

各種 SEM における電子の検出法と像の見え方の違い

Illumination Effects and Image Contrasts Due to Various Electron Detectors in SEM

小野 昭成, 柴田 昌照

Ono Akishige and Shibata Masateru

^a 日本電子株式会社

要旨 二次電子検出器や反射電子検出器は、対物レンズとの位置関係で SEM 像の見え方に大きな影響を及ぼす。汎用形 SEM で用いられているアウトレンズ検出器は強い照明効果を持つので試料表面の凹凸がわかりやすい。超高分解能 SEM で用いられる TTL 検出器はアウトレンズ検出器とはコントラストが大きく異なり、照明効果が弱いので凹凸がわかりにくい。低加速電圧では、検出電子のエネルギー選択を行うことによって表面の形態情報と組成情報を分離して観察することが可能である。シュノーケル対物レンズで用いられる下方検出器では、より強い照明効果が得られるが、作動距離により照明方向が変わるので像解釈の際に注意が必要である。光軸に対称に置いた反射電子検出器の出力を演算することで、組成情報と凹凸情報を分離して観察することが可能である。アウトレンズ検出器および下方検出器の場合、検出器方向を考えないと凹凸を間違えることがある。

キーワード：アウトレンズ検出器，TTL 検出器，下方検出器，反射電子検出器，照明効果

1. はじめに

試料から放出される二次電子や反射電子を検出して画像信号とする二次電子検出器や反射電子検出器は、置かれている位置によって SEM 像の見え方に大きな影響を及ぼす。特に最近の超高分解能 SEM で用いられる TTL 検出器は汎用形 SEM で用いられるアウトレンズ検出器とはコントラストが大きく異なる。ここでは、各種 SEM で用いられている検出器の種類と得られる像コントラストの違いを整理すると同時に、アウトレンズ検出器および下方検出器における照明効果と凹凸感の違いなどに触れ、データ解釈を誤らないための注意について述べることにする。

2. 二次電子検出器

2.1 基本構造

二次電子を検出するには、シンチレータ（蛍光物質）と光電子増倍管を組み合わせた、いわゆる ET 検出器（Everhart-Thornley 検出器）¹⁾ が用いられる。シンチレータ表面には 10 kV 程度の高電圧が印加されており、これによって生じた電界が試料から放出された二次電子を加速し、この電子をシンチレータ表面に衝突させ発光させる。この光を光電子増倍管で増幅し、電気信号とする。

2.2 検出器の種類

二次電子検出器は対物レンズに対する配置から 2 種類に分けられる。一つは、対物レンズと試料の間の空間に置かれたもので（図 1a）アウトレンズ検出器と呼ばれている。この配置は、SEM の開発当初から用いられており、多くの汎用形 SEM で採用されている。もう一つは、対物レンズの上方空間に置かれたもので（図 1b）TTL（Through The Lens）検出器と呼ばれ、対物レンズの磁場を通して二次電子を検出するものである。これは、超高分解能 SEM で用いられている。

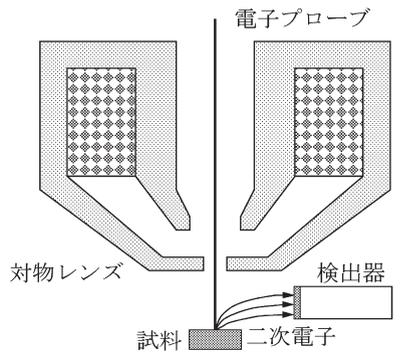
2.2.1 アウトレンズ検出器の特性

SEM 像の凹凸感は検出器の位置に大きく左右される。すなわち、光を使って物体を見たときとの類似性から、検出器位置からの光で照明された試料を、入射電子プローブ方向から観察していると考えられるが、アウトレンズ検出器は電子プローブ方向すなわち光軸からオフセットされているため、その方向から光を当てたような強い照明効果が得られ、凹凸感が強くなる。図 2 に示すように、実際の二次電子検出器には二次電子と反射電子が入射するが、二次電子はエネルギーが小さいので、検出器と反対方向に放出されたものでも検出器の高電界によって偏向され検出器に入射するため、無影照明的なコントラストを形成する。一方、反射電子は試料から検出器に向かって放出されたもののみが直線的に検出器に入射し、反対方向に放出されたものは入射しないので、検出器方向から強い光を当てたような像コントラストを形成する。したがって、SEM 像の立体感を与えるのは主として反射電子ということになる。低加速電圧では反射電子のエネルギーが低くなるため、照明効果が若干弱くなる。

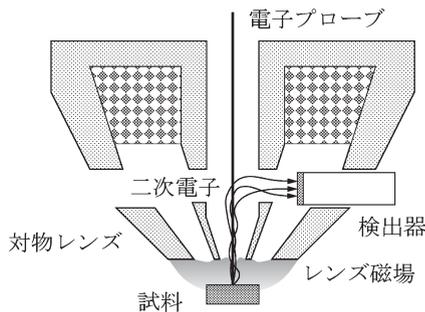
^a 〒 196-8558 昭島市武蔵野 3-1-2

TEL: 042-542-2246; FAX: 042-542-1924

2008 年 5 月 19 日受付



a. アウトレンズ検出器



b. TTL検出器

図1 2種類の二次電子検出器. a. アウトレンズ検出器. b. TTL検出器 (シュノーケル対物レンズの例).

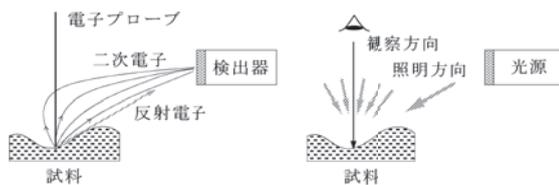


図2 アウトレンズ検出器の照明効果

アウトレンズ検出器では、シンチレータの前にはコレクタと呼ばれる補助電極が置かれており、この電極に $-50\text{ V} \sim +300\text{ V}$ の電圧が印加されている。このコレクタは二次電子を効率よく集めたり、逆に抑制することでシンチレータを保護する目的で使われるが、コレクタ電圧をうまく使うと比較的平坦に近い構造でも立体感豊かに観察することが可能である。図3はその例でICのボンディングパッドの表面である。図3aはコレクタ電圧を $+300\text{ V}$ にしたもので、二次電子の検出効率が高く明るい像が得られるが、表面の立体感はほとんど無い。それに対して、図3bはコレクタ電圧を -50 V にしたもので二次電子は遮蔽され、反射電子のみで画像が形成されているため照明効果が強く、メッキ表面の微妙な凹凸が観察される。

2.2.2 TTL 検出器の特性

インレンズ形あるいはシュノーケル形対物レンズといった超高分解能SEMで用いられる強励磁対物レンズの場合、試

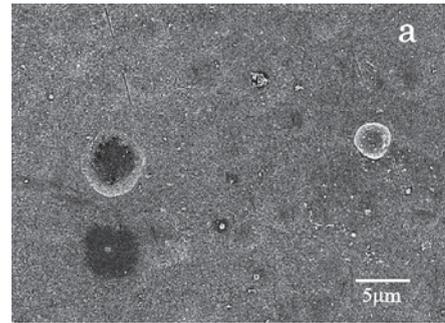


図3 コレクタ電圧による照明効果の違い. 試料: ICのボンディングパッドの表面 加速電圧: 1 kV WD= 8 mm . a コレクタ電圧 300 V . b コレクタ電圧 -50 V .

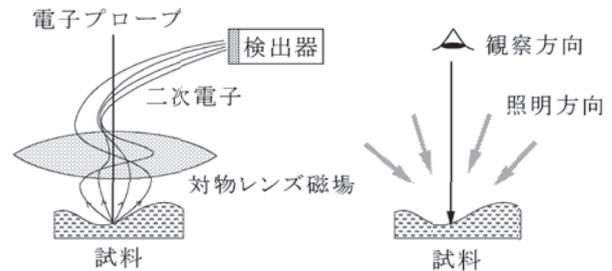


図4 TTL検出器の照明効果

料上への漏れ磁場が大きいので、試料から放出された二次電子は漏れ磁場にトラップされた状態になり、アウトレンズ検出器では検出が難しい。このため開発されたのが対物レンズ上方に置かれたTTL検出器で、試料から放出された二次電子は試料上の漏れ磁場および対物レンズ磁場にトラップされたまま、TTL検出器の電界によって加速され、レンズ磁場が弱くなったところで光軸から離れて検出器シンチレータ面に入射する。TTL検出器の場合、観察方向と照明方向が一致しているため、照明効果が弱く立体感に乏しい像となる(図4)。二次電子検出器の前にエネルギーフィルタを置くことによって、表面形状と組成情報の分離を行うことができるが、これに関しては本特集の“エネルギー選択による信号検出(E×B)”および“磁界・静電界複合光学系SEMにおける信号検出”を参照されたい。

3. 下方検出器

シュノーケル形対物レンズの下方空間に二次電子検出器を置いた場合、この検出器を下方検出器と呼ぶ。図5に示す

ように、TTL 検出器がエネルギーの低い二次電子を検出するのに対して、エネルギーの高い反射電子は対物レンズの漏れ磁場の影響を受けることなく下方検出器に入射し、検出される。また、対物レンズが OFF となる低倍率モードでは、TTL 検出器では検出されにくい二次電子も下方検出器に入射する。下方検出器はアウトレンズ検出器と似ているが、像を形成するのは主として反射電子であるため、アウトレンズ検出器と違って陰影の強い像となる。図 6 はカーボン基板上的の蒸着金粒子の SEM 像で、TTL 検出器による像 (図 6a) と下方検出器による像 (図 6b) を比較したものである。図 6a では金粒子の外形がわかるものの凹凸の判断はできないのに対して、図 6b では左方向から試料を照明しながら観察した像となっており、凹凸がはっきりわかる。

4. 反射電子検出器

反射電子は高いエネルギーを持っているので、二次電子の

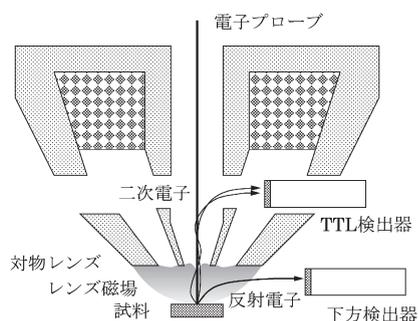


図 5 下方検出器の配置

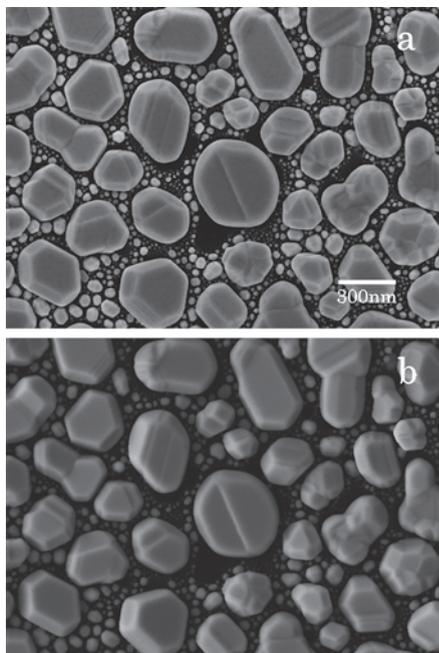


図 6 TTL 検出器と下方検出器の像の違い。

試料：カーボン基板上的の蒸着金粒子 加速電圧：5kV
WD=8mm. a TTL 検出器. b 下方検出器.

検出のような加速のための高電界は必要とせず、半導体検出器あるいはシンチレータ/光電子増倍管を利用した単純な構造の検出器が用いられる。反射電子は原子番号に依存する組成情報を持つほか、試料表面の凹凸の情報を持つが、原子番号依存性が二次電子に比べて強く、平均原子番号の大きな部分ほど明るく、小さな部分ほど暗くなるので組成情報を得るために多く使われる。表面が平坦な試料であれば組成コントラストがそのまま得られるが、表面に凹凸がある場合は凹凸と組成の情報が混在することになる。光軸に関して対称な構造を持つ反射電子検出器が用いられているときは照明効果が弱くなるため、凹凸情報の割合は少なくなり、組成情報が多く得られる。

光軸に関して対称に同じ特性を持つ 2 つの検出器が置かれているとき、出力信号の和を取ると組成像が得られるが、出力信号の差を取ると、組成情報の割合が小さくなり、凹凸像が得られる²⁾。この凹凸像を使うと通常の二次電子像に比べて照明効果が極めて強くなり、なだらかな凹凸も見やすくなる。図 7 は図 6 と同一視野の反射電子像である。図 7a の組成像ではカーボン基板が暗く、蒸着金粒子が明るく観察されるほか、金粒子の中には矢印で示すような電子チャネリングコントラストが観察される。図 7b の凹凸像ではカーボンと金の明るさの差はほとんど無く、右方向から照明を受けた状態で金粒子の表面形状が観察され、電子チャネリングコントラストは観察されない。図 6b に示す下方検出器による像と比較すると、下方検出器では組成の情報が混入しているのに対して、反射電子検出器による凹凸像では組成情報はほとんど入っていないことがわかる。なお、図 6b と図 7b の

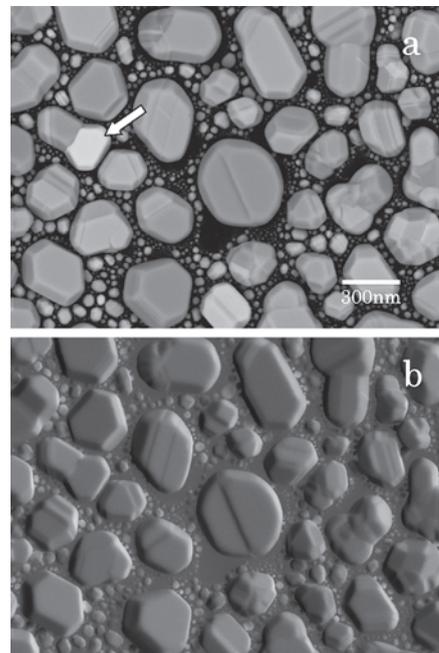


図 7 反射電子検出器による組成像と凹凸像。

試料：カーボン基板上的の蒸着金粒子 加速電圧：5kV
WD=8mm. a 組成像. b 凹凸像.

照明方向の違いは検出器の配置に起因するもので基本的な問題ではない。

5. 検出器位置の凹凸感に及ぼす影響

アウトレンズ検出器は強い照明効果を持っているので、画面上で検出器がどの方向にあるかを考えていないと試料表面の形状によっては、凹凸を間違えて解釈してしまうことがある。その例を図8に示す。図8aでは矢印の部分が凹んで見えるが、図8bでは凸となって見えている。図8aでは検出器は画面の上方に置かれていて、それによって照明されたような状態となっており、これが実際の試料の凹凸を表したものである。図8bでは検出器は画面下方に置かれている。通常は検出器が画面の上方に来るような設計がされているが、試料室に複数の検出器が取り付けられている場合には、設計上の制限から必ずしも全ての検出器が適切な位置に配置できない場合があるので注意が必要である。

下方検出器の場合、作動距離(working distance, WD)によって検出器の方向が見かけ上変わるのに注意を要する。これはWDが短くなると対物レンズの漏洩磁場が強くなるのが原因で、検出器方向とは違った方向に放出された反射電子の軌道が変わり、検出器に入射することによる。その例としてICの電極の像を図9に示す。実際の検出器は画面左上にあり、WD=15 mm(図9a)では見かけ上の検出器方向が実際の検出器の方向とほぼ一致しているが、WD=6 mm(図9b)では見かけ上の検出器方向は反時計方向に約90°回転している。図10は、図9の像を反時計方向に135°回転させたものであるが、図10aと図10bでは凹凸が逆に見える。

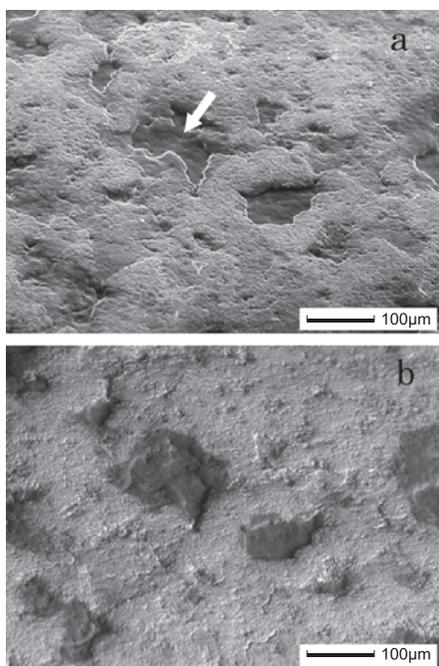


図8 検出器位置による凹凸感の違い。
試料：卵の殻 加速電圧：5 kV WD=10 mm.

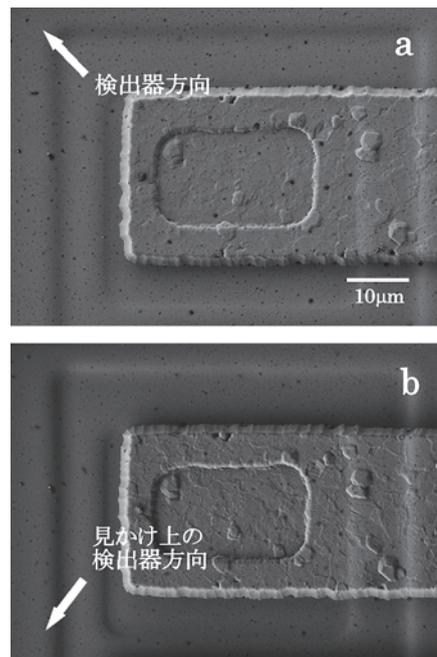


図9 作動距離の違いによる下方検出器の照明方向の変化。
試料：ICの電極 加速電圧：1 kV. a WD=15 mm. b WD=6 mm.

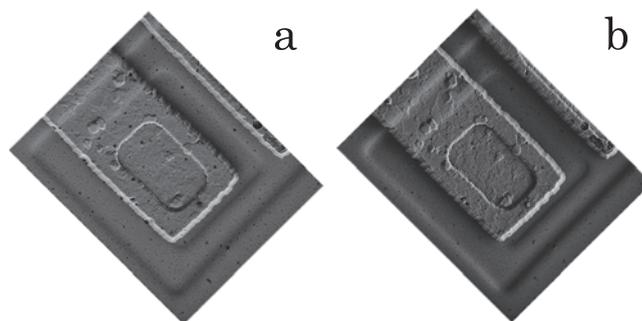


図10 画像を回転させたときの凹凸感の違い。試料：ICの電極 加速電圧：1 kV. a WD=15 mm. b WD=6 mm.

これは、スキャンローテーション(画像の電気的回転機能、ラスターローテーションとも呼ばれる)を使った場合、回転角によっては凹凸を間違えて解釈する可能性があることを意味している。

6. おわりに

SEMの高機能化とともに種々の電子検出器が取り付けられるようになり、試料から放出される電子が持つ情報を色々な形で利用できるようになった。このことは一つ間違えると情報を誤って解釈しかねないことを意味しているおり、これを防ぐには検出器の特性を十分理解して使う必要がある。

文 献

- 1) Everhart, T.E. and Thornley, R.F.M.: *J. Sci. Inst.*, 37, 246-248 (1960)
- 2) Kimoto, S., Hashimoto, H. and Sukanuma, T.: *Proc. Electron Microprobe Symp.*, Washington D.C., 1964, p. 480