三次元流体剛体連成解析手法の地すべり津波に対する再現性検証

浦上 佳太¹·米山 望²

Reproducibility verification of 3D fluid-rigid body coupled analysis method to tsunamis generated by landslide

Keita URAKAMI¹ and Nozomu YONEYAMA²

Abstract

In 2011, Japan suffered from the tsunami that was beyond expectations due to the Tohoku Earthquake. Therefore, it is necessary to take countermeasures against tsunamis caused by various factors including landslides. In this study, the three-dimensional fluid-rigid body coupled analysis method of Yoneyama et al. was applied to a simulation of the past hydraulic model experiments on tsunamis generated by landslides in order to verify its validity. As a result, the time-series waveforms and the maximum and minimum water levels of tsunamis were consistent with those of the experiments in all cases of subaerial landslides. In the case of submarine landslides, the first wave and the second wave of the time-series waveform roughly match with those of the experiments. Moreover, the waveform shifts with the passage of time, and the time-series waveform oscillates in a short cycle.

キーワード:津波,地すべり,三次元数値解析,双方向連成解析 Key words: tsunami, landslide, three-dimensional numerical analysis, two-way coupling analysis

1. はじめに

日本では,東日本大震災で想定を超える高さの 津波に被災した経験から,あらゆる可能性を考慮 した津波への対策が求められている。例えば,原 子力規制委員会では,防潮堤などの津波防護施設

¹ 京都大学工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Kyoto University の設置の基準として,従来の地震性要因に加えて, 地すべり等の非地震性要因,及びそれらの要因の 組み合わせから想定する津波を新たに策定し,よ り安全側な津波対策を進めている。代表的な非地 震性津波の1つである地すべり起因の津波は,規

² 京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本報告に対する討議は2022年2月末日まで受け付ける。

模・被害が大きくなりやすく,発生の予測が難し い。2018年12月22日インドネシアのスンダ海峡で は、大規模な噴火活動によって山体崩壊が起こり, 大量の岩石が海域に流入して津波が発生した。当 時のインドネシアの津波警報システムは山体崩壊 による津波には対応していなかったため,津波は 警報の出ないまま沿岸に到達し多数の死傷者を出 したと報告されている¹⁾。日本でも多数の地すべ り跡が見つかっており、今後日本で地すべり津波 が発生する可能性は否定できないため、数値解析 等を通して地すべり津波の特性を解明し早急に対 策を進める必要がある。

地すべり津波の数値解析手法では、これまで、 地すべり塊の移動を海底面の地盤変動として取り 扱う方法が多く用いられてきた。これらの方法は, 地盤変動量に応じて直上の水位を変化させ津波を 発生させるとともに、流体挙動が地盤変動に影響 を与えない One-way モデルとなっている。殿最 ら²は、そのような One-way モデルとして、運動 学的地すべりモデル (KLS モデル)³⁾, 地すべり の崩壊部と堆積部が同時進行するよう殿最らが修 正した KLS モデル(修正 KLS モデル),地すべり による初期水位分布を与えて伝播計算を進めるモ デル (Watts らのモデル)⁴⁾の三つを用いて海底地 すべりに関する断面二次元水理実験の再現計算を 実施し、各モデルの再現性について検証している。 また,由比ら5)は、海底地すべりに伴う底面変動 項を付加した非線形長波方程式を有限体積法に基 づいて解く数値解析モデルを構築し、既往実験の 再現計算を通してその適用性を検証している。

これらの方法は簡易的に地すべりの影響を把握 することが可能であるが,地すべり津波の特性把 握の観点からは,地すべりの実際の動きや発生し た流れとの相互作用,三次元的な津波の広がり等 を検討できる手法が望まれる。そのような手法の 一つとして,保坂ら⁶⁾が陸上・海底地すべりに伴 う津波の解析に適用している OpenFOAM による 三次元多相流解析手法がある。保坂らは地すべり 塊を粒状体で模した既往水理実験⁷⁾の再現計算を 通してその適用性を検証した結果,時刻歴波形が 実験結果と概ね一致し,津波予測の手法として利 用できる可能性が高い、と報告している。

ところで、藤井らの実験⁷⁾では、地すべり塊と して粒状体を用いた場合の水位変動量は固体模型 を用いた場合より小さくなる、という結果が示さ れている。つまり、地すべり津波をより安全側で 評価する上では、瞬時に変形する粒状体より剛体 運動する固体を地すべり塊として採用する方が適 している、と考えられる。

そこで,地すべり塊を固体(剛体)とした上で, 流れとの相互作用(Two-way)を考慮できる三次 元手法により,地すべり津波挙動の再現を試み る。以下では,本研究で用いる米山らの三次元流 体剛体連成解析手法⁸⁾を簡単に紹介した後,同手 法を用いて藤井らの水理模型実験⁷⁾の再現計算を 行い,主に津波の時刻歴波形の比較を通してその 再現性を検証した結果を報告する。

2. 本解析手法の概要

本研究では米山らの三次元流体剛体連成解析手 法⁸⁾を用いている。本手法では,地すべり塊を剛 体と見なし,解析領域中では計算セルによって分 割された断片(セグメント)として表現する。地 すべり塊が流体挙動に与える影響を各計算セルの 空隙率及び開口率の時間変化として流体挙動の基 礎方程式に反映させることで,流体と剛体の相互 作用を考慮した数値解析が可能となる。以下では, 流体挙動の解析手法及び地すべり塊挙動の解析手 法について述べる。

2.1 流体挙動の解析手法概要

(1) 基礎方程式

本解析手法では,質量保存則およびニュートン の運動の法則から導かれる連続式及び運動方程式 を基礎方程式として,自由水面をもつ多次元流れ を解析する。

・連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{(1)}$$

·運動方程式 (Navier-Stokes 式)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$
(2)

ここで, *u_i*: 流速の各方向成分, ρ: 流体密度, p: 圧力, *G_i*: 単位質量あたり外力の各方向成分, v: 動粘性係数である。以上の方程式を直交座標 系上で離散化し, 解析を行っている。なお, 各物 理量の配置はスタッガード配置とし, 離散化は時 間について前進差分, 移流項は三次精度風上差 分⁹, その他は中央差分とする。

(2) 水面の取り扱い

自由水面の取り扱いは VOF 法¹⁰の考え方を利 用して行っている。VOF 法では,計算セル毎に 液体充填率 F を定義し,解析領域中の流体を表 現している。この値を基に移流方程式を計算して 流速場を更新し,流体全体を移動させる。

・移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \tag{3}$$

なお,移流計算はドナーアクセプター法¹⁰に基 づいて行っており,流体体積を保存するための複 数の工夫を施している⁸⁾。

2.2 地すべり塊挙動の解析手法概要(1)解析中での地すべり塊の扱い方

①地すべり塊の取り扱い

本手法では、地すべり塊を剛体として取り扱っ ている。その利点として、周囲流体から作用する 力を計算すれば流体挙動の計算のみで地すべり塊 の移動が解析できる、ということが挙げられる。 また、解析において計算セルの一部に地すべり塊 が存在するということが起こる。そのため、地す べり塊を含むセルについては計算セルの空隙率 y^v及び計算セル境界の開口率 y^e_iの時間変化を考 慮して移流計算を行っている。

・空隙率

$$\gamma^{\circ} = \frac{計算セル中の物体以外の体積}{計算セルの体積}$$
 (4)

・開口率

$$\gamma_i^a = \frac{\nu \nu 境界面中の物体以外の面積}{\nu \nu 境界面の面積}$$
 (5)

・修正後の移流方程式

$$\frac{\partial \gamma^{\nu} F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_{j}^{a} F u_{j}}{\partial x_{i}} = 0$$
(6)

以上のように、本手法では、流体運動は解析に より求めた圧力及び粘性力として地すべり塊挙動 に反映され、地すべり塊挙動は計算セルの空隙率 及びセル境界の開口率の時間変化として流体挙動 に反映される。

②地すべり塊が存在する計算セルの空隙率及び開 口率の計算方法

前述の通り、本手法では、各計算セルの空隙率 及び開口率を用いて移流計算を行っている。時々 刻々に変化する地すべり塊の位置に応じてこれら の値は変化するため、各計算セルに含まれる地す べり塊(セグメント)の体積及び表面積を逐一計 算し、空隙率及び開口率の値を更新している。そ の計算手順⁸⁾は以下の通りである。

- 1)セグメントを構成する頂点の座標を計算する。
- 2)セグメントを構成する面とそれを構成する頂 点を調べる。
- 3)各セグメント面を複数の三角形に分割し、ベクトルを用いて各三角形の面積を計算する。その総和をセグメント面の表面積とする。

4) セグメントの体積を計算する。

(2) 地すべり塊の移動方法

剛体運動は重心の並進運動と重心まわりの回転 運動に分解でき、以下の方程式に基づいて各運動 の解析を行っている。

・重心の運動方程式

$$ma_{g} = mg + \sum_{segment} (F^{pr} + F^{vis}) + F^{re}$$
 (7)

・重心まわりの回転運動の運動方程式

$$I\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times I\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{N} \tag{8}$$

ここで、m:地すべり塊の質量、 a_g :重心の加速度、 F^{pr} :各セグメントに作用する流体圧力、

 F^{vis} : 各セグメントに作用する流体粘性力, F^{re} : 地すべり塊が接地面から受ける垂直抗力, ω : 慣 性主軸座標系での角速度,I: 慣性主軸座標系で の慣性モーメント,N: 慣性主軸座標系でのモー メントである。

また,各作用力の評価方法を以下に示す。 ①圧力

本解析手法では、圧力を各セグメントの表面毎 に計算している。圧力の計算には、各計算セルの 圧力値Pを計算セル中心 r_c ~セグメント表面の 重心 r_s 間で静水圧分布を仮定して補正した値P''を用いる。

$$p^{pr} = P - \rho g h$$

= $P - \rho g (\mathbf{r}_{e} - \mathbf{r}_{e})_{e}$ (9)

セグメント表面 (面積 S)の重心 r_s に圧力 $P^{\mu\nu}$ が作用しているとすると、この面にかかる力 $F^{\mu\nu}$ は式 (10)のように表せる。

$$\boldsymbol{F}^{pr} = \boldsymbol{P}^{pr} \, \boldsymbol{S}(-\boldsymbol{n}) \tag{10}$$

ここで,**n**は面に対する単位法線ベクトルを表 す。ただし,地すべり塊表面が水面セル内に接す る場合は対象セグメント表面のうち水面下部分の 重心位置を用いる。

②粘性力

位置 $r(=(x y z)^{T})$ における流速ベクトルをU(r)とすると、Uのセグメント面に平行な成分 U_{p} は以下の式で表せる。

$$U_{p} = U - (n \cdot U)n \tag{11}$$

点 r_s におけるせん断応力 $\tau(r_s)$ は、セグメント 表面に垂直表向きの座標軸を η とすると、

$$\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{r}_s) = \mu \frac{\partial \boldsymbol{U}_p}{\partial \eta} \bigg|_{\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_s}$$
(12)

ここで, µは流体の粘性係数である。これを用 いると, セグメント表面に作用する粘性力**F**^{vis}は,

$$\boldsymbol{F}^{vis} = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{r}_s)\boldsymbol{S} = \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{S}\frac{\partial \boldsymbol{U}_p}{\partial \boldsymbol{\eta}}\bigg|_{\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_s}$$
(13)

となる。

2.3 解析の流れ

解析の流れの概略を以下に示す(図1参照)。

- 1)初期データを読み込む。
- 時刻 t での流速 u_iⁿ, 圧力 Pⁿ の境界条件を設 定する。
- 時刻 t+ Δt での圧力の推定値を pⁿ⁺¹=Pⁿ と する。
- 4) 圧力の推定値 pⁿ⁺¹を用いて時刻 t+Δt での地 すべり塊の位置を計算し,同時に計算セルの空 隙率 yⁿ 及びセル境界の開口率 yⁿ_i を計算する。
- 5)時刻 $t+\Delta t$ での流速の推定値 \tilde{u}_{i}^{n+1} を計算する。
- 6)連続式誤差 D を計算する。これが誤差許容最 大値 D_{max} を超えていれば, 圧力誤差方程式を 解いて圧力の推定値 p̄ⁿ⁺¹を修正する。許容最 大値以下であれば, 流速, 圧力, 地すべり塊移 動速度の推定値 ũ̃ⁿ⁺¹_i, p̄ⁿ⁺¹, Ũ̃ⁿ⁺¹をそれぞれ真値 u_iⁿ⁺¹, pⁿ⁺¹, Uⁿ⁺¹とし, 次のステップに進む。
- 7)流速値 u_i^{n+1} より流体移動量を計算し、時刻 $t + \Delta t$ での流体充填率 F^{n+1} を計算する。
- 8)計算セルを分類し、水面形状を更新する。
- 9)この時点で計算終了時刻であれば計算を終了し、そうでなければ時刻を更新して2)に戻る。



3. 本解析手法の適用性検証

本研究では,藤井らの行った水理模型実験ⁿの うち地すべり塊を固体形状で模したケース(表1) を対象に再現計算を行った。以下に計算条件およ び得られた結果を示す。

3.1 計算条件

解析領域の概要を図2に示す。解析領域には, 実験と同様,高さ1.5 m,幅12 m,長さ12 mの平 面水槽に勾配2:1の斜面を取り付けたものを設 定した。領域境界は四方向全て No-slip 条件で, 斜面と地すべり模型間の動摩擦力をゼロと仮定し た。地すべり塊には図3に示す(a)直角三角柱, (b)二等辺三角柱,(c)ガウス分布形状を用いた。 ガウス分布形状では,式(14)~(17)に示すガウ ス関数¹¹⁾を使用して断面形状を設定した。ここで, T:最大厚さ(=0.250 m), b:最大長さ(=0.615 m), $w:最大幅(=1.230 \text{ m}), <math>\varepsilon$:定数(=0.7)である。

$$z = \frac{T}{1 - \varepsilon} \left\{ \frac{1}{\cos(k_b x)} \cdot \frac{1}{\cos(k_w y)} - \varepsilon \right\}$$
(14)

$$k_b = \frac{2C}{b} \tag{15}$$

$$k_w = \frac{2C}{w} \tag{16}$$

$$C = \cosh^{-1}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \tag{17}$$

地すべり塊の初期位置を斜面上端に合わせ,斜面下方向へ滑落させて発生させた波について伝播 計算を行い,その水位を図2に示す計測点H1~ 16で評価した。その他の解析条件は表2に示す通 りである。地すべり塊の滑落方法は、実験時の方 法⁸⁾を模擬して、自由落下方式のケースを自重滑 落、引張方式のケースを一定加速度での滑落、と した。なお、各ケースの加速度は、地すべり塊の 平均滑落速度の実験値から推定した。

3.2 解析結果・実験結果の比較

以下では, 各ケースの解析結果を, 陸上地すべ



表1 実験ケース

	初期水位 (m)	地すべりタイプ	地すべり塊形状	滑落方式
case1	0.50	陸上地すべり	直角三角柱	等加速度運動
case2	1.00	海底地すべり	直角三角柱	自重落下
case3	0.50	陸上地すべり	二等辺三角柱	等加速度運動
case4	1.00	海底地すべり	二等辺三角柱	自重落下
case5	0.50	陸上地すべり	ガウス分布形状	等加速度運動
case6	0.50	陸上地すべり	ガウス分布形状	自重落下
case7	1.00	海底地すべり	ガウス分布形状	等加速度運動
case8	1.00	海底地すべり	ガウス分布形状	自重落下



図3(a) 地すべり塊(直角三角柱)の概要(単位: cm)



図3(b) 地すべり塊 (二等辺三角柱)の概要 (単 位:cm)



図3(c) 地すべり塊(ガウス分布形状)の概要 (単位:cm)

り津波のケース,海底地すべりのケースそれぞれ について示す。なお,結果の評価に際して,将来 的には本解析手法を実スケールの現象へ適用する ため,地すべり塊初期位置より離れた計測点での 第一波,第二波に特に注目して評価した。

(1)陸上地すべり津波のケース

陸上地すべり津波解析のスナップショットを図 4(a)(b),各計測点での水位の時刻歴波形を比較

表2 解析条件

メッシュサイズ (cm)	(2.0, 5.0, 2.0)	
計算間隔	CFL 条件で制御	
計算時間 (15	
地ナベル地の比重	三角柱	1.60
地 り ハリ 地 の ル 里	ガウス	2.48
斜面の動摩擦	0.00	
連続式許容最大	1.00×10^{-10}	
動粘性係数 (n	1.00×10^{-6}	
境界条件	No-slip 条件	

した結果を図5(a)~(d)に示す。ただし,解析 波形・実験波形の時間表示は,顕著な押し波の最 も早く到達した計測点H4において第一波のピー ク時刻が両者で揃うように調整した。図5より, 各計測点での時刻歴波形はいずれのケースも非常 に良好な精度で一致した。また,case5を除いて H4での第一波の最大水位が実験結果より過小評 価される傾向にあることが分かった。しかし,地 すべり塊の初期位置から離れた計測点では,解析 結果が実験結果と水位,周期共に非常に良い精度 で一致している。そのため,将来的により広範の 現象を対象にすることを考慮すると,波源直近の 地点での解析誤差は現象の評価に大きな影響を与 えないと判断できる。

全計測点における時刻歴波形の最大水位・最小 水位の比較結果を図6に示す。図中の破線は傾き 1.0の直線を表す。また、最小水位には第一波の 値、最大水位には、地すべり位置での急激な水面 低下の影響で反作用的に第一波より第二波の水位 の方が大きくなるため、第二波の値を抽出して用 いた。図より、陸上地すべり津波のケースはいず れも、最大水位・最小水位共に概ね一致すること がわかった。

各ケースで計測された地すべり塊の平均滑落速 度を比較した結果を表3,図7に示す。平均速度 は初期位置から水面までの区間,初期位置から斜 面下端までの区間で平均したものをそれぞれ記載 している。ほとんどのケースで解析値と実験値は 概ね一致したが,ガウス分布形状を自重滑落さ せる case6では,解析値が実験値より大きい値と なった。そこで,以下の式(18)に従って case6



(a) 三次元表示



(b) 断面二次元表示

図4 陸上地すべり津波解析のスナップショット(case3, t=1.400(s))

における初期位置〜水面区間平均滑落速度の理論 値を計算した。

 $\overline{v} = \sqrt{\frac{g_H(L-l)}{2}} \tag{18}$

ここで、 g_H :重力加速度の斜面水平方向成分, L: 地すべり塊初期位置~水面区間距離, l:地すべり 塊長さである。その結果, 理論値は $\bar{v} \Rightarrow 32$ (cm/s) となり, 解析値とほぼ一致した。つまり, 実験値 が理論値及び解析値より小さいと言える。このよ うな結果になった原因として, 解析において摩擦 力を考慮していない影響がその他ケースに比べて 大きかったことが考えられる。今回用いた地すべ り形状の比重は, **表2**に示す通り, ガウス分布形 状と三角柱形状で約1.6倍の差がある。体積はい ずれの形状も同程度であるため,ガウス分布形状 の受ける動摩擦力は他形状の約1.6倍である。そ の影響を省略して解析したため,滑落速度の差と して顕著に表れたと考えられる。一方, case6の 最大・最小水位は実験値に概ね一致しているため, 波高の大小には影響を及ぼしていないことが窺え る。これに関しては今後原因を検討する。

以上より,本解析手法は,陸上地すべり津波に ついて,地すべり塊形状に関わらず,定性的に正 しい再現結果を示せると言える。

(2) 海底地すべり津波のケース

海底地すべり津波解析のスナップショットを図 8 (a) (b) 各計測点での水位の時刻歴波形を比較 した結果を図9(a)~(d)に示す。海底地すべり 津波のケースのうちガウス分布形状を用いたもの (case7, case8)では、各計測点での時刻歴波形 は概ね一致した。三角柱を用いたケース (case2. case4)では、時刻歴波形の第一波、第二波はど の計測点でも概ね一致したものの、時間経過につ れて波形がずれる傾向にあることを確認した。ま た、地すべり塊形状に関わらず、短周期振動(例、 case4の計測点H7)が解析波形に生じていること を確認した。陸上地すべりのケースではこのよう な傾向が見られないことから、この現象は津波波 高の大小と相関があると考えられる。陸上地すべ りのケースでは波高がいずれの計測点でも少なく とも2cm 程度あるが、海底地すべりのケースで はほとんどの計測点で波高1cmに満たなかった。 今回の解析では2.0 cm (長さ方向) × 5.0 cm (幅方 向) × 2.0 cm (高さ方向)のメッシュを用いてい るため、より小さい範囲で水位変化する海底地す べり津波の挙動を追跡しきれなかったのだと考え られる。よって、更なる精度向上が必要な場合に は、適切なメッシュサイズの検討などが必要であ ると考えられる。

全計測点における時刻歴波形の最大水位・最小 水位を比較した結果を図10に示す。なお、case2 (直角三角柱)の値をプロットしていないが、こ れは実験において測定水位の頭打ち現象⁸⁾が確認 されており、適切な比較ができないと判断したた



Time (s)

図5(b) 水位変動の時刻歴波形比較 (case3)





図5(d) 水位変動の時刻歴波形比較(case6)



図6 陸上地すべり津波の最大・最小水位比較

表3 地すべり塊の平均滑落速度(陸上地すべ り津波のケース,上段:初期位置~水面 区間の平均速度,下段:初期位置~斜面 下端区間の平均速度)

	実験	解析
	(cm/s)	(cm/s)
anaa1	52	46
Casel	160	152
	59	59
cases	160	159
20005	38	34
CaseJ	166	170
G	22	32
caseo	110	146



図7 地すべり塊の平均滑落速度比較(陸上地 すべり津波のケース)



(a) 三次元表示



(b) 断面二次元表示

図8 海底地すべり津波解析のスナップショッ ト(case4, t=1.711(s))



図9(a) 水位変動の時刻歴波形比較 (case2)



図9(b) 水位変動の時刻歴波形比較(case4)



図9(c) 水位変動の時刻歴波形比較 (case7)



図9(d) 水位変動の時刻歴波形比較 (case8)

めである。海底地すべりのケースでは、最大水位 はいずれのケースも解析値が若干過大評価の傾向 にあったが、その誤差は小さい。最小水位も同様、 若干過大評価の傾向にあるが、一部計測点で破線 から大きく外れることを確認した。しかし、大き なずれが生じている計測点はいずれも地すべり塊 初期位置直近の H3であるため、将来的により広 範の現象を対象にすることから現象の評価に大き な影響をもたらさないと判断した。

各ケースで計測された地すべり塊の平均滑落速 度を比較した結果を表4,図11に示す。平均速度 は地すべり塊初期位置から斜面下端までの区間で 計測した。ほとんどのケースで概ね一致した値



図10 海底地すべり津波の最大・最小水位比較

を得られたが,ガウス分布形状を自重滑落させ るケース(case8)では解析値が実験値に対して大 きく上回る結果となった。これは, case6と同様, 解析において地すべり塊への摩擦力を考慮してい ないことが原因だと考えられる。また,図10より, case8では水位が実験結果より大きくなっており, 平均速度の過大評価との相関が窺える。前述の case6とは真逆の結果が得られたため,地すべり 滑落速度と津波波高の関係性については今後検討 していく必要があると考えられる。

以上の結果から,本解析手法は,海底地すべり 津波について,津波発生直後では定性的に正しい 再現結果を示せると言える。一方,時間経過につ れて波形のずれが生じることや時刻歴波形が短周 期で振動する現象を確認したため,これらの原因 について解明し今後の実スケールでの解析に影響 を及ぼすか検討する必要がある。

表4 地すべり塊の平均滑落速度(海底地すべり津波のケース)

	実験 (cm/s)	解析 (cm/s)
case2	66	65
case4	67	63
case7	164	168
case8	80	107



図11 地すべり塊の平均滑落速度比較(海底地 すべり津波のケース)

4. 結論

本研究では,米山らの手法を応用して地すべり 津波に関する既往実験の再現計算を行い,地すべ り津波解析に対する再現性を検証した。以下で本 研究を通して得られた結果を示す。

- ●陸上地すべり津波のケースについて、時刻歴波 形及び最大・最小水位を比較した。その結果、 諸量について概ね一致することを確認した。以 上より、本解析手法は、地すべり塊形状に関わ らず、陸上地すべり津波を概ね再現可能である と言える。
- ●海底地すべり津波のケースについて、同様に、時刻歴波形及び最大・最小水位を比較した。時刻歴波形の第一波、第二波は、地すべり塊形状に依らず、いずれの計測点でも概ね一致した。また、最大・最小水位は若干過大評価する傾向にあったがその誤差は微小だった。以上の結果から、本解析手法は、海底地すべり津波について、津波発生直後では概ね正しい再現結果を示せると言える。
- ●地すべり塊の平均滑落速度について比較したところ、ほとんどのケースで概ね一致したが、ガウス分布形状を自重滑落させるケース(case6, case8)では解析値が実験値に対して上回る結果となった。これは、ガウス分布形状の質量が三角柱形状の約1.6倍であり、摩擦力を考慮しなかった影響が他ケースに比べて大きかったことが原因だと考えられる。しかし、case8では津波波高が過大評価される傾向にある一方、case6では解析結果が実験結果とあまり変わらないことから、地すべり滑落速度と津波波高の関係性について今後検討していく必要があると考えられる。

また、今後の方針として、以下の事項を検討す る予定である。

- ●本解析手法を用いて数値実験を行い、地すべり 津波の詳細な特性について考察する。具体的に は、地すべり塊のスケール、滑落速度、滑落距 離等のパラメータを変化させて解析し、津波波 高にどのような影響を及ぼすか調査する。
- ●本解析手法を実現象へ適用する場合の諸条件

(各パラメータ,時間間隔,計算格子)について, 詳細に検討する。特に,実現象での地すべりと 本手法中での地すべり塊の大きな違いとして変 形の有無が挙げられる。過度な安全側評価をし ないために,地すべり津波の実例の再現等を通 して,諸条件の調整を行う必要がある。

●本解析手法を用いて実スケールでの現象を評価 するため、今回の解析領域の周囲に平面二次元 領域を配置した平面二次元・三次元ハイブリッ ド解析を行う。

謝辞

本論文で用いた実験は、電力12社による原子力 リスクセンター共研として、土木学会原子力土木 委員会津波小委員会の助言のもと実施した成果で ある。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 今村文彦・Abdul Muhari・有川太郎:インド ネシアスンダ海峡で発生した火山性津波につい て, Research Report of Tsunami Engeneering, Vol.36, pp.27-31, 2019.
- 2) 殿最浩司・志方建二・村上嘉謙:海底地すべり に伴う津波の各種計算モデルの再現性検討,土 木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, I_557-I_562, 2015.
- 3) 佐竹健治・加藤幸弘:1741年寛保津波は渡島大島の山体崩壊によって生じた,月刊海洋/号外 No.28, pp.150-160, 2002.
- 4) P. Watts, S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer: Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Preditive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298–310, 2005.
- 5)由比政年・上野卓也・山本朗宜:海底地滑りによる津波の発生と地滑り土塊形状の関係に関する数値解析,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, I_283-I_288, 2017.
- 6)保坂幸一・松山昌史・森 勇人:陸上・海底 地すべりによる津波の3次元数値解析,土 木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75, No.2, I_331-I_336, 2019.
- 7)藤井直樹・松山昌史・森 勇人:地すべりによる津波の平面水槽を用いた水理模型実験,土

木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, I_145-I_150, 2018.

- 米山 望・永島弘士:複雑な移動・回転を考慮 した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.65, No.1, I_266-I_270, 2009.
- 9) A. Harten, B. Engquist, S. Osher and S. Chakravarthy, "Uniformly high-order accurate essentially non-oscillatory schemes III", J. Comput. Phys. 71, pp.231–303, 1987.
- 10) C.W. Hirt and B.D. Nichols : Volume of Fluid

(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225, 1981.

11) F. Enet and S.T. Grilli: Experimental Study of Tsunami Generation by Three-Dimensional Rigid Underwater Landslides, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.133, No.6, pp.442–454, 2007.

> (投稿受理:令和2年10月28日 訂正稿受理:令和3年1月26日)

要 旨

日本では、東日本大震災で想定を超える高さの津波に被災した経験から、地すべりを含めた あらゆる発生要因の津波への対策が求められている。本研究では、米山らの三次元流体剛体連 成解析手法を地すべり津波の解析に適用し、既往水理模型実験の再現計算を通してその適用性 を検証した。検証の結果、陸上地すべりのケースはいずれも、時刻歴波形及び発生した津波の 最大・最小水位が概ね一致しており、本解析手法の陸上地すべり津波に対する適用性を確認す ることができた。海底地すべり津波のケースでは、時刻歴波形の第一波、第二波は、いずれの 計測点でも概ね一致した一方で、時間経過につれて波形のずれが生じること、時刻歴波形が短 周期で振動する現象を確認した。