

令和 2 年 4 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05540

研究課題名（和文）南九州下のスラブ起源流体の挙動解明をめざした3次元地震波速度構造の高解像度推定

研究課題名（英文）High-resolution estimation of three-dimensional seismic velocity structure aiming to elucidate the behavior of slab-derived fluids beneath southern Kyushu

研究代表者

澁谷 拓郎（Shibutani, Takuo）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70187417

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、日向灘地震の震源域の物性や桜島や霧島などの火山へのマグマ供給過程を推定するため、南九州において独自に行ったりニアレイ地震観測のデータを用いて、レシーバ関数解析と地震波走時トモグラフィ解析を行い、地震波速度不連続面や3次元地震波速度構造を推定した。レシーバ関数解析では、火山の下の下部地殻に低速度層が見られた。また、マンテルウェッジでは大陸モホが不明瞭であり、マンテルが下部地殻より高速度でないと分かった。トモグラフィ解析では、火山の近傍の深さ10 km付近と海洋地殻の深さ30～40 km付近に低速度異常が見られた。これらの特徴はスラブ起源流体やマグマ等の流体に起因すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により推定された低速度異常域の分布から、南九州下に沈み込むフィリピン海プレートからマンテルウェッジへの流体の供給過程が見えてきた。一つは海洋地殻の深さ40 km付近からの脱水であり、もう一つは80 km以深からの脱水である。さらに桜島火山や霧島火山を含む火山帯に沿って強い低速度異常域が深さ20 km付近に存在することも明らかになった。この成因としては、浅い部分で放出された流体の直接的な供給と、深い部分で放出され、マンテルウェッジを上昇して来た流体の供給の両方が考えられる。本研究で得られたこれらの知見は、まだ未解明な点が多い下部地殻以深でのマグマの供給過程を研究するうえで非常に重要である。

研究成果の概要（英文）：In this study, the seismic velocity discontinuities and three-dimensional seismic velocity structures were estimated by receiver function analysis and seismic tomography analysis using data from linear array seismic observations independently conducted in Southern Kyushu to estimate the properties of the source area of the Hyuga-nada earthquake and the magma supply process to volcanoes such as Sakurajima and Kirishima. Receiver function analysis shows low-velocity layers in the lower crust below the two volcanoes mentioned above. The continental Moho at the mantle wedge is obscure, indicating that the seismic velocity in the mantle is not faster than that in the lower crust. Tomographic analysis revealed a low-velocity anomaly in the vicinity of the above two volcanoes at a depth of 10 km and in the oceanic crust at a depth of 30-40 km. These features can be attributed to fluids such as slab-derived fluids and magma.

研究分野：地震学

キーワード：地震波走時トモグラフィ 3次元地震波速度構造 レシーバ関数 地震波速度不連続面 スラブ起源流体  
フィリピン海スラブの形状 深部マグマ 南九州

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

南九州下にはフィリピン海プレートが深さ 200 km まで沈み込んでいる。この沈み込みに伴い、日向灘では 1968 年 (M7.5) や 1984 年 (M7.1) などの地震が引き起こされてきた。さらに、南海トラフ巨大地震の想定では、日向灘セグメントも連動する M9 の超巨大地震が検討されている。またプレートとともに地下にもち込まれた「水」は、深部においてプレートから放出され、マントル中を上昇する際にマグマを生成し、桜島や霧島などの火山の噴火に関与すると考えられている (Iwamori, 2007①)。このようなテクトニクスにある南九州下の地震波速度構造を高解像度で推定し、スラブ起源流体の挙動を解明することは、巨大地震の予測や火山噴火のメカニズムの理解のために非常に重要である

### 2. 研究の目的

巨大地震の予測や火山噴火のメカニズムの基礎研究として、それらの発生場の物性や状態を明らかにすることは非常に重要である。本研究では、レシーバ関数解析と地震波走時トモグラフィ解析を組み合わせることにより、フィリピン海スラブの形状やその周辺の地震波速度構造を 3 次元的に高解像度で推定する。流体の存在はその場の地震波速度を低下させるので、逆に推定された 3 次元地震波速度構造の低速度域からスラブ起源流体の挙動の解明を試みる。

### 3. 研究の方法

#### (1) レシーバ関数解析による地震波速度不連続面の 2 次元形状の推定

レシーバ関数は、遠地地震の P 波部分から観測点下の地震波速度構造のレスポンスを抽出した波形であり (Shibutani et al., 2008②)、直達 P 波と観測点下の S 波速度不連続面での Ps 変換波から構成される。

我々は、フィリピン海スラブの傾斜方向の「宮崎-阿久根測線」と少し斜交する方向の「宮崎-桜島測線」において、観測点間隔が約 5 km のリニアアレイ観測を行った。

リニアアレイの観測点で観測された遠地地震の波形からレシーバ関数を計算した。レシーバ関数の時間軸を、気象庁の地震波速度モデル JMA2001 (上野・他, 2002③) を用いて深さ変換し、測線断面上に投影した Ps 変換点上でレシーバ関数の振幅を重合することにより、上記 2 測線に対して S 波速度不連続面のイメージングを行った (澁谷・他, 2009④)。

#### (2) 地震波走時トモグラフィ解析による 3 次元地震波速度構造の推定

地震波走時トモグラフィ解析の入力データとなる P 波走時と S 波走時を、南九州に展開されている定常点とリニアアレイに含まれる臨時点の観測波形から、自動読み取りソフトにより、読み取った。

トモグラフィ解析には近年開発された FMTOMO というプログラム (Rawlinson et al., 2006 ⑤) を本解析に最適になるよう改良して用いた。このプログラムは、地震波伝播経路の追跡に fast-marching method を用いていて、不連続面と強い不均質を含む地震波速度構造モデルに対して、理論走時を安定して精度よく計算することができる (de Kool et al., 2006⑥)。

速度構造モデルのグリッドサイズは  $0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10 \text{ km}$  とし、初期値には JMA2001 (上野・他, 2002③) を用いた。不連続面として、大陸モホ面、スラブ上面、海洋モホ面を組み込んだが、これらの形状は、Katsumata (2010⑦) の大陸モホ面モデルと Iwasaki et al. (2015⑧) のプレート境界モデルおよびレシーバ関数解析の結果を参考にして決めた。今回は、111,447 個の P 波走時を解いて、P 波速度の 3 次元構造を求めた。

### 4. 研究成果

#### (1) レシーバ関数解析による地震波速度不連続面の 2 次元形状の推定

##### ① 宮崎-阿久根測線

宮崎市から霧島火山を通して阿久根市に至る測線に沿う断面におけるレシーバ関数イメージ

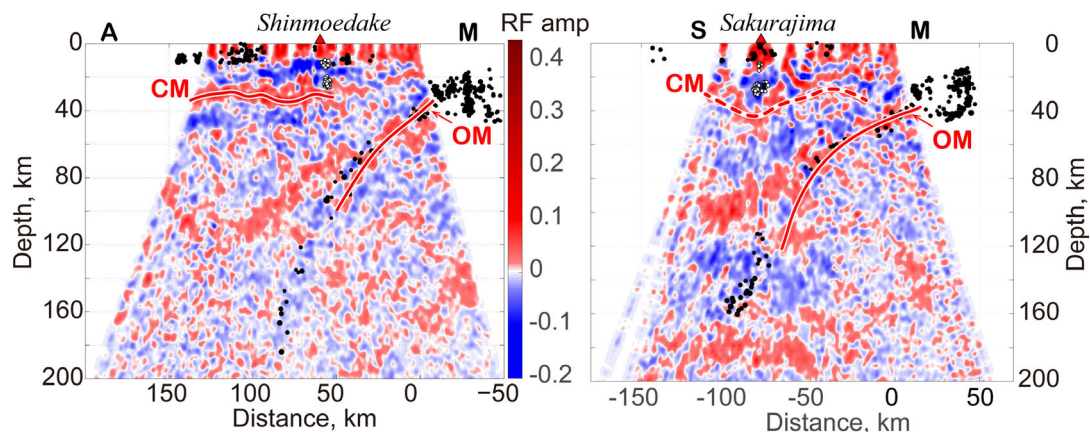


図 1 宮崎-阿久根測線 (左) と宮崎-桜島測線 (右) におけるレシーバ関数イメージ。

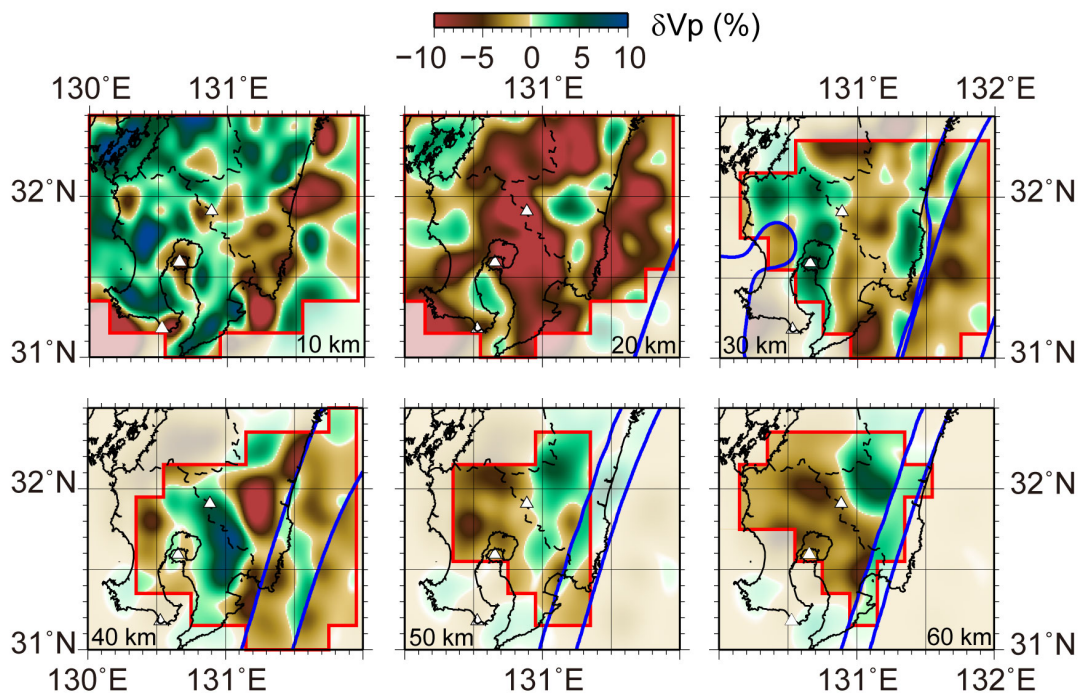


図2 P波速度不均質構造の深さ断面。

を図1左に示す。図中、OMを付した赤線で示すように、沈み込むフィリピン海プレート内の海洋モホ面は、深さ100 km付近まで高速度層上面として明瞭にイメージされている。途中深さ60 km付近に折れ曲がりが見られる。ただし、高角度で傾斜しているフィリピン海スラブを水平成層構造を用いてイメージしているため、深さ60 kmから120 kmまで浅い側にバイアスのかかったイメージが出現していることに注意しなければならない。

また、CMを付した赤線のように大陸モホ面は、南九州の西半分では高速度層上面として明瞭であるが、東側では不明瞭になる。これは、東側のマンテルウェッジ部分が、スラブから供給される「水」の影響で低速度になっているためと考えられる。

さらに、深さ20 kmに低速度層上面を表す青いイメージがほぼ水平に連なっている。新燃岳(霧島火山)の直下に見られる低周波地震(白丸)はこの青いイメージの近傍で発生している。

## ② 宮崎-桜島測線

宮崎市から桜島火山に至る測線に沿う断面におけるレーシーバ関数イメージを図1右に示す。基本的には、図1左に示す宮崎-阿久根測線と同じ特徴がみられる。すなわち、OMで示す海洋モホ面は、深さ60 km付近で上に凸に曲がっていて、深さ120 kmまで明瞭にみられる。CMで示す大陸モホ面は、図1左に比べれば不明瞭であるが、測線の南西部分に限ってみられる。また、桜島火山の下では、大陸モホ面が下に凸に下がっているが、これは、青色で示す低速度層上面が深くまで下がっているためであり、低周波地震もその中で発生している。

2つの測線のレーシーバ関数イメージに共通する特徴として、(1) 島弧側の大陸モホ面がマンテルウェッジ付近で不明瞭になることと、(2) 深さ80~100 kmまで見られるスラブ内の海洋モホ面が深さ60 km付近で折れ曲がること、が挙げられる。(1)は海洋地殻から脱水した流体によりマンテルウェッジが低速度になっていることを、また(2)は脱水後の海洋地殻がbasaltのeclogite化により重くなったことを示している。スラブ起源の流体は、巨大地震の断層面であるプレート境界面の物性に影響を及ぼすとともに、マグマ生成にも関与すると考えられる。

さらに、霧島火山や桜島火山の直下の低周波地震の発生域は強い低速度層であることがわかる。火山活動に関する流体の存在が示唆される。

## (2) 地震波走時トモグラフィ解析による3次元地震波速度構造の推定

深さ10 kmから60 kmまで10 kmごとの深さ断面でのP波速度の不均質分布を図2に示す。赤い太線の内側は、チェッカーボードテストにおいて地震波速度のperturbationが再現された領域である。深さ10 kmでは、白三角で示す新燃岳、桜島、開聞岳の近傍に低速度異常が見られる。深さ20 kmでは上記の3火山の付近に強い低速度異常域が広範囲に広がっている。日向灘の沿岸部付近にも強い低速度異常が見られる。海洋地殻は、深さ30 kmと40 kmでは低速度異常を示すが、深さ60 kmでは高速度異常を示す。

図3に新燃岳、桜島、開聞岳の近傍を通る東西断面でのP波速度の不均質分布を示す。火山下の地殻内に強い低速度異常が広範囲にみられる。マンテルウェッジの先端部の海側にも強い低速度異常域が見られる。海洋地殻は深さ50 km~60 kmでいったん高速度異常を示すが、それより深いところではまた低速度異常に戻るようである。島弧側のマンテルは広範囲に低速度異常を示す。

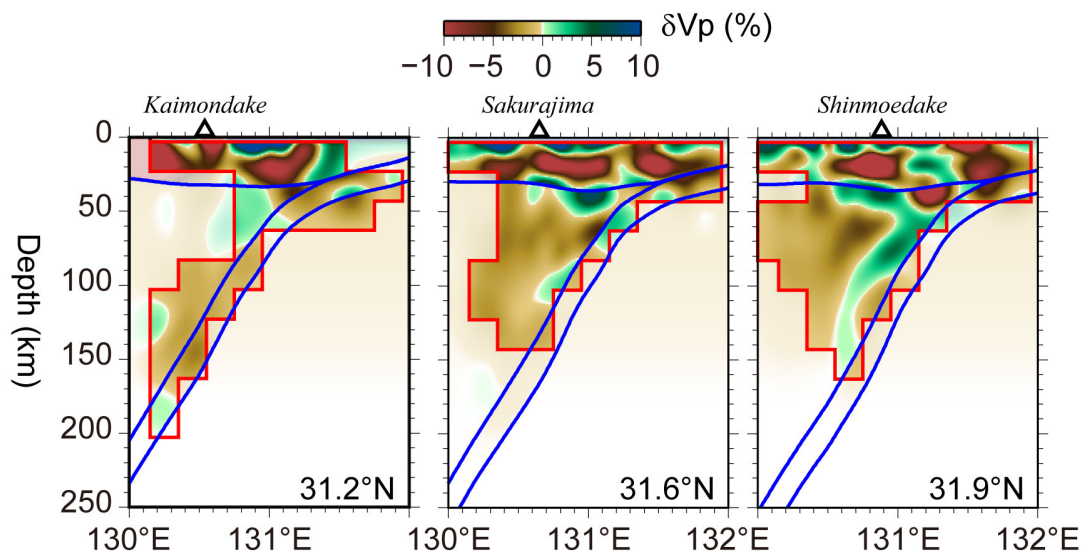


図3 P波速度不均質分布の東西断面。開聞岳(左)、桜島火山(中)、新燃岳(右)付近を通る断面。

これらの低速度異常域は、スラブ起源流体やマグマ等の流体に起因すると考えられる。海洋地殻からの脱水は、マンテルウェッジ先端部の海側付近と深さ 80 km 以深の低速度異常域で発生していると思われる。

### (3) スラブ起源流体

宮崎-阿久根測線のレシーバ関数イメージ(図1左)では、大陸モホ面(CM)がマンテルウェッジの先端部で不明瞭になることから、この部分のマンテルウェッジはスラブ起源流体により低速度になっていると推定した。Abe et al. (2013⑨)は、宮崎-阿久根測線より少し北に位置するCC'断面では、マンテルウェッジの先端部がその上の下部地殻より低速度である逆転モホ(Bostock et al., 2002⑩)の状態であると述べている。我々のトモグラフィの新燃岳(霧島火山)を通る東西断面(図3右図)では、マンテルウェッジの先端部において大陸モホ面の下方のマンテルの方がその上の下部地殻より低速度になっている領域がみられる。

トモグラフィの結果では、海洋地殻は深さ 30 km~40 km において、おおむね低速度異常を示す(図2)。海洋地殻の上面、すなわちフィリピン海プレート上面を挟んで、その上方の下部地殻も低速度異常を示す(図3の中図と右図)。海洋地殻は深さ 60 km においては高速度異常を示す(図2)。レシーバ関数イメージでは、深さ 60 km 付近で海洋モホ面が折れ曲がっている(図1)。これらを総合して考えると、深さ 40 km まで海洋地殻から脱水が起き、放出された「水」によりその上方の下部地殻も低速度になっていると推定される。したがって、この領域のプレート境界面にも流体が存在し、プレート間固着は強くはないと考えられる。さらに、海洋地殻は、「水」を放出し、eclogite 化が進むことにより、深さ 60 km においては高速度異常を示すようになると推定される。深さ 60 km 付近でプレートが折れ曲がることも eclogite 化による密度増加のためと考えられる。

海洋地殻は 60 km より深いところでふたたび低速度異常を示すので、更なる脱水が発生しているのかもしれない(図3)。また、マンテルウェッジの背弧側の以深から火山フロントにかけて、広範囲に低速度異常がみられる(図3)。この低速度異常域も南九州の火山へのマグマ供給に関与している可能性があると思われる。

### <引用文献>

- ① Iwamori, H. (2007): Transportation of H<sub>2</sub>O beneath the Japan arcs and its implications for global water circulation, *Chemical Geology*, Vol. 239, pp. 182-198.
- ② Shibutani, T., Ueno, T. and Hirahara, K. (2008): Improvement in the extended-time multitaper receiver function estimation technique, *Bull. Seismo. Soc. Am.*, Vol. 98, No. 2, pp. 812-816, doi: 10.1785/0120070226.
- ③ 上野 寛・畠山信一・明田川保・舟崎 淳・浜田信生 (2002): 気象庁の震源決定方法の改善-浅部速度構造と重み関数の改良-, 験震時報, 第 65 巻, pp. 123-134.
- ④ 澁谷拓郎・平原和朗・上野友岳 (2009): レシーバ関数解析による地震波速度不連続構造, 地震, 第 61 巻, pp. S199-S207.
- ⑤ Rawlinson, N., de Kool, M. and Sambridge, M. (2006): Seismic wavefront tracking in 3D heterogeneous media: applications with multiple data classes, *Exploration Geophysics*, Vol. 37, pp. 322-330.
- ⑥ de Kool, M., Rawlinson, N. and Sambridge, M. (2006): A practical grid-based method for tracking multiple refraction and reflection phases in three-dimensional heterogeneous media, *Geophys. J. Int.*, Vol. 167, pp. 253-270, doi:

10.1111/j.1365-246X.2006.03078.x

- ⑦ Katsumata, A. (2010): Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by travelttime analysis, *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, B04303, doi:10.1029/2008JB005864.
- ⑧ Iwasaki, T., Sato, H., Shinohara, M., Ishiyama, T. and Hashima, A. (2015): Fundamental structure model of island arcs and subducted plates in and around Japan, 2015 Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, Dec. 14-18, T31B-2878.
- ⑨ Abe Y., Ohkura, T., Hirahara, K. and Shibutani, T. (2013): Along-arc variation in water distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 118, pp. 3540-3556, doi:10.1002/jgrb.50257.
- ⑩ Bostock, M. G., Hyndman, R. D., Rondenay, S. and Peacock, S. M. (2002): An inverted continental Moho and serpentinitization of the forearc mantle, *Nature*, Vol. 417, pp. 536-538.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗 健・園田忠臣	4. 巻 62B
2. 論文標題 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブの構造の推定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 京都大学防災研究所年報	6. 最初と最後の頁 279-287
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗 健・園田忠臣
2. 発表標題 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブとその周辺域の構造の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shibutani, T., K. Hirahara
2. 発表標題 Characteristics of slab-derived fluids beneath Kii Peninsula, southwestern Japan inferred from seismic tomography
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shibutani, T., K. Hirahara
2. 発表標題 3D seismic velocity structure beneath Kii Peninsula, southwestern Japan derived from receiver function analysis and seismic tomography
3. 学会等名 IAG-IASPEI 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗 健・園田忠臣
2. 発表標題 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブの構造の推定
3. 学会等名 日本地震学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 澁谷拓郎・平原和朗
2. 発表標題 地震波走時トモグラフィから推定された紀伊半島下のスラブ起源流体の特徴(2)
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 澁谷拓郎・平原和朗
2. 発表標題 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究(3)
3. 学会等名 日本自然災害学会平成28年度学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 澁谷拓郎・平原和朗
2. 発表標題 地震波走時トモグラフィから推定された紀伊半島下のスラブ起源流体の特徴
3. 学会等名 日本地震学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 澁谷拓郎
2. 発表標題 四国下に沈み込むフィリピン海プレートのレシーバ関数イメージング
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ：<http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~shibutan/index.html>

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
連携研究者	大倉 敬宏  (Ohkura Takahiro)  (40233077)	京都大学・大学院理学研究科・教授   (14301)	
連携研究者	山下 裕亮  (Yamashita Yusuke)  (80725052)	京都大学・防災研究所・助教   (14301)	