

二層流モデルによるパル湾内における 2018 年スラウェシ島津波の再現

KWANCHAI PAKOKSUNG¹, ANAWAT SUPPASRI¹, 倉本和俊², 阿部郁男³, 今村文彦¹,
CIPTA ATHANASIOS⁴, AMALFI OMANG⁴, ABDUL MUHARI⁵, 永澤豪⁶, 馬淵幸雄⁶, 成田裕⁶

¹ 東北大学 災害科学国際研究所

² 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻

³ 常葉大学 社会環境学部

⁴ Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Geological Agency of Indonesia, Bandung, Indonesia

⁵ Coastal Disaster Mitigation Division, Ministry of Marine Affairs and Fisheries, Jakarta, Indonesia

⁶ パシフィックコンサルタンツ株式会社

1. 背景: 2018 年 9 月 28 日 17 時 2 分に図-1 に示すようにインドネシアのスラウェシ島・パル湾の北部で M7.5・横ずれの地震が発生した。パル湾内はパントローン検潮所が設置され、3.81 m の波形が観測された。この地域では過去地震・津波の記録が少なかった。目撃情報により、1927 年 (M6.3) と 1968 年 (M7.8) の地震によって、それぞれ 15 m と 10 m の津波を起こしたが、津波の波源の詳細は不明であった。唯一観測されたのは 1996 年 (M7.9) の逆断層地震による 3.43 m の津波のみであった (Pelinovsky et al., 1997)。このように今回発生した津波に関する波源がまだ不確定だが、発生メカニズムの解明、今後の復興計画等のために、本研究では初期に得られる限られた情報を基に津波を再現することを目的とする。

2. 方法: 本研究の方法はデータセット（波源モデルの推測と地形データ）と長波理論による二層流モデルの 2 項目で分けられる。

2.1 データセット: 横ずれの地震であったため、津波の原因は海底地すべりと仮定した。これは目撃情報・空中のヘリコプターから撮影されたビデオ (http://www.instagram.com/p/BoRttmsn5po/?taken-by=icoze_ricochet) 及び現地調査 (Arikawa et al, 2018) によって、海底地すべりの場所が特定できた。図-2 は仮定した地すべり場所を示し、それぞれ大きい地すべり (L1-L3) と小さい地すべり (S1-S6) と分類されている。大きい地すべりはパル湾の北部（入り口）、今回の主な津波の原因である。小さい地すべりの大きさは 0.1-0.5 km³ と仮定した。使用された 30 m メッシュの地形データ (図-1) はインドネシア政府が公開している 5 m の標高データと 180 m の水深データから作成した。

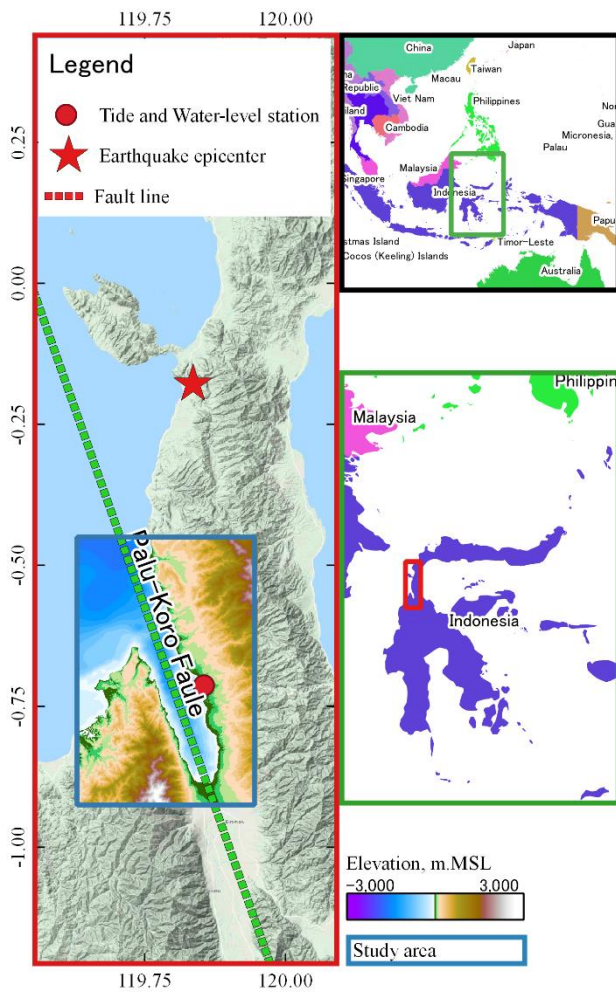


図-1 対象地域と地形データ

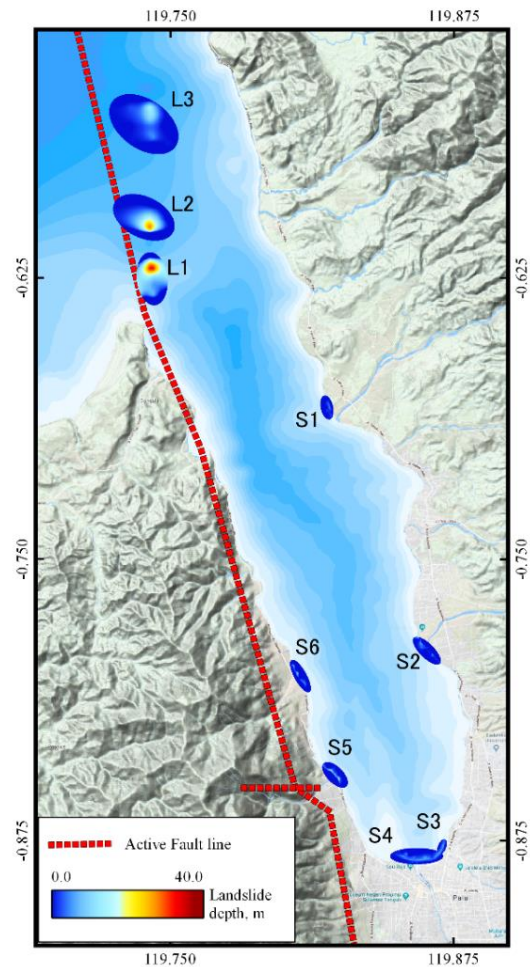


図-2 仮定した海底地すべりの場所

2.2 長波理論による二相流モデル: 地すべり津波を再現するため非線形長波理論による二相流モデルを使用した。このモデルは2相の流体（Two Layer）における海底、環境面、水面における運動学的および動的境界条件を解く（Imamura & Imteaz, 1995）。なお、このモデルは流体、水と流体化漂流物は混ざらないと仮定している。支配方程式は次の通り:

レイヤー1の連続式

$$\frac{\partial Z_1}{\partial t} + \frac{\partial Q_{1x}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{1y}}{\partial y} = 0$$

レイヤー1における X と Y 方向の運動の方程式

$$\frac{\partial Q_{1x}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{1x}^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_{1x}Q_{1y}}{D_1} \right) + gD_1 \frac{\partial Z_1}{\partial x} + gD_1 \frac{\partial Z_2}{\partial x} - \tau_{1x} = 0$$

$$\frac{\partial Q_{1y}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{1x}Q_{1y}}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_{1y}^2}{D_1} \right) + gD_1 \frac{\partial Z_1}{\partial y} + gD_1 \frac{\partial Z_2}{\partial y} - \tau_{1y} = 0$$

レイヤー2の連続式

$$\frac{\partial Z_2}{\partial t} + \frac{\partial Q_{2x}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{2y}}{\partial y} = 0$$

レイヤー2における X と Y 方向の運動方程式

$$\frac{\partial Q_{2x}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{2x}^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_{2x}Q_{2y}}{D_2} \right) + gD_2 \frac{\partial Z_2}{\partial x} + gD_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial Z_1}{\partial x} - \tau_{2x} = 0$$

$$\frac{\partial Q_{2y}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_{2x}Q_{2y}}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_{2y}^2}{D_2} \right) + gD_2 \frac{\partial Z_2}{\partial y} + gD_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial Z_1}{\partial y} - \tau_{2y} = 0$$

但し、1 と 2 はそれぞれ、上部と下部のレイヤーを表す。 $Z_i(x, y, t)$, $i = 1, 2$ は時間 t における各ポイント (x, y) の標準からの水位。 $q_i(x, y, t)$, $i = 1, 2$ は X と Y 方向での垂直方向の積分した流量。 g は重力加速度、 ρ_1 と ρ_2 はそれぞれレイヤー1と2の密度。 $\tau_i(x, y, t)$ は時間 t における各ポイント (x, y) の海底摩擦。

3. 結果

図-3 はパントローン検潮所における今次津波の観測された波形と計算波形を比較する。これより第一波の引き波は地震発生から6分、第一波の押し波はその2分後（地震発生から8分）で確認された。

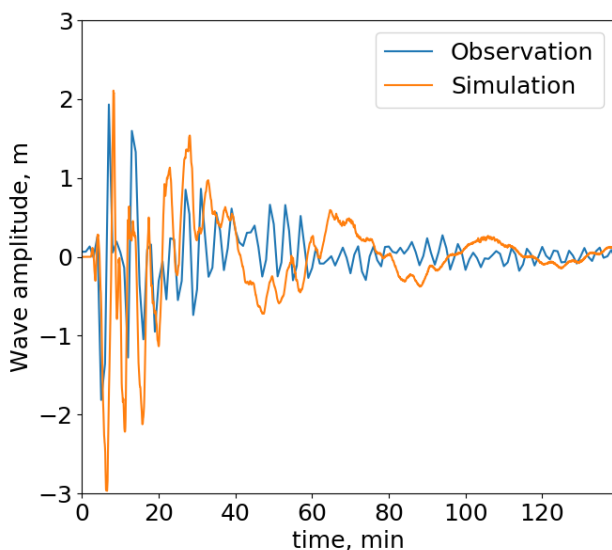


図-3 パントローン検潮所における今次津波の観測された波形と計算波形の比較

図-3 によると仮定した地すべりの波源モデルはある程度今次津波の第一波の水位と周期を再現できるといえる。一般的に津波数値解析による波形の再現において特に第一波の再現性は重要で、後続波は反射波等様々な原因で良く再現することは難しいが、本結果は第一波とその後の後続波も含めて凡そ再現できている。そのため、2018年にスラウェシ島で発生した津波に対して実際に起こった地すべりは仮定した地すべりの場所に近いと推測できる可能性がある。また、他の計算結果として計算したパル湾奥の海岸沿いの最大水位は3.0-7.0 mであり、現地調査の報告と似たような結果になっている（Muhari et al, 2018）。

これまで大きい地すべりと小さい地すべりを合わせて津波を再現したが、大きい地すべりのみの場合はパル湾内での最大水位が再現出来ないことや、大きい地すべりL1のみ場合はパントローン検潮所での後続波が再現出来ないこと等によって、津波発生原因は多数の地すべりであることが分かった。

4. まとめ

本研究は2018年にスラウェシ島パル湾で発生した津波の発生メカニズムの解明、今後の復興計画支援等のため、数値解析を利用し、仮定した海底地すべりより津波を再現した。モデル結果の検証として、パントローン検潮所で観測された波形と比較し、良好な再現性が確認できた。最大水位についても現地調査による報告と同じような再現結果が得られた。このことから、今次津波は単独の波源ではなく、パル湾内で多数の海底地すべりより大きな津波が発生したと推測できる。

謝辞: 本研究はインドネシア Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Geological Agency 及び Coastal Disaster Mitigation Division, Ministry of Marine Affairs and Fisheries よりデータ提供等、多くのご協力より実施された。また、本研究は Willis Research Network の資金のサポートより活動されてる。

参考文献:

- Arikawa, T., Muhari, A., Okumura, Y., Dohi, Y., Afriyanto, B., Sujatmiko, K.A., & Imamura, F. (2018). Coastal Subsidence Induced Several Tsunamis During the 2018 Sulawesi Earthquake. *Journal of Disaster Research*. 13, 1-3.
- Imamura, F., & Imteaz, M. A. (1995). Long waves in two-layers: governing equations and numerical model. *Science of Tsunami Hazards*, 13(1), 3-24.
- Muhari, A., Imamura, F., Arikawa, T., Hakim, A.R. & Afriyanto, B. (2018). Solving the Puzzle of the September 2018 Palu, Indonesia, Tsunami Mystery: Clues from the Tsunami Wave form and the Initial Field Survey Data. *Journal of Disaster Research*. 13, 1-3
- Pelinovsky, E., Yuliyadi, D., Prasetya, G. and Hidayat, R. (1997) The 1996 Sulawesi tsunami, *Natural Hazards*, 16, 29-38.