

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：82716

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17755

研究課題名(和文) 震源の移動現象から見た日本列島の地殻流体分布

研究課題名(英文) Distribution of crustal fluid based on a migration of hypocenter during earthquake swarm activities

研究代表者

行竹 洋平 (Yukutake, Yohei)

神奈川県温泉地学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20435853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では地震発生に与える地殻流体の役割を理解するため群発地震活動に焦点を当てその詳細な活動様式を調べた。箱根火山において発生する群発地震活動について、b値、応力降下量、メカニズム解の時間変化及び地震活動域及びその周辺の地殻構造を推定した結果、火山深部のマグマから生じた熱水が群発地震発生に深く関与していることが明らかになった。さらに日本列島規模で地殻流体の分布域を把握する目的で、震源移動現象を有する地震活動の検出を行ったところ、活火山周辺やプレート境界直上で類似した地震活動が検出された。

研究成果の概要(英文)：To understand the relation between crustal fluid and an occurrence of earthquake, I investigated detailed characteristics of earthquake swarms. The temporal variations of b-value, static stress drop and focal mechanisms during the swarm activity, and the subsurface structure in Hakone volcano, central Japan, support the contribution of crustal fluid on the occurrence of earthquake swarms in this region. Moreover, to find the distribution of crustal fluid within Japanese Islands, I tried to detect the seismic activity that represents a diffusion-like migration of hypocenters. Several seismic activities having a diffusion-like migration were detected in the regions near active volcanos or above the subducting plate in Japanese Islands.

研究分野：地震学

キーワード：群発地震 地殻流体 震源移動 地震活動様式 地殻構造

## 1. 研究開始当初の背景

地殻内の水(地殻流体)が、地震発生において非常に重要な役割を果たしていると考えられている。高圧の地殻流体が断層の中に貫入することにより、断層を押さえる力(法線応力)が減少し断層強度の低下を引き起こすためであり、活断層やプレート境界での大地震を起こす要因の一つと考えられている(Sibson et al., 2009, Tectonophysics)。地殻流体は沈み込んだ海洋プレートからの脱水等により供給されていると考えられており、その様相は地震波トモグラフィ法や電気比抵抗探査により推定されている。また、内陸大地震断層下部延長には地殻流体の存在を示唆する低速度域が検知された事例もある(Kato et al., 2009, GRL)。ただし、地震波トモグラフィ法等で得られる地殻構造は空間分解能の問題があり、また推定された低速度値や低比抵抗値が流体の存在以外でも説明できる場合もあり、それらの結果だけから地震発生と地殻流体との関係を必ずしも明確にはできない。

一方、火山地熱地帯などで発生する群発地震は地殻流体の関係が指摘されている地震活動の一つである(例えば、Mogi, 1989, Tectonophysics)。近年震源決定精度の向上により、群発地震の活動域が時間とともに移動していることが明らかになってきた。例えば本研究課題代表者の先行研究(Yukutake et al. 2011, JGR)では、箱根火山で発生する群発地震活動について、地震活動域が時間の経過とともに拡散的に移動していることを明らかにした。こうした震源の移動様式は、地殻内に高圧の水を注水することで誘発される地震活動(Water-injection induced seismicity)と類似していることから、高圧流体拡散により地震が誘発される可能性が指摘されている。一方、群発地震の発生にはスロースリップが関与していることを指摘している研究もあり(Lohman and McGuire, 2007, JGR)。地殻流体との議論には多方面からの検証が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では地殻流体と群発地震発生との関係について箱根火山での地震観測データをもとに検証を進める。さらに、拡散的な移動様式を持つ地震活動が列島規模でどのような場所で発生しているかを明らかにし、その結果に基づき地殻流体分布を議論する。以上の点を目的として、以下の解析を実施した。

- (1) 箱根火山の群発地震と地殻流体との関係を検証するため、地震発生域周辺部の速度構造を推定するとともに、群発地震の様々な震源パラメータの推定を行う。
- (2) 拡散的な震源移動を示す地震活動について日本列島全域を対象として検出しその分布域を把握し、地殻流体の分布と地震発生への寄与について検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 箱根における速度構造の推定

箱根火山の群発地震発生域における速度構造を地震波トモグラフィ法により推定し、地殻流体分布と地震発生域との関係を検証した。また同地域での群発地震活動に流体が関与していた場合、地殻内地震波速度に何らかの時間変化が起きることが予想されるため地震波干渉法を用いて地震波速度変化の時系列を推定した。

### (2) 群発地震震源パラメータの推定

先行研究(Yukutake et al., 2011, JGR)により地殻流体の寄与が指摘された2009年箱根火山の群発地震活動について、その震源パラメータを推定し、地殻流体との関係について検証を行った。ここでは、b値、応力降下量、メカニズム解の時間変化を調べた。またスロースリップが群発地震をトリガーした可能性を調べるため、活動域周辺の地殻変動データの確認を行った。

### (3) 列島規模での震源移動現象の検出

日本列島全域を対象として箱根群発地震と類似した震源移動現象を有する地震活動の検出を行った。ここでは、Yano et al., (2017)により日本列島全域で2001年から2012年の期間に発生した地震についてDouble-difference法を用いて再決定された高精度震源カタログ(JUICEカタログ)を使用した。

最初に、野口(2007、防災科学研究報告)の手法により、JUICEカタログの中から時間・空間的に近接して発生した地震群(クラスター)を抽出した。それぞれのクラスター活動で、最初に発生した地震からの距離と経過時間との時間距離プロットを2次関数でフィッティングし最適拡散係数を求めた。さらに各地震の発生時刻をシャッフルさせ、最適モデルフィッティングを行うという過程を500回繰り返し、ミスフィットが実データよりも小さくなる割合が5%未満の場合有意な移動現象が起きた地震活動とみなした。さらに、クラスター地震内の震源情報に対して重複を許してランダムに抽出し、そのカタログに対する拡散係数の推定を行う作業を500回繰り返し、得られた拡散係数の標準偏差を求めた。ここでは標準偏差が最適拡散係数値の15%以下のものを使用した。さらに、クラスター活動期間中に複数回の移動現象が起きた場合を考慮して、最初に起きた地震から逐次的に後に発生した地震に変化させて上記の解析を行った。これらの解析をとおして、有意な震源移動現象が認められた場合、その発生位置や拡散係数等を出力する。さらに検出されたクラスター地震の距離時間プロット及び震源分布を目視確認し、明らかに別の活動域が含まれており拡散係数の推定が適切に行われていなかったものなどについては取り除いた。

## 4. 研究成果

(1) 主な研究成果

速度構造に基づくマグマ熱水系と群発地震との関係

地震波トモグラフィ法により箱根火山下の速度構造を推定した結果、深さ 10km 付近に S 波速度が 3.0km/s を下回りかつ Vp/Vs 比が 2.0 に近い領域が推定された (図 1)。

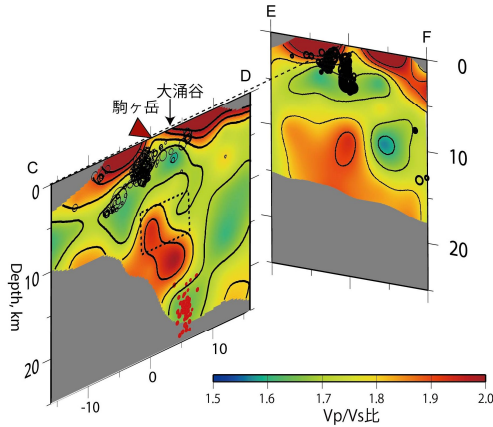


図 1 箱根火山下の Vp/Vs 比 (Yukutake et al., 2015 の Fig.9)。

推定されたこれらの速度パラメータを、Takei (2002, JGR)の多孔質媒質中における弾性波速度の理論式に当てはめると、深さ 10km 付近における高い Vp/Vs 領域は空隙中に水またはメルトで満たされた領域と解釈することができる。さらに、活発な群発地震活動に伴い山体が膨張する地殻変動が GNSS により観測されるがその変動源はこの高い Vp/Vs 領域の上部に位置する。このことから、高い Vp/Vs 領域は火山下のマグマリザーバーに対応すると考えられる。一方、より浅部では Vp/Vs が 1.5 に近くかつ低速度な領域が推定された。同様に Takei (2002)の理論に当てはめると、この領域は空隙中に水またはガスで満たされた領域と解釈することができる。これらの結果をもとに箱根火山のマグマ熱水系と地殻流体分布及び群発地震発生について図 2 にしめす概観モデルを得た。

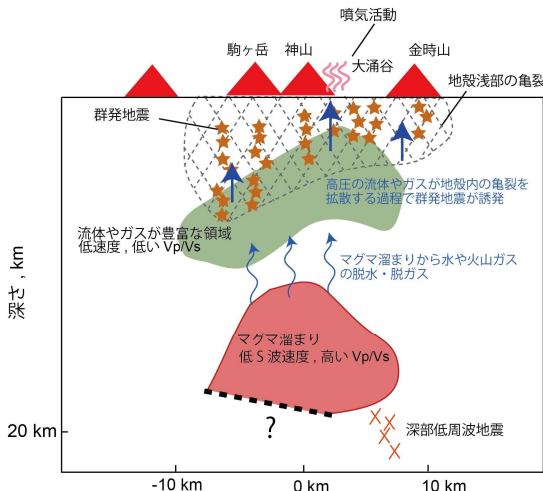


図 2 箱根火山のマグマ熱水系と群発地震 (Yukutake et al., 2015 の Fig.11)。

この中では箱根のマグマリザーバーの存在を示唆する高い Vp/Vs 領域が深さ 10km 付近に位置し、マグマ中の揮発性成分が浅部へ脱水・脱ガスすることより流体やガスが豊富な領域が形成され、それが低い Vp/Vs 領域としてイメージされる。群発地震はこの低い Vp/Vs 領域の上部で発生しているため、この領域の流体やガスが地殻浅部の微細な断層系を拡散する過程で拡散的な震源移動を伴い群発地震が発生すると考えられる。

さらに、2010 年～2013 年の期間において、地震波干渉法を適用した結果 2011 年東北地震後及び 2013 年群発地震活動の際に有意な速度低下が検出された (Yukutake et al., 2016, PEPS)。2011 年の速度低下は東北地震の動的・静的応力変化により深さ 10km 付近のマグマリザーバーからの流体の再配分が起きたことにより、また 2013 年は地殻流体の浅部開口クラック内への貫入により生じたと解釈できた。いずれもこの地域における地殻流体の存在を裏付ける結果である。

2015 年には小規模水蒸気噴火が箱根大涌谷で観測された。この際に、大涌谷の火口近傍で火山性微動やそれに伴う空振波が観測された (Yukutake et al., 2017, 2018, EPS)。こうした現象も浅部の地殻流体の一部が地表付近に達した際の現象と考えられる。また、マグマリザーバー下部には深部低周波地震が発生している (図 2)。この深部低周波地震の活発化に伴い深さ 10km 付近の膨張源の変動や群発地震活動活発化が起きることが分かった。深部低周波地震はモホ面付近での地殻流体の挙動を反映した現象であることが示唆される (行竹・安部、2017、地震学会)。

群発地震震源パラメータと地殻流体

箱根火山での 2009 年群発活動について、b 値の時間変化を求めた結果、図 3 に示すように活動初期において高い b 値が推定され、それが時間経過とともに減少する結果が得られた。

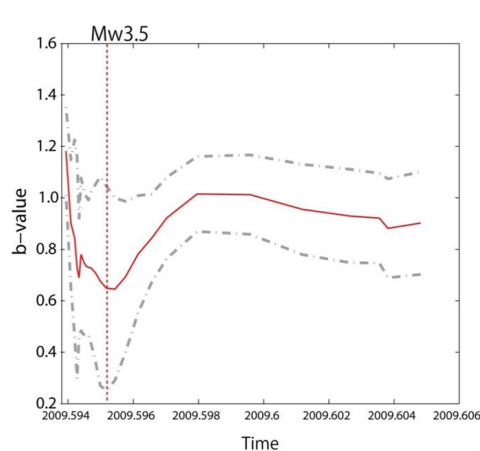


図 3 2009 年箱根群発地震の b 値の時間変化

応力降下量の時間変化を求めた結果活動の初期段階においては応力降下量の低い地震も発生しているのに対して時間の経過とともに相対的に高い応力降下量の地震が卓越して発生したことが分かった (Kim et al. 投稿準備中). さらに、メカニズム解の時間変化に着目すると (図4、5) 活動初期においては周辺応力場に対して最適な方向ではない (Miss-oriented) メカニズム解も観測されたのに対して、時間の経過とともに最適な節面方向を持つメカニズム解が卓越していることが分かった.

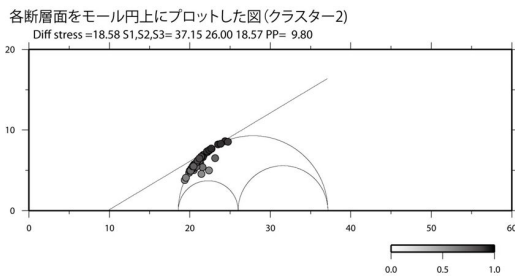


図4 Mohr 円上にプロットされた 2009 年箱根群発地震活動のメカニズム解. Mohr 円作成にあたり箱根カルデラ内の応力場を仮定. 直線は摩擦係数 0.6 での Coulomb 破壊基準線.

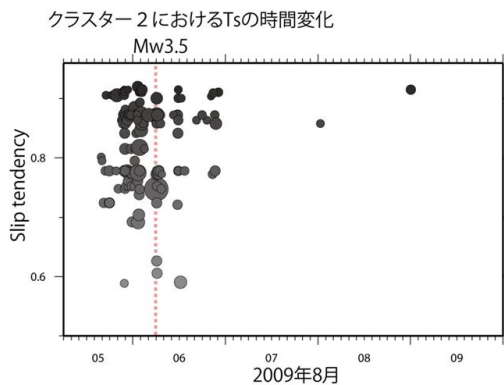


図5 メカニズム解の時間変化. 縦軸は Slip-tendency を表し 1 に近いほど Coulomb 破壊基準 (最適面) に近いことを示す.

b 値が短期間に時間変化する現象については注水試験で誘発される地震活動でも観測されており (例えば, Bachmann et al. 2012, GRL) 流体圧の上昇に伴う有効法線応力の低下により低いせん断応力状態で地震が発生したことを反映している可能性がある. また、応力降下量は、初期せん断応力と動的摩擦すべり時におけるせん断応力との差を表しており、相対的に低い応力降下量の地震は初期せん断応力が低い断層でのすべりを反映している. さらに、応力場に対して最適な方向で

はないメカニズム解について、注水試験による誘発地震で観測されており、高压流体の関与が指摘されている (Terakawa et al. 2012, JGR). 従って、本研究で得られた b 値、応力降下量及びメカニズム解の時間変化は、いずれの結果も群発地震活動における流体圧の拡散を示唆するものである.

スロースリップの関与の可能性について検証するため、2009 年群発地震活動域周辺の傾斜計の時系列データを確認した. その結果、潮汐変動量を超える有意な地殻変動は認められなかった. スロースリップが生じていたとして、それに伴う傾斜変動量の上限值を潮汐による傾斜変動量と仮定し、震源分布から断層モデルを推定しスロースリップで解放されたモーメント上限値を求めた. その結果、スロースリップが起きていた場合でも、それにより開放されたモーメント量は、地震で解放されたモーメントの 17% 以下であることが分かった. スロースリップが生じていてもその影響は限定的であったことを示唆している. 以上の結果から、箱根火山における群発地震の発生について、流体圧拡散とそれに伴う断層強度の低下を考えれば多くの観測結果を説明できると結論付けられた.

2009 年以降に発生した箱根火山の群発地震活動について、その拡散係数を求めた結果、水蒸気噴火が発生した 2015 年は 2009 年と比較して拡散係数が大きな地震活動が特に多く見られた (図6). 流体拡散係数は、流体の粘性率、媒質の透水係数、ポロシティなどで決まるパラメータである. したがって、拡散係数の時間変化は火山活動の活発化に伴う地殻内媒質もしくは流体の特性の変化を反映したものかもしれない.

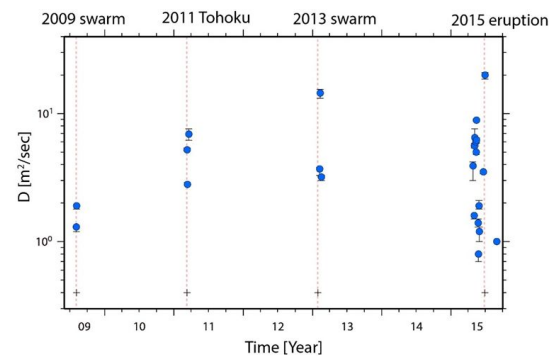


図6 箱根火山群発地震から推定された拡散係数の時間変化

#### 列島規模での震源移動現象の検出

Yano et al. (2017) による JUICE 震源カタログから列島全域で震源移動現象を検出したところ、図7に示した場所で検出された.

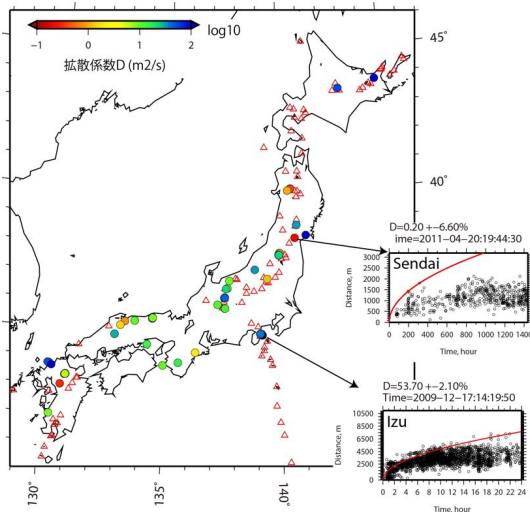


図7 拡散的な震源移動を示す地震活動の発生場所とその拡散係数．赤色は活火山の位置．

本研究で検出された地震活動のうち、秋田県森吉山付近、仙台大倉付近、山形福島県境付近の地震活動については先行研究で震源移動が発生したことが報告されている (Kosuga, 2014 EPS; Okada et al. 2015 Geofluid; Yoshida et al., 2018 Tectonophysics). 検出された地震活動の発生場所を見ると、火山フロントやフィリピン海プレート境界上盤域に位置する．箱根火山の結果を考慮すると、こうした領域では近傍に地殻流体が存在し地震の発生に関与していると考えられる．また、Yoshida et al. (2017, JGR)による山形福島県境付近の地震活動について、当研究課題で得られた  $b$  値、応力降下量及びメカニズム解の時間変化と類似した結果が得られている．こうした特徴は、流体が関与した群発地震活動に普遍的にみられる事象なのかもしれない．

## (2)国内外における位置付けとインパクト

箱根火山における稠密地震観測データを多方面から解析し、地震活動様式、地殻構造、地震波速度、 $b$  値・応力降下量及びメカニズム解、地殻変動検証結果に基づき、群発地震の発生に地殻流体が関与していることを確かめられた．これは地震発生メカニズムに関する重要な成果であると考えられる．これらの結果はいくつかの国際誌に発表され、サイエンスコミュニティに広く普及することができた．さらに、こうした地震活動が日本列島の火山周辺域を中心に広くみられることが本研究で初めて明らかになり、列島規模での地殻流体分布やそれが地震活動に与える影響を議論するうえで重要な知見を得ることができた．

## (3)今後の展望

箱根火山で見られた拡散係数の時間変化については地下内部の媒質や流体特性の変化を反映している可能性があり、こういった

要因により震源の移動速度がコントロールされているかを定量的に検証する必要がある．そのことが明らかになれば、震源移動速度から地殻内状態の時間変化を推定することが可能になるかもしれない．今回の研究で解析対象とした箱根火山は地殻流体の関与が明らかになったが、一方でスロースリップが主要因となり群発地震をトリガーしたことを示す観測結果や理論モデルも存在する．どちらが主要因になるかは、その場のテクトニック背景、地殻構造、応力状態、断層摩擦特性などに依存するのかもしれない．地殻流体とスロースリップが地震発生に及ぼす役割をさらに理解していくためには、今回得られた  $b$  値、応力降下量及びメカニズム解の時間変化と同様な変化が、そのほかの震源移動を伴う地震活動でもみられるかを調査することも重要だと思われる．本研究課題では群発的特性をもつ地震活動を中心に地殻流体との関係を議論したが、そうした活動がない領域において地殻流体がどのように存在し地震発生に影響を及ぼしているのかを把握こともまた今後の課題である．最後に、火山深部で起きる深部低周波地震活動が、より浅部の地震活動に先行して活発になることが明らかになり (行竹・安倍, 2017, 地震学会). この現象は地殻深部モホ面付近から地殻浅部への流体供給プロセスを反映していることが考えられる．今後深部低周波地震の活動様式と周辺の火山や地震活動及び地殻変動データなどとの関連性を明らかにすることにより、地殻深部での流体挙動とそれが周辺の火山地震活動に及ぼす影響についての理解につながることを期待される．

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### 〔雑誌論文〕(計 4 件)

Yukutake, Y., R. Honda, M. Harada, R. Arai, and M. Matsubara (2015), A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 3293-3308. doi: 10.1002/2014JB011856 (査読有) .

Yukutake, Y., T. Ueno, K. Miyaoka (2016), Determination of temporal changes in seismic velocity caused by volcanic activity in and around Hakone volcano, central Japan, using ambient seismic noise records, *Progress in Earth and Planetary Science*, 3:29, DOI: 10.1186/s40645-016-0106-5 (査読有) .

Yukutake, Y., R. Honda, M. Harada, R. Doke, T. Saito, T. Ueno, S. i. Sakai, and Y. Morita (2017), Analyzing the

continuous volcanic tremors detected during the 2015 phreatic eruption of the Hakone volcano, Earth, Planets and Space, 69(1), 164, doi:10.1186/s40623-017-0751-y ( 査読有 ) .

Yukutake Y, Ichihara M, Honda R (2018) Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption Earth, Planets and Space 70:53 doi:10.1186/s40623-018-0820-x ( 査読有 ) .

[ 学会発表 ] ( 計 8 件 )

Yohei Yukutake, Ryou Honda, Masatake Harada, Ryuta Arai, Makoto Matsubara, 2015, Magma-hydrothermal system and its relation to earthquake swarms at Hakone volcano, central Japan, revealed by dense seismic observation, IUGG 2015, Prague, Czech Republic, 30 June, Oral.

Yohei Yukutake, Tomotake Ueno, 2015, Seismic velocity changes associated with volcanic activity at Hakone volcano, central Japan, using ambient seismic noise records, IUGG 2015, Prague, Czech Republic, 30 June, Poster.

行竹洋平・本多亮・原田昌武・道家涼介・齊藤竜彦・上野友岳・酒井慎一・森田裕一、2015、2015 年箱根火山の地震活動について、日本火山学会 2015 年秋季大会、P96、富山、ポスター発表、9 月 28 日

行竹洋平・本多亮・原田昌武・道家涼介・齊藤竜彦・上野友岳・酒井慎一・森田裕一、2015、2015 年箱根火山における地震活動の震源分布、日本地震学会 2015 年秋季大会、S09-P09、神戸、ポスター発表、10 月 26 日

行竹洋平・本多亮・原田昌武・道家涼介・齊藤竜彦・上野友岳・酒井慎一・森田裕一、2016、2015 年箱根火山水蒸気噴火に伴い観測された連続微動、地球惑星科学連合 2016 年大会、幕張、口頭発表、5 月 23 日

行竹洋平・市原美恵・本多亮、2017、相互相関解析に基づく 2015 年箱根水蒸気噴火に伴う空振の検出、地球惑星科学連合 2017 年大会、幕張、ポスター発表、5 月 22 日

行竹洋平、2017、箱根における群発地震と地殻流体との関係、地殻ダイナミクス研究集会、米子コンベンションセンター ( 鳥取県米子市 ) 口頭発表、9 月 24 日

行竹洋平・安部祐希、2017、Matched Filter 法を用いた箱根火山深部低周波地震の検出、日本地震学会 2017 年秋季大会、かごしま県民交流センター ( 鹿児島 ) ポスター発表、10 月 26 日

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

行竹洋平 ( Yohei Yukutake )

神奈川県温泉地学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号 : 20435853

(2) 研究協力者

金亜伊 ( Ahyi Kim )

横浜市立大学・准教授