

# 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<sup>1</sup>・米山 望<sup>2</sup>

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

Keita URAKAMI<sup>1</sup> and Nozomu YONEYAMA<sup>2</sup>

### 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

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

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科都市社会工学専攻  
Department of Urban Management, Kyoto University

<sup>2</sup> 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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>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)<sup>3)</sup>、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)<sup>4)</sup> 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<sup>5)</sup>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<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>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<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>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

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

・運動方程式 (Navier-Stokes 式)

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

ここで、 $u_i$  : 流速の各方向成分、 $\rho$  : 流体密度、 $p$  : 圧力、 $G_i$  : 単位質量あたり外力の各方向成分、 $\nu$  : 動粘性係数である。以上の方程式を直角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<sup>9)</sup>、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<sup>10)</sup>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

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

なお、移流計算はドナーアクセプター法<sup>10)</sup>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<sup>8)</sup>。

## 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  $\gamma^v$  及び計算セル境界の開口率  $\gamma_i^q$  の時間変化を考慮して移流計算を行っている。

・空隙率

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

・開口率

$$\gamma_i^q = \frac{\text{セル境界面中の物体以外の面積}}{\text{セル境界面の面積}} \quad (5)$$

・修正後の移流方程式

$$\frac{\partial \gamma^v F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^q F u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

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<sup>8)</sup>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

$$m \mathbf{a}_g = m \mathbf{g} + \sum_{\text{segment}} (\mathbf{F}^{pr} + \mathbf{F}^{vis}) + \mathbf{F}^{re} \quad (7)$$

・重心まわりの回転運動の運動方程式

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times I \boldsymbol{\omega} = \mathbf{N} \quad (8)$$

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

$\mathbf{F}^{vis}$ ：各セグメントに作用する流体粘性力， $\mathbf{F}^{re}$ ：地すべり塊が接地面から受ける垂直抗力， $\boldsymbol{\omega}$ ：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， $\mathbf{N}$ ：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  $\mathbf{r}_c$  ～セグメント表面の重心  $\mathbf{r}_s$  間で静水圧分布を仮定して補正した値  $P^{br}$  を用いる。

$$\begin{aligned} p^{br} &= P - \rho gh \\ &= P - \rho g(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_c)_z \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$\mathbf{F}^{br} = P^{br} S(-\mathbf{n}) \quad (10)$$

ここで， $\mathbf{n}$  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  $\mathbf{r}(= (x \ y \ z)^T)$  における流速ベクトルを  $\mathbf{U}(\boldsymbol{\tau})$  とすると， $\mathbf{U}$  のセグメント面に平行な成分  $\mathbf{U}_p$  は以下の式で表せる。

$$\mathbf{U}_p = \mathbf{U} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{U})\mathbf{n} \quad (11)$$

点  $\mathbf{r}_s$  におけるせん断応力  $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{r}_s)$  は，セグメント表面に垂直表向き座標軸を  $\boldsymbol{\eta}$  とすると，

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{r}_s) = \mu \left. \frac{\partial \mathbf{U}_p}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_s} \quad (12)$$

ここで， $\mu$  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  $\mathbf{F}^{vis}$  は，

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

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。
- 2) 時刻  $t$  での流速  $\mathbf{u}_i^n$ ，圧力  $P^n$  の境界条件を設定する。
- 3) 時刻  $t + \Delta t$  での圧力の推定値を  $\tilde{p}^{n+1} = P^n$  とする。
- 4) 圧力の推定値  $\tilde{p}^{n+1}$  を用いて時刻  $t + \Delta t$  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  $\gamma^n$  及びセル境界の開口率  $\gamma_i^n$  を計算する。
- 5) 時刻  $t + \Delta t$  での流速の推定値  $\tilde{\mathbf{u}}_i^{n+1}$  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  $\tilde{p}^{n+1}$  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  $\tilde{\mathbf{u}}_i^{n+1}$ ， $\tilde{p}^{n+1}$ ， $\tilde{\mathbf{U}}_i^{n+1}$  をそれぞれ真値  $\mathbf{u}_i^{n+1}$ ， $p^{n+1}$ ， $\mathbf{U}_i^{n+1}$  とし，次のステップに進む。
- 7) 流速値  $\mathbf{u}_i^{n+1}$  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。

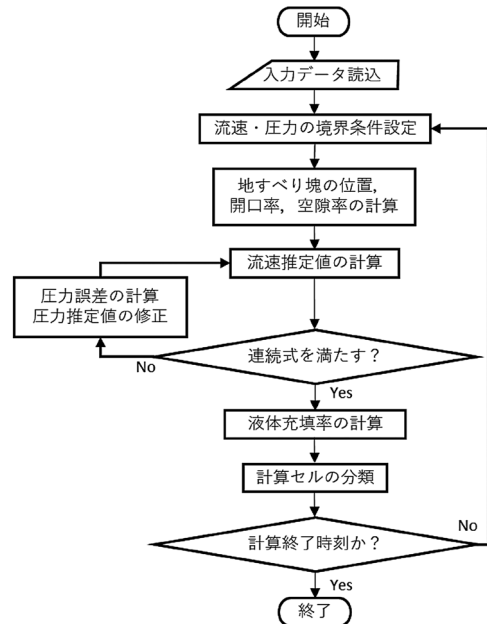


図1 計算処理手順

### 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<sup>7)</sup>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<sup>11)</sup>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 m)、 $\varepsilon$ : 定数 (=0.7) である。

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

$$k_b = \frac{2C}{b} \quad (15)$$

$$k_w = \frac{2C}{w} \quad (16)$$

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

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~H16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<sup>8)</sup>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、陸上地すべり

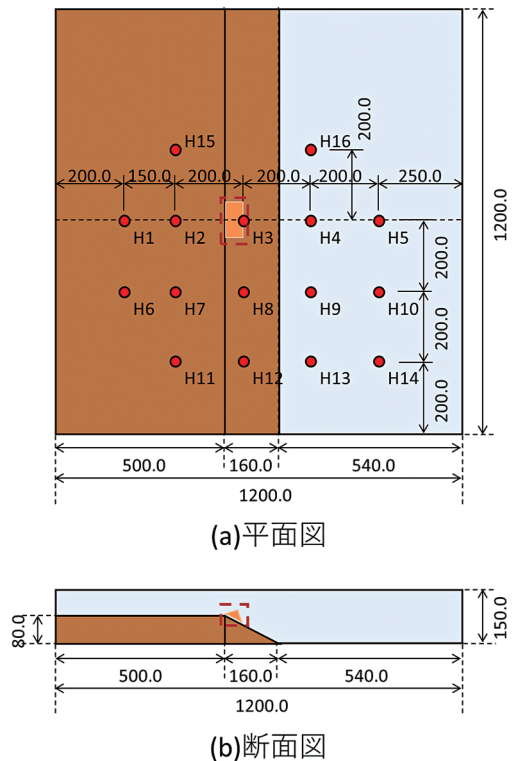


図2 解析領域の概要 (単位: cm)

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

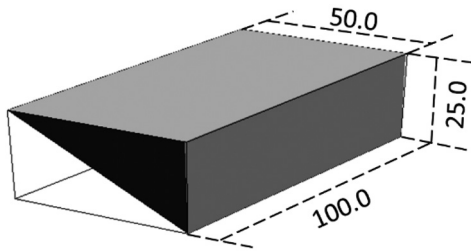


図3 (a) 地すべり塊(直角三角柱)の概要(単位: cm)

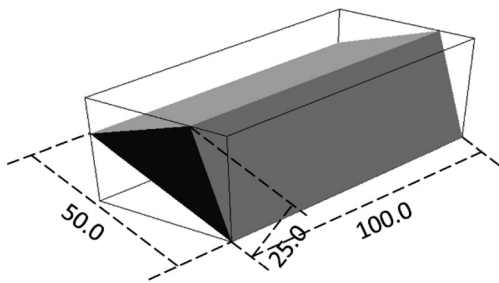


図3 (b) 地すべり塊(二等辺三角柱)の概要(単位: cm)

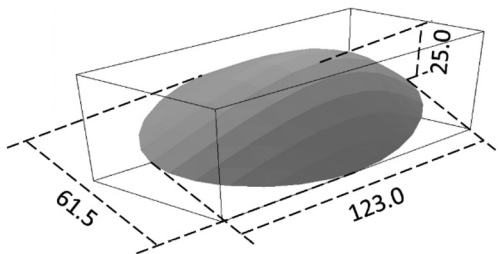


図3 (c) 地すべり塊(ガウス分布形状)の概要(単位: cm)

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

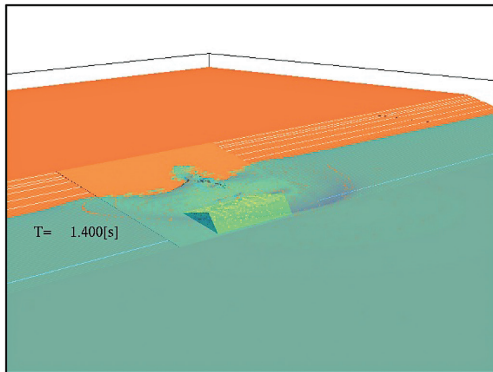
表2 解析条件

メッシュサイズ (cm) (dx, dy, dz)	(2.0, 5.0, 2.0)	
計算間隔	CFL条件で制御	
計算時間 (s)	15	
地すべり塊の比重	三角柱	1.60
	ガウス	2.48
斜面の動摩擦係数	0.00	
連続式許容最大誤差	$1.00 \times 10^{-10}$	
動粘性係数 (m <sup>2</sup> /s)	$1.00 \times 10^{-6}$	
境界条件	No-slip 条件	

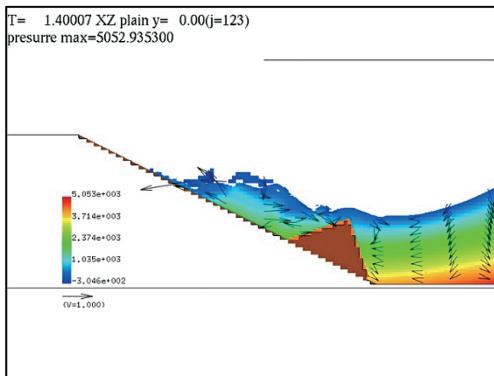
した結果を図5 (a) ~ (d) に示す。ただし、解析波形・実験波形の時間表示は、顕著な押し波の最も早く到達した計測点H4において第一波のピーク時刻が両者で揃うように調整した。図5より、各計測点での時刻歴波形はいずれのケースも非常に良好な精度で一致した。また、case5を除いてH4での第一波の最大水位が実験結果より過小評価される傾向にあることが分かった。しかし、地すべり塊の初期位置から離れた計測点では、解析結果が実験結果と水位、周期共に非常に良い精度で一致している。そのため、将来的により広範の現象を対象にすることを考慮すると、波源直近の地点での解析誤差は現象の評価に大きな影響を与えないと判断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

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。

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

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  $\bar{v} \approx 32$  (cm/s) となり, 解析値とはほぼ一致した。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2 cm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1 cm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<sup>8)</sup>が確認されており, 適切な比較ができないと判断したた

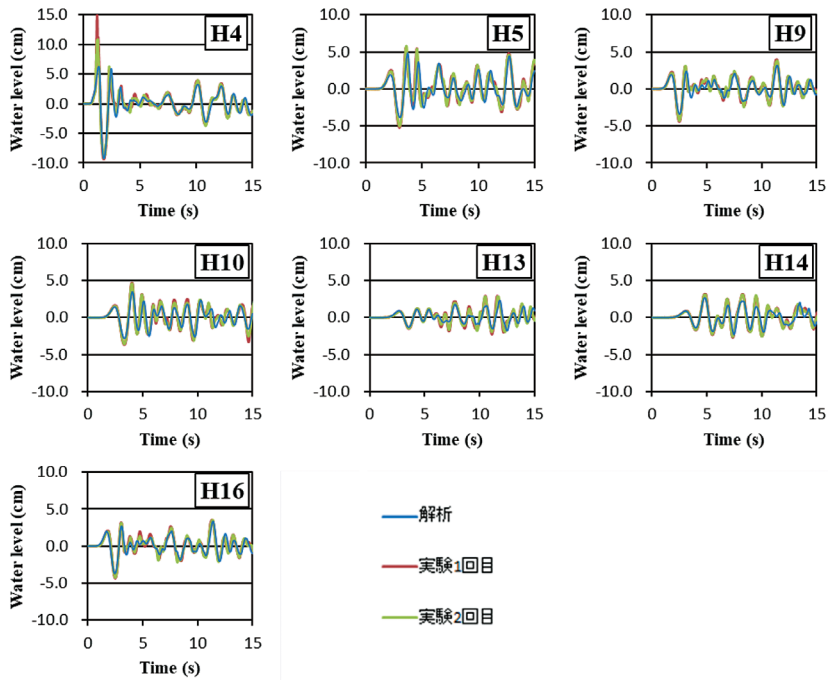


図 5 (a) 水位変動の時刻歴波形比較 (case1)

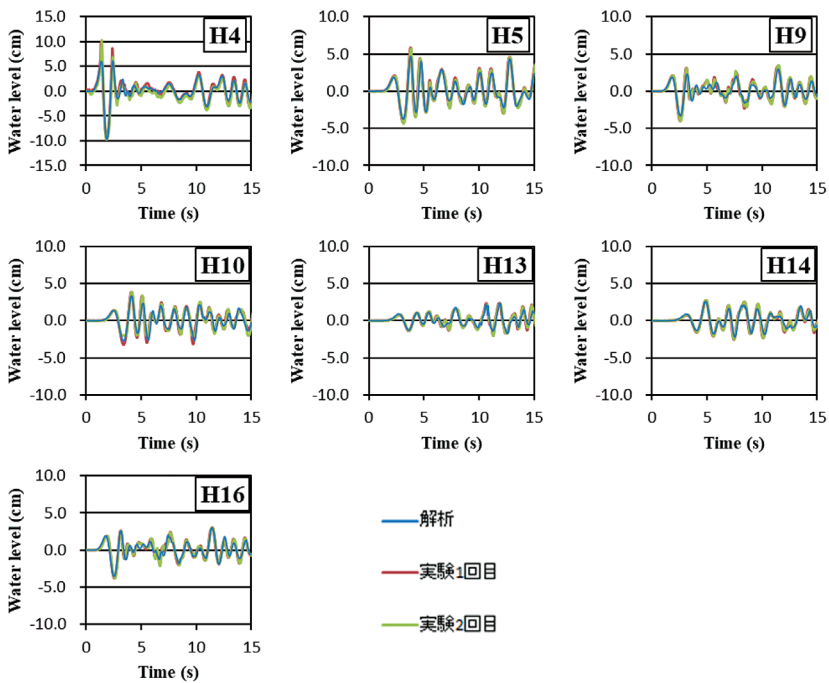


図 5 (b) 水位変動の時刻歴波形比較 (case3)



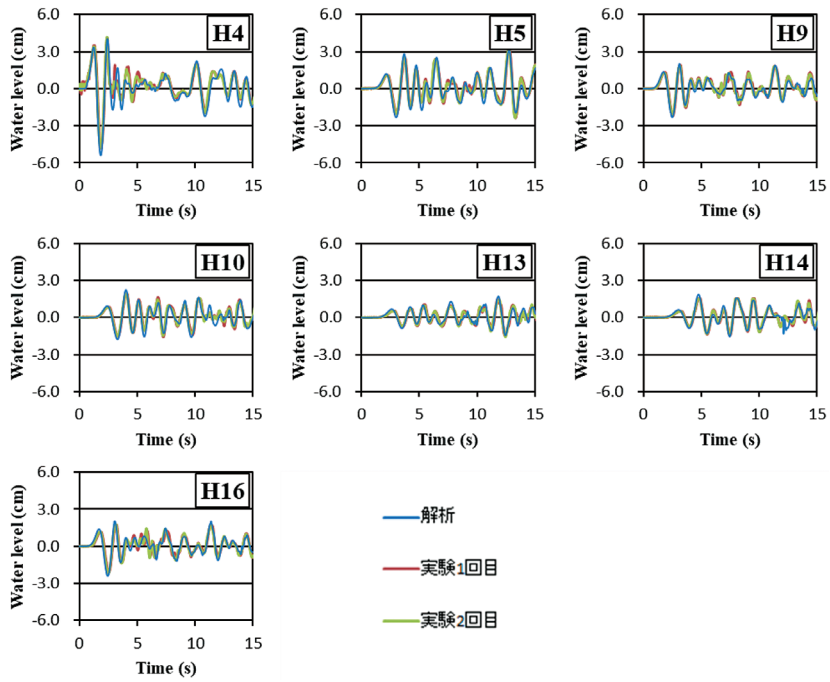


図 5 (c) 水位変動の時刻歴波形比較 (case5)

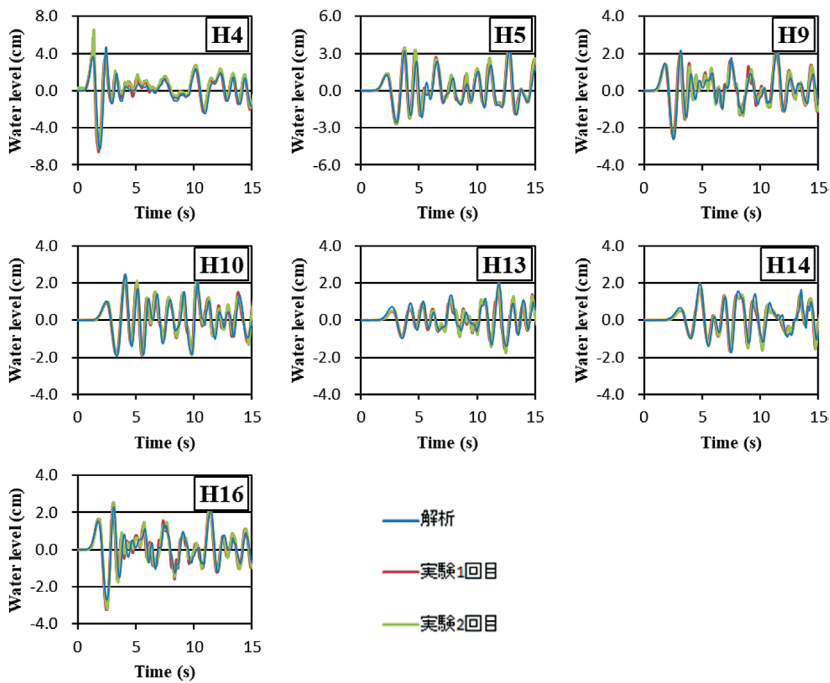


図 5 (d) 水位変動の時刻歴波形比較 (case6)

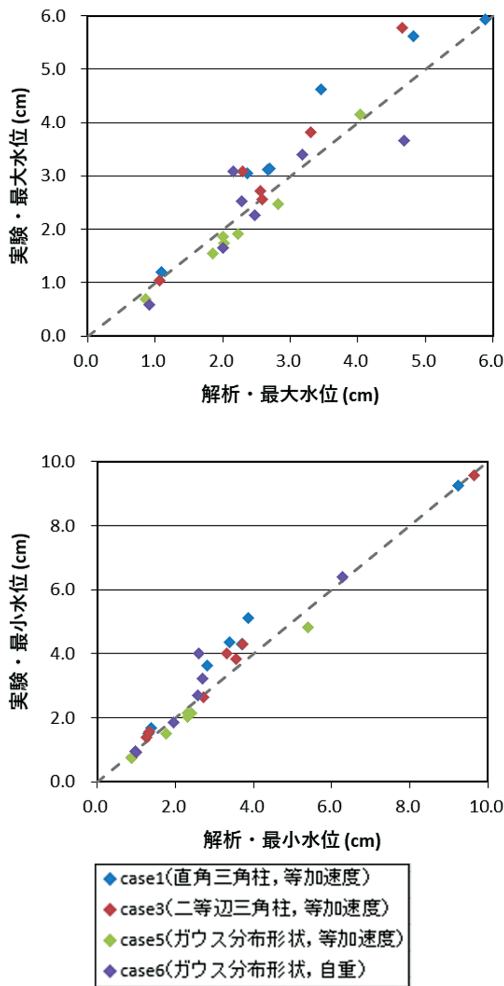


図6 陸上地すべり津波の最大・最小水位比較

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 (cm/s)	解析 (cm/s)
case1	52	46
	160	152
case3	59	59
	160	159
case5	38	34
	166	170
case6	22	32
	110	146

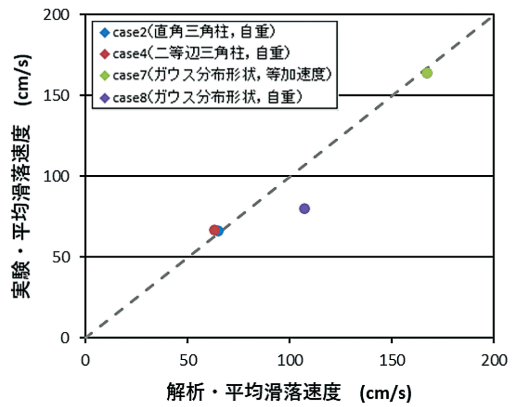
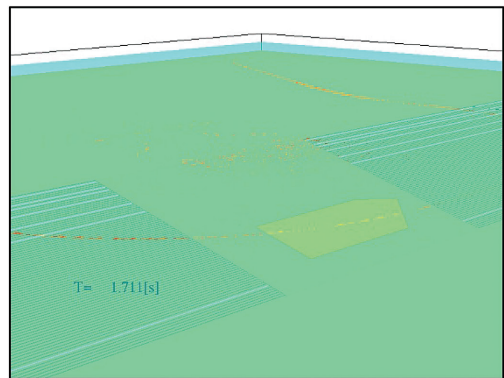
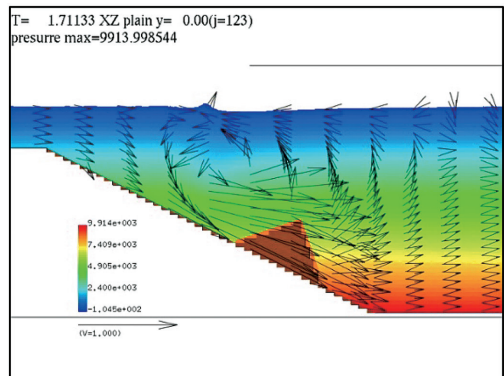


図7 地すべり塊の平均滑落速度比較（陸上地すべり津波のケース）



(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)）

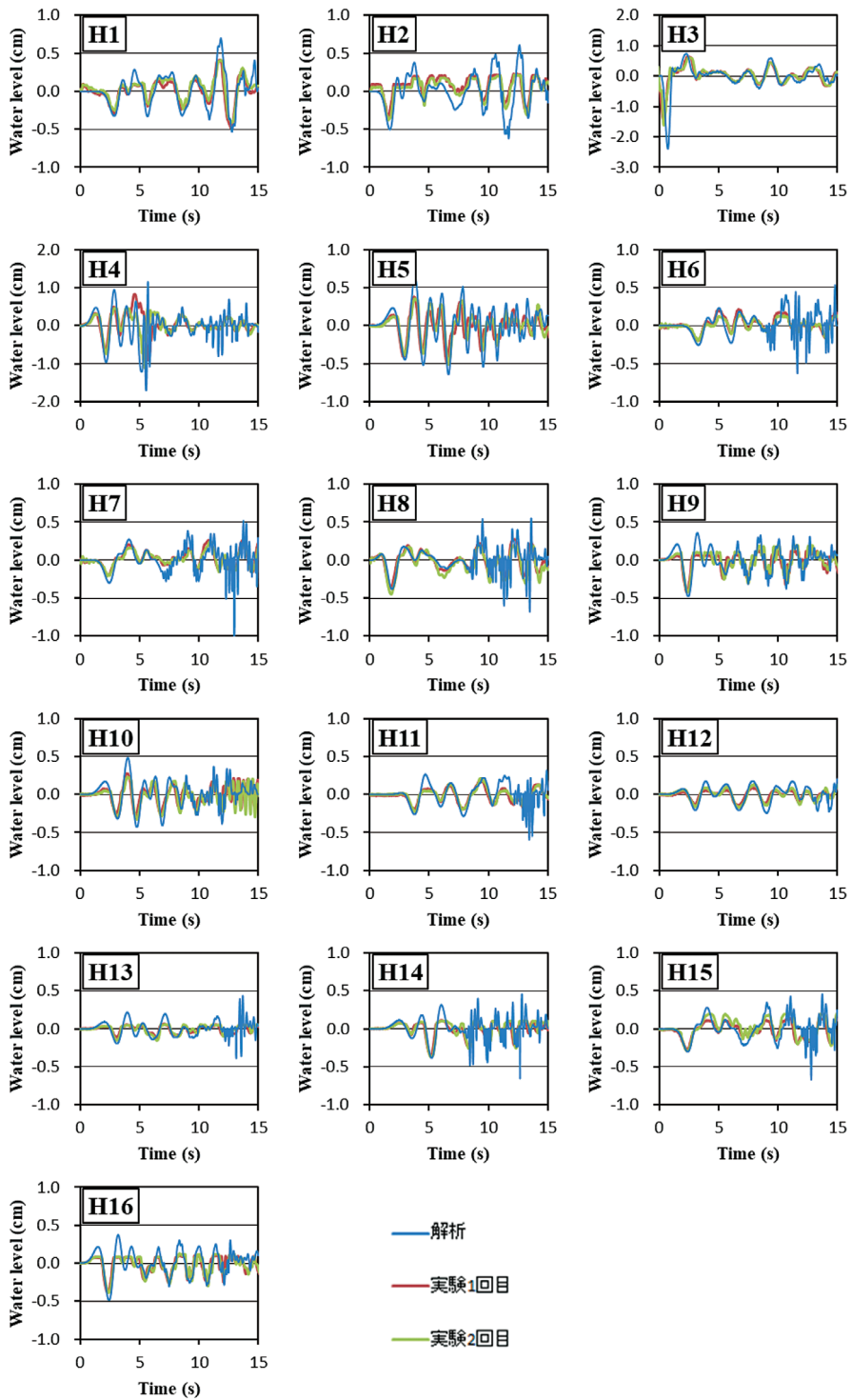


図 9 (a) 水位変動の時刻歴波形比較 (case2)

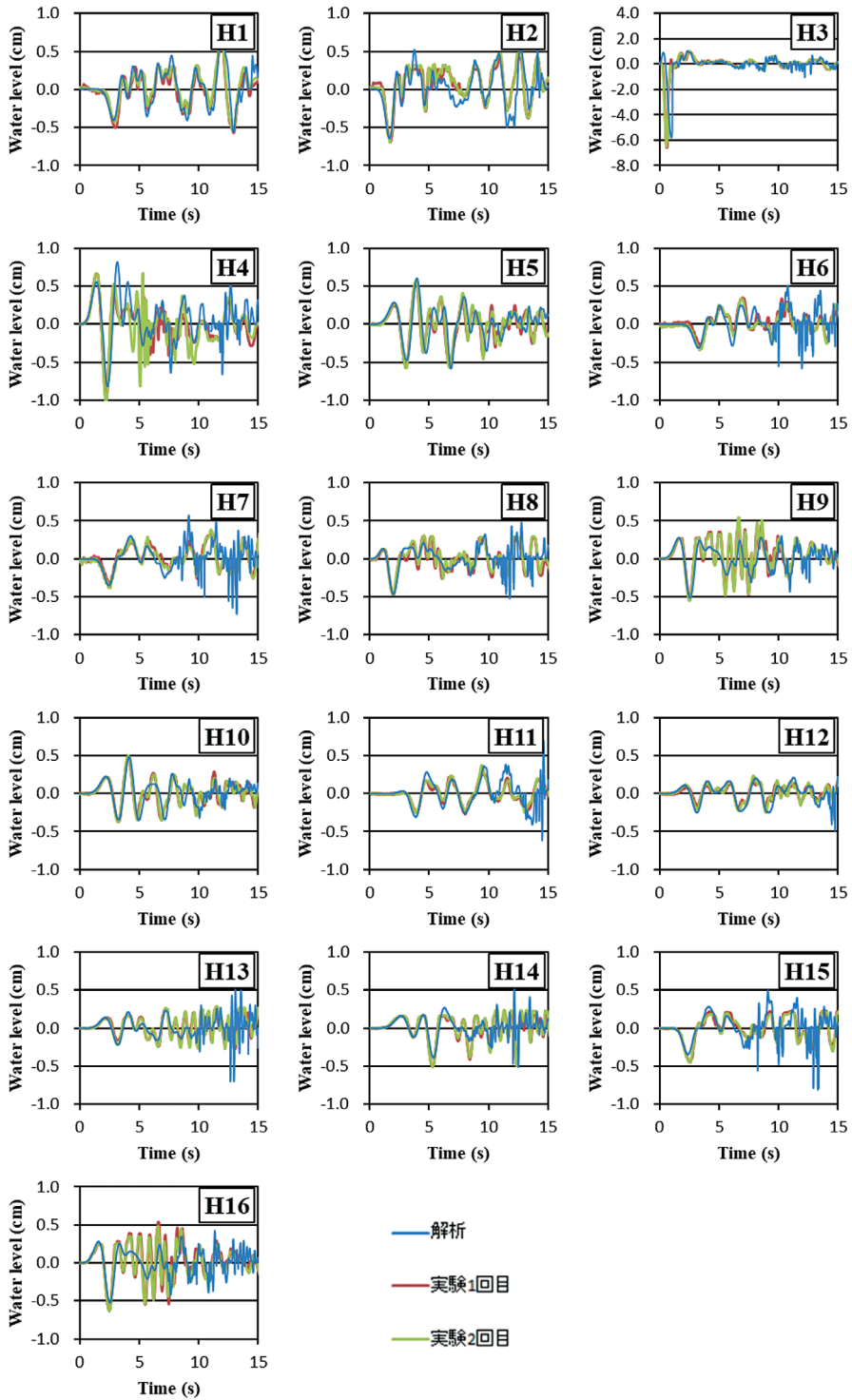


図 9 (b) 水位変動の時刻歴波形比較 (case4)

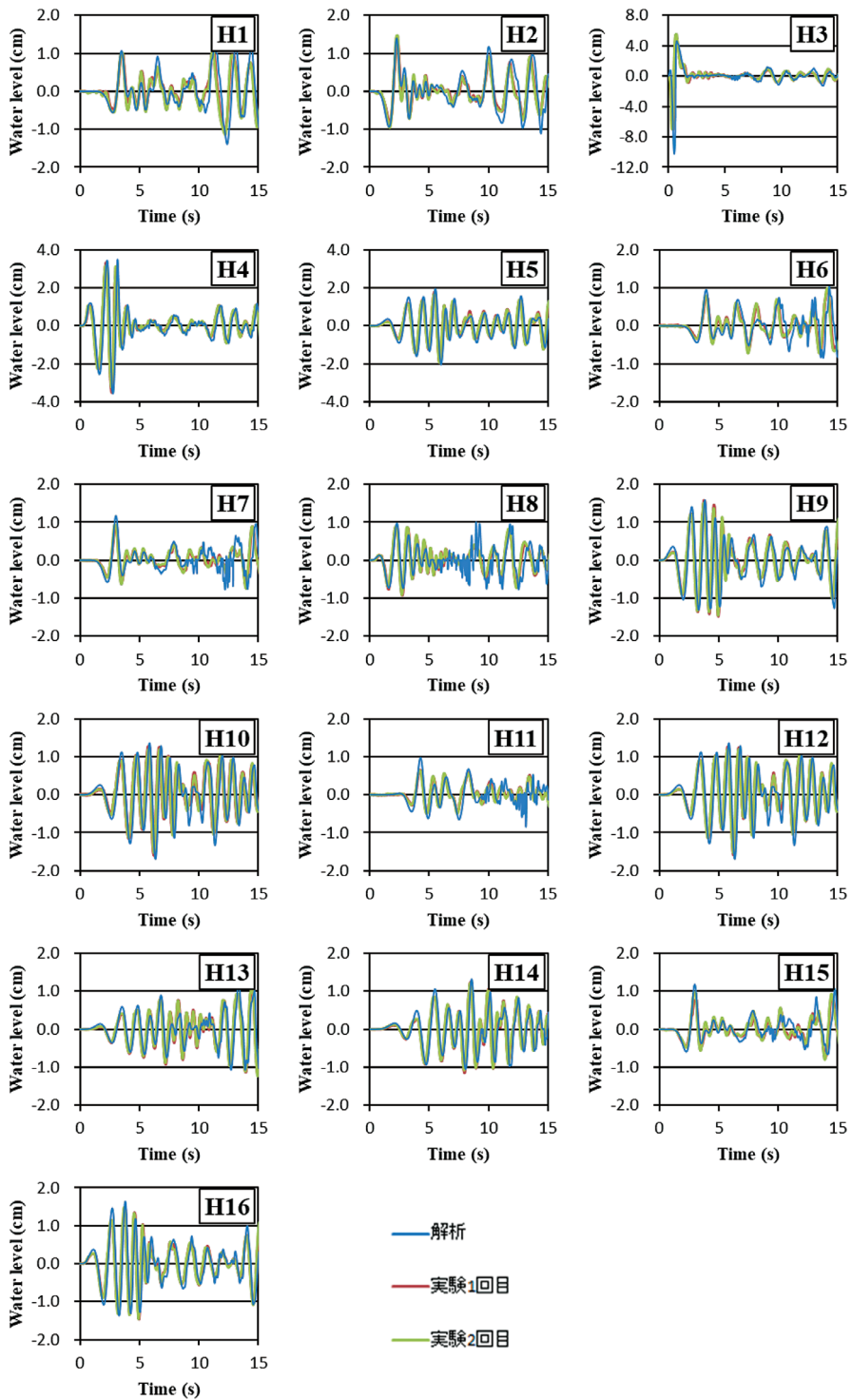


図 9 (c) 水位変動の時刻歴波形比較 (case7)

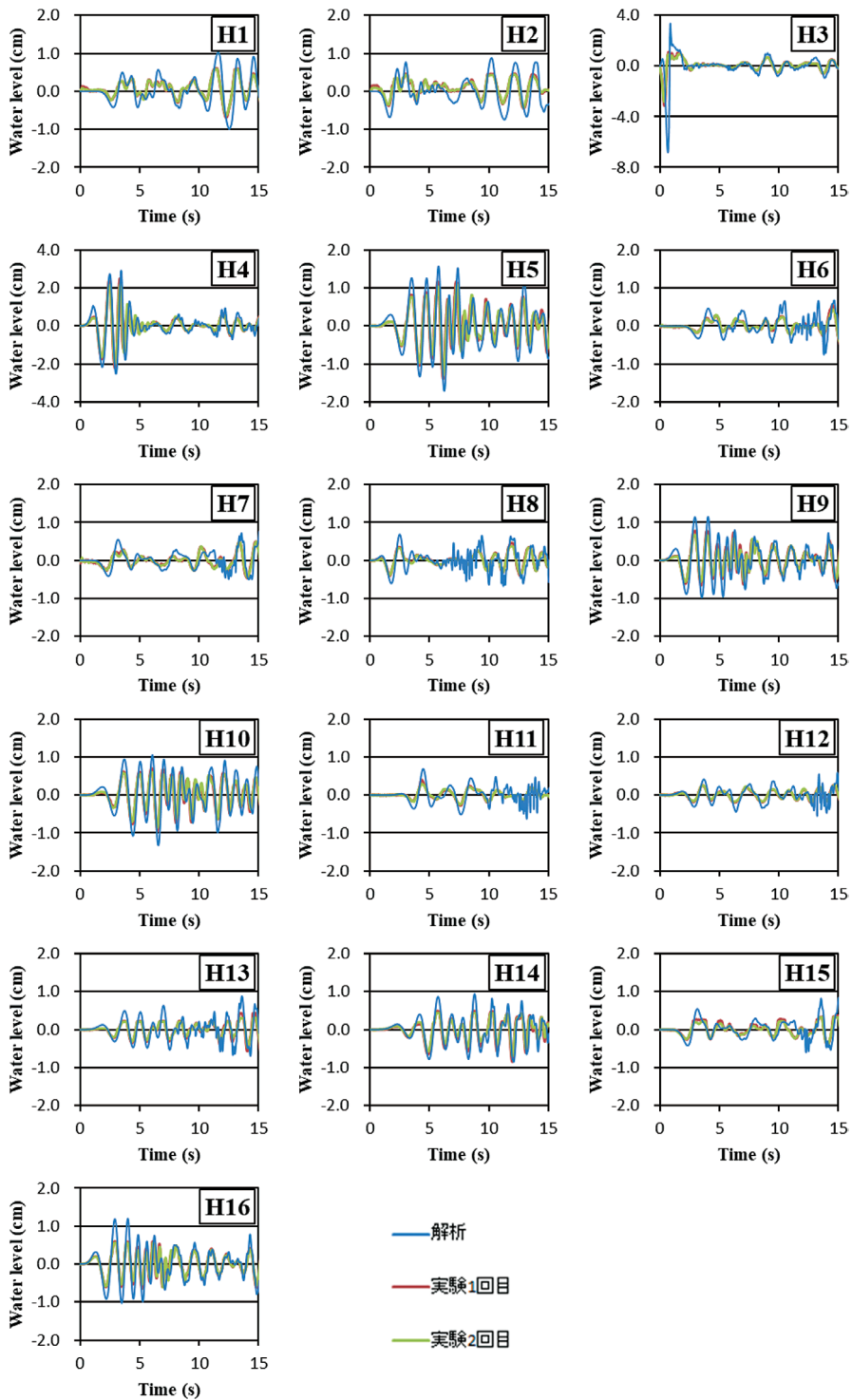


図 9 (d) 水位変動の時刻歴波形比較 (case8)

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

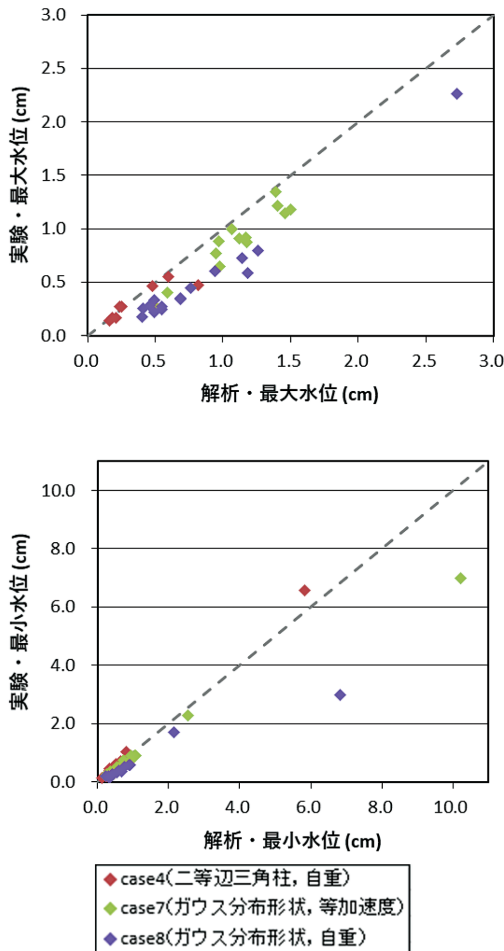


図10 海底地すべり津波の最大・最小水位比較

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

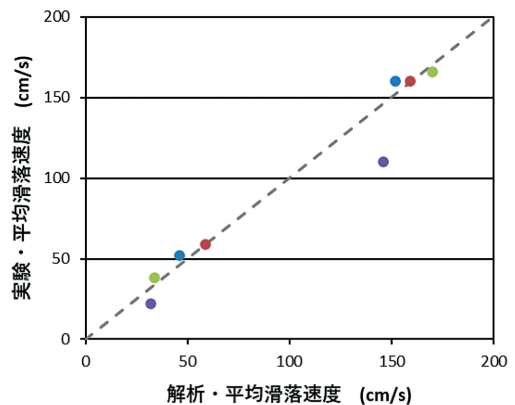


図11 地すべり塊の平均滑落速度比較 (海底地すべり津波のケース)

#### 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

- 1) 今村文彦・Abdul Muhari・有川太郎：インドネシアスラバヤ海峡で発生した火山性津波について、Research Report of Tsunami Engineering, 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: Predictive 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.
- 8) 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。