

平面2次元河床変動モデルによるフラッシング 排砂時の水みち形成プロセスの数値解析

NUMERICAL SIMULATIONS OF CHANNEL FORMATION PROCESS
DURING FLUSHING SEDIMENT THROUGH THE RESERVOIR USING
2D BED VARIATION MODEL

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・小牧 貴大³・才木 康裕³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Takahiro KOMAKI and Yasuhiro SAIKI

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 工学研究科建設社会工学専攻 (同上)

A two-dimensional numerical model for a bed variation is constructed based on the finite-volume method (FVM), flux-difference splitting (FDS) and unstructured grid system. In the model, the effect of gravity associated with the slope angle in longitudinal and lateral directions on the sediment transport, mechanism of slope-collapse so as to keep the local slope angle be equaled to or less than the angle of response and technique of treatment of mobile as well as fixed bed are considered. The model verified against the experimental data of a channel formation process during flushing sediments through the reservoir. It shows that the model has ability to reproduce the channel formation process, but the more improvement is needed to predict the channel formation process with reasonable accuracy.

Key Words : *reservoir sedimentation, flushing sediment, channel formation process, numerical simulations*

1. はじめに

近年、ダム貯水池の機能維持や水系一貫とした土砂管理の立場から、排砂バイパストンネル、ダム下流の仮置き砂、フラッシング排砂などによるダム堆砂の河道への還元が実施されている。このような対策の中でも、フラッシング排砂は、排砂ゲート（底部放流管）からの放流により貯水位を強制的に低下させ、それに伴う掃流力の増大によりダム堆砂を排出させるもので、自然の力によりダム堆砂を排除することから恒久的なダム堆砂対策として位置づけられている¹⁾。

フラッシング排砂では、ダムに流入し堆積した土砂がダムというフィルターを通して下流へ排出されることから、ダム貯水池内の河床変動状況、排出土砂の質と量、また、排出土砂が下流の河川環境へどのように影響を及ぼすかを把握することが重要になる。このためにはフラッシング排砂時の排出土砂の質と量を高い精度で予測する必要がある。

排出土砂量は、水位低下に伴い形成される水みち幅、縦断勾配および側岸侵食状況に依存し、これら排砂時の流量、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り決まることが分かっている^{2), 3)}。従って、フラッシング排砂時の排出土砂の質と量を予測するためには、上記のことを適切に取り扱えることが可能なツールが必要となる。

このようなツールとして、著者らは水位低下時に生じる常・射流下での河床変動が解析可能な平面2次元河床変動数値モデルを、非構造格子を用いた有限体積法と流束差分分離法に基づき開発し⁴⁾、フラッシング排砂の実験結果に適用した⁵⁾。しかしながら、同モデルは、前部堆積層のように有意な傾斜角度が土砂流送に及ぼす影響を、また水中安息角を超えた場合に生じる土砂の崩落メカニズムを考慮していないために流砂量が過小に評価され、流砂時の河床変動を十分な精度で再現することができなかった。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、同モデルに傾斜角度が流砂量に及ぼす影響と、側岸侵食を含

む安息角を超えた際の土砂崩落メカニズムを組み込むことで、フラッシング排砂時の河床変動と水みち形成プロセスの再現を試みたものである。まず、斜面上の掃流力や限界掃流力を導入した。次に、局所的に斜面の水中安息角を越える場合や側岸浸食などの崩落土砂による土砂供給量をモデルに組み込んだ。最後に、貯水池形状の異なる2通りのフラッシング排砂実験結果⁵⁾に基づく数値モデルの検証を行った。

2. 数値モデルの概要

基礎方程式は、2次元浅水流方程式と流砂の連続の式である。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = (h, \quad uh, \quad vh)^T; \quad \mathbf{E} = (uh, \quad u^2h + 1/2gh^2, \quad uvh)^T;$$

$$\mathbf{F} = (vh, \quad uvh, \quad v^2h + 1/2gh^2)^T;$$

$$\mathbf{S} = (0, \quad -gh(S_{ox} - S_{fx}), \quad -gh(S_{oy} - S_{fy}))^T$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda_b} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{U}$ =保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ = x 、 y 方向の流束ベクトル、 $\mathbf{S}$ =発生項・消滅項ベクトル、 h = 水深、 u 、 v = x 、 y 方向の流速、 g =重力加速度、 S_{ox} 、 S_{oy} = x 、 y 方向の地盤高勾配($S_{ox} = -\partial z_b / \partial x$ 、 $S_{oy} = -\partial z_b / \partial y$)、 S_{fx} 、 S_{fy} = x 、 y 方向の摩擦勾配である。摩擦勾配は、Manning の公式を用いて計算される。また、 λ_b =河床材料の空隙率、 q_{Bx} 、 q_{By} = x 、 y 方向の流砂量である。

フラッシング排砂時には、堆砂の肩などで主流に直角な方向だけでなく主流方向についても無視できない河床勾配が生じる。このため、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した式(3)の流砂量式⁶⁾を用いた。

$$q_{Bs} = q_B \left(\frac{\tau_{*s}}{\tau_*} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_d}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial s} \right)$$

$$q_{Bn} = q_B \left(\frac{\tau_{*n}}{\tau_*} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_d}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (3)$$

なお、流砂量式 q_B には芦田・道上の式を適用し、掃流力、限界掃流力については斜面の影響を考慮した掃流力と限界掃流力⁶⁾を用いた。ここに、 q_{Bs} 、 q_{Bn} =主流方向、主流直角方向の流砂量、 τ_* =無次元掃流

力、 τ_{*c} =無次元限界掃流力、 τ_{*s} 、 τ_{*n} =斜面の影響を考慮した s 、 n 方向の掃流力、 $\tau_* = (\tau_{*s}^2 + \tau_{*n}^2)^{1/2}$ 、 μ_s =静止摩擦係数、 μ_d =動摩擦係数である。

水中安息角を越えるような極めて大きな河床勾配が存在する場合には、斜面崩落が生じる。この時の崩落土砂量 V は、関根の方法^{7), 8)}に準じ、セル境界線を挟む二つのセルの河床高が安息角を満たすような補正高さ ε を求め、この補正高さ ε を用いて式(4)より算出した。さらに、この崩落土砂量を式(5)のように単位幅、単位時間当りの流砂量に変換することで、セル境界線の法線方向への流砂量 q_{Collapse} を求めた。なお、本モデルの安息角補正は、セル境界線を挟むセル間で安息角補正を行っており、関根の方法^{7), 8)}のように、各セルの最急河床勾配方向に対して補正を行っているわけではない。

$$V = \frac{A_R}{A_L + A_R} \cdot \varepsilon \cdot A_L \quad (4)$$

$$q_{\text{Collapse}} = (1 - \lambda_b) \cdot \frac{V}{L \cdot \Delta t} \quad (5)$$

ここに、 $A_{R/L}$ =セル境界線の右側/左側のセル面積 L =セル境界線の長さ、 Δt =時間の刻み幅である。

排砂時の従前河道や基盤面の露出した場合には、Struiksma⁹⁾が提案している方法に基づき、河床面から固定面の距離に応じた制限関数により局所的に流砂量を減少させることで取り扱っている。この際、流砂が河床下の固定床の影響を受けなくなる限界の厚さが必要となるが、その厚さを求めることは困難であるので、ここでは河床材料の粒径の2倍とした。

水みち形成時に生じるドライ・ウェット状態の判別は、従来の氾濫解析に用いられる方法と同様に水深の閾値 h_v を与え、水深が h_v 以下となる箇所では流速を0とした。また、左側セルがウェット状態で、右側セルがドライセルである場合またはその逆の場合には、ドライセルからウェットセルへの水の流入が生じないように、一時的に地盤高を補正する方法を用いた¹⁰⁾。この方法により、ウェット・ドライセル境界付近で発生する非物理的な流れを防ぐことができ、そこでの安定した計算が可能となる。

基礎方程式の離散化は、有限体積法に基づき行った。時間積分にはEulerの陽解法を、空間積分には常・射流混在流が安定して計算できる流束差分法を用いた。計算格子には任意の河道形状が再現可能な非構造格子を用いた。数値解析法の詳細は参考文献⁴⁾に示す通りである。

3. 数値モデルの検証

貯水池形状を変化させた排砂実験⁵⁾に基づき、数値モデルの検証を行った。

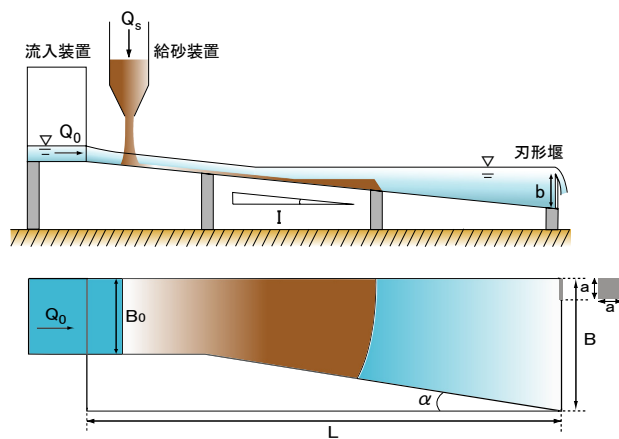


図-1 実験装置の概要と流れの定義図

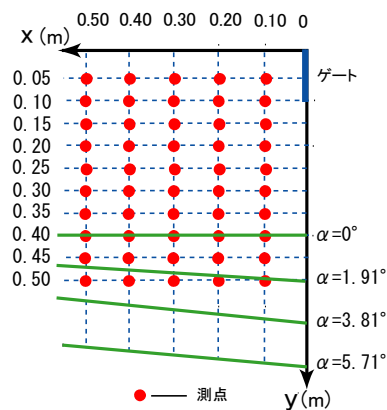


図-2 水深と河床高の測定点

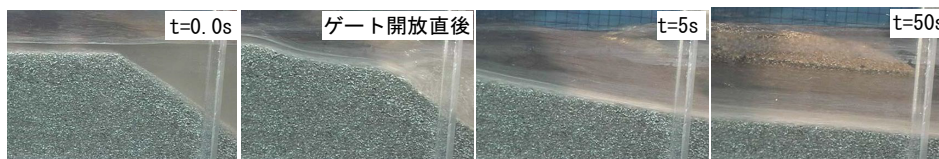


図-3 河床変動状況

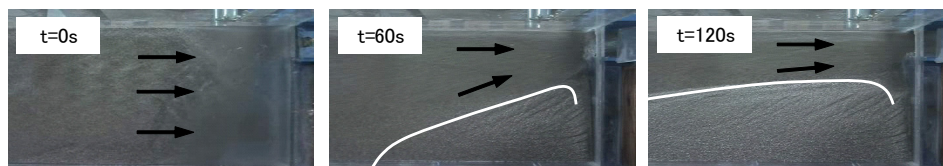


図-4 水みち形成プロセス

(1) 実験の概要

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の二通りの実験が行われている。実験装置の概要を図-1に示す。水路上流端から、一定流量 $Q_0=2.5 \times 10^{-3}(\text{m}^3/\text{s})$ の水を供給し定常状態とした後、水中比重 $s=1.65$ 、中央粒径 $d=0.75\text{mm}$ の一樣砂を一定量 $Q_s=0.4 \times 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ で給砂し堆砂を発生させ、その後 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ のゲートを瞬間的に開放し、フラッシング排砂を発生させている。

実験では、水路側壁の拡がり角度を4通り (Case1-A: $\alpha=5.71^\circ$, CaseB-1: $\alpha=0^\circ$, CaseB-2: $\alpha=1.91^\circ$, CaseB-3: $\alpha=3.81^\circ$, CaseB-4: $\alpha=5.71^\circ$) に変化させることで貯水池形状を変化させている。ゲート開放後から各時間で、図-2に示す測定点で水位 W_L 、河床高 z_b が、また水みち幅 W_B が測定されている。図-3に水面形と河床の経時変化の写真を、図-4に水みち形成プロセスの写真を示す。なお、図-3の手前側は、図-4の左岸側に対応する。

(2) 計算条件

まず、堆砂実験結果により得られた排砂直前の河床高を与え、上・下流端の境界条件に実験条件と同

様な流量・水位を与えた固定床計算により水深と流速の定常解を求めた。これら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。フラッシング排砂時の流れの境界条件は、上流端で一定流量、下流端のゲートで自由流出条件を、河床変動の境界条件は、上流端で流砂量($q_B=0.0(\text{m}^2/\text{s})$)を、下流端のゲートで河床高($z_b=0.0(\text{m})$)を与えた。流砂量については、境界条件として与えた河床高から水深および流速を算定し、これらより式(3)から求めた。水路壁面では流れおよび河床変動のいずれも閉境界条件を与えた。また、ドライベッドの閾値は、 $h_v=0.001(\text{m})$ とし、水深が h_v より小さくなった場合、ドライ状態にあるとして $u=v=0$ とした。また、Manningの粗度係数 n についてはStrickler形式の n の推定式¹¹⁾より $n=0.014$ とした。

(3) 結果と考察

Case B-1とB-3の実験結果に基づき、モデルの検証を行った。Case B-1は前報⁵⁾で開発したモデルを適用した実験結果であり、この比較から本モデルの精度向上を示す。また、Case B-3は水みち形成が認められたケースであり、ここで開発したモデルの水みち形成プロセスの再現精度について検討する。

図-5は、Case B-1のゲート開放40秒後の $y=0.1\text{m}$ お

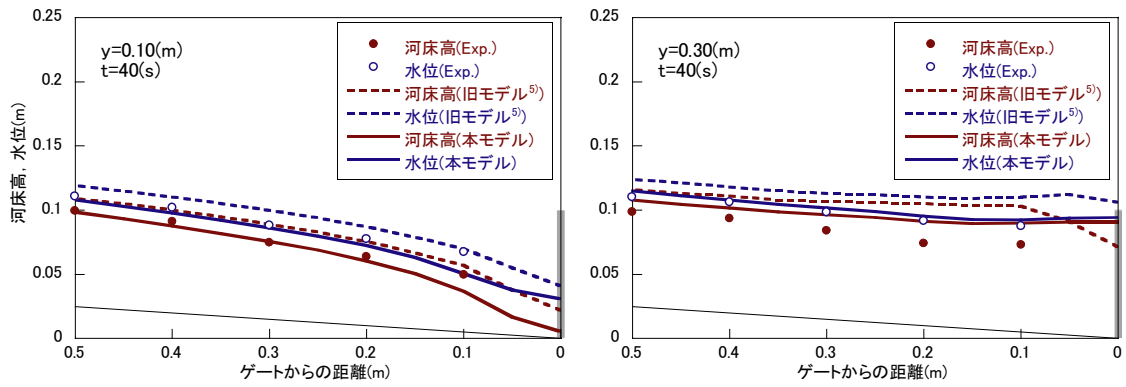


図-5 $y=0.1, 0.3\text{m}$ 断面での解析結果と実験値との比較
(Case B-1(ゲート開放40秒後))

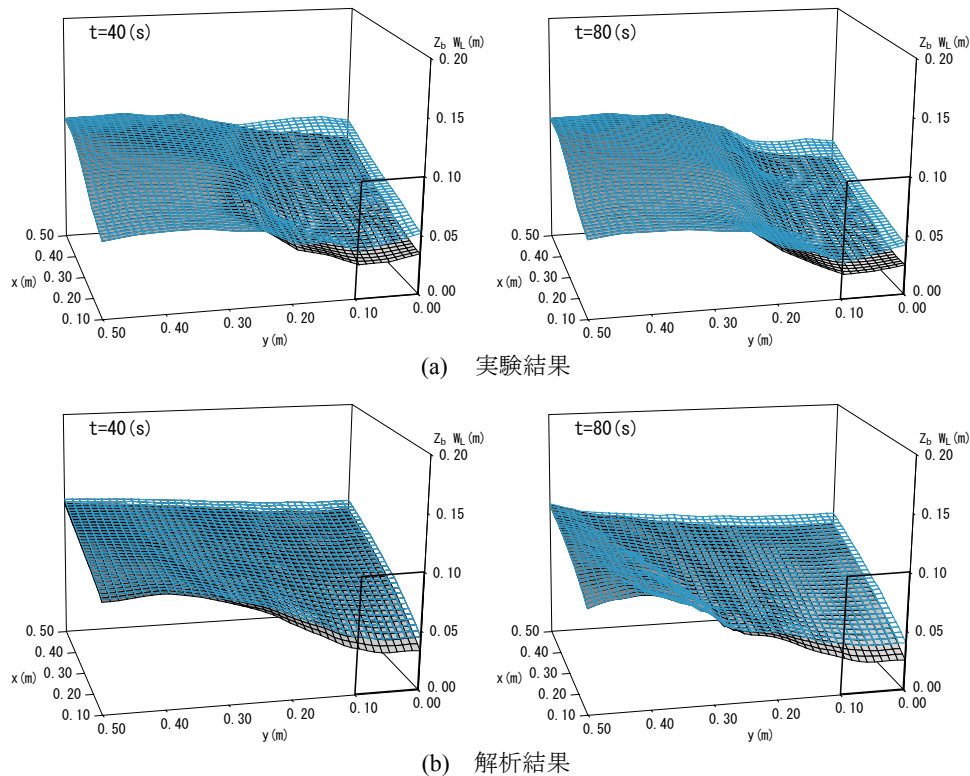


図-6 水面と河床高コンター図の比較

よび $y=0.3\text{m}$ 断面の河床高と水位の解析結果と実験値との比較を行ったものである。なお、図中には前報のモデルの結果⁵⁾もあわせて示している。これより、本モデルの解析結果は、 $y=0.3\text{m}$ の断面で実験値より若干大きくなっているものの、実験値を概ね再現していることが確認できる。また、前報⁵⁾のモデルと比較すると、前報⁵⁾のモデルではいずれの断面においても河床を実験値よりも過大に評価していたが、本モデルでは改善されている。このように、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を組み込むことで、本モデルの予測精度が向上したことが確認できる。

図-6は、Case B-3について水面形状と河床高の3次元コンター図の解析結果および実験値との比較を行ったものである。実験結果は、図-3と図-4に示し

たように、水位低下に伴い、ゲートが設置されている左岸側で河床が低下し、一方右岸側では土砂が堆積し陸化が進み、その後、左岸側で水みちが形成されるプロセスを適切に捉えていることがわかる。解析結果についても、同様なプロセスは再現されている。しかし、解析結果は、実験値に比べ水みちが十分に形成されておらず、そのため水みち幅が実験結果に比べ大きくなっている。

図-7は、ゲート開放40秒および80秒後について $x=0.10\text{m}$ と $x=0.30\text{m}$ 断面での水面形状と河床高の解析結果と実験値を比較したものを示したものである。これらの図から、ゲート開放40秒後については、解析結果は実験値を上回っており、80秒後になると解析結果と実験値との差は40秒後に比べ小さくなるこ

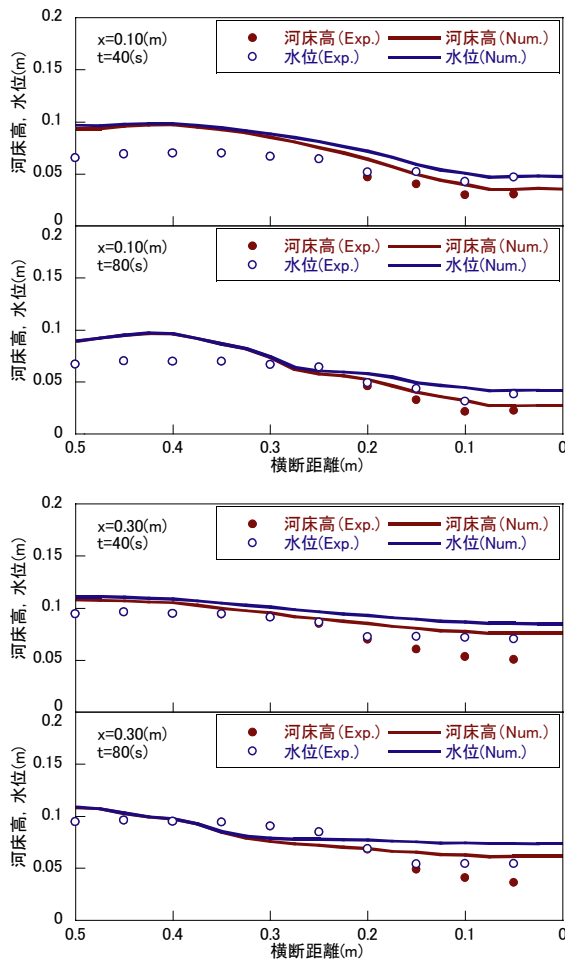


図-7 x=0.1, 0.3m断面での水面形状と河床高の比較
(CaseB-3(ゲート開放40, 80秒後))

とが確認できる。また、右岸側では河床高と水位がほぼ一致しており、ドライ状態となっていることから、水みちが形成されている様子もわかる。

図-8は、水みち幅の解析結果と実験値との比較を行ったものである。解析結果については河床高コンターと流速ベクトルを、実験結果については赤い線でゲート開放 t 秒後の水みち形状を示している。解析結果では流速ベクトルが0となっている箇所が非水没領域である。実験値は、時間の経過とともに下流側の水路中央付近で浮き州が発生した後、ゲート反対側に土砂が堆積・陸化し、ゲート側に水みちが形成されていた。解析結果はこのプロセスを再現していたが、時間にずれが生じており、ゲート開放46秒後に浮洲が発生し、時間の経過とともに図-8のように陸化が生じた。しかしながら、定量的な位置については、実験結果に比べ陸化の進行が遅いなど若干の問題が残る。

図-9は、Case B-1と3について、フラッシング排砂時の排出土砂の体積濃度の解析結果と実験値との比較を行ったものである。Case B-1, 3のいずれについてもピーク値の再現性に問題があるものの、全

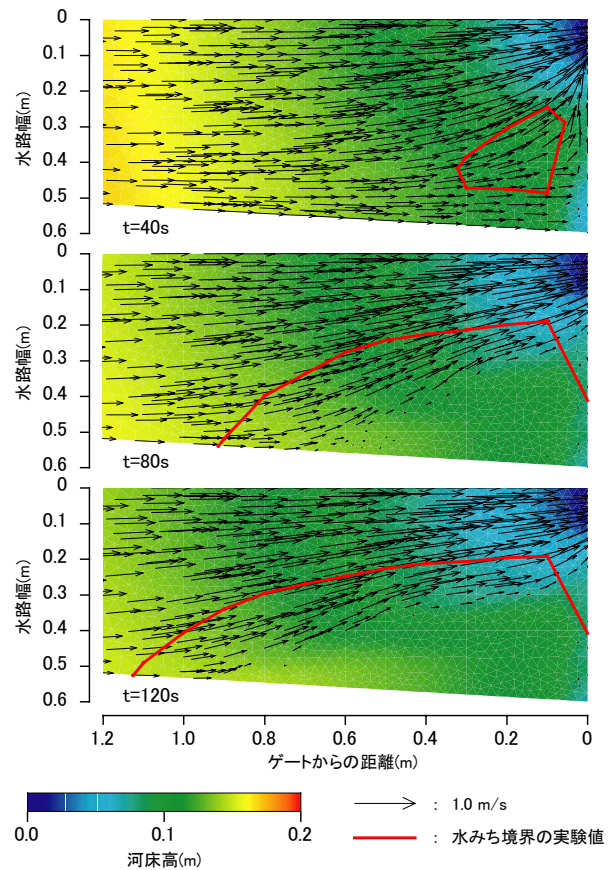


図-8 水みち形状の経時変化の比較(CaseB-3)

体的な傾向は概ね再現していることが確認できる。

以上のように、本数値モデルはフラッシング排砂時における水みち形成プロセスやそれにもなう排出土砂の体積濃度をある程度再現できることが確認できる。しかしながら、水位、河床高または水みち幅の定量的な再現性については改善の必要性が認められる。

ゲート開放直後は、急激な水位低下が生じるため3次元性の強い流れが生じる。この流れによりゲート近傍の堆積土砂は巻き上げられ、ゲートから排出される。図-9の実験値からわかるように、かなりの堆積土砂が排出される。本モデルは平面2次元モデルであるため、このような3次元性の強い流れを取り扱うことができない。そのため排出土砂濃度のピーク値が予測できないと考えられる。また、これに伴い、ゲート開放後の初期段階での河床高を再現することができず、ゲート周辺の河床高が過大に評価されたために、ゲート反対側からゲートへ向かう河床勾配が小さく評価され、流れが十分に発達することができなかった結果、ゲート反対側に土砂が堆積したと考えられる。このため、解析結果は、図-5

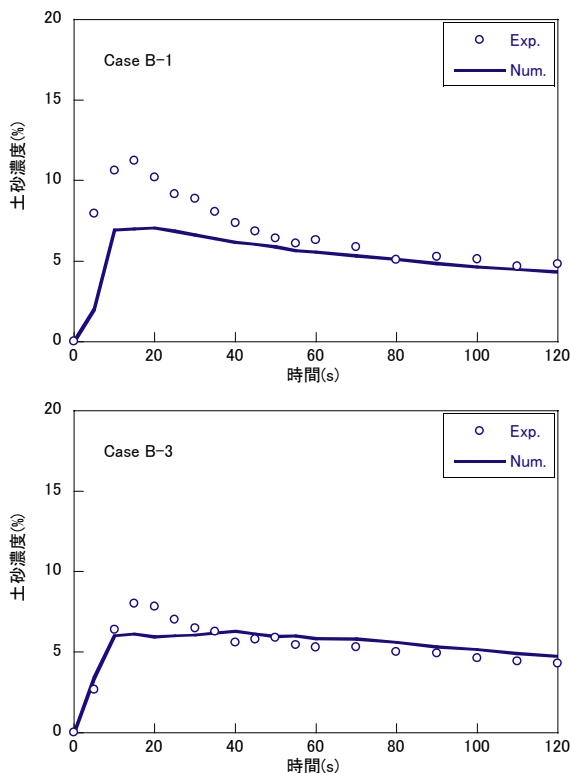


図-9 排出土砂濃度の経時間の比較

～7に示すように実験値に比べ河床高が大きくなったと考えられる。従って、水位低下時のゲート付近での土砂排出については何らかの特別な取り扱いが必要になると考えられる。藤田ら¹²⁾も水平スリットを有するダム流出土砂量を対象に同様な指摘しており、鉛直方向の流れが生じるスリット近傍では流出土砂量を過少に評価するため、ゲート位置から堰上げ水深の3倍の位置まで掃流力が等しいと仮定し、このような現象を取り扱っているが、一般的な方法は存在しないのが実状である。この点については、今後検討する必要がある。また、本モデルでは安息角の補正を斜面の最急勾配方向に対して行っていないこと、本数値モデルでは水位低下時に発生すると考えられる非平衡性の強い場合の流砂を考慮していないこと、抵抗則にManningの式を用いており、水位低下後の水深が浅い状態での抵抗則を十分に考慮できていないこと、なども理由として考えられる。今後、この点について検討し、モデルの予測精度を向上させたいと考えている。

4. おわりに

本研究では、著者ら⁴⁾が開発した河床変動数値モデルに、斜面上の掃流力や限界掃流力、局所的に斜面の水中安息角を越える場合や側岸浸食などによる崩落土砂供給量の取り扱い、また新たなドライ・ウェット条件を組み込んだ新たなモデルを開発し、

水みちが形成されるフラッシング排砂の実験結果に基づき同数値モデルの検証を行った。

その結果、同数値モデルが、フラッシング排砂時における水位、河床高、水みち幅などの水みち形成プロセスおよび排出土砂濃度について概ね再現できることを示した。

今後は、ゲート付近の排出土砂量の取り扱いを検討するとともに、本モデルで考慮されていない斜面急勾配方向を考慮した安息角補正を導入するなど、さらなる精度の改善を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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・堆積過程計測に関する研究(その2)，水工学論文集，第49巻，pp.1033-1038，2005.
- 4) 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，pp.170，2006.
- 5) 重枝未玲，秋山壽一郎，高須賀真哉：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，水工学論文集，第50巻，pp.156，2006.
- 6) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法-治水と環境の調和した川づくり，森北出版社，2005.
- 7) 関根正人，小野了：降雨による斜面浸食過程に関する数値解析，水工学論文集，第46巻，pp.647-652，2002.
- 8) 関根正人：斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション，水工学論文集，第47巻，pp.637-642，2003.
- 9) Struiksma, N.: Mathematical modeling of bed-load transport over non-erodible layers, *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.89-98, 1999.
- 10) 重枝未玲，秋山壽一郎，重岡広美：ドライ・ウェット状態となる地形起伏がある場での氾濫流の数値シミュレーション，水工学論文集，第51巻，2007(投稿中).
- 11) 河村三郎：土砂水理学[POD版]，森北出版株式会社，2005.
- 12) 藤田正治，水山高久，武蔵由育：水平オープン型砂防ダムの機能，水工学論文集，第42巻，pp.613-619，1998.

(2006. 9. 30受付)