

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 17 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2010～2014

課題番号：22244068

研究課題名(和文) 衝撃圧縮・超高温高压下での融体・惑星地球物質の日本先導的局所構造研究

研究課題名(英文) Japanese leading local structure study on minerals and melts under shock compression and high-temperature and -pressure

研究代表者

吉朝 朗 (Yoshiasa, Akira)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：00191536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：鉱物や高压融体の局所構造を日本先導の最新の科学技術により、原子の挙動や物性発現機構を知り、地球惑星物質に凍結された超高压や衝撃圧縮等の惑星地球諸活動の読み取りを試みた。隕石衝突により形成されるガラスは、超高温・還元衝撃圧縮情報が局所構造に凍結されている。大量絶滅が知られているKT境界層には隕石衝突による記録が局所構造に凍結されている。低温固体氷は水に浮く。ある圧力域で低温固体の密度が液体より小さい領域が存在することが一般的であることを、高温高压実験により明らかにした。超高压鉱物にみられる元素の異常配位数、異常価数や低スピン状態の特異性等の本質を結晶化学的に明らかにできた。

研究成果の概要(英文)：This research is an attempt to read the important record concerning the earth and planet activity that remains in and crystal structures and local structure of elements in solids. The experiments are performed in-situ, by using world's top level equipment such as the synchrotron facilities. Information on the short to long range order structures is obtained by XAFS and the diffraction methods. Physical property, electronic state and atomic level structure analyses are put into close contact to investigate details of the melt, glass and crystal materials under extreme conditions. Information on extreme conditions at meteorite impact is frozen in local in impact related glasses. The density of the low-T solid phase is smaller than that of high-T liquid in some P-T region. The existence in such pressure region is general in covalent bond materials. We have clarified the origin on unique valence states and coordination environments in the Earth's mantle origin minerals.

研究分野：結晶学 鉱物学

キーワード：局所構造 精密構造解析 衝撃超高温高压 高压鉱物 高压融体 物性発現機構

1. 研究開始当初の背景

地球惑星物質の主要・微量元素の局所構造情報の重要性が確認されている。各元素周りの局所構造には、拡散移動や諸物性の発現機構情報や過去に経験した温度圧力等の履歴情報が含まれている。高温高压下では、ケイ酸塩鉱物ダイヤモンドに関連するような4配位型構造の隙間の大きな化合物では、ある圧力域では水と氷のように、高温液体の密度が固体より大きい領域が存在し、クラペイロンのカーブが負の勾配を持つ。圧力により融体も結晶同様に大きな構造変化を起こす。元素分配や拡散現象、反応原理、物性発現機構は組成や平均構造に依存するが、圧力増加にともなう局所構造変化、構造の乱れやゆらぎの程度などにも大きく依存する。

鉱物や高压融体の局所構造を詳細に調べ、元素の挙動・拡散移動や諸物性発現機構を知り、地球惑星物質に凍結された高压高温や衝撃圧縮、融体との共存情報等の履歴や惑星地球諸活動の読み取りを行う試みが求められている。マントル鉱物や超高压鉱物にみられる Fe⁴⁺等の遷移金属元素の異常価数や低スピン状態、高温液体の密度が固体より大きい圧力領域で起こる元素分配の特異性、衝撃超高压で特定元素の特異な局所構造等の本質を解明する研究が必要であった。最先端の回折法とX線吸収分析法等を併用した構造解析を同時に行うことで局所構造から中・長距離におよぶ総合情報を得ることで新たな地検が得られる時期にある。第3世代放射光利用による高温高压下その場観測実験と異常分散法やモンテカルロ法等のアルゴリズムを採用した最新の構造解析法により、融体・ランダム系、不規則系の精密構造解析を行う研究が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、鉱物や高压融体の局所構造を詳細に調べ、元素の挙動・拡散移動や諸物性発現機構を知り、地球惑星物質に凍結された高压高温や衝撃圧縮、融体との共存情報等の履歴や惑星地球諸活動の読み取りを行うことである。

配位子場エネルギー等が強いことが原因で遷移金属の低スピン状態が通常の鉱物で観測される。観測される異常価数や特異な電子状態は、主構造の持つ特性を反映した場合と、過去に経験した高压等の極限環境の凍結記録の場合がある。元素の濃集や分配の違いは多成分系の場合、共存相の構造や物理的条件、時間等に依存するが、極限下での融体や結晶の構造変化や局所構造など科学的情報が不足している。衝撃実験からは、独特の高温高压情報が得られ、時間平衡に近い試料と微量元素の分配関係の違いを検討できる。融体のようなランダム系、不規則系の構造解析精度は、放射光を用いることで近年格段に進歩し、短距離から中・長距離に及ぶ原子の静的・動的情報の精密化が進んでいる。X線

吸収微細構造(XAFS)測定実験では、特定元素(例えば Fe⁴⁺や Ir 周り)の局所構造や価数・化学結合性、振動拡散の有効ポテンシャル等を決定できる。

高温高压下で、融体・ランダム系、不規則系のトップレベルでの構造解析を行う。大容量高压プレス、第3世代放射光利用とモンテカルロ法等のアルゴリズムを採用した最新の構造決定法、精密解析に欠かせない各種補正システムを扱う。回折法とXAFS法、電顕、各種分光法や分析法を併用した構造解析、キャラクタリゼーションを同時に行うことで短距離から中・長距離におよぶ総合情報を得る。世界最高の検出技術を有する。最高性能の放射光装置と多素子の検出器を用いての微量元素の測定を行う。各種処理法を確立したことにより、濃集相を分離し、解析する。トップレベルの局所構造解析技術により、配位数、原子間距離(0.001 オーダーの精度)、熱運動などによる構造ゆらぎの定量的な決定が行え、イオンの拡散や熱伝導などの物性に関する各種定数が得る。

3. 研究の方法

回折法とX線吸収分析法等を併用した構造解析を同時に行うことで局所構造から中・長距離におよぶ総合情報を得る。高温高压下での融体や衝撃圧縮下で得られるガラス等のランダム系物質、不完全結晶等の不規則系結晶の構造決定を行う。大容量高压プレス、第3世代放射光利用とモンテカルロ法等のアルゴリズムを採用した最新の構造決定法、精密解析に欠かせない各種補正システムを用いる。FZ炉による超高温からの急冷実験・2段ガンによる衝撃圧縮実験回収試料の解析。融体等のランダム系や欠陥濃度の高い不規則系が共存する系を扱う。温度圧力に伴う構造変化・相図の決定、主要・微量元素の分配の変化、同位体効果や動力学的効果の検出を行う。各元素の局所構造、原子レベル構造、電子状態の精密測定、極限環境の凍結情報を定量的に決める。

特定の温度圧力下でその場観測による、融体等のランダム系の配位数増加を伴ったような構造変化を明らかにする。先端の融体・ランダム系の解析法を高压下で始めて導入する。融体等のランダム系では配位数増加を伴ったような構造変化は、常圧下へのクエンチ実験では詳細には検出できずその場観測を行う。放射光を用いた波長可変の強X線強度利用による、異常分散項を用いた元素別の中距離情報の精密決定を高压高温下で行う。極限環境下その場観測、また同環境を経験した回収試料中の各元素の局所構造、電子状態を精密に決め、重要な物理量を定量的に決定する。平均構造情報と、これまで得られなかった微量元素の精密局所構造の情報から、惑星地球レベルの諸現象解明の更なる手掛かりを得る。衝撃圧縮実験やFZ炉による超高温からの急冷実験等を併用し、

隕石衝突などで起こる特異な分配挙動・局所構造凍結プロセスを明らかにする。回収資料の解析から、如何に過去の温度圧力情報が微量元素に記録されるか明らかにする。天然の試料と各種微量元素を添加含有した各種合成鉱物の局所構造を比較し、より多くの情報を得る。

4. 研究成果

本研究では、鉱物や高圧融体の局所構造を日本先導の最新の科学技術により詳細に調べ、原子の挙動や物性発現機構を知り、地球惑星物質に凍結された高圧高温や衝撃圧縮等の履歴や惑星地球諸活動の読み取り試み、多くの成果がえられた。隕石衝突により形成されるテクタイトガラスやクレーター周辺で形成されるインパクトガラスは、超高温・還元衝撃圧縮情報が Zr や Fe、Ti などの局所構造に凍結されていることを初めて明らかにした。また、隕石衝突による大量絶滅が知られている白亜紀-第三期境界層には隕石衝突による記録が、Zr 等の局所構造に凍結されていることも発見し、新たな堆積岩中での隕石衝突記録のマーカーを提案できた。白亜紀-第三期境界層での As と Sb の異常濃集の本質も明らかにできた。地球惑星物質の局所構造情報獲得の重要性を提案することができた。

低温固体氷が水に浮く特異な性質により惑星地球環境は大きく支配されている。水と氷のように、ケイ酸塩鉱物や共有結合性 4 配位型構造化合物では、ある圧力域で低温固体の密度が液体より小さい領域が存在し、クラペイロンカーブが負の勾配を持つことが一般的であることを、高温高圧実験により明らかにした。圧力により融体も結晶同様に配位数増加による大きな構造変化を起こす。元素分配や溶解現象は、局所構造変化に大きく依存する。

マントル鉱物や超高压鉱物にみられる元素の異常配位数、異常価数や低スピン状態、元素分配の特異性等の本質を結晶化学的に明らかにできた。各種最先端法を活用した精密構造解析により、超高压下で合成した多くのマントル物質固溶体の特異な陽イオン分布とその鉱物学的重要性を明らかにした。ペロブスカイトやスピネル固溶体は、地球型惑星の物理的性質やテクトニクスを知るうえで重要な物質群がとる結晶構造である。イオン半径と配位数の Pauling の原理に従わない特異な例の発見や超重力下等の特異環境で新たな準安定構造を発見した。最も重要な造岩鉱物であるエンスタタイト輝石の高温単斜型の構造凍結メカニズムを明らかにし、長年の鉱物学的重要問題を解決できた。高圧鉱物は大きな不規則性や奇妙な熱振動特性をもち、その本質を解明した。サイズの異なる陽イオンを固溶しつつ、3次元周期性を保ち結晶状態であるために、酸素位置のみが局所的に静的な大きな変位をして、構造を緩和

している様相など、実験により原子レベルで詳細描写に成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 38 件) 全て査読あり

1. Akira Yoshiasa, Maki Okube et al. A Peculiar Site Preference of B in MgAl₂-xBxO₄ Spinel under High-pressure and High-temperature, Z. Anorg. Allg. Chem, 636, (2010) 472-475

2. Akira YOSHIASA, Maki OKUBE, Osamu OHTAKA et al., High-Pressure XAFS Study of Pure ZrO₂ and Stabilized Cubic ZrO₂, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, 79 (2010) 48-50

3. Osamu OHTAKA, Akira YOSHIASA et al., Ionic Conductivities of CuI Phases at High Pressure and Temperature. J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, 79 (2010) 51-53

4. Rabaya Bagum, Akira Yoshiasa, Tsutomu Mashimo, et al., Effect of strong gravity on YBa₂Cu₃O_{7-x} superconductor. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 108 (2010) 053517 7pp

5. Akihiko Nakatsuka, Akira Yoshiasa et al., Static disorders of atoms and experimental determination of Debye temperature in pyrope: Low- and high-temperature single-crystal X-ray diffraction study, American Mineralogist, 96(2011) 1593-1605

6. Ling Wang, Akira Yoshiasa, Maki Okube et al., Titanium local structure in tektite by X ray absorption fine structure spectroscopy. Journal of Synchrotron Radiation, 18 (2011) 885-890

7. Tsutomu Mashimo, Emil Omurzak, et al. Effect of shock compression on wurtzite-type ZnMgS crystals, J. Appl. Phys, 109 (2011) 013514

8. 吉朝朗, 前川英己, 杉山和正, MgAl₂O₄ スピネル固溶体の結晶化学: 高温高圧下や元素置換において観測される特異な陽イオン席選択性, 日本結晶学会誌, 53 (2011) 13-18

9. L. Chen, T. Mashimo, E. Omurzak, H. Okudera, A. Yoshiasa et al., Pure Tetragonal ZrO₂ Nanoparticles Synthesized by Pulsed Plasma in Liquid, Journal of Physical Chemistry, C115 (2011) 9370-9375

10. Hiroyuki Okudera, Akira Yoshiasa et al., Local structure of magnetite and maghemite and chemical shift in Fe K-edge XANES, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 107 (2012) 127-132

11. M. Okube, S. Sasaki, A. Yoshiasa et al., Local structure of Zn in Cretaceous- Tertiary boundary clays from Stevns Klint. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 107 (2012)192-196
12. Y. Sato, M. Terauchi, A. Yoshiasa et al. High energy-resolution electron energy-loss spectroscopy analysis of dielectric property and electronic structure of hexagonal diamond. *Diamond and Related Materials*, 25(2012)40-44.
13. Maki Okube et al., Spin orientation in (Ti-Mn) Ba ferrite estimated from resonant X-ray magnetic scattering, *Journal of Physics: Conference series*, 425 (2012) 102005
14. M. Okube et al., Residual-density mapping and site-selective determination of anomalous scattering factors to examine the origin of Fe K pre-edge peak of magnetite, *Journal of Synchrotron Radiation*, 19 (2012) 759-767
15. Akira Yoshiasa, Akihiko Nakatsuka, Maki Okube and Tomoo Katsura, Single-crystal metastable high temperature C2/c clinoenstatite quenched rapidly from high temperature and high pressure. *Acta Crystallographica Section B*, 69 (2013) 541-546
16. Tatsuya Hiratoko, Akira Yoshiasa, Maki Okube, Akihiko Nakatsuka et al., Temperature dependence of pre-edge feature in Ti K-edge XANES spectra for ATiO₃ (A= Ca and Sr), A₂TiO₄ (A=Mg and Fe), TiO₂ rutile and TiO₂ anatase. *Journal of Synchrotron Radiation*, 20 (2013) 641-643
17. Ai Koganemaru, Akira Yoshiasa, Akihiko Nakatsuka, Maki Okube, et al., Effective pair potential for Ca-O bonds in CaGeO₃ polymorphs. *Journal of Physics: Conference Series*, 430 (2013) 012068 4pp
18. L. Wang, A. Yoshiasa, M. Okube, et al. Local structure of Titanium in natural glasses probed by X-ray absorption fine structure, *Journal of Physics: Conf. Series*, 430 (2013) 012121 4pp.
19. Ling Wang, Akira Yoshiasa, Maki Okube, et al., Local structure of iron in tektites and natural glass probed by X-ray absorption fine structure spectroscopy, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 108 (2013) 288-294
20. T. Tobase, A. Yoshiasa, M. Okube, et al. XAFS study on Ca local structure in natural glasses and tektite., *Journal of Physics: Conference Series*, 430 (2013) 012070 4pp.
21. 吉朝 朗, 回折法と X 線吸収分光(XAFS)法を用いた地球惑星物質の精密構造解析, *岩石鉱物科学*, 42 (2013), 111-122
22. A. Nakatsuka, A. Yoshiasa et al., Low- and high-temperature single crystal X-ray diffraction study of CaGeO₃ perovskite synthesized at 12 GPa and 1253K, *Bulletin of the Am. Phys. Society*, Vol. 58, (2013) 61-62
23. T. Mashimo, A. Yoshiasa et al., Hugoniot-measurement experiment of high- temperature sample on W and Au for discussion of Grüneisen parameter, *Bulletin of the Am. Phys. Society*, Vol. 58, (2013) 200
24. Zhyrgul Abdullaeva, Hiroki Okudera, Tsutomu Mashimo et al., High temperature stable WC_{1-x}@C and TiC@C core-shell nanoparticles by pulsed plasma in liquid., *RSC Advances*, 3 (2013)513-519
25. Lilang Chen, Tsutomu Mashimo, Hiroki Okudera, Akira Yoshiasa et al. Synthesis of novel CoCx@C nanoparticles. *Nanotechnology*, 24(2013)0450602(10pages)
26. Hiroki Okudera, Relationships among channel topology and atomic displacements in the structures of Pb₅(BO₄)₃Cl with B = P (pyromorphite), V (vanadinite) and As (nimetite). *American Mineralogist* 98 (2013)1573-1579.
27. Akane Arasuna, Hiroki Okudera, Shoji Arai et al. The role of water in coesite crystallization from silica gel. *European Journal of Mineralogy* 25 (2013). 791-796,
28. Hiromi Nojiri, Hiroki Okudera, et al.. Structural change of alkali feldspar by ball milling. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 108 (2013) 267-277,
29. N. Nakayama, A. Nakatsuka, M. Isobe et al., Structural Phase Transitions of Li₂MgSiO₄ and Li₂MgGeO₄, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 38[3], (2013) 419-422.
30. 佐藤庸平, 寺内正己, 居波 涉, 吉朝 朗, 高分解能 EELS による六方晶ダイヤモンド粒子の誘電特性, *日本結晶学会誌* 55(2013)245-252
31. A. Yoneda, A. Nakatsuka, A. Yoshiasa, et al., Single crystal elasticity of Cmcm- and Pbnm-CaIrO₃: The D” diversity interpreted by lattice preferred orientation of post perovskite, *Nature Communications*, 5, (2014)

3453 doi:10.1038/ncomms4453.

32. M. Okube and S. Sasaki, Site-specific electronic structures of ferrimagnetic Fe₃O₄ measured by resonant X-ray magnetic scattering, *Journal of Applied Crystallography*, 47, (2014) 1387-1394.

33. M. Okube, et al., Topologically Sensitive Surface Segregations of Au-Pd Alloys in Electrocatalytic Hydrogen Evolution, *ChemElectroChem*, 1, (2014) 207-212

34. L. Chen, T. Mashimo, H. Okudera, et al. Synthesis of WO₃·H₂O nanoparticles by pulsed plasma in liquid, *RSC Advances*, 4, (2014)28673-28677.

35. 中塚晃彦, 「温度をパラメータとした鉱物結晶学 原子変位挙動の解明」, *日本結晶学会誌*, 56, (2014)150-157

36. 奥部 真樹, 佐々木聡, 共鳴散乱と結晶構造解析, *日本結晶学会誌*, 56 (2014) 158-165

37. Tsubasa Tobase, Akira Yoshiasa, et al., XAFS study on the zirconium local structures in tektites and natural glasses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 110 (2015) 1-7

38. Akihiko Nakatsuka, Akira Yoshiasa et al., Crystal structure of SrGeO₃ in the high-pressure perovskite-type phase *Acta Crystallographica*, E71 (2015) 502-504.

[学会発表](計 22件)

1. Akira Yoshiasa: Boron occupation of aluminium site in spinel- and olivine-related structures under high-pressure., The 20th general meeting of the international mineralogical association (特別MS講演)2010年8月21日~8月27日 National Office for Research and Technology, Budapest

2. Wang Ling, Akira Yoshiasa et al.: Local structure analysis of tektite by Ti K-edge EXAFS spectroscopy. The 20th general meeting of the international mineralogical association 2010年8月21日~8月27日 National Office for Research and Technology, Budapest

3. Akira Yoshiasa, Maki Okube and Kei-ichiro Murai: Precise structure analyses of advanced materials using synchrotron radiation under high-pressure and high-temperature., The Sixth International Conference on Advanced Materials Development and Performance (招待講演)2011年7月15日~7月18日, Tokushima

University.

4. Maki Okube et al.: Resonant X-ray magnetic scattering for transition-metal ferrites. IUCr 2011 XXII Congress, International Union of Crystallography (依頼・招待公演)2011年8月22日~8月30日 Spain Madrid

5. 平床竜矢, 吉朝 朗他: Local distortion and pre-edge feature in Ti K-edge XANES spectra for ATiO₃ (A=Mg, Ca, Sr, Ba, Pb) and TiO₂, セラミックス協会 秋季年会(依頼・招待講演)2011年09月06日北海道大学

6. 吉朝 朗他: 高圧高温下での機能性無機化合物の回折法とXAFS法による構造解析, 西日本化学会(招待講演)2011年11月12日11月13日徳島、徳島大学

7. Akira Yoshiasa, et al.: HIGH-PRESSURE AND HIGH-TEMPERATURE IN-SITU XRD AND XAFS MEASUREMENT OF ADVANCED MATERIALS USING SYNCHROTRON RADIATION. The 11th International Conference on Synchrotron Rad. Instrumentation. 2012年7月9日~7月13日 Lyon, France

8. Akira Yoshiasa, Akihiko Nakatsuka, Osamu Ohtaka et al.: Precise structure analyses of advanced materials using in-situ XRD and XAFS methods under high-pressure and high-temperature. The Asian Crystallographic Society (ASCA) and the Society of Crystallographers in Australia and New Zealand (SCANZ) 2012年12月2日~12月5日 Adelaide, Australia

9. Tsubasa Tobase, Ling Wang, Maki Okube, Akira Yoshiasa et al.: Ca local structure in natural glasses and tektite studied by X-ray absorption near edge structure. The 15th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure, 2012年7月22日~7月28日 Beijing, China

10. T. mashimo: Hugoniot- measurements at room- and high- starting temperatures of metals for EOS study(招待講演), 6th Asian Conference on High Pressure Research, 2012年8月8日~8月12日 Beijing, China

11. A. Yoshiasa, A. Nakatsuka, M. Okube, et al.: Mean square relative displacements and mean square displacements in CaGeO₃ high pressure perovskite and garnet phases, European High Pressure Research Group International Meeting (EHPRG51), London, UK, September 2, 2013.

12. A. Nakatsuka, A. Yoshiasa et al.: Temperature dependence of crystal structure of CaGeO₃ high pressure perovskite phase. European High Pressure Research Group

International Meeting (EHPRG51), London, UK, September 2, 2013.

13. A. Nakatsuka, A. Yoshiasa et al.: Low- and high-temperature single crystal X-ray diffraction study of CaGeO₃ perovskite synthesized at 12 GPa and 1253 K. AIRAPT-24, Seattle, USA, July 8, 2013.

14. AKIRA YOSHIASA (invited): XAFS and diffraction analyses of advanced material and melt under high-pressure and high-temperature. IX Conference of the Polish Ceramic Society, 2013年09月19日~09月22日 Zakopane Polish

15. T. Tobase, A. Yoshiasa et al. XANES and EXAFS study on Zr local structure in impact-related glasses. The 2013 Asian Crystallographic Association Meeting (AsCA'13), 2013年12月07日~12月10日 Hongkong

16. A. Yoshiasa (invited): Detail structure characterization of advanced material and melt using synchrotron radiation under high-pressure and high-temperature. THERMEC: the 8th international conference on advanced materials, 2013年12月02日~06日 Las Vegas

17. T. Mashimo(invited): New materials processing under strong gravitational field, 13th International Ceramics Congress (2014CIMTEC), June 8-13, 2014, Montecatini Terme, Pistoia, Italy

18. T. Mashimo(invited): Recent progress in materials science under strong gravitational field, 9th Internat. Conf. on Diffusion in Materials (DIMAT2014), August 17-22, 2014, Münster, Germany.

19. A. Nakatsuka, O. Ohtaka et al.: Structure and H position of tetragonal hydrogarnet derived from CaGeO₃ garnet. 23rd Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, 8/11, 2014, Montreal, Canada

20. Akira Yoshiasa, Akihiko Nakatsuka, Maki Okube: High temperature C2/c clinoenstatite single crystals, detail structure and transition mechanism. the 21st General Meeting of the International Mineralogical Association 2014年09月01日~09月05日 SouthAfrica.

21. Akira Yoshiasa(invited): ,Detail structure analyses of the earth's interior and melt under high pressure and high temperature, The Sixth Meeting of Research Consortium on High-pressure Research, 2014年09月26日~09月27日, Kumamoto

22. Hidetomo HONGU, Akira YOSHIASA, Maki OKUBE et al.: Local structure of Sb in Cretaceous-Tertiary boundary clays from Stevns Klint by the XAFS method, The AGU Fall Meeting 2014年12月15日~12月19日, SanFrancisco.

【図書】(計2件)

【著書】

1. 吉朝 朗, 「日本の結晶学(II) - その輝かしい発展 - 」, 日本結晶学会「日本の結晶学(II)」出版編集委員会編, 2014. (株)日本印刷 (ISBN: 978-4-9903861-1-5)

2. M. Azuma, Osamu Ohtaka and Nobuhiro Kumada, High-Pressure Synthesis of Solids. in Encyclopedia of Inorganic and Bio-inorganic Chemistry, ed R.A. Scott, John Wiley: Chichester. DOI: 10.1002/9781119951438.eibc0080.pub2. 2015.

【その他】

ホームページ等

URL:<http://www.sci.kumamoto-u.ac.jp/~yoshiasa/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉朝 朗 (YOSHIASA Akira)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 00191536

(2)研究分担者

真下 茂 (MASHIMO Tsutomu)

熊本大学・パルスパワー科学研究所・教授

研究者番号: 90128314

大高 理 (OHTAKA Osamu)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 40213748

奥寺 浩樹 (OKUDERA Hiroki)

金沢大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号: 50401881

中塚 晃彦 (NAKATSUKA Akihiko)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 80294651

奥部 真樹 (OKUBE Maki)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教

研究者番号: 10397060