

# 第30回日本放射光学会年会・ 放射光科学合同シンポジウム(JSR2017)学生発表賞審査結果について

第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2017)  
組織委員長 矢代 航(東北大学 多元物質科学研究所)

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30回年会・合同シンポジウム(JSR2017)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5名で学生発表賞選考委員会を組織し、84名の審査員によるのべ499件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30回年会・合同シンポ(JSR2017)では学生発表賞対象講演の申込数が127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126件となりました。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：10件，ポスター発表：34件

## 第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

口頭発表：24件，ポスター発表：25件

## 第3分野 加速器装置・イメージングなど

口頭発表：9件，ポスター発表：24件

合計件数 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Tスコアにより評価し、以下の7名の方々に学生発表賞を授与することに決定しました。受賞者の皆様は、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。

### 【JSR2017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：9P073

氏名(所属)：大出真央(慶大理工，理研播磨)

演題：X線小角散乱法を用いたシロイソナズナ phototropin1の構造及び機能研究

発表番号：8P082

氏名(所属)：中井真理奈(立命館大院生命)

演題：窒化銅ナノ粒子の液相合成過程に関する化学状態解析

#### 第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

発表番号：8P033

氏名(所属)：岸潤一郎(阪大理)

演題：InSb(001)基板上に作製したBi薄膜の1次元的表面電子状態

発表番号：4B004

氏名(所属)：高根大地(東北大院理)

演題：トポロジカル線ノード半金属 HfSiS の高分解能 ARPES

第3分野 加速器装置・イメージングなど

発表番号：9P026

氏名（所属）：関口優希（慶大理工，理研播磨）

演題：XFEL コヒーレント回折イメージング実験におけるデータ解析の高度化と酵母細胞核の三次元構造解析への適用

発表番号：9P027

氏名（所属）：谷直哉（北大電子研）

演題：X線レーザー回折イメージングのための脂質膜マイクロチャンバーの開発

発表番号：3F001

氏名（所属）：山田純平（阪大院工）

演題：小型かつ大倍率を実現するX線結像ミラー光学系の開発

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。

## JSR2017学生発表賞 第1分野

受賞者：大出真央（発表番号：9P073）

題目：X線小角散乱法を用いたシロイヌナズナ phototropin1の構造及び機能研究

講演者：大出真央<sup>1,2</sup>，岡島公司<sup>1,2</sup>，嘉祥寺谷幸子<sup>2,3</sup>，高山裕貴<sup>1,2</sup>，苮口友隆<sup>1,2</sup>，引間孝明<sup>2</sup>，山本雅貴<sup>2</sup>，中迫雅由<sup>1,2</sup>

所属：<sup>1</sup>慶應大・理工，<sup>2</sup>理研・播磨，<sup>3</sup>大阪府大・生命科学

### 1. はじめに

植物蛋白質 phototropin (phot) は光合成の高効率化を担う蛋白質であり，青色光センサーとしての機能を備えている。これまでの研究から，photは2個の青色光受容ドメイン (light-oxygen-voltage sensing domain; LOV1, LOV2)<sup>1,2</sup>と1個のセリン・スレオニンリン酸化酵素ドメイン (ser/thr kinase domain; STK)<sup>3</sup>を持ち，青色光によって励起された LOV2が STK の活性を制御することで他の蛋白質ヘシグナルを伝達すると推定されている<sup>4,5</sup>。しかしながら，photの全体形状が不明であるため，LOV2が STK の活性を制御するメカニズムについて未だ構造的知見は得られていない。

このような背景を踏まえ，本研究では X線小角散乱法 (Small-Angle X-ray Scattering: SAXS) を用いてシロイヌナズナ由来 phototropin1 (phot1) の LOV2と STKで構成された機能最小単位 (phot1 LOV2-STK: P1L2K) の構造を解析し，青色光照射下での LOV2による STK の制御機構を考察した<sup>6</sup>。

### 2. 測定方法

SAXS 測定は，SPring-8小角散乱ビームライン BL45XUにて実施した。青色光照射に伴う P1L2K の構造変化を解析するため，測定中任意のタイミングで青色光を照射できるよう溶液試料セル直上に青色光 LED を配置した。測定シーケンスは以下の通りである ([ ] 内は光条件に応じた測定データの呼称)。

- ①試料溶液を暗条件下で SAXS 測定 [Dark1]
- ②測定後，試料溶液に青色光照射開始
- ③2分後，青色光を照射しながら SAXS 測定 [Light]
- ④青色光照射を停止
- ⑤15分後，暗条件下で再度 SAXS 測定 [Dark2]

これら3度の SAXS 測定により，P1L2K の青色光依存的な構造変化の有無及び可逆性の確認を行った。

### 3. SAXS プロファイル測定結果

Fig. 1に P1L2K SAXS プロファイルを示す。縦軸の散乱強度  $I(S)$  は蛋白質溶液濃度  $C$  で規格化した後，自然対数をとってプロットされている。ここで，上段黒丸のプロファイルが Dark1，中段灰丸のプロファイルが Light，下

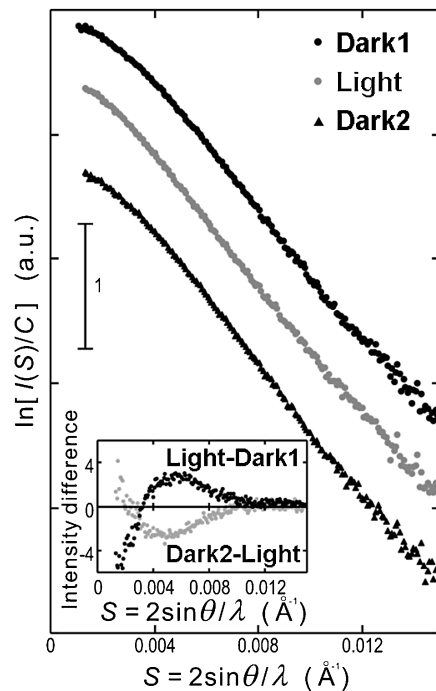


Fig. 1 P1L2K SAXS プロファイル。

段三角のプロファイルが Dark2である。また，グラフ中に Light と Dark1の差分プロファイル (黒丸)，Dark2と Light の差分プロファイル (灰丸) が内挿されている。

Fig. 1差分プロファイルより  $S=0.006 \text{ \AA}^{-1}$  付近で青色光照射下の散乱プロファイルに変化が生じており，青色光依存的に分子全体のスケールで何らかの構造変化が生じていることが示唆された。また，Dark1から Light，Light から Dark2への光条件変化に伴う散乱強度の増減はほぼ対称的である。そのため，P1L2K の青色光に依存した構造変化は可逆的な変化であったと言える。Guinier 解析の結果，原点散乱強度の値から P1L2K は溶液中で二量体を形成していることが明らかになった。また，慣性半径の値は Dark1で  $42.9 \text{ \AA}$ ，Light で  $48.8 \text{ \AA}$ ，Dark2で  $43.5 \text{ \AA}$  であった。従って，青色光を受容した P1L2K には可逆的な分子伸長が生じると推定された。この分子伸長における具体的な構造変化について，分子形状推定ソフトウェアを用いた推定を行った。

### 4. P1L2K 構造変化モデル

得られた Dark1 SAXS プロファイルからソフトウェア GASBOR<sup>7</sup>による分子形状推定を行い，暗条件下での P1L2K が Fig. 2a のように扁平型の二量体であると推定した。また，推定形状に対して LOV2結晶構造<sup>2</sup>と STK 予測構造<sup>5</sup>を重ね合わせ，機能ドメイン配置の予測を行った。同様の解析を Light SAXS プロファイルに対しても行った結果，青色光照射条件下における P1L2K 推定形状は Fig. 2b のように Dark1 推定形状と比較してより伸長・屈

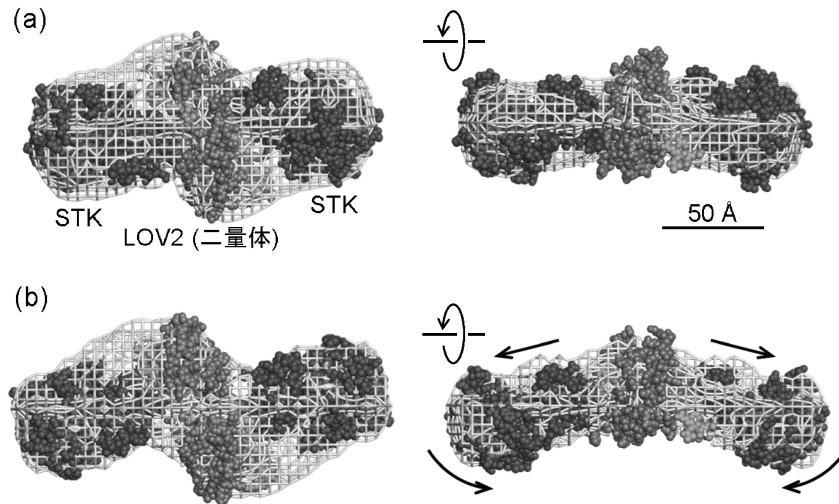


Fig. 2 P1L2K Dark1 推定形状(a)と Light 推定形状(b)。

曲した形状であった。よって P1L2K は青色光照射によって分子全体規模で伸長・屈曲を起こすと考えられる。このモデルは慣性半径の増加というプロファイルの解析結果とも一致しており、尤もらしいモデルであろう。また、Dark1, Light のドメイン配置を比較すると分子全体の形状変化に伴って STK ドメインの LOV2 に対する相対配置が変化している。従って、P1L2K の青色光に依存した STK 制御メカニズムは伸長・屈曲運動による LOV2, STK ドメインの相対位置変化である可能性が示唆された。

### 5. P1L2K 変異体による STK 制御機構の解析

前節において P1L2K の全体形状及び青色光依存的な構造変化が推定された。これについてさらに理解を深めるため、機能発現に重要な残基を置換した P1L2K 変異体について SAXS 解析を行い、自然種 P1L2K SAXS プロファイルと比較した。Fig. 3 は 475 番リジン残基をアラニンに置換した K475A 変異体の SAXS プロファイルである。Fig. 3 も Fig. 1 と同様に、縦軸の散乱強度  $I(S)$  は蛋白質溶液濃度  $C$  で規格化した後、自然対数をとってプロットされている。K475A 変異体は STK の活性を失っていることが先行研究<sup>8)</sup>で確認されているが、SAXS による測定の結果、青色光照射によって小角での散乱強度が大きく、かつ可逆的に上昇した。上昇率はおよそ 1.4 倍であり、この上昇量から K475A 変異体は青色光によって可逆的な凝集を起こしたと考えられる。これは青色光照射によって P1L2K 分子表面の性質が変化したこと起因すると考えられるが、475 番リジン残基はドメイン配置の推定結果から LOV2-STK の界面に位置すると予測されている。従って、LOV2-STK 界面に位置する 475 番リジン残基の欠損が青色光依存的な P1L2K の構造変化に大きな影響を与え、凝集を生じさせたと考えられる。この結果から、LOV2-STK の界面が STK の制御において重要な役割を

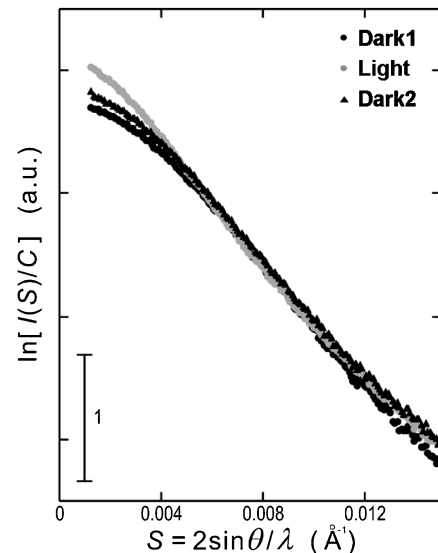


Fig. 3 P1L2K K475A 変異体 SAXS プロファイル。

果たしていると予想される。

### 6. おわりに

本研究から P1L2K の分子形状及び青色光依存的な構造変化が推定され、また LOV2-STK の界面が LOV2 による STK の制御に重要であると予想された。特に、本研究で予想された「LOV2-STK の相対位置による STK ドメインの制御」というメカニズムはシロイヌナズナ由来 phot2 LOV2-STK 断片<sup>5)</sup>やクラミドモナス由来 phot<sup>9)</sup>を対象とした先行研究においても同様のモデルを想起させる結果が得られており、phot に共通の制御メカニズムであることが予想される。

## 参考文献

- 1) M. Nakasako *et al.*: J. Mol. Biol. **381**, 718 (2008).
- 2) A. S. Halavaty and K. Moffat: Acta. Crystallogra. **F69**, 1316 (2013).
- 3) L. Bogre *et al.*: Trends Plant Sci. **8**, 424 (2003).
- 4) J. M. Christie *et al.*: Plant J. **32**, 205 (2002).
- 5) Y. Takayama *et al.*: Biochemistry **50**, 1174 (2011).
- 6) M. Oide *et al.*: J. Biol. Chem. **291**, 19975 (2016).
- 7) D. I. Svergun *et al.*: Biophys. J. **80**, 2946 (2001).
- 8) S. Kashojiya *et al.*: PLoS One **10**, e0124284 (2015).
- 9) K. Okajima *et al.*: J. Biol. Chem. **289**, 413 (2014).



### 大出真央

慶應義塾大学大学院基礎理工学専攻修士課程 2年

#### 【略歴】

2015年慶應義塾大学理工学部物理学専攻卒業。現在、慶應義塾大学大学院基礎理工学専攻修士課程 2年。

#### 【受賞のコメント】

この度は学生発表賞に選出していただいたことを大変光栄に思います。この受賞は多くの皆様に支えていただいた賜物に他なりません。特に、日頃からご指導いただいております中迫教授、笠口専任講師、岡島特任助教、共同実験者である理研・播磨の山本基盤研究部長、引間博士、現兵庫県立大の高山助教、現筑波大の嘉祥寺谷博士にこの場をお借りして厚くお礼申し上げます。これを励みに今後より一層研究に精進してまいりたいと思います。

## JSR2017学生発表賞 第1分野

受賞者：中井真理奈（発表番号：8P082）

題目：窒化銅ナノ粒子の液相合成過程に関する化学状態解析

講演者：中井真理奈<sup>1</sup>，中村考志<sup>2</sup>，山口有朋<sup>2</sup>，渡邊稔樹<sup>1</sup>，片山真祥<sup>1</sup>，稲田康宏<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>立命館大学大学院生命科学研究科，<sup>2</sup>産業技術総合研究所

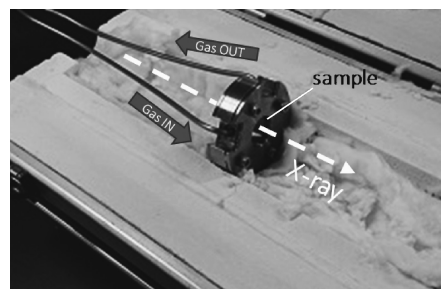


Fig. 1 気体のフローが可能な溶液反应用 XAFS セル。

### 1. 緒言

窒化銅は *anti*- $\text{ReO}_3$  型構造をとり、その薄膜は高速集積回路などに応用される半導体材料である。また、窒化銅ナノ粒子はプリンテッド・エレクトロニクス・デバイスへの応用も期待される重要な電子材料である。

酢酸銅 (II)・一水和物を用いた液相還元法は、比較的容易に窒化銅を合成できる有用な手法であるが<sup>1)</sup>、その合成過程における窒化銅の生成メカニズムは詳しく分かっていない。窒化銅ナノ粒子の生成メカニズムを知ることは、さらに効率的な窒化銅の合成や、新規合成経路の開発のために不可欠な知見であり、窒化銅ナノ粒子の利用範囲の拡大に向けて重要である。

本研究では、窒化銅ナノ粒子を液相還元法で合成する過程の銅化学種の状態変化をその場で解析することにより、窒化銅ナノ粒子の生成メカニズムの解明を目的とした。尿素分解を用いた酢酸銅 (II)・一水和物の液相還元過程について<sup>2)</sup>、*in-situ* XAFS 解析を行うことにより窒化銅ナノ粒子の合成過程での化学状態変化を明らかにした。

### 2. 実験

尿素と酢酸銅 (II)・一水和物を加えた 1-ノナノールにポリビニルピロリドンを追加することで、溶液中での反応物や生成物の沈降を防いだ。本研究で新たに開発した溶液

反应用 XAFS セル (Fig. 1) を用いて、He 雰囲気下において 190°C まで昇温する過程についての *in-situ* XAFS 測定を、高エネルギー加速器研究機構 PF BL-9C において、透過法で行った。

### 3. 結果と考察

尿素分解を用いた液相還元過程の *in-situ* XAFS 測定で得られた XANES スペクトルとその一次微分曲線、及び、それを用いて行った組成解析の結果を Fig. 2 に示す。XANES スペクトルは、始状態の酢酸銅 (II) から最終生成物の窒化銅へ変化することを示しており、組成解析の結果、酢酸銅 (II) から窒化銅へ至る過程で、CuO 及び銅 (I)-アンミン錯体の存在が確認された。

銅 (I)-アンミン錯体は 140°C 以上の温度域で存在しており、この条件では尿素的分解によって生成した十分な濃度のアンモニアが溶液内に存在する。また、同じ溶液反应用 XAFS セルを用いて行ったアンモニア存在下での解析からは、銅 (II)-アンミン錯体が 140°C で 1 価に還元されることを明らかにした。酢酸銅 (II) は尿素的分解によって生成したアンモニアにより銅 (II)-アンミン錯体を形成し、溶媒である 1-ノナノールによって速やかに銅 (I)-ア

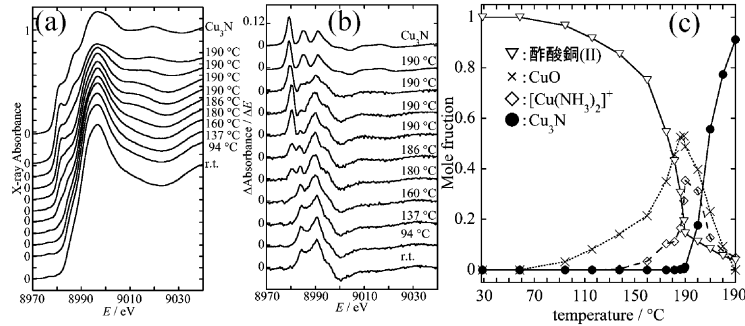


Fig. 2 窒化銅の合成過程における XANES スペクトル (a), XANES スペクトルの一次微分曲線 (b), 銅化学種組成の温度変化 (c)。

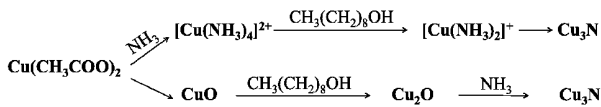


Fig. 3 尿素分解法の反応メカニズム。

ンミン錯体に還元されると考えられる。その後、生成した銅 (I)-アンミン錯体が窒化銅を形成することが明らかになった。

一方で、酢酸銅 (II) は加熱による熱分解によって CuO を形成する。この CuO は、190°C に達して尿素が分解して生成したアンモニアにより窒化され、窒化銅を形成することが、反応物に CuO を用いた解析から明らかになった。従って、尿素分解を用いた液相還元法では、Fig. 3 に示すように、酢酸銅 (II) から銅-アンミン錯体を經由して窒化銅を生成する反応経路と、酸化銅を經由して窒化銅へ至る反応経路が共存することを明らかにした。これは、窒化銅ナノ粒子の合成における副生成物の除去やアンモニア導入の短時間化などについての重要な知見を与える結果であり、固体ナノ粒子の液相合成過程を反応条件下で

直接解析可能な XAFS 法の適用によって初めて解明することに成功した。

### 参考文献

- 1) T. Nakamura *et al.*: Inorg. Chem. **53**, 710 (2014).
- 2) T. Nakamura *et al.*: J. Nanopart. Res. **16**, 1 (2014).



### 中井真理奈

立命館大学大学院生命科学研究科生命科学専攻博士課程前期課程 2 回生

#### 【略歴】

2015年3月立命館大学生命科学部応用化学科卒業。現在、立命館大学大学院生命科学研究科生命科学専攻博士課程前期課程 2 年。

#### 【受賞のコメント】

この度は、荣誉ある JSR2017 学生発表賞を頂き、大変光栄に思います。本研究を進める上でご指導頂いております稲田康宏先生、片山真祥先生ならびに共同研究者の皆様、心から感謝いたします。この受賞を励みに、今後の研究に精進していきたいと思っております。

## JSR2017 学生発表賞 第 2 分野

受賞者：岸潤一郎 (発表番号：8P033)

題目：InSb(001) 基板上に作製した Bi 薄膜の 1 次元的な表面電子状態

講演者：岸潤一郎<sup>1</sup>、大坪嘉之<sup>1,2</sup>、矢治光一郎<sup>3</sup>、原沢あゆみ<sup>3</sup>、小森文夫<sup>3</sup>、辛埴<sup>3</sup>、J. Rault<sup>4</sup>、P. Le Fevre<sup>4</sup>、F. Bertran<sup>4</sup>、A. Taleb-Ibrahimi<sup>4</sup>、木村真<sup>1,2</sup>

所属：<sup>1</sup>阪大理、<sup>2</sup>阪大生命、<sup>3</sup>東大物性研、<sup>4</sup>Synchrotron SOLEIL

### 1. 緒言

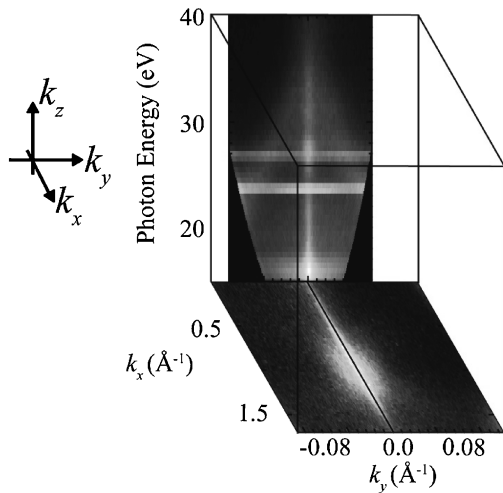
近年、薄膜やナノワイヤといった低次元構造を持つ物質は、量子閉じ込め効果や非フェルミ液体といった興味深い物性を発現するため、盛んに研究されている。特に重元素を含む低次元系は、その強いスピン軌道相互作用により、

スピン偏極した電子状態を持つことがあると知られており、電子の後方散乱抑制による省エネルギー・超高速伝導等、スピントロニクス分野への応用が期待されている<sup>1)</sup>。これまでは、このようなスピン偏極状態は 3D トポロジカル絶縁体の表面状態<sup>2)</sup>等の 2 次元系で主に研究されてきたが、電子の後方散乱の完全な抑制を目指す場合は、重元素を含む 1 次元系を用いてスピン偏極状態を実現する必要がある。

そこで本研究では、面内異方性の大きい InSb(001) を基板とした Bi 薄膜 [Bi/InSb(001)] を作製し、スピン偏極した 1 次元電子状態の実現を目指した。

### 2. 実験

試料は、超高真空下で清浄化した InSb(001) 上に 10 原子層程度の Bi を真空蒸着することで作製した。測定は、



**Fig. 1** 結合エネルギー100 meVにおける電子状態の等エネルギー面に相当する図。 $k_x=0 \text{ \AA}^{-1}$ における電子状態の励起光依存性は、 $k_x=0 \text{ \AA}^{-1}$ における電子状態の $k_z$ 方向分散に対応する。

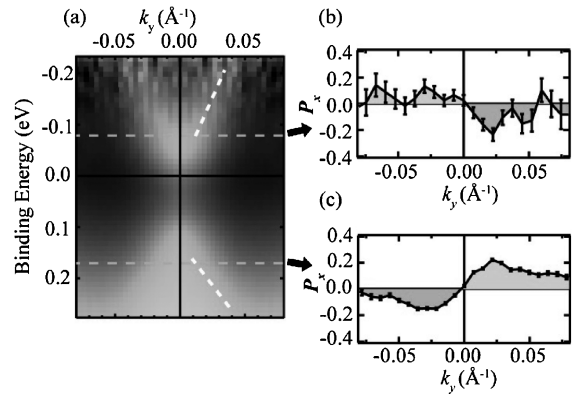
Synchrotron SOLEIL, CASSIOPEE ビームラインにて放射光 ( $h\nu = 15 \sim 90 \text{ eV}$ ) を用いた角度分解光電子分光 (ARPES) を、東京大学物性研究所極限コヒーレント光科学研究センターにてレーザー励起光 ( $h\nu = 6.994 \text{ eV}$ ) を用いた ARPES 及びスピン分解 ARPES (SARPES) を行い、その電子構造及びスピン構造の観測を行った。

### 3. 結果と考察

**Fig. 1**は、フェルミ準位からの結合エネルギー100 meVにおける3次元運動量空間の光電子強度をプロットしたもので、電子状態の等エネルギー面に相当する。測定面内の $k_x$ ,  $k_y$ 方向ばかりではなく励起光エネルギーを変え $k_z$ 方向を観測すると、 $k_y \sim 0 \text{ \AA}^{-1}$ の平面のみに電子が集中しているような直線的な状態密度強度を示していることが分かった。このことから、この電子状態は $k_y$ のみを良い量子数とする、擬1次元的な電子状態だといえる。

**Fig. 2(a)**はこの擬1次元的な電子状態の $k_y$ 方向のエネルギー分散を測定した結果である。非常に急峻な分散形状をしており、また占有-非占有状態間でギャップが開いていることが測定から判明した。このギャップ幅は直接ギャップの場合150 meV程度と、室温程度の温度領域で起こる熱励起エネルギーよりも大きく、将来の電子デバイスとしての応用が期待できる材料といえる。

さらにスピン分解測定では、**Fig. 2(b,c)**に示すx-スピン偏極度 ( $P_x$ ) の運動量分布関数 (MDC) から分かるように、大きくx方向にスピン偏極していることが分かった。このx-スピンは、 $k_y=0 \text{ \AA}^{-1}$ と $E_F$ に関してスピン偏極方向が反転しており、このスピン描像は、1次元ラッシュバ系や1次元トポロジカル系で見られる波数ベクトル ( $k_{||}$ ) と垂直方向かつ $k_{||}$ の符号反転に伴い反転するスピ



**Fig. 2** (a)  $k_x \sim 0 \text{ \AA}^{-1}$ におけるE- $k_y$ バンド分散。(b)結合エネルギー (B.E) が-80 meVにおける、x-スピン偏極度 ( $P_x$ ) の運動量分散曲線 (MDC)。(c) B.E=170 meVにおけるx-スピン偏極度 ( $P_x$ ) MDC。

ン偏極構造と一致している。

### 4. まとめ

放射光等を用いたARPES測定を通して、Bi/InSb (001)の電子状態の観測を行い、B.E = 100 meV近傍の電子状態が、擬1次元的な電子構造を持つことも明らかにした。また、その電子状態は、室温以上のギャップ幅を持つ急峻な分散を持ち、SARPES測定から、この急峻な分散に対して垂直方向に大きくスピン偏極していることが判明した。このような特異な1次元スピン偏極電子状態は、低次元電子物性に関する基礎科学・スピントロニクス等の応用両面から興味深い内容である。

### 参考文献

- 1) A. Manchon *et al.*: Nat. Mat. **14**, 871 (2015).
- 2) M. Z. Hasan and C. L. Kane: Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).



#### 岸 潤一郎

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程2年

#### 【略歴】

2015年3月大阪大学理学部物理学科卒業。

2015年4月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻入学

2017年3月同専攻修了予定

#### 【受賞のコメント】

この度は、JSR2017学生発表賞という栄えある賞を賜り、大変光栄に存じます。日頃からご指導いただいております大坪嘉之助教、木村真一教授、渡邊浩助教、渡辺純二准教授ならびに共同研究者の皆様に、心から感謝を申し上げます。本賞を今後の励みとして、一層精進していきたいと思っております。

## JSR2017学生発表賞 第2分野

受賞者：高根大地（発表番号：4B004）

題目：トポロジカル線ノード半金属 HfSiS の高分解能 ARPES

講演者：高根大地<sup>1</sup>，Zhiwei Wang<sup>2</sup>，相馬清吾<sup>3</sup>，中山耕輔<sup>1</sup>，C. X. Trang<sup>1</sup>，佐藤宇史<sup>1</sup>，高橋隆<sup>1,3</sup>，安藤陽<sup>2</sup>所属：<sup>1</sup>東北大院理，<sup>2</sup>ケルン大学，<sup>3</sup>東北大 WPI

## 1. はじめに

近年、トポロジカル絶縁体を始めとする「トポロジカル物質」が注目を集めている。一般に、トポロジカル物質はバルクの価電子帯と伝導帯の一部がエネルギー的に反転（バンド反転）しているような物質系を指す。物質の結晶の対称性に応じて様々なトポロジカル電子状態が実現し、それに対応して多くの新奇物性の発現が期待されている。バンド反転領域全体に渡ってエネルギーギャップが開いている「トポロジカル絶縁体」の他に、ブリルアンゾーンの特定の点でバンドが縮退し、その他の領域ではギャップが開く「ディラック/ワイル半金属」という物質も提案されている。これまで、角度分解光電子分光（ARPES）による電子状態の直接観測を通して、これらのトポロジカル物質相が多くのもので報告されている<sup>1-3)</sup>。一方で、バンドの縮退が、ある線上において対称性に保護されるような「トポロジカル線ノード半金属（TLNSM）」については、ARPESによる物質報告が PbTaSe<sub>2</sub><sup>4)</sup>とごく最近報告された ZrSiS<sup>5)</sup>の2つのみと未だに少ない。また、トポロジカル物質はその物質系ごとに特異な表面状態をもつことが知られており、トポロジカル絶縁体やワイル半金属では、その特徴的な表面電子構造が理論、実験の双方から確認されている。しかし、TLNSMについては表面状態を予見するトポロジカルな原理が確立しておらず、その実験的な観測もごく少数に限られているのが現状である<sup>4,5)</sup>。以上のことから、今回我々は高分解能 ARPES による新たな TLNSM の発見とその電子構造の詳細な観測が重要であると考え、理論的に TLNSM である可能性が示唆されている HfSiS<sup>6)</sup>について高分解能 ARPES 実験を行った。

## 2. 実験

本実験は高エネルギー加速器研究所 Photon Factory BL28A にて高分解能 ARPES 実験を行った。HfSiS の純良単結晶を  $1 \times 10^{-10}$  Torr 以下の超高真空下で、(001) 面において劈開することで、実験に必要な清浄試料表面を得た。励起光は  $h\nu = 48\text{--}80$  eV を用い、実験中の試料温度は 40 K とした。

## 3. 結果と考察

Fig. 1(a) に、励起光に  $h\nu = 48$  eV の右回り円偏光を用いて得られた ARPES スペクトルの、等エネルギー面上にお

ける強度プロットを示す。各等エネルギー面上において四角形の同心構造が観測されており、これは HfSiS が四角形型の線ノードをもつことを反映している。また、線ノードを垂直に切った cut A, B, C における ARPES スペクトルを Fig. 1(b) にそれぞれ示すが、いずれの cut においても明瞭な直線的な分散が観測され、これは縮退点が一次的に延びていることを表している。以上の実験結果は、HfSiS が新たな TLNSM であることを示している。

次に、HfSiS の表面電子構造について述べる。Fig. 1(a) において  $\bar{X}$  点付近に観測された円形のフェルミ面は、ラシュバ分裂による二重構造を示すことから表面状態であることが明確にわかる。我々はこの他に、線ノード付近 (Fig. 2(a)) において、フェルミ面の上と下のブランチを繋ぐような X1 バンドを見出した。Fig. 2(b) に示す、cut A におけるバンド分散を見ると、X1 バンドは Hf 由来のバンドから折れ曲がるように存在していることがわかるが、バルクバンド計算<sup>6)</sup>にはこれに対応するようなバンドは存在しないことから、X1 バンドは新たな表面状態由来のバンドであると考えられる。同じ実験を励起光を左回り円偏光にして行った結果が Fig. 2(c), (d) であり、X1 バンドとは明確に異なる新たな X2 バンドが観測されていることから、表面状態はその二つのバンドで構成されていることがわかる。また、面内波数とエネルギーからなる 3 次元空間内で、これらの表面状態の分散構造を実験結果から決定した結果を Fig. 2(e) に示す。今回発見した新しい表面状態は、全体として X 字型で、一次的な縮退線が  $\bar{\Gamma}\text{--}\bar{M}$  方向

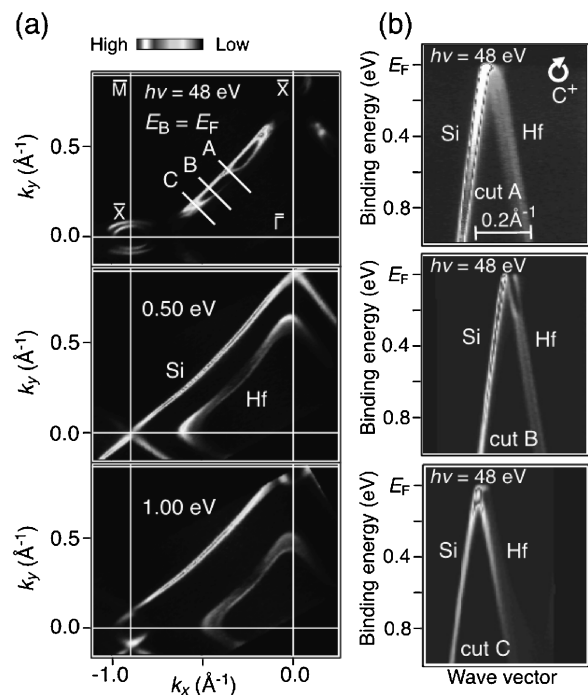
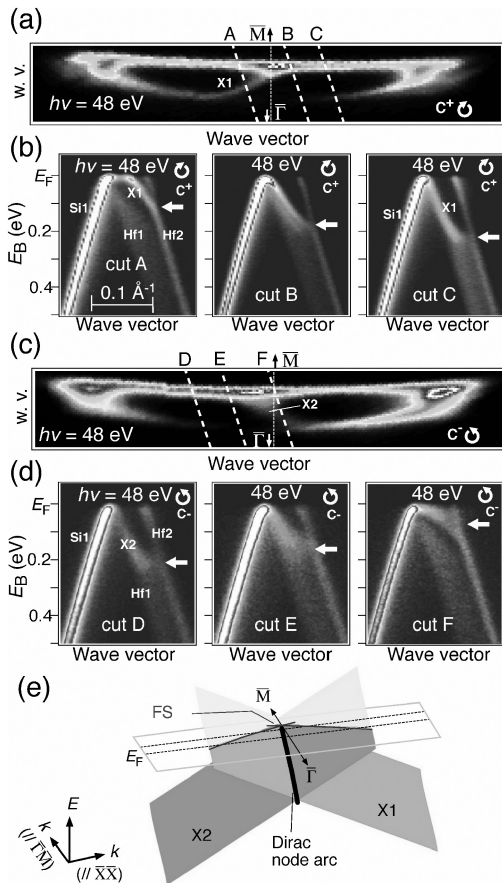


Fig. 1 (a) HfSiS における各等エネルギー面上での ARPES スペクトルの強度プロット。(b) cut A, B, C における ARPES スペクトル。





**Fig. 2** (a)  $h\nu = 48$  eV 右回り円偏光での ARPES スペクトルの  $E_F$  上での強度プロット。(b) cut A, B, C におけるバンド構造。(c), (d) は同じプロットを左回り円偏光について行ったもの。(e) 波数とエネルギーの三次元空間での X1, X2 バンドの分散の模式図。

に伸びるアーク型の構造をとっていることがわかった。我々はこの新奇表面状態を Dirac node arc と名付けた。Dirac node arc の縮退線が伸びる  $\bar{\Gamma}$ - $\bar{M}$  線上は結晶の映進

面上であることから、これまで考えられてこなかった新たな対称性に守られた表面状態である可能性があることや、精密な調整なしにディラックコーンのディラック点に化学ポテンシャルがある時のような特異な電気伝導が観測される可能性があるなど今後の研究が期待される。

以上をまとめると今回我々は HfSiS が 3 つ目となる TLNSM であることを決定するとともに、X 点付近の表面バンドに加え、新奇な表面状態 Dirac node arc の観測に成功した。この発見は、TNLSM のトポロジカル物性に新たな知見を与えるものであると考えられる<sup>7)</sup>。

### 参考文献

- 1) Y. L. Chen *et al.*: Science **325**, 178 (2009).
- 2) Z. K. Liu *et al.*: Science **343**, 864 (2014).
- 3) S.-Y. Xu *et al.*: Science **349**, 613 (2015).
- 4) G. Bian *et al.*: Nat. Commun. **7**, 10556 (2016).
- 5) L. M. Schoop *et al.*: Nat. Commun. **7**, 11696 (2016).
- 6) Q. Xu *et al.*: Phys. Rev. B **92**, 205310 (2015).
- 7) D. Takane *et al.*: Phys. Rev. B **94**, 121108(R) (2016).



### 高根大地

東北大学大学院理学研究科物理学専攻博士前期課程 1 年

#### 【略歴】

2016年3月東北大学理学部物理学科卒業。2016年4月より東北大学大学院理学研究科博士前期課程在学。マルチディメンション物質理工学リーダー養成プログラム生

#### 【受賞のコメント】

学生発表賞に選出頂き大変光栄に思っております。研究をご指導いただいております高橋隆教授、佐藤宇史准教授、相馬清吾准教授、中山耕輔助教ならびに共同研究者のケルン大学の Zhiwei Wang 研究員、安藤陽一教授にこの場を借りて深く御礼申し上げます。今回の受賞を励みとしてさらに研究を発展させていきたいと思っております。

## JSR2017学生発表賞 第3分野

受賞者：関口優希 (発表番号9P026)

題目：XFEL コヒーレント回折イメージング実験におけるデータ解析の高度化と酵母細胞核の三次元構造解析への適用

講演者：関口優希<sup>1,2</sup>, 小林周<sup>1,2</sup>, 岡島公司<sup>1,2</sup>, 荳口友隆<sup>1,2</sup>, 中迫雅由<sup>1,2</sup>, 山本雅貴<sup>2</sup>

所属：<sup>1</sup>慶應・理工, <sup>2</sup>RIKEN SPring-8 Center

### 1. はじめに

Coherent X-ray Diffraction Imaging (CXDI) は、数  $\mu\text{m}$  程度の非結晶試料を数 nm~数十 nm の分解能で可視化する手法である<sup>1)</sup>。CXDI では、コヒーレント X 線を用いて試料の回折パターンを測定し、位相回復計算により電子密

度分布を得る。試料を加工せずに比較的高分解能で構造可視化できるため、特に生体粒子の構造解析手法として期待されている。我々はこれまで、SACLA の超高輝度・高空間コヒーレント X 線を用いて生体・金属粒子の CXDI 実験を行ってきた<sup>2)</sup>。

### 2. SACLA で得られるデータ

SACLA の集光 X 線パルスの輝度は非常に高いため、試料粒子は 1 度の露光で破壊される (ただし、回折現象は粒子破壊前に起こる<sup>3)</sup>)。このため、我々が開発した測定装置「高砂六号」<sup>4)</sup>は、粒子を大量に散布した薄膜上を集光パルスで走査することで、照射野に新鮮な粒子を連続的に導入して測定を行う。装置下流の MPCCD 検出器<sup>5)</sup>により、粒子の回折パターンを画像データとして取得する。

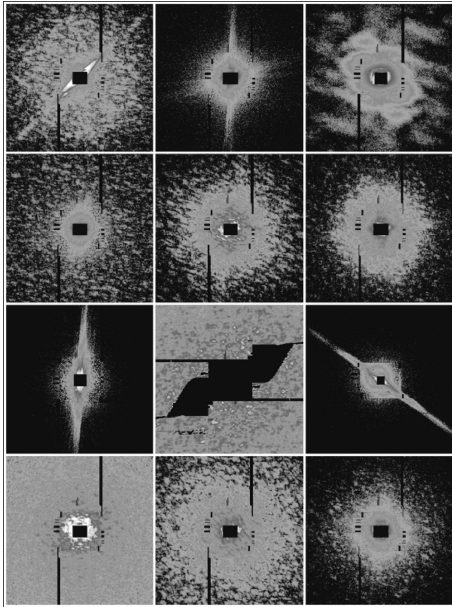


Fig. 1 SACLA で得られる様々な回折パターン。

30 Hz での測定が可能となっており、一回のビームタイムで250万以上のパルスが薄膜に打ちこめる。

250万の画像データは、その全てが解析（位相回復計算）に適している訳ではない。これらの画像には、集光ビームが粒子に当たらなかったもの、凝集粒子の非常に細かい回折パターン、薄膜の亀裂からのパターン、コンタミネーション粒子のパターン、検出器の飽和が甚だしいものなどが多数含まれる（Fig. 1）。真に解析に値するデータは、集光ビームの中心に運良く粒子が1つ孤立して存在していたもののみで、全体の1%程度しかない。パターンの「良し悪し」の定量化は非常に難しく、価値ある1%のデータを取り出すには、回折強度の弱い（パルスが粒子に当たっていない）ものを除いた後<sup>6)</sup>、データを1つ1つ目で見て良いものを選び出すほかないのが現状である。この作業は多大な手間を要し、構造解析の律速となる。

### 3. 機械学習による「良い」データの抽出

機械学習は、大量のデータをコンピュータに学習させ、データの分類ルールなどを発見・構築する技術である<sup>7)</sup>。今回、著者が予め解析に値する（good）・値しない（bad）と分類した回折パターンを、コンピュータに学習させることで分類ルールを作り、これを用いて高速かつ高精度なデータ抽出を試みた。

分類ルールの構築にはニューラルネットワーク（NN）を用いた。NNは、脳の神経細胞ネットワークを模したモデルである。回折パターン毎にその特徴を表す7つのパラメータ（最大強度など）を入力すると、その回折パターンがgood/badである確率を計算するNNを構築する。このNNの構造をFig. 2に示す。7つのパラメータを入力す

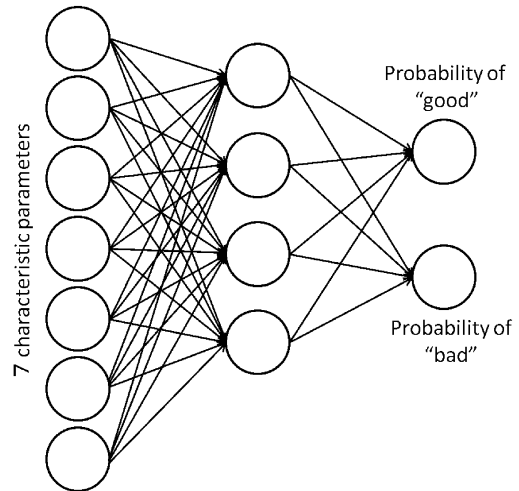
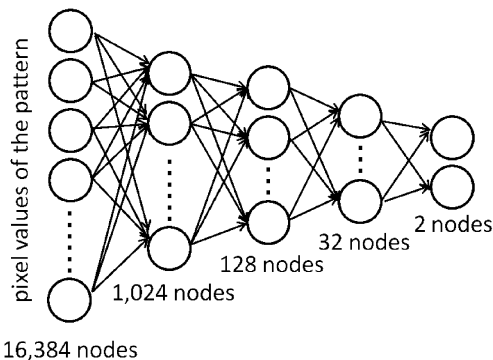


Fig. 2 パラメータ7つから回折パターンがgood/badである確率を計算するNN。

ると、各矢印を通して4つのノードに入り、更に4ノードの出力から2つの最終出力（good/badである確率）が計算される。各ノードは単純な演算器であり、矢印毎に重みを入力値に掛け算し、定数項を足したものを総入力とする。ノードの出力は、総入力を変数とした非線形関数（活性化関数）の値である。NNは単純な演算器の組み合わせに過ぎないが、あらゆる関数を表現できる<sup>8)</sup>。予め分類したgood/badデータから計算した7パラメータを入力すると、good/badデータである確率が1に、bad/goodデータである確率が0になるよう重みと定数項を調整する。これを学習と呼ぶ。学習には時間を要するが、学習したパラメータを使った確率の計算は速い。NNの実装にはGoogle社のライブラリTensorFlow<sup>9)</sup>を用いた。

2015年7月に測定した酵母細胞核の回折パターンのうち、十分な強度を持つ35,073（うちgoodは1,092）データを用いて学習を行った。学習はパソコン上でも3分程度で終わる。学習したNNを用いて、2016年7月に測定した酵母細胞核のパターン（十分な強度のものが515,337、うちgoodは4,854）の分類を行うと、goodのうち97.4%が正しくgoodと分類され、badを誤ってgoodとした割合は18.1%であった。goodの大半を正しく抽出しつつ、badをかなり除けることがわかる。しかしそれでも、元々badの方が圧倒的に多いため、goodと分類された97,292データのうち真にgoodのものはおよそ5%しかない。

更に高精度の分類を行うべく、Fig. 2でgoodと分類されたデータをFig. 3のNNに入力する。このNNは言わば、回折パターンに対する「画像認識」を行うもので、各パターンを表現する16,384個のピクセルの値を入力としてgood/badである確率を計算する。Fig. 2のNNでgoodと判定された97,292データで学習を行う。この中に含まれるgood/badデータの一部を学習に使用せずに除けておき、



**Fig. 3** 回折パターン 픽셀16,384個の値から good/bad である確率を計算する NN。

学習で得た NN の交差検定に用いる。Fig. 2 の NN に比べパラメータ数が40万倍以上になっているが、パソコンでも半日で学習できる。この結果、good のうち84.5%が正しく good と分類され、bad を誤って good とした割合は14.8%となった。

#### 4. まとめと展望

最終的に、十分なシグナル強度を持つデータ（うち good は約1%）に対し、二段階の NN による自動分類を行うことで、good のロスを20%程度に留めながら、bad を98%排除できるようになった。最終的に good と分類されたもののうち、真に good なものは25%程度である。これはすなわち、1つ1つ目で見なければならぬデータの数を1/25にできたことを意味する。

NN をより多層化し、いわゆるディープラーニング<sup>7)</sup>と

呼ばれるほどの規模にすることで、更に高精度で分類できると期待される。精度が十分高くなると、SACLA で測定したその場で good データを自動・高速抽出できるようになり、解析がよりスムーズに行えるだろう。

#### 参考文献

- 1) J. Miao *et al.*: Science. **348**, 530 (2015).
- 2) T. Oroguchi *et al.*: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **48**, 184003 (2015).
- 3) R. Neutze *et al.*: Nature **406**, 752 (2000).
- 4) A. Kobayashi *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **87**, 053109 (2016).
- 5) T. Kameshima *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **85**, 033110 (2014).
- 6) Y. Sekiguchi *et al.*: J. Synchrotron Rad. **21**, 600 (2014).
- 7) 岡谷貴之:『深層学習』, 講談社, 東京 (2015).
- 8) G. Cybenko: Math. Control Signals Systems **2**, 303 (1989).
- 9) <https://www.tensorflow.org/>



#### 関口優希

慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程3年

#### 【略歴】

2014年4月より博士課程在籍。日本学術振興会特別研究員 (DC2)。4月からはIT会社勤務。

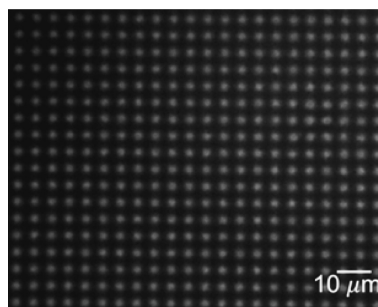
#### 【受賞のコメント】

学生発表賞に選出して頂き大変恐縮しております。本研究は、中迫教授、山本部門長をはじめとする多くの皆様のご尽力により SACLA で膨大なデータが測定可能になって初めて結実したものです。この場をお借り致しまして、SACLA での実験の際にお世話になっている皆様方に深く感謝申し上げます。

### JSR2017学生発表賞 第3分野

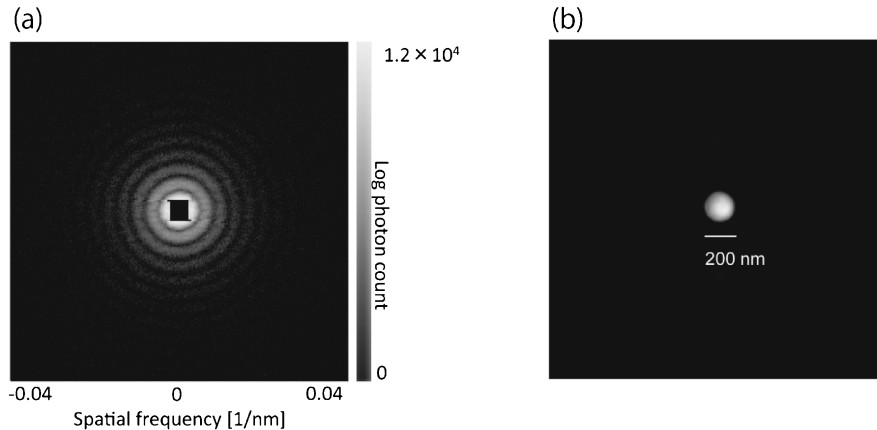
受賞者: 谷直哉 (発表番号: 9P027)  
 題目: X線レーザー回折イメージングのための脂質二重膜マイクロチャンバーの開発  
 講演者: 谷直哉<sup>1</sup>, 木村隆志<sup>1</sup>, 鈴木明大<sup>1</sup>, 城地保昌<sup>2</sup>, 別所義隆<sup>3</sup>, 西野吉則<sup>1</sup>  
 所属: <sup>1</sup>北大電子研, <sup>2</sup>JASRI/SPring-8, <sup>3</sup>Academia Sinica

現在市販されている医薬品の多くが膜タンパク質をターゲットとしていることから分かるように、新たな創薬には細胞膜中の膜タンパク質の機能をより深く理解することが必要である。そのために脂質二重膜に埋め込まれ活性を維持した状態での膜タンパク質の観察が求められている。これを将来的に実現する手法の一つとして、フェムト秒の超短パルスを持つ X 線自由電子レーザー (X-ray free-electron laser: XFEL) と、真空中でも溶液試料を保持することが可能なマイクロ液体封入アレイ (micro-liquid enclosure array: MLEA) チップと呼ばれる試料ホルダを利



**Fig. 1** 蛍光色素を閉じ込めた脂質二重膜マイクロチャンバーの蛍光顕微鏡像。

用したパルス状コヒーレント X 線溶液散乱 (pulsed coherent X-ray solution scattering: PCXSS) 法<sup>1)</sup>が挙げられる。PCXSS 法では溶液中という生体内の環境に近い状態での試料を、無損傷でナノレベルイメージングが可能である。膜タンパク質を PCXSS 法で測定するためには、膜タンパク質由来の微弱なコヒーレント回折パターンを優れた信号対雑音比で検出するための光源・集光性能の向上に加



**Fig. 2** (a)SACLAで取得した200 nmのSiO<sub>2</sub>ビーズ由来のコヒーレント回折パターン。(b)位相回復計算を適用し再構成を行った試料像。

え、MLEAチップに膜タンパク質を埋め込む機構を開発することが必要である。本研究では、人工脂質膜形成技術<sup>2)</sup>を応用し、PCXSS法による膜タンパク質の観察を可能にする脂質二重膜マイクロチャンバーをMLEAチップ内に開発した。さらに、開発した脂質二重膜マイクロチャンバーを試料ホルダとして用い、XFEL施設SACLA<sup>3)</sup>においてコヒーレント回折パターンの取得実験を行った。

MLEAチップ中のマイクロチャンバーはフォトリソグラフィ技術を用いて作製した。アモルファスフッ素樹脂CYTOP、ポジ型フォトリソレジストOFPR-5000の順にMLEAチップにスピコートを用いて塗布し、チャンバーとなる位置のレジストを露光、現像した。その後、露出した部分のCYTOPを酸素プラズマでエッチングを行い、親水性のMLEA表面を露出させた。レジストを除去した後のCYTOPは疎水性であり、この疎水性/親水性の構造がマイクロチャンバーとなる。脂質二重膜は水、リン脂質入りのクロロホルム、水の順に溶液をマイクロチャンバー上に連続で流すことで作製可能である。脂質二重膜マイクロチャンバー内に蛍光色素Sulforhodamine Bを封入し、蛍光顕微鏡で観察を行った結果をFig. 1に示す。マイクロチャンバー位置に局在した蛍光は、脂質二重膜が形成されたことを示している。次に、脂質二重膜マイクロチャンバーに膜タンパク質である $\alpha$ ヘモリシンを埋め込み、活性の評価を行った。マイクロチャンバー内に蛍光色素Alexa488を封入し、 $\alpha$ ヘモリシンを脂質二重膜に埋め込んだ後、蛍光顕微鏡を用い観察を行った。その結果、脂質二重膜に埋まった $\alpha$ ヘモリシンのチャンネルによる蛍光色素の拡散を確認できたため、活性を保った膜タンパク質を脂質二重膜に埋めることに成功したと言える。最後に、開発した脂質二重膜マイクロチャンバーをPCXSS測定に用いることができるかを検証するため、チャンバー内に大き

さが既知である直径200 nmのSiO<sub>2</sub>ビーズを封入し、SACLAにてコヒーレント回折パターンを取得した(Fig. 2a)。取得したコヒーレント回折パターンに位相回復計算を適用し試料像を再構成した結果、試料として用いたSiO<sub>2</sub>ビーズのサイズや形状と整合性のある試料像を得ることに成功した(Fig. 2b)。すなわち、脂質二重膜マイクロチャンバーがPCXSS測定に利用可能であると実証できた。今後は現在開発中である、より集光度を高めたXFELを用いて脂質二重膜マイクロチャンバーに埋め込んだ膜タンパク質由来のコヒーレント回折パターンの計測を目指す。

#### 参考文献

- 1) T. Kimura *et al.*: Nat. Commun. **5**, 3052 (2014).
- 2) R. Watanabe *et al.*: Nat. Commun. **5**, 4519 (2014).
- 3) T. Ishikawa *et al.*: Nat. Photon. **6**, 540 (2012).



#### 谷 直哉

北海道大学大学院情報科学研究科生命人間情報科学専攻 修士課程1年

#### 【略歴】

2016年3月北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。2016年4月北海道大学大学院情報科学研究科・生命人間情報科学専攻に入学。

#### 【受賞のコメント】

JSR2017学生発表賞に選出して頂き、大変光栄に思います。本研究を進めるにあたり、多くの方にお力添えを頂きました。日頃よりご指導頂いている西野吉則教授をはじめ、木村隆志助教、鈴木明大助教、並びに共同研究者の方々に心から感謝申し上げます。本賞を励みに、今後もより一層研究に邁進していきます。

## JSR2017学生発表賞 第3分野

受賞者：山田純平（発表番号3F001）

題目：小型かつ大倍率を実現する X 線結像ミラー光学系の開発

講演者：山田純平<sup>1</sup>，松山智至<sup>1</sup>，安田周平<sup>1</sup>，香村芳樹<sup>2</sup>，矢橋牧名<sup>2</sup>，石川哲也<sup>2</sup>，山内和人<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>大阪大学大学院工学研究科，<sup>2</sup>理研放射光科学総合研究センター

### 1. はじめに

結像型 X 線顕微鏡では、用いる結像素子とその性能を大きく左右する。Fresnel Zone Plate (FZP) を結像素子に用いた結像型 X 線顕微鏡の開発例<sup>1)</sup>では～12 nm の空間分解能を達成したと報告されているが、FZP は原理的に色収差の影響を無視することができない。これに対し我々は、全反射ミラーが色収差の問題を解決し得ることに着目し、Advanced Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー結像光学系<sup>2)</sup>を用いた結像型 X 線顕微鏡の開発を行ってきた。これまでに、色収差無く 50 nm の空間分解能を達成している<sup>3)</sup>。Advanced KB ミラー光学系では、楕円・双曲形状を持つ 2 枚の凹ミラーペアを 2 組、互いに直行直列配置することで 2 次元結像を実現している。しかしながらこの光学系では、適切な拡大倍率を得るために約 50 m の長いミラーカメラ間距離が必要であった。

この問題を解決すべく、我々は小型かつ大倍率が実現可能な楕円凹・双曲凸ミラーによる X 線結像光学系を提案し、計算機シミュレーションによりその有効性を確認してきた<sup>4)</sup>。本稿では光学系の解説と SPring-8 BL29XUL にて実施した実証実験について報告する。

### 2. 楕円凹・双曲凸ミラーによる X 線結像光学系

本光学系では、楕円凹ミラーと双曲凸ミラーのペアを 2 対、互いに直行直列配置している (Fig. 1(a))。倍率の決定基準となる焦点距離は、焦点から主面までの距離で定義される。主面は光学系に入射する光線と出射する光線の延長が交わる面と与えられる。このため本光学系では、Fig. 1(b)に示すように、光学系の主面が物点側に近づき、拡大倍率が飛躍的に向上する。1 次元的には楕円と双曲の幾何学的焦点が一致しているため、光路長一定の条件かつアップの正弦定理を近似的に満たしており、球面・コマ収差がほとんど存在しない。

今回開発した 1 次元結像光学系は、約 2 m の全長においても 321 倍の大きな倍率、かつ  $1.6 \times 10^{-3}$  の開口数を有している。このため小型なセットアップながらも 10 keV において Sub-50 nm 分解能の達成が見込まれる。楕円凹、双曲凸ミラーはそれぞれミラー長 8.2, 8.6 mm である。ミラー作製には独自に開発したイオンビーム加工システム<sup>5)</sup>を用い、2 nm peak-to-valley (PV) の形状精度で作製を完了した。

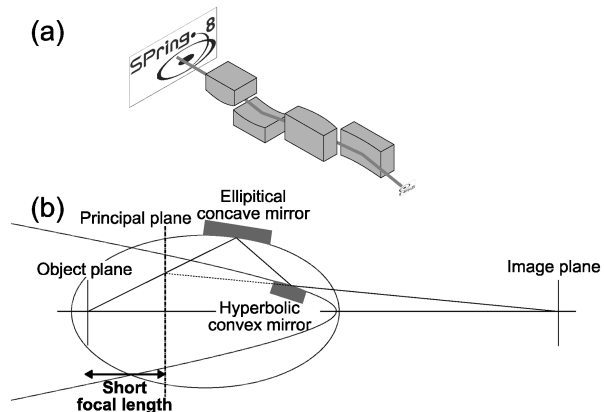


Fig. 1 楕円凹・双曲凸ミラーによる X 線結像光学系。(a) ミラー配置模式図。(b) ミラー配置の 1 次元断面図。

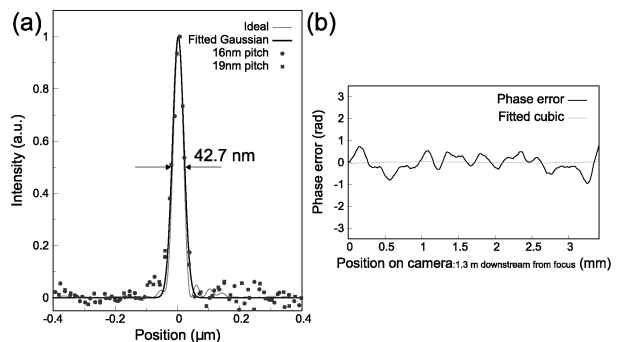


Fig. 2 X 線のエネルギー 10 keV における実験結果。(a) ワイヤスキャン法により得られた PSF。(b) グレーチング干渉計により得られた反射波面誤差。

### 3. SPring-8 における実証実験と結果

作製した 1 次元結像ミラーを用い、SPring-8 BL29XUL にて縮小結像による実証実験を行った。本実験では、10 keV の X 線を用いて、 $10 \mu\text{m}$  幅の仮想光源が縮小結像 (集光) され、結像ミラーの主面から 6.5 mm の位置に像を結ぶ。縮小像サイズは幾何倍率により約 30 nm に、回折限界により約 40 nm に制限される。そこでまず縮小像プロフィール、即ち結像ミラーの point spread function (PSF) をワイヤスキャン法により評価した。結果を Fig. 2(a) に示す。従来型の光学系の場合には幾何倍率により約 100 nm に制限される集光径を突破し、ほぼ回折限界条件下で半値幅 42.7 nm の PSF を取得した。また集光後、発散する X 線に対して Single-grating 干渉計<sup>6)</sup>を構築し、波面誤差を計測した。Talbot 次数 0.5, 格子周期  $2.5 \mu\text{m}$ , 焦点-格子間距離 25.7 mm の条件で、25 ステップ縞走査法により取得した波面誤差を Fig. 2(b) に示す。計測された波面誤差にはコマ収差に由来する 3 次関数形状はほとんど存在せず、全体としても PV 値で  $\lambda/4$  程度であった。この結果からも高精度に光学系が構築されたことが示された。さらに実験では  $\pm 0.7 \text{ mrad}$  ずつ入射角を変化させながら波

面誤差を計測したが、ほぼ変化は見られず、広い視野に渡ってコマ収差の無い結像が可能であることを確認した。中周期の特徴的な波面誤差は、ミラー上の空間波長0.1-0.3 mm 領域の形状誤差に起因している。この高周期形状誤差を1 nm レベルまで修正することが、高分解能顕微鏡の構築へ向けた喫緊の課題となる。

以上のように、従来までの倍率の制限を突破できる本手法を用いれば、全反射現象の色収差無し・高効率といった特徴を持つ高分解能 X 線結像顕微鏡を汎用的に利用することが可能となる。また本実験のような集光光学系としても、短い全長でナノ集光を達成できるという特徴を活かし、次世代放射光のビームライン開発に貢献していくことを期待する。

### 参考文献

- 1) W. Chao *et al.*: Opt. Express **17**, 17669 (2009).
- 2) R. Kodama *et al.*: Opt. Lett. **21**, 1321 (1996).
- 3) S. Matsuyama *et al.*: under revision.
- 4) J. Yamada *et al.*: Appl. Opt. **56**, 967 (2017).
- 5) J. Yamada *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **86**, 093103 (2015).
- 6) S. Matsuyama *et al.*: Opt. Express **20**, 24977 (2012).



### 山田純平

大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻博士後期課程 1 年

#### 【略歴】

2014年3月大阪大学工学部応用自然科学科卒業。2016年3月大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻博士前期課程修了。2016年4月より同博士後期課程に在籍。日本学術振興会特別

研究員 (DC1)。

#### 【受賞のコメント】

JSR2017学生発表賞という大変名誉ある賞を頂きまして、心より光栄に存じます。これもひとえに御指導を頂いている山内和人教授、松山智至助教のおかげであり、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また共同研究者である理研の石川哲也センター長、矢橋牧名グループディレクター、香村芳樹ユニットリーダー、並びに共に実験に取り組んだ阪大の安田周平氏、徳岡郁美氏に深く感謝申し上げます。本賞を励みに、今後もより一層精進致します。