

The International Conference on X-ray Optics, Detectors, Sources, and their Applications 2016 (XOPT2016) 会議報告

公益財団法人高輝度光科学研究センター
光源・光学系部門 湯本 博勝

1. はじめに

2016年5月18日(水)~20日(金)に神奈川県横浜市のパシフィコ横浜において、International Conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2016 (XOPT2016) が開催された (<http://xopt.opicon.jp/>)。XOPT は、Optics & Photonics International Congress 2016 (OPIC2016) (<http://opicon.jp/ja/>) を構成する11の専門国際会議の一つとして今回初めて開催された国際会議で、理化学研究所放射光科学総合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 Conference chair を務めた。

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おり、今年が第5回目の開催であった。OPIC2016の4日間にわたる開催期間中には32カ国から1,000名余りが参加し、30%強が海外からの参加者であった。

2. XOPT の概要

Opening Remarks では、初開催にあたり XOPT の開催趣旨が Conference chair の山内教授から発表された (写真1)。XOPT の名前にあるように、X線の光学素子、検出器、X線光源からアプリケーションに至るまで、X線に関連した様々な分野を対象とし、幅広く活発な議論が行われることを期待することであった。XOPT2016は、13件の invited talks を含む33件の oral 発表、35件のポスター発表が行われ、日本から56名、海外から20名の参加者があることが紹介された。

XOPT2016の会期は3日間で、18日(1日目)の午前は OPIC のプレナリーセッション、午後は XOPT と他の2つの専門国際会議である The 5th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS)



写真1 会議の様子 (XOPT Opening Remarks)

と International Conference on High Energy Density Science (HEDS) との合同セッション (合計6件の invited talks (内 XOPT は2件)) より始まった。

2~3日目全日は XOPT 単独のセッションが一つの会場で行われ (内16件が海外からの発表)、3日目午後にはポスターセッションが開催された。ポスターセッションは、OPIC と同時に開催され、300社強が出展した光学機器関連企業の展示会 (OPIE'16: Optics & Photonics International Exhibition) 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。18日(1日目)の夜は OPIC のレセプション、また19日(2日目)の夜は XOPT のバンケット (写真2) が和食の立食形式で催され、国内外からの参加者による研究交流の場として大いに盛り上がった。

2~3日目は、ポスターを含めて11のセッションから構成された (プログラム順)。

- ・ X-ray source (1件 (内 invited 1件))
- ・ X-ray optics for advanced light sources (4件 (内 invited 4件))



写真2 XOPT バンケットの様子

- X-ray microscopy & imaging (6件 (内 invited 2件))
- X-ray optics (I): refractive optics & applications (4件 (内 invited 1件))
- X-ray detectors (2件 (内 invited 1件))
- X-ray optics (II): reflective optics & applications (4件 (内 invited 2件))
- X-ray optics (III): optics for various spectroscopic methods (4件)
- Poster (欠席があったため 29件)
- X-ray optics for advanced light sources (1件)
- X-ray sources (1件)
- X-ray diagnostics (4件)

SPring-8 (アップグレード計画)、SACLA の他、LCLS、European XFEL の光源・X 線光学素子開発、各種顕微鏡 (ミラーによる結像、位相イメージング、コヒーレント回折顕微法)、屈折型レンズ光学素子、ミラー型光学素子、分光に関する手法 (SACLA ビームスプリッタと遅延光学系、高分解能分光光学系)、検出器、X 線ビーム診断法 (LiF による 2次元強度分布検出、XFEL pump-probe 法) などの講演があり多岐の分野にわたる。

3. XOPT2017

Closing Remarks では、Program committee である理化学研究所放射光科学総合研究センターの矢橋牧名博士より、今後の開催予定などについて発表が行われた。XOPT は今年から毎年開催する予定であり、今回の XOPT2017 は今回と同じパシフィコ横浜にて 2017 年 4 月 19 日~22 日に開催されることである。また今後、XOPT が他の国際会議との違いを出し、特色ある会議となるよう努めるとのことであった。

4. 主な講演の内容

以下、招待講演を中心に、日程に沿って主な講演の内容を紹介する。

Facility, X-ray source :

● T. Ishikawa 氏 (invited : RIKEN SPring-8 Center)

今日の第三世代放射光リングや X 線自由電子レーザー施設に至る X 線光源や X 線回折実験の登場の歴史が説明された後、SPring-8 や SACLA の次世代光源の展望が示された。

● D. M. Fritz 氏 (invited : SLAC National Accelerator Laboratory)

LCLS-II の計画と現状の LCLS について説明、比較された。LCLS-II では現状の LCLS と比較して、エネルギー帯域は 0.25~12.8 keV から 0.25~25 keV に拡大、繰り返しレートは 120 Hz から 929,000 Hz に拡大、パワーは 4 mJ というアップグレードが 2019 年の First light と 2020 年のユーザーオペレーションを目標に進められている。

● H. Tanaka 氏 (invited : RIKEN SPring-8 Center)

X 線光源開発に関する歴史的な流れ、最前線と将来展望が述べられた。カオス光源として利用されてきた X 線が、2009 年 SLAC においてレーザー光源となり、ショートパルスや高い尖頭輝度といった特性を持つ大きな進歩を遂げ、更に高繰り返し化が図られている。一方で、リング型のシンクロトロン放射光施設は、高いコヒーレンス度、高い平均輝度を持つ将来光源の計画が進んでいる。更にリング型自由電子レーザー光源に至る課題やアプローチが述べられた。

X-ray optics for advanced light sources :

● R. Barrett 氏 (invited : ESRF)

ESRF ID-16 のナノ集光ミラーにより集光サイズ 23 nm × 27 nm (半値幅)、集光フォトン数 7×10^{11} photon/s (W/B₄C 多層膜ミラー、120 ペアで 67% 反射率、 $\Delta E/E = 2\%$) を達成したことを紹介した。

● H. Sinn 氏 (invited : European XFEL)

European XFEL 計画、現在の建設状況が説明された。2017 年春にレーズングを予定。X 線ミラーは、ビームラインの振り分けミラーなど 27 枚の入手を計画している。XFEL の波面を保つためには、高精度表面が要求されるばかりでなく、保持による

SAG の変化や、温度変化による変形などに対応が求められる。ミラーマウント法として、静電容量変位センサによるモニタとメカニカルベント方式を採用した。現状で入手した1枚の1 m長平面ミラーは、 ± 1 nm の形状誤差で完成していると報告があった。

● A. Robert 氏 (invited : SLAC National Accelerator Laboratory)

LCLS における硬 X 線用光学系と評価方法。XFEL は SR 光と異なり発生方式上、強度、位置、エネルギースペクトル、タイミングなどにおいて、全てのパルスにおいて変動しており、利用実験のためにはこれらを実験することが要求される。これらを実験する光学系について発表された。タイミングモニタにおいては、ビスマス (Bi(111)) 格子間距離が約 0.3 ps 周期で振動する様子がタイミングの決定により明瞭に観察できることが示された。

● K. Tono 氏 (invited : SPring-8/SACLA)

SACLA における光学系。SACLA の最新状況と光学系の開発状況、サイエンスケースが述べられた。回折格子により波面を分割し、タイミングとスペクトル観察を同時に行うことで、ポンププローブ dispersive XAFS 実験が行えることなどの様々な開発成果が紹介された。

X-ray microscopy & imaging :

● C. G. Schroer 氏 (invited : DESY)

ナノ集光用屈折レンズ光学素子について、PETRA III では、蛍光、回折、吸収分析が 50 nm 以下の空間分解能で、また、CDI (コヒーレント回折イメージング法)、タイコグラフィ分析が 5 nm 以下の空間分解能で 10~50 keV のエネルギーで行われている。タイコグラフィを利用することで、155 nm \times 175 nm の集光プロファイルを 5 桁の強度レンジで回復した結果が示された。また、光軸方向の X 線の伝搬の様子について、回復結果と実測結果が比較された。LCLS では 8.2 keV においてタイコグラフィにより 125 nm の集光サイズを評価した。

● A. Momose 氏 (invited : Tohoku University)

X 線位相イメージングのためのグレーチング干渉計について。タルボ効果とモアレを利用し、位相分布を評価。果物のオレンジの吸収、位相、散乱コントラスト像の例を示し、実験室光源においてマルチスリットを利用した光源サイズの仮想的な小径化の

手法により、19 秒の露光時間、5 mGy で人間の手の吸収、位相、散乱コントラスト像を取得などが紹介された。

● S. Matsuyama 氏 (Osaka University)

ウォルター光学系に全反射ミラーを交差配置することで色収差なく 50 nm 分解能の結像を達成した結果が示された。

● J. Yamada 氏 (Osaka University)

ウォルター III 型光学系を採用することで、拡大倍率を従来のウォルター I 型光学系よりも稼ぐことができ、今まで 50 m 級の光学系が必要であったのに対して、310 倍の拡大倍率を 2 m の光学系で実現できることをシミュレーションにより示した。36.1 nm の Point spread function (点像分布関数)、10.48 μ m の Field of view (観察視野) であり、ミラーは作製済みと報告された。

● W. Yashiro 氏 (Tohoku University)

グレーチング干渉計の試料が斜入射反射ケースについて示された。SPring-8 の BL20XU において実験された。シリコンウエハ上に SiO₂ コートされた 400 nm のラインアンドスペース構造に対して、入射角を変化させながら反射率を取得した結果、干渉効果により埋もれた構造が、しかも、光学系の分解能よりも小さな構造が観察できることが示された。

● T. Kimura 氏 (Hokkaido University)

環境セルアレイ内に封止した溶液中の試料を、SACLA でコヒーレント回折イメージング法により観察した結果を示した。環境セルアレイの作製法、バクテリアの観察例、自己組織化した 15 nm の Au ナノパーティクルや、15 nm と 30 nm の混合 Au ナノパーティクルの 13.9 nm 分解能の観察例が示された。

X-ray optics (I): refractive optics & applications :

● A. Snigirev 氏 (invited : Immanuel Kant Baltic Federal University)

X 線用屈折レンズ集光光学素子の概要について。開発史、ナノ・マイクロビーム用途から、直交配置とコリメータを組み合わせた SR 用モノクロメータ ($\Delta E = \sim 1\%$)、分光結晶と組み合わせたモノクロメータ (~ 0.1 meV)、高調波カット、高エネルギー用集光素子 (70 keV を 1 μ m、115 keV を 0.78 μ m、212 keV を 5 μ m)、暗視野結像、タルボ光学系などが紹介された。また、結晶ダイヤモンド屈折

レンズを、XFELやSRフロントエンドの高フラックス、高熱負荷な環境下での用途を想定し、レーザーカッティングにより厚み1 mm程度のものを表面粗さ1 μm 程度で加工、利用した例が示された。

● I. Snigireva 氏 (ESRF)

メソスコピック材料の観察に Be 屈折レンズを利用した、フォトリソグラフィの観察例、磁場中でコロイダル針鉄鈹 (280 nm \times 68 nm \times 25 nm) が配列変化する様子などが紹介された。

● T. Hoshino 氏 (University of Tsukuba)

波長サイズのナノホールアレイ準結晶構造が、ナノ集光光学素子として機能する様子をシミュレーションにより検討した。

X-ray detectors :

● T. Hatsui 氏 (invited : RIKEN SPring-8 Center)

XFEL や将来の SR 光源の X 線イメージング検出器について要件がまとめられ、LCLS で使用される検出器を含めた現状とアプローチについて述べられた。5~20 keV (検出効率が低下するものの最大30 keV) を目標利用エネルギー範囲としている。現状では6 keV、11,400 photons (SOPHIAS) が実測で最も良好である。単位面積当たりのピークシグナルが向上するように開発を行っている。SPring-8-II 用に、17 kHz フレームレート、70 μm ピクセルサイズ、0.3 M ピクセル数 (768 \times 384)、ピーク1,800 counts (12 keV) が計画中であり、2015年フィージビリティスタディー、2017年プロトタイプ、2019年センサー作製を計画している。

● Q. Xu 氏 (The Ohio State University)

GaN 製 X 線検出器の開発について、ワイドバンドギャップ、熱安定性、高フルエンス耐性の特性を生かし、検出器を試作し、アルファ線を用いた放射線感受性の評価や、印加電圧対電流値の関係などの基礎的調査が行われた。

X-ray optics (II): reflective optics & applications :

● K. Yamauchi 氏 (invited : Osaka University)

X 線ナノ集光や結像光学系に用いられるミラー光学系について発表された。Sub10 nm 集光ミラー光学系、Advanced KB (ウォルター I 型交差配置) 光学系による50 nm 分解能結像、形状可変ミラーによるズーム光学系で、集光サイズを回折限界で

165 nm \times 108 nm、375 nm \times 220 nm、1,434 nm \times 560 nm (半値幅) に調整した結果などが紹介された。

● H. Shiraji 氏 (Osaka University)

法線ベクトル計測型のナノ精度形状計測装置の開発について発表された。20 mm 角で59.2 nm (PV) の形状を0.37 nm (RMS) の測定再現性で評価。干渉計による計測結果と比較し、システムエラーの精度程度で一致した。

● H. Motoyama 氏 (The University of Tokyo)

軟 X 線用の回転楕円体ミラーの開発に関して発表された。SACLA BL1 に応用した場合、2段光学系を構築することで、 2.1×10^{20} W/cm² が10 nm 集光サイズに期待できることをシミュレーションにより示した。また楕円体ミラーに関して、波長13.5~19.5 nm の光源を用いて評価した結果、2.3 μm \times 2.4 μm 集光を達成した。

● H. Yumoto (invited : JASRI)

楕円面集光ミラーの開発について発表した。ミラー作製法として加工法と形状計測法を構築し、楕円面ミラーを1 nmRMS の形状誤差で作製した。SPring-8において7 keV の X 線で集光性能を評価し、85 nm \times 125 nm (半値幅) を達成した。

X-ray optics (III): optics for various spectroscopic methods :

● T. Osaka 氏 (Osaka University)

SACLA における硬 X 線 split-and-delay 光学系の開発について発表された。6.5~11.5 keV において、-50~+47 ps (10 keV) の遅延時間を調整可能である。プラズマ CVM でシリコンの薄片化とチャンネルカットの内面を歪みなく加工が可能である。

● N. G. Kujala 氏 (European XFEL)

European XFEL 用高分解能シングルショットスペクトロメータ (HIREX spectrometer) について発表された。入射光を回折格子により0次光と1次光に分割、その後1次光をベントクリスタルにより発散し、2次元検出器で強度分布を取得。SR で評価し、ダイヤモンド回折格子 (2 mm 角の格子領域、200 nm と150 nm ピッチ、5倍のアスペクト比) と、Si(110) 10 μm 厚を半径150~50 mm に曲げたものを組み合わせ、 5×10^5 前後のエネルギー分解能を得た。

● D. Ishikawa 氏 (RIKEN SPring-8 Center)

SPring-8 BL43LXU における medium-resolution、non-resonant、IXS スペクトロメータの構築について発表された。Si(660) と Si(440) チャンネルカット分光器を入れ子構造にし、22.7 meV (半値幅) 分解能。モニタリングな結晶間の温度を調整することで 60% スループットが向上した。球面バックスキヤタリング (Si(888)) アナライザーをインバー、ガラス、Si (厚み 1~3 mm) の張り合わせ構造で作製した。曲率半径 1,900 mm±15 mm、100 mm × 95 mm × 15 mm、10 μrad (RMS) 以下のスロープエラー等によりトータル ΔE = 34 meV (半値幅) を得た。

X-ray optics for advanced light sources, X-ray sources, X-ray diagnostics :

● L. Samoylova 氏 (European XFEL)

European XFEL の単結晶光学素子。ここでは高繰り返し (~4.5 MHz) と高熱負荷 (10 Hz パルスストレイン、各々 10 kW パワー) が光学素子にさらされ、このような環境下で使用できなければならない。単結晶シリコンモノクロメータやセルフシード用の単結晶ダイヤモンドが用いられた光学系の評価、開発状況が示された。現状のシリコンモノクロ、ヒンジ方式 (+32°~-3°) では、200 パルスストレインまでしか液体窒素温度冷却で熱負荷が耐えられない。

● D. J. Gibson 氏 (Lawrence Livermore National Laboratory)

レーザーコンプトン X 線源について、26.5 keV を発生させ、1 時間程度の安定出力を確認した。

● T. Pikuz 氏 (Osaka University)

LiF を利用した XFEL の 2 次元プロファイル検出について発表された。SACLA において 200 nm 集光ビームを光軸方向の様々な場所で LiF に照明した。10 keV では蛍光領域が広がるためベストフォーカス位置で 1.2 μm 半値幅として検出された。

● M. Manfredda 氏 (Elettra)

ヘテロダインスペックル法による FEL の 2 次元トランスバースコヒーレンスの測定について発表された。コロイダル粒子の散乱スペックル像のフーリエ分析に基づいている。12.4 keV の SR における実験例の他、SPARC (LNF, Frascati - Italy) における 400 nm 波長領域の SASE FEL に適応した結果を示した。

● L. Raimondi 氏 (Elettra-Sincrotrone Trieste ScpA)

FERMI FEL における波面センサを利用したベンダブル KB ミラーによる集光ビーム評価について発表された。波長 32 nm において、回折限界集光サイズが 4.1 μm × 5.9 μm、波面センサでベストに調整後の集光サイズが 5.5 μm × 6.2 μm、形状計測装置 LTP による実測した形状誤差を踏まえた集光サイズが 5.1 μm × 6.0 μm、PMMA (polymethyl methacrylate) によるアブレーション痕による集光サイズが 7 μm × 8 μm であり、シミュレーションとアブレーション痕が良く一致していた。

● I. Inoue 氏 (RIKEN SPring-8 Center)

SACLA での X-ray-X-ray pump-probe 実験でダイヤモンドの破壊の様子を調べた。2 パルス 2 色 FEL を使用し、波長と遅延時間の異なる pump 光と probe 光のブラッグ反射光強度を波長分離することで、格子面間隔を反映した probe 光の時間変化により、フェムト秒オーダーの XFEL によるダメージを観察した。

5. おわりに

XOPT は X 線関連の多岐にわたる分野を対象とし、今回が初回の国際会議として催された。最新かつ最先端の研究成果が発表され、国際的に非常にレベルの高いサイエンスの議論がなされる場が日本で誕生したと感じられた。光源開発から検出器開発に至る多分野を対象とすることで、総合的なシステムとしてマッチした X 線分析法や顕微法の開発に役立つ横断的な議論ができることが本会議の強みであると考えられる。

本稿を読まれる X 線に関連する研究に携わる全ての方に XOPT が周知され、次回 XOPT2017 は日本から最先端の研究成果を世界に発信する場として更なる発展の上で開催されることが期待される。

湯本 博勝 YUMOTO Hirokatsu

(公財)高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0831
e-mail : yumoto@spring8.or.jp