

BL24XU 兵庫県

兵庫県IDビームライン（BL24XU）は、放射光の産業利用推進を主眼とした、兵庫県所有の専用ビームラインである。光源には軸上負荷を低減できる8の字アンジュレーターを採用し、ダイヤモンド薄片結晶を利用した長オフセット2結晶分岐分光器を導入することで、ブランチA、ブランチBへの同時の放射光供給を可能としている。各ブランチにはそれぞれ2つの実験ハッチがタンデムに配置されており、高輝度アンジュレーターの利点を活かす、マイクロビーム利用光学系を応用したエンドステーション群を配している。また、2010年度よりエネルギー高分解能XANES光学系のユーザー利用を開始しており、特にプレエッジ領域の分光測定を行っている。

以下では、各ブランチにおける2010年度の活動について述べる。

1) ブランチA

ブランチAは2つのタンデムハッチで構成されており、上流側のハッチA1では、Bonse-Hart型極小角X線散乱光学系を用いた数 μm ～数100ナノスケールの長周期構造解析、下流側のハッチA2では、マイクロ小角X線散乱光学系を用いた局所領域のナノ構造解析、斜入射回折計を用いた表面界面の回折測定を可能としている。管理は主に兵庫県放射光ナノテク研究所が担当しており、産業界のユーザーに広く利用されている。

2010年度におけるブランチのユーザー利用実績は、2社、計18シフトであった。ハッチA1、及びA2全体に関わる改造として、分光器の分光結晶の変更を行った。実験ハッチAの分光器ではダイヤモンドの単結晶を分光素子として用いているが、結晶の厚さを従来の300 μm から500 μm に変更した。この変更により、ハッチAにおけるX線のフラックスが約2倍になり、 10^{11} photons/sの高フラックスを達成した。また、ハッチA1に設置されているBonse-Hart型超小角X線散乱光学系の改良を行った。試料への入射X線のコリメートを行うコリメータ結晶と、試料による散乱X線の角度分解を行うアナライザ結晶について、チャンネルカット結晶形状とし、それぞれにおいて4回のブラッグ反射を繰り返す仕様とした。さらに反射面について、板状結晶表面の加工と同等の精密処理を施したものを採用した。以上により、コンパクトな光学系構成で、精密測定を可能とした。特に、ダイレクトビームの角度分布において、小角領域に広がる寄生散乱の強度レベルが減少し、従来と比較して2桁以上S/N特性の良い測定を行うことが可能となった。

2) ブランチB

ブランチBは2つのタンデムハッチで構成されており、上流側のハッチB2では、高空間分解能、高時間分解能に特化した利用、下流側のハッチB1では、高角度分解能に特化したマイクロビーム利用を可能としている。管理は主に兵庫県立大学大学院X線光学分野が担当しており、ユーザー利用だけでなく、担当分野による学術研究も行われている。

2010年度におけるブランチのユーザー利用実績は、11社（12グループ）、計132シフトであり、マイクロビーム広角回折、蛍光X線顕微鏡、マイクロCT、高平行度マイクロビームの各光学系での利用であった。マイクロビーム広角回折光学系では、フラットパネル検出器と散乱信号によるモニターシステムを導入し、マイクロビーム試料照射位置をモニターしながらの試料走査による回折像の連続測定を可能とした。また、サイズ $2 \times 10 \mu\text{m}$ 、ビーム強度 10^{11} photons/sの高フラックスマイクロビームの供用も開始し、ポリマー等のソフトマテリアル試料においても数秒の測定時間で回折像が得られるようになった。マイクロCTでは、空間分解能、時間分解能の向上を試み、特に時間分解能においては、1測定0.05秒の高速化を達成した。高平行度マイクロビーム光学系では、新しい集光ミラーを導入し、角度発散が倍ではあるが集光サイズが半分であるビームが得られ、光学系選択の自由度が向上した。

光学系開発を担当するX線光学分野の学術研究における利用実績は125シフトであり、ナノ集光素子の開発及び評価、新しいX線顕微鏡光学系の構築及び評価、新材料の結晶性評価等において研究成果が得られた。学士3名の学位取得に貢献した。

3) エネルギー高分解能XANES光学系

上記の各ブランチの活動に加えて、ブランチAにおける新たな光学系として、プレエッジピークの詳細な分析を目的としたエネルギー高分解能XANES光学系を構築した。XANESスペクトルのプレエッジピークには遷移金属元素（主として3d遷移金属）と、その周辺に存在する酸素配位の構造情報が含まれており、これを詳細に分析することで、例えば、リチウムイオン電池の反応過程やガラスの着色機構を解明することができる。プレエッジピークの分析には、数100 meVのエネルギー分解能が必要である一方で、従来のXANES装置のエネルギー分解能は数 eVであったため、プレエッジピークのプロファイルを明瞭に取得することは

困難であった。そこで、BL24XUブランチAでは、分光器とチャンネルカット分光結晶を組み合わせた光学系を考案し、これを構築した。シリコン単結晶を分光素子とした二結晶分光器とチャンネルカット分光結晶を(+--+)配置とすることで、本光学系でプローブとなるX線のエネルギー分散を抑え、エネルギー分解能を向上した。本光学系のエネルギー分解能は300 meV (計算値)と見積られ、プレエッジピークの分析に十分なエネルギー分解能を達成している。

2010年度における本光学系のユーザー利用実績は4社、計28シフトであった。

発表論文

1. H. Takano, T. Tsuji, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima: "Sub-15 nm hard X-ray focusing with a new total reflection zone plate", *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 076702.
2. H. Takano, T. Hashimoto, T. Tsuji, T. Koyama, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima: "A simple hard X-ray "nanoslit" for measuring wavefront intensity", *Rev. Sci. Instrum.* **81** (2010) 073702.
3. H. Takano, T. Tsuji and Y. Kagoshima: "Reply to 'Comment on Sub-15 nm hard X-ray focusing with a new total-reflection zone plate'", *Appl. Phys. Express* **4** (2011) 019102.
4. Y. Kagoshima, H. Takano, T. Koyama, Y. Tsusaka and A. Saikubo: "Tandem-phase zone-plate optics for high-energy X-ray focusing", *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011) 022503.
5. 佐野則道, 竹田晋吾, 松井純爾, 高野秀和, 籠島靖: 「SPRING-8を利用した毛髪内部の構造変化測定」, *光学* **39** (2010) 550.
6. 高野秀和: 「X線ナノ集光の現状と展望」, *X線分析の進歩* **42** (X線工業分析 45集) 日本分析化学会・X線分析研究懇談会編, アグネ出版 (2011) pp. 83-94.

学会発表等

1. T. Koyama, H. Takenaka, S. Ichimaru, T. Ohchi, T. Tsuji, H. Takano and Y. Kagoshima: "Development of multilayer Laue lenses; (1) linear type", in XRM2010, 10th International Conference on X-ray Microscopy, August 15 - 20, 2010, Chicago, USA.
2. T. Koyama, T. Tsuji, H. Takano, Y. Kagoshima, S. Ichimaru, T. Ohchi and H. Takenaka: "Development of multilayer Laue lenses; (2) circular type", in XRM2010, 10th International Conference on X-ray Microscopy, August 15 - 20, 2010, Chicago, USA.
3. T. Tsuji, H. Takano, T. Hashimoto, S. Konishi, M. Morikawa, T. Koyama, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima:

- "Development of a reflection zone plate for hard X-ray nanofocusing", in XRM2010, 10th International Conference on X-ray Microscopy, August 15 - 20, 2010, Chicago, USA.
4. H. Takano, Y. Nakayama, T. Hashimoto, T. Tsuji, T. Koyama, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima: "New nanoscale imaging with a simple hard X-ray 'nano-slit'", in XRM2010, 10th International Conference on X-ray Microscopy, August 15 - 20, 2010, Chicago, USA.
 5. Y. Tsusaka, H. Takano, Y. Kagoshima, J. Matsui, S. Park, Y. Ishikawa and K. Wada: "Crystallinity estimation of area selective Ge epitaxial layer grown on Si substrate by means of high-resolution X-ray micro diffraction", in the 7th International Conference on Synchrotron Radiation in Materials Science, July 11-14, Oxford, UK.
 6. T. Koyama, T. Tsuji, S. Konishi, H. Takano, Y. Kagoshima, S. Ichimaru, T. Ohchi and H. Takenaka: "Development of linear and circular multilayer Laue lenses", in The 6th International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology, October 25 - 29, 2010, Kobe, Japan.
 7. H. Omi, M. Tateishi, T. Tawara, H. Komatsu, S. Takeda, Y. Tsusaka, Y. Kagoshima and J. Matsui: "Abnormal temperature dependence of photoluminescence from erbium silicates on SiO₂/Si substrates", in E-MRS (European Materials Research Society) 2010 Spring Meeting, June 7-11, 2010, Strasbourg, France.
 8. 小西繁輝, 小山貴久, 辻卓也, 森川美穂, 高野秀和, 津坂佳幸, 籠島靖, 市丸智, 大知渉之, 竹中久貴: 「X線円形多層膜ラウエレンズの集光特性評価」, 2010年秋季第71回応用物理学関係連合講演会, 2010年9月, 長崎大学.
 9. 森川美穂, 小西繁輝, 高野秀和, 津坂佳幸, 籠島靖: 「高速X線マイクロCT光学系の高度化」, 2010年秋季第71回応用物理学関係連合講演会, 2010年9月, 長崎大学.
 10. 高野秀和, 小西繁輝, 森川美穂, 橋本琢人, 辻卓也, 小山貴久, 津坂佳幸, 籠島靖: 「SPRING-8 兵庫県ビームラインにおけるマイクロCTおよびナノ集光の現状」, 第46回X線分析討論会, 2010年10月, 広島県情報プラザ.
 11. 高野秀和, 中山裕貴, 小西繁輝, 森川美穂, 橋本琢人, 津坂佳幸, 籠島靖: 「金属ワイヤーのみで可能な新しいX線ナノイメージング法」, 第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2011年1月, つくば国際会議場.
 12. 辻卓也, 高野秀和, 小山貴久, 津坂佳幸, 籠島靖, 寺田靖子, 宇留賀朋哉, 竹内晃久, 鈴木芳生: 「硬X線用全反射ゾーンプレートの開発および集光特性評価」, 第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2011年1月, つくば国際会議場.
 13. 高野秀和, 森川美穂, 小西繁輝, 橋本琢人, 津坂佳幸, 籠島靖: 「4次元X線マイクロCTの現状」, 第24回日本放

射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2011年1月, つくば国際会議場.

14. 大野知佐, 荒井美智子, 衣笠陽輝, 小西繁輝, 森川美穂, 津坂佳幸, 高野秀和, 籠島靖, 竹田晋吾, 石田成: 「放射光分岐分光用結晶の評価」, 第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2011年1月, つくば国際会議場.

兵庫県立大学大学院 物質理学研究科
高野 秀和、津坂 佳幸、籠島 靖

兵庫県放射光ナノテク研究所
竹田 晋吾、横山 和司、松井 純爾