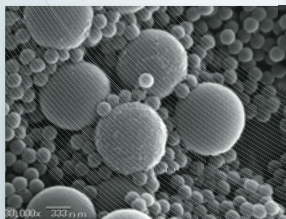
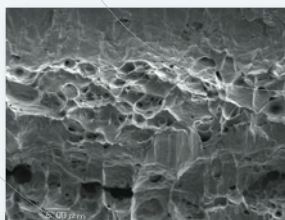


走査型電子顕微鏡ガイドブック

知って得するSEMの活用法

Lesson.1 * SEMのしくみを学ぶ



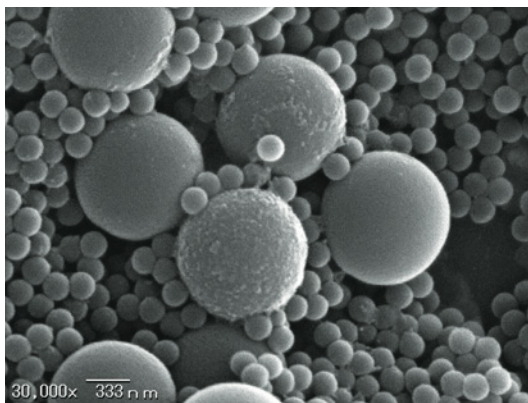
1章 * SEM画像の特徴

SEM画像の特徴

SEMは「Scanning Electron Microscope」の頭文字をとった略称で、日本語では「走査型電子顕微鏡」と言います。文字通り、試料表面を電子で走査して拡大観察像を得る観察装置です。

光学顕微鏡像に比べ、SEM像には次のような特徴があります。

- 分解能が高いため高い倍率で観察できる。
- 被写界深度が深いので、凹凸のある試料を立体的に観察できる。
- 色は観察できない。ただし、透明体や鏡面体など光では観察しにくい試料も難なく観察できる。



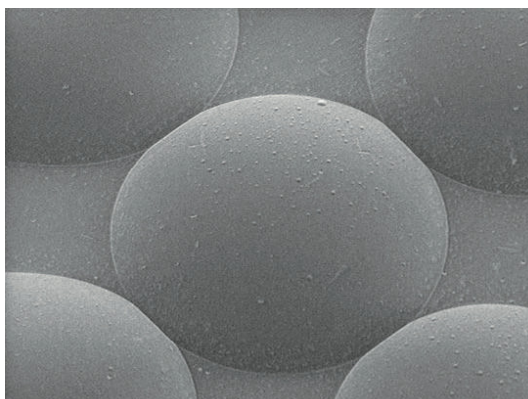
ラテックスゴム粒子 30,000倍

高倍率で微細な形状が観察できます。



はんだ 100倍

奥行きのある構図でも全てにピントが合っています。
光を当てるとハレーションを起こす鏡面体でもはっきり
と形状がわかります。



マイクロレンズ 200倍

透明体でも簡単に観察できます。

2章 * SEMのしくみ① ~SEM像のなりたち

SEMの観察信号

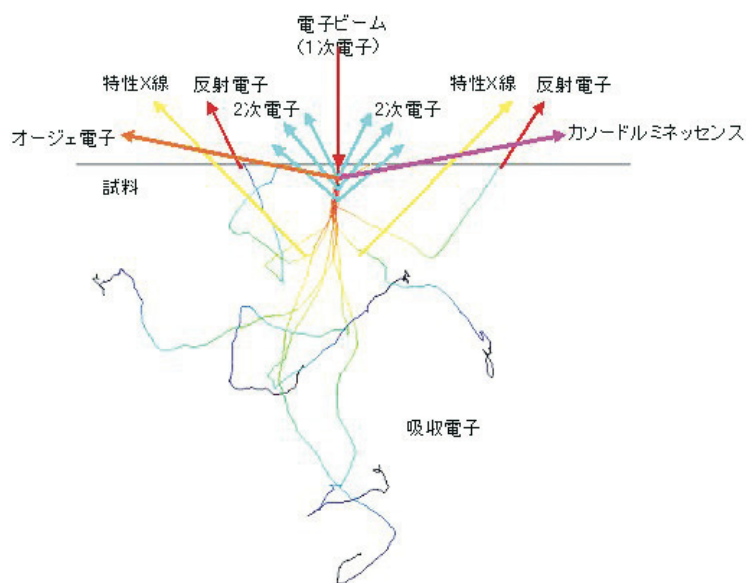
SEMはどのような信号を使って像を表示しているのでしょうか。

電子線を試料に照射すると、試料と相互作用を起こし、様々な信号が発生します。

SEM観察で最も多く利用されているのが、二次電子という信号です。このほかに反射電子を利用して観察することも一般的です。また、特性X線を使った元素分析も可能です。

試料に照射された電子は、そのスピードのエネルギーで試料の中を進んでいきます。（これを「飛程」と呼びます。）試料の中を進むうちに、試料を構成する原子核や電子と相互作用を起こします。

電子は試料を構成する原子と衝突すると進行方向が変わったりエネルギーを失います。これを「散乱」と呼び、様々な信号はこの「散乱」によって発生します。



電子を照射したときに発生する信号

二次電子

電子ビームによりはじき出された試料を構成する元素の電子です。発生量が試料表面の形状に依存するため、試料表面形状の観察に利用されます。

反射電子

試料内部で跳ね返った電子です。発生量は試料表面の形状と試料の元素番号に依存するため、試料表面形状の観察、元素分布観察に利用できます。

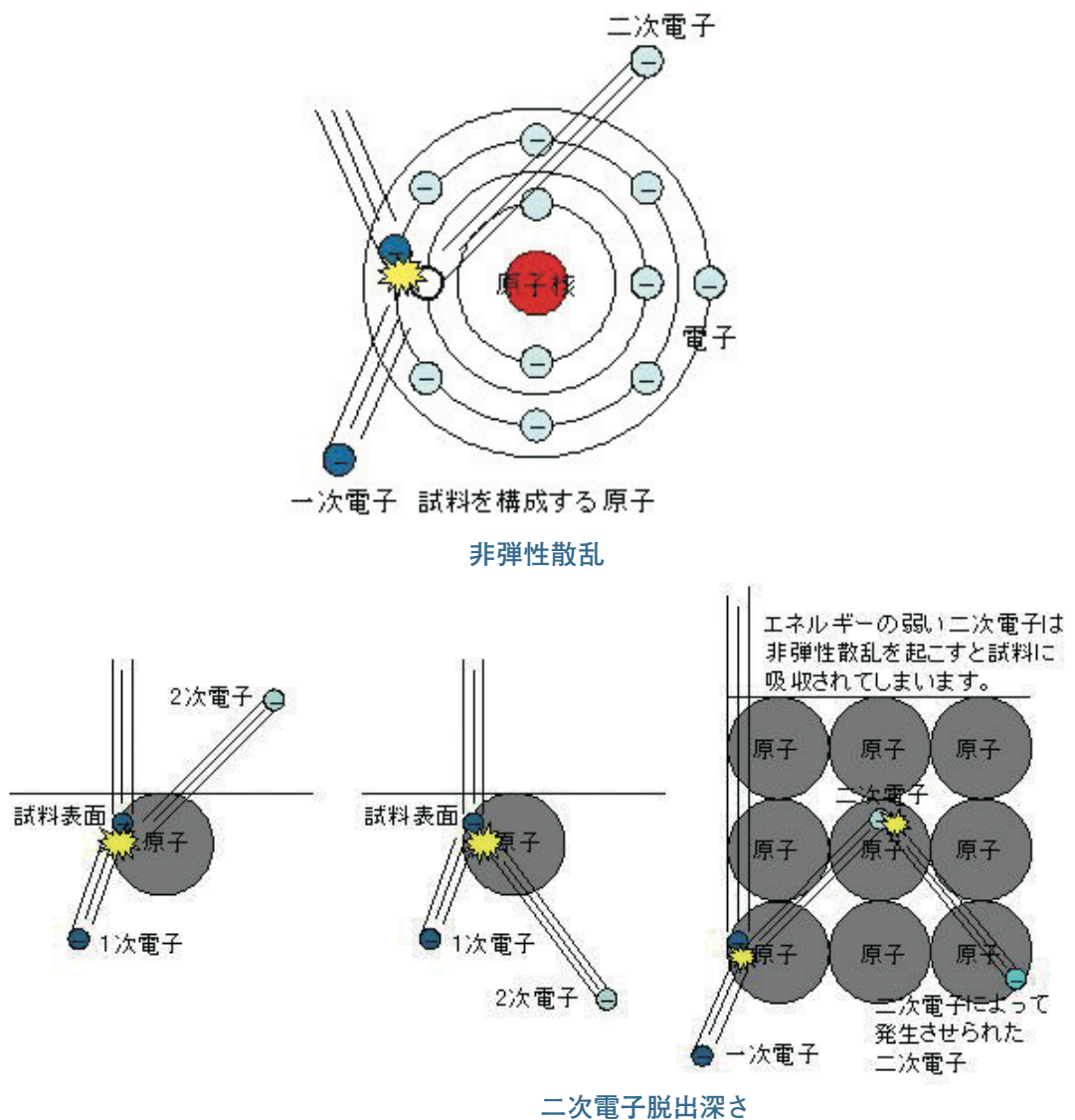
特性X線

電子ビームにより試料の電子が励起（外側の軌道に移る）され、励起された電子の後にエネルギーの高い電子が遷移（空きのできた起動の外側の軌道から電子が移ってくる）する際に、そのエネルギー差に相当する特性X線が放出されます。元素固有の信号であるため、これを利用することで試料に含有される元素がわかります。

二次電子とは

散乱のうち、電子がエネルギーを失うものを「非弾性散乱」と呼びます。

「非弾性散乱」で照射された電子が失うエネルギーにより、試料の原子から放出される電子が「二次電子」です。照射される電子を「一次電子」と呼ぶのに対し、「二次電子」と呼ばれています。



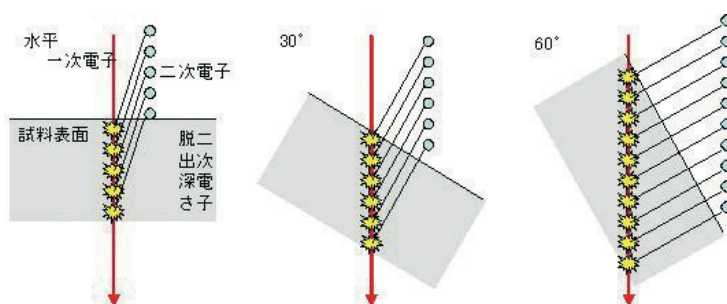
二次電子は一次電子の飛程上で非弾性散乱が起きるたびに発生しますが、二次電子のエネルギーは極めて小さいため、試料表面から5～10nm以内で発生して、表面の方向にはじき出されたものしか試料を飛び出して来ることができません。

試料の表面形状と二次電子の発生

二次電子の発生量が試料の表面構造に依存することは前に述べましたが、試料の表面構造と二次電子発生量にはどのような関係があるのでしょうか。

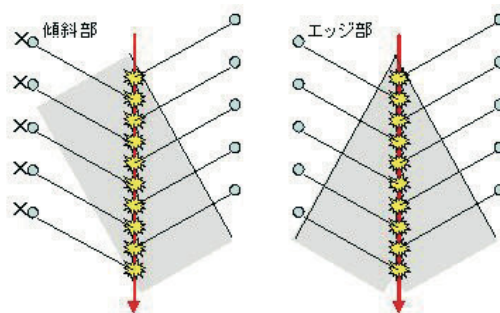
二次電子は試料の斜面やエッジ部で発生量が多くなります。

斜面の傾斜が強くなるほど二次電子発生量が多くなることを「傾斜角効果」、エッジ部で二次電子発生量が多くなることを「エッジ効果」といいます。



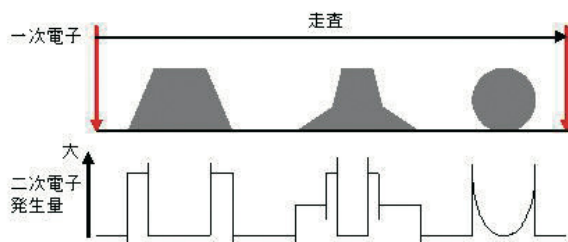
二次電子の傾斜角効果

一定の頻度で一次電子が非弾性散乱を起こし二次電子を発生させるとすると、上図のように二次電子脱出可能深さ内での一次電子の飛程が長くなる傾斜部で二次電子発生量が多くなることがわかります。



二次電子のエッジ効果

斜面では試料表面と反対側に向かって発生した二次電子は試料を脱出できないのに対し、エッジ部では脱出できることがわかります。このためエッジ部での二次電子発生量が最も多くなります。



二次電子発生量モデル

二次電子の発生量はエッジ部が最も多く、また傾きが大きいほど大きくなることから、上図上の形状を走査した際には、グラフのような発生量となります。

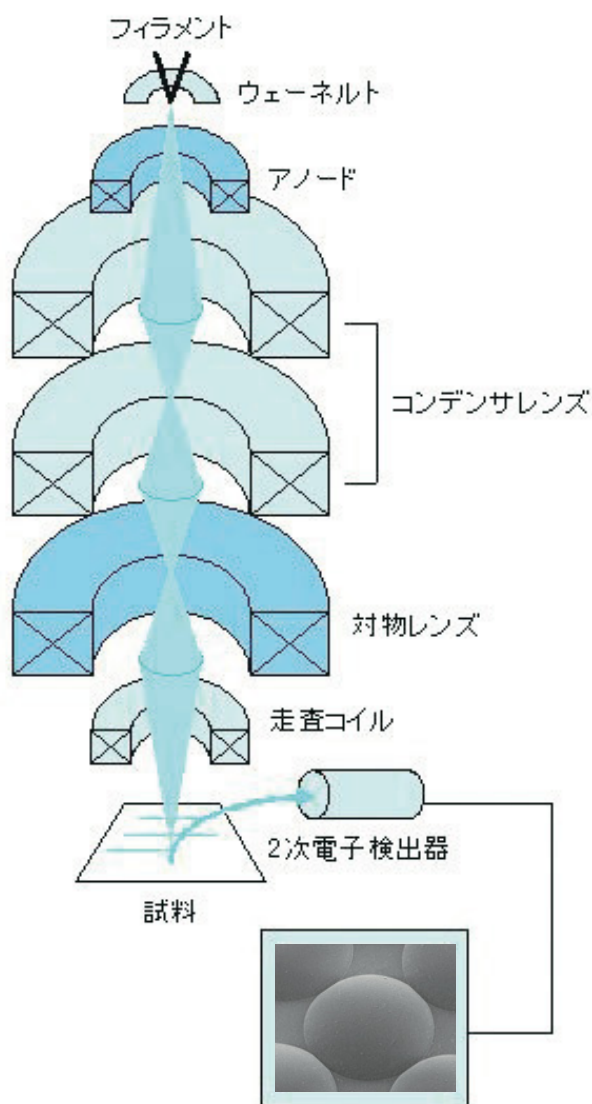
SEM像はこの二次電子発生量の大小を明暗として検出することで構成されています。

3章 * SEMのしくみ②～SEMの電子光学系と検出器

SEMの構造

SEMはどのように電子ビームを照射し、信号を検出して画像を表示するのでしょうか。

ここでは、SEMの構造と画像表示の原理を学びます。



SEMの構造

フィラメント

フィラメントは電子を発生する電子源です。電流による加熱で電子を発生するため熱電子銃と呼ばれます。

ウェーネルト

ウェーネルトはグリッド電極とも呼ばれ、負の電圧（バイアス電圧）が印可されています。バイアス電圧により、フィラメントから放出された電子を収束するレンズです。

アノード

ウェーネルトで収束された電子ビームを設定された加速電圧に加速します。設定された加速電圧に応じた正の高電圧が印可されています。

コンデンサレンズ

磁界が電子ビームを偏向する効果を利用した磁界レンズで、一般的には電磁石が使用されています。電子ビームをさらに収束し、電子ビームを細くします。

対物レンズ

合焦位置を調整するレンズです。SEMのピント調整は対物レンズに流れる電流を変えることで磁界を変え、電子ビームが焦点を結ぶ高さを変えています。

走査コイル

磁界により電子ビームを偏向させ試料表面を走査します。走査する範囲＝観察倍率も走査コイルで調整します。

二次電子検出器

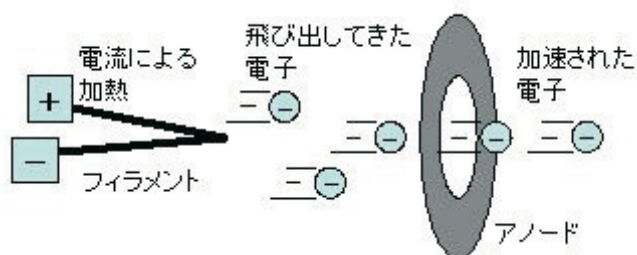
試料から発生した二次電子を検出し増幅します。検出器先端には正の高電圧が印可され、2次電子を吸い寄せることで多くの2次電子を捕捉します。

二次電子検出器で検出された二次電子は電気信号に変換・増幅されてデジタル処理されます。

走査コイルの走査周期と同期して二次電子の強弱を明暗の明るさで表示するとSEM像を表示することができます。

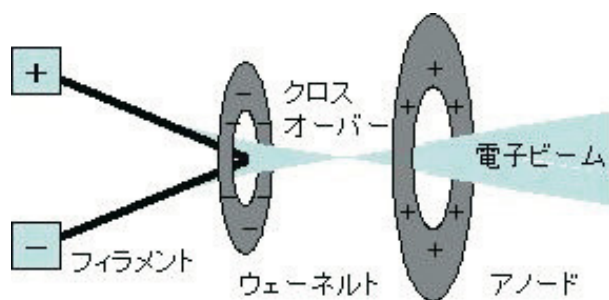
電子銃のはたらきとしくみ

続いてSEMを構成するそれぞれの要素のはたらきとしくみを見ていきます。まずは電子を発生する電子銃です。SEMの光源にあたる部分です。



汎用SEMには熱電子銃が使われています。

熱電子銃は、電子源に熱を加えることで電子のエネルギーを高くして飛び出させる電子銃です。電子源には電子が安定して取り出しやすいタングステンのフィラメントが使用されています。



熱電子銃は、電子を放出するフィラメント（陰極）、放出された電子を収束するウェーネルト（グリッド電極）、電子を加速するアノード（陽極）で構成されています。

フィラメントから飛び出してきた電子は、負の電圧（バイアス電圧）が印可されたウェーネルトにより収束します。収束するポイントを「クロスオーバー」と呼び、これがSEMの光源サイズとなります。収束した電子は正の高電圧（加速電圧）が印可されたアノードにより加速されます。

クロスオーバー

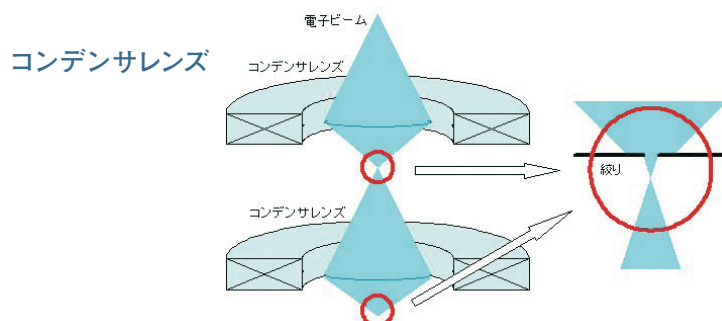
このサイズがSEMの性能を左右します。小さいほど細い電子ビームとなり分解能が高くなります。適切なクロスオーバーにするには、フィラメントとウェーネルトの位置合わせが重要となります。フィラメントの中心をウェーネルトの中心に合わせることはもちろん、フィラメントとウェーネルトの高さも適切に調整する必要があります。またウェーネルトが汚れていると電子を均等に収束できないため、フィラメント交換時には位置合わせと並びウェーネルトの清掃も非常に重要です。



キーエンスのVEシリーズでは、位置合わせや清掃作業が不要の「アジャストメントフリーフィラメント」が用意されており、どなたにでも簡単に交換できるほか、作業にかかる工数を大幅に短縮します。

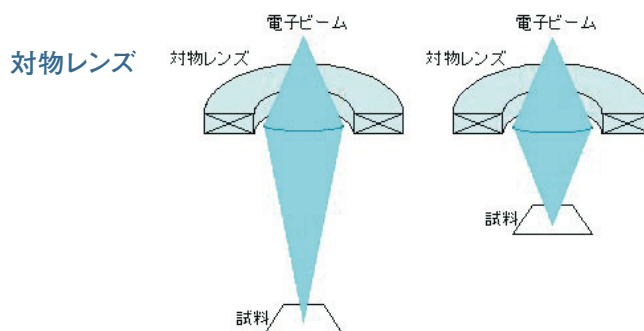
磁界レンズのはたらきとしくみ

フィラメントから放出され加速された電子を収束して非常に小さなスポットにするのがレンズの働きです。SEMでは光を屈折するレンズではなく、磁界により電子を曲げる磁界レンズを使用します。電子は、フレミングの左手の法則にあるように、磁界の中を通ると電磁力により進行方向が変わります。これを「偏向」といい、SEMではこの性質を利用し、電磁石をレンズとして使用しています。SEMには、電子ビームを収束するコンデンサレンズと試料に照射する電子ビームの焦点を調整する対物レンズの二つのレンズが搭載されています。



コンデンサレンズは、内部に設置された絞りとともに電子ビームをより細く収束するレンズです。フィラメントから飛び出した電子ビームはウェーネルトにより $20\mu\text{m}$ 程度のクロスオーバーに収束されます。コンデンサレンズではこの電子ビームをさらに $1/100$ から $1/5000$ に収束します。その結果、コンデンサレンズと絞りを通過した後の電子ビーム径は数百nm～数nmとなります。

コンデンサレンズにより電子ビームをより大きな角度で収束することで、電子ビームを細くしています。この収束する角度は可変できるようになっており、これが「スポット径」調整です。収束する角度を大きくすると、電子ビームを小さく収束するとともに電子ビーム周辺の収束しにくい電子を絞りで遮断します。



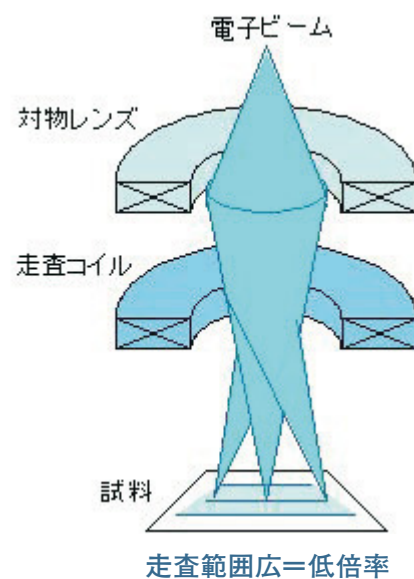
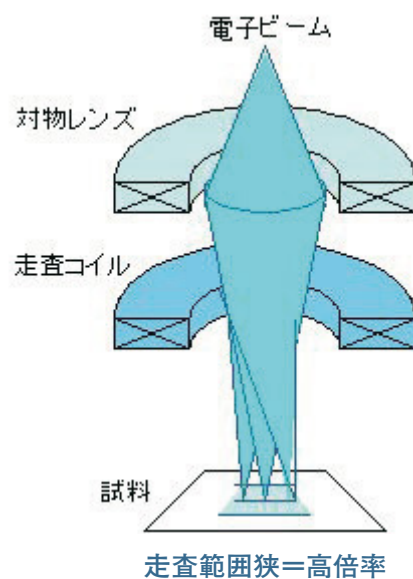
対物レンズは焦点距離を調整するレンズです。SEMでのピント調整は、対物レンズを構成する電磁石に流れる電流を変化させ、焦点位置が試料表面になるようにピント調整をしています。対物レンズによるピント調整で観察距離を自由に換えられ点もSEMの特徴です。



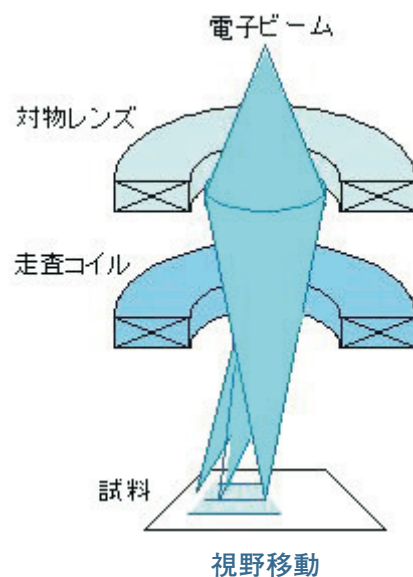
観察距離を短くすると電子ビームを収束する角度が大きくなります。角度が大きくなることでスポット径が小さくなるため、分解能が向上します。反面、焦点深度は浅くなります。

走査コイルのはたらきとしくみ

対物レンズで非常に小さなスポットに絞られた電子ビームを走査することで二次元の画像を映すことができます。電子ビームを走査する役割を担うのが走査コイル（偏向器）です。



SEM画像の倍率を変えるのも走査コイルの役割です。走査範囲を広くすれば視野が広がり倍率が低くなります。逆に走査範囲を狭くすることで倍率を高くします。



倍率を変えずに走査する場所を水平移動すると観える視野が移動します。これを視野移動（イメージシフト）といい、操作コイルを調整することで観る場所を移動できます。

同様に走査する方向を変えると像を回転させることができます。（スキャン回転）

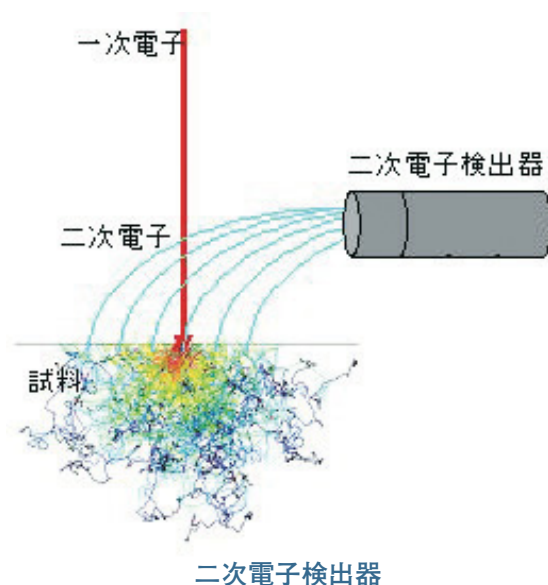


走査コイルによる電子ビームの振り角には限界があり、これが低倍率観察の制約となっています。同じ振り角でも、観察距離を長くすることで走査範囲が広がり視野が広がります。できるだけ低い倍率で観察したいときは、試料ステージを下げてワーキングディスタンス（走査コイルから試料までの距離）を長くすると有効です。

二次電子検出器のはたらきとしくみ

試料から放出される二次電子を検出するのが文字通り二次電子検出器です。

二次電子検出器は、シンチレーター（蛍光体）で電子を光に変換、それを再び光電子に変換し、光電子倍增管で増幅する仕組みになっています。



二次電子検出器の先端には正の高電圧が印加されています。この電圧で電気力を利用して二次電子を引き寄せて捕捉します。

二次電子は非常に微弱な信号であるため、引き寄せて捕捉し光電子倍增管で増幅することで観察に十分な信号量を得ています。

試料からあらゆる方向に飛び出した二次電子を引き寄せて捕捉することから、二次電子像は光学顕微鏡に例えるとあらゆる方向から照明を当てたような無影像と呼ばれる観察像になります。



星砂(有孔虫)の二次電子像

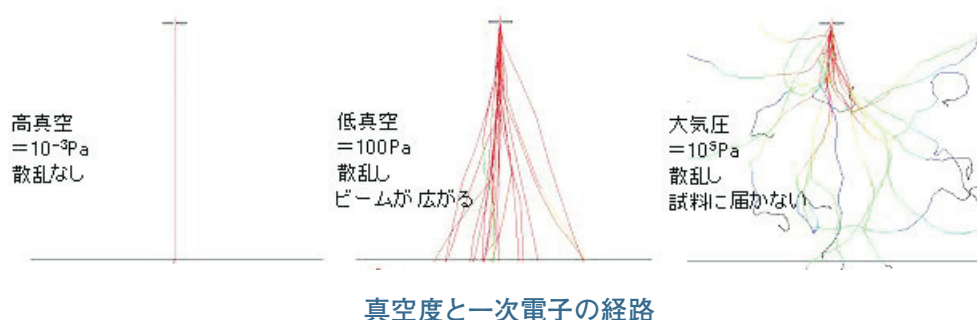
全体に影のない無影像となっています。

二次電子像では、平坦な部分が暗く、斜面とエッジ部分が白く観えます。

4章 * SEMのしくみ③～SEMの真空系

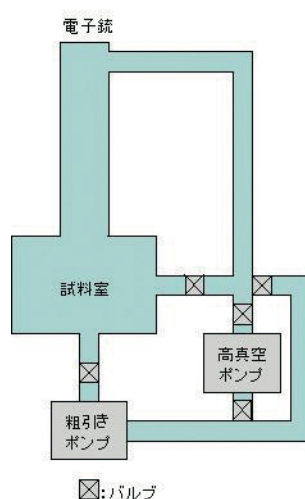
SEMで真空引きが必要な理由

SEMは電子銃部、鏡筒部、試料室を高真空にして使用します。電子は気体分子とも散乱を起こすため、二次電子の経路に気体があると試料に電子を上手く照射できません。さらに観察に使用する二次電子はエネルギーが弱いため、気体の分子と散乱を起こすと検出器で捉えることができません。またフィラメントの周囲に酸素があるとフィラメントはすぐに燃え尽きてしまいます。このような理由でSEM内部は高真空に保たれています。

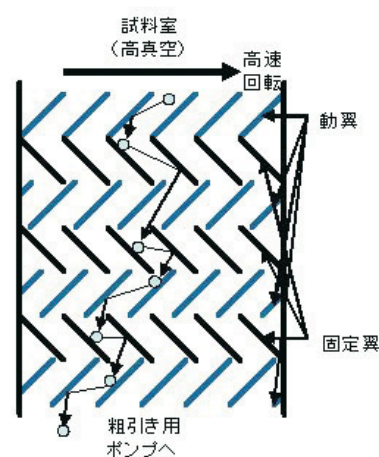


SEMの真空排気系

SEM内を真空にするために汎用SEMには粗引き用ポンプと高真空用ポンプの2台の真空ポンプが装備されています。



SEMの真空排気系概略



ターボ分子ポンプの構造

粗引き用ポンプには、一般的に油回転ポンプが使われており、大気圧から1Pa程度まで真空引きを行います。高真空ポンプには、油拡散ポンプかターボ分子ポンプが使用され、1Paから 10^{-3} ～ 10^{-5} Paまで真空引きを行います。高真空ポンプには、従来は安価な油拡散ポンプが多く使われていましたが、水冷が必要である点や起動/終了に時間がかかる点、取り扱いによってSEM内が油で汚染されるといった問題から、最近では高価なターボ分子ポンプを装備したSEMが増えてきました。

SEMのありようを変える新世代SEM

NEW 3Dリアルサーフェスビュー顕微鏡
VEシリーズ



- あらゆる試料を非蒸着で観察
- 低加速電圧観察対応で試料最表面の微細な形状も観察可能
- 3D機能標準搭載で観察から形状測定まで1台で可能
- フローチャートに従うだけの超簡単操作
- メンテナンスは消耗品交換のみで、調整も全て自動
- デスクサイドに設置できるコンパクトサイズで水冷も不要

デジタル顕微鏡の最新ソリューションを探せる
—— www.keymsp.jp ——

顕微鏡 お客様相談窓口 ▶



フリーダイヤル **0120-739-007**

専用メールアドレス

mtech@keyence.co.jp

株式会社 キーエンス

本社・研究所／マイクロ스코プ事業部

〒533-8555 大阪市東淀川区東中島1-3-14 Tel 06-6379-1141 Fax 06-6379-1140

www.keymsp.jp 記載内容は、発売時点での弊社調べであり、予告なく変更する場合があります。

Copyright© 2008 KEYENCE CORPORATION. All rights reserved.

SP

K2019U-0109-2