

JSR11 企画講演報告

企画1 『XFEL プロジェクトこの一年』一夜明け前：スタートするXFELの利用』報告

田中 均(理研・JASRI XFEL 計画合同推進本部)

企画趣旨

放射光学会が2005年度に「究極を目指す光源」として位置づけ、国家基幹技術に認定された「X線自由電子レーザー(XFEL)」プロジェクトの進捗状況を放射光コミュニティーに報告するために、放射光学会年会において「XFEL プロジェクトこの一年」という特別企画講演が2007年よりスタートした。第1回目はプロジェクトの概要報告、2回目は試験加速器におけるEUV波長域の定常的飽和の達成と実機における建設及び利用研究の準備状況の報告、第3回目はフルコヒーレントのシードFELの開発状況、第4回目の昨年はXFEL利用の展望が報告された。5年間にわたるXFEL建設プロジェクトも2011年の3月で終了し、春からは8月のX線レーザー出力飽和を目指したビーム調整がスタートする。そこで今回の講演では、速やかなレーザー増幅をどう実現するのか、その後の利用実験にどう迅速に対応していくのか等、XFELの施設の立ち上げに向けた戦略と準備状況を放射光学会会員に詳細に報告する。

企画参加人数 約170人

講演構成

	司会 石川哲也
講演1：趣旨説明	田中 均 5分
講演2：速やかなレーザー増幅達成に向けて	田中 均 20分
講演3：迅速で効率的なビームラインの立ち上げに向けて	矢橋牧名 20分
講演4：戦略的な検出器開発と整備状況	初井宇記 20分
講演5：実験ステーション：コヒーレント回折イメージング	Song Changyong 25分

講演概要

a. 講演会は理研・JASRI XFEL 計画合同推進本部（以下合同推進本部）の石川哲也プロジェクトリーダーの司会進行で進められた。企画提案者から講演会の趣旨と構成が説明された後、XFELのビームコミショニングに関し、加速器の安定性や100mを超えるアンジュレータビームラインの高精度アライメント等XFELで新たに解決すべき4つの主要課題への対応は完了し、ビーム調整に向けたRFエージングも進捗しており、SASE XFELのレーザー増幅が極めてスムーズに立ち上がるという明るい見通しが報告された。Beam Based Alignmentにおける地磁気遮蔽の必要性について質問があ

り、これに対し、SAFALI (in-situ field measurement system) を用いて設置場所で磁場分布計測と調整をやるので問題ないとの答えがあった。

- b. 次に、合同推進本部の矢橋牧名氏からビームラインの整備状況に関し、optics、診断装置、可視光レーザー、集光系、レーザーアライメントシステム、XFEL-Spring-8 相互利用実験施設等の各システムの進捗が示され、7月頃から実験ハッチ周りのコミショニングが開始できるという見通しが示された。Bragg 回折を利用したビームスプリッターで構成されるユニークな auto-correlator 開発に関しても紹介があった。
- c. 引き続き同じく合同推進本部の初井宇記氏より主にX線2次元検出器開発状況について、これまでの開発方針とMulti-port CCD (MPCCD) 検出器の性能試験状況、さらに2011年XFEL発振と同時に利用可能となるMPCCD検出器システムの概要が報告された。またより高いダイナミクスレンジが期待できるSilicon-On-Insulator (SOI) センサー技術を用いたMulti-via (MVIA) 検出器についても2013年に利用可能になるべく確実な進捗がなされていることが報告された。
- d. 最後に、理化学研究所Song独立主幹ユニットのChangyong Song氏がコヒーレント回折イメージングについて議論した。Spring-8, SCSS等を活用して先行研究が展開されており、無染色の細胞に対する3次元イメージングをはじめとする成果が得られている。現状が示され、XFELにおいてどのような飛躍があるのかが具体的に議論された。またそれを実現するための実機利用に向けた装置開発も報告された。

『XFEL この一年』シリーズ企画を終えるにあたり

今振り返るとあっという間の5年間でした。最後の5回目講演会が今までで一番質問が少なかったという印象ですが、それだけXFELプロジェクトの状況が皆様方に浸透したものと、また、各講演が分かりやすかったものと信じております。今後も、XFELを用いた実験成果が数多く報告できますよう、関係者一同最大限努力してまいります。長きに渡り、ご参加並びにご支援ありがとうございました。

企画2 『ERL プロジェクトの現状とその利用への期待』報告

河田 洋 (KEK ERL 計画推進室)

企画趣旨

蓄積リング型光源の性能を飛躍的に向上させることができる次世代放射光源・エネルギー回収型加速器(ERL)計

画が KEK を中心にして進められている。この計画では、近年提案された飛躍的な輝度の向上と時間方向のコヒーレンスを実現する共振器型自由電子レーザー (XFEL-O) をも組み入れた形で進めようとしている。既に試験加速器であるコンパクト ERL (cERL) の建設が KEK で開始し、2012年度末には運転を開始する予定である。したがってこの数年の内に、cERL を用いてコヒーレント THz 光、およびレーザー逆コンプトン散乱 X、 γ 線利用も可能となる状況となってきている。さらに、国内を見回すと、小型加速器を用いたレーザー逆コンプトン散乱 X、 γ 線源開発が行われている。本企画講演では、ERL 計画の概要とこれら光源技術の開発現状の紹介、cERL によりまもなく可能となる、加速器をベースにした大強度コヒーレント THz 光の利用研究、及びレーザー逆コンプトン散乱 X、 γ 線源の現状と X、 γ 線源としての cERL への期待を紹介し、それらの実現に向けての共通理解と開発要素を明らかにすることを目的とした。

講演構成

- 1) cERL/5 GeV-ERL/XFEL-O 計画の概要と開発の現状 (KEK, ERL 計画推進室 河田 洋)
- 2) Intense Coherent THz Pulses from the NSLS Source Development Laboratory Photo-injected Linac and Applications in Ultra-fast Material Dynamics (BNL, G. Lawrence Carr)
- 3) レーザー逆コンプトン微小 X 線光源による X 線イメージングの応用研究 (KEK, 物構研 兵藤一行)
- 4) レーザー逆コンプトン γ 線の現状と cERL での展開 (JAEA, ガンマ線核種分析研究グループ 羽島良一)
- 5) 総合討論

講演内容

KEK の河田から本企画の趣旨説明の後、「cERL/5 GeV-ERL/XFEL-O 計画の概要と開発の現状」の講演が行われた。KEK で進めている ERL 計画の 5 GeV・ERL および XFEL-O の光源特性を明らかにした上で、展開されるであろう利用研究の概要の説明があった。ERL 実現に向けた原理実証器である cERL の開発建設状況の説明を行い、2012年度末には試験運転を開始すること、その後、大強度コヒーレント THz 光、およびレーザー逆コンプトン散乱 X・ γ 線利用を行うと同時に、5 GeV・ERL に向けての加速器開発を遂行し、2015年度には 5 GeV・ERL の建設につなげたいという内容であった。この講演に対して、「KEK-X 計画と、この ERL 計画との関連については？」との質問があり、それに対して、個人的な見解と前置きの上で、「KEK-X 計画に関してはスーパー KEK-B の建設と合わせて、実験ホール等の建設が進行することが条件であった。しかし、現在、加速器改造予算だけが進行し、加速器の改造が既に始まっている。つまり現時点で、実験ホール等の建設を行うことは極めて困難な状況となっている。したがって、KEK-X を経由することなく、ERL

計画を前倒して進める必要があると理解している。」との返答があった。

BNL の G. Lawrence Carr 博士は、「Intense Coherent THz Pulses from the NSLS Source Development Laboratory Photo-injected Linac and Applications in Ultra-fast Material Dynamics」の題目で、SDL (Source Development Lab) のライナックの短パルス電子ビームを用いて既に行われている、コヒーレント THz 光利用研究を紹介した。講演では、コヒーレント THz 光発生原理から利用研究まで幅広い内容で、特にハーフサイクルのコヒーレント THz 光の強電場・強磁場環境下での物質応答を探るといふ、励起光源としての利用という側面を強く強調していた。

KEK の兵藤一行氏は「レーザー逆コンプトン微小 X 線光源による X 線イメージングの応用研究」の題目で、cERL で期待される微小光源コーンビーム X 線源による医学応用の展望を述べた。cERL から得られるレーザー逆コンプトン X 線は、約 10 mrad 程度の広がりを持った擬似単色のコーンビームであるが、医学応用のような大きな視野を必要とする対象には分光器を入れる必要が無く、マッチングが取れている。さらに微小光源であるがゆえに屈折イメージングがそのままの状態でも撮影可能であること、空間分解能が高いこと、また東京大学の百生敦氏によって開発されているタルボ干渉計が応用可能であり、軟部組織解析も期待される。研究グループとしては、臨床応用も考慮しながらの開発を行っていくことが報告された。

JAEA の羽島良一氏は、「レーザー逆コンプトン γ 線の現状と cERL での展開」と言う題目で、現状の、主に小型ライナックを用いたレーザー逆コンプトン散乱 γ 線源の現状を概観した上で、 γ 線強度の更なる向上には、繰り返し周波数の高い ERL への期待が大きい事を述べた。特に、近年重要課題となってきている核セキュリティ確保の必要性から、「核物質の測定、検知の技術開発」が、JAEA のプロジェクトとして取り上げられていること、そしてその実現の第一歩として、「レーザー逆コンプトン散乱 γ 線利用・核共鳴蛍光非破壊測定実証試験」を、平成 23年度から 25年度にかけて、cERL を利用して行う計画があることを説明した。既に、基幹技術である高輝度電子銃、超伝導空洞、衝突レーザーの高強度化等に関して、KEK, JAEA その他の協力のもとに目処が立ちつつあり、十分な成果が期待できることを述べた。

会場には、約 160 名の参加者があり、PF の次期計画としての ERL の現状、及びその実証器である cERL を用いた利用・応用研究に関して、学会参加者が高い興味を持っていることがうかがえた。

企画 3 『最先端放射光計測技術による新規電池材料の研究開発』報告

溝川貴司 (東京大学), 阿部 仁 (KEK-PF)
本企画講演は、企画 3 『最先端放射光計測技術による新

規電池材料の研究開発』として、2011年1月9日(日)の9時から12時、つくば国際会議場エポカルの大会議室101(A会場)で行われた。全ての講演が予定通り行われ、139名余の聴衆の皆様にご参加頂き、聴衆と講演者との間で活発な討論が展開された。本稿では、本企画講演について簡単にご報告したい。

企画講演の趣旨

エネルギー問題は、環境問題と並び、解決すべき大きな社会的課題となっている。特に、石油資源枯渇への対応、低炭素社会の実現が求められ、水素を中心としたエネルギー源の確保や電気化学的な貯蔵という観点で、電池技術を中心に“エネルギー”をキーワードとした研究開発が進められている。このような時代背景の中、燃料電池やリチウムイオン電池の研究開発において、鍵となる元素の働きを理解することは特に重要である。高輝度放射光を用いるXAFSやXPSは、元素選択的に材料の構造や動的挙動に関する知見が得られることから、不可欠の計測技術として利用されている。

本企画講演では、高輝度放射光によるXAFSやXPSを駆使し、新規電池材料開発をされている研究者の方々に、研究の現状と将来の展望についてご講演頂いた。

講演構成

趣旨説明 阿部 仁 (KEK-PF) 5 min.
前半

座長：溝川貴司 (東京大学)

「リチウムイオンおよびナトリウムイオン二次電池用正極材料の電極活性とXAFS解析」

駒場慎一先生 (東京理科大学) 25 min.

「軟X線吸収分光によるプルシアンブルー類似体電極材料の電子状態解析」

朝倉大輔先生 (AIST) 20 min.

「硬X線光電子分光による電池材料の電子状態評価」

孫珍永先生 (SPring-8) 20 min.

「高輝度放射光計測と次世代電池材料開発」

内本喜晴先生 (京都大学) 25 min.

休憩 10 min.

後半

座長：阿部 仁 (KEK-PF)

「高輝度放射光を用いた非白金系燃料電池正極触媒における活性点の探索」

原田慈久先生 (東京大学) 25 min.

「Pd微粒子の触媒反応・水素吸蔵反応の実時間連続観測」

松村大樹先生 (JAEA/SPring-8) 20 min.

「放射光XAFS計測技術の高度化と次世代燃料電池触媒の研究開発」

岩澤康裕先生 (電気通信大学) 30 min.

講演内容

本企画講演の前半では、KEK-PFの阿部が趣旨説明を行った後、4名の先生方にご講演を頂いた。最初に、東京理科大学の駒場慎一先生より、リチウムイオンおよびナトリウムイオンによる新しいタイプの2次電池正極材料の研究成果についてお話を頂いた。放射光X線回折による

結晶構造解析とXAFSによる原子価の解析を駆使することによって、2次電池正極材料である遷移金属酸化物の構造物性を評価する手法について分かり易く解説して頂いた。引き続き、産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部の朝倉大輔氏より、プルシアンブルー類似体を電極に用いる2次電池材料の開発について講演があった。プルシアンブルー類似体中の遷移金属が示す複雑な電子構造の解析に、軟X線領域での内殻分光が有用であることが示されるとともに、軟X線領域において電解質中で測定できるように薄膜で真空と仕切られた測定セルの開発が将来の課題であることが議論された。3番目の講演では、SPring-8の孫珍泳氏より硬X線光電子分光による2次電池正極材料の電子状態評価についてお話があった。XAFSに比べて表面敏感ではあるが、軟X線光電子分光に比べると深いところまでプローブできる硬X線光電子分光の特徴を活かして、電池材料の研究に積極的に応用する将来展望が示された。最後に、前半を締めくくのご講演を京都大学の内本喜晴先生より頂いた。2次電池材料・燃料電池材料の研究開発の現状について広い視点からご紹介頂いた後、特に電極表面付近の制御が電池の性能向上に重要であることを解説された。モデル電極の試料作製技術と放射光計測技術を組み合わせることによって、新材料開発のブレークスルーに繋がるということが議論された。

10分の休憩をはさみ、後半は3名の先生方にご講演頂いた。まず、東京大学の原田慈久先生に「高輝度放射光を用いた非白金系燃料電池正極触媒における活性点の探索」という題目でご講演頂いた。高価なPtに替わる燃料電池正極触媒の研究が盛んに行われているが、原田先生らのグループが目したのは炭素を主材料にした触媒であった。この触媒の性能とその触媒能の起源について、XPS、XAFSのデータを示しながら、また理論計算の結果も交えながらご説明頂いた。触媒能には数パーセント程度導入された窒素がカギとなっていることがクリアに示され、非常に興味深いご講演であった。続いてJAEA/SPring-8の松村大樹先生には「Pd微粒子の触媒反応・水素吸蔵反応の実時間連続観測」という題目でご講演頂いた。触媒反応・水素吸蔵反応の過程を、Dispersive-XAFS法を用いて実時間観測した結果を示し、Pd微粒子がどのように変化して行くかを手に取るようにわかりやすくお話頂いた。最後に、電気通信大学の岩澤康裕先生には「放射光XAFS計測技術の高度化と次世代燃料電池触媒の研究開発」という題目でご講演頂いた。非常に多岐にわたる岩澤先生のご研究についてお話下さった。現在我々が抱える問題点を、自動車が今後発展すべき正しい方向なども交えながら、示して頂いた。さらに、それらの問題点を解決するべく建設が進められている新しいビームラインの概要、性能についてお話頂き、そこで展開される研究についてご講演頂いた。

企画講演終了後、会場のあちこちで、多くの方から「良い企画だった」「わかりやすかった」「面白かった」「刺激

を受けた」という言葉を頂き、提案者としてほっとするとともに、大きな喜びを感じた。放射光を用いた XAFS や XPS 等の最先端計測がこれらの材料評価に重要な役割を担っていることが、異分野の聴衆の方々にもお伝えできていれば幸いである。本企画講演が、さらに放射光による計測技術の発展を促し、2次電池・燃料電池の開発に新しい流れを生むことを期待して報告としたい。

企画4 『生命現象のイメージング』報告

木原 裕 (関西医大), 青木貞雄 (筑波大)

企画趣旨

本企画は、近年イメージングの手法が発達し、高い分解能で多くのプローブで生体試料を観察できるようになったことを背景に、生命現象の解明にイメージングが本質的な役割を果たしているかという問いを、様々な手法と階層レベルで投げかけてみることを目的として企画された。特に X 線のマイクロイメージングが10 nm の分解能を有し、細胞内構造の研究に中心的な役割を担いつつあるときであるだけに、他の手法(光学顕微鏡, 電子顕微鏡, PET など)との比較を通じて、X 線のマイクロイメージングの目標はどこにあるかを明らかにすることに焦点を当てた。

企画参加人数 83人

講演構成

司会	木原 裕, 青木貞雄
講演1: はじめに	木原 裕 10分
講演2: 超解像蛍光ライブイメージング—現状と課題	岡田康志 (東大医) 25分
講演3: 免疫組織の生体多光子励起イメージング	石井 優 (阪大免疫フロンティア) 25分
講演4: Soft X-ray nanotomography: A new modality for high-resolution 3D biological imaging	Maho Uchida (UCSF) 25分
講演5: コヒーレントイメージングの現状と展望	西野吉則 (北大応電研) 25分
講演6: 分子イメージングで見る脳の機能と疾患診断	須原哲也 (放医研分子イメージング) 25分
講演7: おわりに	青木貞雄 10分
総合討論	10分

講演内容

本企画は、特に放射光 society と外部の気鋭の研究者との相互作用を目指して行われた。講演2と講演3は、光学顕微鏡の最近の進歩とそれによる生物学への寄与の紹介を目指して行われた。講演4と5は、近年急速に発達してきた X 線のマイクロイメージングの到達点を紹介することを目指した。講演6は、分解能はずっと低いが、観たいものを観るという点で重要な発達を遂げてきている PET (陽電子断層撮影法) により、脳機能を解明しようとする試みを取り上げた。全体として、どのような方法でどのような情報を得ることができるか、さらにそれにより

どのような本質的なサイエンスへの寄与がなされるかを明らかにしようとした。

岡田博士は、光学顕微鏡の分解能が Rayleigh の基準をはるかに超えつつあることを、その具体的事例をあげて説明された。STED (Stimulated Emission Depletion), PALM (Photoactivated Localization Microscopy) / STORM (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy), SIM (Structured Illumination Microscopy) などの手法により、現在30 nm 分解能で画像を得ることができるようになってきている。ただしその分解能の意味は、それぞれの手法で限定的に解釈する必要があることを、具体例を示しながら説明された。

石井博士は、細胞への損傷をより少なくするために用いられ始めている2光子励起の顕微鏡の原理の紹介と免疫組織への応用例を紹介された。2光子励起による顕微鏡は照射光源のエネルギーが低いために生体の損傷が少ないこと、2光子励起の確率が低いために照射された部分以外からの蛍光放出がほとんどないために、深さ方向の分解能も高く得られることなどの利点があることが紹介された。本講演で最も注目されるのは、従来免疫現象の研究にあまり重要視されてこなかったイメージングが、免疫現象の解明に重要な役割を担っていることを明らかにするところであった。生命現象の解明に「場所」の情報が重要であることがあらためて明らかにされたことは、X 線によるマイクロイメージングがどのように生命現象の解明に寄与できるかという問いに重要なヒントをあたえてくれていることを意味している。

3番目に講演された Dr. Uchida は、UCSF の解剖学教室に属するポスドクで、実際の仕事は ALS の X 線ナノトモグラフィーセンターでされており、ALS での軟 X 線トモグラフィーの到達レベルを明らかにしてくれた。X 線は、可視光と異なり、吸収係数の違いをうまく使うと細胞内の諸器官を可視化することができる。Uchida はそのようにして細胞内の3次元像を鮮やかに映像化して見せてくれた。

4番目に講演された西野教授は、最近まで SPring-8 に所属されており、そこにおける成果を基に、新しい XFEL の利用を展望したコヒーレント X 線回折による細胞の構造解明を目指した講演をされた。昨年夏に Chicago で行われた X 線顕微鏡国際会議でも、軟 X 線の実像イメージングとコヒーレントな硬 X 線を用いた X 線回折を用いた位相イメージングとは共に30 nm の分解能の細胞像を示し、迫力のある発表が相次いだ。最後のセッションの議長をされた青木教授が、同一試料を二つの方法で観測したらどうか、と提案され多くの支持を得た。今後この X 線の二つの方法だけでなく、可視光や電子顕微鏡を含めたイメージングの統合像を創り上げていくことが我々の課題と云えよう。

PET による脳機能の解明を目指した須原教授の話は、

少し違った観点から生命像を見ることの重要性を指摘していただいた。脳の機能の解明、ひいては心のイメージングなど X 線とは全く違った情報が PET で明らかになりつつある。脳内のドーパミンやセロトニンの分布を画視化することにより、精神的な疾患の解明や情動のメカニズムにも新しい局面が開けつつある。観たいものを観ることの重要性をひしひしと感じることができた。放射光でも脳機能や心の問題に切り込んでいく日がそう遠くないと思われる。そのとき大切なのは、見えるものを見るのではなく、観るべきものを観ることであろう。

講演のいくつかは、放射光 society の人間にとっては、あまり familiar でないものであったと思われるが、それだけに本企画は聴衆に新鮮なインパクトを与えることができたと思われる。やや残念なのは、講演者に彼らがたじたとするような鋭い質問や、示唆に富んだコメントをするという点では、やや物足りなかったと思われる。この部分は今後期待したい。

企画 5 『次世代放射光に向けた装置開発と利用研究～放射光実験用検出器と超高速現象の研究～』報告

岸本俊二 (KEK-PF), 豊川秀訓 (JASRI/SPring-8), 田中義人 (播磨理研), 佐々木裕次 (東大新領域), 足立伸一 (KEK-PF)

企画講演の趣旨

次世代放射光に向けた装置開発と利用研究開拓は車の両輪であり、両者をバランスよく推進することが肝要である。その中でも、本企画講演では、放射光実験用検出器開発と超高速現象の研究を取り上げた。次世代光源として期待の高い XFEL や ERL は勿論のこと、現状の放射光リングにおいても、放射光の利点を最大限に引き出すためには検出器性能のさらなる向上が不可欠である。検出器開発に関する前半の 3 講演では、PILATUS 検出器など新世代の放射光実験用検出器や最新の応用とともに、検出器開発によって切り拓かれる新たな研究の可能性についてご講演いただいた。一方、次世代放射光源ではフェムト秒短パルス性能の利用が重要なキーワードの一つであり、物質の超高速現象の研究は次世代放射光源における有力な利用研究分野である。後半の 5 講演では、EUV から硬 X 線に渡る広いエネルギー領域における、放射光測定手法を駆使した様々な超高速現象の研究にスポットを当て、その研究の現状と、5~10年後に向けた将来展望についてご講演いただいた。これらを踏まえて、放射光を利用する先端的研究の現状をまとめ、先端的研究にどのような検出器開発が必要とされているかについて議論した。

参加人数 139名

講演構成

1. 趣旨説明 岸本俊二 (KEK)
- 座長：岸本俊二
2. 「PILATUS の現状と新世代検出器の開発状況」

豊川秀訓 (JASRI) 25分

3. 「高速偏光スイッチング実験用マルチアノード MCP システム」 両宮健太 (KEK) 20分

4. 「CMOS 検出器を用いたタンパク質結晶の回折データ測定」 長谷川和也 (JASRI) 20分

座長：田中義人

5. 「ピコ秒時間分解 XAFS を用いたスピンドロスオーバー錯体における光誘起構造転移ダイナミクスの研究」 野澤俊介 (KEK) 20分

6. 「時間分解 X 線回折を用いたナノ構造体の光応答観測」 一柳光平 (東大新領域) 20分

7. 「相変化材料の時間分解顕微 XAFS~マイクロビームを用いた時間分解 XAFS の現状と展望」 大沢仁志 (JASRI) 20分

座長：足立伸一

8. 「軟 X 線放射光による時間分解光電子分光の表面ダイナミクスへの展開」 松田 巖 (東大物性研) 20分

9. 「EUV-FEL と紫外フェムト秒レーザーを用いた光励起分子の超高速電子ダイナミクスの研究」

小城吉寛 (理研基幹研) 20分

10. 「まとめ」 足立伸一 (KEK) 10分

講演と質疑応答

- a. まず初めに、企画提案者を代表して、岸本俊二氏から企画講演の趣旨とプログラム構成について説明した。
- b. 次に、豊川秀訓氏が PILATUS 検出器の現状と、新世代検出器の現状について紹介した。豊川氏は PILATUS 検出器の開発当初から Swiss Light Source (SLS) の検出器開発グループに参加するとともに、SPring-8 での PILATUS の利用研究開拓に深く関わっている。講演では、パルス計数型二次元計数型検出器としての PILATUS の基本的特徴から始めて、PILATUS 検出器を利用したこれまでの利用研究の広がりについて紹介した。また次世代放射光源の利用研究を想定した新世代検出器として、SLS で開発が進んでいる EIGER 検出器、および SPring-8 で開発を進めている CdTe ピクセル検出器について紹介した。これらの動向を踏まえて、今後の新世代検出器開発全体の流れを概観し、最後のまとめとした。
- c. 両宮健太氏は、現在 PF の高速偏光スイッチングビームラインを用いて、高感度な XMCD や XMLD 測定法の開発を行っている。今回は特に、深さ分解 XAFS 実験用のマルチアノード MCP システムについて紹介した。この検出器は、偏光スイッチングによるシグナルの変化に追従でき、かつ深さ分解 XAFS に必要な角度分解能を兼ね備えるという特長を有している。この検出器を利用して、高速偏光スイッチング深さ分解 MCD 測定を行った結果、当初の想定通りの性能が実現できたことを示した。
- d. 長谷川和也氏は、SPring-8 においてタンパク質結晶

回折のユーザー実験に供されている CMOS 検出器について紹介した。現状のタンパク質結晶回折ビームラインでは、CCD 検出器によるデータ測定が一般的であるが、検出器の読み出し時間によるデッドタイムを改善するために、連続読み出しが可能な CMOS 検出器を利用したデータ測定を検討した。その結果、データ測定時間を半分程度に短縮することが実現し、また異常分散効果を利用した構造決定にも成功した。この結果を受けて、現在この CMOS 検出器を主要な検出器の一つとしてユーザーの利用実験に供している。

- e. 野澤俊介氏は、PF-AR の時間分解 X 線ビームラインを利用したピコ秒時間分解 XAFS 測定システムの開発を行っている。講演では溶液系及び固体系のスピントロスオーバー錯体における光誘起構造転移ダイナミクスの研究例を紹介した。溶液系では、鉄錯体溶液をジェットノズルで噴き出しながら循環させることで、安定な液膜試料を作成することが可能となり、溶液試料の時間分解蛍光 XAFS 測定により約700ピコ秒の寿命を持つ鉄 2 価高スピン型励起状態の構造決定に成功した。また固体系では、プルシアンブルー類似錯体薄膜のピコ秒時間分解蛍光 XAFS 測定を行い、光誘起相転移に伴う隠れた光誘起相の存在を示す結果を得ている。
- f. 一柳光平氏は PF-AR でピコ秒時間分解 X 線回折実験を行っており、金のナノ薄膜試料と薄膜をアニーリングして調製した金ナノ結晶試料のピコ秒光応答に関する研究例を紹介した。ナノ薄膜とナノ結晶のどちらの試料においても、ナノ秒以上の時間領域で格子の熱膨張と緩和が観測されるが、特にナノ結晶試料においてはナノ結晶のサイズに依存したコヒーレントフォノンが X 線回折により明瞭に観測された。この結果からコヒーレントフォノン振動と表面プラズモン吸収波長との関係について議論し、ピコ秒時間分解 X 線回折測定法が、今後様々な光機能性ナノ材料の動的挙動の評価に利用できる可能性を示した。
- g. 大沢仁志氏は、SPring-8 のマイクロビームを利用した時間分解顕微 XAFS 測定システムの開発を行っており、相変化材料の結晶—アモルファス転移の研究例を紹介した。相変化材料は、DVD などの記録媒体に広く利用されているが、その高速な相転移のメカニズムはこれまで十分に明らかではなかった。今回の時間分解顕微 XAFS 測定の結果から、Ge-Sb-Te 系相変化材料は結晶状態から液体状態を経ることなくアモルファス相に転移するというメカニズムを提唱し、その結果として高速な相転移が実現していることを示した。今後の方向性として、ナノビームを活かしたナノメートルオーダーの記録デバイスの動作機構のその場観察への展開する方向性について提案した。
- h. 松田巖氏は、SPring-8 の時間分解軟 X 線分光実験ステーションを利用した時間分解光電子分光法の開発を行

っている。レーザーにより誘起される表面相転移や表面化学反応などの表面ダイナミクスを追跡するために装置の整備を進めており、これまでに飛行時間型角度分解電子分析器や高精度遅延時間回路などが利用可能となった。半導体表面におけるレーザー誘起表面光起電力効果の測定を行い、100ピコ秒の精度での計測に成功した。今後は、時間分解 2 次元角度分解光電子分光（フェルミ面マッピング、光電子回折）などの計測へとさらに発展する予定である。

- i. 小城吉寛氏は、EUV-FEL（SCSS 試験加速器）の EUV 光と紫外フェムト秒レーザーを用いた光励起分子の超高速電子ダイナミクスの研究について紹介した。EUV 光に対応可能な光電子イメージング装置を開発し、SCSS と波長可変紫外フェムト秒レーザーを同期させたピコ秒時間分解ポンププローブ実験を実現した。これを用いて、ピラジン分子の項間交差と内部転換を明瞭に観測することに成功した。EUV 光は全ての光化学過程を観測するために万能プローブであり、今後さらなる利用の展開が期待されることを示した。
- j. 最後に企画提案者を代表して、足立伸一氏が企画講演全体のまとめを行った。これまでの放射光科学における超高速現象研究の現在の立ち位置を俯瞰的に示し、放射光の CW 光的利用研究とパルス光利用研究が相補的な立場で相互に発展すべきであることを示した。また次世代光源利用のための検出器開発の方向性として、CW 光的利用研究の立場からは、パルス計数型の二次元ピクセル型検出器が大面積化・高速化してゆくことが重要である一方で、パルス光利用研究の立場からは、積分型の高速度二次元ピクセル型検出器の必要性を指摘した。
- k. これに対して会場から、積分型ピクセル検出器についても従来から開発が行われていること、検出器開発を推進するためには、利用者の立場から新しい検出器の必要性をより訴えるべきであるとのコメントが出された。このコメントを受けて、今後もこのような利用研究と検出器開発を組み合わせたい意見交換の場が企画されることの重要性が指摘され、企画講演を締めくくった。

意義・反省点等

これまで放射光学会ではあまり取り上げられることのなかった「検出器」と「超高速現象のサイエンス」を一つの企画講演として取り上げ、将来光源に向けた装置開発と利用研究の方向性として明確に示すことができたのは、大変意義深いと思われる。特に、この企画では単に利用研究の紹介に留まらず、利用研究側と検出器開発側との意見のキャッチボールが今後も継続する必要性を確認できたことは重要である。

この企画講演は、もともと「検出器」と「超高速現象のサイエンス」という別々の企画であったが、プログラム委員会の判断により、2つを統合した企画講演としてプログラムを構成しなおしたという経緯がある。これにより、上

記のようなプログラム構成が可能となった反面、当初予定していた講演を取り止めたり、講演時間を短縮したりといった作業が必要となり、プログラム再編成の作業が煩雑になった点、質疑応答や議論の時間が十分に確保できなかった点を反省点として挙げておく。

企画6 『X線光学素子とX線イメージング法の新展開』 報告

三村秀和（東京大学大学院工学系研究科）

近年のX線光学素子の発展は目覚ましい。その理由として、1990年後半からのナノテクノロジーの進展による微細加工、高精度加工法などのナノ製造技術の確立が挙げられる。また、同時期における第3世代放射光施設の稼働により、光学素子の性能が発揮される環境が整ったことも大きい。X線イメージング法に関しては、10 nm オーダーの分解能が実現され、シングルナノメートルオーダーの分解能が視野に入っている。X線イメージング分野は、旧来の手法の高精度化と、新手法によるブレークスルーが合い重なって急激な成長を遂げている。

こうした中で、日本は長年に亘ってこの分野をリードしており、最先端の成果を発信し続けている。本企画講演では、この分野で活躍の4名に御講演を頂いた。集光光学素子に関して2件、新規イメージング法に関して2件である。また、企画講演を、本分野を目指す多くの若者に対するメッセージと位置付け、放射光における本分野の将来を担う30代研究者の方に講演をお願いした。多くの候補者がおられたが、すでに多くの研究者が御存知の研究ではなく、この1年で成果が得られた研究、報告された新奇手法を報告することを目的として加えた。また、講演タイトルに関して、多くの放射光ユーザーを意識し、「……の現状と……」という形にし、それぞれの分野の世界の状況に触れて頂いた後、最先端の成果を報告して頂くという形とした。

1件目の講演は、兵庫県立大学大学院理学研究科（現高輝度光科学研究センター）小山貴久氏から、「多層膜ラウエレンズの現状と円形型ラウエレンズへの発展」というタイトルで講演して頂いた。多層膜ラウエレンズは、APS (Advanced Light Source) のグループにより提案され、NSLS II のグループも加わり精力的に研究が進められている集光光学素子である。1次元のラウエレンズにおいてAPSのグループに匹敵する集光サイズが得られ、理想形ともいえる円形型ラウエレンズの作製方法を独自に開発し、回折型の光学素子では類をみない50%を超える回折効率と、50 nm レベルの空間分解能が得られていることを明らかにしており、作製法、性能ともに飛躍的な進展が報告された。

2件目の講演は、大阪大学大学院工学研究科 松山智至氏から、「ミラー光学素子による硬X線顕微鏡の現状と非球面ミラーを用いた結像光学系の実現」というタイトルで

講演を頂いた。全反射ミラー、多層膜ミラー、形状可変ミラーなどの最新の硬X線ミラーの紹介を行った後、本題の4枚のミラーを用いた結像光学系に関する発表に入った。ミラーを用いた結像光学系は、X線を楕円ミラー、双曲ミラーと連続に反射させることで実現できる。2次元で行うためには縦方向、横方向独立のため、4反射させなければならない。そのシミュレーションによる解析を行い、アライメント精度の観点から、この光学系の実現性を初めて示した。実際に光学系を構築し、1次元ではあるが50 nm レベル分解能の拡大結像が可能であることを実証した。

3件目の講演では、東京大学大学院新領域創成研究科矢代航氏から、「X線 Talbot 干渉計の現状と結像型 X 線顕微鏡への発展」というタイトルで講演して頂いた。X線が物体を透過する時に発生する位相変化を計測する位相計測は、X線を利用するイメージング法における有力な手段である。その代表の一つがタルボ効果を利用する方法である。本講演では、最新の現状・成果を報告して頂き、結像光学系と一枚の位相格子を利用することで高分解能の像が得られることを理論的、実験的に示し、対物レンズの性能で決まる空間分解能が得られることを証明した。現在は、ゾンプレートと組み合わせる実験を行っているが、松山氏が発表されたミラーによる結像光学系を組み合わせることも有力であるなどが議論された。

4件目の講演では、Paul Scherrer Institut（スイス放射光施設）の Manuel Guizer-Sicairos 氏から「X-ray Coherent Diffractive Imaging Using Extended References: Holography Beyond the Point Source」というタイトルで講演して頂いた。教科書に書かれているホログラフィーは、基本的には、微小穴からの回折参照光とサンプルを起因とする回折・散乱光が干渉し得られる干渉縞を、フーリエ逆変換することでサンプルの像を再生する。この HER-ALDO と呼ばれるホログラフィーの手法は、点光源ではなく、比較的作製しやすい線形状や鋭角なコーナー形状からの回折光を参照光とし、得られた干渉縞強度分布の微分と逆フーリエ変換を組み合わせる処理を行うことで像再生をする手法である。本講演では、最先端の位相回復法に基づくコヒーレントイメージング法が紹介された後、HER-ALDO法の原理、可視光レーザーを用いた実証実験、軟X線を用いた実験が紹介され、この方法により、20 nm 以上の高分解能が得られていることが報告された。

集光光学素子、X線イメージング法は、常に放射光ユーザーの関心毎であり、学会最終日、最後のシンポジウムにもかかわらず101名の参加者であった。見方を変えるとのセッションとかぶっておらず単独セッションであり、また、学会最終日、最終シンポジウムということで、真に勉強したい方が参加されたと考えている。本シンポジウムは、昨年度大阪大学で行われた第一回若手研究会「X線ナノ集光技術研究会」の継続の意味もあった。この分野

は、放射光研究における花形研究の一つであるが、その分、世界的にも熾烈な競争が繰り広げられており、日本国内でのますますの活性化が必要であると考えている。放射光学会合同シンポジウムの企画講演という舞台で、30代

の若手研究者の活躍の姿を通して、シニア研究者の皆様には活気が伝わり、また、多くの学生の皆様に興味を持って頂けたら幸いである。