

2003年8月洪水において二風谷ダム湖に堆積した 微細粒子の沈降・浮上速度

Fall velocity and Rise velocity of accamuated sedimene
in the Nibutani Dam reservoir

北海道開発土木研究所 ○正会員 島田 友典 (Tomonori SHIMADA)
北海道開発土木研究所 正会員 渡邊 康玄 (Yasuharu WATANABE)

1. はじめに

近年河道内における土砂の侵食・堆砂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、河川管理において流域一貫した土砂管理の重要性が指摘されている。河川において土粒子の移動は特に増水時に顕著に生じ、下流域へと供給されることから、各地において洪水時の物質輸送に関する現地調査が実施されてきている。

北海道開発土木研究所では、中流域にダム湖の存在する沙流川において洪水時の調査を実施し、中下流域のSSや栄養塩類の挙動について把握を行ってきている。出水時の観測データ・出水前後の横断測量等を用いた土砂収支に関して良好な結果を得ている。¹⁾²⁾³⁾

沙流川中流域に位置する二風谷ダムには、年間100万 m^3 の土砂が堆積しており、維持上の問題ともなり得る。特に2003年8月に生じた台風10号による洪水では、既往最大流量を記録し、ダム湖にも240万 m^3 の土砂が堆積した。

著者らは中流域にダム湖の存在する流域一貫を対象とした土砂収支の予測を行っていく第一歩として、未解明部分の多いダム湖内に堆積する粒径の非常に細かい土粒子の挙動を把握することを目的に、二風谷ダム湖の底質採取、採水した試料を用いて土粒子の沈降・浮上実験を行い、二風谷ダム湖内における沈降・浮上の推定式を導き出した結果を利用し、2003年8月に起こった沙流川での出水時のダム湖内における現象を再現することを試みた。⁴⁾しかし沈降実験では非常に粒径の細かいものを対象としていたため、既存の沈降速度式にどのように遷移していくかは推定の域を出ず、また沈降速度も粒径のみに依存するものであった。

そこで本論文では沈降速度実験において対象となる粒径の範囲を広げ、二風谷ダム湖内の土粒子の挙動について再現精度をあげるべく河床変動計算で用いられている砂礫を対象とした既往の式の適応性について検討を行った。

2. 土粒子の沈降・浮上実験

シルト以下を対象とした、組成土(0.0075cm以下)における実験と同様、ダムに堆積した細粒径の粘着性土粒子の挙動を明確にするため、二風谷ダムに2003年8月洪水でダム湖底に堆積した土砂を出来る限り不覚乱状態で採取し、土粒子の沈降・浮上実験を実施した。結果および検討にあたっては今回の実験に加え、シルト以

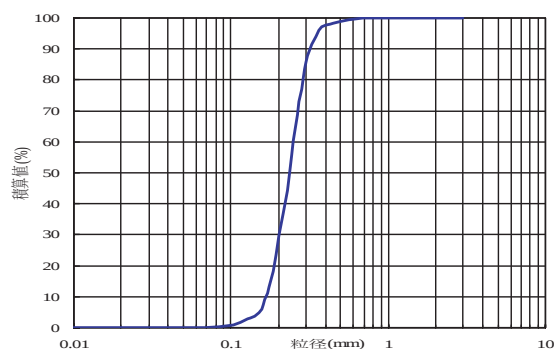


図-1 細砂まで対象にした沈降速度実験の粒度分布

下で行った実験結果も合わせて新たに行うことにした。

(1) 沈降実験

a) 沈降実験の概要

使用した実験装置は幅150mm、高さ750mm、奥行き50mmの亚克力製の水槽を用い、採取した底質材料を250 μm および75 μm メッシュのふるいにかけて実験用の試料をつくり、画像解析装置により336個の土粒子を粒径ごとに沈降速度を測定した。なお、今回新たに行った試料の粒径区分は図-1のとおりである。

b) 沈降実験の結果

実験の結果を図-2示す。ここで沈降速度式を推定することにするがシルト以下を対象とし、提案したもの⁴⁾は沈降速度が粒径によってのみ作用されるものであった。しかし実河川に適用させ、土粒子比重・動粘性係数も考慮した式の提案が、実現象の再現には不可欠と考える。そこで今回は土粒子の水中での抵抗係数を推定することにより、土粒子の沈降速度を導くことを試みた。Rubeyは実験の結果より(1)式を導いている。

$$C_D = \frac{24}{Re} + 2 \quad (1)$$

ここで C_D :土粒子に対する抵抗係数、 Re :レイノルズ数である。この式と実験値の結果を図-3に示す。Rubeyの抵抗係数と比較すると、実験結果では全体的に抵抗が大きいと言える。そこで最小二乗法により線形近似を行い(2)式を得た。

$$C_D = \frac{50.0}{Re} \quad (2)$$

ただし適用範囲は $d_i \leq 0.025\text{cm}$ である。

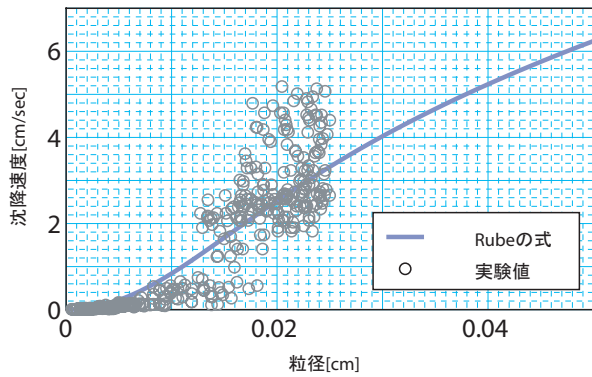


図-2 沈降速度実験結果

一方、流体抵抗が沈降速度の2乗に比例すると仮定した場合の運動方程式は(3)式である。

$$M \frac{dw_i}{dt} = (M - m)g - \frac{1}{2}m \frac{dw_1}{dt} - \frac{1}{8}\pi d^2 \rho C_D w_1^2 \quad (3)$$

ここで M :土粒子の質量, m :水の質量, w_1 :土粒子の沈降速度, d :土粒子直径, g :重力加速度, t :時間である。この式を $t=0, w_1=0$ という条件で積分すると(4)式で表される特殊解を得る。

$$\frac{w_1}{w_0} = \tanh(\eta t) \quad (4)$$

この特殊解より w_1 が終末沈降速度に達するには w_1/w_0 が1に近くなるまでの時間を考えればよい。また w_1 が w_0 になる時は $dw_1/dt=0$ であるから(3)式より(5)式を得ることになる。

$$w_0 = \left(\frac{4}{3} \frac{gd}{C_D} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right)^{1/2} \quad (5)$$

この式に(2)式を代入することにより(6)式を得る。

$$w_f = \frac{1}{34} \frac{sgd^2}{\nu} : d \leq 0.025 \text{ cm} \quad (6)$$

ここで s :土粒子の水中比重, ν :動粘性係数である。

以上より二風谷ダム湖における推定の土粒子沈降速度式の算出をすることが出来た。これを図-4に示す。なお従来の Rubey の式による値も比較のために併記した。

(2) 浮上実験

a) 浮上実験の概要

北海道開発土木研究所が所有する延長 25.0m, 幅 1.0m, 深さ 1.0m の可傾斜水路を用いて二風谷ダム湖で採取した試料を用いて実験を行った。使用した実験水路は図-5に示すとおりで、上流から 11.0m ~ 15.0m の区間 (長さ 4.0m・幅 1.0m) にダム湖の底質を敷き詰め、表-1の条件で30分間の通水を行った。

底質区間の河床高測定は縦断方向に左右岸それぞれ9点とし、通水開始時および5分毎の計7回計測を行った。

また底質材料の移動量を求めるため、通水前後において詳細な河床高の測定を行った。計測数は横断方向5

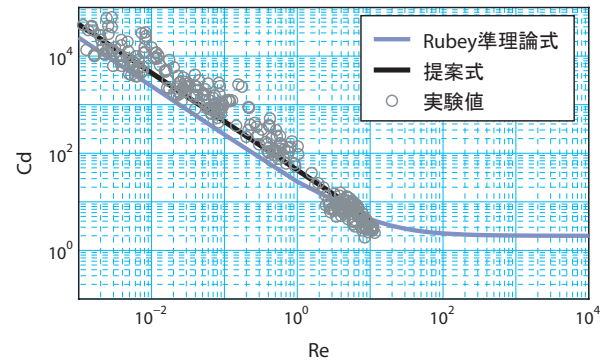
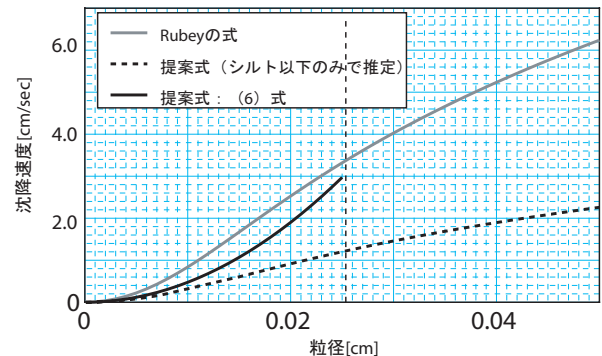
図-3 土粒子に対する抵抗 C_D 

図-4 Rubey の式と著者が提案する式の関係

表-1 浮上実験の諸元

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
流量 (m^3/s)	0.10	0.20	0.22
河床勾配	1/5000	1/5000	1/400
水深 (cm)	75	55	21
通水時間 (分)	30	30	30

表-2 通水後の底質材料移動量

	投入量 [m^3]	残留量 [m^3]	移動量 [m^3]
ケース 1	0.399	0.378	0.022
ケース 2	0.383	0.358	0.025
ケース 3	0.412	0.257	0.154

点と縦断方向9点である。この結果より底質材料区間における通水前後の底質材料の実体積を算出し、その差を移動量とした。併せて底質材料の粒度分析も行った。

さらに浮遊砂濃度測定のため通水中に水路内の1点で採水を行った。計測数は通水前と10分毎の計4回である。併せて浮遊砂の粒度分析も行った。

b) 浮上実験の結果

通水前後の河床高の左右岸平均値を図-6に、底質材料の移動量を表-2に、水中のSS濃度を表-3に示す。

これらの結果より実験で計測された浮上量を算出し

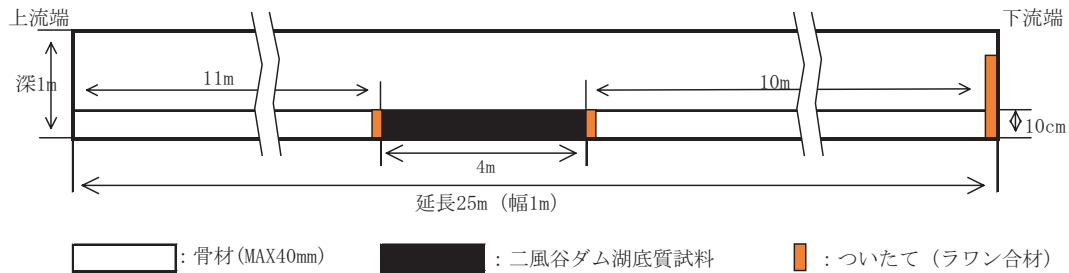


図-5 浮上実験に用いた実験装置 (側面図)

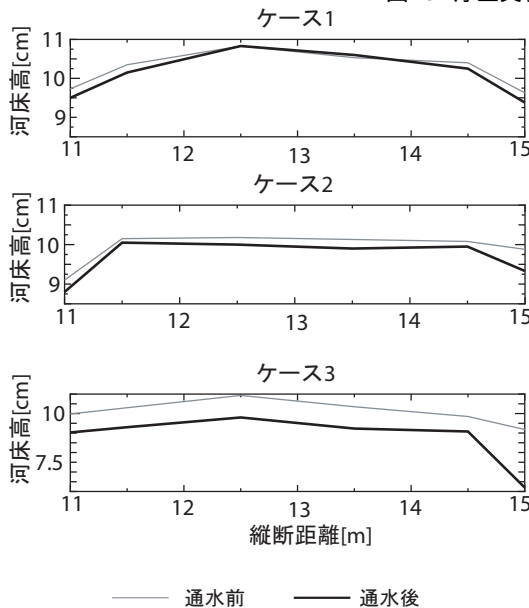


図-6 河床高変化

表-3 通水前後における SS 濃度

	通水前 SS(mg/l)	通水後 SS(mg/l)
ケース 1	17.00	18.50
ケース 2	19.50	31.30
ケース 3	277.75	335.00

た、算出方法は (7) 式を用いた。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} (q_{sui} - n w_{fi} \times c_i) \quad (7)$$

ここで q_{sui} : 粒径別単位時間単位面積あたりの河床からの浮上量, z : 河床高, t : 時間, λ : 空隙率, c_i : 粒径別浮遊砂濃度である。

なお比較のため, (8) 式で表される板倉の式⁵⁾⁶⁾を用いた浮上量を算出することとした。板倉の式は粘性土を対象としないが, 沙流川の河床変動計算⁷⁾において採用され, 実測を精度よく再現していることから, 本研究で対象とする非常に細かい土粒子にも適用可能かを見るために採用した。

$$q_{sui} = p_i K \left(\alpha_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{g d_i}{u_*'} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (8)$$

ここで, p_i : 粒径 d_i の粒子が存在する割合, ρ_s : 浮遊砂粒子の密度, ρ : 水の密度, u_*' : 有効摩擦速度, $K=0.008$, $\alpha_*=0.14$ である。また Ω_i は (9) 式で表される。

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i}'}{B_{*i}} \frac{\int_{a'}^{\infty} \xi \frac{1}{\pi} (-\xi^2) d\xi}{\int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\pi} (-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}'}{B_{*i} \eta_0} - 1 \quad (9)$$

ここで τ_{*i}' : 粒径別限界無次元有効掃流力, $\eta_0=0.5$, B_{*i} : 揚力算定の際の速度に摩擦速度を適用するための換算係数であり, 均一粒径の場合は $B_{*i}=0.143$ の一定値が用いられるが混合粒径では (10) 式が用いられる。

$$B_{*i} = \xi_i B_{*0} \quad (10)$$

ここで $\xi_i = \tau_{*ci} / \tau_{*ci0}$, τ_{*ci} : 粒径別無次元掃粒力, τ_{*ci0} : 単一粒径に対する限界摩擦速度, $B_{*0}=0.143$ である。また (9) 式の a' は (11) 式が用いられる。

$$a' = B_{*i} \frac{B_{*i}}{\tau_{*i}} - \frac{1}{\eta_0} \quad (11)$$

ここで τ_{*i} : 粒径別無次元掃流力である。なお (8) 式と (9) 式の u_*' と τ_{*i}' は本来は全せん断力から河床波等の形状抵抗成分をのぞいた成分とするべきものであるが, ここでは実験中河床波等が形成されなかったことから, 河床波等がない場合として全抵抗に等しいとした。これらの結果をプロットしたものが図-7 である。すべての粒径において板倉の式による結果に比べると浮上量が小さい傾向が確認された。この結果を受けて, 二風谷ダム湖内に堆積した土砂の浮上量式を導くことにする。図-7の実験値を用いて (8) 式の係数 K について最小二乗法により K を算出する。その結果, $K=0.00015$ となり, この係数を用いた浮上量の計算値と実験値を比較すると図-8 となる。この結果より本来であれば粘性土砂について考慮すべきところを板倉の式の係数 K を変えることにより粒径の非常に細かいものについて再現可能であると考えられる。

3. まとめ

本報告はダム湖内における土粒子の挙動を明らかにするため, ダム湖から採取した試料を用いて実験を行い, その結果をもとに土粒子の沈降速度・浮上速度の推定を試みた。特に沈降速度については以前の著者の報告⁴⁾では沈降速度は粒径にのみ依存していたが, よ

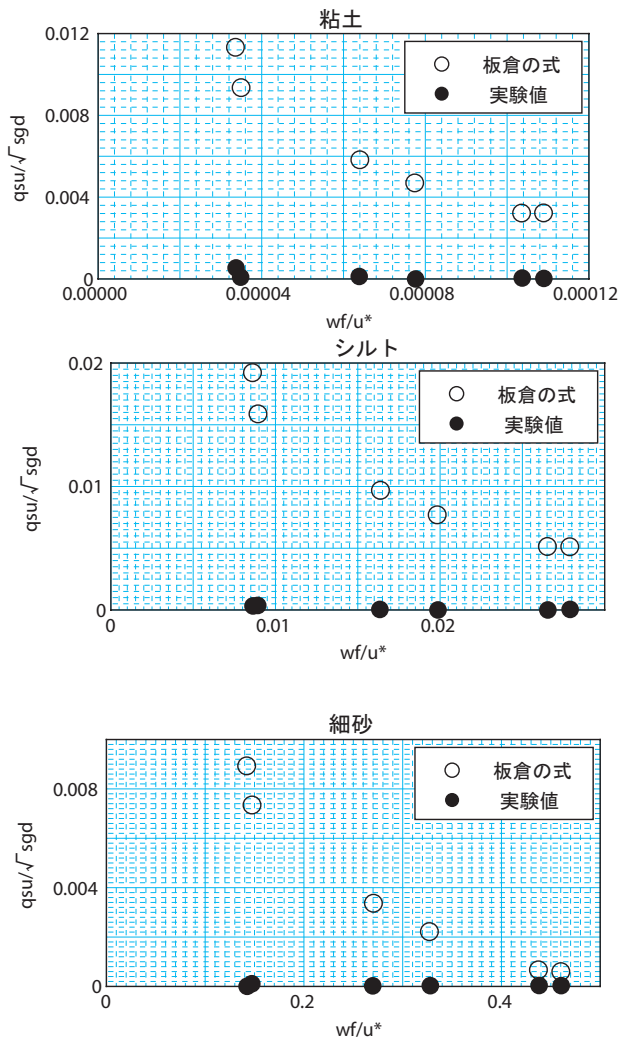


図-7 板倉の式と実験値の浮遊砂比較

り実現象の再現性を高めるため抵抗係数の推定から沈降速度を導き出した。これにより推定された沈降速度は土粒子水中比重、動粘性係数、粒径といった値に依存することになりより実現象の再現性が高まったと考える。

今回は沈降速度・浮上速度の推定をしたが、今後はこれらの式を用いて二風谷ダム湖内の再現計算を行い、未解明部分とされてきたダム湖内の土粒子の挙動を明らかにし報告する予定である。

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。記して謝意を示す。

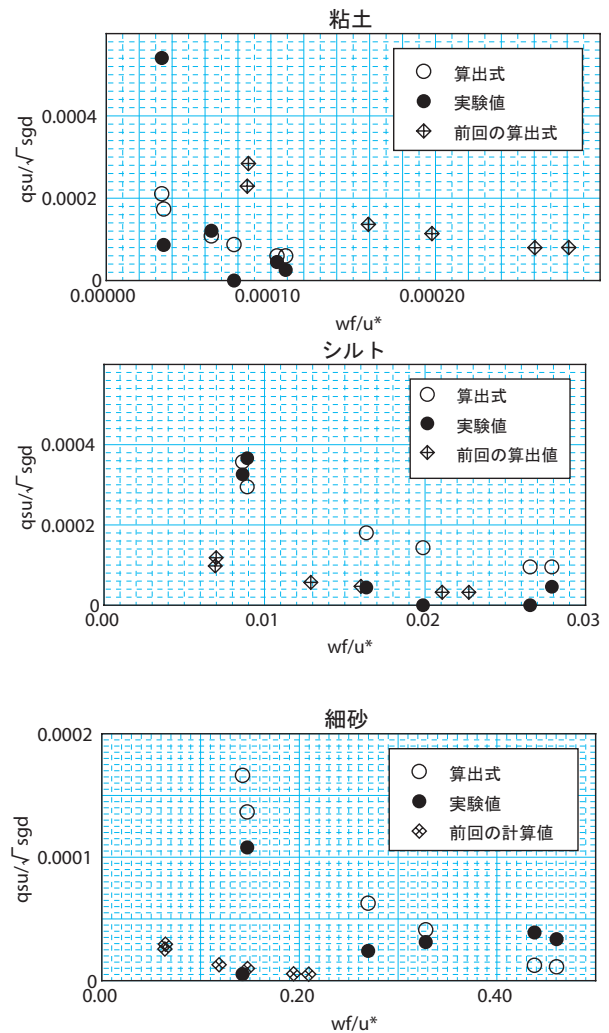


図-8 著者が提案する実験式と実験値の浮遊砂の比較

参考文献

- 1) 渡邊康玄・小川長宏：沙流川 2001 年夏季出水時の SS 輸送特性，土木学会北海道支部論文，2002。
- 2) 小川長宏・渡邊康玄：中流域にダム湖が存在する河川における土砂・物質輸送の観測，河川技術論文集，vol.9，pp.347-352，2003。
- 3) 小川長宏・渡邊康玄：二風谷ダムでの 2003 年台風 10 号における SS の挙動，河川技術論文集，vol.10，2004。
- 4) 島田友典・吉川泰弘・渡邊康玄：2003 年 8 月沙流川洪水時の二風谷ダム湖内の土砂移動，水工学論文集（投稿中）
- 5) Itakura, T. and Kishi, T.: Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, Vol.106, No. HY8, pp.1325-1343, 1980。
- 6) 板倉忠興：河川における乱流拡散現象に関する研究，北海道開発局土木試験所報告，第 83 号，1984。
- 7) 坊野聡子・清水康行・黒木幹男・藤田睦博・吉田義一：ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究，土木学会論文集，No.656/ -52，pp.61-72，2000。