

インドネシア・スラウェシ島における確率論的手法を用いた津波評価

Probability assessment of landslide tsunami in Indonesia, Sulawesi Island

都市人間環境学専攻 永井 香織

Department of Civil and Environmental Engineering /Kaori Nagai

Key Words : Probability, Landslide tsunami, Uncertainty, Palu

1. はじめに

地すべり津波ハザードの評価においては、地すべり津波の発生過程が複雑なゆえに、確率論的手法を用いた波源推定が重要となる。メキシコ湾の海底地形を対象とした検討では、地すべりの発生位置や崩落体の形状に関して不確実性を考慮した上で、モンテカルロシミュレーションを用いた津波高の評価が行われている¹⁾。しかしながら、崩落体の発生位置の決定においては断面上での検討に留まっているため、発生位置に関して平面上でのばらつきが考慮できる手法が必要となる。また、2018年に発生したインドネシア・スラウェシ島における地震によって、パル湾内の複数地点で地すべり津波が発生したことが確認されており、沿岸部では津波による甚大な被害が発生した²⁾。パル湾内は脆弱かつ急峻な海底地形が特徴であるため、当地域における将来の地すべり津波評価を実施することは重要な課題となっている。

本研究では、地すべりの発生箇所や崩落体の不確実性を考慮したパル湾における確率論的地すべり津波評価を実施することを目的とする。波源モデルの生成時には、2018年パル津波の既往パラメータ及び既往実験で示された相関関係を用いてパラメータの確率分布を決定し、モンテカルロ法にならってパラメータを決定した。また、地すべり発生要因を地震動とし、各地滑り

の滑り開始時間についてのばらつきを考慮した。

2. 確率論的地すべり津波評価の概要

本検討で実施した確率論的地すべり津波評価の流れを図-1に示す。モンテカルロ法によって不確実性を考慮した多数の波源モデルを生成し、地すべり津波解析を行った。また、得られた多数の計算結果に対して経験分布関数を得たのちに、福谷ら(2021)³⁾による平滑化手法を適用することで超過確率を得た。さらに、地震の発生間隔を考慮することによって、年超過確率を算出した。

(1) 経験分布関数の平滑化

福谷ら(2021)³⁾は、従来の確率論的津波評価における偶然的な不確定性の考え方を刷新し、多数の解析値から算出した経験分布関数に対して両端打ち切りの対数正規分布を適用し、式(1)に示す平滑化した関数 $Q(x)$ を提案している。

$$Q(x) = \sum_{i=1}^n w_i \left(1 - \Phi \left(\log(x); \log(x_i), \sigma^2 \right) \right) \quad (1)$$

ここで、 $\Phi(x; \mu, \sigma^2)$ は、最大津波高 x 、平均 μ 、標準偏差 σ の両端打ち切り有りの切確正規分布の累積確率分布関数であり、分布の打ち切りを考慮して全確率が1になるように処理されている。また、標準偏差 σ として、推本(2020)⁴⁾で偶然的な不確定性として使用されている自然対数標準偏差0.35、両端打ち切り幅 $\pm 3\sigma$ を用いた。 i はシミュレーションの標本番号、 n は標本数、 w_i は標本に付与する重み（ここでは等重み）を表す。

(2) 地震の平均発生間隔

年超過確率を算出するにあたって、地震規模と年間発生数の関係を説明するGutenberg-Richter則を用いて、Mw7.5-9.0の地震に対する平均発生間隔を想定した。ここで、Putriら(2017)⁵⁾がインドネシア・スラウェシ島周辺を対象として提案した $\log_{10}f = 11.5 - 1.7Mw$ に対して、 f をマグニチュード方向に積分した値の逆数を算出した結果、平均発生間隔は69.81年であった。

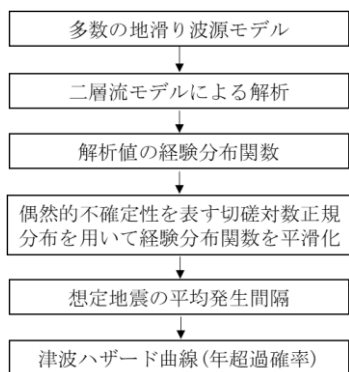


図-1 確率論的地すべり津波評価の流れ

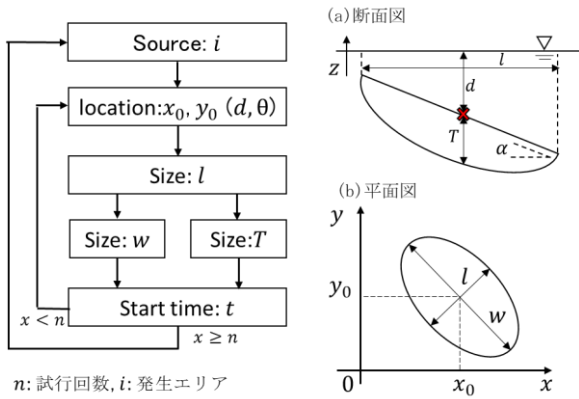


図-2 モンテカルロ法のフローと地すべりパラメータの定義

表-1 各パラメータの確率分布と相関関係。

変数	確率分布	μ	σ	下限	上限
d (m)	Lognormal	75.137	175.336	0	228.60
L (m)	Lognormal	512.65	240.75	190.01	1133.19
t (sec)	Lognormal	3.374	0.615	—	100
α (°)	Normal	10	2	2	14
W	L と線形関係。誤差項: $\varepsilon_i \sim N(\hat{y}_i, \hat{\sigma}^2)$				
T	T/L が一様分布。区間[0.01, 0.04]				

3. 波源パラメータの確率分布

地すべり津波解析では、11か所の沿岸部における地すべり及び湾南部における2箇所の海底地すべりが含まれた波源モデルを用いている。モンテカルロ法を用いた地すべり波源パラメータの決定フローと各パラメータの定義を図-2に示す。地すべり波源の形状は楕円形に近似されることとし、発生位置の緯度経度、長さ、幅、層厚、すべり開始時間のパラメータを確率論的に決定する。また、表-1に各パラメータの確率分布と、取りうる下限値及び上限値を示す。ただし、表中の変数 d については沿岸部を対象とした確率分布である。

(1) 地すべり発生位置

a) 沿岸部における波源の発生位置について

図-3aに、湾内に流入する河川の河口位置と、本検討で採用した沿岸部の地すべり発生エリア(L1-L11)及び海底部の地すべり発生エリア(L12, L13)を示す。沿岸部の各波源の発生位置に関しては、図-3bに示す回転角及び水深の不確実性を考慮し、次のような流れで決定した。

(1) 湾全体の海岸線の曲率を算出し、1.0以下の地点かつ各河口に最も近い点を区分点とすることで、エリア分けを行う。(2) 区分点における海岸線の法線が交わる点を、各エリア毎の基準点とする。(3) 法線の2等分線を回転角の平均値、法線内角の50%を回転角の標準偏差とした確率分布を想定。(4) 決定した回転角方向の断面地形上において水深の値を決める。ここで、水深の確率分布は既往点^{8),9),10)}の水深値の分布から想定したものである。

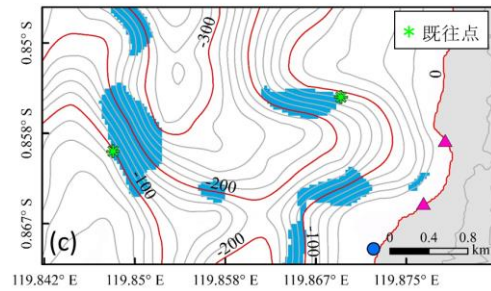
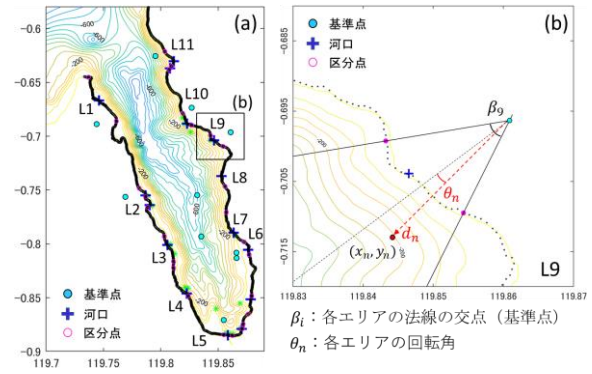


図-3 湾内の河口及び地すべり発生位置

(図-3c中の水色は勾配と水深の条件で絞り込んだエリア)

b) 海底部における波源の発生位置について

湾南部の海底部について、既往点¹⁰⁾における水深や斜面勾配値を用いて地すべり発生エリアの絞り込みをおこなった。図-3cに水深98.12m以下、斜面勾配17.185°以上の条件で絞り込んだエリアを示す。モンテカルロ法では、絞り込まれたエリアにおいて緯度経度に対して一様分布を想定して発生位置の決定を行った。

(2) 地すべり形状パラメータ

モンテカルロ法における形状パラメータ値生成の流れとしては、はじめに長さの値を決定し、幅及び層厚に関しては長さとの相関を考慮した。長さの確率分布については、2018年パル津波の既往パラメータ^{9),10)}の分布を基に、対数正規分布に従うものとして想定した。長さとの間には線形関係を想定し、既往パラメータ^{9),10)}の分布から式(2a)に示す回帰モデルを算出した。さらに、長さに対する幅のばらつきを考慮するため、誤差項の正規分布性を考慮し、誤差項の分散を式(2b)として算出した。

$$y_i = 2.7129x_i - 286.83 + \varepsilon_i \quad (2a)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2b)$$

ここで、 i は観測値の標本番号、 n は標本数、 x_i 、 y_i は長さ、幅の観測値、 ε_i は誤差項、 $\hat{\sigma}^2$ は誤差項の母分散の不偏推定量、 \hat{y}_i は幅の推定値とする。層厚は一様分布を仮定した長さとの比 T/L (Watts et al., 2005¹¹⁾)から算出した。

(3) 滑り開始時間と滑り勾配

2018年パル津波の地すべりの発生要因としては、液状化による水膜現象が指摘されており、既往の調査では地震発生直後～100秒後に土砂崩壊が発生した可能性が示されている。ここでは、各波源の滑り開始時間について、最頻値を地震発生から20秒後とした対数正規分布を仮定した。また、波源モデル毎に設定する滑り開始勾配の条件については計算領域全域で同一の値を適用し、Nagai et al. (2021)¹⁰で用いられた滑り勾配の範囲内で、正規分布を想定した。それぞれの確率分布は表-1に示す。

(4) MCS法によって生成したパラメータの分布

上記の想定に基づき、試行回数を1000回として各パラメータを生成した。図-4に発生位置の分布を示す。沿岸部における水深の確率分布値は比較的浅いエリア（最頻値：約50m）に多く分布する特徴を示しており、モンテカルロ法による発生位置に関しても各エリアで同様の分布傾向が確認できた。海底部の発生位置に関しては設定した条件エリアに一樣に分布していることが確認できる。図-5に、発生エリアL1における長さの分布と、長さ幅の相関図を示す。幅の分布傾向について、対数正規分布が想定されている長さとの相関関係があるため、比較的小さな値側に多く分布している傾向が

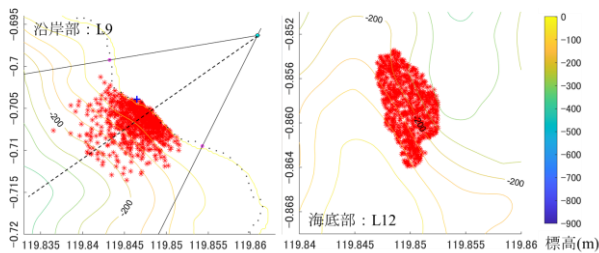


図-4 地すべり発生位置の分布

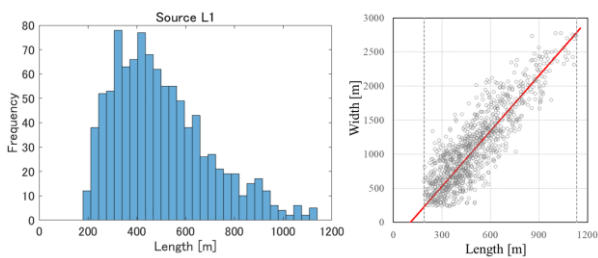


図-5 地すべり長さとの分布

(左：長さの度数分布，右：長さとの相関)

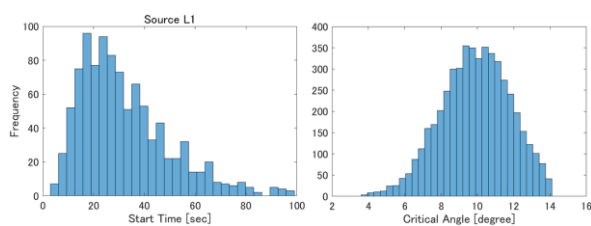


図-6 滑り開始時間と勾配角度の分布

みてとれる。図-6に発生エリアL1の滑り開始時間と滑り勾配角度の分布を示す。各パラメータにおいて、表-1に示す確率分布と概ね同様の分布が確認できたが、今後の課題として、より多くの試行を行い、計算結果への影響を確認する必要がある。

4. 二層流モデルを用いた地すべり津波解析

(1) 計算条件

地すべり津波解析においては、非線形長波理論に基づく二層流モデル¹²を用いた。表-2に二層流モデルの計算条件を示し、図-7aにCarvajalら(2019)¹³によって示された2018年パル津波の時系列水位変動の地点と、海岸線の距離を示す。二層流モデルで用いた波源モデルの例を図-7bに示す。

(2) 任意の地点における津波高の年超過確率

時系列波形が示されている6地点において全計算ケース毎に最大津波高を算出し、1000ケースの結果から経験分布関数の算出を行った(図-8a)。さらに得られた経験分布関数に対して対数正規分布による平滑化⁴を適用したグラフを図-8bに示し、地震の平均発生間隔69.81年を考慮することで算出した年超過確率(津波ハザード曲線)を図-8cに示す。算出した津波ハザード曲線からは、6地点における最大津波高は再現期間70-100年に相当することがわかる。また湾の北部の地点の方が、南部よりも高い津波高の傾向を示していることがわかる。

(3) 湾全域における再現期間ごとの最大津波高

図-9に、再現期間100年、200年の海岸線における最大津波高の分布を、2018年パル津波の遡上高と比較したものを示す。2018年の遡上高については、北部の方が南部に比べて低い傾向となっているが、本検討での計算結果では、北部(0-20km, 60-90km)の方が南部よりも高い

表-2 二層流モデルの計算条件

計算時間	1200s
格子間隔	30m
格子数	1155×1714
計算時間間隔	0.01s
土塊密度	1500kg/m ³

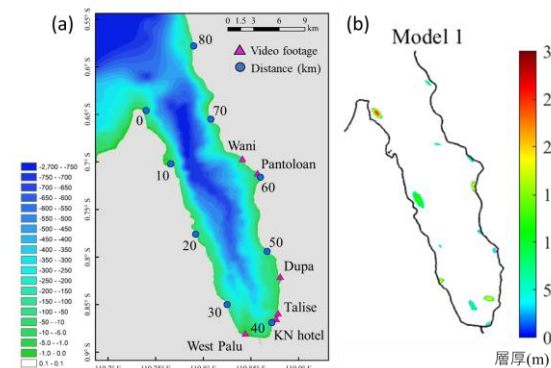


図-7 計算結果の出力地点と波源モデル (Case 1)

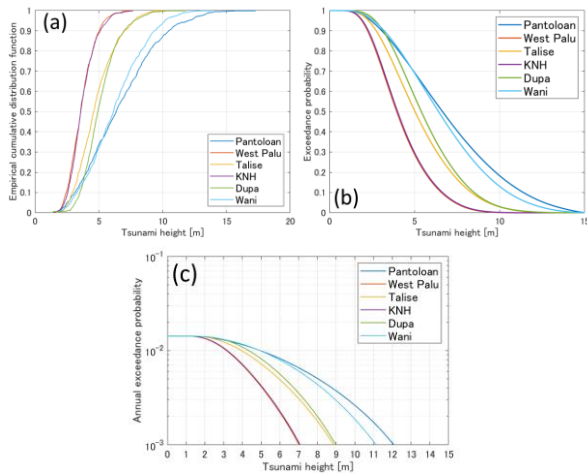


図8 経験分布関数及び津波ハザード曲線

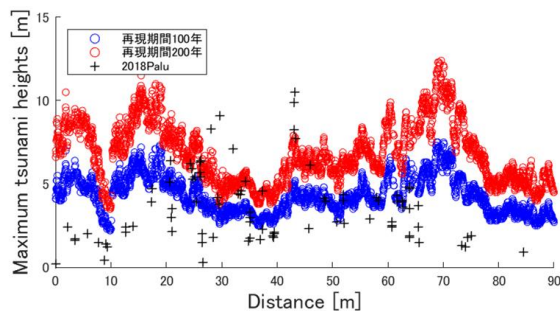


図9 再現期間100年, 200年の最大津波高分布

傾向を示していることが確認できる。この原因としては、湾北部の海底部に比較的急峻な斜面が広がっていることがあげられる。ここから、2018年パル津波発生時には北部における海底地すべりは小規模なものとどまったが、今後の津波対策を考える際には、北部地域に対しても湾南部地域と同様、重点的な津波対策を講じる必要があるといえる。また、2018年の遡上高が、各再現期間における津波高を上回っている地域(20-45 km)が確認でき、今後遡上計算を含めた詳細な検討を行い適切な設計津波高の提案につなげる必要がある。

5. まとめ

本研究では、インドネシア・パル湾を対象とした地滑り津波の確率論的評価を実施した。湾内の海底部において地すべり発生エリアを13箇所抽出し、モンテカルロ法によって地すべりパラメータのばらつきを考慮した。また、各パラメータの確率分布の仮定にあたって、2018年のパル津波における既往点を参照し、モンテカルロ法によって1000ケースの地すべり波源モデルを生成した。その結果、2018年の津波災害における傾向とは異なり、北部において比較的大きな津波高の傾向となった。今後の課題としては、地震平均発生間隔を算出する際に、より正確なGutenberg-Richter式の係数を用いること、現地の地盤物性や河川からの土砂の堆積量を考

慮した上で、発生確率について各エリア毎の重みをモンテカルロ法に取り入れることとする。

参考文献

- 1) Grilli, S.T. C. Baxter, O. Taylor, and S. Marezki: A probabilistic approach for determining submarine landslide tsunami hazard along the upper east coast for the United States, *Marine Geology*, vol. 264, pp.74-97, 2009.
- 2) 嶋原良典・Juan Horrillo: 確率論的手法を用いた海底地すべり津波波源の推定—メキシコ湾への適用—, 土木学会論文集 B2, Vol. 70, No. 2, I_281-I_285, 2014.
- 3) Arikawa, T., Muhari, A., Okumura, Y., Dohi, B., Afriyanto, A., Sujatmilo, K. and Imamura, F. “Coastal Subsidence Induced Several Tsunamis during the 2018 Sulawesi Earthquake.” *Journal Disaster Research* 13: sc20181204. doi:10.20965/jdr.2018.sc20181204.
- 4) 福谷陽, 北野利一, 安田誠宏, 有川太郎, 山中亮一: 確率論的津波ハザード評価手法 (coRaL 法) の構築とそれによる津波浸水評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, 2021.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価, 78p., 2020. https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf, 参照 2021-03-25.
- 6) Putri, A. C., Harimei, B., Massinai, M. F. I.: Analysis of Seismicity Level in Central Sulawesi Period 1997 – 2017., *Earth and Environmental Science* 279: 2019. doi:10.1088/1755-1315/279/1/012022.
- 7) Prasetya, G. S., Delange, W. P. and Healy, T. R. 2001.: The Makassar Strait Tsunamigenic Region, Indonesia., *Natural Hazards* 24: 295-307.
- 8) Aránguiz, R., Esteban, M., Takagi, H., Mikami, T., Takabatake, T., Gómez, M., González, J., Shibayama, T., Okuwaki, R., Yagi, Y., Shimizu, K., Achiari, H., Stolle, J., Robertson, I., Ohira, K., Nakamura, R., Nishida, Y., Krautwald, C., Goseberg N. & Nistor, I.: The 2018 Sulawesi tsunami in Palu city as a result of several landslides and coseismic tsunamis., *Coast. Eng. J.*, vol 62, 445-459, 2020.
- 9) Liu, P.L.-F., Higuera, P., Husrin, S., Prasetya, G. S., Prihantono, J., Diastomo, H., Pryambodo, D. G., Susmoro, H.: Coastal landslides in Palu Bay during 2018 Sulawesi earthquake and tsunami, *Landslides*, 17, 2085-2098, 2020.
- 10) Nagai, K., Muhari, A., Pakoksung, K., Watanabe, M., Suppasri, A., Arikawa, T. and Imamura, F.: Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay., *Coast. Eng. J.*, 2021.
- 11) Watts, P., Grilli, S.T., Tappin, D.R., Fryer, G.J.: Tsunami generation by submarine mass failure. II: predictive equations and case studies. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 131 (6), 298-310, 2005.
- 12) Imamura, F. and Imteaz, M. M. A.: Long waves in two-layers: governing equations and numerical model., *J. Sci. Tsunami Hazards* 13(1), pp.3-24, 1995.
- 13) Carvajal, M., A. C. Comejo, I. Sepúlveda, D. Melnick, and S. J. Haase. 2019.: Nearly Instantaneous Tsunamis following the Mw 7.5 2018 Palu Earthquake., *Geophysics Research Letter* 2019. doi:10.1029/2019GL082578.