

X線結像光学ニュースレター

No. 41 2015年4月発行

★（祝）平成26年度文部科学大臣表彰★

軟X線顕微法と生物観察

東海大学工学部 篠原邦夫

放射光の開発とともに、軟X線顕微法の生物学への利用に興味を持たれた。その理由は、軟X線には、①水の吸収が低く生体試料（主成分 C, H, O, N）の吸収が高い波長領域（water window : 2.3-4.4 nm）があること、②試料の透過性が電子線よりも高いこと、そして③光学顕微鏡よりも高い分解能が原理的に可能な点、にある。利用する側の立場からは、生命の基本単位である細胞をそのままの状態（生きたまま）で高分解能の透視観察ができると期待された。言い換えると、生きている状態の細胞機能の発現構造を光学顕微鏡よりも高解像度で解析できると期待された。本稿では、生物観察のための顕微鏡という視点でその特徴、これまでの経過、を概観し、今後の展望について考えてみたい。

装置の現状

生物観察応用の検討は、軟X線領域のX線を高強度で得られる放射光の利用が可能になって始まった。はじめは光学素子の開発も不十分で、最も原理的に簡便な密着法で行われた。密着法は、当時半導体リソグラフィで開発されていた高解像度のレジスト [例えば PMMA (polymethylmethacrylate)] を記録媒体に利用した顕微法 [1] で、(レジストに密着した) 試料を透過したX線の強度分布をレジストに記録し、何らかの手段でそれを読み出す方法である。この記録媒体の読み出しには電子顕微鏡が使われていたが問題があり、観察中にプラスチックフィルム

であるレジストが電子線で溶けてしまうことが避けられなかった。我々は、プラズマ重合膜レプリカ法を応用することによってその問題を回避して、高解像度を確保した [2] が、その後 AFM の発達がとって代わり [3]、現在は、試料を透過したX線を PMMA で記録し、現像後の凹凸像を AFM で読み出す、という方法が一般的である。この方法の分解能は、PMMA の場合には炭素の K-X 線で評価して、5 nm と推定された [4]。

その後光学素子の開発が進み、現在では、ゾーンプレートを用いた軟X線顕微鏡システムが確立し、分解能も 10 nm に達するレベルになり、軟X線顕微鏡装置は実用段階になっている。放射光を光源とするシステムには、結像型と走査型 [5] があり、結像型は、CT 観察 [6] に利用されている。一方走査型は、試料の吸収特性を利用した分析型の顕微鏡 [7] として利用されている。また、位相コントラスト顕微鏡 [8] やホログラフィー [9] も試されたが軟X線領域では、吸収コントラストと比較した生物観察上の大きな利点はまだ指摘されていないと思われる。最近になってコヒーレント光源を用いた回折顕微法 [10] が注目を集めているが、軟X線領域では、走査型を利用したタイコグラフィー (ptychography) [11] が、光学素子による分解能の制限がないため、高分解能観察に利用価値が高いと思われる。なお、回折顕微法は、X線のエネルギーが高い領域で、試

料の透過性が高い生物試料観察法として今後の発展が期待される。一方軟 X 線領域の実験室型の顕微鏡としては、レーザープラズマ光源を利用した結像型顕微鏡 [12] や走査型電子顕微鏡を利用した投影拡大型の X 線顕微鏡 [13] もある。

生物観察のための条件

生物試料の構造観察に、光学顕微鏡、電子顕微鏡の利用が進歩している中で、軟 X 線顕微鏡（より一般的には X 線顕微鏡）に期待する性能は何かを考えると、まず第 1 に考えられるポイントは、機能を発現中の生理的な状態の観察で、それが実現すると生命科学への寄与は大きいであろう。その目的に最も近づいている現在の方法は、おそらく蛍光染色をした試料の光学顕微鏡観察であろう。ここでいう“生理的な状態”の意味は、細胞の生理活性が正常に営まれる状態をいう。この状態の構造は、少なくとも X 線露光時までは健全で、露光直前の情報を X 線でもとらえることができる。光学顕微鏡の場合には、試料の損傷がない範囲で動的な変化も追跡可能であり、染色した対象物の位置識別分解能は、光学顕微鏡の回折限界を超え、X 線顕微鏡に匹敵する。X 線顕微鏡との違いは、その分子が関与する構造ならびに試料全体の構造を見ているわけではない点である。全体構造を光学顕微鏡で見える場合には、やはりプローブ光の回折限界の制限を受けている。したがって、生理的な状態にある細胞の構造における（蛍光染色した）分子の配置を光学顕微鏡の回折限界を超える解像度で解明するためには、X 線顕微鏡が必要となるはずである。ここに一つの価値がありそうである。しかも、対象分子の位置識別には蛍光染色の代わりに（重金属などによる）電子顕微鏡で利用されている染色法 [14] あるいは、軟 X 線の吸収スペクトルを利用した分析型の顕微法 [15] が有効だろう。

次に動的観察はどうか。次の項で紹介するように X 線による放射線損傷とその断片のブラウン運動による移動のために構造破壊が起こり、光学顕微鏡で見えるような動的解析は期待できない。したがってこの目的には光学顕微鏡による動的変化の解析に X 線顕微鏡による構造観察を重ね合わせる形になるだろ

う。

まとめると、機能的な構造体（例えば細胞）の全体像を生理的な状態で構造観察できれば、X 線顕微鏡の生命科学への寄与が期待できるであろう。そのような顕微鏡として確立するためには、2 次元投影ではその目的は限定的である。理由は、数ミクロンもあるような厚い試料を 2 次元投影した場合には、像の重なりが大きく、目的とする構造体の識別が難しい点にある。方法としては、3 次元観察が有効と思われる。現状は、水溶液中の生理的な状態に近い環境における 2 次元投影観察と凍結試料の 3 次元観察（CT）が実現している。なお、X 線レーザーを利用した短パルス単一露光による 3 次元回折顕微法の報告 [16] があるが、生物試料観察に応用できれば、機能発現場の高分解能 3 次元観察も夢ではなくなるだろう。

軟 X 線顕微鏡の基本性能

軟 X 線顕微鏡に期待する性能は、細胞のような水溶液中の生理的な機能単位を直接高解像度で観察すること、並びにそのような厚い試料の 3 次元観察にある。そこでまずは本顕微鏡の性能がその要求を満たすかどうかを確認する必要がある。

水溶液中の生体試料の観察のために必要な露光量と露光時間については計算で推定した [17]。露光量は、Sayre らの方法を利用して、（染色体繊維の基本単位である）ヌクレオソームと同じ組成を持つ分子を設定したときに必要となる露光量を推定した。ヌクレオソームのサイズが直径 11 nm だから、分解能 10 nm を要求すると露光量は 10^{18} photons/cm² となる。この時の放射線損傷は、細胞死どころか分子がズタズタになる線量 [18] なので、その構造変化は、切れた分子のブラウン運動による移動と推定されている。識別を目的とする分子（例えばヌクレオソーム）を球形と仮定して、ブラウン運動によってその分子の直径に相当する距離を移動するために要する時間を推定したところ、10 nm の球形粒子が 10 nm 移動する時間は、3 μsec 程度と推定された。露光時間がこの時間よりも長くなるとその分子を識別する分解能はないということになる。

水溶液中の生体試料を高解像度で2次元投影観察する試みは、密着顕微法で始まった。固定した細胞の観察 [2, 19] が可能であることが示されたのち、その分解能が生物試料そのもののコントラストで解像度 10 nm レベルの観察が可能であることが示された [20, 21]。その解像度が水溶液中の試料でも可能であることが示され [22]、光学顕微鏡よりも高解像度で観察することが可能であることが実証された。2次元観察には限界があるが、その方法で可能な範囲での機能との関連を迫る試みもなされた。マクロファージは生体内の異物を取り込んで除去する機能を持つが、その水溶液中の細胞の表面構造をレーザープラズマ X 線による密着顕微法で観察すると、固定などの処理が必要な他の方法とは違った構造が観察され、それが異物取り込みの機能と関連するのではないかと推測された [23]。異物取り込み過程の解析には、動的観察が必要となるが、光学顕微鏡と連携した解析はまだなされていない。また機能的にその使命を終えた細胞の再利用のための自殺機構といわれているアポトーシスの細胞核内における進行は、「正常な核→染色体繊維の核膜周辺への移動→染色体繊維のビーズ状への切断→核中央へ凝縮」という経過を取ることが知られているが、この過程を単離核で解析できる試料のレーザープラズマ密着顕微法による観察 (図 1) では、光学顕微鏡による蛍

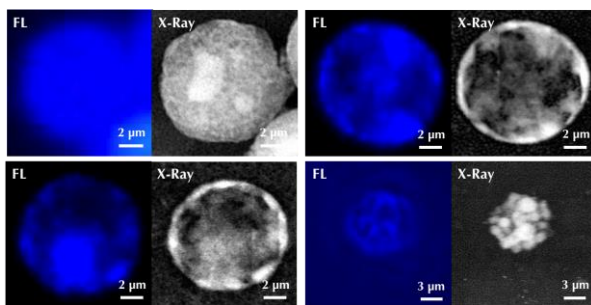


図 1: アポトーシス進行過程における核の変化の X 線密着顕微法による観察像。正常核 (左上)、ステージ 1 (右上)、ステージ 2 (左下)、ステージ 3 (右下)。それぞれ左側の図は、光学顕微鏡による DNA 蛍光の観察像 [24]。

光観察の DNA 分布とよく似た構造のほかにも物質の存在を示す X 線吸収構造がある。この構造が何を意味するかは今後の課題であるが、この場合には、細胞

核内の構造なので、3D 解析は必須となるであろう。

今後の課題

現在は装置も進歩し、透過率の高い高エネルギー領域の X 線利用も可能となった。そのような現状でもまだ、X 線顕微鏡が、光学顕微鏡と電子顕微鏡の間を埋めるような相補的な観察技術として有用であるという位置が確立しているとは思えない。技術的には細胞の 3D 観察が可能になり、分解能も 10 nm に迫る性能が達成できているが、何が欠けているのだろうか？

振り返ってみると、生命学者による利用も古くからなされてきた。思いつくままに例を挙げると、カエルの細胞観察をした Cheng [25]、水溶液中のミオシン繊維を観察した Panessa-Warren [26]、生命学者である奥さんの協力を得てなされた Suckewer らの装置開発 [27]、植物細胞の観察をした Stead と Ford のチーム [28] など数えあげれば多くの例が見つかるが、いずれも生命科学への活用までには至らなかった。生命科学において顕微鏡が必要となるのは、その機能の解明に関連する構造を解析するときである。機能的に解明が進み、構造を明らかにしたいと考えた時、利用できる装置を見回すと、光学顕微鏡の普及が大きい。より高分解能が欲しければ電子顕微鏡も確立している。同じような目で X 線顕微鏡はと見ると、これまで装置の利用に大きな制限があった。そのうえレーザープラズマ X 線による密着顕微法は、他の顕微鏡のように再現性の良い観察像が得られるとは限らない、といった問題もあった。これでは生命科学の研究に利用するには敷居が高すぎたであろう。最近になって格段に装置が進歩している。CT を主目的とした顕微鏡装置を持つ専用ビームライン [29] が ALS (Advanced Light Source, LBNL) に設置されて久しい。初期の生命科学研究者の参加時とは状況が変わっている。生命科学への連携のための装置開発も進み、我々も蛍光染色をして光学顕微鏡で分子の識別をしたのちに同じ試料を密着法で X 線観察することによって観察像における構造の同定を試みているが、結像型顕微鏡でも同様のシステム整備が進み、蛍光顕微鏡で分子の同定をしながら

X線CT観察ができるようになった [30]。幸い昨秋オーストラリアで開催された国際会議 (XRM 2014) には、Zeiss が装置を商業ベースに乗せるようになったことを示すポスター発表があったと聞く。そのような装置が普及してくれば、X線顕微鏡の利用実績が蓄積され、その本当の価値が理解され、生命科学への利用が定着する時が来るものと期待したい。

謝辞

本研究成果の中で、加道雅孝、岸本牧両氏 (日本原子力研究開発機構) との共同研究に対し、平成 26 年度文部科学大臣表彰を受賞する荣誉に恵まれた。共同研究者の方々に厚くお礼申し上げたい。

引用文献

- [1] R Feder *et al.*, *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 1192.
[2] K Shinohara *et al.*, *Photochem. Photobiol.* **44** (1986) 401.
[3] T Tomie *et al.*, *Science* **252** (1991) 691.
[4] W Gudat, In *Uses of Synchrotron Radiation in Biology* (ed. By HB Stuhrmann) (1982) 23.
[5] J Kirz *et al.*, *Quarterly Rev. Biophys.* **28** (1995) 33.
[6] D Weiß *et al.*, *Ultramicroscopy* **84** (2000) 185.
[7] X Zhang *et al.*, *J. Struct. Biol.* **116** (1996) 335.
[8] G Schneider, *Ultramicroscopy* **75** (1998) 85.
[9] K Shinohara *et al.*, *J. Synchrotron Radiat.* **3** (1996) 35.
[10] J Miao *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci USA* **100** (2003) 110.
[11] DA Shapiro *et al.*, *Nature Photonics* **8** (2014) 765.
[12] PA Takman *et al.*, *J. Microscopy* **226** (2007) 175.
[13] 矢田慶治, *電子顕微鏡* **26** (1991) 72.
[14] W Meyer-Ilse *et al.*, *J. Microscopy* **201** (2001) 395.
[15] H Ade *et al.*, *Science* **258** (1992) 972.
[16] KS Raines *et al.*, *Nature* **463** (2010) 214.
[17] 篠原邦夫、伊藤敦, In *極限状態を見る放射光アナリシス* (尾嶋正治編) (2002) 25.
[18] K Shinohara and A Ito, *J. Microscopy* **161** (1991) 463.
[19] J Wm McGowan *et al.*, *J. Cell Biol.* **80** (1979) 732.
[20] R Feder *et al.*, *Science* **197** (1977) 259.
[21] K Shinohara *et al.*, *J. Microscopy* **158** (1990) 335.
[22] Y Kinjo *et al.*, *J. Microscopy* **176** (1994) 63.
[23] Y Yamamoto and K Shinohara, *Anat. Rec.* **269** (2002) 217.
[24] M Kado *et al.*, presented at XRM 2014.
[25] PC Cheng *et al.*, In *X-Ray Microscopy* (ed. By G Schmahl and D Rudolph) (1984) 285.
[26] BJ Panessa-Warren, In *X-Ray Microscopy* (ed. By G Schmahl and D Rudolph) (1984) 268.
[27] S Suckewer *et al.*, *SPIE* **1140** (1989) 33.
[28] AD Stead *et al.*, In *X-Ray Microscopy III* (ed. By AG Michette *et al.*) (1992) 469.
[29] <http://ncxt.lbl.gov/?q=home>
[30] C Hagen *et al.*, *Ultramicroscopy* **146** (2014) 46.

★ご定年を迎えられて★

軟X線光学事始めの頃

東北大学多元物質科学研究所 教授 柳原美廣

1. はじめに

振り分けミラーを真空槽から取り出して見たところ、ミラーの光が当たった部分は茶色に変色し、うろこのようにひび割れ、盛り上がっていた。覚悟をしていたとはいえ、あまりの惨状に愕然とした。これは、フォトンファクトリー（PF）のビームライン 11A（グラスホッパー分光器）においてビームの供用が開始されてしばらくしてからのこと、即ち 1983 年であったと記憶している。当時の軟X線ビームラインは、偏向部からの放射光を振り分けミラーで分けて複数の実験ステーションに供給していた。従って、この振り分けミラーが光源からの放射光を初めに受けることになる。このミラーにどれだけの光がやって来るかは当時も計算で知ることはできた。しかし、それまで物性研の SOR-RING の経験しかない軟X線研究者にとっては、その影響、とりわけミラーが受けるダメージについては想像もつかなかった。そこで、当初は止むを得ず熔融石英の基板に白金を蒸着した反射鏡を使用したものである。その結果が、初めに述べた事態となって現れたのである。

ここにおいて、高輝度放射光用ミラーの開発の必要性を強く感じさせられた。この頃前後して PF の佐々木泰三先生から、「軟X線反射率計を作って光学素子の評価をしてみないか」と誘われた。ミラーの開発は放射光の発展には欠かせないことと思い、お勧めに従うことにした。これが、私が軟X線光学に取り組むことになったきっかけである。本稿では、この頃行った軟X線反射率計の製作と耐熱性ミラーの評価、および光学定数の決定に関する研究を簡単にご紹介したいと思う。高輝度放射光が普及する陰で行われた研究の歴史も知って頂くのは意義があると思うからである。

2. 軟X線反射率計の製作

実は、この問題がいずれ起こることは既に予期されており、PF の佐藤繁先生を中心にして放射光用耐熱性ミラーの研究が始められていた。実際、SOR-RING を使って SiC 試料の反射スペクトルも測定されていた[1]。しかし、このスペクトルには 10 nm より短波長のデータは無かった。そのため、そのような短波長の測定データと、反射率を高精度に測定・評価できる軟X線反射率計の製作が望まれていた。なお、余談であるが、耐熱性ミラーの研究には青木貞雄先生も参加しておられた。

軟X線に対する光学素子の反射率を正確に測るには、スレスレ斜入射の領域でも高精度で測定できることが必須である。そのような条件を満たすよう考慮して製作した軟X線反射率計の模式図を図 1 に示す[2]。試料ホルダーの回転軸と検出器取り付けアームの回転軸が延長線上で相互に一致す

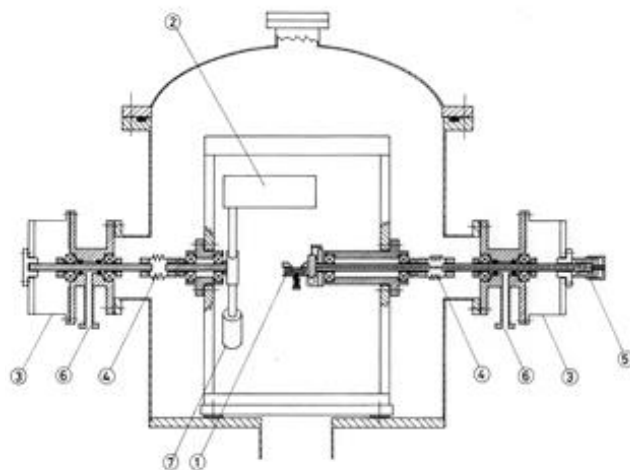


図 1 軟X線反射率計の正面模式図。

①試料、②検出器、③ゴニオメータ、④ペローズ、⑤試料押し下げ機構、⑥差圧排気口、⑦カウンターバランス。

るよう、枠構造の側面にそれぞれの取り付け穴を一体加工で開けた点が大きな特徴である。また、枠構造を真空槽内に置くことにより、排気やベキングで真空槽が歪んでも両回転軸への影響を防ぐこともできる。入射点付近での2軸のずれは30 μm 以下、また、2軸の傾きは 0.01° 以下であることを確認した。一方、ゴニオメータの高精度な回転角はペローズを介して回転軸に伝えられる。入射角の設定精度は30秒角である。試料面に接する試料ホルダーの試料抑えの面は試料の回転軸と正確に一致するよう調整し、スレスレ入射で測定の時も入射点が試料上でずれないようにした。余談ではあるが、その形から軟X線反射率計は「お釜」と呼ばれ、長らく親しんで頂いた。

3. 放射光用耐熱性ミラーの開発

強力な放射光を受けるミラーに求められる特性は、まず熱的に安定であるため、高融点であること、また、冷却によってミラーの形状を保たせるため、熱伝導度が高いことが挙げられる。更には、硬度が高く平滑な研磨面を得やすいことや、放射線損傷を受けにくいという点も考慮に入れる必要がある。これらを満たすものとして、次の3物質を候補に選んだ。即ち、SiC、TiC、及びWCの炭化物である。それらの諸定数を表1に示した。

表1 3つの炭化物の諸定数。

物質	融点 (°C)	熱伝導度 (W/mK)	硬度 (HV)	比重
SiC	2730	270	2300	3.2
TiC	3193	21	3200	4.9
WC	2870	121	1800	15.6

これらの光学的特性を明らかにするため、軟X線領域における光学定数を測定した。Henke のデータ [3] を利用することもできるが、化合物でもあ

り、やはり実測するに如くはない。BL-11Aにおいて製作した反射率計を用いて、入射波長を固定して入射角に対する反射率の依存性 ($R - \theta$ 曲線) を測定した。図2はCVD-SiCについての $R - \theta$ 曲線の測定例であり、図形記号で示した各点が測定値である [2]。それに対し、実線はフレネル反射率に表面粗さを考慮して計算したカーブフィッティングの結果である。反射率の低い入射角領域も高い領域と同等に評価するよう考慮している。4桁も反射率が低い範囲まで測定値と計算値がよく一致していることが分かる。これより光学定数 n (屈折率) と k (消衰係数) が誤差 2% で決定された。この光学定数を用いれば、反射率スペクトルを逆に計算で再現できる。その意味でも光学定数を決定するのは意義のあることと言える。

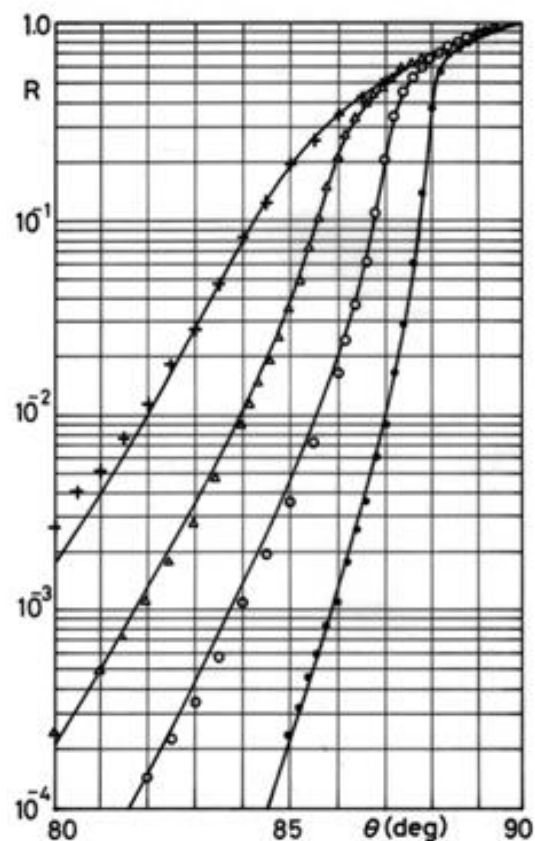


図2 CVD-SiC について入射光のエネルギー1000 eV (●)、700 eV (○)、500 eV (△)、350 eV (+) で測定した $R - \theta$ 曲線。実線はカーブフィッティングの結果を示す。

決定した光学定数 $\delta = 1 - n$ と k を入射光のエネルギーに対してプロットしたのが図 3 である [2]。決定した範囲は 80 eV から 1000 eV である。分かりやすくするため、データ点を直線などで結んだ。350 eV より高エネルギー側では両定数ともよく直線に乗っている。吸収端から離れば原子的な性質が顕著になるので、この結果は容易に理解できる。図 3 で顕著なのは、C K 吸収端及び Si $L_{2,3}$ 吸収端における段差や窪みの構造である。これらは反射スペクトルにおいて大きな変動となって現れ、反射鏡として用いるには却って不利になる。同様のことは、TiC における C K 吸収端や Ti $L_{2,3}$ 吸収端 (450 eV 付近) や WC における C K 吸収端や W M 吸収端 (400 - 600 eV) で顕著に見られた。

従って、これらの炭化物を反射鏡として用いるよりは、これらを基板とし、この上に金属を蒸着してミラーとして用いる方が合理的である。そこで、蒸着材料としてよく用いられる白金について次に測定した [5]。その結果、反射スペクトルには構造が少なく、反射材料として優れていることを確認できた。全反射臨界角 (斜入射) を θ_c とすると、 $\sin^2 \theta_c \approx 2\delta$ なので、 δ が大きいほど全反射鏡として有利である。3 つの炭化物の中で最も δ が大きいのは WC であるが、それより白金の方が有利であることも確かめた。熱伝導度の値から選べば、基板として SiC が最も有利である。全反射の点では SiC は最も不利であるが、基板として用いるなら問題にならない。その上、当時 SiC は産業的にも需要が増しており、大きなサイズ of 材料が入手しやすい環境であったことも幸いした。このようにして放射光用耐熱性ミラーの対策が立てられたことは、その後の高輝度放射光の発展を支えたと言っても過言ではない。基板材料の上に白金を蒸着するということは、結果を見れば何も目新しいことではないが、それを光学的に実証した点が重要であると考え。佐藤先生を中心に行われた耐熱性ミラーの開発が実を結んだわけであるが [6]、光学的計測・評価の点で当時貢献できたのは

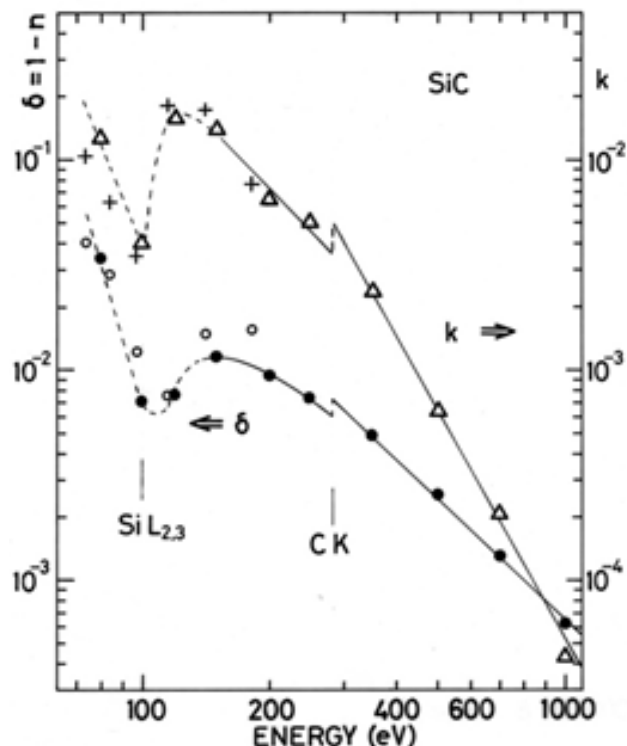


図 3 CVD-SiC について得られた光学定数 δ (●) と k (Δ) を入射光エネルギーに対してプロットしたものの。○及び+は Rife らのデータである [4]。

うれしかった。

余談であるが、東北大に移ってから、超薄膜の軟 X 線光学定数を精密に決定する研究を行い、白金についても測定する機会があった [7]。そのデータと比較すると、 δ と k 各々で少し食い違っていることが分かる。初めに測定した試料の表面状態が反射率測定に十分なほどの粗さではなかったことが主な原因である。しかし、スペクトルに関し当時下した結論は問題なかったことをお断りしておく。

4. 結びに

矢代先生より、定年退職するに当たり、「これまでの研究について (多層膜、軟 X 線顕微鏡) (仮)」という題で書いてほしいと依頼された。軟 X 線顕微鏡については本レターの No. 33 (2011 年) で既に紹介しており、また最新の情報についてはそれに関する研究者本人が書くのがふさわしいと思い、迷っていた。ちょうどそんな頃、最終講義の準備

をしており、私が軟X線光学に取り組むことになったきっかけを是非紹介したいと思うようになったのである。ご期待に添えず申し訳ないと思いつながら、矢代先生始め皆様の寛恕を乞う次第である。

参考文献

- [1] H. Sugawara, S. Sato, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **228** (1985) 549.
- [2] M. Yanagihara *et al.*, Appl. Opt. **25** (1986) 4586.
- [3] B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis, Atomic Data and Nuclear Data Tables **54** (1993) 181.
- [4] J. C. Rife and J. F. Osantowski, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **315** (1981) 103.
- [5] M. Yanagihara, M. Niwano, T. Koide, and S. Sato, Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) 666.
- [6] S. Sato, H. Maezawa, M. Yanagihara, *et al.*, Opt. Eng. **34** (1995) 377.
- [7] T. Maehara, M. Yanagihara, M. Yamamoto, and T. Namioka, Nucl. Instrum. Meth. **B74** (1993) 362.

会議報告 International Conference on X-ray Microscopy 2014

分子科学研究所 UVSOR 大東琢治

今回で12回目となる International Conference on X-ray Microscopy 2014 (XRM) が、南半球はオーストラリアのメルボルンの南に位置する、南半球最大の国際会議・展示施設、Melbourne Convention and Exhibition Centre で開催された。会場前には芝生が広がり、サイクリングやランニングに興じる人々も多く見られ、会場内部で開催されていた緊張感の高い会議とは対照的に、リラックスした印象を受ける立地にある。これまでの XRM は慣例的に 8 月初旬から中旬にかけて開催されてきたのであるが、そこは会議史において初となる南半球での開催。慣例通りならば彼の地では冬となる日程を、春先となる 10 月 27 日より 31 日までの 5 日間の開催と相成った。そもそも 8 月に行われてきたのは、放射光の運転停止期間や教育機関の夏休みに配慮したためであろうと思っているのだが、今回は異例となる 10 月開催ということで、通常業務を優先せざるを得なくなり、やむなく参加を断念したという声を筆者はちらほらと耳にした。

なお本稿に大きく先行して、KEK の武市泰男氏 [1] と JASRI の竹内晃久氏 [2] がそれぞれ、本会議の水をも漏らさぬ仔細な報告が上梓されているので、そちらを是非とも先にご一読戴きたい。後発の本稿において、諸氏と同じ事を記述したところで全く面白くはないし、落ち穂拾いにしても、はや会議録の出版もそう遠くない事であろう。そこで本稿の趣旨としては、やや客観性に欠け、視野が偏狭に過ぎるくらいがあるのは百も承知の上で、いち参加者としての会議の印象をお伝え出来ればと拙文にしたためた次第である。その点ご容赦願いたい。

本会議で俎上に上がった手法としては、Ptychography が最も目についた。本手法は特に走査型透過 X 線顕微鏡のシステムと相性が良く、

Advanced Light Source (ALS) では軟 X 線領域で 3 nm の空間分解能を実現したという報告が為されていた。また既に応用研究の発表も多く為されており、開発段階からはやユーザー利用のフェイズへと、大きく降りてきたという強い印象があった。この流れを後押しするかのように、再構成アルゴリズムのオープンソースの発表があり、かつての Computer Tomography と同様に、観察手法としては、開発段階を進捗しつつも、同時に規定種目的なレベルまで降りてきつつあると言えるのではないだろうか。筆者が ALS の関係者に個人的に尋ねてみたところ、ここ数年内には一般ユーザーに利用解放を行う計画との事であった。実験から再構成、そして本会議のサテライトワークショップでの主題として議論されていたビッグデータの問題まで、果たしてどの程度ユーザーフレンドリーに提供出来る技術となるものなのかは判らなかったが、次回以降の XRM において、応用研究の報告件数が一層増えていることであろうことは想像に難くない。



高野秀和博士（兵庫県立大学）の講演中。

近年急激な展開を見せている空間分解能については、Fresnel Zone Plate (FZP) を用いて 10 nm

台、或いはそれ以下の集光スポットサイズを達成したと言う発表が少なからず見られた。ついに軟 X 線領域の波長と同程度に至ったかという感慨と共に、それがまた、先に述べた Ptychography による分解能と比肩し得る値であることはなかなか興味深い。一般的なユーザーは、果たしてどちらの恩恵を先に享受する事になるであろうか。この一方で、その空間分解能を堅持出来るほどの安定性及び許容性が、光学系や試料にも等しく要求されているものと思うが、その辺りどの様に考えられているものか。なかなか表出する様な類い話では無いが、分解能がこれほどまでに到達しつつある今だからこそ、改めて浮上しつつある懸案事項である様に思う。

今回の XRM では、光学素子開発の報告群の中でも、Sakdinawat 氏 (SLAC) の V-MaCE 法による 100:1 という驚異的な高アスペクト比を有するナノ構造体の製作手法の発表は出色であった。この製作手法で、従来にはあり得なかった超高アスペクト比で、パターン間をランナーで繋ぐ事により支持体が無いフリースタANDINGの FZP やスパイラル FZP の製作を発表していたのは驚異であった。今回は製作のみで、実際に集光などを行った結果が見られなかったのは少々残念ではあったものの、そのインパクトたるや絶大である。特に低エネルギー領域では、支持体の吸収による入射 X 線の減衰が相対的に大きくなってしまうため、この技術によって光学素子が製作可能となることに因る恩恵は非常に大きい。一方でこの報告における X 線用光学素子は、この画期的加工技術の応用例の、あくまで氷山の一角ではないかと予想され得る。例えばマイクロマシーン (MEMS) の分野をはじめとして、興味深い応用は数多くあろう。ともすれば将来は XRM の範疇からは逸脱して行ってしまうのかも知れないが、そこはそれで、そう遠くない将来に見られるであろう成果が非常に楽しみな発表であった。

筆者は XRM に、2002 年に Grenoble で開催され

た第 7 回から継続して参加してきた経緯で強く感じているのが、応用研究発表の増加傾向である。特に今回印象的であったのが、2 次電池を対象として、走査型透過 X 線顕微鏡や Tomography、Ptychography を用いた研究成果であった。このような、特に産業界からの希求に向けた研究成果は、産業の場において実質的にどれくらいのインパクトを与えているものなのか。それはなかなか伺い知る事は叶わないが、X 線顕微技術が一部マニアのツールのみならず、実際に世間から期待される技術として展開しているという風潮は強く感じられる。今年より X-Radia が老舗の光学メーカーである Zeiss の傘下に入った事も、そのような事実を裏付けていると言えるのではないだろうか。それだけ X 線顕微を取り巻く世間的な認知や要求が、変化してきているという事であろう。

今回の XRM は、Chicago において 2010 年に行われた第 10 回の開催以来、3 年周期から 2 年周期へと変更になって以降の 2 回目の開催となる。開催周期が短くなった事で会議の密度が低下するのではないかという懸念は、結果としての 300 人超の参加者と、発表の質量が杞憂であることを如実に表している。

本会議の運営、内容共に素晴らしいものであった事については異論の余地が無い一方、Early Bird 登録で 990 豪ドル、学生参加でも 750 豪ドルにも上る参加登録費は如何なものかと思われた。コーヒーブレイク時にはバリスタを、ポスターセッション時にはビールとオードブルを欠かさない会議を開催するのは大変結構な事であり、筆者に限らずこのような運営方針を楽しんだ参加者は少なくないと思うのだが、一方で高騰する参加費は無用に参加者の敷居を高くしまいかと苦言を呈する次第である。

そして次回は 2016 年に、英国は叡智の拠点、Oxford での開催である。筆者は本稿を執筆しながら、既に開催が待ち遠しくなっている事に気付くのである。

本稿における写真は、上杉健太郎氏 (JASRI/SPring-8)のご厚意により提供頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

[1] 武市 泰男、木村 正雄、*放射光*, **28**, (2015), 31-32.

[2]

<https://user.spring8.or.jp/sp8info?download=32434>



編集部より

今号より新たに宇都宮大学工学部の東口武史先生に編集部にご加入いただきました。名古屋大松本浩典先生の宇宙・天文分野に加え、EUV 分野の先生に加わっていただいたことで、今後ますます幅広い分野の記事をご提供できるようになると期待しております。今後も本誌のご支援・ご協力をよろしくお願い申し上げます。
(文責・矢代航)

【第十三回X線結像光学シンポジウム開催のご案内】

会期：平成27年11月16日（月）～18日（水）

場所：名古屋大学野依記念学術交流館

【メーリングリスト（登録メールアドレスの変更などについて）】

本ニュースレターは原則、メーリングリスト (xio-ml@prec.eng.osaka-u.ac.jp) によるメール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部 (xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp) までご連絡ください。メーリングリストは、研究会のお知らせなど、会員全員に情報を配信したいときなどにも便利なので、積極的にご活用ください。

X線結像光学ニュースレター
No. 37 (2013年4月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 東北大学 柳原美廣)
編集部 山内和人 (大阪大)、齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、
松本浩典 (名古屋大)、東口武史 (宇都宮大)
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成27年度X線結像光学研究会運営組織』

- ・代表者：柳原美廣 (東北大)
- ・副代表者：籠島靖 (兵庫県立大)
- ・事務局担当者：豊田光紀 (東北大)
- ・編集局責任者：山内和人 (大阪大)
- ・編集局委員：齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、松本浩典 (名古屋大)、東口武史 (宇都宮大)、柳原美廣、籠島靖、豊田光紀
- ・幹事：

伊藤 敦 (東海大)	太田 俊明 (立命館大)	籠島 靖 (兵庫県立大)
加道雅孝 (原研)	木下 博雄 (兵庫県立大)	國枝 秀世 (名古屋大)
鈴木 芳生 (JASRI)	田原 譲 (名古屋大)	常深 博 (大阪大)
難波 義治 (中部大)	西村 博明 (大阪大)	羽多野 忠 (東北大)
兵藤 一行 (KEK)	牧村 哲也 (筑波大)	百生 敦 (東北大)
森田 繁 (核融合研)	山内 和人 (大阪大)	柳原 美廣 (東北大)
渡辺 紀生 (筑波大)		
- * 新任：
 - 加道雅孝 (原研)
- ・特別顧問：
 - 波岡武 (東北大名誉教授) 山下広順 (大阪大名誉教授) 青木貞雄 (筑波大名誉教授)