

### 3-1. 電子物性グループ

組頭 広志

物質構造科学研究所放射光科学第一研究系  
総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

#### 1. 概要

当グループの目的は、固体物性、表面科学、原子・分子等の分野において放射光を用いた電子物性研究を促進するために最先端のビームラインおよび周辺技術を開発し、共同利用を展開するとともに、内部スタッフによる研究を推進することにある。

BL・実験ステーション	担当者	備考（ユーザー運営，大学運営など）
BL-2A/B	組頭 広志，堀場 弘司	
BL-3B	間瀬 一彦	ユーザー運営
BL-7A	雨宮 健太，酒巻 真粧子	
BL-11A	北島 義典	
BL-11B	北島 義典	
BL-11D	間瀬 一彦	
BL-13A/B	間瀬 一彦	
BL-16A/B	雨宮 健太，酒巻 真粧子	
BL-20A	足立 純一	ユーザー運営
BL-28A/B	小野 寛太	

#### 2. 活動内容

##### (1) グループとしての取り組み

これまで電子物性グループにおいては、2011年度からVUVおよびSXビームラインおよびエンドステーションの整備を進め、今年度でほぼ全てのビームライン更新が終了した。この更新計画の方針は、「挿入光源ビームラインであるBL-28，BL-2，BL-13，BL-16にリソースを集中し，“リソースの特性を生かしたサイエンス”を発展させるためのVUV-SXビームラインおよびエンドステーションの整備計画を行う」である。具体的な内容と進捗については、以下の通りである。

**BL-28 強相関固体物性 BL**：強相関電子系などの固体物性研究を推進するために、2014年度に挿入光源を真空紫外光（VUV）領域（30-300 eV）偏光切り替え（水平・垂直・右円・左円）に更新し、これらの偏光切り替えを用いた高性能角度分解光電子分光ステーションとして整備している。また、エンドステーションとして、最新式のVG-Scienta社製R4000-DA30を購入し、現在BL-28Bにおいて装置の設計・調整を進めている。

**BL-2 表面・界面物性 BL**：PFの最長直線部を有効活用して、2013年度末にVUV領域（30-300 eV）偏光切り替え（水平・垂直・右円・左円）挿入光源を追加し、既存の軟X線（SX）領域（250-2000 eV）とタンデム配置した。これにより、VUVとSXを高いレベルで融合することで、高分解能・

高強度を保ちながら、広いエネルギー領域の光を利用することが可能な表面・界面物性研究用のビームラインとして整備を進めている。このビームラインBL-2 MUSASHI（Multiple Undulator beamline for Spectroscopic Analysis of Surface and Hetero Interface）は、2015年度の第二期から共同利用実験への供用を開始した。現在は、BL-2Bの2結晶分光器の最終調整中であり、来年度には4 keVまでのエネルギー領域の光が使えるようになる予定である。

**BL-13 表面化学 BL**：2014年度末に挿入光源をVUV・SX領域（50-2000 eV）偏光切り替え（水平・垂直・右円・左円・右楕円・左楕円）に更新し、角度分解紫外光電子分光，内殻光電子分光，軟X線吸収分光などを用いて表面化学および有機薄膜，物質科学研究等を推進できるように整備を進めた。さらに、ブランチャインを整備することで、持ち込み軟X線分光装置の受け入れを開始して、現在は競争的資金による走査型透過軟X線顕微鏡（STXM）の実験が開始されている。

**BL-16 先導的偏光利用表面分光 BL**：高速偏光スイッチング（右円・左円，水平・垂直）を用いた研究に重点化するためにエンドステーションの最適化を進めている。

(2) グループミーティングの開催回数 7回

(3) グループとして推進している研究

とくにグループとして推進している研究はないが、個々人が国家プロジェクト等に参画し、上記のVUV・SXビームラインを用いた研究を進めている。具体的には、元素戦略拠点形成型，NEDOプロジェクト，および大型科研費，等である。

#### 3. 今後の展望

2017年度は上記のVUV・SX挿入光源ビームラインの更新計画が終了し、全てのビームラインが稼働する予定である。そのため、これまで以上に共同利用を発展させるとともに、グループとして大型資金の獲得を目指していく。

また、VUV-SXを用いた産業利用や国家プロジェクトなどを通して研究費・人件費を継続的に確保すると共に、大学共同利用研究所として大学院生の受け入れ等を通じた次世代光源のための人材育成を進めていく。

ユーザー実験を円滑に進めるための維持・管理を行いつつ、ニーズに合わせた高度化についての検討を行っている。それに伴って、アクティビティーの高いビームライン・装置に選択と集中を行う。また、将来光源を視野にいれた活動も並行して行い、現状の光源と装置を用いて展開可能な新たなサイエンス，実験手法の開発を行いつつ，次期光源におけるビームライン・ステーション・装置に関する検討を行っていく。

## BL-2 MUSASHI：表面・界面光電子分光，広エネルギー帯域軟 X 線分光

堀場 弘司，簗原 誠人，組頭 広志  
物質構造科学研究所放射光科学第一研究系，  
総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

### 1. 概要

BL-2 MUSASHI (Multiple Undulator beamline for Spectroscopic Analysis of Surface and HeteroInterface) は，真空紫外光用と軟 X 線用の 2 台のアンジュレータをタンデム配置して排他的に利用することにより，同一のポートで 30-1800 eV の広範囲に渡って高エネルギー分解能かつ高フラックスな放射光ビームを供給できるビームラインである。

BL-2A ブランチにはエンドステーションとして *in situ* 角度分解光電子分光装置が常設されており，レーザー分子線エピタキシー法等で作製した酸化物薄膜表面やヘテロ界面に対して，偏光可変真空紫外光を用いた角度分解光電子分光や，軟 X 線を用いた内殻光電子分光や共鳴光電子分光等の様々な表面・界面光電子分光測定を同一試料で行うことが可能である。

BL-2B ブランチでは，通常の斜入射回折格子分光器の他に 2 結晶分光器を用いることで，更に広いエネルギー範囲の 30-4000 eV の放射光を同一のポートで利用できる。上流に株式会社日立製作所の専用ステーションが常設され (BL-2BH)，下流側はフリーポート (BL-2BF) として持ち込み装置による共同利用実験が可能である。

### 2. 整備開発および運用状況

2016 年までに，斜入射回折格子分光器と真空紫外光・軟 X 線用アンジュレータの調整が概ね終了し，A/B ブランチともに 30-1800 eV の範囲において設計通りの放射光ビームを利用することが可能となっている。現在 A/B ブランチともに，斜入射回折格子分光器からの真空紫外光・軟 X 線を利用した実験に限り，共同利用実験への供用を行っている。

BL-2A ブランチの角度分解光電子分光装置は共同利用実験装置として順調に稼働中である。

BL-2B ブランチでは，フリーポートにおいて持ち込み装置による共同利用実験を行うと共に，早期の共同利用実験への開放を目指して，2 結晶分光器の調整を継続して行っているところである。

### 3. ビームタイム利用状況

BL-2 MUSASHI では，全ビームタイムのうち概ね 30% 程度を株式会社日立製作所との共同研究で使用し，残りを共同利用実験へと開放している。共同利用実験としては，特に本ビームラインの他にはない特長である，真空紫外光・軟 X 線の相互利用や広エネルギー範囲を生かした利用課題

を推奨して，ビームタイム配分を行っている。具体的には，以下のような利用目的が挙げられる。

- (1) 軟 X 線内殻光電子分光と真空紫外角度分解光電子分光の同時測定による化学結合状態とバンド構造の相互理解
- (2) 軟 X 線角度分解光電子分光と真空紫外角度分解光電子分光の同時測定によるバルク電子状態と表面電子状態の相互理解
- (3) Li から Al までの *K* 端，*3d* 遷移金属 *L* 端等の軟 X 線吸収分光測定による機能性複合材料の全元素選択的電子状態解析

### 4. 今後の展望

斜入射回折格子分光器からの真空紫外光・軟 X 線を利用した共同利用実験と並行して，2 結晶分光器の調整を行い，早期の共同利用実験への開放を目指す。これにより更に利用エネルギー範囲が拡大し，Ca までの *K* 吸収端，および Ag 等の *4d* 遷移金属 *L* 吸収端といった，更に幅広い X 線吸収分光測定が可能となる。

## BL-3B : VUV 24m 球面回折格子分光器 (SGM)

枝元 一之<sup>1</sup>, 吉信 淳<sup>2</sup>, 小澤 健一<sup>3</sup>, 加藤 博雄<sup>4</sup>, 山田 洋一<sup>5</sup>, 櫻井 岳暁<sup>5</sup>, 坂間 弘<sup>6</sup>,  
金井 要<sup>7</sup>, 今村 元泰<sup>8</sup>, 間瀬 一彦<sup>9,10</sup>

<sup>1</sup>立教大学理学部化学科, <sup>2</sup>東京大学物性研究所, <sup>3</sup>東京工業大学理学部, <sup>4</sup>弘前大学理工学部,

<sup>5</sup>筑波大学数理物質科学研究科, <sup>6</sup>上智大学理工学部, <sup>7</sup>東京理科大学理工学研究科, <sup>8</sup>産業技術総合研究所,

<sup>9</sup>物質構造科学研究所放射光科学第一研究系, <sup>10</sup>総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

### 1. 概要

BL-3B は, 2015 年度に PF と表面科学ユーザーグループ (UG) との間で結ばれた協定に基づき, UG 運営ステーションとして運営されている。

BL-3B は定偏角分光器を主体とする光学系を備え (図 1) [1], 10 – 300 eV の VUV-SX 領域をカバーするビームラインである (図 2)。エンドステーションには, マルチチャンネルプレートにより光電子検出感度を高めた VSW 社製 HA54 エネルギー分析器を備えた角度分解光電子分光装置 (ARPES II) が常設され, 固体表面・界面の物性解明を目指した研究が行われている。BL-3B は現在の PF では貴重な 100 eV 以下の光を利用できるビームラインであり, 価電子帯, および浅い内殻準位に対して表面敏感な角度分解光電子分光 (ARPES) 測定を行うことができる。また, ARPES II にはオージェ電子分光器と低速電子回折光学系が設置されており, 固体表面研究に欠かせない表面元素分析や表面結晶方位といった情報も得られるようになっている。

測定試料はロードロックから搬入でき, ロードロックへの試料設置から最短 1 時間で ARPES 測定まで持って行ける。測定時に試料は 5 軸 Omniax マニピュレータに設置するが, このマニピュレータには, 試料加熱機構 (電子衝撃加熱と通電加熱) と液体窒素冷却機構が備わっており, -100°C から 1200°C までの温度制御ができる。ARPES II には, 12 時間ベーキングで  $10^{-8}$  Pa の超高真空を作る試料準備槽が接続されており, 蒸着銃の設置等によりユーザ

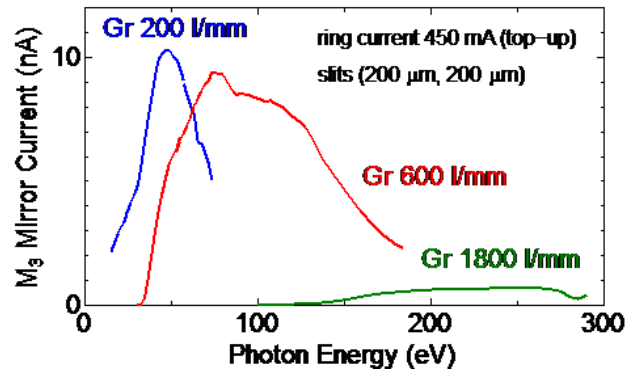


図 2 光強度のエネルギー依存性

一ごとに試料作製環境を整えることが可能である。

このような特性を活かし, 有機薄膜 / 基質界面における電荷移動機構の解明 [2], 有機太陽電池における界面準位アラインメントの解明 [3, 4], 新規材料物質としての酸化超薄膜の開発と電子状態 [5, 6], 光触媒の高活性化を目指した表面改質 [7, 8], 半導体の表面酸化の素過程の解明 [9, 10] などの研究が BL-3B で行われている。また, ARPES II で使用する試料ホルダーは, アンジュレータ光を用いた高分解能光電子分光測定が可能な BL-13B, SES200 装置と共通の仕様となっており, それを活かして BL-3B と BL-13B で相補的なデータの取得を目指すユーザーも増えつつある [2, 11, 12]。

表面科学 UG は, 現在オフラインである ARPES 装置 (VG Microtech 社製 ARUPS 10) も管理運営している。本装置にはヘリウム放電管が取り付けられており, 紫外光電子分光測定が行える。ARUPS 10 は ARPES II のバックアップとして重要であるとともに, ARPES II で新規材料の開発を行う上での予備実験を行う装置として, また ARPES 実験, 表面科学実験の初心者の教育訓練用の装置として重要な役割を果たしている。

### 2. 整備開発および運用状況

ビームラインおよび ARPES II 装置の保守・整備・運用は, 所内電子物性グループ担当者と協議の上, 表面科学 UG の代表者および若干名からなる運営ワーキンググループ (以下運営 WG) が行っている。運営 WG の主な実務は以下の通りである。

- ・ 施設担当者と協力して分光器, 実験装置 (ARPES II,

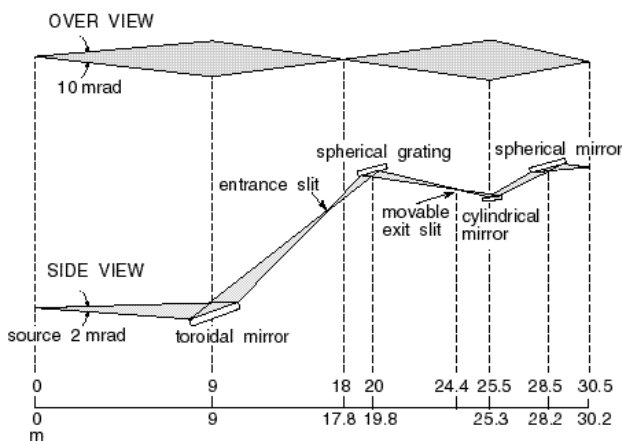


図 1 BL-3B の光学系の概略

ARUPS 10) の維持管理を行う。

- ・ ビームタイム配分原案を作成し、施設の確認・修正・承認を得る。
- ・ 新規ユーザーの教育を、可能な限り一般ユーザーの協力も得て行う。

2015 年度およびそれ以前から継続的に行ってきた、ビームライン・ARPES II 装置の整備開発は以下の通りである。

- (1) ビームライン最下流チャンバーの排気系改良による超高真空化
- (2) トランスファーによる試料搬送機構の設置と SES200 装置との試料ホルダーの共通化 (2010 年 1 月)
- (3) 試料準備槽の設置 (2011 年 11 月)
- (4) 分光器プログラムの更新 (STARS 利用) (2014 年 11 月)
- (5) 通電加熱機構の設置 (2015 年 8 月)
- (6) 試料ロードロックの設置 (2016 年 8 月)

これらの整備開発作業と、装置故障への対処は全てユーザーグループにより行ってきた。

### 3. ビームタイム利用状況

2016 年度のビームタイムの充足率は 87% であり、S 型課題 1 件、G 型課題 16 件、T 型課題 3 件の利用があった。ビームタイムを希望する全グループが利用できることを配分方針としており、2016 年度もその方針に沿ったビームタイム配分を行った。また、新規ユーザーの開拓を目指しており、新規ユーザーに対しては優先的にビームタイムを配分する方針をとっている。2015 年度は 4 グループが、2016 年度は 1 グループが新たに利用を開始した。

### 4. 今後の展望

分光系、光電子分光測定系とも、本質的な改造は現実的には難しいが、今後の改良計画として分光器と光電子分光測定系の連動を目指したい。これは、現在多大な時間を要する共鳴光電子分光測定の自動化や、現状では難しい VUV 領域における吸収スペクトルの測定などを可能とし、またに core-hole clock 分光測定も可能にするものである。このような測定が実現できれば、キャリアダイナミクスや反応ダイナミクスに興味を持つユーザーの発掘につながると期待できる。

### 引用文献

- [1] A. Yagishita, T. Hayaishi, T. Kikuchi and E. Shigemasa, Nucl. Instr. and Meth. **A306**, 578 (1991).
- [2] K. Ozawa, M. Suzuki, R. Tochikubo, H. Kato, Y. Sugizaki, K. Edamoto and K. Mase, J. Phys. Chem. C **120**, 8653 (2016).
- [3] S. Wang, T. Sakurai, X. Hao, W. Fu, S. Masuda and K. Akimoto, J. Appl. Phys. **114**, 183707 (2013).
- [4] X. Hao, S. Wang, W. Hu, T. Sakurai, S. Masuda and K.

Akimoto, Org. Electron. **15**, 1773 (2014).

- [5] T. Hasegawa, S. Munakata, S. Imanishi, Y. Kakefuda, K. Edamoto and K. Ozawa, Surf. Sci. **606**, 414 (2012).
- [6] K. Edamoto, T. Hasegawa, S. Munakata, Y. Kakefuda and K. Ozawa, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **10**, 286 (2012).
- [7] D. Kusano, M. Emori and H. Sakama, RSC Adv. **7**, 1887 (2017).
- [8] M. Emori, A. Kakino, K. Ozawa and H. Sakama, Solid State Commun. **188**, 15 (2014).
- [9] Y. Enta, Int. J. Appl. Nat. Sci. **5**, 63 (2016).
- [10] Y. Enta, H. Nakazawa, S. Sato, H. Kato and Y. Sakisaka, J. Phys. **235**, 012008 (2010).
- [11] K. Ozawa, Y. Mimori, H. Kato, M. Emori, H. Sakama, S. Imanishi, K. Edamoto and K. Mase, Surf. Sci. **623**, 6 (2014).
- [12] Y. Sugizaki, H. Motoyama, K. Edamoto, K. Ozawa, Surf. Sci. (2017), DOI: 10.1016/j.susc.2017.05.010.

## BL-7A：軟 X 線分光 (XAFS, XPS) ステーション

雨宮 健太, 酒巻 真粧子

物質構造科学研究所放射光科学第一研究系,

総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

### 1. 概要

本ビームラインは東京大学大学院理学系研究科 附属スペクトル化学研究センター所属であるが、運営は PF の通常のビームラインと同様に行っており、雨宮と酒巻が担当している。偏向電磁石を光源とし、不等刻線間隔平面回折格子を用いた斜入射分光器により、50-1300 eV の単色軟 X 線を利用することができる [1]。C, N, O など軽元素の K 吸収端, Fe, Co, Ni などの 3d 遷移金属の L 吸収端における X 線吸収分光法 (XAFS), X 線磁気円二色性 (XMCD), および各種元素の光電子分光 (XPS) を行うことを主な目的としており、特に CK 吸収端においても光強度が極端には減少しないことが特長である。偏光としては水平直線偏光の他に、電子軌道面から 0.4 mrad 程度上または下の光を取り込むことで楕円偏光を利用することもできる。

### 2. 整備開発および運用状況

基本的には完成したビームラインであるため、光学系については現状を維持するための整備のみを行っている。焦点位置は一つだけであるが、その 0.7 m 程度上流に常伝導電磁石を用いた XMCD 測定装置を常設し、下流の装置を必要に応じて入れ替えて実験を行っている。施設として管理している実験装置は、XMCD 測定装置の他に、小型深さ分解 XAFS 装置と光電子分光装置である。ユーザー持ち込み装置は下流のポートで受け入れている。

### 3. ビームタイム利用状況

例年、利用可能なビームタイムに対して、1.2～1.5 倍程度の希望が寄せられている。評点が高い課題を優先しながら、原則として利用を希望するユーザー全員にビームタイムを配分している。また、上流に XMCD 測定装置が常設されていて、そのまま下流にビームを抜くことができるため、上流で測定をしている間に下流で準備作業ができるように、配分を工夫している。

### 4. 今後の展望

BL-7A と同程度のエネルギー領域をカバーするアンジュレータビームラインとして、BL-2, BL-13, BL-16 があるので、それらとうまく使い分けていくことが有効であると考えている。特に最近、BL-7A で予備的 (開発的) な実験を行い、目的が立ったところで BL-2 や BL-16 で実験をして結果を出すというケースがあり、今後もこのような使い方は推奨されるべきであろう。光電子分光については、アンジュレータビームラインの方が圧倒的に質の良いデー

タが短時間で得られるので、マニピュレータを直接改造して特殊な実験を行うなどの理由がない限り、BL-7A を利用するメリットはあまりないと考えられる。一方、吸収分光については、特に C, N, O のような比較的低いエネルギーに吸収端をもつ元素の場合、高いエネルギー分解能やフラックスを必要としない試料ならばアンジュレータビームラインと遜色ないデータが得られるので、むやみにアンジュレータビームラインを利用せずに、BL-7A でできる実験は BL-7A で行うようにビームタイムをアレンジしていく予定である。

### 引用文献

- [1] K. Amemiya, H. Kondoh, T. Yokoyama and T. Ohta, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **124**, 151 (2002).

# BL-11A：軟 X 線斜入射回折格子分光ステーション

北島 義典

物質構造科学研究所放射光科学第一研究系

## 1. 概要

BL-11A は、偏向電磁石を光源とし、集光鏡と不等間隔平面回折格子を用いた可変偏角斜入射分光器により、70-2000 eV の単色軟 X 線を利用することができるように設計されている。光源がアンジュレータではなく偏向電磁石であることから、特に幅広いエネルギー領域にわたって利用できることを特徴に光学系が設計されており、C (炭素)、N (窒素)、O (酸素)、F (フッ素)、Na (ナトリウム)、Mg (マグネシウム)、Al (アルミニウム) など軽元素の XAFS スペクトル測定が可能である [1]。これらの軽元素は、材料科学、環境科学、生命科学など、広範な分野で重要であり、ビームラインの管轄は「電子物性」グループであるものの、利用実験としても「化学・材料」「構造物性」「生命科学」を含む様々な分野の測定が行われている。

BL-11A としては、PF 創設当初の 1982 年から市販の回折格子分光器を設置した固体分光ビームラインとして整備されたが、1996 年に光学系を全面更新したところ、それまで回折格子分光と結晶分光の狭間とされてきた 1000 - 1800 eV の軟 X 線領域の利用が可能となった。このエネルギー領域を利用できる実験ステーションは少なく、汎用ステーションとして実験装置を持ち込むことが可能となっているため、近年では、分光測定のみならず、軟 X 線領域の回折実験も開始され、検出器開発や光学素子評価等も含め、多種多様な実験が行われている。

## 2. 整備開発および運用状況

2013 年度末に光学系の大幅更新を行って安定性の向上が図られた。2014 年度初めからは光学系の調整に時間を割かなければならなかったが、加速器の運転時間が短いなか、全く利用実験が行えないという状況を避けるため、2014 年 11 月から理想的とは言えない状況でも利用実験を一部再開していたが、2015 年度で光学系の調整は基本的に終了し、2016 年度は全ての時間を利用実験に充てた。

## 3. ビームタイム利用状況

近年は同じエネルギー領域をカバーするアンジュレータ光源の高性能ビームラインが立ち上がってきているが、検出器の開発や新しい実験装置の立ち上げなど、少し時間をかけなければならない利用には適している。産業利用、元素戦略プロジェクトによる優先利用を含め、新規の利用希望にも迅速に対応して測定が行えるようにしている。

## 4. 今後の展望

偏向電磁石光源の汎用実験ステーションであることから、大きな投資を行うことなく、現状の汎用性を維持して利用研究を促進していきたいと考えている。

## 引用文献

[1] <http://pfwww.kek.jp/sxspec/sx/bl11a.html>

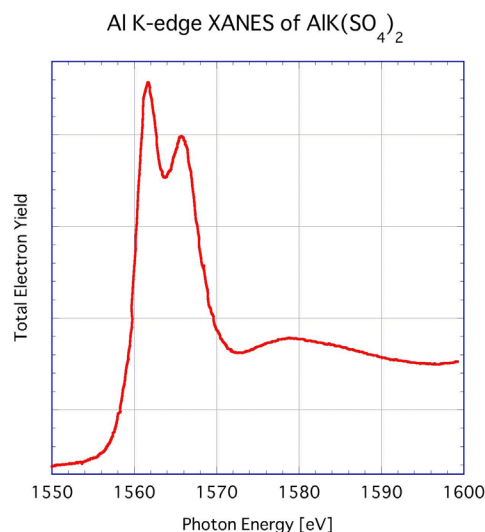


図1 カリミヨウバンの Al K 吸収端 XANES スペクトル

# BL-11B：軟X線2結晶分光ステーション

北島 義典

物質構造科学研究所放射光科学第一研究系

## 1. 概要

BL-11Bは、偏向電磁石を光源とし、集光鏡と高真空2結晶分光器を用いて軟X線領域（1.72 - 5.0 keV）の単色光を供給するステーションである。このエネルギー領域は、放射光の登場によって利用できるようになってきたところであり、PF創設当初の1982年から汎用ビームラインとして整備されたが、2009年に他のビームラインで使用しなくなった2結晶分光器を移設したことにより、分光結晶冷却系が改善され、ビームの安定性が向上した。当初より、光源リングとの間にBe窓が存在せず、通常のX線ステーションでは利用困難な低エネルギー領域の分光研究に用いられることを想定して設計されているため、Si（ケイ素）、P（リン）、S（イオウ）、Cl（塩素）など軽元素のEXAFS測定が可能となっている[1]。これらの軽元素は、材料科学、環境科学、生命科学など、広範な分野で重要であり、ビームラインの管轄は「電子物性」グループであるものの、利用実験としても「化学・材料」「構造物性」「生命科学」を含む様々な分野の測定が行われている。

特にSi(111)結晶では分光することができない2.1 keV以下の軟X線領域を利用できる実験ステーションは少なく、汎用ステーションとして実験装置を持ち込むことが可能となっているため、近年では、分光測定のみならず、軟X線領域の回折実験も開始され、検出器開発や光学素子評価等も含め、多種多様な実験が行われている。

## 2. 整備開発および運用状況

基本的には「完成した」ビームラインであり、2013年度にビームライン制御系を更新した後は、特に新規の整備等を行っていない。

## 3. ビームタイム利用状況

数年前には軟X線領域の共鳴散乱実験装置の立ち上げを含むS型課題等に多くの時間が割かれたが、近年は需給バランスがちょうどよいくらいとなっている。産業利用、元素戦略プロジェクトによる優先利用を含め、新規の利用希望にも迅速に対応して測定が行えるようにしている。

## 4. 今後の展望

偏向電磁石光源の汎用実験ステーションであることから、大きな投資を行うことなく、現状の汎用性を維持して利用研究を促進していきたいと考えている。

## 引用文献

[1] <http://pfwww.kek.jp/sxspec/sx/bl11b.html>

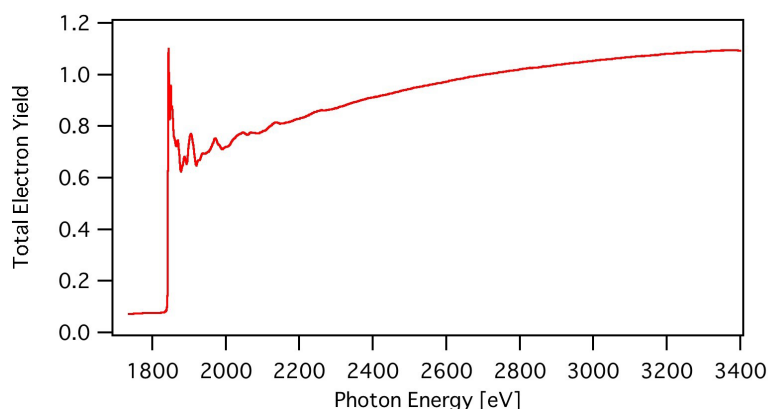


図1 シリコンウェハーのEXAFS スペクトル

# BL-11D：軟 X 線光学素子評価装置用ステーション

間瀬 一彦<sup>1,2</sup>, 菊地 貴司<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系,

<sup>2</sup> 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

## 1. 概要

BL-11D は 2010 年から光学素子評価用ステーションとして利用されている。本ステーションは等間隔直線刻線の球面回折格子を用いた可変偏角型分光器を備えており (図 1), 60 ~ 900 eV の水平直線偏光を利用できる [1]。焦点位置には回折格子や多層膜の反射率などを測定できる光学素子評価装置 (図 2) が常設されており, 入射角 5° から 89° までの反射率測定が可能である。検出器の回転アームは 200 mm と比較的長いので, 入射ビームを絞ること, 細い検出器スリットを用いることにより, 0.1° 以下の角度分解能での測定が可能である。試料台には最大直径 200 mm の試料あるいは小さな試料を複数個載せることができ, パソコン制御により一度の試料設置で一連の測定を行うことができる。本装置には 2 台の 800 L/s のターボ分子ポンプが設置されており, 到達圧力は  $1 \times 10^{-5}$  Pa 以下, 排気開始から測定開始までは数時間である。光学素子評価用装置の下流には持ち込み装置用スペースが用意されている。このスペースに表面コインシデンス分光装置 (図 3) [2] を設置してオージェ電子-光電子コインシデンス分光,

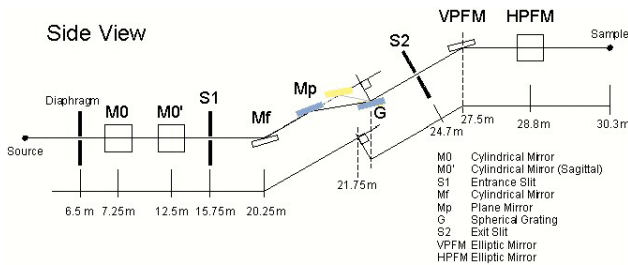


図 1 BL-11D の光学系の概略図。数値は光源からの距離。

## 反射率計の仕様

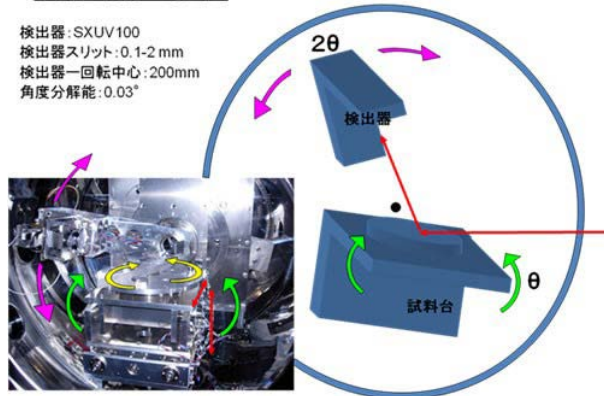


図 2 光学素子評価装置の概念図

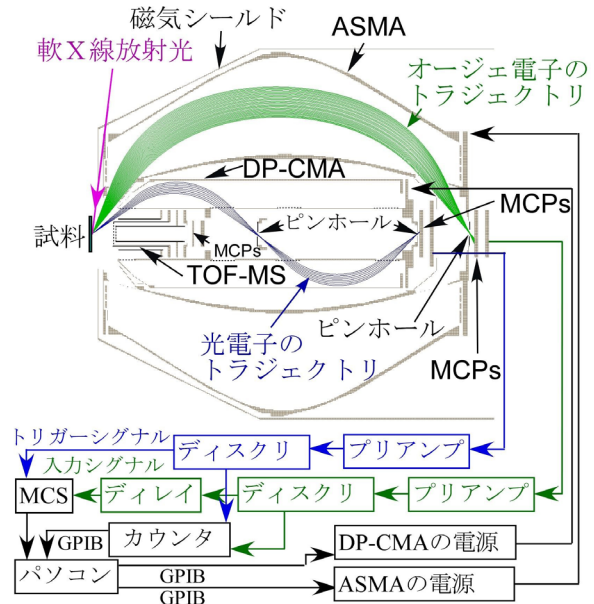


図 3 表面コインシデンス分光装置の模式図

電子-イオンコインシデンス分光を用いた表面局所電子状態, 内殻正孔緩和ダイナミクス等の研究が行われている。

## 2. 整備開発および運用状況

ビームラインの調整および光学素子評価装置の整備はユーザーである羽多野忠氏 (東北大学多元物質科学研究所) と協力して行っている。また, 表面コインシデンス分光装置もユーザーと協力して整備している。その結果, 1 年間にわたり安定して使用できる状況を維持できた。

## 3. ビームタイム利用状況

2016 年度の装置別, 期別ビームタイム配分結果を表 1 に示す。ビームタイムを希望する全グループが利用できることを配分方針としており, 2016 年度もその方針に沿って

表 1 2016 年度の装置別, 期別ビームタイム配分結果。単位は日。

	調整	反射率測定	表面コインシデンス分光	持込み装置	合計	要求	配分率
第 1 期	2.0	17.0	27.0	0.0	46.0	46.0	100.0%
第 2 期	0.0	21.0	19.0	8.0	48.0	51.5	93.2%
第 3 期	0.0	14.5	0.0	5.5	20.0	19.5	102.6%
合計	2.0	52.5	46.0	13.5	114.0	117.0	97.4%
割合	1.6%	22.0%	69.3%	2.4%	100%		



たビームタイム配分を行った。2016年度の新規ユーザーは1グループであった。

#### 4. 今後の展望

ビームラインと光学素子評価装置、表面コインシデンス分光装置は、ユーザーの意見を聞きながら改良を進める。また、科研費等に申請することによる外部資金の獲得、学会等での宣伝による新規ユーザーの発掘、学生ユーザーのサポートを通じた人材育成、民間研究者に対する宣伝による産業利用の促進に努める。

#### 引用文献

- [1] Photon Factory activity Report 1997 **15A**, 101 (1997).
- [2] K. Mase, K. Hiraga, S. Arae, R. Kanemura, Y. Takano, K. Yanase, Y. Ogashiwa, N. Shohata, N. Kanayama, T. Kakiuchi, S. Ohno, D. Sekiba, K. K. Okudaira, M. Okusawa and M. Tanaka, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 094704 (2014).

# BL-13A/B : 表面化学研究用真空紫外軟 X 線分光ステーション

間瀬 一彦<sup>1,2</sup>, 豊島 章雄<sup>1</sup>, 菊地 貴司<sup>1</sup>, 田中 宏和<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系,

<sup>2</sup> 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

## 1. 概要

可変偏光真空紫外・軟 X 線分光ステーション BL-13A/B の目的は角度分解紫外光電子分光, 内殻光電子分光, 軟 X 線吸収分光などを用いて表面化学および有機薄膜, 物質科学研究等を推進することである。本ステーションは Apple II 型可変偏光アンジュレータと不等刻線間隔平面回折格子を用いた斜入射分光器 [1-3] を備えており, 48~2,000 eV の水平直線偏光, 102~2,000 eV の垂直直線偏光, 74~700 eV の左右円偏光, 59~2,000 eV の左右楕円偏光を利用できる。本ステーションの配置図を図 1 に示す。振り分け鏡を入れると 13B が使用でき, 振り分け鏡を抜くと 13A が使用できる。振り分け鏡の Ni コート面, Cr コート面を利用すると効率よく高次光を除去できる [4]。現在, 13A の第一焦点位置にはユーザー持込みのコンパクト走査型透過 X 線顕微鏡 (cSTXM) [5, 6] が設置されており, 有機材料, 金属材料, 磁性材料, 生体物質, 環境物質など幅広い分野の研究に利用されている。また, BL-13A の第二焦点位置にはユーザー持込み装置用のスペースが用意されている。一方, 13B の第一焦点位置には光電子分光装置 (SES-200, Scienta, 図 2) が常設され, 高分解能角度分解光電子分光, 高分解能内殻光電子分光, 高分解能軟 X 線吸収分光が行われている [7]。13B の第二焦点位置にはユーザー持込みの

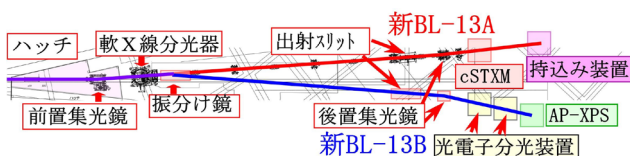


図 1 BL-13A/B の配置図

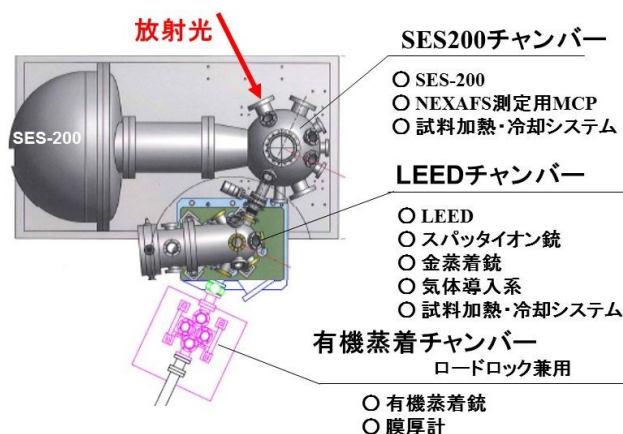


図 2 光電子分光装置 (SES-200, Scienta) の構成

準大気圧 X 線光電子分光装置 (AP-XPS) が設置されていて, 貴金属触媒表面上での化学反応の研究などが行われている [8]。さらに, 第一焦点と第二焦点の中間位置には低温領域でも試料温度を精密に制御できるユーザー持込みの光電子分光装置 (Phoibos100, SPECS) が設置されており, 表面上に吸着した分子の化学状態等の研究が行われている [9]。

## 2. 整備開発および運用状況

2014 年 2 月に BL-13 用挿入光源として APPLE-II 型可変偏光アンジュレータが導入されたことに伴い, 放射線遮蔽を増強するとともに, 出射スリットを最適位置に移動して, ビームラインの再調整を行った。その結果, 水平直線偏光, 光エネルギー 401 eV, 光強度  $2.3 \times 10^{11}$  光子/秒において最高分解能  $E/\Delta E = 10,000$  を達成するとともに, 50 eV 以上での光強度を 1 桁程度改善した (図 3)。また, 13A の第一焦点位置でのスポットサイズは (水平)  $220 \mu\text{m} \times$  (垂直)  $49 \mu\text{m}$  であった。酸素を導入しながら非分光光を照射して振り分け鏡の Cr コート面の炭素汚染を除去することにより, 炭素 K 吸収端領域において 13B に高次光の少ない高強度の光を供給できるようにした [4]。また, 2016 年 4 月および 10 月, 2017 年 1 月, 3 月にユーザーに協力してもらって SES200 光電子分光装置の修理を行ない安定して使用できる状況を 1 年間維持した。

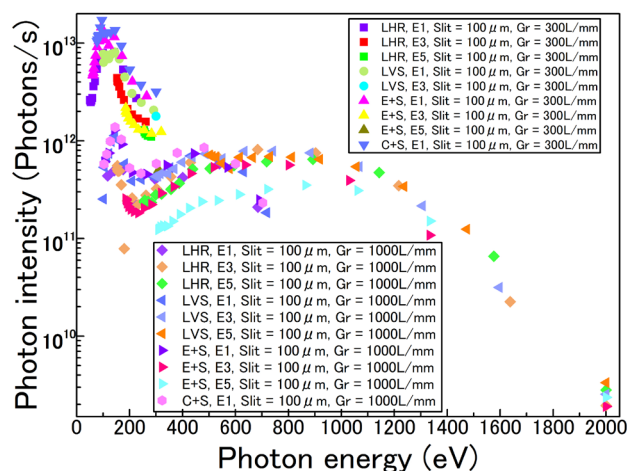


図 3 LHR は水平直線偏光, LVS は垂直直線偏光, E+S は楕円偏光, C+S は円偏光, E1 は 1 次光, E3 は 3 次光, E5 は 5 次光, Gr は回折格子を表す

### 3. ビームタイム利用状況

2016年度の装置別、期別ビームタイム配分結果を表1に示す。2016年度はビームタイムが少なかったことから平均ビームタイム配分率は52.6%と厳しくなった。そこで、有償利用、評点の高い課題を優先するとともに、13Aと13Bを交互に使用することで、試料作製、装置調整時間を確保し効率よく実験できるように配分した。

### 4. 今後の展望

2014年に可変偏光アンジュレータを導入した結果、世界的競争力が増してユーザーと課題、有償利用が増え、質の高い研究と人材育成ができるようになった。今後は既存の装置を改良しつつ新規ユーザーを開拓するとともに、軟X線小角散乱、超伝導軟X線検出器を用いた材料分析など興味深い研究に取り組むユーザーを呼び込む。また、学会等で本ビームラインの研究成果を報告し、民間研究者の利用を呼びかけるなどして産業利用を促進する。

### 引用文献

- [1] K. Amemiya and T. Ohta, J. Synchrotron Rad. **11**, 171 (2004).
- [2] K. Mase, A. Toyoshima, T. Kikuchi, H. Tanaka, K. Amemiya and K. Ito, AIP conference proceedings **1234**, 703 (2010).
- [3] A. Toyoshima, H. Tanaka, T. Kikuchi, K. Amemiya and K. Mase, J. Vac. Soc. Jpn. **54**, 580 (2011).
- [4] A. Toyoshima, T. Kikuchi, H. Tanaka, K. Mase and K. Amemiya, J. Synchrotron Rad. **22**, 1359 (2015).
- [5] Y. Takeichi, N. Inami, H. Suga, K. Ono and Y. Takahashi, Chem. Lett. **43**, 373 (2014).
- [6] Y. Takeichi, N. Inami, H. Suga, C. Miyamoto, T. Ueno, K. Mase, Y. Takahashi and K. Ono, Rev. Sci. Instrum. **87**, 013704 (2016).
- [7] A. Toyoshima, T. Kikuchi, H. Tanaka, K. Mase, K. Amemiya and K. Ozawa, J. Phys.: Conf. Ser. **425**, 152019 (2013).
- [8] R. Toyoshima, M. Yoshida, Y. Monya, Y. Kousa, K. Suzuki, H. Abe, B. Mun, K. Mase, K. Amemiya and H. Kondoh, J. Phys. Chem. C **116**, 18691 (2012).
- [9] S. Shimizu, H. Noritake, T. Koitaya, K. Mukai, S. Yoshimoto and J. Yoshinobu, Surf. Sci. **608**, 220 (2013).

表1 2016年度の装置別、期別ビームタイム配分結果。単位は日。

	調整	STXM	持込み装置	SES200	Phoibos100	AP-XPS	合計	要求	配分率
第1期	1.0	18.2	3.7	11.7	1.5	10.0	46	86.5	53.2%
第2期	1.7	18.8	2.3	13.3	1.5	10.3	48	84.0	57.1%
第3期	0.0	15.3	0.7	5.7	0.7	5.7	28	61.3	45.7%
合計	2.7	52.3	6.7	30.7	3.7	26.0	122	231.8	52.6%
割合	2.2%	42.9%	5.5%	25.1%	3.0%	21.3%			

# BL-16A：可変偏光軟 X 線分光ステーション

雨宮 健太, 酒巻 真粧子

物質構造科学研究所放射光科学第一研究系

総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

## 1. 概要

APPLE-II 型アンジュレータを光源とし、円偏光、垂直・水平直線偏光など、軟 X 線領域の各種偏光が利用できるビームラインである。2 台のタンデム配置アンジュレータとキッカー電磁石を組み合わせることで 10 Hz の偏光スイッチングが可能である [1]。不等刻線間隔平面回折格子を用いた斜入射分光器により、250-1500 eV 程度の単色軟 X 線を利用することができる [2]。測定としては主に X 線吸収分光法 (XAFS) を用いており、Fe, Co, Ni などの 3d 遷移金属の L 吸収端における磁気円二色性 (MCD) や磁気線二色性 (MLD) の測定を行うこと、および波長分散型 XAFS 法によって固体表面における化学反応のその場追跡を行うことを主な目的としている。また、偏光を活かした先端的な測定手法の開発にも力を入れている。

## 2. 整備開発および運用状況

多くの測定装置がビームを利用するため、従来は装置の切り替えを頻繁に行う必要があるのが問題であったが、装置群の整理の結果、2015 年度より図 1 のような配置となっている。フリーポート以外に設置した装置を移動する必要がなく、また、フリーポートでの入れ替え作業中にも常に別のポートで実験ができるため、効率的なビームタイム配分ができる。個々の整備・開発状況は以下の通りである。

### ・ 5T-XMCD 装置用 SDD の整備

素子表面の汚染のために全くシグナルが得られなくなっていた SDD を修理して再調整を行い、部分蛍光収量法による XMCD 測定システムを整備した。これにより、絶縁性の試料や表面が厚い皮膜に覆われた試料の測定や、全電子収量法と部分蛍光収量法 XMCD スペクトルの同時測定による簡易的な深さ分解測定が可能になった。

### ・ 蛍光収量深さ分解 XAFS (XMCD) 法の開発

酒巻が中心となって、軟 X 線 CCD カメラを用いた蛍光収量法による深さ分解 XAFS (XMCD) 測定法の開発を行い、FeCo 薄膜に対する磁場中での深さ分解 XMCD の測定に成功した [4]。従来の深さ分解 XAFS (XMCD) 法は電子収量法によるものであったために、磁場中や電場中では測定ができなかったが、この手法の開発により、測定対象を大きく拡大することができる。

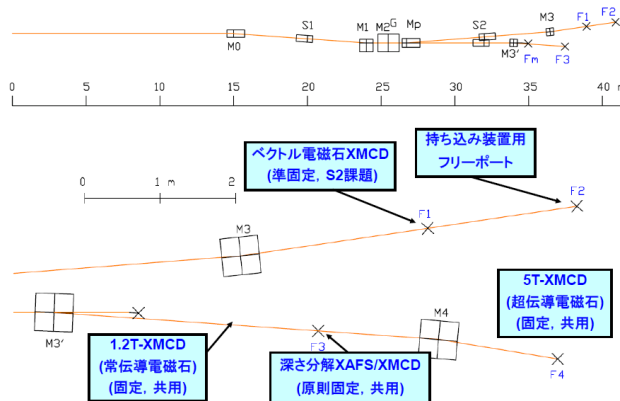


図 1 BL-16A における実験装置の配置

## 3. ビームタイム利用状況

複数の S2 課題および MP 課題が有効なため、それらの研究のアクティビティを確保しつつ、過度のビームタイム集中を防ぐ意味から、S2 および MP 課題での合計ビームタイムを、全体の半分程度にする方針とした。G 課題については、比較的評点の高い課題に対して最低限必要なビームタイムをなるべく確保した上で、比較的評点の低い課題に対して、希望の 1/2 から 1/3 程度で配分できるところまで配分した。また、2つのブランチに複数の装置が設置されている利点を活かし、一方で測定をしている間に他方で準備作業ができるように配分を工夫した。

## 4. 今後の展望

最近、BL-2 や BL-13 など、偏光可変の軟 X 線ビームラインが相次いで稼働したが、偏光スイッチングが行えるのは BL-16 のみである。偏光スイッチングは、時間とともに変化する試料に対して特に有効なので、波長分散 XAFS 法と垂直・水平偏光のスイッチングを組み合わせた表面化学反応中の配向変化のその場観察 [3] など、BL-16 ならではの手法の開発を進める予定である。そのために、偏光スイッチングによる PF リング全体のビーム軌道の変動を抑制するとともに、偏光スイッチングの ON/OFF が随時可能になるように、光源グループと共同で調整を行っていく予定である。

一方、様々な XMCD 測定が行える実験装置が整備されている強みを活かし、多くのユーザーが簡便に磁性試料の測定を行い、多くの成果を挙げられる環境を維持していく。特に、最近では比較的小さい試料の測定希望が増えており、位置合わせに時間がかかることが多い。そこで試料の上下

機構とミラーによるビームの左右方向の走査を組み合わせて、二次元的なマッピングを可能にし、試料位置を効率的に決定できる機構を導入する予定である。

#### 引用文献

- [1] K. Amemiya, M. Sakamaki, T. Koide, K. Ito, K. Tsuchiya, K. Harada, T. Aoto, T. Shioya, T. Obina, S. Yamamoto and Y. Kobayashi, *J. Phys.: Conf. Ser.* **425**, 152015 (2013).
- [2] K. Amemiya, A. Toyoshima, T. Kikuchi, T. Kosuge, K. Nigorikawa, R. Sumii and K. Ito, *AIP Conf. Proc.* **1234**, 295 (2010).
- [3] K. Amemiya, M. Sakamaki, S. Nakamoto, M. Yoshida, K. Suzuki, H. Kondoh, T. Koide, K. Ito, K. Tsuchiya, K. Harada, H. Sasaki, T. Aoto, T. Shioya, T. Obina, S. Yamamoto and Y. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 161601 (2012).
- [4] M. Sakamaki and K. Amemiya, *Rev.Sci.Instrum.* **88**, 083901(2017).

## BL-20A : 3 m直入射型分光器

河内 宣之<sup>1</sup>, 北島 昌史<sup>1</sup>, 穂坂 綱一<sup>1</sup>, 足立 純一<sup>2,3</sup>, 菊地 貴司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 理学院 化学系, <sup>2</sup> 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系

<sup>3</sup> 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

### 1. 概要

BL-20A では、偏向電磁石部からの放射光を直入射分光器で分光し、エネルギー 6 eV から 40 eV の比較的強い光が得られる。30 eV 以下の放射光がフリーポート利用できる、PF で唯一のビームラインである。このエネルギー領域は、到達可能なレーザー光源が現れている。しかし、そのようなレーザー装置は、波長掃引性が高いとは言えない。そのため、波長掃引性が重要となる分光的な研究分野では非常に重要な光源である。特に、Xe ランプそして He I 光源、He II 光源の間の波長領域にある、強い強度の光を得るため重要である。

本ビームラインは教育用ビームラインとして位置づけられている。平成 21 年 4 月に物質構造科学研究所放射光科学研究施設は東京工業大学理工学研究科（理系）化学専攻（現：理学院化学系）と、放射光科学の教育・研究推進についての合意書及び付随する覚書を交わした。この協定は、3 年ごとの評価を受けながら、現在も続いており、その下で教育用ビームラインとして活動している。また大学等運営ステーションとして、東京工業大学理学院化学系河内・北島研究室が、その運営に参画している。また、KEK のサマーチャレンジにて秋の実習が行われる際には、BL-20A からの放射光を光源とする実習を行っている。

### 2. 整備開発および運用状況

フリーポートビームラインであり、常置の実験装置は準備されていない。ただし、可視～真空紫外発光測定装置が東京工業大学運営グループ側により、整備されている。

上記発光測定装置では、東京工業大学運営グループにより新たに時間デジタル変換器が整備され、実習や共同利用実験での利用に供されている。

全ての持ち込み装置で使用可能な差動排気システムが、東京工業大学運営グループ側の負担で整備されている。この差動排気システムをすべてのユーザーに公開した結果、様々な気体試料を安心して（ビームライン上流部へ与える影響を心配することなく）、使用できるようになっている。

分光器の保守は所内スタッフが対応し、運営グループおよび上智大学の関係研究室（小田切准教授・星野准教授）へも協力を要請した。また、真空立ち上げ作業は、業務委託スタッフの支援により行われている。

経年劣化への対応として、2016 年度は分光器の回折格子ホルダー一部の O/H 作業を行うことができた。大気側から真空槽内にある回折格子の調整を、以前と同様に行うことができるよう復旧した。この O/H 作業により、わずか

に回折格子の取り付け角（調整機構がない方向）が変化してしまっただけで、低エネルギー側の可動範囲が狭められてしまっている。次の夏季停止中に対策を予定している。

制御・DAQ 系の回路クレートが故障し、別用途のための同等品を代替として使用する状況となっている。すでに修理が受けられない機器であり、早期の更新が望まれる状況にある。

### 3. ビームタイム利用状況

ビームタイムの配分は運営グループである東京工業大学の河内・北島研究室スタッフが担当した。

ビームタイムは、ユーザーからの希望と課題の評点を基に決めた。自前の装置を持ち込むユーザーが比較的多いので、装置の入れ替えの頻度ができるだけ少なくなるように配慮した。またユーザーの切り替え日をマシンスタディーの前日に設定するなどの工夫をした。こうすることにより、マシンスタディーの時間を真空引きなどの準備に当てることができ、ビームタイムの有効利用に資することができた。また KEK サマーチャレンジの一環としてのビームタイムと以下で述べる教育用ビームタイムも含めて、全体としての配置バランスにも配慮した。

教育用ビームラインとの位置づけに基づき、修士課程 1 年生に対して実習を行なってきている（科目名：放射光科学実習）[1,2]。2016 年度は、一泊二日の実習を 5 回実施し、25 名の学生を受け入れた。本実習に当たっては、KEK 大学等連携支援事業からの援助を受けた。また、これまでの放射光実習は東京工業大学において高い評価を受け、東京工業大学教育賞優秀賞（2015 年度）を受賞した。

KEK サマーチャレンジ [3] では、運営グループである東京工業大学河内・北島研究室だけでなく、上智大学、新潟大学の関連研究室からの協力、また、立教大学、東邦大学の関連教員からもアドバイスをを受けて、積極的に対応する方針にしている。2016 年度は、上智大学のスタッフが担当して秋の実習を行った。夏の実習に参加した 4 名の学生全員が、秋の実習（11/12, 13）にも参加した。

### 4. 今後の展望

(1) これまで多くの実績が上がっており、更なる発展が見込まれる原子分子の光ダイナミクスの研究を、主たる実験として進めていく。そのためにも、ビームタイムの配分、そして、ビームラインの維持・管理などを、運営グループと密接な協力体制の下に着実に進める。

- (2) 30 eV 以下の VUV 光が使える PF 内で唯一のフリーポートビームラインとしての特徴を生かし、新規ユーザーの開拓をいっそう進める。そのためのユーザー教育と支援をきめ細かく行う。また、10 eV 以下の領域の低エネルギー側の利用の要望があり、現在、実効的には利用が困難な状況にある。このエネルギー領域でも、利用可能となるよう運用法の検討を進める。
- (3) 大学院教育における放射光科学実習を継続して実施する。学生の主体的な工夫を盛り込めるように時間的な余裕を作る。
- (4) 大学教育における KEK および東京工業大学、他機関との連携を模索する。例えば、放射光科学のうち光発生及び加速器にかかわる教育を強化することが望まれ、KEK 側からの教育支援を活性化させていく。また、KEK のサマーチャレンジのような活動におけるビームライン実習に対し積極的に関与する。
- (5) 他放射光施設の同じエネルギー領域のビームラインとの情報交換を進め、互いに補完できる部分があれば協力を図る。

#### 引用文献

- [1] 河内宣之, 北島昌史, 穂坂綱一, 足立純一, 高井良太, 2016 年度量子ビームサイエンスフェスタ, ポスター 266V (2017/3/14).
- [2] 河内宣之, 北島昌史, 穂坂綱一, PF News vol.35, No.1, p.35 (2017).
- [3] 第 10 回サマーチャレンジ, “演習課題 M05”, [http://www2.kek.jp/ksc/10th\\_2016/2016img/2016\\_M05.pdf](http://www2.kek.jp/ksc/10th_2016/2016img/2016_M05.pdf).

# BL-28A/B：可変偏光 VUV・SX 不等間隔平面回折格子分光器 高分解能角度分解光電子分光実験ステーション

小野 寛太<sup>1,2</sup>, 堀場 弘司<sup>1,2</sup>, 組頭 広志<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系

<sup>2</sup> 総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科物質構造科学専攻

## 1. 概要

BL-28A/B は可変偏光アンジュレータと不等間隔平面回折格子を用いた可変偏角 Monk-Gillieson 型分光器を備えたビームラインであり、主に 30~300 eV の領域の真空紫外・軟 X 線を用いた研究が行われている。ビームラインは 2 つのブランチからなり、ミラーの切り替えにより排他的な利用を行っている。BL-28A は高分解能角度分解光電子分光ビームラインであり角度分解光電子分光装置 (SES-2002) が常設されている。また、BL-28B はユーザー持ち込み装置用のフリーポートとなっている。

## 2. 整備開発および運用状況

BL-28A では国際的競争の激しい新物質の電子構造研究において主導権を握ることが出来るように、ユーザーフレンドリーかつ高分解能・高精度の角度分解光電子分光実験が可能なビームラインとして整備している。経年に伴う装置の老朽化が目立つものの、共同利用実験では順調に成果が上がっている。また、BL-28B はユーザー持ち込み装置を設置可能なフリーポートとして整備をしている。また、2016 年度からは新しい角度分解光電子分光装置の整備を進めている。

## 3. ビームタイム利用状況

BL-28A/B の共同利用実験では、本ビームラインの特長である低エネルギー (特に 30~100 eV) で高分解能の偏光可変真空紫外・軟 X 線放射光を活かした利用課題に重点を置いてビームタイム配分を行っている。本ビームラインで重点的に行っている研究テーマとしては下記の研究が挙げられる。

### (1) 次世代デバイス開発の扉を開く電子構造の探索 [1]

BL-28A の角度分解光電子分光装置を用いてイリジウム酸化物内の電子を運動量空間で隈無く探索し、フェルミ海の中心一点でのみ海面に顔を出す放物型の電子構造を発見した。これはトポロジカル理論を駆り立てる宝庫とも言える構造で、そこに歪みを加えて空間対称性を破ればトポロジカル絶縁体に、また、磁場を加えて時間対称性を破ればワイル半金属に変化するなど、純スピン流を流す様々な量子現象を発現させる上での起点となる母体となる電子状態である。この成果は、最近急速に理論研究が進展する中、実験による検証が欠如していたため、強く待ち望まれていた。理論予想を裏付ける特異な電子構造が発見されたことで、「強相

関スピントロニクス」時代の幕開けに向けて、強相関かつトポロジカルな物質群を対象とする研究が、理論と実験の両面から加速することが今後期待される。

(2) 反強磁性の影響が強く残ることで知られる電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体で、反強磁性の影響が排除された超伝導状態の観測 [2]

常圧でもっとも高い超伝導転移温度を持つ銅酸化物超伝導体では、反強磁性絶縁体である母物質に電子あるいは正孔をドープすることで超伝導が発現するが、電子をドープした場合には反強磁性の影響が強く、超伝導状態でも反強磁性が共存しているものと考えられてきた。BL-28A 用いた角度分解光電子分光の測定から、反強磁性の影響がない高温超伝導状態を世界で初めて観測し、その超伝導状態が従来考えられていたよりも広い電子濃度領域で、しかもより高温まで実現されていることを明らかにし、超伝導と反強磁性の関係を最重要視してきたこれまでの高温超伝導の物理の根幹部分に見直しを迫る。

## 4. 今後の展望

現在、新しい光電子分光装置の整備を進めており、角度分解光電子分光実験の効率が飛躍的に向上し、上述したような新物質の電子構造研究が大きく進展すると考えられる。

## 引用文献

- [1] T. Kondo *et al.*, *Nature Comm.* **6** 10042 (2015).
- [2] M. Horio *et al.*, *Nature Comm.* **7** 10567 (2016).