

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05344

研究課題名(和文) 温度・圧力を変数とした鉱物結晶化学：原子変位から読み解く地球内部の弾性異方性

研究課題名(英文) Mineral crystal chemistry as a function of temperature and pressure: anisotropy of elasticity in the Earth's interior elucidated from atomic displacement behavior

研究代表者

中塚 晃彦 (Nakatsuka, Akihiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：80294651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、温度を変数とした地球内部関連物質の単結晶X線構造解析から、それらの弾性特性や構造安定性に関する知見を獲得し、地球内部の諸現象の解明を目指した研究である。ペロブスカイト型・ポストペロブスカイト型構造をもつ下部マントルアナログ物質のデバイ温度とポテンシャルの異方性を求め、原子間相互作用の大きさを見積もり、弾性特性と構造安定性に関する詳細情報を得た。特にCaGeO₃ペロブスカイトに関する研究成果から、MgSiO₃ブリッジマナイトが下部マントル中でポストペロブスカイト相へ相転移する前にPbnm構造とは異なる対称性のペロブスカイト相へ相転移する可能性があることが推察された。

研究成果の概要(英文)：This is a research with the aim of elucidating phenomena in the Earth's interior by obtaining knowledge of elastic properties and structural stabilities of Earth's interior-related materials. We determined the anisotropic Debye temperatures and potentials in analogs of Earth's lower mantle materials and estimated the magnitude of their interatomic interactions to obtain detailed knowledge of their elastic properties and structural stabilities. In particular, it is inferred from the findings on CaGeO₃ perovskite that MgSiO₃ bridgmanite may transform to a perovskite phase with a different symmetry from Pbnm structure in the Earth's lower mantle before the transition to the post-perovskite type structure.

研究分野：鉱物結晶学

キーワード：単結晶X線構造解析 地球内部物質 原子変位 デバイ温度 ポテンシャルパラメータ

1. 研究開始当初の背景

地球内部を構成する鉱物結晶の弾性特性は、地球内部の地震波（弾性波）速度分布を予測・解釈する上で非常に重要であることから、国内外で精力的に研究されてきた。鉱物結晶の弾性波速度は、その弾性特性を表す物理定数の一つであるデバイ温度から求められる。しかし、地球内部の地震波速度分布の詳細を明らかにするには鉱物結晶の弾性波速度の異方性を求める必要があるが、鉱物結晶のマクロな性質である比熱や体積熱膨張など従来の手法で求めたデバイ温度は構成原子の総体的な平均値であり、しかも等方的な値にすぎず、これから求めた弾性波速度もまた等方的な平均値にすぎない。最近我々は、これまで培ってきた回折実験・単結晶 X 線精密構造解析の技術を駆使し、広い温度範囲において構造解析から精密決定した各構成原子の平均二乗変位 (MSD) の温度依存性にデバイモデルを適用することによって、各構成原子に対して個別にデバイ温度の異方性を決定する手法を確立した。この手法を MgSiO₃ 多形やそのアナログ物質など地球内部関連物質に適用すれば、現在論争されている下部マントル最下部にあたる D''層での地震波の速度異常や異方性の原因など地球内部の弾性特性の詳細を解明できると考えられる。

この手法は温度を変数とした単結晶 X 線精密構造解析に基づいているので、圧力上昇に伴い輝石型（上部マントル）→ ガーネット型（マントル遷移層）→ ペロブスカイト型（下部マントル）→ ポストペロブスカイト型（D''層）へと相転移する MgSiO₃ 多形の各相において、それら結晶構造の温度依存性に関する知見も得ることができる。ただし、常圧下に急冷回収した（準安定な）ペロブスカイト相は熱的安定性が低く、ポストペロブスカイト相は超高压高温下（120 GPa・2200 °C 以上）でのみ安定で急冷回収できない。このように目的とする高压相に対して直接測定ができない場合には、より低压で合成でき、安定性が高く、しかも物理的・化学的に性質が類似したアナログ物質の研究が、目的とする高压相の構造特性や物性の予測に有効である。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、地球内部物質のアナログ物質である CaGeO₃ ペロブスカイト、CaIrO₃ ポストペロブスカイト、SrGeO₃ ペロブスカイトを取り上げ、単結晶 X 線精密構造解析から求めたデバイ温度の異方性から弾性異方性を決定するとともに、それら結晶構造の温度依存性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的達成のために、各物質について、研究期間内（平成27~29年度）に以下の実験・解析を行った。

単結晶合成実験

高压安定相である CaGeO₃ ペロブスカイトと SrGeO₃ ペロブスカイトについては、キュービックアンビル型高压発生装置を用いて、高压高温（それぞれ 12 GPa・1253 K および 6 GPa・1223 K）の条件下で単結晶の合成を行った。その際出発物質として、それぞれ固相反応法で合成したウォラストナイト型 CaGeO₃ と擬ウォラストナイト型 SrGeO₃ の粉末試料を用いた。一方、常圧安定相である CaIrO₃ ポストペロブスカイトについては、出発物質として Ca(OH)₂ と Ir、フラックスとして CaCl₂ を用い、フラックス法により単結晶を合成した結果、針状結晶が育成した。

単結晶 X 線構造解析

合成した CaGeO₃ ペロブスカイト、SrGeO₃ ペロブスカイト、CaIrO₃ ポストペロブスカイトにおいて、それぞれ 0.15 × 0.14 × 0.14 mm³、0.10 × 0.09 × 0.09 mm³、0.20 × 0.01 × 0.01 mm³ のサイズをもつ単結晶試料を選び、各試料を石英キャピラリーに挿入して回折強度測定を試料とした。冷却・加熱に窒素吹付け型低温・高温装置を用い、CaGeO₃ ペロブスカイトについては 98 ~ 898 K の範囲内の 18 個の温度点、SrGeO₃ ペロブスカイトについては 100 ~ 323 K の範囲内の 7 個の温度点、CaIrO₃ ポストペロブスカイトについては 100~473 K の範囲内の 12 個の温度点で回折強度測定を行った。各強度測定には、Mo K α 線（60 kV・250 mA）を用いて 4 軸型 X 線回折計により反射の強度を測定した。測定の際、試料位置の温度変動を ± 0.2 K 以内に保った。等価反射を平均し、L_p 効果、吸収効果、消衰効果に対する強度補正を施した。構造精密化の際に、多重散乱の影響が疑われる反射と (sin θ)/ λ 値の小さな低角度反射を削除した。とくに後者は、二次消衰効果を低減し、解析に用いる原子散乱因子を選択する際にその原子電荷への依存性をできるだけ避けるためである。各温度に対して $F_0 > 3\sigma(F_0)$ の精度をもつ独立反射を構造精密化に用いた。最終的に信頼度因子は、CaGeO₃ ペロブスカイトについて $R = 0.0142 \sim 0.0229$ および $wR = 0.0117 \sim 0.0184$ 、SrGeO₃ ペロブスカイトについて $R = 0.073 \sim 0.0135$ および $wR = 0.0053 \sim 0.0093$ 、CaIrO₃ ポストペロブスカイトについて $R = 0.0106 \sim 0.0230$ および $wR = 0.0102 \sim 0.0262$ に達した。

デバイ温度の決定

回折法で決定した原子の MSD は、熱振動に起因する動的変位と配置の乱れに起因する静的変位の両方の寄与が含まれ、デバイモデルに基づけば、次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{MSD} &= \langle u^2 \rangle_s + \langle u^2 \rangle_d \\ &= \langle u^2 \rangle_s + \frac{3\hbar^2 T}{mk_B \theta_D^2} \left[\frac{T}{\theta_D} \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{x}{e^x - 1} dx + \frac{\theta_D}{4T} \right] \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $\langle u^2 \rangle_s$ は静的変位成分、 $\langle u^2 \rangle_d$ は動の変位成分、 m は原子質量、 k_B は Boltzmann 定数、 h は換算 Planck 定数、 Θ_D はデバイ温度、 T は絶対温度である。静的変位成分はほとんど温度に依存しないので、 $\langle u^2 \rangle_s$ を定数と見なし、各試料の測定温度範囲内で求めた MSD データに対して式 (1) を最小二乗フィット (デバイフィット) して、 Θ_D と $\langle u^2 \rangle_s$ を決定した。ここで、あらゆる方向に対して平均化した MSD に相当する U_{eq} のデバイフィットから、あらゆる方向に対して平均化したデバイ温度と静的変位成分が決定でき、一方、特定方向の MSD のデバイフィットから、その方向のデバイ温度と静的変位成分が決定できる。

調和型一粒子ポテンシャル係数の決定

デバイ温度 Θ_D から、原子の調和振動を仮定した場合の一粒子ポテンシャル (OPP) 係数 q を次式より見積もった。

$$q = \frac{mk_B^2\Theta_D^2}{3\hbar^2} \quad (2)$$

式 (2) の Θ_D に対して、あらゆる方向に対して平均化したデバイ温度を用いれば、あらゆる方向に対して平均化した等方的な OPP 係数が、特定方向のデバイ温度を用いれば、特定方向の異方的な OPP 係数が各原子に対して決定できる。OPP 係数 q は力定数に相当し、結合の強固さなど周りの原子からの相互作用の大きさを知る指標となる。

4. 研究成果

CaGeO₃ ペロブスカイト

この化合物は、GeO₆ 八面体の tilt (傾きや回転) ため、理想的な立方晶ペロブスカイト (空間群 $Pm\bar{3}m$) から大きく歪み、常温常圧下では直方晶 (斜方晶) で空間群 $Pbnm$ の対称性をもつ。これは、同一構造をもつ下部マントル物質 MgSiO₃ ブリッジマナイトのアナログ物質として重要である。構造解析の結果、過去に 520 K で報告された $Pbnm \rightarrow Cmcm$ の構造相転移は存在せず、測定した温度範囲内において、ペロブスカイト型 CaGeO₃ は $Pbnm$ 構造を維持していることがわかった。MSD に対するデバイモデルフィッティングの結果、各原子において有意な静的変位成分は観測されなかった。得られたデバイ温度からポテンシャルパラメータを求めた結果、 $Ca < O1 < O2 \ll Ge$ の順に大きくなることがわかった。Ca と Ge のこの関係は、結合距離の熱膨張係数から期待される結合の固さと一致している。酸素原子が示す顕著な MSD の異方性は、これら酸素と固く結合している Ge との相互作用の結果であると考えられた。

ここで、CaGeO₃ ペロブスカイト、CaTiO₃ ペロブスカイト、これらと同一構造をもつ下部マントル物質 MgSiO₃ ブリッジマナイトを取り上げ、配位多面体の圧縮率比や八面体 tilt の大きさの比較から、以下の地球科学的インプリケーションを得た。

➤ MgSiO₃ ブリッジマナイトにおいて 7.3 GPa・600 K 付近で示唆された相転移が存在していたとしても、それは CaTiO₃ ペロブスカイトで観測された高対称な低温相への相転移ではなく、低対称な高温相への相転移であろう。

➤ MgSiO₃ ブリッジマナイトが、下部マントル中でポストペロブスカイト相へ相転移する前に (約 23 GPa・1900 K ~ 125 GPa・2500 K) $Pbnm$ 構造とは異なる対称性のペロブスカイト相へ相転移する可能性は十分にある。

SrGeO₃ ペロブスカイト

この化合物は立方晶ペロブスカイト型構造 (空間群 $Pm\bar{3}m$) をもち、下部マントル物質 CaSiO₃ ペロブスカイトのアナログ物質として重要である。構造解析の結果、酸素の熱振動は著しく異方的であり、その変位楕円体は Ge-O 方向にかなり抑圧されていることがわかった。Ge-O 方向における酸素原子の MSD はほとんど温度に依存しないが、一方、結合に垂直な方向における MSD は温度の上昇とともに大きく増加する。ボンドバレンスから見積もった化学結合性、残差電子密度解析による結合電子の観察、決定したデバイ温度から見積もった OPP 係数から、この特異な酸素原子の熱振動挙動は Ge-O 結合における強い共有結合性に起因すると考えられた。

CaIrO₃ ポストペロブスカイト

この化合物は、下部マントル最下部にある D'' 層の主要構成物質であるポストペロブスカイト型 MgSiO₃ のアナログ物質として重要である。この化合物の結晶構造 (直方晶; 空間群 $Cmcm$) は、IrO₆ 八面体層と CaO₈ 多面体層が [010] 方向に交互に積層した構造をとる。構造解析の結果、Ir および Ca の MSD は、両者とも、IrO₆ 八面体間の共有稜を挟む Ir-Ir 方向および CaO₈ 多面体間の共有面を挟む Ca-Ca 方向に相当する [100] 方向に最も大きいことがわかった。このことは、共有面・共有稜を挟む陽イオン間の斥力がそれら陽イオンどうしの熱振動を抑制するという一般的な観点から考えれば、特異的な現象である。この原因を検討するために、各原子の MSD の温度依存性から、デバイモデルに基づき、静的変位成分とデバイ温度を決定した。その結果、Ir および Ca の両原子とも、[100] 方向に極めて有意な静的変位成分が観測された。その静的変位成分に基づいて求めた純粋な動の変位成分 (熱振動成分) は、両原子とも、[100] 方向に最も小さいことがわかった。このことは、共有稜を挟む Ir-Ir 間および共有面を挟む Ca-Ca 間で大きな斥力が存在することを示唆し、 a 軸の熱膨張係数が他の軸長のものよりも小さいことと調和的である。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 17 件)

- 1 . T. Tobase, A. Yoshiasa, T. Hiratoko, A. Nakatsuka, “Rutile and anatase types of temperature dependent pre-edge peak intensities in K-edge XANES spectra for AO (A = Mn), A₂O₃ (A = Sc, Cr and Mn), and AO₂ (A = Ti and V)”, *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018. (印刷中)
 - 2 . 中塚晃彦, 「温度を変数とした地球内部アナログ物質の構造研究: CaGeO₃ 高压ペロブスカイト相について」, *日本結晶学会誌*, 60[1], 24-31, 2018 .
 - 3 . M. Tokuda, A. Yoshiasa, T. Mashimo, K. Iishi and A. Nakatsuka, “The vanadate garnet Ca₂NaCd₂V₃O₁₂: a single-crystal X-ray diffraction study”, *Acta Crystallographica*, C74[4], 460-464, 2018.
 - 4 . K. Fujiwara, K. Shinohara and A. Nakatsuka, “Hydrothermal synthesis and Er³⁺ ion exchange of sodium GTS-type titanosilicate”, *Journal of Physics: Conference Series*, 950, 042048, 2017.
 - 5 . A. Nakatsuka, H. Arima, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Single-crystal X-ray diffraction study of SrGeO₃ high-pressure perovskite phase at 100 K”, *Journal of Physics: Conference Series*, 950, 042015, 2017.
 - 6 . A. Yoshiasa, Y. Miyano, H. Isobe, K. Sugiyama, H. Arima, A. Nakatsuka, K. Momma and R. Miyawaki, “Structure refinement of köttigite-parasymplectite solid solution: Unique cation site occupancy and chemical bonding with water molecules”, *Journal of Mineralogy and Petrological Sciences*, 111, 363-369, 2016.
 - 7 . A. Nakatsuka, K. Sugiyama, M. Ohkawa, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “A new high-pressure strontium germanate, SrGe₂O₅”, *Acta Crystallographica*, C72, 716-719, 2016.
 - 8 . H. Fukui, A. Yoneda, A. Nakatsuka, N. Tsujino, S. Kamada, E. Ohtani, A. Shatskiy, N. Hirao, H. Uchiyama, S. Tsutsui and A. Q. R. Baron, “Effect of cation substitution on bridgmanite elasticity: A key to interpret seismic anomalies in the lower mantle”, *Scientific Reports*, 6, Article number 33337, doi: 10.1038/srep33337, 2016.
 - 9 . A. Yoshiasa, T. Nakatani, T. Hiratoko, T. Tobase, A. Nakatsuka, M. Okube, H. Arim and K. Sugiyama, “Temperature dependence of Zr and Ti K-edge XANES spectra for para- and ferro-electric perovskite-type PbZrO₃, PbTiO₃ and BaTiO₃”, *Journal of Physics: Conference Series*, 712, 012121, 2016.
 - 10 . Y. Miyano, A. Yoshiasa, T. Tobase, H. Isobe, H. Hongu, M. Okube, A. Nakatsuka and K. Sugiyama, “Weathering and precipitation after meteorite impact of Ni, Cr, Fe, Ca and Mn in K-T boundary clays from Stevns Klint”, *Journal of Physics: Conference Series*, 712, 012097, 2016.
 - 11 . T. Tobase, A. Yoshiasa, T. Hiratoko, H. Hongu, H. Isobe, A. Nakatsuka, H. Arima and K. Sugiyama, “Local structures of Ca, Ti and Fe in meteorite fusion crusts”, *Journal of Physics: Conference Series*, 712, 012095, 2016.
 - 12 . 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 PbTiO₃ phases”, *Acta Crystallographica*, B72, 381-388, 2016.
 - 13 . 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*, B72, 151-159, 2016.
 - 14 . A. Nakatsuka, K. Sugiyama, A. Yoneda, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Crystal structure of post-perovskite-type CaIrO₃ reinvestigated: new insights into atomic thermal vibration behaviors”, *Acta Crystallographica*, E71[9], 1109-1113, 2015.
 - 15 . R. Simura, K. Sugiyama, A. Nakatsuka and T. Fukuda, “High-temperature thermal expansion of ScAlMgO₄ for substrate application of GaN and ZnO epitaxial growth”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 54, 075503, 2015.
 - 16 . A. Nakatsuka, S. Kuribayashi, N. Nakayama, H. Fukui, H. Arima, A. Yoneda and A. Yoshiasa, “Temperature dependence of crystal structure of CaGeO₃ high-pressure perovskite phase and experimental determination of its Debye temperatures studied by low- and high-temperature single crystal X-ray diffraction”, *American Mineralogist*, 100[5-6], 1190-1202, 2015.
 - 17 . A. Nakatsuka, H. Arima, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Crystal structure of SrGeO₃ in the high-pressure perovskite-type phase”, *Acta Crystallographica*, E71[5], 502-504, 2015.
- 〔学会発表〕(計 37 件)
- 1 . 吉朝朗, 徳田誠, 西山忠男, 真下茂, 中塚晃彦, 有馬寛, 奥部真樹, 杉山和正, 「マントル起源 spinel 型高压相の結晶構造精密化と不思議な陽イオン席選択性」, 量子ビームサイエンスフェスタ, 2018 年 3 月 3 日, 茨城県立県民文化センター (水戸市) .

2. 北原銀河, 吉朝朗, 徳田誠, 鳥羽瀬翼, 本宮秀朋, 杉山和正, 有馬寛, 中塚晃彦, 「天然産 Ce-perovskite と Nb-perovskite の構造精密化とパラ誘電性の探査」, 日本結晶学会, 2017年11月23日, JMS アステールプラザ(広島市).
3. A. Nakatsuka, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Variable-temperature single-crystal X-ray diffraction study of SrGeO₃ high-pressure perovskite phase”, HPMP-9, 2017年9月24~28日, Saint Malo (France).
4. A. Yoshiasa, A. Nakatsuka, H. Arima, K. Sugiyama and O. Ohtaka, “XRD and XAFS Debye-Waller factors in high-pressure perovskite-type compounds”, HPMP-9, 2017年9月24~28日, Saint Malo (France).
5. K. Fujiwara, T. Hasegawa and A. Nakatsuka, “Hydrothermal synthesis of GTS-type sodium titanate and its Sm³⁺ ion exchange”, HPMP-9, 2017年9月24~28日, Saint Malo (France).
6. 藤原恵子, 谷本良平, 中塚晃彦, 「Na-GTS型チタノシリケートの Er³⁺交換体の作製とその陽イオン分布」, 日本鉱物科学会, 2017年9月12日, 愛媛大学(松山市).
7. 中塚晃彦, 大高理, 藤原恵子, 吉朝朗, 「温度変化による SrGeO₃ 高圧ペロブスカイト相の結晶構造変化」, 日本鉱物科学会, 2017年9月12日, 愛媛大学(松山市).
8. A. Yoshiasa, T. Nakatani, A. Nakatsuka, M. Okube, H. Arima and K. Sugiyama, “Precursor phenomenon before phase transitions in PbTiO₃ and BaTiO₃”, IUCr2017, 2017年8月21~28日, Hyderabad (India).
9. 藤原恵子, 中塚晃彦, 「Na-GTS型チタノシリケートにおける Er³⁺イオン交換体の結晶構造」, 日本化学会, 2017年3月16日, 慶応義塾大学・日吉キャンパス(横浜市).
10. 吉朝朗, 本宮秀朋, 杉山和正, 奥部真樹, 有馬寛, 中塚晃彦, 門馬綱一, 宮脇律郎, 「プロトン伝導性鉱物藍鉄鉱と亜砒藍鉄鉱の精密構造解析と鉄イオン酸化に伴う構造変化」, 量子ビームサイエンスフェスタ, 2017年3月14日, エポカルつくば(つくば市).
11. K. Han, Y. Miyano, H. Hongu, A. Yoshiasa, K. Sugiyama, M. Okube, H. Arima, A. Nakatsuka, K. Momma and R. Miyawaki, “Structure Refinements and Hydrogen Atom Positions of Parasymplesite from Ohita and Vivianite from Nara, Japan”, AsCA2016, 2016年12月6日, Hanoi (Vietnam).
12. A. Nakatsuka, F. Yachi, A. Yoneda, A. Yoshiasa, K. Fujiwara, S. Sasak and K. Sugiyama, “Variable-Temperature Single-Crystal X-ray Diffraction Study of CaIrO₃ Post-Perovskite”, AsCA2016, 2016年12月6日, Hanoi (Vietnam).
13. K. Fujiwara and A. Nakatsuka, “Er³⁺ Ion Exchange and Its Cation Distribution in GTS-Type Sodium Titanosilicate”, AsCA2016, 2016年12月6日, Hanoi (Vietnam).
14. A. Yoshiasa, A. Nakatsuka, M. Okube, H. Arima and K. Sugiyama, “Transition Mechanism of Tetragonal and Cubic Perovskite-Type BaTiO₃ and PbTiO₃”, AsCA2016, 2016年12月6日, Hanoi (Vietnam).
15. A. Umayahara, H. Hongu, A. Yoshiasa, K. Sugiyama, M. Okube, H. Arima, A. Nakatsuka, K. Momma and R. Miyawaki, “The Crystal Structure Refinement and Distorted Cu-sites of Clinoclase, Cu₃AsO₄(OH)₃ from Ikuchi, Hiroshima”, AsCA2016, 2016年12月6日, Hanoi (Vietnam).
16. 吉朝朗, 中塚晃彦, 本宮秀朋, 有馬寛, 奥部真樹, 杉山和正, 「ペロブスカイト型 PbTiO₃ の単結晶構造解析: 正方相に見られる立方相への転移前駆現象」, 日本結晶学会 2016年11月18日, 茨城県立県民文化センター(水戸市).
17. 范華玲, 宮野優美子, 本宮秀朋, 吉朝朗, 杉山和正, 奥部真樹, 有馬寛, 中塚晃彦, 門馬綱一, 宮脇律郎, 「木浦鉱山産亜砒藍鉄鉱と奈良登美ヶ丘産藍鉄鉱の構造精密化と水素原子位置について」, 日本結晶学会, 2016年11月17~18日, 茨城県立県民文化センター(水戸市).
18. 中塚晃彦, 矢地史幸, 米田明, 吉朝朗, 藤原恵子, 佐々木聡, 杉山和正, 「ポストペロブスカイト型 CaIrO₃ の結晶構造の温度依存性と原子変位挙動」, 日本結晶学会, 2016年11月17~18日, 茨城県立県民文化センター(水戸市).
19. 馬屋原明寛, 本宮秀朋, 吉朝朗, 杉山和正, 奥部真樹, 有馬寛, 中塚晃彦, 門馬綱一, 宮脇律郎, 「広島県生口島産斜開銅鉱 Cu₃AsO₄(OH)₃ の構造精密化」, 日本結晶学会, 2016年11月17~18日, 茨城県立県民文化センター(水戸市).
20. 馬屋原明寛, 本宮秀朋, 吉朝朗, 杉山和正, 奥部真樹, 有馬寛, 中塚晃彦, 門馬綱一, 宮脇律郎, 「広島県生口島産斜開銅鉱 Cu₃AsO₄(OH)₃ の構造精密化と水素原子位置について」, 日本鉱物科学会, 2016年9月23~25日, 金沢大学(金沢市).
21. 吉朝朗, 本宮秀朋, 中塚晃彦, 有馬寛,

杉山和正, 「正方・立方晶ペロブスカイト型 PbTiO₃ の相転移機構」, 日本鉱物科学会, 2016 年 9 月 25 日, 金沢大学 (金沢市).

22. 中塚晃彦, 九門亮, 塚本輝, 藤原恵子, 吉朝朗, 「いくつかのバナジン酸塩ガーネットに見られる 4 配位 V イオンの特異な原子変位挙動」, 日本鉱物科学会, 2016 年 9 月 25 日, 金沢大学 (金沢市).

23. 范華玲, 宮野優美子, 本宮秀朋, 吉朝朗, 杉山和正, 奥部真樹, 有馬寛, 中塚晃彦, 門馬綱一, 宮脇律郎, 「木浦鉱山産亜砒藍鉄鈷の構造精密化と水素原子位置について」, 日本鉱物科学会, 2016 年 9 月 25 日, 金沢大学 (金沢市).

24. A. Nakatsuka, K. Sugiyama, M. Ohkawa, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Single-crystal X-ray diffraction study of SrGe₂O₅: a new high-pressure strontium germanate”, EMC2016, 2016 年 9 月 13 日, Rimini (Italy).

25. A. Yoshiasa, A. Nakatsuka, M. Okube, H. Arima and K. Sugiyama, “An ordered arrangement found in local structure of perovskite-type SrCo_{1-x}Mn_xO₃ solid solution: XAFS analysis and spin state change of Co⁴⁺ ions”, EMC2016, 2016 年 9 月 12 日, Rimini (Italy).

26. K. Fujiwara and A. Nakatsuka, “Hydrothermal synthesis of GTS-type sodium titanosilicate and temperature dependence of Er³⁺ ion exchange”, EHPRG54, 2016 年 9 月 8 日, Bayreuth (Germany).

27. O. Ohtaka, Y. Yasuhiro, A. Morimoto, A. Yoshiasa, T. Tobase, A. Nakatsuka, T. Kikegawa, A. Suzuki, H. Arima and H. Saitoh, “Phase relations of CuBr under high pressure and temperature”, EHPRG54, 2016 年 9 月 6 日, Bayreuth (Germany).

28. A. Nakatsuka, K. Sugiyama, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Crystal structure of new high-pressure strontium germanate SrGe₂O₅”, EHPRG54, 2016 年 9 月 6 日, Bayreuth (Germany).

29. A. Yoshiasa, Y. Yasuhiro, T. Tobase, H. Arima, M. Okube, A. Nakatsuka and O. Ohtaka, “Bond distances and effective pair potentials in CuBr under high pressure and high temperature”, EHPRG54, 2016 年 9 月 6 日, Bayreuth (Germany).

30. 中塚晃彦, 有馬寛, 大高理, 藤原恵子, 吉朝朗, 「温度パラメータとした高圧 SrGeO₃ ペロブスカイト単結晶の結晶構造変化」, 量子ビームサイエンスフェスタ, 2016 年 3 月 15 日, エポカルつくば (つくば市).

31. 吉朝朗, 仲谷友孝, 中塚晃彦, 奥部真樹, 杉山和正, 真下茂, 「ペロブスカイト型 PbTiO₃, BaTiO₃ 強誘電体の結晶構造精密化と温度依存性」, 量子ビームサイエンスフェスタ, 2016 年 3 月 15 日, エポカルつくば (つくば市).

32. A. Nakatsuka, H. Arima, O. Ohtaka, K. Fujiwara, A. Yoshiasa, “Structural feature of SrGeO₃ high-pressure perovskite phase studied by single-crystal X-ray diffraction”, PACIFICHEM2015, 2015 年 12 月 18 日, Honolulu (USA).

33. K. Fujiwara, K. Shinohara, A. Nakatsuka, “Cation distribution of Na GTS-type titanosilicates ion-exchanged by Er³⁺”, PACIFICHEM2015, 2015 年 12 月 18 日, Honolulu (USA).

34. 中塚晃彦, 有馬寛, 大高理, 藤原恵子, 吉朝朗, 奥部真樹, 佐々木聡, 「単結晶構造解析による SrGeO₃ 高圧ペロブスカイト相の化学結合性と原子の熱振動」, 日本 MRS, 2015 年 12 月 8 日, 産業貿易センタービル (横浜市).

35. 中塚晃彦, 大山源太, 藤原恵子, 大高理, 奥部真樹, 佐々木聡, 杉山和正, 「CaGeO₃ 正方晶ガーネットに由来した低対称ハイドロガーネットの結晶構造と水素結合」, 日本鉱物科学会, 2015 年 9 月 25 日, 東京大学 (東京都).

36. A. Nakatsuka, H. Arima, O. Ohtaka, K. Fujiwara and A. Yoshiasa, “Single crystal X-ray diffraction study of SrGeO₃ high-pressure perovskite phase”, Joint AIRAPT-25 & EHPRG-53, 2015 年 9 月 3 日, Madrid (Spain).

37. K. Fujiwara, K. Shinohara and A. Nakatsuka, “Hydrothermal synthesis of GTS-type sodium titanosilicate and Er³⁺ ion exchange”, I Joint AIRAPT-25 & EHPRG-53, 2015 年 9 月 1 日, Madrid (Spain).

【その他】

<http://seigyoyamase.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中塚 晃彦 (NAKATSUKA Akihiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号: 80294651

(2) 研究分担者

藤原 恵子 (FUJIWARA Keiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・助手

研究者番号: 50253175