

II-47

砂粒フルード相似に基づいた掃流砂量の推定

—— 河床波が存在する場合 ——

北見工業大学工学部 学生員 吉岡昌俊  
 北見工業大学工学部 正会員 内島邦秀  
 北見工業大学工学部 正会員 早川 博  
 北見工業大学工学部 学生員 魏 炳乾

1. はじめに

著者らは、前報<sup>1)</sup>において無次元掃流力 $\tau_*$ の平方根として定義される砂粒フルード数 $F_{r,s} = \sqrt{\tau_*} = u_* / \sqrt{sgd}$  ( $u_*$ : 摩擦速度,  $s$ : 砂の水中比重,  $g$ : 重力加速度,  $d$ : 平均砂粒径) を原型と模型で一致させる, 砂粒フルード相似に基づく掃流砂量の推定法を提案した。ただし, 河床波が存在する場合には, 掃流砂の推定値が過大に見積られる傾向がみられた。この河床波の存在による掃流砂の影響を考慮するため, 本報は河床波の形状抵抗による掃流力の増分を除いた有効無次元掃流力 $\tau_{*c}$ を用いて掃流砂量の推定を行う。

2. 砂粒フルード相似則

砂粒フルード数を原型と模型で一致させる砂粒フルード相似では, 縮尺比を「原型値/模型値」と定義して添字 $r$ で表せば, 砂粒フルード条件式は $\sqrt{\tau_{*r}} = 1$ となる。即ち

$$\tau_{*r} = \frac{\tau_{*p}}{\tau_{*m}} = 1 \quad (1)$$

である。ここで, 原型値と模型値の添字はそれぞれ $p, m$ で表す。

河床波が存在しない場合の掃流砂量は Brown 型で表示でき, 一般に次式で与えられる。

$$\frac{q_B}{u_* d} = k(\tau_* - \tau_{*c})^p \quad (2)$$

ここに,  $q_B$ : 掃流砂量 (容積単位),  $\tau_{*c}$ : 限界無次元掃流力,  $k, p$ : 定数である。式(2)に対して, 縮尺比を与え, 砂粒フルード条件式を適用すれば式(3)を得る。

$$q_{Bp} = k_r \cdot d_r^{3/2} \cdot q_{Bm} \quad (3)$$

ここで,  $k_r$  を  $d_r$  の関数とおいて式(3)に代入すると次式が得られる<sup>1)</sup>。

$$q_{Bp} = d_r^{11/10} \cdot q_{Bm} \quad (4)$$

したがって, 式(4)から粒径比 $d_r$ と模型の掃流砂量 $q_{Bm}$ を定めれば, 原型の掃流砂量 $q_{Bp}$ の推定が可能である。式(4)の掃流砂量は河床波が存在しない場合の推定式であるため, 河床波が存在する場合には適用できない。

河床波を伴う流れでは, 抵抗は一般に次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$\tau = \tau' + \tau'' \quad (5)$$

ここで,  $\tau'$ は砂粒粗度によるせん断応力で, 摩擦抵抗と呼ばれ,  $\tau''$ が河床波形状によるせん断力で, 形状抵抗と呼ばれている。掃流砂量に直接関与するのは前者の摩擦抵抗による応力であり, 有効掃流力と呼ばれている。そこで河床波による形状抵抗を取り除き, 河床波のない状態の有効掃流力を算出するため, 本研究では次式の芦田・道上の式<sup>3)</sup>を用いて有効摩擦速度 $u_{*c}$ を算定した。

$$\frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{R}{d(1 + 2\tau_*)} \right) \quad (6)$$

ここで、 $u$  は平均流速、 $R$  は径深である。式(6)より得られた $u_{*e}$ を用いれば、摩擦抵抗に対応する無次元有効掃流力 $\tau_{*e}$ は次式で表される。

$$\tau_{*e} = \frac{u_{*e}^2}{sgd} \quad (7)$$

河床波が存在する場合でも、このように無次元有効掃流力 $\tau_{*e}$ に分離することによって、式(4)の掃流砂量の推定式が適用可能となる。式(4)から推定される原型の掃流砂量 $q_{Bp}$ は有効掃流力に対する掃流砂量であるが、これは分離前の全掃流力に対する河床波が存在する場合の掃流砂量とも考えられる。本研究では砂連・砂堆の河床波が存在する場合について、式(4)の模型と原型の無次元有効掃流力 $\tau_{*e}$ を一致させ、模型の掃流砂量から原型の掃流砂量を推定する方法の検証を行った。

### 3. 有効掃流力と模型掃流砂量の関係

模型掃流砂量の測定は、幅 $B_m=30\text{cm}$ 、長さ $14\text{m}$ の直線水路に平均粒径 $d_m=0.022\text{cm}$ の豊浦標準砂を厚さ $7\text{cm}$ に敷き均し移動床として行った。実験条件は、水路勾配 $I_m$ をGarude・Rajuの領域区分図(図-1)より砂連あるいは砂堆が発生する条件を満たす $1/300\sim 1/500$ の範囲内に設定し、水深 $h_m$ は領域区分図の砂連・砂堆領域に入る範囲から求めた。実験はある勾配に設定すると、水深が遷移領域に入るまで流量 $Q_m$ を $0.25I_m$ あるいは $0.5I_m$ 間隔で増やしながら逐次実験を繰り返し、遷移領域に入った時点で勾配を変えて同様に実験を進めた。各実験の平均水深 $h_m$ は水路底面から水面までの高さ $H$ をポイントゲージ、河床高 $z$ を自製の河床形状測定器で測定し、 $h_m=H-z$ から求めた。掃流砂量は実験条件によっては通水後30分から2時間後に河床が安定してから水路下流端で採取した。

本実験の結果は図-1の領域区分図の●印である。データの多くは設定した砂連・砂堆の領域に入っている。一部、遷移領域あるいは反砂堆領域にプロットされたデータがあるが、これは、本実験とほぼ同じ粒径の砂を用いたShinohara・Tsubakiの実験データ<sup>4)</sup>(□印)と同じ条件で行った実験結果である。本研究で対象とした砂連・砂堆は、 $F_s$ 数が0.8

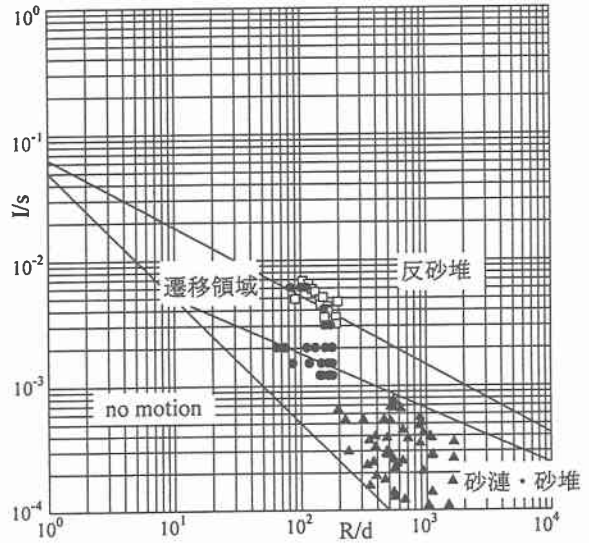


図-1 Garude・Rajuの領域区分図

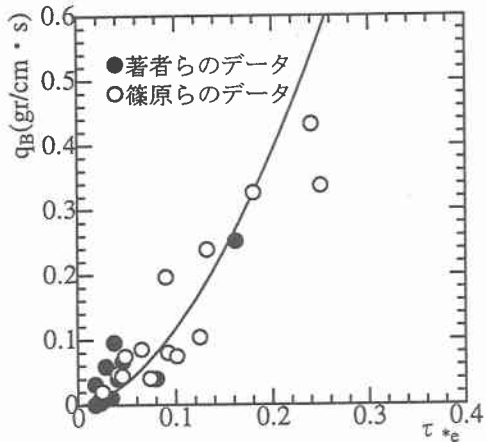


図-2 模型掃流砂量と無次元有効掃流力の関係

以下の Lower regime の領域にあるので、この範囲の実験結果が後の検証に用いられた。写真-1 は今回の実験で発生した河床波の一例で、砂粒レイノルズ数  $R_{*c}$  が 20 以下であることから砂連と判断される。

式(4)の推定法では、無次元有効掃流力  $\tau_{*c}$  に対する模型の掃流砂量  $q_{Bm}$  の定式化が重要である。両者を図-2 にプロットすると、次式の回帰式が得られた。

$$q_{Bm} = 4.41\tau_{*c}^{1.63} \quad (8)$$

ここで、 $q_{Bm}$  は重量単位(gr/cm/s)である。但し、本実験では  $\tau_{*c}$  の大きいデータが不足していたため、Shinohara・Tsubaki の実験データも含めている。この式(8)を式(4)に代入すると、結局、ある  $\tau_{*c}$  に対する原型掃流砂量は式(9)から推定できる。

$$q_{Bp} = 4.41 \cdot d_r^{11/10} \cdot \tau_{*c}^{1.63} \quad (9)$$

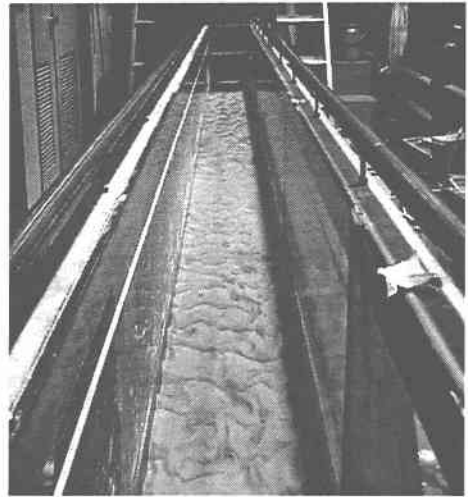


写真-1 発生した河床波(砂連)の状況

#### 4. 河床波が存在する場合の掃流砂量の検証

本研究では、大型模型水路の掃流砂量を原型とにおいて、河床波が存在する場合の掃流砂量推定法の検証を行う。原型に用いたのは、Guy・Simons・Richardson の実験データ<sup>5)</sup>(水路幅 60.96cm および 243.84cm, 砂粒径: 0.019, 0.027, 0.028, 0.032, 0.033, 0.045, 0.047, 0.054cm の 8 種類) および Nordin の実験データ<sup>6)</sup>(水路幅 244cm, 砂粒径: 0.114cm) である。これらのデータを図-1 の領域区分図にプロット(▲印)したところ、いずれも砂連・砂堆の領域にあることが分かる。

図-3~5 は、分離した無次元有効掃流力を原型と模型とで一致させて推定した河床波のない場合における原型の掃流砂量の検証結果である。図-3 は Guy らの水路幅 60.94cm の場合、図-4 が同じく Guy らの水路幅 243.84cm の場合、図-5 が Nordin の水路幅 244cm の場合を原型として求めた掃流砂量の推定結果である。図-3 および図-4 では推定値が過大となり、図-5 では比較的良好な結果を得ている。原型とした Guy らの実験は、砂粒径が模型の砂粒径と大差なく、粒径比  $d_r$  が 1 前後の値である。式(4)の推定式は、

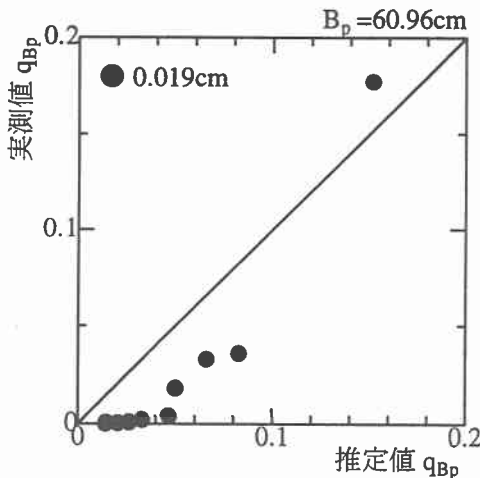


図-3 掃流砂量の推定結果の検証  
(Guy らの実験, 水路幅 60.96cm の場合)

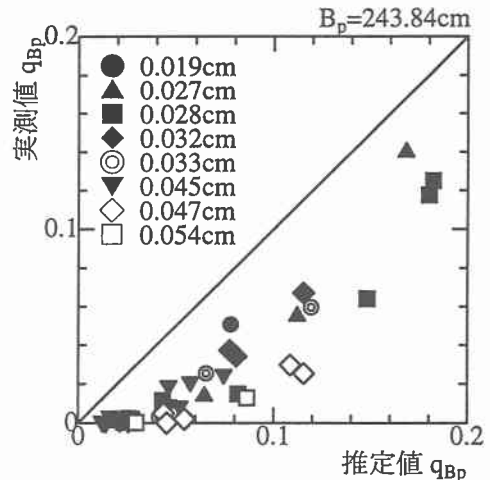


図-4 掃流砂量の推定結果の検証  
(Guy らの実験, 水路幅 243.84cm の場合)

式(3)で $k_r$ と $d_r$ の関係式を前報の実験結果から $k_r = d_r^{-0.4}$ と回帰したものである<sup>1)</sup>。砂粒フルード相似則では、理論上、 $d_r = 1$ の場合 $k_r = 1$ とならなければならないが、前報の実験結果をみると、 $d_r = 1$ 前後の $k_r$ は1より小さいデータが多くみられた。今回のGuyらの実験でも、この $k_r$ と $d_r$ の関係が回帰式より小さくなっているため、推定した掃流砂量が過大となったものと考えられる。一方、Nordinの実験は $d_r = 5.1$ とGuyらの実験よりも大きく、実際の $k_r$ が $k_r = d_r^{-0.4}$ の回帰式に近い値を示したために、かなり良い推定結果が得られたものと考えられる。したがって、 $k_r$ と $d_r$ の関係については検討の余地が残されている。

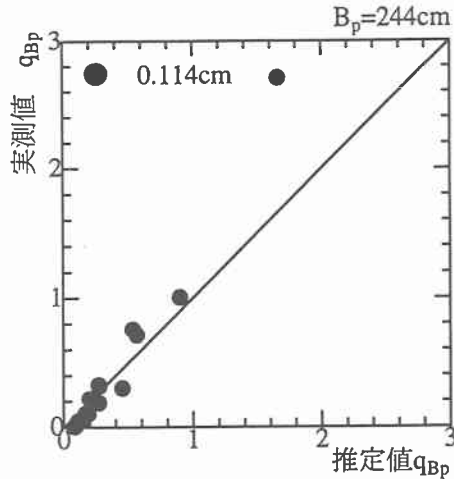


図-5 掃流砂量の推定結果の検証  
(Nordinの実験、水路幅244cmの場合)

## 5. おわりに

本研究は砂粒フルード相似則に基づき、河床波が存在する場合の掃流砂量の推定方法について検討した。掃流砂量は全掃流力から河床波の形状抵抗によるせん断力を分離した有効掃流力だけに関与するとの定義から、河床波が存在しない場合の原型の掃流砂量を推定できることを示した。この推定された掃流砂量は、有効掃流力に対する掃流砂であるばかりでなく、有効掃流力の定義から分離する前の全掃流力に対する、河床波の存在する場合の掃流砂量でもある。今後は、砂連・砂堆以外の河床波が存在する場合の掃流砂量についても検討を加えていく予定である。

## 参考文献

- 1) 吉岡昌俊・内島邦秀・早川博・高木厚・魏炳乾：砂粒フルード相似に基づいた掃流砂量の推定，土木学会北海道支部論文報告集，第53号，pp.26-31, 1997.
- 2) 土木学会：水理公式集，昭和60年版，1981.
- 3) 芦田和男・道上正規：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, 1972.
- 4) Kinji Sinohara and Toichiro Tsubaki : On the Characteristics of Sand Waves Formed upon the Beds of the Open Channels and Rivers : Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. VII, No. 25, pp.15-44, 1959.
- 5) Guy, H. P., D. B. Simons and E. V. Richardson : Summary of Alluvial Channel Data From Flume Experiments, 1956-61, Geological Survey Professional Paper 462-I, United States Government Printing Office, Washington, 1966.
- 6) Nordin, C. F. : Flume Studies with Fine and Coarse Sands, U. S. Geological Survey Open File Report 76-762, 1976.