

レビュー編

目 次

第 1 章 津波伝播計算に関する検討

- 1.1 既往水理実験結果の再現解析による三次元モデルの妥当性確認
..... レビュー編 1-1
- 1.2 三次元海底地殻変動解析による方法 レビュー編 1-22
- 1.3 海底地すべり津波の数値計算手法の再現性に関する検討 レビュー編 1-27

第 2 章 波力評価，漂流物評価に関する検討

- 2.1 水塊落下時に作用する波力の評価に関する検討 レビュー編 2-1
- 2.2 漂流物評価手法に関する既往解析事例 レビュー編 2-6

第1章 津波伝播計算に関する検討

1.1 既往水理実験結果の再現解析による三次元モデルの妥当性確認

津波の近海伝播・陸上遡上を対象とする場合、非線形長波理論（浅水理論）を適用した平面二次元場の数値計算モデル（平面二次元モデル）がよく用いられる。一方、近年では、流体解析技術の発達に伴い、三次元の基礎方程式を直接計算する三次元流体解析モデル（三次元モデル）を適用することも可能になりつつある。

ここでは、代表的な三次元モデルに関する既往解析事例を整理するとともに、既往水理模型実験の再現計算を行い、三次元モデルの妥当性の確認を行った。

1.1.1 代表的な三次元モデルに関する既往解析事例

代表的な三次元モデルに関する既往解析事例について整理を行った。三次元モデルは、静水圧近似を仮定したモデルと静水圧近似を仮定しないモデルに大別される。静水圧型の三次元モデルとしては、STOC-ML や C-HYDRO3D が挙げられ、非静水圧型の三次元モデルとしては、CADMAS-SURF/3D, OpenFOAM, STOC-IC, DOLPHIN-3D, 津波複合災害予測モデル等がある。

(1) CADMAS-SURF/3D

CADMAS-SURF/3D は、沿岸技術研究センター(2010)により研究・開発された非静水圧型の三次元モデルであり、陸上遡上した津波の挙動、波圧の計算のほか、気体・地盤・固体と連成させた解析も可能となっている。有川ほか(2005)は、流体挙動および波圧について、遡上津波に関する模型実験結果との比較から、CADMAS-SURF/3D による解析結果の妥当性を検証している（図 1.1.1-1）。

(2) OpenFOAM

OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) は、2004 年から GPL (GNU General Public License) のもとでソースコードが公開されている流体解析モデルである。ファムほか(2012)および川崎ほか(2013)は、遡上津波の水理実験、水柱崩壊問題の再現計算に OpenFOAM の interFoam ソルバを適用し、流体挙動や波圧の実験結果と比較検証を行っている（図 1.1.1-2, 図 1.1.1-3）。

(3) 高潮津波シミュレータ (STOC)

STOC (Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas) は、三次元非静水圧流動モデル STOC-IC に準三次元静水圧多層レベルモデル STOC-ML を必要に応じて接続できるハイブリッドモデルである。富田・柿沼(2005)、富田・本多(2008)、高橋・富田(2013)は、STOC を用いて、斜面上の津波に関する模型実験、長方形堰の越

流実験，津波防波堤に関する模型実験，実地形による模型実験との比較から，モデルの妥当性や精度を検証している（図 1.1.1-4～図 1.1.1-6）。

(4) DOLPHIN-3D

DOLPHIN-3D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic INteractions-3 Dimension version) は，遡上津波等の挙動，構造物と津波の相互干渉，漂流物の動的挙動を計算可能な非静水圧型の三次元モデルである。川崎ほか (2006)，川崎・袴田 (2007) は，水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流に関する模型実験の再現計算に DOLPHIN-3D を適用し，流体挙動および波圧の実験結果との比較検証を行っている（図 1.1.1-7，図 1.1.1-8）。

(5) 津波複合災害予測モデル

津波複合災害予測モデルは，流体運動のほか，船舶運動，係留索張力の計算が可能な非静水圧型の三次元モデルである。米山ほか (2008)，米山・永島 (2009) は，津波複合災害予測モデルを用いて，模型実験結果との比較から，遡上津波の挙動や漂流物挙動の解析結果の妥当性を検証している（図 1.1.1-9，図 1.1.1-10）。

(6) C-HYDR03D

C-HYDR03D は，津波波源域から沿岸に至る津波伝播，越流・遡上流れの計算のほか，津波による地形変化，漂流物の運動の計算も可能な静水圧型の三次元モデルである。木原・松山 (2010)，Kihara et al. (2012) は，模型実験および 2004 年スマトラ沖地震津波によるスリランカの港湾周辺を対象に，津波挙動と地形変化の再現性を検証しており，また移動床開水路実験との比較により，浮遊砂濃度の鉛直分布の検証も行っている（図 1.1.1-11，図 1.1.1-12）。

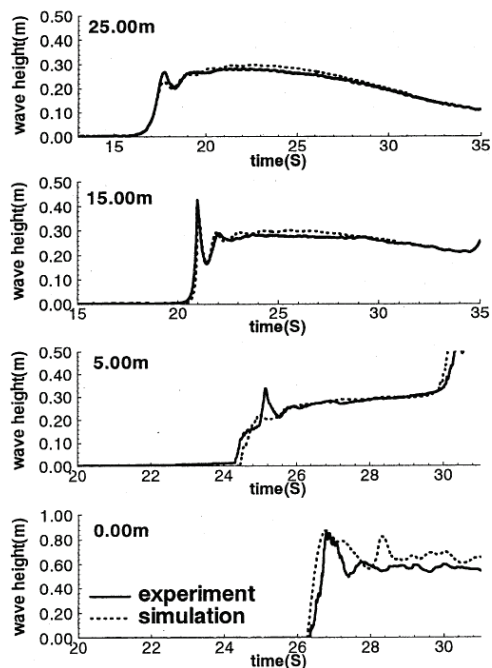


図-6 波高の時系列分布

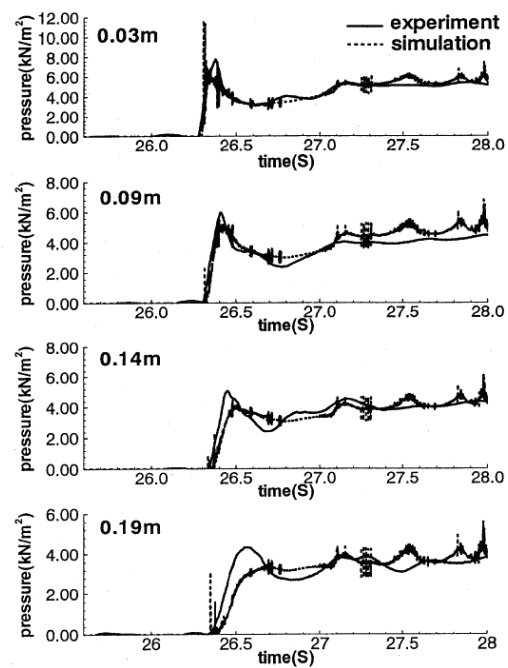


図-7 護岸に作用する圧力

図 1.1.1-1 CADMAS-SURF/3D による解析結果と実験結果の比較 (有川ほか, 2005)

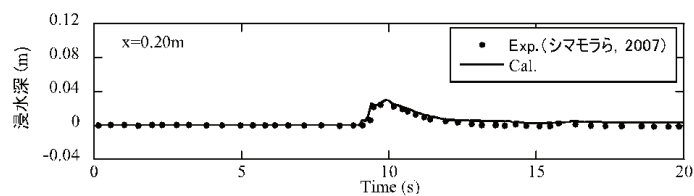


図-9 陸域での浸水深 (Case 1)

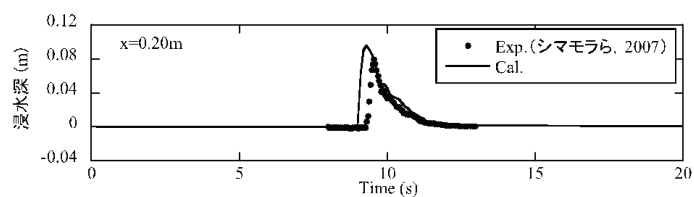


図-10 建物前面での浸水深 (Case 2)

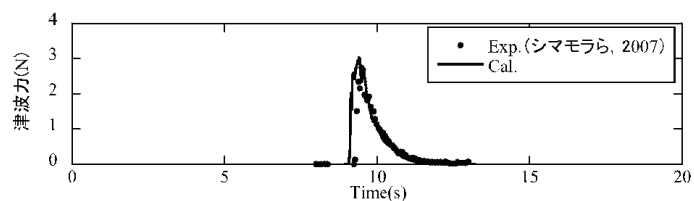


図-11 建物に作用する津波力 (Case 2)

図 1.1.1-2 OpenFOAM による解析結果と実験結果の比較 (ファムほか, 2012)

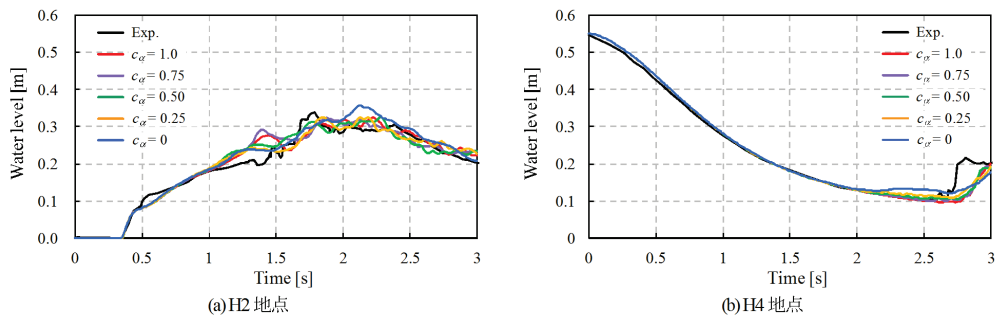


図-10 矩形水槽内における水位の時間変化

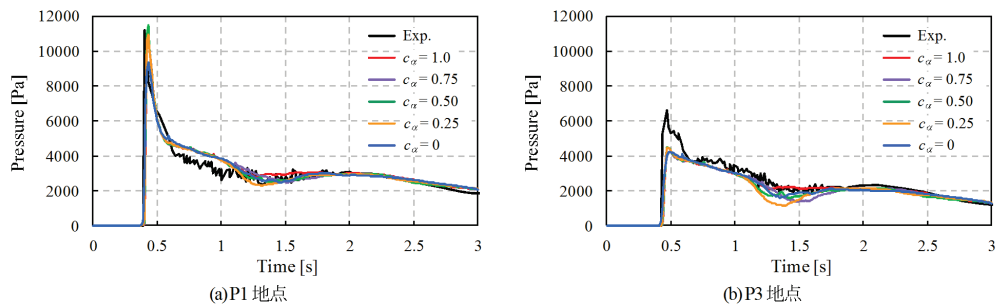


図-11 構造物前面における圧力の時間変化

図 1.1.1-3 OpenFOAM による解析結果と実験結果の比較 (川崎ほか, 2013)

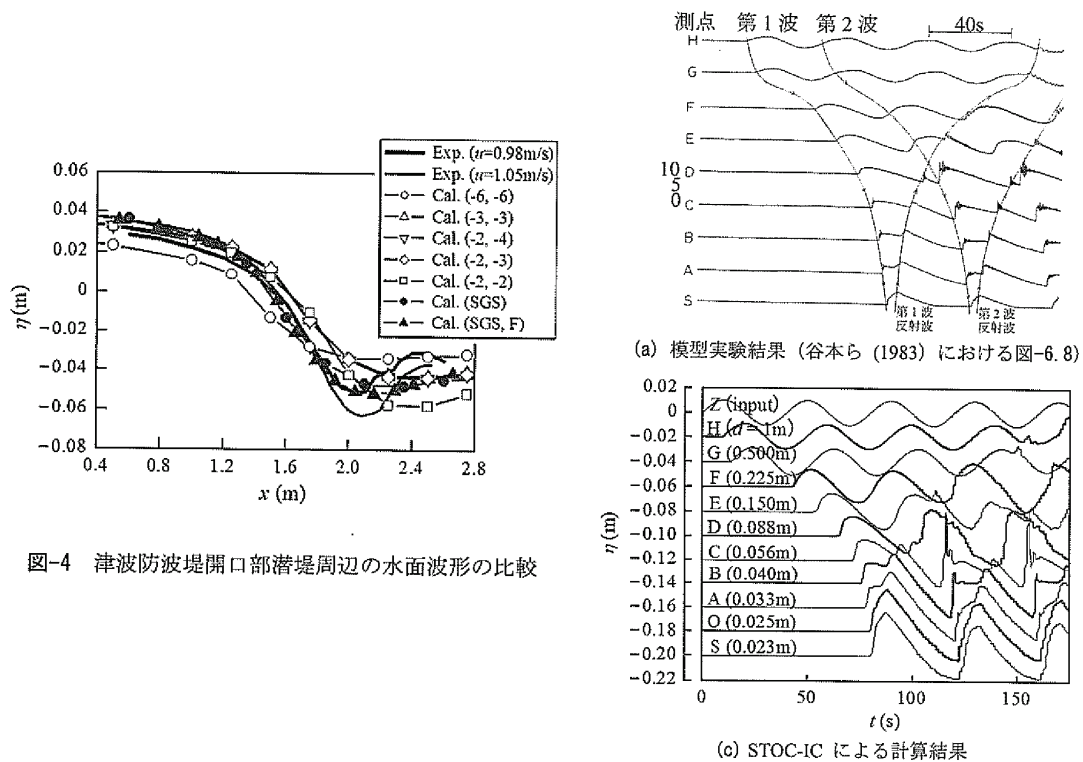


図-5 斜面上の津波波形の比較

図 1.1.1-4 STOC による解析結果と実験結果の比較 (富田・柿沼, 2005)

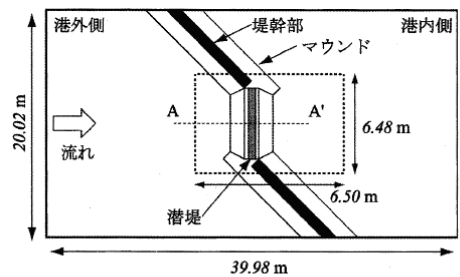


図-5 数値水槽の概要

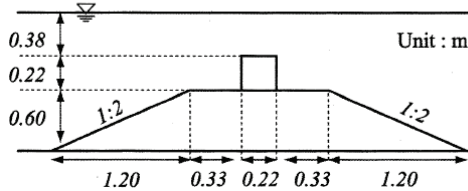


図-6 防波堤開口部潜堤の概要

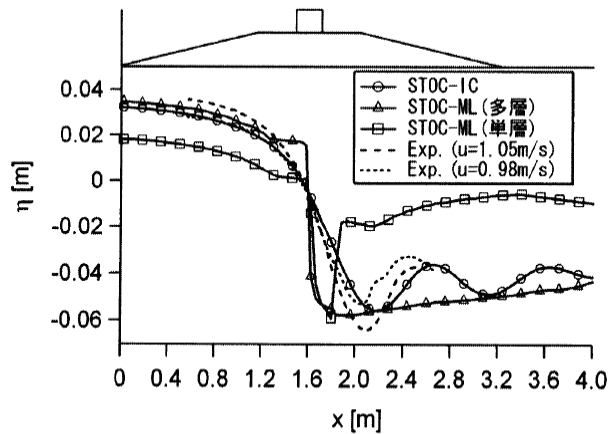
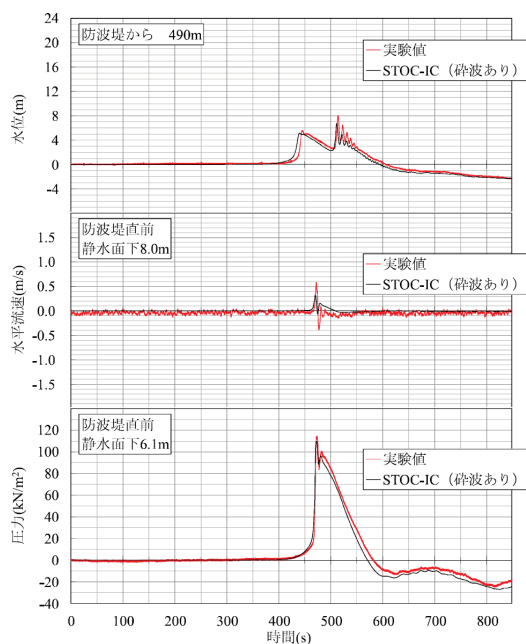
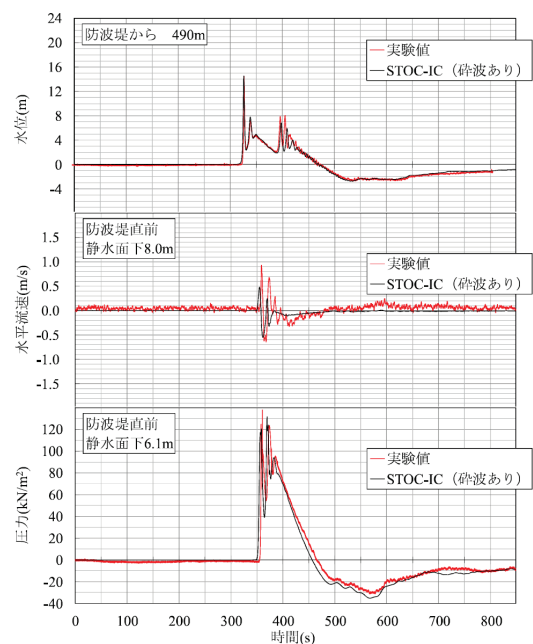


図-9 実験結果と計算結果の比較

図 1.1.1-5 STOC による解析結果と実験結果の比較 (富田・本多, 2008)



(a) $T_{in}=110.3s$, $H_{in}=4.0m$ (非砕波)



(b) $T_{in}=67.9s$, $H_{in}=5.0m$ (砕波)

図-3 局所地形がある場合における水位・水平流速・圧力の変動時系列

図 1.1.1-6 STOC による解析結果と実験結果の比較 (高橋・富田, 2013)

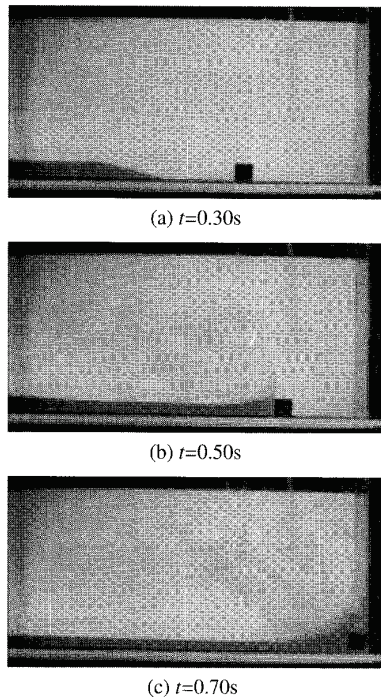


写真-1 水面形の撮影画像

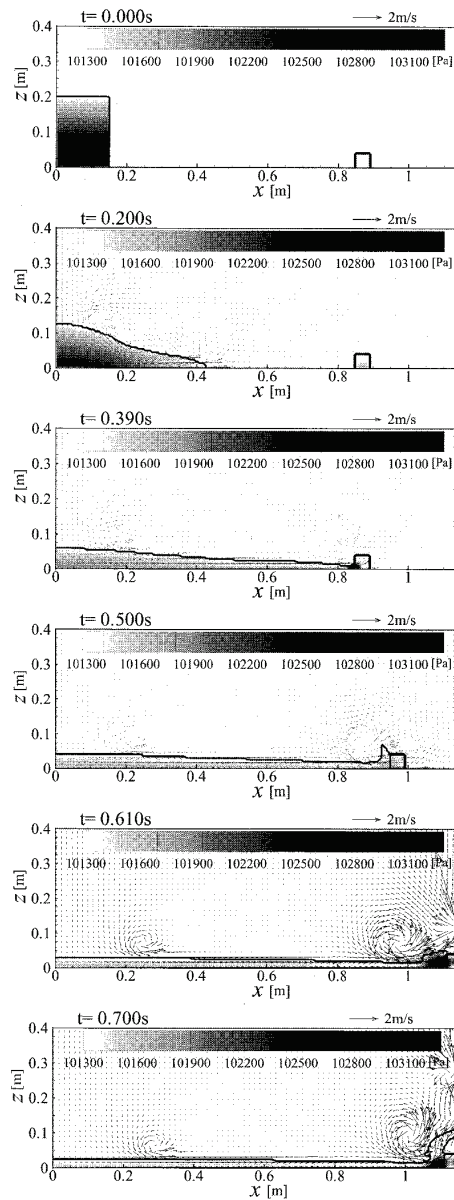


図-7 段波と非固定矩形物体の衝突・漂流過程の計算結果

図 1.1.1-7 DOLPHIN-3D による解析結果と実験結果の比較 (川崎ほか, 2006)

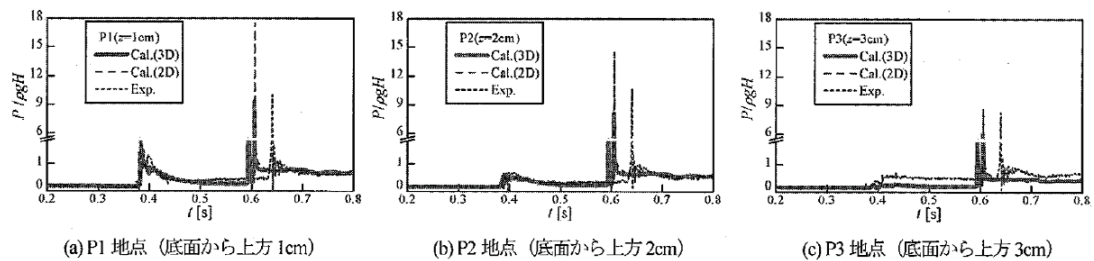
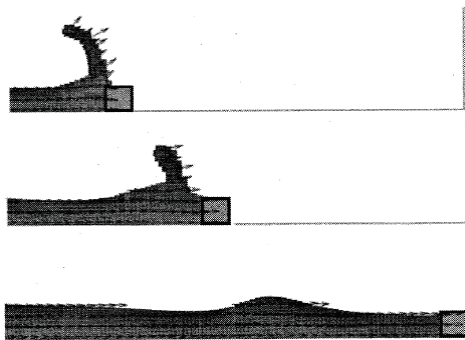


図-5 非固定剛体に作用する波圧の時系列変化

図 1.1.1-8 DOLPHIN-3D による解析結果と実験結果の比較 (川崎・袴田, 2007)



(上から $t = 1.7, 1.8, 2.0$ s)

図-9 実験との比較解析結果の例

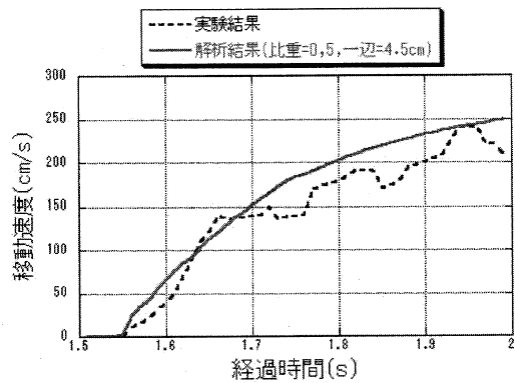


図-10 実験結果との比較

図 1.1.1-9 津波複合災害予測モデルによる解析結果と実験結果の比較 (米山ほか, 2008)

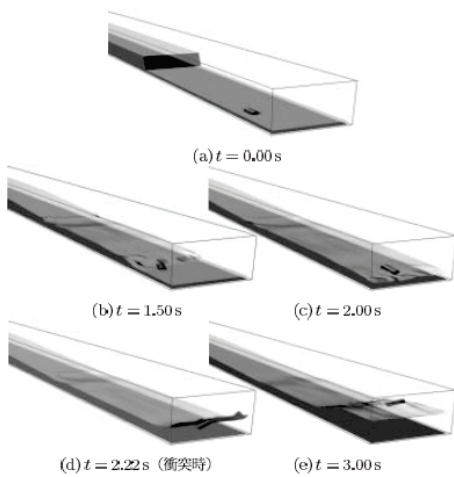


図-8 解析結果の例 (ケース1)

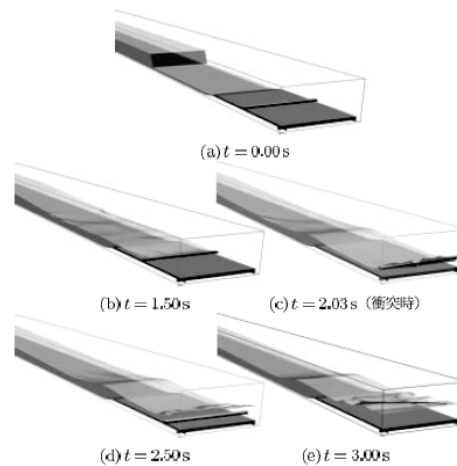


図-11 解析結果の例 (ケース2)

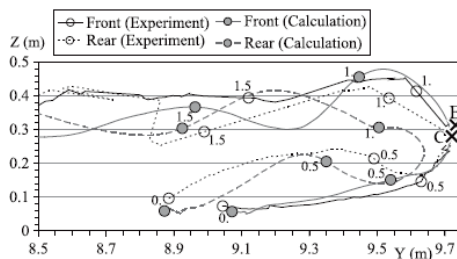


図-9 漂流物先端と後端の鉛直二次元移動軌跡の比較 (ケース1)

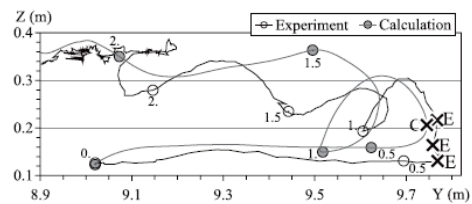


図-12 漂流物重心の鉛直二次元移動軌跡の比較 (ケース2)

図 1.1.1-10 津波複合災害予測モデルによる解析結果と実験結果の比較
(米山・永島, 2009)

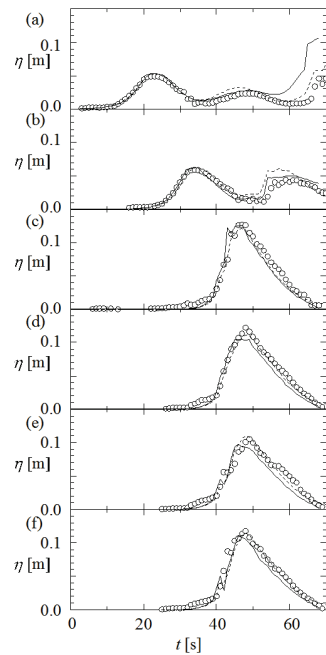


図-3.3 水位の変位量の時間変化。実線，本数値計算結果；破線，木原・松山(2007)の計算結果；○，室内実験結果。(a)，測点1；(b)，測点2；(c)，測点3；(d)，測点4；(e)，測点5；(f)，測点6。

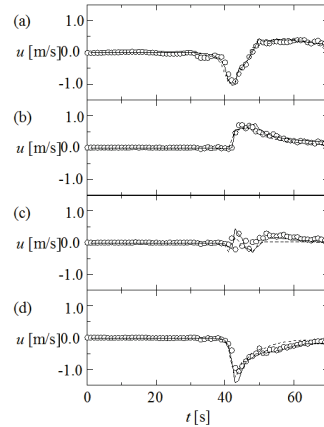


図-3.4 x 方向流速の時間変化。実線，本数値計算結果；破線，木原・松山(2007)の計算結果；○，室内実験結果。(a)，測点3；(b)，測点4；(c)，測点5；(d)，測点6。

図 1.1.1-11 C-HYDRO3D による解析結果と実験結果の比較 (木原・松山, 2010)

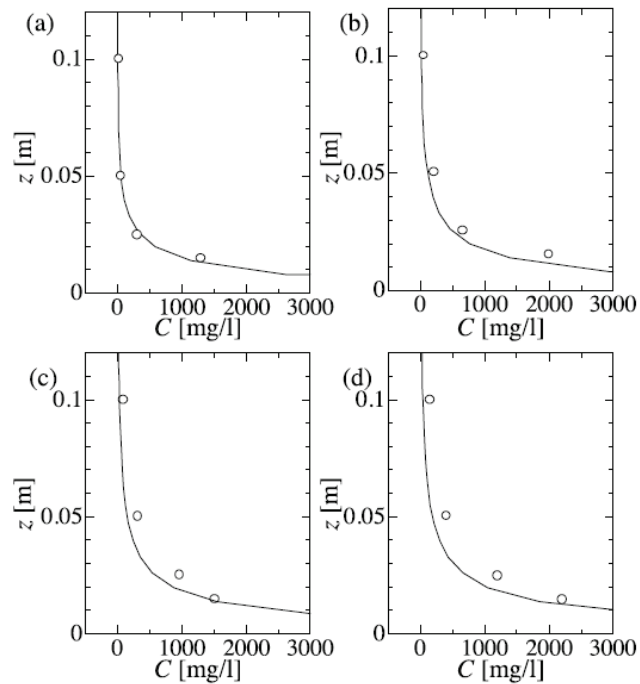


Fig. 2. Vertical profiles of the suspended sediment concentration. The solid lines denote the numerical results and the circles denote the experimental data. (a) $x/h = 4$; (b) $x/h = 10$; (c) $x/h = 20$; (d) $x/h = 40$.

図 1.1.1-12 C-HYDRO3D による解析結果と実験結果の比較 (Kihara et al., 2012)

1.1.2 防潮壁等の施設を越流する津波挙動を模擬した水理実験の再現計算

防潮壁を越流する際の津波挙動を模擬した水理実験を対象に，平面二次元モデルおよび三次元モデルを適用した数値計算を行い，両モデルについて妥当性の確認を行った。

(1) 実験概要

有光ほか(2012)は，**図 1.1.2-1** に示す矩形水路（高さ 0.5m，幅 0.5m，長さ 18m）を使用して，貯水部のゲートを急開することにより段波状の津波を発生させている。津波は，一様水深部（長さ 3.2m）を伝播し，それに続く防潮壁（高さ 0.02m，0.05m）を越流し，平坦な陸上部（長さ 6.8m）を遡上する。実験では，**表 1.1.2-1** に示すように，防潮壁高さ，貯水位 Δh ，構造物模型の形状，構造物設置位置を変化させている。

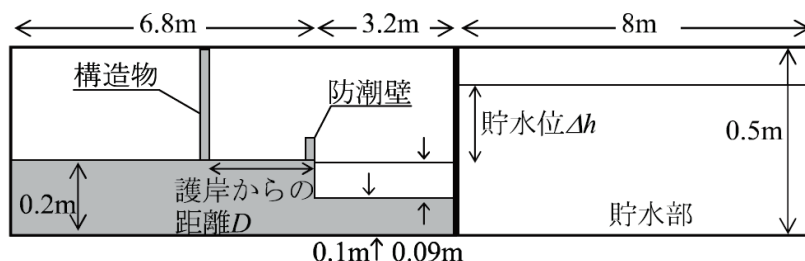


図 1.1.2-1 有光ほか(2012)の実験装置

表 1.1.2-1 実験条件

護岸からの距離 D (m)	防潮壁高さ H_w (m)	貯水位 Δh (m)
1.0	0.00	0.09, 0.15, 0.21
	0.02	0.09, 0.15
	0.05	0.15
2.0	0.00	0.09, 0.15, 0.21
	0.02	0.09, 0.15
	0.05	0.15

(2) 検討条件

1) 平面二次元モデル

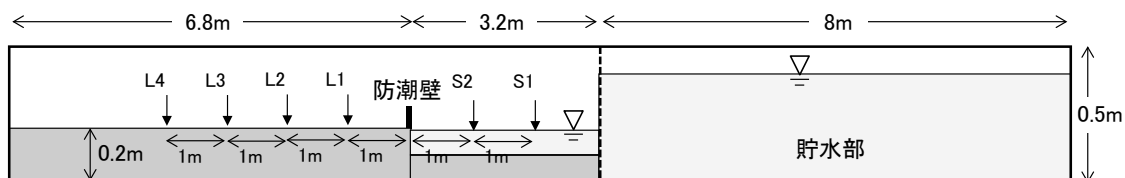
津波の解析にあたっては，連続式と非線形長波理論式をスタッガード・リープフロッド法により差分化する手法（後藤・小川，1982）を用いた。計算領域，地盤高および初期水位はともに実験と同条件とし，貯水部と海域に実験と同じ初期水位を与えることでゲート急開流れを再現した。また，防潮壁は，越流境界として本間(1940)の越流公式を用いて越流量を算定する方法と，地形として非線形長波理論式から線流量を算定する方法の 2 つを用いた。計算に用いる空間格子は，1cm の一様間

隔とした。計算ケースは、有光ほか(2012)の実験条件のうち、貯水位 0.15m, 構造物模型なし, 防潮壁高さが 0.00m (防潮壁なし), 0.02m, 0.05m の計 3 ケースである。

有光ほか(2012)の実験の再現計算における平面二次元モデルの計算条件を表 1.1.2-2 に示す。また、数値計算に使用する数値実験水路を図 1.1.2-2 に示す。

表 1.1.2-2 有光ほか(2012)の実験の再現計算における平面二次元モデルの計算条件

項目		設 定 値
基礎方程式		非線形長波理論式および連続式
計算領域		水理模型実験と同じ範囲
空間格子間隔		1cm の一様間隔
時間格子間隔		0.0002s (CFL 条件を十分に満足するように設定)
初期条件		貯水部と海域に実験と同じ初期水位を与えてゲート急開流れを再現する
境界条件	沖側境界	貯水部側・水路側壁：完全反射条件 陸上部側：自由透過条件
	陸側境界	陸上遡上を考慮
	越流境界	本間(1940)の越流公式
粗度係数		$n=0.010 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$
計算時間		20s



※ 水路幅 0.5m, S1, S2, L1~L4 は水位・流速の計測地点

図 1.1.2-2 有光ほか(2012)の実験の再現計算に使用する数値実験水路

2) 三次元モデル

本検討では、数値波動水路プログラム CADMAS-SURF/3D (沿岸技術研究センター, 2010) を使用する。CADMAS-SURF はナビエ・ストークス方程式を基礎方程式とし、自由表面の処理に VOF 法を用いる三次元流体解析プログラムである。

数値計算に使用する数値実験水路は平面二次元モデルと同じである (図 1.1.2-2)。また、三次元モデルの計算条件を表 1.1.2-3 に示す。三次元モデルにおいても、貯水部と海域に実験と同じ初期水位を与えることで、ゲート急開流れを再現した。解析に用いる格子間隔は、x 方向, y 方向, z 方向, とともに最小 1cm とした。計算ケースは、平面二次元モデルと同様の 3 ケースである。

表 1.1.2-3 有光ほか(2012)の実験の再現計算における三次元モデルの計算条件

項目		設 定 値
初期条件		造波の条件を与えず，貯水部と海域に実験と同じ初期水位を与えてゲート急開流れを再現
計算領域		水理模型実験と同じ範囲
格子間隔	Δx	0.01～0.03m
	Δy	0.01m
	Δz	0.01～0.025m
時間制御	時間ステップ Δt	自動
	計算時間	15s
造波モデル		使用しない
減衰領域		なし
差分スキーム		VP-DONOR
境界条件	流速・圧力	対数則
	VOF 関数	FREE
物性値	密度	1,000kg/m ³
	重力加速度	9.8m/s ²
	粘性	なし
オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下
	表面セルの流速	勾配ゼロ

(3) 再現計算結果

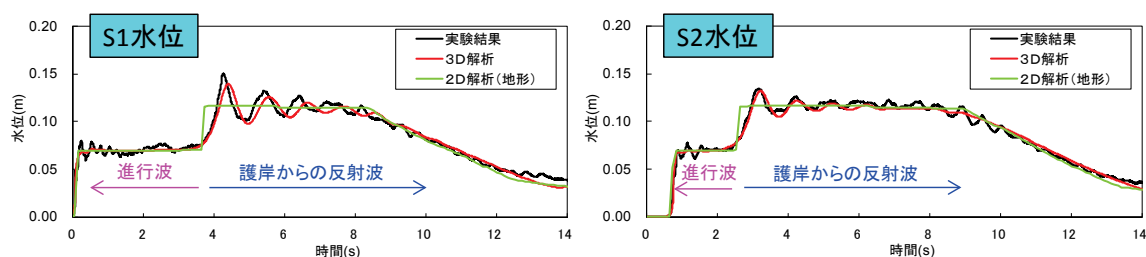
実験の計測地点における水位・流速の時間波形，防潮壁周辺における空間波形について，実験結果と解析結果の比較を行った結果，以下の知見が得られた。

1) 海域の津波挙動

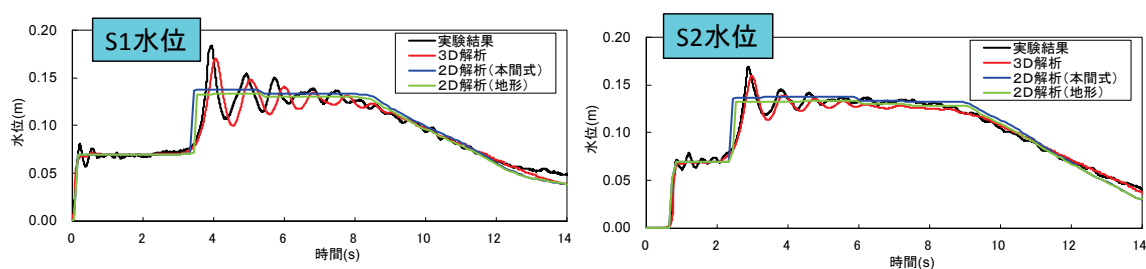
図 1.1.2-3 に示す海域の水位の時間波形から，平面二次元モデルは実験や三次元モデルに見られる津波先端部の分散効果を再現できておらず，また水位ピークの位相も早い，これらを除けば，実験を良く再現できることが確認された。また，三次元モデルは，空間波形，水位の時間波形ともに，実験結果を良好に再現することがわかった。

2) 陸上の津波挙動

図 1.1.2-4 および図 1.1.2-5 に示す陸域の水位・流速の時間波形から、遡上後は防潮堤付近を除いて、平面二次元モデルと三次元モデルの計算結果は一致し、実験結果の浸水深・流速を良好に再現している。ただし、図 1.1.2-6 に示す防潮堤越流時の空間波形から、平面二次元モデルは防潮壁のごく近傍の水面形状を再現できないため、その浸水深・流速をより適切に把握する必要がある場合は、三次元モデルが有効であると考えられる。



(1) 防潮壁がない場合 (高さ $H_w=0.00\text{m}$)



(2) 防潮壁がある場合 (高さ $H_w=0.05\text{m}$)

図 1.1.2-3 海域の水位計測地点 S1, S2 における水位の時間波形

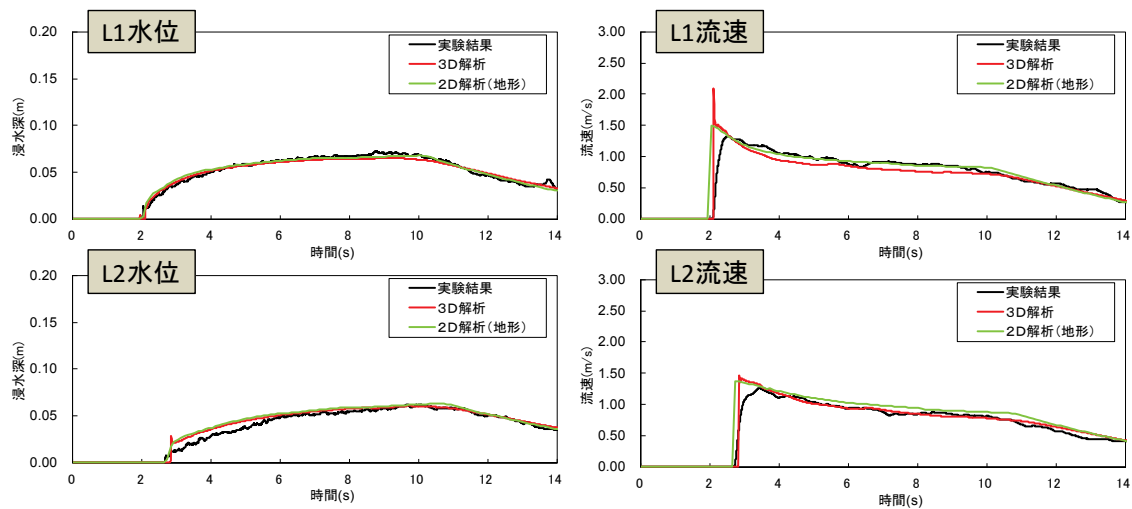


図 1.1.2-4 陸域の計測地点 L1, L2 の水位・流速の時間波形（防潮壁なし $H_w=0.00\text{m}$ ）

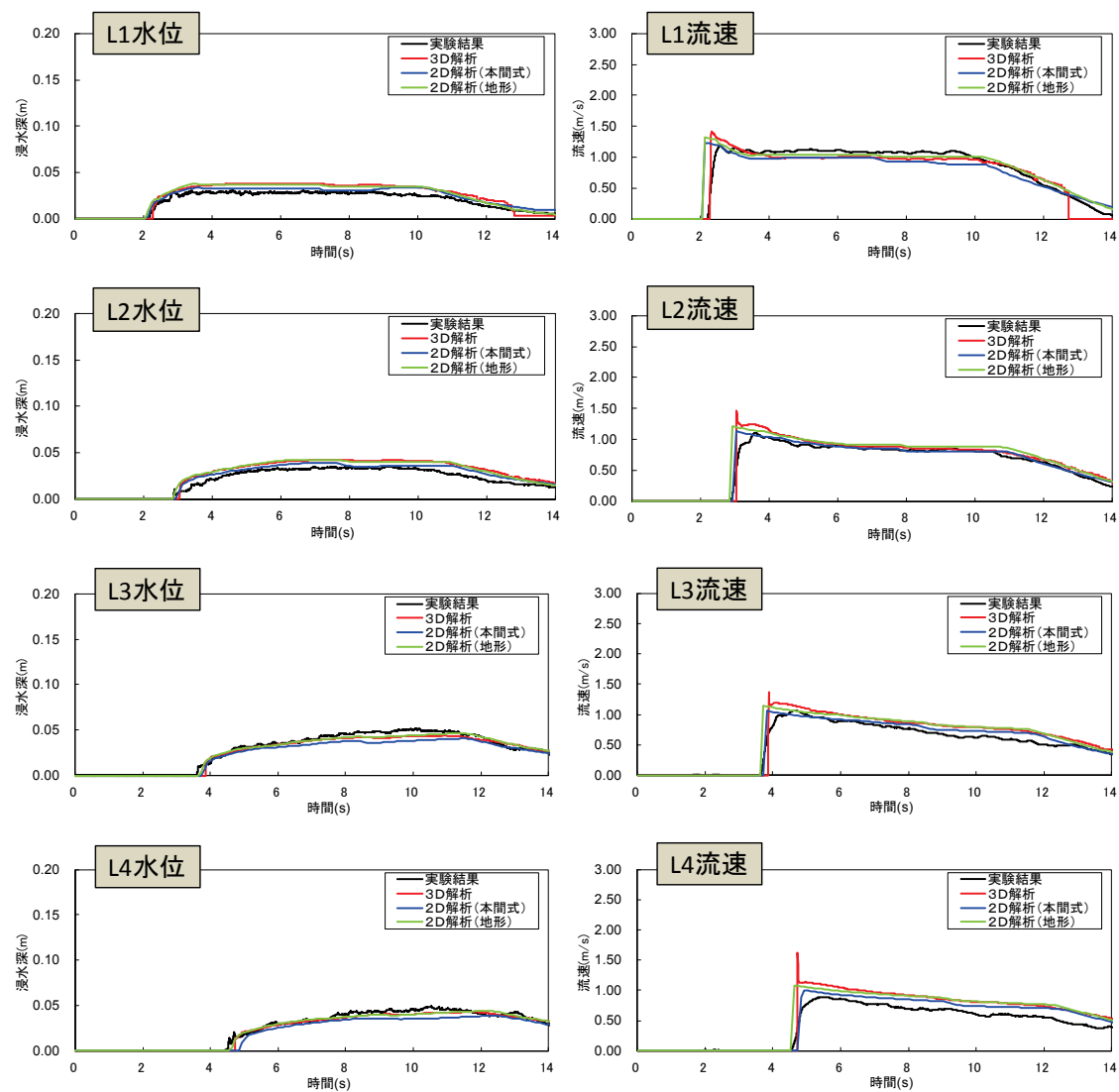
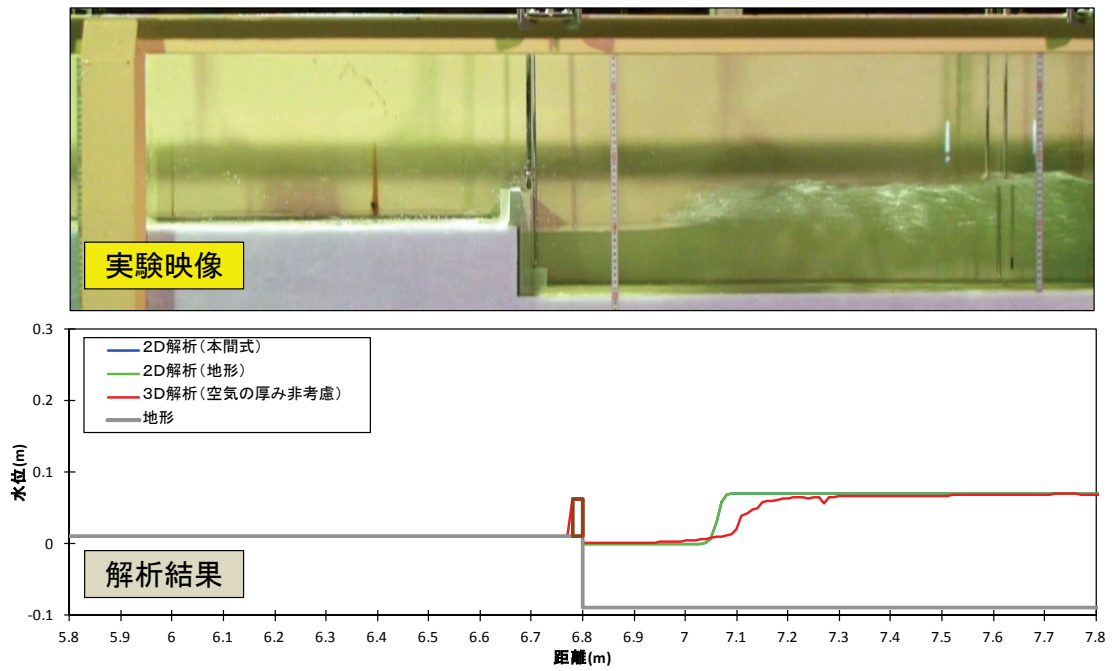


図 1.1.2-5 陸域の計測地点 L1～L4 の水位・流速の時間波形（防潮壁あり $H_w=0.05\text{m}$ ）

t=2.0秒



t=4.0秒

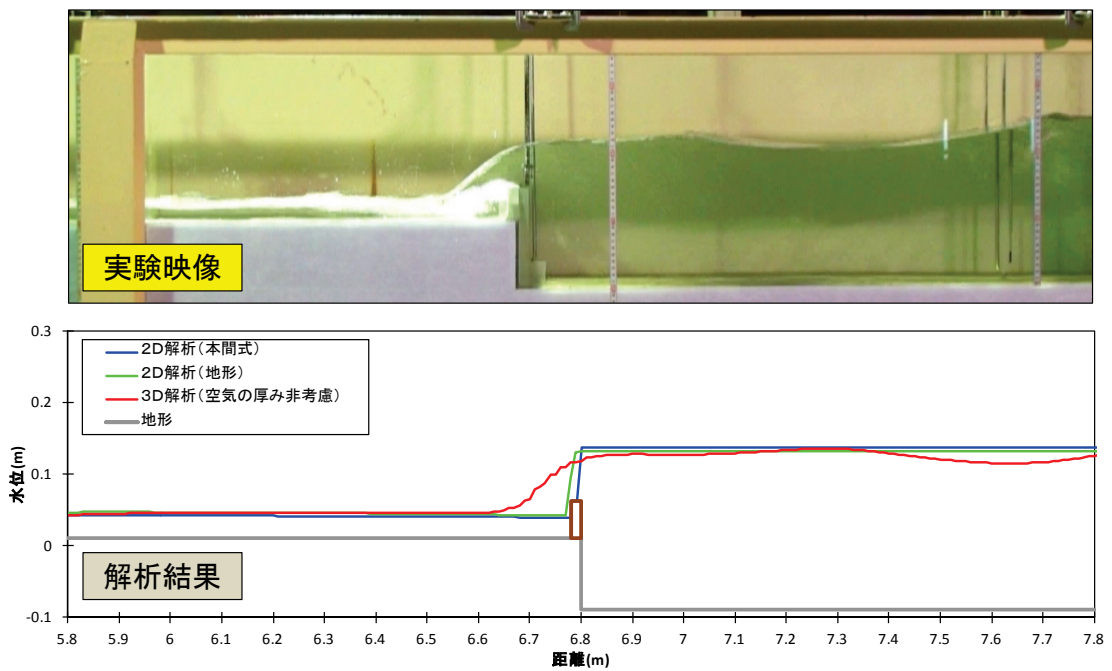


図 1.1.2-6 防潮壁を越流する津波の空間波形の比較

1.1.3 陸域部の建物群等に遡上する津波挙動を模擬した水理実験の再現計算

陸上部の建物群に遡上する津波挙動を模擬した水理実験を対象に、平面二次元モデルおよび三次元モデルを適用した数値計算を行い、両モデルの妥当性の確認を行った。

(1) 実験概要

有光ほか(2013)は、図 1.1.3-1 に示す平面水槽（長さ 38m、幅 20m、高さ 1.2m）のうち、中央の導波板で分割された片側を使用し、造波機により津波を模擬した孤立波を発生させている。津波は、長さ 4.2m の平坦床および 1/10、1/50 の海底勾配を伝播し、高さ 0.11m の直立護岸を越流して平坦な陸上地形を遡上する。構造物模型の配置は、図 1.1.3-1 に示す矩形構造物（長さ 0.1m×幅 0.1m×高さ 0.4m）を単体で設置した場合（単体）と、沖側に同じ構造物を 2 体設置した場合（構造物群）の 2 パターンである。実験では、孤立波の津波高、構造物設置位置を変化させ、海域部の水位・水平流速（H1～H3）、陸上部の浸水深（L0～L3）、流速（L3）を計測している。

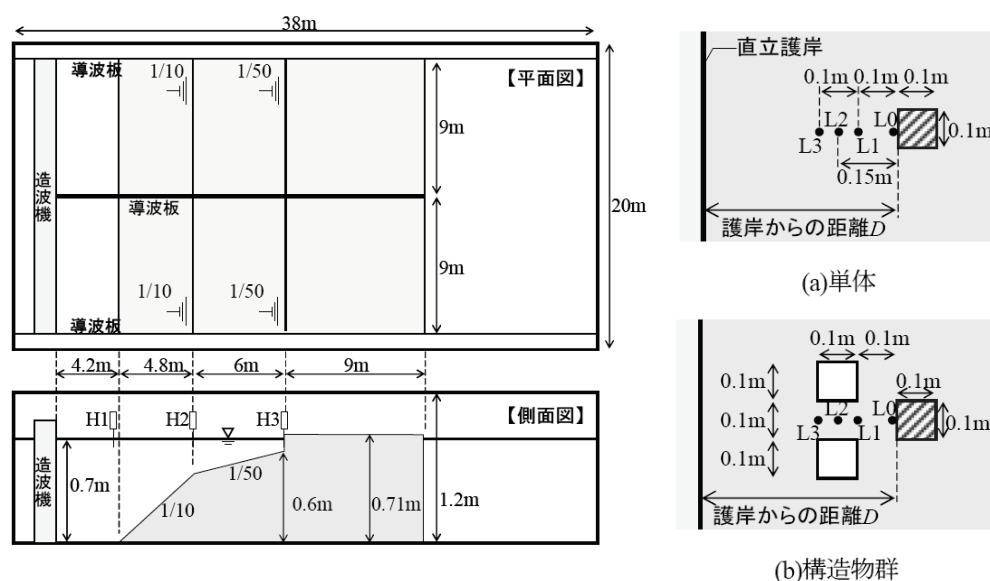


図 1.1.3-1 実験装置および構造物模型の配置

(2) 検討条件

1) 平面二次元モデル

津波の解析にあたっては、連続式と非線形長波理論式をスタッガード・リープフロッグ法により差分化する手法（後藤・小川，1982）を用いた。計算領域は、図 1.1.3-1 に示した平面水槽の片側（幅 9m）の H2 地点から陸上地形の端部までとした。また、解析は構造物の配置が「構造物群」の実験ケースを対象とした。

平面二次元モデルの計算条件を、表 1.1.3-1 に示す。地盤高および初期水位はと

もに実験と同条件とし、実験で得られる観測点 H2 の水位を入射波形とし、沖側境界から入射させた。空間格子間隔は、構造物間 (10cm) の格子数が 10 格子, 5 格子, 4 格子, 3 格子, 2 格子, 1 格子となるように、格子間隔は 1cm, 2cm, 2.5cm, 3.33cm, 5cm, 10cm の計 6 パターンとした。

2) 三次元モデル

1.1.2 の検討と同様、三次元モデルには数値波動水路プログラム CADMAS-SURF/3D (沿岸技術研究センター, 2010) を用いた。計算領域は、平面二次元モデルと同様に、図 1.1.3-1 に示した平面水槽の片側 (幅 9m) の H2 地点から陸上地形の端部までとした。また、解析は構造物の配置が「構造物群」の実験ケースを対象とした。

三次元モデルの計算条件を、表 1.1.3-2 に示す。海域部の造波境界から、孤立波の入射波形 (平面二次元モデルと同じ波形) を入力した。差分スキームは VP-DONOR を用いた。高さ方向の格子間隔については、実験による L0 地点の浸水深に対する格子数が 20 格子, 10 格子, 5 格子程度となるように、最小格子間隔を 0.25cm, 0.5cm, 1cm と変化させた。水平方向の格子間隔については、水平方向と高さ方向の格子間隔の比が 2 : 1 あるいは 1 : 1 となるように設定した。

表 1.1.3-1 有光ほか(2013)の実験の再現計算における平面二次元モデルの計算条件

項目		設 定 値
基礎方程式		非線形長波理論式および連続式
空間格子間隔		1cm, 2cm, 2.5cm, 3.33cm, 5cm, 10cm の 6 パターン
時間格子間隔		CFL 条件を十分に満足するように設定
境界 条件	沖側境界	海域部：孤立波（津波高 3cm）の入射波形を入力 水路側壁：完全反射条件 陸域部：自由透過
	陸側境界	陸上遡上を考慮
粗度係数		$n=0.010 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$
計算時間		15 秒

表 1.1.3-2 有光ほか(2013)の実験の再現計算における三次元モデルの計算条件

項目			設 定 値
格子 間隔	$\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$		構造物周辺の格子間隔は以下の 4 パターン ・ $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 0.25\text{cm}$ ・ $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ ・ $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ ・ $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$
時間 制御	時間ステップ Δt	自動	
	計算時間	15s	
造波モデル			孤立波（津波高 3cm）の入射波形を入力
差分スキーム			VP-DONOR
境界 条件	流速・圧力	SLIP	
	スカラ量	FREE	
物性値	密度	$1,000\text{kg/m}^3$	
	重力加速度	9.8m/s^2	
	粘性	なし	
オプ ション	気泡上昇速度	0.2m/s	
	水滴落下速度	自由落下	

(3) 再現計算結果

津波が防潮堤等を越流して敷地浸水に至るまでの浸水深および流速の再現性について、構造物間等の適切な格子数、構造物背後への回り込みに着目した評価分析を行った結果、以下の知見が得られた。

1) 平面二次元モデル

図 1.1.3-2 から、平面二次元モデルでは構造物前面の水塊の跳ね上がりを再現することは難しいが、こういった局所的な現象以外については、概ね良好な精度で浸水深・流速の計算が可能である。ただし、構造物間の格子数が 1 格子, 2 格子の場合、構造物間通過後の浸水深の再現性が著しく低下するため、構造物間の格子数は最低 3 格子以上とすることが望ましい。

2) 三次元モデル

図 1.1.3-3～図 1.1.3-5 から、三次元モデルでは構造物前面の水塊の跳ね上がりを概ね良好な精度で計算することが可能であり、構造物周辺の津波挙動をより詳細に把握する必要がある場合は、三次元モデルを用いることが有効である。ただし、鉛直方向の格子間隔が粗いと水理量の計算精度が低下する場合があるため、この点に留意して鉛直方向の格子間隔を設定する必要がある。

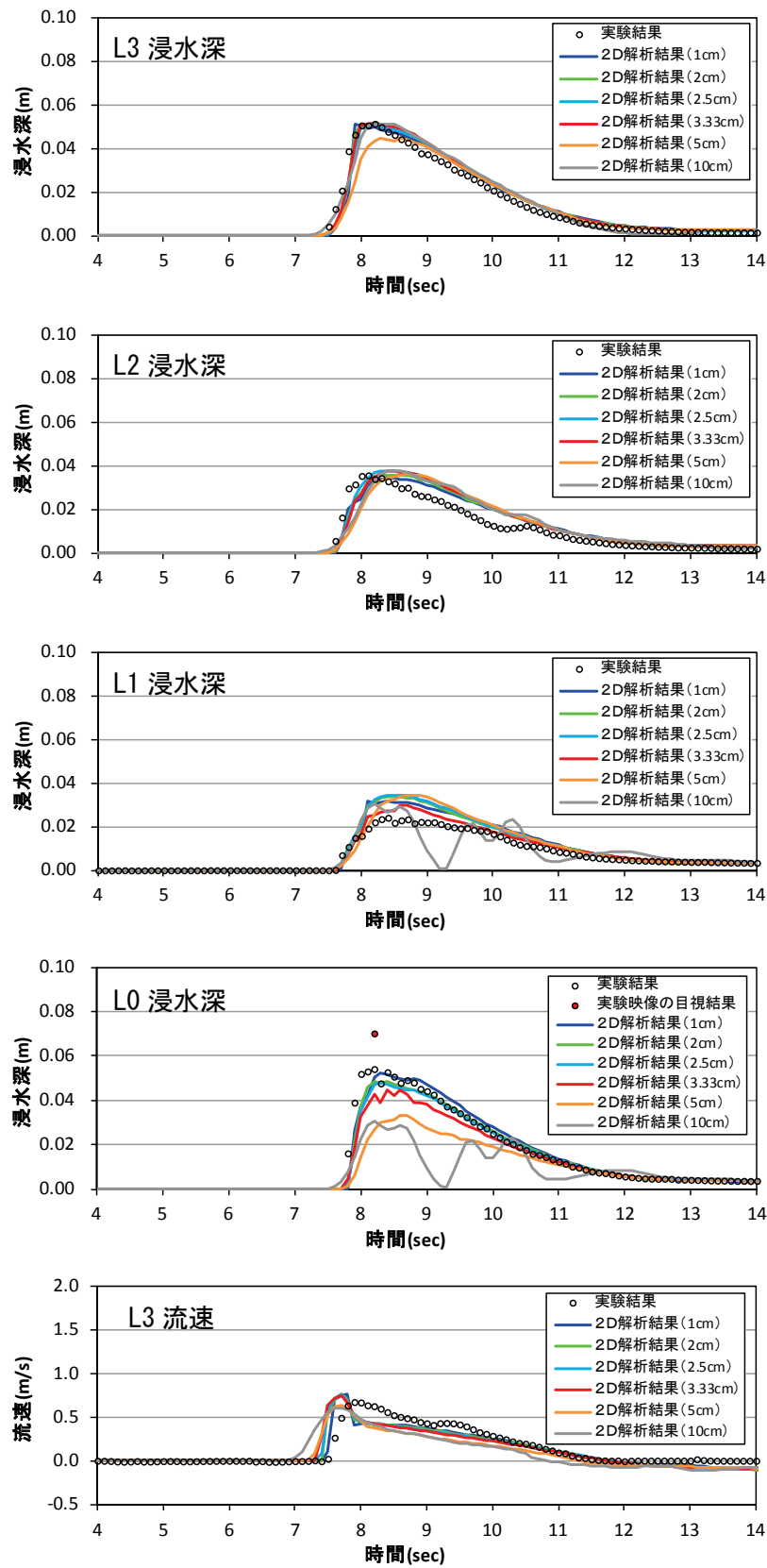


図 1.1.3-2 有光ほか(2013)の実験結果と平面二次元モデルによる浸水深・流速の時間波形

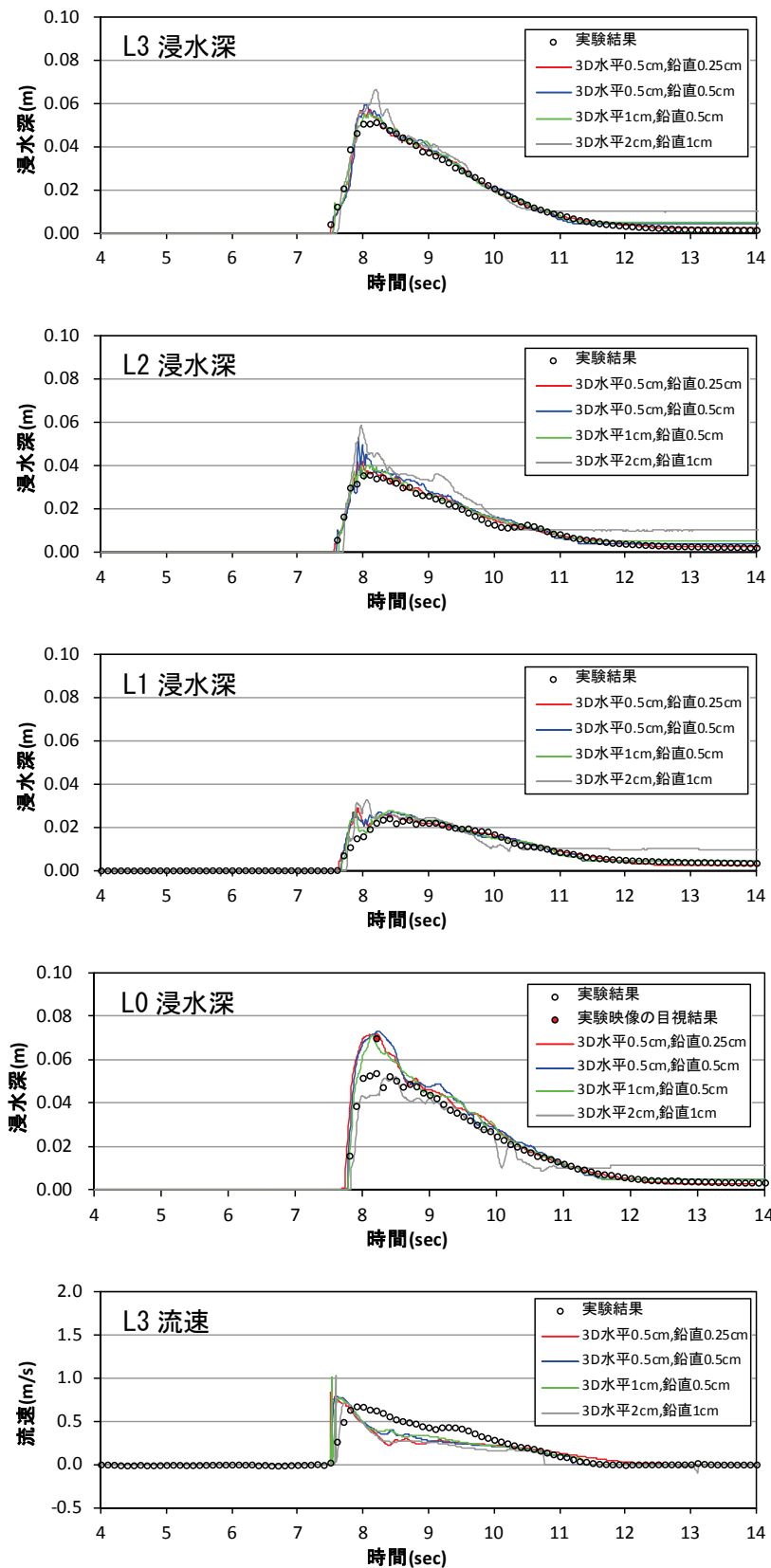
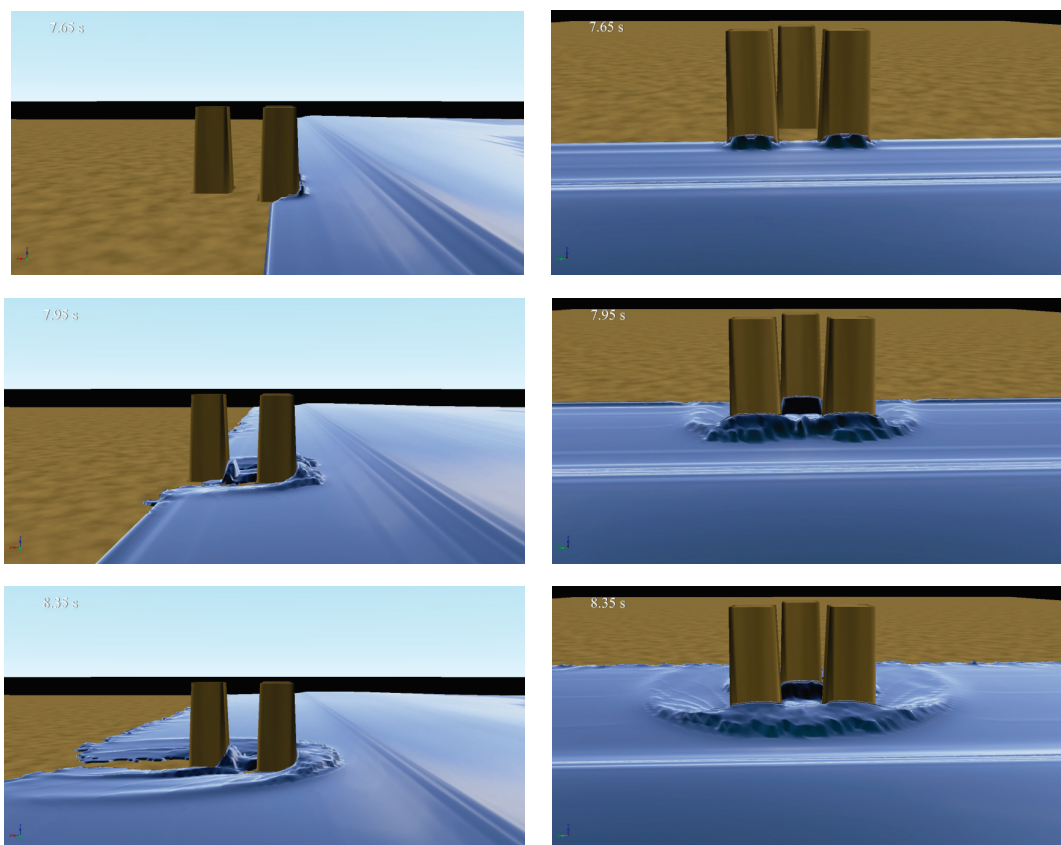


図 1.1.3-3 有光ほか(2013)の実験結果と三次元モデルによる浸水深・流速の時間波形



(a) 側面視点

(b) 正面視点

図 1.1.3-4 三次元モデルによる構造物周辺の津波挙動のスナップショット
(水平方向格子間隔 1cm・鉛直方向格子間隔 0.5cm のケース)

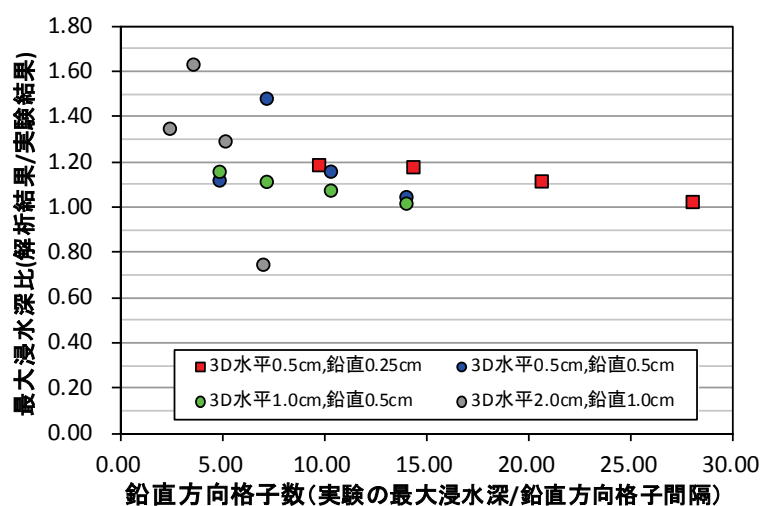


図 1.1.3-5 三次元モデルによる構造物間の最大浸水深比と鉛直方向格子数の関係

1.2 三次元海底地殻変動解析による方法

三次元地下構造が津波に与える影響や海底変位の経時変化を考慮した津波を検討する場合は、三次元不均質地下構造を考慮できる海底地殻変動解析による方法が適用できる（土屋ほか，2013）。この方法を以下に示す。

1.2.1 三次元海底地殻変動解析

最初に、三次元海底地殻変動解析により、三次元不均質地下構造を考慮した地震動解析から地盤変位の経時変化を算定する。

三次元不均質地下構造を考慮した地震動解析や地盤変位の経時変化の計算手法の一つとして、三次元有限差分法による地震動解析ツールである防災科学技術研究所のGMS（Ground Motion Simulator）がある。地震動解析ツールGMSを用いて三次元不均質地下構造を考慮した地震動解析より地盤変位の経時変化を算定することができる。

地盤の三次元地下構造データは、例えば防災科学技術研究所の地震ハザードステーションより、ダウンロードが可能である。このデータは、日本周辺の陸海域を網羅しており、三次元地下構造を考慮した地震動解析に活用することができる。

1.2.2 海底変位の経時変化を考慮した津波解析

三次元海底地殻変動解析により得られた地盤変位の経時変化を平面二次元モデルの初期条件となる海底変位として与える方法は以下の通りである。

連続式：

$$\frac{\partial(\eta-\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

ここで、 x 、 y ：水平座標、 t ：時間座標、 η ：静水面からの水位上昇量、 M 、 N ：線流量、 ζ ：海底の鉛直変位である。

上式の連続式を離散化すると以下のようになる。

$$\begin{aligned}\eta_{i,j}^{k+1} &= \eta_{i,j}^k + (\zeta^{k+1} - \zeta^k) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}) \\ &= \eta_{i,j}^k + \Delta \zeta^{k+1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2})\end{aligned}$$

ここで、 k ：計算ステップ数である。

海底変位の経時変化を考慮する場合は三次元海底地殻変動解析の計算結果より時々刻々の鉛直変位増分量 $\Delta \zeta$ を求め、これを与えることになる。

1.2.3 三次元海底地殻変動解析を用いた津波解析例（土屋ほか，2013）

ここでは，GMS を用いた三次元不均質地下構造を考慮した地震動解析例およびこの計算結果を用いた津波解析事例を以下に示す。

(1) 波源モデル

対象地震は 1923 年関東地震とし，波源モデルは津波再現モデルである相田 (1993) モデルを用いた。断層面は計 732 の点震源（2.5km 間隔で配置）で表現し，破壊開始点は 35.3° N, 139.1° E, 深さ 11.7km（国立天文台編，2007），破壊伝播速度は 3.0km/s，震源時間関数は Triangle 型，各点震源の破壊時間は 4 秒と設定した。

(2) 地下構造モデル

地下構造モデルは，一様物性モデル，水平成層モデル，三次元地下構造モデルの 3 種類のモデルを作成した。一様物性モデルの物性値について， ρ は中央防災会議 (2002)， Q 値は Sato et al. (1999) より設定， V_s は剛性率 $\mu = 4.00 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ として $\mu = \rho V_s^2$ より設定， V_p は $V_p = \sqrt{3}V_s$ より設定した。また，水平成層モデルの物性値は Sato et al. (1999) を参考に設定した。三次元地下構造モデルの物性値は地表面から 3 層の境界面深度分布データを鈴木 (2002) および山田・山中 (2003) を合成して作成，地表面から 4 層目以降は Sato et al. (1999) を参考に設定した。

(3) 三次元海底地殻変動解析計算条件

解析領域は波源を包含した東西 240km，南北 240km の範囲とし，深さは 0～104km とした。このうち，側方 24km，下方 24km は吸収境界としている。格子間隔は深さ 0～44km まで $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 400\text{m}$ ，これ以降は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1,200\text{m}$ ，計算時間間隔は 0.02 秒，現象時間は地震発生後 180 秒までとした。

(4) 三次元海底地殻変動解析計算結果

図 1.2.3-1 に着目地点位置と GMS 計算結果から得られた最終鉛直変位量の比較を示す。最終鉛直変位量は Mansinha and Smylie (1971) の方法と比較して，波源から遠い地点を除き最大で 15% 程度の違いであった。また，手法および場所の違いについて，明確な傾向は見られなかった。

図 1.2.3-2 には，図 1.2.3-1 の着目地点における各地下構造モデルの鉛直変位量の時系列変化を示す。変位の最大振幅は最終変位の 2 倍程度となる地域も現れ，さらに水平成層モデルや三次元地下構造モデルは一様物性モデルに比べてピークでの振幅が増大している。着目地点 D の最大変位を比較すると，三次元地下構造モデルは一様物性モデルの約 1.5 倍となっているが，変位波形の周期は 10 秒弱であり，こうした変位による津波への影響はごく近傍の地域のみと思われる。

なお，ここで発生する変位波形の周期は震源時間関数（各点震源の破壊時間）に大

きく依存するものと考えられるため、対象地震に応じて適切な設定を行う必要がある。

(5) 津波計算条件と計算ケース

ここでは、初期条件となる海底変位を Mansinha and Smylie(1971)の方法や(4)で示した三次元海底地殻変動解析計算結果を与えて津波計算を実施した。

解析領域は千葉県～愛知県を包含する範囲とし、計算格子間隔は沖合 1,600m→800m→400m→200m→100m へ順次細分化を行い、千葉県～愛知県沿岸を格子間隔 50m の陸上遡上モデルとした。また、沖側の境界条件は吸収境界とした。計算時間間隔は 0.5 秒、現象時間は地震発生後 6 時間までとした。

津波解析は、Mansinha and Smylie(1971)の方法で鉛直変位量を瞬時に与えたケース 1、一様物性モデルによる GMS 計算結果の最終鉛直変位量を瞬時に与えたケース 2s および鉛直変位量の経時変化を用いたケース 2d、水平成層モデルによる GMS 計算結果の鉛直変位量の経時変化を用いたケース 3d、三次元地下構造モデルによる GMS 計算結果の鉛直変位量の経時変化を用いたケース 4d の計 5 ケースについて実施した。

(6) 津波計算結果

1) 海底変位の経時変化が津波に与える影響

Mansinha and Smylie(1971)の方法を用いたケース 1 および一様物性モデルによる GMS 計算結果を用いたケース 2d、ケース 2s の津波計算結果の比較を行い、海底変位の経時変化が津波の最大水位に与える影響について検討した。

図 1.2.3-3 には、図 1.2.3-1 の着目地点 B～D のケース 1 とケース 2d の水位及び GMS 計算結果による海底変位の時系列変化を示す。一見ケース 2d の水位がケース 1 より大きく見えるが、地盤自体が上昇しているため、地震発生直後にケース 1 よりも極端に大きな津波が発生しているわけではない。また、いずれの着目地点においても、ケース 2d の水位は、地震発生直後は地盤変動と対応しているが、地盤変動が収束するに従ってケース 1 と大差が見られなくなる。これは、変位の初期波形は図 1.2.3-2 で示した通り 10 秒程度の周期であり津波へほとんど寄与せず、最終変位分布によって発生する長周期波が津波の主要成分を占めているためである。図 1.2.3-4 には、東京湾～相模湾沿岸の着目地点における最大水位の比較を示す。ケース 2d の各地点の最大水位はケース 1 と比較して最大 10%程度、ケース 2s と比較しても最大 10%程度（平均 5%程度）の違いであった。

2) 地盤の地下構造の違いが津波に与える影響

Mansinha and Smylie(1971)の方法を用いたケース 1 および 3 種類の地下構造モデルによる GMS 計算結果を用いたケース 2d、ケース 3d、ケース 4d の津波計算結果の比較を行い、地盤の地下構造の違いが津波に与える影響について検討した。

図 1.2.3-4 より, 3 種類の地下構造モデルそれぞれの最大水位はケース 1 と比較して最大で 15%程度 (平均 5%程度), 3 種類の地下構造モデルで比較しても最大で 20%程度 (平均 5%程度) の違いであった。

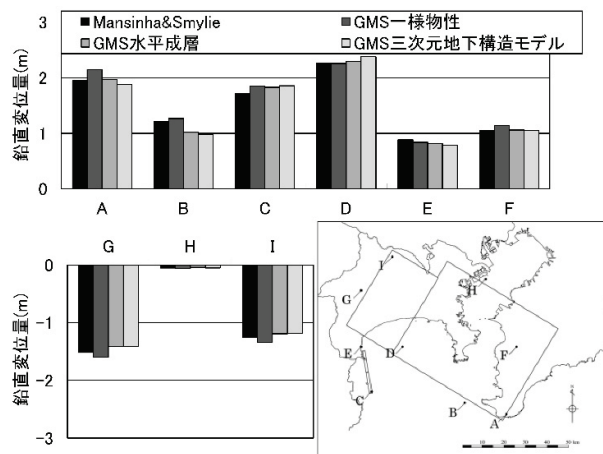


図 1.2.3-1 GMS 計算結果から得られた最終鉛直変位の比較 (着目地点 A~I)

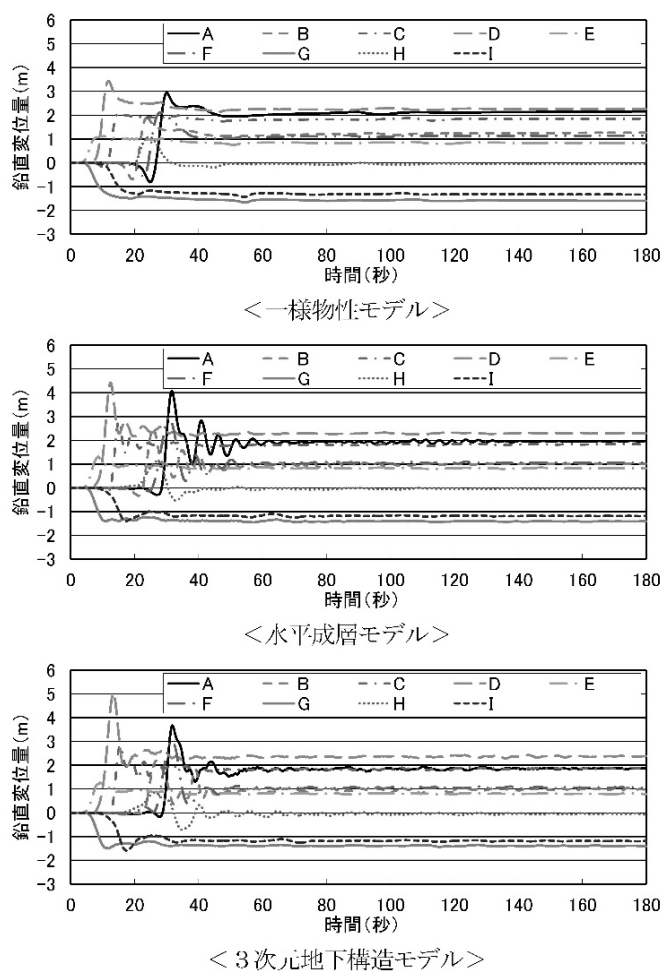
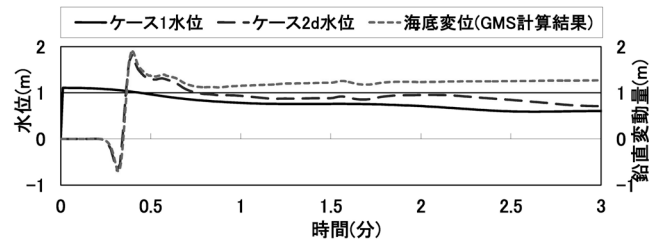
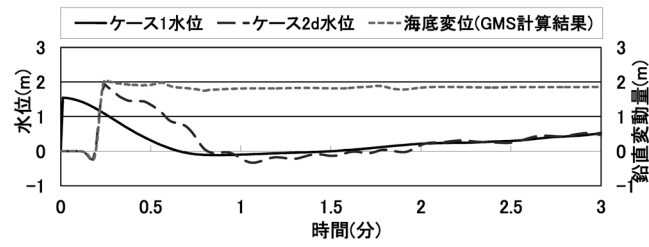


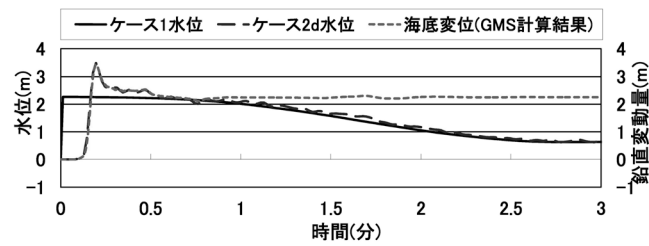
図 1.2.3-2 着目地点における鉛直変位量の時系列変化



<着目地点 B>



<着目地点 C>



<着目地点 D>

図 1.2.3-3 着目地点 B～D における水位・海底変位の時系列変化

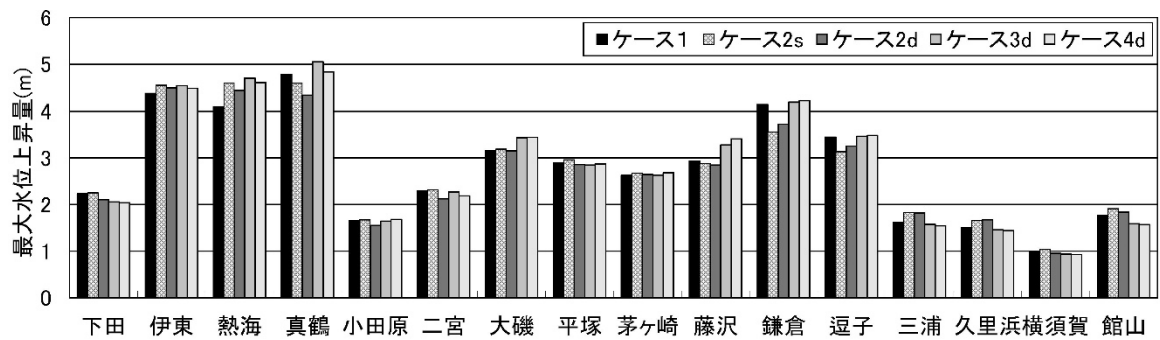


図 1.2.3-4 着目地点における最大水位上昇量の比較

1.3 海底地すべり津波の数値計算手法の再現性に関する検討

1.3.1 検討概要

海底地すべりに伴う津波の数値計算手法としては、以下の計算モデルが提案されている。

- ① KLS モデル：佐竹・加藤(2002)，Satake(2007)等による運動学的地すべりモデル (Kinematic Landslide モデル)
- ② 修正 KLS モデル：殿最ほか(2015)による海底地すべり中の崩壊部と堆積部の土砂収支がとれるように KLS モデルを修正したもの
- ③ 二層流モデル：今村ほか(2001)，Kawamata et al. (2005)等による上層（海水）・下層（土石流）の流体運動と両層の界面に作用する力から地すべりに起因する界面変位を与えるモデル
- ④ Watts モデル：Watts et al. (2005)の初期水位推定式から初期水位分布を設定して津波伝播計算を行うモデル
- ⑤ 地すべり挙動再現モデル：橋本・檀(2008)の実験による地すべり模型の挙動を再現したモデル（レビュー編 1.3.3 参照）

殿最ほか(2015)は、上記の計算モデルのうち、KLS モデル、修正 KLS モデル、Watts モデルを対象に、橋本・檀(2008)による海底地すべり模型実験の再現計算を行っている。本検討は、殿最ほか(2015)の検討結果に、二層流モデル、地すべり挙動再現モデルを加えた 5 つの計算モデルについて、これらの特性比較と再現性の検討を行ったものである。

1.3.2 橋本・檀(2008)による海底地すべり模型実験の概要

橋本・檀(2008)は、海底地すべりに伴う波高等の特性を把握することを目的として、図 1.3.2-1 に示す断面水槽に設置した斜面上を、土塊を模したアクリル板製の三角形断面の地すべり模型を滑らせることにより、津波を発生させる実験を行っている。実験では、地すべり模型の形状および斜面角度を変化させている。

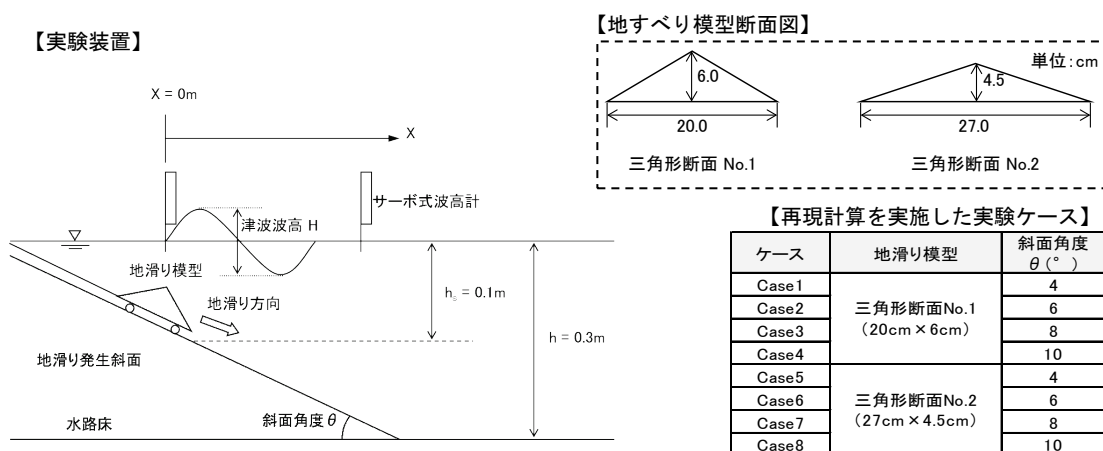


図 1.3.2-1 橋本・檀(2008)による実験装置の概略図および地すべり模型断面図

1.3.3 数値計算モデルの概要とパラメータの設定

(1) KLS モデル

1) モデル概要

佐竹・加藤(2002)は、運動学的地すべりモデル (KLS モデル) を用いて、1741 年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明している。図 1.3.3-1 に、KLS モデルの概念図を示す。(数値計算手法の解説については付属編 4.6 を参照)

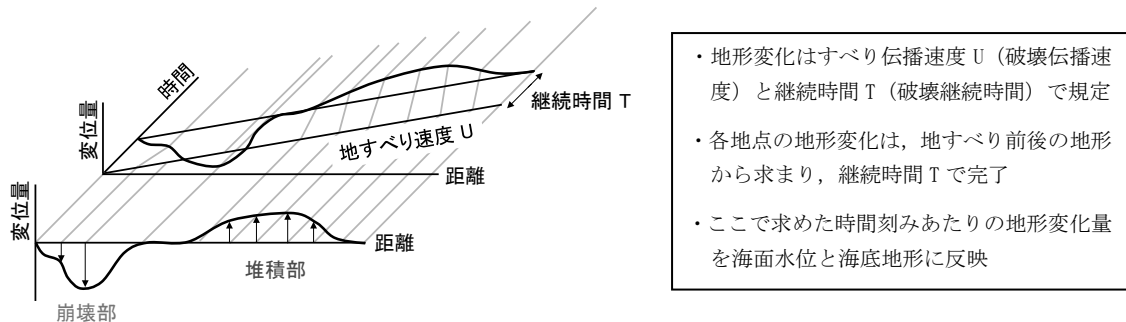


図 1.3.3-1 KLS モデルの概念図 (佐竹・加藤, 2002)

2) パラメータの設定

海底地すべりの地すべり速度および継続時間については観測事例がなく、実測も難しいことから、設定方法が確立されていない。佐竹・加藤(2002)は、パラメータスタディーを実施して渡島大島の山体崩壊 (1741 年) に伴う津波の痕跡高を説明できる地すべり速度と継続時間を検討している。しかし、これは 1 つの事例を再現できるように検討された地すべり速度と継続時間であり、汎用的なものではない。

殿最ほか(2015)は、Watts et al. (2005) が提案する地すべり速度の推定式を基に、地すべり速度、継続時間および地すべり終了時間を算定している。算定結果を、表 1.3.3-1 に示す。

$$U = \sqrt{gd} \sqrt{\frac{b \sin \theta}{d} \frac{\pi(\gamma-1)}{2C_d} \left(1 - \frac{\tan \psi}{\tan \theta}\right)} \quad (1.3.3-1)$$

$$T_z = D_z / U_z \quad (1.3.3-2)$$

$$D_z = T / \cos \theta, \quad U_z = U \sin \theta \quad (1.3.3-3)$$

$$T_{end} = T_z + (h-d) / U_z \quad (1.3.3-4)$$

ここに、 U は地すべり速度、 T_z は継続時間、 T_{end} は地すべり終了時間、 b は地すべり塊長さ、 d は初期の地すべり塊最小水没水深、 T は地すべり厚さ、 θ は斜面角度、 ψ は摩擦角 ($=0$)、 γ は地すべり塊比重 ($=1.7$)、 C_d は抗力係数 ($=1.0$)、 D_z は最大崩壊深さ、 U_z は地すべり速度の鉛直成分、 h は水路床平坦部の水深である (図 1.3.3-3 参照)。

表 1.3.3-1 地すべり速度，継続時間および地すべり終了時間の算定結果

ケース	U (m/s)	U_z (m/s)	D_z (m)	T_z (s)	T_{end} (s)
Case1	0.388	0.027	0.0601	2.222	11.823
Case2	0.475	0.050	0.0603	1.215	6.445
Case3	0.548	0.076	0.0606	0.794	4.196
Case4	0.612	0.106	0.0609	0.573	3.011
Case5	0.451	0.031	0.0451	1.434	9.218
Case6	0.551	0.058	0.0452	0.786	5.035
Case7	0.636	0.089	0.0454	0.513	3.276
Case8	0.711	0.123	0.0457	0.370	2.349

(2) 修正 KLS モデル

1) モデル概要

KLS モデルは山体崩壊に伴う津波を説明するために考案されたモデルであり，山体崩壊の場合は気中の崩壊現象が津波に寄与しないため土砂収支を考慮する必要性はないと考えられる。一方，崩壊部・堆積部ともに水面下の現象となる大規模海底地すべりに KLS モデルを適用する場合は，崩壊と堆積が同時に進行しないため，崩壊部の破壊のみが進行し，崩壊部と堆積部の土砂収支がとれないことが津波挙動に影響を与える可能性がある。

殿最ほか(2015)は，海底地すべりの崩壊部と堆積部の2箇所に破壊開始点を設け，崩壊と堆積を同時に進行させることにより，地すべり継続時間中における崩壊部と堆積部の土砂収支がとれるように修正したモデル（修正 KLS モデル）を提案している。図 1.3.3-2 に，両モデルの比較模式図を示す。

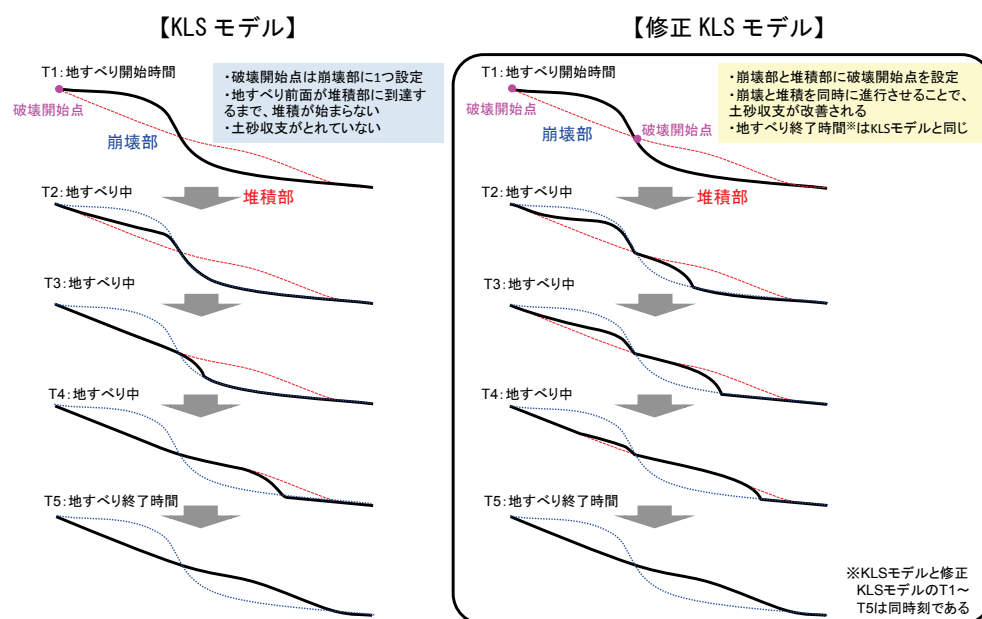


図 1.3.3-2 KLS モデルと修正 KLS モデルの比較模式図

2) パラメータの設定

修正 KLS モデルにおいても、地すべり速度と継続時間を設定する必要がある。殿最ほか(2015)は、継続時間については KLS モデルを海底地すべりに適用するにあたって設定した値と同一にしている。また、地すべり速度については、地すべり終了時間が KLS モデルと修正 KLS モデルで同一になるように設定している。

(3) 二層流モデル

1) モデル概要

二層流モデルは、上層（海水）と下層（土石流）の流体運動ならびに両層の界面に作用する力をモデル化し、地すべりに起因する界面変位を与えるものである。Kawamata et al. (2005)は、土石流の流れを再現する二層流モデルを用いて 1741 年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明している。（数値計算手法の解説については付属編 4.6 を参照）

2) パラメータの設定

二層流モデルにおけるパラメータの設定値を、表 1.3.3-2 に示す。これらのうち、下層のマニング粗度係数および界面抵抗係数は、実験あるいは実現象の再現計算での設定値を参考にしている。下層のマニング粗度係数を 0.08, 0.12, 0.4, 界面抵抗係数を 0.0, 0.2 と変化させ、最大波高の空間分布を確認した結果、『下層のマニング粗度係数 0.08, 界面抵抗係数 0.2』のケースが実験の最大波高に最も近づくことから、以降の検討ではこのケースの計算結果を用いている。ただし、橋本・檀(2008)の実験は、斜面上にアルミ製のレール、地すべりモデルの底面にステンレス製の滑車を取り付けてモデルを滑らせて津波を発生させたものであり、実際の海底地すべり現象とは異なる。そのため、実際の海底地すべりに二層流モデルを適用する際の下層マニング粗度係数とは異なることに留意する必要がある。

表 1.3.3-2 二層流モデルにおける主なパラメータの設定値

パラメータ	設定値	備考
水の密度 (g/cm^3)	1.000	一般に用いられる値
土塊の密度 (g/cm^3)	1.689	檀ほか(2005)より算出
上層のマニング粗度係数 ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)	0.01	檀ほか(2005)を参考に設定 (なめらかな木材の値)
下層のマニング粗度係数 b_f ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)	0.08, 0.12, 0.4	実験あるいは実現象の再現計算での設定値 (今村ほか, 2001; Kawamata et al., 2005; Maeno and Imamura, 2007)
界面抵抗係数 c_f	0.0, 0.2	今村ほか(2001)を参考に設定

(4) Watts モデル

地すべりによる初期水位分布を初期条件として与えて津波の伝播計算を行う方法として、Watts モデルがある。数値計算手法の解説を付属編 4.6 に示す。

Watts et al. (2005) の推定式は地すべり塊の運動様式ごとに Slide と Slump に分けられており、橋本・檀(2008)の実験は土塊を模したアクリル板製の模型を滑らせて津波を発生させていることから、以下に示す Slide の式を用いる。

$$\eta(x) = -\frac{\eta_{0,2D}}{\eta_{\min}} \left\{ \exp \left\{ -\left(\frac{x-x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} - \kappa' \exp \left\{ -\left(\frac{x-\Delta x-x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \right\} \quad (1.3.3-5)$$

$$\eta_{0,2D} = S_0 (0.0574 - 0.0431 \sin \theta) \left(\frac{T}{b} \right) \left(\frac{b \sin \theta}{d} \right)^{1.25} (1 - e^{-2.2(\gamma-1)}) \quad (1.3.3-6)$$

$$a_0 = g \sin \theta \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+C_m} \right) \left(1 - \frac{\tan \Psi}{\tan \theta} \right) \quad (1.3.3-7)$$

$$S_0 = \frac{U^2}{a_0}, \quad t_0 = \frac{U}{a_0}, \quad \lambda_0 = t_0 \sqrt{gd} \quad (1.3.3-8)$$

ここで、 X_g は初期水深が d となる位置の座標、 $\eta_{\min}$ は式(1.3.3-5)右辺の振幅を除く最大値、 C_m は付加質量係数 (=1.0)、 a_0 は初期加速度、 U は地すべり速度 (式(1.3.3-1)より)、 S_0 は特性距離、 t_0 は特性時間、 λ_0 は特性津波波長、 $\eta_{0,2D}$ は $X = X_g$ における最大水位低下量、 Δx ($=\lambda_0/2$) および κ' ($=0.625$) は分布形状パラメータである。また、ここで用いる海底地すべり津波の諸元の記号は、図 1.3.3-4 に示すとおりである。

図 1.3.3-4 は、式(1.3.3-5)～式(1.3.3-8)により各ケース (図 1.3.2-1 参照) の初期水位分布を計算した結果である。

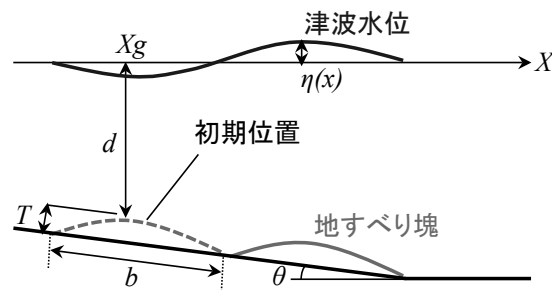


図 1.3.3-3 海底地すべり津波諸元

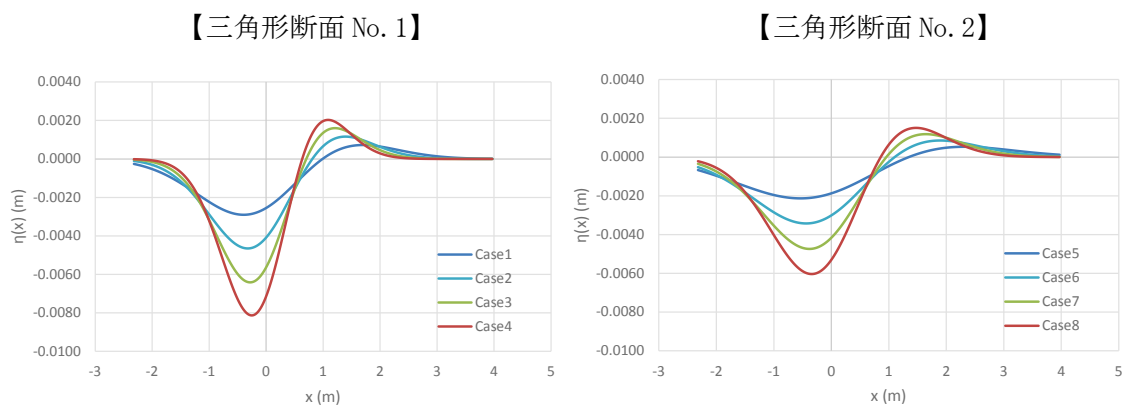


図 1.3.3-4 Watts モデルの初期水位分布

(5) 地すべり挙動再現モデル

地すべり挙動再現モデルは、橋本・檀(2008)の実験と同条件で斜面上に三角形模型をすべらせた場合に、どのような水位が得られるのかを確認するため、実験による地すべり模型の挙動を再現したモデルである。

本モデルでは、実験による三角形模型の動きを基に、計算時間間隔毎の地形変化量を算定し、これを地形および水面に与えている。三角形模型の動きは、図 1.3.3-5 に示す地すべり速度に関する実験結果を基に、三角形模型の地すべり速度を時間の関数で与えて表現している。

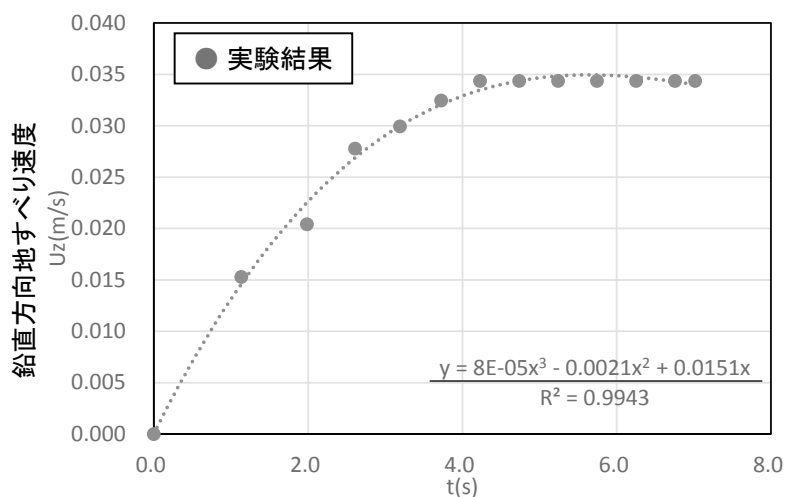


図 1.3.3-5 地すべり速度の時間変化 (Case4：三角形模型 No. 1, 斜面角度 10 度)

1.3.4 計算条件

海底地すべり模型の形状，海底地すべり模型の初期位置および斜面角度の条件は，橋本・檀(2008)の実験と同一である。

計算断面は，図 1.3.4-1 に示すように，斜面陸上部の水平長を 1m，水平床長を 1m に設定し，沖境界を自由透過境界としたものである。また，地すべり模型の停止位置は，斜面と水平面の境界に停止するものとしている。津波伝播の計算手法は，二層流モデルを除き，非線形長波理論（浅水理論）をスタッガード・リーブフロッグ法により差分化して行う一般的な方法である。計算格子間隔は 0.01m，計算時間間隔は 0.001s，マンニングの粗度係数は $0.01\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ （なめらかな木材の値）である。

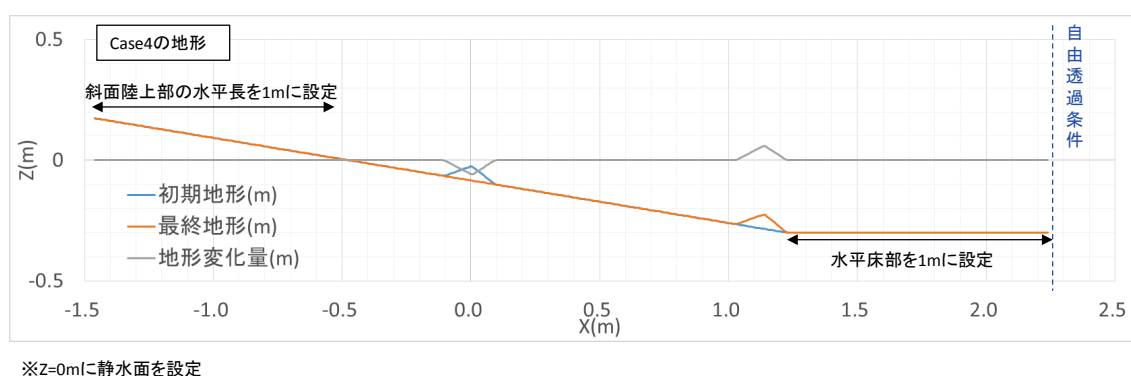


図 1.3.4-1 計算断面（Case4：三角形模型 No. 1，斜面角度 10 度）

1.3.5 計算結果

(1) 最大波高の空間分布

図 1.3.5-1 は，最大波高の空間分布について，実験結果と計算結果を比較したものである。実験では， $X \geq 0$ の範囲でしか波高が計測されていないため，各種計算モデルの計算結果もそれに合わせている。

以下に，各種計算モデルの特徴を示す。

- KLS モデルに Watts et al. (2005)の方法から推定した地すべりの地すべり速度，継続時間を用いた場合の計算結果は，実験結果に比べ約 1.5～3 倍の最大波高となり，再現性は良好でない。
- 修正 KLS モデルと二層流モデルの最大波高はほぼ同程度であり，Watts モデルは若干それらに比べ最大波高が大きくなる傾向にある。
- また，実験結果に比べ，修正 KLS モデルと二層流モデルは波源に近い場所（概ね $X < 1.0\text{m}$ の範囲）で若干小さくなる傾向にあり，Watts モデルは波源から離れた場所（概ね $X > 1.0\text{m}$ の範囲）で若干大きくなる傾向にあるが，3 モデルとも全体的に

は実験結果と一致し、概ね再現できている。

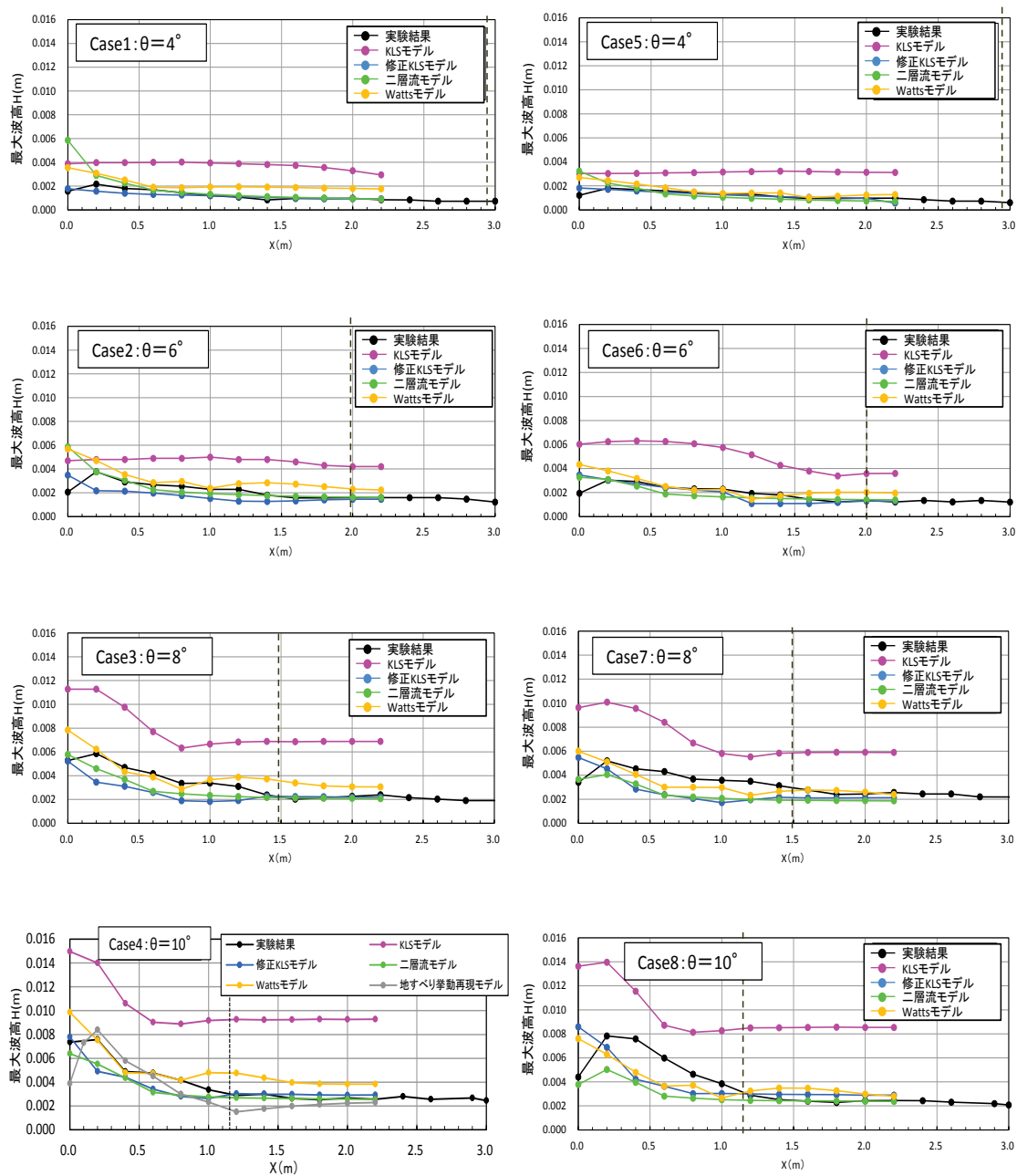
- ・地すべり挙動再現モデルは、地すべり頂位置 ($X=0.0\text{m}$) で実験結果の最大波高を大きく下回るが、地すべり頂位置から少し離れる ($X\geq 0.1\text{m}$) と実験結果と概ね同等の最大波高が得られている。

(2) 水位の時刻歴波形

図 1.3.5-2 は、最も水位変動が大きな Case4 (三角形模型 No. 1, 斜面角度 10 度) を対象に、実験結果と計算結果の水位の時刻歴波形を比較したものである。

以下に、各種計算モデルの特徴を示す。

- ・KLS モデル、修正 KLS モデル、Watts モデルは実験結果に見られない水位上昇が発生するなど、いずれも実験結果との違いが見られる。
- ・二層流モデルは、中間地点 ($X=0.6\text{m}$) で実験結果との違いが見られるが、地すべり頂位置や波源から離れた地点 ($X=1.4\text{m}$) では実験結果と概ね一致する。
- ・地すべり挙動再現モデルは、地すべり頂位置 ($X=0.0\text{m}$) での水位下降ピークが実験結果よりも小さく計算されるものの、地すべり頂位置から少し離れた地点では、水位上昇および水位下降のピークが実験結果と概ね一致し、全体的な水位変動の傾向も実験結果と概ね一致する。



※ 図中の破線は、斜面部と水平部の境界を示している

図 1.3.5-1 最大波高の空間分布の計算結果と実験結果の比較

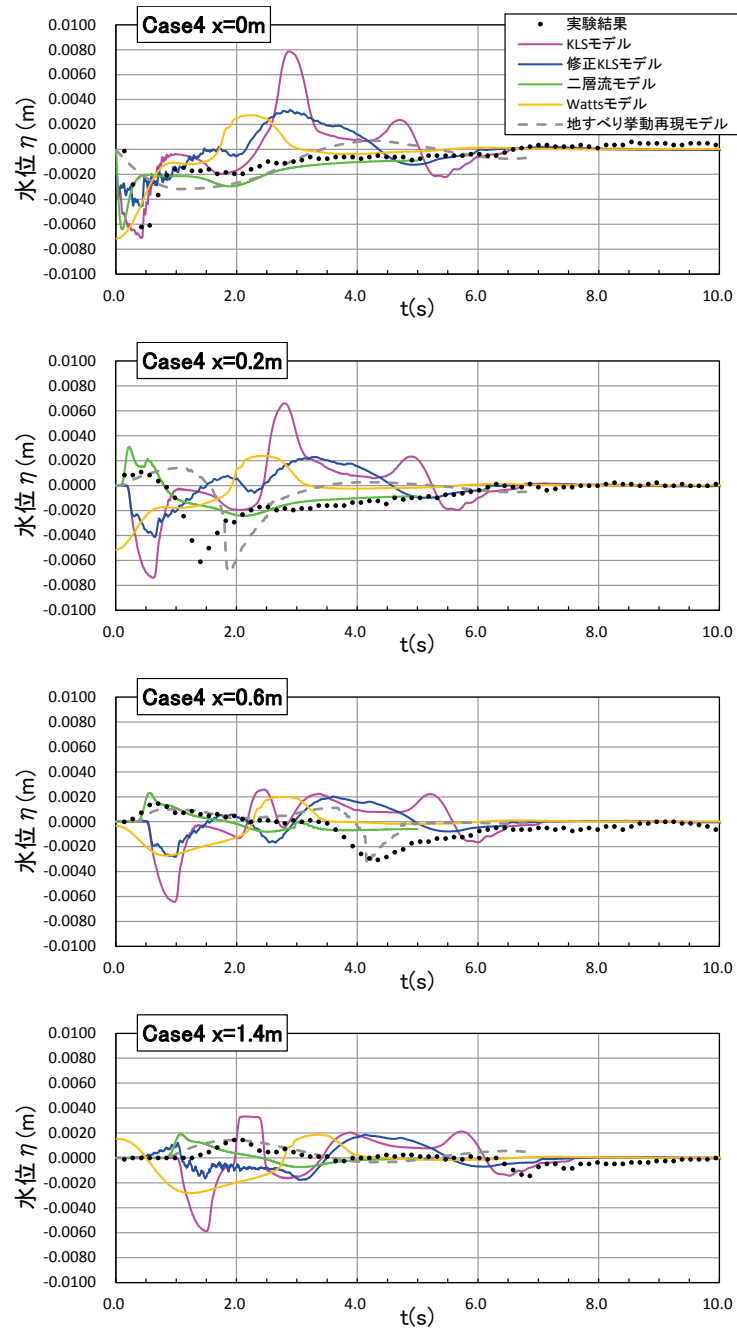


図 1.3.5-2 水位の時刻歴波形の計算結果と実験結果の比較

1.3.6 まとめ

最大波高の空間分布，水位の時刻歴波形について，橋本・檀(2008)の実験結果と各種計算モデル（KLS モデル，修正 KLS モデル，Watts モデル，二層流モデル，地すべり挙動再現モデル）による計算結果を比較した結果，以下の知見が得られた。

- KLS モデルに Watts et al. (2005)の方法から推定した地すべりの鉛直方向破壊伝播速度 U_z ，破壊継続時間 T_z を用いた場合，実験結果の水位の時刻歴波形を再現できず，他のモデルに比べて最大波高は過大（実験結果の約 1.5～3 倍）に計算される。
- Watts モデル，修正 KLS モデル（Watts et al., 2005 の方法から推定した U_z ， T_z を用いた場合）は，実験結果の水位の時刻歴波形を再現できない箇所が見られるものの，実験結果の最大波高を概ね再現できるモデルである。
- 二層流モデルおよび地すべり挙動再現モデルは，実験結果の最大波高を概ね再現し，他のモデルに比べて実験結果に近い水位の時刻歴波形が得られるモデルである。

【レビュー編 第1章 参考文献】

- 相田勇(1993)：相模湾北部に起った歴史津波とその波源数値モデル，地学雑誌，Vol.102，No.4，pp.427-436.
- 有川太郎・山田文則・秋山実(2005)：3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp.46-50.
- 有光剛・大江一也・川崎浩司(2012)：構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp. I_776-I_780.
- 有光剛・出口恭・大江一也・川崎浩司(2013)：構造物前面の水理量を用いた津波波圧算定方法の構造物群への適用性，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp. I_321-I_325.
- 中央防災会議(2002)：東南海・南海地震等に関する専門調査会（第6回），資料1.
- 檀和秀・小林秀禎・萩原淳子(2005)：三角形断面地すべりモデルによる地すべり津波波高に関する実験的研究，Memoirs of Akashi National College of Technology，No.48，pp.45-49.
- 沿岸技術研究センター(2010)：数値波動水槽の研究・開発：CADMAS-SURF/3D：数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究報告書，沿岸技術ライブラリー，No.39.
- ファム バン フック・長谷部雅伸・高橋郁夫(2012)：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.71-75.
- Grilli, S. T. and P. Watts(2005)：Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analysis, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.131, No.6, pp.283-297.
- 後藤智明・小川由信(1982)：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科資料，52p.
- 橋本貴之・檀和秀(2008)：地滑り形状を変化させた場合の海底地滑り津波に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，第63巻，第2号，pp.395-396.
- 今村文彦・後藤大地・嶋原良典・喜多村雄一・松原隆之・高岡一章・伴一彦(2001)：土砂突入による津波発生機構に関する基礎検討，海岸工学論文集，第48巻，pp.321-325.
- Kawamata, K., K. Takaoka, K. Ban, F. Imamura, S. Yamaki, and E. Kobayashi(2005)：Model of Tsunami Generation by Collapse of Volcanic Eruption：The 1741 Oshima-Oshima Tsunami, Tsunamis: Case Studies and Recent Developments, pp.79-96.
- 川崎浩司・袴田充哉(2007)：3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析，海岸工学論文集，第54巻，pp.31-35.

- 川崎浩司・松浦翔・坂谷太基(2013) : 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. 748-753.
- 川崎浩司・山口聡・袴田充哉・水谷法美・宮島正悟(2006) : 段波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 786-790.
- 木原直人・松山昌史(2010) : 津波による土砂移動問題に対する静水圧 3 次元津波解析システム C-HYDRO3D Tsunami の適用性の検討—インド洋大津波による Kirinda 港周辺における土砂移動解析—, 電力中央研究所報告, N09004.
- Kihara, N., N. Fujii and M. Matsuyama(2012) : Three-dimensional sediment transport processes on tsunami-induced topography changes in a harbor, Earth Planets Space, Vol. 64, pp. 787-797.
- 国立天文台編(2007) : 理科年表平成 20 年版, 丸善, p726.
- Maeno, F. and F. Imamura(2007) : Numerical investigations of tsunamis generated by pyroclastic flows from the Kikai caldera, Japan, Geophysical Research Letters, Vol. 34, No. 23, L23303.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie(1971) : THE DISPLACEMENT FIELDS OF INCLINED FAULTS, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- OpenFORM Foundation, OpenFOAM User Guide, <http://www.openform.org/docs/> (2015 年 5 月参照) .
- Satake, K. (2007) : Volcanic origin of the 1741 Oshima-Oshima tsunami in the Japan Sea, Earth Planets Space, Vol. 59, pp. 381-390.
- 佐竹健治・加藤幸弘(2002) : 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.
- Sato, T., R. W. Graves and P. G. Somerville(1999) : Three-dimensional finite-difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake (MJ 5.1) and the great 1923 Kanto earthquake (MS 8.2) in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No. 3, pp. 579-607.
- 鈴木宏芳(2002) : 関東平野の地下地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, 第 63 号, 19p.
- 高橋研也・富田孝史(2013) : 3 次元非静水圧流動モデルを用いた久慈湾における東北地方太平洋沖地震津波の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. 166-170.
- 富田孝史・柿沼太郎(2005) : 海水流動の三次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第 44 巻, 第 2 号, pp. 83-98.
- 富田孝史・本多和彦(2008) : 臨海部における津波解析への 3 次元非静水圧流動モデルの適用, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 231-235.

- 殿最浩司・志方建仁・村上嘉謙(2015)：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, pp. I_557-I_562.
- 土屋悟・佐藤嘉則・松山昌史・田中良仁(2013)：海底変位の計算方法が津波評価に与える影響～3次元海底地殻変動解析～，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 69, No. 2, pp. 441-445.
- Watts, P., S. T. Grilli, D. R. Tappin and G. J. Fryer(2005)：Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 131, No. 6, pp. 298-310.
- 山田伸之・山中浩明(2003)：関東平野における地下構造モデルの比較のための中規模地震の地震動シミュレーション，地震第2輯，56, pp. 111-123.
- 米山望・永島弘士(2009)：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)，第 65 巻，pp. 266-270.
- 米山望・永島弘士・戸田圭一(2008)：FAVOR 法を用いた陸上遡上津波に伴う漂流物挙動の数値解析，水工学論文集，第 52 巻，pp. 1399-1404.

第2章 波力評価、漂流物評価に関する検討

2.1 水塊落下時に作用する波力の評価に関する検討

2.1.1 構造物近傍の地盤に作用する波力に関する事例

大村ほか(2014)は、津波が防潮堤を越流して地表面に落下する際の防潮堤背面の地表面に作用する圧力を、図2.1.1-1に示す簡易計算により求めている。

簡易計算は、防潮堤越流部での水平流速 v_x を $(gh)^{0.5}$ (h は越流深、 g は重力加速度)とし、越流運動が放物落下運動と仮定して地表面落下時の流速 v 、衝突角度 θ 、越波距離 s を求め、これらを条件としてダムの自由落下式減勢工(土木学会, 1971)の動圧評価に倣い、ウォータークッションなしで最大動圧 p_d を計算するものである。

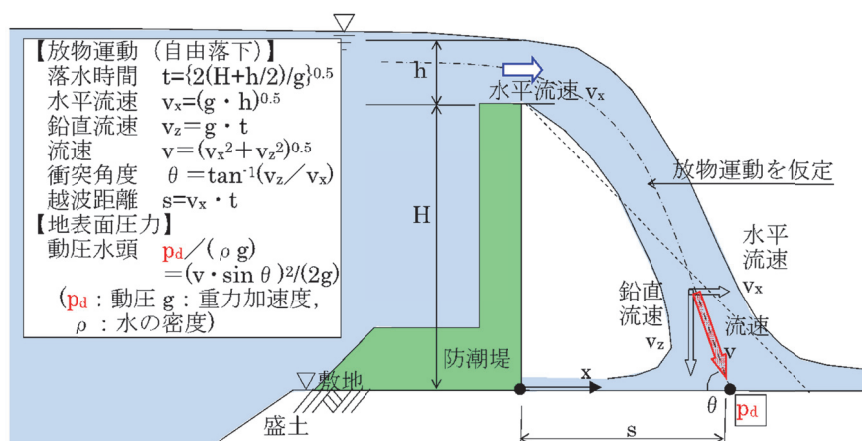


図2.1.1-1 越流水の地表面圧力の簡易計算 (大村ほか, 2014)

2.1.2 近森(1972)による自由落下水脈地点の最大動水圧

近森(1972)は、図2.1.2-1に示す実験装置を用いて、全水頭 $H_0 = 145.2 \sim 170.8$ cmの範囲内で水流を自由落下させ、図2.1.2-2に示す自由落下水脈地点の最大動水圧を得ている。ただし、近森(1972)の実験はアーチダム洪水吐からの自由落下水脈を模擬したものであり、その越流水深は全水頭の3~7%程度と小さいことに留意する必要がある。近森(1972)は、自由落下水脈地点の最大動水圧について、以下のように考察している。

- ・自由落下水脈の水クッション水深が全水頭の10%以下では、気泡の混入によって、全水頭よりも高い動水圧を発生させる場合がある。
- ・最大動水圧としては、実験の範囲内において、最大値で全水頭による圧力の1.15倍程度である。

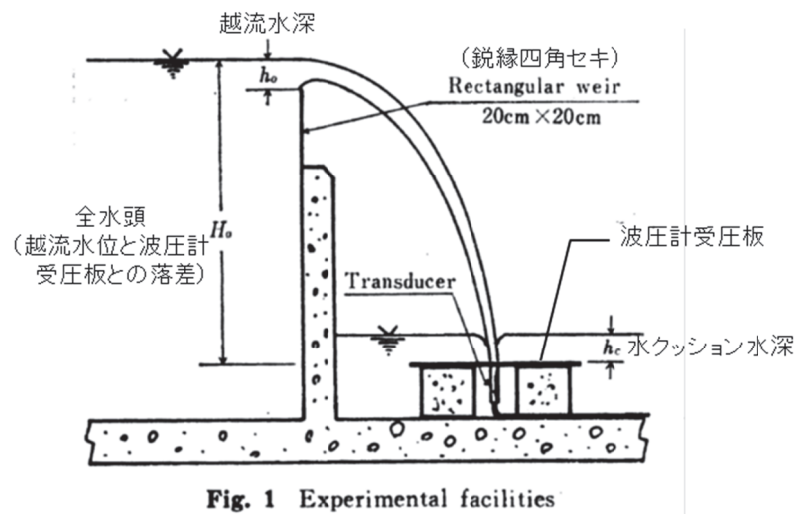


図 2.1.2-1 近森(1972)による実験装置

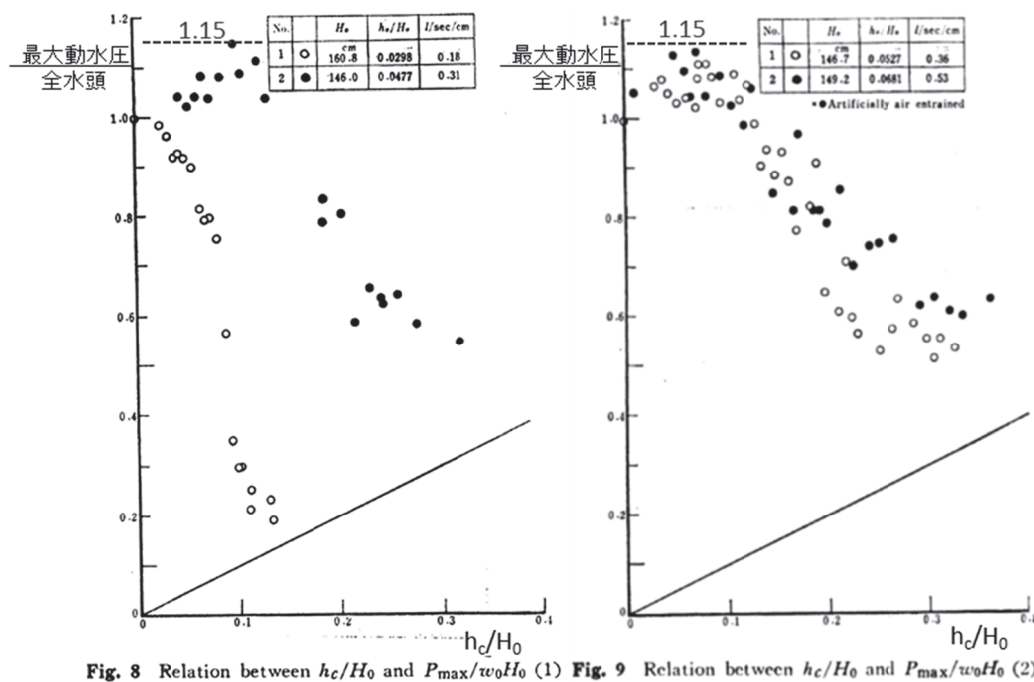


図 2.1.2-2 自由落下水脈地点の最大動水圧 (近森, 1972)

2.1.3 三井ほか(2015)による越流水脈等の簡易推定手法

(1) 越流水脈の簡易推定手法

三井ほか(2015)は、防波堤を越流する津波の越流水脈を簡易的に推定する手法を以下のように提案している。

- ・ ケーソン寸法および津波水位は既知とする (図 2.1.3-1)。
- ・ 算定図 (図 2.1.3-2) を用いて、流量係数 m , h_2/h_1 , u_{2z}/u_{2x} を読み取る。
- ・ ケーソン後端部での水脈厚 h_2 は読み取った h_2/h_1 から求め、流速 u_{2x} , u_{2z} は次式から算出できる。

$$u_{2x} = q/h_2, \quad q = mh_1\sqrt{2gh_1}$$

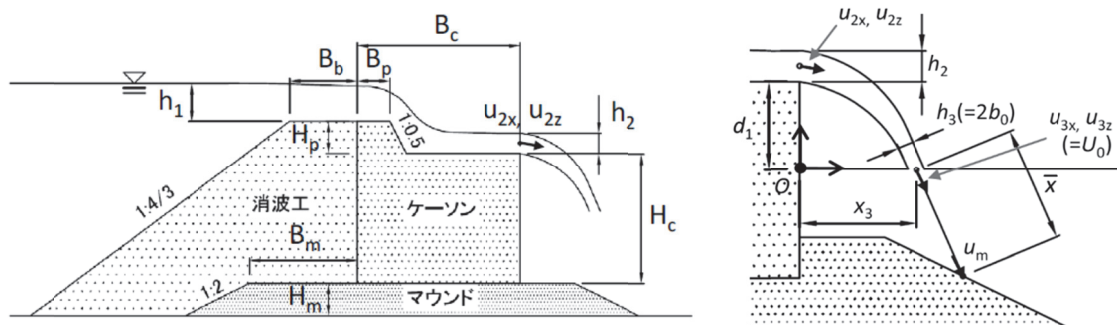
- ・ 越流水脈の軌跡はケーソン後端から水粒子が自由落下すると仮定すると、流速 u_{3x} , u_{3z} および着水位置 x_3 は以下のように求まる。

$$u_{3x} = u_{2x}, \quad u_{3z} = -\sqrt{u_{2z}^2 + 2g(d_1 + h_2/2)}, \quad x_3 = u_{2x} \frac{u_{2z} + \sqrt{u_{2z}^2 + 2g(d_1 + h_2/2)}}{g}$$

- ・ 着水位置における水脈厚 h_3 は次式となり、港内側水面下の軌跡は直線と仮定する。

$$h_3 = q / \sqrt{u_{3x}^2 + u_{3z}^2}$$

図 2.1.3-3 は、簡易推定手法により算定された水脈の軌跡であり、実験結果、数値解析結果、簡易推定手法による結果は概ね一致していることがわかる。



(左：防波堤断面，右：越流水脈)

図 2.1.3-1 越流水脈の簡易推定手法の寸法定義 (三井ほか, 2015)

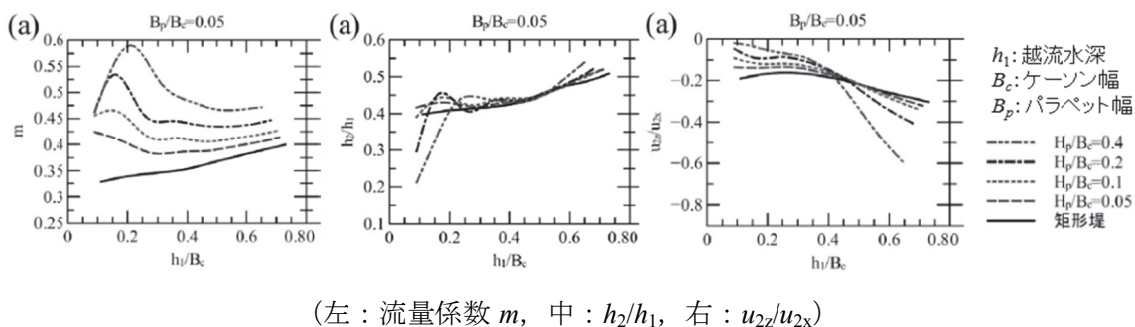


図 2.1.3-2 越流水脈の簡易推定手法の算定図の一例（三井ほか，2015）

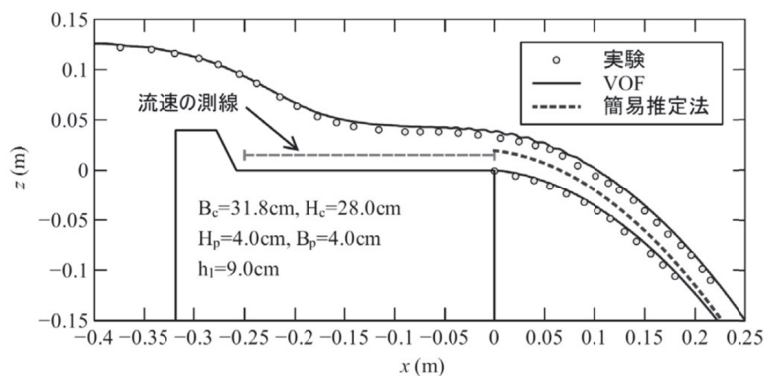


図 2.1.3-3 による越流水脈の軌跡の比較（三井ほか，2015）

(2) 打ち込み流速の推定手法

三井ほか(2015)は、港内側マウンドへの打ち込み流速を推定する手法も提案している。三井ほか(2015)の結果では、 $C_I=3.0$ とすると概ね良好な推定結果が得られている（図 2.1.3-4）。打ち込み流速の推定手法は以下のとおりである。

- ・越流水脈の港内側水面における流速 U_0 から、港内側マウンドへの打ち込み流速を推定する。
- ・Rajaratnam(1976)は、ノズルから吹き出す二次元噴流の中心軸上の流速に関して、理論解や既往の実験結果を基に、以下の式を示している。

$$u_m/U_0 = C_I/\sqrt{\bar{x}/b_0}, \quad C_I = 3.5$$

ここで、 U_0 は噴出口における流速、 u_m は中心軸上の流速、 b_0 は噴出口幅の 1/2、 $\bar{x}$ は噴出口からの距離、 C_I は実験定数である。

- ・これを越流水脈にあてはめて考えると、 U_0 は港内側水面位置での流速の絶対値、 $2b_0$ は水面における水脈厚、 $\bar{x}$ は着水位置からマウンド打ち込み位置までの距離となり、マウンドへの打ち込み流速 u_m は上式の関係から求まる。

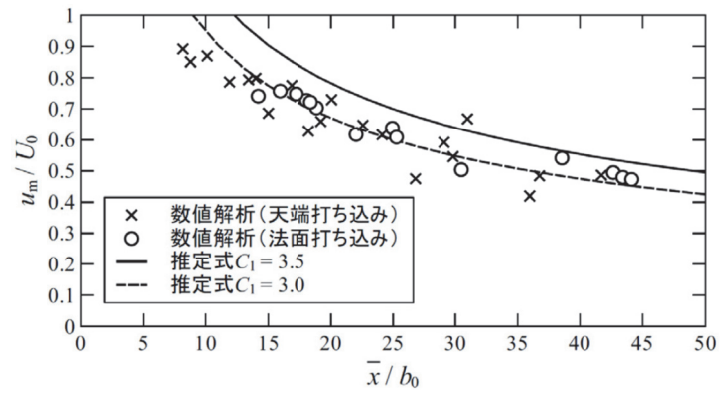


図 2.1.3-4 打ち込み流速の推定式と数値解析結果の比較（三井ほか，2015）

2.2 漂流物解析手法に関する既往解析事例

漂流物解析手法に関する既往解析事例についての整理を行った。表 2.2-1 に既往解析事例をまとめる。既往解析事例を大別すると、浅水理論に基づく平面二次元モデルの津波計算結果を使用して漂流物の移動を解く方法と、漂流物を固相で表現して流体との相互干渉を同時に計算する方法（断面二次元モデルまたは三次元モデル）に分けられる。

- ① 浅水理論に基づく津波計算結果を使用して漂流物の移動を解く方法（平面二次元モデル）
 - ・ 後藤(1983)
 - ・ 藤井ほか(2005), 藤井・今村(2010)
 - ・ 小林ほか(2005), 本多ほか(2009), 橋本ほか(2009), 橋本ほか(2010)
- ② 漂流物を固相で表現して流体との相互干渉を同時に計算する方法（断面二次元, 三次元モデル）
 - ・ 川崎ほか(2006)
 - ・ 川崎ほか(2007)
 - ・ 米山ほか(2008)
 - ・ 米山・永島(2009)
 - ・ 後藤ほか(2009)
 - ・ 池田・有川(2014)

なお、藤井・今村(2010)では、津波漂流物計算と併せて、津波漂流物の被災シナリオや被害想定手順がまとめられている。

上記の津波漂流物に関する既往解析事例より、広域の漂流物の軌跡を算定するには平面二次元解析が実用的であり、三次元解析や断面二次元解析は津波来襲時の漂流物の挙動や構造物への衝突状況を把握するための有効な手段といえる。

表 2.2-1 (1) 津波による漂流物挙動に関する既往解析事例

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
後藤(1983)	木材	平面二次元モデル	・流木の水平方向の運動を、慣性、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗、拡散で表現 ・拡散を除く4種類の力の釣り合いを決定論的に扱い、拡散は確率論的に扱う ・付加質量係数 $C_M = 1.78$, 抵抗係数 C_D はレイノルズ数とフルード数の関数で設定、拡散係数 $\kappa / (u_* h) = 0.032$ (u_*: 摩擦速度, h: 全水深) ・浅水理論による津波解析の水位と流速を使用	十勝沖地震津波 (図 2.2-1)
藤井ほか(2005)	船舶	平面二次元モデル	・船舶を個別要素法 (DEM) によりモデル化し、船舶の挙動を並進および回転に関する6自由度の運動方程式により計算 ・船舶の漂流計算に必要な流体力は、モリソン式を適用 (付加質量係数 $C_M = 1.0$, 抵抗係数 $C_D = 1.0$) ・浅水理論による津波解析の水位と流速を使用	模型実験との比較 (図 2.2-2)
小林ほか(2005)	船舶	平面二次元モデル	・津波の流況計算は浅水理論による ・船舶の漂流に関する運動方程式は主たる運動が前後、左右、ヨー方向 (鉛直軸回りの回転) のみと仮定して定式化し、船体重心を原点とする船体移動座標系を使用 ・船前後方向の船体抵抗係数 C_{DX} はシェンヘル式に基づく抵抗値を用い、船左右方向の船体抵抗係数 C_{DY} は浅水効果の影響を考慮して類似船形の実験値などを参考に設定	中央防災会議 東南海・南海地震津波 (図 2.2-3)
本多ほか(2009)	船舶	平面二次元モデル (臨海部の一部に三次元モデルを適用)	・津波の流況計算は富田・柿沼(2005)が開発した高潮津波シミュレータ (ST0C) による ・船舶の漂流に関する運動方程式は、主たる運動が前後、左右、ヨー方向のみと仮定して定式化し、船体重心を原点とする船体移動座標系を使用 ・船舶の漂流計算に必要な流体力は、モリソン式を拡張したものに基づく (慣性力係数 $C_M = 2.0$, 船体の抗力係数 $C_{DX} \cdot C_{DY}$ は建物に作用する風圧分布などを参考に設定) ・漂流物と地面や建物との衝突および漂流物相互の衝突を考慮	漂流物の運動や衝突に関するテスト計算および実地形への適用 (図 2.2-4)
橋本ほか(2009)	船舶	平面二次元モデル	・津波の流況計算は浅水理論によるスタガード・リープフロッグ差分法で解く ・船舶の漂流に関する運動方程式は、主たる運動が前後、左右、ヨー方向のみと仮定して定式化し、船体重心を原点とする船体移動座標系を使用 ・船体抵抗係数は小林ほか(2005)と同様の設定方法 ・船舶の回頭運動は船体を複数のセグメントに分割して z 軸回りのモーメントを考慮することで表現し、海底摩擦による船舶の座礁も考慮	2004 年インド洋津波 (図 2.2-5)

表 2.2-1 (2) 津波による漂流物挙動に関する既往解析事例

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
橋本ほか (2010)	船舶	平面二次元 モデル	- 橋本ほか(2009)の改良版 - 漂流船舶に作用する流体力は、モリソン式に基づく式で表現し、慣性力係数 $C_M=C_M=1.0$、船体抵抗係数 C_{DW}, C_{DY} は橋本ほか(2009)と同様の設定方法とする - 船体を複数セグメントに分割し、漂流船舶に働く回頭モーメントと、回転によって生じる抵抗モーメントを定式化し、運動方程式に適用 - 漂流船舶と陸上構造物との衝突後の挙動を新たに定式化	藤井ほか (2005) の模型実験との 比較 (図 2.2-6)
藤井・今村 (2010)	船舶	平面二次元 モデル	- 藤井ほか(2005)の拡張個別要素法 (EDEM) による解析結果を使用 - 漂流挙動実験における変動を考慮し、EDEM による確定的な位置と拡散による変動量の和として評価 (碎波前の無次元拡散係数は 0.001, 碎波後の無次元拡散係数は 0.8 と設定) - 藤井ほか(2005)の結果における構造物への衝突時間が遅れる要因は、津波波力算定時のモリソン式中の係数が小さいことが考えられる。	藤井ほか (2005) の模型実験との 比較 (図 2.2-7, 図 2.2-8)
川崎ほか (2006)	矩形 物体	断面二次元 モデル	- 二次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を使用 - 気液界面、物体の動的挙動を始め固相、気相、液相の非線形相互干渉を同時に数値解析可能 - 乱流モデルは Smagorinsky モデルに基づく LES を採用	模型実験との比 較 (図 2.2-9)
川崎・袴田 (2007)	矩形 物体	三次元 モデル	- 三次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D を使用 - 複数剛体の運動解析が可能 (個々の剛体に対する固相密度関数を導入) - 乱流量をダイナミック二変数混合モデル DTM に基づく LES モデルで評価	川崎ほか (2006) の模型実験との 比較 (図 2.2- 10)
米山ほか (2008)	木材 角柱	断面二次元 モデル	- 水面を有する流動現象を精度良く再現するために、水面挙動の予測に VOF 法、境界形状の取り扱いに FAVOR 法を用いた非圧縮流体解析手法を使用 - 運動方程式はレイノルズ方程式とし、流体体積の移流方程式は VOF 法に基づいて離散化し、移流はドナーアクセプタ法により実施 - 漂流物を剛体の移動境界として取り扱い、漂流物の移動は、まず漂流物重心の移動速度と回転速度を計算し、それに基づいて漂流物の位置と回転角を計算	池野ほか (2003) の模型実験との 比較

表 2.2-1 (3) 津波による漂流物挙動に関する既往解析事例

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
米山・永島 (2009)	木材 (円柱 および 角柱)	三次元モデル	・並進 3 自由度および回転 3 自由度を考慮した三次元数値解析手法を開発 ・流体の基礎方程式は米山ほか(2008)と同様 ・剛体運動は剛体の重心を原点とした慣性主軸座標系を設定し、漂流物重心の運動方程式と、漂流物が受ける流体力は圧力（流体内部の場合と水面を含む場合で区別）と粘着力を考慮し、漂流物の壁面への衝突も考慮	池野ほか (2003) の模型実験との 比較 (図 2.2-11)
後藤ほか (2009)	コンテナ	三次元モデル	・津波によるコンテナの挙動および壁面への衝突力を検討するために、粒子法による三次元シミュレーションを実施 ・流体解析は MPS 法を用い、運動方程式はナビエ・ストークス式を使用 ・コンテナは複数の固相粒子を剛体連結モデルによって構成し、コンテナに作用する流体力は剛体構成粒子を流体粒子と一緒に粒子間相互作用モデルに組み込むことで計算（固相粒子間の衝突力はバネ-ダッシュポットモデルを適用して計算）	有川ほか (2007) の模型実験との 比較 (図 2.2-12)
池田・有川 (2014)	コンテナ	三次元モデル	・有川ほか(2011)による固気液三層モデル（CS-2DEM）を用いて、コンテナの漂流挙動を計算 ・固気液三層モデル（CS-2DEM）は、非圧縮性の気液二相流体に対応可能となるように CADMAS-SURF/3D に改良を加えたもの（気液二相モデル）に個別要素法（DEM）を連成させている	模型実験との比 較 (図 2.2-13)

DEM : Distinct Element Method

STOC : Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Costal Areas

EDEM : Extended Distinct Element Method

DOLPHIN-2D : Dynamic numerical model Of multi-Phase flow with Hydrodynamic Interactions-2 Dimension version

DOLPHIN-3D : Dynamic numerical model Of multi-Phase flow with Hydrodynamic Interactions-3 Dimension version

LES : Large Eddy Simulation

DTM : Dynamic Two-parameter Mixed model

VOF : Volume of Fluid

FAVOR : Fractional Area/Volume Obstacle Representation

MPS : Moving Particle Semi-implicit

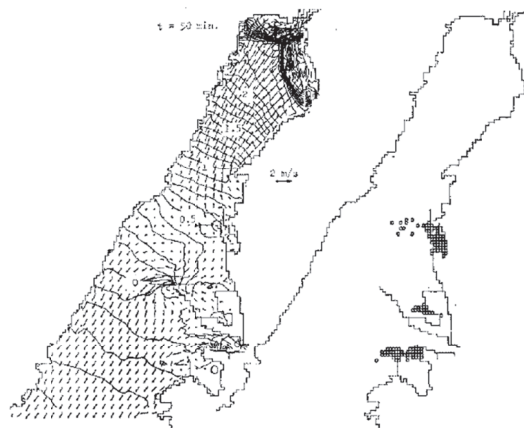


図-5 津波の流況と木材の流出に関する計算結果
(津波発生後 50 分)

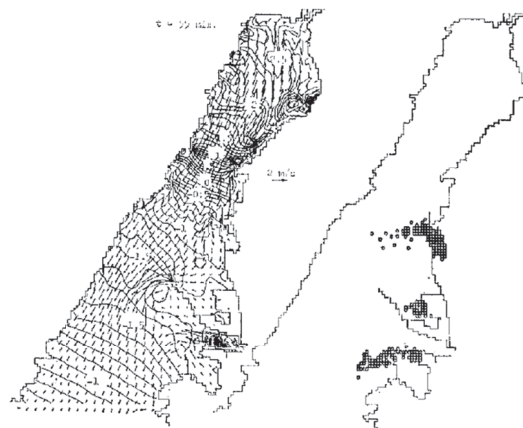


図-6 津波の流況と木材の流出に関する計算結果
(津波発生後 55 分)

図 2.2-1 津波の流況と木材の流出に関する計算結果（後藤，1983）

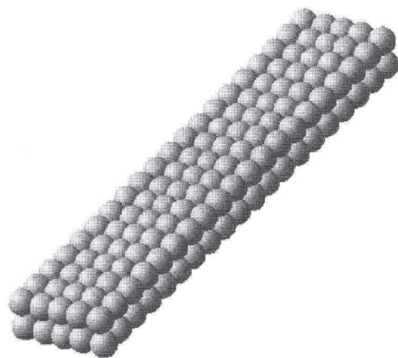


図-2 DEMによる船舶モデル

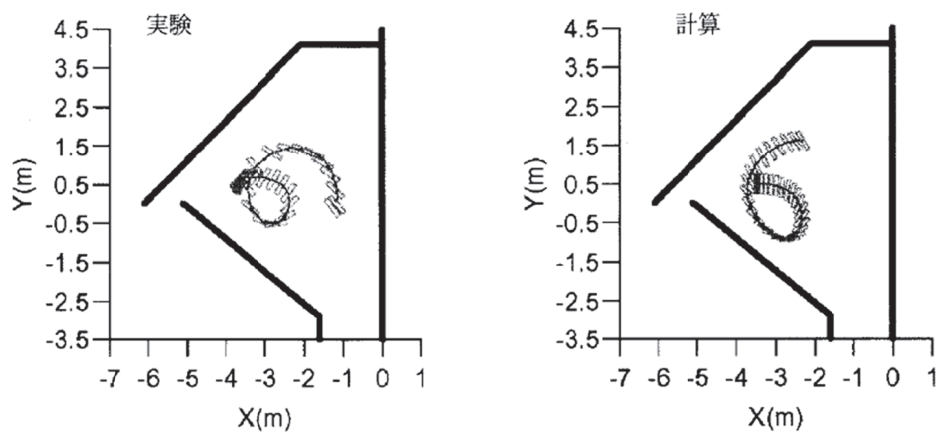


図-3 漂流軌跡（A地点：波高10 cm，周期90秒，軽荷時）

図 2.2-2 船舶モデルと漂流軌跡の比較（藤井ほか，2005）

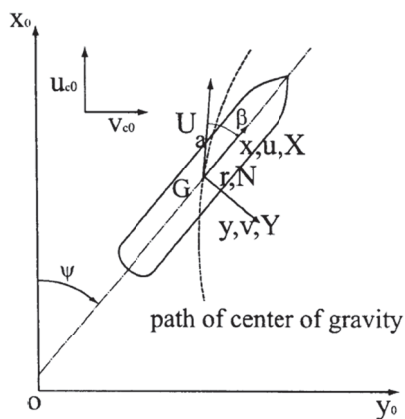


Fig. 2 System of coordinates for ship drifting calculation.

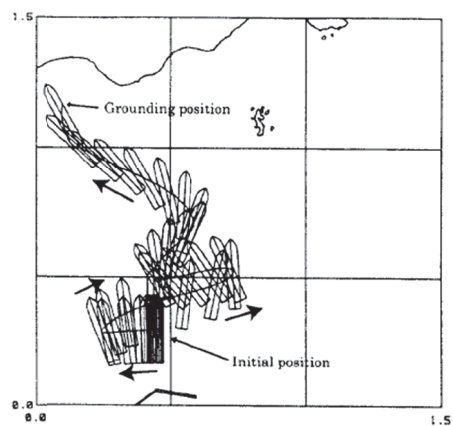


Fig. 13 Ship locus by tsunami attack in Case 2.

図 2.2-3 船体空間固定座標系と船舶の漂流軌跡結果 (小林ほか, 2005)

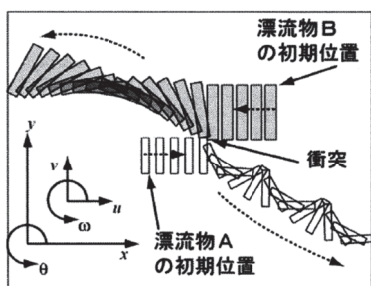


図-6 漂流物同士の衝突

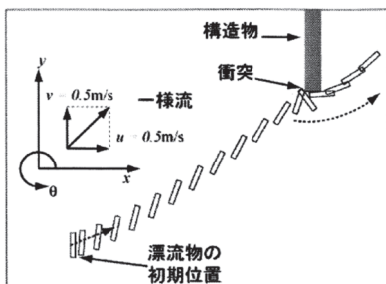


図-9 漂流物と構造物との衝突

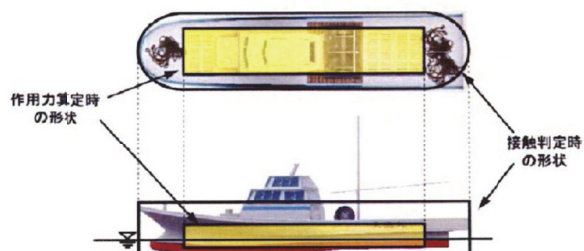
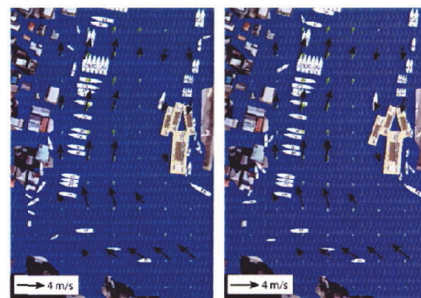
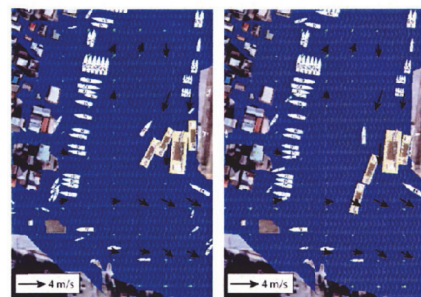


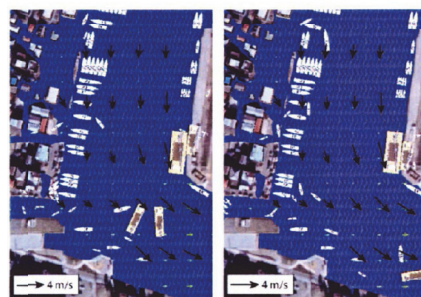
図-13 船舶形状の再現



(漂流開始後 3.5 分)



(漂流開始後 5.0 分)



(漂流開始後 6.5 分)

図-16 船舶の漂流位置および流速ベクトル
(左図：ケース1a，右図：ケース1b)

図 2.2-4 衝突モデルと実地形による計算結果（本多ほか，2009）

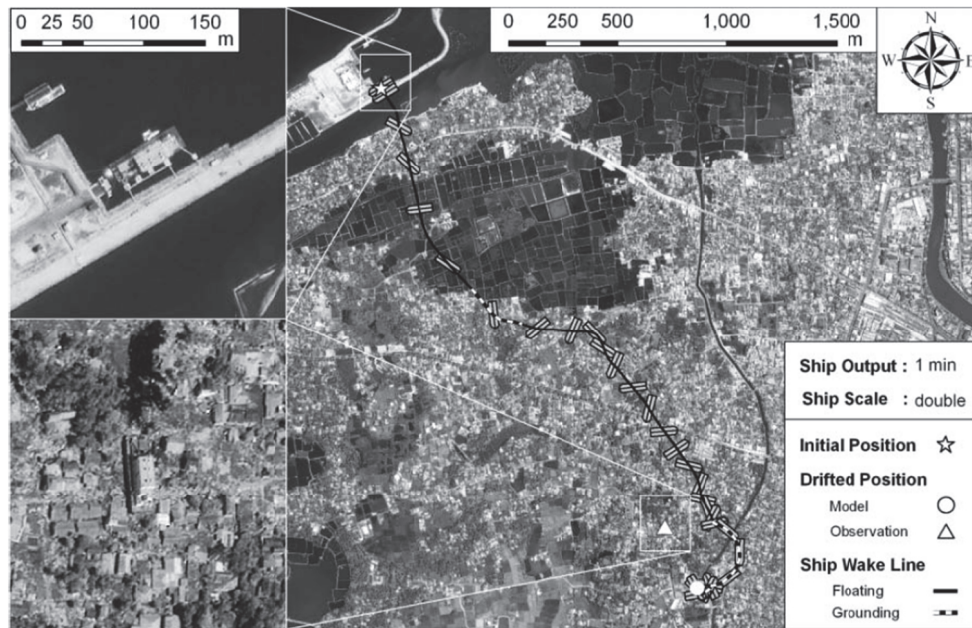


図-6 船舶の初期位置・座礁位置および津波による船舶の漂流軌跡（インドネシア・バンダアチェ）

図 2.2-5 船舶の漂流軌跡結果（橋本ほか，2009）

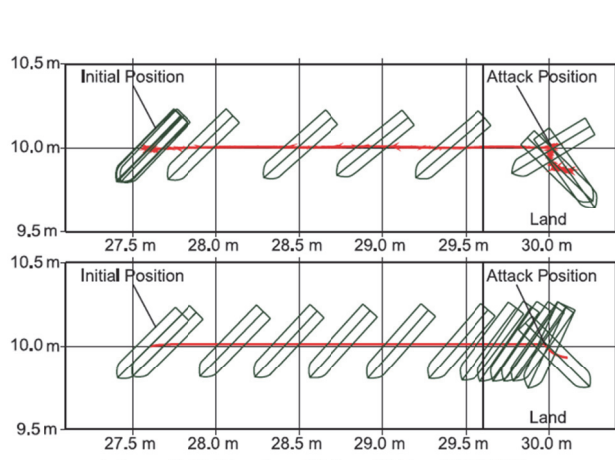


図-5 防波堤のない場合の船舶の漂流軌跡
（上：実験，下：解析）

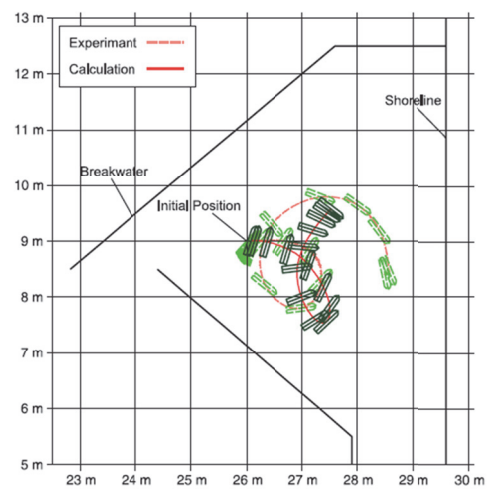


図-6 港湾内の場合の船舶の漂流軌跡

図 2.2-6 船舶の漂流軌跡結果（防波堤のない場合と港湾内）（橋本ほか，2010）

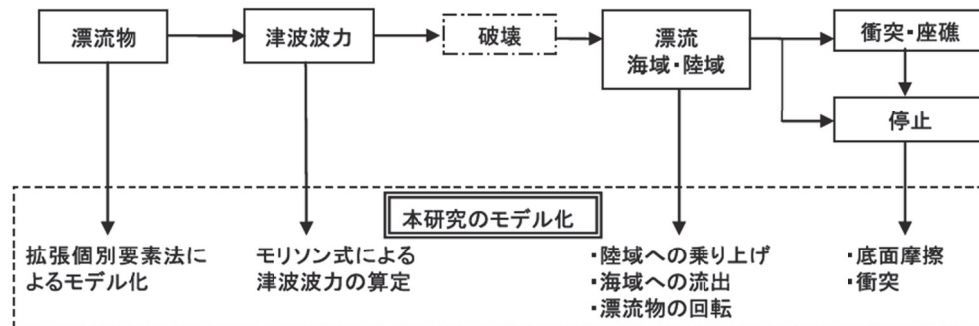


図8 漂流物の移動計算モデルに必要な諸現象と本研究での対応関係

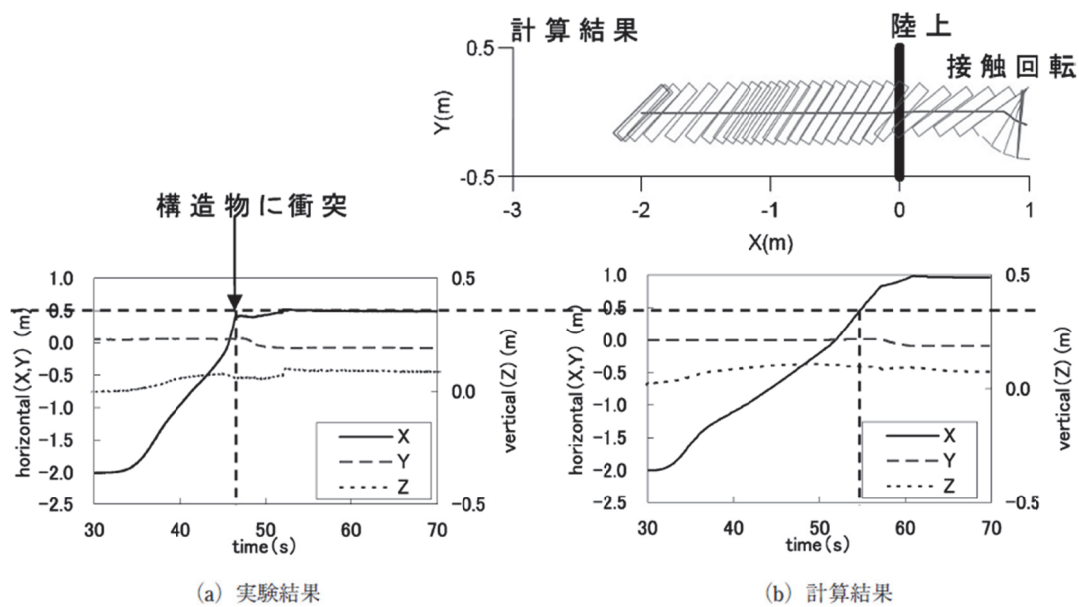


図9 漂流計算と実験による移動量の比較

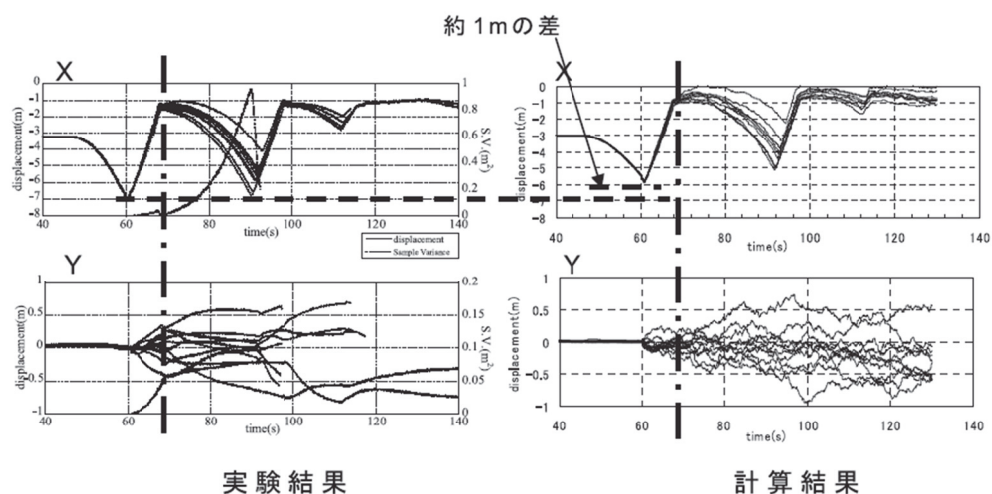


図10 漂流挙動計算結果と実験結果の比較

図2.2-7 漂流物の移動計算モデルと実験結果との比較 (藤井・今村, 2010)

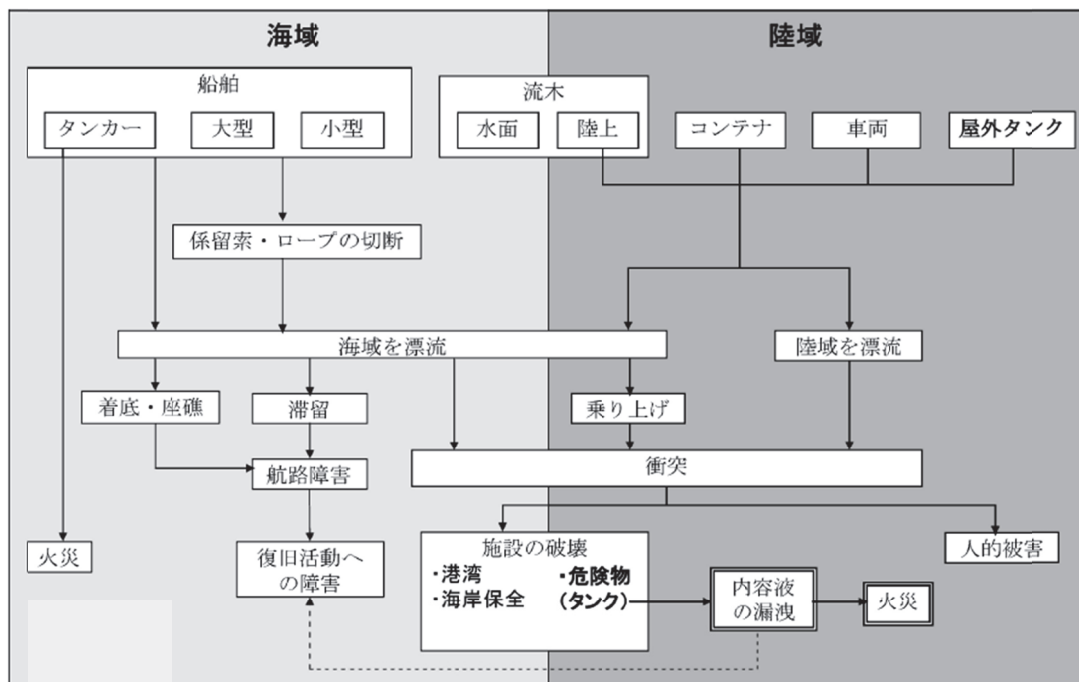


図12 津波に伴う漂流物の被災シナリオ

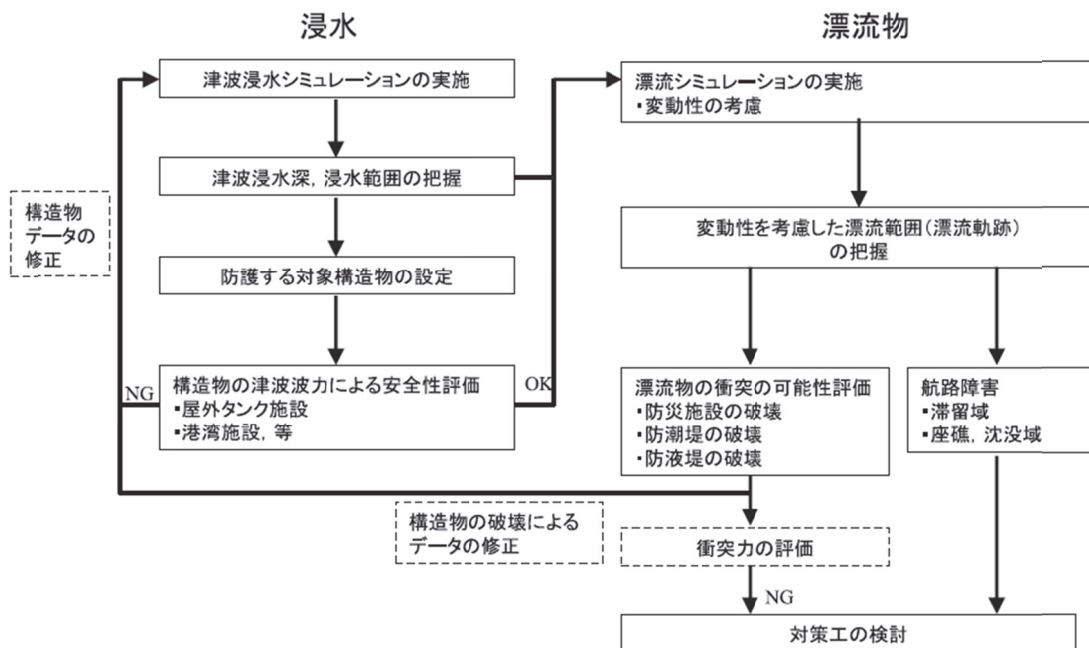


図15 津波漂流物による被害想定手順

図 2.2-8 漂流物の被災シナリオと被害想定手順（藤井・今村，2010）

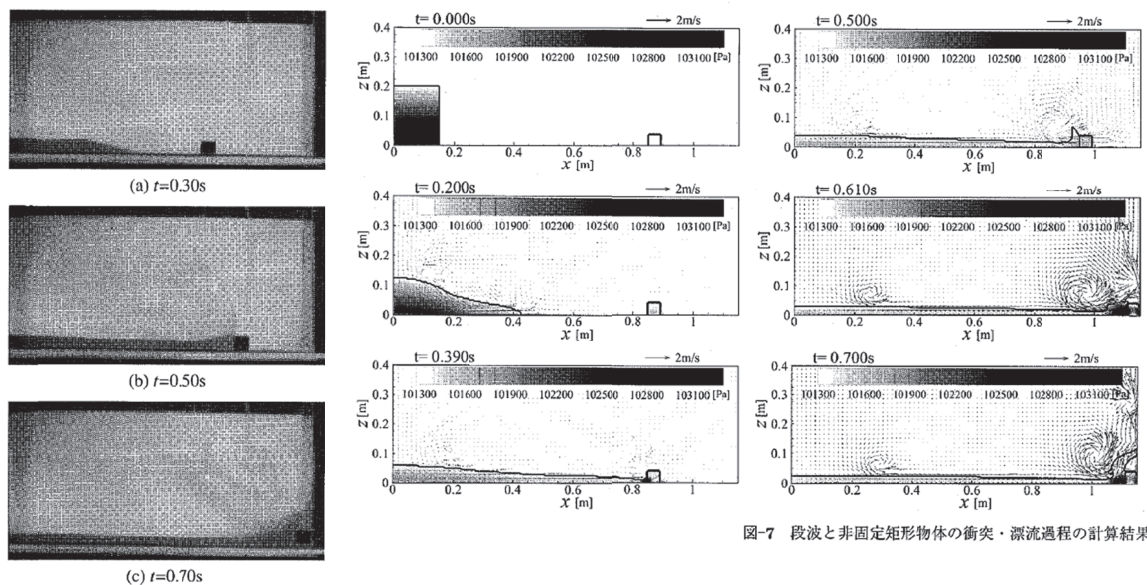


図 2.2-9 実験画像と計算結果 (川崎ほか, 2006)

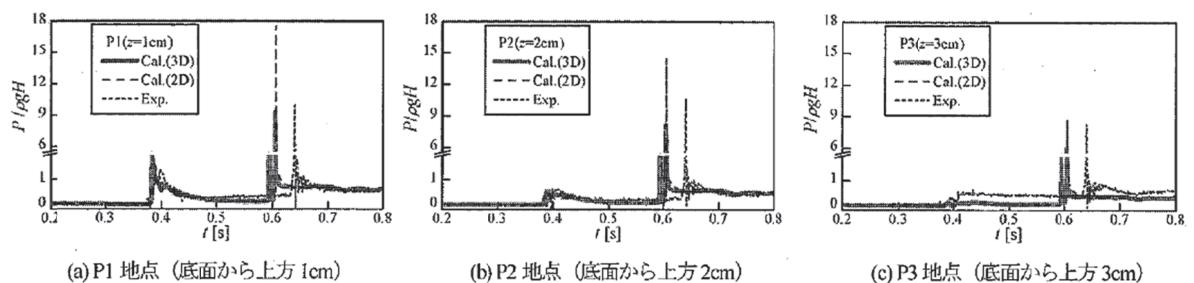
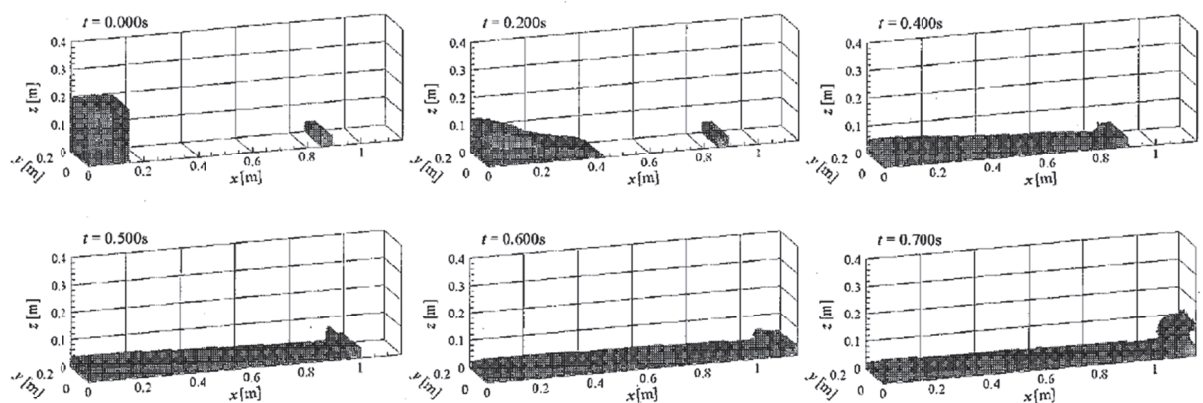


図 2.2-10 矩形剛体の衝突・漂流解析結果と波圧時系列変化 (川崎・袴田, 2007)

	空セル $\gamma^v=0.8$ $F=0.0$	空セル $\gamma^v=0.5$ $F=0.0$	空セル $\gamma^v=0.4$ $F=0.0$	空セル $\gamma^v=0.6$ $F=0.0$	
水面セル $\gamma^v=0.5$ $F=0.6$	物体セル $\gamma^v=0.0$ $F=0.0$	物体セル $\gamma^v=0.0$ $F=0.0$	水面セル $\gamma^v=0.4$ $F=0.6$		
内部セル $\gamma^v=0.7$ $F=1.0$	内部セル $\gamma^v=0.1$ $F=1.0$	内部セル $\gamma^v=0.2$ $F=1.0$	内部セル $\gamma^v=0.5$ $F=1.0$		

図-1 漂流物の取り扱い

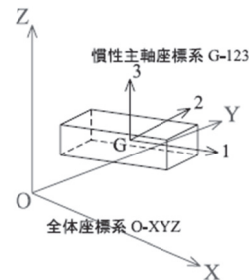


図-3 座標軸と漂流物回転軸

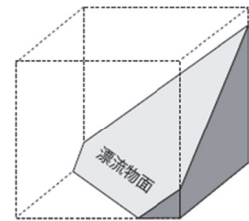


図-4 セグメントの一例

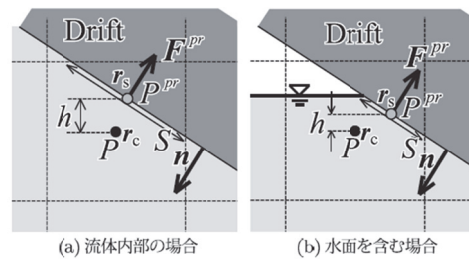


図-5 圧力の評価方法

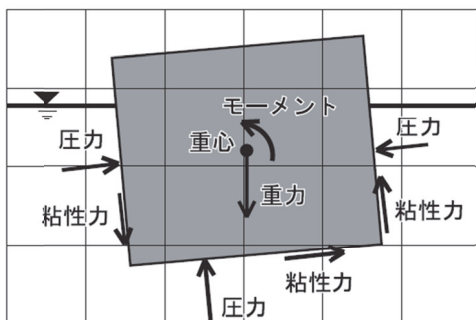


図-2 漂流物に作用する外力

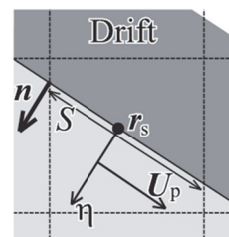


図-6 粘性力の評価方法

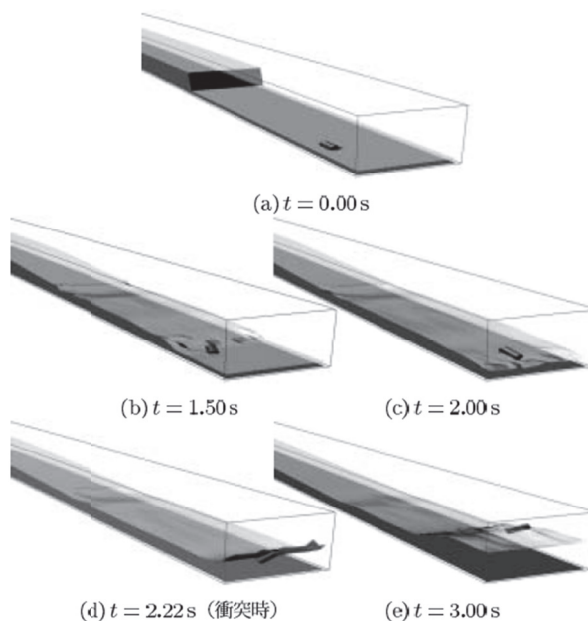


図-8 解析結果の例 (ケース1)

図 2.2-11 漂流物の取り扱い方法と解析結果の例 (米山・永島, 2009)

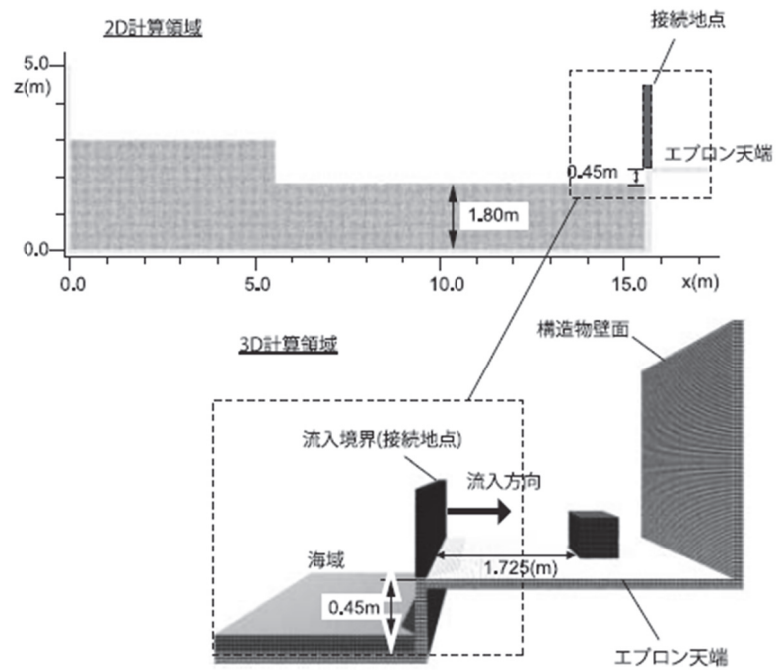


図-9 計算領域 (2D-3D 接続計算)

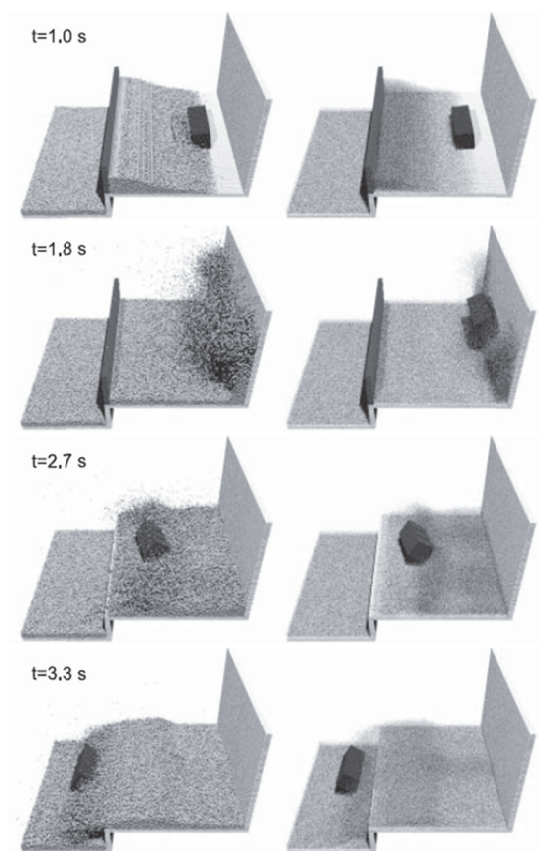


図-10 コンテナの海域への落下

図 2.2-12 2D-3D 接続計算の計算領域とコンテナ挙動結果 (後藤ほか, 2009)

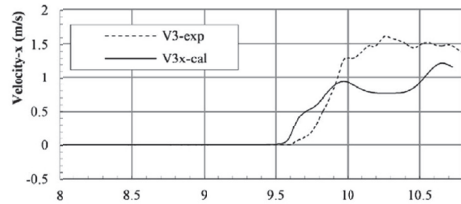
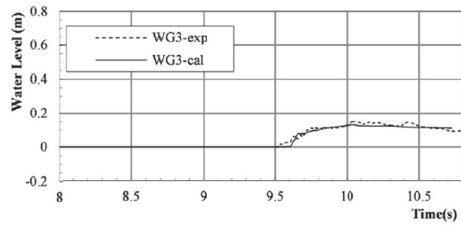


図-5 CS-2-DEM計算結果と実験結果(浸水深, 流速の比較)

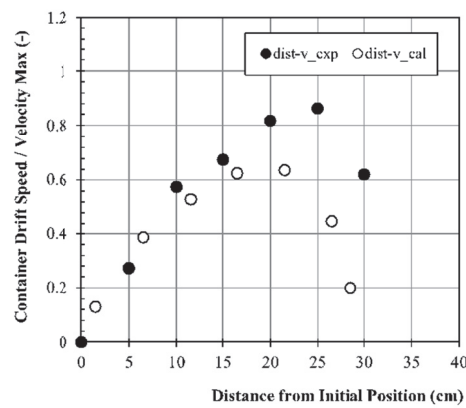


図-6 漂流速度と漂流距離の関係の比較

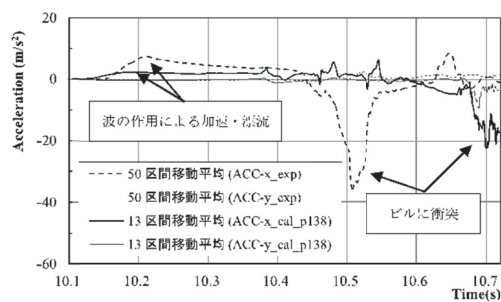


図-7 加速度の経時変化の比較

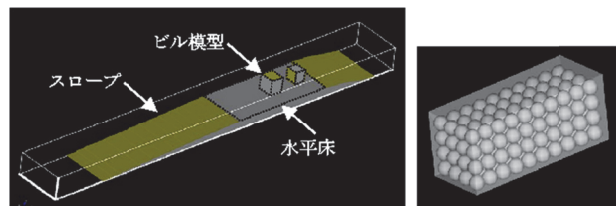


図-8 モデル設定状況(左: 計算領域, 右: コンテナ)

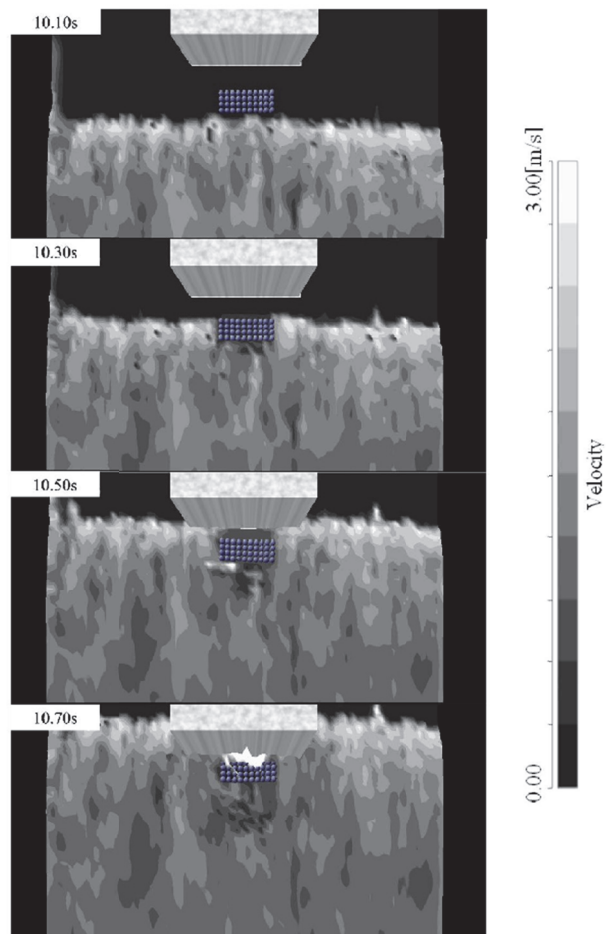


図-10 コンテナ漂流計算における流速分布

図 2.2-13 CS-2-DEM を用いたコンテナ漂流実験の再現計算結果 (池田・有川, 2014)

【レビュー編 第2章 参考文献】

- 有川太郎・秋山実・山崎昇(2011)：数値波動水槽と DEM のカップリングによる固気液 3 相計算システムの開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，第 67 巻，pp. 21-25.
- 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川信隆 (2007)：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 846-850.
- 近森邦英(1972)：自由落下水脈地点における動水圧の変動特性に関する研究，農業土木学会論文集，第 40 号，pp. 49-55.
- 藤井直樹・今村文彦(2010)：津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案，自然災害科学 J. JSNDS28-4，pp. 371-386.
- 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・武田智吉・柳沢賢(2005)：港湾における津波漂流物の数値解析，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 296-300.
- 後藤仁志・五十里洋行・殿最浩司・柴田卓詞・原田知弥・溝江敦基(2009)：粒子法によるエプロン上のコンテナ漂流挙動追跡のシミュレーション，土木学会論文集 B2(海岸工学)，pp. 261-265.
- 後藤智明(1983)：津波による木材の流出に関する計算，海岸工学論文集，第 30 巻，pp. 594-597.
- 橋本貴之・越村俊一・小林英一(2009)：津波による大型船舶の漂流挙動解析ーインドネシア・バンダアチェにおける事例ー，土木学会論文集 B2(海岸工学)，第 65 巻，pp. 316-320.
- 橋本貴之・越村俊一・小林英一・藤井直樹・高尾誠(2010)：津波来襲時における船舶漂流・座礁モデルを用いた臨海都市域危険度マップの開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 66, No. 1, pp. 236-240.
- 本多和彦・富田孝史・西村大司・坂口章(2009)：多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発，海洋開発論文集，第 25 巻，pp. 39-44.
- 池田剛・有川太郎(2014)：数値波動水槽と DEM の連成モデルを用いたコンテナ漂流挙動に関する検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，第 70 巻，pp. 331-335.
- 池野正明・田中寛好 (2003)：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 721-725.
- 川崎浩司・袴田充哉(2007)：3 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 31-35.
- 川崎浩司・山口聡・袴田充哉・水谷法美・宮島正悟(2006)：段波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 786-790.
- 小林英一・越村俊一・久保雅義(2005)：津波による船舶の漂流に関する基礎的研究，関西造船協会論文集，第 243 号，pp. 49-56.

- 三井順・松本朗・半沢稔(2015)：防波堤を越流する津波の数値解析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 71, No. 2, pp. I_1075－I_1080.
- 大村英昭・尾崎充弘・平田一穂・秋山義信・岩前伸幸・池谷毅(2014)：波形特性を再現した防潮堤に作用する津波波力実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 70, No. 2, pp. 432-437.
- Rajaratnam, N. (1976)：Turbulent Jets, Elsevier Scientific Pub.Co., Amsterdam, 304p.
- 富田孝史・柿沼太郎(2005)：海水流動の三次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第 44 巻, 第 2 号, pp. 83-98.
- 米山望・永島弘士・戸田圭一(2008)：津波来襲時の漂流物挙動解析手法の開発，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 886-890.
- 米山望・永島弘士(2009)：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)，第 65 巻，pp. 266-270.