

子との相互作用断面積が電子よりはるかに小さいために、原子分解能への道のりは決して平坦ではないだろうが、XFELの実現が近づきつつある現在において、今後の進展が大いに期待される。

筆者らは縞走査X線干渉法を以前から研究しており、原子分解能化を意識したものではないが、位相計測とそれによる三次元観察を実現している。ワークショップでもポスターで最近の状況を報告した。他にも位相敏感イメージングということで国内に優れた研究は多く、今後の展開が大いに期待できるであろう。しかし、本ワークショップが

主題とする上記分野の日本のアクティビティに限れば、J. MiaoがSP8を使って研究を展開していることを除けば、いささか物足りない気がする。外国の動向をみると、位相回復手法の研究者とX線顕微鏡（イメージング）の研究者がうまく協働しているという印象を持った。自らも鑑み、研究をより一層発展させる上で必要な課題であろうと感じた次第である。次回はESRFのCloetensのホストにより、欧州（たぶんフランス）にて2年後の2005年に開かれる予定である。

SRI2003 satellite workshop X-ray Science with Coherent Radiation

鈴木芳生 (JASRI/SPring-8)

表記ワークショップがSRI2003のサテライトミーティングとして、本会議に先立ち8/22-23にLawrence Berkeley National Lab (LBNL)で開かれた。このワークショップの主催者はQun Shen (CHESS), John Spence (Arizona State Univ./LBNL), ならびにJohn Arthur (SSRL)であり、会議の主旨としてはコヒーレントX線が可能にする新しいサイエンスということであった。このような会議が開かれるようになった理由としては、TESLAに代表されるようなSASE-FELの進歩でX線領域の完全コヒーレント光源が夢の世界から現実へ一歩踏み出して来たこと、現状の光源を用いてコヒーレンスを利用した多くの研究が行われるようになってきたことであろう。例えば、10年前は非常に難しい実験であった硬X線領域のin-line holographyが第三世代光源の出現で今日では容易なものになってしまっている。参加者数はおおざっぱに見積もったところでは100名+ α 程度であるが、このようなテーマにしては思った以上に関心を持たれたように思う。

会議の内容は、23件のオーラル（すべて招待講演）と16件のポスター発表であり、光源から光学系、応用研究までの広い範囲を含めた構成になっていた。最初の講演はコヒーレントな次世代X線光源に関するものであり、ERLについてはコーネル大学のGrunerが一般論に続いてCHESSのERL計画の紹介を行った。7 GeV, 100 mA, エミッタンス15 pmrad, パルス長100 fsであり、これで波長1.5 Åでほぼ完全な一次のコヒーレントをもつ光源を目指している。FELに関してはHasting (SLAC)がスタンフォードにおけるFEL計画の紹介をおこなった。やはり短波長限界の目標値を1.5 ÅとしてSASE-FEL発表を目指す計画である。電子ビームパルス圧縮によりfs以下の短パルス光の発生を計画しているそうである。

利用研究の分野では大別して、光学素子と光学系に関するものと、応用研究では、スペックル、コヒーレント回折からの位相回復、ホログラフィーを含めた位相コントラストイメージングに分類される。

光学素子に関しては、石川哲也（理研）からElastic

Emission Machning (EEM)による超平滑反射面の加工とKirkpatrick-Baez (KB) 光学系による集光実験の発表があった。反射面の加工精度は非球面（平面楕円）でnmレベルの領域に到達しており、回折限界の集光（硬X線で90 nm）が可能だけでなく、表面形状誤差によるスペックルノイズがほとんどない理想に近い光学素子がEEMによって全反射光学系で達成されていることが示された。同様な非球面KBミラーに関してはESRFにおいて非対称bendingの方法でも行われており、同じように硬X線で90 nmの集光ビームサイズが達成されていることがCloetens (ESRF)から発表されていた。ミラーの片方が多層膜ミラーであり、結晶分光器は使わずに多層膜ミラーで単色化されている。ただし、こちらのオプティクスは完全とは言えないようで、実用に耐える領域はミラー全長の1/3程度、それでもスペックルによる強度むらが問題だと言っていた。フレネルゾーンプレートに関してはYun (Xradia Inc.)から、最外線幅50 nmの硬X線用FZP（パターンはウェットプロセスの金）の発表があった。これは製品レベルのものであり、60 K\$払えれば買える。もっとも、このFZPのユーザーであるAPSのPatersonに聞いてみると最外線幅100 nmのものはperfectだが50 nmのはまだそうとは言えないらしい。他には、屈折レンズに関してESRFとBNLからの発表があり、250 nm程度の分解能が達成されている。

X線領域のコヒーレンスを定量的に測定する手法としては、Paterson (APS)によるUniformly Redundant Array (URA)を用いた空間コヒーレンス測定法と、矢橋牧名氏 (JASRI)による強度相関法の講演があった。URAは一種のCoded Maskであり、スリット間隔をいくつか変えたヤングのスリットの干渉縞に相当するものを一度に測定する方法である。これに対して、強度相関法は可視光やマイクロ波でのHanbury-Brown & Twissの実験に相当するものであり、狭帯域分光器（バンド幅120 μ eV）とシンクロトロン放射のパルス特性を利用することで硬X線領域で2次のコヒーレンス測定が可能となっている。講

演では SPring-8 蓄積リングの垂直エミッタンス (光源サイズで $\sigma \sim 13 \mu\text{m}$) を測定した例が紹介された。

このワークショップでは Coherent diffuse scattering と呼ばれているが、スペckル (べつの言い方では、コヒーレント X 線照射での小角散乱) 実験に関しては, Sutton (McGill Univ.) による時間依存スペckル (Intensity Correlation Spectroscopy) の拡散系への応用, および Gruebel (ESRF) による粘性のダイナミクス計測例が紹介された。この手法は原理的にはレーザー光の散乱と同じものであり, X 線を用いることによるメリットが明確に示されている段階には至っていないと思われる。しかしながら, 光学的に不透明な物質への応用や今後集光ビームを用いることによる可視光では不可能な微小領域の計測等への展開は十分に考えられるものであろう。X 線 MCD を利用した磁性体のスペckルに関しては Goedkoop (Amsterdam Univ.) の講演があった。磁区や磁壁の構造に関しては MFM (Magnetic Force Microscopy) やスピン検出型の電子顕微鏡が有用なツールであるが, MCD スペckルではより時間分解能の高い測定が可能であるだけでなく, 元素選択性があるのでこれからの応用が期待される分野であろう。

コヒーレント光照射でのイメージングでは, フラウンホーファー領域 (試料サイズに比べて十分に離れた位置で回折を測定する回折顕微鏡) とフレネル領域 (いわゆる in-line holography もこれに分類される) で測定する波面再構成法がある。フラウンホーファー領域での測定法はオーバーサンプリング法と呼ばれており, 回折斑点の位置と強度だけでなくプロファイルも情報として用いることにより散乱体の位相回復を行うものである。結晶試料の場合は, ブラッグ反射近傍のスペckルプロファイルを測定するが, 小角から広角にわたる散乱を測定することによって, 非周期試料でも位相再構成が可能になることが数年前に Miao らによって示された。再構成像の解像度が検出器の空間分解能に依存しないので (問題なのは画像検出器の大きさと画素数), 10 nm レベルの空間分解能が可能であり, ここ数年注目されている。これに関しては Sayre (SUNY) や Miao (SSRL), Robinson (イリノイ大学), Howells (LBNL), 等の多数の発表があった。Robinson のグループからは金のナノ結晶 (と言っても実際には 1 ミクロン以上の大きさであるが) の回折スペckルからの 3 次元像再生の結果が発表され, また, Pfeiffer (Swiss Light Source) が銀の微粒子の回折イメージングの結果を発表していた。金微結晶中の構造が見えており, twin domain が観測されたと言っていた。Robinson は解析結果にかなり自信を持っているようであったが, 既知の構造の試料で feasibility test をやってあるのか? という指摘

もあった。

投影像からの波面再構成に関しては Nugent と Peele (共に Melbourne Univ.), Cloetens (ESRF) の講演があった。これらの方法は一般的には回折顕微鏡と同様に解の一意性が保証されていない。Cloetens らの方法では, 距離を変えた多数のホログラムを用いることによって redundancy を持たせ, 解の収束性を向上させている。彼らの実験ステーション (ESRF ID19) ではこの方法を既にユーザーに解放して共同利用実験が行われていることは注目すべきである。

位相コントラストイメージングでは, doublet FZP (単一のマスク上に作成) を使った Differential Interference Contrast と称する結像顕微鏡が Di Fabrizio (Trieste) から発表されていた。内容としては, 光軸と直交方向にわずかにずらした同一面内の FZP による二重像の干渉をみるものであり, 光学顕微鏡におけるノルマルスキー微分干渉法と同じである。David (Paul Scherrer Institute) からは回折格子による Shearing 干渉計とそれによる微分干渉像顕微鏡が発表された。実際の方法は百生敦氏 (東大) らが既に発表しているタルボ干渉計による位相コントラストイメージングとまったく同じものである。投影像からの位相再構成 (いわゆる位相コントラストイメージングあるいは屈折コントラストイメージング) ではそれほど高いコヒーレンスを必要としない。微分干渉法でも, 必要な空間コヒーレント領域のサイズは Shearing 量 (言い換えれば光学系の空間分解能) と同程度以上であれば良い。不必要に高いコヒーレンスが障害になる場合すらある。

照明光のコヒーレンスが結像顕微鏡の結像特性に与える影響に関しては, Jacobsen (SUNY) の講演でもかなり詳しく述べられていた。コヒーレント照明ではスペckルノイズの問題もさることながら, 結像特性や分解能の面から考えても, コヒーレントな平面波照明より臨界照明のほうが優れている。第三世代リングでは, カップリングが小さいときは垂直方向のエミッタンスが 10 pmrad 程度になっているので, 硬 X 線領域であっても既にコヒーレント照明になってしまっている。極論すれば, 結像顕微鏡の場合は, 良い前置光学系があって最適化したビームラインの構成が可能なら, 第二世代リングでも遜色のない実験が可能ならずである。

なお, 会議のアブストラクト等は SRI2003 のホームページから迎って, http://staff.chess.cornell.edu/~shen/workshop2003/Xray_coherence_2003.html でみることが出来ます。発表での viewgraph 等の資料も掲載されると聞いていますが, この原稿を書いている段階ではまだのようである。