

# 第24回日本放射光学会年会・ 放射光科学合同シンポジウム(JSR11)学生発表賞審査結果について

第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR11)  
組織委員長 木村 滋 (財団法人高輝度光科学研究センター)

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)学生発表賞は、将来性・独創性のある優秀な発表を行った学生を顕彰して賞状を贈呈するものです。一昨年から、「日本放射光学会学生会員」だけが対象であったものを、年会・合同シンポの精神に則り、「すべての学生による発表」を対象として選考をしています。また、選考方法も、年会・合同シンポ全参加者による投票から、審査員による審査に変更されました。今回の第24回年会・合同シンポ(JSR11)でも、組織委員長、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、1発表当たり4名の方に審査していただくため、専門分野別に計63名の方々に審査をお願いしました。なお、各審査員には1人当たり8~9件程度の審査をして頂きました。

JSR11では、学生発表賞対象が計124件あり、前回のJSR10より28件増えました。その分野別内訳を以下に示します。

第1分野(X線領域の回折・散乱・分光など):口頭発表6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19件,ポスター発表40件

第3分野(第1分野・第2分野以外の加速器装置・イメージング・生物など):口頭発表3件,ポスター発表34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結果を踏まえ、以下の8名(第1分野:2名,第2分野:3名,第3分野:3名)の方に学生発表賞を授与することを決定しました。受賞者の皆様が、この受賞を契機に、今後も放射光の分野で益々ご活躍されることを期待しております。

## 第1分野

- ・仲 旭, 東大院新領域, 「液晶-コロイド分散系の構造およびダイナミクスの測定」
- ・平池佑介, 東大院工, 「多分岐高分子を原料とする固体高分子形燃料電池正極用カーボンアロイ触媒の炭素構造形成過程の観測」

## 第2分野

- ・出田真一郎, 東大院理, 「角度分解光電子分光による  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$  (TM=Ni, Cu) のフェルミ面観測」
- ・田邊健彦, 東工大院理工, 「量子もつれ H(2p) 原子対の特異な崩壊過程」
- ・新井邦明, 東大物性研, 「ミクロンサイズ磁気円盤配列における磁気ダイナミクスの時間分解光電子顕微鏡観測」

## 第3分野

- ・谷川貴紀, 総研大, 「UVSOR-IIにおける飽和領域でのコヒーレント高調波の観測」
- ・木村隆志, 阪大院工, 「二次元硬 X 線 Sub-10 nm 集光システムの構築」
- ・浦山拓郎, 兵庫県立大, 「EUV 干渉露光によるレジストパタン形成」

なお、次ページ以降に各受賞者の紹介と受賞コメント、および、受賞研究の要旨が掲載されますので、是非ご覧下さい。最後になりましたが、学生発表賞審査に関して多大なご協力頂いた審査員の皆様に感謝いたします。

## JSR11 学生発表賞 第 1 分野

受賞者：仲 旭 (発表番号 9P110)

題目：液晶-コロイド分散系の構造およびダイナミクスの測定

講演者：仲 旭<sup>1</sup>, 井上伊知郎<sup>2</sup>, 篠原佑也<sup>1,2</sup>, 雨宮慶幸<sup>1,2</sup>

所属：<sup>1</sup>東大新領域, <sup>2</sup>東大物工

### 1. Introduction

Self-assembled anisotropic structures<sup>1,2)</sup> can be formed when particles are dispersed into nematic liquid crystal (NLC). Investigation is necessary especially focusing on structures and dynamics of these composites in order to fabricate new anisotropic composites.

In this study, small angle x-ray scattering (SAXS) and x-ray photon correlation spectroscopy (XPCS) were used to study structure and dynamics of nanoparticles dispersed in NLC respectively. Scanning micro-beam wide angle x-ray scattering (micro-beam WAXS) was used to investigate the orientation change of NLC molecules after being dispersed with nanoparticles.

### 2. Experiment

Silica nanoparticles ( $d \approx 100$  nm) were coated with Tween 60 and then dispersed into 5CB (NLC). The volume fractions of silica  $\phi$  were from 0.1% to 10.0%.

SAXS was performed at SPring-8 BL03XU. Micro-beam WAXS was performed at Photon Factory BL-4A. XPCS was performed at SPring-8 BL40XU with the diameter of partially coherent x-ray beam  $5 \mu\text{m}^3$ .

### 3. Results and Discussion

SAXS result shows that the average interparticle distance is 100.3 nm. Micro-beam WAXS shows that 5CB molecules become less oriented with increasing  $\phi$ .

XPCS data are analyzed with normalized intensity autocorrelation function  $g_2(q, t)$ . In this study,  $g_2(q, t)$  can be fitted by an exponential equation

$$g_2(q, t) = 1 + \beta \exp \left[ -2 \left( \frac{t}{\tau} \right)^\alpha \right] \quad (1)$$

where  $\beta$  is contrast,  $\tau$  is relaxation time and  $\alpha$  is exponent. Fig. 1(a) shows  $g_2(q, t)$  for 0.5% sample measured at 29°C. Experimental data can be well fitted by Eq. 1 as the lines show. Fig. 1(b) shows dependence of exponent  $\alpha$  on  $q$ . For

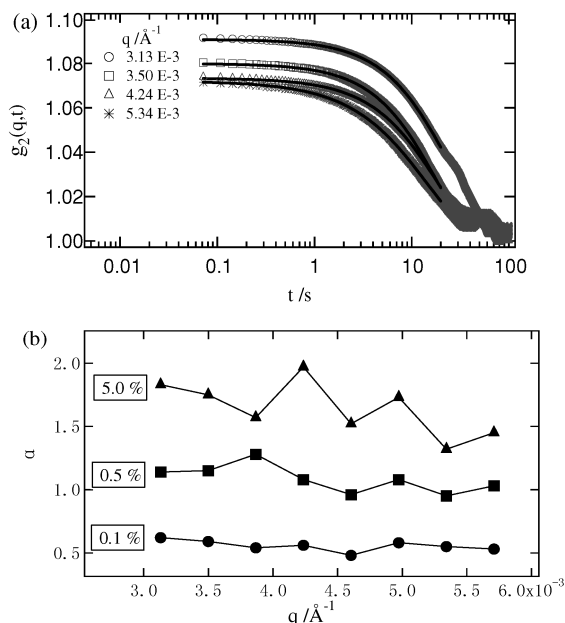


Fig. 1 (a) Dependence of  $g_2(q, t)$  on correlation time  $t$  for 0.5% sample at 29°C (Lines: fitted data). (b) Dependence of exponent  $\alpha$  on  $q$ .

0.1% sample,  $\alpha$  is less than unity, indicating a stretched exponential behavior. For 0.5% sample,  $\alpha$  is around unity, indicating a diffusive behavior. For 5.0% sample,  $\alpha$  is larger than unity, indicating a compressed exponential behavior. These behaviors may originate from the formation of nanoparticle aggregation and generation of microstress among nanoparticles and 5CB molecules.

### References

- 1) P. Poulin *et al.*: Science **275**, 1770 (1997).
- 2) I. Musevic *et al.*: Science **313**, 954 (2006).
- 3) Y. Shinohara *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 13, L300 (2007).



#### Xu Zhong

Graduate School of Frontier Sciences,  
the University of Tokyo  
E-mail: xu@x-ray.k.u-tokyo.ac.jp

#### 【略歴】

2009, B. Eng. in materials science and engineering, Tsinghua university (PRC)  
2009-present, M. A. Sc at Univ. Tokyo

#### 【受賞のコメント】

It's very surprising and exciting to get awarded, and I really appreciate the guidance from my advisor as well as all the members of my lab. And I'm also grateful to beam line scientists for their help with the experiments.

## JSR11 学生発表賞 第1分野

受賞者：平池佑介（発表番号 9P124）

題目：多分岐高分子を原料とする固体高分子形燃料電池正極用カーボンアロイ触媒の炭素構造形成過程の観測

講演者：平池佑介<sup>1</sup>，齋藤 信<sup>1</sup>，丹羽秀治<sup>1</sup>，小林正起<sup>1,2</sup>，原田慈久<sup>1,2</sup>，尾嶋正治<sup>1,2</sup>，金在弘<sup>3</sup>，松林克征<sup>3</sup>，守屋彰悟<sup>3</sup>，難波江裕太<sup>3</sup>，黒木重樹<sup>3</sup>，柿本雅明<sup>3</sup>，池田隆司<sup>4</sup>，寺倉清之<sup>5</sup>，尾崎純一<sup>3,6</sup>，宮田清藏<sup>3,7</sup>所属：<sup>1</sup>東大院工，<sup>2</sup>東大放射光機構，<sup>3</sup>東工大院理工，<sup>4</sup>原子力機構，<sup>5</sup>北陸先端大，<sup>6</sup>群大院工，<sup>7</sup>NEDO

## 1. 緒言

固体高分子形燃料電池（PEFC）は、低温動作、スタック構造による小型化が可能であることから、電気自動車などへの実用化が進みつつある。PEFCのカソード触媒には高価で希少である白金が用いられているが、本格的な普及の為には白金代替触媒の開発が急務である。そこで、炭素骨格を窒素などのヘテロ元素で修飾して、酸素還元反応（ORR）活性を向上させたカーボンアロイ触媒（CAC）が近年注目を集めている<sup>1-4</sup>。これまでに、金属フタロシアニン（MPc）等の遷移金属錯体とフェノール樹脂等の高分子を混合し焼成することで高活性なCACが得られてお

り、グラファイト置換型窒素がORR活性に寄与していることが示唆されている<sup>1,2</sup>。これらの触媒は、MPcが熱分解する600°C付近で最高活性を示すが、昇温と共にグラファイト化が進行し、窒素の脱離を伴って活性が低下する<sup>3</sup>。一方で、この最高活性触媒は耐久性に乏しく、活性を付与した炭素構造を安定化させるためには高温での熱処理が望ましい<sup>4</sup>。そこで本研究では、活性に寄与する窒素の脱離を防ぎつつ高温でグラファイト化を進行させるために、新規前駆体であるハイパーブランチ型鉄フタロシアニン（HB-FePc）に着目した。HB-FePcはFePc環がリンカーで連結された構造を有しており、FePcとフェノール樹脂の混合物と比較して、窒素を固定化し易いと考えられる<sup>5</sup>。これを原料としてCACを合成し、前駆体の熱分解の様子とORR活性の関係を調べることを目的とした。

## 2. 実験

本研究での前駆体は、リンカーに特定の構造（ビフェニル：Bp）を用いている。Fe含有量が約3 wt.%に調整されたHB-FePc-Bpを窒素ガスフローにおいて550~900°Cで熱焼成することによりCACを調製した。これらを熱処理温度により、HB550などと表記する。まず回転リングディスクボルタノメトリー（RRDE）測定により電気化学特性を調べた。

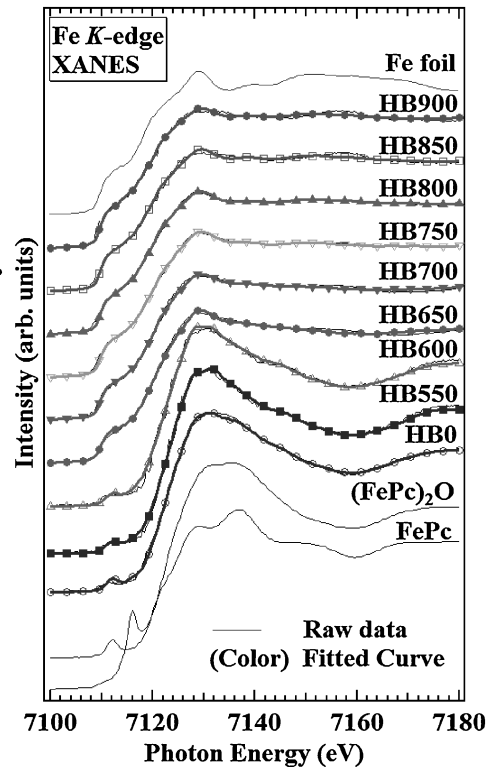
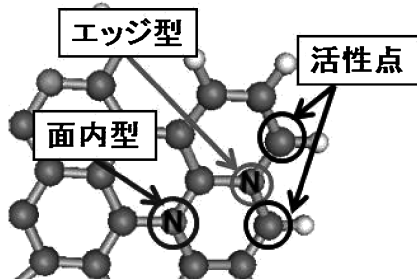
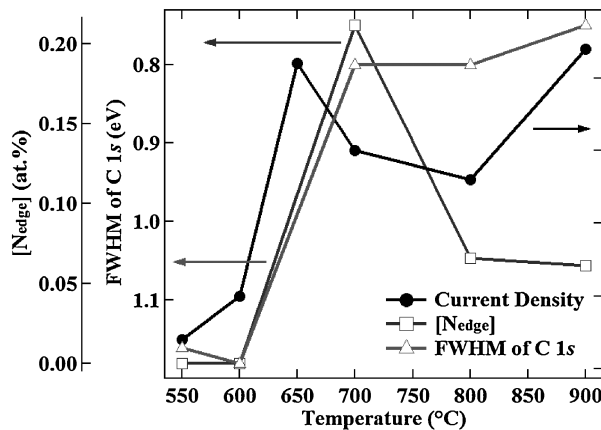


Fig. 1 (左上) HB系CACにおける電流密度，エッジ型窒素濃度（ $[N_{edge}]$ ），C 1s HXPES スペクトルの半値幅の関係。

Fig. 2 (右) Fe K-edge XANES スペクトルとそのフィッティング結果。

Fig. 3 (左下) グラファイト置換型窒素におけるエッジ型・面内型と活性点の模式図。

硬 X 光電子分光 (HXPES) 測定を, SPring-8 BL47XU において行った。検出深さは 30 nm 程度であり, 本研究では主に軽元素の化学状態分析に用いている。また鉄の化学状態分析として, X 線吸収微細構造 (XAFS) 測定を SPring-8 BL14B2 において行った。測定手法は蛍光法であり, 得られた X 線吸収端近傍構造 (XANES) スペクトルから詳細な電子状態を評価した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に示す RRDE 測定の結果 (0.5 V vs. RHE における電流密度) から, 650°C 以上の熱焼成試料は高い触媒活性を示すことが分かった。特に, 従来のフェノール樹脂を用いた系では低活性であった 900°C で最高活性が得られるという, 興味深い知見が得られた。これらの Fe K-edge XANES スペクトルとそのピーク分離結果を Fig. 2 に示す。フィッティング結果から, 600°C 以上で前駆体の分解が始まると同時に活性が発現していること, 900°C 付近では前駆体構造 (Fe-N<sub>4</sub> 構造) はほぼ分解していることが分かった。なお, 前駆体の大部分は (FePc)<sub>2</sub>O として酸化状態にあるということも示された<sup>6)</sup>。

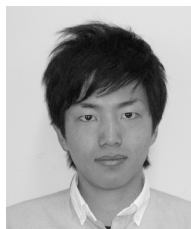
次に, N 1s HXPES スペクトルのピーク分離を行った。これまでに, グラファイトのジグザグエッジの特定の部位にドーパされた窒素が炭素構造に ORR 活性を付与することが第一原理計算により予測されている (Fig. 3)<sup>2)</sup>。そこで, エッジ, 面内に存在するグラファイト置換型窒素の結合エネルギー差が 1.0 eV であるという第一原理計算をもとに<sup>7)</sup>, 両者のピーク分離を行った。エッジの濃度 (at.%) および C 1s HXPES スペクトルの半値幅の, 焼成温度による変化を Fig. 1 に示す。図から, 900°C で最高活性が得られたのは, 窒素が徐々に脱離していくものの, 高温におけるグラファイト化の進行によって導電性が向上し, ORR 活性が促進されるためであることが示唆される。今後, この触媒が実用化に耐えうる安定性を持っているか, さらなる研究を行っていく予定である。

### 謝辞

本研究は, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて行ったものである。また, HXPES 測定は JASRI/SPring-8 の池永英司博士, XAFS 測定は JASRI/SPring-8 の大淵博宣博士にそれぞれ技術的サポートをしていただいた。この場を借りて感謝いたします。

### 参考文献

- 1) H. Niwa *et al.*: J. Power Sources **196**, 1006 (2011).
- 2) T. Ikeda *et al.*: J. Phys. Chem. C **112**, 14706 (2008).
- 3) Y. Nabaie *et al.*: Carbon **48**, 2613 (2010).
- 4) L. Wu *et al.*: Chem. Commun. **46**, 6377 (2010).
- 5) M. Kakimoto *et al.*: Chem. Lett. **35**, 1306 (2006).
- 6) H. J. Choi *et al.*: J. Electroanal. Chem. **508**, 105 (2001).
- 7) J. Casanovas *et al.*: J. Am. Chem. Soc. **118**, 8075 (1996).



#### 平池 佑介

東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 修士課程 1 年

#### 【略歴】

2010年3月, 東京大学工学部応用化学科卒業。2010年4月, 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻修士課程進学。

2011年3月現在, 同大学院修士課程1年在籍中。固体高分子形燃料電池用カー

ボンアロイ触媒について, 主に電気化学と分光分析化学の両面から研究している。

#### 【受賞のコメント】

浅学非才の私が本賞の名誉にあずかりましたことは大変驚きであると共に, 感激もひとしおです。これもひとえに尾嶋正治教授, 原田慈久特任准教授, 難波江裕太助教をはじめとする, 常日頃お世話になっている方々のご指導のおかげです。この場を借りて感謝の意を表したいと思います。本賞を励みに, 今後も信念と情熱を持って研究に取り組んでいく所存です。



## JSR11 学生発表賞 第2分野

受賞者：出田真一郎（発表番号 1B003）

題目：角度分解光電子分光による Ba(Fe<sub>1-x</sub>TM<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (TM=Ni, Cu) のフェルミ面観測講演者：出田真一郎<sup>1</sup>, 吉田鉄平<sup>1,4</sup>, 西 一郎<sup>1</sup>, 藤森淳<sup>1,4</sup>, 中島正道<sup>1,4,6</sup>, 内田慎一<sup>1,4</sup>, 有田亮太郎<sup>3,4</sup>, 小谷佳範<sup>2</sup>, 久保田正人<sup>2</sup>, 小野寛太<sup>2</sup>, 中島裕司<sup>5</sup>, 松尾明寛<sup>5</sup>, 笹川崇男<sup>5</sup>, 木方邦宏<sup>4,6</sup>, 富岡泰秀<sup>4,6</sup>, 李哲虎<sup>4,6</sup>, 伊豫彰<sup>4,6</sup>, 永崎 洋<sup>4,6</sup>, 伊藤利光<sup>4,6</sup>所属：<sup>1</sup>東大理, <sup>2</sup>高工研, <sup>3</sup>東大工, <sup>4</sup>JST-TRIP,<sup>5</sup>東工大応セラ研, <sup>6</sup>産総研

## 1. はじめに

鉄系高温超伝導体の母物質 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> の Fe サイトを Ni, Cu 置換により電子ドーブした Ba(Fe<sub>1-x</sub>TM<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (TM=Ba122, TM=Ni, Cu) は, それぞれ  $x \sim 0.05$  で, 超伝導転移温度  $T_c \sim 18$  K (Ni-Ba122),  $x = 0.044$  で  $T_c \sim 2$  K (Cu-Ba122) を示す<sup>1)</sup>。電子ドーブ型である, Ba(Fe<sub>1-x</sub>TM<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (TM=Co, Ni, Cu) において置換量  $x$  が同じ場合, Ni, Cu 置換で実際にドーブされる電子量は Co に比べて, それぞれ 2 倍, 3 倍になると予想される。角度分解光電子分光 (ARPES) を用いた先行研究では, Co-Ba122 でフェルミ面の 3 次元形状が調べられ<sup>2,3)</sup>, 化学ポテンシャルの変化がリジッドバンド的であることが報告されている<sup>3)</sup>。一方, Density Functional Theory (DFT) による計算では, Fe サイトを不純物 (Co, Ni, Cu) で置換すると, 増加した電子が不純物サイトに局在することが指摘されている<sup>4)</sup>。このように Co, Ni, Cu などの不純物置換が電子ドーブ量及び電子構造に及ぼす影響はまだ明らかではない。

我々は, 電子ドーブ型鉄系高温超伝導体 Ba(Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> ( $x = 0.0375, 0.05, 0.08$ ) 及び Ba(Fe<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> ( $x = 0.06, 0.08$ ) の ARPES を行い, フェルミ面の  $k_z$  方向の形状変化を調べ, フェルミ面の体積からキャリア数を見積もった。

## 2. 結果

Fig. 1(a, b) に  $T = 10$  K で観測した Ba(Fe<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> ( $x = 0.06, 0.08$ ) における, 励起光エネルギー依存性から観測された電子フェルミ面の ARPES スペクトルを示す。Cu-Ba122 で X 点周りの電子フェルミ面が 3 次元的な形状をもつことが観測された。フェルミ面の体積から電子キャリア数を見積ると, Cu-Ba122 では 2 つの組成でほとんど変化していないことがわかった。Ni-Ba122 も同様に, それぞれの組成でホールフェルミ面及び電子フェルミ面の体積よりホールキャリア ( $n_h$ ) 及び電子キャリア数 ( $n_{el}$ ) を見積り, その結果を Fig. 1(c) に示す。

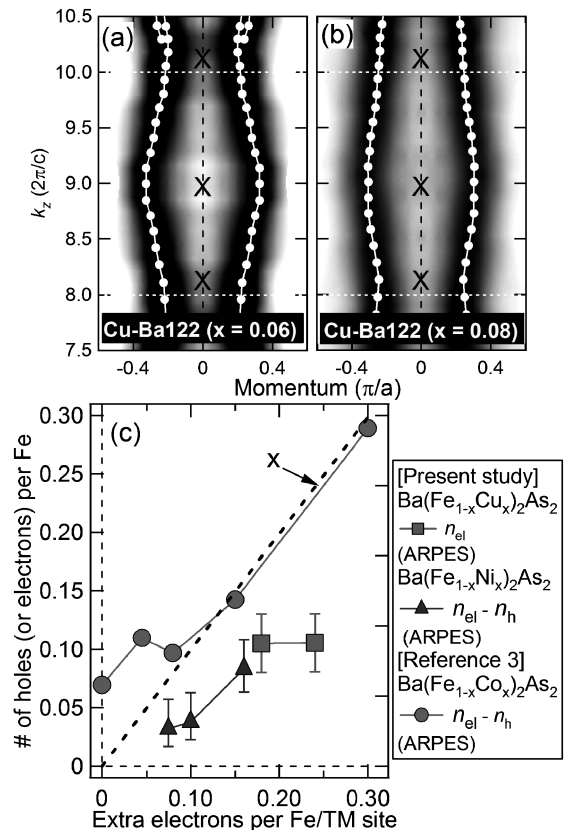


Fig. 1 Ba(Fe<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> の ARPES スペクトルと Co, Ni, Cu-Ba122 のキャリア数の比較。(a, b)  $x = 0.06, 0.08$  での電子フェルミ面の  $k_z$  方向における形状変化。(c) 電荷中和とキャリア数の関係。 $n_{el}$  及び  $n_h$  はそれぞれ電子キャリア, ホールキャリア数を示す。

## 3. 考察

TM=Co, Ni, Cu での電荷中和とフェルミ面の体積から見積もられた  $n_{el} - n_h$  を比較すると, Co-Ba122 では, 最適ドーブから過剰ドーブ領域にかけて電荷中和の直線  $x$  に沿い, リジッドバンド的なキャリア数の増加を示す。一方, Ni, Cu 置換では  $n_{el} - n_h$  は電荷中和からのずれが大きくなる。Ni-, Cu-Ba122 で電荷中和を満たさない理由として, ドーブされた電子キャリアが不純物サイトに局在することが考えられる<sup>4)</sup>。実際, Ni や Cu を Fe サイトに置換することで形成される不純物準位を, 角度積分光電子分光で調べると, フェルミ準位付近にある Fe3d の準位より高い結合エネルギーに Ni, Cu は 3d 軌道の状態密度をもつことがわり, 不純物のポテンシャルが強くなるにつれて, Fe3d の状態密度に電子が供給されにくくなることを示唆すると考えられる。

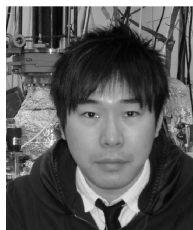
## 謝辞

本研究は, 吉田鉄平助教, 西 一郎氏, 藤森淳教授, 中島正道氏, 内田慎一教授 (東大理), 小谷佳範博士, 久保田正人博士, 小野寛太准教授 (高工研), 中島裕司氏, 松尾明寛氏, 笹川崇男准教授 (東工大応セラ研), 木方邦宏

博士，富岡泰秀博士，李哲虎博士，伊豫彰博士，永崎洋博士，伊藤利充博士（産総研），有田亮太郎准教授（東大工）との共同研究により行われました。この場をお借りして，御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) N. Ni *et al.*: PRB **82**, 024519 (2010).
- 2) W. Malaeb *et al.*: JPSJ **78**, 123706 (2009).
- 3) V. Brouet *et al.*: PRB **80**, 165115 (2009).
- 4) H. Wadati, *et al.*: PRL **105**, 157004 (2010).



### 出田真一郎

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
博士課程 2年

E-mail: ideta@wyvern.phys.s.u-tokyo.ac.jp

### 【略歴】

2009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。現在，同大学院博士課程在学。日本学術振興会特別研究員。

### 【受賞のコメント】

この度，学生会員発表賞を受賞することができ，大変うれしく光栄に思っております。私の研究を評価して下さいました方々に感謝すると共に，日頃からご指導して下さいました先生方や共同研究者の方々にお礼申し上げます。この受賞を励みに，今後も更に研究に精進していきたいと思っております。ありがとうございました。

## JSR11 学生発表賞 第2分野

受賞者：田邊健彦（発表番号 2B002）

題目：量子もつれ H(2p) 原子対の特異な崩壊過程

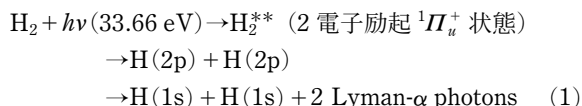
講演者：○田邊健彦<sup>1</sup>，小田切丈<sup>1</sup>，穂坂綱一<sup>1</sup>，  
中野元善<sup>1</sup>，熊谷嘉晃<sup>1</sup>，鈴木 功<sup>2,3</sup>，北島昌史<sup>1</sup>，  
河内宣之<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>東工大大院理工，<sup>2</sup>産総研，<sup>3</sup>高エネ機構物構研

### 【序論】

「量子もつれ状態」とは，注目する系の波動関数が，それを構成する部分系の積では記述できない状態である。量子もつれ状態は，古典論には現れない不思議な状態であり，我々の直感と鋭く対立する量子力学の非日常性を端的に示す状態である。また，量子もつれ状態にある光子や原子・イオンのペアは，量子コンピューターなどの量子情報技術において本質的な役割を果たすため，応用の観点からも注目されている。さて，我々は近年，化学の立場から量子もつれに着目したユニークな研究に取り組んでいる。具体的には「水素分子の光解離により生成する水素原子対の量子もつれ」に着目する。

我々は最近，以下の水素分子の光解離過程<sup>1)</sup>における Lyman- $\alpha$  光子対の角度相関関数を測定した<sup>2)</sup>。



その結果を，本グループによる Lyman- $\alpha$  光子対の角度相関関数の理論予測<sup>3)</sup>と比較することで，(i)過程(1)の H(2p) 原子対が以下の(2)式で記述される量子もつれ状態にあること，(ii)H(2p) 原子対の量子もつれが H<sub>2</sub> 分子との反応により変化し，さらにその量子もつれが変化する反応の断面積が 10<sup>-13</sup>–10<sup>-12</sup> cm<sup>2</sup> にも達すること，の2点を見出した<sup>2)</sup>。この断面積の値は，単独の H(2p) 原子や H

(2s) 原子と H<sub>2</sub> 分子の反応の断面積の約100倍にも達する。

$$\begin{aligned} |{}^1\Pi_u^+\rangle &= \frac{1}{2\sqrt{2}} (|2p_a^1(1)2p_b^0(2)\rangle + |2p_a^1(2)2p_b^0(1)\rangle \\ &\quad - |2p_a^0(1)2p_b^1(2)\rangle - |2p_a^0(2)2p_b^1(1)\rangle \\ &\quad - |2p_{-1}^a(1)2p_b^0(2)\rangle - |2p_{-1}^a(2)2p_b^0(1)\rangle \\ &\quad + |2p_a^0(1)2p_{-1}^b(2)\rangle + |2p_a^0(2)2p_{-1}^b(1)\rangle) \quad (2) \end{aligned}$$

(2)式において，a, b は 2 つのプロトン，1, 2 は 2 つの電子，また下付き添え字は H(2p) 原子の磁気量子数  $m$  を示す。この状態は，電子 1 と 2 の状態の積では記述できない。つまり量子もつれ状態である。過程(1)のような化学反応とも言える分子の光解離により，量子もつれ原子対が生成していることは興味深い。

さて，本研究では過程(1)の Lyman- $\alpha$  光子対の同時計数時間スペクトルに注目する。量子もつれ H(2p) 原子対において，個々の H(2p) 原子が独立にその寿命 1.60 ns で崩壊する場合には，時間スペクトルはやはり 1.60 ns で減衰するはずである<sup>3)</sup>。ところが，過程(1)の Lyman- $\alpha$  光子対の同時計数時間スペクトルを測定したところ，その減衰時定数が 1.60 ns の約半分にならなくなる，という興味深い現象を見出した。本講演では Lyman- $\alpha$  光子対の同時計数時間スペクトルの測定結果について報告した。

### 【実験】

実験は，KEK-PF の BL20A にて行った。水素ガスを満たしたガスセル内に直線偏光した放射光を導入し，過程(1)により発生した Lyman- $\alpha$  光子対を 2 つの光子検出器  $c$  と  $d$  で同時計数した。2 つの光子検出器は，入射光軸に直交する 1 つの軸上に，互いに向かい合うように置かれている。2 つの光子検出器からの信号を遅延同時計数システムに導入し，同時計数時間スペクトルを得た。

### 【結果, 考察】

測定結果を Fig. 1 に示す<sup>4)</sup>。○はガスセル内の水素ガス圧力が0.40 Pa, ▲は0.02 Paにおける同時計数時間スペクトルであり、実線は以下に述べるフィットの結果である。入射光子エネルギーはいずれも33.66 eVであった。なお、Lyman- $\alpha$  光子計数率が水素ガス圧力に0.80 Paまで比例することを確かめてある。同時計数時間スペクトルの横軸は、光子検出器  $c$  と  $d$  による Lyman- $\alpha$  光子の検出時刻の差  $\Delta t$  である。

本グループの理論予測<sup>3)</sup>によると、量子もつれ H(2p) 原子対において、個々の H(2p) 原子が独立にその寿命

1.60 ns で崩壊する場合には、同時計数時間スペクトル  $F(\Delta t)$  は、以下の(3)式で与えられる。

$$F(\Delta t) = A \exp(-\tau_{2p}^{-1} |\Delta t|) \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{2p}$  は単独の H(2p) 原子の寿命1.60 ns である。ところが Fig. 1 に示すように、圧力0.02 Pa では(3)式に当たっていないようである。それを明確に示すために、以下の(4)式を Fig. 1 にフィットし、 $A'$  と減衰時定数  $\tau$  を求めた。

$$F'(\Delta t) = A' \exp(-\tau^{-1} |\Delta t|) \quad (4)$$

フィットにより求まる減衰時定数  $\tau$  は、H(2p) 原子対における個々の H(2p) 原子の見かけの寿命である。フィットの結果を実線で示す。フィットの結果、驚くべきことに水素ガス圧力0.02 Pa においては、減衰時定数は  $(0.78 \pm 0.04)$  ns, つまり単独の H(2p) 原子の寿命1.60 ns の約半分まで短くなった。一方、0.40 Pa においては  $(1.54 \pm 0.08)$  ns が得られ、単独の H(2p) 原子の寿命1.60 ns とほぼ一致した。

ここで、我々が以前に測定した Lyman- $\alpha$  光子対の角度相関関数の測定結果を見てみよう。Fig. 2(a) は本グループによる理論予測である<sup>3)</sup>。2つの角度  $\theta_c, \theta_d$  は、直線偏光した入射光の偏光ベクトルから測った2つの Lyman- $\alpha$  光子の放出方向を、縦軸は Lyman- $\alpha$  光子対の同時計数確率密度である。Fig. 2(b) の実線は、Fig. 2(a) の  $\theta_c\theta_d$  平面上の点線に沿った断面であり、+ は実線を実験装置の角度分解能でコンボリュートした結果である。○はガスセル内の

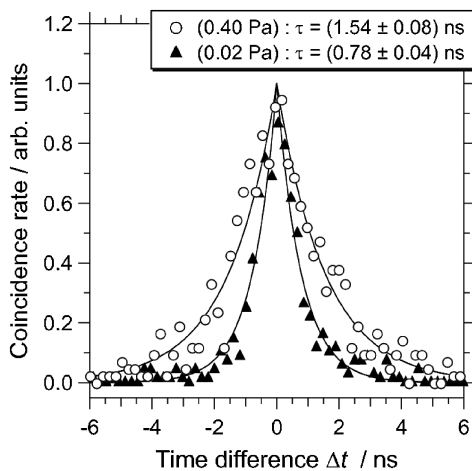


Fig. 1 過程(1)の Lyman- $\alpha$  光子対の同時計数時間スペクトルの測定結果<sup>4)</sup>。入射光子エネルギー33.66 eV において測定した。水素ガス圧力0.40 Pa における結果を○で、0.02 Pa における結果を▲で示す。実線は(4)式をフィットした結果である。

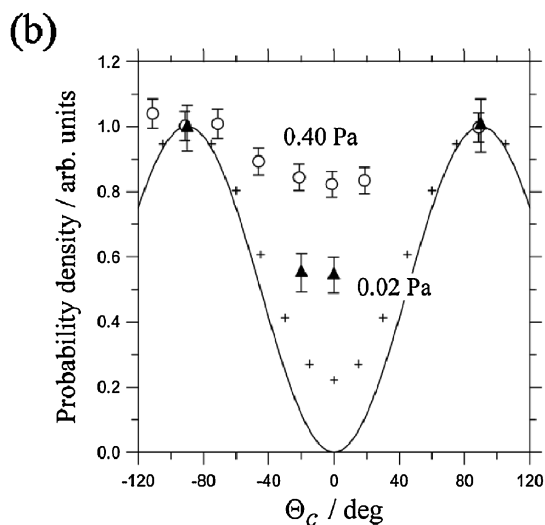
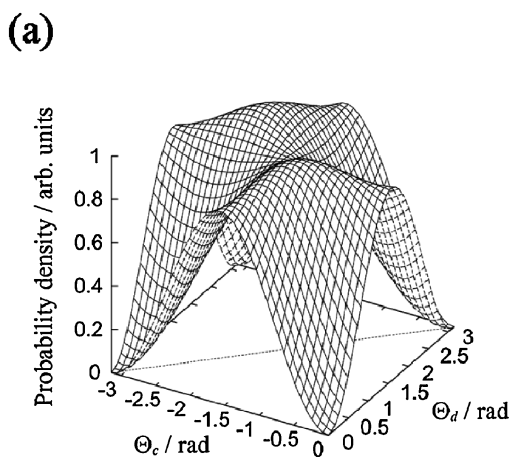


Fig. 2 (a)過程(1)の Lyman- $\alpha$  光子対の角度相関関数の理論予測<sup>3)</sup>。(b) Lyman- $\alpha$  光子対の角度相関関数の測定結果<sup>2,4)</sup>。入射光子エネルギー33.66 eV において測定した。実線は(a)の  $\theta_c\theta_d$  平面上の点線に沿った断面であり、+ は実線を実験装置の角度分解能でコンボリュートした結果である。○はガスセル内の水素ガス圧力が0.40 Pa, ▲は0.02 Pa における測定結果である。

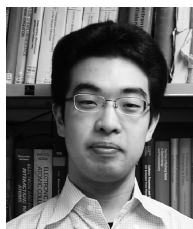
水素ガス圧力が0.40 Pa, ▲は0.02 Paにおける測定結果である<sup>2,4)</sup>。水素ガス圧の低下とともに測定結果は理論予測+に近付いた。これは予測通り、(2)式で記述される量子もつれH(2p)原子対が生成していることを強く示唆している。またFig. 2(b)から、最も理論予測に近付いた水素ガス圧力0.02 Paにおいては、最も理論予測から遠ざかった0.40 Paに比べて、より多くの量子もつれH(2p)原子対が生き残っていることが分かる。このことを踏まえて、今回測定したFig. 1の同時計数時間スペクトルを見ると、「量子もつれH(2p)原子対における個々のH(2p)原子は、単独のH(2p)原子よりも速く崩壊するかのように見える」ということが言える。

このように本研究により、単独のH(2p)原子とは異なる量子もつれH(2p)原子対の興味深いダイナミクス的一端を明らかにすることができた。また「H(2p)原子の見かけの寿命の短縮化機構の解明」という、新たな興味深い研究の萌芽が得られたことも、注目すべき点である。

### 参考文献

- 1) T. Odagiri *et al.*: *J. Phys. B* **37**, 3909 (2004).

- 2) T. Tanabe *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **103**, 173002 (2009).  
(Selected for Virtual Journal of Quantum Information **9**(11) (2009)).  
3) H. Miyagi *et al.*: *J. Phys. B* **40**, 617 (2007).  
4) T. Tanabe *et al.*: *Phys. Rev. A* **82**, 040101(R) (2010).



### 田邊健彦

東京工業大学大学院理工学研究科化学専攻博士後期課程3年

E-mail: ttanabe@chem.titech.ac.jp

### 【略歴】

2006年3月中央大学理工学部応用化学科卒業、2008年3月東京工業大学大学院理工学研究科化学専攻修士課程修了、2011年3月東京工業大学大学院理工学研究科化学専攻博士後期課程修了見込

### 【受賞のコメント】

このたびはJSR11学生発表賞に選出していただき、どうもありがとうございます。学生生活の最後にこのような賞を頂き、大変嬉しく思うと同時に、感慨深い受賞となりました。5年間研究を指導していただいた河内宣之先生、北島昌史先生、小田切丈博士に、この場を借りて心から感謝申し上げます。また今回の受賞を励みに、今後も地道な努力を続けていきたいと思っております。どうもありがとうございました。

## JSR11 学生発表賞 第2分野

受賞者：新井邦明 (発表番号 10P038)

題目：ミクロンサイズ磁気円盤配列における磁気ダイナミクスの時間分解光電子顕微鏡観測

講演者：新井邦明<sup>1</sup>、奥田太一<sup>2</sup>、福本恵紀<sup>3</sup>、小嗣真人<sup>3,4</sup>、大河内拓雄<sup>3</sup>、児玉謙司<sup>3</sup>、春山雄一<sup>6</sup>、中村哲也<sup>3</sup>、松下智裕<sup>3</sup>、大沢仁志<sup>3</sup>、室隆桂之<sup>3</sup>、松井真二<sup>6</sup>、柿崎明人<sup>1</sup>、大谷義近<sup>1,7</sup>、木下豊彦<sup>3,4</sup>

所属：<sup>1</sup>東大物性研、<sup>2</sup>広大放射光セ、<sup>3</sup>JASRI/Spring-8、<sup>4</sup>CREST-JST、<sup>5</sup>九州大、<sup>6</sup>兵庫県立大、<sup>7</sup>理研

強磁性体ドットを規則正しく配列させた系 (array) は、パターンメディアなどの磁気記録デバイスへの応用が提案されている。そこでは、ドット間の磁気的相互作用の磁化反転に対する影響を調べるのが重要である。ミクロンおよびサブミクロンの軟磁性体ドットにおいては、ドット面内に対し磁気渦構造が形成し、磁気渦中心には垂直方向の磁化のコアをもつことが知られている (Fig. 1参照)。磁気渦の時計 or 反時計方向を chirality とよび、コアの磁化方向の向きを polarity とよぶ。磁気渦にパルス磁場を印加すると、印加方向に対して垂直方向にコアが変位しその後、ジャイロ力とよばれる力がコアの速度方向および polarity に対して垂直方向に作用し、コアの平衡位置に対して螺旋運動 (ジャイロ運動) することが実験的に観測されている<sup>1)</sup>。単一の磁性体ドットの磁気渦ダイナミクスに関しては数多く研究がなされているが、微小ドットからの

実験シグナルが弱いことなどが原因で、ドットを近接させた系におけるドット間磁気的相互作用のダイナミクスに対する影響を調べた実験研究は少ない。微小円盤を近接させた系において、近接円盤内に形成する磁気渦間の磁気双極子相互作用により、磁気渦の固有周波数が円盤間隔と polarity に依存することが理論的に示唆された<sup>2)</sup>。一方、強磁性共鳴測定により直径 1 μm の微小円盤を array にした系の固有周波数は円盤間隔に依存するが、polarity に依存しないと報告されており<sup>3)</sup>、統一的理解が得られていな

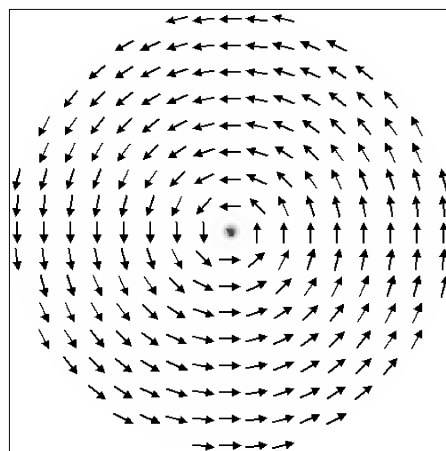


Fig. 1 直径 1 μm, 膜厚 40 nm の Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> (パーマロイ) 円盤におけるマイクロ磁気シミュレーション結果。矢印は磁化方向を示し、磁気渦中心のコントラストは円盤表面に対して垂直方向の磁化方向を示している。

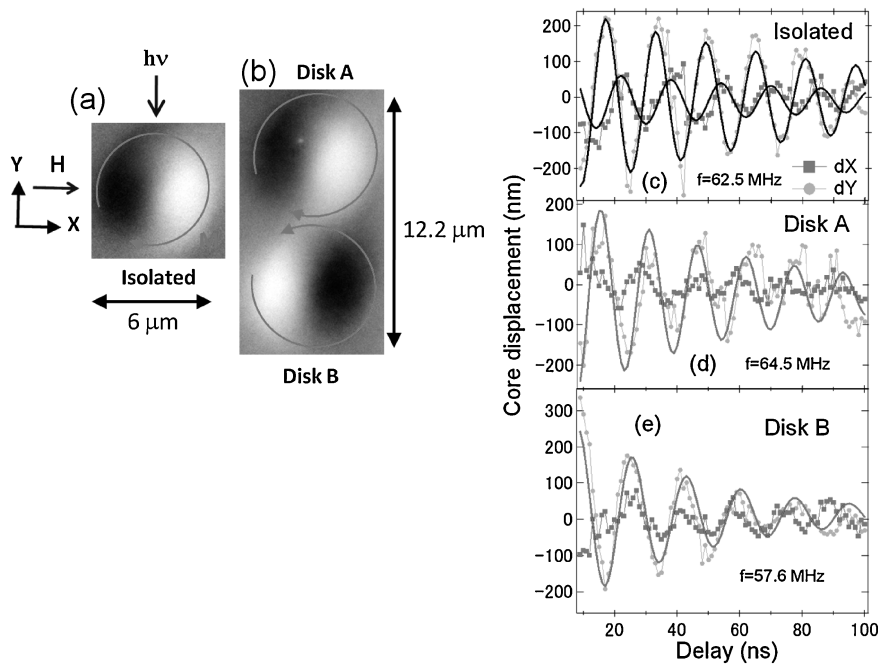


Fig. 2 光電子顕微鏡によって観察された磁場印加前の(a)孤立と(b)近接円盤 (A と B) の磁気渦状態。磁場印加後の緩和における(c)孤立磁気渦と(d)近接磁気渦コアの変位の X 方向と Y 方向の時間依存性。

い。また、これらの研究において、磁気渦ダイナミクスを実空間において直接観察がなされておらず、磁気渦コアの動的振る舞いについて詳細に調べられていない。

そこで本研究では、大型放射光施設 SPring-8 の軟 X 線ビームライン BL25SU において開発・改良を進めてきた時間分解光電子顕微鏡 [4] を用いて、近接したマイクロサイズ磁気円盤間の磁気相互作用のダイナミクス (①パルス磁場による磁気渦コアの変位, ②固有周波数) に対する影響を調べた。

時間分解光電子顕微鏡は光電子顕微鏡 (photoemission electron microscopy: PEEM), X 線磁気円二色性 (X-ray magnetic circular dichroism: XMCD), およびポンプ・プローブ法を組み合わせた手法である<sup>4)</sup>。ポンプはパルス磁場、プローブは円偏光放射光パルスである。時間分解 PEEM の空間分解能および時間分解能は、それぞれおよそ 300 nm, 100 ps である。直径 6  $\mu\text{m}$ 、膜厚 40 nm、の強磁性円盤 ( $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  (パーマロイ)) が孤立および近接した系を電子線リソグラフィにより作製した。近接円盤の円盤間隔は、200 nm, 400 nm、および 800 nm である (Fig. 2 (a), (b) 参照)。近接磁気渦間の相互作用は円盤間隔、磁気渦の chirality および polarity に依存すると示唆されているため<sup>2,5)</sup>、近接磁気渦の固有周波数についてもそれらに依存すると考えられる。磁気渦の chirality および polarity を外部磁場により制御し、それらを系統的に変えたダイナミクス測定を行うことは困難であるため、本研究では固有周波数の円盤間隔依存性に着目した。

パルス磁場印加中の孤立および近接磁気渦のコアの変位

を調べたところ、近接磁気渦のコアの変位は、孤立磁気渦のそれよりも小さいことが分かった。マイクロ磁気シミュレーション<sup>6)</sup>を行ったところ、実験結果をよく再現し、変位の差異は磁気渦間に働く磁気双極子相互作用によるものであることが初めて明らかとなった。

孤立および近接磁気渦の固有周波数は、パルス磁場印加後の緩和におけるジャイロ運動の周波数を導出することにより決定した。測定した結果、孤立と近接磁気渦の固有周波数は互いに異なり、近接磁気渦における 2 つの磁気渦の固有周波数についても互いに異なることが分かった (Fig. 2 参照)。円盤間隔が小さくなるに従い、この近接された 2 つの磁気渦固有周波数の差異 (例えば Fig. 2 における円盤 A と B の周波数の差異) は大きくなり、この原因は磁気渦間に働く磁気双極子相互作用によるものであると示唆される。

今後は、円盤間隔だけでなく、磁気渦 chirality および polarity を系統的に変えたダイナミクスを測定することにより、近接磁気渦ダイナミクスを詳細に調べる必要がある。

## 参考文献

- 1) S.-B. Choe *et al.*: Science **304**, 420 (2004).
- 2) J. Shibata *et al.*: Phys. Rev. B **67**, 224404 (2003).
- 3) A. Vogel *et al.*: Phys. Rev. Lett. **105**, 037201 (2010).
- 4) K. Fukumoto *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **79**, 063903 (2008).
- 5) T. Kimura *et al.*: Appl. Phys. Lett. **90**, 132501 (2007).
- 6) <http://math.nist.gov/oommf/>



### 新井邦明

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
博士課程

#### 【略歴】

2005年3月東京理科大学工学部物理学  
学科卒業。2007年3月東京大学大学院  
理学系研究科物理学専攻修士課程終了。  
現在、同大学院博士課程に在学。

#### 【受賞のコメント】

この度、学生発表賞を受賞でき大変うれしく光栄に思っております。本研究発表を評価して下さいました先生方に感謝いたします。また、ご指導頂いた先生方や共同研究者の方々にはいろいろとお世話になりました。厚くお礼申し上げます。この受賞を励みに、より一層の努力を重ねていきたいと思っております。ありがとうございました。

## JSR11 学生発表賞 第3分野

受賞者：谷川貴紀（発表番号 9P018）

題目：UVSOR-IIにおける飽和領域でのコヒーレント  
高調波の観測

講演者：谷川貴紀<sup>1</sup>，阿達正浩<sup>1,2</sup>，全炳俊<sup>1,2</sup>，保坂将人<sup>3</sup>，  
山本尚人<sup>3</sup>，平 義隆<sup>2,3</sup>，山崎潤一郎<sup>2</sup>，  
加藤政博<sup>1,2,3</sup>

所属：<sup>1</sup>総研大，<sup>2</sup>UVSOR，<sup>3</sup>名大院工

近年、世界各地の放射光施設においてコヒーレント光発生  
の研究が活発になってきている。中でも短波長領域の研究  
開発が顕著であり、共振器型自由電子レーザー（以下、  
FEL: Free-Electron Laser）や Self-Amplified Spontaneous  
Emission (SASE) 型 FEL，そしてレーザーシーディング  
技術を SASE 型 FEL に適用しシード光を増幅する  
シード型 FEL や、HGHG (High-Gain Harmonic Generation)，  
EEHG (Eco-Enabled Harmonic Generation) などが  
挙げられる<sup>1-3)</sup>。

UVSOR-II 電子蓄積リングでは、共振器型 FEL の研究  
に長年取り組んできた<sup>4,5)</sup>。そして近年は、レーザーシー  
ディング技術を用いた THz 領域でのコヒーレントシンク  
ロトロン放射 (CSR: Coherent Synchrotron Radiation) や  
深紫外領域でのコヒーレント高調波発生（以下、CHG:  
Coherent Harmonic Generation)の研究を進めてきた<sup>6,7)</sup>。  
現在は、上記の他にレーザーコンプトン散乱を用いたフェ  
ムト秒ガンマ線発生や、本研究の目的であるレーザーシー  
ディング技術を用いた短パルスで偏光可変な真空紫外（以  
下、VUV: Vacuum UltraViolet) 領域の CHG 研究を行っ  
ている<sup>8)</sup>。

本発表では、昨年度構築された VUV 分光ラインを用い  
て VUV CHG に関する系統的な光特性の測定を行ったの  
で報告する。実験は、UVSOR-II 電子蓄積リング（電子  
ビームエネルギー600 MeV，ビーム電流30 mA，パンチ  
長121 ps のシングルパンチ）と光クライストロン（磁石

周期長110 mm，磁石数9+9，K 値6.18，N<sub>d</sub> 値45の直線  
偏光モード），そして注入レーザー光として外部 RF 同期  
フェムト秒チタンサファイアレーザー（基本波長800 nm，  
パルス強度～2.5 mJ 以下，パルス幅130 fs～1.2 ps）を用  
いた。

まず、自発高調波（以下、SE: Spontaneous Emission）  
とコヒーレント高調波（以下、CH: Coherent Harmonic）  
を測定した結果、CH は第9次高調波（波長89 nm）まで  
の観測に成功した。続いて、SE 及び CH の波長と強度に  
対するアンジュレタギャップ依存性を測定した。SE の  
ピーク波長はギャップに対しほぼ線形に変化していること  
に対し、CH のピーク波長はギャップを変えても注入レー  
ザー光の高調波となる波長に固定されており、SE のピー  
ク波長と注入レーザー光の高調波となる波長が一致するよ  
うなギャップの時に CH 強度は最大となった。最後に、  
CH 強度に対する注入レーザー光強度依存性の測定を行っ  
た。Fig. 1 にショートパルスレーザー（190 fs）を注入し  
た場合の第5次 CH の強度依存性、Fig. 2 にロングパルス  
レーザー（870 fs）を注入した場合の第5, 7, 9次 CH の  
強度依存性を示す。Fig. 1 及び 2 それぞれ、ドットは測定  
値、点線は無限長パルスの注入レーザーと仮定した時、実  
線はガウス分布パルスと仮定した時の1次元解析計算結  
果である。測定の結果、Fig. 1 及び 2 に示す通り CH の強  
度飽和が実験的に初めて観測された。注入レーザー光の  
ピーク強度が大きくなるにつれ CH 強度も大きくなり、注  
入レーザー強度が1～2 GW 付近で強度飽和を迎えた。  
Fig. 1 においては、レーザー強度を大きくしていくと CH  
の強度飽和後に強度振動が、また Fig. 2 においては、高調  
波次数の違いによって CH の強度飽和に必要なレーザー強  
度が異なることが観測された。これら CH の強度飽和現象  
に関して、1次元解析計算を行ったところ、Fig. 1 及び 2  
の点線及び実線に示す通り、定性的な一致が見られた。さ  
らにこの現象を深く理解する為、1次元粒子追跡シミュ  
レーションを行った。Fig. 1 に関しては、過飽和領域にお

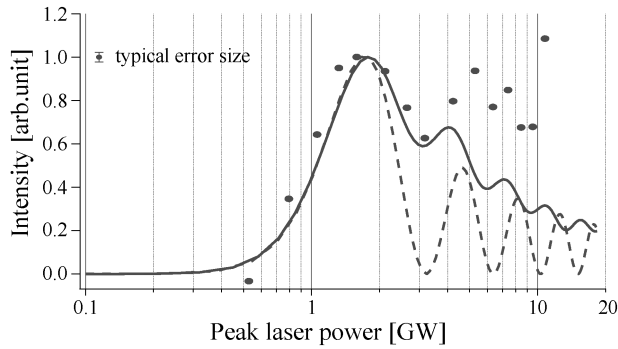


Fig. 1 第5次コヒーレント高調波強度に対する注入レーザー強度依存性。

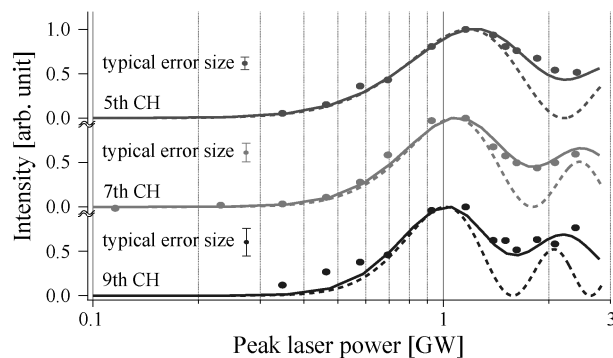


Fig. 2 第5次、7次、9次コヒーレント高調波強度に対する注入レーザー強度依存性。

いてマイクロバンチがダブルピーク構造を持ち、このピーク間隔が高調波波長の整数倍となる時に強度が極大となるとして説明できる。また Fig. 2 に関しては、強度が極大となるマイクロバンチの最適条件が高調波次数によって異なることで説明できる。

以上、VUV CHG の系統的な測定を行った結果、CH スペクトル特性やギャップ依存性の他に、CH の強度飽和に関する興味深い現象が観測され、それらを定性的に説明することができた<sup>9)</sup>。今後は更なる短波長コヒーレント光源

の開発を目指して、注入するレーザー光をチタンサファイアレーザーの代わりに、高強度レーザーと希ガスの相互作用で発生するガス高次高調波を利用することを検討している。現在、ガス高調波発生装置の構築が完了し、高輝度ガス高調波発生に向けた予備実験を行っている。

#### 参考文献

- 1) G. Lambert *et al.*: Nat. Phys. **4**, 296 (2008).
- 2) L. H. Yu *et al.*: Science **289**, 932 (2000).
- 3) D. Xiang and G. Stupakov: Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 030702 (2009).
- 4) M. Hosaka *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **507**, 289 (2003).
- 5) H. Zen *et al.*: Proc. 31<sup>st</sup> Int. Free-Electron Laser Conf., Liverpool, 2009.
- 6) M. Labat *et al.*: Eur. Phys. J. D **44**, 187 (2007).
- 7) M. Labat *et al.*: Phys. Rev. Lett. **101**, 164803 (2008).
- 8) Y. Taira *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, in press.
- 9) T. Tanikawa *et al.*: Appl. Phys. Express **3**, 122702 (2010).



#### 谷川貴紀

総合研究大学院大学物理科学研究科機能分子科学専攻博士後期課程 3年

#### 【略歴】

2008年兵庫県立大学物質科学研究科物質科学専攻博士前期課程卒業。同年総合研究大学院大学物理科学研究科機能分子科学専攻博士後期課程に入学。2009年より日本学術振興会特別研究員。高強度レーザー光と光源加速器を組み合わせたレーザーシーディングによるコヒーレント放射光発生の研究に従事。

#### 【受賞のコメント】

この度はJSR11学生発表賞に選ばれましたことを光栄に思います。博士後期課程を修了という節目の年に、自分の研究成果を評価していただいたことに大変喜ばしく感じております。このような素晴らしい賞を頂いたのも、常日頃より先生方からご指導ご鞭撻していただいたお陰であり、この場を借りて厚く御礼申し上げます。この受賞を励みに、今後も精進して参りたいと思います。

## JSR11 学生発表賞 第3分野

受賞者：木村隆志（発表番号 9P032）

題目：二次元硬 X 線 Sub-10 nm 集光システムの構築

講演者：木村隆志<sup>1</sup>，三村秀和<sup>1</sup>，横山 光<sup>1</sup>，今井将太<sup>1</sup>，湯本博勝<sup>2</sup>，松山智至<sup>1</sup>，香村芳樹<sup>3</sup>，西野吉則<sup>4</sup>，玉作賢治<sup>3</sup>，矢橋牧名<sup>2</sup>，石川哲也<sup>2,3</sup>，山内和人<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>阪大院工，<sup>2</sup>JASRI/SPring-8，<sup>3</sup>理研/SPring-8，<sup>4</sup>北海道大学

高感度・高分解能の X 線分析技術を実現するためには、優れた特性を有する X 線集光光学素子の存在が不可欠である。X 線集光光学素子の特性の中でも集光サイズは、分析技術の空間分解能に直結するため、その微小化には多大な関心が払われており、硬 X 線領域では屈折レンズ<sup>1)</sup>やラウエレンズ<sup>2,3)</sup>、全反射型ゾーンプレート<sup>4)</sup>などの様々な素子が開発され、成果が報告されている。

これまで本研究グループでは、二枚の非球面ミラーを組み合わせた Kirkpatrick-Baez (K-B) ミラー光学系による硬 X 線の集光について研究を行ってきた。K-B ミラー光学系は、高集光効率・長焦点距離であるという特徴を有しており、顕微鏡応用などに適した性質を持っているが、その反面、ミラー表面に高い形状精度が求められることや、二枚のミラーを高精度にアライメントしなければならないといった困難な点も同時に存在している。本発表では、10 nm 以下の集光サイズを得られるような K-B ミラー光学系の設計を行い、必要となる形状・アライメント精度について波動光学計算による検討を行った。そして、実際に K-B ミラーマニピュレータの開発を行い、放射光を用いて集光実験を行った結果について説明を行った。

まず光学系の設計は、空間コヒーレンスが高く、幾何学的な縮小倍率を大きく取ることが可能な、SPring-8 BL29XUL での実験を想定して行った。Fig. 1 に、その K-B ミラー光学系の光学配置を示す。上流側の 80 mm 長ミラーにより水平方向の集光を、下流側の 20 mm 長ミラーにより垂直方向の集光を行う構成となっている。この光学

配置により、理論上半値幅でおよそ 7 nm × 7 nm の集光径を得ることが可能である。Fresnel-Kirchhoff 回折積分を用いた二次元波動光学シミュレータを構築し、本光学系に必要なミラーの表面形状精度及びアライメント精度を見積もった。その結果、理想的な集光サイズを実現するためには Peak-to-Valley (P-V) 1 nm の非球面形状精度が必要となることが分かった。同様に、K-B ミラーのアライメント精度についても検討を行い、面内回転成分については 80 mm 長ミラー：±5 mrad 下流ミラー：±1 mrad、ミラー間直角度で ±50 μrad、ミラー入射角で上流ミラー：±0.2 μrad 下流ミラー：±2 μrad となることが分かった。

以上のようなアライメントを可能にするよう、Fig. 2 に示すミラーマニピュレータを作製した。本システムと、Elastic emission machining (EEM) による数値制御加工によって P-V 1 nm の精度で作製された二枚の非球面集光ミラーを組み合わせ、放射光による 20 keV の硬 X 線二次元集光実験を行った。その結果、半値幅で 8 nm × 8 nm の集光ビームを形成することに成功した。さらに、得られた集光ビームは 10 時間以上に亘って安定しており、顕微鏡用のプローブとして使用するのに十分な安定性を有していることも確認した。今後形成した集光ビームを用いて、10

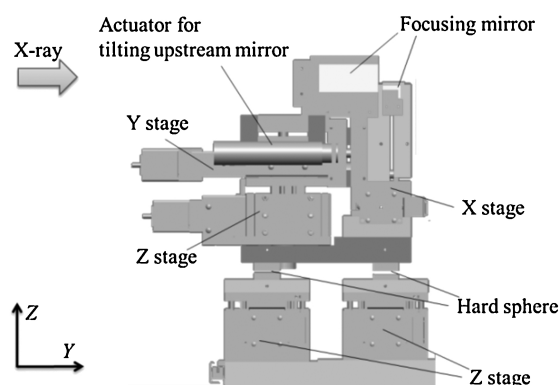


Fig. 2 作成した K-B ミラーマニピュレータ

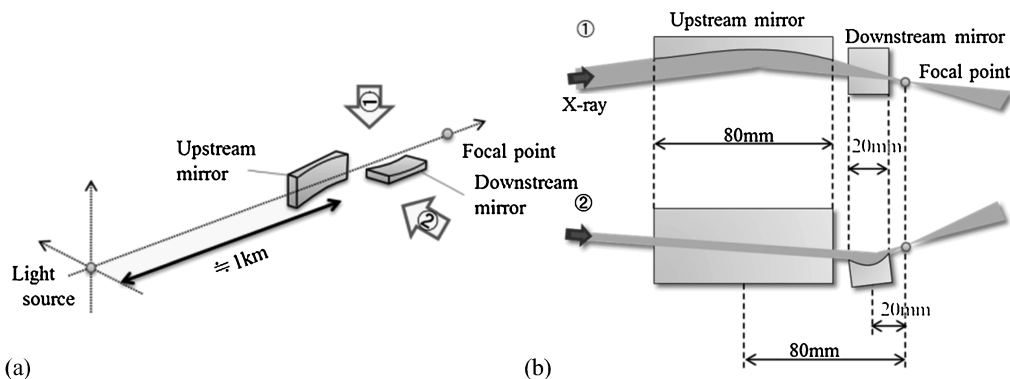


Fig. 1 二次元 Sub-10 nm 集光 K-B ミラー光学系 (a) 全体配置 (b) 集光点近傍光学配置



nm 分解能を有する走査型硬 X 線顕微鏡の開発を行う計画である。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（特別推進研究）「硬 X 線 Sub-10 nm ビーム形成と顕微鏡システムの構築」（18002009）、グローバル COE プログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」、21世紀 COE プログラム「原子論的生産技術の創出拠点」、及び日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の支援により行われたことを記し、ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) C. G. Schroer, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **87**, 124103 (2005).
- 2) H. C. Kang, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **92**, 221114 (2008).

- 3) T. Koyama, *et al.*: Appl. Phys. Express **1**, 117003 (2008).
- 4) H. Takano *et al.*: Applied Physics Express **3**, 076702 (2010).



#### 木村隆志

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】

2006年3月大阪大学工学部応用自然科学科精密科学コース卒業。2007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終了。2008年4月より現博士後期課程に在学。

#### 【受賞のコメント】

この度はJSR11学生発表賞に選出していただき、大変光栄に感じております。これを励みに、今後も精力的に研究に取り組んでいきたいと思っております。

### JSR11学生発表賞 第3分野

受賞者：浦山拓郎（発表番号10P120）

題目：EUV 干渉露光によるレジストパターン形成

講演者：浦山拓郎<sup>1</sup>，福島靖之<sup>1</sup>，山口裕也<sup>1</sup>，井口貴文<sup>1</sup>，  
多田将樹<sup>1</sup>，原田哲男<sup>1</sup>，渡邊健夫<sup>1</sup>，木下博雄<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>兵県大

#### 【緒言】

2012年よりハーフピッチ (hp) 32 nm 世代の半導体量産技術として極端紫外線 (EUV) リソグラフィが導入される。EUV レジストの開発は量産化における重要課題の1つであり、hp 22 nm での線幅ばらつき (LWR) は1.5 nm (3 $\sigma$ ) 以下が要求されている。そこで、hp 22 nm 以下のレジストの解像度および LWR を評価するため、透過型回折格子を用いた EUV 光による二光束干渉露光装置を開発してきた。当装置は、NewSUBARU 放射光施設の長尺アンジュレータビームライン (BL-9) に設置した。これまでに極微細線を持つ透過型回折格子の製作と露光ステージの改善により、hp 22 nm 以下の高コントラストな干渉パターン形成に成功した。

#### 【実験】

二窓透過型回折格子を用いた EUV 光による二光束干渉露光により、複雑な光学系なしで微細なレジストパターン形成が可能である。原理的に収差やフレアがないため、hp 22 nm 世代以下のレジスト解像度や LWR 評価に有効である。Fig. 1に極端紫外線干渉露光 (EUV-IL) の原理を示す。1つの窓から透過回折された-1次光と、もう1つの窓から透過回折された+1次光が重なりあう位置で、干渉フリッジが生成される。このフリッジにより、レジスト上に形成されるレジストパターンピッチは元の回折格子のピッチの半分の大きさである。

Fig. 2に示すように、hp 35 nm L/S の二窓透過型回折

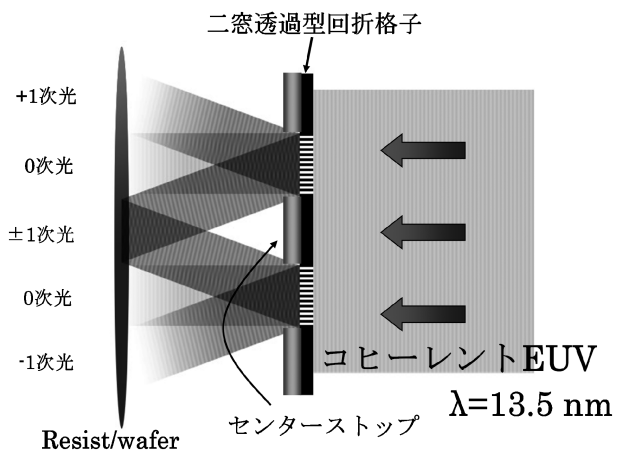


Fig. 1 極端紫外線干渉露光の原理

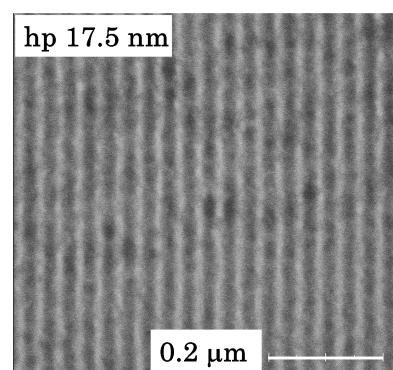


Fig. 2 hp 17.5 nm L/S レジストパタンの SEM 画像

格子を用いた EUV-IL により、hp 17.5 nm L/S レジストパターン形成に成功した。また、hp 40 nm L/S の四窓透過型回折格子を用いることにより、高コントラストな hp 28 nm のホールパタンの形成にも成功した。

### 【結論】

開発した EUV-IL により、17.5 nm のパタン形成に成功した。これにより、hp 1X nm 世代のレジスト評価が可能で、hp 1X nm のレジスト開発を促進できるものと期待される。今後、hp 11 nm L/S までのレジストの評価を実現する。

### 謝辞

この研究は、JSPS による科研費 (22360146) の助成を受けたものである。



### 浦山拓郎

兵庫県立大学工学部 4年

E-mail: takuro@lasti.u-hyogo.ac.jp

### 【略歴】

2007年4月、兵庫県立大学工学部入学。

### 【受賞のコメント】

このたびは JSR11 学生発表賞という名誉ある賞をいただき、大変嬉しく光栄に思っております。日頃よりご指導頂いている木下博雄教授、渡邊健夫准教授、原田哲男助教、福島靖之学振特別研究員、そして共同研究者の方々にこの場を借りてお礼申し上げます。今回の受賞は今後の研究への大きな励みとなります。誠にありがとうございました。