# 小規模河床形態における流砂量に関する研究

### A STUDY OF THE SEDIMENT TRANSPORT RATE ON DUNE-COVERED BEDS

北海道大学工学部土木工学科	学会	主員	外山明宏	(Akihiro Toyama)
北海道大学工学研究科	ΤĒ	員	山口里実	(Satomi Yamaguchi)
北海道大学工学研究科	正	員	清水康行	(Yasuyuki Shimizu)

## 1. はじめに

移動床流れでは,流れと流砂過程の相互作用によって 様々な河床形態が現れる.このような河床形態の中でも, 小規模河床形態に分類される砂堆(Dune)は流れの抵抗に 大きな影響を与え,同時に流砂量にも大きな影響を与え るということが知られている.この砂堆について理論的, 実験的にも従来盛んに研究が行われてきた.近年では, 数値計算によって小規模河床形態の再現計算が行われる ようになり,中でもGiri & Shimizu<sup>1)</sup>が行なった鉛直二次 元流れの河床変動シミュレーションでは砂堆の形状を良 好に再現している.

Giri & Shimizuの数値シミュレーションでは,鉛直二次 元の流れに対して確率過程モデルで表される流砂量式を 適用している.この計算では,流れと流砂量の相互作用 の結果として現れる河床形状が再現され,また同時に, 底面せん断力と砂粒のstep lengthを介して流砂量と河床 変動の相互作用が表現されている.

本研究では、流砂量と河床形状に着目した実験を行い, 砂堆河床における流砂量と河床形状について数値シミュ レーションと実験結果との比較を試みた.

## 2. 実験

(1) 実験方法

実験に用いた水路を図-1に示す,水路はアクリル製で, 水路長は10m,幅は10cmで,上流端には高さ5cm,長さ 2mのアクリル製の固定床を築けている.下流端にも低下 背水による洗屈と,水深及び流速の変化を防ぐために高 さ5cm,長さ50cmのアクリル製の固定床と堰がある.

実験は河床勾配を0.002,粒径0.28mmの均一砂径とし, 一定流量の下で行った.通水時の初期条件として,砂の 河床高さが5cm厚になるようを水路一様に敷き詰めた. また,予備実験により,下流端の水面形が低下背水にな ると流砂量が多く出ることがわかった.そのため上流側 の水深を維持するため,下流端の水深を堰で調節した. 給砂量と給砂方法については,通水初期時は平均の河床 高さが変化しないよう,なおかつ固定床と砂層の境界部 に洗屈が生じないよう十分に配慮し手動で行った.河床 が平衡状態になったのを確認した後,流量と水深を測定 した.平均の河床高さと境界部の洗屈に配慮しながら, 給砂を行った.また,実験で生じる河床形態の変化を観 察するため,いくつかのケースではデジタルカメラを用



図-1 実験水路

い1分間隔でインターバル撮影を行った.

流砂量の計測時間は 1800 秒とし,それぞれのケースで 計測を3回行い,その3回の平均値を実験のデータとし て用いた.

(2) 有効せん断力と流砂量について

本研究では実験の有意性を調べるために,有効せん断力 を用いて掃流砂量式から求められる流砂量を検討するこ とにした.

砂堆が形成された場合は、全抵抗に河床形態の形状抵抗 が加わり、全抵抗が砂堆形成前に比べ増加することが知ら れている、土砂の移動に寄与するのは有効せん断力と考え られているため、表面抵抗と有効せん断力を分けて考える 必要がある.また、砂堆の形成に伴い水深も上昇すること がわかっている、岸・黒木<sup>2)</sup>によると砂堆が発生した場合 の全抵抗<sub>で\*</sub>は以下のように表現される.

$$\tau_* = \tau_* + \tau_*$$

ここで,  $\tau_*$  は有効せん断力,  $\tau_*$  は形状抵抗である.また,全抵抗 $\tau_*$ と有効せん断力 $\tau_*$  はそれぞれ次式で表すことができる.

$$\tau_* = \frac{hI}{R_S d}, \quad \tau_* = \frac{h'I}{R_S d} \tag{2,3}$$

ここで, *I* は河床勾配, *d* は砂の粒径である, *R<sub>S</sub>* は砂の 水中比重を表しており, 1.65を用いた. *h* および *h'* は, そ れぞれ全水深と有効せん断力に対応する水深である.

岸・黒木によると有効せん断力に対応する水深は次式で

## 平成18年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第63号



#### 図-2 実験値と掃流砂式の比較

表される.

$$\overline{U} = \frac{q}{h} = \sqrt{gh'I} \left[ 6.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{h'}{k_s} \right) \right]$$
(4)

ここで, $\overline{U}$ は砂堆発生時の平均水深,qは単位幅流量,gは重力加速度, $k_s$ は粗度高さで $k_s = m \times d$ と表され,mは粗度高さの係数であり本研究では一般的に用いられている2.5を用いた.

掃流砂量 q<sub>R</sub> は次の式で表される.

$$q_B = q_{B*} \sqrt{R_S g d} d \tag{5}$$

ここで, q<sub>B\*</sub> は無次元掃流砂量であり, 理論公式である芦田・道上の掃流砂式と, 実験式であるMeyer-Peter & Muller の掃流砂式などにより求める. 以下に芦田・道上の掃流砂 式とMeyer-Peter & Mullerの掃流砂式を示す.

$$q_{B*} = K(\tau_*)^{3/2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_{c*}}{\tau_*}} \right) \left( 1 - \frac{\tau_{c*}}{\tau_*} \right)$$
(6)

$$q_{B*} = 8 \times (\tau_*)^{3/2} \left( 1 - \frac{\tau_{c*}}{\tau_*} \right)^{3/2} \tag{7}$$

ここで, <sub>て<sub>c\*</sub> は無次元限界せん断力であり.岩垣により提案されている実験式によって求めた.</sub>

この 2 つの掃流砂量式を用い,式(7)と式(8)のせん断 カ $\tau^*$ に式(3)で求められる有効せん断力を代入し,流砂 量を計算する.そして,実験値と比べることにより実験 の有意性を調べた.

#### (3) 実験結果

今回実験は,単位幅流量170cm<sup>2</sup>/sから320cm<sup>2</sup>/sの範囲で 行った.

図-2に実験値での有効せん断力と無次元掃流砂量の関係を示す.黒丸は流量300cm<sup>2</sup>/s程度以上の実験値,中抜きの丸は300cm<sup>2</sup>/s程度以下の実験値を表している.図-2に



図-4 河床の全抵抗と有効せん断力の関係

は芦田・道上とMeyer-Peter & Mullerの掃流砂量式を図示した.この図から2つの掃流砂量式と実験値に比較的良好な 一致が見られることが分かる.しかし,流量300cm<sup>2</sup>/s程度 以上の無次元掃流砂量は,有効せん断力の増加はみられる が,公式の値よりも大幅に少ない値となっている.これは 次節で検討するように側壁の影響ではないかと考えられる.

#### (4) 側壁の影響について

図-3では水深と流量の関係を示した.図-3から流量の増加とともに,水深が増加し,流量300cm<sup>2</sup>/s程度以上になると水深の変化量が大きくなることがわかる.図-4は河床の全抵抗と有効せん断力を示したものである.流量が300cm<sup>2</sup>/s程度以上の全抵抗の増加分は大きく,有効せん断力はあまり増加していないことがわかる.このように全抵抗が急激に増加する要因として,流量300cm<sup>2</sup>/s程度以上では形状抵抗が急激に大きくなっている可能性が考えられる.しかし,実験で流量300cm<sup>2</sup>/s程度以上の河床形態と,流量が300cm<sup>2</sup>/s程度以下の河床形態を見比べると,前者の方が波高も低く波長も長い,つまり河床形態は前者の方が平坦に近く,形状抵抗が急激に増加しているとは考えにくい.

このため,全抵抗が急激に増加するその他の要因として, 側壁の影響が考えられる.流量と共に水深が上昇すると, 側壁の粗度の影響が支配的となる.このとき全抵抗は急激 に増加するため,有効せん断力は側壁の影響によって減少 することになる.このため,図-2が示すように,流量の大 きい範囲での実験値は掃流砂量式の示す値を大きく下回





図-6 通水開始から 120 分後



図-7 水深と無次元掃流砂量の時間変化

っていると考えられる.本実験の条件の下では,流量 300cm<sup>2</sup>/s程度以上の実験値は有意性を失うと考えられる.

## 3. 数値計算との比較

## (1) 数値計算の概要

Giri & Shimizuは鉛直2次元流れに次式で表されるよう な流砂モデルを適用した河床変動計算を行うことによっ て,砂堆形状の再現している.

$$q_B = q_{B*}\sqrt{R_S g d} d = \frac{A_3}{A_2} d \int_{-\infty}^{x} p_s(x') \int_{x-x'}^{\infty} f_s(s) ds dx' \quad (8)$$

$$\frac{\partial y_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{A_3}{A_2} (p_d - p_s) d \right] = 0 \tag{9}$$

ここで,上式は中川・辻本<sup>3)</sup>の確率過程モデル式を用いた河床の時間変化を表す式であり, $y_b$ は河床高さ, $\lambda$ は砂粒の空隙率, $A_2$ , $A_3$ は砂粒の2,3次元形状係数を表している.また,式中の $p_s$ はpick-up rate (単位時間当たり

表-1 数値計算の値と実験値

	平均水深(cm)	無次元掃流砂量	有効せん断力
20d	5.87	0.02447	0.1317
50d	5.63	0.07112	0.1402
実験値	7.00	0.04420	0.1004

の移動開始確率密度), *p<sub>d</sub>* はdeposite rate (単位時間当 たりの砂粒1個の占める面積当りの砂粒落下個数)であり, 以下の式で表される.

$$p_{s*} = p_s \sqrt{d/R_S g} = 0.03\tau_* (1 - 0.035/\tau_*)^3$$
(10)

$$p_d = \int_0^\infty p_s(x-s) f_s(s) ds \tag{11}$$

$$f_s(s) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(\frac{s}{\Lambda}\right) \tag{12}$$

ここで,  $\Lambda$  は平均のstep length,  $f_s(s)$  はstep lengthの確 率密度関数である.

Giri & Shimizuの鉛直2次元流れの流砂モデルは浮遊砂 も考慮されているが,本研究では掃流砂のみの条件で計 算した結果を用いた.

## (2) 数値計算値と実験値

ここでは側壁の影響が小さく,数値計算との比較に有 意性があると考えられる流量221.05cm<sup>2</sup>/s時の数値計算と 実験値について比較,検討を行った.数値計算ではstep lengthによる河床形状および流砂量の違いを検討するた めに,step lengthが砂の粒径の20倍と50倍の2ケースにつ いて計算を行なった.

表-1に,数値計算と実験値の平均水深と無次元掃流砂量,有効せん断力について示す.それぞれの値は計算を 開始してから5400秒から7200秒(1800秒間)の平均値である.

図-5はstep lengthが20dと50dの場合の,計算を開始して から7200秒後の河床形態を表している.砂堆の波長につ いてみるとstep lengthが20dの時,波長は約18cmであり, step lengthが50dの時は,約24cmである.これより,step lengthが50dの場合の波長は20dの場合に比べ長いことが わかる.

図-6は通水してから120分後の河床形状を表している. 図より実験で現れた砂堆の波長は約25cmであることがわかる.

図-5,6より数値計算と実験の河床形状を比べると, step lengthが50dの時と実験値はほぼ一致している.

図-7はstep lengthが20dと50dの場合の,水深と無次元掃 流砂量の時間的変化を示している.この図から計算開始 直後は,無次元掃流砂量が大きい値を示しており,水深 が増加すると無次元掃流砂量が減少していることがわか る.

図-8は掃流砂量式と数値計算値,実験値を比較したも



図-8 掃流砂式と数値計算値,実験値の比較

のである.河床形状がほぼ一致した結果を示している. step lengthが50dの数値計算の結果を実験値と比べると, 数値計算の方が有効せん断力および無次元流砂量は大き い値を示している.実験値は多少とも側壁の影響を受け ていることや計算に用いたstep lengthの不確定さなどを 考慮すると,ある程度は一致していると考えられる.

#### 4. おわりに

本研究では,河床形状と掃流砂について実験を行い, Giri & Shimizuの数値シミュレーションとの比較を行った. 数値計算においてstep lengthが50dのときに,本実験での河 床形状を良好に再現することがわかった.このときの流砂 量について比較したところ,数値計算によって求められた 流砂量のほうが実験値よりも大きな値を示す結果となっ た.実験値が多少とも側壁の影響を受けていることや数値 計算に用いられているstep lengthの不確定さなどによって 両者に差が生じていると考えられる.本研究では,側壁の 影響など実験条件の制約から1ケースのみの比較しか行な っていないが,今後様々な実験条件の下で比較,検討を行 なう必要がある.

#### 参考文献

- Giri S. & Shimizu Y. :Numerical computation of sand dune migration with free surface flow, Water Resources Research, Vol.42, w10422, doi:10.1029/2005WR004588,2 006.
- 2) 岸 力,黒木幹男:移動床における河床形状と流体 抵抗(),北海道大学工学部研究報告,1972.
- 中川博次, 辻本哲郎: 砂礫の運動に伴う移動床砂面の擾乱発生過程, 土木学会論文報告集第 291 号, pp. 53-62.