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)

大堀 真 敬^{*1}, 佐藤 壽 芳^{*1}

Characteristics of Backscattered Electron Signals in Terms of Working Distance and Accelerating Voltage (With Regard to Surface Form Measurement by Scanning Electron Microscope)

Masanori O-HORI and Hisayoshi SATO

The influence of the working distance and accelerating voltage on the backscattered electron signal in an SEM, from which surface topology can be processed, was investigated. An SEM equipped with four detectors was used. The signal for a small, 0.5 mm steel ball, taken as a reference, was observed. The signal intensity was qualitatively represented by the pattern of stripes due to the level of the intensity on the sphere surface. The level was observed along the circle passing through the pole of the ball and crossing the stripes. Looking at the normalized signal, which is a signal divided by the sum of those from four detectors, we found the most preferable property at a distance 14 mm from the sensitivity and the sufficient intensity of the signal view point. The normalized signal for the accelerating voltage could be adjusted to a single characteristic. This means that it could be chosen by taking the sensitivity and the effect of the beam to the materials into account.

Key Words: Manufacturing Technology, Measurement, Precision Machine, Electron Microscope, Backscattered Electron, Electron Beam, Accelerating Voltage, Working Distance

記 号

 V_b : 電子ビーム加速電圧 WD : 対物レンズカバーと試料間の距離 r : 小球を平面上に射影したときの中心からの距離 I_n : n 番めの検出器からの信号 I_n' : 正規化された n 番めの検出器からの信号

1. は じ め に

近年、電子機器製品に代表される機器の小形化、高精度化が進む状況下において、品質管理上微細表面形状を測定する必要性はますます強まっている。著者らは、走査電子顕微鏡 (SEM) の反射電子信号を用いて、画像観察と同時に μm 以下の測定分解能で表面粗さ断面曲線、表面形状を測定する方法について研究をすすめてきた⁽¹⁾。すなわち、SEMの反射電子信号が試料表面の傾斜角の情報を反映していることにもとづき、基本的にはこれを積分して表面形状が求められることを明らかにしてきた。最も一般的な性能を持つ装置とし

ては、反射電子検出器 4 個を備え、これらから得られる画像信号を処理することにより、微細表面の三次元形状を測定、表示できるようにしている。その結果、横分解能を高くできるばかりだけでなく、高さ分解能も高くできる方法であることを示してきた。

通常の SEM 画像の観察時においても作動距離 (WD) や加速電圧 (V_b) などがパラメータとなるが、これまでの研究では、これらと反射電子信号の形状情報との間の関係は必ずしも明らかではないままに、測定の可能性が検討されてきた。本研究では、標準試料としてミニチュアベアリング用の小鋼球を用い、 WD と V_b が反射電子信号の特性に与える影響について調べ、表面形状測定に際し選択すべき条件を明らかにした。

2. 処 理 装 置 の 構 成

図 1 は本研究に用いた装置の構成である。画像観察用の一般形 SEM に 4 個の反射電子検出素子を設置し、これから得られる信号を A-D 変換して、パーソナルコンピュータに取込み処理できるようにしている。装置の構成に留意した諸点は、

(1) 検出素子は感度の高いものを用い、雑音の少ない増幅器と併用して、大きいゲインで信号検出ができ

* 平成元年 4 月 4 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 10 月 3 日。

^{*1} 正員、東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)。

るようにすること。

(2) 電子ビームによる試料の熱損傷や炭化などの変質や表面帯電を極力さけるため、ビームの走査および信号取込みは、観察モードの速度、あるいはこれに近い速度に対応できるようにすること。

(3) 外部クロックによって電子ビームを走査する一方、このクロックによって画像信号をA-D変換、計算機へ取り込むようにし、信号の繰返し取込み位置の安定化をはかるようにすること。

などである。以上に留意して構成した装置各部について次に説明する。

SEMには(株)日本電子製JSM T-330を使用した。主要な性能は、分解能:6 nm, 加速電圧:0.5~30 kVの範囲で32段階の可変, 作動距離:8~40 mmの範

図1 走査電子顕微鏡のシステム構成

図2 検出素子の配置

囲で連続可変, $\phi 5''$ の試料が観察可能等である。

検出素子には(株)浜松フォトニクス製のPIN形SiフォトダイオードS 1723の電子検出感度を向上させたものを用いている。素子は $\phi 10$ mmの通常より大きい正方形として検出効率を上げるようにし、留意点の(1)を生かすことにはかっている。4個の検出素子是对物レンズカバー下部に図2に示すような配置とした。検出素子からえられる信号の初段増幅には留意点(2)に配慮し、入力インピーダンス $10^{11}\Omega$, スルーレート $300\text{ V}/\mu\text{s}$ の特性を有する(株)インターシル製の演算増幅器MAX 452を使用した。

A-D変換器には(株)ソニー製のBX 1300を用いている。その分解能は8 bit, 最大変換速度は、125 nsである。計測の対象とする画像は、クロックパルス各256点からD-A変換されて作られる鋸歯状波によって水平、垂直方向走査を行い、構成している。各検出素子の信号を同時性を保ってA-D変換するため、検出素子それぞれにA-D変換を接続し、同一のパルスですべてを駆動した。この方式により、走査位置とこれに対応する画像出力が同期してえられることとなり、留意点(3)が実現されている。なお取り込まれた画像信号のデータ間の試料表面上の距離は、倍率50 000倍にたいして9 nmにあたっている。

信号処理システムはパーソナルコンピュータに(株)日本電気製PC 9801 VMを使用し、A-D変換されたデータの取込みに(株)I・Oデータ製の内外共用メモリーPIO 9622を接続している。取込みに際し、信号の雑音成分を低減するため、画像データは8画面分を連続して取り込み、平均化している。

形状の標準試料とした鋼球は、(株)天辻鋼球製の直径 $500\mu\text{m}$, 真球度 $0.3\mu\text{m}$ のものである。図3は一つの反射電子検出素子からえられた画像である。検出素子方向を光源としたことに等価な陰影の画像となっている。4個の検出素子それぞれから同様の画像がえられ

図3 小球の一検出素子による反射電子画像

る。しかし、このような画像は信号の詳細な変化を把握するには適切ではない。この変化に注目するため画像信号を256段階の階調とし、8階調ごとに白黒に色分けして示した結果が図4である。しまは輝度の等しい場所を表し、図3の画像では見えていない輝度の変化が明りょうにわかる。図5は図4のHL断面の輝度変化を模式的に示している。

以下では、この断面上で WD , V_0 をパラメータとして反射電子信号の性質を調べ、形状測定をすすめる場合の適切な条件を明らかにすることについて検討した。

3. 作動距離に対する特性

像を観察する場合、 WD を小さくすると分解能が高くなる反面、焦点深度が浅くなる。この場合、試料が対物鏡に近づくことにもなり、試料の移動や回転に際し顕微鏡きょう体に接触しやすく、損傷の恐れが生じる。以下では、 WD を10~30 mmの間で変化して反射

図4 図3の等輝度図による表示 (取出し方向)

図5 図4のHL断面の信号変化の模式図

(a) $WD = 16$ mm

(b) $WD = 22$ mm

(c) $WD = 26$ mm

(d) $WD = 30$ mm

図6 WD を変えたときの等輝度図 ($V_0 = 10$ kV)

電子信号の性質を調べている。

3.1 1検出素子の出力信号の特性 表面形状の計測には4個の検出素子からの信号を必要とするが、その基本的な特徴を調べるために、まず1個の検出素子からの信号にたいし WD の影響を明らかにすることを試みた。

図6は、 V_0 を10 kVに保ちながら WD を16, 22, 26 mmおよび30 mmとしたときの等輝度図である。 WD が大きいほどしまの間隔が広くなり、かつ、しまが強く湾曲している。しまの間隔が広くなることは信号の変化が緩やかになること、すなわち傾斜角の変化にたいする信号の変化の割合が小さくなることに対応している。またしまの湾曲の度合いが強いことは、HL断面に直角方向の傾斜にたいし、輝度の変化が大きいことに対応している。 WD が最も小さい10 mmでは、球頂点付近のしまはHL断面に直角方向にほぼ直線的に並んだ形である。これは球の表面でHL方向の輝度がHLに直角方向の傾斜に関係なく決まることを意味しており、球面を標準として面形状を決める場合に、その性質が単純化されていると見ることで有利な点である。

図7は V_0 を10 kVとして、1検出素子から得られたHL断面上の反射電子信号の強度を、 WD をパラメータとして求めたものである。横軸には r をとっている。 WD を大きくしたとき、すなわち試料を対物レンズから離しておいたとき、 $r > 0$, すなわち検出素子に近い側で信号の強度は、 WD が小さい場合に比べて小さくなっている。 WD を小さくしていくと検出効率が上がり、信号の強度は大きくなり、 $WD = 14$ mmでは最大値を生ずようになっている。しかし、 WD を

図7 WD を変えたときのHL断面上の反射電子信号の強度 ($V_0 = 10$ kV)

さらに小さくし、10 mm までに近づけると、この最大値自体が小さくなっている上、 r の全領域にわたって $WD=14$ mm のときより強度が小さくなっている。これは、試料が検出素子にあまりに近づきすぎて検出素子から試料を見込む角度が小さくなり、検出素子に到達する電子が少なく、検出の効率が悪くなっていると考えられる。これらの特性を考慮すると、本研究の装置においては、 $WD=14$ mm の場合 r の全領域にわたって最も効率のよい検出ができているとみなせる。

図 8 の実線の曲線は WD を横軸にとり、図 7 の $r=0$ における信号出力の変化を示している。図 7 の特性からも出力が最大となる WD があることは示唆されているが、このような整理によって、 $WD=16$ mm 近傍で $r=0$ の出力が最大となっていることがわかる。なお、すでに説明し以下でも明らかにするように、形状計測に適切な WD としては r の全般にわたる特性も考慮して決めることが必要である。

電子ビームに対して反射電子が発生する過程、これが検出素子に到達して信号が得られる過程などが適切に模擬できれば、SEM による形状計測法自体の改善につながるの観点から研究がすすめられているが⁽²⁾、図 8 の点線の曲線は提示されている方法によるシミュレーション結果である。詳細の傾向には問題が残されているが、全体としてはかなりよく一致している。

3.2 正規化された信号の特性 反射電子信号には試料表面の形状による情報のみならず、試料組成に依存した情報が含まれている。したがって形状を求めるためには、組成に関する情報を抑制し、形状に関する情報のみを分離することが必要である。このために式(1)に示す関係によって信号を正規化することが従来から行われており⁽³⁾、本研究でもこの正規化による検討を試みている。

$$I_n = I_n / \sum I_n \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで $n=1, \dots, 4$ とし、 I_n は n 番めの検出素子から

図 8 WD に対する球頂点における反射電子信号出力

えられる信号、 I_n は正規化された信号である。

図 9 は正規化された信号に対する等輝度図である。図 6 と比較してしまの湾曲が少なくなり、球の中心付近では HL 断面に直角方向にしまがそろい、直線的になっていることが特徴的である。 WD が大きいほどしまの間隔が広くなり、傾斜の変化に対して感度が低くなっている。 WD が 10, 16 mm の場合を比較すると、しまの間隔は前者が密である。しかし、湾曲の度合は後者が少なく、試料位置としては WD をあまり小さくとらないほうがよいというすでに述べた観点を説明するものとなっている。

図 10 は正規化された信号について図 7 と対比され

図 9 WD を変えたときの正規化された信号の等輝度図 ($V_b=10$ kV)

図 10 WD を変えたときの HL 断面上の正規化された反射電子信号の強度 ($V_b=10$ kV)

る特性である。 $r=0$ すなわち球頂点では、すべての WD に対する特性が正規化された値として 0.25 を通っていることが示されている。これは、球の頂点で傾斜は零であり、4 検出素子に等しい信号が検出されていると考えることができる。いずれの WD についても $r=0$ を中心に直線的な特性となっているが、 WD が小さいほどその配は大きく、試料表面の傾斜角に対して感度が大きくなっている。すでに述べたように、感度を重視する面から $WD=14\text{ mm}$ を推奨値としているが、図 10 によれば r の両端で線形の範囲が狭まっており、この点では必ずしも有利にはなっていない。

一方 WD が 18 mm より大きい場合、直線的な部分が広くなり、 WD の違いによる差も小さくなっている。すなわち、試料を設置するときに、 WD の設定に少々差が生じて、処理する信号の性質には変化がないことになる。これは計測の過程としては扱いやすい特性である。しかし、本研究で使用した検出素子と増幅器の特性としては、精度よく計測するために十分なゲインをえるには至らなかった。この点が改善されれば、 WD の位置を大きくした場合に測定しやすい条件の信号取得が可能となることが期待される。

以上では 1 個の検出素子からの信号を正規化した場合について検討を行ったが、他の 3 個の検出素子からの信号についても、検出素子と試料の相対的な位置関係を考慮することにより同様な結果がえられている。

4. 加速電圧に対する特性

SEM を用いた通常の像観察では、試料の熱損傷、

(a) $WD=14\text{ mm}$, $V_a=10\text{ kV}$ (b) $WD=14\text{ mm}$, $V_a=30\text{ kV}$

(c) $WD=20\text{ mm}$, $V_a=10\text{ kV}$ (d) $WD=20\text{ mm}$, $V_a=30\text{ kV}$

図 11 V_a を変えたときの等輝度図

炭化などによる変質、表面帯電などとの関連を考慮して V_b が選択されている。これまですすめてきた研究では、SEM の特性による制約もあり、形状測定に適切な V_b は不明のままであった。以下では WD の場合と同様、小球試料を対象に、等輝度図、その HL 断面の信号特性によって反射電子信号の性質を調べた。

図 11 は V_b を 10, 30 kV とし、それぞれに WD を 14, 20 mm とした場合の等輝度図である。この場合、 $V_b=30\text{ kV}$ の場合の信号出力は $V_b=10\text{ kV}$ の場合の約 10 倍と大きくっており、等輝度図は同一のゲインでは表示できていない。したがって図 11 では 10, 30 kV の場合にたいして同程度のしま間隔に描かれているが、しま当たりの輝度差は両者では異なっている。

図 12 V_a を変えたときの HL 断面上の反射電子信号の強度

図 13 $V_b=30\text{ kV}$ 時にたいする信号の強度比

図 14 V_a を変えたときの HL 断面上の正規化された反射電子信号の強度

V_a の相違による影響としては、30 kV の場合にしまの輪郭が明りようとなっていることがあげられる。これは信号出力が大きく、信号の SN 比がよいことによる結果である。しまの湾曲の形状については V_a による相違は小さいといえる。すなわち、適切な正規化を行えば、反射電子信号と小球の表面傾斜角との関係は、 V_a にかかわらず一定となることを意味している。

図 12 は HL 断面上の出力信号の大きさを示しており、 V_a の増加に伴い出力が増加していることがわかる。しかし、いずれの場合でも $r=0$ を中心とした領域で直線的な関係となっている。図 13 は $r=0$ における出力に注目し、30 kV の場合の出力に対する他の場合の比を示している。図 13 によれば、信号出力比は V_a の増加とともに増加しているが、わずかながら非線形性が現れている。また 5 kV で出力比は零に等しく、これ以下の加速電圧は当面の形状測定では無視して差し支えない。

次に 4 個の検出素子から得られた信号について、式 (1)により正規化した結果を図 14 に示す。5 kV の場合を除いて、他のすべての特性が一致している。WD が変わった場合、こう配は変わってくるものの、正規化された特性が一致することでは同様に示される。すなわち、正規化された信号は、 V_a にかかわらず一定の特性となることがわかる。これは形状測定をすすめるうえで、その過程を簡単化するに効果的な特性である。なお図 14 で 5 kV の場合の特性が他の曲線群から外れているが、これは信号出力が小さく、誤差が大きくなっているためと見られる。

5. ま と め

著者らはこれまでの研究により、SEM の反射電子信号を用いて表面形状を測定できることを示してきたが、この際 SEM の操作条件による信号への影響については必ずしも明確ではなかった。本研究では、表面傾斜角の変化の点で標準的な試料として精密微小鋼球を用い、作動距離、電子ビーム加速電圧に注目し、これらと反射電子信号の性質の関係について調べ、いくつかの特徴を明らかにした。結果は次のようにまとめられる。

(1) 球の頂点を通り検出素子方向の球面上の信号強度に注目するとき、これを正規化した作動距離をパラメータとする曲線群は、球の頂点位置において一点で交わる。またこれらの曲線群は球の頂点近傍で直線的な特性である。作動距離を大きくしたとき、直線となる領域は広がるが、信号検出の感度が十分でなく、実用性の点では推奨されない。

(2) 球頂点における反射電子信号出力は、作動距離が約 18 mm のときに最大値を示す。しかし、線形性が保たれている範囲、この範囲の信号出力の大きさを考慮して作動距離としては 14 mm 前後が推奨される。

(3) 作動距離を一定とし、加速電圧をパラメータとして (1) 同様に求められる正規化された信号の曲線群は、加速電圧にかかわらず同一の特性となることが示された。この場合、加速電圧を大きくすることにより反射電子信号出力も大きくなり、SN 比をよくする点で有利であるが、適切な加速電圧は試料の材質との関連で選択されることが期待され、今後の課題である。

本研究をすすめるにあたり元本学大学院学生 (現(株)島津製作所) 粉川良平君に装置製作の援助を受けた。また研究の過程における同君との議論は大変有益であった。本所 鈴木和彦技官には論文の取りまとめに協力を得た。記して感謝する。本研究は一部科研 61850023 によってすすめられた。記して関係各位に感謝する。

文 献

- (1) 大堀・佐藤, 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, **52**-483, C (1986), 2974-2981.
- (2) 粉川・佐藤, 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, **55**-515, C (1989), 1777.
- (3) 菊川・城野・安井・安達・福田, 走査電子顕微鏡による疲労損傷についてのミクロな定量的測定, 材料, **23**-252 (1974), 708-715.