

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244074

研究課題名(和文)放射光X線回折を用いた強相関電子系物質の平衡状態の研究

研究課題名(英文) Study of equilibrium state of strongly correlated electron system using synchrotron radiation X-ray diffraction

研究代表者

澤 博 (Sawa, Hiroshi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50215901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,000,000円

研究成果の概要(和文)：放射光X線回折を用いた精密解析を通して、強相関電子系物質の平衡状態の観測を行った。スピンと軌道の自由度が極低温まで凍結しない平衡状態を維持するという学術的に重要な量子液体状態を銅酸化物の構造物性研究によって得られた。この量子液体状態は、ヤン-テラー活性な二価の銅イオンにおいて数千度のエネルギー利得を得られる対称性の低下を抑えて実現しており、固体物理の常識を覆す大きな発見となった。更に、特異な結晶構造中の軌道分裂を利用した蛍光体の開発、希土類元素の含有量を極力抑えた40K級の転移温度を持つ鉄砒素系超伝導体の発見など、応用上も重要な新規物質開発に多大に貢献することが出来た。

研究成果の概要(英文)：Accurate structural study using synchrotron radiation X-ray diffraction was conducted for equilibrium state of strongly correlated electron system. We found an exotic spin-orbital magnetism in the hexagonal perovskite oxide $Ba_3CuSb_2O_9$, which hosts a self-organized short-range structural order of a strong Jahn-Teller cation Cu^{2+} . It was also possible to contribute to important new materials, such as new iron arsenic superconductors and a yellow-emitting phosphor, the Eu^{2+} -doped chlorometasilicate $Cl_{1-x}MS_x$, which can be used to create glareless white light-emitting diodes.

研究分野：構造物性

キーワード：放射光X線回折 構造解析 電荷密度解析 強相関電子系 量子液体

1. 研究開始当初の背景

構造物性研究の役割は、様々な相互作用に基づくエキゾチックな基底状態の解明から始まり、温度環境の変化に伴う相変化の観測を経て、現代では、物質が機能する状態を直接記述しようとするキネティクス、ダイナミクスをも明らかにする研究へと変遷している。バルクの物質のみならず、薄膜やデバイスなどの機能性材料の動作状態における構造物性の研究も同様に重要になってきている。電気伝導、熱伝導などの輸送現象、磁気緩和、光誘起転移などの動的応答など、様々な興味深い物理現象は、非平衡状態として理解される。この現象は、物質内部で何らかの物理量の散逸が生じていると捉えることが出来る。物性の発現機構を議論するためには、この非平衡状態の物理量を議論する必要があり、現代物理学における一つの重要な課題である。しかし、線形応答以外に非平衡系について確立している物理描像はなく、非平衡現象を見据えた多くの研究報告があるにもかかわらず、残念ながら十分な成果が得られていない。この現状を打破するために非平衡状態の精密な議論に耐えられる、平衡状態に特化して構造物性研究を行うことを目的として、本研究はスタートした。何故、平衡状態を議論しなければならないかについて、まず述べる。

何らかの外場に応答する物理現象を議論するためには、励起状態の観測が必要である。現在数多く行われている研究は、十分明確になっている「基底状態」に対する励起状態の記述が前提である。しかし、現実の系では、有限温度、有限サイズなど何らかの制約条件によって、基底状態ではなく何らかの平衡状態を出発点とする必要がある。例えば、強相関系分子性導体中の対イオンは、通常閉殻イオンとして内部自由度を考えない。しかし、放射光による精密解析では閉殻である I_3^- の分子軌道上の一つの電子が、 $[I^+ I^- I^-]$ と分布していることが明らかになった。簡単な量子化学計算で理解されるこの状態は、しかしながら、物性を議論する上でどのような影響があるかを議論する必要があることは自明であろう。このように、**平衡状態に内在する自由度の精密な抽出なくして非平衡状態の観測はあり得ない**。

また、これまでの励起状態の観測としては、主にポンププローブ分光法が用いられてきた。しかし、明確に観測可能なのは、光励起によって到達したフランクコンドン状態の近傍のみに限られる。光励起された非平衡状態からの緩和によってどのような状態を経て回復していくのかは、ポンププローブ法から得られる情報だけでは不足しているが、電子励起状態と強く結合した格

子の赤外振動などに頼っているのが実情である。この手法では格子の状態と電子の状態を切り分けられず、非平衡状態の記述が困難であることが実情である。

非平衡状態の観測で重要なことは、電子系と格子系では異なる時間スケールでエネルギー移動が生じることである。非平衡環境下では、電子励起スペクトルの観測結果と、回折実験や赤外分光などの結晶構造や振動モードからの電子分布に関する推定を、統合することは極めて困難である。逆に、両者の不整合性を明確にすることで電子相転移の経路に関わる構造変化の寄与などが明らかになるはずであり、これこそが非平衡電子相の制御に必要である。このための最初に必要な情報が、平衡状態における電子相の自由度の決定である。

2. 研究の目的

興味深い物性を発現する舞台には、複数の自由度の相関が関与している。様々な電子相を呈する強相関電子系の物質は基底状態とは異なった平衡状態をとることから、機能発現の励起状態を議論するためには、この平衡状態での物理量を精密に特定する必要がある。SPring-8の放射光を用いて超精密解析を強相関電子系物質に適用する。対象とする物質は、1.自由エネルギーにおける level crossing である相転移系、2.時間スケールの level crossing と理解される分子内自由度を持つ系、3. crossover と位置づけられるスピン系やガラス転移とする。手法として、単結晶X線回折を用いて、 0.2\AA 以上の高分解能データについて、マキシマムエントロピー法による電子密度分析、多極子展開、トポロジカル解析を組み合わせる。

3. 研究の方法

通常のX線構造解析では、原子または分子の空間配置状態を仮定し回折現象で得られる測定データが如何に再現できるか(もっともらしいか)を計算する。必要とされる実空間の情報をどれだけ引き出せるかは、回折点の強度の精度と測定された逆格子空間の体積で決まる。放射光という大強度で並行性の高いX線を用いることで、試料からの回折線の質は格段に高まる。この回折線の測定方法には様々な検出器の選択肢があるが、我々はイメージングプレート(IP)が現時点では最も適した検出器であることを検証した。この結果、様々な補正項を最適化したIPは半導体検出器などの0次元検出器と遜色ない解析が可能であることがわかった。そこで、本研究課題を遂行するために、平成22年3月末にSPring-8

BL-02B1に導入された単結晶用大型IP装置を主な装置として採用した。

試料として単結晶を用いることにより、空間情報を含めた精密な回折データを得ることができるので、我々は精密電子密度解析を実現するために以下のような2つの開発を行った。

単結晶測定を最も効率よく行うための測定手法の確立と、測定条件の自動計算プログラムの開発

通常の画像処理では扱いが困難な重畳反射を分離するための、最適な2次元マスクサイズを自動生成するプログラムの開発

また、測定された回折データを元に精密解析を行うために、マキシマムエントロピー法による電子密度計算、原子散乱因子を内殻電子と価電子に分離して多極性展開を行い、更に得られた電子密度をBaderトポロジカル解析によってその帰属を精密に求めるソフトウェアを用いた。

4. 研究成果

放射光X線回折を用いた精密解析を通して、強相関電子系物質の平衡状態の研究を行う目的達成のために、大きく分けると二つの成果を得ることができた。一つは、測定装置の高度化、解析手法の開発と、もう一つが興味深い物性を示す物質群の平衡状態の研究である。

実験手法に関する成果については、技術的かつ専門的になるので概要に留める。研究期間内に明らかになったこととして、検出器のダイナミックレンジを保証できるだけの装置の安定度が十分でないことが分かったために、施設側と協議して当該装置のメーカーに装置の改造を依頼した。具体的には、測定されたデータを内部処理せずに取り出せるようにした。この結果得られた生データを、論理的に正しく処理する画像処理ソフトウェアを作成し検証を行った結果、ほぼ理論通りの回折データを得ることが出来るようになった。また、波長の短いX線を用いた回折実験では、得られる逆格子空間のデータが稠密になっていて解析が難しい。このため、2次元検出器の回折データを効率よく画像処理するソフトウェアも開発し、既存ソフトウェアでは処理できなかった情報を取り込むことが可能となった。これらの成果については解説記事で発表した[ref.3]。

また、研究期間内には多くの物質群の測定を行ったが、目的の項目では単純に分類することは難しく、これらがクロスオーバーして

いる系が大きな成果につながった。3つのトピックスについて抜粋して述べる。

(1) 最初のトピックスは、自由度のクロスオーバー系と位置付けられる量子液体系銅酸化物である。溶液中の孤立遷移金属イオンのように、熱的な揺らぎが相互作用の異方性に打ち勝つ場合には電子軌道の自由度は縮退し球状を保つ。しかし、結晶中では強いCoulombエネルギーの異方性による自発的対称性の破れが縮退を解いて結合を作るために、軌道の自由度は維持できない。一方、スピン系において幾何学的自己矛盾を内在する反強磁性的相互作用を持つ場合、エネルギー最小の秩序状態を妨げる液体状態が実現し、現在の物性物理学の大きな研究テーマとなっている。「結晶場」に応答する電子軌道の自由度はノイマンの原理に基づく物性の異方性と結晶点群の関係、外場応答の際の系の次元性を記述する重要な項目である。結晶中の軌道自由度が低温まで固化しない状態(軌道液体状態)は、90年代に理論的に予測された。いくつかの遷移金属酸化物において実現の可能性が実験的に指摘はされたが、未だ確立していない。こうした状況の中で、我々は銅酸化物 $6H-Ba_3CuSb_2O_9$ において、 Cu^{2+} の量子スピン液体の実現が短距離秩序を持つ八ニカム格子で生じていることを明らかにした。更に、ヤンテラー活性なCuによる軌道秩序を伴う格子歪みが最低温まで抑制された成分が含まれており、3つの異なる量子化軸を持つ軌道状態が量子的に絡み合って安定化する「軌道液体状態」が実現している可能性を指摘した[図1,ref]。この系では、軌道秩序を生じる相と低温まで軌道液体を保持する相との対比を行うことが出来たために、当初はその発現機構の解明が可能であると予想して研究を進めたが、極めて特異な電子状態であるために、その研究は難解を極めた。しかし、単結晶を用いた電子スピン共鳴、ラマン分光などの各種物性測定を結集して、その特異な量子液体状態の機構解明を進めた。

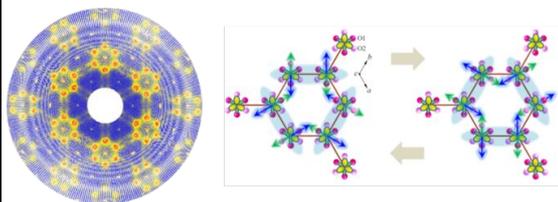


図 1. 八ニカム格子を示す散漫散乱(左)と、スピン - 軌道液体を説明する模式図(右)

(2) 次は新規超伝導体の発見である。2008 年に東工大の細野らによって鉄をベースとした超伝導体が発見され、その最高転移温度が 56 K に達して物性物理分野に大きな衝撃を与えた。鉄系超伝導体には、共通して Fe_2As_2 層間に閉殻カチオンや LaO などの絶縁層がスペーサーとして挿入されているという特徴があり、新たなスペーサーの開発から超伝導転移温度 T_C を向上させようという取り組みが行われている。本研究で Ca-Fe-Pt-As 系[ref.], Ca-Fe-Ir-As 系[ref. ,]などいくつかの新構造超伝導体の同定を行ったが、これらの系は層間に 2 価のヒ素のダイマーを有している。ヒ素の価数を 1 価にすることが出来れば、ダイマーによる一次元鎖を形成した新しいスペーサーを用いた物質設計が可能となる。そこで、この指針に基づいた物質探索により、112 型鉄系超伝導体 $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$ を発見した。 Fe_2As_2 層間では確かに 1 価の As によるジグザグ鎖が存在する新鉄系超伝導体の実現を見出した[図 2, ref.]。これらの系は、当初の目的では鉄系超伝導体に多く報告されている構造相転移に伴う電子状態と超伝導の関連性を明らかにする予定であったが、 Fe_2As_2 層における電子状態の変化は特に観測されなかった代わりに、放射光による MEM 電子密度解析の結果から、As ダイマーの結合電子の可視化によって結合状態を明らかにすることが出来た。更に、構造データをもとにバンド計算を行って二次元的なフェルミ面を持つことを明らかとした。実際に高い超伝導転移温度を有すること、更に La 量が抑えられた超伝導体であることから実

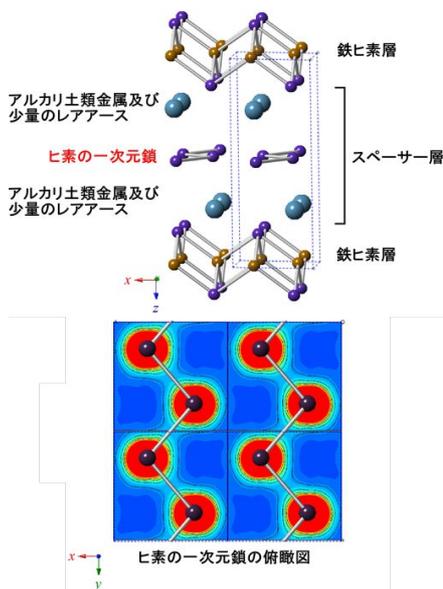


図 2. $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$ の結晶構造(上)とヒ素の一次元鎖の電子密度図

用的な面でも重要な物質とみなせる。この成果は特度の最多引用件数の Highly cited article にも選ばれた。

(3) 最後に、応用を見据えた基礎研究を行った例を一つ上げる。現在主流の白色 LED は青色チップと青色光を黄色光に変換する黄色蛍光体(YAG 蛍光体)との組み合わせである。しかし、(i) 不快な眩しさを与えやすい、(ii) 各白色 LED の発光色がバラつく、(iii) 蛍光体の価格が高いなどの問題点があり、これらを改良した新しい白色 LED の開発が求められてきた。このような問題点を解決する、紫色光を黄色光に変換可能な新しい蛍光体 $\text{CL_MS};[(\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x)_7(\text{SiO}_3)_6\text{Cl}_2:\text{Eu}^{2+}]$ を発見した[ref.]。この系は、安価な元素で構成されており、励起発光スペクトルの幅が広いことによる発色の再現性に優れ、内部量子効率率は 90% 以上と非常に高く、湿度変化に強いなど多くの優れた特長を有している。中でも最大の特徴は青色蛍光体と混合した時、青色光の再変換による色ずれが生じない点であり、市販品では難しい安定した発光色を実現できる。本課題で明らかになった構造情報を元に、密度汎関数を用いて発光サイトの解析を行った結果、CL_MS 蛍光体の層状構造による局所歪が結晶構造内に極めて大きな結晶場勾配を生じさせており、これが Eu^{2+} の軌道に大きなストークスシフトを生み出していることが明らかとなった。この研究における重要な観点は、温度変化による発光特性と結晶場の変化の関係を精密な構造解析を用いて追跡することで、特性の起源を特定できた点にある。

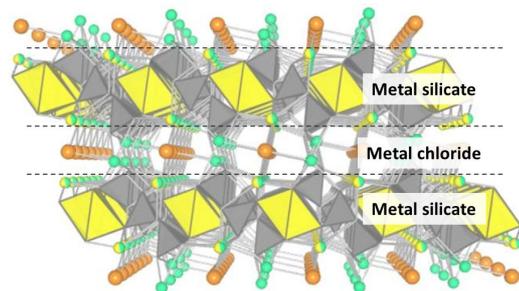


図 3. CL_MS の結晶構造。硬い silicate 層と柔らかい chloride 層との間に発光部位が存在。

以上のように、放射光を用いた様々な解析を適用することで、興味深い物性の発現機構の追跡が可能となった。一方で、超精密解析による電子密度解析には未解決な課題が残されており、手法の完全な確立には至っていない。これは X 線回折データが前人未達の超高分解能で高精度の領域に達したからであり、引き続きその問題の特定と解決策を模索する必要がある。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 72 件)

- N. Katayama, K. Sugawara, Y. Sugiyama, T. Higuchi, K. Kudo, D. Mitsuoka, T. Mizokawa, M. Nohara, and H. Sawa, “Synchrotron X-ray diffraction study of the Structural Phase Transition in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Ir}_x\text{As}_2)_5$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**,113707,2014,p1-5, 査読有 DOI: 10.7566/JPSJ.83.113707
- T. Usui, Y. Tanaka, H. Nakajima, M. Taguchi, A. Chainani, M. Oura, S. Shin, N. Katayama, H. Sawa, Y. Wakabayashi, and T. Kimura, “Observation of quadrupole helix chirality and its domain structure in $\text{DyFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ”, *Nature Materials*, **13** 巻,611-618,2014, 査読有 DOI: 10.1038/nmat3942
- 澤 博,「放射光 X 線回折を用いた分子性結晶の精密電子密度分布解析」, *固体物理*, **49**,2014,pp163-175,査読無
- 澤 博,中辻 知,「銅酸化物磁性体におけるスピン・軌道の特異な量子状態」, *固体物理*, **49**,2014,pp15-25,査読無
- H. Sagayama, S. Toyoda, K. Sugimoto, Y. Maeda, S. Yamada, and T. Arima, “Ferroelectricity driven by charge ordering in the A-site ordered perovskite manganite $\text{SmBaMn}_2\text{O}_6$ ”, *Phys. Rev. B*, **90**, 241113(R), 2014, 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.90.241113.
- 杉本邦久,「放射光 X 線による結晶構造解析の実際と展望」, *日本結晶学会誌*, **56**, 2014, 296–300, 査読無 DOI: 10.5940/jcersj.56.296.
- M. S. Schmökel, L. Bjerg, J. Overgaard, F. K. Larsen, G. K. H. Madsen, K. Sugimoto, M. Takata, B. B. Iversen, “Pushing X-ray Electron Densities to the Limit: Thermoelectric CoSb_3 ,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 2013,1503–1506, 査読有 DOI: 10.1002/anie.201206065.
- N. Katayama, K. Kudo, S. Onari, T. Mizukami, K. Sugawara, Y. Sugiyama, Y. Kitahama, K. Iba, K. Fujimura, N. Nishimoto, M. Nohara, and H. Sawa, “Superconductivity in $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}$: A Novel 112-Type Iron Pnictide with Arsenic Zigzag Bonds”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **82**, 123702, 2013,1-10, 査読有 DOI: 10.7566/JPSJ.82.123702
- K. Kudo, D. Mitsuoka, M. Takasuga, Y. Sugiyama, K. Sugawara, N. Katayama, H. Sawa, H. S. Kubo, K. Takamori, M. Ichioka, T. Fujii, T. Mizokawa, and M. Nohara, “Superconductivity in $\text{Ca}_{10}(\text{Ir}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ with Square-Planar Coordination of Iridium”, *Scientific Reports*, **3**,3101,pp1-5,2013, 査読有, DOI: 10.1038/srep03101
- K. Kimura, S. Nakatsuji, J.-J. Wen, C. Broholm, M. B. Stone, E. Nishibori and H. Sawa, “Quantum fluctuations in spin-ice-like $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ”, *Nature Commun.*, **4**, 1934, 2013, pp1-3, 査読有 DOI:10.1038/ncomms2914
- S. Niitaka, H. Ohsumi, K. Sugimoto, S. Lee, Y. Oshima, K. Kato, D. Hashizume, T. Arima, M. Takata, H. Takagi, “A-Type Antiferro-Orbital Ordering with $I4_1/a$ Symmetry and Geometrical Frustration in the Spinel Vanadate MgV_2O_4 ”, *Phys. Rev. Lett.*, **111**,267201,2013, 査読有 DOI:10.1103/PhysRevLett.111.267201.
- M. Moriya, H. Kitaguchi, E. Nishibori, H. Sawa, W. Sakamoto, T. Yogo, “Molecular Ionics in Supramolecular Assemblies with Channel Structures Containing Lithium Ions”, *Chemistry - A European Journal*, **18** 巻 48 号,2012,pp15305-15309, 査読有 DOI: 10.1002/chem.201202056
- H. Daicho, T. Iwasaki, K. Enomoto, Y. Sasaki, Y. Maeno, Y. Shinomiya, S. Aoyagi, E. Nishibori, M. Sakata, H. Sawa, S. Matsuishi, H. Hoshino, “A novel phosphor for glareless white light-emitting diodes”, *Nature Commun.*, **3**, 1132,2012,pp1-8, 査読有 DOI:10.1038/ncomms2138
- S. Nakatsuji, K. Kuga, K. Kimura, R. Satake, N. Katayama, E. Nishibori, H. Sawa, R. Ishii, M. Hagiwara, F. Bridges, T. U. Ito, W. Higemoto, Y. Karaki, M. Halim, A. A. Nugroho, J. A. Rodriguez-Rivera, M. A. Green, C. Broholm, “Spin-Orbital Short-Range Order on a Honeycomb-Based Lattice”, *Science*, **336**,2012,pp559-563, 査読有 DOI: 10.1126/science.1212154
- S. Aoyagi, Y. Sado, E. Nishibori, H. Sawa, H. Okada, H. Tobita, Y. Kasama, R. Kitaura, H. Shinohara, “Rock-Salt-Type Crystal of Thermally Contracted C_{60} with Encapsulated Lithium Cation”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 2012,pp3377-3381, 査読有 DOI: 10.1002/anie.201108551
- G. Eguchi, D.C. Peets, M. Kriener, Y. Maeno, E. Nishibori, Y. Kumazawa, K. Banno, S. Maki, H. Sawa, “Crystallographic and superconducting properties of the fully gapped noncentrosymmetric 5d-electron superconductors CaMSi_3 ($M = \text{Ir}, \text{Pt}$)”, *Phys. Rev. B*, **83**, 2, 2011,024512. 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.83.024512
- S. Kakiya, K. Kudo, Y. Nishikubo, K. Oku, E. Nishibori, H. Sawa, T. Yamamoto, T. Nozaka and M. Nohara, “Superconductivity at 38 K in Iron-Based compound with Platinum-Arsenide Layers $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 9, 2011, 093704-1,4, 査読有 DOI:10.1143/JPSJ.80.093704

〔学会発表〕(計 47 件)

澤博,「放射光 X 線回折を用いた精密解析による構造物性研究」,東京大学物性研談話会(招待講演),東京大学物性研究所,2013 年 12 月 26 日

澤博,「ビッグデータと仮説形成: 複雑系の理解に向けて」,第 2 回 NINS Colloquium「自然科学の将来像」(招待講演),ヤマハリゾートつま恋,2013 年 12 月 17 日

Hiroshi SAWA, “Charge Density study of Molecular Orbital Using Synchrotron Radiation X-ray”, International school and Symposium on Molecular Materials 2013 (招待講演),東京工業大学大岡山キャンパス,2013 年 11 月 8 日

澤博,「分子性結晶における分子軌道分布の自由度」,第 6 回物性科学領域横断研究会(招待講演),東京大学,2012 年 11 月 27 日~2012 年 11 月 28 日

澤博,「Ba₃CuSb₂O₉ の結晶構造」,基研研究会「量子スピン系の物理」,京都大学,2012 年 11 月 12 日~2012 年 11 月 14 日

Hiroshi Sawa, “Charge Density Study of Molecular Conductors”, International Symposium on Materials Science Opened by Molecular Degrees of Freedom (MDF2012), サンホテルフェニックス(宮崎),2012 年 12 月 1 日~2012 年 12 月 4 日

澤博,「放射光による電荷分布解析」,日本物理学会 2012 第 67 回年次大会,関西学院大学,2012 年 3 月 25 日

Hiroshi Sawa, “Study of Charge Ordering in Strongly Correlated Molecular Conductor System by Synchrotron Radiation X-ray Diffraction”, 第 1 1 回田村記念シンポジウム(招待講演),大阪府立大学,2011 年 12 月 4 日

澤博,「放射光構造解析による格子構造とラットリング」,日本物理学会 2010 秋季大会,大阪府大,2010 年 9 月 24 日

Hiroshi Sawa, “Direct Observation of Electronic State of (TMTTF)₂PF₆ using SR X-ray Analysis”, Electronic Crystals 2011 (招待講演), Cargese Institut Scientifique (France), 2011 年 8 月 19 日

〔図書〕(計 1 件)

那須奎一郎,澤博,門野良典,KEK 物理学シリーズ,物質科学の基礎,2012,175

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 鉄系超伝導物質及びその製造方法
発明者: 野原実,工藤一貴,澤博,片山尚幸,細野秀雄
権利者: 同上
種類: 特許

番号: 2013-199997

出願年月日: 2013 年 9 月 26 日

国内外の別: 国内 / 国外

〔その他〕

ホームページ

<http://www.mcr.nuap.nagoya-u.ac.jp/>

報道関連情報

科学新聞,2013 年 11 月 29 日,1 面

(新しい鉄系超伝導体の発見)

日刊工業新聞,静岡新聞,中日新聞(3 面),2012 年 10 月 17 日

(新しい黄色蛍光体の発見)

日本経済新聞(科学技術 11 面),化学工業日報(1 面)中日新聞(3 面),NHK 愛知県のニュース,2010 年 6 月 21 日

米国化学会(Chemistry & Engineering News),2010 年 6 月 28 日号,pp38-39

(Li@C₆₀ の構造同定)

アウトリーチ活動情報

澤博,「未来を拓く新機能性材料の開発の話」,名古屋大学「秋のオープンレクチャー-2013」,2013 年 9 月 23 日

澤博,「“物理学”は発想の転換」,第 49 回 名大カフェ“Science, and Me”,ジユンク堂書店口フト名古屋店,2014 年,9 月 24 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤博 (SAWA, Hiroshi)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 5 0 2 1 5 9 0 1

(2) 研究分担者

杉本 邦久 (SUGIMOTO, Kunihisa)

(財) 高輝度光科学研究センター

利用研究促進部門 研究員

研究者番号: 0 0 5 1 2 8 0 7