
屈折率分布測定装置(RIMEI)の開発

Development of the Refractive Index Measuring Interferometer (RIMEI)

須原 浩之*
Hiroyuki SUHARA

伊藤 悟*
Satoru ITOH

上田 健*
Takeshi UEDA

伊藤 達也*
Tatsuya ITO

要 旨

X線CT(コンピュータ トモグラフィ)解析技術をレーザー干渉計に展開して、レンズを非破壊で三次元的に計測可能な、測定精度 10^{-4} (PV)以下の屈折率分布測定装置(RIMEI)を開発した。近年、デジタルコピーやレーザープリンタなどの光学素子として搭載されているプラスチックレンズは、ガラスレンズに比べて非球面形状を製作しやすく、低コストの利点がある反面、レンズ内部に屈折率分布を生じることが多く問題となっていた。従来技術では非破壊で屈折率分布を測定することは極めて困難であったが、この開発により高精度の計測を可能にした。

ABSTRACT

The Refractive Index Measuring Interferometer (RIMEI) that can measure 3D refractive index distribution of lenses nondestructively is developed using the idea to apply X-ray computed tomography (CT) technology to laser interferometry. RIMEI has performance with accuracy of 10^{-4} (PV). Plastic lenses have been widely used in optical devices such as digital copiers and laser printers. They are superior to glass lenses in forming of aspherical surfaces and cost reduction, but heterogeneity of them causes degradation of optical characteristics. It becomes possible to measure the refractive index distribution with high accuracy nondestructively.

* 画像技術開発本部 Imaging Technology Division
OE開発室 Opt-Electronics Development Department

1. はじめに

近年、デジタルコピーやレーザープリンタ、カメラ等に使用される光学素子として、プラスチック材料による成形レンズが普及している。このプラスチック成形レンズは、ガラス研磨レンズに比べて非球面レンズの製作性に優れ低コストであるが、屈折率の分布が不安定で、レンズ内部に不均質な部分を生じることが多い。レンズ内部の屈折率の不均質性は、光学特性に大きな影響を及ぼし、結像性能を劣化させる原因となる恐れがある。このようなことから、プラスチックレンズの品質安定化のためには、屈折率の分布を高精度に測定する必要がある。

従来技術としては、最小偏角法などにより偏角を計測して屈折率を求める方法と、干渉計を構成して透過波面を計測し、屈折率分布を求める方法が知られている。しかしながら、いずれの方法も被検物を所定の形状に加工する必要がある。測定対象の光学素子を破壊しなければならない。また測定値は、光路進行方向に積算された平均値となり、3次元空間的な屈折率分布を測定することはできていない。

我々は、プラスチックレンズの屈折率分布を形状に関わらず非破壊で3元的に測定可能な装置を開発¹⁾²⁾し、RIMEI (Refractive Index Measuring Interferometer)と命名した。

2. 原理

2-1 光学系

光学系はFig.1に示すようにマハツェンダ干渉計³⁾を採用している。レーザー光(He-Neレーザー、波長：633nm)は、NDフィルター(ND)、偏光板(POL1,POL2)を通過して光量と偏光方向を適正に調整し、ビームエキスパンダレンズ(BE1,BE2)で必要な大きさに拡大される。空間フィルタ(Spatial Filter)はフレア光、ゴースト光といった不要な光をカットする。次に、ビームスプリッタ(BS1)によって、直角に曲げられた参照波と、直進して位相物体である被検物を通過する被検波とに分割される。これらは、ビームスプリッタ(BS3)で重畳され干渉を起こす。被検物と拡散板(diffuser)とを幾何光学的に共役関係になるように配置した結像レンズ(FL1)で、干渉縞像を一旦拡散板に投影してインコヒーレント光とし、拡散板以降にあるレンズ系やCCD前面の保護ガラスでの多重反射による干渉縞ノイズを低減している。拡散板に生じた干渉縞は、x方向に配列されたデータ取り込み用の1次元CCDと主にモニター用の2次元CCDで検出される。CCD上の干渉縞像の大きさは、ズームレンズによって可変となる。

被検物の実長を計測する手段として、大きさが既知のス

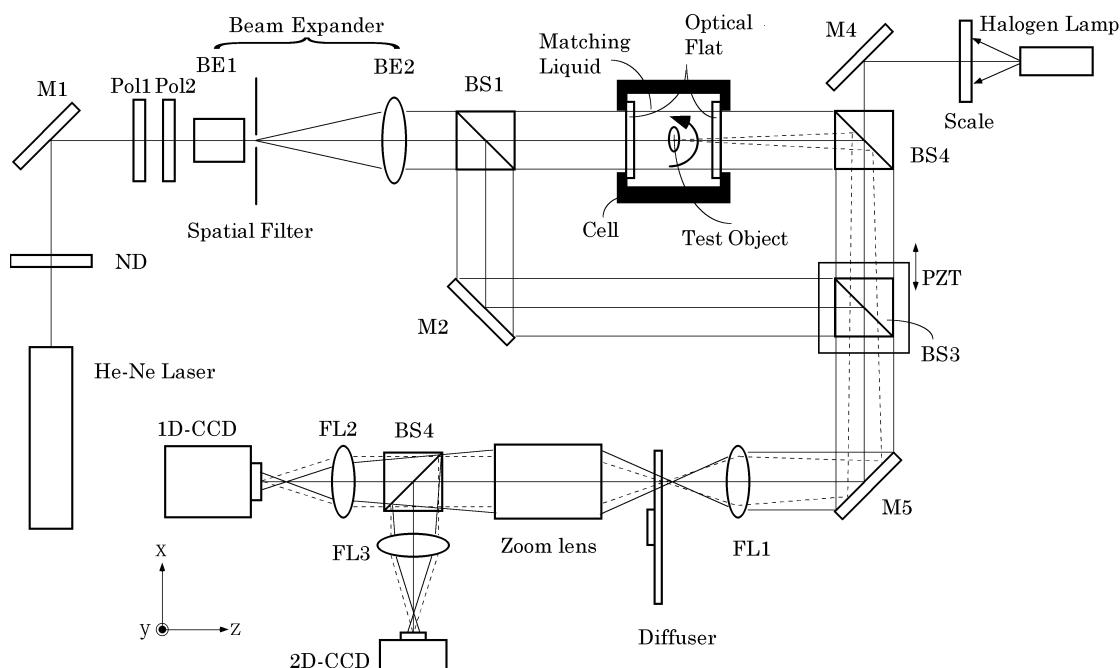


Fig.1 Schematic diagram of RIMEI system.

ケール(scale)をBS2の別光路に設置し、背後からハロゲンランプを照射することで、キャリブレーションを行っている。

被検物セル内には、屈折率が被検物とほぼ等しいマッチング液が充填されており、被検物表面での屈折の影響を排除している。従って、被検物がいかなる外径形状であっても被検波は直進する。入射・射出窓には面精度の高いオプティカルフラットを配置した。また、被検物は光軸に対して直交するy軸周りに回転可能となっており、光軸に直交する断面内の任意の入射方向に対して透過波面の計測を可能としている。

2-2 透過波面計測

干渉縞から透過波面を計測するために、BS3はピエゾ素子(PZT)で駆動され、参照波の光路長を波長オーダで可変としている。干渉縞解析方法としては、位相シフト法を用い $\pi/2$ 間隔で5回データを取り込む5バケット法を採用している。

一方向のみの透過波面の計測の場合、干渉縞像の解析結果は光路進行方向に積算されており、光軸方向に対する平均屈折率分布として算出される。被検物の屈折率分布を3次元空間分布として測定する場合には、被検物に対する被検波の入射方向を $0 \leq \theta \leq \pi$ の範囲で変化させ、各回転角位置における透過波面の計測データを収集してコンピュータにより画像を再構成する。再構成は、医用機器でよく知られているX線CT解析の手法を採用している。

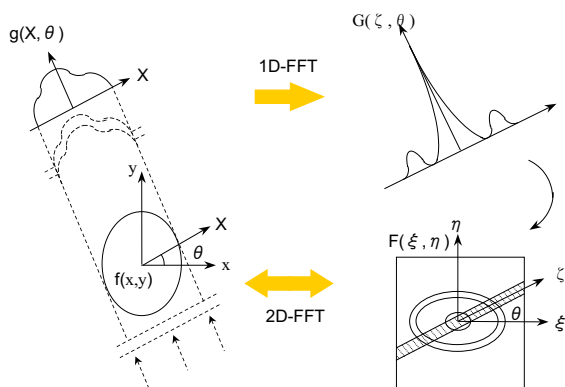


Fig.2 Principle of CT analysis.

2-3 CT解析の原理

Fig.2に示す投影切断面定理⁴⁾によれば、物理分布量をもつ物体 $f(x,y)$ のRadon変換、すなわち角度 θ の方向からの投影データ $g(X, \theta)$ を1次元フーリエ変換した結果 $G(\xi, \theta)$ は、物

体の2次元フーリエ変換 $F(\xi, \eta)$ の極座標表現における θ 方向成分と一致することがわかっている。数式で表すと(1)式となる。

$$F(\xi \cos \theta, \xi \sin \theta) = G(\xi, \theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

物体 $f(x,y)$ を被検物の屈折率分布とするならば、 $g(X, \theta)$ は光路差である。マハツェンダ干渉計の場合、光路差は透過波面として計測される。

CT解析の原理に基づいて、屈折率分布を再構成するためには、被検物を θ 回転($0 \leq \theta \leq \pi$)させて得られた透過波面の1次元フーリエ変換データ $G(\xi, \theta)$ を極座標-直交座標変換して、 $F(\xi, \eta)$ を計算し、2次元逆フーリエ変換すればよい。この方法は、フーリエ変換法と呼ばれているCT解析の手法である。解析フローをFig.3に示す。

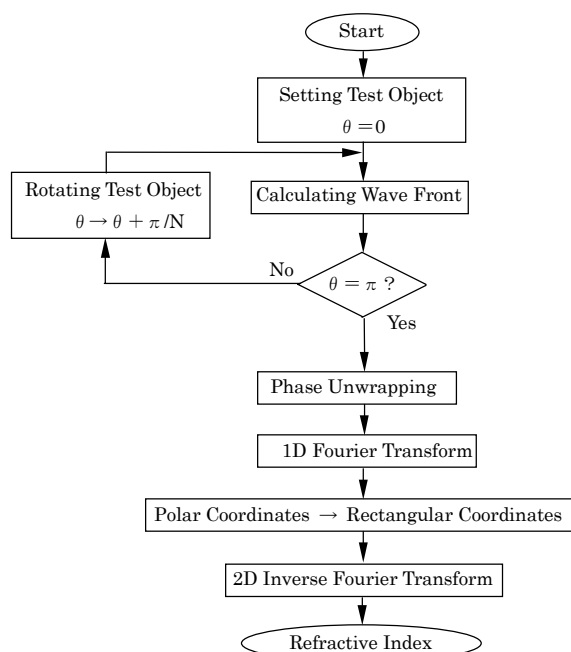


Fig.3 Flow chart for CT analysis.

2-4 マッチング液の温度制御方法

被検物セル内に充填したマッチング液は、屈折率の基準となるので、均質でなければならない。わずかでも温度分布が有ると屈折率が変化するため、不均質となってしまう、測定精度が低下する。このため、マッチング液の温度分布を高精度に制御する必要がある。このことは、装置開発にとって、非常に大きな課題であった。

我々は、温度制御手段としてマッチング液を充填したセ

ルを水で覆い、サーキュレータで水を循環させ、水温を一定に制御する恒温水槽方式を開発した²⁾。

Fig.4に今回開発した温度制御装置の構造を示す。本体はセルと循環水水槽部のアルミ一体 casting により製造された二重の円筒形状をしており、内側の円筒(セル)にはマッチング液と被検物が収納され測定が行われる。水槽部は、セルと平行な方向に4つの部屋に区切られ、水槽部外側には断熱材を充填し、外気との熱の伝達を遮断している。サーキュレータによって温度制御された水が水槽1~4の順番で上方向と下方向に流れることによりセルとの間で熱交換を行い、マッチング液を所定の温度に制御する。

この構造により、水路の断面積が常に一定になり、流れの抵抗を低減し水流をスムーズに流すことができ、またセル外壁の窓を除くすべての隔壁が循環水水流と接触するため、熱の伝達が良く温度制御の効率を高めることができる。

この結果、温度分布を 0.1°C 以下と、測定精度上問題ない範囲に収めることが可能となった。さらに、マッチング液の絶対屈折率は、温度に対してほぼ線形であることを利用して、屈折率の絶対値計測が可能となった²⁾。

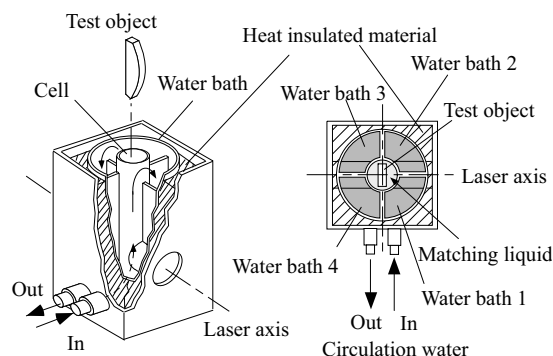


Fig.4 Temperature control unit.

3. 測定結果

3-1 硝材による精度評価実験

性能を確認する手段として、2種類の硝材を張り合わせることで既知の屈折率段差が存在する試料を作製し、破壊測定により得られた硝材の屈折率差データを真値として測定結果と比較した(Fig.5参照)。この結果、屈折率の繰り返し測定精度は 2σ で $10^{-4}(\text{PV})$ 以下であった。

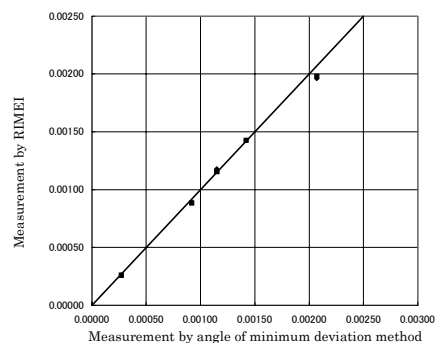


Fig.5 Experimental results of refractive index difference.

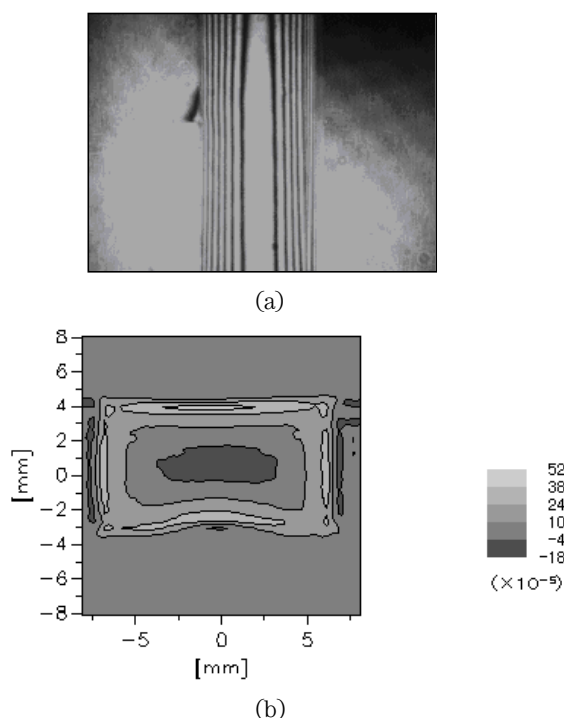


Fig.6 Experimental result of sample A: (a) interference fringe image, (b) contour map of refractive index distribution.

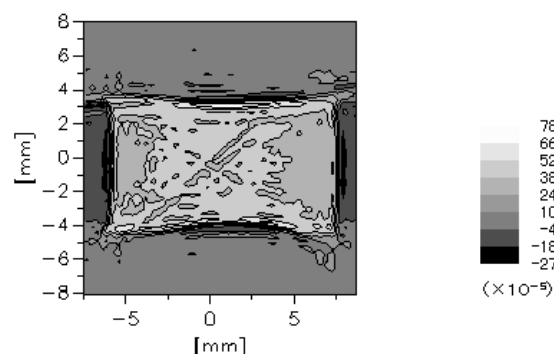


Fig.7 Experimental result of sample B: contour map of refractive index distribution.

3-2 プラスチックレンズの測定

2つのプラスチックレンズの測定結果を示す。サンプルAは外径寸法が縦80mm横8mm中心肉厚14mmの走査光学系用のレンズである。干渉縞像(Fig.6(a))に縦方向に明暗が見えるのは、縦方向は屈折率がほぼ一定で、横方向に屈折率分布が存在することを意味する。中心断面をCT解析した結果をFig.6(b)に示す。濃さの違いは、屈折率の違いを表している。単位は 10^{-5} である。レンズの中心へ向かって、絶対屈折率が小さくなっている。

サンプルAと同じ形状で、成形条件が異なるサンプルBの測定結果をFig.7に示す。比較のため同じスケールに統一して表示した。サンプルBはAに比べて、明らかに屈折率分布が小さい。AとBでは、外径形状が同じであるにもかかわらず、屈折率分布が大きく異なっていることがわかる。

4. 装置仕様

Fig.8に我々が開発したRIMEI全体の写真を示す。RIMEIは、被検物を設置する測定部本体(右側)とPCを組み込んだ制御盤(左側)の構成になっている。測定するための駆動手段は、全てPC上で制御可能である。また、開発したプログラムは、GUI(グラフィック ユーザ インターフェイス)を採用しており、測定者の操作性にも配慮した設計となっている。被検物の仕様と測定精度をTable 1に示す。



Fig.8 RIMEI system.

Table 1 Specifications.

Test object	Size	diameter of 10mm to 25mm
	Length	$\leq 160\text{mm}$
	Refractive index	$\leq 0.002 \text{ (PV)}$
Accuracy	Absolute refractive index	≤ 0.0003
	Refractive index distribution	$\leq 0.0001 \text{ (PV)}$
	Wave front	$\leq 0.2 \lambda \text{ (PV)}$

5. まとめ

X線CT解析の手法をレーザー干渉計に展開することで、プラスチックレンズを形状に関わらず非破壊で三次元的に計測可能な屈折率分布測定装置(RIMEI)を開発した。Table 1の条件を満たす任意形状の被検物に対して、絶対屈折率測定精度は 3×10^{-4} 以下、屈折率分布測定精度は 10^{-4} (PV) 以下という良好な性能を有している。

RIMEIは、製造時の成形条件出しや問題解析、レンズ設計へのフィードバックなどに、活用されている。今後は3次元計測の高速化や、測定対象物の適応範囲を拡大して屈折率勾配の大きなレンズの計測などの展開を考えている。

謝辞

RIMEIの開発にあたり、温度制御方法に関して、御指導いただきました研究開発本部 大島顧問に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 須原浩之, 仲瀬知子: CT解析を用いた光学レンズの屈折率分布測定方法, Japan Optics '96, p331.
- 2) 須原浩之, 仲瀬知子: CT解析を用いた光学素子の屈折率分布測定干渉計, 第22回光学シンポジウム, (1997), p53.
- 3) 岩田耕一: 三次元屈折率分布の測定, 応用物理, 49, (1980), pp487-495.
- 4) 斉藤恒夫: 画像処理アルゴリズム, 近代科学社.