電荷軌道整列状態のマンガン酸化物が示す変調構造

早稲田大学大学院理工学研究科, 物質・材料研究機構 長井拓郎

早稲田大学理工学部 山崎淳司

物質・材料研究機構 松井良夫

Takuro NAGAI, Atsushi YAMAZAKI and Yoshio MATSUI: Modulated Crystal Structure of Charge-Orbital Ordered Manganites

The crystallographic superstructures were investigated for charge-orbital ordered manganites, $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ ($x = 2/3, 3/4$), by low-temperature high-resolution electron microscopy. Transverse and sinusoidal structural modulations were successfully observed in the images at 80 K. The observation implies that a new kind of "Wigner-crystal" model accompanied with a charge-density wave of e_g electrons best explains the charge-orbital ordered state.

1. はじめに

金属-絶縁体転移、高温超伝導、巨大磁気抵抗効果 (CMR 効果) などの遷移金属酸化物におけるさまざまな興味深い現象は、電荷・スピン・軌道などの電子自由度の秩序状態が複雑に絡み合って実現化することが最近明らかになってきた。¹⁾ K_2NiF_4 型層状構造をもつ銅酸化物高温超伝導体では電荷とスピンのストライプ秩序が発見され、高温超伝導の発現機構との関連から大きな関心を呼んでいる。²⁾ また、巨大磁気抵抗効果を示すことで知られるマンガン酸化物では電荷と軌道のストライプ秩序 (電荷軌道整列) が見出され、精力的に研究がなされてきている。³⁾⁻¹³⁾ マンガン酸化物では電子-格子相互作用が強く、この e_g 電子の電荷軌道整列に伴って格子の強い変形がもたらされ結晶学的超構造が形成されることが知られている。 $(\text{Mn}^{3+}\text{O}_6)$ 八面体がヤーン-テラー効果によって e_g 軌道の方向に伸張される。) このため、逆にこの超構造を解明することで e_g 電子の電荷と軌道の実空間における配列パターンを明らかにすることができる。しかし最近、ペロブスカイト型 (113 型) 擬立方構造 (図1a) をもつ $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 2/3$) における配列パターンモデルとして、 Mn^{3+}O_6 八面体のストライプが等間隔に並んだ「Wigner-crystal」モデル⁶⁾ と2つのそのストライプが対をなした「bi-stripe」モデル⁹⁾ というまったく相反するモデルが提案され大きな注目を集めている (図2)。「Wigner-crystal」モデルでは原子変位はストライプと垂直な方向に対して横波^{11),12)}、「bi-stripe」モデルではストライプと垂直な方向に対して縦波⁹⁾ であるが、この系では原子変位の大きさが小さく原子位置の変調を実空間で直接観察することに成功した例は報告されていない。一方、我々の研究グループは K_2NiF_4 型 (214 型) 層状

図1 結晶構造の模式図 (a) ペロブスカイト型擬立方構造 (組成: $R_{1-x}A_x\text{MnO}_3$) (b) K_2NiF_4 型層状構造 (組成: $R_{1-x}A_{1+x}\text{MnO}_4$). (Schematic diagrams of (a) perovskite-type, pseudo-cubic structure with composition of $R_{1-x}A_x\text{MnO}_3$ and (b) K_2NiF_4 -type layered structure with composition of $R_{1-x}A_{1+x}\text{MnO}_4$.) R は3価の希土類イオン, A は2価のアルカリ土類金属イオンを表す。空間群はそれぞれ (a) $Pbnm$ (No.62) (b) $I4/mmm$ (No.139) である。

構造 (図1b) をもつマンガン酸化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ ($x = 2/3, 3/4$) において電荷軌道整列に伴う結晶学的超構造が低温で形成されることを見いだした。¹⁴⁾ 我々はこの超構造が横波変調構造であることを極低温高分解能電子顕微鏡による直接観察で明らかにし、これによりマンガン酸化物の電荷軌道整列に関する新たな知見が得られたので紹介する。¹⁵⁾

図2 $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 2/3$) で提案されている電荷軌道整列モデル (a) 「Wigner-crystal」モデル (b) 「bi-stripe」モデル. (Charge-orbital ordering models proposed for $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 2/3$), (a) "Wigner-crystal" model and (b) "bi-stripe" model.)
ともに $3x^2-r^2$ 軌道をもつ Mn^{3+} ストライプと $3y^2-r^2$ 軌道をもつ Mn^{4+} ストライプが交互に配列している ($3x^2-r^2/3y^2-r^2$ 型軌道秩序) が, 「Wigner-crystal」モデルではストライプが等間隔に配列し, 「bi-stripe」モデルでは対をなしている. (この図ではヤーン-テラー効果による原子変位を省略してある.)

2. 実験方法について

$\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_4$ ($x = 2/3, 3/4$) 結晶の合成には赤外線集光加熱炉によるフローティング・ゾーン法を用いた. 高分解能電子顕微鏡観察には液体窒素冷却ホルダーを備えた電界放出型透過型電子顕微鏡 Hitachi HF-3000S (加速電圧 300 kV) を用いた. 電顕観察用の試料は粉碎法によって作製し, カーボンマイクログリッド上に分散させた. 動力学的回折理論に基づく, 電子回折パターンおよび高分解能像のコンピュータシミュレーションには MacTempas プログラムを用いた.

3. $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_4$ 系の電荷軌道整列相転移

層状マンガン酸化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_4$ ($x = 2/3, 3/4$) における電荷軌道整列に伴う超構造の形成は極低温電子回折測定での超格子反射の出現により示された. 図3に [001] 晶帯軸入射で得られた電子回折パターン (図3a 300 K, $x = 2/3$, 図3b 80 K, $x = 2/3$, 図3c 80 K, $x = 3/4$) を示す. $x = 2/3$ および $x = 3/4$ の両組成とも 300 K では K_2NiF_4 型構造 (正方晶 $I4/mmm$) で指数付けされる基本反射のみが観測された. ($x = 3/4$ の組成について 300 K で得られた電子回折パターンは図3aと同様である.) その格子定数は $x = 2/3$ では $a = 0.3832$ nm, $c = 1.2368$ nm, $x = 3/4$ では $a = 0.3821$ nm, $c = 1.2380$ nm である. このように 300 K では両組成ともに超構造の形成は見られないが, 低温の 80 K では基本反射の周りに明瞭な超格子反射 (衛星反

図3 [001] 晶帯軸入射で得られた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_4$ 結晶の電子回折パターン (a) 300 K, $x = 2/3$ (b) 80 K, $x = 2/3$ (c) 80 K, $x = 3/4$.¹⁵⁾ ([001] zone-axis electron diffraction patterns of $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_4$ crystals (a) at 300 K, $x = 2/3$, (b) at 80 K, $x = 2/3$, and (c) at 80 K, $x = 3/4$.)

低温の 80 K では明瞭な超格子反射の出現が確認できる.

射) が現れ超構造の形成が確認できる. その超構造の変調波数ベクトルは $x = 2/3$ では $q = [1/6, \pm 1/6, 0]$, $x = 3/4$ では $q = [1/8, \pm 1/8, 0]$ で記述される. 試料の温度を室温から下げていくと, 両組成とも 270 K 付近で弱い衛星反射が現れはじめ, その反射強度は温度低下とともに徐々に強くなる. この弱い衛星反射が現れ始める 270 K では MnO_2 面に対して平行な方向の電気抵抗率 (ρ_{ab}) の急激な上昇¹⁴⁾ と低温に向けての磁化の上昇の抑制が観測され, この付近の温度で電荷軌道整列相転移が存在すると考えられる. ほかのマンガン酸化物と同様にこの系においても電荷軌道整列に伴って超構造が形成されることが確認された.

4. 変調構造と電荷軌道整列状態

この系における超構造の基本的な特徴は以下の通りである. 80 K における [001] 入射格子像の観察により, $x = 2/3$ および $x = 3/4$ の両組成において [110] または $[1\bar{1}0]$ 方向に伝播ベクトルをもつ一次元超格子構造のドメインが双晶を形成していることが明らかになった.¹⁵⁾ 図3b, c における電子回折パターンで [110] 方向の超格子反射と $[1\bar{1}0]$ 方向の超格子反射は結晶の異なる領域から生じており, 結晶の変調は二次元的ではなく一次的であることが明らかにされた. また, 図3b, c の電子回折パターンで注目すべき点として, 観測された超格子反射の中でも $x = 2/3$ では $(h, h, 0) \pm m(1/6, 1/6, 0)$, $x = 3/4$ では $(h, h, 0) \pm m$

図4 80 Kにおいて[001]入射で得られた高分解能電子顕微鏡像 (a) – (a') $x = 2/3$, (b) – (b') $x = 3/4$.¹⁵⁾ (HREM images taken along the [001] direction for (a) – (a') $x = 2/3$ and (b) – (b') $x = 3/4$.) (a') および (b') は (a) および (b) を対角方向に引き伸ばした像であり, 正弦波的な横波の原子変位に沿って白い破線を描き加えてある.

(1/8, 1/8, 0) に位置する超格子反射は電子線入射方向を[001] 晶帯軸から大きくずらすと消失することが確認された. これは, これらの超格子反射が電子線の多重回折によって励起されたものであることを示している. このように, この位置に運動学的回折波が観測されないことは超格子反射を生じさせている原子変位が横波であることを暗示している.

この超構造を明らかにするために, 80 Kにおける高分解能電子顕微鏡観察を行った. 図4に80 Kにおいて[001] 入射で得られた高分解能像 (a – a' $x = 2/3$, b – b' $x = 3/4$) を示す. 図4a' および b' は各々原子変位を強調して示すために図4a および b を対角方向に引き伸ばした像である. (電荷軌道整列転移温度 (~270 K) より高い300 Kでは K_2NiF_4 型構造の基本構造のみが観察されている.) 転移温度以下の80 Kでは, $x = 2/3$ および $x = 3/4$ の両組成とも, [110] 方向にコントラストがなだらかに変化する超格子干渉縞が観察され, 超構造の変調波数ベクトルに対応してその周期は $x = 2/3$ では $6d_{110}$, $x = 3/4$ では $8d_{110}$ となっている. そしてさらに同じ周期をもつ正弦波的な横波の原子変位が確認できる. 観察された正弦波的な変調は対応する電子回折パターン (図3b, c) において高次の超格子反射の強度が極めて弱い特徴とよく一致している.

以上の観察結果に基づき, 横波正弦波の原子変位をもつ超構造モデルを構築した (図5). 横波の原子変位の大きさは $\Delta y = b_{\max} \sin(2\pi x_s)$ (ここで $b_{\max}$ は変位の最大値, x_s は超構造単位胞における変調方向(a_s)に沿った分数座標)

図5 $Nd_{1-x}Sr_xMnO_4$ 超構造モデル (a) $x = 2/3$ (b) $x = 3/4$.¹⁵⁾ ($Nd_{1-x}Sr_xMnO_4$ superstructure models for (a) $x = 2/3$ and (b) $x = 3/4$.)

横波の原子変位の大きさを誇張して描いてある. $c_s/2 (= c/2)$ の間隔で MnO_2 面が積層しているが, その積層ベクトルはともに $S = b_s/2$ と表される.

で記述される. $x_s = 0$ に位置をする原子はMn原子であり, これらの超構造の空間群は $x = 2/3$ の場合 $Acam$ (No.64), $x = 3/4$ の場合 $Amam$ (No.63) である. この超構造モデルを用いて, 動力学的回折理論に基づく電子回折パターンのシミュレーションを行った. この結果, $b_{\max}$ がおよそ0.03以下で, 電子線入射方向の晶帯軸からのずれがわずかにある場合には, 実験で観測されたすべての回折パターンと定性的に一致することが確認された. 電子線入射方向の晶帯軸からのずれがわずかにあると仮定した場合, [001] 入射の回折パターンにおいて $x = 2/3$ では $(h, h, 0) \pm m$ (1/6, 1/6, 0), $x = 3/4$ では $(h, h, 0) \pm m$ (1/8, 1/8, 0) の位置に超格子反射が現れる. ずれがまったくないと仮定するとこの位置に超格子反射は現れない. 実際の実験では前述のようにこの位置に多重回折によって励起された超格子反射が観測されたことから, 制限視野絞りで選択される領域 (直径1 μm) よりも微小な領域で結晶の方位が少しずつずれており, このために電子線入射方向が[001] 晶帯軸からわずかにずれたものと考えられる. この電子回折パターンのシミュレーション結果をふまえて, 高分解能像のシミュレーションを行った. $x = 2/3$ で $b_{\max} = 0.025$, $x = 3/4$ で $b_{\max} = 0.03$ とし, 電子線の[001] 晶帯軸からのずれを $h = k = 30 mrad$, デフ

表 1 高分解能像のシミュレーションに用いた $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ ($x = 2/3, 3/4$) 超構造モデルの構造パラメーター. (Structural parameters of $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ superstructure models for $x = 2/3$ and $3/4$, as used for HREM image simulations.)

O_p は MnO_2 面内の, O_a は面外の酸素のサイトを表す. 原子変位の最大値は $x = 2/3$ で $b_{\max} = 0.025$, $x = 3/4$ で $b_{\max} = 0.03$ であり, とともに面内の Mn-O ボンド長比 (ヤーン-テラー歪み) の最大値は 1.05 である.

組成	$x = 2/3$			$x = 3/4$		
空間群	$Acam$ (No.64)			$Amam$ (No.63)		
格子定数 (nm)	$a : 1.625, b : 0.542, c : 1.237$			$a : 2.161, b : 0.540, c : 1.238$		
原子座標	Mn1	4a	[0,0,0]	Mn1	4a	[0,0,0]
	Mn2	8f	$[x,y,0] : x=0.6667, y=0.9783$	Mn2	4c	$[1/4,y,0] : y=0.03$
	Nd/Sr1	8d	$[0,0,z] : z=0.35$	Mn3	8f	$[x,y,0] : x=0.625, y=0.4788$
	Nd/Sr2	16g	$[x,y,z] : x=0.6667, y=0.9783, z=0.35$	Nd/Sr1	8e	$[0,0,z] : z=0.35$
	O_p1	8f	$[x,y,0] : x=0.583, y=0.7375$	Nd/Sr2	16h	$[x,y,z] : x=0.625, y=0.4788, z=0.35$
	O_p2	8f	$[x,y,0] : x=0.75, y=0.725$	Nd/Sr3	8g	$[1/4,y,z] : y=0.03, z=0.35$
	O_p3	8f	$[x,y,0] : x=0.583, y=0.2375$	O_p1	8f	$[x,y,0] : x=0.5625, y=0.2385$
	O_a4	8d	$[0,0,z] : z=0.15$	O_p2	8f	$[x,y,0] : x=0.5625, y=0.7385$
	O_a5	16g	$[x,y,z] : x=0.6667, y=0.9783, z=0.65$	O_p3	8f	$[x,y,0] : x=0.6875, y=0.2223$
				O_p4	8f	$[x,y,0] : x=0.6875, y=0.7223$
				O_a5	8e	$[0,0,z] : z=0.15$
				O_a6	16h	$[x,y,z] : x=0.625, y=0.4788, z=0.15$
				O_a7	8g	$[1/4,y,z] : y=0.03, z=0.15$

フォーカス $\Delta f = -560$ nm とした. 用いた超構造モデルの構造パラメーターを表 1 に, $[001]$ 入射で得られた高分解能像のシミュレーション結果を図 6 に示す. 図 6a-I, b-I のように試料が薄い場合 ($t = 2$ nm) では, それぞれ $6d_{110}$ ($x = 2/3$), $8d_{110}$ ($x = 3/4$) の周期をもつ正弦波的な横波の構造の変調が確認できる. 図 6a-II, b-II のように試料が厚い場合 ($t = 10$ nm) では, さらに加えて, 構造の変調と同じ周期でなだらかに変化する超格子干渉縞が現れることが確認され, 観察結果と一致することが明らかになった. また, シミュレーションではデフォーカス量を変化させていくと, 超格子干渉縞が結晶の変調方向にスライドしていく現象がみられたが, これは実際の実験においても観察されている.

図 5 を見てわかるようにこの超構造モデルでは $x_s = 0$ および $x_s = 1/2$ に位置する MnO_6 八面体が最も大きく歪んでいるが, その歪みの伸張方向は各々 $[100]$ または $[010]$ 方向と逆になっている. この超構造モデルが示す電荷と軌道の配列パターンは前述の $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 2/3$) で提案されている「Wigner-crystal」モデル (図 2a) に相当する. つまり, ヤーン-テラー効果によって歪んだ Mn^{3+}O_6 のストライプが e_g 電子間のクーロン反発力を最小化するためにできるだけ離れて等間隔に配置するという構造である. (図 5 の超構造モデルでは Mn^{3+}O_6 のストライプは b_s 方向に伸びている) さらにこの $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ 超構造モデルはヤーン-テラー歪みが $x_s = 0$ および $x_s = 1/2$ の位置の MnO_6 八面体にのみ存在するのではなく, x_s が 0 または $1/2$ から離れるにつれてその歪みの大きさが小さくなるという特徴をもつ. これは $x_s = 0$ および $x_s = 1/2$ の位置

図 6 高分解能電子顕微鏡像のシミュレーション結果 (a) $x = 2/3$ (b) $x = 3/4$.¹⁵⁾ (Simulated HREM images for (a) $x = 2/3$ and (b) $x = 3/4$.)

I は試料の厚さ $t = 2$ nm, II は $t = 10$ nm とした場合である. すべて, 電子線の $[001]$ 晶帯軸からのずれを $h = k = 30$ mrad, デフォーカスを $\Delta f = -560$ nm としたシミュレーションを行った.

のみに e_g 電子が局在しているのではなく, Mn の価数の変調 (e_g 電子の電荷密度波) または $x_s = 0$ および $x_s = 1/2$ の位置を中心とした e_g 電子の揺らぎが存在することを示している.

このように電荷軌道整列状態における横波変調構造を直接観察することができた要因として, 測定温度 (80 K) における原子の変位がほかの $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ などと比較して大きいことが考えられる. この $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ ($x = 2/3, 3/4$) は転移温度が 270 K と高く, 80 K では変調周期が

$6d_{110}$, $8d_{110}$ と長周期であるのに明瞭な強い超格子反射を与える。原子変位の増大とともに超格子反射の強度が増加することが電子回折のシミュレーションによって確かめられている。また、正方晶 $I4/mmm$ という基本構造の対称性の高さも、同じくその要因であると思われる。斜方晶 $Pnma$ の対称性をもつ $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ 系では MnO_6 八面体が回転や傾きをもつために電荷軌道整列状態で形成される変調構造の観察がさらに難しくなっていると考えられる。¹²⁾

本研究の観察に基づいて得られた超構造モデルは電荷軌道整列状態のマンガン酸化物において e_g 電子の揺らぎの存在を示すモデルである。現在までに放射光 X 線回折、中性子回折実験に基づいて報告された「Wigner-crystal」モデル^{5), 11)} では横波の原子変位を矩形波で近似していたため、 e_g 電子の揺らぎを示すヤーン-テラー歪みの変調が示されていなかった。最近、ほかのマンガン酸化物でも角度分解光電子分光測定から e_g 電子の電荷密度波の存在が示されており、¹⁶⁾ このような e_g 電子の揺らぎはマンガン酸化物の電荷軌道整列状態で広くみられるものであると予想される。

5. 終わりに

本稿では正方晶 K_2NiF_4 型構造をもつ $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_{1+x}\text{MnO}_4$ 系についてのみ紹介したが、 MnO_6 八面体が回転し斜方晶に歪んだ 214 型構造をもつ $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_{1+x}\text{MnO}_4$ 系についても電荷軌道整列に伴う同様な変調構造が観察されている。機会があれば改めて紹介したい。

本稿で紹介した研究は、東京大学の木村剛氏、十倉好紀氏、物質・材料研究機構の木本浩司氏、浅香透氏との共同研究の成果である。各氏並びに電顕観察について技術的支援をして頂いた物質・材料研究機構の鶴田忠正氏に深く感謝いたします。

また、本研究は文部科学省「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」のサポートによりなされたことを付記する。

文 献

- 1) M. Imada, A. Fujimori and Y. Tokura: *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
- 2) J. M. Tranquada, B. J. Sternlieb, J. D. Axe, Y. Nakamura and S. Uchida: *Nature* **375**, 561 (1995).
- 3) Y. Moritomo, Y. Tomioka, A. Asamitsu, Y. Tokura and Y. Matsui: *Phys. Rev. B* **51**, 3297 (1995).
- 4) C. H. Chen and S-W. Cheong: *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4042 (1996).
- 5) P. G. Radaelli, D. E. Cox, M. Marezio and S-W. Cheong: *Phys. Rev. B* **55**, 3015 (1997).
- 6) C. H. Chen, S-W. Cheong and H. Y. Hwang: *J. Appl. Phys.* **81**, 4326 (1997).
- 7) Y. Murakami, H. Kawada, H. Kawata, M. Tanaka, T. Arima, Y. Moritomo and Y. Tokura: *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1932 (1998).
- 8) J. Q. Li, Y. Matsui, T. Kimura, and Y. Tokura: *Phys. Rev. B* **57**, R3205 (1998).
- 9) S. Mori, C. H. Chen and S.-W. Cheong: *Nature* **392**, 473 (1998).
- 10) M. T. Fernandez-Diaz, J. L. Martinez, J. M. Alonso and E. Herrero: *Phys. Rev. B* **59**, 1277 (1999).
- 11) P. G. Radaelli, D. E. Cox, L. Capogna, S.-W. Cheong and M. Marezio: *Phys. Rev. B* **59**, 14440 (1999).
- 12) R. Wang, J. Gui, Y. Zhu and A. R. Moodenbaugh: *Phys. Rev. B* **61**, 11946 (2000).
- 13) T. Asaka, S. Yamada, S. Tsutsumi, C. Tsuruta, K. Kimoto, T. Arima and Y. Matsui: *Phys. Rev. Lett.* **88**, 097201 (2002).
- 14) T. Kimura, K. Hatsuda, Y. Ueno, R. Kajimoto, H. Mochizuki, H. Yoshizawa, T. Nagai, Y. Matsui, A. Yamazaki and Y. Tokura: *Phys. Rev. B* **65**, 020407 (R) (2002).
- 15) T. Nagai, T. Kimura, A. Yamazaki, T. Asaka, K. Kimoto, Y. Tokura and Y. Matsui: *Phys. Rev. B* **65**, 060405 (R) (2002).
- 16) Y. -D. Chuang, A. D. Gromko, D. S. Dessau, T. Kimura and Y. Tokura: *Science* **292**, 1509 (2001).

プロフィール

長井拓郎 Takuro NAGAI
早稲田大学大学院理工学研究科、物質・材料研究機構物質研究所
Graduate School of Science and Engineering, Waseda University
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1
3-4-1 Ohkubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan
e-mail: NAGAI.Takuro@nims.go.jp
現在、博士後期課程在学中
専門分野：高分解能電顕法、結晶化学
現在の研究テーマ：遷移金属酸化物における電荷ストライプ秩序の解析

山崎淳司 Atsushi YAMAZAKI
早稲田大学理工学部
Science and Engineering, Waseda University
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1
3-4-1 Ohkubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan
e-mail: ya81349@waseda.jp
最終学歴：早稲田大学大学院理工学研究科（資源工学）博士後期課程
専門分野：応用鉱物学、無機結晶化学
現在の研究テーマ：無機酸化物結晶のイオン分配制御による鉱物化学的物性変化機構の解明、未利用資源および廃棄物の高機能性素材への転換による高度利用

松井良夫 Yoshio MATSUI
物質・材料研究機構 物質研究所
Advanced Materials Laboratory, National Institute for Materials Science
〒305-0044 つくば市並木 1-1
1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan
e-mail: MATSUI.Yoshio@nims.go.jp
最終学歴：東京大学理学部化学科
専門分野：電子顕微鏡、無機構造化学
現在の研究テーマ：電子顕微鏡による構造解析手法の高度化と応用