2½D電子顕微鏡法とその材料科学への応用

角 田 直 人* 藤 田 廣 志**

1. は じ め に

材料物性の研究をすすめる上で電子顕微鏡(電顕)はますます重要な研究手段となり、広範な研究分野で利用されている。それに伴い電顕観察からより高度な情報を得るために様々な電顕法が開発され、それらが実際の研究に応用されている。しかし、材料の組織観察とそれらの結晶学的情報の相関を得る観察方法は電顕法の最も基本的なものの1つで、研究課題に応じてさまざまな工夫をこらして利用されている。

実用合金の組織は一般に複雑で、いくつかの微細析出相を含むのが常である。通常の電顕法は明視野および暗視野像と制限視野回折図形の組合せでこれら微細組織の結晶学的情報(結晶系、格子定数、結晶方位関係)を得ている。しかし、析出相が小さければ析出相からだけの制限視野回折図形は得られないし、混在する析出相と析出相あるいは母相との回折斑点が近接していれば各々の斑点でそれぞれに対応した暗視野像を得ることができないから、各組織の結晶系や結晶方位関係を知るためには高度な電顕観察法を必要としたり、あるいはそれらを知ることが不可能であったりする。

粒子線照射された実用材料中には寸法の非常に小さい2次欠陥を多数含むことが多い。これらの型(格子間原子型か空孔型)の判定は照射損傷の研究を進める上で最も基礎的な情報であるが、通常の電顕法では比較的寸法の大きい転位ループの型の判定に限定されている。

電顕法は材料の基礎的性質を解明する上で大きな成果をあげているが、複雑かつ微細な組織をもつ実用材料の研究に適用するとき、しばしば上記のような困難に遭遇

する。そこで本稿では従来明快に解決することが困難であった課題に適用し大きな成果が期待できる新しい電顕法——2½D電顕法⁽¹⁾——の原理とこの方法を用いるにあたり留意すべき点を列挙する。さらに、その応用例を二、三概説し、この簡単な観察方法が材料の組織学的研究の情報収集手段として有用であることを示す。

2. 2½D電子顕微鏡とは

入射電子線の方法を傾斜せず対物絞りの位置を移動させて結像した暗視野像はその明視野像と比べると個々の像の位置がずれている。この像の位置変位の方向は回折ベクトルに平行であり、大きさは回折ベクトルの大きさと対物レンズの球面収差と焦点外れ量に比例している⁽²⁾。この事柄は周知の事実であるが、2つの異なる焦点位置(例えば同じ外れ量の不足焦点[†]位置と過焦点位置)で結像したそれぞれの暗視野像は相対位置変位が異なり、それらの組が立体光学効果を生じることあまり知られていない。

図1に示したように近接した2つの回折斑点のある領域に対物絞りを置き結像すると、その暗視野像にはそれぞれの回折斑点に対応した像があらわれる。例えば g_1 と g_2 をそれぞれ析出相1と2に対応する回折ベクトルであるとする、ある焦点外れ量における析出相1と2の像の位置変位は g_1 と g_2 の方向に平行でかつその大き

図1 対物絞りを近接した2つの回折斑点のある領域に移動させて暗視野像を結像する様式。

† 不足焦点はレンズの弱励磁に対応し、この稿では焦点外れ量を D とすると不足焦点外れ量を $D < 0$ と定義する。

* 大阪大学助手；工学部金属材料工学科

** 大阪大学教授；超高压電顕センター，工学部金属材料工学科

2 1/2D Electron Microscopy and its Applications to Materials Science; Naoto Sumida, Hiroshi Fujita (Faculty of Eng., Osaka Univ., Suita)

Keywords: electron microscopy, through-focus, stereo technique, defocused dark-field image, crystallographic relationships characterization of complex microstructure, thin platelet, stacking fault, dislocation loops, twin

1984年11月30日受理

さに比例する。その結果、異なる焦点位置における析出相 1 と 2 の相対位置変位が異なるので、これら 2 つの暗視野像を反射実体鏡で観察すると析出相 1 と 2 が異なる高さ水準に認識されるようになる。

Bell⁽¹⁾はこの電顕像の立体光学効果と回折斑点の対応を論じ、2 つの異なる焦点外れ暗視野像を観察する電顕法が新しい試料の組織学的情報収集手段として利用できることを理論的および実験的に示した。この方法で得られる電顕像の立体感は電顕内で試料を ±θ 度傾斜させて得られる試料の 3 次元 (3D) 分布を示す立体感ではない。しかし、それは試料の 2 次元 (2D) 投影像でもないの、Bell はこの観察方法を 2½D 電子顕微鏡法 (2½D 法) と名づけた。

Michal と Sinclair⁽³⁾は焦点外れ暗視野像のつくる立体分布から識別できる回折斑点間の距離などを定量的に調べ、2½D 法を詳細に検討した。さらに金属組織学的観点から、近接した回折斑点を生じる組織が混在する領域で個々の組織とそれぞれの回折斑点に対応づける試みをした⁽⁴⁾。微小照射欠陥集合体の性格を決める試み⁽⁵⁾もなされ、2½D 法は複雑な微細組織をもつ材料の結晶学的および組織学的情報を簡便に得る新しい電顕観察法としてその有効性が認識されつつある。

3. 2½D 電子顕微鏡法の原理

(1) 像位置の移動と立体感

人間の知覚が像の相対位置が異なる一組の写真からいかに像の立体分布を認識するかを考察する。図 2 はその原理を図示したものである。人間に垂直な線上にある 3 個の対象物 (円、三角形、四角形) を単眼で見ると、図 2 (a) に図示した眼と対象物を結んだ光路から容易に理解できるように、円と四角形的位置は基準線上にある三角形からの遠近に応じて位置ずれを生じる。位置的に離れた左と右の眼が認識する対象物、例えば円的位置ずれ方向は左右反対である。この左と右の眼が認識する相対的位置ずれ (視差) が脳で融合され、感覚としての立体感を得ているわけである。

左眼と右眼の位置で円、三角形、四角形を撮影し、それぞれの写真を図 2 (b) のように配置して反射実体鏡で観察すると、人間の脳は視差のある 2 枚の写真を合成し、感覚としての立体感を獲得するようになる。このような観察方法を一般に立体観察法と呼んでいる。

電顕内で試料を左右に傾斜して 2 つの相異なる方向から電顕像を撮影すると、その電顕像はその膜厚の分布に応じて相対的位置ずれをおこす。この一組の写真を反射実体鏡で観察すると、電顕像の膜厚方向の立体 (3D)

図 2 (a) 人間の左右の眼が遠近のある対象物を見る時の光路図。
(b) 左眼と右眼の位置で撮影した写真と、反射実体鏡を用いたステレオ写真観察装置とその光路図。

分布が感覚として認識される^{††}。この観察方法は電顕による通常の立体観察であるが、2½D 法は 2 つの焦点外れ暗視野像中にあらわれる像の相対的位置ずれを利用して立体観察をする方法である。

(2) 回折ベクトルおよび焦点外れ量と像の位置移動

対物レンズの光軸に対する散乱波の入射角が α であれば像面上でのその散乱波による電顕像の位置は r だけ移動する⁽²⁾。

$$r = C_s \alpha^3 + D \alpha \quad (1)$$

ただし、 C_s は対物レンズの球面収差係数、 D は焦点外れ量である。 $D < 0$ は不足焦点側、 $D > 0$ は過焦点側の外れ量を示す。焦点外れに応じた像の位置移動の方向は回折ベクトルの方向に一致する⁽²⁾から式 (1) は次のように表現できる。

†† 詳細は桐谷の解説⁽⁶⁾を参照のこと。

† 試料が結晶品であると、像のコントラストを同一にするために同じ反射条件を満足するように傾斜する必要がある。

$$\mathbf{r} = (C_0 \lambda^3 g^2 + D\lambda) \mathbf{g} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{g}$ は回折ベクトルで $g = \alpha/\lambda$, λ は電子線の波長である。焦点外れ量の変化 $\Delta D = D_1 - D_2$ に応じた像の相対的位置移動 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ は球面収差係数と無関係で

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta D \lambda \mathbf{g} \quad (3)$$

となる。

暗視野像を観察する時、入射電子線の方法を傾けて結像したい回折斑点を対物レンズの光軸中心に移動させる。図 3 に示したように、近接する 3 つの回折斑点 $\mathbf{g}_L$, $\mathbf{g}$, $\mathbf{g}_R$ を $\mathbf{g}$ がレンズの光軸中心と一致するように移動させると、それぞれの回折斑点に対応する像の相対的位置移動量 $\Delta \mathbf{r}_L$, $\Delta \mathbf{r}$, $\Delta \mathbf{r}_R$ は

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{r}_L &= \Delta D \lambda \mathbf{g}_L \\ \Delta \mathbf{r} &= 0 \\ \Delta \mathbf{r}_R &= \Delta D \lambda \mathbf{g}_R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。ただし、 $\Delta \mathbf{g}_L$, $\Delta \mathbf{g}_R$ は $\mathbf{g}_L$, $\mathbf{g}_R$ の光軸中心からのベクトルである。式 (4) から像の相対位置移動の方向は光軸中心から斑点までのベクトルの方向に一致し、その向きはベクトルの向きと焦点外れの方向で決められ、そしてその大きさはベクトルの大きさと焦点外れ量に比例することが分かる。ところで、人間が立体感を認識するための視差は人間の両眼に平行な像の相対的位置ずれであるから、この方向を x 方向とすると式 (4) は次式のように書くことができる。

図 3 入射線を傾斜し、回折斑点 $\mathbf{g}$ をレンズの光軸中心に移動させて暗視野像を結像する様式。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_L &= \Delta D \lambda u_L \\ \Delta x &= 0 \\ \Delta x_R &= \Delta D \lambda u_R \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 u_L , u_R は $\Delta \mathbf{g}_L$, $\Delta \mathbf{g}_R$ の u 成分である。焦点を適正焦点位置から不足焦点側と過焦点側に等量 D ずつ外した場合は $\Delta D = -2D$ であるから、式 (5) の ΔD を $-2D$ に置き換えればよい。

(3) 像の位置移動と立体水準

対物レンズの焦点の変化に応じた暗視野像の位置移動の方向は前項の式 (4) で示したようにレンズの光軸中心から回折斑点までのベクトルの方向と焦点外れの方向に

図 4 回折斑点 $\mathbf{g}_L$ による像が不足焦点、過焦点でその像位置を移動させる様子。

関係している。これを図示したのが図 4 である。不足焦点側に D だけ焦点を外すと、レンズの光軸中心から左側にある回折斑点 $\mathbf{g}_L$ による像は左側に移動する。電顕像は回折像に対し、 180° 回転しているから、像の移動方向は右側になる。過焦点側に変化させると不足焦点側のそれと反対になる。一方、レンズの光軸中心から右側にある回折斑点 $\mathbf{g}_R$ による像の焦点変化による位置移動の挙動は $\mathbf{g}_L$ のそれと正反対である。しかし、光軸中心上の回折斑点による像の位置は式 (4) でも分かるように焦点を変化しても移動しない。

図 5 は不足焦点、適正焦点および過焦点で撮影された電顕像の相対的位置関係とそれらを結像した回折斑点の配置を図示したものである。円、三角形、四角形はそれぞれ $\mathbf{g}_L$, $\mathbf{g}$, $\mathbf{g}_R$ による電顕像であり、矢印は適正焦点での像位置からの移動方向を示す。図 5 の不足焦点と過焦点での電顕像を反射実体鏡で観察した時に変換される円、三角形、四角形の立体水準について考える。まず、不足焦点の像を左眼で、過焦点の像を右眼で観察すると約束する[†]。次に円、三角形、四角形の像位置の移動方向の矢印を上記約束にしたがって図 6 に整理した。図 6 の

図 5 3 つの回折斑点で結像した暗視野像中にある像の各焦点位置における相対的位置関係。円、三角形、四角形はそれぞれ斑点 $\mathbf{g}_L$, $\mathbf{g}$, $\mathbf{g}_R$ による像に対応する。

[†] この約束を反対にすると以後の記述はすべて反対になる。

	左 眼	右 眼	立 体 水 準
	不足焦点	過 焦 点	
○	→	←	基準線より上方
△	●	●	基 準 線 上
□	←	→	基準線より下方

図 6 反射実体鏡で組写真を観察する時、像を基準線より上方または下方に認識するための像の位置移動方向。

矢印と図 2 (b) の写真左眼と右眼に示された像の移動方向を合わせて考えると、立体観察をした時に円は基準線より上方に、三角形は基準線上に、そして四角形は基準線より下方に認識されるはずである。

以上の考察から、2½D 法で暗視野像を観察すればレンズの光軸中心から左側にある回折斑点による像は基準線より上方に、右側にあるものは下方に分布する立体像に変換されることが分かる。

4. 2½D 電顕法の観察方法

2½D 法の観察方法やその応用例は Sinclair らの研究⁽³⁾⁽⁴⁾に詳述されているから、ここではその要点と像を撮影する際の留意点を列挙するにとどめる。

2½D 法はいろいろな回折斑点に対応する像が相対的位置ずれをおこすように焦点の外れた暗視野像を撮影する電顕観察方法である。焦点を外すと像はボケ、その結果像の分解能の低下をもたらすことになる。しかし、入射電子線の平行度を例えば発散角 $\phi = 2.7 \times 10^{-5}$ rad 程度まで良くすると、 $D = 20 \mu\text{m}$ の焦点外れでも 6 nm の分解能を維持⁽³⁾できるようになる。したがって、焦点外れ暗視野像の撮影は十分な分解能を得るように平行度のよい入射電子線で行なわれなければならない。

像の立体感を認識する相対的位置ずれの量は式 (4) から分かるようにレンズの光軸中心と回折斑点の間の距離 $4g$ と相対的焦点外れ量 $4D$ に比例するのはもちろんのこと、電顕像の観察倍率や写真の引き伸ばし倍率にも比例している。反射実体鏡で観察するとき、立体像の明瞭な高低を得るためには適当な像の相対的位置ずれ⁽⁷⁾が必要である。小さい $4g$ による像を観察するときの撮影条件は大きい $4D$ 、高倍率に設定されるべきである。入射線の ϕ を小さくした状態での高倍率写真撮影は長時間露出を伴い、撮影中の試料ドリフトの問題が無視できなくなる場合がある。したがって、暗視野像の撮影にあたっては入射線の発散角、焦点外れ量、観察倍率、露出時間を総合的に勘案し、適当な像の相対的位置ずれを得るために好都合な撮影条件を設定すべきである。

撮影された相異なる 2 つの暗視野像の作る立体像から回折斑点と像を対応づける方法を述べる。図 7 のように

図 7 回折斑点 g_1, g_2, g_3 を順次左端に置く様に電顕像を回転した時の各斑点の配置図。

図 8 図 7 (a) ~ (c) の配置で立体観察した時に認識する立体的水準の変化。円内の数字はそれぞれ斑点ベクトルの添字に対応する像であることを示す。

4 個の回折斑点で結像された暗視野像を考える。この暗視野像は斑点 g_0 をレンズの光軸中心に置き結像されているとする。また、反射実体鏡を紙面の左右方向に平行に置き、その立体像を観察していると仮定する。3 節 (2) で述べたように人間が立体感を認識するための視差の量は人間の両眼に平行な像の相対的位置移動であるから、図 7 (a) の斑点 $g_0 \sim g_3$ に対応する像 0 ~ 3 の立体的水準は図 8 (a) のようになり、最高水準位は像 1 になる。電顕像を回転し、図 7 (b), (c) の回折像に対応する方向に置いて立体観察すると、像の立体的水準はそれぞれ図 8 (b), (c) のようになる。この回転に応じて最高水準位に像 2, 3 が出現するので、回折斑点と像を疑義なく対応づけることができる。このようにレンズの光軸中心にない回折斑点が多数ある場合は電顕像を回転して各斑点を順次最も左側に置く配置で立体観察し、立体分布の最高水準に存在する像と最も左側の斑点を対応づけるのが常である。

5. 2½D 電顕法の応用例

(1) ダイヤモンド中の窒素薄板

大部分の天然ダイヤモンドは {100} 面上の $\langle 110 \rangle$ 方向に細長くのびた種々の大きさの窒素薄板を含む⁽⁸⁾⁽⁹⁾。この薄板は回折斑点の周辺に $\langle 100 \rangle$ 方向のスパイク反射を生じる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。図 9 (a) に示したように試料面が (110) 面のとき、(100) 面 (a 面) と (010) 面 (b 面) 上の薄板によるスパイク反射は逆格子点を図示した図 9 (b) の AA' と BB' の方向に出現する。(001) 面 (c 面) のその方向は紙面に垂直である。図 9 (b) で分かるように (220) 反射がブラッグ条件を満足するとき、(220) 反射斑点は

$[1\bar{1}0]$ 方向と $[\bar{1}10]$ 方向の両側に衛星斑点 g_a, g_b をもつ。

g_a, g_b はそれぞれ a 面, b 面上の薄板により生じたものであるから, このような回折条件での (220) 反射のウィーク・ビーム (W-B) 暗視野像に $2\frac{1}{2}D$ 法を適用すれば a 面, b 面上にある薄板を異なる立体水準に認識できるはずである。観察の詳細は他の報告⁽¹²⁾を参照していただくとして, ここではその結果の一例を図 10 に示した。図 10(a) は $s_{220} \approx -0.18 \text{ nm}^{-1}$ の W-B 条件にしたときの焦点外れ (220) 暗視野像の組写真である。左側と右側の

写真はそれぞれ $D = \pm 4 \mu\text{m}$ の焦点外れで撮影したものである。これらの組写真を反射実体鏡で観察した結果得られた個々の薄板の立体水準を図 10(b) の適正焦点での暗視野像中に示した。U, L はそれぞれ高水準, 低水準に認識された薄板を意味する。この電顕像に対応する (220) 反射斑点 G とスパイク反射斑点 g_a, g_b の位置が写真の右上に図示されている。 g_a が G の左側に, g_b が右側にあるから, U は a 面上, L は b 面上にある薄板であると判定できる。このように $2\frac{1}{2}D$ 法と W-B 法を併用すれば $20 \sim 30 \text{ nm}$ 程度の大きさの薄板でも個々の薄板がのっている結晶面を区別することができる。

(2) 微小転位ループの型の決定

転位ループが格子間原子型か空孔型かを判定する方法はループ転位のインサイド・アウトサイド・コントラストを利用する⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾の一般的である。しかし, 粒子線照射で材料中に導入される多くの転位ループは寸法が小さいので, そのループ面の傾斜を立体観察で決めることが困難である。そのために電顕法により転位ループの型の決定が出来ない場合がしばしばある。 $2\frac{1}{2}D$ 法を利用すれば微小な薄板でもその結晶を区別できるのでから, この方法を転位ループ面の傾きの決定に応用した例を示す。

オーステナイト系ステンレス鋼に導入されたフランク型転位ループはその内部の積層欠陥によりスパイク反射を生じる⁽¹⁵⁾。このスパイク反射と転位ループの対応から前項と同じ方法でループ面を区別したのが図 11 である。この転位ループは SUS 304 の薄膜を 723 K (450°C) に保持し, 2 MeV †の電子線で 50 秒間電顕内照射したときに

図 9 (a) 試料表面が (110) 面であるダイヤモンドの窒素薄板。ただし, 紙面は (001) 面である。
(b) (a) のダイヤモンドの逆格子点と窒素薄板によるスパイク反射。EE' はエバルド球である。

図 10 (a) 不足焦点(左)と過焦点(右)で撮影した (220) W-B 暗視野像 ($s = -0.18 \text{ nm}^{-1}$) の組写真。
(b) (a) の組写真を反射実体鏡で観察した結果得られた窒素薄板の立体水準を示す適正焦点の (220) W-B 暗視野像。U, L は薄板がそれぞれ高い, 低い立体水準にあることを示す。

† $1 \text{ MeV} \approx 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$

図 11 (a) 不足焦点(左)と過焦点(右)で撮影した(200) W-B 暗視野像($s = -0.11 \text{ nm}^{-1}$)の組写真。
 (b) (a)の組写真を反射実体鏡で観察した結果得られた転位ループの立体水準を示す適正焦点の(200) W-B 暗視野像。U, Lは転位ループがそれぞれ高い, 低い立体水準にあることを示す。
 (c) (a)と(b)の暗視野像の配置に対応する[001]の回折像と, (200)斑点と $s < 0$ の回折条件でその周辺に出現する積層欠陥による衛星斑点の指数。

図 12 (a) (220) 反射斑点からのずれ量 s の符号の反転に伴うループ転位のコントラスト変化。
 (b) (a)の観察結果とそれに対応する $(\mathbf{g} \cdot \mathbf{b})s$ の符号。
 (c) 図 11 と図 12(a) の観察結果から決定された転位ループ 1, 2 のバーガス・ベクトル。

導入されたものである。照射時の電子線強度は $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ である。試料面は(001)面で、暗視野像は(200)反射をブラッグ条件にあわせ、(200)反射で結像した。この W-B 条件は $s_{200} \approx -0.11 \text{ nm}^{-1}$ で、 s は負であるから、(200)斑点周辺の4つの $\{111\}$ 面上にある積層欠陥で生じたスパイク反射による衛星斑点の指数は図 11(c)に示したようになる。図 11(a)の組写真を反射実体鏡で観察すると図 11(b)の写真中に示したように転位ループ 1 は上方の、転位ループ 2 は下方の高き水準に認識でき

る。図 11 の写真の配置では(200)斑点の左側に $(\bar{1}11)$ 、右側に $(1\bar{1}1)$ 面上の積層欠陥によるスパイク反射があるから、転位ループ 1 のループ面は $(\bar{1}11)$ 面に、転位ループ 2 のループ面は $(1\bar{1}1)$ 面上にあることが分かる。この結果と図 12(a)に示された(220)反射によるループ転位のインサイド・アウトサイド・コントラストの観察から得られた結果をまとめて図 12(b)のように整理し、ベクトルの計算をすると、転位ループのバーガス・ベクトルの向きは図 12(c)のようになり、格子間原子型であると結論される⁽¹⁶⁾。この例で分かるように 2½D 法を利用すれば、微小転位ループでもそのループ面が疑義なく決定できるので、従来より転位ループの型が決定できる対象がひろがり、照射損傷の研究に不可欠の情報を容易に得ることができる。

(3) 部分安定化ジルコニアの双晶

近年セラミックスの研究が盛んになるにつれ、物性と組織の関係が重要となり、その微細組織が電顕を用いて観察されている。セラミックスは一般に単体で利用されることは少なく、目的とする機能に合わせ種々の添加剤が加えられるのが常である。そのため組織は複雑となり、従来の制限視野回折法と暗視野法の組合せだけでは十分に組織を把握できないことが多い。

ジルコニア中の双晶を 2½D 法を利用して区別した例を示す⁽¹⁷⁾。図 13(a)は 8 mol% マグネシアを添加した単斜晶部分安定化ジルコニアの明視野像と回折像である。回折像では単斜晶ジルコニアの基本格子斑点の外に双晶によるスパイク反射が多数出現している。しかし、明視野像に認められる組織は複雑で像から各結晶面の双晶を区別することができない。そこで、これらの双晶による斑点と像の対応を得るため、4.8 μm だけ不足焦点側と過

図 13 (a) 8 mol% MgO を添加した部分安定化 ZrO_2 の明視野像と回折像。
 (b) 不足焦点(左)と過焦点(右)で撮影した(200)暗視野像。
 (c) (b)の組写真を反射実体鏡で観察した結果得られた双晶の立体水準を示す適正焦点の暗視野像。 l_1, l_2, l_3, l_4 は高い方から低い方に認識される双晶の立体水準を示す。

焦点側に焦点を外した(200)暗視野像を撮影した写真が図 13(b)に、それらの立体観察結果が図 13(c)に示してある。明視野像中に矢印で示した 1 つの双晶が 3 層に分れているのが分かる。写真中の l_1, l_2, l_3, l_4 が上方から下方への水準を表示している。このように非常に複雑な組織をもつ材料でも回折図形と電顕像の対応から各組織についての明快な結晶学的情報が得られるようになる。

6. お わ り に

$2\frac{1}{2}D$ 電顕法の原理とその応用例を簡単に述べた。この観察方法は発見者やその研究グループによる金属組織学的観点に立つ研究への応用へもさることながら、本稿で例示したように W-B 暗視野像で $2\frac{1}{2}D$ 電顕観察をすれば薄板、積層欠陥、双晶などの結晶面を区別できるので、 $2\frac{1}{2}D$ 法は一層強力な情報収集のための電顕法であることが明らかとなった。この方法は回折斑点と電顕像の対応関係を立体分布から判定するので、その判定は容易で疑義がない。これで得られたような情報と他の電顕法が組合わされることにより、今後ますます広範な研究分野に利用されると期待される。この研究資料がその一助となれば幸いである。

この仕事の一部は筆者の一人(角田)がブリストル大学物理教室に滞在中になされたものである。この機会にブリストル滞在中にいろいろご教示、ご援助下さった Lang 教授と Steeds 博士はじめ電顕グループの人達に感謝する次第です。

文 献

- (1) W.L.Bell : J. Appl. Phys., **47** (1976), 1676.
- (2) P.B.Hirsch, A.Howie, R.B.Nicholson, D.W.Pashley and M.J.Wheelan : *Electron Microscopy of Thin Crystals*, Krieger Publishing Co. Inc., New York, (1977), 18.
- (3) G.M.Michal and R.Sinclair : Phil. Mag., **42** (1980), 691.
- (4) R.Sinclair, G.M.Michal and T.Yamashita : Met. Trans., **12A** (1981), 1503.
- (5) J. B. Mitchell and W. L. Bell : Acta Met., **24** (1976), 147.
- (6) 桐谷道雄 : 電子顕微鏡, **16** (1981), 71.
- (7) B. Hudson and M. J. Makin : J. Phys. E, **3** (1970), 311.
- (8) T.Evans and C.Phaal : Proc. R. Soc. London, **A270** (1962), 538.
- (9) G.S.Wood : Phil. Mag., **34** (1976), 993.
- (10) K. Lonsdale and H. Smith : Nature (London), **148** (1941), 112.
- (11) N.Sumida and A.R.Lang : J. Appl. Cryst., **15** (1982), 266.
- (12) 角田直人, A.R.Lang : 日本電子顕微鏡学会第 38 回学術講演会予稿集, (1982), p.193.
- (13) P.B.Hirsch et al. : 文献(2)の p.263.
- (14) 丸川健三郎 : 日本金属学会会報, **23** (1984), 254.
- (15) C.Brown : *Developments in Electron Microscopy and Analysis*, Ed. by J.A.Venables, Academic Press, (1976), 405.
- (16) 金原尚之, 角田直人, 藤田広志 : 日本金属学会講演概要, (1983・4月), p.145.
- (17) 小松正雄, 藤田広志, 竹野史郎 : 未発表.