

■会議報告

第13回 International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2018) 参加報告

矢橋牧名 (理化学研究所・高輝度光科学研究センター)

井上伊知郎 (理化学研究所)

今井康彦 (高輝度光科学研究センター)

大坂泰斗 (理化学研究所)

仙波泰徳 (高輝度光科学研究センター)

玉作賢治 (理化学研究所)

初井宇記 (理化学研究所)

原 徹 (理化学研究所)

湯本博勝 (高輝度光科学研究センター)

第13回 International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2018) が、台北市 (台湾) の国際コンベンションセンターにて、2018年6月10日～15日の日程で開催された。台湾の National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) がホスト施設をつとめた。850人超の参加者があり、国別には、台湾204名、ドイツ160名、日本125名、米国98名、中国60名の順であった。放射光施設・XFEL 施設の現状と将来計画、要素技術 (挿入光源、X線光学系、検出器等)、手法 (イメージング、時分割、分光、回折・散乱等) を含む幅広いテーマについて議論がなされた。

プログラムは、11日～13日はプレナリーセッションにはじまり、休憩を挟んでポスターセッションと企業展示、午後からオーラルセッションという構成であった。プレナリー講演は10件、口頭発表は230件 (うち招待講演135件) であった。日本からは、プレナリー講演が2件 (石川哲也氏・理研、Alfred Baron氏・理研)、招待講演が14件 (SPring-8/SACLA 関連12件、PF 関連2件) であった。

11日は、陳建仁・台湾副総統を迎えたオープニングセレモニー (図1) に続き、石川氏と Christoph Quitmann 氏 (MAX IV) のプレナリー講演が行なわれた。石川氏は、「Synchrotron radiation research: retrospect and prospect」と題し、1940年代の放射光の発見から現在に至る光源と利用の発展史をレビューするとともに、将来の展望と、社会の諸問題解決のための放射光の重要性を述べた。この分野における我が国のプレゼンスも分かりやすく位置づけられていた。Quitmann氏は、MAX IVの最新の状況について報告を行なった。2017年から利用運転を行ない、現在は蓄積電流360 mAで運用しているということである。イメージングを中心とする利用例もいくつか示していたが、まだ立ち上げ途上という印象であった。また、その他のプ



図1 オープニングセレモニー

レナリー講演として、A. Baron氏は、SPring-8における世界最先端の硬X線高分解能非弾性散乱ビームライン (BL43LXU) の紹介と、サイエンスの展開について講演した。湾曲結晶に10 mKの温度勾配をつけるといった、高分解能を実現するための様々な先端的な技術とともに、固体中の熱輸送に関する基本的な物理を解き明かすための意欲的な取り組みが紹介された。イメージング分野では、PSIのAnna Diaz氏が、SLSのコヒーレント小角散乱 (cSAXS) ビームラインにおけるタイコグラフィの手法・装置の開発に関して、優れたレビューを行なった。今後のMulti-bend achromat (MBA ベースの放射光源の実用化とともに、分解能・視野・計測速度といった指標がどのように伸びていくか、またボトルネックはどこにあるのかという議論が、定量的かつ説得力をもってなされた。また、Robert Feidenhansl氏とPantaleo Raimondi氏が、それぞれ European XFEL と ESRF に関するレビューを行なった。最終日の最後のセッションであったにも関わらず、

多くの聴衆が集まり関心の高さがうかがえた。European XFELはレーザー発振から4ヶ月で利用実験を開始したが、利用実験の採択率が20%程度と非常に競争率が高く、来年末までに更に2本のアンジュレータを稼働させて軟X線から硬X線まで広い波長範囲をカバーするということである。また、ESRFのアップグレード計画は、電磁石などのコンポーネントの組み立てが順調に進んでおり、いよいよ来年リングの入れ換えを行う。

以下、いくつかの主要分野のトピックスを示す。

【施設・加速器・挿入光源】

施設報告では、TPS, NSLS-II, Sirius, MAX IVなどの放射光施設、SwissFEL, PAL-XFEL, European XFELなどのXFEL施設の現状報告があった(一部は上述)。低エミッタンス化が進む放射光施設であるが、現在世界各地で進んでいるアップグレード計画の更に先の計画として、PETRA-IVやHEPS(中国・北京)など100%近いコヒーレントフラックスを目指した数10 pmの超低エミッタンスリングが紹介されていた。日本からはSPring-8-IIの加速器の設計(理研:田中均氏)、SACLAのマルチビームライン運転(理研:原 徹氏)、反射型セルフシードの結果報告(理研:井上伊知郎氏)、1つのパルスから時間間隔を制御したダブルパルスを作り出すsplit-and-delay optics(理研:大坂泰斗氏)などの報告があった。

挿入光源のセッションでは、クライオアンジュレータが多くの放射光施設で導入されている印象を受けた。一方で、超伝導アンジュレータも、APSに3台が設置されるなど、着々と運転実績を重ねており実用化の段階に入っている。しかしまだ熱流入の問題があるため、ビームアパーチャーが7 mm程度と大きい。今後XFELや低エミッタンスリングへの設置には、3~5 mmのアパーチャーで永久磁石を超える性能と安定な運転が実現できるかが普及の鍵であろう。

【X線光学系】

XFEL関連の話題として、LCLSのDiling Zhu氏から、対称・非対称のチャンネルカット結晶4組で構成された硬X線分割遅延光学系の報告があった。遅延時間を約10 psの範囲で連続的に走査した際にも、集光位置の変動を約1 μm 以下に抑えることに成功している。チャンネルカット結晶内壁部に残存するダメージによる波面の乱れ、非対称反射の影響による波面の傾き等、いくつかの課題は残っているものの、安定性が問題となっている分割遅延光学系に対する新たなアプローチとして興味深い。

Sasa Bajt氏(DESY)は、マルチレーザーラウエレンズ(MLL)によるナノ集光ビーム形成を報告した。マスクを使用した傾斜膜を積む方式でMLLを作製し、NSLS-IIにおいて16.3 keVで8.4 nm \times 6.8 nmの集光サイズをタイコグラフィにより評価した。

高エネルギー領域のX線集光光学素子として、John Sutter氏(Diamond Light Source, DLS)により、DLSのI15-1ビームライン(ウィグラー光源)における1 m長の多層膜形状可変ミラーが報告された。80%以上の反射率、 1.5×10^{11} photon/sが得られている。オフラインでのミラー表面形状の計測結果から形状の補正量を検討し、形状を修正することで縦方向を9.7 μm に集光することに成功した。また、Kenneth Evans-Luterodt氏(BNL)からは、シリコン製キノフォームレンズによるナノ集光ビーム形成(~200 nmサイズ)について報告がなされた。

David Laundry氏(DLS)は、集光ミラーの上流側にポリマー製のrefractor(波面変調板)を入れることで、集光ビームサイズを変更する方式を実証した。1秒以下の変更時間で、集光ビームサイズが0.5~10 μm のレンジで可変となった。対応の波面の歪み等はあるようだが、DLSのVMXm macromolecular crystallography beamlineに実装されている。

日本からは、AKB/Wolterミラー光学系(阪大:松山智至氏, 山田純平氏)、軟X線向け集光ミラー(東大:三村秀和氏, JASRI:仙波泰徳氏)に関するインプットがあった。いずれもコンセプト・アプローチがユニークであり、会場の高い関心を呼んでいた。

【検出器】

検出器関連は2つのセッションから構成され、口頭発表は合計13件であった。10件のX線画像検出器に関する発表に加え、マックスプランク研究所のDmitry Vasilyevによる電子スピン検出器、Trieste施設のJernej BufonによるマルチエレメントX線エネルギー検出器、産総研大久保らによる超伝導軟X線高空間分解能ライン検出器の報告が行われた。X線画像検出器については、PILATUSに代表される計数型検出器の発表は1件のみで、積分型の検出器の発表が8件、スイスPSI研究所のA. Bergamaschiによる積分型と計数型の比較・開発プロジェクトの紹介発表が1件であった。口頭発表件数の割合からも検出器開発が積分型画像検出器に大きくシフトしていることがわかる。XFELでは、フェムト秒バンチ内で複数の光子が画素に到来する。このため電子回路での光子計数が不可能で、積分型検出器が必須である。MBAラティスを備えた次世代放射光源でもバンチ当たり複数の光子が画素に到来するため積分型が重要になると考えられている。発表されていた積分型検出器はいずれもシリコンをフォトダイオードとするもので、軟X線から20 keV程度までがターゲットとなっている。

軟X線領域ではFLASHや放射光での利用を念頭に置いた1 Mpixel/120 frames/sの高ダイナミックレンジ画像検出器Percivalの開発進捗状況を、DESYのAlessandro Marrasが発表した。これから最終形状のセンサ製造を開始するとのことである。LCLS-IIでは100 kHz以上の線

り返しが可能なより高速のフレームレートが必要とされている。そこで画素内にアナログ・デジタル変換器を搭載した次世代検出器 FLORA のコンセプト紹介を Fermilab の Tom Zimmerman が行った。今後の予算獲得を目指している。

硬 X 線領域では、European XFEL 施設での AGIPD 検出器、LPD 検出器利用の開始に関して、同施設の検出器責任者 Markus Kuster が発表を行った。ドイツの科学研究大臣の視察時にも動作していない検出器モジュールがあるなど、検出器運用担当者が苦勞している様子が見られたが、利用実験は順調に立ち上がっているとの発表であった。AGIPD は画素サイズ $200\ \mu\text{m}^2$ と LPD の $500\ \mu\text{m}^2$ に比べて比較的小さく、同施設で最も期待されている検出器である。DESY の J. Becker がポスター発表でこの検出器の補正方法について詳細を報告していた。1 Mpixel あたり 2.8×10^9 個の補正パラメータ (22 TByte) の取得が必要とのことであった。今後省力化を検討していくとのことであるが、ビームタイムごとにある程度の補正パラメータ取得作業は必要な見込みとのことで、European XFEL が選択したマイクロバンチ構造が検出器に対して大きな制約を課していることが理解できる。2020年代に実用化が可能となる硬 X 線画像検出器開発としては、理研の初井らによる定格 17 kframe/s の高速検出器 CITIUS、および DESY の Heinz Graafsma による PETRA-IV、European XFEL の CW-XFEL 化に対応するための 100 kframe/s 検出器のコンセプトについて発表があった。

開発グループによる発表は科学的内容に偽りは無いもののいずれも宣伝色が強く、検出器ユーザにとってバランスの取れた情報収集は容易ではなかったと推察される。宣伝色の強い画像検出器の発表が多い中で一服の清涼剤となったのは、PTB の Michael Krümmey による計数型検出器 PILATUS 100k の詳細な性能評価の報告であった。画素ごとの感度ばらつきや光子エネルギー依存性や低エネルギー領域での感度の低下、計数率の非線形性の光子エネルギー依存性を定量的に報告していて興味深いものであった。

【コヒーレンス利用・イメージング】

コヒーレンス利用のセッションでは、Bragg 反射周辺のスペックルを測定することで結晶の歪みを可視化する Bragg CDI と、ビームを走査して回折像を測定することで試料のイメージングを行うタイコグラフィが、海外の放射光施設において精力的に開発されているという印象を持った。これらの方法は手法開発から実材料への応用へと急速にシフトしており、様々な興味深いアプリケーションが発表されていた。また、硬 X 線ナノ集光ビームを利用したマルチ分析ビームラインの整備が様々な放射光施設で進んでおり、吸収、蛍光 X 線、位相コントラスト、回折、タイコグラフィなどを備え、三次元で高分解能かつ高感度な顕微分析が実施されている。

大阪大学の高橋幸生氏は、SPring-8 で開発している Advanced KB ミラーを利用したタイコグラフィの高度化・多機能化について発表した。サンプルやミラー周りの温度の安定化を進めることでビームポジションのドリフトを低減させ、10 nm の空間分解能が達成できている。また、化学状態のイメージングを行うスペクトロタイコグラフィについての実験例が紹介された。David Shapiro 氏 (LBNL) は、ALS で行っている 200-2000 eV の軟 X 線を用いたタイコグラフィを紹介した。動作中の電池の operando 計測や 3 nm の超高空間分解能タイコグラフィといった耳目を引く研究成果を報告した。また、Christian G. Schroer 氏 (DESY) は PETRA III, P06 におけるアクティビティを紹介した。タイコグラフィ法により 5 nm の空間分解能を達成している。また、adiabatically focusing lens (AFL) により 20 nm 以下の集光サイズを達成している。応用として、半導体のコア・シェルマイクロロッドについて、 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ の領域を 50 nm 分解能で取得した例などが示された。

Yong Chu 氏 (BNL) は NSLS-II HXN ビームラインにおける、高分解能マルチモーダルイメージングの開発状況を報告した。集光素子として MLL と ZP を使い分け、3次元 XRF の細胞イメージング、Ag ナノ粒子のタイコグラフィ像、三次元ひずみの観察例等が示された。Peter Cloetens 氏 (ESRF) は ESRF ID16A におけるナノビームを利用したマルチモーダルトモグラフィを報告した。多層膜 KB ミラーにより、12~50 nm の集光ビームが、 1.4×10^{12} ph/s (@E = 17.0 keV or 33.6 keV, $\Delta E/E = 1\%$) で利用可能であり、集光ビームの高い安定性 (水平 2 nm, 垂直 10 nm 程度を 6 時間以上維持) も示されていた。

NSRRC の C.-S. Ku 氏は、TPS の X-ray Nanodiffraction ビームライン 21A で行っている走査型ラウエ顕微鏡と成果について紹介した。K-B ミラー集光によって、白色 X 線を $80 \times 80\ \text{nm}^2$ に集光し、試料からの Laue 反射を真空封止の PILATUS 6M 検出器で撮影することにより、多結晶試料の方位分布や歪み分布を測定することができる。試料観察用の SEM に加え、可視光の発光分光器、蛍光 X 線検出器も備えており、幅広い試料に対応できる装置になっていた。

少し毛色の違う話題として、Henry Chapman と Ralf Rohlsberger から高次コヒーレンス計測による量子イメージング・構造解析の発表があった。強度干渉などの高次コヒーレンス現象を観測する場合には、光のコヒーレンス時間とパルス幅 (または、検出器の応答時間) が同程度である必要がある。XFEL の登場によって短パルス X 線が利用可能になり高次コヒーレンス現象が比較的簡単に観測できるようになったため、このような研究が行われるようになったのであろう。可視光領域で、量子イメージングや非古典光の生成法の研究が最近流行していることを考えると、X 線領域での高次コヒーレンス現象の開拓は非常に面白

い研究テーマになり得るだろう。

【分光】

非弾性散乱のセッションは2つに分かれていて、それぞれ特にテーマを絞っている訳でもなく、やや散漫な印象を受けた。この中では、軟X線共鳴非弾性散乱(RIXS)の分光器が特に興味深かった。DLSからの講演では、分解能30,000を超えるビームラインが限られていることが指摘された。このクラスの分光器は残念ながら日本には存在しない。この講演のタイトルが「RIXS facility」とうたっているように、単なる測定装置というよりは、一つの施設のような規模であった。まず、高分解能を達成するために長尺のアナライザーアームが必須となるが、DLSのものは15mに及ぶ。そして、その性能を発揮するために、地中深くまでパイプを打って、リング建屋とは別棟を建てている。その結果、床面の振動は100 nm (1~100 Hz) に抑えられている。これほどの投資をするには、相当サイエントフィックスケースを検討してあるはずで、その計画・実行力に驚くばかりである。同じく分解能30,000を超えるESRFの軟X線 RIXS ビームラインからも報告があった。こちらはミラー表面へのコンタミネーションの対策が興味を引いた。当初、表面へのコンタミネーションを抑えるために酸素を少量 (10^{-9} mbar) 導入していたという。3年が過ぎても表面が綺麗であったが、計測してみると実はエッチングされていたことがわかった。そのため、現在は酸素を入れていないということである。

硬X線の高分解能分光器について、上述のBaron氏のプレナリー講演に続き、パラレルセッションでもいくつかの新しい装置が発表された。特に興味を引いたのは、NSLS-IIやAPSのMontelミラーを使った分光器である。試料から発散するX線をMontelミラーで平行化すると、平板結晶で高分解能を達成できる。そうすると例えば水晶を分光結晶として、様々な元素で高分解能のRIXSが可能となる。ミラーと結晶を組合せた光学系は、今後の発展を期待できそうな印象を受けた。

【施設見学】

14日には、バスで新竹市まで移動し、Taiwan Photon Source (TPS)の施設見学が行なわれた。TPSは、コンパクト第3世代の3 GeV放射光源で、2016年から利用運転を開始している。見学は、Phase Iの7本を中心とする各ビームライン、蓄積リング、挿入光源のテストベンチに分かれて行なわれた。硬X線では、標準的なProtein Microcrystallography, Quick-scanning XAS等に加えて、X-ray nanodiffraction (21A), X-ray nanoprobe (23A)等のハイエンドのビームラインが設置されている。ここでは、X線集光光学系や2次元検出器の積極的な導入に加えて、試料周りを高真空にしてナノアライメントをSEMで行なうといった様々な工夫がなされており、実験装置の



図2 バンケット会場のThe Grand Hotel

設計が丁寧に行なわれているという印象を受けた。軟X線ビームラインは3本あり、そのうち2本のアンジュレータビームライン(41A, 45A)では、C.T. Chenによって提案されたDragon型分光器の発展版であるActive Grating Monochromatorがインストールされていた。不等刻線間隔回折格子を25個のアクチュエータにより形状可変とすることで収差が低減されエネルギー分解能数万が達成されており、2000年台初頭から培われてきた技術が高い水準にあることを示していた。RIXSエンドステーション(41A)ではスペクトロメータとしてもActive gratingが採用されており、酸素のK-edgeでトータルエネルギー分解能20,000以上を達成しているとのことであった。

実験ホールでは冷却水配管は天井からダンパーを介して吊り下げられており、各装置(光学素子やエンドステーション)の架台は床に接着されていて、振動対策に気を使っている様子が見受けられた。

同日夜には、台北市内のThe Grand Hotel(圓山大飯店)にてバンケットが開催された(図2)。

【終わりに】

SRIも回を重ね、1000人近い参加者を擁する大きな会議になっているが、マンネリ感や閉塞感をあまり感じることもなく、各国・各施設とも概ね健全に発展しているという印象を受けた。光源とサイエンスの絶え間ない進歩がこの分野の発展を支えていると思われる。このような状況の中で、我が国からのインプットに目を向けると、口頭発表の件数こそ参加者の国別の平均から見ると少ないものの、発表の内容は概ね国際水準を超える高いものであったと思う。発表者の年齢構成も、ベテランから若手まで幅広く分布している。最近、放射光学会の年会をはじめとする国内の関連学会において活気を感じる事が多いが、特に基盤技術については、そのまま国際会議にも十分通用する高いレベルに達しているということを改めて実感した。しかし

ながら、サイエンスに展開するところでは依然課題が多い。科学技術を支える基盤として、いかに「外側」に門戸を開いていくかを考えていくことが重要であろう。

次回のSRI2021は、DESYとEuropean XFELが共同

でホストをつとめながら、ハンブルクにおいて開催される。ハンブルクでの開催は、1982年の第1回に続く2回目である。