

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01982

研究課題名（和文）海洋堆積層のS波速度解析に基づく南海トラフ巨大地震による長周期地震動予測の高度化

研究課題名（英文）S-wave velocity analysis of sedimentary layers and long-period ground-motion simulation for large earthquakes in the Nankai trough area

研究代表者

中村 武史（Nakamura, Takeshi）

一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・主任研究員

研究者番号：40435847

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：海底観測データの走時解析や波形解析を実施し、これまで十分に分かっていなかった海洋堆積層のVp/Vs比やS波速度を推定した。南海トラフ域では、場所によっては、Vp/Vs比が5以上の領域が数kmの厚さで広がっていることが分かった。また、南海トラフおよびその周辺域の速度構造解析結果、陸域の全国1次地下構造モデルと沿岸域で接続した3次元地下構造モデルの構築を試みた。さらに、構造モデルを用いて長周期地震動のシミュレーションを実施し、注目する平野部におけるばらつきも含めた振幅の推定を行った。海水層が長周期地震動に与える影響の評価も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、海域における地下構造解析のために従来から使用されている走時解析に加え、波形情報を使った解析を実施し、これまで十分に分かっていなかった海洋堆積層のVp/Vs比やS波速度の推定を行った。長周期地震動の要因ともなる低速度層が海洋堆積層において数 kmの厚さで広がっていることを示した。また、海陸で統合した3次元地下構造モデルの構築を試みた。構造モデルを用いて、静岡県西部を対象に、東南海地震の断層震源モデルを使った長周期地震動のシミュレーションを実施し、断層走向直交成分で振幅のばらつきが顕著に大きくなることや、破壊開始点の位置により振幅に8倍程度の違いが生じることを示した。

研究成果の概要（英文）：We conducted travel-time and waveform analyses of seafloor observation data to estimate Vp/Vs ratio and S-wave velocity of marine sedimentary layers, which were not well understood before. We inferred high Vp/Vs ratios of over 5 extending over several kilometer thickness below the seafloor. We also attempted to construct a three-dimensional subsurface structure model that is based on the velocity structure analysis results in and around the Nankai trough and connects the subsurface structure model of the land area with the coastal area. We simulated long-period ground motions using the structural model and estimates the amplitudes including the variations in our focus plain areas. We also evaluated the effect of the seawater layer on long-period ground motions.

研究分野：地震工学

キーワード：海洋堆積層 S波速度 南海トラフ 長周期地震動

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

南海トラフ周辺は、分厚い海洋堆積層が広く分布しているため、周期数秒～数10秒のゆっくりとした大きな揺れ「長周期地震動」が発達しやすい場である。このような場で大地震が発生した場合、発達した長周期の地震波が陸域まで伝播し、共振した高層建築物や大型構造物が損害を受ける可能性がある。また、海洋堆積層の影響で長周期の地震波の増幅に加え、震動継続時間が長大化し、海底などで観測されたデータを用いた震源の解析では、震源の実態を見誤る危険性がある。

海域における地震波の卓越周期・振幅・震動継続時間は、海洋堆積層のS波速度構造に強く依存する。長周期地震動の被害予測や解析上の問題を解決するためには、S波速度構造の把握と、その構造情報を用いた地震波動場シミュレーションによる評価が必要である。しかし、過去に南海トラフ周辺のS波速度について地下構造探査で調べられたのは、足摺岬沖、紀伊半島沖、室戸岬沖などに限られている。これらの海域における探査測線は、互いに100 km以上離れており、測線間の広大な海域のS波速度の空間分布については十分に調べられていない。地震波動場シミュレーションで用いられることがある、既存の海洋堆積層のS波速度構造モデルでは、海域によっては海洋堆積層のS波速度値が実態から乖離している可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、南海トラフ域に広がる海洋堆積層のS波速度構造を解析する。また、3次元S波速度構造モデルを構築し、海域の地震に対する長周期地震動評価やシミュレーションの精度向上につなげる。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究内容を「走時解析に基づく構造推定と統合モデル構築」、「波形解析に基づく構造推定」、「地震波動場シミュレーションによる長周期地震動評価」の3つの項目に分類し、担当者間で連携しながら各項目の研究を進めた。研究の方法について、それぞれの項目に分けて以下に記載する。

#### (1) 走時解析に基づく構造推定と統合モデル構築

南海トラフおよびその周辺の海域で実施された、人工震源による地震構造探査測線の分布を調査した上、測線データの収集・整理や解析を行い、過去に構築された3次元地下構造モデルを基に、モデルの構築を行った。また、陸域を含む広い範囲をカバーするために、自然地震による走時解析結果、陸域の地下構造モデル(全国1次地下構造モデル)等との統合化を行った。統合したモデルに対して、先行研究によるP波速度とS波速度との比に関する経験式の適用を行った。

#### (2) 波形解析に基づく構造推定

地震構造探査測線上に機動的に設置された自己浮上式海底観測点データと、海底ケーブルにより連続観測が行われている海底観測点(DONET)データを用いて、南海トラフにおける構造推定を行った。解析にあたり、連続観測のデータについては、地震計の成分間のスペクトル解析を実施し、海底ケーブル等の特有の構造により生じる振動と地震計の応答との関係性について調べた。

解析では、波形そのものの情報を活用して、伝播途中の不均質な構造によって生じる波形形状の変化を定量的に評価するために、後続波の一つであるPS変換波に着目して変換面位置や $V_p/V_s$ 比をイメージングするレーバ関数法を適用した。また、観測点間の波形の相互相関解析からS波速度構造やS波速度構造と関係する表面波位相速度を推定する地震波干渉法を用いた。

#### (3) 地震波動場シミュレーションによる長周期地震動評価

南海トラフで繰り返し発生している大地震について、海域の3次元地盤・地殻・マントル構造や海水層、海底地形を含む構造モデルを用いて、静岡県西部地方をターゲットにした長周期地震動のシミュレーションを実施した。対象とする静岡県西部は、牧之原台地から西方の遠州灘沿岸部で低地が続き、浜名湖から天竜川河口付近にかけて広がる浜松平野においては高さ100 m超の高層建築物が複数立地する。1944年東南海地震では、紀伊半島南部の破壊開始点から断層面上で破壊フロントが伝播する方向にあたり、また、それと平行して海洋堆積層がトラフ軸に沿って広がる方向に位置し、伝播経路上の堆積層で生成、増幅した表面波の伝播が予想される場所である。

波形合成で必要となるグリーン関数の計算では、Nakamura et al. (2012)による3次元差分法を用いた。地下構造モデルについては、本研究で構築した構造モデルやJ-SHIS(藤原・他, 2012)のモデルを用いた。また、それぞれについて海水層を除いたモデルも準備して、シミュレーションで用いた。震源モデルについては、先行研究によるモデル間でパラメータに違いがあること、

パラメータの設定の仕方により結果が大きく変わることがあるため、基準とする断層震源モデルから派生させたすべり分布モデルを多数準備してシミュレーションを実行し、ばらつきも含めた振幅の評価を行った。基準とするモデルとしては、Ichinose et al. (2003)やKikuchi et al. (2003)による1944年東南海地震の震源モデル、内閣府(2012)「南海トラフの巨大地震モデル検討会」によるモデルを用いた。また、破壊伝播速度や破壊開始点などのパラメータも変えながら振幅の評価を行った。

#### 4. 研究成果

研究の成果について、それぞれの項目に分けて以下に記載する。

##### (1) 走時解析に基づく構造推定と統合モデル構築

駿河トラフや伊豆・小笠原諸島の海域における地震探査測線データを用いて変換波走時の解析を行い、波線追跡や走時解析からS波速度の推定を行った。島弧地殻の沈み込みの影響で陸側のP波速度5 km/s層以深ではポアソン比0.25、浅部堆積層はポアソン比0.26~0.31となり、河口の沖合延長部で大きな値であることを示した(図1)。この結果や、海陸統合調査観測による人工震源および自然地震による南海トラフ域の走時トモグラフィック結果、人工震源による駿河湾および紀伊半島沖の走時トモグラフィック結果、浅部堆積層構造については反射法地震探査の速度解析結果を用いて、陸域の全国1次地下構造モデルと沿岸域で接続した3次元P波速度構造モデルを構築した(図2)。岩石実験などに基づく経験的なP波速度とS波速度との関係式に基づき、構築したP波速度構造モデルをS波速度構造に変換した。調査観測データから直接推定されたS波速度構造と地殻浅部の深さ5 km程度までよく整合することを確認した。

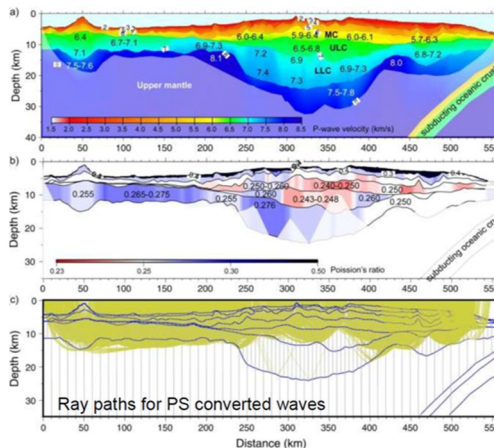


図1: 伊豆-小笠原諸島の測線におけるPS変換波の波線追跡・走時解析によるポアソン比推定。上から、P波速度構造、ポアソン比、波線追跡結果をそれぞれ示す。

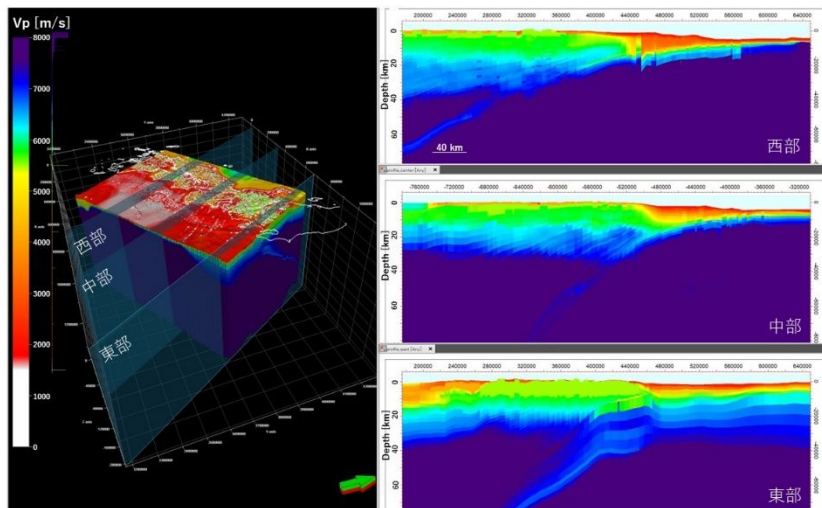


図2: 海域における人工震源および自然地震のデータ解析結果、陸域の全国1次地下構造モデルから構築した3次元P波速度構造モデル。

##### (2) 波形解析に基づく構造推定

各海底観測点における固有の応答特性を把握するため、地震波のコーダ波部分を使って成分間のスペクトル比を調べた。その結果、特にケーブルとセンサーが一体化した海底観測点については、周辺地盤とのカップリング等、設置環境に起因する応答特性を考慮した解析が必要であることを示す結果を得た。また、地震構造探査測線データを用いたPS変換面をイメージングする波形解析手法の有効性について

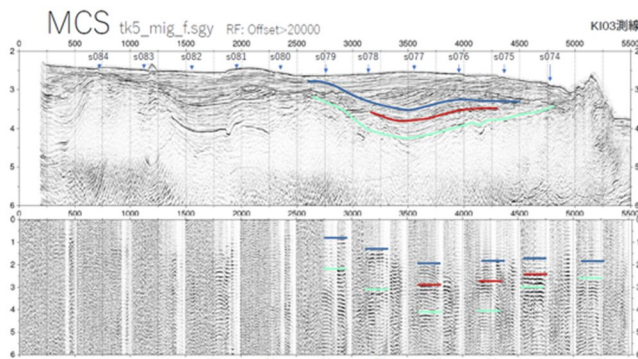


図3: 熊野海盆におけるPS変換波のレーバ関数解析による変換面位置推定。赤線、青線、薄緑線は推定した変換面位置をそれぞれ示す。

て、遠地地震を用いたレシーバ関数解析手法と比較検討を行った。堆積層基盤が正しくイメージングできることや、遠地地震のデータでは捉えることが難しい堆積層内の詳細な PS 変換面分布をイメージングできることを確認した。

上記の特性把握や確認を経て、機動的に設置された自己浮上式海底観測点の人工震源探査時のデータや連続観測が行われている海底地震観測点の微動を活用した波形解析を実施した。レシーバ関数法による解析から変換面位置を推定し(図3) S 波構造のイメージングを試みたところ、P 波 ( $V_p$ ) と S 波速度 ( $V_s$ ) の比 ( $V_p/V_s$ ) が 5-7 程度、 $V_s$  に換算すると 0.3-0.5 km/s 程度の遅い速度を持つ堆積層が数 km の厚さで広がっていることを示した。また、地震波干渉法の解析においても、陸上における地盤と比べて大きな値の  $V_p/V_s$  比を持つ層が海底下に広がっていることが推定され、海盆付近ではレシーバ関数法による  $V_s$  値と同等の結果を得た。また、地震波干渉法による解析から周期 5 秒程度までの表面波位相速度を推定し、水平方向に強い不均質性があることを示した。

### (3)地震波動場シミュレーションによる長周期地震動評価

地盤構造モデルとフィリピン海プレート形状モデルを使い、南海トラフ周辺における周期 5 秒~10 秒の周期帯における地震波シミュレーションを実施した。シミュレーションコードについては、グリッド毎に震源の密配置が可能な拡張を行い、傾斜断層も含め、連続的な断層破壊を考慮した計算を可能とした。

シミュレーションの結果、海底においては、海水層の有無によって波の伝播方向や振動継続時間に違いが生じ(図4) 海底観測点のデータを使った震源解析に影響を及ぼす可能性があることを示した。周期 5 秒は沿岸側、周期 10 秒はトラフ軸側の堆積層構造が波形振幅に影響することが分かった。一方、注目している陸域(静岡県西部)においては、海水層の有無による振幅の違いがほとんど生じず、海水層の影響が小さいことを示した。しかし、断層内の破壊伝播速度 ( $V_r=2.0\sim 3.1$  km/s) など震源の影響により、最大振幅値について 4 倍程度の違いが生じた。また、破壊開始点が観測点から遠方の西側にある場合は東側の場合と比べて大きくなる傾向を示し、振幅の大きさやばらつきに両方で 8 倍程度の違いが生じることも示した。加えて、ディレクティビティの影響によって断層走向直交成分でばらつきが顕著に大きくなることも分かった(図5)。

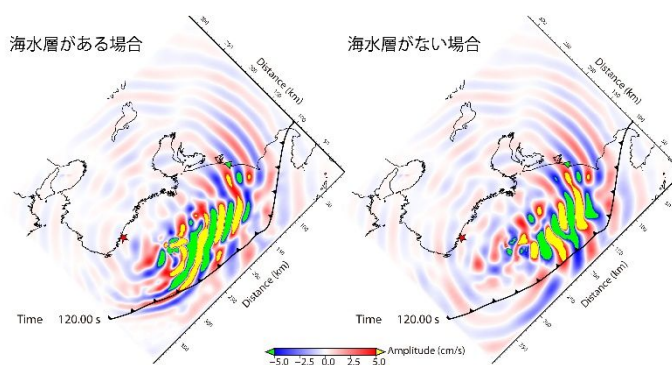


図4: 東南海地震の震源モデルを用いた周期 10 秒における上下動成分のスナップショット。

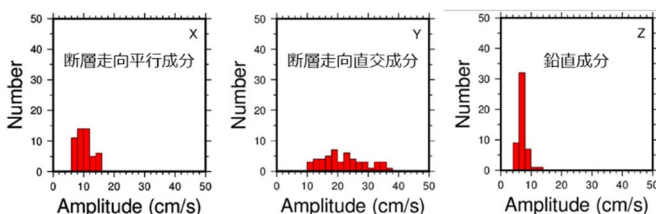


図5: 多数の派生的な震源モデルを用いて計算した静岡県西部における各成分の波形振幅。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sawazaki, K. and Nakamura, T.	4. 巻 72
2. 論文標題 “N”-shaped Y/X coda spectral ratio observed for in-line-type OBS networks; S-net and ETMC: interpretation based on natural vibration of pressure vessel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01255-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fujie Gou, Kodaira Shuichi, Nakamura Yasuyuki, Morgan Jason P., Dannowski Anke, Thorwart Martin, Grevemeyer Ingo, Miura Seiichi	4. 巻 48
2. 論文標題 Spatial variations of incoming sediments at the northeastern Japan arc and their implications for megathrust earthquakes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geology	6. 最初と最後の頁 614 ~ 619
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1130/G46757.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 仲西 理子・Qin Yanfang・Liu Xin・藤江 剛・汐見 勝彦・小平 秀一・高橋 成実・中村 武史・富士原 敏也
2. 発表標題 南海トラフ域の海陸統合3次元地震波速度構造の構築と検証
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村 武史
2. 発表標題 静岡県西部を対象とした南海トラフ巨大地震の長周期地震動シミュレーション（その2）
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 仲西 理子・Liu Xin・Qin Yanfang・藤江 剛・汐見 勝彦・小平 秀一・高橋 成実・中村 武史
2. 発表標題 南海トラフ域の海底地震計データを用いたS波構造推定の試み
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 武史
2. 発表標題 静岡県西部を対象とした南海トラフ巨大地震の長周期地震動シミュレーション
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲西 理子・Qin Yanfang・Liu Xin・藤江 剛・汐見 勝彦・小平 秀一・高橋 成実・中村 武史・富士原 敏也
2. 発表標題 南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 武史・竹中 博士
2. 発表標題 水平成層構造での海面～海中における水中音響波形計算 海水層による増幅・減幅の影響評価 -
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 武史・澤田 昌孝
2. 発表標題 確率すべり分布および3次元速度構造モデルを用いた2008年岩手・宮城 内陸地震の震源断層近傍における地震動評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Spatiotemporal distribution of fin whale signals in northeast Japan
2. 発表標題 Nakamura, T. and Iwase, R.
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sawazaki, K. and Nakamura, T.
2. 発表標題 "N"-shaped Y/X coda spectral ratio observed for in-line type OBS of S-net and ETMC
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sawazaki, K. and Nakamura, T.
2. 発表標題 "N"-shaped Y/X coda amplitude spectral ratio observed for in-line type OBS networks: interpretation based on the natural vibration of the pressure vessel
3. 学会等名 AGU 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤崎 郁、中村武史
2. 発表標題 S-netで観測されたコーダ波水平動振幅間の非等方性について
3. 学会等名 地震研究所共同利用研究会「広帯域波動現象の観測とその背景にある物理モデルの解明」
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	仲西 理子  (Nakanishi Ayako)  (30371727)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・主任研究員   (82706)	
研究分担者	藤江 剛  (Fujie Gou)  (50371729)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・センター長   (82706)	
研究分担者	高橋 成実  (Takahashi Narumi)  (70359131)	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・総括主任研究員   (82102)	
研究分担者	L i u X i n  (Liu Xin)  (80930627)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・特任研究員   (82706)	削除：2022年11月24日
研究分担者	澤崎 郁  (Sawazaki Kaoru)  (30707170)	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・特別研究員   (82102)	



7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------