



複数枚の干渉図形を用いた非球面の形状測定法

大西 邦一・横関 俊介・鈴木 達朗

大阪大学工学部応用物理学教室 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1983年3月24日受理)

Measuring Method of Aspheric Surfaces Using Multiple Interferograms

Kunikazu OHNISHI, Shunsuke YOKOZEKI and Tatsuro SUZUKI

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

A measuring method of aspheric surfaces using multiple interferograms is described. In this method, the general type of interferometer, such as the Twyman-Green, is utilized, and by means of the movement of test surface along the optical axis, the radius of the incident spherical wave to the test surface is varied. Then, the wavefront aberration of the reflected light on the test surface, in the region where the intervals of interference fringes spread in each of the interferograms, is measured, and the shape of the test surface is calculated with these data. By this method, the aspheric surfaces which deviate large from the spheres can be measured absolutely with interferometers which are available on the market.

1. はじめに

干渉計を用いた光学的非球面の形状測定法について報告する。

従来、光学的球面形状の検査には、トワイマン・グリーン干渉計等を用いる方法が、一般的である。一方、球面からの偏差が非常に大きな非球面の形状測定を行なう場合は、球面波を被測定面に入射させる通常の干渉測定法では、被測定波面の波面収差が著しく大きくなり、得られる干渉縞の縞間隔が観測限界を超えるほど小さくなってしまふ。

近年、このような問題を解決する一方法として、計算機プログラムを用いた干渉計マルチテストが、非球面の検査法として大きく注目されている¹⁾。これは、被検面が理想的な形状をもった場合にできる波面と同一の形状の参照波面を計算機プログラムによって合成し、そこからの被検面の偏差を干渉計で検出するものである。

一方、前述のように通常の干渉計で干渉縞の縞間隔が小さくなりすぎるような場合でも、入射球面波の曲率を適当に選べば、被測定波面と球面波との偏差が部分的に小さくなって、一部分ではあっても縞間隔の大きな干渉

縞を発生させることができる²⁾。

著者は、この現象を利用した非球面の絶対形状測定法を報告した³⁾。この測定法では、被測定面を光軸に沿って前後に動かすことによって入射球面波を変化させ、そのつど得られる干渉図形のなかで、入射球面波が被測定面に接しているために干渉縞の縞間隔が最も大きくなっている部分に注目し、その部分の位置から被測定面上の各点における面の傾きを逐次求めていく。

今回は、その測定法をさらにおしすすめ、被測定面の移動によって得られる複数枚の干渉図形中の縞間隔が大きい部分をすべて利用し、その各部分内で従来の干渉縞解析操作と同様の操作を逐次行なっていくことによって、非球面の絶対形状を測定する方法を提案する。この方法によれば、市販の計測用干渉計を用いて、従来の干渉測定法では測定が困難であった非球面の絶対形状を、通常の干渉測定法と同程度に高精度測定することができる。

以下では、この非球面の絶対形状測定法の原理および誤差について述べ、合わせて測定の方法を確認するために行なった実験結果を報告する。

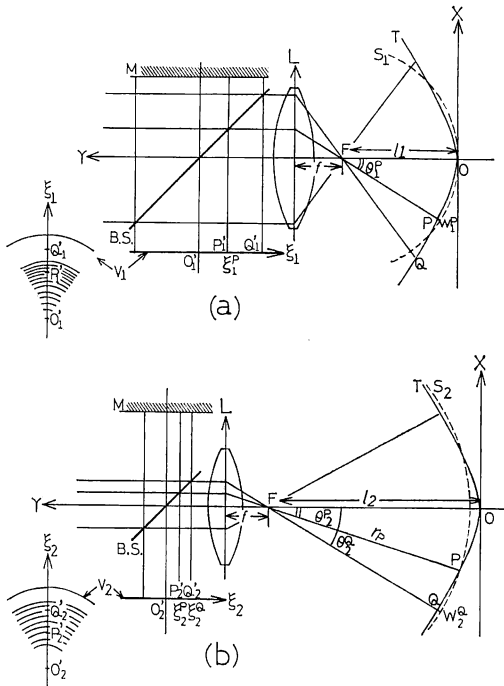


Fig. 1 Schematic diagram of the interferometer for measuring aspheric surfaces using multiple interferograms.
 B. S. : Beam splitter, M : Reference plane mirror, L : Lens, F : Focal point of lens L
 T : Test surface, S_1, S_2 : Incident spherical wavefront, V_1, V_2 : Interference plane.

2. 測定原理

測定に用いられる干渉計の配置図を **Fig. 1** に示す。また、図の左下には観測面 V 上で観測される干渉縞の一例を部分的に示す。

垂直入射した平行光束に対して収差を補正した既知の焦点距離 f のレンズ L に入射したレーザービームは、 L によって L の焦点 F を中心とする球面波に変換されて、被測定面 T に入射する。図のように 2 光束の傾きをゼロにした干渉計の観測面 V では、 V に到達した T からの反射光波の波面収差に対する等高線として、干渉縞が観測される。

いま、**Fig. 1(a)** のように、焦点 F から l_1 の位置に被測定面 T の頂点 O があり、 T に球面波 S_1 が入射する場合を考える。しかもこのとき、 T の S_1 に対する偏差がレーザーの波長に比して著しく大きく、図のように T 上の点 P に対応する V_1 上の点 P_1' 付近から外側は、干渉縞の縞間隔が小さくなり過ぎて観測が困難であるものとする。このような場合は明らかに、被測定面の頂点 O から P 点付近までは、通常の干渉測定法と同様に干渉縞

の解析を行なうことによって、 T の S_1 からの偏差を求めることができる。さらに、焦点 F と T の頂点 O 間の距離 l_1 がわかると、 S_1 の半径および中心の位置が求まるので、簡単な座標変換の関係から、 P 点付近までの被測定面上の各点の X - Y 座標を求めることができる (ただし、 X - Y 座標軸は、図のように光軸方向を Y 軸、頂点 O を通り Y 軸に垂直な軸を X 軸とする)。

一方、観測面 V_1 での干渉縞の縞間隔が小さ過ぎて、縞の観測ができない Q 点などでは、その座標を求めることはできない。

そこで次に、被測定面を光軸に沿って移動させる。そして、たとえば **Fig. 1(b)** のように T の頂点 O が F から l_2 の位置に来たとき、縞間隔の大きな干渉縞が現われる位置がずれて、観測面 V_2 上で P 点に対応する P_2' 点、 Q 点に対応する Q_2' 点の両方を含む部分で干渉縞が観測できるようになったものとする。このとき、 P_2' 点を波面収差がゼロの点 (以下、これを基準点と呼ぶ) とし、干渉縞の縞間隔が大きく観測が可能な部分内の各点で先ほどと同様の縞解析を行なうことによって、焦点 F と P 点を結ぶ線分 r_P を半径とする球面波 S_2 に対する T の偏差を求めることができる。さらに、距離 l_2 と P 点の X - Y 座標から S_2 の中心の位置と半径 r_P が求まるので、先ほどと同様簡単な座標変換の関係からその部分内の被測定面上の各点の座標を求めることができる。

このように、被測定面を光軸に沿って前後に動かし、入射球面波の半径を変えることによって、干渉縞の縞間隔が大きくなる部分の位置を順にずらしてゆくことができる。しかも、その各部分内で干渉縞の解析を行ない、それらを逐次つなぎ合わせていくことで、被測定面の絶対形状を求めることができる。

以上の事実を利用して、次の操作を行なう。まず、被測定面 T を光軸に沿って焦点 F 上に移動する。 T が F 上に来ると入射球面波は一点で反射されるので、反射光波には波面収差は加わらず、観測面 V では一様な強度分布が観測される。次に、 F 上に置かれた T の位置を基準にして、 T を再び光軸に沿って動かし、 T に球面波を入射させる。そして、光軸およびその近傍で干渉縞の縞間隔が大きくなる状態を初期状態 ($i=1$) として、 T を光軸に沿って順に移動させ、干渉縞の縞間隔が大きくなる部分を逐次ずらしていきながら、以下の操作を繰り返す。

- ① T の F からの移動量 l_i ($i=1, 2, \dots$) の測定
- ② 基準点 P_i' の選定: 観測面で得られる i 番目の干渉図形において縞間隔が大きくなっている部分内で、かつ ($i-1$) 番目までの測定操作段階ですでに

X-Y 座標が求まっている部分内か、またはその近傍に対応する干渉縞上の適当な1点を基準点に選ぶ ($i=1$ では、光軸と交わる点を基準点とする)。

- ③ P_i' に対応する被測定面上の点 P_i の座標の算出: 基準点 P_i' は、干渉図形中の縞間隔が大きくなっている部分内にあるので、 P_i' 点における反射光波の波面収差は比較的小さい。したがって、 P_i' 点に対応する被測定面 T 上の点 P_i で反射された光線は、焦点 F のごく近傍を通過してレンズ L に到達したものと考えられる。そこで、 P_i 点からの反射光線は焦点 F を通り、レンズ L 通過後は光軸に平行に進行して P_i' に達するものと仮定し、基準点 P_i' の光軸からの距離 ξ_i^p から P_i と焦点 F を結ぶ直線を求める。そして、この直線とすでに ($i-1$) 番目までの測定操作で P_i 点付近まで求まっている T の断面形状との交点の座標を求め、それを P_i 点の座標とする。
- ④ 干渉縞の縞間隔が大きくなっている部分内での T の球面波からの偏差の算出: まず、②で選んだ基準点 P_i' の干渉縞の次数を 0 次とし、縞間隔が大きくなっている部分内の測定点 Q_i' における次数 n_i^q を求める。そして、以下の式から Q_i' に対応する T 上の点 Q_i における T の球面波 S_i からの偏差 W_i^q を求める。ただし S_i は、基準点 P_i' に対応する T 上の点 P_i と焦点 F を結ぶ線分を半径とする球面波である。

$$W_i^q = (1/2)n_i^q \cdot \lambda \quad (1)$$

ただし、 λ は光源のレーザの波長。

- ⑤ 干渉縞の縞間隔が大きくなっている部分内の各測定点の座標の算出: ①で求めた T の移動量 l_i 、③で求めた基準点 P_i' に対応する T 上の点 P_i の座標 (x_i^p, y_i^p) 、④で求めた測定点 Q_i における T の球面波 S_i からの偏差 W_i^q 、およびレンズ L の焦点距離 f から以下の式を用いて、 Q_i 点の座標 (x_i^q, y_i^q) を求める。

$$\begin{aligned} x_i^q &= x_i^p \cos(\theta_i^q - \theta_i^p) \\ &+ (l_i - y_i^p) \sin(\theta_i^q - \theta_i^p) \\ &+ W_i^q \sin \theta_i^q \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y_i^q &= l_i - (l_i - y_i^q) \cos(\theta_i^q - \theta_i^p) \\ &+ x_i^p \sin(\theta_i^q - \theta_i^p) \\ &- W_i^q \cos \theta_i^q \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$\tan \theta_i^p = \xi_i^p / f, \quad \tan \theta_i^q = \xi_i^q / f \quad (4)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

ここで、 ξ_i^p 、 ξ_i^q は P_i' 点、 Q_i' 点の光軸からの距

離をあらわす。上式を干渉縞間隔が大きくなっている部分内の各測定点に適用することによって、各測定点の座標を求める。

- ⑥ 干渉縞の縞間隔が大きくなっている部分までの T の絶対形状の算出: ⑤で求めた各測定点の座標と、($i-1$) 番目までの測定操作ですでに求まっている光軸から ($i-1$) 番目の干渉図形中の縞間隔が大きくなっている部分までの T 上の各点の座標をつなぎ合わせて、光軸から i 番目の干渉図形中の縞間隔が大きくなっている部分までの、T の X-Y 座標軸に対する絶対的な形状を求める。

3. 誤差解析

本測定法の精度を決定する測定誤差のなかで、測定形状に最も影響を及ぼす要因は、干渉計のレンズ L の焦点 F から被測定面の頂点 O までの距離 l_i の測定誤差である。この距離 l_i は被測定面に対する基準球面の半径を決定する重要な測定量で、その測定誤差の影響は本測定法のような非球面の形状測定法に限らず、干渉計による光学素子の絶対形状測定では避けえない問題である。そこで本節では、この距離 l_i の測定誤差の影響を検討する。

まず、本測定法の基本式(2)、(3)から l_i の測定誤差 δl_i が測定点の座標に及ぼす影響を解析する。簡単のために、(2)、(3)式中の P_i 点の座標 x_i^p 、 y_i^p 、 Q_i 点の偏差 W_i^q および θ_i^p 、 θ_i^q にはまったく誤差は含まないものとする。すると、 l_i の測定誤差 δl_i による Q_i 点の座標 x_i^q 、 y_i^q の誤差 δx_i^q 、 δy_i^q は次式のようにあらわされる。

$$\delta x_i^q = \delta l_i \sin(\theta_i^q - \theta_i^p) \quad (5)$$

$$\delta y_i^q = \delta l_i \{1 - \cos(\theta_i^q - \theta_i^p)\} \quad (6)$$

上式から明らかなように、 δl_i の影響は基準点から離れた点ほど大きくなる。

そこで次に、 δl_i の影響に対するおおよその定量的検討を行なうために、被測定面 T を球面と仮定し、測定では焦点 F からその半径だけ離れた位置の付近に T が配置されるものとする。このような場合は、基準点を原点に置くことができ、 $\theta_i^p = 0$ となって(5)、(6)式はさらに簡単になる。すなわち、T と焦点 F 間の距離 l の T の半径に対する誤差 δl による被測定面上の任意の点 Q における座標の誤差 δx^q 、 δy^q は、Q 点と焦点 F を結ぶ直線と光軸がなす角 θ^q によって次式のようにあらわされる。

$$\delta x^q = \delta l \sin \theta^q \quad (7)$$

$$\delta y^q = \delta l (1 - \cos \theta^q) \quad (8)$$

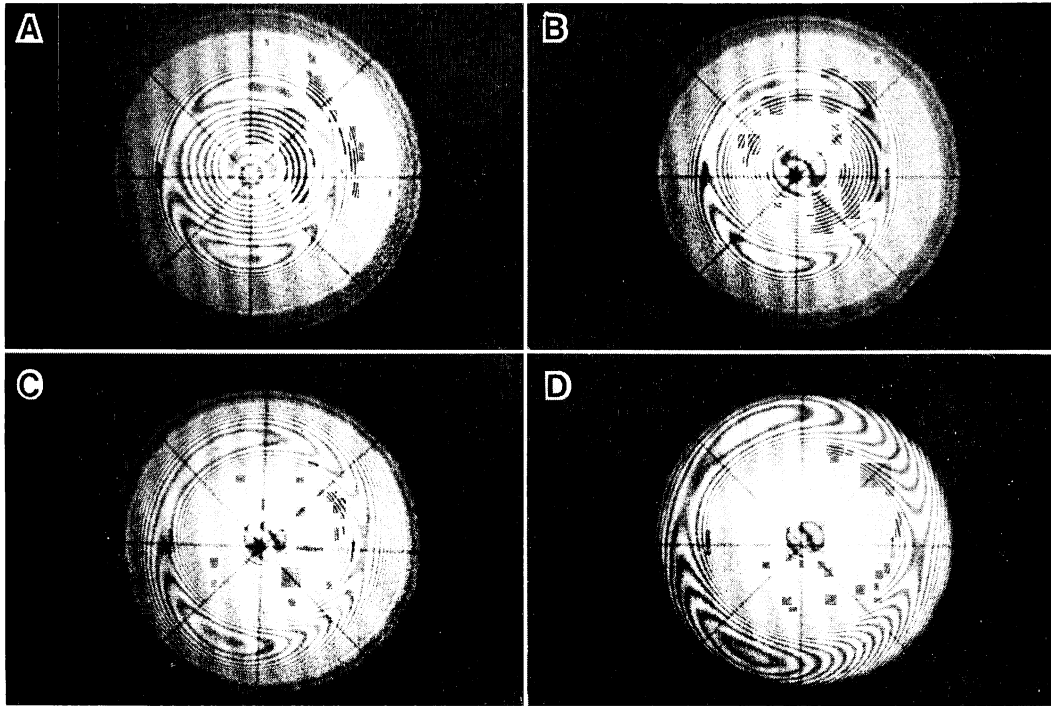


Fig. 2 Interferograms for the aspheric mirror under test by the measuring method using multiple interferograms.
 A: $l=387.92$ mm, B: $l=388.45$ mm, C: $l=389.22$ mm, D: $l=390.06$ mm,
 l : Distance from test surface to the focal point of lens L.

したがって、 δx^Q , δy^Q が最大になるのは Q 点が被測定面の縁にある場合で、そのときの θ^Q を θ^Q_{max} とすると、 θ^Q_{max} は被測定面の F ナンバーを用いて次のようにあらわされる。

$$\tan \theta^Q_{max} = (1/4)F \quad (9)$$

以上から、 δx^Q , δy^Q の最大値 δx_{max} , δy_{max} は次式のように書ける。

$$\delta x_{max} = \delta l \sqrt{1/(16F^2 + 1)} \quad (10)$$

$$\delta y_{max} = \delta l \{1 - 4F\sqrt{1/(16F^2 + 1)}\} \quad (11)$$

上式から、 δl の影響は被測定面の F ナンバーにほぼ反比例し、短焦点・大口径の被測定面ほど l の測定は厳密に行なわなければならないことがわかる。また F ナンバーが 1.75 以上の被測定面では (11) 式の δl にかかる係数値が 0.01 以下になるので、 l の測定誤差を $50 \mu\text{m}$ 以下に抑えれば、その誤差による測定形状の誤差は $0.5 \mu\text{m}$ 以下となり、十分干渉計自体の精度に匹敵する精度が得られる。

4. 実 験

本測定法の原理を確認するために、実際に非球面凹面鏡の断面形状を本測定法で測定した。測定した凹面鏡は

設計焦点距離 194mm の放物面鏡であった。また測定に用いた干渉計は、Fig. 1 に示したようなツイマン・グリーン干渉計であった。

得られた干渉図形の一部を Fig. 2 に示す。測定はこの干渉図形を用いて、2 章で述べた手順で行なった。

Fig. 3 は測定結果の一例で、Fig. 2 の干渉図形の水平軸方向の断面形状を半径 386.7mm の球面からの偏差

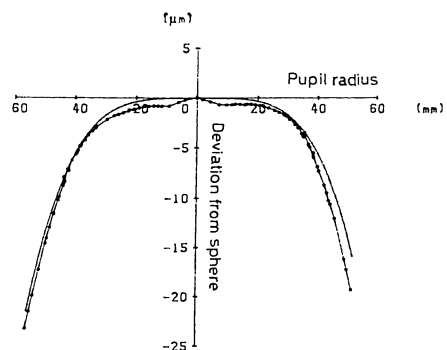


Fig. 3 Deviation of the mirror under test from the sphere whose radius is 386.7mm. Solid line is deviation of the parabolic surface, whose focal length is 193.4 mm, from the sphere.

として描いたものである。測定点は95点であった。また同様に描かれた実線は、焦点距離193.4mmの放物面と球面との偏差をあらわしたものである。この放物面と測定された形状との差は最大で約 $3.4\ \mu\text{m}$ 程度で、被測定面はほぼ焦点距離193.4mmの放物面とみなせた。これは、設計値に比べて0.6mmの差がある。

ところで、この実験では簡単な光学系しか使用していないので、干渉計自身の収差が十分取り除けておらず、各測定値の測定誤差はかなり大きくなっているものと思われる。また、測定値と比較するためにあらかじめ与えられていた焦点距離194mmの放物面という被測定面に関するパラメータは、確実な方法で測定されたものではなく、設計値であった。以上の事実を考慮すると、本実験の結果から本測定法の精度について考察することはできない。しかし、放物面鏡とされている被測定面がほぼ放物面に測定されたこと、測定で得られた焦点距離が設計値に近い値になったことなどから、本実験の結果は、2章で述べた測定原理が正しいことを示していると思われる。

5. おわりに

非球面形状の絶対量測定の一方法として、入射球面波の半径を変えて得られる複数枚の干渉図形から測定を行なう干渉測定法を提案した。

本測定法の特長は、市販の干渉計を用い簡単な操作を行なうことによって、従来の干渉測定法では測定が困難であった非球面の絶対形状を、通常の干渉測定法と同程度の高精度測定できる点である。

本報告ではその測定原理を述べ、さらに測定精度に最も大きく影響すると考えられる収束レンズの焦点から被測定面の頂点までの距離の測定誤差が、実際の測定形状に及ぼす影響を検討した。最後に、本測定法の原理を確認するために行なった実験結果の一例を示した。

文 献

- 1) 谷田貝豊彦, 安田賢司, 斎藤弘義: 光学, **3** (1974) 132.
- 2) 久保田広: 波動光学 (岩波書店, 東京, 1971) p.164.
- 3) 大西邦一, 横関俊介, 鈴木達朗: 光学, **11** (1982) 471.