

河川上流域の中礫を用いた掃流砂量測定実験

EXPERIMENTAL STUDY ON BED LOAD TRANSPORTATION USING GRABEL SAND COLLECTED AT UPPER REACH OF RIVER

小川 長宏¹・渡邊 康玄²
Takehiro OGAWA and Yasuharu WATANABE

¹正会員 北海道開発局開発土木研究所 環境水工部 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所 環境水工部 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

It is important to consider the bed load transportation for performing of river management works. Many researches on bed load transportation were conducted and many estimation methods about the amount of bed load transportation were proposed.

However, it is very difficult to measure the bed load transportation in steep rivers and there are a lot of unknown portions on the behavior of large scale materials. Therefore, the experiments on behavior of large scale materials using high-speed hydraulic channel were conducted. Experimental measurements of bed load were compared with calculated values using several bed load equations (Meyer-Peter-Müller; Ashida and Michiue; Sato, Kikkawa and Ashida). It was found that the Sato-Kikkawa-Ashida equation produced calculations most closely in agreement with the experimental data.

Key Words : Hydraulic experiment, high-speed hydraulic channel, bed load, large scale material

1. 序論

近年河道内における土砂の侵食・堆積作用に伴う洪水流下能力の変化, 上・下流における土砂収支のアンバランス等の課題が指摘されており, 土砂の水系スケールでの管理に向けた取り組みが行われつつある。その中で増水時の流況の把握や土砂移動実態を測定するため流量観測や濁度, SS, 掃流砂等の測定が行われている。しかしながら河川上流域においてはこれらの測定は困難であり, 特に増水時の河川上流域における粗粒径の土砂移動実態については, 不明である部分が多い。河川上流域において土粒子の移動は特に増水時に顕著に行われ, 下流域へと供給されることを考慮すると河川上流域での土粒子移動実態を把握することは河川管理を行う上で重要な問題となってくる。

河床における土粒子の移動に関する研究は現在まで数多く行われており, 山地部を除く河川上流域においても土粒子の移動実態は基本的に既存の掃流砂式に従うものと考えられる。

本報告では, 高速循環実験水路を用いて山地部を除く河川上流域を想定した河床を形成して増水時の流況を再現した実験を行った。実験結果を使用して既存の代表的な掃流砂量式を用いて現象の検証及び考察を行う。

2. 実験概要

実験は北海道開発土木研究所が所有する延長24.0m, 水深1.0m, 幅1.0mの高速循環実験水路を開水路として行った。実験水路の最大流量は3.0m³/sである。高速実験水路の写真を図-1に示す。実験は河床材料と流量を変えた8例行っている。実験の諸元を表-1に示す。なお、実験は河床材料と同じものを上流から給砂して行っている。実験1, 7の粒径分布は北海道札内川とその支川戸鶯別川の合流点での河床材料粒径分布を再現したものであるが, 用いた材料は碎石である。なお、この地点の河床勾配は1/214である。実験2で用いた河床材料は, 実験1で使用した河床材料のうち粒径の大きいものの基礎的な移動状況の把握と, 実験1との比較のため, 平均粒径を

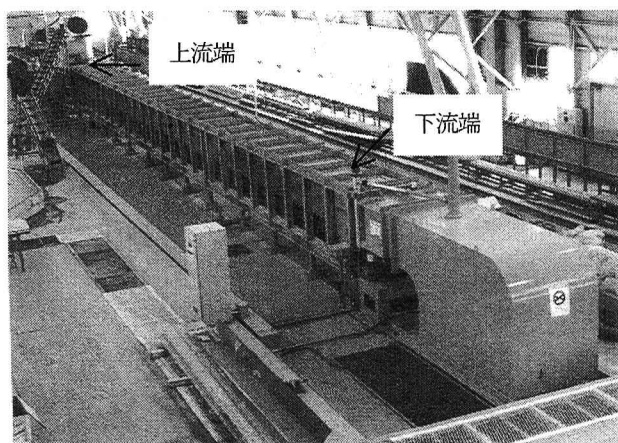


図-1 高速循環実験水路(閉水路時)

表-1 実験諸元

	流量 (m ³ /s)	初期 河床 勾配	平均 粒径 (mm)	粒径 範囲 (mm)	材料	通水 時間
実験1	1.0	1/214	37.32	0.075-75	碎石	30分
実験2	1.0	1/214	30.01	0.075-75	玉石	30分
実験3	1.0	1/214	23.38	4.75-75	玉石	30分
実験4	1.0	1/214	22.59	4.75-75	玉石	30分
実験5	1.0	1/214	25.94	9.5-75	玉石	30分
実験6	1.0	1/214	24.75	9.5-75	玉石	30分
実験7	1.5	1/214	11.29	0.075-75	玉石	20分
実験8	1.5	1/214	30.29	9.5-75	玉石	30分

実験1と同程度にすることを考慮しながら、粗粒径の占める割合を多くする分布とした。実験3, 4では土砂掃流時に微細粒径粒子の粗粒径に対する影響をなくすため、実験1の河床材料の内粒径4.75mm以下、実験5, 6, 8ではさらに粒径9.5mm以下を除去しほぼ単一粒径となる河床材料を用いて実験を行った。また、河床材料は実験1のみが碎石でそれ以外の実験では玉石を使用した。

3. 測定項目と結果

(1) 河床・水位縦断分布

通水開始から5分間隔で、水路左右壁面において縦断方向に計測間隔0.5mで水位、河床高の測定を行った。測定は各測点の水路脇に設置したカメラによって写真を撮り、写真判定し測定値を導いた。

(2) 流速測定

水路上流端より縦断距離16.1mの地点にレーザー流速計を設置し、通水開始から終了までの30分間水路中央の流速分布を計測した。測定深度は測定区間ほぼ中央の縦断距離16.1m地点の初期河床高から鉛直方向に50cmの高さまで測定した。通水開始から終了まで30分間の平均流速分布測定結果を図-2に示す。なお実験1, 2, 7については河床材料にシルト分が混入しており水の濁りがひど

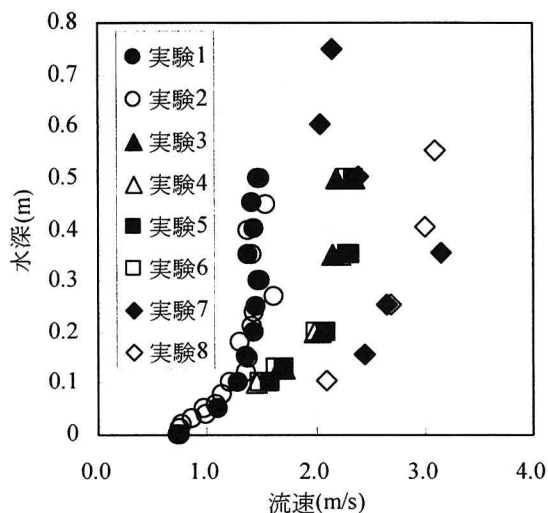


図-2 流速分布

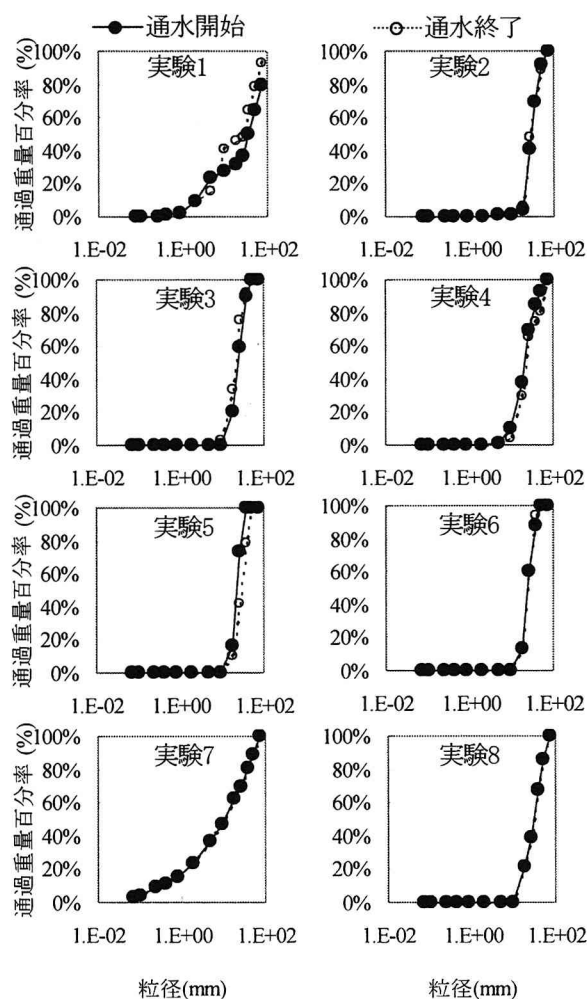


図-3 通水開始・終了時粒径分布

く、レーザー流速計のレーザーが水路中央まで届かず、水路中央の流速測定できなかった。このため、実験1, 2については水路側壁部より横断方向に5mm離れた箇所の流速を記載している。また実験7については水路中央の流速を電磁流速計を用いて測定している。

表-2 平均粒径、空隙率

	平均粒径(mm)		空隙率	
	通水開始時	通水終了時	通水開始時	通水終了時
実験1	37.2	28.0	59.3%	28.9%
実験2	30.1	27.6	28.8%	37.6%
実験3	24.8	22.0	38.6%	40.0%
実験4	21.9	23.3	38.7%	38.9%
実験5	23.5	28.4	37.6%	39.4%
実験6	24.9	24.6	37.7%	41.3%
実験7	11.3	11.3	20.1%	20.1%
実験8	30.3	30.3	37.4%	37.4%

表-3 平均河床変動

平均河床変動値(cm)							
実験1	実験2	実験3	実験4	実験5	実験6	実験7	実験8
2.8	1.3	2.1	1.2	1.2	1.0	0.8	0.2

(3) 通水開始・終了時粒径分布

通水開始・終了時に水路上流端からの距離0.05m, 8.45m, 16.85mの各測点において河床材料の粒度分布を測定した。測定は河床表面から長さ30.0cm×幅30.0cm×深さ5.0cmの試料を採取し、ふるい分け試験を行った。図-3に通水開始、終了時の粒度分布を示す。通水前後において実験1を除いてほとんど変化は見られない。実験1で若干の変化が見られるが、これは通水前の空隙に細粒子が入り込んだことによるものと考えられる。

また表-2に通水開始・終了時の平均粒径、空隙率を示す。

(4) 実験前・後の河床高

各実験の実験前後の河床高を、横断方向中央で水路延長24m間を縦断方向に間隔0.5mで計測した。各実験での河床変動の値を表-3に示す。給砂を行った実験であったが、各実験で河床高の変動が若干見られた。しかしその程度は僅かであり、河床勾配の変化はほとんどなかった。

(5) 流況及び水量

流速測定地点である、測定区間ほぼ中央の水路上流端より縦断距離16.1mの地点での流量を流水面積で割った平均流速 u 、摩擦速度 $u_* (= \sqrt{gRi_e})$ 、 R ：径深、 i_e ：水面勾配)、流れのレイノルズ数 Re 、粒子レイノルズ数 Re_* 、平均水深 h 、平均水深 h を平均粒径 d_m でわった値 h/d_m 、平均水深 h を水路幅 $B=1.0m$ で除した値 h/B を表-4に示す。表-4より同流量では粒度分布の違いに関わらず、各実験間でそれほど大きな差は見られない。流れのレイノルズ数 Re については各実験とも大きな値を示している。例として山地上流河川である鶴川支川のパンケシュル川で、1999年7月31日に観測された洪水ピーク時の流水のレイノルズ数が $Re=1.94E+06$ であり、平水時には $Re=2.0E+05$ 程度であることを考えると、各実験ですべてが洪水時ほどではないがそれに近い値であった。

表-4 $u, u_*, Re, h, h/d_m, h/B$

	u (m/s)	u_* (cm/s)	Re	Re_*	h (cm)	h/d_m	h/B
実験1	1.8	19.4	8.1E+05	6.3E+03	57.1	17.5	0.57
実験2	1.8	20.7	8.2E+05	6.0E+03	55.3	19.2	0.55
実験3	1.7	20.7	8.3E+05	4.8E+03	59.3	25.3	0.59
実験4	1.8	16.1	7.6E+05	3.6E+03	56.8	25.1	0.57
実験5	1.7	17.9	7.9E+05	4.6E+03	59.2	22.8	0.59
実験6	1.7	18.1	7.9E+05	4.5E+03	58.6	23.7	0.59
実験7	2.3	23.3	1.1E+06	2.6E+03	65.2	57.8	0.65
実験8	2.3	25.8	1.2E+06	7.8E+03	64.2	21.2	0.64

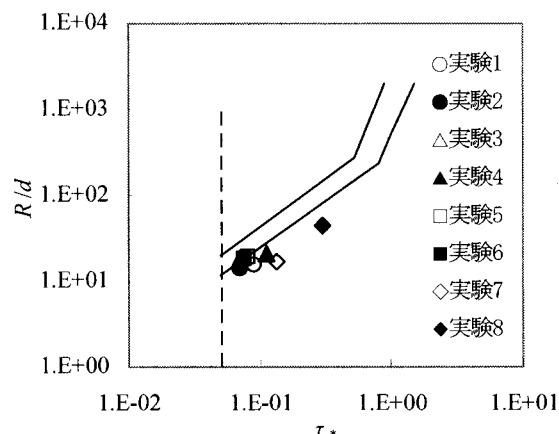


図-4 芦田・道上の方法による河床区分

(6) 河床判定

各実験より得られたデータから芦田・道上¹⁾の河床形態判定法を用いて河床形態の判別を行った。図-4にその結果を示す。図-4より実験1, 2, 4, 5, 6についてはTransitionの領域で平坦河床であると判断されるが、実験3, 7, 8についてはLower regimeの領域となった。しかしながら、Transition領域に近い値となっており、目視では河床波の形成は観測されなかった。このことから今回の実験では河床波は形成されなかったものとして、検討を行った。

4. 掃流砂量の算定

扱っている河床材料が中礫であるとともに、流速も極めて大きいので、水路上流端において流出土砂を直接計測できない。そこで河床高の高さの変化と供給土砂量を基に算出した。すなわち通水開始及び終了時に全水路延長にわたって河床高を測定し、空隙を含む通水開始時の見掛け河床土砂体積 V_1 と通水終了時見掛け河床土砂体積 V_2 を算定するとともに、通水開始及び終了時の空隙率 λ_1, λ_2 を測定して通水開始時土砂体積 $V_1(1-\lambda_1)$ 、通水終了時土砂体積 $V_2(1-\lambda_2)$ を算出した。投入土砂は各実験の初期河床を形成した材料と同じ材料を使用しているため、投入土砂と実験開始時の河床土砂空隙率 λ_1 は等しいとした。次に通水開始時の河床土砂体積に投入土砂

表-5 q_{b*}, q_{b*x}

	実験7	実験8
q_{b*}	0.047091	0.003958
q_{b*x}	0.043598	0.003849

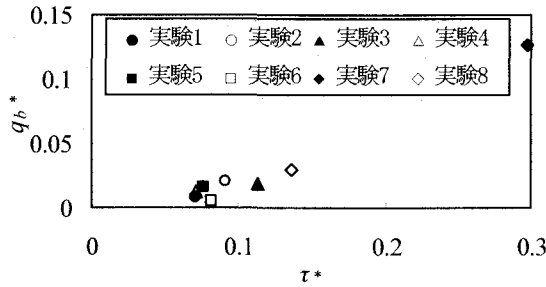


図-5 各実験の無次元掃流砂量

体積を加えた体積から、通水終了時の土砂体積を差し引いた体積を全掃流砂量 V とし、各実験の粒径別掃流砂量 V_i 及び全掃流砂量 V を次式によって求めた。

$$V_i = (V_1 + V_1') \cdot P_{1i} \cdot (1 - \lambda_1) - V_2 \cdot P_{2i} \cdot (1 - \lambda_2) \quad (1)$$

$$V = \sum V_i \quad (2)$$

ここで V ：全掃流砂量、 V_i ：粒径別全掃流砂量、 V_1 ：実験開始時見掛け土砂体積、 V_1' ：投入土砂見掛け体積、 V_2 ：実験終了時見掛け土砂体積、 P_{1i} ：粒径別の実験開始時粒度分布率、 P_{2i} ：粒径別の実験終了時粒度分布率、 λ_1 ：実験開始時空隙率、 λ_2 ：実験終了時空隙率である。

河床土砂体積について、交換層を実験終了後の河床表面から最大粒径の深さとし V_1 、 V_2 は次のようにした。

$$V_1 = Z_1 \cdot L \cdot B \quad (3)$$

$$V_1' = Z_1' \cdot L \cdot B \quad (4)$$

$$V_2 = Z_2 \cdot L \cdot B \quad (5)$$

Z_1 ：交換層からの初期河床高、 Z_1' ： $V_1'/(L \cdot B)$ 、 Z_2 ：交換層厚、 L ：水路延長、 B ：水路幅である。

上式より求めた土砂輸送量を(6)式で単位幅(m)、単位時間(秒)あたりに換算して掃流砂量及び粒径別の流砂量をそれぞれ q_b 、 $q_{b,i}$ とし、これを(7)式で無次元化し無次元掃流砂量 q_{b*} 、 $q_{b*,i}$ を求めた。ここで添字 i は粒径区分 i の値であることを示している。

$$q_b = \frac{V}{B \cdot t} \quad (6)$$

$$q_{b,i} = \frac{V_i}{B \cdot t}$$

$$q_{b*} = \frac{q_b}{\sqrt{sgd_m^3}} \quad (7)$$

$$q_{b*,i} = \frac{q_{b,i}}{\sqrt{s \cdot g \cdot d_i^3}}$$

s ：土砂水中比重、 d_m ：平均粒径、 d_i ：各粒径である。

また(1)、(2)式の土砂輸送量が適当であるかどうかを調べるため、実験7、8で水路より掃流され水路の下流端に位置する低水槽に落下した土砂量 V_x を計測し、掃流砂量 q_{bx} 、無次元掃流砂量 q_{b*x} を求めた。表-5に q_{b*} と q_{b*x} の比較を示す。表-5より q_{b*} と q_{b*x} の差はわずかであるため、 q_{b*} 、 $q_{b*,i}$ を実測の無次元掃流砂量と見なすことが可能と判断される。算出した各実験の q_{b*} を図-5に示す。

通水中の河床勾配の変化がなく、河床波も観察されなかったことから、河床材料が流下方向に一様に移動しているものと考えられる。このことから求められた掃流砂量を水路全体にわたっての平均的な掃流砂量であるとして、各掃流砂量式との比較を行った。

5. 掃流砂量の検討

(1) 実測値の整理

これまで得られた値を元に掃流砂量について実測値と掃流砂量式による計算値の比較及び検討を行った。

ここで今回の実験は表-4に示す通り水深と水路幅の比、 h/B が大きい実験であったため、側壁の影響を考慮しEinsteinの方法²⁾を用いて、側壁の影響を補正した径深 R を式(8)により求めた。

$$R_w = h \left(1 - \frac{R_w}{B} \right) \quad (8)$$

側壁の支配する径深 R_w は側壁の粗度係数を n_w として(9)式で表される。

$$R_w = \left(\frac{n_w u}{\sqrt{i_e}} \right)^{3/2} \quad (9)$$

ここで i_e ：水面勾配、側壁の粗度係数 n_w はガラスの一般的な値とされる、 $n_w = 0.011$ とした。また摩擦速度 u_* 、無次元層流力 τ_* はそれぞれ(10)式、(11)式で表される。

$$u_* = \sqrt{g R_w i_e} \quad (10)$$

$$\tau_* = R_w i_e / s d \quad (11)$$

掃流砂量式については、現在まで多くの計算式が提案されている。それら掃流砂量式は複雑な流水中の土粒子の運動をモデル化、または次元的解析手法、実測値等に基づき構築されたものであり、その推定手法がそれぞれ異なり、各々の流砂量推定値に差がある。今回実験を行った粗粒径土粒子の運動・掃流砂量については不明な部分が多いと考えるため、ここではいくつかの式を使い実測値との比較検討を行うこととした。掃流砂推定式のうちで代表的な、Meyer・Peter-Müllerの式³⁾と芦田・道上の式¹⁾、佐藤・吉川・芦田の式⁴⁾を用いて、平均粒径 d_m を代表粒径とした掃流砂量計算と粒径別による掃流

--- Meyer・Peter-Müller 芦田・道上
—— 佐藤・吉川・芦田 ○ 実測無次元掃流砂量

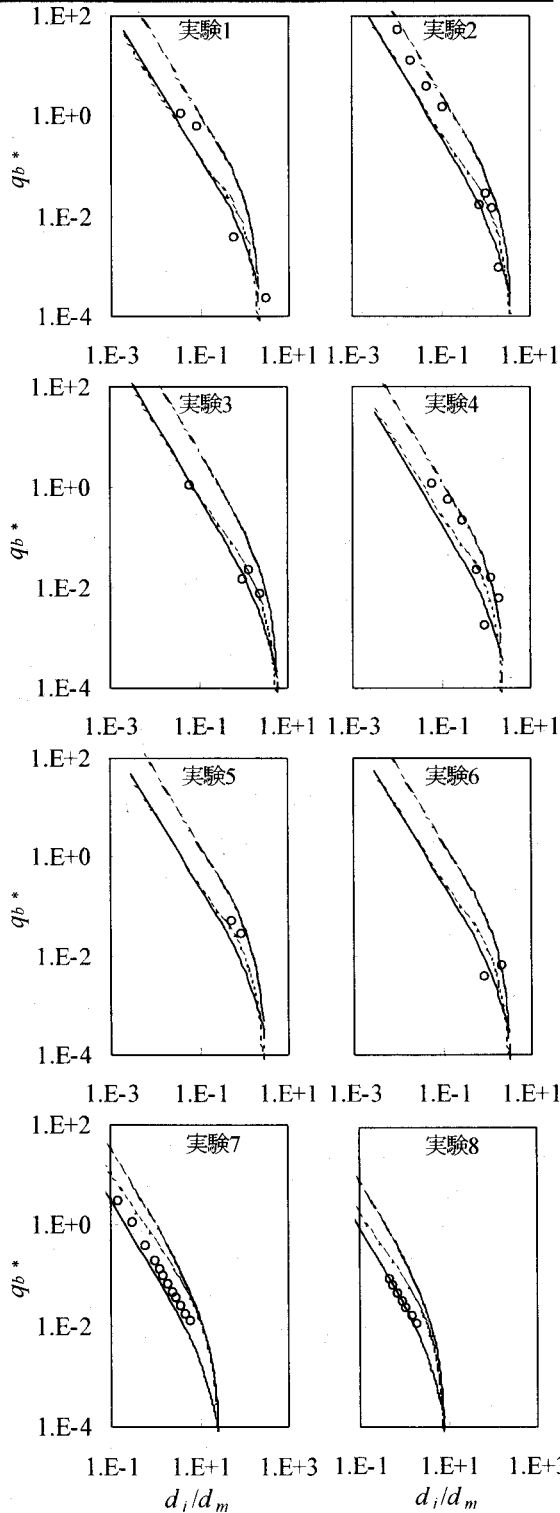


図-6 実測値と計算値(粒径別)

砂量計算を行った。このとき前述したように実験水路に河床波は形成されなかったとして、流れの水量から算定された抵抗力がそのまま河床の掃流力と見なした。

Meyer・Peter-Müllerの式は次式で表される。

$$q_{b*} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \quad (12)$$

表-6 各掃流砂量式を導き出した実験の粒径範囲

粒径範囲	
Meyer・Peter-Müllerの式	0.4mm～30.0mm
芦田・道上の式	0.3048mm～7.01mm
佐藤・吉川・芦田の式	0.305mm～11.1mm
本実験	0.075mm～75mm

●実験1 ○実験2 ▲実験3 △実験4
■実験5 □実験6 ◆実験7 ◇実験8
--- Meyer・Peter-Müller
..... 芦田・道上($u_* / u_{*c} = 0.7$)
—— 佐藤・吉川・芦田($n \geq 0.025$)

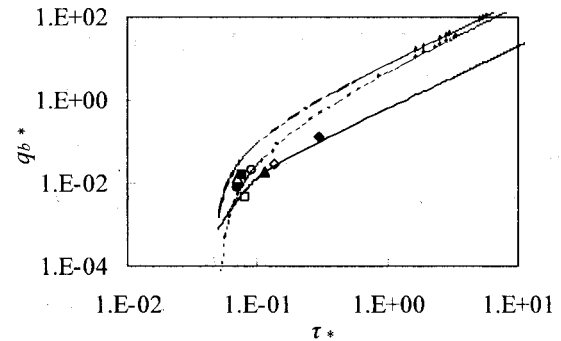


図-7 実測値と計算値(平均粒径)

芦田・道上の式は次式で表される。

$$q_{b*} = 17\tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (13)$$

$$\frac{u}{u_{*c}} = (6.0 + 5.75) \log_{10} \frac{R_b}{d(1 + 2\tau_*)} \quad (14)$$

また佐藤・吉川・芦田の式は

$$q_{b*} \cdot \sqrt{sgd^3} = \frac{u_*^3}{sg} \cdot \frac{1}{1 + 8(u_{*c}^2 / u_*^2)^4} \cdot f(n) \quad (15)$$

$$f(n) = \begin{cases} 0.623; & n \geq 0.025 \\ 0.623(40n)^{-3.5}; & n \leq 0.025 \end{cases} \quad (16)$$

ここで q_{b*} ：無次元掃流砂量， τ_{*c} ：無次元限界掃流力， s ：砂粒の水中比重で， τ_{*c} については平均粒径 d_m を代表粒径とした掃流砂量計算の場合は岩垣の式⁵⁾を，粒径別の掃流砂量計算の場合はEgiazaroffの式⁶⁾と平野⁷⁾と芦田・道上¹⁾が $d_i / d_m \leq 0.4$ の範囲において提案した(17)式及び(18)式で表される式を用いて導いた。

$$\frac{d_i}{d_m} > 0.4: \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_i / d_m)} \right]^2 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \quad (17)$$

$$\frac{d_i}{d_m} \leq 0.4: \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = 0.85 \quad (18)$$

ここで u_{*cm} ：平均粒径 d_m に対する摩擦速度であり，岩垣の方法により求めた。

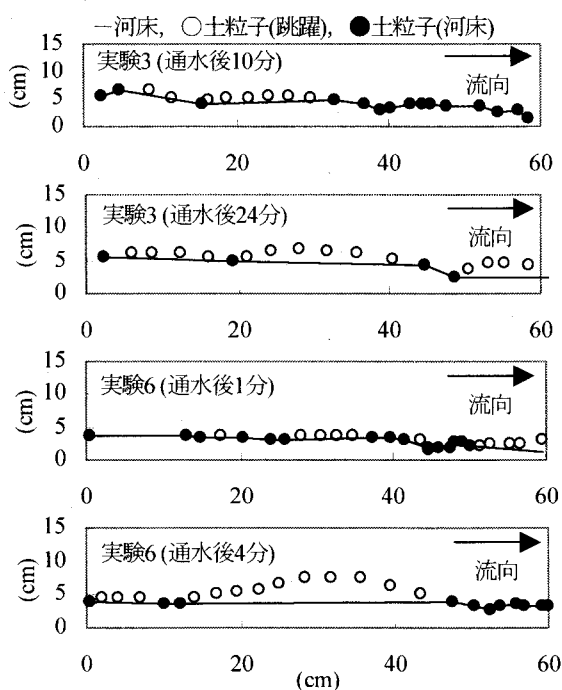


図-8 土粒子の移動軌跡

また、これら掃流砂量式を導いた実験の粒径範囲と本実験の粒径範囲を表-6に示す。

(2) 各実験における流砂量と掃流砂量式との比較

各実験について粒径別に実測の無次元掃流砂量と各掃流砂量式による計算値との比較を図-6に示す。ここで掃流砂量が負、すなわち掃流砂量よりも堆積量が大きかったものについては除外した。掃流砂量よりも堆積量が大きくなる理由としては、通水中に供給された土砂が河床の空隙を埋め、その結果として掃流される土砂が少なく堆積量が多くなったことが考えられる。図-6より実測値が特定の掃流砂量式に近似しているとは言えず、最も大きい値を示すMeyer・Peter-Müllerの式と最も小さい値を示す佐藤・吉川・芦田の式の間に実測値が分布する結果となった。

また各実験について平均粒径 d_m を代表粒径とした場合の無次元掃流砂量と、各掃流砂量式による計算値との比較を図-7に示す。図-7において芦田・道上の式については、有効摩擦速度 u_{*c} と摩擦速度 u_* の比を各実験の平均値 $u_{*c}/u_* = 0.7$ とした計算値を記載した。また、各実験とも算定されたManningの粗度係数は0.025以上であったため、佐藤・吉川・芦田の式については $n \geq 0.025$ での計算値を記載している。図-7より全流砂量については、佐藤・吉川・芦田の式が最もよく実験結果と一致する結果となった。

したがって各粒径ごとに掃流砂量を見た場合には、条件によって一致する掃流砂量式が見られるが、全流砂量としては佐藤・吉川・芦田の式が今回の実験に最も一致する結果となった。

佐藤・吉川・芦田は水塊の乱れによって生起する揚圧力が粒子の重量よりも大きくなったとき、粒子が跳躍し掃流されるとして掃流砂量式を導いている。図-8は実験3, 7における任意の土粒子の挙動について、ビデオ撮影された1/12秒間隔での位置を示したものである。白丸が河床から跳躍しながら移動している状況を、黒丸が河床上を移動している状況をそれぞれ示している。図-8のように土粒子が跳躍し掃流される現象が各実験において観察された。しかしながら土粒子の挙動については図-8のような挙動を示す土粒子が支配的であるとするにはまだ観測解析事例が少ない。これらのことについては今後の検討課題としたい。

6. 結論

本報告では、高速循環実験水路を使用し通常の実験水路では実験することが困難である、粗粒径の河床材料を用いた実験及び実河川の河床状況を再現した実験を行い、代表的な掃流砂式のうち3式を用い検討を行った。結果として、比較した3式のうち佐藤・吉川・芦田の式が全流砂量としてもっとも実測値を良く表現する結果となった。

今回の実験は実測例の少ない粗粒径の実験データとして貴重な一例であると考ええる。今後前述の課題を踏まえ高速循環実験水路を用いた実験とそのデータの実河川との適合性を検討していく予定である。

謝辞：本研究は国土交通省北海道開発局の受託業務による補助を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp59~69, 1972
- 2) Einstein, H. A.: Formulas for the transportation of Bed Load, Trans. ASCE, Vol. 107, No. 2140, pp561~577, 1942
- 3) Meyer-Peter, E. and Muller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd Cong. ITAH, Stockholm, Sweden, pp. 39~64, 1948
- 4) 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), 建設省土木研究所報告, 第98号, 1958
- 5) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎研究, (1)限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, 土木学会, pp1~21, 1956
- 6) Egiazaroff, I. V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY4, pp225~247, 1965
- 7) 平野宗夫：Armoringをともしなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp. 55~65, 1971

(2002. 9. 30受付)