

第23回日本放射光学会年会・ 放射光科学合同シンポジウム(JSR10)学生発表賞審査結果について

第23回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR10)
組織副委員長 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。昨年、「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23回年会・合同シンポ(JSR10)でも昨年の変更を踏襲し、組織委員長、組織副委員長、プログラム委員長、実行委員長、実行副委員長で構成した学生発表賞選考委員会より、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50名の方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件程度の審査をして頂きました。

JSR10では、学生発表賞対象が計96件でした。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5件,ポスター発表24件

第2分野(VSX領域の固体・原子分子など):口頭発表14件,ポスター発表27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23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11名(第1分野:3名,第2分野:4名,第3分野:4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活躍されることを期待しております。

第1分野

- ・今井 亮(東大工物工)「Near-field SAXS をもちいた X 線光子相関法の評価」
- ・阿部善也(東理大理)「放射光を用いた古代中近東地域におけるコバルト着色剤の化学的特性化」
- ・半田昌史(東大院新領域)「硫黄 K 吸収端での異常小角 X 線散乱法の研究」

第2分野

- ・新井邦明(東大物性研)「光電子顕微鏡による反強磁性 NiO の磁壁構造の直接観察」
- ・丹羽秀治(東大院工)「鉄フタロシアニン由来カーボンアロイ触媒の炭素構造の熱処理温度依存性:軟 X 線吸収分光解析」
- ・武市泰男(東大物性研)「角度分解光電子分光による FeSi(001)および CoSi(001)の価電子帯構造の研究」
- ・新井秀実(東大院新領域)「軟 X 線発光分光による溶液中の水の構造観測」

第3分野

- ・藤井正輝(阪大院工)「Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系の開発」
- ・木村隆志(阪大院工)「硬 X 線ナノ集光ビーム用波面誤差算出法の開発」
- ・小河愛実(東大理)「放射光と Laser の同期によるポンププローブ時間分解光電子分光装置の開発」
- ・平 義隆(名大院工)「UVSOR-II におけるレーザーコンプトン散乱を用いた超短パルスガンマ線発生」

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。

JSR10 学生発表賞 第1分野

受賞者：今井 亮（発表番号 9P082）

題目：Near-field SAXS をもちいた X 線光子相関法の評価

講演者：今井 亮¹，篠原佑也²，岸本浩通³，
上杉健太郎⁴，雨宮慶幸²所属：¹東京大学工学部物理工学科，²東京大学大学院新領域創成科学研究科，³住友ゴム工業，⁴JASRI/SPring-8

1. はじめに

小角 X 線散乱 (SAXS) はソフトマター等の解析法として重要な地位を占めている。SAXS は散乱像の小角側を測定することによって試料中の 1-100 nm 程度の大きさの構造を観測する手法である。しかしながらこの手法で測定できるのは数百 nm 程度の大きさの構造までであり、それを越える μm オーダーの構造の測定は非常に困難である。さらにこの手法は試料の構造を逆空間で観測する測定法であるが故に X 線被照射領域内での実空間の空間分解能を持たず、空間分割測定を行うためにはビーム走査を行う必要がある。これに対し論文¹⁾で提案された近接場小角 X 線散乱 (Near-field SAXS, 以下 NFS と略す。) は μm オーダーを超える大きさの構造の測定を行うことができ、なおかつイメージングのように X 線被照射領域内での実空間の空間分解能をも併せ持つ手法である²⁾。しかしこの手法は提案されてから日が浅く、手法の評価、確立とも十分であるとはいえない。本研究ではこの NFS, またそれを用いた動的構造解析法の手法評価と改良を目標とした。

2. Near-field SAXS

Near-field SAXS は散乱観測とイメージングの中間的な位置にある測定法である。数 mm オーダーの太いビームを用い、数十 mm 程度の短い試料-検出器間距離で測定を行う。この結果試料のある部分からの散乱光は検出器上のごく一部にのみ分布し、検出器で観測される強度分布は試料の電荷密度の空間分布を反映する (Fig. 1)。この画像を以下の手順で解析することによって散乱像を得ることができる。

1. 試料の 2 カ所で測定を行い、得られたデータから

$$s(x) = \frac{i_1(x) - i_2(x)}{i_1(x) + i_2(x)}$$

を計算する。 $i_1(x)$, $i_2(x)$ はそれぞれ同一試料の別の場所で撮像されたデータである。この操作により搬送波である透過光成分が取り除かれる³⁾。

2. フーリエ変換により $S(q) = |\text{FT}[s(x)]|^2$ を得る。
3. この $S(q)$ は散乱強度 $I(q)$ に Talbot 効果等による伝達関数 $T(q)$ が加わったものになっている。この補正を $S(q)$ にかけて $I(q)$ を得る。

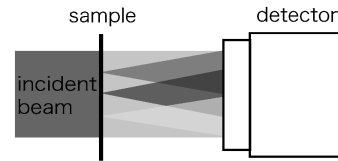


Fig. 1 NFS の概念図

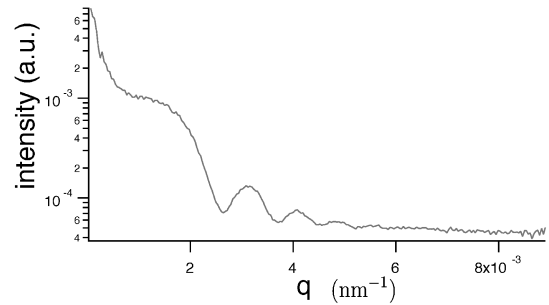
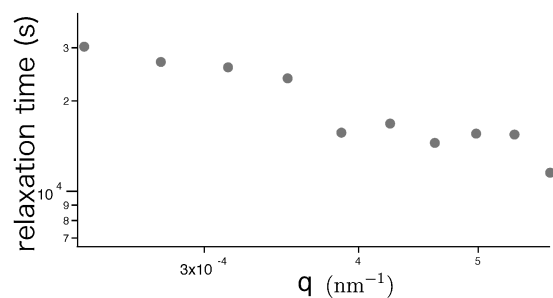
Fig. 2 散乱強度分布 $S(q)$ 

Fig. 3 算出された緩和時間

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に得られた散乱強度分布を示す。試料は微小シリカ球を添加したスチレンブタジエンゴムである。グラフ中に見て取れる振動は Talbot 効果によるものである。

NFS を用いた動的解析は上に示した静的解析を多数回繰り返すことによって行う。連続撮像したデータを解析し散乱像を得て、その時間相関関数を計算する。時間相関関数の緩和過程から緩和時間を算出し、プロットしたものが Fig. 3 である。試料は微小シリカ球を希薄に分散させたエチレングリコールである。シリカ球は希薄であるためブラウン運動を行い、緩和時間は理論的には q^{-2} に比例する。実際に測定された Fig. 3 中にその傾向を確認でき、動的測定の妥当性を確認することができた。

しかし課題も多く残っている。今回用いたのはいずれも X 線を強く散乱するシリカ球を含んだ試料である。NFS は手法の性質上得られる散乱像の SN 比は低くなりがちであり、電荷密度コントラストの低い試料を測定する際には SN 比の改善が求められる。また、NFS は十分な SN 比を確保するために 1 回の撮像につき数十秒オーダーの長い露光を行わなければならない。これにより時間分解能に限

界があり、また長時間の露光のため入射光の強度揺らぎも問題となる。したがって今後露光時間の短縮も図る必要がある。この他にも評価、改善すべき点が多いが、この手法は従来の測定法とは異なる全く新しい種類の測定法となる可能性をも秘めており、この測定法を有益なものとするために今後も研究を継続してゆく。

参考文献

- 1) R. Cerbino *et al.*: Nat. Phys. **4**, 238 (2008).
- 2) R. Cerbino *et al.*: Curr. Opin. Colloid Interface Sci. **14**, 416 (2009).
- 3) D. Brogioli *et al.*: Appl. Phys. Lett. **81**, 4109 (2002).

////////////////////////////////////

JSR10 学生発表賞 第1分野

受賞者：阿部善也（発表番号7B006）
 題目：放射光を用いた古代中近東地域におけるコバルト着色剤の化学的特性化
 講演者：阿部善也¹，菊川 匡^{1,2}，中井 泉¹
 所属：¹東理大理，²古代エジプト美術館

【序】

我々は放射光 X 線分析の考古学への応用を23年前に始めて以来、考古ガラスや土器・陶磁器を中心に、焼成環境や発色技法といった製造技術の解明を目的とした研究を行っている¹⁾。古代エジプトで合成されていた青色顔料「コバルト・ブルー」は、EPMA および XRD による分析から、一般式 $M^{II}Al_2O_4$ ($M^{II}=Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn$) で表されるスピネル型アルミン酸塩であると推定されている^{2,3)}。しかしながら、コバルト・ブルーに含まれる遷移元素にはスピネル型構造の酸化物を持つものが存在し、その格子定数はアルミン酸塩と近い。また2価の金属 M^{II} が連続的に固溶する場合には、格子定数が複雑に変化してしまうため、結晶構造に基づいた相同定が難しくなる。そのため、コバルト・ブルー中の遷移元素がについて、個々の詳細な化学状態ははまだ明らかではない。そこで本研究では Mn, Co, Ni, Zn の各元素の K-edge の蛍光 XAFS 測定により、コバルト・ブルー中の遷移元素の化学状態分析を行った。さらに同時代に作られた2種類のコバルト着色ガラスについても同様の測定を行い、対比を行った。

【実験内容】

測定に用いた考古遺物は古代エジプト美術館所蔵の、エジプト新王国時代（前15～14世紀）の遺物である。コバルト・ブルーによる彩色が施された彩文土器と、コバルトによる青色着色がなされた2種類のガラス（コアガラス容器片，ガラス製象嵌）を分析した。XAFS 測定は高エネルギー加速器研究機構 PF BL-12C にて行われた。入射 X 線は Si(111)二結晶モノクロメータにより単色化し、ス



今井 亮

東京大学工学部物理工学科 4年
雨宮研究室

【略歴】

2006年東京大学教養学部理科1類入学
2008年東京大学工学部物理工学科進学

【受賞のコメント】

JSR10学生発表賞を頂くことができ、大変光栄に思っております。これもひとえに研究を支えてくださった多くの方々のおかげです。簡単ではありますが、この場を借りて深くお礼申し上げます。この賞を励みとして今後も日々精進してゆく所存です。

リットによりビームをおよそ $1 \times 2 \text{ mm}^2$ に成形した。測定は Lytle 型検出器を用いた蛍光法により行った。測定時間は試料の濃度に応じて、1点あたり2～3秒で行った。エネルギー較正には Cu foil を用いた。

【結果】

Co K-edge XANES スペクトルの比較を Fig. 1 に示す。コバルト・ブルーの XANES の形状は参照試料の $CoAl_2O_4$ のものと一致し、コバルト・ブルー中の Co がアルミン酸塩の状態にあることが本研究によって初めて実証された。同様にコバルト・ブルー中の Mn, Ni, Zn についても、各 K-edge XANES の比較により、いずれもアルミン酸塩の形で存在することを明らかにした。青色ガラス中の遷移元素については、ガラスマトリクス中に溶存する金属イオンだけでなく、何らかの不溶成分を含む可能性が示された。さらに存在する不溶成分の割合は2種類のガラスで異なり、コアガラス片よりもガラス製象嵌において不溶成分の存在が顕著であった。また XANES のピーク形状

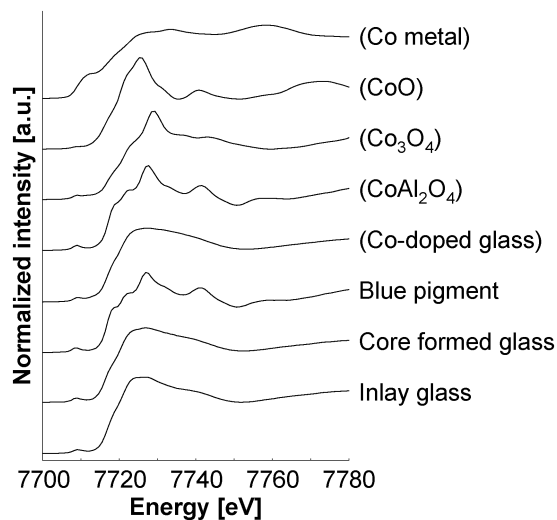


Fig. 1 Co K-edge XANES スペクトルの比較

から、ガラス中の不溶成分はコバルト・ブルーと同じアルミン酸塩である可能性が示された。

新王国時代のエジプトで使われていたコバルト着色剤の原料は、「含コバルト性ミョウバン」と呼ばれる鉱物である²⁾。このミョウバン中にはコバルトをはじめとした遷移元素が特徴的に含まれている。このミョウバンを水に溶かして硫酸酸性の水溶液とした後、水溶液にアルカリを加えて2価の金属イオン M^{2+} および Al^{3+} を水酸化物として沈下させる。得られた水酸化物沈殿を焼成することで、青色顔料であるコバルト・ブルーが得られる。これに対してコバルト着色ガラスは、この過程で得られた水酸化物沈殿をガラス原料中に混和して焼成することで得られるものと考えられていた²⁾。しかし本研究により、ガラス製象嵌中の不溶成分の一部がアルミン酸塩として存在していることが示唆され、ガラス製象嵌の製作では水酸化物沈殿ではなくコバルト・ブルーをガラス原料中に添加していた、すなわちコアガラスとガラス製象嵌には製法上の違いが存在した可能性が示された。このように、エジプト新王国時代に製作されたコバルト着色遺物の蛍光 XAFS 測定により、遺物中の遷移元素の化学状態が明らかになり、また当時の製法に関する興味深い知見が得られた。

【謝辞】

本研究は高エネルギー加速器研究機構放射光共同利用実験（課題番号2008G706）として行われた。

////////////////////////////////////

JSR10 学生発表賞 第1分野

受賞者：半田昌史（発表番号 9P080）
 題目：硫黄 K 吸収端での異常小角 X 線散乱法の研究
 講演者：半田昌史¹，篠原佑也¹，為則雄祐²，岸本浩通³，
 八木直人²，雨宮慶幸¹
 所属：¹東京大院新領域，²JASRI，³住友ゴム工業

1. はじめに

硫黄は様々な高分子材料に含まれる元素であり、その物性を決定する上で非常に重要な役割を果たしている。従って高分子材料中での硫黄の分散状態に関する知見を得る事は大変重要だといえる。しかしこれまで硫黄の K 吸収端（～2.5 keV）付近のエネルギーを利用できるビームラインは限られており、また軟 X 線における散乱実験の難しさもあって硫黄を対象とした異常小角 X 線散乱法 (ASAXS) はほとんど行われていなかった。だがこのエネルギー領域で ASAXS を行うことは、軟 X 線における散乱実験を開拓するという意味でも非常に重要である。

今回 SPring-8 BL27SU にて硫黄 K 吸収端付近で小角 X 線散乱 (SAXS) を行った。差動排気装置の中に Fig. 1 のような光学系をセットし、レンズカップリング CCD 検出器を直接真空につないで実験を行った。サンプルとして

参考文献

- 1) 中井 泉, 望月明彦, 飯田厚夫, 田口 勇, 山崎一雄:『国立歴史民俗博物館研究報告』, 38集, 145 (1992).
- 2) A. J. Shortland, C. A. Hope and M. S. Tite: *Geological Society, London, Special Publications* **257**, 91-99 (2006).
- 3) Y. Abe, I. Nakai, K. Takahashi, N. Kawai and S. Yoshimura: *Anal. Bioanal. Chem.* **295**, 1987-1998 (2009).



阿部善也

東京理科大学 総合化学研究科 総合化学専攻 博士後期課程

E-mail: jb109701@ed.kagu.tus.ac.jp

専門：分析化学, 考古化学

【略歴】

2005年3月国立東京工業高等専門学校物質工学科卒業。2005年4月～2007年3月, 立教大学理学部(3年次より編入)。

2007年4月～2009年3月, 東京理科大学理学研究科博士前期過程。2009年4月より現在, 同大学総合化学研究科博士後期課程。2009年4月より, 日本学術振興会特別研究員。

【受賞のコメント】

このたびは JSR10 学生発表賞という名誉ある賞をいただき、大変光栄に存じます。御指導くださった先生方、特に指導教員である中井先生に心より御礼申し上げます。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。

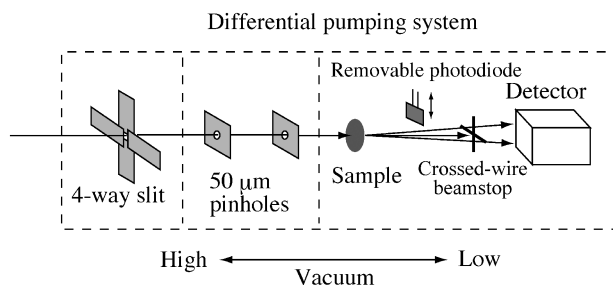


Fig. 1 Schematic view of the experimental set up

は、ゴム (チオコール: $[-C_2H_4-O-CH_2-O-C_2H_4-S-S-]^n$) にシリカ球を分散させたものを用いた。このサンプルは高分子鎖中に硫黄原子が大量に含まれているため、吸収端付近ではこの硫黄が共鳴し、散乱強度が変化する。

2. 結果と考察

得られた散乱曲線は Fig. 2 のようになった。全体としてシリカ球の散乱が綺麗に出ており、球の散乱曲線をフィッティングすることでシリカ粒径 130 ± 11 nm であるとの結論を得た。さらに、入射 X 線の強度を 2100-2466 eV の範囲で変化させたところ、図のように全体の形を保ったまま

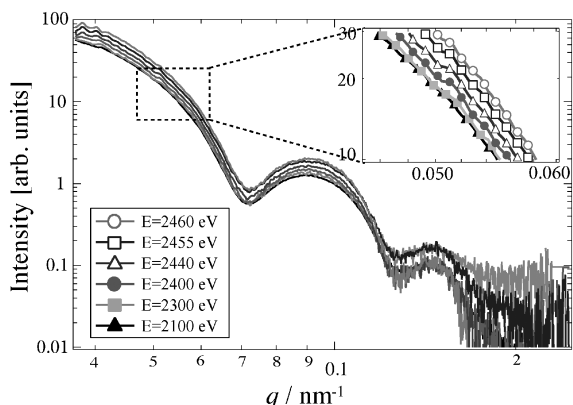


Fig. 2 Scattering profile at some energies near sulphur K-edge.

強度のみが増加していった。

なおこの散乱強度の変化は硫黄の散乱振幅の変化として計算することができるため、Fig. 2 から求めた Invariant Q と、散乱振幅変化を比較したところ、8.7%の誤差で一致した。ただし今回用いたサンプルが多量の硫黄を含んでいたこと、Low-q 側では非常に S/N が悪いことを考えると、今後さらに精度を上げる必要がある。

3. まとめと今後の展望

E = 2.5 keV という低エネルギー領域で SAXS 像を精度

JSR10 学生発表賞 第 2 分野

受賞者：新井邦明（発表番号 8P052）

題目：光電子顕微鏡による反強磁性 NiO の磁壁構造の直接観察

講演者：新井邦明¹，奥田太一^{1,2}，小嗣真人³，大河内拓雄³，大浦正樹⁴，松下智裕³，仙波泰徳³，大橋治彦³，柿崎明人¹，木下豊彦^{3,5}

所属：¹東大物性研，²広大放射光，³JASRI，⁴理研，⁵CREST

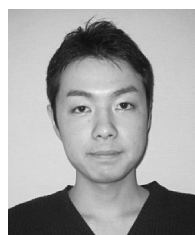
反強磁性層と強磁性層界面で生じる交換磁気異方性は、広く磁気記録デバイスに用いられている。この異方性は反強磁性磁区構造に依存するため、その構造について研究がなされてきた。しかし、反強磁性体ではマクロな磁化をもたないため、微小領域における磁区構造の観察は困難であり詳細に理解されていないのが現状である。磁区構造形成の理解の鍵となる磁壁構造を明らかにするため、我々は高空間分解能で観察できる軟 X 線磁気線二色性 (XMLD) と光電子顕微鏡 (PEEM) を組み合わせた手法を用いて、典型的反強磁性体 NiO の磁壁構造を調べた。

実験は SPring-8 BL17SU で行った。試料は NiO (100) へき開表面である。Ni L_2 吸収端の XMLD を用いて、スピンによって形成されるドメイン (S ドメイン)，O $2p$ 軌

良く測定することができた。また、硫黄 K 吸収端付近での散乱強度変化も理論的に説明することができた。今後さらに精度を上げるために、量子効率を上げた軟 X 線散乱実験用の CCD 検出器をつくること、また BL27SU の B ブランチに Si の二結晶分光器をセットし、硫黄 K 吸収端付近でも今より高いフラックスで実験することを計画している。

参考文献

- H. B. Stuhmann: Acta Cryst. **A64**, 181 (2008).
 Y. Tamenori *et al.*: Rec. Sci. Instrum. **73**, 1588 (2002).
 Y. Tamenori: J. Synchrotron Rad. in press (2010).



半田昌史

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・雨宮研究室，修士課程 1 年

【略歴】

2009 年東京大学工学部物理工学科卒業，同大学院新領域創成科学研究科入学。

【受賞のコメント】

この度は学生発表賞を頂き、大変嬉しく思います。日頃から温かいご指導を頂いている先生方や共同研究者の方々にこの場をかりてお礼申し上げます。この賞を励みにして、今後もより一層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。

道の異方性による線二色性 (XLD) により、結晶歪によって形成されるドメイン (T ドメイン) を観察した。s と p 偏光に対する局所領域 XMLD の方位角依存性から T と S ドメインの磁壁 (それぞれ T&S-wall) を直接観察し磁壁構造を調べた。スピン軸方向の決定は、この方位角依存性と、結晶対称性及び Ni サイトの多重項分裂を考慮したクラスターモデル計算との比較により行った¹⁾。

その結果、 $\langle 001 \rangle$ 及び $\langle 011 \rangle$ 方向に走る T-wall， 60° および 180° のスピン軸のなす角度をもつドメイン間の S-wall を直接観察できた (Fig. 1 参照)。以前の研究報告²⁾とは異なり、存在しうる全ての種類の磁壁内のスピン構造の直接観察に初めて成功し、S ドメインのアサインを正確に行なった¹⁾。 $\{001\}$ & $\{011\}$ T-wall 幅を見積もった結果、ともに数 100 nm のオーダーであり、 $\{011\}$ T-wall 幅は $\{001\}$ T-wall 幅よりも幅広い傾向をもつことが新たに分かった。この差異は、T-wall 内のスピン構造に起因していると考えられる。観察された磁壁内のスピン構造の決定については、現在解析中である。

参考文献

- 1) K. Arai *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 013703 (2010).
 2) N. B. Weber *et al.*: Phys. Rev. Lett. **91**, 237205 (2003).

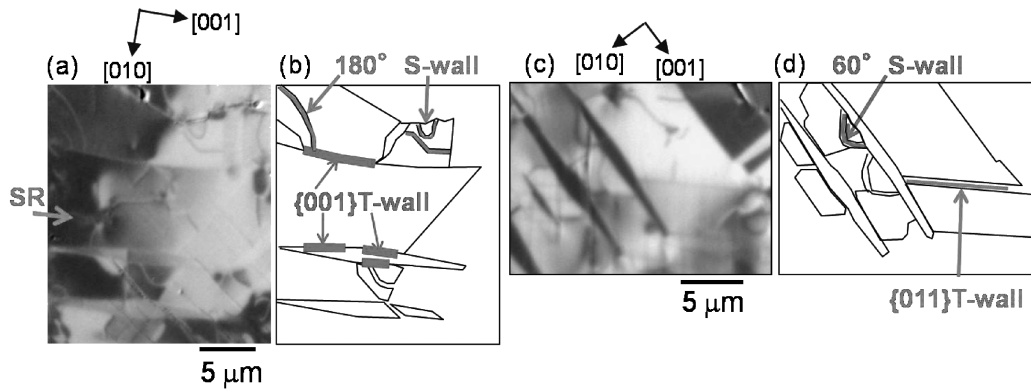


Fig. 1 (a) & (c) s 偏光と XMLD-PEEM を用いて観察された T-wall と S-wall 磁壁幅。(a) イメージ内の矢印の方向は (100) 面に射影した光入射方向を示している。(b) & (d) それぞれ (a) と (c) の磁壁幅を模式的に表した図。太い実線は観察された磁壁幅、細い実線は特徴的な T ドメインと S ドメインの境界を示している。



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。反強磁
性体の磁区構造と微小磁性体のスピンド
イナミクスについて研究している。

【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方々に感謝いたします。また、ご協力、ご指導頂いた共同研究者の皆様、特に SPring-8 JASRI の木下豊彦先生にはいろいろとお世話になり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。

JSR10 学生発表賞 第2分野

受賞者：丹羽秀治（発表番号 8P042）

題目：鉄フタロシアニン由来カーボンアロイ触媒の炭素構造の熱処理温度依存性：軟 X 線吸収分光解析

講演者：丹羽秀治¹、齋藤 信¹、小林正起^{1,2}、
原田慈久^{1,2}、尾嶋正治^{1,2}、松林克征³、
難波江裕太³、黒木重樹³、池田隆司⁴、
寺倉清之⁵、尾崎純一⁶、宮田清蔵⁷

所属：¹東大院工、²東大放射光機構、³東工大、

⁴原子力機構、⁵北陸先端大、⁶群大院工、⁷NEDO

1. 緒言

固体高分子形燃料電池 (PEFC) は、化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため理論効率が高く、小型で低温作動が可能なることから、新たなエネルギー変換デバイスとして実用化されはじめている¹⁾。PEFC のカソード電極触媒には希少で高価な白金が現在用いられている。

PEFC を大幅にコストダウンさせ、本格的に普及させるために、白金に代わる安価な触媒の開発が求められている。白金代替電極触媒として、高い酸素還元反応 (ORR) 活性を示す炭素材料であるカーボンアロイ触媒に注目が集まっているが²⁻⁵⁾、白金の性能に匹敵するまでに至っていない。そこで、カーボンアロイ触媒の ORR 活性点の詳細な知見が得られれば、白金の性能を凌駕する触媒合成の指針となる。これまでの我々の研究は、触媒の炭素自体が ORR 活性点を形成していることを示唆している⁵⁻⁷⁾。しかしながら、直接炭素の電子状態と ORR 活性を結びつけた報告例はこれまでにない。よって本研究では、軟 X 線吸収分光 (XAS) を用いて熱処理温度の異なる鉄フタロシアニン由来カーボンアロイ触媒の炭素の電子状態を観察し、電子状態の熱処理温度による変化と ORR 活性との関係を調べることを目的とした。

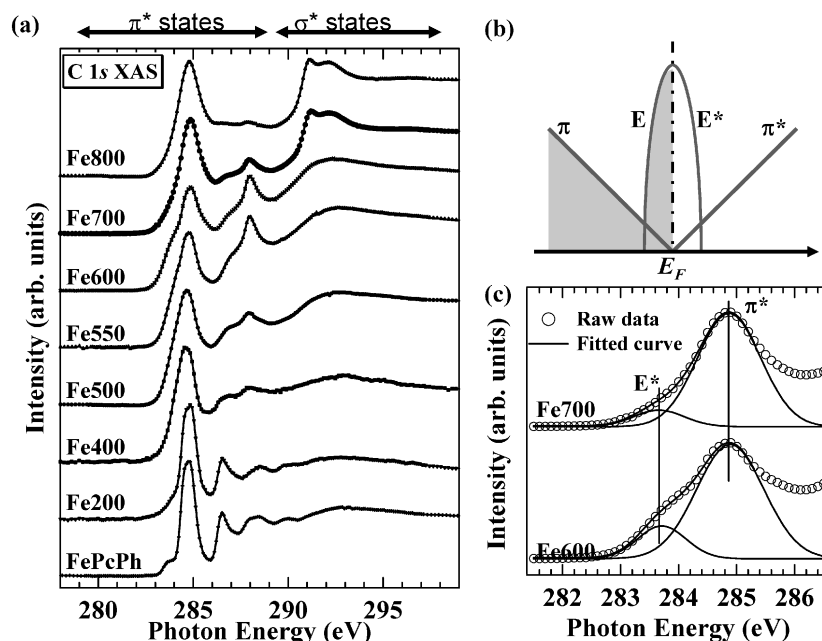


Fig. 1 (a) Fe系カーボンアロイ触媒のC 1s XAS スペクトル。(b)ジグザグエッジのDOS構造。(c) Fe600とFe700のC 1sピークフィッティング結果。

2. 実験

鉄フタロシアニン (FePc) とフェノール樹脂 (Ph) を原料として、異なる焼成温度で一定時間熱処理することで試料を合成した。ここでは、混合した原料を FePcPh, 合成した試料を、熱処理温度 (°C) ごとに、Fe200, Fe400, Fe500, Fe550, Fe600, Fe700, Fe800と呼ぶことにする。

XAS測定は、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory の BL-7A で行った。固体粉末試料を真空チャンバー内に移動させ、C 1s 吸収端を含む280–310 eV の入射光エネルギーを用いて、X線吸収強度を全電子収量法で測定した。検出深さは約10 nm である。得られた吸収スペクトルはバックグラウンドを除去し、 π^* 領域のピーク高さを規格化した。

3. 結果と考察

異なる熱処理温度で合成した鉄フタロシアニン由来カーボンアロイ触媒は、550°C焼成以上のものが ORR 活性を示し、Fe600が最も活性が高かった⁵⁾。Fig. 1(a)にこれらの触媒のC 1s XAS スペクトルを示す。遷移先のC 2p 非占有軌道のエネルギー位置の違いから、吸収スペクトルは主に π^* 遷移と σ^* 遷移に分かれて観測される。全試料で約285 eV に π^* 遷移ピークが観測された。このピークは sp^2 炭素の π^* 空軌道への遷移である。Fe700とFe800の高温熱処理試料において、 σ^* 遷移領域の約291 eV にピークが観測された。このピークはエキシトンピークと呼ばれるものでグラファイトに特徴的なものであるため、700°C以上の温度で試料は積層グラファイト構造が著しく発達していることを示している。

グラフェンやグラファイトのジグザグエッジは、Fig. 1(b)に示したように、通常のグラファイトの π , π^* 軌道に加えて、エッジ状態と呼ばれるシャープな状態密度 (DOS) をフェルミレベル (E_F) 付近に持つ⁸⁾。このジグザグエッジは、酸素還元反応の活性点となりうることが第一原理計算により予測されている⁷⁾。Fig. 1(c)に Fe600とFe700のスペクトルを、 π^* ピークとエッジ状態への遷移である E^* ピークにガウス関数でピーク分離した結果を示す。ORR 活性の高い Fe600の方が、Fe700よりもエッジ状態を多く含んでいることが明らかになった。これは、ORR 活性の高い酸素還元触媒には、確かにジグザグエッジが多く含まれていることを示す初めての例である。上記に加え、導電性と窒素含有量の測定結果から、Fe600が最も活性が高いのは、触媒の導電性が sp^2 炭素ネットワークの成長により向上し、ジグザグエッジの酸素還元活性を強めるグラファイト置換型窒素が多く含まれているためであると考えられる。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の固体高分子燃料電池実用化戦略的技術開発/要素技術開発/カーボンアロイ触媒の委託を受けて行われたものである。XAS実験では、KEK-PFの雨宮健太博士、隅井良平博士に技術的サポートをして頂いた。この場を借りて感謝します。

参考文献

- 1) P. Costamagna *et al.*: J. Power Sources **102**, 242 (2001).
- 2) R. Bashyam *et al.*: Nature **443**, 63 (2006).
- 3) M. Lefevre *et al.*: Science **324**, 71 (2009).
- 4) J. Ozaki *et al.*: Carbon **45**, 1847 (2007).
- 5) Y. Nabae *et al.*: ECS Transaction **25**, 463 (2009).
- 6) H. Niwa *et al.*: J. Power Sources **187**, 93 (2009).
- 7) T. Ikeda *et al.*: J. Phys. Chem. C **112**, 14706 (2008).
- 8) M. Fujita *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn **65**, 1920 (1996).



丹羽秀治

東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻修士課程 2年

【略歴】

2008年3月東京大学工学部応用化学科卒業。2008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。2010年3月現在 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻修士課程2年在籍中

籍中

【受賞のコメント】

この度はこのような栄誉ある賞を頂けることとなり、大変光栄に思います。今回受賞できたのは、日頃ご指導していただいている尾嶋正治教授、原田慈久特任准教授および、共同研究者の皆様のおかげです。この場を借りて御礼申し上げます。世界一の攻め達磨を目指して、今後も精力的に研究してゆきたいと思っております。

JSR10 学生発表賞 第2分野

受賞者：武市泰男（発表番号 2C006）

題目：角度分解光電子分光による FeSi(001) および CoSi(001) の価電子帯構造の研究

講演者：武市泰男, 西出聡悟, 中辻 寛, 奥田太一¹, 森 文夫, 吉信 淳, 近藤 寛², 松田 巖, F. Bertran³, P. Le Fevre³, A. Taleb-Ibrahimi³, 山上浩志⁴, 柿崎明人

所属：東大物性研, ¹広大放射光セ, ²慶応大理工, ³SOLEIL/LURE, ⁴京都産業大理

遷移金属モノシリサイド MSi (M=Mn, Fe, Co) は cubic B20 構造をもち、遷移金属の置換によって格子定数はほとんど変わらない。MSi の物性は 3d 電子数で大きく変化し、MnSi は金属でらせん磁気秩序を示し、FeSi は半導体で常磁性、CoSi は半金属で反磁性である。3d 電子数による物性の変化はリジッドバンドモデルを用いて議論されてきた¹⁾。FeSi の磁化率は、温度の上昇とともに指数関数的に増加する異常な振る舞いを示す。これは、状態密度の鋭いピークで挟まれたギャップ内にフェルミ準位 (E_F) が位置するというモデルにスピン揺らぎの理論を適応することで説明されてきた²⁾。一方、2 バンドハバードモデルから出発して磁化率の異常を再現できること³⁾、実際に光電子スペクトルで E_F 直下に鋭いピークが見られることから、FeSi が強相関電子系物質（近藤絶縁体/半導体）で、光電子スペクトルに近藤ピークを生じるとする報告がなされてきた⁴⁾。しかし、用いられたサンプルは多結晶または単結晶の劈開表面で、表面作成が十分になされておらず、バンド構造の精密な測定がなされてきたとは言いがたい。

最近になって、表面作成条件の違いが光電子スペクトルに大きく影響を与えることが指摘され⁵⁾、表面作成を注意深く行った光電子分光実験では E_F 直下のピークは近藤

ピークを示すものではなく、Fe 3d 状態に起因する価電子帯であるとする報告がなされた⁶⁾。また、CoSi の光電子

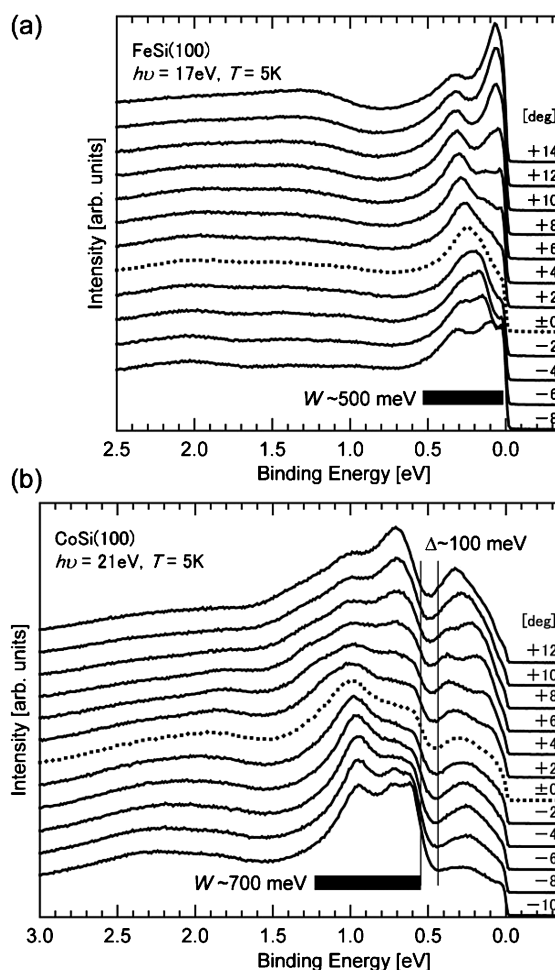


Fig. 1 (a) FeSi(001) および (b) CoSi(001) の角度分解光電子スペクトル。

スペクトルの報告は極めて少ない。

我々は、Synchrotron SOLEILのCASSIOPEEビームラインで高輝度放射光を利用する高分解能角度分解光電子分光実験を行い、単結晶FeSi(001)およびCoSi(001)の価電子帯構造を測定した。試料の清浄表面は、Arスパッタ・アニールによって作成した。その結果、フェルミ準位直下のピークは図のように分散の小さいFe 3dバンドによるものであることが分かった。実験結果をDFTに基づくバンド計算と比較し、FeSi、CoSiともにエネルギー分散の特徴は計算結果とよく一致することを見いだした。CoSiではFeSiの E_F に対応する位置にギャップがみられ、その低および高結合エネルギー側のCo 3dバンド幅はそれぞれ約500 meV、約700 meVと、バンド計算から与えられる値と一致している。一方FeSiにおいては、Fe 3dのバンド幅が計算より約30%減少していることが分かった。

FeSi、CoSi両方で多くのバンドが判別できたのは、ビームラインの高い分解能および表面作成によるものである。光電子分光で観測された E_F 直下のバンドは、いずれも特別な電子相関のハミルトニアンを含まないバンド計算から導かれるものであり、FeSiは通常のナローギャップ半導体として説明することができると思われる。一方で、CoSiやMnSi⁷⁾で見られない光電子励起に伴う多電子効果がFeSiで見られたことは、状態密度の鋭いピークで挟

まれたギャップ内に E_F が位置するというFeSi価電子帯の特徴に起因するものと考えられる。

参考文献

- 1) A. Kakizaki *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **51**, 2597 (1982).
- 2) Y. Takahashi: J. Phys.: Cond. Mat. **9**, 2593 (1997).
- 3) C. Fu *et al.*: Phys. Rev. B **51**, 17439 (1995).
- 4) C.-H. Park *et al.*: Phys. Rev. B **52**, R16981 (1995).
- 5) K. Breuer *et al.*: Phys. Rev. B **56**, R7061 (1997).
- 6) M. Klein *et al.*: Phys. Rev. Lett. **101**, 046406 (2008).
- 7) K. Kura *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 024709 (2008).



武市泰男

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
博士課程2年

【略歴】

平成18年東京大学理学部物理学科卒、
現在理学系研究科物理学専攻博士課程2年。
超低速電子線回折(VLEED)による電子スピン検出器を用いたスピン分解光電子分光、角度分解光電子分光により、主に磁性体薄膜・表面の電子状態の研究を行っている。

【受賞のコメント】

このたびは素晴らしい賞をいただき、本当にありがとうございました。これを励みに、よりいっそう頑張って研究を進めていきたいと思っています。

JSR10 学生発表賞 第2分野

受賞者：新井秀実(発表番号 9P063)

題目：軟X線発光分光による溶液中の水の構造観測

講演者：新井秀実^{1,2}、堀川裕加^{2,4}、貞包浩一郎³、

原田慈久^{2,5,6}、徳島 高²、高田恭孝^{1,2}、辛 埴^{2,7}

所属：¹東大院新領域、²理研 SPring-8、³京大院理、

⁴広大院理、⁵東大院工、⁶東大放射光連携研究機構、

⁷東大物性研

最近、軟X線発光分光を用いて水素結合を形成する液体の研究が行われるようになった^{1,2)}。軟X線発光分光は軟X線を照射して内殻電子を非占有準位に励起することで内殻正孔を生成し、これを外殻の占有準位の電子が埋める際の発光を分光することで、占有準位の状態密度を得る方法である。この手法は絶縁体に適用でき、バルク敏感であることから液体の電子状態を見るのに有効な手段の1つである。我々のグループは水の軟X線発光測定を行い、水には水素結合に由来する4配位した氷様水成分と、水素結合が切れたり歪んだりした成分の2つの成分が存在することを明らかにした^{3,4)}。

本研究では、水素結合に敏感な軟X線発光分光によって、混合溶液中の水の状態を明らかにすることを目的とし、2液混合系の水の軟X線発光測定を行った。水と混合さ

せる溶媒にはピリジン(C₅H₅N)、3-メチルピリジン(C₆H₇N)、アセトニトリル(CH₃CN)を使用した。いずれの溶媒も水と混和し、水素結合を形成する。また、いずれの溶媒も酸素を含まないため酸素1s内殻を選択的に励起して軟X線発光を観測すれば、混合溶液中の水の電子状態のみ抽出できる。

実験はSPring-8 BL17SU発光ステーションで行った。測定には溶液用の軟X線発光分光器を使用した⁵⁾。サンプルを送液するため、溶液セルを用いた(Fig. 1)。送液することで、X線によるサンプルの照射ダメージを防ぐことが可能である。また、窓材(Si₃N₄窓)によって大気と真空の間に仕切りを設け、大気側では溶液セルを設置し、真空側では軟X線を照射し、生じた発光の分光を行った。

アセトニトリル-重水混合系及び3-メチルピリジン-重水混合系の水希薄濃度領域におけるO 1s発光スペクトルをFig. 2に示す。発光スペクトルは水分子の1b₂、3a₁、1b₁の分子軌道に由来する3本のピークから構成される。この結果は、水が薄くなると、溶媒(アセトニトリル、3-メチルピリジン)と水の水素結合のみが形成され、水分子は溶媒の分子によって溶媒和されていると解釈できる。一方で、水が希薄な領域では水と溶媒の組み合わせによって発光スペクトルに違いがあり、特に3a₁のピーク形状が異なることが観測された。我々が行った分子軌道計算

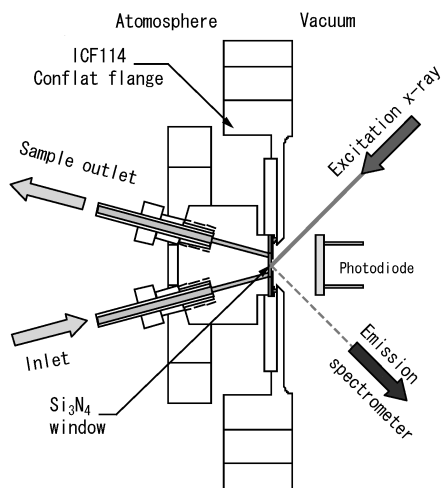


Fig. 1

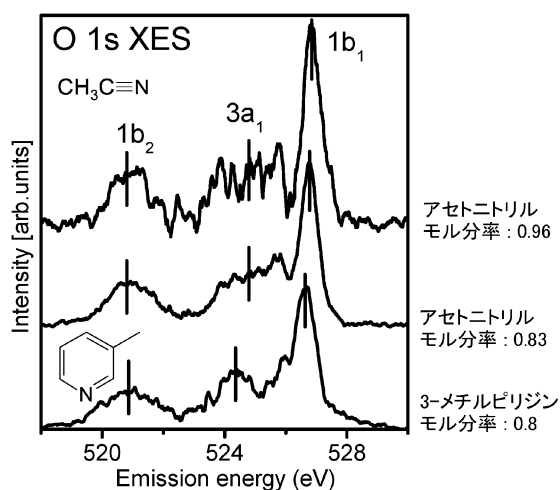


Fig. 2

(Gamess) から、水分子の結合角 (H-O-H のなす角) が変化すると $3a_1$ のピーク位置が大きくエネルギーシフトすることが示されており、この発光スペクトルの違いは、溶媒-水との水素結合に加えて、溶媒の種類によって水分子自体の構造が変化していることを示唆している。これにつ

いては、他の溶媒-水混合系との比較も含めて解釈を進めているところである。

このように、軟X線発光分光は水素結合を形成する液体の研究において強力な手法である。最近では窓材を工夫することによって窒素の発光観測も可能になったので、溶媒分子の電子状態の研究に着手しており、酸素の発光スペクトルと併せて混合液系の水素結合の全容を解明できると期待している。

最後に、本研究を行うには、SPring-8の理研ビームラインBL17SUの性能が必要不可欠であり、高輝度光科学研究センターの大橋治彦氏、仙波泰徳氏、理化学研究所の大浦正樹氏に御尽力頂きました。心から感謝致します。

参考文献

- 1) T. Tokushima *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys. **11**, 1679 (2009).
- 2) Y. Horikawa *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys. **11**, 8226 (2009).
- 3) T. Tokushima *et al.*: Chem. Phys. Lett. **460**, 387 (2008).
- 4) C. Huang *et al.*: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S. A **106**, 15214 (2009).
- 5) T. Tokushima *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **77**, 063107 (2006).



新井秀実

東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻博士課程1年
理化学研究所 ジュニア・リサーチ・アソシエイト

E-mail: hidemi@spring8.or.jp

【略歴】

2007年3月東京都立大学理学部物理学科卒業。2009年3月東京大学大学院新領域創成科学研究科博士前期課程修了。同年より博士後期課程、理化学研究所ジュニア・リサーチ・アソシエイト。

【受賞のコメント】

この度はJSR10学生発表賞を頂き、大変光栄に思います。この受賞は、日頃ご指導頂いております共同研究者の皆様のおかげであり、大変感謝致しております。本受賞を励みに、よりいっそう研究活動に邁進して行きたいと思っております。

JSR10 学生発表賞 第3分野

受賞者：藤井正輝（発表番号 9P107）

題目：Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー光学系の開発

講演者：藤井正輝¹，松山智至¹，三村秀和¹，脇岡敏之¹，
半田宗一郎¹，木村隆志¹，佐野泰久¹，
西野吉則²，玉作賢治²，矢橋牧名³，
石川哲也^{2,3}，山内和人¹

所属：¹阪大院工，²理研，³JASRI

1. はじめに

高分解能で且つ色収差のない結像型硬 X 線顕微鏡を構築するため，1次元ウォルターミラーを KB 配置した Advanced Kirkpatrick-Baez (AKB) ミラー光学系^{1,2)}の開発を行った (Fig. 1)。AKB ミラーは，全反射現象を利用した光学素子であるため，原理的に色収差がない。またウォルターミラーと比べると作製が容易であるため，高分解能化が可能である。本講演では 1次元 AKB ミラーの開発及び，SPring-8 で評価を行った結像性能について述べている。

2. AKB ミラー光学系の開発

本光学系を開発するにあたり，ミラー形状の作製とアライメントシステムの試作を行った (Fig. 2)。ミラー形状は，EEM (Elastic Emission Machining) によって形状誤差 Peak-to-Valley 2 nm と，回折限界結像が可能な精度で加工することに成功した。一方アライメントについては，多数の軸を持つ AKB ミラーに対して円滑な調整が行えるように，リニアアクチュエータを搭載したミラーマニピュレータの開発を行った。また開発したマニピュレータによってアライメントした楕円ミラーと双曲面ミラーの位置関係が最適かどうかは，ミラー配置測定システムによって確認した。このシステムは，X ステージ上にあるレーザー変位計とオートコロメータをスキャンすることで，ミラー間の相対配置を測定している。

3. AKB ミラー光学系の性能評価

開発した AKB ミラー光学系の分解能と視野サイズを，SPring-8 BL29XUL (EH2) で評価した。X 線のエネルギーは 11.5 keV で，大きさ 10 μm のスリット像を焦点面上に縮小結像する光学配置で実験を行った。本光学系の分解能をワイヤスキャン法によって測定したところ，78 nm であった (Fig. 3)。この値は，硬 X 線ウォルターミラー光学系としては世界最小分解能に相当する。また視野サイズは，分解能 200 nm を維持した領域と定義した場合，46 μm という値が得られた。

このように開発した AKB ミラー光学系は優れた結像特性を有していた。今後，2次元結像システムを開発し，高分解能で色収差のない結像型硬 X 線顕微鏡を完成させる予定である。

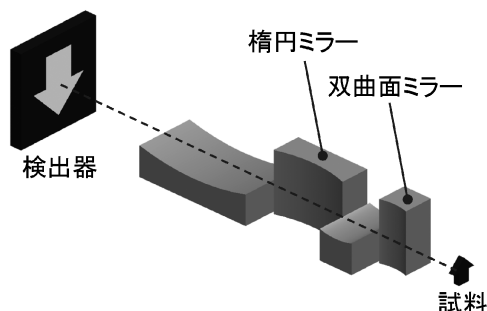


Fig. 1 Advanced Kirkpatrick-Baez ミラー

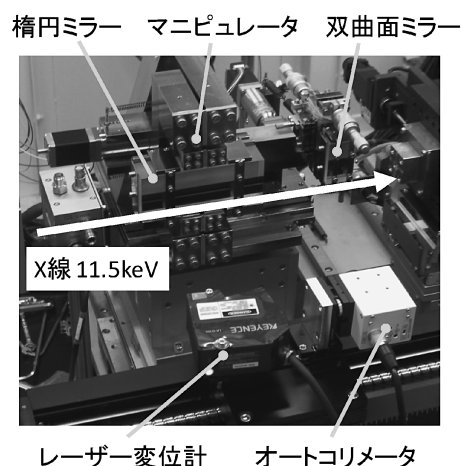


Fig. 2 開発した AKB システム

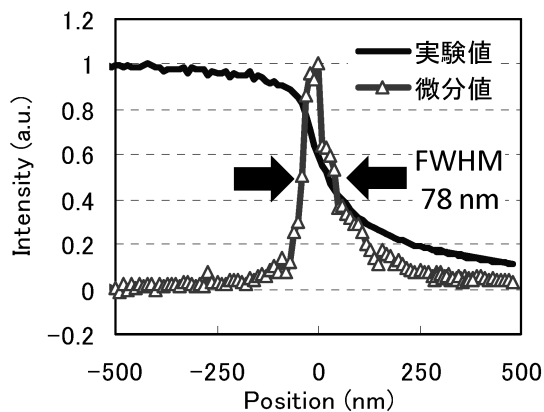
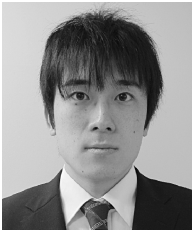


Fig. 3 実験結果

参考文献

- 1) R. Kodama, N. Ikeda, Y. Kato, Y. Katori, T. Iwai and K. Takeshi: OPTICS LETTERS. **21**, 17 (1996).
- 2) S. Matsuyama, M. Fujii and K. Yamauchi: Nucl. Instr. And Meth. A (2009).



藤井正輝

大阪大学大学院工学研究科 精密科学・
応用物理学専攻 修士課程 2年

【略歴】

2007年大阪大学工学部応用自然科学科
精密コース卒業。同年大阪大学大学院工
学研究科精密科学・応用物理学専攻 入
学

【受賞のコメント】

JSR10学生発表賞に選出して頂き、大変光栄に思います。この様な素晴らしい賞を受賞することができたのも、日頃より先生方や先輩方からご指導をいただけたお陰であり、この場をお借りしまして厚く御礼申し上げます。この賞を励みとし、今後より一層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。

JSR10 学生発表賞 第3分野

受賞者：木村隆志（発表番号 3D001）

題目：硬 X 線ナノ集光ビーム用波面誤差算出法の開発

講演者：木村隆志¹、三村秀和¹、半田宗一郎¹、
湯本博勝²、山川大輔¹、松山智至¹、佐野泰久¹、
玉作賢治³、西野吉則³、矢橋牧名²、石川哲也^{2,3}、
山内和人¹

所属：¹阪大院工、²JASRI/SPring-8、³理研/SPring-8

硬 X 線を用いた微細構造計測技術は、硬 X 線の持つ短波長性・高透過性といった特徴から、従来技術では不可知な情報を得られる手段として、非常に大きな可能性を秘めており、現在では硬 X 線を微小領域に集光・走査することにより、数十 nm 以上の分解能で微量元素のマッピングや結晶構造解析を行うことが可能となっている。これらの成果の背景は、大型放射光施設などの高輝度 X 線源の登場とともに、高精度 X 線光学素子の存在抜きに語ることはできない。中でも特に X 線集光光学素子に関しては、

ラウエレンズ・屈折レンズ・X 線ミラーを用いて、半値幅 50 nm 以下の回折限界の集光性能を有するものが既に作製されている。しかし、半値幅で 10 nm を切るような、更なる微小集光ビームを実現するために必要とされる光学素子の作製精度は非常に厳しいものになってきており、従来の精度限界を打ち破る新たな手法の開発が必要とされつつある。

我々はこの困難を克服する手段として、X 線集光ミラー光学系に、波面誤差の修正を行う形状可変ミラーを組み込んだ波面補正システムを導入することを考案した。波長の極端に短い硬 X 線領域において波面補正を実現するためには、極限まで高い精度での波面制御性が要請される。そのため、本発表では波面補正を行う際に必要になる、硬 X 線集光ビームの波面誤差算出法の開発を行った。開発した波面誤差算出法は、X 線集光ビームの集光点近傍の強度プロファイルを高精度に複数計測し、その情報を元に非線形的な位相回復計算¹⁾を行うことにより、光学系に存在する波面誤差の算出を行う。集光点近傍の X

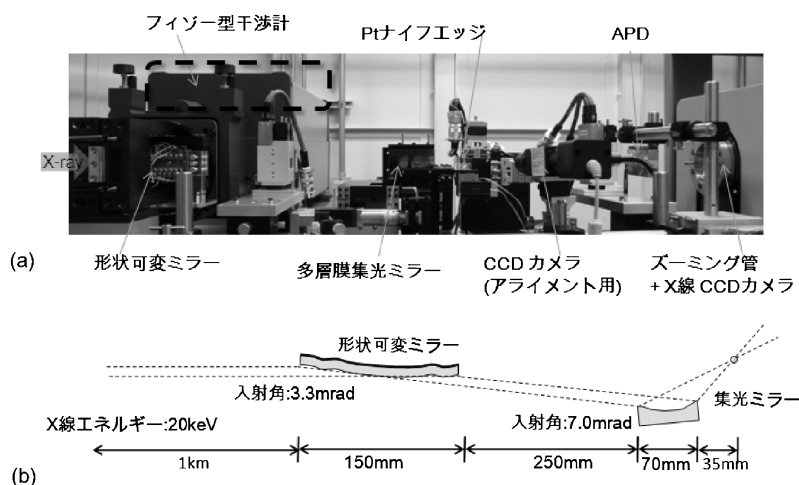


Fig. 1 硬 X 線波面補正・集光ユニット
(a) 外観 (b) 光学配置

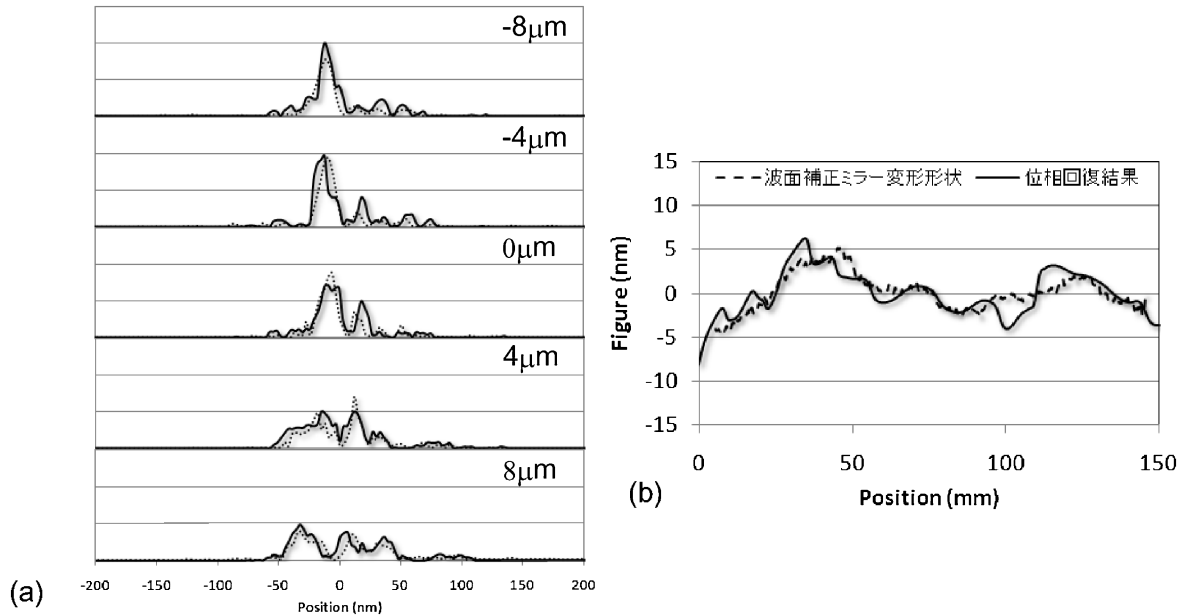


Fig. 2 硬 X 線集光ビームの位相回復結果
(a)実測強度分布 (実線) と回復強度分布 (点線), (b)光学系に存在する波面誤差

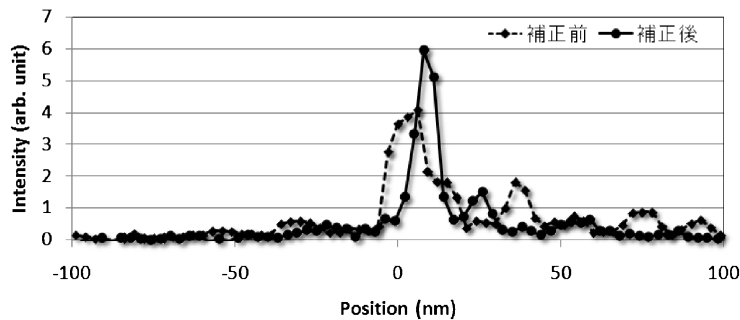


Fig. 3 波面補正前後での集光点強度プロファイルの比較

線強度分布は、光学系に存在する波面誤差の影響を強く反映するため、精度の高い波面誤差の検出が可能であり、更に複数枚の強度プロファイルを利用することにより、解の信頼性を向上できると考えられる。

Fig. 1 に本研究で用いた、波面補正システムを備えた硬 X 線集光光学システムを示す。硬 X 線での波面補正を行うために必要となる高精度形状可変ミラーは、発表者のこれまでの研究により既にサブナノメートルの変形精度を有するものの開発に成功している²⁾。集光ミラーには理論集光径 FWHM で 7 nm となる傾斜多層膜ミラーを作製し、集光ビームの評価には Pt のナイフエッジによる暗視野計測法を用いた³⁾。X 線のエネルギーとしては、ダブルクリスタルモノクロメータによって単色化された 20 keV のものを使用した。実測した集光ビームの強度プロファイル及び位相回復計算によって得られた強度プロファイル、そしてそこから求めた光学系の波面誤差を Fig. 2 に示す。ミラーの形状誤差、多層膜の積層誤差、光学系のアライメント誤差などの影響により、6 rad (P-V) 程度の波面誤差

が存在していることが判明した。これを補正するように形状可変ミラーを変形させ、波面補正前後で集光点での強度プロファイルと比較した結果を Fig. 3 に示す。波面補正を行うことにより、集光ビームの強度・集光径ともに改善が見られており、更に補正後に得られた集光ビームの半値幅は回折限界の値に等しい FWHM で 7 nm であった。この結果は、開発した波面誤差算出法が回折限界集光を実現するのに必要とされる、 $\lambda/4$ 以上の精度を有していたことを示している。本研究で開発した波面誤差算出法及び高精度形状可変ミラーは、硬 X 線領域において in-situ で波長オーダーの波面形状制御が可能なシステムとして、今後様々な分野への応用展開が期待される。

参考文献

- 1) G. R. Brady *et al.*: Optics Express 14, 486 (2006) 474.
- 2) T. Kimura *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 072503.
- 3) H. Mimura *et al.*: Phys. Rev. A 77 (2008) 015812.



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 2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JSR10学生発表賞という素晴らしい賞に選出していただき、大変光栄に感じております。日頃から拙い身をご指導してくださっている先生方、共同研究者の方にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。本受賞を励みとし、より一層研究活動に邁進する所存であります。誠にありがとうございました。

JSR10 学生発表賞 第3分野

受賞者：小河愛実（発表番号 9P028）

題目：放射光と Laser の同期によるポンププローブ時間分解光電子分光装置の開発

講演者：小河愛実^{1,2}，小宇佐友香³，山本 達²，
福島昭子²，原沢あゆみ²，雨宮健太⁴，
近藤 寛³，柿崎明人²，松田 巖²

所属：¹東京大学理学系研究科物理学専攻，
²東京大学物性研究所，
³慶応義塾大学理工学部化学科，
⁴物質構造科学研究所

放射光は約30 ps という時間幅をもつ短パルス光源である。近年、放射光の高輝度化によってこのパルス光という性質を利用した実験が可能になってきており、さかんに研究されている。30 ps という時間スケールで起こる物理には、様々な化学反応や相転移などがある。このような物理現象を詳しく追いかけるため、我々は時間分解光電子分光装置の開発を行っている。放射光による軟 X 線を用いた高分解能光電子分光ではその幅広い光エネルギーによって、Fermi 準位近傍やブリルアンゾーンの広い領域におけるバンド分散、内殻の電子状態、原子分子の化学結合の状態や、振動状態などを調べる事が可能である。高輝度、高分解能の軟 X 線光源を用いる事で、このように多くの情報を得る事ができる事がこれまでの可視光レーザーを用いた時間分解光電子分光装置と異なる本装置の大きな利点である。この時間分解測定を可能にするためには、全く別の光源である、励起光源のレーザー（パルス幅40 fs 繰り返し数 kHz）と、プローブ光である放射光（パルス幅40 ps 繰り返し数 MHz）を同期させなければならない。そのシステムの概略図を Fig. 1 に示している。文献 1) を参考にして、我々は図にあるようなシステムを考案し、その立ち上げを2009年秋に完成した新しいビームライン BL07LSU にて行った。時間分解測定はカウントを溜める事が難し

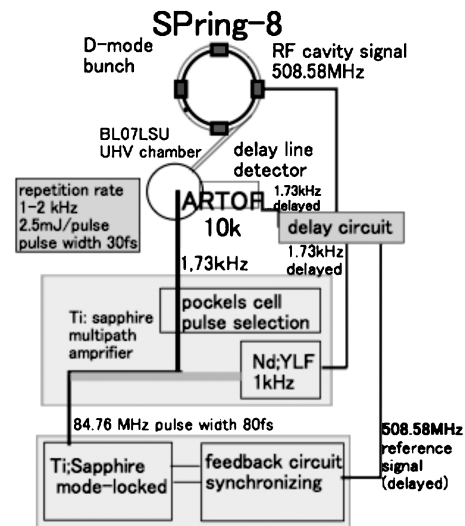


Fig. 1 同期システムの概略図

く、高輝度ビームラインは必要不可欠である。

本装置はアナライザーとして飛行時間型電子分析器 (Time Of Flight (TOF)) と 2 次元ディテクタの DLD を用いた。TOF は時間分解測定においては、従来の半球型光電子分析器と比較して、(1)スリットを用いた分光でないため 1 パルスあたりの光電子の検出効率が良い点、(2) 2 次元ディテクタを用いて 2 方向の角度を 1 度に測定できる点、(3)半球内部での時間ボケや蛍光スクリーンなど時間ボケを生む要素が無い点などの利点を持つ。そこで VG-Scienta 社の ARTOF10k の立ち上げを行い、TOF の苦手とする高い運動エネルギーでも高分解能で測定できる装置を目指して開発を行っている。

講演ではこのような装置の立ち上げを行い、ARTOF10k のテスト測定と時間分解光電子分光測定を試みたことについて詳細に説明した。この立ち上げとテスト測定によって(1)放射光とアナライザー、放射光とレーザーをそれぞれきちんと同期できる事、(2) ARTOF10k を用いた

光電子スペクトルの測定ができる事、(3)時間分解光電子分光測定としてSi(111)7×7のSurface PhotoVoltageの測定を行い、時間変化をとらえる事ができる事などを確認した。

参考文献

- 1) Y. Tanaka *et al.*: Rev. of Sci. Instrum. **71** 1268 (2000).



小河愛実

東京大学理学系研究科物理学専攻修士課程

【略歴】

2008年東京大学教養学部基礎科学科物性科学分科卒業。レーザーポンプ放射光プローブの時間分解光電子分光の立ち上げを行い、半導体キャリアダイナミクスなどの研究を行っている。

【受賞のコメント】

このたびはこのような賞に選んでいただき、本当にありがとうございます。これを励みに今後一層、研究に邁進していきたいと考えています。

JSR10 学生発表賞 第3分野

受賞者：平 義隆 (発表番号 8P014)

題目：UVSOR-IIにおけるレーザーコンプトン散乱を用いた超短パルスガンマ線発生

講演者：平 義隆^{1,2}, 阿達正浩^{2,3}, 全炳俊^{2,3}, 谷川貴紀³, 高嶋圭史¹, 保坂将人¹, 山本尚人¹, 曾田一雄¹, 加藤政博^{2,3,1}

所属：¹名古屋大学大学院 工学研究科, ²UVSOR, ³総合研究大学院大学

1. はじめに

放射線源では生成できないエネルギー数 MeV 以上のガンマ線を生成する有効な方法としてレーザーコンプトン散乱(LCS¹⁾)が用いられている。LCSは、レーザー光子を高エネルギー電子ビームにより逆コンプトン散乱してガンマ線に変換する手法である。電子が静止している系での通常のコンプトン散乱では、光子のエネルギーの一部が電子に付与されるが、逆コンプトン散乱では、散乱光子は入射エネルギーに対して約 γ^2 倍(γ :電子のローレンツ因子)のエネルギーを受け取って散乱される。本研究では、LCSで生成されるガンマ線のパルス幅に着目し、サブピコ秒の超短パルスガンマ線を生成して、LCSガンマ線の新しい利用を開拓することを目指している。

超短パルスガンマ線を生成するために、電子蓄積リングを周回する電子ビームの形状に着目した。電子ビームの形状は、進行方向には数 cm と長い、断面サイズは小さい。特に、軌道面に対して垂直方向には100 μm 以下と薄く、極端に扁平な形をしている。したがって、フェムト秒レーザーを電子ビームに対して垂直方向から衝突させることで、電子ビームとレーザーの相互作用時間が短くなり、生成するガンマ線のパルス幅はサブピコ秒となる (Fig. 1)。電子エネルギー750 MeVのUVSOR-IIにおいて、ビーム電流値100 mA (シングルバンチモード)、波長800 nm、パルスエネルギー10 mJのフェムト秒レーザーを用いた場合で計算すると、ガンマ線のエネルギー、強度、パ

ルス幅は、それぞれ6.6 MeV, $2.4 \times 10^3 \text{ photons pulse}^{-1}$, 288 fsである。これらのパラメーターは、レーザーの入射角度や波長、電子ビームのエネルギー等を変えることで可変である。

2. 実験

UVSOR電子蓄積リングには、複数の方向から真空チャンバー内部を覗くことのできる窓を有するチャンバーを設置している。これを改造し、軌道面垂直方向から電子ビームにレーザーを入射できる窓を取り付けた。この際、電子ビームに悪影響を与えないようにRF遮断を設け、遮断に設けたスリットからレーザーを入射するようにした。レーザーは、蓄積リングのRF加速に同期したTi:Saレーザーが利用可能であった。レーザーのパルスエネルギー、繰り返し周波数、波長、パルス幅、ビームサイズは、それぞれ1.8 mJ, 1 kHz, 800 nm, 600 fs, $2.5 \times 1.5 \text{ mm}$ である。レーザーは、ミラーを用いてリングを横断し、真空チャンバーの入射窓まで輸送した (Fig. 1)。検出器は、NaIシンチレーター (直径127 mm) を使用し、NaIでの吸収エネルギースペクトルを測定した。検出器の飽和を避けるために電子ビーム強度は、通常運転時の1/100以下の1 mA程

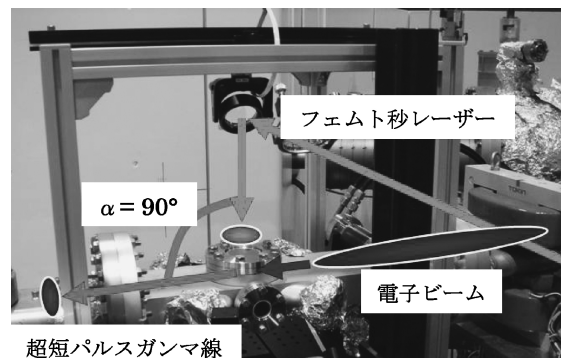


Fig. 1 レーザー垂直入射用真空チャンバー。電子ビームに対して垂直にレーザーを衝突させ、超短パルスガンマ線を発生させる。

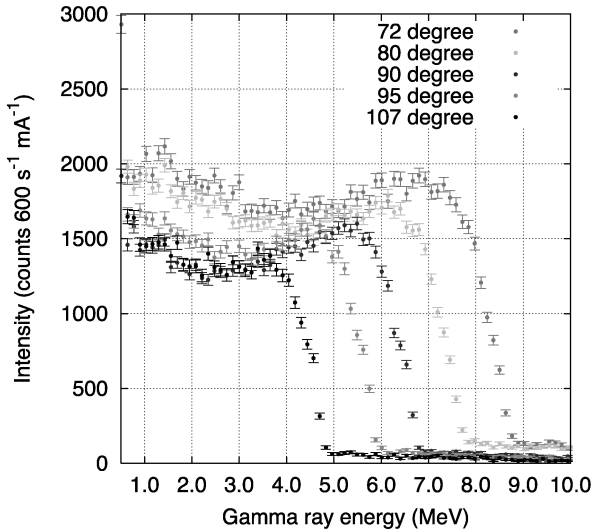


Fig. 2 LCS ガンマ線のエネルギースペクトル。レーザーの入射角度 α を図中に示した。測定時間は10分間。

度とした。電子ビームに対するレーザーの入射角度 α は、連続的に変えることができ、 $\alpha = 72^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 95^\circ$, 及び 107° の場合でそれぞれ測定した。電子ビームパルスとレーザーパルスを衝突させるために、入射窓近傍のピックアップ電極を用いてタイミング調整を行った。また、ガンマ線強度が最大になるように、電子ビームの軌道を変え、空間的なアライメントを調整した。

3. 結果・考察

Fig. 2 に、図中に示したそれぞれの入射角度 α で得られたエネルギースペクトルを示す。垂直方向からレーザーを

入射してガンマ線を生成することに成功した。また、レーザーの入射角度 α を変えることで、ガンマ線の最大エネルギーを変えることができることを実証した。入射角度によるガンマ線の最大エネルギーと強度は、理論式と EGS5²⁾ を用いたシミュレーションから導かれる結果と良く一致した。今回の実験条件をもとに理論的に予想されるパルス幅は、 ~ 5 ps である。今後、レーザーを集光してサイズを絞ることで、サブピコ秒の短パルス生成が可能である。このような超短パルスガンマ線の計測法、利用法は全く未開の領域であり、今後挑戦していきたいと考えている。

参考文献

- 1) J. Stepanek: Nucl. Instr. Meth. A, **412**, 174 (1998).
- 2) H. Hirayama *et al.*: SLAC-R-730 (2005).



平 義隆

名古屋大学工学研究科マテリアル理工学専攻量子エネルギー工学分野博士後期課程1年

E-mail: tairayo@ims.ac.jp

【略歴】

2007年名古屋大学理学部物理学科卒業。同年名古屋大学理学研究科博士前期課程入学。2009年名古屋大学理学研究科博士前期課程修了。同年名古屋大学工学研究科博士後期課程入学。

【受賞のコメント】

この度は、学生発表賞を頂くことができ、光栄に思います。普段、ご指導して下さっている先生方や UVSOR 施設の方々のお陰であり、お礼を申し上げます。今後の研究への大きな励みとなりました。誠にありがとうございました。