

令和 5 年 4 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2022

課題番号：19KK0291

研究課題名（和文）直下型地震による地下環境変化のグローバルモデル創出

研究課題名（英文）Compilation of observations on post-seismic hydro-environmental changes reported over the world

研究代表者

細野 高啓（Hosono, Takahiro）

熊本大学・大学院先端科学研究部（理）・教授

研究者番号：30367065

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：巨大地震は地下環境にどのような変化をもたらすのか？2016年熊本地震時に発見された様々な現象理解を基に、これらが地球規模で起こる普遍的な現象であることを突き止めた。世界をまたにかけた現地調査と特集号出版の二つのアプローチをとった。前者について、アイスランド、イタリア、ニュージーランドを対象に、現地で得られるデータや知見を基に、当該現象の類似性を確認した。また、後者については、世界の最新事例を国際誌の特集号として取りまとめた。以上より、既往研究でみえてきた直下型地震による地下環境変化は、グローバルに起こる普遍的な現象であるといった理解が格段に深まったと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本国際共同研究を通して、当該研究分野の飛躍ならびに当該分野における我が国の存在感・実力を示すと共に、国際研究の連携が強化された。本活動の成果は、これまで情報もアプローチも整備されてこなかった他の地震多発地域（例えばインドネシアや中南米諸国など）にとって、重要な道標になると期待される。本研究の成果は、地震学や都市の地下空間利用や産業廃棄物地層処分を取り扱う分野ならびに減災・防災分野にとって有力情報になると期待される。さらに、災害時の水資源の利用や上下水道等地下インフラ破壊への対策といった観点から、地域の行政や水資源の運用にも重要な指針を提供できると期待される。

研究成果の概要（英文）：What kind of impacts do huge earthquakes bring to the underground environment? Based on our understanding of various phenomena discovered during the 2016 Kumamoto earthquake, we have determined that these are universal phenomena that occur on a global scale. Two approaches were taken: field research across the world and publishing a special issue. Concerning the former, we confirmed the similarity of the phenomena in Iceland, Italy, and New Zealand based on the data and findings obtained locally on site. As for the latter, the latest study cases around the world were compiled as a special issue in an international journal 'Journal of Hydrology'. From the above, it is considered that the understanding on the underground environment changes caused by crustal earthquakes, which have been observed in past studies, is a universal phenomenon that occurs globally, has been greatly advanced.

研究分野：流域環境科学

キーワード：地震 火山 テクトニクス 水循環 地下水 グローバル 現地調査 特集号

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

一般に、地表での地震断層破壊は目に見える現象であるため被害状況を把握しやすい。一方、地下にも破壊活動が存在することが想定されるが、目で見て確認できない地下環境の変化を正しく理解することは容易ではない。地下における応力変化は水圧変化として三次元的に伝搬する。したがって、水位や水量の観測データは、目に見えない地下環境の状態変化を知らせてくれる最も有力なメッセンジャーとなる。これに加え、水温や水質の長期観測データが入手できればより有力な手掛かりとなる。しかし、巨大な断層地震が発生した近傍でたまたま高密度での水位・水質観測網が存在することは稀なため、こうした現象を捉えた報告例は限られている。

直下型 (near field) 地震に伴う地下環境変化を報告した例は、地球のプレート境界のいわゆる活発な地震テクトニクス地域に集中する。代表的な例として、1999年 Mw7.6 台湾大地震発生時には網羅的な水位変動記録が取りまとめられた。この解析をきっかけに、断層地震が帯水層の透水性を増大させ、結果として大規模な地下水流動変化を引き起こす実態が認められるようになった。続いて、2014年アメリカ・カリフォルニア州で発生した Mw6.0 ナパ地震時の水位変動解析は、地震動により周辺の山々に蓄えられた水が解放され、下流部の流量を数倍上昇させる実態を明らかにした。2011年ニュージーランドのカンタベリー地方を襲った Mw6.1 の地震時にも類似の水位変動が報告されている。一方、アイスランド北部ならびにイタリア中部の地震巣窟地域の研究では、地震活動に伴って深部からの流体が断層構造線に沿って上昇する機構が突き止められている。

他の巨大断層地震発生時にも、例えば1995年 Mw7.3 阪神・淡路大震災時のように水位変動を記録した好例はいくつか存在するが、充実した観測網に基づく新しいメカニズムの発案は主として上記5つの例に絞られていた。基課題研究では、世界最高密度の観測記録とこれまでにない学際的アプローチ(水位、水温、水質、同位体比、菌叢解析、数値モデル)を駆使し、断層に沿った水の呑み込み現象(湧水池の水枯れを牽引)や微生物生態系の大規模変革といった新発見を含め、これまで世界で提案されてきた上記現象が一つの地域でまとめて起こりうることを実証してきた。しかしながら、こうした最新の熊本モデルを含め、地震時に起こる地下環境変化についての一般即というのは、まだまだ研究事例が少なく整理が及んでいない状況であった。

2. 研究の目的

どの分野においても、地域における個別研究の成果をグローバルモデルへと展開することは、科学的発見をより普遍的なレベルに高めるうえで本質的に重要と言える。申請者は、当該研究領域のトップランナーとして世界を俯瞰したとき、熊本モデルをベースにここ数年の間に蓄積された最新研究事例を統合することで類似の事象や特異な例をより整理でき、これまで散在的に報告されてきたローカルな事象を、世界に通用する一般法則レベルにまで押し上げる大きな一歩になるのではないかと考えた。これに加え、過去に先駆的な研究報告がなされた現場における水理地質構造および水循環特性を調査し、熊本との類似性や相違点を整理することで、現象の一般特性や相違性を混乱なく説明できるのではないかと考えた。

例えば、台湾中部、カリフォルニア、熊本ではいずれも透水性増加に伴う水位上昇が認められる他、台湾大地震やカンタベリー地震の際には、これについての言及はないが、断層沿いに水の呑み込みを示唆する水位低下が観測されている。鋭敏な同位体トレーサーが明らかにした深部流体の寄与は熊本地域では極めて僅かであったが、アイスランドやイタリアでの典型例の通り、この現象についても国や地域に限らず普遍的であるようにも思えるが、両者のテクトニックなセッティングは必ずしも類似するとは言えない。したがって、この機会に世界の他地域における基本的な水理地質構造や水質特性を整理・比較することが重要だと考えた。

熊本地域の地下水流動系は、典型的な火山性帯水層に発達しており、既に述べた5つの地域も同じく活発な火山-地震テクトニクス地域に分布している。したがって、同地域では他にも類似の現象が起こる可能性が指摘できる。本国際共同研究は、熊本モデルをグローバルに展開し、海外共同研究者の協力を得て実施する現地調査の結果を取りまとめることで、また、代表者が責任者となって牽引する国際誌での特集号の出版を達成することで、当該現象の一般的な理解の促進を目指したものである。

3. 研究の方法

世界をまたにかけた現地調査と特集号出版の二つのアプローチをとった。一つ目に、研究期間中、アイスランド、イタリア中央山脈、ニュージーランド南島において、現地の研究協力者からの協力を得る形で対象地域の水理地質構造および水循環特性の調査ならびに採水を実施した。二つ目に、該当分野において国際的トップジャーナルの一つである *Journal of Hydrology* 誌(2023年インパクトファクター6.7)において特集号の出版を目指した。申請者が **Chief Editor** となり、本研究の海外共同研究者とも関係が深いイタリアと台湾の世界トップレベルの研究者が他の **Guest Editor** となる体制を構築した。

4. 研究成果

図1に研究代表者の細野が提案する巨大地震発生に伴う周辺地下環境の変化を示した模式図を示す。また、主たる研究の成果を、(1)現地調査と(2)特集号の出版、の二つに分けた形で記述する。

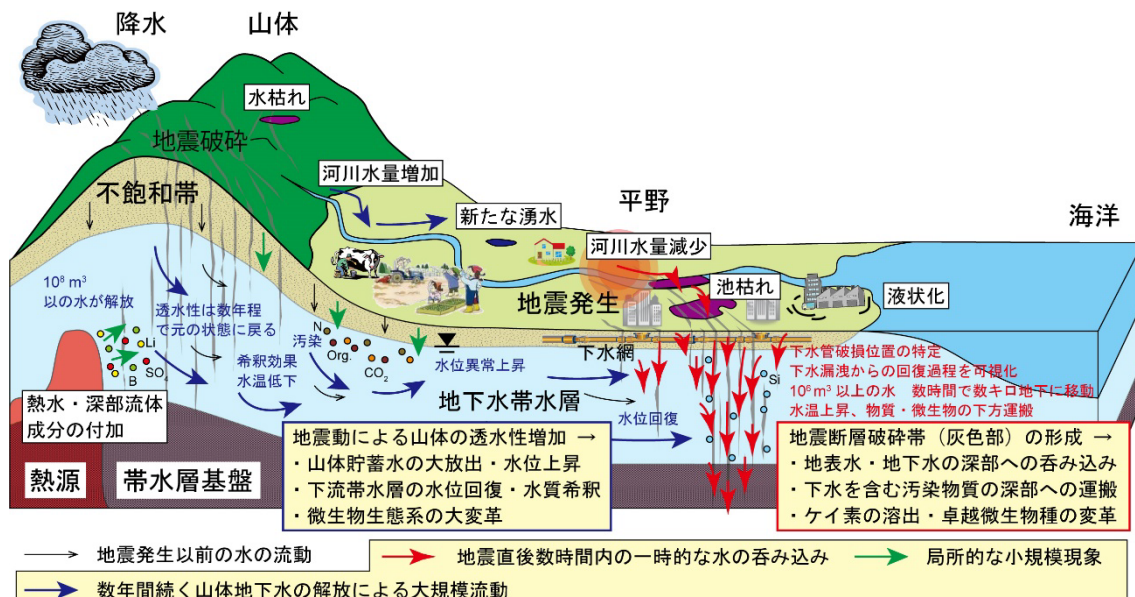


図1 巨大地震発生に伴う地下環境の変化を示した模式図

(1) 2021 最終年度にアイスランド、続く 2022 年度にイタリア中央山脈ならびにニュージーランド南島において、現地調査を実施した。特に、Sapienza University of Rome の研究グループとの共同研究を通じ、直下型地震による地下環境変化の普遍性と地域特異性を整理する貴重な成果を得た。すなわち、山体地下水の解放現象は、2016 イタリア中部地震時に石灰岩帯水層でも同じように起こり、オーダーレベルで同程度 (10^8 m^3) の地下水が放出されたことが明らかとなった。これにより、同現象は地域、気象条件、地質に関わらずグローバルに起こる普遍的な現象であることが裏付けられた。一方、イタリアならびにアイスランドでの現場調査から、深部流体の湧昇現象は、テクトニックセッティングの違いにより、そのメカニズムはかなり異なることが分かってきた。すなわち、熊本のような横ずれ断層が卓越する応力場では、深部の高温高圧環境下に置かれている流体が断層破碎帯を通して減圧や熱エネルギーをもって湧昇するのに対し、典型的な伸長場に置かれているイタリア中部地域では、上位にある地質帯が地震により陥没しその重力によって押し出される形で深部に蓄えられていた流体が地表に湧出していることが明らかとなった。アイスランド、イタリア中央山脈、ニュージーランド南島といった、アクティブなテクトニクスに置かれている現場を対象に、現地調査ならびに現地研究者から得られる知見やデータに基づき、熊本で発見された現象の普遍性や他とは異なる特性が明らかとなってきた。

(2) 申請者が目指すグローバルモデル創出の趣旨と挑戦に賛同くださった海外共同研究者を中心に Journal of Hydrology 誌の特集号を立ち上げた。研究代表者の細野が編集長を務め、そのタイトルは「Coseismic hydro-environmental changes: insights from recent earthquakes」である。タイトルからも、本研究課題の目的を遂行しそれら成果を取り纏めたものであることが明白である。なお、国際誌における当該研究領域の研究事例を取り纏めた特集号は世界初である。合計 30 編の投稿があった内、熊本からの研究論文 10 編の他、熊本以外の 7 つの国や地域（中国、インド、イスラエル、イタリア、韓国、台湾、米国）から 13 編の、合計 23 編の論文が掲載に至った。このほか、グローバルな観測網を用い地球規模で地震による水位変動を評価する方法や、地震予知に係る方法など、これまででない新たな視点からの提案などが盛り込まれた。これら合計 23 編の論文全てを統合する形で、研究代表者の細野が総論の執筆・掲載を達成した。近年の研究成果を取り纏めることで、既往研究でみえてきた直下型地震による地下環境変化は、他地域でも広く観察されることが整理され、同現象に対する一般的な理解が格段に深まったと考えられる。

最後に、当研究計画書企画以前から共同研究を通じて交流があり、本国際共同研究の共同研究者でもあるカリフォルニア大学バークレー校の Chi-Yuen Wang 教授と Michael Manga 教授が、当該研究領域において唯一の教科書となる「Water and Earthquakes」を 2021 年に出版された (Wang and Manga, 2021)。その完成には研究代表者の細野も査読者として関わっており、熊本における新しい発見や Journal of Hydrology 誌の特集号で掲載された論文も取り纏められている。本国際共同研究の終了と共に、世界に通用する一般書が世に出される形となった。こうした形での、プロジェクトの成功は大変意義深いと考えられる。

<引用文献>

Wang, C.-Y., Manga, M., Water and Earthquakes. Springer International Publishing, 387 p, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hosono Takahiro, Yamanaka Chikashige	4. 巻 73
2. 論文標題 Origins and pathways of deeply derived carbon and fluids observed in hot spring waters from non-active volcanic fields, western Kumamoto, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01478-1	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 Rahman A. T. M. Sakiur, Hosono Takahiro, Tawara Yasuhiro, Fukuoka Youichi, Hazart Aurelien, Shimada Jun	4. 巻 29
2. 論文標題 Multiple-tracers-aided surface-subsurface hydrological modeling for detailed characterization of regional catchment water dynamics in Kumamoto area, southern Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrogeology Journal	6. 最初と最後の頁 1885 ~ 1904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10040-021-02354-8	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 Romero-Mujalli Gibran, Hartmann Jens, Hosono Takahiro, Louvat Pascale, Okamura Koki, Delmelle Pierre, Amann Thorben, Böttcher Michael E.	4. 巻 588
2. 論文標題 Hydrothermal and magmatic contributions to surface waters in the Aso caldera, southern Japan: Implications for weathering processes in volcanic areas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 120612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120612	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 Tanimizu M., Sugimoto N., Hosono T., Kuribayashi C., Morimoto T., Ito A., Umam R., Nishio Y., Nagaishi K., Ishikawa T.	4. 巻 55
2. 論文標題 Application of B and Li isotope systematics for detecting chemical disturbance in groundwater associated with large shallow inland earthquakes in Kumamoto, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 GEOCHEMICAL JOURNAL	6. 最初と最後の頁 241 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.2.0633	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 Ishii Eri, Watanabe Yuta, Agusa Tetsuro, Hosono Takahiro, Nakata Haruhiko	4. 巻 754
2. 論文標題 Acesulfame as a suitable sewer tracer on groundwater pollution: A case study before and after the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquakes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 142409 ~ 142409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.142409	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 Hosono Takahiro, Masaki Yukako	4. 巻 580
2. 論文標題 Post-seismic hydrochemical changes in regional groundwater flow systems in response to the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124340 ~ 124340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124340	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 Morimura Shigeru, Zeng Xiangyong, Noboru Naoki, Hosono Takahiro	4. 巻 581
2. 論文標題 Changes to the microbial communities within groundwater in response to a large crustal earthquake in Kumamoto, southern Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124341 ~ 124341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124341	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 Miyakoshi Akinobu, Taniguchi Makoto, Ide Kiyoshi, Kagabu Makoto, Hosono Takahiro, Shimada Jun	4. 巻 582
2. 論文標題 Identification of changes in subsurface temperature and groundwater flow after the 2016 Kumamoto earthquake using long-term well temperature depth profiles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124530 ~ 124530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124530	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 Kagabu Makoto, Ide Kiyoshi, Hosono Takahiro, Nakagawa Kei, Shimada Jun	4. 巻 582
2. 論文標題 Describing coseismic groundwater level rise using tank model in volcanic aquifers, Kumamoto, southern Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124464 ~ 124464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124464	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 Nakagawa Kei, Yu Zhi-Qiang, Berndtsson Ronny, Hosono Takahiro	4. 巻 582
2. 論文標題 Temporal characteristics of groundwater chemistry affected by the 2016 Kumamoto earthquake using self-organizing maps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124519 ~ 124519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2019.124519	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 Ide Kiyoshi, Hosono Takahiro, Kagabu Makoto, Fukamizu Keisuke, Tokunaga Takahiro, Shimada Jun	4. 巻 583
2. 論文標題 Changes of groundwater flow systems after the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake deduced by stable isotopic and CFC-12 compositions of natural springs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124551 ~ 124551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2020.124551	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 Tawara Yasuhiro, Hosono Takahiro, Fukuoka Youichi, Yoshida Takafumi, Shimada Jun	4. 巻 583
2. 論文標題 Quantitative assessment of the changes in regional water flow systems caused by the 2016 Kumamoto Earthquake using numerical modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124559 ~ 124559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2020.124559	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 Kawabata Kuniyo, Sato Tsutomu, Takahashi Hiroshi A., Tsunomori Fumiaki, Hosono Takahiro, Takahashi Masaaki, Kitamura Yujin	4. 巻 584
2. 論文標題 Changes in groundwater radon concentrations caused by the 2016 Kumamoto earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124712 ~ 124712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2020.124712	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 Hosono Takahiro, Hossain Shahadat, Shimada Jun	4. 巻 79
2. 論文標題 Hydrobiogeochemical evolution along the regional groundwater flow systems in volcanic aquifers in Kumamoto, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12665-020-09155-4	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 Hosono Takahiro, Saltalippi Carla, Jean Jiin-Shuh	4. 巻 585
2. 論文標題 Coseismic hydro-environmental changes: Insights from recent earthquakes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 124799 ~ 124799
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydro.2020.124799	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 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Rahman, A.T.M.S., Hosono, T., Tawara, Y., Fukuoka, Y., Hazart, A., Shimada, J.
2. 発表標題 Physically Based Groundwater Flow Simulation using Tracer-aided model in Kumamoto Region, Japan
3. 学会等名 JpGU-AGU joint session, Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Romero-Mujalli, G., Hartmann, J., Hosono, T., Ide, K., Amann, T., Louvat, P.
2. 発表標題 Hydrothermal influence on rock weathering in the Kirishima volcanic complex
3. 学会等名 Goldschmidt 2021, 4-9 July 2021, online conference, Lyon, France (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rahman, A.T.M.S., Hosono, T., Quilty, J.M., Das, J., Basak, A.
2. 発表標題 Automated Hybrid Machine Learning Approaches for Groundwater Level Forecasting in Kumamoto area, Japan
3. 学会等名 日本地下水学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細野高啓
2. 発表標題 直下型地震が及ぼす地下水環境への影響：2016年熊本地震からの学び
3. 学会等名 IAH Japanセミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hosono, T.
2. 発表標題 Coseismic hydro-environmental changes: insights from 2016 Kumamoto earthquakes, Japan
3. 学会等名 Lecture Speech in Dipartimento di Scienze della Terra, Sapienza Universita di Roma（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センター 減災型社会システム部門	4. 発行年 2022年
2. 出版社 熊日出版	5. 総ページ数 164
3. 書名 熊本地震の痕跡からの学び	

1. 著者名 公益社団法人 日本地下水学会	4. 発行年 2020年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 272
3. 書名 地下水・湧水の疑問50	

1. 著者名 嶋田 純、細野 高啓	4. 発行年 2020年
2. 出版社 成文堂	5. 総ページ数 236
3. 書名 巨大地震が地下水環境に与えた影響	

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ペティータ マルコ (Petitta Marco)	ローマ・サピエンツァ大学・Dipartimento di Scienze della Terra・Professor	

	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
その他の研究協力者	マンガ マイケル (Manga Michael)	カリフォルニア大学バークレー校・Department of Earth & Planetary Science・Professor	

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			
イタリア	Sapienza University of Rome			
米国	University of California, Berkeley			
その他の国・地域	University of Iceland			