

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04021

研究課題名(和文) 歪みの蓄積と断層破壊の多様性から考える津波の発生

研究課題名(英文) Tsunami generation: strain accumulation in crust and diversity of earthquake rupture process

研究代表者

齊藤 竜彦 (Saito, Tatsuhiko)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波防災研究部門・主任研究員

研究者番号：30550933

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)：津波発生研究に地震発生メカニズムを取り入れ、日本列島太平洋沖において、どこで、どのような大津波が発生する可能性があるか?という問題に取り組んだ。どこが津波の発生源となりうるかを特定するために、地殻変動データの解析からプレート間の摩擦力が強い箇所を推定する手法を開発し、南海トラフにおけるプレート間固着を推定した。さらに、断層運動に関連するエネルギー収支の理論を利用し、巨大地震の破壊過程をシミュレートし、将来南海トラフで起こりうる巨大地震の断層運動と大津波を理論とデータから想定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過去の大地震が将来も繰り返して起こることを前提にする現在主流の地震発生長期予測手法は、過去に発生事例が知られていない大地震の発生を想定することが難しい。本研究では、GPSなどの衛星測位技術を使うことで列島の変形を計測し、プレート境界に加わっている力を推定し、その力を原動力として巨大地震の断層破壊をシミュレートする手法の研究開発を行った。本研究によって、断層物理学と観測データをから将来起こりうる巨大地震とその津波を想定するフレームワークを実際に提示することができた。

研究成果の概要(英文)：This study investigates tsunami generation based on the tsunami theory including earthquake generation mechanism to assess where and how large tsunamis possibly occur in the future off the Pacific coast of Japan. In order to identify mechanically locked areas along the plate interface as tsunami source, we developed a method to analyze crustal deformation and applied it to the Nankai trough subduction zone. Furthermore, using a theory of energy balance associated with earthquake fault motions, we simulated the earthquake rupture and tsunami propagation. This study developed a method to create earthquake and tsunami scenarios that may occur in the future based on mechanics and observed data.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地震 津波

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

流体海中の津波現象については流体力学をベースにした研究が、巨大地震の準備・断層破壊過程については弾性・粘弾性体力学をベースにした研究が発展してきた。一方、津波即時予測が抱えている課題は、大地震の準備過程、発生過程といった固体地殻の現象と密接に関わっている。流体力学に基礎を置く1940-70年代の津波発生理論(例 高橋 1942; Kajiura 1971)は、海底変位と海面変位の因果関係を定量的に明らかにした津波発生のメカニズム解明に関する一つの到達点である。しかし、地震発生による大津波の励起を根本的に理解するためには、固体地殻内に長い年月(> ~100年)をかけて徐々に歪みが蓄えられていく地震準備過程、歪みの急激な解放としての断層破壊を含めて、津波の発生を理解することが重要となる。地震と津波、固体と流体にまたがる境界領域の研究によって、津波発生のメカニズムに関する理解を一段上のレベルに引き上げることが必要とされていた。

2. 研究の目的

本計画では、津波発生のメカニズム研究に地震発生のメカニズムを取り入れ、固体地殻-流体海水系の現象として、地殻への歪み蓄積-断層破壊-津波励起を統合して考える。そして、日本列島太平洋沖において、どこで、どのような大津波が発生する可能性があるか?という問題に取り組む。そのために以下の2つのテーマに取り組む

(1) 地殻内での弾性歪みの蓄積量が大きい領域ほど大きな地震を引き起こす能力がある。粘弾性・弾性理論に基づき陸上・海底の地殻変動データを解析し、プレート間固着と歪みの蓄積量を推定、大地震の発生可能性が高い地域を予測する。

(2) 歪みの解放過程として断層破壊をモデル化し、海底地殻変動・地震波放射を考慮した津波発生プロセスを再現する固液複合波動場シミュレーションを実施する。様々な断層破壊様式を想定し、バリエーションのある大津波の発生シナリオを作成する。

3. 研究の方法

(1) どこが大津波の発生源となりうるか?

地殻変動データから地殻内の歪み蓄積量を評価し、大津波の波源となり得る領域を推定する。具体的には、陸上・海底の地殻変動データを解析して、地殻内の歪み蓄積を引き起こす、プレート境界の固着域を推定し、それを基に、地殻内の歪み蓄積のプロセスをモデル計算する。プレート境界の固着は、運動学的に記述されるすべり欠損分布として推定される場合が多い。運動学的にはありうる固着分布でも、それを実現する力学的固着分布すなわち摩擦力分布(剪断応力分布)が非現実的な分布になる場合がある。本研究では、この問題を解決するために、運動学的な固着分布をもとめるのではなく、力学的な固着分布を推定する手法を開発する。

(2) どのような大津波が発生しうるか?

地殻内に蓄積されている歪みの急激な解放として断層破壊をモデル化し、固液複合の波動場シミュレーションコード(Saito and Tsushima 2016 JGR)を使って、固体地殻-流体海水の津波発生場をシミュレートする。具体的には、地殻内に蓄積された歪みのほぼ全てが解放するように最終断層すべり分布を設定する。断層破壊による固液複合の波動場を高精度に計算し、固体地殻-流体海水系における津波発生プロセスを明らかにする。特に、海底の水圧変化など、実在する観測設備で観測可能な物理量をシミュレートし、津波即時予測の性能評価に利用できる模擬観測記録も作成する。

4. 研究成果

(1) どこが大津波の発生源となりうるか?

プレート間のすべり遅れによって生成される剪断応力分布を理論的に計算し、プレート間の剪断応力と地表変形を関連付けた応答関数データベースを作成した。このデータベースを利用し、陸域・海域地殻変動データから、プレート間の力学的固着分布(剪断応力増加速度分布)を推定する手法を開発した。この手法を南海トラフのプレート境界に適用した。図1に、剪断応力増加速度分布の推定結果の例を示す。昭和南海東南海、安政南海東南海地震に対応した震源域に対応して、剪断応力の増加速度が大きい箇所を推定した。この箇所が大地震・大津波を引き起こす根本的な原因としての力学的固着域とみなすことができる。

推定したプレート間応力分布とエネルギー収支の理論的考察をもとに、南海トラフで起こりうる巨大地震の連動破壊シナリオ、および、連動破壊が起こるために最低限必要となる歪みエネルギー量を見積もった(Noda, Saito et al. 2021)。さらに、巨大地震の破壊に加え、ゆっくりすべりを考慮した巨大地震の連鎖的破壊シナリオを作成した(齊藤・野田 2021 地震学会)。

断層破壊の連動性・巨大地震への成長のメカニズム解明を目的に、連動破壊が起こるために最低限必要となる歪みエネルギー量の定式化を行った。固着域の連動破壊を起こすためには、より多くの歪みエネルギーが必要となることが判明した(Saito and Noda 2020)。

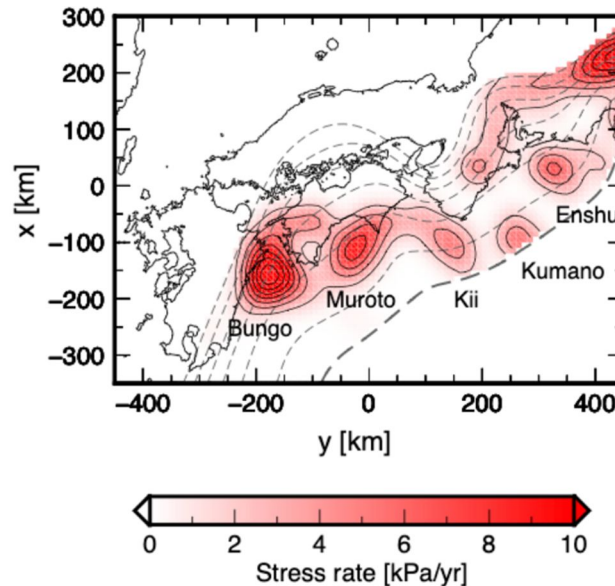


図 1. 南海トラフのプレート境界の力学的固着分布 (剪断応力増加速度分布)
(<https://www.essoar.org/pdf/jst/10.1002/essoar.10510135.1>).

(2) どのような大津波が発生しうるか?

巨大地震および津波発生時の固液複合の波動場をシミュレートした。従来の津波シミュレーションでは、巨大地震による津波発生プロセスは、地下構造が均質、かつ、海底が平らであるといった単純化された数理モデルが利用されてきたが、3次元性体と流体シミュレーションによって、不均質な地下構造、および、複雑な海底地形が津波発生プロセスに与える影響を考慮した津波発生・伝播シミュレーションを実施した。南海トラフで起こりうる巨大地震の場合でも、震源域直上の津波観測点では、地震波が津波信号に重畳し、津波観測のノイズになる場合がある。また、震源域に近い海岸線では、津波波高そのものよりも断層運動による沿岸部の沈降が、浸水域の拡大をもたらす要因となる場合があることが明らかとなった。(Saito et al. 2019; Saito and Kubota 2021).

海底地殻変動による津波発生機構の詳細を検討するために、ラグランジュ表記を利用した津波発生における海底水圧変化の解析解を導出した。これまでオイラー表記で行っていたために、水圧計が設置されている海底が上昇することによる圧力減少効果を補正項として取り入れていたが、ラグランジュ表記のもとで定式化をすることで、補正項を必要としない定式化となった。これまで利用していた補正の正当性を数式展開に基づき証明することができた (Saito et al. 2021)。

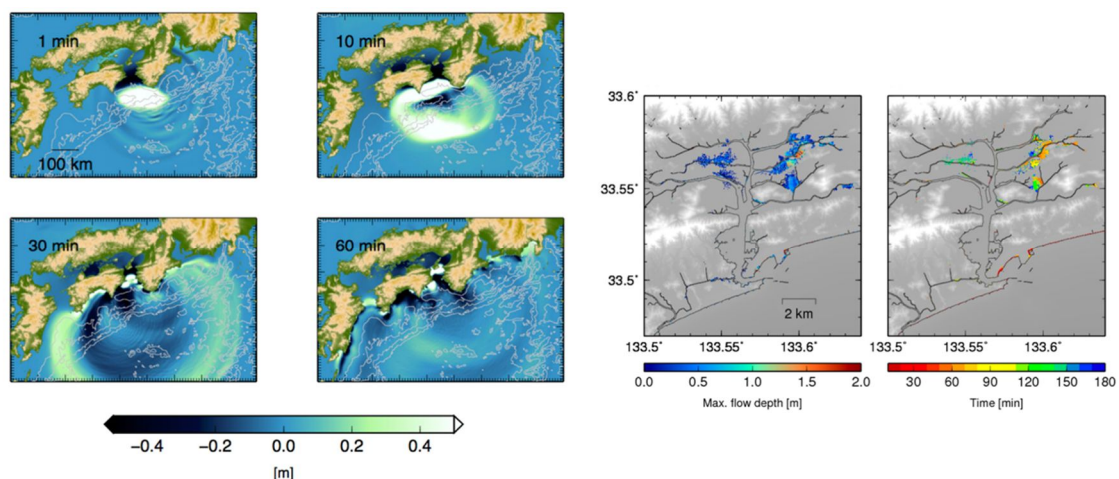


図 2 南海トラフで発生する可能性のある巨大地震による津波の発生と伝播 (左) と高知市付近の浸水のシミュレーション (右)。

さらに、定式化した津波発生理論に基づき、海面で発生する圧力変化による津波励起メカニズムを調査した。単に大気中に低気圧が発生するだけでは、大津波が沿岸に襲来する可能性は低い、低気圧が重力波移動速度と同じ速さで移動する場合、伝播過程において津波が増大し続ける。従来からも、この津波増幅メカニズムは指摘されていたが、本研究の理論に

よって、津波の分散効果が働くことによって、津波の振幅が伝播過程でより急激に増大する場合もありうることを示した。さらに、津波発生・成長過程において観測可能となる海底水圧変化を理論的に計算した (Saito et al. 2021)。

< 引用文献 >

- Kajiura, K. (1963). The leading Wave of a Tsunami. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 41, 535–571.
- Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., & Urata, Y. (2021). Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2020jb020417>
- Saito, T., Baba, T., Inazu, D., Takemura, S., & Fukuyama, E. (2019). Synthesizing sea surface height change including seismic waves and tsunami using a dynamic rupture scenario of anticipated Nankai trough earthquakes. *Tectonophysics*, 769(July), 228166. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228166>
- Saito, T., & Kubota, T. (2020). Tsunami Modeling for the Deep Sea and Inside Focal Areas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48, 121–145. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-054845>
- Saito, T., & Noda, A. (2020). Strain energy released by earthquake faulting with random slip components. *Geophysical Journal International*, 220(3), 2009–2020. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz561>
- Saito, T., Kubota, T., Chikasada, N. Y., Tanaka, Y., & Sandanbata, O. (2021). Meteorological Tsunami Generation Due to Sea-Surface Pressure Change: Three-Dimensional Theory and Synthetics of Ocean-Bottom Pressure Change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(5), 1–29. <https://doi.org/10.1029/2020JC017011>
- Takahashi, R. (1942). On seismic sea waves caused by deformations of the sea bottom. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Saito Tatsuhiko, Kubota Tatsuya	4. 巻 48
2. 論文標題 Tsunami Modeling for the Deep Sea and Inside Focal Areas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annual Review of Earth and Planetary Sciences	6. 最初と最後の頁 121 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-earth-071719-054845	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 Tatsuhiko Saito, Toshitaka Baba, Daisuke Inazu, Shunsuke Takemura, Eiichi Fukuyama	4. 巻 769
2. 論文標題 Synthesizing sea surface height change including seismic waves and tsunami using a dynamic rupture scenario of anticipated Nankai trough earthquakes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2019.228166	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 Tatsuhiko Saito, Akemi Noda	4. 巻 220
2. 論文標題 Strain energy released by earthquake faulting with random slip components	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 2009-2020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz561	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 Saito Tatsuhiko, Kubota Tatsuya, Chikasada Naotaka Y., Tanaka Yuusuke, Sandanbata Osamu	4. 巻 126
2. 論文標題 Meteorological Tsunami Generation Due to Sea Surface Pressure Change: Three Dimensional Theory and Synthetics of Ocean Bottom Pressure Change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020jc017011	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 Noda Akemi, Saito Tatsuhiko, Fukuyama Eiichi, Urata Yumi	4. 巻 126
2. 論文標題 Energy Based Scenarios for Great Thrust Type Earthquakes in the Nankai Trough Subduction Zone, Southwest Japan, Using an Interseismic Slip Deficit Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020jb020417	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 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Tatsuhiko Saito, Akemi Noda
2. 発表標題 Tsunami synthetics using mechanic-based earthquake rupture scenarios
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 Tatsuhiko Saito, Akemi Noda
2. 発表標題 Strain energy released by an earthquake with random slip fluctuations: a stochastic model
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuhiko Saito, Akemi Noda
2. 発表標題 Strain energy release by an earthquake rupture with heterogeneous stress-drop distribution
3. 学会等名 AGU Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤竜彦, 野田朱美
2. 発表標題 弾性・粘弾性媒質における地震による歪みエネルギー変化の可視化と定量化: 波数積分法による計算
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤竜彦, 久保田達矢, 近貞直孝, 田中裕介, 三反畑修
2. 発表標題 海面の気圧変化による津波の発生: 沖合水圧観測のための3次元モデル
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤竜彦
2. 発表標題 歪みエネルギー評価による地震発生メカニズムの理解
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Saito, T, T. Kubota, N.Y. Chikasada, Y. Tanaka, O. Sandanbata
2. 発表標題 A three-dimensional theory for meteorological tsunami generation and propagation
3. 学会等名 30th International Tsunami Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤竜彦, 野田朱美
2. 発表標題 南海トラフの力学的固着: プレート境界地震の連鎖的な発生と余効すべり
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021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
---------	---------