

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00531

研究課題名(和文)非火山域における深部流体の起源と上昇過程

研究課題名(英文)Origin and upwelling process of deep seated fluid in non-volcanic region

研究代表者

中村 仁美(Nakamura, Hitomi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員

研究者番号：60572659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、深部流体の分布と上昇過程を把握し、日本列島における変動現象と流体の関係の理解を進めることである。深部流体の指標と考えられる化学的特徴に基づき、調査対象を選定・調査・試料採取を行い、希土類元素の測定と解析を行うことで、その起源と上昇過程の推定を試みた。その結果、構造線沿いに、スラブ起源流体が低温で脱水する時の特徴を持つ流体が上昇していることが分かった。一部の流体は、上昇途中に帯水層で沈殿物を生成した後、湧出していることも明らかになった。火山域、非火山域、プレート境界域における深部流体の振る舞いを統合的に捉えることで、日本列島全域の深部流体について把握する準備が整ったといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本列島は、水を含む海洋プレートの動的・物質的影響を常に受けており、深部流体が関与すると考えられる変動現象が絶えない。深部流体は、現在沈み込んでいる太平洋プレートとフィリピン海プレートに由来する証拠が蓄積されてきた。一方、これらの深部流体がどのように上昇し変動現象と関わるのか、具体的証拠に乏しい。本研究により、沈み込んでいるプレートから比較的低温(～500度)で脱水する特徴を持つ流体が、構造線沿いに上昇していることが分かり、一部は、上昇中に帯水層で沈殿物を生成した後、湧出することも明らかになった。非火山域の深部流体の挙動を捉えることで、日本列島全域における全貌を把握していくことが重要である。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to understand the relationship among deep fluid and geological phenomena in subduction zone. Based on the chemical signature of deep fluid, we have selected the target region and springs, and then took samples and do chemical analysis, especially rare earth elements, and detect its origin and upwelling process. As a result, it is cleared that the deep fluid dehydrated at lower temperature from the subducting slab is upwelling along the tectonic lines.

Also, a part of these deep fluid is trapped into meteoric aquifer and precipitate a material and then upwelling widely observed over studied area. The behavior of deep fluids in non-volcanic region and volcanic region should be considered together to make a comprehensive understanding of fluid influence against geological phenomena occurred in whole Japan.

研究分野：地球化学

キーワード：深部流体 地殻流体 スラブ起源流体 温泉水 構造線 スラブ プレート

1. 研究開始当初の背景

複数のプレートがせめぎ合う日本列島では、常に深部からの熱水フラックスを受けている。流体は、地震やマグマ・火山活動など沈み込み帯で起こる地学現象に深く関わっている。新学術領域「地殻流体」(平成 21~25 年度)では、地殻流体と固体の相互作用をマイクロからマクロまで、根源的かつ包括的な解明に取り組んでいた。その結果、日本列島下で高塩濃度の地殻流体が広く分布し、断層や構造線を介して、非火山域にも上昇している可能性があることが判ってきた。非火山域では、マグマを介さず、深部と表層を繋ぐ断層に沿って非平衡に上昇するため、深部の情報をあまり損うことなく地表に湧出しているかもしれない。そうであれば、流体が通る経路や上昇過程の情報を保持しているのではないかと研究代表者らは考えた。

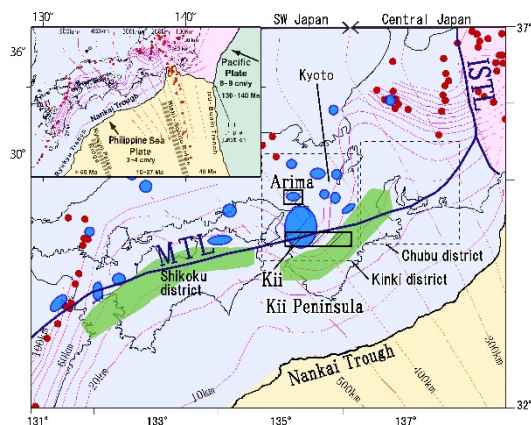


図 1: 非火山域における本研究対象地域(紀伊半島~四国)と、中央構造線(MTL)および糸魚川静岡構造線(ISTL)の関係。緑帯は微小地震(DLF tremor)が観測されている範囲を示す。(挿絵)中部~西南日本のテクトニクス。4色はプレートの違いを示す。東から沈み込む太平洋プレート(緑)は50km毎、南から沈み込むフィリピン海プレート(黄)の形状は10km毎の等深線で示す。第四紀火山は●印で、空白は非火山域に相当する。

2. 研究の目的

非火山域の深部流体の挙動を探ることを目指し、重点的に構造線沿いの温泉水中の希土類元素の測定と解析を行うことで、その起源と上昇過程の検討を試みる。これにより、地殻流体の実態を捉え、日本列島における変動現象に対する役割を理解することを目的とした。

3. 研究の方法

深部流体の上昇過程とテクトニクスの関係性を把握するため、フィリピン海スラブの沈み込みが緩く、水に関係するとみられる地震活動が活発な紀伊半島~四国地域を、中央構造線(図1中のMTL)を重点的に、周辺も合わせて調査対象地域とする。この地域について、(1)深部流体の指標と考えられる化学的特徴に基づき、調査対象となる泉源を選定し、水質調査及び試料採取を行い、地球化学的指標によりそれらが由来した起源物質(特に沈み込んだスラブ物質)を推定する。次に、採取した試料について、主溶存元素や軽元素同位体比を測定し、(2)希土類元素組成の測定を行い、(3)統計解析により多元素-同位体の挙動を整理し、(4)起源と上昇過程を推定する。

4. 研究成果

兵庫県有馬温泉は有馬高槻構造線分岐断層沿いにあり、1km²の狭い領域に様々な泉源を産する。0~6%の塩濃度を示し、金泉と呼ばれる黄金色の泉源や、遊離炭酸ガスに富む炭酸泉源など、深さ方向の多様性が示唆される。研究代表者らが行なった希土類元素組成とその多様性の解析

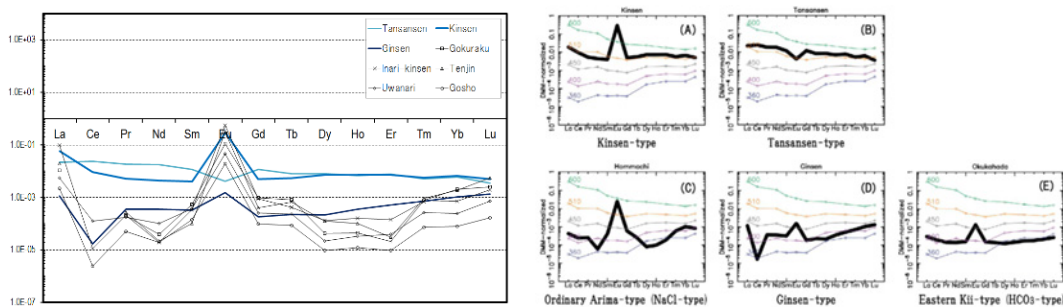


図 2: (左図) 有馬温泉 8 泉源の希土類元素組成をマン틀(DMM)で規格化した。周辺河川水よりも、100 倍~1000000 倍ほど高い濃度を持ち、元素毎に異なる振る舞いをしていることがわかる。Nakamura et al., 2015, JGG, Fig.4 に加筆。(右図) 近畿地域で観測された代表的な希土類元素のパターンを示す。黒太線は測定された組成、数値が付記された色つき線はスラブ脱水温度を変えた時の理論値。Nakamura et al., 2016, JGG, Fig.9 引用。

では (図 2), スラブ起源流体の組成を保持する金泉と, 深さ 160m の天水層で沈殿物を生成したのち上昇する泉源, 深部由来のガスによって 50m の天水層を構成する岩石との反応が促進され生じた炭酸泉源など, 起源と湧出する泉源の経路の違いを見いだすことができた (Nakamura et al., 2015). これにより, 希土類元素の濃度やパターンが成因の指標になり得ることが分かってきた.

そこで, 本研究では, より広域での深部流体の挙動を把握するため, 紀伊半島~四国全域において, 構造線沿いや断層沿いを重点的に, 水質調査を行なった. 従来から有用性が明らかになっている塩濃度, O-H 同位体比, He 同位体比に加え, 研究代表者らが見いだした希土類元素, 及びそれらの多変量統計解析の結果, 紀伊半島と四国に深部流体の可能性のある泉源を見出し, 従来の温泉水区分 (単純泉, 酸性泉, アルカリ泉, 塩化物泉, 炭酸水素塩泉など) によらず, 広域で特異な希土類元素パターンを示す泉源があることを明らかにした (Nakamura et al., 2016).

希土類元素は, 通常は一様にふるまう元素群であるが, pH・温度・溶存元素 (特に HCO_3^-) の影響で, 元素毎に振る舞いが異なってくるのが理論的に分かっている (e. g., Ohta and Kawabe, 2000). 温泉水が上昇するまでの過程で接触する可能性のある, 雨水・地殻を構成する周辺岩石・火山岩や, 温泉水から生成する沈殿物の希土類元素組成を比較することにより, 流体が上昇過程においてどのような改変を受けているのか (もしくは受けていないのか) を検討することができる. 実際, 本研究で検出された多様なパターンは, 上昇過程におけるこれらの要素を反映した結果と考えられる. 図 3 は, 調査地域全域での結果をまとめて示す. 例えば, 同じ和歌山県域でも, 構造線沿い (左上) とそうでない場所 (右上) では, 特に沈殿物の形成過程が異なるようなパターンの違いが見られる (図 3).

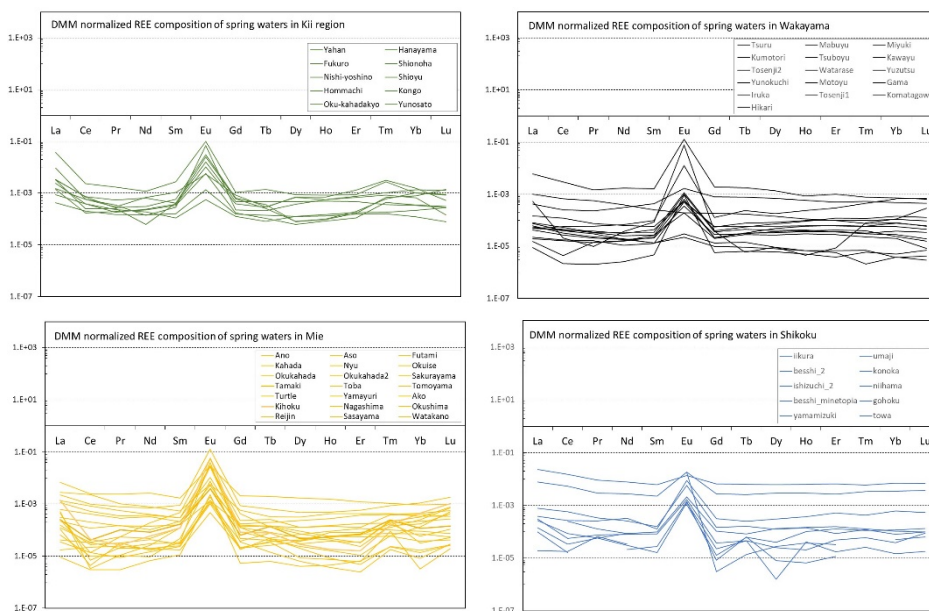


図 3: 温泉水の希土類元素組成をマントル (DMM) で規格化した. 縦軸のスケールは図 2 と同じ. 和歌山県周辺における構造線沿いの泉源 (左上) と構造線から離れた地域の泉源 (右上), 及び三重県周辺 (左下) と四国域 (右下). 構造線沿いの泉源は, 濃度が高いだけでなく, Eu を軸とした W 型の特徴が顕著に見られる. いずれも未公表.

この微細な違いを定量的に評価するため, 統計解析を試みた (Nakamura et al., 2016). その結果, 地殻との反応が深部に由来する炭酸ガスの効果によって促進されている泉源や, 帯水層で沈殿物を生成したと考えられる特徴をもつ泉源が, 調査地域の広い範囲に湧出していることが分かった. また, スラブ起源流体が低温で湧出するときの特徴を持つ泉源を見だし, 深部流体が構造線沿いに上昇していることを明らかにした. このように, 従来の地球化学的見地に加え, クラスタリングと主成分分析を相補的に用いて多変量解析を行う統計的手法 (Iwamori et al., 2017) により, 高い信頼度で解析ができるようになりつつある. 本研究では, 希土類元素に着目する意義を明らかにしたと同時に, 水試料について高次元のデータベース化の必要性和, 多変量解析を行う統計的手法の有効性を明確にしたと言えよう (Iwamori et al., 2017).

非火山域の構造線沿いになぜ深部流体が上昇しているのか, それはフィリピン海スラブに解があると考えられている. フィリピン海スラブは比較的若いため, 堅いプレートが一樣に沈み込んでいるのではなく, うねったような変形した形状が地震学的に捉えられている. また, プレート同士の接触域や先端域など, 地震学的に検出できない不明瞭な範囲もある. スラブの形状を明らかにすることは, 変動現象と流体の関係を解く上で必須である. そこで, 研究代表者らは, プレート先端域における状態を探るべく, フィリピン海スラブの北東端の火山群に着目し, 重元素を用いた化学的解析を元に, 流体が集まる仕組みを考え, モデル化を行なった (図 4). これに

より、深部流体のプレート境界域における振る舞い(Nakamura et al., 2018)と、日本列島の火山域における深部流体の量的分布(Nakamura et al., 2019)を明らかにすることができた(図5)。

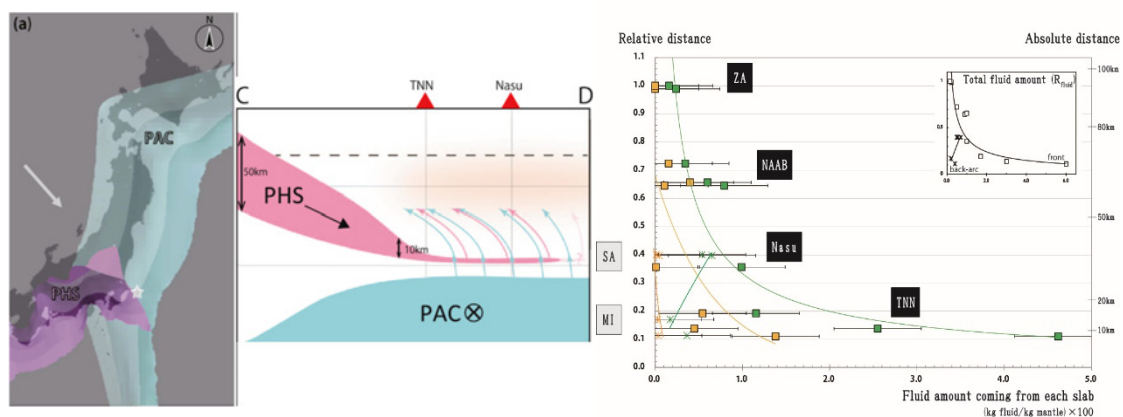


図4：(左図)非地震性の北東端部において地球化学的に推定されるフィリピン海スラブ (PHS) の形状をピンクで示す。紫は地震学的に推定されている形状。緑は太平洋スラブ (PAC)。 (中図)北東端域において推定されるプレートの構造 (およそ南北断面に相当する)。ピンクの領域では、フィリピン海スラブが地震学的には検出できない状態で薄くなっていると考えられる。しかし、深部流体はフィリピン海スラブと太平洋スラブの双方から供給されており、北東端部の火山岩組成中にスラブからの寄与 (緑：太平洋；橙：フィリピン海)として検出される (右図)

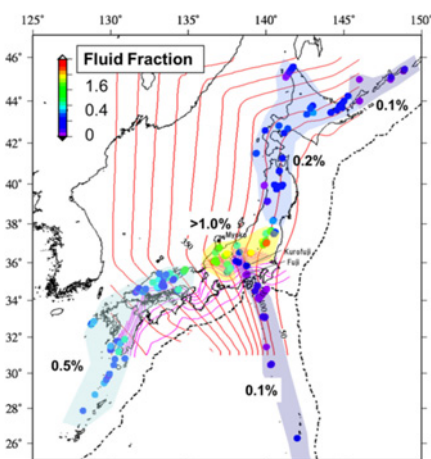


図5：第四紀火山岩の化学組成から検出された、スラブを起源とする流体のマグマ生成場に対する付加量を示す。太字の数值は、半透明で色づけした各島弧における平均値を示し、赤線は太平洋スラブの上面深度を50km毎に示し、ピンク線はフィリピン海スラブの上面深度を10km毎に示す。

本研究は、水に関係するとみられる地震活動が活発な紀伊半島～四国を中央構造線に沿って辿ることで、深部流体の分布と上昇過程を把握し、変動現象—流体の関係を明らかにすることを目指した。得られたデータは膨大であり、多変量解析を行なっている段階であるが、同時に、非火山域のデータを火山域と同レベルで扱うことができるよう、データの量産を計る必要があるとも考えている。また、溶存ガスが泉質の形成過程に与える影響については、Nakamura et al., 2016でも記述し、ガス試料の採取も試みたが、本研究の計画時には含まれていない内容であり、今後の展開として考えていく必要がある。

5. 主な発表論文等 (二重線は研究代表者、下線は研究分担者を示す)

[雑誌論文] (計 12 件)

Nakamura, H., Iwamori, H., Nakagawa, M., Shibata, T., Kimura, J.-I., Miyazaki, T., Chang, Q., Vaglarov, B. S., Takahashi, T., Hirahara, Y. (2019) Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs. *Gondwana Research*, 70, 26-49, doi:10.1016/j.gr.2019.01.007 (査読有)

Iwamori, H., Nakamura, H., Yoshida, M., Nakagawa, T., Ueki, K., Nakao, A., Nishizawa, T., Haraguchi, S. (2019) Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. *Comptes Rendus Geoscience*, 351, 209-220, doi:10.1016/j.crte.2018.09.007 (査読有)

岩森光, 行竹洋平, 飯尾能久, 中村仁美 (2019) 地殻流体の起源・分布と変動現象. *地学雑誌* 特集号 (印刷中) (査読有)

森川徳敏, 角森史昭, 風早康平, 松本則夫 (2019) ヘリウム同位体を用いた地殻流体計測. *地学雑誌* (印刷中) (査読有)

Nakamura, H., Iwamori, H., Ishizuka, O., Nishizawa, T. (2018) Distribution of slab-

- derived fluids around the edge of the Philippine Sea Plate from Central to Northeast Japan. *Tectonophysics*, 723, 297-308, doi:10.1016/j.tecto.2017.12.004 (査読有)
- Nishizawa, T., Nakamura, H., Churikova, T., Gordeychik, B., Ishizuka, O., Haraguchi, S., Miyazaki, T., Vaglarov, B.S., Chang, Q., Hamada, M., Kimura, J.-I., Ueki, K., Toyama, C., Nakao, A., Iwamori, H. (2017) Genesis of ultra-high-Ni olivine in high-Mg andesite lava triggered by seamount subduction. *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-017-10276-3 (査読有)
- Iwamori, H., Yoshida, K., Nakamura, H., Kuwatani, T., Hamada, M., Haraguchi, S., Ueki, K. (2017) Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: complementary roles of cluster, principal component and independent component analyses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 994-1012, doi:10.1002/2016GC006663 (査読有)
- Bragin, I.V., Chelnokov, G.A., Kharitonova, N.A., Nakamura, H. (2017) Hydroecogeochemistry of Baransky volcano activity. *Proceedings of 11th International Hydrogeological Congress of Greece*. (査読有)
- Nakamura, H., Chiba, K., Chang, Q., Morikawa, N., Kazahaya, K., Iwamori, H. (2016) Origin of the Arima-type and associated spring waters in the Kinki district, southwest Japan. *Journal of Geology & Geophysics*, doi:10.4172/2381-8719.1000240 (査読有)
- Nakamura, H. (2016) Understanding the processes of the multiple subduction plate boundary around Japan. *Scientia, Science Diffusion*. (査読無)

[学会発表] (計 26 件)

- 中村仁美 (2018) Behavior of Rare Earth Elements in spring waters: Implications for origin and upwelling process of deep brine. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 (招待講演)
- Nakamura H., Iwamori H., Chang Q., Morikawa N., Kazahaya K., Takahashi M., Tanimizu M. (2018) Variability of deep seated fluid observed by rare earth elements along Median tectonic Line. 10th BIENNIAL WORKSHOP on JAPAN-KAMCHATKA-ALASKA SUBDUCTION PROCESSES (JKASP-2018), Petropavlovsk-Kamchatsky.
- Nakamura H. (2018) Geochemical variability of deep seated fluid along median tectonic line. 17th Japan-Taiwan International workshop on Hydrological and geochemical Research for earthquake Prediction. (Invited)
- Iwamori, H. (2018) Chemical geodynamics based on statistical analyses and forward simulation. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 (招待講演)
- 中村仁美, 岩森光, 石塚治, 西澤達治 (2017) 中部～東北日本火山弧の組成変遷と沈み込むスラブの形状. 招待講演, 日本火山学会 2017 年度秋季大会 (招待講演)
- 吉田健太, 中村仁美, 桑谷立, 原口悟, 風早康平, 高橋正明, 岩森光 (2017) 多変量解析による日本列島深層地下水の化学的特徴の抽出. 2017 年度日本地球化学会年会
- Iwamori, H., Nakamura, H., Yoshida, M., Yanagi, R., Nakagawa, T. (2017) East-west mantle geochemical hemispheres and their implications for top-down hemispherical dynamics. High-Pressure Mineral Physics Seminar (Invited)
- 西澤達治, 中村仁美, Churikova Tatiana, Gordeychik Boris, 石塚治, 常青, 中尾篤史, 岩森光 (2017) カムチャッカ半島北東部, 海山の沈み込みに起因する高 Mg 安山岩に含まれる超高 Ni 含有 olivine の成因. JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- 岩森光, 吉田健太, 中村仁美, 桑谷立, 浜田盛久, 原口悟, 上木賢太 (2017) A new statistical method to identify geochemical data structure. JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- Nakamura, H., Iwamori, H., Ishizuka, O., Nishizawa, T. (2017) Distribution of slab-fluids around the edge of the Philippine Sea plate in Central to Northeast Japan. JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- Iwamori, H., Ikemoto, A., Nakamura, H., Yoshida, M., Yanagi, R. (2016) Subduction Factory and its Impact on Global Mantle Heterogeneity. Goldschmidt Conference 2016 (Invited)
- 吉田健太, 桑谷立, 中村仁美, 原口悟, 風早康平, 高橋正明, 岩森光 (2016) PCA/ICA による深層地下水データベースの多変量解析. 日本鉱物科学会 2016 年年会
- 中村仁美, 千葉紀奈, 常青, 森川徳敏, 風早康平, 岩森光 (2016) 有馬温泉水を含めた温泉水の起源と地殻内上昇過程の制約. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- 西澤達治, 中村仁美, Churikova Tatiana, Gordeychik Boris, 石塚治, 岩森光 (2016) カムチャッカ半島北東部における高 Mg 安山岩を産出した第四紀火山の起源. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- 中村仁美, 岩森光, 千葉紀奈, 常青, 森川徳敏, 風早康平 (2016) 糸魚川静岡構造線沿いに湧出する温泉水の多様性とその起源. 2016 年度日本地球化学会年会

Nakamura, H., Chiba, K., Chang, Q., Morikawa, N., Kazahaya, K., Iwamori, H. (2016) Origin of Arima-type brine and associated spring waters in the Kinki District, Southwest Japan. Goldshmidt Conference 2016
Nishizawa, T., Nakamura, H., Churikova, T., Ishizuka, O., Vaglarov, B.S., Ueki, K., Toyama, C., Iwamori, H. (2016) Geochemistry of High-Mg andesitic rocks in NE Kamchatka. Goldshmidt Conference 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：岩森光

ローマ字氏名：Hikaru IWAMORI

所属研究機関名：東京大学

部局名：地震研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：80221795

研究分担者氏名：常青

ローマ字氏名：Qing CHANG

所属研究機関名：海洋研究開発機構

部局名：地球内部物質循環研究グループ

職名：技術副主幹

研究者番号（8桁）：30359195

研究分担者氏名：森川徳敏

ローマ字氏名：Noritoshi MORIKAWA

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：活断層・火山研究部門

職名：研究グループ長

研究者番号（8桁）：90392670