

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02680

研究課題名(和文) 超高速軟X線吸収分光法による光化学系IIタンパク質の光合成反応の機構解明

研究課題名(英文) Photosynthesis Reaction Mechanism of Photosystem II Protein Studied by Ultrafast Soft X-ray Absorption Spectroscopy

研究代表者

長坂 将成 (NAGASAKA, Masanari)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・助教

研究者番号：90455212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超高速軟X線吸収分光(XAS)法により、光化学系II (PSII)タンパク質の酸素発生中心の構造と、水との分子間相互作用を明らかにすることを目的とする。そのために、膜タンパク質であるPSIIが機能を発現した状態での、PSII包含脂質二重膜のXAS測定法を開発した。更に、放射光から発生する軟X線パルスとフェムト秒レーザーを同期した超高速XAS法を開発することで、N-K吸収端XAS測定から光励起による鉄フェナントロリン錯体の高スピン状態を観測した。今後は、開発した測定技術を組み合わせることで、光合成反応中のPSIIタンパク質の超高速XAS測定の実現を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した光化学系II (PSII)タンパク質の軟X線吸収分光(XAS)法により、膜タンパク質の元素・官能基選択的な電子状態解析が実現する。また、光化学反応の超高速XAS法により、その励起状態解析が行えるので、将来的なPSIIタンパク質の光合成反応の機構解明が期待されるため、その学術的な意義は大きい。また、天然の光合成反応の理解に留まらず、光触媒による人工光合成系の開発につながる可能性もあり、その社会的な意義も大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to observe the structure of the oxygen evolving center in the photosystem II (PSII) protein and its molecular interaction with water by using an ultrafast soft X-ray absorption spectroscopy (XAS). We have measured XAS spectra of PSII proteins embedded in lipid bilayers, where PSII proteins are worked as membrane proteins. We have also developed the ultrafast XAS measurement system with the combination of soft X-ray pulses from synchrotron radiation with femto second laser pulses and observed the high spin state of iron phenanthroline complexes with the photoexcitation state by using N K-edge XAS. In the future, we will realize the ultrafast XAS measurement of the PSII protein during the photosynthesis reaction by the combination of our developed techniques.

研究分野：物理化学

キーワード：軟X線吸収分光法 光化学系IIタンパク質 時間分解測定 光合成反応 金属錯体

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

光化学系 II (PSII) タンパク質の構造が X 線回折で決定されて、PSII による光合成反応の機構解明への道筋が開けた。しかしながら、反応環境とは異なる状態であり、反応中の酸素発生中心である Mn_4CaO_5 クラスターの局所構造と水との分子間相互作用は分からなかった。過去に、硬 X 線領域 (Mn-K: 6.5 keV, Ca-K: 4.0 keV) における X 線吸収分光 (XAS) 測定から、PSII の Mn_4CaO_5 クラスターの構造が調べられた [1]。しかし、酸素発生中心における酸素の構造や水分子との相互作用は分からなかった。一方、1 keV 以下の軟 X 線領域には、C, N (400 eV), O (530 eV) の K 吸収端や金属 (Mn: 640 eV, Ca: 350 eV) の L 吸収端がある。金属の L 吸収端は K 吸収端よりも価数やスピンの変化を明瞭に観測できることにくわえ、O-K 吸収端からは酸化物と水の電子状態が分かるため、軟 X 線 XAS 測定から、 Mn_4CaO_5 クラスターと水の分子間相互作用を明らかにできる。しかしながら、軟 X 線は大気や水に強く吸収されるため、液体層の厚さを 1 μm 以下にしなくては、液体試料の XAS 測定は行えなかった。

最近、我々は液体層の精密厚さ制御法 (20 ~ 2000 nm) を独自に開発することで、液体の XAS 測定を実現して、液相の様々な物理、化学現象の反応機構を調べた [2, 3]。一方、XAS 測定を生体試料に適用した例はなく、PSII の光合成反応中の Mn_4CaO_5 クラスターの局所構造変化を調べるには、膜タンパク質である PSII が実際に機能を発現できるように、脂質二重膜内に包埋した状態の XAS 測定を実現する必要がある。また、放射光からの軟 X 線パルス (70 ps) とレーザー光の同期による超高速 XAS 測定により、光化学反応をピコ秒スケールで追跡できるが、気相と固相への適用に限られていて、液相で進行する PSII の光合成反応への適用は困難であった。

2. 研究の目的

本研究は、ピコ秒スケールの超高速 XAS 測定手法を用いて、PSII タンパク質の光合成反応中の酸素発生中心 Mn_4CaO_5 クラスターの局所電子状態の時間変化を主要な元素を網羅して観測して、その反応メカニズムを明らかにすることを目的とする。PSII タンパク質の高精度 XAS 測定を行うために、(1) 高次光を除去するガスフィルターの開発と、(2) PSII 包含脂質二重膜の調製と、その XAS 測定への適用を行う。また、(3) 光化学反応の超高速 XAS 法を開発することで、鉄錯体溶液の光励起ダイナミクスを明らかにする。以上の研究成果を組み合わせることで、将来的な PSII タンパク質の超高速 XAS 測定の実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) PSII タンパク質の XAS 測定法

PSII タンパク質の XAS 測定は、分子研 UVSOR-III の軟 X 線ビームライン BL3U に設置された液体の XAS 測定装置を用いて行った [2, 3]。図 1(a) に XAS 測定装置の模式図を示す。液体セルは常圧のヘリウム環境下であり、超高真空下の軟 X 線ビームラインとは窓サイズ 200 × 200 μm^2 の Si_3N_4 膜 (100 nm 厚) で分離している。液体層は 2 枚の Si_3N_4 膜で挟みこむことで構成する。液体セルを透過した軟 X 線強度を収量することで、XAS 測定を行う。図 1(a) の挿図に示すように、液体セル周りのヘリウムの圧力調整により、液体層の精密厚さ制御 (20 ~ 2000 nm) を行う。これにより、希薄な溶液では液体層を厚くして、高濃度の溶液では液体層を薄くすることで、軟 X 線吸収量を最適化して、広い濃度領域で溶液の XAS 測定を行える。

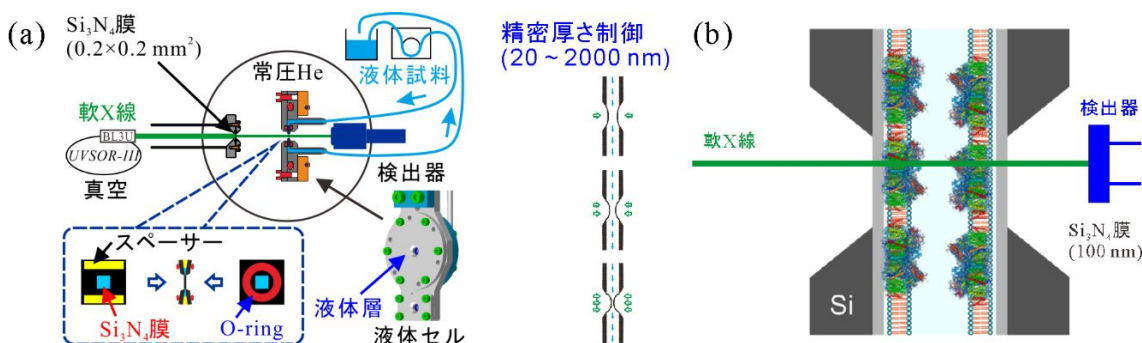


図 1. (a) 液体の XAS 測定システムの模式図。ヘリウムの圧力制御による液体層の精密厚さ制御の模式図も示す。(b) PSII タンパク質の XAS 測定の模式図。

ここで、PSII の XAS 測定を実現するために、PSII タンパク質の精製手法 [4] と、脂質二重膜作製と膜タンパク質再構成 [5] の手法を基にして、図 1(b) に示すように、液体層を構成する Si_3N_4 膜上に PSII タンパク質を包埋した脂質二重膜を担持する。PSII は葉緑体のチラコイド膜に含まれる膜タンパク質であり、脂質二重膜に包埋された状態で正しい構造と機能が維持される。その

ために、ジガラクトシルジアシルグリセロール(DGDG)脂質を加えた懸濁液に、PSII を加えて、 Si_3N_4 膜上に静置する。蛍光顕微鏡像から、この方法により PSII が融合した DGDG 脂質膜の形成が確認できた。

(2) 光化学反応の超高速 XAS 測定方法

図 2 に開発した光化学反応の超高速 XAS 測定システムの模式図を示す。実験は、KEK-PF の軟 X 線ビームライン BL-13A で行った。フェムト秒レーザーには、KEK-PF の所有する Yb:KGW レーザーの二倍波(515 nm)を用いた。KEK-PF のハイブリッドモード運転時に実験を行っている、シングルバンチとマルチバンチの軟 X 線が交互に照射される。ボックスカー検出器を用いることで、シングルバンチの軟 X 線(70 ps)だけ切り出して、その中でもレーザーと軟 X 線が共に照射されている条件と、軟 X 線だけが照射されている条件の、2 つを切り出している。測定の繰り返し周波数は、8 kHz となる。レーザーは穴あきミラーを用いて、軟 X 線と同軸に導入する。更に、軟 X 線検出器の前に金属薄膜フィルターを置くことで、レーザー光を除去して、軟 X 線強度だけを収量できるようにする。これにより、軟 X 線とレーザーを同期したピコ秒スケールの超高速 XAS 測定を実現した。

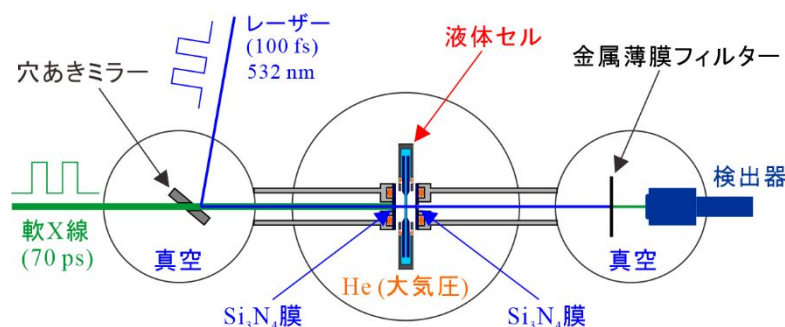


図 2. レーザーと放射光を同期した超高速 XAS 測定システムの模式図。

4. 研究成果

(1) 高次回折光を除去するガスフィルターの開発

ヘリウムは大気圧においても軟 X 線を良く透過する。しかしながら、光エネルギーが低くなるほど、軟 X 線透過率が小さくなるため、高次回折光の割合が大きくなり、目的の一次回折光の強度変化の測定ができなくなる。本研究では、高精度な XAS 測定の実現のために、高次回折光を除去するガスフィルターを開発した。図 3 に大気圧下のアルゴンの軟 X 線透過スペクトルを示す。アルゴンはヘリウムよりも軟 X 線透過率が非常に小さいにも関わらず、Si-L 吸収端の Si_3N_4 膜、S-L 吸収端のジメチルスルホキシド(DMSO)ガスのピークが正しく観測された。以上のように、アルゴン窓は 60 ~ 240 eV の範囲で有効な軟 X 線透過窓として使用できることが分かった[6]。これは、Ar-L 吸収端(240 eV)により、高次回折光が除去できたためであると考えられる。このことは、PSII の XAS 測定においても、ガスフィルターが有効であることを示している。また、高次回折光を除去する新たな軟 X 線検出器の開発も行った[7]。Mn-L、O-K、Ca-L 吸収端の XAS 測定では、ネオンガスの Ne-K 吸収端(870 eV)を利用することを検討している。

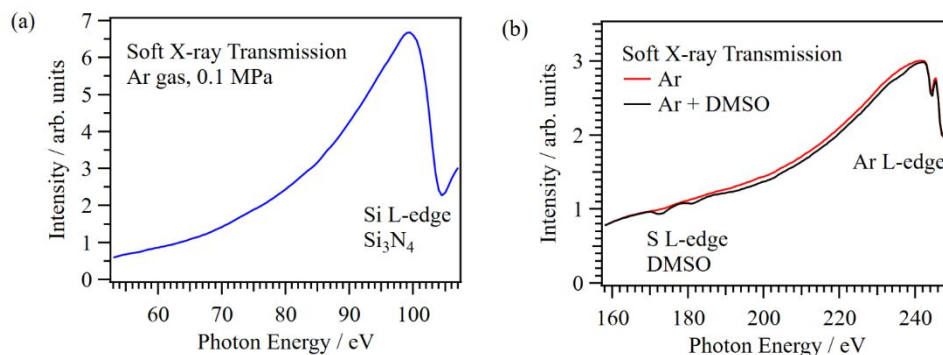


図 3. 低エネルギー領域のアルゴンの軟 X 線透過スペクトル。少量の DMSO ガスを混ぜた状態でも測定した。(a) 53 ~ 107 eV のエネルギー領域と、(b) 158 ~ 249 eV のエネルギー領域を示す。

(2) PSII タンパク質の XAS 測定

図 4(a)に緩衝液、DGDG 脂質膜、PSII+DGDG 脂質膜の O-K 吸収端 XAS スペクトルを示す。O-K 吸収端 XAS スペクトルは、対象の溶液(I)と液体水(I_0)の透過シグナルを測定して、Lambert-Beer 則 $\ln(I_0/I)$ により求めた。希ガスフィルター(He + Ne 混合)により、回折格子からの高次回折光を除去することで、高精度な XAS スペクトルを得ることができた。DGDG 脂質の O-K 吸収端 XAS スペクトルにおいて、532 eV 付近に観測されるのは、DGDG を構成する C=O 基や、COOH 基由来である。また、Pre-edge ピーク(535 eV)が緩衝液より高エネルギーシフトしているが、これは DGDG の OH 基の成分が加わっているためである。PSII+DGDG の O-K 吸収端 XAS スペクトルでは、更に PSII により吸収量が増えているのが分かる。図 4(b)に示す O-K 吸収端 XAS スペクトルは、PSII+DGDG (I)と DGDG (I_0)の透過シグナルを基にしている。532 eV に鋭敏なピークがあり、これは C=O 基由来と考えられる。また、527 eV 付近と 530 eV 付近にピークがあるのが分かる。また、533 eV に肩構造があることが分かる。更に 535 eV においても DGDG と比較して高エネルギー成分が存在するため、スペクトルに肩構造が確認された。

O-K 吸収端の測定は行えたが、PSII の担持量が十分でないため、Mn-L、Ca-L 吸収端の高精度な XAS スペクトルは得られていない。これは、PSII タンパク質の保存のために含まれる界面活性剤と DGDG 脂質二重膜が反発するため、PSII の担持量が少なくなったと考えられる。界面活性剤を吸着するマイクロビーズを用いれば、PSII の担持量を増やすことができると予想される。最近、X 線自由電子レーザーを用いて、PSII の Mn-L 吸収端 XAS 測定が行われて[8]、Mn(III)と Mn(IV)が混合したブロードなピークが観測された。しかしながら、この測定はマイクロジェットを用いた測定であり、チラコイド膜上の PSII とは異なる状態である。今後、我々は PSII の担持量を増やすことで、PSII が機能を発現した状態での Mn-L 吸収端 XAS 測定の実現を目指す。

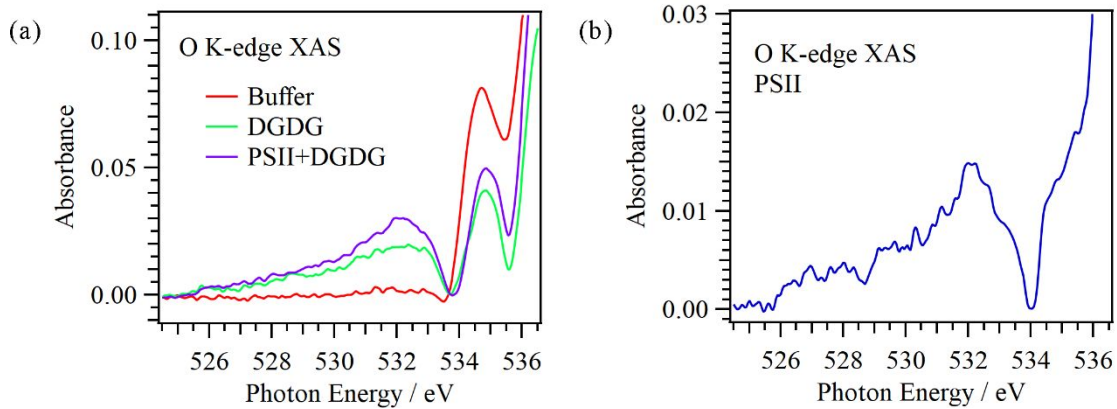


図 4. (a) 緩衝液、DGDG 脂質膜、PSII+DGDG 脂質膜の O-K 吸収端 XAS スペクトル。(b) DGDG 脂質膜の寄与を除いた PSII タンパク質の O-K 吸収端 XAS スペクトル。

(3) 鉄錯体溶液の超高速 XAS 測定

開発した光化学反応の超高速 XAS 測定システムを用いて、基礎的な光化学反応である鉄フェナントロリン錯体水溶液の N-K 吸収端 XAS 測定を行った。鉄フェナントロリン錯体水溶液は、515 nm の光を照射することで、金属-配位子間電子(MLCT)遷移した後、高スピン状態になる。最近、硬 X 線領域の Fe-K 吸収端 XAS 法を用いて、光励起後の鉄フェナントロリン錯体の高スピン状態を観測している[9]。

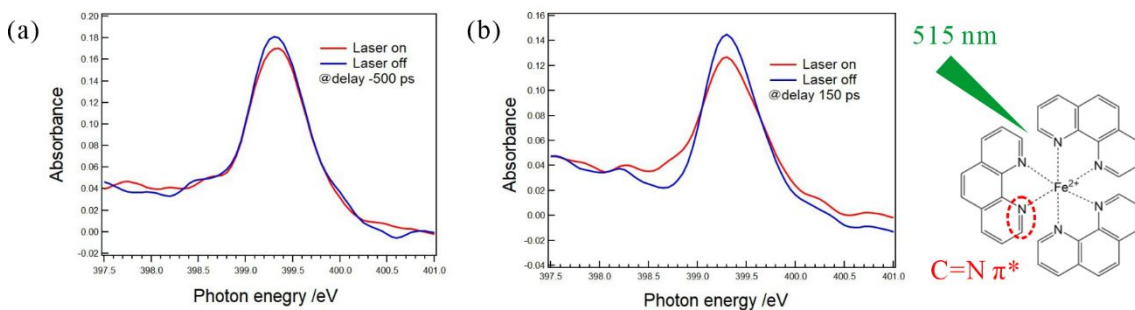


図 5. 鉄錯体溶液の光励起過程の N-K 吸収端 XAS スペクトル。レーザーに対する軟 X 線の遅延時間は、(a) -500 ps と(b) 150 ps となる。挿図に測定した鉄錯体の模式図を示す。

本研究では、鉄フェナントロリン錯体水溶液の高スピン状態の N-K 吸収端 XAS 測定を行った。最近我々は、ヘミン水溶液の N-K 吸収端 XAS 測定を行い、配位子の C=N π^* 軌道と中心金属の 3d 軌道の混成により、C=N π^* ピークが金属と配位子の相互作用を良く反映することを明らかにした。図 5 に鉄フェナントロリン錯体水溶液の光励起過程の N-K 吸収端 XAS 測定の結果を示す。図 5(a)では、レーザーに対する軟 X 線の遅延時間が 500 ps であり、得られる XAS スペクトルは鉄錯体試料にレーザーが照射される前である。そのため、レーザーがオンとオフの状態でも、XAS スペクトルに変化は見られない。一方、図 5(b)では、レーザーに対する軟 X 線の遅延時間が 150 ps であり、レーザーがオンの時には、C=N π^* ピークの低エネルギー側のピーク強度が増えた。高スピン状態の鉄錯体の N-K 吸収端 XAS スペクトルでは、低エネルギー側にピークがあるのを確認している。そのため、レーザーがオンの時のスペクトル変化は、光励起により鉄フェナントロリン錯体が高スピン状態になっていることを表している。今後は、レーザーに対する軟 X 線の遅延時間を変えることで、鉄フェナントロリン錯体の光励起ダイナミクスを明らかにすることを目標とする。

(4) 今後の展望

上述したように、本研究では、PSII タンパク質の XAS 測定法と、光化学反応の超高速 XAS 測定法を開発した。PSII タンパク質の XAS 測定では、O-K 吸収端 XAS スペクトルは精度良く得られたが、Mn-L, Ca-L 吸収端 XAS スペクトルは得られていない。界面活性剤を吸着するマイクロビーズを用いれば、PSII の担持量を増やすことができるため、将来的に Mn-L, Ca-L 吸収端においても、PSII の XAS 測定が実現することが期待される。また、光化学反応の超高速 XAS 測定では、光励起による鉄フェナントロリン錯体水溶液の高スピン状態を観測できたので、今後はその光励起ダイナミクスを明らかにすることを目標とする。

更に今後の展望としては、開発した XAS 測定技術を用いて、PSII タンパク質の光合成反応の超高速 XAS 測定を実現することにある。光合成反応の明反応は、クロロフィル *a* 分子などで構成される光捕集アンテナが、太陽光により光励起した後、アンテナ中心に存在する P680 (special pair)へエネルギー移動する。その後、幾つかの電子移動を経由して、電荷分離した状態を維持することで、正孔の酸素発生中心 Mn_4CaO_5 クラスタで水の酸化反応が進行する。放射光から発生する軟 X 線パルスとフェムト秒レーザーを同期した超高速 XAS 測定により、光合成反応中の PSII タンパク質の Mn-L, Ca-L, O-K 吸収端 XAS スペクトルを得る。これにより、光合成反応中の PSII タンパク質における酸素発生中心 Mn_4CaO_5 クラスタの構造変化と、クラスタと水の間の分子間相互作用の時間変化を明らかにすることを、今後の目標とする。

< 引用文献 >

- C. Glöckner, J. Kern, M. Broser, A. Zouni, V. Yachandra, J. Yano, "Structural Changes of the Oxygen-Evolving Complex in Photosystem II during the Catalytic Cycle", *J. Biol. Chem.* **288**, 22607-22620 (2013).
- M. Nagasaka and N. Kosugi, "Soft X-ray Absorption Spectroscopy for Observing Element-specific Intermolecular Interaction in Solution Chemistry", *Chem. Lett.* **50**, 956-964 (2021).
- M. Nagasaka, H. Yuzawa, and N. Kosugi, "Soft X-ray Absorption Spectroscopy of Liquids for Understanding Chemical Processes in Solution", *Anal. Sci.* **36**, 95-105 (2020).
- R. Tokutsu, N. Kato, K. H. Bui, T. Ishikawa, and J. Minagawa, "Revisiting the supramolecular organization of photosystem II in *Chlamydomonas reinhardtii*", *J. Biol. Chem.* **287**, 31574-31581 (2012).
- R. Tero, K. Fukumoto, T. Motegi, M. Yoshida, M. Niwano, A. Hirano-Iwata, "Formation of cell membrane component domains in artificial lipid bilayer", *Sci. Rep.* **7**, 17905 (2017).
- M. Nagasaka, "Soft X-ray absorption spectroscopy in the low-energy region explored using an argon gas window", *J. Synchrotron Rad.* **27**, 959-962 (2020).
- M. Nagasaka and H. Iwayama, "Photoelectron based soft x-ray detector for removing high order x rays", *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 083103 (2020).
- M. Kubin, J. Kern, S. Gul, T. Kroll, R. Chatterjee, H. Löchel, F. D. Fuller, R. G. Sierra, W. Quevedo, C. Weniger, J. Rehanek, A. Firsov, H. Laksmono, C. Weninger, R. Alonso-Mori, D. L. Nordlund, B. Lassalle-Kaiser, J. M. Glowacki, J. Krzywinski, S. Moeller, J. J. Turner, M. P. Minitti, G. L. Dakovski, S. Koroidov, A. Kawde, J. S. Kanady, E. Y. Tsui, S. Suseno, Z. Han, E. Hill, T. Taguchi, A. S. Borovik, T. Agapie, J. Messinger, A. Erko, A. Föhlisch, U. Bergmann, R. Mitzner, V. K. Yachandra, J. Yano, and P. Wernet, "Soft X-Ray Absorption Spectroscopy of Metalloproteins and High-Valent Metal-Complexes at Room Temperature Using Free-Electron Lasers", *Struct. Dyn.* **4**, 054307 (2017).
- S. Nozawa, T. Sato, M. Chollet, K. Ichihara, A. Tomita, H. Fujii, S. Adachi, S. Koshihara, "Direct Probing of Spin State Dynamics Coupled with Electronic and Structural Modifications by Picosecond Time-Resolved XAFS", *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 61-63 (2010).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nagasaka Masanari	4. 巻 27
2. 論文標題 Soft X-ray absorption spectroscopy in the low-energy region explored using an argon gas window	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 959 ~ 962
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1107/S1600577520005883	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nagasaka Masanari, Iwayama Hiroshi	4. 巻 91
2. 論文標題 Photoelectron based soft x-ray detector for removing high order x rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083103 ~ 083103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0011302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 長坂将成, 小杉信博	4. 巻 75
2. 論文標題 精密厚さ制御による液体の軟X線透過吸収分光測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 496 ~ 503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagasaka Masanari, Yuzawa Hayato, Kosugi Nobuhiro	4. 巻 124
2. 論文標題 Microheterogeneity in Aqueous Acetonitrile Solution Probed by Soft X-ray Absorption Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 1259 ~ 1265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.0c00551	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 NAGASAKA Masanari, YUZAWA Hayato, KOSUGI Nobuhiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Soft X-ray Absorption Spectroscopy of Liquids for Understanding Chemical Processes in Solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Analytical Sciences	6. 最初と最後の頁 95 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2116/analsci.19R005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagasaka Masanari, Kosugi Nobuhiro	4. 巻 50
2. 論文標題 Soft X-ray Absorption Spectroscopy for Observing Element-specific Intermolecular Interaction in Solution Chemistry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 956 ~ 964
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akazawa Daisuke, Sasaki Takehiko, Nagasaka Masanari, Shiga Motoyuki	4. 巻 156
2. 論文標題 X-ray absorption spectra of aqueous cellobiose: Experiment and theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 044202 ~ 044202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0078963	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Masanari Nagasaka
2. 発表標題 Molecular Interactions in Liquids Probed by Soft X-ray Absorption Spectroscopy in Transmission Mode
3. 学会等名 Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2020 (LSC 2020), OPTICS & PHOTONICS International Congress 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 放射光を活用した溶液の軟X線吸収分光法の開発と応用
3. 学会等名 茨城大学 令和2年度第1回量子線科学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 軟X線透過アルゴン窓を用いた液体測定への展望
3. 学会等名 UVSORシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 液体の軟X線吸収分光法のバイオ研究への展望
3. 学会等名 電気学会 光・量子デバイス研究会「医療・バイオ研究に有効なインターフェースと量子ビーム応用の未来」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Goh WeiZheng, 長坂将成, 手老龍吾
2. 発表標題 水溶液中で測定した脂質二重膜のX線吸収スペクトルの帰属
3. 学会等名 電気学会 光・量子デバイス研究会「医療・バイオ研究に有効なインターフェースと量子ビーム応用の未来」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 軟X線吸収分光法による溶液の化学現象の解明
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Goh WeiZheng, 長坂将成, 手老龍吾
2. 発表標題 X線吸収分光法による脂質二重膜へのイオン配位の測定
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立純一
2. 発表標題 PF 2.5 GeVリングハイブリッドモード運転を活用した軟X線時間分解計測の展開
3. 学会等名 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanari Nagasaka
2. 発表標題 Soft X-ray Absorption Spectroscopy of Liquid for Understanding Chemical Processes in Solution
3. 学会等名 Japan-Korea Molecular Science Symposium "Advances in Materials and Molecular Sciences"（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanari Nagasaka, Nobuhiro Kosugi
2. 発表標題 Intermolecular Interactions Revealed by Precise Energy Shift Analysis in Soft X-ray Absorption Spectroscopy for Liquid
3. 学会等名 The 40th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 軟X線XAFSによる溶液反応のその場観測
3. 学会等名 電磁波励起反応場第188委員会 2019年度第1回ワークショップ 「マイクロ波「その場」観察の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 液体の軟X線吸収分光測定の詳細と今後の展望
3. 学会等名 第25回HiSOR研究会「小型放射光リングによる多彩な量子ビームの発生と応用」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 軟X線吸収分光法による溶液反応のオペランド観測
3. 学会等名 日本表面真空学会 放射光表面科学研究部会「放射光を利用したオペランド表面界面観測の最先端：構造から機能・反応へ」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成, 湯沢勇人, 小杉信博
2. 発表標題 軟X線吸収分光法によるアセトニトリル水溶液の微小不均一性の解明
3. 学会等名 第22回XAFS討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成, 湯沢勇人, 小杉信博
2. 発表標題 軟X線吸収分光法によるアセトニトリル水溶液の微小不均一性の解明
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成, 岩山洋士
2. 発表標題 高次回折光を除去する軟X線検出器の開発
3. 学会等名 UVSORシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂将成, 岩山洋士
2. 発表標題 高次回折光を除去する軟X線検出器の開発
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 手老 龍吾, Goh WeiZheng, 長坂 将成
2. 発表標題 生体膜モデル系を用いた脂質二重膜へのイオン配位の計測
3. 学会等名 UVSORシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goh WeiZheng, 長坂 将成, 手老 龍吾
2. 発表標題 水溶液中での脂質二重膜のX線吸収分光計測
3. 学会等名 UVSORシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goh WeiZheng, 長坂 将成, 中村 慎, 佐野 友美, 手老 龍吾
2. 発表標題 脂質二重膜を構成するリン脂質分子の電子状態計測
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立純一, 大滝新平, 副島浩一, 田中宏和, 石井晴乃, 小菅隆
2. 発表標題 磁気軸受型PFハイブリッドモード用パルスセクターの開発4
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中宏和, 足立純一, 大滝新平, 今井学, 石井晴乃, 小菅隆
2. 発表標題 PFハイブリッドモード用磁気軸受軸直交型パルスセクターの開発
3. 学会等名 2019年度KEK技術交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun-ichi Adachi, Hirokazu Tanaka, Takashi Kosuge, Haruno Ishii, Isao H. Suzuki, Tatsuo Kaneyasu, Takuro Taniguchi, Takeshi Odagiri, Shinpei Ohtaki, Yuji Tsuji, Koichi Soejima, Pascal Lablanquie, and Y. Hikosaka,
2. 発表標題 Development of pulse selectors for the synchrotron radiation pulses from the Photon Factory 2.5 GeV ring to study multiple photoionization
3. 学会等名 International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanari Nagasaka
2. 発表標題 Soft X-ray absorption spectroscopy of liquids for understanding chemical processes in solution
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem-2021) "Frontiers of Higher Energy UV Spectroscopy" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanari Nagasaka and Nobuhiro Kosugi
2. 発表標題 Molecular interactions in aqueous solutions probed by soft X-ray absorption spectroscopy
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem-2021) "Frontiers in the Structure, Properties, and Functions of Molecular Liquids and Solutions" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長坂将成
2. 発表標題 軟X線吸収分光法による溶液反応のオペランド観測
3. 学会等名 日本学術振興会69委員会 第2分科会(新素材関連技術) 第74回研究会「機能材料開発を支えるその場(In-situ)・動作環境下(Operando)計測技術の最近の進展」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	足立 純一 (ADACHI Junichi) (10322629)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師 (82118)	
研究分担者	手老 龍吾 (TERO Ryugo) (40390679)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13904)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	熊木 文俊 (KUMAKI Fumitoshi)	総合研究大学院大学・高エネルギー加速器科学研究所・大学院生 (12702)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------