

## 12-11 津波即時予報手法の進展

### Recent development of real-time tsunami forecasting methods

谷岡勇市郎（北海道大学大学院理学研究院）

TANIOKA Yuichiro (Faculty of Science, Hokkaido University)

2011 年東日本大震災の発生を受けて、津波の予測精度向上のため日本海溝・千島海溝沿いに海底地震津波観測網（S-net）が整備された。これを契機として、この稠密観測網（ケーブル方向に 30 km 間隔）を利用し、津波即時予測手法を高度化するための研究開発が一挙に進展した。即時に波源を推定する手法として開発された tFish/Rapid<sup>1)</sup> やデータベースに格納された計算波形と観測波形を複数の指標を用いて比較することで適切に津波波高を予測する手法<sup>2)</sup> などはずでに気象庁や防災科学技術研究所で実用化のレベルに達している。本報告書では、さらに新しい進展が期待できるデータ同化手法を用いた津波予測手法の開発や人工知能（AI）を用いた予測手法の開発についてレビューし、さらなる進展について議論する。

まず、S-net の海底水圧波形を波高データに変換し、それらをデータ同化することで津波数値計算を実施する手法が開発された<sup>3)</sup>。この手法により、精度良く津波波動場を再現できることが数値実験により示された<sup>3)</sup>。震源域内のデータについては海底圧力波形が津波波高を表現できないため、そのままデータ同化はできないが、震源域を離れるとデータ同化により津波波動場を再現できることも示された。この手法の開発により、推定される地震の断層モデルや津波波源を初期条件として津波数値計算を開始するのではなく、観測波形データそのものから津波数値計算実施することが可能となった。これは、津波地震などの津波予測の高精度化に大きく寄与することが期待される。次に開発されたデータ同化手法が 2012 年 Haida Gwaii 地震による津波を実際に観測した海底圧力データに適用された<sup>4)</sup>。地震発生時にアメリカ西海岸沖に展開されていた海底地震計に取り付けられていた圧力計で観測された波形データを利用してデータ同化を行い、断層モデルから計算された津波波形と比較することで、良好な津波波形が再現できることが示された<sup>4)</sup>。また、2016 年福島沖地震（M7.4）により発生した津波を観測した S-net での圧力波形にもこのデータ同化手法が適用され、その有効性が確かめられた<sup>5)</sup>。さらに、この同化手法を即時津波予測に利用するため、グリーン関数を用いた手法（GFTDA）に改良された<sup>6)</sup>。これにより、津波数値計算はグリーン関数を計算する際に実施され、データ同化の際には数値計算の必要がなくなり、計算が高速化された。

一方、震源域直上の海底圧力変化には地震による海底地殻変動が同時に入るため海底圧力波形を津波波高に変換できない問題を解決し、地震直後にデータ同化をして津波の波動場を得る手法も開発された<sup>7)</sup>。これは、線形長波近似の波動方程式に海底圧力データの時間差分を同化することで津波波高分布を得る手法である。次にこの手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震のすべり量分布から計算される津波波動場が 15 分間隔（約 30 km）の海底で圧力が観測されたとして、上記の手法の数値実験を実施した結果、データ同化により津波を適切に計算できることが示された<sup>8)</sup>。この場合、データ同化による津波波動場の推定は地震後 40 秒までで、その後は線形長波近似を用いた津波数値計算を実施している。つまり、震源域近傍の海底圧力観測データを利用するため、地震終了とほぼ同時に地震直後の津波波動場が推定できることを示した。この結果は、津波の即時予測に非常に

有効であることを示唆する。さらに、遠洋での津波波動場から、東北地方沿岸（北は宮古から南は仙台平野まで）の津波遡上計算を実施し、東北地方太平洋沖地震後実際に調査された津波遡上高と比較した。津波計算遡上高は調査された津波遡上高を良く説明できることが示され、この手法による津波波動場推定の結果を用いて津波浸水計算まで精度良く実施できることが確認された<sup>8)</sup>。しかし、実際に津波浸水予測を即時的に実施することを考えた場合、津波遡上計算を津波波動場推定結果から実施する時間的余裕がない。そこで、浸水予測を実施する地域近傍の浅海域での津波波形とその地域での津波浸水計算結果をデータベース化し、浅海域でのデータベース波形と実際の津波計算波形を比較することで最適な津波浸水計算結果を選択することで浸水予測を実施する手法 (NearTif)<sup>9)</sup> を用いることとした。つまり、震源域近傍の海底圧力データから津波波高分布を推定し、データ同化を実施しながら津波数値計算を地震後数分実施し、その後は線形長波近似を用いた津波数値計算により津波遡上予測地域近傍の浅水域の津波波形を出力し、データベース検索により津波浸水予測図を出力する (第 1 図)。この手法を用いることにより地震発生後 10 分程度で津波浸水予測が可能となる。上記手法で推定された東北地方沿岸の浸水予測結果を東北地方太平洋沖地震後実際に調査された津波遡上高と比較した<sup>8)</sup>。ここでも津波予測遡上高は調査された津波遡上高を良く説明でき、この手法が津波浸水予測に非常に有効であることが確認された<sup>8)</sup>。最後に上記の数値実験の問題は、15 分間隔 (約 30 km) の海底で圧力が観測されると仮定しているが、実際の S-net の観測点はそれほど多くない。そこで、実際の S-net の観測点で海底圧力波形が観測されると仮定し、北海道太平洋沖で将来発生すると考えられている 17 世紀型巨大地震 (M9) と根室沖巨大地震 (M8) の津波が上記のデータ同化手法を用いて計算可能となるよう手法を改良した<sup>10)</sup>。

人工知能(AI)を用いて津波の浸水を予測する手法の開発も実施されている<sup>11)</sup>。海底圧力観測網 (S-net) のデータと陸上の GNSS 観測データを利用して陸上での津波波形を予測する手法の開発である。東北地方太平洋沖地震の震源域に 1 万 2 千通りの断層モデルを配置し、陸上での地殻変動と津波波形を計算する。1 千通りの結果を用いて Convolutional Neural Network(CNN)を調整し、1 万通りの結果を構成された CNN に学習させた。残り 1 千通りの断層モデルを用いて津波波形予測実験を実施した結果、最大津波波高の誤差 0.4m、津波到達時刻の誤差 48 秒で予測できることが分かった<sup>11)</sup>。また、陸上 GNSS 観測データは即時予測の精度を高めるために重要であることも示された。

最後に、先に述べたグリーン関数を用いたデータ同化手法 (GFTDA)<sup>6)</sup> についても、浅海域でのデータベース波形と津波計算波形を比較することで最適な津波浸水計算結果を選択する手法 (NearTif)<sup>9)</sup> を利用すれば津波浸水予測を実施することができることを示す (第 1 図)。

世界でも類を見ない高密度な海底圧力計の観測網 (S-net, DONET, DONET2) が設置されている日本での高精度津波浸水予測手法の開発は世界をリードしていくことが期待される。今後もデータ同化手法の進展や人工知能(AI)の活用により、さらなる津波即時浸水予測手法開発が不可欠であろう。

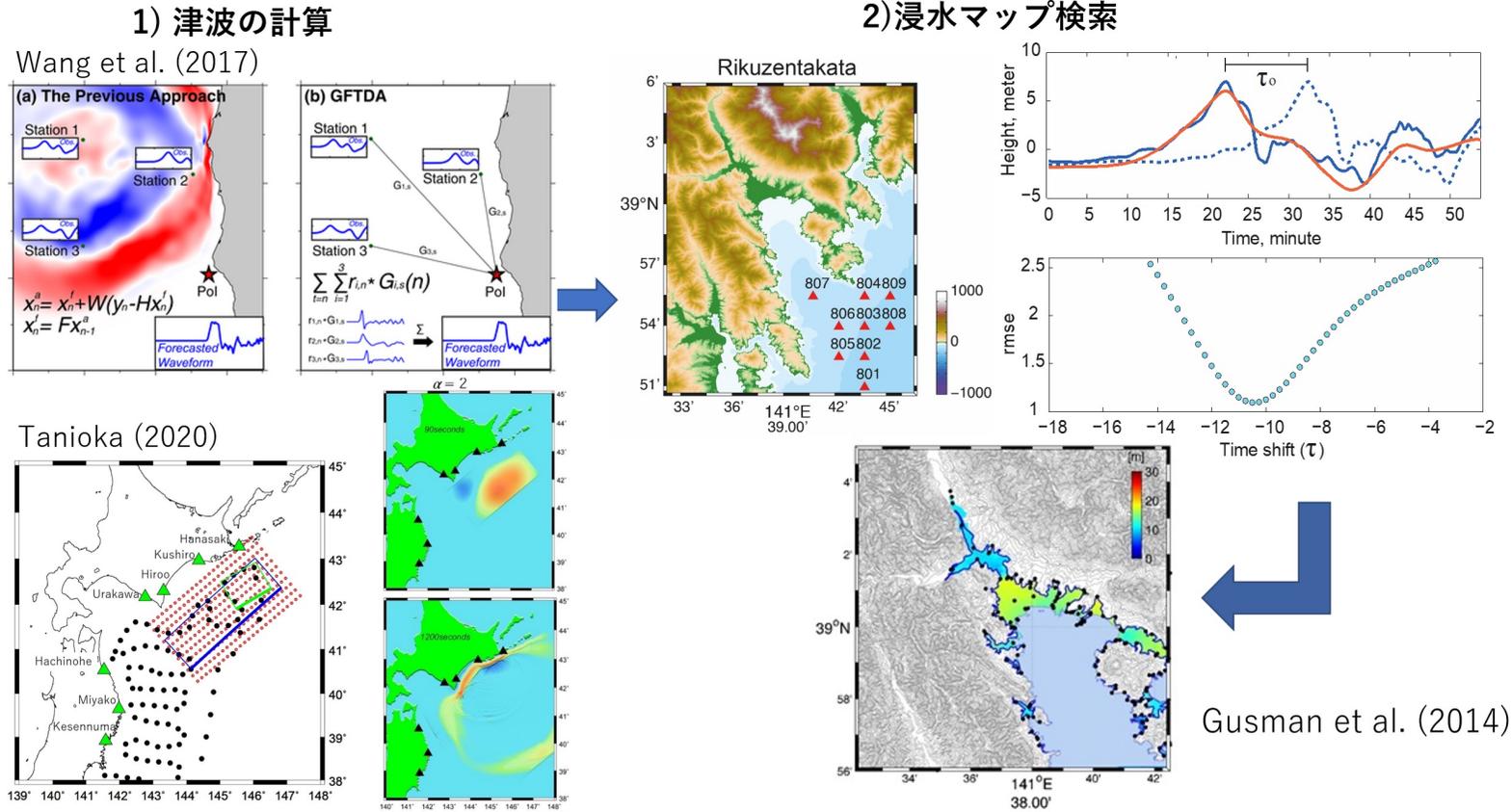
(北海道大学大学院理学研究院, 谷岡勇市郎)

TANIOKA Yuichiro

## 参考文献

- 1) Tsushima et al. (2014), *Geophysical Research Letters*, **41**, 3390-3397. tFISH/RAPiD: Rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data
- 2) Yamamoto et al. (2016), *Earth Planets and Space*, **68**, 128. Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast
- 3) Maeda et al. (2015), *Geophysical Research Letters*, **42**, 7923-7932. Successive estimation of a tsunami wavefield without earthquake source data: a data assimilation approach toward real-time tsunami forecasting
- 4) Gusman et al. (2016), *Geophysical Research Letters*, **43**, 4189-4196. Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake
- 5) Wang and Satake (2021), *Seismological Research Letters*, <https://doi.org/10.1785/0220200447>. Real-Time Tsunami Data Assimilation of S-Net Pressure Gauge Records during the 2016 Fukushima Earthquake
- 6) Wang et al. (2017), *Geophysical Research Letters* **44**, 10,282-10,289. Green's function-based tsunami data assimilation: A fast data assimilation approach toward tsunami early warning
- 7) Tanioka (2018), *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 721-729. Tsunami simulation method assimilating ocean bottom pressure data near a tsunami source region
- 8) Tanioka and Gusman (2018), *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **283** 82–91. Near-field tsunami inundation forecast method assimilating ocean bottom pressure data: a synthetic test for the 2011 Tohoku-oki tsunami
- 9) Gusman et al. (2014), *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, **119**, 8186-8206. A methodology for near-field tsunami inundation forecasting: application to the 2011 Tohoku tsunami
- 10) Tanioka (2020), *Earth Planets and Space*, **72**, 132. Improvement of near-field tsunami forecasting method using ocean-bottom pressure sensor network (S-net)
- 11) Makinoshima (2021), *Nature Communications* **12**, 2253, Early forecasting of tsunami inundation from tsunami and geodetic observation data with convolutional neural networks

- 上記いずれのデータ同化手法の計算結果も利用可能な即時浸水予測



第 1 図 海底圧力観測データを同化する津波数値計算 (Wang et al., 2017, Tanika, 2020) から Gusman et al. (2014)のデータベース検索による津波浸水予測手法につなげ、即時に予測を実施する。  
 Fig. 1 Illustration of the tsunami inundation forecast using tsunami simulation method using assimilation of ocean bottom pressure data (Wang et al., 2017, Tanioka 2020) with the tsunami inundation forecast method (Gusman et al., 2014).