	0.80511	0.87743	0.46029	0.13500
67	1.16937	0.79799	0.87200	0.46999	0.13681
68	1.18682	0.79073	0.86635	0.47979	0.13865
69	1.20427	0.78332	0.86048	0.48970	0.14055
70	1.22173	0.77577	0.85438	0.49972	0.14249
71	1.23918	0.76808	0.84805	0.50983	0.14448
72	1.25663	0.76025	0.84147	0.52004	0.14651
73	1.27409	0.75230	0.83464	0.53035	0.14860
74	1.29154	0.74421	0.82756	0.54075	0.15073
75	1.30899	0.73601	0.82020	0.55124	0.15291
76	1.32644	0.72768	0.81257	0.56182	0.15514
77	1.34390	0.71924	0.80466	0.57247	0.15742
78	1.36135	0.71070	0.79646	0.58319	0.15975
79	1.37880	0.70205	0.78796	0.59399	0.16213
80	1.39626	0.69332	0.77915	0.60484	0.16456
81	1.41371	0.68449	0.77002	0.61575	0.16704
82	1.43116	0.67559	0.76058	0.62670	0.16957
83	1.44862	0.66661	0.75080	0.63769	0.17215
84	1.46607	0.65758	0.74068	0.64871	0.17478
85	1.48352	0.64849	0.73022	0.65975	0.17745
86	1.50098	0.63935	0.71940	0.67080	0.18018
87	1.51843	0.63018	0.70823	0.68185	0.18295
88	1.53588	0.62098	0.69669	0.69289	0.18577
89	1.55334	0.61176	0.68478	0.70390	0.18863
90	1.57079	0.60253	0.67250	0.71487	0.19155

## 付録Ⅷ 円錐管レンズ

半頂角,  $\alpha$  : 0 度屈折率,  $n_2$  : 1.48698

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n=0
0	0.00000	1.00000	1.00000	0.00000	
1	0.01745	0.99996	0.99998	0.00571	
2	0.03490	0.99986	0.99993	0.01143	
3	0.05235	0.99969	0.99985	0.01715	
4	0.06981	0.99946	0.99973	0.02288	
5	0.08726	0.99915	0.99959	0.02861	
6	0.10471	0.99878	0.99940	0.03435	
7	0.12217	0.99834	0.99919	0.04011	
8	0.13962	0.99784	0.99894	0.04587	
9	0.15707	0.99726	0.99866	0.05165	
10	0.17453	0.99661	0.99834	0.05745	
11	0.19198	0.99590	0.99799	0.06326	
12	0.20943	0.99511	0.99760	0.06910	
13	0.22689	0.99425	0.99718	0.07495	
14	0.24434	0.99332	0.99672	0.08083	
15	0.26179	0.99231	0.99623	0.08674	
16	0.27925	0.99124	0.99569	0.09267	
17	0.29670	0.99008	0.99512	0.09863	
18	0.31415	0.98885	0.99451	0.10462	
19	0.33161	0.98754	0.99385	0.11065	
20	0.34906	0.98616	0.99316	0.11671	
21	0.36651	0.98469	0.99243	0.12280	
22	0.38397	0.98314	0.99165	0.12894	
23	0.40142	0.98151	0.99082	0.13512	
24	0.41887	0.97980	0.98996	0.14134	
25	0.43633	0.97800	0.98904	0.14760	
26	0.45378	0.97611	0.98808	0.15391	
27	0.47123	0.97413	0.98707	0.16028	
28	0.48869	0.97207	0.98600	0.16669	
29	0.50614	0.96991	0.98489	0.17316	
30	0.52359	0.96765	0.98372	0.17968	
31	0.54105	0.96531	0.98249	0.18626	
32	0.55850	0.96286	0.98121	0.19290	
33	0.57595	0.96031	0.97987	0.19961	
34	0.59341	0.95766	0.97847	0.20637	
35	0.61086	0.95491	0.97700	0.21321	
36	0.62831	0.95204	0.97547	0.22012	
37	0.64577	0.94907	0.97387	0.22709	
38	0.66322	0.94599	0.97220	0.23415	
39	0.68067	0.94280	0.97045	0.24127	
40	0.69813	0.93949	0.96863	0.24848	
41	0.71558	0.93606	0.96673	0.25577	
42	0.73303	0.93251	0.96475	0.26314	
43	0.75049	0.92883	0.96269	0.27060	
44	0.76794	0.92503	0.96053	0.27815	

$\theta$ (度)	$\theta$ (ラジアン)	$\delta/\delta_0$	l	m	n=0
45	0.78539	0.92111	0.95829	0.28579	
46	0.80285	0.91705	0.95595	0.29352	
47	0.82030	0.91286	0.95351	0.30134	
48	0.83775	0.90853	0.95097	0.30927	
49	0.85521	0.90406	0.94832	0.31729	
50	0.87266	0.89946	0.94556	0.32542	
51	0.89011	0.89471	0.94269	0.33365	
52	0.90757	0.88982	0.93970	0.34199	
53	0.92502	0.88478	0.93658	0.35044	
54	0.94247	0.87959	0.93333	0.35900	
55	0.95993	0.87424	0.92995	0.36767	
56	0.97738	0.86875	0.92643	0.37646	
57	0.99483	0.86310	0.92276	0.38536	
58	1.01229	0.85730	0.91894	0.39438	
59	1.02974	0.85134	0.91496	0.40352	
60	1.04719	0.84522	0.91082	0.41278	
61	1.06465	0.83895	0.90651	0.42217	
62	1.08210	0.83251	0.90202	0.43167	
63	1.09955	0.82592	0.89735	0.44130	
64	1.11701	0.81916	0.89249	0.45105	
65	1.13446	0.81225	0.88743	0.46092	
66	1.15191	0.80518	0.88217	0.47092	
67	1.16937	0.79795	0.87669	0.48104	
68	1.18682	0.79057	0.87099	0.49128	
69	1.20427	0.78303	0.86506	0.50165	
70	1.22173	0.77535	0.85890	0.51213	
71	1.23918	0.76752	0.85249	0.52273	
72	1.25663	0.75954	0.84583	0.53345	
73	1.27409	0.75142	0.83890	0.54427	
74	1.29154	0.74317	0.83170	0.55521	
75	1.30899	0.73478	0.82423	0.56625	
76	1.32644	0.72627	0.81646	0.57739	
77	1.34390	0.71764	0.80839	0.58863	
78	1.36135	0.70890	0.80002	0.59996	
79	1.37880	0.70004	0.79134	0.61137	
80	1.39626	0.69109	0.78233	0.62286	
81	1.41371	0.68205	0.77298	0.63442	
82	1.43116	0.67292	0.76329	0.64604	
83	1.44862	0.66371	0.75326	0.65772	
84	1.46607	0.65444	0.74286	0.66944	
85	1.48352	0.64511	0.73209	0.68119	
86	1.50098	0.63573	0.72096	0.69297	
87	1.51843	0.62630	0.70943	0.70476	
88	1.53588	0.61685	0.69752	0.71656	
89	1.55334	0.60738	0.68521	0.72834	
90	1.57079	0.59790	0.67250	0.74009	

# 既 刊 資 料

TM- 1	高マッハ数風洞について (I)	1961年11月	平 木 一, 清 水 福 寿 橋 本 登
TM- 2	航空技術研究所計数型電子計算機設備 プログラムライブラリー (I)	1962年 2 月	樋口一雄, 戸川隼人之 三好甫, 高橋利之 能美力, 板垣芳雄 鳥海良三, 佐藤保子
TM- 4	18cm×20cm 超音速風洞について	1962年 5 月	長洲秀夫, 伝田幸雄
TM- 5	遷音速流の線型理論	1962年 8 月	細 川 巖
TM- 6	18cm×18cm 遷音速風洞整備試験	1962年 8 月	橋 本 登, 井上政一
TM- 7	慣性力形疲労試験機	1962年 8 月	竹内和之, 山根皓三郎
TM- 8	アルミ合金の前歴が疲れ寿命におよぼ す実験的研究	1962年 9 月	池田為治, 坂元思無邪
TM- 9	方向性次元解析と相似解に関する覚書	1963年 2 月	甲藤好郎, 小出 勉
TM-10	DATATRON 205 用 ALGOL 58 使 用法について	1963年 2 月	高橋利之
TM-11	光弾性による高速車盤の縞模様	1963年 2 月	永井文雄
TM-12	コーティングの断熱効果に関する実験	1963年 3 月	竹中幸彦, 小川鉦一 林 洋一
TM-13	遷音速における 45° 後退角翼の予備的 フラッタ実験	1963年 3 月	中井暎一, 小原 瑛
TM-14	変断面片持梁固有振動数の一計算方法 について	1963年 3 月	中井暎一, 小原 瑛 鳥海良三, 安藤泰勝
TM-16	フラッタ試験設備測定部変換ノズルの 予備試験	1963年 4 月	中井暎一, 橋爪 宏 高木俊朗, 橋本 登
TM-17	VTOL 機用 Jet Lift Engine に関す る一考察	1963年 6 月	鳥崎忠雄, 松木正勝 山中竜夫, 藤井昭一
TM-18	ヘリコプター振動のパワースペクトル 解析	1963年 6 月	小野幸一
TM-19	吹出式超音速風洞による実験データの 処理方式について (I)	1963年 6 月	新井 忠, 原 亘利
TM-20	1m×1m 吹出式超音速風洞における AGARD 標準模型 B の三分力試験	1963年 7 月	高木廣治, 谷 喬 斎藤秀夫, 新井 忠
TM-21	国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験 (第 I 報)	1963年 9 月	竹内和之, 飯田宗四郎 北谷虔勇, 中井治夫
TM-24	円輪と薄肉円筒の回転強度の関係	1963年11月	永井文雄
TM-25	DATATRON 205 用 ALGOL 58 の Procedures ライブラリー	1964年 1 月	高橋利之
TM-26	吹出式風洞の圧力制御 (フラッタ試験 設備の場合)	1964年 1 月	橋爪 宏, 中井暎一
TM-28	一段式観測ロケットの超音速風洞試験	1964年 1 月	谷 喬, 原 亘利 榊原盛三, 外立政隆
TM-29	遷音速フラッタ試験設備の改造および 整備試験	1964年 2 月	中井暎一, 橋爪 宏 安藤泰勝, 高木俊朗
TM-30	二段式ロケット飛しょう体の揚力およ び圧力中心推定法	1964年 3 月	小橋安次郎, 宮沢政文
TM-31	亜音速ジェット輸送機の遷音速風洞に おける試験	1964年 3 月	河崎俊夫, 竹内 理
TM-32	遷音速風洞の防音	1964年 4 月	牛田健二, 高橋 宏
TM-33	非定常境界層の遷移の研究に使用され た定温度型熱線風速計について	1964年 4 月	榎並敬之, 山本稀義



TM-34	極超音速風洞ノズルの境界層補正について	1964年 5 月	長 洲 秀 夫
TM-37	気体の不完全性を考慮した極超音速風洞ノズルの設計計算法	1964年 5 月	毛 利 浩
TM-38	AGARD-A 標準模型の超音速三分力試験	1964年 6 月	高 木 廣 治, 斎 藤 秀 夫 石 原 久 蔵
TM-39	相似極超音速流におかれた半球面上の境界層の遷移に及ぼす粗さと冷却の結合影響	1964年 7 月	石 井 孝 雄
TM-40	国産中型輸送機 YS-11 胴体疲労試験 (I)	1964年 9 月	竹 内 和 之, 川 島 矩 郎
TM-41	抵抗線歪ゲージのゲージ率測定	1964年10月	田 畑 淨 治, 大 坪 孔 治 滝 沢 実
TM-42	実在着氷条件の測定について	1964年10月	古 関 昌 次, 田 寺 木 一 泉 日出夫
TM-44	高負荷燃焼器 (アニュラ模型) の実験結果	1964年12月	大 塚 貞 吉, 鈴 木 邦 男 松 本 宏, 石 井 浅 五 郎 広 木 強, 山 中 国 雍
TM-46	翼洞結合金具の疲労特性	1964年12月	竹 内 和 之, 藤 枝 郭 俊
TM-47	ローター後流中のヘリコプター胴体の抗抵について	1965年 1 月	幸 尾 治 朗, 岡 遠 一
TM-48	極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験	1965年 2 月	平 木 一, 橋 本 登 崇 林 二 識, 吉 永 山 口 富 夫
TM-49	Queen-Air 機の失速特性について	1965年 2 月	幸 尾 治 朗, 岡 遠 一 照 井 祐 之, 鎌 田 幸 男
TM-50	LS-A 型ロケットの曲げ剛性および振動試験について	1965年 5 月	中 井 瑛 一, 塙 武 敏 泉 日出夫
TM-51	超音速風洞空力データ表示記録装置	1965年 5 月	谷 喬, 高 島 一 明 原 亘 利, 近 藤 洋 史
TM-53	ベクトルのノルムと行列のノルム—数値解法の収束条件その他への応用—	1965年 5 月	板 垣 芳 雄
TM-54	熱衝撃試験用風洞整備試験	1965年 5 月	武 藤 洋 治 郎, 池 田 為 治 坂 元 思 無 邪, 光 山 敏 雄
TM-55	ロケット模型風洞試験における超音速相似則の応用	1965年 5 月	河 崎 俊 夫, 谷 喬
TM-56	2024-T4アルミニウム合金平滑丸棒の常温回転曲げ疲労試験	1965年 7 月	石 田 誠, 河 野 哲 雄
TM-57	極超音速における軸対称物体の前面抵抗	1965年 7 月	曾 我 国 男
TM-58	試験用飛しょう体の超音速風洞試験	1965年 8 月	斎 藤 秀 夫, 木 村 友 昭
TM-59	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験 (I)	1965年 9 月	近 藤 博, 増 田 惣 平
TM-60	吹出式超音速風洞における実験データの処理方式について (II)	1965年 9 月	原 亘 利, 高 島 一 明 関 根 英 夫, 中 正 夫 戸 川 保 子
TM-61	クインエア機の風洞試験	1965年 9 月	広 末 健 一, 矢 沢 健 司 塚 野 雄 吉, 田 村 征 一 佐 野 四 郎, 能 村 実 別 府 信 宏
TM-62	高温歪ゲージの温度特性試験	1965年10月	江 川 幸 一
TM-63	2024-T3アルミニウム合金の有孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1965年10月	飯 田 宗 四 郎
TM-64	応力集中による材料の疲れ強さに関する一実験 (I)	1965年10月	池 田 為 治, 坂 元 思 無 邪 光 山 敏 雄

TM-65	ジェットエンジンの翼の固有振動に関する実験	1965年11月	武内澄夫, 星谷昌二, 宮地敏雄
TM-69	質量分析計による水蒸気を含む試料のガス分析	1965年12月	斎藤隆, 堀内正司, 中村浩子
TM-71	可動アイアンバードの構造および機能	1965年12月	機体第一部, 計測部, 原動機部
TM-72	地上付近の風の影響による小型ロケットの姿勢角変化	1965年12月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-73	固定端を有する薄肉円筒殻の自由振動について	1966年1月	田寺木一, 泉日出夫
TM-74	回転振動試験装置の計画, 構造および特性	1966年2月	武内澄夫, 星谷昌二, 宮地敏雄
TM-75	高マッハ数風洞の消音装置について	1966年2月	牛田健二, 吉永崇, 清水福寿
TM-76	コーティングの断熱効果のアナログシミュレーション	1966年2月	小川鉦一
TM-77	テレメータ電波の偏波面の回転を利用したロケットのスピン測定について	1966年3月	田畑浄治, 三浦雅男, 桜井善雄
TM-78	昇降舵の操舵力特性に関するシミュレータ解析	1966年3月	堀川勇壮, 中野佳直, 森幹彦
TM-79	テレメータ機上装置の小型化の研究	1966年3月	新田慶治
TM-80	安定制御のための一計算法	1966年3月	檜崎哲二
TM-81	吹出式超音速風洞の超動時および停止時における過負荷防止装置	1966年3月	石原久蔵, 外立政隆, 宗美均, 斎藤秀夫, 榊原盛三
TM-82	ピトー管による境界層速度分布測定について	1966年4月	長洲秀夫, 柏原登喜子
TM-83	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験(II)	1966年4月	近藤博, 増田惣平
TM-84	二段ロケットの低速風洞試験	1966年7月	毛利浩, 佐野四郎, 田村敦宏, 能村実
TM-85	航空機の滑走路走行時の振動に関する実験的研究	1966年8月	小野幸一
TM-87	極小型超音速機用姿勢制御装置の特性解析	1966年8月	池谷光栄, 畑山茂樹
TM-88	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験(I)	1966年9月	犬丸矩夫, 北村清美, 岡部祐二郎, 木村友昭, 川幡長勝
TM-89	有孔板の振動について	1966年9月	川井忠彦, 泉日出夫
TM-90	地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化	1966年9月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-91	高速タービン翼列二次元試験	1966年10月	近藤博, 山崎紀雄, 蓑田光弘
TM-92	リフトジェットエンジン試験設備(I) 一台上運転設備一	1966年10月	大山耕一, 中山晋, 五味光男, 吉田晃昇, 菅原昇
TM-94	J-3 ジェットエンジン用タービン動翼の固有振動特性	1966年11月	武内澄夫, 星谷昌二, 宮地敏雄
TM-95	超軽量軸流圧縮機動翼の固有振動特性	1966年11月	武内澄夫, 星谷昌二, 宮地敏雄
TM-96	2024-T4 および 7075-T6 有孔平板の曲げ疲労試験と 2024-T4 平滑丸棒の軸荷重疲労試験	1966年11月	佐野政明, 菰岡一洋
TM-97	高マッハ数風洞について(II)	1967年1月	吉永崇, 広田正行, 井上建二, 楯篤志
TM-98	40kW プラズマ発生装置の諸特性	1967年1月	野村茂昭, 相原康彦

TM-99	搭載機器用環境試験装置の特性	1967年2月	大月正男, 鈴木孝雄 田畑浄治, 円居繁治
TM-100	二連型リフトエンジンの吸込み抵抗	1967年3月	近藤博, 大城章一郎
TM-101	低圧環境下における固体ロケットモータの性能	1967年3月	望月昌, 斎藤信弥 五代富文, 伊藤克弥 湯沢克宜
TM-102	弾性支持片持板の振動	1967年3月	塙武敏, 築地恒夫 越出慎一, 林洋一
TM-103	結合梁の振動について	1967年3月	築地恒夫, 林洋一
TM-104	平板翼模型の固有振動モードの測定	1967年4月	中井暎一, 森田甫之
TM-105	非定常境界層方程式を含む放物型微積分方程式の数値解法	1967年4月	関口清子
TM-106	動安定微係数測定用風洞天秤について	1967年5月	高島一明, 榊原盛三 原亘利, 北出大三 金成正好
TM-107	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験 (II)	1967年6月	大丸矩夫, 岡部祐二郎 北村清美, 川幡長勝 高橋俤, 木村友昭
TM-108	インダクタンス型小型圧力変換器の試作とその応用	1967年7月	長洲秀夫, 柳沢三憲
TM-109	ロケットの飛しょう径路計算のためのプログラム	1967年7月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-110	二次元スラットおよびスロテッドフラップの実験的研究 (I)	1967年8月	大丸矩夫, 北村清美 川幡長勝
TM-111	リフトジェット VTOL 機の離陸径路に関する近似解	1967年8月	西村博史
TM-112	極超音速風洞ペブル加熱器の特性	1967年8月	橋爪宏, 橋本登
TM-113	リフトジェットエンジン試験設備 (II) 一計測設備一	1967年9月	森田光男
TM-114	五段遷音速軸流圧縮機の空力設計	1967年9月	藤井昭一, 松木正勝 五味光男
TM-115	燃料蒸発管に関する研究 (I)	1967年9月	大塚貞吉, 鈴木邦男 田丸卓, 乙幡安雄
TM-116	高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて	1967年9月	鈴木邦男, 相波哲朗
TM-117	ロケット用テレメータ機上装置の集積回路化	1967年9月	新田慶治
TM-118	操縦桿レート信号によるアイアンバード制御の安定効果とパイロットのモデルについて	1967年9月	村上力, 真柳光美
TM-119	ベーン型気流方向検出器の特性	1967年11月	田畑浄治, 松島弘一 成田健一, 塚本憲男

注：欠番は配布先を限定したもの

---

## 航空宇宙技術研究所資料120号

昭和42年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422) 44-9171 (代表)

印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2~27~12

---