

# ■第33回日本放射光学会年会・放射光科学 合同シンポジウム (JSR2020) 企画講演報告

企画講演 1 『情報科学を駆使した最先端放射光イメージング』

赤井一郎 (熊本大学),  
水牧仁一朗 (公財・高輝度光科学研究センター)

## 企画要旨

近年、放射光科学において情報科学・データ駆動科学の導入が強く求められており、2018年の本学会では、企画講演「情報科学を活用した放射光科学の新展開」が開催された。現在、「情報科学・統計数理の最先端の方法論」と「計測・解析技術」の高度な融合によって従来の計測限界の突破を実現する情報計測 CREST・さきがけ領域研究が立ち上げられ、放射光計測をターゲットとした多くの融合研究課題が進められている。本企画講演では、それらの中でも先端計測技術の発展とともに可能となった放射光イメージング計測に焦点をあて、情報科学やデータ駆動科学の手法を活用した最先端放射光イメージングの研究を紹介する。また本企画講演を、今後のさらなる融合研究の契機とし、それに基づいた放射光科学の発展の礎とする。

企画参加人数 約170名

## 講演構成

1. 「趣旨説明：データ駆動科学による放射光科学の発展」  
赤井一郎 (熊本)
2. 「情報計測 CREST・さきがけ研究領域の目的・紹介」  
雨宮慶幸 (JASRI)
3. 「ベイズ計測」  
岡田真人 (東大)
4. 「データ同化によるフェーズフィールド法の深化」  
長尾大道 (東大)
5. 「情報科学を活用した XAFS イメージング解析」  
青西 亨 (東工大)
5. 「超圧縮センシングによるミリ秒 X 線トモグラフィ法の開発と展望」  
矢代 航 (東北大)
6. 「X 線小角散乱-CT 法と計算科学の融合による可視化手法の開発と展望」  
小川紘樹 (京大)
7. 「スパース位相回復法によるコヒーレント軟 X 線オペランド計測」  
山崎裕一 (NIMS)
8. 「ビッグデータアプローチによる X 線レーザーイメージングの高度化」  
木村隆志 (東大)

## 講演概要

初めに企画提案者の赤井が、本企画講演に関する趣旨説明を行った。

最初の講演者である雨宮慶幸氏からは、平成28年度から始まった情報計測 CREST・さきがけ研究領域の概要と現状に関する紹介をいただいた。現在、CREST 研究・16

課題、さきがけ・31課題が採択され、計測×情報の相乗効果により各課題で特に放射光分野において、成果が創出されている状況であるとの説明があった。また本企画講演が計測・解析技術のさらなる向上を目指す契機となることを期待されている旨の講演であった。

以降、前半の3つの講演では情報科学の立場から計測への融合研究について、後半の4つの講演では放射光計測の立場から情報科学への融合研究について、講演者の取組について紹介・解説いただいた。

岡田真人氏からは、ベイズ推論を計測科学に導入したベイズ計測の概念と方法論について説明をいただき、その適用例についてご紹介いただいた。対象とする系の物理モデル・計測機器の特性をモデル化し、ベイズの定理を適用することで、系の物理モデルの推定値の信頼性を情報の事後確率分布として得ることができること、またそれを得るためにはレプリカ交換モンテカルロ法が必要不可欠であることを解説していただいた。また具体的な適用例を示しながら、ベイズ計測を用いることで、計測限界の存在や計測から間接的に得られる物理量の定量的かつ統計学的な推定が可能であることを解説いただいた。

長尾大道氏からは、数値シミュレーションと観測・実験データをベイズ統計により統合するための計算技術であるデータ同化の基本的な概念とその計算方法についてご紹介いただいた。具体的には材料組織の時間発展シミュレーション法であるフェーズフィールドモデルに基づいて、データ同化の代表的な手法であるカルマンフィルタ法を適用した例を示していただき、材料のパラメータや組織の推定に有効であると説明された。また非時系列データに対しても有効な方法についてもご講演いただいた。

青西亨氏からは、広領域・高解像度の巨大なデータ量をもつ画像データを有効かつ効率的に解析するための方法論とその実例に関してご紹介いただいた。非負値行列因子分解法を用いて、マウス大脳カルシウムイメージングデータと Li イオン電池の XAFS イメージングデータに適用した研究についてご講演いただいた。特に XAFS イメージングデータでは、エネルギースペクトルと2次元空間イメージングにて構成される高次元データから、少数の特徴的なエネルギースペクトルと2次元空間画像のセットを抽出できることを示していただいた。

矢代航氏からは、高度な圧縮センシングと X 線のマルチビーム化技術により、トモグラフィ法を用いたミリ秒時間分解能をもった超高速 X 線トモグラフィ法の開発の現状とその将来について、ご講演いただいた。これまでにな

いデザインのマルチビーム X 線光学系の開発とそれを用いた 1 ミリ秒での X 線トモグラフィの撮像に成功したことをご紹介いただき、材料変形の 3D 観察や液体などの流動物質の撮像などの将来への展望を示していただいた。

小川紘樹氏からは、X 線小角散乱法とコンピュータトモグラフィ法を組み合わせた方法を用いることで試料内部のナノスケールのサイズ・形状などの構造情報と構造の不均一性を同時に取得可能であることをゴム材料を例としてご紹介いただいた。また、この方法の欠点である測定時間が長時間に渡ることを回避するために、情報科学にて開発された Total-Variation 正則化法を適用し、測定時間の短縮化に成功したことを示していただいた。

山崎裕一氏からは、コヒーレント軟 X 線回折イメージングを用いた磁性体の磁気イメージングの測定とその解析方法についてご講演いただいた。回折データから磁気モーメントの実空間分布像を得るために、位相情報を回復する必要がある。山崎氏は磁気モーメント分布の事前情報を組み込んだスパースモデリングによる位相回復法を開発に成功された。この方法を用いることで、ノイズに対する過学習を抑制し、欠損情報を補完することが可能となることを示していただいた。

木村隆志氏からは、X 線自由電子レーザーを用いたシングルパルス計測とコヒーレント回折イメージングによる顕微法の液中試料の反応過程の研究と、その莫大なデータの処理に関する高効率化・高精度解析についてご紹介いただいた。現状では液中試料からの回折パターンの取得効率が必ずしも高くないため、機械学習の導入によりデータ処理の効率化が行われたことや回折パターンからの情報抽出に成功したことをご講演いただいた。

全体を通して、活発な議論が行われ、情報科学の導入に具体的なイメージを持っていただく良い機会になったと感じている。講演者の皆様には、本企画の意図を十二分に汲んでいただき、計測×情報の相乗効果の最先端事例についてご講演いただき感謝申し上げます。本企画講演をきっかけに、今後放射光分野において計測×情報の融合がより一層進んでいくことを期待したいと考えます。

## 企画講演 2 『次世代放射光施設計画の推進状況(2)』

内海 渉 (量研量子ビーム科学部門次世代放射光施設整備開発センター)

### 企画要旨

令和元年度から、官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設 (軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源) の整備が本格的に開始されている。立地場所における土地造成や基本建屋の詳細設計と並行して、加速器の設計が行われ、各要素機器の発注準備が進められている。ビームラインに関しては、検討委員会における検討により、光源の基本性能や第 1 期に整備する 10 本のビームラインの概要が決定した。計画の進捗状況と今後の見通しなどについて学

会員に報告する。

企画参加人数 256名

### 講演構成

1. 「次世代放射光プロジェクトの概要及び進捗状況」  
内海 渉 (量研)
2. 「次世代放射光の光源・光学系」 高橋正光 (量研)
3. 「次世代放射光施設ビームライン構想—コンセプトと第 1 期整備ビームラインラインアップ—」  
有馬孝尚 (東京大学・理研・次世代放射光施設ビームライン検討委員会委員長)
4. 「共用ビームライン (3 本) の整備構想」  
雨宮慶幸 (JASRI・次世代放射光施設利用研究検討委員会委員長)
5. 「コウリションステーションの整備構想」  
高田昌樹 (光科学イノベーションセンター・東北大学)

### 講演概要

はじめに、内海が「次世代放射光プロジェクトの概要及び進捗状況」と題して、次世代放射光の立地場所 (東北大学青葉山新キャンパス) や施設の目指すもの、これまでの経緯、整備スケジュール、「官民地域パートナーシップ」の枠組み、などを説明した。整備に関しては、財源負担を含めて国 (量研を主体機関として指名) とパートナー (光科学イノベーションセンター (PhoSIC) を代表機関とする、同財団、宮城県、仙台市、東北大学、及び東北経済連合会) が受け持つ役割分担があらかじめ定められており、整備用地・造成、ならびに基本建屋 (研究準備交流棟機能を含む) についてはパートナーの責任でこれを完成させ、加速器の整備は国が行う。また、ビームラインについては、第 1 期に整備するものとして、国が 3 本、パートナーが 7 本を受け持つことになっている。立地場所における土地造成が順調に進行し、基本建屋及び加速器の設計が終了し、これらの発注・契約準備が進められていること、ビームラインに関して「ビームライン構想委員会」「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」「次世代放射光施設利用検討委員会」が設置されており、種々の検討が進められていることなどを報告した。

続いて量研の高橋氏により、次世代放射光の光源・光学系についての講演が行われた。最初に、本施設は、軟 X 線はもとより、これまでの放射光科学で比較利用されてこなかった tender X 線にも強みを持つ低エミッタンス光源であることが述べられ、そのコヒーレント性やスペクトル特性について説明された。そして、挿入光源の検討内容について報告があり、概ね 2 keV 以下の軟 X 線領域では APPLE-II アンジュレーター、それ以上の X 線領域では、真空封止平面アンジュレーターを採用すること、また、偏向磁石光源に代わる X 線領域の広スペクトル光源として、多極ウィグラーを設置予定であることが紹介された。これら標準挿入光源の拡張として、偏光の高速切り替えおよび高エネルギーの円偏光利用を目的に、APPLE-II

アンジュレーター4台と移相器から構成される分割アンジュレーターも計画されている。また、ビームライン光学系について、利用される光子エネルギー、偏光、ビームサイズ等に応じた、光学系の組み合わせの概要が示された。

当初整備が予定されている10本のビームラインとして整備すべきラインアップについては、量研と PhoSIC が共同で設置した「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」において、2018年末から2019年前半にかけて検討が行われ、その結果が報告書として取りまとめられている。同委員会委員長である有馬氏により、その内容が報告された。委員会では、過去にパートナー側の活動の一環として行われた「東北放射光施設計画 (SLiT-J) エンドステーション・デザインコンペ」答申や PhoSIC 諮問委員会「ビームライン構想委員会」報告書、ビームラインについての意見募集に寄せられた意見や共用 BL 提案などをもとに、科学技術の現状と将来、学術研究・産業利用のニーズ、次世代放射光の光源性能、オプティクス等の技術の現状と近い将来における予測、他の国内放射光施設との役割分担などの観点から検討を行い、第1期整備ビームラインラインアップを決定した。10本のうち、4本がテンドー X 線、6本が軟 X 線のビームラインとなっており、国が整備する3本の共用ビームラインはすべて軟 X 線を利用するものである。

ラインアップの決定を受け、量研、PhoSIC では、それぞれの責任所掌のビームラインの具体的検討を開始している。国が整備する3本の共用ビームライン、すなわち、軟 X 線ナノ光電子分光 (ARPES)、軟 X 線ナノ吸収分光 (XMCD 等)、軟 X 線超高分解能共鳴非弾性散乱 (RIXS) の詳細を検討するために、量研に「次世代放射光施設利用研究検討委員会」が設置されている。ビームライン毎にその分野の専門性を有する研究者等で構成されたワーキンググループがおかれ、実施すべき最先端研究の目標設定、そのために必要な光源性能、エンドステーション測定装置の仕様等の議論が活発に行われている。同委員会委員長の雨宮氏より、現在進行中の検討状況についてその概略が報告された。

最後に、7本の整備が予定されているパートナービームラインについて、PhoSIC の高田氏により、「コウリションステーションの整備構想」と題して講演が行われた。次世代放射光プロジェクトの大きな特徴のひとつは「官民地域パートナーシップ」でそれが進められることにあり、産業利用、産学連携の飛躍的な増大が期待されている。産学利用の推進のためにパートナーから打ち出されているのがコウリション・コンセプトであり、出資企業と学術が、one on one で産学連携を進め、企業の有する各種課題を学術の先端科学の開拓とマッチングさせて解決を行おうとするものである。7本のパートナービームラインはその具体的利活用となる。講演では、現在詳細が検討中である7本 (テンドー X 線ビームライン4本 (うち2本がア

ンジュレーター、2本がウィグラーを挿入光源として使用)、軟 X 線ビームライン3本 (いずれもアンジュレーター) について、概要が紹介された。

上述したように、2020年2月現在、基本建屋の詳細設計が終了し、入札手続きが開始されており、今夏には建設が開始される見込みである。また加速器の主要コンポーネント製作も間もなく開始となる。順調に進めば、2021年秋頃から加速器機器の建屋への設置作業が始まり、調整を経て、2023年秋にファーストビームを予定している。このスケジュールに合わせて、ビームラインの設計、製作も、2020年度から順次本格化することになる。完成まではまだまだ長い道のりであるが、多くの皆様の参画、協力をお願いしたい。

### 企画講演3『協奏的量子ビーム研究による科学の最前線—他の量子ビームを知ってみよう—』

本田孝志 (KEK 物構研)

#### 企画趣旨

2017年に SPring-8 が供用開始して20周年、2019年に J-PARC も10周年迎え、量子ビーム大型施設がサイエンスに多く取り入れられるようになった昨今、量子ビーム間あるいは施設間の情報共有の場が必要不可欠となってきている。この大型施設の節目を機に、放射光 X 線に加え、中性子、ミュオンといった量子ビーム研究のシンポジウムを企画する次第です。本シンポジウムでは各量子ビームの利点や相補的に利用することによる利点に関して、学生・若手研究者を中心に講演を行う。

企画参加人数 67名

#### 講演構成

司会 本田孝志 (KEK 物構研)

- 「量子ビームの協奏的利用の今とこれから」  
本田孝志 (KEK 物構研)
- 「SPring-8 BL07LSU と SACLA を用いた光誘起磁気ダイナミクスの時間分解測定」 山本航平 (分子研)
- 「ミュオンスピン緩和で見る機能性材料のスピンゆらぎ」  
足立 匡 (上智大)
- 「放射光と中性子を相補的に利用した結晶性高分子の構造観察」  
松葉 豪 (山形大)
- 「スピンコントラスト中性子を用いた複合材料の構造解析」  
三浦大輔 (山形大)
- 意見交換 本田孝志 (KEK 物構研)

#### 講演概要

はじめに、本田が本企画における趣旨と導入を兼ねた量子ビーム連携に関して説明を行った。我が国における量子ビーム大型施設の現状を俯瞰して見ると、各量子ビームで展開される科学分野や技術面の重なりが大きくなる一方で、施設間連携という点で“壁”が表面化してきた。マルチプローブ研究といった放射光 X 線、中性子、ミュオンの協奏的利用が広がり多角的研究が展開されつつある中

で、各量子ビーム実験における利点難点に関する情報共有の場がないことを危惧し、本企画を当該場の必要性を考える機会とした次第である。今回は広い分野から量子ビーム研究を紹介して頂いた。

山本氏より放射光 X 線と X 線自由電子レーザー (XFEL) の相補的利用に関して、FePt 薄膜や Co/Pt 薄膜の時間分解光誘起消磁ダイナミクスを例に紹介・議論が行われた。強磁性磁化膜において pump-probe 法による消磁過程を入射エネルギーによる元素選択的測定だけでなく、時間分解能の違う測定系 (可視光, 放射光, FEL) を用いて明らかにした結果が紹介され、相補的利用による時間分解能の重要性に関して議論がされた。

続いて、足立氏からミュオンスピン緩和 ( $\mu$ SR) 法に関して導入から研究例まで紹介頂いた。 $\mu$ SR 法は  $S=1/2$  のスピンを持つミュオンを物質中に入射し、ミュオンが静止した場所の局所磁場を観測するスピンゆらぎに敏感なプローブである。核磁気共鳴 (NMR) と中性子非弾性散乱との相補的な関係にある。Nd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>(T') 構造を有する銅酸化物高温超伝導体は、マルチプローブ研究の最たるものである。層状銅酸化物では伝導キャリアドープによる反強磁性的な Cu スピンのゆらぎが超伝導電子対の形成に効いているとされてきたが、T' 構造の CuO<sub>2</sub> 層における過剰な酸素を適切に取り除くと母物質を含む幅広い電子ドープ領域で超伝導が発現し、定説を覆すものとして注目されている。 $\mu$ SR 等からこの系の超伝導が強い電子相関のもとで発現すること、反強磁性的なスピンゆらぎが超伝導の発現に効いている可能性が高いことを明らかにした成果を紹介頂いた。今後の展開として、物質の表面・界面をプローブ可能な超低速ミュオンやミュオン顕微鏡計画等についての報告もされた。

次に、松葉氏から高分子の構造解析研究を例に小角中性子散乱、小角 X 線散乱の相補的利用を紹介頂いた。中性子では重水素と軽水素の散乱能が正負と異なるため、重水素置換によるスピンコントラスト法で観測したい部分のみに濃淡がつくように散乱能を調整可能であり、放射光 X 線と中性子の相補的利用によって分子鎖の広がり、内部構造の変化を定量的に捉えることができる。分子量の異なったポリエチレンを用いた一軸延伸時の分子量依存性や逐次二軸延伸時の分子鎖配向の変化を例に報告して頂いた。

最後に、重水素置換を用いないコントラスト法としてマイクロ波共鳴を用いた動的核偏極 (DNP) 法に関して、開発・研究を行っている大学院生の三浦氏から紹介頂いた。DNP 法は水素の異常小角 X 線散乱法と考えることが出来、これまで小角散乱・反射率測定で用いられてきた。新しい試みとして粉末散乱実験での適応をグルタミン酸の実験結果を例に報告して頂いた。今後期待される手法の一つである。

本企画講演を通して相補的利用に関する情報共有及び議論する場の必要性を提示し、サイエンススペースでの議論が



写真 講演者の集合写真。左から松葉, 山本, 本田, 三浦, 足立 (敬称略)

重要であり、それによってビーム技術へのフィードバックも可能となる。相補的利用とは何かを再認識する良い機会であったと思われる。今後の量子ビーム連携に関しての礎となると幸いである。本企画を進めるにあたり、和達大樹氏 (兵庫県立大) にはいろいろ協力をして頂いたので、ここで感謝の意を表したい。

#### 企画講演 4 『X 線吸収分光におけるラウンドロビン・データベースを巡る状況』

木村正雄 (高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所)

##### 企画趣旨

大学や公的機関等で得られた様々な計測データをデータベースとして公開し活用していくことは、科学技術の発展だけでなく、産業利用の観点からも重要である。それには、各施設で計測されるデータの相互検証が不可欠であり、その代表的な取り組みがラウンドロビンである。本企画講演では、材料評価の手法として産官学の広いユーザーに利用されている X 線吸収分光に関して、ラウンドロビンおよびデータベースを巡る状況の情報を共有し今後の展開を議論した。

企画参加人数 約80名

##### 講演構成

司会 木村正雄 (高エネ研)

1. 「趣旨説明」 木村正雄 (高エネ研)
2. 「光ビームプラットフォームでの取り組み概要」 渡辺義夫 (あいち SR)
3. 「硬 XAFS ラウンドロビン実験」君島堅一 (高エネ研)
4. 「軟 XAFS ラウンドロビン実験」太田俊明 (立命館大)
5. 「硬 XAFS データベース」 朝倉清高 (北大)
6. 「材料データベース」 石井真史 (NIMS)
7. 「産業利用でのラウンドロビン・データベースへの期待」 山口浩司 (住友電気工業㈱)

##### 講演概要

企画提案者の木村から、大学や公的機関等で得られた様

々な計測データをデータベースとして公開し活用するためにはデータの相互検証とそれを保存活用するデータベースが重要となること、そこでX線吸収分光を中心にラウンドロビンおよびデータベースを巡る状況について情報を共有し今後の展開を議論したいとの趣旨説明があった。

最初の講演者である渡辺義夫氏は、光ビームプラットフォーム事業（第一期：2013-2015FY，第二期：2016-2020FY）の活動内容を全体紹介した後、その中で取り組んだラウンドロビン実験（硬X線XAFS，軟X線XAFS，光電子分光，SAXS）について説明し、施設間の連携協力の中で進められた結果について紹介した。質疑では、具体的な進め方の詳細や得られたデータの公開方法が話題となった。

次に、君島堅一氏は、硬X線XAFSラウンドロビンについて、参加機関の関係者がどのように考え、議論を重ねて具体的な実験内容を決めたかの経緯を紹介した後、実際のデータを示しながらラウンドロビン実験の結果を紹介した。バルク標準試料では差は少ないものの、希薄試料や実材料では測定条件を含めて差があることが報告された。質疑では、結果の各施設へのフィードバックや、得られたデータの一般公開が話題となった。

太田俊明氏は、軟X線XAFSラウンドロビンについて、具体的な実験内容を決めるに至った背景を紹介した後、実際のデータを示しながら標準試料のラウンドロビン実験（全電子収量法）の結果を紹介した。今後は、実試料を用いた測定、様々なモード（蛍光X線収量法，部分電子収量法など）でのスペクトル比較等を進めていきたいとの方針が示された。質疑では、ラウンドロビン活動の継続，参加していない機関への拡大，結果の公開，を望む意見がだされた。これに対して太田氏から，SRIの日本版「放射光技術報告会」といった議論の場をつくることが提唱された。

石井真史氏は、自身が所属する機関で進められているNIMS材料データベースについて、そのコンセプトと全体像について紹介した後、具体的な整備スケジュールと現在の状況について詳細な説明を行った。特に、材料に関する様々な分野・カテゴリーのデータを一括して活用する“材料データリポジトリ”が既に試験運用されていることが述べられ、放射光利用研究のデータも含有していくことの重要性・意義を強調した。質疑では、データの所有権，データ識別のための方法(例えばDOI)，等が議論された。

最後に、山口浩司氏から、産業界の立場として、ラウンドロビン・データベースへの期待について発表があった。自身が所属する企業での放射光利用研究の概要と、研究結果がどのようにプロセスに展開され、専用のビームライン建設まで展開してきたかを、具体的な例を挙げて紹介した。複数の放射光施設を利用した経験から、各施設/BLの比較と測定データの有効活用のためには、ラウンドロビンやデータベースの整備の活動に対する期待が述べられた。

このように様々な立場の先生方に変々興味あるご講演を頂いたお陰で、予想以上に多くの方に参加頂き、全体を通して質疑応答も活発に行われた。このことから企画として取り上げた話題そのものが多くの方にとっての関心事であることが再認識された。こうした理由・背景として以下の点が挙げられると考えている。多くの放射光施設がある日本では、複数の施設を使うユーザーも多い。そうした時に、ラウンドロビンによる各施設間のデータの相互検証は不可欠となりその必要性は誰もが感じていながら、その活動について従来あまり議論されることは少なかった。また、近年、情報科学や関連インフラの発達に伴い、様々な機関でデータベースの整備が進んでいるが、集める側主体で話が進むことが多く、それを活用する立場での議論や要望をまとめる機会は意外に少ない。

本企画講演は、そうした問題意識を共有する関係者の議論の中で「小さなことからでもアクションをおこそう」ということで提案されたものである。通常の学術発表とは勝手の違う難しいトピックスにもかかわらずご講演を頂いた先生方に改めて感謝申し上げるとともに、実現のためには多くの方々にご協力頂いたことを改めて記したい。ご講演とその後の活発な質疑を通して、現状の様々な課題が改めて明らかになると共に、今後の進め方へのヒントも多く得られたセッションになったと自負している。この企画講演を契機に、ラウンドロビン活動やデータベース整備を進めていく活動が、ますます広がっていくことを期待したい。

本企画講演の最後に申し上げたように、今後の活動に関して、様々なご意見を広く募集しております。光ビームプラットフォーム事業のホームページを参照頂き御意見を頂ければ幸いです(<https://photonbeam.jp/latenews/2451/>)。

## 企画講演5 『次世代X線画像検出器と期待されるサイエンス』

宮脇 淳（東大物性研），初井宇記（理研）

### 企画趣旨

次世代のX線画像検出器として、読出速度，ダイナミックレンジを大幅に向上させる硬X線向けCITUIS検出器と軟X線向けのsxCMOSの開発が進められている。また、間接型X線画像検出器も200nmを解像できるまで性能が向上してきた。そこで東北放射光やSPring-8-IIといった高輝度光源と検出技術の進歩を念頭に、どのような放射光利用の将来を切り拓いていくのか、検出技術と具体的な可能性の例を皆様と共有しつつ議論を行いたい。

企画参加人数 約150名

### 講演構成

1. 「趣旨説明」 宮脇 淳（東京大学物性研究所）
2. 「間接型高空間分解能検出器の現状と将来展望」 亀島 敬（高輝度光科学研究センター）
3. 「放射光イメージングの現状と将来展望」 上杉健太郎（高輝度光科学研究センター）

4. 「CITIUS 検出器の現状と期待される性能」  
初井宇記（理化学研究所）
5. 「コヒーレント回折イメージングと CITIUS への期待」  
高橋幸生（東北大学）
6. 「軟 X 線検出 CMOS イメージセンサ」  
須川成利（東北大学）
7. 「軟 X 線イメージングと sxCMOS への期待」  
山崎裕一（物質・材料研究機構）
8. 「まとめ」  
宮脇 淳（東京大学物性研究所）

#### 講演概要

はじめに、企画提案者の宮脇から趣旨説明が行われた。建設が開始した東北の次世代放射光施設や計画途中である SPring-8-II などでの光源性能の向上が期待されるが、全体としての実験性能の向上のためには、対となる X 線検出器の性能の向上も必須である。しかし、万能な検出器は存在せず、研究用途に応じて個々の検出器開発が行われる。そこで、次世代放射光に向けて開発中の次世代 X 線検出器について、検出器開発側から開発方針、状況を紹介していただき、利用者側から期待されるサイエンスを紹介していただくという対の組み合わせによって、次世代放射光での次世代 X 線画像検出器の可能性を議論すべく、本講演が企画されたことが説明された。

最初に、亀島氏が放射光イメージングのための高空間分解能 X 線検出器の開発状況、展望について紹介を行った。X 線イメージングを高空間分解能で取得するための検出器として、シンチレーターを X 線検出に用いる間接変換型の検出器が広く用いられているが、新たな高品質薄膜シンチレーター製法の開発によって、200 nm の空間分解能が達成されている。今後の展望として、新規シンチレーター材料の探索によるさらなる高空間分解能化、高効率化や、新規 CMOS センサの導入による高視野角化、広ダイナミックレンジ化、高フレームレート化などの高度化を目指していることが示された。

ついで、上杉氏より放射光イメージングの発展と将来展望について紹介が行われた。放射光イメージングは、間接変換型検出器を用いて20年ほど前から行われてきた手法であるが、検出器の性能向上とともに測定時間が短縮し、より空間分解能を上げた測定や 1 kHz を超えるような時間分解測定、高精細な CT 像の取得などが行われるようになってきている。現在の最高の空間分解能はフレネルゾーンプレートを使った顕微の CT で150 nm 程度であるが、検出器だけでなく画像再構成技術の向上により、さらなる高空間分解能化が見込まれていることが述べられた。

次に、初井氏が、硬 X 線向けの高速度フレームレート積分形 X 線イメージング検出器 CITIUS の開発状況について紹介した。CITIUS は、高速、広ダイナミックレンジ、

高精細を達成するべく2015年に開発が着手された積分型 CMOS 検出器であり、12 keV で30 Mphotons/s/pixel、拡張モードで600 Mphotons/s/pixel という高飽和、17 kfps という高フレームレートが設計値として設定されている。現在は、2020年の利用実験に向け、開発の最終段階にあることが示された。

続いて、高橋氏が、硬 X 線によるコヒーレント回折イメージング、タイコグラフィの現状と CITIUS で期待される新展開について紹介した。現在主に使われている光子計数型のイメージング検出器では、ダイナミックレンジが不足しており再構成像の質が落ちること、また、パンチモードによっては線形性に問題が生じることが報告された。一方、CITIUS は積分型検出器であるので、線形性の問題はなく、かつ広ダイナミックレンジによって次世代放射光源の性能を十分に活用して、より良質な再構成像が得られる展望が述べられた。

3つ目の検出器として、須川氏から、現在開発中の軟 X 線用広ダイナミックレンジ、高速読出の CMOS イメージング検出器 (sxCMOS) の開発について紹介があった。sxCMOS は、エネルギー範囲100~1000 eV、100 eV でも一光子検出が可能であり、飽和性能は $10^7$ 電子、最大1000 fps という設計値が設定されている。現在はプロトタイプ of 検出器による要素技術の検証中で、高飽和、高速読出の性能を達成していることが可視光によって確認されており、今後は、軟 X 線への感度の確認後、実センサ開発への移行を目指していることが紹介された。

ついで、山崎氏が、軟 X 線領域の回折イメージングの現状、sxCMOS を用いた計測の新機軸について紹介した。軟 X 線領域で用いられている画像検出器の主流はまだ CCD であり、ダイナミックレンジ、読出速度ともに求められる性能に達していない。sxCMOS のダイナミックレンジは CCD と比較して2桁以上高く、これによりコントラストの高い実空間像が得られる。更に、高速読出性能と XFEL のようにシングルパルスでのコヒーレントフラックスが十分な光源の組み合わせによるシングルショットイメージングによって、微視的には繰り返し性の低い現象に対する時間分解イメージングの可能性について言及された。

本企画講演は、検出器開発者と利用者の両者の視点で議論する場として提案されたが、特定の分野の利用者だけでなく幅広い分野の多くの方々に参加していただき、新しい検出器への期待の高さを表しているものと考えている。検出器開発には、多大な人手、時間、資金のリソースが必要であるが、今後もこのような議論の場が設けられて、両者の理解、協力を深めて検出器開発が進むことを期待する。