

第34回日本放射光学会年会・ 放射光科学合同シンポジウム(JSR2021)学生発表賞審査結果について

第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2021)
組織委員長 小嗣真人(東京理科大学)

日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(年会・合同シンポ)学生発表賞では、将来性・独創性のある優れた発表を行った学生を顕彰し、賞状を贈呈してまいりました。年会・合同シンポジウムの精神に則り「学生による全ての発表」を対象としています。第34回年会・合同シンポ(JSR2021)では、組織委員長、実行委員長、副実行委員長、プログラム委員長、副プログラム委員長の6名で学生発表賞選考委員会を組織し、55名の審査員によるのべ280件(発表件数70件、発表あたり4人の審査員で審査)の審査結果に基づき選考が行われました。審査にご協力いただいた先生方には、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

第34回年会・合同シンポ(JSR2021)では学生発表賞対象講演の申込数が71件ありましたが、1件の発表キャンセルがあり、最終的な対象講演数は70件となりました。今年度はオンライン化に伴って、ショートプレゼンと個別のディスカッションを組合わせた研究発表に対して審査を行いました。分野別の内訳は以下の通りです。

第1分野 X線領域の回折・散乱・分光など

口頭発表：16件、ポスター発表：9件

第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

口頭発表：11件、ポスター発表：11件

第3分野 加速器装置・イメージングなど

口頭発表：11件、ポスター発表：12件

合計件数 JSR2021 70件(JSR2020：99件、JSR2019：108件、JSR2018：123件、JSR2017：126件、JSR2016：109件、JSR2015：113件、JSR14：124件、JSR13：104件、JSR12：111件、JSR11：124件、JSR10：96件)

学生発表賞選考委員会では上記発表を対象に、審査員による採点の結果を評点およびTスコアにより評価し、以下の8名の方々に学生発表賞を授与することに決定しました。受賞者の皆様が、これを契機に今後も放射光分野において益々活躍されることを期待しております。

【JSR2021学生発表賞受賞者(各分野、五十音順)】

第1分野 X線領域の回折・散乱・分光など

発表番号：10P021

氏名(所属)：清水啓史(慶應義塾大学)

演題：極端軟X線転換電子収量大気圧XAFS測定セルの開発

発表番号：5E002

氏名(所属)：鈴木雄太(総合研究大学院大学)

演題：ブラックボックス最適化を用いたリートベルト解析の自動化

第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

発表番号：2C002

氏名(所属)：河野 嵩(広島大学大学院理学研究科)

演題：軟X線ARPESによる Co_2MnGe のハーフメタル電子状態とワイル交差の直接観測

発表番号：2C003

氏名(所属)：志賀大亮(東北大学多元研)

演題： VO_2 極薄膜における電子・結晶構造の膜厚依存性

発表番号：1C005

氏名（所属）：柴田友里亜（大阪大学大学院理学研究科）

演題：光励起価数転移を示す SmS の時間分解 X 線吸収分光

第3分野 加速器装置・イメージングなど

発表番号：7D003

氏名（所属）：島村勇徳（東京大学大学院工学系研究科）

演題：軟 X 線による超小型 Kirkpatrick-Baez ミラーの特性評価

発表番号：3D002

氏名（所属）：高澤駿太郎（東北大学大学院工学研究科）

演題：三角形開口を用いたシングルフレームコヒーレント X 線回折イメージング

発表番号：8C002

氏名（所属）：山口豪太（東京大学大学院工学系研究科）

演題：銅電鍍製回転楕円ミラーによる軟 X 線 FEL のサブミクロン集光

なお、次ページ以降に各受賞者の研究要旨が本人の紹介と受賞コメントと合わせて掲載されております。ぜひご覧ください。

JSR2021学生発表賞 第1分野

受賞者：清水啓史（発表番号：10P021）

題目：極端軟 X 線転換電子収量大気圧 XAFS 測定セルの開発

講演者：清水啓史¹，伊勢川和久¹，市川理世¹，豊島 遼¹，武安光太郎²，中村潤児²，間瀬一彦³，近藤 寛¹

所属：¹慶大理工，²筑波大数理物質，³KEK 物構研放射光

1. 緒言

X 線吸収微細構造（XAFS）法は測定環境の制約が少ない化学分析手法であり，様々な分野で活用されている。中でも転換電子収量（CEY）XAFS は表面敏感な測定手法である。CEY 法では試料を He 雰囲気下に置いて X 線を照射し，オージェ電子が He ガスを電離して発生した二次電子を収集する¹⁾。しかし，軽元素の測定に用いられる極端軟 X 線領域では環境中のガスによる減衰が著しく，大気圧で動作する触媒の表面分析例は限られている²⁾。そこで本研究では，極端軟 X 線を使用し，大気圧ガス存在下で触媒表面のその場分析が可能な CEY XAFS 測定セルの開発を目的とした。

2. 測定装置

我々の開発した測定セル（Fig. 1）は3枚のフランジ（ICF70規格）で構成されている。上流側のフランジに取り付けた X 線窓（200 nm 厚，Si₃N₄）で He パス（大気圧）と真空領域を仕切っている。真ん中のフランジには X 線窓（100 nm 厚，SiC）が設置されており，膜の周囲に集電電極用の Au が蒸着されている。下流側のフランジに試料を乗せ，3枚のフランジを組み合わせることで，試料と電極を約 1 mm まで近づけることができる。電極にバイアス電圧をかけ，捕集した二次電子をピコアンメータで計測する。得られた信号のバックグラウンド処理は上流の真空領域にある Au ミラーの電流値で行った。測定は全て KEK-PF BL-13A で行った。

3. 実験結果・考察

開発したセルを用いて，0.1 MPa He 中でステンレスの Fe-L 端 XAFS 測定を行った（Fig. 2）。真空中で X 線を照射して試料電流を測定した場合（a）と比較し，バイアス電圧が負の場合（b，電離した He⁺ イオンを捕集）及び正の場合（c，電子を捕集）で同一形状のスペクトルを得た。このことから，我々の開発した装置を用いて極端軟 X 線大気圧 CEY XAFS 測定が可能であることが確かめられた。また，Fig. 3 に示した通り，バイアス電圧が負の場合（b）は測定開始から時間が経過すると Fe²⁺ 成分の酸化が，正の場合（c）は Fe³⁺ 成分の還元が確認された。こうした変化は真空中（a）では観測されなかった。原因として，電子及び He⁺ イオンが電荷キャリアとなり，電気化学的な酸化/還元が起きていた可能性が考えられる。

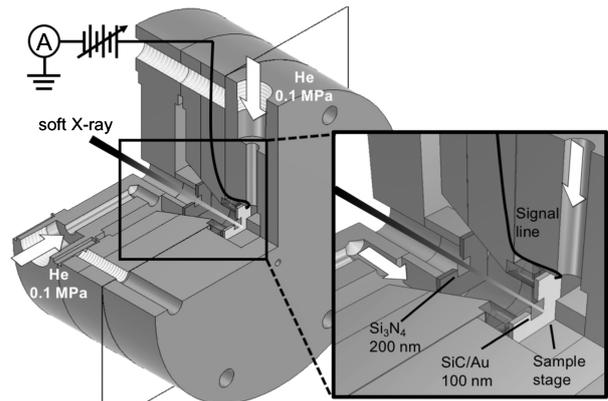


Fig. 1 大気圧 CEY XAFS 測定セル

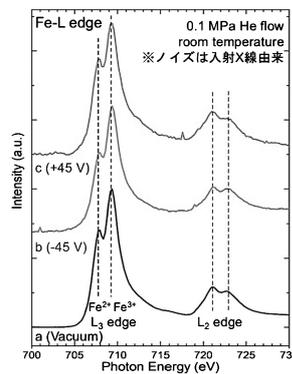


Fig. 2 ステンレス Fe-L 端 XAFS

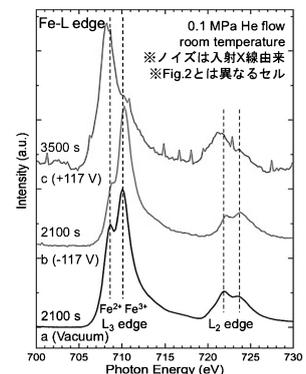


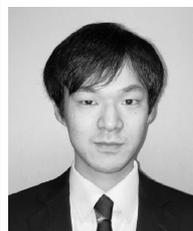
Fig. 3 時間経過後のスペクトル

4. 今後の課題

今後は，酸化/還元の原因解明と試料への影響低減方法を検討する。また，非 Pt 系燃料電池触媒として注目される窒素ドーングラフェンの N-K 端オペランド計測を目指し，検出感度向上のための装置改良を行っていく。

参考文献

- 1) A. Knop-Gericke *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. **406**, 311 (1998).
- 2) S. K. Beaumont: Phys. Chem. Chem. Phys. **22**, 18747 (2020).



清水啓史

慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程 1 年

【略歴】

2020年慶應義塾大学理工学部化学科卒業。2020年より慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程在籍。

【受賞のコメント】

この度は，荣誉ある JSR2021 学生発表賞に選出されて頂き大変光栄に存じます。日頃よりご指導頂いている近藤寛教授，豊島遼助教をはじめ，試料をご提供頂いた筑波大学中村潤児教授，武安光太郎助教，KEK 間瀬一彦准教授に，この場を借りて改めて御礼申し上げます。また，これまで研究に協力して下さった方々，当日発表を聞きにお越し頂いた方々にも，厚く御礼申し上げます。今回の受賞を励みに，より一層研究活動に邁進して参ります。

JSR2021学生発表賞 第1分野

受賞者：鈴木雄太（発表番号：5E002）

題目：ブラックボックス最適化を用いたリートベルト解析の自動化

講演者：鈴木雄太^{1,2}、尾崎嘉彦^{3,4}、羽合孝文¹、
齊藤耕太郎^{2,5}、大西正輝³、小野寛太^{1,2}

所属：¹総研大、²高エネ研、³産総研、⁴GREE, Inc.,
⁵Medley, Inc.

1. 緒言

粉末 X 線回折 (XRD) パターンから結晶構造の情報を得るために、初期結晶構造と装置パラメータ等の情報を用いてフィッティングを行い、結晶構造の精密化を行う手法 (リートベルト解析) が普及している。リートベルト解析は長い歴史をもち信頼のおける手法である一方で、例としてバックグラウンド関数の選択や、どの変数をフィットあるいは固定するかを選択など、解析において材料の性質とは独立に多数のパラメータの設定が必要である。この設定は結果に大きく影響するため、適切な解析結果を得るためには試行錯誤と熟練が必要とされ時間を要する。粉末 XRD 測定が高度に自動化・高速化されていることから、リートベルト解析の工数が研究のボトルネックの一つとなっていた。我々は、この状況が機械学習モデルのハイパーパラメータ最適化 (HPO) の問題と類似していることに気づき、リートベルト解析の試行錯誤を、フィッティング結果の指標 R_{wp} を最小化するリートベルト解析の設定を探索ブラックボックス最適化 (BBO) の問題として定式化した¹⁾。

2. 実験

BBO で最適化する対象として、バックグラウンド関数と次数、フィットする変数の指定等の13個を選び、ベイズ最適化に基づくアルゴリズムの一種である Tree-structured Parzen Estimator (TPE)^{2,3)}を用いてこの最適化問題を解いた。すなわち、ある設定でリートベルト解析を行って得られた R_{wp} をもとに、さらに小さい R_{wp} を与えると思われる設定を TPE で生成して再度リートベルト解析を行うという試行を200回繰り返した。リートベルト解析ソフトウェアには GSAS-II⁴⁾を用いた。エキスパートシステムに基づく自動リートベルト解析法である AutoFP⁵⁾と比較するため、同文献より Y_2O_3 および $Dy_{0.5}Sr_{0.5}MnO_3$ (DSMO) の粉末 XRD パターン (Cu 管球を用いて一般的な粉末 X 線回折装置で測定) を用いて、提案手法の性能を検証した。実験には18コア2.3 GHz CPU, RAM 256 GB の計算機を用いた。

3. 結果と考察

Y_2O_3 の最適化履歴を Fig. 1 に示す。図中の TPE が提案手法による結果であり、TPE の初期設定に用いる乱数を

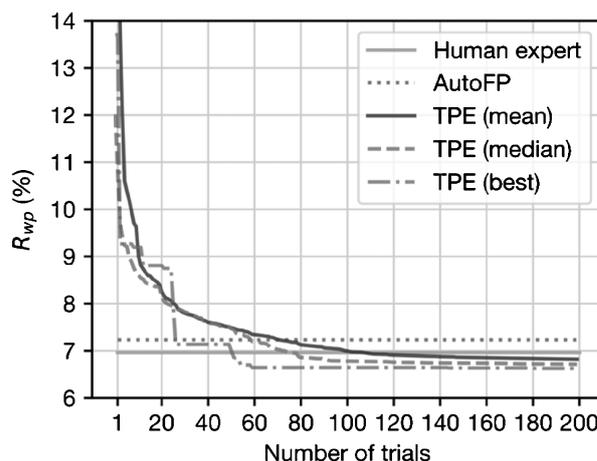


Fig. 1 Y_2O_3 の最適化履歴

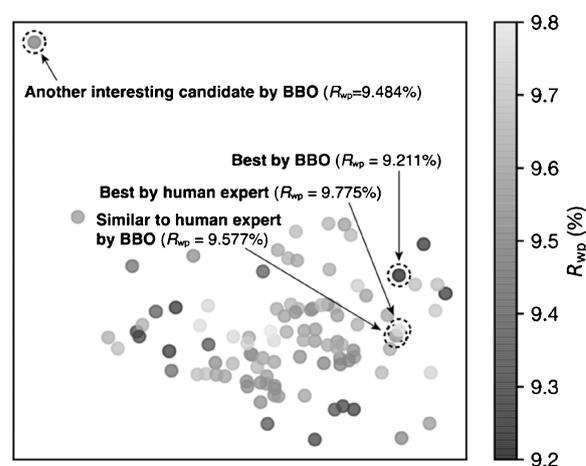


Fig. 2 多次元尺度構成法を用いた DSMO の結晶構造の可視化

変えて100回実験した平均と中央値のプロットも合わせて示した。TPE による最適化の進行に伴って R_{wp} が減少し、 Y_2O_3 と DSMO 両方で、平均して100回程度の試行で熟練者および AutoFP (既存手法) より R_{wp} が小さい結果を得ることができた。各実験で、100回の試行に要する計算時間は並列化無しで30分程度であった。また、乱数を変えた100回の実験において、 Y_2O_3 と DSMO でそれぞれ90回、99回は熟練者による結果よりも小さい R_{wp} を得ることができた。以上より、BBO に基づく提案手法により、少なくとも今回のケースでは熟練者と同程度の性能で自動リートベルト解析が実現できることが示された。

DSMO について、TPE の乱数を変えて100回実験し、得られた R_{wp} 最小の結晶構造について、多次元尺度構成法を用いて結晶構造の類似度を可視化した (Fig. 2)。各点が1つの結晶構造に対応し、図中の距離が構造の類似度に対応する。右下には熟練者による結果に近い結晶構造が緩いクラスターを形成しており、熟練者による手動解析と同程度の構造を自動で得ることができたことが確認された。また、図の左上には外れ値の構造が確認できる。この構造は2つの酸素原子間で熱振動因子の値が大きく異なるな

ど、物理的には不適切な結果であったが、 R_{wp} は熟練者による手動解析の結果よりも小さく、実験結果を十分によく説明している構造の候補と考えられる。このように全く異なる構造の候補も提案できる点から、自動解析により解析者のクセや先入観といったバイアスを取り除き、これまでは見逃されてきた新たな発見を導く可能性が示唆される。

本研究で開発したソフトウェアは Python で実装されており、オープンソースソフトウェアとして GitHub 上で公開している。 <https://github.com/quantumbeam/BBO-Rietveld>

参考文献

- 1) Y. Ozaki *et al.*: npj Comput. Mater. **6**, 75 (2020).
- 2) J. Bergstra, R. Bardenet, Y. Bengio and B. Kégl: Advances in Neural Information Processing Systems, 2546-2554 (2011).
- 3) J. Bergstra, D. Yamins and D. Cox: International Conference on Machine Learning, 115-123 (2013).
- 4) B. H. Toby and R. B. VonDreele: J. Appl. Crystallogr. **46**, 544 (2013).
- 5) X. Cui *et al.*: J. Appl. Crystallogr. **48**, 1581 (2015).

JSR2021学生発表賞 第2分野

受賞者：河野 嵩（発表番号：2C002）

題目：軟 X 線 ARPES による Co_2MnGe のハーフメタル電子状態とワイル交差の直接観測

講演者：河野 嵩¹, 鹿子木雅明¹, 吉川智己¹, Xiaoxiao Wang¹, 後藤一希², 室隆桂之³, 梅津理恵⁴, 木村昭夫^{1,5}

所属：¹広大院理, ²物質・材料研究機構, ³高輝度光科学研究センター, ⁴東北大金研, ⁵広大院先進理工系科学

1. 緒言

Co_2MnGe などのホイスラー合金は、伝導電子が100% スピン偏極するハーフメタル強磁性体であることが、1990年代から理論的に予測されており、トンネル磁気抵抗 (TMR) 素子に代表されるスピントロニクスデバイスの理想的な材料として注目を集めている。しかし、実際にこれらのホイスラー合金を用いた TMR 素子には、低温では比較的高い性能が得られているのに対し室温で性能が急激に減少するという問題があり、実用化に対する障害となっている。これには TMR 素子の絶縁層との界面に原因があると考えられており¹⁾、この問題にアプローチするためには、界面状態とバルク状態の両方の実験的な評価が必要である。さらに、最近になって Co_2MnGa が高い横熱電効果を示すことが分かり、バルクのトポジカルなバンド構造を起源とする内因性機構が理論的に提唱されている²⁾。これらの機構解明・性能向上のためには、まずバルクの電子状態を調べることが必要不可欠である。角度分解光電子分光 (ARPES) はこれらのバンド構造の直接観測が可能



鈴木雄太

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 5 年制博士課程 4 年次

【略歴】

2019年3月東京理科大学基礎工学研究科修士課程修了。同年4月より総合研究大学院大学に在籍。JST ACT-I 研究者 (『情報と未来』領域) および、日本

学術振興会特別研究員。

【受賞のコメント】

この度は権威ある賞をいただき光栄に存じます。共同研究者であり長年の友人でもある GREE/産総研の尾崎くん、指導教員の小野先生、研究室の先輩である斉藤さん、羽合さんをはじめ、研究の遂行にあたってご協力いただきました皆様に、この場を借りてお礼を申し上げます。引き続き、AI-assisted な物質・材料の理解という目標の実現に向け研究に取り組んでまいります。

だが、Co 基ホイスラー合金に対する ARPES を用いたバルクの 3 次元的なバンド構造の観測例は皆無である。

2. 実験

本研究では、ホイスラー合金 Co_2MnGe に対して軟 X 線 ARPES 実験を行った。SPring-8 BL25SU にて、バルク単結晶と $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 程度まで絞られた空間分解能の高い放射光ビームを用いて ARPES 測定を行い、単ドメインのバンド構造を得ることに成功した [Fig. 1(c)]。

3. 結果と考察

Fig. 1(a) に、観測された APRES 像を示す。励起光エネルギー $h\nu = 435 \text{ eV}$ では、 $k_x = 0 \text{ \AA}^{-1}$ を頂点とする上に凸の放物線バンドが見られる一方で、 $h\nu = 535 \text{ eV}$ では、 $k_x = \pm 1.5 \text{ \AA}^{-1}$ を頂点とした同様のバンドが観測されている。ここで、これらの放物線バンドはフェルミ準位を横切っていないという特徴がある。一方で、 $h\nu = 535 \text{ eV}$ の $k_x = \pm 0.4 \text{ \AA}^{-1}$ においてフェルミ準位を横切るバンドも存在することも分かる。このように励起光エネルギーの違いによって、異なる波数空間でのバンドが観測されている。第一原理計算による等エネルギー面 [Fig. 1(b)] より、観測された放物線バンドがブリルアンゾーン中央の円形の少数スピンバンド、フェルミ準位を横切るバンドがブリルアンゾーン境界にまたがる多数スピンバンドに帰属される。さらに、 $h\nu = 535 \text{ eV}$ で観測された等エネルギー面マッピング結果 [Fig. 1(d) 上段] を見ると、4 つの楕円形の構造と点状の構造が観測されている (図中破線)。ここで、点状の構造は第一原理計算結果の少数スピン成分に帰属され、楕円形の構造を含めたその他の構造は多数スピンバンドに

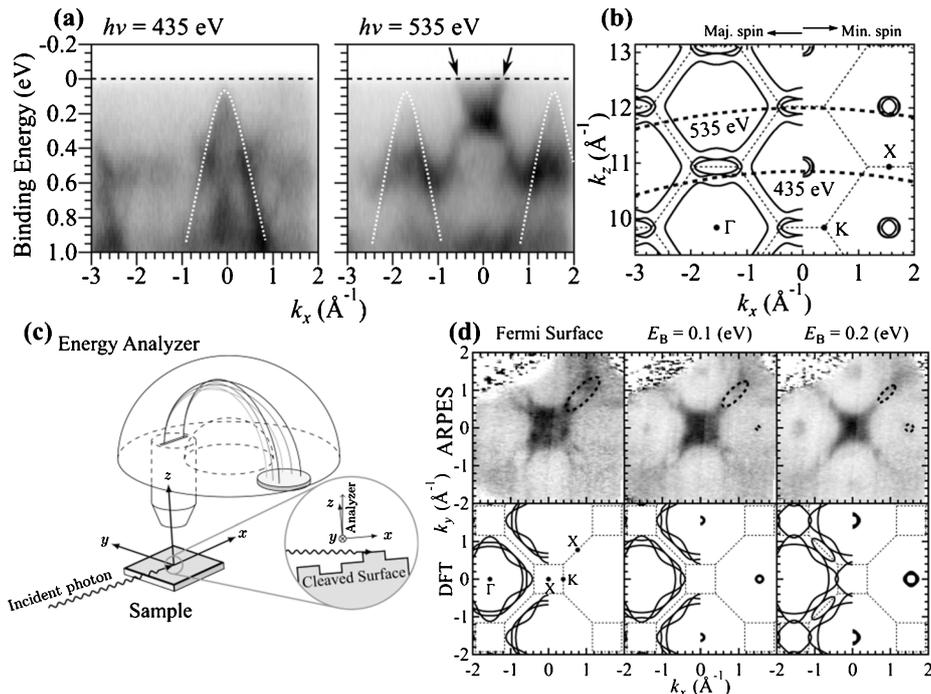


Fig. 1 (a)励起光エネルギー $h\nu = 435, 535$ eV で観測された ARPES 結果 (b)第一原理計算による $k_x - k_z$ 等エネルギー面 ($E_B = 0.2$ eV) 及び ARPES で観測された波数線 (破線) (c)ARPES 実験配置 (d) $h\nu = 535$ eV で観測された等エネルギー面走査測定結果 (上段) 及び第一原理計算結果 (下段) (b, d) の第一原理計算結果は、 $k_x < 0$ ($k_x > 0$) 領域に多数 (少数) スピンバンドを表示している。

帰属される。ここで少数スピン成分に帰属された点状の構造はフェルミ面に現れておらず、フェルミ準位に多数スピンバンドのみが寄与していることが分かる。以上より、 Co_2MnGe のバルクのハーフメタル性を実証することができた。本研究成果は今後のより高い機能性を持つ材料開発への指針を与える³⁾。

参考文献

- 1) S. Tsunegi *et al.*: Phys. Rev. B **85**, 180408(R) (2012).
- 2) A. Sakai *et al.*: Nat. Phys. **14**, 1119 (2018).
- 3) T. Kono *et al.*: Phys. Rev. Lett. **125**, 216403 (2020).



河野 嵩

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻
博士課程前期 2 年

【略歴】

2019年3月広島大学理学部物理科学科卒業。2019年4月より、同大学院理学研究科物理科学専攻博士過程前期在籍。

【受賞のコメント】

この度は、JSR2021学生発表賞にご選出いただきありがとうございます。本会にて本研究の発表をご覧頂いた皆様に感謝申し上げます。また、日頃からご指導いただいております木村昭夫教授、ならびに共同研究者の方々に厚く御礼を申し上げます。本賞を励みとし、より一層精進して参りたいと思います。

受賞者：志賀大亮（発表番号：2C003）
 題目：VO₂ 極薄膜における電子・結晶構造の膜厚依存性
 講演者：志賀大亮^{1,2}，楊以理¹，長谷川直人¹，
 神田龍彦¹，徳永凌祐¹，吉松公平¹，湯川龍²，
 北村未歩²，堀場弘司²，組頭広志^{1,2}
 所属：¹東北大多元研，²KEK 物構研

1. はじめに

強相関酸化物であるVO₂は、室温付近でVイオンの二量化による構造相転移（Fig. 1の挿入図参照）とともに抵抗率の巨大かつ急激な変化を伴った金属-絶縁体転移（MIT）を示す。そのため、超低消費電力で高速にオン・オフ動作するモットランジスタのチャンネル材料候補¹として現在最も盛んに研究されている。このVO₂の特徴的なMITは、パイエルズ転移（V-V二量化）とモット転移（強相関効果）とが協調的に作用した結果であると考えられている²。しかしながら、両者がデバイス動作時におけるチャンネル層（界面数ナノメートル領域）の挙動にどのように関わっているのかについては未だよく分かっていない。また、強相関酸化物を用いたデバイスでは、ナノメートルサイズの領域で特性が大きく変化することが知られている³。そのため、精密なVO₂薄膜デバイスの設計にはその特性のサイズ依存性に関する知見が不可欠となっている。

以上の様に、サイズ制御によるVO₂ナノ構造の電子相変化について調べることは、デバイス应用のみならず、基礎研究の側面でも大きな意義がある。そこで我々は、原子レベルで膜厚（次元性）を制御したVO₂極薄膜を作製し、その電子・結晶構変化（V-V二量化）をその場放射光電子分光により直接決定した。

2. 実験

Photon FactoryのBL-2A MUSAHIに設置された「その場放射光電子分光-レーザー分子線エピタキシ複合装

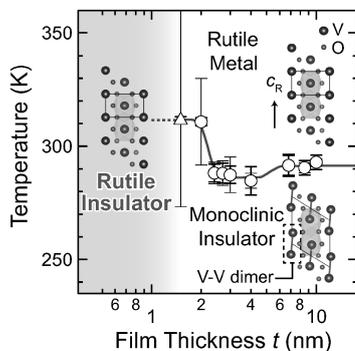


Fig. 1 本研究で決定したVO₂(001)極薄膜の電子相図。丸印は輸送特性評価⁶から決定したT_{MIT}を示す。挿入図はルチル型及び単斜晶系VO₂における結晶構造の模式図。

置」を用いて、TiO₂(001)基板上に表面・界面を原子レベルで制御したVO₂エピタキシャル極薄膜を作製し、その場で放射光電子分光及びX線吸収分光（XAS）を行った。一連の実験は、超高真空中で接続されたチャンパー間で試料を搬送することで、試料表面を一度も大気に曝すことなく行った。

3. 結果と考察

Fig. 2(a)に、320及び250 Kで測定したVO₂極薄膜における価電子帯スペクトルの膜厚依存性を示す。t = 10 nmの厚膜（MIT温度T_{MIT} ~ 295 K）では、ルチル型金属-単斜晶系絶縁体相転移に特徴的なスペクトル変化が観測されており^{2,4}、これらのスペクトル形状はt ≥ 2 nmではほぼ一致している。このことは、VO₂が2 nmまではその物性を維持していることを示している。一方、t < 2 nmでは、320 Kで測定したスペクトル（実線）におけるフェルミ準位（E_F）上の状態密度が急激に減少し、0.5 nmでは完全に消失する様子が観測されている。ここで、フェルミ端の有無に注目すると、VO₂の金属状態は1.5 nm程度まで維持されることが分かる。これらの結果から、VO₂は1.0-1.5 nmの臨界膜厚で膜厚（次元性）に依存したMITを示すことが明らかになった。一方、この臨界膜厚以下のスペクトル形状に注目すると、t ≥ 2 nmで見られる特徴的なスペクトルの温度変化がかなり抑制されている。このことは、VO₂の2次元極限において安定化する絶縁体状態が、厚膜の単斜晶系絶縁体相とは異なる新たな電子相である可能

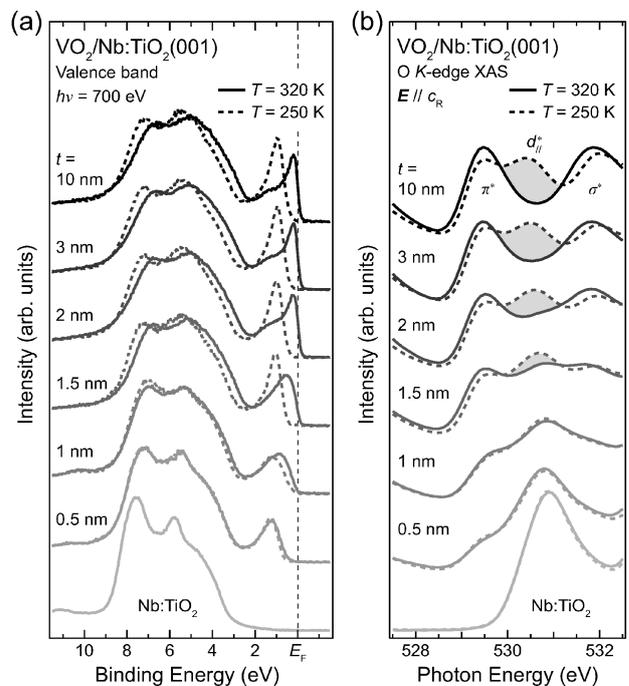


Fig. 2 320及び250 Kで測定したVO₂/Nb:TiO₂(001)薄膜における(a)価電子帯スペクトル及び(b)酸素K端XASスペクトルの膜厚依存性。XASスペクトルは偏光ベクトルEがc_R軸に並行な配置で測定した。

性を示唆している。このことを結晶構造の観点から検証するために、偏光依存 XAS 測定を行った。

Fig. 2(b)に、320及び250 Kで測定した VO₂ 極薄膜における酸素 K 端 XAS スペクトルの膜厚依存性を示す。ここで VO₂ の MIT においては、ルチル型金属相における非結合性 $d_{||}$ 軌道が、V-V 二量化により単斜晶系絶縁体相では結合性 $d_{||}$ 軌道と反結合性 d_{\perp}^* 軌道に分裂する⁵⁾。この新たに非占有状態に形成される d_{\perp}^* 状態は、酸素 K 端の偏光依存 XAS スペクトルで観測されることが知られている²⁾。つまり、偏光依存 XAS 測定により、VO₂ 極薄膜の構造相転移に関する検証が可能となる。実際、10 nm の厚膜では、 d_{\perp}^* 状態に由来するピーク構造が明確に観測されている。この d_{\perp}^* 状態に由来するピーク強度は、膜厚の減少とともに徐々に弱くなり、臨界膜厚以下 ($t < 1.5$ nm) では完全に消失している。このことは、絶縁体的な挙動を示す VO₂ の 2 次元極限 [Fig. 2(a)] では、もはや V-V 二量体は形成されていないことを示している。

以上の結果から、VO₂ の 2 次元極限においては、これまで知られていない V-V 二量化を伴わない絶縁体相が発現することを見いだした。さらに、以上の放射光電子分光解析の結果を輸送特性評価⁶⁾に基づいて作成した電子相図 (Fig. 1) と比較することで、2 次元極限時の VO₂ における絶縁体相は、低次元化によりモット転移不安定性がパイエルズ転移不安定性に打ち勝つことで生じる「ルチル型モット

ト絶縁体相」といった新たな電子相であると結論づけられた⁶⁾。今後、この知見に基づいて最適なデバイス構造を設計することで、次世代のモットトランジスタの実現が期待される。

参考文献

- 1) M. Nakano *et al.*: Nature (London) **487**, 459 (2012).
- 2) T. C. Koethe *et al.*: Phys. Rev. Lett. **97**, 116402 (2006).
- 3) K. Yoshimatsu *et al.*: Phys. Rev. Lett. **104**, 147601 (2010).
- 4) D. Shiga *et al.*: Phys. Rev. B **99**, 125120 (2019).
- 5) J. B. Goodenough: J. Solid State Chem. **3**, 490 (1971).
- 6) D. Shiga *et al.*: Phys. Rev. B **102**, 115114 (2020).



志賀大亮

東北大学大学院理学研究科博士課程 3 年
【略歴】

2016年兵庫県立大学理学部物質科学科卒業。2018年東北大学大学院理学研究科修士課程（物理学専攻）修了。2021年同研究科博士課程（化学専攻）修了。同年4月から東北大学多元物質科学研究所助教。

【受賞のコメント】

本賞にご選出いただき光栄です。本研究を遂行する上でご指導を賜りました組頭広志教授、堀場弘司准教授、吉松公平講師、北村未歩助教、湯川龍助教、並びに放射光実験にご協力いただきました皆様へ心より感謝申し上げます。

JSR2021学生発表賞 第2分野

受賞者：柴田友里亜（発表番号：1C005）

題目：光励起価数転移を示す SmS の時間分解 X 線吸収分光

講演者：柴田友里亜¹、中村拓人¹、渡邊 浩^{2,1}、山神光平³、平田靖透⁴、池田啓祐³、Yujun Zhang⁵、和達大樹⁵、井村敬一郎⁶、鈴木博之³、佐藤憲昭⁶、木村真一^{2,1,7}

所属：¹阪大理、²阪大生命機能、³東大物性研、⁴防衛大応物、⁵兵県大理、⁶名大理、⁷分子研

1. 緒言

硫化サマリウム (SmS) は、圧力印加によって価数が増加する物質として知られている。常圧では Sm の価数は 2 価の黒色絶縁体であるが、圧力を加えることで、Black-Golden (BG) 転移が起き、3 価の金色金属へと変化する¹⁾。この BG 転移の詳細なメカニズムはこれまで明らかにされていなかったが、最近ではエキシトンの不安定性が BG 転移の起源の一つとして提案されている²⁾。過去に我々のグループで行った SmS の反射率測定では、圧力印加により、フリーキャリアに由来したドルーデ成分の強度が増加して反射率が全体的に 100% に近づく様子が観測された。それに加えて、間接ギャップに対応するエネルギー近

傍に、エキシトン単位からの遷移を示唆するピーク成分を観測し、エキシトンが BG 転移に関与することを示唆する結果を得ている³⁾。

一方、エキシトン状態は光励起で作られる。光照射によってエキシトン状態を人工的に作り出すことができれば、エキシトン密度の増加に起因した BG 転移が起こることが期待される。そこで本研究では、光照射によって SmS が BG 転移するのか、そして光誘起相がどのようなものかを解明することを目的とした。この目標を達成するために、光照射前後での価数変化を時間分解 X 線吸収分光 (tr-XAS) を用いて直接観測し、さらにレーザー照射によるバンドギャップ近傍の電子状態の変化を赤外分光で調べた。

2. 実験

試料は名古屋大学理学研究科物質物理学専攻磁性物理学研究室から提供された、ブリッジマン法により作製された、SmS のバルク結晶を用いた⁴⁾。tr-XAS は SPring-8 BL07LSU⁵⁾にて行った。ポンプ光は、1.55 eV、パルス幅 50 fs、繰り返し周波数 1 kHz の Ti: Sapphire laser を使用し、Sm $3d_{5/2}$ 吸収端 (~1100 eV) の XAS を全電子収量 (TEY) 法で測定した。また、レーザー照射下の赤外スペクトルは、顕微赤外装置に Ti: Sapphire laser からのポン

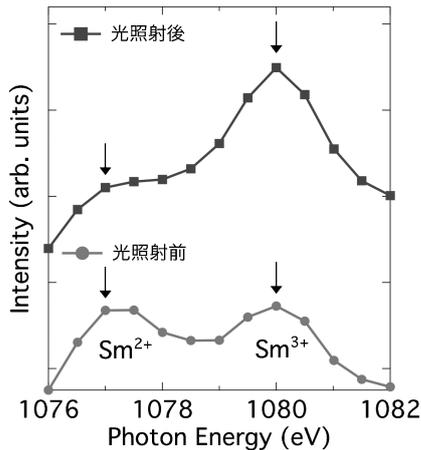


Fig. 1 照射前後における Sm $3d_{5/2}$ 吸収端の X 線吸収スペクトル。1077 eV 付近のピークが主に Sm^{2+} 、1080 eV 付近のピークが主に Sm^{3+} からの寄与を示している。照射によって Sm^{3+} の成分が増えている。

プ光を入射可能な光学系を構築して測定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に、5 分間 (3×10^5 パルス) の照射前後における SmS の Sm $3d_{5/2}$ 内殻の XAS スペクトルを示す。照射前のスペクトルでは、 Sm^{2+} (1077 eV) と Sm^{3+} (1080 eV) のピークが観測されており、 Sm^{2+} だけではなく、わずかに Sm^{3+} が混在した中間価数状態であった。照射後には、 Sm^{3+} ピークが Sm^{2+} のピークに比べて相対的に大きくなった。以上の結果は、照射によって、Sm イオンの価数が増加し、BG 転移の兆候が表れていることを示している。

レーザー照射赤外分光測定では、圧力印加下の赤外反射率測定についての先行研究で観測されていたドルーデ構造²⁾は現れなかった一方で、直接バンドギャップ近傍にエキシトン準位からの遷移を示唆する鋭いピーク構造が観測された。

これらの結果をもとに、SmS の光誘起状態について考察を行った。照射前の SmS では、ほとんどの Sm イオンは 2 価の状態になっている。照射後は、Sm の 4f 電子が伝導帯 5d バンドに励起されることで Sm の価数が 2 価から 3 価へと価数が変化する。しかし、赤外分光の結果において、フリーキャリアに由来した、ドルーデ成分が観測されなかったことから、励起されたキャリアはフリーキャリアにならず、また、基底状態に緩和もせず、エキシトン状態にトラップされたと考えられる。以上の結果から、光励起で価数転移およびエキシトン生成は確認できたが、本研究の目的である光励起による BG 転移の実現までには、至っていないことがわかった。

今後の展望として、励起光エネルギーを制御することで励起密度を高め、光による BG 転移を起こすことを目標としている。

参考文献

- 1) K. Matsubayashi *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 064601 (2007).
- 2) T. Mizuno *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 113704 (2008).
- 3) Y. Takeno *et al.*: 大阪大学大学院理学研究科修士論文(2016).
- 4) K. Matsubayashi *et al.*: Physica B **359**, 151 (2005).
- 5) Y. Senba *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **649**, 58 (2011).



柴田友里亜

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻木村研究室博士前期課程 2 年

【略歴】

2019年3月奈良女子大学理学部数物科学科数物連携コース卒業。2019年4月より大阪大学大学院理学研究科物理学専攻在学。

【受賞のコメント】

この度は名誉ある JSR2021 学生発表賞に選出いただきありがとうございます。日頃よりご指導いただいております渡邊浩助教、木村真一教授、並びに共同研究者の皆様にご心より感謝申し上げます。今回の受賞を励みに今後も精進して参ります。

JSR2021 学生発表賞 第 3 分野

受賞者：島村勇徳 (発表番号：7D003)

題目：軟 X 線による超小型 Kirkpatrick-Baez ミラーの特性評価

講演者：島村勇徳^{1,2}、竹尾陽子^{1,2}、木村隆志^{3,4}、仙波泰徳²、岸本 輝²、大橋治彦²、三村秀和¹

所属：¹東大院工、²高輝度光科学研究センター、³科学技術振興機構さきがけ、⁴東大物性研

1. 緒言と研究目的

X 線顕微鏡には X 線光源・X 線検知器・集光素子という 3 つの要素が不可欠である¹⁾。Fig. 1 に示すように、近年は集光素子の作製精度向上によって X 線集光サイズが

縮小してきた。代表的な反射型素子である Kirkpatrick-Baez ミラー (KB ミラー) は鉛直・水平方向に 2 枚のミラーで集光²⁾、反射面の多層膜化による 7 nm 集光³⁾、高精度多層膜ミラーによる XFEL 9.1 keV の 5.8 nm 集光^{4,5)}、結像性能を持つ AKB ミラーの開発^{6,7)}等で盛んに研究されている。

本研究ではこの KB ミラーについて、焦点距離が長大化する点に着目した。KB ミラーは最大数百 mm 長で作製される⁸⁾が、斜入射光学系では焦点距離がミラー長の半分以下となるため、従来のミラー設計では短い焦点距離を実現できない^{9,10)}。そこで、Fig. 2 のようにミラー長と焦点距離が各々 2 mm と極端に短い超小型 KB ミラーを開発した。作動距離が短い反面、高 NA・高縮小倍率を実現し、

振動や集光点ドリフトに強い。短いミラー長によって設置角度誤差も大幅に許容され、顕微観察での利点が多い¹¹⁾。多層膜化によってX線極限集光にも応用可能だと期待できる。

本実験では軟X線を使用し、提案している全反射型超小型KBミラーの集光特性を実験的に評価した。ミラー作製は東京大学、評価はSPring-8 BL25SU-Aにて行った。

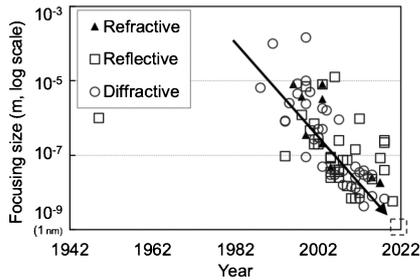


Fig. 1 過去80年で報告された集光サイズ。

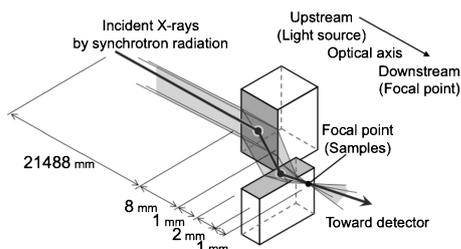


Fig. 2 提案している超小型 Kirkpatrick-Baez ミラーの光学配置。

2. 超小型ミラーの作製

L字型の凹シリンドリカルレンズ表面を楕円形状に修正加工して¹²⁾ Fig. 3 に示す超小型ミラーを作製した¹³⁾。この差分成膜法にはDCマグネトロンスパッタリング装置と白色干渉計を使用した。Fig. 4 に作製した各超小型ミラーの形状誤差と、修正加工量のプロファイルを示す。2 mm 長・1.5 μm 厚の加工量に対して、形状精度 PV 値15 nm 以内で作製した例は過去に無く、高精度なミラーが作製された。

3. 軟X線を用いた超小型ミラーの評価実験

設置角度誤差の許容値を計算し、15軸のピエゾステージで構成されるマニピュレータ (H 250 × W 138 × L 133 mm) とチャンバーを開発した。作製したミラーと試料はマニピュレーター上に設置した。

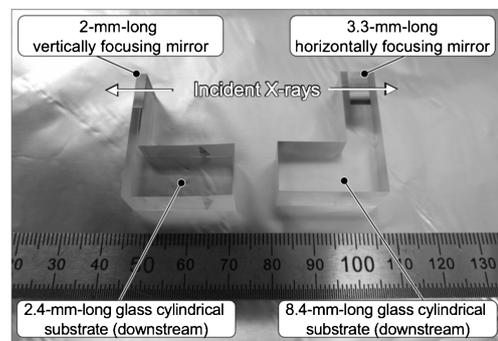


Fig. 3 作製された 2 mm 長と 3.3 mm 長の L 字形ミラー。

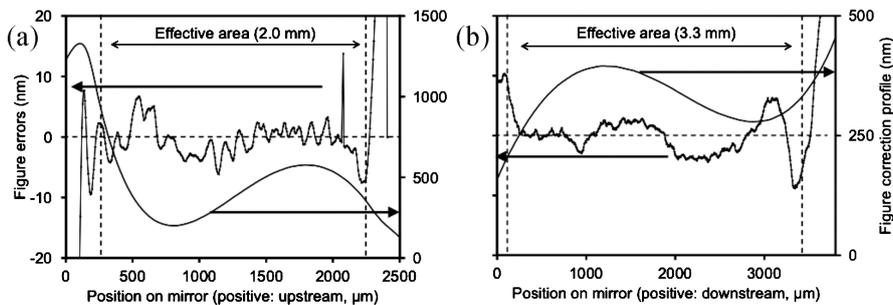


Fig. 4 差分成膜した目標成膜量と形状誤差。(a) 2 mm 長、(b) 3.3 mm 長。

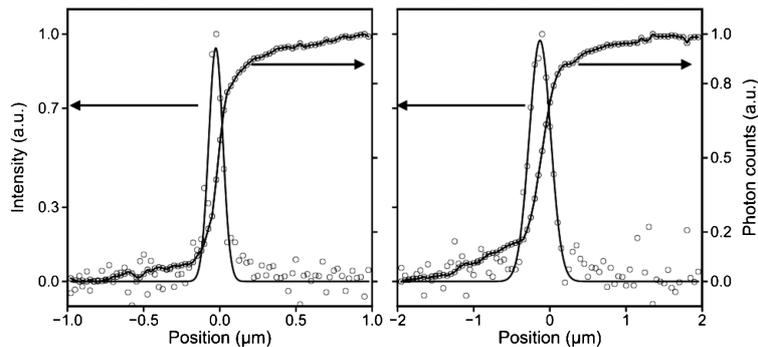


Fig. 5 500 eV 軟X線での集光例。(a) 鉛直100 nm、(b) 水平330 nm (FWHM)。

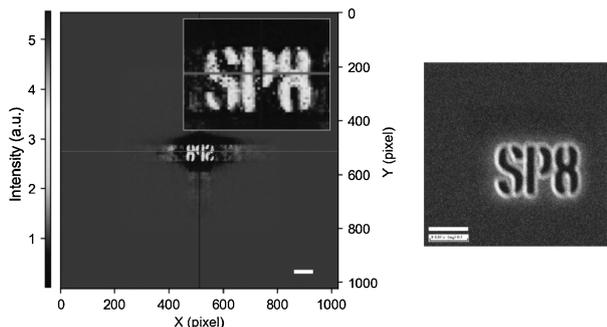


Fig. 6 SP8 文字列の観察 (スケールバーは $2\ \mu\text{m}$)。 (a) 軟 X 線 500 eV を用いたタイコグラフィ結果, (b) 走査型電子顕微鏡による観察像。

まず、ナイフエッジスキャンによって、集光サイズを測定した。500 eV 軟 X 線を用いた際の集光プロファイル例を Fig. 5 に示す。次に、この集光ビームを用いてタイコグラフィ計測を行った。反復計算によって回復した強度像を Fig. 6 に示す。約縦 $2\ \mu\text{m}$ ・横 $3\ \mu\text{m}$ 程度の「SP8」の文字中に、文字線を跨ぐように作られた $150\ \text{nm}$ 幅のブリッジが判別できる。本計測を以て、正しく波面情報が回復されたと判断した。タイコグラフィ法ではオブジェクトと同時に入射ビームの波面情報も回復され、その波面誤差は集光素子に起因すると考えられる¹⁴⁾。波面誤差をミラー形状誤差に変換した結果は、白色干渉計で観測したミラーの形状誤差と概ね一致した。本結果は作製プロセスの妥当性を立証すると共に、超小型 KB ミラーの設置が適切に行われたことを示している。最後に、意図的に姿勢誤差を与えることで、シミュレーション通り $100\ \mu\text{rad}$ 程度の姿勢誤差に耐えられることを実証した。

謝辞

本研究は科研費20J21562及び19H05523の助成を受けたものである。また、本光学系を用いた集光実験は大型放射光施設 SPring-8 にて課題2020A1694及び2019B1628の下

で行われた。

参考文献

- 1) 青木：光学, **42**, 280 (2013).
- 2) P. Kirkpatrick, and A. V. Baez: J. Opt. Soc. Am. A. **38**, 766 (1948).
- 3) H. Mimura *et al.*: Nat. Photonics. **6**, 122 (2010).
- 4) S. Matsuyama *et al.*: Sci. Rep. **8**, 1 (2018).
- 5) T. Inoue *et al.*: J. Synchrotron Rad. **27**, 883 (2020).
- 6) S. Matsuyama *et al.*: Opt. Express. **27**, 18318 (2019).
- 7) J. Yamada *et al.*: Optica. **7**, 367 (2020).
- 8) H. Yumoto *et al.*: Sci. Rep. **7**, 1 (2017).
- 9) L. Wenjun *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **76**, 1 (2005).
- 10) L. Wenjun *et al.*: J. Synchrotron Rad. **18**, 575 (2011).
- 11) T. Shimamura *et al.*: Proc. SPIE. 114920P (2020).
- 12) G. Ice *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **71**, 2635 (2000).
- 13) 島村, 橋爪, 三村: 特願2020-21012.
- 14) F. Seiboth *et al.*: Nat. Commun. **8**, 14623 (2017).



島村勇徳

東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻博士課程 1 年

【略歴】

2014年3月東京大学工学部精密工学科卒業 (工学部長賞, 学修最優秀)。2018年3月同大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了 (工学系研究科長賞, 研究)。現在, 同専攻博士課程在籍。東京大学国際卓越大学院 WINGS-CFS 生。日本学術振興会特別研究員。高輝度光科学研究センター研究生。

【受賞のコメント】

栄えある JSR2021 学生発表賞に本研究を代表して選出いただいたことを光栄に存じますと共に、日頃ご指導・ご支援いただき皆様への感謝の念に堪えません。まずは三村秀和准教授、木村隆志准教授に心からお礼を申し上げます。また、大橋治彦准教授、仙波泰徳主幹研究員、岸本輝様、竹尾陽子博士のご協力・ご指南あって初めて放射光実験を完遂できました。夏目光学株式会社には本実験に不可欠なガラス製基板を作製いただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。今後も本研究を進展させていく所存ですので、ご指導ご鞭撻を賜りたく何卒お願い申し上げます。

JSR2021 学生発表賞 第 3 分野

受賞者：高澤駿太郎 (発表者番号：3D002)
 題目：三角形開口を用いたシングルフレームコヒーレント X 線回折イメージング
 講演者：高澤駿太郎^{1,2}, 姜 正敏^{2,3,4}, 阿部真樹^{1,2}, 上松英司^{1,2}, 石黒 志^{2,3,4}, 高橋幸生^{2,3,4}
 所属：¹東北大学大学院工学研究科, ²理化学研究所放射光科学研究センター, ³東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター, ⁴東北大学多元物質科学研究所

1. 緒言

コヒーレント X 線回折イメージング (Coherent X-ray

Diffraction Imaging: CXDI) は、試料にコヒーレント X 線を照射し、遠方で取得される回折強度パターンに対して、位相回復計算を実行し、試料像を再構成する顕微法である。CXDI はその光学系によっていくつかに分類されるが、その一手法である走査型 CXDI (通称, X 線タイコグラフィ) は位相回復計算の収束性が良く、拡がった物体を観察できるという実用性の観点から、放射光施設で盛んに研究されている。しかしながら、X 線タイコグラフィでは、回折強度パターンを複数枚取得する必要があるため、計測に時間を要し、動的試料の観察には不向きであるという問題がある。これを解決するため、これまで、1 枚の回折強度パターンから拡がった物体の像を再構成できる CXDI として、いくつかの方法が提案・実証されてき

た¹⁻³⁾。しかしながら、これらは、複雑な光学系とその高い位置安定性を必要とするため、実用化には至っていない。

最近、我々は三角形開口を用いるシングルフレームCXDIを提案し、計算機シミュレーションによりその実現可能性を検討した⁴⁾。本研究では、SPring-8 BL29XULにおいて、このシングルフレームCXDIの実証実験を行った。

2. 回折強度パターンの測定

Fig. 1に実証実験における光学系の模式図を示す。厚さ20 μm の白金箔に集束イオンビーム加工を施すことによって、1辺約10 μm の三角形開口を作製した。5 keVに単色化されたX線を三角形開口に照射し、その下流に最外輪帯幅50 nmのフレネルゾーンプレート(FZP)を配置することで、1辺約5 μm の三角形に縮小結像した。試料には、厚さ200 nmのタンタルテストチャートを用いた。結像面に試料を配置し、遠方に設置した画像検出器によって回折強度パターンを取得した。

3. 試料像の再構成と時空間分解能の評価

Fig. 2に、複数枚の回折強度パターンに対してタイコグラフィ位相回復計算を実行して得られた再構成像と、1枚

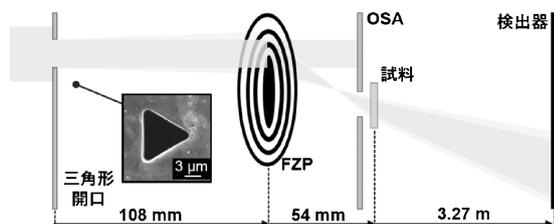


Fig. 1 三角形開口を用いたシングルフレームCXDI光学系の模式図と三角形開口のSIM像

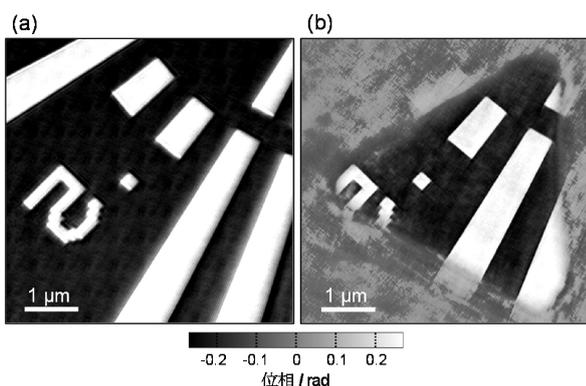


Fig. 2 (a) X線タイコグラフィによる再構成像, スキャン数15×15, スキャン間隔500 nm (b) シングルフレームCXDIによる再構成像

の回折強度パターンに対して、新たに開発した位相回復計算を実行して得られた再構成像を示す。なお、どちらも位相回復計算において1点あたりの露光時間10秒で取得した回折強度パターンを使用した。2つの再構成像を比較すると、X線照射領域について、本手法はX線タイコグラフィと同等の質で像の再構成が可能であると分かる。そして、露光時間の異なる再構成像から、空間分解能をそれぞれ算出し、本手法の時空間分解能を評価した。その結果、露光時間0.1秒以上において、FZPの最外輪帯幅である50 nmより優れた空間分解能を達成した。

4. まとめと展望

SPring-8 BL29XULにて、三角形開口を用いたシングルフレームCXDIの実証実験を行った。その結果、1枚の回折強度パターンから広がった物体を再構成することに成功し、0.1秒以上の露光時間で50 nmより優れた空間分解能を達成することができた。近年、結像型顕微鏡においても優れた時空間分解能が達成されているが^{5,6)}、CXDIは入射X線強度を高めることで、結像型顕微鏡では難しい、10 nm程度まで空間分解能を向上させることができる。したがって、本手法は結像型顕微鏡を超える高い時空間分解能を実現する手法として有望である。今後、X線タイコグラフィでは困難であった動的試料の観察への展開が期待される。

参考文献

- 1) B. Abbey *et al.*: Nat. Phys. **4**, 394 (2008).
- 2) K. P. Khakurel *et al.*: Opt. Express **23**, 28182 (2015).
- 3) F. Zhang *et al.*: Nat. Commun. **7**, 1 (2016).
- 4) J. Kang *et al.*: Opt. Express **29**, 1441 (2021).
- 5) M. Ge *et al.*: Appl. Phys. Lett. **113**, 083109 (2018).
- 6) S. Flenner *et al.*: J. Synchrotron Radiat. **27**, 1339 (2020).



高澤 駿太郎

東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻博士前期課程1年

【略歴】

2020年3月東北大学工学部材料科学総合学科卒業2020年4月同大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻入学

【受賞のコメント】

JSR2021学生発表賞という荣誉ある賞に選出していただき、大変光栄に思っております。日々ご指導いただいております高橋幸生教授、石黒志助教、姜正敏助教に厚く御礼申し上げます。また、共に放射光実験を行っていただいた阿部真樹氏、上松英司氏にも感謝申し上げます。この受賞を励みに、今後も研究活動に精進してまいります。

JSR2021学生発表賞 第3分野

受賞者：山口豪太（発表番号：8C002）

題目：銅電鍍製回転楕円ミラーによる軟X線FELのサブミクロン集光

講演者：山口豪太¹， 本山央人²， 大和田成起^{3,4}，
久保田雄也⁴， 江川 悟⁴， 竹尾陽子^{1,3}，
矢橋牧名^{3,4}， 三村秀和¹

所属：¹東京大学工学系研究科，²東京大学理学系研究科，
³JASRI，⁴理研

1. 緒言

回転楕円ミラーは、楕円プロファイルを光軸に関して一回転させた中空形状をもつ集光ミラーである。中空形状ゆえに大開口であるため、軟X線のサブミクロン集光が理論的に可能である。反射を用いるため、集光性能が波長に依存せず、利用効率も高い。これらの特長をもつ回転楕円ミラーを利用することで、軟X線をプローブとする多様な分析技術の精度向上が可能となる。

中空形状の回転楕円ミラーを高精度に作製するため、ニッケル電鍍を用いたプロセスが開発され、RMS 10 nm程度の高い精度が達成されている¹⁾。さらに、電鍍製回転楕円ミラーを用いて軟X線のサブミクロン集光が可能であることが既実証されている^{2,3)}。しかし、ミラーの材質が強磁性体のニッケルに限定され、さらにミラーと集光点との距離が短いため、強磁場下での試料への軟X線照射や、光電子分光(XPS)装置への電鍍製回転楕円ミラーの導入は難しいとされてきた。非磁性な金属を用いた電鍍を採用することで、この課題を解決できる。しかし、電鍍の高精度化に関する従来の研究では、ほとんどが機械的性質・耐食性ともに優れたニッケルの電鍍を対象としてきた。そこで我々は、非磁性体である銅の電鍍を用いた高精度なミラー作製プロセスを開発した。作製した回転楕円ミラーの100 eVでの集光性能をSACLA BL1において評価した。

2. 銅電鍍製回転楕円ミラーの作製

回転楕円ミラー作製のために開発したプロセスの概要をFig. 1に示す。高精度かつ平滑に加工されたガラス製マンドレルの表面を転写することで、ミラーを得る。マンドレル表面に電子ビーム蒸着により厚さ数百 nm の銅シード層を形成した後、シード層上に、硫酸銅めっきを用いて厚さ数 mm の銅製シェルを成長させる。最後に、熱膨張率の差を利用して、マンドレルとミラーを分離する。作製した銅製回転楕円ミラーの外観をFig. 2aに示す。マンドレルとミラーの典型的な周方向形状プロファイルをFig. 2bに示す。両者はよく一致し、その差はRMS 10 nm前後であった。軟X線ミラーとして実用に供し得る転写精度をニッケル以外の電鍍により達成した例は過去にない。

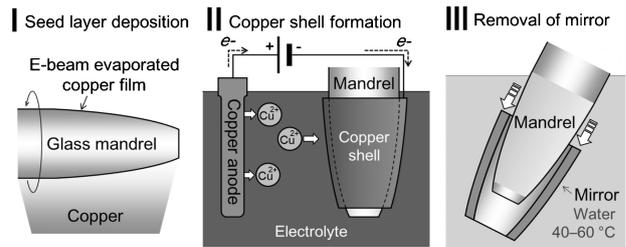


Fig. 1 銅電鍍プロセスの概要

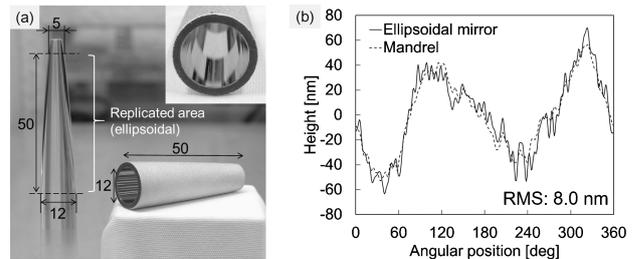


Fig. 2 (a) 回転楕円ミラーとその作製に使用したマンドレル。(b) ミラーとマンドレルの典型的な周方向形状プロファイル。両者はよく一致し、その差はRMS 10 nm 前後。

3. SACLA BL1 での銅電鍍製回転楕円ミラーの評価

本実験では、本山らが開発したハイブリッド型集光システム³⁾を用いた。集光システムの概要をFig. 3に示す。本システムでは、1度FELをKBミラーで集光した後、再び広がり始めたところに回転楕円ミラーを設置し、再度集光する。ナイフエッジスキャン法を用いて回転楕円ミラーの集光点におけるビームプロファイルを測定した結果をFig. 4に示す。ビームサイズは水平370 nm、鉛直400 nm (FWHM) であり、銅電鍍製回転楕円ミラーを用いて軟X線のサブミクロン集光が可能であることが実証された。

4. 今後の展望

電鍍製回転楕円ミラーは、その集光性能の高さにも関わらず、ニッケルのもつ磁性のためにSTXM等に応用が限られているのが現状である。今回我々が開発した銅電鍍プロセスを作製に用いることで、磁性研究分野やXPSでの回転楕円ミラーを利用した研究を開拓できると期待する。すでにSACLA BL1の基本波を用いた高空間分解能な磁性測定への応用が始まっている⁴⁾。今後、銅電鍍製集光ミラーの応用範囲を1 keVまで拡大することで、放射光を含めた広範な軟X線サイエンスの分解能・スループットを向上できると期待する。

参考文献

- 1) H. Mimura *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **89**, 093104 (2018).
- 2) Y. Takeo *et al.*: Appl. Phys. Lett. **116**, 121102 (2020).
- 3) H. Motoyama *et al.*: J. Synchrotron Rad. **26**, 1406 (2019).
- 4) Y. Kubota *et al.*: Appl. Phys. Lett. **117**, 042405 (2020).

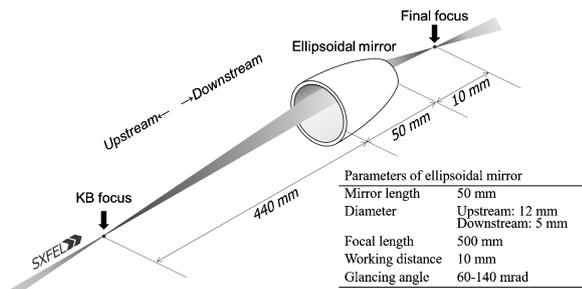


Fig. 3 回転楕円ミラーの集光性能評価実験における光学系。

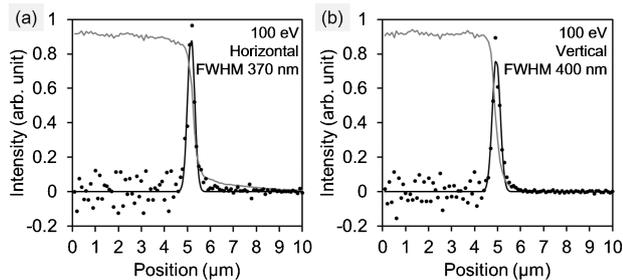


Fig. 4 回転楕円ミラーの集光点におけるビームプロファイル。
(a) 水平370 nm, (b) 鉛直400 nm (FWHM)。



山口豪太

東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻三村研究室博士課程3年

【略歴】

2016年3月東京大学工学部精密工学科卒業。2018年3月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了。現在、同博士課程に在籍。日本学術振興会特別研究員。理化学研究所放射光科学研

究センター研修生。

【受賞のコメント】

この度は、尊敬する先輩方が受賞されてきた名誉ある賞にご選出いただき、大変嬉しく思います。東京大学の三村秀和准教授・本山央人助教、理化学研究所の矢橋牧名博士・久保田雄也博士、JASRIの大和田成起博士をはじめとする、ご指導いただきました共同研究者の皆様、この場を借りて厚くお礼申し上げます。今回の受賞を励みに、今後も日々努力する所存です。