

物性物理からみた加速器

柿崎 明人*

Accelerators for Solid State Physics

Akito KAKIZAKI*

1. はじめに

今年はいんシュタインが特殊相対性理論、ブラウン運動の理論、光量子説と光電効果の理論を発表した「奇跡の年」からちょうど100年目にあたり、現代物理学の100年を記念する行事がいろいろな団体によって企画されている。今から100年前、今日的な意味での加速器も物性物理も生まれていなかった。両者は1920年代の量子力学の形成を経て、理論的にも実験的にも急速に発展した。その間、さまざまな物理現象が量子論の対象として研究され、比熱のインシュタイン模型や強磁性体のハイゼンベルグ模型に代表されるように、気鋭の研究者が現代物理学のさまざまな分野の形成過程に大きく貢献したことは周知の通りである。その中で物性物理は、物質が示す電気伝導、熱的性質や磁性などを原子レベルで理解する学問分野として1930年代までにその基礎を確立したといわれている。一方、加速器はベータトロン、ヴァンデグラフ、サイクロトロンに続いて1940年代にはシンクロトロンが開発され原子核、素粒子実験に用いられるようになった。

物性物理は原子の集合体が示す多彩な性質（物性）の原因を究明するとともに新しい物性を示す物質系を創成する基礎科学であるから、原子の内部構造や原子核を構成する粒子の相互作用を研究する原子核物理や素粒子物理といった学問分野とは対象とする物質が本質的に異なる。物性物理と原子核実験のために生み出されて発展していった加速器とは1950年代までほとんど無縁であった。1960年代以降、加速器が物性物理の中で広く利用されるようになったのは、高エネルギー電子シンクロトロンから放出される電磁波（シン

クロトロン放射）が極めて大きな強度を示すだけでなく、赤外線からX線にわたる幅広いスペクトル分布を持つことが知られ、陽子ビームを使って得られる中性子やミュオンが物質の磁性研究に大きな役割を果たすプローブとして利用できることがわかったことによる。とりわけシンクロトロン放射の光源としての有効性が認められて以来、加速器は物性物理に欠かせない大型実験設備の一つとなった。シンクロトロン放射は「放射光」と呼ばれることが多く、国内だけでも大小含めて現在約20の光源加速器が稼働している。放射光に関する限り日本は加速器大国である。

わが国における放射光の物性物理への利用は、初めての高エネルギー加速器である東京大学（旧）原子核研究所（核研）の電子シンクロトロンを光源として1960年代に始まった。その後、SOR-RING、フォトンファクトリー、SPRING-8など日本を代表する光源加速器を有する放射光施設が作られ、それらを利用して物性研究が盛んに行われ今日にいたっている。この間、放射光の利用は広範な科学分野に広がり、物性物理と加速器との関係も変化してきた。以下ではいくつかの光源加速器をとりあげ、放射光の利用という側面から物性物理と加速器の関係について述べてみたい。

2. 核研電子シンクロトロン

シンクロトロン放射（放射光）が初めて観測された今から約60年前、19世紀の終わりにレントゲンによって発見されたX線はすでにさまざまな分野で利用され、物性物理でも結晶構造解析のために広く使われていた。一方、紫外線とX線の間にある10 eV（約1200 Å）から1000 eV（約12 Å）のエネルギー（波長）を持つ極紫外とか真空紫外あるいは軟X線とよ

* 東京大学物性研究所
Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo
(E-mail: kakizaki@issp.u-tokyo.ac.jp)

表 1 世界の高輝度放射光源施設

施設名 (国名)	エネルギー (GeV)	周長 (m)	エミッタンス (nmrad)	ID 数	備考
ESRF (フランス)	6	844	3.9	38	1993~
APS (米国)	7	1104	8.2	35	1995~
SPring-8 (日本)	8	1436	5.9	38	1997~
Diamond (英国)	3	560	2.5	21	計画中
SSRF (中国)	3.5	396		20	計画中
BOOMERANG (豪)	3	164	22	9	建設中
SESAME (ヨルダン)	2.9	216	16	13	計画中
ELETTRA (イタリア)	2.0~2.4	260	7@2.0 GeV	11	1993~
SSRC (台湾)	1.3~1.5	120	19@1.3 GeV	5	1993~
ALS (米国)	1.0~1.9	197	3.5@1.5 GeV	12	1993~
PLS (韓国)	2.0~2.5	281	12@2.0 GeV	10	1994~
MAX II (スウェーデン)	1.5	88	8	8	1997~
BESSY (ドイツ)	1.7	240	6.1	14	1998~
SLS (スイス)	2.4	288	4.4	6	2001~
CLS (カナダ)	2.5	171	18	12	2003~
SOLEIL (フランス)	2.5	354	3.1	14	建設中
VSX (日本)	1.8	280	8	12	計画中

ばれる領域の光は、物質との相互作用が大きいために大気中での減衰が激しく、観測することが困難であるだけでなく有力な実験室光源もなかった。そのため、1947年に放射光が初めて観測された直後から電子シンクロトロンから放出される電磁波を極紫外・軟 X 線領域 (VSX 領域) の光源として利用することが多くの人々によって検討された^{1,2)}。核研電子シンクロトロン (核研 ES) の建設時 (1956~1959 年) にはすでにそのことが予見されていて、放射光を加速器の外へ取り出すためのポートを ES の真空ダクトに設置することが考えられていた。わが国では、この優れた先見性のおかげで放射光を利用する物性実験が核研 ES の運転開始直後から VSX 領域の物性研究者によって行われ、世界に先んじてさまざまな研究成果が生まれた。得られた実験結果はいずれも物性物理ではほとんど知られていなかった新しい領域に文字通り光を当てることになった。また、核研 ES は物性物理にとって最初の放射光利用実験が行われた場所であると同時に、加速器を利用する共同利用や共同研究の考え方を物性物理の分野の人々に示したという点でも大きな役割を果たした。放射光利用実験の黎明期と核研 ES の詳しい事情については佐々木泰三先生がすでに述べておられる³⁾。新しい光源を求めて努力された人々の熱意と他分野の発展の可能性を考えて適切な対応を示した当時の加速器研究者の柔軟な発想には驚かされる。関係者が書いた回想ないしは記録を見ると、今と

は違った時代の勢いのようなものが感じられて興味深い。

核研 ES では、放射光を利用する実験は VSX 領域の光学定数の決定や加速器から放出される電磁波の強度特性の解析を目的として始まった。そして、VSX 領域の光源としての優れた特性が確認されるや多くの研究者が集まり、VSX 領域の物性物理を中心とした数多くの実験が行われ、この領域の研究が物性物理の発展にとって重要であることを人々に強く印象づけた。核研 ES では、放射光利用実験は原子核実験のパラサイターとして制約がある中で行われた。また、放射光強度の変動が大きいために、多くの実験で光電測光ではなく写真乾板を用いる測定方法が用いられた。しかし、核研 ES で行われた実験は、原子の内殻電子励起スペクトル、軟 X 線吸収や光電子分光による固体の電子構造解析、軟 X 線小角散乱、リソグラフィによる超微細加工など多岐にわたり、これらは今日でも放射光利用実験の主要なテーマとなっている。当時得られた研究成果の中には、アルカリ金属の内殻吸収スペクトルで観測されたフェルミ端異常の研究など、物性物理に大きなインパクトを与えて現在もその価値を失わないものが少なくない。

3. SOR-RING

SOR-RING は当初から放射光の利用を目的として設計・建設された光源加速器である。核研 ES での実

験が軌道にのると共に利用実験の希望者は急激に増え、シンクロトロンよりも安定した放射光を求めるユーザーの声も大きくなった。このため放射光専用光源の必要性が検討され、さまざまな議論を経てSOR-RINGの建設が1971年にスタートした。SOR-RINGには、ユーザーグループが設計と建設の責任を負って整備した光源加速器であるという大きな特徴がある。核研高エネルギー部のサポートがあったとはいえ、加速器に関しては非専門家のユーザーグループが加速器の構成要素である電磁石、高周波空洞、真空、軌道、制御と核研ESから電子ビームを輸送するためのビームトランスポートにいたるまで設計し建設に従事して、わが国最初の電子蓄積リングであるSOR-RINGを完成させた。これは世界でも例がない快挙として国内外でも評判となった³⁾。

SOR-RINGは電子エネルギー300 MeV、蓄積電流100 mA、寿命が1時間の電子蓄積リングとして設計され、運転開始後2年で当初の目標を達成した。建設後も、高周波空洞の更新、真空の改善、電源の改良、ビームモニタと制御系の開発など、光源加速器としての性能向上を目指した改良が加えられた。1997年に運転を停止するときには、SOR-RINGは電子エネルギー500 MeV、蓄積電流500 mA、寿命10時間の光源加速器になっていた。その間、単バンチ運転、電流標準の設定などの試験が行われただけでなく、1981年にはわが国で初めて永久磁石型挿入光源の試運転とアンジュレータ放射の特性評価実験がSOR-RINGで行われた。この成果はすぐさま当時建設中あったフォトンファクトリーに利用され、その後の挿入光源の発展のスタートとなった(図1)。

SOR-RINGは、完成後物性研究所に移管され、核研ESに較べて格段に安定した放射光を利用して物性

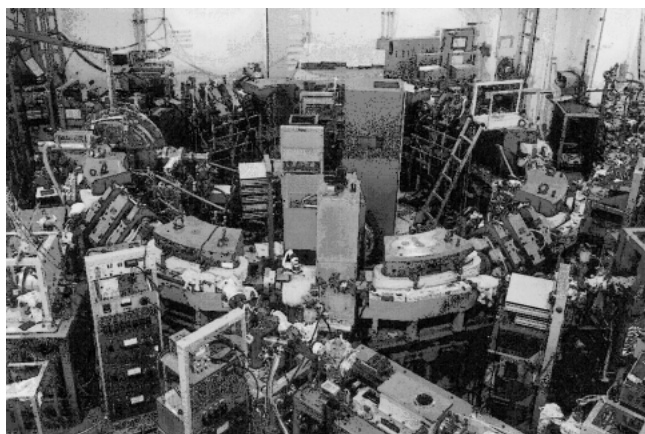


図1 SOR-RING (1974~1997)

実験が行われはじめた。原子物理分野では衝突後相互作用の研究等で大きな成果を得た。放射光を利用する物性研究のための計測器も核研ESの写真測光中心のものから電子計測機器に変わり、光電子分光、吸収反射分光による物質の電子状態の研究のほか、生物試料の照射実験などが活発に行われた。1980年に初めて行われた固体の共鳴光電子分光実験は、遷移金属化合物、稀土類金属化合物やモット絶縁体など、電子相関効果が物性に重要な役割を果たす物質系の電子状態解析に利用され、放射光を使って得られる光電子スペクトルが物質の光学的性質だけでなく輸送現象や磁性についても重要な情報を与えることを示した。今日、光電子分光実験は高温超伝導体の原因究明などにも威力を発揮している。

以上のように、核研ESとSOR-RINGは有力な実験室光源がないVUV・SX領域で放射光がほとんど唯一の光源で優れた性能を持つこと、この領域の研究成果が物性物理の発展に大きな役割を果たすことを実証すると共に、加速器が物性物理のための光源としても重要な大型実験設備であることを示した。

4. フォトンファクトリー

フォトンファクトリーは、従来のX線発生装置に較べて格段に強度が大きいX線源を備えた研究所を作る構想の中から生まれた。高良和武先生を中心とするX線結晶回折研究グループが、電子加速器の建設計画を考えていた核研高エネルギー部と協力して学会会議などさまざまな方面に働きかけ、高エネルギー物理学研究所(KEK)の放射光実験施設として1978年に2.5 GeV電子蓄積リング(KEK-PF)の建設が始まった。X線結晶回折研究グループがさまざまな検討を重ねKEK-PFを実現していくまでの過程については高良先生が書かれた回想録に詳しい⁴⁾。KEK-PFの建設計画が進行しているところ、既にSLACとDESYでは4~6 GeVの電子加速器から出るX線領域の放射光を利用する実験が盛んに行われていたため、関係者の切迫した気持ちが伝わってくる。

KEK-PFは、SOR-RINGに較べてエネルギーや予算規模が大きいだけでなく、高エネルギー加速器の専門家が光源加速器を設計し建設したという点でもSOR-RINGと異なる。また、全国各地で既存のX線源を使って結晶回折実験をしていた大規模なユーザー集団を背景に、KEK-PFではSOR-RINGで行われていたVSX領域の放射光を利用する物性物理だけでなく、構造解析、X線光学、生物学、地球科学から医療診断にいたるまで幅広い放射光X線の利用が計

画され、KEK-PF はわが国の放射光利用研究の中心的施設として建設された。1982年の完成当初の性能は、電子エネルギー 2.5 GeV、蓄積電流 150 mA、ビーム寿命約 10 時間、エミッタンス 130 nrad であった。

新しい光源は、放射光を利用するユーザーの裾野を大きく拡大するだけでなく、新しい利用実験を可能にしてそれまでの利用研究分野にも変化をもたらした。KEK-PF では、蛋白質の構造解析、XAFS、X 線蛍光分析のように利用規模が年を追うごとに拡大した分野があるだけでなく、X 線共鳴磁気散乱のように放射光 X 線を利用して電子系の秩序状態の解析ができることを示し、新たな研究分野を開拓した実験も行われている。また、放射光の偏光特性を利用した XMCD などの新しい分光実験法が多くの物質系に適用され研究成果が得られている。また軟 X 線リソグラフィ、デバイス材料の分析・評価などを中心に産業界の利用も行われた。KEK-PF の出現は、放射光利用分野を拡大しただけでなく「光源加速器を手段として共有する多面的・学際的研究領域」³⁾を作り出した。

完成以来 20 余年の間、KEK-PF でも絶えず光源加速器の性能向上がはかられている。これまでに、電子蓄積リングから陽電子蓄積リングに変わるとともに何回かの大規模、中規模な加速器の改造や構成機器の更新を経て、現在はエミッタンス 36 nrad、ビーム寿命約 40 時間で運転され、多数の新しい挿入光源の設置も計画されている。

5. SPring-8 と極紫外・軟 X 線放射光源 (Super-SOR) 計画

SPring-8 は、挿入光源からの放射光 X 線の利用を主目的とした文字通り 8 GeV の電子蓄積リングで、挿入光源を通る低エミッタンス電子ビームが放射する世界最高性能の高輝度放射光 X 線を利用して先端的光科学研究を行う施設として 1991 年に建設がスタートした。建設には日本原子力研究所 (原研) と理化学研究所 (理研) の共同チームがあたり、1997 年に完成して利用実験が開始された。SPring-8 では、蓄積電流 100 mA、エミッタンス 6.3 nrad、ビーム寿命約 10 時間の設計性能が短時間で達成されただけでなく、8 の字アンジュレータや偏光スイッチングアンジュレータなど利用実験の用途に応じた挿入光源が多数開発・整備されている。最近では、トップアップ入射によってビーム強度を一定に保持することが可能になり、光学素子の熱履歴の影響が格段に軽減された。

現在 SPring-8 では、約 30 本の挿入光源ビームライ

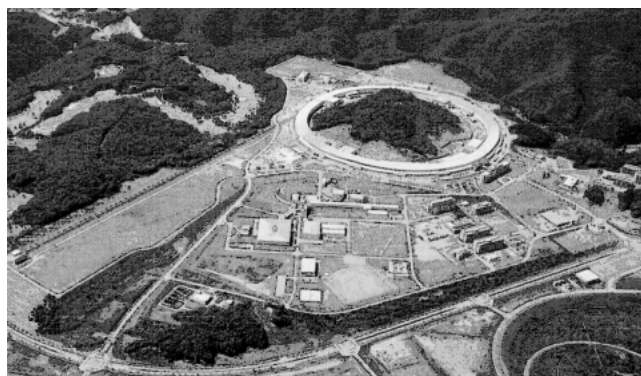


図2 SPring-8 (1997～)

ンが整備され、原研、理研の専用ビームラインのほか外部ユーザーのためのビームラインがあり、蛋白質の構造解析、X 線蛍光分析などの放射光利用実験が活発に行われている。これまでに、原子レベルの平坦性をもつ光学素子の開発、軟 X 線光電子分光による強相関電子系物質の電子状態の解析や X 線回折実験では難しいと思われていた水素の位置を直接決定することに成功するなど、いくつもの優れた成果が得られている。光源加速器としての SPring-8 の成功は、高輝度放射光の威力を証明しただけでなく、放射光 X 線を用いた実験の飛躍的な質の向上とユーザー数の大幅な増加とをもたらした。また SPring-8 では、利用実験についても当初から重点研究課題や長期利用課題、パワーユーザー課題などのカテゴリーを設け、研究成果の期待できる実験課題を良い意味で差別化するなどの工夫をした運営がなされている。この点は全国共同利用の枠の中で放射光利用実験が行われている SOR-RING や KEK-PF とは異なる。現在、SPring-8 は APS, ESRF と並んで世界最高性能の高輝度 X 線を利用できる放射光源施設の一つとなっている (図 2)。

一方、VSX 領域の高輝度放射光を利用できる専用施設がわが国にはない。既に述べたように VSX 領域の放射光は物性物理に不可欠で、超伝導の起源や生体物質の情報伝達機構など、物質の機能発現を原子・分子レベルで解明するためのプローブとして重要な役割を果たす。また、未来の学術や産業の創成に繋がる重要な研究領域の開拓にも大きく貢献すると期待されている。しかし、物性物理に最適な VSX 領域の高輝度放射光は、学術会議や学術審議会加速器部会などでの長期にわたる検討にもかかわらず実現しない状態が続いた。

そのような状況の中、平成 13 年 5 月から文部科学省が中心となって極紫外・軟 X 線放射光源計画検討



図3 東京大学柏キャンパスと極紫外・軟 X 線放射光源施設 (Super-SOR) (イメージ図)

会議 (検討会議) が開催され, VSX 領域の高輝度光源を備えた共同利用施設計画を策定する作業がスタートし, VSX 領域の専用施設が実現にむけて動き出すことになった. 検討会議では, わが国を代表する放射光科学研究者によって世界の放射光施設の現状分析と光源加速器のレビューが行われ, それに基づいてわが国でこれから建設すべき高輝度光源加速器の仕様と施設の設置形態などが約 1 年間にわたって議論された. その結果, 平成 14 年 5 月に検討会議は「極紫外・軟 X 線放射光源計画」の最終案を取りまとめて文部科学省にその早期実現を提案した. さらに, 加速器仕様策定ワーキンググループ (WG), ビームライン仕様策定 WG および利用計画 WG が設置され, 光源加速器, ビームラインと分光系の概念設計が策定され, 高輝度放射光の利用計画とともに「デザインレポート」としてまとめられた^{5,6)}. その後もそれぞれの WG では実現に向けた設計・検討を進める作業が続けられた. 現在, 光源加速器を構成する機器の詳細設計と開発・研究が物性研究所を中心に進められている.

VSX 領域と X 線領域の高輝度放射光は, 物性物理が基礎科学として発展していくため不可欠な互いに相補的な役割を担うプローブであり, VSX 領域の高輝度光源施設 (Super-SOR) と SPring-8 は放射光を利用する物性物理を大きく前進させる車の両輪である. 諸外国ではいくつもの高輝度光源施設が稼働しており, 日本で合成された新奇物質系の電子状態解析もそ

れらの施設で行われている. VSX 領域の高輝度放射光を利用できる専用施設は, 基礎科学である物性物理にとって重要であるだけでなく, わが国の科学技術の発展にも大きな役割を果たすと期待される. 検討会議が提案した「極紫外・軟 X 線放射光源計画」を実現するために, 東京大学では物性研究所が推進母体となって文科省に対して柏キャンパスに極紫外・軟 X 線放射光源を建設するための概算要求を行っている (図 3).

6. おわりに

以上述べたように, わが国ではこれまで約 10 年ごとに最新の光源加速器が建設・整備されて放射光を利用する物性物理の発展に貢献してきた. いずれの加速器でも光源としての性能向上を目指したさまざまな努力がされ, それが物性物理の新しい展開を可能にしている. 有力な実験室光源がない VSX 領域の連続光として物性物理に利用された放射光は, いまでは遠赤外線から 100 keV を超える硬 X 線領域まで利用できる. 連続光としての放射光利用は, X 線が構造解析だけではなく電子系の秩序状態の解析の有力なプローブであることを示した. また, 放射光の偏光利用は物質の磁性やカイラル分子の解析に欠かせないものとなっている. 光電子分光法のように VSX 領域の放射光利用によって大きな発展を遂げ理化学事典に項目が付け加わったものもある. 最近では, 光源加速器の高輝度・低エミッタンスを利用し, 顕微分光法を用いてナ

ノ構造物質の構造や電子状態を解析する新しい実験が盛んに行われるようになってきている。これらはいずれも光源加速器の進歩によってもたらされたものである。

現在、FELやERLを光源として利用するためのさまざまなR&Dが世界各地で行われており、これまでとは桁違いの高輝度、短パルスX線が利用可能になるといわれている。また、CSRのように既存の光源加速器を使って赤外線領域のコヒーレント放射を発生する努力もされている。新しい光源加速器は、これまで物質の時間平均的な性質を主な対象としてきた物性物理にとって新たな変革をもたらすと考えられる。近い将来、光学励起の素過程、磁気モーメントの揺らぎ、光誘起相転移の時間分解解析のほか、蛋白質の単分子構造解析などによって結晶化しない生体分子の機能解明などが期待されている。

一方、放射光の利用実験が始まってから40年余りが経過し、電子シンクロトロンをパラサイターとして利用する時代から挿入光源から放射される高輝度放射光を利用する時代になった。この間、放射光は基礎科学から産業利用にいたる幅広い領域で使われるようになって、利用範囲はさらに拡大し続けている。いままでは、放射光の特徴を最大限に利用する物性研究者だけでなく、工業製品の分析・評価などのように研究とは違った目的で放射光を利用する人も多い。物性物理と加速器の研究者が同じ加速器を使っていて互いに顔見知りであった時代は遠い過去のこと、両者が同じ放射光実験施設の中でさえ顔を合わせることもなくなっている。

物性物理は物性の起源を解明し、新たな物質の創成

を目指す基礎科学である。研究の対象となる物質系と物性は膨大である。物性物理の広範な分野でさまざまな物性の解析に不可欠なプローブとして、放射光がはたす役割とその重要性はますます大きくなっている。既に述べたように、光源加速器の進歩によって物性物理の新しい研究分野が数多く生み出されてきた。しかし、物性物理と加速器の接点がなければこれ以上の進歩は望めない。光源加速器に技術革新を求めなければ性能向上は望めないし、物性物理のフロンティアを拓くことは出来ない。物性物理と加速器の関係者が既存の光源加速器や実験設備にない先端性を目指し、共に努力することによってはじめて光源加速器の新技術が物性物理に活かされる。わが国の放射光を利用する物性物理の発展にとって、そのことを再確認することが常に求められている。

参考文献

- 1) E. E. Koch, D. E. Eastman and Y. Farge, *Handbook on Synchrotron Radiation* (North-Holland, 1983) ed. E. E. Koch, vol. 1a, chap. 1
- 2) H. Winick and S. Doniach, *Synchrotron Radiation Research* (Plenum Press, 1980) ed. H. Winick and S. Doniach, chap. 1
- 3) 佐々木泰三, 固体物理 **22** (1987) 1007, **23** (1988) 142.
- 4) 高良和武, 「未知への旅」(STEP, 2002)
- 5) 「極紫外・軟X線放射光源計画デザインレポート」(日本放射光学会, 2002)
- 6) 「極紫外・軟X線放射光源計画」極紫外・軟X線放射光源計画検討会議世話人会, 佐藤 繁, 福山秀俊, 木村嘉孝, 放射光 **16** (2003) 135.