

磁界・静電界複合光学系 SEM における信号検出

Signal Detection in a SEM with the Magnetic/Electrostatic Compound Lens System

立 花 繁 明

Shigeaki Tachibana

^a エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社

要 旨 走査電子顕微鏡においては最近の技術進歩により、取得できる情報量が著しく増加してきている。一回の走査で複数の検出器からの情報を一度に取得できるようにもなって来た。取得データ量が増加するに伴い像情報解釈の重要性も増している。それぞれの検出器からの像情報は検出器単独からなるわけではなく、電子光学系など装置内の他の部分と関りを持って形成されている。本稿では磁界・静電界複合式の対物レンズ及び光学系に検出器を組み込んだ SEM における二次電子、反射電子信号の検出、像形成の原理について概説する。

キーワード：二次電子、反射電子、エネルギー選択、磁界・静電界複合光学系

1. はじめに

低加速電圧をはじめとした SEM 観察条件の拡張や検出方法の多様化によって、これまでには得られなかった像情報が取得できるようになっている。得られる情報量は増えたが、その分 SEM 像そのものの解釈はこれまで以上に注意を払うべきである。試料から脱出した電子は周囲の磁界や電界の影響を受けた軌道を取りながら検出器に到達する。装置側では小ビーム径維持、検出効率向上などの目的で様々な機構が導入されているが、それらが二次電子、反射電子と検出器間の軌道に与える影響も様々である。

Carl Zeiss 製 FE-SEM の磁界・静電界複合型対物レンズはそれ自体が検出系の一つとして作用している。主として低加速電圧条件下で取得したデータをもとに、この対物レンズと各検出器が信号検出/分離に及ぼす作用について述べる。

2. 電子光学系

低い加速電圧を用いた SEM 観察では入射電子の試料内部での拡散が抑えられるため、表面に敏感な像を得ることが可能である。しかし、加速電圧（入射電子線エネルギー：pE）が低くなるほど電子線源の持つエネルギー幅（ ΔE ）との比が大きくなり、色収差が増大する。このため、高加速電圧条件に比較して入射電子線のビーム径が広がってしまう。

Carl Zeiss の FE-SEM ではこの色収差の低減のため、ビームプースター機構を導入して入射電子線のクロスオーバーポ

イントをなくし、エネルギー幅拡がりを抑制した点が特徴として挙げられる。ビームプースターは終端付近では静電界レンズとして作用しており、対物レンズ全体としてはこの静電界レンズと磁界型レンズが組み合わされた構成になっている。この二つの方式を組み合わせた電子光学系及び対物レンズを Carl Zeiss では Gemini 鏡筒/レンズと呼称している¹⁾。

静電界レンズは入射電子に対しては減速電界として、また放出された電子に対しては加速電界として作用し、二次電子の一部はこの静電界によって対物レンズ上方に配置された環状 InLens SE 検出器によって検出される。高分解能 SEM では発生した電子を対物レンズ内に取り込み、レンズ内に配置された検出器によって信号化する装置が多いが、本光学系 (Gemini レンズ) ではこの「取り込み」を対物レンズの静電界によって行っていることが特徴として挙げられる。

3. 二次電子検出器像

試料から電子がある角度で放出された時、二次電子のうちでも低いエネルギーを持つ電子ほど静電界によって強い集束作用を受けた後に光軸からより遠くへの軌道を取り²⁾、環状 InLens SE 検出器に投影されて信号として検出される。一方、比較的高いエネルギーを持つ二次電子や反射電子、SE3（及び反射電子が試料室内部に衝突して励起された二次電子）のそれぞれの一部分は試料室内に装着された Everhart-Thornley (E-T) 検出器によって検出される。つまりこの時に放出された電子の中で、InLens SE 検出器では主に低エネルギー側を、E-T 検出器は比較的高エネルギー側を持つ電子をそれぞれ検出していることになる。概して InLens SE 検出器像では試料上での電位差や物質による SE 放出率の違いに対してより敏感なコントラストが得られる場合が多い。一例

^a 〒 226-0003 横浜市緑区白山 1-18-2

TEL: 045-938-0171; FAX: 045-938-0172

2008年5月16日受付

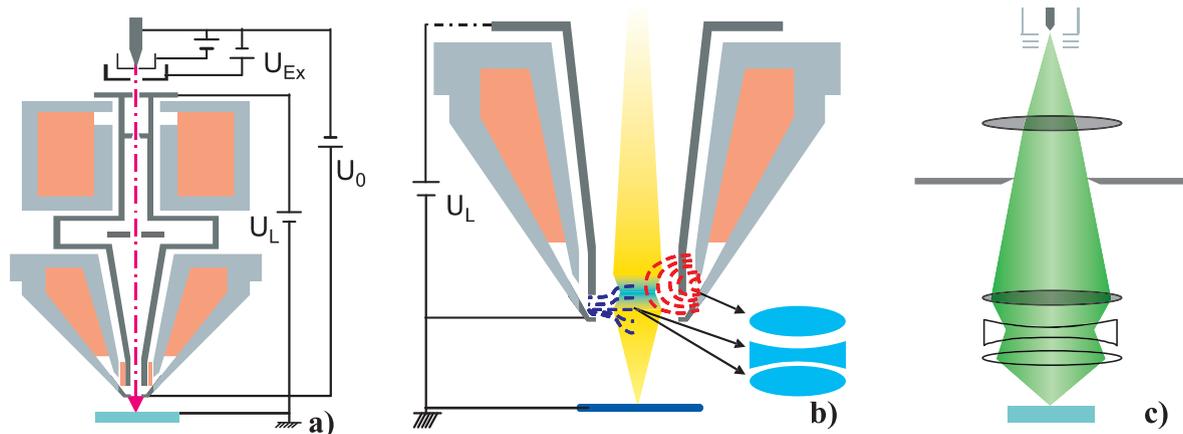


図1 (a) Gemini 光学系断面図概略; U_L によって生ずる静電界が入射電子線の減速電界として作用. (b) Gemini 対物レンズ断面図. 磁界/静電界複合レンズで triplet が構成される. (c) Gemini 光学系光路図. クロスオーバーフリー光路概念図.

として、導電性を高めるなどの目的でカーボンナノチューブ (CNT) を埋め込んだプラスチック試料の各二次電子検出器像を示す。

図2は試料入射電圧=800 V, WD=3 mm で同一視野を同時に取得した画像である。図2aの画像にはチューブ状の暗いコントラストを示す部分が多数箇所認められる。プラスチック表面に形成されたスキン層により、CNT自体は最表面には露出していない。試料入射電圧を増加させて観察を行った場合、InLens 検出器像ではチューブ状の暗いコントラストの領域も増加していく。入射電子エネルギーを増加させてCNTに電子を到達させた時、CNTのもつ導電性によりその部分は周囲のプラスチックのみの部分と比較して電子の拡散の差が生じ、試料内部で電位差が生じていると考えられる。図2aではCNT自体ではなく、最表面より下部でのCNTとの局在を可視化していると示唆される。

E-T 検出器はSEMにおいて最も一般的な検出器であり、斜め方向から電子を検出することでより形状が強調されたコントラストになる場合が多い。図2bにおいても表面の形状情報が主体と考えられる情報が取得されている。E-T 検出器

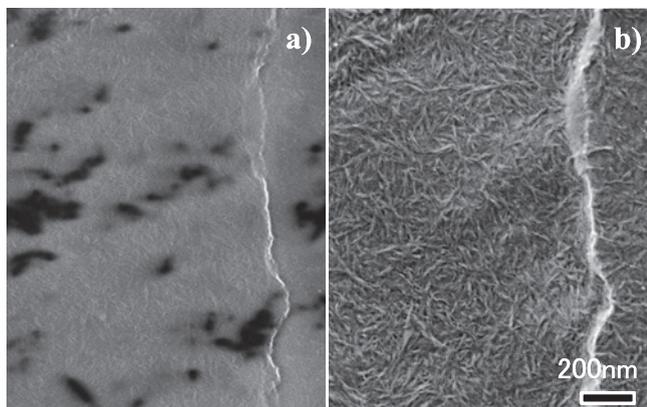


図2 (a) InLens SE 検出器像. (b) E-T SE 検出器像; WD はいずれも 3 mm.

像においてもWDによって、組成情報やチャージアップの影響の増減などのコントラスト変化はよく目にするところである。これらの像においてもWD=3 mm という短いWD条件でデータを取得しているが、WDが変化するにつれ二つの検出器の信号検出効率は当然変化していくので比較的長いWD条件ではInLens 検出器で得られたコントラストに近づいていくこともありうる。試料室内の電場や磁場の分布は対物レンズの機構によって異なるが、この違いによってもE-T 検出器の二次電子検出効率が変化する³⁾ ことも像コントラストに少なからぬ影響を与えられられる。加速電圧などが同一の条件にも関わらず、異なる機種間でのE-T 検出器像の違いが大きい⁴⁾ 場合は対物レンズの機構や検出器のbias 電圧がコントラストに影響している可能性が示唆される。

4. 反射電子検出器像

Carl Zeiss のFE-SEMには Gemini 光学鏡筒内に反射電子検出器を配置した装置 (Ultra シリーズ) がある。検出器はEsB 検出器 (Energy and angle selective Backscattered electron detector) と呼ばれ、図3に示されるように、InLens SE 検出器の直上に配置されている。

EsB 検出器に投影される電子は、InLens SE 検出器の孔を通り抜けられたものだけになる。静電界レンズは弱いエネルギーを持つ電子を光軸からより遠くへ分散してInLens SE 検出器に投影するので、比較的高いエネルギーの二次電子や反射電子はInLens SE 検出器の孔を通過する。この時点で対物レンズを含む検出系は発生した電子の軌道、角度を選別していることになる。より高いエネルギーを持つ電子を積極的に検出するため、EsB 検出器の直前にはEnergy Filter Grid と呼ばれる電極が配置されている^{5,6)}。この電極に印加する電圧 (; グラウンド電位基準) を制御することで障害電場を設け、相対的に高エネルギー電子による信号を取得できる。図3にEsB 検出器とEnergy Filter Grid の動作、信号分離の概念図を示す。

図4にはトナーのSEM像である。トナー表面には酸化物

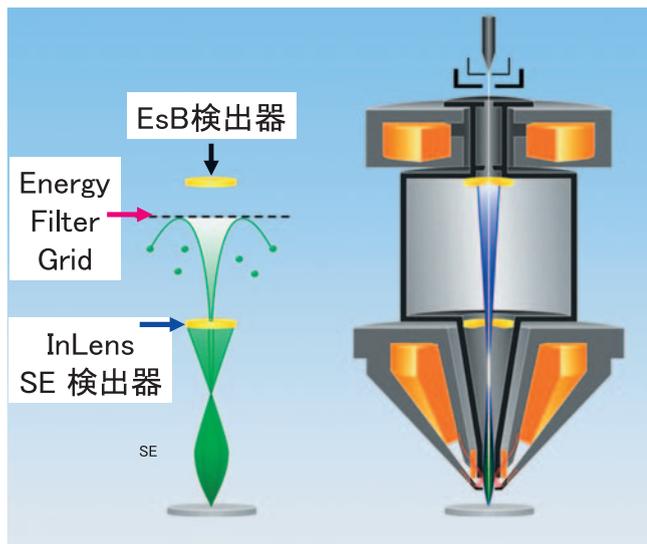


図3 EsB 検出器と Energy Filter Grid の概念図

が複数種類添加されている。四つの像はいずれも同一視野を試料入射電圧：1060 V，WD=3 mm で撮影しているが，検出条件を，a)；InLens SE 検出器，b)；EsB 検出器/Grid 電圧=0 V，c)；EsB 検出器/Grid 電圧=250 V，d)；EsB 検出器/Grid 電圧=1000 V と変化させている。a) と b) を比較すると，球状の酸化物のエッジコントラストがやや減少している程度で目立った変化は見られない。c) では不定形の酸化物の一部が明るいコントラストを示すようになり，さらに d) では，マトリックスと酸化物，及び針状と球状のそれぞれの酸化物についてもコントラストがより強調され，形状のみか

らでは判別しがたい複数種類の酸化物の分布が確認できる。この試料では EDX スペクトル取得を行い，各酸化物の平均原子番号と像コントラストの対応を確認している。

5. まとめ

磁界・静電界複合型光学系を備えた装置と，その一部の検出器像の像形成原理について，光学系の影響を考慮に入れた上で述べた。いずれの検出器の場合も光学系が信号検出に大きな役割を担っていることが示せたと考える。装置性能や操作パラメータの自由度向上に伴い検討すべき事項も増してきているとはいえ，試料をバルク状態のまま扱える，という SEM の利点を保ちつつ高分解能での表面情報，組成情報の取得などが行えるようになったことは明らかに SEM の進化，進歩であり歓迎すべき傾向である。

文 献

- 1) Jaksch, H.: Materials World, Oct. 1996
- 2) Zach, J.: "Design of a high-resolution low-voltage scanning electron microscopy", *Optik*, **83**, 30-40 (1989)
- 3) Konvalina, I., Müllerová, I. and Frank, L.: *Autum School 2004, Proc., Humboldt-Universität zu Berlin Institut für Physik*
- 4) 日本表面科学会編：ナノテクノロジーのための走査電子顕微鏡，丸善，2004，p.55
- 5) Jaksch, H., Steigerwald, M. and Drexel, V.: *Micros. Microanal.*, **11**, 758-759 (2005)
- 6) Jaksch, H., Steigerwald, M., Drexel, V. and Bihl, H.: *Micros. Microanal.*, **9**, 946-947 (2003)

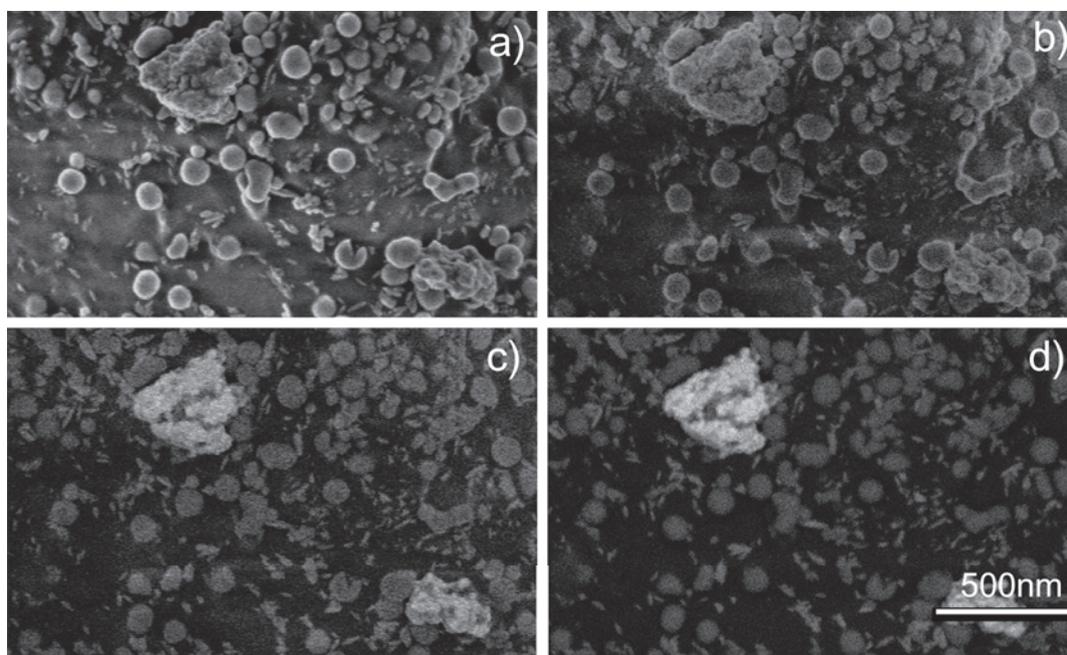


図4 (a) InLens SE 検出器像。(b) EsB 検出器像/Grid Bias=0 V。(c) EsB 検出器像/Grid Bias=250 V。(d) EsB 検出器像/Grid Bias=1000 V；WD はいずれも 3 mm。