

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03747

研究課題名(和文) 共鳴散乱法を応用したスピネル型鉱物の陽イオン席占有率精密解析

研究課題名(英文) Cation distribution in spinel iron oxides by resonant X-ray scattering

研究代表者

奥部 真樹 (Okube, Maki)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：10397060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,400,000円

研究成果の概要(和文)：遷移金属スピネル型酸化物の磁気特性は、陽イオン分布に強く依存する。異種イオンあるいは同種異価イオンを区別して結晶構造中の席占有率を求めるため、共鳴散乱による陽イオン分布解析を行った。MnxFe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>ではMnとFeを区別した解析、TixFe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>ではFe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Ti<sup>4+</sup>を区別して、それぞれの席占有率を求めた。また、結晶中の占有席を区別した磁気構造解析を目的として、左右円偏光を用いたX線共鳴磁気散乱による磁気モーメントの解析法についての検討も行った。

研究成果の概要(英文)：Understanding of cation distribution in spinel-type oxides is essential since their magnetic properties highly depend on the cation distribution. The site occupancies of cations in spinel oxides were analyzed using X-rays with energies near absorption edges. The resonant scattering experiments allowed us to distinguish cations that have close number of electrons or the same cations with different valence. Spinel structure has two different crystallographic sites; tetrahedral site and Octahedral sites. The site occupancies of Mn and Fe for MnxFe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> and Ti<sup>4+</sup> for TixFe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> was distinctively analyzed. X-ray resonant magnetic scattering experiments with circularly polarized X-ray were also carried out to develop site-selective magnetic moment analysis and theoretical expression for asymmetric ratio was discussed.

研究分野：X線結晶学

キーワード：X線異常分散効果 共鳴散乱 スピネル構造 陽イオン分布

### 1. 研究開始当初の背景

マグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) とウルボスピネル ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ) の固溶体はチタノマグネタイト ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ) と呼ばれる。岩石中に出現する磁性鉱物は大半がチタノマグネタイトであり、磁性鉱物では最も重要なものである。このチタノマグネタイト(端成分のマグネタイトとウルボスピネルを含む)はスピネル構造を持ち、陽イオン席は4配位のAサイトと6配位のBサイトの2種類ある。チタノマグネタイトに限らずスピネル型磁性物質では、磁化率や磁化容易軸をはじめ、その物性が陽イオン分布に強く依存することは以前からよく知られている。そのためスピネル構造を持つ物質の物性を議論するには、陽イオン分布に関する情報が非常に重要である。マグネタイトでは陽イオン分布が  $[\text{Fe}^{3+}]^A[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]^B\text{O}_4$  となり、 $\text{Fe}^{3+}$  の磁気モーメントが打消し合うためフェリ磁性である。一方ウルボスピネルでは  $[\text{Fe}^{2+}]^A[\text{Fe}^{2+}\text{Ti}^{4+}]^B\text{O}_4$  のような陽イオン分配をとり、 $\text{Fe}^{2+}$  の磁気モーメントが打消し合い反強磁性となる。中間組成 ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ) のチタノマグネタイトの陽イオン分布を知るには、同種異価イオンである  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  を区別して、AサイトとBサイトに3つの陽イオンがどのように分布するか解析することが必要である。しかし  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  は原子散乱因子の値が非常に近いため、X線を用いた構造解析による判別が容易ではなく、チタノマグネタイトの陽イオン分布に関する既往の研究の多くは、磁化率などから間接的に情報を得るものであった。

### 2. 研究の目的

本研究では、 $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  を中心に、結晶学的サイトを区別してスピネル酸化物の陽イオン分配を求める事を目的とする。吸収端近傍エネルギーのX線を用いた解析により、異種陽イオンのみならず同種異価イオンをも区別した陽イオンの分布の詳細な決定を試みる。また、磁性鉱物の磁気構造の解析を目的として、左右円偏光を用いたX線共鳴磁気散乱による磁気モーメントの解析法についての検討も行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) X線共鳴磁気散乱実験

本研究では、Feを含むスピネル酸化物試料について、Feの吸収端近傍エネルギーのX線を用いて、原子種或いはイオンの価数を区別した陽イオン分布解析を行う。波長が可変であるX線光源を用いる必要があるため、共鳴散乱実験は高エネルギー加速器研究機構の放射光実験施設 Photon Factory で行った。粉末試料を用いて XANES 測定を行い、得られたスペクトルに基づいて測定波長を決定

した。陽イオン分布の解析には単結晶試料を用いた。散乱強度測定には4軸回折計を使用した。回折計がカウンターを水平方向に動かす横振り型であるため水平偏光している放射光X線を用いると、散乱強度に偏光の影響を受ける。このため入射X線には円偏光X線を用いた。円偏光の生成にはダイヤモンド移相子を用いた。試料の組成分析にはEPMAを用いた。

#### (2) X線共鳴磁気散乱実験

共鳴磁気散乱の実験では、左右円偏光を用いて散乱強度差を測定し、その非対称度  $\Delta I/I$  を調べた。単結晶試料は外部磁場中に設置した。測定波長は XMCD スペクトルに基づいて決定した。Feの磁気モーメントが全体の磁化に寄与する割合は補償温度の前後で変化する。これを観測する為に窒素吹付型の低温装置を用いて低温域での共鳴磁気散乱強度測定も行った。

### 4. 研究成果

#### (1) チタノマグネタイトの陽イオン分布

$\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  の単結晶を得るために、両端成分を含む天然試料の収集を行った。産地の異なる7種類の試料を収集し組成分析を行ったところ、ほとんどの試料の組成は端成分の  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  に近く Ti 含有量の少ないものであった。これらのうち、チタノマグネタイト単結晶と確認できた試料について、陽イオン分布解析を行った。試料は宮城県蒲沢鉱山産で組成は  $\text{Ti}_{0.31}\text{Fe}_{2.69}\text{O}_4$  であった。選んだ単結晶試料の格子定数及び結晶構造パラメータは実験室系にて  $\lambda=0.701\text{\AA}$  の X 線を用いて決定した。強度測定には4軸回折計 (Rigaku AFC-7) を使用した。  $\text{Fe}^{2+}$ 、  $\text{Fe}^{3+}$  の同種異価イオンを区別するための共鳴散乱実験は、FeK 吸収端近傍の波長  $\lambda = 1.7441\text{\AA}$  ( $E = 7.1085\text{ keV}$ ) の X 線を用いて回折データ測定を行った。実験は Photon Factory の BL-6C にて行い、回折データの測定には BL-6C 設置の4軸回折計 (Rigaku AFC-5) を用いた。  $\text{Fe}^{2+}$ 、  $\text{Fe}^{3+}$  の原子散乱因子の異常分散項の値は、FeO 粉末、

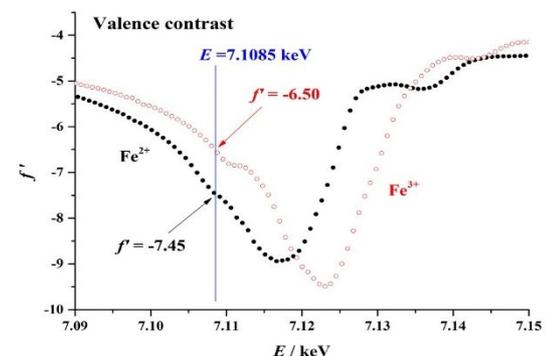


図1: XANES スペクトルより決定した  $\text{FeO}(\text{Fe}^{2+})$  と  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{Fe}^{3+})$  の異常散乱因子  $f'$

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末の XANES スペクトルより kramers-kronig の関係を用いて求めた。Kramers-Kronig 変換には DIFFKK[1]を使用した。測定波長λ = 1.7441Å における異常散乱因子 *f'* の値は Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> でそれぞれ、-7.45 と -6.50 と得られた (図 1)。4 配位 A サイトにおける Fe<sup>2+</sup> と Ti<sup>4+</sup> の占有率をパラメータとして陽イオン分布の解析を行った。解析には RADY を使用した[2]。解析より、A サイトは Fe<sup>3+</sup> が 100% 占有し (図 2)、Ti<sup>4+</sup> は B サイトのみを占有する結果が得られた。陽イオン分布は、[Fe<sub>3+1.00</sub>]<sup>A site</sup> [Fe<sub>3+0.38</sub>, Fe<sup>2+</sup><sub>1.31</sub> Ti<sub>4+0.31</sub>]<sup>B site</sup> と求められた。

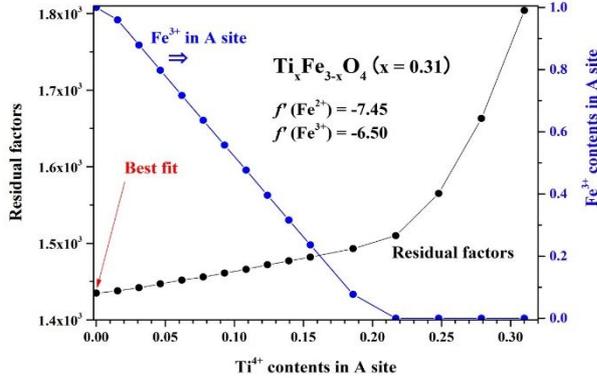


図 2: Fe<sup>3+</sup> の A サイト占有率とフィッティング結果

Fe<sub>3-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>4</sub> の中間組成の Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Ti<sup>2+</sup> の陽イオン配置に関しては、これまで大変多くの研究がなされており、大別して以下の 3 つのモデルが提唱されている。(i) Fe<sup>3+</sup> は A、B サイトに同数ずつ入る (Akimoto モデル[3])、(ii) Fe<sup>3+</sup> は選択的に A サイトに入る、(Néel and Chevallier モデル[4,5])、(iii) A サイトの陽イオン分布が、x ≤ 0.2 では Fe<sup>3+</sup> のみ、0.2 ≤ x ≤ 0.8 では Fe<sup>3+</sup><sub>1.2-x</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>x-0.2</sub>、0.8 ≤ x ≤ 1.0 では Fe<sup>3+</sup><sub>1.2-x</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>x-0.2</sub> となる (O'Reilly and Banerjee モデル[6])。本解析結果は Néel and Chevallier

モデルを支持する結果となった。解析より得られた陽イオン分布を基に磁化率を計算し [7]、既報の実験データと比較した [7,8,9] (図 3)。図 3 に記した実験データ HKS[7] と WLP[8] は Akimoto モデル又は O'Reilly and Banerjee モデルとの一致が良い。HKS[7] と WLP[8] の結晶試料は 1373K 以上の温度で生成されており、結晶が高温下で成長した場合には Akimoto モデル又は O'Reilly and Banerjee モデルの陽イオン分布をとると考えられる。また、x=0.31 のこの組成は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> 間の固溶体で溶解度ギャップがある組成に近い。Lilova *et al.* [10] で示されている固相分離線のこの組成における温度は約 530K であり、今回の宮城県蒲沢産のチタノマグネタイト結晶は比較的低温でゆっくりとした冷却速度にて生成したと考えられる。

## (2) Mn<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> (Mn フェライト) の陽イオン分布と 3d 電子状態の解析

Fe<sub>3-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>4</sub> と同様に、磁気特性を持つ遷移金属スピネル酸化物である Mn<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> について、共鳴散乱法を用いた A サイト B サイトを占有する陽イオン分布の決定と最外殻の 3d 電子に注目した電子密度分布の解析を行った。試料は固相法にて作成した、Mn<sub>1.05</sub>Fe<sub>1.95</sub>O<sub>4</sub>、Mn<sub>1.20</sub>Fe<sub>1.80</sub>O<sub>4</sub>、Mn<sub>1.36</sub>Fe<sub>1.64</sub>O<sub>4</sub>、Mn<sub>1.50</sub>Fe<sub>1.50</sub>O<sub>4</sub> の 4 つの単結晶を用いた。結晶構造パラメータは λ = 0.701Å の X 線を用いて行った。格子定数はそれぞれ a = 8.519(4)、8.498(4)、8.524(4)、8.522(3) と得られ、この組成範囲の中では組成依存性は見られなかった。次に FeK 吸収端近傍の波長 λ = 1.7535Å の X 線を用いて共鳴散乱実験を行い、A サイト B サイトそれぞれにおける Fe と Mn の占有率の解析を行った。解析の結果は X = 1.05、1.20、1.36、1.50 の順に、

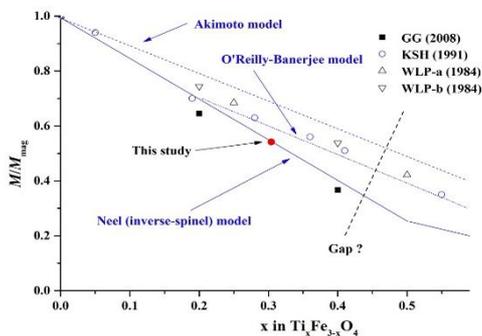
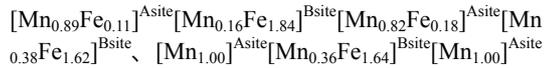


図 3: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> で規格化された磁化率と Ti<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> 中の Ti 含有量

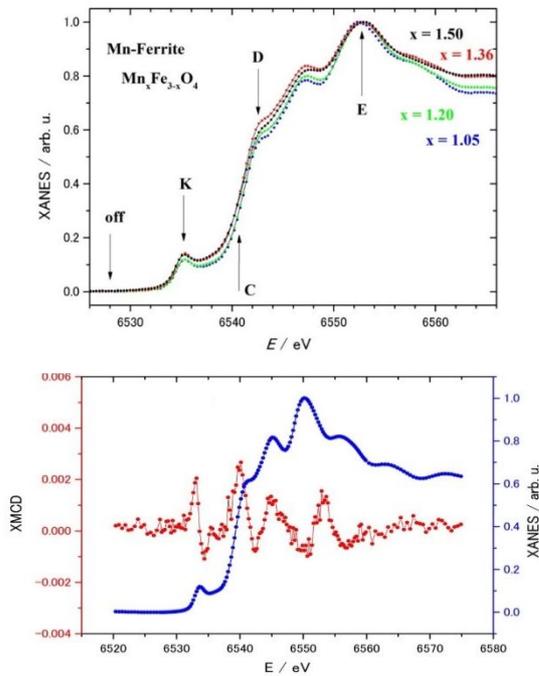


図 4: Mn K 吸収端近傍での(a)4 試料の XANES と (b)x=1.3 の XANES と XMCD

$[\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{1.50}]^{\text{Bsite}}$  と得られ、A サイトは  $x$  が 1.20 以下では Mn と Fe が占有するのに対し、 $x$  が 1.36 より大きい組成では Mn が 100% 占有することが分かった。更に Mn 最外殻の  $3d$  電子に関する情報を得るため、MnK 吸収端近傍の波長を用いた電子密度分布解析を行った。解析は  $x=1.36$  のみにターゲットを絞って行った。本試料の Mn 吸収端近傍の異常散乱因子は、(1)と同様の方法で決定した。図 4(a) に 4 つの組成の試料の XANES スペクトルを、(b)に  $x=1.36$  の XANES と XMCD の対比を示す。XMCD のピークは不対電子の応答、つまり空の軌道があることを示している。これらのピークが現れる点を K、C、D、E とし、不対電子の応答のない位置を off 点として選んだ。これらの 5 つのエネルギー値を持つ X 線を用いて共鳴散乱実験を行ったが、D、E 点では吸収の効果が大きく十分な強度が得られなかったため、D、E 点を除く K ( $\lambda=1.8978\text{\AA}$ , 6.5286keV)、C ( $\lambda=1.8944\text{\AA}$ , 6.5403keV)、off( $\lambda=1.9019\text{\AA}$ , 6.5145keV)の 3 つのデータを用いて解析を行った。拡張差フーリエ法を用いて電子密度分布解析を行った。遷移が起こる K 点から遷移が起こらない off 点の効果を引き去ることで、K 点での遷移に寄与した電子のみの密度分布を得ることができる[11]。K-off の結果を図示する(図 5)。

A サイト位置に強い負のピーク、A サイトの周り結合方向に弱い正のピークが見られた。これは内殻から遷移が起こった際、上の軌道で空気が埋まり、引き算の結果このような正負のピークが表れたと考えられる。K 点は pre-edge 上にあり、6 配位の B サイトではほ

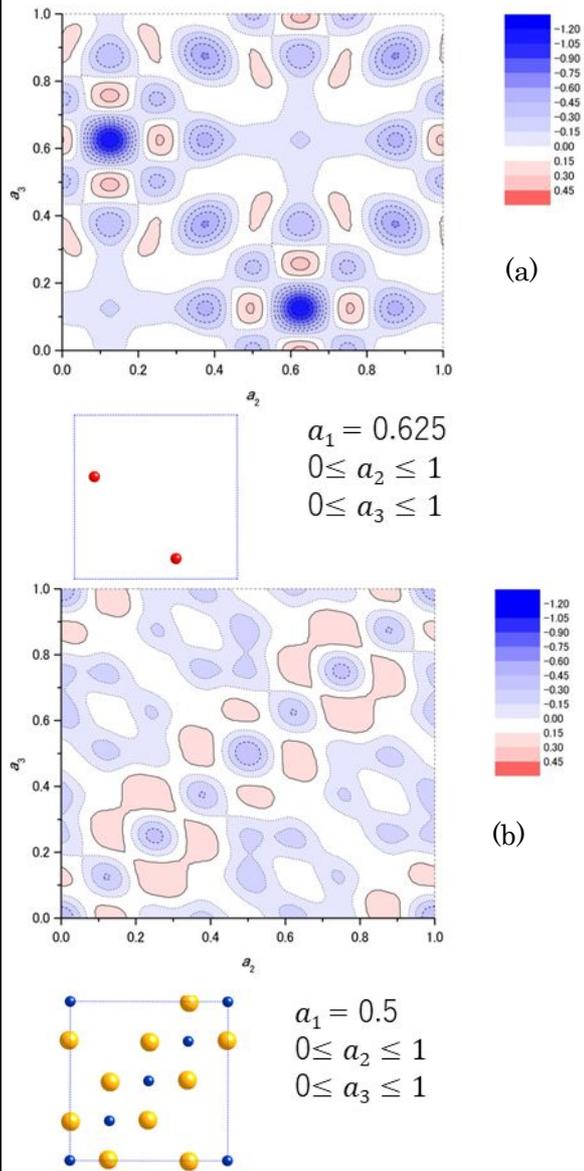


図 5: 6.5286keV での遷移に寄与した電子密度分布、(a)A サイト、(b)B サイト

とんど遷移が起こらず、正ピークがほとんど観測されなかったと考えられる。C-off では A サイト位置に負のピークが見られる以外はほぼ何も無いという結果が得られた。この結果を Zuo and Vittoria[12]による  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  の DOS の結果と照らし合わせると、K 点と C 点は A サイトの  $3d$  空軌道に対応していると言え、それぞれ A サイトの  $e$  軌道と  $t_2$  軌道である。K 点は軌道のピークが大きい値を持つエネルギー、C 点は  $t_2$  軌道の裾野のエネルギーに当たると考えられる。Zuo and Vittoria の計算による両軌道のエネルギー差は約 3eV であった。K 点と C 点の差は 6eV であり、試料組成が少し異なる点や実験の分解能を考慮すると両者は比較的良好一致を示していると言える。

(3)左右円偏光を用いた X 線共鳴磁気散乱による磁気応答の観測

チタノマグネタイトは磁気鉱物であり、その磁気特性は陽イオンの占有率に依存する。今後本研究を磁気構造解析へ発展させてゆくために、円偏光とX線共鳴磁気散乱強度の相関について検討を行った。非共鳴条件での磁気散乱断面積は電荷散乱断面積に比して $10^{-6}$ 倍と微小であり、散乱強度の観測が容易ではない。しかしX線エネルギーが吸収端近傍のエネルギーである(共鳴条件)場合には、原子内で起こる共鳴による電荷散乱と磁気散乱の干渉により、磁気関連散乱強度が増大する(X線共鳴磁気散乱)。その現象に対する理論はHannonらの2編の論文によって得られた[13,14]。これらは、入射ビームが直線偏光である場合について求められており、偏光ベクトルの定義は、入射・散乱X線共に、散乱面に平行及び垂直なベクトルを基底としている。本研究では左右円偏光を偏光ベクトルの基底として扱い、これを用いて散乱振幅の偏光依存性を入射X線の偏光状態と散乱X線の偏光状態との関係で導くことを試みた。式(1)に、直線偏光の入射光に対して磁場を反転させた共鳴磁気散乱強度の差(非対称度)を結晶構造因子の形であらわした表現[15]を、式(2)に本研究にて得られた円偏光共鳴磁気散乱の非対称度を結晶構造因子の形であらわした表現を示す。得られた式(2)を用いてX線磁気散乱強度測定を行った。測定には磁気応答の強い試料として、フェリ磁性の $Gd_3Fe_5O_{12}$ を用いた。

式(1):直線偏光を用いたX線共鳴磁気散乱での非対称度[5]

$$\frac{\Delta I}{2I} \cong 2 \tan \theta \frac{(F_0 + F') - F''F'_m - F''F''_m}{|F|_{charge}^2}$$

式(2):左右円偏光を用いたX線共鳴磁気散乱での非対称度

$$\frac{\Delta I}{2I} \cong \frac{2 \sin \chi [(F_0 + F')(\sin^3 \theta F_{0m} + \sin \theta F'_m) + \sin \theta F''F''_m]}{A_{ch} |F_0 + F' + iF''|^2}$$

$F_0$ 、 $F'$ 、 $F''$ 、 $F_{0m}$ 、 $F'_m$ 、 $F''_m$  はそれぞれ、 $f_0$ : Thomson 散乱による散乱因子、 $f'$ : 電荷散乱異常散乱因子実数部、 $f''$ : 電荷散乱異常散乱因子項虚数部、 $f_{0m}$ : 磁氣的原子散乱因子、 $f'_m$ : 磁氣的原子散乱因子虚数部、 $f''_m$ : 磁氣的原子散乱因子実数部の寄与を示す部分的結晶構造因子。 $A_{ch}$  は電荷散乱の偏光依存項。

$Gd_3Fe_5O_{12}$  は、 $1a-3d$  の空間群を持ち、2

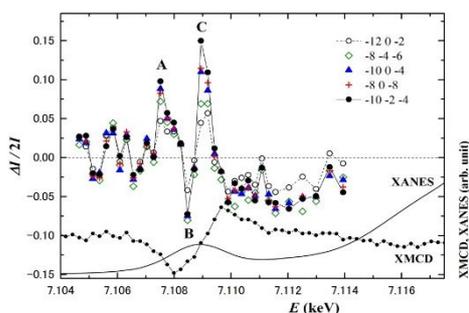


図6: FeK吸収端近傍での $Gd_3Fe_5O_{12}$ の非対称度のエネルギー依存

個の $Fe^{3+}$ が6配位の16aサイト(Fe1)、3個の $Fe^{3+}$ が4配位の24dサイト(Fe2)、3個のRイオンが8配位の24cサイト(Gd)に位置する。磁気配列を観測するため、FeK吸収端近傍にて幾つかの反射のエネルギー依存性を調べた。 $-12\ 0\ -2$ 、 $-8\ -4\ -6$ 、 $-10\ 0\ -4$ 、 $-8\ 0\ -8$ 、 $-10\ -2\ -4$ の5つの反射の強度を左右円偏光にて測定し、(2)式を用いて非対称度を用いた。 $-12\ 0\ -2$ 、 $-8\ -4\ -6$ 、 $-10\ 0\ -4$ の3反射はFe2の寄与のみ、 $-8\ 0\ -8$ 、 $-10\ -2\ -4$ の3反射ではFe1とFe2の寄与がある。

XANESのpre-edge領域に磁気応答の大きなピークが3つ得られた。プロットされた5つの反射はそれぞれFe1とFe2のウエイトが異なるが、Fe1の寄与の有無による強度の依存性は見られなかった。Fe1は電気双極子が禁制となるため、このエネルギー領域では強い散乱強度が得られない。観測された強度は主にFe2からの磁氣的寄与によると考えられ、この結果は対称性の観点の考察からも一致する。 $Gd_3Fe_5O_{12}$ は補償温度( $T_{comp} \leq 291$ )で自発磁化がゼロになり、温度が下がるにつれ急激に自発磁化が増加する。占有サイトの異なるFe1とFe2を区別して磁気配列の温度変化を見るため、吹付型の低温装置を用いて低温域での磁気応答(非対称度)の温度依存性を調べた。図6のBピークのエネルギー( $E=7.1085\text{keV}$ )において、 $10\ 4\ 0$ (Fe2の寄与のみ)と $8\ 8\ 0$ (Fe1とFe2の寄与)の2反射について、降温と昇温の2つの過程で測定を行った。300Kから293Kまでの降温過程で磁気応答の正負が反転しており、スピンの向きが観測されたと考えられる(図7)。磁気応答の大きさは288Kから208Kの間で温度依存性は見られずほぼ一定であり、 $8\ 8\ 0$ 反射でも同様の傾向がみられた。 $Gd_3Fe_5O_{12}$ のバルクの磁化率は補償温度以下に降温する過程で急激に増すが、Feの磁気モーメントの温度依存性は殆どなく一定であり、低温域における磁化率の増大はGdの磁気モーメントの増大に寄ることが示された。複数の元素が磁気を担う系において元素選択的に、且つ構造中の占有サイト選択的に磁気配列の解析が可能であるX線共鳴磁気散乱の有用性が示された。

<引用文献>

- [1] Cross et al., *Phys. Rev. B* 58, 11215 (1998).
- [2] Sasaki, *KEK Internal Report 87-2*, National

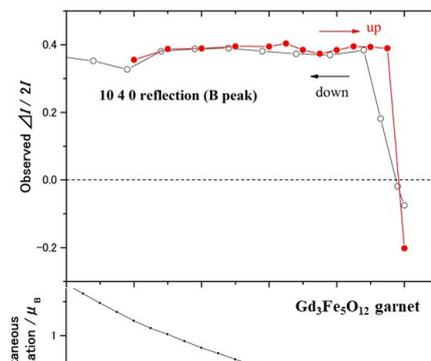


図7:  $10\ 4\ 0$ 反射の非対称度の温度依存性とバルクの磁化率の比較

Laboratory for High Energy Physics, 1-175 (1987). [3] Akimoto *et al.*, *J. Geomagn. Geoelectr.* 9, 165 (1957). [4] Neel, *Adv. Phys.* 4, 191 (1955). [5] Chevallier *et al.*, *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.* 78, 307 (1955). [6] O'Reilly and Banerjee, *Phys. Lett.* 17, 237 (1965). [7] Kakol *et al.*, *Phys. Rev. B* 43, 649-654 (1991). [8] Wechsler *et al.*, *Am. Mineral.* 69, 754 (1984). [9] Gilder and Goff, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10302 (2008). [10] Lilova *et al.* *Am. Mineral.*, 97, 1330-1338 (2012). [11] Okube *et al.* *J. Synchrotron Rad.*, 19, 759-767 (2012). [12] Zuo and Vittoria, *IEEE*, 39, 3133, (2003). [13] Hannon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 61, 1245, (1988). [14] Blume and Gibbs, *Phys. Rev. B*, 37, 1779 (1988). [15] Kobayashi *et al.*, *J. Synchrotron Rad.* 5, 972 (1998).

## 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 4件)

Y. Sasaki, M. Okube and S. Sasaki, Resonant and non-resonant magnetic scatterings with circularly polarized X-rays: magnetic scattering factor and electron density of gadolinium iron garnet, *Acta crystallographica*, 査読有, A73, 2017, 257-270

DOI: 10.1107/S2053273317003588

M. Okube, J. Yoshizaki, T. Toyoda and S. Sasaki, Cation distribution and magnetic structure of M-type BaTiMnFe10O19 examined by synchrotron X-ray and neutron studies, *Journal of Applied Crystallography*, 査読有, 49, 2016, 1433-1442

DOI: 10.1107/S1600576716010591

T. Nakatani, A. Yoshiasa, A. Nakatsuka, T. Hiratoko, T. Mashimo, M. Okube and S. Sasaki, Variable-temperature single-crystal X-ray diffraction study of tetragonal and cubic perovskite-type barium titanate phases, *Acta Crystallographica*, 査読有, B72, 2016, 151-159

DOI: 10.1107/S2052520615022544

A. Yoshiasa, T. Nakatani, A. Nakatsuka, M. Okube, K. Sugiyama and T. Mashimo, High temperature single-crystal X-ray diffraction study of tetragonal and cubic perovskite-type PbTiO<sub>3</sub> phases, *Acta Crystallographica*, 査読有, B72, 2016, 381-388

DOI: 10.1107/S2052520616005114

[学会発表](計 12件)

奥部真樹、鴛海太郎、長瀬敏郎、佐々木聡、杉山和正、異常分散法を用いた Ti<sub>0.31</sub>Fe<sub>2.69</sub>O<sub>4</sub> の陽イオンの占有席解析、2017年度量子ビームサイエンスフェスタ、水戸、2018/3/2-4

奥部真樹、鴛海太郎、長瀬敏郎、佐々木聡、杉山和正、異常分散法を用いたチタノマグネタイトの陽イオン価数分布解析、日本結晶学

会年会、広島、2017/11/23-24

奥部真樹、逢坂尚志、佐々木聡

円偏光 X 線共鳴磁気散乱(CP-RXMS)法：(2)GdIG 磁気構造の温度変化、日本結晶学会年会、広島、2017/11/23-24

鴛海太郎、奥部真樹、有馬寛、長瀬敏郎、杉山和正、X 線異常分散法による、らせん対称性を持つ鉱物のキラリティの決定、日本鉱物科学学会年会、2017/9/12-14

鴛海太郎、奥部真樹、長瀬敏郎、杉山和正、X 線異常分散効果を用いた、らせん対称性の決定、第 134 回東北大学金属材料研究所講演会 2017/11/29-30

M.Okube and S. Sasaki, Site occupancy and energy state of electrons of Mn in Mn<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>, 14<sup>th</sup> Conference of the Asian Crystallographic Association, Hanoi, Vietnam, 2016/12/4-7

K. Fuchigami, Y. Sasaki, M. Okube and S. Sasaki, Circularly polarized X-rays and appearance of resonant and non-resonant magnetic scatterings, 14<sup>th</sup> Conference of the Asian Crystallographic Association, Hanoi, Vietnam, 2016/12/4-7

S. Nishino, Y. Sasaki, M.Okube and S. Sasaki, Magnetic electron-density distributions in Y and Gd iron garnets observed by synchrotron X-ray diffraction at the Fe K pre-edge, 14<sup>th</sup> Conference of the Asian Crystallographic Association, Hanoi, Vietnam, 2016/12/4-7

T. Osaka, M.Okube and S. Sasaki, Temperature dependence of magnetic moments of Fe ions Gd<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, 14<sup>th</sup> Conference of the Asian Crystallographic Association, Hanoi, Vietnam, 2016/12/4-7

佐々木暢、奥部真樹、佐々木聡、円偏光 X 線と共鳴・非共鳴磁気散乱(1)Gd 鉄ガーネット、日本結晶学会年会、水戸、2016/11/17-18

奥部真樹、佐々木聡、Mn フェライトの陽イオン席占有率と電子密度分布、日本結晶学会年会、逢坂、2016/10/17-18

奥部真樹、佐々木聡、Mn<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> における陽イオン分布と電子状態の席選択的解析、2015 年度量子ビームサイエンスフェスタ、つくば、2016/3/15-16

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

奥部真樹 (Okube, Maki)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：10397060

### (3)連携研究者

佐々木聡 (Sasaki, Satoshi)

東京工業大学・科学技術創成研究院・名誉教授

研究者番号：10162364