

# パル湾における津波避難計画に関する検討 Assessment of tsunami evacuation plan in Palu Bay

都市人間環境専攻 コウ ハン

Civil, Human and Environmental Science and Engineering Course Pan HUANG

## 1. はじめに

### (1) 背景及び目的

インドネシアの気象庁に相当するBMKG (Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics) インドネシア気象気候地球物理庁<sup>1)</sup>によると、2018年9月28日現地時間19時2分頃、インドネシアのスラウェシ島で、マグニチュード7.7の地震が発生した。インドネシア気象当局は、地震発生後に津波警報を発表し、地震発生から数分以内に、島の中部の都市パルで最大津波高さ3メートルの津波を観測し、湾内のその他の地域では最大遡上高10mに達した地域も報告されている。この地震と津波の影響で、インドネシア国家防災庁 (National Agency for Disaster Management BNPB) は10月25日、死者・行方不明者が約3,300人、負傷者が約10,500人、家屋倒壊が約68,000棟、避難者が約206,000人に達したと発表した。今回の津波の発生については、Palu-Koro断層の破壊がパル湾内の海域まで及んでいたことに加えて地滑りとの関係も指摘されている。そのため、マグニチュードに比して大きな津波が、地震発生から数分で海岸線に到着した影響で、避難する時間も十分に確保できなかった。そこで、復興対策においては、人口の集中するパル湾南岸部において、嵩上げ道路を建設することで、津波の威力を抑えるとともに、避難時間を稼ぐことを目標とした。

また、図-1に示すパル湾はPalu-Koro断層、Matano断層、Makassar海峡により地震活動が活発な地域に位置している。2017年インドネシア地震ハザードマップ(Pusgen)によると、Palu-Koro断層は地震時に連続して破断する3つのセグメントで構成されており、その総延長は141kmに上る。過去にも大地震に見舞われており、近い将来に再発すると推測されている。一方で、パル湾においては、Makassar海峡における地震津波も懸念されている。Makassar海峡における津波想定では、津波到達まで数十分程度あるものの、浸水範囲も広く、浸水高さも高い津波が想定されている。

そこで、本研究では、西パル湾を対象として、地滑り津波のように、超近地津波で、到達時間も早く、比較的に高い津波に対して、今村らの提案した二層流モデル(土層と水層)を用いて津波浸水計算を行い、現地における地滑り津波の数値解析を行った。そして、出力された水位のデータをマルチエージェントシミュ

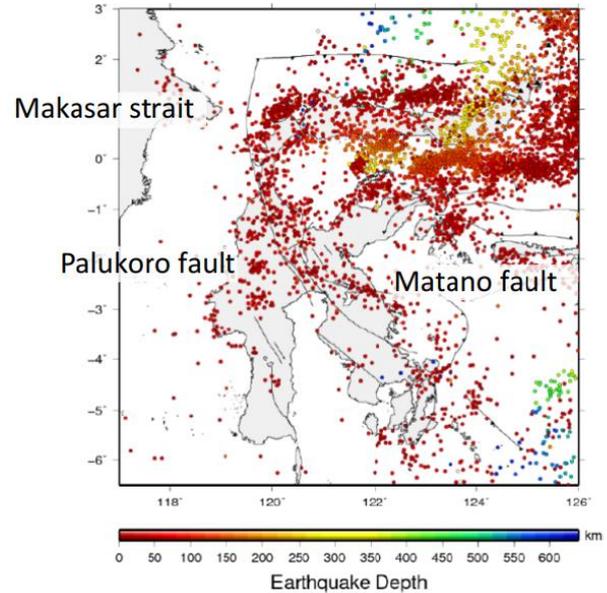


図-1 インドネシアの地震発生源とハザードマップ  
(Peta Gempa Bumi 2017)

レーションに受け渡すことで避難行動を行った。避難行動の再現には、緊急対応に活用できるように、避難所までの最短距離の避難経路とした。

## 2. 数値シミュレーション

### (1) 二層流モデルの概要

本研究では、今村ら<sup>2)</sup>が提案した非線形長波理論に基づく二層流モデルを用いた。地滑り津波では上層の水塊と下層の土塊の二層の相互干渉を考慮する必要がある。以下に、x方向を例として、式(1)に上層の連続式、式(2)に上層の運動方程式、式(3)に下層の連続式、式(4)に下層の運動方程式を示す。

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

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

$$\frac{\partial Z_2}{\partial t} + \frac{\partial Q_{2x}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{2y}}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q_{2x}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_{2x}^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_{2x} Q_{2y}}{D_2} \right) + g D_2 \frac{\partial Z_2}{\partial x} + g \frac{\rho_1}{\rho_2} D_2 \frac{\partial Z_2}{\partial x} - \tau_{2x} = 0 \quad (4)$$

ここで添え字の1,2は上層と下層を,  $x, y$  は座標軸の水平及び垂直成分を表す. また,  $Q_x, Q_y$ :  $x, y$ 方向の線流量,  $Z$ : 静水面からの変動,  $D$ : 層厚,  $\rho_1, \rho_2$ : 水及び土の密度,  $\tau$ : 底面せん断力,  $g$ : 重力加速度を示す.

## (2) 津波シミュレーションの計算条件

二層流モデルにおいては, 現地調査結果及び既往文献<sup>4)</sup>に基づき図-2に示すような地滑り波源を想定した. 各地滑り波源のパラメータを表-1に示す. 本検討ではパル沿岸地域において長さ2300m, 幅15mの道路を5m程嵩上げた地形を想定し(図-3), 嵩上げの有無における, 津波浸水範囲の影響を明確化する. 図-4にパル市街地における時系列津波波形を示す.

## (3) 避難シミュレータの概要

本研究で用いた有川・大家<sup>3)</sup>の避難シミュレータは, ポテンシャルモデルを使用し, 避難者は地形や障害物

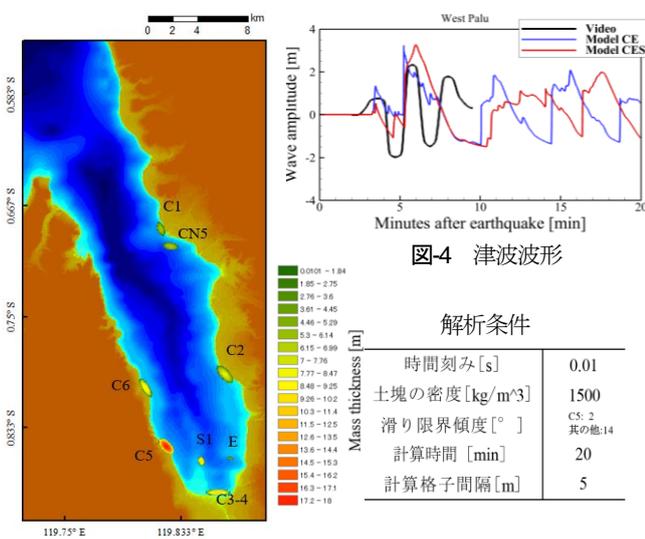


図-4 津波波形

図-2 想定した地滑り波源

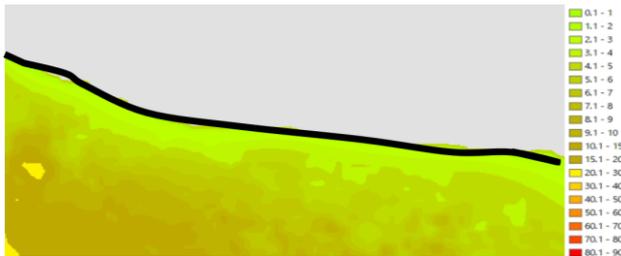


図-3 パル市街地における道路の嵩上げ

を考慮した避難所までの最短距離経路を選択する. また避難速度は, ハイキング関数により経路の勾配を考

慮し, また浸水深による避難速度の補正を行っている. 避難シミュレーションのフローを図-5に示す. 浸水深は, 二層流モデルにより計算される値を読み込むことにより設定する. また, 二層流モデルと避難モデルを連成し, 津波の挙動と避難行動を同時に計算することで, 津波規模と避難条件に応じた死亡率の定量的な評価を可能としている. 避難者の死亡判定は, 死亡判定水深を設定し, その水深を超える浸水深を持つセルに含まれる避難者を死亡判定としている. 本研究では死亡判定水深を1.0mと設定した.

## (4) 避難シミュレーションの計算条件

本計算における詳細な計算条件を表-1に示し, 道路及び設定した避難所を図-6に示す. 設定条件として避難者数1700人, 避難経路上にランダムに配置した. 内閣府(2005)<sup>5)</sup>のガイドラインにより, 「津波避難ビル等候補の選定に伴うカバーエリア」の設定方法を示している. ここでは避難者は一番近くの津波避難ビル等に避難すること, 海方向への避難を想定しないことを条件としている. そのため, 内陸の避難者が津波に向かって避難せず実際の状況を作り出すために図-6に津波避難場所を赤丸の部分に設定した. また, 設定する避難場所には, 十分な建築空間が確保されていること, 避難場所周辺の道路が複雑でないこと, 内陸側にあることを条件とした. SNS上に投稿されたビデオ映像<sup>6)</sup>から, 実際にショッピングモール(A)に逃げたことがわかった. しかし, 避難場所(A)だけでは犠牲者が多かったため, 大学(B), ホテル(C)にも避難場所を追加した. これらの避難場所は地滑り津波のように, 超近地津波で, 到達時間も早く, 比較的に高い津波に対して, 沿岸線から200m以内で, 緊急対応に活用できるよう想定し設



図-5 避難シミュレータのフロー図



図-6 避難経路及び避難所

置した。そして、避難開始時間は、0s~600の間60s毎で設定を行った。上記の避難シミュレーションと二層流モデルでの津波シミュレーションを連成させることで、各条件での死亡率の算出を行った。

| 項目        | 詳細             |
|-----------|----------------|
| 避難経路      |                |
| 避難場所      | 提案避難場所  仮避難場所  |
| 格子間隔      | 5.0m           |
| 格子数       | 400*200        |
| タイムステップ間隔 | 0.1s           |
| 避難開始時間    | 0sから300s 60sずつ |
| 移動速度      | 1.0m/s         |
| Agent数    | 1700           |
| 計算時間      | 1200 s         |
| 避難経路選択    | 最短距離経路         |
| Agent配置場所 | 経路上にランダム       |
| 死亡判定水深    | 1.0m           |

表-1 避難シミュレーション計算条件

### 3. 数値シミュレーションの計算結果

二層流モデルを用いた計算結果により、図-7に示したように浸水範囲が減少した。また、図-8のように嵩上げ道路によって、避難時間を最大で109秒まで稼ぐことが可能となった。避難開始時間と死亡率の関係のグラフと、津波到達時間は地震発生後360sであった。避難場所までの最短距離の避難経路とした場合は、図-9と図-10から、全体の死亡率は低いことがわかる。避難開始時間が遅くなり、津波到達3分後で最大16.4%の死亡率の低減が見られ、複数の避難場所と嵩上げ道路を設置する

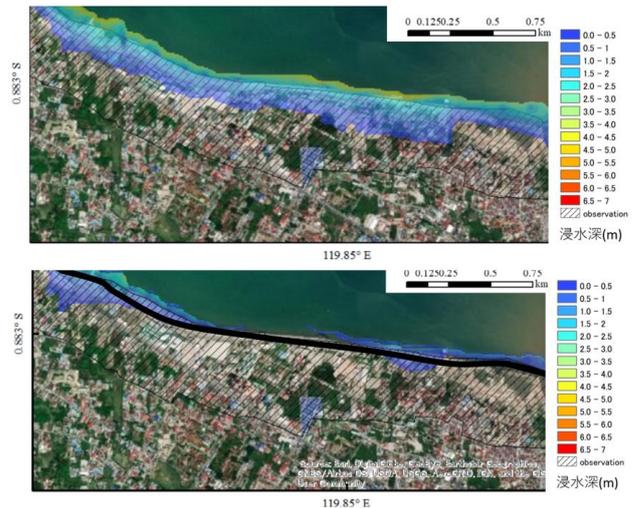


図-7 嵩上げ道路による浸水範囲の比較

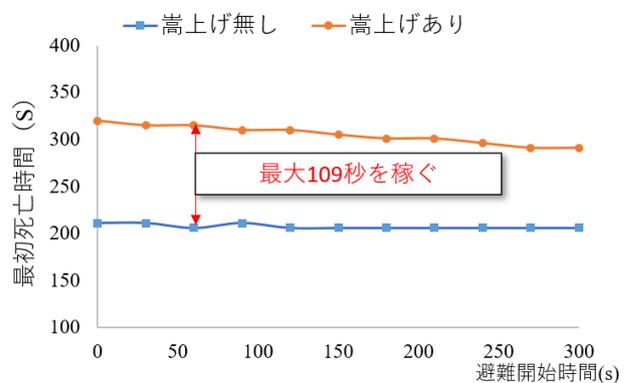


図-8 嵩上げ道路による死亡時間の変化

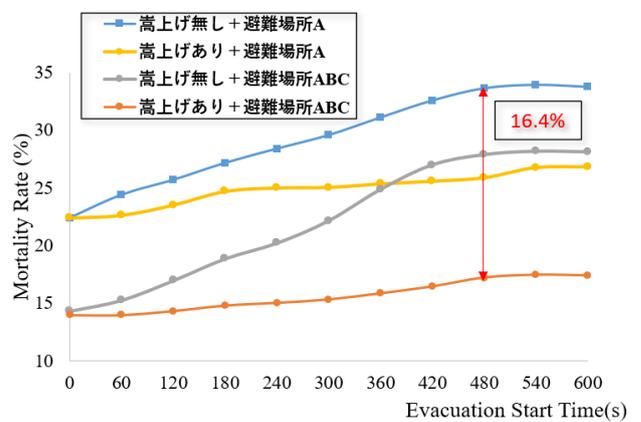


図-9 避難開始時間と死亡率の関係

ことで、津波到達時間の前後に避難を開始する避難者に対しては、避難場所(B)(C)と嵩上げ道路の有効性を確認することができた。

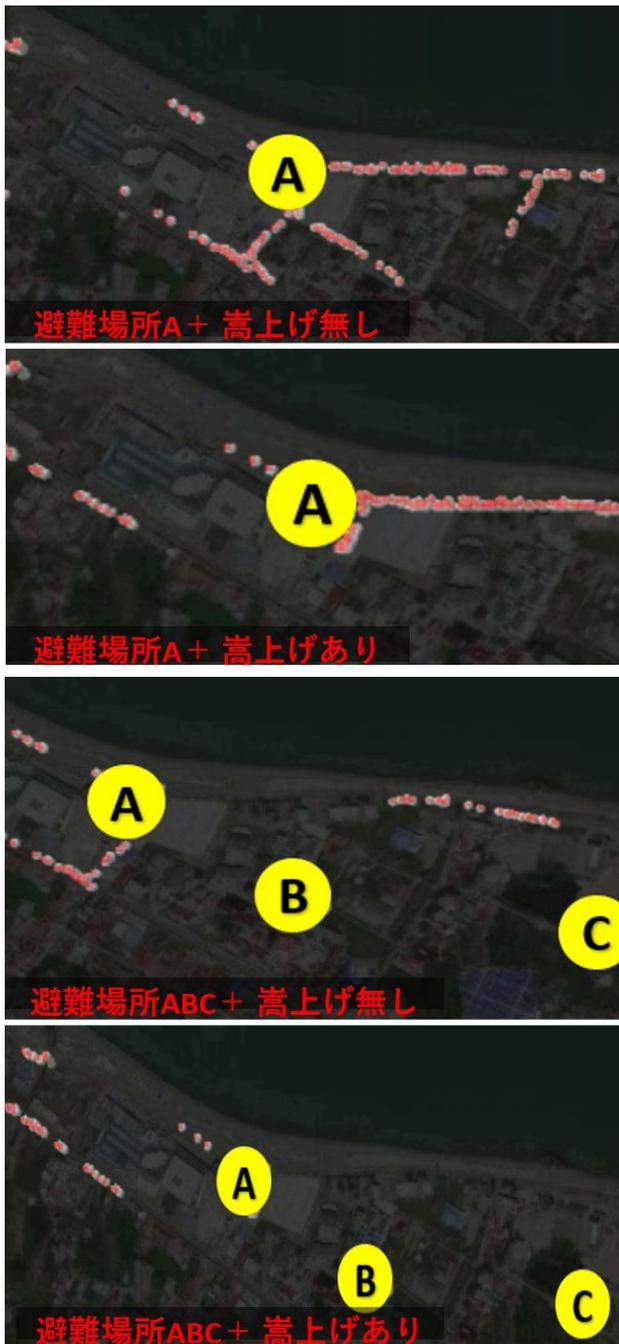


図-10 条件毎の死亡率の変化

#### 4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 海底地すべりがある場合を想定し今回の津波シミュレーションを用いて、パル沿岸において、長さ2300m、幅15mの道路を5m程嵩上げた。それによる嵩上げの有無における、津波浸水範囲が減少したことを明確化し、避難時間を最大で109秒まで稼ぐことが可能となった。
- (2) 避難シミュレーションの結果から、複数の避難場所と嵩上げ道路を設置することで、津波到達時間の前後に避難を開始する避難者に対しては、死亡率が最大

16.4%低減し、避難場所(B)(C)と嵩上げ道路有効性を確認することができたと考える。

(3) 本検討では、1つの波源だけで検討したが、複数のケースを想定することが必要であると考え、マカッサル海峡による地震津波も併せて、避難の在り方と避難場所の検討を続けていく。マカッサル海峡における津波想定では、津波到達まで数十分程度あるものの、浸水範囲も広く、浸水高さも高い津波が想定されている。そのため、マカッサル海峡沿いの津波について、準の次元津波シミュレータを用いて検討し避難者の死亡率の低下とともに、強固で高さのある避難場所がどの程度必要になるのかを検討する。

#### 謝辞

地形データの提供について Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics (BMKG) に感謝の意を示す。

#### 参考文献

- 1) BMKG (Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics)
- 2) Imamura, F. & Imteaz, M. M. A. (1995a). "Long waves in two-layers: governing equations and numerical model." *J. Sci. Tsunami Hazards* 13(1), 3-24.
- 3) 有川太郎, 大家隆行: 数値波動水槽と連成した避難シミュレーションによる避難行動特性についての検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp. L319-L324, 2015.
- 4) 近貞直孝, 鈴木亘, 三好崇之, 青井真, 根本信, 大嶋健嗣, 松山尚典, 高山淳平, 井上拓也, 村田泰洋, 佐竹次郎, 阿部雄太, 是永真理子, 橋本紀彦, 赤木翔: 津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築, 防災科学技術研究所研究資料 第430号, 2019年3月
- 5) 内閣府政策統括官(防災担当): 津波避難ビル等に係るガイドライン, pp.19-24, 2005
- 6) <https://www.bbc.com/japanese/features-and-analysis-45715025>