

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23241033

研究課題名(和文) X線自由電子レーザーを利用する液体中の中距離立体構造の解明

研究課題名(英文) Medium range structure studied by X-ray free electron laser

研究代表者

八尾 誠 (Yao, Makoto)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70182293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,500,000円

研究成果の概要(和文)：X線自由電子レーザー(XFEL)を利用して非周期系物質の3次元構造解析を目指した実験手法と装置開発を行った。XFELを用いて巨大希ガスクラスターの小角X線散乱・蛍光X線・イオンスペクトル同時計測実験を実施し、ナノメートルサイズのクラスターの単粒子構造情報と得ることに成功した。また、XFELを用いた時分割計測実験法を確立し、サブピコ秒の時間分解能でダイナミクス計測が可能であることを示した。

中距離構造を有する液体試料である常温イオン液体について、実験室での小角X線散乱実験に基づき、RTILに添加する芳香族分子の結合性に依存して中距離構造が変化することを見出した。

研究成果の概要(英文)：We constructed the experimental apparatus and analysis methods for the three dimensional structural determination of disordered materials using coherent x-ray pulses of free electron laser (X-FEL). We succeeded in the coincidence measurements of small angle x-ray scattering, fluorescence x-ray emission and ion time-of-flight spectra on giant (~200nm) rare-gas clusters at SACLA. Time resolved measurements of X-FEL induced phenomena in sub-ps temporal resolution were achieved by using X-FEL pump – near infrared laser probe method.

The medium-range order (MRO) of room temperature ionic liquids (RTILs), which have the domain structures on the nm spatial scale, was studied by small angle x-ray scattering experiments. We found that the MRO of RTIL is modified by adding the dopant aromatic molecules in a manner that subtly depends on the bonding nature.

研究分野：不規則系物理学

キーワード：X線自由電子レーザー 液体 クラスター 単粒子構造解析

1. 研究開始当初の背景

A. 技術的背景

大型放射光施設 SPring-8 内に建設される X線自由電子レーザー (X-FEL) により、位相の揃った (coherent) X線パルスが利用可能となる。結晶のラウエ像に相当する 2次元回折像が非周期系物質でも得られることで、非周期系物質で立体構造に情報が得ることが可能になると期待される。加えて、X-FEL はフェムト秒の時間幅かつ、 10^{20} W/cm² の高輝度で放出されるため、時間分割スナップショット撮影が可能となり、非周期ダイナミクス研究の新しい展開が期待される。

B. 学術的背景

液体は、マクロには均一であっても、競合する相互作用が共存すればマイクロ不均一性が出現することもある。最近、新しい化学反応場として注目されている室温イオン液体 (以後 RTIL) もその 1 例である。RTIL では、クーロン力で優先的に結合した極性ドメインと、van der Waals 力による非極性ドメインを形成すると考えられている。

一方、液体が金属-非金属転移を起こす場合には、単体液体であってもマイクロ不均一性に起因する slow dynamics が出現する。特に、カルコゲン族のセレンは、融点近傍では結晶に近い鎖状構造を有する半導体であるが、高温・高圧下では分子の形状と集合状態の変化を伴って金属に転移すると考えられている。しかし、その中距離立体構造の変化については想像の域を出ていない。

2. 研究の目的

本研究では、非周期系物質について 3次元構造の情報を取得するために、単一 FEL パルスでの X線散乱計測を用いた実験手法および解析手法を開発する。さらに、時分割計測によるフェムト秒ダイナミクスの追跡や各種分光 (イオン・電子分光など) の同時計測も含めた単一粒子試料の物性解析を行い、従来手法でのアンサンブル平均や時間平均された構造・物性解析を超えた物性計測手法の実現を目指す。試料としては、室温イオン液体やカルコゲン液体など、非等方な中距離立体構造が期待される非周期系物質について、立体構造ダイナミクスの解明を目指して下記の項目を遂行する。

①. X線自由電子レーザー (X-FEL) 利用実験技術の開発 :

新規光源である X-FEL を使いこなすためには、X-FEL 利用のための実験技術開発に加えて、高強度短パルス X線によって引き起こされる素過程の理解が必要である。実験技術としては、X-FEL の特性に合わせたパルス試料導入装置に加え、計測技術として、X線回折像取得のための二次元 X線検出器利用技術と時分割計測のためのポンプ-プローブ測定技術を確認する。実験技術の開発と同時に、X

線多光子吸収による内殻同時励起の素過程解明など、液体の構造解析の際に必要と予想される基礎的知見を取得する。

② 室温イオン液体 (RTIL) を試料とする回折実験 :

X-FEL での液体研究の評価試料として、試料の取り扱いが比較的容易で、特徴的な中距離構造を持ち、陰イオン種や陽イオンの側鎖長などを制御できる等の利点を有するイミダゾリウム系の室温イオン液体 (RTIL) を取り上げる。RTIL の平均的な中距離構造について同定を進めるために、実験室で小角 X線散乱実験を行う。また、光励起による構造変化が期待される有機分子を添加することで、RTIL の中距離構造をレーザーのパルス光により制御する手法を開発する。実験室での予備的な実験を経て X-FEL での実験に供する。

③ カルコゲン液体を試料とする回折実験 :

本研究の最終目標は、光照射による金属化や中距離構造変化が期待されるカルコゲン液体について、半導体-金属転移などに伴う鎖状分子の形状と集合状態の変化を立体的に追跡することである。これを実現するための専用試料導入装置と計測セットアップの開発を行う。

3. 研究の方法

① X線自由電子レーザー (X-FEL) の立ち上げ実験 :

X-FEL の試験機である極紫外自由電子レーザー (EUV-FEL) で使用実績のある実験装置を用いて、X-FEL 実験技術確立のための試験実験を行う。希ガス原子や、原子の集合体であるクラスターを試料として、X-FEL から放出される硬 X線光子の多重吸収過程の評価を行う。既存の放射光源から放出される硬 X線の 1 光子吸収による内殻励起や EUV-FEL から放出される極紫外多光子吸収による価電子同時励起等の実験との比較によって、X-FEL で誘起される内殻電子同時励起とその緩和ダイナミクスを議論する。

② 室温イオン液体 (RTIL) を試料とする回折実験 :

イミダゾリウム系の RTIL について、中距離構造の情報を得るために実験室での小角 X線散乱実験を行う。特に RTIL が有すると考えられる極性・非極性ドメインについて、それぞれと引力的な相互作用が期待される分子を添加することで極性・非極性ドメインが構成する中距離構造について詳しく検討する。

蒸気圧が低く、粘性が比較的高い室温イオン液体試料を X-FEL 実験チャンバーに導入するため、試料を液体のまま真空中に導入を可能とするパルス液体源の開発を行う。

③ カルコゲン試料実験に向けた試料源と実験装置の開発 :

カルコゲン液体を試料とする場合、高い試料温度や蒸気圧、反応性などのカルコゲン試料特有の問題が想定される。これらを X-FEL 実験に利用できるよう、高温対応の液体ビーム装置および専用実験槽を開発する。

4. 研究成果

① X線自由電子レーザー利用実験の開発

X-FEL から得られる高強度光は、単原子でも多光子イオン化が可能であり、従来の放射光 X 線利用実験と比べて、著しい損傷を試料に与える。X-FEL 照射に伴う損傷などについて定量的に評価するために、SACLA の X-FEL パルスを用いた原子・分子・クラスターのイオン分光・電子分光を実施した。

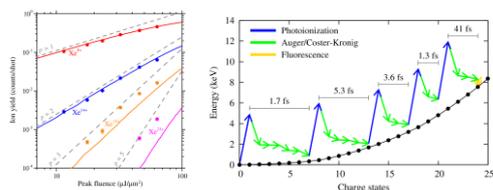


図 1 キセノン原子に 5.5keV の X-FEL を照射して得られた高価数イオン収量の光強度依存性 (左図) と、理論計算から得られた多光子吸収と生成イオン価数の関係 (右図)

キセノン原子を試料として 5.5keV の X-FEL を照射した実験では、最大 26 価の高価数イオンが生成することが確認された。実験で得られた光強度依存性や理論計算との比較 (図 1) から、10fs 程度の時間幅を持つ X-FEL パルス内で、キセノン原子が最大 5 光子を吸収する多光子イオン化過程が実現していることが示された。

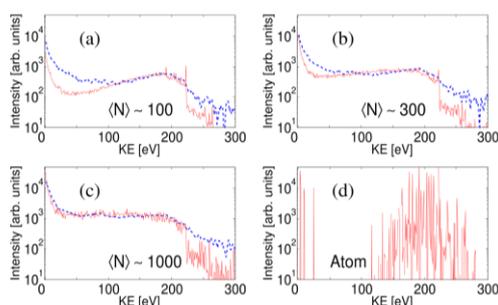


図 2 キセノンクラスターに 5.5keV の X-FEL を照射して得られた電子スペクトル。図中の N は平均クラスターサイズ、赤線は理論計算で得られたスペクトル。

キセノン原子の実験と同様な X-FEL の光源条件を用いて、キセノンクラスターから得られる電子スペクトルをクラスターサイズを変えて計測した (図 2)。得られた電子スペクトルにはクラスターの逐次多光子イオン化の特徴を示す非対称な幅の広いピークが見られるとともに、クラスターイオンに電子が

捕獲されて生成する「ナノプラズマ」に特有の低エネルギー電子の裾が観測された。キセノン原子およびキセノンクラスターの実験は、硬 X 線エネルギー領域の X-FEL を用いた多光子イオン化過程を世界に先駆けて観測した例であり、結果は Phys. Rev. Lett. 誌で発表するとともに、プレス発表を行った。

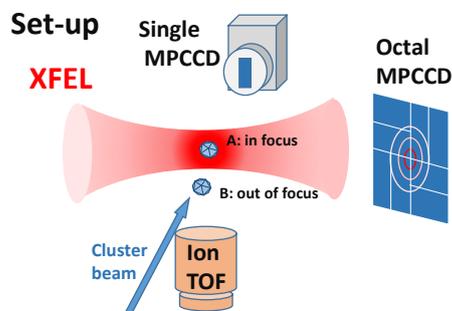
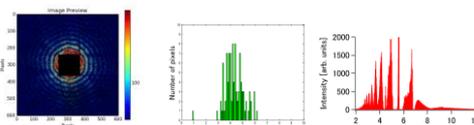


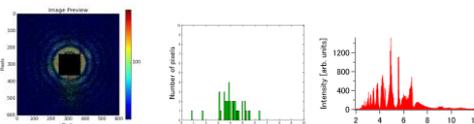
図 3 同時計測実験での実験配置の模式図

単粒子の小角 X 線散乱および蛍光 X 線・イオンスペクトルの同時計測を、図 3 に示す実験配置を用いて実施した。実験では、X 線計測に SACLA で整備された MPCCD オクタールセンサーと MPCCD シングルセンサーを用いた。分子線中に生成した巨大キセノンクラスター (最大 10^8 原子程度) に汎用集光装置 (1 ミクロン集光) からの集光 X-FEL パルスを照射した。小角 X 線散乱 (SAXS) 像 (MPCCD オクタールセンサー)、蛍光 X 線 (MPCCD シングルセンサー)、解離イオン (Ion TOF 分光器) のシングルショット・同時計測に成功した。得られた典型的な結果を図 4 に示す。

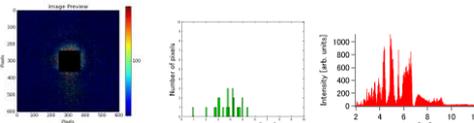
(a) 粒子直径 250nm ($\sim 1 \times 10^8$ 個), FEL fluence $13 \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$



(b) 粒子直径 160nm ($\sim 3 \times 10^7$ 個), FEL fluence $9.4 \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$



(c) 粒子直径 74nm ($\sim 3 \times 10^6$ 個), FEL fluence $10 \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$



Octal MPCCD Single MPCCD Ion TOF

図 4 XFEL 集光点近傍から得られた小角 X 線散乱 (Octal MPCCD)、蛍光 X 線 (single MPCCD) および生成イオン (ion TOF) の各スペクトル。

小角 X 線散乱像をトムソン散乱による散乱公式で解析し、ショット毎に XFEL 強度とクラスターサイズの導出に成功するとともに、蛍光 X 線信号、イオン TOF 信号などに明らかな相関を観測した。本実験で SAXS 信号が得

られた最小クラスターは粒子の直径が50-74nm程度、原子数 10^6 個程度のクラスターであった。得られ小角X線散乱データから構造情報を得るために、モンテカルロ計算などを用いた構造解析手法を独自に開発した。また、試料に及ぼす放射線損傷について、蛍光X線信号、イオンTOF信号なども合わせて検討を加えた結果、小角散乱においては散乱波数の逆数が原子尺度に比べて十分長いこともあり、放射線損傷の程度は軽微なものであると評価した。以上より、SACLAのX-FELパルスを利用した単一粒子の構造情報取得が可能であることが実証された。

X-FELをポンプパルス、近赤外(NIR)レーザーをプローブに用いた時分割計測技術を開発するために、希ガスクラスターを試料とした実験を行った。パルス幅10fs以下というX-FELの特徴を活かすことで、イオンや電子のダイナミクスを高時間分解能で追跡することが可能である。

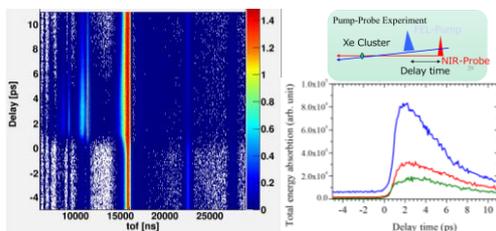


図5 X-FELとNIRパルスの遅延時間を掃引(右上図参照)して、生成するイオンの収量を計測した(左図)。イオン収量から見積もったエネルギー吸収量の遅延時間依存性を右下図に示す。

観測されたイオンスペクトル(図5)には明瞭な遅延時間依存性が見られた。実験から、特定のNIRレーザー遅延時間で表面プラズモン共鳴吸収を起こし、多価イオン・高エネルギーイオンを生成することが確かめられた。X-FELによって生成したナノプラズマは、表面プラズモン共鳴吸収により巨大なエネルギーを投入され、著しく高温のプラズマとなっていることが示唆されている。本成果により、X-FELによるナノプラズマ生成の実験的な検証がなされ、X-FELにより新規なプラズマ状態が生成していることが確認された。さらに、上記の単粒子構造解析および時分割計測の成果を元に、X-FELを用いたフェムト秒時間分解能での構造解析実験の実験配置を提案した。

② 室温イオン液体の中距離構造の制御と小角X線散乱

X-FELでの液体実験の試料としてRTILであるイミダゾリウムイオン液体[C8mim][PF6](図6)を取り上げ、平均的な中距離構造を検討するために小角X線散乱を行った。S(Q)には、過去のイオン液体に関する報告と同様に、 $q = 0.2 \text{ \AA}^{-1}$ 付近に中距離構造の形成を示唆す

るピークが見られた。この中距離構造の成因を詳細に検討するために、RTILに極性や分子量の異なる分子を添加してS(Q)の変化を系統的に検討した。

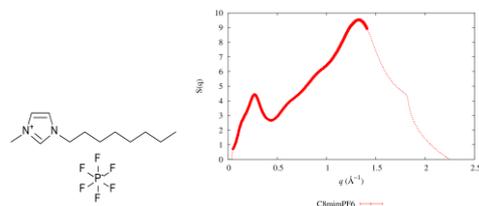


図6 RTILの一つ[C8mim][PF6]の分子構造式と、小角X線散乱で得られたS(Q)。

特徴的な結果として、添加する芳香族分子をベンゼン(C_6H_6)から六フッ化ベンゼン(C_6F_6)に変えると、中距離構造に相当する小角ピークに顕著な差が現れることを見出した(図7)。2つの分子 C_6H_6 と C_6F_6 で分子サイズや極性の差がほとんどないにも関わらずRTILの中距離構造が変化しており、添加する分子の電子状態などの僅かな変化によってRTILの構造に大きな変化が起こせることが示唆されている。以上の実験やこれまでの研究を踏まえて、アゾベンゼンなどの光励起で構造変化を起こす分子を添加することによってRTILの中距離構造の変化を誘起する手法の検討を進めた。

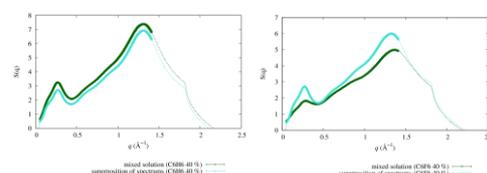


図7 [C8mim][PF6]にベンゼン(C_6H_6 ,左図)および六フッ化ベンゼン(C_6F_6 ,右図)を40%添加して得られたS(Q)スペクトル。緑は線形結合和を仮定して計算で得られたS(Q)。

③ カルコゲン液体ビーム用実験装置の開発

カルコゲン液体を試料とする実験のための高温対応の液体ビーム装置および専用実験槽の開発を進めた。高温液体用のパルスビーム源として、150度までの高温で使用可能な既存の電磁バルブに改造を施して、高温の液体を吐出する構造とした。製作した装置の模式図を図8にしめす。X-FEL実験に適した

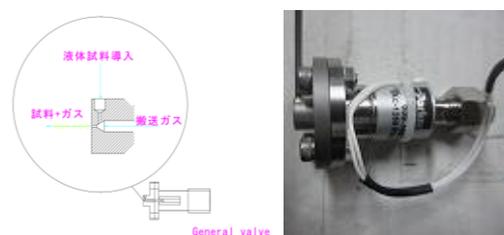


図8 高温用のパルス液体ビーム源

試料も合わせて再検討し、光誘起による大きな構造転移が期待される液体イオウを想定して開発を進めた。

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 21 件)

① Pulse delay effect in angular distribution of near-threshold EUV+IR two-photon ionization of Ne: S. Mondal, H. Fukuzawa, K. Motomura, T. Tachibana, K. Nagaya, T. Sakai, K. Matsunami, S. Yase, M. Yao, S. Wada, H. Hayashita, N. Saito, C. Callegari, K. Prince, C. Miron, M. Nagasono, K. L. Ishikawa, A. K. Kazansky, N. M. Kabachnik and K. Ueda, Phys. Rev. A 89, 013415 (2014).

② Crossover in the Photo-ionization Processes of Ne Clusters with Increasing EUV-FEL Intensity, S. Yase, K. Nagaya, Y. Mizoguchi, M. Yao, H. Fukuzawa, K. Motomura, A. Yamada, Ri Ma, K. Ueda, N. Saito, M. Nagasono, T. Togashi, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, and Y. Senba, Phys. Rev. A 88, 043203 (2013).

③ Sequential multiphoton multiple ionization of atomic argon and xenon irradiated by x-ray free-electron laser pulses from SACLA, K. Motomura, H. Fukuzawa, S-K. Son, S. Mondal, T. Tachibana, Y. Ito, M. Kimura, K. Nagaya, T. Sakai, K. Matsunami, S. Wada, H. Hayashita, J. Kajikawa, X-J. Liu, R. Feifel, P. Johnsson, M. Siano, E. Kukk, B. Rudek, B. Erk, L. Foucar, E. Robert, C. Miron, K. Tono, Y. Inubushi, T. Hatsui, M. Yabashi, M. Yao, R. Santra, K. Ueda, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46 (2013) 164024.

④ Compact XFEL and AMO sciences: SACLA and SCSS, M Yabashi, H Tanaka, T Tanaka, H Tomizawa, T Togashi, M Nagasono, T Ishikawa, J R Harries, Y Hikosaka, A Hishikawa, K Nagaya, N Saito, E Shigemasa, K Ueda and K Yamauchi, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46 (2013) 164001.

⑤ Photoelectron angular distributions for two-photon sequential double ionization of xenon by ultrashort extreme ultraviolet free electron laser pulses, S Mondal, R Ma, K Motomura, H Fukuzawa, A Yamada, K Nagaya, S Yase, Y Mizoguchi, M Yao, A Rouzée, A Hundertmark, M J J Vrakking, P Johnsson, M Nagasono, K Tono,

T Togashi, Y Senba, H Ohashi, M Yabashi, T Ishikawa, I P Sazhina, S Fritzsche, N M Kabachnik and K Ueda, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46 (2013) 164022.

⑥ Unusual Under-threshold Ionization of Neon Clusters Studied by Ion Spectroscopy, K. Nagaya, A. Sugishima, H. Iwayama, H. Murakami, M. Yao, H. Fukuzawa, X.-J. Liu, K. Motomura, K. Ueda, N. Saito, L. Foucar, A. Rudenko, M. Kurka, K.-U. Kühne, J. Ullrich, A. Czasch, R. Dörner, R. Feifel, M. Nagasono, A. Higashiyama, M. Yabashi, T. Ishikawa, T. Togashi, H. Kimura, and H. Ohashi. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46 (2013) 164023.

⑦ Deep inner-shell multiphoton absorption by intense x-ray free-electron laser pulses. H. Fukuzawa, S.-K. Son, K. Motomura, S. Mondal, K. Nagaya, S. Wada, X.-J. Liu, R. Feifel, T. Tachibana, Y. Ito, M. Kimura, T. Sakai, K. Matsunami, H. Hayashita, J. Kajikawa, P. Johnsson, M. Siano, E. Kukk, B. Rudek, B. Erk, L. Foucar, E. Robert, C. Miron, K. Tono, T. Togashi, Y. Inubushi, T. Sato, T. Katayama, T. Hatsui, T. Kameshima, M. Yabashi, M. Yao, R. Santra, and K. Ueda, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 173005.

⑧ Charge and Energy Transfer in Ar core-Ne shell clusters irradiated by Free Electron Laser Pulses at 62 nm, A. Sugishima, H. Iwayama, H. Murakami, K. Nagaya, M. Yao, H. Fukuzawa, X.-J. Liu, K. Motomura, K. Ueda, N. Saito, L. Foucar, A. Rudenko, M. Kurka, K.-U. Kuehnel, J. Ullrich, A. Czasch, R. Doerner, R. Feifel, M. Nagasono, A. Higashiyama, M. Yabashi, T. Ishikawa, T. Togashi, H. Kimura, and H. Ohashi, Phys. Rev. A 86 (2012) 033203.

[学会発表] (計 24 件)

① ” Study of Nano-Plasma Dynamics of Rare-Gas Cluster using EUV-FEL Pump - NIR Probe Measurements at SCSS Test Accelerator” 口頭発表(招待講演) Kiyonobu Nagaya, Metz, France (International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (MPS2014)) 2014年7月16~18日

② ” Application of multidimensional spectrometry for the free electron laser (FEL) experiments of rare-gas cluster” 口頭発表(招待講演) Kiyonobu Nagaya, Cernay la Villa, France (Atomic and Molecular Physics: a joint Japanese and French view over 120 years) 2014年7月22~23日

③ ” Investigation on Dynamics of Nano-Plasma of Rare-Gas Clusters by EUVFEL Pump - NIR Laser Probe Measurements” ポスター発表, K. Nagaya, T. Sakai, T. Nishiyama, K. Matsunami, S. Yase, M. Yao, H. Fukuzawa, K. Motomura, T. Tachibana, S. Mondal, K. Ueda, S. Wada, H. Hayashita, N. Saito, T. Togashi, M. Nagasono, M. Yabashi, Okinawa, Japan (The 19th International Conference on Ultrafast Phenomena (UP2014)) 2014年7月7~11日

④ ” Time Resolved Study of EUV-FEL Triggered Nano-Plasma of Rare-Gas Clusters” ポスター発表 K. Nagaya, T. Sakai, T. Nishiyama, K. Matsunami, S. Yase, M. Yao, H. Fukuzawa, K. Motomura, T. Tachibana, S. Mondal, K. Ueda, S. Wada, H. Hayashita, N. Saito, T. Togashi, M. Nagasono, M. Yabashi, Fukuoka, Japan (17th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC17)), 2014年9月7~12日

⑤ “Single-shot imaging of giant Xe clusters with X-ray free-electron laser” ポスター発表 T. Nishiyama, C. Bostedt, K. R. Ferguson, C. Hutchison, K. Nagaya, H. Fukuzawa, K. Motomura, S. Wada, T. Sakai, K. Matsunami, T. Tachibana, Y. Ito, W. Xu, S. Mondal, T. Umemoto, C. Nicolas, C. Miron, T. Kameshima, Y. Joti, K. Tono, T. Hatsui, M. Yabashi, K. Ueda, M. Yao, Fukuoka, Japan (17th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC17)), 2014年9月7~12日

⑥ EUV-pump-NIR-probe experiments of xenon cluster (ポスター), Tsukasa Sakai, Kenji Matsunami, Kiyonobu Nagaya, Satoshi Yase, Makoto Yao, Hironobu Fukuzawa, Koji Motomura, Kiyoshi Ueda, Shin-ichi Wada, Hironori Hayashita, Norio Saito, Mitsuru Nagasono, 38th International conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX2013), Hefei, China, 2013/7/12-2013/7/19

⑦ Electron Spectroscopic Study of Multiple Photoionization Processes of Xe Clusters by Intense EUV-FEL Pulses (ポスター), Kiyonobu Nagaya, Kenji Matsunami, Tsukasa Sakai, Satoshi Yase, Makoto Yao, Hironobu Fukuzawa, Koji Motomura, Kiyoshi Ueda, Shin-Ichi Wada, Hironori Hayashita, Norio Saito, Mitsuru Nagasono, Kensuke Tono, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, Tutsuya Ishikawa, Haruhiko Ohashi, Yasunori Senba, XXVIII International

Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC), Lanzhou, China, 2013/7/24-2013/7/30

⑧ Nano-plasma Formation and Thermal Electron Emission of Neon Clusters Induced by Extreme Ultraviolet Free Electron Laser Pulses (ポスター), K. Nagaya, S. Yase, Y. Mizoguchi, M. Yao, H. Fukuzawa, K. Motomura, A. Yamada, R. Ma, K. Ueda, N. Saito, A. Rouzee, A. Hundertmark, M. Vrakking, P. Johnsson, M. Nagasono, T. Togashi, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, Y. Senba, XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC), Lanzhou, China, 2013/7/24-2013/7/30

⑨ Dynamics of multiple photoionization of rare-gas clusters caused by intense EUV-FEL pulses (口頭・招待), Kiyonobu Nagaya, VI International Symposium on Atomic Cluster Collisions (ISACC 2013), Wuhan-Chongqing, China, 2013/7/18-2013/7/23

⑩ SACLA のフェムト秒 XFEL パルスによる原子・分子・クラスターの多光子吸収ダイナミクス (口頭・招待), 永谷清信, SPring-8 利用ワークショップ --SPring-8 とユーザーのさらなる連携を目指して, 兵庫県, 2014/2/1-2014/2/2

[その他]

プレス発表

http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2012/130215_3.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八尾 誠 (YAO, Makoto)

京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：70182293

(2) 研究分担者

永谷 清信 (NAGAYA, Kiyonobu)

京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30273436

松田 和博 (MATSUDA, Kazuhiro)

京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50362447