

## 像がどうして見えるか

SEM像は肉眼でものを見たような感じに見えるため、非常に取りつきやすい感じがします。しかし、よく見ていくと説明の付きにくいコントラストが観察されることがあります。このような場合、SEM像がどうして見えるのか、何故このような見え方をするのか、といったことを理解していなければなりません。

## 電子と物質の相互作用

試料に電子が入射すると、電子は試料の中で散乱し、徐々にエネルギーを失って最終的に試料中に吸収されます。その様子を図11に示します。試料中で電子が広がる大きさは、電子のエネルギーや試料の原子番号、密度によって違い、エネルギーが高いほど広がりは大きく、原子番号および密度が大きいほど広がり小さくなります。その様子は、モンテカルロ法と呼ばれるシミュレーションで知ることができます。

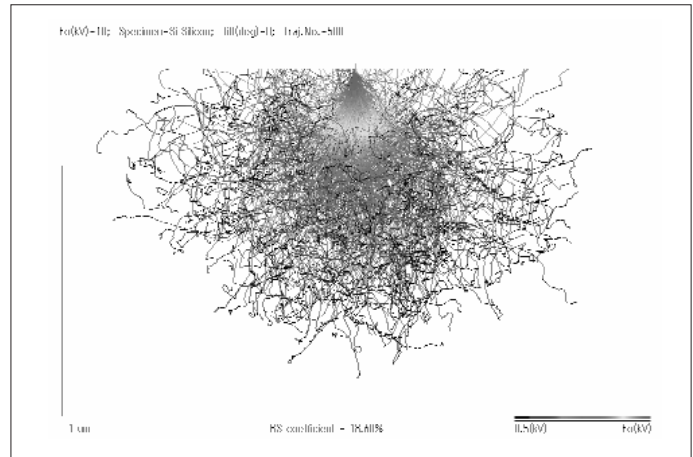


図11 試料中での電子の散乱の様子を示すシミュレーション

図12は、電子が試料に入射したときに、電子、光、X線などが放出される様子を示したものです。これらを利用して、試料表面（あるいは表面直下）を観察したり、分析する装置がSEMです。ですから、SEMは単純な形態観察装置ではなく、小さな領域の元素分析をしたり、状態を調べることができる、多くの機能を持った装置であるといえます。

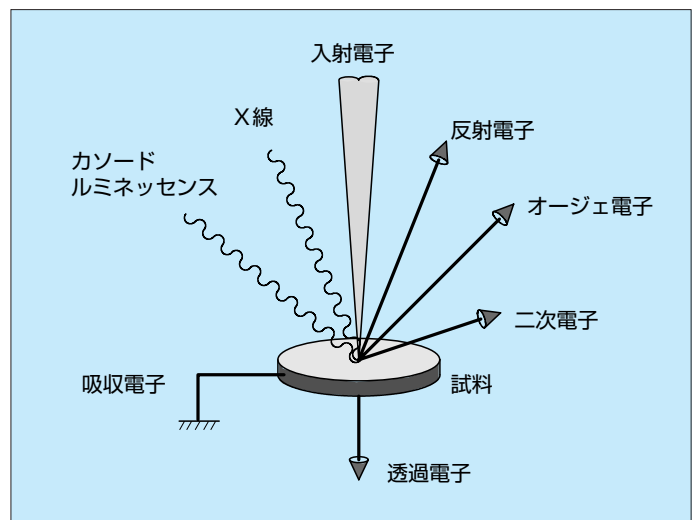


図12 試料からの種々の電子・電磁波の放出

図13に示すのは、試料から放出される電子のエネルギー分布です。二次電子が50 eV以下のエネルギーを持つのに対して、反射電子は入射電子エネルギーから下の極めて広いエネルギー範囲に分布しています。途中にある小さなピークはオージェ電子です。

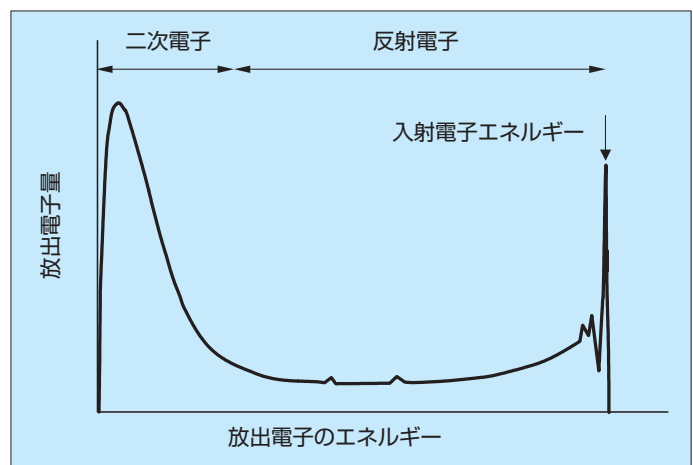


図13 試料から放出される電子のエネルギー分布

## 二次電子

試料に電子が入射したときに、試料を構成する原子の価電子が放出されたものが二次電子です。エネルギーが極めて小さいため、試料の奥深い場所で生成されたものはすぐ試料中で吸収され、試料の極表面で生成されたものだけが試料外に放出されます。これは、表面に敏感なことを意味します。また、図14に示すように、電子線が試料に対して垂直に入射した場合に比べて、斜めに入射した方が二次電子の放出量は多くなります。図15に実際例を示しますが、結晶表面の明るさの違いは電子線の入射角の違いによるものです。このことから、表面の凹凸を観察するのに二次電子が使われるわけです。エネルギーが小さいことから試料近傍の電位の影響も受けやすく、帯電した試料では異常なコントラストを生じるほか、半導体デバイスの電位測定に使われることもあります。

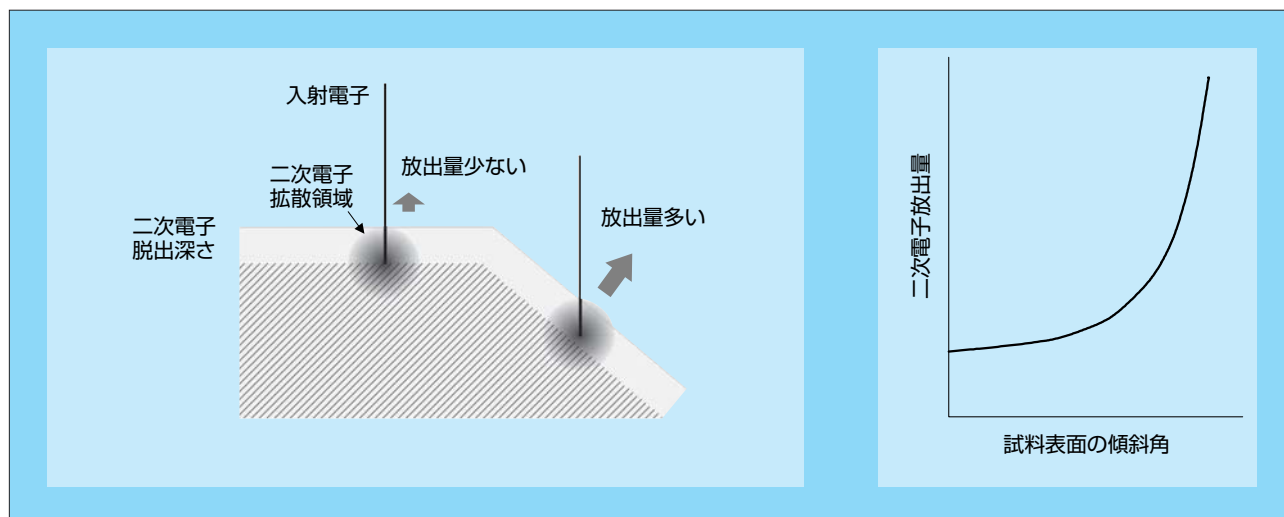


図14 電子プローブの入射角と二次電子放出量の関係

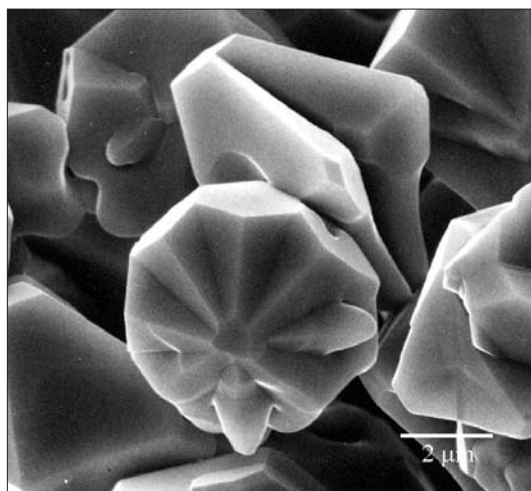


図15 酸化タングステン結晶の二次電子像

## 反射電子

反射電子は、入射電子が試料中で散乱していく過程で後方に散乱し、試料表面から再び放出されたもので、後方散乱電子とも呼ばれます。二次電子に比べて高いエネルギーを持っているので、比較的試料の奥からの情報を持っています。試料の組成に敏感で、図16に示すように試料を構成する物質の原子番号が大きいほど、反射電子は多く放出されます。すなわち、重い元素で出来たところほど明るくなるので、反射電子像は組成の違いを見るのに適しています。図17にその実際例を示します。一方、図18に示すように、試料表面に凹凸があると反射電子は鏡面反射方向に強い強度を持ちますから、表面の凹凸を観察することにも使えます。

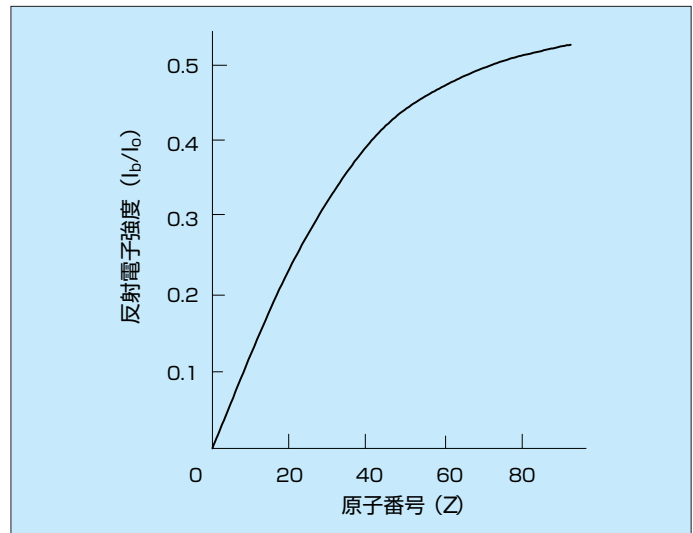


図16 反射電子強度の原子番号依存性

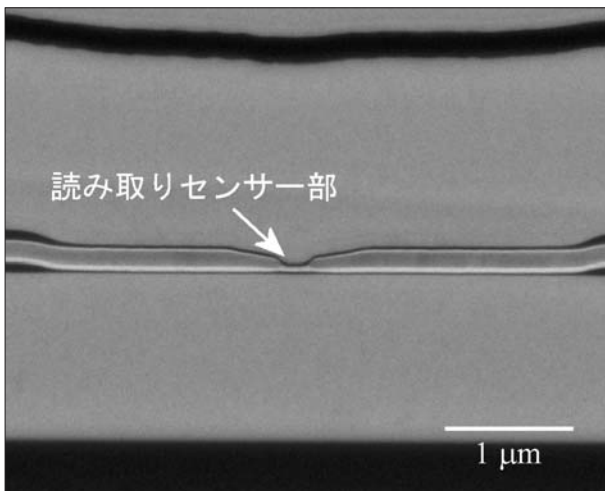


図17 反射電子組成像の例  
試料：ハードディスク用磁気ヘッド

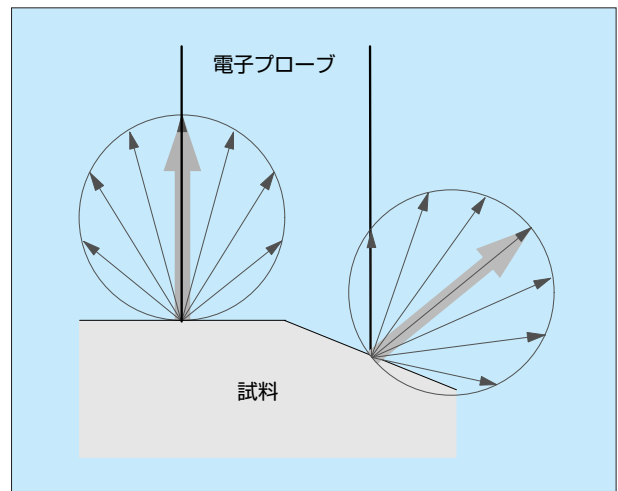


図18 電子プローブ入射角と反射電子強度の関係

組成が均一な結晶性試料に電子が入射すると、図19に示すように、結晶の向きによって反射電子強度が変わります。これを利用すると結晶の方位の違いを像として観察することができ、電子チャネリングコントラスト (Electron Channeling Contrast : ECC) と呼びます。図20にその例を示しますが、試料をわずかに傾斜するとコントラストが変わるのが特徴です。

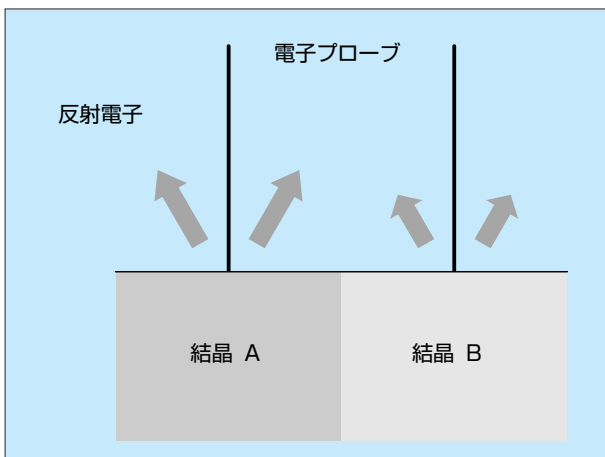


図19 結晶方位と反射電子強度の関係

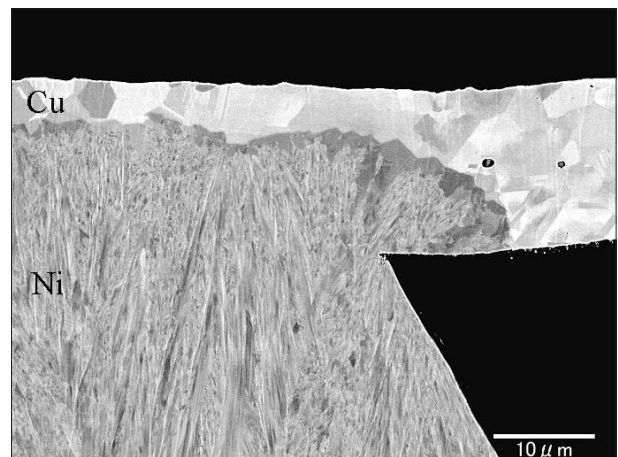


図20 電子チャネリングコントラストの例  
試料：フレキシブル基板断面

## エッジ効果

図21のように試料表面にステップ状の段差があったり、細い突起物があると、段差のエッジ部分がシャープな線ではなくある幅を持って明るくなったり、突起物全体が光るような現象が起きます。これをエッジ効果と言います。これは、図22のように、電子プローブが側壁から離れた位置に照射されているにもかかわらず、試料中で拡散した電子によって側壁から二次電子が放出されるために起きる現象です。

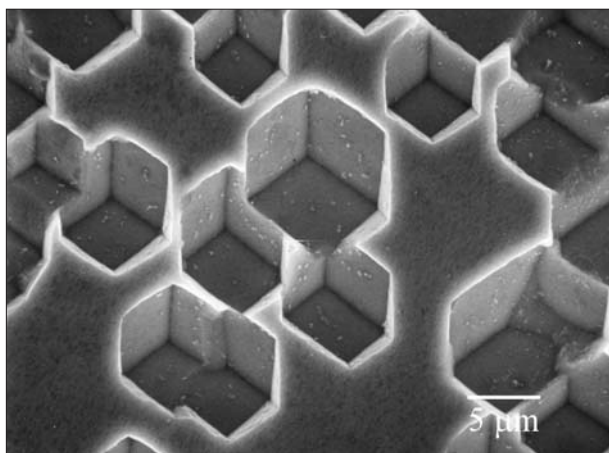


図21 エッジ効果の例  
試料：鉄鋼のエッチピット 加速電圧 25kV

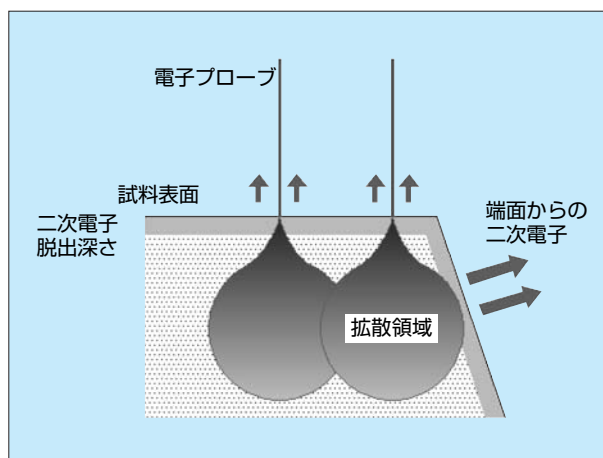


図22 入射電子の拡散とエッジ効果

## 加速電圧の影響

加速電圧を変えると試料に入射した電子の侵入深さが変わります。この結果、加速電圧を上げると、試料内部からの情報がバックグラウンドとなって試料表面のコントラストが低下します。試料内部では電子プローブは広がってしまいますから、図23のように試料内部に構造物があるときは、構造物の像がぼけて重なることもあります。また、加速電圧が高くなるとエッジ効果も顕著になります。したがって、表面構造を見るためには低い加速電圧を使った方がよいことになります。

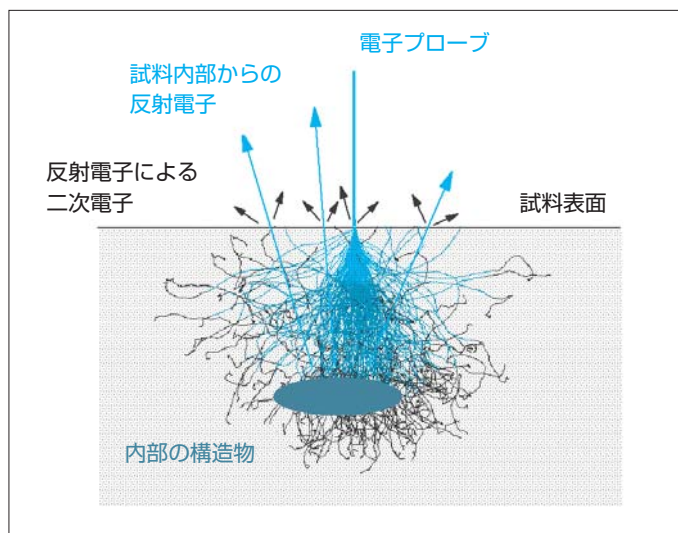


図23 内部構造の表面像への重なり

図24は加速電圧を変えて観察した窒化ホウ素の板状結晶です。原子番号が小さくしかも薄い結晶が重なったものですが、加速電圧が高いと下に重なった結晶が透けてしまっています。宙に浮いていると思われる結晶が明るく見えているのは結晶の裏側から放出された二次電子が検出されているためであり、暗く見えているのは下に重なった結晶のために二次電子が放出されないためと考えられます。加速電圧を1kVまで下げると結晶表面のステップ状の構造がコントラスト良く観察されます。

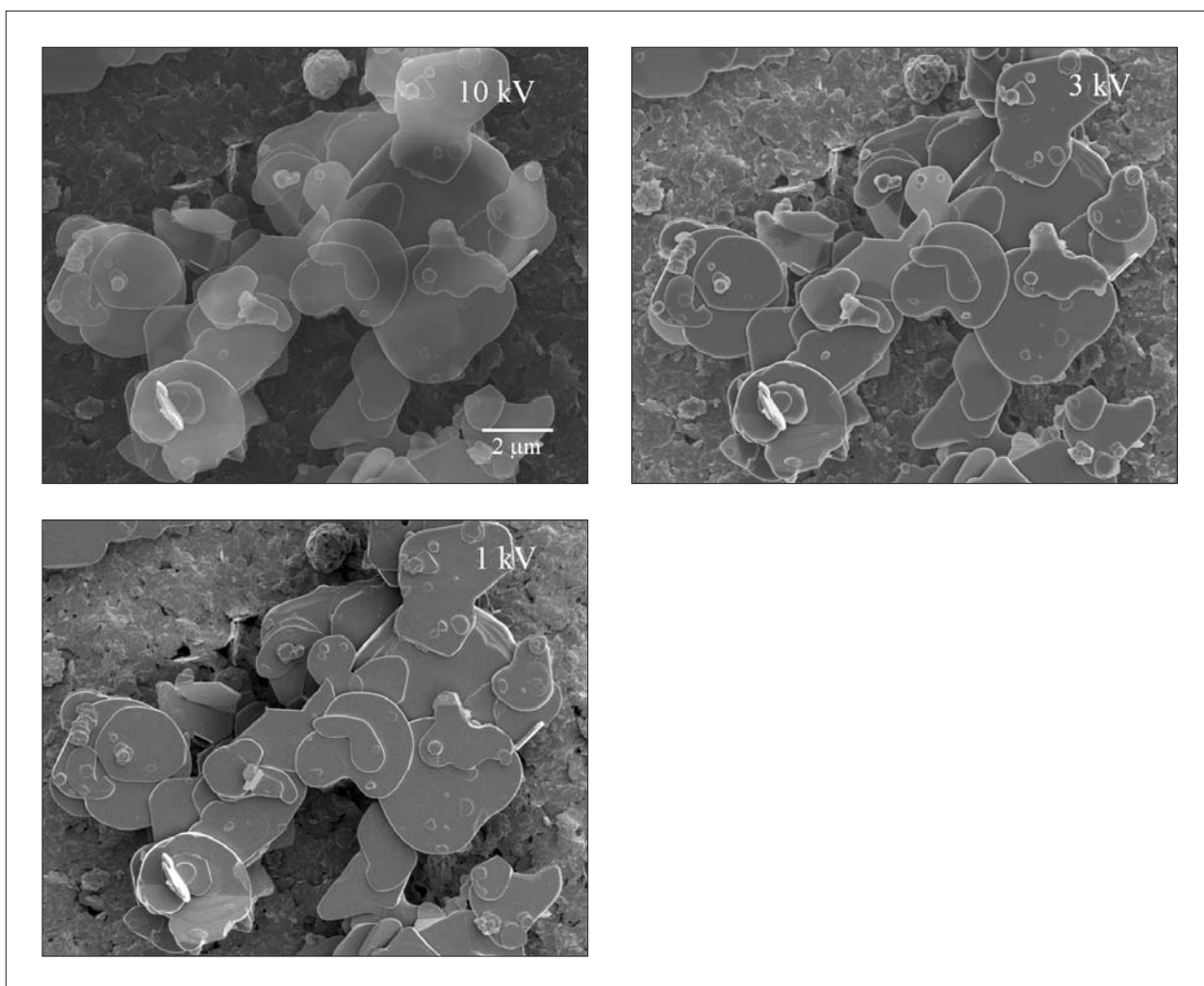


図24 加速電圧の違いによる二次電子像コントラストの違い  
試料：窒化ホウ素の板状結晶

## 二次電子検出器の照明効果

二次電子像では、電子プローブに対して試料表面が垂直になっている場合が暗く、傾斜が大きくなるにつれて明るくなりますが、実際のSEM像では二次電子検出器の位置の影響が加わります。図25は、二次電子検出器に入射する二次電子の軌道を示したものです。二次電子は、二次電子検出器先端に印加された高電圧により加速されて検出器に入射しますが、検出器の反対方向に放出された二次電子もエネルギーが低いいため検出器に引き込まれます。検出された電子の軌道は照明方向を意味するので、無影照明のような照明効果を与えることになります。一方、エネルギーの比較的高い反射電子の一部も検出器に入射しますが、これは、方向性を持った照明効果を与えます。両者を併せた結果として、検出器方向から柔らかい照明を当てたような像が得られます。二次電子の軌道は試料に対する照明の方向となります。実際のSEM像では二次電子検出器のところに光源を置いて試料を照らし、電子プローブの方向から観察していると考えます。

上に述べたのは多く用いられているE-T検出器の場合ですが、TTL検出器の場合は若干異なります。TTL検出器の場合は、図26に示すように、試料から放出された二次電子は対物レンズの磁場に拘束された状態で光軸に沿って運動し、二次電子検出器に入射します。この場合、照明方向と観察方向が同じになるため、立体感が少なくなり通常の二次電子検出器を使ったSEMとは大分違った見え方となります。

## 反射電子検出器の照明効果

反射電子の場合も二次電子の場合と同様に検出器から照明を当てたような像が得られます。ただし、反射電子は二次電子像と違って直進して検出器に入射するので、検出器の位置によって見え方が大きく変わり、また陰影感の強い像となります。図27は、反射電子検出器の1例です。試料の真上に、電子線に対して対称な位置に2つの検出器が置かれています。出力信号の演算A-Bを行うと、検出器Aから照明を当てたような像になるので、試料表面の凹凸が観察されますが、出力信号の演算A+Bを行うと、電子プローブの方向から照明を当てたようになるので、表面の凹凸は消えてしまい、組成の違いが観察されます。

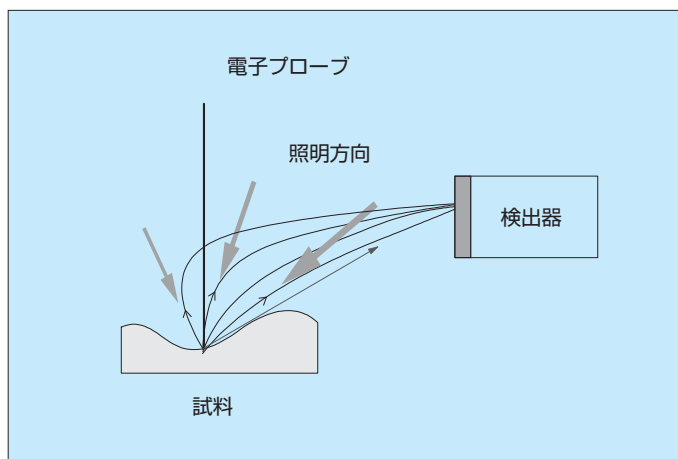


図25 二次電子検出器の照明効果

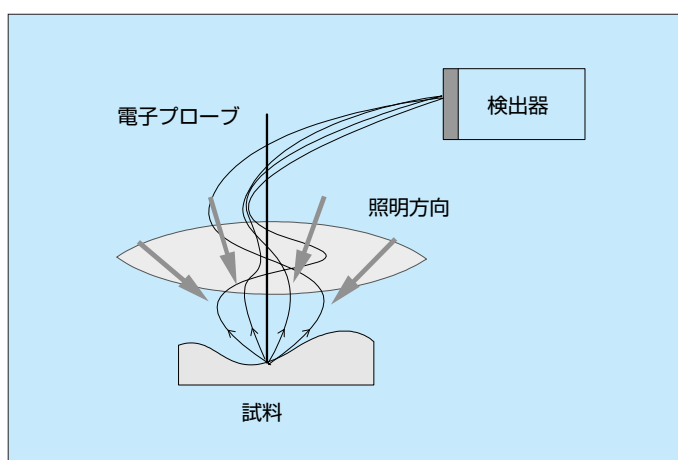


図26 TTL検出器の照明効果

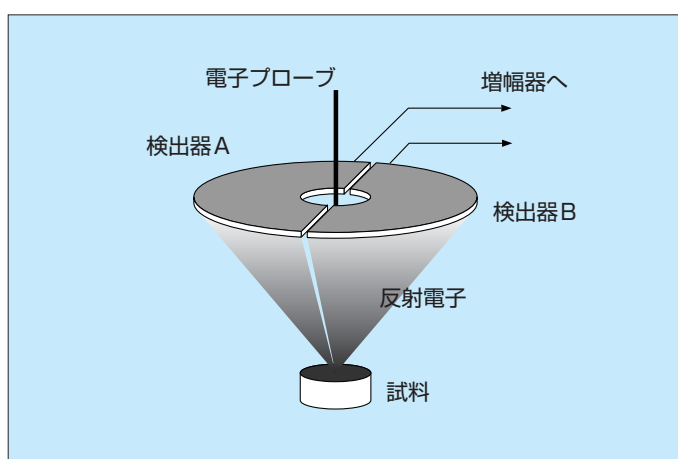


図27 2分割反射電子検出器