表面分析へのアプローチ (II)

電子の検出に基づく表面分析 —— その1 ——

氏 平 祐 輔*

* 東京大学先端科学技術研究センター

Approach to Surface Analyses (II)

—— Surface Analysis Based on the Detection of Electrons —— (1) ——

Yusuke Ujihira*

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

The aspects of surface analytical techniques by detecting outcoming electrons from samples were summarized to get acquainted to the fundamental knowledge of typical electron microscopes—scanning electron microscope, scanning transmission electron microscope, transmission electron microscope, spin polarized scanning electron microscope, analytical electron microscope and scanning tunneling microscope—, electron spectrometry—electron energy loss spectrometry, high resolution electron energy loss spectrometry, Auger electron spectrometry, X ray photoelectron spectrometry (X ray electron spectrometry, electron spectrometry for chemical analysis), conversion electron Mossbauer spectrometry—and electron diffractometry—low energy electron diffractometry, reflection high energy electron diffractometry—. Electron or photon induced current methods for analysing n-p junction, and positron annihilation technique for analysing atomic vacancy type defects were also mentioned.

Key words: surface analysis, electron beam, electron microscope, scanning electron microscope, scanning transmission electron microscope, transmission electron microscope, spin polarized scanning electron microscope, analytical electron microscope, scanning tunneling microscope, electron beam induced current, electron energy loss spectrometry, high resolution electron energy loss spectrometry, Auger electron spectrometry, X ray photoelectron spectrometry, X ray electron spectrometry, electron spectrometry for chemical analysis, electron diffractometry, low energy electron diffractometry, reflection high energy electron diffractometry, conversion electron Mossbauer spectrometry, positron annihilation.

1. 電子, イオン, 光と物質との相互作用

電子ビーム, イオンビーム, 光ビームを固体に入射すると図 1, 高速電子を入射すると図 2 に示す相互作用が起きる。

数 eV~数 keV の電子の固体中の飛程は数原子層~100 nm なので, 電子はプローブとして用いても検出粒子として用いても, この深さ層の表面分析に適した技術を与える。

固体に入射された電子の侵入後の軌跡は図 3 (a) のように, イオンの軌跡は図 3 (b) のようになる。また, 電

子の運動エネルギーと電子の固体中での平均自由行程——脱出深さ (escape depth)——とは図 3 (c) に示した関係がある。

電子の発生源としては, タングステン陰極 ($\sim 10^4$ A/cm²·str), LAB₆ ($\sim 10^6$ A/cm²·str), 冷陰極電界放射型 ($\sim 10^7$ A/cm²·str) などの熱電子源が用いられる。

電子は気体分子に衝突すると, 励起やイオン化を行いエネルギーを失うので, 電子が走行する空間は 10^{-7} ~ 10^{-9} Pa の超高真空中に保たれる。

固体表面で散乱された電子のエネルギー分析は, 円筒鏡型エネルギー分析器 (Cylindrical Mirror Analyser, CMA, 図 4) や半球型エネルギー分析器 (Concentric

* 〒153 目黒区駒場 4-6-1 (Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, Japan)

(a) 電子と物質との相互作用

(b) イオンと物質との相互作用

(c) 光子と物質との相互作用

図1 電子(a), イオン(b), 光(c)と物質との相互作用とそれを利用した表面分析¹⁾

Hemispherical Analyser, CHA) によって行われる。

AES などで使用する CMA は、2 個の円筒 (内筒径: r_1 , 外筒径: r_2) が同軸に配置され、エネルギー (E) が

$$E = K / \ln(r_2/r_1)$$

の電子だけが検出器に入る。入射角が 42.3° (広がり角: 6°) のとき $K=1.31$ で、エネルギー分解能は $\sim 0.3\%$ である。

電子はチャンネルトロン、セラトロン、CCD (Charge

図2 物質に高速電子を入射したときに発生する種々の電子や光子

Coupled Detector) カメラなどで検出される。

2. いろいろな電子顕微鏡 (EM)^{2)~4)}

現在、使用されている代表的な電子顕微鏡 (Electron Microscope) を図5に示した。

2.1 走査電子顕微鏡 (SEM)^{5)~6)}

直径が $\sim \mu\text{m}$ の数 keV の電子ビームで試料表面を走査し、散乱電子 (数 keV) の強度を p-n 接合形 Si 半導体検出器で検出する走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope) である。表面の凸部では入射電子は散乱されやすく、凹部では散乱されにくいので、表面の凸凹が散乱電子像の明暗として現れる。原子番号の大きい元素ほど電子の散乱能は大きい。原子番号の大きい元素部分は明るく、原子番号の小さい元素の部分は暗いので、SEM 像から元素分布の概略を知ることできる。

二次電子を検出しても表面の凸凹が電子像の明暗として現れる。最近では、加速電圧が 30 kV で分解能が 0.4 nm の SEM や、低真空で測定できる湿式の SEM も市販されている。

市販されている走査電子顕微鏡

エリオニクス (ESA-2000, ESA-8000。二次電子像分解能: 4.5 nm, 凸凹像, 組画像, 倍率: 30 万倍)

トプコン (ABT-60, 加速電圧: 0.5~30 kV。空間分解能: 4 nm。ABT-150F, 電界放射型, 空間分解能: 1 nm, ウエット SEM は低真空観察用)

日立 (S-2700, 空間分解能: 4 nm, 加速電圧: 0.2~30 keV EDX, WDX 取り付け可能)

日本電子 (JSM-5000, 低真空観察用で空間分解能: 7~15 nm)

丸文 (ステレオスキャン 360, 3 次元走査用)

2.2 走査透過電子顕微鏡 (STEM)

径が $\sim \text{nm}$ レベルの電子ビームで薄い試料を走査し、

図3 物質中での (a) 電子の軌跡, (b) イオンの軌跡, (c) 電子の運動エネルギーと固体からの脱出深さとの関係

透過電子強度を計測する走査型の透過電子顕微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscope) で、0.2 nm の解像力がある。分析電子顕微鏡の本体として使用される。

図4 円筒鏡型電子エネルギー分析器 (CMA) の概略

図5 TEM, REM, SEM, STEM の概念図

2.3 透過電子顕微鏡 (TEM)⁷⁾

試料薄片を透過した電子の強弱から像を求める透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope) は解像力が高いので、高分解能電子顕微鏡 (High Resolution TEM, HRTEM) とも称される。

空間分解能 (d) は電子の波長 (λ) の $3/4$ 乗に比例する。

$$d=0.65 \text{ Cs}_{0.25} \lambda^{0.75}$$

電子の加速電圧が 100 kV では 0.5~20 nm, 200 kV では 0.3 nm, 400 kV では 0.17 nm となる。加速電圧が 100

図6 空間分解能による観察原子像の差

図7 加速電圧と測定可能な試料厚さの関係

万ボルト以上の TEM の解像力は $\sim 0.1 \text{ nm}$ となり、原子像や分子像が見られる。

空間分解能と観察される原子像との対応を図6に示した。また、図7に示すように、加速電圧が高いほど測定できる試料の厚さは厚くなる。

市販されている透過電子顕微鏡

日本電子 (JEM-ARM 1000/1250, 空間分解能: 0.12 nm)

日立 (H-8000, 空間分解能: 0.144 nm , 加速電圧: 200

図8 吸収電子顕微鏡の概略

図9 スピン偏極走査電子顕微鏡による磁気記録書き込み、読みだしヘッドのパーマロイコア (強磁性体の2次電子のスピンの偏極 (a)) と磁区、磁壁のコントラスト (b)

keV, 電子回折像。H-1500, 空間分解能: 0.104 nm , 加速電圧: 1300 keV)

2.4 吸収電子顕微鏡

試料に吸収された電子も試料表面の凸凹、原子番号に関する情報を与える (図8)。試料に吸収される電子の数は、試料構成元素の原子番号が小さいほど多く、原子番号が大きいほど少ない。

2.5 反射電子顕微鏡 (REM)⁸⁾

試料に電子を入射し、小反射角で反射電子を検出する反射電子顕微鏡 (Reflection Electron Microscope) で

(a) MoS₂ 結晶の単分子ステップ

(b) 磁気テープの磁力線
図10 電子線ホログラム

図11 電界放射電子顕微鏡の概略

図12 分析電子顕微鏡の構成図

は、(111) 面のステップ構造、欠陥に基づくピット、転位、スリップの痕跡もはっきり観察できる。走査型の反射電子顕微鏡は走査反射電子顕微鏡 (SREM) といわれる。

2.6 スピン偏極走査電子顕微鏡⁹⁾

強磁性体では、磁性を発現する d 電子や f 電子のスピンが特定方向に偏極しているので、電子ビームを入射した試料から放出される二次電子には、スピンの偏極した電子が含まれている。走査電子顕微鏡でスピン偏極二次電子像を求めるスピン偏極走査型電子顕微鏡 (Spin Polarized SEM) では、磁気ディスクの磁区像の分布、磁気記録薄膜ヘッドコアの磁区構造、磁壁構造など強磁性体表面のスピン状態の分布が観察できる。図 9 は厚さ 1.4 nm の磁気記録用磁気コアで矢印は磁区の磁化ベクトルの方向を示している。二次電子のスピン偏極ベクトルと磁化ベクトルの向きは反平行である。

2.7 電子線ホログラフイー¹⁰⁾

電子ビームを 2 分割し、試料を透過させた電子ビームと、透過させない電子ビームとをプリズムで干渉させ干渉縞 (ホログラム) を作ると、透過電子線の強度と位相を含んだ電子顕微鏡信号が得られる。電子線ホログラフイー (Electron Beam Holography) では位相の情報も加わるので、100 keV の電子で分解能 ~3 ppm が得られ

る。
図 10 (a) は MoS₂ 結晶の薄膜の電子線ホログラムである。中央に高さ 0.6 nm の段差が見える。原子 1 個が検出でき、微粒子の大きさも推定できる。干渉縞の等高線は磁場によっても生じるので、磁気テープに記録された磁力線も調べることもできる (図 10 (b))。

2.8 電界放射電子顕微鏡 (FEM)

先端を 100 nm より鋭い曲率半径にした針先状試料に正の高電圧を印加し、電界放出する電子 (Field Emission Electron) を検出して表面像を観察する。

3. 分析電子顕微鏡 (AEM)^{11)~17)}

200~400 keV の STEM に Si 半導体検出器を取り付

けると高分解能電子線プローブ X 線微小領域分析 (EPMA) が、電子エネルギーアナライザーを組み合わせると電子エネルギー損失スペクトロ (EELS) が、電流計測回路を付けると電子線励起電流測定 (EBIC) が、光電子増倍管を取り付けるとカソードルミネッセンス (CL) が測定できる分析電子顕微鏡 (Analytical Electron Microscope) になる。～数 nm の極微小領域を観察しながら各種のスペクトルを測定するので、多角的な情報が得られる。

市販されている分析電子顕微鏡

明石ビームテクノロジー (EM002B, 200 keV, UHR-EM+EDS+EELS)

カルツァイス (DSM960・940, 日本総代理店ホロン, 03-3341-6431)

日本電子 (JEM-4000FX, 位置分解能 0.18 nm, 400 keV, EDS+EELS)

日立製作所 (H-9000, 300 keV, SEM/STEM+EDX+EELS 機能)

Philips (CM30/STEM)

トプコン (EM-002B, 200 keV, 分解能: 0.18 nm)

4. 走査トンネル顕微鏡 (STM)^{18)~23)}

電子ビームを使用しない顕微鏡で、先端を鋭く尖らせた金属チップを試料表面に 0.5~1.0 nm まで接近させ、両者間に電圧を印加するとトンネル電流が流れる。圧電素子を用いて試料を x-y 平面に走査しながら、針状電極に流れるトンネル電流を一定にするよう針状電極を z 軸方向に動かすと、試料表面の凸凹に沿って上下する針状電極にかかる電圧変化は表面の凸凹を示す。この方式の顕微鏡を走査トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope) といい、平面分解能は 0.1 nm, 垂直分解能は 0.01 nm が得られる。トンネル電流 (I_T) は、 ϕ を仕事関数 (eV), $\beta=e^2/h$, Z を探針と試料表面との距離 (nm), V をバイアス電圧, λ を金属外の波動関数の減衰距離 (局所状態密度, $\lambda=h/2\pi m\phi$) とすると

$$I_T=(\beta V/2\pi\lambda Z)\exp(-2Z/\lambda)$$

となる。半導体や絶縁体の試料には、伝導性薄膜を蒸着する必要がある。Si の 7×7 構造の観察 (図 13), 高配向性グラファイト (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG) の観察、電解溶液中の電極表面などが観察されている。

STM で検出法を変えた走査プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope, SPM) も考案されている。

- a) 原子間力顕微鏡 (Atom Force Microscope, AFM): 探針を試料表面に近づけ相互の原子間に働く力をトンネル電流に変換し測定する。

図13 STM で観察された Si (111) 清浄表面

- b) 走査トンネル電位差法 (Scanning Tunneling Potentiometry, STP): 試料に電位分布をつくり、試料表面の微小部分の電圧降下を検出する。絶縁体試料に有効である。
- c) 磁力顕微鏡 (Magnetic Force Microscope, MFM): 磁気による反発を測定する。磁性材料のドメイン観察に有効である。
- d) バリスチック電子顕微鏡 (Ballistic Electron Microscope, BEEM): 金属と半導体、半導体と半導体などの界面の電子構造の情報が得られる。
- e) 走査イオンコンダクタンス顕微鏡 (Scanning Ion Conductance Microscope, SICM): 電解質溶液中の非伝導性試料表面をマイクロピペット電極で走査する。
- f) 走査電気化学顕微鏡 (Scanning Electrochemical Microscope, SECM): 電解質中の固体表面が観察できる。
- g) 光学近接界顕微鏡 (Optical Near Field Microscope): 探針先端の微小な孔を通った光を用いる。
- h) 走査トンネルスペクトロメトリー (Scanning Tunneling Microspectrometry, STS): 振動スペクトルを測定する非弾性電子トンネルスペクトロメトリー (Inelastic Electron Tunnelling Spectrometry, IETS, $1\text{ meV}=0.24\times10^{12}\text{ s}^{-1}=8.07\text{ cm}^{-1}=11.64\text{ K}$) と STM を結合する。

また、三次元での超精密位置決定技術で STM の手法と組合せ、原子や分子の移動、切断などの取扱い、半導体マイクロエレクトロニクスの nm レベルの精密加工への応用も始まっている。

市販されている走査トンネル顕微鏡

エヴィク (EWIG Technology) (UHV 対応 STM,

水平分解能: 0.01 nm, 垂直分解能: 0.005 nm, トンネル電流 1 pA~100 nA)

伯東 (SAI-800: 大気測定, SU2-800/900: 超高真空測定)

丸文 (STM 2000~900 C)

日本電子 (JSTM-4000XV: 10^{-8} Pa の真空中で測定, 水平分解能: 0.14 nm, 垂直分解能: 0.01 nm)

Omicron-アステック (UHV-STM, LEED/AES, XPS, FIM を含むシステム)

Park Scientific Instruments-伯東 (SFM-BD2, 大気中原子間力顕微鏡, 130×130 nm, 水平分解能: 1 nm 以下, 垂直分解能: 0.01 nm 以下)

ストラス-日本シベルヘグナー (トンネルスコープ 2400, 走査範囲: 6×6 nm, 水平分解能: 0.01 nm, トンネル電流: 0.01~10 nm)

セイコー電子 (SPI 3600 シリーズ, 水平分解能: 0.2 nm, 垂直分解能: 0.01 nm, 走査スピード: 0.01~100 nm/sec)

島津製作所 (AIS-900 は超高真空測定で水平分解能: 0.2 nm, 垂直分解能: 0.01 nm, 測定時間: 17 s)

東陽テクニカ (Nanoscope I, Nanoscope II, 角視野 $80 \mu\text{m}$, デジタル型, 原子力間顕微鏡は Nanoscope AMF)

ユニソク (USM-101)

VG Scientific-丸文 (STM 2000: 超高真空測定, トンネルスコープ 2400)

5. 電流測定

5.1 電子線励起電流測定 (EBIC)²⁴⁾

半導体に電子ビームを入射すると, 照射スポットに電子・正孔対が生成して起電力が生じ電子線励起電流 (Electron Beam Induced Current) が流れる。p-n 接合部は電子・正孔対が生成しやすいので EBIC が増大する。エネルギーを高くすると入射電子は試料深部にまで侵入するので, 加速電圧を変えて測定すれば水平接合部の位置が求められる。また電子ビームを走査すれば電子ビーム誘起電流像 (EBIC 像) が得られる。

5.2 低速電子透過スペクトロメトリー²⁵⁾

LEED の光学系を利用して, 0~数 10 eV の電子ビームを半導体 (薄膜)/金属試料に直角に入射し電子のエネルギーと流れる電流との関係をプロットすると, 薄膜の膜厚に固有な振動が現れる。この振動から界面の平滑さ, 薄膜の膜厚などに関する知見が得られる。

5.3 レーザー誘起電流測定 (LBIC)²⁶⁾

EBIC の電子ビームをレーザービームに代えた方法で, 半導体にエネルギーがバンド幅より大きい光を入射すると, 光電効果で電子-正孔対が生成し光誘起電流

図14 EBIC 測定システム (a) と p-n 接合面の EBIC 像 (b)

(Laser Beam Induced Current) が流れる。格子欠陥や不純物が存在すると再結合し光電流は減少する。レーザー走査型 (光ファイバー) 顕微鏡で得られる光電流検知トポグラフは半導体表面層の格子欠陥, 不純物の分布, p-n 接合部の分布を示している。

6. 電子エネルギー損失スペクトロメトリー (EELS)^{27)~32)}

1 eV~100 keV の単一エネルギーの電子ビームを試料に入射すると, 表面原子の電子による弾性散乱, フォノン励起, プラズモン励起, 吸着ガスの脱離および振動励起による非弾性散乱などによる入射電子のエネルギー損失が起きる。散乱電子のエネルギースペクトル (数 meV ~ 数 keV) を測定する電子エネルギー損失スペクトロメトリー (Electron Energy Loss Spectrometry) を用いると, これらプロセスの情報が求められる。~100 keV の電子ビームを用いたとき, EEL スペクトルの分解能は約 2 eV である。磁場掃引により電子エネルギーを分離するシリアル (serial) 方式では, 1 スポットの測定に数分かかる。

EELS を高感度化するため, 磁場を固定し, 分離された各エネルギーの電子を複数個の固体検出素子を並列に並べたパラレル検出器で同時計測する方式が試みられ,

図15 平行検出方式 EEL 測定装置の構成

図16 EEL スペクトルに現れるピーク

数秒で1スポットの測定が可能となった (図 15)。

図 16 に示すように、EEL スペクトルはエネルギー無損失のゼロ損失ピーク、プラズモン損失ピークなどによる 50 eV 以下の価電子励起スペクトル領域、50 eV 以上の内殻電子励起領域の 3 領域に分けられる。厚い試料では入射電子が多重散乱してエネルギーを損失するので、スペクトルの解析が難しくなる。表 1 にいくつかの原子のプラズモンエネルギーを示した。

EEL スペクトルのピークプロファイルは、元素の存在

表 1 プラズモンのエネルギーの例

元素	B	C	Na	Mg	Al	Si	SiO ₂
eV	24	25	5	11	16	17	25

図17 炭素の同素体の EEL スペクトル
元素の存在状態によってピークプロファイルが変化している

状態によって変化したり、シフトしたりする。図 17 は炭素同素体の C(1s) 内殻励起による EEL スペクトルで、化学状態のちがいでプロファイルが異なっており、同素体の伝導帯の状態密度がよく反映されている。グラ

図18 Fe(11), Fe(111) を含むクロム酸塩スピネル鉱石の EEL スペクトル (左) と Fe(11), Fe(111) ピーク部分の拡大図 (右)

ファイトには π 電子があるので、幅の狭いピークが現れる。図 17 の上部に A, B で示した部分は、6.2 で述べる損失ピークの微細構造である。

6 配位 (octahedral site, O_h) および 4 配位 (tetrahedral site, T_d) の Fe^{2+} と Fe^{3+} のピーク位置はわずかに異なっており、図 18 に示すようにスペクトル上で区別できる。

6.1 EELS によるマイクロアナリシス

電子ビームを走査し注目する EEL ピークの信号強度を検出すれば注目化学種の平面の濃度分布が得られる。

6.2 電子エネルギー損失吸収端微細構造 (ELNES)

試料の内殻電子の束縛エネルギー以上の数 keV の電子線を入射して内殻電子を励起すると、励起電子は近傍の原子で散乱され、周囲の原子の影響が電子エネルギー損失スペクトルの微細構造として現れる。これをフーリエ (Fourier) 変換すると、相互作用原子間の距離の分布——動径分布関数——が得られる。主損失ピーク近傍の微細構造を Fourier 変換すると、エネルギー損失ピークの微細構造 (Energy Loss Near Edge Structure, ELNES) が得られ、注目原子の化学状態、隣接原子の数、原子間距離などが推定できる。

6.3 広域電子エネルギー損失微細構造 (EXELFS)

内殻電子が伝導帯の空準位軌道に遷移したとき、内殻吸収端の近傍 (エッジ) から 50~700 eV 高エネルギー側に現れる微細構造を Fourier 変換すると、広域電子エネルギー損失微細構造 (Extended Energy Loss Fine Structure) が得られ、隣接原子の数や原子間距離が推定できる。

6.4 表面電子線エネルギー損失微細構造 (SEELFS)⁸⁰⁾

表面から放射する散乱電子、X線を検出すると、飛程距離の表面に存在する注目原子やフォノンによる電子線エネルギー損失微細構造 (Surface Extended Energy Loss Fine Structure) が得られるので、化学状態、隣接原子の数、原子間距離を知ることができる。

6.5 高分解能電子エネルギー損失スペクトロメトリー (HREELS)

表面に吸着した分子の振動エネルギーは 0~4000 cm^{-1} 、単位の自然幅は 10 cm^{-1} なので、数 eV の電子ビームを入射し散乱電子のエネルギースペクトルを 30 cm^{-1} の分解能で観測すると、表面フォノンの発生に基づく振動励起によって失われたエネルギーだけ小さい散乱電子のピークが現れ、5000~100 cm^{-1} 領域の振動スペクトルが観測できる。高分解能電子エネルギー損失スペクトロメトリー (High Resolution EELS) と称される。吸着分子の同定、位置、構造、吸着状態の確認、表面の電子状態の解析、吸着分子の反応などを追跡できる。

図 19 は、Mo 単結晶の (100) 面に 120 K で吸着させ

図19 Mo 単結晶に吸着させた HCOOH の HRE-EL スペクトルの温度変化

た HCOOH が、450 K で分解する様子を示したものである。3570 cm^{-1} は OH の伸縮振動、2940 cm^{-1} は CH の伸縮振動、1950 cm^{-1} は CO の伸縮振動、1680 cm^{-1} は COO の非対称伸縮振動、1370 cm^{-1} は COO の対称伸縮振動、700 cm^{-1} 付近は水の liberation によるピークである。OCH の変角振動は 780 cm^{-1} に見られる。250 K では、120 K で現れている HCOOH に基づく CH や COO のピークが消失している、450 K では、HO や CO に基づくピークが現れているので、HCOOH は H_2O と CO に分解していることが分かる。

市販されている電子エネルギー損失スペクトロメーター
エイコーエンジニアリング (EES-10 型, 分解能 <5 meV, 掃引は 2 eV~12 eV)

VSW Scientific Instruments—コロムビア貿易 (0~300 eV, XPS, AES, LEED, UPS, ISS, TDS との複合化可能)

分析電子顕微鏡には標準仕様で電子エネルギー損失ス

ペクトロメーターが装備されている。

(1992 年 3 月 10 日受理)

文 献

- 1) 氏平祐輔編:「固体表面/微小領域の解析・評価技術」, リアライズ社 (1991).
- 2) 堀内繁雄:「高分解能電子顕微鏡-原理と利用法」, 共立出版 (1988).
- 3) P. W. Hauks, Ed.: "The Beginning of Electron Microscopy", Academic Press, New York (1985).
- 4) J. A. Venables, D. J. Smith and M. Cowley: *Surface Science*, **181**, 235 (1987).
- 5) 日本電子顕微鏡学会関東部編:「走査型電子顕微鏡-基礎と応用」, 共立出版 (1976).
- 6) 小林茂樹: 日本金属学会会報, **22**, 673 (1983).
- 7) 守吉佑祐, 坂東義雄, 北見喜三: 日本金属学会会報, **25**, 914 (1986).
- 8) 本田耕一郎, 大沢 昭: 真空, **31**, 783 (1988).
- 9) 早川和延, 小池和幸, 松山秀生: *Hitachi Scientific Instrument News*, **32**, 2932 (1989).
- 10) 外村 彰:「電子線ホログラフィー」(新 OHM 文庫), オーム社 (1985).
- 11) J. J. Hren, *et al.*, Eds.: "Introduction to Analytical Electron Microscopy", Plenum, New York (1979).
- 12) D. B. Williams: "Practical Analytical Electron Microscopy in Materials Science", Philips (1984).
- 13) D. C. Joy, A. D. Romig, Jr., J. I. Goldstein, Eds.: "Principles of Analytical Electron Microscopy", Plenum, New York and London (1986).
- 14) 松井良夫:「エレクトロニクセラミックス」(1987), 5~14.
- 15) 坂東義雄: ぶんせき, **173** (1986).
- 16) 坂東義雄: 電子顕微鏡, **21**, 30 (1986).
- 17) 黒沢文夫: ぶんせき, **173** (1986).
- 18) 桜井利夫, 小林明子, 酒井 明: 日本金属学会会報, **25**, 821 (1986).
- 19) 梶村皓二, 坂東 寛, 水谷 亘ら: 固体物理, **22**, 176 (1987).
- 20) 小野雅敏, 梶村皓二, 水谷 亘ら: 応用物理, **56**, 1126 (1987).
- 21) 小野雅敏ら, STM 特集: 化学, **45**, 666 (1990).
- 22) STM ワークショップ特集: *Ultramicroscopy*, **25**, 99 (1988).
- 23) STM 特集: 化学工業, **42**, 925 (1991).
- 24) N. Puhmann & G. Oelgart: *Phys. Status Solidi A*, **122**, 705 (1990).
- 25) 長谷川繁彦: 応用物理, **61**, 169 (1992).
- 26) Y. Mita, S. Sugata, N. Tsukada.: *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 841 (1983).
- 27) R. F. Egerton: "Electron Energy Loss Spectroscopy in the Electron Microscope", Plenum, New York (1986).
- 28) 増田 茂: 触媒, **27**, 500 (1985).
- 29) 小西亮介, 小林靖弘, 笹倉 博: 応用物理, **57**, 765 (1988).
- 30) 西嶋光昭: 応用物理, **57**, 1785 (1988).
- 31) 西嶋光昭: 表面科学, **8**, 273 (1987).
- 32) H. Ibach & D. L. Mills: "Electron Energy Loss Spectroscopy and Surface Vibration", Academic Press, New York (1982).