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	堀場　弘司，組頭　広志	
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	堀場　弘司	
BL-19	小野　寛太	建設開始

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 年度から震災復興経費によるビームライン・エンドステーション整備を進めてきており，現在ではほぼ全てのビームラインが更新され共同利用実験を開始している。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 UV-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。また，主に軟X線領域の走査型透過X線顕微鏡（STXM）のビームラインとして，機能強化費による BL19 の更新に物質化学グループとの共同で着手した。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（広角取り込み，リフレクタースキャン機能）を立ち上げ，パワーユーザーによる調整を行いながら，共同利用実験を開始した。

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（250-2000eV）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されている。ビームライン BL-2A MUSASHI（Multiple Undulator beamline for Spectroscopic Analysis of Surface and Hetero Interface）は調整がほぼ完了し，共同利用実験への供用を開始している。また，ブランチの BL-2B では 2 つあるビームポートの上流部を日立製作所との施設利用として，下流部を持ち込み装置用のフリーポートとして運営している。

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されている。さらに，これまでブランチラインで使用されていた STXM が新 BL-19 へ移設されたことを踏まえて，BL-2 および BL-16 と併せた軟X線ビームライン全体のエンドステーションの最適化を進めている。

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 走査型透過 X 線顕微鏡 BL：機能強化費および科研費新学術領域研究「水惑星学の創成」により，軟X線領域の STXM 用のビームラインとして整備を開始した。

(2) グループミーティングの開催回数，5 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，個々人が国プロ等に参画し，上記の VUV・SX ビームラインを用いた研究を進めている。

3．今後の展望

- VUV・SX 挿入光源ビームラインによる研究を推進する。
- グループとしての大型資金の獲得を目指していく。
- VUV-SX を用いた産業利用や国プロ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した次世代光源のための人材育成を進めていく。

- ４月から組頭広志教授が東北大学に転出した（同時にクロスアポイントメントにより物構研の特別教授（20%）を併任）。加えて，10 月から酒巻真粧子助教が群馬大学に准教授として転出した。上記の VUV-SX 研究を展開していく上でも，共同利用研究の継続・発展を行うためにも，人員補充が急務である。
- 博士研究員・特任教員なども含めて，電子物性グループは人材の流動性が高い。このこと自体は非常に良いことであるが, 異動に伴って共同利用などの業務に支障がでている。特に独自のノウハウの蓄積が重要な分野であるので，パーマネントポストを用いて若い優秀な人材を獲得・育成することが喫緊の課題である。

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 [1,2]，北村　未歩 [1]，組頭　広志 [1,3]
[1] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系，
[2] 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
[3] 東北大学多元物質科学研究所

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，3*d* 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

ユーザー利用としては，BL-2A ブランチの角度分解光電子分光装置では，BL-28 と差別化した高エネルギーの軟Ｘ線（~500 eV）を使用した角度分解光電子分光実験がよく利用されている。また BL-2B ブランチにおいてユーザー自身の持ち込み装置による利用実験も年々増加している。

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ているが，これを積極的に使用するユーザー利用はまだ行われていない。今後 Ca までの *K* 吸収端，および Ag 等の 4*d* 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[1]，吉信　淳[2]，小澤　健一[3]，山田　洋一[4]，櫻井　岳暁[4]，
奥平　幸司[5]，中辻　寛[6]，間瀬　一彦[7,8]
[1] 立教大学理学部化学科，[2] 東京大学物性研究所，[3] 東京工業大学理学院，[4] 筑波大学数理物質科学研究科，
[5] 千葉大学大学院工学研究科，[6] 東京工業大学物質理工学院，[7] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系，
[8] 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。

ベ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 の真空紫外から軟 X 線領域（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，マイクロ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 VUV 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。

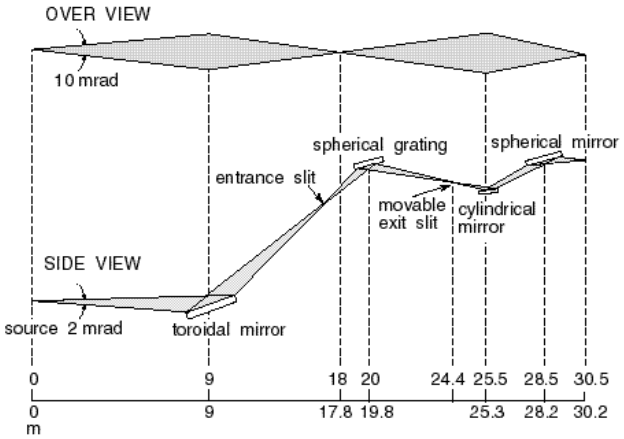

図 1　BL-3B の光学系の概略 [1]

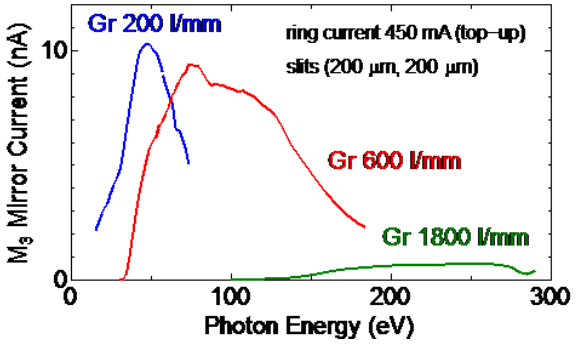

図 2　光強度のエネルギー依存性

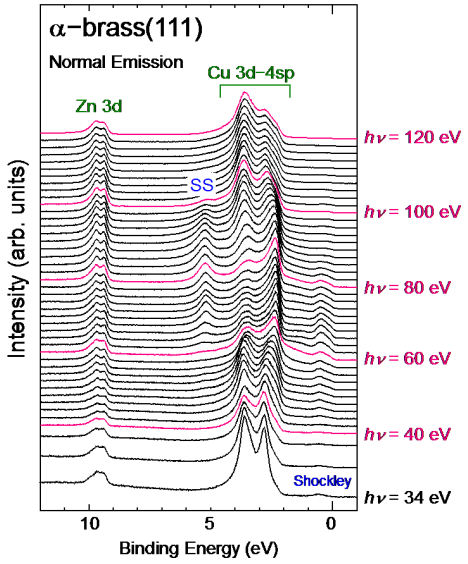

図 3　単結晶真鍮 (111) 表面の入射エネルギー依存スペクトル

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 測定ができる。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°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 の超高真空を作れ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，酸化物超薄膜の電子物性研究 [2]，貴金属単結晶 (111) 表面での Shockley 準位の分子吸着に対する応答研究 [3, 4]，金属リン化物触媒表面の原子組成と電子構造の相関研究 [5]，有機太陽電池研究 [6, 7] などが実施され，成果を挙げている。

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いる。また，BL-3B でのビームタイムは BL-13B に比べて比較的長く確保できる。こういった特徴を生かして，試料調製の最適条件を決めるような時間のかかる実験を BL-3B で行った上で，BL-13B での測定に臨むといった使い方をするユーザーもいる。

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, 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。

2010 年度以降，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) Omniax マニピュレータへの通電加熱システムの設置（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表面科学 UG により行ってきた。

3．ビームタイム利用状況

2018 年度は G 型課題 12 件，S 型課題 2 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，2018 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。2018 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

BL-3B の ARPES II と BL-13B の SES200 装置の双方を利用するユーザーが増えていることから，BL-3B で調製・評価した試料を超高真空（UHV）環境に保ったまま BL-13B に移送し，ここでアンジュレータ光を使った光電子分光測定ができれば，研究のさらなる効率化が図れる。UHV 試料搬送装置としては，電池で動作する小型イオンポンプを備えた装置などが既にあるが，最近 PF で開発された無酸素 Pd/Ti コーティングによる新しいタイプの非蒸発型ゲッター [8] を利用すると，より小型軽量で汎用性の高い搬送装置が開発できるだろう。同一試料を装置横断的に，あるいはビームライン横断的に評価できることは，物性研究では不可欠であることから，BL-3B でも実施する方向で検討する。

引用文献

[1] A. Yagishita, T. Hayaishi, T. Kikuchi and E. Shigemasa, Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. A **306**, 578 (1991).

[2] Y. Sugizaki, H. Motoyama, K. Edamoto, K. Ozawa, e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **16**, 236 (2018).

[3] 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).

[4] K. Ozawa, Y. Mimori, H. Kato, M. Emori, H. Sakama, S. Imanishi, K. Edamoto, K. Mase, Surf. Sci. **623**, 6 (2014).

[5] Y. Sugizaki, Y Shimato, T. Yoshida, R. Sugimoto, N. Maejima, K. Edamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SIIC02 (2019).

[6] K. Ozawa, S. Yamamoto, M. D'angelo, Y. Natsui, N. Terashima, K. Mase, I. Matsuda, J. Phys. Chem. C **123**, 4388 (2019).

[7] A. L. Foggiatto, H. Suga, Y. Takeichi, K. Ono, Y. Takahashi, K. Kutsukake, T. Ueba, S. Kera. T. Sakurai, Jan. J. Appl. Phys. **58**, SBBG06 (2019).

[8] T. Miyazawa, Y. Kano, Y. Nakayama, K. Ozawa, T. Iga, M. Yamanaka, A. Hashimoto, T. Kikuchi, K. Mase, J. Vac. Sci. Technol. A **37**, 02160 (2019).

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（酒巻は 2018 年 10 月に転出）。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

2018 年度のビームタイム配分率は，98%（第 1 期），65%（第 2 期），78%（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，BL-19 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，通常の測定であれば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，ユーザー持ち込み装置などを用いた特殊な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），A1（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，2018 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

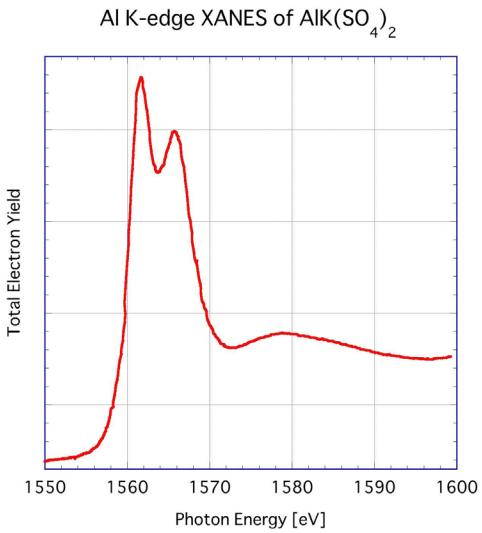

図 1　カリミョウバンの Al K 吸収端 XANES スペクトル

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，特に新規の整備等は行っていない。

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 2018 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

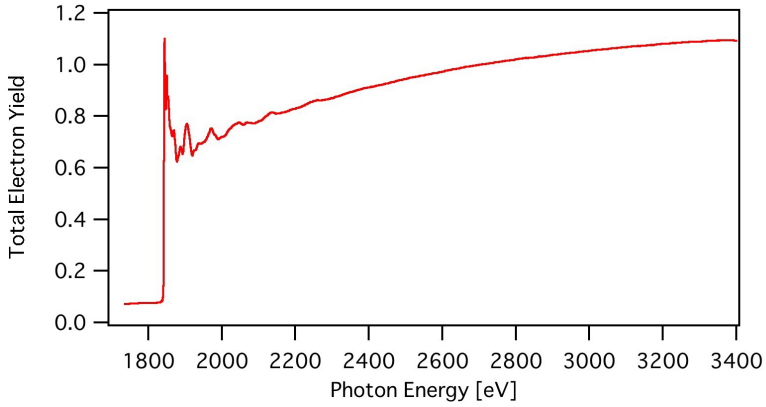

図１　シリコンウェハーの EXAFS スペクトル

BL-11D：軟 X 線光学素子評価装置用ステーション

間瀬　一彦 [1,2]，菊地　貴司 [1]
[1] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系，
[2] 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 1 台の 500 L/s のターボ分子ポンプが設置されており，到達圧力は 1×10^{-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，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。

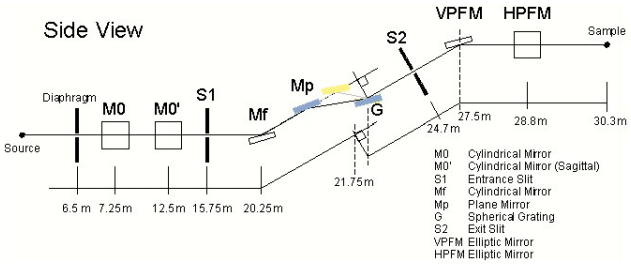

図 1　BL-11D の光学系の概略図。数値は光源からの距離。

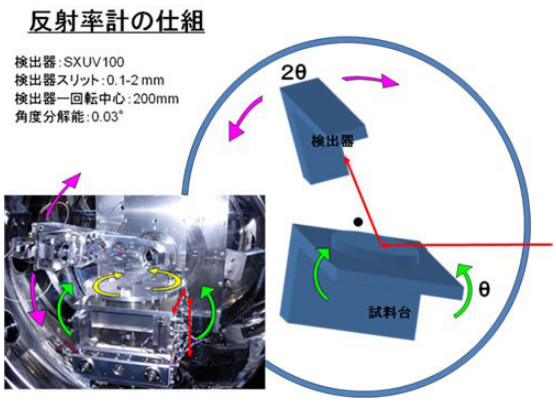

図 2　光学素子評価装置の概念図

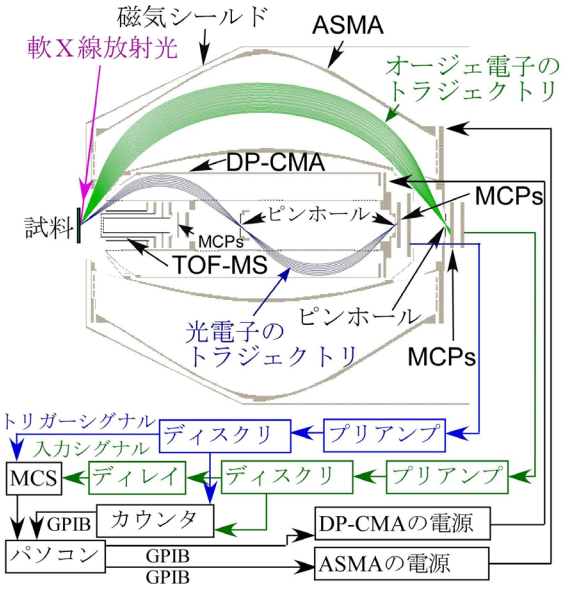

図 3　表面コインシデンス分光装置の模式図

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

2018 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，2018 年度もその方針に沿っ

表 1　2018 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	表面ｺｲﾝｼﾃﾞﾝｽ分光	持込み装置	合計	要求	配分率
第 1 期	3.0	15.0	7.0	18.0	43.0	43.0	100%
第 2 期	0.0	12.0	8.0	11.0	31.0	33.0	93%
第 3 期	0.0	6.0	10.0	17.0	33.0	26.0	100%
合計	3.0	33.0	25.0	46.0	107.0	102.0	105%
割合	2.8%	30.8%	23.4%	43.0%	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した人材育成，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 [1,2]，豊島　章雄 [1]，菊地　貴司 [1]，田中　宏和 [1]
[1] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系，
[2] 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]。13A の第一焦 点位置には 2018 年度第 1 期まで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] が設置されていたが，2018 年夏に BL-19A に移動した。cSTXM 移動後の 13A 第一焦点位置は ユーザー持ち込み装置用のスペースとして利用している。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]。

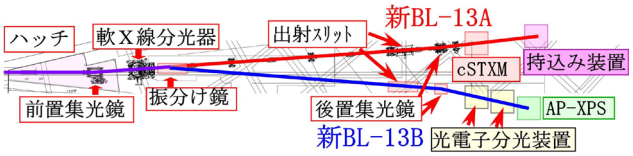

図 1　BL-13A/B の配置図

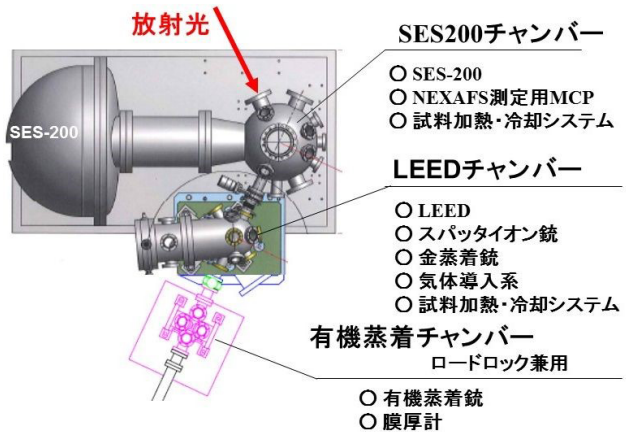

図 2　光電子分光装置（SES-200，Scienta）の構成

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 2.3×10^{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 μm ×（垂直）49 μm であった。酸素を導入しながら非分光光を照射して振分け鏡の 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，年数回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維持している。

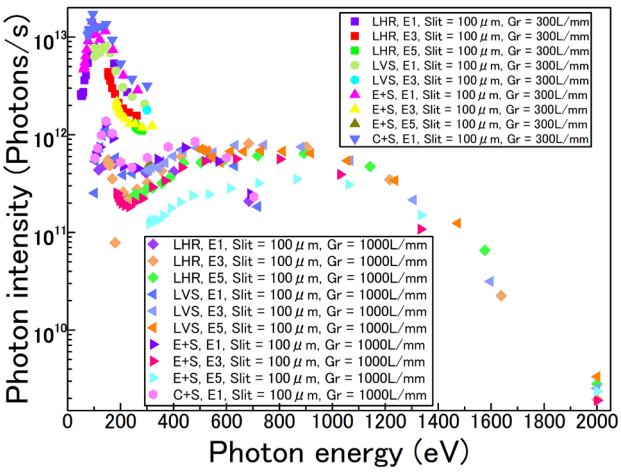

図 3　LHR は水平直線偏光，LVS は垂直直線偏光，E+S は楕円偏光，C+S は円偏光，E1 は 1 次光，E3 は 3 次光，E5 は 5 次光，Gr は回折格子を表す。

３．ビームタイム利用状況

2018 年度の装置別，期別ビームタイム配分結果を表 1 に示す。2018 年度の平均ビームタイム配分率は 48.9% であった。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。

2018 年度第 1 期は cSTXM 装置を 13A で利用できる最後の機会であったため、cSTXM 利用研究に重点的に配分した。2018 年度第 2 期，第 3 期は cSTXM 利用研究がなくなったにも関わらず，軟Ｘ線発光分光，軟Ｘ線回折，軟Ｘ線時間分解計測，超伝導軟 X 線検出器を用いた材料分析などの利用が増えたため，配分率はほとんど変わらなかった。

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　2018 年度の装置別，期別ビームタイム配分結果。単位は日。

	調整	cSTXM	持込み装置	SES200	Phoibos100	AP-XPS	合計	要求	配分率
第 1 期	0.2	25.7	3.0	12.5	2.5	7.2	51	103.2	49.4%
第 2 期	0.5	0.0	10.0	14.3	1.5	4.7	31	73.8	42.0%
第 3 期	0.5	0.0	15.5	15.5	1.5	3.0	36	64.3	56.0%
合計	1.2	25.7	28.5	42.3	5.5	14.9	118	241.3	48.9%
割合	1.0%	21.8%	24.2%	35.8%	4.7%	12.6%			

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が準備されている（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 [3-5]。

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，2017 年度に上流のミラー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が，2018 年度はユーザーインターフェースを改良し，より効率的にビーム位置の調整が行えるようにした。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。

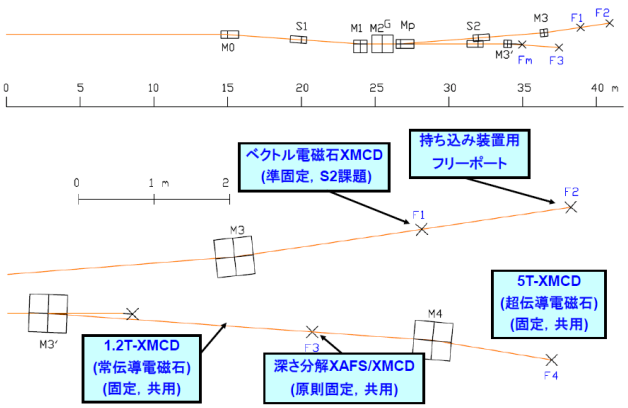

図 1　BL-16A における実験装置の配置

・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] の開発を行っており，電界を印加した状態で原子層レベルの深さ分解 XMCD を測定することも可能である [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，着目する元素からの蛍光 X 線のみを取り込むことによって，微量元素や埋もれた界面に対する深さ分解 XAFS 測定におけるバックグラウンドを，100 分の 1 程度に減少させることに成功した [6]。

3．ビームタイム利用状況

2018 年度のビームタイム配分率は，44%（第 1 期），39%（第 2 期），44%（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，BL-19 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).

[6] M. Suzuki-Sakamaki and K. Amemiya, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 120308 (2018).

BL-19A/B：軟 X 線顕微・分光実験ステーション

武市泰男 [1,3]，若林大佑 [2,3]，山下翔平 [2,3]，田中宏和 [2]，豊島章雄 [2]，小野寛太 [2,3]，木村正雄 [1,3]
[1] 物質構造科学研究所放射光科学第二研究系，[2] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系，
[3] 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

旧 BL-19 は，東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設（現・極限コヒーレント光科学研究センター）が 1987 年に建設し，真空紫外線および軟 X 線領域の分光実験ステーションとして運用していたビームラインである [1]。2014 年に物性研が撤退した後は，PF スタッフによる R&D 実験ステーションとして運用されてきた。2017 年度より，PF では新学術領域「水惑星学」[2] 推進のため，および産業利用によるイノベーション創出のための X 線顕微鏡を中心とする実験ステーションとして，BL-19 を解体・再構築することとなった。

ここで言う X 線顕微鏡は，筆者らが BL-13A/B 等で開発・運用してきた走査型透過 X 線顕微鏡 (scanning transmission X-ray microscopy: STXM) [3] であり，物質中の化学状態を高い空間分解能で可視化する実験手法である。STXM の概念を図 1 に示す。軟 X 線をフレネルゾーンプレートと呼ばれる集光素子で数十ナノメートルに集光し，試料に照射する。試料を透過した X 線の強度を計測しながら試料位置を走査することで，透過像が得られる。さらに X 線のエネルギーを変化させて観察を行うことで，物質の化学状態に敏感な X 線吸収分光実験の特性をそのままに有する顕微鏡として機能する。STXM を用いると，隕石等の地球外物質で過去に生じた化学反応の痕跡を可視化したり，土壌・エアロゾル等の環境化学物質中で起こる不均一な化学反応の挙動を明らかにしたりすることができる。また，希土類磁石の磁気構造の可視化や樹脂材料の化学状態分布の分析が可能で，産学双方の材料研究者らによる利用が見込まれている。

新しい BL-19 は，ふたつのブランチから構成されている。A ブランチは STXM 専用であり，19B は持ち込み装置に対応するバルク分光実験ステーションである。B ブランチ用としてバルク軟 X 線 XAFS 実験装置を整備し，STXM の解析に使用する多数の標準試料スペクトルを迅速に測定することが可能になる。このように，単一ビームラインで顕微・バルク両方の分析機能を有する組み合わせは世界でも例がなく，STXM 実験結果から有益な情報を効率よく引き出すための環境が提供されることとなる。

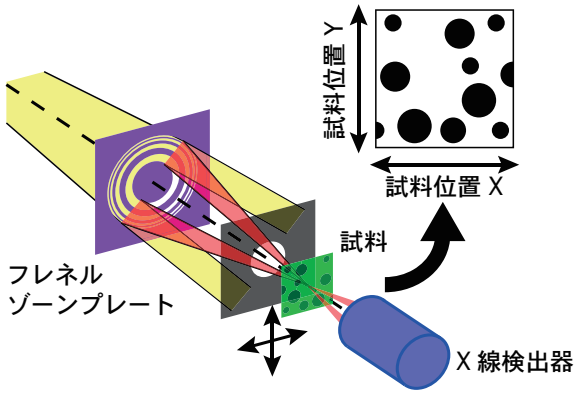

図 1　走査型透過 X 線顕微鏡の概念図

2．整備開発および運用状況

BL-19 解体・再構築の様子を図 2 に示す。2017 年度途中より，光学系の設計と一部の大型装置の調達を開始した。

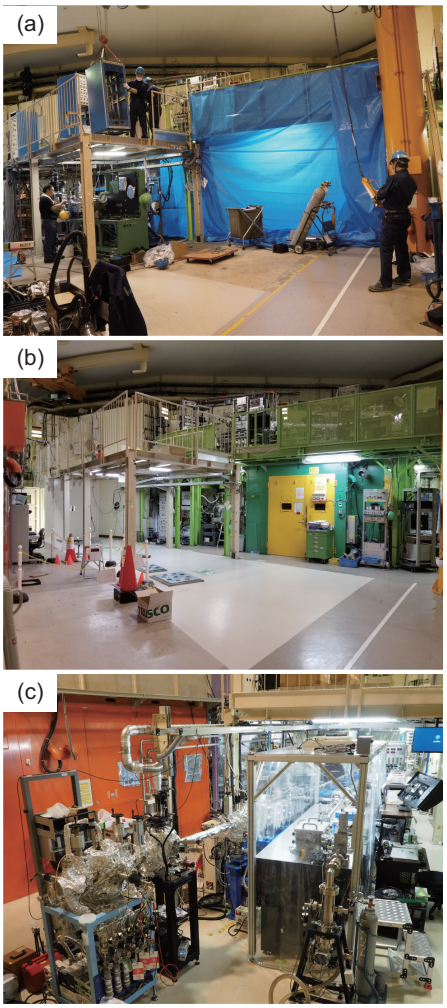

図 2　BL-19 解体・再構築の様子。(a) 2018 年 3 月，旧ビームライン解体作業。(b) 2018 年 4 月，床補修完了時。(c) 2019 年 3 月，新ビームライン建設作業完了後。右側が A ブランチの STXM，左側が B ブランチ。

2018年3月をもって旧BL-19を閉鎖し，解体作業と床補修・ハッチ構築などの基礎工事を行った。2018年夏のPF運転終了後より，放射光を発生させる挿入光源，放射光を取り出す基幹部，ミラー・回折格子分光器などの光学素子の設置，インフラ・制御系の構築等の作業を行った。各種放射線手続きを経て2018年11月に初めてビームラインに放射光を導入し，放射光を利用して光学素子の焼き出しとビームラインの調整，STXMの調整などを行った。

ビームライン調整は概ね良好に進捗し，2019年3月には新しいビームラインの放射光を使ったSTXM像の観察に成功した。当初予定された利用エネルギー範囲，偏光，STXMの空間分解能・光強度，迅速なバルク分光スペクトルの計測などが実現している。

3．ビームタイム利用状況

2018年度内はビームラインの立ち上げ調整期間とし，ユーザー利用は行われていない。

4．今後の展望

BL-19では，2019年度前半より有効となるユーザー共同利用課題の受付を開始した。2019年5月のユーザー利用開始を目指して調整作業を継続している。2019年度より「水惑星学」関連研究者を中心とした大学ユーザーの利用が予定されているほか，すでに多数の民間企業研究者からの利用相談を受けており，活発な利用が期待される。

引用文献

[1] http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/tsukuba/index-j.html

[2] http://www.aquaplanetology.jp/

[3] Y. Takeichi et al., Rev. Sci. Instrum. **87**, 013704 (2016).

BL-20A：3 m直入射型分光器

河内　宣之[1]，北島　昌史[1]，穂坂　綱一[1]，足立　純一[2,3]，菊地　貴司[2]
[1] 東京工業大学 理学院 化学系，[2] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系
[3] 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。2009 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。

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，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。

ビームラインの利用法の拡張の可能性を探るため，2018 年度は運営グループと PF スタッフにより，偏光度・偏光軸の再評価と楕円偏光利用が可能かどうかのテスト実験を行った。現状の前置鏡の駆動機構では楕円偏光利用は困難である結果となった。

第 3 期開始時に，分光器駆動のモータードライバーが故障した。制御系グループの全面的な協力により，代替器への交換と制御プログラムの修正を行うことができ，ビームタイムのロスはほとんどなくユーザー運転へと移ることができた。一方で，故障した制御・DAQ 系の回路クレートの更新について，2018 年度も予算が認められず代替器にて運用した。制御系 PC の OS のサポート終了に合わせて，制御系を更新することを検討し始めた。

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。

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）。2018 年度は，一泊二日の実習を 2 回実施し，5 名の学生を受け入れた [1]。ここ数年間の受入れ学生人数と比べ，今年度は大幅の減少となっている。実習の実施期間に割り当てられる第 2 期が今年度は短く，学生が履修できる日程の選択肢が非常に狭くなったことが，人数が減少した原因の 1 つとして考えられる。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。

ビームライン利用の原子分子科学へのさらなる展開を進めるため，留保ビームタイムを利用して難揮発性液体分子の真空紫外分光計測の試験測定を行った。

本ビームラインでは，放射光の波長可変性を活かし，しきい電子放出過程による運動エネルギーが 100 meV 以下の電子線生成とその原子分子過程研究への応用が行われてきている。近年になり比較的安定して極低運動エネルギー電子線が取り出せるようになってきており，精度の高い断面積測定が行われるようになった [2]。

4．今後の展望

(1) これまで実績が上がっており，今後も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行う。

(2) 30 eV 以下の VUV 光が使える PF 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。また，10 eV 以下の低エネルギー側の利用の要望があるが，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。特に，光発生およ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。
(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。

参考文献

[1] 河内宣之，穂坂綱一，北島昌史，足立純一，高井良太，2018 年度量子ビームサイエンスフェスタ，ポスター 248U (2019/3/12).
[2] 北島昌史，招待講演 " 放射光の二次ビーム利用：超低速電子ビームを用いた電子－分子衝突実験 "，第 32 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム (2019 / 1 / 9-11).

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

堀場　弘司[1,2]，組頭　広志[1,3]
[1] 物質構造科学研究所放射光科学第一研究系
[2] 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
[3] 東北大学多元物質科学研究所

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（R4000-DA30）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。この装置は試料を回転させずに，すなわち試料と偏光ベクトルの関係を変化させずに 2 軸の角度分解光電子スペクトルを取得することが可能なため，本ビームラインの特長である偏光依存性測定において，より精度の高い実験が可能となる。2017 年度にはこの整備が概ね終了し，S2 課題メンバーを主体としたヘビーユーザーによるテスト利用実験を開始している。

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。2017 年度は暫定的に BL-28A，BL-28B 両ブランチに新旧 2 台の角度分解光電子分光装置が設置されている状態のため，ユーザー利用は 100% 角度分解光電子分光実験に配分されている。

4．今後の展望

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（R4000-DA30）の整備が概ね終了したため，今後は BL-28A に常設してユーザー利用実験を開始する。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。加えて，更なる国際競争力の強化のため，CREST「ナノスピン ARPES によるハイブリッドトポロジカル材料創製」の競争的資金を得て，第 3 世代放射光源での実験に匹敵するマイクロスポット化を目指し，BL-28A 後置集光鏡を K-B ミラーへ更新する計画である。また，BL-28B ブランチはフリーポートとして運営する予定である。