jh210054-NAH

大規模地震波シミュレーションによる沈み込み帯の波形トモグラフィー: 2011 年東北地震震源域と南西諸島域

岡元 太郎 (東京工業大学)

概要 本課題研究の最終目標は波形トモグラフィー手法を用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域および南西諸島域の 3 次元速度構造モデルの推定と改良を行うことである。この目標に向けて今年度は以下の研究を行なった。東北沖パートでは東京工業大学の TSUBAME-3.0 の GPU を利用した大規模計算結果をもとにして、①波形トモグラフィーで用いる感度カーネルの時間領域における特徴を検討した。②波形トモグラフィーの逐次近似 1 回目に相当する逆問題計算を試行して、地震波速度としては現れにくいパラメータ個別の修正量を得られる可能性などを示すことができた($\S 5.1$)。南西諸島域パートでは、名古屋大学の「不老」スーパーコンピュータ Type-I サブシステムによる大規模計算結果をもとにした計算波形と観測グリーン関数波形との比較により、設定した構造モデルの特徴を検討することができた。特に、① 南西諸島域のほぼ全域に相当する約1000 km にわたる伝播距離に関する理論波形の計算、② その理論波形と観測グリーン関数との比較検討により観測グリーン関数の特徴をある程度まで再現できる場合があることを見出したこと、③ 比較的に近距離 ($\le 200 \text{ km}$) かつ長周期(周期 10 $\sim 20 \text{ P}$) では波形を良好に再現できることの確認、などの成果を得た。($\S 5.2$)。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名 東京工業大学 名古屋大学

(2) 共同研究分野

超大規模数值計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

東京工業大学·理学院· 岡元太郎	研究代表者・TSUBAME- 3.0 での地震波計算と波形 インバージョン
岡山大学・学術研究院	副代表者・不老(TypeI)で
自然科学学域・竹中博	の地震波計算と構造モデ
士	ルの検討
東京工業大学・学術国際	GPU 計算最適化・大規模
情報センター・青木尊之	並列化・可視化への助言
岡山大学·大学院自然科	不老(TypeI)での地震波計
学研究科·小松正直	算と構造モデルの検討

2. 研究の目的と意義

本研究では大規模地震波シミュレーションの結果を用いた全波形トモグラフィーによって、沈み込み帯の3次元不均質構造モデルを改良する。対

象領域は東北地方太平洋沖地震の震源域と南西諸 島域の2地域とする。改良した3次元構造モデル を用いて短周期の波形再現性を向上させて震源パ ラメータや破壊過程の解析を高精度化し、短波長 域において地震発生場と地球内部構造との相関関 係を探ることが本課題研究の最終的な目標である。

地震の震源パラメータや断層破壊過程などの研究では、計算地震波波形を用いた解析が欠かせない。このとき計算波形の精度が不十分であると、解析結果にバイアスを生じたり分解能に制約を受けたりする可能性がある。我々は、プレート沈み込み型の巨大地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域において、たとえ3次元構造モデルを用いて理論波形を計算しても、周期10秒程度以下の短周期地震波波形の再現性が良くないことを見出した(Okamoto et al. 2018)。このことは、波形計算に用いた既存の3次元構造モデルが数10 km 程度の波長域で十分ではないために、短周期(短波長)の計算波形の精度が低下していることを示唆する。この計算波形の精度限界のために、短波長現象である破壊現象の考察や、地震発生場

の短波長構造の考察においても現状では精度に限 界があるのではないか、と考えられる。

そこで本研究では全波形トモグラフィーによる 沈み込み帯の3次元速度構造モデルの改良をテーマとする。本研究の意義は、短波長側が改良された3次元構造モデルを提案できること、さらにその改良したモデルにより震源パラメータや破壊過程の解析において短周期(短波長)側の精度を向上させて、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究の短波長域への拡張を目指すことができる、というものである。

本年度は前年度に引き続いて、東北地方太平洋 沖地震震源域についての陸上観測点データを用い た解析を進め、トモグラフィー解析の試行検討を 行った。また、南西諸島域を新たな対象として、 この地域における地球内部構造モデルの検討を実 施した。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

沈み込み帯は、海水層・不規則海底地形・厚い 堆積物層・沈み込む海洋プレートなどから構成さ れており、不均質性が非常に強い。そのため地震 波動場には 3 次元不均質構造による伝播経路の屈 曲などの効果が強く表れる。しかも周期数秒程度 の地震波計算では格子間隔を 100-200 m 程度に する必要があることから、数百 km スケールの対 象領域での地震波シミュレーションは必然的に大 規模計算となる。そのため、東京工業大学の TSUBAME-3.0 および名古屋大学の FX1000 という スーパーコンピュータの利用が必要となる。本研 究では具体的には、東京工業大学の TSUBAME-3.0 で格子間隔 0.15 km、格子サイズ4896×3360× 800 (734km×504km×120km) という大規模計 算を実施してトモグラフィーの試行解析を行うこ とができた。また名古屋大学の FX1000 では格子 間隔が約0.2km、格子サイズ2201×5501×1001 (約483km×約1206km×200km) という大規

(約483km×約1206km×200km)という大規模計算により1000kmを超える南西諸島全域に渡る地震波伝播をシミュレートできて、この地域の地球内部構造モデルの検討を行うことができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本課題研究の目標は波形トモグラフィー手法を 用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震震源域の3次 元速度構造モデルの改良を行うことである。前年度 には、東京工業大学の TSUBAME3.0 の GPU を利用した 大規模計算結果をもとにして、物性パラメータ摂動 に対する波形の変化量を定量的に表した「感度カー ネル」の試行計算と検討を行った。この感度カーネ ルは波形トモグラフィーで用いるものであり、それ 自体に波動伝播の情報が含まれたものになっている。 計算の結果、浅い地震に対しては深さ 0-12km 程度の 範囲の浅い領域の感度カーネルの振幅が強くなるこ と(つまり構造モデルの浅い部分が観測波形に大き な影響を及ぼすこと)のような深さ方向の変化や、 剛性率 (S波弾性率) の感度カーネルが最も強く P波 弾性率や密度の効果はやや小さくなることなどのパ ラメータごとの振る舞いの違い、感度カーネルのパ ターンが屈曲するなどの空間的な振る舞いなど、基 本的な性質を明らかにして波形トモグラフィー実施 に向けた検討材料を得ることができた。

また我々は、GPUとは異なるアーキテクチャのもとでの計算手法開発も進めている。前年度には新規導入された名古屋大学の「不老」スーパーコンピュータ Type-I サブシステム(富岳と同じアーキテクチャの富士通 FX1000)において大規模地震波シミュレーションを実施し、計算結果の確認や性能の考察など、当システムを利用していくうえでの基本的な検討を行うことができた。

5. 今年度の研究成果の詳細

今年度は次の2つのパートで研究を進めた。

[1] 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域について、陸上観測点データを用いた解析を進め、構造モデル改良のためのトモグラフィー解析の試行的な検討を行った。(§ 5.1)

[2] 南西諸島域を新たな対象として、大規模地震 波伝播シミュレーション結果と、地震波干渉法に よって得られる観測グリーン関数との比較によっ て、この地域における地球内部構造モデルを検討 した。(§5.2)

のパラメータを表1に示す。

5.1 東北沖での陸上観測点データによる解析時間領域カーネルの検討 我々は、構造パラメータ摂動量に対する地震波波形の変化量(感度)を示す「感度カーネル」をもとにして構造パラメータ推定の研究を進めている。例えば剛性率 $\mu_R(\mathbf{x})$ に関する周波数領域の感度カーネル $K_{\mu}(\mathbf{x},\omega)$ は、シンボリックには下式のように物性パラメータ変化分布 $\delta\mu_R(\mathbf{x})$ に関する体積積分として波形の変化量 $\delta u(\omega)$ を表す際の積分核として使われる。

$$\delta u(\omega) = \int \mathbf{K}_{\mu} \left(\mathbf{x}, \ \omega \right) \left(\frac{\delta \mu_{R}(\mathbf{x})}{\mu_{R}(\mathbf{x})} \right) d\mathbf{x}$$
 ①

もしも波動場の経路上に不均質 $\delta\mu_R(x)$ があれば、 感度カーネルと不均質の積に応じた変化を波形に もたらす。つまり感度カーネルは構造モデル中の 各部分が波形に対して及ぼす影響を定量的に表す ものとなっている(図1)。

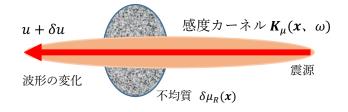


図 1 感度カーネルと波形の変化量の関係を表す概念図。

これまでに、東北沖の3次元構造モデルのもとで周期10秒以下の波動場について周波数領域の感度カーネルを計算し、直線経路に関して非対称で屈曲したパターンになることなどを見出してきた(4.研究成果の概要)。

今年度はまず、これまでに周波数領域で得られた特徴がどのような波動に由来しているのかを把握するために、時間領域の感度カーネルを計算して考察した。感度カーネルは各観測点から広がるアジョイント波動場と震源から広がるフォワード波動場の積として求められる。そこで、東工大TSUBAME-3.0を用いた大規模地震波シミュレーションによってこれらの波動場を計算した。本研究の対象地域や対象地震を図2に、また大規模計算

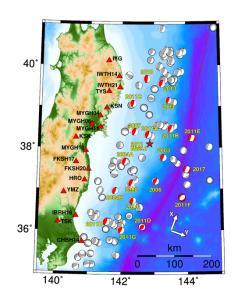


図 2 解析対象地域。本研究でこれまでに震源パラメータを解析した地震(赤い記号でプロットしたもの)、およびデータを用いた観測点(赤い三角)を示す。

表 1 TSUBAME-3.0 での計算パラメータ。

	4 - F121 / / / 0
全格子サイズ	4896×3360×800
副領域サイズ	544×480×400
格子間隔	150 m
時間ステップ数	35000
時間間隔	$0.007143 \mathrm{\ s}$
ノード数	32
GPU 数	126
シミュレーション回数	57 回(=17×3+6)
1回あたり計算時間	3886 s (平均値)

図3には短周期の時間領域感度カーネルの一例を示す。周波数領域感度カーネルでは、構造モデルの浅い部分(深さ0km~数km)に感度が非常に強い部分が表れていた。これは時間領域感度カーネルでは波形の後半に対応する140秒付近以降の時間帯に現れていることが見て取れる。つまり、強い感度を持つ浅い領域は、主に波形の主要部分が通り過ぎた後に到来する群速度が遅い後続波や散乱波に対応していると見なされる。このことから、東北沖の浅部構造をこれらの短周期データで探るには後続波のモデリングが重要になることが示される。一方で、後続波は複雑な経路を通ってきた散乱波も含まれていると考えられ、直達波よ

りもモデル化することは難しくなることが考えられる。また、浅い部分の感度が極端に強いと、深い部分のパラメータ摂動量を求めにくくなる場合もあると考えられる。

そこで今回はまず、波形の前半部分(振幅の大きい部分)を解析対象データとして、トモグラフィー解析のための逆問題計算を行うこととした。

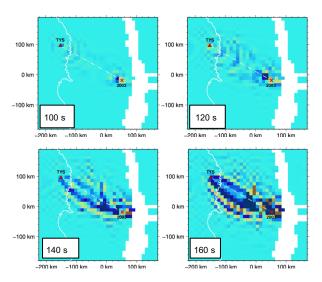


図 3 東北沖の浅い地震 (2003/11/01 Mw5.8) と観測点 TYS (上下動成分) に関する、周期 6-8 秒の波動に対する時間領域の感度カーネル (深さ 0-6 km のブロック)。 感度が強い部分が色の濃い領域で示される。

逆問題解析の試行 上記のように波形の主要部分を対象とするために、フィルターをかけた観測波形データについて、振幅が最大値の30%に低下するまでの時間帯を解析対象とした。

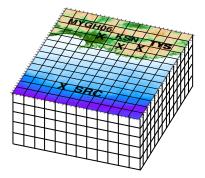


図 4 ブロック分割の概念図。本研究での実際のブロック 数は水平方向 39×28、鉛直方向が 5 個である。ブロックサイズは 12.6km×12.6km×8.4km とした。

ここでは逆問題解析の試行として、図1に示した17観測点のうち、広帯域地震計が使われているF-net観測網(7地点)の観測データを使った。また、地震は15個を用いた。逆問題解析は対象地域をブロックに分割し、各ブロック内の平均摂動量を求めるように設定する(図4)。

逆問題計算では周波数領域で①式を逆に解いて 摂動量を推定する。ここでは15 地震・7 観測点(各3成分)の波形データから周期9秒-41秒のフーリ 工係数を利用したので、周波数ポイント数は 20,868となる。逆問題計算には平滑化の拘束条件 を付けた最小二乗法を用いた。この解析のための 感度カーネル生成もTSUBAME-3.0で実施した。

パラメータがどのような方向に修正されていく かを見るため、図5に逐次近似1回目の剛性率(S 波弾性率) に関する修正量を示す。まず、浅い層 (第1層)で修正量が最も大きく、層が深くなる と修正量が小さくなることがわかる。これは波形 において振幅が大きい部分が主に表面波に対応し ていることが理由になっていると考えられる。ま た浅い層(第1層)に顕著に表れているように、 剛性率に関しては全体的に負の修正量(初期値よ りもS波速度を低下させる方向)が卓越している。 図 6 には P 波弾性率、剛性率 (S 波弾性率)、密度 について、それぞれの第2層(深さ 8.4-16.8km) での修正量を比較した。この図から剛性率(S波弾 性率)で負の修正量が大きい部分では、P波弾性率 と密度は正の修正量となっており、大まかにはこ れらのパラメータが相補的になっている傾向が示 唆される。地震波速度は(弾性率/密度)の平方 根なので、剛性率と密度の傾向はS波速度を初期 値よりも遅くする方向になっている。P 波につい ては弾性率も密度も同程度の正の修正量なので、 P速度変化は小さいことになる。

このように本研究では、波形を使った解析では 密度をパラメータとすることができて、地震波速 度の変化が小さくてもパラメータには変化があっ て、それを検出できる可能性が示された。しかし 各パラメータの寄与度の精度についてはさらに検 討が必要となる。また、現時点では逐次近似の最 初の段階であるため、今後、逐次近似を繰り返し て最終的な修正量を推定する必要がある。

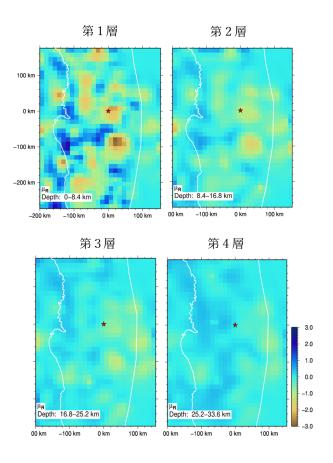


図5 逐次近似1回目における各層の剛性率(S波弾性率)の修正量(初期値に対する百分率)。青色は正の修正量(≒密度一定ならS波速度が初期値よりも速い)、橙色は負の修正量(≒S波速度が初期値よりも遅い)ことを示す。

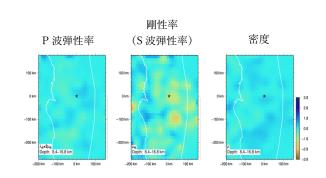


図 6 逐次近似1回目における第2層(深さ 8.4-16.8 km)のP波弾性率、剛性率(S波弾性率)、密度の各修正量。

5.2 南西諸島の波動場の検討

本年度は、地震波干渉法によって抽出した地震 観測点の間を伝播する観測グリーン関数と、大規 模地震波伝播シミュレーションによって生成した 計算波形とを比較して、南西諸島の初期速度構造 モデル(小松、2018)の検討を実施した。

「地震波干渉法」とは、ある観測点で観測された地動波形と、別の観測点で観測された地動波形との相互相関関数を計算することによって、これらの2地点の一方を震源、他方を観測点とするグリーン関数を抽出するものである(Campillo & Paul, 2003 など)。この観測グリーン関数には現実の不均質構造の効果が含まれているので、速度構造モデルの妥当性を検証する上で非常に有用な情報となる。本研究では、観測グリーン関数は観測微動波形をもとにして抽出したもの(邱・ほか、2017)を用いた。

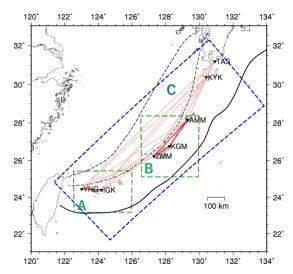


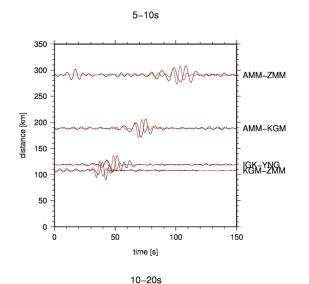
図 7 緑色破線ならびに青色破線が計算領域。黒三角形が F-net 観測点を示す。赤色線とピンク色線は各領域における観測点間を結ぶ線。

表 2 沖縄本島周辺・八重山諸島の計算パラメータ。沖縄本島周辺の計算時間は3回の平均値である。

	沖縄本島周辺	八重山諸島
格子サイズ	3601 × 3401 × 801	2501 × 3501 × 601
格子間隔	0.1 km × 0.1 km × 0.1 km	
時間ステップ	50001	
時間間隔	0.005秒	
ノード数	432	288
プロセス数	1728	1152
スレッド数	12	
計算時間	95分	63分

本年度はまず、2つの計算領域(図7のAとB)

を設定して、比較的短い距離を伝播する理論波形を計算し、観測グリーン関数と比較した。計算には我々が開発した差分法 (Nakamura et al. 2012) と名古屋大学情報基盤センターの FX1000 を使用した (表 2)。この地震波干渉法で抽出されるのは、主に鉛直加振で生成される表面波成分に関するグリーン関数であると考えられるので、シミュレーションの震源も鉛直加振とした。



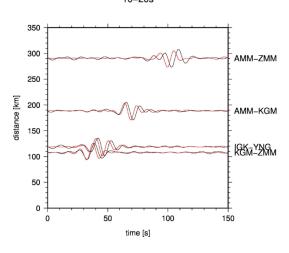


図 8 沖縄本島周辺・八重山諸島(表 2)を対象とした比較的に近距離(~300km まで)の計算結果。周期 5~10秒(上段)と10~20秒(下段)における観測グリーン関数波形(黒線)と理論波形(赤線)との比較。横軸は時間、縦軸は観測点間距離。波形は上下動成分の速度波形である。

比較の結果、長周期 (10~20 秒) かつ観測点間距離 200 km 以下では、理論波形が観測グリーン関数を良好に再現することが示された (図 8)。それ

以上の距離でも、位相に若干のずれが見られる程度であり(図8下段のAMM-ZMM)、この例では構造モデルの上部数10kmのパラメータを改良することによって波形の一致が改善されることが示唆される。

次に、邱・ほか(2017)で抽出したすべての観測グリーン関数との比較を行うために、与那国島から鹿児島県を含む全長 1000 km の領域(図 7 の C)を伝播する理論波形を大規模シミュレーションによって生成した。伝播経路がおよそ 1000 km にわたることから、この計算では地球の曲率の効果を考慮するために我々が開発した準球座標による差分法の計算スキーム(Takenaka et al. 2017)を利用した。計算は前のケースと同様に、名古屋大学情報基盤センターの FX1000 を使用して実行した(表 3)。

表 3 南西諸島全域の計算パラメータ。計算時間は7回の平均値である。

格子サイズ	2201 × 5501 × 1001
格子間隔	0.002度×0.002度×0.2 km
時間ステップ	60001
時間間隔	0.01秒
ノード数	432
プロセス数	1728
スレッド数	12
計算時間	130分

すべての観測点ペアにおける観測グリーン関数と理論波形を比較すると(図9)、領域AとBの計算結果と同様に長周期かつ観測点間距離200km以下では、理論波形が観測グリーン関数を良好に再現することを確認した(図10上段)。さらに、それ以上の長距離を伝播する理論波形についても一部のフェーズの再現性が良い観測点ペアが存在した(図10下段)。今後、波形再現性に地域性があるか否かなどについて、図8を例とするような局所的な計算結果と、南西諸島全域に渡る大規模な計算結果(図10)とを相互に比較しなが

ら引き続き分析する必要がある。

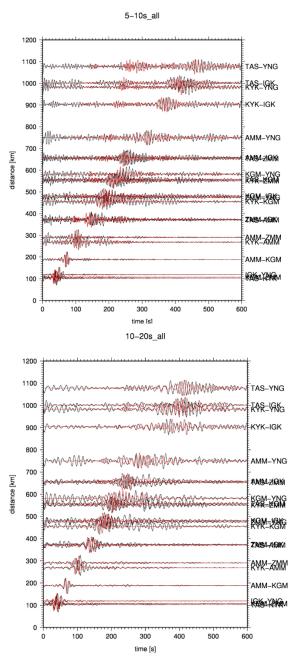


図 9 南西諸島全域(表 3)を対象とした遠距離(~1000km)を含む計算結果。周期 5~10 秒(上段)と周期 10~20 秒(下段)の観測グリーン関数波形(黒線)と理論波形(赤線)との比較。横軸は時間、縦軸は観測点間距離。波形は上下動成分の速度波形である。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

東北地方太平洋沖地震震源域の構造推定のパートでは、① 今年度は新たに時間領域のカーネル

の検討も行い、波動場の特徴を把握することができた。② さらにその結果を反映させたデータ処理を施したのちにトモグラフィーにおける逆問題計算の最初の部分を進めることができた。構造モデルパラメータ相互の関係から、地震波速度についての初期モデルからの修正量が小さくても個別のパラメータには一定の修正量がある場合が考えられる。今年度の結果から、本研究の手法ではそのような個別のパラメータの修正量を検出できる可能性が示された。

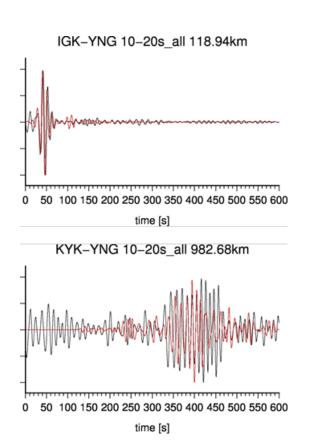


図 10 伝播距離の異なる 2 つの観測点ペアにおける周期 10~20 秒の観測グリーン関数 (黒線) と理論波形 (赤線) の比較例。図の上部に観測点間距離を明記している。波形は上下動成分の速度波形である。なお、下段で 0~150 秒付近の観測波形 (黒線) に現れている震動はノイズであると考えられるので、比較対象にはならない。

ただし、各パラメータの寄与度の精度(パラメータ間の分解能)についてはトレードオフがあり得るのでさらに検討が必要となる。また、現時点

では逐次近似の最初の段階であるため、今後、逐 次近似を繰り返して最終的な修正量を推定する必 要がある。これらの点や、海底地震計データの追 加を検討することについては次年度(2022 年度) の課題とする。

南西諸島域のパートでは観測グリーン関数波形と計算波形の比較により、設定した構造モデルの特徴を検討することができた。特に、名古屋大学の「不老」Type-I サブシステム(FX1000)の性能を活用した大規模計算によって、①南西諸島域のほぼ全域に相当する約 1000 km にわたる伝播距離に関する理論波形計算ができたこと、②その理論波形と観測グリーン関数との比較検討により観測グリーン関数の特徴をある程度まで再現性できる場合があることを観察できたことは大きな成果であると考えられる。また、③検討した地域では、比較的に近距離(≤200 km)かつ長周期(周期 10~20 秒)では波形の再現性が良好であることも確認できた。

これらの成果を受けて、次年度(2022年度)には、波形再現性の地域性や、どの程度の改良が必要であるかなどについて地域的な計算結果と、南西諸島全域に渡る大規模な計算結果とを相互に比較しながら引き続き分析する予定である。

7. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

- (1) **学術論文 (査読あり)** 該当なし。
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)該当なし。
- (3) **国際会議発表 (査読なし)** 該当なし。
- (4) 国内会議発表 (査読なし)

岡元 太郎・竹中 博士・中村 武史、東北 地方太平洋沖地震震源域の波形トモグ ラフィーに向けた波動場の検討、日本地 震学会 2021 年度秋季大会、S01P-05、2021 年 10 月 15 日。

- (5) 公開したライブラリなど 該当なし。
- (6) その他 (特許、プレスリリース、著書等) 該当なし。

参考文献

- 1. Campillo, M. and A. Paul, Long-Range correlations in the diffuse seismic coda, Science, 299, 547-549 (2003).
- 2. 小松正直、南西諸島における地震波減衰構造 の推定とそれに基づく地震動シミュレーショ ンのための広域地下構造モデルの構築、岡山 大学博士学位論文(2018).
- 3. 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、日本地震学会 2017 年秋季 大会、S06-P16 (2017).
- 4. Nakamura T, Takenaka H, Okamoto T, Kaneda Y, FDM simulation of seismic-wave propagation for an aftershock of the 2009 Suruga bay earthquake: effects of ocean-bottom topography and seawater layer, Bull. Seismol. Soc. Am., 102, 2420–2435 (2012).
- 5. Hiroshi Takenaka, Masanao Komatsu, Genti Toyokuni, Takeshi Nakamura, Taro Okamoto, Quasi-Cartesian finite-difference computation of seismic wave propagation for a three-dimensional subglobal model, Earth, Planets and Space, 69, 67 (2017).