放物面鏡形状検査測定用ホログラム干渉計*

天神林 孝 二**

Hologram Interferometer for Null-testing and Measuring Paraboloidal Mirror Configuration

Koji TENJIMBAYASHI

A new type of hologram interferometer for null-testing and measuring a paraboloidal mirror configuration is proposed. In the interferometer a hologram causes a spherical reference wavefront which interferes with a spherical wavefront reflected by a paraboloidal mirror under test. The method to calculate the amount of configuration error of a paraboloidal mirror from the interferogram is also proposed. Almost straight and equally spaced tilt fringes obtained in the experiment for a commercial on-axis paraboloidal mirror shows the interferometer is useful.

Key words: hologram interferometer, null-testing, paraboloidal mirror, configuration error measurement

1. はじめに

近年、ダイヤモンド旋削等による超精密加工技術の発達によって、高精度でさまざまな形状の鏡面が以前よりも簡単に製作されるようになってきた。それに伴って、製作された鏡面あるいは製作中の鏡面の表面形状を精度良く検査・測定する装置があらためて多くの台数必要となってきた。また、製作される鏡面は今や平面や球面形状だけにとどまらず非球面形状に及んでいる。非球面鏡の中でも放物面鏡は平面波を球面波に変換したり、逆に球面波を平面波に変換できるために用途の多い光学素子となっている。例えば、レーザ加工機において用いられる放物面鏡は平行光を収差なく一点に集められるため、高い精度で効率の良い加工ができ、望遠鏡に大口径の放物面鏡を用いると暗くて遠い星も高い精度で観測できる。

ところで、平面や球面鏡の形状検査測定には一般に市販の高精度フィゾー型干渉計がよく用いられており、放物面鏡もこのフィゾー型干渉計と補助平面鏡を用いることによってダブルパス型の光学系によってナルテストができる¹⁾。ただし、軸内放物面鏡の場合は、中心部に穴の開いた補助平面鏡を用いなければならないため、中心部が検査できないという欠点が生じる。また、軸外放物面鏡でもダブルパス型にすると、

ダイヤモンド旋削加工のような場合、形状誤差がゴーストを生じてしまって正しい測定を阻害する恐れがあり、そのため、軸外放物面鏡の検査にシングルパス型のマッハ・ツェンダ型を採用した例もある²⁾。ほかにも放物面鏡のような非球面鏡を検査測定する方法は現在まで光学メーカー等によっていろいろな方式が提案されており、逆にそのことが決定的な方法がまだ定まっていなかったことを示している³⁾。筆者は、既にホログラムを用いた干渉計について高精度の測定例を報告したが⁴⁾、ここでは同じくホログラムを用いて放物面鏡（特に軸内のもの）をナルテストで検査し、形状誤差を定量的に算出する方法を提案する。それによって形状誤差値がフィードバックされ、ダイヤモンド旋削等の再加工が可能となると思われる。

2. 放物面鏡検査測定用ホログラム干渉計

2.1 放物面鏡の反射特性

図1のように、次式で表される放物線

$$Z = \frac{X^2}{4f} \quad (1)$$

をZ軸の回りに回転させると放物面が形成され、それを鏡面としたものが放物面鏡となる。放物面は回転対称であるから、図1のようにZ-X断面だけを考えても一般性を失わない。ここで半径方向がX軸、光軸方向がZ軸、放物面の頂点が原点である。Z軸に対して負の方向に向かい、かつ平行に入射する光線 l_0 は放物面鏡の一点Rで反射されて l_1 となり、Z軸を

* 原稿受付 平成2年6月7日、昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会（昭和62年10月14日）にて発表

** 正会員 機械技術研究所（つくば市並木1-2）

Fig. 1 A reflected ray by a paraboloidal mirror

点Fで切る。反射光線 I_1 の式は、点Rの座標をR(Z_R, X_R)とし、反射の法則を考慮して次式のようになる。

$$Z - \frac{X_R^2}{4f} = \left(\frac{X_R}{4f} - \frac{f}{X_R} \right) (X - X_R) \quad (2)$$

従って、反射光がZ軸を切る点Fの座標は、式(2)より、

$$F(f, 0) \quad (3)$$

となって、これは放物面鏡の反射点の位置Rに依存しない。すなわち、理想放物面鏡によって反射された平行光は一点Fに集光することがわかる。点Fはいわゆる焦点と呼ばれているものである。次に焦点Fを通してZ軸に垂直に引いた直線と入射光線 I_0 との交点を $A_0(f, X_R)$ とすると、光路長 $\overline{A_0RF}$ は、

$$\begin{aligned} \overline{A_0RF} &= \overline{A_0R} + \overline{RF} \\ &= f - \frac{X_R^2}{4f} + \sqrt{\left(f - \frac{X_R^2}{4f}\right)^2 + X_R^2} \\ &= 2f \end{aligned} \quad (4)$$

と一定値となって、これも放物面鏡の反射点の位置Rに依存しない。以上から、Z軸に垂直な平面波で直線 $\overline{A_0F}$ を含む等位相面は、放物面鏡で反射された後、収束球面波(波面 C_1)となって焦点Fに集光した後、発散球面波(波面 C_2)となって焦点Fから出射することがわかる。

2.2 軸内放物面鏡検査測定用ホログラム干渉計

上記の性質を考慮すると、ホログラムを用いることにより、放物面鏡の検査・測定が行える。まず、ホログラムの作製のための光学系を図2に示す。レーザー光源(He-Neレーザー、波長 $\lambda=632.8\text{ nm}$)から発せられたレーザービームはビームスプリッター(BS)で振幅

Fig. 2 The optical system for forming a hologram

Fig. 3 The optical system of a hologram interferometer to null-test a paraboloidal mirror

分割される。一方(透過ビーム)を顕微鏡対物レンズ(MO2)とピンホール(P2)とで発散球面波としてホログラム乾板(H)に照射させる(物体光)。他方(反射ビーム)は顕微鏡対物レンズ(MO1)とピンホール(P1)及びコリメートレンズ(CL)によって平行光とし、同じくホログラム乾板に照射させる(参照光)。

このように作製したホログラムを用いて図3のような光学系を組むと放物面鏡形状の検査・測定のためのホログラム干渉計となる。ホログラムは作製時と同じレーザー光源(He-Neレーザー、波長 $\lambda=632.8\text{ nm}$)を用いて、顕微鏡対物レンズ(MO1)とピンホール(P1)及びコリメートレンズ(CL1)によって得ら

れた平行光（照明光）によって照明され、焦点Fから発散する球面波を再生する（基準波面）。一方、顕微鏡対物レンズ（MO2）とピンホール（P2）及びコリメートレンズ（CL2）によって作られた平面波が検査放物面鏡によって反射されると焦点に収束する球面波となる。これは、焦点を通過後に発散球面波となり、検査波面となって基準波面と干渉する。これらの基準波面と検査波面は干渉後、直ちにホログラムガラス基板を透過した後、イメージレンズを通してスクリーン上に投影される。検査放物面鏡

が形状誤差を持たない理想放物面鏡の場合、スクリーンには1本の干渉じまも生ぜず、一様な明るさとなり（ナルテスト）、形状誤差が大きい（数 λ 程度以上）場合には干渉じま模様が見られる。形状誤差が小さい場合（ $\lambda/2$ 程度以下）は通常、基準波面と検査波面に相対的なわずかな傾き（ティルト）を与えて、ほぼ等間隔の直線状の干渉じま群を生じさせ、これを観測することによって検査したり、解析することによって形状誤差を求めたりする。

2.3 放物面鏡形状誤差の測定

検査対象が平面や球面の場合、ナルテスト状態の干渉じま模様は $\lambda/2$ ごとの等高線の形状誤差マップを現すが、放物面鏡の場合は、放物面鏡の検査位置によって感度が異なるので、定量的な測定の場合には感度補正が必要である。すなわち中心（光軸）近くは $\lambda/2$ であるが周辺部になるにつれて感度が少しずつ小さくなっていく。ここでは、インタフェログラム（干渉じま模様）から測定放物面鏡の形状誤差を算出する方法について述べる。

今、形状誤差量の算出に便利のように、前記光学系を図4のように書き直す。図4では簡単のため、測定放物面鏡上の点（P）を通して光軸（Z軸）に垂直な平面から、イメージレンズ（IL）の中心を通して光軸に垂直な平面（LP）までの距離を $2f_L$ とし、LP平面から、光軸に垂直なスクリーン平面（SC）までの距離を同じく $2f_L$ とする。また、点Pを通して光軸に平行な直線と、イメージレンズの焦点Fを通して光軸に垂直な平面（FP）とが交わる点を S_P とする。そ

Fig. 4 The method to calculate the amount of configuration error of a paraboloidal mirror from the interferogram

うすると測定放物面による光線の反射は次のようになる。すなわち、点 S_P をとる入射平行光線は測定放物面鏡上の点Pで反射され、イメージレンズ内の点（ L_P ）を通してスクリーン上の点P'に達する。また、イメージレンズの焦点Fと測定放物面鏡上の点Pを結ぶ直線が理想放物面鏡（焦点距離 f_R ）と交わる点をRとし、点Rを通して光軸に平行な直線と平面FPとが交わる点を S_R とすると、理想放物面鏡による光線の反射は次のようになる。すなわち、点 S_R を通る入射平行光線は理想放物面鏡上の点Rで反射され、焦点Fを通り、イメージレンズ内の点（ L_R ）を通してスクリーン上の点R'に達する。ここで、イメージレンズ（IL）は、平面FP上の点をスクリーン（SC）上に常に等倍で結像しているからスクリーン上で点P'と点R'は一致する。点 S_P と点 S_R は一つの単色点光源から発生してコリメートレンズで平面波とされた同位相波面上の点であるから、それらがそれぞれ測定放物面鏡と理想放物面鏡によって反射された後にスクリーン上で干渉する場合の干渉光強度は、それらの光路差に依存する。今点Rと点 S_R を結んだ直線に点Pから下ろした垂線の足をHとすると、光路差OPDは

$$OPD = \overline{RH} + \overline{RP} \quad (5)$$

となる。なぜなら他の光路の差はキャンセルされるからである。今直線FOと直線FP（または直線FR）のなす角を θ （見込み角と呼ぶ）とし、距離 $\overline{PR}$ の長さを Δh とし、スクリーン上の点P'（または点R'）で観測される干渉じまの次数を m （整数とは限らな

い) とし、用いた光の波長を λ とすると式 (5) は次のようになる。

$$m\lambda = \Delta h(1 + \cos \theta) \quad (6)$$

これより形状誤差は

$$\Delta h = \frac{m\lambda}{1 + \cos \theta} \quad (7)$$

と求まる。ところで点 R は焦点距離 f_R の理想放物面上の点であるから、式 (1) より

$$R\left(\frac{X_R^2}{4f_R}, X_R\right) \quad (8)$$

であり、これは見込み角 θ をパラメータとして計算すると次のように表される。

$$R\left(f_R \tan^2 \frac{\theta}{2}, 2f_R \tan \frac{\theta}{2}\right) \quad (9)$$

点 P の位置は図のように点 R から角度 θ の方向に Δh 離れた位置であるから、式 (7), (9) から計算によって

$$P\left(\frac{m\lambda}{2} + \left(f_R - \frac{m\lambda}{2}\right) \tan^2 \frac{\theta}{2}, (2f_R - m\lambda) \tan \frac{\theta}{2}\right) \quad (10)$$

となる。

この式を用いて例えばダイヤモンド旋削によって形状誤差分の除去加工ができる。すなわち、まずスクリーン上の点 P' での干渉じまを観測してその次数 m を求め、次にバイトの先端を式 (10) で定まる位置に置き、かつバイトの送り方向を θ に向け、最後にそこから式 (7) で定まる距離だけ除去すれば理想放物面になるはずである。

3. ホログラム干渉計による放物面の検査測定実験

3.1 実験条件

ホログラム作製のための主な条件は以下のとおりである。ホログラム乾板は Agfa-Gevaert 社製の 10 E 75 で、大きさは $90 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 、乳剤厚さ約 $7 \mu\text{m}$ である。露光条件及び現像処理はおおよそ次の通りである。露光量は約 50 erg/cm^2 、現像処理は、D 19 現像液を用いて、標準的な処理 (20°C , 約 5 min) を行った。定着 (フジフィックス) と水洗の後、赤血塩水溶液で黒色が完全にぬけるまで漂白を行った。テストサンプルとして測定した放物面鏡は焦点距離 400 mm、開口径 35 mm、すなわち F 値 11.4 であった。ところで、一般に干渉計で放物面のような平面以外の面を検査する場合においては、平面のように目で観測しながら干渉じまの本数をゼロにして (ナルテスト) そのままティルトを与えただけでは等間隔で直線性の良い干渉じまは得られない。干渉じまをゼ

(a)

(b)

(c)

Fig. 5 Interferograms of a commercial paraboloidal mirror by the hologram interferometer
(a) : null-test, (b) : tilt, (c) : tilt for analysis

ロにしてからティルトを与え、そのティルト干渉じまを見ながら光学系の微調整によって等間隔で直線性の良いティルト干渉じまを探索していかなければならない。ただし、本実験では、 F 値の大きい放物面で

あったので光学調整は比較的容易であった。

3.2 結果及び考察

図3の光学系においてスクリーンの代わりに写真乾板を置いて撮影したものを印画紙にプリントしたものが図5である。図5のうち(a)はナルテストで、(b)は微小なティルトを与えたものである。本実験においては、基準波面と測定波面の光路長が等しくなくて干渉じまのコントラストはあまり高くないが、ほぼ直線で等間隔のティルトじまが観測できている。

解析は本来、式(7)によって行うべきであるが、ここでは F 値が11.4と大きいため、放物面鏡の中心の感度の 0.5λ に対して周辺の感度は $0.500\,239\lambda$ であり、誤差 0.048% しかないので、これを無視すると市販の球面鏡用干渉じま解析ソフト(WISP: 米国ウィコ社製)が利用できる。図5(c)は、干渉じまの解析点として干渉じまのピーク位置の読取り状況を示したものである。ただし干渉じまのコントラストがあまり高くないため、ホログラムガラス基板の裏面反射による干渉じまが、形状誤差を示す干渉じまと重なり合って干渉じまのピーク位置がジグザグとなって、干渉じまの読取りに誤差を生じていることがわかる。これは、既報⁴⁾のように光路長や干渉光の強度を一致させたりして干渉じまのコントラストを高くすることによって解決するものであると思われる。また、結像レンズの焦点がやや放物面から外れているためインタフェログラムの周辺部分に回折による干渉じまの乱れが生じている。これも焦点合わせをすることで、容易に解決できると思われる。

解析の結果、形状誤差はPV値で 0.13λ 、RMS値

で 0.026λ ($\lambda=0.632\,8\,\mu\text{m}$) が得られた。

また、図3の光学系において、口径の大きなコリメータレンズを用いればもっと F 値の小さな放物面鏡の検査及び測定ができると考えられる。

4. 結 論

- (1) ナルテストによって放物面鏡の形状を検査し、測定するホログラム干渉計を提案し、実際に F 値11.4の市販の放物面鏡を対象として実験を行ったところ、ほぼ直線で等間隔な干渉じまが得られ、それを解析して形状誤差値としてPV値で 0.132λ 、RMS値で 0.026λ ($\lambda=0.632\,8\,\mu\text{m}$) が得られた。
- (2) 測定した形状誤差をフィードバックして再加工できるように、放物面鏡上の各位置における形状誤差量を、焦点からの見込み角をパラメータとして干渉じまから定量的に導く方法を示した。

参 考 文 献

- 1) Osuk Kwon, J. C. Wyant and R. C. Hayslett: Long-wave Interferometer in the Optical Shop, SPIE 192, (1979) 88.
- 2) R. N. Shagam, R. E. Sladky and J. C. Wyant: Optical Figure Inspection of Diamond-Turned Metal Mirrors, Opt. Engg., **16**, 4, (1977) 375.
- 3) 例えば、佐伯裕史: 非球面レンズ形状を精密測定——メーカ独自の技術開発が活発化, 日経メカニカル, 2/24 (1986) 64.
- 4) 天神林孝二: 表面形状検査測定用ホログラム干渉計——ホログラムガラス基板の光学的不均一性を補償した光学系, 精密工学会誌, **56**, 4 (1990) 745.