

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12485

研究課題名（和文）多原子共鳴を利用した新しい構造解析

研究課題名（英文）New structural analysis using multi-atom resonance

研究代表者

馬場 祐治（Baba, Yuji）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究嘱託

研究者番号：90360403

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：多原子共鳴現象を利用した新しい構造解析法の確立を目指し、蛍光X線放出および光電子放出における多原子共鳴効果について調べた。CaCl₂などアルカリハライドの固体について、片方の原子の内殻電子を共鳴励起すると、多原子共鳴効果により相手側の原子から放出される蛍光X線強度が減少することを見出した。同様の多原子共鳴効果は、SiO₂などの固体の光電子放出においても認められた。以上の結果から、多原子共鳴現象は、隣接元素を特定できる新しい構造解析手法として利用できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、X線を用いた従来の構造解析法において困難であった「隣接元素の特定」が可能であることが分かったことは、X線吸収分光法を補完する新しい構造解析法としての応用が期待されるため、学術的意義がある。また、本手法の特長として、多くの元素から成り立つ複雑な物質の構造解析にも適用できる点があり、今後、先端材料、環境試料、生物試料など様々な実試料の構造を明らかにできることが期待できることから、社会的意義も大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：In order to establish a new method for structure analysis using multi-atom resonance, the multi-atom resonance process in fluorescence X-ray emission and photoelectron emission has been investigated. For solids such as CaCl₂, it was found that core-to-valence resonant excitation in an atom led to the intensity reduction of the fluorescence X-rays from the neighboring atom due to the multi-atom resonance effect. Similar phenomena were also observed in photoelectron emission from solids such as SiO₂. From these results, we propose a new method for structural analysis where the neighboring atom can be specified.

研究分野：化学

キーワード：多原子共鳴 放射光 蛍光X線 光電子分光

1. 研究開始当初の背景

X線は物質の構造や電子状態を調べる手段として広く用いられている。特にエネルギー可変のX線である放射光X線を用いたX線吸収分光法(XAFS: X-ray Absorption Fine Structure など)は、複数の元素から成り立つ物質であっても、特定の元素周辺の構造を知ることができるため、先端材料、環境試料、生物試料など多様な物質の構造解析に広く用いられている。しかしXAFSによる構造解析にも限界があった。それは、特定の元素周辺の構造が分かると言っても、数多くの種類の元素から成る複雑な物質の場合、測定対象とする元素の隣の元素が何であるかについては、XAFSだけでは分からないということである。この問題を解決する可能性として、1999年に「多原子共鳴(Multi-atom resonance)」という現象が発見された(A.W. Kay, C.S. Fadley *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 101-103, 647 (1999))。具体的には、酸化マンガン(MnO)のマンガン原子の内殻吸収端付近のエネルギーの放射光X線を照射すると、マンガンの隣にある酸素から放出される光電子の強度が変化するという現象である。その後、同様な現象がいくつか報告された一方で、これらの論文が誤りであるという指摘や、多原子共鳴は誤差の範囲で起こらないという論文が発表されるなど、論争が続いていた。

2. 研究の目的

上記の状況下において、本研究では第一に、「多原子共鳴」という現象が起こるかどうか、また起こるとするならば、どのような場合に、どの程度起こるかについて明らかにすることを目的とした。多原子共鳴が起これば、隣の原子のX線吸収量(内殻イオン化断面積)が変化するので、その後続過程として、光電子放出(オージェ電子放出)あるいは蛍光X線放出の強度が変化するはずである。そこで、本研究では、光電子放出と蛍光X線放出の両者について、多原子共鳴による強度変化を測定した。また本研究独自のアイデアとして、全く同じ組成、同じ濃度の固体と水溶液における多原子共鳴を比較することを試みた。具体的には、例えば、塩化カルシウム(CaCl_2)の固体と水溶液を比較することである。固体の場合は格子を形成しているので、Caの隣にはClが存在し多原子共鳴が起こりうる。一方水溶液では、CaとClは解離しており、Caの隣にClは存在しないので、多原子共鳴は起こりえない。従ってこの2つを比べれば、多原子共鳴が起こるかどうかを明らかにすることができると考えた。本研究の第二の目的は、多原子共鳴が起こった場合、この現象を用いて実際の複雑な物質において、測定対象とする元素に隣接する元素を特定できるかどうかを明らかにすることである。具体的には、先端材料の例として酸化物高温超電導体($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ など)、環境試料の例として鉱物中の主要成分である雲母を取り上げ、これらの物質中の、ある元素に隣接する元素を特定できるかどうかを調べる。以上の研究結果に基づき、最終的に多原子共鳴現象が、隣接元素を特定できる構造解析法に利用できるかどうかについて明らかにすることを最終目標とした。

3. 研究の方法

実験は高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設(KEK-PF)の軟X線ビームライン(BL-27A)で行った。使用したX線のエネルギーは1.8 keV~3.5 keV、X線のエネルギー分解能は1.8 keVで0.9 eV、3.5 keVで1.7 eV、X線のフラックスは約 10^{10} photons/cm²・secである。

(1) 蛍光X線測定

軟 X 線は空気により吸収されるので、減圧下またはヘリウムガス雰囲気中で測定できるアクリル製グローブボックスを製作した。これを用い、軟 X 線領域において水溶液系の蛍光 X 線測定および X 線吸収スペクトル測定を行った。ヘリウム置換または減圧したグローブボックス内に試料を置き、試料の下面から 0.8° の角度で放射光を入射した。試料下面から垂直方向に放出される蛍光 X 線を、シリコン半導体検出器（シリコンドリフト検出器または CdTe 半導体検出器：Amptek 社製）により測定した。X 線吸収スペクトル測定では、放射光 X 線のエネルギーを変化させながら、蛍光 X 線スペクトル中の特定の元素から放出される蛍光 X 線ピークの強度をプロットした。

(2) 光電子分光測定

KEK の BL-27A に設置された光電子分光装置（VSW 社製、CLASS-100）を用いた。光電子分光スペクトルの測定では、放射光 X 線のエネルギーを固定し、電子分光器によりスペクトルを測定した。X 線吸収スペクトル測定では、放射光 X 線のエネルギーを変化させながら、光電子分光スペクトル中の特定の元素から放出される光電子ピークの強度をプロットした。

4. 研究成果

(1) 蛍光 X 線放出における多原子共鳴

図 1 は固体及び水溶液の CaCl_2 に Ca 1s 領域の X 線を照射したときの蛍光 X 線強度をプロットしたものである。黒丸が固体、白丸が水溶液のスペクトルを示している。(a) は Ca $K\alpha$ X 線の強度である。このスペクトルが一般的な X 線吸収スペクトル(XAFS)であり、4045 eV 付近に Ca 1s $4p^*$ 共鳴励起に対応するピークが認められる。一方、(b) は Cl $K\alpha$ X 線の強度をプロットしたものである。固体試料の場合は、Ca 1s $4p^*$ 共鳴励起付近で、強度が約 30% 減少したが、水溶液では強度の減少は認められなかった。固体の場合は格子を形成しており、Ca の隣には Cl があるので、この強度の減少は多原子共鳴効果によるものと考えられる。一方、水溶液では Ca と Cl は解離しているため、多原子共鳴が起こらなかったと考えられる。同様の現象は KCl、 SrCl_2 など、他のアルカリハライド、アルカリ土類ハライドなどの化合物でも認められた。

(2) 光電子放出における多原子共鳴

次に光電子分光スペクトルにおける多原子共鳴について調べた。図 2 上図は、二酸化ケイ素(SiO_2)と窒化ホウ素(BN)の粉末を混合し固めてペレット状試料に対し、Si 1s 領域の X 線を照射したときの光電子強度をプロットしたものである。下図は X 線吸収スペクトルであり 1846 eV 付近に Si 1s $3p^*$ の共鳴吸収ピークが認められる。このエネルギーで O 1s 光電子の強度は約 13% 減少した。これは多原子共鳴によるものと考えられる。一方、BN から放出される B 1s および N 1s の強度に変化は認められなかった。この試料は、 SiO_2 と BN の粉末

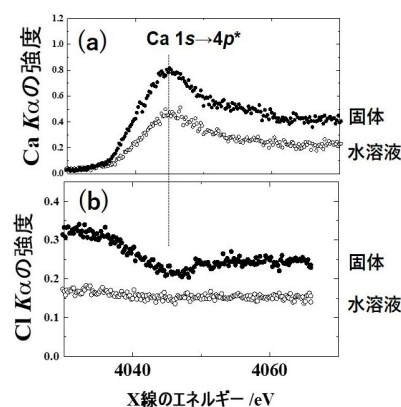


図 1 CaCl_2 に Ca 1s 領域の X 線を照射したときの蛍光 X 線強度。黒丸は固体、白丸は水溶液。

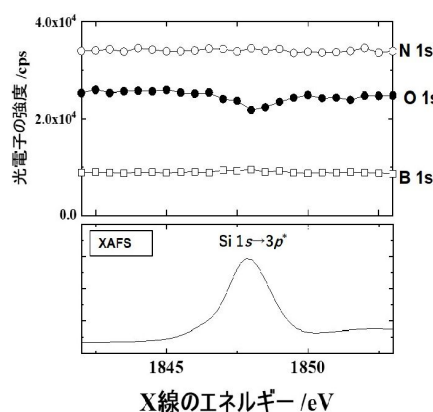


図 2 上図： SiO_2 と BN の混合ペレットに Si 1s 領域の X 線を照射したときの光電子強度。下図：X 線吸収スペクトル (XAFS)。

を混合して固めたものであるため、酸素はシリコンと結合しているが、ホウ素と窒素はシリコンと結合していない。したがって、O 1sとは異なり、多原子共鳴が起こらなかったと考えられる。同様な現象は、窒化ケイ素 (Si₃N₄) においても認められた。以上の結果から、光電子放出における多原子共鳴も、蛍光 X 線放出と同様、共鳴励起する原子と直接結合した原子のみで起こることが明らかとなった。

(3) 多く元素からなる複雑な物質の構造解析への応用

ここまでの結果は、ClCl₂、SiO₂ など、簡単な 2 成分系の物質に関するものであった。先端材料、環境試料、生体試料など、実際の試料の構造解析への応用を考えると、多くの元素から成る複雑な物質で、実際に隣接元素を特定できる構造解析が可能かどうかを検証する必要がある。そこで、先端材料の例として、酸化物高温超電導体 (YBa₂Cu₃O_{7-x} など)、環境試料の例として雲母、粘土鉱物などについて検討を行った。このうち、雲母の例を次に示す。

図 3 は金雲母 (phlogopite: 組成は KMg₃AlSi₃O₁₀F₂) を試料とし、K 1s 領域の X 線を照射したときの蛍光 X 線強度を X 線のエネルギーに対してプロットしたものである。(a) は K Kα 線の強度であり、これが一般に測定されている X 線吸収スペクトルに対応する。3598 eV に認められるピークは K 1s から価電子帯の非占有軌道である K 3p* への共鳴励起によるものである。このピークの形状や、高エネルギー側の振動構造を解析することにより、カリウム周辺の電子構造 (電子状態、配位数、原子間距離など) を知ることができる。しかしながら、この物質は多くの元素から成る複雑な組成をしているため、カリウムに隣接する元素の種類を特定することはできないので、上記の構造解析には任意性が伴う。一方、(b) は Si Kα 線、(c) は Al Kα 線の強度をプロットしたものである。K 1s 3p* 共鳴エネルギーにおいて、Si Kα 線の強度は 15% ほど低下しているが、Al Kα 線の強度は変化していない。このことは、カリウムに隣接する元素がアルミニウムではなくケイ素であることを明確に示している。雲母の構造に関しては多くの研究が行われているが、一般にカリウムのような陽イオンは、Al を中心とした八面体層、Si を中心とした SiO₄ 四面体層、これらの混合したアルミノシリケート層に挟まれたサンドイッチ構造をとることが知られている。金雲母の場合、カリウムイオンは主に Si から成る層に挟まれており、その外側に Al から成る層が存在することが分かっている。これは図 3 の結果とよく一致しており、本手

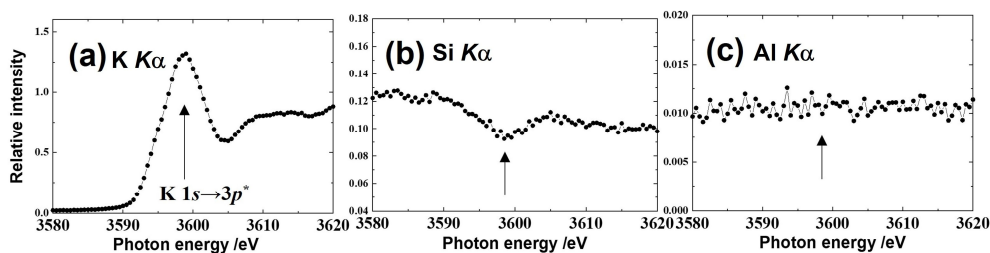


図 3 金雲母 (KMg₃AlSi₃O₁₀F₂) に K 1s 領域の X 線を照射したときの蛍光 X 線強度の X 線エネルギー依存性。(a), (b), (c) はそれぞれ、K Kα 線、Si Kα 線、Al Kα 線の強度である。

法のように多原子共鳴を利用することにより、隣接元素を特定できることが明らかとなった。この方法の利点は、X 線吸収スペクトルによる構造解析と同時に隣接元素を特定できる点にある。従って、両者を組み合わせることにより、一回の測定で複雑な組成を持つ物質の詳細な構造解析が可能となると考える。

以上をまとめると、多原子共鳴を利用した隣接元素を特定できる構造解析法の確立を目指し、

蛍光 X 線放出、光電子放出における多原子共鳴効果について調べ以下の結果を得た。

- 1) CaCl_2 などのアルカリハライド、アルカリ土類ハライドの固体について、片方の原子の内殻電子を共鳴励起すると、相手側の原子から放出される蛍光 X 線強度が減少することを見出した。一方、水溶液ではこの現象は認められず、多原子共鳴は、直接結合した最近接原子のみで起こることが分かった。
- 2) SiO_2 などの微粒子を固めた試料について、片方の原子の内殻電子を共鳴励起すると、相手側の原子から放出される光電子強度が減少することを見出した。一方、微粒子を固める際の母材として用いた元素からの光電子強度は変化しなかった。このことから上記と同様に、多原子共鳴は、直接結合した最近接原子のみで起こることが分かった。
- 3) 金雲母など多くの元素から成る複雑な物質について多原子共鳴に関する実験を行い、特定の元素に隣接する元素を同定できることを見出した。

以上の結果から、X 線吸収スペクトルに測定と同時に、多原子共鳴による隣接元素の特定を行うことにより、一回の測定で複雑な組成を持つ物質の詳細な構造解析が可能となることが分かった。

最後に、本手法をより一般的な構造解析法として確立するために、今後必要となる検討事項について記す。そもそも、X 線を用いた構造解析の利点は、内殻軌道のエネルギーが元素により固有であるため、水素、ヘリウムを除くすべての元素の構造解析に応用できるという点である。光電子分光は、基本的にすべての元素に対応できるが、真空でなくては測定できないという制約がある。一方、蛍光 X 線測定は大気中でも可能なので応用範囲が広い。一般の X 線吸収分光測定（蛍光 XAFS）では、測定対象とする元素から放出される蛍光 X 線を測定するので、重い元素の場合は、Ge 半導体検出器を用いて空気中で測定を行う。しかし、本提案の手法は、重い元素の内殻電子を励起しながら軽い元素から放出される蛍光 X 線を測定するという特殊な装置が必要となる。そのためには、硬 X 線分光測定を行う施設に、真空紫外～軟 X 線領域の軽元素の蛍光 X 線を測定でき、かつヘリウム置換可能な装置を設置する必要がある。最近では 1 keV 以下の低エネルギーまで測定可能な極薄窓材を使った Si 半導体検出器も市販されているので、これを用いれば、環境試料や生物試料のその場観察など、さらに応用範囲は広がることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Y. Baba, I. Shimoyama | 4. 巻 550 |
| 2. 論文標題 Effect of resonant core-level excitation in an atom on photoemission from the neighboring atoms | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Physics | 6. 最初と最後の頁 111302 ~ 111302 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemphys.2021.111302 | 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 S. Entani, M. Honda, H. Naramoto, S. Li, S. Sakai | 4. 巻 704 |
| 2. 論文標題 Synchrotron X-ray standing wave Characterization of atomic arrangement at interface between transferred graphene and -Al2O3(0001) | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Surface Science | 6. 最初と最後の頁 121749 ~ 121749 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2020.121749 | 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 N. Kozai, J. Sato, T. Osugi, I. Shimoyama, Y. Sekine, F. Sakamoto, T. Ohnuki | 4. 巻 416 |
| 2. 論文標題 Sewage sludge ash contaminated with radiocesium: Solidification with alkaline-reacted metakaolinite (geopolymer) and Portland cement | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials | 6. 最初と最後の頁 125965 ~ 125965 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhazmat.2021.125965 | 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 Y. Baba, I. Shimoyama | 4. 巻 987 |
| 2. 論文標題 Multi-atom resonant X-ray emission in simple binary compounds | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment | 6. 最初と最後の頁 164845 ~ 164845 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164845 | 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 Y. Baba and I. Shimoyama | 4. 巻 987 |
| 2. 論文標題 Multi-atom resonant X-ray emission in simple binary compounds | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A | 6. 最初と最後の頁 164845(1-5) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164845 | 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 M. Hirato, M. Onizawa, Y. Baba, Y. Haga, K. Fujii, S. Wada, and A. Yokoya | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Electronic properties of DNA-related molecules containing a bromine atom | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Int. J. Rad. Biology. | 6. 最初と最後の頁 1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09553002.2020.1800121 | 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 本田充紀, 後藤琢也, 坂中佳秀, 鈴木伸一, 矢板毅 | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Cesium removal and reductive effect from Fukushima weathered biotite using molten NaCl-CaCl ₂ | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Photon Factory Activity Reports | 6. 最初と最後の頁 196 |
| 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 無 |
| 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 圓谷志郎, 本田充紀, 李松田, 檜本洋, 境誠司 | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 XAFS Study of K Adsorption on Graphene Oxide | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Photon Factory Activity Reports | 6. 最初と最後の頁 186 |
| 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 無 |
| 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 永井崇之, 下山 巖, 岡本芳浩, 秋山大輔, 有馬立身 | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Investigation of chemical state of simulated waste glasses by using XAFS measurement | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Photon Factory Activity Reports | 6. 最初と最後の頁 42 |
| 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 無 |
| 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 Y. Baba, I. Shimoyama | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Multi-atom Resonance in Simple Binary Molecules -Comparison between Solid and Aqueous Solution- | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Photon Factory Activity Reports | 6. 最初と最後の頁 78 |
| 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 無 |
| 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 Y. Baba, I. Shimoyama | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 Multi-atom resonant photoemission in silicon compounds | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Photon Factory Activity Reports | 6. 最初と最後の頁 126 |
| 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 無 |
| 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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 坂口佳史、馬場祐治、M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散 - XAFSおよびXPS測定による局所構造の研究 III, |
| 3. 学会等名 応用物理学会2022年第68回春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 坂口佳史、馬場祐治、M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散による局所構造の変化 III |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 金田結依、小林徹、松村大樹、辻卓也、本田充紀、横山啓一、矢板毅 |
| 2. 発表標題 湿式ボールミル法を用いた粘土鉱物のセシウム吸着サイトの構造破壊とそのイオン脱離 |
| 3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 泉雄大、大原麻希、馬場祐治、横谷明德 |
| 2. 発表標題 5-ハロゲン化ウラシルのX線光電分光測定 |
| 3. 学会等名 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 馬場祐治、下山巖 |
| 2. 発表標題 蛍光XAFSにおける隣接原子の共鳴効果 |
| 3. 学会等名 第35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 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平戸未彩紀、横谷明德、馬場祐治、和田真一、芳賀芳範、藤井健太郎 |
| 2. 発表標題 軟X線XPSによるBr-ヌクレオチド分子の価電子状態計測とDNA分子内電荷移動機構 |
| 3. 学会等名 第35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 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 泉雄大、大原麻希、馬場祐治、横谷明德 |
| 2. 発表標題 5-クロロウラシルの塩素K殻XANESスペクトル測定 |
| 3. 学会等名 第35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 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 馬場祐治、下山巖 |
| 2. 発表標題 固体表面の蛍光X線分析における多原子共鳴効果 |
| 3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 M. Hirato, A. Yokoya, Y. Baba, Y. Kurokawa, H. Nakatsuji, S. Mori, S. Wada, Y. Haga, K. Fujii |
| 2. 発表標題 Photoelectron spectroscopy and quantum-chemistry calculation study of bromine-incorporated DNA and its radio-sensitization mechanism |
| 3. 学会等名 日本放射線影響学会第64回大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 坂口佳史、馬場祐治、花島隆泰、笠井聡、A. A. Simon、M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散 XAFS、中性子反射率、ラマン散乱による構造変化の研究 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中瀬正彦、針貝美樹、和田恵梨子、小林徹、馬場祐治、竹下健二 |
| 2. 発表標題 放射光XAFSによる福島第一原子力発電所由来の汚染水処理廃棄物のリン酸塩固化体の提案と、その構成元素の電子状態解析 |
| 3. 学会等名 第24回XAFS討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 下山巖、馬場祐治 |
| 2. 発表標題 熱処理におけるNaCl添加効果：真空によるイオン交換促進のメカニズム |
| 3. 学会等名 環境放射能除染学会第10回研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 坂口佳史、馬場祐治、A. A. Simon、M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散 XAFSおよびXPS測定による局所構造の研究 II |
| 3. 学会等名 2021年第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 坂口佳史, 馬場祐治, A. A. Simon, M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散による局所構造の変化 II, |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平戸未彩紀, 馬場祐治, 和田真一, 藤井健太郎, 横谷明德 |
| 2. 発表標題 軟X線光電子分光法を用いた臭素化DNA関連分子の電子状態の研究 |
| 3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 馬場祐治、下山 巖 |
| 2. 発表標題 内殻共鳴励起の隣接元素への影響について |
| 3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 馬場祐治、下山 巖 |
| 2. 発表標題 化合物のXPSにおける多原子共鳴 |
| 3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 本田充紀、金田結依、矢板毅 |
| 2. 発表標題 溶融塩法を用いた土壌粘土鉱物によるストロンチウム吸着法の開発 |
| 3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 坂口佳史, 馬場祐治, A. A. Simon, M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散による局所構造の変化 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂口佳史, 馬場祐治, A. A. Simon, M. Mitkova |
| 2. 発表標題 アモルファス硫化ゲルマニウムへの銀の光拡散 XAFSおよびXPS測定による局所構造の研究 |
| 3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 馬場祐治 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 総合科学出版 | 5. 総ページ数 184 |
| 3. 書名 核エネルギーの時代を拓いた10人の科学者たち | |

〔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 | 下山 巖 (Shimoyama Iwao) (10425572) | 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹 (82110) | |
| 研究分担者 | 本田 充紀 (Honda Mitsunori) (10435597) | 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究副主幹 (82110) | |

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 |
|---------|---------|
| | |