

平成 21 年 6 月 30 日現在

研究種目：特定領域研究(計画研究)

研究期間：2004 ～ 2008

課題番号：16075208

研究課題名(和文) 地震波トモグラフィーによる滞留スラブの高分解能イメージング

研究課題名(英文) High resolution seismic tomography of stagnant slabs

研究代表者

末次 大輔 (SUETSUGU DAISUKE)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・グループリーダー

研究者番号：20359178

研究成果の概要：本特定領域研究により得られた海底・陸上地震観測データと既存観測データにより、西太平洋マントル遷移層に滞留するスラブの鮮明な P 波、S 波速度イメージや相転移面の深さ分布を推定した。その結果、スラブが滞留する前に断裂していること；沈み込むスラブ内部にはプレート生成時の異方性が保存されているが、滞留スラブではそれが見られないこと；滞留スラブの主要部分の温度は周囲より 500 度低く、水はほとんど含まれていないこと、などが明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004 年度	7,100,000	0	7,100,000
2005 年度	10,800,000	0	10,800,000
2006 年度	13,000,000	0	13,000,000
2007 年度	13,000,000	0	13,000,000
2008 年度	8,800,000	0	8,800,000
総計	52,700,000	0	52,700,000

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

キーワード：内部構造、内部変動、地殻・マントル・核、地震波トモグラフィー

1. 研究開始当初の背景

3 次元マントル構造の研究は欧米、日本の研究者によって 80 年代以降活発におこなわれている。その中で、滞留スラブは 90 年代から本研究の分担者(深尾、大林)によって提唱されて以来常に議論をリードしてきており、ここ数年でその存在についての国際的コンセンサスが固まった。しかし、多くの沈み込み帯が地震観測の困難な海域であるため、現在国際的に流通しているデータから得られる滞留スラブ・モデルの分解能には限界があり、滞留スラブの規模や速度異常などに

対する分解能は、超高压高温岩石学の結果と結びつけてモデリングを行うには不十分であった。本研究では、当該領域の他研究課題で得られる海底観測データやロシアのデータを取り入れることによって、従来の分解能の限界を大きく超えることをねらいとした。また、スラブ滞留に関係するスラブの内部構造の研究には非常に高密度の観測データが必要であり、そのような研究は国内外を見渡しても少なかった。本研究は、日本における Hi-net、F-net など高密度観測の展開と同期して計画され、初めて滞留スラブ微細構造の

推定が可能になった。

2. 研究の目的

(1) 西太平洋沈み込み帯滞留スラブの形状の推定: 新たに得られる地震データと従来のデータを用いた地震波トモグラフィーにより、カムチャツカ・千島から日本、伊豆・小笠原、マリアナにいたる西太平洋沈み込み帯全体にわたってスラブの滞留形状と深さ、異方性の存在などを考慮したスラブ内部構造を連続的に空間分解能 100km でイメージングする。

(2) スラブの滞留にマントル不連続面がどのように寄与しているかを明らかにするために、マントル不連続面凹凸を空間分解能 300km で詳細にマッピングするとともに、トモグラフィーの結果と併せて、滞留スラブ内外の温度異常・含水率を推定する。

(3) コア・マントル境界付近の構造スラブが下部マントルに崩落して溜まっていると考えられるコア・マントル境界付近の地震波速度構造を推定する。

(4) 当該領域で得られる地震波・電磁気的全データを管理し、当該領域に参加する研究者の解析に資するためのデータセンターの立ち上げ・運営をおこなう。

3. 研究の方法

本研究では、(1)実体波走時トモグラフィーと、表面波を含めた波形インバージョンを用いた西太平洋沈み込み帯滞留スラブの高分解能イメージング；(2)ScS 反射波・Ps 変換波解析及び実体波波形解析による西太平洋沈み込み帯マントル遷移層の凹凸推定を主なターゲットとする。また、(3)ロシア・フィリピン海の地震波形データを管理し、領域参加者の利用に資するためのデータセンターを立ち上げ、運用する。

用いるデータとしては、海洋研究開発機構で構築している既存観測点データによる走時データベースと ISC データ、グローバル既存観測網のデータ、日本列島の Hi-net、F-net データ、そして千島・カムチャツカとフィリピン海の分解能を大幅に向上させるために当該領域で新設される臨時観測点のデータを用いる。

手法と目標とする空間分解能としては、上記(1)実体波走時トモグラフィーでは3次元P波速度・S波速度構造を同時に決定する走時トモグラフィー法を用いて滞留スラブ付近で50-100kmの空間分解能でイメージングし、波形インバージョンでは高次ボルン近似に基づく手法を用い、1000-2000kmの空間分解能を目指す。上記(2)のマントル遷移層凹凸

の推定では、西太平洋沈み込み帯全域の深さ400-1000kmに存在する可能性がある速度不連続面の深さとそこでの速度・密度変化を空間分解能 300km 以下の分解能で推定する。

4. 研究成果

(1) 滞留スラブのP波速度構造

既存データにフィリピン海のOBS、BBOBSなど海底地震計や、極東ロシア、中国の広帯域観測点の波形データから測定したP波時刻データをすべて加えて全マントルトモグラフィーを行った。極東ロシアから中国、フィリピン海にかけて、滞留スラブを含むマントル構造が高分解能で求めた。特に、これまで鉛直に連続して下部マントルへ沈み込んでいると考えられてきたマリアナ・スラブが660km不連続面で断裂して下部マントルに沈み込んでい

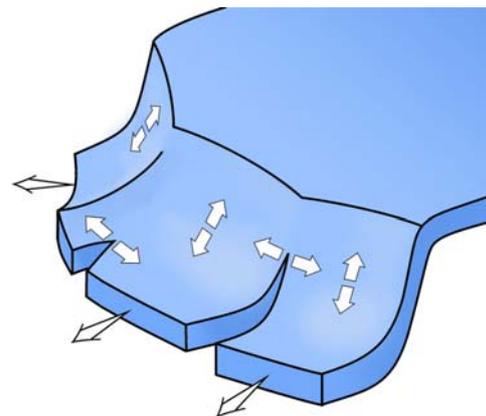
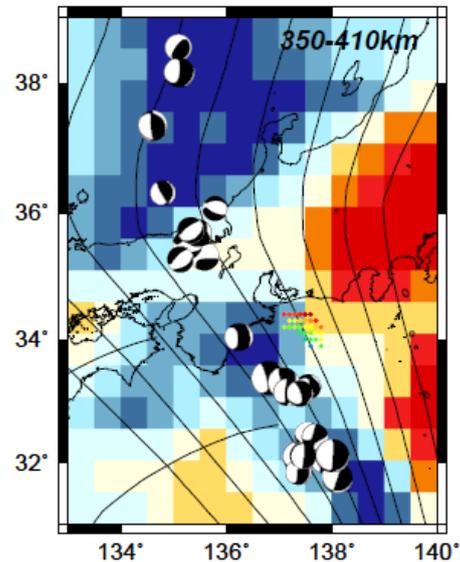


図1 深さ 400km 付近の P 波速度分布 (上)。中部日本の下で高速度異常 (青) が途切れている。滞留するためにスラブが断裂していると考えられる (下)。

ることが明らかになった。また、中部日本の深さ300km以深でスラブが横方向に裂けた後に遷移層で滞留していることも明らかになった(図1)。この成果は、2009年にScience誌に掲載された。

(2) 滞留スラブのS波速度構造

長周期波形インバージョンにより、グローバル3次元マントルS波速度構造を波長2000kmの分解能で求めた。震源パラメータの誤差による速度構造へのバイアスを小さくする手法を開発し、西太平洋沈み込み帯の滞留スラブを鮮明に捉えることができた。また、従来、ISCの短周期S波データのトモグラフィーでは滞留スラブを捉えることはできなかった。日本や中国の波形記録からS波到着時を直接読み取り、走時残差を計算した。既存のP波モデルに基づいてS波モデルをつくり理論走時残差を計算したところ、滞留スラブのS波速度異常は2-3%であることが分かった。

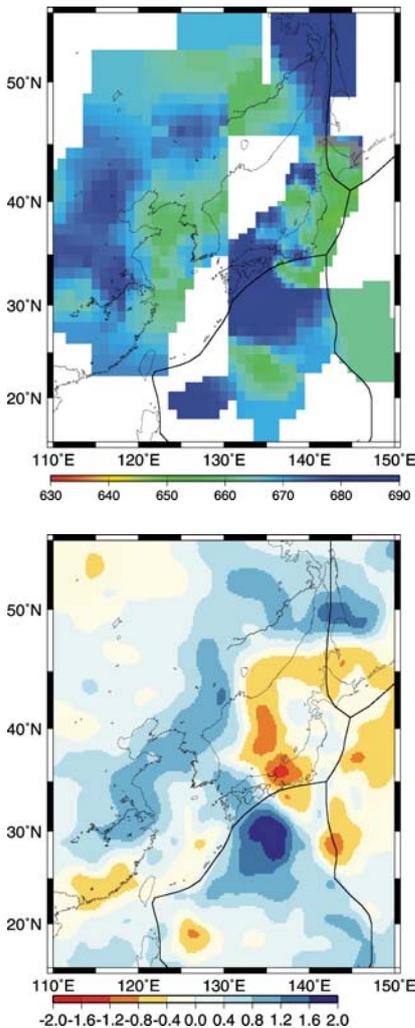


図2 660km不連続面の深さ分布(上)とP波速度分布(下)

(3) マントル不連続面

フィリピン海のBBOBデータ、中国と極東ロシアの広帯域観測点の波形データを用いてレスナー関数解析をおこない、410, 660km不連続面の凹凸を求めた。マントル遷移層内にスラブが横たわっているところでは660km不連続面は680-695kmと深いが、その周辺域では660-670kmと全地球平均値に近いことがわかった(図2上)。この深さとP波トモグラフィーで求められたP波速度異常(図2下)から、鉍物の高圧実験の結果を用いて滞留スラブの温度と水含有率を求めた。その結果、滞留スラブ内部では300-500度程度周囲よりも低温であり、水はほとんど含んでいないことがわかった。また、中国の下の滞留スラブでは660km不連続面の下700-750kmに別の不連続面があることが分かった。これはスラブ内部のガーネット成分がペロブスカイトに相転移しているものだと考えられる。

(4) S-P走時トモグラフィー

Vp/Vs比は鉍物物理分野によって速度異常の成因により異なる値をとることが知られており、速度異常の成因を議論するのに有効なパラメータである。Vp/Vs比トモグラフィーモデルの構築に必要な短周期S-P走時差測定手法を開発し、Vp/Vs比を直接のモデルパラメータとしたトモグラフィー手法の開発を行い、世界で初めてデータから直接、Vp/Vs比のグローバル3次元モデルを求めた。沈み込むスラブを含むマントルのほとんどの場所で、速度異常は温度異常により説明できることがわかった。

(5) 西太平洋沈み込み帯のマントル異方性 防災科研 Hinet 傾斜計データのScS波スプリ

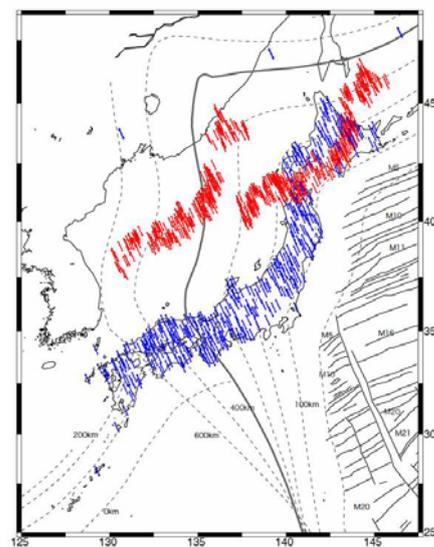


図3 スラブ内部のScS波異方性分布

ッティング解析から、日本列島のマントル異方性分布を明らかにした。マントルウェッジでは火山フロントの海側ではスラブ沈み込みに直交する方向に速く、フロントの陸側では沈み込み方向に平行する方向に速い。また、沈み込むスラブ内部では、海嶺でのプレート拡大軸に平行に速い異方性があることがわかった(図3)。これはプレート生成時にできたオリビン選択配向が沈み込んだスラブ内部でも保存されていることを示している。一方、マントル遷移層に滞留している部分のスラブにはそのような明瞭な異方性パターンは見られなかった。これは、410km付近で起きているオリビンワズレイト相転移に伴うオリビン細粒化と変形によって結晶の選択配向がくずれ、系統的な異方性を持たなくなったことを示している。

(6) 下部マントル反射面

Hinetデータを用いたP波後続波のアレイ解析により、マリアナ下部マントルでの地震波反射面の位置決定を行った。深さは700-950kmに分布し、下部マントルに沈み込むスラブ内部だけでなく、外部にも反射面が存在することが分かった。この反射面はスラブから剥離して沈み込む海洋性地殻である可能性があるが、それを確かめるためには今後反射面の性質をより詳細に推定することが必要である。

(7) コアーマントル境界付近の低速度異常

長周期S波波形インバージョン法によって求められた全マントルS波速度分布から、太平洋のコアーマントル境界から地表まで低速度異常が分布していることがわかった。これはマントル上昇流をあらわしていると考えられる。また、西太平洋のコアーマントル境界に反射点を持つScS波の走時解析から、低速度異常がこの地域下のコアーマントル境界付近に存在することがわかった。低速度異常の境界は非常にシャープであり、化学組成が周囲と異なることを示している。

(8) データセンターの運営

本特定領域研究の計画研究で実施された地震観測による地震波形データを収集・品質管理し、研究参加者が利用できるようなためのデータセンターを立ち上げ、運営を行った。特定領域研究終了後は、参加研究者による一定の優先使用期間の後に一般に公開する予定である。

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23件)

1. Obayashi, M., J. Yoshimitsu, Y. Fukao, Tearing of stagnant slab, *Science*, 324, 1173-1175, 2009

(査読有) .

2. Tanaka, S., D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, T. Kanazawa, Y. Fukao, G. Barruol, D. Reymond, The vertical extent of the large low shear velocity province beneath the South Pacific Superswell, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07305, doi:10.1029/2009GL037568, 2009 (査読有) .

3. Tono, Y., Y. Fukao, T. Kunugi, S. Tsuboi, Seismic anisotropy of the Pacific slab and mantle wedge, beneath the Japanese islands, *J. Geophys. Res.*, 2009, in press (査読有) .

4. Fukao, Y., M. Obayashi, T. Nakakuki, Deep slab project group, Stagnant slab: A review, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2009, in press (査読有)

5. Takeuchi, N., A low-velocity conduit throughout the mantle in the robust component of a tomography model, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07306, doi:10.1029/2009GL037590, 2009 (査読有) .

6. 竹内 希, 非対称グローバル地球モデルに対する理論波形計算手法～トモグラフィーに応用された手法を中心に～、*地震* 2, 2009、印刷中 (査読有)

7. Tanaka, S., D. Suetsugu, M. Obayashi, H. Shiobara, H. Sugioka, Y. Fukao, T. Kanazawa, G. Burruol, P-wave tomography of the mantle beneath the South Pacific Superswell revealed by joint ocean floor and islands broadband seismic experiments, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 172, 268-277, 2008 (査読有) .

8. Tanaka, S., Possibility of a low P-wave velocity layer in the outermost core from global SmKS waveforms, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 259, 486-499, 2007 (査読有) .

9. Takeuchi, N., Extent of the low-velocity region in the lowermost mantle beneath the western Pacific detected by the Vietnamese broadband seismograph array, *Geophys. Res. Lett.*, 35, doi:10.1029/2008GL033197, 2008 (査読有) .

10. Takeuchi, N., Whole mantle SH velocity model constrained by waveform inversion based on three-dimensional Born kernels, *Geophys. J. Int.*, 169, 1153-1163, 2007 (査読有) .

11. Obayashi, M., Sugioka, H., Y. Fukao, High temperature anomalies oceanward of subducting slabs at the 410-km discontinuity, *Earth Planet. Sci., Lett.*, 243, 149-158, 2007 (査読有) .

12. Suetsugu, D., T. Inoue, A. Yamada, M. Obayashi, D. Zhao, Towards mapping the three-dimensional distribution of water in the transition zone from P-velocity tomography and 660-km discontinuity depths, *AGU monograph "Earth's Deep Water Cycle"*, 167, 237-249, 2006 (査読有) .

13. Suetsugu, D., H. Shiobara, H. Sugioka, T. Kanazawa, Y. Fukao, Topography of the mantle discontinuities beneath the South Pacific

superswell as inferred from broadband waveforms on seafloor, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 160, 310-318, 2007 (査読有) .

14. Isse, T., K. Yoshizawa, H. Shiobara, M. Shinohara, K. Nakahigashi, K. Mochizuki, H. Sugioka, D. Suetsugu, S. Oki, T. Kanazawa, K. Suyehiro, Y. Fukao, 3-D shear wave structure beneath the Philippine Sea from land and ocean bottom broadband seismograms, *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JB003750, 2006 (査読有) .

15. Isse, T., K. Yoshizawa, D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, T. Kanazawa, Y. Fukao, Shear wave speed structure beneath the South Pacific superswell using broadband data from ocean floor and islands, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL026872, 2006 (査読有) .

16. Ichiki, M., K. Baba, M. Obayashi, H. Utada, Water content and geotherm in the upper mantle above the stagnant slab: Interpretation of electrical conductivity and seismic P-wave velocity models, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 155, 1-15, 2006 (査読有) .

17. Niu, F., A. Levander, S. Ham, M. Obayashi, Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi-net receiver functions, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 239, 9-17, 2005 (査読有) .

18. Suetsugu, D., M. Shinohara, E. Araki, T. Kanazawa, K. Suyehiro, T. Yamada, K. Nakahigashi, H. Shiobara, H. Sugioka, K. Kawai, Y. Fukao, Mantle discontinuity depths beneath the west Philippine basin from receiver function analysis of deep-sea borehole and seafloor broadband waveforms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95, doi: 10.1785/0120040169, 2005 (査読有) .

19. Kawai, K., N. Takeuchi, R.J. Geller, Complete synthetic seismograms up to 2 Hz for transversely isotropic spherically symmetric media, *Geophys. J. Int.*, 164, 411-424, 2006 (査読有) .

20. Ji, C., S. Tsuboi, D. Komatitsch, J. Tromp, Rayleigh-wave multipathing along the west coast of North America, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95, 2125-2135, 2005 (査読有) .

21. Gorvatov, A., Y. Fukao, Tomographic search for missing link between the remnant Farallon slab and present day plate subduction, *Geophys. J. Int.*, 160, 849-854, 2005 (査読有) .

22. Tono, Y., T. Kunugi, Y. Fukao, S. Tsuboi, K. Kanjo, K. Kasahara, Mapping of the 410- and 660-km discontinuities beneath the Japanese islands, *J. Geophys. Res.*, 110, doi: 10.1029/2004JB003194, 2005 (査読有) .

23. Kuge, K., Y. Fukao, High-velocity lid of East Antarctica: Evidence of a depleted continental lithosphere, *J. Geophys. Res.*, 110, doi: 10.1029/2004JB003382, 2005 (査読有) .

[学会発表] (計 24 件)

1. Takeuchi, N., Depth and Sharpness Variation of the D" Discontinuity at the Border of Lower and Higher Velocity Regions, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008/11/25, つくば国際会議場.

2. Takeuchi, N., The extent of the Pacific Low Velocity Province in the lowermost mantle constrained by global and regional data, AOGS2008, 2008/6/20, Busan Exhibition & Convention Centre, Korea.

3. Obayashi, M., Slab tearing to be stagnant, AGU 2008 Fall Meeting, 2008/12/15, Moscone Center, San Francisco, USA.

4. 坪井 誠司, Adjoint法による日本列島下の構造に対する finite frequency kernel の計算、2008年度日本地球惑星科学連合大会、2008/5/27、幕張国際会議場.

5. 末次 大輔、2005-2007年フィリピン海BBS観測によるスタグナントスラブ内外のマンテル不連続面深さの推定、2008年度日本地球惑星科学連合大会、2008/5/26、幕張国際会議場.

6. 坪井 誠司, 広帯域地震波形データのXMLスキーマとデータセンターポータルの開発、2008年度日本地球惑星科学連合大会、2008/5/26、幕張国際会議場.

7. Suetsugu, D., Mantle discontinuity depths beneath the Russian Far East as determined by Japan-Russia cooperative broadband network, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008/11/25, つくば国際会議場.

8. Tanaka, S., P-wave tomography of the mantle beneath the South Pacific Superswell revealed by joint ocean floor and islands broadband seismic experiments, SEDI2008 Meeting, 2008/7/28, 金龍飯店 (中国・昆明).

9. Tanaka, S., S-wave velocity structure beneath the South Pacific Superswell derived from passive seismic experiments, AGU 2008 Fall Meeting, 2008/12/15, Moscone Center, San Francisco, USA.

10. Suetsugu, D., Seismic reflectors in the lower mantle beneath the Mariana subduction zone, 2007 IUGG General Assembly, 2007/7/6, Perugia Univ., Italy.

11. Suetsugu, D., The mantle discontinuity depths in the stagnant Pacific slab beneath the Philippine Sea, 2007 IUGG General Assembly, 2007/7/6, Perugia Univ., Italy.

12. 末次 大輔、マリアナの下部マンテルにおける地震波反射面、2007年度日本地球惑星科学連合大会、2007/5/24、幕張国際会議場.

13. 東野 陽子、東アジア下におけるマンテル異方性 2007年度日本地球惑星科学連合大

会、2007/5/24、幕張国際会議場。

14. 石原 靖、南西諸島で発生するとても低い周波地震、2007年度日本地球惑星科学連合大会、2007/5/24、幕張国際会議場。

15. 坪井 誠司、スタグナントスラブに対する理論波形について、2007年度日本地震学会秋季大会、2007/10/24、東北大学、仙台。

16. 東野 陽子、回折P波を用いた核マントル境界上のP波速度構造推定、2007年度日本地震学会秋季大会、2007/10/24、東北大学、仙台。

17. Obayashi, M., Stagnant slab configuration in the vicinity of the 660-km discontinuity, 2007 IUGG General Assembly, 2007/7/6, Perugia, Italy.

18. Suetsugu, D., S-wave travel time anomalies by the Izu-Bonin stagnant slab, 2006年度日本地球惑星科学連合大会、2006/5/15、幕張国際会議場。

19. Suetsugu, D., Determination of mantle discontinuity depths beneath the South Pacific superswell as inferred using data from broadband OBS array, 2005 AGU Fall Meeting, 2005/12/6, Moscone Center, Sac Francisco, USA.

20. Obayashi, M., High temperature and hydrous melt oceanward of subducting slabs at the 410-km discontinuity, 2006年度日本地球惑星科学連合大会、2006/5/15、幕張国際会議場。

21. Tono, Y., Mantle anisotropy beneath the Japanese islands, 2006年度日本地球惑星科学連合大会、2006/5/15、幕張国際会議場。

22. 坪井 誠司、不連続面の形状を考慮した理論地震波形記録の計算について、2006年度日本地球惑星科学連合大会、2006/5/16、幕張国際会議場。

23. 石原 靖、低周波微動のスペクトル変動の検出の試み、2006年度日本地球惑星科学連合大会、2006/5/17、幕張国際会議場。

24. 石原 靖、テレメータ化された海半球ネットワークによる地震イベントの検出能力、2006年度日本地球惑星科学連合大会、2006/5/17、幕張国際会議場。

〔図書〕(計1件)

1. 阪口 秀、草野 完也、末次 大輔、階層構造の科学、東京大学出版会、227p、2008。

〔その他〕

ホームページ等

<http://ohp-ju.eri.u-tokyo.ac.jp/tokutei/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末次 大輔 (SUETSUGU DAISUKE)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・グループリーダー

研究者番号：20359178

(2) 研究分担者

東野 陽子 (TONO YOKO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・研究員

研究者番号：90359183

山田 功夫 (YAMADA ISAO)

名古屋大学・環境学研究科地震火山防災研究センター・教授

研究者番号：1390189920

(3) 連携研究者

深尾 良夫 (FUKAO YOSHIO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・センター長

研究者番号：10022708

坪井 誠司 (TSUBOI SEIJI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・プログラムディレクター

研究者番号：90183871

大林 政行 (OBAYASHI MASAYUKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・主任研究員

研究者番号：30359179

竹内 希 (TAKEUCHI NOZOMU)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：90313048

石原 靖 (ISHIHARA YASUSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究主任

研究者番号：40232334

田中 聡 (TANAKA SATORU)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・主任研究員

研究者番号：60281961

吉光 淳子 (YOSHIMITSU JUNKO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・研究推進スタッフ

研究者番号：70392941