

令和 4 年 8 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03816

研究課題名（和文）火山深部低周波地震とマグマ性流体との因果関係の解明

研究課題名（英文）Relation between deep low-frequency earthquakes and magmatic fluid

研究代表者

行竹 洋平（Yukutake, Yohei）

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：20435853

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：火山深部で起きる地震活動である深部低周波地震は地殻深部で我々が観測できる唯一の地震波励起現象であり、マグマ供給過程を理解する上で重要なデータとなる。本研究課題で、深部低周波地震に対する網羅的な地震カタログの作成及び箱根火山を対象とした詳細な地殻構造を推定した結果、多くの場合深部低周波地震が火山浅部での現象と時間的に連動性があること、および火山深部へのマグマ供給がその活発化に大きく関わっていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、火山深部低周波地震の活発化が火山深部へのマグマ供給レートの増加を反映し、多くの場合において火山浅部での群発地震活動や噴火に先行して起きることが明らかになった。深部低周波地震のリアルタイムでのモニタリングを通して、火山活発化への中期から短期的な予測につながる情報が得られ、今後の火山防災に対する重要な成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Deep low-frequency earthquakes are seismic activities occurring at deep parts of volcanoes and only phenomena existing at the depth. Therefore, this seismic activity provides us important data for understanding magma supply processes. In this research project, we estimated a comprehensive seismic catalog of deep low-frequency earthquakes and estimated the detailed crustal structure beneath Hakone volcano and found that deep low-frequency earthquakes are often temporally linked with shallow volcanic activities. The results also indicate that magma supply to deep volcanoes plays an important role in their activation.

研究分野：火山地震学

キーワード：深部低周波地震 マグマ供給 火山活動

1. 研究開始当初の背景

火山の直下深さ 10~30km の範囲で通常の地震よりもゆっくりとした震動の地震波を出す、「深部低周波地震」という現象が観測されている。気象庁ルーチン処理により検知された震源カタログ（気象庁カタログ）で過去 15 年間に日本国内で発生した深部低周波地震の分布をみると（図 1）、フィリピン海プレート境界を除けば多くは活火山周辺で発生しており、火山活動と密接に関わっている現象であることは容易に想像できる。過去の研究では、例えば岩手山の深部低周波地震活動に対して火山深部でのマグマ性流体の寄与を示唆する結果が得られている(Nakamichi et al. 2003)。しかしながら、深部低周波地震のマグマ性流体との関係性についての議論は一部の火山にとどまり、また気象庁カタログによる深部低周波地震と火山活動との相関は必ずしも明瞭でなく（例えば、原田 ほか, 2010）、発生原因について未解明な点が多い現象である。

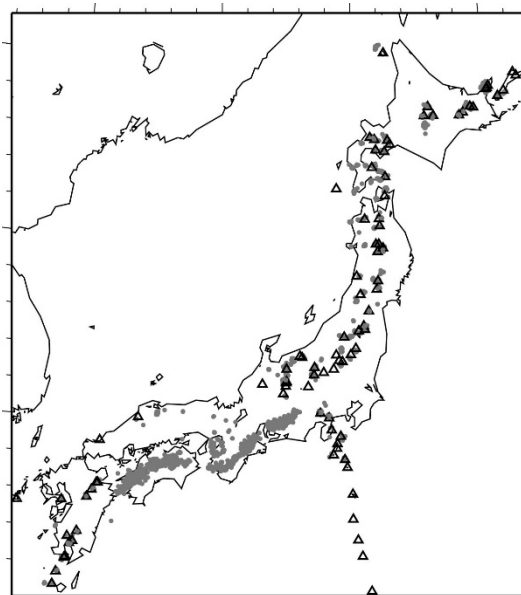


図 1 活火山分布(△)と気象庁カタログによる深部低周波地震 (●)

2. 研究の目的

本研究は深部低周波地震と火山活動（特にマグマ供給過程）との関係を理解することを目的とした。そのためには、まず深部低周波地震の詳細な活動履歴を得るために高品質な地震カタログの整備を行った。それに加えて、箱根火山を研究フィールドとして、火山下の詳細な地震波速度構造を推定することを行った。

3. 研究の方法

深部低周波地震の観測波形は通常の地震よりもゆっくりと立ち上がり、かつほとんどがマグニチュード 1 以下の微小なものなので地動ノイズに埋もれてしまう。本研究では上記の問題を克服するために、従来の短期間と長期間の波形振幅比に基づいた地震検出方法ではなく、Matched Filter 法 (MF 法) を用いたイベント検出を行った。MF 法では、S/N 比の良い深部低周波地震の波形を雛形にして、この雛形地震波形と相似なシグナルを地震連続波形記録との相関処理を行い検出するものである。連続波形記録は端から端までなめるように調べつくすので、この手法により従来地動ノイズに埋もれていた深部低周波地震を拾い出すことができ、地震検出能力を飛躍的に向上することができる。気象庁一元化カタログに記載されている深部低周波地震のなかで SN 比のよいイベントを雛形地震波形として使用した。本研究では、この手法を箱根火山のほか、富士山や伊豆東方沖領域に適用して深部低周波地震活動の詳細な活動履歴を推定した。また箱根火山を対象に、火山周辺域に展開された高密度な地震観測網のデータを用いて、自然地震の走時データから、3次元速度トモグラフィ法 (Zhang and Thurber, 2003)を用いて地震波速度構造の推定を行った。

4. 研究成果

2000 年から 2019 年末までの 20 年間の箱根火山周辺の地震観測点連続波形記録に MF 法を適用した結果、約 16,000 の深部低周波地震が検出された（図 2a）。これは気象庁一元化カタログ記載数の約 35 倍に相当する。検出された深部低周波地震数の積算曲線を見ると、一定レートで発生しているのではなく、発生数が急増する期間がいくつかあることが分かった。図 2d 及び f に示した箱根浅部で発生する群発地震活動や地殻変動の時系列を比較すると、深部低周波地震活発化時期の多くで、それにやや遅れて群発地震の活発化や地殻変動時が起きているように見える。例えば、2015 年の活動に焦点を当てると、3 月上旬に最初に深部低周波地震が活発化し、少し遅れて膨張性地殻変動が開始、4 月下旬から浅部での群発地震の急激な増加が発生している。さらに遅れて、5 月上旬に大涌谷での温泉蒸気井の圧力増加に伴う蒸気の噴出（暴噴）、6 月末に水蒸気噴火が発生した。さらに、深さ 22km 以深で発生する深部低周波地震に着目すると（図 2b、深部クラスター）、群発地震活動との関連性はより顕著であることが明らかになった。深部低周波地震と火山浅部での群発地震との関連性を統計的に評価するには、地震の活動度を何らかの手法で定量化する必要がある。ここでは、Huang (2006) で用いられたにより提案された RTL 関数を用いた。RTL 関数はある時間・空間窓を用いて、その中で発生した地震数を規模、時間及び空間距離で重み付けし積算した値の時間関数で表される。図 2c 及び 2e に深部クラスター

一で発生した深部低周波地震及び火山浅部群発地震のRTL関数が示されている。RTL関数が正の値をもつ期間は、地震活動が定常より活発化していることを意味している。深部低周波地震と群発地震のRTL関数(図2ce)の相関係数を推定すると、深部低周波地震のRTL関数を約40日遅らせたときに最大値0.66となる。深部低周波地震のRTL関数が継続して正になる期間(活発化期間)をランダムに移動させて群発地震との相関係数を計算するというプロセスを10万回実施した結果、相関係数が観測値を超える回数は5%以下であった。つまり、深部低周波地震と浅部の群発地震との相関が偶然生じたという帰無仮説(null hypothesis)は高い信頼性で棄却できるため、深部低周波地震の活動と浅部の地震活動には時間的な相関性があることがこの検証により示された。また、約40日の時間遅れは深部低周波地震が浅部の地震活動に先行して活発化することを意味しているのだろう。

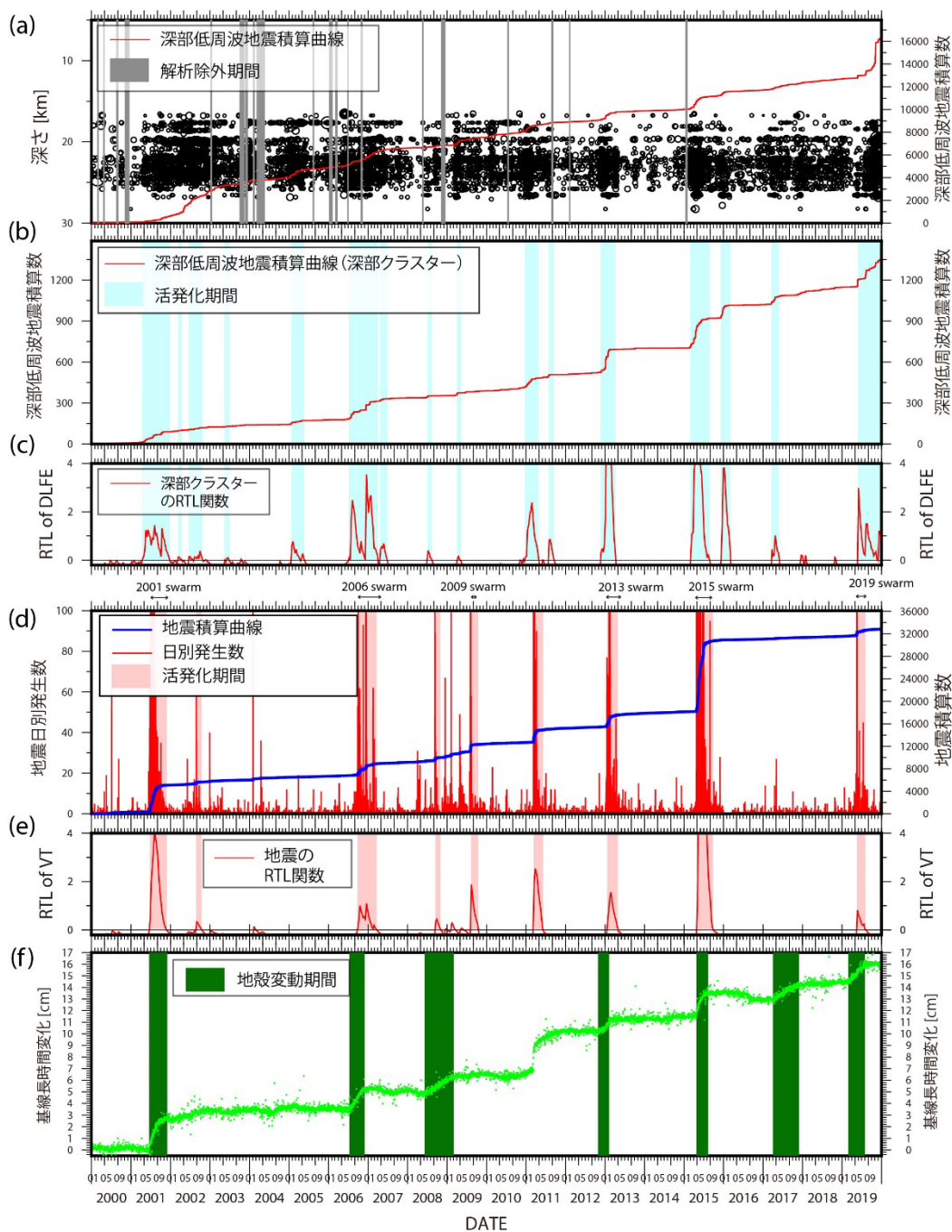


図2 Matched Filter法で検出された深部低周波地震と浅部の地震活動、地殻変動との比較。(a) 深部低周波地震の積算曲線(赤線)と深さ-時間分布(黒丸)。波形データの欠如により解析除外となった期間を灰色で示す。(b)活動域深部(22km以深)で発生した深部低周波地震(深部クラスター)の積算曲線と(c)そのRTL関数。(d)火山浅部の地震活動時系列と(e)そのRTL関数。(f)小田原-裾野観測点間の基線長時間変化。

次に、3次元地震波速度構造を推定し、火山下のマグマ溜まりや深部低周波地震発生域からマグマ溜まりへの供給経路を示唆する低速度域の存在を明らかにした。火山の深さ 6km より深部で顕著な低速度域が推定された (図 3)。この低速度域の P 波速度と S 波速度との比 (V_p/V_s 比) を調べると、深さ 9km 付近にマグマ溜まりを示唆する高 V_p/V_s 域、またその上部にマグマ由来の熱水やガスの存在を示唆する低 V_p/V_s 域の存在が明らかになった。群発地震活動は低速度域より浅部深さ 6km 以浅で発生し、また GNSS 観測により推定された圧力源は低速度域上部の深さ 6km 付近に位置することが明らかになった (図 3)。また深さ 20km 付近に発生する深部低周波地震は、上記のとおりより浅部の群発地震活動や地殻変動と時間的に連動し深部低周波地震がやや先行して活発化し、その後深さ 6km 付近を圧力源とする膨張性地殻変動やより浅部での群発地震活動が開始することが示されている。これらの結果をもとに考察すると、深部からのマグマ供給に伴い深さ 20km 付近で深部低周波地震が活発化し、その影響がより浅部の深さ 9km 付近のマグマ溜まりに伝播し、それにともないマグマ溜まり上部の熱水域の圧力が高まり、膨張性地殻変動が観測され、それにともない浅部脆性領域への熱水の供給レートが増加することにより、脆性領域における微小な断層の強度低下が起こり群発地震の活発化などの火山活動を引き起こしていることが示唆される (図 4)。本研究により、箱根火山において詳細な地震波速度構造が推定され、さらに地震分布や地殻変動源との比較により、火山の熱水系及びマグマ供給系を含む火山体浅部からやや深部までの構造が得られ、深部低周波地震の発生と地殻流体との関係の理解がより深まった。

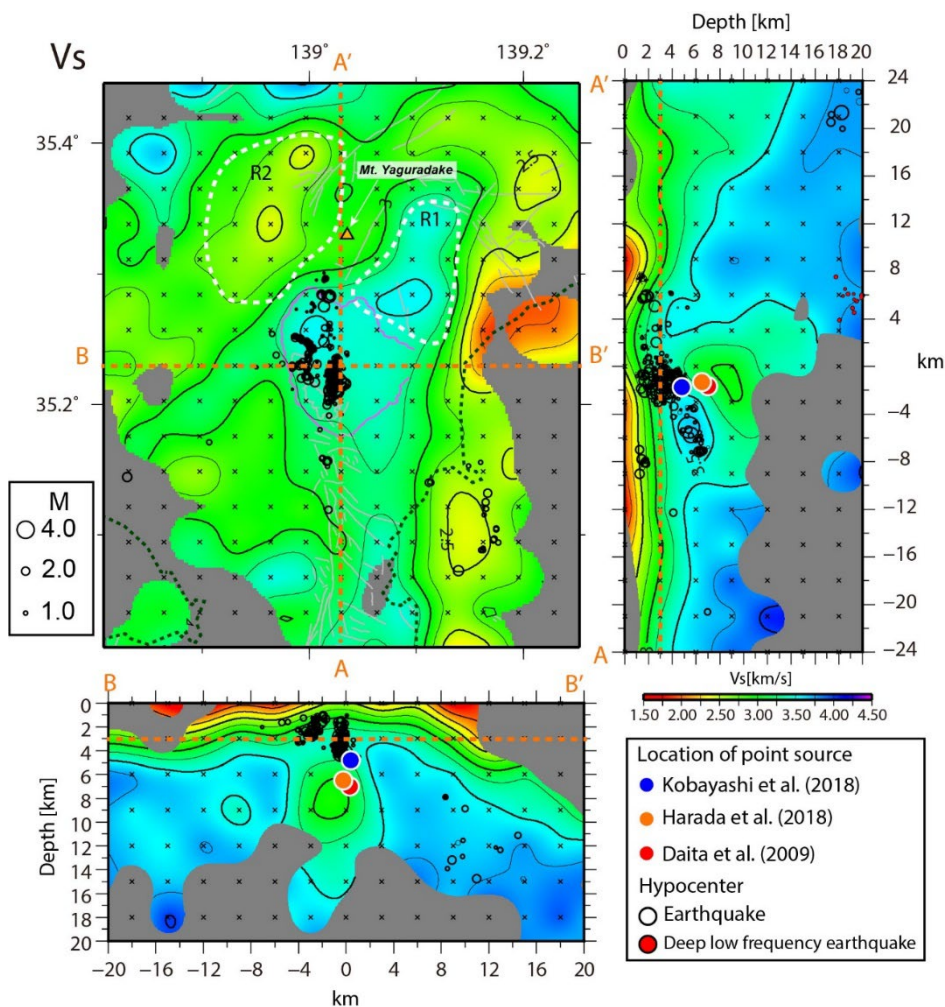


図 3 箱根火山及び周辺域の S 波速度構造。中央図は深さ 3km における速度構造を、右及び下図は中央火口丘を南北及び東西に通る断面上に投影した速度構造を示す。黒丸は構造的な地震の震源位置を、青丸・オレンジ丸・赤丸は GNSS データにより推定された圧力源の位置を示す。(Yukutake et al., 2021)

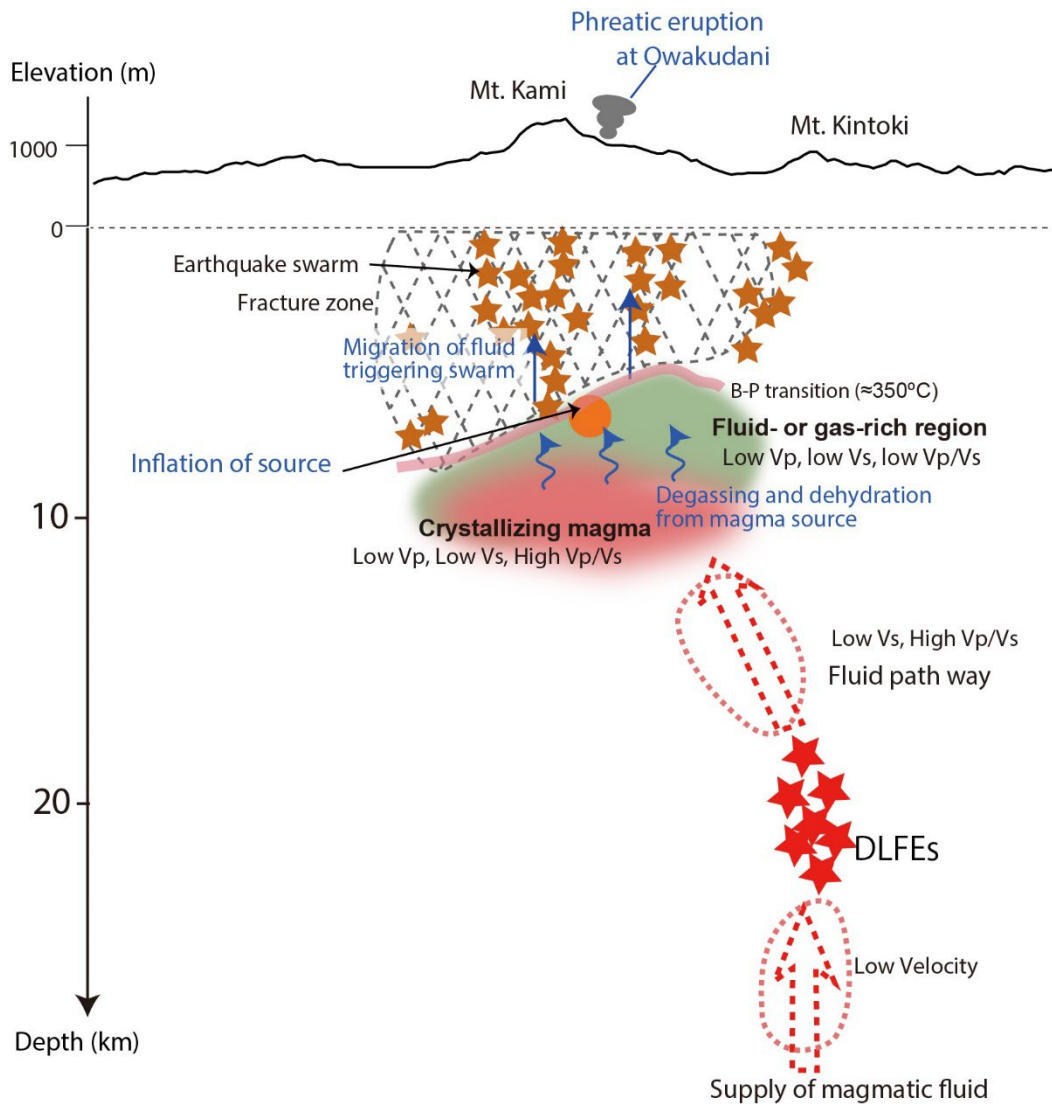


図4 地殻構造、構造性地震や深部低周波地震の活動、地殻変動変の分布から推察された、箱根火山下でのマグマ供給過程を示す模式図。(Yukutake et al., 2021)

さらに静岡県立大学との共同研究のもと、富士山及び伊豆半島東方沖で発生する深部低周波地震についてマッチドフィルター法を用いた地震の検出を進め、過去の20年間での詳細な活動履歴及び浅部地震活動との関係性を調査した。富士山では2011年東北地方太平洋沖地震後に深部低周波地震が活発化した可能性があることが分かったほか、伊豆半島東方沖での深部低周波地震については、2006年に浅部で活発な群発地震が起きた後に活発化したことが明らかになった。ただし、箱根火山の例のように浅部火山活動と深部低周波地震活動とが時間的に明瞭に相関していない事例も確認され、深部低周波地震発生域からより浅部への流体供給プロセスのメカニズムについては今後さらなる研究が必要となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Yukutake Yohei, Iwata Takaki, Iio Yoshihisa	4. 巻 790
2. 論文標題 Estimation of the heterogeneity of stress fields using misfit angles in focal mechanisms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228553 ~ 228553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2020.228553	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 Kashiwagi Hirokazu, Nakajima Junichi, Yukutake Yohei, Honda Ryou, Abe Yuki, Sakai Shin'ichi	4. 巻 125
2. 論文標題 Seismic Constraint on the Fluid Bearing Systems Feeding Hakone Volcano, Central Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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) 10.1029/2020JB020341	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 Seki K., Kanda W., Mannen K., Takakura S., Koyama T., Noguchi R., Yukutake Y., Ishikawa M., Fukai M., Harada M., Abe Y.	4. 巻 48
2. 論文標題 Imaging the Source Region of the 2015 Phreatic Eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, Using High Density Audio Frequency Magnetotellurics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2020GL091568	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 Mannen Kazutaka, Abe Yuki, Daita Yasushi, Doke Ryosuke, Harada Masatake, Kikugawa George, Honma Naoki, Miyashita Yuji, Yukutake Yohei	4. 巻 73
2. 論文標題 Volcanic unrest at Hakone volcano after the 2015 phreatic eruption: reactivation of a ruptured hydrothermal system?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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/s40623-021-01387-3	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 行竹洋平	4. 巻 69
2. 論文標題 箱根火山の深部低周波地震	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地震ジャーナル	6. 最初と最後の頁 31-41
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yukutake Y., Abe Y., Doke R.	4. 巻 46
2. 論文標題 Deep Low Frequency Earthquakes Beneath the Hakone Volcano, Central Japan, and their Relation to Volcanic Activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11035 ~ 11043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL084357	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 IWAMORI Hikaru, YUKUTAKE Yohei, IIO Yoshihisa, NAKAMURA Hitomi	4. 巻 128
2. 論文標題 Origin and Distribution of Geofluids and Their Roles on Geodynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 761 ~ 783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.761	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 Honda Ryou, Yukutake Yohei, Morita Yuichi, Sakai Shin'ichi, Itadera Kazuhiro, Kokubo Kazuya	4. 巻 70
2. 論文標題 Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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/s40623-018-0887-4	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 Mannen Kazutaka, Yukutake Yohei, Kikugawa George, Harada Masatake, Itadera Kazuhiro, Takenaka Jun	4. 巻 70
2. 論文標題 Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan: geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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/s40623-018-0844-2	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 Yoshimura Ryohei, Ogawa Yasuo, Yukutake Yohei, Kanda Wataru, Komori Shogo, Hase Hideaki, Goto Tada-nori, Honda Ryou, Harada Masatake, Yamazaki Tomoya, Kamo Masato, Kawasaki Shingo, Higa Tetsuya, Suzuki Takeshi, Yasuda Yojiro, Tani Masanori, Usui Yoshiya	4. 巻 70
2. 論文標題 Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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/s40623-018-0848-y	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 Yukutake Yohei, Ichihara Mie, Honda Ryou	4. 巻 70
2. 論文標題 Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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/s40623-018-0820-x	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 Yukutake Y., Abe Y., Honda R., Sakai S.	4. 巻 126
2. 論文標題 Magma Reservoir and Magmatic Feeding System Beneath Hakone Volcano, Central Japan, Revealed by Highly Resolved Velocity Structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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) 10.1029/2020JB021236	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 YUKUTAKE Yohei、MANNEN Kazutaka	4. 巻 130
2. 論文標題 Observations of Hydrothermal System and Preparatory Process of Phreatic Eruption: Recent Developments and Future Prospects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 731 ~ 753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.130.731	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 -

[学会発表] 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yohei Yukutake, Ryou Honda
2. 発表標題 Aseismic Slip during the Earthquake Swarm in Hakone Volcano on May 2019
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 行竹洋平・本多亮
2. 発表標題 2019年5月箱根群発地震活動時に観測された非地震すべり
3. 学会等名 地球惑星科学科連合2020大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Yukutake
2. 発表標題 Earthquake swarms, subsurface structure and deep low frequency earthquakes beneath Hakone volcano, and its relation to magma-hydrothermal system
3. 学会等名 International Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 行竹洋平, 安部祐希
2. 発表標題 箱根火山深部低周波地震活動様式から見るマグマ供給過程
3. 学会等名 地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 行竹洋平
2. 発表標題 箱根山2019年火山活動において観測された深部低周波微動
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Yukutake, Yuki Abe, Ryosuke Doke
2. 発表標題 Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath the Hakone Volcano, Central Japan, and Their Relation with the Volcanic Activity
3. 学会等名 AGU 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 行竹洋平・安部祐希・本多亮・酒井慎一
2. 発表標題 稠密地震観測から得られた箱根火山の地殻構造
3. 学会等名 日本火山学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 行竹洋平・安部祐希
2. 発表標題 箱根火山深部低周波地震と火山活動との関係
3. 学会等名 2018年地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Yukutake, Ryou Honda, Masatake Harada, Ryosuke Doke, Tatsuhiko Saito, Tomotake Ueno, Shin'ichi Sakai and Yuichi Morita
2. 発表標題 Analyzing the continuous volcanic tremors detected during the 2015 phreatic eruption of the Hakone volcano
3. 学会等名 AOGS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Yukutake
2. 発表標題 Earthquake swarms and their relation to crustal fluid as revealed by dense seismic observation in Hakone volcano
3. 学会等名 AOGS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 行竹洋平
2. 発表標題 稠密地震観測から明らかになった箱根火山における群発地震と地殻流体との関係
3. 学会等名 2018年地球惑星科学連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 行竹洋平・鶴川元雄・栗田 敬・小菅正裕・前田拓人
2. 発表標題 箱根火山深部ハーモニック微動に対する数値モデリング
3. 学会等名 日本火山学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021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
---------	---------