

第25回日本放射光学会年会・ 放射光科学合同シンポジウム(JSR12)学生発表賞審査結果について

第25回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR12)
放射光学会行事幹事 松田 巖(東京大学 物性研究所)

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「全ての学生による発表」を対象としています。第25回年会・合同シンポ(JSR12)では、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69名の方々に審査をお願いいたしました*。なお、各審査員には1人辺り8件程度の審査をしていただきました。

第25回年会・合同シンポ(JSR12)では学生発表賞対象が計111件あり、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：7件、ポスター発表：33件
第2分野 VSX領域の固体・原子分子など 口頭発表：11件、ポスター発表：28件
第3分野 加速器装置・イメージングなど 口頭発表：8件、ポスター発表：24件
合計件数 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9名(各分野3名、あいうえお順)の方に学生発表賞を授与することに決定しました。受賞者の皆様が、これを契機に今後も放射光分野において益々活躍されることを期待しております。

【JSR12学生発表賞受賞者】

第1分野 X線領域の回折・散乱・分光など

- 井上伊知郎(東大院新領域)：X線光子相関分光法(XPCS)による加硫ゴムにおけるナノ粒子ダイナミクスの観測
- 小川古都(名大院工)： $\text{Bi}_2(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_2\text{CuO}_{6+\delta}$ の超伝導ギャップのキャリア濃度依存性
- 星指健太郎(東大院新領域)：水溶液中中金ナノ結晶にかかる aN レベルの X 線放射圧

第2分野 VSX領域の固体・原子分子など

- 丹羽秀治(東大院工)：鉄フタロシアニン由来酸素還元触媒の酸素雰囲気下軟 X 線発光分光
- 林 博和(広大院理)：偏光依存高分解能角度分解光電子分光による Pd(110)単結晶の多体相互作用の研究
- 吉松公平(東大院工)：強相関酸化物 SrVO_3 における量子井戸状態

第3分野 加速器装置・イメージングなど

- 小河愛実(東大物性研, 東大院理)：放射光とレーザーの同期による時間分解光電子分光装置の開発と半導体表面光起電力効果の研究
- 鈴木祥仁(東大院新領域)：X線1分子追跡法を用いた膜タンパク質の高速1分子計測
- 中森紘基(阪大院工)：アダプティブ集光光学系のための高精度形状可変ミラーの作製と評価

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。

*謝辞：審査にご協力いただいた先生方、このたびはご多忙にもかかわらずご協力いただき、誠にありがとうございました。今回の第25回年会・合同シンポ(JSR12)の講演会場において、学生と先生方との間で活発に議論が交わされる様子を拝見させていただきました。本来なら個別にて御礼申し上げるところですが、本紙面にて感謝の意を伝えさせていただきます。

JSR12 学生発表賞 第1分野

受賞者：井上伊知郎（発表番号8P083）

題目：X線光子相関分光法（XPCS）による加硫ゴムにおけるナノ粒子ダイナミクスの観測

講演者：井上伊知郎¹，篠原佑也¹，岸本浩通^{1,2}，雨宮慶幸¹

所属：¹東大院新領域，²住友ゴム工業株式会社

1. はじめに

コヒーレントなX線が物質に入射すると照射位置全体の散乱波が干渉し、スペックルと呼ばれる粒状の散乱が観測される¹⁾。時間的に物質の構造が揺らぐとスペックルも揺らぐために、スペックルの時間変化を調べることで物質の構造揺らぎに関する情報を得ることが出来る。この手法のことをX線光子相関分光法（X-ray Photon Correlation Spectroscopy, XPCS）²⁾と呼ぶ。X線光子相関分光ではナノメータスケールのミリ秒から秒程度の構造揺らぎの情報を得ることができ、さらに可視光の動的散乱では測定が難しいような濃厚で不透明な系にも適用できるというメリットがある。

本研究ではX線光子相関分光法を用いて、加硫したゴムに充填したナノ粒子がどのようなダイナミクスを示すのかを調べた。加硫とは、硫黄をゴムの高分子と混合して加熱することで高分子同士を結びつけるプロセスのことであり、このプロセスによってゴム材料の力学物性が飛躍的に向上することから、現在のゴム製品の製造にとって必要不可欠のものとなっている。加硫によって物性が向上すること自体は150年以上も前に発見されたものであるが、驚くべきことに加硫によって系に引き起こされるミクロスコピックな動的・静的構造は十分に理解されていない。実際のゴム材料においては、カーボンブラックやシリカといったナノ粒子を充填させることで更なる力学物性の向上を獲得しているが、加硫ゴムにおけるナノ粒子のダイナミクスを理解することは学術的な観点だけでなく、材料設計などに有用であると考えられるため、産業的にも重要な問題である。

2. 実験

実験はSPring-8のBL40XUおよびBL03XUで行った。試料としてはシリカナノ粒子を充填したスチレンブタジエンゴムを加硫したものをを用いて測定を実施した。試料に照射されるX線の断面全体を空間的にコヒーレントにするために5 μm 径のピンホールスリットをサンプルの上流に設置し、さらに、このピンホールからの回折によって生じる寄生散乱を除去するために5 μm 系のピンホールと試料の間に35 μm 径のピンホールを設置した。試料の3m下流にイメージインテンシファイアとCCDを組み合わせた検出器³⁾を設置し、スペックル状の散乱像を時分割で測定した。

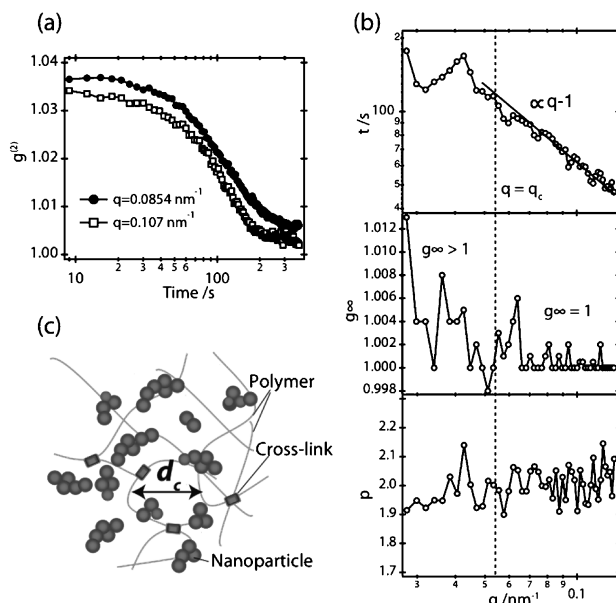


Fig. 1 (a) 実験によって得られた強度相関関数の例
(b) 120°Cにおけるナノ粒子ダイナミクスの解析結果
(c) 実験から示唆された高分子のネットワーク構造

3. 結果と考察

X線光子相関分光法では

$$g^{(2)}(q, t) = \frac{\langle I(q, 0)I(q, t) \rangle}{\langle I(q, 0) \rangle^2}$$

で定義される強度相関関数を様々な散乱ベクトル $q = 4\pi \sin \theta / \lambda$ に関して得ることができる。

Fig. 1(a)に実験によって求められた強度相関関数の一例を示す。強度相関関数は時間的に減少していくが、測定時間の時間スケールでは1よりも大きな値に収束している。この特徴は系の構造揺らぎが制限されているような非エルゴードな系に見られる振る舞いであり⁴⁾、可視光の動的散乱の分野ではゲルなどの系について報告がある。

定量的な評価のために実験的に得られた強度相関関数を

$$g^{(2)}(q, t) = g_{\infty} + \beta \exp \left[-2 \left(\frac{t}{\tau} \right)^p \right]$$

によってフィッティングした。ただし、 g_{∞} は相関関数のベースライン、 β は光学系によって決まるパラメータ、 τ は系の緩和時間、 p は構造の揺らぎ方に関係した指数である。試料の温度を120°Cに保った時の実験結果をフィッティングした結果 (τ, g_{∞}, p) を Fig. 1(b)に示す。

この解析の結果、ある散乱ベクトル $q_c = 5.5 \text{ nm}^{-1}$ を境にナノ粒子のダイナミクスの振る舞いが異なることが分かった。 $q > q_c$ の領域では g_{∞} がおよそ1であり、 τ が q の-1乗に比例し、 p がおよそ2程度である。これらは加硫を

していないゴムにおけるナノ粒子のダイナミクスと同じ振る舞いである⁵⁾。一方、 $q < q_c$ の領域では g_∞ が 1 よりも大きいことから系の構造揺らぎが制限されていると考えられる。また、この領域では τ の q 依存性が加硫をしていないゴムと異なっている。

この q 依存するナノ粒子ダイナミクスを説明するモデルとして Fig. 1(c) で示されるような高分子のネットワークがナノ粒子のダイナミクスに影響するようなモデルが考えられる。すなわち 1 つの高分子のネットワークのかご (ケージ) の大きさを d_c とし、 $q_c = 2\pi/d_c$ としたときに、ケージよりも小さな空間スケール ($q > q_c$ に対応) の構造揺らぎは高分子のネットワークに影響されず、ナノ粒子は比較的自由に動くことが出来るため、加硫していないゴムにおけるナノ粒子ダイナミクスと同等の振る舞いをすると考えられるが、一方で、ケージよりも大きな空間スケール ($q < q_c$ に対応) の構造揺らぎは高分子のネットワークによって制限されてしまっているということである。

4. まとめと今後の展望

加硫がゴムにおけるナノ粒子ダイナミクスに与える影響を実験によって調べた結果、高分子のネットワークがナノ粒子ダイナミクスに影響を与えることが示唆された。今後はナノ粒子ダイナミクスから力学物性と結びつけるマイクロレオロジー的なアプローチ⁶⁾やシミュレーションを用いたナノ粒子ダイナミクスの解析が必要であると考えている。また、現状では実験データの精度は試料への radiation damage によって制限されているが、X 線領域の Speckle Visibility Spectroscopy^{7,8)}などの新しいアプロー

チによってデータの質を向上させることも検討している。

参考文献

- 1) M. Sutton *et al.*: Nature 352, 6336, 608 (1991).
- 2) M. Sutton: Cr. Phys. 9, 657 (2008).
- 3) Y. Shinohara *et al.*: J. Synchrotron rad. 17, 737 (2010).
- 4) P. N. Pusey and W. Van Megan: Physica A 157, 705 (1989).
- 5) Y. Shinohara *et al.*: Macromolecules 43, 9480 (2010).
- 6) A. Papagiannopoulos *et al.*: J. Phys.: Condens. Matter 17, L279 (2005).
- 7) P. K. Dixon and D. J. Durian: Phys. Rev. Lett. 90, 184302 (2003).
- 8) R. Bandyopadhyay *et al.*: Rev. Sci. Instrum. 76, 093110 (2005).



井上伊知郎

東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程

【略歴】

2011年東京大学工学部物理工学科卒業。現在、同大学院新領域創成科学研究科修士課程在学。コヒーレント X 線散乱を用いた動的・静的構造解析の研究に従事。

【受賞のコメント】

この度は JSR12 学生発表賞に選出して頂いたことを大変光栄に思います。研究を指導していただいた雨宮慶幸教授、篠原佑也助教、試料を提供していただいた住友ゴム工業株式会社の岸本浩通氏、SPring-8 での実験でお手伝いしていただいた八木直人博士、太田昇博士、増永啓康博士の諸氏に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。本賞を励みにして、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。

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

JSR12 学生発表賞 第 1 分野

受賞者：小川古都 (発表番号 8P098)

題目：Bi₂(Sr_{1-x}La_x)₂CuO_{6+δ} の超伝導ギャップのキャリア濃度依存性

講演者：小川古都¹、坂本英城²、Walid Malaeb³、近藤猛³、辛埴³、生田博志^{1,2}、竹内恒博^{1,2,4}

所属：¹名大院工、²名大工、³東大物性研、⁴名大エコトピア科学研究所

【緒言】

銅酸化物高温超伝導体において不足ドープ領域で顕著に観測される擬ギャップは、フェルミ面の一部を消失させ、クーパー対となり得る電子の数を減らしている。さらに、超伝導状態でも残存することで、超伝導相の安定化を阻害していると報告されている^{1,2)}。この解釈が正しければ、超伝導遷移温度 T_c の決定に直接関係する超流動密度は、超伝導ギャップの大きさのみに決定されている訳ではなく、フェルミ面上における擬ギャップに阻害されない領域の大きさにも依存しているはずである。

不足ドープ領域において、キャリア濃度の減少に伴う擬ギャップの増大は T_c の減少の一因であることは間違いない。しかし、もう一つの因子である超伝導ギャップのキャリア濃度依存性は正確には解明されていない。

【実験】

高分解能レーザー励起角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて、Bi₂(Sr_{1-x}La_x)₂CuO_{6+δ} (Bi2201) の超伝導ギャップを正確に測定し、そのキャリア濃度依存性を解明した。キャリア濃度は、放射光励起 ARPES を行い、フェルミ面の大きさから決定した。

【結果および考察】

フェルミ波数における対称化スペクトルと、スペクトルから見積もった超伝導ギャップの大きさの方位依存性を Fig. 1 に示す。測定の結果、ノード近傍では、超伝導ギャップは単純な d 波のギャップ関数 $\Delta = \Delta_0 |\cos 2\phi|$ で表わすことが出来ることが分かった。

Fig. 2 に Δ_0 , T_c を、ホール濃度 p に対してプロットし

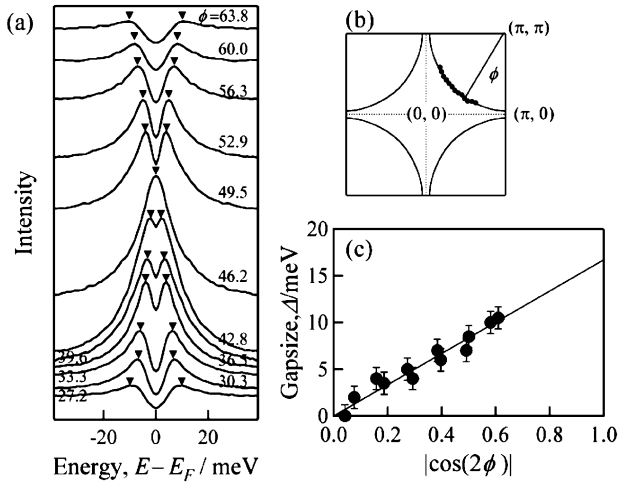


Fig. 1 不足ドーピング試料 ($T_c=28\text{ K}$) における (a) フェルミ波数での対称化スペクトルの方位依存性, (b) フェルミ面, (c) ARPES 測定により見積もった超伝導ギャップの方位依存性

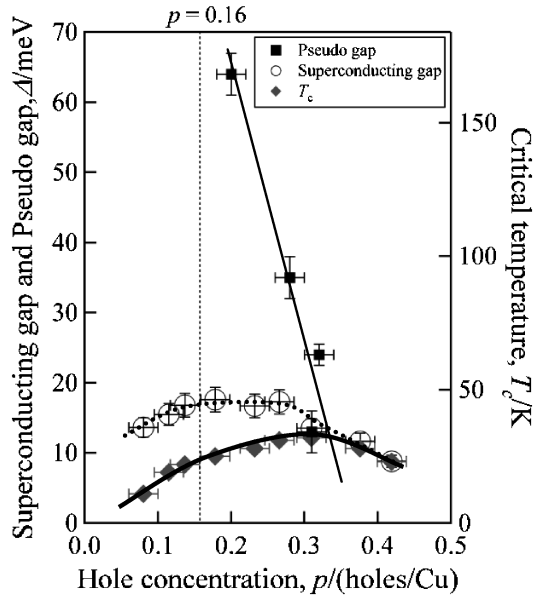


Fig. 2 超伝導ギャップ及び擬ギャップと超伝導遷移温度 T_c のホール濃度 p 依存性。超伝導ギャップと T_c は $1/(2\Delta_0/k_B T_c) = 8.9$ で規格化した。

た。幅広い組成領域において測定を行った結果、超伝導ギャップの大きさは、最適ドーピングからやや不足ドーピング領域に

おける幅広い領域 ($0.16 < p < 0.26$) でほぼ一定かつ最大になることが分かった。このことは、クーパー対を生み出す相互作用が比較的幅広い領域で強くなっていることを示している。

また、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における最適ドーピングのキャリア濃度 $p=0.16$ は、超伝導ギャップが最大となる領域に含まれており、 $p=0.16$ より p を減少させると超伝導ギャップが減少することが分かった。

過剰ドーピングで規格化 ($2\Delta_0/k_B T_c \sim 8.9$ に相当) すると、アンチノードで観測される擬ギャップの大きさが Δ_0 よりも大きくなるキャリア濃度領域において、 Δ_0 と T_c で描かれる曲線の差が生じ、キャリア濃度の減少に伴いその差が大きくなっている。この実験事実は、不足ドーピングにおいて擬ギャップが成長することで超伝導相の安定化が阻害されていることを明瞭に示している。

謝辞

本研究は、放射光 ARPES を UVSOR BL7U 及び SRC U-NIM にて、レーザー ARPES を東京大学物性研究所辛研究室にて行いました。御協力くださいました先生方にご場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) T. Kondo, R. Khasanov, T. Takeuchi, J. Schmalian and A. Kaminski: Nature **457**, 296 (2009).
- 2) Y. Okada, T. Kawaguchi, M. Ohkawa, K. Ishizaka, T. Takeuchi and H. Ikuta: Phys. Rev. B **83**, 104502 (2011).



小川古都

名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻修士課程 2 年

【略歴】

2010 年名古屋大学工学部物理工学科卒業。2010 年名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻入学。

【受賞のコメント】

この度は、名誉ある賞を頂き、誠にありがとうございます。本研究を評価していただきましたことを大変嬉しく思っております。日頃からご指導いただいております竹内恒博先生、生田博志先生、竹中康司先生、ならびに本研究にご協力くださいました皆様のお陰です。厚く御礼申し上げます。

JSR12 学生発表賞 第1分野

受賞者：星指健太郎（発表番号 9P096）

題目：水溶液中金ナノ結晶にかかる aN レベルの X 線放射圧

講演者：星指健太郎^{1,2}、関口博史^{1,2}、一柳光平^{1,2}、鈴木祥仁^{1,2}、八木直人^{2,3}、松尾龍人³、太田昇³、佐々木裕次^{1,2,3}所属：¹東大新領域、²JST/CREST 佐々木チーム、³SPRING-8/JASRI

電磁放射を受ける物体に働く力場である放射圧は、そのマイクロサイズの力場形成という新規な物理現象を実現できるため、可視領域のレーザー光を用いたトラップツールとして広く利用されている。波長の短い X 線による放射圧は、生体高分子に金ナノ結晶を標識した X 線 1 分子追跡法 (Diffracted X-ray Tracking: DXT) を用いることで、数 aN レベルの外力の存在を世界で初めて確認できた¹⁾。

本研究では、 μsec レベルの検出が可能な高速 X 線カメラ (イメージインテンシファイヤー + 高速 CCD) を用いて、水溶液中に単分散している金ナノ結晶のブラウン運動を観測した。入射 X 線の波長とフラックス量を変化させることによって、エネルギー量に対する金ナノ結晶の動的挙動変化を高速 DXT により単一ナノ結晶計測することに成功した (Fig. 1)。DXT によって計測できる 2 つの軸方向について運動性の入射強度依存性を調べると、入射 X 線の同心円方向 (χ 方向) は運動がほぼ変化しないが入射 X 線軸方向 (θ 方向: 放射圧方向) の揺らぎは大きくなるのが分かった (Fig. 2)。

ナノ結晶のブラウン運動と外力の評価は、金ナノ結晶の回転方向に関する平均二乗変位量 (Mean-square Displacement: MSD) と運動量ヒストグラムを用いて行った。その結果、金ナノ結晶の結晶面 (111) に対してエネルギー依存の明確な放射圧が観測され、計測結果から得られた圧力と入射 X 線の波長と光子量から導かれる圧力がほぼ一致した (Table 1)。また、ナノ結晶の運動方位性を詳細に解析した結果、複数結晶面に対する X 線放射圧の合力が存在すると考えられる結果も得ることができた。

この結果は、結晶性ナノプローブや結晶方位トラップとしての働きや、溶液中の結晶成長の際の結晶性を上げるための力場形成として、X 線を光源に用いた新奇の現象を作り出すことができることを示している。また、金ナノ結晶をタンパク質分子にラベルし、タンパク質 1 分子の動きを可視化できる高速 DXT²⁾において、数 aN レベルの力場を検出できることを証明したことになり、逆に aN でナノ結晶のブラウン運動を変調することも可能である。つまり、もしタンパク質分子の中で AFM や STM で検出が不可能な超微小な力場によって誘導された動的構造変化が存在するならば検出することができる。加えて今後、XFEL や ERL 等の高フラックスの光源を用いた実験系で、以上

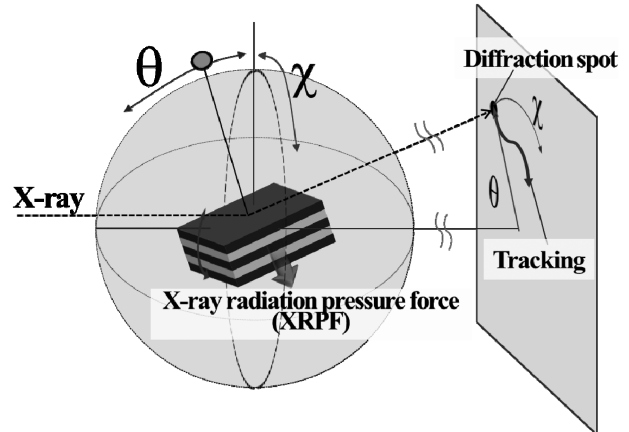


Fig. 1 Schematic diagram of the DXT and XRPF

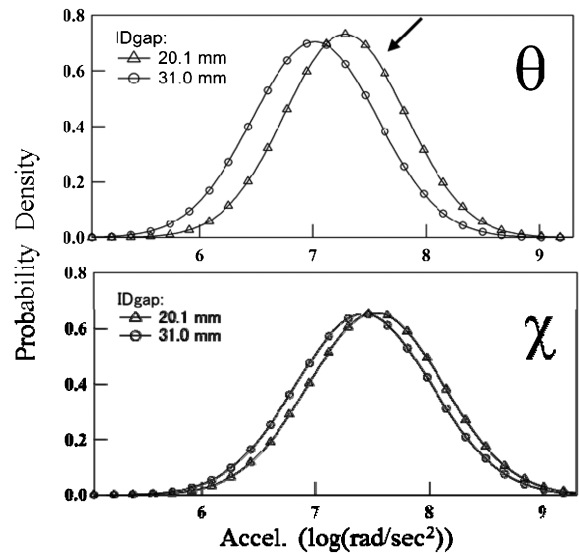
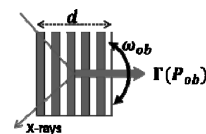
Fig. 2 Instantaneous acceleration ($/5 \mu\text{s}$)

Table 1 Calculation of X-ray radiation pressure



P_{ob} of XRPF as an experimental value was calculated from the torque Γ obtained from MSD curve. P_{est} was estimated by wavelength and flux of the incident X-ray characterization.

ID gap (mm)	ω_{ob} (mrad/s)	Γ (aN nm)	P_{ob} (aN)	P_{est} (aN)
20.1	171.4	40.0	1.09 (0.29~3.16)	0.92 (0.31~2.07)
31.0	132.0	30.8	0.81 (0.15~1.34)	0.70 (0.23~1.60)
20.1 (200)	83.9	19.6	0.53 (0.14~1.55)	0.47 (0.15~1.06)

のような X 線放射圧が外力として無視できない要素になることが考えられる。

参考文献

- 1) Y. C. Sasaki *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* 89, 053121 (2006).
- 2) H. Shimizu *et al.*: *Cell*, Vol. 132, 67-78 (2008).



星指健太郎

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

E-mail: kk106114 @ mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

【略歴】

2010年3月東京工業大学生命理工学部卒業2010年10月より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

在籍中

【受賞のコメント】

この度は、学生会員発表賞に選出されたことを大変光栄に思います。評価していただいた方に感謝をするとともに、日頃ご指導いただいている佐々木裕次教授、関口博史特任助教授、一柳光平助教授、並びに助言等を頂いた方々にお礼申し上げます。本省を励みに今後もより一層の精進を積みたいと思います。

JSR12 学生発表賞 第2分野

受賞者：吉松公平（発表番号 5C002）
 題目：強相関酸化物 SrVO₃ における量子井戸状態
 講演者：吉松公平¹，堀場弘司^{1,2}，組頭広志¹⁻³，
 藤森 淳⁴，吉田鉄平⁴，尾嶋正治^{1,2,5}
 所属：¹東大院工，²東大放射光機構，³JST さきがけ，
⁴東大院理，⁵JST-CREST

1. 緒言

自然量子井戸構造を持つ層状酸化物では、強相関電子が2次元の伝導層に閉じ込められることで銅酸化物の高温超伝導やMn酸化物の巨大磁気抵抗効果といった特異物性が発現している。そのため近年の酸化物薄膜作製技術の進歩を背景として、人工構造を用いた強相関電子の量子閉じ込めが注目されている。人工構造を用いて強相関電子の量子閉じ込めを実現できれば、その高い構造の自由度から新たな機能を持つ物質を創製できると考えられる。しかしながら、未だ強相関電子の2次元閉じ込めに成功した例は報告されていない。

そこで本研究では、典型的な強相関金属であるペロブスカイト酸化物 SrVO₃ に着目し、伝導層の厚さを自由に制御した量子井戸構造を作製することで強相関電子の2次元閉じ込めを行った。また、閉じ込められた強相関電子の振る舞いを角度分解光電子分光 (ARPES) により直接観測した。

2. 実験

実験は KEK-PF の BL28A にレーザー MBE-*in situ* 光電子分光複合装置を設置して行った。SrVO₃/SrTiO₃ 金属量子井戸構造はレーザー分子線エピタキシー法を用いて作製し、SrVO₃ 薄膜の膜厚は反射高速電子線回折を用いて原子層レベルで制御した。

角度分解光電子分光は入射エネルギー88 eV を用いて20

K で測定を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1(a) に Γ 点での V 3d 状態の ARPES スペクトルを示す。SrVO₃ 薄膜の膜厚増加に伴い、1) ピーク構造が高結合エネルギー側にシフトする、2) 新たなピーク構造がフェルミ準位近傍に出現する、3) ピーク位置がバルク V 3d バンドの底に収束する、といった金属量子井戸状態に典型的な現象が観測された。このピーク位置の膜厚依存性を位相シフト量子化則¹⁾を用いて解析したところ、Fig. 1

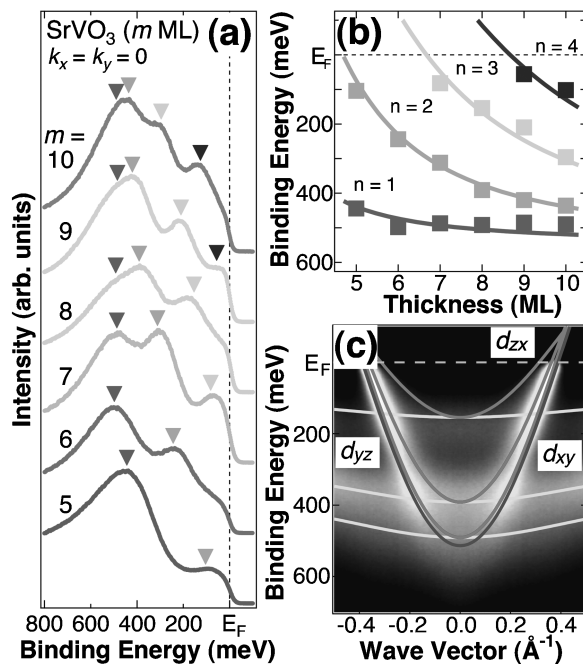


Fig. 1 (a) Γ 点での SrVO₃ 膜厚依存 ARPES スペクトル, (b) SrVO₃ 膜厚に対する Γ 点での量子化準位のエネルギー位置, (c) Γ -X 方向における SrVO₃ (8 ML) の量子化準位のバンド分散

(b)に示すように実験を非常に良く再現する結果が得られた。このことは、強相関金属量子井戸においても量子化準位の基本的な振る舞いは、従来の金属量子井戸の概念で理解できることを示している。一方で、サブバンドの分散からは異方的な $3d$ バンドを由来とする軌道選択的な量子化や、強い電子相関を反映したサブバンドに依存した有効質量の増大といった強相関金属量子井戸特有の現象が観測された²⁾。

Fig. 1(c)に示す Γ -X 方向のサブバンドの分散からは、 d_{yz} 軌道由来の重いサブバンドと d_{zx} 軌道由来の軽いサブバンドの二種類が観測された。一方で、 d_{xy} 軌道由来のバンドは極薄膜においてもバルクと同じ構造を保持しており、量子化していないことが明らかとなった。この軌道選択的な量子化は、 t_{2g} 軌道が量子化方向 (z 方向) に対して異方的であることを起源としている。

またサブバンドの分散の大きさに着目すると、バンドの底がフェルミ準位に近いサブバンドほど $3d$ バンド幅が狭くなり、有効質量が大きくなっているように見える。このサブバンドの質量増大係数は、量子化状態における定在波の波長にスケールしており、表面・界面では $3d$ バンド幅の減少により電子相関が相対的に強くなることが起源であると考えられる^{3,4)}。

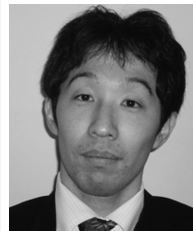
4. まとめと今後の展望

本研究は酸化物薄膜 SrVO_3 人工構造を用いて強相関電子の 2 次元閉じ込めに世界に先駆けて成功し、ARPES に

よりその量子化状態を明らかにしたものである。この結果は、強相関酸化物においても人工構造による物性制御というアプローチが可能になったことを示しており、新奇量子物性の創製や制御に向けた大きなステップであると考えられる。

参考文献

- 1) T.-C. Chiang: Surf. Sci. Rep. **39**, 181 (2000).
- 2) K. Yoshimatsu *et al.*: Science **333**, 319 (2011).
- 3) K. Yoshimatsu *et al.*: Phys. Rev. Lett. **104**, 147601 (2010).
- 4) S. Okamoto: Phys. Rev. B **84**, 201305(R) (2011).



吉松公平

東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻博士課程 3 年

【略歴】

2007年3月東京大学工学部応用化学科卒業。2009年3月東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻修士課程修了。現在、同専攻博士課程に在籍。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】

この度は JSR12 学生発表賞に選出していただきありがとうございます。これまで賞というには縁のなかった私ですが、ラストチャンスで名誉ある本賞を頂き大変嬉しく光栄に思っております。これもひとえにご指導して下さいました先生方や共同研究者の方々のおかげです。この受賞を励みにして、今後も研究に邁進し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。

JSR12 学生発表賞 第 2 分野

受賞者：林 博和 (発表番号 8P037)

題目：偏光依存高分解能角度分解光電子分光による Pd (110) 単結晶の多体相互作用の研究

講演者：林 博和¹⁾、島田賢也²⁾、岩澤英明²⁾、姜 健¹⁾、平山大裕¹⁾、羽瀧隆文¹⁾、相浦義弘³⁾、生天目博文²⁾、谷口雅樹^{1,2)}

所属：¹⁾広大院理、²⁾広大放射光セ、³⁾産総研

1. はじめに

パラジウム (Pd) は、周期律表で強磁性金属ニッケルの下に位置する常磁性金属であり、強磁性寸前の物質と考えられている。また Pd はレアメタルの一つであり、水素吸蔵合金や自動車の排ガスを清浄化する触媒などで利用されている重要な金属である。本研究は、放射光励起による直線偏光依存高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) により、Pd の表面・バルク物性に密接に関係するフェルミ準位近傍の準粒子に働く多体相互作用を定量的に評価することを目的としている。

2. 実験

直線偏光依存高分解能 ARPES 実験は広島大学 HiSOR リニアアンジュレータビームライン (BL-1) で行った。超高真空中で Ar^+ スパッタリング、1000 K のアニーリングを繰り返して Pd (110) 単結晶試料の清浄表面を作製し、オージェ電子分光、低速電子線回折、光電子分光により清浄性を確認した。

3. 結果と考察

Fig. 1(a) は、 $h\nu = 21$ eV、試料温度 8 K、p 偏光配置で測定した $I(KX)$ 対称線上の Σ_1 バルクバンドの高分解能 ARPES イメージプロットである。このバンドは s 偏光配置では観測されないため、鏡映面に関して偶対称の始状態を持つ Σ_1 バンドであることが確認できた。Fig. 1(b) は ARPES スペクトルのピーク位置 (点)、LDA 計算¹⁾ によるバンド分散 (破線) を示す。フェルミ速度は概ね一致しているが、およそ 24 meV に折れ曲がり構造 (キック構造) の存在が確認できる。これはデバイエネルギー ($k_B\Theta_D \sim 23.6$ meV) と良く一致している。

キック構造の起源を確かめるため、実験と理論のエネルギーの差から自己エネルギー実部を導出した (Fig. 2)。低

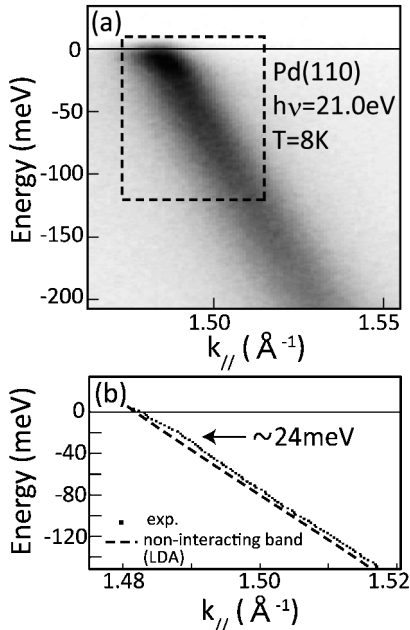


Fig. 1 (a) $h\nu=21$ eV, 試料温度 8 K, p 偏光配置で観測したフェルミ準位近傍の Σ_1 バンドのイメージプロット。破線範囲内の ARPES スペクトルから求められたピーク位置(点)と LDA 計算によるバンド分散(破線)を(b)に示す。

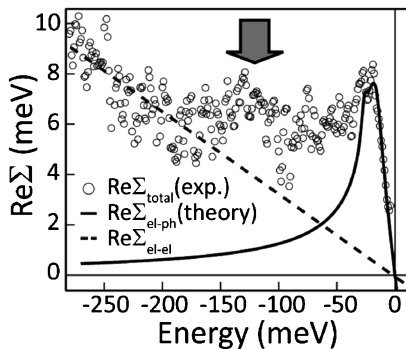


Fig. 2 白丸はスペクトル形状解析により得た自己エネルギー実部 ($\text{Re}\Sigma$)。実線はフォノンの状態密度から求められた $\text{Re}\Sigma$ 。破線は電子-電子相互作用による $\text{Re}\Sigma$ への寄与。

結合エネルギー側 (~ 24 meV) の鋭いピーク構造は、フォノンの状態密度²⁾から計算した理論値(実線)と良く対応しており、キック構造が電子-格子相互作用に由来することが明らかになった。実験で得られた自己エネルギー実部のフェルミ準位における傾きから、電子-格子相互作用の強さを表す無次元結合パラメータ $\lambda=0.40$ を得た。これは電子-格子相互作用によって準粒子の有効質量が約1.4倍に増強されることを示す。

一方、高結合エネルギー側 (~ 120 meV) の領域(矢印部)は、電子-電子相互作用(点線部)だけでは説明がつかない。中性子散乱の結果³⁾によると、少なくとも $\hbar\omega \sim 128$ meV までのエネルギー範囲でパラマグノンの励起が観測されており、パラマグノン³⁾による散乱の寄与が強く示唆される。

参考文献

- 1) T. Oguchi: private communication.
- 2) T. Takezawa *et al.*: PRB **71**, 012515 (2005).
- 3) R. Doublet *et al.*: PRL **105**, 27207 (2010).



林 博和

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻
博士課程後期 2 年

【略歴】

2008年3月広島大学理学部物理科学科卒業、2010年3月広島大学大学院理学研究科物理科学専攻博士課程前期修了、同年4月同大学院博士課程後期に進学。

【受賞のコメント】

この度はJSR12学生発表賞という名誉ある賞に選出して頂き、恐縮に感じるとともに非常に光栄に感じております。これもひとえに島田教授、谷口教授、生天目教授、岩澤特任助教をはじめとする、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のお陰であり、この場を借りて厚くお礼申し上げます。これを励みに今後も精進を重ねていきたいと思っております。

JSR12学生発表賞 第2分野

受賞者：丹羽秀治（発表番号 8P060）

題目：鉄フタロシアニン由来酸素還元触媒の酸素雰囲気
下軟 X 線発光分光講演者：丹羽秀治¹，小林正起^{1,2}，原田悠久^{1,2}，
尾嶋正治^{1,2}，難波江裕太³，尾崎純一^{3,4}，
池田隆司⁵，寺倉清之⁶，宮田清蔵³所属：¹東大院工，²東大放射光機構，³東工大，
⁴群大院工，⁵原子力機構，⁶北陸先端大

1. 緒言

燃料電池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大きく、その中でも固体高分子形燃料電池（PEFC）は小型で低温作動が可能なることから、定置型燃料電池として実用化が始まっており、燃料電池自動車の研究開発も進められている。PEFCの正極触媒には遅い酸素還元反応（ORR）の触媒として希少で高価な白金が用いられているが、PEFCを本格的に普及させるためには資源豊富で安価な白金代替触媒の開発が不可欠である。最近、白金代替触媒として、高いORR活性を示す炭素材料由来のカーボンアロイ触媒（CAC）に注目が集まっている¹⁻⁵。しかしながらPEFC動作条件下ではCACのORR活性は白金系触媒よりも劣っている。そこで、白金系触媒の性能を凌駕するCAC開発のため、PEFC動作条件下においてCACの電子状態変化を直接観測し、ORR活性点や劣化メカニズムを明らかにし、触媒合成の指針を得る必要がある。

軟 X 線発光分光（XES）は高分解能で元素選択的に価電子帯の電子状態が観測可能であり、真空隔離膜を含む *in situ* セルを用いて大気圧環境下で測定できるため⁶、これをカーボンアロイ触媒に用いれば、燃料電池動作下におけるその場電子状態観察が可能である。そこで本研究では、ORRの第一反応である酸素吸着過程に着目し、*in situ* XESにより鉄フタロシアニン由来CACの酸素吸着活性サイトを同定することを目的とした。

2. 実験

鉄フタロシアニン（FePc）とフェノール樹脂（PhRs）を原料として、不活性ガス雰囲気下で5時間、600°C及び800°Cで熱処理を行い、CAC触媒を合成した³。ORR活性評価は回転ディスク電極法により、酸素飽和0.5 M 硫酸溶媒を用いて行った。

in situ XES測定は、SPring-8 東京大学物質科学アウトステーションビームラインBL07LSUの超高分解能発光分光装置を用いて行った。また、軟 X 線測定に必要な高真空環境と大気圧雰囲気下の触媒を隔てる *in situ* セルを設計した。触媒試料は厚み150 nmのSi₃N₄膜の大気側にドロップキャスト法にて塗布した。Fe 2p XES測定はAr及びO₂雰囲気下で行った。

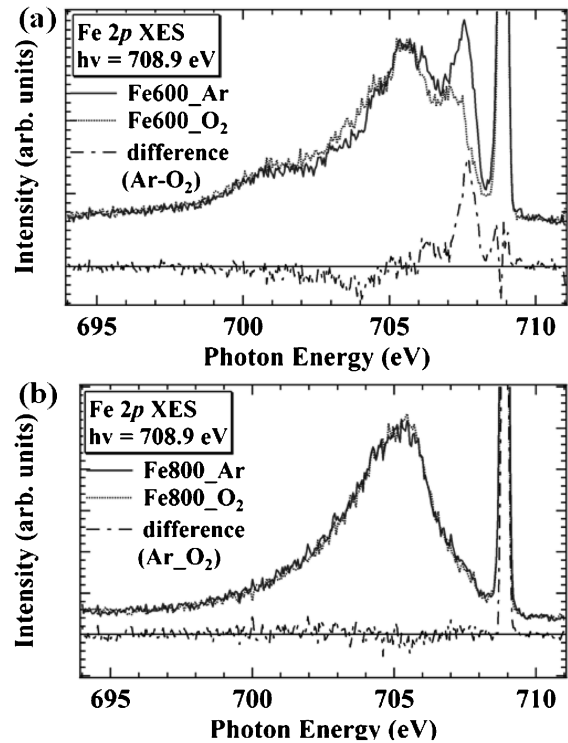


Fig. 1 (a) Fe600および(b) Fe800のFe 2p XES スペクトル

3. 結果と考察

作成した触媒は、600°C焼成試料（Fe600）が最もORR活性が高く、800°C焼成試料（Fe800）はFe600に比べるとやや低いORR活性を示した³。

Si₃N₄膜上に塗布した試料膜厚はおおよそ1 μmであった。この触媒塗布層はポラスであるため、O₂ガスはSi₃N₄界面まで到達しうるものと考えられる。

Fe600のFe 2p XES測定の結果をFig. 1(a)に示す。708.9 eVの弾性散乱よりも低いエネルギーに見られる構造はFe 3d軌道間の電荷励起（*dd*励起）である。O₂雰囲気下測定の*dd*励起ピーク強度は、Ar雰囲気下測定の*dd*励起ピーク強度よりも小さかった。これは、Fe600に含まれるFe元素に酸素分子が化学吸着し、Feから酸素π*軌道への電子逆供与が生じたことを示している。差分スペクトルの形状が前駆体FePcの場合と異なるため、Fe600の酸素吸着サイトはFePcとは異なっており、熱分解により生じたsp²炭素ネットワーク中のFe-N_xサイト⁵が酸素吸着サイトとして存在していると考えられる。

次に、Fe800のFe 2p XES測定の結果をFig. 1(b)に示す。Fe800のXESスペクトル形状は、鉄カーバイド（Fe₃C）に類似しており、高温処理のためFe元素の熱還元が進行したことがわかる。Fe600の場合とは異なり、酸素分子はFe800のFeサイトには吸着しないことが明らかになった。しかしながらFe800はORR活性を持つため、エッジ炭素など^{4,7-9}の鉄以外の酸素吸着活性サイトの存在が強く示唆される。

以上から、ガス雰囲気下で測定可能な *in situ* 軟 X 線発光分光により、CAC の酸素吸着サイトを明らかにした。今後は、N 1s XES により吸着サイトの検証を行うと共に、電気化学測定が出来るように装置を改良し、定電位下において酸素還元反応中の触媒の電子状態を観測し、劣化機構に関する知見を得て高活性触媒の合成に活かす予定である。

謝辞

本研究は NEDO の固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発/基盤技術開発/カーボンアロイ触媒の委託を受けて行ったものです。東京工業大学の宮田清蔵特任教授、柿本雅明教授、難波江裕太助教、北陸先端大の寺倉清之特別招聘教授、日本原子力研究開発機構の池田隆司博士には試料の合成、電気化学評価、実験結果の解釈等において多くのご協力をいただきました。この場を借りて感謝します。

参考文献

- 1) D. Yu *et al.*: J. Phys. Chem. Lett. **1**, 2165 (2010).
- 2) F. Jaouen *et al.*: Energy Environ. Sci **4**, 114 (2011).

JSR12 学生発表賞 第 3 分野

受賞者：鈴木祥仁（発表番号 7C005）

題目：X 線 1 分子追跡法を用いた膜タンパク質の高速 1 分子計測

講演者：鈴木祥仁^{1,3}、関口博史^{1,3}、星指健太郎^{1,3}、小林寿珠子^{2,3}、Cai Weiyang^{2,3}、下山よしこ^{2,3}、西野友里⁴、八木直人⁵、太田 昇⁵、宮澤淳夫⁴、久保 泰^{2,3}、佐々木裕次^{1,3}

所属：¹東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻、²産業総合技術研究所脳神経情報研究部門、³CREST 佐々木チーム JST、⁴兵庫県立大学理学部、⁵Spring-8/Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

諸言

James W. Black, Gertrude B. Elion, そして George H. Hitchings らが、医薬品の作用がタンパク質と医薬品の鍵と鍵穴モデルで説明できることを示して（1988年ノーベル生理学・医学賞受賞）以降、放射光計測技術の発展と相まって、タンパク質の立体構造解析が盛んになった。現在では、約73,000種類（2012年2月時点）のタンパク質の立体構造が解析されている。タンパク質の構造解析に放射光が果たした役割は非常に大きく、また、タンパク質の機能を理解する上で立体構造情報は必要不可欠である。しかしながら、タンパク質の立体構造は結晶状態で固定されたタンパク質の静的な構造であり、さらに本質的にタンパク質の機能発現を理解するためには、立体構造情報に加え

- 3) Y. Nabae *et al.*: ECS Trans. **25**, 463 (2009).
- 4) J. Ozaki *et al.*: Electrochim. Acta **55**, 1864 (2010).
- 5) M. Lefevre *et al.*: Science **324**, 71 (2009).
- 6) T. Tokushima *et al.*: Chem. Phys. Lett. **460**, 387 (2008).
- 7) T. Ikeda *et al.*: J. Phys. Chem. C **112**, 14706 (2008).
- 8) H. Niwa *et al.*: J. Power Sources **187**, 93 (2009).
- 9) H. Niwa *et al.*: J. Power Sources **196**, 1006 (2011).



丹羽秀治

東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻博士課程

【略歴】

2008年3月東京大学工学部応用化学科卒業。2010年3月東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻修士課程修了。現在、同大学院博士課程在籍。日本学術振興会特別研究員。

【受賞のコメント】

この度は JSR12 学生発表賞を受賞させていただき、大変光栄に思います。日頃ご指導いただいている尾嶋正治教授、原田慈久准教授および共同研究者の皆様がこの場を借りて感謝申し上げます。研究室の優秀な先輩方を見習い、今後も精力的に研究してゆきたいと思っております。

て、分子内部の運動を理解することも必要である。近年、いくつか 1 分子追跡法が提案されているが、高精度にかつ高速に分子内運動計測することは困難であった。

nAChR (nicotinic acetylcholine receptor) は、中枢および末梢神経に存在する 5 量体の機能性膜タンパク質で、神経伝達物質である ACh (acetylcholine) を受容することでカチオンポンプとして働く。2003年に宮沢ら¹⁾によって立体構造が決定された。しかし、ACh と結合した状態の結晶構造が決まっていないこともあり、イオンチャンネルとして働くメカニズムはわかっていない。2001年に発見された nAChR の膜外領域のホモログ AChBP (acetylcholine binding protein) や似た構造を持つチャンネルとの立体構造の比較によって現在までに、回転モデルとチルトモデル²⁾の二つのモデルが提唱されている。

実験手法

本研究では、X 線 1 分子追跡法 (Diffracted X-ray Tracking: DXT, Fig. 1) を使用し、AChBP と nAChR の分子内運動を 1 分子計測した。DXT は、直径 20–80 nm 程度の金ナノ結晶をタンパク質にラベルし、そこからの回折点を追跡する手法である³⁾。DXT には以下の 3 つの大きな特徴がある。溶液で計測可能である、回転 (χ 方向) とチルト (θ 方向) の両方の運動を計測することができる、そして時間および空間分解能非常に高いということである。現在の技術的な位置決定精度は 100 pm 程度であり、時間分解能は、数 μ s である。本研究では、100 μ s の時間スケールで AChBP と nAChR の分子内部運動を 1 分子計測

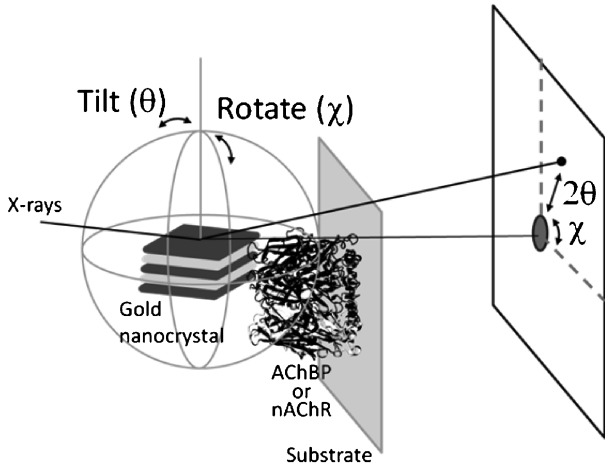


Fig. 1 Concept of single molecular detection system using x-rays.

した。これは電気生理学的な手法（パッチクランプ法）による実験から予想されているチャンネル開閉時間スケールに合わせたためである。

サンプル

1. AChBP

AChBPのサンプルは、N末端にHis-tag、C末端にSTrept-tagを持った変異体を使用した。基板は、カプトンに金を蒸着したものを使用し、その上にSAM膜を反応させ、Tagを利用して基板へAChBPの固定と金ナノ結晶のAChBPへの標識を行った。

2. nAChR

nAChRは、ヘテロユニットからなる膜タンパク質であり、変異体の作成が非常に困難である。そのため、シビレイ由来のベシクル状態のまま試薬を用いて基板と金ナノ結晶に固定した。

結果と考察

まず、ACh存在下と非存在下での運動挙動を調べた。それぞれの条件のもと、約500点の回折点の軌跡を追ってデータを分析した。一つの軌跡がどのくらいの角度動いたかについて、 θ 方向と χ 方向を個別に比較をすると特徴的な差は見られなかった。これは、AChBPやnAChRの分子内揺らぎが比較的大きく、全体の運動距離に着目するとほぼ同じになってしまうためと考えられる。そこで、揺らぎの中で、能動的な運動を見つけるため、速度に着目して2次元ヒストグラムを作成した。Fig. 2は、ACh存在下条件と非存在下条件のデータをそれぞれ規格化した上で差分をとったものである。横軸に θ 方向、縦軸に χ 方向をとり、頻度を縦方向の色の濃淡で表している。チルトモデル（Tilting mode）が正しい場合は、右方向へ活性化されるはずであり、回転モデル（Rotational mode）が正しい場合は上方向へ活性化されるはずである。しかしながらこの

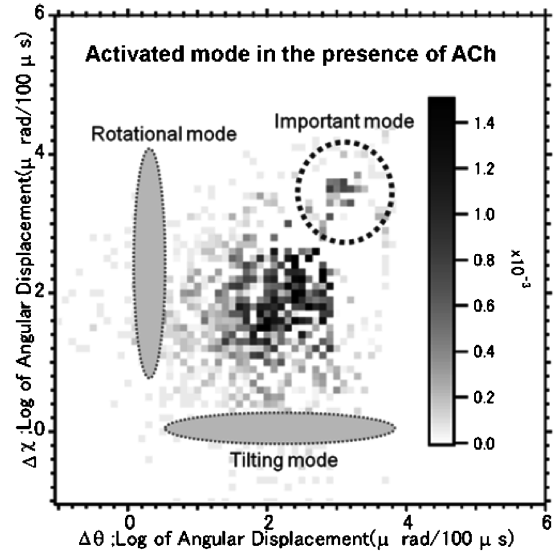


Fig. 2 Bivariate differential histogram of the velocity of θ and χ .

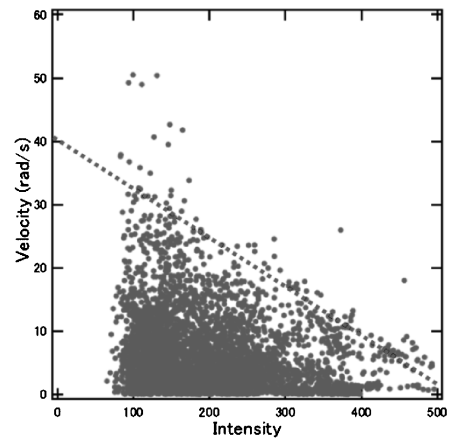


Fig. 3 Intensity of diffracted spots vs Velocity (θ direction).

データからは、チルトと回転の両方のモードが活性化されることが示唆されている。

そこで、具体的な個々の軌跡の中でACh存在下のみに存在し、チルトと回転の両方のモードが活性化されているものを探した。その結果、 $\theta \rightarrow \chi \rightarrow \theta$ という3段階の運動を発見することができた。この運動は、今までに提唱されているチルトモデルと回転モデルの両方を説明できるものである。回転軸の距離をnAChRの膜外領域の長さ程度（60 Å）と仮定すると、併進運動の距離として見積もることができ、おおよそ、 θ 方向へ4.2 Å、 χ 方向へ3.6 Åの運動であった。一つのナトリウムやカリウムイオンが通るか通らないかといった構造的制御をしているため、Åのオーダーの運動をしていることは矛盾しない。

DXTはもともと位置情報を得ることを目的とした手法であるが、データの中には位置情報の他に回折斑点の輝度情報が含まれる。Fig. 3は回折斑点輝度とその速度の関係をプロットしたものである。輝度と速度の間におおよそ1

参考文献

- 1) Miyazawa *et al.*: Nature **423**, 949–955 (2003).
- 2) Ricarda *et al.*: Nature **452**, 375–380 (2008).
- 3) Shimizu *et al.*: Cell **132**, 67–78 (2008).

次の相関があることがわかる。一般に結晶性が同じであれば、粒径が大きいほど回折ピークの輝度が高くなると考えることができる。また、大きな結晶になるほど粘性抵抗も大きくなると考えることができる。そこで、分布に合うような直線を引き、交点の位置がナノ結晶のないときの角速度と見積もった。この値をもとに並進運動に換算すると、約 $0.2 \mu\text{m/s}$ いう速度でタンパク質が運動していることがわかった。運動性のタンパク質に比べて二桁ほど遅い運動であることも推定された。

まとめ

本研究では、DXTを用いてnAChRおよびAChBPのACh結合に伴う分子内運動を世界で初めてマイクロ秒レベルの高速で1分子計測することに成功した。統計的な分布から、チャンネル開閉時において、チルト(θ)と回転(χ)の両方の運動が活性化されることを明らかとなり、また1分子の運動では3ステップの特徴的な運動も発見した。回折斑点輝度情報から、AChBPとnAChRに標識したナノ結晶を結合させていない場合の各分子の運動速度(θ , χ)も見積もることができた。



鈴木祥仁

東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻 佐々木研究室修士2年
E-mail: yasu.b28@gmail.com

【略歴】

東京生まれ。函館ラ・サール高校、岩手大学工学部を経て現所属。4月よりドイツのPhDコースへ進学。マックスプランク研究所(マインツ)にてソフトマター

の研究予定。趣味；ラグビー観戦。

【受賞のコメント】

本研究は、サンプルが非常に重要なものであることもあり、多くの方々のお世話になりました。佐々木研究室、共同研究者、SPring-8の方々をはじめとして、関係者各位に厚く御礼申し上げます。また、放射光学会では、さまざまなアドバイスをいただき、ありがとうございました。将来、日本に戻ってきた時に、また放射光(SPping-8)を使用した研究に関われたらと思います。

JSR12 学生発表賞 第3分野

受賞者：小河愛実（発表番号 8C004）

題目：放射光とレーザーの同期による時間分解光電子分光装置の開発と半導体表面光起電力効果の研究

講演者：小河愛実¹，山本 達¹，小宇佐友香²，中村史一¹，湯川 龍¹，福島昭子¹，原沢あゆみ¹，近藤 寛²，田中義人³，柿崎明人¹，松田 巖¹

所属：¹東大物性研，²慶応大理工，³理研 SPping-8

近年の超短パルス光源と検出器の発展に伴い、物質の励起や緩和といった動的状態の実時間測定が可能となってきている。放射光は幅広い領域でエネルギー可変な光源であり、さらにパルス幅数十psのパルス光源である。レーザーと放射光を高精度で同期することによってこの放射光のパルス幅程度の時間分解能でのリアルタイム測定が可能である。放射光とレーザーを同期させた時間分解測定は散乱や吸収などの様々な手法で盛んに行われている。XFELなど第4世代光源ではそのパルス幅はフェムト秒のオーダーに達する。今年度より共同利用が開始されるSACLAなど日本を含めた世界各国でFELは稼働し始めており、放射光を用いた化学反応や相転移などのダイナミクスの研究の重要性は増している。

我々のグループは軟X線ビームラインであるSPping-8のBL07LSUにおいて、時間分解光電子分光装置の開発を行って来た。軟X線領域を用いる事で内殻分光や広い波数空間におけるバンド測定が可能である。我々は、光電子分析器として、従来の半球型の電子分析器とは異なる飛

行時間型(TOF)光電子分析装置ARTOF10k(VG Scienta)を導入した。測定の繰り返し周波数が低い時間分解測定では1パルスあたりの検出効率が非常に重要である。TOFは分光のためのスリットのない電子分析器であるので、同じ高エネルギー分解能と比較すると、半球型よりも効率の高いアナライザーである。また、この電子分析器はディテクターとして2次元検出器、Delay Line detector(DLD)を用いており、2次元角度分解測定が一度に可能である。サンプルを回す事無く2次元分散が取れることによって、偏光依存性の測定からスピンや対称性の情報をより正確に取り出す事が出来る。

我々はこの装置を用いてSi(111)7×7表面の光起電力(SPV)効果の時間分解測定を行った。半導体のバンドは、表面電荷を補償するためにバルク深くから表面に向けており曲がっている。バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を当てて、電子を励起すると、この新しい電荷分布が表面電荷を補償し、バンドの折り曲がり小さくなる。Fig. 1は、このバンドの折り曲がりの変化量を励起からの時間に対してプロットしている。変化量はSi2pのピークシフトから求めている。得られた時間変化から緩和時間を求めると、 $\tau_1 = 3.3 \pm 0.80 \text{ ns}$ 、 $\tau_2 = 500 \pm 25 \text{ ns}$ の二つの緩和過程がある事が分かった。速い方の緩和は表面構造によって大きく変わる事が分かっている。測定では、放射光とレーザーの同期精度が、放射光のパルス幅と同程度の50psに達することをフォトダイオードを用いて確認した。

本発表ではこのSPVの測定をもとに、新型アナライザーの性能や、レーザーと放射光の同期精度など、装置全

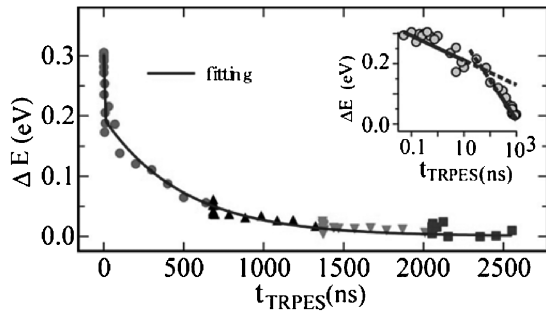


Fig. 1 SPV による Si Si(111) 2p のピーク位置の変化量を時間に対してプロットしたもの。inset は時間の log スケールに対するプロットである。

体のパフォーマンスについて詳細に説明した。また、デモンストレーションとして行った Si(111)7×7 に対する SPV 効果の時間分解測定の結果を示した。

JSR12 学生発表賞 第 3 分野

受賞者：中森紘基（発表番号 9P004）

題目：アダプティブ集光光学系のための高精度形状可変ミラーの作製と評価

講演者：中森紘基¹，松山智至¹，今井将太¹，横山 光¹，木村隆志²，三村秀和³，佐野泰久¹，香村芳樹⁴，玉作賢治⁴，矢橋牧名⁴，石川哲也⁴，山内和人¹

所属：¹阪大，²北大，³東大，⁴理研

近年、アダプティブ光学系の発展が大きく進んでいる。天体望遠鏡においては、大気揺らぎから発生する波面の乱れを、形状可変ミラーの変形によって打ち消し、高分解能観測が実現されている。また X 線領域でも、作り込みミラー上の微細な形状誤差によって発生する波面の乱れを、形状可変ミラーによって修正することで 7 nm の X 線集光が実現されている¹⁾。さらに、形状可変ミラーによって X 線集光光学系を構築し、焦点距離や入射角、開口数 (NA) などの光学パラメータを変化させることが行われている²⁾。前者は、高性能な結像・集光を実現するために波面を制御することを目的とし、後者は実験に最適な光学系をその場で作り出すことを目的としている。

本研究では、波面補償とパラメータ可変集光の両方の機能を持ち合わせた形状可変ミラーを開発し、アダプティブ集光光学系を構築することを最終目標としている。しかし、これを実現するためには、大変形かつ高精度な変形を可能とする形状可変ミラーが必要となる。

そこで、大変形かつ高精度変形が可能な X 線形状可変ミラーの設計指針を得るため、構造の異なる二種類の形状可変ミラーを作製し、変形時に生じる短周期の変形誤差を評価した。本設計指針を元に試作した形状可変ミラーの変形実験を行い、変形再現性や長時間にわたる変形安定性に



小河愛実

東京大学物性研究所

【略歴】

2008年東京大学教養学部基礎科学科物性科学学科卒業。2010年東京大学理学系研究科物理学専攻修士課程修了。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。今後よりいっそう研究に邁進していきたいと思えます。

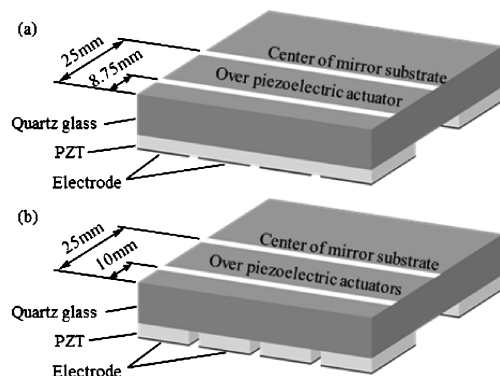


Fig. 1 形状可変ミラー，(a)圧電素子一体型，(b)圧電素子分離型

ついて詳細に調べた。本形状可変ミラーの集光特性を、SPring-8 において評価した結果、半値幅 120 nm の回折限界集光を達成した。

アダプティブ集光光学系を構築するためには、高精度変形を可能とする形状可変ミラーが必要不可欠である。そこで、多数の圧電素子を基板に接着した圧電素子分離型と、1 枚の圧電素子に多数の電極を作り基板に接着した圧電素子一体型の 2 種類の形状可変ミラーを作製した (Fig. 1)。そして干渉計を用いて、それぞれの構造について、電圧印加時に発生する、圧電素子で修正不可能な短周期変形誤差の発生を検証した (Fig. 2)。その結果、圧電素子一体型を用いることで、短周期変形誤差が発生しない高精度形状可変ミラーの実現が可能であることがわかった。さらに X 線反射像による評価も行い、圧電素子一体型によりスペックルフリーな形状可変ミラーが実現可能であることを確認した。

集光実験は SPring-8 BL29XUL 第 2 ハッチにおいて、エネルギー 15 keV の X 線を用いて行った。形状可変ミ

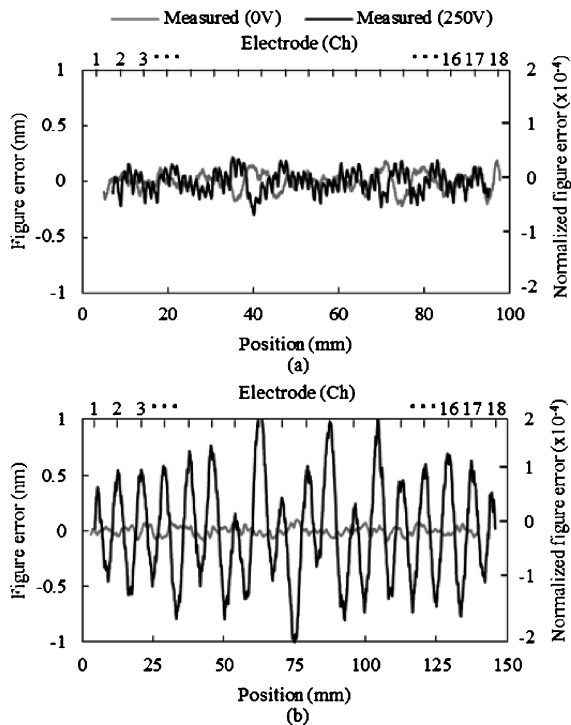


Fig. 2 形状計測結果から得られた短周期変形誤差, (a)圧電素子一体型, (b)圧電素子分離型

ラーは変形の高精度化と温度安定性を考慮し、圧電素子一体型バイモルフ構造を採用した。形状可変ミラーの形状は、電圧の印加により最適な楕円に変形させたが、圧電素子のヒステリシスやクリープの影響でPeak-to-Valley (PV) 20 nm 程度の形状誤差が発生した。そのため、ペン

シルビーム法³⁾と At-wavelength 計測法⁴⁾を用いて、形状誤差を PV 約 2 nm まで修正した。結果、半値幅 120 nm の回折限界集光を達成した。

今後は 2 枚の形状可変ミラーを作製し、二次元での集光実験を行う計画である。

本研究の一部は文部科学省グローバル COE プログラム、基盤研究 (S) (23226004) ならびに CREST (コヒーレント X 線による走査透過 X 線顕微鏡システムの構築と分析科学への応用) の助成を受けて行われた。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Mimura *et al.*: *Nature Physics* **6**(2), 122-125 (2009).
- 2) R. Signorato *et al.*: *J. of Synchrotron Rad.* 797-800 (1998).
- 3) O. Hignette *et al.*: *SPIE Proc.* **3152**, 188-199 (1997).
- 4) T. Kimura *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 123704 (2010).



中森 紘基

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 2 年

【略歴】

2010年3月神戸市立工業高等専門学校機械システム工学専攻修了。2010年4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入学。

【受賞のコメント】

この度は JSR12 学生発表賞を頂戴いたしまして、身に余る光栄と、心から感謝しております。これも偏に、先生方のご指導によるものと感じております。今回の受賞を励みに、今後も研究に日々精進して参りたいと思います。