

機関番号：63903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20350014

研究課題名（和文）軟 X 線内殻分光による分子間相互作用系の局所電子構造研究

研究課題名（英文） Local Electronic Structures in Molecular Interaction Systems
Studied by Soft X-Ray Core Excited Spectroscopies

研究代表者

小杉 信博（KOSUGI NOBUHIRO）

分子科学研究所・光分子科学研究領域・教授

研究者番号：20153546

研究成果の概要（和文）：

弱い分子間相互作用による分子クラスター、液体・溶液、有機分子固体の局所電子構造を軟 X 線吸収分光法と内殻励起後の共鳴オージェ電子分光法、発光分光法により調べた。これにより希ガスクラスター、Kr/Xe 混合クラスターの局所構造を明らかにした。また透過法の軟 X 線吸収分光法を可能とする液体セルを開発し、塩水溶液中のアルカリ金属周りの水和構造を明らかにした。更に軟 X 線発光分光法によりフタロシアニン結晶膜の局所相互作用を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Local electronic structures of weak molecular interaction systems such as molecular clusters, liquids, and organic molecular solids were investigated by soft X-ray absorption spectroscopy and resonant Auger electron and emission spectroscopy after core excitation processes. The local structures of rare gas clusters and Kr/Xe mixed clusters were revealed by soft X-ray photoelectron spectroscopy. We developed a liquid cell for the soft X-ray absorption spectroscopy in a transmission mode, and revealed hydration structures of alkali metal cations in aqueous salt solutions. We also investigated the site-specific intermolecular interaction in crystalline phthalocyanine films by X-ray emission spectroscopy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：X 線吸収分光法・共鳴オージェ電子分光法・X 線発光分光法

1. 研究開始当初の背景

放射光の本格的な利用により内殻分光法が物質の電子構造の理解に新たな切り口を可能とした。特に深い内殻電子を励起する硬 X 線は透過法に優れているため、試料に対する制約が少なく、X 線の内殻吸収端に微細に現れる非占有状態への内殻励起(XANES)を使って、溶液や反応下での触媒などの局所電子構造解析が可能になっている。

一方、軟 X 線分光法(吸収、光電子、発光)

は、炭素、窒素、酸素などの内殻を励起、イオン化するため、分子科学にとって非常に重要な方法である。本研究グループではこれまで軟 X 線分光法を用いて、気体分子や蒸気圧の低い分子固体や吸着分子の局所電子状態を調べてきた。しかし大気に吸収される軟 X 線や光電子の測定は真空を必要とするため、分子クラスターや溶液・液体などの弱い分子間相互作用系の局所電子構造の解明はまだ限定的であるのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究では分子クラスター、溶液・液体、有機分子固体などの弱い分子間相互作用系の局所電子状態を明らかにするために、軟 X 線吸収分光（内殻励起）及び軟 X 線励起による共鳴光電子分光・発光分光の実験技術確立することを目的とする。軟 X 線吸収分光法における内殻準位シフトから、バルク（中心部）と表面の各サイトを区別し、分子間の近接配位構造を決定する。さらに共鳴分光によって各配位構造を区別して電子構造を明らかにする。また相互作用による分子の対称性の崩れや電荷移動の機構も明らかにする。本研究ではこのようにこれまでの分子クラスターや溶液・液体の研究では未解決であった微視的な構造・局所電子構造の知見を得る。具体的には以下のテーマについて実験を行い、また理論的な裏付けも得る。

- (1) 希ガス(Kr, Xe)クラスターの軟 X 線光電子分光、軟 X 線吸収分光、共鳴オージェ電子分光測定を行うことにより、内殻励起により生じた Rydberg 電子と周りの原子の交換相互作用を求める。これによりクラスター内の微視的な構造の情報を得る。
- (2) 小さなサイズの Kr/Xe 混合クラスターを異なる比率で生成させて、軟 X 線光電子分光法により、その構造変化を内殻準位シフトから明らかにする。
- (3) 透過法による液体・溶液の軟 X 線吸収分光法を可能とする液体セルを新たに開発することにより、塩水溶液中の陽イオン周辺の水和構造とその局所電子状態を明らかにする。
- (4) 軟 X 線発光分光法により、一般的な光電子分光法では不可能な分子性有機固体における局所価電子状態を明らかにする

3. 研究の方法

(1),(2) クラスターの軟 X 線分光測定

クラスターの軟 X 線光電子分光法(XPS)は分子科学研究所極端紫外光研究施設(UVSOR-II)の軟 X 線アンジュレータービームライン BL3U で行った。XPS の測定は高分解能電子分光器(SCIENTA SES200 + MBS A-1)を用いて行った。希ガス(Kr, Xe)クラスターの生成はノズルから真空中に希ガスを放出することにより作成した。Kr/Xe 混合クラスターについては、ガス混合装置(Kofloc 社製)を用いて、Xe の割合を 1-5% の範囲で調製した混合ガスを用いて生成させた。XPS の測定は Kr 3d_{5/2}, Xe 4d_{5/2} の領域で行った。また自作したモンテカルロ法と分極を考慮したエネルギーシフトを計算するプログラムを用いて、XPS のエネルギーシフトから異なる比率の Kr/Xe 混合クラスターがどのような構造なのかを考察した。

X 線吸収分光法(XAS)については、X 線照射により生じる希ガスのダイマーイオンの総量を自作した飛行時間型質量分析計を用いた、励起 X 線エネルギーを変えながら行うことにより得た。共鳴オージェ電子分光法(RAS)は、XAS で得られたピーク位置に励起エネルギーを合わせた後、電子分光器を用いて測定した。

(3) 溶液の軟 X 線吸収分光測定

液体セルの模式図を図 1(a)に示す。液体セルには4つの領域があり、それぞれを厚さ 100 nm の SiN_x メンブレン(NTT AT 社製)で分けている。領域 I は真空であり、UVSOR-II の BL3U に接続している。領域 II と IV は常圧のヘリウムで満たしている。軟 X 線は領域 I から II を経由して、液体薄層である III で吸収されて、IV にあるフォトダイオードで検出される。また領域 III の模式図を図 1(b)に示すが、メンブレンの支持板に 20 μm の厚さのテフロンを入れて、全体を圧縮することにより作成した。また領域 II と IV のヘリウム圧を調整することにより、液体層の厚さ制御に成功した。XAS スペクトルは液体のない状態(I₀)と液体のある状態(I)の強度から、ln(I₀/I)の関係により求めた。

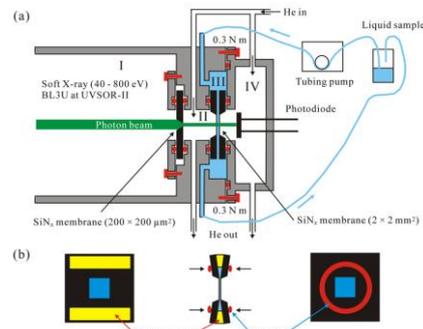


図 1. (a) 液体セルの模式図。(b) 液体薄層(III)の詳細。

(4) 分子性有機固体の局所価電子状態測定

本研究では、分子性有機固体のエネルギーギャップ近傍の空準位と価電子準位の局所電子状態・電荷輸送機構を明らかにし、さらに、結晶構造の影響を検証するため、種々の軟 X 線分光（軟 X 線吸収分光法：XAS, 軟 X 線発光分光法：XES, 角度分解光電子分光法：ARPES）を駆使した研究を UVSOR-II の BL3U および BL6U で行った。

申請時の段階で上記の測定系については既に十分な整備が進んでいたが、有機薄膜の作製機構は未整備であった。本研究を効率よく展開するため、実験装置の調整・改良と平行して、試料作製時の基板温度や表面処理等の様々な条件や環境に対応できる試料作製機構を製作した。

4. 研究成果

(1) Kr クラスターの軟 X 線分光

図2にKrクラスターのXPSの結果を示す。クラスターの表面サイトごとにピークが観測され、それぞれが原子ピークより低結合エネルギー側に存在する。これは光電子放出により生成した一価イオンによる周辺原子の分極効果により、全体のエネルギーが安定化したためである。シフト量はその最近接原子数にほぼ比例する。

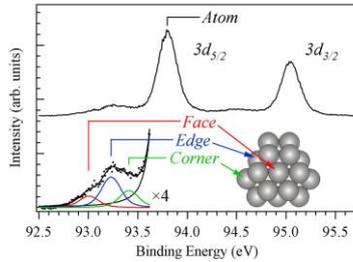


図2. Kr クラスターの XPS スペクトル。

図3にKrクラスターのXASの結果を示す。X線照射により $3d_{5/2}$ 電子を $5p$, $6p$ 軌道に遷移させている。クラスターの $5p$ 軌道は青方シフトするのに対して、 $6p$ 軌道では赤方シフトすることが確認された。この時の終状態は一価イオンとRydberg電子となる。一価イオンの分極はXPSの結果と同じ値となり、赤方シフトの効果を持つ。これと共にRydberg電子と周りの原子との交換相互作用による不安定化により、ピークは青方シフトする。そのためXPSで得られた分極の効果ピークシフトから差し引くことにより、一価イオンの交換相互作用を求めることができる。

得られた交換相互作用は $5p$, $6p$ 軌道共に表面サイトの最近接原子数に比例することが分かり、ここから交換相互作用は主に一価イオンの最近接原子とRydberg電子の重なりによることが分かる。そして $5p$ 軌道の方が $6p$ 軌道より交換相互作用が大きくなり、 $5p$ 軌道の方が最近接原子との重なりが大きいといえる。このことは一価イオンにおける $5p$, $6p$ のRydberg軌道の平均距離からも説明できる。

次にKrクラスターのRAS測定の結果を図3に示す。これは $3d_{5/2}$ 内殻電子を $5p$ 軌道に内殻励起後の共鳴オーグジュ電子を測定した。そのため終状態は $4s$ 軌道に2つホールがある二価イオンとRydberg電子となる。ここで二価イオンによる分極の効果は一価イオンの4倍となるため、それによる赤方シフトの効果をクラスターピークのエネルギーシフトから差し引くことにより、二価イオンにおけるRydberg軌道の交換相互作用を求めた。得られた交換相互作用は二価イオンにおいても最近接原子数に比例することが分かった。また $5p$ 軌道においては、一価イオンの2.3倍の交換相互作用となり、 $6p$ 軌道は一価イオンの

$5p$ 軌道に近い値となることが分かった。これらの値の変化はRydberg軌道が二価イオンにより収縮されたことによると考えられる。このことは二価イオンにおける $5p$, $6p$ 軌道の平均距離からも説明できる。

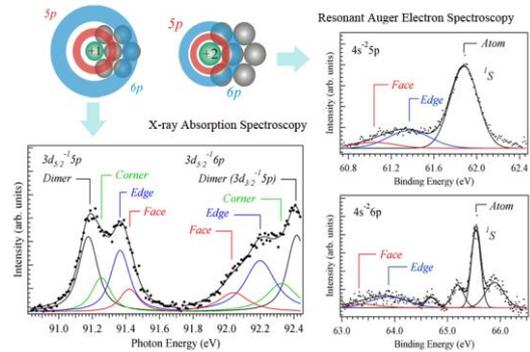


図3. Kr クラスターの XAS と RAS スペクトル、内殻励起による Rydberg 軌道の模式図。

(2) Kr/Xe 混合クラスターの軟 X 線分光

図4に異なる比率のKr-Xe混合クラスターのXe $4d_{5/2}$ 領域のXPSの結果を示す。スペクトルからはクラスターと共に存在するXe原子の寄与を取り除き、横軸の結合エネルギーはXe原子のピークを基準に表示している。まずXe 100%の条件で得られるXe $_{30}$ のスペクトルではクラスターの表面サイト(corner, edge, bulk)を分けて分離することができた。そしてXe 1%の条件で得られるXe $_5$ Kr $_{27}$ クラスターのスペクトルでは、全ての表面サイトのエネルギーシフトがXe $_{30}$ よりも小さい。これはKrの分極率がXeよりも小さいためであり、このことは混合クラスター中のXe原子がKr原子と接触していることを意味する。またXe 1%において、表面とバルクサイトの強度が近い。分極を考慮した計算を様々なモデルの混合クラスターで計算した結果、Xeが小さい核を作り、それがKrクラスターの表面に埋まっている構造で説明できた。

Xe 2%の条件では混合クラスターはXe $_{11}$ Kr $_{26}$ となる。またこの時のクラスターピークのエネルギーシフトは、Xe 1%の条件よりわずかに低結合エネルギー側にシフトする。もし混合クラスターの構造が、Xeが一つの大きな塊となると考えると、そのエネルギーシフトはより大きくなる。しかしシフトが比較的小さいことから、この構造は2個の小さなXe核がKr表面に埋まっている構造の方が良いことが分かった。このことは分極を考慮した計算の結果からも確かめられた。

Xe 3%の時にはXe $_{15}$ Kr $_{22}$ クラスターとなり、Xeの表面成分の強度が増大する。このことからXeが混合クラスターの表面上で広がっていく構造であることが分かった。Xe 5%ではXe $_{22}$ Kr $_{14}$ クラスターとなり、XeとKrの両方の領域で表面成分とバルク成分が観測され

た。これは Xe と Kr が分離し、それらが接している層構造であることを示している。

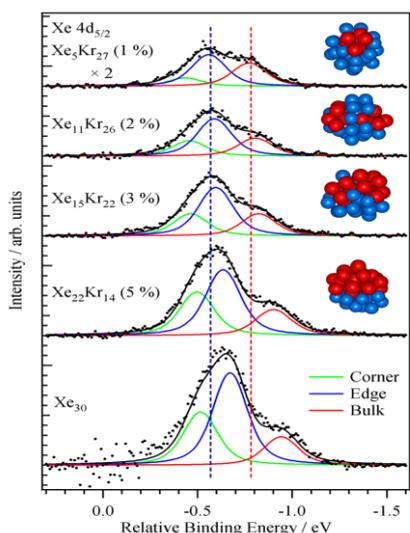


図 4. Kr-Xe 混合クラスターの Xe 4d_{5/2} 領域の XPS の結果。挿図は提案されたクラスターモデルで、赤が Xe で青が Kr 原子である。

(3) 塩水溶液の軟 X 線吸収分光測定

塩水溶液の物性は溶液中のイオンと水の相互作用により大きく影響を受ける。これは水の水素結合ネットワークが、イオンにより生成されたり切断されたりするためである。水溶液中では陽イオンが水の酸素原子側に結合して、陰イオンが水の水素原子側に結合する。陰イオン側については、ラマン分光における OH 伸縮振動により調べることが行われている。一方、陽イオン側は有効な手法がほとんどない。水の 4a₁*軌道が水の酸素原子周りに広がっており、内殻励起の Pre-edge ピークのシフトが陽イオンと水の相互作用を反映すると期待される。

図 5 に 25 °C における水と LiCl 水溶液の酸素の K 吸収端の XAS スペクトルを示す。LiCl 水溶液の濃度が増すにつれて、Pre-edge ピークが高エネルギー側に遷移することが確認された。また挿図に示すように、等吸収点も確認された。このことはスペクトルが 2 種類の成分で表されることを意味する。また異なる陽イオンと陰イオン (NaCl, KCl, NaBr, NaI) の水溶液の XAS スペクトルを観測したところ、陰イオンを変えても Pre-edge はシフトせず、陽イオンを変えた時にピークがシフトした。このことは、2 成分は水と Li イオンに配位した水由来であることを意味する。

得られたスペクトルから Li イオン周りの水の寄与だけを取り出すために、過去に中性子散乱で得られた配位数 4 と、水溶液の濃度から、水と Li イオンに配位した水の割合を求めた。その結果、Na と K イオンと比較して、Li イオンでは陽イオンに配位する水の Pre-edge ピークが、より高エネルギー側にシ

フトすることが分かった。これは水と Li イオン間の結合距離が短いため、その相互作用が大きいためだと考えられる。このことは過去の中性子散乱の結果と一致する。

また LiCl 水溶液を異なる温度 (4, 25, 60 °C) で、酸素の K 吸収端の XAS を測定した。その結果、Li イオン周りの水のスペクトルにおける Pre-edge ピークは温度が変化しても変わらないことが分かった。これは Li イオン周りの水の配位構造が強いため、温度を変えてもその構造が変化しないことを表している。

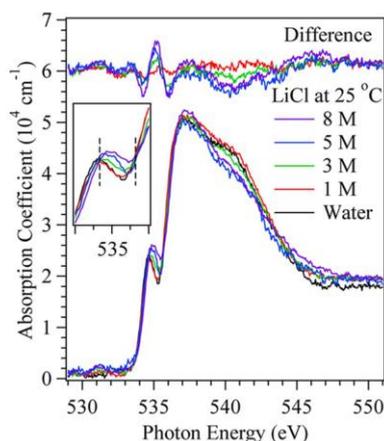


図 5. 水と塩化リチウム水溶液の酸素の K 吸収端の XAS スペクトル及び水と塩化リチウムの差分スペクトル。

(4) 分子性有機固体の局所価電子状態測定

成膜時の基板温度を制御することで、ZnPc の結晶膜と非晶質膜を作製し、ZnPc を構成する各元素サイトにおける分子間相互作用を蛍光収量軟 X 線吸収分光法 (FY-XAS) と軟 X 線発光分光法 (XES) で調べた。

FY-XAS で得られた共鳴励起条件に入射光エネルギーを合わせ、共鳴 XES 実験を行った結果、ZnPc 結晶膜中の炭素サイトと窒素サイトで異なる分子間相互作用が発現し、共鳴

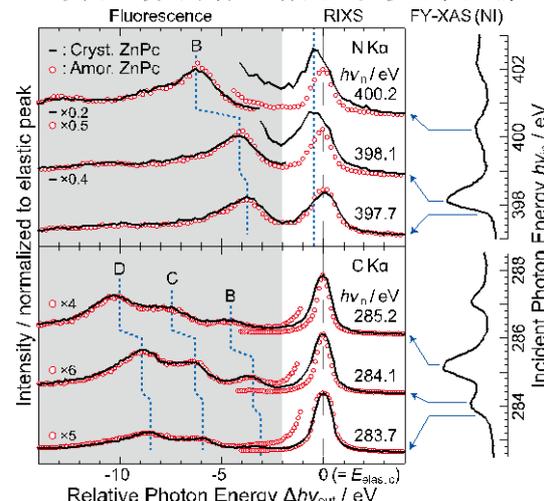


図 6. ZnPc の結晶膜と非晶質膜に対する XES の励起エネルギー依存性。

非弾性X線散乱(RIXS)構造が生じていることがわかった(図6)。具体的には、炭素サイトでは分子間振電相互作用に由来する励起電子の高速伝導が生じ、一方、窒素サイトでは分子間電荷移動相互作用が生じて RIXS 構造が発現していることを明らかにした。

図6のXES実験で得られた結果を受け、ZnPc結晶膜に対して垂直放出条件ARPESスペクトルの励起波長依存性を超高分解能で測定した(図7)。その結果、最高被占軌道(HOMO)の分散幅が0.1 eVのオーダーの非常に狭い分子間エネルギーバンド分散「 $E(\mathbf{k})$ 」の実測に成功した。

$E(\mathbf{k})$ とは、エネルギーと波数の関係であり、物質の電気・光学特性に関する直接的な知見を与える。有機半導体の分野では、分子間 $E(\mathbf{k})$ の実験研究がここ数年で大きく進展したが、今後、分子・素子設計の系統的な指針を確立するには、分子間エネルギーバンド分散の定量的実測が重要な役割を担うと考えられる。フタロシアニンには多くの物性研究が行われてきた分子の一つだが、 $E(\mathbf{k})$ の測定が可能な配向膜の作製が難しく、バンド幅が非常に狭いと予想されたことなどから、分子間 $E(\mathbf{k})$ の実測例はこれまでになかった。

この結果は、① 0.1 eV程度の分子間エネルギーバンド分散が存在し、実測が可能であること(従来の実測例の最下限値の更新)や、② 結晶構造の適切な制御により、フタロシアニン分子薄膜でもバンド伝導が確実に実現できることを示している。また、今後、今回の結果をベンチマークとし、③ 中心金属が異なるフタロシアニン薄膜の結晶構造を精密制御し、そのエネルギーバンド分散測定を行うことで、分子間相互作用に対する分子間距離の影響や分子軌道対称性に関する定量的な実験研究の展開が期待できる。

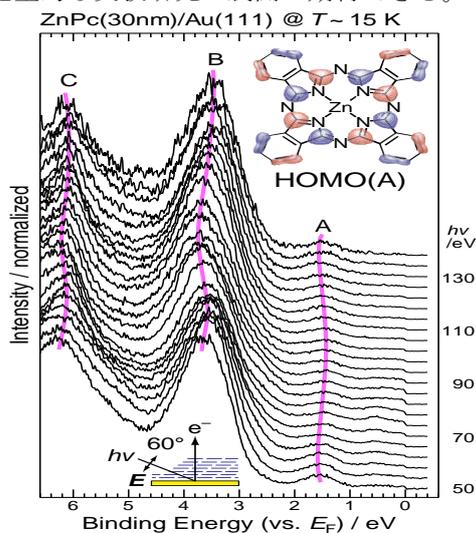


図7. ZnPc結晶膜に対するARPESの励起エネルギー依存性。HOMOに帰属されるピークAが周期的な繰り返しシフトを示している。

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15件)

- (1) K. Nishizawa, N. Kurahashi, K. Sekiguchi, T. Mizuno, Y. Ogi, T. Horio, M. Oura, N. Kosugi, T. Suzuki, "High-resolution soft X-ray photoelectron spectroscopy of liquid water", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13** (2011) pp.413-417. (査読有)
- (2) M. Nagasaka, T. Hatsui, H. Setoyama, E. Rühl, N. Kosugi, "Inner-shell spectroscopy and exchange interaction of Rydberg electrons bound by singly and doubly charged Kr and Xe atoms in small clusters", *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **183** (2011) pp. 29-35. (査読有)
- (3) M. Nagasaka, T. Hatsui, T. Horigome, Y. Hamamura, N. Kosugi, "Development of a liquid flow cell to measure soft X-ray absorption in transmission mode: A test for liquid water", *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **177** (2010) pp. 130-134. (査読有)
- (4) W. Hua, H. Yamane, B. Gao, J. Jiang, S. Li, H. S. Kato, M. Kawai, T. Hatsui, Y. Luo, N. Kosugi, H. Ågren, "A systematic study of soft-X-ray spectra of poly(dG)-poly(dC) and poly(dA)-poly(dT) DNA duplexes", *J. Phys. Chem. B* **114**, 7016-7021 (2010). (査読有)
- (5) R. Guillemin, M. Simon, E. Shigemasa, "Doppler effects in fragment autoionization following core-to-valence excitation in O₂", *Phys. Rev. A* **82** (2010) 051401(R) (4 pages). (査読有)
- (6) V. Kimberg, N. Kosugi, F. Gel'mukhanov, "Theoretical studies of angle-resolved ion yield spectra of core-to-valence transitions of acetylene", *J. Chem. Phys.* **130** (2009) 114302 (10 pages). (査読有)
- (7) E. Otero, N. Kosugi, S. Urquhart, "Strong double excitation and open-shell features in the near-edge X-ray absorption fine structure spectroscopy of ferrocene and ferrocenium compounds", *J. Chem. Phys.* **131** (2009) 114313 (8 pages). (査読有)
- (8) H. S. Kato, R. Hirakawa, F. Yamauchi, T. Minato, M. Kawai, T. Hatsui, N. Kosugi, "Electronic state observation of inner organic thin films beneath electrodes", *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **174** (2009) pp. 93-99. (査読有)
- (9) M. Nagasaka, T. Hatsui, N. Kosugi, "Exchange interaction in Kr 3d excitations of small krypton clusters", *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **166-167** (2008) pp. 16-20. (査読有)

(10) B. Winter, E. F. Aziz, N. Ottosson, M. Faubel, N. Kosugi, I. V. Hertel, "Electron dynamics in charge transfer-to-solvent states of aqueous chloride revealed by Cl⁻ 2p resonant Auger electron spectroscopy", *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) pp.7130-7138. (査読有)

[学会発表] (計 19 件)

- (1) H. Yamane, T. Hatsui, N. Kosugi, "Highly efficient soft X-ray emission spectrometer using a transmission grating", The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2010) 2010 年 12 月 18 日, Honolulu (USA).
- (2) 長坂将成, 初井字記, 小杉信博, "水溶液の軟 X 線吸収分光法: アルカリ金属イオン周辺の水の構造研究", 第 4 回分子科学討論会, 2010 年 9 月 15 日, 大阪大学(大阪). [優秀講演賞]
- (3) N. Kosugi, "Molecular Inner-shell spectra of weakly bonding and interacting systems", 37th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUV2010), 2010 年 7 月 16 日, Vancouver (Canada) [招待講演]
- (4) M. Nagasaka, N. Kosugi, E. Rühl, "Structural changes of small Kr-Xe mixed clusters with different compositions studied by soft X-ray photoelectron spectroscopy", 37th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUV2010), 2010 年 7 月 16 日, Vancouver (Canada).
- (5) H. Yamane, T. Hatsui, N. Kosugi, "Recent progress and future prospects of transmission-grating-based X-ray emission spectroscopy of functional materials", Workshop on Soft X-ray Scattering, 2009 年 10 月 13 日, Hsinchu (Taiwan) [招待講演]
- (6) H. Yamane, T. Hatsui, N. Kosugi, "Bulk electronic structure of organic solids probed by soft X-ray emission spectroscopy using transmission-grating spectrometer", 11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS2009), 2009 年 10 月 7 日, Nara (Japan).
- (7) M. Nagasaka, N. Kosugi, E. Rühl, "Surface structure of Kr-Xe mixed clusters studied by soft x-ray photoelectron spectroscopy", 11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS2009), 2009 年 10 月 6 日, Nara (Japan).
- (8) H. Yamane, T. Hatsui, N. Kosugi, "Soft X-ray emission spectroscopy of organic solids", 5th Workshop on Advanced Spectroscopy of Organic Materials for Electronic Applications (ASOMEA-V), 2009 年 10 月 2 日, Krusenberg (Sweden) [招待講演]

- (9) M. Nagasaka, T. Hatsui, H. Setoyama, N. Kosugi, E. Rühl, "Geometry of small krypton clusters revealed by site dependent peak shifts in inner-shell spectroscopies", 14th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure (XAFS14), 2009 年 7 月 27 日, Camerino (Italy).
- (10) 小杉信博, "内殻励起から何がわかるか。その特徴と課題", 第 3 回分子科学討論会, 2009 年 9 月 23 日, 名古屋大学(愛知). [招待講演]
- (11) M. Nagasaka, T. Hatsui, N. Kosugi, "Surface site dependence of Rydberg states converging to the single Kr 3d and double Kr 4p ionizations in small Kr clusters", International Workshop on Photoionization (IWP2008), 2008 年 6 月 16 日, Sätra Brunn (Sweden)
- (12) N. Kosugi, "Resonant Auger spectra of Kr clusters and aqueous chlorides", 21th International Conference on X-ray and Inner-shell Processes (X08), 2008 年 6 月 27 日, Paris (France). [招待講演]

[その他] ホームページでの成果紹介

<http://www.ims.ac.jp/topics/2008/090302.html>

<http://www.ims.ac.jp/known/light/kosugi/kosugi.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小杉 信博 (KOSUGI NOBUHIRO)
分子科学研究所・光分子科学研究領域・
教授
研究者番号：20153546

(2) 研究分担者

繁政 英治 (SHIGEMASA EIJI)
分子科学研究所・極端紫外光研究施設・
准教授
研究者番号：90226118

(3) 連携研究者

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

山根 宏之 (YAMANE HIROYUKI)
分子科学研究所・光分子科学研究領域・
助教
研究者番号：50402459