

地震・津波に対する原子力発電所の安全性～能登半島地震から学ぶ～

Safety of Nuclear Power Plants against Earthquakes and Tsunamis

- Lessons from the Noto Peninsula Earthquake-

(2) 能登半島地震による津波の発生と影響

(2) Tsunami generation and impacts caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake

*今村文彦¹, 増田英敏¹, 菅原大助¹, サッパシー・アナワット¹, 鄭 安棋¹¹ 東北大学災害科学国際研究所

1. はじめに

3年前から連続地震が生じていた能登半島において、今年1月1日午後4時10分にMj7.6の大地震が発生し、観測された最大震度は石川県羽咋郡志賀町や輪島市で震度7が記録された。この地震の2分後には、気象庁から山形県・新潟県上中下越・佐渡島・富山県・石川県能登・加賀・福井県・兵庫県北部の各津波予報区に津波警報、その他日本海沿岸各地の津波予報区にも津波注意報が発表になった。その10分後には、石川県能登では津波警報が大津波警報に切り替えられた。

本文は、能登半島地震による津波の発生について、得られた痕跡データを元に波源モデルを選定し、志賀原発サイト周辺での観測波形との対応を確認した上で、波源からの詳細な伝播過程を推定する。現在、周辺での詳細地形や構造物データが未入手のために、沖合での波形の再現に留まるが、周辺での津波の特性について報告するものである。

2. 日本海側での津波の特徴 ―早い到達と長時間の継続

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、日本列島陸側の北米プレートとその下に潜り込むように動いている海側の太平洋プレートの境界付近で発生したタイプであり震源は陸地からも遠く、津波が沿岸部に到着するまでに一定での時間猶予があった。一方で、日本海側での地震は、陸地に近い海域の活断層で起こることが多く、震源も比較的浅いため、津波が起きればすぐに沿岸部に到達することになる。実際に、2024年能登半島地震による津波では、珠洲市、輪島市、能登町、七尾市などでは、1から2分以内に津波の初動（沿岸での影響開始）が到達したと数値シミュレーションで推定されている（Pakoksung et al., 2024; Masuda et al., 2024; 今村, 2024）。

我が国での大津波警報の発表は、2011年（平成23年）3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災を引き起こした巨大地震）以来になる。大津波を起こすような大地震は、一般的には、太平洋側に多く発生しているが、過去6回の事例の中で、1983年日本海中部地震津波、1993年北海道南西沖地震津波を含めて、実に半数が日本海側で発表されている。また、日本海という閉鎖空間で発生した津波であるので、発生から収束までの継続時間が長く、最大波出現時間も遅れる傾向がある。

今回の能登半島地震では、図1に示したように、今回の地震断層は主に2つが推定されており、半島陸部の西側と半島東部沖の東側に分かれる。主に東側での断層が津波を発生したと考えられるが、志賀原発周辺の半島西側では、もう1つの断層による津波の影響も考える。そのため、全体での分布に加えて、特にサイト周辺での半島西側での津波痕跡記録および観測波形を説明出来る波源モデルを選定することとした。

*Fumihiko Imamura¹, Hidetoshi Masuda¹, Daisuke Sugawara¹, Suppasri Anawat¹, and Anchi Cheng¹¹IRIDeS, Tohoku Univ.

能登半島の地形特性としては、概ね標高 300m 以下の低山地と丘陵地が大部分を占めており、能登外浦は各所に海岸段丘が発達し、一方で、能登内浦は沈降性の入り組んだ静かな海岸線が続く海岸地形がみられる（産総研, 2019）。また、能登半島沿岸の海底地形は、能登外浦では島や瀬といった天然礁も存在し、舢倉島までの水深が 100m 程度と比較的浅い海域であり、一方で、能登内浦は急激に深くなっており、1,000m より深い海盆になっている。



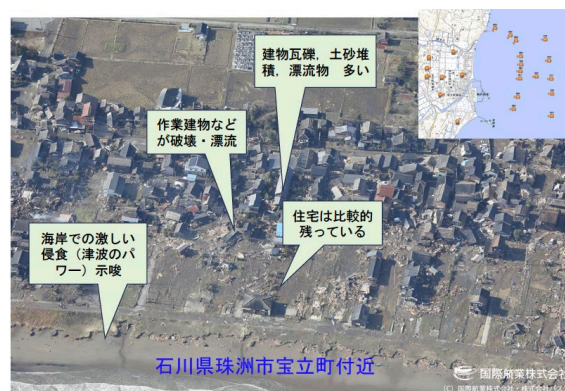
図ー1 推定された能登半島地震の東西断層モデル

3. 津波による被害状況—震源付近 珠洲市沿岸での事例

国土交通省(2024)によると、震源に近かった石川県珠洲市、能登町、志賀町では、津波で浸水した面積が少なくとも計 190 ヘクタールになったと報告している。特に浸水範囲の広い珠洲市における津波浸水深は航空写真から約 4m に達したと想定され、実際に土木学会海岸工学の令和 6 年能登半島地震津波調査グループによれば、約 2-5m の浸水高が報告されている。

石川県能登半島を中心に津波が来襲したが、他に、富山湾、新潟県上越や佐渡の周辺でも痕跡が残されている。日本海沿岸では、2m から 5m 程度の津波浸水高が報告されており (Yuhi et al., 2024a; 2024b), 津波警報レベルの規模であったことが判断できる。なお、新潟県中越市では 7m 以上の痕跡も得られている。

沿岸への被害を見ると、珠洲市飯田湾、能登町、志賀町、上越市などが挙げられる。特に、珠洲市沿岸（宝立地区）では、津波被害が大きく、海岸線にはえぐられたような痕跡があり、津波が侵食したことがわかる（写真ー1）。強いパワーがある津波が海岸に押し寄せた証拠になる。さらに、船や車を持ち上げ（写真ー2）、弱い建物を壊し（写真ー3）、瓦礫を押し流していった。流れが早かった証拠の 1 つが削られたアスファルトであり道路も壊れている。さらに、液状化によるマンホールの隆起（写真ー3）なども見られ、津波避難時に道路上がかなり悪い状況であったことが推察される。このように複合的な災害の代表事例となった (Suppasri et al., 2024)



写真ー1 航空写真による珠洲市宝立町での沿岸の様子（B0IS 提供）



写真一 2 珠洲市宝立地区での漁港付近（著者撮影）



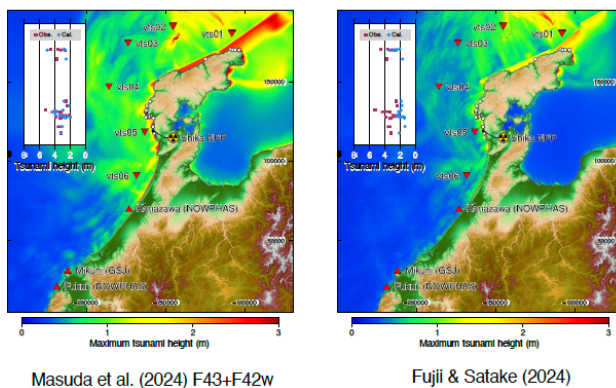
写真一 3 珠洲市宝立地区での住宅域（著者撮影）

4. 志賀原発周辺での津波挙動解析について

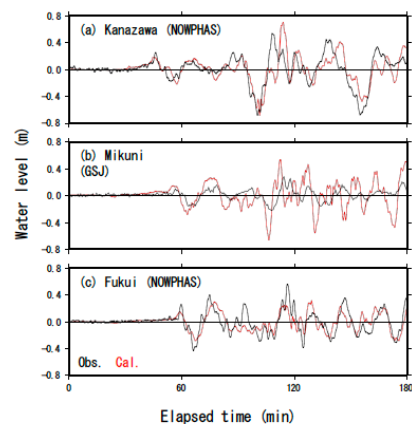
4.1 津波の解析モデル選定と津波痕跡データ比較

地震断層が半島陸部の西側と半島沖の海域の東部に分かれおり、志賀原発には位置的には近い西部の影響があり、一方で今回の津波を起こした断層は東部が主であるので両方を考慮する必要がある。特に、西部の断層は主に陸上にあり、その位置関係によっては海域にも広がるため、津波の発生に影響する。現在まで有力な津波モデルとしては、Masuda et al. (2024) および Fujii・Satake (2024) があり、このモデルによる結果を半島西部で調査された津波痕跡データ（土木学会海岸工学委員会能登半島地震津波グループによる津波浸水高や遡上高 (Yuhi et al., 2024a; 2024b) との比較により、選定する事とした。津波数値解析の詳細は、Masuda et al. (2024) を参照されたい。

この結果を図一 2（津波高の比較では、赤が実測値、青が計算値になる）に示す。Masuda et al. (2024) および Fujii・Satake (2014) の再現性を見ると、半島西側 ($n=29$) では $K=1.02$, $\kappa=1.31$, および, $K=1.64$, $\kappa=1.37$ さらにサイト周辺に絞ると ($n=23$) では $K=1.02$, $\kappa=1.23$, および, $K=1.71$, $\kappa=1.32$ となった。半島西部の比較を見ると、前者の方が再現性が高いと判断できる。この後の津波解析ではこのモデルを用いて、津波の伝播過程と波形の変化を見る。



図一 2 2つの断層モデルによる最大津波高と痕跡高比較



図一 3 Masuda et al. (2024)断層モデルによる解析波形(赤線)と観測波形(黒線)の比較

4.2 志賀原発付近（金沢、三国、福井）での津波の沖合い観測波形と解析波形の比較

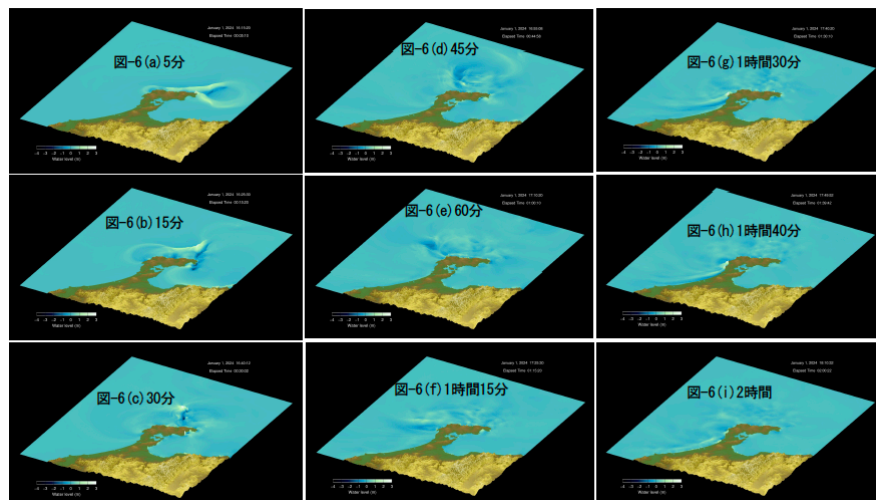
図一 3 には、志賀原発付近（金沢、三国、福井）で入手できる津波の観測波形と解析波形の比較を示す。この3点は志賀原発の西側に位置しており、発生場所から遠い地点になるが、ここでの波形が再現できるということは途中地点の結果の信頼性も高いと判断できる。なお、金沢と福井は NOWPHAS システム（超音波式波高計）による観測値であり、沖合での短周期の成分も精度高く計測できる。一方で、三国はフロート式検潮儀による観測値であり、短周期成分については若干精度は低くなる。いずれも、3時間の波形において良好な

一致を示していると判断出来る．第一波の押し波から，第二，第三，第四など後続波形の再現性も高いと考えられる．特徴としては，初動より後続波の波高が大きくなり，境界波的な挙動を示している．最大波高の出現は津波発生から2時間前後となる．

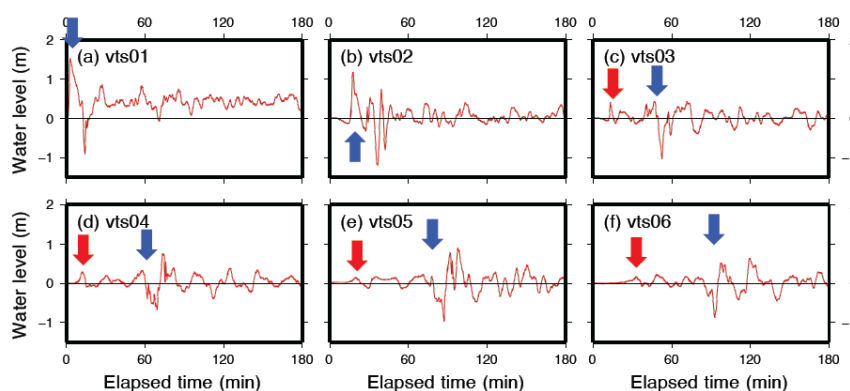
4.3 志賀原発への津波伝播の過程

今回の解析結果を一定の時間間隔で再現した空間波形を図―4に，時間波形を図―5に示す（図―2に示す代表点6点での結果であり，東断層に近い地点から番号付けている．vts05が発電所サイト手前になる）．今次津波は，半島西部で発生した津波成分が直接に志賀原発サイトに向かう成分と，東側断層により生じた津波が能登外浦（半島北側）での浅い陸棚を通じて伝播してくる成分が確認できる．前者は，発生から15分程度でサイト沖に到達しており，図―5のvts05地点での波形でも第一波の押し波（赤色の矢印）を確認いただきたい．後者は，能登半島を東から北の陸棚を通じて回り込み，サイトに複雑に伝播している過程が示されている．発生15分，30分，45分と見て頂きたいが，舳倉島付近に集中する押し波の津波が確認できる．その後，60分後以降になると押し波成分から引き波成分が卓越し，サイトには，少し沖から回り込む成分と一緒に，集中効果による波形増幅が1時間半及び1時間40分当りに見られる．この様子は，図―5（青色の矢印）のvts02から04の時間波形でも確認できる．

今回は，サイトの周辺での詳細な海底および陸上地形や防波堤などの構造物を含んだ数値解析ではないので，北陸電力(2024)が報告している津波観測（最高水位上昇や最高水位下降）と比較することはまだ出来ない．データや情報を得た後での課題としたい．



図―4 能登半島周辺での津波伝播の様子



図―5 能登半島西岸沖での津波波形（数値解析）

赤矢印が西側断層からの初動，青色矢印が東側断層からの初動

5. 今後の志賀原発オペレーションへの提言

北陸電力からの報告によれば、サイト内での津波は防波堤内での波高計と取水ピット内での水位計で観測された。ここでは、水位上昇と水位下降の観測値および計測値が示されており、いずれも施設の安全性に影響を与えるものではないと判断できる。なお、このような観測値は、実際に津波来襲後に確認出来るのであって、今後は、地震発生後で津波来襲前に、一定の津波情報を得ておきたい。公的には気象庁による津波情報になるが、広域での代表値であり、発電所サイトでの詳細情報にはならない。独自の予測情報を持ちたい。

そこで、今回のような周辺でのリアルタイム情報を活用しながら、その規模の程度や到達予想を行い、津波来襲前にオペレーション対応の参考とすることを提案したい。今次津波も含めて、複数のシナリオの下、サイト周辺（NOWHPAS などの詳細なリアルタイム情報）とサイトでの津波波形の関係を把握しておくことができる。実際、津波発生した時に、沖合からの状況については監視カメラなども活用も有用である（Shirai T. et al., 2024）。最後に、様々なシナリオの下に、津波の影響を事前に把握することも重要である。どの位の規模の津波が、サイト内へどのような場所（防波堤、物揚場、敷地、取水ピット、防潮壁）を通じて影響を与えるのか？、さらに継続時間も一定予測できれば、緊急対応時の作業マニュアル作成にも役立つはずである。

参考文献；

- 国土交通省 (2024), 令和 6 年能登半島地震 津波による浸水および海岸保全施設の被害状況(速報)
https://www.mlit.go.jp/river/bousai/240101_noto/pdf/tsunamishinsui_higai_240423.pdf
- 産総研 (2019), 能登半島北部周辺に刻まれた日本海発達の歴史,
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2019/nr20190823/nr20190823.html
- 土木学会海岸工学委員会(2024), 令和6年能登半島地震津波調査情報 <https://coastal.jp/info/library/noto20240101/>
- 北陸電力(2024), 令和 6 年能登半島地震以降の 志賀原子力発電所の現況について(3 月 25 日現在)
https://www.rikuden.co.jp/nw_press/attach/24032599.pdf
- Fujii Y, Satake K (2024), Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (MJMA 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data. Earth Planets Space 76:44. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01991-z>
- Masuda H. et al., Modeling the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami: implications for tsunami sources in the eastern margin of the Japan Sea, Geoscience Letters 11(1) 2024 年 6 月 14 日, <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00344-8>
- Pakoksung, K., Suppasri, A. & Imamura, F. (2024), Preliminary modeling and analysis of the Tsunami generated by the 2024 Noto Peninsula earthquake on 1 January: Wave characteristics in the Sea of Japan.
- Shirai T. et al. (2024), , Potential for tsunami detection via CCTV cameras in northeastern Toyama Prefecture, Japan, following the 2024 Noto Peninsula earthquake, Geoscience Letters 11(1) 2024 年 6 月 5 日, <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00343-9>
- Suppasri A. et al. (2024), The 2024 Noto Peninsula Earthquake: Preliminary Observations and Lessons to be Learned, International Journal of Disaster Risk Reduction 104611-104611 2024 年 6 月, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104611>
- Yuhi M. et al. (2024), Dataset of Post-Event Survey of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Tsunami in Japan, Scientific Data volume 11, Article number: 786
- Yuhi M. et al., Post-event survey of the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami in Japan, Coastal Engineering Journal 1-14 2024 年 7 月 2 日, <https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2368955>