

1. はじめに

X線を物質に照射すると、内殻に束縛されていた電子が 励起,放出され、イオン化されるが、その緩和過程で、外の 軌道の電子が内殻に遷移し, エネルギー準位差に等しいエネ ルギーのX線が放射される.これを蛍光X線と呼ぶ.蛍光 X線の波長が元素に固有であることは、古く1906~1911年 頃に C. G. Barkla (1877-1944, 1917年ノーベル賞受賞)によ って見出されており(1),今日では測定機器の進歩により、い わば,元素を「色」によって識別する分析ツールとして広く 用いられている⁽²⁾⁽³⁾.X線領域のアンジュレータ光源を備 えた最初の高輝度放射光施設である European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)が稼働開始した1994年, 蛍光 X 線スペクトロメトリーをはじめとする多くのX線技術は新 しい時代を迎えることになった. その数年の後に, アメリカ のアルゴンヌ国立研究所では Advanced Photon Source (APS),わが国ではSPring-8が動き始め、現在では、それ らの大型施設とほぼ同等の性能を持つ放射光施設が世界中に 建設され,先端科学技術の研究拠点になっている.本稿で は、筆者の研究室が開発を行ってきた蛍光 X 線迅速イメー ジングと超微量分析の経験を中心に、高輝度放射光がもたら した蛍光 X 線スペクトロメトリーの進歩と物質・材料工学 分野へのインパクトを概観する. また,X線自由電子レー ザー等の新光源の登場により期待される今後の展開にも触れ る.

2. 蛍光 X 線迅速イメージング

(1) XY スキャンを必要としないイメージングの方法・装置

蛍光X線スペクトロメトリーにおいて,元素の空間分布 を画像として得る技術は,これまでのところ,放射光ナノビ ーム形成を主な柱とする走査型の思想に基づくものが主流で ある.これに対し,図1に示すような非走査型(投影型)のイ

メージング技術は、試料も装置のどの部分も動かすことな く、およそ15~20ミクロンの空間分解能で、1000×1000程 度の画像を0.03秒~3秒程度の撮像時間で取得することがで きる⁽⁴⁾⁻⁽¹⁴⁾.このイメージング技術の初期の検討には実験室 系X線源⁽⁵⁾や第2世代放射光施設の偏向電磁石光源が用い られ、その後、多極ウィグラー光源やアンジュレータ光源の 利用により大きな進展を遂げた.元素別の画像を得るための 検出器としては、CCD または CMOS カメラ等の蓄積型2次 元検出器のほか、エネルギー識別を行う信号回路を搭載した ピクセル検出器⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾,さらには波長分散型分光器を組み合 わせる方法(17)等が用いられる. 蓄積型2次元検出器の場合 は,吸収端をはさんでエネルギーの異なる単色 X線により 得られる複数の画像比較する方法や、実質的に蓄積を行わず 高速読み出しを頻繁に繰り返すことによりエネルギー識別を 行う方法(シングルフォトンカウンティング)が用いられる. このイメージング法の原理や装置構成要素の詳細について



図1 投影型蛍光 X 線イメージングの原理図.水平方向に長い 形状をしたビームを使用し,試料の広い領域を一度に照 射する.試料は入射ビームに対して1~2.5°傾いている. コリメーターを通過する特定の平行な成分の X 線のみが 2 次元 X 線検出器に到達するため,試料上の位置と画像 とが対応づけられる.2次元 X 線検出器,コリメータ ー,試料は互いに密着している.

* 独立行政法人物質・材料研究機構量子ビームユニット高輝度光解析グループリーダー(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1) X-ray Fluorescence Spectrometry with Advanced Synchrotron X-ray Sources; Kenji Sakurai(National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: *projection-type X-ray fluorescence imaging, realtime imaging, combinatorial screening, total-reflection X-ray fluorescence, detection limit, downsizing, X-ray free-electron laser* 2013年10月 9 日受理[doi:10.2320/materia.52.567] は,他の解説記事⁽⁶⁾⁽¹³⁾に詳しく説明しているので,興味を お持ちの読者はぜひご覧頂きたい.

試料のXYスキャンを必要としない,この投影型蛍光X 線イメージングは,典型的には1cm角程度のやや広めの視 野をやや粗い分解能ながらも,高画素数で,しかも迅速に撮 像するのが得意である⁽⁷⁾.そのため,放射光ナノビームと試 料のXYスキャンを組み合わせる従来の走査型蛍光X線イ メージングとは異なる応用展開が可能になる.本稿では,試 料の時々刻々の元素分布を動画としてとらえる研究例として 化学反応イメージング,不均一試料のXAFSイメージング の応用例としてコンビナトリアル材料イメージングを紹介す る.

(2) 化学反応イメージング

非平衡反応における化学パターンの形成、リズムの発生に ついて、多くの物理化学的研究がなされてきた⁽¹⁸⁾. 1950年 代に見出された Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応の周期的変 化を伴う振動化学反応や、さらに古く、19世紀末に報告さ れた Liesegang 現象(規則的な縞模様を描いて沈殿が生成す る)等は、典型的な非線形現象である.こうした反応におい て形成される化学パターンは、いわゆる散逸構造(dissipative system,物質やエネルギーの出入りがある環境におけ る平衡状態から乖離した熱力学的開放系)として理解され, 反応拡散モデルで記述することにより解釈されている.理論 的研究とシミュレーションが成功をおさめており、例えば、 上述の BZ 反応は、いくつもの素反応からなる FKN メカニ ズムにより説明されている(19). 他方,実験的な研究,特に 化学パターンの詳しい構造については、種々の光学顕微鏡に よる観察が圧倒的多数をしめ、化学パターンの各部分の形 態、大きさ、色等、またその時々刻々の変化が観察されてい る.光学顕微鏡では得られない情報,例えば詳しい化学組 成,結晶構造については,ほとんど研究されていないが,そ の理由は、単にそのような分析手法が未確立であったという ことに尽きるであろう.特に、時々刻々の元素毎の分布の変 化等を分析できれば、化学パターンの変化の本質を理解する のにきわめて有用である.

水溶液の液滴を乾燥させる際,その乾固,結晶析出によっ て化学パターンが得られる.図2はフェロシアン化カリウム 水溶液について,7400 eV(鉄の吸収端の上)のX線を用いて 連続的に観察したもので,X線像は主として鉄の濃度分布 を反映している.乾固の初期は,丸い液滴の主に周辺部分で 結晶化が生じているが,やがて中心方向に進んでゆく.濃度 の不均一さを反映して,サイズの異なる針状晶が得られた.

蛍光 X 線イメージングは,化学組成の情報を含むきわめ て有用な技術であり,さまざまな化学パターンを理解するこ とに貢献できる.投影型蛍光 X 線イメージングの方法を用 いると,1つの画像を取得するのに必要な測定時間を劇的に 短縮でき,30ミリ秒~1秒程度(本研究例では1秒)で取得で きるため,連続的に撮像を繰り返すことにより,時々刻々の 化学パターンの変化の過程を追跡できる.



図2 溶液から沈殿析出する結晶(フェロシアン化カリウム)の 時々刻々変化する化学パターンの蛍光X線動画イメージ ング.1画像あたりの撮像時間1秒.

(3) コンビナトリアル材料イメージング

新しい材料を探索し開発するための効率的な手法として, 近年コンビナトリアル材料合成法⁽²⁰⁾⁽²¹⁾が利用されるように なった.1枚の基板上に,化学組成や各種の合成条件の異な る微小試料を大量に系統的に並べ(コンビナトリアルライブ ラリー),その物性・機能特性の評価,組成分析,構造解析 等を一度にまとめて行うことにより、優れた材料を効率的に 探索することができる.この技術のスループットは、現状、 主に分析の部分で制約されている. 蛍光 X 線法や X 線回折 法,XAFS法等による化学組成,結晶構造,化学状態等の 分析は、非破壊的で定量性にも優れた有用な方法であるが、 基板上に配列された大量の試料を測定するには、微小ビーム を走査して個々の試料に照射してデータを取得する操作を非 常に多く繰り返す必要があり、迅速な評価は容易ではない. 他方、少数の点分析ではなく、非常に多くの測定点のデータ を取得して高画素数のイメージングを行おうとする場合に は,莫大な長時間の測定時間が必要になる.このような分析 には、投影型 X線イメージング、特に投影型 XAFS イメー ジングが有望と考えられる⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

蛍光 X 線収量法による XAFS 測定は,濃度・厚さ等に注 意を払って準備された均一試料からの蛍光 X 線強度を入射 X 線のエネルギー(モノクロメータの角度)の関数として取 得することにより行われる.これに対し,投影型 XAFS イ メージングでは,不均一で分布のある試料からの蛍光 X 線 を図1の方法で,試料位置と1対1対応する X 線像として 取得する.このような画像をモノクロメータの角度走査と連 動させて行うと,ただ1度のモノクロメータの走査のみ で,全測定点の XAFS 測定を行うことができる.

図3にアルカリ電解質型燃料電池の負極の酸素還元反応を 促進する材料として有望なマンガン・コバルト酸化物ナノ粒 子作製条件のスクリーニングに適用した例⁽¹⁰⁾を示す.目的 の物質はマンガン塩とコバルト塩の混合水溶液を蒸発乾固お よび400℃以下の低温での処理を行うことにより合成するこ とができる.ナノ粒子のサイズを制御するために処理温度を 下げ,あるいは欠陥構造を制御するために硝酸を加えるなど の合成条件の最適化を行う必要がある.そこで硝酸濃度と熱 処理温度をパラメータにとって作成された9つのサンプル をアルミナ基板上に配列し,投影型 XAFS イメージング測 定を行った.同時に取得された9つの XAFS スペクトルの



図3 1枚の基板上に配列されたマンガンコバルト酸化物ナノ 粒子のコンビナトリアルライブラリの投影型X線イメー ジングから一括して取得されたXAFSスペクトル.モノ クロメータの1点あたりでの撮像時間は1秒,測定時間 は全部で13分.

マンガン K 吸収端のケミカルシフトに明瞭な差異が認めら れた.すなわち,温度が低く硝酸の量が少ない時は塩の熱分 解が不十分なため,目的のスピネル型酸化物に比べ低酸化数 になることがわかる.原料のマンガン塩化物のマンガン酸化 数は2で,理想的に作成されたマンガン・コバルト酸化物 のマンガン酸化数は4であるので,この結果から,高い硝 酸濃度か,高温の熱処理かのいずれかが必須であることが明 らかになった.

3. 超微量分析

(1) 放射光による超微量蛍光 X 線分析

きわめて微量の金属が各種工業材料や環境物質,あるいは 生体系の中で決定的に重要な役割を果たす場合が多くあるこ とが知られている⁽²²⁾.そのような微量物質を検出し,化学 種を識別するための高感度な分析・計測技術は重要である. 蛍光X線スペクトロメトリーは,多数の元素を対象として 高信頼性の定量分析を非破壊的に行うことのできる手法であ るが,一般的には,微量物質の検出に適しているとは必ずし も考えられていない.この状況を大きく変えたのが,X線 領域をカバーする新しい光源,シンクロトロン放射光であ る.ただし,微量物質検出能力を極限的に引き上げるために は,単純に高輝度光源のあるところに分析装置を持って行け ばよいというわけではなく,そのような優れた光源の性能を 引き出すことのできる新たな分光器・検出器の開発が鍵にな る.

(2) 微量物質の化学計測のための条件

蛍光 X 線強度は用いる入射 X 線の強度に比例して強くな るので,試料の総量が少なく,さらにそのなかの濃度レベル が低い場合であっても、シンクロトロン放射光のような高輝 度の光源を用いれば、微量物質からの弱い信号を強くするこ とができる.ところが、これだけでは不十分である.なぜな ら、入射 X 線の強度が強くなれば、バックグラウンドや主 成分の元素からの強い蛍光 X 線も,また同じように比例し て強くなるからである.多くの X 線検出器が実際に計数可 能な単位時間当たりのカウント数には制限があり,いくらで も強い X 線を数えられるわけではない.従って,入射 X 線 の強さを生かして,微量物質の検出能力を引き出すために は,信号対バックグラウンド(S/B)の比そのものを変えるよ うな工夫を導入することが重要になる.

全反射蛍光 X 線分光法は,わが国の研究者により1971年 に見出された優秀な技術であり⁽²³⁾,S/B比を飛躍的に向上 させることのできる最も有力な方法の1つである.放射光は 平行性が高く全反射配置に適しているため大幅な性能向上が 可能である.半導体分野の表面汚染評価にも威力を発揮し, 大きなシリコンウエハのどの部分にどんな元素がどれくらい あるか,たちどころに,しかも非破壊的に分析できる.オー ストリアの研究グループは,この分析技術の検出限界を引下 げる努力を継続的に行い,1998年には,シリコンウエハ表面上 のニッケル不純物について13フェムトグラムに達した⁽²⁴⁾.

(3) 全反射蛍光 X 線分析法への波長分散法の導入

蛍光X線スペクトロメトリーでは、半導体検出器を用い るエネルギー分散型と結晶分光器を用いる波長分散型の2 つの方法が知られていて、それぞれ研究目的により一長一短 がある. 波長分散型はエネルギー分解能が高いが検出効率は 高くはない.検出効率ではエネルギー分散型の方が優れてい ることから、微量分析を行う能力に関して、波長分散型がエ ネルギー分散型に勝ることなど、ありえないと長く信じられ ていた. ESRF や SPring-8 等の高輝度光源が完成した後 も、世界中どこでも圧倒的に多くの研究者が、エネルギー分 散型の方法を採用しており、それほどにも常識の壁は厚かっ た.しかし、これは本当に正しいのだろうか.もともと、分 光器や検出器は使用する光源と切り離して考えることなどで きないものであり、新光源が登場すれば、その特性に見合っ た分光システムを再考する必要がある. 前述した通り, あら ゆる検出器には、特にエネルギー分散型の半導体検出器のよ うなパルス型検出器には、計数可能なX線強度に上限があ り、非常に高輝度な光源が利用できる場合に、その性能を十 分生かせないことが十分考えられる.計数率の制限に対して 十分な能力を持ち、かつ信号対バックグラウンド比を向上さ せる観点から、半導体検出器よりもエネルギー分解能が約1 桁優れたシステムの開発が必要と考えたのである.

本研究では,波長分散型の技術に着目し,ヨハンソン型結 晶分光器を取り上げ,従来の欠点であった検出効率の低さを ダウンサイジングによりエネルギー分解能をさほど損なうこ となく飛躍的に改善できることを見出した⁽²⁵⁾⁻⁽²⁹⁾.図4に 開発された分光器の概念図を示す.45度入射・出射の配置 の場合が描かれているが,試料ホルダーを交換するだけで全 反射蛍光X線分析を行うことができる.

(4) 超微量分析

図5は、微量金属を含むNIST標準試料のスペクトルで



図4 微量分析を目的として開発された小型X線分光器.検出 効率は大幅に稼ぐことができ、しかし、エネルギー分解 能はそれほど犠牲にはならない.1996年,SPring-8の 運転が始まる以前に、開発に着手した当初は、それほど 小型ではなく、ローランド円半径350ミリの分光器であ った.その後、実際にSPring-8での実験が始まり、200 ミリ、150ミリ、120ミリと小型化を進め、最終的に100 ミリの超小型分光器を採用するに至った.



図5 リンゴとトマトの葉(ともに NIST 標準試料)のスペクト ル. 全反射を使用しない通常の蛍光 X 線分析の配置で測 定された.これまでの多くの放射光の蛍光 X 線スペクト ルと異なり,エネルギー分解能が30倍以上良く,ほとん どのピークの重なりが分離できる.それでいて,検出限 界は 100ppb を切った.

あり、全反射条件を使用しない通常配置で取得された. Si (Li)検出器を用いる通常のスペクトルよりもエネルギー分解 能が約30倍優れており、多数のピークを効果的に分離でき ている. その結果, S/B比が大幅に改善されている. 図6 は、シリコンウエハ上に滴下された微小液滴中の微量金属 (20ppbのニッケル、コバルト、鉄)の全反射蛍光 X 線スペ クトルである⁽²⁸⁾.測定は1点あたり5秒のスキャンで,1 元素のデータは10~15分ほどで取得される.得られたスペ クトルのエネルギー分解能は約6~7 eV であり, Si(Li)検出 器よりも25倍以上優れており、散乱X線に起因するバック グラウンドや原子番号の隣接する元素の影響を著しく減少さ せることができる. 例えば, Si(Li)検出器で得られるスペク トルであれば、コバルトの Kα線は隣接する元素である鉄の Kβ線と重なり,鉄の含有量が多いときはコバルトの検出は 困難であるが、この測定では完全に分離して検出することが できている.また,濃度と蛍光X線強度の直線関係も良好 であり、特段の複雑な補正を行わなくても、桁で濃度が変化 するような系についての定量分析を行うことができる.

検出限界は大幅に更新され、0.1 µ リットル程度の微小液



図6 液滴の全反射蛍光X線スペクトル.滴下量0.1µl, Fe, Co, Niの濃度20ppb. R=120ミリ分光器のデータである.

滴に含まれる超微量のニッケルで0.31フェムトグラム,濃度 では,ppt(1兆分の1)以下の超微量物質の分析が可能とな った⁽²⁸⁾.数ある既存の微量分析技術のなかでもトップクラ スと言ってよいであろう.

ところで、超微量分析は、光源と分光器だけで行えるわけ ではない、大気浮遊物等、周囲からのコンタミネーションを 極限的に低減させなければ、そもそも測定を行うことなどで きない、クリーンルームの実験ハッチや超高真空の測定装 置・ビームラインのようなものも必要になってくるわけであ るが、放射光施設のビームラインは、微量分析専用ではな く、多様な研究に使用できるようにデザインされているた め、そのような設備はない、この研究では、試料を中心に発 想し、試料を取り扱う周辺の空間の清浄度を確保するため、 人も装置もすっぽり入る2重構造のクリーンブースを実験 ハッチの中と外にそれぞれ1式ずつ設置した、図のデータ は、そのようにして取得されたものである。

高輝度放射光を用いると、今までほとんど分析が不可能と 諦められていたような超微量の物質にも科学のメスが入るこ とになる.ナノ材料開発はもちろん、河川・湖沼・海の水、 土壌、エアロゾル等の環境物質や宇宙・航空機事故等や犯罪 現場の遺留品等の分析など、多方面で貢献することが期待さ れている.

4. おわりに

既に見てきたように X 線領域のアンジュレータを備えた 高輝度光源の登場により, 蛍光 X 線スペクトロメトリーを 大きく変革された. これまで不可能と信じられていた計測が 次々に可能となり, 応用分野も拡大している. しかし, 飛躍 と呼ぶべき段階はむしろこれからである. 21世紀の中期に 向けて, さらに高度な新光源が続々と姿を現し, 稼働を開始 する. 2009年4月, スタンフォードにある SLAC 国立加速 器研究所では, 世界初の X 線波長(0.15 nm)でのレーザー発 振に成功⁽³⁰⁾, 続いて, わが国でも SPring-8 キャンパス内で SACLA が稼働を開始した⁽³¹⁾. X 線レーザーは, いよいよ



図7 蛍光X線スペクトロメトリーの将来.

現実のものになり⁽³²⁾,特にコヒーレンスの利用やフェムト 秒以下の時分割解析は,大きく前進すると期待される.

図7に示すように、蛍光X線スペクトロメトリーについ ても、格段の進歩、発展、拡張が期待される.元素分析法、 化学状態分析法として成熟する一方、静的な計測から変化を 対象とする計測に発展し、将来は化学的な変化を検知する技 術が続々と生み出されるであろう.実時間で時々刻々の変化 を追跡する測定、非常に短時間な変化の素過程を解析する測 定等、新たな展開が期待される.特に、短パルスX線を用 い、ポンプ・プローブ法により、特定元素の化学環境の変 化、特に電荷の動きを解析するような研究⁽³³⁾が今後なされ ると考えられる.

また、スタンフォードの施設におけるネオンガスのスペク トルについての報告⁽³⁴⁾からも明らかな通り、X線自由電子 レーザーにより、内殻電子の励起を多重イオン化も含めて自 在にコントロールできるようになった.これまで詳細が明ら かではなかった蛍光X線やオージェ電子発生の詳細な機構 の全容が解明される日は近い、蛍光X線スペクトロメトリ ーによる化学状態分析の革新、特にスペクトルの再解釈を大 いに助けるであろう.X線ファンダメンタルパラメータの ほとんどが変化する要因のある部分も含めて詳細に決定さ れ、標準試料も検量線も使用しない絶対定量分析の信頼性向 上に寄与することも期待される.

しばらくの間,実験は,世界でもごく限られた場所でしか 実施できないかもしれないが,今はむしろ,新しい理論やデ ータ解析法をよく準備することが最も重要な時期であると思 う.レーザーのようなX線源は,今後,大型加速器を使う ものばかりでなく,テーブルトップのものも含め,多様な形 態で実現するのではないかと予想される.今後,多くの若手 研究者が,蛍光X線スペクトロメトリーの新たな展開の分 野で活躍することを願ってやまない.

本稿で紹介した研究の多くは、当研究室の元メンバーであ る江場宏美博士(現東京都市大学工学部准教授)、水沢まり 博士(現総合科学研究機構東海、グループリーダー)との共 同研究である。蛍光X線迅速イメージングの研究は、高エ ネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設(BL-4A, BL-16A1, NW2A)を, 超微量分析の研究は, SPring-8 (BL39XU, BL40XU)を利用した.両施設のスタッフの皆様 にも多くのご協力を頂いたことを記して感謝する.

文 献

- (1) C. G. Barkla: Nature, 73(1906), 365; C. G. Barkla: Philos. Mag., 22(1911), 395.
- (2) 中井泉編: 蛍光X線分析の実際,朝倉書店,(2005).
- (3) K. Tsuji, R. Van Grieken, J. Injuk Eds: X-Ray Spectrometry: Recent Technological Advances, John Wiley & Sons, London, (2004).
- (4) 桜井健次他:特許第3049313号,第3663439号,第3834652号.
- (5) K. Sakurai: Spectrochim. Acta B, **54**(1999), 1497.
- (6) 桜井健次, 江場宏美, 水沢まり:まてりあ, 41(2002), 616.
- (7) K. Sakurai and H. Eba: Anal. Chem., **75**(2003), 355.
- (8) K. Sakurai and M. Mizusawa: Nanotechnology, 15(2004), S428.
- (9) M. Mizusawa and K. Sakurai: J. Synchrotron Rad., **11**(2004), 209.
- (10) H. Eba and K. Sakurai: Chemistry Letters, 34(2005), 872.
- (11) H. Eba and K. Sakurai: Mater. Trans., **46**(2005), 665.
- (12) H. Eba and K. Sakurai: Appl. Surf. Sci., 252(2006), 2608– 2614.
- (13) 桜井健次:応用物理, 73(2004), 754.
- (14) K. Sakurai and M. Mizusawa: Anal. Chem., 82(2010), 3519.
- (15) L. Strider et al.: Nucl. Instr. and Meth. A, 614(2010), 483.
- (16) O. Scharf *et al.*: Anal. Chem., **83**(2011), 2532.
- (17) K. Tsuji, T. Ohmori and M. Yamaguchi: Anal. Chem., 83 (2011), 6389.
- (18) 例えば三村昌泰監修,松下貢編:生物に見られるパターンと その起源,東大出版会,(2005).
- (19) R. J. Field, E. Koros and R. M. Noyes: JACS, 94(1972), 8649.
- (20) X. -D. Xiang, X. Sun, G. Briceno, Y. Lou, K. -A. Wang, H. Chang, W. G. Wallace-Freedman, S. -W. Chen and P. G. Schultz: Science, 268 (1995), 1738.
- (21) 鯉沼秀臣, 川崎雅司: コンビナトリアルテクノロジー, 丸 善, (2004).
- (22) 木村 優:微量元素の世界, 裳華房, (1990).
- (23) Y. Yoneda and T. Horiuchi: Rev. Sci. Instrum., 42(1971), 1069.
- (24) P. Wobrauschek, R. Gorgl, P. Kresamer, C. Streli, S. Pahlke, L. Fabry, M. Haller, A. Knochel and M. Radtke: Spectrochim. Acta B, 52(1997), 901.
- (25) K. Sakurai and H. Eba: Jpn. J. Appl. Phys., Suppl., 38–1 (1999), 332.
- (26) H. Eba, C. Numako, J. Iihara and K. Sakurai: Anal. Chem., 72 (2000), 2613.
- (27) K. Sakurai, H. Eba, K. Inoue and N. Yagi: Nucl. Instrum. Methods A, 467-468 (2001), 1549.
- (28) K. Sakurai, H. Eba, K. Inoue and N. Yagi: Anal. Chem., 74 (2002), 4532.
- (29) 桜井健次:X線分析の進歩 35, アグネ技術センター, (2004), 201.
- (30) B. McNeil: Nature Photonics, 3(2009), 375.
- (31) T. Ishikawa *et al.*: Nature Photonics, **6**(2012), 540.
- (32) S. Suckewer and P. Jaegle: Laser Phys. Lett., 6(2009), 411.
- (33) 桜井健次他:第48回X線分析討論会予稿集(2012年11月,名
- 古屋大学). (34) L. Young *et al.*: Nature, **56**(2010), 466.



★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★ 1988年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 同年,科学技術庁金属材料技術研究所入所,2001年 組織改正により触物質・材料研究機構.2011年4月 より現職.2004年4月より筑波大学大学院数理物質 科学研究科物質・材料工学専攻教授を兼任. 専門分野:X線分光計測

- http://www.nims.go.jp/xray/lab/
- ◎本稿で解説した研究以外に、非結晶物質の短中距離 構造の新しい計測・解析法、薄膜・多層膜の埋もれ
- 構造の新しい計測・解析法,海膜・多層膜の埋もれ た界面の新しい可視化法等の開発に関心を持ってい る.
