

津波により陸上斜面上に形成される 堆積砂分布に関する水理実験

原田 賢治¹・高橋 智幸²・野島 和也³

¹ 正会員 静岡大学准教授 防災総合センター (〒422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836)
E-mail: okharad@ipc.shizuoka.ac.jp

² 正会員 関西大学教授 社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1)
E-mail: tomot@kansai-u.ac.jp

³ 正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)
E-mail: a7385@n-koei.co.jp

津波堆積物の層厚や粒度分布などの情報は、土砂を押し流す津波の水理量との相関が高いと考えられ、津波堆積物に関する詳細な調査結果からその堆積物を形成した津波外力を推定することが期待される。そのためには、津波堆積物の形成メカニズムの理解および津波移動床モデルによる再現性の向上が必要となる。本研究では、津波により陸上斜面上に形成される堆積砂分布について、砂の粒径、遡上域の勾配、外力を変化させて津波移動床の水理実験を実施した。その結果、遡上距離と堆積物形成距離との関係、入射波と堆積物の分布の関係、砂の粒径の相違による堆積物の分布の相違、単一砂と混合砂による堆積物の分布の相違について検討を行った。

Key Words: tsunami deposit, particle size, sediment distribution, sand-catcher, hydraulic experiment

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震津波では、地震および津波の想定が実際に起こった現象と比べ過小評価であった。このような地震および津波の想定が過小評価となった原因としては、既往地震および津波に関する知見や情報が不足していたことが挙げられる。特に、津波は発生頻度が低いため、歴史津波に関する資料は極めて限られている。歴史津波を調べる手法として、津波堆積物が直接的な物的証拠として有効であるが、津波来襲の有無の判定にのみ使われていたのがこれまでの実状である。

しかし、津波堆積物の層厚や粒度分布などの情報は、土砂を押し流す津波の水理量との相関が高いと考えられ、津波堆積物に関する詳細な調査結果からその堆積物を形成した津波外力を推定することが期待される。そのためには、津波堆積物の形成メカニズムの理解および津波移動床モデルによる再現性の向上が必要となる。

これまでに、津波堆積物の形成メカニズムの理解を目的とした水理実験が、長谷川ら¹⁾、菅原ら²⁾、原田ら³⁾により検討されている。長谷川ら¹⁾は、1/20 勾配の不透水性一様斜面上に津波を想定した孤立波が遡上したときに豊浦標準砂（中央粒径 0.293mm）が形成する津波堆積物

の分布を計測している。汀線付近では陸側から沖側に向けての戻り流れの強い流速の影響で堆積物が減少し、汀線から離れた遡上範囲では遡上限界に向けて堆積物が徐々に減少していくくさび状の堆積分布が確認されている。長谷川ら²⁾は、1/10 勾配の不透水性一様斜面上にゲート急開による津波段波が遡上したときに粒径の異なる 2 種類の標準砂（中央粒径 0.293, 0.358mm）が形成する津波堆積物の分布を計測している。押し波により 1/10 斜面上に運ばれた堆積砂分布は、遡上限界に向けて減少するくさび型の分布となり、その後、遡上範囲の斜面上に運ばれた堆積砂は引き波により引き戻され、水路底面と斜面の接続部付近で引き波の流れが変化する事に影響を受け再堆積する状況が確認されている。また、粒径の小さな砂がより多くより遠くまで移動している傾向にある事も示されている。さらに、斜面上で 0.2m ごとに計測した流速から、正と負の流速積分値を求め、押し波による楔型の堆積分布が正の流速積分値と関連し、引き波により引き戻され侵食された砂量分布が負の流速積分値と関連することを示している。原田ら³⁾は、1/20 勾配の不透水性一様斜面上にゲート急開による津波段波が押し波として遡上したとき、粒径の異なる 3 種類の砂（中央粒径 0.11, 0.22, 0.32mm）が形成する津波堆積物の分布と移動床初

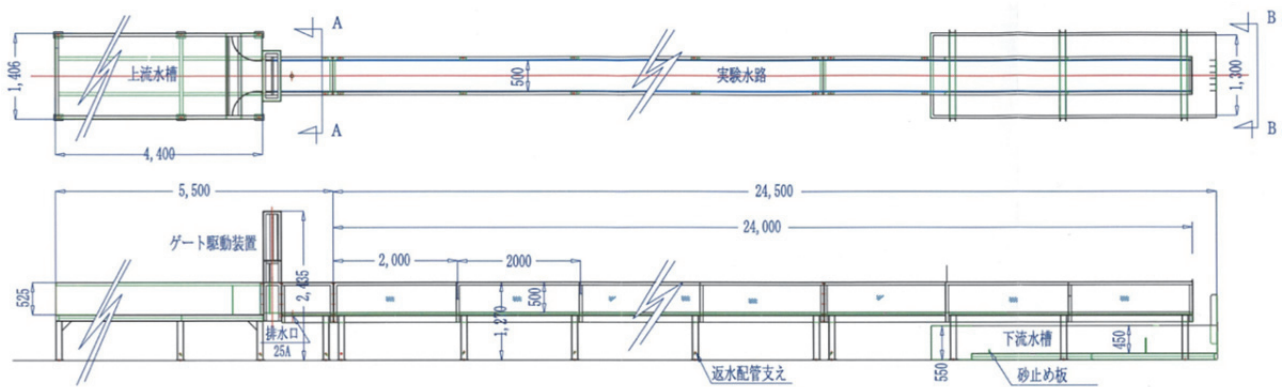


図-1 実験水路の概要

期位置の違い（海域，陸域，海域+陸域）による堆積砂の分布を計測している．粒径が大きい場合には遡上限界まで砂が運ばれず斜面下方に多くの砂が堆積し，堆積分布は急勾配のくさび型となる事を示している．また，粒径が小さい場合には，遡上限界近くまで砂が運ばれるが，汀線付近では大きい粒径に比べ少ない堆積量となり，堆積分布は緩勾配のくさび形となる事を示している．さらに，移動床初期位置については，海域由来の堆積量は少なく，陸域由来の堆積量が約 80%になっていた事を示している．これらの様な津波堆積物の形成メカニズムの理解についての検討が行われているが，単純化された条件においても十分な理解が行われているとは言えない．さらに，現象の理解を進めるための再現計算と比較可能な検証データも十分とは言えない状況である．

これらの様な背景を踏まえ，本研究では，砂の粒径，遡上域の勾配，外力を変化させた津波移動床の水理実験を実施し，水量と津波堆積物の関係を調べ，①遡上距離と堆積物形成距離との関係，②入射波と堆積物の分布の関係，③砂の粒径の相違による堆積物の分布の相違，④単一砂と混合砂による堆積物の分布の相違を明らかにすることを目的として検討を行った．

2. 水理実験

(1) 実験装置および実験条件

実験は水路長 24m，高さ 0.5m，幅 0.5m の両面ガラス張り鋼製矩形断面水路を用いて行った．片側水路端には，長さ 4.4m，高さ 0.5m，幅 1.4m の貯水タンクが接続しており，間に幅 0.5m，高さ 0.5m の急開ゲートが設置されている．図-1 に水路の概要を示す．実験では，貯水タンクに水を溜め，ゲートを急開することにより津波を模した段波を造波することができる（図-2）．

実験では，水路内に移動床斜面模型（ゲートより 5m の位置，長さ 2 m，勾配 1/20）と勾配の異なる 2 種類の陸上斜面模型（ゲートより 7m の位置，長さ 16m，勾配 1/60 (S2) と 1/90 (S1)）を設置し，移動床が水没する様に

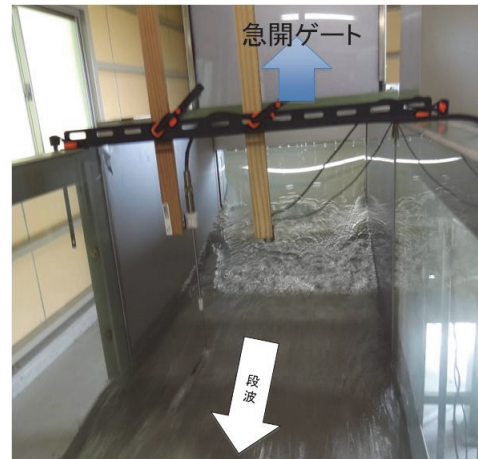


図-2 ゲート急開の状況

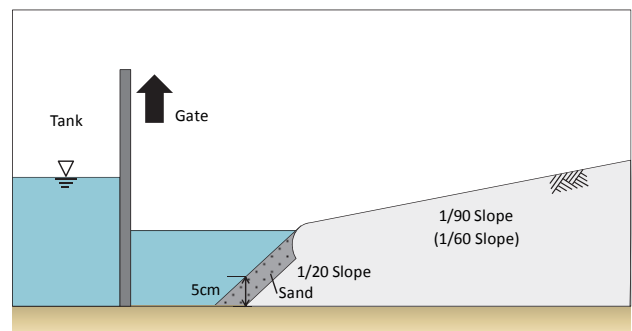


図-3 斜面模型と砂床区間の初期条件

初期水深 10cm の水を溜めてを行った．斜面模型の表面には 0.2mm の粗度を付けている．移動床斜面模型は，図-3 に示す様に，厚さ 5cm で各粒径の砂を敷き詰めることができる砂床区間としている．

ゲート急開による入射波は段波条件となる．水路内初期水深 10cm と貯留タンク水深の水位差（ ΔH ）を調整することにより入射波条件を設定した．陸上斜面勾配 1/90 の時，H1 の水位差を 14cm，H2 の水位差を 9cm とし，陸上斜面勾配 1/60 の時，H1 の水位差を 19cm，H2 の水位差を 14cm と設定した．これらの入射波条件は，各陸上斜面勾配条件において，津波遡上先端が斜面長を

表-1 砂の粒径条件

粒径#	対象粒径	粒径 (d50 : mm)
D1	大	0.600
D2	中	0.350
D3	小	0.165
D4	混合比 1	5:3:2 (大:中:小)
D5	混合比 2	2:3:5 (大:中:小)

表-2 実験ケース

#	勾配	入射波 ΔH(cm)	粒径 (d50: mm)
S1-H1-D1	1/90 (S1)	14 (H1)	0.600 (D1)
S1-H1-D2			0.350 (D2)
S1-H1-D3			0.165 (D3)
S1-H1-D4			混合比 1 (D4)
S1-H1-D5			混合比 2 (D5)
S1-H2-D1	9 (H2)		0.600 (D1)
S1-H2-D2			0.350 (D2)
S1-H2-D3			0.165 (D3)
S1-H2-D4			混合比 1 (D4)
S1-H2-D5			混合比 2 (D5)
S2-H1-D1	1/60 (S2)	19 (H1)	0.600 (D1)
S2-H1-D2			0.350 (D2)
S2-H1-D3			0.165 (D3)
S2-H1-D4			混合比 1 (D4)
S2-H1-D5			混合比 2 (D5)
S2-H2-D1	14 (H2)		0.600 (D1)
S2-H2-D2			0.350 (D2)
S2-H2-D3			0.165 (D3)
S2-H2-D4			混合比 1 (D4)
S2-H2-D5			混合比 2 (D5)

超えて越流することの無い条件として設定している。

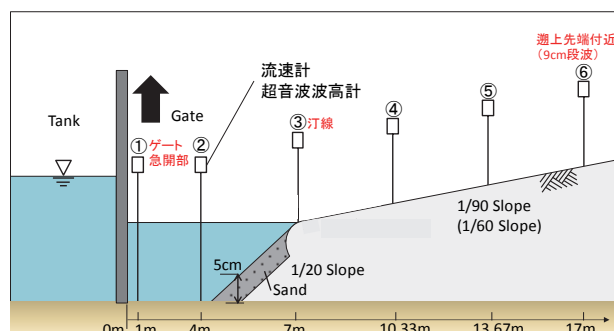
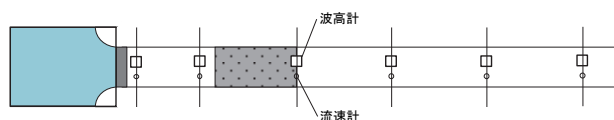
粒径の違いによる堆積砂分布への影響を検討するため、中央粒径の異なる単一粒径の条件を 3 ケースと混合比の異なる砂の条件を 2 ケースの計 5 ケースを設定した。用いた砂の粒径条件を表-1 に示す。混合砂の条件として、粒径の大中小の混合比を大粒径が多い比率（大：中：小＝5：3：2）、小粒径が多い比率（大：中：小＝2：3：5）と変えて設定した。

以上の実験条件の設定より、本研究で検討した実験ケースの一覧を表-2 に示す。

(2) 計測項目

a) 津波の水理条件計測

実験では津波の水理条件を計測するため、図-4 に例を示す様に計 6 点で水面変動と水平流速を各斜面条件において計測した。水面変動は超音波波高計（OMRON 社製）を用い、水平流速は電磁流速計（KENEK 社製；①、②）とプロペラ式流速計（中村製作所製；③、④、⑤、⑥）を用いて計測を行った。計測は各斜面条件および各入射波条件において 3 回行い、実験の再現性を確認して代表値を計測値として用いた。各実験ケースにおいて、



※①、②：電磁流速計 ※③、④、⑤、⑥：プロペラ流速計

図-4 計測機器設置位置

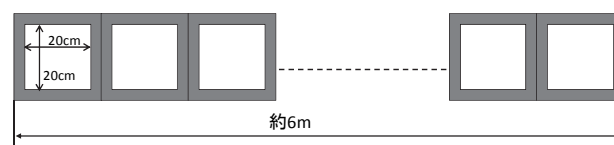


図-5 サンドキャッチャー

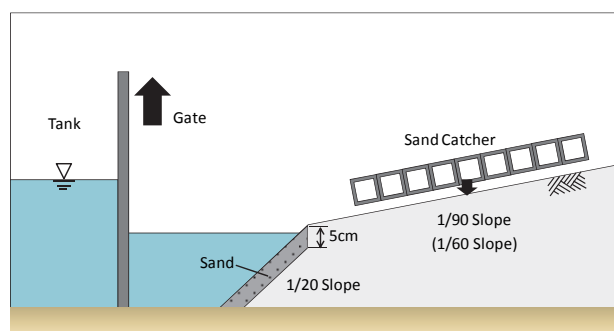


図-6 サンドキャッチャーによる砂の捕捉方法

実験の再現性は良好な結果が得られている。

b) 陸上斜面上の堆積砂分布の計測

移動床区間を津波段波が通過し、陸上斜面を遡上することにより、斜面上に堆積砂が運ばれる。この堆積砂の分布を定量的に計測するため、サンドキャッチャーを作成し砂の量の分布を計測した。サンドキャッチャーは、図-5 に示す様に、20cm×20cm のマス状の枠を水路長さ方向に約 6m の長さにつなげた梯子状のものである。このサンドキャッチャーを津波段波が斜面遡上し遡上先端部からの戻り流れによる反射波が形成されるまでに瞬時に水面から斜面に向けてかぶせることで、津波段波の水と一緒に運ばれた砂を 20cm×20cm のマスの中に捕捉することができる（図-6）。各マスの中の砂を個別に回収し、炉乾燥させて乾燥重量を計測した。各マスの乾燥重量から、陸上斜面上の堆積砂分布を求めた。

表-3 サンドキャッチャーによる堆積砂分布計測区間の例

勾配	$\Delta H(\text{cm})$	遡上限界※	計測区間※
1/90 (S1)	14(H1)	22.0	12.0–18.0
	9(H2)	17.5	9.0–15.0
1/60 (S2)	19(H1)	22.5	12.0–18.0
	14(H2)	19.5	9.0–15.0

※粒径は混合砂， ※遡上限界， 計測区間は， 急開ゲートからの距離 (m)

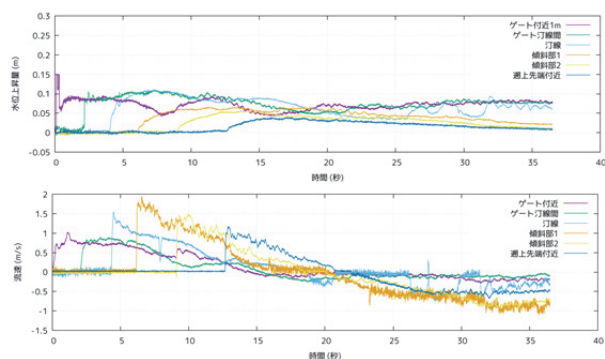


図-7 水位，流速の計測結果例
(勾配 1/90 (S1)，入射波 14cm (H1))

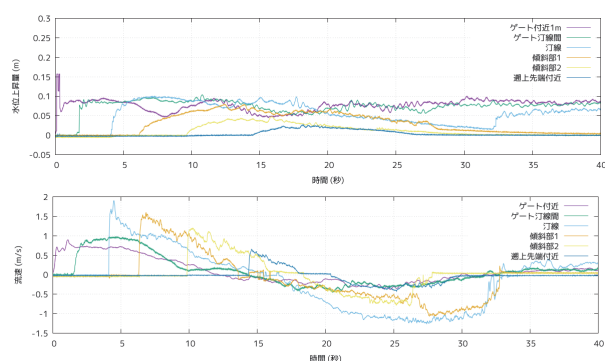


図-8 水位，流速の計測結果例
(勾配 1/60 (S2)，入射波 14cm (H2))

サンドキャッチャーは，斜面勾配条件と入射波条件により決まる遡上限界付近の位置で，堆積砂を捕捉できる様に設置位置を調整し表-3 の例の様に計測区間を設定した．津波段波の遡上限界位置では，水は到達していても粒径の条件により砂の移動が確認できない実験ケースもあったため，砂の移動が確認できた位置でサンドキャッチャーを設置し計測している．

さらに，混合砂の実験ケースでは，混合比による堆積砂の分布への影響を検討するため，各マスで回収した砂を炉乾燥させて重量を計測するとともに，ふるい試験により粒度分析を行った．

3. 実験結果

(1) 水位，流速の計測結果の例

図-7，8 に各計測地点で計測された，水位，流速の計測結果の例を示す．図-7 は勾配 1/90，入射波の 14cm の

表-4 遡上範囲と堆積砂の到達範囲

#	対象粒径	遡上※	砂到達※	砂到達率※
S1-H1-D1	大	15.0	10.0	0.67
S1-H1-D2	中		12.0	0.80
S1-H1-D3	小		15.0	1.0
S1-H1-D4	混合比 1		15.0	1.0
S1-H1-D5	混合比 2		15.0	1.0
S1-H2-D1	大	10.5	7.8	0.74
S1-H2-D2	中		9.0	0.86
S1-H2-D3	小		10.5	1.0
S1-H2-D4	混合比 1		10.5	1.0
S1-H2-D5	混合比 2		10.5	1.0
S2-H1-D1	大	15.5	12.0	0.77
S2-H1-D2	中		13.0	0.84
S2-H1-D3	小		15.0	0.97
S2-H1-D4	混合比 1		15.0	0.97
S2-H1-D5	混合比 2		15.0	0.97
S2-H2-D1	大	12.5	10.2	0.82
S2-H2-D2	中		10.5	0.84
S2-H2-D3	小		12.0	0.96
S2-H2-D4	混合比 1		12.0	0.96
S2-H2-D5	混合比 2		12.0	0.96

※遡上，砂到達は，汀線からの遡上距離 (m)，砂到達距離 (m)
※到達率は，(砂到達/遡上) により算出

時，図-8 は勾配 1/60，入射波の 14cm の時の各計測位置での水位と流速の時系列変化である．水位変化は，ゲート付近から汀線まで段波先端部の急激な水位上昇の変動が見られるが，斜面上を遡上するに従い緩やかな水位上昇の変動となっており，斜面上に広がる津波の遡上過程が表れている．流速は，段波先端部で急激な速度上昇がおこり，順次，流速低下が起こっている．また，汀線に近い所では，押し波が強い流れを発生しており，戻り流れも長い時間継続することが確認できる．これらの水位と流速の特徴が，斜面上の場所により，計測値の大小，時間の長短の違いとして確認できる．

(2) 遡上範囲と堆積砂の到達範囲

表-4 に各実験ケースにおける津波段波の遡上範囲と砂の到達範囲の結果および砂の到達率を示す．砂の到達率は，汀線からの遡上範囲に対する砂の到達した範囲として求めた．津波堆積物は津波の遡上限界範囲よりも狭い範囲に形成されると知られているが，同様の結果が本実験においても得られた．砂の粒径が大きい場合には砂到達率は小さくなり，粒径が小さい場合には到達率が高くなる．また，同じ入射波条件 (ΔH が 14cm の S1-H1 と S1-H2) に対して，斜面勾配が緩やかな場合 (S1; 1/90) の粒径の大小を比較すると距離で 5.0m，砂到達率で 0.33 の変動があるのに対して，勾配が急な場合 (S2; 1/60) の粒径の大小を比較すると距離で 1.8m，砂到達率で 0.14 の変動となり，勾配が緩やかな方が大きな変動幅となり，浸水範囲と堆積物の範囲に誤差が出やすい結果となる．また，混合砂と粒径小の砂到達範囲は同じ値となってお

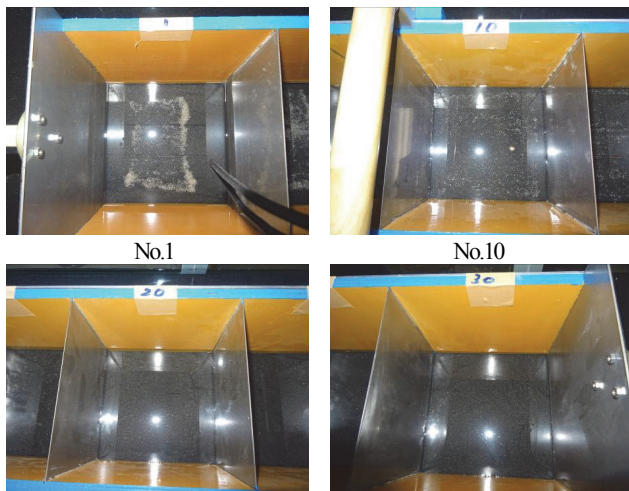


図9 サンドキャッチャーによる堆積砂の捕捉状況の例

り、細かな砂の到達範囲により堆積物の範囲がおおよそ決まることが推測される。

(3) 陸上斜面上の堆積砂

a) サンドキャッチャーによる堆積砂の捕捉状況

図-9 にサンドキャッチャーにより捕捉された堆積砂の状況の例を示す。図中の番号はサンドキャッチャーのマス番号であり、No.1 が最も汀線に近いマスであり、No.30 が最も遡上限界に近いマスとなる。No.1 のマスの中央付近に捕捉された堆積砂を確認することができる。No.30 のマスでは、砂が到達していない状況であることがわかる。このようにして捕捉した砂を回収し、炉乾燥させて乾燥重量を各マスごとに計測を行い斜面上の分布を求めている。

b) 堆積砂量分布

図-10 から図-13 に斜面上で計測された堆積砂量の分布を示す。図-10 は斜面勾配 1/90、入射波 ΔH が 14cm の時、図-11 は斜面勾配 1/90、入射波 ΔH が 9cm の時、図-12 は斜面勾配 1/60、入射波 ΔH が 19cm の時、図-13 は斜面勾配 1/60、入射波 ΔH が 14cm の時の粒径条件毎の計測結果である。各実験ケースにおいて 3 回ずつ計測した結果の平均値をプロットしている。

各図より、遡上限界範囲に向かうように堆積砂量の分布はくさび形の減少をして行く状況が確認できる。この結果は、現地の津波堆積物や既往の研究の成果^{1), 2), 3)}とも一致しており、計測位置や分布量などにより違いはあるが全ての分布計測結果でも同様の傾向が確認できる。津波の押し波により運ばれる土砂が、遡上先端に向かう津波の流速低下に伴い斜面途中から遡上先端に向けて堆積砂量が減少している。

また、単一粒径の結果を見ると、粒径（小；D3）の堆積砂量分布が最も大きい値の分布をとっており、次い

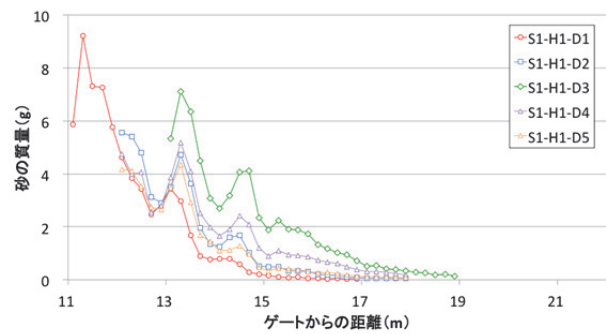


図-10 斜面上の堆積砂量の分布（S1-H1）

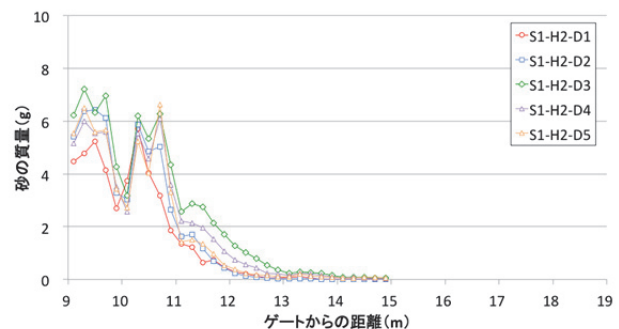


図-11 斜面上の堆積砂量の分布（S1-H2）

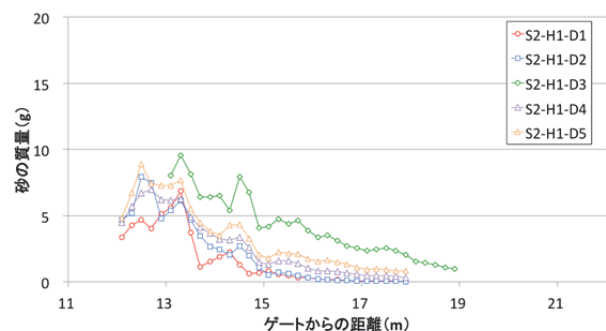


図-12 斜面上の堆積砂量の分布（S2-H1）

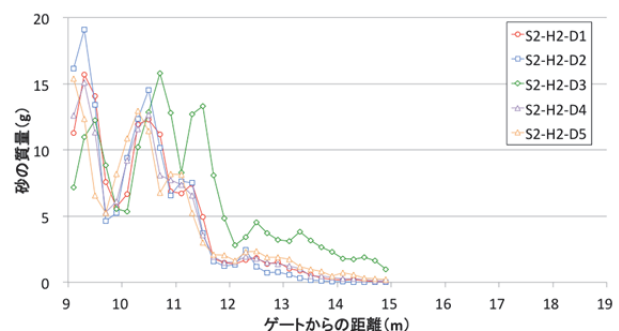


図-13 斜面上の堆積砂量の分布（S2-H2）

で粒径（中；D2）、粒径（大；D1）と堆積砂量が少なくなっている。この傾向は、原田ら³⁾の実験結果にも見られる。同じ斜面勾配条件、同じ入射波条件の時には、津波が土砂を押し流そうとする力は同じ様に作用するが、

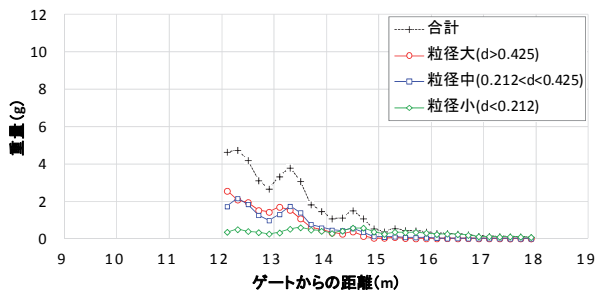


図-14 混合砂における堆積砂量の粒度別重量分布
(勾配 1/90, 入射波 14cm, 混合比 1 (大 5 中 3 小 2))

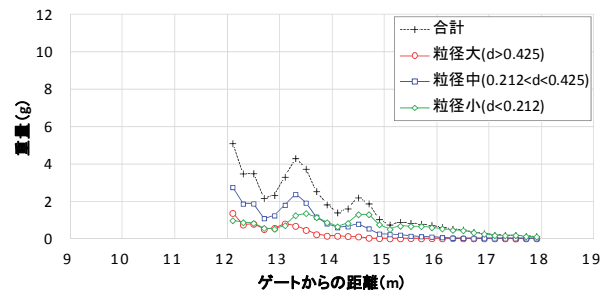


図-16 混合砂における堆積砂量の粒度別重量分布
(勾配 1/90, 入射波 14cm, 混合比 2 (大 2 中 3 小 5))

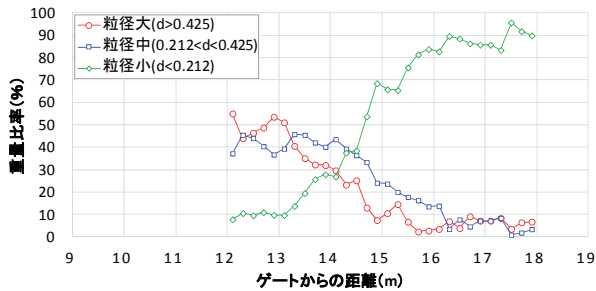


図-15 混合砂における堆積砂量の粒度別重量比率分布
(勾配 1/90, 入射波 14cm, 混合比 1 (大 5 中 3 小 2))

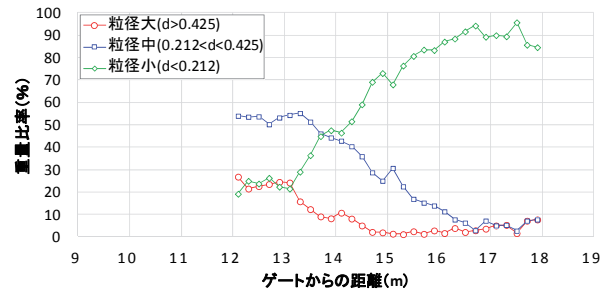


図-17 混合砂における堆積砂量の粒度別重量比率分布
(勾配 1/90, 入射波 14cm, 混合比 1 (大 2 中 3 小 5))

流される粒径が異なることにより、流されやすさ（移動限界の流速や土砂移動量）に違いが生じるため、結果としての堆積砂量の分布に違いが出ていと考えられる。また、混合砂のケース（混合比 1, D4；混合比 2, D5）を見ると、粒径（大；D1）と粒径（小；D3）の堆積砂分布の間に分布をとることが分かる。混合比 1 の粒径（大）が 5 割を占めるケースでは、単一粒径（大）の結果と比べると、より多い堆積砂量分布となっている。同様に、混合比 2 の粒径（小）が 5 割を占めるケースでは、単一粒径（小）の結果と比べると、より少ない堆積砂量分布となっている。これらの結果から、津波堆積物の供給源となる土砂の粒径の条件により、陸上に形成される津波堆積物の分布は影響を受け、中央粒径だけでなく粒度分布によっても堆積砂の分布に影響があることが確認された。

c) 混合砂条件における粒径別堆積砂量分布

混合砂の実験ケースにおいて、サンドキャッチャーで捕捉した砂の重量分布と重量比分布の結果の例を図-14 から図-17 に示す。図-14 は斜面勾配 1/90, 入射波 14cm, 混合比 1（大 5 中 3 小 2）の時の堆積砂量の粒度別重量分布を、図-15 はこの時の堆積砂量の粒度別重量比率分布の結果である。同様に、図-16 は混合比 2（大 2 中 3 小 5）の時の堆積砂量の粒度別重量分布を、図-17 は粒度別重量比率分布の結果である。サンドキャッチャーにより回収された各マスの砂をふるいにかけて粒度別の重量としている。粒度分析条件として、0.425mm と 0.212mm

のふるいを用いて、各ふるいに残った量と通過した量を計測し、粒径大中小の砂量としている。

図-14 から 17 より、混合比 1（大 5 中 3 小 2）と 2（大 2 中 3 小 5）の混合砂の堆積砂量合計の分布は多少の凹凸の差異があるが同程度の量の分布傾向となっており、その構成を粒度別に見ると粒径大（ $d > 0.425$ ）と小（ $d < 0.212$ ）について傾向が大きく異なっていることがわかる。粒径大（ $d > 0.425$ ）の分布は、混合比 1（大 5 中 3 小 2）においては 12～14m にかけて多く、比率分布でも 50%に及んでいるが、混合比 2（大 2 中 3 小 5）においては分布量が少なく、12m で 28%程度の比率が最大となっている。粒径中（ $0.212 < d < 0.425$ ）の分布は、混合比 1, 2 ともに重量分布、重量比率分布が類似した傾向となっており、粒径（中）の混合の割合が 3 と同じであることを考えると妥当な結果と考えられる。粒径小（ $d < 0.212$ ）の分布は、計測区間全体で広く計測されており、特に遡上限界付近では 90%を超える割合で粒径小（ $d < 0.212$ ）が分布している。また、混合比 1 と混合比 2 を比べると混合比 2（大 2 中 3 小 5）で多く分布しており、比率分布も混合比 2 が大きな割合を示している。

これらの結果から、混合比の異なる条件で形成された堆積砂の分布は、同じ条件の津波で堆積砂量合計では同程度の分布になったが、堆積砂を構成している粒度分布に大きな違いが確認された。このことは、津波堆積物が同程度の厚さを持つ場合でも、堆積砂の粒度構成比率から供給源の粒度分布の特徴を検討できると予想される。

4. おわりに

本研究では、津波により陸上斜面上に形成される堆積砂分布について、砂の粒径、遡上域の勾配、外力を変化させて津波移動床の水理実験を実施した。その結果、①遡上距離と堆積物形成距離との関係、②入射波と堆積物の分布の関係、③砂の粒径の相違による堆積物の分布の相違、④単一砂と混合砂による堆積物の分布の相違について検討を行った。

本研究では、押し波により運ばれてくる堆積砂を対象に水理実験を行っており、地形の起伏や河川等の影響により、強い引き波が発生しない条件における津波堆積物の形成過程に関する現象に対応していることになる。実際の津波の来襲状況を考えると引き波により土砂が運び去られることもある。今後、引き波の影響を考慮した場合において、斜面上に形成される津波堆積物の特徴と砂の粒径や遡上域の勾配、外力の関係性を明らかにする必要がある。さらに、単純な一様勾配だけでない条件での

検討も実際に津波堆積物が形成する過程を理解する上では必要になると考えられ、今後の検討課題である。

謝辞：本研究は、原子力規制庁委託事業（代表：関西大学 高橋智幸、課題名：津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発）の成果の一部である。

参考文献

- 1) 長谷川史郎, 高橋智幸, 上畑義之: 津波遡上に伴う陸域での堆積物形成に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.311-315, 2001.
- 2) 菅原正宏, 大窪慈生, 菅原大助, 箕浦幸治, 今村文彦: 津波により一様斜面上を移動する土砂および津波石に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.266-270, 2003.
- 3) 原田賢治, 今井健太郎, Tran The Anh, 藤木悦史: 津波斜面上による陸域での堆積砂形成に関する水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_251-I_255, 2011.

HYDRAULIC EXPERIMENT FOR DISTRIBUTION OF SAND DEPOSIT FORMED ON SLOPE BY TSUNAMI

Kenji HARADA, Tomoyuki TAKAHASHI and Kazuya NOJIMA

In the present study, a hydraulic experiment was carried out on the deposited sand distribution to be formed on the land slope by the tsunami. Sand of particle size, the slope of the run-up area and the tsunami conditions was investigated by the moving bed experiment. From experimental result, these were examined; the relationship between the run-up distance and deposit formation distance, the relationship of the distribution of the sediment and the incident wave, the difference in the distribution of the deposit due to the difference in particle size of the source sand, the distribution of the deposit by uniform sand and mixed sand.