

International Forum on Detectors for Photon Science (IFDEPS) Virtual Thursdays 2021会議報告

今井康彦, 宇留賀朋哉, 亀島 敬, 中嶋 享, 杉本邦久 (高輝度光科学研究センター)
平木俊幸, 本城嘉章, 初井宇記 (理化学研究所)

IFDEPSは放射光分野の検出器に関するワークショップで、2016年に理研がホストとなって第1回が開催された。第2回会議¹⁾については本誌に報告をおこなっている²⁾。第3回は2020年3月に米国で行われる予定だったがCOVID-19の影響で2022年に延期となった。代わりにVirtual Thursdaysという名称で2021年3月25日から4月8日にかけて毎週木曜日、各3時間のオンライン形式の会議が開催された³⁾。本会議では招待施設の代表者1名と招待講演者のみのクローズドな会議であったが、Virtual Thursdaysでは招待施設あたり約12名までの参加者を募

る形で開催された。17ヵ国から25の放射光施設を含む45の大学や研究機関から165名が参加した(表1)。

プログラムは、初日に施設報告、2,3日目にテーマ毎のflash talksで構成された。講演スライド等はwebで公開されている^{3,4)}。本報告では主な発表を筆者らの印象を含めて紹介したい。なお、可能な限り施設名で記述したが、一部に組織名での記述がある。施設名と組織名の関係については表1を参照いただきたい。

表1 参加施設と代表者, 参加人数。施設名の後に続くカッコ内の名称は運営している組織の名称。

Facility (Laboratory)	Country	Lab Correspondent	Number of participants
America			
APS - Advanced Photon Source (ANL)	USA	Antonino Miceli	1
ALS - Advanced Light Source (LBNL)	USA	Anton Tremsin	1
CHESS - Cornell High Energy Synchrotron Source (Cornell Univ.)	USA	Kate Sato Shanks	1
CLS - Canadian Light Source	Canada	Tom Regier	4
LCLS - Linear Coherent Light Source (SLAC)	USA	Mark McKelvey	5
LNLS - Brazilian Synchrotron Light Laboratory	Brazil	Jean Polli	4
NSLS-II - National Synchrotron Light Source (BNL)	USA	Peter Siddons	10
SSRL - Stanford Synchrotron Radiation Light source (SLAC)	USA	Jun-Sik Lee	3
Asia Pacific			
Australian Synchrotron (ANSTO)	Australia	Chris Hall	1
HEPS - High Energy Photon Source (IHEP)	China	Wei Wei	2
TPS - Taiwan Photon Source (NSRRC)	Taiwan	Yu-Shan Huang	7
PAL-XFEL (Pohang Accelerator Laboratory, PAL)	South Korea	Intae Eom	7
PF - Photon Factory (KEK)	Japan	Shunji Kishimoto	3
SACLA - SPring-8 Angstrom Compact free electron Laser (RIKEN)	Japan	Takaki Hatsui	11
SHINE - Shanghai XFEL (Shanghai Tech Univ.)	China	Zhi Liu	12
SPring-8 - Super Photon Ring 8 GeV (JASRI)	Japan	Yasuhiko Imai	7
Europe			
ALBA Synchrotron	Spain	Oscar Matilla	9
PETRA, FLASH (DESY)	Germany	Heinz Graafsma	14
DLS - Diamond Light Source	UK	Nicola Tartoni	11
FERMI, ELETTRA (ELETTRA Sincrotrone Trieste)	Italy	Ralf Menk	2
European XFEL	Germany	Steve Aplin	16
ESRF - European Synchrotron Radiation Facility	France	Pablo Fajardo	15
MAX IV Laboratory	Sweden	Paul Bell	9
SLS, SwissFEL (PSI)	Switzerland	Bernd Schmitt	6
Synchrotron SOLEIL	France	Fabienne Orsini	4
Total			165

[施設報告]

施設の検出器責任者による活動紹介からワークショップは始まった。講演はアルファベット順であったが、本稿では大陸ごとに発表内容を紹介する。

米国 APS の Antonio Miceli 氏は、TES⁵⁾ 検出器による蛍光 X 線分析、on-chip データ圧縮などについて発表した。TES 検出器は超伝導転移を利用した X 線エネルギーを弁別できる検出器で、米国の NIST や SLAC に強力な開発グループが存在する。米国の放射光施設では利活用が進んでいるが、この講演では 50 μm 角の素子 24 個からなる検出器で測定した集積回路試料からの蛍光 X 線スペクトルが紹介された。エネルギー分解能は 12~15 eV (@7~12 keV) であった。近年の画像検出器ではフレームレートのボトルネックの一つが ASIC⁶⁾ のデータ出力部となっている。そこで、ASIC からデータを出力する前にデータを圧縮してしまおうという試みが on-chip データ圧縮である。彼らは、高エネルギー X 線回折実験やタイコグラフィ、XPCS 実験において 80~98% の画素の出力値がゼロである特徴を利用したアルゴリズム考案し実装を始めている。4~8 倍のロスレス圧縮が実現されていた。

LCLS 施設を運営する SLAC 研究所は米国の中で最も開発人員の多い検出器グループをもつ。検出器グループは宇宙物理学・素粒子物理学の検出器開発も手掛けているが、約半分が放射光分野の研究開発を行っている。LCLS の検出器責任者 M. McKelvey 氏からは LCLS-II プロジェクトの進捗と検出器開発の状況が報告された。LCLS-II プロジェクトは常伝導リニアックの増強と超伝導加速空洞の導入による高繰り返し化からなる。前者については、120 Hz 動作で 25 keV までの高エネルギー発振を実現する常伝導リニアックの運転が 2020 年秋より始まっている。後者については最大 1 MHz の等間隔 X 線パルスが得られるもので、2022 年 8 月の運転開始を目指しているとのことであった。直近の活動として積分型⁷⁾ のハイブリッド検出器⁸⁾ ePix10k 系列の開発状況と 4 Mpixel の真空対応 Jungfrau 検出器⁹⁾ の導入が報告された。また LCLS-II の 1 MHz 運転時に最大 100 kframes/s で動作する X 線画像検出器が必要とのニーズ調査結果をもとに ePix 系列の高フレームレート化にも取り組んでいる。段階的に 100 kHz を目指すとのことであった。

CHESS 施設は Cornell 大学が運営する施設で、独自のアイデアに基づいた挑戦的な検出器開発研究を行っている。K. Shanks 氏は二つのハイブリッド検出器 MM-PAD と Keck-PAD の開発進捗を報告した。MM-PAD は疑似積分型方式¹⁰⁾ の画素回路を持ち、光子計数型で対応できない高計数率 (連続撮像時に 10^8 phs./pixel/s 以上、瞬間露光時 10^{12} phs./pixel/s 以上) まで計測できる。Keck-PAD はバーストモード¹¹⁾ に特化した検出器で単一パンチ由来の画像を 8 ないし 27 フレーム分格納できる機能を持つ。いずれも Si と CdTe センサが搭載可能となっている。さ

らに高性能化を狙うため CdTe に代わるセンサとして Ge、アモルファスセレン、CdZnTe について研究している。

今回はブラジルから J. M. Polli 氏による LNLS の Medipix¹²⁾ ベースの検出器開発について報告があった。彼らは Medipix コラボレーションのなかでもデータ処理部に強みを持つグループとして知られている。すでに 10 Mpixel のシステムまでの構築を行い運用していることが示された。

欧州は CERN を中心とした素粒子物理学の検出器開発コミュニティが活発で、素粒子分野で教育を受けた研究者が放射光分野に参入して新しい流れを作ってきた。PSI の Pilatus 検出器はその好例と言える。近年は、博士課程の段階から放射光分野の検出器開発に従事している“放射光ネイティブ”といえる若手検出器研究者が急速に増えてきた。European XFEL (EuXFEL) のための検出器開発に長期的かつ安定的に開発予算が投じられたことが大きな要因と考えられる。今回の会議では欧州から合計 86 名の参加があり、全体の半分を占めていた。

DESY の検出器開発グループは 20~25 名からなり欧州の中でも大きなグループである。リーダーの H. Graafsma 氏は PETRA-III、FLASH、および EuXFEL のための検出器開発について発表した。彼らのグループは既に Medipix3¹²⁾ を採用した Lambda 検出器を実用化し PETRA-III に導入している。次のステップとして Timepix4 を採用した検出器の開発に着手しているとのことであった。J. Correa 氏の発表で詳細が報告されたが、Timepix3 のイベントモード¹³⁾ と Medipix3 の光子計数モード両方を動作させることができるため Timepix4 を選択したとのことであった¹⁴⁾。EuXFEL のための AGIPD、FLASH のための軟 X 線 CMOS 検出器 PERCIVAL¹⁵⁾ の開発に継続して取り組んでいる。AGIPD に関しては S. Stern 氏が CdTe に対応できる ASIC として AGIPD1.3 を開発し、ダイヤモンドアンビルセル内の Pt からの回折が MHz の XFEL の照射によって変化する様子を flash talk で報告していた。また、新しいプロジェクトとして CoRDIA という高速画像検出器の開発に着手したことがアナウンスされた。PETRA-III のアップグレードおよび EuXFEL の CW 化に対応するためのもので、ピクセルサイズ 100 μm の積分型⁷⁾ 画素で 100 kframes/s 以上のフレームレートを目指していることが報告された¹⁶⁾。CoRDIA は高いフレームレートに対応するため 65 nm ノード¹⁷⁾ の試作を始めるとのことである。

ESRF からは T. Martin 氏が検出器の利用・開発状況を報告した。ESRF は 6 GeV 級施設として世界で初めて MBA¹⁸⁾ リングへのアップグレードに成功しており検出器グループの動きも活発である。ESRF の検出器グループは、これまで外部機関・企業から導入した検出器の最適運用技術・インテグレーションに力を入れてきた。最近では

タンパク質シリアル結晶構造解析のための Jungfrau 検出器が導入されている。理研の CITIUS 検出器の導入についても検討が進められている。独自開発としては、薄膜シンチレーターを用いた間接型検出器や Medipix3 を利用したハイブリッド検出器などを実施している。開発コストの大きな ASIC の開発はこれまでは実施していなかったが、加速器アップグレード後の実験¹⁹⁾では既存検出器では対応できないため二つの ASIC 開発を実施している。一つは高計数率に対応するための incremental digital integration 方式²⁰⁾による XIDER で 30–100 keV 領域で 10^9 phs./s/pixel を目標としている²¹⁾。もう一つは、50 μm 以下の画素サイズを目指す計数型の SPHIRD である。微小画素の場合、信号電荷が複数の画素にまたがるために光子計数が動作しなくなるという課題 (charge sharing) があるが、これを ASIC 内の回路で補正するもので、最終的に 15 Mcps/pixel 以上の動作を目標としている。SPHIRD は 40 nm ノードの CMOS を ASIC に採用する予定で最も微細化が進んだプロジェクトである²²⁾。今後の動向が注目される。関連して N. Janvier 氏からは分散型 DAQ フレームワーク RASHPA について発表があった。次世代検出器での 100 GB/s/Mpixel のデータ生成に対応することを目指している。

Diamond Light Source (DLS) 内の検出器グループは隣接した RAL 研究所および他の機関の技術の最適導入・システム化、およびビームラインへのインテグレーションに秀でたグループという印象がある。リーダーの N. Tartoni 氏は、現在コミッショニング中の Timepix3 をベースとした時間分解実験向け TRISTAN 10M (1M pixel/module) について発表した。この検出器グループはこれまで XAFS の蛍光収量検出器の多チャンネル化にも力を注いでおり、その中で今回イベント・タイムスタンプ機能をもつデジタルシグナルプロセッサの Xspress4 について紹介を行った。また、高エネルギー X 線全散乱測定用に Medipix3 と CdTe センサを組み合わせた検出器を湾曲配置したシステムについても報告した。関連した発表として G. Dennis 氏から HP-Ge 検出器と Xspress4 の組み合わせでミリ秒オーダーの高速な蛍光収量クイック XAFS の例を報告していた。

DECTRIS 社から販売されている Pilatus, Eiger, Mythen 検出器はよく知られているが、これらの検出器の開発を行ったのが PSI の検出器グループで、リーダーの B. Schmitt 氏がグループ全体の活動を報告した。予定されている Swiss Light Source (SLS) のアップグレードにおける検出器の課題として軟 X 線対応、高計数率、高エネルギー対応の 3 つがあり、それぞれアバランシェ効果による信号電荷の増幅 (Low gain avalanche diode, LGAD)、SwissFEL 用に開発した 2 kframe/s まで高速化した Jungfrau^{9,23)} 検出器 (20 Mcps/pixel 相当) の 10 kframes/s (100 Mcps/pixel 相当) までの高フレームレート化、

ESRF と共同で取り組んでいる High Z センサ開発の 3 つで対応するとのことであった。またデータ量増大に対応するため、現在ボード 1 枚当たり 20 Gbps の光出力を 100 Gbps の光出力技術を導入して広帯域化することが言及された。Flash talk では J. Zhang 氏からストリップ検出器 Gotthard-II の紹介があった。50 μm ピッチと 25 μm ピッチの 2 つのタイプがある。積分型⁷⁾ (バーストモードで 4.5 MHz, 連続モードで 410 kHz), および計数型 (max. 4.5 Mcps) として動作し、XFEL と SR の両方に対応できる。また光子計数型のストリップ検出器について A. Bergamaschi 氏が 400 kHz の高速性と感度の均一化をターゲットしている Mythen III について報告を行った。

EuXFEL の検出器グループは、開発マネジメントと補正アルゴリズム開発・運用を担うグループである。開発を内部で行っていないものの 20 名程度のメンバーが所属する大所帯である。リーダーの M. Turcato 氏からは、EuXFEL のバンチ構造に対応した 4.5 MHz バースト撮像が可能な AGIPD, LPD, DSSC およびそれを補完する検出器 Jungfrau⁹⁾, ePix100, Gotthard-II, pnCCD の運用状況が報告された。バースト撮像が可能な検出器は、運用開始直後は画像の歪みが大きかった。歪みの理解と補正方法の改良、歪みを抑制した電子回路の改善などの努力により満足できる画質が得られるようになった。また、すでに 32 PByte のデータを保管しており今後はデータ圧縮にも取り組んでいくとの発言があった。関連する flash talk には、M. Porro 氏による DSSC プロジェクトの進展、M. Ramilli 氏の Jungfrau⁹⁾ と GOTTHARD-II の Euro-XFEL 導入状況、J. Sztuk-Dambietz 氏の AGIPD の運用詳細、特に放射線損傷によるベースラインシフトがあった。AGIPD は画素内に 352 のアナログメモリを持つ。したがって 1 Mpixel のシステムでも 352 Mpixel 相当の感度ばらつきがある。M. Cascella 氏はこのメモリの感度補正の実施状況について報告をおこなった。

前記の SLS と同じく 3 GeV 級の施設として Elettra, SOLEIL と MAX-IV がある。いずれも興味深い講演であったが紙面の都合上 MAX-IV のみ紹介させていただく。MAX-IV については P. Bell 氏が報告を行い、2020 年に informal detector group が結成されて市販画像検出器および施設間の共同研究の枠組みでの Jungfrau⁹⁾ や TRISTAN の導入と、これら検出器から生成される大量データに対応する 40 Gbps クラスのデータ処理系の開発を行っていることが示された。また LGAD と Medipix3 の組み合わせによる軟 X 線 XPCS 用検出器の検討など、ビームラインのニーズに密着した研究開発について検討を行っており、さらにコラボレーションを通じてビームラインへの貢献を拡充するつもりであることが報告された。関連研究として flash talk で Lund 大学の Z. Matej 氏から FPGA²⁴⁾ に関する発表があった。Matej 氏は粉末回折において回折パターンに変化があったその瞬間に別の低速検出器の撮像を開始

させる利用例を示し、データ解析と制御を組み合わせる場合に FPGA が有利であるとの主張をしていた。

最後にアジア・オセアニアの施設報告を紹介する。

SHINE は、上海近郊で建設中の全長 3 km 超の超伝導リニアックの硬 X 線 XFEL 施設である。SHINE では検出器の大規模な独自開発を検討しているとの話が以前からあったが、今回現状の一端を知ることができた。代表の Z. Liu 氏は SHINE 向けにハイブリッド検出器と TES の開発を行っている概況について示した。ハイブリッド検出器は Jungfrau⁹⁾ と同じように見えるアーキテクチャであるが、これを中国科学院 (CAS) 傘下の 4 機関が協力して開発している。TES についてはまだ性能は世界最高レベルとまではいかないものの、すでに 1.5 keV で 2.1 eV FWHM のエネルギー分解能が得られていることを示した。

PAL - XFEL の H. Hyun 氏は MPCCD, Jungfrau⁹⁾, Rayonix の CCD 検出器など多くの検出器の導入と安定稼働に成功していることを報告した。また DESY を中心とした軟 X 線 CMOS 検出器 Percival のコラボレーションにも初期より参加している。検出器専従の研究者が 3 名と小さい所帯であるものの、欧州との共同研究にも積極的に参加することで若手人材育成も考慮してプロジェクト選択をしているように筆者らには感じられた。

TPS からは NSRRC の Y.-S. Huang 氏が BL の整備状況 (17 本稼働中, 9 本計画中) と市販の検出器や共同研究ベースのエネルギー分散型検出器 (Maia-384) の運用状況を報告した。また、間接型検出器および EMCCD ベースの軟 X 線検出器の開発にも取り組んでいることが報告された。施設として力を入れている脳サイエンスおよび軟 X 線の超高分解能非弾性散乱に関連するものと思われる。

SACLA の代表として初井が理研の研究開発について報告を行った。理研がこれまで開発してきた検出器 MPCCD, SOPHIAS および開発中の CITIUS を紹介し、共通点として積分型⁷⁾であること、性能向上のため ADC の数を増やしてきたことを報告した。また CITIUS の現状として 600 Mcps/pixel の計数率, 17.4 kframes/s がすでに実証されていることを報告した。他に開発中の話題として 64 Mcps 以上の計数率の実現を目指す多チャンネル SDD 検出器 mxDCMOS プロジェクトと、東北大須川研究室および東大, 産総研, 兵庫県立大等が開発している超高ピーク信号を有する軟 X 線画像検出器 sxCMOS プロジェクトの紹介を行った。関連して flash talk では理研の平木が CITIUS のデータ処理系について発表を行った。他の発表よりも 1~2 桁以上大きなデータ帯域 10 Tbps をターゲットとしているほか、最大 1000 倍の on-the-fly データ圧縮や FPGA を利用したデータ処理など新しい話題が含まれていたため質疑が多くなされた。

SPring-8 からは今井が SPring-8-II 計画の概要, 先行して進められている BL 再編の状況, 再編に伴う市販の検出器の導入状況を報告した。特に 30 keV 以上の高エネルギー

領域における X 線回折測定のため, Lambda などの CdTe 画像検出器の導入を進めていることを紹介した。

施設報告は今回なかったものの, Australian Synchrotron においても研究者とエンジニアの混成チームが主に検出器の運用についてサポートする体制を構築したとの話が出ていた。

[Flash talk]

flash talk のうち筆者らが興味を持ったものについて報告する。

(Session 6—Energy dispersive detection)

TES⁵⁾は運用にノウハウが必要であることが知られている。SSRL の S.-J. Lee 氏は, 240 素子の TES が, 自動リアルタイムデータ処理などの環境が整備され 2 本の軟 X 線ビームラインで RIXS, XMCD 研究に利用されているとの紹介を行った。NIST の Galen O'Neil 氏からは, SSRL 向けの TES 検出器のアップグレードについて報告を行った。センサ素材を Mo/Au に変更し超伝導転移温度を下げることで, 高エネルギー分解能化と高計数率化, 素子当たりの大面積化, 低エネルギー側のテイル構造の解消を実現し 2021 年に導入する予定とした。中期の開発方針についても説明があり, 現状は 1 ユニット当たり 100 素子程度であるが, 複数ユニットを並べる技術, ユニット内の 3 次元配線技術の導入, MKID²⁵⁾方式の導入によって LCLS 向けに 1 万素子の検出器システムを構築しようとしているとのことであった。

(Session 8—New detector projects: indirect detection)

SPring-8 から亀島が, 透明セラミックスを用いた高解像度シンチレーターの開発・回折限界に近い 200 nm line & space を解像する空間分解能の達成・サブミクロン分解能検出器の高視野化プロジェクトを紹介した。

(Session 10—Sensors, components and technology)

カルフォルニア大学バークレー校の A. S. Tremsin 氏は電子・軟 X 線用の MCP と Timepix を組み合わせた検出器についての紹介があった。ARPES や RIXS, XPCS で利用されており, 時間分可能 2 ns に加えてイベントの重心演算によって約 6.5 μm の空間分解能が得られていた。NSLS II の A. Rumaiz 氏は, エネルギー分解能を持つ Ge ストリップ検出器などを報告した。1% のエネルギー分解能で 200 keV まで検出可能となっていた。ESRF の K. Pauwels 氏からは高計数率下での残光と着色特性を改善するための構造化シンチレーターについて発表があった。

【おわりに】

コロナ禍であっても各国で着実に研究開発が進んでいることが改めて認識でき, 有意義な会議となった。flash talks は 1 件 5 分だけであったがモデレータの上手なアジェンダ設定によって活発な議論が行われ, 海外の研究者と問題意識を共有できたように思う。ビームライン研究者の

参加も多かった。自身の研究に必要な検出器をいち早く導入したい、という貪欲さを感じた。

技術面では全体を通じて画像検出器の話題が多かった。画像検出器に関しては、急速に進歩しつつある積分型検出器、積分型⁷⁾と光子計数型の使い分けの将来動向、軟 X 線対応技術、高光子エネルギー向け CdTe 代替センサ材料の探索、100 Mcps/pixel 超の高計数率の実現、1 TB/s レベルの広帯域データ収集、データ圧縮、FPGA によるデータ処理²⁴⁾、イベントモード¹³⁾、間接型検出器の高計数率化・高空間分解能化、などがキーワードであったように思う。また高速画像検出器は複雑でデータ量も多い。MAX-IV の報告のように検出器を開発していない施設でも、ビームラインに高速画像検出器をインテグレーションする専任人員の重要性が顕在化している。

今回は2022年に本会議が開催される予定である。また、今回のようなオンライン会議を2023年に開催することも検討されることになった。

参考文献

- 1) <https://www.esrf.fr/home/events/conferences/2018/ifdeps-2018.html>
- 2) 今井康彦, 初井宇記: 放射光 31, 281 (2018).
- 3) <https://www.esrf.fr/sites/www/home/events/conferences/2021/ifdeps-virtual-thursdays-2021/programme.html>
- 4) <https://www.esrf.fr/home/events/conferences/2021/ifdeps-virtual-thursdays-2021/presentations.html>
- 5) Transition edge sensor の略
- 6) ASIC とは application specific integrated circuit の略で、この原稿ではハイブリッド検出器等における画素の信号処理回路が実装された大面積集積回路を指す。
- 7) 信号電荷の総量を計測する検出器を積分型と呼ぶ。瞬間的な計数率に原理的な限界がないためフェムト秒オーダーのパルス X 線にも対応できる。XFEL 用検出器はすべて積分型が採用されている。積分型では、信号電荷を増幅回路によって電圧に変換する。増幅回路が飽和する信号量 (飽和信号量) が各フレームで測定できる限界となる。連続 X 線源では計数率が重要であるが、計数率は飽和信号量とフレームレートの積となる。
- 8) センサと ASIC を画素ごとに10 μm 程度の金属パンプで接合した検出器をハイブリッド検出器という。シリコンセンサを CdTe などの重元素化合物半導体に置き換えることで20 keV 以上の高エネルギー領域の感度を向上できる検出器技術である。
- 9) Jungfrau 検出器については A. Mozzanica 氏が詳細を flash talk で報告した。
- 10) 電荷量を増幅する回路と、飽和した時に増幅回路をリセットしリセットした回数を数える計数回路を画素内に内蔵した方式。Cornell 大学は mixed mode と呼んでいる。一般名称がないが本稿では疑似積分型と呼んでいる。リセットするために一定時間が必要であるため、リセットする速度が入力信号に追いつかなくなる限界が瞬時露光時の最大計数率となる。
- 11) パーストモード動作とは、ASIC 内もしくは画素内にデータを格納する機能を持つことにより極めて高速に撮像できるものをいう。Keck-PAD は150 ns 間隔で撮像できる。一方、ASIC の外にデータを転送する速度は撮像速度より遅いため、高速撮像時に連続して撮像できるフレーム数には限りがある。
- 12) Medipix, Timepix は CERN が開発している ASIC の名称で、コラボレーションに参加している機関・企業がセンサとのパンプ接合およびシステム化を行っている。画素サイズはすべて55 μm に統一されている。ASIC としては Medipix3, Timepix3 までの開発は終了しており、現在 Medipix4, Timepix4 の開発が進められている。
- 13) 光子が検出された際 (イベントと呼ぶ) の時刻も記録する機能。ASIC としてはサブナノ秒レベルを実現できるがセンサ内の信号電荷の移動時間によるボケにより10 ns 程度の時間分解能が設計性能となることが多い。
- 14) Timepix4 を搭載した検出器で、光子計数モードで Medipix3 の10倍の計数率と40 kHz のフレームレートでの読み出しを目標としている。イベントモードではナノ秒レベルの時間分解能、 ~ 2 keV のエネルギー分解能を実現し、チョッパーなどを用いずにシングルバンチによる時間分解実験を可能にすることを狙っている。走査型のナノ小角散乱や XPCS などへの利用が想定されている。
- 15) 詳細は C. Wunderer 氏の flash talk で報告された。2011年に開始されたプロジェクトであるが裏面加工などが難しかったようで、ようやく利用研究の成果が報告され始めている。
- 16) Flash talk の A. Marras 氏の発表で目標仕様が報告された。100 kframes/s を目標に設定した理由は、EuXFEL の CW 化時は1 MHz 程度であるが検出器技術の実現可能性を加味して100 kframes/s 超レベルを狙うという趣旨、および PETRA の周回周波数130 kHz を意識して決定したとのことであった。
- 17) CMOS の微細化レベルを示すテクノロジーノード。DESY はこれまで130 nm ノードで ASIC を開発していた。65 nm ノードは CERN の LHC 施設アップグレードプロジェクトですでに採用されており、CERN 加盟国であれば放射線耐性を有する設計ライブラリの使用が可能となっている。微細化が進むと試作費用、設計コストが指数関数的に増大する傾向があり、戦略的な判断が求められる。
- 18) Multi-Bend Achromat の略。
- 19) 最大で 10^{16} ph/s の単色 X 線ビームが得られていると報告された。
- 20) 積分型の場合、計数率は飽和信号量とフレームレートの積となる⁷⁾。計数率を2倍にするためにフレームレートを2倍にするとデータが2倍になってしまう。一方飽和信号量を2倍にした場合、データはフレーム当たり1 bit 増大するだけである。したがって飽和信号量を大きくする方がデータ量を抑制でき有利である。しかしフレームレートが低くなると露光時間が長くなり暗電流等に起因するノイズ増大が課題となる。そこでフレームを多数のサブフレームに分割し露光時間を短くしたうえで、サブフレームの出力デジタルデータをデジタル回路によって積算してしまうことで、データ量と露光時間を両方抑制しようというアイデアが incremental digital integration である。課題としては、信号電荷が複数画素にまたがった時の処理、およびサブフレーム間に信号が来たときの動作に由来する統計誤差としている。
- 21) flash talk では P. Busca 氏から XIDER の詳細について講演がなされた。CdTe センサを使ったテストでは、高計数率領域で残像などのセンサの非線形応答が顕著で目標性能の実現が難しく、CdZnTe など他の材料の検討を始めているとのことであった。質疑を通して、CdTe の残像や感度の不安定性が放射光分野での重要な課題であることがコンセンサスとして得られたと思う。
- 22) D. Magalhães 氏の発表による。
- 23) F. Leonarski et. al.: Structural Dynamics 7, 014305 (2020).
- 24) Field Programmable Gate Array の略。論理回路を自由に書き込みできるため GPU よりも高度な並列計算が可能な集積回路である。制御信号出力のタイミングを10 ns レベルで制御できるなど、並列計算・リアルタイム性に秀でているが

プログラミングコストが高い。検出器では主に制御用集積回路として用いられてきたが、最近になってデータ処理でも利用が始まっている。通常はハードウェア記述言語(HDL)によって設計するが、C言語などでもプログラミングが可能となりつつある。

25) Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) は一つの

信号ライン上に複数個の共振周波数を持つ素子をつなげることにより、配線数が少なくても多数の素子を実装できる技術。超伝導検出器の場合、信号ラインを介した熱流入を極限まで抑制する必要があるため信号ライン数を減らす技術が重要となっている。