

The International Conference on X-ray Optics and Applications (XOPT2023) 会議報告

公益財団法人高輝度光科学研究センター
ビームライン技術推進室 小山 貴久

1. はじめに

2023年4月18日～20日の日程で横浜市のパシフィコ横浜においてThe International Conference on X-ray Optics and Applications (XOPT2023)^[1]が開催された。XOPTはThe Optics and Photonics International Congress (OPIC2023)^[2]を構成する13の専門国際会議の1つで2016年から毎年開催されており、Conference chairは、理化学研究所放射光科学研究センターの石川哲也センター長と大阪大学の山内和人教授が務めている。第1回のXOPT2016については本誌に報告がある^[3]。なお、OPICは国内最大級の光科学の国際会議で、2012年から毎年横浜で開催されている。OPIC2023は4月18日から4日間で開催され、4月20日の時点で1,000名弱が参加していると事務局から聞いている。

2. 会議の概要

表1にプログラム概要と各セッションの発表件数を示す。1日目は、6件の招待講演と2件の口頭発表があった。この日はOPICプレナリーセッションがあり、2件の招待講演が行われた。最後にXOPT Banquetが開催された。2日目は、1件の招待講演と3件の口頭発表、XOPTと他の2つの専門国際会議であるThe 12th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS2023)とInternational Conference on High Energy Density Sciences 2023 (HEDS2023)との合同セッション(合計3件の招待講演)が行われた。この日はポスターセッションが行われ、21件の発表があり、OPICと同時に開催され500社弱が出展した光学機器関連企業の展示会 OPIE'23 (OPTICS & PHOTONICS International Exhibition 2023)^[4]とともに展示ホール内で開催され、ポスターセッションと同時に企業展示を見学することができた。3件の企業

表1 プログラム概要と発表件数

4月18日	<ul style="list-style-type: none"> ・ Opening ・ Beamlines I & Metrology I 3件 (うち招待講演3件) ・ Beamlines II 2件 (うち招待講演2件) ・ Methods & Applications I 3件 (うち招待講演1件) ・ OPIC Plenary I 2件 ・ XOPT Banquet
4月19日	<ul style="list-style-type: none"> ・ Beamlines III & Metrology II 2件 (うち招待講演1件) ・ X-ray Telescopes 2件 ・ Joint Session 3件 (うち招待講演3件) ・ Poster session 21件 ・ Applications II 3件 (企業発表) ・ OPIC Plenary II 3件 ・ OPIC Banquet
4月20日	<ul style="list-style-type: none"> ・ X-ray Optics I 5件 ・ X-ray Imaging I 5件 (うち招待講演1件) ・ X-ray Imaging II & Beamlines IV 3件 (うち招待講演1件) ・ X-ray Optics II 6件 ・ Closing

発表 (DECTRIS Ltd.、XRnanotech GmbH、PALM Scientific) があり、その後、OPICプレナリーセッション、OPICレセプションが催された。3日目は、XOPT単独のセッションとなり、2件の招待講演、17件の口頭発表、最後にClosing remarksが述べられ閉会した。

3. 主な講演の内容

以下に主な講演内容を紹介する。

Argonne National LaboratoryのX. Shi氏はAPSの波面計測の現状について報告を行った。計測系の手

法は回折格子干渉計、スペックルトラッキング、符号化マスクを用いる手法が紹介された。波面センサーはズーム可能なものやコンパクトなものがあり各ビームラインに最適化されたものを使用することであった。測定例として屈折レンズを測定した結果が紹介され、曲率、厚さ誤差、欠陥の有無などを記録したデータベースを作成し、数十から数百のレンズピースを用いる Transfocator のレンズ選定に役立っている結果が報告された。

Brookhaven National Laboratory の M. Idir 氏は NSLS-II 施設の X 線反射型光学素子表面の計測機器について紹介を行った。計測機器は次のものがあり、Long Tracing Profiler (LTP)、Nanometer Optical component measuring Machine (NOM)、Nano-accuracy Surface Profiler (NSP)、Fizeau interferometer、White light interferometer、Stitching Shack Hartmann Optical Head (SSHOP) などである。これら計測機器の繰り返し測定精度、絶対精度、装置間誤差などが報告された。ツイスト成分が測定できる 2 次元の形状計測が重要で 2 次元画像を繋ぎ合わせるステッチングを行う解析ソフトの開発が紹介された。さらに、最近の試みとして、波面計測で形状を計測しイオンビーム加工で必要な部分を削る wavefront guided LASIK、KB 集光ミラーのリアルタイムフィードバックアライメントが紹介された。

Elettra の M. Zangrando 氏は自由電子レーザー施設 FERMI の光ビーム輸送系と診断系の現状についての報告を行った。FERMI はシード型 FEL で現在 2 本のビームラインを持ち、FEL1 では 1 段階の High Gain Harmonic Generation (HG) 方式で波長 20~100 nm を発生させる。FEL2 は 2 段階の HG 方式で波長 4~20 nm を発生させる。パルスエネルギーは 10~250 μ J、パルス幅は 20~100 fs である。アップグレード計画では 2027~2028 年に波長 2 nm まで短波長化し、パルス幅は < 10 fs を発生させることである。ビームライン輸送系のミラーコーティングの変更、フィードバックシステムを備えた分岐遅延光学系の現状などの報告があった。機械曲げによる形状可変 KB 集光ミラーの評価で波面センサーによる評価と、PMMA (ポリメタクリル酸メチル樹脂) に付けた集光ビームの照射痕の評価とを比較した結果が報告された。

Brazilian Synchrotron の B. C. Meyer 氏は高エネルギーズームトモグラフィビームライン MOGNO の光学機械設計と立上調整について報告を行った。KB 集光ミラーで 2 次光源を形成し、それからのコンベームを利用する。2 次光源から検出器までの距離は 85 m で、試料の配置と 2 次光源のサイズで視野と空間分解能が決まり、設計では視野 150 μ m~85 mm、空間分解能 120 nm~55 μ m である。3 つのエネルギーに特化し 21.5 keV、39 keV、67 keV から選択し、エネルギー分解能は $\Delta E/E = 10^{-2}$ と高スループットである。KB 集光ミラーは W/B₄C 多層膜を 3 つのストライプでコーティングしている。集光ミラーメカの振動を有限要素法でシミュレーションし解析を行っており、ミラーホルダをボルトで 3 点止めした時と接着材で 3 点止めした時の比較等を行っていた。

SLAC の T. Sato 氏は SPring-8 BL19LXU で Time-resolved Rocking Curve Imaging (TRCI) を行った結果について報告した。バンチフィリングとチタンサファイヤレーザー、X 線チョッパーを同期させ、シリコンやダイヤモンドにレーザーを照射した直後の歪みが波紋のように伝搬していく様子が観察された。

Aichi Synchrotron Radiation Center の H. Kunieda 氏は蛍光イメージングのための多層膜光学系の設計について報告を行った。試料からの蛍光 X 線を多層膜ウォルターミラーで 2 次元検出器に結像させる。Pt/C 多層膜で斜入射角は 1.2 deg、Co-K 線 (6.9 keV) 用で多層膜周期 4.5 nm とした。反射率 50% で空間分解能 1 μ m のイメージング結果が報告された。

Helmholtz-Zentrum Berlin の A. F. Herrero 氏はブレード型回折格子の新しい作製法について報告を行った。電子ビームリソグラフィ法でブレード型格子の斜辺に当たる部分を Gray tone 露光でシリコン基板に形成する。さらにシリコンの熱酸化と除去を行うことで滑らかな面が得られるとのこと。12.5~1850 eV で反射率測定を行い高い反射率が得られていた。

X 線望遠鏡の開発として 2 件の発表があった。1 つは、Tokyo Denki University の K. Tsuchiya 氏から炭素繊維強化プラスチック基板とニッケルリン薄膜を組み合わせたミラーの開発状況の報告があった。作製法を改良し、ミラーの反りが 55 mm 角で PV 100 μ m 以内に抑えることができたとのこと。もう 1 つの

発表は、Nagoya University の R. Fujii 氏から $\phi 60$ mm、長さ 220 mm、厚さ 2 mm の Ni 製望遠鏡用ミラーを電鍍法で作製し、評価した結果について報告があった。SPring-8 BL29XU で評価を行い、 $\phi 70$ mm のビームを用いて 10~15 keV の X 線で 3 秒角の半値全幅、17 秒角の Half power diameter が得られた。

Osaka University の K. Yamauchi 氏は合同セッションの招待講演で SACLA の sub-10 nm 集光ミラーの開発について発表を行った。SPring-8 BL29XU を利用して sub-10 nm 集光を達成した KB 集光ミラーの開発から SACLA における Advanced KB 集光ミラーを利用した sub-10 nm 達成までの開発の進捗が発表された。

3 件の企業発表があり、1 件目は DECTRIS Ltd 社の C. Schulze-Briese 氏から EIGER2 CdTe 検出器の紹介があった。高エネルギー対応で 100 keV まで高い量子効率で検出可能、8 bit であれば数 kHz のフレームレートで観察可能であるとのこと。2 件目は XRnanotech GmbH 社の F. Döring 氏から回折型、屈折型の光学素子作製の紹介があった。Paul Scherrer Institute (PSI) からスピノフした会社で、オフセットゾーンプレート、スパイラルゾーンプレート、透過型回折格子、反射型回折格子の作製の紹介があり、2 光子重合による 3D プリンターを利用した、レンズアレイ、キノフォーム型屈折レンズ、波面補正プレートの作製の紹介があった。さらに、ゾーンプレートと屈折レンズを組み合わせた色収差補正レンズの紹介があった。また、レーザーまたは電子ビームのグレースケール露光技術によるブレード型回折格子の作製が可能であるとのこと。3 件目は PALM Scientific 社の S. Antipov 氏からダイヤモンドレンズの紹介があった。レーザーアブレーションで回転放物面形状に加工し、さらに研磨で形状誤差 25 nm に仕上げているとのこと。レンズの開口と最小曲率半径で幾つか種類が選択できるとのこと。

PSI の T. Mamyrbayev 氏は XFEL 応用のための回折光学素子について報告を行った。回折光学素子によりビームを 2 つ以上に振幅分割し、一方のビームは試料を通過し、他方のビームは規格化のために利用する。European XFEL においてシリコン製の Beam-splitting off-axis ゾーンプレートを用いて 3 つの集光

ビームを形成し、試料の有無とレーザー照射部を通った X 線を同時に記録することで吸収スペクトルのポンププローブ計測を行う。また、SwissFEL のポンププローブ計測において、KB 集光ミラーと集光点との間にダイヤモンド製回折格子を配置し、エネルギーバンド幅 3% の集光ビームを 2 つに分割し、試料の有無でショット毎のスペクトルの規格化を可能としている。

Osaka University の J. Yamada 氏は SACLA において集光ビームサイズ 7 nm、集光強度 10^{22} W/cm² を達成した開発の詳細を発表した。まず、既存の 100 nm 集光ミラーシステムで SACLA BL3 での光源サイズを見積もり、それを元に Advanced KB 集光ミラーを設計した。超高精度なミラー作製において、格子干渉計で 2 次元波面を計測し、差分成膜でミラー形状にフィードバックした。ミラーの姿勢制御はスティックスリップ型のピエゾアクチュエーターを採用することで安定性が 22 時間以上に向上したとのこと。集光ビームの焦点深度が 2 μ m であるので、試料の光軸方向の位置合わせは白色干渉計を用いて行うとのこと。

Elettra の M. Manfreda 氏は波面計測手法の 1 つである Hartmann センサーを用いて FERMI の光輸送光学系の評価と光源位置の変化を調査した。光学系の評価として機械曲げによる形状可変 KB 集光ミラーの評価を行った。光源位置変化の調査として、加速器のパラメータ違いによる光軸方向の光源位置変化を調査した。アンジュレータ台数によるゲインカーブと光源位置変化との関係や、位相シフター、分散セクションの電流、シード遅延などの細かなパラメータ変化による光源位置の変化を調査していた。

University of Lisbon の P. Estrela 氏はテーブルトップ型の高次高調波 EUV 光源とスパイラルゾーンプレートを用いて光渦を形成した結果を報告した。波長 800 nm の 19~27 次の高調波で波長 42~29 nm の EUV 光を発生させ、スパイラルゾーンプレートで集光する。集光点はドーナツ状の強度分布をしている。波長に対して焦点位置が変わり、全波長を使用して 10 mm 程度の焦点深度を持つビームを形成した。

Göttingen University の J. Frohn 氏は PETRA III P10 ビームラインにおいて KB 集光ミラーと X 線導波路を用いて超解像インラインホログラフィを行っ

た結果を報告した。ホログラムの明視野とその外側の回折光も再構成に利用し超解像を行うものであった。50 nm line & space を観察し半値半幅で 11.2 nm 分解能が得られた。

RIKEN の G. Yamaguchi 氏は高開口数 (NA = 0.01) 硬 X 線インラインホログラフィの開発について報告を行った。シミュレーションによりインラインホログラフィで 10 nm 分解能を得るためには 10^{11} ph のフォトン数が必要であると検討した。SACLA Sub-10 nm 集光システムは NA が 0.01 でありフォトン数 10^{11-12} ph でこの見積りを満たしている。また、次世代の SPring-8-II になれば 10^{13} ph となる見込みとのこと。SACLA で 9.1 keV の X 線を使用し、中空ポリスチレン微粒子のインラインホログラフィをテストした。ショット毎にビーム強度分布が異なる XFEL 光ではフラットフィールド補正が困難ではあるが、再構成した試料像が得られた。

The University of Tokyo の K. Sakurai 氏は SPring-8 BL07LSU のタイコグラフィイメージングシステム CARROT を用いて哺乳類細胞の XAFS イメージングを行った。酸素と窒素の吸収端付近でエネルギースキャンを行い、タイコグラフィで得られた画像で画素ごとに吸収スペクトルが得られた。細胞内構造に対応する吸収スペクトルの分類を機械学習で行った結果が示された。

Korea Advanced Institute of Science and Technology の K. Lee 氏は空間領域 Kramers-Kronig の関係式を用いた位相ナノトモグラフィを開発した結果を報告した。ゾーンプレートを使用した結像型顕微鏡の試料場のフーリエ空間 (後ろ側焦平面) の半分にカットオフフィルター (シリコン板) を挿入する。対称にフィルターをかけた 2 枚の画像から空間領域 Kramers-Kronig の関係式より、強度分布から試料の位相分布が求まるとのこと。ホロトモグラフィやタイコグラフィのように試料をスキャンしなくてもよいことがこの手法の利点であるとのことであった。

MAX IV の D. Carbone 氏は結晶試料の Bragg 反射した回折パターンから試料像再構成を行う Bragg タイコグラフィの開発について報告を行った。この手法の開発の歴史から MAX IV における開発まで紹介を行い、試料の歪み、磁性、スピンなどの物理量が 3

次元で観測可能であるとのこと。

DESY の M. Lyubomirskiy 氏はマルチプローブを用いたタイコグラフィの開発について報告を行った。タイコグラフィは相互に非干渉なモードであれば重なり合った回折パターンからでも再構成できるとのこと。複数のビームを同時に試料の異なる場所に照明し、少ないスキャン範囲で広い領域を観察する。3D プリンターで屈折レンズアレイを作製し複数 (2~6) の集光ビームを形成した。さらに幾つかのビームに位相板を挿入し光渦を形成することで相互に非干渉なビームとした。テストチャートや IC 回路基板を観察し、分解能 100 nm 程度で広い視野 85 μm が得られた。

ESRF の J. Reyes-Herrera 氏はビームラインシミュレーションコード OASYS に拡張機能を追加し、ESRF ビームラインの挿入光源のパワーマネージメント、光輸送、コヒーレンス伝搬のシミュレーションモデルを開発し、熱負荷が激しくなった ESRF-EBS のビームラインに適用した結果を報告した。

PSI の N. Samadi 氏は屈折アキシコンレンズの開発について報告を行った。アップグレードを予定している SLS ではビームのサイズ、発散角が小さくなるため、TOMCAT ビームラインの透過型 X 線顕微鏡装置で使用されているコンデンサーゾンプレート全体を照明することができない。そこでアキシコンレンズを使用してビームをドーナツ状に広げ、全体を照明できるようにしたいとのこと。3D プリンターでレンズを作製しており、形状は円錐状と鋸歯状が幾つかあり、それぞれの強度分布などを調べた。

ESRF の R. Celestre 氏は傾斜 X 線レンズによる焦点距離の調整について報告を行った。複合屈折レンズの最終段に 1 次元屈折レンズを挿入しこれを傾けることで水平、垂直の焦点位置を微調整できるとのこと。

University of Twente の I. Makhotkin 氏は MESA+ NanoLab で開発しているシリコン、SiC、ポリマーのナノ集光レンズについて紹介を行った。深掘りエッチング技術の改良によりエッチング時の側壁の粗さが低減したとのこと。シリコン製ナノ集光レンズでは集光サイズ 170 nm \times 190 nm が得られている。SiC 製ナノ集光レンズでは、形状はシリコン製ほど滑らかではないが、集光サイズ 186 nm \times 275 nm が得られ

ている。3D プリンターで製作したポリマーレンズの紹介があったが、X線照射で変形するとのこと。

DESY の K. V. Falch 氏は焦点距離可変の複合屈折レンズの開発について報告を行った。1次元の放物面レンズの頂点の曲率を光軸と直交する方向に沿って変え、レンズをこの方向に沿って挿入退避することで焦点距離を変えるものである。レンズは2光子重合による3Dプリンターで製作した。PETRA III P06で実験を行い、8.0~8.2 keVで焦点距離が一定になるように補正できることを確認した。

PSI の P. Qi 氏は色収差補正したレンズの開発について報告を行った。発散型レンズとして屈折レンズ、集光型レンズとしてゾンプレートを用い、これらを組み合わせることで色収差が補正できるとのこと。彼らはこれまで6.2 keVを中心に1.5 keVのバンド幅が色収差補正されたアクロマート光学系を開発した。今回、屈折レンズとゾンプレート間の距離を最適化することで、アクロマートの4倍広いエネルギー範囲で焦点距離がほぼ一定になるアポクロマートとしたとのこと。走査型顕微鏡で集光サイズは940 nm × 740 nm FWHMであり、テストチャートを観察しエネルギー範囲7.5~12.5 keVでボケの少ない鮮明な画像が得られていた。ゾンプレートを形成した基板の上に屈折レンズを塔のように(ロケットの発射台のように)形成し、一体で使用することで安定性を高めるとのこと。

4. おわりに

会議の様子として図1に会場写真、図2に集合写真を載せた。今回の会議は新型コロナウイルス関連の行動制限がほとんど緩和された時期に開催され、XOPTは完全対面形式で行われた。XOPTの参加者は95名であり、そのうち海外からの参加者は47名であった。過去に開催された会議と比べても海外参加者の割合が多いものとなった。Banquetも開催され個別の深い議論が交わされ大いに盛り上がるものとなった。会議の最終日はXOPT単独のセッションだったこともあり発表や議論の密度が高い一日となった。

次回は2024年4月22日~26日に開催が決まっているOPICの期間中の3日間で開催される予定である。XOPTの対象とする分野は光源から手法、検出

器の開発・応用までX線技術と開発に関わる広い分野に及んでいる。また、国内最大級の光学機器関連企業の展示会OPIETMも同時開催されており、会場のパシフィコ横浜はアクセスしやすい場所にある。最新の情報を発信・収集できるこの会議に読者の皆様も参加を考えてみてはいかがでしょうか。

Conference chairの一人を務められ、合同セッションの招待講演で発表された山内教授は、この会議後の4月28日に紫綬褒章授章が発表された。この場を借りてお祝いさせていただきたい。



図1 会場の様子



図2 集合写真

参考文献

- [1] <https://xopt.opicon.jp/>
- [2] <https://opicon.jp/>
- [3] SPring-8/SACLA 利用者情報 **21** (2016) 193-197.
- [4] <https://www.opie.jp/>

小山 貴久 KOYAMA Takahisa

(公財)高輝度光科学研究センター ビームライン技術推進室
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0831
e-mail : koyama@spring8.or.jp