原子力材料研究の最前線



高速重イオン照射誘起によるスピネル構造酸化物中 **欠陥のシンクロトロン X 線解析**

吉

岡

聰1)

安

田

和

弘2)

1. はじめに

スピネル構造を有すマグネシウムアルミネート(MgAl2 O₄)は、放射線照射に対する高い耐性を示す数多くの研究報 告がある⁽¹⁾⁽²⁾. 例えば, MgAl₂O₄は原子炉内で200 dpa 以 上の高照射量まで高速中性子を照射してもほとんど体積膨張 を示さない、この要因の一つに挙げられるのが、カチオンの 格子間原子がスピネル構造特有のカチオン空位を介して容易 に再結合することであり、結果として点欠陥濃度が増加し難 くなる.図1に示すようにスピネル構造は、面心立方構造の



図1 正スピネル構造 AB₂O₄の結晶構造.アニオン酸素(黄 色)原子が面心立方構造を形成し、カチオンAおよびB が4面体中心(青色)および6面体中心(赤色)を占め る⁽¹⁵⁾.(オンラインカラー)

酸素イオン副格子と4面体および8面体のカチオンサイト から構成されている. MgAl₂O₄は,低温域では Mgが4配 位のAサイト,Alが6配位のBサイトを占める正スピネル 構造であるが、高温域では一部の Mg と Al がサイト交換を するカチオン不規則配列を生じることが知られている. この ようなカチオン不規則挙動が先述の点欠陥濃度の上昇抑制に 寄与していると考えられる.そのため,MgAl₂O₄の耐照射 損傷性をその素過程から理解するためには不規則状態の局所 構造の詳細や不規則度の定量的な評価が不可欠である. MgAl₂O₄の不規則状態に関する構造解析の報告は数多く, 中性子回折法,X線回折法や核磁気共鳴(NMR)法による実 験⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾,および密度汎関数理論に基づく自由エネルギー評 価やモンテカルロシミュレーション等の理論計算があ る⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁴⁾.一方,材料の重要な構造解析手法の一つにX線 吸収分光(XAFS)法があり、この手法は原子の配位環境や電 子構造に関する情報を与える. XAFS 法は,特に元素選択 性に優れるため、スピネル構造酸化物のように複数のカチオ ンを含む系では詳細な構造観察を可能にする有効な手段であ る. XAFS の吸収端微細構造 (XANES) 領域では、スペクト ルから局所構造を解釈する際に、様々な標準物質のスペクト ルを参照試料として比較する手法が一般的に行われている. しかしながら、非平衡状態にある試料や化学的に不安定な試 料のスペクトル解析では、比較検討が適切に行えるような標 準試料が見つからないことや準備出来ないことが少なからず ある.本研究対象であるスピネル構造の不規則状態もまさに 適切な標準試料を得ることが難しい例の一つである. そこで 我々は、標準試料とのスペクトル照合のみに頼るのではな く, 第一原理法による XANES の理論スペクトルを計算 し、それを用いて実験スペクトルを解釈する手法から様々な 物質の局所構造の解析に取り組んでいる(15)-(17).

* 九州大学大学院工学研究院;1)助教 2)教授(〒819-0395 福岡市西区元岡744) Synchrotron X-ray Study for Defect Structure in MgAl₂O₄ Spinel Induced by Swift Heavy Ions; Satoru Yoshioka* and Kazuhiro Yasuda* (*Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka) Keywords: spinel, swift heavy ion, radiation effect, cationic disorder, xanes, first principles calculation, saxs 2023年1月20日受理[doi:10.2320/materia.62.169]

我々のグループでは、セラミックスに放射線の一種である 高速重イオンを照射したときの局所構造変化に注目した研究 を進めている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾.高速重イオンは、その高い電子 的阻止能によりターゲット材料中に高密度電子励起を誘起す る.その結果、絶縁体セラミックスでは、イオン進行方向に 沿って直径数ナノメートルの柱状の損傷領域が形成され る⁽²¹⁾⁻⁽²³⁾.これはイオントラックと呼ばれる照射欠陥であ り、これまでに透過電子顕微鏡(TEM)観察によってサイズ や分布状態が報告されている⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾.X線をプローブとし てナノメートルスケールの構造体の形状・サイズを評価する 手法に小角X線散乱(SAXS)法がある.SAXS法は、散乱 体とその周辺間での僅かな電子密度差から構造を捉えること が可能であり、TEM 法と比べて統計的に十分な数での散乱 体の構造評価が出来ることも特長である.

本稿では、高速重イオン照射により MgAl₂O₄ スピネル中 に形成される欠陥構造の形状・サイズおよびカチオンの不規 則構造に注目し、シンクロトロン X 線を用いた SAXS 法と XANES 法による構造解析について紹介する⁽¹⁶⁾.

2. 高速重イオン照射実験

イオン照射試料は、市販の MgAl₂O₄ 多結晶体(住友化学) をプレート状(10 mm×4 mm×0.5 mm)に切り出して用い た.高速重イオン照射は大型の加速器施設を必要とし、本実 験では原子力研究機構のタンデム加速器、ビームライン H1 を利用した.イオンビームは、10 mm×10 mmに成形さ れ、真空中、室温において試料板面に垂直な方向から照射し た.イオンエネルギーおよびイオン種は100 MeV Xe と し、照射量変化による構造変化を観察するために、照射量を 3×10^{11} , 5×10^{11} , 1×10^{12} , 5×10^{12} , 1×10^{13} cm⁻² とする照射 試料を作製した.100 MeV Xe イオンの MgAl₂O₄ への侵入 深さは、固体物質への原子衝突シミュレーションプログラム (SRIM コード)により10 µm 程度と評価した.

3. シンクロトロン X 線を用いた構造観察

SAXS 実験は,九州シンクロトロン光研究センター (SAGA-LS)内の BL06(九州大学ビームライン)を用いて入 射 X 線の波長を 1.5 Å,カメラ長を 2.0 m として行った.散 乱パターンは、ピクセルアレイ型2次元検出器(PILATUS-300K, DECTRIS)により収集した.

XAFS 測定は,高エネルギー加速器研究機構の Photon Factory内 BL11A で行い,Mg K-edge(1280 eV)および Al K-edge XANES(1550 eV)を蛍光法により測定した.X線 エネルギーが 2000 eV 以下の場合,MgAl₂O₄ 試料へのX線 透過率は,厚さ 10 μ m で0.001程度まで減衰する.したがっ て,試料から得られる XANES 信号は,全てイオン照射に より損傷を受けた表面層領域から選択的に得られたものであ る.

4. 実験結果

図2に100 MeV Xeを1×10¹³ cm⁻²まで照射した MgAl₂ **O**₄の2次元 SAXS 像を示す. (A)~(D)では, X 線ビーム に対する試料の傾斜角を変化させて観察している. (A)に示 すようなイオン照射方向にX線ビームが平行となる条件で は、同心円状の SAXS 像が観察される.一方、(B)~(D)の ようにX線ビームを傾斜させて測定した場合には、ストリ ークが発生し、さらにそれらは傾斜角が増大するに従い線幅 が細くなり、曲率が小さくなっている. このような X 線入 射方向に依存した SAXS 像の変化は、ナノサイズ散乱体の 形状が円柱状であり、かつ円柱の高さ/半径比が大きい場合 に顕著に現れる.これまでの SAXS 法によるイオン照射材 料の構造解析では、シリカ(SiO₂)ガラスやニオブ酸リチウム (LiNbO₃)において、本研究と同様なX線の入射角に依存し た特徴的な SAXS パターンが観察されている⁽²⁴⁾⁻⁽²⁶⁾.これ らは、高速重イオンの飛跡に沿って生成したセラミックス中 の電子密度が変化した微細な散乱体(イオントラック)に起因 するものと考察されている. このような入射 X 線方向に依 存した SAXS 像の変化は、3×10¹¹ cm⁻² から1×10¹³ cm⁻² まで全ての照射量において観察された.

各照射量の試料で、図2(a)のようなイオン照射方向にシ ンクロトロンX線ビームが平行となる観察条件で取得した 2次元 SAXS パターンの強度を円環積分したプロファイル を図3に示す、イオン照射量の増加に従い、散乱強度も増加 している、このような照射量に依存した強度変化は、イオン 照射により生成するナノサイズ散乱体の数密度が増加してい ることを示唆している、5×10¹² cm⁻² および1×10¹³ cm⁻²



図2 MgAl₂O₄に100 MeV Xeを1×10¹³ cm⁻²まで照射した試料のSAXS像.(a)入射X線をイオン照射方向が平行になるように試料を配置.(b-d)入射X線を1°,5°,15°となるように試料を傾斜して配置.各像に見られる強度を持たない横方向に走る2本線と中心スポットは、検出器のモジュールギャップと入射X線ダイレクトビームのストッパーである⁽¹⁶⁾.(オンラインカラー)



図3 MgAl₂O₄に100 MeV Xe を 3×10¹¹から1×10¹³ cm⁻² まで照射した試料の SAXS プロファイル⁽¹⁶⁾.(オンライ ンカラー)

の比較的高照射量まで照射した試料では、散乱ベクトルqの ピークが 5 nm⁻¹付近に出現し、散乱体の形状が明瞭化して いることを示唆する.このようなピークを有す散乱プロファ イルについて、円柱形状の散乱体を仮定して fitting 解析を 行った.図3 に示す fitting 曲線は実験の散乱プロファイル と良い一致を示している.fitting 解析の結果、5×10¹² cm⁻² および 1×10¹³ cm⁻² 照射の試料に形成される散乱体は、4.9 および 5.1 nm の直径を持つ円柱形状であることがわかっ た.評価したイオントラック半径は、200 MeV Xe および 340 MeV Au と本研究のイオン照射条件と異なるものの、 TEM による構造解析の報告と概ねよい一致をしてい る⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾.

図4(a)にイオン照射した MgAl₂O₄ 試料および非照射試料 の Mg K-edge XANES を示す. 右列(図4(b))は, 照射試 料のスペクトルから非照射試料のスペクトルを差し引いた差 分スペクトルである. 低照射量である 3×10¹¹ cm⁻² および 5×10¹¹ cm⁻²の試料では, XANES スペクトルは非照射試 料のスペクトルからほとんど変化していない.一方,高照射 量 1×10¹³ cm⁻²の試料では、非照射試料と比べてピーク A、 BおよびCの強度比が変化し、さらにそれらピークは高エ ネルギー方向にシフトしている. 差分スペクトル(b)では, (a)で示す XANES スペクトル変化が明瞭な変調として抽出 されている. さらに、そのスペクトル変調は低照射試料の差 分スペクトルにおいても現れており,変調強度が照射量に依 存して系統的に変化していることがわかる.特に,差分スペ クトルにおいて強度が0となる等吸収点が全ての照射試料 の同一のエネルギー位置で観察されることもスペクトル変調 が系統的に現れていることを支持している.

もう一方のカチオンである Al についての Al *K*-edge XANES スペクトルを図5に示す.イオン照射量が1×10¹² cm⁻² および5×10¹² cm⁻²の試料でピークG および Hの強 度比が変化している.さらに照射量が最も高い1×10¹³



cm⁻²の試料では、ピークGとHの間に明瞭な谷が観察されている.このような変化は(b)に示す照射試料と非照射試料間での差分スペクトルでも明瞭に観察される. Mg K-edge 同様に照射量に依存した系統的な変化であり、等吸収 点も同様に観察されている.

以上述べたように Mg および Alの両カチオンについて照 射量に依存した系統的な XANES スペクトル変化を得るこ とが出来た.しかし、これらの変化を引き起こす物理的根拠 を事前に測定した Mg および Al の酸化物標準試料(MgO や α-Al₂O₃)のみから理解することは非常に困難である.そこ で、2種の局所構造モデルを構築して、密度汎関数理論に基 づく XANES スペクトルを計算し、これを実験スペクトル と照合することによりイオン照射による構造変化の理解を試 みた.構造モデルの1つは、規則状態のスピネル構造であ り, もう一方のモデルは Mg と Al がそれぞれ 6 配位と4 配 位に配置する不規則状態である.この不規則構造は,スピネ ル構造の primitive セル(14原子)を2×2×2に拡張した112 原子のスーパーセル内で Mg と Alの1原子ずつの位置を交 換することにより導入した. その結果, 互いに交換された MgおよびAlの1原子ずつが6配位サイトおよび4配位サ イトに位置し、それ以外の Mg および Al は正規のサイトで ある6配位サイト,4配位サイトそれぞれを占有したままで



(a) MgAl204 (c) 100 MeV Xe を 1 × 10~ cm - まで無効した試料および非照射試料の Al K-edge XANES. (b) 照射試料と非照射試料の差分スペクトル⁽¹⁶⁾. (オンラインカラー)

ある.この交換された Mg と Al はスーパーセル内で最大距 離(7.8 Å)となるように配位した. このような操作を経ても スピネル構造の基本組成 MgAl₂O₄ は維持されている.不規 則状態の Mg 原子については、この配置を交換した6 配位 Mg原子のみのスペクトルを計算した. Alの場合も同様で あり、配置を交換した4配位Alのみのスペクトルを計算し た. XANES 理論スペクトルを得る前に、スーパーセル内の 原子位置の最適化を projector-augmented wave (PAW)法に より行っている⁽²⁷⁾⁻⁽²⁹⁾. その後に full-potential linearized augmented plane wave(FL-APW)法による Mg K-edge, Al *K*-edge XANES 理論スペクトルを得た⁽³⁰⁾⁽³¹⁾. 図 6(A)にス ピネル規則状態と不規則状態の Mg K-edge XANES を示 す. これらは、図中では Calc. tet および Calc. oct と示して いる.規則状態の理論スペクトルは、非照射 MgAl₂O₄の Mg K-edge スペクトルをよく再現している.一方,不規則 構造の6配位 Mg 原子のスペクトルは、1311 eV に鋭いピー クを示すなど規則状態とは大きく異なるスペクトル形状を示 す. 規則状態と不規則状態の計算スペクトルの違いを両者の 差分をとることで評価した結果を図6(b)に示す.この計算 から得られた不規則状態-規則状態の差分スペクトルの変調 は,実験で得られたイオン照射試料-非照射試料の差分スペ



 図6 (a) 規則状態(Calc. tet.)および不規則状態(Calc. oct.) での Mg K-edge XANES 計算スペクトル. (b) 規則状 態および不規則状態の計算 XANES の差分スペクトル と実験での差分スペクトルの比較.実験でのスペクト ルは,100 MeV Xe を1×10¹³ cm⁻² まで照射した試料 と非照射試料間での差分を用いた⁽¹⁶⁾.(オンラインカラ -)



 図7 (a) 規則状態(Calc. oct.)および不規則状態(Calc. tet.) での Al K-edge XANES 計算スペクトル. (b) 規則状 態および不規則状態の計算 XANES の差分スペクトル と実験での差分スペクトルの比較.実験でのスペクト ルは,100 MeV Xe を1×10¹³ cm⁻² まで照射した試料 と非照射試料間での差分を用いた⁽¹⁶⁾.(オンラインカラ ー)

クトルのピーク a~e の変調とよく一致する. Al K-edge ス ペクトルでも同様の計算および実験との比較を行った結果を 図7に示す.カチオン規則状態の Al のスペクトルは非照射 試料 MgAl₂O₄のスペクトルとよい一致をする.さらに,実 験でのイオン照射試料-非照射試料間の差分スペクトルは, 計算での差分スペクトルとよい一致をする.計算での差分ス ペクトルでは 1554 eV に鋭いピークが出現しているが,こ れは不規則状態 Al と規則状態 Al のスペクトルの立ち上が

特 集

りが僅かに低エネルギー側にシフトしていることに起因して いる.実験スペクトルにおいて,このピークは照射量1× 10¹³ cm⁻² 試料のスペクトルでは残念ながら観察されないも のの,照射量5×10¹² cm⁻² の試料のスペクトルには観察さ れている(図5).よって計算での差分スペクトルに見られる 全ての微細構造が実験スペクトルに帰属できる.このような Mg *K*-edge および Al *K*-edge の計算結果は,実験での照射 量に依存した系統的なスペクトル変化がカチオンの不規則化 を起源としていることを示している.

本研究では、さらに XANES を用いて高速重イオン照射 の照射量に依存した不規則度を定量的に評価することを試み た.カチオン不規則状態にあるスピネル構造から得られる XANES は、4 配位サイトおよび 6 配位サイトからの信号で 構成されると考えられる.すなわち不規則状態を $[Mg_{1-x}$ $Al_x](Mg_xAl_{2-x})で表す.ここで、丸括弧内は4 配位サイ$ ト、角括弧内は6 配位サイトの組成である.スピネル構造 $試料において、Mg および Al の XANES 強度である <math>I^{Mg}(E)$ および I^{AI}(E)は、不規則度 x を用いた線型結合で以下のよう な式で表される.

Mg:
$$I^{Mg}(E) = (1-x)I^{Mg}_{tet}(E) + xI^{Mg}_{oct}(E)$$
 (1)

Al:
$$I^{Al}(E) = x I^{Al}_{tet}(E) + (2-x) I^{Al}_{oct}(E)$$
 (2)

ここで I_{tet} および I_{oct} は4配位サイトおよび6配位サイトからの単位モル当たりの XANES 強度である. イオン照射試料の不規則度をx, 非照射試料の不規則度を $x = a_0$ とすると両者の XANES 差分スペクトルは以下のように表される.

$$\operatorname{Mg:} \Delta \mathrm{I}^{\operatorname{Mg}}(E) = (x - a_0) \left(-\mathrm{I}^{\operatorname{Mg}}_{\operatorname{tet}}(E) + \mathrm{I}^{\operatorname{Mg}}_{\operatorname{oct}}(E) \right)$$
(3)

Al: $\Delta I^{Al}(E) = -(x-a_0)(-I^{Al}_{tet}(E) + I^{Al}_{oct}(E))$ (4) ここで, $-I^{Mg}_{tet}(E) + I^{Mg}_{oct}(E)$ および $-I^{Al}_{tet}(E) + I^{Al}_{oct}(E)$ は, 図 6 および図7に示した理論スペクトルからそれぞれ見積もる ことが出来る. $x-a_0$ の値は, 式(3)および(4)から照射に よって進行した不規則度と規定される. これらの式は, 以下 のように変形できる.

Mg:
$$x - a_0 = \frac{|\Delta I^{Mg}(E)|}{| - I^{Mg}_{tet}(E) + I^{Mg}_{oct}(E)|}$$
 (5)

Al:
$$\mathbf{x} - \mathbf{a}_0 = \frac{|\Delta \mathbf{I}^{\text{Al}}(E)|}{|-\mathbf{I}^{\text{Al}}_{\text{tet}}(E) + \mathbf{I}^{\text{Al}}_{\text{oct}}(E)|}$$
 (6)

Mg および Al それぞれの $x - a_0(=x_p)$ については, Mg では 1293-1333 eV 間, Al では 1545-1585 eV 間の強度の平均値 を算出し用いた.本研究で用いた MgAl₂O₄ 試料は,高温で の固相焼結法により合成しているため,その段階で相当量の 不規則化が発生している.そのため本研究での x_p は非照射 試料を基準とする不規則度となる.これにより通常用いられ ている不規則度 x と比べて, x_p は過小評価されている.図8 には,イオン照射量に対する x_p の進行度を示す.Mg Kedge および Al K-edge どちらの結果からもイオン照射量の 増加に応じて x_p 値が増加している.これまでの TEM 法に よる観察実験では,比較的照射量が高い範囲の5×10¹² cm⁻² および 1×10¹³ cm⁻² 試料において,イオントラックの 数密度が飽和することが報告されている.これは,先発のイ オンによって形成されたイオンの飛跡が後発のイオンの照射



図 8 100 MeV Xe イオン照射による非照射試料からの不規則 度の進行⁽¹⁶⁾.(オンラインカラー)

によって回復していることを示唆する結果と考えられてい る.本研究のXAFS解析では、この照射量範囲でも不規則 度 xn の明瞭な増加が見られ,不規則化が蓄積,進行してい ることが示唆された. さらに,最も照射量が高い1×10¹³ cm⁻²では, Mg K-edge から算出される結果が Al K-edge から算出される結果に比べて大きくなっている. このことは, Mgが4配位サイトから6配位サイトに移動する傾向に比べ て、Alが6配位サイトから4配位サイトへ移動する傾向が 小さいことを示している. すなわち, カチオンの占有サイト に偏りが生じていることを示唆する結果と考えられる. この ような Mg および Al 間でサイト交換の均衡が崩れること は、欠陥構造の形成を示唆する.これまでの MgAl₂O₄ への 高速重イオン照射に関する報告では

、照射量が高い場合に、 欠陥岩塩型(Fd-3m)構造が生成することが TEM 観察によ り報告されている.スピネル構造から欠陥岩塩型構造への相 変化は,カチオンの4配位から6配位への優先的な移動に 起因する. 分子動力学シミュレーションにおいても Frenkel 型の欠陥を導入する場合に、カチオンは構造空孔を伴って再 結合し,6配位サイトを占有する傾向が報告されてい る⁽³²⁾⁽³³⁾.本研究でのXAFSによる構造解析見られた不均 衡なカチオンサイト交換は、この岩塩型構造への変化の前駆 的段階にあると考えられる.

5. 結 論

高い照射耐性を有する MgAl₂O₄ に 100 MeV Xe イオンを 照射した際の欠陥構造とカチオン不規則化過程を SAXS 法 および XANES 法によって調べた. SAXS 法では欠陥構造 がイオン進行方向に円柱型構造を形成していることを明らか にした. イオン照射量の増加に伴って, SAXS 散乱強度も 増加し, 円柱構造の半径についてはこれまでの TEM 観察か らの結果とよい一致をした. Mg *K*-edge および Al *K*-edge でのスペクトル変化もイオン照射量の増加に伴って, 大きく なった. DFT 計算からの理論 XANES を用いたスペクトル 解析により、実験でのスペクトル変化は、カチオンの4配 位,6配位間での不規則化であることが明らかになった. XANES の実験と計算を組み合わせることで非照射試料から の不規則化の進行度を算出した.照射量が最も高い試料では, Mg および Al が6配位サイトへ偏在し、欠陥岩塩型構造の 前段階にあることが示唆された.

本研究は, 松村晶 九州大学名誉教授, 石川法人 日本原子 力研究開発機構研究主幹,大場洋次郎 同機構研究副主幹, 小林英一 九州シンクロトロン光研究センター主任研究員, 奥平幸司 千葉大学准教授の協力を受けて行われました. こ こに深く感謝の意を表します.

文 献

- (1) C. Kinoshita, K. Fukumoto, K. Fukuda, F. A. Garner and G. W. Hollenberg: J. Nucl. Mater., 219 (1995), 143-151.
- (2) F. W. Clinard Jr., G. F. Hurley and L. W. Hobbs: J. Nucl. Mater., 108–109 (1982), 655–670.
- (3) R. C. Peterson, G. A. Lager and R. L. Hitterman: Am. Mineral., 76(1991), 1455-1458.
- S. A. T. Redfern and R. J. Harrison: Am. Mineral., 84(1999), (4)299 - 300.
- (5) G. B. Andreozzi, F. Princivalle, H. Skogby and A. D. Giusta: Am. Mineral., 85(2000), 1164-1171.
- (6) T. Yamanaka and Y. Takeuchi: Z. Kristallogr. Cryst. Mater., 165(1983), 65-78.
- (7) B. J. Wood, R. J. Kirkpatrick and B. Montez: Am. Mineral., 71 (1986), 999-1006.
- (8) R. L. Millard, R. C. Peterson and B. K. Hunter: Am. Mineral., 77(1992), 44-52,
- (9) H. Maekawa, S. Kato, K. Kawamura and T. Yokokawa: Am. Mineral., 82(1997), 1125-1132.
- (10) D. R. Neuville, D. D. Ligny, L. Cormier, G. S. Henderson, J. Roux, A. Flank and P. Lagarde: Geochim. Cosmochim. Acta., 73(2009), 3410-3422.
- (11) M. C. Warren, M. T. Dove and S. A. T. Redfern: J. Phys. Condens. Matter, 12(2000), L43-L48.
- (12) M. C. Warren, M. T. Dove and S. A. T. Redfern: Miner. Mag., **64**(2000), 311-317.
- (13) S. D. Rocha and P. Thibaudeau: J. Phys. Condens. Matter, 15 (2003), 7103-7115.
- (14) A. Seko, K. Yuge, F. Oba, A. Kuwabara, I. Tanaka and T. Yamamoto: Phys. Rev. B., 73 (2006), 094116.
- (15) S. Yoshioka, K. Tsuruta, T. Yamamoto, K. Yasuda, S. Matsumura, N. Ishikawa and E. Kobayashi: Phys. Chem. Chem. Phys., 20 (2018), 4962-4969.
- (16) S. Yoshioka, K. Tsuruta, T. Yamamoto, K. Yasuda, S. Matsumura, T. Sugiyama, Y. Oba, N. Ishikawa, E. Kobayashi and K. Okudaira: J. Am. Ceram. Soc., 103 (2020), 4654-4663.
- (17) S. Yoshioka, K. Yasuda, S. Matsumura, T. Sugiyama and E. Kobayashi: J. Phys. Chem. C, 125 (2021), 5269-5277

- (18) T. Yamamoto, M. Shimada, K. Yasuda, S. Matsumura, Y. Chimi and N. Ishikawa: Nucl. Instrum. Meth. B, 245(2006), 235 - 238.
- (19) K. Yasuda, T. Yamamoto, M. Shimada, S. Matsumura, Y. Chimi and N. Ishikawa: Nucl. Instrum. Meth. B, 250(2006), 238 - 244.
- (20) K. Yasuda, T. Yamamoto, M. Etoh, S. Kawasoe, S. Matsumura and N. Ishikawa: Int. J. Mater. Res., 102(2011), 1082 - 1088
- (21) M. Toulemonde, W. Assmann, C. Dufour, A. Meftah, F. Studer and C. Trautmann: Mat. Fys. Medd., 52(2006), 263-292
- (22) C. A. Yablinskya, R. Devanathan, J. Pakarinen, J. Gan, D. Severin and C. Trautmann: J. Mater. Res., 30(2015), 1473-1484
- (23) M. Lang, R. Devanathan, M. Toulemonde and C. Trautmann: Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., 19(2014), 39-48.
- (24) P. Kluth, C. S. Schnohr, D. J. Sprouster, A. P. Byrne, D. J. Cookson and M. C. Ridgway: Nucl. Instr. Meth B, 266 (2008), 2994-2997.
- (25) B. Afra, M. D. Rodriguez, C. Trautmann, O. H. Pakarinen, F. Dhurabekova, K. Nordlund, T. Bierschenk, R. Giulian, M. C. Ridgway, G. Rizza, N. Kirby, M. Toulemonde and P. Kluth: J. Phys. Condens Matter, 25 (2013), 045006.
- (26) S. Park, M. Lang, C. L. Tracy, J. Zhang, F. Zhang, C. Trautmann, P. Kluth, M. D. Rodriguez and R. C. Ewing: Nucl. Instr. Meth. B, 326(2014), 145-149.
- (27) P. E. Blöchl: Phys. Rev. B, 50(1994), 17953.
- (28) G. Kresse and J. Furthmüller: Phys. Rev. B, 54(1996), 11169.
- (29) G. Kresse and D. Joubert: Phys. Rev. B, 59(1999), 1758.
- (30) P. Blaha, K. Schwarz, F. Tran F, R. Laskowski, G. K. H. Madsen and L. D. Marks: J. Chem. Phys., 152(2020), 074101.
- (31) E. Sjöstedt, L. Nordstörm and D. J. Singh: Solid State Commun., 114(2000), 15-20.
- T. Yamamoto, A. Chartier, K. Yasuda, C. Meis, K. Shiiyama (32)and S. Matsumura: Nucl. Instrum. Meth. B, 266 (2006), 2676-2682.
- (33) A. Chartier, T. Yamamoto, K. Yasuda, C. Meis and S. Matsumura: J. Nucl. Mat., 378(2008), 188-192.

***** 吉岡 聰

- 京都大学大学院工学研究科博士課程修了 博士(工学) 2007年3月 2007年4月 現職
- フランス CEA Saclay 研究所 客員研究員 2019年9月
- 専門分野:セラミックス構造解析、高速重イオンビーム照射
- ◎シンクロトロン光を用いた構造解析に従事.特に,X線吸収分光による局 所構造の解析を中心に活動
- *****

