

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02128

研究課題名（和文）マントル鉱物の結晶弾性測定：地震波速度異方性の物質的解釈に向けて

研究課題名（英文）Crystal elasticity of mantle mineral towards understanding seismic anisotropy

研究代表者

米田 明（Yoneda, Akira）

岡山大学・惑星物質研究所・客員研究員

研究者番号：10262841

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,800,000円

研究成果の概要（和文）：非弾性X線散乱実験（IXS）ではAuとPtの測定結果を論文としては発表した。これらは、IXSで取得した体積弾性率と同時測定した格子定数のデータのみを使っており、一次圧力スケールと位置付けられるものである。その後、NaClで20GPa、Taの単結晶弾性を約33GPaまで測定することに成功した。NaClの結果は論文として投稿中である。

一方GHz音速法ではDAC試料からのシグナル取得に手間取ったが、アンモニア塗布、メタルカップラーの導入、新DAC支持具の開発、S波パファロッドの開発などの結果、ようやく2GPaにおいて鉄試料のP波S波の両方を良好に取得できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

成果の第一は、ブリッジマナイトの結晶弾性をマントル深部条件まで測定し、地震学で観測されているLLSVP異常域の成因を解明したことである。また、そこから派生したテーマが、X線非弾性散乱法とX線回折を組み合わせる圧力スケールの構築法を提案である、実際にAuとPtに基づく圧力スケールを提案したことである。

GHz音速法では、基礎的開発が完了し、データを取得できるころまで進展させた。今後多くの研究機関（岡山大、大阪大、東北大等）を巻き込んだ活発な研究の進展が期待できる。

期間中の半導体ダイヤモンドヒーターの開発という成果を上げることができた。今まで活用してきた有限要素法についてに啓蒙活動も実施した。

研究成果の概要（英文）：On inelastic X-ray scattering experiment (IXS), we published the measurement results of Au and Pt in international papers. These were constituted only using the bulk modulus obtained by IXS and the X ray lattice constant data measured at the same time; thus they are recognized as the primary pressure scale. After that, we succeeded in measuring the single crystal elasticity of NaCl up to 20 GPa and Ta up to ~33 GPa.

On the other hand, on the GHz sound velocity method, it took long time to acquire the signal from the DAC sample. However by introducing ammonia coating, metal coupler, devising new DAC support, and developing S-wave buffer rod, the simultaneous P-wave and S-wave of the iron sample was finally obtained at 2 GPa.

研究分野：固体地球科学

キーワード：GHz音速法 マントル 非弾性X線散乱 圧力スケール

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の非弾性 X 線散乱実験の状況は、常圧から DAC 内で加圧した試料の測定に移行する時期であった。どのように DAC に入る微小試料を作成し、静水圧性を確保して加圧するかが問題となっていた。加圧だけでなく加熱も行うことが、その当時において問題意識として共有されていた。一方、GHz 音速法の開発は、初期段階の予備測定を完了し、DAC で加圧された試料の測定をどのように行うかと段階にあった。また、S 波パファロッドの開発も課題として認識されていた。

### 2. 研究の目的

非弾性 X 線散乱法では一貫して結晶試料の測定を行ってきた。マントル内の地震学的異方性を解釈するためであり、ブリッジマナイトの測定により目的の一つを達成した。研究過程において、圧力スケールの確立にも貢献できることがわかり、その方向で Au, Pt, NaCl 等の圧力校正物質の状態方程式決定を志向することになった。GHz 音速法では、最初の課題として Fe の bcc-hcp 相転移を音速測定でモニターすることを設定した。

### 3. 研究の方法

非弾性 X 線散乱法は成果がいくつかの論文に纏められているので、ここでは、GHz-DAC 音速法の開発経過を纏めることにする。パファロッドからダイヤモンドへの音波伝達にはアンモニア塗布が有効であることがわかり研究が進展するようになった。さらに金属箔の併用も有効である。当たり前のことであるが、パファロッドとダイヤモンドの面がピタリと整合することが音波伝達に重要である。そのための DAC 支持具を開発した。この DAC 支持具は、その後も改良が加えられ、ようやく、GHz-DAC 音速法が展開できるようになった。また、パファロッドをダイヤモンドに 6 kgw の力で印可しているが、ルビースケール測定時にも 6 kgw の力を印可する治具も自作し、測定環境を整備した。

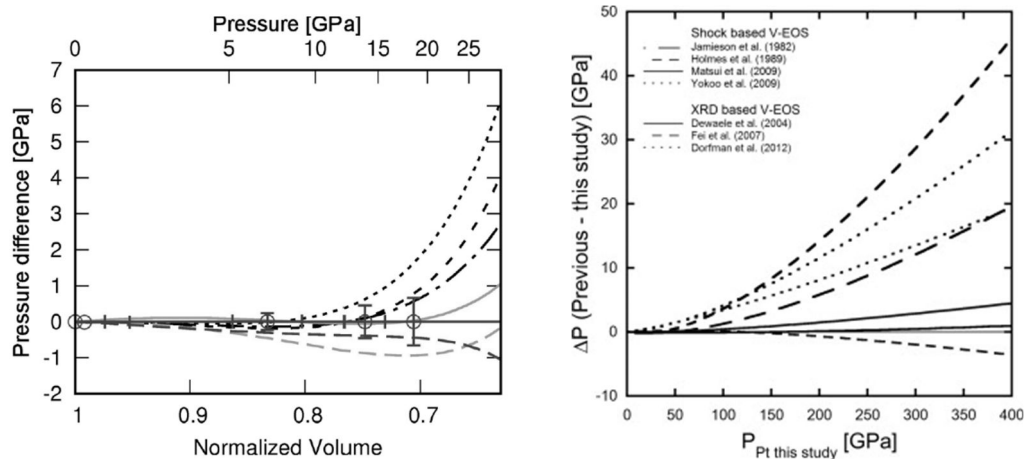
### 4. 研究成果

#### 4.1 非弾性 X 線散乱法による成果

分担者の福井との共同研究である。期間中に、SPring-8 への課題が順調に採択され、Pt と NaCl の状態方程式を提案することができた。非弾性 X 線散乱法で決定した体積弾性率と通常の X 線回折で決定した格子定数に基づいており、一次圧力スケールである。He ガス圧媒体の静水圧低下が影響し、現在は 20 GPa までしか決定できていない。手法のユニーク性と結果の重要性から、今後もより高圧までの一次圧力スケール確立を目指して研究継続の予定である。今後、高温実験を行えば He ガス媒体の静水圧性が大幅に改善すると期待している。

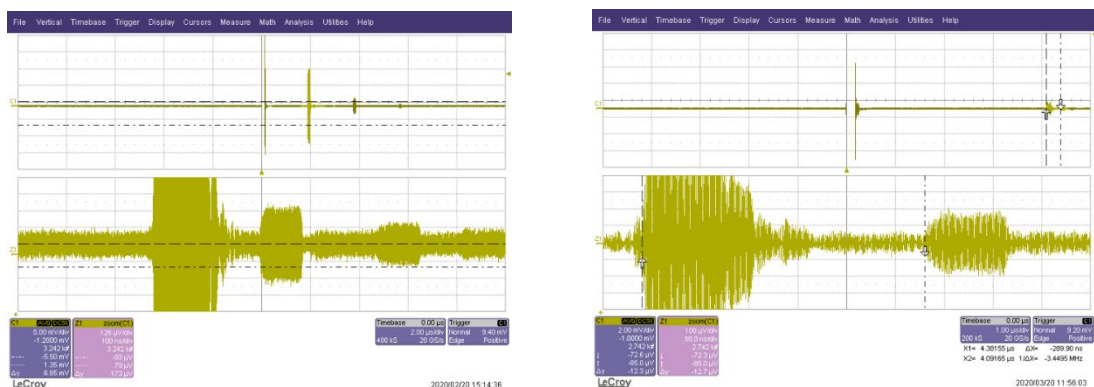
以下に、研究期間中に得られた成果を示す。左図は NaCl、右図は Pt に対する結果の纏めである。NaCl は○が実験点を示している。最高実験点の圧力は、約 20 GPa であるが、その圧力領域で先行研究と約 2GPa の差があることが確認できる。外挿部分の差が急拡大することも図から察することができる。Pt の方は、400 GPa までの外挿を示している。実験領域は約 20 GPa までである。今回の結果は、同様の手法で行われた先行研究と 400 GPa 領域でも僅か数 GPa 以内に収まっている。このことは、今回の手法の信頼性を保証するものである。一方、衝撃波実験に基づく結果とは、最大 40 GPa 以上と大きな差がある。衝撃波実験の精度が温度補正のどちらかに大きな問題があることが示唆される。

いずれにしても、本手法による一次圧力スケール確立は、その重要性に鑑み今後も継続していく。類似研究があるが、単結晶試料を用いているのは我々のグループだけであり、重要な差別化となっている。多結晶試料を用いた場合、体積弾性率に関係しない  $C_{44}$  弾性定数の影響が含まれてしまい、正確な圧力スケールには不適という見解から、単結晶試料での測定にこだわっている。



#### 4.2 GHz-DAC 音速法による成果

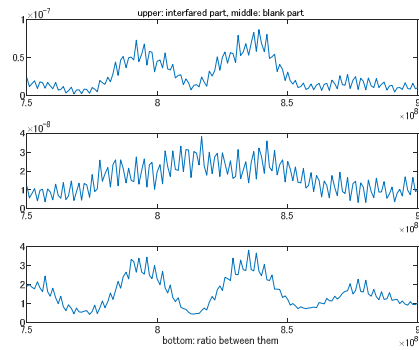
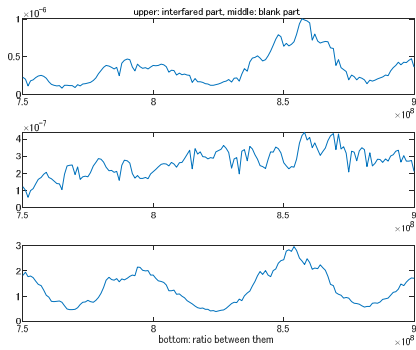
DAC で加圧した鉄試料の P 波 S 波測定の測定結果を示す。圧力は 1.8 GPa である。以下に示すのはオシロスコープ上の生データである。左側が P 波、右側が S 波の結果である。



共に最初の波はバッファロッド端面からのものであり、その次に見えるのがダイヤモンドアンビル先端からのシグナルである。そのシグナルの中に鉄試料の音速データが含まれている。鉄試料のトラベルタイムは数十ナノセックと微小であるため二つのパルスとして分離できない。それを克服するのがパルス干渉法である。この方法は、音速測定の世界では MHz 領域でも伝統的に使われてきた古典的方法であるが、GHz 音速法では定番となる重要な手法である。その結果を次頁に示す。同じく、左側が P 波、右側が S 波の結果である。それぞれ上段がシグナル部の変調、中段がブランク部の変調である。下段がシグナル部の振幅をブランク部の振幅で規格化した結果である。良好な周期性が確認できている。この図に対し、ローパスフィルター操作を実施し、極値をとる周波数をもとめ、その間隔の平均値と分散を求める。平均値の逆数がトラベルタイムになる。誤差は平均値と分散の比から評価できる。

今回の結果から、P 波と S 波のそれぞれの極値間隔は 57 MHz、43 MHz となった。トラベルタイム比は 1.33 になるが常圧の音速比は  $5.41/3.86 = 1.40$  なので、妥当な結果が得られたと考

えている。



研究期間内に基礎的開発は完了できた。また、東北大学や大阪大学との研究者との共同研究体制が構築できた。特に大阪大学の博士大学院生が本プロジェクトに参加することになり、マンパワーの面からも今後の進展が加速化する。鉄の測定が完了後は、スピン転移をまたぐ測定を行う。スピン転移が地震学的に観測されていないことに対する問題にアプローチする。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Longjian Xie, Akira Yoneda, Fang Xu, Yuji Higo, Chao Wang, Yoshinori Tange, Andrew King, Nicolas Guignot	4. 巻 91
2. 論文標題 Boron-MgO composite as an X-ray transparent pressure medium in the multi-anvil apparatus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 RSI	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.1063/1.5137740	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 Fang Xu, Longjian Xie, Akira Yoneda, Nicolas Guignot, Andrew King, Guillaume Morard & Daniele Antonangeli	4. 巻 -
2. 論文標題 TiC-MgO composite: an X-ray transparent and machinable heating element in a multi-anvil high pressure apparatus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1080/08957959.2020.1747452	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 Xie, L., Yoneda, A., Yamazaki, D., Manthilake, G., Higo, Y., Tange, Y., Guignot, N., King, A., Scheel, M., Andraut, D.	4. 巻 11
2. 論文標題 Formation of bridgmanite-enriched layer at the top lower-mantle during magma ocean solidification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Comm.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1038/s41467-019-14071-8	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 Zhang, Y., Yoshino, T., Yoneda, A., Osako, M.	4. 巻 519
2. 論文標題 Effect of iron content on thermal conductivity of olivine with implications for cooling history of rocky planets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth Planet. Sci. Lett.	6. 最初と最後の頁 109-119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.epsl.2019.04.048	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 Yoneda, A., Kobayashi, S., Kamada, S.	4. 巻 29
2. 論文標題 GHz Ultrasonic Velocity Measurement in Diamond Anvil Cell	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 High Pressure Sci. Tech.	6. 最初と最後の頁 144-155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.4131/jshpreview.29.144	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 Yamazaki, D., Ito, E., Yoshino, T., Tsujino, N., Yoneda, A., Gomi, H., Vazhakuttiyakam, J., Sakurai, M., Zhang, Y., Higo, Y., Tange, Y.	4. 巻 351
2. 論文標題 High pressure generation in the Kawai-type multianvil apparatus equipped with tungsten carbide anvils and sintered diamond anvils and X-ray observation on CaSnO <sub>3</sub> and (Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Comptes Rendus Geoscience	6. 最初と最後の頁 253-259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.epsl.2019.04.048	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 H. Ozawa, S. Tateno, L. Xie, Y. Nakajima, N. Sakamoto, S.I. Kawaguchi, A. Yoneda, N. Hirao	4. 巻 -
2. 論文標題 Boron-doped diamond as a new heating element for internal internal resistive heated diamond-anvil cell	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 High Press. Res.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1080/08957959	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 S. Kamada, H. Fukui, A. Yoneda, H. Gomi, F. Maeda, S. Tsutsui, H. Uchiyama, N. Hirao, D. Ishikawa, A.Q.R. Baron	4. 巻 -
2. 論文標題 Elastic constants of single-crystal Pt measured up to 20 GPa based on inelastic X-ray scattering: Implication for the establishment of an equation of state	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Comptes Rendus Geoscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.crte.2018.11.003	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 A. Yoneda, L. Xie, E. Ito	4. 巻 34-3
2. 論文標題 High temperature generation under high pressure by using semi-conductor diamond heater II	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NEW DIAMOND	6. 最初と最後の頁 25-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Yoneda, A., Fukui, H., Gomi, H., Kamada, S., Xie, L., Hirao, N., Uchiyama, H., Tsutsui, S., Baron, A.Q.R.	4. 巻 56
2. 論文標題 Single crystal elasticity of gold up to 20 GPa: Bulk modulus anomaly and implication for a primary pressure scale	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 95801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.7567/JJAP.56.095801	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 Xie, L., Yoneda, A., Yoshino, T., Fei, H., Ito, E	4. 巻 36
2. 論文標題 Graphite ;boron composite heater in a Kawai-type apparatus: the inhibitory effect of boron oxide and countermeasures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 High Pressure Res	6. 最初と最後の頁 issue2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2016.1164151	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 Fukui, H., Yoneda, A., Nakatsuka, A., Tsujino, N., Kamada, S., Ohtani, E., Shatskiy, A., Hirao, N., Tsutsui, S., Uchiyama, H., Baron, A.Q.R	4. 巻 6
2. 論文標題 Effect of cation substitution on bridgmanite elasticity: A key to interpret seismic anomalies in the lower mantle	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 33337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep33337	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 Yoneda, A., F. Sohag	4. 巻 81
2. 論文標題 3D analysis of pore effect on composite elasticity by means of the finite-element method Read More: <a href="http://library.seg.org/doi/10.1190/geo2014-0614.1">http://library.seg.org/doi/10.1190/geo2014-0614.1</a>	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geophysics	6. 最初と最後の頁 L15-L26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1190/geo2014-0614.1	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 Longjian Xie, Akira Yoneda, Takashi Yoshino, Hongzhan Fei & Eiji Ito	4. 巻 X
2. 論文標題 Graphite-boron composite heater in a Kawai-type apparatus: the inhibitory effect of boron oxide and countermeasures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 L1-L16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2016.1164151	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

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 DAC-GHz ultrasonic P wave velocity measurement on KCl and natural olivine
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 GHz-DAC音速法による核マントル物質のP波速度、S波速度の同時測定の試み
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 GHz-DAC音速法の開発：ここまでの総括と今後の展望
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年年会・総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 P波S波速度同時測定にむけた GHz-DAC 音速法の開発
3. 学会等名 第60回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 弾性定数研究における三題漸：有限要素法解析・音速測定・振動解析
3. 学会等名 岩の力学連合会 賛助会員特別会議（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 高圧地球科学実験における有限要素法の活用
3. 学会等名 COMSOL Conference 2019 Tokyo（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 GHz-DAC音速法：KCl試料による予察的測定
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 GHz-DAC法の開発：KClのP波速度の測定とS波パッファロッドの開発
3. 学会等名 高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 GHz-DAC音速法の開発：KCl試料での予察的測定
3. 学会等名 鉱物科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米田明
2. 発表標題 GHz-DAC音速法の開発：KCl試料での予察的測定
3. 学会等名 地震学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米田 明
2. 発表標題 ダイヤモンドアンピル-GHz音速法の開発
3. 学会等名 秋季地震学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 米田 明
2. 発表標題 Development of S wave buffer rod for DAC-GHz experiments
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 米田明(岡山大)・福井宏之(兵庫県立大)・鎌田誠司(東北大)
2. 発表標題 地球深部科学における絶対圧力スケールの重要性
3. 学会等名 秋季地震学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 米田 明
2. 発表標題 DAC-GHz 音速測定法の開発
3. 学会等名 秋季地震学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 米田 明・福井 宏之・鎌田 誠司・謝 龍剣・平尾 直久・内山 裕士・BARON Alfred. Q. R.・筒井 智嗣
2. 発表標題 金の結晶弾性の圧力位依存性測定： 低圧領域での体積弾性率 異常と絶対圧カスケールの検討
3. 学会等名 高压討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 米田 明
2. 発表標題 GHz -DAC実験用バッファロッドの開発：II
3. 学会等名 高压討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 米田 明
2. 発表標題 Development of P wave and S wave GHz buffer rod-transducer for DAC experiments
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 米田 明
2. 発表標題 GHz -DAC 実験用バッファロッドの開発
3. 学会等名 高压討論会
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岡山大学惑星物質研究所 <a href="http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/jp/">http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/jp/</a> 惑星研究所高圧グループ (HACTO) <a href="http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hacto/">http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hacto/</a> 岡山大学惑星物質研究所 <a href="http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/jp/">http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/jp/</a> 惑星研究所高圧グループ (HACTO) <a href="http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hacto/">http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hacto/</a>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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
研究分担者	辻野 典秀  (Tsujino Noriyoshi)  (20633093)	岡山大学・惑星物質研究所・助手   (15301)	
研究分担者	芳野 極  (Yoshino Takashi)  (30423338)	岡山大学・惑星物質研究所・准教授   (15301)	
研究分担者	山崎 大輔  (Yamazaki Daisuke)  (90346693)	岡山大学・惑星物質研究所・准教授   (15301)	
研究分担者	福井 宏之  (Fukui Hiroshi)  (90397901)	兵庫県立大学・物質理学研究科・助教   (24506)	