

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25241010

研究課題名(和文)放射線による生体分子損傷の緩和的定着に関する分光研究

研究課題名(英文)Development of a spectroscopic study for radiation damage induction by thermal relaxation

研究代表者

鶴飼 正敏(Ukai, Masatoshi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80192508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：DNAの放射線損傷の修復過程には酵素修復とともに、迅速な自己組織化修復である“その場修復”の存在が想定される。これはDNAの緩和的定着と経路を共有しつつ天然の安定状態への熱力学的緩和過程でありDNA損傷の別側面である。本研究では、原子・分子分光学と湿潤生態系のアプローチを総合し、DNA分子を含む系の放射線による異常エネルギー状態の発生と、その熱力学的緩和過程(分子構造変化)を明らかにすることを目的として、シンクロトロン放射光による液体分子線・光電子分光法を格段に発展させ、相補的な高速電子線エネルギー損失分光法を開発し、また反応中間体生成物分析のための質量分析法と蛍光分析法を開発した。

研究成果の概要(英文)：As well as the enzymatic repair for the radiation damage of DNA, a self-assembled repair is proposed to occur thermodynamically to restore the locally absorbed excess energy in a cell from radiation. Induction of radiation damage and self-assembled repair are the alternative thermal relaxation processes of bio-cell after irradiation, on which, however, much is not known. To investigate the radiation damage induction to DNA and its self-assembled repair, we have developed a new spectroscopic study to observe and bridge the initial energy deposition and the following chemical reaction under cell-mimetic condition. We thus developed synchrotron-radiation photoelectron spectroscopy and high-energy electron energy-loss spectroscopy in combination with a liquid-micro-jet sampling. For the analysis of molecular specie appearing time-dependently after irradiation, a high resolution mass spectrometry and fluorescence spectroscopy have also been developed.

研究分野：原子・分子物理学

キーワード：DNA放射線損傷 その場修復 緩和的損傷定着 高速電子線エネルギー損失分光法 液体分子線 時間相関分光法

1. 研究開始当初の背景

- DNA の放射線損傷の分子メカニズム、すなわち細胞のどの部位に放射線エネルギーが吸収され、どのような化学反応を経て化学的に安定で、かつ難修復性の損傷生成物が定着するかについては、まだほとんど理解されていない。
- 一方、DNA 損傷の修復には、修復酵素タンパク質が行う酵素修復が知られているが、難修復性損傷の生成以前に細胞系の自己組織化修復というべき迅速な“その場修復”の存在が想定されている。
- その場修復は DNA 損傷の定着と経路を共有しつつ、しかし択一的に分岐して放射線照射前の安定状態へと回帰する熱力学的緩和過程と捉えられる。すなわち、その時間発展的理解は、同時に DNA 損傷の分子メカニズムの理解につながる。
- 研究代表者、鶴飼と分担者、横谷はシンクロトロン放射光励起・液体分子線分光法を確立し、液相試料に対する X 線分光測定を世界に先駆けて成功させてきたが、これを放射線作用の観点からさらに総合的に発展させ DNA 損傷の緩和的定着とその場修復のメカニズムを明らかにする方法論の開発を目指して本研究に至った。

2. 研究の目的

- 研究では DNA 分子を含む系の放射線照射後の異常な非平衡状態(分子構造変化)の発生と、その熱力学的緩和過程を分子レベルで明らかにすることを目的とする新規の実験方法の開発を行う。
- 原子・分子分光と湿潤生態系の相異なるアプローチを総合し、既開発のシンクロトロン放射光による液体分子線・光電子分光法を格段に発展させ、かつ、生体放射線初期過程情報の飛躍的充実のため新たに高速電子線エネルギー損失分光法を確立する。以上を通じて、選択的な超励起に開始される生体分子の放射線損傷の緩和的定着過程という側面を研究する方法論を開発する。

3. 研究の方法

- 上記の目的にもとづき、溶媒和によって規定された DNA の構造に特有な放射線誘起構造変化を、放射線エネルギー付与の始状態を特定し、経時的に発生する反応中間体の分光分析によって損傷定着の初期過程を特定する。
- 溶媒和された DNA 構造の実験室的再現のために液体分子線技術を用いて、真空中に液体状態を生成する。

- 放射線エネルギー付与の初期状態の特定には、軟 X 線シンクロトロン放射光による元素・結合サイト選択的励起の方法と、軟 X 線光電子分光法を用い、かつこれらと相補的、かつ、近似的には同一の励起方法であり、実験室的に実現可能な高速電子線エネルギー損失分光法を開発・確立する。
- 選択的なエネルギー付与ののちに発生する反応中間体の分析法を以下の通り開発する。
 - 1) 光電子分光法をオージェ電子分光器として使用できるように改造し、二価イオン生成物の内部エネルギー状態を識別する。
 - 2) 高分解能飛行時間質量分析器を開発しイオン解離生成物の分析を行う。
 - 3) 中性中間体生成物の分析のためにこれらからの発光を観測する蛍光分光法を開発する。
- 以上により、放射線エネルギーの選択的付与によって開始される後続反応についての時間発展分光を行う方法を開発する。
- これらと並行して試料調製法の開発を行う。

4. 研究成果

- 計画に基づき、溶媒和が規定する分子構造に特有な放射線誘起構造変化を結合サイト選択的に観測するため、シンクロトロン放射光分光法の改造・整備を行った。これにより、DNA の構成単位であるヌクレオチドの X 線吸収スペクトルとその水素イオン濃度(pH)変化に対する依存性を見出すとともに、ヌクレオチドからの放出電子スペクトルの溶液 pH 変化をも明らかにし、放射線による直接作用と間接作用の共同する新たなメカニズムを見出すに至った(農工大・原子力機構共同プレス 2014 年 8 月 7 日。科学新聞 2014 年 8 月 29 日版掲載)。
- シンクロトロン放射光励起と相補的に用いるための高速電子線エネルギー損失分光システム、ならびに、液体分子線試料に対する往復飛行時間質量分析器を製作・開発し、新規の方法論として高く評価された(原子衝突学会第 40 回年会優秀ポスター賞受賞)。
- 放射光励起による蛍光分析法開発上の必要から、ドイツ国カッセル大学物理学科のグループとの技術提携のための相互派遣交流を実施し、蛍光分析装置の開発を行った(これにもとづき H28-29 年度 JSPS 二国間交流事業ドイツとの共同研究(対応機関ドイツ学術交流会 DAAD)に採択。また共同論文準備中)。

・さらに以上の実験に供する試料調整法の整備と検討を継続し、種々の放射光・放射線効果の実験にて実証した。

・以上のとおり、計画調書に記載した開発をほぼ遅滞なく計画通り行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

島田紘行, 横谷明德, 鵜飼正敏, 水溶液環境下における生体分子放射線損傷の分光研究, *日本物理学会誌*, **71**(2016) *in press*. 依頼原稿, 査読有

H.Shimada, H.Minami, N.Okuzumi, I.Sakuma, M.Ukai, K.Fujii, A.Yokoya, K.Fujii, Y.Fukuda, Y.Saitoh, Nitrogen K-edge X-ray absorption near edge structure of pyrimidine-containing nucleotides in aqueous solution, *J. Chem. Phys.* **142**, 175102_1-9 (2015). 査読有

<http://doi.org/10.1063/1.4919744>

T.Kai, A.Yokoya, R.Watanabe, M.Ukai, Thermal equilibrium and prehydration processes of electrons injected into liquid water calculated by dynamic Monte Carlo method, *Radiat. Phys. Chem.* **115**, 1-5 (2015). 査読有
doi:10.1016/j.radphyschem.2015.05.021

Y.Hattori, M.Suzuki, T.Funayama, Y.Kobayashi, A.Yokoya, R.Watanabe, A mathematical model of the radiation-induced responses in cellular population including cell-to-cell communications, *Radiat. Protect. Dosim.* **166**, 142-147 (2015). 査読有 doi:10.1093/rpd/ncv149

A.Narita, K.Kaminaga, A.Yokoya, M.Noguchi, K.Kobayashi, N.Usami, K.Fujii, Real-time observation of irradiated HELA-cell modified by fluorescent ubiquitination-based cell cycle indicator using synchrotron X-ray microbeam, *Radiat. Protect. Dosim.* **166**, 192-196 (2015). 査読有 doi:10.1093/rpd/ncv156

K.Kaminaga, M.Noguchi, A.Narita, Y.Sakamoto, Y.Kanari, A.Yokoya, Visualization of cell cycle modifications by X-irradiation of single HELA cells using fluorescent ubiquitination-based cell cycle indicators, *Radiat. Protect. Dosim.* **166**, 91-94 (2015). 査読有
doi:10.1093/rpd/ncv168

M.Noguchi, Y.Kanari, A.Yokoya, A.Narita, K.Fujii, Live-cell imaging study of mitochondrial morphology in mammalian cells exposed to X-rays, *Radiat. Protect.*

Dosim. **166**, 101-103 (2015). 査読有

doi:10.1093/rpd/ncv157

T.Kai, A.Yokoya, M.Ukai, R.Watanabe, Cross sections, stopping power and energy loss rate for rotational excitation and phonon processes in liquid water by electron impact, *Radiat. Phys. Chem.* **108**, 13-17 (2015). 査読有

doi:10.1016/j.radphyschem.2014.11.008

K.Hata, A.Urushibara, S.Yamashita, M.Lin, Y.Muroya, N.Shikazono, A.Yokoya, H.Fu, Y.Katsumura, Chemical repair activity of free radical scavenger, edaravone: Reduction reactions with dGMP hydroxyl radical adducts and suppression of base lesions and AP sites on irradiated plasmid DNA, *J. Radiat. Res.* **56**, 59-66 (2015). 査読有
doi:10.1093/jrr/rru079

H.Shimada, T.Fukao, H.Minami, M.Ukai, K.Fujii, A.Yokoya, Y.Fukuda, Y.Saitoh, Nitrogen K-edge X-ray absorption near edge structure (XANES) spectra of purine-containing nucleotides in aqueous solution, *J. Chem. Phys.* **141**, 055102 (2014). 査読有
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4891480>

T.Kai, A.Yokoya, M.Ukai, K.Fujii, M.Higuchi, R.Watanabe, Dynamics of low-energy electrons in liquid water with consideration of Coulomb interaction with positively charged water molecules induced by electron collision, *Radiat. Phys. Chem.* **102**, 16-22 (2014). 査読有
doi:10.1016/j.radphyschem.2014.04.017

横谷明德, 神長輝一, シングルセルトランスクニングによる細胞集団挙動の観測とシステム生物学的解析への展開, *放射線生物研究*, **49**, 418-431 (2014). 依頼原稿, 査読有

A.Urushibara, S.Kodama, A.Yokoya, Induction of genetic instability by transfer of a UV-A-irradiated chromosome, *Mutat. Res.* **766**, 29-34 (2014). 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mrgentox.2014.02.005>

K.Fujii, A.Narita, A.Yokoya, Bond cleavage of adenosine 5'-triphosphate induced by monochromatic soft X-rays, *J. Phys.: Conf. Ser.* **502** 012034_1-4 (2014). 査読有
doi:10.1088/1742-6596/502/1/012034

H.Shimada, T.Fukao, H.Minami, M.Ukai, K.Fujii, A.Yokoya, Y.Fukuda, Y.Saitoh, Structural changes of nucleic acid base in aqueous solution as observed in X-ray absorption near edge structure (XANES). *Chem. Phys. Lett.* **591**, 137-141 (2014). 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cpllett.2013.11.026>

島田紘行, 鶴飼正敏, 水溶液生体分子構造に対する放射光励起・液体分子線分光研究(後編), *放射線化学*, **97**, 3-12(2014). **査読有**

Y.Sugaya, A.Nartita, K.Fujii, A.Yokoya, DNA damage by soft X-ray exposure at oxygen K-edge. *J. Phys.: Conf. Ser.* **502**, 012040_1-4 (2014). **査読有**
doi:10.1088/1742-6596/502/1/012040

横谷明德, 鶴飼正敏, 岡壽崇, 甲斐健師, 渡邊立子, 藤井健太郎, 内殻イオン化によるDNA損傷と局在化, *原子衝突学会誌* *しょうとつ*, **11**, 33-39 (2014) **依頼原稿, 査読有**

N.Shikazono, K.Akamatsu, M. Takahashi, M.Noguchi, A.Urushibara, P.O'Neill, A.Yokoya, Significance of DNA polymerase I in *in vivo* processing of clustered DNA damage. *Mutat. Res.* **749**, 9-15(2013). **査読有**
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mrgentox.2013.07.010>

K.Hata, A.Urushibara, S.Yamashita, N. Shikazono, A.Yokoya, Y.Katsumura, Chemical repair of base lesions, AP-sites, and strand breaks on plasmid DNA in dilute aqueous solution by ascorbic acid, *Biochem. Biophys. Res. Comm.* **434**, 341-345(2013) **査読有**
<http://dx.doi.org/10.1016/j.bbrc.2013.03.075>

[学会発表] (計 35 件)

H.Shimada, A.Yokoya, K.Fujii, M.Ukai, Selective energy deposition to nucleobases in the primary interaction using soft X-ray synchrotron radiation, *14th International Workshop on Radiation Damage to DNA*, March 20-24, 2016, Melbourne Australia. **invited**

A.Yokoya, Y.Sugaya, T.Oka, K.Fujii, M.Ukai, DNA damage induction by K-shell ionization and succeeding resonant Auger transition, *14th International Workshop on Radiation Damage to DNA*, March 20-24, 2016, Melbourne Australia. **invited**

島田紘行, 武田泰明, 三浦亮介, 柏田拓臣, 篠澤柚衣, 村井龍司, 鶴飼正敏, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, C.Ozga, A.Knie, 水溶液ヌクレオチドのオージェ崩壊の pH 依存性, *日本物理学会第 71 年次大会*, 2016 年 3 月 19-22 日, 東北学院大学(宮城県仙台市).

島田紘行, 内殻励起から始まる DNA の損傷過程, *物核融合科学研究所合同研究会「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」*, 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」, 2016 年 1 月 27-29 日, 核融合科学研究所(岐阜県土岐市) **invited**.

島田紘行, 液体分子線を用いた溶質分子の内殻電子分光, *物質構造科学研究所フォト*

ンファクトリー研究会: 先進的放射光利用による原子分子科学, 2016 年 1 月 12-12 日, 物質構造科学研究所(茨城県つくば市) **invited**.

柏田拓臣, 横島熙, 島田紘行, 鶴飼正敏, 水溶液中の生体分子に対する高速電子線エネルギー損失分光法の開発, *原子衝突学会第 40 回年会*, 2015 年 9 月 28-30 日, 首都大学東京(東京都八王子市).

篠澤柚衣, 小田島嘉孝, 島田紘行, 鶴飼正敏, 液体分子線試料に対する質量分析実験の開発, *原子衝突学会第 40 回年会*, 2015 年 9 月 28-30 日, 首都大学東京(東京都八王子市).

村井龍司, 島田紘行, 鶴飼正敏, 水溶液中ヌクレオチドの放射線損傷中間体分子観測のための蛍光分光法の開発, *原子衝突学会第 40 回年会*, 2015 年 9 月 28-30 日, 首都大学東京(東京都八王子市).

島田紘行, 鶴飼正敏, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, 水溶液ヌクレオチドのオージェ電子スペクトルの測定, *日本物理学会 2015 秋期大会*, 2015 年 9 月 16-19 日, 関西大学(大阪府吹田市).

H.Shimada, M.Ukai, A.Yokoya, K.Fujii, Y. Fukuda, Y.Saitoh, Observation of core hole states of nucleotides under aqueous environment using soft X-ray spectroscopies, *ICPEAC2015: XXIX International Conference on Photonic, Electronic, Atomic Collisions*, June 22-28, 2015, Toledo, Spain.

M.-A.Herve du Penhoat, M.-P.Gaigeot, R. Vuilleumier, R.Spenzia, K.Fujii, A.Yokoya, Dissociation of ionized biomolecule: *ab initio* molecular dynamics studies, *15th International Congress on Radiation Research*, May 25-29, 2015, Kyoto International Conference Center, Kyoto-shi, Kyoto, Japan. **invited**

A.Yokoya, K.Fujii, T.Kai, R.Watanabe, M. Noguchi, Structure and reparability of clustered DNA damage, *15th International Congress on Radiation Research*, May 25-29, 2015, Kyoto International Conference Center, Kyoto-shi, Kyoto, Japan. **invited**

H.Shimada, M.Ukai, K.Fujii, A.Yokoya, Y. Fukuda, Y.Saitoh, Nitrogen K-edge X-ray absorption near edge structure of pyrimidine-containing nucleotides in aqueous solution, *8th Auger Symposium: An International Meeting of Physical, Molecular and Cellular Aspects of Auger Processes*, May 20-22, 2015, Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, Kizu, Kyoto, Japan. **invited**

島田紘行, 鶴飼正敏, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, 軟 X 線分光による水溶液中ヌクレオチドの内殻励起・脱励起状態の観測, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学 (東京都新宿区) .

島田紘行, 佐久間一郎, 奥泉直人, 武田泰明, 三浦亮介, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, 鶴飼正敏, 水溶液中ピリミジン塩基の軟 X 線吸収スペクトルに現れる pH および水和の影響, 第 28 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2015 年 1 月 10-12 日, 立命館大学 (滋賀県草津市) .

横谷明德, 放射光を用いたゲノム DNA 損傷の初期過程と生体修復, 第 28 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2015 年 1 月 10-12 日, 立命館大学 (滋賀県草津市) *invited*.

H. Shimada, Y. Takeda, R. Miura, T. Kashiwada, Y. Shinozawa, R. Murai, K. Fujii, A. Yokoya, Y. Fukuda, Y. Saitoh, M. Ukai, Initial process of DNA base damage induction explored by soft X-ray spectroscopies, *39th Annual Meeting of Atomic Collision Society of Japan/ 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics*, October 4-10, 2014, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan.

Y. Takeda, H. Shimada, M. Ukai, Hydrogen effect of nucleobases as identified by a DFT analysis for X-ray absorption spectrum of aqueous nucleobase, *39th Annual Meeting of Atomic Collision Society of Japan/ 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics*, October 4-10, 2014, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan.

R. Miura, H. Shimada, M. Ukai, Development of a high electron energy loss spectroscopy for aqueous bio-molecules, *39th Annual Meeting of Atomic Collision Society of Japan/ 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics*, October 4-10, 2014, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan.

H. Shimada, T. Fukao, H. Minami, N. Okuizumi, I. Sakuma, M. Ukai, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Fukuda, Y. Saitoh, Core-excitation process of hydrated nucleobase as an initial process of base damage induction, *13th International Workshop on Radiation Damage to DNA*, June 14-18, 2014, Boston, USA.

- ⑳ H. Shimada, H. Minami, I. Sakuma, N. Okuizumi, M. Ukai, K. Fujii, A. Yokoya, Y. Fukuda, Y. Saitoh, pH-dependence of soft X-ray absorption spectra of nucleotides in aqueous

solution, *30th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics*, June 4-6, 2014, Egret Himeji, Himeji-shi, Hyogo, Japan.

- ㉑ 島田紘行, 深尾大志, 南寛威, 佐久間一郎, 奥泉直人, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, 鶴飼正敏, 水溶液中プリンヌクレオチドの軟 X 線吸収スペクトルおよび pH 依存性, 第 27 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2014 年 1 月 11-13 日, 広島国際会議場 (広島県広島市).
- ㉒ 島田紘行, 深尾大志, 南寛威, 佐久間一郎, 奥泉直人, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, 鶴飼正敏, 軟 X 線を用いた水溶液中のヌクレオチドの幾何・電子構造の研究, 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16-17 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市) *invited*
- ㉓ 奥泉直人, 島田紘行, 深尾大志, 南寛威, 佐久間一郎, 鶴飼正敏, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, X 線吸収スペクトルに見る水溶液中のプリンヌクレオチドの構造変化, 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16-17 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市) .
- ㉔ 佐久間一郎, 島田紘行, 南寛威, 奥泉直人, 鶴飼正敏, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, ピリミジンヌクレオチドの窒素 K 殻吸収端近傍における X 線吸収スペクトル, 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16-17 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市) .
- ㉕ 武田泰明, 島田紘行, 鶴飼正敏, 核酸塩基分子の軟 X 線吸収スペクトルに対する水和効果, 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16-17 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市) .
- ㉖ H. Shimada, M. Ukai, A. Yokoya, K. Fujii, Atomic site-selective energy deposition to nucleobases observed by X-ray absorption spectroscopy, *MACROS2013: 16th International Symposium on Microdosimetry*, October 20-25, 2013, Treviso, Italy.
- ㉗ Y. Hattori, M. Suzuki, T. Fukunayama, Y. Kobayashi, A. Yokoya, R. Watanabe, Non-linear phenomena at low-doses such as radiation-induced bystander effects, genomic instability, adaptive response and hyper-radiosensitivity, *MACROS2013: 16th International Symposium on Microdosimetry*, October 20-25, 2013, Treviso, Italy.
- ㉘ M. Noguchi, Y. Kanari, A. Narita, K. Fujii, A. Yokoya, Relation between morphological changes of mitochondria and radiosensitivity, *MACROS2013: 16th International Symposium on Microdosimetry*, October 20-25, 2013, Treviso, Italy.

- ③⑩ K.Kaminaga, M.Noguchi, A.Narita, Y. Sakamoto, A.Kanari, A.Yokoya, Visualization of cell cycle modification by X-irradiation in single HELA cells using fluorescent ubiquitination-based cell cycle indicator, *MACROS2013: 16th International Symposium on Microdosimetry*, October 20-25, 2013, Treviso, Italy.
- ③⑪ A.Narita, K.Kaminaga, A.Yokoya, M. Noguchi, K.Kobayashi, N.Usami, K.Fujii, Real-time observation of irradiated HELA-cell modified by fluorescent ubiquitination-based cell cycle indicator using synchrotron X-ray microbeam, *MACROS2013: 16th International Symposium on Microdosimetry*, October 20-25, 2013, Treviso, Italy.
- ③⑫ 島田紘行, 深尾大志, 南寛威, 佐久間一郎, 奥泉直人, 横谷明德, 藤井健太郎, 福田義博, 斎藤祐児, 鵜飼正敏, 窒素 K 吸収端近傍 X 線吸収スペクトルの pH 依存性における水溶液中のプリンヌクレオチドの構造変化, *第 56 回放射線化学討論会*, 2013 年 9 月 27-29 日, 広島大学 (広島県東広島市).
- ③⑬ 岡壽崇, 横谷明德, 藤井健太郎, 鵜飼正敏, DNA および DNA 関連分子の K 殻イオン化閾値領域における不対電子生成, *第 56 回放射線化学討論会*, 2013 年 9 月 27-29 日, 広島大学 (広島県東広島市).
- ③⑭ 甲斐健師, 横谷明德, 鵜飼正敏, 藤井健太郎, 樋口真理子, 渡邊立子, 水中におけるフェムト秒オーダーでの電離電子のダイナミクス, *第 56 回放射線化学討論会*, 2013 年 9 月 27-29 日, 広島大学 (広島県東広島市).
- ③⑮ K.Fujii, A.Narita, A.Yokoya, Bond cleavage of adenosine 5'-triphosphate induced by monochromatic soft X-rays, *Light and Particle Beams in Material Science 2013*, August 29-31, 2013, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan.

〔図書〕(計 1 件)

鵜飼正敏(共著, 笠井秀明編, 共著者: 岡野由紀子, 岡本昭夫ほか 116 名), 最新実用真空技術総覧, 産業技術サービスセンター(2016) *in press*. 総ページ数 1000 うち 5 ページ.

〔産業財産権〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鵜飼正敏 (UKAI, Masatoshi)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 8 0 1 9 2 5 0 8

(2) 研究分担者

横谷明德 (YOKOYA, Akinari)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究センター・研究主幹
研究者番号: 1 0 3 5 4 9 8 7

島田紘行 (SHIMADA, Hiroyuki)
東京農工大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 3 0 5 4 2 1 1 2

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

藤井 健太郎 (FUJII, Kentaro)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究センター・研究副主幹

斎藤 祐児 (SAITOH, Yuji)
日本原子力研究開発機構・関西光子量子研究
所放射光科学研究センター・研究副主幹

福田 義博 (FUKUDA, Yoshihiro)
日本原子力研究開発機構・関西光子量子研究
所放射光科学研究センター・技術職員

奥泉 直人 (OKUIZUMI, Naoto)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2013 年度に参画)

佐久間 一郎 (SAKUMA, Ichiro)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2013 年度に参画)

武田 泰明 (TAKEDA, Yasuaki)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2013-14 年度に参画)

三浦 亮介 (MIURA, Ryouzuke)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2013-14 年度に参画)

柏田 拓臣 (KASHIWADA, Takumi)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2014-15 年度に参画)

篠澤 柚衣 (SHINOZAWA, Yui)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2014-15 年度に参画)

村井 龍司 (MURAI, Ryuji)
東京農工大学・大学院工学府・
博士前期課程(2014-15 年度に参画)