# 津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定と巻上量式の提案

Estimation of Pickup Rate of Suspended Sand by Tsunami Experiment and Proposal of Pickup Rate Formula

池野正明<sup>1</sup>·吉井 匠<sup>2</sup>·松山昌史<sup>3</sup>·藤井直樹<sup>4</sup>

## Masaaki IKENO, Takumi YOSHII, Masafumi MATSUYAMA and Naoki FUJII

Pickup rate of seabed sand was estimated from the balance of suspended sediment flux obtained by tsunami experiment (Yoshii et al., 2008). Two nondimensional dominant parameters such as 'nondimensional sand grain diameter' and 'nondimensional settling velocity', were newly introduced. And a new pickup rate formula of suspended sand was proposed by using their two parameters and the Shield's number. Generally, the new pickup rate formula could reproduce the experimental results of two sand grain sizes, and pickup rates by the previous tsunami experiment (Takahashi et al., 1999) better than the conventional pickup rate formula. It was showed that the above formula was able to reproduce the experimental seabed topography deformation around a harbor due to tsunami better than the conventional pickup rate formula.

# 1. はじめに

津波による海底地形変化予測モデルが開発されたが (高橋ら,1999),実務への適用には予測精度面から検討 の余地が残されている.予測モデルの精度向上のために は、浮遊砂濃度の移流拡散方程式の底面境界条件に用い る際,海底から巻き上げられる砂の量や浮遊砂フラック ス等を精度よく見積もることができる流砂量式が必要で ある.そこで,本研究では,津波による砂移動基礎実験 から得られる流速,浮遊砂濃度の詳細な測定データ(吉 井ら,2008)に基づき海底砂の巻上量を算定する.得ら れた浮遊砂巻上量と津波外力との関係を分析して既往の 巻上量式の適用限界を示し,津波に対する新しい浮遊砂 巻上量式を提案する.提案式を津波による海底地形変化 モデルに適用し港内地形変化量の再現性を検証する.

#### 2. 津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定

(1) 浮遊砂巻上量の算定方法

吉井ら(2008)は、粒径0.08mm,0.2mmの砂を対象に、 津波1波を造波し、非砕波でシールズ数が最大1までの 砂移動実験を行い、水位、浮遊砂濃度、フラックスの鉛 直分布の時間変化を測定している.

ここでは、水深方向に鉛直積分された浮遊砂濃度とフ ラックスの時系列から海底砂の巻上量の時系列を求める 方法について検討する.鉛直断面2次元の浮遊砂濃度の 移流拡散方程式を水深方向に鉛直積分し式変形をする と、以下の水平1次元移流方程式が得られる.

1	正会員	工博	電力中央研究所	環境科学研究所
2	正会員	修(工)	電力中央研究所	環境科学研究所
3	正会員	博(工)	電力中央研究所	地球工学研究所
4	正会員	埔(工)	車電設計株式 会社	社会基盤推進部

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{z_b}^{\eta+h} c(z)dz + \frac{\partial}{\partial x}\int_{z_b}^{\eta+h} c(z)u(z)dz = P - w_s c|_{z_b} \cdots \cdots (1)$$

ここに, ηは水位, hは静水深, cは浮遊砂濃度, uは水 平流速, z<sub>b</sub>は掃流砂層と浮遊砂層の境界の高さの座標, P は砂の巻上量, w<sub>s</sub>は沈降速度である. 簡易化のため水平 方向には拡散よりも移流が支配的と仮定して水平拡散項 は省略する. 巻上量Pは以下の式で求めることができる.

$$P = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{\eta+h} c(z) dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\eta+h} c(z) u(z) dz + w_s c|_{z_b} \cdots \cdots (2)$$

式 (2) の右辺第2項に,式 (3) が適用できると仮定する.

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -\frac{1}{w_c} \frac{\partial F}{\partial t} \qquad (3)$$

ここに,Fは浮遊砂フラックス等の変数,w<sub>c</sub>は波速で ある.すなわち,津波1波が変形せずに海底の砂を巻き 上げながら岸に向かって進行する時,砂層長さが無限と 見なせる場所(砂層長さの有限性の影響を受けない場所) での浮遊砂7ラックスは,その直下での巻上量と上流か らの浮遊砂移流分との和として表される.この時に下流 のどの場所でも、フラックスの位相は異なるが津波1波 分のフラックス総量は同じになると考える.

すると,式(2)は次式になる.

$$P = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{\eta+h} c(z)dz - \frac{\partial}{w_c \partial t} \int_{z_b}^{\eta+h} c(z)u(z)dz + w_s c \Big|_{z_b} \cdots (4)$$
$$= P_c + P_{cu} + w_s c_b$$

ここに、c<sub>b</sub>は底面濃度である.

水位,濃度と水平流速の鉛直分布の基礎実験データを 上記式(4)の右辺に用いて巻上量Pを抽出する.その際, 式(4)の右辺第2項の分母にある波速w。を求める必要が ある.基礎実験時に砂層先端から1mと7mの地点で計測 された水位データの位相差から波速の実験式を作成しこ れを用いた(池野ら,2009).

上記式(4)を用いて巻上量を算定するためには、右 辺第1項,第2項の濃度とフラックスの鉛直積分値を求 める必要がある.その際の濃度と水平流速の鉛直分布関 数は、実験結果に基づき同定した鉛直分布関数を用いた (吉井ら, 2008).

### (2) 算定結果と考察

#### 1) 巻上量 Pを構成する式(4) 右辺各項の影響

図-1に、砂粒径0.08mmについて、砂層先端から7mの 地点(x=7m)における水深方向に鉛直積分した浮遊砂濃 度cとフラックスcu,巻上量算定式(4)右辺を構成する 各項の影響,底面摩擦速度に対応するシールズ数,巻上 量の時系列、および無次元巻上量とシールズ数の関係を 示す (図 (a) ~図 (f)).

巻上量を式(4)を用いて算定する際、式(4)の右辺 第1項, 第2項は時間に関して数値微分する必要がある. その際,数値微分後の不連続なパルスを防ぐために,0.2s 移動平均を施した.まず、図-1 (a) (b) によると、水深 積分した濃度は100sから上昇し始め108s付近でピークと なる.水深積分したフラックスは100sから上昇し始め105s 付近でピークとなる. 図-1 (c) によると, 式 (4) 右辺の 濃度の時間微分項Pe,沈降項ws・cbが支配的であり、両者 のピーク時刻は異なるが、その最大値は同程度である.こ れに対し、フラックスの時間微分項Pauは比較的小さいこ とがわかる.図の掲載は省略するが、砂粒径0.2mmにつ いて同様に検討すると、 $P_{a}$ 項、 $P_{a}$ 項に比べて、 $w_{a} \cdot c_{b}$ 項 が大きく支配的であった.これは、粒径0.2mmの砂の沈 降速度が大きいためである(池野ら,2009).

#### 2)シールズ数と巻上量の関係

図-1 (d) (e) (f) から, 巻上量は, 同じシールズ数で も水平流速の加速期と減速期で異なっており、減速期の 巻上量が加速期の巻上量よりも大きくなっている.この 主な原因として、流れに対する砂の巻き上げや浮遊砂の 動きの位相遅れが考えられる(本田ら, 2006). すなわ ち,流れが加速しても巻上量はすぐには増加しにくい. これに対し、実験で作用させた津波波形では、減速期の 継続時間(8s程度)に比べて加速期の継続時間(3s程度) が短く、短期間で最大流速(最大シールズ数)まで加速 している.このため、上記の位相遅れの影響が加速度期 により顕著になると推察される.

减速期

加速期 一定期

<sup>1.0</sup>7d=0.08mm

0.8



式(4)右辺の各項 (c)



#### -0.0005 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 0.0 0.1 Shield's number u<sub>u</sub>²/(sgd)

#### (f) 無次元巻上量とシールズ数 図-1 式(4)右辺の寄与分の影響(d=0.08mm, H=6cm, 2回平均)





#### 3) 巻上量の特性

図-2は、入射波高6cmと5cmで砂粒径の異なるケース について、横軸の'底面摩擦速度-移動限界摩擦速度'と、 縦軸の巻上量で実験結果を重ね書きした例である.この 際、移動限界摩擦速度は、岩垣公式(1956)を用いた。

図-2によると、砂粒径0.08mmと0.2mmとで、底面摩 擦速度-移動限界摩擦速度の値(過剰せん断力に対応)が ほぼ同じならば、巻上量もほぼ同じに見える.

これに対し、図-3は、従来の無次元巻上量(P/(sgd)<sup>0.5</sup>) と、シールズ数-限界シールズ数、の関係で整理した例で ある.この際、限界シールズ数に用いる限界摩擦速度は 岩垣公式(1956)を援用した.本来は巻上限界に対応す るシールズ数を用いるべきであるが、実験も難しく厳密 には不明であるためである.図-3の整理では、同じ入射 波高に対する粒径0.08mmと0.2mmとで、無次元巻上量 とシールズ数との関係が別々の場所に集まり差が出てお り、無次元巻上量とシールズ数には粒径依存性(砂の粒径 により無次元量が異なる意味)が現れているのがわかる.

そこで,次節で述べる次元解析を行い,巻上量を支配 する無次元支配パラメターを抽出することにする.

#### 3. 浮遊砂巻上量式の提案

#### (1) 次元解析による無次元支配パラメターの選定

海底砂の巻上量Pを支配する因子は、底面摩擦速度 $u_{b*}$ , 砂の密度 $\rho_s$ , 流体の密度 $\rho_w$ , 重力加速度g, 砂の粒径d, 動粘性係数v, 砂の沈降速度 $w_s$ の7つと考えられる.  $\pi$ 定 理によれば、巻上量Pは支配因子を用いて以下の式で表 される.

ここに、kは無次元係数, n<sub>j</sub>は支配因子の乗数である. 上記式の左辺と右辺を,質量,長さ,時間の基本単位 を用いた次元で表わすと,左辺と右辺の次元が一致する ことから,支配因子の乗数間で関係式が得られる.



$$P = k g^{1/2} d^{1/2} (u_{b^*} / (gd)^{1/2})^{n_1} (\rho_s / \rho_w)^{n_2}$$

$$(v / (gd^3)^{1/2})^{n_6} (w_s / (gd)^{1/2})^{n_7}$$
(6)

限界底面摩擦速度 $u_{b*cr.}$ を導入し、 $\rho_s/\rho_w$ を砂の水中比重sに置き換えて、左辺と右辺に振り分けて式変形して表わ すと、以下のようになる.

$$\frac{P/\sqrt{sgd} = k' \{(u_{b^*}^2 - u_{b^*cr}^2)/(sgd)\}^{n_1}}{(\nu^2/(sgd^3))^{n_2}(w_s/\sqrt{sgd})^{n_3}} \cdots (7)$$

ここに、 *k*'は無次元係数, *n<sub>j</sub>*'は無次元パラメターの乗数, *k*'中に砂の水中比重*s*の乗数の項が含まれるが,水中比重*s*が同じとみなせる砂に適用する場合には,*k*'は無次元定数とみなせる.

ここで上記の無次元パラメターについて考察する.

ι

・シールズ数Ψ;流れによるせん断力/砂の水中摩擦抵抗力.

$$\Psi = \frac{u_{b^*}^2}{sgd} \qquad (8)$$

このパラメターが大きくなると,水底砂が移動しやすく なる.水底からの砂の巻上量が増加する.

・無次元粒径D<sub>\*</sub>;砂の水中重力/流れによる粘性力
 (砂を流れと同じように動かす力),あるいは、(砂粒レイノルズ数)<sup>2</sup>/シールズ数(五十嵐,2001).

ここに、R<sub>e\*</sub>は砂粒レイノルズ数である.

$$R_{e^*} = \frac{u_{b^*}d}{v} \qquad (10)$$

式(9)のパラメターが大きくなると、流れより砂の動きが遅くなる.水底からの砂の巻上量が減少する.

無次元沈降速度; 
$$\frac{W_s}{\sqrt{sgd}}$$
 .....(11)

{砂の沈降に対する抗力/(砂の水中重力・抗力係数)}<sup>12</sup>に 相当する.抗力係数が一定の場合には,砂の沈降に対す る抵抗力と砂の水中重力の比を反映した指標となり得る.

(2) 各無次元支配パラメターの乗数同定

2. (2) 3) で述べた巻上量に及ぼす砂の粒径依存性を 解消するために,抽出した無次元支配パラメターを用い て無次元巻上量式を検討する.式(7)の右辺と左辺を 以下のように変形して,右辺と左辺に実験データをあて はめる.

 $(sgd^{3}/v^{2})^{n_{2}'}P/\sqrt{sgd} = k^{2} ((u_{b^{*}}^{2} - u_{b^{*}cr}^{2})/(sgd)(w_{s}/\sqrt{gd})^{n_{3}'-n_{1}'})^{n_{1}'}\cdots(12)$ 

図-4は、入射波高6cmと5cmで砂粒径の異なるケース について、前出の図-3の従来の整理から、横軸を上記式 (12)の右辺に整理し直し、縦軸を上記式(12)の左辺 に整理し直した実験結果の例である.

まず,横軸の砂粒径依存性を解消するため,横軸の 'シールズ数-限界シールズ数'に'無次元沈降速度'のべ き乗を掛けて整理した結果が,同じ入射波高の砂粒径 0.08mmと0.2mmとで横軸が重なるように乗数を同定し た結果,0.8となった.つぎに,縦軸の砂粒径依存性を解 消するため,縦軸の従来の無次元巻上量に'無次元粒径' のべき乗を掛けて整理した結果が,同じ入射波高の砂粒 径0.08mmと0.2mmとで縦軸が重なるように乗数を同定 した結果,0.2となった.以上,図-4に示すように,シー ルズ数と他の2つの無次元パラメターを組み合わせるこ とにより,無次元巻上量に含まれる粒径依存性が,前出 の図-3と比べると解消されている.

#### (3) 無次元巻上量式の提案

上記の無次元パラメターを用いて,無次元巻上量の算 定式案を作成し,候補を,本研究と高橋ら(1999)の実 験結果と併せて図-5(a)に示す.ただし,巻上量の本実 験結果の上限を包絡し,継続時間が長いデータが取得で きている減速期の実験データに注目して,減速期上限式 を検討した.波高が大きく巻上量が大きい入射波高5, 6cmの実験データから加速期の部分を削除し両対数表示 でプロットした.高橋ら(1999)は管水路の床に砂試料 を設置しヘッドタンクに貯めた水を所定の流量,流速で 流下させ津波を想定し流砂量を測定している.砂の粒径 は0.2mmである。本実験データの平均的な勾配(Xの乗 数に対応)はXの1乗に近くなったが,シールズ数が1程 度までの実験データに基づいてXの乗数を選定して,実 験式を高シールズ数の領域へ外挿すると,過小評価にな る恐れがある.

図-5(b)は、入射波高6cmの2種類の砂粒径に対する 本実験データ(減速期)と高橋ら(1999)の実験データ を用いて回帰式を求めた結果である.ただし、本実験の



巻上量は, 津波1波が入射する際の時系列データ(デー タ数901個×2ケース)である.一方,高橋ら(1999) の巻上量は、定常流速値の異なるケース毎の時間平均デ ータ(データ数41個)であり、両者で実験データの性質 が異なっている.破線の回帰式は、高橋らのデータ数41 個をそのまま用いた場合である.実線の回帰式は、両者 の実験データの重みを統一するために高橋らのデータ数 を22倍して用いた場合である.破線では、高橋らのデー タ数が本実験よりも圧倒的に少ないため、YはXの1乗に 近くなるが、両者のデータ数を901個と同じにした実線 では、YはXの2乗に近くなっている.図-5を参考に、無 次元巻上量式を作成すると以下のようになる.図-5(a) 中のXの2乗(n=2)に比例する無次元巻上量式(13)が, 高橋らのデータを含めた実験結果を総合的に説明できる と判断できる. ただし, 図-5 (a) 中の実験データとの対 応から無次元巻上量式(13)中の係数aの候補は0.10~ 0.2 (*Y*=*aX*<sup>2</sup>) と推定されるが,係数*a*の最適値を図-5 (a) から同定するのは難しい. そこで,数値計算を用いて係 数aの最適値を同定する.

・本研究における無次元巻上量式

 $P/\sqrt{sgd} = a(v^2/sgd^3)^{0.2} \{(w_s/\sqrt{sgd})^{0.8}(\Psi - \Psi_{cr_s})\}^2 \cdots (13)$ 

・高橋ら(1999)の無次元巻上量式

 $P/\sqrt{sgd} = 0.012\Psi^2 \dots (14)$ 

(4) 海底地形変化モデルによる新巻上量式の検証と係 数同定

提案式を海底地形変化モデルに適用し,粒径0.08mm の砂を用い港口部で浮遊砂の巻上が卓越する条件での港 内地形変化量の実験結果(藤井ら,2009)の再現性を検 証するとともに係数aの最適値を同定した.数値計算は 高橋ら(1999)の非線形長波理論による流動支配方程式, 浮遊砂層の流砂連続式,掃流砂層の地形変化連続式を用



(a) 加速期を除いた無次元巻上量と無次元パラメターとの関係



図-5 無次元パラメターを用いた無次元巻上量式の検討



図-6 数値計算による地形変化量の比較からみた浮遊砂巻上量 係数aの同定

いた. 掃流砂量の算定には,吉井ら(2008)の検討で有 効性が確認されている芦田・道上式(1972)を用いた. 実験内容や数値計算方法の詳細説明は藤井ら(2009)に 譲る.

図-6は、新浮遊砂巻上量式を適用した本海底地形変化 モデルと従来の高橋ら(1999)の海底地形変化モデルに よる港湾内外の侵食・堆積量の計算値と実験値との比を 比較したものである.本海底地形変化モデルでは、図-5 (a)で示した結果に基づき、巻上量式(13)右辺中の係 数*a*を0.10,0.15,0.20に変化させて地形変化量を比較した.

実験結果によれば、モデル港湾港口部では、シールズ 数3~4程度の津波の大流速が発生し侵食が顕著となり、 港口部から巻き上げられた多量の砂が浮遊砂となって港 内に流れ込み、港湾中央部に堆積した.図-6横軸の数字 は、港湾内外の侵食・堆積量を算定するための領域区分 番号で、藤井ら(2009)を参照されたい.高橋ら(1999) の海底地形変化モデルでは、侵食・堆積量が全体的に過 大評価になっている.本海底地形変化モデル間を比較す ると、a=0.10の場合は、侵食・堆積量が全体的に若干過 小評価、a=0.20の場合は全体的に若干過大評価となって おり、a=0.15の場合の再現性が最もよい.

#### 4.結 論

- (1) 既往のシールズ数のみをパラメターとした整理では、 無次元巻上量の特性に砂の粒径依存の影響が含まれる。
- (2)次元解析により、シールズ数以外に無次元巻上量に 影響を及ぼす2つの支配パラメター(無次元粒径と無 次元沈降速度)を用いて新たな巻上量式を提案した. 既往の実験結果から式(13)の係数aは0.1~0.2の範 囲に絞られた.
- (3) 粒径の違いを考慮できる巻上量式を用いると従来の 数値計算法(高橋ら,1999)よりも地形変化量の再現 性が向上した.提案式中の係数aは数値計算により港 湾実験の地形変化の再現性を踏まえて最適値(0.15) を同定した.

3. (4) の数値計算は,電力共通研究の成果の一部であ り,原子力土木委員会津波評価部会(主査 首藤伸夫 日本大学教授)で審議して頂き,委員の皆様から有益な ご助言を頂きました.特に,高橋智幸 秋田大学准教授, 栗山善昭 港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究チー ムリーダーには,実験データや流砂量式のまとめ方に対 し有意義な議論をして頂きました.ここに記して謝意を 表します.

#### 参考文献

- 芦田和男・道上正規(1972):移動床流れの抵抗と掃流砂量に 関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第206号, pp.59-69.
- 五十嵐 保 (2001):水流に引き上げられる卵,ゴルフボール および球まわりの流れに関する研究(第1報,臨海流量), 流れ,20,日本流体力学会誌,pp.406-414.
- 池野正明・吉井 匠・松山昌史・藤井直樹 (2009):津波によ る砂移動量実験と浮遊砂巻上量式の提案,電力中央研究 所 研究報告V08064,43p.
- 岩垣雄一(1956):限界掃流力に関する基礎的研究,(I) 限界 掃流力の流体力学的研究,土木学会論文報告集,第41号, pp.1-21.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999):掃流砂 層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデル の開発,海岸工学論文集,第46巻, pp.606-610.
- 藤井直樹・池野正明・榊山 勉・松山昌史・高尾 誠・向原 健(2009):津波による港湾内の流況と地形変化に関する 実験およびその数値計算,海岸工学論文集,第56巻(印 刷中).
- 本田隆英・佐藤愼司・磯部雅彦 (2006) : 波による質量輸送が シートフロー漂砂量に及ぼす影響について,土木学会論 文集B, Vol.62, No.1, pp.139-149.
- 吉井 匠・池野正明・松山昌史 (2008):津波による砂移動に 関する実験的研究,海岸工学論文集,第55巻,pp.441-445.