

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420678

研究課題名(和文) 水熱反応による新しい超伝導ビスマス酸化物の探索と特性評価

研究課題名(英文) Preparation and Characterization of New Superconductive Bismuth Oxides by Hydrothermal Reaction

研究代表者

熊田 伸弘 (KUMADA, Nobuhiro)

山梨大学・総合研究部・教授

研究者番号：90161702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：水熱反応を用いてペロブスカイト型構造を持つ3種類の新しいビスマス酸化物を合成することができた。 $(K1.00)(Ba1.00)3(Bi0.89Na0.11)4O12$ は $T_c=31.5K$ でダブルペロブスカイト型構造を持っていた。 $(Ba0.62K0.38)(Bi0.92Mg0.08)O3$ および $(Ba0.83K0.17)(Bi0.54Pb0.46)O3$ は単純ペロブスカイト型構造を持ち、 $T_c$ はそれぞれ30および22.8Kであった。いずれも化合物についても放射光X線回折データを持ちいたRietveld法によって結晶構造の精密化を行った。

研究成果の概要(英文)：New superconductive bismuth oxides,  $(K1.00)(Ba1.00)3(Bi0.89Na0.11)4O12$ ,  $(Ba0.62K0.38)(Bi0.92Mg0.08)O3$  and  $(Ba0.83K0.17)(Bi0.54Pb0.46)O3$  were prepared by hydrothermal reaction. The first one had a double perovskite-type structure with  $T_c = 31.5K$  and the second and third ones had a simple perovskite-type structure. The  $T_c$  of the second and third ones were 30 and 22.8k, respectively. Their crystal structures were refined by Rietveld method using synchrotron X-ray powder diffraction data.

研究分野：無機合成化学

キーワード：水熱反応 超伝導 ビスマス酸化物 結晶構造

1. 研究開始当初の背景

これまでに水熱反応を用いて多くの新しいビスマス酸化物を合成し、その結晶構造解析および特性評価を行ってきた。その研究の過程で発見したダブルペロブスカイト型構造を持つ $(\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.45})\text{Ba}_3\text{Bi}_4\text{O}_{12}$ は $T_c = 27\text{ K}$ の超伝導体であった。図1にその結晶構造を示した。本研究ではこの新しいビスマス酸化物超伝導体について、その合成条件、生成物の化学組成、結晶構造および超伝導特性を明らかにすることである。ビスマス系酸化物では単純ペロブスカイト型構造を持つ $(\text{Ba,K})\text{BiO}_3$ において $T_c = 31\text{ K}$ の超伝導体が既に報告されており、結晶構造および超伝導特性等については詳細に調べられている。図2にその結晶構造を示した。これらの超伝導ビスマス酸化物の相違は超伝導転移温度以外に以下の二点にまとめられる。

1) 結晶構造: 図1に示すように、本研究におけるペロブスカイト型構造では $\text{BiO}_6$ 八面体が歪み、さらにAサイトの陽イオンが規則配列することで単純ペロブスカイト型構造の2倍の単位格子を持つダブルペロブスカイト型である。

2) 合成方法: 単純ペロブスカイトは高温反応によって合成されるのに対し、本研究におけるダブルペロブスカイト型超伝導体は水熱反応でしか生成せず、 $600^\circ\text{C}$ 以上に加熱することで分解して超伝導性を示さなくなる。

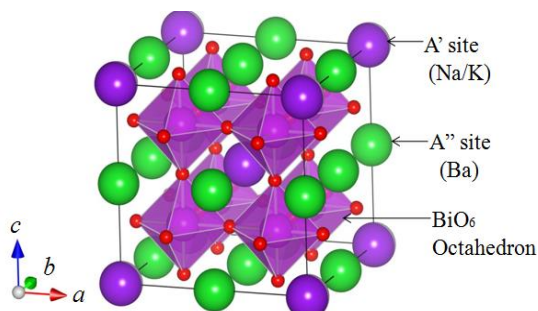


図1  $(\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.45})\text{Ba}_3\text{Bi}_4\text{O}_{12}$ の結晶構造

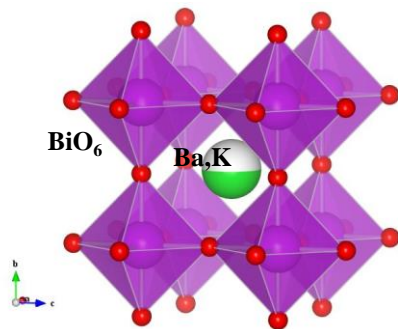


図2  $(\text{Ba,K})\text{BiO}_3$ の結晶構造

2. 研究の目的

超伝導ビスマス酸化物では $T_c = 31\text{ K}$ の単純ペロブスカイト型構造を持つ $(\text{Ba,K})\text{BiO}_3$ が有名であるが、水熱反応によって $T_c = 27\text{ K}$ のダブルペロブスカイト型構造を持つ新しい超伝導ビスマス酸化物 $(\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.45})$

$\text{Ba}_3\text{Bi}_4\text{O}_{12}$ を発見した。この新しい超伝導体のユニークな点はダブルペロブスカイト型構造を持つことであり、2種類の陽イオンサイトを様々な元素によって置換することで数多くの新しい超伝導体を合成できる可能性を秘めている。そこで、本研究の目的はこの新しい超伝導体を中心にその派生物を合成し、超伝導の発現機構や超伝導転移温度の上昇の可能性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

水熱反応を用いて多くの新しいビスマス酸化物を合成できるが、いずれも出発物質として水和ビスマス酸ナトリウム $(\text{NaBiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ を用いることで合成することができた。本研究における新しい超伝導ビスマス酸化物もこれまでと同じ出発物質によって合成できるが、この化合物においてはペロブスカイト型構造におけるAサイト陽イオンが、その超伝導特性に影響を及ぼすと考えられ、その合成条件において出発物質の選択から再考する必要がある。したがって、本研究ではその合成条件の精査を第一に行い、合成条件と生成物の結晶構造、化学組成および超伝導特性との関連性を明らかにする。その結果を基に従来のビスマス酸化物超伝導体との相違を明らかにして、新しい超伝導体の超伝導の発現機構や超伝導転移温度の上昇の可能性を探った。

4. 研究成果

本研究によって合成された化合物毎にその合成方法、結晶構造および特性について以下に紹介する。

(1)  $(\text{K}_{1.00})(\text{Ba}_{1.00})_3(\text{Bi}_{0.89}\text{Na}_{0.11})_4\text{O}_{12}$

ダブルペロブスカイト型構造を持つ $T_c = 27\text{ K}$ の超伝導体である $(\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.45})\text{Ba}_3\text{Bi}_4\text{O}_{12}$ は水和ビスマス酸ナトリウム $(\text{NaBiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ を出発物質として $220^\circ\text{C}$ で水熱反応を行うことによって合成することができた。さらに合成温度を $240^\circ\text{C}$ に上昇させると $T_c = 31.5\text{ K}$ の超伝導体である $(\text{K}_{1.00})(\text{Ba}_{1.00})_3(\text{Bi}_{0.89}\text{Na}_{0.11})_4\text{O}_{12}$ を合成することができた。この化合物の結晶構造は図1に示した $(\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.45})\text{Ba}_3\text{Bi}_4\text{O}_{12}$ と同様にダブルペロブスカイト型構造を持つが、Bサイトの

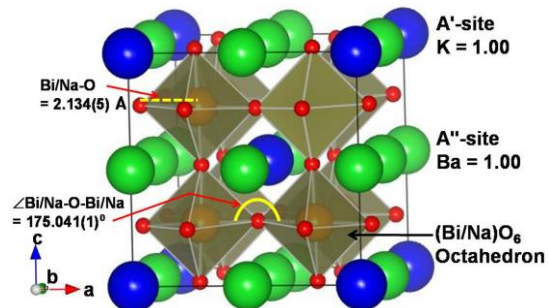


図3  $(\text{K}_{1.00})(\text{Ba}_{1.00})_3(\text{Bi}_{0.89}\text{Na}_{0.11})_4\text{O}_{12}$ の結晶構造

Bi の一部が Na と置換していた。図 3 に  $(K_{1.00})(Ba_{1.00})_3(Bi_{0.89}Na_{0.11})_4O_{12}$  の結晶構造を示す。この化合物の結晶構造の精密化には放射光 X 線回折および中性子線回折の 2 種類のデータを用いて行った。図 4 にそれらの回折プロファイルを示す。図 5 に種々の水熱反応温度による生成物の磁化率の温度依存性を示す。

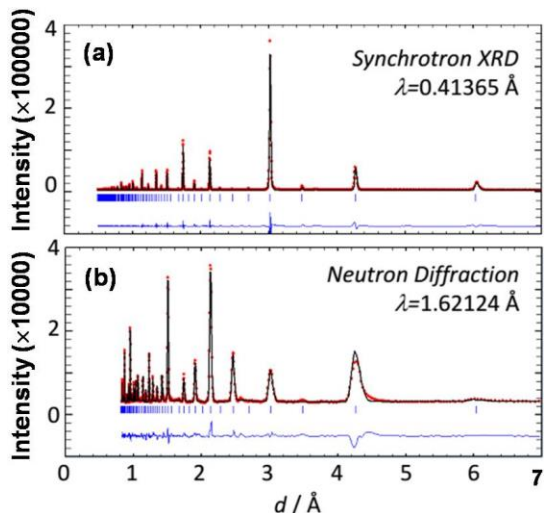


図 4  $(K_{1.00})(Ba_{1.00})_3(Bi_{0.89}Na_{0.11})_4O_{12}$  の (a) 放射光 X 線回折および中性子線回折プロファイル

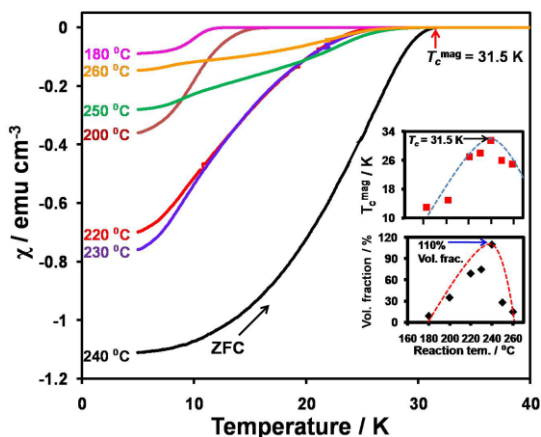


図 5 種々の水熱反応温度による生成物の磁化率の温度依存性

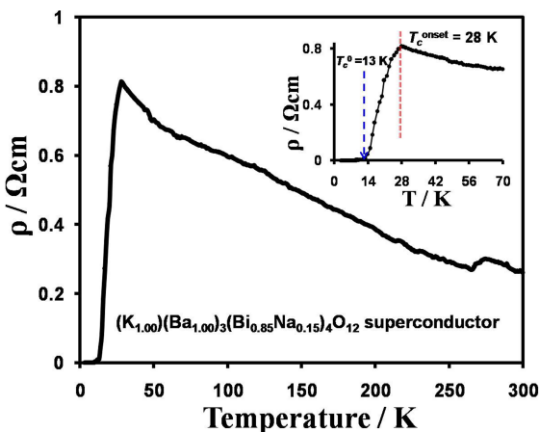


図 6  $(K_{1.00})(Ba_{1.00})_3(Bi_{0.89}Na_{0.11})_4O_{12}$  の電気抵抗の温度依存性

す。また、電気抵抗の温度依存性では 28K から電気抵抗の減少が認められた(図 6)。また、第一原理計算による電子構造図を図 7 に示す。この電子構造は単純ペロブスカイト型  $(Ba,K)BiO_3$  に類似しており、その超伝導の発現も同じ機構によるものと考えられた。水熱温度を上昇させることで僅かに  $T_c$  が高いダブルペロブスカイト型構造を持つビスマス酸化物を合成することができたが、その  $T_c$  が従来のものと同程度であった。

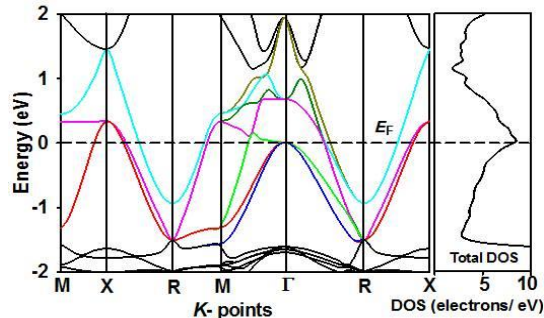


図 7 第一原理計算による  $(K_{1.00})(Ba_{1.00})_3(Bi_{0.89}Na_{0.11})_4O_{12}$  の電子構造図

## (2) $(Ba_{0.62}K_{0.38})(Bi_{0.92}Mg_{0.08})O_3$

出発物質に  $NaBiO_3 \cdot nH_2O$  を用いた水熱反応によってダブルペロブスカイト型構造を持つ  $T_c = 31.5$  K の超伝導体である  $(K_{1.00})(Ba_{1.00})_3(Bi_{0.89}Na_{0.11})_4O_{12}$  が合成できたが、B サイトの一部が Na によって置換されているという特徴があった。そこで、出発物質に  $NaBiO_3 \cdot nH_2O$  から合成される  $MgBi_2O_6$  を用いた水熱合成を試みた。

$MgBi_2O_6$ 、 $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$  および KOH を出発物質に用い 220°C で水熱反応を行うことによって単純ペロブスカイト型構造を持つ  $(Ba_{0.62}K_{0.38})(Bi_{0.92}Mg_{0.08})O_3$  を合成することができた。図 8 にその結晶構造を示す。結晶構造は放射光 X 線回折データを用いて精密化を行った結果、 $R_{wp} = 6.11\%$  および  $R_p = 4.47\%$  が得られた。空間群は  $Pm\bar{3}m(\#221)$  で、格子定数は  $a = 4.27864(2)$  Å であった。放射光 X 線回折データを用いた Rietveld 解析によるプロファイルを図 9 に示す。図 10 にこの系における水熱反応温度による  $T_c$  の変化を示す。220 °C での生成物である  $(Ba_{0.62}K_{0.38})(Bi_{0.92}Mg_{0.08})O_3$  において  $T_c = 30$  K を示した。

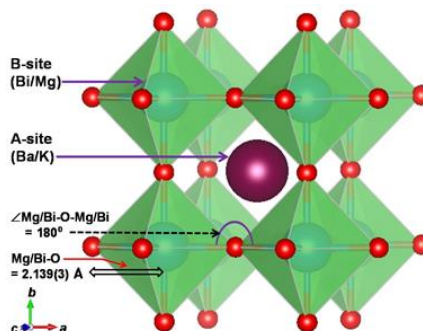


図 8  $(Ba_{0.62}K_{0.38})(Bi_{0.92}Mg_{0.08})O_3$  の結晶構造

また、 $(\text{Ba}_{0.62}\text{K}_{0.38})(\text{Bi}_{0.92}\text{Mg}_{0.08})\text{O}_3$  の電気抵抗の温度依存性を図 11 に示し、図 12 に第一原理計算によって求められた電子構造図を示す。

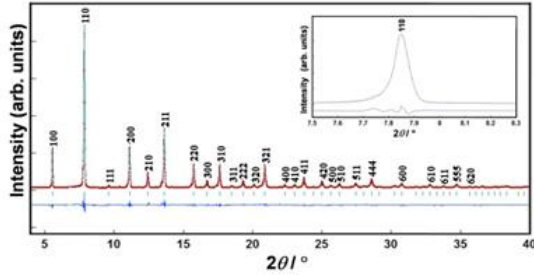


図 9  $(\text{Ba}_{0.62}\text{K}_{0.38})(\text{Bi}_{0.92}\text{Mg}_{0.08})\text{O}_3$  の放射光 X 線回折プロファイル

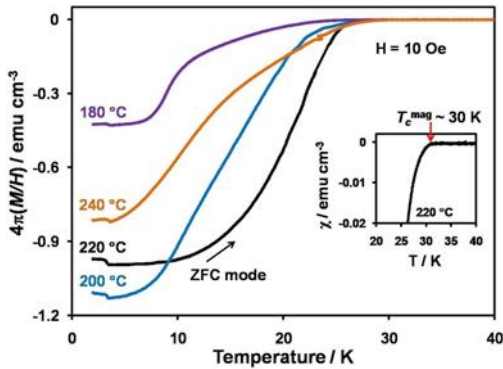


図 10 種々の水熱反応温度による生成物の磁化率の温度依存性

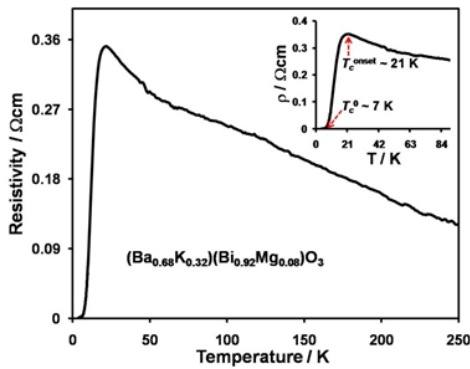


図 11  $(\text{Ba}_{0.62}\text{K}_{0.38})(\text{Bi}_{0.92}\text{Mg}_{0.08})\text{O}_3$  の電気抵抗の温度依存性

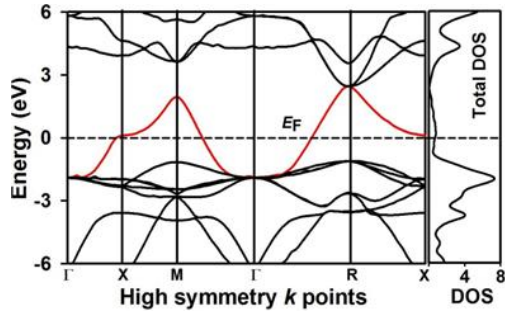


図 12 第一原理計算による  $(\text{Ba}_{0.62}\text{K}_{0.38})(\text{Bi}_{0.92}\text{Mg}_{0.08})\text{O}_3$  の電子構造図

(3)  $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$

出発物質に  $\text{NaBiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  から合成される  $\text{PbBi}_2\text{O}_6$  を用いた場合においても超伝導を示す  $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$  が合成できた。 $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$  は単純ペロブスカイト型構造を持ち、空間群は  $Pm\bar{3}m(\#221)$  で、格子定数は  $a = 4.28877(1)\text{Å}$  であった。結晶構造は放射光 X 線回折データを用いて精密化を行った結果、 $R_{wp} = 7.56\%$  および  $R_p = 5.26\%$  であった。放射光 X 線回折データを用いた Rietveld 解析によるプロファイルを図 13 に示す。この化合物の磁化率の温度依存性を図 14 に示し、 $T_c$  は  $22.8\text{K}$  であった。また、電気抵抗の温度依存性および磁場印可による電気抵抗の変化を図 15 に示す。

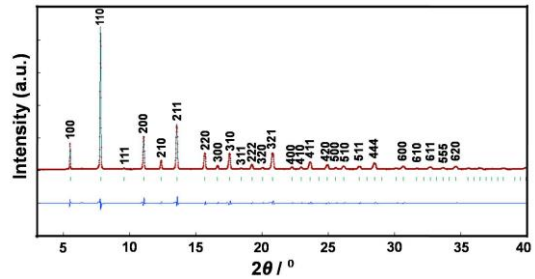


図 13  $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$  の放射光 X 線回折プロファイル

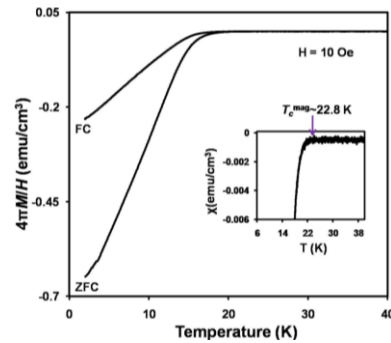


図 14  $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$  の磁化率の温度依存性

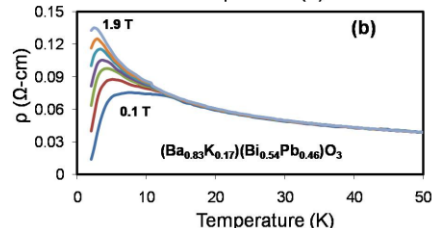
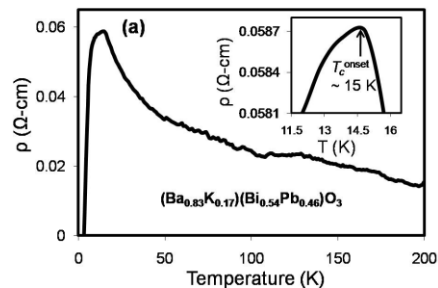


図 15  $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$  の(a)電気抵抗の温度依存性および(b)磁場依存性

以上のように出発物質に依存して、超伝導転移温度  $T_c$  が異なるペロブスカイト型ビスマス酸化物を合成することができた。超伝導転移温度  $T_c$  はビスマスの原子価が 4.6 付近で最大となることがわかったが、2 倍の周期を持つダブルペロブスカイト型構造と単純ペロブスカイト型構造との生成要因の差については未だ不明である。超伝導転移温度の上昇およびその結晶化学的の体系化のためにはさらに異なる出発物質を用いた合成実験が必要である。

#### (4) その他の化合物

水熱反応を用いて超伝導体を探索する過程で超伝導を示さない新しい化合物である  $\text{SrBi}_2\text{O}_6$ 、 $\text{CdBi}_2\text{O}_6$  および  $\text{LiCuBiO}_4$  を合成することができた。いずれも出発物質に  $\text{NaBiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  を用い、 $\text{SrBi}_2\text{O}_6$  は  $\text{SrCl}_2$ 、 $\text{CdBi}_2\text{O}_6$  は  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{LiCuBiO}_4$  は  $\text{LiOH}$  と  $\text{CuO}$  をそれぞれ用いることで合成できた。 $\text{SrBi}_2\text{O}_6$  の結晶構造は  $\text{PbSb}_2\text{O}_6$  型であり、その結晶構造の精密化は中性子線回折データを用いて行った結果  $R_{wp} = 4.49\%$  および  $R_p = 3.46\%$  であった。 $\text{SrBi}_2\text{O}_6$  の結晶構造を図 16 に示す。

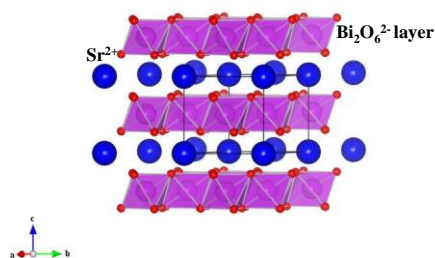


図 16  $\text{SrBi}_2\text{O}_6$  の結晶構造

$\text{CdBi}_2\text{O}_6$  は  $\text{MnSb}_2\text{O}_6$  型の結晶構造を持ち、この結晶構造では  $\text{PbSb}_2\text{O}_6$  型の陽イオンの規則配列の様式が異なっている。 $\text{CdBi}_2\text{O}_6$  の結晶構造を図 17 に示す。放射光 X 線回折データを用いた Rietveld 法による精密化の結果は  $R_{wp} = 4.59\%$  および  $R_p = 3.04\%$  であった。

$\text{LiCuBiO}_4$  は  $\text{LiCuSbO}_4$  と類似した結晶構造を持ち、 $\text{LiCuBiO}_4$  の  $\text{BiO}_6$  八面体の配列様式が  $\text{LiCuSbO}_4$  の  $\text{SbO}_6$  八面体のそれと異なっていた。 $\text{LiCuBiO}_4$  の結晶構造を図 18 に示す。Rietveld 法による精密化の結果は  $R_{wp} = 4.84\%$  および  $R_p = 3.58\%$  であった。

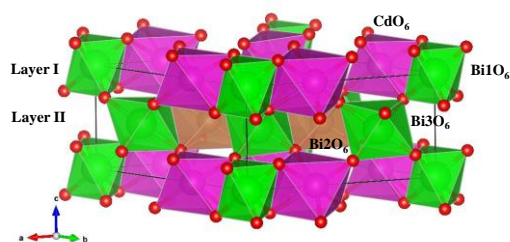


図 17  $\text{CdBi}_2\text{O}_6$  の結晶構造

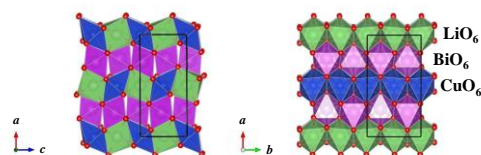


図 18  $\text{LiCuBiO}_4$  の結晶構造

#### 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 9 件)

- ① N. Kumada, A. Nakamura, A. Miura, T. Takei, M. Azuma, H. Yamamoto, E. Magome, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Hydrothermal Synthesis and Crystal Structure of A New Lithium Copper Bismuth Oxide,  $\text{LiCuBiO}_4$ , J. Solid State Chem., 査読有, 245, 2017, 30-33.  
DOI:doi: 10.1016/j.jssc.2016.10.003
- ② M. H. K. Rubel, T. Takei, N. Kumada, M. M. Ali, A. Miura, K. Tadanaga, K. Oka, M. Azuma, M. Yashima, K. Fujii, E. Magome, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, J. R. Hester, and M. Avdeev, Hydrothermal Synthesis, Crystal Structure, and Superconductivity of a Double-Perovskite Bi Oxide, Chem. Mater., 査読有, 28, 2016, 459-465.  
DOI:doi: 10.1021/acs.chemmater.5b02386
- ③ O. Naa, N. Kumada, A. Miura, T. Takei, M. Azuma, Y. Kusano, and K. Oka, High Pressure Polymorph of  $\text{NaBiO}_3$ , Inorg. Chem., 査読有, 55, 2016, 5547-5549.  
DOI:doi: 10.1021/acs.inorgchem.6b00947
- ④ M. H. K. Rubel, T. Takei, N. Kumada, M. M. Ali, A. Miura, K. Tadanaga, K. Oka, M. Azuma, E. Magome, C. Moriyoshi and Y. Kuroiwa, Hydrothermal Synthesis, Structure and Superconductivity of a simple-cubic perovskite  $(\text{Ba}_{0.62}\text{K}_{0.38})(\text{Bi}_{0.92}\text{Mg}_{0.08})\text{O}_3$  with  $T_c \sim 30$  K Inorg. Chem., 査読有, 56, 2016, 3174-3181.  
DOI:doi: 10.1021/acs.inorgchem.6b01853
- ⑤ M. H. K. Rubel, A. Miura, T. Takei, N. Kumada, M. M. Ali, K. Oka, M. Azuma, E. Magome, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Low-temperature hydrothermal synthesis of a new Bi based  $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.17})(\text{Bi}_{0.54}\text{Pb}_{0.46})\text{O}_3$  superconductor, J. Alloys. Comp., 査読有, 634, 2015, 208-214.  
DOI:doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.274
- ⑥ N. Kumada, A. Miura, T. Takei, S. Nishimoto, Y. Kameshima, M. Miyake, Y. Kuroiwa and C. Moriyoshi, Hydrothermal Synthesis and Crystal Structure of Two New Cadmium Bismuthates,  $\text{CdBi}_2\text{O}_6$  and  $\text{Cd}_{0.37}\text{Bi}_{0.63}\text{O}_{1.79}$ , J. Asian Ceram. Soc., 査読

有, 3, 2015, 251-254.

DOI:doi: 10.1016/j.jascr.2015.04.003

- ⑦ M. H. K. Rubel, A. Miura, T. Takei, N. Kumada, M. M. Ali, M. Nagao, S. Watauchi, I. Tanaka, K. Oka, M. Azuma, E. Magome, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, A. K. M. Azharul I., Superconducting double perovskite bismuth oxide (Na<sub>0.25</sub>K<sub>0.45</sub>)(Ba<sub>1.00</sub>)<sub>3</sub>(Bi<sub>1.00</sub>)<sub>4</sub>O<sub>12</sub> prepared by low-temperature hydrothermal reaction, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, 147, 2014, 3599-3603.  
DOI:doi: 10.1002/anie.201400607
- ⑧ N. Kumada, A. Miura, T. Takei and M. Yashima, Crystal structure of a pentavalent bismuthate, SrBi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> and a fluorite-type (Pb<sub>1/3</sub>Bi<sub>2/3</sub>)O<sub>1.6</sub>, *J. Asian Ceram. Soc.*, 査読有, 2, 2014, 150-153.  
DOI:doi: 10.1016/j.jascr.2014.02.002
- ⑨ N. Kumada, N. Xu, A. Miura and T. Takei, Preparation and photocatalytic property of new calcium and lead bismuthates, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 査読有, 122, 2014, 509-512.  
DOI:doi: 10.2109/jcersj2.122.307

[学会発表] (計 10件)

- ① M. Saiduzzaman, T. Takei, S. Yanagida, N. Kumada, Hydrothermal Synthesis of New Bismuthates with Bi<sup>5+</sup>, 日本セラミックス協会 2017 年年会, 2017/3/17-19, 日本大学駿河台キャンパス(東京都・千代田区)
- ② I. Withanage, N. Kumada, S. Yanagida, T. Takei Preparation and characterization of pyrochlore-type AgMO<sub>3</sub> (M=Nb,Ta), 第 55 回セラミックス基礎科学討論会, 2017/1/12-13, 岡山コンベンションセンター(岡山県・岡山市)
- ③ I. Withanage, N. Kumada, S. Yanagida, T. Takei Preparation and crystal structure analysis of pyrochlore-type oxides, 第 28 回日本セラミックス協会秋季シンポジウム, 2016/9/7-9, 広島大学東広島キャンパス(広島県・東広島市)
- ④ 前島悠作, 武井貴弘, 熊田伸弘, 水熱反応によるペロブスカイト型 Ba(Bi,R)O<sub>3</sub> (R:希土類金属)の合成, 日本セラミックス協会 2016 年年会, 2016/3/14-16, 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都・新宿区)
- ⑤ 中村あゆ美, 三浦章, 武井貴弘, 熊田伸弘, 水熱反応による新しいピスマス酸化物 LiCuBiO<sub>4</sub> の合成と結晶構造, 第 54 回セラミックス基礎科学討論会, 2016/1/7-8, アバンセ(佐賀県・佐賀市)
- ⑥ M. H. K. Rubel, T. Takei, N. Kumada, A. Miura, M. Azuma, E. Magomae, C. Moriyoshi, Y. Kuroiwa, Preparation of new Bi based simple and double perovskite-type superconductors by hydrothermal reaction, 日本セラミックス協会 2015 年年会, 2015/3/18-20, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)
- ⑦ M. H. K. Rubel, A. Miura, T. Takei, N.

Kumada, Hydrothermal synthesis of superconductive perovskite-type bismuthates, 第 53 回セラミックス基礎科学討論会, 2015/1/8-9, 京都テルサ(京都府・京都市)

- ⑧ M. H. K. Rubel, A. Miura, T. Takei, N. Kumada, Hydrothermal synthesis of superconductive perovskite-type bismuthates, 第 53 回セラミックス基礎科学討論会, 2015/1/8-9, 京都テルサ(京都府・京都市)
- ⑨ N. Kumada, Hydrothermal Synthesis of New Bismuth Oxides, The 4th International Solvothermal and Hydrothermal Association Conference, 2014/10/26-29, Bordeaux Institute of Technology (Bordeaux, France)
- ⑩ 中村あゆ美, 三浦章, 武井貴弘, 熊田伸弘, 水熱反応による Bi<sup>5+</sup>を含む新しいピスマス酸化物の合成と結晶構造, 第 27 回日本セラミックス協会秋季シンポジウム, 2014/9/9-11, 鹿児島大学郡元キャンパス(鹿児島県・鹿児島市)
- ⑪ M. H. K. Rubel, A. Miura, T. Takei, N. Kumada, K. Oka and M. Azuma, Effect of Synthesis Temperatures on Superconducting Properties of Double Perovskite Bismuth Oxides, The 8th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics, 2014/7/25-27, MIELPARQUE YOKOHAMA (Yokohama Japan)

[その他]

ホームページ等

<http://www.inorg.yamanashi.ac.jp/research/17>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

熊田 伸弘 (KUMADA Nobuhiro)  
山梨大学・大学院総合研究部・教授  
研究者番号: 90161702

### (2) 研究分担者

武井 貴弘 (TAKEI Takahiro)  
山梨大学・大学院総合研究部・教授  
研究者番号: 50324182

三浦 章 (MIURA Akira)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 10603201