

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 8 月 17 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05550

研究課題名(和文) 固体水素高压相：III相の高圧低温 X線回折実験による構造決定

研究課題名(英文) Structure analysis of solid hydrogen III phase using high-pressure X-ray diffraction technique

研究代表者

赤浜 裕一 (Akahama, Yuichi)

兵庫県立大学・物質理学研究科・特任教授・名誉教授

研究者番号：90202522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：固体水素 相からの統計精度の高い粉末X線回折パターンを200 GPaまで観測することに世界で初めて成功した。観測データを基に、相は、六方晶の対称性を持つ構造で、200 GPaでも水素分子は依然としてhcp構造の格子点近傍にあることを明らかにした。これまで、相の構造は理論研究から単斜晶(C2/c)が有力視されてきたが、この提案を覆す結果となり、理論計算の再検討を促した。一方、ラマン散乱から相は230 GPa程で結晶の低対称化を起こすことを突き止めた。さらに、水素超臨界流体相のX線回折とラマン分光実験から、密度と分子振動の相関を明らかにした他、多くの単体物質の圧力誘起構造相転移を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水素は、最も単純な元素で、科学研究における重要な対象物質である。400 GPa以上の超高压力下で実現すると予言されている金属水素は、室温で超伝導を示すことが提案され固体物理学の分野の重要課題となっている。本研究で解明された固体水素 相の結晶構造、密度そして分子振動に関する情報は、金属水素を実現し、金属相の物性を理解する上で貴重な基礎データであり、学術的に大きな意義がある。また、本研究により解明された水素超臨界流体相の光学的性質や凝集状態そして密度等の基礎物性は、水素社会実現のための高压水素ガス応用の上で貴重なデータに成ることから社会的に意義があると確信している。

研究成果の概要(英文)：For the first time in the world, we succeeded in observing a high-quality powder X-ray diffraction pattern from the solid hydrogen phase III up to 200 GPa. Based on the observed data, it was clarified that the phase III structure has hexagonal symmetry, and that the hydrogen molecule is still near the lattice point of the hcp structure even at 200 GPa. So far, a monoclinic lattice (C2/c) has been regarded as promising for the structure of phase III from theoretical studies, but this result overturned this prediction and prompted a reexamination of theoretical calculations. Our Raman spectroscopy also clarified that the phase III caused a low symmetry of the crystal structure at about 230 GPa. Furthermore, the correlation between density and molecular vibration for the hydrogen supercritical fluid phase was found from X-ray diffraction and Raman spectroscopy experiments, and the pressure-induced structural phase transitions of many elemental materials were clarified.

研究分野：高圧力物理学

キーワード：水素 高压固体相 X線回折 金属化 超臨界流体相 ラマン分光 放射光 ダイヤモンドアンビル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水素は、最も単純な元素で、科学研究における重要な対象物質であることから、その物性は古くから研究されている。固体水素には、最近発見された半導体相 (VI 相) を加え、現在、四つの相の存在が明らかにされている。低温下 160 GPa 程で出現する III 相では水素分子の回転は完全に凍結され、分子の配向秩序が定まると考えられているがその結晶構造は不明である。多くの理論研究は、単原子水素金属相への転移に先立って、III 相のバンドオーバーラップ金属化を提案しているが、提案された結晶構造と金属化圧力は収束していない。それゆえ III 相の構造解明は、水素の金属化過程を解明する上での重要課題である。また、近年、水素は次世代クリーンエネルギー源として注目を集めているが、水素社会実現のためには、水素超臨界流体相の光学的性質や凝集状態そして密度等の基礎物性は応用上、大変重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高压下での X 線回折実験とラマン分光実験を行い、固体水素 III 相の結晶構造を解明することである。また、水素エネルギーの応用の見地から高密度水素の密度や分子振動の情報を系統的に理解する。さらに、高密度水素の研究で培った超高压発生技術を物質科学研究に活用することである。

3. 研究の方法

本研究では、ダイヤモンドアンビルセル圧力発生装置を用いた超高压発生法や 100 GPa 以上で使用可能な二次圧力スケールの超高压技術を独自に開発する。この技術を使って、バンドオーバーラップによる金属化が提案させる水素の分子性固体 III-相の結晶構造を SPring-8 の高輝度放射光を用いた X 線回折実験を行って解明する。具体的には、固体水素 III-相の安定領域 (100 K 以下、160 GPa 以上) でも、水素分子の回転が完全に凍結される 200 GPa までの超高压下で粉末 X 線回折データを収集し構造解析を行う。得られた結果を理論から提案された構造と比較検討して、金属化の圧力や機構を精査する。また、水素超臨界流体相の X 線回折実験とラマン分光実験を行って、分子振動と密度の相関を解明する。さらに、本研究で独自に開発した超高压発生法や超高压技術を応用し、単体物質の高力誘起相転移や状態方程式を解明する。

4. 研究成果

本研究では、世界最大の放射光施設 SPring-8 において、固体水素 III 相からの比較的統計精度の高い回折パターンを 200 GPa まで観測することに世界で初めて成功した。III 相は、200 GPa でも水素分子は依然として hcp 構造の格子点近傍にあることを明らかにした。これまで、III 相の構造は理論研究から提案された単斜晶 (C2/c) が有力視されてきたが、この提案を覆す結果となり、理論計算の再検討を促した。極最近、理論計算が再検討され、200 GPa までは Hexagonal 構造が最安定で、我々の実験結果を支持する結果が報告された。また、水素超臨界流体相の X 線回折実験とラマン分光実験を行い、密度と分子振動の間に強い相関があること明らかにし、論文発表した。この結果は、水素社会実現のため貴重なデータである。一方、本研究で独自に開発した超高压技術を活用して、単体物質の固体酸素、黒リン、インジウム、テルル、チタン、バナジウム等の圧力誘起の構造相転移を発見し、高密度状態の構造物性を解明して論文発表した。

< 引用文献 >

- (1) Y. Akahama, Y. Mizuki, S. Nakano, N. Hirao, and Y. Ohishi, Raman scattering and X-ray diffraction studies on phase III of solid hydrogen, *Journal of Physics: Conf. Series* **950** 042060 (2017).
- (2) T. Sasaki, K. Kondo, Y. Akahama, S. Nakano, and T. Taniguchi, Raman spectroscopy of Two-Dimensional Material under high pressure: black phosphorus ultrathin film, phosphorene, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 05FB06 (2017).
- (3) K. Akiba, A. Miyake, Y. Akahama, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, and M. Tokunaga, Two-carrier analyses of the transport properties of black phosphorus under pressure, *Phys. Rev. B* **95**, 115126 (2017).

- (4) Y. Akahama, N. Okawa, T. Sugimoto, N. Hirao, and Y. Ohishi, Coexistence of a metastable double hcp phase in bcc-fcc structure transition of Te under high pressure, *Jpn. J. App. Phys.* **57**, 025601 (2018).
- (5) M. Fujimoto, Y. Akahama, H. Fukui, N. Hirao, and Y. Ohishi, Observation of the negative pressure derivative of the bulk modulus in monoclinic ZrO₂, *AIP Advances* **8**, 015310 (2018).
- (6) T. Ono, Y. Tsukiyama, A. Taema, H. Sato, H. Kiyooka, Y. Yamaguchi, A. Nagahashi, M. Nishiyama, Y. Akahama, Y. Ozawa, M. Abe, and Y. Hisaeda, Piezofluorochromism in charge-transfer inclusion crystals: A prominent influence of high-pressure over mechanical grinding, *ChemPhotoChem*, DOI: [10.1002/cptc.201700227](https://doi.org/10.1002/cptc.201700227) (2018).
- (7) Y. Machida, A. Subedi, K. Akiba, A. Miyake, M. Tokunaga, Y. Akahama, K. Izawa, and K. Behnia, Observation of Poiseuille Flow of Phonons in Black Phosphorus, *Science Advances* **4**(6) DOI: [10.1126/sciadv.aat3374](https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3374) (2018).
- (8) M. Nurmat, R. Yori, Y. Ishida, K. Sumida, S. Zhu, M. Nakatake, Y. Ueda, M. Taniguchi, S. Shin, Y. Akahama, and A. Kimura, Prolonged photo-carriers generated in a massive-and-anisotropic Dirac material, *Scientific Reports* **8**(1) DOI: [10.1038/s41598-018-27133-6](https://doi.org/10.1038/s41598-018-27133-6) (2018).
- (9) K. Hirose, T. Osada, K. Uchida, T. Taen, K. Watanabe, T. Taniguchi, and Y. Akahama, Double carrier transport in electron doped region in black phosphorus FET, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 193101 (2018).
- (10) Y. Akahama, K. Takahashi, K. Kamiue, T. Sugimoto, N. Hirao, and Y. Ohishi, Pressure-induced reentrant structural transition and equation of state of indium, *J. Appl. Phys.* **125**, 075901 (2019).
- (11) Y. Akahama, H. Fujihisa, N. Hirao and Y. Ohishi, Relation between O₈ cluster shape and vibrational spectra in the β -phase of solid oxygen, *Jpn J. of Appl. Phys.*, **58**, 095502 (2019).
- (12) H. Fukui, Le The Anh, M. Wada, N. Hiraoka, T. Iitaka, N. Hirao, Y. Akahama, and T. Irifune, Electronic structure of dense solid oxygen from insulator to metal investigated with X-ray Raman scattering, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **116**, 21385-21391 (2019).
- (13) H. Fukui, M. Fujimoto, Y. Akahama, A. Sano-Furukawa, T. Hattori, Structure change of monoclinic ZrO₂ baddeleyite involving softenings of bulk modulus and atom vibrations, *Acta Crystallographica Section B Structural Science, Crystal Engineering and Materials*. **75**. 4. 742-749 (2019)
- (14) Y. Akahama, R. Miyamoto, S. Nakano, S. Kawaguchi, N. Hirao, and Y. Ohishi, High-pressure Raman scattering and x-ray diffraction studies of the supercritical fluid of hydrogen, *J. Appl. Phys.* **128**, 135901 (2020).
- (15) T. Fujii, Y. Nakai, Y. Akahama, K. Ueda, and T. Mito, Pressure-induced evolution of band structure in black phosphorus studied by ³¹P NMR, *Phys. Rev. B* **101**, 161408(R) (2020).
- (16) Y. Akahama, Y. Fujimoto, T. Terai, T. Fukuda, S. Kawaguchi, N. Hirao, Y. Ohishi, and T. Kakeshita, Pressure Composition Phase Diagram of Fe-Ni Alloy, *Materials Transactions*, **61**, 1058 to 1062 (2020).
- (17) Y. Akahama, M. Miyakawa, T. Taniguchi, A. Sano-Furukawa, S. Machida, and T. Hattori, Structure refinement of black phosphorus under high pressure, *J. Chem. Phys.* **153**, 014704 (2020).
- (18) Y. Akahama, S. Kawaguchi, N. Hirao, and Y. Ohishi, Observation of high-pressure bcc phase of titanium at 243 GPa, *J. Appl. Phys.* **128**, 035901 (2020).
- (19) Y. Akahama, S. Kawaguchi, N. Hirao, and Y. Ohishi, Elastic softening of bulk modulus of monoclinic HfO₂ under high pressure, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 182903 (2020).
- (20) Y. Akahama, K. Kamiue, N. Okawa, S. Kawaguchi, N. Hirao, and Y. Ohishi, Volume compression of period 4 elements: Zn, Ge, As, and Se above 200 GPa: Ordering of atomic volume by atomic number, *J. Appl. Phys.* **129**, 025901 (2021).
- (21) Y. Akahama, S. Kawaguchi, N. Hirao, and Y. Ohishi, High-pressure stability of bcc phase and phase transition to rhombohedral structure in vanadium at 200 GPa, *J. Appl. Phys.* **129**, 135902 (2021).
- (22) D. E. Fratanduono, M. Millot, D. G. Braun, S. J. Ali, A. Fernandez-Pañella, C. T. Seagle, J.-P. Davis, J. L. Brown, Y. Akahama, R. G. Kraus, M. C. Marshall, R. F.

Smit, E. F. O' Bannon III, J. M. McNaney, and J. H. Eggert, Establishing Gold and Platinum Standards to 1 Terapascal Using Shockless Compression, *Science* **372**, 1063 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Akahama Yuichi, Miyamoto Ryosuke, Nakano Satoshi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 128
2. 論文標題 High-pressure Raman scattering and x-ray diffraction studies of the supercritical fluid of hydrogen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 135901 ~ 135901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022735	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 Fujii T., Nakai Y., Akahama Y., Ueda K., Mito T.	4. 巻 101
2. 論文標題 Pressure-induced evolution of band structure in black phosphorus studied by P31 NMR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161408/1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.161408	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 Akahama Yuichi, Fujimoto Yuki, Terai Tomoyuki, Fukuda Takashi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo, Kakeshita Tomoyuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Pressure-Composition Phase Diagram of Fe-Ni Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1058 ~ 1062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020047	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 Akahama Yuichi, Miyakawa Masashi, Taniguchi Takashi, Sano-Furukawa Asami, Machida Shinichi, Hattori Takanori	4. 巻 153
2. 論文標題 Structure refinement of black phosphorus under high pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 014704 ~ 014704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012870	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 Akahama Yuichi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 128
2. 論文標題 Observation of high-pressure bcc phase of titanium at 243GPa	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 035901 ~ 035901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0014766	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 Akahama Yuichi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 117
2. 論文標題 Elastic softening of bulk modulus of monoclinic HfO ₂ under high pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 182903 ~ 182903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029148	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 Akahama Y., Kamiue K., Okawa N., Kawaguchi S., Hirao N., Ohishi Y.	4. 巻 129
2. 論文標題 Volume compression of period 4 elements: Zn, Ge, As, and Se above 200?GPa: Ordering of atomic volume by atomic number	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025901 ~ 025901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0033721	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 Akahama Yuichi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 129
2. 論文標題 High-pressure stability of bcc-vanadium and phase transition to a rhombohedral structure at 200?GPa	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 135902 ~ 135902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041208	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 Fratanduono D. E., Millot M., Braun D. G., Ali S. J., Fernandez-Panella A., Seagle C. T., Davis J.-P., Brown J. L., Akahama Y., Kraus R. G., Marshall M. C., Smith R. F., O'Bannon E. F., McNaney J. M., Eggert J. H.	4. 巻 372
2. 論文標題 Establishing gold and platinum standards to 1 terapascal using shockless compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1063 ~ 1068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abh0364	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 Akahama Yuichi, Fujimoto Yuki, Terai Tomoyuki, Fukuda Takashi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo, Kakeshita Tomoyuki	4. 巻 61
2. 論文標題 Pressure - Composition Phase Diagram of Fe - Ni Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1058 ~ 1062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020047	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 Akahama Yuichi, Miyakawa Masashi, Taniguchi Takashi, Sano-Furukawa Asami, Machida Shinichi, Hattori Takanori	4. 巻 153
2. 論文標題 Structure refinement of black phosphorus under high pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 014704 ~ 014704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012870	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 Akahama Yuichi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 128
2. 論文標題 Observation of high-pressure bcc phase of titanium at 243?GPa	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 035901 ~ 035901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0014766	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 Akahama Yuichi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 117
2. 論文標題 Elastic softening of bulk modulus of monoclinic HfO2 under high pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 182903 ~ 182903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029148	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 Akahama Yuichi, Miyamoto Ryosuke, Nakano Satoshi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 128
2. 論文標題 High-pressure Raman scattering and x-ray diffraction studies of the supercritical fluid of hydrogen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 135901 ~ 135901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022735	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 Akahama Y., Kamiue K., Okawa N., Kawaguchi S., Hirao N., Ohishi Y.	4. 巻 129
2. 論文標題 Volume compression of period 4 elements: Zn, Ge, As, and Se above 200?GPa: Ordering of atomic volume by atomic number	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025901 ~ 025901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0033721	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 Akahama Yuichi, Kawaguchi Saori, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 129
2. 論文標題 High-pressure stability of bcc-vanadium and phase transition to a rhombohedral structure at 200?GPa	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 135902 ~ 135902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041208	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 Akahama Yuichi, Fujihisa Hiroshi, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 58
2. 論文標題 Relation between O8 cluster shape and vibrational spectra in the β -phase of solid oxygen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 095502 ~ 095502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab355a	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 Fukui Hiroshi, Fujimoto Manato, Akahama Yuichi, Sano-Furukawa Asami, Hattori Takanori	4. 巻 75
2. 論文標題 Structure change of monoclinic ZrO ₂ baddeleyite involving softenings of bulk modulus and atom vibrations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Crystallographica Section B Structural Science, Crystal Engineering and Materials	6. 最初と最後の頁 742 ~ 749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S2052520619007923	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 Fujii T., Nakai Y., Akahama Y., Ueda K., Mito T.	4. 巻 101
2. 論文標題 Pressure-induced evolution of band structure in black phosphorus studied by P31 NMR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161408(R) 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.161408	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 Akahama Y., Takahashi K., Kamiue K., Sugimoto T., Hirao N., Ohishi Y.	4. 巻 125
2. 論文標題 Pressure-induced reentrant structural transition and equation of state of indium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075901 ~ 075901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5086318	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 Ono Toshikazu, Tsukiyama Yoshifumi, Taema Ai, Sato Hiroyasu, Kiyooka Hidetoshi, Yamaguchi Yuma, Nagahashi Ayumi, Nishiyama Manami, Akahama Yuichi, Ozawa Yoshiki, Abe Masaaki, Hisaeda Yoshio	4. 巻 2
2. 論文標題 Piezofluorochromism in Charge-Transfer Inclusion Crystals: The Influence of High Pressure versus Mechanical Grinding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	6. 最初と最後の頁 416 ~ 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cptc.201700227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Machida Yo, Subedi Alaska, Akiba Kazuto, Miyake Atsushi, Tokunaga Masashi, Akahama Yuichi, Izawa Koichi, Behnia Kamran	4. 巻 4
2. 論文標題 Observation of Poiseuille flow of phonons in black phosphorus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 3374 ~ 3374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aat3374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nurmamat Munisa, Ishida Yukiaki, Yori Ryohei, Sumida Kazuki, Zhu Siyuan, Nakatake Masashi, Ueda Yoshifumi, Taniguchi Masaki, Shin Shik, Akahama Yuichi, Kimura Akio	4. 巻 8
2. 論文標題 Prolonged photo-carriers generated in a massive-and-anisotropic Dirac material	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-27133-6	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Akahama Y, Mizuki Y, Nakano S, Hirao N, Ohishi Y	4. 巻 950
2. 論文標題 Raman scattering and X-ray diffraction studies on phase III of solid hydrogen	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf, Series	6. 最初と最後の頁 042060 ~ 042060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/950/4/042060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujimoto Manato, Akahama Yuichi, Fukui Hiroshi, Hirao Naohisa, Ohishi Yasuo	4. 巻 8
2. 論文標題 Observation of the negative pressure derivative of the bulk modulus in monoclinic ZrO ₂	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015310 ~ 015310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5017774	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Akahama, N. Okawa, T. Sugimoto, N. Hirao, and Y. Ohishi	4. 巻 57
2. 論文標題 Coexistence of a metastable double hcp phase in bcc-fcc structure transition of Te under high pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Jpn. J. App. Phys.	6. 最初と最後の頁 025601 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.025601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Y. Akahama, K. Kamiue, N. Okawa, S. Kawaguchi, N. Hirao, and Y. Ohishi
2. 発表標題 Volume compression of period 4 elements: Zn, Ge, As, and Se up to multimegabar pressures
3. 学会等名 The 57th European High Pressure Research Group Meeting on High Pressure Science and Technology: (EHPRG2019) September 1-6, 2019, Hotel Duo, Prague, Czech Republic (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤浜 裕一, 藤久 裕司, 平尾 直久, 大石 泰生
2. 発表標題 固体酸素 相の08クラスターの変形と分子振動の相関
3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会 (岐阜大学 2019年9月10-13日)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤浜 裕一・中野 智志・河口 沙織・平尾 直久・大石 泰生
2. 発表標題 水素超臨界流体相の高圧X線回折研究II
3. 学会等名 日本高圧力学会第60回高圧討論会 北海道札幌市かでの2・7 北海道立道民活動センター2019.10.23-25
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤浜 裕一・福井 宏之・河口 沙織・平尾 直久・大石 泰生
2. 発表標題 単斜晶ハフニアの高圧下の弾性ソフト化
3. 学会等名 日本高圧力学会第60回高圧討論会 北海道札幌市かでの2・7 北海道立道民活動センター2019.10.23-25
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤浜裕一, 河口沙織, 平尾直久, 大石泰生
2. 発表標題 金属チタンの圧力誘起によるbcc相への構造転移
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (名古屋大学東山キャンパス2020年3月16日~19日)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Akahama, K. Kamiue, K. Takahashi, N. Hirao, and Y. Ohishi
2. 発表標題 Reentrant structure transition of indium at 130 GPa
3. 学会等名 The 18th International Conference on High Pressure in Semiconductor Physics (HPSP-18) & The Workshop on High pressure Study on Superconducting (WHS), (Barcelona, Spain July 23-27, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Miyake, K. Akiba, M. Kano, Y. Akahama, K. Kindo and M. Tokunaga
2. 発表標題 Pressure and Magnetic Field Angle Dependence of Magnetoresistance of Black Phosphorous under Pulsed Magnetic Fields
3. 学会等名 The 12th International Conference on Research in High Magnetic Fields (RHMF 2018), (Santa Fe, NM USA June 24-28, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 1)宮本椋介、福井宏之、赤浜裕一、中野智志、河口沙織、平尾直久、大石泰生
2. 発表標題 水素の圧力誘起超臨界流体相-固相転移のラマン分光とX線回折研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 同志社大学 2018年 9月 9日-12日
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤浜 裕一・中野 智志・河口 沙織・平尾 直久・大石 泰生
2. 発表標題 水素超臨界流体相の高圧X線回折研究
3. 学会等名 第59回高圧討論会 岡山理科大学2018年11月26日
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤浜裕一
2. 発表標題 昔、今、そして明日の高圧研究 - 物質理学から -
3. 学会等名 第59回高圧討論会 岡山理科大学2018年11月26日~28日 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大川 直樹・赤浜 裕一・河口 沙織・平尾 直久・大石 泰生
2. 発表標題 超高压X線回折によるSeとTeの構造相転移の研究
3. 学会等名 第59回高压論会 岡山理科大学2018年11月26日~28日
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 紙上 昂大・赤浜 裕一・河口 沙織・平尾 直久・大石 泰生
2. 発表標題 第四周期元素:Zn, Ge, Asの超高压X線回折による原子体積の研究
3. 学会等名 第59回高压討論会 岡山理科大学2018年11月26日~28日
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤浜裕一, 紙上昂大, 中野智志, 河口沙織, 平尾直久, 大石泰生
2. 発表標題 固体水素III 相のX 線回折実験III
3. 学会等名 日本高圧力学会 第58回高压討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大川直樹, 赤浜裕一, 平尾直久, 大石泰生, 藤久裕司
2. 発表標題 Se とTe の圧力誘起構造相転移
3. 学会等名 日本高圧力学会 第58回高压討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤本真人, 福井宏之, 赤浜裕一, 平尾直久, 服部高典, 佐野 亜沙美
2. 発表標題 高压下におけるZrO ₂ 単斜晶相の圧縮異常
3. 学会等名 日本高圧力学会 第58回高圧討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 紙上昂大, 赤浜裕一, 平尾直久, 大石泰生
2. 発表標題 ヒ素の超高压X線回折実験
3. 学会等名 日本高圧力学会 第58回高圧討論会
4. 発表年 2017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

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