

# 解説

## 複屈折性材料を用いた二重焦点レンズと共通光路干渉計

岩田 耕一・菊田 久雄

大阪府立大学工学部機械工学科 〒593 堺市学園町 1-1

(1992年1月27日受理)

### Birefringent Double-Focus Lens and Common Path Interferometers

Koichi IWATA and Hisao KIKUTA

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University  
of Osaka Prefecture, 1-1, Gakuen-cho, Sakai 593

#### 1. はじめに

複屈折材料(光学的異方性材料)では、同一方向に進む光波でも、偏光方向によって屈折率が異なる<sup>1,2)</sup>。そのため、複屈折材料に入射した光波は、偏光方向に応じて異なる方向に屈折される。このことを利用した光学素子として、ウオラストンプリズムやノマルスキープリズムなどがある<sup>3)</sup>。これらは、たとえば、光磁気ディスクの信号検出の光学系や微分偏光干渉計などに用いられている。このような複屈折材料を用いた光学素子の多くは、その表面を平面に加工されたものであり、入射波の進行方向を二つの異なる方向に分離させるものとして用いられている。

複屈折材料を球面に加工すると、レンズが得られる。このレンズは、ガラスなどの等方性材料で作られたレンズと違って、二つの偏光成分に応じて異なる焦点距離を持つことが期待される。すなわち、二重焦点レンズとして働くことになる。

筆者らの知る限り、この種の二重焦点レンズ(double-focus lens)について初めて述べたのは、1957年、J. Dyson である<sup>4)</sup>。彼は、このレンズを「ビームスプリッタ」として用いて、共通光路型の干渉計を組み立て、凹面鏡などの検査に用いた。この干渉計は、一つの偏光を被測定面の1点に集光して、参照光に用い、もう一方の偏光を物体全面に当て物体光として用いるものである。両者の干渉により、測定面の1点に対する測定面全体の凹凸の変化が干渉縞として表れる。このような干渉計は、参照光と物体光が同一面からの反射光であるため振

動などの外乱に強いという利点がある<sup>5)</sup>。しかし、この干渉計は、広く一般に用いられているとはいいがたい。

最近、加工技術の進歩に伴い、面形状の検査に干渉計が用いられることが多くなってきた。しかも、従来のような研究室ないしは測定室という環境の良いところばかりではなく、生産ラインなどで用いられるようになってきており、外乱に強い干渉計に対する要望が強い。この情勢を考慮すれば、二重焦点レンズを用いた共通光路干渉計を再検討することが必要であると考えられる。

このような考えのもとに、Dyson の干渉計に位相シフト法を導入して、より感度の高い共通光路型干渉計を作る研究が行われている<sup>6,7)</sup>。また、Dyson の干渉計とは逆に、集光した1点を物体光に用い、広がった光を参照光にして、被測定面上を走査するタイプの干渉計を製作した例も発表されている<sup>8,9)</sup>。また、このような二重焦点レンズの干渉計の精度や適用範囲を議論するためには、二重焦点レンズそのものの性質について知っておくことが必要となる<sup>10,11)</sup>。

この解説では、まず、単軸結晶中の光波の伝搬と表面での屈折について説明し、これをもとに複屈折材料を用いた二重焦点レンズの性質について述べ、次いで、共通光路の干渉計への応用について述べる。

#### 2. 結晶中の光伝搬と屈折

複屈折材料は、一軸性結晶と二軸性結晶に分類される。現在は、二重焦点レンズとして、一軸性結晶を用い、しかも、その光学軸が光学系の光軸と垂直なものが用いられている。ここでもその場合に限定して話を進め

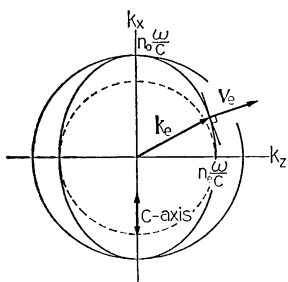


図1 一軸性結晶における波動ベクトル空間

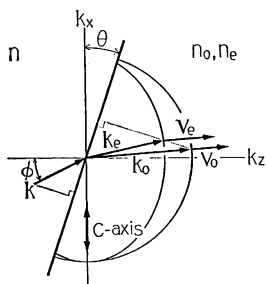


図2 一軸性結晶における光線の屈折

る。

図1に一軸性結晶に対して、光波の伝搬方向に対応する波動ベクトルが描く軌跡を示す<sup>2)</sup>。図中の  $k$  は真空中の波動ベクトルの大きさ、 $n_o, n_e$  は一軸性結晶の主屈折率である。図の面内に偏光した光は常光線であり、どの方向に伝搬しても、屈折率は変わらず、波動ベクトル  $k_o$  の軌跡は球となる。しかし、それに垂直に偏光した異常光線は伝搬方向によって屈折率が異なり、波動ベクトル  $k_e$  の軌跡は楕円体となる。

屈折率  $n$  の等方性媒質から、結晶表面 B に波動ベクトル  $k$  を持つ光波が入射した時の屈折光の波動ベクトルの方向を考える。これを求めるには、図2に示すように、入射点 O を中心に波動ベクトルの軌跡を描き、 $k_o$  と  $k_e$  の表面 B への投影が、 $k$  の表面への投影と等しくなるような  $k_o$  と  $k_e$  を求めればよい。得られた  $k_o, k_e$  が結晶内での常光線と異常光線の波動ベクトルである。

常光線では光線の方向と波動ベクトルの方向は一致するが、異常光線の進む方向は、一般に波動ベクトル  $k_e$  の方向と異なる。その方向は図2に示すように  $k_e$  の楕円体の法線方向として求める。

### 3. 二重焦点レンズの性質

#### 3.1 焦点距離

図3に示すような光学軸が光軸に垂直な一軸性結晶で

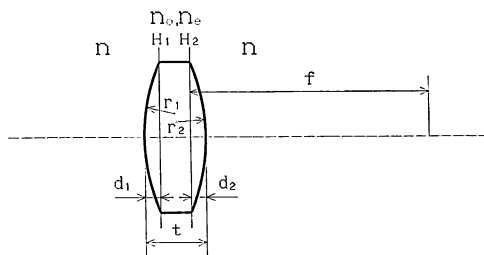


図3 レンズの主要パラメータ

作った単レンズを考える。レンズは屈折率  $n$  の等方性媒質内にあるとする。このレンズに近軸光線が入射するとき、常光線については、等方性媒質のレンズとまったく同様に考えることができる。しかし、異常光線については、同じにはならない。たとえば、光軸方向に入射した平行光でも、レンズ表面の入射位置によって屈折方向が異なり、結晶内での伝搬方向が異なってくるため、対応する屈折率が入射位置に依存するからである。

しかし、近軸光線を考える限り、異常光線に対する屈折率の第0近似として、光軸方向に伝搬する異常光線に対する屈折率を用いることができると考えられる。これは、波動ベクトル図で、軸近くの楕円体を楕円体主軸の径を半径とする球(破線)で置き換えたことに相当する。

この考えのもとでは、等方性の近軸光線の公式から、薄肉の二重焦点レンズの焦点距離  $f_o, f_e$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} f_o &= r_1 r_2 / \{(\nu_o - 1)(r_1 - r_2)\} \\ f_e &= r_1 r_2 / \{(\nu_e - 1)(r_1 - r_2)\} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$\nu_o = n_o/n, \quad \nu_e = n_e/n.$$

これから、二つの焦点距離の比は  $(\nu_o - 1)/(\nu_e - 1)$  となる。

いくつかの複屈折材料についての主屈折率の値を表1に示す。この表から、焦点距離の異なるレンズを得るには、主屈折率の値の差が大きい方解石を用いればよいこ

表1 一軸性結晶の主屈折率

物質	主屈折率	
	常光線	異常光線
方解石	1.658	1.486
水晶	1.544	1.553
サファイヤ	1.768	1.760
K D P	1.501	1.468
A D P	1.524	1.478

とがわかる。

3.2 近軸における収差

前節の説明からもわかるように、異常光線の屈折率が伝搬方向によって異なるため、近軸域 (ガウス近似) でも完全な結像は得られない。近軸光線の式は、図1と図2で表される光波伝搬の考え方をもとに求められる。ここでは、その結果を簡単に述べる。

図3に示すような肉厚  $t$  の二焦点レンズの場合、常光線の焦点距離  $f$ 、レンズ端から主点までの長さ  $d_1, d_2$  は次のように表される<sup>10)</sup>。

$$\begin{aligned} f &= \nu_0 r_1 r_2 / \{ \Delta(\nu_0 - 1) \} \\ d_1 &= r_1 t / \Delta \\ d_2 &= r_2 t / \Delta \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Delta &= \nu_0 (r_1 - r_2) - (\nu_0 - 1)t \\ \nu_0 &= n_0 / n \end{aligned}$$

当然のことであるが、この式は屈折率  $n_0$  の等方性材料に対する厚肉レンズのパラメータの式と同じである。

異常光線については、その結像の様子は少し複雑になる。図4のように結晶の光学軸が  $x$  方向にあるとき、 $x-z$  系と  $y-z$  系の結像のためのレンズパラメータが異なる。 $y-z$  系でのパラメータは、この(2)式において  $\nu_0$  を  $\nu_e$  で置き換えることによって求められる。一方、 $x-z$  系では、さらにレンズ厚  $t$  を  $t(n_e/n_0)^2$  と置き換える必要がある。

このことは、近軸領域でも、図4に示すように、異常光線に非点収差が表れることを意味する。通常の等方性レンズにおける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がない場合にも生じる。

式からわかるように、レンズの肉厚  $t$  がゼロであると、異常光線の  $x$  座標に対する焦点距離と  $y$  座標に対する焦点距離が等しくなり、また、 $d_1, d_2$  もゼロになる

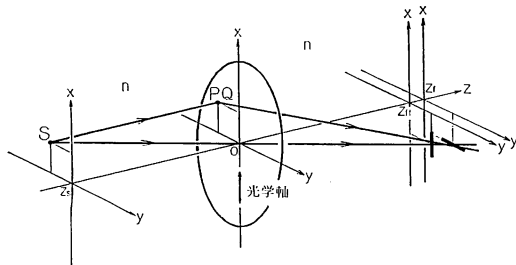


図4 複屈折レンズの非点収差

ので、非点収差は生じないことになる。

3.3 光線追跡

前節の式は近軸光線に対するものであるが、近軸以外の場合の収差を見るために、図2で示された屈折の考え方にしたがって、光線追跡を行うことができる。

以下に光線追跡の一例を示す<sup>11)</sup>。計算したレンズは、両凸の方解石の単レンズ ( $n_o=1.658, n_e=1.486$ ) で、 $r_1=r_2=60$  mm,  $t=3$  mm, 直径 5 mm である。このレンズに光軸に平行な光が入るときの異常光線のスポットダイアグラムを図5に示す。図の左の数値はレンズからの距離を表し、X-focus, Y-focus はそれぞれ先の  $x-z$  系、 $y-z$  系の焦点位置を示している。図には比較のために、同じ形状で屈折率が  $n_e$  の等方性レンズのスポットダイアグラムも示している。開口径が 1 mm と小さいとき二焦点レンズの非点収差が顕著に表れる。また、図6は入射高さに対する焦点位置の変化を示す収差曲線である。図中の  $X, Y$  は図4において  $x$  軸、 $y$  軸を通る光軸に平行な入射光の焦点位置の変化を表している。

ここで示した例では、スポットダイアグラムおよび焦点位置の変化曲線を見る限り、その収差の程度は同焦点距離の等方性レンズの収差と同じくらいの大きさである。したがって、近軸域においてすら収差を持つが、その収差が極端に結像を損ねることはなく、高解像を要求される光学系でなければ、実際に使用しても差し支えないことがわかる。ただし、先の計算結果は光線の収束性を評価しているだけで、実際の干渉計に用いた場合に表れる波面収差については議論されていない。これについ

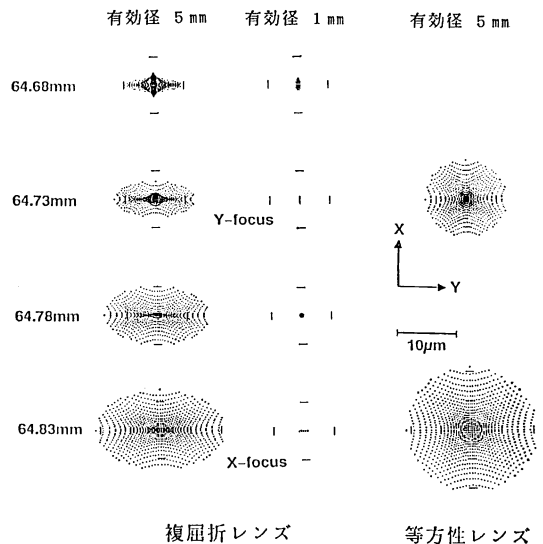


図5 複屈折レンズのスポットダイアグラムの一例

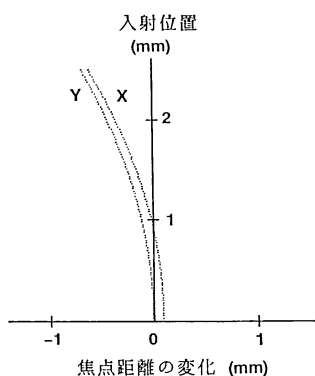


図 6 複屈折レンズの収差曲線の例。光線の入射位置に対する焦点距離の変化

ては今後の課題である。

#### 4. 二重焦点レンズの応用

二重焦点レンズの応用として、現在知られているのは干渉計における光波分割の要素としてである。ここでは、これを全視野型と走査型に分けて説明する。

##### 4.1 全視野型干渉計

###### 4.1.1 共通光路干渉計

Dyson の製作した干渉計の光学系を図 7 に示す。二重焦点レンズ  $L_1$  は、対称な 3 枚組レンズで、方解石でできた両凹レンズを、2 枚の両凸のガラスレンズで挟んだものである。このレンズは、焦点距離が常光線に対してゼロパワー、異常光線に対して数 cm になるように設計されている。

レンズ  $L_1$  の P 点に、光軸に平行に入射する光線を考える。この光線の光学軸方向に偏光した成分、すなわち常光線は、 $L_1$  を方向を変えず (屈折せず) に透過し、レンズ  $L_2$  で被検査表面 M の中央の 1 点 O に収束される。反射した光線は  $L_1$  の入射位置 P と対称の点 Q に到達する。 $L_1$  と  $L_2$  の間には  $\frac{1}{4}$  波長板が置かれ、その主軸が方解石の光学軸と  $45^\circ$  をなしているので、帰ってきた光線の偏光方向は行きと  $90^\circ$  だけ変化する。そのため、光線は異常光線として  $L_1$  を透過し、 $F_1'$  点に

収束される。この光線は入射位置 P に関係なくすべて O 点で収束するので、参照光として使われる。

一方、紙面に垂直な偏光成分を持って入射する異常光線はレンズ  $L_1, L_2$  で収束され、収束点  $F_2$  を通り、被検査面の 1 点 T に当たる。いま、図のような凹面鏡が被検査面であるとき、この凹面鏡の曲率中心がトリプレット  $L_1$  の中心に一致していると、反射した光線は Q 点に戻って来る。偏光成分が  $90^\circ$  入れ替わっているので、この光線は常光線となり、 $L_1$  で屈折されず、 $F_1'$  点に収束する。この光線は、レンズへの入射位置 P に応じて被検査面の異なる位置に当たるので、被検査面全体を照射することになり、物体光となる。

帰ってきた二つの偏光方向の光をハーフミラー HM で取り出し、偏光板を通して、被検査面の像位置で観測する。このとき、参照光と物体光の干渉によって、O 点を参照点とする凹面鏡の形状の場所的変化が干渉縞として観測される。

この干渉計は、P 点から分かれた光線が、帰ってきたときに、Q 点で再び一致するような光学系の場合に有効である。すなわち、P 点の像が同一面内の Q 点に生じる場合である。このような光学系は、autostigmatic と呼ばれている。この条件にあわない面でも、レンズなどを組み合わせることによって、autostigmatic にすることができる。たとえば、被検査面が平面の場合にも図 8 に示すように  $L_2$  の焦点距離の位置にレンズ  $L_1$  を置くことにより、この光学系が作られる。

通常の干渉計では、参照波面は別に作られた標準の面からの反射光を用いる。このため、標準の面と被測定面との相対変位が、直接光路差の変化としてあらわれ、振動などの外乱に弱いことになる。しかし、二重焦点レンズを用いた干渉計では、被測定面上の 1 点に参照点を置いているため、被測定面が光軸方向へ平行変位する限り、参照光と物体光の光路差は変化せず、振動に強い干渉縞が得られる。また、物体光と参照光がほぼ同一の光路を通るため、空気屈折率のゆらぎ等による光路長の変化にも強い。このようなことから、この種の干渉計を

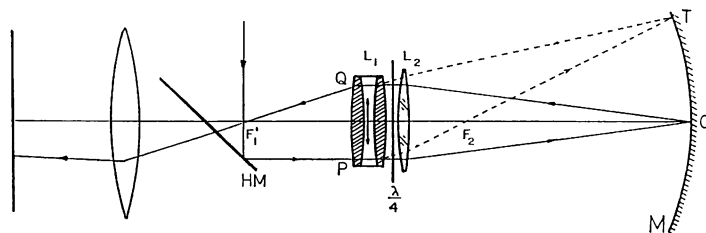


図 7 Dyson の二重焦点レンズを用いた共通光路干渉計 (凹面鏡の測定)

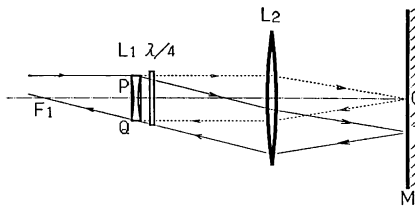


図 8 平面測定の場合の Dyson 型干渉計

共通光路干渉計と呼んでいる。

#### 4.1.2 位相シフト干渉計

共通光路型の干渉計が振動に強いという点は、近年、干渉計が生産ラインなどで用いられつつあることを考えると、非常な利点である。しかし、最近の干渉計は、干渉縞の1縞に相当する半波長よりさらに高い分解能を要求されている。このことを考えると、振動に強い共通光路型干渉計に位相シフト法を用いて感度を上げることが考えられる。

この目的の干渉計の一例を図9に示す。用いられている二重焦点レンズは Dyson と同様なトリプレットであり、常光線に対してゼロパワーで、異常光線に対する焦点距離が 38 cm である。ただし、Dyson のものとは少し異なり、4分の1波長板を用いない光学系を構成している。

光源は半導体レーザーで、二重焦点レンズの焦点距離だけ離れた点  $F_1$  に集光されている。二重焦点レンズの P 点を通った異常光線は、平行光となり、レンズ  $L_2$  で収束され、被検査物体の表面の1点 O に集光する。反射した光は、二重焦点レンズの対称点 Q に至る。4分の1波長板を用いていないので、偏光方向の変化は起こらず、この光線は再び異常光線となるので、二重焦点レンズで再び屈折される。一方、常光線は二重焦点レンズを屈折されずに通過するが、 $L_2$  を通ったあと平行光となり、被測定面を広く照らし、物体光となる。入射方向は被測定面に垂直であるので、反射光は、元の光路を反対に帰っていき、二重焦点レンズ上の P 点を通り、参照光と同方向に進むことになる。偏光板 P を通して観測すると、物体光と参照光の間の光路差が干渉縞として得られる。この干渉計では、往復とも物体光は常光線、参照光は異常光線であるので、両者に一樣な光路差が生じる。可干渉距離の短い半導体レーザー LD を光源として用いているので、この光路差を保証するために複屈折補償板 C が必要となる。

この干渉計に位相シフト法を導入するには、異常光線と常光線の間には既知の位相差を作る必要がある。これ

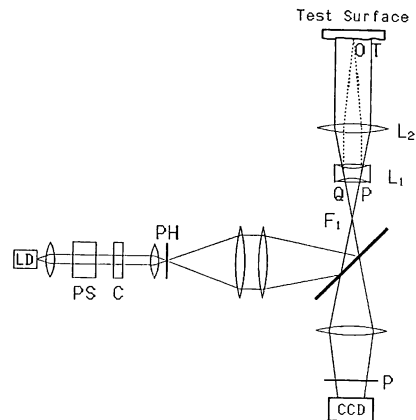


図 9 共通光路位相シフト干渉計

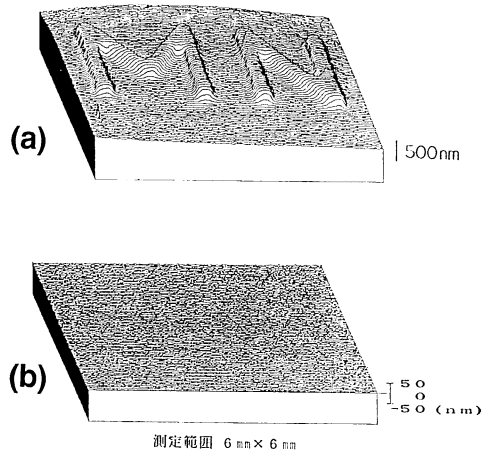


図 10 測定結果と再現性

は、光源のところに置かれたバビネソレイユの補償板 PS で行っている。実用的には、電圧の変化で位相差が変化する電気光学変調器などを用いることができよう。

この干渉計を用いて、位相シフト法により表面の計測をした結果の一例を図10(a)に示す。蒸着により作った鏡面の凹凸を測定している。図10(b)は、同様な表面について、同一場所を異なる時刻に測定した結果の差を示している。この干渉計は、定盤の上にマグネティックチャックで固定した光学素子をならべて組み上げただけのものであり、また、その定盤は特に防振していないにもかかわらず、このような再現性のよい結果を得ている。従来の干渉計が振動に非常に敏感であることを考えると、この結果は特筆すべきであると思われる。

Dyson 型の光学系でも同様に位相シフトが適用でき、その場合、複屈折の補償板 C が不用である。また、P 点で分かれた光線がレンズの対称な点 Q で再び合わさるた

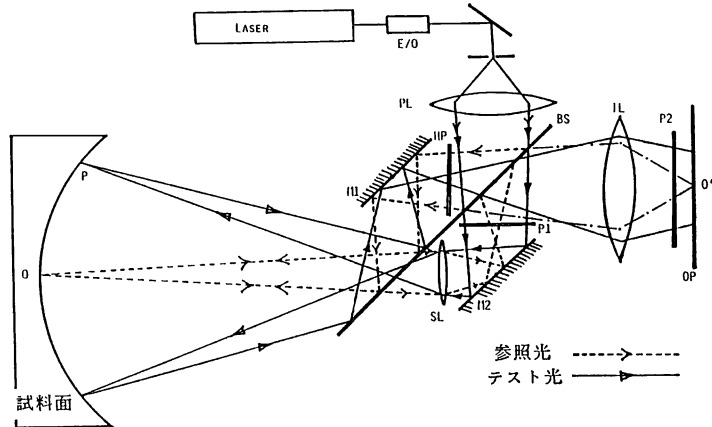


図 11 サイクリックな光学系による位相シフト干渉計

め、二重焦点レンズの収差をある程度軽減できる利点がある。ただし、4分の1波長板は実際には完全でないため、偏光方向が正確に90°変化せず、一部の光が像面の中央に集光して強いスポットをつくるために、像の中心点の測定に問題があると思われる。

二重焦点レンズを用いた干渉計と同様の共通光路干渉計は、フレネルゾーンプレートやサイクリックな二重焦点の光学系を用いても実現できる。ゾーンプレートを用いる場合、次数の異なる二つの回折光を参照光と物体光に用いればよい。ゾーンプレートと複屈折材料による二重焦点レンズとの違いは、前者が振幅分割により光波を分割しているのに対して、後者は偏光分割していることである。このため、ゾーンプレートによる二重焦点レンズを用いた干渉計に位相シフト法を導入することは難しい。

一方、サイクリックな光学系でも、偏光をうまく利用することで、位相シフトを行うことができる<sup>7)</sup>。図11にその光学系を示しておく。この方式の場合、光学系が複雑なことが問題であろう。

#### 4.2 走査型干渉計

前節の干渉計は物体光として物体面上に広がった光を用い、参照光として物体面上の1点からの反射光を用いている。この役割を逆にし、物体面上に集光する光をプローブ光として、物体を走査させて形状をはかるタイプの干渉計も発表されている<sup>8,9)</sup>。

そのシステムの例を図12に示す<sup>9)</sup>。この干渉計における二重焦点レンズは、被測定物体の1点に収束する常光線(プローブ光)と広い範囲を照射する異常光線(スキッド光)を作る。これらの反射光は検光子を通して干渉し、測定用センサーで検出される。二つの光線の間の位相差は、スキッド光で照らされた広い面全体の平均の

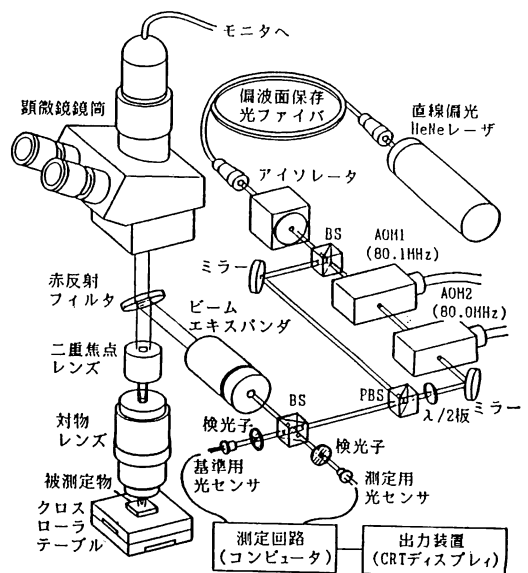
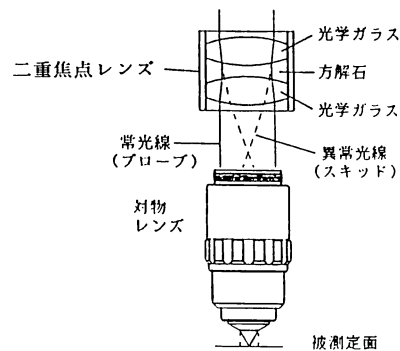


図 12 走査型干渉計の一例

位相とプローブ光の位相との差である。クロステーブルを動かして被測定物を走査することにより、場所的な位相差の変化が測定される。これが被測定物の形状を与えることになる。二つの光線の間の位相差を感度よく検出するために、ヘテロダイン干渉法が用いられている。

この干渉計では、走査のためにテーブルが上下方向に平行移動しても、位相差に変化がないのでテーブルの移動精度に対する制約が緩和されると考えられる。プローブ光とスキッド光が、触針式の表面粗さ計の触針とスキッドに相当している。

## 5. おわりに

複屈折材料を用いた二重焦点レンズは現在のところ共通光路干渉計に用いられているだけであると思われる。しかし、二つの異なる面にピントがあうことも利点である。このような面での応用も考えられよう。

干渉計への応用にしても、新しい模索が始まった段階である。振動など外乱に対する有利性は明らかであるが、二重焦点レンズの設計や、収差の測定形状への影響の評価などさらに詰めるべきことは多い。また、サイクリックな光学系による二重焦点系との比較も必要であろう。

画像処理の技術などの進歩によって、収差が測定形状に影響したとしても、測定値を補正して正しい形状を求めることは次第に容易になりつつある。このような状況では、測定値の正しさよりは、外乱に影響されず再現性がよいことが重要である。この意味では、安定性のよい共通光路干渉計が有利であると考えられる。

ところで、方解石をはじめとする複屈折材料を加工することは非常に難しいと思われる。この点が、複屈折材

料を用いた二重焦点レンズの応用をためらわせる一因であろう。しかし、最近では微細加工の進歩によって、偏光特性をもたせた回折格子が作られるようになってきている。この技術を応用して、回折を利用した偏光性のフレネルレンズを作ることによって、この問題を解決する方法も考えられる。

## 文 献

- 1) 例えば, M. Born and E. Wolf: "Optics of crystals (Chap. 9)," *Principles of Optics*, 6th ed. (Pregamon Press, New York, 1986).
- 2) A. Yariv and P. Yeh: "Electromagnetic propagation in anisotropic media (Chap. 4)," *Optical Waves in Crystals* (John Wiley and Sons, New York, 1983).
- 3) 例えば, 鶴田匡夫: 応用光学 II (培風館, 1990) pp. 159-163.
- 4) J. Dyson: "Common-path interferometer for testing purposes," *J. Opt. Soc. Am.*, **47** (1957) 386-390.
- 5) S. Mallick: "Common-path interferometers (Chap. 3)," *Optical Shop Testing* (John Wiley and Sons, New York, 1978).
- 6) K. Iwata and T. Nishikawa: "Profile measurement with a phase-shifting common-path polarization interferometer," *Proc. SPIE*, **1162** (1989) 389-394.
- 7) J. Huang, T. Honda and N. Ohyama: "A phase stepping double-focus interferometer using a cyclic design and polarized light," *Opt. Commun.*, **71** (1990) 297-301.
- 8) 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.
- 9) 日野元人, 別府芳則, 近藤道雄, 寺本卓司, 柴田 淳, 藤田一彦: "二重焦点レンズを用いた除振型ヘテロダイン干渉計の開発", 1990年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, pp. 441-442.
- 10) 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* (1992) in press.
- 11) 菊田久雄, 下村 広, 岩田耕一: "複屈折二重焦点レンズの光線追跡", *光学*, **21** (1992) 230-236.