

X線結像光学ニューズレター

No.46 2017年12月発行

X線を用いた難病の臨床診断の実際と、新たに視えてきた病態

藤田保健衛生大学医学部大学院 分子病理学 杵渕 幸、松浦晃洋

1. 背景

なぜ、わざわざ放射光を使って病理の組織切片を診断するの？よく質問されることで、より良く視たいという願いで理論的に狙っていく対象と、プラスアルファの実測値から始まる新しい病理学的考察を求めているから。病理学は病因 etiology と病態形成 pathogenesis を明らかにする学問であり、実際の臨床における治療の科学的根拠を支えている。人体は元素で構成され、健康に生きるためには99%をしめる必須常量元素11種 (O, C, H, N, Ca, P, S, K, Na, Cl, Mg) と必須微量元素9種 (Fe, Zn, Cu, Mn, I, Mo, Se, Cr, Co) が必要で、必須微量元素は不足しても過剰でも疾患につながる。我々は現在、遺伝性銅代謝異常症のWilson病患児の早期診断を、放射光を用いて実施している。ヒトの遺伝性銅代謝異常症には銅欠乏症のMenkes病と銅過剰症のWilson病がある。それぞれ、Cu⁺ transporting-ATPase type A or B (ATP7A/B) のゲノム遺伝子異常による。ヒトにおけるCuの過不足は血清 Ceruloplasmin 値 (reference range, 21-37 mg/dL)、血清 Cu 値 (reference range, 78-131 μg/dL) で診断する。[注: Ceruloplasmin は1分子に6~7のCuイオンを含み、血清Cuの95%をしめ、全身にCuを運搬するキャリアである。同時にferroxidase活性をもつ。肝細胞でApoceruloplasmin (Ceruloplasmin前駆体) にATP7Bを介してCuが組み込まれ、Ceruloplasminとして肝細胞から循環血に放出され、全身に供給される]。病理では一般的に rhodanine 染色した組織切

片を光学顕微鏡で観察してCuの局在を診断し、Cu含有量は患者組織塊をサンプルとして原子吸光度法で定量する。我々は atomic absorption spectrophotometry (Shimadzu AA-6800) を用いた。さらに確定診断の目的で ATPase A/B 遺伝子の DNA 配列を決定し変異の有無を探す遺伝子診断を実施する(図1)[1]。我々は臨床へ高精度診断の結果をわたす、とともに病理研究の目的で、病理切片を直接サンプルとし放射光を用いて実験している。図1にWilson病確定診断までのフローチャートを示す。

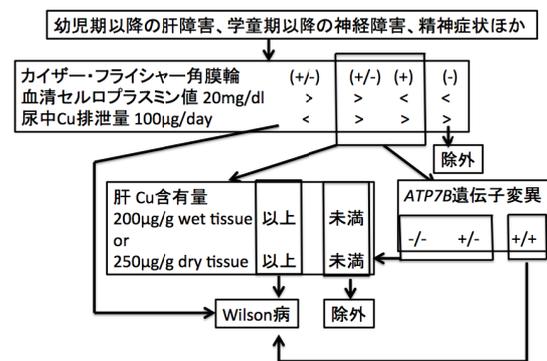


図1 Wilson病確定診断までのフローチャート

2. 測定:放射光蛍光X線分析法 (SR-XRF)

synchrotron-generated X-ray fluorescence technique

試料の準備は通常の病理生検 biopsy 検体と類似である。試料は医学系の規定に従い採取後2時間以内に液体窒素を用いて flash-frozen し、使用時まで

-80 に保存する。試料の処理プロセスは、formalin 固定後にパラフィンに包埋する。これを formalin-fixed paraffin-embedded (FFPE) tissue とよんでいる。これを薄切し、試料支持膜にのせ、室温の状態施設に運ぶ。患児の状態にあわせて、BL37XU (SPring-8)またはBL-4A (KEK)に赴く。放射光の 10 keV における flux は最低で 10^{11} photons/sec 必要である。BL37XU 使用時の単色 X 線をスポットサイズ $1.3 \mu\text{m}$ (V) x $1.3 \mu\text{m}$ (H) に集光する。ビームサイズは $5 \mu\text{m}$ ~ $50 \mu\text{m}$ である。上記のように準備した試料を XY-走査 ステージ測定台にセットする。この時、takeoff angle は 10 度としている。K-B ミラー光学系を用いた当時の入射角は 2.8 mrad であった。放射光の入射強度を I_0 として規格化のために記録する。内殻結合に相当する元素特異的エネルギーの蛍光 X 線を photons として single-element silicon drift detector (Roentec) で測定する。測定時の K はそれぞれ、S が 2.3 keV、Fe 6.4 keV、Cu 8.0 keV、Zn 8.6 keV である。走査範囲が $1000 \mu\text{m}$ ~ $500 \mu\text{m}$ 四方の場合は $5 \mu\text{m}$ ステップ、 $200 \mu\text{m}$ ~ $100 \mu\text{m}$ 四方の場合は $1.5 \mu\text{m}$ ~ $1 \mu\text{m}$ ステップとした。0.5 sec/pixel で集計した。

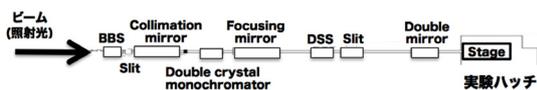


図2 実際に用いた構成 (1例)

3. 結果

ジャーナルの受理したデータを示す(図3,4) [2]。

の矢印が示すのは腸の上皮層である。の血管内のほうが上皮よりもCu値は高いが、その解釈は別の問題で、健常者の腸上皮は(d)に示すように通常、Cuシグナルは描出されない。人はCu 2~5mg/日をおもに食品から経口的に腸より摂取し、それを排泄するのが、正常で健康な状態とされる。Cu²⁺は reductaseによりCu¹⁺に変換されたのち、腸上皮の腸管側 apicalに発現する膜蛋白Ctr1: 高親和性Cu¹⁺

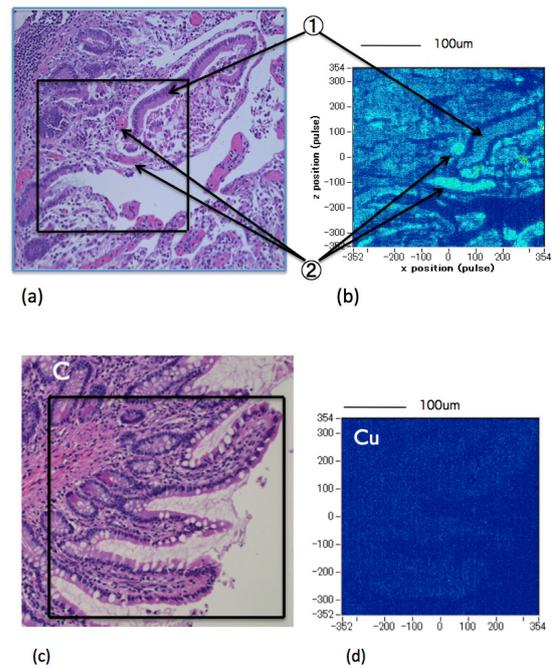


図3 Menkes病の腸 (a)ヘマトキシリンエオジン (HE)染色, 光学顕微鏡 (b)SR-XRF (K =8.0 keV); 健常者の腸 (c)HE染色 (d) SR-XRF (K =8.0 keV)

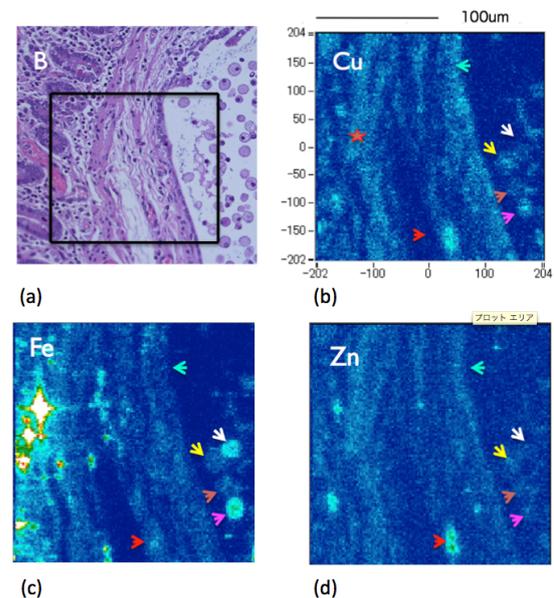


図4 Menkes病の腸 写真右はリンパ管 (a) HE染色 (b) Cu (c) Fe (d) Zn (矢印白、黄、茶、ピンクは同一のマクロファージ)

トランスポーターの形成する channel を非エネルギー依存性に細胞内へ通過する。Cu¹⁺は redox-active であることから、細胞質内ですみやかに Cu シャペロンに結合し保護される。腸上皮細胞内では Cu シャペロンの ATOX1 から Cu¹⁺ をうけとった ATP7A:

Cu¹⁺-transporting P-type ATPase A は Golgi 器官で銅結合蛋白に Cu¹⁺ を提供する。さらに細胞内 Cu 濃度が上昇すると ATP 依存性に ATP7A は細胞外の循環血へ Cu¹⁺ を放出する。Menkes 病は ATP7A の異常により腸上皮細胞からの Cu¹⁺ の排出障害があり に示すように腸上皮内に高濃度の Cu が貯留する。

同じ腸組織にあるリンパ管内のマクロファージを示す(図4)。それぞれのマクロファージは貪食した物質の違いにより Cu、Fe、Zn の含有量の相違が明らかである。Menkes 病は腸からの銅吸収不全により生後2~3か月から銅欠乏症を発症する。日本において定められた標準治療は体重に応じて投与量を算出した histidine-Cu を皮下注射する (107 μg/kg/day, everyday~twice a week)。血清Cu値や血清 Ceruloplasmin 値から判断してある程度良くコントロールされた治療下でも、重症てんかんを伴い中枢神経の進行性変性をきたす症例が多い。これまで中枢神経障害が進行する理由として、皮下投与された Cu の脳血液関門 blood-brain barrier (BBB) を介する移行が、ここに存在する ATP7A の異常により障害されると考えられてきた。

histidine-Cu の治療のかいなく中枢神経障害が進行した患児の頭部をのぞく全身の組織を SR-XRF で調べた結果、脊髄から流出する静脈内および静脈近傍に最高濃度の Cu が計測された[2]。

4. 考察

Menkes 病患児に histidine-Cu を皮下投与すると Cu の代謝経路で ATP7A がゲートとなる細胞内に Cu が蓄積していた。これまで Cu の中枢神経系からの排泄経路は特定されていなかったが、脊髄から流出する

静脈や近傍エリアに高い Cu 濃度を認めたことは、これらが Cu の流出路であることを示し、かつ中枢神経に入った Cu が無効のまま出てきたことを示唆する。SR-XRF は光学顕微鏡の高解像度と同レベルの位置情報で特異的に Cu を含む範囲の 内殻エネルギーの元素群を定量することができる。

5. 展望

現状はピクセルごとに計測した内殻分光の光子数で疾患を視ている。3d 遷移元素である Cu の外殻電子の状態が引き起こす病態を視ることができれば、あるいは、結晶化の step をとらずに人体の挙動する元素を相互作用も含め、切りとって視ることができればと思う。世界の Cu の研究者たちに我々の SR-XRF の手技が受け入れられたので[2-5]、この方法を用いた Wilson 病患児群の高精度診断結果を報告する責務を果たす。研究を支えてくださる放射光施設の皆様に深く感謝申し上げます。方法を探すのに我々だけでは力不足であり、物理の専門家に伝わるように努力する次第である。

参考文献

- [1] A. Matsuura et al., 日本小児栄養消化器肝臓学会雑誌 29 (2015) 63.
- [2] M Kinebuchi et al., *Sci. Rep.* 6 (2016) 33247.
- [3] A. Matsuura et al., *J Nanomed. Nanotechnol.* 5 (2014) 121.
- [4] A. Matsuura et al., *J. Trace Elem. Med. Biol.* 32S (2015) 25.
- [5] A. Matsuura et al., *J. Trace Elem. Med. Biol.* 35S (2017) 8.

超小型衛星でサブ秒角撮像を目指す多重像 X 線干涉計

大阪大学大学院理学研究科

林田 清

1993年打ち上げのあすか衛星以降のX線天文衛星は、斜入射反射鏡とX線CCDを組み合わせた形式が標準となっている。この形式によりX線撮像分光で、超新星残骸や銀河団にひろがる高温プラズマの温度、電離状態、元素組成の分布がはじめて明らかになり、X線天文学が大きく進展した。X線撮像はバックグラウンド、混入天体の分別にも有効で、コリメータ方式と比べて二けた以上暗い天体を観測可能にした点でも重要である。

X線望遠鏡の有効面積、角度分解能、エネルギー範囲、視野、検出器のエネルギー分解能は、衛星によって異なり、それぞれの特徴を競い合う、あるいは、補い合う形になっている。ただし、角度分解能に着目すると1999年打ち上げで現在も運用を続けるアメリカのChandra衛星の0.5秒角が圧倒的に優れている。ヨーロッパのXMM-Newton衛星の15秒角、日本のすざく衛星の2分角と比較してもその差は歴然で、実際、Chandra衛星はこの高い角度分解能を生かして多くの新発見を生み出してきた。最近でも、重力波GW170817のX線対応天体を発見している[1]。

X線より長波長側の観測装置が0.1秒角あるいはそれを切る角度分解能を達成する中、X線域でも同等の性能が必要とされるケースが多くなっている。目標天体の詳細な構造を測定するだけでなく、目標以外の天体からの混入を避けるという意味でも高い角度分解能は必要である。しかし、Chandra衛星搭載のX線反射鏡の再現は、コスト的、技術的(製造メーカーが撤退している)に非常に困難とされている。実際、2028年打ち上げ予定のヨーロッパの大型X線天文台AthenaでもX線望遠鏡の角度分解能目標は5秒角にとどまる。

一方で、斜入射反射鏡とは別のアプローチ、X線干涉計で高い角度分解能をめざす計画も検討されて

きた。代表的なのが2000年代初頭にアメリカで提案されたMAXIM計画[2]である。しかし、そのパイロット版MAXIM-pathfinderでも450km離れた編隊飛行の衛星を使う計画で、実現の見込みはたっていない。一方、立教大学グループは半透明鏡を用いたデザインで1台の衛星におさまる形式を提案している[3]、[4]が、現時点ではX線干涉縞の検出は報告されていない。

X線(天文用)干涉計に関しては様々な構成があり得る[5]が、上で示した計画も含めて基本的には、マクロな距離離れて入射した二本のX線ビームを干渉させ1個あるいは2個(半透明鏡のケース)の干渉像を得ることを目標にしている。干涉計が大活躍している電波天文学、特定用途には確立している赤外、可視天文学と比べて、X線の波長の短さが実現を困難にしている。

一方、放射光を含めた地上のX線実験ではあらゆる面で干渉効果が利用されている。中でも位相コントラスト撮像のタルボ(・ロー)干涉計[6][7]は実用化の面で最先端にある(e.g.[8])。これは、回折格子を通ったX線がタルボ効果によって生じる干渉縞が、格子の上流においた試料によってゆがむことを検出し、試料の詳細構造を像再合成で検出する装置である。

X線結像光学の皆さまには周知の方式と思うが、筆者がこれを認識したのは4年ほど前、タルボ効果自体はじめて知った。物理的に大変興味深いと思ったのと同時に、X線ピクセル検出器開発の応用対象として利用できると考えた。つまり、タルボ(・ロー)干涉計で使用されている検出器は、多くの場合、閾値以上のエネルギーの光子数あるいはフラックスを測定しているのみで、光子ごとのエネルギー測定はしていない。様々なエネルギーのX線を放射す

る天体観測では、光子1個ごとにエネルギー測定する撮像分光が天体で起こっている物理の解釈に本質的である。マイクロフォーカスX線源を利用したタルボ・ロー干涉計では、この点は本質的ではないが、エネルギー選別することで原理的にはS/Nの向上が見込める。

このような意図で、タルボ・ロー干涉計の実験のセットアップを構成し、干涉縞がかるうじて得られるようになった。その段階で、(誰でも気が付くかもしれないが)タルボ干涉計の構成で光源のプロファイルを測定できることに気が付いた。つまり、理想的な平行光であれば、格子の自己像がシャープに生じるべきところ、光源が二個あるとか広がりをもっている、それに依りて像が変わる。格子の前に試料は置かないので、理想的には、格子と同じピッチの多数の自己像が生じる。これを解析で重ね合わせることで、光源のプロファイル(に格子の吸収プロファイルを畳み込んだもの)が得られる[9]。

カギになる式は二つで、 d を格子のピッチ、 λ をX線の波長としてタルボ条件を満たす距離 z_T が

$$z_T = md^2/\lambda = 50\text{cm} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$$

と書けること(ここで m は整数)、格子の開口率を f とすると像幅 $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = \frac{fd}{z_T} = \frac{f\lambda}{dm} = \frac{0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)}{\left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right)}$$

と書ける。X線を吸収するピッチ $5\mu\text{m}$ 程度の格子はLIGA技術を用いて製作されており、タルボ干涉計で用いられている。開口率0.2はこの目的のために通常の0.5より小さくすることを意図したものである。いずれにせよ、50cmのサイズで10mのChandra衛星の角度分解能0.5秒角を凌駕する可能性があることを示している。

タルボ干涉計と同様なハードウェア構成ではあるが、対象と解析方法が異なるので、我々は、多重像X線干涉計(Multi Image X-ray Interferometer Module)MIXIMと呼んでいる。MAXIM計画を意識したNamingであると同時に、多数の像を重ねあわせる点

がポイントであることを主張している。つまり、MAXIM計画でも立教グループ方式でも、マクロな光路離れた二つのビームを重ね合わせて干渉させている。数 m の距離離れて入射したX線ビームを干渉させることができればその干渉限界はマイクロ秒角に達し、ブラックホールの事象の地平線に迫ることができる。しかし技術的障壁は大きい。それに対して、タルボ干涉計、MIXIMでは、数 μm の間隔(の整数倍)離れた格子スリットを通るビームを重ね合わせることに相当する。 $\Delta\theta$ の式をみると、格子のピッチ d を直径ととらえた場合の回折限界の式とファクタ倍で一致することからもこの点は納得できる。

タルボ(・ロー)干涉計が各所で実用化されていることから、X線干涉縞がこの形式で原理的に得られることは保証されている。我々も、マイクロフォーカスX線源からの球面波を、 $4.8\mu\text{m}$ ピッチの格子を通してピクセルサイズ $30\mu\text{m}$ のSOI検出器(京大、KEK他で開発されたXRPIX2b[11])に照射し、X線干涉縞を得ている[10]。この場合、拡大率は4.4倍で、さらに、X線イベントごとにピクセル間に信号電荷が分割することを利用した解析を行いサブピクセルの位置分解能を確保している。

しかし、最終的な目標のX線天体は平行光で、拡大が効かない。つまり、さらに4-5倍の位置分解能の向上が必要である。今後のSOI検出器の開発に期待するとともに、パイロット的に、可視光用の微細ピクセルCMOS画像検出器を試用することも始めている。近年、CMOS画像検出器の性能向上は著しく、例えば我々が使用したGpixel GSENSE5130という素子は $4.25\mu\text{m}$ サイズの15Mピクセルの素子で、常温動作で $240\text{eV}@5.9\text{keV}$ (ただしシングルピクセルイベントを取り出した場合)の性能をもっている。これを使用し放射光施設SPring8の長尺ビームラインで準平行光を照射する実験を開始しており、いずれ結果を報告したい。

ここまで紹介したデザインは一次元の光源プロファイルを得るものであるが、原理的にはMIXIMの複数のユニットを格子方向が直交するように配置する

ことでXY方向に投影したプロファイルを得ることができる。その他の二次元化方法も検討中である。

実際にX線天体の観測に使用する場合には、バックグラウンドを削減することも必要で、アクティブシールドの利用や、1度程度に視野をしぼるマイクロコリメータ（開口率の異なる2枚の格子を近接して設置する）を検討している。有効面積の確保も重要で、格子の開口率をむやみに小さくすることはできない。現実的な構成を想定すると、バンド幅も考慮して超小型衛星に実現できる有効面積は数 cm^2 と評価している。格子+検出器のMIXIMユニットを複数搭載する場合には、1個の検出器あたりの使用電力、発熱も問題になり、-100程度までの冷却を必要とするX線CCDは難しい。常温動作可能なCMOSが利用できれば実現性が増す。

バックグラウンド、有効面積からしても観測対象はコリメータ衛星で観測していたような明るい天体に限定される。X線天文学では、かに星雲の明るさをX線フラックスの単位にすることがあるが、数mCrabから10Crabがその対象である。すざく衛星では μ Crab、Chandra衛星ではその二けた下10nCrabまで対象にしていることからすると限定的ではあるが、そもそも、かつてない角度分解能でまず調べるべきは近傍の対象である。具体的な対象としては、最近傍（といっても数千万光年）の活動銀河核（降着現象が起こっている超巨大ブラックホール）である。活動銀河核には、中心核が直接見える1型と何かに隠されている2型があるが、これは我々の視線方向の差だけによっているという活動銀河核統一モデルが30年以上前に提唱されている。このモデルでは、トーラスというドーナツ状の雲がブラックホールのまわりに数光年〜数100光年のサイズで存在すると想定されている。しかし、これを直接空間分解した例はない。超小型衛星に搭載したMIXIMは、このトーラスの空間分解が目標となる。25.6 keV(次数 $m=1$)、12.8 keV($m=2$)、8.5 keV($m=3$)、6.4 keV($m=4$)、5.1 keV($m=5$)付近の、それぞれ10/m%程度の幅のバンドを利用することを計画し、吸収、散乱成分と鉄輝線の空間分布を中心核周辺数秒角領域で測定したい。

MIXIMでは微小ピクセルの検出器が本質的であることを記したが、ピクセルサイズが小さくなることによって、X線偏光検出が可能になる。これは我々がX線CCDで実証したことであるが[12][13]、ピクセルサイズが数ミクロンになると実用的な偏光検出感度が期待される。1型活動銀河核の中心核を囲むトーラス周辺に同心円状の偏光パターンを検出することで、統一モデル検証をより確定的にする。

X線結像光学ニュースレターの記事では、広く内外に認められている研究開発を、その歴史と将来の展望を含めて紹介されることが多い。それに対して、本研究はまだ始まったばかりで、海のものとも山のものともわからない。しかし、放射光を含めた地上利用と宇宙利用、光学系と検出器を網羅するX線結像光学研究会の皆さまのお知恵をいただくのには最適な機会と思い、紹介させていただいた。今後とも、アドバイスをお願いしたい。

なお、MIXIMの開発は、大阪大学理学研究科X線天文グループの久留飛寛之、川端智樹、花坂剛史、井上翔太、中嶋大、常深博、松本浩典、大阪大学工学研究科の細野凌、志村孝功の皆さん（敬称略）の協力で進めている。XRPIXの動作では京都大学の鶴剛、CMOSの導入では関西学院大の平賀純子、国立天文台の成影典之の皆さん（敬称略）から支援をいただいた。ここに感謝する次第である。

また本研究は、科研費「新学術領域」、「挑戦的萌芽研究」の支援の下、遂行された。

参考文献

- [1] LIGO collabo. and Virgo collabo., ApJ. Letters, 848 (2017), L12.
- [2] W.Cash et al., Proc. SPIE 4852 (2002) 196.
- [3] S. Kitamoto et al., Proc. SPIE 8147 (2011) 81471P.
- [4] S. Kitamoto et al., Proc. SPIE 9144 (2014) 91441Z.
- [5] W. Cash, Experimental Astronomy 16 (2003), 91.
- [6] A. Momose et al., JJAP 42 (2003), L866.

- [7] F. Pfeiffer et al., Nat. Phys. 2 (2006), 258.
- [8] 百生 敦、Isotope News 705 (2013), 8.
- [9] K. Hayashida et al., SPIE Proc 9905 (2016), 990557.
- [10] K. Hayashida et al., X-ray Universe 2017 (2017), https://www.cosmos.esa.int/documents/332006/1402684/KHayashida_t.pdf
- [11] T.G. Tsuru et al., SPIE Proc. 9144 (2014), 914412.
- [12] H. Tsunemi et al., NIMA 321 (1992), 629.
- [13] K. Hayashida et al., NIMA 436 (1999), 96.

「The 24th Congress of the International Commission for Optics

-X-ray and High energy Optics- の会議報告」

東京大学大学院工学系研究科

三村秀和

The 24th Congress of the International Commission for Optics が、2017年8月21日から25日にかけて日本で開催された。場所は、新宿の京王プラザホテルであった。この会議は、世界各地を回り3年に1回開催される大規模な光学全分野に関する会議である。

初日のPlenary sessionでは、名古屋大学 天野浩教授、東京大学 梶田隆章教授 の二人のノーベル賞受賞者が講演され、その後のReceptionでは、天皇皇后両陛下がご臨席された。日本国内外のOpticsとPhotonics分野の第一線の研究者が集う豪華な国際会議であった。

18のカテゴリの中で、X-ray and High Energy Opticsに関するセッションが8月21日、22日に開催された。東北大学の百生氏が本カテゴリのChairであり、1件のKeynote講演、5件の招待講演、14件の一般発表、13件のポスター発表が行われた。口頭発表は3つのセッション構成で行われた。

下図は、2日目のセッション後、本セッション参加者でおこなった懇親会の時のグループフォトである。



中央に左から4番目の人物はX線顕微鏡分野を創世期から支え、本セッションでKeynote講演をおこなったLawrence Berkeley National LaboratoryのJ. Kirz氏である。

8月21日、百生氏からOpening Remarkの後、1つ目のセッション「X-ray Optics」がはじまった。はじめに、J. Kirz氏からX線顕微鏡のこれまでの発展についてKeynote講演があった。X線の発見からゾーンプレートやミラーなどのX線光学素子の進歩、Ptychographyなどのコヒーレンスを利用した新手法への発展、の流れの発表であった。最後にFELなどのX線光源の進歩が続く限り、新しい手法が生まれるのでX線顕微鏡分野は今後も進展すると話を締めくくった。X線顕微鏡分野における、ターニングポイントとなった論文の紹介があり、個人的に大変勉強になった。

続いて、理化学研究所の玉作氏から、日本のSACLAの現状と最新の研究成果に関する招待講演があった。ビームラインの概要、光学素子、そしてX線非線形光学に関する多くの成果を発表された。次に、三村から回転楕円ミラーによる軟X線集光に関する最新のデータを紹介した。その後、大阪大学の山田氏から、ウォルター型のX線顕微鏡システムの開発に関する研究報告があった。最後に、JAXAの前田氏から、X線宇宙望遠鏡用のウォルターミラーのデザインに関する発表があった。このセッションの一般公演はミラーに関するものであり、ミラー光学素子でリードする日本で開催された国際会議の特徴が表れた。1日目のセッションの終了後、本大会のPlenary講演、Receptionが行われた。

2日目午前のセッション「X-ray Imaging and Applications」での一件目の招待講演では、Paul

Scherrer Institut の M. Guizar-Sicairos 氏が、スイス放射光施設における Ptychography による 3 次元ナノイメージングに関する発表を行った。スイス放射光施設ではイメージング専用のビームラインがあり、近年、多くの優れたユーザーを取り込んだことで、Nature 誌に掲載される論文が多くなっており、それらの紹介が主体であった。一般的な観察でも、20nm の分解能での 3 次元観察が可能であり、それを活用した電子デバイスの立体電子配線の 3 次元イメージングが印象に残った。その後、兵庫県立大学の高山氏、大阪大学の下村氏が、それぞれコヒーレント回折イメージングと Ptychography 顕微鏡に関する発表を行った。

休憩をはさみ 2 件目の招待講演では、Sigray, Inc. (USA) の W. Yun 氏が講演を行った。ラボベース光源とキャピラリーレンズの組み合わせによるマイクロ分解能の X 線 CT 顕微鏡の発表であった。キャピラリーレンズの作製方法、性能について紹介後、X 線吸収分光、X 線回折を組み合わせることで、ラボベース光源でも様々なサンプルの 3 次元情報を得られた例を紹介していた。続いて百生氏から、現在推進している ERATO プロジェクトのタルボ干渉計による X 線イメージングに関する発表があった。実験室光源を利用した高分解イメージング、リュウマチ検査への応用など多くの成果を発表していた。その後、中国の上海放射光施設の T-Q.XI0 氏、日本の UVSOR の大東氏から、それぞれの施設における X 線顕微鏡開発の現状について報告があった。筑波大学の渡辺氏からの発表は、knife-edge-scan filter を用いたゾンプレートによる位相差顕微鏡の開発であった。本セッション最後の Kineuchi 氏からは、蛍光 X 線顕微鏡の医学応用に関する発表であった。

2 日目午後のセッション「X-ray Optics」では、X 線集光、結像素子の話題が中心であった。1 件目の招待講演では、Desy の A. Schropp 氏から屈折レンズによる硬 X 線集光における収差補正の発表であった。測定された波面誤差を補正する形状分布をもつ透過素子を作製し、理想的な硬 X 線集光を実現していた。続いて、Berkeley Lab の P. Naulleau 氏から、

EUV 領域における高分解能イメージングの発表があり EUV リソグラフィ技術を生かした、10nm 分解能の顕微鏡の発表であった。続いて、東北大学の豊田氏からも、同様に New SUBARU での EUV 領域の顕微鏡の発表があり、160 μ m の領域で 30nm 分解能を達成していた。続いて、L. Marcos 氏から、EUV 多層膜ミラー材料に関する発表、JASRI の竹内氏から、X 線顕微鏡の照明光学系の改善に関する発表があった。最後に中性子用の Waveguide の開発について I. Peña 氏から発表があった。最後に百生氏の Closing remark で会議を締めくくった。

2 日目 15 時から、2 時間に亘って他のカテゴリと合同で 13 件のポスター発表が行われ、活発な議論が行われた。2 日目の夜、本カテゴリの参加者で懇親会を行い、一部の参加者は 2 次会に行き交流を深めた。

以上、X-ray and High Energy Optics のカテゴリは 8 月 21 日、22 日の 2 日間で行われたが EUV、軟 X 線、硬 X 線、中性子線用の光学素子開発、Ptychography、結像顕微鏡、X 線顕微鏡の医学応用など、内容は多岐にわたった。また、本カテゴリから、大阪大学の山田氏が、OSA/SPIE Student Paper Award に選ばれた。山田氏が開発しているウォルター型の X 線顕微鏡システムは注目されており当然の結果と思われる。

IC0 においては、おそらく X 線光学分野は初参加であったが、多くの著名な招待講演者の参加もあり、活発な議論が交わされた。

本セッションを取りまとめた東北大学の百生氏は、ほぼすべての準備を一手に引き受けておられ大変な努力をなされた。最後に参加者を代表して感謝を申し上げます。



編集部より

杵渕先生、松浦先生、林田先生、三村先生に記事を執筆して頂いたおかげで、今回もニュースレターを発行することが出来ました。ただ、今回は（も？）ニュースレター製作のとりかかりが少々遅かったため、本来11月ごろに発行予定のところ、年末になってしまいました。反省しております。次回以降に生かしたいと思っております。それはそうと、11月のX線結像光学シンポジウムも無事終了しました。そこでの発表論文、あるいは本ニュースレターの記事にもありますように、X線結像光学、およびその周辺分野はなお発展を続けています。ニュースレターを通じて、みなさまにはそのような話題をタイムリーにお知らせしていきたいと思っております。今後ともよろしく願いいたします。

(文責・松本浩典)

【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.46 (2017年12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(大阪大) 東口武史(宇都宮大)
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成28年度X線結像光学研究会運営組織』

- ・代表者：竈島 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（大阪大）、
東口 武史（宇都宮大）、 竈島 靖（兵庫県立大）、 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）
竈島 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（東京大）、 竹内 晃久（JASRI）
田原 謙（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（大阪大）
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）