

走査電子顕微鏡を用いた非球面形状測定法に関する研究

A Measurement Method of Aspheric Form of Lens by Scanning Electron Microscope

粉川 良平*・佐藤 壽芳*
Ryohei KOKAWA and Hisayoshi SATO

1. ま え が き

計算機周辺機器等にみられる光応用技術の著しい進展に関連し、光学系の小型化、収差に関する性能の向上、コストの低減等を目的として、非球面レンズの導入が図られている^{1,2)}。非球面形状は通常球面からの偏差のNC加工によって創成されている。この形状の測定法に関しては各種の装置がようやく実用化されつつあるが、測定結果を加工精度向上に利用し、レンズ特性の向上を図ることについては今後待つところが少なくない。

現在提案されている測定法としては、座標読み取りをヘテロダイン干渉によって高精度化した三次元測定機による方法^{3,4)}、シアリング干渉計による方法⁵⁾等が挙げられる。これらはいずれも光学的な方法であり、安定した干渉縞を得るための環境の整備、干渉縞から形状を創成するときの縞の読み取り精度、装置の調整法等に問題点を残している。

著者らは走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 以下SEMと略す) を用いて表面形状を測定することについて研究を進めてきたが^{6,7,8)}、これらが高倍率の領域を対象としていたのに対し、本研究では低倍率の画像信号を用い、小型の非球面レンズを対象にその形状を測定する方法について研究を進めたので報告する。この際、SEMの反射電子画像信号から試料表面の傾斜を求める新たな方法を提示し、表面形状計測の信頼性の向上と計測処理速度の短縮を図っている。

2. 装置の構成

図1は実験装置の概要である。反射電子の検出には、検出の感度を高めるため、従来のものより面積を広くした10mm角のシリコンフォトダイオードを使用している。従来の方法と同様、検出素子は試料を4方向から見込む対称的な位置に設置している。ここで出力される信号電流は高入力インピーダンス、高増幅の初段増幅器を設け

て電流-電圧変換を行ったのち、8 bitデータとしてパーソナルコンピュータに取り込まれる。一方、画像をCRT上で観察しながら測定的位置を特定するため、データ取り込みのクロックと同期させて鋸歯状波を創成して外部から走査を行い、4個の検出素子から反射電子信号出力が得られる装置としている。取り込み画面のデータ点数は256×256である。

3. 球試料反射電子信号の特性

形状を測定するための基礎的な特性として、まず球試料について反射電子信号の特性を明らかにすることを試みている。試料には、(株)天辻鋼球製作所製、φ0.5、真球度0.3μmのベアリング用超精密鋼球を使用した。図2は鋼球に対し互いに直交する相対する二組の検出素子1、3と2、4にたいし、その出力差を4個の検出素子の和

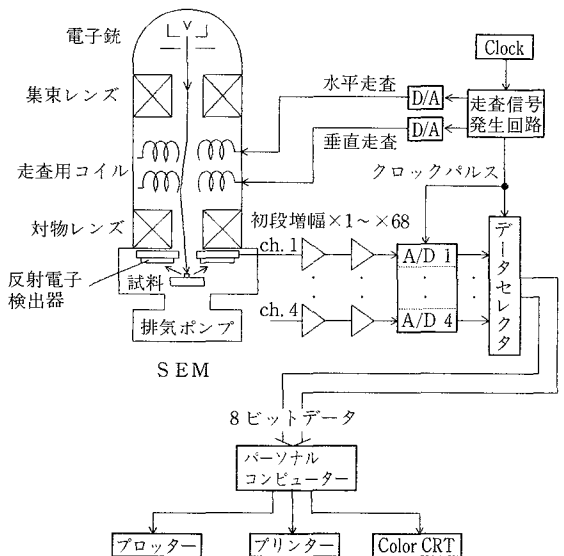


図1 実験装置構成の概要

*東京大学生産技術研究所 第2部

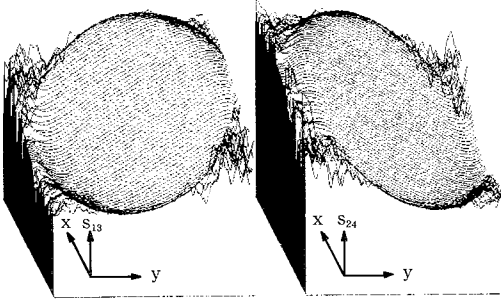


図 2 球面に対する規準化された反射電子信号出力

の平均値で規準化した量⁹⁾ S_{13} , S_{24} を縦軸にとり、走査に対応して球全面についてこれを並べ、図 2 の俯瞰図に表現している。球の外側の隅の部分が乱れた出力になっているのは、鋼球の固定に用いた導電性塗料によるものである。信号そのものはノイズ成分が大きく、また SEM のビーム加速電圧、試料の組成、信号増幅度等により、出力が異なっているため、10 回の走査に対する出力の平均をとってノイズを抑制する一方、上記の規準化を行っている。信号出力の規準化は出力レベルを揃えること、試料組成に依存する信号成分を除去することを意図している。

図 2 の出力は球の頂上に対して零であり、その周辺に対して平面形状となっている。図 2 の二組の出力差は、検出素子配置に対応して水平面内で 90°回転した関係にあることが明らかである。この関係については、別に反射電子信号が得られる過程を模擬する解析的な検証を試み、実測の結果を良く説明できることを明らかにしている。またこの特性が成り立つ範囲、平面の傾き等については、試料球の大きさや組成、SEM の倍率、加速電圧、照射電流によって違いは出るが、平面となる性質についてはこれらによらないことも確認している。

4. 差信号と表面傾斜角の関係

以上に明らかにしたように、反射電子信号の出力強度は試料表面の傾斜角に対応づけられる。すなわち球表面の傾斜角が大きくない範囲で、相対する二検出器の出力差は球中心から検出器方向への距離に比例している。この関係は球面を対象とした場合のみならず、試料表面の傾斜角に対して成り立つ関係である。この関係を基にして試料表面の法線の傾斜角と方位角を求めることが可能になる。

図 3 において検出器 1-3 方向に x 軸、検出素子 2-4 方向に y 軸をとると、単位球上の点 P(x, y) における検出素子 1 と 3、2 と 4 の規準化された出力差 S_{13} , S_{24} は、球の頂上付近において

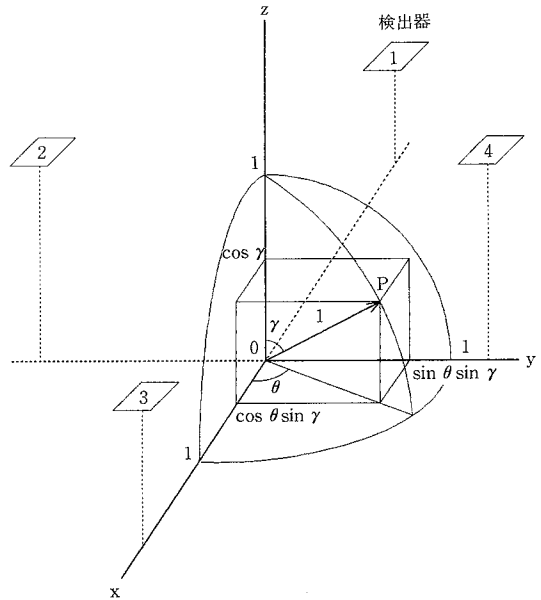


図 3 表面傾斜角算出のモデル

$$S_{13} = ax \tag{1}$$

$$S_{24} = ay \tag{2}$$

と書ける。ここで a は SEM の加速電圧、試料組成、検出器配置等によって決まる定数である。図 3 において

$$x = \cos \theta \sin \gamma \tag{3}$$

$$y = \sin \theta \sin \gamma \tag{4}$$

であるから

$$S_{13}^2 + S_{24}^2 = a^2 \sin^2 \gamma \tag{5}$$

$$S_{24} / S_{13} = \tan \theta \tag{6}$$

が導かれ、これより

$$\gamma = \sin^{-1} (\sqrt{S_{13}^2 + S_{24}^2} / a) \tag{7}$$

$$\theta = \tan^{-1} (S_{24} / S_{13}) \tag{8}$$

と P における法線の傾斜角 γ と方位角 θ が求められる。すなわち a を適切に定めることにより、検出された二組の規準化された出力差 S_{13} , S_{24} から注目点の法線傾斜角 γ とその方位角 θ を求めることが可能となる。

4 個の検出素子で検出された反射電子信号と同じ強度の組み合わせを球上の点から探索し、得られた球の点の法線をもって試料の注目する点の法線を求める従来の方法に比べ探索の時間を節減できる。また、検出器 1-3 方向と、2-4 方向を独立して扱うことができるうえ、(7), (8) に示される簡単な解析的關係で求められることは利点である。また、試料の部分的な汚染や帯電、材料の組成等が差信号を用いることによって相殺される性質はこの場合にも生かされる。

研 究 速 報

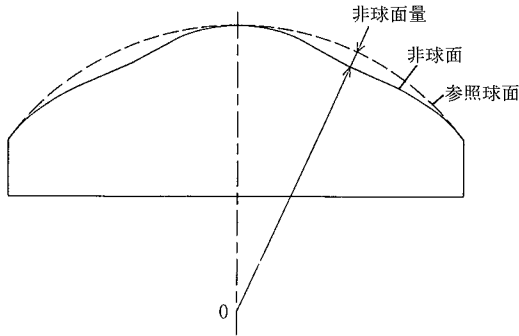


図 4 非球面形状の規定

5. 非球面レンズの測定

図 4 に示すように非球面レンズの形状は標準球面からの偏差を解析的な関係等によってあたえられる。以下ではポリカーボネート製の光ピックアップ用小型非球面レンズを対象例とした場合の結果について述べる。

反射電子信号の出力差を用い、上記の手法によって法線傾斜角を求めれば、試料表面の傾斜角が求められるから、図 5 はそれが等しい点を結んで等傾線を示した例である。真球の場合、中心軸近傍で表面傾斜角を等間隔にとると、等傾線は等間隔の円となるから、非球面の場合その度合いは等傾線の円の間隔の変化として表される。

図 6 は図 5 に示す領域に 9 個の等傾斜の値を設定し、これに最小自乗法によって適合して得られる円の半径について、最内部の径 r_1 に対する同心円間の間隔の差 $r_{i+1} - r_i$ の割合 $R = (r_{i+1} - r_i) / r_1$ を百分率で表している。円の間隔が外側で広くなっており、球面からの偏差のあ

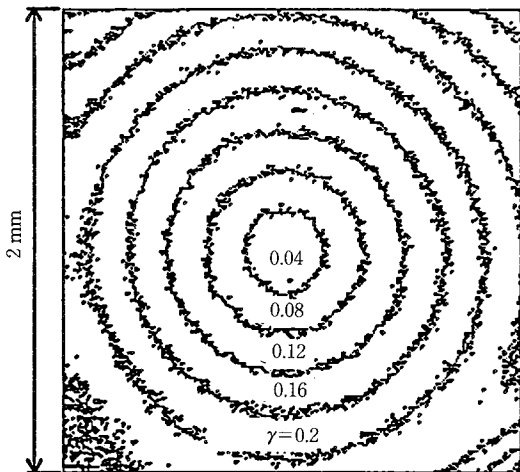


図 5 非球面レンズの実測された等傾斜線の点群

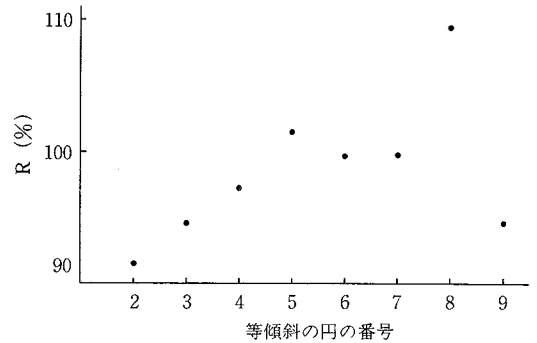


図 6 傾斜値を等間隔にとった等傾斜線間隔の変化による非球面度の表示

ることが観察される。非球面形状は半径方向に球面からの偏差をあたえ、周方向にはこの偏差を保持して旋削することによって製作されるから、周方向には形状精度は比較的安定に保たれているとみられ、半径方向の形状精度に注目すればよい。この場合、表面の傾斜角を半径方向に積分して表面形状を求めることができる。この際、(1)、(2)に示される a を決める必要があるが、 a は試料と検出器の距離、非導電性試料に対するスパッタコーティングの相違等によって変化する。この評価について、本研究では積分によって求められた試料の断面形状が、所要の非球面形状に最小自乗法の意味でもっともよい近似となるように決定している。

図 7 は測定された断面形状の設計値に対する誤差量を示している。SEM の倍率は $\times 50$ を用いている。図からは、形状誤差が半径 0.9mm の範囲に対し、最大約 $0.1 \mu\text{m}$ と読める。図中右端の急激な曲線の変化はこの部分が水平走査の端部で画像が歪むことによっており、当面の課題の形状誤差とは異なった性質のものである。

他の測定方法による検証が困難なため上記の測定結果

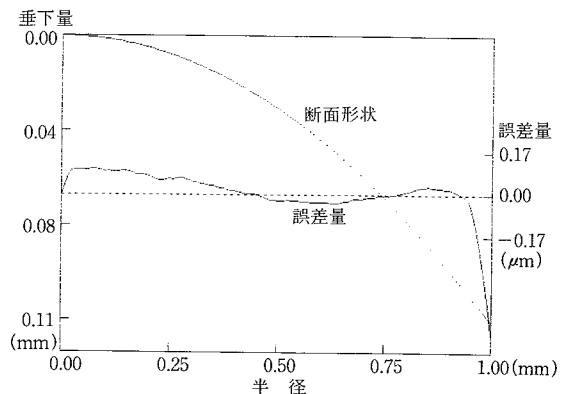


図 7 非球面レンズの断面形状と設計値からの誤差量

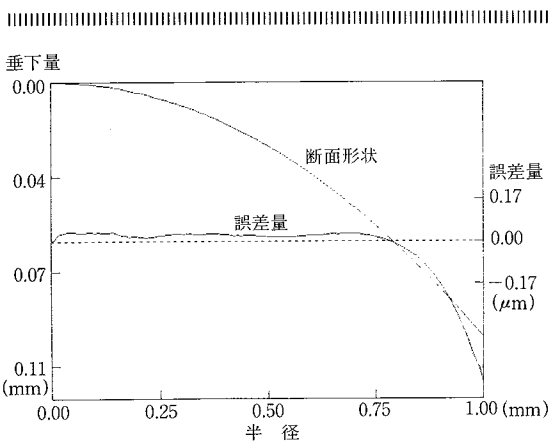


図8 鋼球の断面形状と公称値からの誤差量

を検証する段階にないが、φ10.0 超精密鋼球にたいしてこの手法を適用して形状誤差を求め、測定法の可能性の検討を試みている。図8は断面形状と誤差量を示したものである。0.75mmまでの範囲ではあるが、誤差量はほぼ一定であることから、球形状が一樣に良く保たれていることがわかる。すなわち、本測定法の有効性の一端が示されている。

6. ま と め

走査電子顕微鏡を用いて表面形状を測定するに際し、表面傾斜角の測定を可能にする新たなアルゴリズムとこれを利用するに容易なデータ取得の方法を提案した。またこの方法をコンパクトディスク等に用いられるピックアップ用小型非球面レンズの形状測定に適用することを試みた。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 対物レンズの中心に対し直交する方向に相対して置いた4個の反射電子検出素子の差信号をもとに、法線傾斜角、ならびに表面傾斜角を算出できることを明らかにした。
- (2) 非球面レンズに対して表面傾斜角を計測結果とその

解析により求めた。さらにこの結果に基づき半径方向の断面曲線を求め、これを設計形状に対して適合し、所要の形状との誤差が求められることを示した。

SEMの低倍率を利用することについて、当初肯定的ではなかったが、(株)コニック社大川雄史社長から非球面形状測定の問題点について示唆を受けたことが研究の発端となった。本所小倉馨夫教授からは光学系の動向についてご教示をいただいた。記して心からの御礼を申し上げる。論文のとりまとめには大堀真敬助手、鈴木芙佐子事務官、鈴木和彦技官の協力を得たことを感謝する。本研究は一部科学研究費61850023を受けている。

(1988年7月14日受理)

参 考 文 献

- 1) M. Sunohara, Y. Tanaka, Y. Nagaoka, M. Ueda and K. Azuma: Single Lens CD Player Pickup System Using a Bi-Aspheric Molded Glass Lens, IEEE, Trans. Cons. Elec., CE-33, 4, Nov. 1987, 520-530
- 2) 田中康弘, 上田昌明, 長岡良富: 両面非球面ガラスレンズの設計とその応用, 機械設計, 30-4, 昭61, 36-41
- 3) 吉住恵一, 村尾次男, 塩谷雅美, 今中良一, 沖野芳弘: 超高精度三次元測定機, 光学, 15-6, 昭61-12, 496-503
- 4) 吉住恵一, 沖野芳弘: 非球面形状の超精密測定システム, 光学, 12-6, 昭58-12, 450-454
- 5) 加納敏夫: 非球面干渉計測システムの開発, 光学技術コンタクト, 23, 昭60, 1647-1653
- 6) 佐藤壽芳, 大堀真敬: 走査電子顕微鏡(SEM)による表面粗さ測定の研究, 機論C, 48-436, 昭57-12, 227-234
- 7) 佐藤壽芳, 大堀真敬: 走査電子顕微鏡(SEM)による表面あらさ測定の研究(デジタル方式による), 機論C, 51-469, 昭60-9, 2381-2388
- 8) 大堀真敬, 佐藤壽芳: 走査電子顕微鏡(SEM)による表面形状測定の研究(法線検出法による), 機論C, 52-483, 昭61-11, 2974-2980
- 9) 菊川真, 城野政弘, 安井一雄, 安達正晴, 福田裕: 電子顕微鏡による疲労損傷についてのマイクロな定量的測定, 材料, 23-252, 昭49-9, 708-715