

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01181

研究課題名（和文）地震発生深度における断層運動素過程の解明

研究課題名（英文）Faulting process in the deep hypocentral region

研究代表者

安東 淳一（Ando, Jun-ichi）

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・教授

研究者番号：50291480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：内陸地震は約10km-15kmの深さで発生する。この深度は、岩石の変形様式が脆性から塑性（流動）に遷移する脆性-塑性遷移領域に対応する。「なぜ岩石の流動変形が、断層を形成するような脆性変形に発展してゆくのか」とい問いに対して、まだ統一的な見解はない。本研究では、地質調査と採取した岩石試料の変形組織に着目して研究を行った。その結果、流体によって岩石が層状珪酸塩鉱物化した弱化した岩石と強度を保った岩石と間で、剪断センスが逆になることで断層が形成されることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震は断層の形成とともに発生する。内陸地震（一般的には直下型地震として知られている）を発生させる断層は、通常では形成されにくい条件で生じる。その原因を明らかにするために、インドにおける地質調査と採取した岩石試料の変形組織を行った。本研究の成果は、普遍的な内陸地震の発生の成因を明らかにすることにつながり、また国民が地震の本質をより理解することにつながる。

研究成果の概要（英文）：Inland earthquakes occur at depths of about 10 km - 15 km. This depth corresponds to the brittle-plastic transition zone, where the deformation mode of the rock changes from brittle to plastic (flow). There is no consensus on why plastic deformation of rocks evolves into brittle deformation that forms faults. The study focused on the deformation microstructure of rock samples collected during the field survey. The study focused on field investigations and the deformation microstructure of the rock samples collected. The results show that faults form by the reversal of shear direction between fluid-weakened rocks, where phyllosilicates dominate, and rocks that retain their strength.

研究分野：地質学

キーワード：脆性-塑性遷移領域 マイロナイト 変形集中 石英 層状珪酸塩鉱物 変形微細組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内陸地震は主に地表から約 10 km-15 km の深さ、温度約 300 °C の条件で岩石破壊にともなって発生する。この震源域は、岩石の変形様式が脆性から塑性（流動）に遷移する脆性-塑性遷移領域に対応する。そのため地震発生過程を理解するためには、脆性-塑性遷移領域条件で生じている岩石破壊現象の素過程を明らかにする必要がある。しかし岩石の塑性（流動）変形が関与した脆性破壊現象の解明は簡単ではない。

断層運動の素過程の解明は、地震学的研究や高速摩擦実験により多くのことが理解されるようになってきた。これらの研究では、断層が動き始めてからの断層の諸性質に関する解明を主に目指しており、「なぜ脆性-塑性遷移領域で、岩石は断層を発生させうるのか」といった問いに対しては、岩石・鉱物学的な見地から明らかにした統一的な見解はない。

この問題を解決できる最善の方法は、震源域その場に存在する断層岩の微細組織のキャラクタリゼーションを、その断層岩の空間的な分布の把握とともに行うことである。しかし約 10km-15km の深さその場に存在する断層岩に対して、この研究を行うことは技術的にほぼ不可能である。そこで、その深さで断層岩として形成され、その組織が改変されないまま地表に上昇・露出した断層岩を対象とした研究を行う必要がある。

2. 研究の目的

脆性-塑性遷移領域条件で形成された断層とその近傍地域の地質調査、及び、断層に伴って露出する断層岩（マイロナイト）の微細組織のキャラクタリゼーションを通して、「なぜ脆性-塑性遷移領域で、岩石は断層を発生させうるのか」ということを明らかにすることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

研究対象とした断層は、インド北部 Uttarakhand 州に露出する衝上断層である。この断層は、主中央断層として知られている。ヒマラヤ地域には、ヒマラヤ山脈にほぼ平行に発達する 3 つの主要な衝上断層（北から MCT-主中央断層、MBT-主境界断層、MFT-主前縁断層）が存在する。これらの衝上断層は、インド大陸がアジア大陸に衝突することで形成された断層で、いわゆるプレート境界断層である。インド大陸がアジア大陸に衝突した後、順次北から南へ MCT、MBT、MFT が形成された。MCT は 24-20 Ma (Yin, 2006)、MBT は 11-10 Ma (酒井他, 2017)、MFT は 3-2.5 Ma (酒井他, 2017) に形成されたことが知られている。本研究は「なぜプレート境界断層が、時代とともに南に活動域を移すのか」という問いに対しても示唆を与える研究である。

本地域の MCT は、上盤側に沈み込んだインド大陸を構成していた花崗岩（マイロナイト化を受けている）下盤には変成した堆積岩が分布する。その活動は 11-10 Ma に停止し、活動停止時における変成岩の温度は 300 °C を越えていたと考えられている (Srivastava and Mitra, 1996、Sakai et al., 1999)。研究対象地域では MCT は褶曲作用を受けており、MCT の南部が上盤側となっている。

本研究は、MCT から南方約 8 km の範囲の地質調査を行った。この地域では、マイロナイト化を受けた花崗岩が露出する。調査地域の最南部では、下盤の雲母片岩が認められる（図 1）。マイロナイトの面構造は MCT の走向とほぼ平行であることから、花崗岩のマイロナイト化と MCT の運動は関係していたことが分かる（図 1）。このマイロナイト化した花崗岩は、塑性変形した石英と層状珪酸塩鉱物（黒雲母と白雲母）それと脆性変形した長石から構成されており（図 2）、マイロナイト化が脆性-塑性遷移の深度で生じたことが分かる。マイロナイト化の程度は、南部から北部に存在する MCT に近づくほど、プロトマイロナイトからマイロナイト、そしてウルトラマイロナイトへと変化する（歪量が大きくなる）傾向が認められる。

採集した花崗岩マイロナイトに対し、偏光顕微鏡、後方散乱電子回折検出器付き走査型電子顕微鏡（SEM-EBSD）それと透過型電子顕微鏡（TEM）といった装置、また ImageJ や MATLAB を用いて微細組織のキャラクタリゼーションを行った。これによりマイロナイト化の

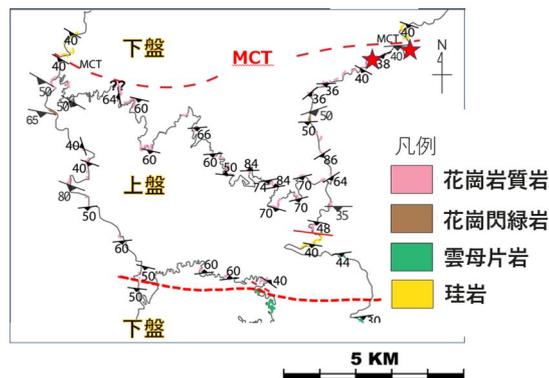


図 1: マイロナイト化した花崗岩の片理面の走行と傾斜。

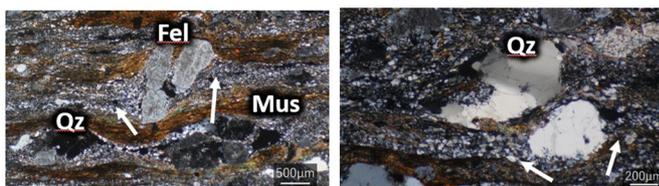


図 2: マイロナイト化した花崗岩の薄片写真。Fel:長石。Qz:石英。Mus:白雲母。長石は脆性破壊を、石英は波動消光を示し転位クリープによって塑性変形したことが分かる。

温度と応力値、 剪断方向、 マイロナイト化に与えた層状珪酸塩鉱物の影響を明らかにした。

剪断方向は、野外における岩石と薄片での非対称組織、および SEM-EBSD で取得した再結晶石英の C 軸ファブリックを用いて決定した。これらのデータを基に、花崗岩のマイロナイト化と MCT の形成の関係を明らかにし、脆性-塑性遷移領域で断層が形成される過程を考察した。

4. 研究成果

明らかとなった主要な点をまとめる。

(1) まず重要な結果は、花崗岩マイロナイトに占める層状珪酸塩鉱物の量が MCT に近づくにつれて増加することである (図 3)。層状珪酸塩鉱物は、石英と長石が流体と反応して生成される。この結果は、MCT に近づくに従って流体の関与が大きくなったことを示す。また層状珪酸塩鉱物の占める量が増えると、プロトマイロナイトからマイロナイト、そしてウルトラマイロナイトへとマイロナイト化の程度が強くなることも明らかとなった。MCT 近傍約 1 Km の範囲では、完全にウルトラマイロナイトとなっている。

(2) マイロナイト化の温度を、長石のミルメカイト組織 (長石温度計) を使用して求めた。MCT 近傍では 420 -435 、離れると 350 -400 であった。この温度は、石英が転位クリーブによって塑性変形し、長石が脆性変形する温度と矛盾しない。

(3) 石英の再結晶粒子の粒径は、MCT 近傍約 1 Km の範囲 (ウルトラマイロナイトとなっている範囲) では約 25 μm であり、4 Km から 8 Km では約 50 μm であった。このことは MCT 近傍に応力集中が生じたことを示唆する。

(4) 層状珪酸塩鉱物と石英の C 軸ファブリックの集中度の関係を求めた (図 4)。層状珪酸塩鉱物が占める割合が 60% 以上の場所は MCT 近傍約 1 Km (図 3) で、(3) の結果から応力集中を受けた地域である。一般的に応力集中を受けると石英の C 軸ファブリックの集中度は上昇するので本結果と矛盾する。しかしこの図 4 の結果は、石英の動的再結晶組織からうまく説明できることが分かった。層状珪酸塩鉱物の量が増えると、石英の再結晶がマントルポーフィロクラストによって進行している (図 5)。マントルポーフィロクラストは、石英が回転しながら再結晶するため、再結晶粒子の C 軸は集中しにくくなるので図 4 の結果を説明できる。またこのことは層状珪酸塩鉱物が占める割合が大きくなると、層状珪酸塩鉱物に塑性変形が集中することを示している。

(5) 本地域に露出する花崗岩マイロナイトの剪断方向は、インド大陸の沈み込みに整合的な上盤が南に剪断を受ける top-to-south である。しかし MCT 近傍に露出するウルトラマイロナイト中の層状珪酸塩鉱物が示す非対称組織は逆のセンス、すなわち上盤が北に剪断を受ける top-to-north を示す (図 6)。南部に露出のマイロナイト地域の一部には、層状珪酸塩鉱物が卓越する小規模なウルトラマイロナイト岩体が確認できる。そのような場所でも岩石の非対称組織は top-to-north を示す。そして重要な観察結果は、ウルトラマイロナイト中で層状珪酸塩鉱物に変化しなかった石英部分の微細組織は top-to-south を示すことである (図 7)。このことは、流体が関与して層状珪酸塩鉱物が晶出する前は、他の領域と同じ top-to-south の応力場であったことを示す。

(6) TEM による観察の結果、ウルトラマイロナイト中の層状珪酸塩鉱物は転位クリーブによって

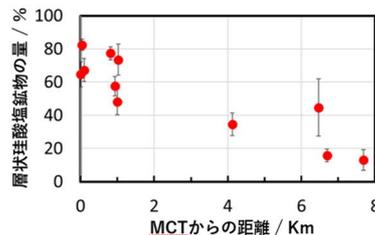


図 3: MCT からの距離と層状珪酸塩鉱物の占める量との関係。

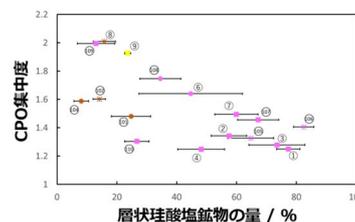


図 4: 層状珪酸塩鉱物の占める量と石英の C 軸ファブリックの集中度の関係。

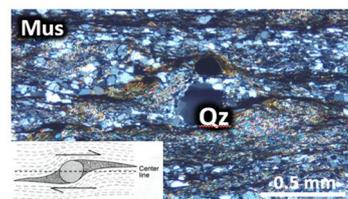


図 5: シグマタイプのマントルポーフィロクラスト。

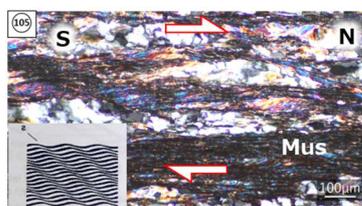


図 6: 層状珪酸塩鉱物の非対称組織。

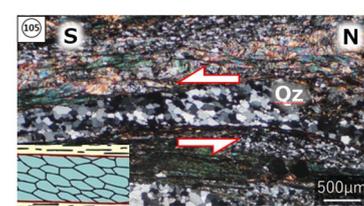


図 7: 再結晶石英の非対称組織。

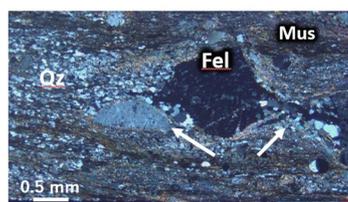
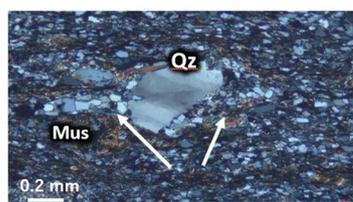


図 8: 石英と長石の圧力溶解クリーブ。矢印部分が圧力溶解によって再結晶化した部分。

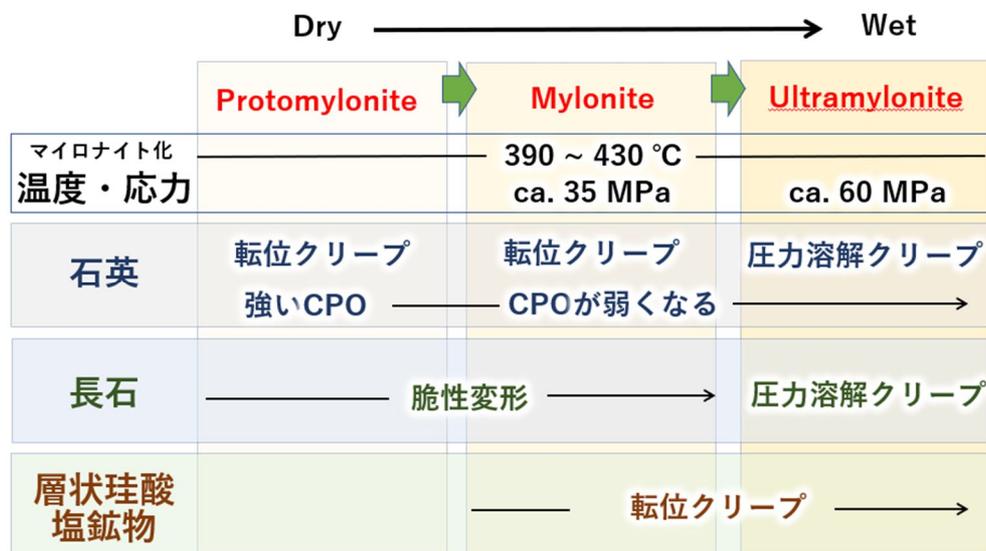


図9：花崗岩のマイロナイト化に伴う石英、長石、層状珪酸塩鉱物の変形様式の変化。

塑性変形したことが分かった。また層状珪酸塩鉱物の占める割合が多くなると（図1の60%以上の地域では）、石英と長石の一部は圧力溶解クリープによって変形していることも分かった（図8）。

以上の結果から理解できた、花崗岩のマイロナイト化に伴う石英、長石、層状珪酸塩鉱物の変形様式を図9にまとめる。

本研究の目的である「なぜ脆性-塑性遷移領域で、岩石は断層を発生させうるのか」という問いに関して最も重要な発見は上記（5）である。本調査地域の花崗岩マイロナイトは、インド大陸の沈み込みに整合的な top-to-south の応力場で形成された。しかし流体が関与して層状珪酸塩鉱物が晶出し、その割合が多くなると層状珪酸塩鉱物に変形が集中し、ウルトラマイロナイト領域のみ top-to-north と逆センスの応力場となった。この現象はチャネルフローモデルとして知られている現象で説明ができる。層状珪酸塩鉱物は、石英と長石と比較すると塑性変形強度がかなり小さい。そのため層状珪酸塩鉱物が卓越する領域は、そうでない領域に比べて塑性変形強度が小さいために、インド大陸の沈み込みに伴う応力によって地表に押し出される様に変形することになる。これにより断層（MCT）が形成されたと考えられる。まとめると、脆性-塑性遷移領域において断層が形成されるためには、岩体中に流体が浸透すること、その結果 層状珪酸塩鉱物が晶出し、層状珪酸塩鉱物卓越領域に応力と歪が集中する必要があるとの結論である。このことがインドヒマラヤ地域の衝上断層の研究から明らかとなった。（上記の流体の浸透には割れ目の存在が重要で、割れ目の形成は「岩石の脆性変形」特性、その後の 層状珪酸塩鉱物卓越領域に応力と歪が集中しウルトラマイロナイトが形成するためには「岩石の塑性変形」特性が対応する）。

最後に「なぜプレート境界断層が、時代とともに南に活動域を移すのか」といった問いに関しては、流体の浸透、すなわち割れ目がプレート境界断層の南に生じるためだと考えているが今後の研究が必要である。

<引用文献>

- Sakai H., Takigami, Y., Nakamura, Y. and Nomura, H., 1999, Inverted metamorphism in the Pre-Siwalik foreland basin sediments beneath the crystalline nappe, western Nepal Himalaya, *Journal of Asian Earth Sciences* 17, 727-739.
- 酒井治孝、今山武志、吉田孝紀、朝日克彦、2017, ヒマラヤのテクトニクス、*地質学雑誌*、123、403-421
- Srivastava, P. and Mitra, G., 1996, Deformation mechanisms and inverted thermal profile in the North Almora Thrust mylonite zone, Kumaon Lesser Himalaya, India, *J. Structural Geology*, 18, 27-39.
- Yin, A., 2006, Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation, *Earth-Science Reviews*, 76, 1-131.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Sarkar Dyuti Prakash, Ando Jun-ichi, Ghosh Gautam, Das Kaushik, Dasgupta Prabir, Tomioka Naotaka	4. 巻 135
2. 論文標題 Fault zone architecture and lithology-dependent deformation mechanisms of the Himalayan frontal fold-thrust belt: Insights from the Nahan Thrust, India	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 GSA Bulletin	6. 最初と最後の頁 1206-1224
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1130/B36246.1	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 該当する
1. 著者名 Obata Masaaki, Mashimo T., Ando J., Chen L., Kawai N., Liu Xun, Yamamoto T.	4. 巻 338
2. 論文標題 High-pressure shock compression of olivine: Dynamic pulverization and frictional melting	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 107009 ~ 107009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pepi.2023.107009	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 Bui Dong Van, Takeshita Toru, Ando Jun-ichi, Yamamoto Takafumi, Huang Wencheng, Yeo Thomas, Czertowicz Thomas A.	4. 巻 850
2. 論文標題 Development of the Median Tectonic Line-related shear zone, southwest Japan: An analysis of strain localization processes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 229751 ~ 229751
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2023.229751	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 Sarkar Dyuti Prakash, Ando Jun-ichi, Kano Akihiro, Kato Hirokazu, Ghosh Gautam, Das Kaushik	4. 巻 8
2. 論文標題 Carbonate clumped isotope thermometry of fault rocks and its possibilities: tectonic implications from calcites within Himalayan Frontal Fold-Thrust Belt	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	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） 10.1186/s40645-021-00435-6	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

1. 著者名 Okazaki Jun ya, Das Kaushik, Chattopadhyay Anupam, Ando Jun ichi, Sarkar Arindam	4. 巻 59
2. 論文標題 U?Pb geochronology and metamorphic history of gneissic rocks from Sarwar Junia Fault Zone, Rajasthan, NW India: Implications for the tectonothermal evolution of the Aravalli Delhi Mobile Belt	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geological Journal	6. 最初と最後の頁 169 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/gj.4854	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 Sarkar Dyuti Prakash, Ando Jun ichi, Das Kaushik, Ghosh Gautam	4. 巻 33
2. 論文標題 Delineation of an exhumed intermediate depth crustal fault in a collisional setting: An example from the Himalaya	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Island Arc	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) 10.1111/iar.12515	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 Ranjan Mishra Shruti, Pratim Chakraborty Partha, Das Kaushik, Saha Subhojit, Shibata Tomoyuki, Mohanty Sarada P., Chandra Tripathi Satish	4. 巻 264
2. 論文標題 Tracking provenance shift in the Cretaceous-Paleogene sedimentary succession of the Garhwal foreland basin, NW Himalaya using sediment geochemistry and U-Pb detrital zircon geochronology	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 106067 ~ 106067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2024.106067	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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 安東淳一、樹神洸寿、Das Kaushik, Sakar Dyuti Prakash, Gautam Ghosh、富岡尚敬
2. 発表標題 脆性-塑性遷移領域における断層形成メカニズム
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樹神洸寿、安東淳一、Das Kaushik, Sarkar Dyuti Prakash
2. 発表標題 マイロナイトから推定する北アルモラ衝上断層の運動像
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樹神洸寿、安東淳一、Das Kaushik, Sakar Dyuti Prakash
2. 発表標題 マイロナイトの組織から考察するヒマラヤ地域の主中央衝上断層の運動像
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安東淳一、樹神洸寿、Das Kaushik, Sakar Dyuti Prakash, Gautam Ghosh、富岡尚敬
2. 発表標題 脆性-塑性遷移領域での断層形成メカニズム
3. 学会等名 地質学会西日本支部会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安東淳一、Sakar Dyuti Prakash、樹神洸寿、Das Kaushik、Gautam Ghosh、富岡尚敬
2. 発表標題 流体が関与した岩石のマイロナイト化と断層形成過程
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

広島大学大学院先進理工系科学研究科 地球惑星システム学プログラム
<https://depss.hiroshima-u.ac.jp/gs/index.html>
広島大学プレート収束域の物質科学研究拠点
<https://hiper.hiroshima-u.ac.jp/about/>

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	富岡 尚敬 (Tomioka Naotaka) (30335418)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員 (82706)	
研究分担者	Das Kaushik (Das Kaushik) (40634077)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・准教授 (15401)	
研究分担者	竹下 徹 (Toru Takeshita) (30216882)	北海道大学・理学研究院・名誉教授 (10101)	

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		
インド	Presidency University		