

SRI '97 特集

## 放射光研究50年の回顧と展望

佐々木 泰三

高輝度光科学研究センター\*

A Prospect and Retrospect at the 50<sup>th</sup> Anniversary of Synchrotron Radiation

Taizo SASAKI

JASRI

The early through recent history of synchrotron radiation research in Japan, since the initial efforts in 1962, is reviewed. Following a period of parasitic use of an electron synchrotron, Japanese users attempted to build a dedicated soft X-ray source, which was completed in 1974. It opened up a new era of synchrotron radiation research. The Photon Factory, a dedicated X-ray source commissioned in 1982, provided a much wider research area as well as a number of technical innovations, among which insertion devices brought the further prospect of significant improvements in the properties of sources. As a consequence, the new concept of a light source oriented towards full exploitation of insertion devices, or the idea of third generation sources, was created. The motivations and developments which led to SPring-8, a third generation Japanese X-ray source that is currently commissioned, will be reviewed briefly.

## 1. はじめに—INS-ES まで：1947—1962

1947年の4月にニューヨークのGeneral Electricの研究所でPollockと数人の共同実験者が70 MeVの小さなシンクロトロンで放射光を初めて観察した。1997年はそれから50年に当たり、世界のあちこちで記念の催しがあった。日本で開催されたSRI-97でも会議の中で放射光研究の歴史を回顧する特別セッションがあり、日・米・欧のそれぞれの歴史に関する特別講演が企画された。この報告は其中で筆者が担当した日本関係の部分講演の内容に沿って書き直したものである。この講演の要旨は関係者の要請によって、会議のProceedingsの刊行に先立ってJournal of Synchrotron Radiationの放射光研究50周年記念号に掲載されている<sup>1)</sup>。本稿の内容は大部分これと重複するが、会場での講演内容に若干の補足や変更を加えてある。

放射光の「発見」は思いがけない出来事のようにも伝えられるが、実は決して偶然ではない。そのいきさつを伝える関係者の報告には多少の混乱があり、1970年代にはPhysics TodayのLetter欄に相次いで当時の「目撃者」の「真相」を語る投稿が掲載された。この出来事の真相に迫った第三者の詳細な記述が文献<sup>2)</sup>に出ているが、その中

でこの時の実験のリーダーであったGEのPollockと、早くから放射損失による電子加速器の加速の限界を指摘していたソ連のIwanenkoの間にあった生々しいやりとりも再現している。

そもそも、速度と加速度が直交する場合の高エネルギー電子の発光という古典電磁気学の問題は、実は原子スペクトルの起原や原子構造のモデルの探索とも密接に関連して、既にこのときを更に半世紀溯った19世紀末の物理学者の興味の対象であって、一応の答えはすでに出ているのである<sup>3)</sup>。ベータトロンやシンクロトロンが発明された時はこの事は当然発明者達の関心事であった。この特別セッションに87歳という高齢で参加して格調高い講演をしたJohn Blewettはその2年前、同じGEの研究所で100 MeVのベータトロンを使って放射光の観測を試みたが、軌道の収縮は確認したものの、電磁波を直接見るという点では成功しなかった。もしこの時の実験がうまく行っていれば、これは今日のように「シンクロトロン放射」ではなく、「ベータトロン放射」と呼ばれたかもしれないのである。Pollockたちは自分達が初めて見たこの光をソ連の同僚の先見性に敬意を表して「Iwanenko-Pomeranchuk

\* 高輝度光科学研究センター；連絡先 〒134-0087 東京都江戸川区清新町1-1-34-101  
TEL 03-5696-7725 FAX 03-5696-7726

放射」と呼んでいた<sup>2)</sup>。

さて最初からいささか脱線したが、話を日本に戻すことにしよう。1947年、日本は未だ社会も大学も敗戦の衝撃から立ち直っていなかった。終戦後間も無い45/46年の冬、理研・京大・阪大に全部で4台あったサイクロトロンが悉く破壊・廃棄され、それと共に占領軍当局は一切の加速器の建設・運転を禁止した。この政策は日本の素粒子原子核の研究者に大きな衝撃を与え、暫くの間この分野の研究者達は理論と宇宙線に研究課題をシフトするか、物性研究に転向するしかなかった。日本最初の実用的な電子シンクロトロンが動き出すにはそれから15年が必要であった。しかし占領軍による加速器の禁止や廃棄の政策はアメリカの物理学界にも波紋を起し、これに対する補償の提案や、政策の修正を求める声が有力なアメリカの物理学者の間に起こった。その結果日本の物理学界に当時一台も無かった大型のヘリウムの液化機を寄贈するという提案がA. Compton から茅誠司に伝えられ、これが今日の東大物性研設立のきっかけになった。一方加速器の禁止の解除にはサイクロトロンの発明者であるE. Lawrenceが精力的に占領軍を説得し、講和条約締結前に解除の方針が決定した。その結果、日本側でもこの状況を踏まえて加速器を中心設備とする全国共同利用研究所の設立の気運が高まり、1955年の東京大学原子核研究所の設立となった。この事情は「核研20年史」<sup>4)</sup>に朝永振一郎が詳しく紹介している。後に我が国の放射光研究の初期にその舞台となった二つの研究所はこうして未だ占領中であった1950年代前半の日米の物理学界の民間交渉の中で気運が出来たものであった。

## 2. 高エネルギー加速器に寄生した放射光利用 —INS-SOR: 1962-1974

核研の電子シンクロトロン (ES) は1956年に着工、61年12月に完成した。それに先立って東北大学で小型の電子シンクロトロンが運転に成功し、放射光の観測記録も学内誌に報告されているが、これは試験機であって、高エネルギー実験にも放射光実験にも利用はされなかったもので、ここでは取り上げないことにする。核研 ES は後にエネルギーを1.3 GeV に増強したが、完成時のエネルギーは750 MeV であった。この建設計画に関しては素粒子研究者の間でかなり厳しい議論があり、それは主として $\pi$ 中間子の発生装置である1 GeV クラスの電子シンクロトロンを今更作ったところで、パークレーでパイオンが発見されてから既に10年以上も経過しているのに、先端的な物理の研究は出来ないのではないか、という懸念であった。ES を推進した人々の意見は、仮にその通りだとしても、戦後10年の素粒子実験、加速器技術の空白を考えると、いきなり最前線を目指して冒険するよりも、一旦これで実験技術の蓄積を計り、次の段階で物理学の最先端を目指すのが現実的なアプローチだ、というものであった。

放射光の利用をこの時点で計画していたのは大阪市大の小塩高文と筆者とであったが、小塩は既にシンクロトロンの完成に先立って、この光源から得られる軟 X 線の分光強度の計算を公表しており、その内容は核研の所内報と1962年春に大阪大学の豊中キャンパスであった物理学会の素粒子実験分科会で発表された<sup>5,6)</sup>。小塩の目的は軟 X 線宇宙放射の測定に用いる分光器や検出器の較正に放射光を標準光源として利用するというものであった。一方、筆者の方はフォトン・エネルギー10 eV 以上の極紫外領域で固体の反射率測定をスパーク放電の線スペクトル光源でやっていて、強度の不足と測定点が少ないことに限界を感じていた。特に20 eV 以上では実用的な光源がこれ以外にはないので、放射光は極紫外光学の最大の弱点であった「光源問題」を一気に解決する魔法のように思われた。1962年にはESの共同利用に向けて「ES委員会」が組織され、利用申請が始まった。ES委員会は小塩・佐々木の提案を受けて、「放射光利用」が核研の当初計画に無かった「番外」プログラムであったにもかかわらず、正規の利用課題として認知した。1963年には放射光取り出し口が設置され、少ないながらビームタイムの配分があり、他の実験のビームタイムにもパラサイト、つまりスケジュールや運転モードの決定権はないが、マシンが動いている限り光を取り出すのは自由、という条件で実験を認められた。

このような核研側の対応には背景があり、それは10年前の1950年代初期に溯る。50年代前半にはコーネル大学のTombouliau と Hartman のグループが320 MeV のシンクロトロンを使って放射光軟 X 線の分光測定を始めていた<sup>7)</sup>。ちょうどこの頃、2人の阪大の教授菊池正士と沢田昌雄がコーネル大学に滞在していた。後に菊池教授は1955年に核研の初代所長として着任し、建設の指揮を執ることになる。沢田教授は X 線結晶学・X 線分光学の専門家で、Tombouliau 教授と親交があり、放射光の応用の可能性には強い関心を持っていた。菊池教授が核研建設のために大阪中ノ島から自分の研究室のスタッフを大量に引き連れて田無に移る時、沢田教授が後にシンクロトロンの建設を担当することになる山口省太郎に「シンクロトロン作ったら孔一つ開けときなはれや」と念を押したという。ESの完成直後に小塩・佐々木の陳情部隊が現れて、孔を開けてくれと頼んだ時、核研側は全く驚かず、矢張り来たか、という顔をしていた。

放射光利用者は核研所内では「SX」というグループ名で呼ばれていたが、INS-SOR という団体を組織して利用者の結集を図り、経費の調達、設備の建設・管理、利用者への世話、マシンタイムの配分、ES委員会へのオブザーバー派遣、核研、物性研等関係機関との交渉、会員への情報連絡等、核研での放射光利用に関するすべての仕事を取り仕切った<sup>8)</sup>。この組織はそれから35年も経った現在も未だ活動しているが、1963年の結成から物性研に「軌道放射物性研究施設」が開設された1975年までの12年間、日本の

放射光研究はすべてこの NGO とでもいうべき自主的な団体の活動であった。公的な支援を受けないこのような自主的組織の活動には自ずから限界があり、然るべき国の機関の関与の方策は当初から検討されてはいたが、核研側では加速器本来の利用目的の外にあるということで、また物性研にしても施設が所外にあり、しかもこれまた当初の計画にはなかった未知の研究課題であったことが障害になって、これだけの年月がかかったのである。

そのような限界にもかかわらず、INS-SOR の活動の成果は間もなく大きな衝撃を国内だけでなく、世界に巻き起こしたが、そこまで来るのは一本道ではなかった。

62年は小塩・佐々木の二人三脚で核研の関係者と ES 委員会に放射光利用実験を課題の一つとして認知するよう働きかけ、一方全国の関連研究者に参加を呼びかけて INS-SOR 結成に向けて組織の準備をし、物性研の短期研究会を開催した。現地では熊谷寛夫高エネルギー部主任の立ち会いでビームダクトと実験室の設置場所を探して歩いた。

1963年、いよいよ ES の共同利用が開始され、6 月には光取り出し口の付いた新しいドーナツが設置された。そのころ INS-SOR の発足があり、予備実験とビームライン建設の実行部隊（佐々木・山口・井口）が編成された。このチームが最初にやったのはビーム・モニタリングで、加速器の軌道の様子や安定性を確認して置こう、というものであった。放射光の御利益もその通り、Schwinger の理論も正しいだろうが、実際は泥沼で、とても実用になる代物ではあるまい、止めた方がいいよ、という忠告は何人もの先生方から聞いた。やってみるとなるほど、そう簡単ではない。特に初期のシンクロトロンは不安定で、21.5ヘルツで繰り返し軌道に乗るビームの強度がその都度違うばかりでなく、加速途中でのビームの振り落とし、位置の変動、形の変化は絶えず起こっており、加速の最後に高周波加速を止める時の軌道の収縮もはっきり見える<sup>9)</sup>。分光器の出口スリットにこの光を結像させて光電測光をやろうとすればこれは全部ノイズとなるだろう。予備実験を終わって翌年、初めてのビームタイムに軟 X 線モノクロ（借用）を据え付けて光電測光を試みたが、この惧れはまさにその通り厳しい現実となった。我々はここで方針を切り替え、1 年後の次のマシンタイムに備えて東京教育大光研の古い斜入射写真分光器を井口裕夫が整備調整して核研に持ち込み、65年3月に再び INS-SOR の連合チームで分光写真測定を試みてやっと成功した<sup>10-12)</sup>。その間、64年の夏に東京と京都で Congress for Optics という大きな国際会議があり、これに参加した Tomboulian と Hartman を物性研に呼んでサテライト・ミーティングをやった<sup>8,13)</sup>。コーネルの経験をたっぷり聞いて、大いに勉強させてもらったが、バラサイトの苦勞はどこも同じ、というのも強く印象に残った。コーネルはこれからどうするのか、と聞いたら、Tomboulian 教授は「もう俺達は疲れ果てた。あんな

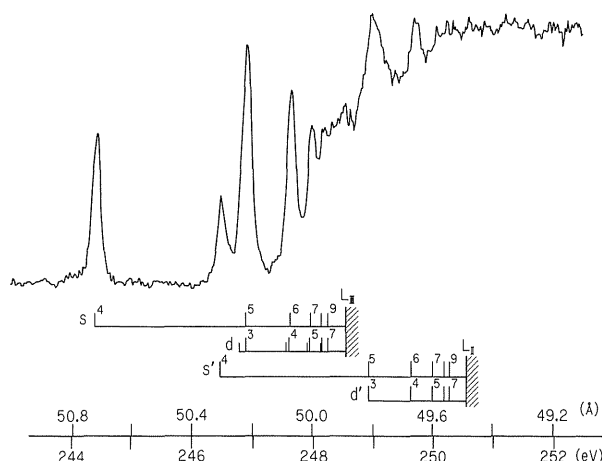


Figure 1. Rydberg series of the argon  $L_{2,3}$  absorption spectrum (Nakamura et al., 1968)<sup>16)</sup>.

苦勞は二度とやりたくない。我々は撤退する」との厳しい宣言であった。

この間には63年に、アメリカで NBS の Madden 達による希ガスの自動電離領域の美しい吸収スペクトル写真が公表され、これが放射光の真価を証明する世界最初の成果となった<sup>14)</sup>。INS-SOR の最初の実験はそれから1年半ほど遅れた65年3月のことで、NBS の実験の追試と使用している分光器の性能試験も兼ねて同じ希ガスのスペクトルを測定した<sup>15)</sup>。結果は見事に一致したので、我々は分光器の性能を確認できたことに満足して気体の実験を打ち切り、この成果は論文としては公表しなかった。この実験ではまた各大学のグループが分担で試料を作成して持ち寄り、金属、イオン結晶薄膜の吸収スペクトルを撮った<sup>10,11)</sup>。NBS の240 MeV に対して核研が750 MeV とエネルギーが高かったので、INS-SOR は NBS では見ることの出来ない200 eV 以上の深い内殻の吸収帯を見ることが出来た。その結果、INS-SOR はこの最初の実験に引き続いて更に多数の新しいスペクトルの観測を報告した。Fig. 1はその一例で、Ar の L 吸収帯のリドベルク系列を始めて観察したものである<sup>16)</sup>。当時、固体の価電子帯の吸収スペクトルに関しては主な特徴はバンド・モデルで解明できることが分かり、内殻励起に関して同じ手法が適用できるのかどうか、関心が持たれていた。この実験に参加した大多数の人は放射光が強いという利点の上に、内殻励起を用いる固体分光のメリットを価電子帯での固体の光物性の延長線上で考えていて、始状態のエネルギーの幅が狭く、波数の分散が起こらないことで、終状態を精度よく特定できるだろう、というような単純な期待をしていた。最初の結果のいくつかはこうした予想に反して、内殻固有の未知の光過程があることを示唆していた。その後の展開を含めて、内殻励起に始まる光と物質の相互作用は遥かに多彩であった。その結果多くの予想は覆され、励起過程のダイナミズムも含めて多電子系の相互作用の複雑さを背景に、全く予

想外の現象が次々と発見されて、原子・分子・固体のすべてに亘って分光学は面目を一新した。我々は黄金の国ジバングを求めて航海しているうちに、アメリカ大陸に上陸してしまい、探検の目的を切り替えざるを得なくなったのである。

### 3. 専用光源を求めて—SOR-RING：1965-1975

1960年代前半のNBSとINS-SORの成功は衝撃波となって世界中に伝わり、この時点では欧米で専ら分光学の研究者の間で放射光研究の開始に向けて気運が高まった。日本では最初の成果の報告の後、INS-SORグループへの参加者が急激に増えた。その頃にはINS-SORでは単一のグループで全てのビームタイムに臨む初期のやり方は止めて、テーマ毎にグループを編成してビームタイムを分割していた。グループ数が増えればグループ当たりの時間の配分は減ることになる。時間が短くなれば勢い大きなテーマ、野心的なテーマは企て難い。INS-SORは急速ビームラインを3本まで増やしたが、焼け石に水であった。その上、INS-SORの利用できる大部分のビームタイムが窮屈極まるパラサイトの時間帯であったことが更に問題を深刻にした。運の悪いグループは事実上実験が全く出来ないという事も起こった。高エネルギー実験のグループが検出器の校正のために長時間に亘って低電流運転をやったり、頻繁にビームを止めたりしても、パラサイトに苦情を言う権利はなかったのである。自前の光源が欲しいというのはINS-SORの悲願になった。

こうして1965年秋には岡山大学での総会で、INS-SORは300 MeVの専用蓄積リングを建設する、という決議を採択して、物小委、物研連に支援を求めた。「蓄積リング」はアイデアが提案されてから既に10年近く経っていたにもかかわらず、当時はまだソ連とフランスで試験用の小型リングが僅かに動き始めただけで、電子と陽電子の衝突実験の有効性については高エネルギー物理学の専門家の間でも意見が分かれていた。熱心な推進者のいたスタンフォードやハンブルクでさえも実用機の建設はまだ承認されていなかった。しかし放射光の光源という観点で見れば、シンクロトロンと比べて性能上の優位は圧倒的である。エネルギーが一定していて、スペクトルやビームの位置、形状、大きさが時間的に変化する心配がない。電流値で見ても安定性は比較にならない。その上大電流を蓄積することが出来、光の強度も大きい。蓄積リングの技術的可能性が既に証明されていたこの時点で、光源として新しく作るならばシンクロトロンを作るのは意味が無い。しかし一方、もし日本でも高エネルギー物理学のグループが衝突型の蓄積リングを作ることになれば、ドイツやアメリカがそうしたように、我々もそこに放射光施設を併設する、というアプローチも検討に値したであろう。蓄積リングを作る計画が日本にあるのかどうか、核研に来ていた高エネルギー実験の専門家達に意見を聞いた。しかし当時の日本の素粒子実験

の次期計画の主流はプロトン・シンクロトロンと決まっていた、衝突実験を支持する人は居なかった。やむを得ずINS-SORとしては既存の電子加速器から電子ビームの供給を受ける形で自前の光源を新設する、という方針を採択し、66年に線型加速器を持っていた東北大核理研に物小委を通じて光源の併設を申し入れた。この努力は3年越しの交渉を経て結局不調に終わった。核研からの好意的な申し入れで蓄積リングの建設を含む特別設備費の申請が提出されたのはその直後、1969年の夏であった。幸いこの申請が認められて1970年には文部省の予備費で建設準備が開始され、本予算は71年度から3年間にわたって認められた。

この専用光源「SOR-RING」の建設に当たっての核研高エネルギー部のスタンスは、建設の実質的責任はすべて利用者グループINS-SORにあり、核研は求められれば助言はするが、手は出さず、責任も負わない、しかし高エネルギー部の職員が個人的に研究活動として建設を手伝うことは妨げないというものであった。この建設にはINS-SORの有志が全期間を平均して常勤者5名、非常勤で5名前後が参加し、その主力は20代と30代前半の放射光ユーザーであった。このチームには加速器物理学や技術の専門家は一人も居なかったが、核研高エネルギー部の助言と指導を受けながら任務を完遂した<sup>17,18)</sup>。最初のビーム蓄積は1974年12月15日未明であった。Fig. 2は最初の蓄積の際に見た光、Fig. 3は蓄積成功直後の建設現場での建設



Figure 2. First light from SOR-RING, December 1974.



Figure 3. The team SOR-RING, December 1974. The first row from left to right: Watanabe, Miyahara, Nagakura, Ishiguro, Sato; the second row from left to right: Yamakawa\*, Kitamura, Tsujikawa\*, Yamaguchi\*, Katayama\*, Sasaki.  
\*High Energy Physics Division, INS.

チームである。

SOR-RINGの完成と共に、1975年4月に物性研に軌道放射物性研究施設が開設されて神前熙教授が施設長に就任し、それまで任意団体INS-SORの管理下にあった核研の放射光施設はすべて物性研に移管された。このリングの当初設計仕様は核研ESから300 MeVで電子を取り出し、300 MeVで蓄積することになっていたが、1975年に高周波の加速空洞と電源を科研費で調達した後、電源に余裕のある範囲でエネルギーを上げ、1976年から380 MeVで共同利用のための定常運転に入った。その後歴代の物性研の加速器チームの努力によって改良が重ねられ、500 MeVで200 mAの電流を入射蓄積し、最大電流値でも10時間以上の寿命を保証し、年間2,000時間の運転により、毎年100人以上の利用者に光を供給した。東大が柏の新キャンパスで第三世代軟X線放射光施設の次期計画を推進する事になって、この第二世代の幕開けとなった光源は1997年3月で使命を終わり、22年間中断無く続けられた共同利用のサービスを停止した。新旧の世代の交代を前にして、1994年12月に物性研はSOR-RING 20周年の記念式典を行い、回顧と展望の記録を残している<sup>19)</sup>。

#### 4. X線光源への展開—フォトン・ファクトリー：1972-1982

SOR-RINGの建設は専用光源を待望していた内外の放射光研究者に大きなインパクトを与えた。国内では生命科学・材料科学の有力研究手段となる高輝度X線の発生方法を巡ってX線結晶学の研究者の間に放射光への関心が高まり、高良和武、千川純一を中心とする研究グループが70年代の初期に選択肢としての放射光と回転陰極を持つ従来型のX線管とを比較検討した。その結果、放射光

の優位性が確認され、2.5 GeVの光源加速器の建設が提案された。この計画は1974年秋、SOR-RING完成とはほぼ時を同じくして学術会議から政府に勧告され、その結果つくばの高エネルギー物理学研究所に放射光実験施設、「フォトン・ファクトリー」が実現したが、その経緯については最近高良和武初代施設長が物理学会誌に詳しく書いているので、ここで繰り返すのは避けることにする<sup>20)</sup>。

一方、この年アメリカではスタンフォード大学の蓄積リングSPEARが活動を始め、いきなりJ/ψ粒子を発見してノーベル賞を獲得するという幸運なスタートを切った。一方ハンブルクでも同規模の蓄積リングDORISが運転を始め、タッチの差でアメリカにノーベル賞を攫われはしたが、2週間後に同じ粒子のより精密な測定を発表して世界を驚かせた。この二つのリングには最初から放射光施設が併設されていて、専用光源ではなかったが、早くもEX-AFSのような革新的な構造研究の手法の有効性を実証して、X線放射光の大きな将来を予感させるスタートを切った。放射光利用が分光学でスタートを切った時は結晶学研究者の反応は鈍かったが、ここに来て放射光X線の巨大な潜在的可能性は世界中で注目され始めた。アメリカの科学アカデミーは1976年に放射光が科学技術の未来にどれだけの貢献をなし得るか、そのための専用光源の建設の意義について包括的な調査と提言を行った<sup>21)</sup>。その中では従来の放射光研究が素粒子研究用の加速器に寄生する形で行われてきたため、これが研究の発展の妨げになってきたことを強調し、その時点では稼働している専用光源が東京の300 MeVの蓄積リングただ一つしかないことを指摘して、専用光源の早急な実現を呼びかけている。こうして既存の高エネルギー加速器に寄生する形では放射光はその力をフルに発揮することは出来ない、という認識が一般的になった。X線の専用光源加速器の計画は日・米・欧でほぼ同時に発生し、結局80年代にダレスベリーのSRS、つくばのフォトン・ファクトリー、ブルックヘブンのNSLSが相次いで活動を開始することになった。この認識が正しかったことはその後の放射光研究が再び大きな活性化の時期を迎え、物質科学・生命科学・産業や医学への応用等の広範囲で多彩な分野で新しい対象や方法を生み出し、今日の隆盛が実現したことで明らかである。

フォトン・ファクトリー(PF)がどれだけの貢献をしたか、これを現時点で総括するのはまだ早いかもしれない。PFは引き続き発展を続け、今後の活動に対する期待も大きい。しかし1996年、PFは外部の委員会に依る評価を受け、この委員会に対して包括的な報告書を提出した。これは一般に向けて公開された報告ではないが、その最近までの活動の全般を概観するには最も良くまとまったレビューである<sup>22)</sup>。従ってここではその内容を繰り返さず避けて、PF、或いは放射光X線の出現で日本や世界の放射光研究に何が新しく生まれたのか、何が特に進んだのかを振り返ってみたい。

INS-SORの時代、放射光は分光学の世界であった。波長領域は極紫外・軟X線。この領域にはそれまで光源が殆ど何も無かった。従って見るもの聞くものすべてが新発見で、初めて見る未踏の世界の光景に人々は興奮し、戸惑い、やがてそこに光と物質中の電子が織り成す無数の新しいドラマを次々に発見し、理解した。

PFの時代は勿論X線が主役に躍り出たが、それ以前でも任意の波長を選択できないという制約を別とすれば、光源が全く無かった訳ではない。それ以前にも人々はX線を使って結構沢山の仕事をし、X線結晶学は既に体系として成熟した学問であった。放射光の出現で一番劇的に変化したのはむしろその圧倒的な強度による測定時間の短縮、或いは動的な観察手法の出現であった。大きな分子量を持つ蛋白質結晶、あるいは複雑な構造を持つ鉱物の構造解析などは従来の光源でも研究が無かった訳ではないが、放射光の出現で初めて現実射程距離に入ってきて、系統的な研究の対象となったとあって良い。一方白色性もXAFSやトポグラフのような局所構造の研究手段を初めて生み出した。高温高圧下の構造相転移の研究などもその強度と白色性の両方で成り立つ研究対象である。更に著しい変化は、放射光X線の出現で物質構造の探求は従来は長距離秩序を持つ結晶に限られていたのが、表面、界面、生体高分子の活性中心のような局所構造、さらに非晶質、液体、溶液、格子欠陥に到るすべての凝縮相が対象として研究課題に入ってきたことである。

また波長選択性が無制限に拡大されたことによって、多くの元素の複数の吸収端を利用する吸収あるいは位相のコントラスト映像が産業・医療への応用技術として急速に展開しつつある。半導体の微小回路素子やマイクロマシンの製造・加工への応用、技術開発は軟X線の時代に始まっていたが、X線領域への拡大によってますます多彩な応用が展開している。

一方分光学の方もX線への領域の拡大によって様々な新技術、新分野が開けてきた。それは分野も対象も手法もさまざまで、個別に論ずる余裕はないので、不完全は承知の上で表にしてTable 1にまとめておいた。

この表にも一部含まれているが、ここで特に強調しておきたいのは、この時期以後、放射光測定技術の高度化と、それが生み出す様々なニーズに応じてX線光学の目覚ましい展開が始まったということである。X線領域というのは元来屈折率が極めて1に近く、反射率が極端に小さいため、レンズや鏡を用いる幾何光学的操作で結像系を構成するのは困難であった。X線光学というのはコンセプトとしては殆ど成立していなかったと言って良い。結像系として従来から使われていたのは主に全反射凹面鏡かフレネル・ゾーン・プレートである。しかし全反射鏡を用いる光学系は大きな収差を伴う扱いにくい光学系だという制約があり、一方フレネル・ゾーン・プレートは製作が著しく困難で、大量に製作できる素子ではない。ところが1980

年代以後、放射光X線の出現と共に急激な技術革新が起こり、状況は一変した。特に軽元素と重元素を交互に積層して作る多層膜の素子は直入射でも高い反射率を達成し、カークパトリック・バエズのような古典的な望遠鏡の光学系がX線領域に導入される時代になった。一方、鏡そのものの製作・評価技術も格段の進歩を遂げ、非球面の製作と評価技術が進み、表面の形状誤差を極めて小さく制御する製造技術が普及した。これは放射光技術の成果というよりも、コンピューターの進歩に伴う半導体微細素子製造技術への激しいニーズに応じて技術革新を達成した、精密加工技術全般の進歩に負うところが大きい。いわば放射光技術にとっては強力な追い風であった。

偏光の発生と検出・制御も放射光の出現によって可能になった新しい光学技術である。後述するアンジュレーターによって純度の高い直線偏光・円偏光の発生が可能になっただけでなく、光学素子による偏光の測定や制御も可能になり、偏光測定は放射光研究全般の中で重要な地位を占めるようになった。偏光素子は軟X線領域では多層膜素子を用い、X線領域では高品位の単結晶のブラッグ回折波の複屈折を利用して実現できる。またこの技術は全波長領域を隈なくカバーするところまでは行っていないが、方法的には基礎が確立されたと言って良い。この結果、偏光子・検光子・4分の1波長板といった偏光の測定、評価、制御に必要な素子は一応出そろったことになる。

専用光源の出現が最も大きな技術革新を齎したのは何と言っても加速器の性能である。つまり素粒子実験という他目的の制約を離れて、光源としての最適化を図る自由を獲得したことで、光源加速器研究者は高い輝度と安定度を達成するために努力を結集し、大きな成果を上げた。最大蓄積電流500 mA、寿命50時間、といった数字は今日例外ではない。光源の位置、形状、大きさの制御も光源の安定性の重要な一部である。この点での性能の向上には何よりも光源そのものの観測が不可欠で、ビーム・モニタリング技術の進歩も著しいものがあつた。初期には100  $\mu\text{m}$ 程度であった位置決め精度が今日では1  $\mu\text{m}$ の桁になっている。同時に輝度の向上には最も大きな効果を発揮するビームのエミッタンスの減少にも加速器設計・制御技術の進歩が貢献した。

## 5. 挿入光源の導入：1980-1992

蓄積リング本体の進歩と並んで、第二世代の専用光源時代が齎した最大の変革は挿入光源の出現である。アンジュレーターのアイデアは既に1947年のGinsburgの論文に出ている、図らずもこれは放射光の初観測と同時である<sup>23)</sup>。従って、1997年は挿入光源の歴史にとっても50周年であった。このアイデアが放射光の発生に実用化されたのは1978年、スタンフォードでHalbachとWinickによって永久磁石の装置が開発され、試験されたのが最初である<sup>24)</sup>。電磁石でも超伝導磁石でもない、永久磁石の磁気

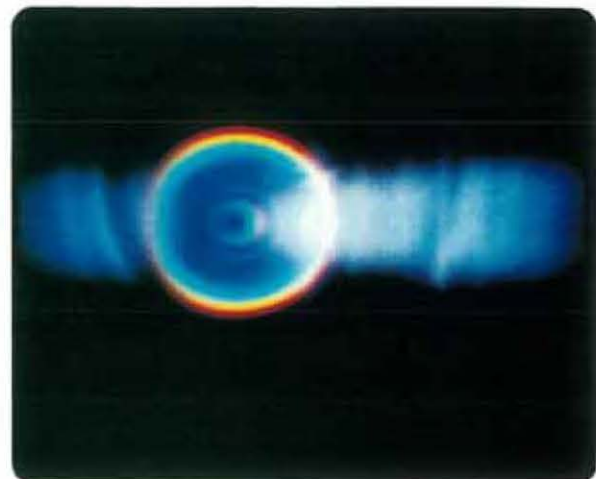
Table 1. Novel Opportunities Created or Activated by Synchrotron Radiation

Target	Processes or Structures	Methods and Techniques
Atoms	Photoionization Photoelectric processes of inner shells Total and partial photoabsorption cross sections Relaxation of inner shell holes Electron correlation Angular distributions of photo electrons and asymmetry factors Post-collision interactions Delayed onset of ionization cross-sections and giant resonances Multiply charged photoions Double photoionization	Absorption spectroscopy Photoelectron spectroscopy Photoion spectroscopy Fluorescence and excitation spectra Auger electron spectroscopy Multiple coincidence spectroscopy Multi-color spectroscopy (lasers) Aligned atoms Mass spectroscopy (time-of-flight) Linearly or circularly polarized light
Molecules	Photoabsorption Total and partial cross-sections Photoionization Photodissociation Shape resonances Super-excited states Molecules on top of crystals Site-specific excitations Site-specific dissociations State-specific excitations Chemical reactions	Absorption spectroscopy Photoelectron spectroscopy Photoion (fragment) spectroscopy Fluorescence (excitation) spectroscopy Multiple coincidence spectroscopy Mass spectroscopy (time-of-flight) Photodesorption Linearly or circularly polarized light Oriented molecules
Condensed Matters (Crystals, Liquids, Solutions, Amorphous solids)	Energy band structures Fermi surfaces Surface states Surface reconstructions Physical & chemical adsorption Magnetism (Bulk, thin films, domain structures & boundaries) Imperfections in crystals (dislocations, point defects, color centers, impurities) Local structures (surfaces & interfaces, enzymes, intercalations, crystal growth, strain around imperfections, etc.) Phase transition dynamics Chemical reactions on catalysts Materials under extreme circumstances (High pressures, high or low temperatures, hydraulic or uniaxial pressures, magnetic or electric fields)	Absorption spectroscopy Reflection spectroscopy Photoelectron-yield spectroscopy Photoelectron spectroscopy (angle-integrated or angle-resolved) Fluorescence (excitation) spectroscopy Spin analysis of photoelectrons Linear or circularly polarized light Circular dichroism Magnetic circular dichroism Multiple coincidence spectroscopy XAFS (absorption, fluorescence, yield, Auger, time-resolved) XANES (NEXAFS) X-ray diffraction analysis Small-angle scattering Debye-Scherrer ring Diffuse scattering Inelastic scattering (Compton, Raman, Magnetic, Nuclear-resonant, etc.) Interference, Standing wave Photoelectron diffraction Diffraction topography
Living substances, Biology & Medicine	Structure of macromolecules 3D arrangements and motions of proteins Active centers of enzymes Structure & function of muscles and membranes Effects of radiation upon living substance, mutation, & lethal dose Diagnosis of circulatory defects, cancers Environmental hygiene	X-ray diffraction analysis XAFS & XANES Small angle scattering X-ray radiography X-ray computed tomography Subtraction angiography Photon activated therapy (proposed) X-ray microscopy X-ray phase contrast microscopy X-ray fluorescence analysis
Engineering & Techniques	Materials research Non-destructive inspection of materials or devices Fabrication of microstructures X-ray lithography LIGA Characterization of natural or synthetic crystals & surfaces Crystal growth from liquids, formation of dislocations or defects Magnetic alloys & films Chemical reactions, & catalysts Structure of enzymes Pharmaceutical research Characterization of optical devices (Mirrors, gratings, crystals, filters, windows, polarizers, capillaries, concave lenses, Fresnel zone plates, Bragg-Fresnel plates, multilayers, quarter-wave plates)	X-ray diffraction topography X-ray radiography X-ray CT X-ray microscopy XAFS & XANES Photoelectron spectroscopy Auger electron spectroscopy X-ray fluorescence analysis Circular dichroism Magnetic circular dichroism Photodesorption (Photon-stimulated desorption) Reflectance measurements Polarization measurements Plane-wave topography Interferometer Speckle pattern Holography

回路の発明こそがこの仕掛けを加速器の外部から「挿入」して安定した加速器の運転と共存することを容易にしたのであって、この発明によってアンジュレーターは新型の光源として急速に普及した。PF では当初から超伝導磁石を用いて軌道の一部で波長の短い X 線を発生するウィグラーを導入する計画であったが、この新しい展開に対応して、更にアンジュレーターの導入をも視野に入れた設計変更を行い、軌道を当初の円形から挿入光源用の長い直線部を2箇所、中程度の直線部を4箇所持つ長円形に変更した。その結果、1983年に共同利用に施設を公開した時点でウィグラーとアンジュレーターも同時に完成し、定常運転を始めた。アンジュレーターは多数回の直線軌道上の発光を重ねあわせる干渉性の光源で、放射光のスペクトルは狭帯域に集中し、通常の放射光に比べて遥かに高い輝度と平行性を実現し、コヒーレンスも不完全ながら利用できる。

挿入光源実用機の導入に先立って、PF では10周期の試験用小型アンジュレーターを試作し、1981年に田無のSOR-RINGに挿入して東大物性研・教養学部のチームと共同で、性能の評価を行った。その結果アンジュレーター発光の輝度、スペクトル、角度依存性、偏光特性などが理論通り実現できること、加速器の運転への影響も小さく、容易に補正できることが確認された<sup>25,26)</sup>。Fig. 4はこの実験に用いたアンジュレーターをSOR-RINGの直線部に挿入した状態(b)と、この時観察したアンジュレーターの虹(a)である。

PFで最初に動き出したアンジュレーターのビームラインはBL-2(60周期、磁場周期長:6 cm)で、一次光のピークは400 eV、ほぼ窒素のK吸収端にあった。このビームラインで行った原子・分子の光電離の実験では田無のSOR-RINGでやった同じ種類の実験に比べて、データ蓄積の速度は3-4桁上昇した。このビームラインで行われた数多くの実験の中から、代表的な実例を二つだけ示す。Fig. 5はシランSiH<sub>4</sub>のSi K吸収帯励起による光電離に伴って生成する分子断片イオンの質量分析スペクトルである。価電子帯、L吸収帯で生成する分子イオンには水素が残留するが、K帯励起では完全にバラバラになって裸のSiイオンだけが観測されている<sup>27)</sup>。これは深い内殻励起によって生ずる分子の終状態が極めて不安定で、大きな化学的活性を持つことを示す典型的な実例である。この実験は4次の高調波で行われたもので、アンジュレーターでは基本波だけでなく、高調波も十分実用になるという一例でもある。Fig. 6はN<sub>2</sub>のK殻光電離によって放出される光電子の角度分布を「形状共鳴」のフォトン・エネルギー419 eVと、それより遥かに高い447 eVで測定したものである<sup>28)</sup>。この実験ではアンジュレーターからの直線偏光を用いて光電子と光イオンのコインシデンスをとり、自由気体の分子軸を放射光の直線偏光の方向に仮想的に「整列」させて、分子軸に対する光電子の角度分布を見ること



(a)



(b)

Figure 4. (a) A rainbow of undulator radiation at SOR-RING operated at 200 MeV, December 1981. Two faint extra rainbows at the center are produced by fringing fields of dipoles, and stay even if the undulator magnets are removed (Kitamura et al., 1982)<sup>25)</sup>. (b) The 19-pole test undulator inserted into a straight section of SOR-RING.

が出来る。図の i) は形状共鳴の起こるフォトン・エネルギー、419 eV、ii) は共鳴に遠い447 eVでの光電子放出の角度分布である。この実験で、「形状共鳴」では近傍原子による終状態電子波の散乱で、波面の対称性が大きく乱れていることが裏付けられた。

PFは後にトリスタンの6.5 GeV入射リング「AR」に実験室を拡大したが、このビームラインの一つに楕円偏光多重極ウィグラー「EMPW」が設置され、円偏光X線の実用化に初めて成功した<sup>29)</sup>。通常の放射光では軌道面の上下に軸を外して観測すれば、それぞれ回転の向きが反対の円偏光を見ることが出来る。しかしこの方法では十分な円偏光度を得ようとすると、強度を一桁以上失うことになる。これに対して直交する磁石列を持つアンジュレーターの光は軌道の軸上で得られ、強度も桁違いに大きい。これを用いた磁気コンプトン散乱の実験は強磁性体のフェルミ面の測定に威力を発揮した<sup>30)</sup>。またARに導入されたもう一つのアンジュレーターは狭い磁極間隙を実現するため



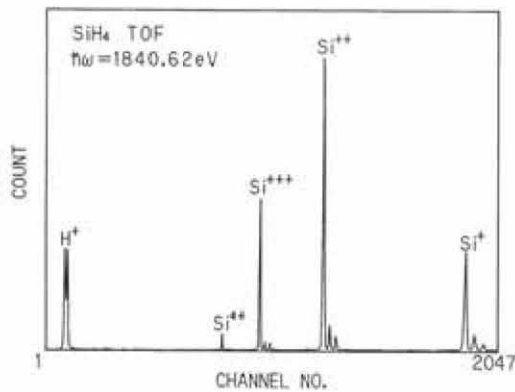


Figure 5. Time-of-flight mass spectra of molecular-ion fragments produced by Si K-photoionization of  $\text{SiH}_4$ . Ions are dominantly bare silicon without traces of hydrogen bonded to Si. Satellites observed at higher mass sides are due to Si isotopes (Shigemasa et al., 1990)<sup>27)</sup>.

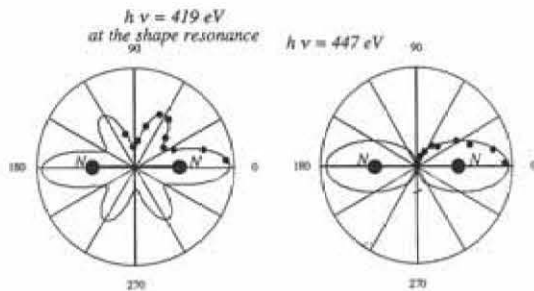


Figure 6. Angular distributions of K-shell photoelectrons against the molecular axis (angle  $0^\circ$ ) of nitrogen i) at the shape resonance, 419 eV, with the final-state symmetry parallel to the axis, and ii) at 447 eV, far beyond the resonance. The final state i) shows dominant  $f$  symmetry, whereas ii) shows a simple  $p$  type symmetry<sup>28)</sup>.

に、磁石列を真空中に封入して、基本波で14.4 keVの強力な直線偏光を発生し、核磁気共鳴散乱に應用されて威力を發揮した (Fig. 7)<sup>31)</sup>。

PFではまたアンジュレーターの特性の評価を系統的に行い、ビームのエミッタンスが輝度やスペクトルに及ぼす影響を詳細に測定した。第二世代の蓄積リングは一般に100 nm rad以上のエミッタンスを持つものが多く、軌道の安定性を重視してかなり保守的な設計になっていた。PFのエミッタンスは当初設計では400 nm radとかなり大きく、後に改造して130 nm radとなったが、次の改造では27 nm radに改良されることになっている。Fig. 8は運転の初期、1983年から84年に行った400 nm radの条件でのBL-2の基本波ピークでの絶対強度測定の結果で、この当初設計では理論値と比較すると約2桁近い輝度の損失が生じていることが示された<sup>32,35)</sup>。このような評価の結果、アンジュレーターがその本来の輝度を実現するためにはエミッタンスはどんなに大きくとも10 nm rad以下にする必要があることも明らかになった。

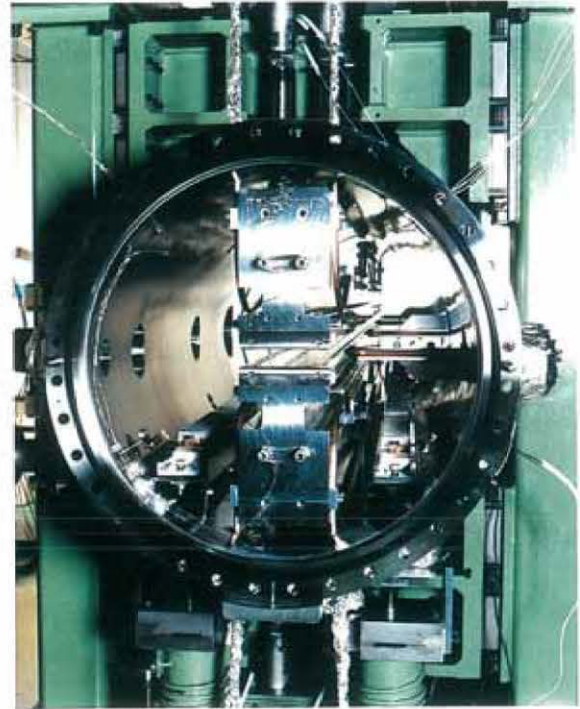


Figure 7. In-vacuum undulator of the 6 GeV TRISTAN AR-ring at the Photon Factory (Yamamoto et al., 1992)<sup>31)</sup>.

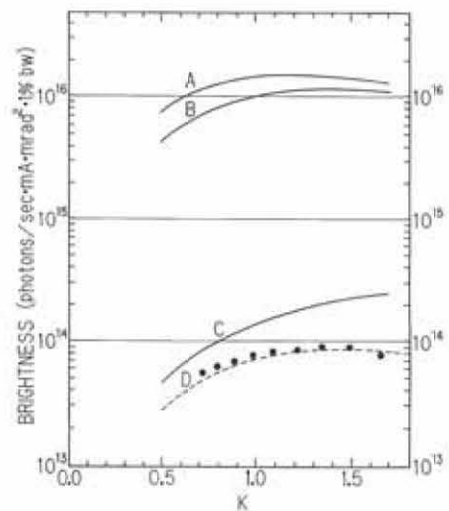


Figure 8. Calculated (A, B, C) and observed (D) peak brightness of 6 cm  $\times$  60 period undulator at BL-2, Photon Factory, against the field parameter K. Curve A is plotted by assuming a low-emittance limit ( $<10 \text{ nm rad}$ ), B is corrected for a finite aperture, and C is the value for the actual emittance of PF-ring, 400 nm rad. The absolute brightness (D) was deduced from the photoelectron count of helium as the target gas (Sasaki, 1986)<sup>35)</sup>.

## 6. 第三世代の放射光に向けて—SPring-8の夢：1985-1997

アンジュレーターの開発とその実用化によって、放射光の発生と利用の技術には新たな展望が生まれた。第二世代の不利なエミッタンスの条件下でも、アンジュレーター・

ビームラインの明るさは抜群で、多くのユーザーはこの数少ないビームラインに殺到した。高い分解能、コインシデンス実験を目指すユーザーは早くも明るさが不足することに悩み始めた。非弾性散乱実験や構造相転移の実時間観測を目指すグループももっと強力な光源の必要を感じ始めた。従来のような偏向電磁石からの発光に依存する放射光利用のコンセプトから発想を転換して、リング全周にわたって多数の長い直線部を導入し、アンジュレーターの発光を最大限に利用する、という第三代放射光への探求が1985年頃から全世界で始まった。第三代の放射光施設は円形加速器の軌道に多数の直線部を導入する上、アンジュレーターの基本波のフォトン・エネルギーが通常の放射光に比べて低くなるため、X線領域では5-10 GeV、軟X線領域では1.5-2 GeVという大型のマシンになる。アンジュレーター発光を中心に加速器を設計する限り、大型化は避けては通れない。更にアンジュレーターの優れた性能をフルに発揮するためには加速器のエミッタンスが数 nmrad の領域に来るような磁石配列 (lattice) の設計を要求される。しかもそれは安定性の要求と両立するものでなければならない。この厳しい加速器設計への要請は暫くの間、世界中の加速器設計者を深刻に悩ませた。しかし国際協力の成果もあって予想外に短い期間に解決が見出され、今日では世界中で多くの第三代放射光加速器がかつての心配や大騒ぎが嘘のように順調に動いている。

我が国では従来 PF を中心に研究活動を展開していた利用者が中心となって第三代放射光 X 線光源の実現に向けて、1985年頃から利用計画の策定と、同時に実現の方策を模索し始めた。施設の候補地としてはつくばで高工研に併設する案と、兵庫県の西播磨テクノポリスの敷地内に新設する案とが提案されたが、利用者グループとしては関東・関西の区別なく一体の研究活動をして、実現可能な計画がスタートした時はそれに合流するという合意の下で準備を進めた。結局この努力は科学技術庁の計画として取り上げられ、1,089億円の予算で日本原子力研究所・理化学研究所の「共同チーム」が播磨科学公園都市に建設する SPring-8 プロジェクトとして実を結んだ。1989年に建設を開始し、1997年に完成する運びとなったことは周知の通りである。幸い多くの関係者の努力のおかげで光源加速器の立ち上がりは順調で、97年10月の研究開始から数ヶ月の現在、既にいくつかのビームラインは活発に実験成果を上げ始め、大きな未来を予感させる挑戦的な研究手法の開発も進んでいる。この第三代放射光 X 線施設の計画から完成までには12年の歳月が経過しており、その間の世界の放射光研究の水準も飛躍的に向上したが、我が国の放射光研究のポテンシャルは極めて高い。先行したグループやアルゴンヌからの後れを取り戻すのに大した時間はかからないだろう。

一方第三代軟 X 線光源については東大物性研の次期計画案をもとに、千葉県柏の新キャンパスに新施設を建設

するという提案が出されているが、未だ実現の見通しは明らかでない。大は小を兼ねる、というのが初期の放射光施設のあり方であったが、現在ではそれぞれ領域を分担して住み分けを図るのが合理的だ、というのが世界の考え方の大勢である。SPring-8 と並んで車の両輪を構成する第三代軟 X 線光源の早急な実現が望まれる。

## 7. いくつかの教訓

放射光科学は分光学で口火を切ってから35年、科学と技術の全分野に展開し始めて20年の若い研究分野であるが、その進歩は極めて早く、拡大と発展のエネルギーは今なお大きい。その理由は何か？ 言うまでもなく放射光がカバーする電磁波の領域はそれまで一切地上では発生の手段の無い、暗闇の領域であった。しかもそこに物質内の電子の束縛エネルギーの大部分が分布し、またその波長は物質の化学結合や原子・分子の大きさに近い。光と物質の相互作用、物質の構造を解明する鍵を握る光が此処に集中的に含まれている。放射光研究は従って今後も長期に亘って現代科学技術の未踏領域に迫る鍵である。

一方、放射光は加速器による発光であって、高エネルギー物理学がそれ以前に蓄積した高度な加速器技術の存在によって、この分野は長い技術的準備の期間を待たずにいち早く活動を開始することが出来たのであって、その恩恵は計り知れないものがある。しかしまた、既存の高エネルギー加速器のコンセプトにとらわれず、放射光光源として独自の最適化の努力をしたおかげで更に大きな発展の道を歩き出したのも事実である。その原動力は専らユーザーのニーズとイニシアチブであって、研究手段が他人の恩恵として天下りに降ってくることばかり期待しては進歩は望めない。歴史を振り返ってみると、こうしたユーザーのイニシアチブと光源や光学系・測定器系の製作者・設計者の創意・工夫がうまく噛み合った時に最も大きな成果が上がるのである。これまでの経験を基に今後を占うとすれば、こうした利用者と、上流にいる光源・光学研究者とのより密接な協力と相互の刺激がますます発展の鍵を握るようになるであろう。

以上のことを一つの大きな教訓として今後のことを考えてみると、利用者のイニシアチブのない行政主導、或いは採算性重視の放射光施設の計画はうまく行かないのではないか。特に公開型の施設については次のことを忘れてはならぬ。それは、洋の東西を問わず、ユーザーというのは極めて貪欲で勘定高い客である、ということだ。多数の施設が競合する状況では、ユーザーは性能の優れた施設、ユーザーに親切な施設、自分にとって使いやすい施設を鋭く選別して流動する。ユーザーに見放された施設は極めて厳しい状況に立たされるだろう。放射光の世界でも今後国際化の波が押し寄せ、日本もその一環を担って、輸入輸出の両面で国際的な役割分担を求められるだろう。そうならばユーザーというのは、千里の道を遠しとせず、世界中何処

へでも出かけて行くものである。

放射光研究の収益性はどうか？ 放射光研究はいずれは産業技術の一環として成長を遂げ、その一部では収益を生む時代も来るであろう。しかし少なくとも現在の状況はこうだ。我々が今歩いているのは30年前と変わらぬ茨の道で、放射光研究は楽な仕事ではない。しかもその努力の報酬の大部分は知的資産の蓄積である。長期的な視野に立った研究開発の一環としてはともかく、これを短期的な収益の対象と見るのはリスクが大きい。これが産業として開花するためには、半導体産業全体での劇的な環境変化が必要であろう。

放射光研究は今播磨の SPring-8 の完成で第三世代の真ん中に来たが、第四世代の姿も次第に見え始め、今後急速に次世代へのシフトが始まることになり、研究者の心の準備も要求される。今の放射光が未踏の領域として残している最大の課題は軟 X 線・X 線でのコヒーレンスの達成である。コヒーレントな短波長放射光による分光学・構造研究・映像技術で何が出来るか、これは今後の大きな宿題である。既に第三世代でもアンジュレーターによって部分的なコヒーレンスの利用技術の開発が始まっており、ホログラム、スペックル、位相差顕微鏡等波面の位相情報を利用した近代光学の手法が X 線にも導入されようとしている<sup>33)</sup>。これから放射光研究に参画する若い研究者は量子光学の基礎をしっかりと勉強しておく必要がある。

本稿では日本の放射光研究の歴史を、その始まりに溯って初心を回顧する一方で、今日の状態を生み出した主要な動機と転換点に重点を置いて、いささか駆け足で通り過ぎたが、勿論これは日本のこの分野の公平な、或いは包括的なレビューではない。そのような観点で書かれた歴史については別の文献を参照して頂くようお願いしたい<sup>34)</sup>。

## 参考文献

- 1) T. Sasaki: *J. Synchrotron Rad.* **4**, 359 (1997).
- 2) E.-E. Koch, D. E. Eastman and Y. Farge: *Handbook on Synchrotron Radiation*, Vol. 1a, ed. E.-E. Koch, North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1983, p. 1.
- 3) A. A. Sokolov and I. M. Ternov: *Synchrotron Radiation*, Akademie-Verlag Berlin, 1968.
- 4) 朝永振一郎: *核研20年史*, 東京大学原子核研究所, 1978, p1.
- 5) T. Oshio and M. Sasanuma: *INS-TH No. 43* (1962).
- 6) 小塩高文, 笹沼道雄: *応用物理* **37**, 43 (1968).
- 7) D. H. Tomboulion and P. L. Hartman: *Phys. Rev.* **102**, 1423 (1956).
- 8) 佐々木泰三: *固体物理* **22**, 1007 (1987).
- 9) 佐々木泰三: *応用物理* **3**, 231 (1965).
- 10) T. Sagawa, Y. Iguchi, M. Sasanuma, T. Nasu, S. Yamaguchi, S. Fujiwara, M. Nakamura, A. Ejiri, T. Masuoka, T. Sasaki and T. Oshio: *J. Phys. Soc. Japan* **21**, 2587 (1966).
- 11) T. Sagawa, Y. Iguchi, M. Sasanuma, A. Ejiri, S. Fujiwara, M. Yokota, S. Yamaguchi, T. Sasaki and T. Oshio: *J. Phys. Soc. Japan* **21**, 2602 (1966).
- 12) 小塩高文, 笹沼道雄, 佐々木泰三: *日本物理学会誌* **22**, 285 (1967).
- 13) P. L. Hartman: *Nucl. Instrum. & Meth.* **195**, 1 (1982).
- 14) R. P. Madden and K. Codling: *Phys. Rev. Letters* **10**, 516 (1963).
- 15) T. Sasaki: *Atomic Physics 10*, ed. H. Narumi & I. Shimamura, p. 283, Amsterdam, North Holland Publ. Co., 1987.
- 16) M. Nakamura, M. Sasanuma, S. Sato, M. Watanabe, H. Yamashita, Y. Iguchi, A. Ejiri, S. Nakai, S. Yamaguchi, T. Sagawa, Y. Nakai and T. Oshio: *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1303 (1968).
- 17) T. Miyahara, H. Kitamura, S. Sato, M. Watanabe, S. Mitani, E. Ishiguro, T. Fukushima, T. Ishii, Shigeo Yamaguchi, M. Endo, Y. Iguchi, H. Tsujikawa, T. Sugiura, T. Katayama, T. Yamakawa, Seitaro Yamaguchi and T. Sasaki: *Particle Accelerators* **7**, 163 (1976).
- 18) 佐々木泰三: *固体物理* **23**, 142 (1988).
- 19) SOR-RING 20周年記念, 1994年12月, 東京大学物性研究所.
- 20) 高良和武: *日本物理学会誌* **51**, 879 (1996).
- 21) An Assessment of the National Need for Facilities Dedicated to the Production of Synchrotron Radiation, National Academy of Science, Washington, D.C., 1976.
- 22) 放射光実験施設 フォトン・ファクトリー: 現状と成果, 1997年7月, 高エネルギー物理学研究所.
- 23) V. L. Ginsburg: *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Fiz.* **11**, 165 (1947).
- 24) G. Brown, K. Halbach, J. Harris and H. Winick: *Nucl. Instrum. Methods*, **208**, 65 (1983).
- 25) H. Kitamura, S. Tamamushi, T. Yamakawa, S. Sato, T. Miyahara, G. Isoyama, H. Nishimura, A. Mikuni, S. Asaoka, S. Mitani, H. Maezawa, Y. Suzuki, H. Kanamori and T. Sasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **21**, 1728 (1982).
- 26) H. Maezawa, S. Mitani, Y. Suzuki, H. Kanamori, S. Tamamushi, S. Mikuni, H. Kitamura and T. Sasaki: *Nucl. Instrum. Methods* **208**, 151 (1983).
- 27) E. Shigemasa, K. Ueda, Y. Sato, A. Yagishita, H. Maezawa, T. Sasaki and T. Hayaishi: *Phys. Scr.* **41**, 67 (1990).
- 28) E. Shigemasa, J. Adachi, M. Oura, N. Watanabe, K. Soejima and A. Yagishita: *Atomic and Molecular Photoionization*, edited by A. Yagishita and T. Sasaki, p. 69, Tokyo, Universal Academy Press.
- 29) S. Yamamoto and H. Kitamura: *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**, L1613 (1987).
- 30) N. Sakai, M. Ito, H. Kawata, T. Iwazumi, M. Ando, N. Shiotani, F. Itoh, Y. Sakurai and S. Nanao: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A303**, 488 (1991).
- 31) S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, T. Sugiyama and M. Ando: *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 400 (1992).
- 32) H. Maezawa, H. Suzuki, H. Kitamura and T. Sasaki: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A246**, 82 (1986).
- 33) *Highlights 1994/1995*, p. 6, 1995/1996, p. 5, ESRF.
- 34) T. Sasaki: *Synchrotron Radiation in Biosciences*, eds., B. Chance et al., Oxford University Press, Oxford, 1994, p. 335.
- 35) T. Sasaki: Presented at SPIE Symposium No. 733, Berlin, 1986.