

軟 X 線領域の波長分散型 XAFS 法の最近の進展

雨宮健太

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

要旨

波長分散型 XAFS (X-ray absorption fine structure) 法は、分光器を掃引することなく XAFS スペクトルを一度に得ることのできる手法であり、表面化学反応のように頻繁な繰り返しが難しい高速現象の追跡に適している。軟 X 線領域においてこの手法が開発されたのは比較的最近であり、まだ10年程度の歴史しかないが、この間に時間分解能の大幅な向上が見られ、現在では33 ms ごと (30 Hz) の連続測定が可能になっている。さらにごく最近になって、垂直・水平偏光のスイッチングと組み合わせることによって、吸着種の種類と量だけでなく、配向情報も含めて一度の反応過程で観察できることが示された。

1. はじめに

XAFS (X-ray absorption fine structure) 法は、元素選択的に構造および電子状態に関する情報を得られる有効な手法である¹⁾。特に表面化学研究においては、XAFS スペクトルがそれぞれの化学種に応じた特徴的な形状を示すことから、吸着種の種類の同定とその量の決定に威力を発揮してきた。さらに直線偏光の方向に対するピーク強度の依存性を利用すれば、表面に吸着した分子の配向を決定することができる。このように XAFS 法は表面化学研究における最も強力な実験手法の一つであるが、X 線のエネルギーに対する吸収強度の変化を測定する手法であるため、通常は分光器を用いてエネルギーを1点1点変えながら測定を行う必要があり、一つのスペクトルの測定には吸収端の近傍だけでも5-10分程度かかることが多い。これでは表面化学反応のような動的な過程を追跡するのは、よほどゆっくり反応が進む場合を除いて難しい。

一般に、動的過程を追跡するにはいわゆるポンプアンドプローブ法が用いられるが、この場合には同じ現象を全く同じタイムスケールで繰り返し行う必要がある。残念ながら、化学反応の多くは不可逆的であり、可逆的な反応の場合でも元の状態に戻すのに時間と手間がかかることが多い。例えば後に紹介する CO の酸化反応の場合、酸素が吸着した表面を CO 雰囲気から脱離させることで反応が進行するが、反応生成物である CO₂ は即座に脱離してしまい、反応が終了した時点では過剰になった CO のみが表面に吸着している。これを元の状態に戻すには、加熱などによって CO を脱離させ、もう一度温度を下げて酸素を吸着させる必要がある。これだけの作業を、温度、酸素の吸着量、CO の圧力といった条件を全く同一にして何千、何万回と繰り返すのは現実的には不可能である。一方、最近では特に硬 X 線領域において、分光器を連続的に掃引しながら

データを測定する quick XAFS 法が開発され、秒レベルの時間分解能も実現しているが、その場合でもスペクトルの1点1点は、厳密には同じ時刻に測定されていない。

XAFS スペクトルを波長掃引なしに測定する手法である波長分散型 XAFS 法は、まず硬 X 線領域において開発された²⁾。これは、白色 X 線を湾曲結晶によって試料位置に集光し、再び広がった透過 X 線を位置分解して検出するものである。湾曲結晶のどの位置に白色 X 線が当たるかによって入射角が異なるため、検出器上において透過光の位置と波長が1対1に対応することを利用している。一方、分光に回折格子を用いる軟 X 線領域の場合には、分光の原理が結晶分光とは異なることもさることながら、表面化学の研究においては、表面感度を確保するために多くの場合透過法ではなく電子収量法で測定を行うという事情もあり、硬 X 線領域に比べて20年程度遅れてようやく波長分散型 XAFS 法が開発された³⁾。本解説では、軟 X 線領域の波長分散型 XAFS 法の原理を簡単に説明したのちに、最近の進展、特に時間分解能の向上と偏光スイッチングの利用について紹介する。

2. 波長分散型 XAFS 法の原理

Fig. 1 に軟 X 線領域における波長分散型 XAFS 法の概念図を示す。回折格子はそもそも、波長の異なる光を異なる角度に反射させる (波長分散させる) 光学素子なので、特に工夫をしなくても波長分散した X 線を得ることができる。具体的には、出射スリット位置において、場所によって波長の異なる、いわば虹のような X 線が自動的に得られており、通常は出射スリットを閉じることによって特定の波長を取り出して (単色化して) いるので、単に出射スリットを大きく開けば位置によって波長の異なる (波長分散した) X 線が得られるのである。これを集光ミラー

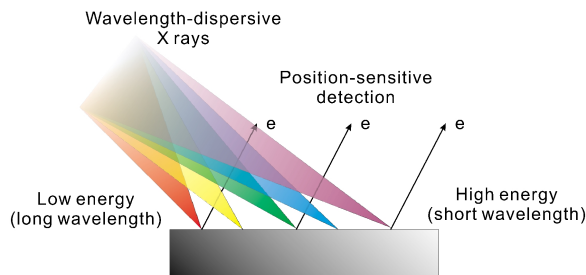


Fig. 1 (Color online) Schematic concept of wavelength-dispersive XAFS.

で試料位置に集光すると（これも回折格子分光器では日常的に行われていることであり、特に改造は必要ない）、Fig. 1に示すように試料上において波長分散したX線が得られる。電子収量法によるXAFS測定においては、X線吸収に伴って放出されるAuger電子および2次電子を検出し、その量が吸収強度に比例することを利用しているため、それぞれの位置から放出される電子を位置分解して一度に取り込むことができれば、それぞれの位置、すなわち波長における吸収強度を得ることができる。幸いなことに、静電半球型の電子アナライザーは原理的に1次元のイメージング機能を有しており、電子レンズがきちんと設計され、検出器がイメージング機能を有していれば、こうした測定が可能である。このような電子アナライザーはすでに市販されており、本稿で紹介する実験はすべて、GAMMADATA-SCIENTIA社（当時）のSES-2002を用いて行われたものである。

測定のレイアウトをFig. 2に示す^{3,4)}。この図のようにアナライザーを設置した場合、試料上の水平方向の位置 x' から放出された電子はアナライザーを経て検出器の位置 x に到達し、 x' と x は電子レンズの倍率に応じた比例係数をもって1:1に対応している。一方、検出器において y 方向は電子の運動エネルギーに対応する。電子検出系は蛍光スクリーン付きのMicrochannel Plate (MCP) 検出器とCCDカメラからなり、 x, y の2次元イメージングが行える。ここで、検出器上の位置 x は試料上の x' 、すなわちX線の波長に対応しているため、それぞれの x に対するAuger電子の強度をプロットすれば、XAFSスペクトルを得ることができる。なお、これは本質的ではない問題だが、放射光施設における回折格子を用いた軟X線分光器は通常、垂直方向に波長分散をしているのに対し、上述の通り電子アナライザーは水平方向に位置分解能をもつように設置されている。そこで分散方向を90度回転させるために、試料の上流に「斜め振りミラー」を置いている^{3,4)}。

Fig. 3に実際に得られたデータの例を示す。Fig. 3(b)において、534 eV（に対応する位置）に上から下へと明るい線が走っているが、これがCOのO 1sから π^* 軌道への遷移にともなう吸収によって生じるAuger電子である。一方、イメージ上で斜めに走る線は光電子ピークであり、

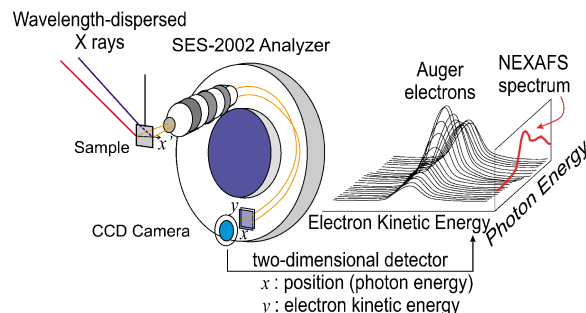


Fig. 2 (Color online) Schematic layout of wavelength-dispersive XAFS measurement with an electron energy analyzer.

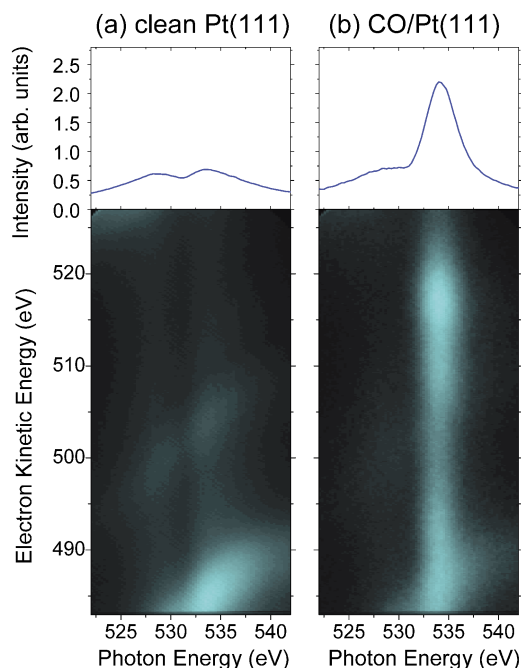


Fig. 3 (Color online) Electron intensity image on the two-dimensional detector (bottom) and its integral along the electron kinetic energy (top) taken from clean (a) and CO-adsorbed (b) Pt(111) single crystal surface.

入射X線のエネルギーによって電子の運動エネルギーが変化していることがわかる。また、Fig. 3(a)に示した清浄表面に対するデータにも、Ptの光電子の他に何らかの入射X線エネルギー依存性が見られる（上段に示した積分を見るとわかりやすい）。これは検出器の不均一性と入射X線強度のエネルギー依存性に起因する構造である。当然、同じ構造はCO吸着表面に対するデータにも含まれているため、Fig. 3(b)のデータをFig. 3(a)の値で割り算することによって、検出器の不均一性をキャンセルするとともにX線強度による規格化を行うことができる。これ以降、本稿で示すスペクトルはすべて、このように清浄表面のデータを用いた規格化を行ったものである。

3. 時間分解能の向上

軟 X 線領域の波長分散型 XAFS の開発は、高エネルギー加速器研究機構、放射光科学研究施設 (KEK-PF) の偏向電磁石ビームライン BL-7A で行われた^{3,4)}。通常の測定方法と開発当初の波長分散型 XAFS 法の比較の結果を Fig. 4 (a) (b) に示す。この時点では電子アナライザの空間分解能が設計値に達していなかったために、波長分散型 XAFS 法によるスペクトルのエネルギー分解能は若干劣っているが、1 スペクトルあたり 30 s と、通常の 10 倍程度の速度で測定が行えている。30 s/spectrum というのはあまり速いとは言えないかもしれないが、上述のようにすべてのデータ点が同じ時刻に測定されていることに大きな意味がある。また、この後 2, 3 年間の間に、集光光学系の改善や電子レンズの修正によって、1 スペクトルあたり数秒程度で測定が行えるようになった。この手法を用いて表面化学反応を定量的に実時間追跡した結果が数多く報告されている⁵⁻¹¹⁾。

偏向電磁石ビームラインにおける時間分解能を制限していたのは、X 線の強度もさることながら、試料位置におけるビームサイズである。というのは、電子アナライザ (SES-2002) が取り込めるのは、レンズの倍率にも依存するが、おおよそ試料上において水平 6 mm、垂直 0.4 mm 程度なのに対して、垂直方向のビームサイズが 3 mm 程度もあり、X 線の大部分を無駄にしていたからである。なお、試料上における水平方向は、この配置では波長分散方向なので、エネルギー範囲と分解能を決めることになる。上述の通り分散方向を 90 度回転させるために斜め振りミラーを用いているので、試料上における垂直方向のビームサイズというのは通常のビームラインで言えば水平方向のビームサイズに対応するが、偏向電磁石ビームラインで水平方向のビームサイズを小さくすることは容易ではない。そこで 2007 年度からは、KEK-PF に新たに建設されたアンジュレータビームライン BL-16A¹²⁾ への展開が行われた。このビームラインでは水平方向 (従来と同様に斜め振りミラーを用いるので試料上では垂直方向) に 0.2-0.3 mm 程度の集光が可能なので、X 線を無駄なく用いることができるとともに、X 線の強度自体も大幅に向上した。ただし、次の問題はデータの取得速度である。SES-2002 の測定システムでイメージングを行うと、1 枚画像を得るたびに数秒のデータ保存時間が必要となる。幸い、SES-2002 はアナログ出力の CCD カメラを用いて測定を行っているので、画像を直接取り込むことさえできれば、いわゆるビデオレート、すなわち 30 Hz での連続測定が可能になる。このようにして得られたデータを Fig. 4 (c) に示す。偏向電磁石ビームラインで測定した Fig. 4 (b) のデータに比べて約 1/1000 の測定時間にもかかわらず、S/N 比、エネルギー分解能ともに同等以上である。なお、アンジュレータから得られる軟 X 線は準単色光であるため、広い

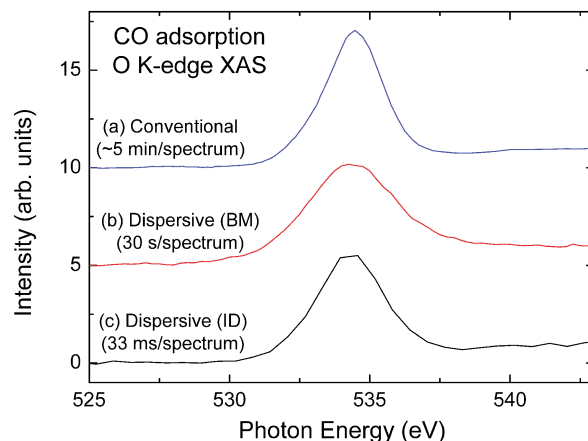


Fig. 4 (Color online) O K-edge X-ray absorption spectra for adsorbed CO taken by the conventional mode with a monochromator scan (a) and the dispersive mode at a bending-magnet (BM) (b), and an insertion-device (ID) (c) beamlines.

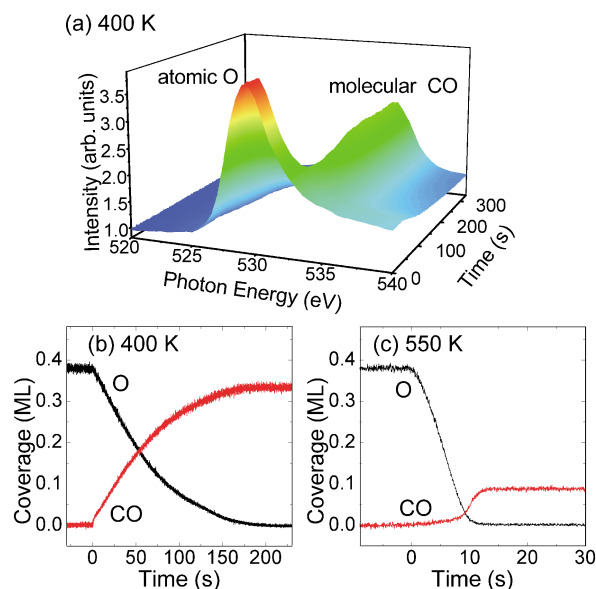


Fig. 5 (Color online) Three-dimensional plot of O K-edge XAFS spectra taken at every 33 ms during the exposure of the O/Ir (111) surface to 4×10^{-7} Torr CO at 400 K (a) and time evolution of O and CO coverages at 400 (b) and 550 K (c) obtained by fitting each XAFS spectrum.

エネルギー範囲を一度に測定することは難しいが、ここで示したような吸収端近傍のスペクトルであれば、十分測定可能である。もちろん、偏向電磁石光源に比べれば光強度のエネルギー分布は鋭くなるので、上述のような清浄表面のデータを用いたスペクトルの規格化がより重要になる。

この新しいシステムを用いて行った、Ir (111) 表面上における CO 酸化反応の実時間追跡の結果を Fig. 5 に示す¹³⁾。これは、超高真空チェンバー内で清浄化した Ir (111) 表面に酸素を原子吸着させ、基板を所定の温度に保ちながら 4×10^{-7} Torr の CO をチェンバー内に導入し、

O と CO が反応して CO₂ が生成、脱離することによって表面の酸素原子が失われていく様子をビデオレート（時間分解能33 ms）で実時間追跡したものである。当然のことながら、それぞれの温度において反応は一度しか行っていない（ポンプアンドプローブのような繰り返し測定ではない）。Fig. 5 (a) に示すように、反応開始前には原子状酸素に由来するピークのみが観測され、CO を導入すると、CO の π^* 軌道への遷移によるピークが増加するとともに原子状酸素のピークが減少し、最後には CO 由来のピークのみになる。各時刻におけるスペクトルを、飽和吸着した原子状 O および CO 分子のスペクトルを用いてフィッティングすることによって、それぞれの時刻における O と CO の吸着量を決定することができる。このようにして得られた吸着量の時間変化を Fig. 5 (b) (c) に示す。550 K においては10秒程度で反応が完結してしまうが、このような反応でも、33 ms の時間分解能によって、吸着種の量の変化を定量的に追跡することが可能である。

4. 偏光スイッチングを利用した配向のリアルタイム観察

ここまで示したデータはすべて、いわゆるマジックアングル入射条件（電場ベクトルが表面垂直から55度）で測定したものであり、ピーク強度が分子の配向によらないことを利用して吸着量を求めている。一方 XAFS 法には、偏光依存性を用いて分子配向の決定が可能であるという重要な特長がある。表面化学反応においては、分子の配向は反応性に直結しており、是非とも知りたい情報である。原理的には、二つ以上の偏光方向（通常は試料を回転させて入射角を変えることで制御する）に対して、全く同じ反応を実時間追跡すれば、それぞれの時刻における分子の配向を決定できるが、実際には、複数回の反応の時間軸を正確にそろえることは非常に困難である。もちろん、本質的には同じ反応が起こるので、再現性というレベルでの問題ではなく、あくまでも各時刻における偏光依存性を調べようとしたときに生じる問題である。

ごく最近、この問題を解決する方法として、偏光スイッチングの利用が開始された¹⁴⁾。軟 X 線領域における偏光スイッチングは、SPring-8 において開発された、2 台の円偏光アンジュレータをタンデムに配置し、そこを通る電子の軌道を高速で変化させる方式がよく知られている¹⁵⁻¹⁷⁾。KEK-PF では可変偏光アンジュレータとして APPLE-II 型を採用することによって、左右円偏光だけでなく水平垂直直線偏光のスイッチングも可能にし、波長分散型 XAFS 法と組み合わせることによって、分子配向の実時間観察を実現した。

Fig. 6 (a) に、Ir (111) 表面への NO 吸着過程に対して、1 Hz の偏光スイッチングを行いながらビデオレート（30 Hz）で連続測定した波長分散型 XAFS のデータから抜き

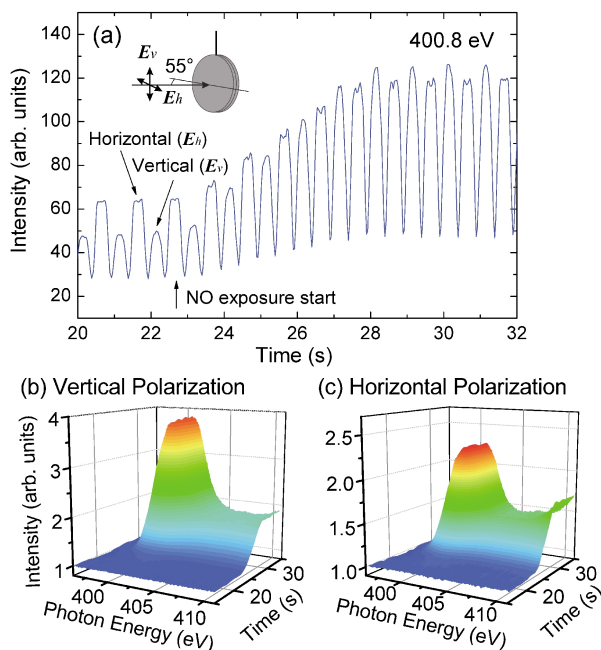


Fig. 6 (Color online) Time dependence of the X-ray absorption intensity at 400.8 eV taken during 1 Hz switching between vertical, E_v , and horizontal, E_h , linear polarizations (a) and three-dimensional plots of N K-edge XAS for vertical (b) and horizontal (c) polarizations. A Ir(111) surface was exposed to 5×10^{-8} Torr NO.

出した、400.8 eV における吸収強度の時間変化を示す。1 Hz の偏光スイッチングによって、1 秒に 2 回、強度のピークが見られ、それぞれが垂直、水平偏光に対応している。このようなデータが、N K 吸収端近傍の全ての X 線エネルギーに対して同時に得られているので、垂直、水平偏光それぞれに対応する部分だけを抜き出して 3 次元プロットすると Fig. 6 (b) (c) のようになる。どちらの偏光に対しても、23 s あたりから急速にピークが成長し、わずか数秒間で飽和に達していることがわかる。吸着過程における分子の配向変化を調べるために、400.8 eV (NO の N 1s から π^* 軌道への遷移に対応) のピーク強度の時間変化を、それぞれの偏光に対してプロットしたものを Fig. 7 (a) に示す。相対的な配向変化がわかりやすいように、飽和吸着した時の強度を 1 に規格化している。垂直偏光（電場ベクトルは表面に平行）と水平偏光（電場ベクトルは表面垂直から55度、すなわちマジックアングル入射条件）の時間変化はほぼ完全に一致しており、NO 分子は常に一定の配向を保ったままで吸着していくことがわかる。

一方、同様の測定を N₂O 分子の吸着過程に対して行った結果を Fig. 7 (b) に示す。NO 分子の場合とは対照的に、二つの偏光に対するピーク強度は異なった挙動を示している。まず、45 s 付近で吸着が始まってから 52 s くらいまでの間は、二つの偏光に対するピーク強度は同じように増加する。すなわち、この時間領域では分子の配向は一定である。なお、ここまでで分子の吸着量は飽和に対して 2/3

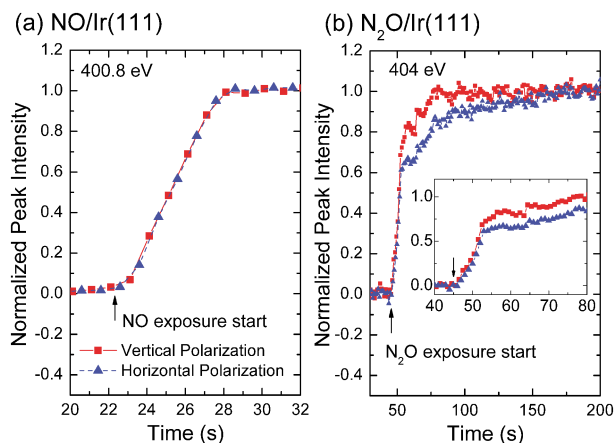


Fig. 7 (Color online) Time evolution of normalized peak intensity for vertical and horizontal polarizations simultaneously taken by using 1 Hz polarization switching during the exposure of the Ir(111) surface to (a) 5×10^{-8} Torr NO and (b) 1×10^{-7} Torr N_2O .

程度に達する。その後80 s程度までの間は、垂直偏光に対するピーク強度が相対的に弱くなる。ここで観察しているピークは、 N_2O 分子の1sから π^* 軌道への遷移に対応しているので、この結果は、 N_2O の分子軸が、それ以前に比べて表面平行方向に近づくことを意味している。ただし、XAFSの結果は表面全体の分子に対するある種の平均配向を与えるので、全ての分子の配向が変化するか、新たにより表面垂直に近い配向をもった分子が吸着するために平均値として変化するかを区別することはできない。しかしながら、52 s付近を境にピーク強度の増加が大幅に緩やかになることから、52 sまでは最も吸着しやすいサイトへの吸着が急速に進行し、そのサイトが52 s付近で埋め尽くされたことによって、それ以降はより表面平行方向に近い配向を示す別のサイトへの吸着が始まるのが自然であろう。最後に80 s以降においては、吸着速度が一段と低下し、配向はゆっくりと表面平行にさらに近づく方向に変化していく。この過程において、別の配向を示す新たなサイトへの吸着が起こっているのか、それとも既存のサイトにおいて吸着構造の再構成が起こっているのかは定かではないが、これらの結果は、化学反応の過程において、吸着種の種類と量だけでなく(平均)配向も含めて実時間観察することが可能になったことを示している。

5. おわりに

本稿で示したように、軟 X 線領域の波長分散型 XAFS 法は、この10年間で急速な発展を遂げた。特にアンジュレータの利用による時間分解能の大幅な向上と、偏光スイッチングとの組み合わせによる配向を含めた実時間追跡の実現は、この手法の応用範囲を大きく広げたといえよう。ここで紹介した研究例は、すべて単結晶基板上的の化学反応

あるいは吸着過程であるが、0.1 mmレベルでの均一性さえ保障できれば、どのような基板にも適用できる手法であることを忘れてはならない。触媒化学の研究をはじめとする、今後の応用研究の展開に期待している。一方で、もっと小さい領域(例えば0.1 μm 以下)で見ると、表面化学反応の多くは不均一に進行しており、アイランドなどのドメイン構造がダイナミックに変化している。今後、新しい工夫によって、位置情報をも含めた実時間観察が可能になれば、より有効な手法としてさらに発展することが可能であろう。

謝辞

軟 X 線領域の波長分散型 XAFS 法は、筆者が中心になって開発を行ってきたものであるが、言うまでもなくその過程においては多くの方々にご協力を頂いた。当初の開発は筆者が東京大学大学院理学系研究科の助手であった時期に、同研究科の太田俊明教授(現在は立命館大学教授)のもとで、近藤寛助教授(現在は慶應義塾大学教授)を始めとする太田研究室の皆さんの協力によって行ったものである。アンジュレータを用いた開発は筆者がKEK-PFに移ってから行ったものであるが、その際にも慶應義塾大学の近藤寛教授、阿部仁博士(現在はKEK-PF准教授)、吉田真明博士および近藤研究室の学生さん、そしてKEK-PFの隅井良平博士(現在は榊フェローテック)、酒巻真粧子博士、および光源、ビームライン関係者の方々に多大な協力を頂いた。これらの皆様に心から感謝するとともに、参考文献の著者としてしかお名前を挙げられなかった方々に非礼をお詫びする次第である。

参考文献

- 1) J. Stöhr: NEXAFS Spectroscopy, (Springer, Berlin 1992).
- 2) T. Matsushita and P. Phizackerly: Jpn. J. Appl. Phys. **20**, 2223 (1981).
- 3) K. Amemiya, H. Kondoh, A. Nambu, M. Iwasaki, I. Nakai, T. Yokoyama and T. Ohta: Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L718 (2001).
- 4) K. Amemiya, H. Kondoh, T. Yokoyama and T. Ohta: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **124**, 151 (2002).
- 5) I. Nakai, H. Kondoh, K. Amemiya, M. Nagasaka, A. Nambu, T. Shimada and T. Ohta: J. Chem. Phys. **121**, 5035 (2004).
- 6) I. Nakai, H. Kondoh, K. Amemiya, M. Nagasaka, T. Shimada, R. Yokota, A. Nambu and T. Ohta: J. Chem. Phys. **122**, 134709 (2005).
- 7) I. Nakai, H. Kondoh, T. Shimada, M. Nagasaka, R. Yokota, K. Amemiya, H. Orita and T. Ohta: J. Phys. Chem. B **110**, 25578 (2006).
- 8) I. Nakai, H. Kondoh, T. Shimada, M. Nagasaka, R. Yokota, T. Katayama, K. Amemiya, H. Orita and T. Ohta: J. Phys. Chem. C **113**, 13257 (2009).
- 9) M. Nagasaka, H. Kondoh, K. Amemiya, I. Nakai, T. Shimada, R. Yokota and T. Ohta: J. Phys. Chem. C **114**, 2146 (2010).
- 10) 近藤 寛, 雨宮健太, 太田俊明: 分光研究 **54**, 306 (2005).
- 11) 近藤 寛, 中井郁代, 長坂将成, 雨宮健太, 太田俊明: 放

- 射光 **19**, 167 (2006).
- 12) K. Amemiya, A. Toyoshima, T. Kikuchi, T. Kosuge, K. Nigorikawa, R. Sumii and K. Ito: AIP Conf. Proc. **1234**, 295 (2010).
- 13) K. Amemiya, Y. Kousa, S. Nakamoto, T. Harada, S. Kozai, M. Yoshida, H. Abe, R. Sumii, M. Sakamaki and H. Kondoh: Appl. Phys. Lett. **99**, 074104 (2011).
- 14) K. Amemiya, M. Sakamaki, S. Nakamoto, M. Yoshida, H. Kondoh, T. Koide, K. Ito, K. Tsuchiya, K. Harada, H. Sasaki, T. Aoto, T. Shioya, T. Obina, S. Yamamoto and Y. Kobayashi: submitted to Appl. Phys. Lett.
- 15) T. Muro, Y. Saitoh, H. Kimura, T. Matsushita, T. Nakatani, M. Takeuchi, T. Hirono, T. Kudo, T. Nakamura, T. Wakita, K. Kobayashi, T. Hara, K. Shirasawa and H. Kitamura: AIP Conf. Proc. **705**, 1051 (2004).
- 16) T. Muro, T. Nakamura, T. Matsushita, H. Kimura, T. Nakatani, T. Hirono, T. Kudo, K. Kobayashi, Y. Saitoh, M. Takeuchi, T. Hara, K. Shirasawa and H. Kitamura: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147**, 1101 (2005).
- 17) T. Muro, T. Nakamura, T. Matsushita, T. Wakita, K. Fukumoto, H. Kimura, T. Hirono, T. Kinoshita, T. Hara, K. Shirasawa, M. Takeuchi and H. Kitamura: AIP Conf. Proc. **879**, 571 (2007).

著者紹介



雨宮健太

高エネルギー加速器研究機構

物質構造科学研究所・教授

E-mail: kenta.amemiya@kek.jp

専門：軟X線分光学，表面科学

【略歴】

1999年東京大学大学院理学系研究科助手，
2000年同研究科にて博士（理学）取得。
2006年高エネルギー加速器研究機構助教
授（2007年より准教授），2012年4月より
現職。

Recent developments of the wavelength-dispersive XAFS technique in the soft X-ray region

Kenta AMEMIYA Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract The wavelength-dispersive XAFS (X-ray absorption fine structure) technique, by which a XAFS spectrum is recorded at once without monochromator scan, is suitable for tracing high-speed phenomena such as surface chemical reactions, in which a frequent repetition is hardly expected. Although only about ten years have been past from the development of the technique, the time resolution has been greatly improved, and a continuous measurement with a 33 ms time resolution is achieved at present. Moreover, it has very recently been demonstrated that the orientation of adsorbate, as well as the amount of each chemical species, is traced within one chemical reaction, by combining the wavelength-dispersive XAFS with switching between the vertical and horizontal linear polarizations.