

II - 6

砂粒フルード相似に基づいた掃流砂量の推定

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
 北見工業大学大学院 学生員 高木 厚
 北見工業大学大学院 学生員 魏 炳乾

1. はじめに

従来、数多くの掃流砂量公式が提案されている¹⁾。しかしながら、これらを用いた算定結果は互いに大きな相違を示し、的確な掃流砂量の推定を困難なものにしている。

本研究では、無次元掃流力 τ_* の平方根として定義される砂粒フルード数(grain Froude number)²⁾ $Fr_* = \sqrt{\tau_*} = u_* / \sqrt{sgd}$ (ここで、 u_* : 摩擦速度、 s : 砂粒の水中比重、 g : 重力加速度、 d : 平均砂粒径) を用いた砂粒フルード相似に基づく掃流砂量の推定法を提案し、この推定法の検証を行う。ただし、今回は本研究の第一段階として河床波が存在しない場合について検討する。

2. 砂粒フルード相似と掃流砂量の推定法

河床波が存在しない場合の単位時間、単位幅当たりの掃流砂量 q_B (容積単位) は、無次元表示 $q_B / u_* d$ あるいは $q_B / \sqrt{sgd^3}$ ($= q_B \tau_*^{1/2} / u_* d$) で一般に次式で表される。

$$q_B / u_* d = k (\tau_* - \tau_{*c})^p \quad (1)$$

ここに、 τ_{*c} : 限界無次元掃流力(=0.05), k, p : 定数 であり、 $\tau_* \leq \tau_{*c}$ のとき $q_B = 0$ である。

式(1)から掃流砂量の相似関係を求めるに当たり、縮尺比を「原型値/模型値」と定義して添字 r で表し、また、原型値、模型値をそれぞれ添字 p, m で表示する。例えば、平均粒径縮尺比 d_r は $d_r = d_p / d_m$ であり、原型値=模型値であれば $d_r = 1$ である。したがって、式(1)より、

$$q_{B,r} / u_{*r} d_r = k_r (\tau_{*r} - \tau_{*c,r})^{p_r} \quad (2)$$

の相似関係式を得る。式(2)に対して、前述の砂粒フルード数を原型と模型で一致させる、いわゆる砂粒フルード相似条件式、 $\sqrt{\tau_{*r}} = 1$ 、即ち、

$$\tau_{*r} = 1 \quad (3)$$

および $\tau_{*c,r} = 1$ の条件を適用すると、 $(\tau_* - \tau_{*c})_r = 1$ となり、式(2)は、

$$q_{B,r} = k_r \cdot u_{*r} \cdot d_r = k_r \cdot (g_r h_r I_r / s_r d_r)^{1/2} \cdot s_r^{1/2} \cdot d_r^{1/2} \cdot d_r \quad (4)$$

と変形でき、 $g_r = 1, h_r I_r / s_r d_r = \tau_{*r} = 1$ 、また、模型の河床材料に砂を用いれば $s_r = 1$ であるから、結局、式(4)は、

$$q_{B,r} = k_r \cdot d_r^{3/2} \quad (5)$$

となり、縮尺比の定義から、

$$q_{Bm} = k_r \cdot d_r^{3/2} \cdot q_{Bm} \quad (6)$$

を得る。したがって、 k_r を定め、 d_r 値および砂粒フルード相似条件下の模型で測定された掃流砂量 q_{Bm} を与えることにより、式(6)から原型の掃流砂量を推定することが可能である。

3. 模型掃流砂量の測定とその結果

模型水路として幅 $B_m=30\text{cm}$ 、長さ 14m の直線水路を用い、平均砂粒径 $d_m=0.53, 0.75\text{mm}$ の2種類の東北珪砂をそれぞれ厚さ 7cm に敷き均して移動床とした。水路勾配 I_m は $I_m=1/60$ に設定し、流量 Q_m は 1 l/s から 0.25 l/s あるいは 0.5 l/s 間隔で 9 l/s までの小規模河床波(反砂堆)が発生しない流量に留めた。各流量通水時の平均水深 h_m は、過マンガン酸カリウム水溶液をトレーサーとして平均流速 u_m を直接測定し、 $h_m=Q_m/B_m u_m$ から求めた。各流量に対する掃流砂量は通水後10分以降に水路下流端で採取し、乾燥させた後に重量を計量した。また、実験では定常状態を保持するために水路上流端で初期河床面を維持するように給砂している。

本実験で観測された河床形態は平坦か交互砂州

であり、Garde・Rajuの領域区分図では遷移領域にプロットされる(付図参照)。交互砂州の形状抵抗は大きく見ても全抵抗の20%程度であり³⁾、既報⁴⁾の平均砂粒径 1.34mm を用いた交互砂州形成の実験データも本研究の模型掃流砂量測定の結果として採用した。

模型掃流砂量の測定結果を式(1)に基づいて図示したのが図-1である。測定結果はBrown型式で近似でき、各粒径ごとに最小自乗法で定式化すると次式(7)となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{q_{Bm}}{u_m \cdot d_m} &= 11.63 \cdot \tau_{*m}^2 \quad (d_m=0.053 \text{ cm}) \\ \frac{q_{Bm}}{u_m \cdot d_m} &= 9.99 \cdot \tau_{*m}^2 \quad (d_m=0.075 \text{ cm}) \\ \frac{q_{Bm}}{u_m \cdot d_m} &= 13.88 \cdot \tau_{*m}^2 \quad (d_m=0.134 \text{ cm}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

また、式(6)の砂粒フルード相似の q_{Bm} を与えるために τ_{*m} との関係を示したのが図-2であり、同様に定式化すると、 q_{Bm} が重量単位 $\text{gr/cm}\cdot\text{sec}$ で、

$$\left. \begin{aligned} q_{Bm} &= 11.68 \cdot \tau_{*m}^{2.23} \quad (d_m=0.053 \text{ cm}) \\ q_{Bm} &= 15.25 \cdot \tau_{*m}^{2.26} \quad (d_m=0.075 \text{ cm}) \\ q_{Bm} &= 40.45 \cdot \tau_{*m}^{2.22} \quad (d_m=0.134 \text{ cm}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。

4. 掃流砂量推定法の検証

(1) 大型直線水路で測定された掃流砂量による検証

前章の模型水路幅 $B_m=30\text{cm}$ に比較して大型の水路幅 78cm の水路を用いた佐藤・吉川・芦田⁵⁾の掃流砂量実験データ(砂粒径: $0.1038, 0.221, 0.262, 0.376, 0.458\text{cm}$ の5種類)および水路幅 1.76m の水路を用い

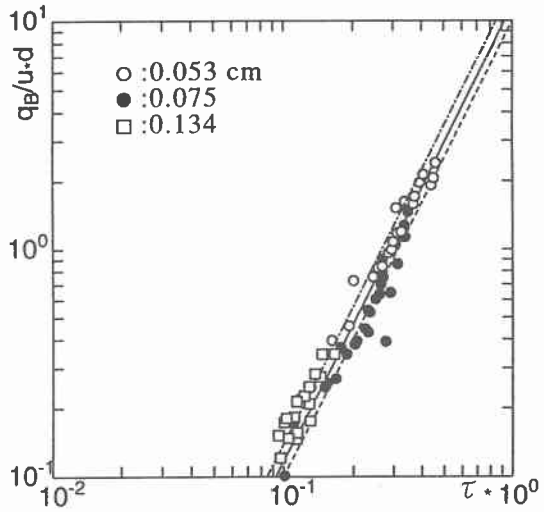


図-1 模型掃流砂量(1)

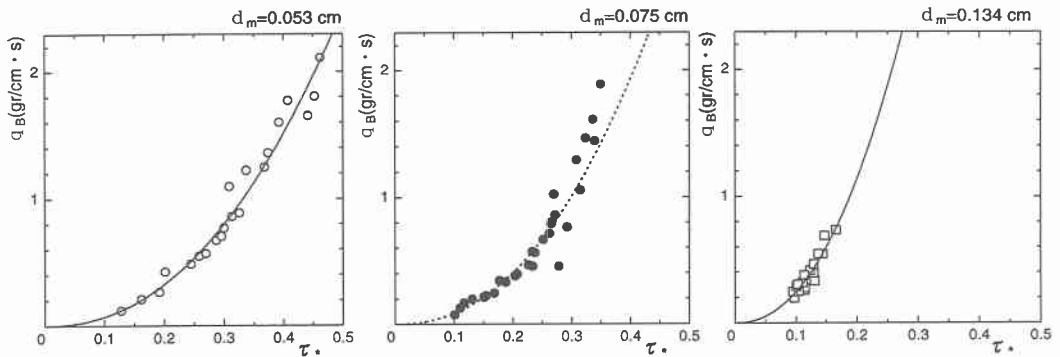


図-2 模型掃流砂量(2)

た吉川・福岡・馬場・河野⁶⁾の掃流砂量実験データ(砂粒径:1.0, 3.0, 5.0cmの3種類)を原型とし, 式(6)による掃流砂量推定法を検証する。

まず, 各粒径ごとの原型掃流砂量を式(7)の τ_{*m} のべき指数2を固定してBrown型で近似し k_r を求めた。 k_r と d_r の関係は図-3のとおりであり, $d_r=1$ で $k_r=1$ となるように定式化すると式(9)となる。

$$k_r = d_r^{-0.4} \quad (9)$$

したがって, 掃流砂量推定式(6)は次式になる。

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

式(10)の検証結果は図-4である。河床波の存在を考慮していないため $d_p=0.458\text{cm}$ 以下の推定値は過大となる。河床波の存在しない(付図参照) $d_p=1.0\text{cm}$ 以上では比較的良好である。ただし, $d_p=3.0\text{cm}$ で推定値が過小となっているのは移動限界である $\tau_{*p}=0.05$ 近傍のデータが多く, q_{Bm} が正確性を欠くためと考えられる。

(2) 大雪ダム堆砂量による検証

大雪ダムの主要な流入河川である石狩川本川, ホロカイシカリ川, 由仁石狩川, ルベシナイ川の4河川について河床材料と河道勾配の現地調査を平成8年9月12, 13日に行った。河床材料は線格子法⁷⁾によって採取し, 現地で計測した長軸, 中軸, 短軸の幾何平均粒径を用いた粒度分布を図-5に示す。線格子法で無作為に採取することは当然ながらも, どうしても大きめの砂礫を採取することになる。このため個数百分率の分布から代表粒径 d_p を決定した。以下に, 北海道開発局で調査したダム堆砂量, また, 同局が流量観測している石狩川本川石狩平観測所およびルベシナイ川ルベシナイ観測所の推定掃流砂量について順を追って述べる。

①対象としたダム堆砂量: 大雪ダム(流域面積291.6km²)は昭和49年に竣工し, 昭和51年から堆砂量を調査している。本研究では, 平成6年9月19日から平成7年9月18日までの平成7年堆砂量120,000m³を対象とした。以下では同期間の出水(最大流量は石狩平で59m³/s, ルベシナイで11m³/s)に伴う掃流砂量を推定することになる。

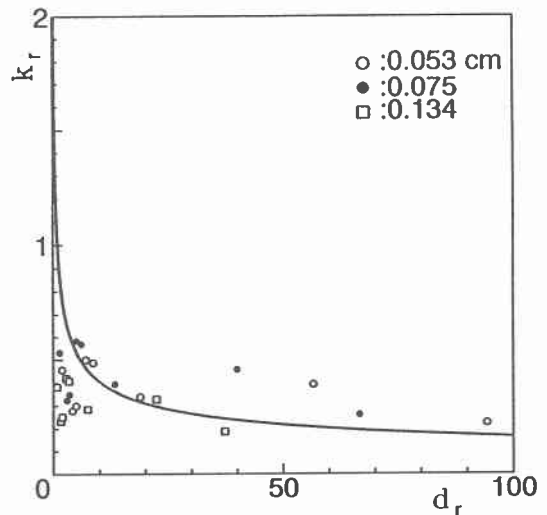


図-3 k_r と d_r の関係

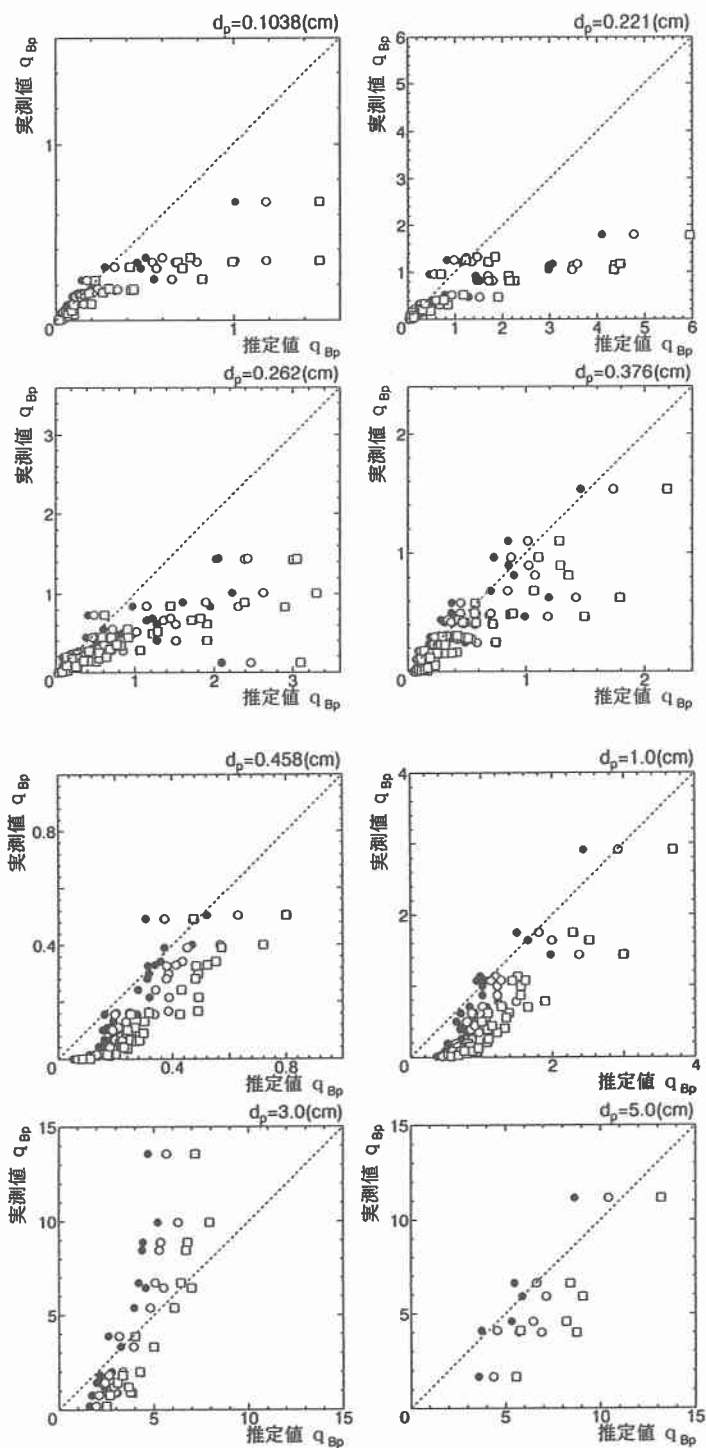


図-4 掃流砂量推定式 (10) の検証 (単位 : $\text{gr}/\text{cm}\cdot\text{sec}$)

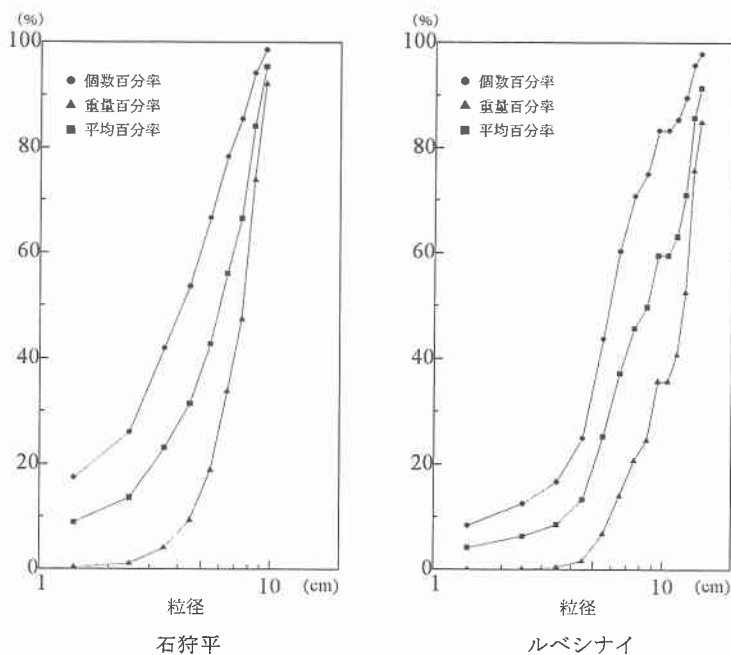


図-5 石狩平とルベシナイの粒度分布

②石狩川本川（石狩平）の掃流砂量：図-5の個数百分率から求めた平均粒径は $d_p=4.9\text{cm}$ ，現地調査と低水流量観測時の勾配より $I_p=1/76$ とし，河道横断面は低水流量観測時の代表的2断面の平均断面とした。これらの諸量より $\tau_{*p}=0.05$ となる水理水深次いで $H-Q$ 曲線より流量を求めると $13.8\text{m}^3/\text{s}$ となり，これ以上の流量について1時間ごとに式(8)と(10)によって掃流砂量を算出した。 $13.8\text{m}^3/\text{s}$ を越えた出水時間は1,764時間(=74日)で，式(8)の3式による平均総掃流砂量は $59,970\text{ton}$ となった。容積単位に換算すると $22,630\text{m}^3$ となるが，これは実質体積であり，空隙率を35%とすれば1.35倍して $30,000\text{m}^3$ 程度となる。

③ルベシナイ川（ルベシナイ）の掃流砂量：②と同様に $I_p=1/101$ ，河道横断面を定め，平成6,7年の流量データより支配流量⁸⁾を試算すると $9.4\text{m}^3/\text{s}$ となり，図-5から求める平均粒径を用いて τ_{*p} を算出すると0.05以下となった。このため逆に $\tau_{*p}=0.05$ となる粒径を求めると 5.0cm であり，図-5の 5.0cm 以下の平均粒径 $d_p=3.0\text{cm}$ を代表粒径とした。この場合の限界流量は $1.8\text{m}^3/\text{s}$ であり，これを越えた出水時間は1,758時間(=73日)であった。以下②と同様にして空隙率も考慮した総掃流砂量を推定すると $9,000\text{m}^3$ 程度となった。

以上の②，③の推定量から①の年間堆砂量について直接議論することは不可能である。ただ，由仁石狩川の粒度分布，勾配はルベシナイ川と同程度，ホロカイシカリ川の粒度分布は流入本川と同程度であるが勾配が大きいなど，他の未調査の流入河川についても地図上で見える限りであるが，②，③の推定量はオーダー的には妥当ではないかと考える。

5. おわりに

以上，本研究では，原型河川の無次元掃流力に等しくなる条件下の基礎的移動床模型実験の掃流砂量および原型と模型の河床材料粒径比を与えて，原型河川の掃流砂量を推定する方法を提案し，不完全ながらその検証も試みた。今後，さらに河床波が存在する場合についても検討したいと考えている。

謝辞：本研究は(財)北海道河川防災研究センターの平成8年度研究助成(内島邦秀)を受けて行われた。

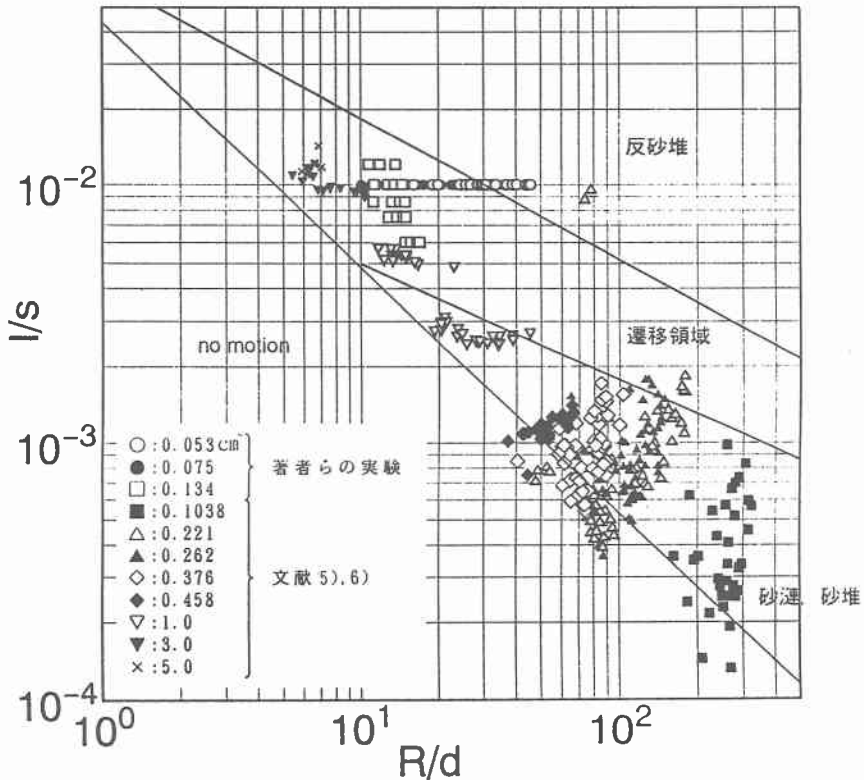
また，北海道開発局旭川開発建設部大雪ダム管理所より貴重な資料を提供して頂いた。

ここに記して，関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集，昭和60年版，1985.
- 2) Novak and Cabelka：Models in Hydraulic Engineering，1981.
- 3) 内島邦秀：掃流・浮流砂混在条件下の河床波と抵抗に関する実験的研究，水工学論文集，第36巻，pp. 117-122，1992.
- 4) 福岡捷二・内島邦秀・山坂昌成・早川博：交互砂州上の流砂量分布，第27回水理講演会論文集，pp. 697-702，1983.
- 5) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男：河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1)，土木研究所報告，第98号，pp. 13-30，1957.
- 6) 吉川秀夫・福岡捷二・馬場亨・河野二夫：大粒径砂礫の掃流砂量に関する研究，第19回水理講演会論文集，pp. 1-6，1975.
- 7) 河村三郎・小沢功一：山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布，土木学会誌，第55巻，第12号，pp. 53-58，1970.
- 8) 河村三郎：支配流量の一計算法，第12回水理講演会講演集，pp. 79-84，1968.

付 録



付図 Garde・Rajuの領域区分図