

# ■ The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2009) 会議報告

## Next Generation Sources

加藤政博 (分子科学研究所 極端紫外光研究施設)

Next Generation Source に関して、現在 X 線自由電子レーザーを建設中の3つの施設、すなわち、SLAC, DESY, SPring-8 から、最初に報告があった。以下ではこの3件を紹介する。

Plenary Talk の一番手として SLAC の J. Hastings 氏が登場し、間違いなく放射光分野における今年一番のハイライトである LCLS での X 線自由電子レーザー発振成功に関する報告を行った。LCLS は SLAC の既存の 3 km ライナックの約1/3を有効に活用し、SASE 方式による X 線レーザー発振一番乗りを目指した計画であったが、2009年4月10日の最初の発振実験で発振が確認され、その数日後には出力の飽和にいたったとのことであった。直列に設置されたアンジュレータを次々と稼働させると出力がどんどんと上昇し、飽和に至った過程がわかりやすく説明された。発振波長は1.5オングストロームとのことである。写真も交えて報告されたコミッションの様子はその場の熱気が感じられるようであった。10月からはユーザー実験が開始されるとのことであり、その成果が待たれる。

Next Generation Source のセッションの最初に登場したのは、DESY の E. Weckert 氏である。建設中の European XFEL ではなく、今年稼働を始めた PETRA-III の話から始まった。元々、高エネルギー物理学実験用の周長

2.3 km の大型リングであったが、その一部を改造して、アンジュレータやダンピングウィングラを装着した。ビームエネルギー 6 GeV で 1 nm-rad という低エミッタンスを実現しているのが特徴である。4月に稼働を始め10月からはユーザー運転が開始されるとのことである。続いて VUV 領域の SASE 方式自由電子レーザー装置 FLASH の現状が報告された。また BESSY との共同の FLASH-II と呼ばれる増強計画が紹介された。Euro XFEL については建設の現状が報告された程度であった。

Next Generation Source のセッションで次に登場したのは理研の石川哲也氏であり、SPring-8 サイトで建設中の X-FEL の状況について報告した。加速器トンネルや実験エリアの様子がアニメーションでわかりやすく説明された。世界の34つの X-FEL 計画を比較し、それぞれが少しずつ異なる基幹技術を採用していることがわかりやすく説明されていた。日本の計画は、安定性に優れる熱電子銃の採用、C-band 加速管と真空封止型アンジュレータを用いることで、他のプロジェクトに比較してではあるが、コンパクトである点が特徴であることを強調していた。また、SPring-8 との併設で利用上の特徴を出していこうとしている。2010年コミッション開始とのことである。

## Microscopy and Micro/Nanoprobes, Imaging and Coherence

鈴木芳生 (財高輝度光科学研究センター)

最初に統計の話であるが、今回の SRI でこの分野の占める割合は約15% (口頭発表、ポスター発表共に同程度) であった。この統計には医学利用イメージングを含めていない。また、全体でもっとも多い分野はビームラインとオプティックス (1/3を占める) であり、加速器も含まれていることを考慮すると、End Station 関係で広義の X 線顕微鏡の占める割合は非常に高くなっている。これを例えば18年前の SRI91 と比較すると、実に3倍になっていることになる。これは X 線顕微鏡という分野の成長を示している (実際に X 線顕微鏡国際会議の参加者数は同じ期間で3倍になった) と思われるが、同時に X 線顕微鏡がまだ発展途上 (未成熟) の分野であるために、未だに方法論や装置開発が重要であるということも示しているのだろう。

今回の中心テーマは、nm 分解能とコヒーレント回折イメージングであった。フレネルゾーンプレート (FZP) 等の従来型の光学素子では波長を問わず10 nm 程度が理論限界分解能とされているが、Lawrence Berkeley National Lab. の W. Chao により軟 X 線結像顕微鏡で最外線幅12 nm の FZP を開発して理論限界に迫る12 nm 分解能を得た結果が報告された。ただし、ゾーンは厚さ30 nm の金であり、理論効率でも0.5%にすぎない (実測値は無いが、おそらくもっと低いと思われる)。10 nm 分解能を超える可能性がある光学素子としてラウエレンズあるいは多層膜非球面鏡等があるが、NSLS の R. Conley 等からラウエレンズによる硬 X 線領域での集光ビーム16 nm が報告され、大阪大学の三村、山内からは多層膜非球面集光鏡によ

り硬 X 線領域での 15 nm 集光が報告された（但し、どちらもまだ一次元集光のみ）。特に後者で発表されたピエゾ駆動前置ミラーによる adaptive optics は硬 X 線領域で波長以下の任意波面制御を行う新しい手法であり、今後のナノ集光ビームを実現するための鍵となる可能性があると思われる。

コヒーレント回折は試料による回折から位相推定法により実空間に変換する方法を周期構造でない場合に拡張した手法であり、数学的には構造解析の精密化と類似のものである。Melbourne 大の K. Nugent によりこの方法に関するレビュー講演があった。他にも、University College London の I. Robinson からは単結晶試料の回折点周囲の散乱線に対してコヒーレント回折の位相再生を利用した方法が報告された。通常のコヒーレント回折ではフラウンホーファー近似の条件で行われるが、フレネル領域（試料の大きさを考慮する条件）でも同じような位相回復法が可能である。この場合はホログラフィーとコヒーレント回折をミックスしたようになり、散乱角の小さな領域まですべて観測していることになり、データに欠落がない。通常は、FZP 等による集光点からの球面波照明で行うので Gabor ホログラフィーを照明光の範囲の外側まで拡張したことに相当する。一方、通常のコヒーレント回折では試料全体を照明する必要があるが、適当な開口で試料の一部を照明して得られた結果をつなぎ合わせるにより、ビームの空間コヒーレント領域より大きい試料を観測することも可能である。この手法は Ptychography と呼ばれている。今回この Ptychography をフレネル領域のコヒーレント散乱に適用した結果が Melbourne 大の D. Vine から報告され

た。このようにしてコヒーレント回折法における色々な欠点を克服する工夫はなされているが、同時にフレネル回折条件や Ptychography では本来コヒーレント回折法が持っていた利点（試料の位置安定性に関する許容性）も失われていることに注意する必要がある。

従来からの X 線顕微鏡やマイクロビームに関しては、ALS BL2.1.2 に建設されている生物学应用到に特化した軟 X 線結像顕微トモグラフィーと ESR ID22 の硬 X 線マイクロビームが注目される。ALS の軟 X 線顕微トモグラフィーは立ち上げフェイズが終わりいよいよ応用段階になったようである。装置性能としては十分であり、既に様々な応用例が示されたが、どこまで生物学に貢献できるかこれから試されることになるだろう。ESRF ID22 のマイクロビームはアンジュレータ光を結晶分光器無しで多層膜非球面鏡 Kirkpatrick-Baez 光学系を用いて集光している。ID22 は high beta セクションであるため、本来マイクロビームに適しているとは言えないが、光源から 26 m のフロントエンドスリットで水平方向だけを制限し、垂直方向では十分小さいエミッタンスをそのまま利用することにより、出来る限り最適化されており、ユーザー利用として 100 nm × 100 nm の集光ビームが定常的に利用できる。また、 $5 \times 10^7$  photons/nm<sup>2</sup> というフラックス密度が達成されており、この集光ビームを用いた走査顕微鏡と拡大投影（Gabor ホログラフィー）イメージングが行われているが、同一試料に対してマイクロビームと拡大イメージング間の切替は数秒で可能だそうである、開発を進めつつ既に利用実験も行われている。

## Remote Access/Industrial Applications

平木雅彦（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所）

表記セッションは、9月28日の午前中の3つのパラレルセッションのうちの一つに割り当てられ、休憩をはさんで7件の講演があった。筆者が初めて参加した SRI2003（サンフランシスコ）では、Remote Access も Industrial Applications もセッションはなかったが、前回の SRI2006（韓国）では Industrial Applications のセッションが設けられた。また Remote Access については、発表自体は以前から行われていたが、今回初めてその名を冠したセッションが開かれたのではないかと思う。Remote Access と Industrial Applications という一見何の関係もなさそうな2つの分野が同じセッションになっているのは奇妙な感じを受けるが、実はそのベースにあるものは自動化技術であると勝手に推測する。

初期の Remote Access は、単に遠隔地から実験の様子をモニタできるというものであったが、ネットワークのイ

ンフラ整備が進み、誰もが簡単に高速ネットワークを利用できるようになるにしたがって、Remote Access も遠隔操作で実験を行うことができるように進化してきている。そのためにはネットワークを介して遠隔操作ができる実験装置でなければならず、通信コストを低減し効率的に実験を行うために実験装置の自動化が進んできている。例えば、遠隔地から次に測定する試料を選ぶだけで、試料の交換、次の実験条件のセットアップ等が自動で行われるというものである。一方、Industrial Applications の方はどうか。産業利用の場合、ビームラインの使用料を払って利用する場合はほとんどであるので、決められた時間内でより多くの試料を用いて実験を行うことが望まれる。したがって、試料交換の度に実験ハッチに出入りするといったことはもってのほかで、効率的な実験を実現するために実験の自動化が求められているのである。

多少強引ではあるが、以上のような理由で Remote Access と Industrial Applications は両者とも自動化技術が共通項であると言える。本セッションの7件の発表のうち4件は自動化に関するもので、残り3件は Canadian Light Source Inc. (CLS) の Jeffrey Cutler 氏による産業利用についての発表と、Zhonghou Cai 氏 (Argonne National Laboratory) および Klaus Liss 氏 (Australian Nuclear Science and Technology Organization) による研究発表であった。

Jeffrey Cutler 氏が所属している CLS では、カナダ国内の主要な産業ニーズの調査の結果、Mining and Environment, Pharmaceutical, Materials Sciences を3つの柱として Industrial Science Team がそのサポートを行う仕組みを構築している (Web ページでは、さらに Life Sciences が加わっている)。産業利用ビームタイムの70~90%は Environment と Materials Sciences が占めており、天然資源が豊富なお国柄が表れている。ビームタイム利用料に追加すれば、サンプルの準備、実験データ解析、レポートの作成などのサービスも行っている。

Remote Access および Industrial Applications の基礎となる自動化技術については、タンパク質結晶構造解析、粉末回折、XAFS 測定のそれぞれのビームラインでの試料交換を主とした実験装置の紹介があった。

Aina Cohen 氏が所属している SSRL macromolecular crystallography team は、2002年にはタンパク質結晶の自動交換ロボットを完成させており、2005年の段階でタンパク質結晶構造解析ビームラインユーザーの50%、現在では85%がロボットを利用しているそうである。さらに2005年からはリモート実験を開始している。リモート実験には、NoMachine がリリースしている NX Client を用いており、これは SSH を用いてリモートデスクトップを実現しているため、セキュリティの面でも安心である。2007年の段階で、ユーザーの75%がリモート実験を行っている。オーストラリア放射光施設にも SSRL タイプのロボットが導入されており、会期中に行われた施設見学で公開されていた。

Stefan Fiedler 氏が所属している EMBL Hamburg は、PETRA III に構造生物学のための Integrated Facility を建設している。通常ビームラインではタンパク質結晶を持

ち込んで回折データを取るだけであるが、Integrated Facility ではタンパク質の発現から結晶化、試料準備、データ収集までを一貫して行うことが可能となる。彼らは DORIS-BW7B で既にタンパク質結晶自動交換ロボットを運用しているが、PETRA III 用に新たにロボットを開発している。MARVIN と名付けられたこのロボットは、現在のところヨーロッパで統一されている SPINE 規格のカセットを扱うが、ACTOR カセットや Uni-puck などの異なる種類のカセットにも対応予定である。

Keiichi Osaka 氏 (JASRI/SPring-8) が開発した粉末回折実験用試料交換システムは、2分かかっていた試料交換作業を30秒に短縮し、さらに5分かかっていた試料の位置合わせを5秒にまで短縮することに成功している。従来はビームタイムの40~60%しか回折実験に使用していなかったが、開発したシステムを用いることでビームタイムの85%を回折実験に使用できるようになった。

Tetsuo Honma 氏 (JASRI/SPring-8) は、SPring-8 BL14B2 において全自動 XAFS 測定システムの開発を行っており、40~55分かかっていた光学系調整を25分に短縮することに成功している。さらに、このシステムでは試料の交換やゲイン調整などを自動化することで、8~10分の実験サイクルで80個の試料の自動測定を行うことが可能である。

本セッションでは以上4つの代表的な自動化システムの講演を拝聴することができたが、ポスターセッションでも様々な自動化システムが紹介されていた。試料交換に限らず自動化システムは、効率化・省力化のためには (開発スタッフの労力は増える一方であるが) 今や無くてはならないものとなってきている。試料交換のような短いスパンの自動化だけでなく、例えばビームダンプ時に一時実験を中断し、入射後に実験を再開するような長いスパンの自動化を実現するためには、1つのビームラインだけではなく施設全体が自動化に対応する必要がある。また、最初に紹介した産業利用を推進するためには、実験装置の自動化・効率化といったハードウェアだけでなく、CLS の Industrial Science Team や Osaka 氏、Honma 氏が所属している JASRI/SPring-8 Industrial Application Division などのサポート体制のようなソフトウェアも重要であろう。

## Beamlines & Optics I, II, III

山崎裕史 (勲高輝度光科学研究センター)

口頭発表は全部で15件あり、内訳はビームラインの紹介10件、光学素子開発3件、その他2件。ビームライン紹介では、ビームライン配置に加えて、イメージングデバイスの仕様にも重点が置かれた発表が多かった。R. C. At-

wood (Diamond) は Diamond の JEEP ビームラインの紹介を行った。このビームラインは全長100 m あり、50から150 keV のラジオグラフィが可能で、1 インチ厚の鉄の内部観察も可能である。L. Petaccia (Trieste) は Elettra

に新設された軟 X 線ビームラインを紹介し、4.6から40 eV のエネルギー領域でフラックス $10^{11}$ 以上、Ne の  $2p_{3/2}$ - $2p_{1/2}$  遷移からエネルギー分解能  $E/\Delta E=89000$ と報告した。S. Fiedler (EMBL) は集光機能を持つ2枚の多層膜による分光器を製作し、シリコン111分光器と比べて19から65倍のフラックス密度を得た。そのメリットとして、測定時間の短縮と結晶からの反射スポット数の増大を確認している。N. M. Kirby (Australian Synchrotron) は Australian Synchrotron の SAXS/WAXS ビームラインの紹介を行った。q の範囲は SAXS で  $0.0015 \sim 1.1 \text{ \AA}$ , WAXS で  $0.5 \sim 10 \text{ \AA}$  である。M. R. Fuchs (PSI) は SLS の高分子結晶構造解析ビームラインのディテクターとサンプルチェンジャーのアップグレードについて報告した。Y. Q. Cai (BNL) は NSLS-II の X 線非弾性散乱ビームラインの可能性について紹介し、続いて、Y. Shvyd'ko (ANL) がそのビームラインで使用するサブ meV バンド幅の高分解能分光器のデザインを紹介した。A. T. Macrander (ANL) は多層膜ラウエレンズの発表を行った。材料  $WSi_2/Si$ , 最外ゾーン幅 5 nm のレンズで 16 nm の集光幅を得た。D. Wermeille (ESRF) は ESRF の表面 X 線散乱ビームラインの改造について報告した。光源から異なる距離の2箇所 K-B ミラー等による集光を行い、ナノ粒子のコヒー

レント回折イメージングを可能にした。また、触媒研究用の In-situ 反応容器も新設した。M. L. Rivers (Univ. Chicago) は 2D ディテクターの制御プログラムのコンセプトについてと、別の発表で 3 GeV リングにおけるマイクロプローブの現状について報告した。D. J. Paterson (Australian Synchrotron) は Australian Synchrotron の蛍光マイクロスペクトロスコーピービームラインの紹介を行った。特に、2D 検出器に関して1時間あたりメガピクセルのデータ取得を強調していた。O. Mathon (ESRF) は ESRF アップグレード計画にある時分割、極端条件下 X 線吸収スペクトロスコーピーに要求されるビームライン性能についての検討を行い、安定性の向上、光学配置の最適化、ディテクターの高度化の必要性を報告した。E. Granado (Univ. Campinas) は、現在は偏向電磁石だけで運用されている Brazilian Synchrotron に超伝導ウィグラーを導入し、あらゆる用途に使用できるビームラインを 2011年オープン目指して開発中であることを報告した。C. Rau (Diamond) は3本のブランチを持ち、それぞれでインライン屈折コントラストイメージング、フルフィールドマイクロスペクトル、コヒーレント回折実験ができるビームラインを Diamond に建設中であり、2011年から運用できることを報告した。

## Insertion Devices

土屋公央 (高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設)

9/23から10/2にかけてメルボルンで開催された SIR2009の中で発表された挿入光源に関する報告を、主観まじりではありませんがまとめてみようと思います。挿入光源の分野の中では次の2つのテーマに関する報告に目をひかれましたので紹介したいと思います。

1. クライオ永久磁石や超伝導磁石による短周期アンジュレータの開発
2. “究極”の電子蓄積リングの挿入光源

テーマ1のクライオ温度での永久磁石アンジュレータ (CPMU) や超伝導磁石アンジュレータは常温での永久磁石よりも磁場を強くできるため、従来よりも短い周期長のアンジュレータの実現が期待できます。前回の SRI2006 ではこれらの方法の基礎的な特性が報告されましたが、今回の SRI2009では実機の開発に向けての R&D の現状について発表がありました。口頭発表の挿入光源セッションでは CPMU に関しては ESRF (周期長18 mm, 長さ2 m) と NSLS-II (周期長14.5 mm), 超伝導アンジュレータでは ANKA (周期長15 mm, 長さ1.5 m) と NSRRC (周期長15 mm, 長さ1 m) のそれぞれ2件ずつ発表されました。このうち NSLS-II では永久磁石材として馴染み深い NdFeB ではなく PrFeB を使った CPMU (150 K 以下で

の磁場特性が良い) の開発が報告されました。これら4件のアンジュレータを見るとそれらの周期長はどれも15 mm 程度であることに気づきます。これは現在の開発段階をよく表していると思いますが、将来的には周期長10 mm 以下の短周期アンジュレータの実現に向けての努力が世界各地で行われていると感じ取れました。

次にテーマ2についてですが、これは最近建設されつつある 1 nrad からそれ以下の超低エミッタンス電子蓄積リングの挿入光源という意味で勝手に命名しました。今回の SRI2009では NSLS-II と PETRA-III の挿入光源の報告が目をつきました。NSLS-II の計画ではエネルギー: 3 GeV, 電流値: 0.5 A, エミッタンス: 0.6 nrad であり、挿入光源の設計はできるだけ電子ビームの性能を損なわないことに注意して詳細に検討していました。また DESY の PETRA-III では周長2.3 km の高エネルギー実験用加速器リングを放射光に転用し 6 GeV での運転を今年開始しました。全体の8分の1周部分が放射光実験のために利用可能となり、ここに14台の挿入光源が入る予定 (現在約半数が設置) だそうです。これらの挿入光源の多くは全長2 m, 周期長30 mm 程度のアンジュレータで最小ギャップは9.5 mm です。これらのアンジュレータは

真空ダクトを持った通常型で、彼らは真空ダクトの上下方向の厚さを7mmまで薄くすることで最小ギャップ9.5mmを達成したそうです。日本ならば真空封止型が採用されるでしょうが彼らは真空封止型の経験がないためそうしたとのことでした。これらの挿入光源からは電子ビームの

驚くべき性能と相まって21乗台の平均輝度を持った放射光が得られます。今回のSRI2009に参加して、これらの超低エミッタンスリングの実現に向けた動きやX線FELの進展のニュースによって未来の放射光源の姿が少しずつ見えてきたという印象を持つことができました。

## Infra Red and Terahertz

木村真一 (分子科学研究所 極端紫外光研究施設)

赤外・テラヘルツセッションは、座長の赤外放射光のパイオニアの1人であるG. Williams (Jefferson Lab.)の挨拶から開始した。そこでは、この赤外・テラヘルツのセッションはSRIの長い歴史で最初の単独セッションであり、歴史に残るものであると述べた。その後、最初に、P. Dumas (SOLEIL)が赤外放射光の歴史・ビームラインの性能とその利用例についてのアウトラインを講演した。現在世界中に30以上ある赤外ビームラインでは、回折限界分解能での顕微赤外分光・イメージングが主流であり、その利用例について紹介した。また、光源やビームラインの機械的な振動が測定精度を悪化させる原因であり、それを抑えることが赤外放射光利用では重要であることを示した。M. Tobin (Australian Synchrotron, AS)は、まず、ASに新たに建設した赤外ビームラインの概要を紹介した。ここでは、1つの偏向電磁石から取り出した赤外放射光を顕微赤外分光装置と超高分解能赤外分光装置に導く光学系を詳しく紹介し、レイトレースやSRWによる回折効果を考慮したシミュレーションとよく合っていることを示した。また、自身が担当している顕微赤外装置の性能と測定結果を紹介した。L. Carr (NSLS)は、超伝導マグネットとパルスレーザーを組み合わせた新しい赤外磁気光学分光法を紹

介した。例えば、超伝導体のクーパー対をレーザー励起によって壊すと、ピコ秒程度の緩和によって再結合する。それを磁場中で行うと、スピニアップとスピンドアウンのクーパー対が観測されることを示した。さらに、化合物半導体であるGaAsを磁場下で励起した際のサイクロトロン共鳴についての研究も紹介した。D. Appadoo (AS)は、ASの超高分解能赤外ビームラインの装置とその性能を紹介した。放射光を使うと熱光源に比べて格段に高いS/Nが得られ、 $0.00096\text{ cm}^{-1}$ の分解能が可能であることを示した。また、新たに開発したマルチパスのガスセルを使った気体やクラスターの研究が紹介された。最後に、S. Kimura (UVSOR)が、大強度テラヘルツコヒーレント放射光 (THz-CSR)を励起光として利用した新しい分光法である、テラヘルツポンプ・光電子プローブ分光の計画について紹介した。UVSORでは、レーザースライス法を使ったTHz-CSR発生の研究に実績がある、それに加えて、同じようなレーザーと電子ビームとの相互作用によって真空紫外高次高調波 (VUV-CHG)を発生できることを示してきた。この2つの新しい光源をつかっ、テラヘルツポンプ・光電子プローブ分光を行う計画があり、そのビームラインの光学系と利用計画について紹介した。

## Detectors

岸本俊二 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)

米国コーネル大学のSol Gruner氏が29日のPlenary IIで登場、“Synchrotron X-ray Detectors, Past and Future”というタイトルで講演した。印象的だったのは、魚が両生類に進化して陸上へ上がり、最後に猿から人間へという生物の「進化」図を示し、検出器も同様な進化・発展を遂げていると冒頭で述べたことである。現時点での進化の頂点として紹介されたのがIntelligent detectorとしての二次元ピクセルアレイ検出器 (PAD)である。ピクセルごとに信号処理回路がつながり信号処理の自由度が高いので賢いという訳だ。Detectors IIセッションでの口頭発表によって製品として購入できるシステムDECTRIS社 Pila-

tusが紹介され普及実績が披露されたように、今回の会議ではPADが前面かつ全面に登場したことが特徴だった。

ついに現実のものとなったX線FELによるイメージング実験への応用が検出器開発プロジェクトの目的となっていたことも印象深い。100 $\mu\text{m}$ 以下の微細ピクセルによる高い空間分解能とシグナル/ノイズ比で、かつ1フレームのデータを高速に処理する可能性を持つPAD利用の要求拡大は必然だろう。ただし、検出器システムを新しく開発する体制は国内どこも十分とは言えず、とくに検出器信号処理のエレクトロニクス技術開発の体制整備を急ぐ必要を強く感じた。10<sup>6</sup>チャンネル規模のデータ処理を可能にする

ためには、信号回路系を ASIC (Application Specific IC) で構成することが不可欠である。今回の SRI で発表された、いくつかの PAD システムでは欧州原子核研究機構 (CERN) で開発された ASIC チップ (Medipix) が採用されていた。高エネルギー物理学実験での大規模な信号処理技術とそれを支えた組織の協力を得ることが重要と感じ

た。

ただし、研究に必要な装置の発展は一直線でないことをここで改めて強調したい。研究テーマに応じた多様な発展が検出器にもある。回路系の開発も同様である。PAD に限らず特徴ある先端的な検出器システム開発の成果発表が国内からも数多く行われる状況をめざし続けたいと思う。

## Diffraction and Scattering

杉本邦久 (勲高輝度光科学研究センター)

「回折・散乱」のセッションは、9月30日(水)に開かれ、8件の口頭発表があった。講演は、粉末、単結晶、薄膜、高分子、応力・歪みなど回折・散乱分野の全般にわたり、且つ最前線を取り上げた内容であった。全ての講演に共通したキーワードは「Ultra」(超〜)であり、これまで行われてきた放射光実験をさらに一步前に進めた挑戦的な研究について報告がなされた。本セッションの招待講演では高田昌樹氏(理化学研究所)が、SPring-8で行われている最先端の回折・散乱分野の放射光実験について報告した。現在、回折・散乱分野で求められているものは、「Ultra Precise」, 「Ultra Small」, 「Ultra Fast」であり、その課題を克服していくためへの道が示されたように感じた。X線回折と物性測定を同時に行う最新の同時測定技術、高輝度X線ビームを用いたマイクロ(ナノ)ビーム形成技術を用いた微小試料あるいは局所的な測定技術、高輝度パルスX線ビームのマイクロビームと組み合わせることにより実現される動的な構造研究などは、今後、マテリアルサイエンスに新たな展開を与えることが期待される。

「Ultra Precise」の一つのビジョンとして、X線回折と物性測定を同時に行う最新の同時測定技術が提案された。通常、実験室で測定した物性の知見に基づいてX線回折実験が行われるが、この様な方法では、X線回折実験時の環境と物性測定時の条件を完全に一致させることが難しく、得られた結果に曖昧さを残すことが少なくない。特に、この曖昧さは電子密度分布レベルでの構造物性研究では解析結果に影響を与えることがあり、解決すべき問題として残されていた。このような曖昧さを解決するため、提案された最新の同時測定技術では、X線回折実験と物性との相関をより精密、且つより正確なものするために必要な技術である。これまでX線回折実験により可視化してきた分子内および分子間の相互作用を物性測定と組み合わせることにより物質を「より精密」、「より正確」に探求し

ていくことが可能となるだろう。

高輝度X線ビームを用いたマイクロ(ナノ)ビーム形成技術は今回のSRI全般にわたる共通のテーマであった。安田伸広氏(JASRI)は、マイクロ(ナノ)ビームを用いた超微小単結晶構造解析についての報告を行った。結晶サイズが数百 $\mu\text{m}$ 以上の単結晶構造解析では、基本的にX線の吸収効果や消衰効果の補正が必要となる。しかし、結晶の大きさが数 $\mu\text{m}$ 以下の微小結晶を用いることにより吸収や消衰効果を軽減することができ、より精度の高い解析結果を導くことができる。このような実験では、X線の照射面積をX線ミラーやゾーンプレートを用いて結晶のサイズと同程度まで集光することにより光子密度を高め、S/Nの良いデータを収集することができる。高輝度放射線の特性を生かしたマイクロビームの技術は、微小単結晶を用いたナノスケールの解析だけではなく、局所的な構造情報を正確に観測するのに必須の技術である。今後、マイクロ(ナノ)ビームを用いた実験は、構造と物性の相関研究を進めていく上でも、さらに深い議論が可能になると思われる。

パルス光源による時間分解実験技術では、パルスX線とレーザーとを同期させる技術が報告された。特に、SPring-8の時間分解の技術は、高輝度パルスX線ビームの特性を持つマイクロビームと組み合わせることにより、DVDのような実用材料の動的な構造研究を可能としている。このような技術を用いて放射光でしか見えない世界を探求していくことによりマテリアルサイエンスをリードしていくことが期待される。

発表者の一人であるGene Ice氏(ORNL)は、ギターを持ち出して自身の研究「Mapping Structure and Defects in 3D with Polychromatic Microdiffraction」への思いを込めた自作の歌を披露する場面もあり心に残るセッションであった。

## Storage Ring Sources

谷本育律 (高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設)

会期4日目の午前中にはリング型光源に関する8件の口頭発表がありました。既存リングの運転や開発状況はポスターセッションの方に纏められており、ここでは施設のアップグレード計画に関する発表が多く組まれていました。そのほとんどが蓄積ビームの低エミッタンス化と挿入光源ビームラインの増強を柱としており、1990年代に運転を開始した第3世代光源に対してもリングの大規模な改造が求められる時代になってきたことを表しています。

欧州放射光施設 ESRF では、2009年より10年計画でのアップグレードが開始され、第一フェーズとして2015年までの7年間で1.8億ユーロ(約240億円)の改造予算が認められました。放射光輝度の向上(3倍)とビームの安定化、およびビームラインの増強と測定器の高性能化を主な目的としています。具体的には、ビーム位置検出器の更新、既存直線部の延長、トップアップ(連続入射)運転を視野に入れた安定な半導体ベース高周波源の採用、高調波吸収型加速空洞の採用による電流値の増強(200→300 mA)、および新実験ホールと11本(当面8本)の新ビームラインの建設などです。新実験ホールでは温度変動を極力抑制し、実験サンプル位置で $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内を目指すとのことでした。

ドイツの DESY では、2007年6月に PETRA II リングが陽子・電子衝突型加速器 HERA への入射器としての役割を終えると同時に、それを放射光専用リング PETRA III に転用する大規模な改造が行われました。周長2.3 km のリングを8等分した内の1区間を再建設して14本の挿入光源ビームラインを集中的に配置し、そのための実験ホールも新設されました。長尺(80 m)のダンピングウィングラを利用して1 nmrad という現行の光源リングでは世界最小エミッタンスを実現し、アンジュレータ光は $10^{21}$  photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1% BW に及ぶ高輝度な光源として生まれ変わりました。2009年4月に最初のビーム蓄積に成功し、同7月に最初の光を観測したとのことでした。さらなるビームラインの建設とマシンの安定性改善を進め、2010年夏頃に正式なユーザー運転を開始する予定とのことでした。

米国 APS からアップグレード計画についての発表がありました。当初は Energy Recovery Linac (ERL) の採用も検討されましたが、主に予算的な問題と R&D や建設のための期間が長く確保できないという理由で、既存光源リングの改造とビームラインの増強に焦点を絞った計画として進められています。2009年5月にエネルギー省(DOE)に対して、Critical Decision Zero (CD-0) と呼ばれる計画案を提出し(CD-3で建設の承認)、現在回答待

ち状態にあるとのことでした。リングの具体的な改造内容は、直線部の伸長(5→7.7 m)、電流値の増強(100→200 mA)、温度変動抑制によるマシン安定性の向上、超伝導アンジュレータを含む挿入光源の増強、1~2 ps の短パルスの生成、などが挙げられていました。また、長期的な展望として、ERL や X-ray FEL-Oscillator (XFEL-O) の R&D 予算も要求していくそうです。

スエーデンの Max-lab からは MAX IV 計画に関する発表がありました。MAX IV は、1.5 GeV、3 GeV の2リングと3 GeV の入射線型加速器(Linac)で構成される複合施設となる予定で、リングからの幅広いエネルギーの放射光に加え、Linac のビームを利用した短パルス(~100 fs)の X 線を供給するとのことでした。27億スエーデンクローナ(約350億円)の予算が認められ、2010年に着工し、2014年のユーザー運転開始を目指しています。主要光源である3 GeV リングは0.3 nmrad という超低エミッタンスビームを蓄積するように設計されています。そのための新電磁石は真空ダクトの高さを25 mm に制限しますが、偏向部ダクトも含めて内壁に Non-Evaporable Getter コーティングを施すことで十分な排気速度を実現する案が示されていました。

韓国では1995年に運転を開始した PLS リングを PLS-II に改造する計画が進められています。ビームエネルギーの増強(2.5→3 GeV)、低エミッタンス化(18→5.9 nmrad)、蓄積電流値の増強(200→400 mA)、3 GeV-Linac によるトップアップ運転、および挿入光源ビームラインの増強などが改造の柱となります。2011年に運転を停止して改造に入り、2012年初頭からユーザー運転を再開する予定です。その間のユーザーのアクティビティを維持するために、諸外国の放射光施設に対してビームタイムの割当を交渉しているとのことでした。

台湾の NSRRC でも既存の1.5 GeV リング TLS の隣に3 GeV リング TPS を建設する計画が進行中です。TPS は2007年に2億ドル(約180億円)の予算が認められ、現在はマシンの設計が確定された段階です。リングの周長は518 m、エミッタンスは1.6 nmrad で、12 m と7 m の直線部がそれぞれ6本と18本確保されるとのことでした。運転開始目標は2013年とされていました。

「究極の蓄積リング」とも呼ばれている超低エミッタンスリング[1-3]の一つの設計案が、APS の Borland 氏により紹介されていました。エネルギー7 GeV、周長3 km クラスのリングで、Multi-bend Achromat ラティスと長尺のダンピングウィングラを採用し、Full Coupling(丸ビームにより Touschek 効果も低減される)とすることで、水平

垂直ともに15 pmradの超低エミッタンスを達成できるとのことでした。

SPring-8からは満田氏による、蓄積リングでの短パルス光生成試験の結果報告もありました。垂直キッカー電磁石とパルス電源により鉛直方向にバンチを傾けて、その鉛直方向に拡がった放射光の一部をスリットで切り出すという手法です。通常の約5分の1となる7 psの短パルスX線の生成に成功し、運転条件やシステムの最適化によりさ

らに短いパルス光の生成を目指すとのことでした。

- [1] A. Ropert, J. M. Filhol, P. Elleaume, L. Farvacque, L. Hardy, J. Jacob and U. Weinrich: in *Proceedings of the 7th European Particle Accelerator Conference, Vienna, Austria, 2000* (EPS-IGA, Geneva, 2000) pp. 83-87.
- [2] M. Borland: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **557**, 230 (2006).
- [3] K. Tsumaki and N. Kumagai: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **565**, 394 (2006).

## Spectroscopy

小野寛太 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)

Spectroscopyのセッションは10/1の16:00-17:30に行われ、招待講演1件を含む5件の講演が行われた。

S. Shin (東大) による招待講演では、最近注目を集めている硬X線光電子分光(HAXPES)の手法とその応用について、幅広いレビューが行われた。特に、SPring-8からの高輝度放射光とHAXPES用に開発した電子アナライザを用いることにより、7.9 keVで55 meVという高いエネルギー分解能を達成したことが報告され、聴衆の関心を集めていた。また、軽元素からの高エネルギー光電子放出では、リコイルの効果が重要であるとの報告があった。

ニュージーランドのC. Zou (Univ. of Auckland) らはAustralian Synchrotronを用いて、ZnO/TiO<sub>2</sub>のコア・シェル構造について、光電子分光とNEXAFSの研究結果を紹介した。Australian Synchrotronが順調に立ち上がっており、オセアニア地域での放射光利用研究が盛んになってきていることが印象的であった。

K. Ono (KEK) らは、軟X線放射光と光電子顕微鏡(PEEM)とを組み合わせることにより、二次元ナノ材料のX線吸収分光がアトグラム程度の極微量の試料で測定

可能であることを示した。

R. Frahm (Univ. Wuppertal) らは、SLSのSuperXASビームラインに設置されたQuick scanning EXAFS (QEXAFS) 装置について報告した。彼らの開発したQEXAFS装置では、1秒間に80スペクトル測定できることが示され、これまでにQEXAFSを用いて行われた応用例についての報告があった。

JASRIのJ. Kim らは、SPring-8 BL44B2に設置されたX線構造解析とUV-IR領域での光吸収分光の同時測定装置について報告を行った。講演では、X線回折測定と光吸収分光測定との正確な同期をとる方法について紹介があり、光誘起相転移への展開についての報告があった。

Spectroscopyのセッションでは、時代を反映して、ほとんどの講演がナノや時分割をキーワードにしていたことが印象的であった。一方、これまでのSRI国際会議で報告が多かった、従来型の測定手法を用いた研究に関する発表が減っており、より装置の国際会議という位置づけが明確になってきているように感じた。

## Time Resolved Applications

田中義人 (理化学研究所 播磨研究所)

Time Resolved Applicationsのセッションでは、フェムト秒からミリ秒まで幅広い時間分解能を対象として報告があった。

フェムト秒領域では、軟X線領域におけるレーザースライミングによる時間分解分光測定2件、およびFLASHでのフェムト秒時間分解測定が報告された。なかでも、ALSのM. Hertlein氏からのレーザースライミング光を用いたフェムト秒軟X線分光の報告が印象的であった。近赤外域波長域のフェムト秒パルスレーザーを用いてコヒーレンスが与えられた多価イオン系で、共鳴エネルギー

でフェムト秒軟X線の吸収係数が小さくなる現象、すなわち電磁誘起透過(Electromagnetically induced transparency)を観測することに成功し、これを用いて放射光のパルス幅を評価したとのことである。近々論文発表されるとのことである。また、BESSY-IIではフェムト秒パルスレーザーで電子ビームにエネルギー変調を与えた後、角度分離させる手法を採用し、低バックグラウンドで、偏光制御されたレーザースライミング光が得られていて、既に2008年から利用実験が行われている。また低アルファ運動によるピコ秒光源など、時間分解測定用の短パルス発生

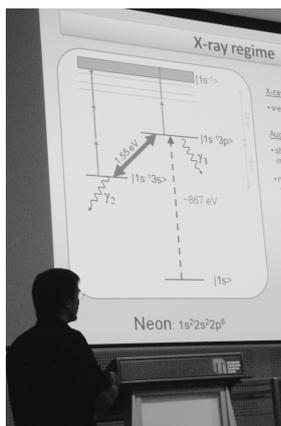


写真 Time Resolved Applications のセッションで講演する ALS の Hertlein 氏。

も試されている。楕円型反射型ゾーンプレートを用いた分光計の紹介と、Ni フィルムにおける XMCD スペクトルにおいて時定数約150 fs で消失する時間分解測定結果の報告があった (A. Erko 氏)。FLASH の W. Schlotter 氏からは、パルス幅30 fs の光源の自己相関測定、時間コヒーレンス評価の報告があった。ビームスプリッターを用いた光遅延は、 $\pm 6$  ps の遅延範囲をカバーし、遅延精度は0.2 fs とのこと。干渉縞の鮮明度から決定した時間コヒーレンスは、波長33.2 nm, 9.6 nm の光に対し、それぞれ、 $> 8.1$  fs, 1.6 fs ということである。

ピコ秒域では、SPring-8 の福山祥光氏から、試料回転ディスクを用いた不可逆過程の時間分解測定法についての発表があった。また、APS の E. Dufresne 氏から、時間



写真 SPring-8 の福山氏。

分解計測ビームライン7ID についての現状報告があった。高速測定法の開発としては、光伝導スイッチを使ったストリークカメラによる高速測定法の他、超伝導空洞によりパンチを偏向させて短パルスを得る手法も進めているとのことである。SOLEIL の F. Polack 氏からは、時間分解測定用に準備された軟 X 線 TEMPO (Time-resolved Experiments on Materials with Photoelectron Spectroscopy) ビームラインの紹介があった。

また、ミリ秒域では ESRF の A. Bytchkov 氏からガラス固化の様子を CCD を用いて30 ms の時間分解能で測定した例が紹介された。