

SEM を用いたモアレトポグラフィーに基づくマイクロ構造物の測定法の開発

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

A new measurement technology for 3-D shape measurement of a micro-structure like micro electro mechanical systems (MEMS) is proposed and discussed. The principle of this method is based on moiré topography. The moiré topography is applied to a scanning electron microscope (SEM) using backscattered electrons. The measurement system is constructed with the SEM and a grating produced by silicon processing. Then, the system is similar to the optical system of moiré topography functionally. The principle is investigated in experiments concerning in the measurement of the slope of a plane. The validity of the method is confirmed in the experiment using the grating whose pitch is 400 μm .

Key words: moiré topography, SEM, 3-D shape measurement

1. はじめに

光学顕微鏡では観察することが困難な光の回折限界を越える微細構造物を観察する場合に、電子顕微鏡が用いられる。電子顕微鏡は、電子を用いて微細構造物を観察するものである¹⁾。一般には、透過電子顕微鏡 (TEM)²⁾ と走査電子顕微鏡 (SEM)¹⁾ とに大別することができる。透過電子顕微鏡では、薄片化した試料に電子線を照射し、試料を透過した電子を用いて試料の内部組織や構造が観察される。一方、走査電子顕微鏡は、真空鏡体で細く絞られた電子ビームを試料表面に入射し、発生する二次電子、反射電子、X線、オージェ電子などを利用することによって試料表面形態を観察、また元素分析が可能な装置である。SEMの特徴としては、走査電子プローブとしてきわめて細いビームを用いるために分解能が高く、焦点深度が光学顕微鏡に比べて著しく大きいことがあげられる。凹凸の激しい試料表面であっても、ほぼ全面に電子ビームは焦点を結び、臨場感にあふれたミクロの世界が映し出されるところにあ

る。また、観察のための試料作製は一般に TEM に比較して容易であり、金属・鉱物・半導体などの試料は、レプリカの作製の工程なしにそのまま観察することができる。

Fig. 1 (a) に、Fig. 1 (c) に概略を示す構造をもつマイクロカンチレバーを二次電子を用いて観察した場合の画像を示す。長さ 100 μm 、幅 50 μm のマイクロカンチレバーを三次元的に観察することができる。このように、対象物の形態観察は、一般に二次電子が用いられている。このマイクロカンチレバーを反射電子を用いて観察したものが Fig. 1 (b) に示す画像である。この場合には、Fig. 1 (a) に示す二次電子を用いた SEM では観察することのできなかつたマイクロカンチレバーの影が床面に存在している。反射電子を観察する場合の影の発生は、試料表面からの反射電子をシンチレーターに直接入射しているため、物体の背面に存在する表面からは反射電子が発生しない性質によるものであるといえる。すなわち、反射電子を用いた SEM では、物体が存在すると、その後ろに影が存在する³⁾。この

E-mail: arai@kansai-u.ac.jp

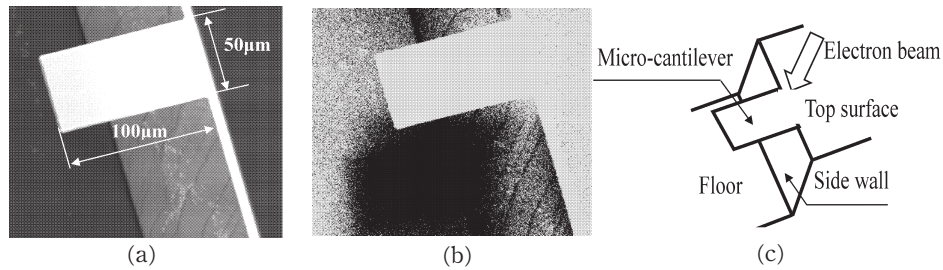


Fig. 1 SEM images. (a) By secondary electrons, (b) by backscattered electrons, (c) schema of micro-cantilever.

性質を用いると、光学的形状計測法として知られているモアレトポグラフィー⁴⁾の技術に基づく微細構造物に対する形状計測が可能になる。

モアレトポグラフィーは、格子像を物体に投影することによって、計測する格子投影型モアレトポグラフィーと測定対象の直前に実体格子を設置し、測定物体上に発生するこの格子の影と、本来の実体格子との間に発生するモアレ縞を用いて、計測する実体格子型モアレトポグラフィーとに分類することができる⁴⁾。本研究では、反射電子を用いたSEMにマイクロマシニング技術を用いて製作した実体格子を付加したシステムを用いて、微小構造物を対象とする実体格子型モアレトポグラフィーを提案する。

一方、SEMを用いた微小構造物の計測法として、二次電子の放出特性を利用した角度検出の二次元電子信号積分法^{5,6)}がすでに提案され、商品化もなされている。

この方法は、二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する技術^{7,8)}に基づくもので、SEM画像のみならず広く利用されている技術である。

このSEMによる手法では、試料のトポグラフィーに対して数nmの分解能が報告されている。しかしながら、画像の強度分布を二次元的に精度よく検出しなければならないために、高精度な検出器が複数個必要となり、製品化されたものは一般に高価なものとなっている。

本研究で取り扱う技術は、反射電子を用いたSEMの機能をもつ装置に、実体格子を取り付けることのできる格子ホルダー、被測定対象物体固定台を新たに付与するだけで、形状計測が可能なシステムである。また、ここでは、SEMを用いた実体格子型モアレトポグラフィーを考えているが、この考え方はEB描画機を用いると格子投影型モアレトポグラフィーを実現することが可能なものであり、微小構造物の形状計測法としてより発展性の高いものであるといえる。さらに、本手法はSEMによる計測であるから、干渉計測のように光軸方向の分解能のみがナノメートルであり、光軸に垂直方向の空間分解能がマイクロメートルであるなどといった、計測のアンバランスもなく、三次

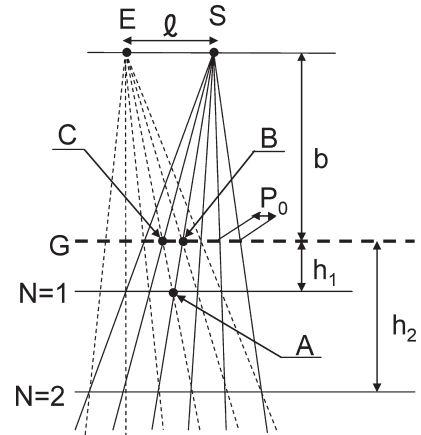


Fig. 2 Principle of moiré topography.

元すべて10nm程度の分解能で三次元測定系を構築することができる特徴をもっている。

本稿では、光学分野で開発されてきた、いくつかの技術を基礎としたSEMによる反射電子を用いた三次元形状計測法の原理確認実験と、その実用化に向けての問題を検討する。

2. 実体格子型モアレトポグラフィーのSEMへの導入

実体格子型モアレトポグラフィーは、Fig. 2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⁴⁾。

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

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。

また、このモアレトポグラフィーに縞走査技術^{9,10)}を導入することによって、高分解能化をはかることができる。この技術をSEMへ導入するためには、はじめにFig. 2に示す光学系と同じ機能をもつシステムを構成しなければならない。SEMのチャンバー内の構成をFig. 3に示す。

SEMのチャンバー内の機構は、一般に中央に電子レン

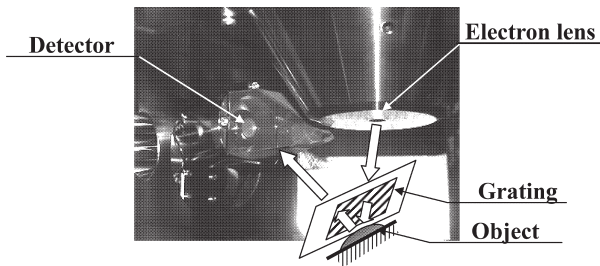


Fig. 3 Position of electron lens and detector in SEM chamber.

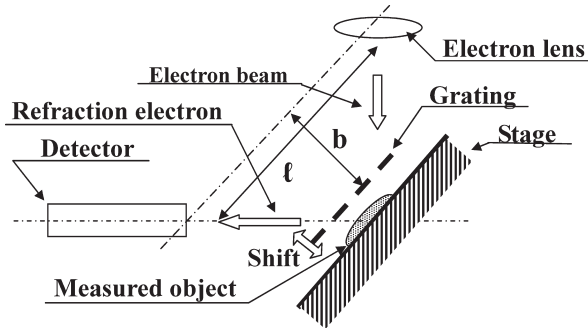


Fig. 4 Schematic diagram of measurement system.

ズがあり、その横に検出器が設置されている。そこで Fig. 4 に示すように、電子レンズと検出器（シンチレータ）を Fig. 2 に示す実体格子型モアレトポグラフィ光学系の光源とカメラに相当する機能をもつものと考え、格子を Fig. 2 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することによって、SEM のチャンバ内に実体格子型モアレトポグラフィと同じ構成のシステムを用意する。ここで、今回の原理確認実験に使用する格子は、マイクロマシニング技術を用いて SiO_2 によって作製されたものである。そのピッチは 200, 400 μm であり、格子の厚みは 2 μm である。

Fig. 5 に、ピッチ 200 μm の格子によって観察された平面 (a) と球面 (b) の画像を示す。いずれの画像においても、格子の影が物体表面上に投影され、結果としてモアレ縞が生成されていることがわかる。

Fig. 6 に、格子の保持を行うための格子ホルダーならびに SEM チャンバー内での測定システムを示す。このシステムを用いることによって形状計測を行う。しかしながら、SEM において、光学レンズの主点のようなそれぞれの部分の実質的な機能をもつ点を三次元座標として決定することは、SEM の一般ユーザーとしては困難である。この結果として、Fig. 2 に示すような実体格子型モアレトポグラフィのように、レンズ-格子間距離の寸法測定だけでは、チャンバー内の検出器、電子レンズなどの各部品に対

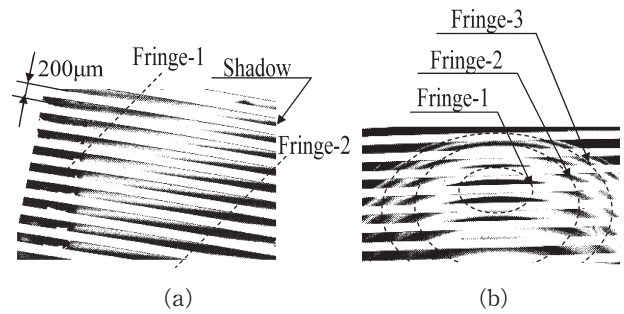


Fig. 5 Moiré fringes on plane and sphere surfaces. (a) Moiré fringes on plate, (b) moiré fringes on sphere.

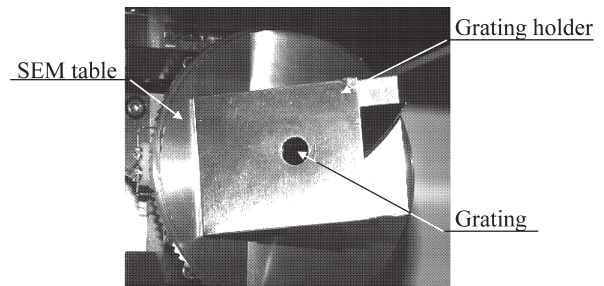


Fig. 6 Grating and grating holder in SEM chamber.

するレンズ間距離： l 、格子レンズ間距離： b を決定することはできない。この問題に対して、本研究では、 l 、 b の概寸をあらかじめ計測し、この値を基礎データとして、一般に用いられている 3 種類の異なった既知の直径をもつボールベアリングの鋼球を用いることによって、実験的にこれらの値を決定した。

3. 実験結果と検討

呼び直径 $d_1=15/32$ inch, $d_2=13/32$ inch, $d_3=9/32$ inch の 3 種類のベアリングのボールを格子に接触するように設置し、それぞれの鋼球を用いた 3 回の計測を行い、測定結果がそれぞれの鋼球の直径に最も近づくことのできる条件を満足するように l と b を定めた。

具体的には、はじめに Fig. 7 に示すように、直径が既知のベアリングボールを格子に接触するように設置する。この結果、画像上で P_2 点を定めることができる。さらにこの場合、発生するモアレ縞からモアレ縞の半径 a を求めることができる。ボールの直径は既知であることから r が求められ、結果的に h_1 を求めることができる。

ここで、式 (1) に h_1 を代入すると、式 (1) は 2 つの未知数 b と l の関数となる。この状況を異なった直径をもつボールで繰り返し、 b と l を算出する。しかしながら、 a は目視によって定め、かつレンズ-格子間の平行度についても b そのものが未定であることから、この方法によって b と

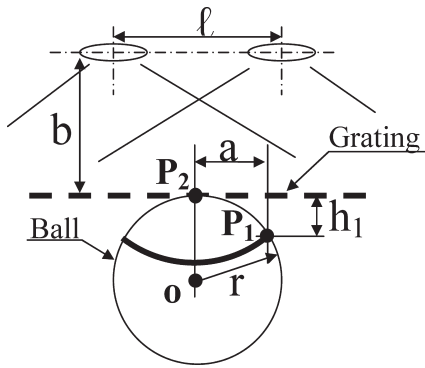


Fig. 7 Schematic diagram of definition of l and b using balls.

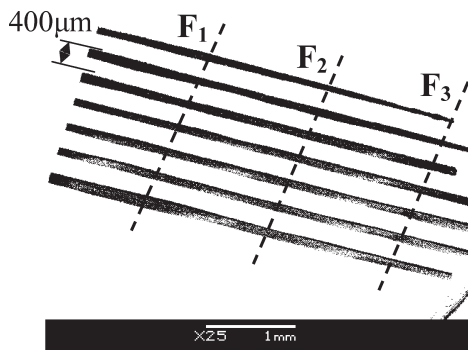


Fig. 8 Measurement of slope of plane.

l の決定を行うことは十分とは考えにくい。したがって、2種類のボールだけではなく、さらに直径の異なったもう1種類のボールを用いて、求められた b と l の正しさを b , l の概寸から繰り返し検証し、最終的にその値を決定した。この作業の結果、 b と l をそれぞれ 50.0 mm, 31.0 mm として決定し、利用した。

この結果に基づいて、今回用意した最大ピッチ (400 μm) の格子を用いて平面を計測し、その傾きを求めることによって、本稿に示す計測原理の正当性を検討した。ここで測定対象として用いた平面は、シリコンウェハによって作製し、Dektak 社製段差計によって傾き 9.64 deg と測定された平面である。

Fig. 8 に示すように、撮影された画像には、 F_1 , F_2 , F_3 と示す黒い3本の縞を観察することができる。この場合の縞のピッチを SEM の長さ標準画像と目視と比較し、ピクセル数として求めた。その結果、縞のピッチを 1.52 mm と決定した。ここで、式 (1) より縞深さは、 F_1 , F_2 , F_3 それぞれ Table 1 に示すように求めることができる。Table 1 より、 $\tan^{-1}(0.512/3.04) = 0.1668$ [rad] (= 9.56 [deg]) として、その傾きを求めることができる。この結果から、9.64 deg に対して 0.83% の偏差を確認することができる。しかしながら、いずれの結果もすべて目視をベースに

Table 1 Calculation of fringe depth.

Fringe name	Fringe number	Fringe depth (mm)	Difference (mm)
F_1	1	0.25	0
F_2	2	0.504	0.252
F_3	3	0.762	0.256

$l = 50.0$ mm, $b = 31.0$ mm, $P = 0.40$ mm.

したものであることから、あいまいさを含むものであるものの、偏差は小さなものであると考えられる。

また、SEM のチャンバー内での精密位置決めが非常に困難を伴うため、本稿に示す実験では、比較的大きな対象物ならびに大きなピッチをもつ格子を使用せざるを得なかった。さらに、現状では、目視による計測であるために、本来の微細構造物の計測が行われていない。今後、より信頼性の高い既知の値をもつ標準を対象とし、加えて、圧電素子を用いた遠隔操作可能な位置決めシステムの構築のもとに、本手法に基づく高分解能測定に対しての詳細な検討が必要であると考えている。

上記のように、今後より詳細な検討が必要であると考えられるものの、原理確認実験において得られた結果より、本稿において提案した反射電子を用いた SEM によるモアレトポグラフィーの測定原理が正当であると考えられる。

現状では、縞走査技術⁹⁾などを用いた高分解能化をはかっている問題がある。しかしながら、実体格子型モアレトポグラフィーへの縞走査技術を、Fig. 4 に示すように圧電素子を導入することによって、格子をシフトする技術¹⁰⁾などを用いて実現することを今後計画している。たとえば、10 μm 程度のピッチをもつ格子を用い、従来の縞走査技術によって 50 分の 1 fringe 程度の高分解能化¹¹⁾は十分に実現可能であると考えられるので、式 (1) より、現状の測定システムでも 300 nm 程度の分解能を得ることができると考えている。さらに、格子のピッチの微細化ならびに b を短く設定した測定台の使用によって、10 nm 程度の分解能をもつ形状計測が実現可能であるとも考えている。

本稿で提案した手法は、光波干渉計測に基づかない、新しい微細構造物の形状計測の可能性を示すものであると考えている。

4. おわりに

本稿では、光学的形状計測法として知られているモアレトポグラフィーの技術を反射電子を用いた SEM に適用することによって、実体格子型モアレトポグラフィーの原理に基づく光の回折限界を越える微小構造物の形状計測の可

能性を示すことができた。

現状では、SEM 画像による目視計測をベースにした測定であるために、十分に微細な構造物の計測を行うことはできていないものの、測定原理の正当性を確認することができた。さらに、モアレトポグラフィの、従来技術の導入による高分解能化の可能性を示した。

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) T. Suganuma: Measurement of surface topography using SEM with two secondary electron detectors," *J. Electron Microsc.*, **34** (1985) 328-337.
- 6) 村田雅人, 向井喜彦, 田口佳男, 堀田昌直: “走査電子顕微鏡による二次元電子放出特性を用いた立体像の構築とその応用”, 溶接学会論文集, **9**, (1991) 452-457.
- 7) 池内克史: “反射率地図に基づき, 二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する 2 手法”, 電子通信学会誌, **J65-D** (1982) 842-857.
- 8) P. H. Winston: *The Psychology of Computer Vision* (McGraw-Hill, New York, 1975) pp. 115-155.
- 9) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 10) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: “実体格子型モアレトポグラフィ法の高感度化”, 光学, **21** (1992) 39-42.
- 11) 新井泰彦, 横関俊介: “空間的縞解析法の通信理論にもとづく検討”, 光学, **30** (2001) 684-691.