

平成30年6月5日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26282105

研究課題名(和文)島の強震動と津波：地形と海を含む3次元構造モデルに基づくシームレスな予測の実現

研究課題名(英文)Studies on prediction of strong ground motion and tsunamis for islands

研究代表者

竹中 博士 (TAKENAKA, Hiroshi)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：30253397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：現在立ち遅れている島の強震動と津波の予測の高精度化を図るため、南西諸島を例として以下の3つのテーマについて研究し、成果を得た。我々が先に構築した陸海地形及び地盤から沈み込む海洋スラブまでを含む南西諸島の地下構造モデル暫定版の改良を図った(サブテーマ1)。次に3次元地下構造モデルを用いて、地震動・地殻変動・津波を統合的にシミュレーションするシステム(サブテーマ2)を実現し、地震発生に伴う一連の現象について、シームレスに予測することが可能となった。さらに、遠地実体波記録を用いて南西諸島域で発生する中規模以上の地震の震源を高精度で決定するシステム(サブテーマ3)を実現し、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：We have studied three main subjects on prediction of strong ground motion and tsunamis for the Ryukyu Islands as typical examples of islands in Japan. First, we have improved the subsurface structure models including near-surface layers. Secondly, we have implemented an integrated system to continuously simulate seismic motion, quasi-static crustal deformation and tsunami due to a sub-oceanic earthquake, and confirmed the stable performance by applying it to a number of past events which occurred around the Ryukyu Islands. Thirdly, we have realized a precise hypocenter location system based on "waveform relocation technique" which combines a teleseismic inversion of source parameters with a grid search procedure to correct possible systematic bias in hypocentral parameters using 2.5-D Green's functions for a 2-D slice from the realistic 3-D heterogeneous structure model. We have also demonstrated the effectiveness of this system by applying it to middle-sized events.

研究分野：地震学

キーワード：地震動 津波 南西諸島 強震動予測 地震防災

1. 研究開始当初の背景

我が国は6千以上の島からなり、島嶼部性(単位面積に占める海岸線の距離の比率)でフィリピンに次いで世界第2位である。この島嶼部性という数値は国土に島や半島が多いと大きくなる。しかし、地震の揺れを評価する強震動予測においては残念ながら島嶼部の地理的特性、すなわち陸上地形・海底地形はもちろん海が存在すら考慮されていない。強震動予測はどうしても人口の多い平野部を優先してなされてきたためであろう。そこで、我々は2011年~2013年の3年間、立ち遅れている島の強震動予測の高精度化を図ることを目的とし、海洋に囲まれた地域において海水、海底地形・陸上地形と地下構造が強震動生成に及ぼす効果を解明する新たな試みとして、南西諸島を例として、各島の地盤から沈み込む海洋スラブまで含む広域の3次元地下構造モデル暫定版を構築し、地形と海が扱える独自の地震動シミュレーション手法を用いて島特有の効果の検討を行った。その結果、分かったことは、海水、海陸地形そして地下構造が強震動生成に及ぼす総合的な効果の重要性である。例えば、実際の記録に共通に見られる長い振動継続時間は、堆積層だけではなく海底地形や陸地形を入れたモデルでないと再現されない。浅部を伝播する強烈な地震動の複雑なパターンは海水・海底地形・陸地形とその下の地下構造が互いに影響して生じており、これが長く続く振動を引き起こしている。

2. 研究の目的

上述の先の成果を実際の防災に役立てるための次のステップとして、3次元構造モデル暫定版の改良を図るとともに、そのモデルに基づいた以下の2つのシステムを実現する。ひとつは巨大地震における地震動・地殻変動・津波の統合予測システムであり、もうひとつは、遠地実体波記録を用いて南西諸島域で発生する中規模以上の地震の震源を高精度で決定するシステムである。

3. 研究の方法

本研究課題は、南西諸島を対象にした以下の3つのサブテーマから構成され、期間4年間で実施した。
 サブテーマ1: 3次元構造モデルの高度化
 サブテーマ2: 地震動・地殻変動・津波の統合予測システムの実現
 サブテーマ3: 遠地実体波の2.5次元モデリングを用いた高精度震源決定システムの実現

4. 研究成果

以下、各サブテーマの主な成果を記す。

(1) サブテーマ1

図1に示す南西諸島の各島での深部地盤構造探査を目的とした微動アレイ探査を実施し、S波速度構造の解明を行った。本研究課

題遂行期間(2014~2017年度)に本課題開始前の2014年度以前からの探査の蓄積を加えて計48地点において微動アレイ探査を実施し、各地点の1次元S波速度構造を明らかにした。この中には、大東諸島やトカラ列島のようにこれまで地震動に関する調査が全くなされていない島もあり、大半が世界初のS波速度構造探査ともなっている。

南西諸島島嶼部の速度構造は、地震基盤とその上の3層構造で概ねモデル化(微動アレイ観測で算出された位相速度を説明できる地下構造モデル)できることが分かった。また、3次元での数値モデル構築を視野に入れて、各地域の平均的なVs値の算出も行った。その結果、例えば、沖縄島周辺は表1a、先島諸島周辺は表1bのようになった。両者の間は300km程度離れているが、層数は同じとなり、また、各層のS波速度値も大きく変わらないことが分かった。従って、広大な南西諸島地域全体について、地震基盤と3層構造でモデル化することが1つの方向性である。

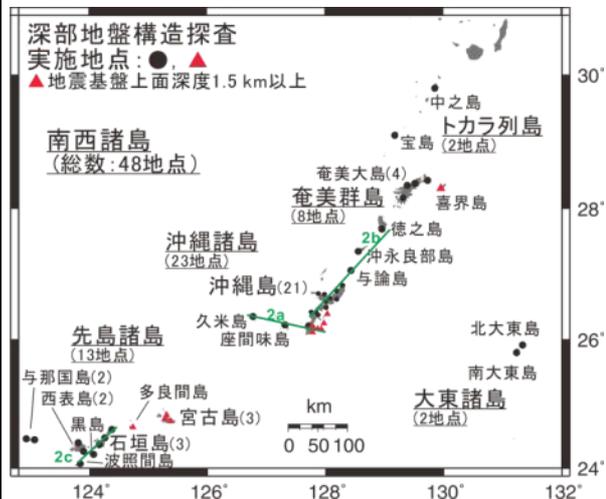


図1 深部地盤構造探査地点(S波速度構造を明らかにした地点)

表1 Vsの平均値

a 沖縄諸島周辺		b 先島諸島周辺	
layer	Vs (km/s)	Layer	Vs (km/s)
1	0.72	1	0.69
2	1.12	2	1.08
3	2.03	3	1.74
4	3.49	4	3.44

比較的近い位置関係にある地点を並べたものを図2に示す(図番号と測線番号を対応させている)。これは、Vs値を平均値に固定して、層境界のみを変動パラメータとして逆解析を行ったものである。測線2aは、琉球海溝に直交する測線に相当するが、基盤深度は西側で浅く(500~600m程度)、東側で深い傾向にあり、東に傾斜した構造になっており、基盤深度は2000mを越える。この傾向は重力異常の変化傾向や数少ない資源調査ボーリングの情報とも整合する。測線2bは、琉球海溝に平行な測線であるが、いずれの地

点も基盤深度は概ね 500~600 m 程度で、各層境界深度の変化は小さい。測線 2a の西側の地点と測線 2a の基盤深度は概ね同じである。また、測線 2c は、八重山諸島の層境界深度を示し、地点間距離は小さいが、深度変化が大きい。地質構造も変化の大きい地域であり、それとの対応も見られる。

図 1 には、地震基盤の深度 1.5 km であった地点を（赤）で示した。沖縄島南東部や宮古諸島の地点がそれに対応し、ある程度集まっており、空間的に地震基盤までが深い領域がまとまっている。特異点として、喜界島が挙げられ、隣接する奄美大島とはまったく速度構造の様相は異なる。このように面積的には僅かではかない島嶼部ではあるが、地盤構造の面的な傾向をみてとることができる。

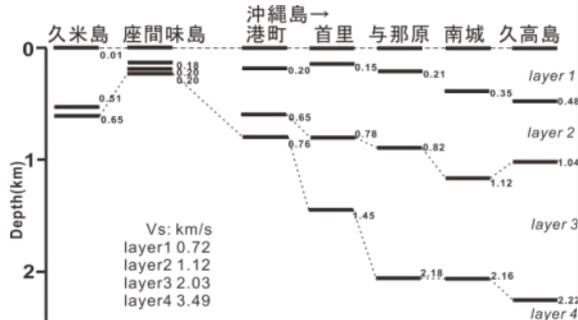


図 2a. 測線 2a の層境界深度

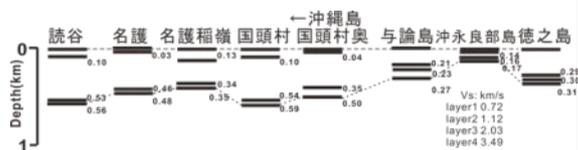


図 2b. 測線 2b の層境界深度

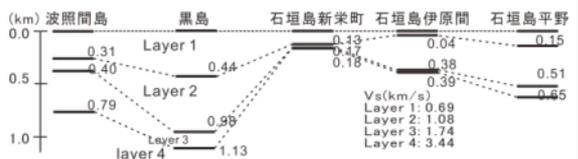


図 2c. 測線 2c の層境界深度

(2) サブテーマ 2

現実的な地下構造モデルを用いて、地震動・地殻変動・津波を統合的にシミュレーションするシステムを実現した。このシステムは、地震動・地殻変動シミュレーションコード (Nakamura et al., 2012, BSSA、または Takenaka et al., 2017, EPS) と津波シミュレーションコード (Nakamura and Baba, 2016, Marine Tech. Soc. J.) で構成され、入出力ファイルを通して、連成したシミュレーションが可能である。津波シミュレーションでは、差分格子以下の水深地点での波高評価や、地震動継続時間を大きく超える時間ステップでのシミュレーションが可能である。各コードは計算機の構成に合わせて最適化され、従来の各コードと比べて効率的にシミュレーションを行うことができる (Nakamura et al., 2015, Sci. Rep.)。このシステムを用いて、南西諸島周辺の海域において過去に発生

した中～大規模地震およびプレート境界で想定される大規模地震を対象に、地震動・地殻変動・津波の統合シミュレーションを行った。計算領域は、奄美諸島を中心としたブロック A、沖縄本島を中心としたブロック B、先島諸島を中心としたブロック C の 3 海域に分け、それぞれの海域のブロックについて行った。各ブロックでの地震動・地殻変動シミュレーションでは、陸上・海底地形と海水を含む 3 次元地下構造モデルを用い、島嶼部に設置された地震観測点における地震動や海底の地殻変動量の推定を行った。3 次元構造地下構造モデルでは、フィリピン海プレートの形状や地盤構造、さらに構造の各層における粘性の効果も取り入れた。津波シミュレーションでは、地震動・地殻変動シミュレーションで得た地殻変動分布結果を基に、島嶼部

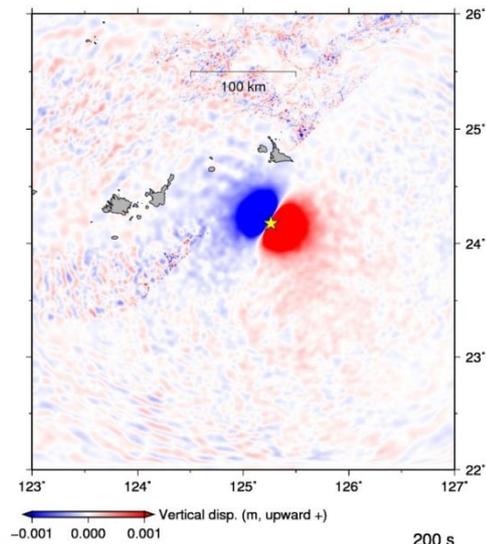


図 3 . 統合計算による海底の地殻変動分布

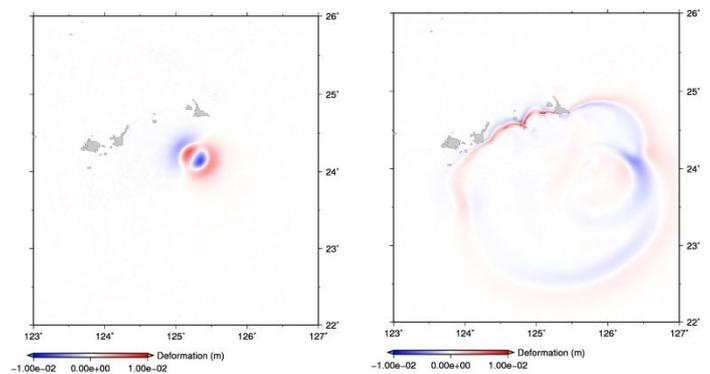


図 4. 統合計算による津波伝播のスナップショット

における津波伝播や沿岸波高の推定を行った。図 3 に地殻変動 (上下動)、図 4 に津波伝播のシミュレーション結果の例を示す。この例では、2009 年 8 月 5 日に先島諸島付近 (ブロック C 内) で発生した Mw 6.1、深さ 35 km の地震を対象としている。先島諸島付近で地震が発生後、震源直上の海底において、地殻変動による残留変位分布が見られ (図

3) 海底での変位によって津波が発生し、地震発生から数100秒後に先島諸島の沿岸に最大波が到来し、その後、反射や回折などによる後続波が到来している様子が分かる(図4)。

次に、ブロックAとブロックBにまたがる領域(図5)における地震動シミュレーションの例を示す。2004年7月に沖縄本島東沖で発生した M_w 6.1の地震を設定した。震源の深さは海洋性地殻内の深さ15kmに仮定した。震源時間関数はパルス幅3.548秒のベル型とし、領域の格子間隔は100mで、80秒間の地震波形を計算した。地下構造モデルは、島嶼部で地盤が薄く、前弧側で厚い堆積層に覆われている。計算された地震波が海底・地表を伝播する様子を図6に示す。この図には、島嶼部に比べて前弧側で波が卓越しており、前弧側の厚い堆積層の影響が反映している。

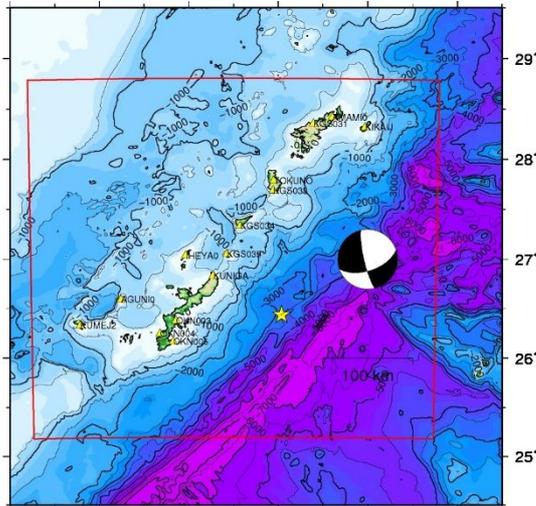


図5. 計算領域(赤線の範囲)。星は震央, 三角は観測点。対象地震の震源メカニズムを表す。

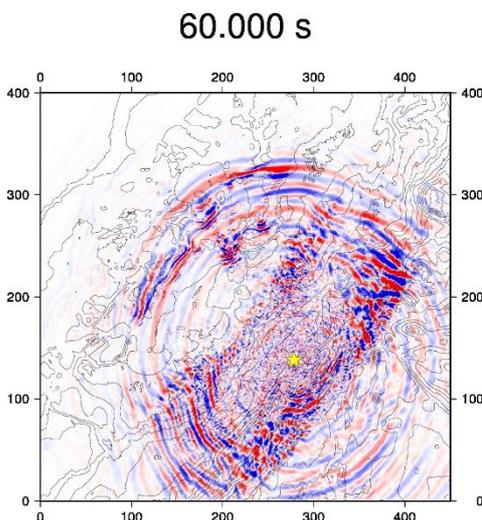


図6. 海底・地表の地震動東西成分(発震時より60秒後)。星印は震央, 黒線は等深度線。

同様のシミュレーションを全てのブロックにおいて複数の地震のケースで実施し、点

震源および断層震源による地震動から地殻変動、津波の発生・伝播・収束まで、計算が安定していることを確認した。これで、地震発生に伴う一連の現象について、開発したシステム上でシームレスに予測することが可能となった。このシステムは、南西諸島に限らず他の島嶼部における予測評価においても活用が期待できる。

(3) サブテーマ3

遠地実体波記録を用いて南西諸島域で発生する中規模以上の地震の震源を高精度で決定するシステムを実現した。それを奄美大島周辺地域に適用した例を以下に示す。

奄美大島周辺の地域では1995年奄美大島近海地震(M_{JMA} 6.9)を始めとして $M5\sim7$ 程度の地震がたびたび発生している(図7)。そこでサブテーマ3の対象として奄美大島周辺を選択して解析を実施した。以下に実際の解析例を用いて震源決定システムの概要を示す。

2.5次元構造モデル 南西諸島3次元構造モデルを構成する境界面形状データから1995年奄美大島近海地震付近を通る鉛直断面に沿う境界位置情報を切り出し、そのデータを編集することによって、2.5次元波形計算用の構造モデルを作成した(図8)。

2.5次元差分法計算 震源付近の不均質地球内部構造(図8)の効果を取り入れるために23個のグローバルな遠地観測点について、遠地実体波波形(P波波形)を合成するための2.5次元差分法計算を実施した。

解析対象地震 1995年10月18日(M_{JMA} 6.9)と2017年7月26日(M_{JMA} 5.8)の地震を選択し(図7)、遠地実体波波形データを収集した。それらの原記録データを上下動変位成分(5-50秒バンドパス)に変換して逆問題解析用のデータとした。

逆問題解析+格子探索 本研究のシステムでは波形を用いた非線型逆問題解析によって点震源の震源時間関数とモーメン

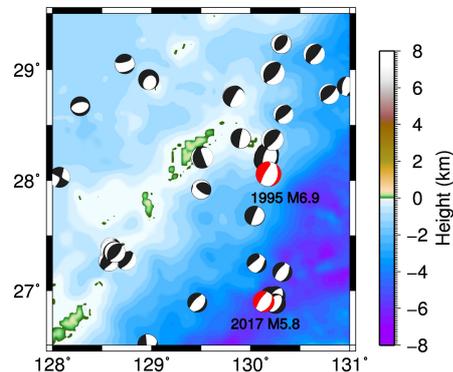


図7. 1995年~2017年のグローバルCMT解(M_w 5.5、深さ50km)。解析例としたイベントを赤色で描いた。

トテンソルを同時に推定する。さらに対

象領域内での格子探索により最適震源位置を推定する。なお 2017 年イベントは図 8 の構造モデル断面からやや離れているのでメカニズムを GCMT 解に固定して解析した。

解析結果 図 8 に最適震源位置を、図 9 に 1995 年イベントの解析結果を示す。1995 年イベントの最適震源深さは 10 km であり、テクトニクス的には上盤側プレート内部の地震であると言える(図 8)。この地震の気象庁深さは 38.5 km、PDE は 27.0 km、GCMT は 18.5 km と深い震源が推定されており、これらはテクトニクス的な位置付けに不明瞭さが残るものであった。このように、本解析システムの高精度震源決定によって震源時間関数やモーメントテンソルを決定できるだけでなく、海域の地震のテクトニクス的な位置付けが明瞭にできる場合があるという意義を確認することができた。

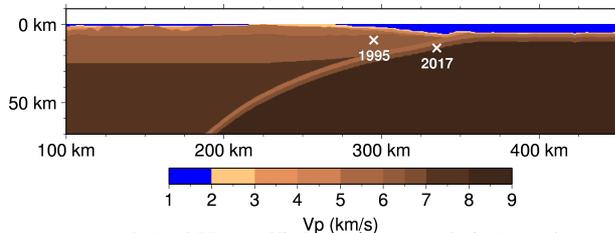


図 8 . 2.5 次元計算用の構造モデル (P 波速度)。本研究で推定した各震源の深さも × マークで示した。

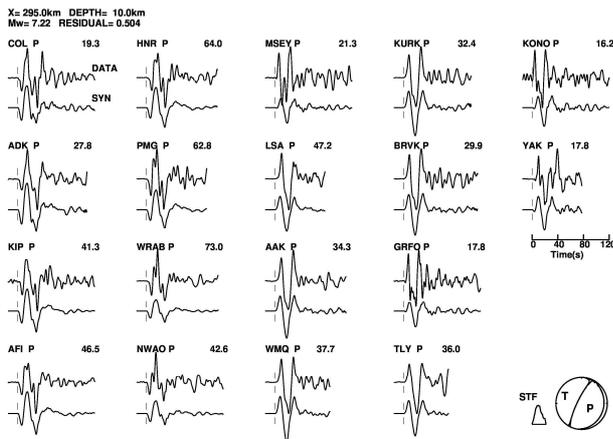


図 9 . 1995 年 10 月 18 日の逆問題解析結果。各波形ペアの上側 (DATA) は観測上下動変位波形、下側 (SYN) は計算波形。右下には推定された震源時間関数 (STF) とモーメントテンソル解を示した。

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 7 件)

山田伸之・竹中博士, 先島諸島 (宮古諸島・八重山諸島) 島嶼部における深部地盤 S 波速度構造, 日本地震工学会論文集, 18(1), 77-88, DOI:10.5610/jaee.18.1_77, 2018, 査読有。

Toyokuni, G., H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono, Numerical

modeling of seismic waves for estimating the influence of the Greenland ice sheet on observed seismograms, Polar Science, 9, 80-93, DOI:10.1016/j.polar.2014.12.001, 2018, 査読有。

Komatsu M., H. Takenaka, and H. Oda, Three-dimensional P- and S-wave attenuation structures around the source region of the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth, Planets and Space, 69, DOI:10.1186/s40623-017-0683-6, 2017, 査読有。

Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura and T. Hara, FDM simulation of earthquakes off western Kyushu, Japan, using a land-ocean unified 3D structure model, Earth, Planets and Space, 69, DOI:10.1186/s40623-017-0672-9, 2017, 査読有。

Takenaka, H., M. Komatsu, G. Toyokuni, T. Nakamura, and T. Okamoto, Quasi-Cartesian finite-difference computation of seismic wave propagation for a three-dimensional sub-global model, Earth, Planets and Space, 69, doi:10.1186/s40623-017-0651-1, 2017, 査読有。

小松正直・竹中博士, 焼きなまし法による初動発震機構解の決定, 岡山大学地球科学研究報告, 22(1), 9-23, DOI:10.18926/ESR/54116, 2015, 査読無。

[学会発表](計 33 件)

Nakamura, T., W. Suzuki, N. Yamamoto, H. Kimura, and N. Takahashi, A rapid calculation system for tsunami propagation in Japan by using the AQUA-MT/CMT solutions, American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans (USA), 2017 年 12 月 12 日。

山田伸之・竹中博士, 北大東島における深部地盤 S 波速度構造, 物理探査学会第 137 回学術講演会, 241-244, 東京工業大学 (横浜市), 2017 年 11 月 8 日。

邱 冬晨・小松正直・豊国源知・竹中博士, 南西諸島における連続地動記録を用いた雑微動の相互相関解析, S06-P16, 日本地震学会 2017 年秋季大会, かがしま県民交流センター (鹿児島市), 2017 年 10 月 26 日。

山田伸之・竹中博士, 吐カラ喇 (トカラ) 列島 中之島および宝島の深部地盤 S 波速度構造, S16-P04, 日本地震学会 2017 年度秋季大会, かがしま県民交流センター (鹿児島市), 2017 年 10 月 26 日。

竹中博士・小松正直・小田 仁 地震波減衰トモグラフィから見る 2016 年熊

本地震震源域下の流体分布,日本第四紀学会
2017年大会,福岡大学(福岡市),2017年8
月28日.

Komatsu, M., H. Takenaka,
Three-dimensional P- and S-wave
attenuation tomography in the Ryukyu Arc,
Japan, J08-P-15, the Joint Scientific
Assembly of the IAG-IASPE 2017, 神戸国際
会議場(神戸市), 2017年8月3-4日.

Usami, T., M. Komatsu, H. Takenaka,
Early rupture process of the 2016 Kumamoto
earthquake inferred from source imaging,
S13-P-10, the Joint Scientific Assembly of
the IAG-IASPE 2017, 神戸国際会議場(神戸
市), 2017年8月3-4日.

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi,
M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs,
and D. Zhao, Seismology reveals ice sheet
basal conditions, J01-1-03, the Joint
Scientific Assembly of the IAG-IASPE 2017,
神戸国際会議場(神戸市), 2017年8月2日.

Yamada, N., H. Takenaka and M. Komatsu,
S-wave structure in the Nansei Islands,
Japan, inferred from microtremor array
explorations, S07-P-20, the Joint
Scientific Assembly of the IAG-IASPE, 神
戸国際会議場(神戸市), 2017年8月1-2日.

Okamoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura,
T. Hara, FDM Simulation of The 2016 West
Off Satsuma Peninsula, Kyushu, Japan,
Earthquakes by Using Land-Ocean Unified 3D
Structure Model, American Geophysical
Union Fall Meeting 2016, San Francisco
(USA), 2016年12月16日.

Murakoshi T., H. Takenaka, M. Komatsu,
N. Yamada, Seismic Imaging of Receiver
Functions at Virtual Receivers in Ryukyu
Arc, Japan, S41A-2724, American
Geophysical Union Fall Meeting 2016 (San
Francisco), December 15, 2016.

山田伸之, 竹中博士, 小松正直, 沖縄本
島における深部地盤のS波速度構造, 物理
探査学会第135回学術講演会, 216-217, 室
蘭工業大学(北海道室蘭市), 2016年10月
26日.

Nakamura, T., T. Okamoto, and H.
Takenaka, Complex seismic wavefield of
long-period components around the Nankai
trough in southwest Japan and its effect
on source mechanism analyses, American
Geophysical Union 2015 Fall Meeting, San
Francisco (USA), 2015年12月18日.

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto,
M. Otori, and S. Tsuboi, Observation and
simulation of long-period ground motions
in the Nankai Trough, southwest Japan, the
26th General Assembly of the International
Union of Geodesy and Geophysics (IUGG
2015), Prague (Czech), 2015年6月28日.

[図書](計 0件)

[産業財産権]
出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹中 博士(TAKENAKA, Hiroshi)
岡山大学・自然科学研究科・教授
研究者番号: 30253397

(2) 研究分担者

岡元 太郎(OKAMOTO, Taro)
東京工業大学・理学院・助教
研究者番号: 40270920

山田 伸之(YAMADA, Nobuyuki)
高知大学・教育研究部自然科学系理学部
門・准教授
研究者番号: 80334522

中村 武史(NAKAMURA, Takeshi)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・
地震津波火山ネットワークセンター・
主幹研究員
研究者番号: 40435847

豊国 源知(Toyokuni, Genti)
東北大学・理学研究科・助教
研究者番号: 90626871

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

村越 匠(MURAKOSHI, Takumi)
防衛大学校・応用科学群地球海洋学科・
助教

小松 正直(KOMATSU, Masanao)
岡山大学・自然科学研究科・大学院生