

■会議報告

Coherence Workshop 2012報告

香村芳樹 (理化学研究所 播磨研究所)

Coherence Workshop (WS) は、X線や電子線の回折顕微鏡法や、X線 cross correlation spectroscopy 法の急激な進展を報告する国際会議として二年おきに開催されている。第一回から、パークレー (米)、ケアンズ (豪)、ポルケロール島 (仏)、アシロマ (米)、バルネムンデ (独) で開かれ、今回、第六回が Coherence WS2012として、初めて日本で開かれた。この一連のシリーズのWSは海辺で開かれるのを恒例としており、今回も、博多のベイサイドのヒルトンホテルで開催された。今回は、一件当たりの講演時間を20分と短くし、口頭発表を多数受け入れる事が出来た。合計、61件の口頭発表があった。短いなりに、良く練られた講演が多かったと思われる。

最初に、WSの主催者を代表して、石川播磨理研所長から挨拶があった。次に、J. Miao氏 (UCLA 大学) が、今年2月に亡くなった David Sayre 氏の業績をたたえる講演を行った。David Sayre 氏は、小さい分子結晶の位相を決定するため atomicity と呼ばれる拘束条件を考案し、さらに、Sayre の式を導出し、近年の Coherent Diffractive Imaging の発展の基礎を築いた。さらに、J. Miao 氏は、自分のグループの最新の研究成果報告も行った。ankylography 法と呼ばれる、一つの回折パターンから物体の三次元情報を取得する方法について報告した。まだ、決定的な実験結果とは言えなさそうだが、可視光レーザーを用いた実験で、肯定的な結果が得られつつ有ると言う研究発表だった。

Eisebitt 氏 (ベルリン工科大学) が、Fourier 変換ホログラフィー法による非晶質物体の実像直接回復法について、最新成果を報告した。複数の参照波用ピンホールと、物体波を発する開口部が開けられたマスクに、二つのコヒーレント X線ビームを0.06度だけ角度差を付けて照射した。二光束は、ともに物体領域を照射し、(一部は共通となるが)異なる領域内の参照波用ピンホールを照射する。カメラの一つの露出時間内で二つのホログラムが重なった物が記録される。また、二つのビームは、FLASH (ドイツ・ハンブルグで稼働中の真空紫外領域の FEL) で開発された4枚の反射鏡による autocorrelator 装置を通し、50 fs の時間差をつけ照射されている。時間差によって、物体の変化を、二ビームによるホログラムから再生する事を計画している。また、X線集光や、解像度の向上を行い、同様の実験を XFEL で行う事も考えているようであ



写真1 コヒーレンス WS2012集合写真



写真2 博多屋台での一コマ

る。

Loh 氏 (Pulse Institute, SLAC) が、cryptotomography 法と称する方法について報告を行った。XFEL ビームに、ほとんど同一だが、ランダムな方位で、ナノ粒子を注入させ、それらの二次元回折パターンから、三次元情報を抽出する方法である。この方法では、ノイズを含んだ回折像を多数取得し、イテレーションの後に、三次元的な方位を求め、三次元の実空間の構造を回復する事が出来るようである。

A. Barty 氏 (DESY) が、H. Chapman 氏らと組んでいる巨大なグループの成果を報告した。20分と短い講演時間で有ったため、LCLS を用いたサブミクロンの微結晶の構造解析に絞って報告した。現状は、4.5%のヒットレートだが、2 Å 以上の分解能で構造解析が出来ているようで

ある。講演では直接紹介は無かったと思うが、膜タンパク質の serial フェムト秒結晶構造解析の研究で、最近、二編の Nature Methods 論文が掲載されたそうである。

Ptychography 法の研究者がヨーロッパを中心に急増している事を反映して、合計12件の Ptychography 法関連の研究発表があった。この内、生体関連にターゲットを絞った研究は2件だった。結晶の Bragg 反射から、結晶の格子歪み分布を計測する Bragg Ptychography 法の研究発表が4件も有り、新しい傾向だと感じた。

今回の WS では、SACLA のスペシャルセッションが組まれた。施設者を代表して、田中(均)氏(理研)、矢橋氏(理研)、登野氏(JASRI)、初井氏(JASRI)から SACLA の現状が報告された。また、山内教授(阪大)から、XFEL のための究極集光、結像ミラー光学系の現状が報告された。さらに、SACLA のユーザーを代表して、松原教授(京大)、岩田教授(京大、理研)から、それぞれ、XFEL を用いた物性分野と生命科学分野の研究の将来展望の講演がなされた。これらの報告は、国内外の参加者

に、大きなインパクトを与えたようだ。最後に、Nugent 氏(メルボルン大学)が、WS の Summary を行った。

会議中には、エクスカッションが用意されていた。バスをチャーターし、阿蘇山山頂まで出かける計画である。前日夜の予報では台風が直撃すると思われた。幸い、台風の進路は東にずれ、小雨、ほぼ無風と言う、意外な程の好条件に恵まれ、ツアーが実施された。4人程度のグループに別れ行動した。ロープウエーで山頂に至った。一瞬だけ、雲が晴れ、火山湖の神秘的な黄緑色の液面が沸騰する様子が見られた。が、まもなく、風向きが変化し、火山性のガスが充満した。避難せよと言う赤信号が灯り、係員に追い立てられ、山頂を早々に撤退せざるを得なかった。夕食は、やはり小雨の降る中で、長浜の屋台で豚骨ラーメンを食した。外国からの参加者には、屋台体験は好評だったようである。

国内外の先鋭的な研究者が集い、非常に実りの多い WS だった。二年後の開催地は未定だが、次回が楽しみである。

■ 会議報告

第11回 X線顕微鏡国際会議 (XRM2012) の会議報告

竹内晃久 (公益財団法人 高輝度光科学研究センター)

「夏の上海は暑くて大変だよ～気を付けてねひひひ。」

中国・上海は初めてであった筆者は、上海の知人から事前にこんな有難く親身なアドバイスをいただいていた。実際降り立ってみると、いや仰せの通り…。さすが上海…。暑い…。そして…。台風である。「タイフーン? 素晴らしい! 私初めて」などと異様にエキサイトしているヨーロッパからの参加者もいたが。そんな中開催された X 線顕微鏡の国際会議 (The 11th International Conference on X-ray Microscopy, 以下 XRM) は、1983年にドイツ Göttingen で第一回が開催されてから、今回の中国・上海で十一回目となる。中国で行われるのは初めてで、アジアでは2005年姫路(第八回)以来二回目となる。前々回2008年のスイス・チューリッヒでの国際会議までは3年毎に行われていた XRM であるが、前回2010年アメリカ・シカゴでの国際会議からは2年毎に行われることになった。学会の会場は、上海の中心街からほど近い位置にある上海 Hope Hotel。まあこのホテルにずっといれば暑いのも台風も全く関係ないのだが。

学会は、2012年8月5日(日)から10日(金)までの全6日間の日程。初日はレセプション、中日の8日(水)の夜はバンケット、最終日10日の午後は上海郊外の放射光施設 Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) 見学

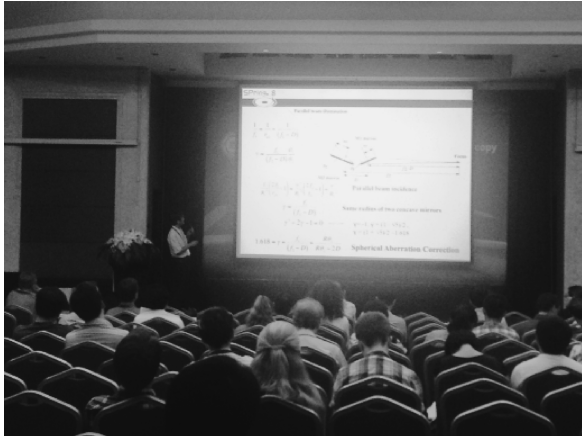
ツアーがプログラムされた。また、最終日10日午前中の予定であったクロージングセレモニーのプログラムが、急遽前日夕方に前倒しとなった。なお、9日(木)には one-day ツアーが予定されていたが、生憎の台風の影響で最終的にはキャンセルとなってしまった。

初日のレセプション会場は、最近の例だと、会場ホテルのラウンジ(シカゴ)または広場を借りたり(チューリッヒ)、荒技として路地(姫路)なんてのもあったが、今回はなんといきなり豪華にナイトクルージングであった。中日の8日(水)夜のバンケットは更にゴージャスに上海の中心街の Seagull palace にて行われた。中華料理に舌鼓しつつ、中国の伝統楽器による生演奏を楽しむことができた。最終日の午後には、SSRF の見学ツアーが行われた。2009年より7つのビームラインで利用実験が開始され、今はまだ実験ホール内はがらんとした感じであったが、建設は2013年より第2フェーズに入り、ここでは更に16のビームラインが建設されるという。

ここからようやく本題の会議の中身に入る。

XRM 期間中のすべての話題について触れることはこの報告書では不可能であるが、筆者が特に印象的に感じた話題について報告する。

今回はオーラルセッションが71件(うち招待講演21



ホテルに設営されたオーラル発表会場の様子。



バンケットの様子。

件), ポスターセッションが151件プログラムされた。ただ、期間中に上陸した台風の影響により、残念ながらオーラルで一件、ポスターでも何件かのキャンセルがあった。XRM では伝統的にオーラル発表の平行セッションは行われてこなかったが、前回から一部平行セッションを取り入れるようになり、今回もその形式を踏襲した形だ。今回全部で22あったオーラルセッションのうち、半数以上の12のセッションが応用例のセッションであった。応用のセッションが占める割合は会を追うごとに徐々に増えている。応用例の内訳は、これまで同様細胞、生物、材料、鉱物など多岐にわたるが、今回は特に、環境・エネルギー関連、特に電池関連の利用報告が急激に増えたことが印象的だった。それ専用のセッションだけで4つも設けられており(ちなみに前は惑星科学との合同で一個のみ)、この分野における世界的な関心の高まりが伺えた。また、女性参加者が急激に増えたことも印象的であった。あるセッションにおいては、発表者の殆どを女性で占めるほどだった。このことから、様々な分野にX線顕微鏡が普及し始めていることが伺える。ポスターに関しては、前回までは二日に分けて行われていたが、今回は毎日夕方に行われるようになった。確かにこの方が、一日あた

りのポスター枚数が分散され、割と広いスペースでじっくり見る事ができて良かった。その代わり、その日を逃すともう二度と見る事ができないのだが。

今回のXRMの特色としては、アメリカLCLS、日本のSACLA、ドイツのEuropean-XFELなど、世界各地のXFEL施設が次々稼働していく中で施設の現状またはその利用を念頭においた発表が多かった点であろう。日本からは、理研の矢橋氏によって、今年7月にユーザー運転が始まったばかりのSACLAの現状について、また、JASRIの小山氏によるSACLAにおける集光ミラーによる1ミクロン集光ビームの照射ダメージに関する考察が発表された。新しい超強力な光源の出現により、照射される試料、または光学素子がどの程度照射ダメージに耐えられるか、或はどのようにダメージを軽減させるか、という点に主題をおいた報告が多かった。European-XFELは、運転開始予定が2015年とまだ先であるにも関わらず、既にFLASHとは独立して人員を充実させているらしい。その成果もあってか、非常に精細なシミュレーションとR&Dが行われている印象を受けた。

現在、X線顕微鏡においてナノメートルオーダーの空間分解能を得る手法は大別すると、Fresnel zone plate (FZP)、ミラー、レンズ等の光学素子を利用するものと、コヒーレント回折イメージング(coherent diffraction imaging, CDI)のようなレンズレスイメージング法になる。2000年台中盤ころまでは前者のトピックが主流であったが、2008年のスイスでの学会以来、後者が急激に増えている。国内からの参加者としては、大阪大学の高橋幸生氏によって、CDIに集光光学系を組み合わせることにより、2nmの空間分解能が達成されたことが報告された。また、CDIに関する発表者の殆どが、その応用であるタイコグラフィーに関しての報告も行ってた。CDIと走査光学系の測定法を組み合わせたこの手法は、前回の会議においても多数の発表があったが、前ははまだ開発や評価法に関するトピックが殆どであったのに対して、今回は既に利用に関して多くの発表があり、この分野の開発ならびに普及のスピードの速さが伺い知れた。

一方、FZP、ミラー、レンズといった光学素子、またはそれを利用した光学系の空間分解能に関して、前回の報告を超えるような報告はなかった。すでにこれら従来から存在する素子は理論的に限界といわれている10nmにかなり近づいており、空間分解能に関してはそろそろ頭打ちの感がある。例えばFZPに関する報告は、実はそのものの開発よりも、今は既にそれを利用した利用実験の報告の方が圧倒的に多くなっている。これは2000年設立のアメリカの企業であるXradia Co. LtdによるX線結像顕微鏡、走査顕微鏡の商品化による普及の影響が大きい。同社のX線顕微鏡を購入することで、今や専門の知識がなくても、空間分解能20-30nm程度のほぼ世界トップレベルの2D、3Dイメージングが可能となっている。今回の会議でも、

Xradia 社の装置を利用した応用例の報告が多数あった。X 線顕微鏡の分野そのものが、すでに研究開発から利用のフェーズに入ってきていることを伺わせた。

このような中 FZP 開発の最近の傾向としては、回折効率を上げるための工夫や、様々な特殊な用途に特化した形状のもの報告が多くなっている。スイス Paul-Scherrer Institute (PSI) の C. David 氏らのグループは、毎回色々とユニークな形状の FZP の報告をしている。今回は一次元の FZP パターンに、レンズのようなパターンを彫り込み、斜めから照射することで精度の高いキノフォルムとして使えるという報告があった。スウェーデン Albanova 大 U. Vogt 氏らのグループでは、FZP の XFEL での利用を想定して、従来よりも格段に高い放射線耐性が期待できるダイヤモンド基盤 FZP の報告があった。ダイヤモンド FZP に関しては、レイヤーを 3 つ重ねることにより、厚さを 3 倍稼ぐという試みが報告されていた。また、このレイヤーを格段微妙にずらすことによって、擬似的な volume FZP (詳細は後述) の製作も可能とのことであった。上記 2 つのグループは、開発をインハウスで行える或は製作者と使用者側の密接な連携により、アイデアを即座に製作に反映できる体制をとっている。そのことで良い意味で突拍子もないアウトプットを頻繁に出せているように思う。また、素子の破壊が前提の照射実験の実施は、通常市販の FZP では非常に高価であるため、インハウスで素子を製作できる強みと言える。

ミラーについては、二日目のセッションで大阪大学の松山氏による、非球面斜入射鏡四枚を利用した所謂 Advanced Kirkpatrick-Baez (AKB) 型と呼ばれる X 線結像光学系に関する報告があった。AKB や原理を同じくする Wolter 型と呼ばれる素子は、これまでは十分な精度での製作が技術的に難しいとされてきたが、近年大阪大学の山内氏らにより高精度の非球面ミラーの製作が可能になってきたことで、ようやく日の目が見えてきた。50 nm 以下の空間分解能で十数ミクロンの視野が得られることが示された。ミラーについては、同じ日に日本からもう一件 JASRI の鈴木芳生氏より発表があった。前者で示されたような超高精度の非球面鏡を使わなくても、それよりかなり安価に購入可能な球面鏡で、ある程度高分解能な光学系の設計が可能であるという。光学配置は AKB 型を倣うもので、各方向二反射させることにより、球面収差をキャンセルするというアイデアである。200 nm 以下の集光ビームサイズが報告された。発表はマイクロビームのみであったが、この光学系は結像も可能なので、今後の展開が楽しみである。これらの二件の報告は、当日 chairman だった A. Snigirev 氏をして「ミラーを 4 枚も使う発表が 2 件。しかも両方日本」と驚かせたが、日本としての独自性がしめされた例ではないかと思う。ミラーを X 線の結像に使う、というアイデア自体は古くからあったが、開発の難しさからつい最近まで真剣に議論に上ることは少なかった。

一方日本では、XRM 発起人の一人である筑波大学の青木氏らにより、長く開発が進められてきた背景がある。鈴木氏の球面収差をキャンセルさせるアイデアも元々は 40 年も前に日本で生まれたものであり、ミラーを結像に利用する事に関して真剣に議論を交わす土台が培われてきていたことが今に繋がっているのではと思う。

上記 X 線光学素子の分解能限界を超える素子の一つとして近年注目を集めているのが volume FZP、或いはマルチレイヤーラウエレンズ (multilayer Laue lens, MLL) と呼ばれる素子である。今回はアメリカ、日本、ヨーロッパ、中国から発表があった。一番目を引いたのはドイツ Göttingen 大のグループで、硬 X 線用に開発された W/Si レイヤーの一次元 MLL を縦横に組み合わせる配置で、13.8 keV の X 線で集光サイズ 6.8 nm という報告があった。これだけ集光スポットサイズが小さくなると、これを正確に測定すること自体が一つの問題となる。このグループは Far-field 領域におけるビームの強度分布を測定し、この自己相関関数を計算することで集光スポットの強度分布を導出していた。MLL の製作に必要な精密積層構造を製作する技術は、マルチレイヤー FZP の製作にも転用されている。上記のグループがマルチレイヤー FZP の製作に関する報告を出していたほか、やはり日本において MLL の開発を NTT-AT と共同開発を進めている兵庫県立大の籠島氏からもこの素子の発表があり、MoSi₂/Si 構造のマルチレイヤー FZP で集光ビーム径半値幅約 45 nm が報告されていた。

CT に関する報告で目立ったのは、高速 CT、所謂 4D CT (4D = 3D + time) に関する報告である。放射光を利用した CT では目下のところ、これまで撮像素子に利用していた CCD (charge coupled device) に代わって、高性能な CMOS (complementary metal oxide semiconductor) が入手しやすくなったことにより、各放射光施設で目覚ましい高速化が進んでいる。空間分解能とのトレードオフなので条件にもよるが、速いものだとビデオレート (~30 images/sec) での 3D 像撮影が兵庫県大のグループより紹介されていた。スイス PSI のグループは 1 ミクロン分解能の条件下でも 1 秒以下での 3D 像取得が可能とのことである。利用例としては、液体中のバブルの挙動や、血管内の PIV (particle image velocimetry) に応用する例 (Pohang Univ. S. Y. Jung 氏ら) などがあった。

CT の高分解能化に関しては、前回から大きな進歩はなかったが、前述したように Xradia 社の提供する装置の普及、また、SPring-8 等でも利用実験が可能になっていることもあり、数十~数百 nm というトップレベルの空間分解能での測定を、誰もが享受できるようになってきた。また、ただ 3DCT 測定をするだけでなく、in-situ な条件での測定を試みる報告も見られるようになってきた。アメリカ SLAC の W. Mao は、高分解能 CT 用に 400 GPa、5000 K の環境設定が可能なダイヤモンドアンビルセルと

ベリリウムガasketを開発し、高温高圧下でも30-60 nmの空間分解能で3D測定が可能との報告をしていた。CTでは、測定中の試料の変形や装置のドリフトが許されないため、熱や物理的な外乱を受けやすいin-situ測定は、高分解能化が非常に難しい。これらの報告を見ると、試験機や試料周りの環境がその用途に特化して開発されており、装置開発者とユーザー側の綿密な擦り合わせが不可欠であることが改めて痛感させられた。

生体など軽元素を主成分とする試料の高感度イメージング法である位相コントラスト法に関しては、前回もX線Talbot干渉計を利用した手法の普及が目立ってきていた。光源の単色性、装置の測定条件、安定性に対する要求が他の手法に比べて低く、簡便であることが普及の要因の一つと考えられる。今回は殆どが二次元回折格子を使った報告であった。基本的には一次元回折格子でも位相回復は可能であるが、二次元回折格子を利用する方が、位相回復エラーに伴うアーティファクトが低減できるという特徴がある。Diamondのグループからは、回折格子のかわりにスペckルを発生させるプレート（サンドペーパーでよいらしい）を利用したspeckle tracking techniqueと呼ばれる方法の紹介もされていた。また、位相コントラストイメージングだけでなく、Talbot干渉計を使ってX線の波面を計測する試みもなされている。測定の精度は10 nrad程度。LCLSではPSIのグループによって水平・垂直方

向のX線波面計測が実際に行われ、FELでの波面計測に有効であることを示した。

学会の総括としては、開催が二年おきになったことで、会ごとでの測定手法や技術の劇的な進歩は見られなくなるのではとの懸念があった。確かにこれまでものすごい勢いで伸びてきていた高分解能化などのトピックは、多少鈍化してきたような印象はある。しかしそれは技術が成熟してきたからとみるべきであろう。上への伸びの代わりに、手法の多様化や応用例の報告の増加など、今回は横方向に大きな広がりを見せた。これは、X線顕微鏡が光学顕微鏡や電顕など他のツール同様分析ツールとして会議に参加しているコミュニティ以外の研究者からも注目されるようになってきた証左でもあろう。環境・エネルギー分野への利用が急激に増え、急激に女性参加者が増えたように、たった二年でも様相はがらりと変わりうる。

XRMでは、次の開催地をどこにするかを期間中に参加者全員の投票によって決定してきた。前回から2年おきに開催されるようになったため、準備期間を考慮して次々の開催地を決めるようになった。今回の投票では2016年の開催地を投票し、その結果イギリス・ロンドンで開催されることになった。

ちなみに次回2014年はオーストラリアのメルボルンで開催される（10月26日～31日）。南半球での開催は初となる。今度は涼しいかな。

■ 会議報告

FEL2012 会議報告

田中隆次（理化学研究所・XFEL 研究開発部門）

第34回自由電子レーザー国際会議（FEL2012）が、京都大学とSPring-8の共催で、奈良県新公会堂において8月26日から31日の日程で開催された。会場は鹿で有名な奈良公園内に位置し、公会堂という名前からは想像できない立派な国際会議場であった。周りには多数の鹿が戯れており、無料で配られた鹿せんべいで、参加者が餌付けを楽しむ様子が見受けられた。またこの会議場は能楽や狂言を鑑賞するための能舞台を備えており、全ての口頭発表がこの舞台で行われた。舞台壇上は土足禁止であるため、登壇者は舞台上上がる前に靴を脱ぐという一風変わった光景が見られた。以下、会議内容について項目ごとに報告するが、紙面の制約上全てを網羅しているわけではないこと、また施設名は断りなく略称を使用していることをご了解いただきたい。

FEL 賞受賞講演・特別講演

会議初日に昨年のFEL賞受賞者である新竹積氏の受賞記念講演が行われ、日本独自のコンセプトで発振に成功したSACLAの開発経緯を振り返るとともに、現在の研究テーマである電子顕微鏡とXFELとの連携の可能性について展望が語られた。最終日には、昨年のFEL若手賞受賞者であるMarie Labat氏の講演が行われ、自身の研究履歴を紹介するとともに、現在の研究テーマであるレーザー加速を利用した小型XFELの開発について詳細な検討結果が報告された。

今回のFEL会議では、分野外の研究者を招いた特別講演が2件行われた。東北大学の上田潔教授は、これまでに各国のFEL施設を利用してきた経験をベースとして、VUVからX線に至る短波長領域における、原子や原子クラスターによる多光子吸収過程の研究と、今後の展望に関



写真1 参加者集合写真 (FEL2012ホームページより転載)



写真2 口頭発表に使用された能舞台 (FEL2012ホームページより転載)

する講演を行った。京都大学の田中耕一郎教授は、電子ビームではなく、高出力短パルスレーザーを利用した大強度・半サイクルテラヘルツ光 (半波長に相当するパルス長を有する光) の生成と応用に関して講演を行った。短波長 FEL 光を利用した最先端研究や、半サイクルパルス長という FEL とは対照的な光の生成とその応用という研究分野を垣間見ることによって刺激を受けた参加者は多かったのではなかろうか。

施設現状報告

昨年の FEL 会議において、世界最短波長でのレーザー

発振に成功したことが報告された SACLA では、この1年の間にビーム調整が順調に進み、現在ではほぼ設計値通りのレーザー出力が得られ、安定に運転されていることが報告された。SACLA と同様に真空封止アンジュレータと C バンド加速器を採用し、さらにコンパクトな施設を目指す SwissFEL では予算が承認され、2017年のレーザー発振に向けて建設や技術開発が進められていることが報告された。また EuroXFEL では全長5.8 km に及ぶ加速器収納用のトンネル建設が完了し、2015年末の発振に向けて順調に建設が進められていることなどが報告された。これらの SASE¹ 方式に基づくオンストローム XFEL 施設とは異なり、HGHG² 方式を採用して VUV から軟 X 線の領域においてフルコヒーレント FEL の実現と応用を目指している FERMI では、昨年発振に成功した1本目のビームライン (FEL-1) に引き続き、2本目のビームライン (FEL-2) におけるステージ1までの発振に成功したと報告があった。FEL-2 では HGHG をカスケード的に行うことにより、「水の窓」領域まで短波長化する計画であり、着実にコミッショニングが進んでいるようである。

¹ Self-Amplified Spontaneous Emission : 自発放射光を増幅する FEL 方式で、空間コヒーレンスは高いが、時間コヒーレンスは十分ではない

² High-Gain Harmonic Generation : 長波長レーザーをシード光として生成したマイクロバンチの高次成分を利用して短波長レーザー発振を実現する FEL 方式で、理想的には完全にコヒーレントな光が得られる

シーディング

FLASHで波長38.1 nm (HHGによる21次高調波)においてシード化に成功したとの報告があった。SASE光と比較して、パルスエネルギーで4倍の増強、ピークエネルギーで26倍の増強が得られたとのことであるが、時間ジッターによる不安定性が大きく、シード化に成功する割合は全ショットのうち10%程度である。また、本来はスペクトル測定結果を示してそのバンド幅が改善されていることを示すべきであるが、使用したスペクトロメータの分解能が悪く、SASE光との明確な差違は示されていない。今後の改善や詳細な測定が待たれる。

LCLSからはX線領域での単結晶を利用したセルフシーディングについて報告があった。本年1月にシード化に成功して以降、ユーザー運転に向けたR&Dが進められている。現時点での最も大きな問題は、電子エネルギーのジッターに起因すると思われるシード化FEL強度の大きな変動であり、電源の改良や、アンジュレータ台数の増加、さらにはシケイン位置の最適化などによる改善を試みるとのことであった。一方、シード化した場合とSASE光を分光利用した場合とでフラックスの比較がなされ、シード化によるフラックス増強は3倍程度であるという報告があった。ただしこれはフラックス測定に利用したSi(111)結晶分光器の分解能が不十分なためである可能性が指摘された。またLCLSでは、軟X線領域においてもセルフシード法によるシード化が計画されており、そのための分光器に関する詳細な検討結果の報告があった。結晶による方法と同様に、アンジュレータ1台分のスペースに必要な機器を収納できるよう、コンパクトな設計がなされている。順調にいけば2013年夏に設置されるとのことで、その結果報告が待たれる。

FERMIではHHG型FELが有効に稼働しており、20次以上の高調波の発生に成功していることが報告された。さらに、これらの空間コヒーレンスの測定結果が報告されたが、多数のショットの平均化処理により、予測よりも低い値にとどまっているとのことで、今後の測定系の改善が待たれる。FERMIでは外部レーザーをシード光として利用する場合に問題となる時間ジッターが電子バンチ長に比べて小さいため、シード光の入射タイミングを走査することによってFEL出力の最適化やエネルギーチャープの影響調査などが行われていることは驚きであった。

コミッションング及びビーム診断法

SASE光の時間プロファイル計測手法として、これと同期してテラヘルツ光をガスターゲットに入射することによって光の電場をストリークし、SASE光とガス分子の相互作用によって放出される光電子エネルギー分布を測定する手法が提案され、原理検証実験の結果が示された。この手

法は非破壊での時間プロファイルモニターとして機能することが特徴であり、今後のR&Dの結果が待たれる。一方、電子バンチの時間プロファイル計測手法として、通常利用されるRFディフレクターという特殊な加速空洞の代わりに、ねじれ4極磁石を利用する方法が提案され、その応用としてCSR³によるビーム特性劣化の測定が行われた。この結果、測定された条件の下ではRFディフレクターと遜色ない精度が得られ、CSRによる電子バンチのエミッタンス劣化の様子が明らかとなった。この手法が利用できる条件や分解能は限定的なものになると思われるが、より安価な手法として今後広がっていく可能性がある。また、セルフシード用シケインを利用する時間プロファイル計測方法について、LCLSにおいて実施された原理検証実験の報告があった。

空間プロファイルの測定では、コヒーレントOTR⁴のFar Field像をオーバーサンプリングによって位相回復することにより、マイクロバンチの空間分布を測定する手法が提案され、測定結果が示された。また、2枚のスリットを利用して干渉性回折放射を生成し、その空間分布の測定結果を計算値と比較することによりエミッタンスを同定する方法が提案され、測定結果とともに報告された。この方法には非破壊での測定が可能という利点がある。

その他の話題として、複数のセグメントから構成される長尺アンジュレータにおけるK値の調整や位相整合、さらに軌道補正などのコミッションングを精度よく行うために、各セグメントから放出される自発放射光の特性を精密に測定し、解析する手法の解説とSACLAにおける適用例が報告された。

新概念及び新規プロジェクト

短波長FELの小型化を可能にする、レーザープラズマ加速による高エネルギー電子ビーム生成について、口頭・ポスターとも多数の発表があった。この方法の最近の進展は目覚ましく、電荷100 pC程度で、エネルギー1 GeV、規格化エミッタンス1 mm.mrad以下、バンチ長数fsecのビームが生成されるようになってきた。一方で、エネルギー幅が数%程度あるため、そのままでは短波長FELを実現することは困難である。この問題を解決するためのR&Dの報告が2件あった。1つはエネルギー幅自体を軽減する加速手法の開発であり、対向する2つのレーザービームを利用することなどにより、電子の生成と加速のタイミングを厳密に調整する方法、他方はエネルギー幅を補償するために、電子ビームにエネルギー分散を与え、かつ

³ Coherent Synchrotron Radiation : 電子バンチより長い波長領域で放出されるコヒーレント光で、バンチ圧縮器などで生成される場合にはエミッタンス劣化などの原因となる

⁴ Optical Transition Radiation : 可視光領域の遷移放射光で、ビームプロファイルモニターとして利用する

その分散方向に磁場勾配を持つ特殊なアンジュレータを利用する方法である。

新規プロジェクト関連では、LBNL からパルス繰り返し数 1 MHz のフルコヒーレント軟 X 線 FEL を目指す計画が紹介された。主加速器には CW 超伝導加速器を利用し、また各種の手法を利用したシーディングが計画されている。フランスからも同様の計画の紹介があったが、従来型（といっても超伝導）加速器に加えて、レーザー場を利用した加速方式を併用することにより、その実用化を目指すとのことである。

各種イベントについて

会議初日の夕方には、参加者に抹茶と菓子が提供され、広大な庭園の風景を楽しんだ後、能舞台で狂言が披露された。開始前に、狂言に関する詳細な解説が英語で行われ、終了後には質疑応答などもあり、国内外の研究者にも好評なようであった。バンケットは 3 日目の晩にホテル日航奈良で開催され、鏡割りや餅つきなどの趣向を凝らしたイ

ベントで大いに盛り上がった。恒例になっている FEL 賞の発表も行われ、本賞には John Galayda、若手賞には Daniel Ratner という、いずれも LCLS の関係者が受賞した。最終日の午後には SACLA への見学ツアーが行われ、100 名を超える参加者があった。見学当日は夏季停止期間中ということもあり、電子銃、加速器、アンジュレータ、実験ホール、さらには試験加速器に亘ってほぼ全ての施設が公開された。稼働中の XFEL 施設を有する組織が本会議を主催するのは初めてということもあり、説明員に熱心に質問をしている参加者が多数見受けられた。

会議を終えての個人的な感想であるが、FEL の世界は波長と施設規模において一段と 2 極化が進んでいるようである。すなわち比較的大規模な短波長 FEL 施設と、小規模テラヘルツ FEL 施設である。また、フルコヒーレント X 線レーザーの実現を目指すシーディング技術の進展は目覚ましく、もはや必須のオプションとなりつつある。ちなみに来年の同会議は BNL 主催によりニューヨーク市で開催される予定である。