材料表面・界面の構造を明らかにする新しい物理解析技術

橋 本 哲^a, 櫻 田 委 大^a

^a JFE テクノリサーチ(株) ソリューション本部(川崎)ナノ材料評価センター
(〒 210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

Advanced Microbeam Analysis for Characterizing Structure of Surface and Interface for Various Material

Satoshi HASHIMOTO^a and Tsuguo SAKURADA^a

^a Solution Division(Kawasaki), Nano-scale Characterization Center, JFE Techno-Research Corporation(1-1, Minamiwatarida, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-0855)

Keywords : Surface Analysis, Micro Beam Analysis, Scanning Electron Microscopy, Transmission Electron Microscopy

1. はじめに

XPS, AES, SIMS などの表面分析法, TEM や SEM などの電子顕微鏡法は表面処理・薄膜材料の微細構造を調べるため, 広く用いられている。これら技術は, 先駆的な研究に始まり, 安定した装置開発と材料に合わせた分析法の研究により, 実用的な分析技術になった。例えば, XPS の原理である光電効果は Einstein により 1905 年に予見され¹⁾, Siegbahn らにより元素の化学状態に決定に応用できることが 1957 年に示された²⁾。これらノーベル賞が与えられた先駆的研究以降, 分析手法の継続的研究により, 現在では XPS は実用的な分析技術となっている。本解説では, 先駆的な研究の紹介でなく, 材料開発の現場において行われる商用装置を用いた実用的な分析の現状について述べる。

ここで実用的な分析とは, 要求される性能を発揮する材料を開発し製造する現場での分析を意味している。例えば, 自動車用防錆鋼板として, 冬季に道路に散布される融雪塩が存在する腐食性の高い環境においても自動車の安全走行を確保するため, 80 年代初頭に自動車車体の防錆管理目標として, カナダコードやノルディックコードなどが提示され, 車体構造, 塗装, 化成処理, 表面処理鋼板の開発が行われた。耐食性だけでなく, 溶接性, 加工性, 塗装性などの性能を兼ね備えていることが必須である表面処理鋼板の開発において, この間で大きく進歩した表面分析・電子顕微鏡観察による構造解析は重要な役割を果たした^{3),4)}。表面処理鋼板を含めた鉄鋼材料, ガラスや製紙, 高分子材料, セラミックスなどの素材, LSI などの半導体, MEMS, 磁性記録など各種機能部品, これらを総合的に利用する重工・重電, 自動車など, 様々な産業分野で使われる表面処理・薄膜材料の設計・製造ニーズに対して適切な分析法が構築され, 多くの材料, 部品の進歩を支えてきた^{5)~7)}。

本解説では, 1960 年代以降実用的に使われている表面・

界面の解析技術, すわわち, 薄膜・表面処理の組成や化学状態の深さ方向分布などを解析できる表面分析法や電子顕微鏡法について概観した後, 最近の進歩について述べる。

2. 2000 年までの表面・界面解析

2. 1 表面・界面解析技術の進展

個々の材料に合わせた分析技術の蓄積や試料調整法も進展とともに, 各手法での定量法に必要な物理量(電子の弾性・非弾性散乱平均自由行程^{8),9)}や背面散乱効果¹⁰⁾, 特性 X 線の発生関数¹¹⁾など)の蓄積, 相対感度因子の理解, 標準物質の作製・選択などの分析法の構築が行われた。

微小部の表面定量分析用の EPMA は 60 年代に, 深さ方向分析や化学状態の解析に使われる表面分析装置(AES, XPS, SIMS)は 75 年代以降に, それぞれ商用機が販売された。これら装置も 80 年代から 90 年代にかけて PC 化するなど大きく進歩し, 使いやすいものとなった。その後 90 年代に, 微小で高感度な分析ニーズに対応して, 電界放出電子源やイオン源などの照射系, 電子・イオン光学系, 検出系におけるマルチチャンネル検出など装置開発が進んだ結果, AES の分析領域は 100 μm から数 10 nm に, XPS では cm から 100 μm に, EPMA では数 μm から 100 nm の技術に進歩した。化学状態分析が可能な XPS も単色化 X 線源の採用により, エネルギー分解能が向上し詳細な状態決定も可能になった。微量分析の SIMS の感度は約二桁向上したことに加えて, TOF (Time of Flight) -SIMS の開発により有機物の状態分析も可能となった。

電子顕微鏡では SEM は 60 年代に商用機が使われるようになり, 微細な表面組織, 断面構造の観察が可能となった。安定した電界放出型電子銃の開発により, 一桁以上分解能が向上し, ビーム径として 1 nm 程度が得られている。ただし, バルク試料のナノレベルの解析が可能な TEM は試料作製の困難さから, TEM は FIB が 90 年前半に実用化されるまで,

図1 SST 前後の ZnNi 合金電気めっき鋼板の AES 深さ方向分析¹²⁾

皮膜断面の解析例は少なかった。

この時代の材料の分析例として、腐食前後での ZnNi 合金電気めっき皮膜解析結果を図1に示す¹²⁾。この結果から、腐食生成物の表層は Zn の酸化物(水酸化物も含む)であり、その内層に Zn, Ni, Cl, O からなる層が存在するとしている。さらに、AES マッピングと XRD, XPS の結果と組み合わせ、内層で絶縁性の $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2$ が、微細な Zn-Ni 合金結晶粒を取り囲むことにより腐食反応が抑制され、電気 Zn-Ni 合金めっきは、高い耐食性を示すものと推定された¹²⁾。

2. 2 標準化

現在広く使われる表面分析技術や電子顕微鏡技術も、80 年代初頭までは、機関間でのトレーサビリティがあるかどうかは不明であった。状態分析、元素分析において重要な分光スペクトルのエネルギー軸、定量分析における強度軸、深さ方向における深さ軸、画像における倍率や分解能など、重要なパラメータが異なるこれら手法を用いて分析を実施する分析機関間で比較できるものかを明らかにするラウンドロビン試験が国内外で行われた^{13)~19)}結果、トレーサビリティがあること、またそのための分析法や装置較正法などが明らかとなった。これらの結果に基づき、規格(ISO や JIS)が作られている²⁰⁾。

3. 2000 年以降の新技术：極低加速電圧 SEM を用いた材料極表面の解析

3. 1 極低加速電圧での電子の振る舞いと特徴的な SEM 像

SEM は細く絞った電子を試料に照射し、表面から放出される二次電子(真の二次電子、反射電子(弾性散乱電子と非弾性散乱電子の両方を含む)など)を用いた顕微鏡法である。2002 年に、100 V まで加速電圧を低くできる ULV-SEM (Ultra Low Voltage SEM) が国内で販売されるようになり、SEM 技術は大きく変わった。ULV-SEM 技術は、1) 電子の侵入深さを小さくできナノレベルの材料極表面の観察ができること、2) 加速条件を制御することで帯電を防いで高分子材料やセラミックスなどの絶縁物でも試料前処理をしない観察ができる

こと 3) 表面形状以外の情報(表面形状、組成、化学状態、結晶方位)が得られるなどの特徴がある^{21)~23)}。

加速電圧に対する SEM 観察の情報深さを図2に示した。情報深さを、電子の非弾性散乱平均自由行程⁷⁾の3倍、すなわち入射した電子の約 95% が減衰する長さとした。一般に SEM は表面に敏感とされているが、通常の高加速電圧(典型的には 10 から 30 kV 程度)における二次電子像では、試料中に数 10 nm 以上拡散した入射電子と反射電子により励起されるため、表面から数 10 nm の平均構造を観察している。2 kV 以下まで加速電圧を小さくすると、情報深さが数 nm 以下になり、Ni めっき表面のめっき残渣²⁴⁾、冷延鋼板上の自然酸化膜²²⁾や Si ウエハ上に付着した有機系汚れ²³⁾などの材料最表面の構造や超微粒子が観察できる。

ULV-SEM (Carl Zeiss 社製 Ultra55 または 1530)を用いた観察例を以下に示す。図3に加速電圧を変えて観察した Si ウ

図2 加速電圧による電子の情報深さ

Tamura らによる電子の非弾性散乱平均自由行程⁸⁾の3倍の値で示した。試料中で平均自由行程の3倍の距離を通過すると、約 95% の電子が吸収される。

図3 15 kV と 100 V の加速電圧で観察した Si ウエハ上の有機物系汚れの SEM 像²³⁾

エハ上の有機物系の汚れを示す²³⁾。従来の SEM で用いられている高加速電圧 (15 kV) で観察すると、均一な暗いコントラストを有する汚れしか見られない。加速電圧を 100 V まで低くすることにより、この汚れは一様ではなく、小さな粒の集合体であることがわかる。さらに、中央の大きな汚れの周辺に、0.1 μm 程度の小さな粒子が広く存在していることも観察される。高加速電圧の場合は、電子の平均自由行程が大きく、入射電子が最表面の汚れを貫通して Si ウエハに達するため、二次電子の発生がほとんど Si ウエハからであるのに対し、極低加速電圧では平均自由行程が小さくなり、最表面の汚れが観察できたものと考えられる。

電子の検出器を選択することにより、通常の二次電子像に見られる表面形状以外の情報も可視化できる。図 4 に表面に腐食生成物がわずかに発生した冷延鋼板の表面観察結果を示す。電子の運動エネルギーの選択性の少ない ET 検出器を用いて観察した表面形状強調像では、平滑な鋼板上に腐食生成物が形成している様子が観察できる。一方、20 V 以下程度の電子が主に検出される環状インレンズ検出器を用いた SEM 像 (化学状態強調像) では、腐食生成物の部分で暗く、

鋼板が明るいコントラストが得られ、表面形状より物質の分布の方が観察できる。EDX マッピングにより、この化学状態強調像で暗いコントラストの部分が酸化物 (水酸化物、オキシ水酸化物を含む) であることが確認できた。反射電子による組成コントラストによる組成分布の観察も行われているが、この系では、化学状態強調像のほうが、物質の違いを表していることがわかる。

3. 2 低加速電圧励起 EDX による微細構造の分析

SEM で観察した部分を定性・定量分析、マッピングするため、EDX 分析が広く用いられている。高加速電圧で励起した場合の EDX の空間分解能は数 μm であるのに対し、加速電圧を小さくすることで一桁以上小さい 30 nm 程度の分解能が得られる^{25), 26)}。

ULV-SEM に取り付けした EDS 分光器 (サーモフィッシャーサイエンティフィック社製、NSS300) を用い、Si ウエハ上に形成した W (12 nm) / Cr (35 nm) 金属多層膜 / TaOx 皮膜断面の EDX 分析結果を図 5 に示す²⁶⁾。加速電圧を汎用的に用いられる 10 ~ 20 kV の内、10 kV とした場合、12 nm の W 層と 35 nm の Cr 層とが分離できず、1 つの層のように測定さ

図 4 初期さびの発生した冷延鋼板表面の観察結果

(a) 表面状態強調像: ET 検出器, (b) 化学状態強調像: 環状インレンズ検出器, (c) 反射電子像, (d) EDX マッピング: 多変量解析により, Fe と FeOx 成分に分離。

図 5 Si ウエハ上に形成した W (12 nm) / Cr (35 nm) 金属多層膜断面の EDX マッピング²⁶⁾

(a) ピーク分離したもの: 加速電圧 2.7 kV, 10 kV, (b) 測定ままのピーク強度マッピング: Si K, W M

れているのに対し、加速電圧を 2.7 kV と低くすることにより、W 層と Cr 層とを明瞭に分析できることがわかる。

ここで、低加速電圧励起では結合エネルギーが大きい内殻電子を励起できないため、低運動エネルギーのピーク (O : K, Si : K, Cr : L, W : M, Ta : M) を用いた。EDS 分光器のエネルギー分解能が低いいため特性 X 線スペクトルに対し、標準スペクトルを用いたピーク分離を行った結果、W と Si, Ta との分布が、また Cr と O との分布が分離できている。

低加速電圧励起で高空間分解能 EDX 分析が可能となった要因は、1) 低エネルギーのため電子の拡散が小さいこと、2) 低加速電圧でもビーム径が充分小さいこと、3) ビームドリフト・試料ドリフトを押さえるため SEM 画像を用いた移動補正を行ったこと、4) 重なる特性 X 線スペクトルのピーク分離を行ったことによるものと考えられる。

4. 2000 年以降の新技术：Cs 補正 STEM を用いた原子スケールの構造解析

4. 1 表面処理・薄膜に対する TEM 技術の適応

90 年代後半に、特定の位置を狙って薄い試料を作製可能な質の良い FIB 装置が商用化され、薄膜・表面処理の断面構造を解析できるようになった²⁷⁾。加えて、球面収差 (Cs) を小さくできる補正レンズが開発され、2005 年に従来の限界を越えた空間分解能が得られる Cs 補正 STEM が商用化された²⁸⁾。Cs 補正 STEM に搭載した EDX や EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy : 電子エネルギー損失分光法) を用いることで、ナノスケールでの EDX 分析で元素の定性分析・定量分析・分布分析が可能になり、EELS 分析でナノスケールでの軽元素の検出や、化学状態評価も可能となった^{29), 32)}。

4. 2 Cs 補正 STEM を用いた原子スケールでの材料の観察

Cs 補正 STEM (Tiata80-300 : FEI 製, ARM200F : 日本電子製) を用いた、微細領域の観察・解析を行った例を以下に示す。図 6 に、Cs 補正 STEM による GaAs/AlGaAs 超格子断面の HAADF-STEM (High-angle Annular Dark Field Scanning TEM) 像を示す。低倍の像では GaAs 層が明るく AlGaAs 層が暗く観察されている。原子分解能の像では、原子番号が近い Ga-As 最近接原子対の両原子コラムの強度はほぼ同じであるのに対し、Al (Ga) -As では強度の非対称が見られている。これは、散乱能が、電子数に依存する局所のポテンシャルに

関連しているため、Ga コラムが Al コラムより明るく観察されている。このように、並進対称性を反映する HR-TEM 像と異なり、STEM 像では個々の原子コラムを直接見分けることができる。

このような原子レベルの観察技術は大変重要ではあるものの、必ずしも原子 1 個 1 個のプロセス制御がされていない実用材料の材料物性に対する構造の役割を理解するためには、局所の原子配列観察よりもナノスケールの分析が重要と思われる。図 7 に、GaAs/AlGaAs 超格子断面の Cs 補正 STEM による EDX および EELS 線分析結果³²⁾を示す。ここでは、空間分解能を EDX または EELS 強度が 20 ~ 80% となる界面幅と定義した。EDX の場合は 1.1 nm であり、EELS では 1.5 nm であった。Cs 補正 STEM-EDX あるいは EELS 分析では、原子スケールのマッピングが行われており³³⁾、特定サイトの占有率の測定も可能になっている。ここに示した分析は一見分解能が低いように見える。しかし、原子マッピングは対称性が高い完全結晶において達成されている。実際の TEM 用試料の厚さは数 10 nm 程度であるのに対し、表面処理材料における界面の粗さはビーム径 (0.1 nm 程度) より大きく、得られる分析結果は、試料厚さ方向に平均化され、分解能は大きくなってしまう。

材料の最表面を分析する場合、簡便で定量性も確保できる XPS や AES などの表面分析の方が適しているが、深い位置にある数 nm の界面に対してはスパッタリングできないため、分析が困難となる。Cs 補正 STEM-EDX/EELS 分析はこのような深い位置にある界面においても適応可能である。図 8 に、

図 6 GaAs/AlGaAs 超格子薄膜の HAADF 像

図 7 GaAs/AlGaAs 超格子薄膜の Cs 補正 STEM EDX および EELS 線分析³²⁾

図8 ネオジム磁石結晶粒界面のCs補正STEMを用いた解析結果³²⁾

HAADF像中に、界面を挟んで行ったEDX線分析結果を示し、および主相および界面での電子回折図形を上方に示す。HAADF像の下方にはコントラストを変えたものを示す。

ネオジム磁石結晶粒界面の観察結果を示す³²⁾。左右の結晶粒のコントラストが大きく異なるので、コントラストを変えたHAADF像も下方に示した。HAADF像における左側の結晶粒(主相)は[110]の方位であり、原子コラムが観察できている。右は[120]に近いが対称軸入射でないため、原子コラムまでは見えていない。その結晶粒界面に、数nm程度の主相と異なるアモルファスあるいは微結晶の界面層が見られる。界面層を挟んでEDX線分析を行った結果、その界面層にNd, Prの希土類元素が偏析していること、Cuがこれらと異なる分布で偏析していることが確認された。

5. 今後の表面・界面解析技術

目覚ましい発展を遂げた電子顕微鏡技術では、観察範囲が数~数十 μm の一断面に限られている。一般の表面処理・薄膜では深さ方向の構造がnmレベルであっても、面内には大きな揺らぎがあることが多く、一ヶ所の断面観察結果がその材料の代表的な構造を示しているとは限らない。最近使われるようになってきた、FIBとSEMとを組み合わせた3D解析技術やTEMの3Dトモグラフィ技術は、この代表性を確保する方法の一つと考えられる。

また、図1に示したようなXPSやAESによる広い面積の深さ方向分析は、代表性を保っており、重要な技術である。条件ごとで決まる分解能さえ理解しておくと、界面の広がりから、元素の拡散や反応を解析できるし、膜厚や組成のムラも考察できる。図1で腐食したものの結果で界面がだれているのは場所により腐食生成物の厚さが異なることを意味しているものと思われる。ただし、イオンスパッタリングによって生じる物質の変化¹⁵⁾や選択スパッタによる組成の変化³⁴⁾は避けられない。この分析による変化を避ける方法として、HAXPES (Hard X-ray PhotoEmission Spectroscopy: 硬X線光電子分光法)を用いた埋もれた界面の分析³⁵⁾が、代表性を確

保する別の方法となる可能性がある。

極低加速電圧励起のSEM像のコントラストは単純でなく^{21)~24), 36), 37)}、物理的解釈は十分でない。例えば、反射電子に関しては、高加速電圧の様な系の平均電子番号に比例したコントラスト(Zコントラスト)とは異なる振る舞いをしている^{37), 38)}など、二次電子像、反射電子像の解釈に関する研究が必要である。

従来の分析結果は、組織形態、定性、定量など分析した結果そのものであったが、工夫して計測した結果にデータ処理することで材料物性を直接表現する物性量を得ることも重要になる。例えば、EELSに現れるバンド間遷移から求めた誘電関数によるLowK皮膜の評価³⁹⁾や磁性のスピンや磁気モーメントの示す磁気円二色性の評価⁴⁰⁾、TEMトモグラフィを用いたポテンシャル分布評価⁴¹⁾などはその可能性を示すものと考えられる。

6. おわりに

表面処理・薄膜材料の微細構造を調べるため広く用いられている表面分析技術・電子顕微鏡法など、表面・界面の分析技術は、商用SEM装置が使えるようになって以降のこの50年で大きく進歩し、鉄鋼、半導体など多くの材料開発に貢献してきた。本稿では、表面・界面の分析技術の最新の状況を概観した。

これら分析技術は新材料・プロセスの研究・開発、トラブルシューティング、生産管理など異なる場面で使われているものの、万能なものではなく、材料の構造のある側面を明らかにするものである。どのような基本構造が制御したい材料物性を支配するかを考え、その構造に合わせた最適な分析法を採用することで、適切な結果が得られる。

分析には、異なる3つの開発の立場が、すなわち、材料開発、分析手法開発、装置開発とがある。この順で分析ニーズが発生し、これに応える分析シーズはその逆に発信される。互いのニーズ・シーズ技術の共有化をした上で、それぞれがその技術を高度化することが必要である。分析手法の立場では、材料開発者が制御したい物性に合わせて、最適な分析手法を選択・構築するし、このために必要な機能を分析装置の開発者に提案することになる。今後も、これまでのように表面・界面分析に係わる技術者が、それぞれの立場での研究・開発を進めることで、薄膜・表面処理材料の発展に寄与できるものと信じている。

(Received August 27, 2015)

文 献

- 1) A. Einstein; *Annalen der Physik*, **17**, 132 (1905).
- 2) C. Nordling, E. Sokolowski, K. Siegbahn; *Phys. Rev.*, **105**, 1676 (1957).
- 3) 橋本 哲; 表面科学, **22**, 128 (2001).
- 4) 名越正泰; 第219・220回西山記念講座資料, p.161 (2014).
- 5) 笹川 薫; 表面科学, **32**, 254 (2011).
- 6) 中村 誠; 表面科学, **32**, 246 (2011).
- 7) 日本學術振興会 マイクロビームアナリシス第141委員会編; マイクロビームアナリシス・ハンドブック (オーム社, 2014).
- 8) S. Tanuma, C. J. Powell, D. R. Penn; *Surf. Interface Anal.*, **21**, 165

- (1994).
- 9) C. J. Powell, A. Jablonski ; *Surf. Interface Anal.*, **33**, 211 (2002).
- 10) Ding Ze Jun, R. Shimizu, S. Ichimura ; *Surf. Interface Anal.*, **10**, 253 (1987).
- 11) 西尾満章 ; *J. Surf. Anal.*, **20**, 111 (2013).
- 12) 福田安生, 土谷康夫, 寺坂正二, 中岡一秀, 原 富啓 ; 鉄と鋼, **72**, 1782 (1986).
- 13) 大坪孝至, 広川吉之助, 福田安生, 大橋善治, 薄木智亮, 源内規夫, 石田英明, 吉田鎮雄, 関本靖裕, 鈴木堅市 ; 鉄と鋼, **73**, 259 (1987).
- 14) 大坪孝至, 広川吉之助, 福田安生, 大橋善治, 薄木智亮, 源内規夫, 石田英明, 吉田鎮雄, 関本靖裕, 鈴木堅市 ; 鉄と鋼, **73**, 437 (1987).
- 15) 橋本 哲, 広川吉之助, 福田安生, 鈴木堅市, 鈴木敏子, 薄木智亮, 源内規夫, 吉田鎮男, 甲田 満, 瀬崎博史, 堀江 浩, 田中彰博, 大坪孝至 ; 鉄と鋼, **78**, 149 (1992).
- 16) 薄木智亮, 広川吉之助, 福田安生, 鈴木堅市, 橋本 哲, 鈴木敏子, 源内規夫, 吉田鎮男, 甲田 満, 瀬崎博史, 堀江 浩, 田中彰博, 大坪孝至 ; 鉄と鋼, **78**, 158 (1991).
- 17) C. J. Powell, N. E. Erickson, T.E. Madey ; *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **25**, 87 (1982).
- 18) 表面化学分析作業部会 ; *J. of Surf. Anal.*, **8**, 269 (2002).
- 19) M. P. Seah ; *Surf. Interface Anal.*, **20**, 243 (1993).
- 20) 一村信吾, 田沼繁夫, 田中幸基 ; マイクロビームアナリシス・ハンドブック, 日本学術振興会 マイクロビームアナリシス第141委員会編, p.605 (オーム社, 2014).
- 21) 清水健一, 立花繁昭, H.Yaksch, 幅崎浩樹 ; 工業材料, **52**, 70 (2004).
- 22) 佐藤 馨, 名越正泰, 河野崇史, 本間芳和 ; 応用物理, **73**, 1328 (2004).
- 23) 橋本 哲 ; 日本信頼性学会誌, **28**, 155 (2006).
- 24) 土谷康夫, 立花繁明, 花田 剛, 橋本 哲, 櫻田委大 ; 2006年度材料技術研究協会討論会 (2006).
- 25) T. Sakurada, S. Hashimoto, Y. Tsuchiya, S. Tachibana, M. Suzuki, K. Shimizu ; *J. Surf. Anal.*, **12**, 118 (2005).
- 26) S. Hashimoto, Sakurada, M. Suzuki ; *J. Surf. Anal.*, **14**, 428 (2008).
- 27) 洪 文恵, 加藤丈晴, 坂 公恭 ; 鉄と鋼, **83**, 311 (1997).
- 28) 田中信夫 ; 顕微鏡, **46**, 175 (2011).
- 29) S. D. Findlay, N. Shibata, H. Sawada, E. Okunishi, Y. Kondo, T. Yamamoto, Y. Ikuhara ; *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 191913 (2009).
- 30) E. Hamada, K. Yamada, M. Nagoshi, N. Makiishi, K. Sato, T. Ishii, K. Fukuda, S. Ishikawa, T. Ujiro ; *Corr. Sci.*, **52**, 3851 (2001).
- 31) 猪瀬 明, 橋本 哲, 小形健二, 前田千寿子, 矢野裕司 ; 応用物理学会, 先進パワー半導体研究会第22回講演会, L16 (2013).
- 32) 橋本 哲, 小形健二, 池本 祥, 北原保子, 猪瀬 明, 前田千寿子 ; 希土類学会 第30回希土類討論会, 2A-11 (2013).
- 33) 柴田直哉, フィンドレイ・スコット, 幾原雄一 ; 顕微鏡, **46**, 55 (2011).
- 34) G. Betz ; *Surf. Sci.*, **92**, 283 (1980).
- 35) N. Hoshiya, N. Isomura, M. Shimoda, H. Yoshikawa, Y. Yamashita, K. Iizuka, S. Tsukamoto, S. Shuto, M. Arisawa ; *Chem Cat Chem.*, **1**, 279 (2009).
- 36) R. Schmid, K. H. Gaukler, H. Seiler ; Scanning Electron Microscopy, p.501 (1983, SEM Inc, AMF OHare).
- 37) 櫻田委大, 橋本 哲, 前田千津子, 後藤敬典 ; 2009年日本表面科学会講演大会, 159 (2009).
- 38) 橋本 哲, 櫻田委大, 後藤敬典, 田沼繁夫 ; 日本顕微鏡学会 第71回学術講演会, p.56 (2015).
- 39) 阿南義弘, 高口雅成, 朝山匡一郎, 木本浩司, 松井良夫 ; 電子顕微鏡, **44**, 227 (2009).
- 40) P. Schattschneider, S. Rubino, C. Hébert, J. Rusz, J. Kuneš, P. Novák, E. Carlino, M. Fabriziooli, G. Panaccione, G. Rossi ; *Nature*, **441**, 486 (2006).
- 41) W. D. Rau, P. Schwander, F. H. Baumann, W. Höppner, A. Ourmazd ; *Phys. Rev.Lett.*, **82**, 2614 (1999).

補 遺

本文では、一般的に使われるようになった分析手法の表記として略語だけを示したが、参考として、本解説で触れなかった技術のものと合わせて、表1に示す。

表1 各種表面技術・顕微鏡技術の名称(*: 本文では触れていない分析技術)

分野	略称	英文名称	邦文名称
表面分析	AES	Auger Electron Spectroscopy	オージェ電子分光法
	XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	X線光電子分光法
	HAXPES	HArd X-ray PhotoEmission Spectroscopy	高X線光電子分光法
	SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry	二次イオン質量分析法
	TOF-SIMS	Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry	飛行時間型二次イオン質量分析法
	GDS*	Glow Discharge Spectroscopy	グロー放電発光分光法
顕微鏡法	EPMA	Electron Probe MicroAnalysis	電子線マイクロアナリシス
	SEM	Scanning Electron Microscopy	走査電子顕微鏡法
	ULV-SEM	Ultra Low Voltage Scanning Electron Microscopy	極低加速電圧走査電子顕微鏡法
	EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	エネルギー分散型X線分光法
	EBSD*	Electron Backscatter Diffraction	後方散乱電子回折法
	TEM	Transmission Electron Microscopy	透過電子顕微鏡法
	STEM	Scanning Transmission Electron Microscopy	走査透過電子顕微鏡法
	HAADF	High Angle Annular Dark Field	高角度環状暗視野
	EELS	Electron Energy Loss Spectroscopy	電子エネルギー損失分光法
	SPM*	Scanning Probe Microscopy	走査プローブ顕微鏡法
	AFM*	Atomic Force Microscopy	原子間力顕微鏡法