

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360007

研究課題名(和文) 強相関電子系酸化物での酸素介在磁性電子のX線共鳴磁気散乱研究

研究課題名(英文) Resonant X-ray magnetic scattering studies on magnetic electrons in strongly-correlated electron oxides

研究代表者

佐々木 聡 (Sasaki, Satoshi)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授

研究者番号：10162364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：高エネ放射光 PF-BL-6C実験ハッチ内に放物面多層膜X線ミラーを設置し、移相子と高精度AFC-5u型4軸回折計を制御した。これにより放射光X線を高効率で集光でき、X線共鳴磁気散乱強度が高精度で測定可能となった。

フェリ磁性化合物であるマグネタイトについて、Fe K吸収端で微弱な共鳴磁気散乱信号を計測した。そのエネルギー依存性から、分光法では観測不可能な電子軌道をA、Bサイト独立に観測できた。その結果は、Feと隣接酸素原子、さらに遠方のFe原子との間で超交換相互作用が存在することを示唆する。更に、共鳴磁気散乱強度をフーリエ合成し、混成軌道が関与する磁性電子密度分布を求めた。

研究成果の概要(英文)：The X-ray mirror system was installed in the BL-6C experimental hatch of the Photon Factory, KEK, where various experiments on the resonant X-ray magnetic scattering (RXMS) become possible to study magnetic electrons with the focused X rays. A parabolic multilayer mirror was placed between the phase retarder and a high-precision AFC-5u four-circle diffractometer.

The weak RXMS signal of magnetite, Fe₃O₄, was measured at Fe K absorption edge. It becomes clear that ferrimagnetic magnetite has the energy dependency in resonant magnetic scattering factors, suggesting the existence of specific electron orbits for A and B crystallographic sites. Super exchange interaction possibly exists between a transition-metal atom and oxygen and more distant atoms. The Fourier analyses using the RXMS data give the magnetic electron-density distribution and the information on such hybrid orbits related to the electronic transition of Fe atoms.

研究分野：固体物理・X線結晶学

キーワード：X線共鳴磁気散乱 マグネタイト 放物面多層膜ミラー 磁性電子密度 不對電子軌道 フェリ磁性
超交換相互作用 放射光X線

1. 研究開始当初の背景

原子中の少量の価電子や磁性電子が係わる化学状態や磁気状態をX線で調べる場合、その効果が微弱なため、一般のX線回折では散乱能に十分な差がつかず観測が困難な場合が多い。しかし、物質内電子の振動とX線の振動との共鳴を利用すると、共鳴散乱により、X線散乱能(原子散乱因子)に有意義な差をつけた結晶構造解析が可能になる。X線の振動(エネルギー)が電子の束縛エネルギーに近い場合、電子はX線からエネルギーを受け取って非占有軌道へ励起され、その後、入射X線と同じエネルギーのX線を出して元の束縛状態に戻る。共鳴散乱の利用には、元素の吸収端が必要であり、十分な強度でエネルギーを選択できる放射光X線が用いられる。

X線散乱の大部分は、X線の電場と電子の電荷との相互作用による電荷散乱であり、中性子回折法に比べ、磁気構造解析には不向きであると考えられてきた。しかし、X線吸収端の近傍では、電子の電荷による共鳴散乱と同様に、X線の磁氣的相互作用による共鳴散乱が現れる。そして、電荷散乱と磁気散乱の干渉項の存在のため、電荷散乱強度の 10^{-3} 程度にまで増幅された共鳴磁気散乱強度が観測される[1]。X線共鳴磁気散乱は、世界に先駆けて並河ら[2]によって観測された。

X線共鳴磁気散乱による磁気構造研究は徐々に進展してきた。共鳴磁気散乱には元素選択性があり、複数の磁性元素を含む系において、注目する元素にのみ着目した磁気構造解析を行うことができる。例えば、Baフェライト中のFe原子の磁気モーメントの傾きがX線でも得られている[3]。

遷移金属添加のM型BaフェライトBaTiCoFe₁₀O₁₉は、c軸に沿って大きな磁気異方性を持つが、Fe³⁺をTi⁴⁺とCo²⁺で置換するとFeのスピンの傾き、磁気異方性の低減が知られている。また、中性子回折の実験から、2種類の磁性イオンCo²⁺とFe³⁺のスピンの配向が提案されている[4]。この系でX線共鳴磁気散乱実験が行われた。円偏光反転で非対称度を実験的に求める一方で、結晶構造因子の共鳴磁気散乱寄与分を磁気構造のモデル化から得ることで、磁気構造が議論されている。5種類の陽イオンサイトで、非対称度の実験値と計算値の残差因子を比較して、磁気モーメントの大きさ(スピンのc軸からの傾き角)が見積られている[3]。

[1] J. P. Hannon et al. (1988) *Phys. Rev. Lett.* **61**, 1245. [2] K. Namikawa et al. (1985) *J. Phys. Soc. Jpn.* **54**, 4099. [3] M. Okube et al. (2010) *AIP Conf. Proc.*, **1234**, 871. [4] J. Kreisel et al. (2001) *J. Magn. Mater.* **224**, 17.

2. 研究の目的

本研究の目的は、X線結晶構造解析から、結晶内原子の磁気モーメントの大きさ・方向・空間密度分布などのスピン情報を求めることにある。特に、中性子回折からでは得られない電子非占有準位への電子遷移(電子軌道)の情報や隣接原子と結合する電子の情報に着目し、その磁気構造を入手することにある。遷移金属イオンと酸素間の超交換相互作用やホッピング伝導と磁性電子の係りに関する知見を同時に得ることで、次世代磁性材料の開発に貢献できると考える。

3. 研究の方法

(1) X線共鳴磁気散乱(RXMS)

X線共鳴磁気散乱強度を求めるために、左右円偏光でのブラッグ反射強度の差を、以下のように非対称度と定義した。

$$\Delta I/2I = (I^+ - I^-)/(I^+ + I^-)$$

I^+ と I^- は、ヘリシティが+1と-1のときのブラッグ反射強度である。 hkl 反射の積分反射強度は、結晶構造因子 $F(hkl)$ の絶対値の2乗で定義され、電荷散乱や磁気散乱を区別すると、

$$I = |F_{ch}(hkl) + iF_{mag}(hkl) + iF_{rem}(hkl)|^2$$

で与えられる[1]。 $F_{ch}(hkl)$ 、 $F_{mag}(hkl)$ 、 $F_{rem}(hkl)$ は、それぞれ結晶構造因子の電荷散乱、磁気散乱、共鳴散乱による寄与である。電荷散乱と磁気散乱は円偏光で変化しないため、円偏光の入射でX線共鳴磁気散乱に寄与する結晶構造因子は、以下のように書ける。

$$F_{rem}(hkl) = \sum_j (\mathbf{e} \times \mathbf{e}_0) \cdot \mathbf{z} (f_m + if'_m) \exp(-W_j) \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j)$$

である。ここで、 \mathbf{e} は散乱波の偏光ベクトル、 \mathbf{e}_0 は入射波の偏光ベクトル、 \mathbf{z} は磁気モーメント(量子化軸方向)、 $f_m + if'_m$ は原子散乱因子の共鳴磁気散乱項、 W_j はDebye-Waller因子、 x_j, y_j, z_j はj番目の原子の分率座標である。以上から、RXMSの非対称度は、

$$\Delta I/2I = -4(\cos 2\theta)(1 - \cos 2\theta) \frac{\{(F_0 + F')F''_m + F''F'_m + F''F_{0,m}\}}{\{(1 + \cos^2 2\theta)|F|^2\}}$$

と記述できる。ただし、 2θ は散乱角、 $F_0, F_{0,m}, F', F'', F'_m, F''_m$ は、Thomson散乱因子、磁気散乱因子、異常散乱因子と共鳴磁気散乱因子の実数項と虚数項である。

(2) 放射光実験

X線共鳴磁気散乱をうまく使うと、通常の実験室X線では散乱能の差が小さくて区別し難い磁性イオンに対し、散乱能に十分な差をつけた結晶構造解析が可能になる。X線吸収端近傍構造(XANES)領域で散乱因子の

差を利用すると、分光法を取り入れたX線回折実験や結晶構造解析が行える。このとき、特別な非占有準位への電子遷移や電子軌道を含んだ磁気情報が必要となる。そのため共鳴磁気散乱には、十分な強度でエネルギーを選択できる放射光X線が不可避である。エネルギー分解能は、測定したい現象とX線強度測定時の安定度で決まるが、本研究では $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ 程度が最低でも必要である。

実験の特徴をまとめる。吸収端では試料による吸収が大きくなり回折強度が弱くなるため、高強度のX線が必要である。一方、円偏光アンジュレータなど特殊な場合をのぞき、共鳴磁気散乱強度の測定には円偏光を生成する移相子を必要とする。円偏光移相子としてダイヤモンド完全結晶を用いる場合、円偏光生成効率と純度(円偏光度)の問題から、発散光は利用できない。完全結晶のブラッグ反射を利用する場合、平行性のよいビームでなければ、反射率が低くなってしまふ。このため、ビームラインに設置されている集光光学系を用いても強度の増大には繋がらず、新たなミラー集光系が移相子の後方に必要である(図1参照)。

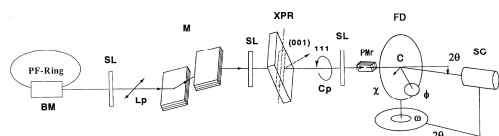


図1 X線共鳴磁気散乱実験の概念図(PFのビームラインBL-6C)。BM = 偏光電磁石光源、SL = スリット、M = 分光器、XPR = X線移相子、PMr = 放物面ミラー、FD = 4軸回折計(2θ, ω, χ, φサークル)、C = 結晶、SC = シンチレーション検出器、Lp = 直線偏光X線、Cp = 円偏光X線。

(3) X線集光と多層膜ミラー導入

共鳴磁気散乱強度測定のため、透過型移相子を通過した後に集光することを考え、放射光を擬平行光線とみなして放物面多層膜ミラーを採用した。通常の4軸回折計を用いて測定するために、その集光ビームが4軸回折計に最適にコリメートされているかどうか重要である。

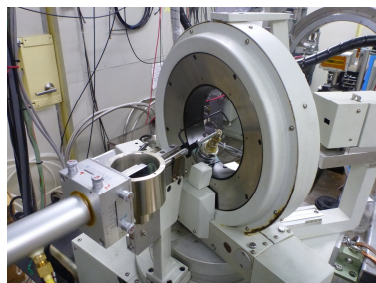


図2 BL-6C内AFC-5u型4軸回折計前方に設置された多層膜放物面ミラー。

放射光実験施設のBL-6C実験ハッチ内に、図2に示すような放物面多層膜ミラーシステム

を設置した。光軸前方(左側)に移相子があり、ミラーチャンバーはリガクAFC-5u型4軸回折計の前方に位置する。AFC-5u回折計はハッチ内の大型4軸回折計架台上に設置されており、ハッチ内前方の移相子で生成された円偏光X線がミラーチャンバーに入射される。そして、多層膜ミラーにより反射され、AFC-5uのコリメータを通過した後に、試料結晶に照射される。ミラーを含めた光軸調整は、架台の水平回転および水平移動が利用できる。

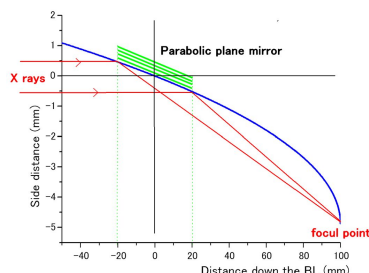


図3 多層膜放物面ミラーの幾何。

放物面ミラーによる集光システムの詳細を図3に示す。透過型移相子で円偏光X線を生成し、その移相子を通過した平行X線を後方で集光する。すなわち、放射光を擬平行光線とみなし、放物線 $h^2 = 2rz$ (縦軸:h、横軸:z、頂点の曲率半径:r)で集光する。

ミラー本体は格子面間隔が33~40ÅのW/Si多層膜製で、設計波長はFe K吸収端近傍である。大きさは40mm(L)×20mm(W)で、反射率は65%である。波長 $\lambda = 1.79$ Åでの放物線曲率は0.11838であり、ミラー中心でのブラッグ角は $\theta_B = 1.39^\circ$ となる。また、+20mm、中心、-20mm位置での格子面間隔は、それぞれ32.90Å、36.78Å、40.29Åとなっている。

ミラーの評価実験は、共鳴磁気散乱測定に利用するBL-6Cビームラインで行った。直線偏光X線を透過型(001)ダイヤモンド移相子で円偏光に変換した。Fe K吸収端の波長($\lambda = 1.74352$ Å)およびCu特性X線の波長($\lambda = 1.54058$ Å)での集光状態を評価した(図4)。

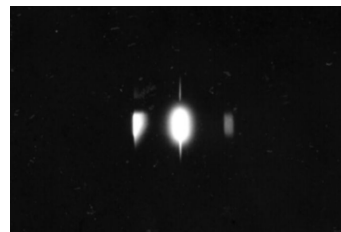


図4 多層膜放物面ミラーにより集光されたX線。 $(\lambda = 1.74352$ Å, $2\theta = 0.53^\circ)$

放物面ミラーによりビームが集光されることを確認した後、集光制御システムの最適化をはかり、4軸回折計による積分反射強度測定システムを整備した。本実験では、遷

移金属元素の吸収端で強相関電子系酸化物の多数のブラッグ反射をAFC-5uで測定した。その反射強度データから共鳴磁気散乱の寄与を分離した。

(4) 共鳴磁気散乱実験

Fe *K* や Co *K* などの遷移金属元素 *K* 吸収端で、散乱角 $2\theta \leq 161^\circ$ までの角度範囲で、ブラッグ反射強度を測定した。なお、連続強度測定に先立ち、Ho や Tb 単結晶試料で共鳴磁気散乱による磁性超格子反射を観測し、システムの有効性を確認した。

強度測定については、吸収の大きい吸収端近傍で円偏光反転を行うことを除けば、通常の精密構造解析実験と大きな違いはない。直径数十 μm 程度の球に整形した単結晶試料を希土類磁石にマウントし、磁区を揃えた上でゴニオメーターヘッドに搭載した(磁場:0.18 T)。低温実験では、窓材が無く観測領域を広く確保できる窒素吹き付け型低温装置を用いた。

AFC-5u は、小型のため4つの制御軸の交差精度が特に優れている。全軸にエンコーダが取り付けられており、平行性の高い放射光であっても、3次元反射強度データを高精度に測定できる。直線偏光を円偏光に変換しているため、水平振りの既存の4軸回折計がそのまま利用できる。このように、測定空間の全域にわたり、RXMSの高精度測定を担保した。

4. 研究成果

(1) 電子軌道と共鳴磁気散乱

一般に磁気構造を研究する場合、偏極中性子が利用される。共鳴磁気散乱の特徴は、内殻電子がスピン分極した外殻電子軌道へ遷移した後に元のエネルギー準位に戻る散乱過程を利用するため、非占有準位の電子スピン偏極情報が得られるところにある。本研究では、典型的なフェリ磁性酸化物であるマグネタイト Fe_3O_4 について、サイトを区別しながら磁性電子軌道に注目し、共鳴磁気散乱のX線強度変化を解析した。

マグネタイトのイオン分配は、AとBサイト間で、 $[\text{Fe}^{3+}]^A[\text{Fe}^{2+}]^B[\text{Fe}^{3+}]^B\text{O}_4$ という逆スピネル型である。スピネル構造では、 a_0 軸に沿って-A-B-A-B-の特別な配列があるため、 Fe^{3+} スピンは超交換相互作用をもち、AとBサイトで反平行に配置する。

Fe *K* 吸収端 XANES 領域で、円偏光を左右反転することにより、マグネタイトのRXMS強度を測定した。ブラッグ反射の指数間には、スピネル構造特有の規則性が存在する。例えば、266反射と026反射の結晶構造因子は、

$$F(266) = (13.8 f_B - 26.8 f_A) \exp(-W)$$

$$F(026) = (7.56 f_A - 0.06 f_B - 0.26 f_C) \exp(-W)$$

と簡略化できる。 f_A, f_B, f_C は、A、Bサイトと酸素イオンの原子散乱因子である。式と式より、酸素原子からの寄与を除くと、266反射ではBサイトからの寄与が、026反射ではAサイトからの寄与が大部分を占めることがわかる。これらの反射について、左右円偏光でのブラッグ反射強度差から、式に基づいた非対称度を実験的に求めた。図5に、その非対称度のエネルギー依存性を示す。前吸収端領域に着目すると、 $\Delta I/I$ プロファイルは、Aサイト寄与とBサイト寄与の反射で正負逆転しており、図5下部に示す磁気円二色性(XMCD)スペクトルとも大きく異なっている。

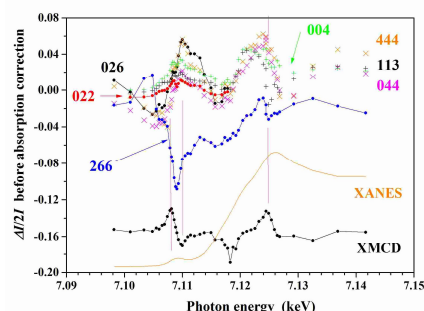


図5 7反射のRXMS非対称度(上)とXMCDとXANES(下)のエネルギー依存。

入射X線エネルギーが前吸収端XANESの中央($E = 7.109 \text{ keV}$)であるときには、XMCD分光法では磁気モーメントが相殺され、その信号はゼロに近いのがわかる。一方、共鳴磁気散乱の結晶構造解析では、Aサイト寄与の026反射やBサイト寄与の266反射が夫々、大きな正と負ピークをもって観測できる。このようにフェリ磁性結晶の共鳴磁気散乱では、ブラッグ反射強度がサイト独立に測定できるため、磁気モーメントの空間配置を求めるのに適している。

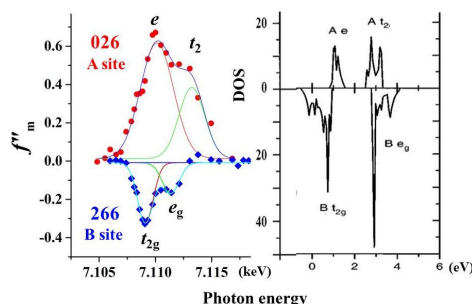


図6 マグネタイトにおける共鳴磁気散乱因子 f'_m のエネルギー依存と対応するDOSの電子軌道(左)(Anisimov *et al.* (1996)によるLSDA計算)。

結晶構造因子 $F(hkl)$ は原子散乱因子 f の関数である。式と式より、共鳴磁気散乱因子 f'_m を実験的に求めた。026反射(Aサイト寄与)と266反射(Bサイト寄与)のFe *K* 前吸収端近傍における f'_m のエネルギー依存

を図 6 (左) に示す。一般に X 線回折で用いられる原子散乱因子は、電子軌道分布をフーリエ変換したものである。共鳴磁気散乱の原子散乱因子 f'_m の符号は A と B サイトで反対である。これは磁気モーメントの反転を示唆し、 $1s-3d$ 電子軌道の電子遷移のスピンの分極に対応する。この f'_m から、up-spin で 4 配位の e と t_{2g} 軌道に、down-spin で 6 配位の t_{2g} と e_g 軌道に不對の空軌道が存在することがわかる。この実験結果は LSDA 計算(図 6 左)と一致している。

(2) 電子密度分布解析

X 線回折は電子雲の観察を得意とする。結晶構造解析により、回折強度データを逆フーリエ変換すると電子密度分布が求まる。従来は、全原子の電子をまとめた形で電子密度情報を求めていたが、本研究から、例えば $E = 7.109$ keV の X 線を選べば、そのときの電子遷移が関係する e と t_{2g} 軌道の電子の分布が求まるようになった。 $E = 7.113$ keV では、A サイトを占める Fe^{3+} の t_{2g} 軌道が観測できる。

マグネタイトの不對スピンの電子密度分布を求めるため、ここでは反射強度の左右円偏光での差をフーリエ変換した。このとき、磁性電子密度は

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{\text{spin}}(\mathbf{r}) &= \rho_{\text{obs}}(\mathbf{r})^{\text{left}} - \rho_{\text{obs}}(\mathbf{r})^{\text{right}} \\ &= V^{-1} \sum [F_{\text{obs}}(\uparrow, hkl) - F_{\text{obs}}(\downarrow, hkl)] \\ &\quad \exp\{-2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)\} \end{aligned}$$

で与えられる。式では測定値 F_{obs} の差から差フーリエ合成を行っているため、級数打ち切り誤差を小さくできる上に、左右円偏光での変化量以外の測定系統誤差を打ち消せる。

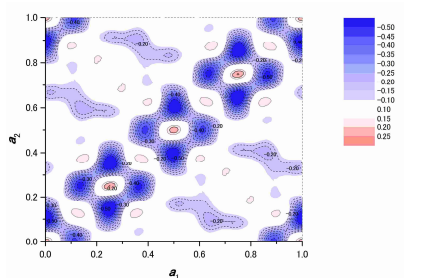


図 7 マグネタイトの磁性電子密度図 ($E = 7.109$ keV) B サイト: $(0, 0, 1/2)$, $(1/4, 1/4, 1/2)$, $(1/2, 1/2, 1/2)$, $(3/4, 3/4, 1/2)$, $(1, 1, 1/2)$ 。B サイトと酸素の間に負のピーク(青色)が出現。

マグネタイトの磁性電子密度分布を図 7 に示す。この X 線エネルギーでは e と t_{2g} 空軌道の情報が含まれる(図 6 参照)。図 7 の (002) セクションでは、左下から右上にかけて、ジグザグに B-O-B-O が配列している。B サイトの Fe と酸素原子の間に、負の磁性電子密度が観測され、 $p-d$ 混成の存在が示唆される。この方向は、 Fe^{2+} と Fe^{3+} との間で電子ホッピングが起こる方向でもあり興味深い。

以上のように、エネルギー選択的かつサイト選択的に、不對電子分布を観測する試みは

新しく、電子スピン遷移と関連づけるところに研究意義がある。分光と回折を融合させた解析技術として、優れた磁気構造解析用プローブに発展することを期待する。

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 8 件)

(1) M. Okube and S. Sasaki (2014) Site-specific electronic structures of ferrimagnetic Fe_3O_4 measured by resonant X-ray magnetic scattering, *Journal of Applied Crystallography* **47**, 1387–1394, doi:10.1107/S1600576714013302, 査読有。

(2) 佐々木 聡 (2014) 放射光と結晶構造解析 (1980年代), *日本の結晶学(II)*, 29-31, 査読有。

(3) 佐々木 聡 (2014) 放射光で測定した磁気構造, *日本の結晶学(II)*, 99-100, 査読有。

(4) 奥部真樹, 佐々木 聡 (2014) 共鳴散乱と結晶構造解析, *日本結晶学会誌* **56**, 158-165, 査読有。

(5) M. Okube and S. Sasaki (2013) Accurate determination of anomalous scattering factor near Fe K absorption edge, *Journal of Physics: Conference series* **425**, 202002-1,4, doi: 10.1088/1742-6598/425/20/202002, 査読有。

(6) M. Okube, A. Kinoshita, J. Yoshizaki, T. Toyoda and S. Sasaki (2013) Spin orientation in (Ti-Mn) Ba ferrite estimated from resonant X-ray magnetic scattering, *Journal of Physics: Conference series* **425**, 102005-1,4, doi: 10.1088/1742-6598/425/10/102005, 査読有。

(7) M. Okube, T. Yasue and S. Sasaki (2012) Residual-density mapping and site-selective determination of anomalous scattering factors to examine the origin of Fe K pre-edge peak of magnetite, *Journal of Synchrotron Radiation* **19**, 759-767, doi: 10.1107/50909049512031147, 査読有。

(8) M. Okube, S. Sasaki, A. Yoshiasa, L. Wang, T. Nakatani, H. Hongu, K. Murai, A. Nakatsuka and R. Miyawaki (2012) Local structure of Zn in Cretaceous-Tertiary boundary clay from Stevns Klint, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* **107**, 192-196, doi: 10.2465/jmps.110606, 査読有。

[学会発表](計 18 件)

(1) 奥部真樹, 佐々木 聡 (2015) X 線共鳴磁気散乱を用いた Fe_3O_4 の電子密度分布解析, 第 3 回 PF シンポジウム, つくば国際会議場(茨城県・つくば市), 2015 年 3 月 17 日, p. 39.

(2) S. Sasaki, M. Okube and S. Takayasu (2014) Magnetic electron density in Fe_3O_4 examined by

RXMS at Fe K edge, *23rd Congress and general assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2014)*, Montreal (Canada), August 9, 2014; *Acta Crystallogr. A* **70**, C1555.

(3) M. Okube and S. Sasaki (2014) Site-specific RXMS study on the magnetic electron of magnetite, *23rd Congress and general assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2014)*, Montreal (Canada), August 11, 2014; *Acta Crystallogr. A* **70**, C1368.

(4) R. Matsumura, M. Okube and S. Sasaki (2014) Substitution effect in high- T_c mercury-based cuprate superconductor, *23rd Congress and general assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2014)*, Montreal (Canada), August 11, 2014; *Acta Crystallogr. A* **70**, C1364.

(5) Y. Aoyagi, M. Okube and S. Sasaki (2014) Distribution of mixed-valence ions in $Mn_{1+x}Fe_{2-x}O_4$ ferrites, *23rd Congress and general assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2014)*, Montreal (Canada), August 11, 2014; *Acta Crystallogr. A* **70**, C1354.

(6) Y. Sasaki, M. Okube, S. Sasaki and T. Toyoda (2014) Resonant X-ray magnetic scattering study of Ti-Mn-doped Ba ferrites, *23rd Congress and general assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2014)*, Montreal (Canada), August 9, 2014; *Acta Crystallogr. A* **70**, C1465.

(7) 奥部真樹, 佐々木聡 (2014) マグネタイトの Fe K 共鳴磁気散乱と電子密度分布, *日本結晶学会, 東京大学(東京都・文京区)*, 2014年11月1日, p. 28.

(8) S. Sasaki, M. Okube and G. Fujinawa (2013) Parabolic mirror focusing for structure analyses with resonant X-ray magnetic scattering, *Asian Crystallographic Association (AsCA'13)*, Hong Kong Univ. Sci. Tech. (Hong Kong), Dec. 8, 2013, P-081.

(9) M. Okube and S. Sasaki (2013) Energy-dependent study of resonant X-ray magnetic scattering to spin-resolve the ferrimagnetic structure of Fe_3O_4 , *Asian Crystallographic Association (AsCA'13)*, Hong Kong Univ. Sci. Tech. (Hong Kong), Dec. 8, 2013, P-079.

(10) S. Takayasu, J. Yoshizaki, M. Okube, T. Toyoda, N. Igawa and S. Sasaki (2013) Site preference and magnetic structure of M-type $BaTiMnFe_{10}O_{19}$ ferrite determined by X-ray and neutron diffraction methods, *Asian Crystallographic Association (AsCA'13)*, Hong Kong Univ. Sci. Tech. (Hong Kong), Dec. 9, 2013, P-078.

(11) 奥部真樹・佐々木聡 (2013) 共鳴散乱法を用いた異常散乱因子の席選択的決定, *物構研サイエンスフェスタ・第30回PFシンポジウム, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)*, 平成25年3月14日, p. 34.

(12) 佐々木聡, 奥部真樹, 藤縄剛 (2013) X

線共鳴磁気散乱用放物面ミラー集光システムの開発(2), *日本結晶学会, 熊本大学(熊本県・熊本市)*, 2013年10月12日, p. 83.

(13) 奥部真樹, 佐々木聡 (2013) X線共鳴磁気散乱法によるマグネタイトのフェリ磁性の研究, *日本結晶学会, 熊本大学(熊本県・熊本市)*, 2013年10月12日, p. 24.

(14) 高安俊一, 吉崎隼平, 奥部真樹, 豊田丈紫, 井川直樹, 佐々木聡 (2013) 中性子とX線による $BaTiMnFe_{10}O_{19}$ の席占有率決定と磁気構造解析, *日本結晶学会, 熊本大学(熊本県・熊本市)*, 2013年10月12日, p. 48.

(15) M. Okube and S. Sasaki (2012) Accurate determination of anomalous scattering factor near Fe K absorption edge, *The 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI '11)*, Lyon (France), July 12, 2012, TH-U-P-21.

(16) J. Yoshizaki, A. Kinoshita, M. Okube, T. Toyoda and S. Sasaki (2012) Spin canting in (Ti-Mn) Ba ferrite estimated from resonant X-ray magnetic scattering, *The 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI '11)*, Lyon (France), July 11, 2012, WE-J-P-09.

(17) 佐々木聡, 奥部真樹, 藤縄剛 (2012) X線共鳴磁気散乱用放物面ミラー集光システムの開発(1), *日本結晶学会, 東北大学(宮城県・仙台市)*, 平成24年10月25日, p. 55.

(18) 奥部真樹, 佐々木聡 (2012) マグネタイト Fe_3O_4 の席選択的異常散乱因子の決定と電子分布, *日本結晶学会, 東北大学(宮城県・仙台市)*, 平成24年10月25日, p. 55.

〔図書〕(計 1件)

佐々木聡(分担), *日本の結晶学(II)*, 日本結晶学会編, 978-4-9903861-1-5, 1-485, 2014.

〔その他〕

ホームページ(佐々木研究室)
<http://lipro.msl.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 聡 (Satoshi Sasaki)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授
研究者番号: 10162364

(2) 研究分担者

奥部 真樹 (Maki Okube)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教
研究者番号: 10397060

(3) 連携研究者