

令和 4 年 5 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02794

研究課題名（和文）フラックス法による新規金属亜酸化物・亜窒化物の探索

研究課題名（英文）Explore new suboxide and subnitride by the flux method

研究代表者

山根 久典 (Yamane, Hisanori)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：20191364

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

研究成果の概要（和文）：低融点金属のSnやNaをフラックスに用いて新規亜酸化物Ti₆Sn_{500.9}と新規亜窒化物Sr₇N₂Sn₃を単結晶の形態で得た。これらの単結晶についてX線回折法により結晶構造を解析し、Ti₆Sn_{500.9}では、O原子がTiの4面体内のサイトに位置し、金属的な電気伝導を示すことを明らかにした。Sr₇N₂Sn₃はCa₂Nb₀₇の逆構造に関連した層状逆ペロブスカイト型構造を有する初めての亜窒化物で、4つのSn原子がジグザグに配列した[Sn₄]ポリアニオンの層を介して、[Sn₂N₄Sr₁₄]の逆ペロブスカイト4重層が積層している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、低融点金属をフラックスとして用いることにより、これまでに報告のない結晶構造を有する亜酸化物や亜窒化物が合成され、その過程で新規の酸化物も見出された。それらの結晶構造の特徴や電気的性質が明らかにされた。これらの研究成果は、無機固体化学、結晶構造化学、無機材料科学の学術的発展に貢献するものであり、新規化合物の情報は貴重な文化遺産となる。

研究成果の概要（英文）：New suboxide Ti₆Sn_{500.9} and subnitride Sr₇N₂Sn₃ were synthesized in single crystal forms using low temperature metal fluxes of Sn and Na, respectively. The crystal structures were determined by single crystal X-ray diffraction. O atoms are situated at the center of the Ti tetrahedra in the structure of Ti₆Sn_{500.9}. Metallic electrical conduction of Ti₆Sn_{500.9} was demonstrated. Sr₇N₂Sn₃ is the first subnitride with a structure related to the antistructure of Ca₂Nb₀₇-type layered perovskite structure. Polyanions of [Sn₄] which consists of four Sn atoms with a zigzag arrangement are intervened between the four layers of anti-perovskite unit [Sn₂N₄Sr₁₄].

研究分野：無機固体化学

キーワード：新物質探査 亜酸化物 亜窒化物 フラックス法 X線結晶構造解析 導電率 化学結合

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

無機化合物の中でも金属酸化物は材料として広く利用され、様々な金属元素との組み合わせで多種多様な酸化物が合成され、それらの結晶化学的な研究が進んでいる。大気中で焼成されるほとんどの酸化物では、酸素が 50 at% 以上の割合を占める。本研究代表者は、先の基盤研究(B)「金属フラックスを利用した新規遷移金属酸ビスマス化物の合成」の研究において、Ti と Bi を含む系で通常の酸化物よりも酸素含有量の少ない新規化合物(亜酸化物)の存在と結晶構造を明らかにした。これらの合成では、結晶構造解析に必要な単結晶を得るために低融点金属の Bi がフラックスとして使用された。Bi やこれと同様な低融点金属のフラックスを用いることで、さらに新たな亜酸化物の合成が期待された。また、研究代表者は、以前に Na フラックス法を用いて新規窒化物を合成したことから、酸化物と亜酸化物との関係の類推で亜窒化物についても興味を持たれた。さらに、先の研究では物質探査の過程で Ti-Ba-Ga-O 系において新しい金属酸化物も発見され、これらの結晶化学的な特徴についても関心がもたれた。

2. 研究の目的

本研究では、フラックス法により亜酸化物や亜窒化物を合成し、それらの結晶構造や固体化学的特徴および物質固有の性質を明らかにして、新たな物質領域を開拓することを目的とする。合成される亜酸化物や亜窒化物、および研究の過程で合成される関連の新規物質に関し、新素材・新材料としての可能性を探り、固体化学や物質・材料科学の学術的進展に貢献する。研究の過程で見いだされる様々な新規物質についても、結晶構造解析や特性評価を進め、結晶化学的な特徴を理解し、材料応用の可能性を検討する。

3. 研究の方法

出発原料として純度 99% 以上の Ti や Sn、Sr、Na などの金属や TiO、TiO₂、SnO₂ などの酸化物粉末を用いた。これらの原料を Ar 雰囲気グローブボックス中で所定量秤量した。酸化物粉末原料はメノウ乳鉢で混合し、一軸加圧により円盤状に成型した。金属原料や混合粉末の成型体を Ti や Al₂O₃、BN 製のポートやルツボに投入した。これらをステンレス鋼容器内に Ar ガスとともに封入した。大気中で安定な原料については、成型体を Pt 板上に置き、ふた付きアルミナルツボに入れた。電気炉を用いて所定の条件で容器やルツボを加熱した。

波長分散型 X 線分光器を備えた電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いて、合成された試料の化学組成を分析した。粉末 X 線回折(XRD)装置を用いて、室温における粉末 XRD パターンを測定した。単結晶構造解析で示された結晶構造モデルを用いて粉末 XRD パターンのリートベルト解析を行った。

合成された化合物が大気中の水蒸気や酸素と反応する場合はグローブボックス内で単結晶をガラスキャピラリー内に封入したものを、大気中で安定な場合は単結晶をガラスファイバーの先端にエポキシ樹脂で固定したものをゴニオヘッドにセットし、Mo K α 線源と CMOS 二次元 X 線検出器を備えた単結晶 X 線回折計を用いて XRD データを測定した。直接法により結晶構造モデルを導出し、構造因子の二乗に基づくフルマトリックス最小二乗法により原子座標と変位のパラメータを精密化した。直流四端子法や複素インピーダンス法による多結晶試料の電気抵抗率や温度差法によるゼーベック係数、積分球型を備えた蛍光分光光度計を用いた反射率などの測定を行った。

4. 研究成果

(1) 新規亜酸化物 Ti₆Sn₅O_{0.9}

低融点金属の Sn をフラックスとして、TiO₂ 粉末を含む Sn に富む Ti-Sn-O 融液を 1273 K から 1073 K まで徐冷して得た試料には、20 ~ 60 μm の大きさで黒色の金属光沢を有する Ti₆Sn₅O_{0.9} の粒状単結晶が含まれていた。EPMA 分析で、この単結晶から Ti、Sn、O が検出された。定量分析値は Ti : 33.8 (5)、Sn : 64.3 (16)、O : 2.4 (2) mass% で、Ti : Sn : O のモル比は 6 : 4.6 (1) : 1.3 (1) となり、Ti₆Sn₅O_{0.9} の組成に近い原子比が示された。

Ti₆Sn₅O_{0.9} 単結晶からの XRD 反射は、直方晶系 $a = 5.72790(10)$ \AA 、 $b = 9.1379(2)$ \AA 、 $c = 16.9275(3)$ \AA で指数づけされた。

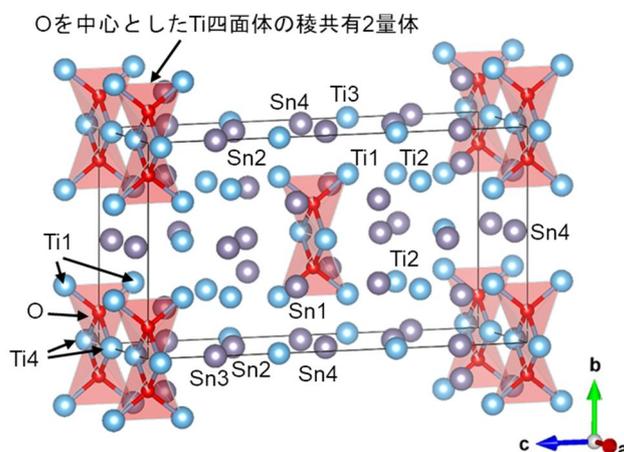


図1 Ti₆Sn₅O_{0.9} の結晶構造

測定された XRD 強度データを直方晶系、空間群 $Immm$ の構造モデルで解析した結果、解析の信頼度因子 $R1$ は 1.10% で、Ti1 サイト(8l)の 2 つと Ti4 サイト(4e)の 2 つの計 4 つの Ti 原子に囲まれた 4g サイトに O 原子が占有率 0.880(14) に入る結晶構造が示された(図 1)。Ti1 と Ti4 の四面体は、Ti4-Ti4 の稜を共有して 2 量体を形成している(図 1)。このような結晶構造の報告例は他に報告がなく、 $Ti_6Sn_5O_{0.9}$ が初めての例である。

$Ti_6Sn_5O_{0.9}$ 多結晶体の 465 K での電気抵抗率()は 1.6 m Ω cm で、温度低下と共に電気抵抗率は単調に減少し、15 K の は 0.7 m Ω cm で、金属的な温度依存性が見られた(図 2)。この $Ti_6Sn_5O_{0.9}$ 多結晶体の電気抵抗率は、金属間化合物 Ti_6Sn_5 の多結晶体や Ti_2Sn_3 、 β 金属スズで報告された電気抵抗率に比べると 1~2 桁以上高かった。試料の 298 K の Seebeck 係数は +1.3 μ V K⁻¹、370 K では +1.7 μ V K⁻¹ の小さな正の値であった。これらの値は、 Ti_2Sn_3 で報告された 295 K のゼーベック係数 +0.8 μ V K⁻¹ と同程度であった。

O サイトの占有率が 1.0 の秩序構造モデルを用いて密度汎関数法に基づく第一原理計算により電子状態が算出された。0.1 程度の酸素欠損が導入されても状態密度に大きな変化がないとすると、Fermi 準位近傍では有限の状態密度が存在し、電気抵抗率と Seebeck 係数の測定で観測された金属的な特性に対応した電子構造が示された。

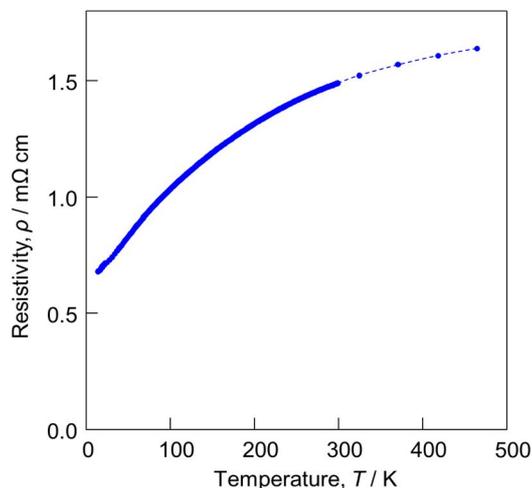


図 2 $Ti_6Sn_5O_{0.9}$ の多結晶体試料で測定された電気抵抗率の温度依存性

(2) 新規層状逆ペロブスカイト型亜窒化物 $Sr_7N_2Sn_3$

ペロブスカイト型構造(ABC₃)やこの構造のブロックを構成要素とする様々な結晶構造を有する多種多様な酸化物が合成され、それらの特性や材料応用に向けた数多くの研究が展開されている。近年、陽イオンと陰イオンの配列が入れ替わった逆ペロブスカイト型構造の化合物も盛んに研究されるようになり、それらの様々な特性が研究されている。八面体 6 配位の B サイト内に N を含む逆ペロブスカイト型構造の 3 元系化合物(亜窒化物)に関しても報告は多岐にわたり、ICSD データベース(2021)に収録されている数は 118 におよぶ。

ペロブスカイト型関連構造である層状ペロブスカイト型構造としては、Dion-Jacobson 相や Ruddsden-Popper 相、Aurivillius 相の構造があり、[100]_p 方向のペロブスカイト層間に、陽イオンや陽イオンの酸化物層が介在して様々な 2 次元層構造が形成される。 Ca_2NbO_7 相は、[110]_p 方向にペロブスカイト・ブロック層が積層した層状構造を有する。酸化物と比べると、層状逆ペロブスカイト型関連構造の化合物の報告例は非常に少なく、亜窒化物では(PrCa₃N)Bi₂ と $Sr_{11}Ge_4N_6$ の 2 例だけであった。本研究では、Sr-N-Sn 系で [110]_p 方向の積層構造を有し、ポリアニオンが層間に入る層状逆ペロブスカイト型構造の新規物質 $Sr_7N_2Sn_3$ を見いだした。

Sn、Sr、NaN₃、Na をそれぞれモル比 0.5 : 1.0 : 0.6 : 2.0 (試料 I)と 0.5 : 2.0 : 0.6 : 2.0 (試料 II)を秤量し、BN 坩堝に入れた後、ステンレス鋼容器に封入した。この容器を電気炉内で 1073 K まで 4 h で加熱し、この温度を 2 h 保持した後、573 K まで 96 h かけて冷却し、その後、炉内で自然冷却した。グローブボックス内で容器を開封して坩堝を取り出し、減圧容器内に収め 573 K で 12 h 加熱することにより、試料からフラックスの Na を蒸発させて除去した。

試料 I には、黒色板状で厚さ 20~50 μ m、一辺が最大で 500 μ m の新規化合物 $Sr_7N_2Sn_3$ の単結晶が含まれていた。EPMA による板状結晶の組成分析値は、Sr、Sn、N、O が 58.1、36.7、2.6、1.9 mass% で、Na は 0.01 mass% 以下であった。酸素は EPMA 装置内に試料を入れる際の短時間の大気暴露に起因すると考えられた。Sr と Sn の金属モル比はほぼ 7 : 3 で、構造解析で決定された板状単結晶の組成 $Sr_7N_2Sn_3$ と一致した。 $Sr_7N_2Sn_3$ の回折線は直方晶系の格子定数 $a = 10.4082(2)$ Å、 $b = 18.0737(4)$ Å、 $c = 7.43390(10)$ Å で指数付けされ、結晶構造は空間群 $Pmna$ で解析された($R1$ 値 1.8%)。試料 I には、この板状単結晶の他に、60 μ m 程度の SrSn の粒状単結晶が含まれていた。

試料 II の主な生成物は、70 μ m 程度の逆ペロブスカイト型構造の亜窒化物 Sr_3N_xSn の単結晶であった。この単結晶の格子定数は立方晶系 $a = 5.24180(10)$ Å で、 $Sr_3N_{0.74}Sn$ の粉末試料で報告された格子定数 とほぼ一致した。

逆ペロブスカイト型構造の Sr_3N_xSn では、N サイトの欠損の存在が報告されている。 $Sr_7N_2Sn_3$ の Sr 八面体内に位置する N1 と N2 の 2 つのサイトの占有率について精密化した値は、それぞれ 1.034(10)と 0.991(11)であったことから、最終の解析では N1 と N2 の占有率を 1 に固定した。 Sr_3N_xSn についても N サイトの占有率を解析した結果、 $x = 0.767(17)$ の値が得られ、粉末試料で報告された $Sr_3N_{0.74}Sn$ の窒素量とほぼ一致した。

新規物質 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ の結晶構造では、図 3(a,b) 示すように N を中心とした Sr の八面体と Sn で構成される $[110]_p$ 方向に積層した 4 重の逆ペロブスカイト層が、Sn 原子 4 個がジグザグ配列したポリアニオン $[\text{Sn}_4]$: Sn—Sn—Sn—Sn を挟んで、 b 軸方向に積層している。この積層配列を $\text{Ca}_2[\text{Ca}_2\text{Nb}_4\text{O}_{14}]$ で表される 4 重ペロブスカイト層の $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ の構造(図 3(c,d)) と比較すると、 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ は $[\text{Sn}_4]$ $[\text{Sn}_2\text{N}_4\text{Sr}_{14}]$ で表される逆構造になる。 $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 相の 4 重層 $[\text{Ca}_2\text{Nb}_4\text{O}_{14}]$ は c 軸方向に $1/4$ ずれて積み重なるのに対し、 $[\text{Sn}_2\text{N}_4\text{Sr}_{14}]$ は $[\text{Sn}_4]$ ポリアニオンを介して真上に積層している点が異なっている。

$\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ のペロブスカイト層 $[\text{Sn}_2\text{N}_4\text{Sr}_{14}]$ 中の Sn を -4 と仮定すると、層間に存在するポリアニオンは $[\text{Sn}_4]^{8-}$ となり、 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ は $\{(\text{Sr}_{14})^{28+}(\text{N}_4)^{12-}(\text{Sn}_2)^{8-}\}[\text{Sn}_4]^{8-}$ と表される。8-N 則”より $[\text{Sn}_4]$ の Sn—Sn 結合がすべて σ 結合と仮定すると $[\text{Sn}_4]^{10-}$ の形式電荷となり、 $[\text{Sn}_4]^{8-}$ より電子が足りない分だけ結合次数の増加(π 結合性)が期待される。しかし、Zintl 化合物 SrSn の $1^\infty[\text{Sn}]$ ジグザグ鎖の Sn—Sn 単結合(σ 結合)距離 $2.9420(4)$ Å は、 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ の $[\text{Sn}_4]$ の Sn—Sn 距離 ($3.0932(5)$ と $3.1118(6)$ Å、平均 3.1025 Å) よりも短い。このため原子間距離の単純な比較では、 $[\text{Sn}_4]$ ポリアニオンの多重結合の有無を判断できない。試料 II で合成された逆ペロブスカイト相の $\text{Sr}_3\text{N}_0.77\text{Sn}$ における Sn 形式電荷は -3.69 で、仮に $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ のペロブスカイト層内の Sn の形式価数を -3 とすると、 $\{(\text{Sn}_2)^6(\text{N}_4)^{12-}(\text{Sr}_{14})^{28+}\}[\text{Sn}_4]^{10-}$ と表すこともできる。このように、伝統的な形式価数と電荷配分による説明では種々の可能性が考えられた。

研究協力者のドイツ・アーヘン工科大学の Steinberg 教授の電子状態計算によると、 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ のフェルミレベル付近は、主に Sn の $5p$ と N の $2p$ 軌道により構成され、Sr は酸化され価電子を供給していることが示された。フェルミレベルは擬ギャップより下に位置し、 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ は金属伝導を示す。Sn—Sn の結合に比べ Sr—N や Sr—Sn の結合は極性が大きい共有結合性の寄与もある程度存在し、形式的な Zintl-Klemm 則での $[\text{Sn}_4]$ ポリアニオンの結合に関する説明の限界が示された。

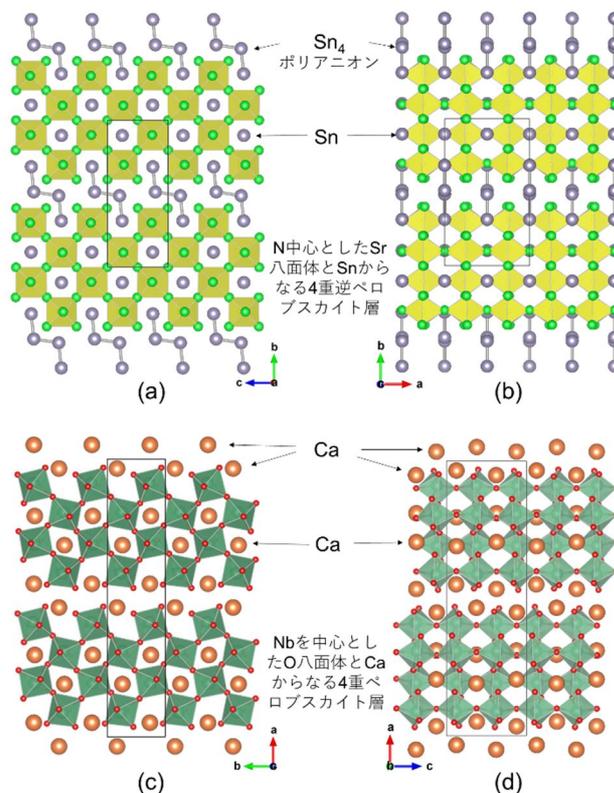


図 3 $\text{Sr}_7\text{N}_2\text{Sn}_3$ (a, b) と $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ (c, d) の結晶構造

(3) パイロクロア型酸化物固溶体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2-d}\text{Ti}_2\text{O}_{7-3d/2}$

パイロクロア型酸化物 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ は 670°C 以上では熱力学的に不安定で $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ と $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ の 2 相に分解するが、Bi や Ti の一部を他の元素で置換することで構造が安定化され、様々な元素置換固溶体について導電性や酸化物イオン伝導性、誘電性、触媒性能に関する研究がなされている。Ti と Bi を含む系で通常の酸化物よりも酸素含有量の少ない未知の亜酸化物を探索する過程で、 TiO_2 – Ga_2O_3 – Bi_2O_3 の 3 成分系の新規化合物 $\text{BiGaTi}_3\text{O}_{11}$ が生成することを先の基盤研究で明らかにした。本研究では、さらに $\text{Bi}_{2-d}\text{Ti}_2\text{O}_{7-3d/2}$ の Bi の一部を Ga が置換した欠陥パイロクロア型構造の新規固溶体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2-d}\text{Ti}_2\text{O}_{7-3d/2}$ が見いだされた。

出発原料の TiO_2 、 Ga_2O_3 、および Bi_2O_3 の酸化物粉末を所定量秤量し、メノウ乳鉢で混合後、一軸加圧でペレットを作製した。原料ペレットを Pt 板上で 1250°C 、 0.5 h 加熱後、 900°C まで 24 h かけて冷却し、 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2-d}\text{Ti}_2\text{O}_{7-3d/2}$ ($x = 0.08$ 、 $d = 0.36$) の単結晶を作製した。 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2-d}\text{Ti}_2\text{O}_{7-3d/2}$ ($(x, d) = (0.04, 0.19) \sim (0.18, 0)$) の多結晶焼結体試料は、原料ペレットを Pt 板上に置き、大気中 1100°C で 12 h 加熱して作製した。

本研究で合成された $(\text{Bi}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2-d}\text{Ti}_2\text{O}_{7-3d/2}$ の粉末 XRD パターンは、通常のパイロクロア型構造の立方晶系の空間群 $Fd\bar{3}m$ では禁制反射の 240 がブロードなピークとして認められた。単結晶からの XRD 反射ピークは立方晶系、格子定数 $a = 10.3363(2)$ Å で指数付けされ、240 回折線は単結晶 XRD でも観察された。このことは、空間群が $Fd\bar{3}m$ から反転対象操作を除いた空間群 $F4_132$ であることを示している。粉末 XRD パターンの 311、331、531 ピークの裾の広がりや、ブロードな 022 や 240 ピークは、単結晶 XRD パターンにおいて hkl で $h+k=2, 4, 6$ の条件で $[1-1$

1]*と[1 -1 -1]*方向に観察されたストリーク線に対応し、統計的な平均構造モデルの{111}面付近に分布するBi1やGa1の分割サイトにおける占有原子の不規則配列関係していると考えられる。このモデルでは、図4に示すように酸素8配位のBi1の96hサイトに隣接したGa1が入る6配位のサイト(48g)があり、Ti1(16d)サイトの一部が96hの6配位サイトに、O1の48fサイトの一部が96hサイトに、O2の8aサイトの一部が32eサイトに分割されている。

(Bi_{1-x}Ga_x)_{2-d}Ti₂O_{7-3d/2}の焼結体について周波数 100 kHz、20 °C で測定された $x = 0.06$ 、 $d = 0.15$ のセラミック試料の比誘電率は 127 で、このときの誘電損失 $\tan \delta$ は 0.003 であった。周波数 1 MHz で測定された温度範囲 20 ~ 160 °C の比誘電率は 120 ~ 118 で、温度係数は 20 °C 基準で -166 ppm/°C であった(図 5)。焼結体の 700 °C の導電率はおよそ $2.0 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ で、この導電の活性化エネルギーは $E_a = 1.5 \text{ eV}$ であった。直流二端子法およびインピーダンス法で測定された導電率はほぼ一致し、主な導電種がホールまたは電子伝導であることが示された。間接および直接許容遷移を仮定して求めた (Bi_{1-x}Ga_x)_{2-d}Ti₂O_{7-3d/2} ($x = 0.06$ 、 $d = 0.15$) の光学バンドギャップは 2.90 と 3.09 eV で、導電率から求めたバンドギャップ 3.0 eV にほぼ一致した。

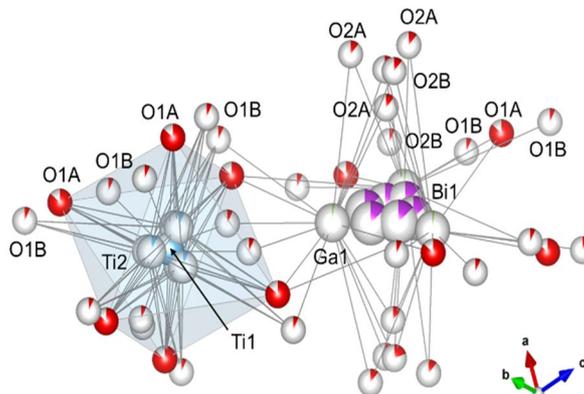


図4 (Bi_{1-x}Ga_x)_{2-d}Ti₂O_{7-3d/2}の統計的平均結晶構造モデルにおける分割サイト

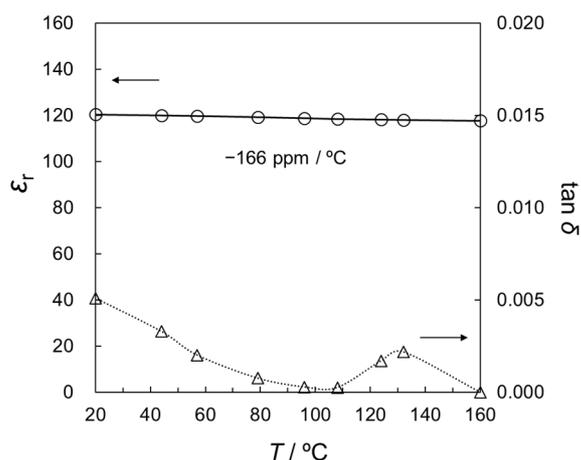


図5 (Bi_{1-x}Ga_x)_{2-d}Ti₂O_{7-3d/2} ($x = 0.06$ 、 $d = 0.15$) 多結晶焼結体試料の比誘電率と誘電損失 $\tan \delta$ の温度依存性 (測定周波数 1 MHz).

<引用文献>

- Kleinke, H. et al. *Chem. Mater.* **2000**, *12*, 2219-2224.
 Niewa, R. *Eur. J. Inorg. Chem.* **2019**, 3647-3660.
 Wang, Y. et al., *Adv. Mater.* **2020**, *32*, 1905007.
 Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), 2021-1 version, FIZ Karlsruhe.
 Gäbler, F. et al., *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2005**, *631*, 397-402.
 Scheunemann, K.; Müller-Buschbaum, H., *J. Inorg. Nucl. Chem.* **1974**, *36*, 1965-1970.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hisanori Yamane, Ryota Yagi, Takahiro Yamada	4. 巻 8
2. 論文標題 Pyrochlore-type oxide solid solutions: (Bi _{1-x} Gax) ₂ -dTl ₂₀₇ -3d/2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 663-671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9tc06074j	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sota Inoue, Hisanori Yamane, Takahiro Yamada	4. 巻 28
2. 論文標題 Identification and characterisation of a new orthorhombic Ti ₆ Sn _{500.9} structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 102704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtcomm.2021.102704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hisanori Yamane, Simon Steinberg	4. 巻 76
2. 論文標題 Sr ₇ N ₂ Sn ₃ : a layered antiperovskite-type nitride stannide containing zigzag chains of Sn ₄ polyanions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Zeitschrift für Naturforschung B	6. 最初と最後の頁 625-633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/znb-2021-0097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takahiro Yamada, Naoki Matsuo, Masanori Enoki, Hisanori Yamane	4. 巻 76
2. 論文標題 A novel ternary bismuthide, NaMgBi: crystal and electronic structure and electrical properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Zeitschrift für Naturforschung B	6. 最初と最後の頁 789-795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/znb-2021-0130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井上蒼太, 山根久典, 山田高広
2. 発表標題 新規亜酸化物Ti ₆ Sn ₅ O, Ti ₅ Sn ₃ Oの合成と結晶構造解析
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋季第167回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根久典, 八木亮太, 山田高広
2. 発表標題 新規パイロクロア型酸化物固溶体(Bi _{1-x} Gax) ₂ -dT _i 207-3d/2の合成、結晶構造と特性評価
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋季第167回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上蒼太, 山根久典, 山田高広
2. 発表標題 Ti-Sn-O系亜酸化物の合成と結晶構造
3. 学会等名 日本セラミックス協会東北北海道支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮 瞭, 山根久典
2. 発表標題 Biフラックス法による δ -Mn単結晶の作製と格子間炭素
3. 学会等名 日本金属学会2019秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮 瞭, 山根久典
2. 発表標題 Biフラックス法によるTi-Mn系亜酸化物の単結晶作製と結晶構造解析
3. 学会等名 日本セラミックス協会2019年度東北北海道支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮 瞭, 山根久典
2. 発表標題 Biフラックスを用いたMn炭化物単結晶の合成と結晶構造解析
3. 学会等名 第58回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根久典, 八木亮太, 山田高広
2. 発表標題 Bi-Ga-Ti-O系で合成された新規パイロクア型酸化物の結晶構造と電気的特性
3. 学会等名 第58回セラミックス基礎科学討論会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山田 高広 (YAMADA Takahiro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	シュタインベルグ サイモン (STEINBERG Simon)		
研究協力者	八木 亮太 (YAGI Ryota)		
研究協力者	井上 蒼太 (INOUE Sota)		
研究協力者	宮 瞭 (Miya Ryo)		
研究協力者	榎木 勝徳 (ENOKI Masanori)		
研究協力者	松尾 直樹 (MATSUO Naoki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

ドイツ	RWTH Aachen University			
-----	------------------------	--	--	--