

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成27年6月1日現在

機関番号：12601
研究種目：特別推進研究
研究期間：2010～2014
課題番号：22000003
研究課題名（和文） 海半球計画の新展開：最先端の海底観測による海洋マンツルの描像
研究課題名（英文） New phase of Ocean Hemisphere Project: Imaging the normal oceanic mantle by advanced ocean bottom observations

研究代表者
歌田 久司 (UTADA, Hisashi)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：70134632
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：434,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、北西太平洋において独自に開発した世界最先端の海底観測装置（深海底で地震波や電磁場を測定する機器）による長期観測を実施した。その結果、プレート運動を始めとするマンツルの活動の理解の基礎となる、地震波速度や電気伝導度の詳しい分布を明らかにすることができた。特に、海洋プレートが中央海嶺で生成してから海溝から沈み込むまで単純に冷えて厚くなる、という従来の考え方では説明できない不均質構造があることが見出された。

研究成果の概要（英文）：In this project, we conducted a long-term geophysical observation in the northwest Pacific basin, by installing an array of seafloor instruments to record seismic waves or electromagnetic field variations at deep ocean bottom. These instruments were all developed by the present research group and show highest performance in the world. The long-term observation revealed detailed structures of seismic velocity and electrical conductivity below the study area, which are essential for understanding the mantle dynamics including movements of oceanic plates. In particular, it has first revealed the presence of laterally heterogeneous structure that is hardly explained by conventional plate evolution model assuming a simple cooling of the oceanic lithosphere while moving from the mid-oceanic ridge to the subduction zone.

研究分野：数物系科学

キーワード：海洋マンツル リソスフェア アセノスフェア マンツル遷移層
海底地球物理観測 最先端技術

1. 研究開始当初の背景

本研究グループの中核となっているのは海底地震および海底電磁気観測を研究手法とする研究者である。本グループは、創成的学術研究「海半球計画」および特定領域研究「スタグナントスラブ計画」という科研費大型研究を通じて、主として西太平洋の沈み込み帯に焦点を当てた地球内部観測で実績を上げてきた。これらの科学的プログラムを実施する一方で、観測機器の性能向上を目指した機器開発を進めてきたが、ついにそれらが実用的なレベルに達した。

深海底は、陸上に比べてはるかに過酷な条件にあるため、従来の観測機器で得られるデータの解析で得られる情報は陸上観測で得られるものに比べて質が劣るとされてきた。しかし、実地検証によって、新たに開発した観測機器は陸上観測データと比べても遜色

ない質であることが明らかになった。

研究開始当初、次項で述べる「ふつうの海洋マンツル」に関わる2つの重要課題が、それぞれ20世紀からの引き継がれた課題、21世紀になって顕在化した課題として認識され、国内外の学会などでも特別セッションが頻繁に組まれるなど、さまざまなアプローチで解決をめざそうという機運が盛り上がりつつあった。本研究グループが開発した最先端の海底観測技術をもってすれば、これらの課題の解決に不可欠な観測データが、十分な精度で得られるものと考えられた。

2. 研究の目的

地球表面の3分の2以上を占める海洋域のマンツルは、地球全体を理解する上で不可欠の領域である。特に中央海嶺で生成されたプレートが海溝から再びマンツルに沈み込

むまでの、いわゆる「ふつうの海洋マントル」には、地球科学上最も本質的な二つの問題が未解明のまま残されている。

(1) 「アセノスフェアの流動性の原因は何か」プレートテクトニクスの根本には、堅いプレート（リソスフェア）が軟らかいアセノスフェアの上をすべるように動くという考え方がある。しかし、アセノスフェアの流動性の原因は未解明であり、マントル物質の部分熔融による、鉱物の粒子サイズによる、鉱物中の水の効果によるなどの説がある。

(2) 「水星地球全体の水収支がどうなっているのか」

水は地球という惑星を特徴付ける物質である。近年の高温高压実験の成果により、マントル遷移層（深さおよそ 410~660 km の範囲）には、最大限に見積もると地表の全ての海水よりも大量の水を含み得ることが示された。最近、沈み込み帯における地球物理観測から、プレートの沈み込みに伴う水輸送の様子が明らかにされつつあるが、体積的に大半を占める「ふつうの海洋マントル」の遷移層の水の量の推定なしには地球全体の収支はわからない。

最先端の機器による海底観測によって、「ふつうの海洋マントル」にある二つの重要課題を解明することが、本研究の目的である。これには、学術的にみて二種類の意義・インパクトを世界の固体地球科学コミュニティに与えると考えられる。一つは純粋な科学的成果として、固体地球科学の重要課題の一つの見通しをあたえることである。もう一つは研究アプローチに関することで、本研究により「深海底でも陸上と同等の機動観測が行える」ことが示されれば、観測固体地球科学の新たな潮流が生み出されると期待される。

3. 研究の方法

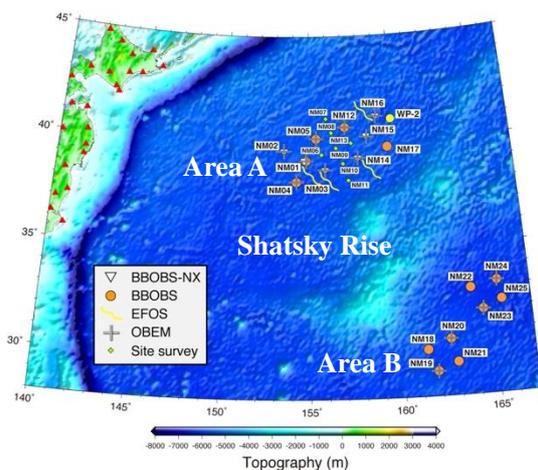


図 1 本研究における観測対象の海域 A と B に設置した観測アレー。両海域の間に広がる水深の浅い（明るい色）部分がシャツキー海台である。

海底における最先端の地震観測と電磁気観測によって海洋マントルの描像（イメージ）を得て、その物理的解釈によりその場の物理気学的状態を推定する。地震学的パラメータと電磁気学的パラメータとを組み合わせることにより、信頼性の高い推定を行うことができる。具体的な観測対象地域は、西太平洋のシャツキー海台の北西側と南東側に広がる、年代がいずれもおよそ一億三千万年程度の比較的平坦な海底とする。これら 2 海域（それぞれ海域 A、海域 B と呼ぶ）は、シャツキー海台を形成したかつての海底火山活動の影響を受けない程度に十分離れており、海底下のマントルは「ふつう」と考えられる（図 1）。

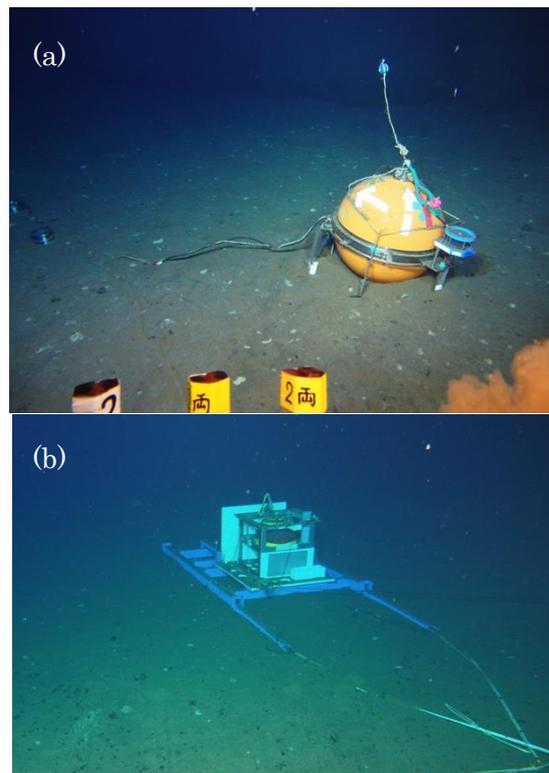


図 2 深さおよそ 5800m 深海底に設置された最先端の(a)海底地震計（BBOBS-NX）と(b)海底電位差計（EFOS）

ここで、我々のグループが開発して過去十年あまりの間に多くの成果を得てきた海底地球物理観測装置（広帯域海底地震計および海底電磁力計）に加え、最先端の装置（新型の海底地震計および海底電位差計、図 2 (a)、(b)参照）を用いた長期観測を行う。新型の地震観測では従来は難しいとされてきた海底における水平地震動の観測を陸上と同程度のノイズレベルで行うことができるようになった。電磁気観測でも、遷移層に感度のある数万秒より長い周期帯域でのノイズレベルを、従来に比べ十分の一に低減することができた。これらにより、さまざまデータ解析

手法の適用により、ふつうのマントルから多様な情報を抽出することができる。

観測的アプローチで得た、「ふつうの海洋マントル」の鮮明なイメージを解釈することにより、地震学的・電磁気学的パラメーターを規定している物理条件を決定することができる。この過程は、本研究に参加している物質科学（室内実験）および計算機モデリングを専門とする研究者との連携によって行われる。

4. 研究成果

本研究の海底観測は、2010年6月に1回目の機器設置航海を行って以降、合計6回の機器設置と回収の航海を実施した。2011年3月の東日本大震災の影響で、航海計画はおよそ1年の遅れが出たが、全体としてはほぼ当初の予定通りの質・量のデータを取得することができた。海底地震観測は、海域AとBそれぞれ10ヶ所と8ヶ所の観測点においてのべ504ヶ月・台の観測を行い、データの取得率は85%であった。このうち、海域Aの3ヶ所で新型の広帯域地震計の良好なデータが得られた。海底電磁気観測は、海域AとBそれぞれ17ヶ所と8ヶ所でのべ588ヶ月・台の観測を行い、有効なデータ取得率は78%であった。また、A海域に設置した3台の新型電位差計による観測データが得られた。研究対象海域の水深がおよそ6000mと深い上に、多くの場合に設置から回収までが2年という長期に渡ったことを考慮すると、これらの有効データ取得率は十分に高い数字である。

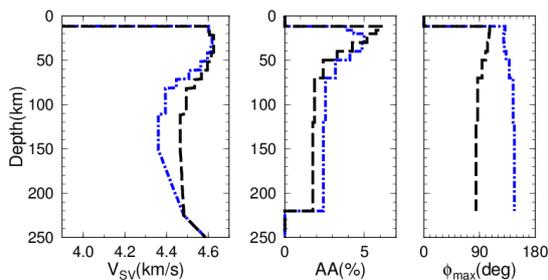


図3 海域A(青線)およびB(黒線)におけるS波速度(V_{sv})、方位異方性(AA)の強さと早い方向(ϕ_{max})の深さ分布。150km以深は解像度がない。

海底広帯域地震計によって観測された地震波形データの解析では、遠地地震と脈動ノイズを統合した、表面波の広帯域分散解析による観測アレイ直下の一次元構造(方位異方性を含む)を可能にする手法開発を達成した。これにより、海水面から100–150kmの深さ(アセノスフェアの深度まで)まで構造を推定で

きるようになった。海洋におけるマントルの地震観測研究が、これまで主に屈折法探査による海洋モホ面直下(せいぜい10km程度)、またはグローバルな表面波トモグラフィーによる深部(~50km以深)の大まかな構造(水平方向の波長が数千kmの解像度)のみにとどまっていたことを考えると、リソスフェア・アセノスフェア全体を深さ方向に連続的に探査できることとなり、観測研究上の重要な到達点と考えられる。今後はLove波の計測技術の確立、レーザー関数解析との統合を進める予定である。この海底広帯域地震探査手法により、A・B両海域での構造モデルが得られ(図3)、アセノスフェアに対応する深さでS波速度に2%強の違いがあることが明らかになった。両海域共に年齢一億三千万年以上の古いプレートに属することを考えると、この違いは顕著であり、北西太平洋下のアセノスフェアにおいて、小規模対流のような不均質が存在することを示唆している。

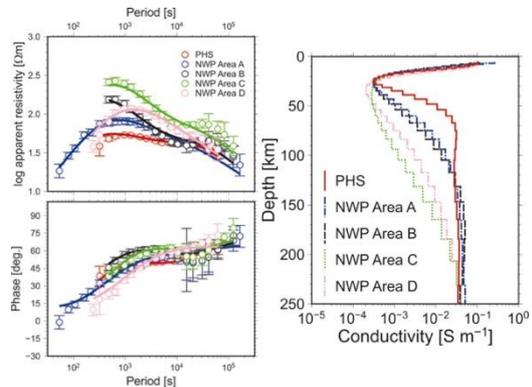


図4 海底電磁気観測結果得られた、アレイで平均した応答関数(左)と一次元電気伝導度構造(右)。海域Aの結果を青線、Bの結果を黒線で示す。比較のため、過去の研究で得られたフィリピン海(赤線)、本研究海域の海溝よりの2海域(ピンクおよび緑)の結果も示す。

海底電磁気観測によって得られた電磁場データの解析から、それぞれの観測アレイ直下の平均的応答関数と一次元電気伝導度構造を極めて精度よく決定した(図4)。さらに3次元インバージョンによって不均質構造モデルを求めることもできるが、一次元モデルのアレイ全データに対する適合度は高く、アレイスケール以下の不均質性はあっても弱いものと推定することができる。こうして求められた両海域のモデルを比較すると、リソスフェア・アセノスフェア境界の深さが海域Bの方が約10km程度深くなっていることがわかった。さらに両海域よりも日本海溝よりで年齢が約一億五千万年の海底で以前に

行った観測で得られた一次元モデルは、リソスフェアに対応する低電気伝導度層の厚みが150~180kmにも達するという特徴があった。約一億年の年代の違いのある若いフィリピン海プレート直下の構造との違いを比較すると、北西太平洋の二千万年程度の年代範囲に見られる構造の違いは顕著である。このことは地震波解析で明らかになった不均質構造が、本研究海域から沈み込み帯にわたって大規模に存在することを示唆する。このような不均質の存在が観測によって明らかにされたのは初めてであり、今後新たな研究の展開が大いに期待される。

新型の海底地震計および海底電位差計による観測が成功したことにより、さらに深部のマントル遷移層の構造推定が可能となった。地震波形データからは、レシーバ関数解析によって、410kmと660kmの地震波不連続面のイメージが得られ、遷移層の厚みを精度よく推定することができた。結果は、海域Bがグローバルな平均値とほぼ同じであるのに対して、海域Aでは10-20km程度厚くなっていることがわかった。この結果から、海域A直下の遷移層はグローバル平均よりやや低温であると推定できる。一方、新型電位差計の解析により、これまでは難しかった遷移層の電気伝導度の推定がなされ、太平洋全体の平均値とほぼ同じであることがわかった。低温異常があるにもかかわらず平均的な電気伝導度になるのは、温度以外の要因で電気伝導度が高くなっていることを意味する。電気伝導度を高める要因が水（水素イオン）による導電性であると仮定して、遷移層の含水量の上限を0.1~0.5重量%と求めることができた。

地球内部の3次元速度構造から地球内部の温度分布や流体分布を定量的に推定するためには、室内実験での物性値の測定が不可欠である。本研究では、有機物多結晶体をマントル岩石のアナログ物質として用いた実験と合成した模擬マントル岩石を用いた実験を行った。

岩石の非弾性特性はこれまで実験データが十分でなく未知の部分が多い。有機物多結晶体をマントル岩石のアナログ物質として用いて、実物質の実験では難しい融点を超える温度範囲での非弾性測定実験を行った。そして地震波帯域において、非弾性がマックスウエル周波数による単純な相似則からずれることを明らかにした。さらにこの相似則からの「ずれ」は、温度が融点に近づくほど減衰が大きくなる方向に拡大するという系統性があることも分かった。また、温度による「ずれ」の増大は融点を超えるまで連続的に続くため、融点に近い温度ではメルトが無くても地震波が低速度・高減衰になり得ること

を示唆する結果を得た。

合成岩石を用いた実験では、さまざまな温度や歪速度下で変形させた後、その微細構造を調べた。その結果、粒子が相対的にずれる（粒界すべり）拡散クリープ下で岩石が変形すると、主要鉱物であるオリビン粒子の結晶軸が特定の方向に配列する（結晶軸選択配向）ことを見出した。また、その配向パターンや強度は温度条件やメルトの存在によって変化することも示された。本実験結果により、マントル内の地震波速度異方性が生じる深さは130-210kmと推定され、これまで強い異方性が観測されている領域と一致した。これにより、上部マントルの地震波速度異方性が、マントルの拡散クリープによって生じている可能性が示され、数十年来常識とされてきた「地震波速度異方性は転位クリープにより生じる」の見直しが必要になった。

本研究計画の3年目の2013年3月と、最終年度の2015年3月に、国際研究集会を主催し、この分野で世界を代表する第一線の研究者の参加があった。これらの集会では、単なる研究成果の発表にとどまらず、今後の研究の方向性についても十分議論した。これにより、本研究グループがリードして国際連携による海洋マントルの観測研究を展開するための足がかりをつくることができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計103件)

1. Utada, H., Electromagnetic exploration of the oceanic mantle, Proc. Japan Acad. Ser. B, 査読有, 91巻, 2015, 印刷中
2. Takeuchi, N., Kawakatsu, H., Tanaka, S., Obayashi, M., Chen, Y.J., Ning, J., Grand, S.P., Niu, F., Ni, J., Iritani, R., Idehara, K., Tonegawa, T., Upper Mantle Tomography in the Northwestern Pacific Region Using Triplicated P Waves, J. Geophys. Res., 査読有, 119巻, 2014, 7667-7685, DOI:10.1002/2014JB011161
3. Takei, Y., Karasawa, F., Yamauchi, H., Temperature, grain size, and chemical controls on polycrystal anelasticity over a broad frequency range extending into the seismic range, J. Geophys. Res., 査読有, 119巻, 2014, 5414-5443, DOI: 10.1002/2014JB011146
4. Tada, N., Baba, K., Utada, H., Three-dimensional inversion of seafloor magnetotelluric data collected in the Philippine Sea and the western margin of the northwest Pacific Ocean, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 査読有, 15巻, 2014, 2895-2917, DOI:10.1002/2014GC005421
5. Baba, K., Tada, N., Zhang, L.L., Liang, P.F., Shimizu, H., Utada, H., Is the electrical conductivity of the northwestern Pacific upper mantle normal?, Geochem., Geophys., Geosyst.,

- 査読有, 14 巻, 2013, 4969-4979,
DOI:10.1002/2013GC004997
6. Takeo, A., Forsyth, D.W., Weeraratne, D.S., Nishida, K., Estimation of azimuthal anisotropy in the NW Pacific from seismic ambient noise in seafloor records, *Geophysical Journal International*, 査読有, 199 巻, 2014, 11-22, DOI:10.1093/gji/ggu240
 7. Suetsugu, D., H. Shiobara., Broadband Ocean-Bottom Seismology, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 査読有, 42 巻, 2014, 27-43, DOI:10.1146/annurev-earth-060313-054818
 8. Takeo, A., K. Nishida., T. Isse., H. Kawakatsu., H. Shiobara., H. Sugioka., T. Kanazawa., Radially anisotropic structure beneath the Shikoku Basin from broadband surface wave analysis of ocean bottom seismometer records, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 118 巻, 2013, 2878-2892, DOI:10.1002/jgrb.50219
 9. Miyazaki, T., Sueyoshi, K., Hiraga, T., Olivine crystals align during diffusion creep of Earth's upper mantle, *Nature*, 査読有, 502 巻, 2013, 321-326, DOI:10.1038/nature12570
 10. Kawakatsu, H., At the bottom of the oceanic plate (Perspective), *Science*, 査読有, 335 巻, 2012, 1448-1449, DOI:10.1126/science.1219658

[学会発表] (計 155 件)

1. Utada, H., Kawakatsu, H., Shiobara, H., Baba, K., Isse, T., Suetsugu, D., and the NOMan Project Team, 5 years of NOMan Project, International Symposium on "Structure and Dynamics of the Oceanic Lithosphere/Asthenosphere System", 2015 年 3 月 4 日, ホテル松島大観荘 (宮城県・宮城郡松島町)
2. Isse, T., H. Shiobara., M. Shinohara., T. Yamada., T. Yagi., H. Sugioka., H. Utada., Oceanic plate structures beneath the northwestern Pacific Ocean revealed by explosion experiments, AGU Fall Meeting, 2014 年 12 月 19 日, サンフランシスコ (アメリカ)
3. Kawakatsu, H., Pacific Array (invited) Amphibious Array Facility Workshop (招待講演), 2014 年 10 月 23 日-24 日, スノーバード (アメリカ)
4. Miyazaki, T., Sueyoshi, K., Hiraga, T., Development of crystal preferred orientation of olivine during diffusion creep: a matter of olivine crystal shape, AGU Fall Meeting, 2013 年 12 月 11 日, San Francisco (USA)
5. Kawakatsu, H., Toward in-situ Characterization of the Lithosphere/Asthenosphere System of the «Normal Oceanic» Mantle, College de France workshop: "Structure and Dynamics of the

Lithosphere/Asthenosphere System", 2013 年 11 月 19 日, Paris (FRANCE)

6. Shiobara, H., H. Sugioka., T. Isse., A. Ito., M. Shinohara., T. Kanazawa., BBOBS-NX: practical observation tool for broadband seismology at the seafloor, Joint Assembly IAHS-IASPO-IASPEI (招待講演), 2013 年 7 月 22 日-7 月 26 日, Gothenburg (Sweden)
7. Takei, Y., Experimental study on anelasticity of polycrystalline material for seismological application, CIDER Workshop on Seismic Attenuation in the Earth's Mantle, 2013 年 5 月 9 日-10 日, Lamont-Doherty Earth Observatory, New York (USA)

[図書] (計 3 件)

1. Takei, Y., John Wiley & Sons, Ltd., 2013 Elasticity, anelasticity, and viscosity of a partially molten rock. In *Physics and Chemistry of the Deep Earth* (ed. S. Karato), 2013, pp.66-93
2. Shinohara, M., K. Suyehiro., H. Shiobara., IASPEI New manual of seismological observatory practice (revised version), Chapter 7.5, Marine seismic observation, 2012, 136
3. 大木 聖子. 地球の声に耳をすませて、くもん出版、2012、143

[産業財産権]
なし

[その他]
報道関連情報

1. 産経新聞 (産経Webニュースでも掲載) 2010 年 9 月 27 日朝刊 東京版 11 面
 2. テレビ番組 BSフジ「ガリレオ X」2013 年 1 月 13 日、2014 年 11 月 9 日
- アウトリーチ活動情報 (公開講座)
1. 夏休み特別企画『小麦粉ねんどで地球を作ってみよう!』2014 年 7 月 27 日 (親子 15 組)
 2. 夏休み特別企画「地球の声に耳をすませて-海底からのぞく新しい地球-」2012 年 7 月 28 日、8 月 5 日 (中学生各 20 名)
- ホームページ等
1. 研究者向け
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/yesman/>
 2. 一般向け
<http://www.noman.jp/>
<http://with-earth.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

歌田 久司 (UTADA, Hisashi)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号: 70134632

(2)研究分担者

川勝 均 (KAWAKATSU, Hitoshi)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：60242153

塩原 肇 (SHIOBARA, Hajime)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：60211950

馬場 聖至 (BABA, Kiyoshi)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：70371721

一瀬 建日 (ISSE, Takehi)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：60359180

末次 大輔 (SUETSUGU, Daisuke)
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス
研究分野・分野長 (上席研究員)
研究者番号：20359178

(3)連携研究者

本多 了 (HONDA, Satoru)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：00219239

篠原 雅尚 (SHINOHARA, Masanao)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：90242172

武井 康子 (TAKEL, Yasuko)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：30323653

上嶋 誠 (UYESHIMA, Makoto)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：70242154

清水 久芳 (SHIMIZU, Hisayoshi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：70302619

平賀 岳彦 (HIRAGA, Takehiko)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：10444077

竹内 希 (TAKEUCHI, Nozomu)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：90313048

西田 究 (NISHIDA, Kiwamu)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：10345176

三部 賢治 (MIBE, Kenji)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：10372426

田中 聡 (TANAKA, Satoru)
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス
研究分野・分野長代理 (主任研究員)
研究者番号：60281961

大林 政行 (OBAYASHI, Masayuki)
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス
研究分野・主任研究員
研究者番号：30359179

杉岡 裕子 (SUGIOKA, Hiroko)
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス
研究分野・主任研究員
研究者番号：00359184

多田 訓子 (TADA, Noriko)
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス
研究分野・技術研究員
研究者番号：00509713

伊藤 亜妃 (ITO, Aki)
海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス
研究分野・技術研究員
研究者番号：90371723

利根川 貴志 (TONEGAWA, Takashi)
海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究
開発センター・研究員
研究者番号：60610855

志藤 あずさ (SHITO, Azusa)
京都大学・大学院理学研究科附属地球熱学
研究施設・研究員
研究者番号：90376541

大木 聖子 (OKI, Satoko)
慶應義塾大学・環境情報学部・准教授
研究者番号：40443337

(4)研究協力者

竹尾 明子 (TAKEO, Akiko)
北海道大学・大学院理学研究院自然史科学
部門・学術振興会特別研究員 (PD)
研究者番号：90756933

森重 学 (MORISHIGE, Manabu)
京都大学・大学院理学研究科附属地球熱学
研究施設・研究員
研究者番号：70746544