陸上・海底地すべりによる津波の 3次元数値解析

保坂 幸一1・松山 昌史2・森 勇人3

 ¹正会員 八千代エンジニヤリング株式会社 事業統括本部国内事業部河川部 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー)
²正会員 (一財)電力中央研究所 原子カリスク研究センター (〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1)
³中部電力株式会社 原子力本部原子力土建部 (〒461-8680 愛知県名古屋市東区東新町1番地)
E-mail:Mori.Hayato@chuden.co.jp

陸上・海底地すべり津波の3次元数値解析手法としてオープンソース流体解析ソフトウェアOpenFOAM による多相流解析手法を適用し,水理模型実験結果を検証データにその適用性を検討した.平面水槽を用 いた水理模型実験の再現計算の結果,時間波形が良好に再現された.また海底地すべりケースでは陸側へ 伝播する津波に短周期水面変動が現れ,その再現には計算格子サイズを適切に設定する必要があることを 明らかにした.地すべり体の挙動は,移動初期の厚みは整合するものの,実験では計算に比べ地すべり体 が斜面流下に伴い地すべり体流下方向の直交方向に広がる傾向が認められ,断面2次元水路ではなく,平 面水槽によって計算手法の再現性検討を行ったことによって,地すべり体の流下形状,堆積範囲の再現性 の課題を抽出することができた.

Key Words : tsunami, landslide, three-dimensional analysis, multi-phase flow model, plane wave tank

1. はじめに

2018年に発生したインドネシアのスラウェシ島および スンダ海峡津波は、それぞれ海底地すべりや陸上地すべ り(山体崩壊含む)が主な原因である可能性が報告され た.世界では陸上地すべり・海底地すべり津波の発生事 例がどちらも報告されており、日本でもこれらの津波評 価の必要性が高まっている.既往研究では、陸上・海底 地すべり津波を同じ解析手法で扱った例は少なく、その 検証に用いられたものは断面2次元水路を用いた実験デ ータが多い.本研究では、陸上・海底地すべり津波に共 通に利用可能で、かつ模型実験の代替えおよび分析補助 ツールとして幅広く利用可能な3次元数値解析手法を、 水理模型実験結果を検証データに、その適用性を検討す ることを目的とした.

2. 解析手法

陸上・海底地すべりによる津波の3次元数値解析手法 は、VOF法による多相流解析¹,粒子法による多相流解 析・固液多相流解析²³,流体と個別要素の連成解析⁴等 の多くの種類に対して,水理実験に対する再現性評価結 果が報告されている.しかしながら現時点で実務利用として一般化されたものが見当たらないことから、本研究では実用性を勘案して、汎用的なオープンソース流体解析ソフトウェアであるOpenFOAMによる方法を検討し、その適用性を検証することとした.

(1) OpenFOAMによる多相流解析手法

本研究では、OpenFOAMのうち、非圧縮性多相流ソル バであるmultiphaseInterFoamを用いた.基礎方程式は、非 圧縮性流体の連続式(1)およびNavier-Stokes方程式(2)であ り、有限体積法によって離散化し、PISO法とSIMPLE法 のハイブリッド法(PIMPLE法)を用いて流速と圧力を 計算する.

$$\nabla \cdot U=0$$
 (1)

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p^* + \nabla \cdot \tau + \rho g + f_s \tag{2}$$

ここで、 ∇ は3次元領域におけるベクトル微分演算子、 *U*は流速ベクトル、 ρ は密度、 p^* は擬似動圧、tは粘性応 カテンソル、gは重力加速度ベクトル、 f_s は表面張力に 相当する体積力である.

同ソルバでの自由表面の解析にはVOF法を用いており, 各相においてVOF値αを導入している.以下は例として3 相(水相,気相,土砂相)の場合を示す.

計算格子の流体密度pおよびrの算定に必要となる粘性係数uは式(3)および(4)で計算される.

$$\rho = \alpha_{\rm w} \cdot \rho_{\rm w} + \alpha_{\rm a} \cdot \rho_{\rm a} + \alpha_{\rm m} \cdot \rho_{\rm m} \tag{3}$$

$$\mu = \alpha_{\rm w} \cdot \mu_{\rm w} + \alpha_{\rm a} \cdot \mu_{\rm a} + \alpha_{\rm m} \cdot \mu_{\rm m} \tag{4}$$

ここで、 $\alpha_w \cdot \alpha_a \cdot \alpha_m$ 、 $\rho_w \cdot \rho_a \cdot \rho_m$ および $\mu_w \cdot \mu_a \cdot \mu_m$ は、 水相、気相、土砂相のVOF値 ($\alpha_w + \alpha_a + \alpha_m = 1$) 、密度お よび粘性係数である、水を例として α_w は式(5)の移流方程 式により求める.

$$\frac{\partial \alpha_{\rm w}}{\partial t} + \nabla \cdot U \alpha_{\rm w} + \nabla \cdot (U_{\rm cwa} \alpha_{\rm w} \alpha_{\rm a} + U_{\rm cwm} \alpha_{\rm w} \alpha_{\rm m}) = 0 \qquad (5)$$

ここで、Uは計算格子の平均流速、UcovaおよびUcovnは気相および土砂相と水相との相対流速である.式(5)左辺 第3項は、界面の数値拡散を抑制するための人工的な圧縮項である.Ucova、Ucovnは平均流速Uとユーザーが設定する数値拡散抑制パラメータ C_a により決定される.川崎ほか⁵0は水柱崩壊問題等を対象とした気液2相流解析では C_a によって自由表面の挙動や構造物への作用波圧に違いが生じること、対象問題の範囲では $0 < C_a < 0.5$ の範囲が妥当であったと報告している.

(2) 地すべり体のモデル化

地すべり体を流体として扱う上で、その流動特性について既往研究ではニュートン流体⁹、ビンガム流体¹⁹、 ダイラタント流体⁹とする場合等、多くの種類の設定例がある.石礫型土石流の流動に関する研究では、高濃度 に土砂を含む流体は、その粘性抵抗が粒子間の衝突によって生じ、せん断応力がせん断速度の自乗に比例するというBagnoldの理論⁸を展開したダイラタント流体のモデ ルが使用される場合がある⁹. それを踏まえ本研究では 地すべり体にダイラタント流体の粘性特性を与えること とした.

ダイラタント流体の粘度は、式(6)で表される.

(6)

ここで、ηは粘度、μαはダイラタント流体粘度、γはせん 断速度、nは構造指数であり、既往研究を踏まえ2とする. OpenFOAMには数種の非ニュートン流体モデルが組み込 まれており、そのうちの代表的なモデルとしてpowerLaw モデルを用いることとした. OpenFOAMのpowerLawモデ ルは式(7)のとおりである.

 $\eta = \mu_d \dot{\gamma}^{n-1}$

$$\eta = \max(\eta_{\min}, \min(\eta_{\max}, k\dot{\gamma}^{n-1}))$$
(7)

ここで、 η_{min} および η_{max} は粘度の下限値および上限値、kはモデル定数で式(6)と対比すると μ に相当する、 η_{min} および η_{max} は解析上便宜的に設定するものであり、本研究では η_{min} は水の粘度相当、 η_{max} はkの1000倍相当に設定した、 μ は塩野ほか¹⁰⁰の水と砂(粒径0.2mm)を混合した土砂流を開水路に流下させた実験結果を参考にして0.1Pa・sとした.



双 し 便能クロス (クロス石は膝弁はかんによる)						
ケース	勾配	径 (mm)	重量 (kg)	水深 (m)	地すべり タイプ	
G1	1:2	30	101	0.500	陸上	
G4	1:2	30	101	1.000	海底	
G9	1:1.5	30	135	0.400	陸上	
G10	1:1.5	30	135	0.634	半陸上	
G11	1:1.5	30	135	0.850	海底	
G12	1:1.5	30	135	1.000	海底	

表−1 検証ケース (ケース名は藤井ほか¹¹⁾による)

3. 水理模型実験の再現計算

(1) 水理模型実験の概要と検証ケース

計算手法の検証のため,藤井ほか¹¹による陸上・海底 地すべり津波の平面水槽(長さ12m,幅12m,高さ1.5m) を用いた実験(図-1)のうち,地すべり体を粒状体(径 30mmのガラスマーブル)で模擬したケース(表-1)の再現 計算を実施した.斜面上部に設置したゲート上流に粒状 体を充填し,ゲート(幅1m)を引き下げることにより津波 を発生させている.水位変動は図-1に示す位置において, 容量式波高計により計測されている.

(2) 計算領域および計算条件

実験と同じ平面水槽の計算領域を設定した.計算格子 は、全体を直交構造格子とした後に斜面と地すべり体初 期位置側壁部には形状に合わせて非構造格子を設定した. 格子サイズは全体を水平および鉛直方向約4cmとし,詳 細範囲として水面変動範囲(初期水面位置±20~30cm)



図-2 計算領域とセルサイズ(陸上地すべりケースの場合)

と地すべり体流下・堆積範囲を約2cmとした(図-2).

計算条件は**表**-2に示すとおりである.粘度については, multiphaseInterFoamでは動粘度を入力するため,動粘度と して表示している.密度は,海底地すべりの場合には既 往の数値解析では空隙部に水の密度を考慮した見かけの 密度が用いられる例が多いが,陸上地すべりと同条件と して,海底地すべりの場合の空隙部の水の密度は考慮し ないこととした.表面張力は,空気と水の間のみに一般 的に知られている0.07N/mを設定した.乱流モデルは, ファムほか^{ID}を参考に標準Smagorinskyモデルを設定した. 数値拡散抑制パラメータ C_a は,値が大きいほど界面圧縮 性が強調される.事前に予備計算を実施した結果から, 水と地すべり体モデルの界面の数値拡散が大きく,0~ C_a <0.5の範囲では計算の時間進行に伴い水と地すべり体 の界面が追跡できなくなったため, C_a は1.0に設定した.

(3) 水位変動波形の比較

水位変動波形の比較結果の例として陸上地すべりの場合を図-3,半陸上地すべりの場合を図-4,海底地すべり の場合を図-5に示す.図に示す各地点の実験と計算の水 位変動波形は整合的な結果となった.なお,実験波形は ゲートを引き下げる時刻を基準としているが,ゲートが 完全に開放されるまでの時間(0.3s程度)以降に粒状体が 動き始めることや時間計測誤差等を要因として,各地点 の実験波形と計算波形の水位変動開始時刻がずれてしま う.そのため,計算波形の基準時刻を初期位置から最も 近い海側水位計測点H4の第1波水位上昇のピーク時刻が 一致するようにずらしている.

海底地すべり実験の水深が最も浅いケースG11の陸側 地点では周期0.5秒程度の短周期の水面変動が実験で現 れ、他の地点に比べ著しく実験波形と計算波形が不整合 となった.そこで該当ケースのみ初期水面位置0.85m± 3cmの範囲の格子サイズを0.5cmに変更したケースを計算 した.実験と2つの格子サイズケースの水位変動波形を 比較した結果を図-6に示す.格子サイズが2cmの場合で は現れない短周期水面変動が格子サイズを0.5cmとした 場合では確認された.実験波形の周期0.5秒程度と水深 から算出される波長に対して格子サイズが2cmの場合は

表-2 計算条件

1	頁目	設定値			
計算格子間	i 一 行	領域全体:Δx=Δy=Δz=0.04m 詳細範囲:Δx=Δy=Δz=0.02m			
計算時間間	雨	自動調整(最大クーラン数0.5)			
計算時間		10s			
新 电	空気va	1.48×10 ⁻⁵ m ² /s			
	水w	1.00×10 ⁶ m ² /s			
111文	粒状体 k	6.21×10 ⁻⁵ m ² /s(勾配 1:2)			
	(=0.1Pa · s/ρ _m)	6.17×10 ⁻⁵ m ² /s(勾配 1:1.5)			
	空気 ρ_a	1kg/m ³			
宓亩	水 $\rho_{\rm w}$	1000kg/m ³			
山汉	粉出休 。	1610kg/m³(勾配 1:2)			
	$\pi \pi \pi \pi h$	1622kg/m³(勾配 1:1.5)			
表面張力	空気-水	0.07N/m			
乱流モデル		標準 Smagorinsky モデル			
培思冬代	壁面	no-slip条件			
宛尔木什	上面	開放条件			
数值拡散抑制	制パラメータ Cα	1.0			





波長の1/10程度, 0.05cmの場合は1/60程度となり, 格子サ イズ2cmでは短周期水面変動を再現するだけの空間解像 度が不足していたものと考えられる. 該当ケースの津波 伝播状況は図-7に示すとおりである.陸側の短周期水面 変動は、波源域の水位変動量に対して水深が浅く、伝播 速度が遅いために伝播する波の非線形性が強くなること や、地すべり位置から側方に伝播した波の屈折の影響か ら発生しているものと推定される.一方で、沖側では伝 播速度が速いため、沖側への進行に伴い波長が長くなっ ている.本解析手法によって、水深が浅い地点で海底地 すべりが発生する場合の特徴的な津波の伝播の傾向が再 現できることが確認された.しかしながら、実験では H1地点とH7地点で第1波の水位が同程度となっているが、 解析ではH7の方が高く、H1では実験に比べ水位を過小 評価するとともに伝播速度が遅くなっている. このため, さらに再現性を向上させるためには、格子サイズの影響 や乱流モデルパラメータ、底面境界条件の影響の分析が 必要と考えられる.

時間波形と計算波形の再現性を検証するために,各地 点の0.1sピッチの実験水位と計算水位を用いて波形の相 関係数を算定した.地すべり位置からの岸沖方向距離

(沖側をプラス)と相関係数の関係を図-8に示す.大部 分のケースで0.7~0.8以上の高い相関係数が得られた. 海底地すべりの水深の浅いケースG11の陸側の地点で相 関係数が低下する傾向がある.これは,短周期水面変動 が発生し,わずかな波形の時間差で相関が低下しやすい ためである.

実験と解析における最高水位,最低水位を比較した結 果を図-9,図-10に示す.陸上地すべりケースでは第1波 の最高水位および最低水位,海底地すべりケースでは陸



図-10 海底地すべりケースの水位の比較

側のどの地点においても、地すべり発生位置での急激な 水位の下降による反作用により、第1波の最高水位に比 べ第2波最高水位の方が高くなる¹¹ため、最高水位には 第2波最高水位を抽出した.また、海底地すべりの水深 lmのケースの平面水槽中央側線上のH1~H5以外の地点 においては、水位上昇量が識別できないほどに小さいた め図から除外した.図中の破線は1:1の直線である.陸 上および半陸上地すべりでは最高水位で若干計算水位が 大きい傾向があるが、概ね実験と解析の関係は1:1とな った.海底地すべりでは、水深の浅いケースG11の最高 水位で、解析が実験を過小評価する地点がある.これら は、前述の陸側の短周期の水位上昇量を過小評価してし まった地点である.

以上の水位および時間波形の比較結果から,陸側地点 での短周期水面変動の発生地点の再現性に課題が残るも のの,本解析手法で実験水位・波形を概ね再現可能であ ると判断される.

(4) 粒状体の厚み・流下形状・堆積形状の比較

勾配1:1.5ケースでは、地すべり初期位置のゲート近傍 および側壁に厚み計測用スケールが設置されているため



図-13 G9陸上(勾配1:1.5,水深0.4m)の地すべり体形状比較



図-14 G11海底(勾配1:1.5,水深0.85m)地すべり体形状比較

交方向に広がり, 堆積範囲も解析に比べその方向に広が った. その要因は、粒子間衝突により粒子を側方に分散 させる影響を考慮していないためであると推定した. そ のため、地すべり体の流下形状・堆積範囲を再現するに は、地すべり体のモデル化方法をさらに検討する必要が ある.この問題は、断面水路実験の場合では地すべり体 の流下方向の直交方向への広がりが抑止されることから, 平面水槽実験により計算手法の再現性検討を行ったこと により、抽出されたものと考えられる.

しかしながら、水面波形の再現性が高い結果となった こと、ゲート開放直後の地すべり体の厚みが整合的であ ったことを併せて考えると,陸上地すべりにおける水面 突入時の地すべり体の厚み、海底地すべりにおける初期 の地すべり体形状変化に比べ、斜面流下中の形状や堆積 範囲は発生する津波へ与える影響が小さい可能性がある.

4. まとめ

陸上・海底地すべり津波の3次元数値解析手法として OpenFOAMによる多相流解析手法を適用し、水理模型実 験結果を検証データにその適用性を検討した. 以下に本 研究の主要な結論をまとめる.





水中部での撮影

G9:陸上(水深0.40m,勾配1:1.5) 陸上部での撮影 G11:海底(水深0.85m,勾配1:1.5) 図-11 地すべり体厚み計測結果(実験)



地すべり体初期位置側方(図-1(a)青矢印)より撮影した 実験映像における地すべり体の厚みと解析による地すべ り体の厚み(側壁のスケールによる地すべり体上面位置 の読取値から斜面鉛直方向の厚みを算出)を比較した. 図-11に実験結果、図-12に解析結果を示す。ゲート開放 直後(図-11の上段とそれに対応する図-12の時刻)の地 すべり体の厚みは実験,解析ともに14~15cm程度であ り、陸上地すべりでは水面突入時の地すべり体の厚み、 海底地すべりでは初期の地すべり体形状変化の一致度が 高い結果となった.時間が進むほど解析の方が実験に比 べて地すべり体の厚みが薄くなる傾向が見られた. また 解析では流下の進行に伴い地すべり体先端部がめくれ上 がる.実験では流下に伴い粒子同士の間隔が開き、そ の間を水がすり抜ける.解析の地すべり体は連続体であ り、水がすり抜けず地すべり体に作用する水の抵抗が大 きいため、このめくり上がりが生じると推察される.

地すべり体の斜面流下中の形状および堆積範囲の比 較結果を図-13、図-14に示す.地すべり体先端部の斜面 到達時刻は実験と計算で整合しているものの、実験では 解析に比べ地すべり体が斜面の流下に伴い流下方向の直 ・水位,時間波形の再現性を検証した結果,本解析手法 は陸上・海底地すべりによる津波予測のための数値解析 手法として利用できる可能性が高いと考えられる.

・海底地すべり実験で陸側へ伝播する津波に短周期水面 変動が現れ、その再現には計算格子サイズを適切に設定 する必要があることが明らかとなった。そのため海底地 すべりによる津波予測における格子サイズ設定は、地す べり位置陸側に伝播する津波の再現精度に留意する必要 があると考えられる。

・ゲート開放直後の地すべり体の厚みは実験と解析で整合的な結果となったが、斜面を流下中の地すべり体形状や堆積範囲の再現に課題が残った.要因は、本研究で比較対象とした実験条件・材料において、採用した地すべり体のモデル化方法では粒子間衝突が考慮できない等の実現象と異なる部分の影響が現れたためと考えられる.

この課題は断面水路実験ではなく、平面水槽実験により 計算手法の再現性検討を行ったことにより、抽出できた ものと考えられる.

今後の検討として、地すべり体の流下形状・堆積形状 の再現性向上のため、本研究で用いたダイラタント流体 以外のモデル化方法等をさらに検討する必要があると考 えられる.ただし、今回のガラスマーブルを一様勾配斜 面を流下させる実験方法に限らず、より実態に近い地す べりによる津波実験方法の検討を併せて実施していくこ とが重要と考えられる.

計算時間は、10秒の再現に格子サイズ2cmの場合で約 60時間、0.5cmの場合で約1カ月を要した.実利用にあた っては計算速度を向上させる検討が必要と考えられる.

謝辞:本研究は電力12社による原子カリスクセンター共研として実施した成果を付記するとともに、土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(委員長高橋智幸関西大学教授)の委員各位に研究成果をご議論頂き、有益なご助言を賜りました.関係各位に謝意を表します.

参考文献

- Rzadkiewicz, S.A.,C. Mariotti and P. Heinrich: Numerical Simulation of Submarine Landslides and Their Hydraulic Effects, *J.Waterway*, *Port*, *Coastal and Ocean Eng.*, Vol.123, pp.149-157, 1997.
- 五十里洋行,後藤仁志,新井智之:粒子法型非ニュートン流体モデルによる地滑り津波解析,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No.2, pp. I_66-I_70, 2012.
- 柿沼太郎,澤田 亮,山下 啓,入部綱清:地滑りに伴う津 波生成の数値シミュレーション,土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_61-I_65, 2012.
- 後藤仁志, 五十里洋行, 松原隆之, 伊藤 孝: 高精度粒子 法に基づく固液二相流モデルによる山体崩壊津波の 発生過程解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_196-I_200, 2011.
- 川崎浩司,松浦翔,坂谷太基:3次元数値流体力学ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性に関する検討,土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I_748-I_753, 2013.
- 酒井大樹, 辻本剛三, 柿木哲哉, 石原莉輝, 金 澤剛: OpenFOAM を用いた土砂の流入に伴う静水域に生じ る流動・波動に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋 開発), Vol. 74, No.2, pp. I_205-I_209, 2018.
- 松本智裕,橋 和正,今村文彦,首藤伸夫:土石流による 津波発生・伝播モデルの開発,海岸工学論文集,第 54 巻,pp.346-350,1998.
- Bagnold R.A.: Experiments of a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluids under shear, *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol.225, pp.49-63, 1954.
- 高橋保:土石流の発生と流動に関する研究,京都大学 防災研年報, No.20-B, pp.405-435, 1977.
- 塩野裕司,水原邦夫,小橋澄治,武居有恒:土石流のレオ ロジー的性質について,京都大学農学部演習林報告, 51, pp.184-196. 1979.
- 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, pp.I_145-I_150, 2018.
- ファムバンフック,長谷部雅伸,橋 郁夫: VOF法を用 いた3次元津波解析に関する研究,土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_71-I_75, 2012.

(2019.3.13 受付)

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI GENERATION BY LANDSLIDE

Koichi HOSAKA, Masafumi MATSUYAMA and Hayato MORI

In this study, the three-dimensional numerical analysis using OpenFOAM for tsunamis generated by subaerial and submarine landslides, was verified the relevance of its analysis in comparison with the results of hydraulic model experiments using the plane water tank. In the case of submarine landslide, it became clear that it is necessary to set the grid size appropriately in order to reproduce the short wave propagating to the shallow water area. The thickness of the landslide body at the start of movement by calculation was consistent with that of the experiment, but in the experiment, the spread in the slope orthogonal direction with the flow of the landslide body was wider than the calculation. By examining the validity of the analysis for the experiment using the plane water tank instead of the two-dimensional water channel, the problem of the reproducibility of the flow shape and deposition area of the landslide body became clear.