

第5回播磨国際フォーラム報告

第5回播磨国際フォーラム実行委員会
姫路工業大学 理学部
松井 純爾、竈島 靖

財団法人高輝度光科学研究センター
利用研究促進部門
鈴木 芳生

兵庫県とSPring-8の共催になる第5回播磨国際フォーラムが2001年7月11日(水)から14日(土)まで開催された。そのうちの播磨コンフェレンスは“New Aspect of X-Ray Imaging Technology with Synchrotron Radiation - Present Status and Future Possibility -”を学術テーマに、11日から13日までSPring-8普及棟で、また講演会は一般市民を対象に14日に姫路商工会議所会館で行われた。この播磨国際フォーラムは、昨年10月に播磨国際フォーラム組織委員会(熊谷信昭委員長)においてその開催が承認され、兵庫県とJASRIが等分の費用負担で毎年1回(ただし、生命科学分野と物質科学分野に分けて別の日程で)開催されるもので、播磨コンフェレンスの学術テーマは前記組織委員会で選定されるものである。

本年の物質科学分野におけるテーマは、SPring-8をはじめとする世界の放射光施設において、特に高輝度放射光の出現以来、急速に発展しつつある「X線イメージング技術」に焦点を絞って、国際的に顕著な成果を発表されている著名な研究者を一同に集めて、ホットな話題提供とこれに関する学術的議論を深めていただくという主旨である。今回のテーマには、硬X線、軟X線顕微鏡、X線マイクロビームの形成とその応用、X線屈折イメージング、X線CT技術、そしてX線トポグラフィの各X線イメージングの科学と技術が含まれ、イメージングについて幅広い討議がなされた。なお、通常「X線イメージング」といえば、フーリエ変換等の特別なデータ処理過程を経ないで直接イメージング(画像化)できる技術ということで、X線顕微鏡や屈折イメージング技術を討議の中心とすることは当初からの計画であったが、本年3月にスタートした実行委員会でフォーラムの全体構成を検討する中で、急速「X線トポグラフィ」を入れ込むことになった経緯がある。

実行委員会(松井(委員長)、竈島(幹事)、鈴木(幹事)、それに海外からのコンサルタントとして豪州CSIROのStephen W. Wilkins博士にも幹事の一人として加わっていただいた。また、スタッフとして

兵庫県産業労働部科学・情報局、落合正晴、杉浦美紀彦の両氏、JASRI企画調査部から北嶋勇人、坂川琢磨の両氏らに参加していただいた。)では、数回の現地打ち合わせを経た上で、コンフェレンスのセッションテーマを前記のように定め、およその開催日程を決めた。

第5回播磨国際フォーラムの主要企画である播磨コンフェレンスには、国外からの11名(英1、独2、仏3、米2、豪2、フィンランド1)を含めて全体で50名余りの参加者があり、ゆったりした雰囲気の中で2.5日間の会議(初日はウェルカムパーティのみ、最終日の午後はエクスカージョンを開催)が続けられた。初日の到着飛行便の関係でウェルカムパーティに間に合わない海外招待者もおられたが、パーティ終了時までには海外招待者はほぼ全員そろったようで、実行委員会として一応ほっとした記憶がある。

オーラルプレゼンテーションが19件、ポスターセッションでの発表が21件と、通常の国際会議に比べるとやや小さめの規模で行われたが、その代わり口頭発表時間が1人40分(質疑応答を含む)と長めの時間が与えられた結果、落ち着いたプレゼンテーションで討議も充分なされたのは大変良かった(ある海外招待者の意見)。以下に各セッションで発表された研究内容と討議内容について列記したい。

1. X線顕微鏡

軟X線領域でのX線顕微鏡について、G. Schmahl (Göttingen大)がBESSY とを使って、またG. Denbeaux (Lawrence Berkeley 国立研)がALSを使って得たfull fieldの高分解能顕微鏡像を示した。現在はそれぞれ20~30nm程度の解像度であるが、将来はフレネルゾーンプレート(FZP)の高次を利用するなどして数年後に10nm、さらにその先は3nm位まで期待できそうだという。両者とも、試料の冷却装置を付加して(Cryo TXM)試料への照射の影響を減じる工夫をしたり、磁気円二色性を応用して例えばFeGd多層膜における磁区観察をFeL吸収端近傍で行うなど、新しい応用展開を意図している。

一方、硬X線領域のX線顕微鏡については、A. Snigirev (ESRF) が、1958年にはA. Vazineがすでに蠅の屈折像を撮影していたこと、今日ではESRFにおける4本の、SPRING-8では6本のビームラインなど多くのX線イメージングの研究が行われて、この分野のアクティビティが向上していることなど、そして今後、空間分解能と撮影時間の縮小には焦点サイズとビームの発散角を抑制すること、コヒーレンシを利用することなどいくつかの課題を克服せねばいけないことを指摘した。同時に、ESRFでのマイクロトモグラフィについて多くの例を紹介し、アンジュレタ光の高調波部分(“Pink beam” と呼称)を利用した1秒以下の高速CTを計画していることを含めて、ESRFでのマイクロトモグラフィについての現状を多く紹介していた。渡辺(筑波大)は、Wolterミラーを使った蛍光X線顕微鏡とZernike型の位相コントラストX線顕微鏡を紹介した。In-lineホログラフィには実効的焦点サイズを小さくすることを心がけ、2.6nmまで達成できた。同じくZernike型の位相コントラストイメージングでは、G. R. Morrison (King's College) が、ESRFにおいて0.12×0.24 μm^2 サイズの80×80素子改良型CCDと組み合わせて走査型X線顕微鏡を3.3keVでの動作に成功している。応用としてCVD成長のダイヤモンド結晶やポリスチレンなどの観察結果を示した。

2. X線マイクロビームとその応用

X線顕微鏡セッションの延長線上にあるセッションではあるが、ここではむしろX線マイクロビームの形成方法とその応用に主題がある。早川(広島大)は、SPRING-8のBL39XUにおいて、KBミラーにより10keVで5×6 μm^2 のマイクロビームを形成、隕石やエアロゾルについて蛍光分布マップやXAFSを測定した。現在はNi等の検出限界はピコグラム試料で1ppmレベルにまで達しており、将来は光学系の工夫でもっと高エネルギーでの高感度検出が可能という。上條(関西医大)はAl/Cu多層膜を磁気スパッタ法で膜厚を制御しながら交互に積層し、最外輪帯幅0.14~0.25 μm 、プレート厚を20~40 μm とすることで0.2~0.3 μm 分解能のイメージを得た。例えば、このFZPを使ってE=8.9~25keVで0.2 μm のTaパターンを解像できた。これに対してB. Lengeler (Aachen工科大)は、パラボリック曲線の対称内面を持つ屈折レンズを使ったマイクロビームを紹介した。これは素材の吸収や表面粗さの影響が少なく、NA (numerical aperture) が小さい(10^{-4})ことを利

用したものだが、実際に多くの試料でその高分解能性(0.2 μm 、理論的には90nm)を示している。例えば、鉄鋼中の各粒界の歪みや転位密度まで、あるいは花の断面、植物の根や果実の屈折像や元素分布などである。

3. X線イメージング

このセッションでは、各種X線イメージング技術の長所短所について、物理的な意味からの比較が、S. W. Wilkin (CSIRO) と Wah-keat Lee (APS) の講演の中でなされた。すなわち、(1) interferometry (干渉) (2) angular deflectometry (通常の屈折イメージング) (3) propagation-based (フレネル回折) のそれぞれについて扱う波の情報(振幅、位相、強度)が異なっており、位相情報と振幅(吸収)情報の抽出分離(phase/amplitude extractionまたはretrieval)の難易性もさまざまである。分解能は(1)では結晶内での波の広がり(Borrmannの扇)によって決まり15 μm 位、(2)ではX線の消費距離によって6 μm 以下、(3)では1~10 μm 、またビーム安定性は(1)が最も不安定、(3)が最も安定などとして、(3)の優位性が強調された内容であった。Leeの講演では高エネルギー領域で、ガス噴射時の気相密度変動やクラックの進行状態などリアルタイムでのX線イメージを見せて興味を引いた。八木・鈴木(JASRI)は屈折イメージングの医学応用結果を披露した中で、光学系を最適化したとしても、肺などX線透過距離の大きな試料のイメージ解釈は、複雑なX線の光路を考慮すると大変難しい問題を含んでいることを指摘した。このセッションの最後で、急に来日できなくなったD. Chapman (IIT) に代わってT. E. Gureyev (CSIRO) がESRFで得られた多波長in-line屈折イメージングにおけるphase retrievalの仕事を紹介したが、その際使った“X-Tract”というソフトのフリー利用の可能性を暗示して聴衆の関心を呼んだ。

4. X線CT技術

X線CTは分解能とCT化に要する撮像時間が最大の関心事であるが、前のセッションでも指摘されたように、百生(東大)のBonse-Hart型干渉計によるイメージングは最も感度が高い。特に空間的に徐々に変化する密度を画像化できる点では他のイメージング技術はこれに及ばない。視野(試料)の大きさ(2.5cm×1.5cm)や、干渉計に用いる結晶の完全性、光学系調整の精度や安定性(フィードバック制御の

導入)など実験上の課題を含むものの、試料の選択と使い方を考えれば面白い技術であることには変わりはない。P. Cloetens (ESRF) のグループでは、放射光のコヒーレンシをうまく使って前述した位相/吸収情報の抽出分離が可能であることを早くから検証していた。propagation-basedのイメージング、すなわち屈折波がいろいろな角度を持って広がる結果できる最終的なコントラスト強度分布を、試料からの距離を変えながら多くのデータを取得した上で(“Through-Focus”法ともいふべき、前述の多波長法と得られる結果はほぼ同じ)計算処理すれば定量的な議論に耐える高品質な画像(電子密度の立体的画像)を得られる、と指摘している。実際に、Al/Ga合金の粒界、Al中SiC粒近傍の微小クラック、Al-Al/Si準固体、バイオ試料(植物)などの高分解(1 μ m)三次元像を示した。続いて上杉(JASRI)は、SPring-8のBL47XUとBL20B2ラインで冷却CCDカメラを使って高分解能(1 μ m)X線CTを試みた結果を紹介した。29keVのエネルギーでSn/Pb合金内のPbリッチ相とSnリッチ相領域をこの分解能で識別して画像化している。

5. X線トポグラフィ

放射光が利用可能になって以来、トポグラフィは大いに進展を見せた利用技術で、回折を使うものの得られる画像は実空間の結晶内の異常(歪み、転位、析出物など)部位を素直に映し出す。T. Tuomi (Helsinki大)は、放射光白色ビームを単結晶に照射して同時に得られる回折像から結晶欠陥を一気に同定する技術を報じた最初の研究者であるが、今回はHASYLAB(Hamburg)ラインを使い10~40 μ mの結晶内空孔と析出物の像が回折方向に互いに反転の白黒ペアでコントラストを作ることを利用して両者の区別が即座にできることを実証した。また、GaAs結晶やSiC結晶内の転位(後者では転位はマイクロパイプとなる)InGaP/GaAs, GaAsN/GaAs等のミスフィット転位などのパーガースベクトルの同定、あるいはSiO₂膜に窓を開けそこだけに局所エピタキシャル成長した層の歪み解析など、主として半導体結晶への応用を積極的に展開している。J. Härtwig (ESRF)は、放射光X線トポが古典的な手法の高輝度化に留まらず、新しい試みを加えることで従来得られなかった情報が得られることを志向している。例えば、イメージング化に読み出し速度の早い低ノイズ、高ダイナミックレンジ、小ピクセ

ル寸法の二次元CCDカメラを採用して、弱いコントラスト変化を高感度で取得すること、長直線ビームラインの極小発散角、コヒーレントビームの活用、特にブラッグ回折とフレネル回折を組み合わせた光学系で、物質による位相変化に着目して磁区ドメインのトポ像を撮影する試みなどである。ロッキングカーブの傾斜肩位置で撮影した反強磁性材料中の180°ドメインの観察、 piezoelectric材料に振動電場を与えた時の結晶歪みを高速トポでストロボ的に撮像するなど斬新な結果に驚かされた。最後に飯田(富山大)が、BL20B2(ビームの水平幅が広く、垂直発散角が小さな医学イメージング用ビームライン)で極端非対称反射コリメータによる超平行ビームを使って、引き上げ法Si結晶中の微小欠陥を透過配置(ラウエケース)で撮影し、高エネルギー側で高次反射次数を採用するとさらに像を高分解能化できることを示した。このように完全性の高い半導体単結晶中に残る微小欠陥のトポグラフィ像取得は、従来の実験室X線ではほぼ不可能に近かったといえる。

以上、口頭講演者の内容のみを大雑把に紹介したが、これ以外に20件あまりのポスター(すべて招待論文扱いとしている)がそれぞれのオーラルセッションにテーマを合わせて展示された。ここでは紙面の都合上紹介できないのは残念だが、それぞれに最近の成果が発表されており、内容の豊富な点では見ごたえ聞きごたえのある発表が多かった。

総じて、full fieldのX線顕微鏡分野ではハードウェア、とりわけFZPなど光学系の改良(高アスペクト比などで、将来は硬X線領域での分解能が80nm程度、軟X線領域では3nm位(FZPの高次利用)まで期待して良さそうである。そして、撮像の高速性、安定性、実効的な微小光源(長尺ビームラインの利用など)の採用でpropagation basedのイメージング技術の高速CT(現在40sec、将来1sec)が可能になるかも知れない。このときの分解能として現状でも20nm(冷却装置付きで60nm)が得られており、Through-Focus法などで多くのデータを取得すれば高品質の画像を確保できる可能性が高い。X線顕微鏡を初めとするX線イメージングは、APS(Leelによれば、SPring-8の6本に比して全体で1.5本分のビームラインしかないという)のアクティビティが低いのが気になるが、世界的にはますます拡大する分野と見てよいであろう。各種屈折レンズの開発を含めて成果のインパクトは大きそうである。

6. 講演会

一般向け講演会は、市民を対象に播磨コンフェレンスの最終日の午後毎回開催される市民セミナーである。今回は約100名の参加者があり会場（姫路商工会議所会館）は後ろの席まで埋められた。講演に先立ち、播磨国際フォーラム組織委員長である熊谷信昭氏（(財)ひょうご科学技術協会理事長）より、第5回播磨国際フォーラム開催の意義と、講演者の紹介があった。そのあとまず松井実行委員長から、今回の播磨国際フォーラムで議論された「放射光利用X線イメージング技術の動向 - 現状と将来 -」の概要を報告し、X線顕微鏡の簡単な紹介を行った。

それからお二人の講師をお招きして「光時代の幕開け」に焦点を当てたご講演をいただいた。今回の講師は、JASRI放射光研究所の前所長（現在JASRI副会長）上坪宏道先生に「21世紀の光はこうして光った - SPring-8の誕生とその展開 - 」と題して、また、神戸市立工業高等専門学校校長・神戸大学名誉教授の西野種夫先生には「IT社会を支える半導体技術」と題してご講演いただいた。

ご存知のように上坪先生は、10年近く前の「原研・理研共同チーム」でSPring-8建設計画を展開したときから、というよりもっと前のいわゆる「関西6GeV計画」として大型放射光施設の建設話が持ち上がった時点から、深くSPring-8に関わってこられ、監督官庁との折衝を含めて多くのご苦労をされてこられた方である。地ならし工事に始まり、建屋、直線加速器、蓄積リングの建設、さらには最初の放射光の発光を確認された後、今日の本格的「利用フェーズ」に至る間、ずっとSPring-8の発展を見守ってこられただけに、そのご苦労がにじみ出たお話の断片には、僭越ながら関連委員会の委員を担当させていただいた者の一人として感慨深いものがあった。

西野先生は、高速通信素子あるいは光通信素子として現在も盛んに研究され続けている化合物半導体結晶の結晶成長やデバイスプロセス開発の草分け的なお仕事に長年従事され、筆者の一人（松井）も、学会講演会や各種の委員会などを通していろいろご教示いただいた方である。学術的な実績もさることながら、先生のざっくばらんなお人柄から、今も多くの友人と幅広い交わりを保っておられる方である。お話の内容は、IT、つまり高速通信時代の幕開けを意味する新世紀に、どのように半導体結晶が役立っているかについて、例えば、記憶素子であるLSI（高密度集積回路）が今や1素子で新聞2年分の記憶容量を持っていることなど、実例をあげて一般

の人にも分かり易く解説された。

7. その他

コンフェレンス開催中には、初日にウェルカムパーティ（韓国風バーベキュー）、12日の夕食後にわが国伝統文化の紹介として、SPring-8茶道部のご協力でお茶会を、13日昼には恒例のSPring-8ツアー（鈴木幹事担当）を行った。また同日夕刻のレセプション（立食）では上坪JASRI副会長、菊田放射光研究所副所長、CSIROのWilkins博士からそれぞれご挨拶をいただいた。最終日のエクスカージョンでは、これも恒例になった姫路城訪問に海外研究者のみ10名の参加を得た。

謝 辞

電子メール等による招待講演者との調整、アブストラクト集の作成、コンフェレンスポスター等の手配など、ほとんどの事務的処理は籠島幹事が担当し、これにJASRI企画調査部、坂川氏、兵庫県産業労働部、杉浦両氏から随所で助力していただいた。なお事務局には河端恭子さんに諸々の書類整理、作成をお手伝いいただいた。また初日のバーベキューは鈴木幹事が担当し、多くのJASRI若手研究者に企画、実行していただいた。最後になったが、姫路工業大学理学部X線光学講座の大学院学生諸君には、海外招待者の相生駅でのピックアップや、播磨国際フォーラム開催中の会場係りとして実務的な労働提供をしてもらい、本フォーラムのスムーズな運営に影の力になったことを強調したい。

松井 純爾 *MATSUI Junji*

姫路工業大学 理学部 物質科学科 教授
〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-2-1
TEL : 0791-58-0233 FAX : 0791-58-0236
e-mail : matsui@sci.himeji-tech.ac.jp

籠島 靖 *KAGOSHIMA Yasushi*

姫路工業大学 理学部 物質科学科 助教授
〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-2-1
TEL : 0791-58-0230 FAX : 0791-58-0236
e-mail : kagosima@sci.himeji-tech.ac.jp

鈴木 芳生 *SUZUKI Yoshio*

(財)高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0907 FAX : 0791-58-0830
e-mail : yoshio@spring8.or.jp