

# 電子顕微鏡観察入門

椿野 晴繁\*・山本 厚之\*

Introduction to Transmission Electron Microscopy  
Harushige Tsubakino and Atsushi Yamamoto

**Synopsis:** A transmission electron microscope (TEM) is a useful tool for materials scientists because a clear image in high magnification can be obtained and composition in a nano-scale region can be analyzed. However, it seems difficult to operate a TEM. The aim of present paper is to explain elemental functions of a TEM and elemental operations for observing microstructures. An introduction of the roles of lenses and apertures is outlined to observe the TEM images. Illumination conditions to take a bright field, dark field and also high resolution transmission electron microscopic (HRTEM) images are explained. Energy dispersive X-ray analysis (EDX) is briefly mentioned.

**Key words:** transmission electron microscope; bright field image; dark field image; high resolution electron microscopy; energy dispersive X-ray analysis.

## 1. はじめに

「透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope : TEM) を使いたいが、難しそう」という声をしばしば聞く。それはおそらく以下のようなことのためであろう。

- (1) いかにも繊細な装置で、下手に扱くと壊れそうなこと。
- (2) 像の解釈が難しいこと。
- (3) 結晶学の知識が必要なこと。
- (4) 試料作製が面倒くさいこと。

これらのうち、(1) については誤解であり、(2) ~ (4) は真であろう。(1) は、古い世代のTEMに対するイメージである。今の世代のTEMは、試料脱着時とフィラメント点灯時さえ注意すれば、壊れることはほとんど無い。TEMの原理と、電子回折の基礎を理解すれば、TEM観察は容易である。様々なつまみを種々操作して、色々な条件で観察を行っているうちに、結晶学と像・回折図形の関係が理解できるようになるのである。

以下、TEMの原理からその観察入門までを、できるだけ平易に記してみた。

## 2. TEMの原理

### 2.1 電子線の発生

固体を加熱すると、固体内の自由電子は、固体と真空の界面に存在するポテンシャル障壁を乗り越えて外部に放出

される。これを熱電子放出と呼び、従来から使用されているタングステン・フィラメントがこの典型であり、 $\text{LaB}_6$ はこのポテンシャル障壁が低い材料である。従って加熱温度はタングステン・フィラメントの方が高く、約2600K、 $\text{LaB}_6$ では1500~1900Kである。試料に収束させた際の電子流密度は、前者では約 $3\text{A}/\text{cm}^2$ 、後者は約 $20\text{A}/\text{cm}^2$ である。これらを熱電子放出型フィラメントと呼ぶ。かなりの高温まで加熱されるので、フィラメントのつまみは徐々に回し、急熱・急冷は極力避けなければならない。

最近、フィラメントを加熱せず、強い電界によるトンネル効果により電子を引き出す、電界放出 (Field Emission : FE) 型電子銃を用いたTEMが市販されるようになってきた。この特徴は、放出される電子のエネルギー幅が狭い (約0.2eV) こと、電子流密度が高い ( $5 \times 10^3 \text{A}/\text{cm}^2$ ) ことであり、高分解能観察、微小部の分析に適する。

### 2.2 電子レンズおよびTEMの構成

TEMで使用されるレンズは磁界型のレンズであり、電子はフレミングの左手の法則により、ひねられながら一点に集束する。従って、本来は観察倍率を変えると像は回転する。特に後述の電子回折パターンと像の向きは、観察倍率により変化することに注意すべきであるが、最近のTEMではそれが補正されて、無回転になっていることが多い。

Fig.1にTEMの模式的な構成図を示す。TEMには、集束レンズ ( $L_1, L_2$ )、対物レンズ ( $L_3$ )、中間レンズ ( $L_4$ )、投射 (投影) レンズ ( $L_5$ ) の4種類のレンズがある。集束レ

\* 姫路工業大学[Himeji Institute of Technology, 2167, Shosha, Himeji 671-22], 工博

レンズ、対物レンズは一段ではなく複数のレンズにより構成される。しかし、以下では、簡単のため、集束レンズは2段（第一集束レンズ（L1）、第二集束レンズ（L2））、その他は1段として話を進める。

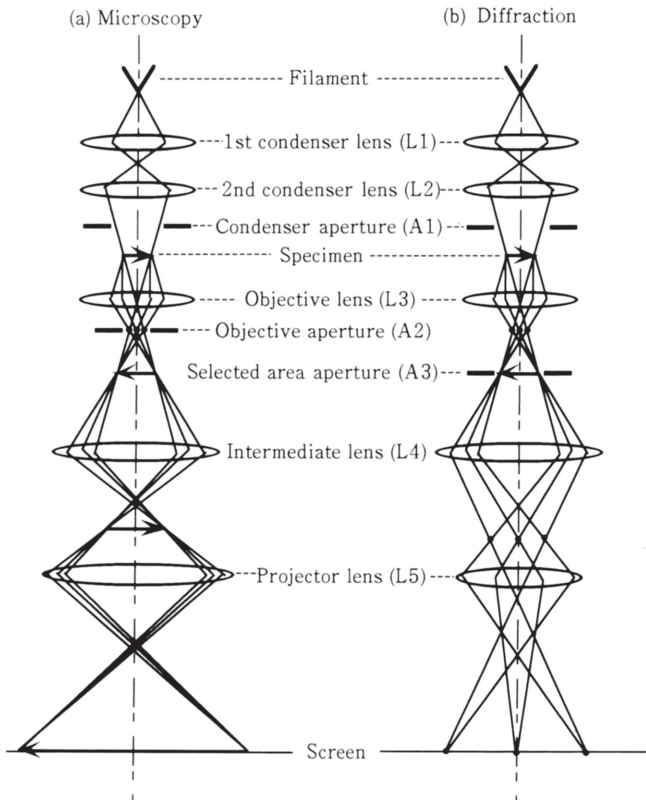


Fig.1. Ray path in a transmission electron microscope. (a) :microscopy condition, (b) :diffraction condition.

電子銃から出た電子は、第一集束レンズ（L1）により縮小され、小さい光源像をつくる。“Spot size” つまみは、第一集束レンズ（L1）の電流を調整するためのものであり、これにより、光源像の大きさを選ぶ。

第二集束レンズ（L2）は、試料に照射する面積を変化させるために使われる。操作盤面の“Condenser” つまみは、このレンズの電流の調整を行うためのものである。

対物レンズ（L3）は焦点を合わせるためのものであり、“Focus” つまみで操作する。

中間レンズ（L4）は倍率を変化させるために使われるものであり、“Magnification” つまみで操作する。対物レンズ（L3）と中間レンズ（L4）だけでも像観察はできるが、像を歪ませることなく高倍率を得るために、投影レンズ（L5）を使用する。電子回折図形の焦点を合わせる“Diffraction focus” つまみは、投影レンズ（L5）の電流を調整するためのものである。

TEMの主な機能は像観察と電子回折である。Fig.1 (a) は像観察の時、(b) は電子回折の時の光路である。(a) ,

(b) は、中間レンズ（L4）より上は全く同じであり、中間レンズ（L4）および投影レンズ（L5）の倍率を変えているだけである。

Fig.1中には3種類の絞り、集束絞り（A1）、対物絞り（A2）、制限視野絞り（A3）も示した。集束しぼり（A1）はビームの周辺部を除いて球面収差の影響を低減するために使われる。

Fig.2に集束絞り（A1）の径を変えたときの像を示す。SUS304中の析出物の観察例である。

(a) は直径400 $\mu\text{m}$ 、(b) は200 $\mu\text{m}$ 、(c) は20 $\mu\text{m}$ の絞りを使用した像である。大まかには像の変化は無いように見えるが、析出物の縁および周辺の微細な黒い点などを仔細に見れば、絞りの径が小さいほどシャープになっていることが判る。しかしながら、絞りの径を小さくしすぎると像は暗くなる。長時間露光（数10秒）が必要となり、試料の

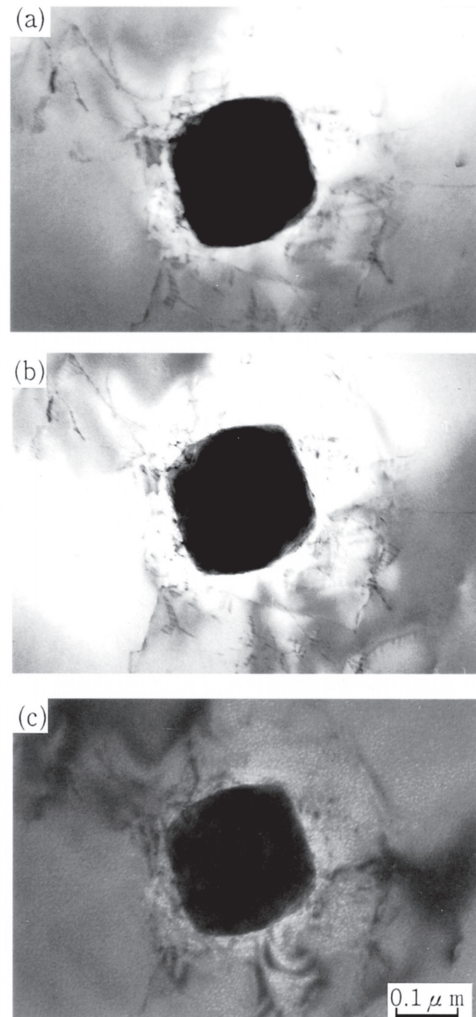


Fig.2. Change in TEM images depending on size of condenser aperture.

(a) :400, (b) :200, (c) :20  $\mu\text{m}$  in diameter.



ドリフトによる像の流れが生じて (c) のように不鮮明な像となる。露光時間約2秒以内を目安に絞りの径を選ぶ必要がある。

対物絞り (A2) は、結像に寄与するスポットを選ぶため、制限視野絞り (A3) は、特定の部分の回折図形を得るために用いられる。これらの実例については後述する。

レンズと絞りの他に、TEMには各種偏光コイルおよび非点補正コイルが組み込まれている。これらについては適宜述べる。

### 3. 像と電子回折図形

#### 3・1 電子回折図形ならびに明視野像と暗視野像

結晶性の試料に電子線が入射すると、X線回折の場合と同様に回折が生じる。その基礎となるのは、Braggの法則であり、電子線の波長を $\lambda$ 、試料の面間隔を $d$ とすると、

$$\lambda = 2d \sin \theta_B \dots \dots \dots (1)$$

を満足する角度 $\theta_B$ に反射 (回折) が生じる。X線との相違点は、波長である。電子線の波長は、加速電圧に依存して変化し、例えば、100kVでは、 $\lambda=0.00370\text{nm}$ 、200kVでは、 $\lambda=0.00251\text{nm}$ である。これに対して、X線回折にしばしば使用されるCu-K $\alpha$ は、 $\lambda=0.1542\text{nm}$ であり、約2桁大きい。従って、 $\alpha\text{-Fe}$ の格子定数を $a_0=0.28665\text{nm}$ として、(200)面による回折の際の $\theta_B$ を求めると、Cu-K $\alpha$ では $\theta_B=32.5^\circ$ となるのに対し、200kVで加速された電子線では、 $\theta_B=0.502^\circ$ となる。すなわち、入射電子線にほぼ平行な面で回折が生じる。

電子回折図形において、中心の、強度の高い斑点を透過斑点と言う。三次元座標の原点 (0,0,0) であるが、慣習的に000と表記する。(hkl)面による回折により生じた斑点をhklと表す。000とhkl斑点の間の距離は (hkl)面の面間隔の逆数に比例する。また、二つの面 ( $h_1k_1l_1$ ) と ( $h_2k_2l_2$ ) により、回折された斑点 $h_1k_1l_1$ と $h_2k_2l_2$ が、000を挟んでなす角度は、( $h_1k_1l_1$ )面と ( $h_2k_2l_2$ )面のなす角度に等しい。従って、電子回折図形を解析すると、試料の結晶構造、結晶面方位などを知ることができる他、析出物の同定も可能である。

高倍率像を観察できることはTEMの利点の一つであるが、その反面、観察視野が狭いという欠点を持つ。そこで、通常は、まず光学顕微鏡で試料の組織観察を行い、なぜTEM観察が必要か、TEMで何をみたいかを明らかにしてからTEM観察を行う。Fig.3に、Fe-0.19C-2.30Mo (mass%)鋼を、1523K、1.8ksのオーステナイト化処理後、883Kで72ks、等温変態させた試料の光学顕微鏡組織写真を示す<sup>1)</sup>。(a)は電子回折図形である。透過斑点のみを対物絞り

(Fig.1 A2)で選び、像観察を行うと、(b)のようになる。これが明視野像 (Bright Field Image : BFI) と呼ばれるものである。(a)の電子回折図形を解析した結果、2種類の炭化物、 $\text{Mo}_2\text{C}$ と $\text{M}_6\text{C}$ が形成されていることが判った。(c)、(d)は、それぞれ、 $\text{Mo}_2\text{C}$ 、 $\text{M}_6\text{C}$ の回折斑点を対物絞りを選んで撮影した像であり、暗視野像 (Dark Field Image : DFI) と呼ばれる。(b)、(c)、(d)は同一視野を示しており、 $\text{Mo}_2\text{C}$ はフェライト粒内に形成され、 $\text{M}_6\text{C}$ は旧オーステナイト粒界に形成されていることが判る。このように、TEM観察により、異なる相の識別およびそれらの分布状態を知ることが可能となる。

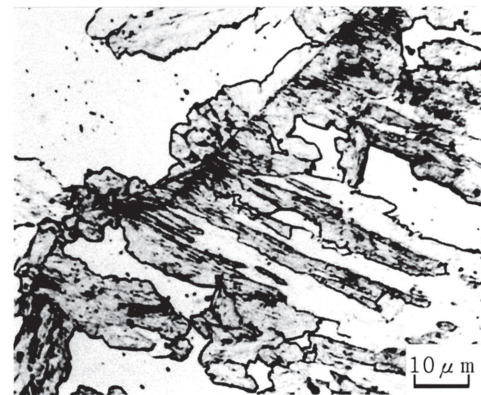


Fig.3. Optical micrograph of the Fe-0.19C-2.30Mo (mass%) steel austenitized at 1523 K for 1.8 ks and then isothermally transformed at 883 K for 72 ks.

対物絞りは、4種類ほどの異なる穴径が選べるようになっており、TEMの機種によって異なるが、一例を挙げれば、120、60、40、20 $\mu\text{m}$ などとなっている。

Fig.5に対物絞りの穴径を変化させて得た明視野像を示す。(a)は $\phi 20\mu\text{m}$ の絞りで、透過斑点のみを選んで撮影した像であり、(b)は $\phi 120\mu\text{m}$ の絞りを使用して、回折斑点も透過斑点とともに絞りの中に入れて撮影した像である。しほり径が大きくなると、像のコントラストが低下し、(c)に示した対物絞り無しの像ではコントラストはほとんどない。

暗視野像を撮影するためには、便宜的には対物絞りを、目的とする回折斑点の位置まで移動させる。しかし、これにより、絞りが光軸からずれることになり、像が一方方向に流れたようになる。これを防ぐために、絞りの位置は透過斑点の位置のまま動かさず、入射光を傾斜させて回折斑点を絞りの中に入れる。入射光の傾斜は、集束レンズの下に設置されている偏光コイルの電流を、"Dark field alignment, Tilt"つまみにより調整して行う。Fig.6にその実例を示す。(a)は入射光を傾斜させて撮影した像 (Centered Dark Field Image : CDFIと呼ばれる)、(b)は絞りを移動して撮影した像である。(b)の像には、流れたような不鮮明な縞模様が見られる。Fig.4に示した暗視野像はいずれもCDFIである。

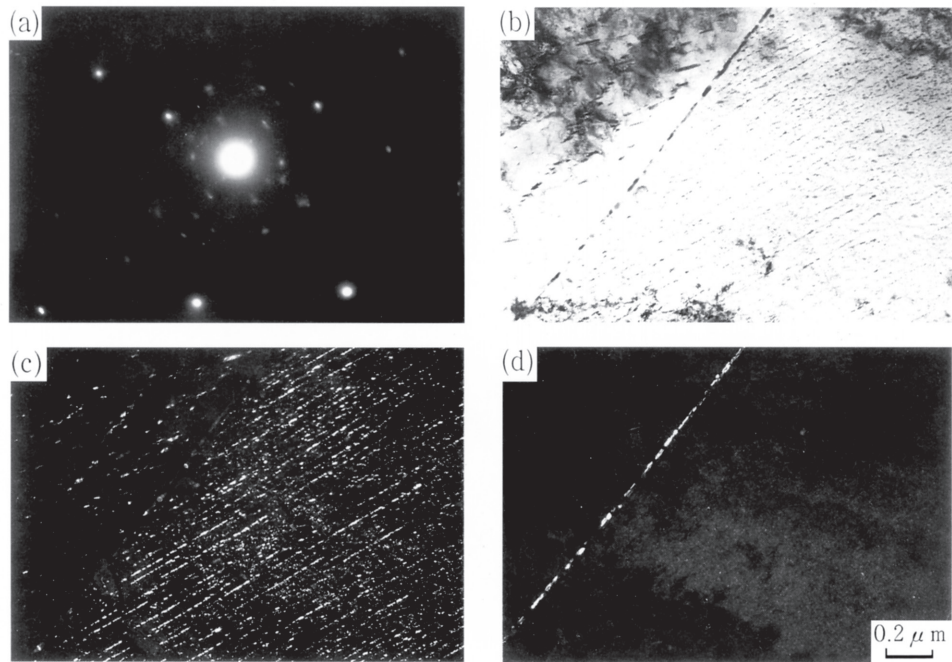


Fig.4. Transmission electron micrographs of the same specimen as Fig. 3.  
 (a) :diffraction pattern, (b) :bright field image,  
 (c) :dark field image of  $\text{Mo}_2\text{C}$  and (d) :dark field image of  $\text{M}_6\text{C}$ .

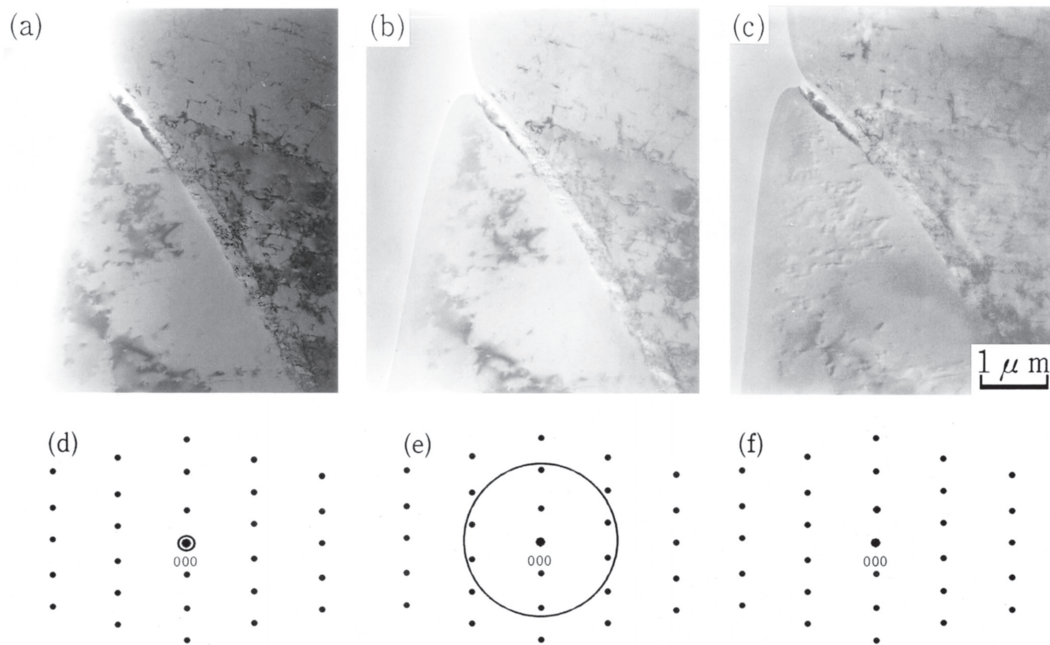


Fig. 5. Change in TEM images depending on size of objective aperture.  
 (a) :20, (b) :120 μm in diameter and (c) :without an objective aperture.  
 (d), (e) and (f) :schematic illustrations of objective aperture (open circle) and diffraction pattern (solid circle) for (a), (b) and (c), respectively.



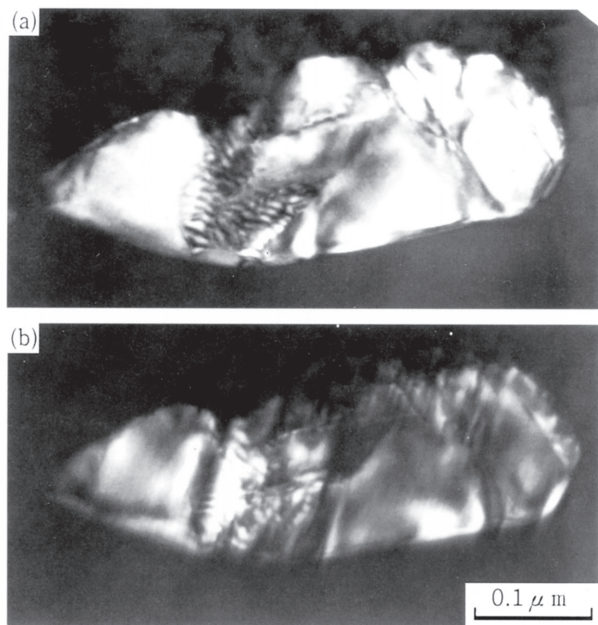


Fig. 6. Dark field images taken with a diffracted spot centered to an optical axis (a) and not centered to an optical axis (b).

### 3・2 菊池線

試料が比較的厚い場合、電子回折図形の中に、Fig.7に示すような明線、暗線が現れる場合がある。これは菊池線と呼ばれるものであり、平行な明・暗線で一対となって現れる。菊池線の発生原因は、電子が試料中の原子の内殻電子を励起してエネルギーをやや失い、種々の方向に散乱（非弾性散乱）されることにある。散乱された電子の方向は連続的に変化しているので、ある結晶格子面に様々な方向から電子を入射したのと同じことになり、Braggの条件を満たす角度 $\theta_b$ で入射したものが反射される。反射された電子は、入射点を頂点とする円錐面に沿っており、フィルム上では双曲線になるが、 $\theta_b$ が小さいため、近似的に直線となる。試料中のそれぞれの結晶格子面について、回折斑点と、菊池線が生じ、それらの反射の角度 $\theta_b$ は互いに等しいので、一対の菊池線の間隔は、回折斑点一透過斑点間の距離に等しい。また、菊池線は、対応する回折斑点と透過斑点を結ぶ線に垂直である。

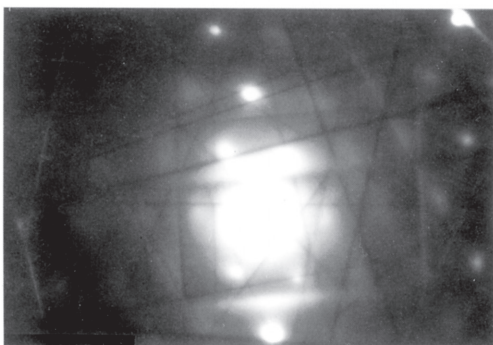


Fig. 7. An example of Kikuchi lines.

電子回折図形は、試料を多少傾斜してもさほど変化しないが、菊池線は、試料の傾斜に応じて敏感に変化する。従って、試料の方位を正確に求める際、および以下に述べるような、観察条件に設定する際などには、菊池線を利用すると便利である。

二軸傾斜試料ホルダーを用いて、フット・スイッチの操作により、試料を傾斜して、同じ結晶格子面による菊池線と回折斑点を一致させると、透過斑点と回折斑点の強度が、他の斑点に比較して著しく高くなる。このような状態を2ビーム条件と呼び、転位などの観察の際に用いられる。Fig.8に、SUS304中の転位を示す。(a)は2ビーム条件で撮影したものである。正確に2ビーム条件に合わせると、明瞭な像が得られないため、通常は、少し試料を傾斜させて2ビーム条件からやや外して観察すると良い (b)。

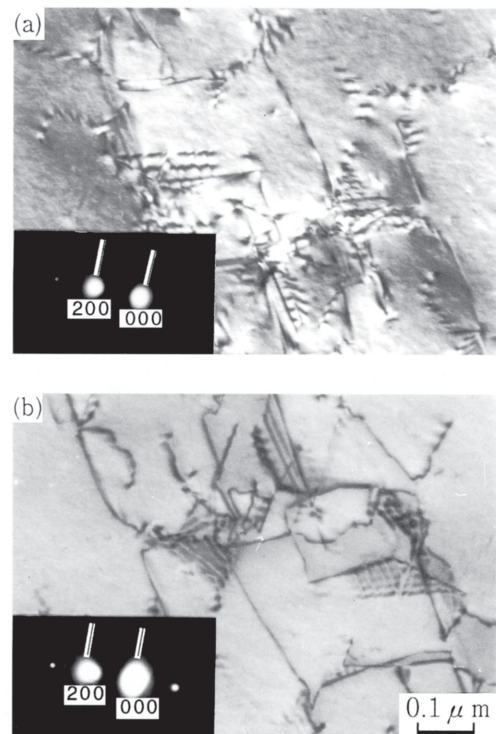


Fig. 8. TEM images of dislocations taken with just two-beam condition (a) and slightly off two-beam condition (b). Solid lines indicate the positions of Kikuchi lines.

### 3・3 収束電子回折

通常の電子回折図形は、制限視野絞り (Fig.1 A3) で目的の箇所を選び、電子回折モードにした後、ビームを広げて撮影する。これに対し、制限視野絞りを用いず、ビームを目的の箇所に収束して電子回折モードにすると、Fig.9に示すように、透過斑点および回折斑点が円盤（ディスク）状になる<sup>2)</sup>。これが収束電子回折 (Convergent Beam Electron Diffraction: CBED) と呼ばれる電子回折の一種である。結晶構造（点群、空間群）の解析に用いられる他、試料の厚さを精度良く求める際に利用できる。

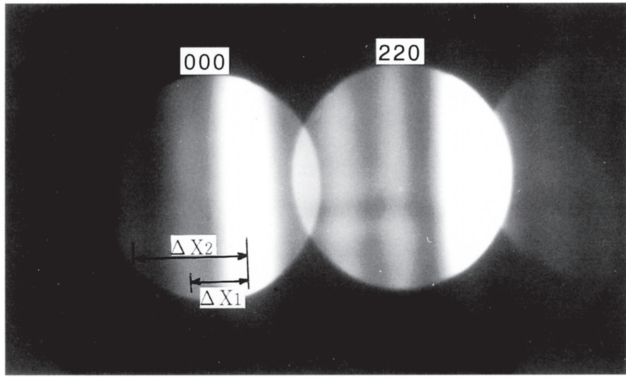


Fig.9. Convergent beam electron diffraction (CBED) pattern of Pb for estimating the specimen thickness.

Fig.9の試料は鉛であり、220斑点について2ビーム条件を満たすように試料を傾斜した。ディスクの中に明暗の縞模様が見られる。縞がn本見られる時に、n番目の縞の間隔を $\Delta X_n$ とし、試料の厚さをt、面間隔をd、電子の波長を $\lambda$ 、ディスク間距離をR、消衰距離を $\xi_g$ とすると、

$$(S_n/n)^2 + (1/\xi_g^2) \cdot (1/n)^2 = 1/t^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$S_n = (\lambda/d^2) \cdot (\Delta X_n/R) \dots\dots\dots (3)$$

という関係式が成り立つ。 $(S_n/n)^2$ をy軸にとり、 $(1/n)^2$ をx軸にとってプロットする。nは必ずしも1からは始まらないので、試行錯誤的に $n=1, 2, 3 \dots, n=2, 3, 4 \dots$ などとしてプロットし、すべての点の一つの直線に乗るようにすると、y切片が $1/t^2$ となるので、厚さを求めることができる。Fig.9では、厚さは約60nmであった。

試料が非常に薄い場合はディスクの中に縞が1本も見られないことになり、適用できないし、非常に厚い場合には縞が不鮮明となって適用できないが、析出物、転位などの密度を測定するような際には便利な手法である。

### 3・4 高分解能TEM像観察

対物絞り (Fig.1 A2) の中に、透過斑点と、回折斑点のうちの一つを入れ、これら2個のスポットによる像を結像すると、透過斑点と回折斑点を結ぶベクトルに直交する格子縞が見られる。この格子縞の間隔は、対物絞りに入れた回折斑点に対応する面の面間隔に等しい。Fig.10の丸印のように、さらに他の多くの回折斑点を、透過斑点とともに対物絞りの中に取り入れ、結像すると、多波格子像と呼ばれる高分解能TEM像が観察できる (High Resolution Transmission Electron Microscopy: HRTEM)。

高分解能像観察の際に守るべき主な条件は、以下の4項目である。

- (1) TEMの分解能 (点分解能) 以上の面間隔を有する結晶格子面を対象とする。
- (2) 電子回折モードで、試料を傾斜し、回折斑点の強度を互いにほぼ等しくしてから、対物絞りに透過斑点と回折斑点を入れる。
- (3) 像観察モードにして、電圧中心軸を合わせる。

(4) 対物レンズ (Fig.1 L3) の非点補正を十分行う。

TEMの点分解能は、最近のものではほぼ0.2nm程度である。 $\alpha$ -Feでは、(110)面が最も間隔の広い面であり、その面間隔が約0.203nmである。次に広いのは(200)面で、0.143nmである。従って、高分解能観察が可能なのは(110)面のみである。

前述のFig.10は、2相ステンレス鋼中の $\alpha$ 相の(100)面について、回折斑点の強度を互いに等しくした例であり、軸上照射条件 (Axial illumination condition) と呼ばれる。

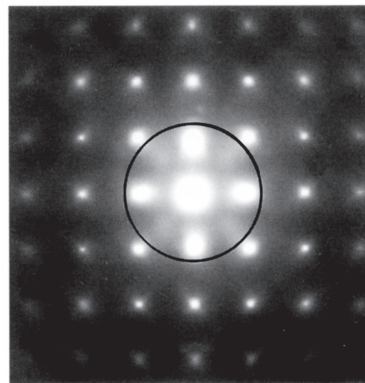


Fig.10. An example of the axial illumination condition of (100) plane of an  $\alpha$ -grain in a duplex stainless steel.

上記 (3) は、電子線の軸合わせであり、対物レンズの中心を電子線が通るようにすることである。高圧ウオブラーにより、加速電圧を周期的に変動させ、像が同心円状に動くようにする。この操作は、第二集束レンズ (Fig.1 L2) の下に設置されている偏光コイルの電流を、"Bright field alignment, Tilt" つまみで調整して行う。

上記 (4) は、対物レンズ (Fig.1 L3) の焦点が円形になるようにする調整である。対物レンズの非点はわかりにくいので、第二集束レンズ (Fig.1 L2) を例にして述べると、Fig.11に示すように、非点補正が不十分な場合はビームを絞る⇔拡げるの操作により、(a) ⇔ (b) ⇔ (c) のようになり、拡げた状態で楕円形になる。集束レンズの下に設置されている集束レンズ非点補正コイルの電流を、"Condenser stigmator" つまみにより、真円になるように調整する。非点補正を十分行くと (d) ⇔ (e) ⇔ (f) のように同心円的に変化する。対物レンズでは、このようなビームの形と結びつけての説明はできないが、像の中の、例えば微細な点状のものについて同様な変化が見られるので、その点について (d) ⇔ (e) ⇔ (f) のようになるように、"Objective stigmator" つまみを操作して非点調整を行う。



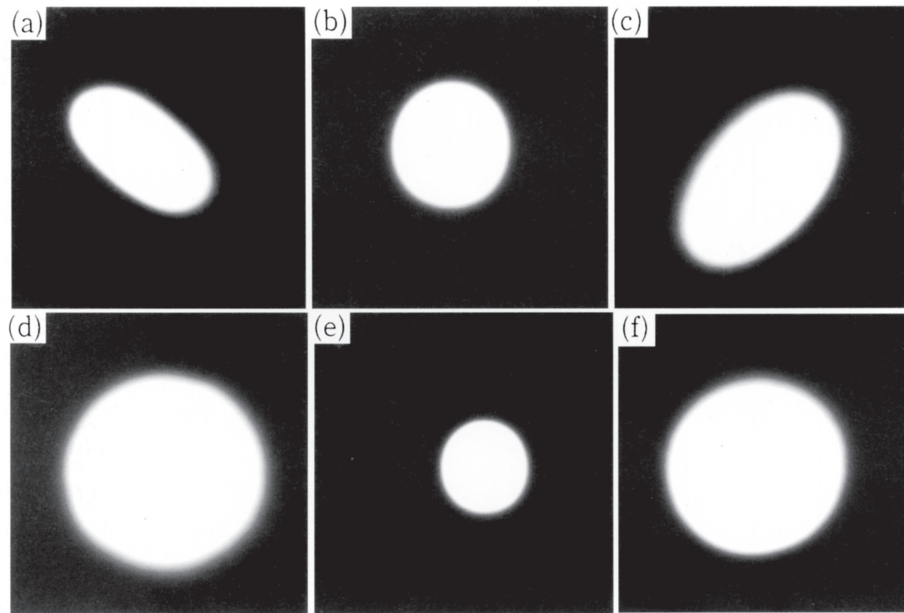


Fig.11. Change in shape of incident beam without correction of astigmatism of a condenser lens: (a) , (b) and (c) . After correction of astigmatism: (d) , (e) and (f) .

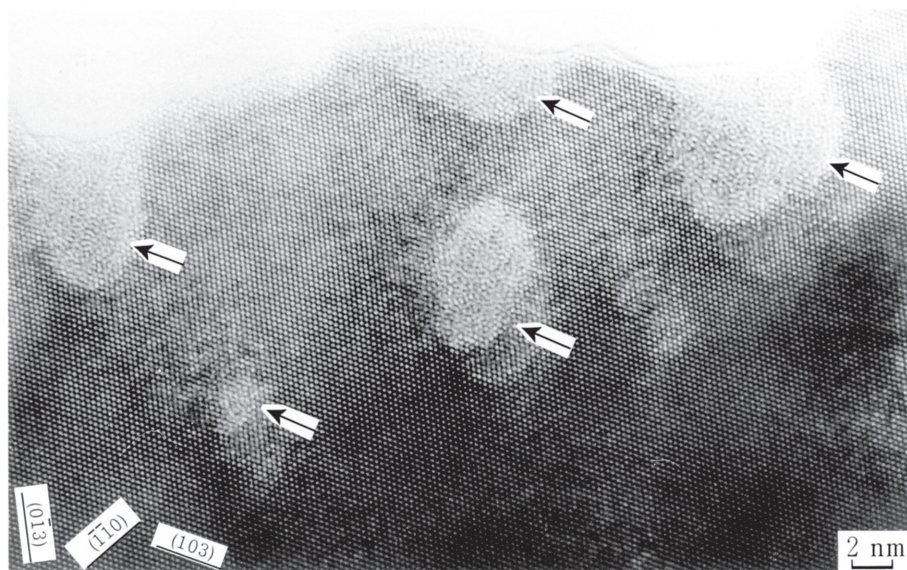


Fig.12. A high resolution electron micrograph of  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  irradiated with  $^{136}\text{Xe}^{31+}$  ions accelerated at 3.5 GeV. The arrows indicate amorphous regions formed by irradiation.

Fig.12は、酸化物超伝導物質、 $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ に、加速エネルギー3.5GeVのキセノンイオン、 $^{136}\text{Xe}^{31+}$ を照射した試料の高分解能像である<sup>3)</sup>。図中に示した各(hkl)面に沿った原子の並びが見られる。原子の並びが見られない明るい楕円形の部分は、Xeイオンの通過した跡であり、非晶質になっていることがわかる。高分解能像は、この例のように、試料中の原子の並び方、および欠陥などを直接、原子レベルで観察することを可能にする。

#### 4. EDX分析

TEMには上に述べた像観察、電子回折の他に、微小部の分析が行えるという重要な機能がある。電子プローブマイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) では、X線発生領域が試料内部で広がるため、分析の空間分解能が数 $\mu\text{m}$ となる。これに対して、TEMでは薄膜試料を用いているため、X線発生領域は電子ビームの照射面積

と同程度となり、ナノ領域の分析も可能である。

試料に入射した電子は、試料中の原子の内殻電子を励起する。その様相をFig.13に模式的に示す。入射電子に励起された内殻電子は2次電子となって放出され、その空席をより外殻の電子が満たす。その際の、エネルギー差を、特性X線として放出する（あるいはオージェ電子が放出される）。エネルギー分散型X線分析器（Energy Dispersive X-ray Analyzer : EDX）は、特性X線のエネルギーを測定して、元素分析を行うものである。Fig.13にはEDXの検出素子も模式的に示した。BなどをドープしたSiのp型単結晶にLiを拡散してp-i-n構造のダイオードとしたものであり、Si (Li) 検出素子と呼ばれる。検出素子にX線が入射すると、そのエネルギーに応じた数の電子-正孔対が生じ、正孔はP層（陰極）に、電子はN層（陽極）に集められ、電流パルスとして取り出される。1対の電子-正孔を生じさせるのに、約3.8eVを必要とする。入射X線のエネルギーを $E_x$ とすると、 $E_x/3.8$ 対の電子-正孔対が形成され（実際には、ファノ因子（F）と呼ばれる係数が必要であり、 $F \cdot E_x/3.8$ となる）、パルスの大きさとX線のエネルギーの比例関係から、入射X線のエネルギーが測定される。エネルギー分解能は150eV程度である。

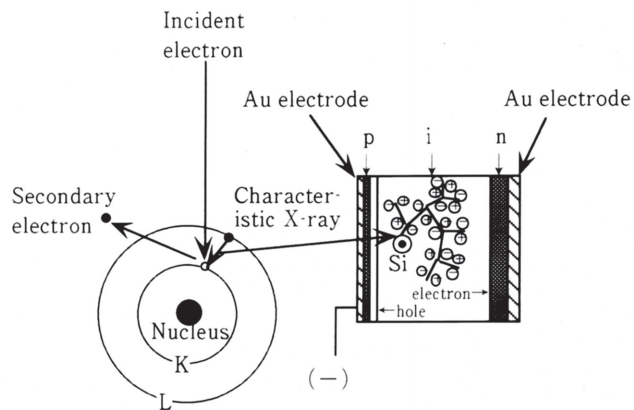


Fig.13. Schematic illustration of EDX analysis.

特性X線の放出と、Auger電子の放出は相補的なものであり、軽元素では、Auger電子の放出が主となるため、EDXによる検出感度は低い。従来のBe窓を使用したEDXでは、原子番号がNa以上のものしか分析できなかったが、現在の主流である有機高分子薄膜（Ultra Thin Window : UTW）窓を使用したものでは、B以上の元素が分析可能である。

近年、定性/定量分析とも、比較的容易に行い得るようになった。Fig.14に、Ti-10V-2Fe-3Al合金の分析例を示す。Ti-K $\beta$ とV-K $\alpha$ のピークは重なるが、それを分離して定量計算を行うことができ、結果を図中に示したが、化学分析値とほぼ等しい値が得られる。

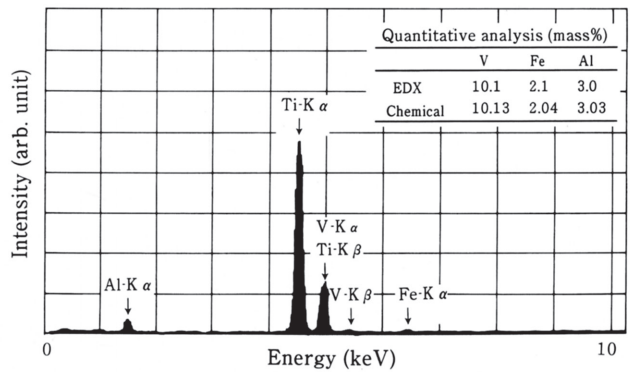


Fig. 14. EDX spectrum of Ti-10V-2Fe-3Al alloy.

## 5. おわりに

TEMを使いこなすには、操作しようとしているつまみ/スイッチの類の機能は何であるかを知る必要があるが、最低限、Fig.1のどの部分に関するものかを把握する必要がある。

最近のTEMでは、試料の傾斜、移動および各種レンズの操作、入射電子線の傾斜など、多くの部分がリセットできるようになっており、たとえビームが見えなくなっても、リセットボタンを押すだけでほぼ元の状態に戻る。

ここで述べたことの多くは、実際にTEMを用いて組織観察する際の入門編である。

## 文献

- 1) H. Tsubakino and H. I. Aaronson : Metall. Trans. A, 18A (1987), 1987.
- 2) 榎野晴繁, 野里僚一, 山本厚之 : 姫路工業大学工学部研究報告, 44 (1991), 125.
- 3) M. Terasawa, T. Mitamura, T. Kohara, K. Ueda, H. Tsubakino, A. Yamamoto, Y. Awaya, T. Kambara, Y. Kanai, M. Oura and Y. Nakai : Advanced Materials '93, / Laser and Ion Beam Modification of Materials, ed. by I. Yamada et al., Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., Vol. 17, (1994), 383.

以下、本文中に引用箇所を示していないが、TEMに関する教科書的なものを挙げる。

- 4) 橋本初次郎, 小川和朗 : 電子顕微鏡学事典, 朝倉書店, (1986).
- 5) P. B. Hirsch, A. Howie, R. B. Nicholson, D. W. Pashley and M. J. Whelan著, 幸田成康監修, 諸住正太郎ら訳 : 透過電子顕微鏡法, コロナ社, (1974).
- 6) 上田良二編 : 実験物理学講座23, 電子顕微鏡, 共立出版, (1986).
- 7) 堀内繁雄 : 高分解能電子顕微鏡—原理と利用法—, 共立出版, (1988).
- 8) 合志陽一, 佐藤公隆編 : 日本分光学会測定法シリーズ18, エネルギー分散型X線分析—半導体検出器の使い方—, 学会出版センター, (1989).
- 9) J. W. Edington : Practical Electron Microscopy in Materials Science, Van Nostrand Reinhold Company, (1976).