

走査電子顕微鏡による表面形状測定

Measurements of Surface Profile by Scanning Electron Microscope

佐藤 壽 芳*・大堀 真 敬*

Hisayoshi SATO and Masanori OHORI

走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて微細表面形状を測定する方法について、光学的方法、トンネル顕微鏡 (STM) との比較を簡単に行った後、SEMを用いる方法の中にも、ステレオ画像法、二次電子信号を用いる方法、反射電子信号を用いる方法があることを述べている。サブ μm 台の形状に対する当面の最も信頼性の高い方法として、反射電子信号による方法があげられていることを、その特徴や機能を概説しつつ明らかにしている。

1 はじめに

超精密加工、半導体製造の微細化等によってサブ μm の表面粗さ、形状測定に対する必要性は高まる一方である。最近ではトンネル顕微鏡 (STM: Scanning Tunneling Microscope) の開発¹⁾によって原子分子レベルの形状測定が可能となっており、実用的な見地からもその利用が図られている。しかし、走査電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) は試料面の画像観察の装置として、広く用いられており、その特性を生かした形状測定が可能となれば、普及している装置だけに有用性が高い。表面の断面形状を求める粗さの測定には、触針式測定法がいまだに一般的であり、世界的にみれば Taylor Hobson 社の測定装置が標準的なものとして評価を得ている。しかし、触針式測定では表面に微細な傷をつけることになり、精度の高い加工面を対象とするほど非破壊検査としての特性が失われることとなる。この点を解決するものとしては従来も各種の光学的な測定法が評価を得てきた。

光学的な方法としては、光切断法²⁾、あるいはこれに基礎をおいた方法³⁾、反射強度を利用する方法⁴⁾等が用いられた。これらによれば μm 台の形状測定が可能であったが、超精密加工ではサブ μm 、nm台の測定が要請され、新たな方法の必要性が生じていた。光の波長が $0.5\mu\text{m}$ 前後であることから、これを越えて分解能を高める一つの方法は干渉を用いることである。実際、長さの測定にこれを表現したものが HP 社のレーザ測定装置であり、表面形状に対しても、いくつかの方法が開発されている^{5,6)}。しかし、干渉による方法は空気の流れ等による雑音の影響を受けやすいことに問題を残していた。

これに対し、光の楕子、反射臨界角、非点収差等光学

的な現象を利用した方法によってサブ μm の微細な粗さ測定が実現されている^{7,8,9)}。干渉による測定は光の波長を商として分解能を高めているが上記の方法では光学的現象を系の構成と相まって巧みに利用し分解能をあげている。

表 1 形状測定法の比較

Method	Vertical Resolution (nm)	Horizontal Resolution (μm)	Commercial Availability	3D Measurement
Optical Method				
Heterodyne Interferometer (Sommargren)	0.1	2	no	not easy
Mirau Interferometer (Wyant)	0.5	1.5	yes	yes
Optical Lever Method	2	5	no	possible
Critical Angle Detectoin	5	2	yes	possible
Astigmatic Focus Error Detection	2	2	yes	possible
Method Using SEM				
Stereo Pair Images	30	0.003	possible	yes
Secondary Electron Signal	2	0.006	yes	possible
Backscattered Electron Signal	2	0.006	yes	yes
STM	0.05	0.001	yes	yes

*東京大学生産技術研究所 第2部

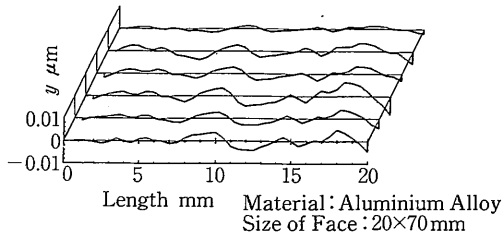


図1 光楯子の方法による測定結果

SEMは試料の画像観察に主として用いられてきた。しかし、光学顕微鏡よりも倍率が大きくとれ、焦点深度が深く立体的な印象を与える画像が構成される等の特徴を生かし、表面粗さの測定が可能となれば、サブ μm 台の表面粗さ測定の新たな手法となりえよう。以下では、光学的な方法と比較しつつ、これまでに試みられている方法についてその概要に触れた後、筆者らが研究を進めてきた反射電子信号を用いる方法についての特徴等について述べることにする。

2 光学的方法の現状

表1は各種のサブ μm 表面粗さ測定法の特徴を表にまとめたものである。光学的な方法とSEMによる方法では縦分解能は変わらないが、STMでは二けたは向上している。横分解能はSEMでは二けた半は向上している。一方、STMとSEMは同定度となっている。光学的な方法の場合、装置には機械的な走査が組み込まれるが、SEMの画像観察では電子的に走査されるから走査線に対して粗さ

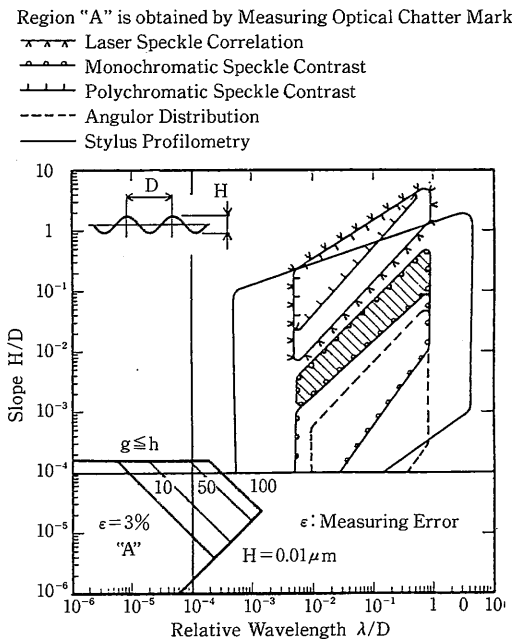


図2 各種測定法と光楯子の方法の特徴の比較

断面曲線が求められれば、画面全体に対しては容易に三次元形状が求められることとなる。

Sakaiらは光の楯子の原理に基づいた装置を構成し、目視によれば観察が可能であるが、触針式の粗さ計では検出が難しかった研削面のびびり痕の形状を求めることを可能としている⁷⁾。図1はこれをダイヤモンド工具によって切削された回転多面鏡の鏡面の形状測定に適用を試みた結果である。鏡面上の複数個所で測定されており、切削痕とみられる相互に関連のある $0.01\mu\text{m}$ 台の形状が測定されている。この方法の測定可能域をTeagueらが整理した各種の方法の測定可能域の図^{10,11)}に併せて示したものが図2である。表面の断面曲線の特性として、これまでのものと比較してはるかに波長が長く、傾斜の緩い性質の成分が測定できている。

光ディスクの信号検出ピックアップは、光ディスク盤面上の微細なピットの有無を、装置内光学系に設定された臨界角反射面の機能によって所定位置に光が到達することの有無によって検出している。光ディスクのピックアップとしてはこれをデジタル的に処理しているが、これを基にアナログ信号によって表面の形状を検出する装置として改良されている⁸⁾。図3はこれによってフィルム表面を測定した結果である¹²⁾。フィルムのように柔軟性があり、かつ平滑な面を持っている材料に対しては

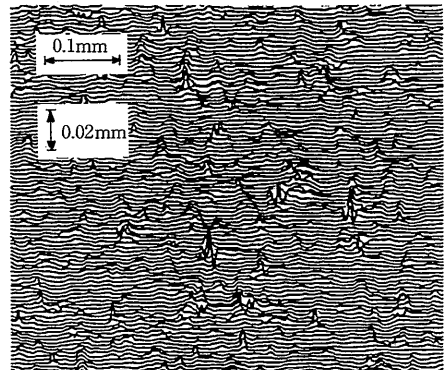


図3 臨界角法によるフィルム面の測定結果

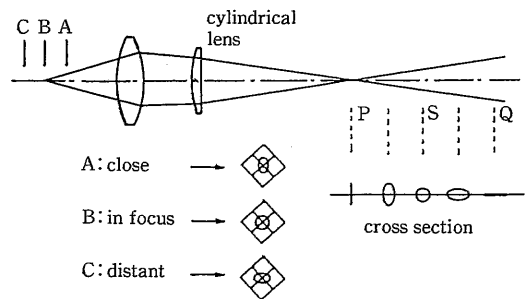


図4 非点収差法の原理

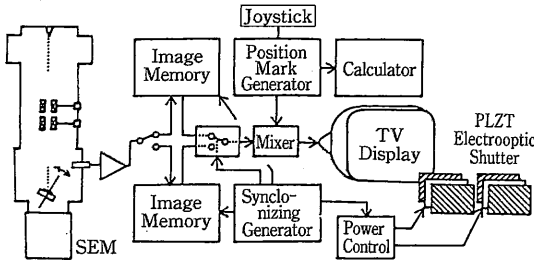


図5 SEMのステレオ画像構成の装置

最も適切な方法となっている。

いま一つの方法である非点取差の原理は図4に示されるものである。対象表面上の一点がスクリーン上に円筒レンズを介して結像される時、対象と結像の位置関係によって結像の形状が変わることを4分割センサによって検出するものである。実用に供されている検出系では、4分割センサの差動的な利用によって回折によるかく乱の影響の除去が図られ、nm台の測定が実現されている。

3 SEMによる測定

3.1 ステレオ像による方法

電子ビーム走査の左右画像の切り替えに対応して、これを観察する装置が構成できれば、ステレオ立体像の観察が可能となる。これをもとに観察される画像との関連で形状を求めることが試みられている。図5はその装置構成の例である。左右の視野に対応する画像は試料台を視野に対応して傾ける一方、この傾斜に同期して表示される画像も切り替えられる。更にこの切り替えに同期して切り替わる半導体シャッターを通して画像を見ることにより立体像が観察される¹⁹⁾。

ステレオ法による立体画像から試料の所要の形状を求めるには画像内でその形状に沿ってポインターを動かし、このときに得られる信号を処理して求める方法が取られている^{14,15)}。しかし、この方法ではポインターによる指示

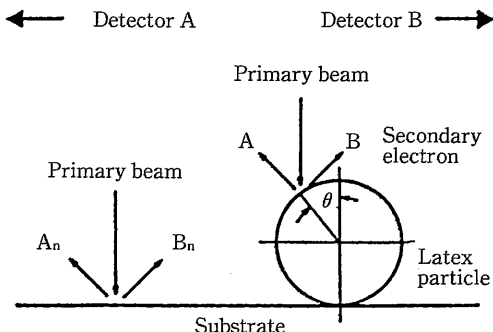


図6 二次電子信号による形状測定の信号取得

が正確には形状をたどり難いこと、較正が容易ではないこと等のために、精度の高い形状を求めるには至っていなかった。また、図5のような装置の較正も経済性、操作性の点から問題を残していた。

SEMによる画像観察は電子ビーム走査に対する二次電子、あるいは反射電子を信号とすることによって行われている。一般的には検出の感度がよく、観察画像に立体感があり、倍率を大きく取れる二次電子信号が用いられている。これらの信号の特性を利用して表面形状を求めることについては、Kimotoらが反射電子信号の性質が密接に形状の特性と結び付いており、これを利用することによってその可能性があることを指摘した¹⁶⁾。しかし、これが近似的な特性を含めて、実用性の高いものとして利用しうることの指摘は、筆者らによって行われるまで待たねばならなかった¹⁷⁾。

ステレオ画像法は最近になって金属疲労破壊面の評価の観点から研究が進められている。駒井らはBarneaらによって開発されたSSDA (sequential similarity detection algorithm)¹⁸⁾、Leeseらによる相関係数法¹⁹⁾が観察面の三次元形状を求めることに有効であることを確かめている²⁰⁾。酒井らは試料の傾斜を変えた2枚の画像を基に、パーソナルコンピュータによって表面形状を求めるに適切なアルゴリズムを開発した²¹⁾。この方法では、所定の範囲内で標準の画像と傾斜させた画像の点を対応させ、画像信号の強度の比較、傾き角、対応する二点間の距離等から形状が求められている。

3.2 二次電子画像による方法

ステレオ法は画像を構成する信号の形状に関する特性にはよらず、画像処理の手法に基づいて形状を求めている。したがって、基準とする区間の距離、試料を傾斜させる角度、画像信号の強度等によって求められた形状の分解能が決ってくる。二次電子信号の形状との関連は反射電子信号と形状との関連ほど明確ではなかったが、高

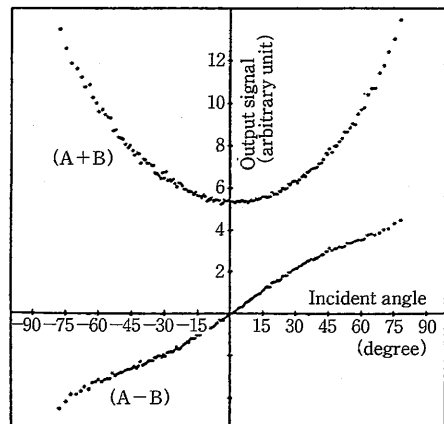


図7 傾斜角と二次電子信号の特性

倍率、高感度で画像の取得が可能であることに基づき、これを用いた表面形状測定法が開発されている²²⁾。

図6は二次電子信号によって表面形状を求める際の原理、較正を示している。二つの検出素子で平面、球面からの信号を求め、これらと傾斜角、信号の強度の関係が図7のように求められる球面上の面の傾斜角が

$$\tan \theta = k(A^2 - B^2) / (A_n + B_n)^2 \quad (1)$$

となることを明らかにしている。これによって走査に対する信号から粗さ断面曲線が求められている。ここで k は定数である。この方法はCDピットの形状測定に利用された。二次電子信号を用いるこの方法では、検出素子の配置が限定されていること、二次電子信号の性質上走査が一回に限られ、信号に伴う雑音の処理に平均化が用いられないこと、一般的に任意の方向の傾斜を持つ試料面にたいして処理法が明確でないこと、したがって三次元形状を求める手法を見いだすには至っていないこと、較正を傾斜角に対しておこなうがこれは必ずしも容易ではないこと等に問題を残している。

4 反射電子信号による方法

4.1 測定原理

菊川らは金属疲労破壊面を観察する装置として4個の反射電子信号検出素子を備えたSEMをミニコンピュータに結合し、面の傾斜と反射電子信号強度の較正曲線を用いて信号を処理、断面曲線を求めることを行っている²³⁾。これは非常に先駆的な研究であったが、面積、経費等の点でミニコンピュータがSEMにたいして占める割合が大きかったこと、較正曲線の特性が単純化されていなかったこと等が理由と思われるが、実用化には至らなかった。

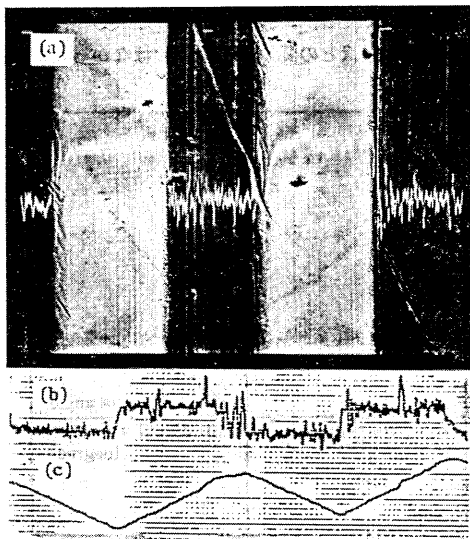


図8 三角山断面形状試料の反射電子画像と信号

佐藤らは三角山形状の断面曲線を有する粗さ試験片を用い、電子ビームの横方向走査にたいして得られる反射電子信号の強度は三角山の傾斜に比例することを確認した²⁴⁾。図8はその過程を示したものである。画像を構成している信号の波形が矩形波であることから、第一次近似として、信号を走査線方向に積分する簡単な処理によって断面曲線が求められることを明らかにしている。

図9は傾斜角と信号の強度の関係を求めたものであり、反射電子信号について検出素子が1個と2個の場合、二次電子信号の場合を比較している。反射電子信号の特性も完全な比例関係とは言い難いが、ある角度範囲では比例関係として差し支えない。検出素子を2個とした場合には特性の範囲が広がり、感度を上げることができている。二次電子信号の特性は、Cookらによっても示されている²⁵⁾が、反射電子信号とは全く異なり、比例関係は全く成り立っていないこと、角度が負の範囲に至っても信号が検出されていること等、形状の検出には有利ではない特性となっている。

三角山形状の試料についての二次電子画像もこれを示しており、通常の画像信号からは形状を全く推察できないものとなっている。

4.2 断面曲線の較正

図10は観察倍率は350, 150とした三角山粗さ試験片の反射電子信号と、これを積分して求めた断面曲線である²⁶⁾。これによれば、反射電子信号の振幅は観察倍率によっては変わっていない。これを積分して求められ断面曲線の振幅は等しくなるべきものであり倍率 K , L における信号を $R_K(I)$, $R_L(J)$ とすると

$$R_L(J) = (L/K) R_K(I) \quad (2)$$

によって相互の関係が与えられる。これは倍率の比率で較正できることを意味しており、断面曲線の高さを与え

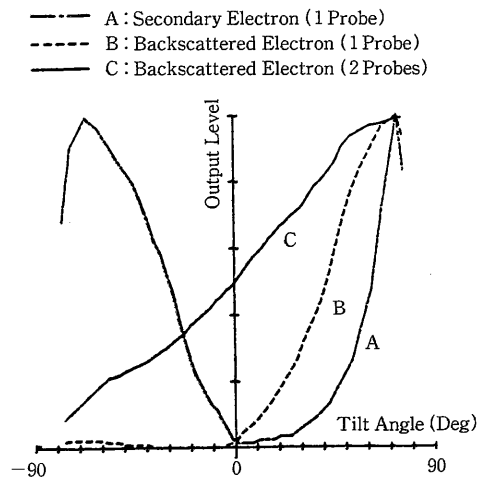


図9 傾斜角と反射電子、二次電子信号の特性

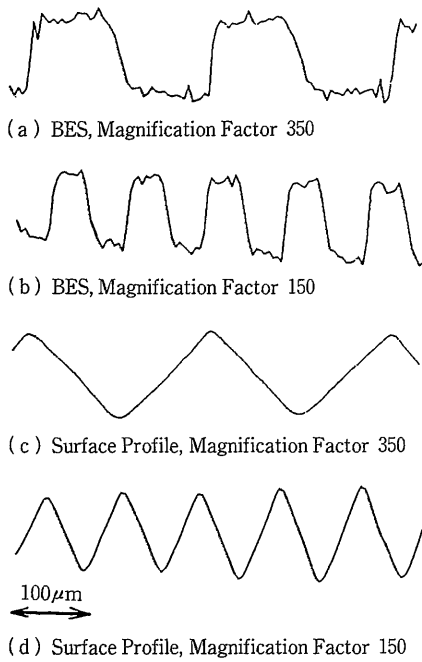


図10 異なる倍率に対する反射電子信号と表面形状

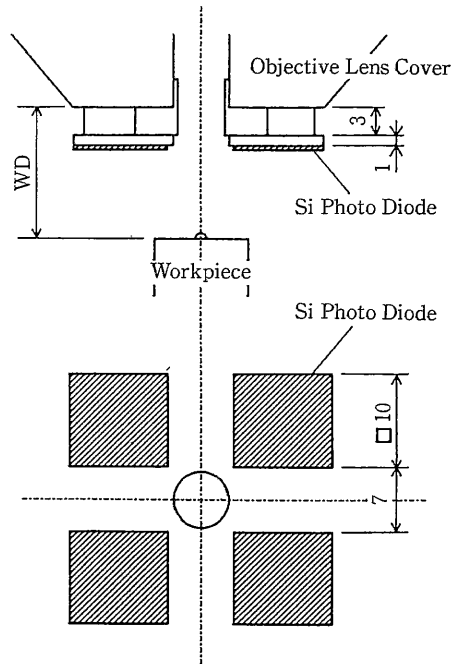


図12 試料と検出素子間の概念図

標準の試験片を試料の近傍に備えることによって、較正が可能となる。ここで、 I, J はおのおのの倍率における、画像位置に対応している。この関係を用い、干渉縞を蝕刻した資料によって断面曲線を測定し30nmの振幅を十分な感度で測定している。この結果は表面の傾斜が検出できていれば、nm台の測定も可能であることを示唆するものである²⁶⁾。

4.3 雑音の抑制

走査に対応した信号波形を観察するとき、雑音成分を多く含んだ波形となっている。加算平均によって雑音成分を除去した後積分し、初めて精度の高い断面曲線が求められることが明らかにされている²⁶⁾。図11は平均のための加算の回数と分散の関係を示しており、100回に至るまで、除去が進むことが示されている。しかし、処理時間との兼ね合いで実用的には10回を用いている。

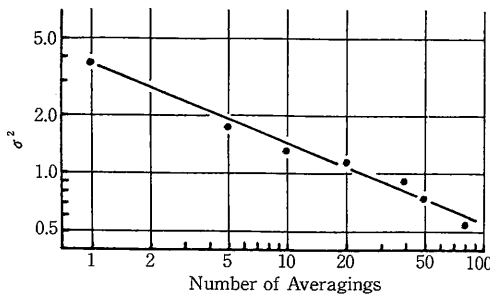


図11 平均回数と標準偏差

4.4 試料・検出素子間距離、ビーム加速電圧の影響

任意の方向に傾斜を持つ代表的な試料としては球を挙げる事ができる。通常これは長さの標準として用いられるが、表面形状の測定では傾斜の標準として用いている。球面を対象とした傾斜の検出はすでに菊川らによっても試みられている²³⁾が、座標変換等処理の容易さを考慮して、4個の検出素子を用いることが妥当である。

反射電子信号を用いて、表面形状を測定する過程では反射電子信号の強度は各種のパラメータの影響を受ける。パラメータの中では試料と検出素子間の距離、電子ビーム加速電圧が最も直接的なものと思われる。図12は検出素子の大きさ、配置、試料との距離(動作距離)等を概念的に示したものである²⁷⁾。図13は右上方に検出素子を置いて求められた小球の反射電子画像である。この画像に対して、反射電子信号の等強度分布を模式的に示したものが図14である。この図の二つの例は、加速電圧を一定にして動作距離を変えた場合を示している。動作距離、加速電圧の影響の特性を明らかにするために、図14(a)のHL断面の信号の強度の性質を調べ、動作距離をパラメータとして、図15を得ている²⁷⁾。信号の強度としては相対する検出素子の差信号を4個の検出素子から求められる信号の和で規準化している。表面形状の計測にとって好ましいのは、小球の頂点近傍、すなわち、横軸の値が零のところで十分な勾配を持ち、かつ直線的になることである。この観点からは動作距離14mmを標準としてよいことが示されている。

加速電圧をパラメータとして図15と同様の図を求めたものが、図16である²⁷⁾。加速電圧が小さいときに、検出感度が落ちて精度が悪くなり、やや外れた結果となっていることを除けば、加速電圧の影響はなく、すべて重なってしまうことが示されている。これは測定にとっては好ましい特性と言える。電子ビームによる試料の損傷を考慮すれば加速電圧は可能な限り低いことが望まれる。

4.5 法線検出による表面形状の計測

走査線と同期して得られる反射電子信号を積分して断面曲線を求める方法は簡単ではあるが、表面の傾斜が任意の方向を有する一般の試料に対しては必ずしも精度のよい方法ではなかった。このような場合に対しても表面形状を精度よく求める方法として、試料面の法線を求め、これをもとに所要の表面形状を求める方法が提示されている²⁸⁾。

図17はこの原理を示す概念図である。右側にある試料上の点Pにおける法線を求めるに、この点に対する4個の検出素子による信号強度の組が L_p のように求められるとする。標準小球に対し、 L_p と同じ信号強度の組となる点P'を探し、球として求まるこの点の法線をもって試料上Pの法線とするものである。以下試料の全面にこの操作を繰り返せばよい。これら法線群を満足する面の構成は、面を表す代数方程式とこれから求められる法線の条件に対し、計測された法線の条件を満足する係数を求めて面が求められる。面全体は、例えば9個の法線に

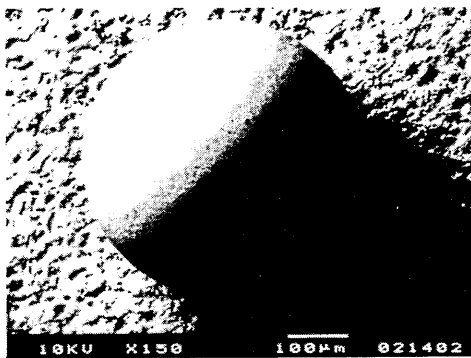
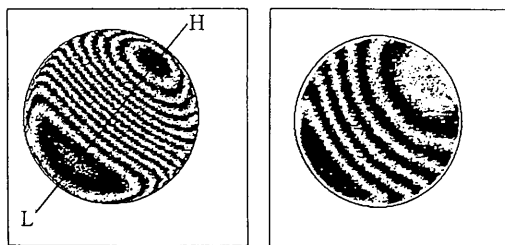


図13 小球の反射電子画像



(a) WD=14mm, EV=10kV (b) WD=22mm, EV=10kV

図14 小球の反射電子信号の等強度線図

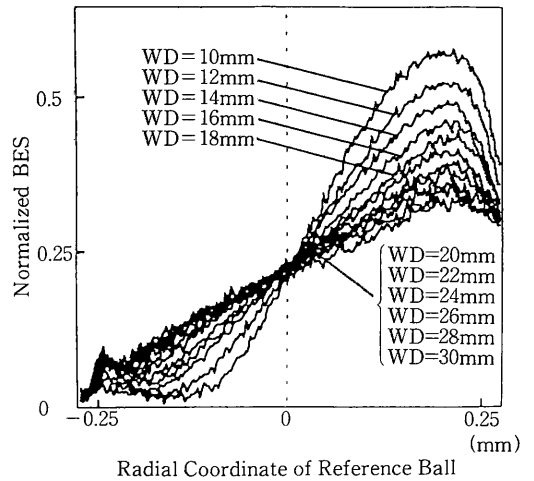


図15 動作距離をパラメータとする小球断面上の反射電子信号強度

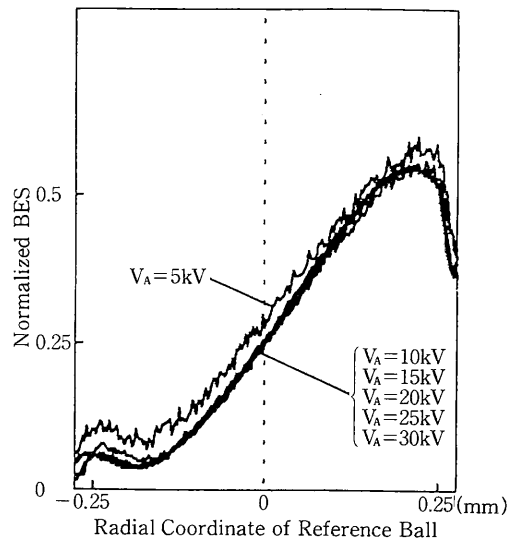


図16 ビーム加速電圧をパラメータとする小球断面上の反射電子信号強度

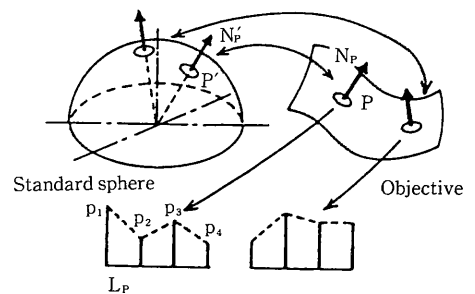


図17 法線測定原理

対して微少な面を求めこれらを全面にわたり接続することによって求められている。

この方法はヴィッカース圧痕の形状測定、ダイヤモンド刃先の形状測定等に用いられ、これまでの各種の微細形状測定にはない特徴を發揮している。図18はヴィッカース圧痕の反射電子画像である。図19はこれに対して求められた法線水平方向成分を図示したものであり、図20はこれをもとに求めた三次元形状である。圧子の頂点の開き角と圧痕の開き角の関係、材料による圧痕と周辺形状の関係等から測定の精度を検証することは今後の課題である。

図21はダイヤモンド工具の刃先先端形状のふかん図である。図22は図21の摩耗部と示されている部分について同様の測定を試みたものである²⁹⁾。図22の下部に示された断面曲線は立体形状の矢印で示された断面に関するものである。断面曲線中央部のくぼみは送りによる摩耗痕と見られ、サブ μm の形状がよく把握されている。図21と同様な測定の試みは二次電子信号によっても試みられているが、二次電子信号を用いることの問題点により図21

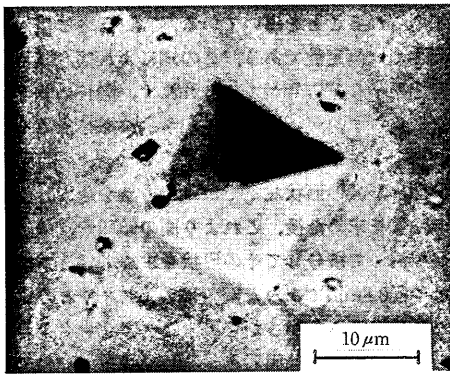


図18 ヴィッカース圧痕の反射電子画像

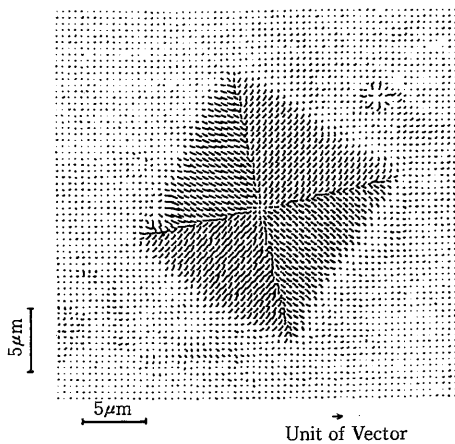


図19 法線の水平方向成分の表示

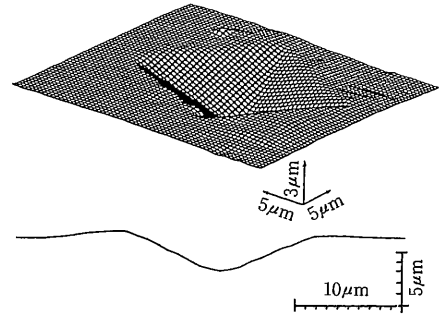


図20 図19から求められた三次元表示

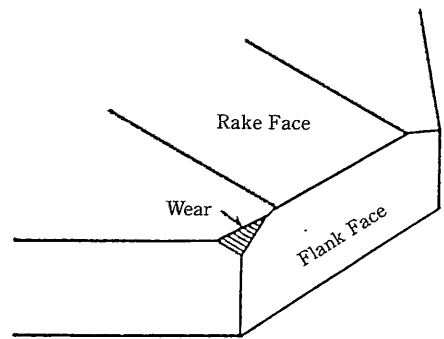


図21 ダイヤモンド工具刃先形状の概念図

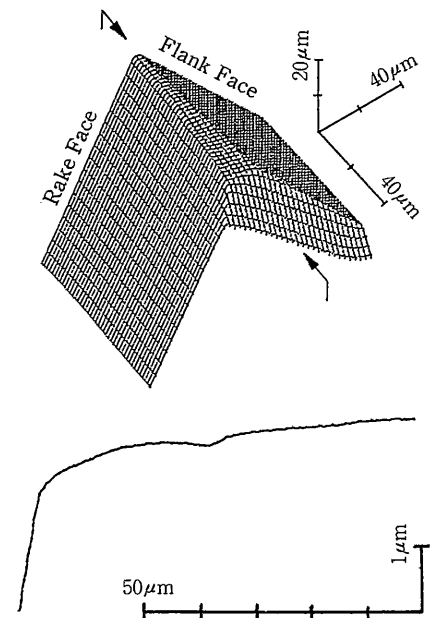


図22 刃先の三次元形状の測定結果

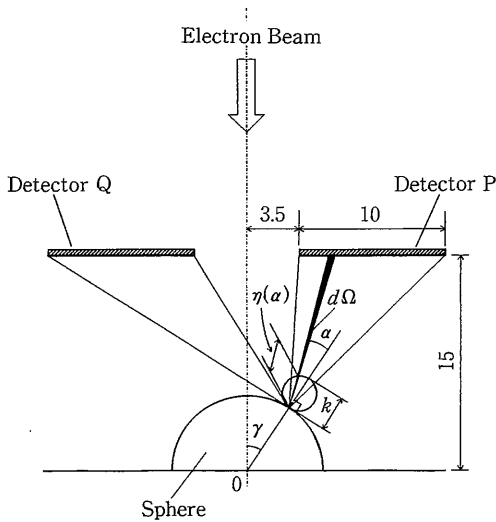


図23 反射電子発生モデル

に示されているほどの結果を得るまでには至っていない。

ダイヤモンド工具刃先形状の測定は、当初、解析的には2nmと言われる³⁰⁾切り刃の先端半径を求めることにあった。しかし、SEMによってダイヤモンドを観察するためにはAu等による表面の被覆が必要で、これが刃先形状を丸めてしまうこと、法線の情報から面を構成する際平均化の処理がなされること等により、SEMの分解能が問題となる以前に、高精度の測定が難しくなっている。この点の解決は今後の課題である。

4.6 反射電子信号発生過程のモデル化と非球面形状測定

法線を求めて表面形状を求める方法は非球面レンズの形状を求めることについても応用が試みられている³¹⁾。この場合、レンズ形状との関係でSEMの倍率は低い倍率が利用されている。この課題では参照試料である小球を標準として、実験と対比しながら反射電子信号が得られる過程を模擬するモデルを検討し、法線の検出を解析的な方法のみによることの可能性を探っている。図23は小球上の反射電子信号発生分布とそれが検出素子に到達する状況をモデル化したものである。電子ビームが当たった位置で反射電子は球状の分布をもって発生すると仮定し^{32,33)}、これが検出素子に到達した分に対して信号が発生するとしている。 $\eta(\alpha)$ が反射電子の強度分布で球状であるとする、

$$\eta(\alpha) = k \cos \alpha \quad (k \text{ は定数}) \quad (3)$$

とあらわされ、Pにより検出される信号の強度は

$$I = \int \eta(\alpha) d\Omega \quad (4)$$

として求められる。

図24は反射電子信号を基に法線を求める過程を説明するものである。二組の相対する検出素子の差信号を S_{24} 、

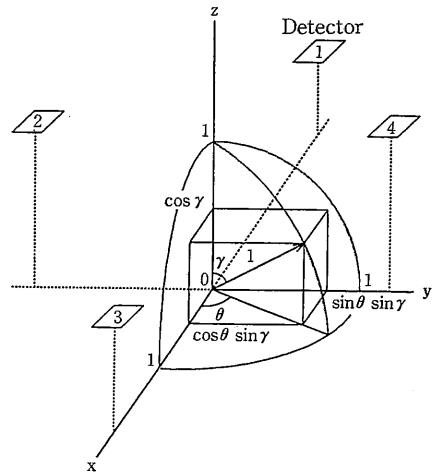


図24 法線導出モデル

S_{24} とすると、幾何学的な構成から、法線の傾斜角 γ 、方位角 θ は

$$\gamma = \sin^{-1}(\sqrt{S_{13}^2 + S_{24}^2} / \alpha) \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1}(S_{24} / S_{13}) \quad (6)$$

から求められることを導いている。ここで、 α は信号の強さに関する比例定数である。この式によれば、試料に対して検出素子の差信号が求められれば、図17に示す比較の方法によらず、解析的な関係から、法線を求めることが可能となる。

非球面レンズの形状測定ではこの方法を適用し、各半径上の法線を求めた後、これより面の傾斜を求め、これを半径に沿って積分してその形状を求めている。測定の範囲は半径0.8mmであったが、他の方法^{34,35)}との比較をするまでには至らなかったものの、ベアリング小球の測定との比較では、非球面形状、球面形状のおおのに特徴のある結果が求められ、特徴の把握が可能となっていることが示されている。

以上の研究によればmmの大きさの領域についてサブ μm の形状精度を有しているものの評価に有効なことが示されている。具体的にどのようなものが対象となるかは今後の問題であるが、機構要素のマイクロ化のすう勢を考慮するとき、これまで述べてきたSEMの特徴を生かした利用が期待される。

5 SEMによる方法の得失

以上に述べてきたSEMによる形状測定法の得失は次のようにまとめられる。まず反射電子信号の処理については、

- ・試料表面の断面形状がSEMの観察画面に対応して求められる。
- ・測定の分解能はSTMには及ばないが、サブ μm 台の測

定には容易に対応が可能である。特に反射電子信号を用いた方法は十分に評価の手段となりえる。

- SEMとしてはわずかの装置を付加することにより、新たな機能が得られることも有利な点である。
 - 観察画面は縦、横に走査されているから、これに対応して表面形状を求めることにより、微細な三次元形状を求めることが可能である。
- 一方、当面の問題点としては、
- ダイヤモンド切削されたAlディスク表面のような鏡面、フィルム面等に対しては、面の傾斜を検出する測定原理が機能しないこと、電子ビームによる表面の焼けが生じること等があり、これに対応できていない。
 - SEMが従来は観察の装置であり、測定装置として構成されていないため、操作性に問題を残している。
 - 試料と検出素子間の距離、非導電性試料に対するコート膜厚、電子ビーム強さ等による効果が完全には把握できていない。

等が挙げられる。また、二次電子信号を用いる方法は、SEMとしては一般的に二次電子信号が用いられており、反射電子信号に比べて感度がよく、高い倍率の観察が可能であることを特徴としている。しかし、二次電子信号を用いる測定では傾斜を校正した形で形状を求めている結果、ダイヤモンド刃先形状に見る先端角度を測定値として必要とするような場合、対象の角度をあらかじめ知っていることが必要なことは問題であろう。二次電子の信号の性質として二回目以降の走査に対しては表面汚濁の影響が出るため、信号の取得は初回の走査に限られている。これは雑音処理にも好ましい結果をもたらすとは思えず、二次電子信号の本来の性質が、形状との相関が薄いことと相まって問題点であろう。

原子、分子レベルの分解能を持つことから、STMの工学的な課題への適用が図られ、その利用範囲の拡大が試みられつつある。この意味ではSEMの利用による形状測定には限界が見える。しかしその特徴を理解した利用がなされれば、サブ μm 台の形状測定に特徴を発揮するものと思われる。SEMの長い歴史にもかかわらず、この試みは始まったばかりであり、斯界関係者の理解を得て、今後の発展が望まれる。(1990年3月29日受理)

参 考 文 献

- 1) G.ビーニヒ, H.ローラー: 走査型トンネル顕微鏡, サイエンス, 15-10, 昭60, 10-17
- 2) Schmaelz: Technische Oberflaechenkunde, 1936, Springer
- 3) 三井公之, 佐藤壽芳: 表面粗さの実時間測定に関する研究 (第1報 測定装置の試作と二, 三の基礎的検討), 機論, 44-377, 昭53-1, 321-331
- 4) 山関口博, 竹山秀彦, 村田良司, 松崎寛司: 切削仕上げ面粗さのインプロセス測定に関する研究, 機論, 43-374, 昭52-10, 3893-3900
- 5) J.C. Wyant, C.L. Kolipoulos, B. Bushan and D. Basila: Development of a Three-Dimensional Non-contact Digital Optical Profiler, Trans. ASME, Jour. Tribology, 108-1, Jan. 1986, 1-8
- 6) G.E. Sommargren: Optical Heterodyne Profilometry, Appl. Optics, 20-4, 15 Feb. 1981, 610-618
- 7) Y. Sakai, S. Ogata and S. Asai: Optical Measuring Instrument for Chatter Marks, Annals CIRP, 33-1, 1984, 407-412
- 8) 小沢則光, 河野嗣男, 三井公之, 武者徹, 宮本紘三: 非接触光学式微細形状測定ヘッド (HIPOSS-1), 精密工学, 52-12, 1986, 2080-2086
- 9) 三井公之, 坂井誠, 木塚慶次, 小沢則光, 河野嗣男: 高感度非接触粗さ計の開発, 精密工学, 53-2, 1987, 328-333
- 10) T.V. Vorburger: Measurement of Roughness of Very Smooth Surfaces, Annals CIRP, 36-2, 1987, 503-509
- 11) E.C. Teague, T.V. Vorburger and D. Maystre: Light Scattering from Manufactured Surface, Annals CIRP, 30-2, 1981, 563-569
- 12) 桜井功: 表面の微細形状測定の実際, ツールエンジニア, 23-8, 1986, 92-98
- 13) Y. Kato, S. Fukuhara and T. Komoda: Stereoscopic Evaluation and Three Dimensional Measurement for Scanning Electron Microscopy, Proc. 10th Ann. SEM Symp. March 1977, 41-48
- 14) 紀本静雄, 菅沼忠雄, 大島太市: 走査電子顕微鏡による凹凸の測定 第1報, 写真測量, 8-1, 1969, 8-11
- 15) A. Boyde: Photogrammetry of Stereo Pair SEM Images Using Separate Measurements from the Two Images, Proc. 7th SEM Symp., 1974, 101-108
- 16) S. Kimoto and H. Hashimoto: Stereoscopic Observation in SEM Using Multiple Detectors, The Electron Microscope, Ed. H. Mckinley, John Wiley & Sons, 1966, 480-489
- 17) 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, 49-438, 昭58-2, 227-234
- 18) D.I. Barnea and H.F. Silverman: A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration, Trans. IEEE, Computer, 21, 1972, 179-186
- 19) J.A. Leese, C.S. Novak and B.B. Clark: An Automated Technique for Obtaining Cloud Motion from Geosynchronous Satellite Data Using Cross Correlation, Jour. Appl. Meteorology, vol. 10, 1971, 118-132
- 20) 駒井謙次郎, 箕島弘二, 菊池純, 野口昌利, 金貴植: SEM画像の三次元画像構築技術, 機論A, 53-494, 1987-10, 1961-1965
- 21) 酒井信介, 森田英明, 岡村弘之, 高野太刀雄: 走査電子顕微鏡による微視破面の三次元解析 (第1報 小型計算機に適した三次元定量化アルゴリズムの提案), 機論A, 54-507, 1988-11, 2061-2068
- 22) T. Suganuma: Measurement of Surface Topography Using SEM with Two Secondary Electron Detectors, Jour. Electron Microsc., 34-4, 1985,

- 328-337
- 23) 菊川真, 城野政弘, 安井一雄, 安達正晴, 福田裕: 走査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
 - 24) 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, 49-438, 昭58-2, 227-233
 - 25) L.P. Cook, E.N. Farabaugh and C.D. Olson: Y-Deflection Modulated Secondary Electron Images in the Evaluation of Ceramic Surface Finish, NBS Spec. Pub., Dept. of Commerce, 562, 1979, 407
 - 26) 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(デジタル方式による), 機論C, 51-469, 昭60-9, 2381-2388
 - 27) 大堀真敬, 佐藤壽芳: 反射電子信号の作動距離および加速電圧に対する特性(走査電子顕微鏡による表面形状測定に関連して), 機論C, 55-515, 1989-07, 1771-1776
 - 28) 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
 - 29) 大堀真敬, 佐藤壽芳: 走査電子顕微鏡によるダイヤモンドバイト刃先の立体形状測定, 精密工学会春季大会講演論文集, N35, 1989/03, 791-792
 - 30) 井川直哉, 島田尚一: 超精密ダイヤモンド切削の精度要因, 最近の超精密加工技術に関するシンポジウムテキスト, 精密工学会, 昭58, 48-61
 - 31) 粉川良平, 佐藤壽芳: 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, 機論C, 55-515, 1989-07, 1777-1783
 - 32) C.W. Oatley: The Scanning Electron Microscope, Part 1, The Instrument, Cambridge Univ. Press 1973, 146
 - 33) H. Niedrig: Physical Background of Electron Back-scattering, Scanning, 1, 1973, 17-34
 - 34) 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, 1987, 520-530
 - 35) 吉住恵一, 沖野芳弘: 非球面形状の精密測定システム, 光学, 12-6, Dec. 1983, 450-454