

一分解能 (6 keV で500) をもつ X 線検出器として X 線ポロメーターが開発され、ASTRO-E 衛星 (2000年2月打ち上げ) に搭載されることになった。多くの迫力ある最新の研究成果が発表され、熱心な議論があったが、なるべく多くの方々に講演をお願いしようと思図したために、質疑の時間が少し短すぎたように感じている。X 線光源については、それぞれの講演の中で触れるにとどめ、時間の都合上、独立したセッションを設けなかった。

これまでのシンポジウムでは軟 X 線領域での研究が中心であったが、光源の開発や基盤技術の進歩によって、硬 X 線領域の研究が大きく進展してきたことが注目される。特に、多層膜スーパーミラーによる集光・結像光学系や位相コントラストの利用は結像光学に新たな展開をもたらすと思われる。科学目的は異なっても、それを達成するための X 線光学・計測技術は共通したものがあり、互いに有

機的な連携をして研究を進めることが重要であることを再認識した。この学際的なシンポジウムを隔年で開催してはどうかと考えている。これを機に、共同研究や新たなプロジェクト研究が推進されることを期待している。

追記：X 線天文衛星「あすか」(1993年打ち上げ) の後継機と期待されていた ASTRO-E 衛星は本年2月に宇宙科学研究所の M-V ロケットによって打ち上げられましたが、残念ながら1段目ロケットの異常により軌道に投入することができませんでした。21世紀の X 線天文学はアメリカの Chandra 衛星 (1999年7月)、ヨーロッパの XMM-Newton 衛星 (1999年12月) との相補的競合の中で大きな研究成果が期待されていました。現在、関係者による復活の努力が進められています。この場を借りて、皆様のご理解とご支援をお願いする次第です。

## ＜研究会報告＞

# 第4回 SR 産業利用関連技術国際会議

千川 純一 (会議企画委員会, 兵庫県立先端科学技術支援センター)

ヨーロッパの科学技術の風土が急変している。基礎科学に専念してきた欧州連合の大型放射光施設 ESRF を昨年10月に訪問、産業利用部門の新設には驚いた。

「だれが産業利用部門を設けたのですか」という質問に、ペトロフ所長は答えられ

「私が設置を決めた。基礎研究だけでは社会へのインパクトが弱い」

ドゥーセ産業利用部門長は企業を訪問し、「放射光で何が出来るか」を説明し、また、企業の要望を聞く運動を展開、現在33社が放射光を利用している。

硬 X 線の利用のため ESRF に出資した13ヶ国 (現在15ヶ国) は、自国の放射光施設を真空紫外・軟 X 線専用にして高輝度化し、新設もすべて真空紫外・軟 X 線専用とした。日本では SPring-8 の完成で PF の硬 X 線の利用を止めるなど全く考えられない、さすがヨーロッパで厳格に棲み分けると感心したものでした。

ところが、今回行ってみると、様子が一変している。ESRF に専用ビームラインをもつスイスは自国に 1 GeV 級の真空紫外・軟 X 線用の放射光施設を建設する計画を1990年頃から進めてきたが、それを2.4 GeV に変更し大型化した。ドイツの ANKA も 1 GeV から2.5 GeV に変更して完成した。つまり、硬 X 線まで利用できるよう波長範囲を広げて産業界の利用と医学応用を自国でできる態勢

にした。

そこで、前記の ESRF の産業利用部門長のドゥーセ博士と ANKA の所長ザイレ博士をお招きし、放射光施設の戦略、最近の成果、現状と将来展望について語ってもらい、国内の研究者に産業利用研究の実例を示していただく国際会議を企画し、産業界での放射光技術の普及と高度化、新分野の発掘を目的として、「第4回放射光産業利用」国際会議が播磨科学公園都市、先端科学技術支援センターで2月18日に開催された。

この会議は、第1回を兵庫県立先端科学技術支援センターが完成した平成5年に「こけらおとし」として開催、その後隔年に、このところ毎年の行事となっている。

## 産業利用が急増する ESRF

ESRF はフランス、グルノーブルの民間研究所です。なぜ産業利用研究が必要か。その理由は、(1)参加国の政府から要求、(2)SR スタッフの研究を新分野に発展させる、(3)追加収入をはかる。このため新設された調整役 ICO (Industrial Coordinator Office) は明確なビジョンをもって、産業界と内部スタッフとの仲介をし、無駄な競争をさけて、効果的に研究を推進している。

工業的利用の実例としては、製薬のための蛋白結晶構造解析、シリコンウエーハ表面汚染の X 線蛍光分析、材料

の三次元トモグラフィ、繊維の構造解析、材料の応力歪解析などがある。

シリコンウエーハの表面汚染不純物は集積回路の集積度が高まるにしたがって深刻な問題となり、金属元素に対する必要な分析感度は、集積回路が $0.15\ \mu\text{m}$ ルールとなる2001年には $2\sim 30\times 10^8\ \text{atoms/cm}^2$ で、これは放射光X線蛍光分析で達成されている。さらに、2003年には $2\sim 15\times 10^8\ \text{atoms/cm}^2$ 、2010年には $0.07\ \mu\text{m}$ ルールで $10^8\ \text{atoms/cm}^2$ の感度が必要と予測され、しかも大直径化、直径30 cmのウエーハの表面蛍光X線分析に取り組み、このため、CNET-France Telecom とほか2社が専用ビームラインを共有している。

材料トモグラフィには、シリコン結晶の非対称反射で平行にしたX線ビームが用いられる。被写体の縁がプリズムの役割をし、わずかに進行方向を変える屈折X線により輪郭が強調された透過像が得られる。分解能は $10\ \mu\text{m}$  ( $1\ \mu\text{m}$ も達成可能)で、X線をよく透過するウレタンフォームに圧縮応力をかけながらその中の気泡の大きさの変化をリアルタイムで観察して、コントラストはX線の吸収によらないことを示した。

この手法は、SPring-8の兵庫県ビームラインでも既に実施されており、午後のセッションで神戸製鋼の中山博士が鉄鋼のひび割れの観察結果を報告した。ESRFでは女性の背骨(骨粗鬆症)、炭化珪素粒を混入した強化アルミ(省エネルギーのため自動車の軽量化材料)、雪塊(なだれの子知)、1 cmの厚さに切り出したコンクリートなどの内部を観察している。新幹線トンネルのコンクリートの寿命予測ができる可能性がある。

セメントは19世紀初めに発明されたが、凝固の過程は複雑で多くの中間相を経て起こるので、まだ解明されていない。ESRFでは、特殊用途のコンクリートを開発するために、凝固の過程のその場解析もX線回折法でSchlumberger Cambridge ResearchとBirkbeck College社が行っている。

繊維のX線構造解析の例も紹介された。蜘蛛の糸は、本来、非常に強く、もし太くすることができれば明石大橋を吊ることができるという。太さ $2\ \mu\text{m}$ の放射光ビームを使って蜘蛛の糸の構造を解明し、これをモデルにして、強力な繊維の開発にDuPont社などが取り組んでいる。

このようにESRFに参加した企業33社の代表的な放射光利用が紹介され、産業界の利用が急速に広がっていることが示された。その推進には産業界と研究者をつなぐ仲介役が不可欠で、今後、ICOを一層充実する。

#### 高集積度光システムの産業化を目指す ANKA

ANKAは、カールスルーエ市に原子スケールの世界を開こうという意気込みで、“Angstrom Karlsruhe”から命名された。その基本技術は放射光によるLIGAであり、新分野「マイクロ光学」「マイクロ流体工学」の構築を目

指し、期待される製品は超小型分光器、マイクロデバイス、超小型ポンプ、バルブ、センサーなど。

LIGAは、半導体のリソグラフィLithographie、メッキ技術Galvanoformung、鋳型成形技術Abformungの頭文字から名付けられたもので、放射光の平行なX線を用いてミクロン幅の切りしろで加工できる。これまでカールスルーエには放射光源がなく、ボンやベルリンの放射光施設を利用して試作を続けてきた。

ファイバー通信、ファイバー光学の分野では半導体レーザー、ファイバー、レンズ、ミラーなどの光部品が数ミクロンの大きさ、しかも、これらを極めて精密に配置する必要があり、その作業は容易でない。LIGAはリソグラフィ技術でこれらの部品を一体として製作してしまうもので、20世紀最大の発明である半導体集積回路が膨大な数の部品の配線作業を解消するために開発されたのに似ており、21世紀を創造する生産技術に発展する可能性がある。試作品の例として、大きさ1 cm ぐらいの可視光、赤外分光器、レーザー光源、レンズ、ファイバー等を搭載した光学ベンチ、光通信用ヘテロダイン受信器、距離計などが写真で示された。LIGAは細い溝が深く切れる特長を利用して複雑な構造を一体物として作ることができるので、大きさ1 cm以下の加速度計、2つのモーターを持つジャイロスコープなど、複雑な構造をもつ試作品が紹介された。

このような新産業分野を発展させるために、放射光源が不可欠であり、試運転を開始したANKA光源は、周長110 mの蓄積リングで、電子エネルギー2.5 GeV、エミッタンスは $41\ \text{nm}\cdot\text{rad}$ です。合計9本のビームラインが2000年夏までに完成、その内訳は、3本がクリーンルーム環境で終端する深溝X線リソグラフィ用、4本が硬X線利用(X線分光学、蛍光X線分析、X線回折、構造生物学)、1本が赤外線用、1本はマックスプランク協会が金属薄膜の研究に使用する。

完成後は民間の営利企業、ANKA株式会社がこの放射光施設の所有者となり、産業界の顧客に対しビームタイムの販売と依託分析サービス、マイクロマシンの生産、独自の開発研究を実施し、その経営にあたる。

#### 楽しむ

イベントは楽しくないと人が集まらない。何を楽しむか、「楽しさ」の中身は急変していて、最近では高水準のものがうける。楽しむうちに、自然に「放射光による地域振興」の目的が達成できるのが理想で、それには会議を盛り上げる最先端の研究の発表が必要、国内から4人の専門家に40分講演を戴いた(表1参照)。

その場観察：高輝度SR光源の出現によりX線散乱・回折法、X線定在波法、X線吸収分光法、光電子分光法を用いて高温、高圧、高磁場、光励起などの環境下でその場観察が可能となり、マクロな物性のミクロの起源が解明できる。その事例として、非晶質セレンの光励起融解(Pho-

表1 第4回SR産業利用関連技術国際会議プログラム

- |                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) Applied and industrial research at the ESRF<br>—Policy and recent developments—<br>Jean Doucet (ESRF, Grenoble)                              |
| 2) Microfabrication and other<br>Synchrotron Radiation Applications at ANKA<br>Volker Saile (ANKA, Karlsruhe)                                   |
| 3) Frontiers in Materials Science: Recent Advances in In-Situ<br>Synchrotron Radiation Research<br>Hiroyuki Oyanagi (ETL)                       |
| 4) Synchrotron Radiation Analysis of Nanoelectronics Materials<br>Masaharu Oshima (University of Tokyo)                                         |
| 5) Observation of Cracks in Structural Materials by Refraction<br>Contrast X-ray Imaging using SPring-8<br>Takenori Nakayama (Kobe Steel, Ltd.) |
| 6) Applications of the LIGA process at Sumitomo Electric<br>Industries<br>Yoshihiro Hirata (Sumitomo Electric Industries)                       |

ton melting) や高温超伝導の起源の XAS による研究を紹介。その場観察は生産現場でも重要と思われた。

ナノエレクトロニクス材料評価：電子素子の微小化に向かう21世紀に放射光はどのように貢献できるか、講演者自身の研究をベースに解説。エネルギー分解能  $E/\Delta E = 16000$  の光電子分光を PF で実現し、これに X 線定在波法、EXAFS 構造解析も加えて、 $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ,  $\text{S}/\text{GaAs}$  の界面構造と各原子層の電子状態を解明、さらに 0 次元量子効果による光・電子・スピンを包括した量子ドット素子への展望。放射光なしでは不可能な研究の紹介でした。

構造材料の割れの観察：構造材料の腐食や割れによる損失は GNP の 2~3% に達する。また、省エネルギーを目指

す車両、船舶、航空機の軽量化のため、材料強度を上げると、必ず割れが起こりやすくなる。強い材料の開発には割れやボイド(空洞)の起点と進行のその場観察が決め手になる。前述の平行 X 線による屈折 X 線撮像によって非金属介在物、応力腐食割れ、合金鋳物中のボイドなどが明瞭に観察された。今後の研究が期待される。

**LIGA プロセス応用開発**：ANKA は光部品の集積化に挑戦するのに対して、医療、生産現場のニーズに対応して、医療超音波診断の高分解能トランスデューサの生産、細管内の検査、修理等を分担するマイクロマシンを機械的・電気的に連結するマイクロコネクタ、高分解能・高感度のマイクロ光電子増倍アレイ、ハードディスクの記録密度を向上するヘッド微動アクチュエータなど、試作や実用化に成功。マイクロロボットが散乱した米粒を避けて移動するビデオも紹介された。その背景には小型放射光源用の高感度レジストやマスクの開発がある。

**同時通訳**：国際会議の「楽しさ」を阻むのは言葉の問題です。今回は、同時通訳で進行し、海外からの講演も日本語で聴くことができ、また、国内からの講演者には日本語で思う存分に語って戴き、海外からの出席者には通訳の英語で聴いてもらった。「通訳は明解で、日本語の講演もエンジョイした」と外国人の評価も高い。実際、通訳は前日に講演の 2~3 倍もの時間を掛けて講演者と打合せをするので、中身を理解した上で通訳され、講演者が話し忘れたことも補足されて、ごく自然に聞くことができる。専門外の研究を知るのに効果的で、楽しめます。また、広い視野で自分の研究の位置づけをしたい若手研究者の方も、今回は一層 Informative, Interesting, Impressive な内容の企画をしますので、御出席下さい。

## ＜研究会報告＞

# 第6回 UVSOR ワークショップ

繁政 英治, 下條 竜夫 (分子研 UVSOR)

2000年3月13日, 14日の両日, 分子研において第6回 UVSOR ワークショップが開催されました。以前, UVSOR では利用者の成果発表会を主目的として UVSOR 研究会を毎年開催していたのですが, 放射光学会年会在各施設の合同シンポジウムの機能を果たすようになったため, ワークショップと名前を改め, 放射光利用に関する技術的な課題や学問的な展望を, UVSOR の年次計画・将来計画

を意識しながら議論しています。本年は, 主に PF, SPring-8, HISOR, 電総研そして UVSOR を利用して原子分子を測定対象とした実験を行っている研究者を招いて, 「放射光を用いた原子分子研究の現状と UVSOR での将来の展望」というテーマで行われました。ちなみにこれまでの UVSOR ワークショップは, 「放射光とレーザーを併用した分子科学の展望」「放射光赤外線利用ワークショップ」