

# X線結像光学ニューズレター

No.19 2004年2月発行

X線結像光学の発展を願って

名古屋大学大学院理学研究科 山下広順

時の経つのは早いもので、1991年度に波岡先生からバトンを受け継ぎ、X線結像光学の研究の取りまとめを行ってきましたが、いよいよ次の世代にこの分野の発展を託す齢となりました。今後の行く末には、行政改革に端を発した法人化の大波によって大学、研究所の組織改革が余儀なくされ、教育・研究に対する危機感が強まっています。目先の研究成果に目が奪われる風潮の中で、長期的な展望をもって学術研究を如何に発展させるかが大きな課題であると思います。X線結像光学の分野は、元来学際的であり、基礎研究と応用・実用研究の両面を併せ持っていることから、これから大きく発展するチャンスであると捉えています。1989年（平成元年）度に重点領域研究「X線結像光学」（1989～1992年度）によってこの分野が発足したときから、科学と技術は車の両輪のように互いに支え合い、刺激しあいながら発展していくものであり、X線結像光学はその典型としてX線光学・計測を共通の手段として広汎な分野を包含する学際的研究領域であると認識していました。今喧伝されている学際化、総合化あるいはグローバリゼーションを先取りしてきたと思っています。

顧みれば、重点領域研究終了後、次のプロジェクトが中々立ち上がらず、苦しい時期もありましたが、退官後NASAに行かれた波岡先生のご尽力で、1994～1995年度に日本学術振興会日米科学協力事業共同研究「軟X線結像光学」が採択され、1995年1月情報交換のために「X線結像光学ニューズレター」（年2回発行）を創刊し、何とかこの研究者組織を維持することができました。この組織は、宇宙科学、放射光科学、物質科学、プラズマ・核融合科学、生命科学、X線光学、精密工学、微細加工等の研究者の有機的な集合体であり、求心力がなくなれば簡単に崩壊する危険性を孕んでいました。その後は、各分野で大型プロジェクトを取得し、X線結像光学の発展に寄与するという奉仕の精神を持って進めることにしました。その結果、6年間の空白を経て、1999年に第5回のX線結像光学シンポジウムを開催するとともに、レントゲンのX線の発見100年（1995年）を記念して企画した専門書「X線結像光学」（1000部完売）を多くの方々の執筆により刊行することができました。このシンポジウムは、今後隔年で開催することとし、2003年で第7回となりました。それぞれの分野で大型プロジェクトが現在3つ採択されており、将来に向けて明るい見通しが得られるようになってきました。現在、国策として4つの重点分野（ナノテク・材料、情報・通信、生命、環境）に研究費が集中的に投資されており、我々が有効に使おうという気概をもって、再びX線結像光学を中心とした大プロジェクトが発足することを願っています。

す。

X線結像光学は広汎な分野の研究者で構成され、give and takeのもとに研究が進められてきましたが、広い視野と深い思考力を培う大学の教育においても大変有効であったと思います。それによって、研究者の育成と多様な研究の展開が促され、新しい研究の芽が創出されることが期待されます。当初は、研究対象が軟X線領域に限定されていましたが、SPring-8が稼働したことや研究の進展とともに硬X線領域へと拡大しています。また、第7回のシンポジウムでは、多くの若手研究者の参加があり、将来に向けて益々発展していくものと意を強くしています。目前に迫った大型計画として、2000年に打上げに失敗したX線天文衛星Astro-Eの復活を目指して、2005年2月にAstro-E2の打ち上げが予定されています。失敗続きの宇宙開発に対する世の風当たりが強い中で、無事成功することを祈っています。

多くの方々のご協力を得て、何とかX線結像光学研究会の代表を全うすることができました。特に、ニューズレターの編集・発行は東北大の渡辺先生の多大なご尽力によるものです。ここに厚くお礼申し上げます。

## SRI 2003 と Satellite Workshop (X-ray Science with Coherent Radiation)

JASRI/SPring-8 鈴木芳生

2003年のSRI (Synchrotron Radiation Instrumentationに関する国際会議)がサンフランシスコで8月25-29に開催されました。この国際会議は御存知のように3年毎に開催されるシンクロトロン放射での装置技術と方法論を中心にした国際会議です。第一回は1982年にハンブルグで開催されたそうですが、これはプロシーディングも発行されていないので、実質的には1985年のスタンフォードでの会議が初回と断言していいかもしれません。18年たってまた西海岸に戻ってきたことになります。また本会議に先立ちX-ray Science with Coherent Radiationと題するサテライトワークショップが8/22-23にLawrence Berkely National Lab.で開催されました。X線結像光学に関連する研究はこのサテライトミーティングでも数多く取り上げられていたので、両者をまとめて報告することにします。

X線光学と顕微鏡に関する今年を中心話題は、次世代光源と硬X線での100nm分解能に尽きると思われます。次世代(第四世代とも言いますが)光源の定義は定かではありませんが、この会議ではエネルギー回収型線形加速器とアンジュレータの組み合わせ(ERL)と線形加速器ベースのシングルパス自由電子レーザー(SASE-FEL)を次世代光源と定義しているようでした。TESLAでのSASE-FELで短波長(真空紫外)の発振に成功したこともあって、最近になりコヒーレントX線源の実現性が一気に高まってきているように感じられます。しかしながらどちらにしてもX線源としてはいずれにしても現段階では計算機シミュレーションでしか無いことも事実です。

ERLとFELでは光源の特性はまったく異なるものです。ERLは基本的にはシンクロトロン放射であって、電子ビームのエミッタンスを光の固有エミッタンスより小さく

して、かつエネルギーバンド幅も  $10E-4$  以下（従来の蓄積リングより一桁以上小さい）にすることに特長があります。この場合放射される光は空間的には完全コヒーレントになり、多周期アンジュレータを用いることによって時間コヒーレンスも分光器を用いた場合と同程度のものが得られる可能性があります。もっとも ERL の放射光は本質的にはカオス光であり、レーザーのような高次のコヒーレンスは持つ光ではありません（位相はでたらめという意味です）。しかしながら、SASE-FEL と異なり時間的には連続光になります（もっとも普通のシンクロトロン放射と同じように高周波加速によるバンチングでパルス化されてはいるが、実用的には連続光と見なせるでしょう）。一方、SASE-FEL は共振器は持たないが、自分自身の放射と相互作用することによる一種の誘導輻射であり、可視光のレーザーと同じように高次のコヒーレンスを持つことが出来ると考えられます。ただし、基本的にはパルス駆動であり、繰り返しはせいぜい 10Hz 程度が想定されています。利用する立場から考えると、現状の X 線源の延長上にあるものではないでしょう。

このような光源でいったいどんな新しいサイエンスが可能になるか？という素朴な疑問に対する明快な答えはまだ無いように思われます。コヒーレント散乱による回折イメージング（X 線の波長分解能でのイメージングの可能性はある）、スペックル、非線形光学、フェムト秒時間分解実験などが提案されてはいますが、これだけで次世代光源の意義を説明するのはちょっと苦しいのではないのでしょうか。もっとも第三世代光源の SPring-8 SRF, APS で行われている実験の中で本当に高輝度リングを必要としているのはその一部に過ぎないことを考えると、別の考え方もあるかもしれません。技術的に最先端のものでなくても科学としての最先端の成果を得ることは可能であり、また今の知識だけで将来像を描くのはあまり当てにならないと思われます。

次に X 線結像光学素子の分野の現状を見てみますと、ここ数年で硬 X 線領域での性能向上がめざましくなっています。軟 X 線顕微鏡の分解能は 10 年以上前に既に 100 nm を切る解像度の走査型や結像顕微鏡が出来ていましたが、それに比べて硬 X 線はずっと遅れていて、その当時走査型顕微鏡でやっと 1 ミクロン分解能が達成されたところでした。今回の SRI ではフレネルゾーンプレート、全反射ミラー、及び屈折レンズに関する現状に関するいくつかの発表があり、硬 X 線領域で FZP を用いて 50 nm 程度、楕円 Kirkpatrick-Baez ミラー光学系で 100 nm 前後、屈折レンズでも 200-300 nm 程度の分解能が得られていることが報告されていました。とくに全反射ミラーの進歩はめざましいものがありますので、このあたりを少し詳しく説明します。

現在 100 nm 程度の分解能を 1 オングストローム前後の硬 X 線領域で達成している全反射ミラーは 3 グループあり、光学系はいずれも非球面（原則として楕円面）の Kirkpatrick-Baez 光学系を用いたマイクロビームです。しかしながらそれぞれのミラーの作り方は全く異なるものです。ESRF では薄いテーパーミラーの弾性曲げで楕円面を生成する方法が用いられています。ミラーベンダーや調整機構は ESRF の光学系グループ内で作っているそうです。このオプティックスで半値幅 80 nm x 90 nm のマイクロビームを得ています。これに対して、SPring-8 からは二つの独立なグループからそれぞれ発表がありました。ひとつは大阪大学との共同研究で、EEM(Elastic

Emission Machining)による超平滑面加工を用いたものです。硬X線領域で90 nm x 180 nmの集光ビームサイズが得られています。もうひとつはキャノンで加工されたミラーであり、非球面の母型に沿って弾性変型させたミラー表面を通常の精密研磨で仕上げ、母型から外すことによって母型の形状が研磨面に転写されると言う特殊な方法で作られています。こちらのミラーでも110 nm x 150 nmの集光ビームが得られています。いずれにしても硬X線領域でミラーを用いて回折限界に近い分解能が得られるようになり、しかもこれらの独立な研究がほとんど同時に行われていたことには驚きました。

もっとも、このような高分解能マイクロビームが得られるようになった理由のひとつは光源とビームラインの性能に依存する部分が非常に大きいように思われます。特にここで挙げた高分解能マイクロビーム実験は第三世代リングのアンジュレータを光源としているだけでなく、長いビームライン（ESRFのID19は150m、SPring-8のBL20XUは250m、BL29XUに至っては1km!）を利用しています。硬X線領域では光学素子を用いて空間コヒーレンスを制御することが実際上不可能です。したがって、このようなビームラインを用いることによって初めて十分な空間コヒーレンスと強度を得ることが出来るようになったと言えるでしょう。実際にミラー加工技術に関してはかなり前から開発されていたものですが、本当にX線でのテストが出来るようになったのはごく最近になってからです。ゾーンプレートの場合でも光学素子の精度としては既に完成されていたとも言えますが、実際に100 nm以下の分解能をマイクロビームとして実証するためには光源（とビームライン）の進歩が必須だったと考えられます。これから考えると、光源が進歩するだけで、今までとは全く違ったサイエンスが可能になることもあり得るかもしれません。

なお、会議のプロシーディングスはAIPから出版される予定であり、筆者の知る限りではカメラレディの原稿に対する大体の査読は終了しているようですので、そのうち出版されると思われます。また、次回のSRIは韓国の浦項放射光施設がホストになって2006年に開催される予定です。

## 第7回 X線結像光学シンポジウム報告

東北大学多元物質科学研究所 渡辺 誠

去る平成15年11月26日(水)の午後から27日(木)の午後にかけて、標記のシンポジウムが仙台市戦災復興記念会館で開催されました。日本応用物理学会東北支部、日本放射光学会、レーザー学会、日本天文学会の後援を頂きました。講演は口頭発表とポスター発表で行いました。口頭発表は14件で下記の通りでした。

1. LPP軟X線光源を用いた超高分解能多元物質顕微鏡の開発 山本正樹（東北大多元研）
2. 誘電体のスペックル観察 R. Z. Tai (JAERI)
3. 多層膜回折格子偏光分光計の性能評価と応用 柳原美広（東北大多元研）

4. 次世代軟X線発光分光器のデザインと開発 初井宇記 (分子研・総研大院)
5. 硬X線ホログラフィーによる100nm領域の位相計測 渡辺紀生 (筑波大物工)
6. 放射光利用X線マイクロビーム光学系の構築と半導体結晶の極小局所歪み評価に関する研究 竹田晋吾 (JASRI)
7. 位相差極端紫外線顕微鏡による機能性材料表面観察・計測技術 木下博雄 (姫路工大高度研、CREST)
8. 非球面光学素子加工の最近の課題 安藤 学 (キャノン)
9. 透過電子顕微鏡法によるPt/C硬X線多層膜のナノ構造評価 大西直之 (中部大工)
10. 大視野・高分解能X線暗視野法の開発 杉山 弘 (KEK、GUAS)
11. 硬X線撮像観測による非熱的宇宙の研究 国枝秀世 (宇宙機構宇宙研)
12. Astro-E2衛星と宇宙X線分光観測 満田和久 (宇宙機構宇宙研)
13. X線撮像分光器の開発の現状 宮田恵美 (阪大院理)

今回は口頭発表を各分野から1~2件に絞り、発表時間を充実して30分としました。ただし、大型プロジェクトの発表(1、7、11)は40分でした。個々の研究発表はポスター発表で行いました。ポスター発表は55件でした。その内訳はX線望遠鏡:4件、宇宙X線観測用検出器:7件、プラズマ計測:1件、反射鏡:10件、X線屈折光学系:1件、フォトレジスト:1件、X線顕微鏡:14件、蛍光X線ホログラフィ:2件、分光素子:3件、分光器:1件、多層膜および成膜技術:6件、放射光光源・ビームライン:2件、光学測定法:2件、干渉計測:1件でした。今回は新しい試みとしてポスター会場で懇親会を開きました。実質的にポスターの時間が長くなり、ポスターの前で議論を深めるとともに懇親も深めることができたのではないかと考えております。全出席者は101人でした。仙台は筑波より遠いので第6回より少し人数が少なかったようです。しかし若い人たちが多く参加し、これからも「X線結像光学」はますます発展するであろうと安心することができました。なお次回は2005年に開催の予定です。世話人は姫路工業大学の木下博雄氏です。

## X線顕微鏡国際会議準備委員会報告

筑波大学 青木貞雄 (準備委員会世話人代表)

2005年7月姫路市で開催予定のX線顕微鏡国際会議準備委員会が、昨年11月のX線結像光学研究会シンポジウム(仙台)ならびに本年1月の放射光学会(つくば)の機会を利用して開かれました。準備委員会には、組織委員会委員および実行委員会委員就任予定の先生方を中心に、延べ50名近い方にお集まり頂きました。

準備委員会の主な議題は、開催日程、主催団体、組織委員会および実行委員会のメンバーの推薦、国際プログラム委員推薦などでした。2回の会議で議論を重ね、以下の項目が確認されました。

- (1) 開催日程、開催場所  
2005年7月25日(月)～30日(土)  
イーグレ姫路(姫路市)
- (2) 主催団体、組織委員長、実行委員長、事務局  
主催団体 : SPring-8  
組織委員長 : 吉良爽(JASRI)、副委員長 : 青木貞雄(筑波大学)  
実行委員長 : 鈴木芳生(JASRI)、副委員長 : 籠島靖(姫路工大)  
事務局 : 当真一裕(JASRI)、小林由香(JASRI)
- (3) WEBの開設  
担当者 : 木村洋昭(JASRI)、1月中に開設
- (4) プロシーディング  
JJAPプロシーディング部に打診
- (5) 共催、後援  
共催あるいは後援を関係団体および学会に依頼することにした。  
既に決まっている後援 : 日本放射光学会
- (6) 関連事項  
平成16年度科学研究費、基盤研究(C)「企画調査」申請  
代表 : 青木貞雄、分担者24名
- (7) 今後の予定  
平成16年4月 : 第1回組織委員会開催(イーグレ姫路)  
平成16年7月 : First Announcement  
平成16年11月 : 第2回組織委員会およびX線顕微鏡ワークショップ

最後になりましたが、対外的な交渉を進めるために組織委員会を前倒しで1月からスタートすることになりました。関係者の皆様の御支援をよろしくお願いいたします。

## 編集部より

本ニューズレターのはじめのあいさつにもありますように、世代交代ということで平成16年度から本研究会の代表は名古屋大学山下広順氏から筑波大学青木貞雄氏に、また編集部は東北大学渡辺 誠から名古屋大学田原 讓氏にかわります。4月以降は新スタッフの方に連絡をお願いします。

---

発行 X線結像光学研究会(代表 名古屋大学大学院理学研究科物理学教室 山下広順)  
編集部 東北大学多元物質科学研究所 多元解析研究部門表面プロセス解析研究分野 渡辺 誠  
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 TEL: 022-217-5376, FAX : 022-217-5379  
E-mail:watamako@tagen.tohoku.ac.jp