

走査電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope：SEM）は試料の表面を見る装置です。細い電子線（電子プローブといいます）を試料に照射すると、試料表面から二次電子が放出されます。電子プローブを二次元的に走査しながら、二次電子の多い少ないを検出して1枚の画像にすると、試料表面の凹凸を観察することができます。

SEMの構成

装置の構成

SEMには、電子プローブを作るための電子光学系、試料を載せるための試料ステージ、二次電子を検出するための二次電子検出器、画像を表示するための表示装置、種々の操作を行うための操作系などがが必要です（図1）。電子光学系は、電子プローブを作るための電子銃、集束レンズ、対物レンズと、電子プローブを走査するための走査コイル、などで構成されています。

電子光学系（鏡筒内部）および試料周囲の空間は真空になっています。

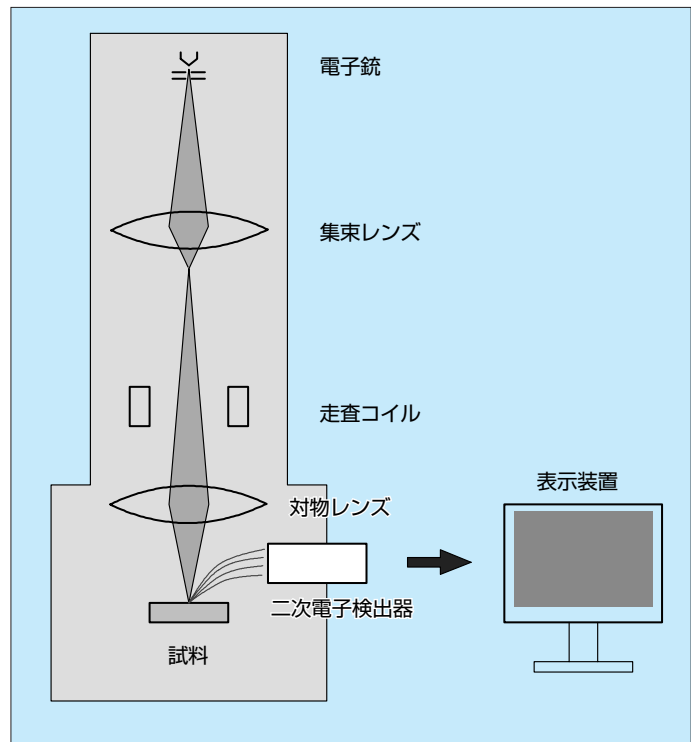


図1 SEMの基本構成

電子銃

電子線を発生する部分で、図2に構造を示します。細い（0.1 mm程度）タングステン線で出来たフィラメント（陰極）を高温（2800 K程度）に加熱すると熱電子が放出されます。対向して置いた金属板（陽極）にプラスの高電圧（1～30 kV）を掛けると熱電子は電子線となって陽極に流れ込みますが、陽極中央に孔をあけておくと電子線は孔を通して流れ出します。陰極と陽極の間に電極を置きマイナスの電圧を掛けると、電子線の電流量を調整することができますが、この電極（ウェーネルト電極と呼びます）の作用で、電子線は一度細く絞られます。一番細くなったところをクロスオーバーと言い、実質的な光源となりますが、この直径は15～20 μmです。

ここで説明したのは、熱電子銃と呼ばれるもので、最も一般的に使われていますが、他に電界放出電子銃、ショットキー電子銃などが使われます（p16）。熱電子銃の陰極としては、タングステン線のほかに、LaB₆の単結晶が使われることもあります。活性が高いのでやや高い真空が必要です。

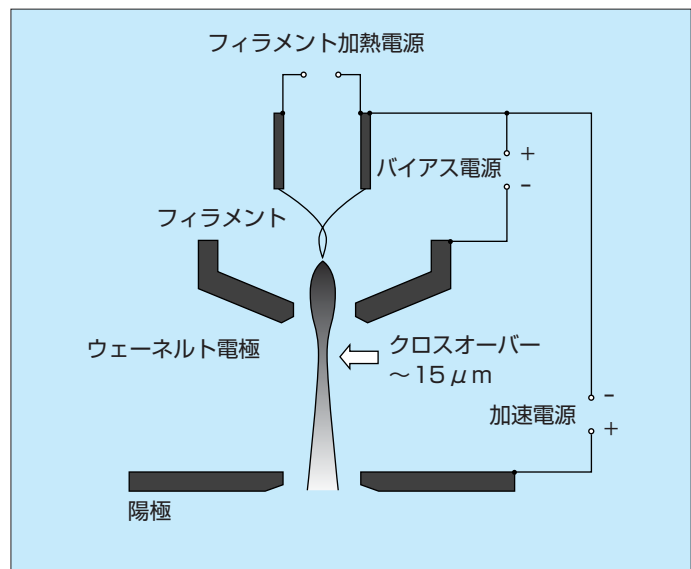


図2 電子銃の構造

レンズの構造

電子顕微鏡では、一般に磁石の作用を利用した磁界レンズが使われています。

コイル状に巻いた電線に直流の電流を流すと、回転対称な磁力線が生まれ、電子線に対するレンズ作用が生じます。強いレンズ（焦点距離が短いレンズ）を作るには磁力線の密度を高くする必要があります。図3に示すように、コイルの周囲を鉄枠（ヨーク）で囲み、狭い隙間から磁力線を漏洩させます。隙間の部分は磁極片（ポールピース）と呼ばれ、高い工作精度で仕上げられています。コイルに流す電流を変えるとレンズの強さを変えることができるのが、光学レンズに無い特長です。

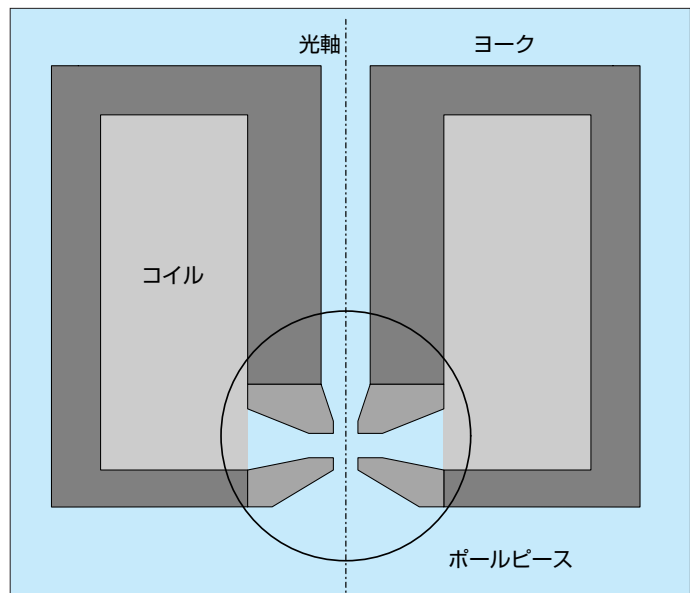


図3 磁界レンズの構造

集束レンズと対物レンズ

電子銃の後ろにレンズを置くと、電子線の太さを調節することができます。

SEMでは細い電子線が必要ですから、その説明をしましょう。図4では、電子銃の後ろに集束レンズと対物レンズの2段のレンズが置かれており、電子銃から出た電子線はこの2段のレンズで細められ、電子プローブができます。

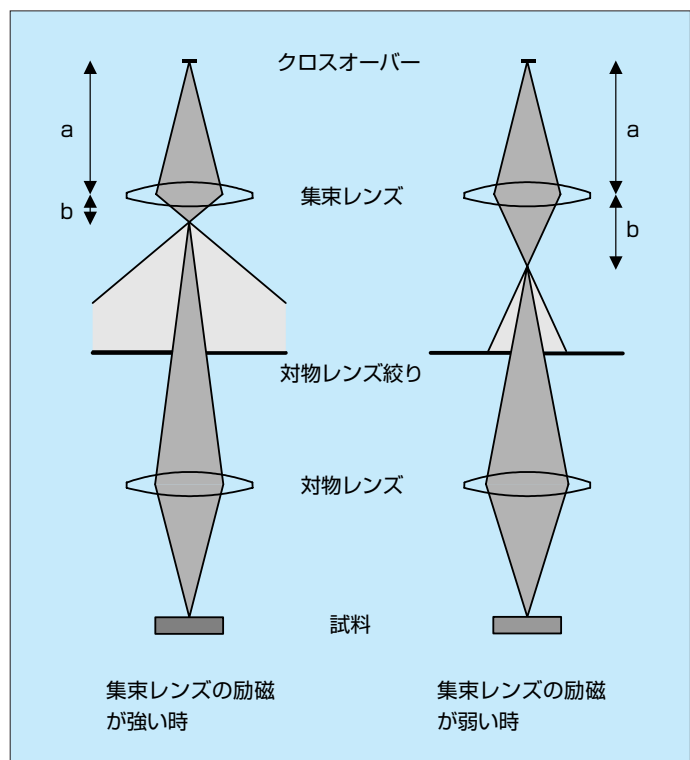


図4 レンズによる電子プローブの形成

●集束レンズの役割

集束レンズのレンズ作用を強くすると、電子プローブは b/a の割合で細くなり、弱くすると太い電子プローブとなります。一方、集束レンズと対物レンズの間には、薄い金属板に小さい孔があいた“絞り”が置いてあります。集束レンズを通った電子線はこの絞りに当たって、一部の電子線だけが孔を通して対物レンズに到達します。集束レンズを強くすると、絞りの上で電子線は大きく広がり、一部の電子線しか通り抜けられないため、対物レンズに到達する電子の数（プローブ電流）は減ります。逆に、集束レンズを弱めると、絞りの上で電子線はそれほど広がらないので、大部分の電子線は絞りを通り抜け、多くの電子が対物レンズに到達します。すなわち、集束レンズを調節すると、電子プローブの太さとプローブ電流を変えることができるわけです。

では、集束レンズをどんどん強くしていくと、電子プローブの太さは無限に細くなるのでしょうか？残念ながら限界があります。この説明は別項目でしましょう。(p15)

●対物レンズの役割

対物レンズは、焦点合わせに使われますが、最終的な電子プローブ径を決める大事なレンズです。その前でどんなに頑張っても、対物レンズが悪ければ細い電子プローブを作ることにはできません。ですから、どこの電子顕微鏡メーカーも性能の良い対物レンズを作る努力をしています。

試料ステージ

電子顕微鏡では高倍率で試料を観察することが多いので、試料を安定に支持しながら、スムーズな動きをする試料ステージが必要です。SEMでは通常、平面内の移動（X, Y）、縦方向の移動（Z）のほか、試料の傾斜（T）、回転（R）の5つの動きができるようになっています。単純な視野選び（X, Y）だけでなく、Zを変えることで、解像力（p15）や焦点深度（p8）を変えることができます。図5にステージの構造を示します。

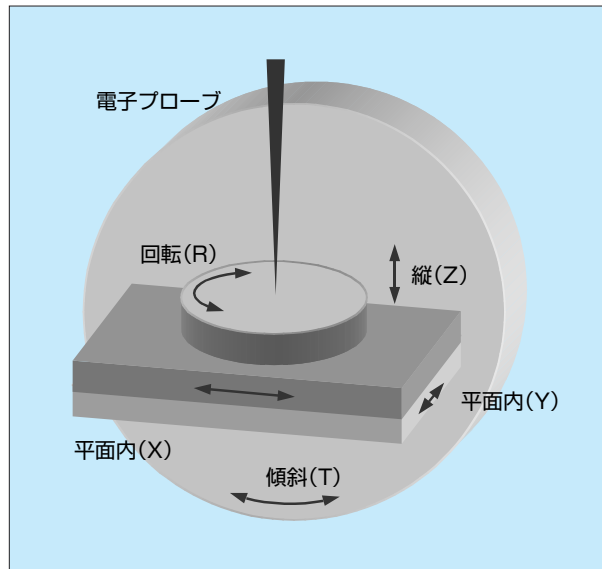


図5 試料ステージの構造

試料を傾斜した時に視野がずれない、あるいは傾斜した状態で視野移動を行った時に焦点がずれない、といった機能を持った試料ステージをユーセントリック（eucentric）ステージといいます。

手動のステージの他、最近はモーター駆動のステージも多くなっており、パーソナルコンピュータで制御する試料ステージも多く使われるようになってきました。このようなステージでは、観察画面上で選択した位置にマウスクリック一つで移動したり、一度観察した位置を記憶しておいてその場所に戻ったり、より高度なユーセントリック機能を備えるといったことが可能になっています。

二次電子検出器

試料から放出された二次電子を検出するのが二次電子検出器で、図6にその構造を示します。先端にはシンチレータ（蛍光物質）が塗ってあり、10 kV程度の高電圧が掛かっています。試料から放出された二次電子はこの高電圧に引き寄せられてシンチレータに衝突し、発光します。その光はライトガイドを通して光電子増倍管に導かれ、再び電子に変換・増幅されて、電気信号になります。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、数百Vの電圧が掛けられるようになっていますが、この電圧を変えることで二次電子を沢山集めたり、カットしたりすることができます。この検出器の原型はEverhartとThornleyが開発したことから、E-T検出器と呼ばれることがあります。多くのSEMはこのタイプの検出器を試料室に取り付けていますが、分解能を追求するタイプの対物レンズの場合（p19）は、対物レンズ上部に二次電子検出器を置き、レンズ磁場を利用して二次電子を検出する方法が取られます。この検出器はしばしばTTL（Through The Lens）検出器と呼ばれます。

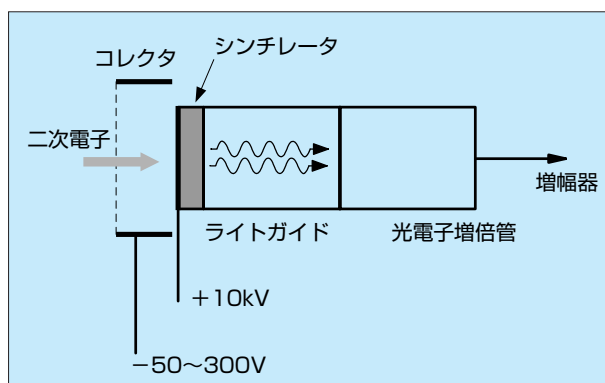


図6 二次電子検出器の構造

画像の表示と記録

二次電子検出器の出力は増幅されて、表示装置に送られます。表示装置の走査と電子プローブの走査は同期しているため、表示装置の画面には二次電子の量に応じた明るさの変化が現れ、SEM像が形成されます。表示装置としては長い間ブラウン管が用いられてきましたが、最近では液晶ディスプレイが使われるようになってきています。一般に電子プローブの走査速度は何段階かに切り替えることができ、観察用には極めて早い走査速度が使われます。また画像の撮影や保存のためにはゆっくりとした走査速度が使われます。

SEM像を記録するには、従来はブラウン管に表示されたSEM像をカメラで撮影していましたが、最近は電子ファイルの形で記録されるようになってきています。これは、解像力の高いブラウン管の入手が困難になってきていること、電子ファイルの方が種々の画像処理をやりやすいこと、情報のやりとりに便利なことなどから起きたことです。ちなみに、通常100万画素程度の画像フォーマットを使用します。

真空系

電子光学系および試料室の内部は、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Paの真空に保つ必要がありますから、普通は油拡散ポンプで排気されていますが、真空の質を問題にする場合にはターボモレキュラポンプが使われる場合もあります。一方、後でふれる電界放出電子銃は超高真空を必要とするので、スパッタイオンポンプが使われます。

試料を交換する方法には、試料室全体を大気にして行う方法と、試料室は高真空に保ったまま試料予備排気室（試料交換室）を介して行う方法の2種類があります。