



非球面の干渉縞計測法における問題点

横 関 俊 介

九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820 飯塚市大字川津 680-4

(1990年10月11日受理)

On Interference Fringe Method of Aspheric Surface Measurement

Shunsuke YOKOZEKI

Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Ohaza-kawazu, Iizuka 820

1. はじめに

現在、種々のサイズのレンズを高性能化しながら軽量化や低価格化する要望が強い。これに答えるのが、レンズ面の非球面化である^{1,2)}。その非球面も、球面からの形状偏差の大きいものが多い。超精密加工技術の進歩によりレンズ面の非球面化が可能となり、一部では量産化されるまでになっている³⁾。非球面レンズの製造工程の各段階で非球面の検査や形状計測を行わなければならない。この数年間に、種々の非球面計測法が開発され³⁻⁶⁾、非球面計測機が商品化されるまでになっている。

ここでは、非球面計測法のなかでも重要なものと考えられている干渉縞計測法で得た干渉縞図形から非球面と参照球面との形状偏差を求める際に注意しなければならないことや、干渉計の光学系における問題点などについて解説する。干渉縞計測法とは、参照光型干渉計やシャリング干渉計によって被測定非球面上に干渉縞図形が得られる計測法である。

これから述べることは、基礎的な事項なので、いまさらの感もある。しかし、干渉縞計測を行っている人のなかにも、これらの問題に気付いていない人がいる。そこで、あえて、活字にするしだいである。

2. 非球面の干渉縞計測法

参照光型干渉計の一つであるトワイマン・グリーン干渉計(図1)を例にあげて、非球面計測法を説明する。単色点光源(PS)からの光波をレンズ(L₁)で平面波にし

たのち、ビームスプリッター(BS)を透過する参照光波と反射してレンズ(L₂)に向かう光波とに分ける。ビームスプリッターで反射した光波をレンズ(L₂)によって焦点(F₂)に集束し、焦点(F₂)を中心とする球面波に変換する。この球面波が被測定非球面(T)で反射したのちレンズ(L₂)とレンズ(L₃)とを通過した物体光波と、参照鏡(M)とビームスプリッター(BS)で反射したのちレンズ(L₃)を通った参照光波とを非球面(T)の像面上で重ね合わせて干渉縞を発生させる。

ここでは、説明を簡明にするために、被測定非球面は光軸を軸とする回転体で、光学系の結像倍率を1とする。したがって、光軸を含む紙面による非球面の断面図を求めることになる。また、非球面への入射光線や反射光線は紙面内だけで考えればよい。

非球面計測は次のようにして行う。

- 1) まず、非球面の頂点を焦点(F₂)に一致させる。一致したことは、干渉縞の様子からわかる。
- 2) 次に、縞解析しやすい粗い干渉縞が発生する所で光軸方向に非球面を移動する。
- 3) この移動距離を精度よく測定する。この測定値が参照球面の曲率半径となる。
- 4) 干渉縞図形を解析することによって、参照球面と非球面との形状偏差を求める。

3. 干渉縞図形解析法における問題点

干渉縞図形解析法を考察する際に、実際の光学系をそのまま考えるよりも、次に示す簡略化した光学系を用

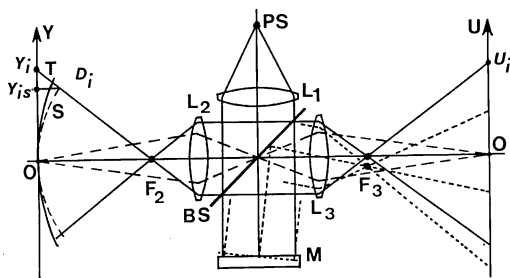


図1 トワイマン・グリーン干渉計による非球面計測光学系

PS: 単色点光源, L₁, L₂, L₃: レンズ, M: 参照鏡, BS: ビームスプリッター, F₂, F₃: 焦点, T: 非球面, S: 参照球面, D_i: 形状偏差, 点線: ティルトを与えた場合, 結像倍率=1 (破線).

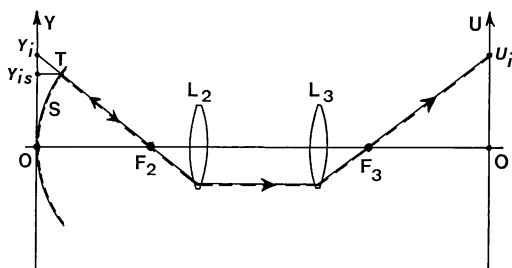


図2 簡略化した光学系 (形状偏差が小さい場合)

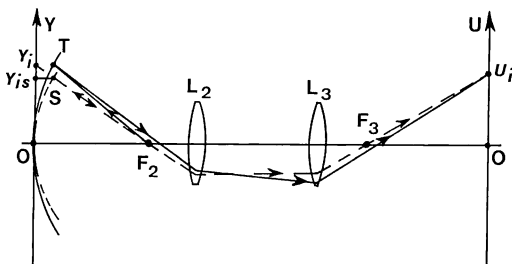


図3 簡略化した光学系 (形状偏差が大きい場合)

いるほうが容易に行える。

非球面 (T) の像面 (観測面) から参照鏡 (M) を見ると, あたかも, 非球面と頂点 (O) を共有し, その頂点と焦点 (F₂) との距離を半径とし, 焦点 (F₂) を中心とする球面 (S) のように見える。すなわち, 参照鏡 (M) からの反射光波は虚の参照球面 (S) からの反射光波と等価である。厳密に言えば, 参照鏡 (M) が光軸方向に移動することは, 参照球面からの反射光波の位相が変化することに相当する。しかし, 光軸と観測面との交点での干渉縞の縞次数をゼロと定義すれば, この問題は解決できる。

また, 単色点光源 (PS) は, 焦点 (F₂) にあると考えることができる。したがって, 図1の干渉計で得られた干渉縞図形を解析する際には, 点光源 (PS) とレンズ (L₁), ビームスプリッター (BS), 平面鏡 (M) を省略した, 図2や図3の光学系を用いればよい。参照球面と非球面との形状偏差 (D_i) の小さい場合が図2に, 形状偏差の大きい場合が図3に示されている。

2. に述べた方法で得られた干渉縞図形から, どのようにして形状偏差を求めたらよいのであろうか。一般的な干渉縞図形解析法⁷⁾を採用すると, 次のようになる。

- 1) 干渉縞図形上の任意の点 (U_i) における縞次数 (N_i) を求める。干渉縞図形上の位相分布を求めた場合でも, 簡単に縞次数に変換できる。すなわち, 位相の値を 2π で割ったものが縞次数である。
- 2) 結像倍率を考慮して, 観測面 (像面) 上の点 (U_i) に対応する物面上の点の座標 (Y_i) を求める。
- 3) Y=Y_i における形状偏差は,

$$D_i(Y_i) = N_i(U_i) \cdot \lambda / 2 \quad (1)$$

である。

この解析法には問題のあることを, 著者らはここ数年, 少しずつ報告してきた。これまでの考察結果をまとめて, 問題点やその解決法について解説することにする。

ここでは, 一般的に考察するのではなく, 具体例をあげて示すことにする。そして, 形状偏差が小さくて非球面全面上に粗い干渉縞が発生する場合と, 形状偏差が大きくて干渉縞が細くなる場合とに分けて説明する。

3.1 形状偏差が小さい場合

この場合の干渉縞形成の様子が図2に示してある。いま, 焦点 (F₂) から物面上の任意の点 (Y_i) に向かって進む光線は非球面 (T) と虚の参照球面 (S) とによって反射される。形状偏差 (D_i) が光の波長のオーダーでいほどに小さい場合を考えているので, 二つの反射光線は, ともに, 焦点 (F₂) を通る。したがって, 像面へは同じ光路を通って点 (U_i) へ向かう。この場合には, 点 (U_i) での縞次数 (N_i) と形状偏差 (D_i) との間には, 次の関係のあることが, 図2からわかる。

$$D_i(Y_i) = N_i(U_i) \cdot \lambda / 2 \quad (2)$$

式(1)とのちがいは, この形状偏差が点 (U_i) に対応する物面上の点の Y 座標 (Y_i) にあるのではなく, 図2の Y=Y_i にあることである。この座標 (Y_i) は, 物面上の点 (Y_i) と焦点 (F₂) とを結ぶ直線と参照球面 (S) との交点の Y 座標である。この交点の座標は測定値から計算することによって求めることができる。

すなわち、形状偏差が小さいとき干渉縞図形から形状偏差を求めるには、次のようにすればよい。

- 1) 干渉縞図形上の任意の点 (U_i) における縞次数 (N_i) を求める。
- 2) 結像倍率を考慮して、像面上の点 (U_i) に対応する物面上の点の座標 (Y_i) を求める。
- 3) この点 (Y_i) と焦点 (F_2) とを結ぶ直線を求める。
- 4) この直線と参照球面 (S) との交点の Y 座標の値 ($Y_{i,s}$) を求める。
- 5) $Y=Y_{i,s}$ での形状偏差 D_i ($Y_{i,s}$) は、式(2)で表される。

すなわち、像面上の点に対応する物面上の座標を求めるときに、結像倍率で求めた座標に補正が必要である。この理由は、非球面からの反射光は正反射されていることと、物体が非球面で像面が平面であることによる。したがって、他の参照光型干渉計やシャリング干渉計による場合にも、同じように座標の補正が必要となる。

3.2 形状偏差が大きい場合

形状偏差が大きい場合には、焦点 (F_2) からの任意の光線が非球面で反射した反射光源は焦点 (F_2) を通らなくなる。この様子を示したのが図3である。この反射光線が像面に到達したときの到達点の座標を U_i とする。一方、焦点 (F_2) から出た光線が虚の参照球面で反射した場合には、かならず、二つの焦点 (F_2) と (F_3) を通る。したがって、焦点 (F_2) を出て虚の参照球面で反射したのち像面上の点 (U_i) に到達する光線(破線)は容易に見つけ出すことができる。すなわち、点 (U_i) から焦点 (F_3) と (F_2) を通る光線を実際に進む方向と逆方向に光線追跡すれば、虚の参照球面上での反射点の座標が求まり、その点へは焦点 (F_2) から光線が入射することになる。

像面上の点 (U_i) における干渉縞の縞次数は、非球面で反射した光線(実線)と参照球面で反射した光線(破線)との光路差を光の波長で割ったものとなる。したがって、図3からもわかるように、この縞次数は形状偏差には直接関係しないことになる。

そこで、近似解として、3.1 で示した方法によって形状偏差を求めると、どのくらいの誤差が入ってくるのかを、具体例をもって検討してみた⁹⁾。この計算には、干渉計のレンズを理想的な薄いレンズと仮定し、レンズによる光線の屈折は結像式を用いて求めた。レンズ (L_2) と (L_3) の焦点距離を 200 mm とし、光源には He-Ne ガスレーザーを考えた。焦点距離が 194 mm で口径が 120 mm の放物面の場合が図4に示されている。誤差の最

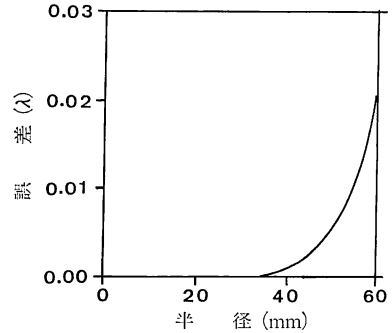


図4 近似解法による誤差⁹⁾(焦点距離=194 mm の放物面)

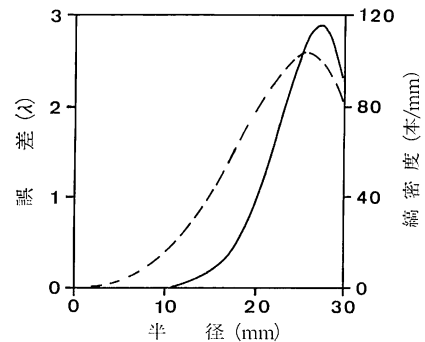


図5 縞密度と近似解法による誤差⁹⁾(ビデオカメラの接眼レンズの一非球面)
実線: 誤差, 破線: 縞密度, 結像倍率=1.

大値が 0.02λ なので無視できる程度である。しかし、最大非球面度が 720λ であるビデオカメラの接眼レンズに使われている非球面の場合には、図5のように誤差の最大値が 3λ になることがわかる。非球面計測に求められている精度が $0.1\mu\text{m}$ といわれているので、 3λ は大きすぎる。また、図5には、縞密度(破線)も示してある。干渉縞が細くなるほど誤差が大きくなることがわかる。

したがって、形状偏差が大きくて干渉縞が細くなる場合には、3.1 で示した方法で形状偏差を求めることはできない。工夫が必要である。これまでに、二、三の方法が提案されている。

一つは、ハイゲンスの原理を用いたものである⁹⁾。他の方法では、非球面の設計形状値から光線追跡を行っている¹⁰⁾。著者らの提案したのは、観測面から物面への逆方向の光線追跡を行うもの¹¹⁻¹³⁾である。ここでは、それぞれの方法を紹介するだけの紙数に余裕がない。とにかく、細かい干渉縞図形から形状偏差を求める際には、相当の工夫と計算を要することだけは強調しておきたい。

以上の問題点は、やはり、他の参照光型干渉計やシャリング干渉計による干渉縞図形を解析する場合にも生じる。

4. 干渉計の光学系における問題点

4.1 変形格子型干渉縞図形を発生させる場合

非球面と参照球面との形状偏差が小さくて粗い干渉縞が得られる場合には、物体光と参照光との間に傾きを与えずに等高線型干渉縞を発生させたり、傾きを与えて波面収差に対応した変形のある変形格子型干渉縞を発生させることができる。

図1に示してあるように、結像レンズ (L_2) を用いると、像面上では、一般に、参照光の波面形状と物体光の基準波面 (波面収差のない) 形状とは球面である場合が多い。

ここでは、観測面 (像面) 上での参照光波面と物体光の基準波面との形状が球面の干渉計で、変形格子型干渉縞を発生させる場合について考察を行う。

いま、物体光に波面収差がない場合を考える。図1に点線で示してあるようにレンズ (L_2) の焦点面上にある二つの焦点からの球面波同士の干渉結果を観測面上で見ることになる。球面波同士の干渉縞図形は、厳密に言えば、等間隔の格子状の干渉縞図形にはならない^{14,15)}。

ところが、この変形格子型干渉縞図形をコンピュータで解析する際には、等間隔の格子状干渉縞の変形量が物体光の波面収差に関係していると仮定している。そして、その変形量は、1/100 フリンジまで検出される。したがって、物体光波に波面収差がなくても波面収差が存在しているように解析されてしまう。すなわち、被測定面と参照球面との間に形状偏差がなくても、有るように解析されることになる。

そこで、干渉計の光学系として観測面上での参照光波面や物体光の基準波面の形状が平面の光学系を選べばこの問題は生じない。

この問題は、シャリング干渉計の場合にも生じる。シャリング干渉計の一種である Talbot 干渉計でレンズの球面収差を測定した際に、観測面上での基準波面形状が球面の光学系を採用した時には大きな誤差が入り、平面の光学系を採用するとその誤差が現われないことを、すでに報告してある¹⁶⁾。

4.2 参照球面の曲率半径の測定誤差

参照球面の曲率半径の測定誤差が大きいから、干渉縞計測法による非球面計測はダメだと、一部で信じられている。それは、本当であろうか。

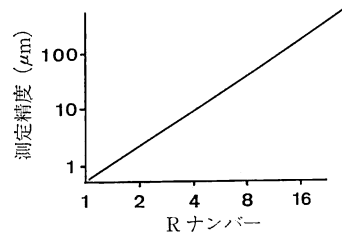


図6 干渉計による曲率半径の測定精度¹⁷⁾

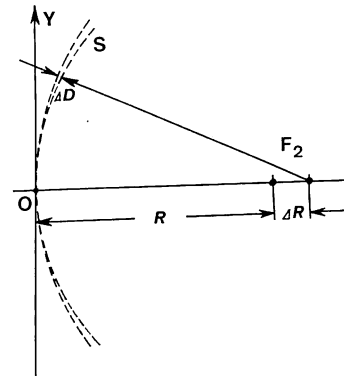


図7 曲率半径 (R) の測定誤差 (ΔR) と形状偏差の誤差 (ΔD)

参照球面の曲率半径は、2. で示した方法によって測定される。非球面の焦点 (F_2) からの移動距離は高精度に測定できる。問題は、焦点 (F_2) の位置の決定である。

あるメーカーのレーザー干渉計による球面の曲率半径の測定精度と被測定球面の R ナンバーとの関係を示したグラフが図6である¹⁷⁾。このグラフは、干渉縞の解析が $\lambda/10$ の精度で行えるとして求められたものである。最近では、位相測定を行って $\lambda/100$ ぐらいの精度で測定できるようになっている。したがって、図6のグラフの測定精度の $1/10$ ぐらいまでは精度が上るのではないかと思われる。

非球面計測においては、一般に、参照球面と非球面との形状偏差を求めている。したがって、参照球面の曲率半径の測定誤差が直接そのまま形状偏差の誤差となるわけではない。いま、参照球面の曲率半径を R 、その測定誤差を ΔR としたとき、形状偏差を求める場合には、図7に示してあるように非球面の頂点においては、つねに、形状偏差をゼロとする。したがって、この測定誤差 (ΔR) による形状偏差の誤差 (ΔD) は、図7の二つの円弧の形状誤差となり、 ΔD は ΔR に比べて相当に小さくなる。したがって、一般に思われているほどには、参照球面の曲率半径の測定誤差は測定結果に影響しない。

5. おわりに

以上、非球面に対する干渉縞図形を解析する際に生ずる問題点を2点と、使用する干渉計の光学系についての考察を2点解説した。前半の3点は問題点の指摘であり、最後の考察は思われているほど問題ではないということである。なお、この考察では、光学系に収差のない理想的な干渉計を考えた。上に示した4点をまとめると、次のようになる。

- 1) 粗い干渉縞が得られる場合には、縞次数と光の波長を乗じたものの1/2が非球面と参照球面との形状偏差を与える。しかし、像面である観測面上の任意の点に対応する物面上の点の座標を求める際には、補正が必要である。
- 2) 形状偏差が大きくて干渉縞が細かい場合に干渉縞図形から形状偏差を求めるには、相当の工夫と計算が必要である。どのくらい干渉縞が細くなればこの問題が生じてくるかについては、一般的にはいえない。しかし、具体例の図5が参考になる。
- 3) 変形格子型干渉縞を発生させる場合には、観測面上での参照光波面や物体光の基準波面の形状が球面ではなく平面である光学系を採用したほうが良い。どのていど問題になるかについては、文献4)の図7が参考になる。
- 4) 参照球面の曲率半径の測定誤差が大きいことが、一般に問題であると考えられている。しかし、最新の位相測定干渉計によれば測定精度が1桁はあがるし、また、この測定誤差が、そのまま、求められた形状偏差の誤差になるわけではない。

文 献

- 1) 小島 忠：“CD用非球面プラスチックレンズの開発と評価”，光学技術コンタクト，**23** (1985) 465-470.
- 2) 土肥寿秀，道正田隆，若菜勇次：“複合型非球面レンズに関する量産技術の確立”，精密工学会誌，**52** (1986) 979-982.
- 3) 横関俊介：“非球面計測法”，光学，**16** (1987) 134-140.
- 4) 横関俊介：“非球面の光学的測定法”，応用物理，**57** (1988) 333-340.
- 5) 特集『非球面形状測定』，光技術コンタクト，**27**，No. 5 (1989).
- 6) 荒井則一：“光学部品の非球面形状計測”，O plus E，No. 124 (1990) 115-120.
- 7) 谷田貝豊彦：“干渉計測法の最近の進歩”，精密機械，**51** (1985) 695-702.
- 8) 津村徳道，山本高志，大西邦一，横関俊介：“非球面に対する干渉図形の解析法”，精密工学会誌 (投稿中).
- 9) H. Kurita, K. Saito, M. Kato and T. Yatagai: "Influence of system aberrations on interferometric aspheric surface testing," Proc. SPIE, **680** (1986) 47-52.
- 10) 小野 明：“非球面形状計測”，光学素子加工技術研修会テキスト (日本オプトメカトロニクス協会，東京，1990) II-6章.
- 11) 大西邦一，横関俊介，鈴木達朗：“被測定面の移動による非球面の干渉測定法”，光学，**11** (1982) 471-477.
- 12) 大西邦一，横関俊介，鈴木達朗：“複数枚の干渉図形を用いた非球面の形状測定法”，光学，**12** (1983) 296-300.
- 13) 西村哲也，石黒敬三，横関俊介：“トルボット干渉計による非球面形状測定法”，光学，**14** (1985) 462-467.
- 14) 例は，文献4)の図7.
- 15) W. H. Steel: *Interferometry*, 2nd ed. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1983) pp. 47-48.
- 16) S. Yokozeki and K. Ohnishi: "Spherical aberration measurement with shearing interferometer using Fourier imaging and moire method," Appl. Opt., **14** (1975) 623-627.
- 17) キヤノン (株) カタログ，“レーザー干渉計システム”，p. 23.