



原器ゾーンプレートを用いた2次曲面の検査法

中 島 一 敏

大阪工業技術試験所 〒563 池田市緑ヶ丘 1-8-31

(1990年4月19日受付, 1990年6月28日受理)

Testing Conic Surfaces Using a Modified Zone Plate

Kazutoshi NAKAJIMA

Government Industrial Research Institute, Osaka,
1-8-31, Midorigaoka, Ikeda 563

(Received April 19, 1990; Accepted June 28, 1990)

The zone plate interferometer is conveniently used to test optical surfaces for its simplicity and stability. To perform the null-test of aspheric surfaces with the interferometer, a modified zone plate (MZP) generated by computer has been used. One problem with the interferometer, however, is the necessity of preparing a particular MZP specified for the surface to be tested. In this paper, a convenient method of making MZPs for testing conic surfaces is proposed. In this method, MZPs for various conic surfaces can be made using an MZP for a conic surface by modifying the magnification factor of the MZP or the photoreduction factor of its computer plot. Formulas to calculate the magnification factor are derived. Several examples of numerical simulation and experiment are given. It is concluded that by the method an MZP for a conic surface can be made the most of to obtain MZPs for other ones of different specifications, thus the performance of the interferometer will be extensively enhanced.

1. はじめに

光学システムの結像性能の飛躍的な向上および機能の高度化を図るうえで、非球面光学素子の果たす役割はきわめて大きい。今日、光応用技術の著しい発展に伴い、非球面素子に対するニーズも多様化し、精度要求も厳しくなっている。このような高精度非球面の実用化のためには、加工法と同時に加工面の検査・測定法の開発が不可欠であり、種々の原理・方式による測定装置の開発または提案が活発に行われている。

非球面の製作において、加工と測定は不可分のものであり、インプロセス計測が求められる。そしてこのためには、測定の簡便性とともな振動に対する安定性が重要なファクターとなる。

Murty¹⁾ さらに Smartt²⁾ によって提案されたゾーンプレート干渉計は、光学的に作製したフレネル・ゾーンプレート (FZP) を用いて球面鏡の検査を行うものであ

るが、干渉計の構成がコモンパス型であるため、振動に対する安定性に優れており、また測定法も容易である。

ゾーンプレート干渉法を非球面測定に応用する^{3,4)} 場合、大別して二つの方法が提案されている。一つは、ゾーンプレート干渉計における FZP をゾーンプレート型の計算機プログラム (原器ゾーンプレート; MZP と略記する) に置き換えて、非球面のマルチテストを実現する方法である⁵⁻⁸⁾。一方、FZP を用いるゾーンプレート干渉計において、照明レーザー光の波長を変化させる方法^{9,10)}、FZP を光軸上で移動させる方法¹¹⁾等による非球面計測法が提案されている。また、FZP の発生する波面収差を利用した2次曲面検査法が報告されている¹²⁾。

MZP を用いる方法は、マルチテストとなるので、干渉縞の解析が容易であるだけでなく、システム構成がきわめて単純になること、セッティングや測定のための微調整を干渉縞を観察しながら容易に行うことができ、高精度の測定が可能となること等が特長として上げられる。

ただし、この場合、設計値の異なる非球面ごとに MZP を新たに作製することが必要となる。これは、一品種多量生産の場合には問題とならないが、単品ないし少量生産の場合、コスト面での欠点となる。

本論文では、MZP を用いるゾーンプレート干渉法^{6,7)}により、放物面・双曲面等の2次曲面の測定を行う場合の MZP の簡便な作製法を提案する。すなわち、本方法によれば、ある一つの2次曲面用に作製した MZP (またはその原画) を用いて、この MZP を所定の倍率で拡大または縮小する (拡大原画の場合には、その縮小率を変える。以下についても同様とする) ことにより、設計値または種類の異なる種々の2次曲面用の MZP を作製することができる (本方法を、“倍率変換法”と呼ぶことにする)。以下の章では、まず、測定原理と MZP についての概要を述べ、ついで、本題である倍率変換法による MZP の波面再生機能の変換について詳述し、変換倍率の計算式を求め、具体例としての数値計算例および測定実験例について報告する。

2. 原器ゾーンプレート

最初に、本測定法について簡単に述べる。Fig. 1 に、被検面および MZP を含む干渉計の主要部を示す。まず、被検面の中心Oに焦点を結ぶレーザー光で MZP を照明するとき、-1次回折光は所望の非球面波を再生し、テスト光として被検面全面に垂直に入射し、反射後、MZP の0次光として空間フィルターを通して取り出され、干渉像面に達する。一方、最初、MZP の0次回折光として被検面の中心に収束し、反射してくる球面波による+1次再生光は、測定規準となる参照光としてテスト光と干渉し、マルチストを与える干渉縞を作る。

Fig. 1 では、MZP が被検面の曲率中心の前側に配置されているが、MZP を曲率中心の後側に配置する場合も同様である。

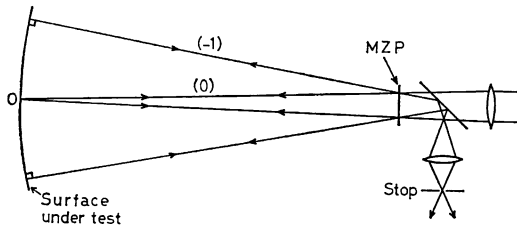


Fig. 1 Configuration of a zone plate interferometer for testing aspheric surfaces. MZP is a modified zone plate generated by computer which reconstructs the desired aspheric wavefronts for the test and the reference beams.

なお、本測定法ではテスト光が被検面に垂直に入射するので、被検面が完全であれば、反射後、テスト光は各場所へ入射時と同一の波面形状をとりながら (すなわち、位相共役波となって) 元の光路を戻す。このことから、テスト光および参照光の球面波からの波面偏差は、通常の球面波を被検面に入射させる場合の半分になり、原器 (MZP) 作製上の利点となる。

さて、回転2次曲面の形状を、その頂点を原点とする (ξ, ζ) 座標を用いて、次式で与える (Fig. 2)。

$$\zeta = \frac{\xi^2}{2R} + \frac{e\xi^4}{8R^3} + \frac{e^2\xi^6}{16R^5} + \dots \quad (1)$$

ここで、 R は近軸曲率半径であり、 $e=0$ は放物面、 $e<0$ は双曲面、 $e=1$ は球面、その他は楕円面を与える。

次に、MZP 計算の概要を示す。MZP を光軸上 z_0 の位置に設定するとき、非球面上の点 A において面に垂直な光線が MZP 面と交わる点 P の値 x は (Fig. 2)。

$$x = (R - z_0)(\xi/R) + \frac{1}{2}(R - ez_0)(\xi/R)^3 + \frac{3}{8}e(R - ez_0)(\xi/R)^5 + \dots \quad (2)$$

となる。ただし、系は光軸 (z 軸) に関して回転対称であり、点 A と点 P とは 1 対 1 に対応しているものとする。

MZP の光路差を与える関数 $\Phi(x)$ を次式で定義する。

$$\Phi(x) = (\overline{OP} - \overline{AP})/\lambda \quad (3)$$

$$\overline{OP} = \sqrt{z_0^2 + x^2} \approx z_0 + x^2/2z_0 \quad (4)$$

$$\overline{AP} = \sqrt{(z_0 - \zeta)^2 + (x - \xi)^2} \quad (5)$$

ただし、 $\Phi(x)$ は光波長 λ を単位として与えてある。(1)~(5)式から、 $\Phi(x)$ を (ξ/R) の6次項まで展開すれば、

$$\Phi = A_1\left(\frac{\xi}{R}\right)^2 + A_2\left(\frac{\xi}{R}\right)^4 + A_3\left(\frac{\xi}{R}\right)^6 \quad (6)$$

ただし、

$$A_1 = R(R - z_0)/2z_0\lambda \quad (7)$$

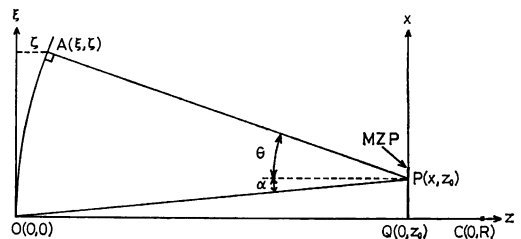


Fig. 2 Geometry for calculating the MZP.

$$A_2 = \{3R(R-2z_0) + (R-z_0)^2\} / 8z_0\lambda \quad (8)$$

$$A_3 = \{(3+2e)(R-z_0) + 5e(1-e)R\} / 16\lambda \quad (9)$$

なお、(6)式の右辺は ξ の関数となっているが、(2)式により ξ を媒介変数と考えれば、 Φ は x の関数となる。

以上から、 n を正または負の整数として、

$$\Phi = n \quad (10)$$

を解き、その解を ξ_n とする。この ξ_n を(2)式に代入すれば、MZPを形成する n 番目のゾーンの中心半径 x_n が求められる。ここで、 $z_0 < R$ のとき n は正、 $z_0 > R$ のとき n は負とする。実際には、各ゾーンには内半径、外半径があり、それらは(10)式で n を $n-1/4$ または $n+1/4$ に置き換えて求められる。以下では、簡単のために各ゾーンの中心半径 x_n のことを“ゾーン半径”と呼ぶことにする。

3. 原器ゾーンプレートの波面再生機能とその変換

MZPの波面再生機能は、それを構成するゾーン半径 x_n ($n=0, 1, 2, \dots$)によって決定されるが、前章で与えたMZPの計算式から明らかなように、MZPのゾーン半径 x_n を決定するパラメータは、2次曲面の曲率半径 R 、係数 e 、MZPの位置 z_0 および光源の波長 λ であって、これら4変数の値を指定することによってMZPは一義的に決定される(ここで、F数はゾーン総数に関係するが、 x_n には直接的には関係しない)。このように、MZPの波面再生機能を決定するのは、ゾーン半径であるが、ここで、“ゾーン半径”を“ゾーン間隔”または“局所空間周波数”と置き換えても同じである。したがって、いま、“二つのMZPがあって、それらの対応するすべての点で同一の局所空間周波数をもつならば、これら二つのMZPは同一の波面再生機能をもつ”、

といえる。

ホログラムのもつ局所空間周波数¹³⁾は、回折の公式から得られる。いま、MZPの局所空間周波数を $D(x)$ とすれば (Fig. 2),

$$D(x) = (\sin \theta - \sin \alpha) / \lambda \quad (11)$$

ここで、 θ は光線APが光軸となす角、 α は光線OPが光軸となす角(微量)であり、それぞれ次式で与えられる。

$$\sin \theta = \xi / R + \frac{1}{2}(e-1)(\xi/R)^3 + \dots \quad (12)$$

$$\sin \alpha = -x / \overline{OP} \doteq -x / z_0 \quad (13)$$

(12), (13), (2)式を(11)式に代入すれば、

$$\lambda D(x) = \frac{R}{z_0} \left(\frac{\xi}{R} \right) + \frac{R-z_0}{2z_0} \left(\frac{\xi}{R} \right)^3 + \dots \quad (14)$$

なお、(14)式の右辺は ξ の関数となっているが、(6)式と同様に(2)式により ξ を媒介変数と考えれば、右辺は x の関数と見なせるので、便宜上(14)式のように記述してある。

さて、 $D(x)$ の空間周波数をもつMZPを[MZP]と記し、この[MZP]を m 倍に拡大または縮小したものを、[MZP] _{m} と記すことにすれば、[MZP] _{m} の半径 \bar{x} における局所空間周波数 $D_m(\bar{x})$ と $D(x)$ の間には、容易にわかるように、次の関係が成り立つ。

$$D_m(\bar{x}) = \frac{1}{m} D(x) \quad (15)$$

ただし、

$$\bar{x} = mx \quad (16)$$

一方、別の回転2次曲面を、すべての変数の右肩に(')を付けて記すことにし、また、MZPの位置を z_0' とすれば、(1), (2)式に対応して (Fig. 3 参照),

$$\zeta' = \frac{\xi'^2}{2R'} + \frac{e'\xi'^4}{8R'^3} + \frac{e'^2\xi'^6}{16R'^5} + \dots \quad (17)$$

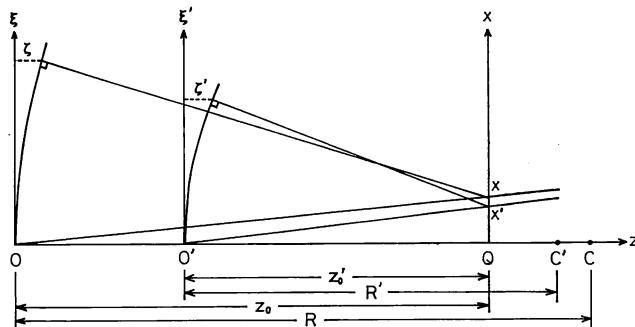


Fig. 3 Illustration of wavefront conversion by the method of change of magnification factor of an MZP for a conic surface. The figure is drawn so that MZPs lie in the same plane.

$$x' = (R' - z_0')(\xi'/R') + \frac{1}{2}(R' - e'z_0')(\xi'/R')^3 + \frac{3}{8}e'(R' - e'z_0')(\xi'/R')^5 + \dots \quad (18)$$

この場合の MZP を $\{MZP\}'$ と記せば, その局所空間周波数 $D'(x')$ は, (14)式に対応して

$$\lambda'D'(x') = \frac{R'}{z_0'}\left(\frac{\xi'}{R'}\right) + \frac{R' - z_0'}{2z_0'}\left(\frac{\xi'}{R'}\right)^3 + \dots \quad (19)$$

と与えられる. ただし, 光波長を λ' とする.

さて, $\{MZP\}'$ と $\{MZP\}_m$ との間に

$$D'(x') = D_m(\bar{x}) \quad (20)$$

$$x' = \bar{x} \quad (21)$$

の関係が同時に成り立つとすれば, 上に述べた MZP の同一性により, 両者は同一の波面再生機能をもつことになる. この関係は, (15), (16)式を用いて $\{MZP\}'$ と $\{MZP\}$ との関係として書き直せば,

$$D'(x') = \frac{1}{m}D(x) \quad (22)$$

$$x' = mx \quad (23)$$

を得る.

以下において, (22), (23)式を同時に満足する2個の未知数, 倍率 m および $\{MZP\}'$ の位置 z_0' を求める.

このため(22)式に(14), (19)式を, また(23)式に(2), (18)式を代入し, ξ/R , ξ'/R' の3次項までを用いれば,

$$\frac{R'}{\mu z_0'}\left(\frac{\xi'}{R'}\right) + \frac{R' - z_0'}{2\mu z_0'}\left(\frac{\xi'}{R'}\right)^3 = \frac{R}{m z_0}\left(\frac{\xi}{R}\right) + \frac{R - z_0}{2m z_0}\left(\frac{\xi}{R}\right)^3 \quad (24)$$

$$(R' - z_0')\left(\frac{\xi'}{R'}\right) + \frac{1}{2}(R' - e'z_0')\left(\frac{\xi'}{R'}\right)^3 = m(R - z_0)\left(\frac{\xi}{R}\right) + \frac{m}{2}(R - ez_0)\left(\frac{\xi}{R}\right)^3 \quad (25)$$

を得る. ただし,

$$\mu = \lambda'/\lambda \quad (26)$$

と置いた.

さて, (24), (25)式から, まず近軸域では, 次の関係が成り立つ.

$$\frac{R'}{\mu z_0'}\left(\frac{\xi'}{R'}\right) = \frac{R}{m z_0}\left(\frac{\xi}{R}\right) \quad (27)$$

$$(R' - z_0')\left(\frac{\xi'}{R'}\right) = m(R - z_0)\left(\frac{\xi}{R}\right) \quad (28)$$

(27), (28)式から, ξ , ξ' を消去すれば, z_0' に関する次の2次方程式を得る.

$$(z_0')^2 - R'z_0' + (m^2/\mu)(R - z_0)z_0R'/R = 0 \quad (29)$$

これを z_0' について解いて,

$$z_0' = \frac{R'}{2} \left\{ 1 + \left[1 - \frac{4m^2(R - z_0)z_0}{\mu R R'} \right]^{1/2} \right\} \quad (30)$$

ただし, (30)式の右辺の m はここでは未知数である.

次に, 3次の領域について考える. このため, (24)式において, 左辺の $(\xi'/R')^3$ に(27)式を代入すれば, (ξ'/R') を (ξ/R) の3次項までの級数展開として与えられることがわかる. この結果を(25)式の左辺に代入して, 両辺の $(\xi/R)^3$ の係数を等しいと置くことにより, 次のような m^2 に関する2次方程式が得られる(ただし, これらの計算は簡単な代数計算であり, 途中の計算式の提示は煩雑になるので, 結果だけを示すことにする).

$$m^4 - 2Bm^2 - A = 0 \quad (31)$$

ここで,

$$A = \frac{\mu^3(2 - e' - z_0'/R')z_0'}{R - ez_0} \left(\frac{Rz_0'}{R'z_0} \right)^3 \quad (32)$$

$$B = \frac{\mu(R' - z_0')(R - z_0)}{2R(R - ez_0)} \left(\frac{Rz_0'}{R'z_0} \right) \quad (33)$$

(31)式を m^2 について解けば, 物理上の解として

$$m^2 = \sqrt{A + B^2} + B \quad (34)$$

を得る. (32), (33)式からわかるように, (34)式の右辺には未知数 z_0' が含まれているが, (30)および(34)式を用いて m および z_0' を求めることができる.

以上によって, MZP の波面再生機能変換のための変換倍率の計算式が求められた.

4. 数値計算例

前章で求めた(30)および(34)式から未知数 m および z_0' を解析的に求めることは困難であるが, 数値解法により所望の精度でこれらの値を求めることができる. 本章では, 2~3の具体例について反復法により求めた計算例を示す. このため, まず, 初期値として $m=1$ を(30)式に代入し, z_0' を得る. 次に, この z_0' を(34)式に代入して m^2 を得, 再度この m^2 を(30)式に代入する. このような反復計算を数回行うことにより, MZP の変換倍率 m および設定位置 z_0' を所望の精度で求めることができる.

以下の計算例1~4では, いずれも元になる MZP としては, 放物面 ($R=2000$ mm, $e=0$; $z_0=1980$ mm, $\lambda=0.6328$ μm) 用で作成したものを用いるものとする (Fig. 3 参照).

〔計算例1〕 同一種類で, 設計値が異なる場合 ($R' < R$).

放物面 ($R'=1000$ mm, $e'=0$; $\lambda'=0.6328$ μm) 用の MZP とするための変換倍率および設定位置は,

$$m = 0.83825, \quad z_0' = 985.888 \text{ mm}$$

〔計算例2〕 上の例1で, $R' > R$ の場合.

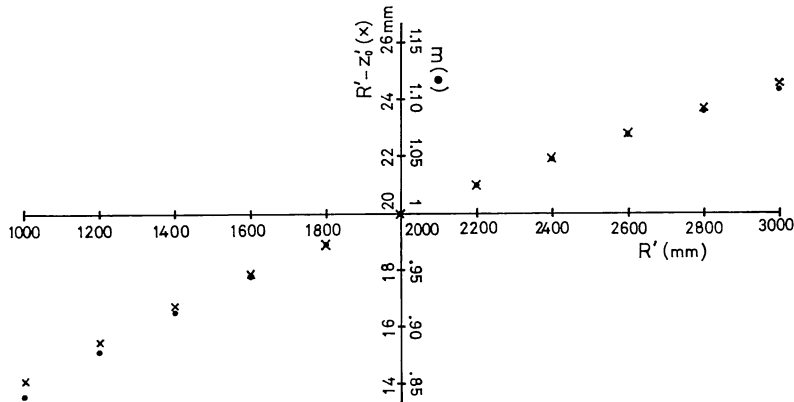


Fig. 4 Example of magnification factors, m (●), and setting places, $R' - z_0'$ (×), calculated for obtaining MZPs to test various paraboids. An original MZP used is for a paraboloid of $R=2000$ mm, and the setting place, $R - z_0 = 20$ mm.

放物面 ($R'=3000$ mm, $e'=0$; $\lambda'=0.6328 \mu\text{m}$) 用の MZP とするための変換倍率および設定位置は,

$$m=1.10822, z_0'=2975.482 \text{ mm}$$

(計算例3) 異なる種類の非球面の場合 ($e' \neq e$).

双曲面 ($R'=2000$ mm, $e'=-0.2$; $\lambda'=0.6328 \mu\text{m}$) 用の MZP とするための変換倍率および設定位置は,

$$m=1.04541, z_0'=1978.121 \text{ mm}$$

(計算例4) MZP の作成波長と測定波長が異なる場合.

作成時の波長 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ と異なる波長 $\lambda'=0.5145 \mu\text{m}$ で放物面 ($R'=2000$ mm, $e'=0$) を測定するための変換倍率および設定位置は,

$$m=0.85686, z_0'=1981.957 \text{ mm}$$

となる。Fig. 4 は、計算例1および2でさらに R' を種々変えた場合の、変換倍率および設定位置を図示したものである。

ところで、以上のように $(\xi/R)^3$ 項までを考慮して求めた変換倍率を用いて作成した MZP ($(\text{MZP})_m$) により正しい測定ができるかどうかは、 $(\text{MZP})_m$ のゾーン位置を、2章で与えた計算法により直接求めたゾーン位置と比べることにより検証できる。すなわち、元の MZP のゾーン位置を x_n ($n=1, 2, 3, \dots$) とすれば、 $(\text{MZP})_m$ のゾーン位置は mx_n となる。一方、非球面 ($R', e'; z_0'$) に対して直接求めたゾーン位置を x_n' とすれば、 $mx_n - x_n'$ を計算することによりゾーン誤差、つまり、倍率変換法により作成した MZP の精度が求められる。

Table 1 に〔計算例1〕について求めた結果を例示する。ところで、ゾーン誤差 Δx が存在するとき、それによる測定誤差 δ (波面誤差の符号を反転したもの)

Table 1 Accuracy of the MZP for paraboloid (B) obtained from the MZP for paraboloid (A) by the method of change of magnification factor.

Zone No. n	Radii of n -th zone of the MZPs			Zone error $mx_n - x_n'$ (mm)
	for paraboloid (A)	for paraboloid (B)		
	x_n (mm)	mx_n (mm)	x_n' (mm)	
50	1.157339	0.970145	0.970144	0.000001
100	1.679871	1.408160	1.408155	0.000005
150	2.102596	1.762511	1.762502	0.000009
170	2.255966	1.891074	1.891062	0.000012
	(F/3)	(F/2.52)	(F/2.52)	(F/2.52)

Paraboloid (A) : $R=2000$ mm ; $R - z_0 = 20$ mm.

Paraboloid (B) : $R'=1000$ mm ; $R' - z_0' = 14.112$ mm.

Magnification factor for conversion : $m=0.838255$.

は、

$$\delta \doteq \Delta x \cdot \sin \theta \tag{35}$$

で与えられる⁶⁾。上式に、 $\sin \theta \doteq \xi/R$ を代入し、また、 $|\xi/R| \leq 1/4 F$ を用いれば (ただし、 F は F 数とする)、 $\delta \leq |\Delta x|/4 F$ となる。Table 1 からこの場合の $(\text{MZP})_m$ の誤差は十分小さく、それによる測定誤差は $\lambda/500$ 以下であり、全く無視できる。

ここで、倍率変換法により作製した MZP がカバーできる F 数 (これを、 F' とする) を求めておこう。これは、(27)式において、 $R/4 \xi_N \equiv F$ 、 $R'/4 \xi_{N'} \equiv F'$ (ただし、 N は最外周ゾーン番号とする) と置くことにより

$$F' = (mR'z_0'/\mu Rz_0)F \tag{36}$$

と得られる。ただし、 F は元の MZP の F 数である。

Table 1 の例では、 $F=3$ のとき、 $F'=2.52$ となる。

上では、四つの代表例を示したが、もちろんそれら

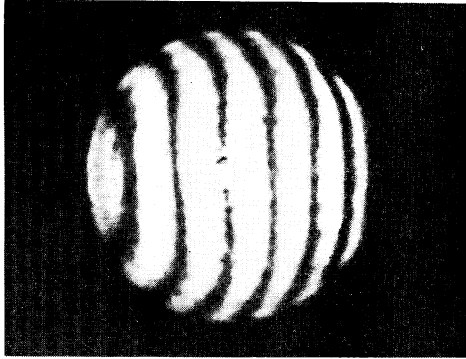


Fig. 5 Result of the null-test of a parabolic mirror of $R=800$ mm and $F/4$. The MZP used in the test was made by photoreducing the computer plot of MZP for a parabolic mirror of $R=1200$ mm and $F/4$ by a factor required theoretically.

組み合わせる場合も可能である。したがって、ある一つの MZP があるとき、倍率変換法により種々の 2 次曲面測定用の MZP の作製が可能となる。

5. 実 験

本方法により作製した MZP を用いて測定実験を行った。測定試料としては、放物面 ($R=800$ mm, $F/4$) を用いた。元になる MZP としては、放物面 ($R=1200$ mm, $F/4$; $z_0=1223$ mm) 用に作製した MZP の拡大原画を用いた。この場合の MZP の変換倍率 m および設定位置 z_0' は、 $m=0.9065$, $z_0'=818.818$ mm, となる。ただし、原画の作画倍率を 80 倍としたので、所望の MZP 作製のための原画の縮小率は、 $0.9065/80=1/88.25$, となる。この場合、MZP の理論的誤差は全く無視できる。写真縮小により実寸の MZP を作製した。

Fig. 5 に測定結果のヌルテストを与える干渉縞写真を示す。ただし、実験に用いた光波長は、MZP 計算時と同一の $\lambda=0.6328$ μm である。干渉縞の解釈は通常のニュートン縞と同じであり、被検面に形状誤差が無ければ等間隔の平行縞が得られる。なお、平行縞は MZP を光軸からわずかに横ずらしすることにより形成され、また、形状誤差の正負の判定も容易にできる^{6,7)}。

6. お わ り に

原器ゾーンプレート (MZP) を用いる非球面検査のためのゾーンプレート干渉法は、ヌルテスト法であるため、

測定装置の単純さとともに測定法が簡便でかつ高精度測定が行えるが、測定面の設計データが異なれば MZP を新たに作製しなければならない点がコスト面での欠点となる。

MZP の作製を、高精度作画機による原画の作製とその写真縮小により行うものとするれば、本論文で提案した方法によれば、ある 2 次曲面測定用に作製した MZP の原画を用いて、それを所定の縮小率で縮小することにより、設計値の異なる 2 次曲面測定用の MZP の作製が可能となる。したがって、本方法により MZP 作製のための負担が大いに軽減されることになり、本測定法が高精度かつ簡便な測定法として利用価値の高いものになると期待される。

文 献

- 1) M. V. R. K. Murty: "Common path interferometer using Fresnel zone plates," J. Opt. Soc. Am., **53** (1963) 568-570.
- 2) R. N. Smartt: "Zone plate interferometer," Appl. Opt., **13** (1974) 1093-1099.
- 3) F. Broder-Bursztyn and D. Malacara-Hernández: "Holographic interferometer to test optical surfaces," Appl. Opt., **14** (1975) 2280-2282.
- 4) 谷田貝豊彦, 齋藤弘義: "ゾーンプレート干渉計による非球面の検査", 第 23 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 29a-B-3 (1976).
- 5) H. Tanigawa, K. Nakajima and S. Matsuura: "Modified zone-plate interferometer for testing aspherical surfaces," Opt. Acta, **27** (1980) 1327-1334.
- 6) 中島一敏, 谷川英夫, 松浦 茂: "非球面検査のためのゾーンプレート・コモンパス干渉計", 光学, **10** (1981) 174-183.
- 7) 中島一敏: "非球面検査のためのゾーンプレート干渉計—基本三構成モードの特性および精度解析", 光学, **14** (1985) 365-376.
- 8) 中島一敏: "ゾーンプレート干渉法による非球面の測定", 光技術コンタクト, **27** (1989) 271-277.
- 9) N. Ohyama, I. Yamaguchi, I. Ichimura, T. Honda and J. Tsujiuchi: "A dynamic zone-plate interferometer for measuring aspherical surfaces," Opt. Commun., **54** (1985) 257-261.
- 10) N. Ohyama, I. Ichimura, I. Yamaguchi, T. Honda and J. Tsujiuchi: "The dynamic zone plate interferometer for measuring aspherical surfaces (II)," Opt. Commun., **56** (1986) 369-373.
- 11) 野村 俊, 吉川和男, 田代発造, 鈴木正根, 薄木雅雄, 辻内順平: "ゾーンプレートの移動による凹面鏡の測定法", 精密工学会誌, **54** (1988) 1770-1775.
- 12) J. Huang, N. Ohyama and T. Honda: "A null test of conic surfaces in zone plate interferometer," Opt. Commun., **72** (1989) 17-21.
- 13) 小瀬輝次: "幾何光学によるホログラフィの結像", 生産研究, **19** (1967) 140-141.