

急勾配湾曲水路の河床・河道変動に対する 平衡・非平衡流砂モデルの適用性について

APPLICATION OF EQUILIBRIUM AND NON-EQUILIBRIUM SEDIMENT TRANSPORT MODEL TO RIVER CHANNEL PROCESSES IN STEEP CURVED CHANNEL

音田 慎一郎¹・白井 秀和²・細田 尚³・有光 剛⁴・大江 一也⁵
Shinichiro ONDA, Hidekazu SHIRAI, Takashi HOSODA, Tsuyoshi ARIMITSU and Kazuya OOE

¹正会員 博(工) 京都大学大学院助教 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻(同 上)

³正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻(同 上)

⁴正会員 博(工) 関西電力株式会社 電力技術研究所(〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)

⁵正会員 工修 関西電力株式会社 電力技術研究所(同 上)

Accurate estimation of sediment inflow to reservoir is of great importance for an efficient dam management. The sediment supply is mainly caused by excessive bank erosion in mountainous rivers during floods. In this study, numerical models which combine a depth averaged flow model in generalized curvilinear coordinate system and equilibrium and non-equilibrium sediment transport models are applied to river channel processes with bank erosion in steep curved channel. The bank collapse process is also considered by a simplified model. The applicability of numerical model is examined through the comparison of the previous experimental results.

Key Words : bank erosion, equilibrium and non-equilibrium sediment transport model, numerical simulation, generalized curvilinear coordinate system

1. はじめに

河岸侵食とそれに伴う流路変動を的確に予測することは、適切な河道計画を検討する上で非常に重要である。例えば、山地河川では、河岸侵食によって供給された土砂が下流へ流送されていくため、適切なダム管理を考えるには、河川上流域における河床変動特性や流下土砂の量や質を精度良く予測することが必要である。本研究は、急勾配湾曲水路の河床・河道変動について数値解析的に検討したものであり、特に流路変動現象に対する平衡・非平衡流砂モデルの適用性について考察することを目的とする。

河岸侵食を伴う河床・河道変動については、これまで実験的、理論的、及び数値解析的研究が数多く行われており、対象も直線流路、蛇行・湾曲流路と様々である。例えば、蛇行・湾曲流路での実験的研究について整理してみると、福岡ら¹⁾は一樣湾曲水路において交互砂州が発生する場合と発生しない場合について拡幅実験を行い、各々の拡幅機構の違いや湾曲流路から蛇行流路へ移行する機構を明らかにしている。また、清水ら²⁾も同様に砂州が発生する場合と発生しない場合について蛇行流路を

対象に水理実験を行っている。こうした知見をもとに清水ら^{2), 3)}、関根⁴⁾、長田ら^{5), 6)}は側岸侵食を伴う流路変動について数値解析を行っているが、緩勾配を対象とした解析例が大半であり、本研究で対象としている急勾配については十分な議論がなされていない。

次に、本研究で対象としている河川上流域での河床・河道変動について整理すると、目黒・長谷川ら⁷⁾は、直線水路を用いた水理実験が行い、小規模、中規模、大規模と複数の河床形態が生じることを指摘している。有光ら⁸⁾は、急勾配での単一湾曲水路における固定床・移動床実験を行い、固定床実験では衝撃波による水面変動特性について考察するとともに、移動床実験では側岸侵食に影響を及ぼすパラメータについて検討している。また、側岸侵食については、従来から指摘されている緩勾配水路での結果と同様な結果が得られたものの、実験中の動画を見てみると河床には反砂堆が生じており、小規模と中規模の河床形態が共存していることが確認されている。

一方、上流域の河床・河道変動解析においては、大規模な縦断地形変化を予測するため、1次元河床変動モデルが用いられているのが現状であり、数値解析モデルの適用性については十分な検討が行われていない。ここで、

急勾配湾曲流路での河床・河道変動解析を行うにあたり、湾曲部流れの特徴として考えられる2次流の発生や外岸側での河床洗掘と内岸側での砂州の発達、河岸侵食過程において水際近傍で卓越すると考えられる流砂の非平衡性を再現することが必要である。

そこで、本研究では一般座標系での平面2次元モデルと平衡・非平衡流砂モデル⁶⁾を用いて急勾配湾曲水路における流路変動解析を行い、土砂輸送モデルによる現象の再現性について考察する。

2. 数値解析法

(1) 流れの基礎式

流れの基礎式には、一般座標系での平面2次元モデルを適用する。

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動量方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} \quad (2a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ & + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} \quad (2b) \\ & + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'} h \right) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'} h \right) \end{aligned}$$

ここに、 t ：時間、 (x, y) ：空間座標、 (ξ, η) ：一般座標、 $(\xi_x, \eta_x, \xi_y, \eta_y)$ ：座標変換のメトリックス、 J ：座標変換のヤコビアン、 (Q^ξ, Q^η) ：流量フラックスの反変成分、 (M, N) ： x, y 方向の流量フラックス、 (U, V) ： x, y 方向の水深平均流速ベクトルの反変成分、 h ：水深、 g ：重力加速度、 ρ ：水の密度、 $(-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2})$ ： x, y 座標系の水深平均レイノルズ応力、 $(\tau_b^\xi, \tau_b^\eta)$ ：底面せん断応力の反変成分である。

$(\tau_{cs}, \tau_{cs}, \tau_s)$ ：無次元有効掃流力、無次元限界掃流力、無次元掃流力、 u_s, u_{sc} ：摩擦速度、限界摩擦速度、 d ：砂の粒径、 σ ：河床材料の密度、 (u_{sb}, u_{nb}) ：河床近傍の流速の (s, n) 方向成分、 μ_s ：河床材料の静止摩擦係数、 μ_n ：河床材料の動摩擦係数である。上記の流砂量式を反変成分 $(q_{b\xi}, q_{b\eta})$ に変換し、以下に示す連続式より河床変動を計算する。

(2) 平衡流砂モデル

掃流砂量については、流れ方向に芦田・道上の式⁹⁾を、横断方向に長谷川の式¹⁰⁾を適用する。

$$q_{bs} = 17\tau_{sc}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{sc}}{\tau_s} \right) \left(1 - \frac{u_{sc}}{u_s} \right) \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3} \quad (3a)$$

$$q_{bn} = q_{bs} \left(\frac{u_{nb}}{u_{sb}} - \sqrt{\frac{\tau_{sc}}{\mu_s \mu_n \tau_s}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (3b)$$

ここに、 (q_{bs}, q_{bn}) ：流れ方向、横断方向流砂量フラックス、 $\tau_{cs}, \tau_{cs}, \tau_s$ ：無次元有効掃流力、無次元限界掃流力、無次元掃流力、 u_s, u_{sc} ：摩擦速度、限界摩擦速度、 d ：砂の粒径、 σ ：河床材料の密度、 (u_{sb}, u_{nb}) ：河床近傍の流速の (s, n) 方向成分、 μ_s ：河床材料の静止摩擦係数、 μ_n ：河床材料の動摩擦係数である。上記の流砂量式を反変成分 $(q_{b\xi}, q_{b\eta})$ に変換し、以下に示す連続式より河床変動を計算する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{b\xi}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{b\eta}}{J} \right) \right\} = 0 \quad (4)$$

ここに、 z_b ：河床高、 λ ：河床材料の空隙率である。

(3) 非平衡流砂モデル

非平衡流砂モデル⁶⁾は、①pick-up rateによる土砂の離脱量の計算、②流砂量から求めた土砂の移動方向より砂粒の移動経路の算出、③step lengthの確率密度関数による堆積土砂量の計算、④河床変動計算の4つのステップから成り立っている。pick-up rateの算定には、中川・辻本・村上¹¹⁾が提案した横断勾配を有する場合にも適用可能な次式を用いる。

$$\begin{aligned} p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} &= F_0 G_* \tau_s \left(1 - \frac{k_2 \Omega \tau_{sc}}{\tau_s} \right)^m \\ G_* &= \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \\ \Omega &= \left(\frac{\mu_s \cos \theta_n - \sin \theta_n \sin \phi}{\cos \psi + k_L \mu_s} \right) \left(\frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 p_s ：pick-up rate、 k_L ：抗力と揚力の比(=0.85)、 θ_n ：横断勾配角、 ψ ：河床での流速ベクトルと砂粒子の移動方向とのなす角、 ϕ ：砂粒の移動方向と主流方向とのなす角とする。定数 F_0, k_2, m はそれぞれ0.03, 0.7, 3である。

次に、別途算出した主流方向及び横断方向流砂量式より砂粒子の移動方向を求めることでpick-up地点から Δs (=0.01m)ずつ移動させた後の移動経路を計算する。こ

表-1 計算条件

	流砂モデル	step length (=Λ)	水中安息角	水際安息角
Run1-1	平衡流砂モデル	= 50 <i>d</i> = 100 <i>d</i> = 250 <i>d</i>	25°	65°
Run1-2	非平衡流砂モデル		15°	
Run1-3	非平衡流砂モデル			
Run1-4	非平衡流砂モデル			
Run2-1	平衡流砂モデル	= 100 <i>d</i>	25°	65°
Run2-2	非平衡流砂モデル		15°	

こである地点 j から出発した軌跡において、出発地点から i 番目の点でのdeposit rate $p_{d(j,i)}$ は次式で求められる。

$$p_{d(j,i)} = p_{s(j)} f_s(s_{(i)}) \Delta s \frac{A_{(j)}}{A_{(i)}} \quad (6)$$

ここで $A_{(j)}$, $A_{(i)}$: pick-up及びdeposit地点の計算メッシュの面積, Δs : 砂粒の移動軌跡の計算ステップ幅, $f_s(s)$: step lengthの確率密度関数であり、次のように表す。

$$f_s(s) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(-\frac{s}{\Lambda}\right) \quad (7)$$

ここに、 Λ : 平均step lengthで、一般に粒径の50~250倍と言われているため、本研究では後述のようにstep lengthを変化させて数値解析を行った。

上記によって算出したpick-up rate, deposit rateを用いて次式により河床変動計算を行う。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = A_1 d(p_d - p_s) \quad (8)$$

ここに、 A_1 : 1次元の砂粒形状係数(=1.0)である。

(4) 土砂崩壊モデル

河床が洗掘されると、その周辺に位置する土塊が間欠的に崩落する。土砂崩壊モデルについては様々なモデルが提案されている^{2)6), 10), 12)}が、本研究では以下に示す簡易なモデルを適用する。即ち、あるセルとそれに隣接する上下左右と斜め方向の8つのセルにおいて斜面の角度が安息角を越えたとき崩落すると判定する。崩落させる量は、崩落して堆積する土砂量と崩落によって減少する土砂量が等しいという条件のもと、崩落後の斜面角度が安息角以下になるように与える。ここでは、崩落が生じるかどうかを判定する安息角を考えている方向の隣り合うメッシュがどちらも水中に属するか、或いはいずれかが河岸を示すかで分けて考え、異なる角度を用いた。このように取り扱うことで、河岸侵食が生じた後、実験結果⁸⁾に見られるような河岸が切り立つ形状を示すことを模擬した。なお、このモデルでは、崩落に関して隣接する8方向のみの影響を考慮しているため、計算格子に依存する可能性がある。一方、関根ら¹²⁾は崩落面の方向を特定した上で崩壊土砂量を算定する斜面崩落モデルを提案している。土砂の崩壊の取り扱い方については今後の検討課題としたい。

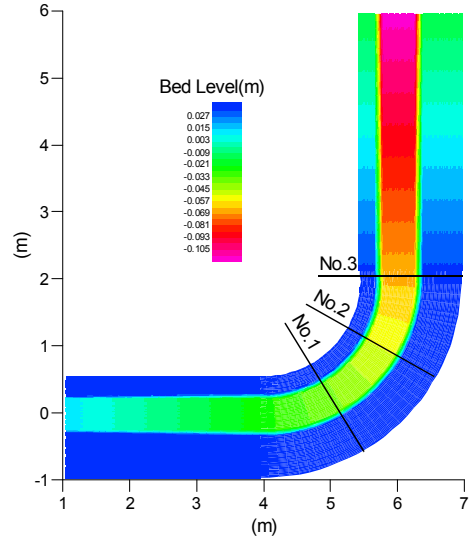


図-1 川幅が小さい場合の初期河床形状

3. 計算条件

上記のモデルを有光ら⁸⁾の実験に適用し、急勾配湾曲水路における河床・河道変動解析に対する平衡・非平衡流砂モデルの適用性について考察する。計算対象とする水路の形状は曲率半径 $r=2.0(\text{m})$ 、河床勾配1/80、法面勾配40°の台形断面の単一湾曲水路であり、川幅が小さい場合($B=0.5(\text{m})$, $r/B=4.0$)と大きい場合($b=1.0(\text{m})$, $r/B=2.0$)について検討した。水理条件は流量 $Q=0.0085(\text{m}^3/\text{s})$ 、砂の粒径 $d=1.86(\text{mm})$ であり、平均水深 h は川幅が小さい場合0.024m、大きい場合0.016mである。計算条件を表-1に、川幅が小さい場合の初期河床形状を図-1に示す。計算格子については、主流方向において直線部で0.1(m)間隔、湾曲部で3°間隔で格子を設定した。

数値解析法として有限体積法を用い、移流項の離散化にはQUICK-schemeを、時間積分にはAdams-Bashforth法を適用した。

4. 計算結果と考察

まず、図は省略するが、平衡流砂モデルを用いて川幅が小さい場合の河床・河道変動計算を行い、土砂崩落モデルにおける安息角の影響について考察を行った。水中

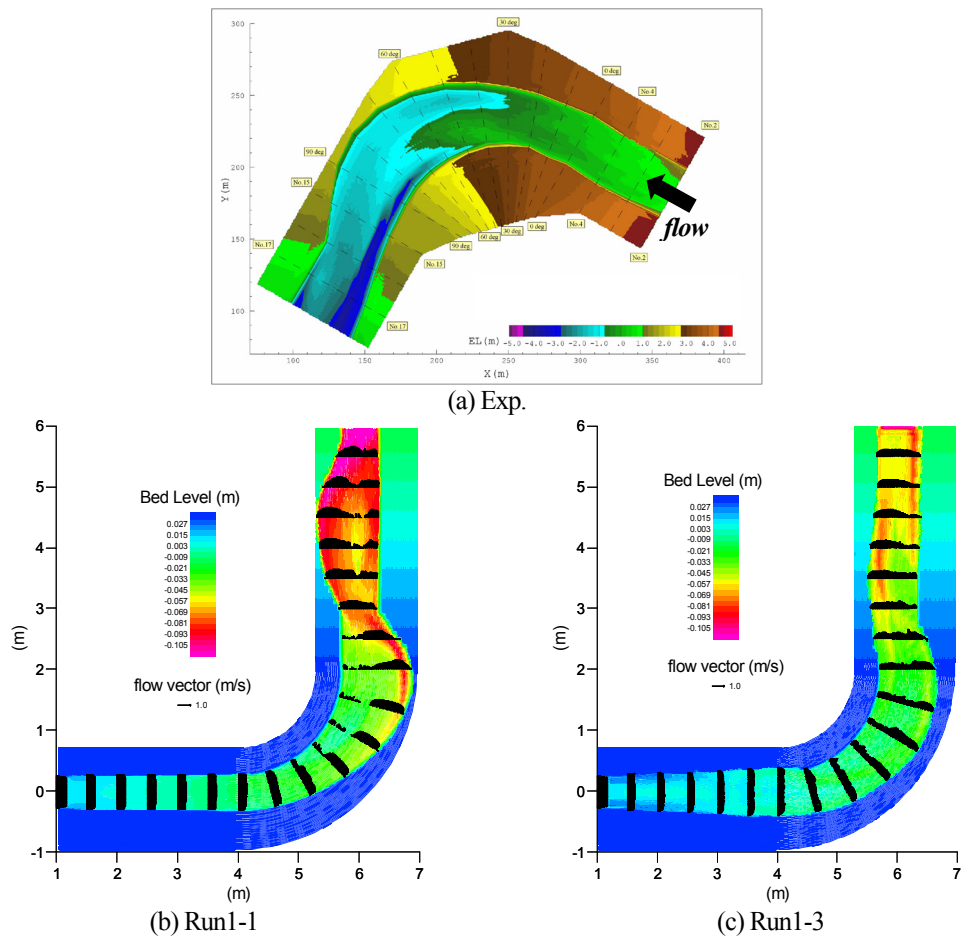


図-2 流速ベクトルと河床コンター図

安息角は概ね 30° 程度と言われているが、後藤ら¹³⁾が指摘しているように側岸侵食を含む河床横断形状は河床材料の性質や水理条件によって異なることが考えられる。そこで、水際安息角を同じ値に設定のもと、水中安息角を変化させて数値実験を行った結果、水中安息角を大きく設定(例えば一般的に言われている 30°)すると、湾曲部外岸側の河床低下が生じても横断方向からの土砂崩壊による供給がないため、外岸側での河床低下が顕著になるとともに、河岸侵食が進行しない結果となった。一方で、水中安息角を小さく設定した場合、外岸側での河床が低下すると横断方向から土砂が供給されるため、小さい値を用いると河岸侵食が進行しすぎる結果が得られた。そこで本研究では、実際の水中安息角より小さいが、河岸の位置が概ね再現できるように表-1のようにパラメータを設定した。今後、様々な水理条件のもとで計算を行い、最適なパラメータの設定方法について検討したい。

次に、川幅が小さい場合について実験結果との比較を行う。図-2は川幅が小さい場合の河床高コンター図を比較したものであり、図-3は図-1に示した3つの断面(湾曲部 30° , 60° , 90°)での河床横断分布を比較したものである。図をみると平衡流砂モデルを用いたRun1-1でも安息角を調整することで湾曲部下流側(No.3)での河岸の位置を概ね再現できたが、湾曲部上流側での再現性が十分ではな

い。一方、非平衡流砂モデルを用いたRun1-2, 1-3, 1-4について比較すると、平均step lengthが短いRun1-2では、pick-upされた土砂がpick-up地点から近い位置に堆積するため、外岸側の河床低下とそれに伴う侵食の進行が再現できておらず、実験結果と適合していない。またRun1-4では、侵食のピークが湾曲部上流側に生じており、下流側の適合性が悪い。一方、Run1-3では実験結果の河床形状を再現しており、平均step lengthを調整することで平衡流砂モデルを用いたRun1-1よりも精度の高い結果が得られた。これは、長田ら⁶⁾が指摘しているように、このケースでは水際からの土砂流入がないことに起因する流砂の非平衡性の影響が大きかったためであると考えられる。なお、実験中の動画で確認されている反砂堆の発生については基礎式に静水圧を仮定した平面2次元モデルを用いていることから再現できなかった。

次に、川幅が大きい場合について考察を行う。図-4は河床高コンター図について実験結果と比較したものであり、図-5は河床横断分布を比較したものである。図をみると、このケースでは河床変動が進まず、河岸侵食も進行していないためどちらの流砂モデルでも概ね一致していることがわかる。また、川幅が小さい場合に比べて侵食のピーク位置が下流側になることも再現できている。

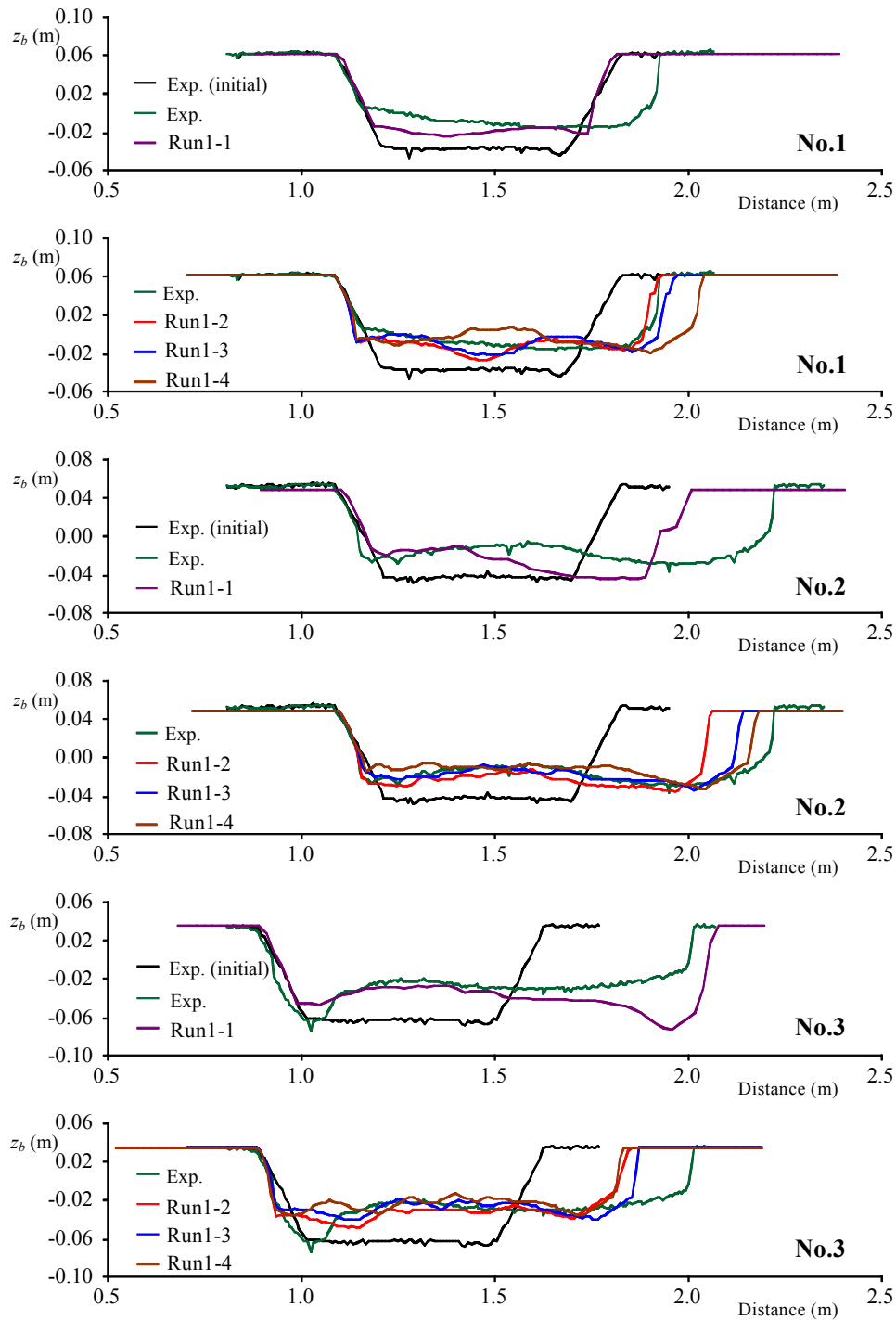


図-3 河床横断分布の比較

5. おわりに

本研究では、一般座標系での平面2次元モデルと平衡・非平衡流砂モデルを組み合わせ、急勾配湾曲水路における河床・河道変動解析を行い、土砂輸送モデルによる現象の再現性について検討した。その結果、河岸侵食が殆ど進まない場合には、どちらの流砂モデルでも再現できたが、河岸侵食が進行する場合には非平衡流砂モデルを用いる方が現象を再現できることを示した。今後、様々な水理条件で数値解析を行い、モデルの妥当性につ

いて検討するとともに、pick-upされた土砂がどこにどの割合でdepositするのか考察することで非平衡流砂モデルの有用性を示したい。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 山坂昌成, 竹内 聡, 古屋 晃, 永納栄一: 湾曲流路の側岸侵食, 第27回水理講演会論文集, pp.721-726, 1983.
- 2) 清水康行, 平野道夫, 渡辺康玄: 河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.921-926, 1996.
- 3) 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-

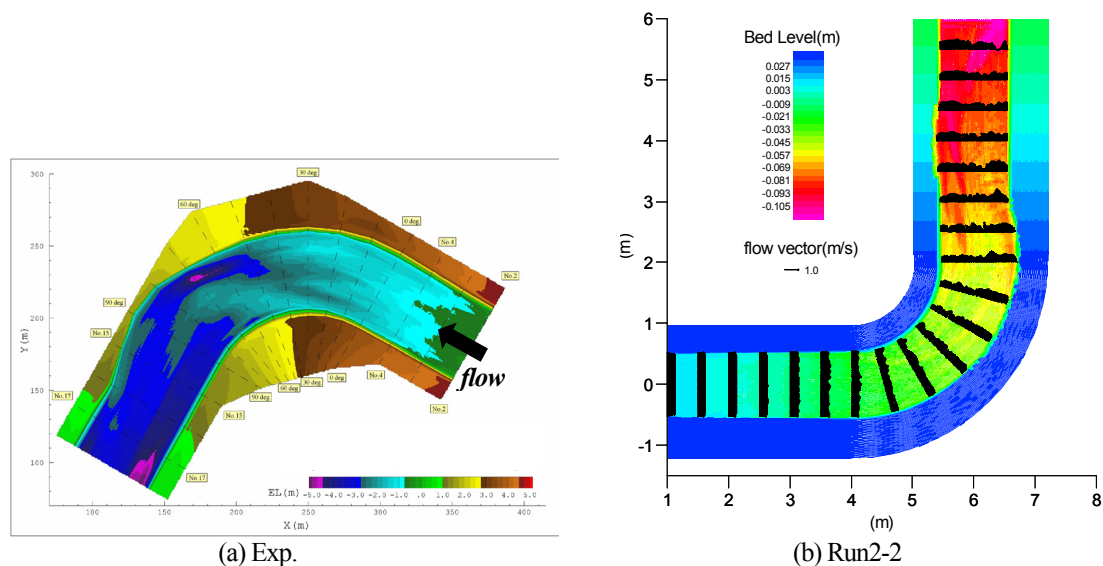


図-4 流速ベクトルと河床コンター図

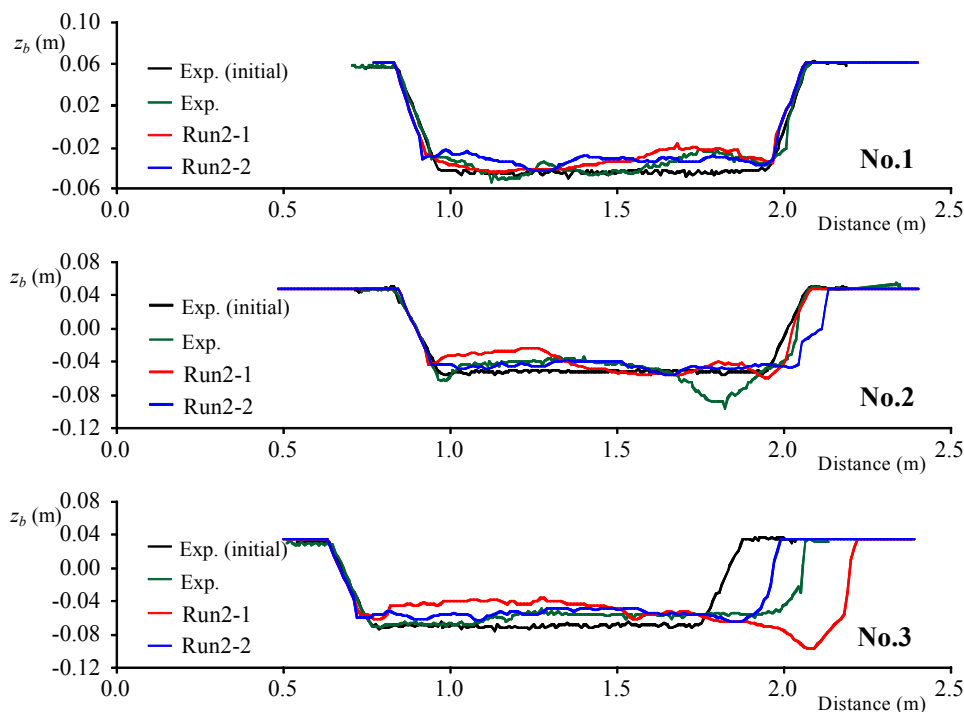


図-5 河床横断分布の比較

648, 2007.

- 4) 関根正人：側岸侵食を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.553/II-34, pp.51-59, 1996.
- 5) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄, Md. M. Rahman：移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析, 水工学論文集, 第40巻, pp.927-932, 1996.
- 6) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄, Md. M. Rahman：河岸侵食過程における流砂の非平衡性を考慮した流路変動の数値解析, 水工学論文集, 第41巻, pp.889-894, 1997.
- 7) 目黒嗣樹, 長谷川和義, 大塚剛史, 竜澤宏昌：山地河川に見られる大・中・小規模共存河床形態の再現実験, 水工学論文集, 第45巻, pp.733-738, 2001.
- 8) 有光 剛, 大江一也, 出口 恭, 森山陽一, 藤田一郎：急勾配河川湾曲部における流れと側岸侵食に関する実験的研究,

水工学論文集, 第53巻, pp.775-780, 2009.

- 9) 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的研究, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 10) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文, 1983.
- 11) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾：側岸における非平衡流砂過程, 第29回水理講演会論文集, pp.561-566, 1985.
- 12) 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.
- 13) 後藤孝臣, 北村忠紀, 辻本哲郎：上・下流境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.35-46, 2001.

(2009. 9. 30受付)