

# 第29回日本放射光学会年会・ 放射光科学合同シンポジウム(JSR2016)学生発表賞審査結果について

第29回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR2016)  
組織委員長 篠原佑也(東京大学大学院 新領域創成科学研究科)

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)学生発表賞とは、将来性・独創性のある優れた発表を行った学生を顕彰し、賞状を贈呈するものです。年会・合同シンポの精神に則り「学生による全ての発表」を対象としています。第29回年会・合同シンポ(JSR2016)では、組織委員長、組織副委員長、プログラム委員長、プログラム副委員長、実行委員長、実行副委員長で学生発表賞選考委員会を組織し、本委員会により推薦された審査員による審査で選考が行われました。学生の1つの発表に対して4名の審査員を割り当て、専門分野別に計74名の方々に審査をお願いいたしました。この場をお借りして、審査をご協力頂いた先生方に深く御礼申し上げます。

第29回年会・合同シンポ(JSR2016)では学生発表賞対象講演が計113件ありましたが、発表キャンセル、教員による代理発表があり、最終的な対象講演数は109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：13件，ポスター発表：22件

## 第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

口頭発表：25件，ポスター発表：15件

## 第3分野 加速器装置・イメージングなど

口頭発表：15件，ポスター発表：19件

## 合計件数

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、以下の8名の方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ご活躍されることを期待しております。

### 【JSR2016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：3E003

氏名(所属)：岡村嘉大(東大工)

演題：共鳴軟X線小角散乱を用いたマルチフェロイクス $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ におけるスキルミオンダイナミクスの観測

発表番号：11P049

氏名(所属)：小野貴大(東京理科大学)

演題：放射光X線分析を用いた福島第一原発事故1号機由来とされる放射性粒子の化学的性状の解明

発表番号：11P038

氏名(所属)：菊竹大樹(東大院新領域)

演題：核共鳴弾性散乱法を用いたイオン液体のガラス転移点近傍での微視的ダイナミクスの観測

#### 第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

発表番号：5E004

氏名(所属)：小島耀平(広大院理)

演題：Ce単結晶薄膜の高分解能角度分解光電子分光

発表番号：6E005

氏名(所属)：坂本祥哉(東大理)

演題：軟X線角度分解光電子分光による強磁性半導体 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ の電子構造の解明

---

第3分野 加速器装置・イメージングなど

発表番号：3D002

氏名（所属）：大坂泰斗（阪大院工）

演題：XFEL用分割・遅延光学系の開発—SACLAにおける性能評価—

発表番号：7Ab003

氏名（所属）：亀井 俊（阪大生命）

演題：顕微赤外イメージングによるアミノ酸の光学異性化の観察

発表番号：4D003

氏名（所属）：鈴木明大（阪大院工）

演題：暗視野 X線タイコグラフィーによる弱位相物体の高分解能イメージング

尚、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。是非ご覧ください。

## JSR2016学生発表賞 第1分野

受賞者：岡村嘉大（発表番号 3E003）

題目：共鳴軟 X 線小角散乱を用いたマルチフェロイクス  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$  におけるスキルミオンダイナミクスの観測講演者：岡村嘉大<sup>1</sup>，山崎裕一<sup>1,2</sup>，森川大輔<sup>2</sup>，本田孝志<sup>3</sup>，中尾裕則<sup>3</sup>，村上洋一<sup>3</sup>，関真一郎<sup>2</sup>，賀川史敬<sup>2</sup>，有馬孝尚<sup>2,4</sup>，十倉好紀<sup>1,2</sup>所属：<sup>1</sup>東大工，<sup>2</sup>理研 CEMS，<sup>3</sup>KEK 物構研，<sup>4</sup>東大新領域

## 1. 諸言

近年、キラルな磁性体において、スキルミオンと呼ばれる渦状の磁気構造体が発見された<sup>1)</sup>。このスキルミオンは、構成する電子スピンのあらゆる方向をもつという特徴をもち、これによって多彩な電磁気応答が発現することが知られている。現在では、スキルミオンの駆動や生成・消滅などの制御に向けた研究が多く行われているが、そのダイナミクスをとらえるための実験手法は未だ確立されていなかった。

このような課題に対して、KEK-PFのBL-16Aにおいて新たに開発された共鳴軟 X 線小角散乱は、これまでスキルミオンをとらえるのに最も有力な手法の一つであった小角中性子散乱よりも優れた波数・時間分解能を実現することができる<sup>2)</sup>。本研究では、これらの特長を活かすことで、スキルミオンの新奇な高速ダイナミクスの観測を目指した。

## 2. 実験

この手法では、試料から透過した X 線の散乱光を CCD カメラでとらえるということを行っている (Fig. 1(a))。ここで重要な点は、軟 X 線の減衰長を考慮した試料準備である。今回の試料 ( $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ 、物性の詳細については後述) では、Cu の L 端における減衰長がおよそ 200 nm 程度と見積もられることから、回折光を最も強く得るには試料の厚みもやはり 200 nm 程度であることが必要である。そこで、収束イオンビーム法 (FIB) という手法を用いることによって、ミリメートルサイズのバルク結晶から  $15\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m} \times 200\ \text{nm}$  程度の試料を作成した (Fig. 1(a))。これによるさらなる利点としては、巨大な電流密度や電場を簡単に実現できるということである。

## 3. 結果と考察

今回我々は、スキルミオン相を有するだけでなく、磁性と誘電性が強く結合するマルチフェロイクスとしての性質を持つ  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$  に注目した<sup>3)</sup>。この性質を利用すれば、電場によるスキルミオンの生成・消滅ができるはずであり、さらにはそれにいたるまでのダイナミクスの観測も本手法を用いれば可能なはずである。

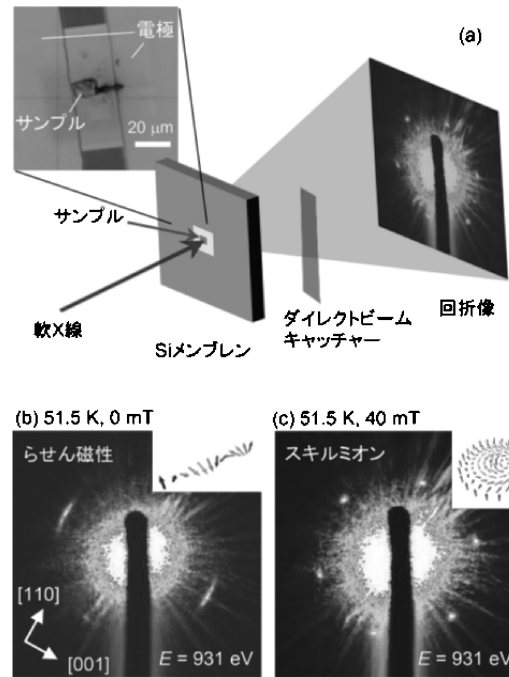


Fig. 1 (a)実験の概念図およびサンプルの写真。(b, c)Cu の L 端 ( $E = 931\ \text{eV}$ ) において観測された回折図形。それぞれ、らせん磁性(b)、スキルミオン(c)。

まずこれに向けた準備として、スキルミオン、らせん磁気相の観測を目指した。Fig. 1(b, c)に、代表的な回折図形を示す。2 回対称、6 回対称のスポットを観測し、それぞれ、らせん磁性、スキルミオン格子の形成を確認することができた。さらに大きな磁場をかけ強磁性になると、回折スポットが消えることも確認している。このようにして、様々な磁場温度走査過程における磁気相図を作成し、電場制御に最適な温度磁場についての知見を得ることができた。

その後電場を印加したものの、磁気構造に有意な変化をみることはできなかった。サンプル以外の場所に電流が多く流れてしまったためであると考えられ、サンプル構造の改善が必要である。

今回目標達成には至らなかったものの、スキルミオンの比較的早い時間スケール (0.5秒程度) の電場応答を探索する準備が整ったといえる。また現在では、ギガヘルツ領域の応答を観測できるような測定系の立ち上げもっており、磁気励起ダイナミクスの実時間観測なども視野にいれ研究を進めている。

## 参考文献

- 1) N. Nagaosa *et al.*: Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013).
- 2) Y. Yamasaki *et al.*: Phys. Rev. B **92**, 220421 (2015).
- 3) S. Seki *et al.*: Science **336**, 198 (2013).



### 岡村嘉大

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士後期課程

#### 【略歴】

2012年3月東京大学工学部物理工学科卒業。2014年3月東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。現在、同大学院博士課程在籍。

#### 【受賞のコメント】

この度は、このような賞をいただき大変光栄に思います。評価していただいた方に感謝するとともに、共同研究者の方々、特に今回の共鳴軟X線小角散乱実験を直接指導していただいているKEKの中尾裕則准教授、東大工学系研究科の山崎裕一特任講師、KEKの本田孝志助教に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邁進したいと思います。

## JSR2016学生発表賞 第1分野

受賞者：小野貴大（発表番号11P049）

題目：放射光X線分析を用いた福島第一原発事故1号機由来の放射性粒子の化学的性状の解明

講演者：小野貴大<sup>1</sup>、飯澤勇信<sup>1</sup>、阿部善也<sup>1</sup>、中井泉<sup>1</sup>、寺田靖子<sup>2</sup>、佐藤志彦<sup>3</sup>、末木啓介<sup>3</sup>、二宮和彦<sup>4</sup>、五十嵐康人<sup>5</sup>、足立光司<sup>5</sup>

所属：<sup>1</sup>東理大・理、<sup>2</sup>JASRI/SPring-8、<sup>3</sup>筑波大、<sup>4</sup>阪大、<sup>5</sup>気象研

### 1. はじめに

2011年3月に発生した福島第一原発事故により、大量の放射性物質が環境中に放出された。我々は事故により放出された放射性物質の性状解明および炉内状況の推定を目的として、これまでに茨城県つくば市で事故直後に採取した大気粉塵から放射性Csを含む直径数 $\mu\text{m}$ の球状粒子（通称Csボール）を発見した<sup>1)</sup>。同試料についての放射光施設SPring-8における放射光複合X線分析から、核燃料と考えられるUとその核分裂生成物および原子炉の構成材料が混合したガラス状粒子であることを解明した<sup>2)</sup>。この粒子の存在および性状は、事故当時の炉内状況を理解する上できわめて重要な情報である。しかし、現時点でCsボールは2または3号機から放出されたものと考えられ、津波により最も深刻な影響を受け水素ガス爆発が発生した1号機については、事故によりどのような放射性物質が放出されたのかは不明である。そこで本研究では、1号機由来と考えられる放射性物質が飛来した可能性が指摘されている福島県北西地域の土壌<sup>3)</sup>から放射性粒子を採取し、SPring-8を用いた非破壊の放射光複合X線分析により物理・化学的性状の解明を行った。

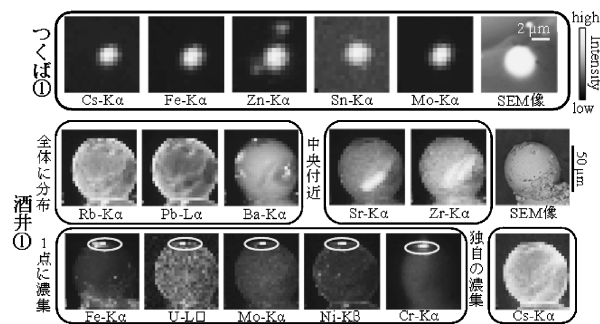


Fig. 1 各粒子のSEM像と $\mu$ -XRFイメージング像。(上)つくば市の大気粉塵から分離したCsボール<sup>2)</sup>、(下)福島県酒井の土壌から分離した放射性粒子。

### 2. 実験

試料は、福島県酒井の土壌から分離した放射性粒子4点である。分離方法は先行研究<sup>1,2)</sup>に準拠した。分離された放射性粒子について、1粒子ごとにGe半導体検出器を用いたガンマ線測定を行い、福島第一原発1号機<sup>4)</sup>由来の可能性が高いことを確認した。さらに低真空SEM-EDSによる観察および組成分析を行った。

放射光X線分析は、SPring-8 BL37XUにて非破壊で行った。K-Bミラーを用いて放射光X線を縦横約 $1\mu\text{m}$ に集光し、励起光とした。励起光を37.5 keVに単色化し、 $\mu$ -蛍光X線分析(XRF)により粒子の化学組成および元素分布を調べた。さらにFe, Zn, Mo, SnのK吸収端について $\mu$ -X線吸収端近傍構造分析(XANES)により化学状態を、 $\mu$ -X線回折測定(XRD)により結晶構造を分析した。

### 3. 結果・考察

酒井の土壌から分離された放射性粒子は球状ではないものが多く、また $250\mu\text{m}$ に及ぶ大きなものも存在した。これまでに分析されたCsボールは全て直径 $2\mu\text{m}$ 前後の球形であり<sup>1,2)</sup>、Csボールとは異なる物理的性状を持つ粒子

が1号炉から放出された可能性が明らかとなった。4粒子すべてが $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ を含み、また $\mu\text{-XRF}$ によりCs以外にも核分裂生成物および原子炉の構成材料と思われる様々な重元素が検出された。Csボールの $\mu\text{-XRF}$ 結果<sup>2)</sup>と比較すると、酒井の土壌から分離された粒子はSrを含み、またCs-K $\alpha$ よりもBa-K $\alpha$ の方が高い強度で検出される等、組成的な違いが見出された。さらに検出された元素の分布 (Fig. 1) についても、Csボールにおいては各元素が粒子内に均一に分布していたのに対し<sup>2)</sup>、酒井の土壌から分離された粒子においては元素の不均一性が見られ、特にFeやUなど一部の金属元素が微小領域に濃集するなど特徴的な分布が認められた。

また $\mu\text{-XANES}$ および $\mu\text{-XRD}$ の分析結果では、粒子本体はCsボールと同様に高酸化数のガラス状態<sup>2)</sup>であったが、濃集部位では一部の元素が酸化物または金属に近い状態にあることが $\mu\text{-XANES}$ から示され、また $\mu\text{-XRD}$ においても濃集部位では結晶性物質の存在が明らかとなった。この結果は、酒井の土壌から分離した放射性粒子では、1粒子内に複数の化学状態が混在していることを表している。

これらの分析結果により、福島県酒井の土壌から分離した放射性粒子の物理・化学的性状は、先行研究<sup>1,2)</sup>のCsボールとは異なることが化学的に実証された。これにより、事故当時1号機と2,3号機において異なるプロセスによって放射性物質が放出された可能性が初めて実証された。

## 謝辞

本研究は科研費新学術領域「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究 (領域代表 恩田裕一 筑波大学教授)」の一環として、研究費補助金 (公募研究, 課題番号: 25110510) の支援により実施されました。本研究の放射光実験は高輝度光科学研究センター SPring-8 一般利用課題 (課題番号: 2014A1403, 2014B1493, 2015A1895, 2015B1828) として行われました。

## 参考文献

- 1) K. Adachi *et al.*: Scientific Reports **3**, 2554 (2013).
- 2) Y. Abe *et al.*: Analytical Chemistry **87**, 8521 (2014).
- 3) 佐藤志彦ら: 放射化学 **31**, 27 (2015).
- 4) 小森昌史ら: 分析化学 **62**, 475 (2013).



### 小野貴大

東京理科大学大学院総合化学研究科修士課程

#### 【略歴】

2015年東京理科大学理学部第二部化学科卒業。現在、同大学院総合化学研究科修士課程在学中。

#### 【受賞のコメント】

この度はJSR2016学生発表賞に選出させていただいたことを大変嬉しく思います。研究を指導していただいた中井泉教授、阿部善也助教、ならびに共同研究者の皆様へ厚く御礼申し上げます。今後とも研究を進め、この名誉ある賞に恥じぬよう、日々成長していきたいと思っております。

## JSR2016学生発表賞 第1分野

受賞者: 菊竹大樹 (発表番号11P038)

題目: 核共鳴準弾性散乱法を用いたイオン液体のガラス転移点近傍での微視的ダイナミクスの観測

講演者: 菊竹大樹<sup>1</sup>, 松井和也<sup>1</sup>, 北原暁<sup>1</sup>, 篠原佑也<sup>1</sup>, 雨宮慶幸<sup>1</sup>, 齋藤真器名<sup>2</sup>, 瀬戸誠<sup>2</sup>

所属: <sup>1</sup>東大院新領域, <sup>2</sup>京大原子炉

### 1. 緒言

イオン液体は、不揮発性、難燃性、高イオン伝導性など、一般的な分子性液体とは異なる特徴を有していることから、様々な分野での応用利用が期待されている。その一方で、イオン液体にはファンデルワールス力のみならず、カチオン・アニオン間にクーロン相互作用がはたらくため、イオン液体の物性制御は複雑で未解明な点が多く、イオン液体をより微視的観点から理解することが求められている。イオン液体の微視的構造に関してはX線・中性子散乱を用いた研究が数多く行われており、イオン液体には長さスケールの異なる3種類の秩序構造が存在すること

が明らかとなっている<sup>1)</sup>。この特徴的な階層構造がイオン液体の物性に深く関与していると考えられるが、その詳細な関係はまだ十分に理解されていない。

イオン液体の粘度やイオン伝導率などの巨視的物性と、イオン液体の微視的構造を結びつけるためには、イオン液体の微視的ダイナミクスに関する理解が不可欠である。イオン液体の微視的ダイナミクスに関しては中性子準弾性散乱法による測定がすでに行われているが<sup>2)</sup>、緩和時間の温度依存性から微視的構造と巨視的物性の関係を議論するためには、中性子準弾性散乱法では測定することのできない、百ナノ秒より遅いダイナミクスの情報が必要である。それを得るための手法としては、核共鳴準弾性散乱法が非常に有効である。この手法は核共鳴散乱により得られる超単色ガンマ線を利用した準弾性散乱法で、数ナノ秒から数十マイクロ秒の時間領域のダイナミクスを測定することが可能である<sup>3,4)</sup>。

以上に述べた背景の下、本研究では、イオン液体の巨視的物性とイオン液体特有の階層構造との関係を明らかにすることを目的として、核共鳴準弾性散乱法によるイオン液体の微視的ダイナミクスの測定を行った。

## 2. 実験

実験は、Spring-8のBL09XUで行った。実験セットアップをFig. 1に示す。測定試料としては1-nonyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide (C9mimTFSI)を、核共鳴試料としては $^{57}\text{Fe}$ 濃縮 $\alpha\text{-Fe}$ を用いた。入射X線のエネルギーは $^{57}\text{Fe}$ の第一核共鳴励起エネルギーである14.4 keVとした。二つの核共鳴試料を測定試料の前後に置き、それぞれ異なる方向に0.6 T程度の磁場をかけた。2台の多素子アバランシェフォトダイオード (APD) 検出器を、Fig. 2に示したX線散乱強度曲線における3つのピーク ( $q = 3.0 \text{ nm}^{-1}$ ,  $8.8 \text{ nm}^{-1}$ ,  $13.2 \text{ nm}^{-1}$ ) に対応する位置に設置し、散乱ガンマ線の時間スペクトルを測定した。200 K から270 K の間の7点の温度で測定を行った。本手法の詳細な測定原理に関しては、他の文献を参照されたい<sup>3,4)</sup>。

## 3. 結果と考察

それぞれの $q$ における緩和時間の温度依存性を調べた結果、 $q = 3.0 \text{ nm}^{-1}$ ,  $8.8 \text{ nm}^{-1}$ についてはアレニウスの式  $\tau = \tau_0 \exp(E_a/k_B T)$  に従う温度依存性を示し、 $q = 13.2 \text{ nm}^{-1}$ についてはVogel-Fulcher Tamman (VFT) 式  $\tau = \tau_0 \exp[D/(T - T_0)]$  に従う温度依存性を示した。ただし、 $\tau_0$ は高温極限における緩和時間、 $E_a$ は活性化エネルギー、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T_0$ はVogel温度、 $D$ は定数である。特に $q = 13.2 \text{ nm}^{-1}$ における緩和時間の温度依存性は、粘弾性測定により得られた巨視的な緩和時間の温度依存性や、他のグループによって調べられた粘度や拡散係数、イオン伝導率といった巨視的物性の温度依存性<sup>5)</sup>と非常に近いものであった。したがって今回の測定結果は、 $q = 13.2 \text{ nm}^{-1}$ に対応する構造のダイナミクスがイオン液体の巨視的物性に深く関与していることを示唆する結果であるといえる。

## 4. まとめ

本研究では、Spring-8のBL09XUにおいてイオン液体の階層構造の微視的ダイナミクスの測定を行った。その結果、 $q = 3.0 \text{ nm}^{-1}$ ,  $8.8 \text{ nm}^{-1}$ における緩和時間はアレニウスの式に従う温度依存性を示し、 $q = 13.2 \text{ nm}^{-1}$ における緩和時間はVFT式に従う温度依存性を示した。さらに、粘弾性測定により得られた巨視的な緩和時間や粘度等の巨視的物性の温度依存性との比較から、 $q = 13.2 \text{ nm}^{-1}$ に対応する構造のダイナミクスがイオン液体の巨視的物性に深く関与していることがわかった。

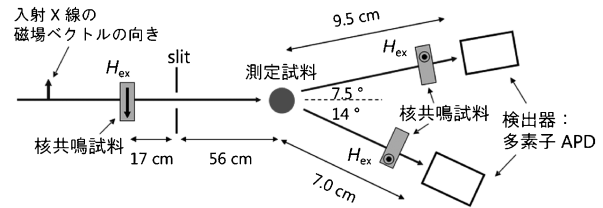


Fig. 1 核共鳴準弾性散乱測定の実験セットアップ。

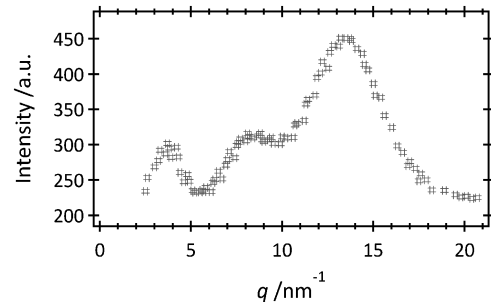


Fig. 2 270 KにおけるC9mimTFSIのX線散乱強度曲線。

## 参考文献

- 1) O. Russina *et al.*: J. Phys.: Condens. Matter **21**, 424121 (2008).
- 2) M. Kofu *et al.*: J. Chem. Phys. **143**, 234502 (2015).
- 3) A. Q. R. Baron *et al.*: Phys. Rev. Lett. **79**, 2823 (1997).
- 4) M. Saito *et al.*: Hyperfine Interact **206**, 87 (2012).
- 5) H. Tokuda *et al.*: J. Phys. Chem. B **109**, 6103 (2005).



### 菊竹大樹

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻修士課程1年

#### 【略歴】

2015年3月東京大学工学部物理工学科卒業。2015年4月より同大学院新領域創成科学研究科物質系専攻修士課程在学。

#### 【受賞のコメント】

学生発表賞に選出させていただき、大変光栄に思います。日頃からご指導いただいている雨宮慶幸教授、篠原佑也助教、共同研究という形でご協力いただきました京都大学の瀬戸誠教授、齋藤真器名助教、そして共に研究に取り組んだ松井和也氏、北原暁氏に厚く御礼申し上げます。特に松井和也氏からは、本研究を進めるにあたって数えきれないほど多くの助言をいただきました。心より感謝しております。

## JSR2016学生発表賞 第2分野

受賞者：小島耀平（発表番号 5E004）

題目：Ce 単結晶薄膜の高分解能角度分解光電子分光

講演者：小島耀平<sup>1</sup>，島田賢也<sup>2</sup>，永田偉士<sup>1</sup>，Eike F. Schwier<sup>2</sup>，岩澤英明<sup>2</sup>，鄭明天<sup>1</sup>，堀家大希<sup>1</sup>，相浦義弘<sup>3</sup>，生天目博文<sup>2</sup>，谷口雅樹<sup>2</sup>所属：<sup>1</sup>広大院理，<sup>2</sup>広大放射光セ，<sup>3</sup>産総研

## 1. 諸言

希土類金属元素を含む系は、局在性の強い4f電子間のオンサイトクーロン相互作用と遍歴的な伝導電子との間のc-f混成相互作用により、近藤効果、RKKY相互作用、重い電子など、多彩な物性を示す。こうした物性を理解するうえで、電子状態、とりわけフェルミ準位 ( $E_F$ ) 近傍の微細電子構造を実験的に明らかにすることが重要である。放射光を利用した角度分解光電子分光 (Angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES) は、物質の電子構造 (バンド分散、フェルミ面) を直接的に調べることができる有力な実験手法である。本研究では4f電子を形式的に1個持つセリウム (Ce) 単体金属に着目し、その電子状態をARPESにより明らかにすることを目的とした。Ce金属は4f電子が関わる多体相互作用の基本的な散乱プロセスを含んでおり、この系を理解することによって希土類化合物の電子状態の解明に貢献することを期待している。Ce単体金属は反応性に富み、バルク試料の清浄表面は容易に得られない。このため先行研究では、タングステン (W) などの金属単結晶基板上にエピタキシャル成長させたCe単結晶薄膜の電子状態が調べられているが<sup>1,2)</sup>、フェルミ面構造や  $E_F$  近傍のc-f混成バンドの詳細は実験的に明らかになっていない。

本研究では真空蒸着法によりW(110)基板上に清浄なCe単結晶薄膜を作製し、放射光を用いた高分解能ARPESにより詳細な電子構造 (バンド分散、フェルミ面) を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験

ARPES実験は広島大学放射光科学研究センター (Hi-SOR) の直線偏光アンジュレータビームライン (BL-1) で行った。蒸着基板となるW(110)の清浄表面は、高温アニール装置を設計・製作し、酸素雰囲気中でのアニール (1100°C) とフラッシングアニール (2000°C) を繰り返すことで得た。Ceを入れたタンタルるつぼを電子衝撃加熱することでCeを蒸発させた。不純物がなくなるまで蒸発を続けることで清浄なCe薄膜が成長できるようにした。作製した試料の清浄表面はオージェ電子分光 (AES)、低速電子線回折 (LEED)、光電子分光を用いて評価した。測定した試料のLEED像は6回対称であり、CeとWのAESピーク強度比をもとに膜厚は4-5 MLと見積もった。

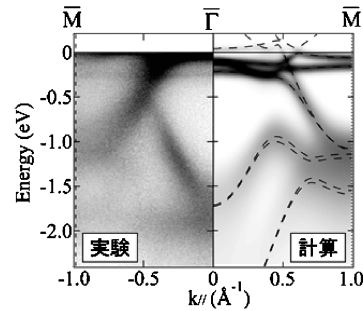


Fig. 1 励起光エネルギー  $h\nu=42$  eV で観測した Ce 単結晶薄膜の  $\bar{\Gamma}$ - $\bar{M}$  方向の ARPES イメージプロット (左側) とバンド計算結果 (右側)。

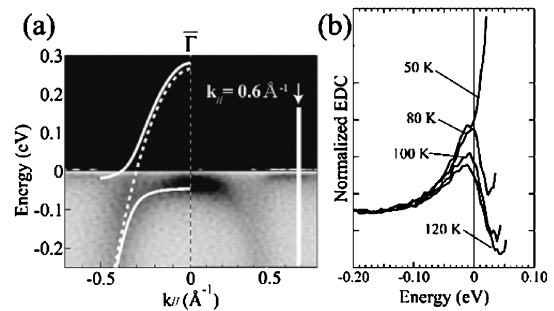


Fig. 2 (a)  $E_F$  近傍の高分解能 ARPES イメージプロット。実線は周期的アンダーソンモデルによる計算結果、破線は混成前の Ce 5d バンド。(b) 波数  $k_{\parallel}=0.6 \text{ \AA}^{-1}$ ,  $E_F$  直上における Ce 4f スペクトル強度の温度依存性。

## 3. 結果及び考察

Fig. 1の左半分は励起光エネルギー  $h\nu=42$  eV、試料温度 11 K で測定した ARPES イメージプロットであり、色の濃い部分が表面ブリルアンゾーンの  $\bar{\Gamma}$ - $\bar{M}$  方向のバンド分散に対応している。 $\bar{\Gamma}$  点 ( $-1.8$  eV) と  $\bar{M}$  点 ( $-1.0$  eV) をバンドの底として比較的大きく分散する Ce 5d 由来のバンドと、ほとんど分散を示さない平坦な Ce 4f 由来のバンド ( $E_F$  直上,  $-0.25$  eV,  $-1.9$  eV) が観測された。

Fig. 1の右側は hcp 構造を仮定したバルクのバンド計算 (DFT + Yukawa potential) による  $\bar{\Gamma}$  $\bar{M}$  方向の分散である。本来は薄膜なのでスラブモデルを用いた計算が必要であるが、 $k_z$  方向に分散が弱い場合、経験的には比較的良く対応する結果を与える。実際、Ce 5d バンドのバンド幅やフェルミ波数については計算と実験結果が良く対応しており、 $E_F$  近傍の平坦な Ce 4f バンドについても定性的に対応していることが注目される。

Fig. 2(a)は Fig. 1の  $E_F$  付近を高分解能で測定したイメージプロットである。 $\bar{\Gamma}$  点を頂点として上に凸に分散しているバンドと  $E_F$  直上、波数  $k_{\parallel}=0.6 \text{ \AA}^{-1}$  付近に平坦に広がる Ce 4f バンドが c-f 混成バンドを形成している様子が明瞭に観測された。Fig. 2(a)の破線のように Ce 5d バンドのフィッティングを行い、実験を再現するような c-f 混成バンドを周期的アンダーソンモデルにもとづいて求めた (Fig. 2(a)実線)。得られた c-f 混成バンドのギャップの大

きさから、混成強度は70 meV と見積もられた。さらに波数  $k_{||} = 0.6 \text{ \AA}^{-1}$  で  $E_F$  直上にある Ce 4f スペクトル強度の温度依存性を調べた (Fig. 2(b))。EDC スペクトルは低温になるにつれてピーク強度が増大し、とりわけ80 K と100 K の間で急激に増強されていることが分かる。このことは c-f 混成バンド形成に関わる特性温度が  $T_0 \sim 80 \text{ K}$  であることを示唆している。

### 参考文献

- 1) F. Schiller *et al.*: Phys. Rev. B **68**, 233103 (2003).
- 2) O. Morimoto *et al.*: Surf. Sci. **603**, 2145 (2006).



### 小島耀平

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】

2014年広島大学理学研究科物理科学専攻卒業

2014年広島大学大学院理学研究科物理科学専攻入学

#### 【受賞のコメント】

この度は、JSR2016学生発表賞という名誉ある賞を頂き大変光栄に存じます。日頃からご指導いただきありがとうございます島田賢也教授、岩澤英明助教、Eike. F. Schwier 助教、ならびに本研究にご助力いただきました皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

## JSR2016学生発表賞 第2分野

受賞者：坂本祥哉 (発表番号 6E005)

題目：軟 X 線角度分解光電子分光による強磁性半導体  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  の電子構造の解明

講演者：坂本祥哉<sup>1</sup>、若林勇希<sup>2</sup>、竹田幸治<sup>3</sup>、藤森伸一<sup>3</sup>、鈴木博人<sup>1</sup>、伴芳祐<sup>2</sup>、山上浩志<sup>3,4</sup>、田中雅明<sup>2</sup>、大矢忍<sup>2</sup>、藤森淳<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>東大理、<sup>2</sup>東大工、<sup>3</sup>JAEA、<sup>4</sup>京産大理

### 1. 緒言

近年、半導体スピントロニクスという分野では、キャリアの持つ電荷の自由度に加え、スピンの自由度を利用することで、既存のエレクトロニクスにはない機能を持った新しいデバイスを作成することが目標とされている。その中でも磁性元素を希薄に導入した希薄磁性半導体は、(Ga, Mn)As, (In, Mn)As で強磁性が発見されたのを契機に盛んに研究されてきた。

本研究の研究対象である Fe をドーブした Ge(Ge:Fe) は p 型の強磁性半導体である。低温分子線エピタキシー法により Ge や Si 基板上に作成することが可能であり、既存の IV 族半導体をベースとしたエレクトロニクスとの整合性が良く、応用が期待される<sup>1,2)</sup>。

強磁性半導体において、その強磁性相互作用の起源は、価電子帯に存在する遍歴的なキャリアが相互作用を媒介するというモデルと、不純物準位間を動き回るキャリアが媒介するというモデルで説明される。本研究では、Ge:Fe の電子構造、特に、Fe の準位、フェルミエネルギーの位置を明らかにし、強磁性発現機構に関する知見を得ることを目的とし、角度分解光電子分光 (ARPES) を行った。入射光として軟 X 線を用いることでバルク敏感かつ元素選択的な情報を抽出することに成功した。

### 2. 実験

実験は SPring-8 の BL23SU で行った。測定した試料は Fe を 6.5% ドープしたものであり、キュリー温度は 100 K であった。試料は低温 MBE 法により作製され、その構造は Ge cap (2 nm)/Ge:Fe (130 nm)/Ge buffer (20 nm)/p-Ge(001) substrate である。試料表面の酸化物の影響を取り除くために、測定の前直前にフッ酸エッチングを行い、清浄表面を得た。測定は 20 K で行った。

### 3. 結果及び考察

得られた  $\Gamma$  点まわりの ARPES スペクトルを Fig. 1(a) に示す。母体のゲルマニウムに由来する light-hole (LH), heavy-hole (HH), split-off (SO) バンドが明瞭に観測され、結晶性が非常に良いことが確認された。またそれらは

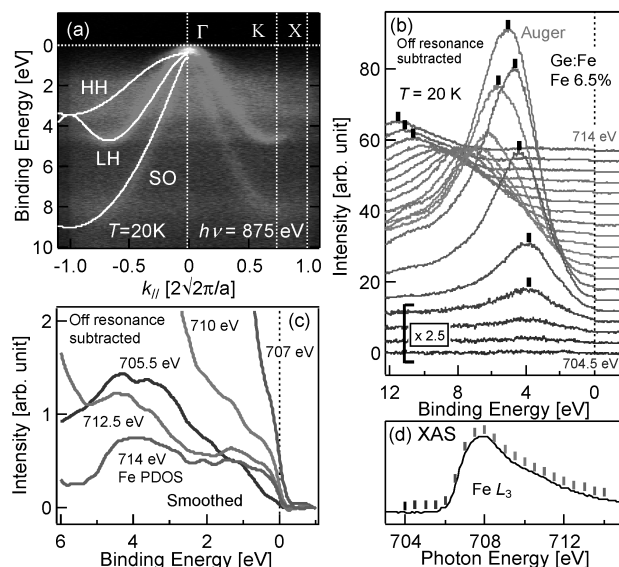


Fig. 1 (a)  $\Gamma$ -K-X ラインにおける ARPES スペクトル。実線は Ge に対する DFT 計算。(b), (c)  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x=0.065$ ) の Fe  $L_3$  端共鳴光電子分光スペクトルの入射光エネルギー依存性。(d) XAS スペクトル。



Wien2kを用いたDFT計算(mBJ-LDA法)によって得られたGe母体のバンド構造(実線)とよく一致しており、導入されたFeがGeのバンド構造をあまり変化させていないことがわかった。価電子帯の頂上(VBM)はフェルミエネルギー( $E_F$ )より0.35 eV下に位置しており、不純物バンドが伝導を担っていると考えられることから、不純物バンドのキャリアが強磁性相互作用を媒介している可能性を示唆している。

Fig. 1(d)にX線吸収スペクトル(XAS)を示す。XASには酸化物由来の構造(~710 eV)が見られず、表面酸化物がフッ酸エッチングにより効果的に取り除かれていることを示している。Fig. 1(b)にFeの $L_3$ 端をまたぐ704.5 eVから714 eVまで0.5 eV刻みで光のエネルギーを変えながら測定した光電子スペクトルを示す。スペクトルからは非共鳴条件化の704 eVで測定したものが差し引かれている。ここに $E_B=4$  eV付近から立ち上がり高束縛エネルギー側にシフトしていく(一定の運動エネルギーを持つ)強いAugerピークが観測され、Feの3d電子が遍歴的な性質を持っていることがわかった。XASが最大となるエネルギー707 eV付近では巨大なAugerピークがあるために共鳴増大したFeの構造が隠されているが、Fig. 1(c)に示した拡大図に見るように、714 eVで測定したスペクトルからはFeの部分状態密度(PDOS)を得ることができた。ここで4 eV付近の構造はサテライト構造だと考えると、FeのPDOSは $E_F$ から3 eV付近まで幅広く存在

していると考えられる。また $E_F$ 直上のスペクトル強度も共鳴的に増大していることから、Feが $E_F$ に状態を持つことがわかった。VBMが $E_F$ より0.35 eV下に位置していたことを考えると、これはキャリアの伝導が価電子バンドではなく、Fe由来の不純物準位を介しておこっており、強磁性が鉄の不純物準位間を動き回るキャリアによって担われていることを示唆している。

## 参考文献

- 1) Y. Shuto *et al.*: Appl. Phys. Lett. **90**, 132512 (2007).
- 2) Y. K. Wakabayashi *et al.*: Phys. Rev. B **90**, 205209 (2014).



### 坂本祥哉

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
博士課程1年

#### 【略歴】

2013年東京大学理学部物理学専攻卒業。  
2015年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程修了。

#### 【受賞のコメント】

この度はJSR2016学生発表賞に選出されましたことを大変うれしく、光栄に思います。日頃よりご指導いただいている藤森淳教授、試料をご提供いただいた田中雅明教授、大矢忍准教授、若林勇希氏、SPring-8での実験で多大なご助力を賜った竹田幸治氏、藤森伸一氏、および共同研究者の方々に心より感謝いたします。

## JSR2016学生発表賞 第3分野

受賞者：大坂泰斗(発表番号3D002)

題目：XFEL用分割・遅延光学系の開発—SACLAにおける性能評価—

講演者：大坂泰斗<sup>1</sup>, 平野嵩<sup>1</sup>, 犬伏雄一<sup>2</sup>,  
佐野泰久<sup>1</sup>, 松山智至<sup>1</sup>, 登野健介<sup>2</sup>,  
石川哲也<sup>3</sup>, 山内和人<sup>1</sup>, 矢橋牧名<sup>3</sup>

所属：<sup>1</sup>大阪大学大学院工学研究科, <sup>2</sup>JASRI, <sup>3</sup>理研放射光科学総合研究センター

### 1. はじめに

X線自由電子レーザー(X-ray Free-Electron Laser, XFEL)の登場<sup>1)</sup>によって、オングストロームの空間分解能と、フェムト秒の時間分解能とを兼ね備えた観測が可能となった。XFELの分割・遅延光学系の開発により、フェムト秒からナノ秒に至るX線励起ダイナミクスや、自発的な原子の揺らぎが直接的に測定可能となり、時間分解研究に新たな扉が開かれる。その為には、結晶素子によるBragg回折の利用が最も有効であり、いくつかの光学系が提案、開発されている<sup>2,3)</sup>。しかしながら、実用に供されているものは未だ存在しない。

我々は広い波長範囲、高い安定性、制御性を有する新た

な光学配置(Fig. 1)を考案した。これまで、本光学系に必要な光学素子として、無歪みの極薄ビーム分割素子<sup>4)</sup>とチャンネルカット結晶<sup>5)</sup>を開発し、SPring-8における実証実験<sup>6)</sup>を進めてきた。ここでは、光学系の解説と、SACLAにおいて行った性能評価実験に関して報告する。

### 2. 分割・遅延光学系の光学配置

開発した分割・遅延光学系の光学配置をFig. 1に示す。本光学系は光路長可変パスと固定パスとで構成されている。光路長可変パスには極薄結晶であるビーム分割素子と、厚い結晶であるビーム反射素子とをそれぞれ2つずつ配置しており、固定パスには2つのチャンネルカット結晶を用いた。チャンネルカット結晶を利用する事で、高い安

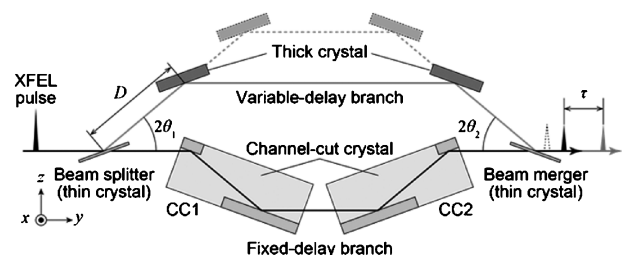


Fig. 1 分割・遅延光学系の光学配置。

定性、制御性を実現した。本光学系は Si(220)回折利用時、6.5–11.5 keV において利用可能であり、両遅延パスの独立性により XFEL の 2 色発振<sup>7)</sup>との併用も可能である。また、6.5 keV において最大 220 ps の遅延時間を 1 fs 以下の分解能によって生成可能である。Si(111)回折のバンド幅を有する入射光に対して、10 keV において約 50% の効率が期待される。

### 3. SACLA における性能評価実験と結果

SACLA BL3 において、10 keV の XFEL を用いて性能評価実験を行った。特に、Si(111)二結晶分光器による入射光の単色化と、極薄ビーム分割素子雰囲気を He パージすることにより、X 線照射による光学素子の性能劣化を抑制した。分割・遅延光学系の下流には、X 線ストリークカメラを配置し遅延時間精度を評価した。また、1  $\mu\text{m}$  集光光学系<sup>8)</sup>を利用した際の集光プロファイルの評価した。

各結晶素子の理想的なアライメントからのずれにより、初期位置においては遅延時間に約 5 ps の誤差が確認された。一方で、光路長変更時の遅延時間の線形性は非常に高く、近似直線の傾き誤差は約 1.4%，各点の誤差は標準偏差約 100 fs であった。これらの結果より、X 線ストリークカメラにより遅延時間の絶対値、線形性を測定する事で、全時間範囲に渡って不確かさ 100 fs の時間精度が達成可能である事を確認した。

測定した各分割ビームの集光プロファイルを Fig. 2 に示す。精密なアライメントにより、集光面において両分割ビームを空間的に重複させる事に成功した。また、光路長固定パスからのビームは理想集光が達成されたものの、可変パスからのビームの集光径は理想値から約 4 倍となった。これは極薄結晶に残留するわずかな格子面の歪みにより反射波の波面が乱れ、集光点が光軸方向に変位した（デフォーカス）為だと考えられる。

### 4. まとめと将来展望

開発した分割・遅延光学系の性能を SACLA において評価した。X 線ストリークカメラを利用することで、約 100 fs の遅延時間精度が達成される事を確認した。極薄結晶に残留した歪みにより両分割ビームの理想集光には至っていないが、極薄結晶加工プロセスの更なる高精度化により、近い将来達成可能だと期待される。

我々は厚い結晶のエッジ部による波面分割も平行して検討しており、両分割ビームに対してほぼ理想的な集光を既に達成している。これは世界で初めての硬 X 線領域にお

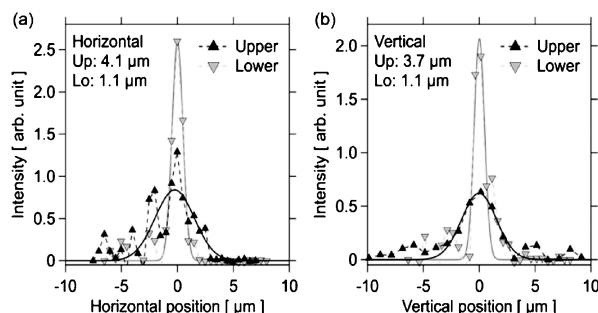


Fig. 2 分割ビームの集光プロファイル。(a) 水平、(b) 鉛直方向。上三角、下三角はそれぞれ光路長可変 (upper) パス、光路長固定 (lower) パスからの分割ビーム。実線はガウスフィット。

ける分割・遅延光学系の成功例であり、本格的な利用に向けて、光学系の更なる高度化、各種診断法、測定法の開発を進めている。

### 参考文献

- 1) T. Ishikawa *et al.*: Nat. Photon. **6**, 540 (2012).
- 2) W. Roseker *et al.*: J. Synchrotron Rad. **18**, 481 (2011).
- 3) Y. P. Stetsko *et al.*: Appl. Phys. Lett. **103**, 173508 (2013).
- 4) T. Osaka *et al.*: Opt. Express **21**, 2823 (2013).
- 5) T. Hirano *et al.*: submitted.
- 6) T. Osaka *et al.*: accepted for publication in Optics Express.
- 7) T. Hara *et al.*: Nat. Commun. **4**, 2919 (2013).
- 8) H. Yumoto *et al.*: Nat. Photon. **7**, 43 (2012).



#### 大坂泰斗

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 3 年  
【略歴】

2011年3月大阪大学工学部応用自然科学科卒業。2013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3月同専攻において博士号（工学）取得。2013年4月から2016年3月日本学術振興会特別研究員（DC1）。2016年4月より理研基礎科学特別研究員として播磨に就任予定。

#### 【受賞のコメント】

この度は、JSR16学生発表賞という名誉ある賞に選出頂き、大変光栄に思います。御指導頂いた山内和人教授、佐野泰久准教授、矢橋牧名博士、共に研究に取り組んでいる平野嵩氏、並びに御助言頂いた多くの方々に深く御礼申し上げます。厚い後ろ盾からも離れ、1人の研究者として人生の新たな一歩を踏み出すこの4月からも、本賞を励みに、より一層精進を重ねていく所存です。

## JSR2016学生発表賞 第3分野

受賞者：亀井 俊（発表番号 7Ab003）

題目：顕微赤外イメージングによるアミノ酸の光学異性化の観察

講演者：亀井俊<sup>1</sup>，横山裕子<sup>2</sup>，木村真一<sup>1,2</sup>所属：<sup>1</sup>阪大生命，<sup>2</sup>阪大理

## 1. はじめに

我々の体の重要な構成要素の一つであるタンパク質は、アミノ酸からできている。アミノ酸には一般にL体とD体という2種類の光学異性体が存在するが、生体内を構成しているアミノ酸はほぼ全てがL体である。しかし近年、老化とともに生体内でラセミ化反応が進んでD体のアミノ酸が増加することが明らかになってきた。現在ではこのDアミノ酸がタンパク質の高次構造を変化させ、白内障やアルツハイマーといった老化疾患の一因になると考えられている<sup>1)</sup>。このような老化による疾病の早期予防のため、Dアミノ酸の簡易な検出手法が求められている。

しかし、アミノ酸のL体とD体はほとんどの物理的・化学的性質が同じであるため、これらを分離して検出するには特殊な手法が必要である。例えば、現在のDアミノ酸検出は、タンパク質を生体から取り出してアミノ酸に分割した後、不斉を組み込んだ特殊なクロマトグラフィーを用いるなどで行われている<sup>1)</sup>。この手法は複雑であるほか、原理的に非破壊での検出が不可能であり、空間分布情報を得るのが難しいといった欠点がある。

以上のようにL体とD体を分離して検出することは難しいが、混合物の場合は別である。この混合物はラセミ体と呼ばれ、元素組成はL体やD体と同じだが、一部構造が異なり、Fig. 1のように赤外吸収スペクトルが異なることがわかっている。そこで、ラセミ体の特定の吸収ピークをプローブとして、L体に混ざったD体の存在比を間接的に推定できないかと考えた。本研究の目的は、このラセミ体の吸収ピークをプローブとした、Dアミノ酸の簡易で非破壊な検出法の開発である。

## 2. 実験

試料は、KBr基板上に事前にL体とD体に分割されたアラニン粉末を別々に蒸着して作成した。試料作製の手法については、神戸大学の中川等の手法を参考にした<sup>3)</sup>。Fig. 2(c)のようにL体とD体が一部が重なるように蒸着することで、L、D単体領域とそれらが重なった(L+D)領域をつくることができる。

測定は分子科学研究所 UVSOR-III BL6B 顕微赤外エンドステーションで行った。

## 3. 結果と考察

Fig. 2(a)はL体、D体それぞれの単体領域とラセミ体領域の吸収スペクトルを比較した図である。L、D単体領域

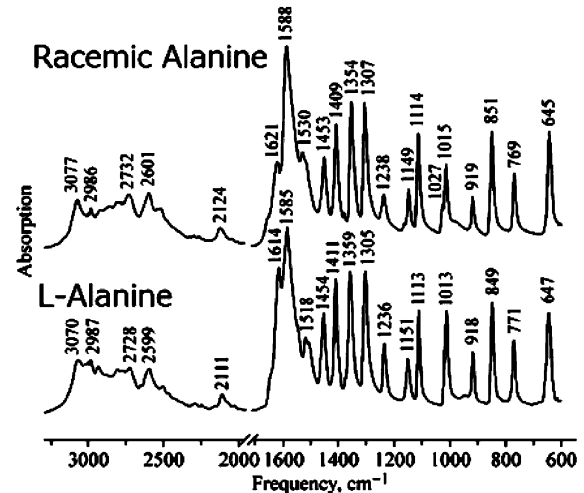


Fig. 1 アラニン薄膜のラセミ体とL体の赤外吸収スペクトルの違い<sup>2)</sup>。

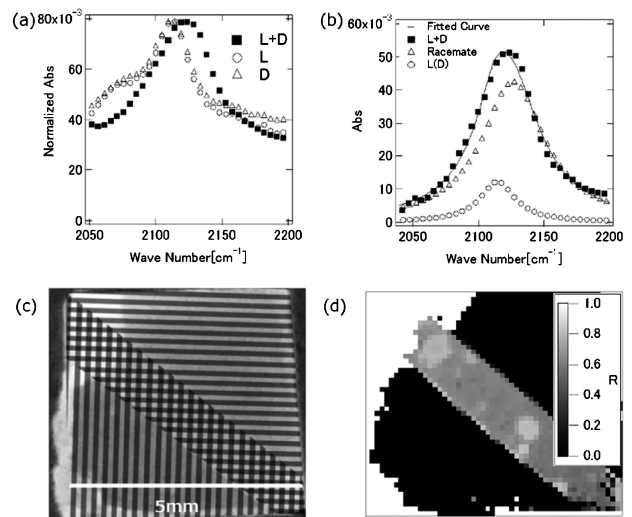


Fig. 2 (a)L、D-アラニン単体領域と両者を重ねた領域(L+D)の吸収スペクトル。(b)ラセミ体L+Dの吸収スペクトルの近似曲線。(c)Lアラニン(横線部)とDアラニン(縦線部)を蒸着した薄膜全体の可視像。(d)薄膜全体におけるラセミ体比Rのイメージング。

のピーク位置や形状はそれぞれ一致するが、単体領域とL+D領域でスペクトル形状に違いがあることがわかる。これはL+D領域では、L体蒸着膜とD体蒸着膜の境界面が、吸収スペクトルの異なるラセミ体になっているためと考えられる。実際、L+D領域のスペクトルはL体単体とラセミ体の吸収の重ね合わせでよく近似される(Fig. 2(b))。この近似に用いたL体単体とラセミ体の吸収ピーク面積比から、ラセミ体比(R)の推定が可能であると考え、アラニン薄膜全体についてRのイメージングを行ったのがFig. 2(d)である。測定間隔は縦横100 μmで約3000点の吸収スペクトルを測定し、フィッティングを行い、各点におけるRを導出した。図のようにL+D領域で大き

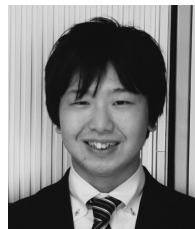
く値が変化しており、簡単に可視化が可能であることがわかった。UVSOR-III BL6B の高輝度な赤外放射光を用いると空間分解能を10倍の約 $10\ \mu\text{m}$  とすることが可能で、ラセミ体比 R のより微細な空間分布を知ることができることがわかった。

#### 4. まとめ

L 体と D 体のアラニン単体、およびそれらを積み重ねた領域を持つ薄膜の作製とその赤外吸収スペクトルの空間分布イメージングを行った。その結果、ラセミ領域の可視化およびその定量評価が可能であることを確認した。この結果は、生体内で発生する L アミノ酸中の D アミノ酸の空間分布と濃度が、赤外顕微イメージングという簡便な手法で間接的に検出可能であり、その高空間分解能での分布の計測に赤外放射光を用いると極めて有効であることがわかった。

#### 参考文献

- 1) Y. Kaji *et al.*: Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. **48**, 3923 (2007).
- 2) V. S. Minkov *et al.*: J. Struct. Chem. **51**, 1052 (2010).
- 3) M. Tanaka *et al.*: J. Synchrotron Rad. **8** 1009 (2001).



#### 亀井 俊

大阪大学大学院生命機能研究科生命機能専攻 5 年一貫博士課程 1 年

#### 【略歴】

2015 年大阪大学理学部物理学学科卒業。  
2015 年 4 月より大阪大学大学院生命機能研究科生命機能専攻所属。

#### 【受賞のコメント】

この度は大変名誉ある賞に選出して頂き、ありがとうございます。これもひとえに、日々ご指導頂いている木村教授、渡辺純二准教授、大坪助教、渡邊浩助教および試料作製にご協力いただいた神戸大学中川教授、また研究室のメンバーのお陰です。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

### JSR2016 学生発表賞 第 3 分野

受賞者：鈴木明大（発表番号：4D003）

題目：暗視野 X 線タイコグラフィによる弱位相物体の高分解能イメージング

講演者：鈴木明大<sup>1,2</sup>、下村啓<sup>1,2</sup>、広瀬真<sup>1,2</sup>、Nicolas Burdet<sup>2</sup>、高橋幸生<sup>1,2</sup>

所属：<sup>1</sup>大阪大学大学院工学研究科、<sup>2</sup>理研放射光センター

#### 1. はじめに

X 線タイコグラフィでは、試料をステップ走査させながら取得した複数の回折パターンに位相回復計算を実行することで、試料に対する X 線の複素屈折率を反映した試料像を再構成する<sup>1)</sup>。走査型のイメージング手法であるため広い観察視野を獲得でき、また、結像光学素子を用いないために収差に煩わされない高空間分解能観察が可能という特長をもつ。X 線タイコグラフィにおいて高位相感度測定を実現するためには、試料由来の微弱な回折パターンを広い強度ダイナミックレンジで取得する必要がある。しかしながら、実験的に取得可能な回折パターンの強度ダイナミックレンジは、検出器の性能や入射 X 線のコヒーレントフラックスによって制限されてしまう。そこで我々は、高空間分解能・高位相感度観察に必要な回折パターンの強度ダイナミックレンジを圧縮する手法として、試料の上流に配置した円柱構造体からの散乱 X 線を参照波としたインラインホログラムを取得することで、ビームストップによる低空間周波数領域のデータ欠損を補完する“暗視野 X 線タイコグラフィ”を提案し、計算機シミュレーションによってその有効性を確認した<sup>2)</sup>。本稿では、SPring-8 BL29XUL において実施した暗視野 X 線タイコグラフィ

の実証実験に関して報告する。

#### 2. X 線回折パターン取得実験

Fig. 1 に暗視野 X 線タイコグラフィの模式図を示した。6.5 keV に単色化された X 線は KB ミラーによってスポットサイズ 550 nm に集光され、焦点位置の 780  $\mu\text{m}$  上流に配置された円柱構造体に入射する。円柱構造体からの散乱 X 線が参照波として機能することで、KB ミラーの焦点位置に置かれた試料からのインラインホログラムを取得できる。材質 Ta、直径 100 nm、高さ 500 nm の円柱構造体は電子線リソグラフィ技術で作製した。試料には厚さ 30 nm の Ta ジーメンススターテストチャートを用いた。試料の 1.2 m 下流に直接撮像型 CCD 検出器を配置して、間隔 300

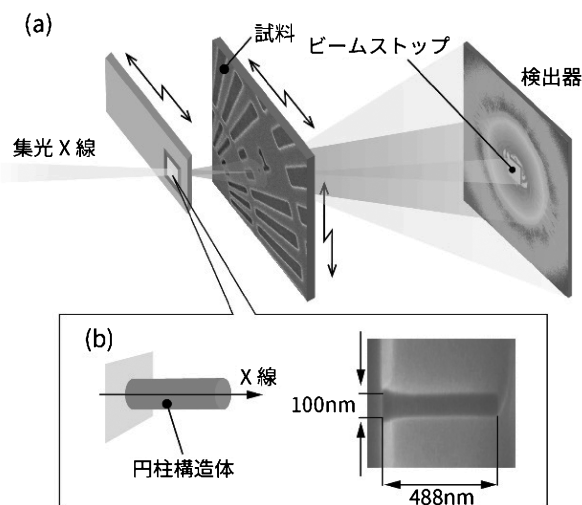


Fig. 1 (a)暗視野 X 線タイコグラフィの実験系模式図。(b)円柱構造体の模式図と断面 SEM 像。

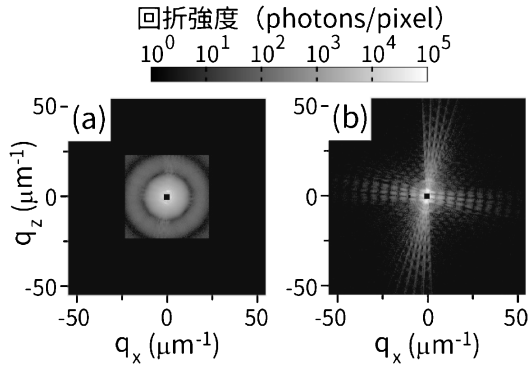


Fig. 2 (a)円柱構造体があるとき、(b)円柱構造体がないときの回折パターン。

nm で試料を  $7 \times 7$  点ステップ走査し、49枚の回折パターンを円柱構造体がある場合とない場合でそれぞれ取得した。取得した回折パターンを Fig. 2 に示す。ダイレクトビームを遮蔽するための大きさ  $800 \times 800 \mu\text{m}^2$  のビームストップを検出器直前に配置しているため、 $1.7 \mu\text{m}^{-1}$  以下の空間周波数領域の回折パターンが欠損している。円柱構造体がある場合の最大空間周波数は  $23 \mu\text{m}^{-1}$ 、円柱構造体がない場合の最大空間周波数は  $55 \mu\text{m}^{-1}$  であり、これらを再構成像のピクセルサイズに換算すると  $22 \text{ nm}$ 、 $9.1 \text{ nm}$  となる。

### 3. 位相回復計算による試料像の再構成

位相回復計算において円柱構造体がある場合とない場合の回折パターンデータセットを交互に逆空間拘束とすることで、円柱構造体がある場合ではインラインホログラムによって試料の大きい構造の再構成を担い、高空間周波数領域まで優れた信号対雑音比で取得できている円柱構造体がない場合では試料の微細構造の再構成を担う、というように2つの回折パターンデータセットを相補的に活用した。また、円柱構造体や試料の位置不安定性、ならびに空間的・時間的コヒーレンスの不完全さによる再構成像への悪影響を解析的に取り除くことを目的として混合状態解析<sup>3)</sup>を取り入れた。円柱構造体がある場合は6モード、円柱構造体がない場合は3モードの入射波動場関数を導入して解析を行った。

比較のために、“円柱構造体ありの回折パターンデータセットのみ”、“円柱構造体なしの回折パターンデータセットのみ”、“2つの回折パターンデータセットの相補的利用”の3通りで位相回復計算を行った。それぞれの再構成像の特徴を Table 1 にまとめる。空間分解能はエッジ構造の

Table 1 3つの条件における再構成像の空間分解能および位相感度。

|         | 長周期の<br>アーティファクト | 空間分解能<br>(nm) | 位相感度<br>(rad) |
|---------|------------------|---------------|---------------|
| 円柱構造体あり | ○                | 33.7          | —             |
| 円柱構造体なし | ×                | 13.7          | 0.0125        |
| 相補的利用   | ○                | 11.7          | 0.0079        |

断面プロファイルから、位相感度は再構成像の位相ヒストグラムからそれぞれ導出した。円柱構造体ありの回折パターンデータセットのみから再構成された試料像では、空間分解能は  $33.7 \text{ nm}$  と劣っているがインラインホログラムによって低空間周波数成分に相当する試料の大きい構造情報を取得しているため、長周期のアーティファクトは見られなかった。また、円柱構造体なしの回折パターンデータセットのみから再構成された試料像では、空間分解能は  $13.7 \text{ nm}$  と優れた値を示しているが、ビームストップによるデータ欠損の影響で長周期のアーティファクトが現れていた。一方、2つの回折パターンデータセットを相補的に利用した再構成像では両者の特長が両立し、空間分解能  $11.7 \text{ nm}$ 、位相感度  $0.0079 \text{ rad}$  を達成した。

### 参考文献

- 1) J. M. Rodenburg *et al.*: Phys. Rev. Lett. **98**, 034801 (2007).
- 2) A. Suzuki and Y. Takahashi: Opt. Express **23**, 16429 (2015).
- 3) P. Thibault and A. Menzel: Nature **494**, 68 (2013).



#### 鈴木明大

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 3年

#### 【略歴】

2011年3月大阪大学工学部応用自然科学科卒業。2013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。2013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)。

別研究員 (DC1)。

#### 【受賞のコメント】

JSR2016学生発表賞に選出して頂き、たいへん光栄に思っております。研究をご指導頂いた高橋幸生准教授、ならびに山内和人教授に心から感謝を申し上げます。また、放射光実験に共に取り組んだ理研放射光センターの Nicolas Burdet 研究員、阪大の下村啓氏、広瀬真氏にも深く感謝を申し上げます。今回の受賞を励みにして、新年度からも研究に一意専心致します。