

北海道沿岸で甚大な被害を伴う巨大津波の発生メカニズム

Tsunami-generation mechanisms of large tsunamis caused significant disasters along the coast of Hokkaido

谷岡勇市郎

北海道大学大学院理学研究院

Yuichiro Tanioka

Faculty of Science, Hokkaido University

Abstract

Tsunami generation mechanisms along Hokkaido, Japan, were discussed in this paper. Not only great underthrust earthquakes along the Kurile Trench but also sector collapses of volcanos during their eruptions generated hazardous tsunamis. The tsunami deposits of the 17th century gigantic underthrust earthquake along the Kurile Trench were explained by the source model with a large slip of 25 m near the trench. The source model with a large slip of 18 m for the 12th century earthquake in Japan Sea off Hokkaido was estimated using tsunami deposit data. The tsunamis caused by two sector collapses of the 1640 Komagatake and the 1741 Oshima-Oshima were well modeled using numerical simulations. The 1929 Grand Banks tsunami was well modeled using the numerical simulation of the deep ocean landslide and tsunami. The coupling of the Atmosphere and Ocean generated the tsunami caused by the 2022 Tonga eruption. Those various tsunami-generation mechanisms are important in forecasting future tsunamis.

Key Words: Tsunami-generation mechanisms, Great underthrust earthquake, Volcanic tsunamis, deep landslide tsunamis

キーワード：津波発生メカニズム、プレート境界型巨大地震、火山性津波、深海地すべり津波

1. 概要

2011年東北地方太平洋巨大地震により発生した大津波は東日本の太平洋沿岸に甚大な被害を及ぼした。南海トラフ沿いでは過去に巨大地震が繰り返し発生し、西日本の太平洋沿岸に大津波が襲った。これらの地震はプレート沈み込み帯のプレート境界で発生した典型的な巨大地震で大津波を励起する。北海道太平洋沖でも2003年十勝沖地震などがプレート境界型巨大地震で津波を励起し、沿岸に4mを超える津波が襲った。北海道沿岸はこれらの巨大プレート境界型巨大地震による津波だけでなく、日本海側の日本海東縁ひずみ集中帯に存在する海底活断層群で発生する巨大地震によっても大津波に襲われてきた。さらに沿岸の存在する火山や火山島の火山活動に伴う山体崩壊により大津波が励起され、甚大な被害に見舞われてきた。

本論文では、上記の大津波をレビューしながら、それらの大津波がどのように発生してきたのかを数値計算手法を用いて明らかにするとともに、それらの研究成果を、将来の津波評価に役立てる可能性を示す。さらに貴重な海外の事例を用いて、深海での海底地すべりによる大津波の励起過程や火山噴火による大気・海洋カップリングによる津波の励起メカニズムを議論し、数値計算による予測の可能性を示す。

2. 北海道太平洋沖のプレート境界型超巨大地震による津波

北海道太平洋沖ではプレート境界型巨大地震が繰り返し発生してきた。例えば、2003年十勝沖巨大地震 (Mw8.0) は1952年十勝沖巨大地震 (Mw8.2) の繰り返し地震であったとされ¹⁾。また根室半島沖では1973年根室半島巨大地震 (Mw) が発生し、同じプレート境界では1894年にも根室半島沖巨大地震 (Mw8.0) が発生していた²⁾。これら典型的なプレート境界型巨大地震の他にも1975年根室半島沖地震のような津波地震(地震動から予測されるよりも異常に大きな津波を発生させる地震)も発生している³⁾。これらの巨大地震は地震波形や津波波形として記録が残されているため、それら波形の解析により震源過程がある程度理解されている地震である。

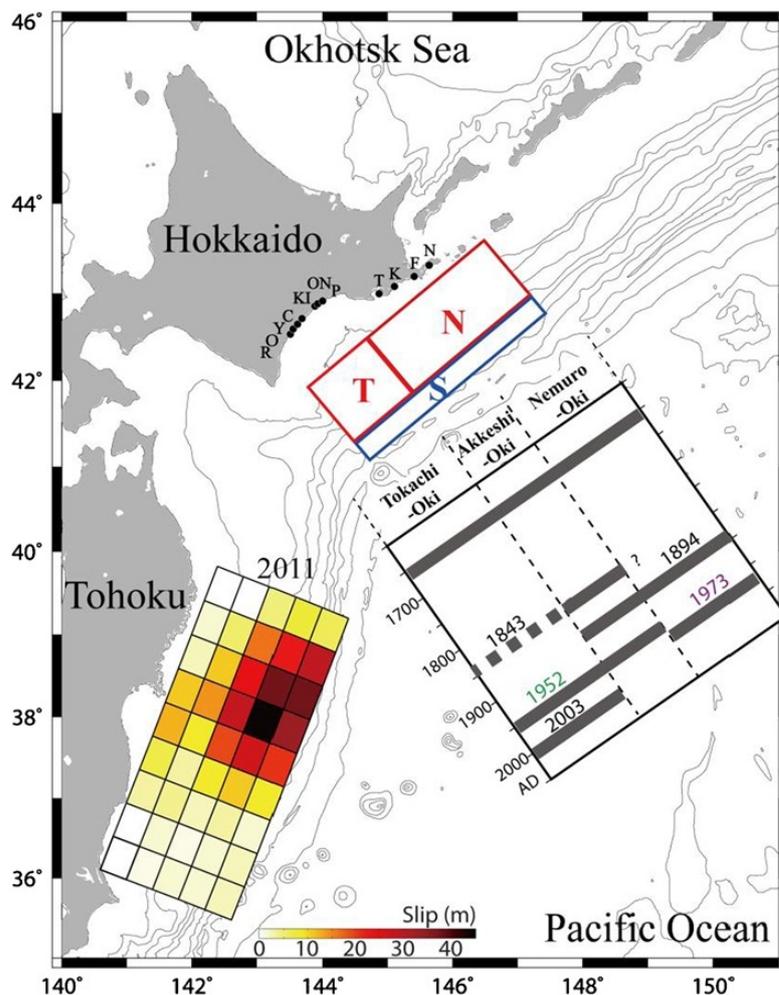


図1 17世紀北海道沖巨大地震の断層モデル、東北地方太平洋沖地震の断層モデル¹⁷⁾および過去に推定された巨大地震の震源長さ。(Ioki and Tanioka (2016)⁷⁾より。)

北海道太平洋沿岸（特に十勝から根室にかけて）では歴史記録が少なく、19世紀以前の過去の巨大地震についての情報がない。しかし、北海道太平洋沿岸は人為的に開拓されていない地域が多く存在し、それを利用して地質学的調査（津波堆積物調査）が盛んに実施されるようになった。その結果、17世紀前半に上記に記した過去の巨大地震よりもはるかに大きな超巨大地震（M9クラス）が発生していたことが明らかになった^{4) 5) 6)}。さらにそれらの超巨大地震は過去に繰り返し発生していたことも明らかになった。その後、2011年東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）の発生を受けて、北海道沖で17世紀前半に発生した巨大地震の震源過程について、最新の津波堆積物データを加えた再解析を実施し、この地震は東北地方太平洋沖巨大地震と同じく海溝近傍のプレート境界に非常に大きなすべり（25m）を発生させた地震であったことを明らかにした⁷⁾（図1）。これらの研究成果は国の地震調査推進本部による「千島海溝沿いの地震活動の長期評価」や内閣府による「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震による断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書」に役立てられている。

3. 日本海側の巨大地震による津波

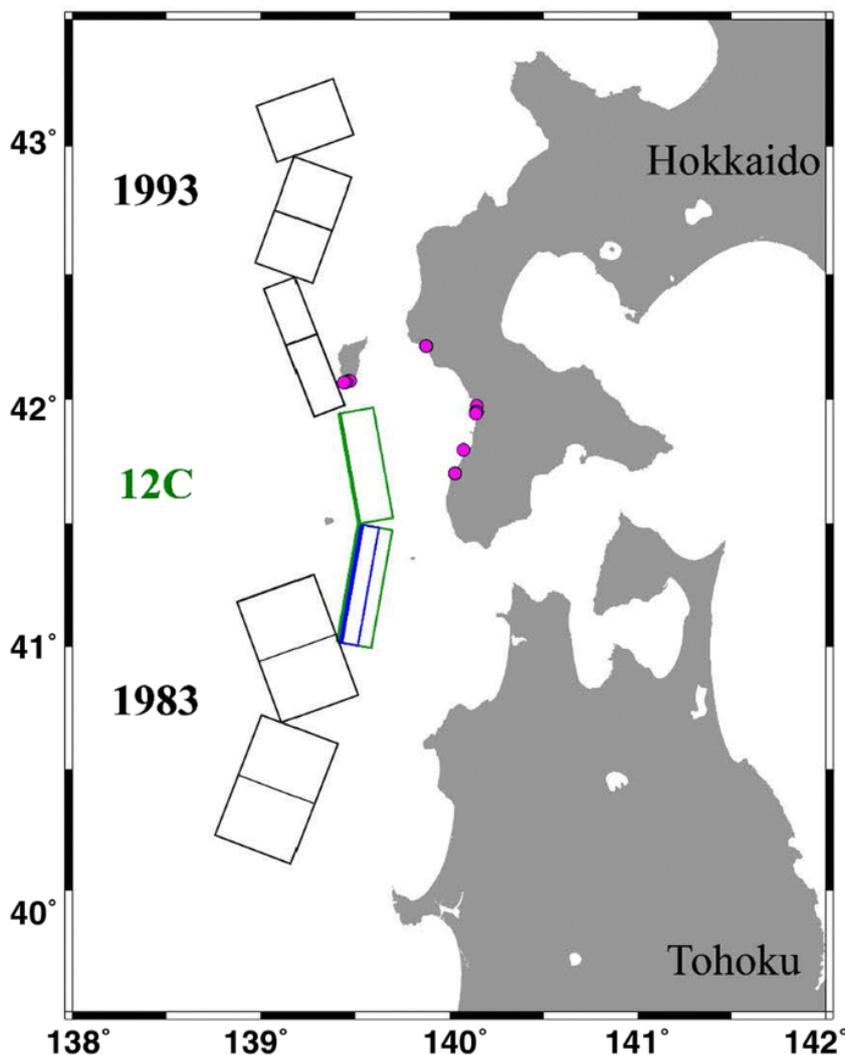


図2 12世紀巨大地震の断層モデルと1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震の断層モデル。(Ioki et al. (2019) ¹⁰⁾より)

太平洋沿岸で発生する巨大地震に比べて日本海側で発生する巨大地震の頻度は低い。しかし1993年北海道南西沖巨大地震 ($M_w 8.0$) のように、その津波による被害は大きい⁸⁾。日本海沖には太平洋沖のように典型的なプレート境界はなく、プレート間のひずみは、日本海沖に発達した海底活断層群で発生する地震活動によって解消されていると考えられている。巨大地震を発生させると考えられる海底活断層の分布はすでに公表されている⁹⁾。日本海側でも津波堆積物調査は実施されているが、太平洋側のように多くの津波堆積イベントが発見されている訳ではない。その中でも、12世紀の津波堆積イベントは道南の日本海沿岸で発見されており、そのイベントは公表されていた海底活断層で発生した巨大地震 (M_w) により説明可能であることが示された¹⁰⁾。この解析結果から、日本海側では1940年積丹沖地震、1993年北海道南西沖地震、12世紀地震、1983年日本海中部地震と北部から南部にかけて連続して活断層群が地震により破壊した事となる(図2)。さらに、日本海側での地震による断層運動のすべり量は8m程度で飽和するスケーリング則が想定津波の計算の際に使われてきたが、12世紀の小断層は18mのすべり量が推定されており、スケーリング則の改良が求められる結果となった。将来の日本海側で発生する津波を想定する上で重要な結果である。

4. 火山性山体崩壊による津波

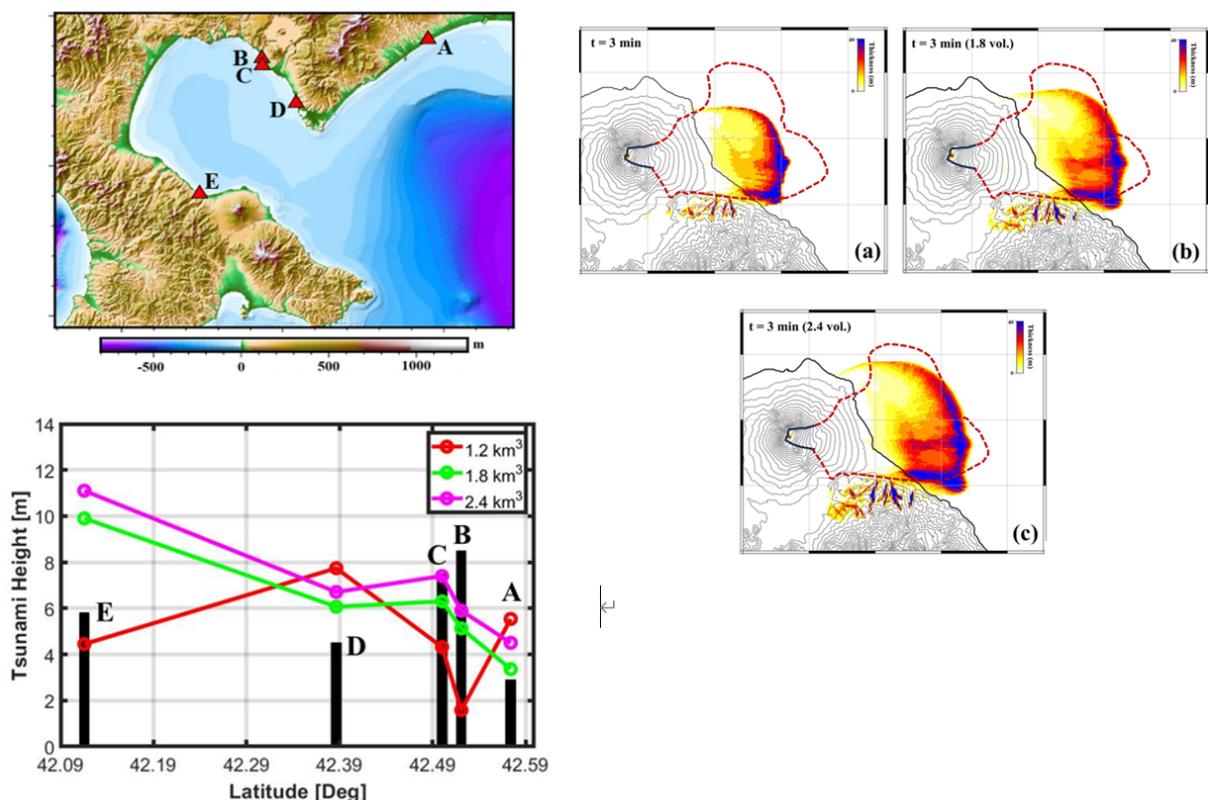


図3 1640年駒ヶ岳山体崩壊による山体崩壊と津波のモデル化。左下) 津波高の調査結果と数値計算結果の比較。右) 山体崩壊堆積物調査結果と数値計算結果の比較。(Ratnasari (2024)¹¹⁾より。)

北海道で被害を及ぼしてきた津波は太平洋側や日本海側で発生した巨大地震による津波だけではない。1640年北海道駒ヶ岳の火山活動にともなう山体崩壊により大津波が発生し、噴火湾沿いで大きな被害となった。山体崩壊は2度発生したとされ、最初は南側が崩壊し、折戸川がせき止められ、大沼・小沼が形成された。次に東側が崩壊し、鹿部側から土砂が海に流れ込み、大津波を発生させた¹¹⁾。大津波は内浦湾沿岸で最大8mに達し、7百名の犠牲者を伴う大災害となった。その山体崩壊と津波は数値計算により再現され、山体崩壊の量は約2 km³であったと見積もられた¹¹⁾ (図3)。

さらに日本海側では1741年渡島大島の火山活動にともなう山体崩壊により大津波を発生させた。最大25mを超える巨大津波が道南の日本海沿岸を襲い、約1400名の犠牲者を出したとされ、北海道で記録が残っている津波による犠牲者数では最大であったとされている。さらに、海底探査により、この火山活動による山体崩壊痕と崩壊物の海底での堆積分布が明らかになっている¹²⁾。また、津波の高さ分布も調査されており、この津波により堆積したとされる津波堆積物の調査も実施されている。そこで山体崩壊痕と津波調査データを用いて山体崩壊と津波を数値計算によりモデル化し全てのデータを説明した¹³⁾ (図4)。これらの研究成果は、山体崩壊による津波の数値計算手法が確立してきた事を示す。将来、火山活動による山体崩壊の津波についても、崩壊域が事前に推定できれば、沿岸での津波高を予測できる可能性が高い。

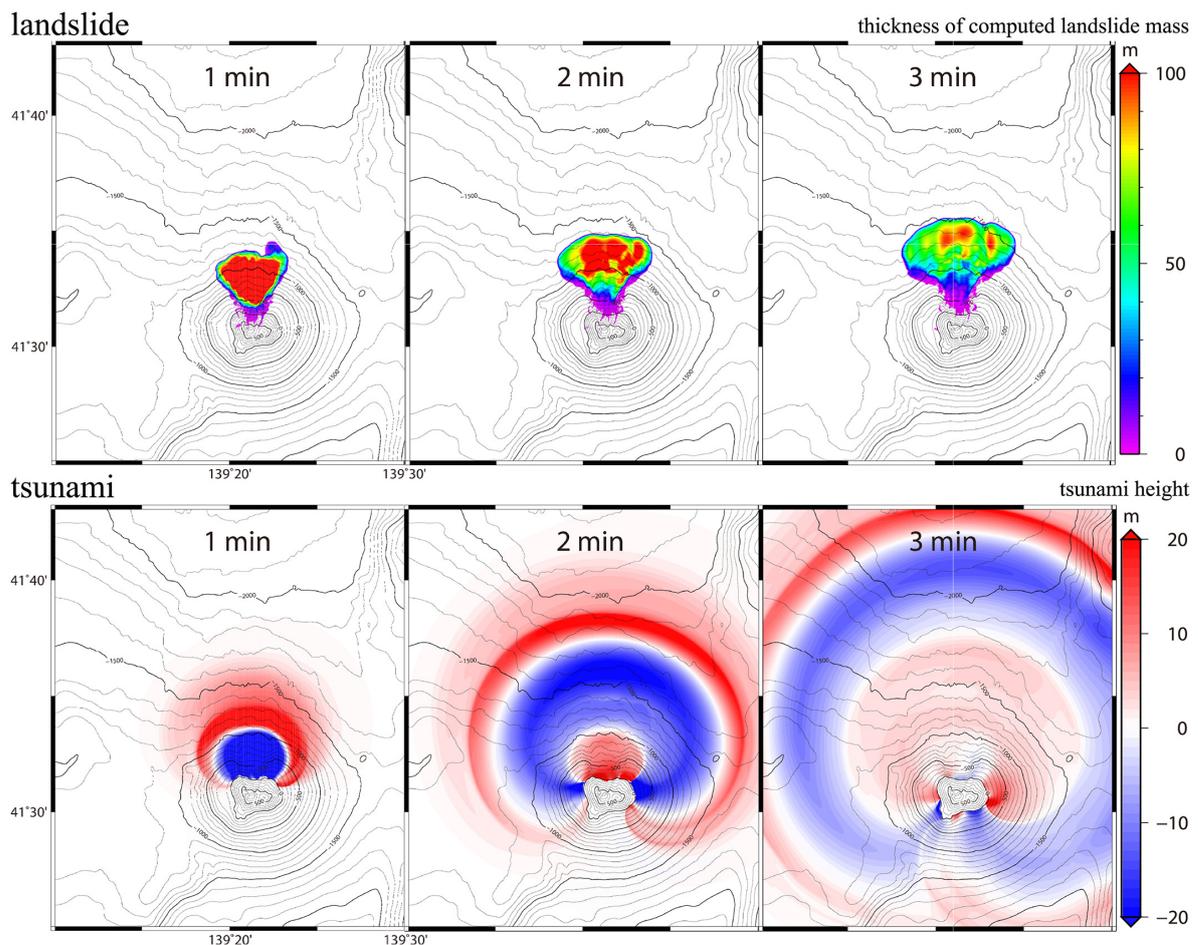


図4 1741年渡島大島火山噴火による山体崩壊と津波のモデル化。
(Ioki et al., (2019)¹³⁾より。)

5. その他（海外の巨大津波の事例からの示唆）

深海での海底地すべりによる津波として世界的に有名なイベントは 1929 年 Grand Banks で発生した津波である。この津波は巨大地震が発生するプレート境界が存在しないカナダ東海岸沖で発生した。火山活動もないこの場所で津波が発生し、カナダ東海岸はこの津波により甚大な被害を被った。津波の前に地震 (M7.2) が発生し、それと同時に沖合に設置されていた多くの海底ケーブルが切断された。同時に切断されたケーブルもあれば 1 時間後に切断されたものや数時間後に切断されたものもあり、海底地すべりが発生したと考えられていた。そのため、津波は深海の海底地すべりにより発生したのではないかとされていた。Nakagaki and Tanioka¹⁴⁾ は深海での海底地すべりを数値計算に再現するとともに、それにより励起された津波も再現することに成功した。この研究成果は 1929 年 Grand Banks 津波が深海の海底地すべりにより励起されたことを明らかにするもので、将来同じように北海道の沖合の深海で発生する海底地すべりによる津波も数値計算により予測可能になったことを示唆する。

海外ではその他にも 2022 年トンガ火山噴火により津波が発生し、その津波は日本にも到達した。この津波は通常の津波の伝搬よりも速い速度で伝搬し、日本沿岸に到達した。気象庁の津波予測も津波到達後になり、この津波が気象庁津波予測の改良するきっかけとなった。Tanioka et al.¹⁵⁾ は日本海溝・千島海溝沿いの海底に設置された地震津波観測網 (S-net) で観測されたこの津波による圧力波形を数値計算手法を用いて解析し、トンガ火山噴火により励起された大気を伝搬する波が海洋とカップリングすることで励起された津波で説明できることを示した (図 5)。さらに、Mizutani and Yomogida¹⁶⁾ は観測網で観測された後続波を含めて計算する手法を開発した。これらの成果は、将来世界のどこかで巨大噴火が発生した場合、日本を襲う津波を精度良く計算することを可能にした。

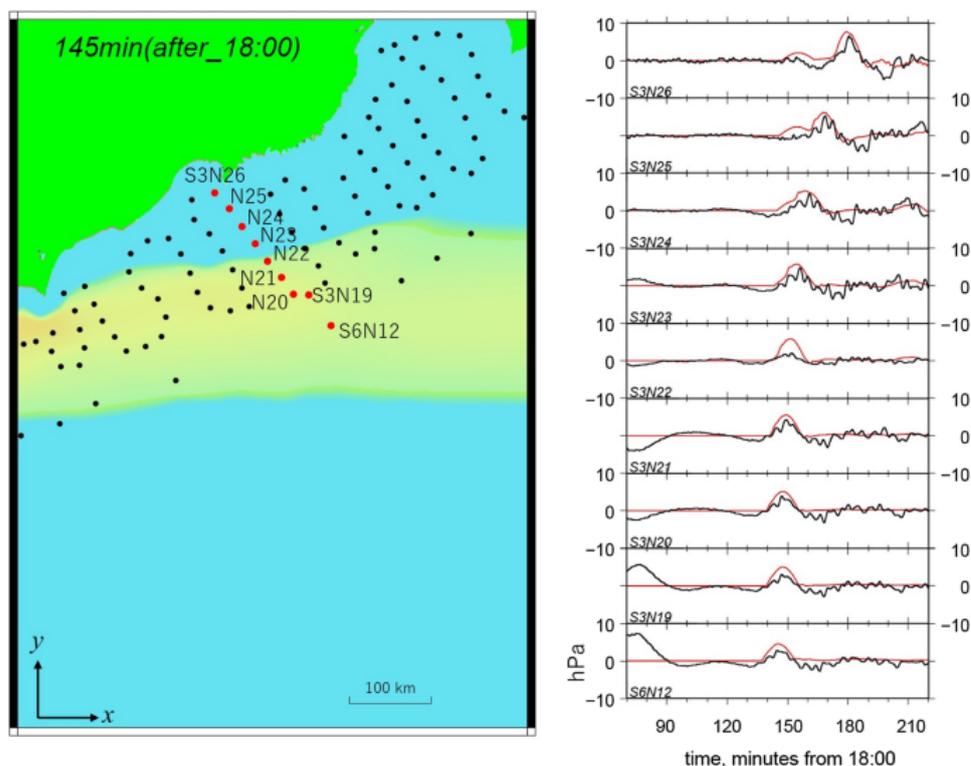


図 5 2022 年トンガ噴火にともなう大気海洋カップリングによる津波のモデル化。日本での S-net のよる観測波形 (黒) と計算波形 (赤) の比較。(Tanioka et al. (2022)¹⁵⁾ より。)

6. まとめ

北海道では太平洋沖の海溝型巨大地震による津波だけでなく日本海側のひずみ集中帯に存在する海底活断層群や沿岸の火山や火山島の火山噴火による山体崩壊により津波は発生し、甚大な災害を被って来た歴史がある。それらの津波の発生メカニズムを明らかにしてきた。

1) 17世紀前半に太平洋沖で発生した超巨大地震 (Mw8.8) は海溝近傍のプレート境界に超巨大すべり域を持つ東北地方太平洋沖地震型であった⁷⁾。

2) 日本海側の海底活断層で発生した12世紀の地震による津波は津波堆積物調査と数値計算により小断層で18mのすべり量が必要である事が明らかになった¹⁰⁾。

3) 1640年駒ヶ岳火山噴火により発生した東側の山体崩壊による津波は約2km³の山体が崩壊したとすると説明可能である事が分かった¹¹⁾。また1741年渡島大島火山噴火による山体崩壊で発生した津波も数値計算により再現できることを明らかにした¹³⁾。

4) 1929年Grand Banks津波は深海海底地すべりにより発生した津波で、世界ではじめて海底地すべりから津波まで数値計算による再現に成功した¹⁴⁾。同様の津波は北海道沖で発生する可能性もある。

5) 2022年トンガ噴火により発生し、日本に到達し沿岸に被害を及ぼした津波は、大気と海洋がカップリングすることで励起された事が明らかになった¹⁵⁾。

参考文献

- (1) Y. Tanioka, K. Hirata, R. Hino, and T. Kanazawa: *Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion*, *Earth Planets Space*, Vol. 56, pp. 373-376, 2004.
- (2) Y. Tanioka, K. Satake, and K. Hirata: *Recurrence of recent large earthquakes along the southernmost Kurile-Kamchatka subduction zone*, *Geophysical Monograph*, Vol. 172, pp. 145-152, 2007.
- (3) K. Ioki, and Y. Tanioka: *Rupture Process of the 1969 and 1975 Kurile Earthquakes Estimated from Tsunami Waveform Analyses, Pure and Applied. Geophysics.*, pp 4179-4187, doi:10.1007/978-3-319-55480-8_25, 2017
- (4) F. Nanayama, K. Satake, R. Furukawa, K. Shimokawa, B.F. Atwater, K. Shigeno, and S. Yamaki: *Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kurile trench*, *Nature*, Vol. 424, pp. 660-663, 2003.
- (5) K. Satake, F. Nanayama, and S. Yamaki: *Fault models of unusual tsunami in the 17th century along the Kurile trench*, *Earth Planets Space*, Vol. 60, pp. 925-935, 2008
- (6) Y. Sawai, T. Kamataki, M. Shishikura, H. Nasu, Y. Okamura, K. Satake, K.H. Thomson, D. Matsumoto, Y. Fujii, J. Komasubara, and T.T. Aung: *Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, Article B01319, 10.1029/2007JB005503, 2009.
- (7) K. Ioki and Y. Tanioka: *Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data*, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 433, pp

- 133-138, 2016.
- (8) Y. Tanioka, K. Satake, and L. Ruff: *Total analysis of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake using seismic wave, tsunami, and geodetic data*, *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, pp 9-12, 1995.
 - (9) I. E. Mulia, T. Ishibe, K. Satake, A. R. Gusman, and S. Murotani: Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan, *Earth Planets Space* Vol. 72, 123, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01256-5>, 2020
 - (10) K. Ioki, Y. Tanioka, G. Kawakami, Y. Kase, K. Nishina, W. Hirase, K. Hayashi, and R. Takahashi: *Fault model of the 12th Century southwestern Hokkaido earthquake estimated from tsunami deposit distributions*, *Earth Planets and Space*, Vol. 71, doi:0.1186/s40623-019-1034-6, 2019
 - (11) R. N. Ratnasari: *Development of Early Warning System for Volcanic Sector Collapse Tsunamis*, *Doctoral Dissertation, Hokkaido University*, pp 1-138, 2024.
 - (12) K. Satake and Y. Kato: *The 1741 Oshima-Oshima eruption: Extent and volume of submarine debris avalanche*. *Geophysical Research Letters*, Vol. 28(3), pp 427–430, doi:10.1029/2000GL012175, 2001
 - (13) K. Ioki, Y. Tanioka, H. Yanagisawa, and G. Kawakami: *Numerical simulation of the landslide and tsunami due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan*, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JB016166, 2019.
 - (14) T. Nakagaki, and Y. Tanioka: *Estimation of the landslide source for the 1929 Grand Banks event using a deep-sea landslide tsunami simulation*, *Geophysical Journal International*, in press.
 - (15) Y. Tanioka, Y. Yamanaka, and T. Nakagaki: *Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption*, *Earth Planet. Space*, Vol. 74, doi:10.1186/s40623-022-01614-5, 2022.
 - (16) A. Mizutani and K. Yomogida: *Source estimation of the tsunami later phases associated with the 2022 Hunga Tonga volcanic eruption*, *Geophysical Journal International*, Vol. 234, pp 1885–1902, 2023
 - (17) A.R. Gusman, Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima: *Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 341–344, pp. 234-242, (2012)