オージェ電子分光法

田中 幸基^a，新谷 龍二^b，山本 広一^a

^a 日鉄住金テクノロジー(株) 富津事業所(〒293-0011 千葉県富津市新富 20-1)

^b 日鉄住金テクノロジー(株) 尼崎事業所(〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8)

Auger Electron Spectrometry

Koki TANAKA^a, Ryuji SHINYA^b and Kohichi YAMAMOTO^a

^a Futtsu Unit, NIPPON STEEL & SUMIKIN TECHNOLOGY Co., Ltd.(20-1, Shintomi, Futtsu-shi, Chiba 293-0011)

^b Amagasaki Unit, NIPPON STEEL & SUMIKIN TECHNOLOGY Co., Ltd.(1-8, Fuso-cho, Amagasaki-shi, Hyogo 660-0891)

Keywords : Electron Spectrometry, Surface Analysis, Depth Profile, Segregation, Precipitate

1. はじめに

オージェ電子分光法(Auger Electron Spectrometry または Auger Electron Spectroscopy, AES)は、加速した電子を分析試料に照射し、1～2 nm 程度の表面層から放出される元素固有のエネルギーを持つオージェ電子を検出することで、試料の表面に存在する元素の種類と量に関する情報を得る分析法である。数十 nm 程度の微小領域の元素分析、元素の面内分布、深さ方向分布が分析でき、試料表面の組成、微小析出物の成分、表面および界面における偏析元素、被膜を有する試料では被膜と基材のそれぞれの成分、被膜と基材の界面における元素分布、拡散状態、析出相などの分析に有効な方法である。また、オージェ電子のエネルギースペクトルを詳しく解析することで、元素の化学状態に関する情報も得られる。本稿では AES の原理と特徴、応用事例を紹介する。

2. 原理と特徴

2.1 オージェ電子分光法の原理

固体に電子を照射すると、固体内原子の内殻電子が励起されて空孔が生じ、直ちに外殻の電子で満たされる。このとき内殻と外殻のエネルギー差は、特性 X 線の放出か、または、電子の放出のどちらか一方で消費される。放出される電子は、現象の発見者である Pierre Victor Auger にちなんでオージェ電子と呼ばれている。

図 1 に原理の概要を示すが、この例では、電子照射で生じた K 殻の空孔を L₂ 殻の電子が満たし、その際のエネルギー差によって L₃ 殻からオージェ電子が放出される様子を示している。このオージェ電子は KL₂L₃ と表記される。KL₂L₃ オージェ電子の運動エネルギー E_A は、(1)式で表すことができる。

$$E_A = E_K - E_{L_2} - E_{L_3} - \phi_s \quad (1)$$

ここで、E_K、E_{L₂}、E_{L₃} は、K、L₂、L₃ 準位のエネルギー、φ_s は試料の仕事関数である。

オージェ電子の運動エネルギー E_A は図 1 に示したように

電子のエネルギー準位にのみ依存しており、照射する電子の加速エネルギーには依存しない。元素の電子の束縛エネルギーは既知なので、測定したオージェ電子のエネルギーから元素を同定できる。オージェ電子のエネルギーについては、装置メーカーのハンドブック¹⁾や専門書²⁾で確認することができる。通常、表面分析に応用するオージェ電子は約 20～2500 eV 程度の運動エネルギーを持つが、この範囲の運動エネルギーを持つ電子は固体中で吸収され、約 5 nm より深い位置で発生したオージェ電子は試料表面から脱出できない。検出されるオージェ電子は、試料表面から 0.3～5 nm 程度の深さ範囲に存在する元素から放出されたものである。上述したように、オージェ電子の運動エネルギーは照射する電子の加速エネルギーには依存しないので、加速電圧を大きくしても、オージェ電子の脱出深さが深くなることはない。すなわち、AES が検出する元素は試料表面だけの元素であって、約 5 nm よりも深い部分の元素については検出しないので、表面にのみ感度が高い分析方法となる。オージェ電子の検出

図 1 オージェ電子の発生

深さについての詳細は文献 2), 3) を参照されたい。

元素から放出されるオージェ電子の電流は、(2) 式であらわされる。

$$I = I_p \cdot \sigma \cdot (1 - X) \cdot \lambda \cdot C \cdot (1 + B) \cdot T \cdots \cdots (2)$$

I_p : 照射電子の電流, σ : イオン化断面積, X : 蛍光収率, λ : 電子の平均自由行程, C : 元素の表面濃度, B : 背面散乱因子, T : 分析器の透過率

蛍光収率 X は、電子照射で生じた空孔を外殻電子が埋める際に X 線が放出される確率で、 $1 - X$ はオージェ電子が放出される確率に相当する。(2) 式が示すように、オージェ電子の電流は試料表面の元素含有量 C に比例するので、電子検出器で計測されるオージェ信号強度から元素の表面濃度が分かる。蛍光収率 X は原子番号が大きい元素ほど大きく、一方、オージェ電子の放出率は軽元素ほど大きい。そのため、AES は軽元素ほど高感度で検出することができる。走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) で成分分析をする場合、エネルギー分散型 X 線分析器 (Energy Dispersive X-ray Spectrometry, EDS) が用いられるが、EDS では、B, C, N, O などの軽元素は感度が低く、検出されにくい元素である。AES ではこれらの軽元素が容易に検出可能である。特に EDS ではできない Li の分析が可能で、Li イオン電池の電極材料の分析に応用されている³⁾。なお、オージェ電子の放出には上記のように 3 個の電子が関与するため、H と He は分析できない。

2. 2 AES 装置

AES 分析装置は、主として電子銃と電子光学系、試料室、電子分光装置とイオンエッチング用のイオン銃から構成されている。

電子銃は、タングステンフィラメントを通電加熱し、発生する熱電子を電極に印加した電圧によって引き出す。電子放出源として高融点で仕事関数が低い六ホウ化ランタン (LaB_6) を用いた電子銃や、さらに高輝度の電子源であるフィールドエミッション電子銃を用いた装置 (FE-AES) がある。電子銃から放出された電子は、電子光学系で数 kV ~ 25 kV 程度の電圧で加速され、レンズで直径数 nm 程度のビームに集束されて試料に照射される。

オージェ電子の測定方法には、主に図 2 と図 3 に示すような 2 通りの方法がある。図 2 は同軸円筒鏡型の電子分光器で、外側の円筒と内側の円筒の間に電圧を印加して、特定のエネルギーを持つオージェ電子を電子検出器に導くことでエネルギー分析を行う。分光器の中心軸上に電子銃を配置し、360 度全方位に放出されるオージェ電子を取り込むため、分析結果が試料形状や試料の傾斜角の影響を受けにくいという特徴がある。

図 3 は同心半球型の電子分光器である。半径が大小 2 つの半球を電極とした構造の分光器で、高いエネルギー分解能でオージェ電子を検出でき、化学結合状態によるオージェ電子のピーク形状の変化をとらえることが可能である。

AES 装置には、Ar イオン銃が搭載されており、1 ~ 5 kV 程度の電圧で加速した Ar イオンを試料に照射し、スパッタリング現象を使って表面を剥離し、清浄な試料面を露出させる場合や、元素の深さ方向分布を測定する場合に用いられる。

試料室はターボ分子ポンプやスパッタイオンポンプ、チタングッターポンプを組み合わせた超高真空排気装置で排気されて、 1×10^{-8} Pa 以下の圧力に維持されている。

AES は表面に敏感な分析法であるので、表面を汚染しないように試料の取り扱いには細心の注意が必要である。通常、大気に触れた試料は表面に水や炭化水素などの分子を吸着している。オージェ電子はこの吸着層に吸収されて強度が大きく減少するため、試料表面を Ar イオンでエッチングして、吸着層を除去することが必要な場合が多い。

試料室の中は真空排気しても、気体分子が残留しており、その量は試料室中の圧力に比例し、圧力が高いほど試料表面に吸着する気体分子の量は多くなる。試料室中を超高真空に保てない場合、残留気体の分子が試料表面に吸着し、オージェ電子がこの吸着層に吸収され検出されなくなる。また、Ar イオンでエッチングして清浄面を得ても、試料表面は直ちに残留気体の分子で覆われ、水分子や炭化水素分子に由来する C や O からのオージェ信号が常に検出されてしまうことになる。前述したように、AES は C, O に対する感度が高いので、これらの元素を分析する目的で用いることが多いが、残留気体の分子が吸着すると、本来目的とした試料中の C, O の分析が困難になる。そのため、試料室内は超高真空に保つ必要がある。油脂や水分が付着した試料や多孔質の試料は、真空

図2 同軸円筒鏡型オージェ電子分光器

図3 同心半球型オージェ電子分光器

中で長時間にわたってガスを放出し続け、試料室内の圧力が十分下がらない場合がある。分析の前に試料を脱脂洗浄し、予備排気室で十分にガスを放出した後、試料室に入れるなどの工夫が必要である。

また、試料を直接素手で扱うと油脂が付着して分析の妨げになるので、常にポリエチレン製やビニール製の清浄な使い捨て手袋を装着した手で扱うことが必要である。ピンセットやドライバーなどの器具類も、脱脂洗浄したものを使うことが望ましい。試料を識別するための記号を、試料に直接書くことは避けなければならない。

2.3 分析方法

図4にオージェ電子信号の例として鋼板表面に電子を照射して得られるオージェ電子スペクトルの例を示す。試料から放出されるオージェ電子の数は、電子照射で発生する散乱電子や2次電子の0.1%程度以下しかなく、オージェ電子は散乱電子と2次電子によってつくられるバックグラウンドの上に微小な信号であらわれる。そのため、オージェ電子の信号は図4のように微分スペクトルであらわされることが多い。前述したように固体中のオージェ電子の平均自由行程は数nm以下であるために、それよりも深い部分の元素情報は含まれていない。

定量分析を行うには、得られたオージェ電子スペクトルから以下の(3)式によって原子濃度を求める。

$$X_i = \frac{N_i/S_i}{\sum_{j=1}^N N_j/S_j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 X_i は元素*i*の原子濃度、 N_j は*j*元素のオージェ電子の信号強度(微分曲線の山と谷の計数の差)、 S_j は元素*j*の感度係数である。実際の定量には、試料の組成の影響など(3)式に補正を加える必要があるが、その詳細については専門書を参照されたい。市販の装置には、オージェ電子の信号強度から組成を求めるためのソフトウェアが付属しており、手軽に定量値を求めることができるが、精度はあまり高くはないとされている。

図4にはオージェ電子の信号強度から定量化した各元素の原子数濃度を示したが、試料を測定室に入れた直後にオー

ジェ電子を測定すると、この例のようにCやOからのオージェ電子信号が強く表れることが多い。これは試料中に含有されるCやOに由来するものではなく、試料表面に形成された酸化物や吸着分子の層からの信号である。しかし、Arイオンにより表面をスパッタリングして、清浄面を得た状態でオージェ電子スペクトルを測定すると、後述する優先スパッタリングが起きにくい試料では、化学組成にほぼ等しい定量値が得られる。精度のよい定量値が必要な場合には、煩雑ではあるが標準試料を用いることによって可能である。AESの感度は、他の分析法と比較すると、あまり高くない。先述したように、オージェ電子の信号はS/N比が低いので、試料や元素にもよるが定量下限は1~2%程度である。

2.4 オージェ電子分光法の特徴

表面分析では目的に応じて最適な方法を選択して用いることが重要である。原理や特徴をAESと比較するため、他の分析法についても簡単に触れる⁵⁾。

電子プローブX線分析法(Electron Probe X-ray Micro Analysis, EPMA)は、AESと同様に細く絞った電子をプローブとして用いる分析方法で、電子照射で励起された原子から放出される元素特有の波長をもつ特性X線を計測することで元素分析を行う。検出する信号が異なるだけで、AESとEPMAはよく似た方法であるが、特性X線はオージェ電子と比較して固体中の透過率が高いので、EPMAは試料表面から約1μm程度までの深い部分からの情報が得られる。また、固体中での電子の拡散により、プローブ径よりも広い範囲から特性X線が放出される。一方、オージェ電子の放出範囲は特性X線のそれよりも浅く狭いので、AESはEPMAよりも浅い最表面のみの情報を得たい場合や、深さ方向の元素分布を測定する場合に有効である。特に、電子ビームが5nm程度まで集束されるFE-AESでは、空間分解能が電子ビーム径と同程度であり、数十nm程度の微小領域の分析が可能である。

深さ方向の元素分布を測定するための分析方法として、グロー放電発光分析法(Glow Discharge Optical Emission Spectrometry, GDS)がある。GDSは、バルクの成分定量のほか、深さ方向の元素分布を測定する目的で用いられることが多く、最表面~数nmあるいは100μmを超える深さまで、深さ方向の元素分布を短時間で定量できる。金属材料だけでなく、セラミックスなどの絶縁物でも分析が可能で、酸化スケール、表面コーティング、めっきなどの被膜組成や界面の元素分析に有効である。分析できる元素は水素からウランまで幅広く、数ppm~数十ppm程度の微量元素を検出できる。分析領域のサイズは通常、直径が数mmで、特定の微小領域の分析には不向きであるが、被膜等の平均組成については代表性の良い分析結果が得られる。GDSは超高真空が不要で、装置の操作や保守が容易である。

微小領域で、高感度の分析が可能な方法として二次イオン質量分析法(Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS)がある。SIMSは、イオンを試料に照射し、スパッタリングによって真空中に放出された粒子の質量と強度を測定することで、表面の元素分析を行う方法である。SIMSは水素をはじめほとんどの元素を高感度で検出することができ、深さ方向の元素分布が測定可能である。

図4 AESで得られるオージェ電子信号の例
鋼板試料表面からのオージェ電子のエネルギー分布

SIMS では試料に照射するイオンを1次イオン、スパッタリングで放出される粒子イオンを2次イオンと呼ぶ。装置は主に1次イオン照射装置と2次イオン質量分析装置から構成されており、1次イオンとしてCs(セシウム)イオンが用いられることが多い。2次イオン質量分析装置には、磁場偏向型質量分析装置、四重極質量分析装置、飛行時間型質量分析装置などのタイプがある。最近ではGa(ガリウム)の集束イオンビームにより、40 nm 程度の分解能での元素マッピングも可能となっている。SIMS の深さ方向の分解能は数十 nm 程度、空間分解能は数 μm 程度である。検出下限は、元素によっては ppb レベルの極微量元素の検出が可能である。定量は適切な標準試料が得られれば可能であるが、例えば試料の酸化物の影響を受けやすいなど、高精度の定量を目的とする場合には注意が必要である。

X 線光電子分光法(X-ray Photoelectron Spectrometry または X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)は、AES と同様、電子分光による表面分析法である。XPS は、X 線を試料に照射し、試料中の原子から放出される電子(光電子)のエネルギー分析を行うことで試料表面の組成を定量する分析法である。光電子の運動エネルギーから電子の結合エネルギー、すなわち元素の化学状態に関する情報が得られる。結合エネルギーは元素固有の値であるので試料中の含有元素が同定でき、光電子の強度から含有量が定量できる。また、化合物では、原子間の価電子の移動に伴う電荷分布の変化により内殻電子の結合エネルギーが数 10 eV ~ 数 eV にわたって変化することを利用して化学状態が推定できる。一般的にはイオン結合性が増加し、高酸化状態になるほど結合エネルギーが増加する傾向がある。

光電子の運動エネルギーは励起 X 線のエネルギーに依存するが、Al $K\alpha$ 線を励起源とした場合、1200 eV 以下であり、固体からの平均脱出深さは 1 nm 以下である。そのため XPS は試料の表面の元素のみを分析していることになる。プローブとして X 線を用いるので、分析領域のサイズは、実用的には数十 μm 程度が最小である。定量下限は AES と同程度で、1 ~ 2 原子数%程度である。

上記のように、AES は各種表面分析法の中では比較的空間分解能が高く、表面敏感であるので、1 μm 以下の微小析出物の成分分析、粒界偏析元素の同定、1 μm 以下の薄い被膜の深さ方向の分析を目的とする場合に有力な選択肢のひとつになる。分析対象とする物質は、金属以外にも、半導体、セラミックス、金属酸化物などが分析可能である。ただし、絶縁物質の分析には注意が必要である。絶縁物に電子を照射すると、試料表面が帯電して、その影響でオージェ電子の運動エネルギーが変化してしまい、正しい測定ができなくなってしまう。また、集積回路の電極を分析する場合のように分析箇所は金属であっても周囲が樹脂のような絶縁物で囲まれている場合も同様である。絶縁物を分析する場合には、試料の帯電を防止する対策が必要である。EPMA の場合には、試料表面に炭素や金などの導電性物質を薄く蒸着することで絶縁物の分析をしているが、AES の場合にはこの方法は使えない。AES では、帯電防止策として試料を傾斜させる方法や、低速の Ar イオンを照射することで帯電を中和する方法がある⁴⁾。

有機物質の分析は慎重に行う必要がある。電子照射によって試料状態が容易に変化するものは分析できないし、電子照射によって溶解して真空中にガスを放出するものは、装置を汚染して性能を劣化させてしまうため扱いが困難である。

3. オージェ電子分光法の応用例

図5に元素の深さ方向分布を測定した例として、PbSn 共晶はんだの深さ方向分析を測定した例を示す⁵⁾。図5(1)は、二次電子像観察による PbSn 共晶はんだの組織である。四角で囲んだ部分(a), (b)はそれぞれ組成が異なり、(a) Pb リッチ相と(b) Sn リッチ相に分離している。(a), (b)それぞれについて、Ar イオンでエッチングしつつ Pb と Sn, O のオージェ電子スペクトルを測定し、各元素の深さ方向分布を取得した。図5(2)は図5(1)の(a), (b)における O, Pb, Sn の深さ方向分布である。はんだの表面 1.5 nm 程度に酸化物が形成されていることがわかる。また、2 nm よりも深い部分においては、(a) Pb リッチ相と(b) Sn リッチ相、それぞれの組成を示している。このような合金元素を定量する場合に

図5 SnPb 共晶はんだの AES 分析

(1) PbSn 共晶はんだの 2 次電子像、

(2) (a), (b) における O, Sn, Pb の深さ方向分布

気をつけなければならないのは、元素によってはArイオンで優先的にスパッタされるため、バルク組成と異なる結果が得られる場合があることである⁶⁾。

FE電子銃を用いたAESでは空間分解能が高いという特徴を活かし、試料の断面を研磨によって露出させ、断面を横切るように電子を走査しオージェ電子を測定することで元素の深さ方向分布を測定することが可能である。Arイオンエッチングでは、数 μm 程度の深さまで掘り下げるには長時間を要することと、Ar照射量の増加と共に試料表面が荒れるので、数百 μm を超える深さまで分析することは実用上困難であるが、集束イオンビーム加工(Focused Ion Beam, FIB)等で露出させた断面を測定すれば、数百 μm 程度の深さ方向分析が可能である。図6はその一例で、試料はSiウエハー基板にスパッタ蒸着法でTi膜を形成し、さらに、その上に順にPd, Au, Cr, Wの層を形成した多層膜である。断面をFIB加工によって露出させ、W層からSi基板にかけて電子を走査しつつ各元素からのオージェ電子スペクトルを測定し、深さ方向の分布を得ている⁷⁾。

P, S, Sn, Sbなどは鋼の粒界に偏析しやすい元素で、粒界脆化の原因になることが良く知られている。AESは粒界脆化の原因となる元素を特定する分析に有効な手段である。AESで粒界を分析するには、粒界面を露出させる必要がある。そのためには、試料に予めノッチ加工を加え、AES装置の試料室で液体窒素によって間接的に冷却し、外部から衝撃を加えて破断する。破断した部分の破面の2次電子像を観察して、粒界破面を選んでAES分析を行う。分析は、通常、0～2000 eV程度のエネルギー範囲でオージェ電子スペクトルを測定して検出される元素を確認する。次に、粒界面上で電子を走査し、検出元素のオージェ電子信号によるマッピング像を観察する。

図7は、純鉄に添加したSの粒界偏析を調べた例である⁷⁾。脆化した試料の粒界破面をAES分析した結果、(a)に示すように、Sが粒界偏析していることが確認された。一方、硫化物を形成しやすいAl, Caを添加した試料では、(b)に示したように、Sは検出されず粒界偏析が抑制されていることが分かる。図8は、鋼の粒界に偏析したPの存在状態を分析

した例で、PとFeについてマッピングを行った結果である⁵⁾。粒界偏析したPは1原子層程度の厚さしかないが、AESは表面敏感であるために元素マッピング像が観察できる。粒界偏析による脆化対策として、第3元素を添加し析出物を形成することで粒界偏析が抑制できるが、析出物の形成状態と粒界偏析状態を確認する目的でもAESは有効に活用できる。図7、図8で示した粒界偏析元素をAESで分析するには、試料を真空中で破断して粒界を露出させた後、試料を大気に暴露することなくAES装置に導入することが必要である。大気中で試料を破断すると、破断面には大気中のガス分子が吸着し、オージェ電子が検出されなくなるためである。破断面の分析を目的として、試料室内で試料を破断する機構を備えたAES分析装置もある。

Liイオン電池の開発における電極材中のLiの分析にAESは有効な手段の一つであり、AESによるLiの分析について、堤らの報告がある⁸⁾。LiからのKVVオージェ電子は、運動エネルギーが低いので、バックグラウンドに埋もれてS/N比が低くなることと、試料表面からのオージェ電子の脱出深さが浅く、わずかな汚染層で吸収されて検出が困難であるため、XPSと比較してAESによるLiの分析は困難とされてきた。堤らはAESとXPSによるLiの検出感度を検討し、10 kV, 10 nAの電子照射によるLi KVVオージェ電子のC KLLオージェ電子に対する強度比は4倍程度、一方、Al K α X線による1S_{1/2}光電子のCに対するLiの強度比は1/18程度であるので、試料の前処理を十分注意して行うことで、AESによるLiの分析は十分可能であるとしている。リチウムイオン電池材料に含まれるLi, C, O, Mn, Co, Niを、蛍光X線分析法, XPS, AES, 走査電子顕微鏡で分析し、AESによって精度のよい結果が得られることを示している。

同心半球型電子分光器を備えたAES装置では、オージェ電子を高エネルギー分解能で測定でき、化学結合状態によるオージェ電子のエネルギーシフトを測定することができる。これを応用することで、微小領域の化学状態分析が可能とされている。AESによる化学状態分析については、多くの検討事例がありその可能性が示唆されている^{9),10)}。オージェ電

図6 FIB加工による薄膜の断面での深さ方向分析

図7 硫黄を添加した純鉄の粒界破面のAES分析⁶⁾
(a) Al無添加, (b) Al添加

図8 鋼中に添加したPの粒界偏析のAES分析⁵⁾
(a) 2次電子像, (b) Pの分布, (c) Feの分布

図9 銅の化学状態とCu LMM オージェ電子スペクトル¹¹⁾

図10 亜鉛の化学状態とZn LMM オージェ電子スペクトル¹¹⁾

子の運動エネルギーは(1)式であらわされるが、分析元素と隣接元素との間の電子の共有状態によって、 E_K , E_{L2} , E_{L3} がそれぞれ変化する。XPSでは、化学結合に伴う光電子スペクトルの化学シフトは、分析元素の1つの電子エネルギー準位の変化によるので、比較的理解しやすく、分子軌道法によって化学シフトの計算が可能である¹¹⁾。しかし、AESの化学シフトは上記の3つのエネルギー準位の変化が関係しているためXPSより複雑である。あらかじめ、化学状態が既知の純物質のAESスペクトルを測定しておき、分析試料のAESスペクトルと比較することによって化学状態を推定することが多い。境は、Cu, CuO, Cu₂OのCu LMM オージェスペクトルとCu 2p_{3/2}光電子スペクトルを比較し、AESはXPSより大きな化学シフト量であることを示している¹⁰⁾。

堤らは、自動車用ラジアルタイヤに使用されているスチールコードのCuZnめっき部を高エネルギー分解能でAES分析を行い、めっき部から芯材にかけて深さ方向にCuとZnの状態別の定量分析を行っている¹²⁾。化学状態別の定量は、Cu, CuO, Cu₂O, CuS, ZnO, ZnSの純物質のスペクトルを用いてオージェスペクトルのピーク分離によって行われた。図9と図10にそれぞれの物質のオージェスペクトルを示す。スチールコードの分析結果は、図11のようになり、めっき層とゴムの界面では、めっき中のCu, Znとゴム中のS, Oが反応し、硫化物や酸化物を形成していることが示された。

図11 スチールコードの化学状態別深さ方向分布¹¹⁾

4. おわりに

FE電子銃を装備したAESによって数十nmの空間分解能で形態観察と元素分析が可能になったことで、従来、透過電子顕微鏡に頼っていたような微小部の分析もAESで可能な場合がある。試料の薄片加工が不要なので分析が容易にでき、迅速に低コストで分析結果を得たい場合には有力な手段である。また、高エネルギー分解能のAESは、微小部の化学状

態に関する情報も得られるなど他の表面分析には無い特徴的な方法であり、応用範囲の広がり期待できる。

材料の開発や製造に役立つ分析情報を得るために、AESは幅広いニーズにこたえる方法であるが、AES以外にも各種分析法の原理や特徴を理解し、それぞれの特徴を活かしてうまく使い分けることが重要である。本稿で述べたAESの原理、特徴、応用事例がその一助となれば幸いである。

(Received August 28, 2015)

文 献

- 1) アルバック・ファイ(株); Handbook of Auger Electron Spectroscopy
- 2) 日本表面科学会編; オージェ電子分光法(丸善(株), 2001).
- 3) (社)日本分析機器工業会ホームページ; <http://www.jaima.or.jp/jp/>

basic/pdf/basic_18.pdf

- 4) 堤 建一, 鈴木俊明, 長澤勇二; 日本電子ニュース, **33**, 61 (2001).
- 5) 田中幸基, 祐谷将人; 特殊鋼, 2015年9月号(印刷中).
- 6) R. Kelly, D. E. Harrison; *Materials Science and Engineering*, **69**, 449 (1985).
- 7) 日鉄住金テクノロジー(株) ホームページ; <http://www.nsst.nssmc.com/>
- 8) K. Tsutsumi, M. Shima, A. Tanaka; *JEOL News*, **49**, 59 (2014).
- 9) 広川吉之助, 福田安生, 鈴木堅市, 橋本 哲, 鈴木敏子, 薄木智亮, 源内規夫, 吉田鎮雄, 甲田 満, 瀬崎博史, 堀江 浩, 田中彰博, 大坪孝至; 鉄と鋼, **77**, 1533 (1991).
- 10) 境 悠治; *Journal of Surface Analysis*, **13**, 239 (2006).
- 11) 河合 潤, 足立裕彦; 表面科学, **15**, 23 (1994).
- 12) K. Tsutsumi; JEOL Application Report, (2005). JEOL EPMA Surface Analysis Users Meetingより日本電子(株)の許可を得て転載

~~~~~