

光電子回折法による固体表面構造解析の進歩

Advances in Structural Analysis of Solid Surfaces by Photoelectron Diffraction

二瓶好正*・一戸裕司*・中間哲也*

Yoshimasa NIHEI, Yuji ICHINOHE and Tetsuya NAKAMA

光電子回折法は、固体表面の電子状態と表面原子の配列・構造や吸着構造など固体表面の原子構造の両者の情報を同時に提供してくれる、比較的新しい表面解析法である。本稿では本法の最近の進歩と動向について紹介する。

1. はじめに

生産技術研究所には、表面・界面科学に関連する分野における研究の伝統があり、真空工学、電子物性、材料科学、表面化学、分析化学などの各分野において精力的に研究が行われてきた。筆者もかねてから分析化学ないしは表面化学の立場から表面・界面の研究を行ってきた。本特集においては、このような立場より、最近の研究の動向とその成果の一部について解説したい。

材料工学ないしは物性工学における先端技術を支えてきた指導原理のひとつに不均一系材料の構造制御の概念がある。いわゆる、素材から素子への動きである。材料の機能化、素子化、インテリジェント化等というターゲットは、いずれも構造制御が可能でなければ成り立たない。また、材料の構造制御による素子化、集積化、マイクロ化の方向は、表面と界面の重要性を著しく高める。そのため、物質系の合成、物性の探索、生産技術の確立等の研究分野において、表面・界面の制御が必要不可欠となるのである。

一方、計測なくして制御なし、といわれるとおりであり、上記のような高度に先端的な材料工学における合成研究、物性研究、生産技術研究等、あらゆる局面において表面・界面のキャラクタリゼーションの必要性が生じるのである。

筆者らのグループは、光電子回折法と呼ばれる、新しい表面キャラクタリゼーション法を開発した。この方法は、次章において述べるとおり、いくつかのユニークな特徴を有しており、現在でもさらに発展を続けているので、最近の進歩について述べることとする。

2. 光電子回折法の原理と特徴

固体表面のキャラクタリゼーションを行う際には、そ

*東京大学生産技術研究所 第4部

の化学組成と原子構造、さらには化学状態を明らかにすることが必要である。ところが情報を実際に獲得するためには単一の手法によるのみでは不可能に近く、複数の方法を組み合わせて使用するのが通例である。なぜならば、物質の化学状態を知るための方法と物質の原子構造を知るための方法では、原理的にも装置的にも大変異なることが多いからである。光電子回折法^{1)~4)}はまだ比較的新しい方法であるが、固体表面の電子状態と、表面原子の配列・構造や吸着構造など固体表面の原子構造の両者を同時に提供してくれる、きわめてユニークな方法である。すなわち、X線光電子分光法(XPS)による電子状態解析と、固体表面より放出された光電子の回折現象を利用した構造解析法を一体化した方法である。このため、たとえばX線光電子分光法における化学シフトを利用して、特定の原子の化学結合状態識別を行いつつ光電子回折を測定することにより、特定の化学状態にある原子の結晶構造に関する知見を得ることが可能である。このような情報の取得は他のいかなる手法を用いても不可能であり、まったく新しい手法であると言ってよい。

2-1 光電子回折の原理

光電子回折の原理を直感的に理解するためには、まず光電子放出の過程を四段階に分けて考える必要がある。すなわち、①入射光の固体内での伝播、②入射光による光イオン化、③光電子の固体内での伝播、④真空中への放出である。XPSでは、一定のエネルギーのX線(E_{x-ray})により励起され、真空中に放出された光電子の運動エネルギー(E_{kin})を測定し、次式により求めた光電子の結合エネルギー(E_b)

$$E_b = E_{x-ray} - E_{kin} - \phi_{sp} \quad (1)$$

により、物質中での電子のエネルギー状態を知るのである。ただし、ここで ϕ_{sp} は電子分光器の仕事関数である。一方、光電子回折では、光電子の運動エネルギーを測

定する点は同様であるが、さらに上記の過程③に注目し、その結果生ずる光電子の放出角度の異方性を精密に測定するのである。すなわち、特定の原子から放出された電子(波)が周囲の原子による弾性散乱を受けつつ伝播していくが、これらが波として干渉しあい、結果として特定の方向に強く(または弱く)散乱する現象に注目するのである。光電子回折の測定概念図と測定角の定義を図1に示した。

光電子回折の原理をより詳細に検討するために、比較的簡単な近似のもとに、電子線回折の理論計算を行った。図2に運動学的回折モデルの概念図を示した。1個の光電子放出原子(emitter)から得られる光電子強度は検出器の位置における光電子波の振幅の2乗に比例すると仮定する。光電子波は検出器方向に直接励起される一次波と、周囲の各原子の方向に励起され、それぞれの散乱体原子(scatterer)により検出器方向に散乱される散乱波の重ね合わせとして表現される。固体中の非弾性散乱に基づく強度減衰は等方的な指数関数型減衰と考える。試料表面における屈折および原子の熱振動の影響を無視して表式化すると次式で表される。

$$I(\theta) \propto \left\{ \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_e) \right\}^{1/2} \exp\left(-\frac{r_1}{2\lambda}\right) + \sum_j \left\{ \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_{ej}) \right\}^{1/2} \frac{f_j(\theta)}{r_{2j}} \times \exp\{ikr_{2j}(1-\cos\theta_j)\} \times \exp\left(-\frac{r_{2j}+r_{3j}}{2\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

式中 $d\sigma/d\Omega$ は微分光イオン化断面積、 λ は電子の非弾性散乱平均自由行程、 f_j は原子 j による複素散乱振幅、 k は波動ベクトルの大きさを示し、 $\exp\{ikr_{2j}(1-\cos\theta_j)\}$ は一次波と散乱波の路差に基づく位相因子である。ここで微分光イオン化断面積 ($d\sigma/d\Omega$) と複素散乱振幅 $f_j(\theta)$ は理論計算により得られた値を用い、 λ はおよそ 20\AA とした。

図3はGaAs(001)から実測されたGa3d光電子の二次元回折パターンと理論計算の結果を比較したものである⁵⁾。(a)は実測結果であり、(b)は一次波と1500の散乱

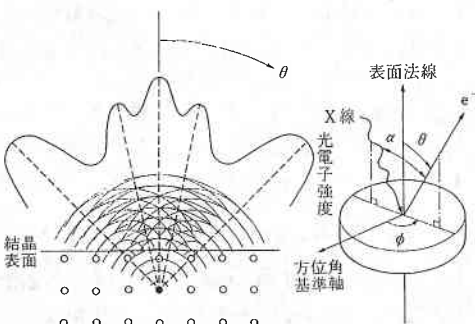


図1 光電子回折測定概念図と測定角の定義

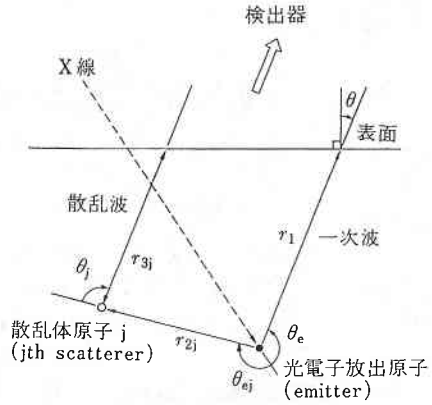


図2 運動学的回折モデルの概念図

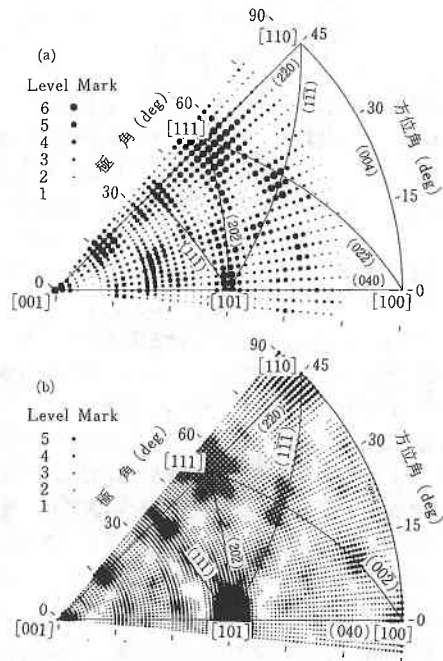


図3 GaAs(001)表面よりのGa3dスペクトルの二次元光電子回折パターンに関する実験と理論の比較

波を用いた計算結果である。各角度における回折強度は点の大きさによって表されている。両者の一致は良好であり、比較的簡単な近似計算によっても実測データにおける回折ピーク位置が理論的に再現できることがわかる。

図4にGaAs(110)表面より得られた光電子回折の極角分布パターンを示した。

2-2 光電子回折により得られる情報

光電子回折法の特徴は、方法本来のものと、この方法の基礎となっている光電子分光法の特徴を反映したものとからなっている。以下にこの方法により得られる情報とその測定例を列挙する。

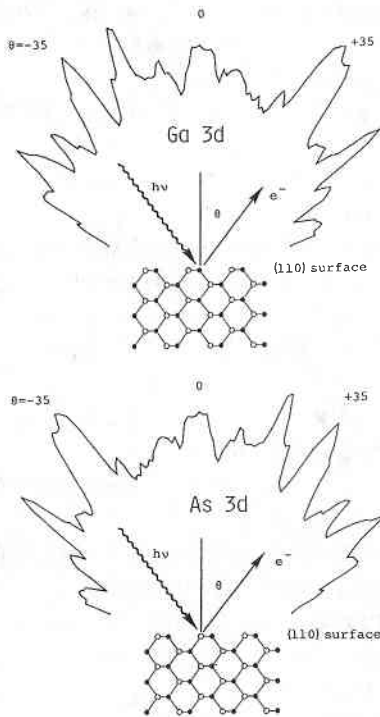


図4 ヒ化ガリウム結晶より得られる光電子回折パターン

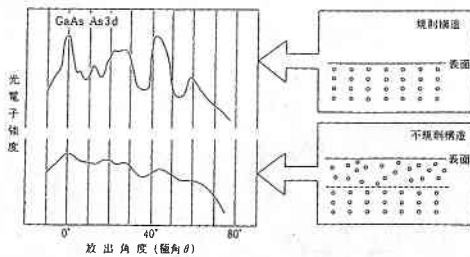


図5 結晶表面の構造規則性に関する情報

規則的構造を持つ表面からは振幅の大きなパターンが得られ、構造が不規則になるにつれてその振幅は小さくなってゆく。

- ① 結晶表面の構造規則性に関する知見を与える。
アモルファスかまったくランダムな方位を有する多結晶層か、またはある程度の規則性を有するのかなどの判定が可能である^{6),7)}。(図5参照)
- ② 結晶表面の対称性に関する知見を与える。
薄膜成長の初期過程におけるエピタキシーの解析などが可能である⁸⁾。(図6参照)
- ③ 結晶中における原子位置に関する知見を与える。
化合物結晶中の構成成分原子、あるいは結晶中に存在する異種原子の原子位置に関する知見を与える⁹⁾。(図7参照)
- ④ 結晶表面上の異種原子の吸着構造に関する知見を与える。

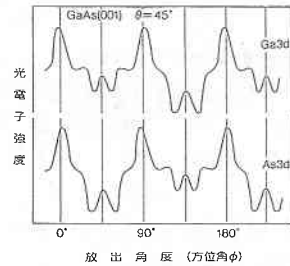
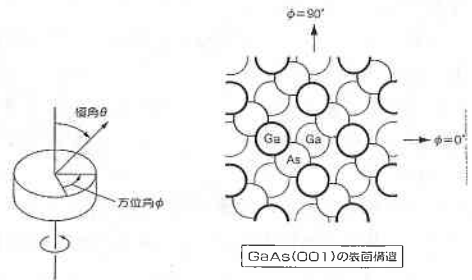


図6 結晶の対称性に関する情報

結晶中で各原子が占める位置の対称性と同じ対称性を持つパターンが得られる。

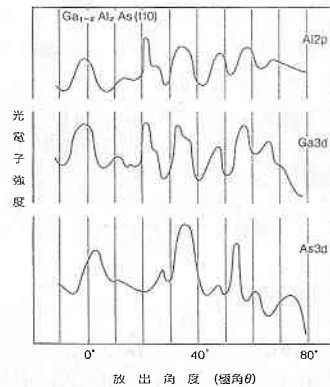
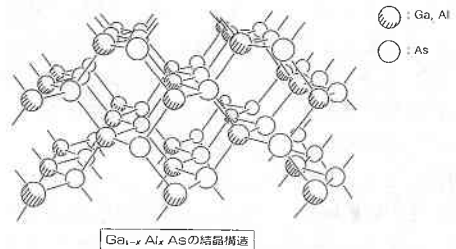


図7 結晶中での原子位置に関する情報

結晶中の異種原子から得られるパターンは、それと等価な位置にある母体結晶原子が示すパターンと一致する。

光電子回折法では、原子の種類を識別したうえで、構造情報を得ることができるので、分子吸着の場合、ないしは共吸着の場合のように複数の原子種が共存する場合において特に有効である。

- ⑤ X線励起による場合、原子の内殻光電子スペクトルの示す化学シフトを用いることにより、化学状態別に原子構造の知見を与える。(第4章参照)
- ⑥ 測定に用いる光電子の平均自由行程程度の深さまでの固体表層に関する知見を与える。

2-3 特徴

上で述べたものと類似の情報を与える他種のキャラクターレーション法と比較すると、さらにいくつかの特徴が明らかとなる。

- ① 注目している原子 (emitter 原子) の周囲の原子配列の規則性が保たれていれば測定可能であり、注目原子自身が規則的配列を示さなくてもよい。
- ② 測定データの理論的解釈は比較的簡単なモデル計算により可能である。
- ③ X線ないしは真空紫外線と光電子を用いる測定法であるので、測定が非破壊的である。
- ④ 解析に用いる測定量は、光電子スペクトル強度であり、定量的に優れている。
- ⑤ 金属、半導体、絶縁体など、あらゆる種類の対象物に対して適用可能である。

上記特徴の①と②については、たとえば LEED との比較によって理解できる。すなわち、LEED は、固体表面ないしは表面上の吸着化学種の二次元的周期性について、ユニットセルの対称性と大きさの知見を与えるが、その周期性を形成している化学種の同定はできない。また、その化学種の原子位置に関する知見についても、非常に複雑なモデル計算を必要とし、なおかつ十分とはいえない。また吸着構造の周期性についても、一般に数百 Å 程度以上にわたる周期性が実在しないと測定できない。

また、上記特徴の③と④はイオン散乱による方法などとの比較により理解できる。特徴⑤についても、一次粒子として荷電粒子を用いた方法の場合には、測定の際に生ずるチャージアップ現象が、一般に絶縁体の測定を困難にしている。

3. 光電子回折の測定法

3-1 装置

光電子回折を測定するためには、試料表面より放出された光電子を、高いエネルギー分解能と角度分解能を有する電子分光器により測定する必要がある。すなわち、角度分解型光電子分光器が必要となる。

通常、角度分解型光電子分光測定に必要な実験パラメーターは以下のとおりである。

- ① 励起光 (X線または真空紫外光) の波長ならびに偏光特性
- ② 励起光の試料表面への入射角
- ③ 光電子の運動エネルギー

- ④ 光電子の試料からの放出角度 (極角, 方位角)
 - ⑤ 光電子分光のエネルギー分解能
 - ⑥ 光電子分光の角度分解能
- これらのパラメーターのうち、①, ③, ④, ⑥, などが特に重要である。

また、実際に使用されている測定装置は、大別すると以下のとおりである。

- ① 試料回転型立体角規制光電子分光装置 (図8)
- ② アナライザー移動型立体角規制光電子分光装置
- ③ 非分散型 (ハイパス/ローパスフィルター型) アナライザーを用いた二次元光電子放出角度分布直視装置¹⁰⁾
- ④ トロイダル型アナライザーによる二次元角度分布同時測定装置¹¹⁾ (図9)
- ⑤ シンクロトロン放射光による波長走査型角度分解光電子分光装置

以上の装置の中で、①と②がもっとも多く使用されているが、③と④はいわば第二世代の装置として今後の発展が期待される。また、⑤の装置は、波長走査モードでの光電子回折データが測定できる点で他の装置と異なった特徴を持っている。

3-2 角度分解能の高分解能化

光電子回折現象は結晶中に発生源を有する電子の回折現象であり、通常は放出光電子の角度分布が測定される。

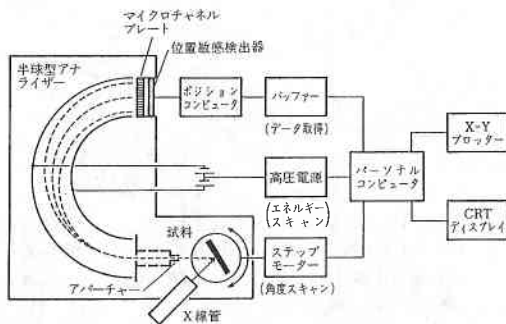


図8 角度分解型X線光電子分光装置のブロックダイアグラム

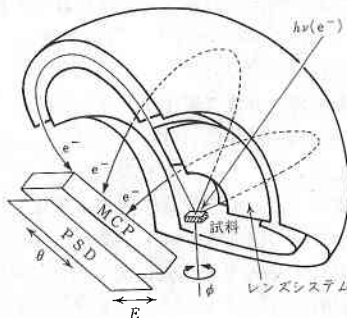


図9 180°トロイダル型アナライザーを用いたエネルギー、角度分布同時測定電子分光装置

すでにかなり多くの測定例があり、理論的検討もなされているが、どの程度の角度分解能が必要であるかについては結論が出されていない。

筆者らは、**図10**に示すような角度規制アパーチャーにより、極角方向 $\pm 1.3^\circ$ 、方位角方向 $\pm 1.8^\circ$ の角度分解能で測定を行ってきた¹²⁾。この程度の角度分解能でも、上に述べたような各種情報が得られ、有用であることは事実であり、世界中の研究者もよい場合で $\pm 1.5^\circ$ 程度の角度分解能で研究を進めている場合が多い。

筆者らは、角度分解能の向上が実験結果に及ぼす影響を調べる目的で、極角方向ならびに方位角方向の両者とも $\pm 0.6^\circ$ の分解能を有するアパーチャーを作成し、光電子回折パターンを測定した。**図11**に CaF_2 (111) 表面の $\text{Ca}2p$ 光電子に関する測定結果を示す。図中(a)が高い角度分解能、(b)が従来の角度分解能による測定結果を示している。結果の比較は一目瞭然であり、分解能の向上がきわめて重要であることが示された。

角度分解能の向上は、構造情報の精度を大幅に高めるのみならず、いまだかならずしも十分ではない光電子回折の理論計算における精度の向上に大きな貢献をすることを考えられる。

4. 化学状態識別光電子回折による結晶表層構造解析

原理の項目において記したとおり、光電子回折法は、光電子スペクトルの測定にその根拠を有している。したがって、光電子スペクトルにおける化学シフトを測定することによって、光電子放出原子の化学状態を識別することが可能である。化学状態識別光電子回折法は、化学シフトを利用して化学状態を見分けたうえで、そのスペクトル強度の角度分布を測定し、特定の化学状態を示す原子の構造化学的情報を獲得する方法である。

ここでは、 CaF_2 (111) 表層に、電子ビーム衝撃により原子欠陥を生成し、雰囲気酸素との反応を利用して CaO 反応層を形成する表面反応系について、化学状態識別光電子回折法を適用した例について紹介する¹³⁾。通常の方法により清浄化した CaF_2 (111) 表面を、水分子の存在下で電子ビーム加熱を行うと、 CaF_2 表層に

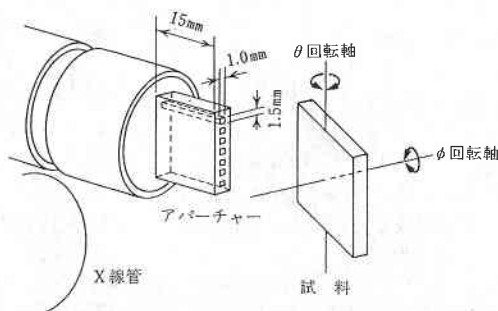


図10 角度分解型光電子分光装置の角度規制アパーチャー

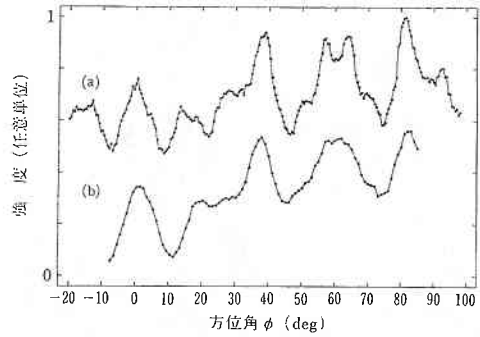


図11 CaF_2 (111) 表面より得られた $\text{Ca}2p$ スペクトルの方位角分布
(a)角度分解能 $\pm 0.6^\circ$ (b)角度分解能 $\pm 1.8^\circ$

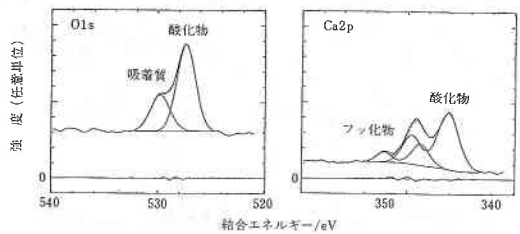


図12 300°C に加熱され電子衝撃された CaF_2 (111) 表面より得られた $\text{O}1s$, $\text{Ca}2p$ スペクトルの化学状態別ピーク分離点線は実測データで、ゼロライン付近の実線はピーク分離計算の残差を示す。

CaO 反応層が形成される。その際の光電子スペクトルは**図12**のとおりであり、 $\text{O}1s$, $\text{Ca}2p$ ともに二つの成分に分離することができる。それぞれのスペクトル強度の極角方向の角度分布を測定すると、**図13**のようなデータが得られた。**図13(a)**はアルゴンイオンエッチングによる清浄化処理後のパターンであるが、 $\text{F}1s$, $\text{Ca}2p$ のパターンは CaF_2 (111) の基底に対応している。ただし、 $\text{O}1s$ パターンより、若干の吸着酸素が不規則な状態で表面に存在することもわかる。同**図(b)**は、 CaF_2 (111) 表層のうえに CaO 層が薄く形成された状態のパターンである。このデータより、まず、 $\text{F}1s$ ピークはかなり減少したがフッ素を含む下地が結晶性を保っていることを示している。さらに、フッ化物の Ca 原子のパターンは同**図(a)**と一致することから、 CaF_2 下地に由来していることがわかる。また、 CaO 由来の $\text{O}1s$, $\text{Ca}2p$ ピークはともに明らかなモジュレーションを示しており、また両者ともに NaCl 型結晶構造の特徴を保持していることから、表層の CaO 層は下地に対しエピタキシャルに成長していることがわかる。同**図(c)**に 400°C に加熱した後得られた CaO 層由来の $\text{O}1s$, $\text{Ca}2p$ パターンを示した。これらのパターンは極角 0° と 35° に特徴的なピークを示しているが、これは生成した CaO 層に含まれる低指数結晶軸が極角 0° と 35° に対応する方向に存在することを

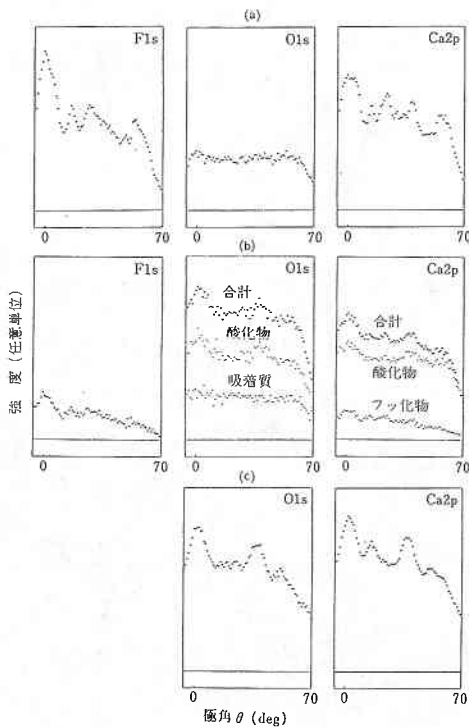


図13 CaF₂ (111) 表面の光電子回折パターン
(a)清浄化処理後表面, (b)300°Cに加熱され電子衝撃された表面, (c)400°Cに加熱され電子衝撃された表面

示している。さらに、CaO層の結晶学的方位を決定する目的で極角35°での方位角方向での走査を行いパターンを測定したところ、生成したCaO層は下地CaF₂と(111)軸を共有する方位にあることが明らかになった。以上述べたとおり、化学状態識別光電子回折法が、一種類の元素が表層の複数の相に存在する系の構造解析に対しきわめて有力であることがわかる。

5. 高角度分解能による光電子回折パターンの精密測定

すでに述べたように、光電子回折現象は結晶中に発生源を有する電子の回折現象であり、角度分解能は重要な測定パラメーターである。それにもかかわらず従来は、その検討は必ずしも十分に行われていなかった。

角度分解能の検討は、実験的な精度を向上させるという意味だけでなく、理論計算との比較に際しても参照すべき真のデータを提供するという点で重要であり、今後の光電子回折法の発展の鍵を握る最重要検討課題であると言っても過言ではない。

光電子回折の高角度分解能精密測定により期待される成果は以下のとおりである。

① 結晶構造解析の高精度化

高角度分解能を用いた精密測定により以下の各項目が検討可能となる。

- * 結晶表面の緩和
- * 結晶表面の再配列
- * 結晶表面吸着構造の解析
- * 結晶表面の欠陥構造の解析
- * 結晶表層中の異種原子位置の解析
- * ヘテロ結晶成長界面の構造解析
- * 原子層エピタキシーの構造解析

② 光電子回折理論の改善

精密なデータとの比較により以下の各項目の検討が可能となる。

- * 運動学的近似計算の評価
- * 動力学的計算の評価
- * 熱振動項の評価

ここでは、最近の研究成果の一例として、図14にMgO (001) 表面から得られた光電子回折パターンの測定結果と、熱振動を加味した理論計算結果の比較を示す。

図14に示した理論計算は、第2章に示した計算法に次式に示すDebye-Waller因子を加味したものである。

$$W_j = \exp \left[-2k^2(1 - \cos\theta_j) \frac{(h/2\pi)^2}{m\Theta_T^2 k_B} T \right] \quad (3)$$

m : 原子の質量

Θ_T : デバイ特性温度

T : 試料温度

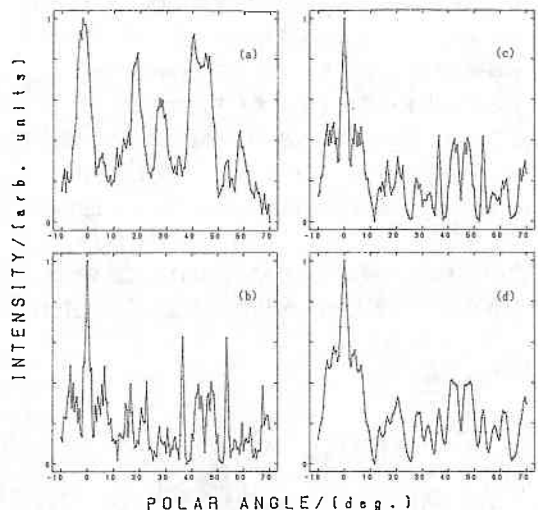


図14 MgO (001) 表面のMg2p光電子回折実測パターンと熱振動効果を含む理論計算結果の比較 (方位角[100]方向の極角パターン)

(a)実測パターン, 試料温度約295K (b)理論計算結果, 試料温度0K (c)理論計算結果, 試料温度100K (d)理論計算結果, 試料温度300K

以上の式から明らかなように、軽い元素からなる結晶に対しては熱振動項の影響が大きくなる。

図14に見られるとおり、MgO 結晶の場合の理論計算結果は、温度による光電子回折パターンの変化が大きく、実験結果とも比較的良好一致している。

6. 光電子ホログラフィー

近年、光電子回折現象が、光電子ホログラフィーとして解釈できることが指摘され、理論的、実験的検討が開始された。事実、現在よく知られているレーザー光を利用したホログラフィーの原理は、その最初の論文¹⁴⁾において電子線を用いる形式で提案されたものである。光電子回折現象において光電子放出原子 (emitter) から直接検出器に到達する電子波を参照波と考え、周囲の散乱原子 (scatterer) による散乱を受けて検出器に到達した電子波は物体波であり、極角と方位角の両方を走査して得られる二次元光電子回折パターンは両者の干渉の結果得られるものである、まさしくホログラムに相当する。したがって、この光電子回折ホログラムを適切に像再生してやれば、表面原子 (scatterer 原子群) の三次元構造イメージが得られるはずである。J. J. Barton は、光電子回折ホログラムを像再生するための数値計算法を考察し、Ni (001) 上の c (2×2) で吸着した S 原子について、シミュレーション計算により得た光電子回折パターンを数値的に二次元フーリエ変換することにより、再生像を得ることに成功した¹⁵⁾。

Barton の論文がきっかけとなりその後、各種の吸着系の構造や、固体表面構造について、理論的検討と実験的検証が行われた。ただし当初は精度の高い実験データを得ることが比較的難しかったため、理論的近似計算により得た光電子回折パターンに基づく検討が多くなされ

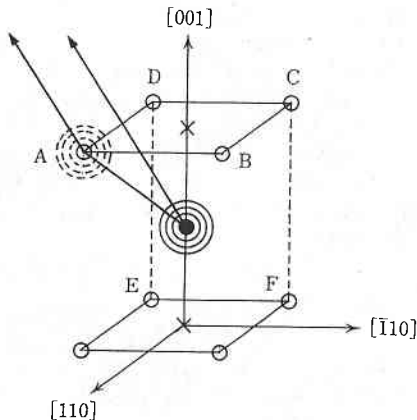


図15 Cu (001) 表面付近の結晶構造モデルとホログラフィーの概念図
 図中黒丸は (光) 電子放出原子であり参照波を放出し、白丸は散乱原子であり物体波を放出する。

た。この結果、理論的取り扱いにおける問題点とその対策などがしだいに明らかにされつつある。

一方実験的検証は G. R. Harp らにより Cu (001) 表面構造について初めて行われた¹⁶⁾。彼らは、Cu (001) 表面に電子線を垂直に照射して得られる、Cu 原子による準弾性散乱電子 (Kikuchi パターンを生成する電子) が光電子とよく似た回折パターンをもたらすことに注目して、この Kikuchi パターンホログラムを用いて数値計算を行った。

図15に実験に用いた Cu (001) 表面の結晶モデルを示した。ここで黒丸は参照波を放出する中心原子を示し、白丸は回折パターンを生成する物体波を発生させる散乱原子を示している。

図16は Kikuchi パターンホログラムであり、Cu (001) 表面に1075eV の電子を入射させて得た準弾性散乱電子 (Kikuchi 電子) による回折パターンを極角で ±50° の範囲で二次元測定したものである。このホログラムを Barton らと同様な計算方法により二次元フーリエ変換を行うと、図17、図18に示す結果が得られる。図17は図15に示されている A, B, C, D 原子を含む水平面上での再生像であり、図18は同様に E, F, C, D 原子を含む垂直面上での再生像である。それぞれの図中の+印は対応する原子位置を示している。再生像における原子位置を検討すると、水平方向では精度よく一致しているが、垂直方向では、中心原子の方向に対し像のボケが生じていることがわかる。

光電子ホログラフィーはきわめて興味深い研究対象で

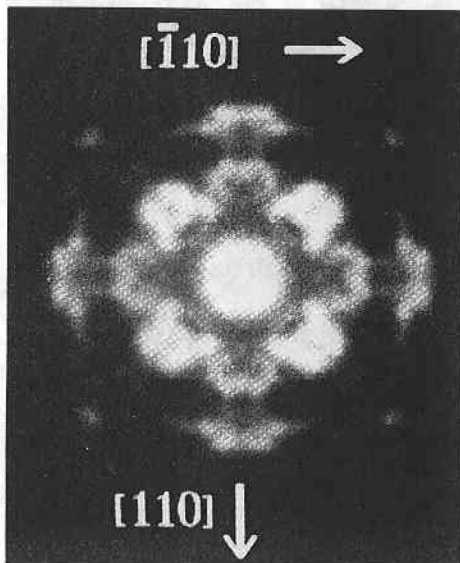


図16 Cu (001) について実測された Kikuchi パターンホログラム
 電子回折パターンは中心 (法線方向) を 0 とした表面方向の運動量の関数で表示されている。

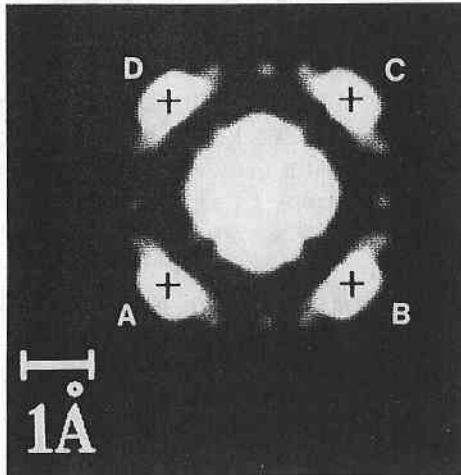


図17 図16のホログラムから得た、(光)電子放出原子の上方の原子(A, B, C, D)を含む水平面上の再生像
図中+印は結晶中の原子の位置を示す。

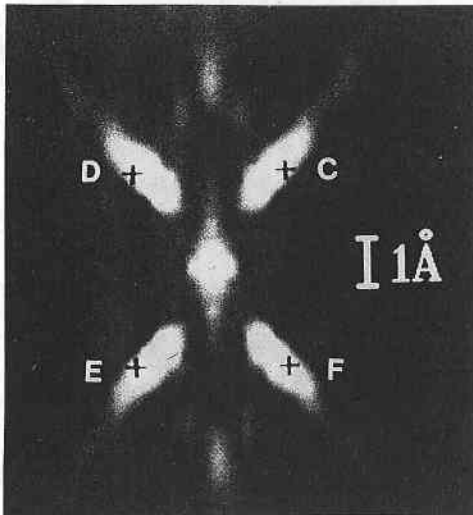


図18 図16のホログラムから得た、結晶面に垂直の面(E, F, C, Dを含む面)における再生像
図中+印は結晶中の原子の位置を示す。

あるが、現時点では理論的にも実験的にも問題点が少なからず存在する。特に、中心原子を見込む方向の位置に関し像ボケが生じる点は、1 keV 領域のエネルギーを有する電子の原子による散乱特性の本質と関係しているため解決が容易でない。

7. おわりに

光電子回折法は比較的歴史の浅い実験手法であるが、元素と化学状態をエネルギー的に識別したうえで、その状態に関与している原子の、結晶内における構造に関する知見を与えてくれるというきわめてユニークな方法である。最近では、その原理的ユニークさから世界中の若い研究者の関心を集めており、急速に研究者が増加しつつある。本法の特徴は、原理的興味に加えて、実用的にも数々の有用性を兼ね備えていることであり、近い将来にさらなる進歩と展開が実現されると期待される。

(1993年9月8日受理)

参考文献

- 1) 二瓶好正, ぶんせき, **1984**, 628 (1984)
- 2) 二瓶好正, 学術月報, **43**, 29 (1990)
- 3) S. A. Chambers, *Advances in Physics*, **40**, 357 (1991)
- 4) C. S. Fadley, in *Synchrotron Radiation Research: Advances in Surface and Interface Science, Volume 1: Techniques* (edited by R. Z. Bachrach), Plenum Press, New York, (1992) p. 421
- 5) M. Owari, M. Kudo, Y. Nihei and H. Kamada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, L394 (1985)
- 6) M. Owari, M. Kudo, Y. Nihei and H. Kamada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, 1203 (1980)
- 7) Y. Sekino, M. Owari, M. Kudo and Y. Nihei, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**, 538 (1986)
- 8) 尾張真則, 簡 佩薫, 工藤正博, 二瓶好正, 鎌田 仁, *分光研究*, **32**, 103 (1983)
- 9) Y. Nihei, M. Owari, M. Kudo and H. Kamada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, L420 (1981)
- 10) H. Daimon and S. Ino, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**, 57 (1990)
- 11) S. Kanayama, S. Teramoto, M. Owari and Y. Nihei, in *The Structure of Surfaces III* (edited by S. Y. Tong, M. A. Van Hove, K. Takayanagi and X. D. Xie) Springer-Verlag Berlin, Heidelberg (1991) p. 102
- 12) M. Owari, M. Kudo, Y. Nihei and H. Kamada, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **22**, 131 (1981)
- 13) C. Akita, T. Tomioka, M. Owari, A. Mizuike and Y. Nihei, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, 2106 (1990)
- 14) D. Gabor, *Nature*, **161**, 777 (1948)
- 15) J. J. Barton, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 1356 (1988)
- 16) G. R. Harp, D. K. Saldin and B. P. Tonner, *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 1012 (1990)