

## 走査電子顕微鏡によるリアルタイムステレオ観察

小竹 航

1. SEMによるステレオ観察法の流れ<sup>1)</sup>

走査電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) は、細く絞った電子線を用いることから、焦点深度の深い高分解能観察が可能である。また、SEMで得られる画像 (SEM像) は、立体的なコントラストを有することが特徴である。しかし、一般的に観察される SEM像は単眼視の情報であり、表面形状の情報を十分に生かしているとは言えない。そこで、SEM像のステレオ観察法が1960年代後半から試みられてきているが<sup>2)</sup>、2枚の視差画像の取得が煩雑であったり、ステレオ観察に専用のメガネや表示装置が必要であったりするため、これまでそれほど普及してこなかった。ところが、最近のコンピュータ技術の進歩や表示技術の進歩により、新しい可能性が出てきている。

## 2. 立体観察の原理

観察モニターに表示されたSEM像が立体的に見える原理を図1に示す。SEM像を立体観察するためには、人の視差に応じた2枚の画像が必要となる。人の眼の間隔 (瞳孔間距離) が約65 mm、眼とモニターの距離が約600 mmとした場合、観察モニター画面上の位置  $f_0$  が焦点が合うようにすると、視差角  $\omega_0$  は約3°と計算することができる。

$f_0$  よりも手前の位置  $f_1$  に物体Pが存在するように見えるためには、物体Pの視差角  $\omega_1$  となり、右眼と左眼で見た画像は、観察モニター上ではそれぞれ  $P_R$  および  $P_L$  の位置に投影された画像となる。これらの投影された画像が、それぞれ対応した眼で見えるようにすることで、物体が立体

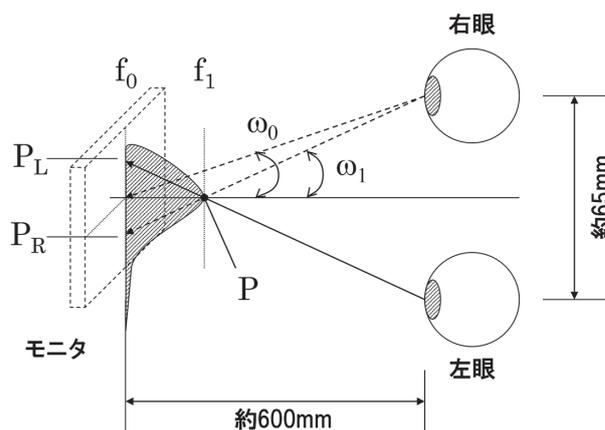


図1 ステレオ観察における立体構造とモニター表示の原理

的に観察できる。この時、 $\omega_0 < \omega_1$  となるが、 $f_1$  よりも更に手前に物体Pが飛び出しているように見るには視差角  $\omega_1$  がより大きくなる。このように視差角が大きくなると、立体感は強くなるが、左右の画像の違いが大きくなるため、眼の疲労感が大きくなると言われている。一方、視差角が小さくなると、立体感は乏しくなるが、立体観察ができないということではない。

また、ここでは観察モニターと眼の位置関係を前述のように考えて視差角を算出したが、瞳孔間距離は人により多少異なり、モニターとの距離はモニターの大きさにも依存するため、視差角が必ずしも3°である必要は無く、コンピュータ画面や一般的なプロジェクタに投影した結果からは、視差角2°程度で十分な立体感を得られることが分かっている。

## 3. 視差画像取得方法

SEMで立体観察をするために視差画像を取得する方法は様々あるが、一般的には①試料を傾斜させて視差画像を得るステージ傾斜法、②電子線を傾斜させてその傾斜角に応じた視差画像を得る電子線傾斜法がある。

## 3.1 ステージ傾斜法

最も一般的に用いられている方法で、図2に示すように試料台を傾斜して視差角に応じた角度の異なる2枚の画像を1枚ずつ取得する。試料傾斜が可能なSEMであれば、



Real-Time Stereo Observation by Scanning Electron Microscope  
Wataru KOTAKE  
2006年 茨城大学大学院応用粒子線科学専攻修了  
現在 (株)日立ハイテク コアテクノロジー & ソリューション事業統括本部 CTシステム製品本部 解析システム第一設計部 技師  
連絡先: 〒312-8504 茨城県ひたちなか市新光町552-53  
E-mail wataru.kotake.cj@hitachi-hightech.com

2022年6月21日受理

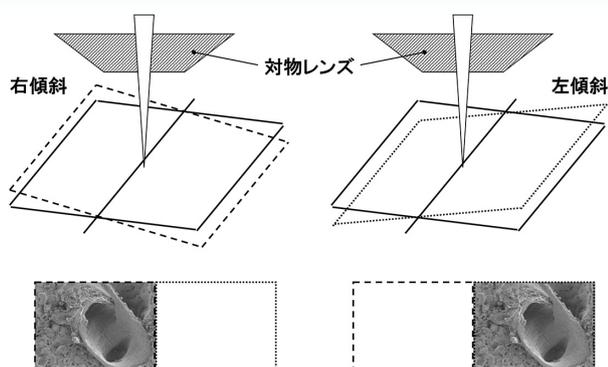


図2 試料傾斜による視差画像取得法

どんな装置でも視差画像が得られること、高分解能観察が可能であることが利点である。ただし、試料移動装置の性能と関係するが、一般には試料を傾斜させた時に視野が異なる位置に移動する「視野逃げ」が発生するため、同一視野で画像を取得することは煩雑な作業であり難点である。

### 3.2 電子線傾斜法

電子線を傾斜して視差画像を得る方法は既に1970年代に登場し、TVレートで立体観察ができるSEMが紹介されている<sup>3)</sup>。電子線を傾斜させる方法については様々な手法が考案されているが、ここではレンズの集束作用を利用して電子線を傾斜させる方法について紹介する。レンズの集束作用を利用した電子線傾斜による視差画像取得法を図3に示す。

図3に示す傾斜角制御コイルにより、角度 $\omega_0$ で傾斜された電子線は、対物レンズの軸外を通過し、その後、対物レンズの集束作用により、傾斜角 $\omega_i$ で試料に入射する。傾斜角 $\omega_i$ の電子線で試料上を走査することで視差画像が取得される。電磁的に電子線を傾斜させる方法の利点は、1ライン単位または1フレーム単位で左右切替が可能のため、1回の操作で2枚の視差画像を取得できることにある。また、走査速度に応じてそれぞれ視差画像を取得できることから、TVレートでもステレオ観察ができる。更に、任

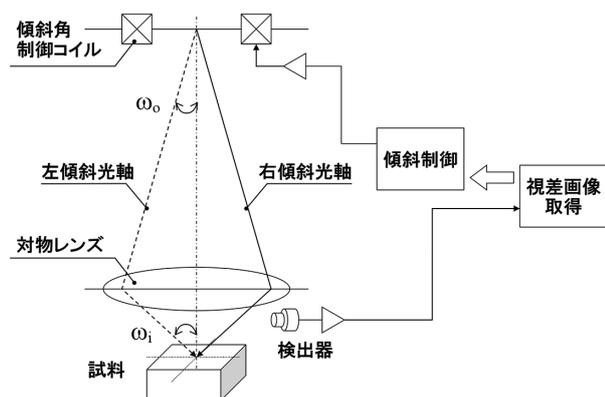


図3 電子線傾斜による視差画像取得法

意の方向や角度に電子線を傾斜できることから、試料を機械的に回転させなくても画像を回転させてステレオ観察をおこなうことができる点も、実際の観察においては便利である。

しかし、集束作用を利用した場合は、電子線がレンズの軸外を通過することで発生する収差(軸外収差)が増大し、分解能が低下するため、観察倍率は2,000倍程度までとなる課題もある。なお、近年は軸外収差を低減する技術を備えたSEMも考案されてきている<sup>4,5)</sup>。

ここで、電子線傾斜法を用いて取得した左右の視差画像から生成されたアナグリフ画像を図4に示す。試料はポリビニルアルコール (PVA)、検出器は反射電子検出器、加速電圧5 kV、倍率1,200倍、真空度70 Paで観察をおこなった。前処理は70 Paの低真空条件下だったため実施していない。今回、左右の視差画像は80秒(1枚の視差画像取得時間は40秒)で取得した。図4に示すアナグリフ画像は、赤青メガネ(右眼が青、左眼が赤)を用いることにより立体観察が可能である。

## 4. 3D 観察(表示)方法

SEMで得た視差画像をステレオ観察(3D表示)する方法は、次のようなものがある。

### 4.1 専用メガネを用いて観察する方式(メガネ方式)

先に紹介した左右の視差画像を赤と青の光で重ねて表示し、左右に赤と青のカラーフィルタ(セロファン紙)を貼ったメガネ(赤青メガネ)を用いて観察する方法をアナグリフ(anaglyph)という。この方式はパソコンで簡単に合成できること、更に通常のプロジェクタやモニターにおいても赤青メガネさえあれば表示可能である点から、広く普及している。また、アナグリフ方式を用いることにより、ステレオ像を簡単に印刷表現できる点も魅力である。

一方、左右の画像に異なる偏光を掛けたものを重ねて投影し、これを偏光フィルタの付いたメガネで観察する方法

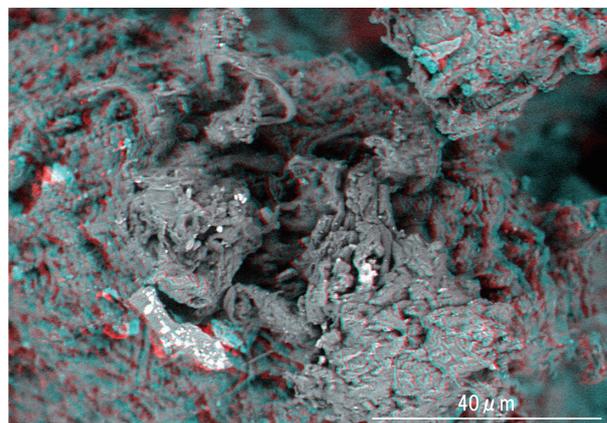


図4 電子線傾斜で取得した視差画像

もある。これには円偏光と直線偏光を用いるものがある。3Dシアターの投影では、カラー投影が可能であることから、この偏光方式が多く用いられており、パソコンやテレビの液晶モニターにおいても、偏光方式をとるものが出てきている。

このほか、動画表示の場合は、専用の液晶シャッターメガネを用いて、左右の画像を高速で交互にモニターに表示するものが開発されている。

#### 4.2 特殊な3D液晶モニターを用いて裸眼で観察する方式(裸眼方式)

近年、メガネを利用しないでステレオ観察をおこなう裸眼立体ディスプレイが開発されている。これには縦縞ないし、横縞のフィルタを重ねて左右の眼に見える像を分離する「視差バリア方式」や小さなレンズを板状に並べて左右の像を分離する「レンチキュラ方式」がよく知られている。しかし、どちらの方法もフィルタを通して観察(表示)するために、モアレの発生や輝度の低下が見られる。また、左右の画像を分離して1つのモニターに表示するために、モニター本来の解像度が半減する点も問題である。

一般に、SEMの画像は1000ライン以上の走査線を有することから、SEM観察に適した3D観察モニターは、理想的には片目当たりSXGA(1280×1024)以上の解像度があることが好ましい。

## 5. おわりに

SEMによる立体観察が可能になることで、奥行きが実感できるようになった。そのため、従来のSEMでは困難であったSEM内でのマニピュレータの操作性が向上し、その利用の可能性が拡大している。実際、SEM内に搭載可能なマニピュレータも開発され、生物試料のマニピュレーションへの利用・有用性も確かめられてきている<sup>6,7)</sup>。

本内容は、文部科学省委託事業「次世代の電子顕微鏡要素技術の開発」で採択された課題「力覚制御による体感型3Dナノ解剖バイオ顕微鏡の開発」(2006~2008)と文部科学省・先端計測分析技術・機器開発事業の開発課題「実用化に向けたリアルタイムステレオSEMの開発」(2009~2011)による成果を含む。

#### 参考文献

- 1) 山田満彦：ステレオ観察，日本電子顕微鏡学会関東支部編，走査電子顕微鏡，pp.108-111，共立出版(2000)
- 2) Kimoto, S. and H. Hayashi：Stereoscopic observation in scanning microscopy using multiple detectors, *The Electron Microprobe*, 480, John Wiley(1966)
- 3) Pawley, J. B.：Design and performance of presently available TV-rate stereo SEM systems, *Scanning Electron Microscopy*(1978)
- 4) 牛木辰男ら：力覚制御による体感型3Dナノ解剖バイオ顕微鏡の開発，日本顕微鏡学会第65回学術講演会予稿集，96(2009)
- 5) 伊東祐博ら：リアルタイムステレオSEMの実用化開発，日本顕微鏡学会第66回学術講演会予稿集，179(2010)
- 6) Iwata, F. *et al.*： *Arch. Histol. Cytol.*, **72**(4-5), 271-278(2009)
- 7) 岩田太，牛木辰男： *O plus E*, **34**(3), 229-234(2012)

## 2020年4月より「化学工学－電子版－」を配信しています

化学工学会情報サービスセンター

PC, スマホに対応。お気に入り記事登録機能付き！  
(毎月の10日頃発行です。)