

# 研究

## 複屈折二重焦点レンズの光線追跡

菊田 久雄\*・下村 広\*\*・岩田 耕一\*

\* 大阪府立大学工学部機械工学科 〒591 堺市百舌鳥梅町4丁 804

\*\* 大阪府立三島高校 〒569 高槻市今城 27-1

(1991年12月18日受付, 1992年1月28日受理)

### Ray Tracing of Birefringent Double Focus Lenses

Hisao KIKUTA,\* Hiroshi SHIMOMURA\*\* and Koichi IWATA\*

\* Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Osaka Prefecture, 4-cho, Mozu-umemachi, Sakai 591

\*\* Mishima High-School, 27-1, Imashiro, Takatsuki 569

(Received December 18, 1991; Accepted January 28, 1992)

A lens of uniaxial crystal whose optic axis is perpendicular to the optical axis of the lens has two foci. The one is for ordinary rays, and the other one for extraordinary rays. The extraordinary rays have a special aberration due to the birefringence. Under paraxial condition, the aberration becomes astigmatism. In this paper, we made ray tracing of the extraordinary rays, and showed some examples of the birefringent aberrations as spot diagrams and aberration curves. For a calcite single birefringent lens with 63 mm focal length, the birefringent astigmatism is the same extent as the aberration for a single isotropic lens. For a thinner lens, the aberration is shown to be reduced. And an evaluation is made for a triplet birefringent lens which is similar to the Dyson's double focus lens.

### 1. はじめに

方解石などの一軸性複屈折結晶を用いて、その光学軸が光軸と直角になるようなレンズをつくると、常光線と異常光線で異なる焦点を結ぶ二重焦点レンズができる。それらの焦点は結晶の二つの主屈折率  $n_o$  と  $n_e$  で決まる。

この複屈折二重焦点レンズを用いて共通光路型干渉計を構成することは 1957 年に Dyson が提案している<sup>1)</sup>。近年になって、レンズの偏光特性を利用して、このような共通光路型干渉計に位相シフト法やヘテロダイイン法を適用することが提案されている<sup>2-4)</sup>。二重焦点レンズによる共通光路の光学系は、レンズ焦点の違いを利用して、試料表面の 1 点に収束する光と広く照らす光をつくり出し、これらを参照光・物体照射光としている。このような干渉計は機械振動や温度ドリフトに強く、近年要求されるようになってきた「作業現場での測定」に有効であると思われる。

そこで、複屈折二重焦点レンズにおける収差を検討しておくことは、先の干渉計の精度を評価する上で重要である。しかし、異常光線の振舞いは複雑で、その収差については詳しい検討が行われていない。なぜなら、レンズ（結晶）内での光線は一般に光学軸に垂直でなく、屈折率が一定値  $n_e$  にならないからである。そのため複屈折性による特別な収差が現れる。一方、常光線の振舞いは屈折率  $n_o$  をもった通常の等方性材料のレンズとまったく同じであり、その収差についても既存の方法で評価ができる。本論文の興味はこの異常光線における収差にある。

著者らは、異常光線について近軸領域として結像を考えた<sup>5)</sup>。その結果、このような複屈折レンズは厳密には結像せず、近軸領域ですらボケを生じることがわかった。ここではこのボケを「一次の収差」と呼ぶ。異常光線の一次収差は、レンズの光軸からのずれ量と無関係な一定の非点収差で、その大きさはレンズの厚みと主屈折率の比に関係する。

本報告では、近軸以外の領域にまで拡張した場合の複屈折性による収差の大きさを検討するために、一軸性結晶の複屈折レンズにおける光線追跡のプログラムを作成した。このプログラムを用いて、いくつかのレンズについてスポットダイヤグラムおよび収差曲線を作成し、等方性レンズの場合の結果と比較を行った。

次節では複屈折性媒質での屈折について波動ベクトル空間を用いて説明を行い、それを用いた光線追跡の手順について述べる。第3節では、複屈折性の影響が最も顕著に現れるであろう一次の収差について簡単に述べておく。第4節において単レンズにおける光線追跡の結果を示し、等方性レンズの場合と比較する。また、前述の共通光路型干渉計で用いられている、Dyson型のトリップレットレンズについての結果も示す。

## 2. 一軸結晶での屈折と光線追跡

複屈折性媒質での屈折を考えるとき、波動ベクトル空間 ( $\mathbf{k}$ -space) を用いると便利である<sup>6)</sup>。いま、一軸性結晶を考えると、その結晶軸は光学軸と一致する。光学軸を  $x$  方向にとり、主屈折率を  $n_o, n_e$  とするとき、媒質内での波動ベクトル  $\mathbf{k}(k_x, k_y, k_z)$  は(1)式を満足しなければならない。

$$\left( \frac{k_x^2}{n_o^2} + \frac{k_y^2 + k_z^2 - \omega^2}{n_e^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \left( \frac{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \omega^2}{n_o^2} - \frac{\omega^2}{c^2} \right) = 0 \quad (1)$$

この式において、左のカッコ内がゼロになる条件が異常光線の条件、右のカッコが常光線の条件を表している。一方、結晶内では、波面の進行方向を示す波動ベクトル  $\mathbf{k}$  とエネルギーの進行方向を示す光線速度ベクトル  $\mathbf{V}$  は一般に異なる。光線のベクトル  $\mathbf{V}$  は

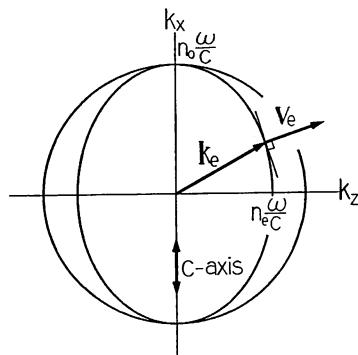
$$\mathbf{V} = \nabla_{\mathbf{k}} \cdot \omega(\mathbf{k}) \quad (2)$$

で表される。ただし、 $\omega$  は(1)式の条件を満足する角周波数である。

**Fig. 1** は異常光線についての波動ベクトル  $\mathbf{k}_e$ 、光線速度ベクトル  $\mathbf{V}_e$  の例を示している。この例では両方のベクトルが  $x-z$  面内にある。 $\mathbf{k}_e$  先端は(1)式の異常光線の条件を与える橒円体の上にあり、 $\mathbf{V}_e$  はその橒円体の法線方向を向いている。 $\mathbf{V}_e$  の大きさは(2)式で求まる。外側の球は常光線に対するものである。常光線の場合、その法線は常に球の中心を通るので、波動ベクトルと光線速度ベクトルの方向は一致する。

$\mathbf{k}_e$  の各成分を  $(k_{ex}, k_{ey}, k_{ez})$  と表すと、これらは(1)式より、

$$\frac{k_{ex}^2}{n_o^2} + \frac{k_{ey}^2 + k_{ez}^2 - \omega^2}{n_e^2} = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (3)$$

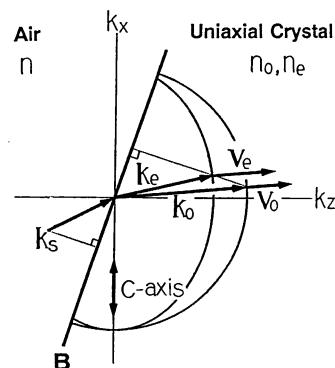


**Fig. 1** A wave vector and its ray velocity in the wave vector space of a uniaxial crystal. Direction of the optic axis is along the  $k_z$  axis. The sphere shows the locus of the wave vector for the ordinary rays, and the ellipse shows the locus of the wave vector  $\mathbf{k}_e$  for the extraordinary rays.  $n_o$  and  $n_e$  are principal refractive indices.  $\mathbf{V}_e$  is the ray velocity vector, which is normal to the ellipse.

を満足する。これを(2)式に代入することにより、 $\mathbf{V}_e$  の各成分  $(V_{ex}, V_{ey}, V_{ez})$  が求まる。

$$\begin{aligned} V_{ex} &= \frac{\partial \omega}{\partial k_{ex}} = \frac{c^2 k_{ex}}{\omega n_o^2}, \\ V_{ey} &= \frac{\partial \omega}{\partial k_{ey}} = \frac{c^2 k_{ey}}{\omega n_e^2}, \\ V_{ez} &= \frac{\partial \omega}{\partial k_{ez}} = \frac{c^2 k_{ez}}{\omega n_e^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

次に、この波動ベクトル空間を用いて屈折のようすを説明する。**Fig. 2** のように、屈折率  $n$  の媒質から波動ベクトル  $\mathbf{k}_s$  の光が入射し、境界面 B で屈折する場合を考える。 $\mathbf{k}_o, \mathbf{k}_e$  は結晶内での常光線・異常光線を表す



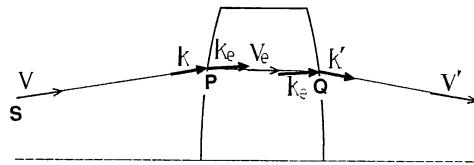
**Fig. 2** Refraction at a boundary B between air and the uniaxial crystal. Incident wave vector is  $\mathbf{k}_s$ , and the refracted vectors are  $\mathbf{k}_o$  and  $\mathbf{k}_e$  for ordinary and extraordinary rays. The components tangential to the surface must be the same for these vectors.

波動ベクトルである。屈折においては  $\mathbf{k}_s$  と  $\mathbf{k}_e$ ,  $\mathbf{k}'_e$  の境界面内の成分は互いに等しくなければならない。図は  $x$ - $z$  面内の例であるが、 $\mathbf{k}_s$  が  $y$  方向に成分を持っている場合においても面内成分が等しくなければならない。異常光線についての光線追跡を行う場合、まず  $\mathbf{k}_s$  の B 面内の成分を求め、次にその成分をもち、かつ、(1)式を満足する  $\mathbf{k}_e$  を決定する。実際の光線の進行方向は  $\mathbf{V}_e$  であり、これは(2)式より求める。

レンズ内での光線追跡において注意しなければならないのは、波動ベクトルと光線速度ベクトルの方向が異なることである。**Fig. 3** の例のように、屈折光は  $\mathbf{V}_e$  の方向に進み、それがレンズ後面で再び屈折する。結晶内から外部への屈折の場合、そこで入射の波動ベクトルは先の  $\mathbf{k}_e$  であり、外部の波動ベクトル  $\mathbf{k}'_e$  は等方性の条件を満足しなければならない。

単レンズの場合の異常光線についての光線追跡の手順を以下に示す。

- 1) 物空間における光線の入射位置  $S$  と波動ベクトル  $\mathbf{k}_s$ :  $(k_{sx}, k_{sy}, k_{sz})$  を与える。物空間の媒質は等方性なので  $\mathbf{k}_s$  と  $\mathbf{V}_s$ :  $(V_{sx}, V_{sy}, V_{sz})$  の方向は一致する。
- 2)  $\mathbf{V}_s$  よりレンズ前面での屈折点  $P$  を求める。
- 3)  $P$  点における  $\mathbf{k}_s$  の境界面内の成分を求める。
- 4) 3)で求めた面内成分と等しい成分をもつ屈折光の波動ベクトル  $\mathbf{k}_e$ :  $(k_{ex}, k_{ey}, k_{ez})$  を(3)式を満足するように決定する。
- 5)  $\mathbf{k}_e$  を(4)式に代入して  $\mathbf{V}_e$ :  $(V_{ex}, V_{ey}, V_{ez})$  を求める。
- 6)  $\mathbf{V}_e$  よりレンズ後面での屈折点  $Q$  を求める。
- 7)  $Q$  点における  $\mathbf{k}_e$  の境界面内の成分を求める。



**Fig. 3** Ray trace of the extraordinary ray. The ray vector  $\mathbf{V}_s$  in the object space is in the same direction as the wave vector  $\mathbf{k}_s$ . In the crystal lens, the ray vector  $\mathbf{V}_e$  directs to a direction different from the wave vector  $\mathbf{k}_e$ . In the image space, the ray vector  $\mathbf{V}'$  is in the same direction of  $\mathbf{k}'$ .

8) 7)で求めた面内成分と等しい成分をもつ屈折光の波動ベクトル  $\mathbf{k}'_e$ :  $(k_{x'}, k_{y'}, k_{z'})$  を求める。等方性媒質なので  $\mathbf{k}'_e$  と  $\mathbf{V}'$  のベクトルの方向は一致する。

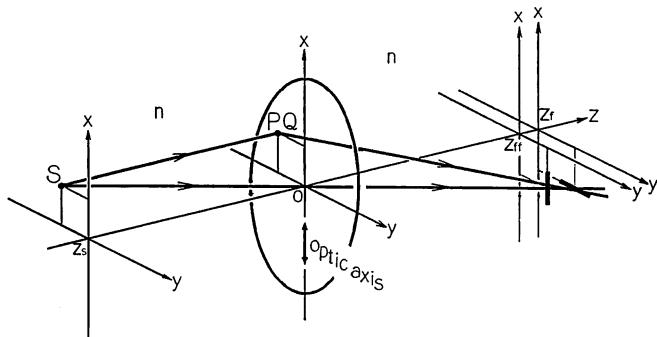
この手順で複屈折レンズの前面・後面の屈折を計算しながら光線追跡を行う。また、等方性媒質のレンズについての計算は  $n_e = n$  とするだけで同様の光線追跡が行える。

### 3. 近軸領域での収差

この節では、近軸領域で現れる一次の収差について簡単に述べておく<sup>5)</sup>。

光学軸が  $x$  方向に、レンズの光軸が  $z$  方向にある場合、その収差は**Fig. 4** に示すような非点収差になる。球面レンズにおける3次の非点収差は像の光軸からのずれによって生じるが、複屈折レンズによる収差は、二つの主曲率が異なる非球面による非点収差と同様であり、像の光軸からのずれによらず収差は一定である。

結の関係は以像下のようになっている。 $x$  座標の結像系と  $y$  座標の結像系はそれぞれ別のレンズパラメータを



**Fig. 4** Astigmatism of the extraordinary ray under paraxial condition. The aberration exists even if the object point  $S$  is on the optical axis  $z$ . The lens has a certain thickness, but it is not shown for simplicity. Therefore, the origin  $O$  corresponds to the two cross points of the  $z$  axis with the front and back surfaces of the lens.

持つており、このため焦点の位置がずれ、非点収差が現れる。 $y$  座標の結像系は屈折率を  $n_e$  とした通常の等方性レンズでの結像である。これに対し、 $x$  座標系では、レンズの厚みが  $(n_e/n_o)^2$  だけ厚くなつたような結像系を構成する。

物空間での原点をレンズ前面の  $O$ 、像空間での原点をレンズ後面の  $O'$  とする。Fig. 4 においてはレンズの厚さを省略し、 $O$ 、 $O'$  ともに原点  $O$  としている。レンズの厚さを  $t$ 、レンズ前面の曲率半径を  $R_1$ 、後面の曲率半径を  $R_2$  とする。物体の  $z$  座標を  $z_s$ 、 $y$  座標系での結像位置の  $z$  座標を  $z_{ff}$  とすると、 $y$  座標系での結像の式は

$$\frac{t}{n_e} \frac{1}{\frac{n_e-n}{R_1} + \frac{n}{z_s}} - \frac{1}{\frac{n_e-n}{R_2} + \frac{n}{z_{ff}}} = 0 \quad (5)$$

となる。ただし、物空間と像空間での屈折率はともに  $n$  である。これに対し  $x$  座標系での結像位置の  $z$  座標を  $z_f$  とすると、その結像の式は

$$\frac{\alpha t}{n_e} \frac{1}{\frac{n_e-n}{R_1} + \frac{n}{z_s}} - \frac{1}{\frac{n_e-n}{R_2} + \frac{n}{z_f}} = 0, \quad (6)$$

$$\alpha = \left( \frac{n_e}{n_o} \right)^2,$$

となる。この式は、(5)式と比べると、レンズの厚み  $t$  が  $\alpha$  倍だけ厚くなつたような形をしている。

$x$  座標系、 $y$  座標系でのレンズパラメータを Fig. 5 のようにおくと、それらは以下の式で表すことができる。

$$f_x = \frac{n}{\frac{n_e-n}{R_1} + \frac{n}{f_x}}, \quad (7)$$

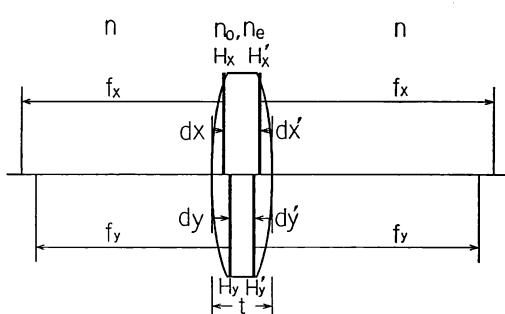


Fig. 5 Principal lens parameters for the extraordinary ray. Image formation is expressed by different parameters for the  $X$ - $Z$  coordinate and  $Y$ - $Z$  coordinate.  $H_x$ ,  $H'_x$ ,  $H_y$ , and  $H'_y$  shows principal planes for imaging systems in  $X$ - $Z$  and  $Y$ - $Z$  coordinates.

$$d_x = -\alpha t \frac{n_e - n}{n_e} \frac{f_x}{R_2} \quad (8)$$

$$d_x' = \alpha t \frac{n_e - n}{n_e} \frac{f_x}{R_1} \quad (9)$$

$$f_y = \frac{\frac{n}{n_e - n}}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + t \frac{n_e - n}{n_e} \frac{1}{R_1 R_2}} \quad (10)$$

$$d_y = -t \frac{n_e - n}{n_e} \frac{f_y}{R_2} \quad (11)$$

$$d_y' = t \frac{n_e - n}{n_e} \frac{f_y}{R_1} \quad (12)$$

これらの式からわかるように、 $\alpha=1$  すなわち等方性の場合には  $x$  座標系と  $y$  座標系でのパラメータが一致し、収差が存在しない。また、レンズの厚み  $t$  が薄いほど、その収差は小さい。

#### 4. 異常光線のスポットダイヤグラム

##### 4.1 単レンズの場合

ここでは、第2節で述べた光線追跡の手法にしたがつて二つの単レンズの場合のスポットダイヤグラムを求め、複屈折による収差の様子を調べる。具体的には方解石のレンズについて光線追跡を行う。方解石の主屈折率は  $n_o=1.648$ 、 $n_e=1.482$  (波長 780 nm) で、光学軸は Fig. 4 と同様に  $X$  軸方向とする。レンズの曲率半径は前面後面ともに  $R_1=R_2=60$  mm、厚み  $t$  は 3 mm、有効径は 5 mm のものを考える。このレンズの焦点距離は常光線、異常光線に対してそれぞれ約 47 mm, 63 mm である。

近軸域での異常光線に対するレンズの焦点距離および主点位置は、(7), (9), (10), (12)式より

$$f_x = 62.650 \text{ mm}, \quad d_x' = 0.824 \text{ mm}$$

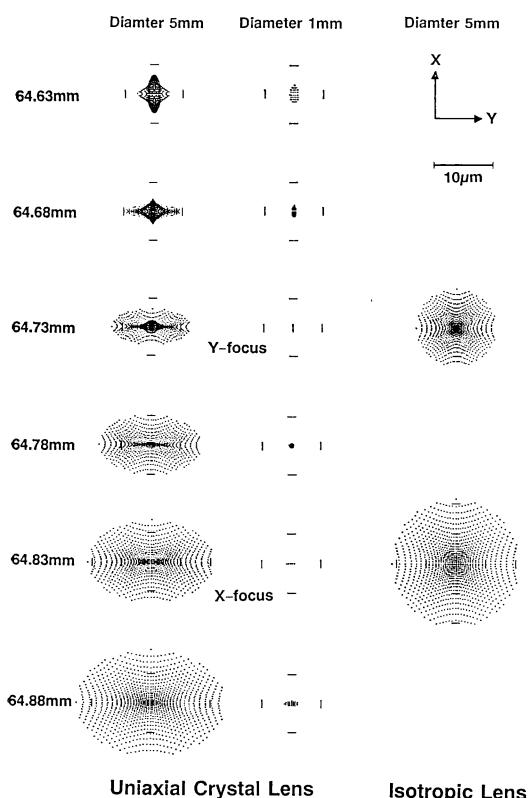
$$f_y = 62.748 \text{ mm}, \quad d_y' = 1.020 \text{ mm}$$

である。したがって、平行光が入射した場合の  $X$ - $Z$  座標系と  $Y$ - $Z$  座標系での焦点位置のはずれは

$$(f_x - d_x') - (f_y - d_y') = 0.098 \text{ mm}$$

になる。

Fig. 6 はレンズの光軸に沿う平行光を入射した場合のスポットダイヤグラムである。スクリーンを  $Z$  方向に変化させた場合の結果を示しており、図中の左に示す長さはレンズの前面 (Fig. 4 における物空間側の  $O$  点) からスクリーンまでの距離を表している。 $X$ -Focus,  $Y$ -Focus は近軸域における  $X$ - $Z$ ,  $Y$ - $Z$  系での焦点位置である。右側に比較のために同形状の等方性レンズ (屈折率: 1.482) の結果を示している。等方性の場合と比較



**Fig. 6** Spot diagrams of normal incident rays for a calcite lens with the thickness of 3 mm. Left row of the diagrams is for the lens with diameter of 5 mm. Middle row is for 1 mm diameter. And right row is for an isotropic lens whose refractive index corresponds to  $n_e$  of calcite. The positions of the image planes are show on the left side of diagrams.

すると、通常の球面収差に複屈折性の非点収差が重なっているのがわかる。さらに、Y方向については複屈折性収差の影響が少なく、X方向にその影響が大きい。とくに、Y軸上を通る光線については非点収差の影響が全くない。これはX方向に光学軸を持つ屈折率楕円体を考えたとき、Y-Z面内の光線に対しては常に屈折率  $n_e$  になることを考えると当然の結果である。図中央の列のスポットダイヤグラムはレンズの有効径が1 mmの場合の結果である。近軸領域になると球面収差がなくなり、複屈折性による非点収差だけがはっきり現れている。

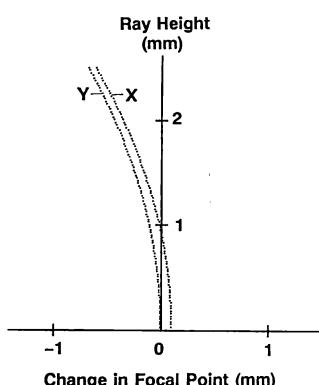
次に、このレンズにおいて、光軸( $z$ 軸)方向に入射する光のなかで、 $x$ 軸、 $y$ 軸を通る光線だけをとりあげ、その収差曲線を求めた。この収差曲線は、通常のレンズにおける球面収差に対応している。ただし、 $x$ 、 $y$ 軸上を通らない光線については、 $z$ 軸と交わることがなく、このような収差曲線として表現できない。結果を

**Fig. 7** に示す。縦軸の ray height は光線が  $x$ 、 $y$  軸を横切る座標を示している。横軸は光線が  $z$  軸を横切る座標を表しており、0 は近軸域での Y-Focus の位置である。 $y$  軸を通る光線の収差は、先に述べたように、等方性レンズのものとまったく同じである。Ray height が 0 mm のときの焦点ずれは 0.098 mm であり、この値は先の近軸域での結果と一致する。この計算例では、 $X$  軸、 $Y$  軸を通る光線の焦点位置は異なるものの、その収差の大きさは同程度であることがわかる。

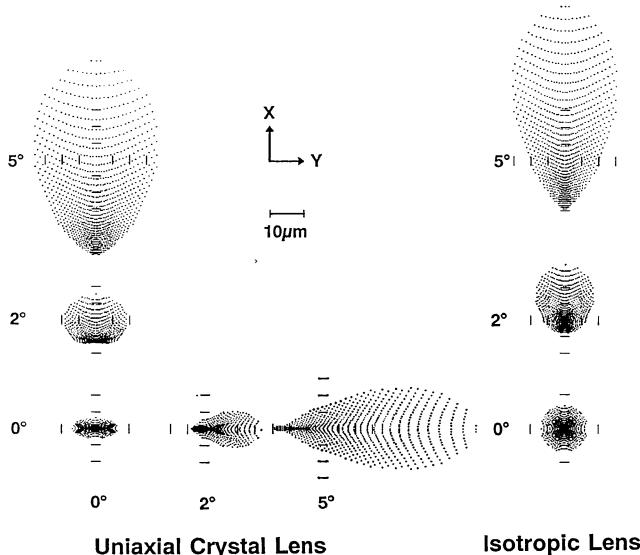
**Fig. 8** は、平行光を斜めに入射した場合のスポットダイヤグラムである。平行光の入射角度を  $X$  軸方向と  $Y$  軸方向に  $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $5^\circ$  だけ傾けたときの結果を示している。右側の図は比較のための等方性レンズの結果である。非点収差とコマ収差が合わさったようになっているが、収差の大きさは等方性の場合と同程度である。

近軸域での収差はレンズの厚み  $t$  が小さいほど小さかった。そこで、先の場合と同じ曲率、同じ有効径で、厚みが 1 mm の場合の計算を行った。結果を **Fig. 9** に示す。スポットダイヤグラム、収差曲線とともに、複屈折性の収差が現れているが、その程度が小さくなっている。このときの X-Focus, Y-Focus の位置ずれは 0.032 mm であり、3 mm の厚さの場合と比べると、レンズの厚さにほぼ比例して小さくなっている。

複屈折性の収差は、レンズ内で波動ベクトル  $\mathbf{k}_e$  と光線速度ベクトル  $\mathbf{V}_e$  の方向が異なるために生じる。そこで、平凸レンズの平面側から平行光を入射した場合を考えてみると、レンズ内の光は、 $\mathbf{k}_e$  と  $\mathbf{V}_e$  の方向が一致しないものの、やはり平行光のままである。したがって、レンズ後面での屈折だけがレンズ作用としてはたら



**Fig. 7** Aberration curves of the single birefringent lens of the thickness 3 mm. The curve X shows the longitudinal spherical aberration of rays in the  $X$ - $Z$  plane. And the curve Y is of the rays in the  $Y$ - $Z$  plane.

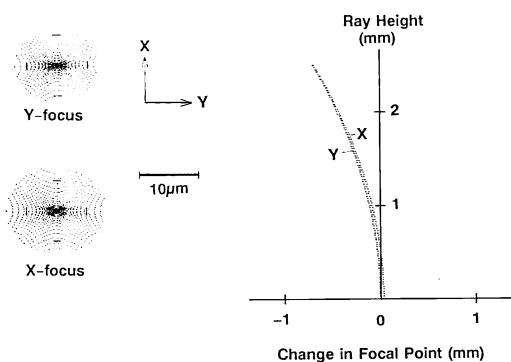


**Fig. 8** Spot diagrams of oblique incident rays. The diagrams on the right side are results of isotropic lens.

き、複屈折による収差は現れないことになる。

**Fig. 10** は平凸レンズに光軸に沿う平行光を入射した場合の例である。レンズは、方解石、有効径 5 mm、凸側の曲率半径 30 mm である。異常光線の焦点距離は約 62 mm。スポットダイヤグラムは Y-Focus での場合を示している。Convex-plane lens では複屈折性の収差が大きく現れているが、Plano-convex lens では複屈折性の影響がなく、等方性レンズと全く同じ収差である。

平凸レンズの例を前節で示した近軸域の結果に当てはめてみる。この場合、 $R_1=\infty$ 、 $R_2=$ 有限になるので、像



(a) Spot Diagram

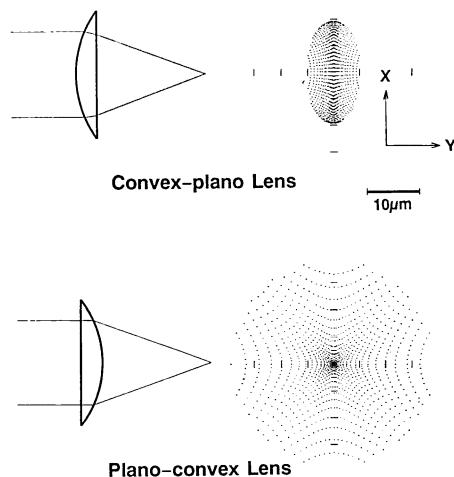
(b) Aberration Curve

**Fig. 9** Spot diagrams and aberration curves of a thin birefringent lens with the thickness of 1 mm. Other lens dimensions are the same as Fig. 6. Focal length of extraordinary ray is 63 mm. The difference of the focal points is 0.032 mm.

空間側での主面位置、焦点距離は等方性の場合と一致する。一方、物空間側では焦点距離は一致するものの、主面位置がずれる ( $f_x=f_y, d_x'=d_y'=0, d_z \neq d_y$ )。したがって、Fig. 10 に示した Convex-plane lens の場合、この主面の位置ずれが主に影響していることになる。

#### 4.2 トリプレットの場合

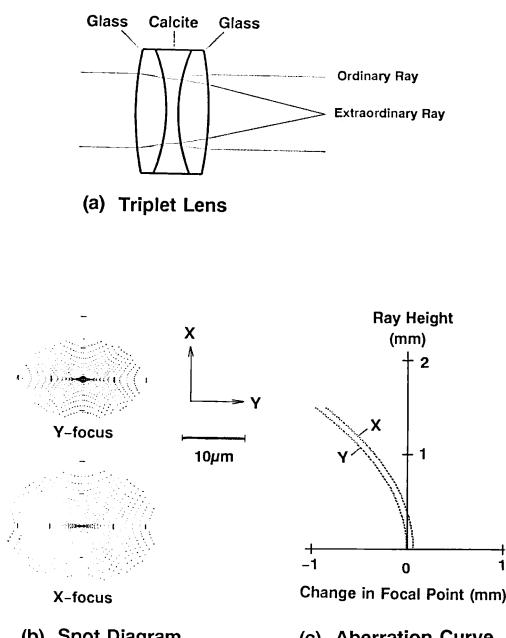
**Fig. 11** に示すような、方解石と光学ガラス (BK 7)



**Fig. 10** Spot diagrams of a convex-plane and a plano-convex birefringent lenses. The radius of the spherical surface is 30 mm and the lens diameter is 5 mm. Focal length of the extraordinary ray is 62 mm. The incident rays are parallel to the optical axis. Plano-convex lens dose not have the aberration due to birefringence.

で構成されている三枚組の対称レンズ（トリプレット）を考える。たとえば、外側の曲率半径が1,000mm、方解石側で30mmのものを作ると、常光線の焦点距離がほぼゼロパワー（約10m）、異常光線については約38.5mmの焦点距離を持つ二重焦点レンズができる。このようなレンズはDysonの設計による二重焦点レンズであり、常光線・異常光線を試験光・参照光とする共通光路型の干渉計に用いることができる。そこで、このレンズのスポットダイヤグラムと収差曲線をもとめてみた。

レンズの曲率については上述のものを用い、ガラスレンズの厚さはともに4mm、方解石レンズの厚さは2mm、有効径は3mmと設定した。結果をFig. 11に示す。図は、平行光を入射した場合である。複屈折性による収差の影響は、通常の等方性の場合と同程度である。X-Z系、Y-Z系での焦点距離はそれぞれ38.52mmと38.58mmである。ただし、主面位置の違いにより、Y-FocusのほうがX-Focusより約0.07mmレンズ側にある。なお、この収差は、同じ焦点距離(38.5mm)を持ったBK7の単レンズと同程度である。



**Fig. 11** Triplet lens made of optical glass (BK 7) and calcite. Focal lengths of ordinary and extraordinary rays are infinity and 38.5 mm, respectively. The radii of the outside spherical surfaces are 1,000 mm, and the radii of the inside surfaces are 30 mm. Lens diameter is 3 mm, and thicknesses are 4 mm, 2 mm, and 4 mm. The difference of the focal points of the astigmatism is 0.07 mm.

## 5. ま と め

一軸性結晶を用いた複屈折二重焦点レンズの収差について検討するため、光線追跡のプログラムを作成し、単レンズにおけるスポットダイヤグラムおよび収差曲線を求めた。これらの収差は、「等方性レンズにおける収差」に「複屈折性による非点収差」が重なっている。また、レンズ厚が薄いほど複屈折性に影響が少なく、平凸レンズに平行光を入射した場合複屈折性の影響がほとんど現れないことがわかった。また、常光線が焦点距離を持たないDyson型二重焦点レンズについても計算を行い、その収差の程度を見積った。

複屈折性による収差は1次近似ですら存在する。しかし、これまでの計算例では、その収差は3次のものと同程度であった。通常のレンズにおける収差は、多数のレンズを組み合わせることにより、小さくすることができる。それに対し、複屈折レンズの異常光線の収差を小さくすることは簡単でない。さらに、実際には常光線の収差についても同時に小さくする必要がある。したがって、低収差の複屈折レンズの設計は容易でない。

実際の使用では、先にあげた平凸レンズを利用して複屈折性による収差の影響をできるだけ小さくする必要がある。一方、計算機を利用して画像計測の場合、これらの収差についてはソフトウェア上である程度補正を行えるので、ここであげた方解石の単レンズやDyson型レンズも計測に用いることが可能であろう。

本報告ではスポットダイヤグラムと球面収差に相当する収差曲線を用いて複屈折性の収差を求めたが、干渉計に用いる場合、波面収差についても検討を行う必要がある。今後これについても検討を行いたい。

## 文 献

- 1) L. Dyson : "Common-path interferometer for testing purposes," J. Opt. Soc. Am., **47** (1957) 386-390.
- 2) K. Iwata and N. Nishikawa : "Profile measurement with a phase-shift common-path polarization interferometer," Proc. SPIE, **1162** (1989) 389-394.
- 3) 紙谷文啓、菊田久雄、岩田耕一: 第37回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1990) p. 739.
- 4) M. J. Downs, W. H. McGivern and H. J. Ferguson : "Optical system for measuring the profiles of super-smooth surfaces," Precis. Eng., **7** (1985) 211-215.
- 5) H. Kikuta, K. Iwata and H. Shimomura : "First order aberration of a double focus lens made of a uniaxial crystal," J. Opt. Soc. Am. A, **9** (1992) in press.
- 6) A. Yariv and P. Yeh : "Electromagnetic propagation in anisotropic media (Chap. 4)," *Optical Waves in Crystals* (John Wiley and Sons, 1983).