

### 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、現在ほぼ全てのビームライン更新が終了した。この更新計画では、「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を行う」である。具体的な内容については、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 を導入し、現在 BL-28B において装置の最終調整を進めている。

**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 BL-2 MUSASHI (Multiple Undulator beamline for Spectroscopic Analysis of Surface and Hetero Interface) として整備を進めている。BL-2B においては、本年度に 2 結晶分光器の最終調整が終了し、4 keV までのエネルギー領域の光が使えるようになった。

**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。

BL-19 STXM を用いた産業利用や国家プロジェクトを推進するために、本年度から整備計画を進めている。設計はほぼ終了し、来年度からスクラップ&ビルトが開始される。

- (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

2018 年度は新たに BL-19 の整備計画が進められる。これにより、PF の全 VUV・SX 挿入光源ビームラインの更新計画が終了し、全ての挿入光源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、グループとして的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継続的に行っている。それに伴って、アクティビティの高いビームライン・装置に選択と集中を行う。また、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，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っている。また，2 結晶分光器の調整が概ね完了し，新たに 2 - 4 keV までの高エネルギー X 線が利用可能となった。

## 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に加えて，2 結晶分光器の調整が完了したことにより，4 keV までの高エネルギー X 線が利用可能となった。これにより，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 線吸収分光測定を利用した研究の発展が見込まれる。

## 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>, 山田 洋一<sup>4</sup>, 櫻井 岳暁<sup>4</sup>,  
金井 要<sup>5</sup>, 今村 元泰<sup>6</sup>, 間瀬 一彦<sup>7,8</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>筑波大学数理物質科学研究科,  
<sup>5</sup>東京理科大学理工学研究科, <sup>6</sup>産業技術総合研究所, <sup>7</sup>物質構造科学研究所放射光科学第一研究系,  
<sup>8</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。

バンディングマグネットからの光を利用する 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

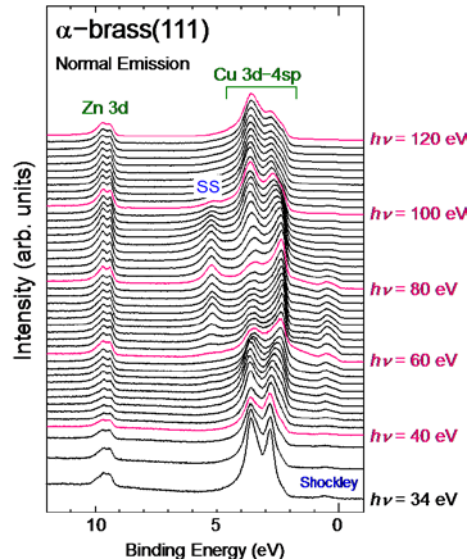


図 3 単結晶真鍮 (111) 表面の入射エネルギー依存スペクトル

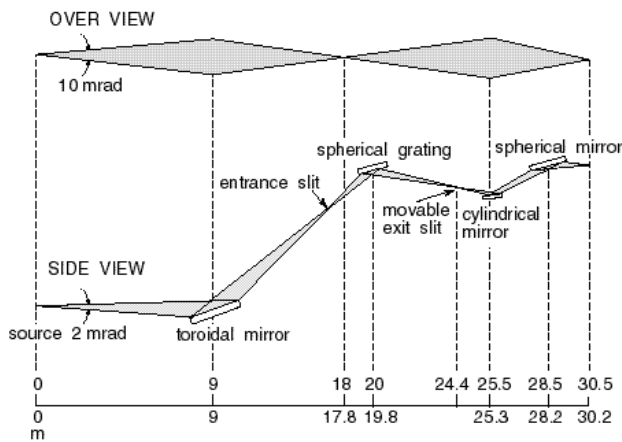


図 1 BL-3B の光学系の概略

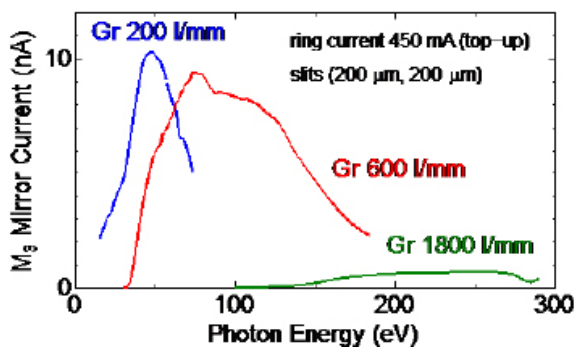


図 2 光強度のエネルギー依存性

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) 測定を高エネルギー分解能で行うことができる (図 3)。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 Vacuum Generators 社製の 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,  $-100^{\circ}\text{C}$  から  $1200^{\circ}\text{C}$  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ーごとに試料作製環境を整えることが可能である。

以上のようなビームラインとエンドステーションの特性を活かし, 半導体表面改質の研究 [2,3], 酸化物超薄膜の電子物性研究 [4,5], 金属・半導体表面と有機分子の相互作用研究 [6-8], 光触媒研究 [9], 有機太陽電池研究 [10, 11] などが実施されている。ARPES II で使用する試料ホルダーは, 50-1400 eV の UVU-SX 領域のアンジュレータ光を用いて高分解能光電子分光測定が可能な BL-13B の

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研究が増えている。

表面科学 UG は、オフラインにある 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へ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, ARUPS10) 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)
- (7) 電子エネルギー分析器 (CMA) と試料マニピュレータの衝突防止装置の設置 (2017 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

2017 年度のビームタイムの配分率は 99.2% であり、G 型課題 11 件、T 型課題 1 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、2017 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。2017 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 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. Instrum. Methods Phys. Res. A **306**, 578 (1991).
- [2] R. Okada, A. Yoshioge, Y. Teraoka, Y. Yamada, M. Sasaki, Appl. Phys. Express **8**, 025701 (2015).
- [3] Y. Enta, Int. J. Appl. Nat. Sci. **5**, 63 (2016).
- [4] Y. Sugizaki, H. Motoyama, K. Edamoto, K. Ozawa, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **16**, 236, (2018).
- [5] Y. Sugizaki, K. Ozawa, K. Edamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 085501 (2017).
- [6] Y. Hasegawa, Y. Yamada, J. Phys. Chem. C **118**, 24490, (2014).
- [7] K. Ozawa, M. Suzuki, R. Tochikubo, H. Kato, Y. Sugizaki, K. Edamoto and K. Mase, J. Phys. Chem. C **120**, 8653 (2016).
- [8] H. Mizushima, H. Koike, K. Kuroda, Y. Ishida, M. Nakayama, K. Mase, T. Kondo, S. Shin, K. Kanai, Phys. Chem. Chem. Phys. **19**, 18646 (2017).
- [9] D. Kusano, M. Emori and H. Sakama, RSC Adv. **7**, 1887 (2017).
- [10] S. Wang, T. Sakurai, X. Hao, W. Fu, S. Masuda and K. Akimoto, J. Appl. Phys. **114**, 183707 (2013).
- [11] X. Hao, S. Wang, W. Hu, T. Sakurai, S. Masuda and K. Akimoto, Org. Electron. **15**, 1773 (2014).



---

## 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の一般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）、および各種元素の内殻光電子分光（XPS）を行うことを主な目的としており、特にC K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

基本的にはすでに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た。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

2017年度のビームタイム配分率は、71%（第1期）、72%（第2期）、90%（第3期）であった。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た。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、配分を工夫した。

### 4. 今後の展望

ビームライン自体は特に改造等は予定していない。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、用途が立ったところでBL-2やBL-16で本実験をして結果を出すというケースが増えてきており、今後このような使い方をさらに推進していきたい。ただし、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、真空を破って試料を取り付ける必要がある実験のみを行うようにしていきたい。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 年度からは全ての時間を利用実験に充てており、2017 年度も順調に利用実験が行われた。

## 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>

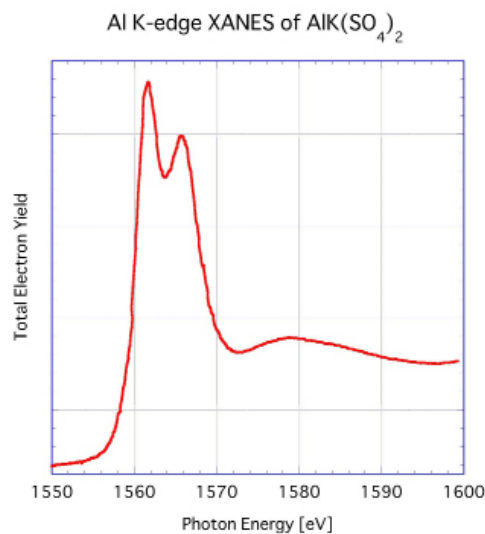


図1 カリミヨウバンの Al K 吸収端 XANES スペクトル

# 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おり、実際に2017年度も途中から新規の利用を受け入れた。

## 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>

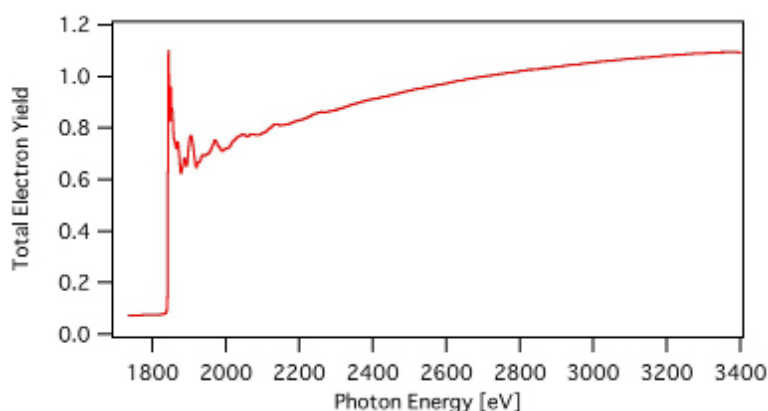


図1 シリコンウェハーのEXAFS スペクトル

# BL-11D：軟 X 線光学素子評価装置用ステーション

問瀬 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,

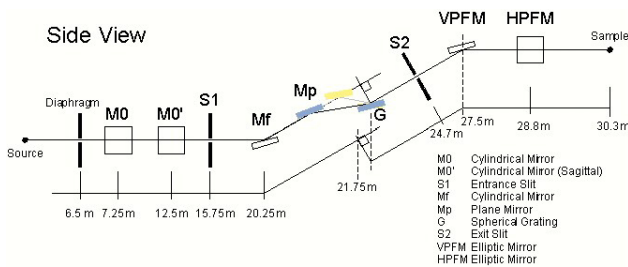


図 1 BL-11D の光学系の概略図。数値は光源からの距離。

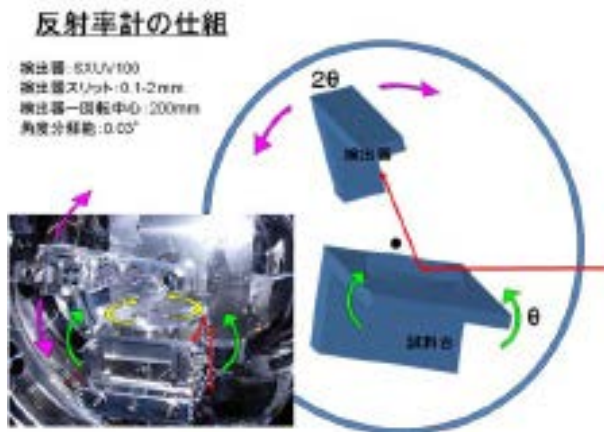


図 2 光学素子評価装置の概念図

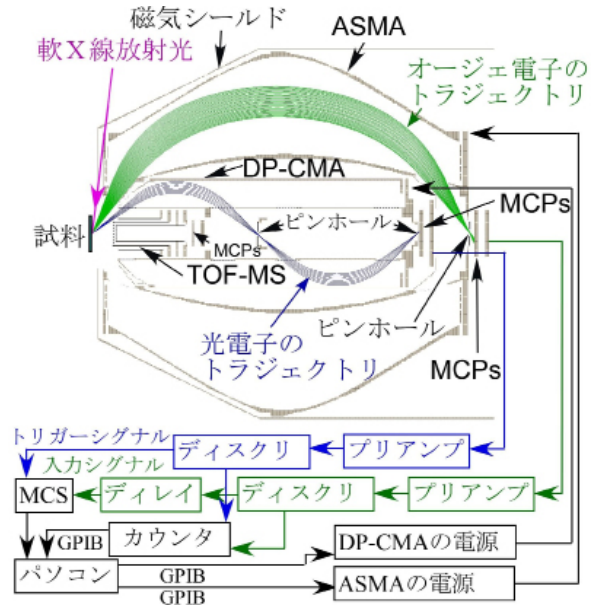


図 3 表面コインシデンス分光装置の模式図

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

2017 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, 2017 年度もその方針に沿って

表 1 2017 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	持ち込み装置	合計	要求	配分率
第 1 期	0.0	12.0	10.0	9.0	31.0	41.5	74.7%
第 2 期	5.0	12.0	7.0	10.0	34.0	34.0	100%
第 3 期	3.0	3.0	7.0	10.0	23.0	23.0	100%
合計	8.0	27.0	24.0	29.0	88.0	98.5	89.3%
割合	9.1%	30.7%	27.3%	33.0%	100%		



たビームタイム配分を行った。

#### 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. Arai, 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

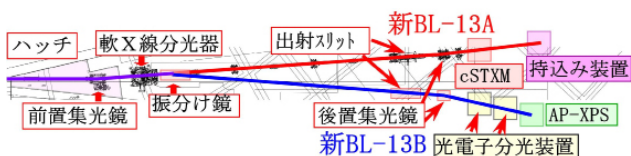


図 1 BL-13A/B の配置図

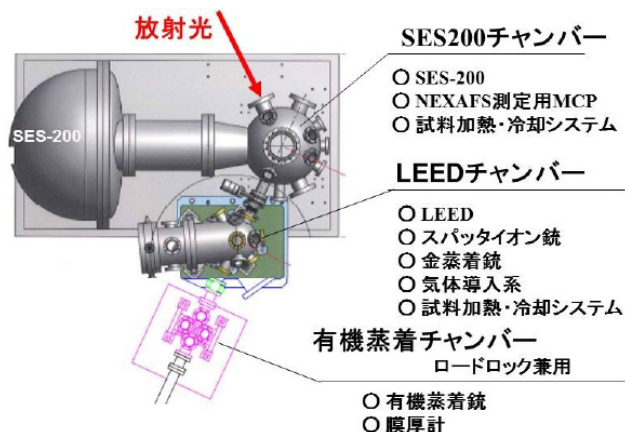


図 2 光電子分光装置 (SES-200, Scienta) の構成

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, 2017 年 9 月および 11 月, 2018 年 1 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。

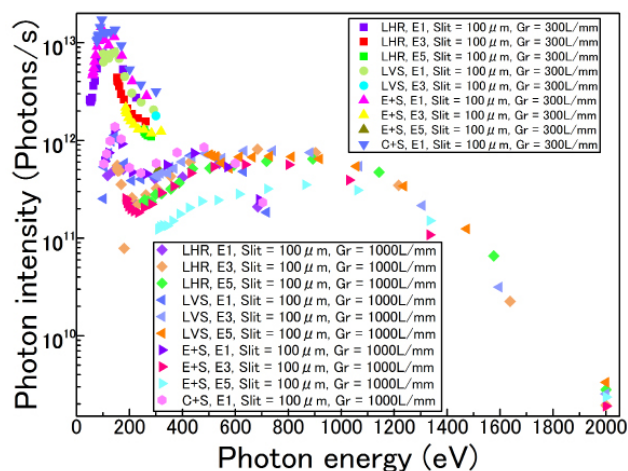


図 3 LHR は水平直線偏光, LVS は垂直直線偏光, E+S は楕円偏光, C+S は円偏光, E1 は 1 次光, E3 は 3 次光, E5 は 5 次光, Gr は回折格子を表す。

### 3. ビームタイム利用状況

2017年度の装置別、期別ビームタイム配分結果を表1に示す。2017年度の平均ビームタイム配分率は60.0%であった。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 2017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	0.0	15.0	1.0	8.2	1.3	5.5	31	52.8	53.8%
第2期	0.0	19.0	2.2	16.8	1.5	6.5	46	76.3	60.3%
第3期	0.2	20.5	0.7	19.5	1.5	5.7	48	79.2	60.6%
合計	0.2	54.5	3.9	44.5	4.3	17.7	125	208.3	60.0%
割合	0.2%	43.6%	3.1%	35.6%	3.4%	14.1%			

# 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]。ビームライン備え付けの装置 (1.2T-XMCD, 5T-XMCD, 深さ分解 XAFS/XMCD) は、いずれも X 線吸収分光法 (XAFS) に関するものであり、Fe, Co, Ni などの 3d 遷移金属の L 吸収端および希土類金属の M 吸収端における磁気円二色性 (MCD) や磁気線二色性 (MLD) の測定を行うことができる。こうした常設装置のためのポートの他に、持ち込み装置用のフリーポートや、S2 型課題の遂行のための準常設装置を設置できるポートを準備している (図 1) また、高いフラックスや偏光スイッチング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 [3,4]。

## 2. 整備開発および運用状況

ビームライン担当者が整備・開発している装置の状況は以下の通りである。

### ・1.2 T-XMCD および 5T-XMCD 装置

XMCD 測定装置の宿命として、試料周りのスペースが狭く可動範囲が少ないために、従来はビームを試料上の正しい位置に照射するための調整に時間がかかることが多かった。これを解消するために、上流のミラー

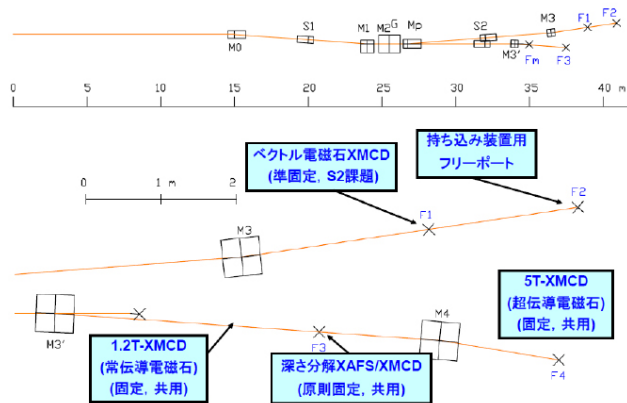


図 1 BL-16A における実験装置の配置

の角度と試料の高さを掃引することで、試料の 2 次元マップを得ることを可能にした。これによって、試料位置の調整にかかる時間が大幅に短縮されるとともに、データの信頼性が向上した。引き続き、多くのユーザーによる利用実験に供されている。

### ・蛍光収量深さ分解 XAFS (XMCD) 装置

2015 年度より、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 [4] の開発を行ってきたが、これを用いて、電界を印加した状態で原子層レベルの深さ分解 XMCD を測定することに成功した [5]。さらに、この手法に回折格子による蛍光 X 線のエネルギー分解を組み合わせることによって、微量元素や埋もれた界面のような、バックグラウンドが大きい測定対象に対して、着目する元素からの蛍光 X 線のみを取り込むことで、感度よく深さ分解 XAFS スペクトルが測定できる手法の開発に成功した。

## 3. ビームタイム利用状況

2017 年度のビームタイム配分率は、38% (第 1 期)、41% (第 2 期)、54% (第 3 期) であった。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 課題に対しては、基本的に必要最低限のビームタイムのみを配分するようにした。それでも、それらの課題への配分が全体のビームタイムの半分以上を占めている。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は、希望の 1/2 から 1/3 程度のビームタイムを、運転時間の許す範囲で評点順に配分した。したがって、結果的に配分ができない課題も多い。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や、バックグラウンドが安定しない測定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。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。また、偏光スイッチングが不要な実験については、他の軟X線ビームラインとの間で柔軟にビームタイムの調整を行い、特定のビームラインに負担が集中しないように工夫したい。

#### 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).
- [5] M. Sakamaki and K. Amemiya, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 20004 (2018).

## 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学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 [1]。

### 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。

運用・整備のための作業として、2017 年度は 2 つのことを行った。1 つは、高精度の分光実験で用いる 1 次光に混入する高次光の評価作業である。運営グループの協力を得て、2 つの回折格子について 2 次光の含まれる割合を評

価した。これにより低エネルギー側をカバーする回折格子（1200 本/mm）の使用では、2 次光の割合が比較的高く、高精度な実験には注意が必要となることが判明した。もう 1 つの作業として、基幹部の大気開放を伴う作業に協力した。作業前に比べて大幅に真空度が悪化し、いくつかの対策を行ってきているが、完全な回復には至っていない。明確な原因は判っておらず、今後も対策を行うことが必要な状況である。

制御・DAQ 系の回路クレーンが故障し、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が、2017 年度も更新が認められなかった。

### 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）[2]。2017 年度は、一泊二日の実習を 5 回実施し、29 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。

KEK サマーチャレンジ [1,3] 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受けて、積極的に対応する方針にしている。2017 年度は、東工大のスタッフが主に担当して秋の実習を行った。夏の実習に参加した 5 名の内の 4 名が、秋の実習（11/18, 19）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を行う。

- (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。

#### 引用文献および註

- [1] 2017 年度をもって物構研のサマーチャレンジへの参加は終了することになった。2018 年度以降の学部生を対象とする教育プログラムの開催は未定である。
- [2] 河内宣之、穂坂綱一、北島昌史、足立純一、高井良太、2017 年度量子ビームサイエンスフェスタ、ポスター P1-129U (2018/3/3).
- [3] 第 11 回サマーチャレンジ、“演習課題 M04” : [http://www2.kek.jp/ksc/11th\\_2017/pdf/2017\\_M04.pdf](http://www2.kek.jp/ksc/11th_2017/pdf/2017_M04.pdf); 秋の演習 : [http://www2.kek.jp/ksc/11th\\_2017/aki/kadai.html](http://www2.kek.jp/ksc/11th_2017/aki/kadai.html); 報告書 : KEK Proc. 2017-10 (March 2018).

# 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、現在 BL-28B では、偏向電子レンズ走査による新しい光電子分光装置をユーザー利用開放するための調整を行っている。

## 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。2016 年度からは、老朽化した装置の更新および更なる国際競争力の強化のために、偏向電子レンズ走査による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。今年度本ビームラインで得られた重要な成果として、新しい「ワイル磁性体」の発見 [1] について取り上げる。

質量ゼロのワイル粒子は、素粒子分野で長年研究されてきたが、2015 年に TaAs という物質中の伝導電子がワイル粒子として振る舞うことが発見されて以来、物性分野においてもその研究が広がっている。ここで、物質中のワイル粒子には先に予言された磁気ワイル粒子と、その後存在が予想された非磁性ワイル粒子の二種類あることが知られており、TaAs において発見されたワイル粒子は非磁性ワイル粒子であった。磁気ワイル粒子は磁場による制御が可能となるため、よりデバイス応用において重要になると考えられており、世界中でその探索が行われていたが、これまで磁気ワイル粒子が観測されていなかった。今回磁性金属である  $Mn_3Sn$  という物質において、角度分解光電子分光

と理論計算を組み合わせることでその電子構造を詳細に調べた結果、フェルミ準位近傍にワイル点が形成されていることを明らかにした。本研究により、 $Mn_3Sn$  がワイル粒子と磁性を併せ持った新しいトポロジカル物質「ワイル磁性体」であることが明らかとなった。この発見により、ワイル粒子の物性研究がさらに発展し、ワイル磁性体を利用したこれまでにない磁気メモリや熱電デバイスなどの革新的な次世代デバイスの開発が進展することが期待される。

## 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、これにより角度分解光電子分光実験の測定効率および偏光依存性実験の精度が飛躍的に向上し、上述したような新物質の電子構造研究が更に大きく進展すると考えられる。

## 引用文献

[1] K. Kuroda *et. al.*, Nature Materials **16**, 1090 (2017).