

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310055

研究課題名(和文) パイ電子系単一分子の非接触電気伝導測定

研究課題名(英文) Contactless measurements of charge migration within single  $\pi$ -electron molecules

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

研究成果の概要(和文)：単一分子の電気伝導特性を評価するための、硬 X 線による内殻励起を用いる新しい手法を提案し、ベンゼン環の両端に臭素と酸素を有するパイ電子系分子へ適用した。臭素原子上で生成した電荷の分子内移動を、酸素イオンの収量を計測することで評価した。運動量イメージングを用いたイオン計測によって、分子形状を認識した電荷移動計測が可能なが示唆された。

研究成果の概要(英文)：A novel method for the contactless measurements of charge migration was applied to  $\pi$ -conjugated molecules in each of which a bromine atom and an oxygen atom are located on the opposite sides of the aromatic ring. A core hole was generated selectively in the Br atom by X-ray absorption, followed by the Auger cascade, and the subsequent charge migration within the molecule was examined by detecting an O<sup>+</sup> ion by means of the coincidence momentum imaging measurements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2009年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：不規則系物理学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ ナノ構造物性

キーワード：単一分子計測、電気伝導特性、分子ワイヤ、内殻励起分光、多重同期計測

## 1. 研究開始当初の背景

## (1)はじめに ー電極問題ー

シリコンを主材料とする電子デバイスは、年を追うごとに微小化・集積化が図られてきたが、微細加工技術にも限界があるため、分子を主材料とする電子デバイスの開発、即ちボトムアップ技術の開発に熱い視線が注がれている。しかし実用化への道はまだ遠い。そもそも、最初にやるべき分子1個の伝導特

性計測ですらクリアしていないのが現状である。その原因として挙げられるのが、伝導特性測定のために用いられる電極の存在、すなわち「電極問題」である。

分子はナノ・スケールであり、これに巨視的な電極を着けることは、技術的に克服すべき大きな課題である。例えば、電極間隔の制御法として、細線を機械的に切断して接点を作る方法などが注目されているが、たとえ電極が良く規定されている場合でも、分子と電

極が単に機械的に接触しているのと、原子レベルで化学結合しているのでは、質的に異なった状況である。しかし、さらに深刻な問題は、電極の存在が分子の性質を変えてしまうことである。分子における電子準位は本来、離散的であるが、電極と接触することにより、準位がシフトすると共に有限のエネルギー幅をもつに到る。即ち、電極の存在により、研究対象が分子から巨視系に転化してしまうのである。

本課題では、この「電極問題」を回避するため、X線内殻励起を利用して非接触でナノ構造体の電気伝導特性を測定する手法を提案すると共に、手法の評価を行った。

## (2) X線内殻励起利用の電荷移動測定

本計測手法の基礎となる、X線吸収過程とこれに続いて起こる脱励起過程について、まず孤立原子を例にとって解説する。原子に10keV程度のエネルギーのX線を照射すると、X線吸収に伴って光電子が放出される(図1(a)参照)。この効果は、元素固有の吸収端エネルギーの直上で特に顕著になる。光電子放出に伴い、内殻(1s電子放出の場合はK殻)に正孔が生成されるが、エネルギー的に不安定であるため、フェムト秒程度の短い時間で一つ外殻からの電子の降位によって埋められ、その外殻に新たな正孔が生成される。その際、過剰のエネルギーが輻射として開放される場合(蛍光X線放出)には正孔の数は保存されるが、非輻射的に開放される場合(オージェ過程)には正孔数が増加する(図1(b))。重元素にK殻正孔が生成されると完全に緩和するまでに複数回のオージェ過程がカスケード的に起こる(vacancy cascade)ため(図1(c))、正孔数が著しく増大し多価イオンになる(図1(d))ことが知られている。

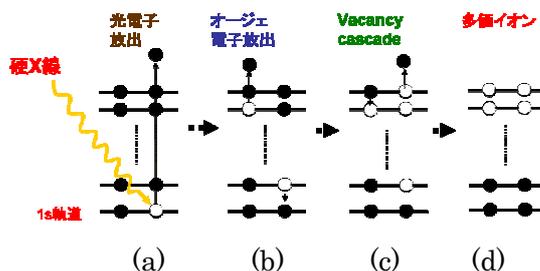


図1 原子のオージェカスケード概念図

さて、このような深い準位の内殻励起が、クラスター(図2(a))や分子(図2(b))等の少数多体系で起きる場合はどうなるであろうか?今、試料中のA原子のX線吸収端エネルギーに相当するX線を照射すると、A原子で選択的なX線吸収が起こる。この選択性は

A原子が他の原子に比べて重元素である場合に、特に顕著である。vacancy cascadeは基本的には原子内過程であるため、分子の結合状態などに殆ど影響を受けずに、A原子中で正孔が増殖する。しかし、正孔が価電子帯に至ると隣接原子への移動が無視できなくなる。但し、「どの程度の距離まで正孔が広がっていくのか?」は、その物質の性質に依存する。即ち、金属的な性質を有する場合には遠くまで広がるが、絶縁性が強い場合には、X線吸収原子近傍に局在するだろう。いずれの場合にも、電荷が複数個の原子に分配されると静電反発が強くなり、それが分子の結合エネルギーを超えると、クーロン爆発と呼ばれる過程により分子は様々な質量電荷比を持つ子イオンへと解離する。解離イオンのもつ運動エネルギーの総和は、爆発直前の静電エネルギーの総和にほぼ等しいと考えられる。また、爆発直後の運動量ベクトルは、爆発直前の正電荷の空間分布を反映しているはずである。以上のことから、X線吸収原子を正電荷源として利用して、その電荷の広がりについては、解離イオンの3次元運動量分布等から算出する。これが、我々が提案している、非接触での電気伝導特性評価の原理である。

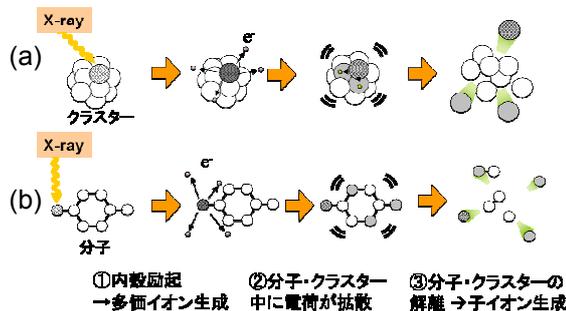


図2 内殻励起とクラスター、分子

## 2. 研究の目的

本課題では「電極問題」を回避するため、非接触でナノ構造体の電気伝導特性を測定する手法の開発を目指す。このために、(1)パイ電子系有機分子などの典型的な分子に対して、放射光X線を用いた電荷移動の計測を試み、測定手法の妥当性を評価する。(2)高分子を含む様々な分子に本手法を適用する上で必要となる技術として、エレクトロイオンスプレーイオン法による分子ビーム源を開発する。(3)計測効率の向上や高度化を目指して、次世代高強度X線光源である自由電子レーザーの利用実験技術を開発する。

### 3. 研究の方法

上述の原理に基づいて実験を行うためには、次の2点が肝要である。即ち、(1) 試料が高真空中に孤立した状態でX線照射を行う。試料を孤立させることにより、基板などを經由したエネルギーや電荷の移動を考慮する必要がなくなるため、X線吸収によって生成したイオンの解離過程についてより明確な情報が得られる。(2) X線照射により生成した殆ど全ての解離イオンについて、質量電荷比や収量に加えて、3次元運動量を計測する。これを実現するため、我々は図3に示すような分子・クラスター用X線照射計測装置を製作した。(a)図は、分子・クラスタービーム源を含む装置全体を模式的示したものである。パイ電子系分子等の試料は、試料室の温度を調整した上でノズルから分子ビームとして噴出させた。(b)図は、X線吸収によって放出された電子またはイオンを検出する部分の詳細である。X線照射によって生成する電子・イオンをそれぞれ計測し、光電子検出を時間原点として光イオンの飛行時間を得る光電子-光イオン同期計測 (PEPICO = photoelectron-photoion-coincidence) を行った。本装置では、イオンの検出に二次元検出器を採用し、イオンの飛行時間  $T$  に加えて、検出器上の検出位置  $(X, Y)$  の情報も合わせて、解離イオンの3次元運動量  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$  を測定した。即ち、

$$p_x = \frac{m(X - X_0)}{T}, \quad p_y = \frac{m(Y - Y_0)}{T},$$

$$p_z = \frac{q\Delta U}{d}(T_0 - T).$$

ここで、 $m$  と  $q$  は解離イオンの質量と電荷、 $X_0$  と  $Y_0$  は検出器の中心位置、 $T_0$  は初期運動量ゼロの場合の飛行時間、 $\Delta U$  は検出器のイオン引き込み部分の電場である。

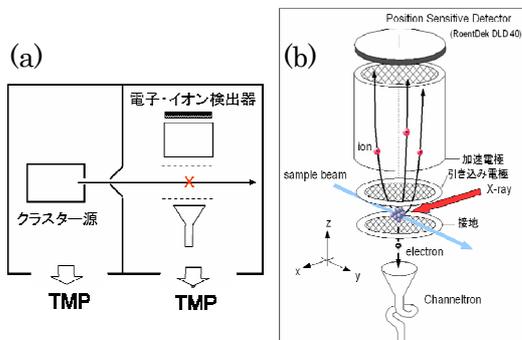


図3 実験装置の模式図

### 4. 研究成果

(1) X線内殻励起を利用した非接触での単一分子内の電気伝導特性測定

いくつかの典型的な分子を取り上げ、イオンの運動量イメージング計測を行い、分子形状と分子内の電荷分配の關係に着目して研究を進めた[雑誌論文 3, 4, 7, 11]。実験には、大型放射光施設 SPring8 のアンジュレータビームライン BL37XU から得られる高輝度 X 線を用いた。

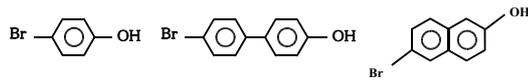


図4 芳香族分子試料の構造式

試料として、まず、パイ電子系分子としてベンゼン環を1つまたは2つ有し、Br と OH 基が対向している芳香族分子 (図4) を用いた。次に、パイ電子の効果を明らかにするための参照試料として、典型的なシグマ電子系の鎖状分子を取り上げ、鎖長の異なる、臭化プロパノール ( $\text{BrC}_3\text{H}_6\text{OH}$ )、臭化ヘキサノール ( $\text{BrC}_6\text{H}_{12}\text{OH}$ )、臭化デカノール ( $\text{BrC}_{10}\text{H}_{20}\text{OH}$ ) で計測を行った。臭素の 1s 電子励起後に得られる解離イオンの飛行時間スペクトルや、運動量イメージング計測により得られる解離イオンの3次元運動量等から、分子形状と分子内電荷移動の關係について検討した。

解離イオンの飛行時間スペクトルや運動量相関の解析から、以下の結果を得た。

- (a) いずれの分子も X 線吸収後に激しい解離を起こし、多数の小さいイオンに分解する。
- (b) 臭素原子上で生成された空孔が一定の確率で酸素まで到達して、酸素イオンが生成する。また、酸素イオンの収量は分子によって異なる。
- (c) 酸素イオンの収量は分子内での電荷移動を反映し、非局在性の高いパイ電子有する芳香族分子では、直鎖アルコール分子よりも高い頻度で電荷が酸素まで移動している。
- (d) アルコール分子では分子長の増大に対して、酸素イオン収量が系統的に減少する。
- (e) 放出イオンの運動量相関には分子形状が明瞭に反映されている。

同様の方法は希ガス・クラスターにも適用し、希ガスの絶縁性を反映する結果を得ている[雑誌論文 17, 20]。本研究で得られた一連の成果から、硬 X 線を用いた局所励起によって、単一分子を含むナノ粒子の電荷移動の評価が可能であることが結論された。また、各々の X 線吸収イベント毎に分子形状認識

が可能なことから、単一分子の形状を弁別して電荷分配の計測が可能な、これまでにない新たな手法となることが示唆された。

### (2) エレクトロイオンスプレーイオン法による分子ビーム源の開発

本課題で提案する方法を任意サイズの分子、特に高分子に適用するためには、真空中にマクロ分子を孤立させる方法を確立することが重要である。このために、巨大分子のビーム生成が可能なエレクトロスプレーイオン(ESI)ビーム源を開発した。ESI法は、高電界を印加して微小液滴を自由空間に引き出すため、引き出し電場の正負に応じて、正イオンと負イオンのいずれも生成することができるという著しい特長を有する。製作した装置を用いて、試料生成の重要なパラメータである試料流量、噴霧ガス流量、印加電圧によるビーム生成の様子を確認した後に、真空槽内に設置して、質量分析法によって生成する試料ビームの評価を進めた。

### (3) 自由電子レーザー利用実験技術の開発

項目(1)で述べた手法の発展を目指し、極紫外自由電子レーザー利用の実験を行った。自由電子レーザー(FEL)光源は、従来の放射光源と比べて1億倍以上の輝度の短波長光パルスが得られるため、単一の分子やクラスターの物性評価に有望な光源と期待される。

クラスターについてのFEL実験より、以下の興味深い成果が得られた。

(a) EUV-FEL光をクラスターに照射した際に見られるイオン化の抑制の観測[雑誌論文6, 13]。

(b) 多価イオンクラスター内での電荷分布の自己組織化の発見[雑誌論文1, 5]。

(c) コア-シェル型 Ar-Ne クラスターでの電荷・エネルギー移動の観測[学会発表1, 4]。

(d) ネオンクラスター多重共鳴励起により誘起される新しい電子緩和過程の発見[学会発表8]。

特に成果(c)では、FEL波長を調整することによって、コア-シェル構造を有する希ガス・クラスターのコアに選択的にエネルギーを注入した際の、コアからシェルへのエネルギーや電荷の拡散について定量的な評価に成功している。即ち、FEL光源がナノ粒子の電荷移動やエネルギー移動の観測に利用できることが実証された。

FELを利用したクラスター実験は世界的にも高く評価されており、国際会議などで多数の招待講演を行った。

### 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41件)

1. Metallic-like droplets produced by irradiating rare-gas clusters with free electron laser pulses, M. Yao, K. Nagaya, H. Iwayama, H. Fukuzawa, K. Ueda, M. Nagasono and T. Ishikawa, European Physical Journal, Special Topics “Liquid and Amorphous metals: current trends and future perspectives” 印刷中。査読有
2. Electron-Transfer-Mediated Decay and Interatomic Coulombic Decay from Triply Ionized States in Argon Dimers, K. Sakai, S. Stoychev, T. Ouchi, I. Higuchi, M. Schröffler, T. Mazza, H. Fukuzawa, K. Nagaya, M. Yao, Y. Tamenori, A. I. Kuleff, N. Saito and K. Ueda, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 033401-1-4. 査読有
3. Contactless measurements of charge migration within single molecules, K. Nagaya, H. Iwayama, A. Sugishima, Y. Ohmasa, M. Yao, Appl. Phys. Lett. 96 (2010) 233101. 査読有
4. Coulomb explosion imaging of bromobenzene and bromophenol molecules following Br K-shell ionization, H. Iwayama, K. Nagaya, H. Murakami, Y. Ohmasa, and M. Yao, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 43 (2010) 185207. 査読有
5. Inhomogeneous charge redistribution in Xe clusters exposed to intense extreme ultraviolet free electron laser, H. Iwayama, A. Sugishima, K. Nagaya, M. Yao, H. Fukuzawa, K. Motomura, X.-J. Liu, A. Yamada, C. Wang, K. Ueda, N. Saito, 他7名, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. Fast track 43 (2010) 161001(5pp). 査読有
6. Investigation of the interaction of xenon cluster with intense EUV-FEL pulses using pulsed cluster beam source and momentum imaging spectrometer, K. Nagaya, H. Iwayama, H. Murakami, M. Yao, H. Fukuzawa, K. Motomura, K. Ueda, N. Saito, 他7名, J. Electr. Spectrosc. Relat. Phenom. 181 (2010) 125-128 (ICES invited talk). 査読有
7. Ion-ion coincidence studies on multiple ionizations of N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> molecules irradiated by EUV

- free-electron laser pulses, A. Yamada, H. Fukuzawa, K. Motomura, X.-J. Liu, L. Foucar, M. Kurka, M. Okunishi, K. Ueda, N. Saito, H. Iwayama, K. Nagaya, A. Sugishima, H. Murakami, M. Yao, 他 13 名, J. Chem. Phys. 132, 204305 (2010). 査読有
8. Photoelectron spectroscopy of sequential three-photon double ionization of Ar irradiated by EUV free-electron laser pulses, H. Fukuzawa, E.V. Gryzloza, K. Motomura, A. Yamada, K. Ueda, A.N. Grum-Grzhimailo, S.I. Strakhova, K. Nagaya, A. Sugishima, Y. Mizoguchi, H. Iwayama, M. Yao, N. Saito, P. Piseri, T. Mazza, M. Devetta, M. Coreno, M. Nagasono, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, H. Kimura, T. Togashi, and Y. Senba, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. Fast track 43 (2010) 111001. 査読有
  9. Dielectric permittivity of room temperature ionic liquids: A relation to the polar and non-polar domain structures, M. Mizoshiri, T. Nagao, Y. Mizoguchi and M. Yao, J. Chem. Phys. 132, 164510 (2010). 査読有
  10. Dissociation dynamics of C6H6 and C6H5F molecules following carbon 1s and fluorine 1s photo ionization studied by a 3D momentum imaging method, A. Sugishima, K. Nagaya, H. Iwayama, M. Yao, J. Adachi, Y. Kimura, M. Yamazaki and A. Yagishita, J. Chem. Phys. 131 (2009) 114309-1-6. 査読有
  11. ナノ構造体の電荷移動ダイナミクス—非接触で測定する原子レベルの電気伝導—、八尾 誠, 永谷 清信、応用物理 78 巻 6 号 (2009) 549-553. 査読有
  12. Ion momentum spectroscopy of N2 and O2 molecules irradiated by EUV free-electron laser pulses, H. Fukuzawa, K. Motomura, X.-J. Liu, G. Prümper, M. Okunishi, K. Ueda, N. Saito, H. Iwayama, K. Nagaya, M. Yao, M. Nagasono, A. Higashiya, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, and H. Kimura, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 42, 181001 (2009). 査読有
  13. Frustration of direct photoionizations of Ar clusters in intense extreme ultraviolet pulses from a free electron laser, H. Iwayama, K. Nagaya, M. Yao, H. Fukuzawa, X.-J. Liu, G. Prümper, M. Okunishi, K. Shimada, K. Ueda, T. Harada, M. Toyoda, M. Yanagihara, M. Yamamoto, K. Motomura, N. Saito, A. Rudenko, J. Ullrich, L. Foucar, A. Czasch, R. Dörner, M. Nagasono, A. Higashiya, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, and H. Kimura. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 42 (2009) 134019(5pp). 査読有
  14. Dead-time-free ion momentum spectroscopy of multiple ionization of Xe clusters irradiated by euv free-electron laser pulses, H. Fukuzawa, X.-J. Liu, G. Prümper, M. Okunishi, K. Shimada, K. Ueda, T. Harada, M. Toyoda, M. Yanagihara, M. Yamamoto, H. Iwayama, K. Nagaya, M. Yao, K. Motomura, N. Saito, A. Rudenko, J. Ullrich, L. Foucar, A. Czasch, R. Dörner, M. Nagasono, A. Higashiya, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, and H. Kimura. Phys. Rev. A. 79 031201(R) (2009). 査読有
  15. Surface tension of room-temperature ionic liquids measured by dynamic light scattering, R. Osada, T. Hoshino, K. Okada, Y. Ohmasa and M. Yao, J. Chem. Phys. 130 184705-1-8 (2009). 査読有
  16. Multiple ionization of atomic argon irradiated by EUV free-electron laser pulses at 62 nm: Evidence of sequential electron strip, K. Motomura, H. Fukuzawa, L. Foucar, X.-J. Liu, G. Prümper, K. Ueda, N. Saito, H. Iwayama, K. Nagaya, H. Murakami, M. Yao, A. Belkacem, M. Nagasono, A. Higashiya, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohashi, and H. Kimura, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 42, 221003 (2009). 査読有
  17. Observation of Site Specific Decay Processes in Ar-Kr Mixed Clusters following Krypton K-Shell Excitation, K. Nagaya, H. Murakami, H. Iwayama and M. Yao, Electron Spectr. and Related Phenom. 166-167 (2008) 11-15. 査読有
  18. Photoelectron-Photoion-Photoion Momentum Spectroscopy as a Clock for Core-Hole Decay of Ne Dimers, M. Yamazaki, J. Adachi, Y. Kimura, A. Yagishita, M. Stener, P. Decleva, N. Kosugi, H. Iwayama, K. Nagaya, and M. Yao, Phys. Rev. Letts. 101 (2008) 043004-1-4. 査読有
  19. Evidence of interatomic Coulombic decay in ArKr after Ar 2p Auger decay, Y. Morishita, N. Saito, I.H. Suzuki, H. Fukuzawa, X.-J. Liu, K. Sakai, G. Pruemper, K. Ueda, H. Iwayama, K.

- Nagaya, M. Yao, K. Kreidi, M. Schöffner, R. Dörner, J. Harris and Y. Tamenori, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 41 (2008) 025101 (5pp). 査読有
20. Fragmentation channels of K-shell excited rare-gas clusters studied by multiple-ion coincidence momentum imaging, H. Murakami, H. Iwayama, K. Nagaya and M. Yao, J. Chem. Phys. 128 (2008) 054303-1-9. 査読有
  21. Dispersion relation of capillary waves on ionic liquids - Observation of the fast overdamped mode -, T. Hoshino, Y. Ohmasa, R. Osada and M. Yao, Phys. Rev. E 78 061604- 1-8 (2008). 査読有
  22. Viscoelastic Properties of Room Temperature Ionic Liquids, W. Makino, R. Kishikawa, M. Mizoshiri, S. Takeda and M. Yao, J. Chem. Phys. 129 104510-1-7 (2008). 査読有
- [学会発表] (計 86 件)
1. 永谷清信、「EUV-FEL によるクラスターの多重イオン化とダイナミクス」(招待講演)、日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日(金) - 28 日(月)、新潟大学
  2. 永谷清信、「硬 X 線を用いた有機分子の運動量イメージング計測」、第 24 回放射光学会年会・放射光化学合同シンポジウム、2011 年 1 月 7-10 日、つくば市 国際会議場
  3. 永谷清信、「硬 X 線を用いた直鎖臭化アルコール分子の運動量イメージング計測」、日本物理学会 秋季大会、2010 年 9 月 23 日~26 日、大阪府立大 中百舌鳥キャンパス
  4. Makoto YAO, “Self-organized charge redistribution in pure and mixed rare-gas clusters” (invited), International Workshop (DyNano2010): Structure and Dynamics of Nano-objects using short wavelength radiation, April 21-25, 2010, France, Corsica.
  5. M. Yao, “Inhomogeneous chemical reaction fields” (invited), Workshop of Room Temperature Ionic Liquids in NDA, July 21, 2010, 防衛大学
  6. K. Nagaya, “Studies on Interaction of Clusters with Intense EUV-FEL Pulses at SPring8”(invited), International conference on many particle spectroscopy of atoms, molecules, clusters and surfaces (MPS2010), 4-7 Sep. 2010, Sendai, Japan
  7. Makoto YAO, “INFLUENCES OF DOMAIN STRUCTURES ON THE BULK AND SURFACE DYNAMICS OF ROOM TEMPERATURE IONIC LIQUIDS” (invited), 6th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems, 2009 年 8 月 31 日, Roma Italy
  8. K. Nagaya, “Studies of multiphoton processes of clusters by using Japanese EUV-FEL facility at SPring8/RIKEN”(invited), 11-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure, Oct. 6-10, 2009 Nara, Japan
  9. K. Nagaya, “Fragmentation of large halogenated aromatic molecules following deep inner-core excitation studied by molecular imaging method”, International Workshop on Electronic Spectroscopy for Gas-Phase Molecules and Solid Surfaces, Oct. 12-15, 2009, Sendai, Japan
  10. 永谷清信、「硬 X 線により励起された複数の環を有する芳香族分子の運動量イメージング」、物理学会 第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日~30 日、立教学院池袋キャンパス
  11. 永谷清信、「ベンゼンおよびその誘導体の内殻励起後の解離ダイナミクス」(招待講演)、PF 研究会「BL2C ユーザー研究会:PF の挿入光源における新しい研究の探究」、2009 年 1 月 13~14 日、高エネルギー加速器研究機構 国際交流センター つくば
  12. 八尾誠、室温イオン液体のダイナミクス”(招待講演)、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日~23 日、岩手大学上田キャンパス
- [図書] (計 1 件)
1. 講談社基礎物理学シリーズ第 11 巻 現代物理学の世界—トップ研究者からのメッセージ—(二宮正夫編) 12 不規則系物理学、八尾 誠, pp.111-121 (2010).
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