

SEM を用いたモアレトポグラフィーに基づく三次元形状計測法の高分解能化

新井 泰彦*・横関 俊介**

* 関西大学工学部機械工学科 〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35

** 常光応用光学研究所 〒811-4142 宗像市泉が丘 2-32-1

Development of Metrology of Micro-Structure Using SEM Based on Moiré Topography

Yasuhiko ARAI* and Shunsuke YOKOZEKI**

* Department of Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, 3-3-35 Yamate-cho, Suita 564-8680

** Jyouko Applied Optics Laboratory, 2-32-1 Izumigaoka, Munakata 811-4142

The novel precise three dimensional shape measurement method using SEM and moiré topography has been proposed. In this paper, the method with high resolution power based on the new method is proposed by employing the fringe scanning technology for shadow moiré. The optical system with SEM using backscattering electrons, grating holder which can shift the position of grating, and the grating of which pitch is $120\ \mu\text{m}$ is constructed. Measured results using a bearing ball as a sample showed that high resolution measurement (around $1\ \mu\text{m}$) can be performed by introducing the fringe scanning technology to the new measurement method.

Key words: shadow moiré, SEM, 3-D shape measurement, fringe scanning

1. はじめに

反射電子を利用した走査型電子顕微鏡 (scanning electron microscope: SEM) に、光学的三次元計測法であるモアレトポグラフィー¹⁻⁴⁾を導入することによって、光の波長を超える微小構造物の三次元形状計測の可能性が示されている⁵⁾。この新しい SEM を用いた手法は、従来の SEM に微細格子の保持器、試料台を付加することによって容易に計測が実施できるなど、利点の多い計測法として提案されている⁵⁾。

前報⁵⁾では、微小構造物に対するモアレトポグラフィーの原理確認実験を通して、SEM の反射電子を用いることによって、微小構造物の三次元形状計測の可能性ならびに測定精度に関する検討を行った。本報では、実体格子型モアレトポグラフィー⁴⁾に対しての縞走査技術⁶⁾を用いることによって、反射電子を用いた SEM によるモアレトポグラフィーの高分解能化を検討する。

実体格子型モアレトポグラフィー⁴⁾は、1枚の格子を用いた計測技術である。したがって、格子を面内で移動させても、発生するモアレ縞画像の縞の位相を変化させることはできない。そのために、一般に縞走査技術導入に不向きな測定手法であると考えられていた。このような実体格子型モアレトポグラフィーに対して、格子を面外に移動させることによる縞走査技術が提案⁷⁾されている。

本報の目的は、上記実体格子型モアレトポグラフィーに対して開発された縞走査技術の導入ならびに導入時の周辺技術の整備によって、SEM によるモアレトポグラフィーの高分解能化が可能であるか否かを検討するものである。したがって、実験遂行の容易さを重視して、現状ではマニュアルによる操作が中心となっている。そのために、 $120\ \mu\text{m}$ という比較的大きなピッチをもつ格子による実験結果を用いて議論を行っている。しかしながら、比較的大きなピッチをもつ格子による実験ではあるものの、直径が約

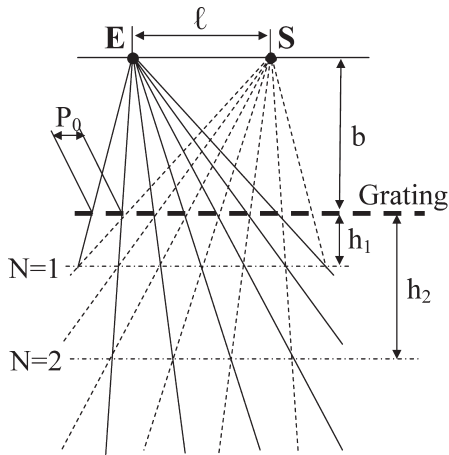


Fig. 1 Shadow moiré system.

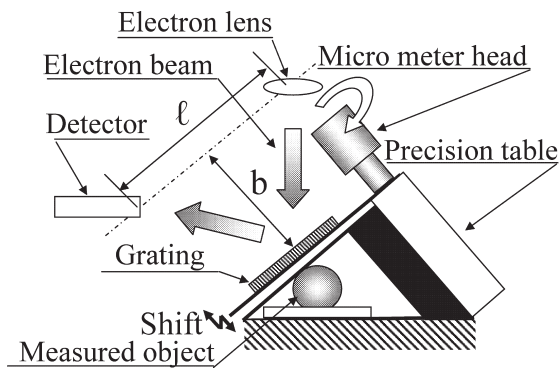


Fig. 2 Grating holder for shifting grating.

10 mm のボールベアリングのボールを測定対象とした場合に、誤差解析結果によって $1 \mu\text{m}$ 程度のばらつきの計測が可能である条件が検討され、また SEM を用いた新しい微細計測法に縞走査技術を導入する場合の問題点、さらにその解決技術が検討されている。

2. SEM によるモアレトポグラフィーの測定原理⁵⁾

実体格子型モアレトポグラフィーは、Fig. 1 に示す光学系ならびに式 (1) を用いることにより、縞深さ h_N を測定することができる手法である。

$$h_N = \frac{P_0 N b}{l - N P_0} \quad (1)$$

ただし、 P_0 は格子のピッチ、 N は縞次数、 b は格子と光源 (カメラ) のレンズ主点間距離、 l は光源とカメラのそれぞれのレンズ主点間距離である。

この技術を SEM へ導入するためには、はじめに Fig. 1 に示す実体格子型モアレトポグラフィーの光学系と同じ機能をもつ光学システムを SEM のチャンバー内に構成しなければならない。

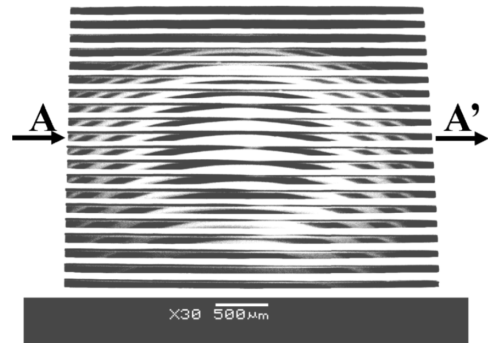


Fig. 3 Moiré fringes.

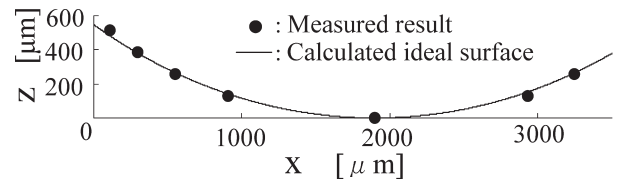


Fig. 4 Measured results of ball without fringe scanning method.

SEM のチャンバー内の機構は、一般に中央に電子レンズがあり、その横に検出器が設置されている。そこで Fig. 2 に示すように、電子レンズと検出器 (シンチレーター) を Fig. 1 に示す実体格子型モアレトポグラフィー光学系の光源 : S とカメラ : E に相当する機能をもつものとそれぞれ想定し、格子を Fig. 1 に相当するように傾斜を与えて、レンズと検出器を結ぶ線に平行に設置した⁵⁾。この構成によって、SEM のチャンバー内に実体格子型モアレトポグラフィーと同じ機能をもつ光学系を用意することができる。ここで、格子は、マイクロマシニング技術を用いて厚さ $1 \mu\text{m}$ として SiO_2 によって作製されている。Fig. 3 に、ピッチ $120 \mu\text{m}$ の格子を用いて、ボールベアリングのボールを測定対象とした場合のモアレ縞画像を示す。格子の影が物体表面上に生じ、結果としてモアレ縞が生成されることが確認できる。

Fig. 3 に示すモアレ縞画像の A-A' ライン上の測定対象の断面を、式 (1) に基づいて計算した結果が、Fig. 4 である。ここでの計算は、前報⁵⁾ に示す光学系設定時のパラメーター決定法に基づいて求めた $l=50.0 \text{ mm}$ 、 $b=37.6 \text{ mm}$ を用いて行った。

被測定対象としてのベアリングのボール径は $9/32 \text{ inch}$ であり、ベアリングボール表面が格子に接触するように設置されているので、画像上から同心円の中心位置とボールの半径を用いるとベアリングボールの中心座標 C_1 を得ることができる。このようにして求めた中心座標を用いて、

計算上求めることのできるベアリングボールの理想表面形状を Fig. 4 に示す測定結果に重ね合わせると、測定結果によく対応していることがわかる。縞画像からのデータ採集は、いずれも画像上のピクセル数で5ピクセル、実寸法で15 μm 程度の誤差を含む可能性のある目視によるものである。このデータに対して、あえて両者の差の標準偏差を計算すると、18.8 μm であった。また、実験結果から球としての直径を最小自乗法に基づいて求めた場合、7.03 mm であり、9/32 inch を7.144 mm とするとその差は0.11 mm となり、その直径に関する誤差は1.5% (=0.11/7.144×100) であった。目視によるデータ処理とはいえ、本手法によって比較的良好な結果が得られることがわかる。

3. SEM によるモアレトポグラフィーの高分解能化の解析原理

次に、上記 SEM を用いたモアレトポグラフィーの高分解能化が、実体格子型モアレトポグラフィーの縞走査技術^{7,8)}を導入することによってどの程度実現可能かを検討する。

Fig. 1 に示すような SEM におけるモアレトポグラフィー光学系において、実体格子を光軸に沿って平行移動し、オリジナルな格子の位置を含めて3枚のモアレ画像を採取すると、前報^{7,8)}に示したように実体格子型モアレトポグラフィーの高分解能化が実現可能であると考えられるので、その処理過程を検討した。

Fig. 3 に示すようなモアレ縞の強度分布 $I_M(x, z)$ は、前報^{7,8)}に示すように、式(2)として表すことができる。

$$I_M(x, z) = \alpha(x, z) + \beta(x, z) \cos \frac{2\pi lh}{P_0(h+b)} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha(x, z)$ はバイアス成分、 $\beta(x, z)$ は縞画像の振幅成分である。

式(2)で示した縞画像が、本来の格子の位置から $\pm \Delta b$ 変化した場合のモアレ縞画像の強度分布は、式(2)と同様にそれぞれ式(3)、(4)として表すことができる⁷⁾。

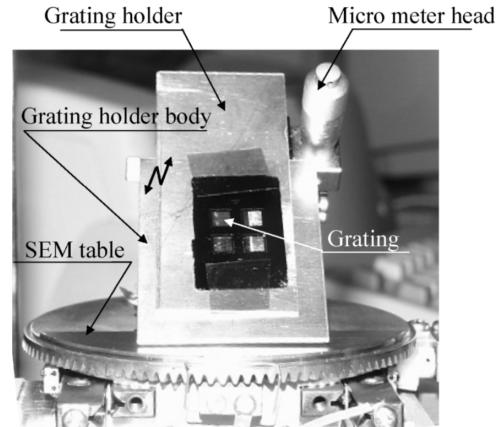


Fig. 5 Grating holder.

$$I_{M+\Delta b}(x, z) = \alpha(x, z) + \beta(x, z) \cos \frac{2\pi l(h+\Delta b)}{P_0(h+b)} \quad (3)$$

$$I_{M-\Delta b}(x, z) = \alpha(x, z) + \beta(x, z) \cos \frac{2\pi l(h-\Delta b)}{P_0(h+b)} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)に対して、 $\alpha(x, z)$ 、 $\beta(x, z)$ の影響を除去するために、式(5)に示すような関数 $f(h)$ を定義し、式(5)に示す非線形方程式 $f(h)$ に対する根 $h(x, z)$ を実測値から得られた $f(h)$ に相当する値を用いてニュートン-ラフソン法によって求め、実体格子型モアレトポグラフィーの高分解能化を前報^{7,8)}に示す考え方に基づいて行った。

$$f(h) = \frac{I_M(x, z) - I_{M+\Delta b}(x, z)}{I_{M-\Delta b}(x, z) - I_M(x, z)} = \frac{\cos \frac{2\pi lh}{P_0(h+b)} - \cos \frac{2\pi l(h+\Delta b)}{P_0(h+b)}}{\cos \frac{2\pi l(h-\Delta b)}{P_0(h+b)} - \cos \frac{2\pi lh}{P_0(h+b)}} \quad (5)$$

4. 縞走査技術を用いた解析原理に基づく測定結果

格子を平行移動させるために、Fig. 2 ならびに Fig. 5 に示すような格子ホルダーを格子ホルダー本体からマイクロメーターヘッドを用いてマニュアルで移動させることのできる装置を用意し、前章に示すように、オリジナルな格子

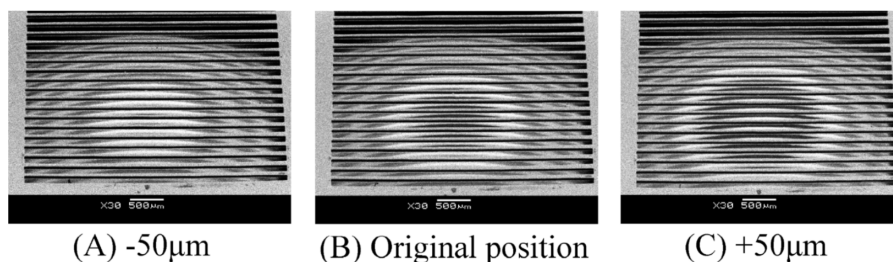


Fig. 6 Moiré fringes at different positions of grating.

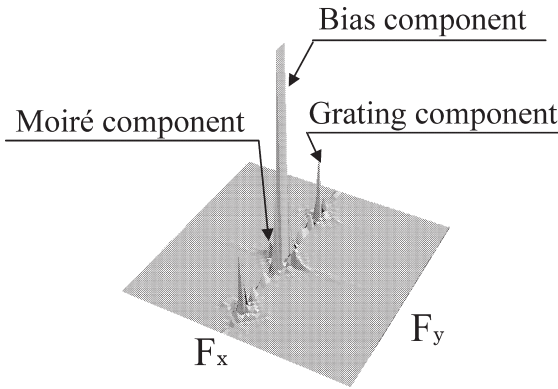


Fig. 7 Moiré image in frequency domain.

の位置から $\pm 50 \mu\text{m}$ 移動させた場合のモアレ縞画像を得ることのできる光学系をSEMチャンバー内に設置した。また、本来、本研究では微細構造物の計測を目的としているので、実体格子の周期は数 μm のものを利用するべきであるが、ここでは、SEM内での装置のセッティング・測定精度の検討時の扱いが原理確認実験として容易に実施できるように、比較的大きなピッチ ($120 \mu\text{m}$) をもつ格子を用意して実験を行った。

直径 $13/32 \text{ inch}$ のボールベアリングのボールを測定対象として、格子ピッチ $120 \mu\text{m}$ 、格子平行移動距離 $\pm 50 \mu\text{m}$ の場合の3枚のモアレ縞画像を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 に示すモアレ縞画像は、格子の影も鮮明に観察できるような状況にあり、明らかに、格子の移動に伴う位相の異なったモアレ縞が発生していることが確認できる。

この状況で、このモアレ縞画像 (Fig. 6 (B)) をフーリエ変換した結果が Fig. 7 である。Fig. 7 を観察すると、いわゆるモアレ縞画像内に残存する格子成分が、周波数領域で存在していることがわかる。この問題を除去するために、Fig. 6 の各縞画像をローパスフィルター処理しモアレ縞成分のみの抽出を行った縞画像を用いて、上記のように実体格子型モアレトポグラフィーの高分解能化処理を行った。Fig. 6 に示す3枚の縞画像をローパスフィルタリングした結果を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 に示す縞画像の強度分布の B-B' 断面を取り出し

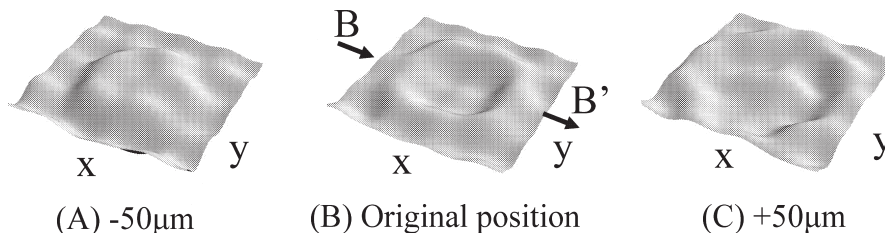


Fig. 8 Filtered moiré intensities.

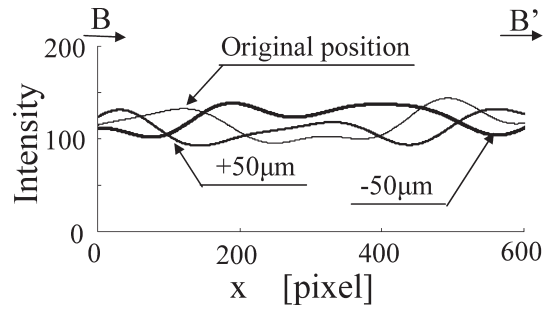


Fig. 9 Profiles of moiré fringes.

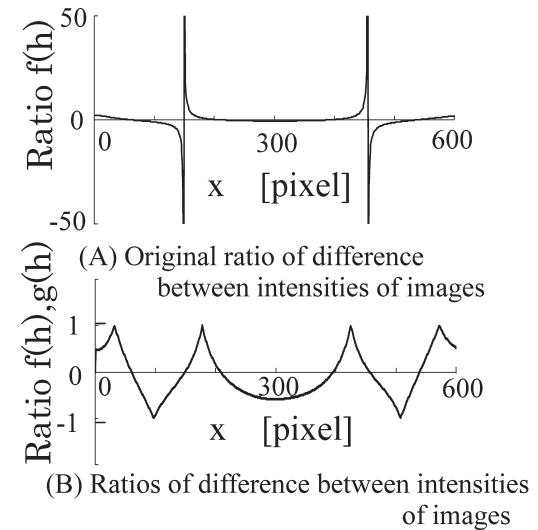


Fig. 10 Ratio functions $f(h)$ and $g(h)$.

たものが、Fig. 9 である。Fig. 9 から、上記の解析原理に基づき、式 (5) に示す比率 $f(h)$ を求めた結果が Fig. 10 (A) である。ところが、Fig. 10 (A) は式 (5) の分母が 0 に近づくに従い、その比は無限大となる。前報^{7,8)} に示したと同様に、ニュートン-ラフソン法は関数の連続性などによる制限が存在するため、式 (5) で定義する実測値が 1 を超えた場合には、分子分母を交換し、比率が 1 を超えないように新たに $g(h)$ を定義して、式 (5) に対応する関数を h に関して解くことにした。このような処理に基づき求めた $f(h)$ 、 $g(h)$ を Fig. 10 (B) に示す。

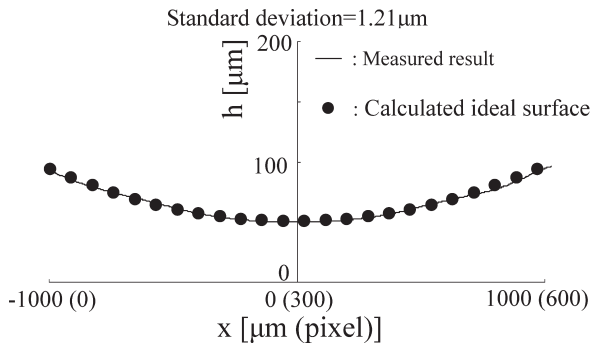


Fig. 11 Measured result of ball with fringe scanning method.

$f(h)$, $g(h)$ より求めたベアリングボールの断面を Fig. 11 に示す. この場合にも, $\Delta b = -50 \mu\text{m}$ の位置において格子とベアリングボール表面とが接触するように設置されているので, 上記の場合と同様にベアリングボールの中心を求めることができる. この中心 C_2 でボールの直径 (13/32 inch) を用いて理想的な円を計算した結果を Fig. 11 にプロットした.

ここで, x 軸は, Fig. 10 の $f(h)$, $g(h)$ との関係を確認するためにピクセル数と長さの単位を併記している. さらに, この測定値と理想的な円弧との差の標準偏差は $1.21 \mu\text{m}$ であることがわかった.

5. 測定精度の検討

5.1 SEM を用いた実体格子型モアレトポグラフィーの光学系設定誤差の影響

本計測技術は, 実体格子型モアレトポグラフィーの測定原理に基づいている. 実体格子型モアレトポグラフィーでは, 式 (1) に示すように縞深さ h_N を求めることができる. したがって, 測定システムにおける格子のピッチ: P_0 , 格子と光源のレンズ主点間距離: b , 光源とカメラのそれぞれのレンズ主点間距離: l のそれぞれの設定誤差が測定結果に及ぼす影響は, 誤差伝播の考え方に基づいて式 (6), (7) によって検討することができる⁹⁾.

$$\Delta h = \left| \Delta P_0 \frac{\partial h}{\partial P_0} \right| + \left| \Delta b \frac{\partial h}{\partial b} \right| + \left| \Delta l \frac{\partial h}{\partial l} \right| \quad (6)$$

$$\sigma_h^2 = \left\{ \frac{\partial h}{\partial P_0} \right\}^2 \sigma_{P_0}^2 + \left\{ \frac{\partial h}{\partial b} \right\}^2 \sigma_b^2 + \left\{ \frac{\partial h}{\partial l} \right\}^2 \sigma_l^2 \quad (7)$$

式 (1) を式 (6) へ適用して, 格子のピッチ: P_0 , 格子と光源のレンズ主点間距離: b , 光源とカメラのレンズ主点間距離: l のそれぞれの値が実際の長さの 10% の誤差 ($\Delta P_0: 0.012 \text{ mm}$, $\Delta b: 3.76 \text{ mm}$, $\Delta l: 5.0 \text{ mm}$) を含むと仮定した場合を例に挙げて, 格子のピッチ, 格子と光源の

レンズ主点間距離, 光源とカメラのそれぞれのレンズ主点間距離におけるそれぞれの光学系設置・製作時の誤差の縞深さ測定結果への影響を検討する.

ここで, Fig. 6 (B) の縞画像で確認できるように, 実際の測定では縞次数 N が 2~4 の縞を対象として演算が行われている. したがって, この範囲の縞次数で検討すると, 縞次数 $N=2$ では 0.055 mm , $N=3$ で 0.082 mm , $N=4$ では 0.110 mm の誤差が縞深さに生じるものと推定することができる.

さらに, 現状の測定システムを用いて $1 \mu\text{m}$ 程度に測定誤差を抑制するためには, 誤差等分の原理⁹⁾に従って, 式 (6) より, 格子のピッチ誤差を 140 nm , 格子と光源のレンズ主点間距離は $45 \mu\text{m}$, 光源とカメラのそれぞれのレンズ主点間距離を $60 \mu\text{m}$ 程度の設定誤差に抑えなければならぬこともわかる.

このような演算過程より, 格子のピッチ, 格子と光源のレンズ主点間距離, 光源とカメラのそれぞれのレンズ主点間距離において, それぞれの光学系設置・製作時の誤差の縞深さへの影響は, 格子ピッチの誤差が最もセンシティブに縞深さに影響を及ぼすことも同時に確認することはできる. この場合, 現在利用しているような一般的な SEM のチャンバー内に設置する光学系では, 測定システム設定時に格子のピッチ誤差は, 実際の長さにおいて他に比べて 400 倍程度の正確さが求められていることがわかった.

一方, 測定における偶然誤差は, 式 (7) によって検討することができる. この場合に, 格子のピッチ, 格子と光源のレンズ主点間距離, 光源とカメラのそれぞれのレンズ主点間距離の標準偏差 σ が, それぞれ本来の設定値の 5% であると仮定すれば, 縞深さの標準偏差を縞次数 $N=2$ では $16 \mu\text{m}$, $N=3$ では $24 \mu\text{m}$, $N=4$ では $31 \mu\text{m}$ であると推定することができる.

以上のように, 提案する測定法において, 測定システムにおける光学系設置時の設定誤差が測定結果に及ぼす影響は, 誤差伝播の考え方に基づいて検討可能であることが確認できる.

5.2 本手法における縞走査技術のシフト誤差の影響

本手法は, 実体格子型モアレトポグラフィーの測定原理に, 縞走査技術を導入したものである. したがって, 縞走査処理時の格子移動誤差が測定結果に対しても影響を及ぼすものであるといえる. そこで, 式 (5) において, 格子のシフト量 $\pm \Delta b$ が誤差を含んだ場合の測定結果への影響を次に検討する.

格子のシフト量の影響を検討するに当たって, はじめに, Fig. 11 に示す測定結果と同様の条件で測定対象の球の

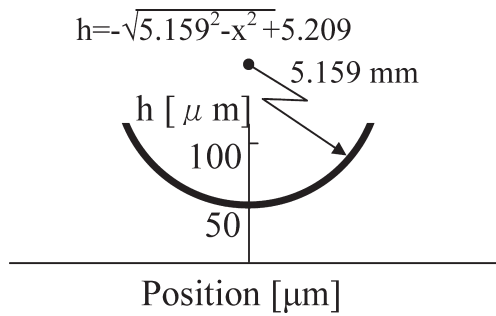


Fig. 12 Simulation model.

形状を用いて、縞深さ h_N を Fig. 12 に示すように球の断面の座標としてあらかじめ計算しておき、次に、この縞深さの計算値を用いて式 (2), (3), (4) によって縞の強度を計算する。この演算過程において、 $\pm \Delta b$ にシフト誤差が存在するものと仮定して、式 (3), (4) にシフト誤差を設定する。式 (3), (4) より導いたシフト誤差を含むこれらの縞の強度に関する結果を用いて比率 (関数: $f(h)$) を計算し、この $f(h)$ に基づく縞深さを求める処理を次に行った。この結果と、誤差を含まない球の形状との差の標準偏差を求めることによって、シフト誤差の測定結果への影響を検討した。結果を Fig. 13 に示す。

ここでは、シフト誤差の測定結果への影響の傾向を知るために単に式 (3), 式 (4) にシフト誤差を設定した検討結果に過ぎないものの、式 (3), 式 (4) における数 μm 程度のシフト誤差は、測定結果へセンシティブに影響していることがわかった。例えば、Fig. 13 において式 (3) のシフト誤差が $-2\mu\text{m}$ 、式 (4) のシフト誤差が $5\mu\text{m}$ になると、急激に測定誤差に影響が及ぶことがわかる。この場合、どのような状況で誤差が増大しているのかを検討するために、この条件で演算された形状を Fig. 14 として示す。

Fig. 14 にみられるように、シフト誤差が生じると、本手法に基づく縞走査技術では、測定結果がうねるように変化することがわかる。このような演算結果は、シフト誤差に非常に敏感に生じている。このような誤差の発生状況を加味して、演算結果への影響を $1\mu\text{m}$ 以下に抑えるための条件を検討すると、Fig. 13 の計算結果より $\pm 1.2\mu\text{m}$ にシフト誤差を抑制する必要があることがわかった。

以上の結果より、 $120\mu\text{m}$ 程度の比較的大きなピッチをもつ格子を用いた場合でも、前報⁵⁾ に示す光学系設定時のパラメータ決定法と本報に示す誤差解析に基づく設定誤差についての検討を繰り返し行うことによって、 $1\mu\text{m}$ 程度のばらつきで本手法による形状計測が実施可能であると考えられる。

以上のように、反射電子を用いた SEM にモアレトポグ

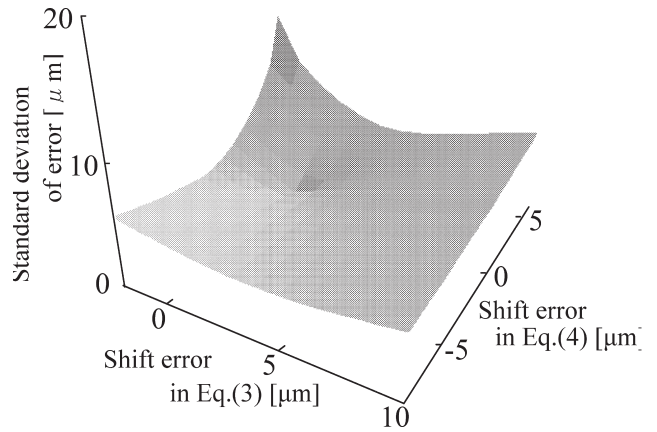


Fig. 13 Simulation result for estimation of error in fringe scanning method.

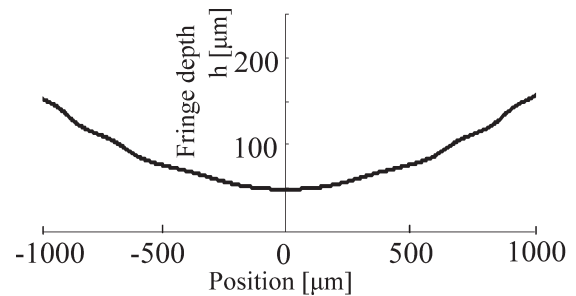


Fig. 14 Cause of error in fringe scanning method.

ラフィーを導入し、実体格子型モアレトポグラフィの縞走査技術を導入することによって、高分解能化された計測が可能であることがわかった。今後は、現実にもどの程度までの分解能を有する計測が実現可能であるかを、実験を通して検討しなければならない。本手法の実用化に向けて、さらに踏み込んだ不確かさの検討が必要であると考えている。

6. おわりに

実体格子型モアレトポグラフィにおける高分解能化の手法によって、SEM を用いたモアレトポグラフィの高分解能化が可能であることがわかった。現状では、SEM チャンバー内での位置合わせ、マニュアルによる格子の移動など、十分に微細な構造物を取り扱うことが困難なために、 $120\mu\text{m}$ の大きなピッチをもつ格子を用いた計測しか実現していない。しかしながら、実体格子型モアレトポグラフィに高分解能化の技術を導入することによって、 $120\mu\text{m}$ のピッチをもつ格子の使用においても、SEM を用いた微細構造物の三次元形状計測が $1\mu\text{m}$ 程度のばらつきで実現可能であることがわかった。また、縞解析時に縞画像にフィルタリング処理が必要であることがわかった。こ

のフィルタリング処理を用いれば、縞画像のフーリエ変換結果を観察することによって、周波数領域で縞情報の存在領域を確認し、その縞情報のみをローパスフィルタリングすることによって抽出すれば、容易に前報に示した実体格子型モアレトポグラフィにおける高分解能化手法の導入が可能であることがわかった。さらに、測定に対する誤差解析を行うことによって、光学系の設置誤差、縞走査時の格子移動誤差によって発生する測定結果に含まれる誤差の性質を明確にすることができた。

本研究の一部は、平成 16 年度科学研究費補助金ならびに平成 16 年度関西大学重点領域助成金によって行った。

文 献

- 1) J. I. Goldstein: *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (Plenum Press, New York, 1981) pp. 1-203.
- 2) L. Reimer: *Transmission Electron Microscopy* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984) pp. 1-133.
- 3) 田中敬一, 永谷 隆: 図説走査電子顕微鏡 (朝倉書店, 1980) pp. 1-56.
- 4) 山田朝治, 横関俊介: モアレ縞・干渉縞応用計測法 (コロナ社, 1996) pp. 119-151.
- 5) 新井泰彦, 横関俊介: “SEM を用いたモアレトポグラフィに基づくマイクロ構造物の測定法の開発”, *光学*, **34** (2005) 225-229.
- 6) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 7) Y. Arai, S. Yokozeki and T. Yamada: “Fringe-scanning method using a general function for shadow moire,” *Appl. Opt.*, **34** (1995) 4877-4882.
- 8) Y. Arai and S. Yokozeki: “Improvement of measurement accuracy in shadow moiré by considering the influence of harmonics in the moiré profile,” *Appl. Opt.*, **38** (1999) 3503-3507.
- 9) E. O. Doebelin: *Measurement Systems*, 4th ed. (McGraw-Hill International, New York, 1990) pp. 58-67.