

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21109001

研究課題名(和文)地殻流体：その実態と沈み込み変動への役割

研究課題名(英文)Geofluid: Nature and dynamics of fluids in subduction zones

研究代表者

高橋 栄一(Takahashi, Eiichi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40144779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 62,900,000円、(間接経費) 18,870,000円

研究成果の概要(和文)：日本列島は2つの海洋プレートが沈み込む『地球上で最も激しい変動帯』に位置する。「地震・火山活動」など沈み込み変動の多くに「地殻流体」(岩石鉱物の粒界に存在するH₂Oなどの流体)が深くかかわっている。本研究は新学術領域研究「地殻流体」の総括班として、沈み込むプレートに由来する「地殻流体」の発生から地表に至るまで、「地殻流体」の実態とそれが沈み込み変動に果たす役割の全貌解明を目指した。精密な地震波観測と電磁気観測を共同で実施し、観測結果を高圧高温実験に基づいて解釈し、地殻流体の分布を3次元的に示す、“Geofluid Map”を作成した。

研究成果の概要(英文)：The Japanese island arc is one of the most active mobile belts on the Earth. Deep fluids liberated from the subducting plates migrate upward and they play vital roles in various subduction zone phenomena; magma genesis, earthquake mechanism, etc. In order to understand the nature and dynamics of fluids in subduction zone processes and clarify their roles, we organize a research team consisting of geophysical observation (3D tomography using both seismology and MT methods), high-pressure experiments (fluid chemistry, grain boundary textures, etc) and geofluid dynamics (numerical simulation, geochemical mapping of volcanic rocks and hot springs, etc.). We aim to provide 3D Geofluid-Map underneath Japan based on our interdisciplinary collaborating research.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：サブダクション帯 地震 火山 流体 地殻変動 温泉 鉱床

1. 研究開始当初の背景

2000年以降世界の地球科学で「地殻流体」に対する関心が急速に高まり、専門誌(Geofluids)が刊行され国際会議が毎年開催されるようになった。諸外国の研究者は、堆積盆、地熱帯、鉱床脈など地球表層付近に於ける「地殻流体」と岩石の相互作用を、「資源」「エネルギー」「環境」の立場から活発に研究している。一方、複数のプレートがせめぎ合う『地球上で最も激しい変動帯』に位置する日本列島は、沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートに由来する熱水フラックスを受け、「地震発生」および「マグマ火山活動」などの変動現象に「地殻流体」が深く関わっていることが様々な証拠から明らかにされつつある。深部由来流体の成因と役割を解明するには、諸外国の研究のように深さ10km以浅の流体だけを扱うのではなく、沈み込むプレート・マントルウェッジ・地殻を一つの系とみなし、地殻流体の『根』から研究を行う必要がある。さらに、水溶液-マグマ-超臨界流体-固体の振る舞いを、ミクロな構造・素過程からマクロな発生・移動にいたる幅広いレンジで研究せねばならない。(領域計画書より抜粋)。

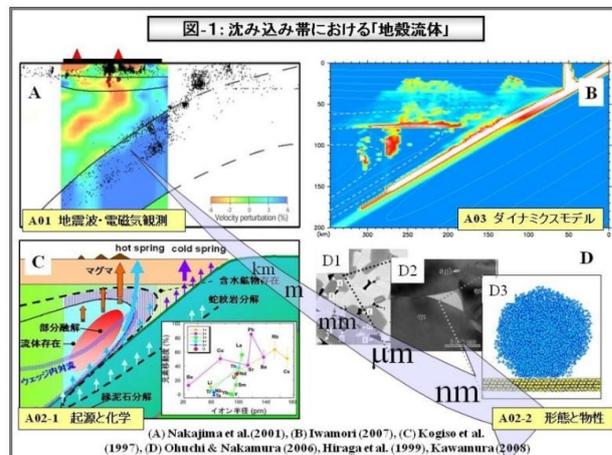
2. 研究の目的

本領域(新学術領域研究「地殻流体」)では、複数のプレートがせめぎ合う場所に位置する日本列島を、沈み込み変動を研究する地球上でもっとも恵まれたフィールドと考え、地震学・地球電磁気学・高温高压実験・岩石学・鉱物物理学・地球化学・鉱床学・水文地質学・地球ダイナミクスなど多様な研究分野の研究者をメンバーとする学際融合研究チームを組織した。沈み込み帯の各場所に存在する流体相の実態とそれが沈み込み変動に果たす役割を、学際的な研究手法を用い、水溶液の分子構造から日本列島の水循環までのマルチスケールで解明することを目指した。我々は地殻および最上部マントルに存する流体を総称して「地殻流体」と呼ぶことを新たに定義した。地殻流体にはH₂Oを中心とするさまざまな組成のC-H-O流体、シリケートメルトなどが含まれる。地震・火山・地殻変動など顕著で巨大スケールの沈み込み変動に対する従来の研究を、「鉱物粒界に存在するミクロな流体相の役割」という新たな視点から再構成するところに本プロジェクトの狙いがある。

3. 研究の方法

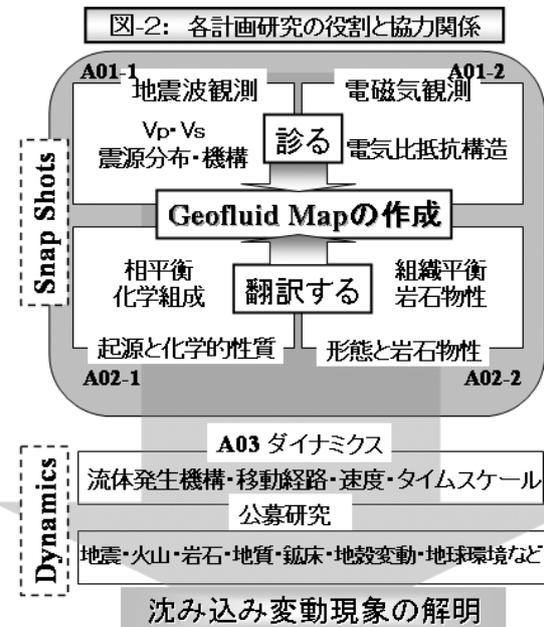
東北日本の東西断面の地震波トモグラフィ(図1A)が示すように、日本列島は沈み込むプレートに含まれる含水鉱物の脱水分解反応により供給される(H₂Oを主成分とする)流体によりいわば蒸し焼きの状態にある(図1C)。地震波トモグラフィによって得られる低速度異常構造(図1A)はH₂Oの効果で融点が低下し、マントルが部分融解し

た部分と解釈されている。沈み込むプレートの脱水により発生した流体の移動およびマグマ生成を予測する数値シミュレーション結果(図1B)は地震波トモグラフィの特徴をよく説明する。



地殻流体の起源・実態・役割を解明するために、手法を異にする3つの研究項目(A01観測班, A02実験・翻訳班, A03ダイナミクス班)を置く。観測と実験・翻訳の各項目中に、研究対象の異なる2つの計画研究を配置する(図-2)。絵を総括班中心に書き直す(地震波A01-1)と(電磁気A01-2)の共同観測異なる手法で地殻流体の3次元的分布を解明する目的で、地震波班(A01-1)と電磁気班(A01-2)が協力して鳴子火山周辺で調密観測を実施している。

総括班(本研究)は分野を異にする3研究項



目5計画研究班の統括・交流を図り、分野横断研究の飛躍的推進を支援するため、総括班は研究集会の開催、学会特別セッション、融合研究セミナー、ホームページ・ニュースレター、外国人研究者の招聘、アウトリーチな

どの活動を行ってきた。全国の大学から参加を募った学生・大学院生を加え地殻流体研究会並びにサマースクールを毎年開催している。地震発生・火山活動等に重要な役割を果たすと考えられる地殻流体の起源・実態・役割を解明するために、観測・実験・数値計算・化学分析等を有機的に結び付けることによって、沈み込み帯における Geofluid Map の作成ならびに Geofluid Dynamics の創生を目指そうとするものである。世界最高水準にある、我が国の地震波観測や電磁気観測、高圧物性、レオロジー及び高圧相平衡実験、地球化学分析、分子シミュレーション、地殻流体の挙動に関する数値計算等の研究者が一致団結して研究チームを構成した。研究出発時に指摘された「観測」と「他研究項目」の連携を強化するため、計画研究 A01 の分担者に高温高圧実験の研究者を加えたほか、総括班のイニシアティブのもと、A01(観測)、A02(実験)、A03(ダイナミクス)の研究者を束ねた融合研究セミナーやワークショップを頻繁に開催して分野間の連携強化に努めた。その結果、本報告書に示すように、鳴子火山周辺において調密な地震観測、電磁気 MT 観測を同時に行い、さらに観測結果を分野融合研究チームが翻訳し、世界で初めて地震波、電磁気、温度構造および岩石学的制約を満たす地殻流体分布図 Geofluid Map を作成した。

4. 研究成果 (領域全体)

公募研究 16 件を含む本研究の関連研究者は述べ 75 人、大学院生 40 人に及んだ。毎年の全体研究発表会に加えて国際シンポジウム 7 件、国内シンポジウム 19 件を主催し、5 年間で 678 件の学術論文(すべて査読有)を生み出した。領域発足時には新しい言葉であった本領域の略称「地殻流体」は 5 年間に広範囲で使用されるようになり専門用語として定着した。さらに、英語略称 Geofluid の概念も従来の地下水に加えてマントル深部由来の流体も含むように意味が変化した。プレートの沈み込み帯で起こる地震・火山・地殻変動などを深部由来の流体相の役割として研究する本領域の目標と、地球物理・地質学・岩石鉱物・地球化学などの広範な学際融合チームで研究する研究スタイルとは、招聘した著名な外国人研究者全員から極めて高い評価を得た。また、本領域はサマースクールなどを通じて学際融合的な研究手法に大学院生が慣れ、視野の広い研究者として育つよう最大限に努力した。その結果、きわめて多くの若手研究者を輩出し、地球科学研究コミュニティの発展に大きく貢献した。

●「地殻流体」概念の創生と普及：

地震・火山など沈み込み帯の変動現象を、それぞれの現象の背後にある流体の役割に着目するために、沈み込み帯に存在する流体を表す言葉として、「地殻流体」というそれまであまり使用されていなかった言葉を

用いて、我々は地殻および最上部マントルに存する流体を総称して「地殻流体」と呼ぶことを新たに定義した。英語名としては 2000 年から学術誌名にも採用されている Geofluid (諸外国の用例は地下 10km より浅い地下水や熱水を指していた)をあてた。領域の発足した 2009 年当時「地殻流体」は検索総数が 100 件未満であったが領域終了時には数万件までに増加し、地球内部に広く分布する流体の総称として広く用いられるようになった(下記参照)。

「地殻流体」検索結果：google：58800 件
yahoo：58600 件 MSN：71900 件
(2014 年 5 月 23 日現在)

●地殻流体研究コミュニティの育成：

本領域の関係者が中心となり、各学会において、地殻流体に関係するセッションが設置され、沈み込み帯の変動現象に果たす流体の役割について活発な議論がなされてきた。東北地方太平洋沖地震直後の 2011 年度日本地震学会においては、巨大地震発生に及ぼす地殻流体の役割が 2 つのスペシャルセッションで議論された。日本鉱物科学会においては、2011 年以降、毎年、「火成作用と流体」セッションが立ち上げられ、流体によって引き起こされる火成作用について、物質科学に基づく議論が行われた。日本鉱物科学会誌『岩石鉱物科学』の第 39 巻 6 号(2010 年)と第 40 巻 3 号(2011 年)で特集号「地殻流体：その岩石物性と化学輸送への役割」が生まれ、合計 6 本の論文が掲載された。さらに、日本地球化学会誌『地球化学』第 46 巻 4 号(2012 年)において特集号「地殻流体」が生まれ、5 本の論文が掲載された。そのほか、日本水文学会誌でも特集号「地殻流体研究に果たす水文科学の役割」が生まれ、第 43 巻 4 号(2013 年)、第 44 巻 1 号(2014)および今後発行予定のもう一号に、合計 8 本の論文が掲載される。これらの活動は、これまで各学会のレベルにおける「水」や「流体」の研究の学際化を促進し、その結果、地殻流体に関する研究が、本領域外でも活発に進められるようになった。例えば、日本地球科学連合大会において、「流体」をキーワードとしたセッションは、この数年間、約 3 つ立ち上げられてきており、そのうち少なくとも 1 つは本領域外の研究者によって招集されていた。2014 年大会においては、「流体」をキーワードとする本領域外の研究者によって召集されたセッションは一気に 3 つへと増加した。このことは、地殻流体研究コミュニティが大きく広がったことを示す。

総括班(本研究)はさらに研究成果を学生や一般に普及する目的で東大出版会から単行本「地殻流体と沈み込み変動(仮題)」を 2015 年に刊行する予定で準備を進めている。

総括班が開催した「地殻流体全体研究発表会」並びに「サマースクール」:

- 地殻流体キックオフ会議 2009年9月23日～25日 東北大学川渡セミナーハウス、参加者80名(うち学生・院生20名)
- 2009年度地殻流体研究会 2010年3月25～26日 産総研・別棟大会議室、参加者100名(うち学生・院生20名)
- 2010年度「地殻流体研究会」並びに「サマースクール」 2010年9月10日～13日 ラフォーレ修善寺、参加者103名(うち学生・大学院生45名)。



- 2011年度「地殻流体研究会」並びに「サマースクール」(2011年9月17日～19日 岩手県花巻市 湯の杜ホテル志戸平)77名(うち学生・院生が25名)参加。口頭発表23件、ポスター発表27件。
- 2012年度「地殻流体研究会」(2013年3月1日～4日 静岡県伊豆市 ラフォーレ修善寺)93名参加(うち、学生・院生は31名)2013年度は国際シンポジウム Geofluid-3 を全体研究発表会とした。

総括班が主催した国際シンポジウム7件:

- 国際シンポジウム Geofluid-1: 2011年3月17～19日 東工大・デジタル多目的ホール、参加予定者120名(うち招聘外国人11名、学生・院生60名)。直前に発生した東日本大震災のため Geofluid-1 は中止し、参加者全員に講演要旨(冊子)を郵送することに

より紙面成立とした。

- 国際地球物理学連合 IUGG2011 特別セッション(2011年7月4日 オーストラリア・メルボルン)
"Fluids in the crust and mantle: Geodynamic and seismological consequences-geophysical and geological constraints"コンビナー:小川康雄・Grant Caldwell (New Zealand)
- 米国地球物理学連合 AGU2011 特別セッション "Role of fluids in subduction processes"(2011年12月8～9日 サンフランシスコ・モスコーンセンター)コンビナー:岩森光・Anne Pommier・高橋栄一
- 国際合同シンポジウム Misasa-2012 and Geofluid-2 (2012年3月18日～21日 鳥取県三朝町 三朝町総合文化ホール・三朝町営国民宿舎ブランナールみささ)
- 2013年度日本地球惑星科学連合大会特別セッション(2013年5月19日～24日 幕張メッセ国際会議場)
 - ・国際セッション "Geofluids and their roles in dynamics of the Earth's interior" (コンビナー:岩森光・Stephen Kirby・高橋栄一)
- 国際火山学・地球内部化学協会学術総会2013年大会 (IAVCEI2013)(2013年7月20日～24日 かがしま県民交流センター)特別セッション"Volatiles, fluids, and melts in magmatic and metamorphic processes"
(「地殻流体」に関するコンビナー:岩森光・中島淳一・木村純一・川本竜彦・浜田盛久)
- 国際シンポジウム Geofluid-3: Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones (2014年2月28日～3月3日 東京工業大学デジタル多目的ホール)延べ135名参加(うち招聘外国人12名、研究メンバー75名、大学院生40名など 集合写真参照)。



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 16 件)

- 1.*Sakurai M., N. Tsujino, H. Sakuma, K. Kawamura, E. Takahashi, Effects of Al content on water partitioning between orthopyroxene and olivine: Implications for lithosphere-asthenosphere boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014. 印刷中、査読有
- 2.Miyoshi, A., *T. Kogiso, N. Ishikawa, K. Mibe, Role of silica for the progress of serpentinization reactions: Constraints from successive changes in mineralogical textures of serpentinites from Iwanaidake ultramafic body, Japan, *Am. Mineral.*, 99, 1035-1044, 2014. 査読有
- 3.*Mujin, M., M. Nakamura, A nanolite record of eruption style transition, *Geology*, in press. 2014. 査読有
- 4.*Kanda, W., Ogawa, Y., Three-Dimensional Electromagnetic Imaging of Fluids and Melts Beneath the NE Japan Arc Revisited by Geomagnetic Transfer Function Data, *Earth Planets Space*, 65, 2014 (in press). 査読有
- 5.Miyoshi, A., *T. Kogiso, N. Ishikawa, K. Mibe, Role of silica for the progress of serpentinization reactions: Constraints from successive changes in mineralogical textures of serpentinites from Iwanaidake ultramafic body, Japan, *Am. Mineral.*, 99, 1035-1044, 2014. 査読有
- 6.*Heise, W., Y. Ogawa(6名中6番目), Changes in electrical resistivity track changes in tectonic plate coupling, *Geophys. Res. Lett.*, 40:1-5. 2013. 査読有
- 7.*Hamada, M., M. Ushioda, T. Fujii, E. Takahashi Hydrogen concentration in plagioclase as a hygrometer of arc basaltic melts: Approaches from melt inclusion analyses and hydrous melting experiments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 365, 253-262, 2013. 査読有
- 8.*Iwamori, H., Nakakuki, T., Fluid processes in subduction zones and water transport to the deep mantle. In: *Physics and Chemistry of the Deep Earth* ed. S. Karato, Elsevier, Amsterdam, 446-468, 2013. 査読有
- 9.*Nakajima, J., S. Hada, E. Hayami, N. Uchida, A. Hasegawa, S. Yoshioka, T. Matsuzawa, N. Umino, Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constraints on mantle dynamics and arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, 118, 5838-5855, 2013. 査読有
- 10.*Sakuma, H., Ichiki, M., Kawamura, K., Fuji-ta, K., Prediction of physical properties of water under extremely supercritical conditions: A molecular dynamics study, *J. Chem. Phys.*, 138, 134506, 2013. 査読有
- 11.*Imai T., E. Takahashi, T. Suzuki, T. Hirata Element partitioning between olivine and melt up to 10GPa: implication for the effect of pressure, *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 212-213, p.64-75, 2012. doi.org/10.1016/j.pepi.2012.09.001 査読有
- 12.*Iwamori, H., Nakamura, H., East-west mantle geochemical hemispheres constrained from Independent Component Analysis of basalt isotopic compositions, *Geochem. J.*, 46, e39-e46, 2012. 査読有
- 13.*Noritake, F., K. Kawamura, T. Yoshino, E. Takahashi, Molecular dynamics simulation and electrical conductivity measurement of Na₂O·3SiO₂ melt under high pressure; relationship between its structure and properties *J. Non-Cryst. Solids*, 358, 3109-3118, 2012. 査読有
- 14.Omuralieva, A., *A. Hasegawa, T. Matsuzawa, J. Nakajima, T. Okada, Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis, *Tectonophysics*, 518-521, 93-105, 2012. 査読有
- 15.*Sakuma, H., K. Kawamura, Structure and dynamics of water on Li⁺, Na⁺, K⁺, Cs⁺, H₃O⁺-exchanged muscovite surfaces: A molecular dynamics study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 63-81, 2011. 査読有
- 16.*Yoshimura, S., M. Nakamura, Carbon dioxide transport in crustal magmatic systems, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 307, 470-478, 2011. 査読有

[学会発表] (計 15 件)

1. Role of Water in Arc Basalts: case studies in Miyakejima, Fuji and some other volcanoes Eiichi Takahashi, Masashi Ushioda, Kenta Asano & Toshiro Suzuki Geofluid-3 国際シンポジウム 招待講演 2014年2月28日—3月3日 東京工業大学デジタル多目的ホール
2. Magma feeding system of Fuji volcano, Japan E. Takahashi, K. Asano and J. Nakajima Goldschmidt 国際会議 2013年8月28日—3月3日 フィレンツェ、イタリア
3. Deep magma feeding system of Fuji volcano, Japan E. Takahashi, J. Nakajima and K. Asano IAVCEI 国際火山学会 2013年7月20日—7月24日 鹿児島県民交流センター
4. LF-earthquakes, S-wave reflectors and Arima-type Brine: A model for Geofluid circulation in arc crust Eiichi Takahashi 地球惑星科学連合大会 招待講演 2013年5月19日—5月24日 幕張メッセ
5. Deep magma feeding system of Fuji volcano, Japan E. Takahashi, K. Asano, J. Nakajima 米国地球物理学連合秋季大会 2012年12月3日—12月7日 モスコーンセンター サンフランシスコ
6. 島弧玄武岩マグマの含水量・岩相・火山活

動様式：三宅島火山・富士火山を例として
高橋栄一・潮田雅司・浅野健太 鉱物科学
会 招待講演 2012年9月19日—9月21
日 都大学吉田キャンパス

7. 島弧玄武岩マグマの含水量について：伊豆
大島、三宅島、富士ならびに東北日本弧火
山からの考察 高橋栄一、浜田盛久、潮田
雅司、浅野健太 地球惑星科学連合大会
招待講演 2012年5月20日—5月25日 幕
張メッセ
8. Possible Role of Hydrogen in the Earth
Core Eiichi Takahashi and Takamasa Imai
米国地球物理学連合秋季大会 2011年12月
10日 モスコーンセンター サンフラン
シスコ
9. Role of Hydrogen in the Earth's core
E. Takahashi and T. Imai IUGG2011
International Union of Geophysics and
Geodesy 2011年7月2日メルボルンコン
ベンションセンター
10. Melting in the asthenosphere beneath
old oceanic plate E. Takahashi 招
待講演 IUGG2011 International Union of
Geophysics and Geodesy 2011年7月1日
メルボルンコンベンションセンター オ
ーストラリア
11. Origin of Arima-type Brine, E.
Takahashi 招待講演 First
International Symposium on Geofluids :
Geofluid Processes in Subduction Zones
and Mantle Dynamics 2011年3月17-19日
東京工業大学デジタル多目的ホール(震災
により書面開催)
12. 三宅島火山：大船戸期玄武岩の融解実験
と酸素雰囲気制御 潮田雅司・高橋栄一・
鈴木敏弘・浜田盛久 火山学会秋期大会
(2010年10月9日) 京都大学
13. カンラン石、メジャライトガーネット/
ペリドタイトメルト間における分配係数
の圧力依存性 今井崇暢、高橋栄一、鈴木
敏弘 平田岳史 日本地球化学会年会 立
正大学 2010年9月15日
14. 沈み込み帯深部に存在する流体の化学組
成：実験的アプローチ 高橋栄一 地球惑星
科学連合大会 招待講演 2010年5月26日
幕張メッセ
15. Water content of Miyakejima Basalt:
Melting Experiments of basalt from
Miyakejima volcano, Japan M. Ushioda, E.
Takahashi, T. Suzuki 地球惑星連合大会
(2010年5月25日) 幕張メッセ

[その他]
ホームページ等
<http://www.geofluids.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 栄一 (TAKAHASHI Eiichi)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：40144779

(2) 研究分担者

松澤 暢 (MATSUZAWA Tooru)
東北大学・理学系研究科・教授
研究者番号：20190449

研究分担者

小川 康雄 (OGAWA Yasuo)
東京工業大学・火山流体研究センター・教授
研究者番号：10334525

研究分担者

小木曾 哲 (KOGISO Tetsu)
京都大学・人間・環境学研究科・准教授
研究者番号：60359172

研究分担者

中村 美千彦 (NAKAMURAMichihiko)
東北大学・理学系研究科・教授
研究者番号：70260528

研究分担者

岩森 光 (IWAMORI Hikaru)
独立行政法人海洋開発研究機構・地球内部
物質循環分野・分野長
研究者番号：80221795

研究分担者

栗田 敬 (KURITA Kei)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：00111451

研究分担者

河村 雄行 (KAWAMURAKatsuyuki)
岡山大学・環境生命科学研究所・教授
研究者番号：00126038

研究分担者

横山 哲也 (YOKOYAMA Tetsuya)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00467028

(3) 連携研究者

浜田 盛久 (HAMADA Morihisa)
独立行政法人海洋開発研究機構・地球内部
物質循環研究分野・研究員
研究者番号：60456853

連携研究者

佐久間 博 (SAKUMA Hiroshi)
独立行政法人物質・材料研究機構・環境・
エネルギー材料部門環境再生材料ユニット
ジオ機能材料グループ主任研究員
研究者番号：20400426