



## 「軟 X 線光学と技術」国際会議

佐々木 泰三

大阪大学基礎工学部 〒560 豊中市待兼山町 1-1

Soft X-Ray Optics and Technology 「軟X線光学と技術」という国際会議が昨年(1997)の12月8~11日、西ベルリンで開催された。主催は SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) と BESSY (ベルリン放射光研究所) で、共催がベルリンの Fritz-Haber Institut と Brookhaven 国立研究所の放射光施設 NSLS である。組織したのは BESSY 所長の E.-E. Koch とゲッティンゲン大学の G. Schmahl である。

軟X線の定義ははっきりしていないが、ひろく解釈すれば 0.1~5 keV くらいが含まれるらしい。一昔前の常識からすれば、ここは「光学技術」が手も足も出ない厄介な領域で、「軟X線の光学」などという概念はなかったに等しい。こういう国際会議が開かれるようになったのは応用物理学の一分野としてこれが認知される程度に、この10年あまり目ざましい進展があったからで、その背景には、(1)シンクロトロン放射、(2)レーザー・プラズマとプラズマによる軟X線レーザー、(3)軟X線天文学の急速な進歩がある。

すべて単一会場の小規模会議で参加者150名くらい(?)、日本からは筆者を含めて4名が参加した。セッションは口頭発表が以下の12、ほかにポスターが半日と、番外で R. Coisson (パルマ大) による挿入型光源の理論に関する4時間の講義があった。セッション名は、(1)真空紫外・軟X線光源、(2)高輝度シンクロトロン光源、(3)軟X線用鏡、(4)X線天文衛星用装置、(5)シンクロトロン放射用軟X線測定技術、(6)真空紫外・軟X線光学系、(7)多層膜 I、(8)多層膜 II、(9)軟X線走査顕微鏡、(10)微細加工とゾーン・プレート I、(11)同 II、(12)軟X線の測光と検出。

論文数は講演63(うち招待12, 表1参照)、ポスター21, 計84で、題目別では光源16, 光学系とその応用48, 測光・検出法14, その他4である。

軟X線の光源の主流は電子加速器とプラズマであるが、その主力はアンジュレーターを中心とする挿入型光源とレーザー励起プラズマになりつつある。その先には軟X線レーザーという大きな開発課題があるが、そこに至るアプローチにやはりこの二つの手法の延長、つまり

表1 招待講演一覧

講演者	所属	題目
P. Jaegle	南バリ大 (仏)	プラズマ光源とX線レーザー
K. Wille	ドルトムント大 (独)	光源加速器の設計
T. Sasaki	阪大 (日)	干渉性放射光の評価
S. N. Kulipanov	核物理研 (ソ)	ノボシビルスクの軟X線光源
V. Saile	DESY (独)	軟X線ビームライン用鏡: 一般論と損傷
B. Aschenbach	天体物理研 (独)	紫外・X線天体観測衛星用斜入射望遠鏡
D. Rudolph	ゲッティンゲン大 (独)	X線光学研究の現状
T. W. Barbee	ローレンス・リバモア研 (米)	多層膜X線光学
P. Dhez	LURE (仏)	放射光およびプラズマ診断用多層膜
H. Aritome	阪大 (日)	電子線によるX線光学素子の製作
V. Bögli	半導体技研 (独)	電子線微細加工: ゾーンプレート製作
M. Kühne	PTB (独)	軟X線強度測定

自由電子レーザーと再結合過程のプラズマという可能性が見えてきたのが面白い。しかし、この会議の中味としては、これらのやや遠い未来の話は主題とはならず、光源技術の現状についての実験的報告が主であった。

この点がたぶんこの会議の主催者のねらいで、従来からX線レーザーとか挿入型光源については理論や提案ばかりが先行し、地道に実験データを積み上げて理論を検証していく努力が不足していた。筆者の報告ではアンジュレーターの輝度が実際には電子ビームの発散角  $\sigma_x, \sigma_y$  によって著しく低下することを定量的に示し、次世代の光源加速器が低エミッタンスを要求されるという常識を実証的に裏付けたが、その他にもX線カメラでビーム断面の  $\sigma_x, \sigma_y$  を測定し、さらに強度の角度分布を理論とくらべて  $\sigma_y'$  を決め、したがってタテ方向エミッタンス  $\epsilon_y$  を実験的に決める方法 (Riehle)、軌道位置の変動を2本の直列ワイヤで10~20  $\mu\text{m}$  の精度で測定する方法 (Wolf)、X線顕微鏡像の安定化法 (Rahback)、フォ

トレジストにホログラムをつくり、これから空間的にコヒーレントな軟X線成分を見積もる方法 (Rahback) など、地元ベルリンと米国ブルックヘブンのグループから手がたい報告があった。

光学系としては鏡・結晶・回折格子・多層膜・ゾーンプレートなどの素子技術と、その応用としてのモノクロメータ・偏光子・望遠鏡・顕微鏡などの話題が取り上げられた。X線用の鏡は放射光・レーザー・宇宙の三分野に共通の開発課題で、非球面の製作と評価、表面あらかの制御と測定、汚染除去技術、熱負荷・放射線損傷対策、有望な材料の開発・評価、光学定数の測定などたくさんさんの難題を抱えている。HASYLAB の V. Saile が 3.3~5.3 GeV で行なった豊富な実験データをもとに、将来の高輝度光源が鏡技術に要求する課題のすさまじさを詳細に語ったが、このなかで日本の PF グループ (佐藤・柳原・三国ら) の着実な成果、たとえば SiC の光学定数の測定、汚染除去法などを高く評価していたのが心強かった。欧米とくに西ドイツでは銅やアルミなど熱伝導のよい金属にカニゲン・メッキしたものを多用しており、これを用いた非球面の製作技術は日本のかなり先を行っている。とくに 1990 年代の打上げを目標に EC 各国で製作中の X 線天文衛星 ROSAT のための技術開発は大へん活発で、大型の軟 X 線用非球面鏡や多層膜・ゾーンプレートなどの技術が英・独・仏・蘭の諸国で急速に進んでいるという印象を受けた。HASYLAB では局所的な高密度照射の効果を調べるミニウィグラー・ビームラインに赤外線カメラ・マイケルソン干渉計・ブラッグ反射計を用いて鏡や結晶・多層膜などの変形や温度分布の測定を行なっている。熱膨張係数がゼロのガラス Xerodur はレーザーや放射光のような大負荷には不適当だが、天体望遠鏡には有用で、Zeiss が 1~4 m 級の巨大な放物面や楕円面をつくり、レーザー干渉計を用いた  $\lambda=10$  nm の精密座標測定法を開発して形状検査をやっている。一方米国のグループ (Stanford 大, Lockheed 等) はダイヤモンド加工の溝を消すためのラッカー塗装鏡面の開発を報告している。

高反射率の軟 X 線分光・結像素子としての多層膜の開発はこの領域の光学技術の将来に大きな希望を与えるものとして注目をあつめており、この会議のハイライトでもあった。相かわらず Lawrence Livermore の T. Barbee が進歩をリードしているが、ヨーロッパの水準も上がってきている。報告されたデータを表 2 にまとめてあるが、? は筆者の記憶から脱落した部分でお許しを願う。Rh/Si による反射率 80% は目下の新記録だが、今

表 2 多層膜反射率測定結果一覧

報告者	領域 (eV)	材 質	反射率 (%)	備 考
T. W. Barbee (米)	100~400	Mo/Si	$\geq 20$	斜入射
	15~100	"	$> 45$	直入射
	92	Rh/Si	80	40~100 eV 可
	90~280	Rh/C	$> 40$	1 k~3 keV 可
P. Dhez (仏)	80.5	Nb/S	~45	偏光子 (P~0.9) 計算値 45%
C. Sella (仏)	280 (CK $\alpha$ )	Ni/C	25	計算値 45%
		W/C		
B. L. Evans (英)	1.5 k (AlK $\alpha$ )	Pt/C	40~50	
P. Houdy (仏)	280	W/C	17	GaAs 上
R. C. Catura (米)	280	?	40	
	410	?	30	
	1.5 k	?	6	

後の見通しについて Barbee は来年 (1987) 中に 400 eV で 20%、数年後に 600 eV で 20% はいくであろう、また完全結晶を仮定すれば 8 keV で 91% も可能になると答えていた。Mo/Si 膜を 2 枚使った単色光器と Be フィルターで 60~120 eV の分光実験も試みられ、8.5% の分解能で強度  $5 \times 10^{10}$  ph/s を得て AlL $_{2,3}$  吸収スペクトルを測定している。Mo/Si や Rh/C で多層膜回折格子も製作され、1.3 keV 付近の MgK 吸収の EXAFS も見えるという。理論的には 1,400 くらい分解能は可能ということであった (Barbee)。

多層膜の応用に関する Dhez の報告では、45° 反射利用の偏光子、レーザー・プラズマ診断用ストリーク・カメラ、ROSAT 等天文衛星ウォルター型望遠鏡、軟 X 線レーザー用共振器、軟 X 線顕微鏡用フェブリー・ペロー板、ラジオグラフィ・アンジオグラフィ用 2 波長反射板等の例が紹介された。

ゾーン・プレートの製作については有留のグループの仕事が高く評価されているが、顕微鏡・望遠鏡・分光系などへの実用化では Göttingen 大学を筆頭とする欧米のグループが日本に数歩先行している。他にもまだ紹介すべき話題を多数書き残したが紙数の制限で割愛する。

(1987年6月1日受理)