

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20944

研究課題名（和文）マントルかんらん岩の絶対年代測定：カンラン石のニュートリノ年代測定法の開発

研究課題名（英文）Dating of mantle derived peridotite: development of neutrino-dating of olivine

研究代表者

加藤 丈典（Kato, Takenori）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：90293688

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）： マントルの形成年代を推定するために素粒子と鉱物の相互作用に着目して原理実証研究を行った。まず、ICP-MS分析によりカンラン石中に存在するウラン濃度は十分低いことが明らかになった。また、照射実験を行った試料を観察したところ、素粒子が飛跡を残す可能性が示唆された。検出効率の評価と電離的阻止能と核的阻止能で形成される飛跡の区別方法の開発するとともに、検出効率のキャリブレーションを行えば、カンラン石とニュートリノとの相互作用継続時間の求めることが可能となり、マントルの絶対年代測定を実現する可能性があると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果はマントルの絶対年代測定の可能性を示すものであり、プレート運動と駆動機構の時間変化や、地殻・マントル間での物質移動を理解するうえで必要不可欠な情報を与えることが可能になると期待できる。また、本研究で用いた手法はニュートリノ以外の素粒子にも応用可能であり、暗黒物質の直接探索を可能にする可能性がある。

研究成果の概要（英文）： A principle demonstration study was conducted to estimate the formation age of the mantle by focusing on the interaction between subatomic particles and minerals. First, ICP-MS analysis revealed that the uranium concentration in peridotite was significantly low. Additionally, observation of samples subjected to irradiation experiments suggested the potential of subatomic particles leaving tracks.

The development of a method to distinguish tracks formed by ionization stopping power and nuclear stopping power, along with the evaluation of detection efficiency, would allow for the determination of the interaction duration between peridotite and neutrinos. With the calibration of detection efficiency, it is believed that the absolute dating of the mantle could be realized.

研究分野：地質年代学

キーワード：マントル 素粒子 飛跡 カンラン石 白雲母 阻止能 年代測定

### 1. 研究開始当初の背景

マントルの年代、特にリソスフェアを構成する上部マントルの形成年代は、プレート運動と駆動機構の時間変化や、地殻・マントル間での物質移動を理解するうえで必要不可欠な情報である。これまで多くの橄欖岩の同位体年代測定が行われているが、部分熔融によるメルトの形成・固結の年代であり、もともと存在した橄欖岩の形成年代とは異なる可能性がある。また、橄欖岩中にごくわずかに産するジルコンを用いた局所年代測定を実施した例もあるが、橄欖岩の形成年代を議論するために十分な知見はまだ得られていない。これらのことは、従来の同位体年代測定法では橄欖岩の形成年代を直接得ることは困難であることを示していると考えられる。そこで、マントルの主要構成鉱物であるカンラン石に着目し、素粒子と鉱物の相互作用を用いることで絶対年代測定の実用化に向けた要素技術を開発することにした。

### 2. 研究の目的

部分熔融や交代作用ではなく形成年代を得る手法として、素粒子と鉱物の相互作用に着もした。例えば、ニュートリノは透過性が高く地球を通り抜ける。しかし、わずかな確率で物質と相互作用する。素粒子と鉱物の相互作用が生じた場合、フィッシュトラックと同じような傷が結晶内に生じると考えられている。この傷の長さの単位体積当たりの頻度分布が、図1のようにニュートリノに暴露した時間の関数になることが理論的に示されている (Edwards et al., 2018; Drukier et al., 2019 など)。

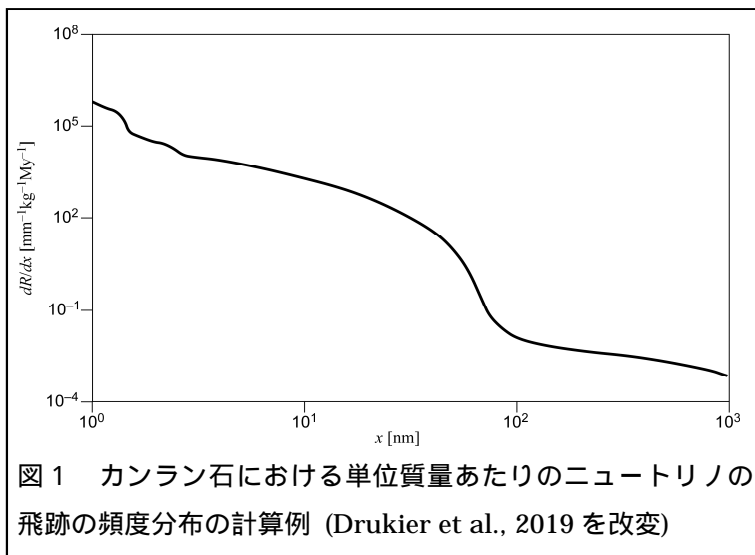


図1 カンラン石における単位質量あたりのニュートリノの飛跡の頻度分布の計算例 (Drukier et al., 2019 を改変)

このこととニュートリノの透過性から、橄欖岩の主要鉱物であるカンラン石に記録されたニュートリノにより生じた傷を計数して頻度分布を求めることができれば、マントル由来の橄欖岩を用いることでマントルの絶対年代測定が可能になると予想される。この手法を実現させるため、(1) 試料の選定方法の検討、(2) 素粒子は本当に飛跡を残す可能性があるのかどうかの検証、および、(3) 飛跡の読み出し方法の開発を行う。

### 3. 研究の方法

飛跡の計数にあたり、まず、バックグラウンドの低い試料がそもそも存在するのか検討した。主要なバックグラウンド源として、宇宙線の影響と鉱物に含まれるトリウムやウランの崩壊や自発核分裂の影響が考えられている (Drukier et al., 2019)。宇宙線は水により大幅に減衰することが知られている。そこで、海洋底から採取された橄欖岩に着目した。次に、海洋底から採取された橄欖岩などから分離したカンラン石に含まれる微量元素を誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) により分析した。試料は Milli-Q 水とメタノールで超音波洗浄し、表面に付着した不純物を除去した。そして、高純度の 70% 過塩素酸と 38% フッ酸を用いて還流し溶解した。さらに、乾固させた試料を 70% 過塩素酸で再溶解した。分析には名古屋大学大学院環境学研究科の Agilent 社製 7700x を用いた。測定元素は、U, Th, Pb, Tl, Ba, Cs, Cd, Ag, Nb, Zr, Sr, Rb, Se, As, Ga, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Sc, K, Al, Na, Li である。

鉱物と所粒子の相互作用により生じた飛跡の読み取り方法として、さまざまな手法が提唱されている (例えば、Baum et al., 2023)。その中で、本研究では透過電子顕微鏡による観察と光学読み取りを検討した。素粒子による飛跡がどのようになるのか不明であるため、粒子を照射して観察した。試料にはカンラン石のほか、20 世紀後半に磁気単極子の探索 (Price and Salamon, 1986; Guo et al., 1988; Gosh and Chatterjea, 1990) で用いられた実績のある白雲母を用いた。カンラン石は 0.25 ミクロンのダイヤモンドで鏡面研磨し、コロイダルシリカによるケミカルエッチングを行った試料を用いた。白雲母は劈開面ではがした試料を用いた。粒子の照射は量子科学研究開発機構の重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて行った。照射後の試料については、次のような観察を実施した。本研究では、500 MeV/n のアルゴン照射したカンラン石、および、500 MeV/n の鉄を照射した白雲母を観察した。これらの条件は、照射粒子の阻止能を考慮して決定した。カンラン石は名古屋大学未来材料・システム研究所の透過電子顕微鏡 (日本電子株式会社製 JEM-2100F) により観察した。白雲母はフッ酸によるエッチングを行った試料を位相

差顕微鏡で観察した。

#### 4. 研究成果

ICP-MS の分析の結果、マントル由来のカンラン石の中にはウラン濃度が 100 pg/g オーダーのものが存在することが明らかになった。これは、理論的な研究でバックグラウンドを推定するために仮定している濃度と同等である。

カンラン石試料の透過電子顕微鏡観察により、飛跡と考えられる傷が観察された。しかし、ジルコン中のフィッシュトラックに比べて転移が少なかった。このことは、飛跡の検出効率が素粒子の種類や鉱物により異なる可能性を示唆している。したがって、今後ニュートリノの特性に似た粒子を照射し、照射した粒子の量と観察された飛跡の量を比較することによって検出効率を求めなければ、観察された飛跡の頻度分布から実際に生じた相互作用の量を推定することができないことが示された。

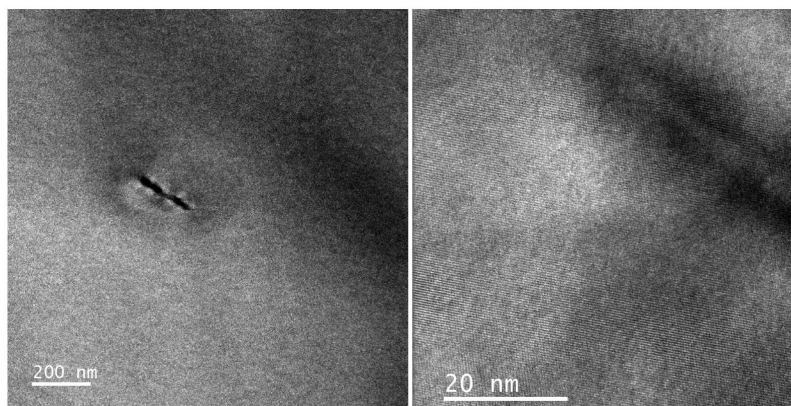


図2 500 MeV/n のアルゴンを照射した橄欖石の透過電子顕微鏡写真（明視野像）

エッチングした白雲母試料を位相差顕微鏡で観察したところ、図3のように明瞭な飛跡が観察された。この照射条件では電離的阻止能が支配的な領域と核的阻止能が支配的な領域の両方で形成された飛跡を観察していると考えられる。ニュートリノの飛跡は核的阻止能が支配的な領域で形成されると予想されるため、電離的阻止能で生じる飛跡と核的阻止能で生じる飛跡を区別する方法を今後開発する必要があることが明らかになった。

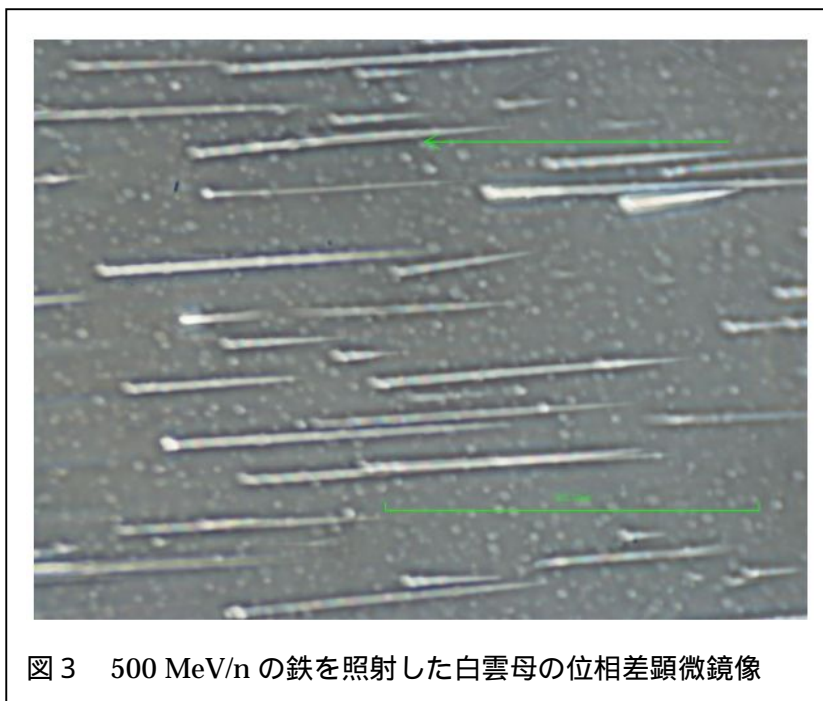


図3 500 MeV/n の鉄を照射した白雲母の位相差顕微鏡像

以上のことから、素粒子は鉱物中に飛跡を残すため、ニュートリノの

飛跡を区別する手法と大量の試料を測定する手法を今後開発することにより、マントル由来のカンラン石を用いてニュートリノとの相互作用の量を推定可能になると考えられる。検出効率のキャリブレーションなどを行うことにより、相互作用継続時間を求めることが可能になるので、ウラン・トリウムなどのバックグラウンド源の少ない試料を用いればマントルの絶対年代測定を実用化させることが可能であると考えられる。

#### 引用文献

Baum, S., Stengel, P., Abe, N., Acevedo, J.F., Araujo, G.R., Asahara, Y., Avignone, F., Balogh, L., Baudis, L., Boukhtouchen, Y., Bramante, J., Breur, P.A., Caccianiga, L., Capozzi, F., Collar, J.I., Ebadi, R., Edwards, T., Eitel, K., Elykov, A.I., Ewing, R.C., Freese, K., Fung, A., Galelli, C., Glasmacher, U.A., Gleason, A., Hasebe, N.,

Hirose, S., Horiuchi, S., Hoshino, Y., Huber, P., Ido, Y., Igami, Y., Ishikawa, N., Itow, Y., Kamiyama, T., Kato, T., Kavanagh, B.J., Kawamura, Y., Kaama, S., Kenney, C.J., Kilminster, B., Kouketsu, Y., Kozaka, Y., Kurinsky, N.A., Leybourne, M., Lucas, T., McDonough, W.F., Marshall, M., Mateos, J.M., Mathur, A., Michibayashi, K., Mkhonto, S., Murase, K., Naka, T., Oguni, K., Rajendran, S., Sakane, H., Sala, P., Scholberg, K., Semene, I., Shiraishi, T., Spitz, J., Sun, K., Suzuki, K., Tanin, E.H., Vincent, A., Vladimirov, N., Walsworth, R.L. and Watanabe, H. (2023) Mineral detection of neutrinos and Dark matter. A whitepaper. *Physics of the Dark Universe*, 41, 101245.

Drukier, A.K., Baum, S., Freese, K., Gorski, M. and Stengel, P. (2018) Paleo-detectors: Searching for Dark Matter with Ancient Minerals. arXiv:1811.06844v2 [Astro-ph.CO]

Edwards, T.D.P., Kavanagh, B.J., Weniger, C., Baum, S., Drukier, A.K., Freese, K., Gorski, M. & Stengel, P. (2018) Digging for Dark Matter: Spectral Analysis and Discovery Potential of Paleo-Detectors. arXiv:1811.10549v2 [hep-ph]

Gosh, D. and Chatterjea, S. (1990) Supermassive Magnetic Monopoles Flux from the Oldest Mica Samples. *Europhysics Letters*, 12, 25 - 28.

Guo, S.-L., Sun, S.-F., Hao, X.-H., Luo, Y., Zhao, Y.-H., Wang, Y.-L., Ren, G., Zhou, Y., Zhou, R. and He, Z. (1988) Fission Track Dation of Muscovite Mica for Searching for Magnetic Monopoles. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 15, 703 - 705.

Price, P. B. and Salamon, M.H. (1986) Search for Supermassive magnetic Monopoles Using Mica Crystals. *Physical Review Letters*, 56, 1226 - 1229.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Cho Deung-Lyong, Lee Tae-Ho, Takahashi Yutaka, Kato Takenori, Yi Keewook, Lee Shinae, Cheong Albert Chang-sik	4. 巻 12
2. 論文標題 Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of magmatic and metamorphic rocks from the Hida Belt, southwest Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geoscience Frontiers	6. 最初と最後の頁 101145 ~ 101145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gsf.2021.101145	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 Lin Jian-Wei, Lee Chi-Yu, Chen Cheng-Hong, Kato Takenori, Sano Yuji, Naoto Takahata	4. 巻 218
2. 論文標題 Buchan type metamorphism in the Pingtan-Dongshan metamorphic belt, SE China: Evidence from combined EMP monazite and U-Pb zircon ages of mica schists	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104891 ~ 104891
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2021.104891	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 Kawabata Ryoichi, Imayama Takeshi, Kato Takenori, Oh Chang Whan, Horie Kenji, Takehara Mami	4. 巻 40
2. 論文標題 Multi stage metamorphic history of the Oki gneisses in Japan: Implications for Paleoproterozoic metamorphism and tectonic correlations in northeastern Asia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Metamorphic Geology	6. 最初と最後の頁 257 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jmg.12627	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 Akizawa Norikatsu, Miyake Akira, Igami Yohei, Tsuchiyama Akira, Asanuma Hisashi, Kogiso Tetsu, Wakaki Shigeyuki, Ishikawa Tsuyoshi, Arai Shoji, Eom Jiwon, Kawahata Hodaka, Aze Takahiro, Yokoyama Yusuke	4. 巻 30
2. 論文標題 Crustal anorthosite formation by deep seated hydrothermal circulation beneath fast spreading axis: Constraints from chronological approach, Sr isotope, and fluid-chromite inclusion investigation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 e12423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12423	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 Igami Yohei, Michibayashi Katsuyoshi	4. 巻 48
2. 論文標題 Transmission Kikuchi diffraction study of submicrotexture within ultramylonitic peridotite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-021-01161-7	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 Igami Yohei, Muto Shunsuke, Takigawa Aki, Ohtsuka Masahiro, Miyake Akira, Suzuki Kohtaku, Yasuda Keisuke, Tsuchiyama Akira	4. 巻 315
2. 論文標題 Structural and chemical modifications of oxides and OH generation by space weathering: Electron microscopic/spectroscopic study of hydrogen-ion-irradiated Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 61 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2021.09.031	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 Yuguchi Takashi, Ogita Yasuhiro, Kato Takenori, Yokota Rintaro, Sasao Eiji, Nishiyama Tadao	4. 巻 192
2. 論文標題 Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Cathodoluminescence zonation pattern controlled by temperature and titanium diffusivity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 104289 ~ 104289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2020.104289	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 NAEMURA Kosuke, ERDENEJARGAL Choindonjamts, JAVKHLAN Terbishiinchen O., KATO Takenori, HIRAJIMA Takao	4. 巻 115
2. 論文標題 Geochronology and tectonic implications of the Urgamal eclogite, Western Mongolia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 357 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.191126	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 S. Baum, ..., Y. Igami, ..., T. Kato, ..., Y. Kozaka, ..., T. Naka, ..., et al.	4. 巻 41
2. 論文標題 Mineral detection of neutrinos and dark matter. A whitepaper	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of the Dark Universe	6. 最初と最後の頁 101245 ~ 101245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dark.2023.101245	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 T. Noguchi, ..., Y. Igami, ..., et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 170-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01841-6	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11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 加藤丈典・小坂由紀子・浅原良浩・纈纈佑衣・道林克禎
2. 発表標題 マントル起源のカンラン石・蛇紋石に含まれるU・Th・PbのICP-MS定量分析結果
3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤丈典・陳美呈
2. 発表標題 電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) を用いた新生代のCHIME年代測定の要素技術: 不感時間補正
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂 由紀子・加藤 丈典・道林 克禎・瀧澤 佑衣・浅原 良浩
2. 発表標題 ICP-MS を用いたカンラン石中の微量元素の定量分析
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kozaka, Y., Kato, T., Michibayashi, K., Kouketsu, Y., Tokuda, Y., Sato, H. and Ikehara, M.
2. 発表標題 The formation process of calcsitic skeleton of deep-sea isidid octocorals inferred from crystal orientation
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kato
2. 発表標題 Geoscience question for MDDMv 1
3. 学会等名 Mineral Detection of Dark Matter and Neutrinos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Naka
2. 発表標題 Feasibility studies at Toho U and Nagoya U
3. 学会等名 Mineral Detection of Dark Matter and Neutrinos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 加藤丈典
2. 発表標題 電子プロ部マイクロアナライザー（EPMA）による極微量元素定量分析における不感時間法制方法の評価
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊神洋平、若林凌、三宅亮
2. 発表標題 ALCHEMIによるオリピン中微量元素のサイト選択性検討
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊神洋平、若林凌、三宅亮
2. 発表標題 ALCHEMI法によるオリピン中の微量元素のサイト選択性検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊神洋平、三宅亮、野村龍一
2. 発表標題 電子回折イメージングによる鉱物の局所歪計測と応力下その場観察への応用
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤丈典
2. 発表標題 カンラン石中のウラン
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム2023
4. 発表年 2023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
研究分担者	中 竜大 (Naka Tatsuhiko)  (00608888)	東邦大学・理学部・講師  (32661)	
研究分担者	伊神 洋平 (Igami Yohei)  (30816020)	京都大学・理学研究科・助教  (14301)	
研究分担者	小坂 由紀子 (Kozaka Yukiiko)  (90847360)	高知大学・海洋コア総合研究センター・特任助教  (16401)	

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		
韓国	釜山国立大学	韓国地質資源研究院	