

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24241060

研究課題名(和文) 日本周辺の巨大地震スーパーサイクルの解明と津波予測

研究課題名(英文) Supercycle of giant earthquakes around Japan and tsunami forecast

研究代表者

佐竹 健治 (SATAKE, Kenji)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20178685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,500,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北地方太平洋沖地震は、プレート境界深部と海溝軸付近の両方がほぼ同時に破壊した。この新知見に基づいて、日本海溝で発生した869年貞観地震と千島海溝で17世紀に発生し北海道東部に津波堆積物をもたらした巨大地震の規模を再検討すると、ともにM8.8以上となった。北海道・岩手県・福島県では、さらに古い巨大地震による津波堆積物を発見した。日本海溝・千島海溝において、数十年間隔で繰り返し発生するM8クラスの地震の他に、約400～600年間隔でM9クラスの巨大地震が発生したこと、すなわち、スーパーサイクルモデルが成り立つことが分かった。M9クラスの地震についての即時的な津波浸水予測方法も考案した。

研究成果の概要(英文)：The 2011 Tohoku earthquake consisted of ruptures on deeper plate interface and shallower slip near trench axis. By using this model of the 2011 earthquake, sizes of the 869 Jogan earthquake along Japan Trench and the 17th century earthquake along Kuril Trench which brought tsunami deposits on the Hokkaido coast were estimated as M 8.8 or larger. Tsunami deposits from older giant earthquakes along Japan and Kuril Trenches were also found in Hokkaido and Tohoku coasts. These support a supercycle model of giant earthquakes along Japan and Kuril Trenches, in which giant earthquakes of M-9 repeat with intervals of 400 to 600 years, in addition to recurrence of M-8 earthquakes with intervals of several decades. We also proposed a real-time forecast method of tsunami inundation for such a giant earthquake.

研究分野：地震学

キーワード：巨大地震 津波 沈み込み帯

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災を起こした2011年東北地方太平洋沖地震は、想定外の規模であったとされていた。政府の地震調査委員会では、今後30年間に宮城県沖でM7.5クラスの大地震が発生する確率を99%とし、三陸沖海溝寄りの固有地震と連動した際にはM8クラスになるとの長期予測を公表していた。ところが、東北地方太平洋沖地震の規模はM9.0であり、長期評価と比べて規模が大きく、震源域も三陸沖中部や福島県沖・茨城県沖まで広がっていた。東北地方太平洋沖地震について、沿岸や沖合の津波波形やGPSデータの解析結果によれば、海溝軸付近で50mを超える大きなすべりが発生し、宮城県沖でも10~20mものすべりが発生したことが明らかになっていた。2011年の地震によって、それまでプレート運動によるすべり欠損が蓄積されず津波地震のみが発生するとされてきた海溝軸付近や、プレート運動と地震性すべりの差は非地震的に解放されていると考えられていた宮城県沖で、M7クラスの固有地震で解放されないひずみが蓄積されていたことがわかってきた。一方で、世界中の沈み込み帯における古地震調査の結果からは、プレート間地震の規模や震源域の大きさは毎回同じでなく多様性があること、M9クラスの超巨大地震はそれぞれの地域で数百年間隔で発生していることがわかってきた。日本周辺でも、千島海溝沿いで17世紀に連動型超巨大地震が発生したことや、南海トラフ沿いでは1707年宝永地震はそれ以降の安政や昭和の地震よりもずっと大規模であったことが、津波堆積物の調査などから明らかにされていた。

2. 研究の目的

日本周辺で過去に発生したプレート間巨大地震・津波地震について、津波堆積物分布などの古地震調査結果、歴史文書による被害・波高分布に基づき、津波数値シミュレーションを用いて断層モデルを推定する。海外の沈み込み帯では超巨大地震が数百年間隔で発生し、固有地震のサイクルの上にスーパーサイクルが存在すると推定されていた。日本周辺で過去に発生した巨大地震のスーパーサイクルを解明するとともに津波地震のモデルを再検討し、これらの地震からの津波を計算し、国や地方自治体の地震・津波の想定に資することを目的とした。

3. 研究の方法

過去に発生した超巨大地震や津波地震について、津波堆積物調査が行われているものは、その分布をコンパイルして浸水域を推定する。有史時代以降に発生したものについては、信頼できる歴史史料から沿岸での津波高さや浸水域を推定する。これらを数値シミュ

レーション結果と比較するため、当時の地形も、海岸地質や史料に基づいて出来る限り復元する。

断層モデルを仮定して津波数値シミュレーションを実施し、古地震や歴史データから推定された浸水域と比較する。試行錯誤的あるいは波高データのインバージョンを行って、最適な断層モデルを求め、これらから、現在の地形・水深データに基づいて沿岸の津波高や浸水域を計算する。

4. 研究成果

(1) 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年東北地方太平洋沖地震については多くの震源断層モデルが提案されており、宮城県沖の震央付近で数十m以上という大きなすべりが生じたことが明らかになっている(論文7,9)。ところが、津波の高さは震央から約100kmも北の岩手県沿岸で最大となっており(論文12)、この原因は不明であった。日本沿岸や沖合の水位計・水圧計・GPS波浪計に記録された津波波形のインバージョンにより、震源断層上のすべり分布の時空間分布を推定したところ、破壊開始の約2分後にプレート境界のやや深部で25m以上の大きなすべりが、さらにその1分後以降に海溝軸付近で巨大なすべり(約70m)が発生したことがわかった(論文15)。岩手県沿岸で津波が大きかった原因は、海溝軸付近で遅れて発生した大きなすべりであった。いっぽう、仙台平野への津波の浸水は、869年貞観地震のモデルとして提出されていたものと同様のプレート境界深部のすべりが主な原因であった。すなわち、東北地方太平洋沖地震は、869年貞観地震のようなプレート境界深部のすべりと、1896年明治三陸地震のような海溝軸付近のすべりがほぼ同時に発生したものであることがわかった。

2012年12月に日本海溝で発生した余震(M7.3)は、逆断層の地震に引き続き正断層の地震が発生した複雑な地震であること、これらは本震及び最初の正断層地震による応力変化で誘発されたものであることがわかった(論文14)。

(2) 日本海溝沿いで過去に発生した地震

東北地方太平洋沖地震の津波と、過去に三陸海岸に被害をもたらした1896年明治三陸津波・1933年昭和三陸津波とを定量的に比較した(論文12)。三陸海岸はリアス式海岸であり、津波高さは地形による影響を大きく受けることから、津波の調査地点がよくわかっているデータのみを選択して比較した。その結果、2011年東北地方太平洋沖地震による津波の高さは、平均すると1896年明治三陸津波の1.5倍、1933年昭和三陸津波の3倍であった。

2011年の津波が堆積物を残した青森県・岩手県及び福島県の海岸で津波堆積物調査を

行った。岩手県宮古市の沿岸湿地において 9 層の砂質堆積物を発見した。放射性炭素・セシウム・鉛の同位体分析から、砂層の堆積年代を推定したところ、すべて 15 世紀以降の堆積物であることが分かり、歴史記録に残る津波及び高潮と対比した。これらの中には、2011 年東北地方太平洋沖地震、1933 年・1896 年三陸地震、1611 年慶長地震などの津波が含まれる(論文 4)。869 年貞観地震によると考えられる津波堆積物は、岩手県及び福島県で発見されたが、青森県では発見されなかった。

869 年貞観地震については、津波堆積物の分布とシミュレーションによる浸水域が一致するという仮定に基づき、Mw 8.4 程度とされていた(論文 16)。2011 年東北地方太平洋沖地震の津波浸水域は、津波堆積物よりもさらに内陸まで広がっていたことから、上で求めた波源モデル(論文 15)から仙台平野における津波の遡上シミュレーションを行ったところ、海岸から最も遠い津波堆積物での浸水深は 1m 程度であることが分かった。この値を用いて貞観地震の規模を再度推定したところ、最低でも Mw 8.6 で、2011 年のすべり量分布を用いると 8.8 以上となった(論文 11)。

(3) 千島海溝沿いで過去に発生した地震

20 世紀に千島海溝で発生した地震によって発生した津波の波形を解析し、震源域の関係を調べた。その結果、1969 年と 1973 年の地震は千島海溝沿いで隣り合う領域で発生し、大きなすべりの領域は重ならないこと、さらに 1975 年の津波地震は、1969 年よりも海溝軸よりのプレート境界浅部で発生したことが分かった(論文 1)。

千島海溝沿いの超巨大地震の震源域の東側がどこまで破壊したかを推定するため、北海道の根室海峡沿岸で津波堆積物調査を実施した。別海町から標津町の沿岸低地において津波堆積物調査をおこなった結果、古津波堆積物の可能性の高い砂層 2 層を検出した。これに加えて今までの津波堆積物調査結果を総合的に判断すると、2500 年前から 350 年前の間には、北海道東部の太平洋沿岸を襲う大規模な津波が 4 回発生したと考えられる。また、そのうちの 2 回は、根室海峡沿岸に到達した可能性がある。

17 世紀に北海道東岸に津波堆積物を残した地震について、これまでのモデルに加えて、2011 年東北地方太平洋沖地震を参照して、海溝軸付近で 25m のすべりを加えたところ、沿岸湿地における津波堆積物の分布ならびに海岸段丘における津波堆積物の標高(最大 18m)も再現することができた。この新しいモデルの Mw は 8.8 であり、千島海溝においても M9 クラスの巨大地震が発生していたことが明らかになった(論文 2)。この地震のモデルは、現在改訂中の地震調査委員会の長期評価でも取り上げられている。

(4) 海外の超巨大地震

遠地津波については、その到達時間が従来のモデルで予測したものから遅れることが知られていたが、その原因は海水の圧縮性・弾性地球及び重力ポテンシャル変化であることを明らかにし、それらを考慮した解析法を開発した(論文 8)。それを用いて、2010 年及び 2014 年にチリで発生した巨大地震について、津波波形から規模や震源域の大きさを明らかにした(論文 3, 6)。

20 世紀以降に発生した 7 つの M9 クラス巨大地震のすべり量分布をまとめた結果、それらは似たような分布を示すことがわかった(論文 13)。平均すべり量の 1.5 倍以上の領域をアスペリティと定義すると、地震モーメント・断層面積・平均すべり量・アスペリティの面積の間の関係は、日本付近の M7~8 クラスの海溝型地震のスケーリング則と一致する。

(5) スーパーサイクルモデル

以上の結果に基づき、日本周辺の巨大地震の発生履歴についてまとめた。千島海溝ではこれまで考えられてきた 100 年以下の繰り返し間隔で発生する M8 クラスの地震の他に、約 400 年間隔で M9 クラスの巨大地震が発生している。日本海溝でも、M8 以下の地震の発生間隔は数十年だが、2011 年東北沖地震クラスの巨大地震は約 600 年間隔で発生している。これらは日本海溝・千島海溝においても、地震発生のスーパーサイクルモデルが成り立つことを示している(論文 5)。このようなスーパーサイクル中の M9 クラスの地震について、即時的な津波浸水予測方法を考案した(論文 10)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件)

1. Ioki, K. and Y. Tanioka, Rupture Process of the 1969 and 1975 Kurile Earthquakes Estimated from Tsunami Waveform Analyses, *Pure Appl. Geophys.*, 173, 4179–4187, DOI: 10.1007/s00024-016-1402-0, 2016, 査読有。
2. Ioki, K. and Y. Tanioka, Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 433, 133–138, DOI: 10.1016/j.epsl.2015.10.009, 2016, 査読有。
3. Yoshimoto, M., S. Watada, Y. Fujii and K. Satake, Source estimate and tsunami forecast from far-field deep-ocean tsunami waveforms - the 27 February 2010 Mw 8.8 Maule earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 659–665, DOI:10.1002/2015GL067181, 2016, 査読有。
4. Goto, T., K. Satake, T. Sugai, T. Ishibe, T. Harada, and S. Murotani, Historical tsunami and storm deposits during the last five centuries

- on the Sanriku coast, Japan, *Marine Geology*, 367, 105-117, DOI: 10.1016/j.margeo.2015.05.009, 2015, 査読有.
5. Satake, K., Geological and historical evidence of irregular recurrent earthquakes in Japan, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373, 2014375, DOI: 10.1098/rsta.2014.0375, 2015, 査読有.
 6. Gusman, A. R., Murotani, S., Satake, K., Heidarzadeh, M., Gunawan, E., Watada, S. and Schurr, B., Fault slip distribution of the 2014 Iquique, Chile, earthquake estimated from ocean-wide tsunami waveforms and GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 42: 1053-1060, DOI: 10.1002/2014GL062604, 2015, 査読有.
 7. Satake, K., Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian ocean tsunami, *Geoscience Letters*, 1:15, DOI: 10.1186/s40562-014-0015-7, 2014, 査読有.
 8. Watada, S., S. Kusumoto and K. Satake, Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth, *J. Geophys. Res.*, 119 (5), 4287-4310, DOI: 10.1002/2013JB010841, 2014, 査読有.
 9. Satake, K. and Y. Fujii, Review: source models of the 2011 Tohoku earthquake and long-term forecast of large earthquakes. *J. Disaster Res.*, 9 (3), 272-280, DOI: 10.20965/jdr.2014.p0272, 2014, 査読有.
 10. Tanioka, Y., Gusman, A.R., Ioki, K., and Nakamura, Y. Real-time tsunami inundation forecast for a recurrence of 17th century great Hokkaido earthquake in Japan, *J. Disaster Res.*, 9, 358-364, DOI: 10.20965/jdr.2014.p0358, 2014, 査読有.
 11. Namegaya, Y. and K. Satake, Reexamination of the AD 869 Jogan earthquake size from tsunami deposit distribution, simulated flow depth and velocity, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2297-2303, DOI: 10.1002/2013GL058678, 2014, 査読有.
 12. Tsuji, Y., K. Satake, T. Ishibe, T. Harada, A. Nishiyama, and S. Kusumoto, Tsunami heights along the Pacific coast of northern Honshu recorded from the 2011 Tohoku and previous great earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 171, 3183-3215, DOI:10.1007/s00024-014-0779-x, 2014, 査読有.
 13. Murotani, S., K. Satake, and Y. Fujii, Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M~9 subduction-zone earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5070-5074, DOI:10.1002/grl.50976, 2013, 査読有.
 14. Harada, T., S. Murotani and K. Satake, A deep outer-rise reverse-fault earthquake immediately triggered a shallow normal-fault earthquake - the Dec. 7, 2012 Off-Sanriku earthquake (Mw 7.3), *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4214-4219, DOI: 10.1002/grl.50808, 2013, 査読有.
 15. Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya, Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 103, 1473-1492, DOI: 10.1785/0120120122, 2013, 査読有.
 16. Sawai, Y., Y. Namegaya, Y. Okamura, K. Satake and M. Shishikura, Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L21309, DOI: 10.1029/2012GL053692, 2012, 査読有.
- 〔学会発表〕(計 35 件)
1. Satake, K., Geological and historical evidence of recurrent earthquakes in Japan, AOGS 12th Annual Meeting, 2015 年 8 月 4 日, シンガポール (シンガポール).
 2. Satake, K., Giant tsunamis in the Holocene: geological and historical evidence and geophysical modeling, XIX INQUA congress, 2015 年 7 月 31 日, 名古屋国際会議場 (愛知県・名古屋市).
 3. Satake, K., Historical and geological evidence of recurrent large earthquake tsunamis in Japan, IUGG 26th General Assembly, 2015 年 6 月 28 日, プラハ (チェコ).
 4. Satake, K., Lessons from the 2004 Indian Ocean and 2011 Tohoku tsunamis, developments, and future directions, AGU fall meeting, 2014 年 12 月 15 日, サンフランシスコ (米国).
 5. Satake, K. and Y. Namegaya, Size and type of the 869 Jogan earthquake inferred from tsunami simulation and deposits, 日本地球惑星科学学会, 2014 年 9 月 14 日, 鹿児島大学 (鹿児島県・鹿児島市).
 6. Satake, K., Y. Tsuji, T. Harada, T. Ishibe, A. Nishiyama, and S. Kusumoto, Quantitative comparison of the 2011 Tohoku and past tsunami heights, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014 年 7 月 31 日, 札幌口イトンホテル (北海道・札幌市).
 7. 佐竹 健治, 都司 嘉宣, 原田 智也, 石辺 岳男, 西山 昭仁, 楠本 聡, 2011 年東北地方太平洋沖地震と過去の津波高さの定量的比較, 日本地球惑星科学学会 2014 年大会, 2014 年 5 月 1 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市).
 8. Ioki, K. and Y. Tanioka, Tsunami source of the 17th century great earthquake off Hokkaido estimated from tsunami deposit data, International Tsunami Symposium, 2013 年 9 月 25 - 27 日, ゲジエック (トルコ).
 9. Tanioka, Y. and K. Ioki, Real-time tsunami inundation forecast for a recurrence of 17 century great Hokkaido earthquake, International Tsunami Symposium, 2013 年 9 月

25 - 27 日 , ゲジエック (トルコ) .

10 . Satake, K., Y. Fujii, Y. Namegaya and T. Harada, Comparison of the 2011 Tohoku, 1896 Sanriku and 869 Jogan tsunamis in terms of displaced water volume and energy, International Tsunami Symposium, 2013 年 9 月 26 日 , ゲジエック (トルコ) .

11. Satake, K., Y. Fujii, Y. Namegaya and T. Harada, Estimation of modern, historic and prehistoric tsunami sources along the Japan Trench: the 2011 Tohoku, 1896 Sanriku and 869 Jogan earthquakes, AOGS 10th annual meeting, 2013 年 6 月 26 日 , プリスペン (オーストラリア) .

12. 佐竹 健治, 世界の沈み込み帯で発生する巨大地震の共通性と多様性, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, , 2013 年 5 月 22 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県・千葉市) .

13. Satake, K., Hazard Assessment and Early Warning of Tsunamis: Lessons from the 2011 Tohoku earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting, 2012 年 12 月 3-7 日 , サンフランシスコ (米国) .

14. 佐竹健治・藤井雄士郎・原田智也・行谷佑一, 津波波形からみた 2011 年東北地方太平洋沖地震のすべりの時空間分布 - 貞観型プレート間地震が津波地震を誘発した可能性 - , 日本地震学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 16-19 日 , 函館市民会館 (北海道・函館市) .

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

佐竹 健治 (SATAKE, Kenji)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号 : 2 0 1 7 8 6 8 5

(2) 研究分担者

谷岡 勇市郎 (TANIOKA Yuichiro)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号 : 4 0 3 5 4 5 2 6