

## 分割型クロス・アンジュレータによる偏光制御型 高輝度軟 X 線ビームライン SPring-8 BL07LSU

東京大学 物性研究所  
東京大学 放射光連携研究機構  
松田 巖

### Abstract

SPring-8 BL07LSU は高輝度軟 X 線ビームラインとして (1) 光エネルギー 250–2,000 eV、(2) 分解能 10,000 以上、(3) スポットサイズ 10  $\mu\text{m}$  以下 (ゾンプレートで 70 nm、ミラー集光で 1  $\mu\text{m}$ )、(4) 強度  $\sim 10^{12}$  photons/秒、(5) 偏光の切換、といった光学性能を有し、先端的な軟 X 線実験装置の開発及び利用実験が実施されています。光源加速器は世界唯一の分割型クロス・アンジュレータであり、偏光を自由に換えられるだけでなく、その切換も高速にできる特徴があります。本稿では、この偏光特性を中心にビームラインの現状を紹介します。

### 1. はじめに

我々が目にする (可視) 光を物質に照射すると吸収、散乱、そして発光が occurs。同様な現象は波長がナノメートル (nm、 $10^{-9}$  m) 程度の軟 X 線の光でも起き、その結果、吸収分光、光散乱・回折、発光・非弾性散乱などの測定法が生まれ、基礎から応用まで幅広い研究分野で利用されています。これらの分析法は軟 X 線が高輝度になると、より高いエネルギー分解能で測定ができるだけでなく、時間分解、微小領域 (ナノ空間)、実環境下での実験も実施できるようになります。最後のものはオペランド (ラテン語: *operando*) 測定と呼ばれ、実触媒やデバイス動作下での物質の様子を直接探ることができるため、産業課題の解決を基礎科学から実施できるものとして、最近、特に注目を集めています。

このような高輝度軟 X 線を発生する光源として、SPring-8 BL07LSU<sup>[1]</sup> では全長約 30 m の長尺アンジュレータ (undulator) が理化学研究所放射光科学総合研究センターと公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) の協力の下に設置、そして管理・運営されています。そしてこの長尺アンジュレータ (ID07) と連続偏角可変の Monk-Gillieson 型不等刻線間隔平面回折格子分光器<sup>[2]</sup> により、高輝度軟 X 線ビームラインとして現在、(1) 光エネルギー 250–2,000 eV、(2) 分解能 10,000 以上、(3) スポットサイズ 10  $\mu\text{m}$  以下 (ゾンプレートで 70 nm、

ミラー集光で 1  $\mu\text{m}$ )、(4) 強度  $\sim 10^{12}$  photons/秒、(5) 偏光の切換、の性能を達成しています。エンドステーションでは時間分解軟 X 線光電子分光や、3次元光電子顕微分光、高分解能発光分光、雰囲気軟 X 線光電子分光、共鳴軟 X 線回折、共鳴磁気光学



図1 SPring-8 BL07LSU の挿入光源 ID07  
(a) 水平偏光型「8の字」アンジュレータ、(b) 垂直偏光型「8の字」アンジュレータ、(c) 2種類を各4台、合計8台のアンジュレータから構成された長尺アンジュレータの写真。挿入図はビームラインのロゴマーク。



図2 SPring-8 BL07LSUの長尺アンジュレータID07の構成図。水平偏光型「8の字」アンジュレータセグメント (H) 及び垂直偏光型「8の字」アンジュレータセグメント (V) から構成され、それぞれの間に移相器 (PS) として「永久磁石型」(緑色) と「電磁石型」(黄色) がペアとなって設置されています (図3)。この図の右側にビームラインがあります。

効果などの先端測定法の開発やそれらを用いた物質科学の研究が実施されています。

## 2. 分割型クロス・アンジュレータ

アンジュレータ中では、電子の軌道が周期的に変化 (加速度運動) することで電磁波が発生 (軌道放射)・干渉し、放射光の強度及び単色性が向上します (アンジュレータ光の発生)。そしてその電子軌道を制御すると、生成される軟 X 線フォトンの偏光特性も選択することができます。例えば、アンジュレータ中の電子が、蛇行や「8の字」の軌道で運動をすると直線偏光の光が、螺旋運動すると円偏光が、それぞれ光軸に沿って発生します。一方、光は複数の光を重ね合わせることも、その偏光特性を変えることができます。そこで水平直線偏光と垂直直線偏光の2種類のアンジュレータを組み合わせた「クロス・アンジュレータ」が提案され<sup>[3]</sup>、ドイツは BESSY 放射光施設でその開発が行われ<sup>[4]</sup>、最近では X 線自由電子レーザーでもその利用<sup>[5]</sup>が検討されています。この光源の鍵となるのは内部で電子軌道が異なる2種類のアンジュレータの間に置かれた移相器で、これは電子の軌道を変化させることでそれぞれのアンジュレータ光に位相差を生み出し、放射光全体の偏光を制御するものです。しかしながらクロス・アンジュレータは、仮に質の良いビームを用いても、フラックスを十分に得ようとする限り高い偏光度は期待できず、改善するためにはセグメント数を増やした「分割型」のクロス・アンジュレータにしなくてはなりません<sup>[6,7]</sup>。

SPring-8 BL07LSU では、この「分割型」クロス・アンジュレータを採用しています<sup>[1]</sup>。実際の挿入光源 (ID07) では、図2のように水平の直線偏光を生成する水平偏光型「8の字」アンジュレータ (H)、垂直の直線偏光を生成する垂直偏光型「8の字」アンジュレータ (V) の2種類のセグメント各4台を

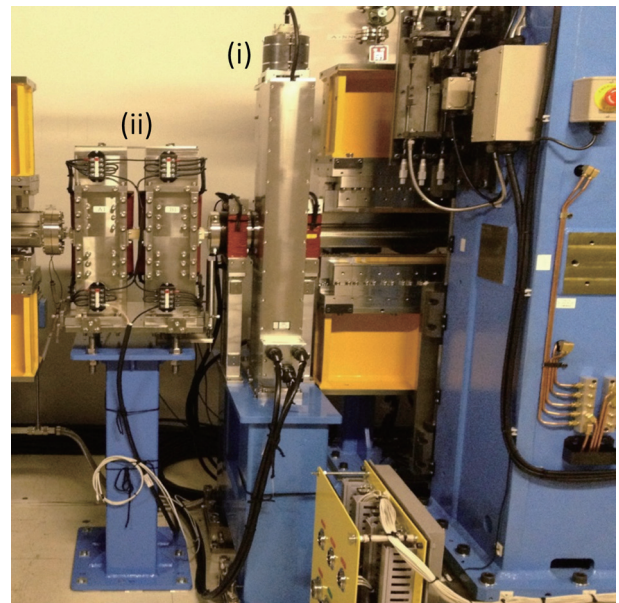


図3 2種類のアンジュレータの間に設置された (i) 永久磁石型及び、(ii) 電磁石型移相器 (PS) の写真です。この写真の左の方にビームラインがあります。

交互に並べたものを用意しています。そしてセグメントの間には移相器 (Phase Shifter, PS) として、図3のように「永久磁石型」と「電磁石型」のものが1ペアとして、合計7ペアが設置されています<sup>[8]</sup>。それぞれ磁石間の空間ギャップ及び電磁石コイルに流す電流で、運動する電子に印加する磁場の大きさを調整しています。BL07LSUではエンドステーションでユーザーが水平直線偏光 (LH) 及び垂直直線偏光 (LV) を用いる場合はそれぞれ水平偏光型「8の字」アンジュレータ (H) 及び垂直偏光型「8の字」アンジュレータ (V) を使い、いずれも直線偏光度は  $P_1 = 1.00$  です<sup>[1]</sup>。円偏光 (LHCP、RHCP) や斜め直線偏光 (楕円偏光) を用いる場合は、2種類のアンジュレータセグメントと移相器を組み合わせた。図4は各アンジュレータセグメントの種類及び台数に応じた光スペクトルの変化です。図のよう

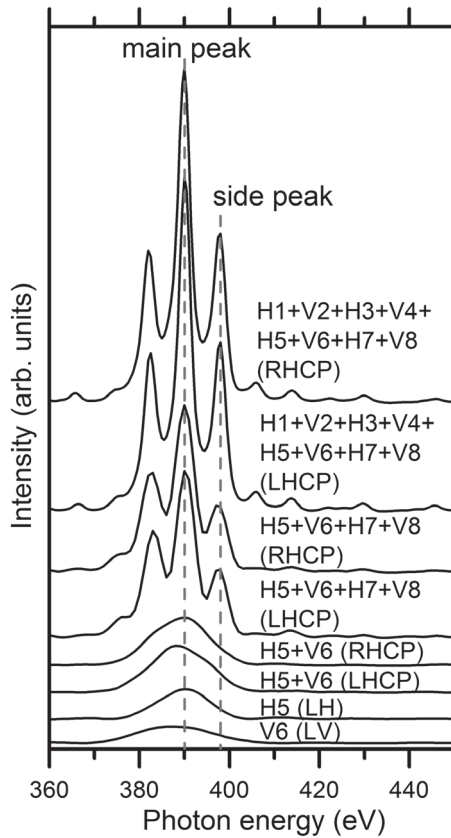


図4 SPring-8 BL07LSU で発生した光スペクトルにおけるアンジュレータセグメント台数に対する変化。

に分割型クロス・アンジュレータのセグメントの台数に応じて強度が大きくなり、またメインピーク (main peak) と共にサイドピーク (side peak) が現れる特徴もあります。円偏光度は高い光エネルギー側のサイドピークで最も高くなり、 $P_c = +/- 0.93$  があります<sup>[1]</sup>。

### 3. 偏光スイッチング

ビームライン BL07LSU のクロス・アンジュレータでは移相器として電磁石型を用いているため、AC 電流を使用することで偏光を高速に切り換えることができます。図5は電磁石移相器の (a) 3次元図と (b) 調整中に撮影した実物の写真です<sup>[8]</sup>。(a) のように2つカットコアコイルから構成され、その間のスペースを電子 (electron) が通過します。そしてコイルの中を設定したパターンの電流が流れて、その間の磁場を時間変化させます。(b) のように実物では SUS 製の薄肉チャンバーがコイルの間に設置され、電子が通過するところを超高真空条件にし

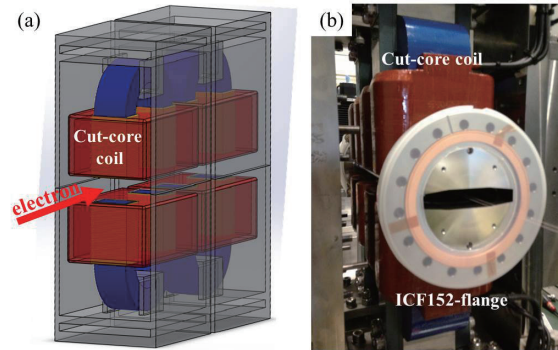


図5 電磁石移相器の様子 (a) 3次元図、(b) 調整中の写真。

ています。

吸収分光で偏光実験を行う場合、直線偏光を元にして移相器で位相を  $+/-\pi/2$  変調させると、左右円偏光を高速で切り換えることができます。そして該当する周波数成分の吸収信号を抽出すると、自動的に円2色性を測定することができます。図6は FePt 合金の Fe  $L_3$  端磁気円2色性のスペクトルについて、永久磁石型移相器で左右の円偏光を切り換えて測定したものと、10 Hz で偏光スイッチングしたものを比較したものです。これらは H5+V6 の2台のアンジュレータのペアで測定したのですが、磁気円2色性がこの偏光スイッチングで確かに測定することができるのが分かります。クロス・アンジュレータでは高速に偏光を切り換えても光源点がずれません。そのため、エンドステーションにおける微小スポットや高分解能の軟 X 線実験などとの相性が良

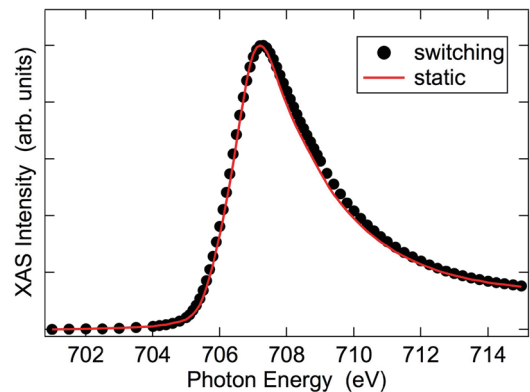


図6 FePt 合金の Fe  $L_3$  端磁気円2色性 (XMCD) スペクトル。永久磁石型移相器で測定したもの (static) と電磁石型移相器による偏光スイッチングで測定したもの (switching)。外部磁場 0.26 T により、試料は面直磁化しています。

く、今後微小信号検出や新しい物理量の測定に力を発揮することが期待されます。

#### 4. まとめ

SPring-8 BL07LSU は現在、高輝度軟 X 線ビームラインとしてユーザーに利用され、物質科学において順調に成果をあげています。光源の分割型クロス・アンジュレータの特性を活かした高速切替実験として、これまで2台のアンジュレータセグメント(H+V)を用いた実証実験に成功しました。今後は8台全てを利用した偏光スイッチング実験を実現し、この新しい光源機能を利用した次の軟 X 線測定技術の展開を図ります。

#### 謝辞

SPring-8 BL07LSU にて軟 X 線分光・散乱実験の開発を行い、そしてユーザーにそれらを利用していただけなのは、理化学研究所放射光科学総合研究センター、公益財団法人高輝度光科学研究センター、VUV・SX 高輝度光源利用者懇談会、東京大学放射光連携研究機構、東京大学物性研究所の関係者の協力あつてのことです。本紙面をお借りして厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] S. Yamamoto, Y. Senba, T. Tanaka, H. Ohashi, T. Hirono, H. Kimura, M. Fujisawa, J. Miyawaki, A. Harasawa, T. Seike, S. Takahashi, N. Nariyama, T. Matsushita, M. Takeuchi, T. Ohata, Y. Furukawa, K. Takeshita, S. Goto, Y. Harada, S. Shin, H. Kitamura, A. Kakizaki, M. Oshima and I. Matsuda: *J. Syn. Rad.* **21** (2014) 352-365.
- [2] Y. Senba, S. Yamamoto, H. Ohashi, I. Matsuda, M. Fujisawa, A. Harasawa, T. Okuda, S. Takahashi, N. Nariyama, T. Matsushita, T. Ohata, Y. Furukawa, T. Tanaka, K. Takeshita, S. Goto, H. Kitamura, A. Kakizaki and M. Oshima: *Nucl. Instr. and Meth. A* **649** (2011) 58-60.
- [3] K. J. Kim: *Nucl. Instr. and Meth.* **222** (1984) 11-13.
- [4] J. Bahrtdt, A. Gaupp, W. Gudat, M. Mast, K. Molter, W. B. Peatman, M. Scheer, Th. Schroeter and Ch. Wang: *Rev. Sci. Instrum.* **63** (1992) 339.

- [5] E. Ferrari, E. Allaria, J. Buck, G. De Ninno, B. Diviacco, D. Gauthier, L. Giannessi, L. Glaser, Z. Huang, M. Ilchen, G. Lambert, A. A. Lutman, B. Mahieu, G. Penco, C. Spezzani and J. Viefhaus: *Scientific Reports* **5** (2015) 13531.
- [6] T. Tanaka and H. Kitamura: *AIP Conf. Proc.* **705** (2004) 231.
- [7] T. Tanaka and H. Kitamura: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **490** (2002) 583-591.
- [8] I. Matsuda, A. Kuroda, J. Miyawaki, Y. Kosegawa, S. Yamamoto, T. Seike, T. Bizen, Y. Harada, T. Tanaka and H. Kitamura: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **767** (2014) 296-299.

松田 巖 *MATSUDA Iwao*

東京大学 物性研究所

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5-1-5

TEL : 04-7136-3402

播磨分室

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1 蓄積リング棟A28

TEL : 0791-58-0802 ext 4111

e-mail : imatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp