

## 作動距離、加速電圧と反射電子信号の関連について ——走査電子顕微鏡による表面形状測定——

Correlation of Backscattered Electron Signal with Working Distance and Accelerating Voltage  
——The Surface Form Measurement using SEM——

大 堀 真 敬\*・佐 藤 壽 芳\*

Masanori OHHORI and Hisayoshi SATO

### 1. は じ め に

著者らは走査電子顕微鏡 (SEM) の反射電子画像の信号を処理することにより、測定位置の画像確認と同時に表面形状がnm台の深さ方向分解能をもって測定できることを明らかにしてきた。画像観察の機能を主体とする従来のSEMでは、電子ビームの加速電圧、電流、作動距離と称される試料・対物レンズ絞り間距離 (以下ではWDとする) 等がパラメータとなるが<sup>1)</sup>、これまでの経過では<sup>2)3)</sup>、画像信号とこれらのパラメータとの関係について明確ではなかった。以下では、電子ビーム加速電圧、WDに注目し、鋼球を対象にこれらと反射電子画像の信号との関係について検討を試みた。

### 2. 測定装置の概要

使用したSEMはJSM T330 (㈱日本電子製) である。主な仕様は分解能: 6 nm, 作動距離: 8~40mmの間で連続可変, 加速電圧: 0.5~30kVの間で32段階の可変, 試料室: 5インチまでの試料が装てん可能である。反射電子検出器はPIN型シリコンフォトダイオードS1723 (㈱浜松フォトニクス製) 4個を対物レンズカバー下面に図1のように配置している。各検出器の有効受光面積は100mm<sup>2</sup>であり、使用に際して電子の検出感度の向上を図るために表面の保護層を除去している。

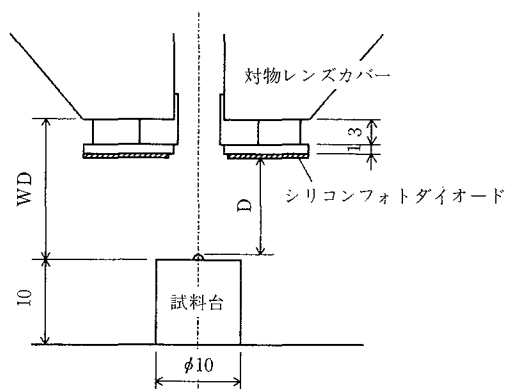
信号処理システムとして、コンピュータにPC9801VM (㈱日本電気製), ADコンバータに分解能8ビットのBX1300 (㈱ソニー製), 内外共用メモリーとして容量4MBのPIO9622 (㈱I/Oデータ機器製) を用いている。

試料としてφ0.5mm, 真球度0.3μmの軸受用鋼球 (㈱天辻鋼球製作所製) を用いている。

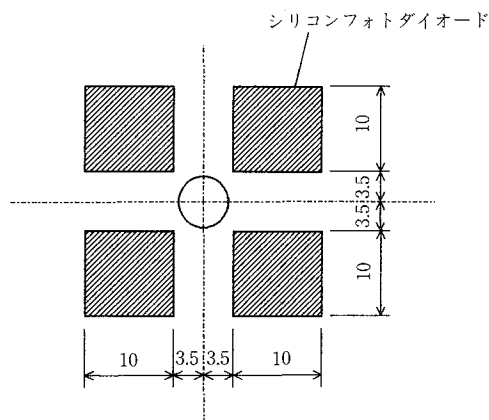
### 3. 作動距離と反射電子信号

図2は検出器からえられる鋼球の反射電子信号の陰影画像である。信号の変化の様子を明確にするために輝度

に応じて明暗をつけた縞状の等輝度図としたものが図3 (a), (b)である。(a)はWDが14mmの場合, (b)は同じく22mmの場合の反射電子信号にたいするものである。図3 (c)は同図 (a)中に示したHL方向の信号の変化を示したものであり、中央が球の頂点にあっている。H



(a)側面図



(b)反射電子検出素子の配置平面図

図1 試料室内の配置

\*東京大学生産技術研究所 第2部

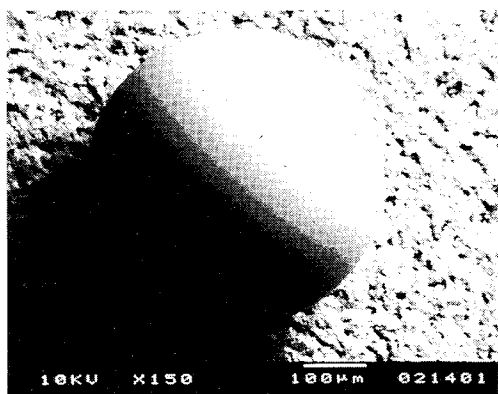


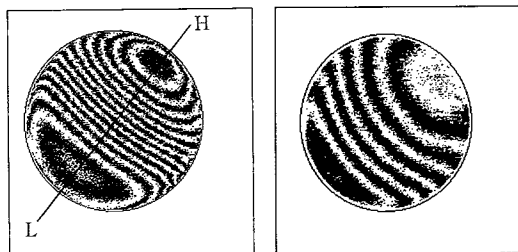
図2 鋼球の1つの検出器からの反射電子画像  
(加速電圧=10kV, WD=14mm)

方向は、陰影画像で明るく、信号出力が高くなっている部分の方向であり、Lはその反対に暗い部分がある方向である。

上記等輝度図はメモリに取り込まれたビットデータから直接描画しており、較正された振幅としての比較はできないが、傾向は特徴が十分に把握できるものである。図2(a)と(b)を比較すると、どちらも陰影の様子が最輝部あるいは最暗部を取り囲むように連続的に変化している。しかし、両者では縞の幅、縞の湾曲の様子が違っている。特に縞の湾曲している様子がWDによって異なっているのは、試料表面における接平面の傾斜角に対し信号強度の変化の割合が一定ではないことを表している。表面形状の情報を含む反射電子信号が、表面の傾斜角に依存していることに基づいて表面形状を求めてきているが、信号の強度と表面の傾斜角との関係を求めるにあたっては、WDをそろえることが望ましいことを意味している。

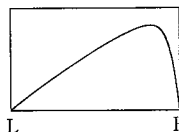
図4は図3に示したHL方向の信号の変化について、WDをパラメータとして調べた結果である。WDが14mm以上では信号出力は低くなり、HL断面にわたる信号の形状も平坦になっている。すなわちWDについては14mm近辺で最も感度が高い。分解能の点ではWDが小さいほうが有利であるが、試料、試料台が反射電子検出素子に接触する恐れが生じることについては注意を要する。

WDが14mmの近辺で信号出力が最大になる理由としては、WDが小さくなるにしたがい、検出素子に対してビーム照射点が死角となる範囲が生じることによって、このことは、電子ビームが照射された時に試料表面から発生する反射電子と、これに基づいて反射電子信号が生成される過程を模擬する試みによっても検証されている。



(a) WD=14mm, 加速電圧=10kV

(b) WD=22mm, 加速電圧=10kV



(c) BL方向の信号の変化の模式図

図3 WDの違いによる球に対する反射電子信号の等輝度図

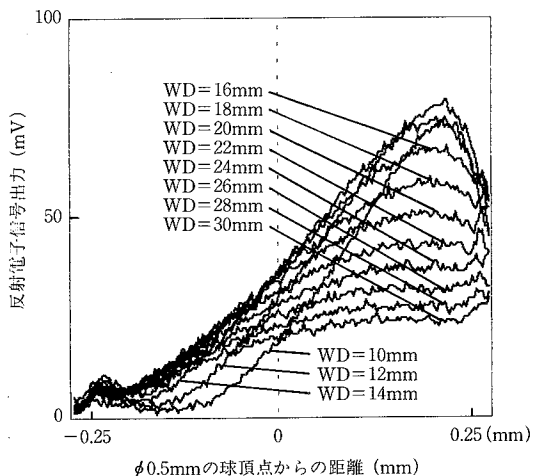


図4 WDの違いによる反射電子信号の強度変化  
(加速電圧=10kV)

反射電子信号の検出効率を高めること、試料中の材質の変化による影響を除去すること等を目的として、試料に対して相対する検出素子の差信号を求めること、4検出素子からの信号の総和でこれらの信号を除し、正規化することが行われている<sup>4)</sup>。図5は、図4の特性に後者の方法を適用した結果である。

鋼球の頂点ではいずれのWDに対しても一定の値を通り、さらに球頂点からの距離にたいし直線的な比例関係で求められている。この結果はWDによって特性に相異がでることを示しているが、WDを大きくした場合に、直線の範囲が広がり、特に球頂点からの距離の負側でこの傾向が著しく、かつ、WDにかかわらず同一の特性に近づくことが示されている。このことは信号を処理する面

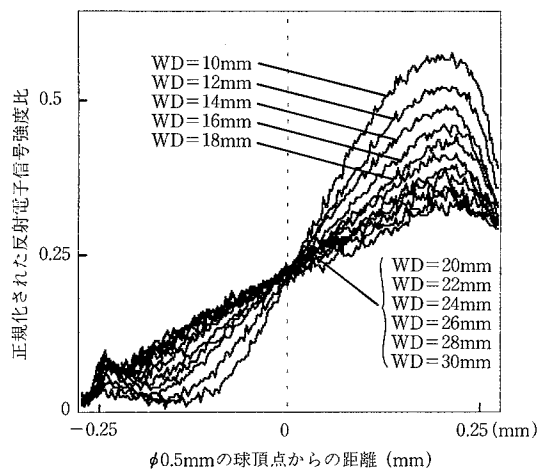


図5 WDの違いによる正規化された反射電子信号の強度変化 (加速電圧=10kV)

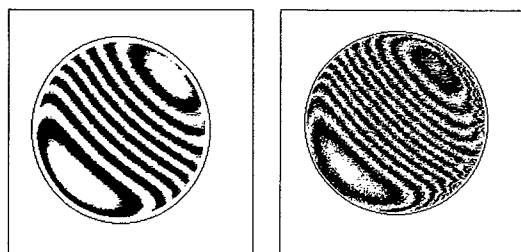
では有利な性質であるが、一方で耐雑音特性の劣化が著しい。これらの結果を考慮して測定には14mmのWDとすることができる。

#### 4. 加速電圧と反射電子信号

加速電圧については5～30kVの間で変化させ、反射電子信号に及ぼす影響について調べた。使用したSEMでは5kV以下の加速電圧の設定も可能であるが、この範囲では反射電子信号の出力はほとんど検出できず使用していない。

10kVと30kVの場合の球全体にわたる反射電子信号の様子を図6に等輝度図によって示す。図3と同様縞の間隔は両者でやや異なっているが、縞の形状は同様のパターンとみてよい。縞の状態は10kVのときに比べて30kVのほうが明瞭になっている。これは30kVの信号出力が大きく、耐雑音特性の点では優れていることによって、図7はWDを14mmとし、図3のHL方向に対応した1検出素子からの反射電子信号を示している。加速電圧の増加にしたがって信号出力も増加しており、増加の様子は球上のどの位置においても加速電圧に対して比例的に増加している。図8は加速電圧の増加に対する球の頂点における信号出力を調べたものである。30kVのときの値を1として他の場合の割合を示しているが、ほぼ直線的な関係となっている。この特性はWDを20mmとした場合についても全く同じといってよい結果が求められている。

次に4検出器の総和で各検出器の出力を正規化した結果を図9に示す。図9ではすべての線がほぼ一致しており、球面の大半に沿って得られる反射電子信号の特性は



(a) 加速電圧=10kV (b) 加速電圧=30kV

図6 加速電圧の違いによる球に対する反射電子信号の等輝度図 (WD=14mm)

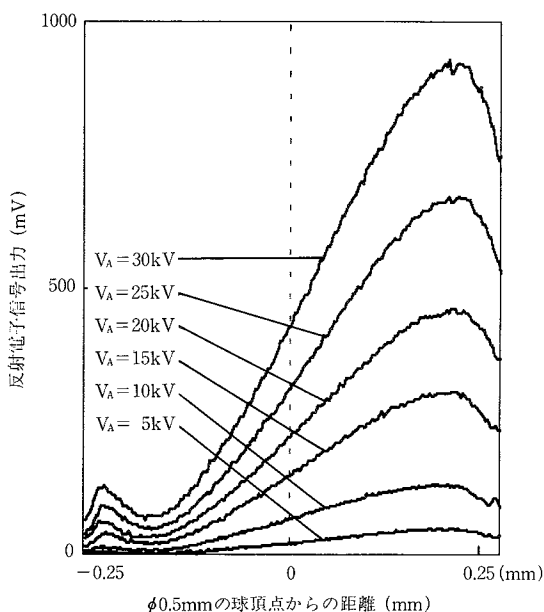


図7 加速電圧の違いによる球に対する反射電子信号の強度変化 (WD=14mm)

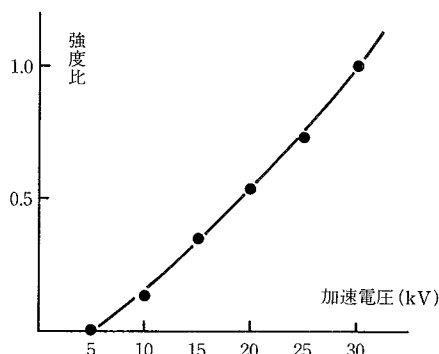


図8 球の頂点における加速電圧による出力変化の割合 (加速電圧は30kVを基準とする)

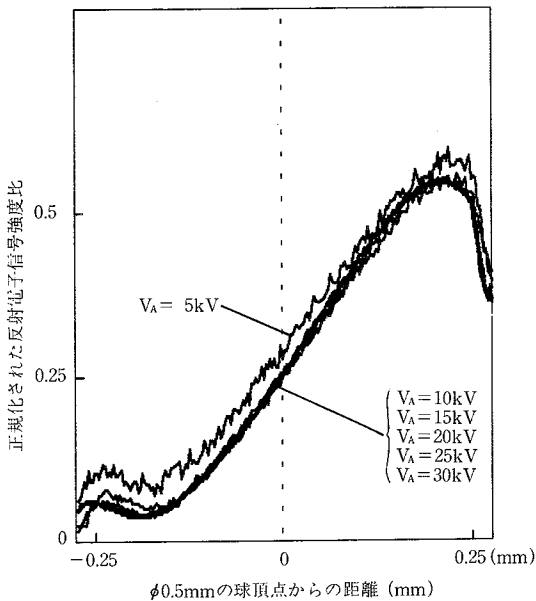


図 9 加速電圧の違いによる正規化された反射電子信号の強度変化 (WD=14mm)

加速電圧にはよらないことがわかる。なお、5 kVの線は他の曲線群から少しずれているが、この場合信号の雑音成分が多いため等輝度図の縞があまり鮮明でなく、HL方向の決め方に誤差が生じたことによっている。

以上鋼球のように帯電や損傷等が問題にならない試料の場合に、正規化された反射電子信号は加速電圧によって顕著な影響を受けないことが示された。

## 5. ま と め

SEMの反射電子信号を用いて表面形状の測定が可能なることを示してきたが、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にされていなかった。本研究では、表面傾斜角に変化をもつ試料として鋼球を対象とし、作動距離ならびに、電子ビーム加速電圧と反射電子信号の関係について調べた。結果は次のようにまとめ

られる。

- 1) 球の大円について作動距離をパラメータとして求められる相対する検出素子からの正規化された信号群は球の頂点において一点で交わる。これらの信号群は球の頂点近傍で直線的に変化するが、作動距離を大きくした時に直線となる領域が拡がり、作動距離によらず同じ特性となる傾向がある。
- 2) 作動距離を一定とし、加速電圧をパラメータとして同様に求められた信号群は、作動距離にかかわらず同一の特性となることが示された。すなわち、試料の表面形状に関する情報を含む正規化された反射電子信号は、加速電圧による影響が少ない。
- 3) 形状測定に用いる信号という観点からは、作動距離については感度良く信号が求められる距離として14mm前後が奨められる結果である。また正規化された反射電子信号は加速電圧によってはあまり影響を受けないことから損傷を招かない程度で十分な感度の値が試料ごとに選択されることが良い。

本研究の遂行にあたり元大学院学生 粉川良平君 (現 ㈱島津製作所) に装置製作の援助および有益な論議を頂いた。また本所鈴木和彦技官、鈴木美佐子事務官には論文のとりまとめに援助を頂いた。記して感謝する。

(1988年7月20日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 日本電子顕微鏡学会関東支部編：走査電子顕微鏡—基礎と応用—，共立出版，昭和52-3
- 2) 佐藤，大堀：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
- 3) 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 c，52-483，昭61-11，2974-2981
- 4) 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，昭49-9，708-715