

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16306

研究課題名(和文)次世代稠密海底観測網のためのシミュレーション同化型津波即時予測

研究課題名(英文)Development of a real-time tsunami forecasting method based on the data assimilation technique for next-generation dense tsunameter network

研究代表者

前田 拓人(Maeda, Takuto)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：90435579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生後に迅速に津波の現況を把握し、高精度な津波予測を行う津波即時予測手法に、データ同化法を適用することに成功した。このデータ同化法は、地震発生時における初期値ではなく、現時刻における津波波高と流速の空間分布を直接逐次的に推定する。これは、観測記録を逐次的にシミュレーションモデルにフィードバックすることで実現される。S-net観測点レイアウトでの数値実験やオフライン観測で収録された津波記録への適用事例から、提案手法の有効性が確認された。一方、海底圧力計では、震源近傍において地殻変動に伴うオフセットに伴うバイアスが起ることが判明し、その対策方法についての理論的な検討も実施した。

研究成果の概要(英文)：This study utilized the data assimilation technique for the real-time tsunami forecasting problem for the first time. The data assimilation directly estimates the tsunami wavefield, consists of tsunami height and flow velocity vector, at the present time rather than the initial tsunami height due to the earthquake fault motion. This was achieved by successive feedbacks from the observed data to the numerical simulation of tsunami wave propagation. Verification of this method has been done via numerical tests with the station layout of the S-net around Japan trench, and a real-world application with offline ocean-bottom stations. On the other hand, tsunami observation based on ocean-bottom pressure gauges may be biased due to the coseismic deformation near the earthquake source, which considerably affects the result of the data assimilation. Several countermeasures against this problem are investigated theoretically.

研究分野：地震学

キーワード：津波 即時予測 海底圧力観測 データ同化 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

津波はその伝播速度が地震動の約 1/10 と遅い。そのため、外洋において津波の励起状態を把握する事ができれば、即時予測によりその被害を劇的に減らすことが可能であると期待されている。このような目的から全世界規模で海底における津波観測網が整備されており、特に我が国においては、2011年東北地方太平洋沖地震ならびに想定南海トラフ地震を踏まえ、沈み込み帯を観測点間隔 30-50km という密な間隔で覆う稠密海底観測網が構築されつつある。

ところが、従来の津波予測は、津波観測記録から一度震源により励起された初期津波を推定する必要があり(右図上部)、震源過程推定の不確定性の影響を大きく受ける。だが、申請者が行ってきた稠密観測記録解析と数値計算を融合することで、震源の推定なしに直接津波波動場を推定できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では大気・海洋分野のデータ同化の考え方を援用し、震源断層に頼らない新しい津波予測の方法を実現する。提案する新たな方法は、(1) 稠密に観測されたデータからの短時間津波予測 (2) 観測されたデータと(1)による数値予測との比較 (3) 予測と観測の差をモデルにフィードバック、という一連のプロセスにより、津波励起源ではなく現時刻の津波波動場そのものを推定しようというものである。

過去の震源破壊を推定する事無く津波が予測できる事で、即時性がより向上するだけでなく、推定に伴う不確実性を排除したより信頼性の高い津波推定ができると期待される。また、そもそも震源が近くに存在しない遠地地震による津波や、通常とは異なる震源特性をもつ津波地震による津波などに対しても、近海のリアルタイム観測のみから津波予測を行う本手法は、特段の困難なしにそのまま一元的に適用できると期待される。

3. 研究の方法

データ同化の一般的な定式化に基づき、その津波への適用性について検討する。日本近海を空間的に離散化したすべてのグリッド点における津波波高と流速ベクトルをモデルパラメータとし、その時間発展を線形長波・線形分散波などの津波伝播支配方程式の離散化式で記述する。その上で、1時間ステップ先の津波を、数値モデルからの時間発展と、データと数値モデルの残差からのフィードバックとして記述する。このときの、観測と数値モデルの残差をモデルパラメータに射影する行列いかに推定するかによって、データ同化の特性と性能が決まってくると期待される。申請者の予備的な準備段階研究において、もっとも単純な最適内挿法にもとづき、1次元の津波伝播のデータ同化による波動場現状把握が可能である事がすでに確かめられていた。そこで、

既に成功しつつある最適内挿法をそのまま 2次元に拡張すると同時に、より高精度なデータ同化手法であるカルマンフィルタやその統計的拡張等に基づく高度化についても並行して検討する。同化により得られた津波波動場から、数時間後の沿岸への津波来襲とその遡上を予測する前方予測シミュレーションを行い、データ同化に基づく津波予測の手法を完成させる。

本研究期間中に完成・公開が予定されていた防災科学技術研究所 S-net および設置がすでに先行していた海洋研究開発機構の DONET, DONET2 の観測点レイアウトを想定して津波予測実験を行う。また、その時点で解析に耐えうるような津波記録が存在していれば、実データへのデータ同化法の予備的な適用を行い、他の手法により推定された津波予測結果と比較検討を行う。

さらに発展的な課題として、本研究で用いるデータ同化の考え方を援用した、地震波動の即時モニタリングにも挑戦する。地震動の運動方程式および構成方程式と、本研究で用いる津波波動伝播方程式は数学的にほとんど同じ構造をしており、地震波でも即時観測記録から地震波動場と応力場を直接推定することが原理的に可能であると期待される。

4. 研究成果

(1) データ同化による即時予測手法の構築

まず、データ同化手法の一つである最適内挿法に基づき、津波観測記録をもとに津波波動伝播シミュレーションを逐次的に同化する手法の定式化と数値実験を行った。データ同化は、海底地殻変動や断層運動、あるいは初期水位などの従来用いられてきた初期条件に頼ることなく、現時刻の津波波動場(津波波高ならびに流速)をモデルパラメータとして直接推定する。同化を行うときには、パラメータ数より圧倒的に少ない観測量からモデル全体を更新する必要がある。本研究では、観測および数値計算誤差の統計的特徴を先験的に仮定することで、その更新に必要な平滑化行列を解析的に求める最適内挿法を利用した。より高度な推定手法であるカルマンフィルタに基づく定式化も検討を行った。しかし、1次元問題であるならばともかく、実際の津波予測に必要な 2次元問題でのカルマンフィルタはあまりにも莫大な計算資源を必要とすることが明らかになった。その問題を緩和する統計的な手法も調査したが、より基本的な最適内挿法で十分な性能が達せられたこと(下記項目(2)参照)ことと、カルマンフィルタを近似することによる影響の調査も必要となることなどから、本課題では採用を見送った。

(2) データ同化手法の検証と実記録への応用

開発した手法の数値実験を行った。まず、東北地方太平洋沖地震の断層モデル解を仮定し、数値計算により S-net 設置予定点における津波波形を計算した。それを擬似的な観測記録

として、毎秒の津波波動場を推定した。その結果、仮定していた津波波動場そのものを高速かつ正確に再現することに成功し、本手法の有効性が明らかになった。一方、震源域のごく近傍においては、海底津波計が圧力を通じて津波を検知することに起因するオフセットが現れることが明らかになった（下記項目(5)参照）。津波シミュレーション結果を仮想観測記録として用いる数値実験に加え、2012年 Haida Gwaii 地震の海底オフライン津波記録に対して も津波データ同化を適用し、その津波予測手法としての有効性を示すことができた。本手法を広く利用してもらうため、データ同化の中心部分のコードは誰でも制約なく使えるオープンソースのコードとして広く公開した。

(3) 津波数値計算の高度化

一連のデータ同化に基づく津波即時予測手法開発に付随して、データ同化にも用いる津波数値計算の境界条件に改善の余地があることが明らかになった。電磁気や地震動の数値シミュレーションで広く用いられてきた Perfectly Matched Layer (PML) 法を津波方程式に適用することにより、計算領域の外部との境界から発生する人工反射波を劇的に減ずることが可能になった。この手法についても実装例をオープンソースコードとして公開を行った。高精度な津波吸収境界条件が実装されたことにより、必要最低限の計算領域でデータ同化を実行することができるようになり、計算効率が劇的に向上した。

(4) 地震動のデータ同化の試み

津波のみならず地震動についても面的な波動場を直接的に推定する手法を考案した。研究立案時にはデータ同化を直接援用することを計画していたが、より簡単にシミュレーションとの同化は行わずに、波動場の空間勾配を推定する Seismic Wave Gradiometry 法を援用することで、地震動の面的分布からその伝播方向は地震波の種類などの情報を明らかにすることに成功した。

(5) 水圧観測に伴うオフセットとその対策

従来の海底水圧計に基づく津波観測では、測定器の直下に海底地殻変動があるとそれがオフセットとして現れ、津波が地殻変動域から十分に遠ざかるまで予測手法が有効に働かない、という共通の問題があった。この問題に対して、津波データ同化を拡張し、観測方程式に圧力計記録から得られる推定波高と真の波高に系統的な差異が起りうることを考慮する新しい定式化を行った。このことにより、地震発生直後における最適内挿法の圧力同化結果のダランベール演算項を非斉次項にもつポアソン方程式を数値的に解くことで、海底水圧系直下ならびに周辺の海底地殻変動量を即時的に推定・分離できることを理論的に示した。ただし、この方法はポアソン方程式の

数値計算に莫大な時間がかかり、そのままでは即時予測には適さない。そこで、有限要素法に用いられる弱形式での定式化により、必要最低限の計算のみで地殻変動推定を行う方法を検討した。改良手法は一定の成果をもたらしたが、結果が数値的に不安定になる問題が残っており、今後さらなる改善が必要である。これらの成果により、地震発生直後の海底水圧記録を用いたより早い津波予測への展望が開けた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① Wang, Y., Satake, K., Maeda, T., & Gusman, A. R. (2017). Green's Function-based Tsunami Data Assimilation (GFTDA): A fast data assimilation approach toward tsunami early warning, *Geophysical Research Letters*, 44, 10282–10289, doi:10.1002/2017GL075307. (査読あり)
- ② Maeda, T., Nishida, K., Takagi, R., & Obara, K. (2016). Reconstruction of a 2D seismic wavefield by seismic gradiometry, *Progress in Earth and Planetary Science*, 3, 31, doi:10.1186/s40645-016-0107-4. (査読あり)
- ③ Gusman, A. R., Sheehan, A. F., Stake, K., Heidarzadeh, M., Mulia, I. E., & Maeda, T. (2016). Tsunami data assimilation of high-density offshore pressure gauges off Cascade from the 2012 Haida Gwaii earthquake, *Geophysical Research Letters*, 43, 4189–4196, doi:10.1002/2016GL068368. (査読あり)
- ④ Maeda, T., H. Tsushima, & Furumura, T. (2016). An effective absorbing boundary condition for linear long-wave and linear dispersive-wave tsunami simulations, *Earth, Planets and Space*, 68, 63, doi:10.1186/s40623-016-0436-y. (査読あり)
- ⑤ Maeda, T., Obara, K., M. Shinohara, T. Kanazawa, & K. Uehira (2015). Successive estimation of a tsunami wavefield without earthquake source data: A data assimilation approach toward real-time tsunami forecasting, *Geophysical Research Letters*, 42, 7923–7932, doi:10.1002/2015GL065588. (査読あり)

〔学会発表〕(計16件)

- ① Wang, Y., K. Satake, A. R. Gusman, and T. Maeda, Dynamic Tsunami Data Assimilation (DTDA) Based on Green's Function: Theory and Application, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, NH14A-05, 2017-12-11.
- ② 前田拓人, 海底水圧計記録による津波データ同化における地殻変動成分の推定:

- 高速解法の定式化, 日本地震学会 2017 年
秋季大会, 鹿児島, S17-P04, 2017-10-25.
- ③ Wang, Y., K. Satake, and T. Maeda, A fast
tsunami data assimilation approach on the
2012 Haida Gwaii earthquake: based on the
employment of Green's function, IAG-
IASPEI2017, Kobe, Japan, J04-5-02, 2017-
08-04.
- ④ Maeda, T., Tsunami data assimilation
including effects of coseismic deformation
for real-time tsunami forecasting using
pressure gauges, IAG-IASPEI2017, Kobe,
Japan, J04-5-01, 2017-08-04.
- ⑤ Wang, Y., K. Satake, A. Gusman, and T. Maeda,
A fast tsunami data assimilation approach
on 2012 Haida Gwaii earthquake: based on
the employment of Green's function, JpGU-
AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Japan,
HDS12-P06, 2017-05-25.
- ⑥ 前田拓人, 海底水圧計データ同化による
津波波高と海底地殻変動の即時的分離推
定, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 名
古屋国際会議場(名古屋市), S17-06, 2016-
10-07.
- ⑦ Maeda, T., Instantaneous separation
between coseismic deformation and
tsunami height from pressure gauge
records based on the data assimilation
method, AGU Fall Meeting, San Francisco,
California, NH32B-02, 2016-12-14.
- ⑧ 前田拓人・対馬弘晃・古村孝志, 線形長波
および線形分散波の津波数値シミュレー
ションのための効果的な PML 吸収境界条
件, 地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張,
HDS19-P07, 2016-05-25.
- ⑨ Maeda, T., Two-dimensional wavefield
reconstruction: tsunami data assimilation
and seismic gradiometry, 5th IASPEI/IAEE
International Symposium: Effects of
Surface Geology on Seismic Motion (ESG5),
Taipei, Taiwan, I104A, 2016-08-15.
(Invited)
- ⑩ 前田拓人, 海底水圧記録のデータ同化に
基づく津波波高と地殻変動の分離の試み,
地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張,
HDS19-04, 2016-05-25.
- ⑪ Maeda, T., K. Nishida, R. Takagi, and K. Obara,
Reconstruction of 2D seismic wavefield
from long-period seismogram and short-
period seismogram envelope by seismic
gradiometry applied to Hi-net array, EGU
General Assembly, Vienna, Austria,
EGU2016-10245, 2016-04-18.
- ⑫ 前田拓人・西田究・高木涼太・小原一成,
地震観測網への Seismic Gradiometry 法の
適用に基づく長周期地震波形ならびに短
周期地震波エンベロープの時空間解析,
地震学会 2015 年秋季大会, 神戸, S21-10,
2015-10-28.
- ⑬ Maeda, T., K. Nishida, R. Takagi, and K. Obara,

- Toward 2D Seismic Wavefield Monitoring:
Seismic Gradiometry for Long-Period
Seismogram and Short-Period Seismogram
Envelope applied to the Hi-net Array, AGU
Fall Meeting, San Francisco, California,
S52A-07, 2015-12-18.
- ⑭ Gusman, A., K. Stake, A. Sheehan, I. Mulia, M.
Heidarzadeh, and T. Maeda, First
application of tsunami back-projection and
source inversion for the 2012 Haida Gwaii
earthquake using tsunami data recorded on
a dense array of seafloor pressure gauges,
AGU Fall Meeting, San Francisco, California,
NH23A-1856, 2015-12-15.
- ⑮ Maeda, T., K. Nishida, R. Takagi, and K. Obara,
From seismic waveforms to seismic
wavefield: A feasibility study of the seismic
gradiometry applied to the Hi-net array,
AOGS2015, Suntec City, Singapore, 2015-
08-07.
- ⑯ 前田拓人・西田究・高木涼太・小原一成,
地震波形解析から地震波動場解析へ:
Seismic Gradiometry 法の広帯域化 Hi-net
記録への適用可能性, 地球惑星科学連合
2015 年大会, 幕張, 2015-05-26.

[その他]
ホームページ等
研究成果コード公開
<https://github.com/takuto-maeda/tdac>
https://github.com/takuto-maeda/tsunami_pml

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 拓人 (MAEDA, Takuto)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 90435579