

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04006

研究課題名（和文）地震・津波波動場の空間連続性に基づく情報抽出

研究課題名（英文）Extraction of wave propagation characteristics from spatial continuity of seismic and tsunami wavefields

研究代表者

前田 拓人（Maeda, Takuto）

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90435579

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、陸域および海域での稠密な地震・津波観測網のデータから波動現象の空間連続性に基づく情報抽出を目指すものであり、地震波のポテンシャル分解による情報抽出法の開発と、地震・津波共通のデータ同化手法の開発を実施した。前者からは不均質媒質中でのP-SV/SH成分の分離手法を数値シミュレーションに基づいて検討し、その有効性を示した。後者については、アジョイント方程式に基づき波動場を高精度に推定する新手法を開発し、数値実験を通じて即時予測問題への有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

稠密な地震および津波記録からの情報抽出方法の高度化を通じて、地震波解析においてはより高精度な地球内部構造や震源推定への応用が、そして津波記録解析においてはより正確な即時予測への応用がそれぞれ今後の発展として期待される。さらに、アジョイント法に基づくデータ同化は地震学における多くの逆問題や時間反転イメージングとも密接に関連するものであり、今後のさらなる研究開発に資すると期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aims to extract information based on the spatial continuity of wavefield from dense seismic and tsunami observation network data. It involves the development of an information extraction method using seismic wave potential decomposition and a data assimilation method common to both earthquakes and tsunamis. For the former, a method for separating P-SV/SH components in heterogeneous media was examined through numerical simulations, demonstrating its effectiveness. For the latter, a new method for highly-accurate estimation of the wavefield based on adjoint equations was developed, and its applicability to real-time forecasting problems was demonstrated through numerical experiments.

研究分野：地震学

キーワード：地震波 津波 数値シミュレーション データ同化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

陸域における地震の稠密基盤観測から約 20 年が経って十分な記録が蓄積され、さらに海域にも稠密な観測網が構築されつつある。これらの稠密な観測網の記録からより多くの地震波・津波に関する情報を抽出するためには、それら観測される波動現象の空間連続性が 1 つの鍵となりうる。しかし、地震波や津波解析においては、伝統的に時間と空間の取り扱いに大きな差があり、時間については必要な周波数の範囲で事実上連続な高サンプリングな記録が取られる一方で、空間方向は離散的な点として記録を扱い、複数の連続な時系列の集団として地震・津波波形が扱われてきた。研究代表者はこの問題をいち早く認識し、高周波地震計記録の信号処理による広帯域化や、空間連続性に基づく波動伝播特徴の抽出、さらにはデータ同化に基づいた波動場の再構築といった先駆的な研究を進めてきていた。

2. 研究の目的

これまでの空間連続性に着目した一連の研究は、地震と津波それぞれの研究フィールドで独立に行われてきたものである。そこで、それらの問題を、一旦『固体地球の波動現象における波動場空間連続性からの情報抽出』という抽象的なレベルでの共通的な問題として捉え直し、それぞれ分野で検討されてきた手法を交叉させることで、超稠密観測時代の地震波および津波解析手法を進歩させることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 地震波動場のポテンシャル分解

水平成層構造における地震波動場は P 波・SV 波・SH 波を表す時空間ポテンシャル関数によって記述できることは地震波動論で広く知られていることである。これらポテンシャル関数は、従来は専ら成層あるいは均質な構造における波動場の理論的な表現の方法として用いられてきたものである。しかし、予備的な検討から、もし地震波の空間微分を観測することができれば、そこから観測された 3 成分の地震波形を、P-SV と SH という物理的に意味の異なる成分に分解できる可能性が示された。そこで、地震波動場の数値シミュレーションと実記録との双方からこの手法についての検討を行い、不均質媒質中の波動伝播の理解にアプローチする。

(2) 津波・地震共通基盤としてのデータ同化手法の構築

これまで、研究代表者は空間補完法の一つである最適内挿法に基づき、稠密な海底津波観測記録から津波波動場全体を再構築するデータ同化手法を提案し、それに基づく津波や地震動の即時予測についての成果を挙げてきた。本項目ではそのデータ同化手法を根本から捉え直し、波動場そのものを推定する新たな定式化に挑戦する。

(3) 高精度数値シミュレーション・大容量波形記録解析に関する技術開発

本研究課題(1)(2)は、大規模かつ高精度な地震・津波数値シミュレーションや、大容量の連続波形記録の記録解析を基盤としている。これらの高度化に資する技術開発も継続的に実施する。

4. 研究成果

(1) 地震波動場のポテンシャル分解

弾性波動論に基づく定式化から、地震波動場の空間勾配量を非斉次項に持つ Poisson 方程式を解くことで、弾性波ポテンシャルのうち SH 波成分だけを単独で推定できることを明らかにした。SH 波ポテンシャルから SH 波動場そのものを計算することができるため、観測記録からそれを差し引くことで、結果的に P-SV 成分も求まる。つまり、空間勾配量に基づき、地震波を物理的に意味のある 2 成分に分解することができる、ということを示した。このような分離は、地震波速度が鉛直方向にしか変化しない水平成層構造においては、地震波の伝播方向によって P-SV と SH 成分を分解することができる。本研究はそれを不均質媒質に一般化したものであるとの位置づけも明らかにした。

この定式化を受けて、差分法による数値シミュレーションから得られた日本列島を模した 3 次元不均質構造を伝播する地震波の空間勾配から P-SV/SH 分解を実施した (図 1)。不均質構造下

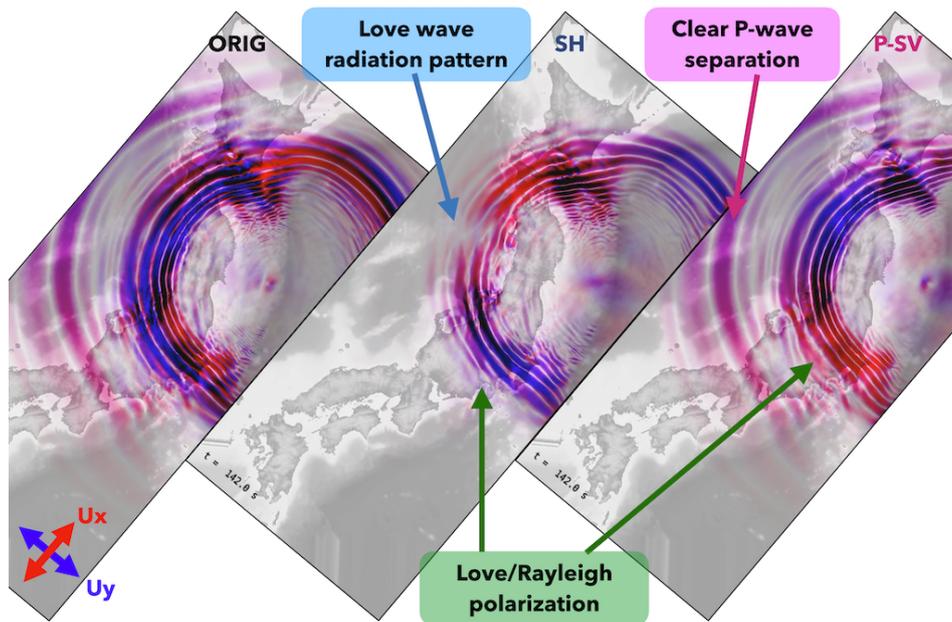


図1 数値波動場の P-SV/SH 分解の例.

の地震波動場の数値シミュレーションの結果はしばしば非常に複雑で解釈に困難を伴うことがあるが、この波動場の構成要素分解がその特性の理解に有効であることが示された。ただし、震源の付近においては分解の結果に時間に対するトレンド成分が生じていた。この問題については理論的なサーベイを行い、震源まで含めてポテンシャル分解を行うと、時間の1次関数で表されるようなトレンドが原理的に生じること、比較的単純な時間領域の周波数フィルタを組み合わせることでこの影響を低減できることも明らかにした。

数値シミュレーションでは計算対象のあらゆる空間地点における地震波動場の空間勾配があらかじめ求められていたが、実記録では地表の離散的な観測点における変位速度しか観測されない。そこで、その状況を模した不等間隔の数値シミュレーション記録を仮想データとして用い、それに対してまず Seismic wave gradiometry 法を適用して空間勾配を求め、その推定結果に基づいて P-SV/SH 波動場に分解する2段階法も検討した。この場合は観測点が陸上にしか存在せず、その周辺という複雑形状下での Poisson 方程式を解く必要が生じるが、その際境界形状の影響を最小限にするような境界条件の与え方を見出し、観測点周辺における観測記録からの波動場の構成要素分解の実現に道筋をつけた。

(2) 津波・地震共通基盤としてのデータ同化手法の構築

津波と地震動のデータ同化について、逐次的な同化を行って時間発展させながら波動場を推定する方法と、初期条件として初期波動場を推定する手法との関係について検討を行い、それらが観測値と予測値の差異に基づいて初期条件推定値に対する勾配を求める、アジョイント方程式に帰着できるということに着想した。さらに、最適制御理論に基づき、津波および地震波の基礎方程式系の両方について、波動場そのものを推定するためのアジョイント方程式を導出することに成功した。その結果として得られたアジョイント方程式は、線形弾性体運動方程式と構成関係式、ならびに津波の線形長波方程式について、もとの基礎方程式と完全に同一かつ時間反転したものであることが明らかになった。そのことから、これまで行われてきた時間反転波動方程式に基づく震源イメージングは、アジョイント法に基づく波動場初期状態推定の第1イタレーションであったこと、さらにそれを繰り返し計算(イタレーション)することでさらにその解像度を上げることができることも理論的に明らかになった。

この定式化を踏まえ、特に津波について即時予測問題への応用を意識した数値実験を実施した。実地形に基づく数値シミュレーションにより作成した海底津波観測点における模擬波形記録から、震源(波源)の推定と波動伝播途中状態の推定を実施した。まず波源の推定からは、たかだか100点強の観測点の記録から数百万点もある数値グリッド全てにおける波動場を推定するという劣決定問題であるにも関わらず、仮定した初期波動場をほぼ完全に再現できるということが明らかになった。ただし、そのためには多数の繰り返し計算が必要となるため、計算の高速化のための技法の検討も行った。一方、この手法は任意の時刻における波動場の状況を原理的には推定できるはずであるにも関わらず、津波が波源から一定程度広がった、波動伝播途中状態を直接推定することは困難であることもわかった。そこで、アジョイント方程式のイタレーション

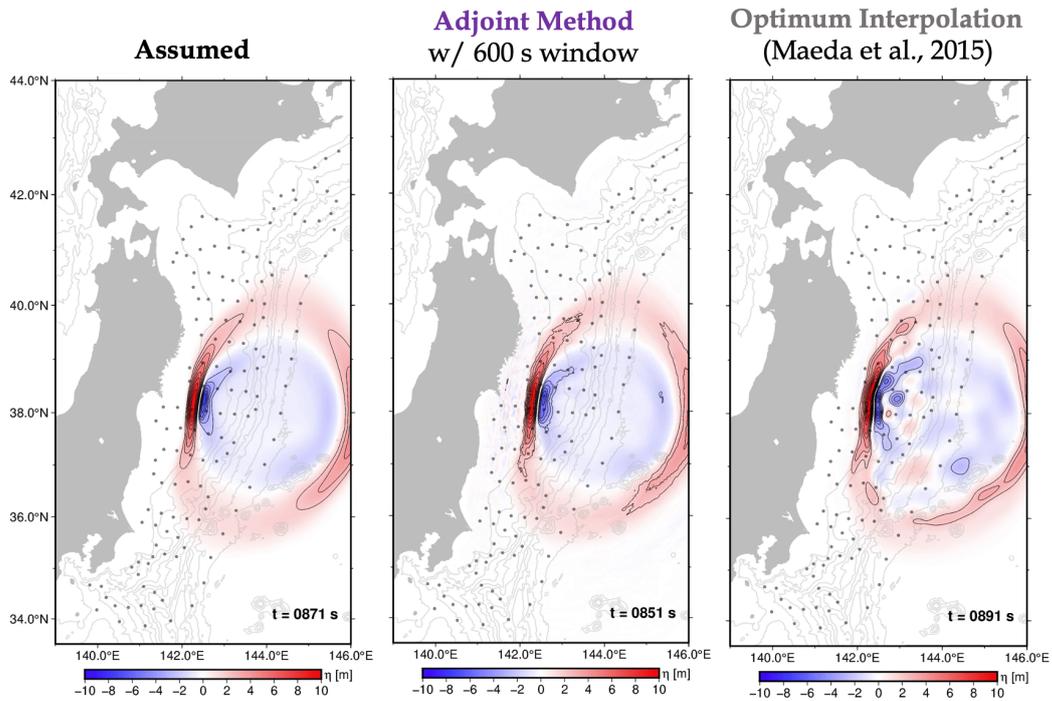


図2 仮定した津波波動場（左）に対する逐次的なアジョイント法による津波波動場の再現（中央）および従来手法である最適内挿法（右）との比較。

ンを繰り返すたびに逐次的に推定対象を時間発展させる，という方式を試したところ，数百時間ステップ（数百秒）という津波予測としては十分な短時間で仮定した波動場に収束し，従来の逐次的データ同化法である最適内挿法よりも高精度に波動場の状態を再現できた。

(3) 技術開発

地震波勾配法やデータ同化研究で用いる大容量の連続記録に効率的にアクセスするため，日本国内で用いられている波形フォーマット Win32 に対する高速読み込みライブラリを開発，公開した。また，データ同化の数値実験研究に資するため，地震と津波の数値シミュレーションを弱結合し，地震動から津波までを含む海底仮想記録を計算するあらたな手法を提案，実装した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 前田拓人・齊藤竜彦・馬場俊孝	4. 巻 44
2. 論文標題 津波即時予測手法の高度化のための地震・津波統合数値シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊地球	6. 最初と最後の頁 374-380
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oba Atsuki, Furumura Takashi, Maeda Takuto	4. 巻 125
2. 論文標題 Data Assimilation Based Early Forecasting of Long Period Ground Motions for Large Earthquakes Along the Nankai Trough	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2019JB019047
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JB019047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shiina Takahiro, Maeda Takuto, Kano Masayuki, Kato Aitaro, Hirata Naoshi	4. 巻 92
2. 論文標題 An Optimum 2D Seismic-Wavefield Reconstruction in Densely and Nonuniformly Distributed Stations: The Metropolitan Seismic Observation Network in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Seismological Research Letters	6. 最初と最後の頁 2015-2027
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0220200196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Furumura Takashi, Maeda Takuto	4. 巻 225
2. 論文標題 High-resolution source imaging based on time-reversal wave propagation simulations using assimilated dense seismic records	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 140 ~ 157
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggaa586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Y., Satake K., Sandanbata O., Maeda T., Su H.	4. 巻 124
2. 論文標題 Tsunami Data Assimilation of Cabled Ocean Bottom Pressure Records for the 2015 Torishima Volcanic Tsunami Earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 10413 ~ 10422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB018056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Maeda, T.
2. 発表標題 Forward/inverse problems and data assimilation in earthquake seismology
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 地震・津波波動場の時空間状態を推定するためのアジョイント方程式の導出
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 アジョイント方程式に基づく津波波動場推定の数値実験
3. 学会等名 日本地震学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 アジョイント法による地震・津波波動場の把握:最適制御理論に基づく導出と即時予測に向けた数値実験
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学3.0」-高密度観測・高周波数地震動で見る地殻・マントル不均質構造-
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 高密度・広帯域・長期間の地震動振幅モニタリングに向けて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 アジョイント方程式に基づく波動場の推定とその津波即時予測問題への応用の試み
3. 学会等名 日本地震学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 Adjoint 法に基づく波動場の時空間状態把握に向けて
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会『陸海両域での超高密度観測時代の観測・解析手法と地震波伝播理論の新展開』
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田勇吾・古村孝志・前田拓人
2. 発表標題 地震波逆伝播計算を用いた大地震の断層すべり即時推定の高解像度化
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 柴田勇吾・古村孝志・前田拓人
2. 発表標題 データ同化を導入した地震波逆伝播計算による大地震の震源断層すべり分布の推定
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 小菅正裕
2. 発表標題 広帯域レコードセクションに現れる変換波の網羅的探索
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会『固体地球の多様な波動現象へのアプローチ：多量データ解析と大規模計算を両輪に』
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前田拓人・齊藤竜彦・馬場俊孝
2. 発表標題 OpenSWPC + JAGURS: 巨大地震の全波動現象再現のための融合数値シミュレーション
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田拓人・齊藤竜彦・馬場俊孝
2. 発表標題 津波即時予測実験のための現実的全波動数値シミュレーション
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球の多様な波動現象へのアプローチ：多量データ解析と大規模計算を両輪に」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古村 孝志・前田 拓人
2. 発表標題 地震観測データと逆伝播計算のデータ同化に基づく震源即時推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 WIN/WIN32フォーマット地震波形ファイルの高速読み込みツールの開発
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田拓人
2. 発表標題 空間微分量を用いた地震波動場の構成要素分解
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「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

1. 発表者名 大峽充己・古村孝志・前田拓人
2. 発表標題 南海トラフ地震における長周期地震動の即時予測：Green関数を併用したデータ同化手法の有効性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口科子・前田拓人・古村孝志
2. 発表標題 東北沖の地震の際に北海道で観測される長周期の後続相（2）地殻と太平洋スラブの影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王宇晨・佐竹健治・三反畑修・前田拓人
2. 発表標題 2015年鳥島地震の津波データ同化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田早祐美・前田拓人・小菅正裕
2. 発表標題 地震波干渉法により推定した津軽平野とその周辺における表面波群速度
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大峽充己・古村孝志・前田拓人
2. 発表標題 データ同化に基づく南海トラフの地震の長周期地震動即時予測－海域観測点のサイト増幅の影響
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oba, A., Furumura, T., and Maeda, T.
2. 発表標題 Early forecast of long-period ground motions for large earthquakes in the Nankai trough based on data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sandanbata, O., Wang, Y., Satake, K., Maeda, T., and Su, H.
2. 発表標題 Tsunami Data Assimilation of the 2015 Torishima Earthquake
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
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	小菅 正裕 (Kosuga Masahiro) (90142835)	弘前大学・理工学研究科・客員研究員 (11101)	

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
---------	---------