

X線結像光学ニューズレター

No. 45 2017年4月発行

4枚の形状可変鏡に基づく開口数可変集光光学系を用いた回折限界X線集光

大阪大学大学院工学研究科

松山智至

X線集光ビームをその場で自由自在に制御（形、大きさ、焦点位置、開口数など）することができれば、どんなにX線実験が簡単に、便利になるかと考えたことはないだろうか？しかし、実際にそのようなことをしたければ、通常は複数の集光光学系を切り替えて使わねばならない。経済的、心理的な障壁は非常に高い。この問題に対する答えとして、形状を自由に変えることができるX線ミラー（つまり、形状可変ミラー）の使用が挙げられる。形状可変ミラーの利点は、上記の点だけでなく、作製が難しいミラーを低コストかつ高精度に実現できる点や、補償光学の適用もカバーできるからである。このような理由から形状可変ミラーの開発は国内外で1990年代ごろから精力的に進められている[1]。すでに、ビームライン上流に設置し、ビーム径をほどほどに制御（穏やかに集光したり、発散を抑えたりする目的で利用）できるものが使われ始めているが、未だに理想的なナノ集光を形成できるほど精度の高いものは開発できていなかった。

この問題を解決するために、我々は超高精度な形状可変ミラーの開発に挑んだ。さらに、これを用いて焦点位置を変えずに集光ビームサイズを自由に変更できる光学系（詳細は後述）の実現を目指した。この光学系は将来の多機能顕微鏡開発を念頭に置いたものである。例えば、走査型顕微鏡と回折顕微鏡を組み合わせることもでき、ユーザーは回折顕微鏡で試料の詳細な構造（電子密度分布）を知ったうえで、ある特定箇所周辺を走査型X線顕微鏡でナノX線分析できるようになる。SPring-8-IIによって高輝

度化が進めば、このような多機能顕微鏡を用いて、実用的な試料を多方面から調べ尽くすことができるため、近い将来有力なツールとなることが期待される。

本プロジェクトのキーテクニックの一つは高精度な形状可変ミラーとその制御法である。形状可変ミラーは一般にベント式[2]とバイモルフ式（圧電素子）[1]に大別できる。前者はミラー基板をアクチュエータで曲げるシステムであり、後者はミラー基板と圧電素子を貼り合わせ（バイモルフ構造）これを変形させるシステムである。この構造の違いは、変形によって作り出せる形に影響を与える。前者は凹面や凸面といった全体形状しか作れない一方で、後者は自由形状を作り出せる。我々は自由な形状制御と精度を追い求めた結果、バイモルフ式を選択した。

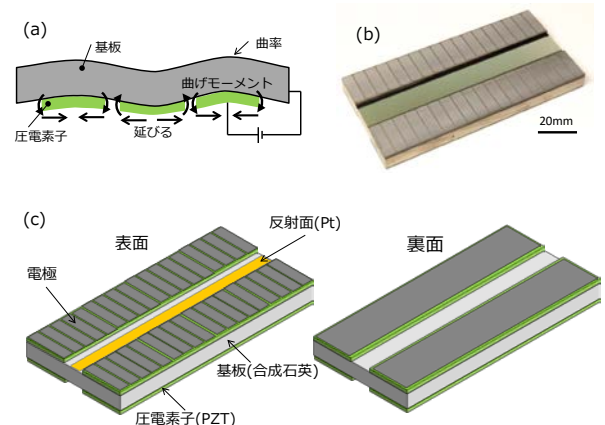


図1 形状可変ミラー [3]。(a) 変形原理。開発したミラーの (b) 写真とその構造の (c) 概略図。

バイモルフ式の形状可変ミラーの原理を図1 (a) に示す。基板に貼りつけられた圧電素子は電圧印加によって伸縮し、これによって基板に曲げモーメントが与えられる。この曲げモーメントは、基板をある曲率を持つように曲げることができ、印加電圧を調整することで自由に曲率を制御できる。自由局面を作り出すためには複数の曲げモーメントを与える必要があるが、我々は圧電素子に18個の電極を作製し、自由度の高い形状へと曲げられるように設計した(最大9個のサインカーブを形成可能)。図1 (b)

(c) に実際に開発した形状可変ミラーの写真と模式図を示す。表裏に計4枚の圧電素子プレートが張り付けられている。表側の圧電素子は18個の電極を持ち、細かな形状を生み出せる。一方、裏面の圧電素子は1つの電極を持ち、大きな2次関数状形状の形成を担当する(集光鏡として一般に用いられる形状は楕円であって、主には2次関数状の形状であるため)。電極へはバネを使って高圧電源とのコンタクトをとっており、これによる影響が最小となるようにばね定数の小さいバネを選定した。可視光干渉計を使ったデモ実験では、誤差2nm以下で入力した目標形状へと変形できることを確認している [4]。

形状可変ミラーは、必ず形状を知る術とセットで使用しなければその性能を最大限引き出すことはできない。可視光干渉計、オートコリメータ、X線干渉計などが提案されているが、我々は in-situ、高性能、簡便、自動化が容易等の理由から、X線ペンシルビーム法を採用した(図2 (a)) [5, 6]。本手法は、X線を使用した角度計測法である。X線の短波長性と高い透過能ゆえに回折や空気の影響をほとんど受けることなく直進するため、可視光の同型の手法と比べて、非常に高い精度を実現できる。我々の場合、焦点面に間接撮像型のX線カメラを配置し、X線ビームの重心をサブピクセル分解能で計測した。これによってミラー上の各点を反射したX線の軌道のずれを精密計測した。本手法の性能評価を実施したところ、X線の軌道を10nmで計測できることを確認している(図2 (b)) [5]。これはスロープエラーにして50nrad程度で、形状誤差では0.25nm

程度に相当する。形状可変ミラーを制御するためには十分な精度である。

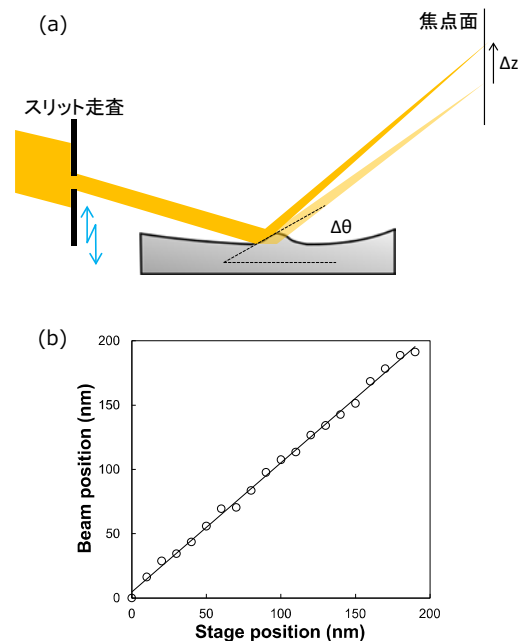


図2 X線ペンシルビーム法。(a) 原理。(b) 用いたX線カメラの性能評価結果 [5]。X線カメラ前にピンホールを設置し、これを動かした距離とカメラで検出されたビームポジションの変化をサブピクセルで検出した。

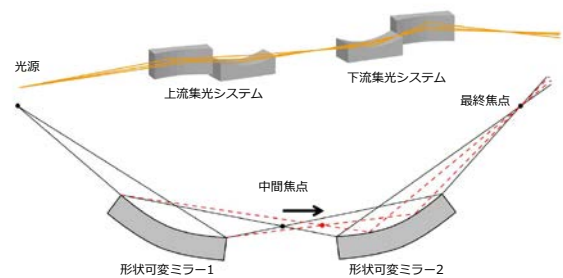


図3 開口数可変集光光学系。ミラー変形によって中間焦点位置をシフトさせることで、最終焦点の位置が不動のまま、開口数が増える。

次に、ビームサイズ可変(開口数可変)集光光学系のデモ実験について解説する。本光学系は上述したように最終焦点面を固定しながら開口数を制御できる集光光学系である(図3)。2組のKBミラー(2枚の形状可変ミラーで構成)がタンデムに組み合わされている。上段と下段の形状可変ミラーは、それぞれ、光源、中間焦点、最終焦点を焦点とするよ

うな楕円形状である。ミラー形状をうまく変形させることで、中間焦点の位置を光軸に沿って移動させることができ、これによって開口数に変化する（図3の点線の光線に注目）。実験は SPring-8 BL29XULの第三実験ハッチ（光源から92 m）で10 keVのX線を用いて行った。形状可変ミラーから約50 m上流のTCスリットを仮想光源とし、X線を集光した。形状可変ミラーはX線ペンシルビーム法を使って、最適に調整された。図4(a)は形状可変ミラーの調整前後の典型的な形状誤差を示している。なお、2次関数状、3次関数状の形状誤差はミラーのミスアライメント（デフォーカス、入射角誤差）を意味するため、変形ではなく、アライメントの調整でこれを除去した。グラフより約2 nm精度で調整できた[3]。Rayleighの $\lambda/4$ 則で予想される許容誤差は約4 nmであるので、十分な精度である。

集光プロファイルの計測は、暗視野ワイヤスキャン法（ $\phi 50 \mu\text{m}$ 金ワイヤ）によって実施された。最終焦点の集光プロファイルを図4(b)に示す。設定した開口数に応じ、ビームサイズが変化していることが分かる。計算値との比較からほとんど回折限界に到達していることを確認した[3]。以上の実験からX線領域では初めてビームサイズ可変集光を達成した。

本システムの課題は、形状可変ミラーの形状の安定性である。圧電素子はもともと素子内部に分極が電場に応答しにくい領域を持つ。これが時間とともに分極が進み、それにつれて形状がドリフトする。このような現象は本実験でも見られ、6時間で焦点位置が $270 \mu\text{m}$ 変化したこともあった（もっとも大きな変形は、裏面の単電極を持つ圧電素子が担うため、ここがドリフトすることで曲率が変化し、焦点距離が変化した）。現在、この問題を解決できる新型形状可変ミラーの研究を進めている。このような形状可変ミラーが実現できれば、ユーザーフレンドリーな多機能X線顕微鏡が現実のものとなり、ユーザーの望み通りの分析・観察が実施できるようになると期待している。

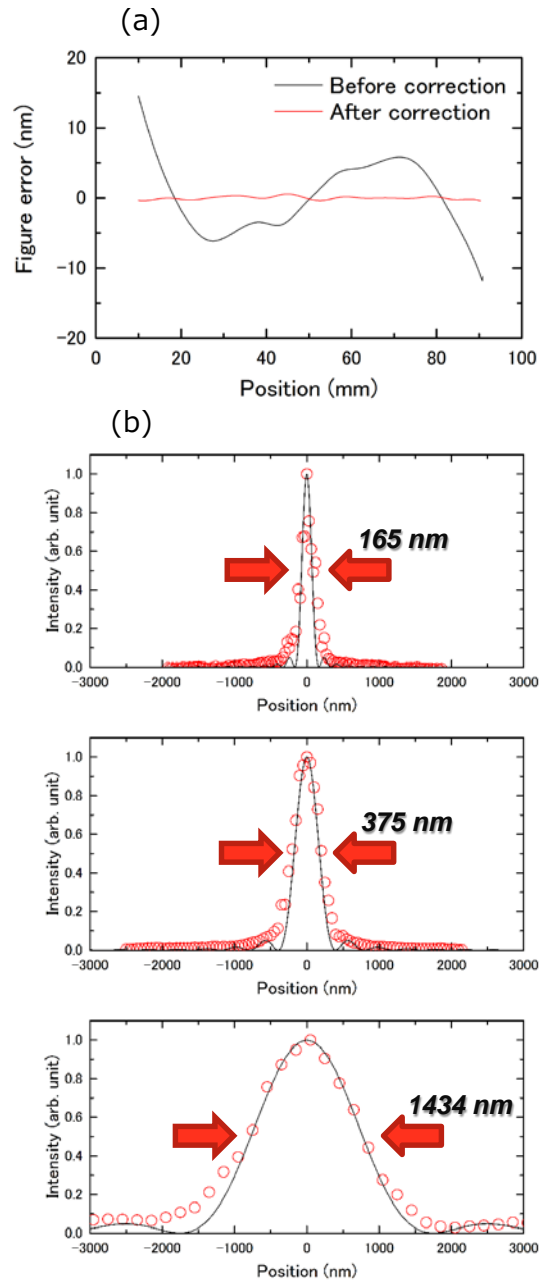


図4 開口数可変X線集光の結果 [3]。(a) 典型的なミラー変形の調整結果。(b) 開口数を変化させた場合の最終焦点における集光強度プロファイル。実線は計算結果、赤○は実験結果。

謝辞

本研究は、科学技術機構（JST）戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）「コヒーレントX線による走査透過X線顕微鏡システムの構築と分析科学への応用」（研究代表者：大阪大学 山内和人教授）の研究課題として実施された。本内容は、大阪大学

山内和人教授、北海道大学 西野吉則教授、国立遺伝学研究所 前島一博教授、国立国際医療研究センター 研究所 志村まり室長をはじめ数多くの研究者・技術者・学生が共同で実施した成果である。

参考文献

- [1] J. Susini *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **66** (1995) 2229.
- [2] O. Hignette *et al.*, *Proc. SPIE* **4499** (2001) 105.
- [3] S. Matsuyama *et al.*, *Sci. Rep.* **6** (2016) 24801.
- [4] H. Nakamori *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **710** (2012) 93.
- [5] T. Goto *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **86** (2015) 43102.
- [6] T. Goto *et al.*, *Synchrotron Radiat. News* **29** (2016) 32.

1. はじめに

「形は機能に従う」とは、シカゴ派の建築家ルイス・サリヴァンにより提唱された、建築デザイン時の指針である。この言葉は、生物学者ダーシー・トンプソンが自著「On Growth and Form」の中で力学現象に見事に適った生物構造の例を示してからは、工業デザイナーが「生物構造をお手本に製品をデザインしよう」的な意味で使われるようになった。言葉自体はラマルクの要・不要説に端を発する言葉ならしく、由来はともあれ現在の生物学者にもよく知られ、引用される[1]。参考論文 1 はオルガネラ研究に於いてこの言葉がまだ生きている事を示しているが、言葉とは逆に、明らかになった機能から形を推測していると考えられる例も多い。

考えるに、その一因は可視顕微鏡の空間分解能にあり、我々が軟X線を用いて生物細胞を撮像するのも、なんとかオルガネラの形を明らかにしたいと考えてのことだ。しかし、軟X線による生物細胞像にはひとつの問題がある。マウス 3T3 細胞を撮像した

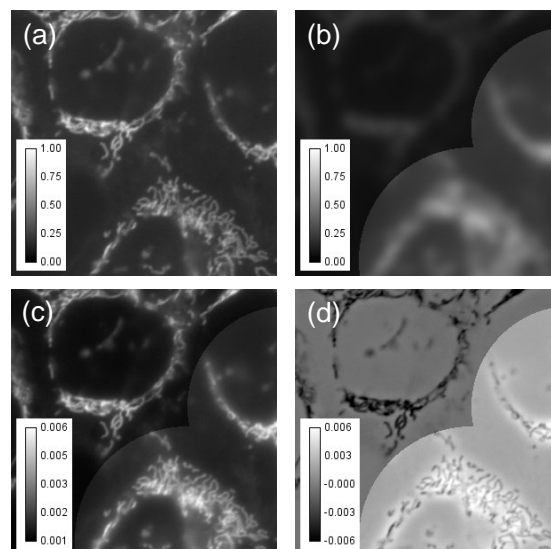


図2 主成分分析の適用例。(a) 軟X線像および(b) 蛍光像を模した元画像、適用の結果得られた (c) 第一固有画像、(d) 第二固有画像。

初期の軟X線像には多くの細かなオルガネラが写っているが、オルガネラの同定はほとんどされていない[2]。顕微鏡開発者には如何に細かな構造がコントラスト良く写ったかが重要なので区別がなくても良いが、生物学者にはどの部分が何のオルガネラを指すのかが分からず軟X線顕微鏡に関心を寄せない原因となる。

現在の標準的なオルガネラ同定法は、オルガネラ固有のタンパク質に蛍光色素を修飾し、像中の蛍光の有無でオルガネラを判別する[3]。最も信頼されている同定法であるにもかかわらず、先のサリヴァンの言葉を信奉する生物学者には、この蛍光法も不満であるらしい。というのは、観察されたオルガネラの形状は蛍光色素がどの程度オルガネラに忠実に付着しているかに依存するためである。以上から著者は、オルガネラを同定しつつその形状を正確に知りたいという需要は高い、と考えている。

主成分分析は、データ間の類似性を数値的に見

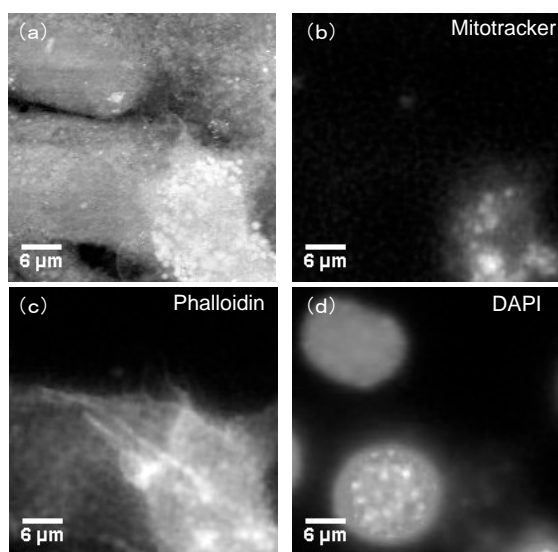


図1 同じマウス精巣ライディッヒ細胞の軟X線像 (a) と各種蛍光像 (b) ~ (d)。

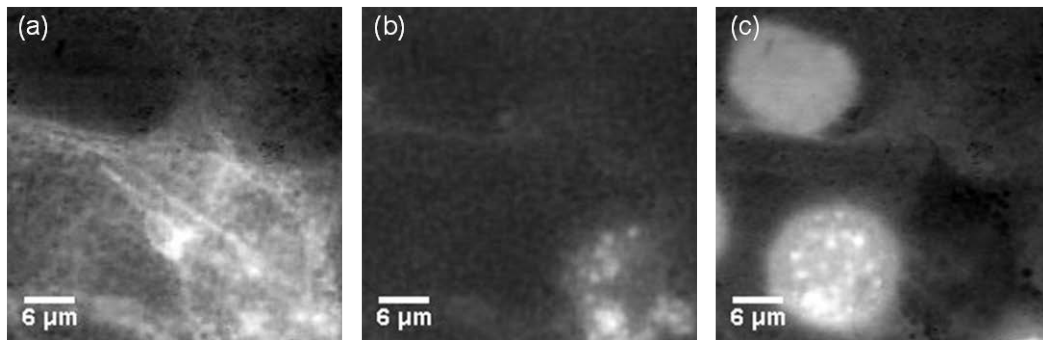


図3 図1に示した軟X線像と各蛍光像に主成分分析を適用した結果。それぞれ(a) アクチン、(b) ミトコンドリア、(c) クロマチンの分布を表わす。

け出す手法のひとつで、画像解析に適用した場合には画像間に共通するパターンを明らかにすることが出来る[4]。本稿では、空間分解能の高い「水の窓」波長域で得られた軟X線顕微像とオルガネラの同定のための可視蛍光像に主成分分析を適用し、オルガネラ構造の同定とその詳細な形が同時に決定できないかどうかを探ることにした。

2. 試料と方法

2-1. 軟X線像と蛍光像の取得方法

軟X線画像は、レーザ生成プラズマ (LPP) 光源を用いた密着法により得た。プラズマ励起光源には、パルス持続時間 600 ps、出力エネルギー 20 J/pulse を有する Nd: ガラスレーザを用いた。プラズマターゲットには 200 μ m 厚の金箔を用いた。

感光材には、厚さ 500 nm のポリメチルメタクリレート (PMMA) をガラス板上に塗布して用いた。マウス精巣ライディッヒ細胞を感光材上で 2~3 日間培養し、膜表面に密着させた後、Phalloidin、MitoTracker、および DAPI の蛍光色素で染色した。蛍光顕微鏡により細胞骨格、ミトコンドリアおよびクロマチンの像を得た後、200 nm 厚の Si_3N_4 膜により封入し、軟X線撮像を行った。蛍光顕微鏡観察と軟X線撮像間の所要時間は、約 10 分であった。

軟X線で露光した後、次亜塩素酸ナトリウム (NaClO) ですすいで細胞を除去し、メチルイソブチルケトン (MIBK) とイソプロピルアルコール (IPA) との混合溶液で現像した。現像された感光材表面の凹凸を原子間力顕微鏡を用いて読み取り、軟X線像

とした。得られた像から推定した空間分解能は約 90 nm であった[5, 6]。同じ領域で得られた軟X線画像と蛍光画像を図1に示す。

2-2. 主成分分析法による共通領域の抽出

2つの画像に主成分分析を適用すると、画像の分散を最大にする軸とその軸に直交し分散が最小となる軸の2つの軸に沿った画像が得られる。主成分分析はデータ依存性が高く、得られた軸の解釈はデータ毎に行う必要がある[4, 7]。これを避け、分散が最少となる軸が2つの画像が同程度に寄与する共通部分を常に指すためには、規格化を要する。

規格化法を探るため、まず同じ画像から適用しようとする軟X線像と蛍光像に相当する空間分解能とコントラストを持つ画像を作成し、それらに主成分分析を適用した。次に、得られた画像が元画像の共通部分を指すかどうかを比較検討し、規格化方法の優劣を判定した。

その結果、各像のピクセル値が最小値を0、最大値を1となるように規格化すると最も良い結果が得られた。図2に例を示す。図2(a)と(b)は、それぞれ軟X線像、可視蛍光像を再現するように作成した画像で、図2(c)と(d)は、(a)と(b)に主成分分析を適用して得られた第一固有像と第二固有像である。元画像と比べると分かる通り、第一固有像は元画像の平均像となっており、第二固有画像は2つの元画像の共通部分である。

第二固有画像を示す新しい軸は、その値の分布が最小となるように選ばれる。値の正負は2つの画

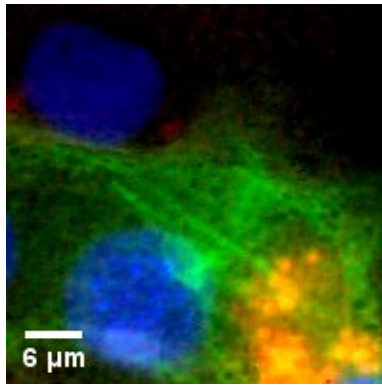


図 4 主成分分析の結果を疑似カラー化した合成像。緑がアクチン、赤がミトコンドリア、青がクロマチンの分布を表わす。

像に共通する構造が元画像のどちらに近いのかを示し、図 2 (d) の場合、白い「+」の領域は図 2 (b) よりの構造を表し、黒い「-」の領域は図 2 (a) よりの構造を表す。符号がどちらの構造を表すのかは元画像に依存するため、解析して得られた画像毎に判断する必要がある[4]。

3. 蛍光像と軟 X 線像への主成分分析の適用

2-1 節により得られたマウス精巣ライディッヒ細胞の蛍光像と軟 X 線像に、2-2 節で示した画像処理を行った。得られた第二固有画像（共通構造）を図 3 (a)、(b)、(c) に示す。それぞれ Phalloidin 染色蛍光像と軟 X 線像、MitoTracker 染色蛍光像と軟 X 線像、DAPI 染色蛍光像と軟 X 線像との第二固有画像を表している（以下、それぞれ Phalloidin \otimes SX 像、MitoTracker \otimes SX 像、DAPI \otimes SX 像と略記）。さらに各構造の分布の相互の関係を調べるために固有画像に着色し、重ね合わせた画像を作成した。得られた結果を図 4 に示す。図 1 (a) と比較すると、軟 X 線像から蛍光像に写っていない構造が消え、それぞれの構造の帰属がはっきりとした。

画像間の類似度は、画像における空間周波数の分布を示すパワースペクトルにより、定量的に比較することができる[8]。図 3 の各画像のパワースペクトルを計算し、元画像と比較した。MitoTracker 蛍光画像と Phalloidin 蛍光画像の 2 つの場合について、軟 X 線像、蛍光像、蛍光像 \otimes 軟 X 線像の 3 つのパワ

ースペクトルを計算し比較した結果を図 5 に示す。スペクトルは最低空間周波数での強度で規格化した。

図 5 から、Phalloidin 染色の場合は、第二固有画像のスペクトル曲線は蛍光画像と軟 X 線像のスペクトル曲線の間にある。これは、蛍光像で見られる構造が、軟 X 線像中のより細かい構造と相関が高いことを示している。一方 MitoTracker 蛍光画像と MitoTracker \otimes SX 像のスペクトル曲線はほぼ同じであり、得られた第二固有画像はほぼ蛍光画像と同じであることを示している。結果を割愛したが、DAPI 染色の場合は MitoTracker と同じ傾向を示し、得られた第二固有画像のスペクトル曲線はほぼ蛍光画像のスペクトル曲線とほぼ同じであった。

4. 議論

パワースペクトルは、空間周波数の値が高くかつその値が大きいときに、より細かな微細構造が画像中に含まれていることを示す。従って元々の空間分解能を反映するとき、高空間周波数側の値は軟 X 線像では強く蛍光像では低いと予想される。また、両者の画像を用いて得られる主成分分析の第二固有画像のパワースペクトルは、軟 X 線像と蛍光像の値の間のどこかに分布し、値が軟 X 線像に近づけば近づくほどより細かい構造が同定されたことを示す。

図 5 のスペクトル曲線から、同定された共通構造が微細構造を含む場合と、そうでない場合があることが分かる。図 5 (a) の Phalloidin \otimes SX 像の場合、得られた第二固有画像のパワースペクトル曲線は（図 5 (a)）蛍光染色像より高い値を示し、得られた共通構造がより高い空間分解能で同定できたことを示している。後者の例は図 3 (b) の MitoTracker \otimes SX 像の場合で、得られたパワースペクトル曲線は元の蛍光画像のそれとほぼ同じ形状を示した。これは、可視像より空間分解能の高い軟 X 線像であっても、すべてのオルガネラ構造が高い空間分解能で写るわけではないことを示している。

第二固有画像中のアクチンのみが軟X線像をより反映する理由の一つとして、アクチンの細胞中の分布が考えられる。ライディッヒ細胞は細胞を拡げようとする傾向を持ち、その中でアクチンは細胞を押し広げる役割を果たす。結果として周辺に大きなオルガネラがない中にアクチンだけが存在する状況になっていると考えられる。また吸収コントラストによる軟X線像はオルガネラの密度差を反映するため、周辺に特に大きなオルガネラ構造がなくアクチンだけが密度の高い構造である状況は、アクチンだけが軟X線によく感光する理由となる。以上から、アクチンが他のオルガネラに比べより鮮明に観測され、他のオルガネラが存在しにくい細胞末端部でよく一致したと考えられる。

5. まとめ

Pharoidin、MitoTracker、DAPIの3つの蛍光染色剤を用いて染色したマウス精巣ライディッヒ細胞の蛍光像を撮像し、その直後に「水の窓」波長域を用いた軟X線像の撮像を行った。得られた4枚の画像に主成分分析法を適用し、共通構造を反映する第二固有像を得た。また2つの像の間に共通性のない構造を効率的に取り除くことができることを示した。更に第二固有像と元画像のパワースペクトルを比較し、オルガネラに応じて軟X線像中に写る微小構造に差があることを見出した。

今回の結果は、同じ試料を複数の顕微鏡で観察する「相関顕微法」により、像単体で得られる情報に比べより多くの情報が得られることを示している。この手法は、単に生物細胞のみならず、他の複雑系物質の画像にも容易に応用できるであろう。

謝辞

本研究は東北大学の根市侑太郎氏、量研機構の加道雅孝博士、岸本牧博士、奈良女子大学の青山雅人博士、安田恵子准教授、保智己教授との共同研究です。また主成分分析に関して分子科学研究所の大東琢治博士にご教示頂きました。合わせて感謝いたします。

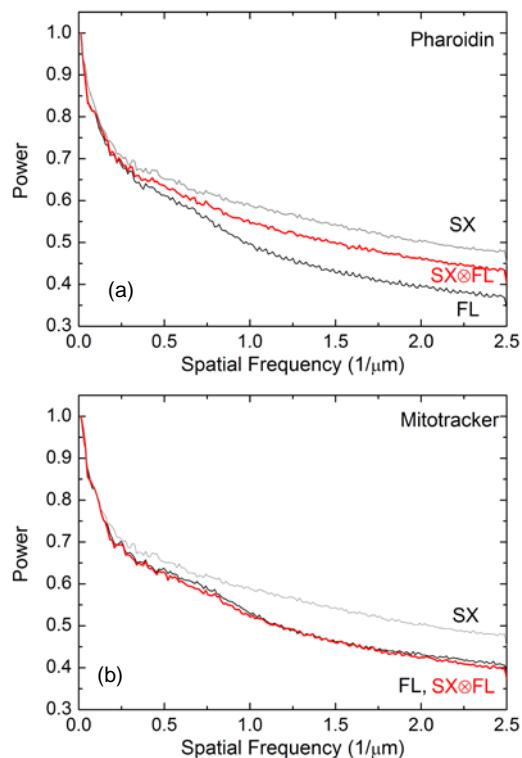


図5 (a) Pharoidin 染色、(b) MitoTracker 染色の場合のパワースペクトルの比較。図中、FL は蛍光像、SX は軟X線像、SX⊗FL は第二固有画像を示す。

参考文献

- [1] C. Wang & R. Youle, *Nature* **530** (2016) 288–289.
- [2] W. Meyer-Illse, D. Hamamoto, A. Nair, S. A. Lelievre, G. Denbeaux, L. Johnson, A. L. Pearson, D. Yager, M. A. Legros and C. A. Larabell, *J. Microscopy* **201** (2001) 395–403.
- [3] B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, D. Morgan, M. Raff, K. Roberts and P. Walter, "Molecular Biology of the Cell 6th." New York, Garland Science (2014) Chap. 9.
- [4] S. Konishi, "Introduction to Multivariate Analysis" in Japanese, Tokyo, Iwanami shoten Publishers (2010).
- [5] M. Kado, M. Ishino, S. Tamotsu, K. Yasuda, M. Kishimoto, M. Nishikino, Y. Kinjo and K. Shinohara, *IEEJ Trans. EIS* **130** (2010) 1774–1778.
- [6] S. Sayre, J. Kirz, R. Feder, D. M. Kim and E.

- Spiller, *Ultramicroscopy* **2** (1977) 337–349.
- [7] L. Sirovich and M. Kirby, *J. Opt. Soc. Am. A* **4**, (1987) 519–524.
- [8] W. Burger and M.J. Burge, "Digital Image Processing: an algorithmic introduction using Java", New York, Springer, (2010) 339.

International Conference on X-ray Microscopy (XRM2016)の会議報告

公益財団法人 高輝度光科学研究センター 星野真人

13 回目の開催となったX線顕微鏡国際会議 International Conference on X-ray Microscopy (XRM2016) がイギリス・オックスフォードで開催された。会議は、2016年8月15日から19日までの日程で、University of Oxford の The Mathematical Institute という建物で行われた。今回の会議の参加者は、380人以上(主催者発表)で、発表申し込み数は330件に及んだとのことである。オーラル発表は、計22個のセッション(内14個の平行セッション)で65件の発表があり、ポスター発表は258件にのぼった。図1は、会場前で撮影されたXRM2016参加者によるグループフォトである。なお、手前の3名は、X線顕微鏡分野を創成期から支えてきたJ. Kirz氏、G. Schmahl氏と、Conference ChairのC. Rau氏である。

さて、本題の会議報告であるが、会期中に報告された最近のX線顕微鏡分野における研究動向や最新情報について、いくつかピックアップして報告する。X線顕微鏡における研究分野としては、光源や光学素子、検出器といったハードウェア面の開発や進捗に関するものから、計測ツールの一つとしてのX線顕微鏡のアプリケーションに関するものまで多岐にわたる。

まず、新しい次世代放射光施設のコミッショニングに関する報告として、Lund Universitet の Y. Cerenius 氏よりスウェーデンの MAX IV の状況に関する報告があった。ビームラインは計測種類ごとに大別されており、例えば NanoMAX ビームラインでは、硬X線ナノプローブを用いた計測(STXM、XRF、CDIなど)に特化していることが紹介された。現在はコミッショニング段階で、2018年度にかけて段階的にコミッショニングしていくとのことである。紹介された各ビームラインの計測手法を見ると、次世代の放射光施設らしく、ナノ集光や CDI、タイコグラフィなど、光源の空間コヒーレンスを利用した計測

を前面に押し出しているのが印象的であった。一方で、実験室規模の高輝度光源に関する報告では、ハイパワーレーザー逆コンプトン散乱を用いた光源として、Munich Compact Light Source (MuCLS) の状況が Technische Universität München の M. Dierolf 氏より報告された。光源のコンセプトは、「小型の放射光」であり、現状で 3×10^{10} photons/sec 程度のビームフラックスが得られているとのことである。

次に、X線顕微鏡における光学素子に関する報告について紹介する。まず、全反射ミラー製作技術において世界をリードしている大阪大学の山内教授より、以前より開発を行っている Advabced KB ミラーを用いた結像型顕微鏡の現状や問題点に関する報告があった。現状では、50 nm の L&S パターンまで解像できているということであるが、高分解能計測を実現する上で重要な要素である「高倍率化」に関する問題が指摘された。基本的には試料と検出器間距離を長く設定することにより、高倍率光学系を実現することができるが、よりコンパクトな光学系で高倍率を達成するための取り組みとして、これまでの Wolter I 型配置から Wolter III 型配置を採用した光学系の開発を進めているとの報告があった。現状では、結像光学系ではなく、集光光学系ではあるが、Wolter III 型配置における集光を達成しているとのことである。

一方で、回折型の光学素子としては、Multilayer Laue Lens (MLL) の実用利用として、Brookhaven National Laboratory の H. Yan 氏より、MLL を用いた空間分解能 20 nm での硬X線ナノプローブによるマルチモダルイメージングに関する報告があった。スペクトロスコピックイメージングをはじめ、ナノトポグラフィへの応用展開も示唆された。

空間的な分解能を追求する一方で、光源性能や計測手法の高効率化が実現されてくると、時分割計測のような高速イメージングで量産される、いわゆる

ビッグデータに関する取り組みについても重要な検討項目となる。このようなビッグデータに関する取り組みとして、Paul Scherrer Institute の C. Schlepütz 氏より、SLS の TOMCAT ビームラインで開発された GigaFRoST (Giga Fast Readout System for Tomography) に関する報告があった。8 GB/sec の転送レートを有することで、2分間で1 TB 分のデータ取得が可能とのことであり、20 Hz の時間分解能で X 線マイクロ CT 計測が行えることが紹介された (1CT 計測あたり 50 ms の測定時間)。一方で、繰り返し現象に対しては、ゲート式の CT 計測技術を適用することにより、kHz オーダーの時間分解能でハエの羽ばたきのメカニズムを 3 次元で解析できることが紹介された。

新規性のある光学素子や計測システムに関する提案では、PSI の M. Kagias 氏により、同心円の微小パターンを平面状に多数配置した素子が提案され、シングルショットで、試料からの散乱を方向性にとられることなく、全方位でイメージングすることができる計測手法の開発についての報告がなされた。小角散乱のイメージングでは、これまで回折格子を用いたものが報告されているが、新規提案手法では、試料を面内回転させたり、あるいは回折格子の配向を変えることなく、試料の微細構造の配向に依存した散乱イメージングが行えることが示された。なお、Kagias 氏の提案に対しては、若手研究者の優秀発表に対して贈られる Werner Meyer-Ilse Memorial Award が授与された。

おわりに、筆者は 2010 年のシカゴでの XRM 以来、6 年ぶりの参加であったが、以前のように、X 線顕微鏡での世界最高分解能に対してしのぎをけずるような発表件数は少なくなってきた印象を受ける。言い換えれば、数 10 nm~50 nm の空間分解能での X 線イメージングは、日常的となっており、X 線顕微鏡という一つの計測ツールが確立されたという印象である。しかしながら、回折限界での X 線イメージングが日常的に可能になるためには、まだまだ課題も多く、それらの実現のために、各研究分野の今後の発展に期待したい。

なお、次回の XRM 国際会議は、カナダの Saskatoon で 2018 年 8 月 19 日から 24 日の日程で行われる。また、次々回の開催地は、投票の結果、台湾で開催されることが決定した。台湾での開催は、2005 年の姫路、2012 年の上海に次いで、アジアでは 3 回目の開催である。



図 1 University of Oxford, The Mathematical Institute の玄関前で撮影されたグループフォト (XRM2016 ホームページよりダウンロード, <http://www.xrm2016.com/Conference/XRM2016/Gallery.html>)。



編集部より

【第十四回X線結像光学シンポジウム開催のご案内】

会期：平成29年11月29日（水）～30日（木）

場所：筑波大学学生会館 国際会議室

【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-nl@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. 45 (2017年4月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 兵庫県立大 籠島靖)
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29年度X線結像光学研究会運営組織』

- ・代表者：籠島 靖 (兵庫県立大)
- ・事務局担当者：高山 裕貴 (兵庫県立大)
- ・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)、籠島 靖、豊田 光紀 (東北大)
- ・幹事：

伊藤 敦 (東海大)	太田 俊明 (立命館大)	大東 琢治 (分子研)
籠島 靖、	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 (東京大)	竹内 晃久 (JASRI)
田原 譲 (名古屋大)	常深 博 (大阪大)	難波 義治 (中部大)
西野 吉則 (北海道大)	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)	矢橋 牧名 (理研)	山内 和人
渡辺 紀生 (筑波大)		
- ・特別顧問：

波岡 武 (東北大名誉教授)	青木 貞雄 (筑波大名誉教授)	柳原 美廣 (東北大名誉教授)
----------------	-----------------	-----------------