

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号： 14301
 研究種目： 学術創成研究費
 研究期間： 2007～2011
 課題番号： 19GS0207
 研究課題名（和文）物質新機能開発戦略としての精密固体化学：
 機能複合相関新物質の探索と新機能の探求
 研究課題名（英文）Strategic state-of-the-art solid state chemistry for new functional materials
 Exploring for new multi-functional materials
 研究代表者
 島川 祐一（SHIMAKAWA YUICHI）
 京都大学・化学研究所・教授
 研究者番号： 20372550

研究成果の概要（和文）：「ものづくり」という化学の原点に、近年発展の著しいナノスケールレベルの視点を加えて発展させ、機能を意識した物質創製研究を展開してきた。その結果、大きな負の熱膨張を示す鉄酸化物や、ありふれたシリコンでの巨大な磁気抵抗など、幾つかの新物質、新現象を見出した。放射光 X 線や高分解能電子顕微鏡を用いた構造評価、さらに第一原理による電子状態計算を駆使して、これらの新物質、新現象に見出された新しい機能特性の原理や機構の解明を果たした。

研究成果の概要（英文）： We introduced a strategic state-of-the-art concept into our solid state chemistry and sought new functional materials and new functional phenomena. During our research project, we found new materials such as oxide materials showing large negative thermal expansion and new phenomena like large magnetoresistance in silicon. We also revealed the mechanisms of new functional properties by analyzing the *nano*-size structures of the materials with synchrotron X-ray and high-resolution electron microscopy techniques, and by calculating electronic structures from the first principle calculations. The materials developed in our study will be useful for future information-technology society.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	89,300,000	26,790,000	116,090,000
2008 年度	82,100,000	24,630,000	106,730,000
2009 年度	84,900,000	25,470,000	110,370,000
2010 年度	85,200,000	25,560,000	110,760,000
2011 年度	67,000,000	20,100,000	87,100,000
総計	408,500,000	122,550,000	531,050,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・機能物質化学

キーワード：固体化学、新物質合成、微細加工、構造解析、電子状態計算

1. 研究開始当初の背景

近年の高温超伝導、超巨大電磁応答現象、等で代表される新現象の発見に見られるように、電子間での強い相関に加えて、電子-スピン-格子にわたる強い相互作用に由来する物性には、未知の優れた物質機能が未だ数多く隠れている可能性を窺わせる。従来の

電子やスピンといった単一の機能応用を越えた新しい複合機能の開発につながる新物質、新物性の開拓は、古典的な枠組みを超える新しい学術領域の形成のみならず社会的にも強く望まれており、このような機能を意識した物質創製の研究を推進することは科学技術創造立国を謳う我が国の物質科学研究

究の最重要な戦略の一つである。

本研究では、「ものづくり」という化学の原点に、近年発展の著しいナノスケールレベルの視点を加えて発展させる物質創製研究を「精密固体化学」として新たに提唱し、物質とその性質の新規開発・制御を体系的に行うこととした。このような新しい「機能を意識した精密固体化学」を展開する背景には、理論的なアプローチによる物質デザインが可能となり、ナノ領域にまで及ぶ新しい物質合成・評価手法の開発により、まさに物質創製の新しい転換期が訪れているという機運があったからである。

2. 研究の目的

新物質開発の視点から、まず新しい物質を生み出すための新しい合成・制御手法を開発、確立する。我々が特に注力するのは、非平衡物質の合成を可能とする高压合成、薄膜法による原子層単位での結晶成長、ナノサイズの微細加工である。これらの技術は物質探索・物性制御の範囲を著しく拡大させ、根元的には元素に由来する「化学的特性」と固体の電子的・原子的な「物性・機能」を融合することが可能となる。

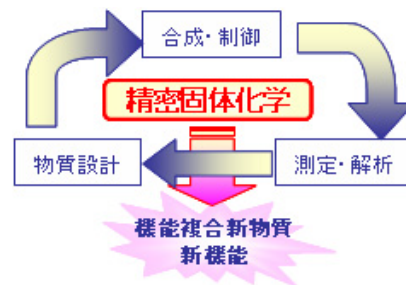
つづいて、これらの新しい合成・制御手法を駆使して、物質設計に基づく新規な「機能複合相関新物質」の創製を展開する。特に、「磁性-誘電性」、「電流-磁気」、などの機能複合相関を端緒に、全く新しい原理に基づく（スピン）エレクトロニクスを構築する可能性のある材料や、従来技術の特性を飛躍的に進歩させ得る機能材料の物質開発を行う。ここでは、高分解能電子顕微鏡や放射光 X 線によるナノ構造評価と物性評価結果が電子状態計算のデータベースとしてフィードバックされ、第一原理計算をはじめとする電子状態計算による物質デザインと呼ぶべき物質合成指針を与えることが可能となる。これにより、将来の機能材料として有用となる基礎物質の探索と基礎物性の解明を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の遂行のため、代表者（島川）を研究の総括として、(1) 新物質探索と合成手法開発、(2) ナノ構造分析・評価、(3) 理論計算による物質デザイン、の3つの研究グループを設定した。一連の研究は「物質設計」-「合成・制御」-「測定・解析」が機能的に結ばれた発展的循環プロセスによって遂行し、新物質創製と物質合成手法の開発を展開する。

また、物理と化学、理論と実験にまたがる融合的研究について高いアクティビティを誇る我が国でこの分野を積極的に推進し、世界的なレベルで研究を先導することを目

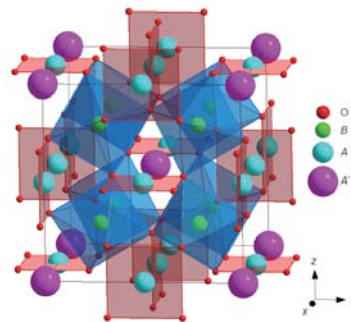
指して、国際的な共同研究プロジェクトなどへも積極的に参画し、アジアを中心としたポスドクなどの人材交流と若手研究者の養成も含めた研究活動を展開する。



4. 研究成果

(1) 高压法による新物質合成とその機能開拓

新物質・新物性探索を中心とする研究では、高压合成法を用いて多くの新しいAサイト秩序型ペロブスカイト構造酸化物を見出すことに成功した。同じAサイト秩序型ペロブスカイト構造において、強磁性-反強磁性-強磁性転移を示す $\text{CaCu}_3\text{B}_4\text{O}_{12}$ ($\text{B} = \text{Sn, Ti, Ge}$)はその一例である。A'サイトの直接交換相互作用と、Bサイトを介した超交換相互作用の拮抗により、特異な磁気転移が起こることを放射光 X 線吸収スペクトル測定や電子状態計算から明らかにした。また、異常高原子価のFeイオンを含む新規化合物 $\text{CaCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ や $\text{LaCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ も見出した。 $\text{CaCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ は $4\text{Fe}^{4+} \rightarrow 2\text{Fe}^{3+} + 2\text{Fe}^{5+}$ で表わされる電荷不均化を示すが、 $\text{LaCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ は $3\text{Cu}^{2+} + 4\text{Fe}^{3.75+} \rightarrow 3\text{Cu}^{3+} + 4\text{Fe}^{3+}$ と表わせる温度誘起サイト間電荷移動を示す。特に、このサイト間電荷移動では、電子状態変化がスピン系や格子系とも強く相関しており、電荷移動転移温度において大きな「負の熱膨張」的な格子変形を示すことを見出した (*Nature*, 2010)。 $\text{LaCu}_3\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ の特異な電子状態変化については、電子状態計算、および放射光 X 線を用いた X 線吸収スペクトルの実験から、Cu の d 軌道と配位酸素イオンの p 軌道間の強い混成による酸素ホルルの振る舞いの重要性を明らかにした。



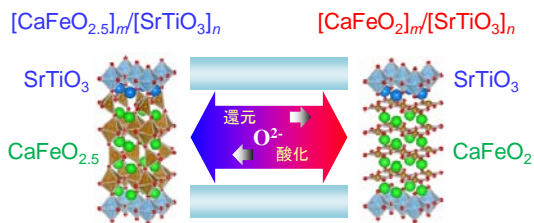
Aサイト秩序型ペロブスカイト酸化物の結晶構造

高圧法では、その他、幾つかの新物質の合成にも成功した。特に、単純ペロブスカイト構造の BiNiO_3 や BiCoO_3 、 PbVO_3 の新たな機能特性を見出した。 La を僅かにドーブした $(\text{Bi,L a})\text{NiO}_3$ では、 A サイト秩序型酸化物と同様のサイト間電荷移動に伴う負の熱膨張を見出し、歪みゲージによる測定から、従来材料の3倍に達する大きなものであることを確認した (*Nature Communications*, 2011)。 BiCoO_3 や PbVO_3 では電子状態計算から大きな正方晶歪み及び強誘電的イオン変位に加えて、磁気異方性に顕著な違いが見られることも明らかになった。これら一連の化合物は、電荷-スピン-格子にわたる強い機能複合相間を示す新物質群である。

(2) 薄膜新物質とその構造評価、エネルギー材料への応用展開

パルスレーザー蒸着法を用いた薄膜作製では、酸素が平面4配位した Fe^{2+} からなる無限層構造 SrFeO_2 単結晶薄膜の作成に世界に先駆けて成功した。得られた薄膜の構造は、走査型透過電子顕微鏡とサイト分解 EELS 法を組み合わせた評価から、原子レベルでの局所構造の異方性が明確に得られており、遷移金属イオンと配位酸素との共有結合性の重要性が明らかとなった。

また、ブラウンミレライト構造の $\text{CaFeO}_{2.5}$ が無限層構造の CaFeO_2 へと変化する過程から、低温での酸素の移動が異なる2つの方向に起こることも初めて明らかにした (*Nature Chemistry*, 2010)。さらに、ブラウンミレライトとペロブスカイトとの人工超格子薄膜 $[\text{CaFeO}_{2.5}]_m/[\text{SrTiO}_3]_n$ の低温での酸化・還元過程を観察し、人工超格子薄膜構造では酸素イオンの拡散を2次元面内に制御できることを実証した。これらのは低温動作固体酸化物燃料電池としての応用へ向けた重要な知見である (*Scientific Reports*, 2011)。



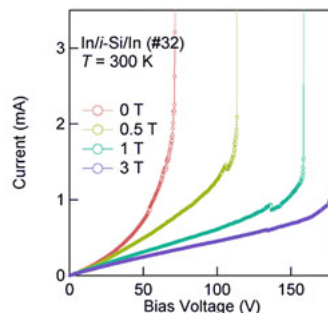
人工超格子薄膜における
低温での層選択的酸素拡散

その他、薄膜新物質としては、高温超伝導で注目される酸素平面4配位 d^9 電子配置をもつ LaNiO_2 の単結晶薄膜の作成にも成功した。エピタキシャル薄膜作製と CaH_2 を用いた低温還元を用いた手法が、広く新物質合成にも有効であることを実証したものである。

(3) 微細加工による新機能特性発現

電流-磁気機能複合相関に注目して、微細加工などの合成手法と新たな測定手法の開発を行い、新しい物性展開の可能性を提示した。特に、磁気円盤内に生じる磁気渦を X 線顕微鏡を用いて観察し、電流誘起磁気渦共鳴現象を実時間で測定することに成功した。さらに、ナノ秒電流パルス印加による磁気コア反転にも成功し、電流誘起磁気渦共鳴を利用した3端子素子を提案し、実際にその素子を作成し特性評価も行った。これらの電流誘起スピンドYNAMIXSの詳細な研究は、新規メモリやスピントランジスタ等への応用展開を図るうえで重要な進展であった (*Nature Materials*, 2010)。

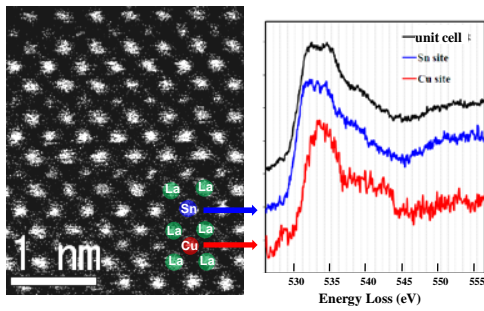
また、空間電荷効果によってシリコンにおいて巨大な磁気抵抗効果が誘起されることも見出した。この成果は、ありふれた半導体であるシリコンにおいても微細加工により作り出された特殊な状況下においては新しい機能を発現させることができることを示した点で極めて重要なものである (*Nature*, 2009)。



半導体シリコンにおける巨大磁気抵抗効果

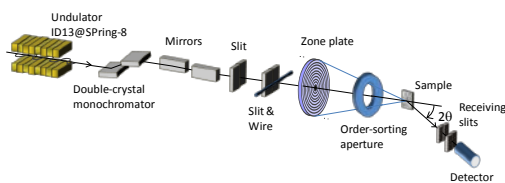
(4) 構造評価技術の新手法の開発

本研究では材料をナノレベルで評価する新しい手法を開発するとともに、その技術を物質合成グループにより見出された新材料に適用してきた。電子エネルギー損失分光 (EELS) を複合した走査型透過電子顕微鏡 (STEM) 技術では、原子レベルでの局所構造の歪みを検出することに成功した。さらに、局所構造を原子レベルで観察する HAADF 像のコントラストから原子変位と温度因子を定量的に解釈することもできるようになった。これらの手法を用いて、塩素置換したフタロシアニン銅薄膜中の分子カラムを原子分解能で観察することに成功すると同時に、結晶粒界に存在する配向の異なる分子の存在を明らかにすることに成功した (*Scientific Reports*, 2012)。また、酸化物ヘテロ界面近傍の原子分解能観察からは、ミスフィット転位での Ba 欠損による欠陥構造を明らかにすることができた。



高分解能電子顕微鏡による
サイト分解 EELS 分析

放射光 X 線を利用したナノ構造評価では、高分解能マイクロ X 線回折装置の開発を行ってきた。新規ゾンプレート的设计・導入により、150 nm(水平方向)×250 nm(垂直方向)のビームを形成することに成功するとともに、二次元検出器である X 線 CCD 検出器による逆格子マッピング測定を実現し、測定時間も従来より約 1/5 に短縮することに成功した。これにより、微細加工素子での評価が実際に可能であることも実証した。また、SPRING-8 放射光のシングルバンチ(時間幅 40 ピコ秒)を切り出すことができる高速 X 線チョッパーの開発にも成功し、ナノ～マイクロ秒オーダーの時分割その場測定技術が可能となった。実際に圧電体 BaTiO₃ 単結晶では、圧電誘起による 0.1 pm/V 程度の微小な格子変形をマイクロ秒単位で測定することに成功した。

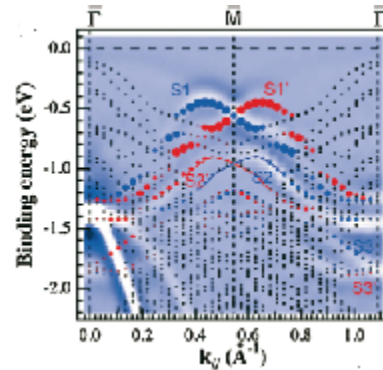


新型ゾンプレートで 150×250 nm² の集光
(SPRING-8 高輝度アンジュレータ光)

(5) 電子状態計算による物質デザイン

第一原理計算に基づき、物質合成グループなどで見出された新物質の電子状態を計算から明らかにするとともに、X 線吸収スペクトルなど評価グループの実験と理論計算結果を結びつけた。特に、磁性—誘電特性機能複合相関を示すマルチフェロイック関連物質の発現機構に関する研究を進め、新物質探索指針を提示した。一例を挙げると、ガーネットフェリ磁性体 Y₃Fe₅O₁₂ のオフセンタリング構造不安定化の可能性を調べ、フェリ磁性化合物における強誘電性発現に関する物質デザインのアイディアを示した。また、新しい機能複合相関を示す新物質探索に対して、磁気的秩序と電氣的秩序の交差相関に注目して、スピン軌道相互作用が反転対称性の破れ

た系の電子状態に及ぼす効果 (Rashba 効果) を群論の立場から解明した。特殊な対称性の場合には時間反転対称性と同じ Rashba 効果が現れる可能性を指摘し、実際に Bi 原子が吸着した Si(111) 表面の角度分解光電子分光実験によって観測された特異なスピン分裂現象がこれにより説明できることを明らかにした。



第一原理計算によりスピン分解角度
分解光電子分光実験結果を説明

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 137 件)

[1] Y. Shimakawa and T. Saito (Invited review article), "A-site magnetism in A-site-ordered perovskite-structure oxides", *Physica Status Solidi B*, 249, 423-434 (2012). DOI: 10.1002/pssb.201147477

[2] A. Takayama, T. Sato, S. Souma, T. Oguchi, and T. Takahashi, "Tunable Spin Polarization in Bismuth Ultrathin Film on Si(111)", *Nano Lett.* 12, 1776-1779 (2012). DOI: 10.1021/nl2035018

[3] M. Haruta and H. Kurata, "Direct observation of crystal defects in an organic molecular crystals of copper hexachlorophthalocyanine by STEM-EELS", *Sci. Repts*, 2, 252/1-4 (2011). DOI: 10.1038/srep00252

[4] K. Matsumoto, M. Haruta, M. Kawai, A. Sakaiguchi, N. Ichikawa, H. Kurata, and Y. Shimakawa, "Selective reduction of layers at low temperature in artificial superlattice thin films", *Sci. Repts*, 1, 27/1-4 (2011). DOI: 10.1038/srep00027

[5] M. Azuma, W. T. Chen, H. Seki, M. Czpski, S. Olga, K. Oka, M. Mizumaki, T. Watanuki, N. Ishimatsu, N. Kawamura, S. Ishiwata, M. G. Tucker, Y. Shimakawa, and J. P. Attfield, "Colossal negative thermal expansion in BiNiO₃ induced by intermetallic charge transfer", *Nature Comm.*, 2, 347/1-5 (2011). DOI: 10.1038/ncomms1361

[6] Y. Shimakawa, M. Azuma, and N. Ichikawa (Invited review article), "Multiferroic compounds with double-perovskite structures",

Materials, 4, 153-168 (2011). DOI: 10.3390/ma4010153

[7] T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono "Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire", *Nature Materials*, **10**, 194-197 (2011). DOI: 10.1038/nmat2961

[8] S. Inoue, M. Kawai, N. Ichikawa, H. Kageyama, W. Paulus, and Y. Shimakawa, "Anisotropic oxygen diffusion at low temperature in perovskite-structure iron oxides", *Nature Chemistry*, **2**, 213-217 (2010). DOI: 10.1038/nchem.547

[9] M. Kawai, K. Matsumoto, N. Ichikawa, M. Mizumaki, O. Sakata, N. Kawamura, S. Kimura, and Y. Shimakawa, "Orientation change of an infinite-layer structure LaNiO₂ epitaxial thin film by annealing with CaH₂", *Crystal Growth & Design*, **10**, 2044-2046 (2010). DOI: 10.1021/cg100178y

[10] Y.W. Long, N. Hayashi, T. Saito, M. Azuma, S. Muranaka, and Y. Shimakawa, "Temperature-induced A-B intersite charge transfer in an A-site-ordered LaCu₃Fe₄O₁₂ perovskite", *Nature*, **458**, 60-63 (2009). DOI:10.1038/nature07816

[11] M. P. Delmo, S. Yamamoto, S. Kasai, T. Ono, and K. Kobayashi, "Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect", *Nature* **457**, 1112-1115 (2009). DOI:10.1038/nature07711

[12] S. M. Haruta, H. Kurata, H. Komatsu, Y. Shimakawa, and S. Isoda, "Site-resolved oxygen K-edge ELNES of the layered double perovskite La₂CuSnO₆", *Phys. Rev. B*, **80**, 165123 (2009). DOI:10.1103/PhysRevB.80.165123

[13] Y. Uratani, T. Shishidou, and T. Oguchi, "First-Principles Study on the Magnetic Anisotropy in Multiferroic PbVO₃ and BiCoO₃", *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 084709/1-6 (2009). DOI: DOI: 10.1143/JPSJ.78.084709

[学会発表] (計 80 件)

[1] Y. Shimakawa (invited), "New perovskite-structure oxides containing Fe with unusually oxidation states and unusual oxygen coordinations", *10th International Conference on Materials Chemistry*, Manchester, UK, Jul. 6 (2011).

[2] H. Kurata (invited), "Local analysis by transmission electron microscope", *Japan-Taiwan Symposium on Innovative Synthesis for New Materials Chemistry*, Chiang Mai, Thai, Dec. 4 (2010).

[3] S. Kimura (invited), "High-Resolution X-ray Microdiffraction Analysis of Local Strain in Semiconductor Materials", *The 10th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, Shanghai, China, Nov. 3 (2010).

[4] T. Ono (invited), "Modification of Spin Wave Propagation by Current Injection", *American Physical Society March Meeting*, Portland, USA, Mar. 17 (2010).

[5] Y. Shimakawa (invited), "New perovskite-type structure oxides: High-pressure synthesized bulks and epitaxially grown thin films", *Gordon Research Conferences, Solid State Chemistry*, Oxford, UK, Sep. 2 (2009).

[6] T. Oguchi (invited), "Giant piezoelectric response under a misfit strain in PbTiO₃: a first-principles study", *IMF-12 and ISAF-18*, Xian, China, Aug. 23 (2009).

[7] K. Kobayashi (invited), "Tuning of the Spin-dependent Transport in Quantum Point Contacts", *The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop*, Kyoto, Japan, Oct. 27 (2008).

[8] M. Azuma (invited), "Charge and orbital orderings in some new oxides", *Workshop on Frontiers in Complex Oxides*, Santa Barbara, USA, Jul. (2008).

[9] Y. Shimakawa (invited), "Multiferroic Bi₂NiMnO₆ with a Double-Perovskite Structure: High-Pressure Synthesized Bulk and Epitaxially Grown Thin Films", *Materials Research Society, Fall Meeting*, Boston, USA, Nov. 27 (2007).

[図書] (計 4 件)

[1] 木村 滋, 「放射光が解き明かす驚異のナノの世界: キラキラ光る DVD にどうやってデータを記録するの?」ブルーバックス (講談社), p125-127 (2011).

[2] 小口 多美夫, 「密度汎関数法の発展-マテリアルデザインへの応用」シュプリンガー・ジャパン, p275-292 (2011).

[産業財産権]

○出願状況 (計 6 件)

名称: A サイト秩序型ペロブスカイト酸化物
発明者: 龍 有文, 島川 祐二, 林 直顕、齋藤 高志、東 正樹、村中 重利
権利者: 国立大学法人京都大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-50505

出願年月日: 2009 年 3 月 4 日出願

国内外の別: 国内、PTC

名称: 磁気抵抗素子及び磁気感応スイッチ
発明者: 小林研介、小野輝男

権利者：国立大学法人京都大学
種類：特許
番号：特願 2009-136275
出願年月日：2009年6月5日出願
国内外の別：国内、PTC

〔その他〕

新聞発表、等

[1] 2011年度に *Scientific Reports* に報告した「原子分解能で有機結晶中の欠陥構造観察に成功」(倉田)は関連記事が産経新聞、京都新聞に掲載された。

[2] 2011年度に *Jpn. J. Appl. Phys.*に報告した「圧電結晶の伸縮・変形を100万分の1秒でキャッチ」(木村)は、関連記事が日刊工業新聞に掲載された。

[3] 2011年度に *Scientific Reports* に報告した「人工超格子での酸素イオン拡散の制御に成功」(島川)は関連記事が京都新聞、日刊工業新聞、科学新聞に掲載された。

[4] 2011年度に *Nature Communications* に報告した「温めると縮む新材料を発見」(東、島川)は関連記事が朝日新聞、京都新聞、日経産業新聞に掲載された。

[5] 2010年度に *Nature Materials* に報告した「磁石を使ったメモリに道：磁壁の電流による移動の要因を解明」(小林、小野)は関連記事が京都新聞に掲載された。

[6] 2010年度に *Nature Chemistry* に報告した「固体酸化物における低温での酸素イオン拡散の解明」(島川)は関連記事が京都新聞、産経新聞、日経産業新聞、日刊工業新聞に掲載された他、Yahoo ニュースのトピックスにも取り上げられた。

[7] 2009年度に *Nature* に報告した「温度誘起サイト間電荷移動と負の熱膨張率の発見」(島川、東)は関連記事が毎日新聞、京都新聞、産経新聞、朝日新聞、中日新聞、日刊工業新聞、読売新聞に掲載された他、*Nature Asia Pacific* の Research Highlight にも選出された。

[8] 2009年度に *Nature* に報告した「空間電荷効果によるシリコンでの巨大磁気抵抗効果の発見」(小林、小野)は関連記事が朝日新聞、京都新聞、産経新聞、日刊工業新聞、読売新聞に掲載された。

受賞

[1] 島川 祐一「日本化学会学術賞」(2012.3)

[2] 小林 研介「湯川・朝永奨励賞」(2011.2)

[3] 小林 研介「船井学術賞」(2010.5)

[4] 小林 研介「日本物理学会 若手奨励賞」(2009.3)

[5] 小野 輝男「大阪科学賞」(2009.9)

[6] 小野 輝男「日本 IBM 科学賞」(2008. 11)

[7] 小野 輝男「サー・マーティン・ウッド賞」(2008. 11)

[8] 東 正樹、島川 祐一、高野 幹夫「Thomson Scientific Research Front Award」(2008. 11)

国際交流

本研究では若手外国人を含むPDを採用し、人材育成と国際交流も積極的に行ってきた。特に、EU やアジア諸国から毎年数名の学生・若手研究者を長期滞在研究者として受け入れてきた他、博士後期課程の学生を中心に1~3 ヶ月程度の海外研究滞在を積極的に支援し、国際共同研究も推進してきた。

ホームページ等

<http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~shimakgr/>

http://www.cmp.sanken.osaka-u.ac.jp/index_jp

<http://ssc1.kuicr.kyoto-u.ac.jp/indexj.html>

<http://eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp:8080/Root/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島川 祐一 (SHIMAKAWA YUICHI)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：20372550

(2) 研究分担者

倉田 博基 (KURATA HIROKI)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：50186491

木村 滋 (KIMURA SHIGERU)

(財)高輝度光科学研究センター・

利用研究促進部門・副主席研究員

研究者番号：50360821

小口 多美夫 (OGUCHI TAMIO)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：90253054

菅 大介 (KAN DAISUKE)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：40378881

齊藤 高志 (SAITO TAKASHI)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：40378857

小野 輝男 (ONO TERUO)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：90296749

平成23年度より連携研究者

東 正樹 (AZUMA MASAKI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・

教授

研究者番号：40273510

平成23年度より連携研究者

小林 研介 (KOBAYASHI KENSUKE)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：10302803

平成23年度より連携研究者