

三次元流体剛体連成解析を用いた 地すべり津波評価手法の提案

京都大学 防災研究所 米山望

地すべり津波の性質

- 発生頻度が低いが，規模・被害が大きくなりやすい
E.G.) リツヤ湾大津波（1958年，アメリカ）
：史上最大波高524M
- 既存の津波警報システムで検知できない
E.G.) スンダ海峡津波（2018年，インドネシア）
- 地震性津波に重畳して経験則に合わない規模の津波
E.G.) パプアニューギニア地震（1998年）



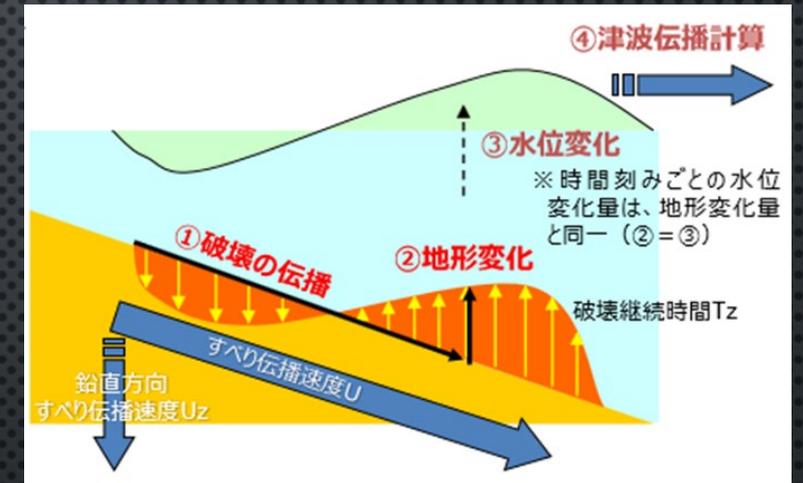
先行研究の事例

- 過去には、地すべり津波の解析手法が複数提案、再現計算を通してその適用性が検証されている

E.G.)

- KLSモデル (2002)
- WATTSらのモデル (2005)
- 由比らのモデル (2017)

KLSモデルの概要



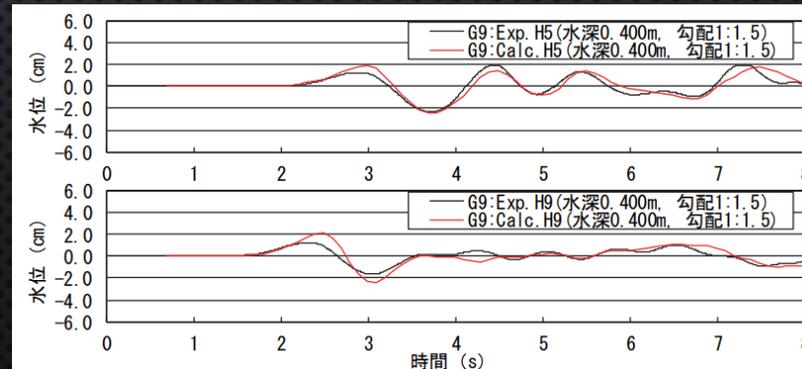
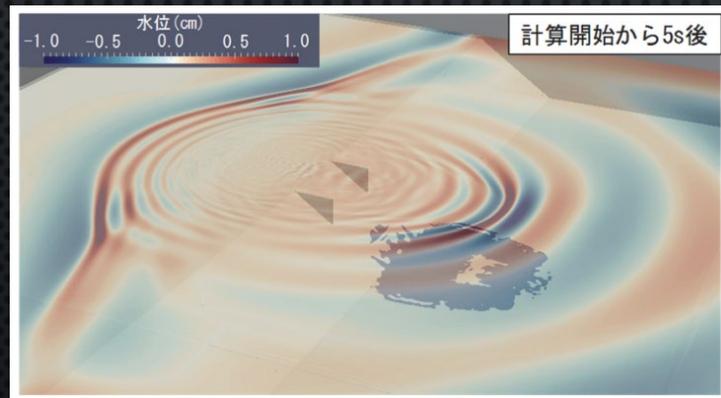
- 地すべり挙動の水面変動に対する一方向的な影響のみ考慮するONE-WAYモデル
 - 地すべり津波を簡易的に評価可能
 - 実際の挙動や発生した流れとの相互作用等を考慮していないため、現象の詳細な評価には不向き

先行研究の事例（津波評価小委員会）

- 現象のより正確な把握のため...
地すべりと流体の相互作用, 三次元的な津波伝播等を考慮した数値モデルが必要

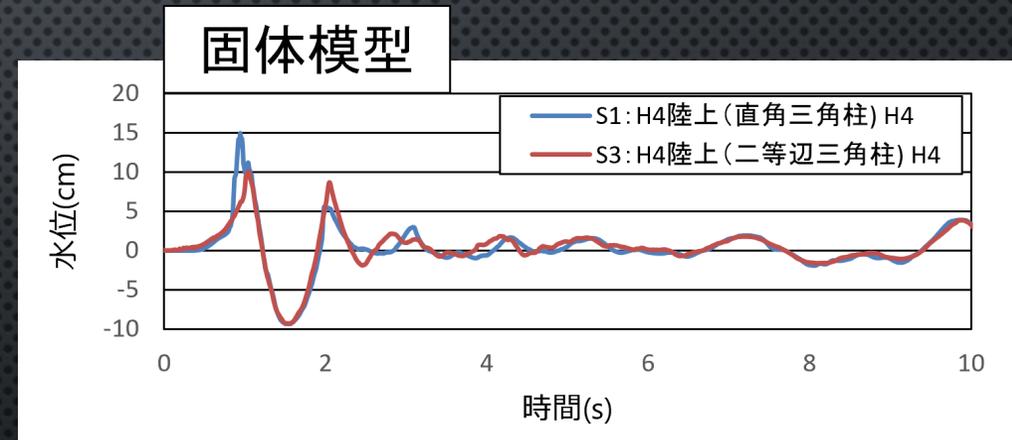
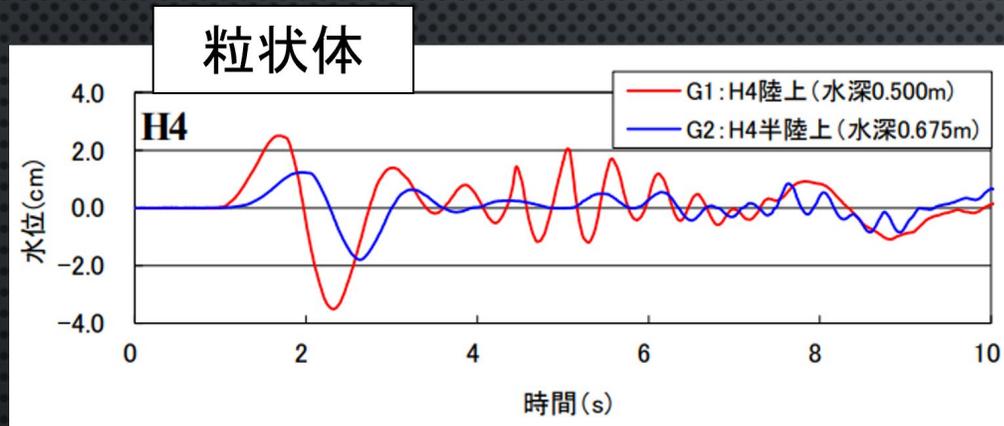
保坂らの手法（2019）

- OPENFOAMを用いた三次元多相流解析手法
- 粒状体による既往実験で再現計算, 適用性を検証



先行研究の事例（津波評価小委員会）

- 藤井らの実験（2018）
 - 粒状体と固体模型（剛体）を用いて津波の発達特性を観察
 - 粒状体と固体模型の時系列波形を比較、固体模型の方が水位変動幅が大きい



⇒地すべり津波をより安全側で評価するため...
地すべり塊を固体として取り扱って解析する

発表の流れ

- 目的：米山らの手法を用いて地すべり津波に関する種々の検討
- 地すべり津波の評価を通して原子力防災に資する知見を得る

解析手法（3D解析）の適用性検証

既往水理実験の再現計算

(浦上, 米山, 自然災害科学2021.8)

解析手法（2DH-3DHybrid解析）の妥当性検証

実地形への適用を視野に入れたHybrid解析

(浦上, 米山, 海岸工学 2021)

地すべり諸元と津波発達特性の考察

数値実験, 水位変動に影響を与えるパラメータの特定

(浦上, 米山, 同上)

本解析手法（3D解析）の適用性検証

既往水理実験の再現計算

本解析手法（2DH3DHybrid解析）の妥当性検証

実地形への適用を視野に入れた2DH-3DHybrid解析

地すべり諸元と津波発達特性の関係性評価

数値実験，水位変動に影響を与えるパラメータの特定

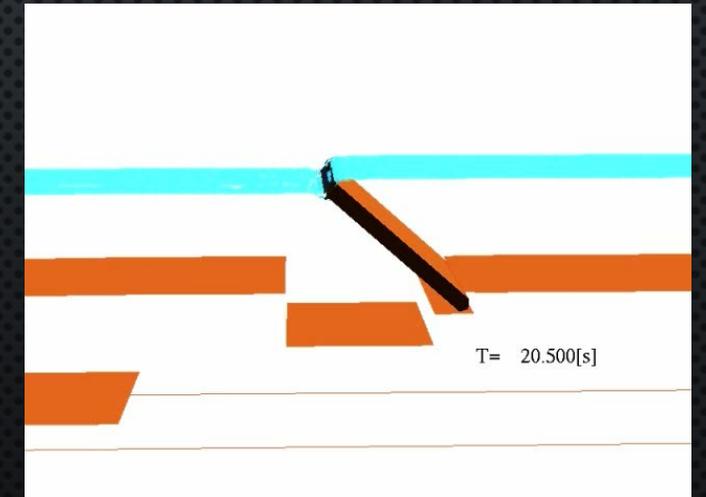
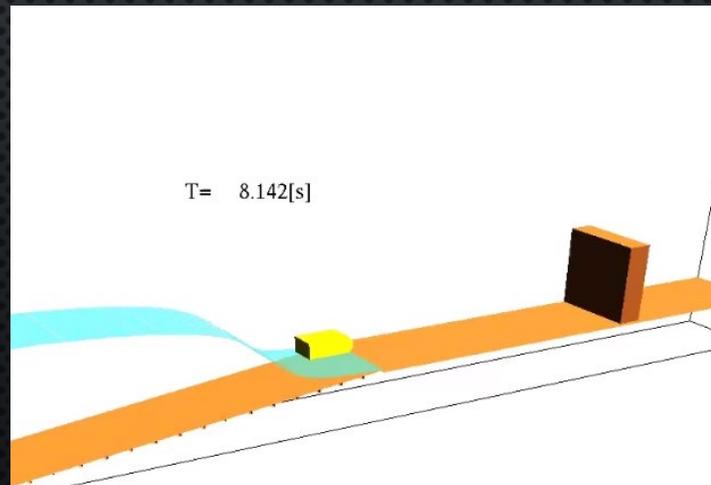
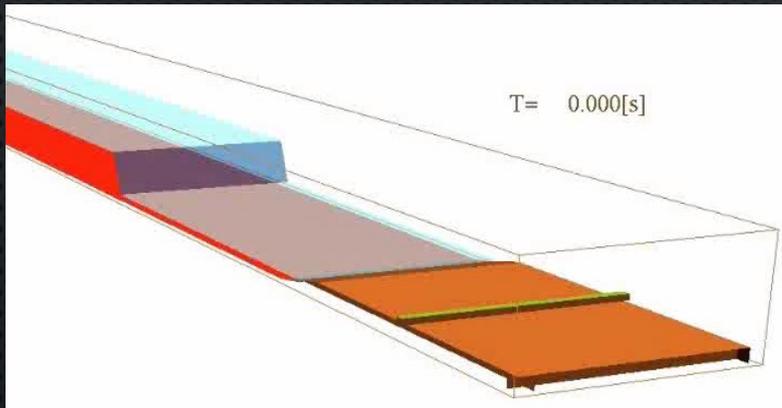
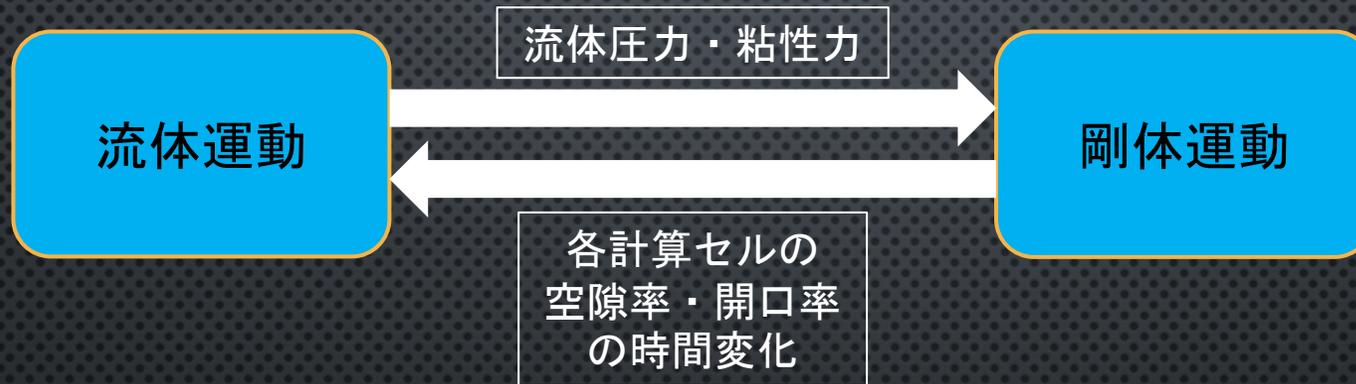
本研究で用いる手法

再現計算

Hybrid解析

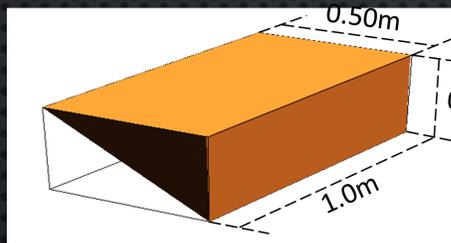
数値実験

- 米山らの開発した**H-FRESH**を用いた三次元流体剛体連成解析（2009）
 - 流体と剛体の相互作用を考慮した解析が可能

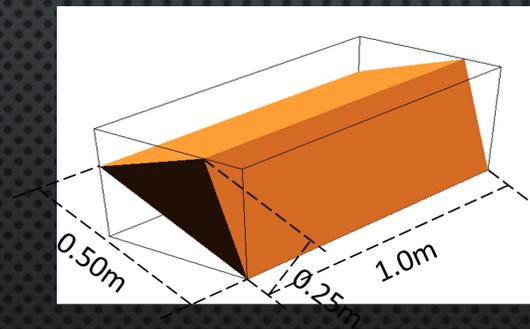


解析条件

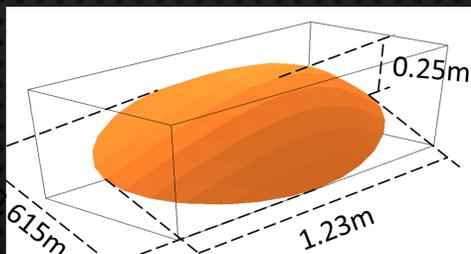
- 再現対象：藤井らの実験（2018）
 - 解析領域（右図）
：12M×12M×1.5Mの平面水槽+勾配2:1の斜面
 - 地すべり塊の動き
 - 等加速度，自重
 - 地すべり形態
 - 海底地すべり，陸上地すべり
 - 地すべり塊形状



(a) 直角三角柱



(b) 二等辺三角柱

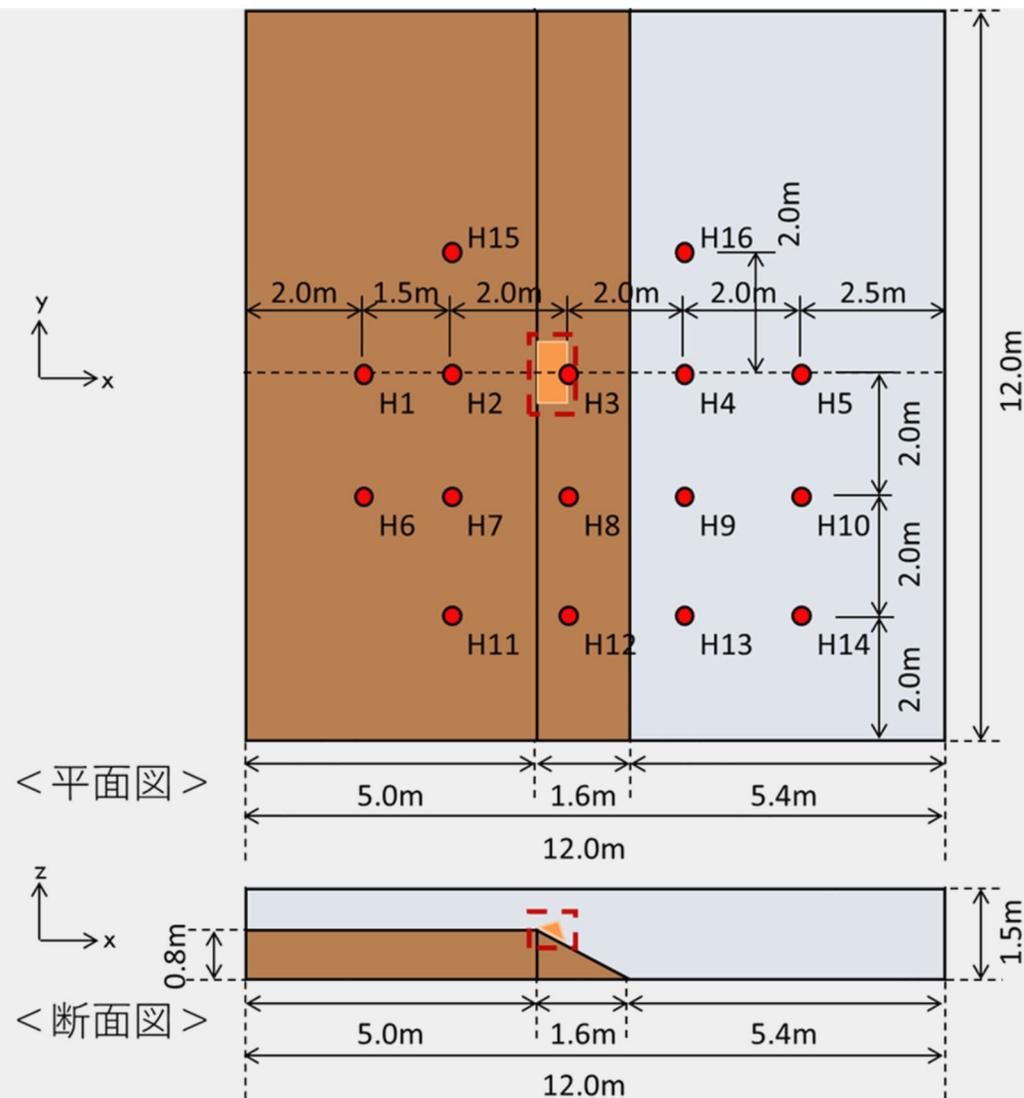


(c) ガウス分布形状

再現計算

Hybrid解析

数値実験



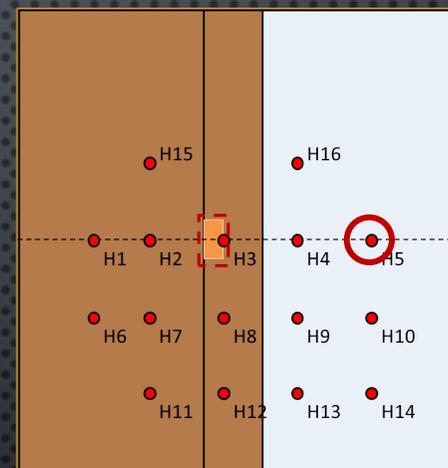
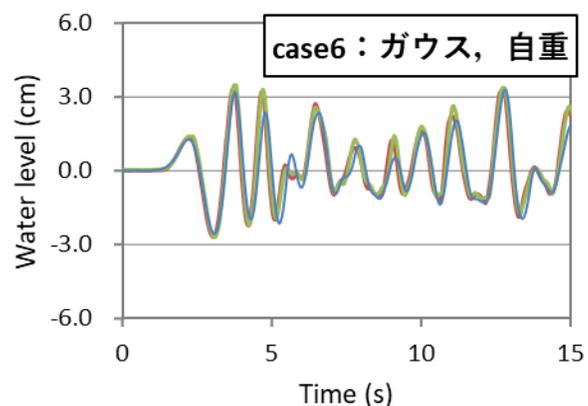
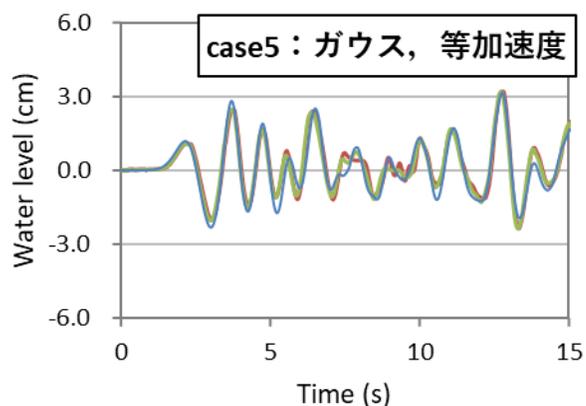
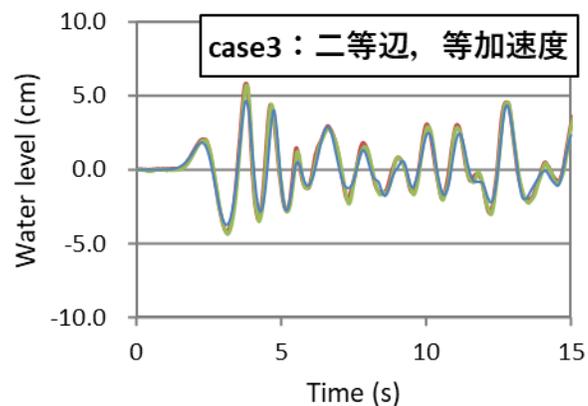
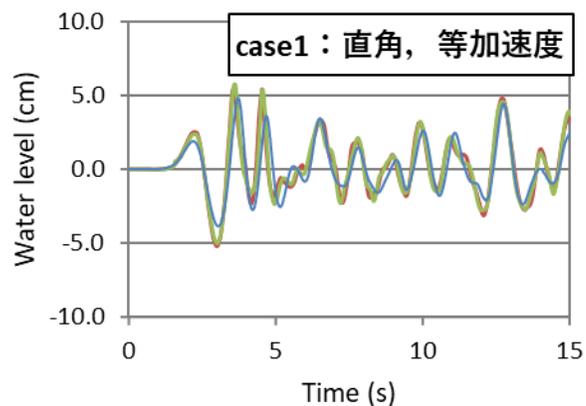
解析条件

- 解析ケース：計8ケース
 - 地すべり塊形状
 - 直角三角柱
 - 二等辺三角柱
 - ガウス分布形状
 - 初期水深
 - 0.5M (陸上地すべり)
 - 1.0M (海底地すべり)
 - 滑落方式
 - 自重滑落
 - 等加速度運動

	初期水深 (m)	地すべり塊形状	滑落方式
case1	0.5 (陸上地すべり)	直角三角柱	等加速度運動
case2	1.0 (海底地すべり)		自重滑落
case3	0.5 (陸上地すべり)	二等辺三角柱	等加速度運動
case4	1.0 (海底地すべり)		自重滑落
case5	0.5 (陸上地すべり)	ガウス分布形状	等加速度運動
case6			自重滑落
case7	1.0 (海底地すべり)		等加速度運動
case8		自重滑落	

解析結果

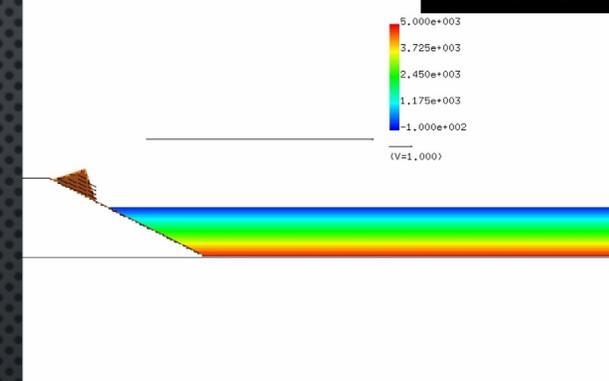
- 陸上地すべり津波のケース：計測点H5での時刻歴波形



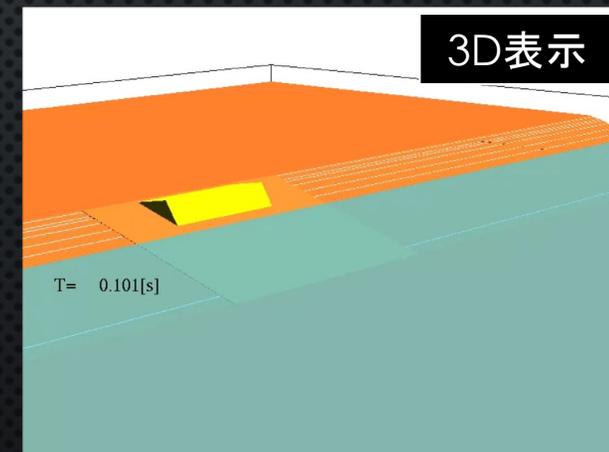
case3

T= 0.10026 XZ plain y= 0.00(j=123)
pressure max=5000.000000

2D表示

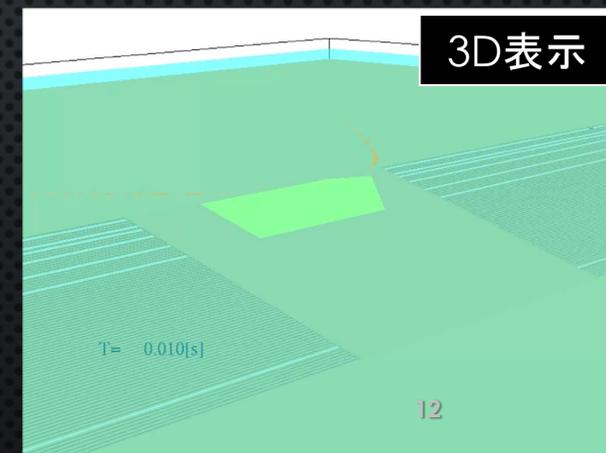
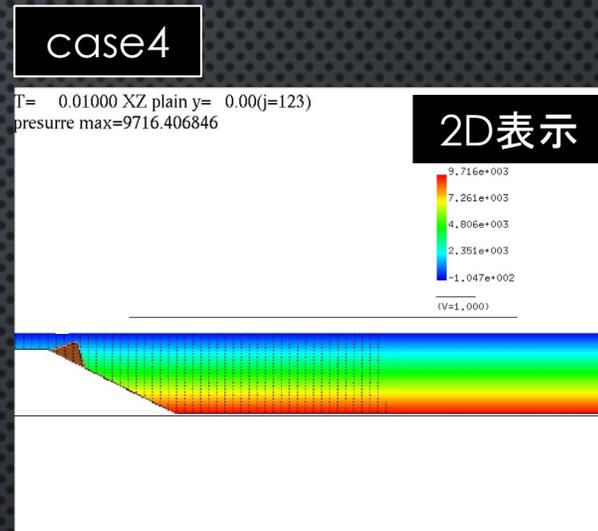
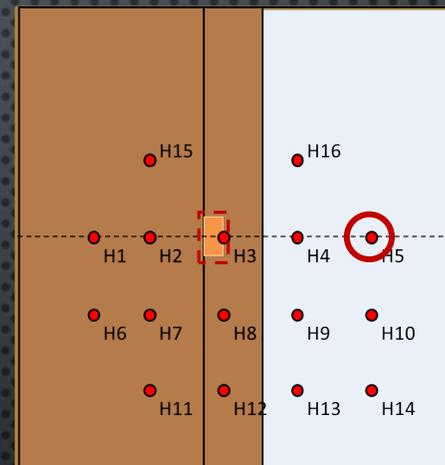
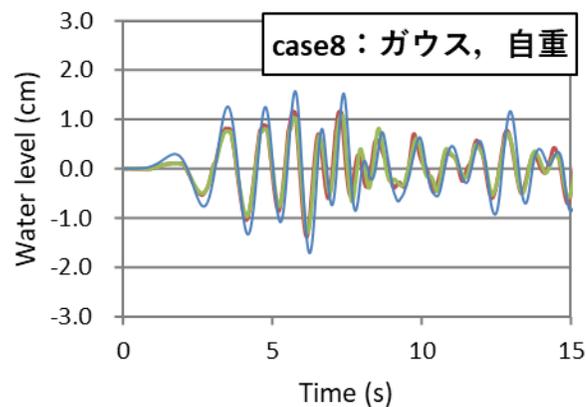
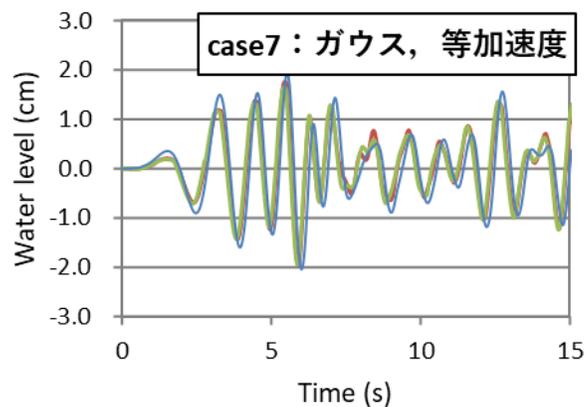
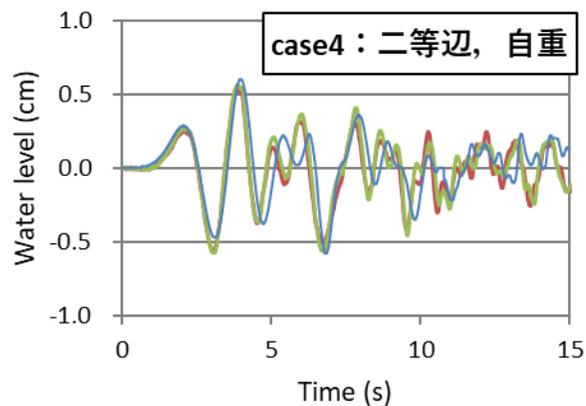
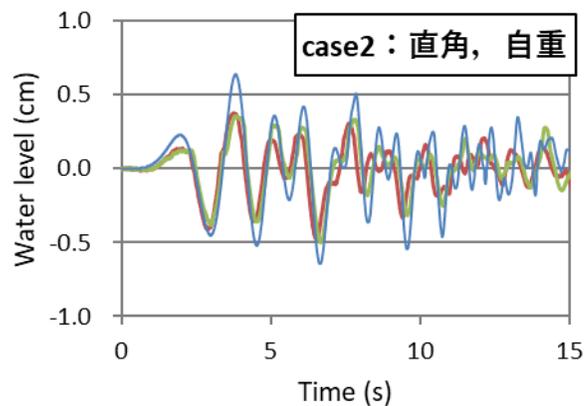


3D表示



解析結果

- 海底地すべり津波のケース：計測点H5での時刻歴波形



再現計算まとめ

- 以下のことが明らかになった。
 1. 三次元流体剛体連成解析により地すべりに伴う津波波形の特徴を概ね再現できる。
([浦上・米山, 自然災害科学2021](#), にすべての計測点の波形を掲載)
 2. 最大水位については, 過大評価となる場合は問題がないが, 条件によっては, 若干過小評価となる場合もあるため, その原因については検討する必要がある.

本解析手法（3D解析）の適用性検証

既往水理実験の再現計算



本解析手法（2DH3DHybrid解析）の妥当性検証

実地形への適用を視野に入れた2DH3DHybrid解析



地すべり諸元と津波発達特性の関係性評価

数値実験, 水位変動に影響を与えるパラメータの特定

2DH3DHYBRID解析の目的

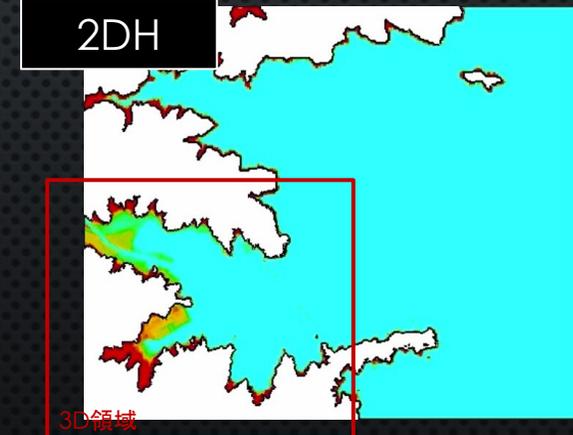
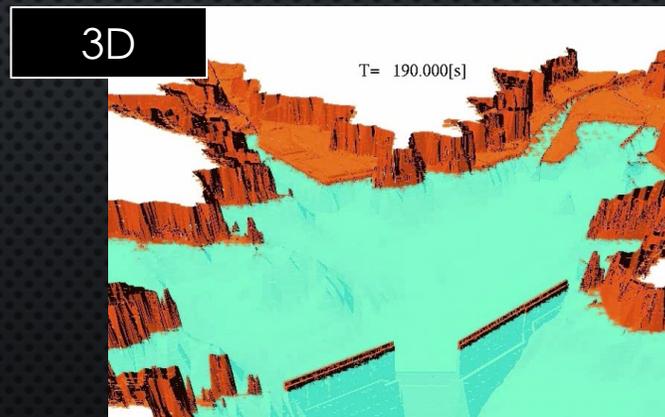
再現計算

Hybrid解析

数値実験

- 三次元解析手法を実現象スケールでの解析に適用する場合...
解析領域の拡大に伴って計算負荷が非常に大きくなる
C.F.) 再現計算：1ケースあたり約10.5日（メッシュ数 $600 \times 240 \times 20$ ）
- 目的：本解析手法の**平面二次元・三次元ハイブリッド解析手法**への拡張
 - 解析領域全域を2D領域，局所的に3D領域を設けて解析
 - 利点
 - 計算負荷を抑えつつ広域を対象に解析可能
 - 物体周りの複雑な流体挙動を詳細に解析可能

<実績> 釜石湾の港湾防波堤を含む
地域における津波挙動の再現
(Pringleら, 2013)

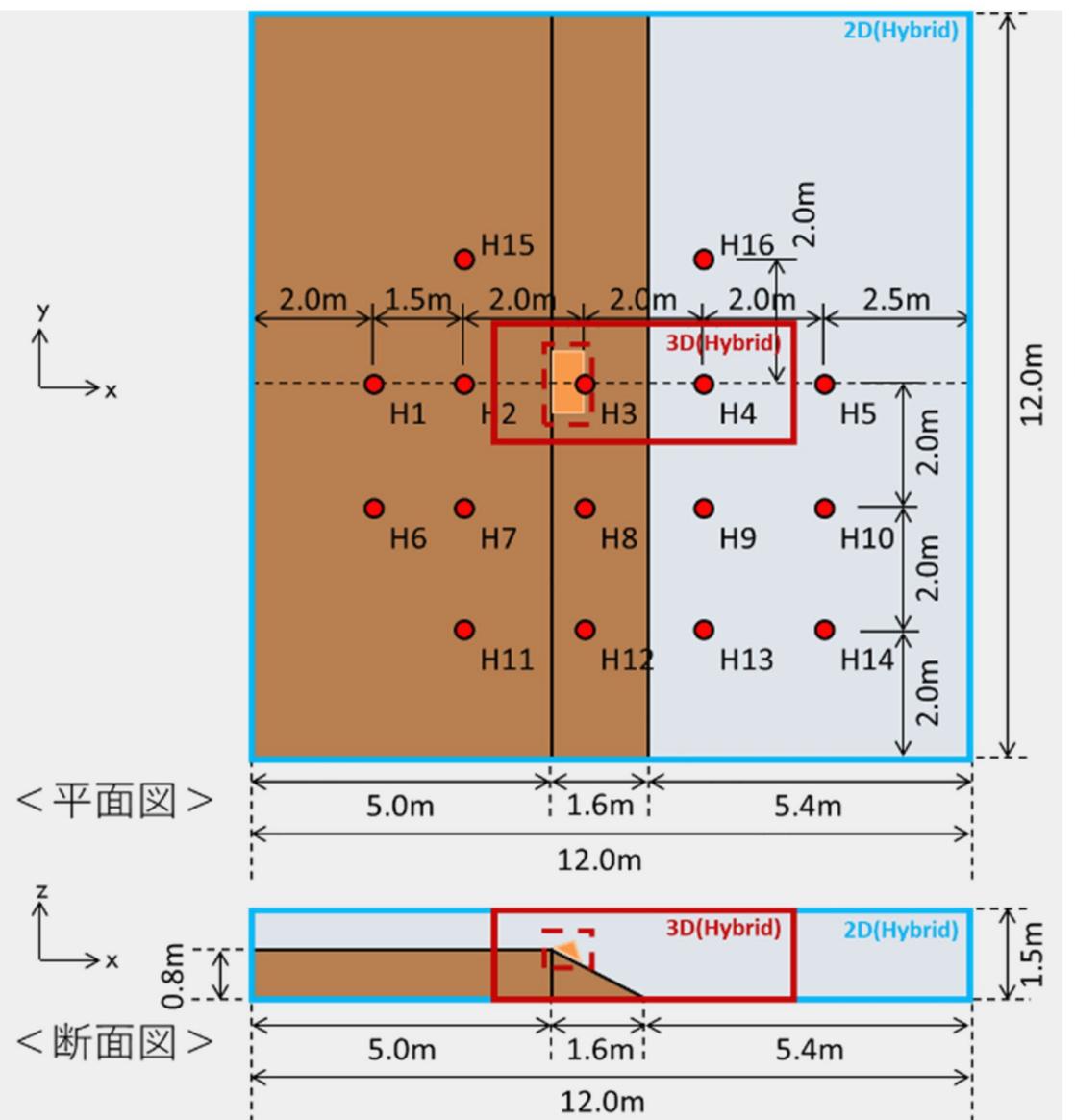


解析条件

- 検討方法
 - 実験スケールでの検討
 - 藤井らの実験のCASE4をHYBRID手法で解析, 3D解析による結果と比較して適用性を検討

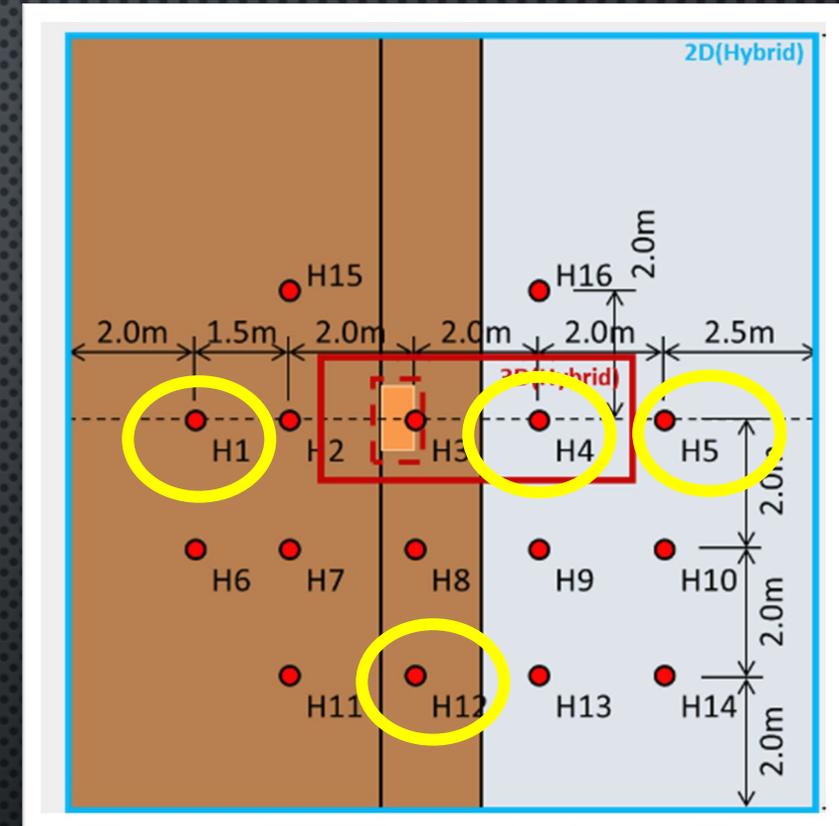
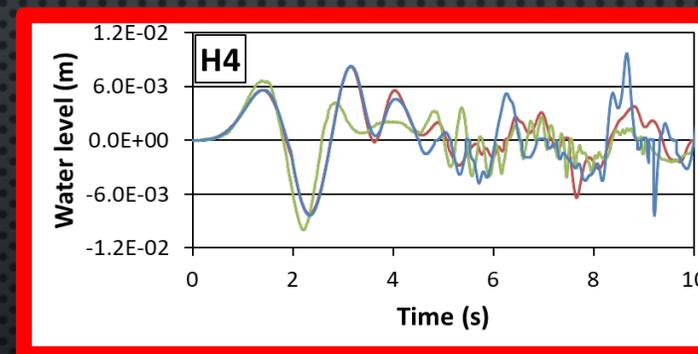
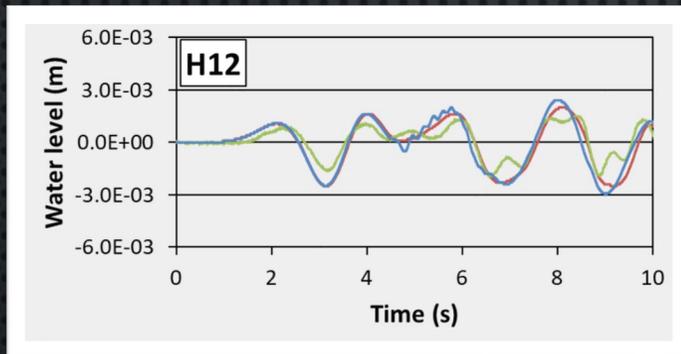
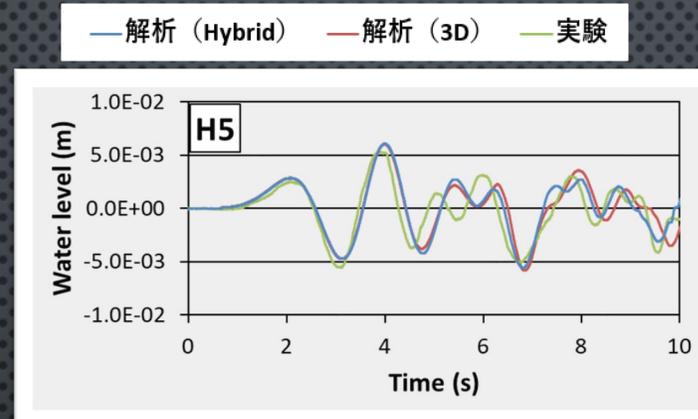
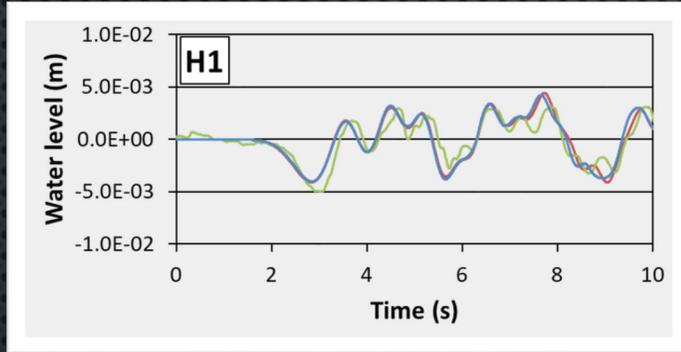
	初期水深 (m)	地すべり塊形状	滑落方式
case4	1.00 (海底地すべり)	二等辺三角柱	自重滑落

- 解析領域 (右図)
 - 3D領域 (赤枠) : 地すべり周辺の $5\text{M} \times 2\text{M}$
 - 2D領域 (青枠) : それ以外の領域
 - メッシュ数は3D解析と同様
- その他解析条件は再現計算と同様



解析結果

- 各計測点での時刻歴波形



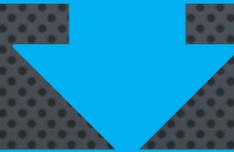
- 2D領域 (H1, H5, H12) での解析結果は3D解析による結果と概ね一致
- 3D領域 (H4) での解析結果は発生直後では概ね一致, 時間経過につれて波形にずれ
 <原因> 2D領域から戻る反射波と3D領域内で干渉⇒広域解析での評価には影響しない
- 約15時間で計算が完了, 計算時間を1/16以下に短縮 c.f.) 3D解析: 約10.5日

HYBRID解析まとめ

- 2DH-3DHYBRID解析により，フル三次元と同等の解析精度を保ったまま，地すべり解析を短時間で行うことができる。
- ただし，周囲より反射波が三次元領域（地すべり発生領域）に戻る現象が重要な場合には注意を要する。

本解析手法（3D解析）の適用性検証

既往水理実験の再現計算



本解析手法（2DH3DHybrid解析）の妥当性検証

実地形への適用を視野に入れた2DH3DHybrid解析



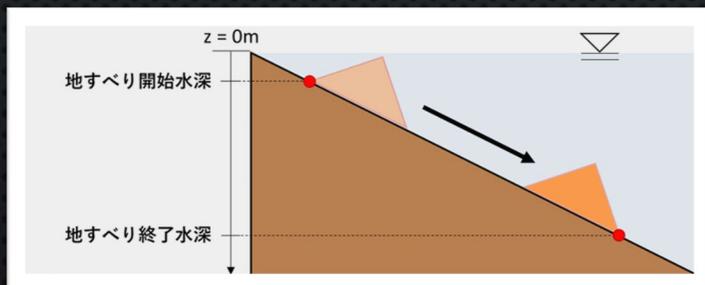
地すべり諸元と津波発達特性の関係性評価

数値実験, 水位変動に影響を与えるパラメータの特定

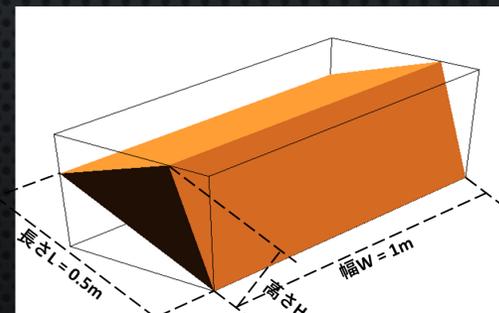
数値実験の概要

- 目的
 - 地すべり諸元と津波発達特性の関係性について力学的に評価
 - 規模の大きい津波を引き起こすパラメータの選定
- 検討パラメータ
 - 既往研究で地すべり津波に対する影響が高いと指摘されるものを選定
C.F.) 川村らの研究 (2017), 由比らの研究 (2017)

① 地すべり発生水深

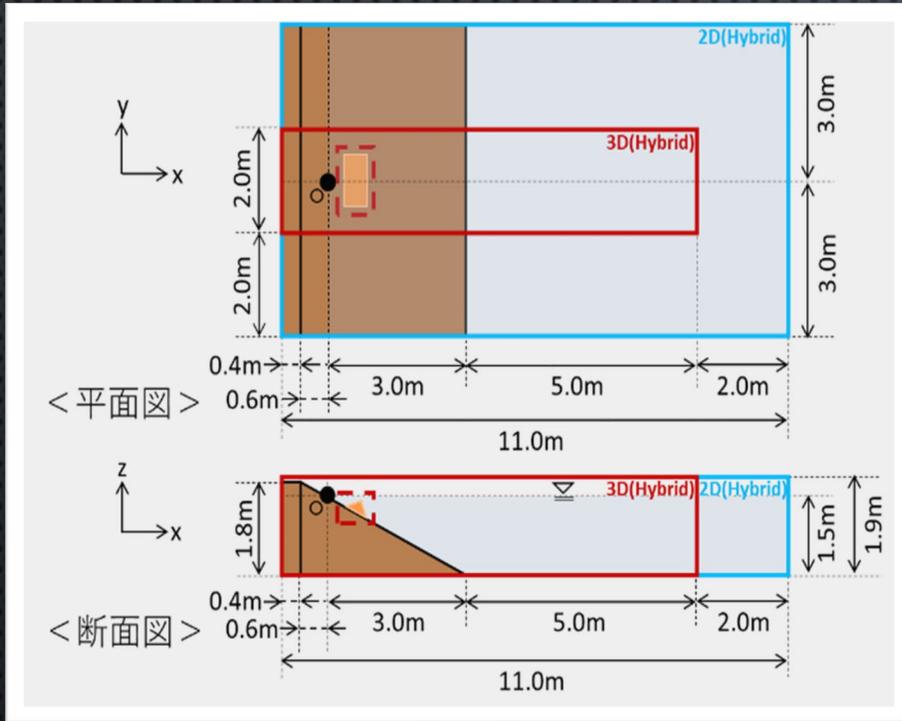


② 地すべり塊寸法 (長さ・高さ・幅)



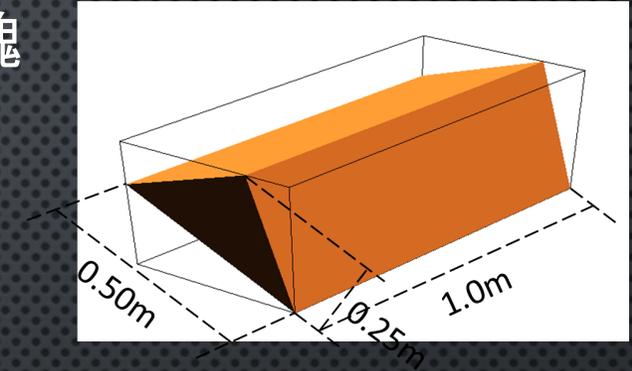
解析条件 (2DH-3DHYBRID解析)

解析領域



- 反射波の影響を取り除くため、2DH解析領域境界を開境界とした。
- 地すべり方向 ($Y=0$) 上の水位を評価

地すべり塊



斜面勾配		2:1
初期水深 (m)		1.5
境界条件	岸側	No-slip条件
	岸側以外	開境界条件
地すべり塊	比重	1.6
	滑り方式	自重滑落

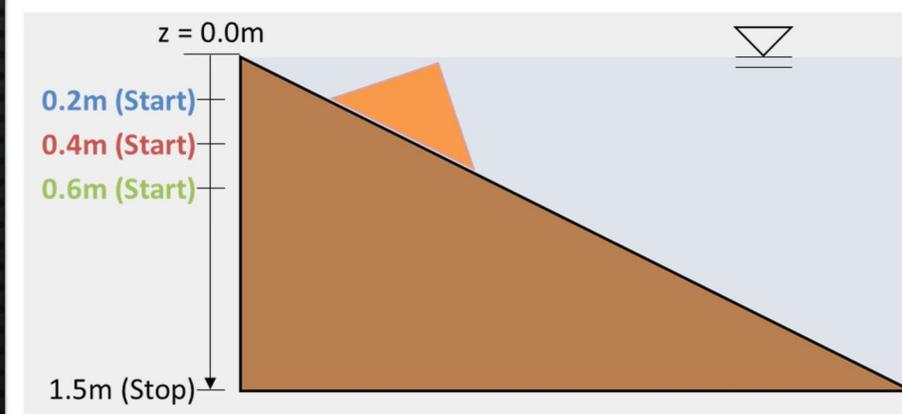
地すべり発生水深

- 検証パラメータの設定
 - 地すべり発生水深を①地すべり開始水深、及び②地すべり終了水深で定義

◆ 検証ケース

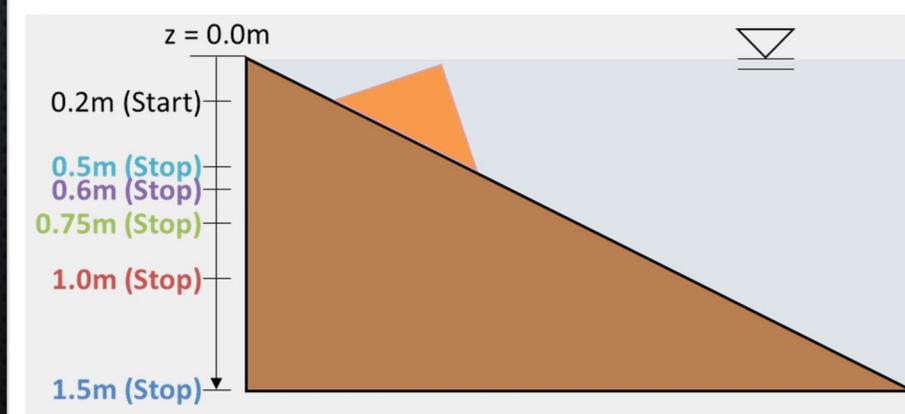
① 地すべり開始水深の影響

開始水深 (m)	0.2, 0.4, 0.6
終了水深 (m)	1.5 (固定)



② 地すべり終了水深の影響

開始水深 (m)	0.2 (固定)
終了水深 (m)	0.5, 0.6, 0.75, 1.0, 1.5



解析結果

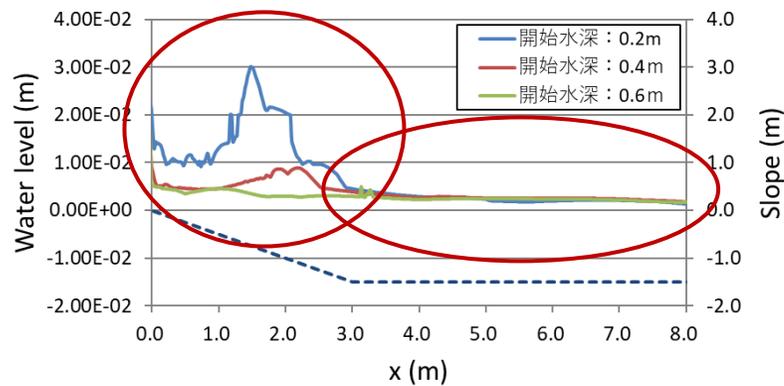
再現計算

Hybrid解析

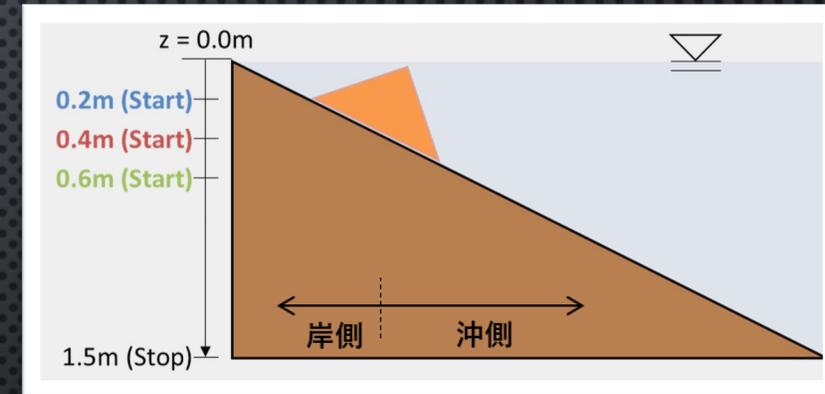
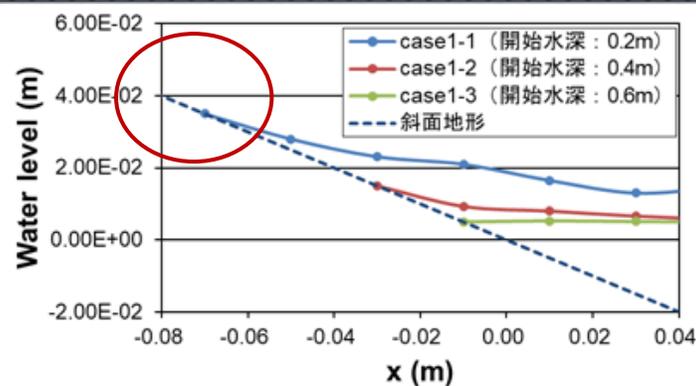
数値実験

① 地すべり開始水深の影響

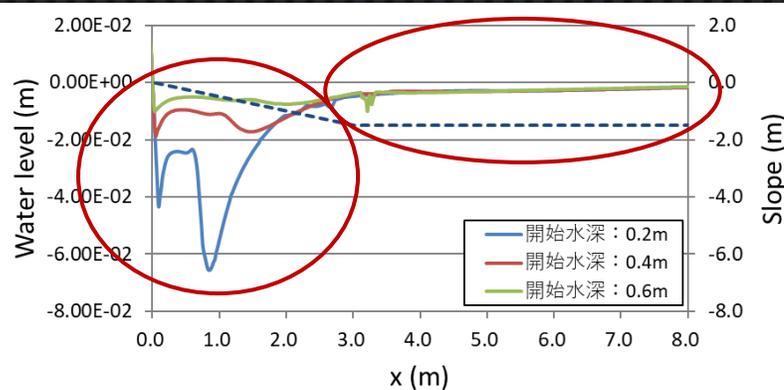
最大水位の空間分布（沖側）



最大水位の空間分布（岸側）



最小水位の空間分布（沖側）

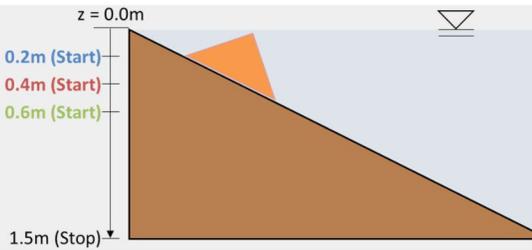
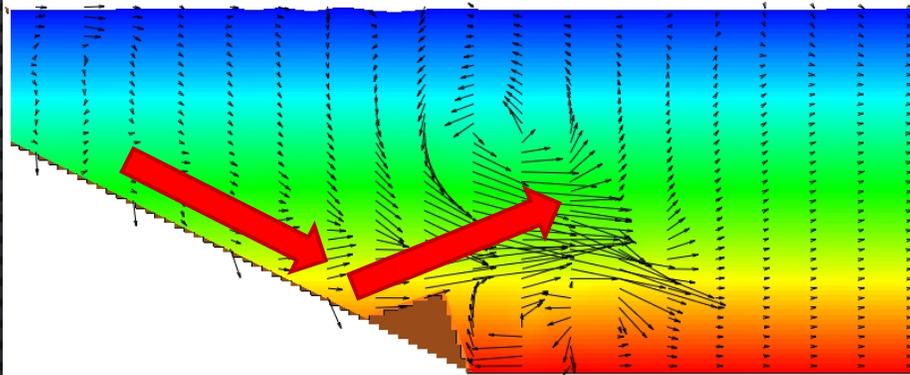


- 開始水深が浅いケースほど斜面上の水位変動が顕著
- 開始水深が浅いケースでは岸側遡上高も高くなる
- 沖側へ伝播する過程で、いずれのケースも概ね一定値に収束

結果の考察

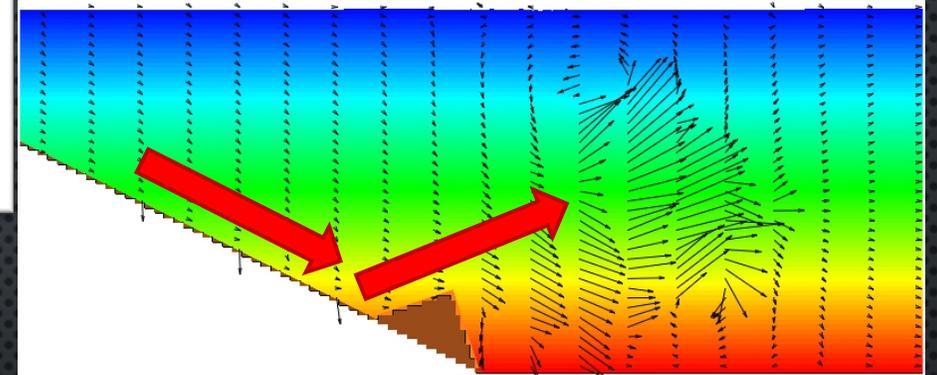
開始水深 : 0.2m

T= 5.00084 XZ plain y= 0.00(j=23)
pressure max=14716.652995



開始水深 : 0.6m

T= 5.00084 XZ plain y= 0.00(j=23)
pressure max=14643.842215

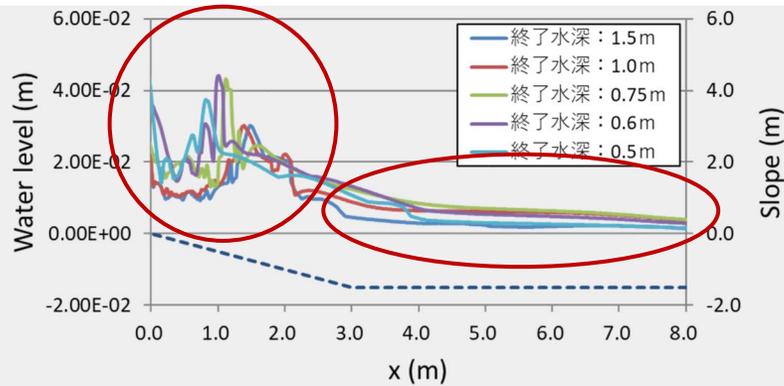


- 開始水深が浅い場合、**水面付近の流体運動**が顕著に⇒斜面上の水位変動、岸側遡上高
- 地すべり塊停止後、**地すべりに伴って運動する流体の流向**が背面勾配方向に変化
- **流体運動が水面到達前に減衰**，水面変動に反映されない⇒沖側水位が概ね一定値に収束

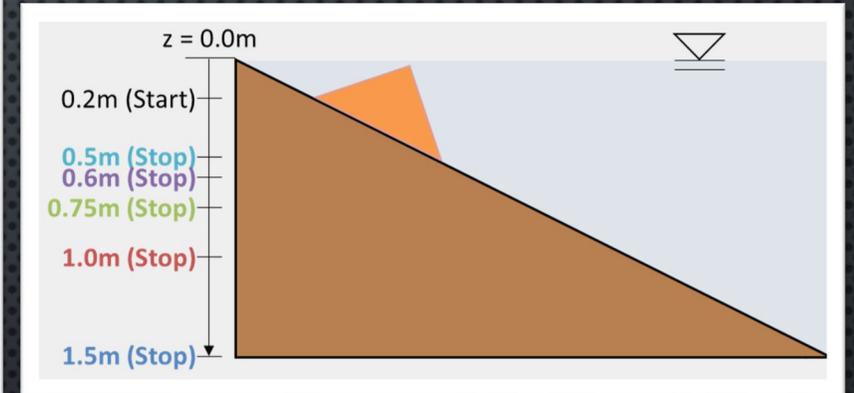
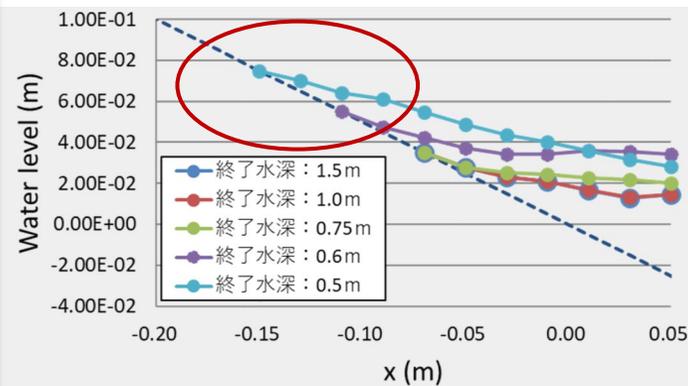
解析結果

② 地すべり終了水深の影響

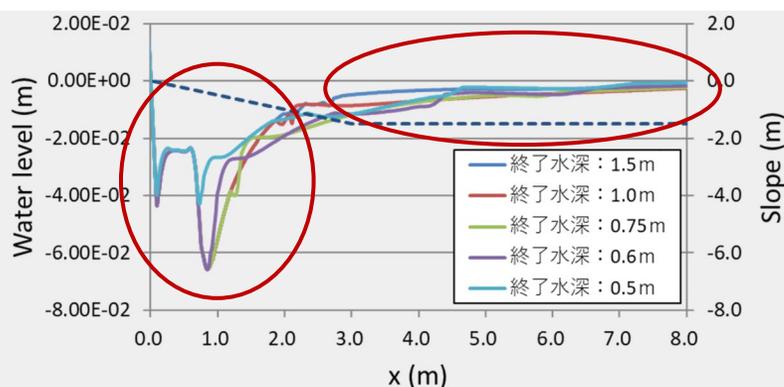
最大水位の空間分布（沖側）



最大水位の空間分布（岸側）



最小水位の空間分布（沖側）



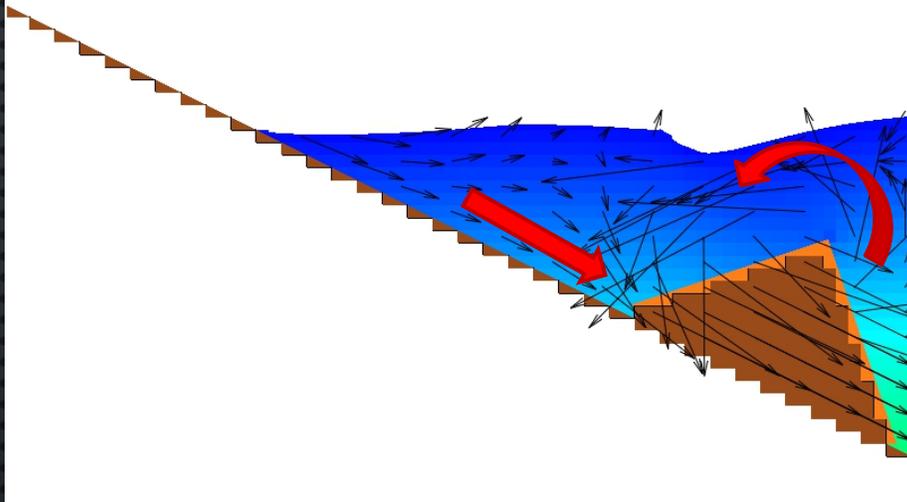
● 斜面上について

- 最大水位：終了水深の浅いケース（0.5, 0.6, 0.75m）で変動量大きい
- 最小水位：終了水深の最も浅いケース（0.5m）以外で最小
- 岸側遡上高：終了水深0.5mで最大，次点で0.6m
- 沖側水位：終了水深0.6m, 0.75m, 1.0mで特に大きい

結果の考察

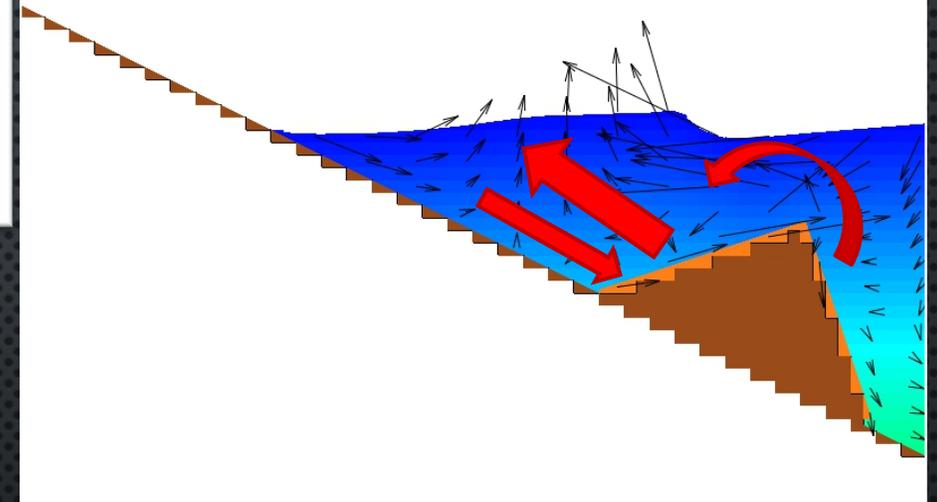
終了水深 : 0.75m

T= 0.71180 XZ plain y= 0.00(j=23)
 presurre max=14624.060426



終了水深 : 0.5m

T= 0.71180 XZ plain y= 0.00(j=23)
 presurre max=14616.628009



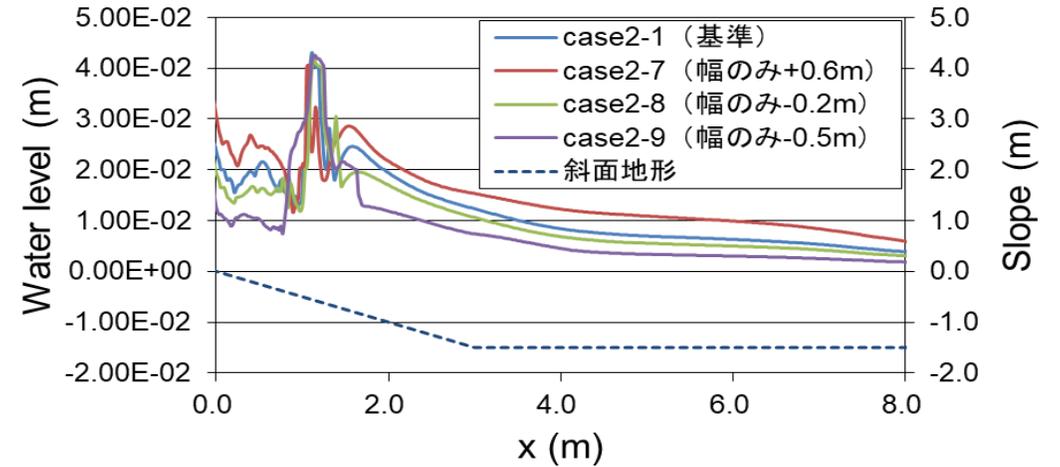
- 背面勾配方向に運動する流体が水面まで到達⇒斜面上及び沖側での水位変動が増大
- 地すべり塊前面で押された流体が背面へ流れ込むことで岸側へ遡上
- 終了水深が浅いと、停止時の慣性力が流体に作用⇒岸側遡上高が更に増大

地すべり塊寸法の影響

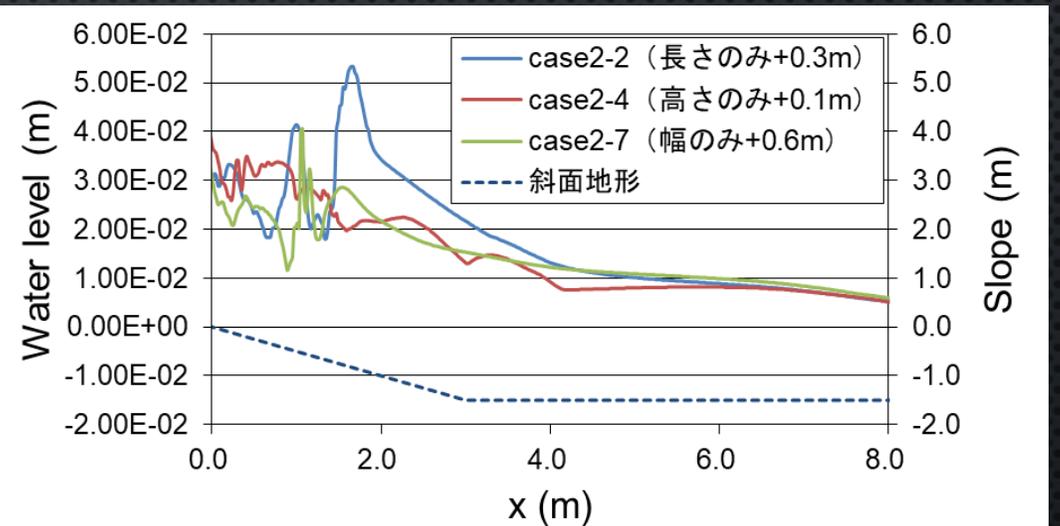
表-3 解析ケース（地すべり塊寸法の影響）

	長さ(m)	高さ(m)	幅(m)	体積(m ³)
case2-1	0.5	0.25	1	0.0625
case2-2	0.8	0.25	1	0.1
case2-3	0.4	0.25	1	0.05
case2-4	0.5	0.4	1	0.1
case2-5	0.5	0.2	1	0.05
case2-6	0.5	0.1	1	0.025
case2-7	0.5	0.25	1.6	0.1
case2-8	0.5	0.25	0.8	0.05
case2-9	0.5	0.25	0.5	0.03125

- 地すべり塊の体積増加に伴い、沖側、岸側の水位が上昇（右上図）
- 体積が同じ場合には、形状が多少変化しても、岸側での津波水位は同等となる、ただし、斜面上の水位には違いが現れた（右下図）



最大水位の空間分布（地すべり塊幅の影響）



最大水位の空間分布（同体積条件での比較）

数値実験まとめ

- 地すべり発生水深の津波に対する影響について：

発生水深の浅い地すべりほど規模の大きな津波を引き起こす可能性があると考えられる。

- 地すべり塊寸法（長さ・高さ・幅）の津波に対する影響について

地すべり津波の規模を評価する上では、地すべり塊形状よりも地すべり塊体積が特に重要であると考えられる。

まとめと今後の予定

- 挙動が十分把握されていない，地すべり津波について，その挙動を安全側に評価できると考えられる三次元流体剛体連成解析手法について紹介した。
- 三次元モデルを用いた詳細解析により，実験の挙動を概ね再現できることを明らかにしたのち，地すべり周辺のみを三次元で解析する2DH-3DHYBRID解析モデルの妥当性も合わせて確認した。
- 2DH-3DHYBRID解析モデルを用いて地すべり津波に関するいくつかの知見を得た。

- 地すべり塊の形状について検討し，地すべり津波が大きくなる形状を検討する。
- また，巨大地震と地すべりが同時発生した場合の津波挙動を念頭に，実形状への適用を検討する。