

X線・EUV結像光学ニューズレター

No. 53 2021年5月発行

X線・EUV結像光学研究グループの発足にあたり

一般社団法人日本光学会
X線・EUV結像光学研究グループ代表
兵庫県立大学 籠島 靖

本年令和3年(2021年)4月1日に、一般社団法人日本光学会に「X線・EUV結像光学研究グループ」が発足いたしましたので、お知らせいたします。

X線結像光学研究会は、30年以上にわたりX線結像光学研究の中核コミュニティとして交流を重ねてきました。近年の関連研究分野の急速な進展を鑑み、本研究会の今後の活動のあり方などについて、同研究会の幹事会で議論を重ねました。その結果、本研究分野のさらなる発展には他分野との交流等が重要と考え、一般社団法人日本光学会傘下の「X線・EUV結像光学研究グループ」に組織替えすることになった次第です。

X線結像光学研究会は、文部省科学研究費重点領域研究「X線結像光学(平成元年度~4年度)」の発足に始まります。同重点領域研究は、関連する広汎な科学・技術分野の研究者の有機的な連携と産学官協力のもとに進められ、多くの成果を挙げました。重点領域研究終了後は、本研究会はその主要な行事としてX線結像光学シンポジウムを隔年で開催してきました。同シンポジウムは、第1回は1990(平成2)年1月29日~30日に学習院大学百周年記念会館で開催され、1999(平成11)年12月の第5回以降は、名古屋地区、つくば地区、東北地区、関西地区の持ち回りで開催されてきました。また「X線結像光学ニューズレター」を発行し情報交換に努めてきました。さらに重点領域研究の成果をもとに大学院生以上を対象とした専門書を編纂し「X線結像光学」と

して1999年7月に培風館から出版されました。

上述のように本研究会は30年以上にわたり組織を継続してきましたが、ここ10年ほどはその活動がシンポジウムの開催だけに留まり、組織としての活動様態が内向きになってしまっていました。これは放射光施設の利用拡大、X線天文学の隆盛、極端紫外線リソグラフィの発展、X線光学素子の高性能化などによりX線光学という学問分野の認知度・成熟度が高まり、本研究会の活動がグループを核とする普及・広報や大型予算申請のフェーズから研究者個々の研究活動が中心のフェーズへ移行したことによるものと考えられ、ある意味必然的な変化であったと言えると思います。本研究会が更なる発展を遂げX線光学がより一層社会の発展に寄与するためには、内向きから外向きへの姿勢転換を図る必要があると考えました。

X線光学はもとより光学(Optics)を基礎としており、本研究会の新たな活動拠点として(一社)日本光学会(OSJ)は最も有力な存在であります。すでに同学会には「量子エレクトロニクス」分類に「X線全般」という分科が存在しており、「光学設計・光デバイス」分類に「X線・EUV結像光学」分科の増設も期待でき、本研究会の新しい情報発信と議論の場に相応しいと考えました。光学をキーワードとする異分野との交流や相乗効果も期待できます。一方、全く異なる視点ですが、昨今の情報公開・コンプライアンス遵守などの時代の要請に応えるには、本研

研究会には、定款がない、正式な会員名簿がないなど組織としての脆弱性は否定できないものでした。

つくばで開かれた第14回シンポジウムの幹事会で、OSJと本研究会で連携を持ってはどうかという発議がなされました。同幹事会で議論し、代表が連携の条件、メリット・デメリットなど整理し後日報告することとなり、仙台で開かれた第15回シンポジウムの幹事会で、OSJとの連携について検討するワーキンググループ(WG)を立ち上げることとなりました。同WGの検討結果をまとめ、本研究会の意志決定機関である幹事会に答申し幹事会において承認されました。2020年7月29日付けで日本光学会に「X線・EUV結像光学研究グループ」設立趣意書を提出し、9月19日の同学会理事会において2021年4月1日からの設立が認められました。

X線・EUV結像光学研究グループの組織は、執行部として、代表、副代表、運営委員(委員長、副委員長、庶務担当、編集担当、会計担当およびOPJプログラム担当等)、審議機関として幹事会をおきます。代表、副代表は運営委員会の委員長、副委員長を兼ねます。執行部、幹事、会則等は研究グループのHP*に載せておりますので、詳しくはそちらをご覧ください。

X線・EUV結像光学研究グループの今後の運営方針として、

1. まずは、OPJ(OSJの年次学術講演会)でのシンポジウム等企画講演の隔年開催から始める。さらに、OPJでの定常的で活発な活動も奨励する。
2. 日本光学会会員を中心に広く開催を宣伝する。
3. X線結像光学ニューズレターの出版継続(X線・EUV結像光学ニューズレターに改名)
4. HP等による情報の発信・普及、異分野・他学会との交流、海外への発信を推進する。
5. 本研究グループおよび日本光学会への入会促進に取り組む。
6. 年1回程度の幹事会開催(Web会議)
7. 書籍「X線結像光学」の続編の出版

を幹事会に提案し、承認されました。本令和3年度は、第1回X線・EUV結像光学シンポジウムをOPJ2021に合わせて開催することを目標に活動を開始しました。例年通り11月に東京方面ないしオンラインで開催予定で調整中と伺っています。本X線・EUV結像光学ニューズレターの読者の皆様には、是非ご参加いただきたいと思います。

コロナ禍でWGや幹事会の議論はメールやオンライン会議で行いました。社会が大きな変化を強いられたこのタイミングに、偶然にも本研究会は新しいスタートを切ることとなりました。ピンチはチャンスと言います。X線・EUV結像光学研究グループの発展に、是非皆様のお力添えをいただきますようお願い申し上げます。

*X線・EUV結像光学研究グループのHP
<http://xray-euv-optics.group>

放射光 CT による小惑星リターンサンプルのイメージングの現状と将来展望

JASRI/SPRING-8 上相真之

1. はじめに

2020年12月4日、小惑星リュウグウから「はやぶさ2」が無事帰還し、サンプルが入ったリエントリークプセルを地上に届けた。サンプルキャッチャーの中には10mm近い複数の粒子をはじめとして、リュウグウの土壌サンプルが大量に存在していることが確認された。結果として探査機「はやぶさ2」は、小惑星上での2回のタッチダウンや、弾丸衝突実験など、挑戦的な計画を全て完璧に遂行することに成功した。2021年6月にはJAXAキュレーションセンターから、サンプルの配分が行われ、本格的な試料分析が開始する予定である。

NASAのWild2彗星からのサンプルリターンであるStardust計画や、先代の初号機「はやぶさ」の成功により、無人機によるサンプルリターンの有用性が示され、この「はやぶさ2」をはじめとして、NASAのOSIRIS-RExなど、世界各地で太陽系の微小天体に対するサンプルリターンが計画され、現在、実行に移されている。

微小天体がサンプルリターンの対象になるのは、重力が小さく、着陸、離脱のコストが小さいことも理由として存在するが、それ以前に科学的価値が大きいことがあげられる。地球型惑星のような固体惑星は、放射性核種の崩壊熱が内部に蓄積されることによって高温になり、変成、熔融などが起こる。このため、もともとの物質が持っていた化学組成、鉱物組成、結晶構造、組織や構造などの物質化学的特性は大部分が失われている。しかし、小惑星のような小天体、その中でも特に小さな天体は、この崩壊熱が蓄積されるよりも早く表面から放出されるため、温度が上がりにくく、物質化学的特性を失いにくい。従って、小天体のサンプルを直接採取し、地球上の汚染無しに分析する事は、太陽系がどのような物質

から形成されたか、またその起源物質がどのような進化過程を経て固体惑星を形成したか、という形成の道筋を調べるために非常に有益な情報をもたらすと考えられる。

JAXA初の小惑星探査機「はやぶさ」によって得られた、小惑星イトカワのサンプルは、最大でも300 μ m以下程度と極めて微小であった。しかしそのサンプルの分析から、イトカワの組成(化学・同位体組成、鉱物組成)が、地球に飛来する隕石の内80%を占める普通コンドライトグループのものと非常に良く一致することがわかった[1-4]。

普通コンドライトは、45.65億年前に形成されたchondruleと呼ばれる物質を体積にして80%以上含んでいる。さらに炭素質コンドライトと呼ばれる隕石グループには、このchondruleの他、U-Pb年代測定から45.67億年前と太陽系の物質の中で最も古い年代を示すCalcium Aluminum rich Inclusion (CAI)と呼ばれる物質や、水、有機物、を含んでいる。このような隕石は高温になった形跡があまり認められないため、微小な小天体を起源としていたと考えられてきた。「はやぶさ」サンプルが地上の隕石と一致する特性を示したことは、このような隕石の母天体が、小天体である小惑星であることを裏付けた。

「はやぶさ2」の探査対象天体であるリュウグウは、太陽光の反射スペクトルが、炭素質コンドライトとよく似た特性を持つ。このことは、リュウグウが高温を経験しておらず、採取されたサンプル中に水や有機物が存在する事を示唆している。従って「はやぶさ」サンプルからは得られなかった、地球の水や生命に関する情報が得られると期待されている。今後、微小天体をターゲットとしたサンプルリターンを通して、このような太陽系初期の情報を保持している始原的な天体の物質を、数多く得ることが期待

されている。

しかし、このような直接採取によるサンプルは、探査機のキャパシティの問題から、非常に量が少ないことが多い。「はやぶさ」ではサンプリング時のトラブルによって、トータルで 100 μg 以下程度しか得る事が出来なかった。「はやぶさ2」では「はやぶさ」のサンプリング機構をマイナーチェンジしたものをを用いて、当初の 1 g 程度の見込みを大幅に上回る、5 g 程度のサンプルの回収に成功した。しかしそれでも、その一部は将来分析のために保管され、分析対象となるサンプルも複数の研究者に分配されるため、一度の分析に使用できるサンプル量は極めて限られる。このように、希少かつ微量のサンプルの分析手法の確立や、新規の分析装置の開発は、惑星科学における喫緊の重要課題となっている。

本稿では、今後のリターンサンプルの分析に向けてこれまでの分析成果、現在開発されている放射光 CT の技術と、今後のサンプル分析の課題について、報告する。

2. 「はやぶさ」サンプルの X 線 CT 観察

X 線 CT 法は物質の内部を非破壊で三次元観察する事が可能で、希少かつ微小なサンプルを効率よく分析するためには必須の技術である。「はやぶさ」サンプルの分析では、100 μm 以下程度の粒子、わずか 40 粒程度の 3 次元鉱物組成を、SPring-8 の BL47XU で開発された結像光学系のナノ CT 装置を用いて 200 nm 程度の分解能で調べた。その際、鉄の吸収端の上下のエネルギーである 7 keV、と 8 keV の X 線を使ってサンプルを 2 回 CT スキャンし、線吸収係数の 2 次元ヒストグラムを作成することで、内部の鉱物組成とその 3 次元組織を特定するという、隕石試料に特化した DET (Dual energy tomography) と呼ばれる手法を同時並行で開発、適用している [5]。この結果、「はやぶさ」で採取された小惑星イトカワのサンプルは、地球上の普通コンドライト、さらにその中でも LL4 から LL6 と呼ばれる隕石の鉱物組成と極めて良く一致することを示すことができた。また、重元素を多く含み、U-Pb 年代測定が可能なリン酸塩鉱物

の試料内部の位置、組織を非破壊で同定し、その部分を狙って研磨試料を作成後、2 次イオン質量分析計 (SIMS) を用いて同位体比測定を行い、イトカワ母天体の衝突破壊年代を調べる事にも成功している [6]。

このようにリターンサンプルの分析にあたって、その最上流で X 線 CT を行い、三次元的な組織・構造を非破壊で観察し、その後の分析計画をより詳細化するフローはすでにほぼ確立・一般化されている。

3. 始原天体のマルチスケール/マルチコンポーネント構造と、X 線 CT 法

始原天体は加熱による元素の移動・平均化、軽元素の揮発、鉱物粒の粗大化等がほとんど起こっておらず、極めて多種多様な物質の集合体としての組織を示す。「はやぶさ2」では「はやぶさ」と異なり、最大で 10 mm 程度のサンプルが回収された。その内部には微小な有機物粒子 (100 nm 以下 - 1 μm) [7] や輝石の針状結晶 (Enstatite whisker) (1 μm - 10 μm) [8]、などをはじめとして、小惑星上での液体の水による変成の証拠である Framboidal magnetite (10 μm - 100 μm)、前述の chondrule (100 μm - 1 mm) や CAI (100 μm - 10 mm) 等、太陽系の物質進化過程において重要な情報を保持している様々な物質が、多様なスケールで存在していると考えられる (図 1)。これらの構成要素の化学組成、サイズ、存在度等は様々であり、隕石の記述をするために非常に重要な要素である。

これらの 3 次元組織や分布・位置を得るためには、サンプルの外形に対して 10^{-6} - 10^{-5} のサイズの構造・組織を調べることが可能である必要がある。さらに 10 mm の岩石鉱物の集合体を X 線 CT で調べるためには、サンプルを透過するために 30 keV 以上のエネルギーの X 線が必要である。サンプル中には金属鉄粒子、珪酸塩鉱物、水、炭素物質などが含まれている可能性がある。30 keV の X 線においてそれぞれの線吸収係数は、FeNi 合金 ($\sim 70 \text{ cm}^{-1}$)、珪酸塩鉱物 (1 cm^{-1} - 20 cm^{-1})、炭素物質 (0.4 cm^{-1} - 0.7 cm^{-1})、水 (0.3 cm^{-1})、となり、それらを区別・同定する

ためには 100 cm^{-1} 程度の中の 0.1 cm^{-1} 程度を分解する必要がある。

しかし、現状の X 線検出器は 2000×2000 画素程度が主流であり、サンプルサイズに対して 10^{-3} 程度のサイズの物体を観測するのが限界である。また、 30 keV

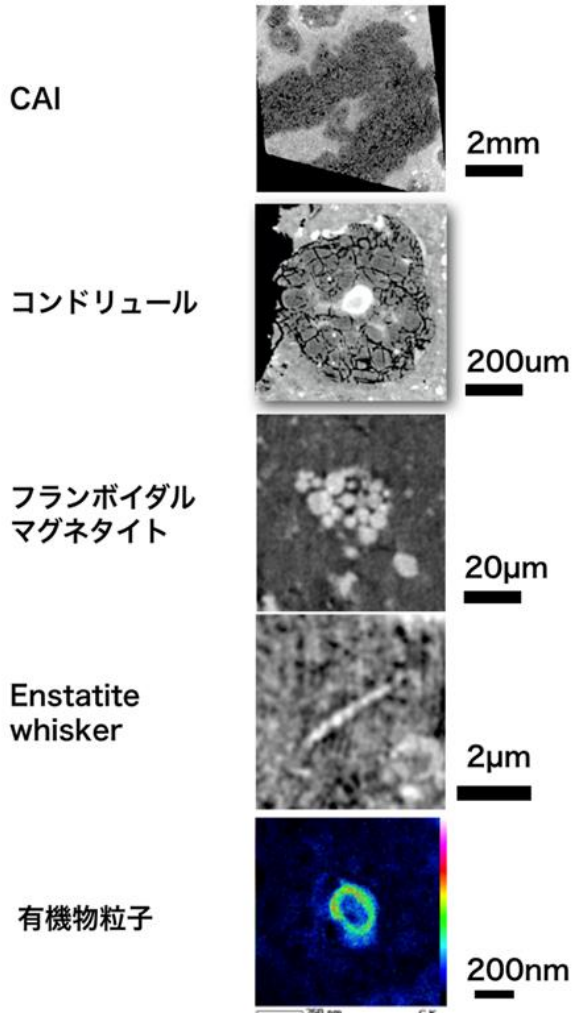


図 1 放射光 CT で得られた隕石内部の構成要素の例。有機物粒子は未だ CT で 3 次元組織を得られたことがないため、FIB 加工で作成された 100 nm の超薄切片を、TEM-EDS を用いた炭素のマッピング画像で観察した結果を表示している。CAI は特徴的な組成を持つ、不定形の包有物。コンドリュールは溶融液滴の急冷凝固物で、丸い形が特徴。フランボイダルマグネタイトは自形を持つマグネタイトの集合体で、その集合体自身も粒子状を示す。Enstatite whisker は気相成長した針状の輝石の結晶。有機物粒子は起源の分からない、中空の有機物粒子である。これらの構成要素の間を、 $1 \mu\text{m}$ 以下程度の細粒の鉱物粒子の集合体が埋めている。

の X 線を利用した SPring-8 の投影型吸収 X 線 CT では、シグナルノイズ比 (SN 比) は 50 程度である [9]。近年の検出器の性能向上を考慮に入れても、 10^3 近い線吸収係数の範囲を分解することは難しい。これに加え、線吸収係数は一次元の情報なので、例えば線吸収係数に関して目的の範囲が目的の分解能で観測出来たととしても、異なる物質の吸収係数が重なっていた場合、それらの物質を区別することは出来ない。

「はやぶさ」サンプルの分析の際には、この問題を解消するために DET が開発された。しかし、この手法では 7 keV , 8 keV の低エネルギー X 線を使うため、 10 mm 近いサイズのサンプルでは X 線が透過せず、適用できない。

「はやぶさ」サンプルは、直前に行われた NASA の Stardust の時と、たまたまサンプルサイズが近かったために、Stardust サンプルの分析に使用された技術を応用することで、分析を円滑に実施する事が出来た。しかし、「はやぶさ 2」では「はやぶさ」サンプルと比べサイズが 2 桁近く跳ね上がった。また、水や有機物など、それまでの探査のサンプルでは分析する事が難しかった物質が、主なターゲットになる。従って「はやぶさ」サンプルを分析した技術を応用するだけで不十分であり、さらなる新規開発が必要である。

4. 統合 CT 環境 - マルチスケール CT -

このような問題を解決するために SPring-8 の BL20XU で開発されている、統合 CT 環境について紹介する。この統合 CT 環境は 3 つの分解能・視野の異なる検出器、及び複数の光学素子を設置し、様々な CT 観察を切り替えながら実施するシステムである。探査機のリターンサンプル分析に限らず、大きなサンプルの中の微細な構造・組織を非破壊で観察したいという要望は多い。近年の SPring-8 のイメージングビームラインでは、分解能の違う 2 種類以上の系を準備し、これを位置情報を保持したまま切り替えて使用することが出来る。広視野の検出器を用いてサンプルの全体像と定量性を確保した CT データを取得し、その後、吸収係数の定量性は失われるもの

の、その中の狙った部分の局所構造を高分解能の局所 CT によって調べる事が出来るようになってきている。BL20XU では、マルチスケールセットアップとして CMOS カメラを利用した、視野 6 mm (ピクセルサイズ 3 μm) と、視野 1 mm (ピクセルサイズ 0.5 μm) の 2 種類の X 線検出器を備えている。6 mm から 10 mm の大きさを持つサンプルについては、6 mm の視野の検出器で、回転軸を視野の外側に移動させてサンプルを 360 度回転させ CT に必要な像を得る、オフセット CT を使用して対応できる。

さらにオプションとして、BL20XU では 160 m のハッチ間距離を利用した、高エネルギー結像 CT [10] (ピクセルサイズ 50 nm、視野 50 μm) により、30 keV の X 線エネルギーで、サブ μm の分解能をもつ CT 装置を実現しており、これを分析に使用することも可能である。残念ながら 6 mm の最大視野の CT と高エネルギー結像 CT はハッチの構成が異なるため、同時に使用することは出来ず、セットアップを変更し、視野 1 mm の検出器と視野 50 μm の高エネルギー結像 CT でマルチスケール CT を、別のマシンタイムを使って行う。しかし、6 mm の最大視野を含むセットアップも 1 mm の視野の CT 装置を併設しているため、別々のマシンタイムで観察する場合でも、この 1 mm の視野の CT データを利用してサンプル中の位置関係を確認してから、局所観察を行うことが可能である (図 2)。これにより、やや力業ではあるが、最大視野 10 mm、最小分解能 150 nm 程度で、視野と分解能を切り替えてサンプル内を非破壊で観察する事が可能となった。

5. 統合 CT 環境 - マルチモード CT -

前述のように、完全に未知のサンプルの場合、内部物質の同定のためには、吸収 CT で得られる線吸収係数の情報だけでは不十分である。統合 CT 環境には、X 線回折のセットアップが含まれる。このセットアップでは、X 線を Fresnel zone plate (FZP) を用いて水平方向 10 μm 程度、垂直方向に 2 μm 程度に集光し、サンプルに照射してその回折線を取得する。検出器はピクセルサイズ 19 μm 、視野 40 mm で、同様

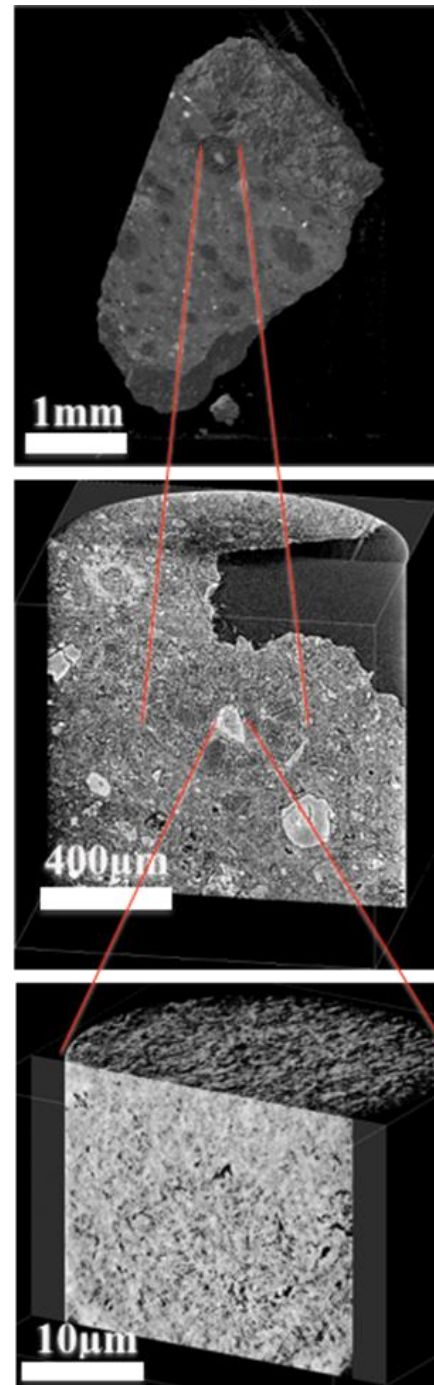


図 2 マルチスケール CT の一例。マーチソン隕石の 4mm 程度の試料中のコンドリユールを 3 μm (上)、0.5 μm (中)、50nm(下)のピクセルサイズの CT で観察した物。中心に白い鉱物が存在しており、その中身は、微細な樹枝状結晶が入り乱れた構造である事がわかる。これは硫化鉄鉱物が水によって変質することで形成される、トチリナイトの典型的な組織である。

に CMOS カメラを用いている。検出器は試料から 60 mm の位置に設置されており、30 keV の X 線の場合、D-spacing として、16 Å から 1.3 Å までを検出することが出来る。この範囲には代表的な珪酸塩鉱物の回折ピークがほぼ含まれており、サンプルの鉱物構成を調べるには十分な範囲を取得出来る。またカメラ長はパルスモーター制御で変更が可能のため、ターゲットとしている鉱物の回折ピークを分離するために最適なカメラ長 (D-spacing 範囲) を選択することも可能である。さらに、サンプルを集光 X 線に対して水平方向にスキャンしながら、各スキャンステップ位置で半回転させることで、X 線回折の情報を元にしたトモグラフィである、XRD-CT が可能になる [e. g. 11]。この手法によりサンプル内部の鉱物マッピングが、非破壊で可能になる。

また、現在開発中であるが、同様に集光 X 線を利用して、サンプルを透過する際のスポット位置変化を用いることで、走査型微分位相コントラスト CT を行う事が出来る [12]。これは既存の吸収 X 線 CT の検出器を流用し、カメラ長を 500 mm とすることで XRD-CT と同様のフローで実施可能である。この位相コントラスト CT を用いることで、炭素等の軽元素で構成される吸収係数の低い物質に対して、最大 1000 倍程度の高い感度を持ったイメージングを行う事が可能である [13]。図 3 は、このマルチモード CT によって得られた、隕石中のダイヤモンドの分布である。岩石中の炭素物質をはっきりと捉える事に成功している。今後 refractive index decrement (RID) と線吸収係数を用いた 2 次元ヒストグラムを作成し、DET と同様な定量的な物質同定を行う事も検討している。

これらのマルチスケール CT、及びマルチモード CT は、(高エネルギー結像 CT を除く) 全ての光学系、検出器を一つのハッチ内にセットし、PC 上の制御ソフトウェアのボタン一つで任意の光学系に自動で切り替えが可能である。従って、マルチスケール CT を用いてサンプルを観察しながら、重要な点を絞り込み、マルチモード CT で詳細な分析を行うことが一つのセットアップで可能となる。

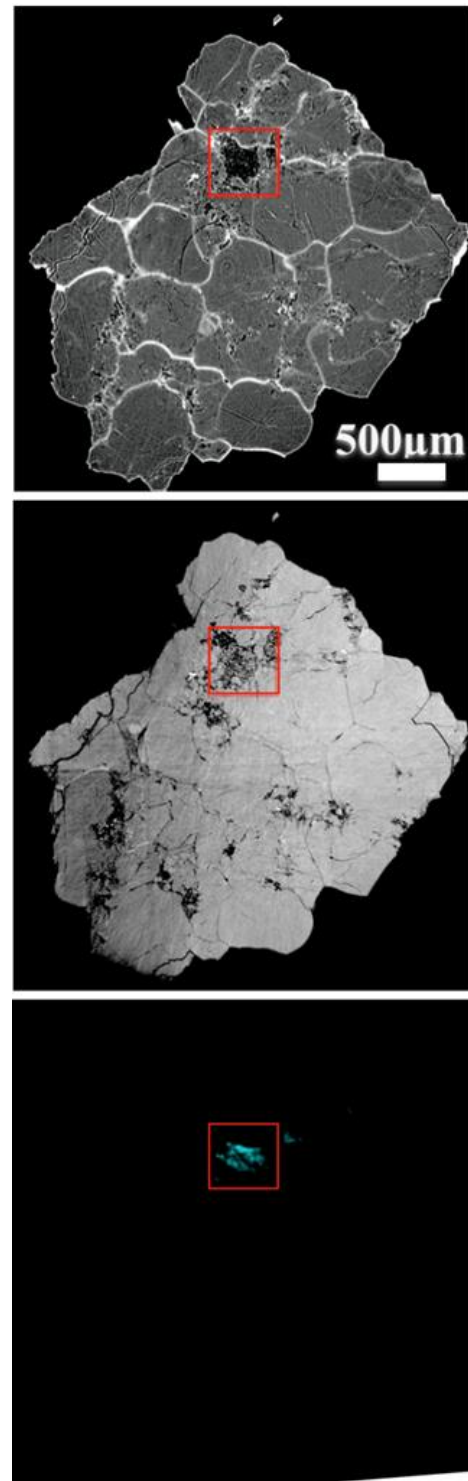


図 3 マルチモード CT の例。ユレーライト隕石である、Y-791538 隕石の、(上) 吸収 X 線 CT 像、(中) 微分位相コントラスト CT 像、(下) XRD-CT 像。吸収 CT 像では真っ黒な穴になっている赤枠部分に、位相コントラスト CT 像では多数の粒子が浮かび上がっている。さらにダイヤモンドの回折線を使用した XRD-CT では、その部分のみに像が示されている。

6. 将来の探査計画と、今後の課題

本稿では「はやぶさ2」サンプルの分析を目的とする、統合CT環境の開発状況を紹介した。このため、サンプルサイズ、X線エネルギーなどの実験パラメータは「はやぶさ2」サンプルをベースに設定している。しかし、今後は、NASAのOSIRIS-RExやJAXAの火星衛星サンプルリターンMMXなどの将来的なリターンサンプルの分析を検討する必要がある。最も注意が必要なこととして、サンプルサイズがあげられる。内部の構成要素は大幅に変化する事は無いので、必要な空間分解能はあまり大きく変化しない。しかし、サンプルサイズが変化することで、同じシステムでも達成可能な分解能は変化する。OSIRIS-RExでは20 mmを超えるサンプルの採取に成功している可能性があり、ビームサイズが最大6mm程度であるBL20XUの設備では全体を観察することは不可能である。さらに、MMXでは探査機を天体上に固定し、コアリングを行う可能性があり、この場合も、サンプルサイズは大きくなる。より大きな試料を高分解能で観察する場合、複数のビームラインの連携を利用したマルチスケールCT観察が必須になる。また、試料が大きくなった場合は、30 keVのX線では透過力が足らなくなる。40 keV、50 keVのより高いエネルギーでの高分解能CT装置も検討する必要がある。

また、地球外物質中には本稿で紹介した以外にも、glass with embedded metal and sulfides (GEMS) 粒子や Interstellar grain [17] など、1 μm 以下の極微細の組織が多く存在しているが、これらの構造をとらえるためには、分解能が不足している。さらにそれらの一部は炭素など軽元素から構成されており、未だに有機物粒子の3次元構造はCTで捉えられていない。10 mmを超える岩石試料中の有機物粒子などを観察するためには、30 keV以上のX線エネルギーで10 nm程度の分解能を持つ、軽元素に対応した高コントラストのCT装置が必要になる。もしくは、低エネルギーX線で高コントラストの高分解能ナノCT観察を行うために、試料の加工を行うことも考えられる。その場合、広視野CTのデータを元に、関心領域を高精度で抽出する試料加工スキームの構築が

必要である。これらも、今後の検討課題である。

統合CT環境は多くの選択肢を提供できる一方、実験操作、データ解析が複雑化の一途を辿るという、複合計測全般に共通する一般的な問題が存在する。もともとCTはそれ自体が3次元データ解析という、あまり一般的でない解析手法に習熟する必要がある。また、ラボ装置と違い、特にマシンタイムの制約が厳しい放射光CT装置では、装置の習熟に年単位の時間が必要である。こうした問題に対しては、操作系に対しては大幅な改良が加えられているが、同時にデータ解析に対して、統合CTデータ解析環境の開発が必要である。

また、放射光実験は非破壊分析が最大の特徴であるため、一連の試料分析では、多くの場合、最上流で行われる。このため、下流の分析に対して影響を与えないよう、非破壊、非汚染に最大限の注意を払う必要がある。結像CT、XRDや微分位相コントラストCTなど、集光ビームを用いたイメージングでは、有機物がダメージを受けることが検証実験から確認されているため、有機物に対しては、十分破壊分析となり得る。下流の実験に有機物の分子構造分析が予定されている場合、放射光実験を避ける、あるいは極力照射時間を短くする、集光ビームを使用した実験を避けるなど、注意が必要である。

非汚染に対しては、サンプルに触れる部分、また大気からの汚染に特に注意を払う必要がある。「はやぶさ2」サンプル分析に関しては、カーボンナノチューブからなるシートをサンプル保持に使用しており[14, 15]、大気遮断にはポリイミドチューブを使っている。これらについては、サンプルとの接触による汚染に対する評価も実施している[16]。しかし、ポリイミドは水分の透過性が高いため、長時間の分析には適していない。今後、大気遮断に関してはさらに開発が必要である。

初号機「はやぶさ」では、サンプルキャッチャーを開けるまでサンプルのサイズ等が分からない状況だった。しかし、既存の技術を応用して結果的に多くの成果を得る事が出来たのは非常に幸運だった。一方で「はやぶさ2」に対しては「はやぶさ」の経験を

生かし、早い段階から十分な準備を行う事が出来た。しかし、将来のサンプルリターン計画のサンプル分析についてはまだ開発要素は多く、さらに継続的な開発が必須である。

謝辞

本研究は SPring-8、BL20XU を用いて実施された。SPring-8 の安武博士には Enstatite whisker の CT データを提供していただいた。本研究は JSPS 科研費 JP15H03755、JP18H05479 の助成を受けた。

参考文献

[1] T. Nakamura et al., Itokawa dust particles: a direct link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites. *Science*, 333, 1113 (2011).

[2] A. Tsuchiyama et al., Three-dimensional structure of Hayabusa samples: Origin and evolution of Itokawa regolith. *Science*, 333, 1125, (2011).

[3] H. Yurimoto et al., Oxygen isotopic compositions of asteroidal materials returned from Itokawa by the Hayabusa mission. *Science*, 333, 1116, (2011).

[4] M. Ebihara et al., Neutron activation analysis of a particle returned from asteroid Itokawa. *Science*, 333, 1119, (2011).

[5] A. Tsuchiyama et al., Analytical dual-energy micro-tomography: A new method for obtaining three-dimensional mineral phase images and its application to Hayabusa samples. *Geochimi. Cosmochimi. Acta* 116:5-16 (2013).

[6] K. Terada et al., Thermal and impact histories of 25143 Itokawa recorded in Hayabusa particles. *Scientific Reports*. 8:1, (2018).

[7] L. A. J. Garvie and P. R. Buseck, Carbonaceous materials in the acid residue from the Orgueil carbonaceous chondrite meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* 41:633-642 (2006).

[8] M. Yasutake et al., Mineralogical

investigation of enstatite whisker in primitive carbonaceous chondrites. *LPSC conference* 2326:1728 (2020).

[9] M. Uesugi et al., Non-destructive observation of meteorite chips using quantitative analysis of optimized X-ray micro-Computed Tomography Earth. *Planet. Sci. Lett.* 299:359-597 (2010).

[10] A. Takeuchi et al., High-energy x-ray nanotomography introducing an apodization Fresnel zone plate objective lens *Rev. Sci. Instrum.* 92:023701 (2021).

[11] M. Uesugi et al., Three-dimensional observation of carbonaceous chondrites by Synchrotron radiation X-ray CT - quantitative analysis and developments for the future sample return missions - *Geochimi. Cosmochimi. Acta* 116, 17-32 (2013).

[12] A. Takeuchi et al., Differential-phase-contrast knife-edge scan method for precise evaluation of X-ray nanobeam. *Jpn. J. Appl. Phys.* 54 092401 (2015).

[13] 百生 敦, 位相コントラストX線イメージング. *放射光* 第10巻 273.

[14] K. Hirahara et al., Carbon nanotube plane fastener. *AIP Advances*, 1, 042105 (2011).

[15] M. Uesugi et al., Development of a sample holder for synchrotron radiation-based computed tomography and diffraction analysis of extraterrestrial materials, *Rev. Sci. Instrum.* 91:035107 (2020).

[16] K. Shirai et al., The effects of possible contamination by sample holders on samples to be returned by Hayabusa2, *Meteorit. Planet. Sci.*, 55:1665-1680 (2020).

[17] F. J. Rietmeijer., Interplanetary dust particles, in *Planetary materials* J.J. Papike eds., Mineralogical society of America (1998).

Wolter 3 型配置を取り入れた Advanced KB 結像光学系の開発

理化学研究所 放射光科学研究センター 山田純平

人間の目に見えないほどの小さな世界を観察したい。この探究心が古今東西の顕微鏡研究、延いては科学の発展を支えてきた。最近では超解像蛍光顕微鏡・クライオ電子顕微鏡がノーベル化学賞を受賞し、また物理学賞でなく「化学賞」を受賞した事実からも、顕微観察技術が多岐に渡る学術研究・応用研究に不可欠であることが伺い知れる。さて、X線をプローブとして顕微鏡を構築すると、どんな利点があるであろうか。X線の短波長性・高透過性などといった性質、および発展目覚ましい可視光・電子顕微鏡との差別化を考慮すると、「厚みを持ったバルク試料の内部構造を高空間分解能に3次元観察可能であること、同時に、X線分光分析技術との融合が可能であること」であると思われる。

このような特性を備えたX線顕微鏡の一つとしてAdvanced Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー光学系[1]に基づく結像型X線顕微鏡が開発されてきた。これまでに開発されたAdvanced KB ミラーは、1次元のWolter 1型ミラー[2]を直行直列配置した光学系(AKB-I) (図1(a))と言い換えることができ、鉛直・水平それぞれの方向に関して、双曲・楕円の凹ミラーペアの2回反射により試料からのX線を導く。全反射現象に基づきX線結像を行なうことができるため、色収差が無い点で顕微分光への応用に優れており、高反射率の点でハイスループットなトモグラフィ(3次元)観察に対して利点がある。またKB元来の直行直列配置を踏襲しているため、ミラー表面は平坦に近い形状を有しており、その形状を高精度に作製可能であることから、回折限界性能に迫る高空間分解能を実現可能である。これまでに、1枚の基板上に1次元Wolterミラーを高精度に作り込むことで安定性の高い光学系が構築され、線幅分解能で50nmを下回る性能や、X線吸収分光や蛍光X線分析といった

顕微分光への応用が実証されている[1, 3]。

しかしながらこれらの先行研究では、検出器の画素サイズと結像における拡大倍率によって幾何学的に分解能が制限されることを避けるために、数十メートルの大きなセットアップを必要としていた。AKB-I型配置においては主面(倍率の決定基準、図1(a))が楕円と双曲の中間あたりに存在し、実効焦点距離を作動距離や双曲ミラー長さそのものより短くすることができず、大拡大倍率のためにはカメラ長を大きく取らざるを得なかったわけである。また特に、直行直列配置としているため、試料から遠い側のミラーペアは必ずと倍率が低くなり、光学系の設計自由度や顕微鏡としての汎用性を制限してしまうという問題があった。

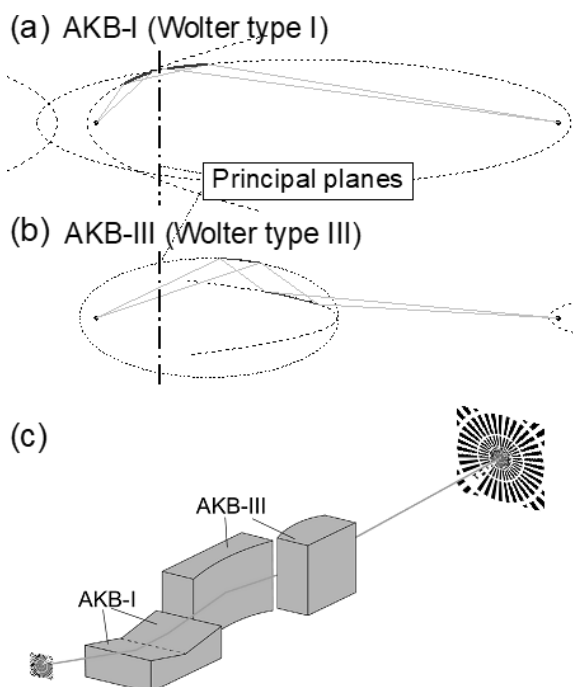


図1. (a, b) AKB-I型およびAKB-III型光学系の1次元断面図。(c) 本研究にて開発した結像光学系の概念図。

本研究では、Wolter 3 型配置を取り入れた新たな advanced KB ミラー (AKB-III) (図 1 (b)) [4, 5] を導入することで、上記の問題を克服する結像光学系を構築した。AKB-III 型光学系は、試料に近い側に楕円凹ミラー、次に双曲凸ミラーを配置している。最大の特徴は、双曲の凸ミラーを導入することで光を拡大する方向に反射することである。これにより、主面を試料側へ近づけることができ、全体として小型なセットアップにおいても拡大倍率を飛躍的に高くすることが可能である。従来の Advanced KB ミラーと同様、楕円と双曲の 2 回の反射により光路長一定のまま光を導き、近似的に Abbe の正弦条件を満たすためコマ収差を低減できる。本光学系に用いる各ミラー表面は、それぞれほぼ平面に近い非球面形状であることから、既存の超精密加工・計測技術により、高精度な作製が可能である。また、曲率の正負が異なる反射面を組み合わせることで、ペッツバル和 [6] が 0 へと近づき、結像光学系としての像面湾曲を比較的低減する効果も確認されている [4]。

本研究では、AKB-III 型光学系の倍率に対する設計自由度の高さを上手く取り入れ、図 1 (c) に示す AKB 1-3 型ハイブリッド光学系を設計・開発した [7]。鉛直方向に従来の AKB-I 型、水平方向に新たな AKB-III 型ミラーを配置し、互いの主面の位置をほとんど一致させつつ、全長 2 m において約 44 倍の拡大倍率を実現する。作動距離約 25 mm、開口数 0.001、反射面を Ir 成膜した場合のカットオフエネルギーを 15keV として設計している。

本光学系の構築にあたり重要となるのは、やはりその作製精度である。計算機実験による検討では、求められる形状精度約 2 nm PV と見積もられた [4]。大阪大学山内研究室にて開発された、超精密 X 線ミラー作製技術 (EEM 加工およびステッチング干渉計) [8-10] により、4 枚のミラー反射面を 1.5~2 nm PV の精度で作製した。

同時に、ミラーペア同士の相対配置の精度、いわばアライメント精度も重要となってくる。結像性能の安定性の観点から考えると、先行研究にて AKB-I 型ミラーが一体型基板に作り込まれたように [1], AKB-

III 型光学系も楕円・双曲のミラーペアが一体化したユニットとすることが望ましい。一方で、AKB-III 型光学系は 2 枚のミラーが対向配置をとるため、同一基板上への作り込みは適用できない。このため、以下の検討のもと、シリコン母材基板上への対向配置ミラーペアの固定化を試みた。

2 枚のミラーの相対配置として、結像特性に大きく影響を及ぼすのは図 2 (a) に示す相対角度および相対距離 (隙間方向) である [4, 5]。フレネル・キルヒホッフ回折積分に基づく計算機実験により、配置誤差が存在する場合の、焦点近傍での点拡がり関数 (PSF) を評価した (図 2 (a) 下段)。それぞれ数十 μrad レベル、数 μm レベルの配置誤差が結像におけるコマ収差を生むこと、また、微小なコマ収差は互いに打ち消しあうことを明らかにした。この結果に基づき、X 線を用いた集光 (縮小結像) 実験により、対向配置ミラーペアの固定化を実施した。集光後発散する X 線の波面誤差を、シングルグレーチング干渉計 [11] により測定しつつ相対角度を変化させ、コマ収差の最小化調整を行なった。調整結果の波面誤差プロファイ

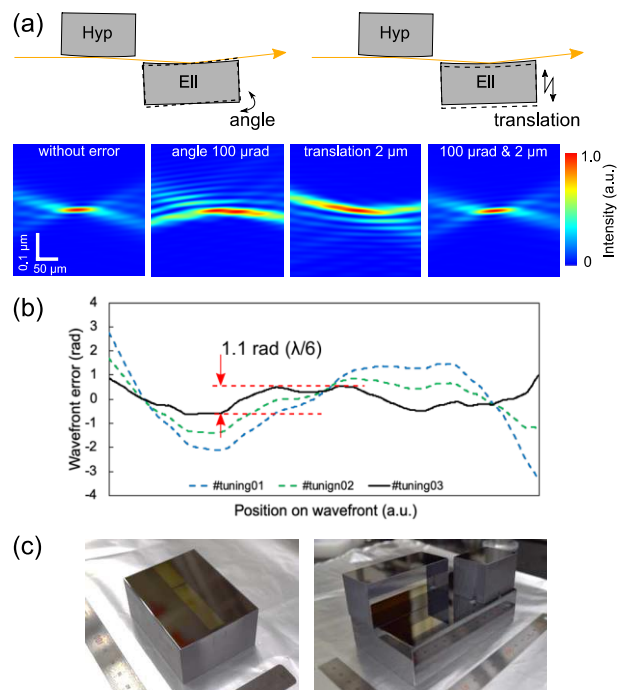


図 2. (a) AKB-III 型光学系のアライメントに関するシミュレーション結果。 (b) X 線波面計測によるアライメント評価結果。 (c) 開発したミラーの外観。

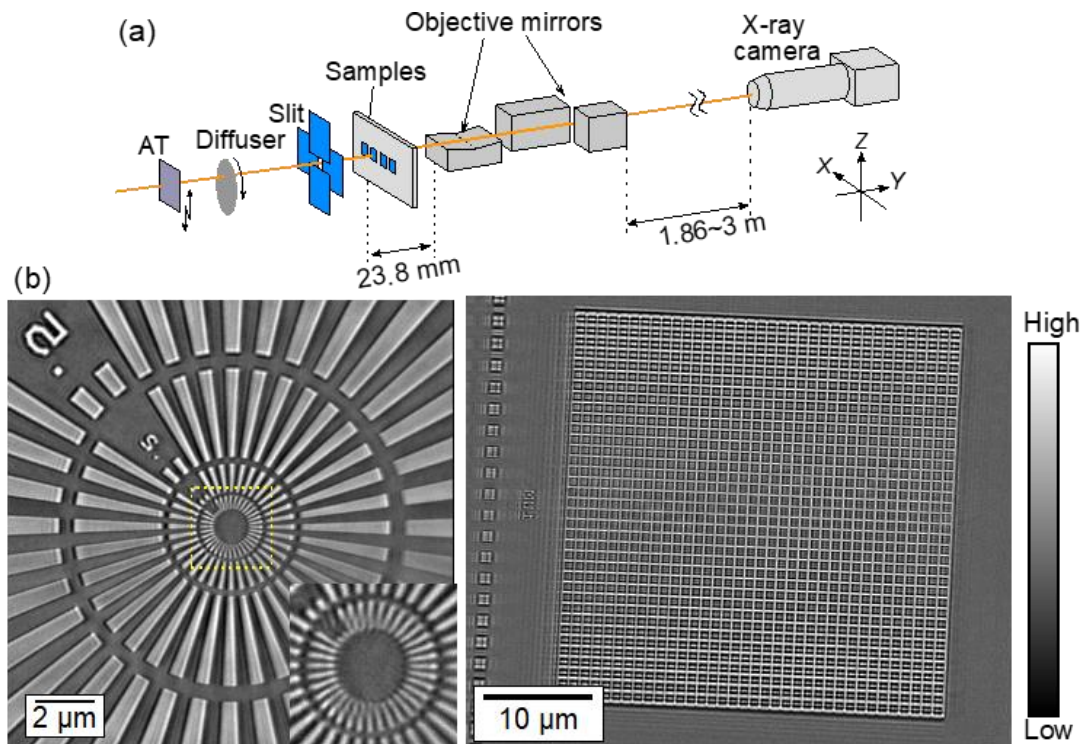


図3. (a) X線結像実験の光学配置概略図. (b) 取得したX線像.

ルを図2(b)に示す. 数回の相対角度調整により, コマ収差に対応する3次関数波面誤差減少している様子が示されている. 引き続きコマ収差関数を測定しつつ, 紫外線硬化樹脂を用いてシリコン母材基板へと対向配置を固定化した. 図2(b)黒線に固定化後の波面誤差, 固定後のミラー外観を図2(c)に示す. なお, 鉛直方向のAKB-I型ミラーは前述のように一体型基板上への作り込みにより作製した.

作製した結像ミラーを用いてX線拡大結像実験を実施した. 実験はSPring-8 BL29XUの実験ハッチ2にて行なった. 実験配置を図3(a)に示す. 原理実証のため, 照明光学系は導入しておらずほとんど平面波による照明となっている. 試料からのX線は結像ミラーにより1.86~3 m離れたレンズカップル型のX線カメラ(実効ピクセルサイズ 0.65~1.3 μm, 2048×2048pixel)へと導かれ, 拡大像を結ぶ. カメラ長および実効ピクセルサイズは, 所望の倍率・画角サイズに応じて調整した. タンタル製テストチャート(NTT-AT社 XRES0-50, 厚み500 nm)の光子エネルギー15 keVにおけるX線像を図3(b)左側に示す.

視野全体に均一なコントラストにて, 最小構造50nm線幅が解像されていることが分かる. また像特性は30時間以上に渡って安定しており, 9~15 keVの光子エネルギー範囲においてほとんど遜色のない結像結果が確認された[7]. また, 図3(b)右側に画角サイズ約54(横)×45(縦)μmで撮像した1μmピッチ格子パターンを示す. 特に縦方向において, 中心付近と画角の端領域でデフォーカスに起因するコントラストの差が観察でき, 結像ミラーの像面湾曲収差により実効視野(良好な分解能が得られる空間領域)が制限されていることが分かる. 得られた像より, 結像ミラーにより決まる実効視野はおおよそ縦11μm×横18μmであると見積もられた. 構築した顕微鏡をトモグラフィ観察に応用し, Si0.7mmの厚い基板上の300nm構造の3次元像取得にも成功した[7].

本実験で得られた像には, 図3(b)左側の最小構造付近からも分かるように, 水平方向AKB-III型ミラー由来のコマ収差が残存している. おそらく配置固定を行なった実験から結像実験までの期間(数ヶ月)の間に, 温度や湿度の変化といった要因で配置ずれ

が生じたと予想される。その後の研究において、高安定な配置調整機構が開発されており、収差特性の非常にきれいな X 線像の取得が可能となっている。また、見積もられた実効視野は比較的小さな値となったが、これは焦点距離の長い、もしくは斜入射角の大きなミラー設計により像面湾曲収差が緩和され、実効視野が増大することが見込まれている。例として、光子エネルギー 8keV において多層膜反射を用いる大入射角結像ミラーでは、30~40 μ m 程度の視野を達成している。本実証実験においては、ミラーのパーティクル汚染を避けるためアッテネータ (Si 0.2~0.5mm 厚) を使用しており、X 線像 1 枚あたりの露光時間は 1~60 秒程度に留まっていた。現在では、真空/He 環境の導入によりアッテネータが不要になり、また空気パスによる吸収が減ったため、露光時間 0.2~10 秒程度まで短縮されている。今後、照明光学系の導入により、さらに 5~20 倍程度の向上を見込んでいる。顕微鏡システムの今後の課題として、「色収差無し特性を活かした 2 次元/3 次元の X 線顕微分光応用」および「位相イメージング手法の確立」が挙げられる。特に前者は、オペランド XAFS イメージングやナノ XAFS-CT として、固体触媒・デバイスを対象とした幅広い研究分野へと寄与していきたい。最後に蛇足になるかもしれないが、AKB-III 型結像ミラーの集光光学素子としての利用について、特性と展望を述べたい。ミラーの結像特性が集光の安定化に寄与すること [12] に加えて、光学系の主面をシフトすることにより倍率の設計自由度を高める AKB-III 型光学系は、次世代放射光施設における硬 X 線ナノ集光においても活用の余地があると考えられる。近年世界中で、急速に低エミッタンス化リング光源の建設が進められているが、現状予測されている光源性能は、特に水平方向光源サイズ/エミッタンスにおいて「回折限界」にそれでも届かない。このため、KB ミラーにより 100 nm 以下の硬 X 線集光を、2 次・仮想光源無しに行なうためには、ビームライン長さ、集光スルーポットの減少、10 mm レベルの短い作動距離の制限、のいずれかが必ず問題となる。AKB-III 型結像ミラーは、この問題を解決可能な候

補の一つと考えられ、実際に現在、倍率の設計自由度を活かした X 線自由電子レーザー-SACLA 向け sub-10 nm 集光光学系の開発を進めている。

本研究は、名古屋大学大学院工学研究科 松山智至准教授、大阪大学大学院工学研究科 山内和人 教授、理化学研究所放射光科学研究センター 石川哲也センター長・矢橋牧名グループディレクター・香村芳樹ユニットリーダー、株式会社リガク X 線研究所 表和彦所長・武田佳彦博士・廣瀬雷太博士との共同研究によるものである。また本研究は、理化学研究所基礎科学特別研究員制度、JSPS 特別研究員制度 (DC1)・科研費「基盤研究 A」、JST A-STEP の支援の下、遂行された。

参考文献

- [1] S. Matsuyama et al.: Sci. Rep. 7, 46358 (2017).
- [2] H. Wolter: Ann. Phys. 445, 94-114 (1952).
- [3] S. Matsuyama et al.: Opt. Express 27(13), 18318-18328 (2019).
- [4] J. Yamada et al.: Appl. Opt. 56(4) 967-974 (2016).
- [5] J. Yamada et al.: Opt. Express 27(3), 3429-3438 (2019).
- [6] M. Born and E. Wolf: "Principles of Optics, 7th ed." Cambridge University, (1999).
- [7] J. Yamada et al.: Optica 7(4), 367-370 (2020).
- [8] K. Yamauchi et al.: Rev. Sci. Instrum. 73(11), 4028 (2002).
- [9] K. Yamauchi et al.: Rev. Sci. Instrum. 74(5), 2894 (2003).
- [10] H. Mimura et al.: Rev. Sci. Instrum. 76(4), 045102 (2005).
- [11] J. Yamada et al.: Sensors 20, 7356 (2020).
- [12] 松山智至: 放射光 31(1), 22-31 (2018).

オンライン雑感

東京工芸大学 豊田光紀

2021 年度から、X 線結像光学研究会が発展的に日本光学会の研究グループに改組された。お祝いを申し上げるとともに、籠島先生を始めとする研究会幹事の先生方のご尽力に感謝を述べたい。

さて、昨年度の後半に編集委員の先生から本欄への記事の依頼を頂いた。筆者が応用物理学会のプログラム編集委員を担当していることもあり、講演会の報告などをお薦め頂いたが、内容に制限はないとのことであった。講演会の報告は学会のホームページで既に公開されていることもあり、重複を避けるためにも本稿では少し異なる視点から、今般のコロナ禍下で急速に導入が進む、「オンラインツール」による研究や教育環境の変化について雑感を述べたい。

応用物理学会では、2020 年の春季講演会がコロナ感染の影響から中止となった。講演プログラムや予稿集は既に完成していて、これらを学会 WEB サイトから公開することで、講演を公表扱いにする処置が取られた一方で、参加者からは講演会の再開を望む声が多く寄せられた。続く、秋季講演会からはオンライン会議ツール (Zoom) を基盤とした運営が採用された。初めてのオンライン講演会への不安感からか、講演数は従前の 6 割程度に減少したものの、参加者は約 9000 人に増加した。参加への時間・経済的コストが削減され、企業の研究者が参加しやすくなったことが一つの原因かもしれない。学会事務局の迅速なシステム開発のおかげで、参加者は WEB 上のプログラムから参加したいセッションや講演を選択すれば、Zoom 会議室に入室できたため、運営に大きな混乱は起きなかった。

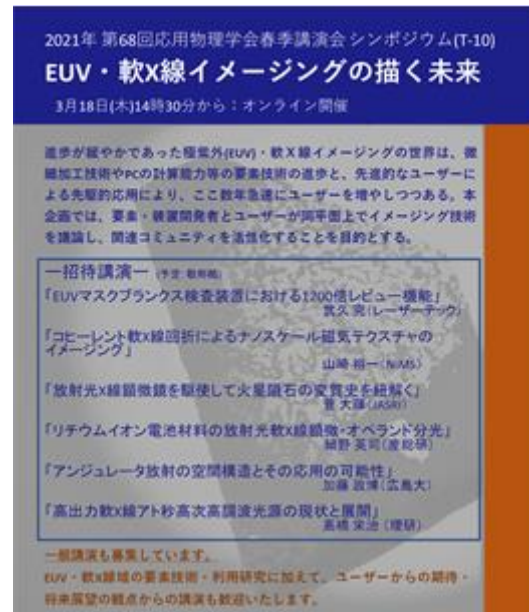


図 1. EUV・軟 X 線イメージングの描く未来の概要

今般のワクチン接種に関するシステムトラブルの報道と比較すれば、短期間に完成度が高い会議システムを構築した学会事務局の実力は称賛されるべきと思う。Zoom 上では講演スライドや音声はとても明瞭で、講演会の主たる目的である「先端研究の公表・共有」の面では、従来の対面講演会よりも優れているとも感じた。実際、プロジェクタやマイクの設備が参加者数に対して貧弱な場合の対面講演会と比較すれば、オンライン講演会は、よく見え、よく聞こえる。

21 年の春季講演会では、X 線結像光学研究会と共催で「EUV・軟 X 線イメージングの描く未来」というタイトルでシンポジウムを企画した。シンポジウムの概要(ポスター)を図 1 に示す。このシンポジウムは、分子研・大東氏、兵庫県

立大・原田氏と共同で世話人となり、2015年に初回を分子研で開催した。100人程度の参加者により光学素子・光源開発、応用事例、また他分野研究者からの提言など、複数の観点から有意義な議論が進んだ。第2回の開催を世話人一同で検討していた矢先のコロナ禍であったが、その利点を実感したこともあり6年ぶりにオンラインで開催することとした。コロナ禍下で開催する不安をよそに、150名程度の参加者があり盛会であった。(詳しい開催報告は学会のHPを参照頂きたい)。また、このシンポジウムでは、講演の録画配信も試行された。講演後1週間程度、参加者は講演の動画を視聴でき、所用等でシンポジウムを視聴できない参加者には便利なサービスである。一方で、講演者の中には、最新の研究データの取り扱いの不安などから録画公開を望まない場合がある。行き違いがあると後々、大きな影響があるため、録画の可否について講演者の意向確認を確実にすることも、シンポジウム開催準備の新たな項目として重要であると感じた。

次に、オンライン講演会の弱点や欠点について考えたい。発表後の質問や議論が盛り上がらないことに、オンライン講演会特有の問題があると感じている。筆者は、中分類7.1「X線技術」や上述のシンポジウムで座長を担当したが、対面形式と同様に発表終了後に質問を募っても、従前と比べて明らかに反応が少なく困惑した。沈黙に耐えかねてポツポツと質問やコメントは出るものの、中々議論が活発化しない場面が散見された。会議後に参加者に感想を求めたところ、

「他に誰が参加しているのか分からない」、
「質問をするタイミングや手順(挙手ボタン)が分からない」などのコメントが寄せられた。これらは、オンライン会議システムの操作法の問題に留まらず、議論の活性化には、参加メンバー一覧の周知や、発言・表情の共有が大切な役割を果たしていることを示唆している。現状

のオンライン会議システムは、発表者と参加者(聴衆)との間のコミュニケーションでは十分な情報を提供できるが、聴衆の間のそれは僅かであり、これが質問・議論の発展を妨げている要因の一つなのであろう。別の言い方をすれば、オンラインツールでは、空気を読む、間を計る、または、顔色を伺うことが難しいのではと思う。参加者間の有機的なコミュニケーションを可能とするシステムへの改良が長期的には望まれるが、まずは、Zoomなど現有ツール上での工夫も重要である。質問のきっかけが捉えにくいのであれば、例えば、座長から発表内容に関連する参加者を指名して、(示唆に富む良い)質問をしてもらうことも考えられる。筆者は講演会で試したことは未だないが、大学のオンライン講義では、これが呼び水となり、議論が活発となることが度々あった。

最後に、オンラインツールの教育への応用について、筆者の例を挙げて現状を紹介したい。2020年4月に関東地方に緊急事態宣言が発令されてから、所属する大学の講義はオンラインを中心に行われている。筆者は、学部生を対象に光学設計を講義しているが、これらの物理系の科目では黒板への板書を主として、必要に応じてパワーポイントを使う場合が多いようである。オンラインで講義や演習をする上で一番困るのは黒板がないことだ。大学の講義室には、通常、大きな黒板が4面ある。板書に時間がかかることで、講義の進行や分量が丁度良くなること、また、多くの板書を一度に見られることが利点で、使えなくなって、じっくりと物事を考える物理分野の講義に黒板が適していると再認識した。作図や数式が多い光学設計の講義では、PCにつないだ書画カメラで、講義ノートや作図を撮影することで黒板を代用し、YouTubeを通して1時間程度の講義ビデオを学生に配信している。書画カメラは黒板1面分くらいの情報量しかなく、学生は動画を止めたり、巻き戻したりすることで、補いながら受講して

いるようである。YouTube には、視聴率を表示する機能があり、理解に手こずる箇所は繰り返し見るため高視聴率に、冗長な部分は早送りされるため、視聴率が下がり表示される。視聴率を適度な一定値に保つことは教員にとって良いプレゼンの練習になるが、一方で学生から見た講義の優劣が明示されるため、いい加減な講義はできず気が抜けない。活用の是非を別にすれば、オンライン講演会に対しても同様な視聴率を計測することは容易と思われる。電子ジャーナルと検索エンジンの出現が、impact factor や h-index などの評価手法を生み出した歴史を考えると、近い将来、オンライン講演会に対しても数値的指標を計測・評価する流れが出てくるかもしれない。

コロナ感染が収束するまで、しばらくの間はオンライン講演会と上手く付き合う必要があると思われる。現状のオンラインツールには一長一短があり、その特性を活かし補完する講演会の運用が求められる。関連して、オンラインと懇親会との相性が悪いのは見逃せない問題である。酒席での情報交換から研究の良いアイデアが湧く経験は皆にあると思われる。願わくは感染が着実に収束し、次回の X 線結像光学シンポジウムは対面で行いたいものである。

編集部より

X線結像光学研究会は、本年4月より日本光学会の「X線・EUV結像光学研究グループ」として組織改編致しました。年2回発行してきた本ニュースレターは、「X線・EUV結像光学ニュースレター」として、これまで通り発行致します。これまでと同様のご支援・ご協力をよろしくお願い申し上げます。今号にホットな話題をご寄稿頂いた先生方に感謝申し上げます。COVID-19の世界的な流行が続く中、様々な制約がございますが、皆様の研究活動の益々のご発展をお祈り申し上げます。

(文責・高野秀和)

【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・EUV結像光学ニュースレター
No. 53 (2021年5月)

発行 一般社団法人 日本光学会
X線・EUV結像光学研究グループ
(代表 兵庫県立大学 籠島靖)

編集部 山内和人 (大阪大)、西野吉則 (北海道大)、
齋藤彰 (大阪大)、松本浩典 (名古屋大)、
東口武史 (宇都宮大)、高野秀和 (理研)
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp
