

フラッシング排砂のプロセスと その数値シミュレーション

PROCESS OF FLUSHING SEDIMENT THROUGH RESERVOIR AND THE NUMERICAL SIMULATION

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・高須賀 真哉³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Shinya TAKASUKA

¹正会員 博士(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科(同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻(同上)

The process of flushing sediment through reservoirs was investigated experimentally and numerically. The experiments were conducted to obtain the bed variation data of the flushing sediment for verification of the numerical models. The effects of gate of flushing and horizontal shape of the reservoir on the bed variation and sediment discharge through the gate were also examined from the experimental results. A numerical simulation of the flushing sediments were also performed by two-dimensional bed variation model and verified against the obtained data. It shows that the model has ability to reproduce the process of the flushing sediments, but the more improvement is needed to predict the flushing process with reasonable accuracy.

Key Words : reservoir sedimentation, flushing sediment, experiments, numerical simulation

1. はじめに

近年,ダム貯水池では予測を上回る堆砂の進行に伴い,その機能の低下が問題となっている.ダム機能を恒久的に維持していくためには,ダム貯水池での適切な土砂管理の手法の確立が必要となる.ダム堆砂は世界規模の問題であり,ダム貯水池の持続的管理の実現可能性を評価・検討を行う「RESCON(REservoir CONservation)モデル¹⁾のようなツールの開発も行われている.

ダム貯水池の堆砂対策としては,浚渫・掘削土をダム下流に置き,土砂を河道に還元する「置き砂」,土砂の貯留によりピーク流砂量を減少させる「砂防ダム」,流送土砂を貯水池内に貯めることなく河道へ還元する「バイパストンネル」,ダムの貯水位を強制的に下げ,流水の掃流力により土砂を河道へ還元する「フラッシング排砂」などが挙げられる.これらの対策の中でも,フラッシング排砂は自然の力を利用することから,恒久的な堆砂対策として位置付けられている²⁾.フラッシング排砂の実施には,(1)貯水位の低下・回復の操作を行う上で水量が十分確保できること,(2)底部放流管(排砂ゲート)が設置されていること,などの条件を満たせば良く³⁾,スイスやフランス等の欧州各国では既に実施

され,貯水容量の持続的な確保に成功している.また,わが国でも黒部川の宇奈月,出平ダムで連携排砂が実施されている⁴⁾.

フラッシング排砂時には水位低下に伴う縦断方向の河床低下と横断方向の側岸侵食が同時に進行する.そのため,排出される堆砂土砂量は,排砂時に形成される水みちの幅,縦断勾配および側岸侵食状況に依存し,これらは排砂時の流量,ダム貯水池の平面形状,排砂ゲートの形状・敷高,堆積土砂の土質力学的要素等によって決まることがわかっている^{5),6)}.このため,排砂時の排砂効率や貯水池内の河床変化や下流に及ぼす環境上の影響等を把握するためには,上記のようなことを適切に評価できるツールが必要となる.

このようなツールとして,数値解析は有効であると考えられるが,そのためには水位低下時に生じる常・射流下での河床変動,側岸侵食等の様々な問題を取り扱う必要がある.河道を対象に側岸侵食や崩落土砂を考慮し,流路変動の予測を行う数値モデルは存在するものの^{7),8),9)},フラッシング排砂のように常・射流が混在した複雑な流況での河床変動を十分な精度で再現できるかどうか不明である.砂防分野では山地河川を対象に常・射流下での河床変動,側岸侵食に関する数値

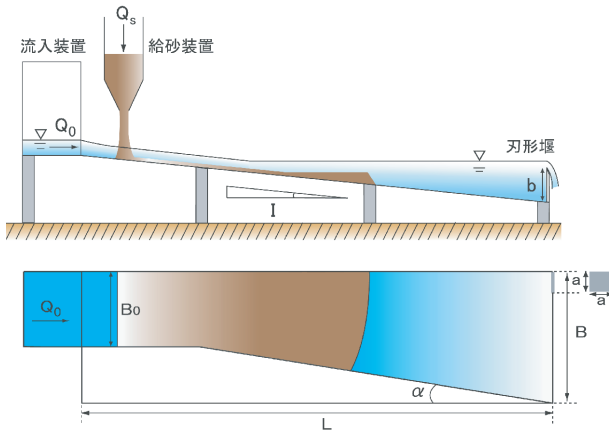


図-1 実験装置および流れの定義図

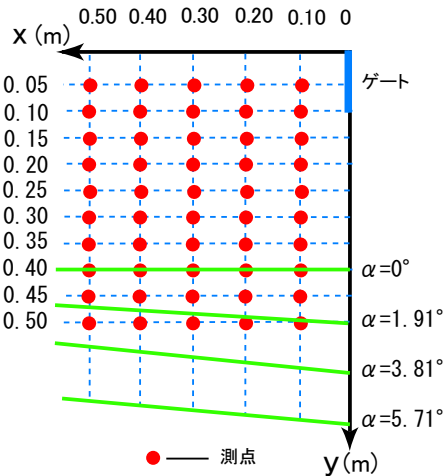


図-2 水深と河床の測定点

モデルの開発が活発に行われている¹⁰⁾ものの、それらのモデルのフラッシング排砂への適用性については不明である。また、フラッシング排砂による排砂量については Noh¹¹⁾らの研究が存在するが、排砂時の河床変動については角ら^{5),6)}の現地調査に基づくデータに限られており、数値モデルを検証できるようなデータは存在しないのが実情である。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、ゲートの形状と貯水池の平面形状が排砂プロセスに及ぼす影響を実験的に調べるとともに、数値モデルの検証に必要なデータを収集し、それに基づき数値モデルによる排砂プロセスの再現性について検討したものである。

2. 実験概要

実験は、排砂ゲートのサイズの違いが排砂プロセスに及ぼす影響を調べた Case A と貯水池形状が排砂プロセスに及ぼす影響を調べた Case B の二通りの実験を行った。

実験装置は、図-1 に示す長さ 4.0m、高さ 0.7m、幅 0.7m の全面アクリル製の水槽に幅 0.4m の等幅水路と片側の側壁の拡がり角度 α が一定の漸拡水路を水路床勾配 $I=1/20$ で設置したものである。水路の下流端には

高さ 0.15m の刃型堰が設置されており、堰には可動ゲート(高さ a (m) × 幅 a (m)) が設けられている。水路上流端から一定流量 $Q_0=2.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ で通水し、定常状態とした後に、水中比重 $s=1.65$ 、中央粒径 $d=0.75\text{mm}$ の砂を一定量 (Case A: $Q_s=1.33 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$, Case B: $Q_s=0.4 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$) で給砂し堆砂させた。給砂は水路上流端で横断方向に一樣に流入させ、堆砂フロントがゲートから 0.1m に到達するまで行い、ゲートから 0.05m に到達した時にゲートを瞬間的に開放し、フラッシング排砂を行った。

Case A では側壁の拡がり角度 $\alpha=5.71^\circ$ とし、ゲートサイズを 2 通り変化させ排砂を行った。ゲート形状を一辺が a の正方形とし、ゲート周辺の流れが自由表面流状態 (Case A-1 $a=0.1\text{m}$) と圧力流状態 (Case A-2 $a=0.07\text{m}$) になるよう a を決定した。Case B では側壁の拡がり角度 α を 4 通り (Case B-1: $\alpha=0^\circ$, Case B-2: $\alpha=1.91^\circ$, Case B-3: $\alpha=3.81^\circ$, Case B-4: $\alpha=5.71^\circ$) に変化させ行った。側壁の拡がり角度は剥離が生じないように、 7° 以下の間で変化させた。なお、ゲートサイズを $a=0.1\text{m}$ としゲート周辺の流れを自由表面流状態とした。

測定刻目は、水深 h 、河床高 z_b 、水みち幅 W_B 、ゲートからの排出流量 Q_e と排砂量 Q_{se} である。また、水みち幅は、図-2 に示す y 軸方向の流路幅と定義した。水深と河床高は、一定時間毎に目盛りを記した直径約 1mm の棒を水路床に垂直に落下させ、それを DV カメラで撮影し、収録された画像を画像解析することで求めた。なお、棒には自重で河床に埋まることを防ぐために、棒の先にはゴムシートが付けられている。本研究の測定方法による結果とポイントゲージによる水深および水路側面に設置した目盛りによる河床の測定結果との比較を行ったところ、その差は 1mm 程度であり、有意な差は認められなかった。測定点を図-2 に示す。水みち幅 W_B は、水路上方から DV カメラで撮影し、水深と河床高の解析同様に画像解析から水の流れと陸化した箇所境界を求め、流路の幅を y 軸に沿って測定することで算定した。また、ゲートからの排出流量 Q_e と排砂量 Q_{se} を一定時間間隔においてバケツで採取し、その体積を測定した。その際、いずれの測定も同一条件下で 3 回行い、それらの平均値をもって測定結果とした。なお、測定誤差は 1 割未満であった。

3. 結果と考察

(1) ゲートの形状が排砂プロセスに及ぼす影響

図-3 は、Case A-1 の河床変動と流況の写真を示したものである。また、Case A-1 と A-2 の河床変動と水位をコンター図化したものが、図-4 である。これより、(1) ゲート開放により水位が低下し、掃流力が増すことで河床が侵食され、砂がゲートから排出される様子、(2)

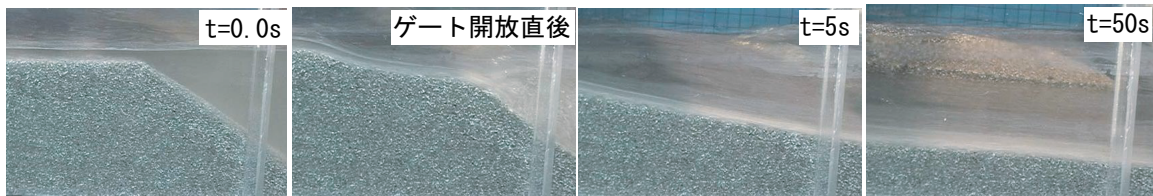
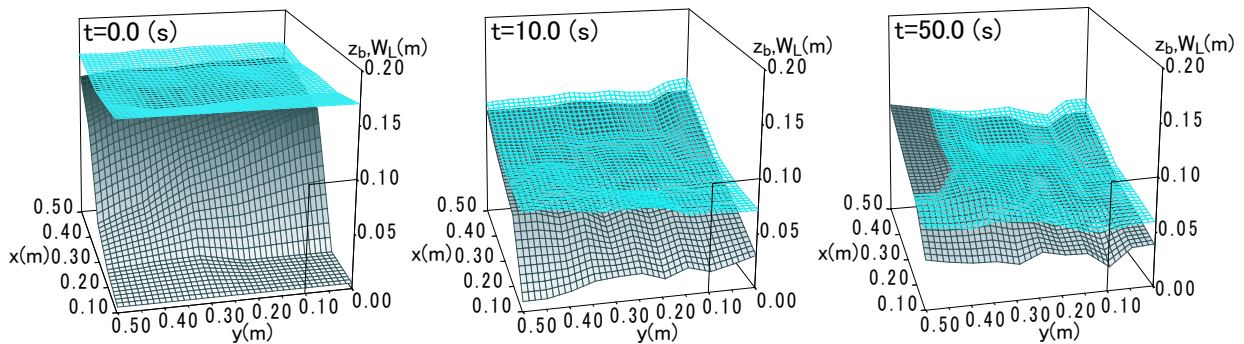
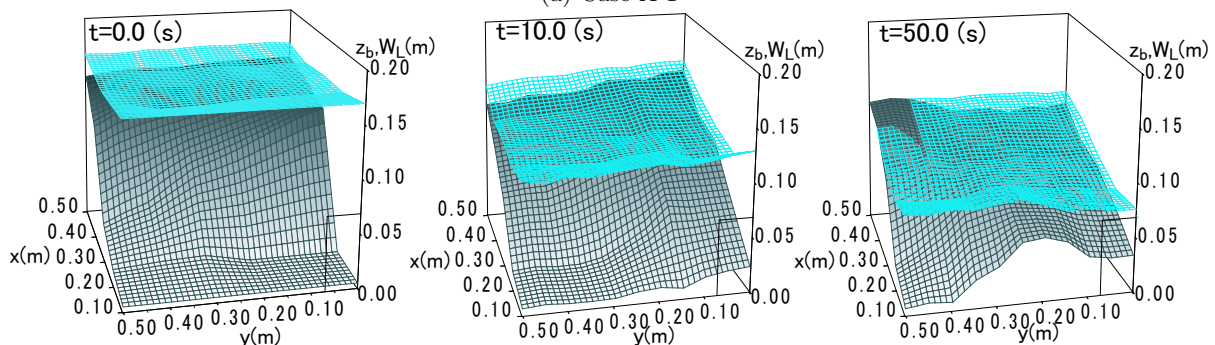


図-3 流況と河床変動状況 (Case A-1)



(a) Case A-1



(b) Case A-2

図-4 水面と河床コンター図の時間変化

ゲートがない右岸側は砂が堆積し，左岸側は水みちが形成される様子などがわかる．また，両 Case を比較すると，自由流出となる Case A-1 の方が全体的に河床高が低くなるのがわかる．これは，水面がより低下する Case A-1 の方が掃流力が増し土砂輸送が活発になるためである．

図-5 は，ゲートからの濁度と Q_{se} と Q_e の時系列変化を示したものである．これより，濁度と Q_{se} についてはゲートの開放とともに急激に増加した後に徐々に減少し，ほぼ一定に近づくこと， Q_e についてはゲートの開放とともに急激に増加した後に徐々に一定になることがわかる．実際のフラッシュ排砂では濁度のピーク値は，(1) ゲート付近に堆積していた土砂が流される時，(2) 貯水池内の堆積土砂の侵食が最も活発になるとき，(3) 河岸の侵食崩壊により一時的に土砂濃度が増加するときに 3 度発生する¹²⁾．本結果のピーク値は (2) に対応していると考えられる．また，Case A-2 では，Case A-1 に比べ Q_{se} ， Q_e のピーク値がともに減少すること，Case A-1 に比べ排出流量が小さく水位の低下に時間がかかるため Q_{se} のピーク値が遅れて現れるこ

とも確認できる．排砂開始 1 分後， Q_e が等しくなるにもかかわらず，Case A-2 の Q_{se} が小さいのは，ゲート幅が小さいために水位が低下せず，流速が大きくなるためである．また，式 (1) で表される排砂効率 F_e (総排出流量中に占める総排砂量の割合) を比較すると，Case A-2 は Case A-1 の 60% であった．なお， F_e が大きいことは，少ない流量で多量の土砂を排出できることを示している．

$$F_e = \frac{\int Q_{se} dt}{\int Q_e dt} \quad (1)$$

このように，本実験データは，ゲートサイズにより変化する自由表面流れや圧力流れのような流れの状態が排砂プロセスおよび排砂量に及ぼす影響を的確に捉えていることがわかる．

(2) 貯水池の平面形状が排砂プロセスに及ぼす影響

図-6 は Case B-3 ($\alpha = 3.81^\circ$) の場合の水みち形成状況を示したものである．これに基づき水みち幅の時間変化を求めたものを図-7 に示す．なお， $\alpha = 0^\circ$ では水

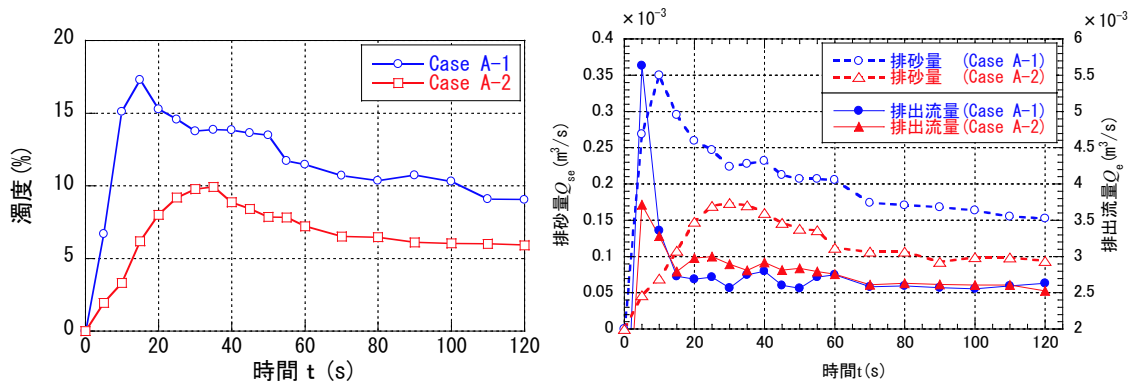


図-5 濁度の時間変化，排砂量 Q_{se} と排出流量 Q_e の時間変化 (Case A)

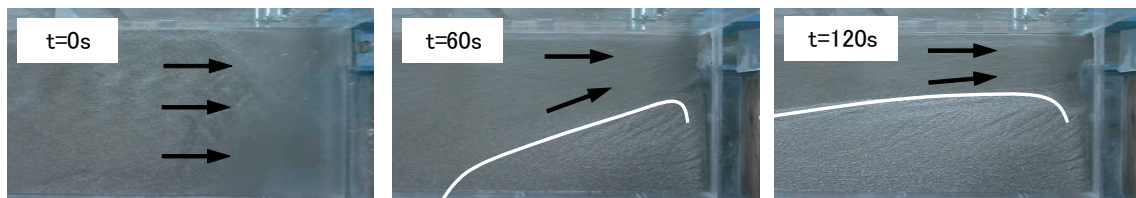


図-6 水みち形成時の流況写真 (Case B-3 : $\alpha=3.81^\circ$)

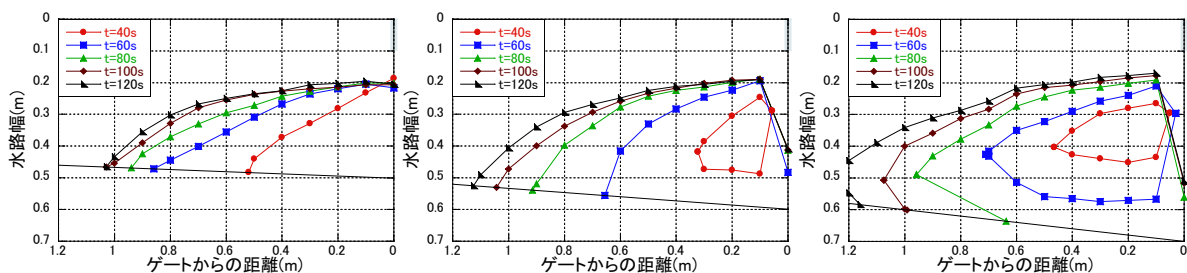


図-7 水みち形状の時間変化 (左 : Case B-2 : $\alpha=1.91^\circ$, 中 : Case B-3 : $\alpha=3.81^\circ$, 右 : Case B-4 : $\alpha=5.71^\circ$)

みちは発生しなかった．これより，時間経過とともに非水没領域が上流側に移動し，水みちが形成されていく様子がわかる．また， α が変化してもゲート付近での最終的な水みち幅は変化しないが，その形成過程は変化することがわかる．また， $\alpha = 3.81^\circ$ と $\alpha = 5.71^\circ$ の形成過程に明確な違いがほとんど見られないことも確認できる，これより，貯水池の平面形状が排砂ゲートの大きさに比べ十分大きくなると，貯水池形状が排砂プロセスに及ぼす影響は小さくなることわかる．

図-8 は，水路形状の変化が排砂効率 F_e に及ぼす影響を調べたものである．これより，水路の広がり角度 α が増加すると排砂効率 F_e が減少するが， α がある値以上になると減少の割合が小さくなることわかる．これは，水路幅に対するゲート幅の割合がある値より小さくなると，水みちの形成過程がほとんど変化なくなるためだと考えられる．このように，本実験データは，水みちの形成過程が排砂量に及ぼす影響を的確に捉えていることがわかる．

(3) 現地データとの整合性

本研究より得られたデータと現地データとの整合性について検討する．Atkinson ら¹³⁾によると，水みち幅

W_B は現地観測により求められた経験式 $W_B = \beta Q_e^{0.5}$ で，排砂量 Q_{se} は精華大学式 $Q_{se} = \psi Q_e^{1.6} I^{1.2} / W_B^{0.6}$ で求められる．ここで， β と ψ は定数であり，RESCON モデルでは $\beta=12.8$ ， ψ は，中央粒径が 0.1mm 以上の場合 $\psi=300$ ，流量が小さいときの排砂の場合 $\psi=180$ であることがわかっている¹⁴⁾．しかし，日本のダムではこれらの値は適さないことが指摘されており¹⁴⁾， β は日本の一般河道では $\beta=5 \sim 8$ が適用され，出し平ダムの排砂の実測値では $\beta \approx 6$ であった¹⁴⁾ ことがわかっている．また， ψ については掃流砂を対象とした場合，直径 $d \geq 0.1\text{mm}$ の砂に対しては次式を用いることが提案されている¹⁴⁾．この式に，本研究の実験条件を適用すると $\psi \approx 173$ が得られる．

$$\psi = 12.7d^{-0.043}S^{-0.11}Q_f^{-0.33} \quad (2)$$

本研究より得られた水みち幅 W_B と排出流量 Q_e との関係を図-9 に，本研究の排砂量 Q_{se} の結果と経験式との比較を図-10 に示す．なお，ここでの水みち幅 W_B には，図-7 に示すように時間によって大きな変化の生じなかった $x=0.1\text{m}$ における値を用いた．図-9 より，実験結果は，現地観測より得られる $\beta=5.0 \sim 8.0$ の範囲におさまっており，経験式と整合していることが確認

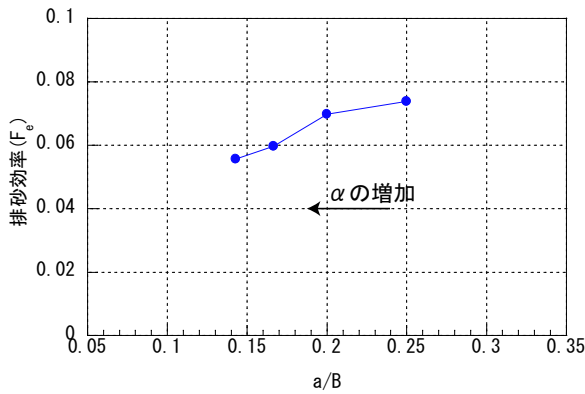


図-8 水路形状変化による排砂効率 F_e の変化

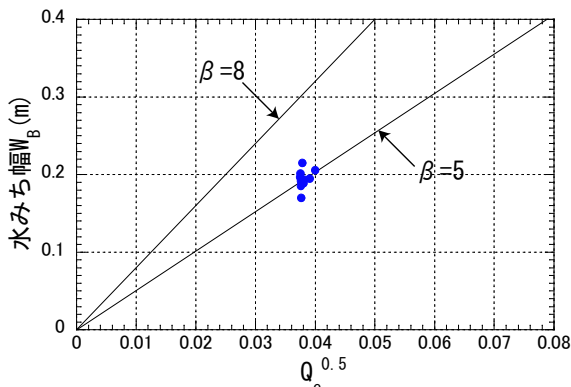


図-9 水みち幅 W_B と排出流量 Q_e との関係

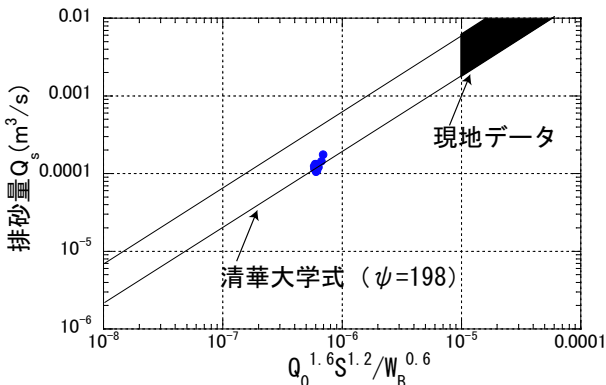


図-10 排砂量 Q_{sc} と $Q_e^{1.6} S^{1.2} / W_B^{0.6}$ との関係

できる．なお，本実験結果に基づき得られた β 値は 5.0 であった．図-10 より， $\psi \approx 198$ となり，流量の小さな場合の排砂の値に，若干大きくなるものの式 (2) より得られる値におおよそ一致することがわかる．このように，本実験データは現地観測結果と整合しており，数値モデルの検証用データとして価値が高いと考えられる．

4. 数値シミュレーション

著者らが開発した平面 2 次元河床変動モデル¹⁵⁾を用い，排砂プロセスの再現を試みた．本モデルは，2 次元浅水流方程式と流砂の連続の式を基礎方程式としており，主流方向の流砂量式には芦田・道上式¹⁶⁾を，主流に垂直な方向の流砂量式に 2 次元流の影響を無視した長

谷川の式¹⁷⁾を用いている．また，河床の固定物がある場合は Struiksmas¹⁸⁾が提案した式を用い流砂量の補正を行っている．モデルの詳細については，参考文献¹⁵⁾を参照されたい．なお，本モデルは河岸の崩落・堆積モデルは組み込んでいない．そのため，水位低下に伴い陸化する河床が現れ，水みちが形成されるような排砂プロセスについては再現できない．そこで，ここでは水みちが形成されない CaseB-1 のデータにより，水位低下に伴う常・射流混在下の河床変動についてモデルの検証を行った．

計算領域を 3300 個のメッシュで分割した．まず，排砂直前の河床高を与え，実験条件と同様な流量を上流端の境界条件，水位を下流端の境界条件として与え，固定床計算を行い定常解を求めた．このときの水深，流速および河床高を初期条件として与え，ゲートを瞬間的に開放しフラッシング排砂を行った．なお，Manning の粗度係数 n には，平坦床の場合の砂の粒径 d と粗度係数 n との関係式 $n = d^{1/6} / (6.8\sqrt{g})$ より算定した $n=0.014$ を用いた．

図-11 は，それぞれ排砂ゲート開放から 0, 10, 40, 120 秒後の水面形状と河床形状の時間変化を示したものである．これより，排砂ゲート開放とともに水面が低下し，堆砂の肩付近から侵食がはじまり，それが上流から下流へ伝播される様子や，ゲート付近の河床が低下するとともに，ゲート反対側では土砂が堆積し河床高が上昇する様子が確認できる．また，上流側で基盤面が表れ，それが時間とともに下流へ移動していく様子や，時間の経過すると堆砂体積が減少する様子も確認できる．このように，本数値モデルはフラッシング排砂のプロセスを再現していることがわかる．

図-12 は， $t=40$ 秒の $y=0.1\text{m}$ および $y=0.3\text{m}$ 断面の河床高と水位の解析結果と実験結果との比較を行ったものである．これより，解析結果は，実験値よりも，過大に河床を評価していることが確認できる．この理由としては，本数値モデルは掃流砂関数として芦田・道上式を用いており，前部堆積層のように有意な角度傾斜している箇所の流砂量を過小に評価しているために，流砂が排砂ゲートから流出しなかったこと，などが考えられる．この点については，今後改善し，より予測精度の高いモデルにしたいと考えている．また，今後は河岸の崩落・堆積モデルを取り込み，水みち形成時の排砂についても取り扱えるようにしたいと考えている．

5. おわりに

本研究では，ゲートの形状や貯水池の平面形状が排砂プロセスに及ぼす影響を実験的に調べるとともに，数値モデルの検証に必要なデータを収集し，それに基づき数値モデルによる排砂プロセスの再現性について検

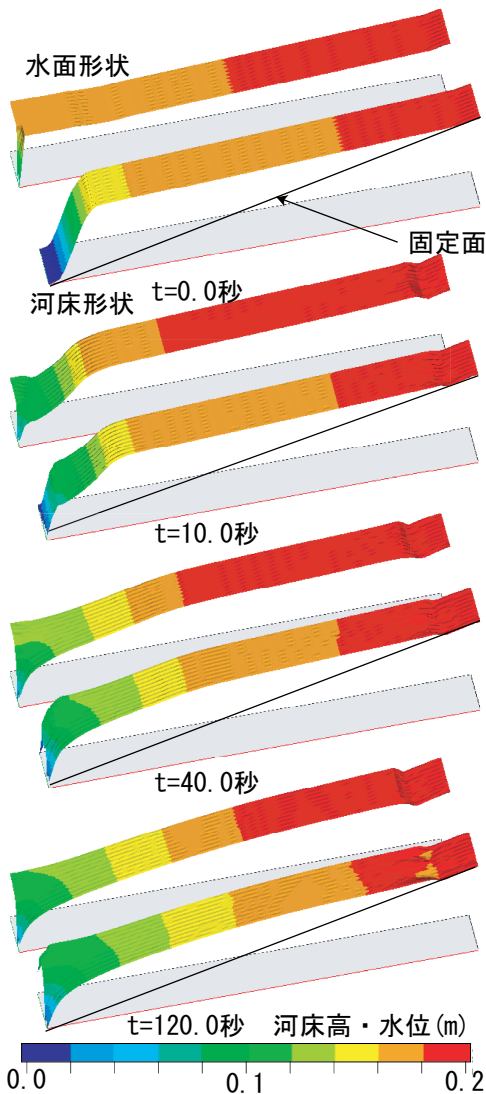


図-11 河床形状と水面形状の時間変化 (解析結果)

討した。その結果、現地観測結果と整合するような価値のある検証用データを得ることができた。また、このデータに基づき平面 2 次元河床変動モデルを検証したところ、定量的には改善すべき点が数多くあるものの、難しいとされるフラッシング排砂のプロセスを定性的ではあるが再現できることを示した。

参考文献

- 1) The World Bank: *Reservoir conservation volume I The RESCON approach*, 2003.
- 2) 角哲也：ダム貯水池のフラッシング排砂における排砂効率, *ダム工学*, Vol. 10, No. 3, pp. 211-221, 2000.
- 3) 角哲也：土砂をためないダムの実現 流砂系総合土砂管理に向けた黒部川の挑戦, *土木学会誌*, Vol. 88, No. 3, pp. 41-44, 2003.
- 4) 進藤裕之, 二俣秀：黒部川におけるダム排砂, 第 6 回水資源に関するシンポジウム, pp. 207-212, 2002.
- 5) 角哲也, 村崎充弘, 藤永清和, 名倉裕, 玉置晴朗：フラッシング排砂時における貯水池堆砂の侵食・堆積過程計測に関する研究, *水工学論文集*, 第 48 巻, pp. 1147-1152, 2004.
- 6) 角哲也, 村崎充弘, 名倉裕, 玉置晴朗, 今城貴弘：フラッシング排砂時における貯水池堆砂の侵食・堆積過程計

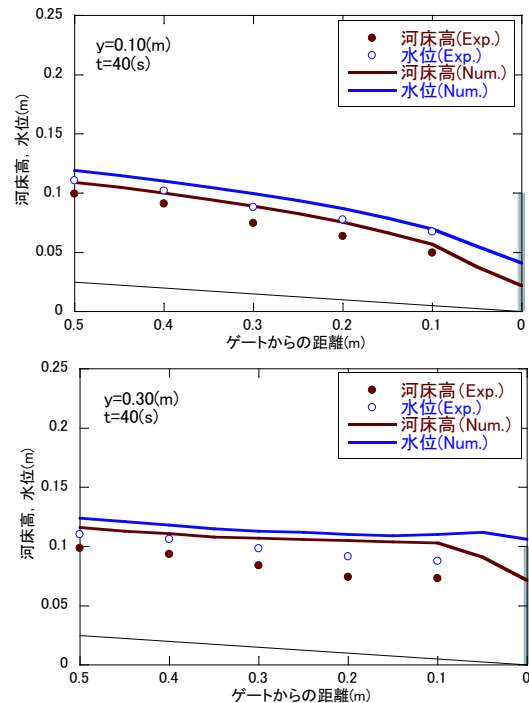


図-12 解析結果と実験結果との比較 ($y = 0.1\text{m}$ と $y = 0.3\text{m}$ の断面 ($t = 40$ 秒))

測に関する研究 (その 2), *水工学論文集*, 第 49 巻, pp. 1033-1038, 2005.

- 7) 関根正人, 片桐康博, 小笠原基：鬼怒川における洪水時の流路変動とその数値予測に関する研究, *水工学論文集*, 第 49 巻, pp. 1015-1020, 2005.
- 8) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, *水工学論文集*, 第 47 巻, pp. 643-648, 2003.
- 9) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, Rahman, M. M.：側岸侵食を伴う河道変動の数値解析, *京都大学防災研究所年報*, 第 39 号 B-2, pp. 415-428, 1996.
- 10) 社団法人砂防学会 (編)：山地河川における河床変動の数値計算法, 山海堂, 2000.
- 11) Noh, M. M., Michiue, M., Hinokidani, O. and Tsuji, T.: Sediment flushing for steep slope reservoir, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, 2002.
- 12) 角哲也：ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理, *ダム技術*, No. 127, pp. 30-38, 1997.
- 13) Atkinson, E.: The feasibility of flushing sediment from reservoirs, *HR Wallingford Report OD137*, 1996.
- 14) 角哲也, 高田康史, 井口真生子, 中西義昭：RESCON モデルによるフラッシング排砂のフィジビリティ評価に関する研究, *河川技術論文集*, 第 11 巻, pp. 285-290, 2005.
- 15) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 小牧貴大, 高須賀真哉：河道への置き砂還元プロセスの平面 2 次元数値シミュレーション, *水工学論文集*, 第 50 巻, , 2006.
- 16) 芦田和男, 道上直規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, 第 195 号, pp. 55-65, 1971.
- 17) 長谷川和義：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する水理学的研究, *北海道大学博士論文*, 1984.
- 18) Struiksma, N.: Mathematical modeling of bedload transport over non-erodible layers, *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp. 89-98, 1999.

(2005. 9. 30 受付)