

トピックス

広島大学放射光科学研究センターの現状

谷口 雅樹

広島大学放射光科学研究センター*

Current Status of Hiroshima Synchrotron Radiation Center

Masaki TANIGUCHI

Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

The Hiroshima Synchrotron Radiation Center is a common facility for both research and education in the field of synchrotron radiation science. The role of the center is to promote original research, training of young scientists, international exchange and cooperative research with neighbouring universities, public organizations and industries.

1. はじめに

広島大学は1983年以来地域型放射光施設の設置を提案してきたが、1995年度第一次補正予算において小型放射光施設の建設が認められ、1996年度中に小型放射光源、ビームラインと観測システムおよびこれらを収納する放射光実験棟が整備された。同年度からは放射光科学研究センター(省令施設)が発足し、1998年5月より放射光利用を開始している。

Figure 1は電子入射器室と実験ホールからなる放射光実験棟、実験準備等、研究棟からなる施設建物平面を示す。また、Fig. 2は最近の実験ホールの様子を映したものである。

2. センター設備の整備状況

放射光実験施設は、土地・建物、放射光源、ビームライン・観測システム等すべてが一体の装置とみなすのが適当であるが、ここでは放射光源とビームライン・観測システムの整備状況について述べる。

2.1 放射光源

放射光源加速器は、電子入射器、電子輸送系、と2カ所の長直線部をもつレーストラック状の電子蓄積リングから成る(Fig. 3)。2カ所の長直線部には標準的な直線偏光アンジュレータと直線一楕円一円偏光が切り替えられるマルチモードアンジュレータが装着されている。放射光源

加速器の整備と性能向上は、広島大学、KEK-PF、名古屋大学、SHI〔(株)住友重機械工業〕の研究者により精力的になされてきた。

マイクロトロン

電子入射器は150 MeV レーストラックマイクロトロンである。蓄積リングへの電子ビーム入射は繰返し周波数2 Hz、パルス巾2 μ s、ピーク電流2 mAで行われている。

電子蓄積蓄積リング

電子蓄積リングは、アンジュレータ装着のために2カ所の長直線部をもつことと、偏向電磁石の磁場が常伝導で2.7 Tと強いのが特徴である(Fig. 3及びTable 1)。通常の放射光源の偏向電磁石の磁場は1~1.5 Tであるが、仮に1.2 Tとすると、全放射パワーで比べると1.6 GeVリングに相当し、臨界波長で比べると1.1 GeVリングに相当する。

Figure 4は縦軸に真空度(左側:RFとCTの位置)または電子ビーム寿命(右側)、横軸に電子ビームの真空チェンバーに対するドーズ量をとって、蓄積リングの立ち上げの履歴を示したものである。50 A \cdot H以降、真空排気系の増強と軌道補正により状況が急激に改善された。現在、電子エネルギー700 MeV、最大蓄積電流100 mAで定常運転を行っている。100 mA蓄積時の電子ビームの寿命は11時間かそれ以上である。2000年4月、200 mA運転の承認が得られた。

放射光源のスタディーについては、チューン測定、

* 広島大学放射光科学研究センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山2-313
TEL 0824-24-6293 FAX 0824-24-6294 E-mail taniguch@hisor.material.sci.hiroshi

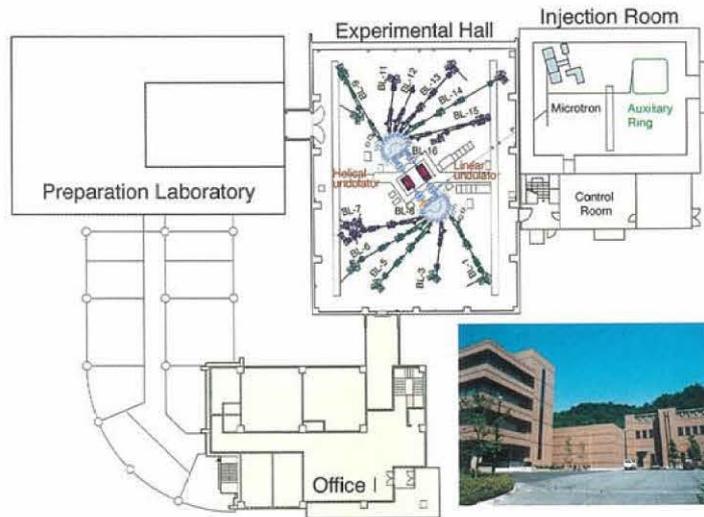


Figure 1. Layout of Hiroshima Synchrotron Radiation Center.



Figure 2. A view of experimental hall.

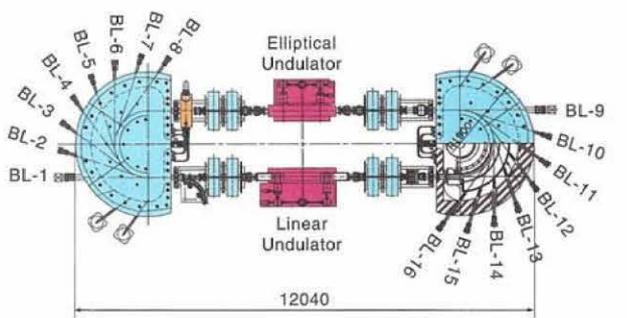


Figure 3. Storage ring with two bending magnets and two undulators.

COD 補正, ビームパラメータ (β , η -関数, クロマティシティー) の測定, シングルバンチ運転によるバンチ長測定などが行われた。最近, 700 MeV でバンチ長は約100 ps と評価されている。

軌道補正は現在, 10基のステアリング電磁石と6個の

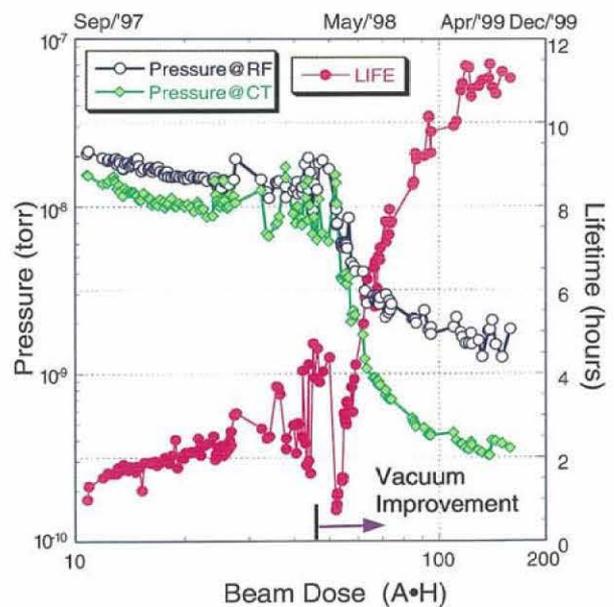


Figure 4. Improvements of the vacuum level and life time at 100 mA beam as a function of an integrated dose.

Table 1.

Type	Racetrack Synchrotron
Injector	Pulsed Racetrack Microtron
Electron Beam Energy at Injection	150 MeV
at storage	700 MeV
Mag. Field of Bend. Magnet	2.7 T
Bending Radius	0.87 m
Circumference	21.95 m
Betatron Tune Horizontal	1.72
Vertical	1.84
RF Frequency	191.244 MHz
RF Voltage	220 kV
Harmonic Number	14
Stored Current (Normal)	300 mA
Beam Lifetime (at 100 mA)	11 hours
Beam Emittance	0.4 π mm μ mrad
Critical Wave Length	1.42 nm
Photon Intensity	5 keV: 1.2×10^{11} photons/ sec/mrad ² /0.1% B.W./300 mA
Number of Photon Beam Port (at Bending Section)	14
(at Straight Section)	2
Angular Width of Beam Port	20 mrad

ボタンモニタ (BPM ; 4 端子) を用いて行っている。長時間にわたるビームの安定化が実現したが、今後、BL-8とBL-16に電子ビーム診断用の光モニターポートを整備して軌道補正のさらなる精密化をはかる計画である。

アンジュレータ

2本の長直線部にはリニアアンジュレータとマルチモードアンジュレータが設置されている。リニアアンジュレータは26~300 eVの直線偏光、マルチモードアンジュレータは上下それぞれ3列の磁石列の位相を変えることにより、ヘリカルモードで4~40 eVの左右円偏光、リニアモードで3~300 eVの直線偏光を発生する。さらに、マルチモードアンジュレータは最小ギャップ値 (30 mm)、位相変位2.5 mm~5 mm とすることによって楕円偏光ウィグラーとして作用し、数十~数百 eV のエネルギー領域の楕円偏光を発生することも可能である。

リニアアンジュレータビームライン (BL-1) とマルチモードアンジュレータビームライン (BL-9) には、それぞれドラゴン型斜入射分光器と3 m オフプレーンイーグル型直入射分光器が設置されている。マルチモードアンジュレータをウィグラーとして用いたときに得られる数百 eV までの直線偏光または楕円偏光のアンジュレータ光を分光して利用するために、ビームラインの分岐化も検討中である。

リニアアンジュレータの最小ギャップ (30 mm) に対して得られた実測スペクトル¹⁾と理論計算による光源分布

スペクトルを Fig. 5(a) に示す。両者のピーク位置は良い一致を示している。ヘリカルアンジュレータについては、紫外領域においてアンジュレータ光の空間分布と円偏光度の測定を行ない、設計値とほぼ一致する性能が得られており、Fig. 5(b) に示す実測スペクトル²⁾も理論計算と良く一致している。

放射光スペクトル

偏向電磁石、リニアアンジュレータ、マルチモードアンジュレータからの放射光スペクトル分布をまとめて Fig. 6 に示す。本センターの放射光利用研究が真空紫外線~軟X線域に重心をおいている事が明らかである。図中のビームラインの番号と横棒はそれぞれのビームラインがカバーするエネルギー範囲を示している。

運転

運転期間中は毎週、月曜日が放射光源の調整を含むマシンスタディー、火曜日から金曜日がユーザータイムである。一日のうちユーザーが確実に利用できるのは10時から18時の時間帯であり、昼夜運転は行っていない。できるだけ早い時期に、運転停止のみに限定したライセンスを発行しオペレータの数を増やす事等で、22時までの運転を定常的に実施したいと考えている。

入射器から発生する電子ビームは、蓄積リングへの電子入射の時間帯をのぞいて、同じ部屋に設置されている電子周回装置に供給されている。高エネルギー電子ビームが軌道上に設置された薄膜単結晶を通過する際に発生するパラメトリック X 線の研究に利用されている。

2.2 ビームライン・観測システム

放射光利用に関する基本方針 (後述) にそって1999年

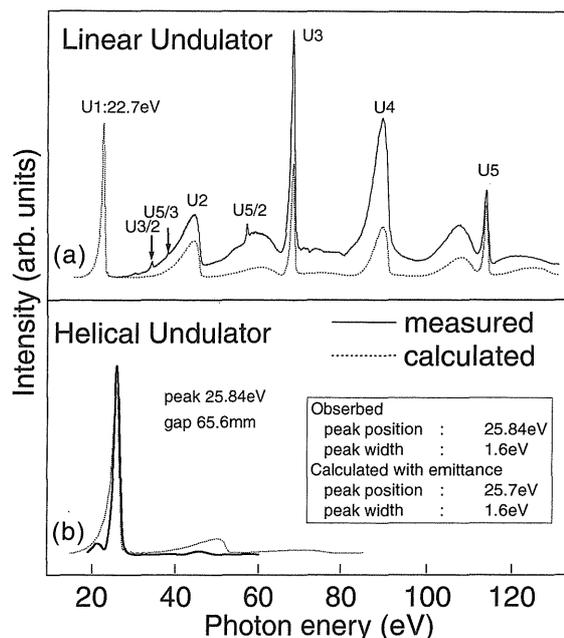


Figure 5. (a) Spectra of light from the linear undulator at BL-1. (b) Spectra of light from the helical undulator at BL-9.

度までに、11系列のビームラインと観測システムの導入

・整備が行われた (Fig. 7 及び Table 2)。これまでに、5ビームラインが稼働状態 (BL-3, BL-7, BL-11, BL-13, BL-15) に入っている。観測システムについては、高分解能極低温光電子分光実験装置、表面 XAFS 実験装置、光

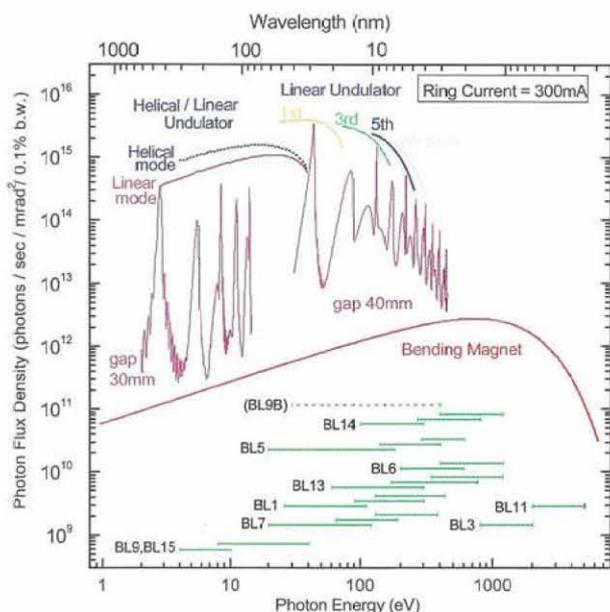


Figure 6. Spectra of light from bending magnets and undulators.

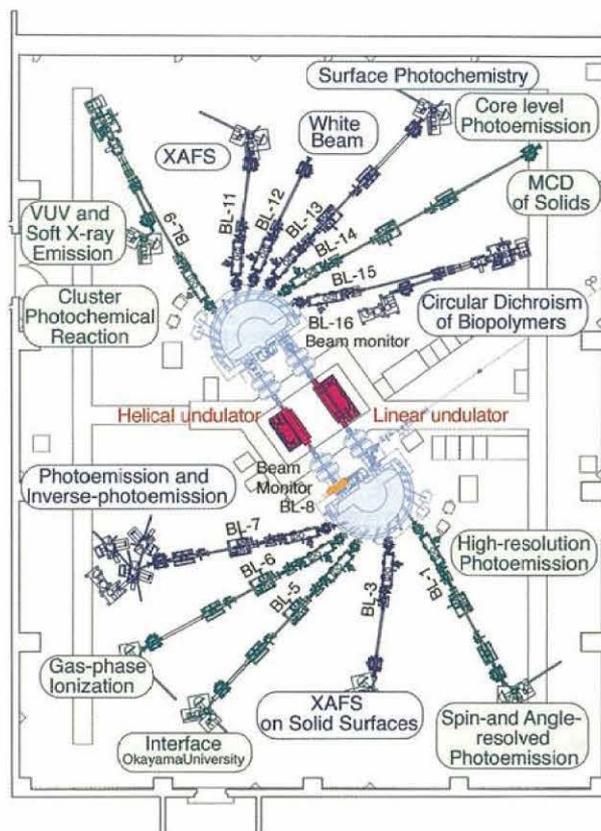


Figure 7. Layout of beamlines.

Table 2.

BL#	Source	Monochromator etc.	Usage	Photon Energy	Status
BL1	LU	“Dragon” type SGM-3	Solid/Gas	26~300	Testing
BL2	BM	Double Crystal & Muti-	Medical	200~5000	Plan
BL3	BM	Double Crystal (Beryl)	Solid/Surface	800~4000	In use
BL4	BM	[Hiroshima Pref. BL]	Irradiation		Plan
BL5	BM	VLS-PGM [Okayama Univ.]	Solid	20~600	Testing
BL6	BM	VLS-PGM	Gas	200~1200	Testing
BL7	BM	“Dragon” type SGM-1	Solid	20~380	In use
BL8	BM	Beam Monitor Port	Machine		In use
BL9	HU/LU	3 m off-plane Eagle	Solid/Gas	4~40	Testing
		VLS-PGM or CDCL-SGM	CPR, Solid/Gas	30~400	Plan
BL10	BM	Reserved			
BL11	BM	Double Crystal (Si-111)	Solid	2000~6000	In use
BL12	BM	White light irradiation	Solid + gas		Testing
BL13	BM	“Dragon” type SGM-2	Surface	60~1200	In use
BL14	BM	“NOGARD” type SGM	CPR	100~1200	Testing
BL15	BM	1 m NIM	CPR (biomolecule)	4~40	In use
BL16	BM	Beam Monitor Port	Machine		In use

BM: Bending Magnet, LU: Linear Undulator, HU/LU: Helical/Linear multi-mode Undulator
CPR: Circularly Polarized Radiation

電子・逆光電子分光実験装置, 軟 X 線発光分光実験装置, XAFS 実験装置, 白色光利用実験装置, 表面光化学反応実験装置, 生体物質円二色性実験装置, 気相イオン化実験装置が稼働状態に入った。表面・界面構造解析実験装置(岡山大学), スピン・角度分解光電子分光装置, 内殻共鳴光電子分光実験装置については, 整備が進行中である。今後, 医療材料表面評価実験装置や放射線生物学実験装置の整備も行われる計画である。

BL-1 と BL-9 については今後, 光子数やエネルギー分解能の評価を行い, 出来るだけ早く観測システムをつなぎ込み実験を開始する計画である。

BL-3 と BL-11 には, 両者同じ方式の 2 結晶分光装置が接続されている。BL-3 は, $800\sim 4000$ eV, 5×10^9 photons/s/100 mA, $E/\Delta E\sim 2000$ また BL-11 は, $2200\sim 5000$ eV, 5×10^9 photons/s/100 mA, $E/\Delta E\sim 2400$ の性能を発揮している。BL-3 には複合表面解析装置が接続され金属上の分子吸着構造の研究が進行中である。

BL-5 では不等間隔回折格子分光装置が調整中である。光電子顕微鏡と角度分解光電子分光による表面・界面の研究に適したビームラインの設計となっている。BL-6 では同型式の不等間隔回折格子分光器の性能試験が進行中で, $400\sim 1200$ eV ($E/\Delta E$; $4300\sim 2000$) が得られている。フラグメントイオンの運動エネルギーと角度分布を測定するための角度可変反射型飛行時間質量分析装置はすでに稼働しており, まもなく実験開始の状況にある。

BL-7 にはドラゴン型分光装置が接続され, $20\sim 380$ eV 領域で光電子分光実験が始められている。今後分光装置の調整を進めながら, 逆光電子分光装置と複数の薄膜成長装置が接続される。BL-12 の白色光照射ラインが稼働状態に入った。今後, 集光光学系, 帯域フィルターの増設に加え, 照射による表面改質等のための評価装置を整備してゆく。

BL-13 では, $60\sim 1200$ eV 領域でエネルギー分解能というよりはスリットを開いて ($E/\Delta E\sim 1000$) 高フラックスを利用 (3×10^{11} photons/s/100 mA at 600 eV) した, NEXAFS, TOF, AEPICO 等の実験が進行中である。

BL-14 には, 軟 X 線域 ($100\sim 1000$ eV) での円偏光利用を行うために NOGARD 型分光器が接続され, 性能評価が進行中である。BL-15 には直入射分光器が設置され, 現在, 水中での生体物質に関する円二色性実験が進行中である。

3. 放射光利用

広島大学での放射光利用は, 「特色ある研究」, 「共同利用」, 「学部・大学院教育への導入」, 「国際交流」を 4 つの柱としている。また, 社会との連携一地域での取り組みを大切にしている。

3.1 特色ある研究

本センターでは, 小型放射光源の利用にふさわしい, オリジナリティーの高い研究を推進する。SPring-8, KEK-PF, UVSOR 等で実施するのが適当である研究課題については共同利用実験を申請する。

放射光源の利用においては, 偏向部からの放射光は, エネルギー分解能よりはむしろ光子数を必要とする実験や特殊な観測システムを用いる実験に, また, アンジュレータからの高輝度放射光は, 高エネルギー分解能が不可欠な実験や分光器を通さないダイレクトビームなど極端に多くの光子を必要とする実験に利用する事を基本としている。

3.2 共同利用

「学内共同利用を基本とし学外に対しても共同利用を行う」, いわゆる地域型共同利用を実施している。岡山大学所管のビームラインの設置は, 地域型共同利用の実態を実際に見える形で示すものである。学外ユーザーによる共同利用については, 「客員研究員 (国立大学・研究所など)」や「受託研究員」, 「民間企業等との共同研究」(自治体・産業界) など現行の制度を活用しつつ, 将来的にはさらに円滑な運用ができるよう努力しているが, 将来的には「全国共同利用」への転換を目指すのが適当であろうと考えている。

1999年度, 共同利用申請課題25件に対して, 169名の研究者ならびに学部・大学院生が整備や実験に取り組んだ。共同利用の申請は随時可能であるが, 2000年4月時点で募集した2000年度では, 申請件数が48件に倍増した。計画当初, 年間280名程度の利用者を見込んでいたがこれを超えそうな勢いである。整備のコアになっているグループに新たなグループが加わってきているのが大きな変化の一因である。

3.3 教育への導入

大学院において放射光の発生原理や放射光利用研究に関する講義を行い放射光科学への理解を深める努力を継続してきた。この間, 受講対象を自然科学系の4研究科に拡大した。2000年度からの理学研究科重点化では, 協力講座としての位置づけを得て活動領域を一気に広げている。

学部では, 新入生を対象とする少人数クラスの授業で放射光科学をとりあげ, 研究のフロンティアの紹介, センターの見学, 光電子分光実験の実習などを行い, 放射光科学に関する興味と関心の高揚をはかっている。見学や実習のあとには超高真空の理解への期待を込めて, 一度使用した ICF70 ガスケットを受講者にさしあげることにしている。

3.4 国際交流

1999年に Activity Report を創刊し, 国内外の放射光施設や研究者との交流をはじめた。また, 1997年より毎年3月中旬に Hiroshima International Symposium on Syn-

chrotron Radiation を開催し報告書を発刊している。今年から研究者を直接海外から広島へ招へいする事が出来るようになった(後述; 広島大学放射光科学研究センター利用促進協議会)。また, 我国に滞在中の外国人研究者を招へいして国際セミナーや国際ワークショップを1~2ヶ月に一度の頻度で開催している。

3.5 社会との連携—地域での取り組み—

放射光実験施設が実現する前は, 自治体, 経済界, 産業界が中心となった「広島大学放射光利用研究センター設置促進協議会」が結成され, 放射光計画の推進に大きく貢献した。計画実現は地域社会との連携の貴重な成果として認識している。

昨年, センターの地域利用の促進ならびに国際交流の推進をはかる事を目的として, 「広島大学放射光科学研究センター利用促進協議会」(会員; 広島大学, 広島県などの5自治体, 財)中国技術振興センター, 中国経済連合会等の9団体, 関連企業11社)が発足した。この協議会により年4回「利用研究会」を開催し, その都度, 産業界向けの講演とセンターのビームラインを用いた実習をかさねている。参加者の中から共同研究の提案も出てきている。また, 国際シンポジウムをはじめとする国際的な学会会合を開催するための支援を頂いている。この支援の効果は大きく, かなりの自由度を持って海外から直接研究者を招へいできるようになった。

自治体, 地域産業界からの講演会や見学会, 地元の高等学校の生徒, 父母会, 教員による見学会, 広島市こども文化科学館への展示等も行っている。センターの見学者は年間300名を超えている。

4. 研究成果と準備研究の現状

4.1 高分解能低温光電子分光実験

かねてより電気抵抗や帯磁率の研究をはじめとする精密物性実験と放射光光電子分光実験の橋渡しの実現を夢見ていた。アンジュレータービームラインにおいては, 精密物性研究を目指して高分解能低温光電子分光実験の実施を計画している。BL-1の分光装置は10 μ mスリット使用時で各エネルギー領域において, 26~120 eV ($E/\Delta E$; 59000~9500), 90~300 eV ($E/\Delta E$; 24000~5300), 130~430 eV (24000~5300)のエネルギー分解能を有し, 毎秒あたり10¹¹個の光子数が見込めるような設計となっている。

高分解能光電子分光実験は, 試料の素性が明快である事が不可欠で, 物質開発グループや様々な物性測定をしているグループとの緊密な連携が重要である。広島大学で放射光と物質開発のグループでここ数年共同で取り組んでいる研究をひとつのモデルとして紹介する。

歪んだペロブスカイト型結晶構造を持つ $Y_{1-x}Ca_xTiO_3$ は, YサイトをCaに置換することにより, d¹のMott絶縁体 $YTiO_3$ からd⁰のバンド絶縁体 $CaTiO_3$ へと変化する

系である。電気抵抗率の測定によると, $Y_{0.61}Ca_{0.39}TiO_3$ は~150 Kで鋭い金属—絶縁体転移を起こし, 高温側で絶縁体的, 低温側で金属的温度依存性を示す。**Figure 8**は $Y_{0.61}Ca_{0.39}TiO_3$ ($x=0.39$)に対する光電子スペクトルである($\Delta E \sim 5$ meV)³⁾。結合エネルギーが~2 eVから E_F までの構造は主としてTi 3d状態に由来する。1.4 eV付近の構造はバンド計算による状態密度には存在しない構造で, 非コヒーレント部分と呼ばれる。これはMott絶縁体における下部ハバードバンドに対応するもので, Ti 3dバンド中の電子に強い相関があることを明瞭に示すものである。 E_F 近傍の構造はコヒーレント部分と呼ばれ, バンド計算の状態密度に対応する構造である。

非コヒーレント部分のスペクトル強度は, 低温になるに従って弱くなる。 E_F 近傍を詳細にみると転移点(~150 K)以下では明確なフェルミ端が確認できる金属であり, 転移点以上では E_F においてスペクトル強度の無い絶縁体であることが分かる。

この結果は, 転移点における電気抵抗率の急峻な金属—非金属転移と一貫している。すなわち光電子スペクトルで見ると高温側でMott絶縁体で, 上部ハバードバンドと下部ハバードバンドに分かれており, 温度を下げていくと非コヒーレント部分が弱まってスペクトル強度分布が変化し, 転移点以下でエネルギーギャップが埋まって相関の強

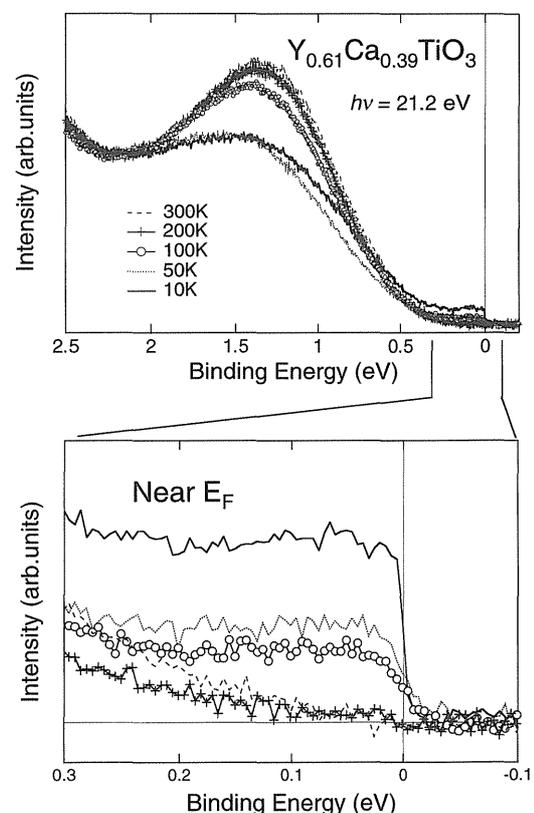


Figure 8. (a) Temperature dependence of photoemission spectra of $Y_{0.61}Ca_{0.39}TiO_3$. (b) Temperature dependence of photoemission spectra near E_F .

い金属となるといえる。

転移点近傍で O2p や Ti2p 光電子スペクトルを詳細に調べると、スペクトル形状の変化は小さく連続的であった。これは格子歪みの変化あるいは Ti-O の結台状態の変化が転移点近傍でゆるやかで連続的であることを示唆している。しかし、その小さな変化に対して、臨界的なキャリア数を持つ $x=0.39$ は敏感に反応し、非コヒーレント部分とコヒーレント部分との間のスペクトル強度の移動によって金属と絶縁体との間を行き来するものと考えられる。

4.2 光電子・逆光電子分光実験

光電子分光と逆光電子分光がそれぞれ固体の価電子帯と伝導帯の電子状態の情報を与える。光電子分光と逆光電子分光を同一の清浄表面に対して in situ で行くと、特にエネルギーギャップを持つ半導体では両スペクトルをフェルミ準位で接続する事により各々独立の測定では得られない情報を得る事が出来る。

逆光電子分光では、試料の抵抗が高いと帯電効果が生じ測定が困難となるが、もし低抵抗基板上に薄膜結晶を成長出来ればこの困難は解消する。薄膜結晶ではさらに、バルクでは仮想物質である閃亜鉛鉱型 (ZB)MnTe 単結晶 (MnTe は常温常圧で六方晶 (H)NiAs 型構造をとる) が得られたり、バルク単結晶の劈開では得るのが困難な単結晶表面を作り出す (角度分解によるエネルギー分散の決定に有効) ことが出来る。

BL-7 はドラゴン型分光器、正・逆光電子分光装置、ホットウォールエピタキシャル装置、分子線エピタキシャル装置、バルク試料準備槽などから構成される。未だ、全体は完成していないがここでは、ドラゴン型分光器、正・逆光電子分光装置、ホットウォールエピタキシャル装置に関する成果について述べる。これらはすべて BL-7 に集結してゆくものである。

NiAs はパウリ常磁性を示す金属でこれまで全温度領域で NiAs 型構造が安定であるとされてきたが、近年になって 340 K 以下ではニコライト構造と呼ばれる超格子構造に相転移することがわかってきた。Figure 9(a) は、NiAs の電子状態の見直しのため、フェルミ面を含む電子帯構造全体の電子状態を高分解能で直接観測するために BL-7 で共鳴光電子分光を行ったものである⁴⁾。束縛エネルギーが約 1.5 eV のところにピーク構造 (以下メインピーク; d^7L 終状態)、約 8.4 eV のところにサテライト構造 (d^6 終状態) がみられる。エネルギー ($h\nu$) が 69 eV の光で励起されたスペクトルをみると、メインピークよりもむしろサテライト構造の方が増大している。NiAs の場合、メインピークとサテライト構造のエネルギー差が他の Ni 化合物に比べ大きくなっているが、クラスター計算から、これは Ni と配位子との混成強度が大きいためであることがわかる。

Figure 9(b), (c) は、H-MnTe および ZB-MnTe の光

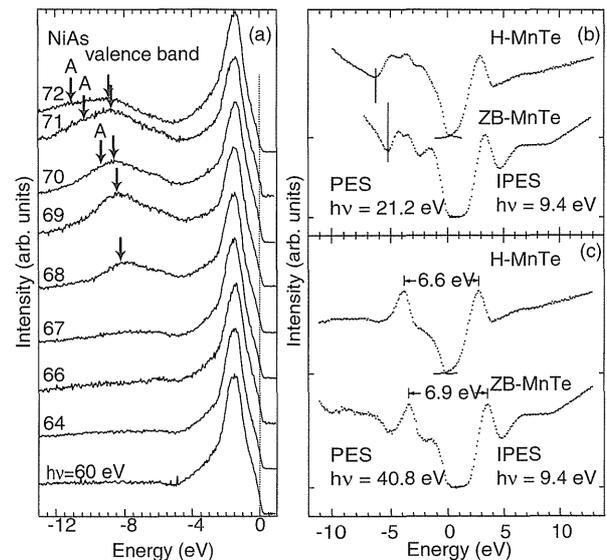


Figure 9. (a) Resonant photoemission spectra of NiAs in the Ni 3p core excitation region. Auger emission structures are shown by A. (b) and (c) Photoemission and inverse-photoemission spectra of H-Mn and ZB-MnTe.

電子 (He I ; 21.2 eV, He II ; 40.8 eV) ・逆光電子スペクトルを示す⁵⁾。両スペクトルはフェルミ準位で接続し、価電子帯頂上を基準にしている。MnTe の価電子帯は主に Mn 3d, Te 5p 軌道よりなっているが、He I 励起エネルギーでは、Mn 3d, Te 5p 軌道のイオン化断面積がほぼ等しいため、スペクトルは両者の寄与を反映している。価電子帯における p-d 混成バンドは、H-MnTe で価電子帯頂上より 6.5 eV, ZB-MnTe では 5.2 eV に広がっており、H-MnTe のほうが p-d 混成の程度が大きいことを示唆している。He II 励起エネルギーでは、Mn 3d 軌道のイオン化断面積が Te 5p に比べて大きいいため、ほぼ Mn 3d 部分状態密度に対応している。He II スペクトルにみられる主ピーク (H-MnTe: -3.7 eV, ZB-MnTe: -3.4 eV) は、ほぼ局在した Mn 3d \uparrow 軌道に起因する。一方逆光電子スペクトルには、同様にほぼ局在した Mn 3d \downarrow 軌道によるピークが出現している (H-MnTe: 2.9 eV, ZB-MnTe: 3.5 eV)。He II 光電子および逆光電子スペクトルから見積もられる Mn 3d 交換分裂エネルギーは、H-MnTe で 6.6 eV, ZB-MnTe で 6.9 eV である。

両結晶の結晶構造の特徴をもとに、p-d 混成の程度ならびに Mn 3d 交換分裂エネルギーの差を一貫して説明することができた。

4.3 光化学反応実験

BL-13 に設置されているドラゴン型分光器は 60~1200 eV 領域をカバーし、軽元素の内殻励起が関与する研究に用いられている。ここでは日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業の研究プロジェクト「内殻励起による化学反応制御—分子メス—」として採択されている、高フラックス放

射光と新開発の高感度電子-イオン・コインシデンス装置を用いたポリメチルメタクリレート[PMMA, $(C_5O_2H_8)_n$]薄膜試料 (100 Å) の炭素内殻励起によるイオン脱離反応の研究について紹介する⁶⁾。

PMMA は、モノマーのユニットとしてそれぞれサイトの異なる5つの炭素原子と2つの酸素原子を含み、サイト選択的な反応の研究に適している (Fig. 10挿絵)。PMMA 薄膜の炭素内殻励起領域での全イオン収量を吸収スペクトルで規格化することによりイオン脱離効率を求めると、290 eV に鋭いピークを示す。このピークは O-CH₃ 側鎖の炭素 1s 電子の $\sigma^*(O-CH_3)$ 軌道への共鳴励起に対応する。PF のシングルバンチを利用して行った飛行時間型質量分析器を用いた脱離イオンの測定により、このエネルギー領域で H⁺, CH⁺, CH₂⁺, CH₃⁺, OCH⁺, COOCH₃⁺ などさまざまな脱離イオン種が観測され、とくに CH₃⁺ イオンの強度が大きい。イオン脱離効率にみられるピークは、側鎖の O-CH₃ の反結合性軌道への励起により O-CH₃ 結合の切断が促進されていると考えられる。

このイオン脱離効率の顕著な増大を示す $\sigma^*(O-CH_3)$ 共鳴励起位置で、オージェ電子とイオンのコインシデンス測定が行われた。Figure 10(a) にオージェ電子-イオン・コインシデンス (AEPTCO) スペクトルを示す。400 ns に H⁺ イオンが、~1500 ns に CH_n⁺ (n=1~3) イオンが観測

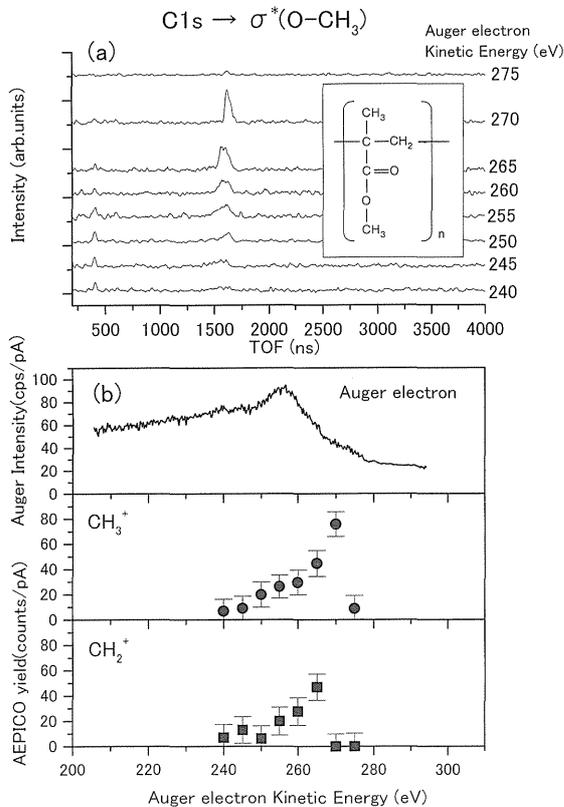


Figure 10. (a) A series of AEPICO spectra of PMMA at $\sigma^*(O-CH_3)$ resonant excitation. (b) AEPICO yield spectra of CH₃⁺ and CH₂⁺ ions.

される。電子のエネルギーによって脱離イオンの信号強度が異なることが分かるが、特に顕著な興味深いエネルギー依存性がみられた CH₃⁺ イオンと CH₂⁺ イオンの AEPICO 収量 (コインシデンス信号強度の積分値) をオージェ電子スペクトルとともに Fig. 10(b) に示す。オージェ電子スペクトルの高エネルギー側 (それぞれ 270 eV と 265 eV) で顕著な増大を示している。

これまでの水やアセトニトリルなどの低温凝縮分子での研究結果を考慮すると、O-CH₃ の結合性軌道に正孔を持つ傍観型オージェ終状態に対応して顕著な CH_n⁺ (n=2, 3) イオンの脱離が起きたと考えられる。すなわち、サイト選択的な内殻共鳴励起とその後の傍観型のオージェ過程により、側鎖の O-CH₃ の軌道に対し反結合性軌道を示す $\sigma^*(O-CH_3)$ 軌道に電子が励起され、O-CH₃ 結合に対して結合性を示す軌道上の電子がオージェ過程で取り除かれたことにより、特定の結合切断が促進されることが示唆される。

4.4 円・線二色性実験

軟 X 線域 (100~1000 eV) での magnetic circular dichroism (MCD) や X-ray absorption spectroscopy (XAS) の研究を目指して整備が進行中である。Figure 11 は分光装置の分解能評価のために測定された N₂ の 1s→ π^* 吸収スペクトルを示す⁷⁾。これより 400 eV において E/ΔE~5300 の分解能が達成されている事がわかる。3d 遷移金属の L 吸収の自然幅 (100 meV for Ti, 400 meV for Cu) を考慮して、分光装置は 400 eV において 50 meV の分解能が得られるよう設計されている。

最近、円偏光利用だけでなく、強相関電子系でよく知られたいくつかのペロブスカイト型遷移金属酸化物の軌道秩序を L_{2,3} 吸収線二色性実験から明らかにしよとする利用申請がなされている。2p→3d の双極子遷移は 3d 軌道の波動関数により遷移確率が決まり、単結晶では電場の偏光方向により吸収過程に差が生じるため、これらを定量的に評価することで直接軌道秩序を決定することが可能である。このため、直線偏光光源と構造既知の単結晶が必要で

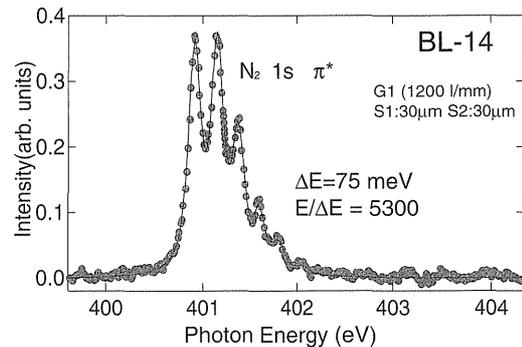


Figure 11. 1s→ π^* absorption spectrum of N₂ gas.

ある。単結晶 YTiO_3 , YVO_3 の結晶構造は斜方晶であり、Ti や V の磁性原子の周りには酸素が 8 面体配位している。Ti-O₆ 八面体では頂点酸素を共有してジグザグに連なっている。磁気的には $\text{YTiO}_3(3d^1)$ が $T_c=30$ K の強磁性体、 $\text{YVO}_3(3d^2)$ が $T_{N1}=90$, $T_{N2}=110$ K の反強磁性体であり、この転移点前後で軌道の変化が期待される。

5. センターの組織

研究組織

研究組織は「センター長」のもとに設けられた「基礎研究部門」、「応用研究部門」、「客員部門」、「非常勤研究員」、「客員研究員」、「研究員」から構成される。基礎・応用部門は教授 2, 助教授 2, 助手 2, 教務職員 1, 技官 1 からなり、放射光源の整備、保守・運転、性能向上のための光源加速器の技術開発や研究、ビームライン・観測システムをはじめとする実験設備の整備、新しい実験装置の開発や放射光を用いたサイエンスの研究等を行っている。

客員部門は I 種 (民間; 教授 1), II 種 (国立大学等; 教授 1, 助教授 1) が措置され、これまで、放射光源やビームライン・観測システムの整備ならびに開発研究を実施した。今後、国際共同研究については国際共同利用の基礎を築くため客員 III 種 (外国人) を整備したいと考えている。非常勤研究員 (5) は、2 年任期 (最長 3 年間) の博士研究員で、それぞれの専門を生かす形で放射光源、ビームライン・観測システムの整備や研究に取り組んでいる。客員研究員は、センターの整備や支援研究のために学外の研究者に委嘱するもので、現在、産業界 3, 大学 6, 研究所 2 であるが人数は今後増加の傾向にある。

研究員は学内の 46 名の研究者からなり、センタースタッフと協力して主にビームライン・観測システムの整備やこれらを用いたサイエンスの研究を行っている。これらに加え、リサーチアシスタント (1), 研究支援推進員 (1) が措置されている。

運営組織

センターの運営に関する重要事項の審議を行うために「運営委員会」(委員数 14, 学外オブザーバー 1) が設けられている。「運営委員会」の下には、「共同利用専門委員会」(委員数 11) が付置されており共同利用をはじめとする専門的事項の審議検討を行っている。また、センターの将来計画等の審議を行うための「顧問」(委員数 7) を設けている。センター発足後 5 年目に入るため、2000 年度より「運営委員会」の下に「自己点検評価委員会」を設置した。

6. 今後の展望

利用申請の急増に、関係者一同これまでの 4 年間の取り組みに対する確かな手応えを感じている。今後は、小型放射光源の改良や小型放射光源利用に最適化した要素技術

の開発研究とともに大学等の実験室での日常の研究スタイルに近い形の放射光利用を実施し、質的にも量的にも優れた研究成果をあげる事に集中的に取り組んでいきたいと考えている。また、大学という教育・研究の現場に設置された施設である事を最大限に生かして、明日を担う若者が夢と希望を抱くことのできるような研究施設の形成を強く意識している。

将来、現在の 2 部門から基礎物質科学、量子生命科学、応用分析技術、粒子線技術の 4 部門からなるセンターに発展的に改組する計画を進めている。

謝辞

1997 年 3 月に放射光源が導入されてから 3 年間、学内外の研究者の努力によりセンター全体の整備がようやく現在のレベルまで進んだ。特に、放射光源の整備では KEK-PF の春日教授のグループをはじめとする学外の研究者に多大なご指導を頂き、SHI のスタッフの皆様にも献身的な取り組みを頂いた。ビームライン・観測システムについても同様の状況があった。関係者の皆様に厚く感謝申し上げます。

本原稿を準備するに際して、センタースタッフならびに学内関係者の方々に迅速な対応を頂き、改めて皆様からの暖かさを感じた。時間的に藁にもすがりたい状況の中でのひとときの喜びであり、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) K. Shimada, M. Arita, T. Matsui, K. Goto, S. Qiao, K. Yoshida, M. Taniguchi, H. Namatame, T. Sekitani, K. Tanaka, H. Yoshida, K. Shirasawa, N. Smolyakov and A. Hiraya: The 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 16-17, 2000, Higashi-Hiroshima, Japan.
- 2) M. Matsui, H. Sato, K. Shimada, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Yoshida and A. Hiraya: The 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 16-17, 2000, Higashi-Hiroshima, Japan.
- 3) M. Arita, Y. Takeda, Y. Okamura, H. Sato, K. Shimada, K. Mamiya, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Tsubota, F. Iga and T. Takabatake: Jpn. J. Appl. Phys. 38 Suppl. 38-1, 206 (1999).
- 4) A. Kimura, Y. Takaichi, C. Hirai, H. Sato, M. Nakatake, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, A. Fujimori, T. Nozue and T. Kamimura: The 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 16-17, 2000, Higashi-Hiroshima, Japan.
- 5) H. Sato, M. Taniguchi, K. Mimura, S. Senba, H. Namatame and Y. Ueda: Phys. Rev. B61, 1062 (2000).
- 6) E. Ikenaga, K. Isari, K. Kudara, Y. Yasui, S. A. Sardar, S. Tanaka, K. Mase, S. Wada, T. Sekitani and K. Tanaka: submitted to J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.
- 7) K. Mamiya, K. Yaji, A. Kimura, J. van. Elp, H. Namatame, M. Taniguchi and A. Hiraya: The 4th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, March 16-17, 2000, Higashi-Hiroshima, Japan.