

軟 X 線ビームライン SPring-8 BL07LSU からの技術移設 Transfers of the Techniques from SPring-8 BL07LSU

松田 巖

東京大学物性研究所

Iwao Matsuda

The institute for Solid State Physics, the University of Tokyo

imatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp

SPring-8 BL07LSU は高輝度軟 X 線アンジュレータビームラインとして、(1) 光エネルギー 250-2000eV、(2) 分解能 10,000 以上、(3) スポットサイズ 10 μ m 以下 (ゾンプレートで 70nm、ミラー集光で 1 μ m を記録)、(4) 強度 $\sim 10^{12}$ photons/秒、(5) 偏光(直線、円)の高速切換を達成している。光源加速器は分割型クロスアンジュレータを採用し、水平及び垂直の 8 の字アンジュレータセグメントがそれぞれ 4 台 (合計 8 台) 設置されている[1,2]。またビームライン BL07LSU では現在 1) 時間分解軟 X 線分光実験、2) 3 次元走査型光電子顕微鏡、3) 超高分解能軟 X 線発光、4) フリーポートの 4 つの実験ステーションが設置・整備されており、それぞれ共同利用実験装置として開放されている。

Slit-J の建設計画が始まってから、SPring-8 BL07LSU で培ったこれらの放射光実験技術について、我々は新光源での展開を検討してきた。SPring-8 と Slit-J の蓄積リングのパラメータは表 1 の通りであり、本性能によって軟 X 線放射光の輝度は新光源では桁で向上される。一方、放射光実験の現場では、ユーザーはビームラインのフラックスや分解能を参考に行っている。そこで SPring-8 BL07LSU での経験を元に具体的にどのように改善するかシミュレーション計算を行った。この結果を元に、本講演では軟 X 線アンジュレータビームラインを中心に Slit-J での軟 X 線放射光実験の展開を議論する。

表 1 蓄積リングのパラメータ

Storage ring	Slit-J	SPring-8
Electron Energy (GeV)	3	8
Average Current (mA)	400	100
Circumference (m)	354.094	1435.95
Natural Emittance (nm rad)	0.93	2.4

[1] S. Yamamoto *et al.*, J. Syn. Rad. **21**, 352-365 (2014).

[2] Y. Senba *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **649**, 58-60 (2011).

軟 X 線用マイクロ・ナノ集光ミラー開発の現状

Current status of development of micro- and nano- focusing mirrors for soft x-rays

三村秀和^{1,*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科

Hidekazu Mimura¹

¹ Graduate school of engineering, The University of Tokyo

* mimura@edm.t.u-tokyo.ac.jp

硬 X 線用の集光ミラーに比べて、波長の長い軟 X 線用の集光ミラーの作製の方が難しいという事実は、多くの方にとって意外に思うかもしれない。現在、実際に軟 X 線を 100 nm 以下のサイズに集光可能な放射光用のミラーは入手することはできない。軟 X 線のナノ集光はゾーンプレートにより容易に可能であるため、世界を見渡しても、すべての軟 X 線のナノ集光のビームラインにはゾーンプレートが採用されている。しかしながら、硬 X 線領域と同様に軟 X 線領域においても、色収差がなく高効率という性能を有する集光ミラーの潜在能力は高く、ミラーによる軟 X 線ナノ集光技術が確立すれば、現在の状況が一変する可能性がある。

それでは、硬 X 線の集光ミラーと比べて何が違うか？図のように波長が長くなると光学系に必要な開口数 (NA: Numerical Aperture) が大きくなる。その結果、軟 X 線用の集光ミラーの形状は、硬 X 線用のミラーの形状に比べて大きく湾曲する。さらに、入射角度の増加に伴い理想的に集光をするために必要な形状精度は硬 X 線用のミラーとほぼ同等である。この湾曲形状を高精度に作製することは、最先端の超精密加工技術を用いても困難である。

我々は、夏目光学株式会社、SACLA、SPring-8 など、多くの技術者、研究者と共同で、この作製困難な軟 X 線用集光ミラーの開発を進めている。目指すは、高精度ミラーによる軟 X 線の理想的な回折限界集光である。これまで、いくつかの軟 X 線集光用のミラーを作製し、SPring-8、SACLA において従来にない優れた集光性能を確認している [1]。さらに、ウォルターミラーによる結像イメージングにも成功している。その開発過程において、様々な新規のミラー製造技術の研究開発を行った。

本発表では、軟 X 線集光ミラーの開発の現状について報告し、それを踏まえた将来の軟 X 線ビームラインのマイクロ・ナノ集光光学系について議論したい。

$$\text{Diffraction Limited Focused Beam Size} \propto \lambda / \text{NA}$$

λ : wavelength, NA: Numerical aperture

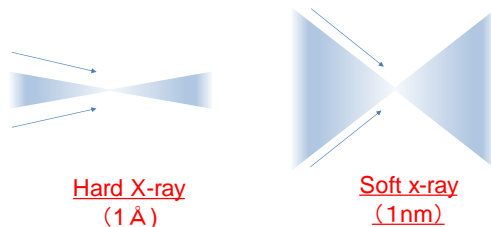


図 硬 X 線ナノ集光と軟 X 線ナノ集光の違い

[1] H. Mimura, et al., Fabrication of a precise ellipsoidal mirror for soft x-ray nanofocusing, Review of Scientific Instruments, 89, 093104 (2018).

二刀流ビームラインがもたらす新しい放射光利用の切り口

A two-color BL brings new colors of a SR facility

阿部 仁^{1,2,*}

¹高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

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

Hitoshi Abe^{1,2}

¹Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

²Dept. of Materials Structure Science, Sch. of High Energy Accelerator Science, SOKENDAI

*hitoshi.abe@kek.jp

“投入した資本に対して” どれだけの成果を挙げたかが今後ますます問われると感じている。この観点で放射光施設を眺めると、1本のビームライン(BL)をいかに効率良く使うかを考えることになる。1本のBLで軟X線と硬X線と両方使えるBL、二刀流のBLを考えてみたい。

軟X線と硬X線と同時に使えるBLとして、例えばDiamond Light Source I09 BLがある[1]。ここではSX-ARPES, HAXPESなどが可能で、いずれも需要の極めて高い手法であり、効率の良い運用と思われる。さらに、軟X線と硬X線が同時に同じ試料に使用できれば、斬新な実験が可能になり、新しい成果を生むと思われる。一例として筆者の動機を紹介させて頂きたい。

筆者らは表面敏感な“XAFS”測定手法の開発を行い、TREXS(Total REFelction X-ray Spectroscopy)と名付けた[2,3]。全反射条件の測定で表面感度~2 nmのスペクトルを取得し、Kramers-Kronigの関係式を用いることで“吸収”スペクトルを得て、通常のXAFS解析手法により表面~2 nmの局所構造解析等を可能にした。また、全反射スペクトルそのものの変化を通常のXANES解析のように追跡することで、表面で起こる反応を*in situ* TREXS測定によって実時間観察可能である。*in situ* TREXSで得られる情報は、金属の表面酸化反応であれば、金属元素の価数変化、などとなる。ただし、残念ながら吸着酸素などの反応分子種の情報は得られない。ここで同時に軟X線が使えると質的に新しい展開が期待できる。軟X線でC, N, Oのような化学種を捉え、同時に硬X線でFe, NiあるいはRu, Pdなどの金属種を捉えられるからである。このような需要は潜在的には多いと思われる。化学反応、触媒はすべからず対象になるし、錯体や金属中心を持つタンパク質、あるいは各種半導体材料等の研究にも利用され得るだろう。

良い成果を効率良く挙げるため、また新しいBLならではの成果を挙げるため、軟X線と硬X線が同時に利用可能なBL、エンドステーションはどのような姿であるべきか。話題提供を行いながら、議論したい。

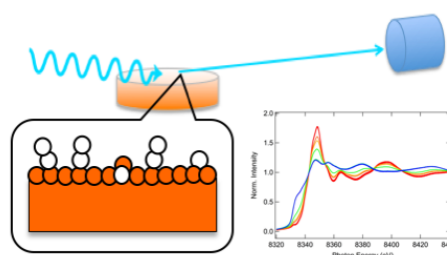


Fig. 1: TREXSで表面金属種を捉える。さらに軟X線で表面吸着種を見たい。

参考文献

[1] T.-L Lee and D. A. Duncan, *Synch. Rad. News* **31**, 16 (2018).

[2] H. Abe, et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **502**, 012035 (2014).

[3] H. Abe, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 062401 (2016).

軟 X 線偏光スイッチング法のスピンドイナミクス研究への展開 Development of soft x-ray polarization switching for studying spin dynamics

和達大樹 (東大物性研)
Hiroki Wadati (Institute for Solid State Physics, University of Tokyo)

20 世紀の物質科学は、物質内の電子の自由度のうち電荷を用いるものが主流であり、これが半導体などのエレクトロニクスであった。21 世紀に入り、電子の自由度のうちスピンを用いるスピントロニクスが大いに研究されている。ここでは、軟 X 線の偏光制御として高速スイッチング法を用い、X 線磁気円二色性(XMCD)や X 線磁気光学カー効果(XMOKE)による磁性研究の展望を示す。

ここではまず、SPring-8 の BL07LSU における計 8 台のアンジュレーターによる軟 X 線の偏光制御について述べる。これは 2 種類のアンジュレーターと位相シフターから成っている。前者が水平または垂直方向に偏光した軟 X 線を生み出し、後者が前者からの軟 X 線の位相を制御することで様々な偏光を生み出す。電磁石コイルからの磁場を使って相対論的な電子に余計な経路を取らせることにより、連続的な位相のシフトが実現する。図 1 に正弦波の交流電流を用いた様子を具体的に示す。図 1 (a)は位相差の時間変化を示す。軟 X 線の偏光は直線偏光→右円偏光→直線偏光→左円偏光→直線偏光→...と変化する。このような偏光を持つ軟 X 線を用いて磁気光学効果測定を行うと、楕円率が(b)の XMCD により p 成分として現れ、(c)のカー回転角が $2p$ 成分として現れる。

このようにして、 p と $2p$ 成分の抽出により、楕円率とカー回転角が同時に測定できる。このようなシグナルは、ロックインアンプを含む測定系の確立により、高精度で測定できるようになった[1]。

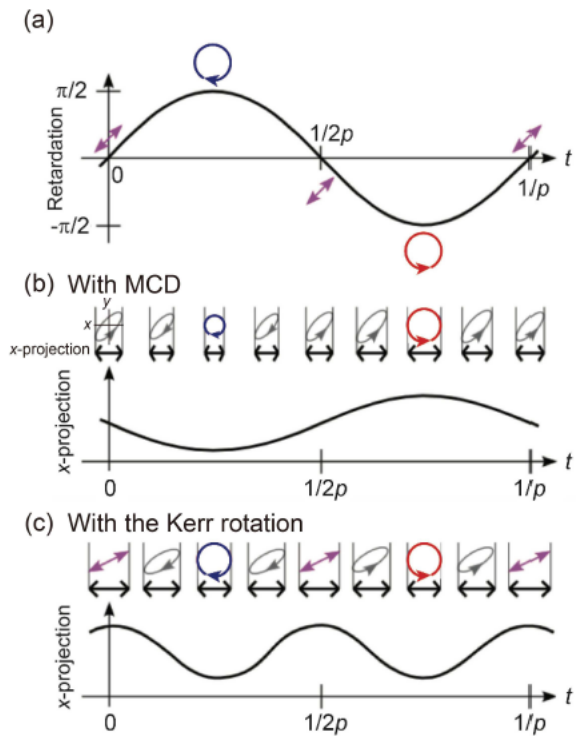


図 1: (a) 位相差の時間変化と軟 X 線の偏光。
(b), (c) p 成分が XMCD、 $2p$ 成分が XMOKE となる

磁性研究の中でも近年目覚ましく研究が進んでいるのが、光励起に対するスピンドイナミクスである。我々はフリーポートステーションにフェムト秒レーザーを引き込むことで、ポンププローブ法による時間分解共鳴軟 X 線回折・吸収測定を行うシステムの開発を行った[2]。新光源での展望として、FePt などの強磁性合金薄膜の時間分解磁気円二色性測定や、希土類化合物の価数揺動、光誘起超伝導など様々な電子物性のダイナミクス観測について議論する。

[1] Y. Kubota *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 214417 (2017). [2] K. Takubo *et al.*, Appl. Phys. Lett. **110**, 162401 (2017).

ナノ集光・オペランド・機械学習などの組合せで十分なのか？

吹留 博一^{1,*}

¹東北大学電気通信研究所

Hirokazu Fukidome¹

¹Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

*fukidome@riec.tohoku.ac.jp

次世代放射光は、基礎研究成果に基づく産学連携を通じた社会貢献が求められている。そのターゲットの一つが、ナノ集光された高輝度放射光を用いたオペランド X 線分光の次世代デバイス研究開発への応用である。デバイスの活性層の極小化にともない、それをとりまく界面や寄生領域の影響をナノスケールで制御する必要があるのが、その理由である。

我々は、動作しているデバイスの微視的な電子状態を調べることを目的とした、オペランド顕微 X 線分光 (o-SXS) の研究を進めている。我々の o-SXS は、二つに大別される。一つは、SPRING-8 BL17SU および BL25SU に設置されている PEEM を用いた元素吸収端でのオペランド・ナノ X 線吸収分光[1, 2]、もう一つは、BL07LSU に設置されている 3D nano-ESCA をもちいたオペランド・ナノ X 線光電子分光である [3, 4]。

我々の研究におけるターゲットは、グラフェンをはじめとする二次元原子薄膜を用いたデバイス[1-3]や GaN-HEMT[4]である。前者は、長期的視野に立ったものであり、また、その極限的な薄さから表面科学の観点から標準試料である。後者に関しては、短中期的視野に立つものであり、二次元的な量子効果を用いたデバイスという観点からのモデル試料である。双方の試料に関し、オペランド顕微 X 線分光はデバイス物理および実用化に関わる有益な情報を提供している。尾嶋先生にも御参画いただいた住友電工との NEDO 産官学連携プロジェクトや、総務省管轄の産官学プロジェクトにおいて、オペランド顕微 X 線分光は重要な役割を果たしている。

以上の研究は、DC 電圧下に限られていた。しかし、これでは、デバイス物理の真の理解につながらない場合がある。BL25SU において、時空間分解オペランド X 線分光に取り組んでおり、DC 電圧下と非 DC 電圧下では、表面準位の時空間的挙動が大きく異なることが明らかになりつつある。SPRING-8 では軟 X 線領域の輝度が不十分であるため時空間分解研究は困難となる場合があるが、次世代放射光の高輝度化はこの課題は解決する。

しかし、解決されたとしてそれで十分なのかという疑問が生じる。分光技術の多様化・高度化、ナノ集光技術の高度化や、機械学習などによる解析の高度化、で充分なのだろうか？

(軟) X 線分光、特に、光電子分光の弱点「深い所を調べられない」を克服すること無しには、X 線分光がデバイス研究開発に真に役立つものとなることは難しい。この弱点を克服するヒントが最近の我々の GaN-HEMT 研究にあったことに私は気付いた。縦方向の電荷中性条件が成立する系においては精密ナノデバイス技術との融合により、深い箇所にある数十 nm の厚さ程度の領域の情報を選択的に得られるのではないかと推論している。現在、この方向性に沿った実験を BL07LSU にて進めさせていただいているところです。

本研究は、尾嶋先生、小嗣先生、大河内博士、永村博士、住友電工との共同研究である。本研究は、科研費（基盤研究(B)や(S)など）、NEDO 国プロや総務省 SCOPE などの助成を受けた。

参考文献

- [1] Fukidome et al., *Sci. Rep.* **4**, 3713 (2014).
- [2] G. Kamta, *Phys. Stat. Solid.*, *accepted*.
- [3] H. Fukidome et al., *APEX*, **7**, 065101 (2017).
- [4] K. Omika et al., *Sci. Rep.* **8**, 13268 (2014).

オペランド軟 X 線分光を用いた触媒研究：
現状と次世代放射光施設における展望
**Catalysis science by *operando* soft X-ray spectroscopy:
Present status and future prospect at next generation
synchrotron radiation facility**

山本 達

東京大学物性研究所

Susumu Yamamoto

The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

susumu@issp.u-tokyo.ac.jp

触媒研究において、反応中・動作中の触媒を直接観測する「オペランド観測」の重要性が高まっている。軟 X 線は、触媒を構成する金属重元素だけでなく反応・生成種を構成する軽元素に高い感度を持ち、触媒反応の全貌を観測することを可能にする。しかし、軟 X 線は物質との相互作用が大きいため、試料環境は真空中に限られてきた。ところが近年になり高輝度放射光の利用や新規装置開発により、ガス雰囲気下でのオペランド軟 X 線分光測定が可能になってきた。

我々はこのオペランド観測の重要性を鑑み、放射光施設 SPring-8 の高輝度軟 X 線ビームライン BL07LSU において雰囲気 X 線光電子分光法(Ambient pressure XPS, AP-XPS) [1] と雰囲気 X 線吸収分光法(AP-XAS)というオペランド軟 X 線分光法を開発し、これらの手法を用いた触媒研究を推進してきた[2-4]。

本講演では、オペランド軟 X 線分光法、特に AP-XPS に関して、最近の利用技術の進展及びそれを用いた研究を紹介し、現在の技術的課題について議論する。それに基づいて、次世代放射光施設において展開すべきオペランド軟 X 線分光実験及び触媒研究について考察したい。

参考文献

- [1] S. Yamamoto *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 184025 (2008).
- [2] T. Koitaya, S. Yamamoto *et al.*, *Topics in Catalysis* **59**, 526-531 (2016).
- [3] S. Yamamoto *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 19532-19538 (2018).
- [4] J. Tang, S. Yamamoto *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **463**, 1161-1167 (2019).

ナノ・スピン ARPES を用いた物性研究と今後の展開

Solid state physics and its future development with nano-spin ARPES

近藤 猛

東京大学物性研究所

Takeshi Kondo

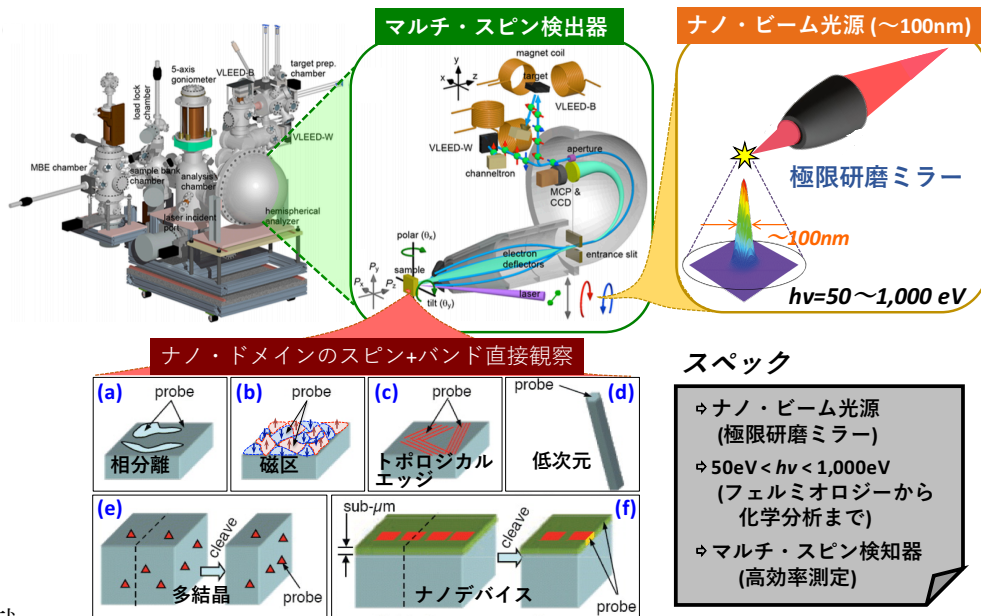
ISSP, The University of Tokyo

kondo1215@issp.u-tokyo.ac.jp

「ナノ・スピン ARPES」は、東京大学放射光連携研究機構から SLiT-J のエンドステーションとして提案する2つのうちの1つである。その構想図を下図に示す。

高温超伝導体の発見時に勝るとも劣らない衝撃をもって登場したトポロジカル絶縁体の実験的証明には、スピン分解 ARPES が主役を担った。近年、トポロジカル絶縁体を典型例とする新奇なエッジ電子状態や、ワイル半金属といったスピン偏極する電子構造を母体とする物質科学が世界的に競って研究されている。その中において、高輝度 3GeV 放射光を用いた ARPES 研究の活躍は凄まじい状況にある。「ワイルの年」と言えるほどに賑わった 2015 年を見ても、3GeV 放射光 ARPES を活かすことで初めて、TaAs においてワイル半金属状態が発見された [Xu et al., Science (2015), Lv et al., Nat. phys. (2015), Yang et al., Nat. phys. (2015), Liu et al., Nat. Mater. (2015)]。トポロジカル絶縁体の発見と共に一気に加速した新奇トポロジカル量子相開拓の学術的要請と、「エレクトロニクス」を一刷新して更なる人類繁栄をもたらし得る「スピントロニクス」の社会的要請を受けて、電子物性科学に不可欠な実験ツールとしての地位を既に確立したスピン分解 ARPES 技術を、さらに革新させる必要がある。我々は、SLiT-J が誇る低エミッタンス放射光の威力を最大限に活かしてこそ実現する「見えなかったものを見る」ナノ・スピン ARPES を開発する計画である。

「ナノ・スピンARPES 構想」



参考文献:

- [1] A. Bostwick, et al., Synchrotron Radiat. News 25, 19–25 (2012).
- [2] K. Yaji et al., Rev. sci. instrum. 87, 053111 (2016).

データ同化による結晶構造予測 (Crystal structure prediction by data assimilation)

藤堂眞治^{1,2,3,*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科

² 東京大学物性研究所

³ 物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門

Synge Todo^{1,2,3}

¹Department of Physics, University of Tokyo

²Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

³MaDIS, National Institute for Materials Science

*wistaria@phys.s.u-tokyo.ac.jp

密度汎関数法や量子モンテカルロ法に代表される計算科学アルゴリズムの進化やスーパーコンピュータによる大規模な並列化により、より複雑な物質をより精密にシミュレーションすることが可能となってきた。また近年、シミュレーションソフトウェアのオープンソース化やパッケージ化も進み、計算物質科学の専門家でなくとも本格的なシミュレーションを手軽に行えるようになってきた[1,2]。先端的な計算物質科学シミュレーションと精密な実験データを最新のデータ科学の手法により組み合わせることで、これまで難しかった物質の構造予測や物性予測が今後飛躍的に発展すると期待される。

その一つの試みとして、最近我々が提案した実験とシミュレーションの「データ同化」による新しい結晶構造手法[3,4]を紹介する。この手法では、原子間ポテンシャルエネルギーと X 線回折データから定義される「結晶化度」を組み合わせたコスト関数を最適化する。たとえ X 線回折データがそれ自体では従来の構造解析手法には全く不十分であったとしても、シミュレーションという全く性質の異なるデータと組み合わせることで構造予測が可能となる。我々は SiO₂ の多形やダイヤモンドなどの物質にこの手法を適用し、100 以上の原子を含むような大きな計算セルに対しても、高い確率で正しい構造が推定されることを示した。また、この手法で現れる、複数のコスト関数の同時最適化問題に対する新しい最適化手法を開発することで、アニーリング法などの「メタヒューリスティクス」に頼らずにさらに効率よく最適解を探索することが可能となった。講演では、シミュレーションや実験データといった様々な「部品」をデータ科学により「同化」することで可能となる新しい物質科学について展望する。

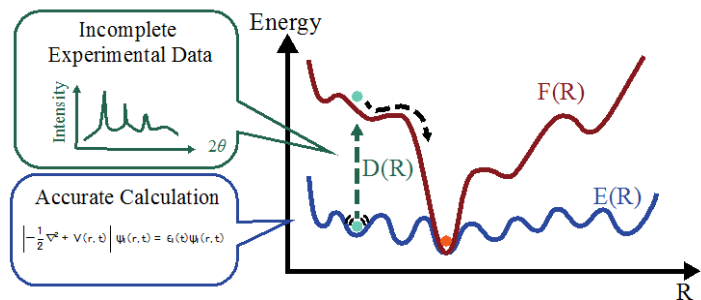


Fig. 1: 実験と計算のデータ同化の概念図。

[1] MateriApps – 物質科学シミュレーションのポータルサイト <http://ma.issp.u-tokyo.ac.jp/>

[2] 本山, 三澤, 加藤, 藤堂, 固体物理 **52**, 743-755 (2017).

[3] N. Tsujimoto, D. Adachi, R. Akashi, S. Todo, S. Tsuneyuki, *Phys. Rev. Materials* **2**, 053801 (2018).

[4] D. Adachi, N. Tsujimoto, R. Akashi, S. Todo, S. Tsuneyuki, preprint: arXiv:1808.06846.

UVSOR-III における走査型透過 X 線顕微鏡の現状と将来展望 (Recent status and future of a scanning transmission X-ray microscope in UVSOR-III)

大東 琢治^{1,2,*}, 湯沢 勇人¹

¹分子科学研究所 極端紫外光研究施設, ²総合研究大学院大学

Takuji Ohigashi^{1,2,*}, Hayato Yuzawa¹

¹UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science, ²Sokendai

*ohigashi@ims.ac.jp

分子科学研究所の放射光施設、極端紫外光研究施設 (UVSOR) は 2012 年に 3 度目の大改造を行い (UVSOR-III 計画)、準回折限界と高輝度化を達成した。この高度化に伴い、その光源性能を発揮する新規ビームラインとして、真空封止アンジュレーターを光源として用いた走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) ビームライン BL4U の建設を行なった。BL4U は現在、100~770 eV のエネルギー範囲を $E/\Delta E \sim 5,000$ で利用可能で、その際の試料位置でのフォトンフラックスは約 $\sim 10^7$ photons/s としている。BL4U は 2013 年 6 月より共同利用を開始し、今年度は年間述べ 54 ユーザーにマシンタイムを供している。その内の約 3 割弱は民間企業の利用であり、その需要はなおも高くなる一方である。

このような状況下で我々は、ビームラインの多様性を追求し、さらなる新規研究分野の利用を開拓するため、in-situ/operando 分析手法[1]や Computer Tomography による 3 次元吸収分光法[2]、試料の大気非暴露搬送装置 (施設間リンケージ分析システム[3]) をはじめとする、特殊な分析手法の開発に注力している。またその一方では、ビームラインの性能向上を目的として、利用可能エネルギー領域の拡張、特に低エネルギー側の拡張を行なってきている。UVSOR は低エネルギー領域の利用に特徴がある光源であるため、これにより分析装置としてのポテンシャル向上とともに、世界的にも唯一無二の装置となり得ることを期待している。そこで着目しているのがリチウム (K 吸収端 : 55 eV) の分析であるが、その実現には光学素子である Fresnel Zone Plate の焦点距離が著しく短いことと、高次光の除去が主要な課題となる。それらの課題を解決してきた結果、初となる塩化リチウム粒子の顕微分光測定を行うことができた。さらなる測定状況の改善を図った上で、近日中に利用公開する予定である。

本発表では BL4U のビームラインの現状および、これまでの研究成果の紹介を行う。また、今後の 3 GeV 光源建設計画を見据えた上での、UVSOR における顕微分光ビームラインの将来について述べる。

[1] T. Ohigashi, M. Nagasaka, T. Horigome, N. Kosugi, S. M. Rosendahl and A. P. Hitchcock, *AIP Conf. Proc.*, **1741**, 050002 (2016).

[2] T. Ohigashi, Y. Inagaki, A. Ito, K. Shinohara and N. Kosugi, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **849**, 012044 (2017).

[3] T. Ohigashi, in preparation

次世代放射光施設におけるコヒーレント軟 X 線と 情報技術の融合による超高速磁気イメージングへの展開 (Development for high-speed magnetic imaging by fusion of coherent soft X-ray and information technology)

山崎裕一

物質・材料研究機構 MaDIS, JST さきがけ「情報計測」, 理化学研究所 CEMS

Yuichi YAMASAKI

NIMS-MaDIS, JST-PRESTO, RIKEN-CEMS

*YAMASAKI.Yuichi@nims.go.jp

軟 X 線は、多くの磁性体材料に構成元素として含まれる 3d 遷移金属元素の吸収端に対応するエネルギー領域にあり、磁気状態を高感度に検出できることから磁性体材料の磁気特性を解明する強力なプローブとなっている。特に、放射光から発生する軟 X 線のコヒーレント性、短パルス性を活用すると、磁気構造を高い時間と空間の分解能で実空間計測することが可能となる。

近年、我々はメゾスコピック領域の磁気構造体である磁気スキルミオンに着目して、軟 X 線散乱・回折による観測を行ってきた。磁気スキルミオンはトポロジカルに安定な磁気構造であるため、外乱要因に対して強く、電流や光など様々な外場によって制御できることからスピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。例えば、カイラル磁性体鉄ゲルマニウム(FeGe)では共鳴軟 X 線磁気散乱によって磁気スキルミオンが三角格子を形成する様子を観測し[1]、さらにコヒーレント軟 X 線によって得られる回折図形から磁気スキルミオンの実空間像を再構成することにも成功している (右図) [2]。

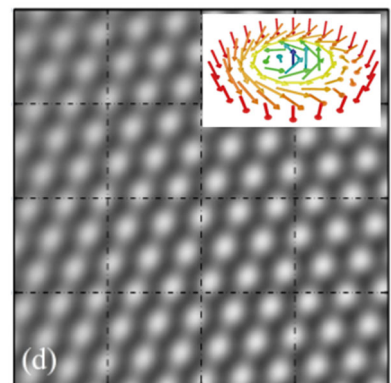
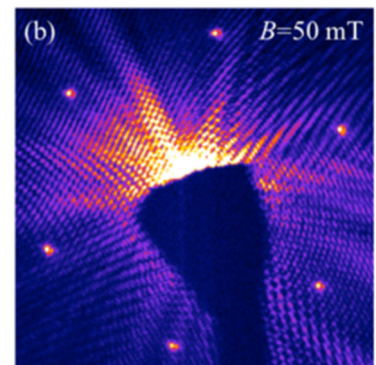
次世代放射光施設ではコヒーレントフラックスが大幅に向上するため、より高速の磁気ダイナミクスも観測が可能になると期待される。しかし、そのような計測を実現するためには検出器のダイナミックレンジやノイズ、情報欠損の問題など、光源の向上だけでは解決できない問題もある。そのため、先端的な情報技術を活用した解析技術を開発することも重要となってくる。講演では、我々が現在、取り組んでいる情報技術を融合させた解析手法を紹介し、次世代放射光施設で加速度的な発展が期待されるコヒーレント軟 X 線を使った磁気イメージング手法の展望について議論したい。

本研究は、有馬孝尚先生 (理研/東大)、岡田真人先生 (NIMS/東大)、中尾裕則先生 (KEK) 他、多くの方々との共同研究で行ったものである。

参考文献

[1] Y. Yamasaki *et al.*, *Phys. Rev. B* 92, 220421(R) (2015)

[2] V. Ukleev, Y. Yamasaki *et al.*, *Quantum Beam Science* 2, 3 (2018)



次世代放射光を活かす共鳴軟X線非弾性散乱分光の戦略 (Strategy for resonant inelastic soft X-ray scattering using next-generation synchrotron radiation)

原田慈久

東京大学物性研究所

Yoshihisa Harada

Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

*harada@issp.u-tokyo.ac.jp

この10年間のRIXSの発展は目覚ましく、諸外国の3GeVクラス光源で大型の共鳴軟X線非弾性散乱装置の建設が相次ぎ、現在はCu L端で30meVの素励起を捉えることのできる、 $E/\Delta E > 30,000$ の超高分解能分光が実現している[1]。分光性能の向上に伴って利用分野も拡大しており、高温超電導やマルチフェロイクス材料、スピントロニクス材料等の機能性材料の分析はもとより、電解液を含む電池材料や環境応答材料、生体材料等のその場・オペランド分析でも威力を発揮している[2]。

RIXSはその遷移断面積の小ささと分光手法の極めて小さい検出立体角のために圧倒的な入射光量と集光特性の両方を必要とすることから、高輝度、連続光源という放射光の特長を最大限に活かせる手法として、放射光源の進展とともに発展してきた。日本の次世代放射光においても、RIXSが先端分光ツールの要の一つとなることは間違いない。しかし世界的な開発の流れを見ると、RIXSの開発競争は常にエネルギー分解能の向上・運動量分散・偏光解析とそれを印象付ける“デモンストレーション”的な実験が多く、XPSやXAFSのような誰もが利用するツールにはまだなっていない。これは、RIXSが二次光学過程で解釈が難しいとか、測定に時間がかかるという理由だけではなく、究極の分光を目指した尖った研究が強相関と原子分子に偏り、裾野を広げる研究とリンクしていないことにも一因があると思われる。我々が目指すべきは、究極の分光を目指した装置開発を行いつつ、尖った研究の種となる測定対象を、裾野を広げる研究の中から抽出するという連携プレーである。そのために、分光素子と集光素子、検出素子の最適化を図って $E/\Delta E > 100,000$ を達成する超高分解能RIXS分光器の開発と、従来の100倍以上の速さでRIXSを取得する高効率RIXS分光器の開発の両方が必要である。後者ではさらに固体物理から生命科学まで垣根なく分野を横断して、産業界のニーズにも呼応できる試料環境を完備する。

本講演では、次世代RIXSで展開するサイエンスの一つとして、表面・界面分析を紹介する。超高分解能分析の実現により、表面を構成して反応に寄与する各化学種の電子状態とその反応過程における変化を追うのみならず、固液界面に形成された電気二重層が液体の構造やイオンの分布に与える影響や、その液体・イオン種が材料に与える影響を、深さ分解・高感度・電子軌道分解で詳細に追うことが可能になる。最後に、励起エネルギー依存2Dマッピング、回折との融合による新たな展開の可能性についても議論する。

参考文献

[1] L. Chaix *et al.*, *Nat. Phys.*, **10**, 1038 (2017).

[2] See, e.g., F. Lin *et al.*, *Chem. Rev.*, **117**, 13123 (2017).