

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14563

研究課題名（和文）沿岸津波観測記録を用いた高精度波源推定に関する研究

研究課題名（英文）A study on tsunami source estimation using coastal observation records

研究代表者

山中 悠資（Yamanaka, Yusuke）

北海道大学・理学研究院・講師

研究者番号：60815108

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では沿岸観測記録を用いた津波の波源推定手法の高度化を念頭に置きながら、水槽実験や数値実験に基づきその波動特性を精緻に分析し、津波の非線形効果を定量的に評価した。その結果を踏まえ、津波の非線形効果を考慮しながら実津波イベントの波源推定を実施した。非線形効果を考慮せずに推定された波源による津波と比較して、それを考慮して推定された波源による津波は観測記録をより妥当に再現できることを示した。また、非線形効果を考慮せずに津波の波源を推定すると、波源の規模が過小に評価される可能性があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、沿岸域で観測された津波波形に基づく波源推定を、津波の非線形効果を考慮しながら実施するとともに、その考慮の有無が推定波源にどのように影響するのかを評価した。本研究の成果により、実津波イベントにおいて非線形効果を考慮せずに推定された津波波源を再評価する余地が残されていることが示された。また本研究の成果により、沖合津波観測網が整備される以前に発生した津波イベントにおける波源推定精度が大きく向上する可能性があり、歴史津波イベントの解明や津波防災が進展・高度化することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to improve the accuracy of source inversion using coastal tsunami observation records. In this study, nonlinear effects of tsunami propagation were investigated through laboratory and numerical experiments. Based on the results, a source inversion method considering the nonlinear effects was proposed and applied to the estimation of an actual tsunami source using the tsunami waveform data observed at tide gauges. The developed source model accurately reproduced the observed tsunami waveforms compared to a source model developed using an existing inversion method that does not account for the nonlinear effects. Additionally, it was found that disregarding the nonlinear effects in the inversion process led to an underestimation of the source magnitude.

研究分野：津波工学

キーワード：津波 地震 波源推定 断層モデル 非線形性

1. 研究開始当初の背景

これまでに発生した津波波源の推定および分析は、一連の津波挙動の系統的理解や沿岸津波防災計画の策定に向けて重要である。沿岸域では、古くから潮位を計測することを目的とした検潮所が設置されている。これによってしばしば津波が観測されることがあり、その波形データが記録されてきた。このような観測波形記録を用いながら、解の重ね合わせの原理に基づく線形逆解析手法が津波の波源推定に多く適用されてきた(以下、従来手法と呼ぶ)。従来手法に基づく波源推定は、観測された津波波形および津波の波動特性を線形と仮定することで実施できる。しかしながら、沖合を伝播する津波は線形波動として表すことができるが、沿岸域における津波伝播は非線形波動の特性を持つ。沿岸域の津波に対して前述の仮定を置きながら実施した津波の波源推定において、津波の波動特性を線形近似することによる影響、すなわち津波の非線形効果が推定される波源にどのように影響するのかについては、必ずしも十分に分析および評価されていない。

2. 研究の目的

本研究では、従来手法に基づき推定された実津波イベントの波源の不確実性を評価する。その結果を踏まえながら、津波の非線形効果の考慮に基づき波源推定手法を高度化することを研究の目的とする。本研究で開発した手法の有用性を示すとともに津波の非線形効果の考慮の有無がどのように推定される波源に影響するのかを評価する。現在では、観測津波波形だけでなく、地震波形や地殻変動などの観測データを併せて用いるジョイント・インバージョン法が波源推定に用いられることもある。しかしながら、観測津波波形のみを用いた従来手法を高度化する余地は残されており、これを達成するために津波の波動特性を精緻に分析する。本研究の成果により、沖合における津波観測記録や地震波形・地殻変動データが乏しい時代に発生した津波の波源推定精度の向上が期待でき、各津波波源特性の理解の促進に加え、長期的な津波被害リスク評価の精度向上にも貢献することが可能である。

3. 研究の方法

(1) 水槽実験および数値実験

本研究ではまず水槽実験と数値実験を行い、主に津波伝播に関する定量的なデータを取得するとともにその再現計算を行う。水槽実験では津波を模した段波を発生させ、その伝播および発達過程を、波高計などを用いながら計測する。数値実験では、まず数値モデルを用いて水槽実験で得られた段波の再現計算を行う。その再現性と数値モデルの妥当性を検証しながら、津波の非線形効果を考慮した波源推定手法の開発に向けて再現された波動特性を詳細に分析する。また、実海域における津波の数値実験を行い、津波の非線形効果に伴う推定波源の不確実性を評価する。さらに、水槽実験スケールで得られた波動特性が実海域スケールにおいても同様に得られるかどうかを検証する。

(2) 津波の非線形効果を考慮した波源推定手法の開発

前述の水槽実験および数値実験の結果を踏まえながら、津波の非線形効果を考慮した波源推定手法を開発する。従来手法と本研究で開発した手法に基づき、沿岸域で観測された実津波イベントの津波波形を用いてその波源を推定する。その二つの手法に基づき推定された波源の特性や観測された津波波形の再現性を比較することで、本研究で開発した手法の有用性を示すとともに、津波の非線形効果の考慮の有無が推定される波源にどのような影響を及ぼしたかを定量的に評価する。なお後述するように、本研究では2003年に発生した北海道十勝沖地震・津波を対象に上述の分析を行った。

4. 研究成果

(1) 水槽実験および数値実験

津波を模した段波の水槽実験を行い、その水位変動を計測した。さらに、実津波イベントの分析に広く用いられている数値モデルを用いて、水槽実験で得られた段波の再現計算を行った。用いた数値モデルは非線形長波方程式、非線形分散波方程式に基づくモデルであり、比較のため線形長波方程式に基づくモデルも用いた(以下、非線形長波モデル・非線形分散波モデル・線形長波モデルと呼ぶ)。その結果、実験条件に応じて適切な数値モデルおよびその初期条件を用いることで、段波の非線形効果が比較的強い場合においてもそれが砕波に至るまでは実験結果を良好に再現できることを確認した。この結果を踏まえ、数値モデルにより再現された段波の水位変動特性、流束特性、および非線形効果を分析した。本研究では非線形長波および非線形分散波モ

デルに含まれる移流項に着目した。段波の第一波目がピークに達するまでの時々刻々の流束と移流項に起因する非線形効果の大きさの関係をプロットすると、放物線でその形状を近似することができた。その放物線の大きさをさらに線形関数で近似することで、流束の大きさに比例する非線形効果をモデル化した。観測津波波形を用いた波源推定では、第一波目の津波波形のみを用いることが多いことから、第一波目の津波が影響している間に生じる非線形効果の分析が最も重要である。すなわち、第一波目の津波の非線形効果をモデル化できたことにより、非線形効果を考慮した波源推定手法の構築に向けて大きく前進した。

実海域スケールにおける津波の数値実験を行った。本報告書では2003年十勝沖地震津波を対象とした分析結果について詳述する。同津波は北海道や東北地方の検潮所などで観測されており、従来手法に基づきその波源が推定されている(Tanioka et al., 2004; 谷岡ら, 2004)。観測津波波形に基づき推定された既存の波源モデルに基づく津波の伝播計算を、線形長波モデルおよび非線形長波モデルを用いて行い、同津波の非線形効果を評価した。その結果、十勝および釧路検潮所が位置する港湾周辺域においては、津波の第一波目においてもその非線形効果が無視できないことがわかった。その効果が最も大きかった十勝港周辺域に着目して詳細に分析すると、防波堤開口部などで局所的に非線形効果が大きくなっていることがわかった。数値計算における津波の非線形効果は、津波の氾濫や海底摩擦による津波の減衰などによる影響を含むがそれらの影響は小さく、同津波の非線形効果は概ね移流に起因していたことがわかった。この結果を踏まえ、水槽実験の再現計算結果における分析と同様に、同津波の第一波目がピークに達するまでの時々刻々の流束と移流項に起因する非線形効果の大きさの関係をプロットすると、その形状を放物線で近似することができた。その放物線の大きさを線形関数で近似することで、流束の大きさに比例する非線形効果をモデル化できることがわかった。この関係を波源推定において考慮しながら、津波の非線形効果を考慮した波源推定手法の開発を行う。

(2) 津波の非線形効果を考慮した波源推定手法の開発

前述の成果により、2003年十勝沖地震津波の沿岸津波観測波形を用いた波源推定においては、津波の非線形効果を考慮する必要があることがわかった。また同津波の非線形効果は流束に比例する線形関数で表すことができることがわかった。これらを踏まえて、津波の非線形効果を考慮しながら同津波の波源を再推定した。なお、本報告書においては2003年十勝沖地震津波の波源推定と同地震の断層モデル構築は同義であり、以下では沿岸津波観測波形を用い、非線形効果を考慮した同地震の断層モデル構築手法について詳述する。

まず従来手法に基づき、観測津波波形および沿岸域における津波波動を線形と見なしながら2003年十勝沖地震の断層モデルを構築する。本研究においては花咲・厚岸・釧路・十勝・八戸・宮古検潮所で観測された津波波形を用いることとした。断層は8つの要素断層に分割し、各要素断層に単位すべり量を与えたときに生じる要素津波の伝播を線形長波モデルに基づき推定し、各検潮所地点におけるその津波波形(以下、グリーン関数と呼ぶ)を推定した。観測津波波形を最も妥当に再現できるグリーン関数の線形和を求めることにより、各要素断層で生じるべきすべり量を逆推定し、断層モデルを構築した(図1左)。しかしながら前述したように、十勝および釧路検潮所周辺地域では津波の非線形効果が無視できない。現段階においては津波の波動を線形近似して非線形効果を無視しているため、構築された断層モデルにはそれに伴う誤差が含まれていると考えられる。そこで、以下の手順に従い断層モデルの補正を行った。

構築した断層モデル(断層モデル A とする)による津波の伝播計算を、十勝および釧路検潮所周辺地域に対して非線形長波モデルに基づき行う。

得られた結果に基づき、十勝および釧路検潮所周辺地域の非線形効果を、流束に比例する線形関数として表す。

得られた線形関数を考慮しながら、十勝および釧路検潮所地点に対するグリーン関数を補正する。

十勝および釧路検潮所地点に対して補正されたグリーン関数とその他の検潮所地点に対するグリーン関数を用いて、観測津波波形を最も妥当に再現できるそれらの線形和を求めたことで新たな断層モデル(断層モデル B とする)を構築する。

断層モデル B と断層モデル A のすべり量分布に有意差がない場合は解析を終了する。そうでない場合には、断層モデル B を断層モデル A と見なしして へ戻り、 から の手順を繰り返す。

津波の非線形効果を考慮して補正された断層モデルを図1(右)に示す。補正前の断層モデル(図1左)では最大すべり量が5.3 mであったのに対し、補正後の断層モデルでは5.9 mとなった。剛性率を60GPaと仮定すると(Yamanaka and Kikuchi, 2003)、断層モデルに基づく地震モーメントおよびモーメントマグニチュード(Mw)は、補正前では 1.00×10^{21} Nm および Mw 7.9 となり、補正後は 1.16×10^{21} Nm および Mw 8.0 となった。これらの結果から、津波の非線形効果を考慮することにより、推定される断層モデルの規模(地震モーメントおよびモーメントマグニチュード)が大きくなることがわかった。Yamanaka and Kikuchi (2003)は観測された地震波形を用いて2003年十勝沖地震の震源過程をモデル化し、 1.0×10^{21} Nm の地震モーメントおよび5.8 m の最大すべり量を推定した。また、Koketsu et al. (2004)は強震動および地殻変動データを用

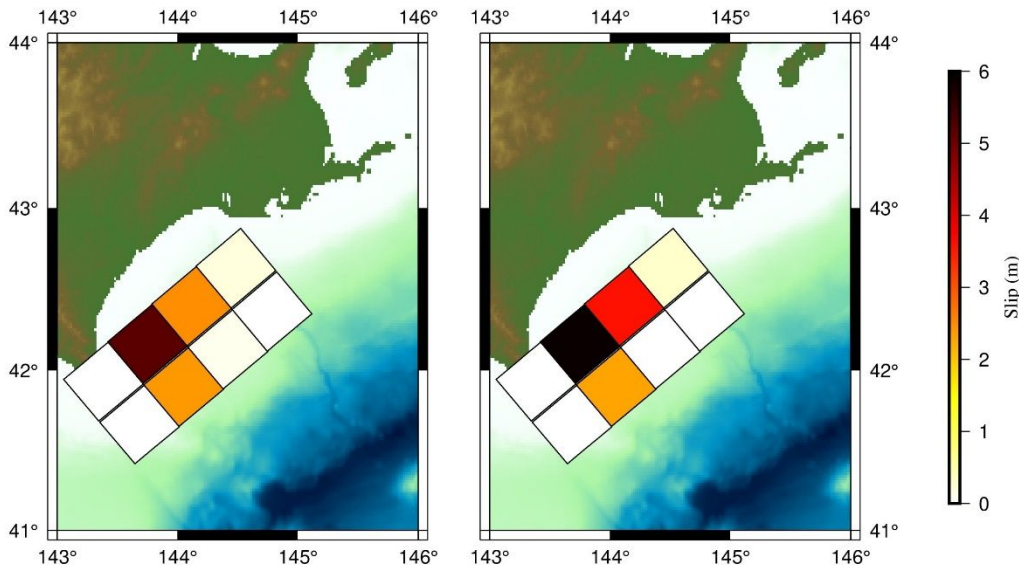


図1 2003年十勝沖地震の断層モデル。
(左：津波の非線形効果を無視，右：津波の非線形効果を考慮)

いて、それらをそれぞれ 2.2×10^{21} Nm および 7.1 m と推定している。これらの先行研究結果と比較すると、本研究で構築した断層モデルは先行研究が構築した断層モデルと矛盾しない妥当な規模を有していることが確認できる。

津波の非線形効果を考慮せずに構築した断層モデルとそれを考慮して構築した断層モデル(図1)による津波の伝播計算を非線形長波モデルに基づき行い、各検潮所地点でそれらの波形を比較した結果を図2に示す。特に十勝および釧路検潮所における観測波形の再現性が、非線形効果を考慮して断層モデルを構築したことによって向上したかが重要な点である。比較のため、図2にはそれぞれの断層モデルによる津波の伝播を線形長波モデルに基づき推定した結果を併せて示している。十勝および釧路検潮所地点では、津波の第一波目では線形長波モデルに基づく津波の方が非線形長波モデルに基づく津波よりも大きい。また両モデルで推定された津波の周期特性も異なっていることがわかる。非線形効果を考慮して構築した断層モデルによる津波の伝播を非線形長波モデルに基づき推定した結果に注目すると、十勝および釧路検潮所で観測された波形が良好に再現できていることがわかる。また最大水位の観点において、両検潮所の観測波形の再現性が向上したことが確認できた。さらに、観測されたその他の津波波形も良好に再現できていることが確認できる。以上の結果より、津波の非線形性を考慮した断層モデルを構築することによって、観測津波波形の再現性を向上させることができた結論付けられる。

(3) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクトと今後の展望

本研究では、沿岸域で観測された津波波形を用いた波源推定において津波の非線形効果の考慮の有無がどのように影響するのかを評価するとともに、それを考慮した波源推定手法を開発した。本研究で開発した手法を2003年十勝沖地震津波に適用し、同地震の断層モデルを構築することでその波源を推定した。その結果、津波の非線形効果を考慮することで構築される断層モデルの規模が大きくなった。前述したように、従来手法に基づく津波の波源推定(断層モデル構築)は先行研究により国内外を問わず多く行われているが、津波の非線形効果を考慮していない場合が多く、またその効果も十分に評価されていない場合が多い。本研究で得られた成果は、他のイベントにおいて従来手法に基づき構築された断層モデルの規模が過少に評価されている可能性を示唆する。したがって、本研究の成果に基づきそれらの見直し・再評価に発展する可能性がある。本研究の手法は従来の線形逆解析の枠組みを利用しながらも、その理論的整合性を維持しつつ津波の非線形効果を考慮するという特徴があり、既存の手法とは異なるアプローチで推定波源の高度化を実現するものである。本研究では2003年十勝沖地震津波に開発した手法を適用したが、多数の津波イベントにそれを適用するまでには至らなかった。開発した手法を他のイベントに適用し、手法の性能や特性を評価していくことが必要である。

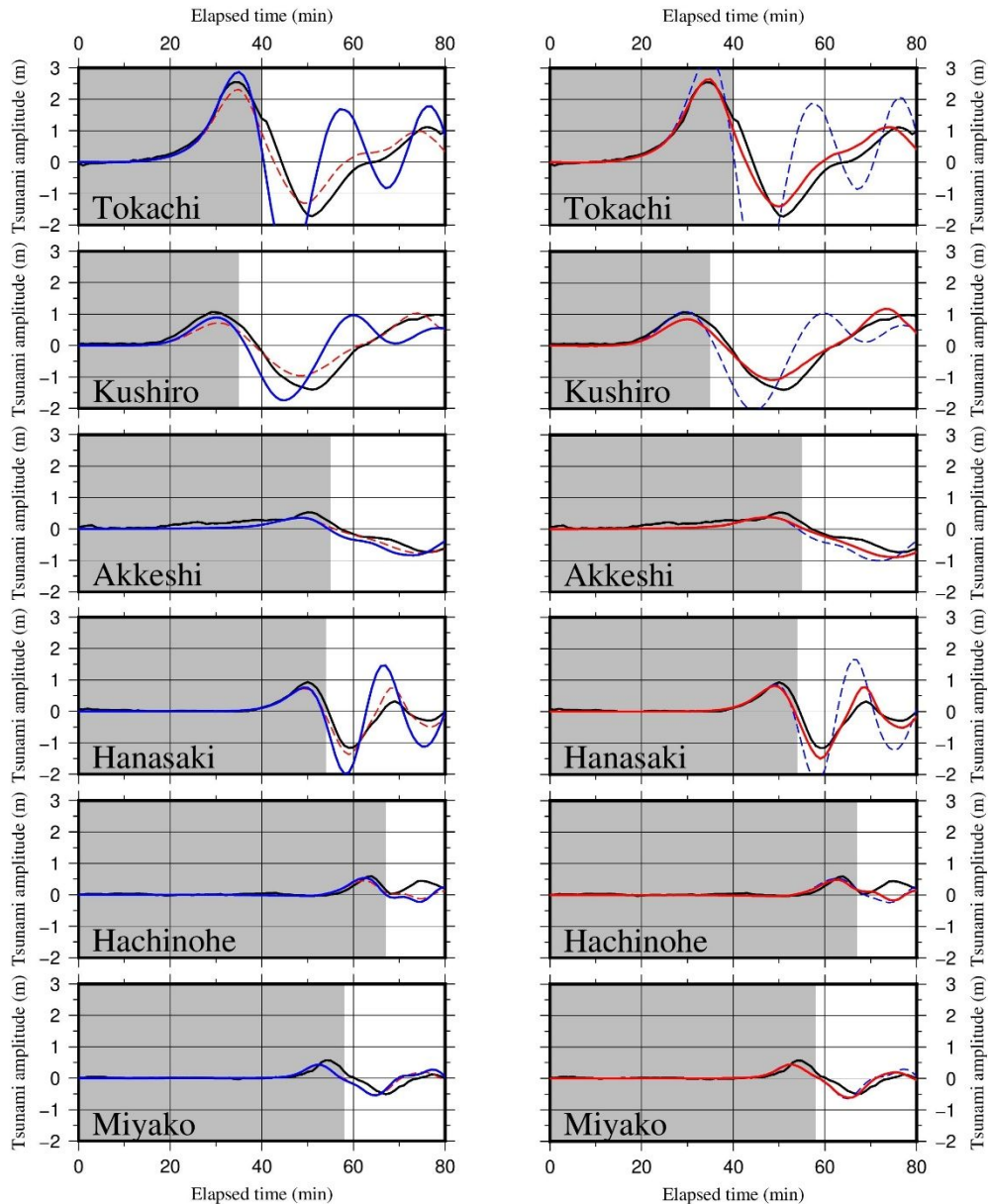


図2 構築した断層モデルに基づく津波波形．黒線は観測波形，青線および赤線は線形長波モデルおよび非線形長波モデルに基づく推定波形を示し，灰色の領域は逆解析に使用した観測データ区間を示す(左：図1左の断層モデルによる津波；右：図1右の断層モデルによる津波)．

(参考文献)

1. Koketsu, K., Hikima, K., Miyazaki, S., and Ide, S.: Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake. *Earth, Planet and Space*, 56, 329-334, 2004. <https://doi.org/10.1186/BF03353060>
2. Tanioka, Y., Hirata, K., Hino, R., and Kanazawa, T.: Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion. *Earth, Planet and Space*, 56, 373-376, 2004. <https://doi.org/10.1186/BF03353067>
3. Yamanaka, Y. and Kikuchi, M.: Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves. *Earth, Planets and Space*, 55(12), e21-e24, 2003. <https://doi.org/10.1186/BF03352479>
4. 谷岡勇市郎, 平田賢治, 日野亮太, 金沢敏彦: 津波波形から推定した詳細な2003年十勝沖地震のすべり量分布, *地震第2輯*, 57(2), 75-81, 2004. https://doi.org/10.4294/zisin1948.57.2_75

5. 主な発表論文等

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

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山中悠資, 谷岡勇市郎
2. 発表標題 2003年十勝沖地震津波の数値波動特性
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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