

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310122

研究課題名(和文)島の強震動予測：海陸分布・陸地形・海水・海底地形・地下構造の総合効果の解明と予測

研究課題名(英文)Strong-motion prediction 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) 10,800,000円、(間接経費) 3,240,000円

研究成果の概要(和文)：立ち遅れている島の地震動予測の高精度化を目指して、南西諸島の島々においてアレイ微動探査を実施し、観測地点直下の1次元深部地盤構造モデルの推定を行い、地盤構造の概要と震動特性を明らかにした。得られた深部地盤構造に加えて南西諸島周辺域のプレート形状や地殻構造に関する利用可能な情報を収集し、陸地形・海底地形と地盤から最上部マントルまでの島弧及びフィリピン海スラブを含む南西諸島全域にわたる強震動予測のための3次元地下構造数値モデルを構築した。さらに中規模地震に基づいた地震動シミュレーションを実施し、構築した陸海統合3次元地下構造数値モデルが同地域の強震動予測にとって有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Japan consists of many islands. From the point of view of disaster prevention, it is also important to improve the precision of strong ground motion prediction for the islands. The Ryukyu Islands are a typical example of such islands. In this study we build a 3D numerical structure model for modeling of strong ground motion, which includes land and ocean-bottom topographies and a seawater layer as well as subsurface structures of the arc side and the PHS slab, partially based on the existing models for near-surface structure and a slab-top depth of the PHS. We then try to improve the near-surface structure model in the islands using the microtremor surveys we conducted originally in this project. We then simulate seismic wave propagation for three sub-oceanic earthquakes which occurred near the Amami Islands, Okinawa Island and Miyako Island to confirm the applicability of the constructed structure model.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：地震動 南西諸島 強震動予測 地震防災 地下構造モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 島嶼(とうしょ)部の地震動の特徴とその重要性

我が国は6000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。現在このような島を津波から守るため詳細な海底地形や島の地形を用いた津波のシミュレーションによる検討が各地でなされている。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の存在すら考慮されていない。周囲を海に囲まれた中小規模の島嶼部では、人口の多い平野部に比べ地震動評価に関する調査研究が手薄であることは否めない。特に、S波速度(V_s) 3km/s相当層の地震基盤までの地盤構造に関わる物性値情報は不足している。島嶼部の特性を考慮した地震動の評価は、島嶼部における地震防災のために必要不可欠であり、眼下の急務である。このような島嶼部の典型的な例として、本課題では南西諸島(薩南諸島・琉球諸島)を研究対象として選んだ。

(2) なぜ南西諸島か?

南西諸島は隆起珊瑚礁の島、火成岩の島、火山島などからなり多様な震動特性が期待される。南西諸島周辺ではプレート境界地震、浅いプレート内地震、深いスラブ内地震のいずれのタイプの地震も活動度が高く、過去100年以内にM7クラスの大地震が起きている。近年に限っても広い範囲で震度3以上の揺れを観測するような中規模以上の地震が頻繁に起きており強震記録が比較的豊富である。また、喜界島ではM8クラスの巨大地震が想定されている。従来プレート間カップリングが弱く巨大地震発生の可能性は低いと考えられてきた八重山諸島付近(琉球海溝西部)でも浅部で超低周波地震、やや深部においてスロースリップが発生していることから固着している可能性が高いことが指摘されている。

2. 研究の目的

本研究課題では、現在立ち遅れている島の地震動予測の高精度化を図ることを目指して、海洋に囲まれた地域において海水の存在、海底地形と陸上地形そして地下構造がその地域の強震動生成に及ぼす総合的な効果(相互作用)を、南西諸島(薩南諸島・琉球諸島)をターゲット領域としてモデル化し、強震動予測に資することを目的とする。南西諸島の各地では海陸地形を含む3次元地下構造と海水の効果を考慮した地震動特性が得られるようになる。これは、対象地域はもちろん、他の島嶼部における地震動評価にとってもきわめて重要な基礎資料となり得る。

3. 研究の方法

まず、南西諸島の島々においてアレイ微動探査を実施し、観測地点直下の1次元深部地盤構造モデルの推定を行い、地盤構造の概要と震動特性を明らかにする。次に、得られた深部地盤構造に加えて南西諸島周辺域のプレート形状や地殻構造に関する利用可能な情報を収集し、陸地形・海底地形と地盤から最上部マントルまでの島弧及びフィリピン海スラブを含む南西諸島全域にわたる強震動予測のための3次元地下構造数値モデルを構築する。さらに、中規模地震に基づいた地震動シミュレーションを実施し、構築した陸海統合3次元地下構造数値モデルの有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) 微動アレイ探査(地盤構造探査)

図1に示す南端の与那国島(KBR)、波照間島(HTR)から、北端は屋久島(YAK)までの各島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波速度構造を推定した。本研究課題遂行期間の2011~2013年度と本課題開始2011年度以前からの探査の蓄積を含めて計35地点で微動アレイ探査を実施し、過半数の地点で地盤の1次元S波速度構造を明らかにした。

本報告では、図1に示す探査地点のうち、主要島の結果として、石垣島(IGK)、宮古島平良(HRR)、沖縄島那覇(MTM)、喜界島(KKI)、奄美大島笠利(KSR)の探査結果について記す。

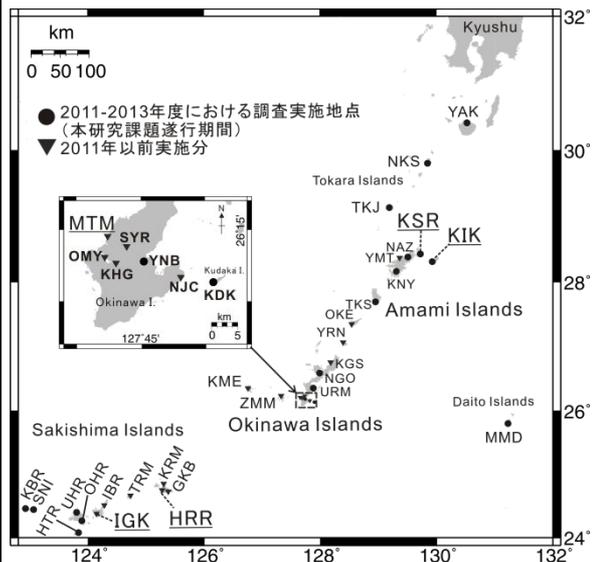


図1 深部地盤構造探査地点

常時微動のアレイ観測記録からF-K法(Capon, 1969, Proc. IEEE)を用いて求めた位相速度を図2に示す。いずれも滑らかに漸増するレイリー波の位相速度の分散曲線が得られている。その中で、HRRとKKIは位相速度の変化は緩やかであるのに対し、IGKやKSRでは傾きが急である。KKIとKSRは、わずか20km程度しか離れていないにも関わらず、変化が大きい。また、周期1s付

近の短周期帯域においては、比較的同じ値の位相速度を示した。浅部の速度構造は、離れた島間においても差異が小さい可能性がある。

なお、ここで示した代表5地点以外の島においても同様に解析に耐えうる適切な微動記録が得られており、位相速度およびS波速度構造の推定がなされている。

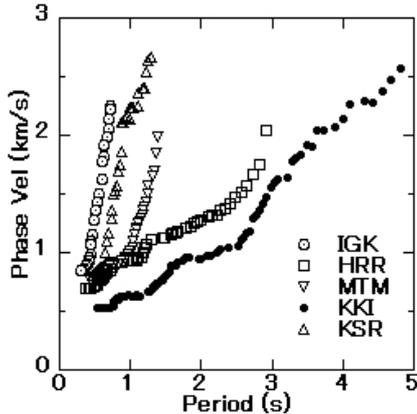


図2 5地点での微動アレイデータから得られた位相速度

こうして得られた位相速度から遺伝的アルゴリズム (Yamanaka and Ishida, 1996, BSSA) による逆解析を行い、1次元S波速度構造を推定した。なお、ここでは、地震動シミュレーションによる地震動評価を目的とした地下構造の数値モデルを作成することにもあるため、堆積層数は極力少なく仮定した。その結果を図3に示す。最下層のVsは概ね3.5 km/s前後であるが、地点ごとに層数や厚さは異なる。この5地点の中では、HRR(宮古島)の基盤上面深度が最も深く、2 kmであった。隣接する島でありながら位相速度に大きな違いがあったKKIとKSRは推定された地盤構造にも大きな差異があり、地震基盤の深さも1 kmの差があった。MTM(那覇)は各島の間中間的な速度構造が得られた。

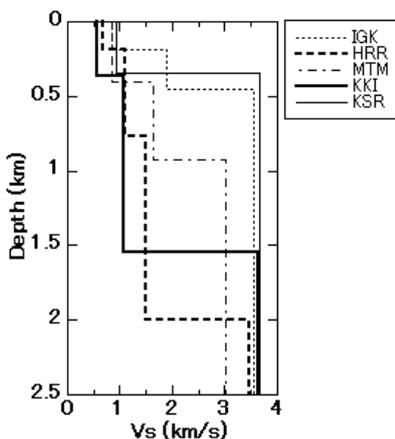


図3 5地点で得られたS波速度構造

(2) 3次元地下構造数値モデル
陸地形・海底地形と地盤から最上部マント

ルまでの島弧及びフィリピン海スラブを含む南西諸島全域(図4)にわたる地震動予測のための3次元地下構造数値モデルを構築した。使用したデータは、陸上地形:50mメッシュ標高データ(国土地理院);海底地形:JTOPO30v2(海洋情報研究センター);地盤構造:J-SHIS 深部地盤モデル(防災科学技術研究所);島弧コンラッド・島弧モホ面:Nakamura et al. (2003, JGR);PHSプレート上面深度:PHSプレート境界データ(地震調査研究推進本部)である。物性値は、深部地盤構造についてはJ-SHISの物性値を用いた。ただし、Q値については全国一次地下構造モデル(地震調査研究推進本部)のVs速度が対応する層の値を使用した。それ以外の下部地殻、マントル、海洋性地殻第二層、海洋性地殻第三層、海洋性マントルの物性値については全国一次地下構造モデルの物性値を用いた。

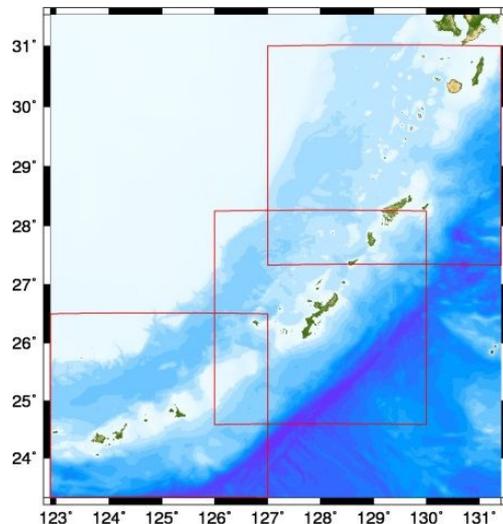


図4 陸海統合3次元地下構造数値モデル作成領域。地震動シミュレーションは3領域(赤枠)に分けて実施。

構築の過程で、我々がこれまで行ってきた微動探査の結果(1)を利用してその地盤モデルの改良を行った。改良方法は、J-SHIS深部地盤モデルの各層について上面深度が微動探査結果にできるだけ一致するように修正値を求め、観測点以外の部分は放射基底関数(radial basis function)のひとつであるmultiquadric functionを用いて補間して求めた。ただし、陸地の一部で行った微動探査の結果で観測点から大きく離れた海洋の構造まで変更されるのは望ましくないため、水深1000~2000mの部分に修正値ゼロを挿入し、遠くまで補間が行われるのを防いだ。

モデル全体を通し奄美大島が最も修正値が大きく、Vs1.7km/s層上面以降は改良前後の違いが顕著であった。Vs1.1km/s層上面については沖縄本島の西の座間味島のみが深くなり、他の地域は浅くなった。地震基盤であるVs3.1km/s層、Vs3.3km/s層上面は改良後全体的に上昇する結果となった。

Vs1.7km/s 層と Vs2.1km/s 層の上面は先島諸島周辺で改良前後の変化が大きく、1 km 以上下降した部分も見られた。改良した地盤モデルの Vs1.7km/s 層と Vs3.1km/s の上面深度(標高)を図5と図6に示す。

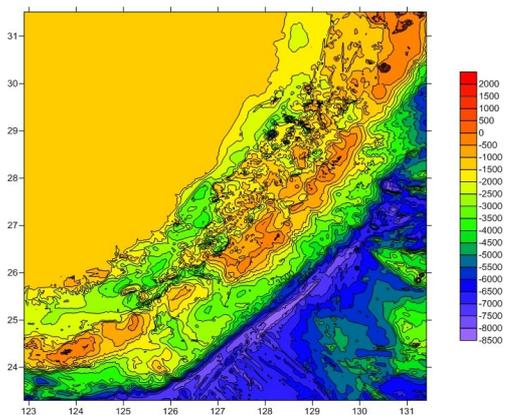


図5 Vs1.7km/s 層上面深度(標高: m)

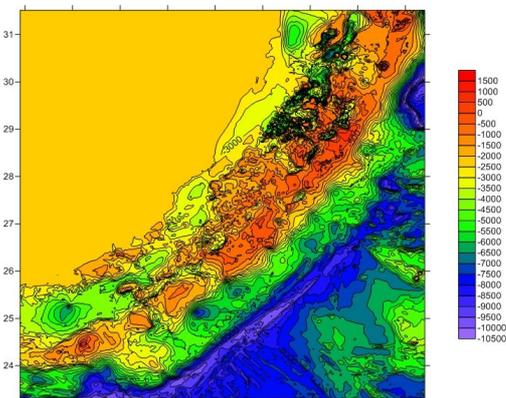


図6 Vs3.1km/s 層上面深度(標高: m)

モデル改良の効果を検討するため、改良前後のモデルについて差分法による地震動シミュレーションを行った。モデル範囲が広大なため3つの領域(奄美大島周辺、沖縄本島周辺、先島諸島周辺)に分割し(図4)それぞれの領域について実地震を基にしたシミュレーションを行った。地下構造の効果を見るのが目的であるため、中規模のイベントを選んだ。各イベントの震源メカニズムはF-netのCMTを利用した。シミュレーション後はF-net, K-NET観測点の実波形と計算波形の間で時系列波形の比較と岩盤観測点を基準とするスペクトル比の比較により地盤の改良効果を検討した。下に奄美大島周辺の例を示す(図7、図8)。イベントは2001年12月9日に奄美大島近海で発生したMj5.8(Mw6.1)の地震である。地震動の計算には、陸上地形・海底地形や海水も扱えるTakenaka et al. (2012, ACES)の地震動・津波統合シミュレーション差分法コード(地震動のみだと Nakamura et al., 2012, BSSA と等価)を用い、格子サイズ: 801 × 801 × 501; X=100 m; t=0.005 s; 震源の深さ: 36 km; 震源時間関数: 幅 3.548 s のベル型

パルスで行った。

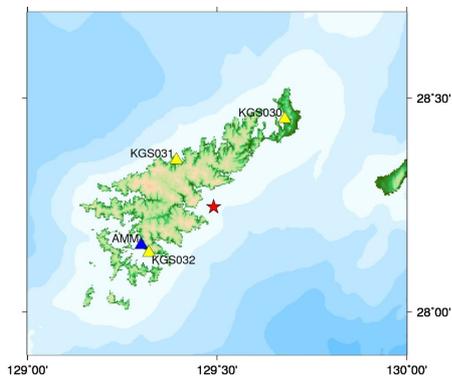


図7 奄美大島の観測点。星印は震央。青色三角: F-net; 黄色三角: K-NET

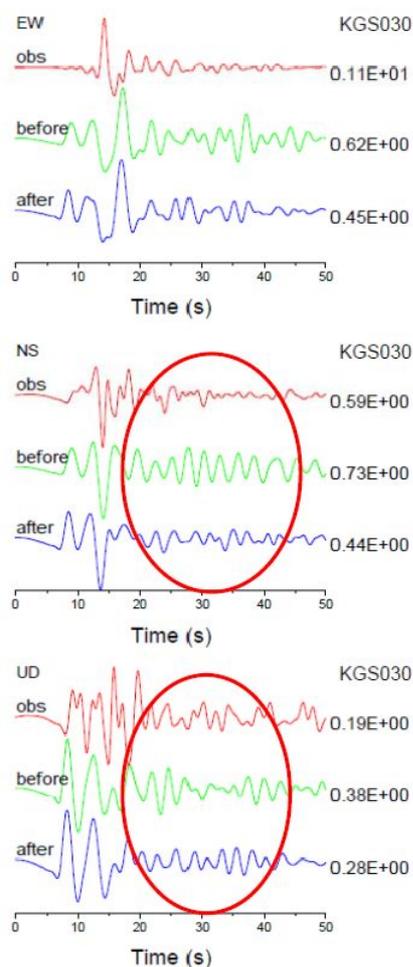


図8 KGS030の波形比較。赤: 観測波形; 緑: 改良前モデル計算波形; 青: 改良後モデル計算波形。0.1 Hz ~ 0.5 Hz のバンドパスフィルターをかけている。モデルの改良によって丸で囲った部分に顕著な改善が見られる。

時系列波形の比較によるモデルの検討では、3領域のどのイベントでも観測波形を非常によく再現することができ、構築したモデルが強震動シミュレーションに有効であることが示された。また、スペクトル比の比較でも地盤モデルの改良により多くの観測点

で改良の効果を確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

Nakamura, T., M. Nakano, N. Hayashimoto, N. Takahashi, H. Takenaka, T. Okamoto, E. Araki, and Y. Kaneda, Anomalously large seismic amplifications in the seafloor area off the Kii peninsula, Marine Geophysical Research, 査読有, in press, 2014,
DOI: 10.1007/s11001-014-9211-2

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto, and Y. Kaneda, Seismic wavefields in the deep seafloor area from a submarine landslide source, Pure and Applied Geophysics, 査読有, in press, 2014,
DOI: 10.1007/s00024-013-0717-3

Yamada, N. and H. Takenaka, S-wave subsurface structure model of the southern part of Okinawa Island, in Nansei Islands, Japan, Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, Yokohama, Japan, 18-21 November 2013, 査読有, pp. 506-509, 2013
DOI: 10.1190/segj112013-127
<http://library.seg.org/doi/abs/10.1190/segj112013-127>

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto, and Y. Kaneda, Seismic wave simulation at DONET ocean-bottom stations. Proceedings of the 11th SEGJ (Society of Exploration Geophysicists of Japan) International Symposium, Yokohama, Japan, 18-21 November 2013, 査読有, pp. 485-488, 2013,
DOI: 10.1190/segj112013-122
<http://jairo.nii.ac.jp/0153/00024159>
<http://library.seg.org/doi/abs/10.1190/segj112013-122>

JafarGandomi, A. and H. Takenaka, FDTD3C - A FORTRAN program to model multi-component seismic waves for vertically heterogeneous attenuative media, Computers and Geosciences, 査読有, 51, pp. 314-323,
DOI: 10.1016/j.cageo.2012.07.022, 2013

Nakamura, T., H. Takenaka, T. Okamoto, and Y. Kaneda, FDM simulation of seismic-wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga Bay earthquake: Effects of ocean-bottom topography and seawater layer, Bulletin of the Seismological Society of America, 査読有, 102(6), pp. 2420-2435, 2012,

DOI: 10.1785/0120110356

〔学会発表〕(計28件)

藤岡 慧・竹中博士・山田伸之・中村武史・岡元太郎・藤原広行, 南西諸島における強震動シミュレーションのための3次元地下構造モデル, SSS23-08, 日本地球惑星科学連合2014年大会, パシフィコ横浜(横浜市), 2014年5月1日

上田拓哉・竹中博士・村越 匠・岡元太郎, S-wavevector receiver functionによる九州地域における地殻及び最上部マントルの地震学的構造の推定, SSS26-P04, 日本地球惑星科学連合2014年大会, パシフィコ横浜(横浜市), 2014年4月30日

Toyokuni, G., H. Takenaka, T. Okamoto, and D. Zhao, Quasi-cylindrical 2.5-D wave modeling with a moment-tensor point source and the anelastic attenuation, S53C-03, American Geophysical Union (AGU) 2013 Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, 2013年12月13日

山田伸之・竹中博士, 奄美大島でのS波速度構造探査 - 島の地震動評価のために -, 日本地震学会秋季大会, 神奈川県民ホール・産業貿易センター(横浜市), 2013年10月8日

Ueda, T., H. Takenaka, T. Murakoshi, and T. Okamoto, Low velocity structure beneath Kyushu island, Japan, inferred from Receiver functions, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま市民福祉プラザ(鹿児島市), 2013年7月23日

Fujioka, A., H. Takenaka, T. Nakamura, and T. Okamoto, Modeling of Topographic Effects of Seismic Wave Propagation Around Sakurajima Volcano, Japan, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島市), 2013年7月23日

Takenaka, H., T. Nakamura, T. Kuramoto, T. Okamoto, and G. Toyokuni, New FDTD scheme for unified modeling of nearfield tsunami and seismic waves using a three-dimensional earth model, APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES) 8th International Workshop: Advances in Simulation of Multihazards, Makena Conference Center in Kihei, Maui, Hawaii, 2012年10月23日

藤岡 慧・竹中博士・山田伸之・中村武史・岡元太郎・村越 匠・藤原広行, 南西諸島における地震動シミュレーションのための3次元地下構造モデルの構築, B32-04, 日

本地震学会 2012 年度秋季大会, 函館市民会館 (函館市), 2012 年 10 月 19 日

山田伸之・立川真太郎・竹中博士, 南大東島における地盤震動調査 - 島の地震動評価のために -, P2-49, 日本地震学会秋季大会, 函館市民会館 (函館市), 2012 年 10 月 18 日

竹中博士・中村武史・藏本稔大・岡元太郎・豊国源知, 近地地震における地震動・津波統合 3 次元数値シミュレーションの新スキーム, C12-05, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 函館市民会館 (函館市), 2012 年 10 月 17 日

Takenaka, H., T. Kuramoto, T. Okamoto, T. Nakamura, and G. Toyokuni, Computation of nearfield tsunami as a seismic wave with a finite-difference scheme for gravitational elastodynamic equation, American Geophysical Union (AGU) 2011 Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, 2011 年 12 月 9 日

竹中博士・藏本稔大・中村武史・岡元太郎・豊国源知, 時間領域差分法による地震波動としての近地地震津波の数値計算, 日本地震学会 2011 年度秋季大会, 静岡コンベンションアーツセンター グランシップ (静岡市), 2011 年 10 月 13 日

山田伸之・竹中博士・奥平良太, 喜界島における微動探査 - 島の地震動評価のために -, 日本地震学会 2011 年度秋季大会, 静岡コンベンションアーツセンター グランシップ (静岡市), 2011 年 10 月 14 日

Kuramoto, T., H. Takenaka, T. Nakamura, T. Okamoto, and G. Toyokuni, FDTD computation of nearfield tsunami as a seismic wave using elastodynamic equation with the Cowling approximation of self-gravitation, The 2011 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly (28 June-7 July, 2011), Melbourne, Australia, 2011 年 7 月 3 日.

山田伸之・竹中博士・奥平良太・後藤史紀, 藏本稔大, 石垣島・西表島の強震観測点における S 波速度構造探査, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市), 2011 年 5 月 24 日

岡元太郎・竹中博士・中村武史・青木尊之, 陸海地形モデルを用いた地震波伝播シミュレーションの並列 GPU による高速化, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ国際会議場 (千葉市), 2011 年 5 月 23

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹中 博士 (TAKENAKA, Hiroshi)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 3 0 2 5 3 3 9 7

(2) 研究分担者

岡元 太郎 (OKAMOTO, Taro)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 4 0 2 7 0 9 2 0

山田 伸之 (YAMADA, Nobuyuki)
福岡教育大学・教育学部・准教授
研究者番号: 8 0 3 3 4 5 2 2

中村 武史 (YAMADA, Nobuyuki)
独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波・防災プロジェクト・技術研究副主任
研究者番号: 4 0 4 3 5 8 4 7

豊国 源知 (TOYOKUNI, Genti)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 9 0 6 2 6 8 7 1

(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

藤岡 慧 (Fujioka, Akira)
九州大学・大学院理学院・大学院生

上田 拓哉 (Ueda, Takuya)
九州大学・大学院理学院・大学院生