

浮遊砂を伴う非定常流下での砂州形成に関する研究

Study on Bar Formation under Unsteady Flow Condition with Suspended Load

(株)北開水工コンサルタント

○正会員 大山史晃 (Fumiaki Ooyama)

独立行政法人 北海道開発土木研究所

正会員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)

1 はじめに

河床に形成される砂州は、流れを蛇行させ水衝部や局所的な深掘れを形成するため、その発生形態と災害が密接に関係してくる。中規模河床形態が形成される河川の河床・河道形状を定量的に把握することは河川工学上重要な課題であり、今日まで様々な研究が行われ、砂州の特性等がかなり明らかになってきている。しかし、これらの研究の多くは流れを定常流として砂州の挙動を把握したものであり、時間的に流れの大きく変化する洪水時の挙動把握は、流れの変化の速度に比較して砂州の形成時間が極めて長い非定常流による影響は大きくないとの理由から行われてこなかった。しかし、災害の発生は、非定常性の強い降雨洪水時にも見られ、流れの非定常性の影響も検討する必要があると考えられる。

また、洪水時の河川流、とくに下流部においては浮遊砂が卓越しており、砂州の形成に浮遊砂の影響を無視することはできない。本研究では、渡邊ら¹⁾の非定常流下の線形安定解析法を用いて、洪水時における掃流砂および浮遊砂の砂州発生に及ぼす影響について考察した。

2 非定常流における線形安定解析の概要¹⁾

川幅 $2B^*$ の直線水路における非定常2次元浅水流式と連続の式および掃流砂と浮遊砂を対象とした流砂連続式を $(U, V) = (U^*, V^*)/\bar{U}_0^*$ 、 $D = D^*/\bar{D}_0^*$ 、 $H = H^*/(\bar{F}_0^2 \bar{D}_0^*)$ 、 $(x, y) = (x^*, y^*)/B^*$ 、 $(Q_b, Q_s) = (Q_b^*, Q_s^*)/(\Delta g^* d_s^{*3})^{1/2}$ 、 $(\tau, t) = (\tau^*, t^*)/(\rho^* \bar{U}_0^*)$ 、 $(\tau_x, \tau_y) = (\tau_x^*, \tau_y^*)/(\rho^* \bar{U}_0^{*2})$ で無次元化すると、(1)~(4)式となる。

$$\sigma \frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} + \bar{\beta}_0 \frac{\tau_x}{D} = 0 \quad (1)$$

$$\sigma \frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} + \bar{\beta}_0 \frac{\tau_y}{D} = 0 \quad (2)$$

$$\sigma \frac{\partial D}{\partial \tau} + \frac{\partial (UD)}{\partial x} + \frac{\partial (VD)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\bar{F}_0^2 H - D)}{\partial t} + \bar{Q}_0 \left(\frac{\partial (Q_{bx} + Q_{sx})}{\partial x} + \frac{\partial (Q_{by} + Q_{sy})}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 t^* ；時間、 x^*, y^* ；縦横断方向座標軸、 U^*, V^* ； x^*, y^* 軸方向の流速、 H^* ；水位、 D^* ；水深、 η^* ；河床高 ($= H^* - D^*$)、 τ_x^*, τ_y^* ； x^*, y^* 軸方向の剪断力、 Q_{bx}^*, Q_{by}^* ； x^*, y^* 軸方向の掃流砂量、 Q_{sx}^*, Q_{sy}^* ； x^*, y^* 軸方向の浮遊砂量、 ρ^* ；水の密度、 g^* ；重力加速度、 $1/\sigma^*$ ；

洪水の継続時間である。また、 $\bar{F}_0 = \bar{U}_0^*/(g^* \bar{D}_0^*)^{1/2}$ 、 $\bar{\beta}_0 = B^*/\bar{D}_0^*$ 、 $\sigma = \sigma^* B^*/\bar{U}_0^*$ 、 $\Delta = (\rho_s^* - \rho^*)/\rho^*$ 、 $\bar{Q}_0 = (\Delta g^* d_s^{*3})^{1/2} / [(1-P)\bar{U}_0^* \bar{D}_0^*]$ であり、 ρ_s^*, P, d_s^* ；河床材料の単位堆積重量・空隙率・粒径、 $\bar{U}_0^*, \bar{H}_0^*, \bar{D}_0^*$ ；基底流の流速・水位・水深である。なお、*の付いた記号は有次元量を示し、付いていないものは無次元量を表している。浮遊砂については、浮遊砂濃度の連続式を3次元表示である(5)式で与えることにした。

$$\sigma \frac{\partial C}{\partial \tau} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} - \bar{\beta}_0 w_f \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\psi}{\bar{\beta}_0} \sqrt{c_{f0}} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \bar{\beta}_0 \sqrt{c_{f0}} \psi \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5)$$

ここで、 C ；浮遊砂濃度、 w_f ；砂粒子の沈降速度 ($w_f = w_f^*/\bar{U}_0^*$)、 ψ ；渦動粘性係数、 z ；基準面からの高さ ($z = z^*/\bar{D}_0^*$)、 c_{f0} ；河床摩擦係数(等流時)である。

次に各諸量を、波形によって決定されるものと、河床の変化に伴う摂動量に分け $U = U_0 + \varepsilon U_1$ 、 $V = \varepsilon V_1$ 、 $H = H_0 + \varepsilon H_1$ 、 $D = D_0 + \varepsilon D_1$ 、 $C = C_0 + \varepsilon C_1$ 、 $\mathcal{G} = \mathcal{G}_0 + \varepsilon \mathcal{G}_1$ 、 $\phi = \phi_0 + \varepsilon \phi_1$ 等で表現する。 $\mathcal{G}$ ；無次元掃流力、 ϕ ；単位幅流砂量を $(\Delta g^* d_s^{*3})^{1/2}$ で無次元化した掃流砂関数、 ε ；摂動パラメータである。河床波の波長は一般に洪水波の波長に比べ十分小さい。このため、定点では時間的に洪水波の挙動すなわち水位の上昇下降等の挙動を示すが、洪水波によって決定される水深や流速の変化は時間のみに依存し、水面勾配は時間的に変化しない状態を扱うこととすると、波形によって決定される U_0, V_0, H_0, D_0, C_0 等は時間 t のみの関数であり、 x, y については一定値となる。水路側壁において横断方向流速0となる条件を考慮し、砂州形成に伴う摂動量 U_1, V_1, H_1, D_1, C_1 について、(6)式で表現する。

$$\{U_1, V_1, H_1, D_1, C_1\} = \{\hat{U}_1, \hat{V}_1, \hat{H}_1, \hat{D}_1, \hat{C}_1\} \{S_1, C_1, S_1, S_1\} E_1 + c.c. \quad (6)$$

$S_1 = \sin(\pi y/2)$ 、 $C_1 = \cos(\pi y/2)$ 、 $E_1 = \exp(i\lambda x)$ で表され、 i ；虚数単位、 $c.c.$ ；共役複素数、 λ ；縦断方向砂州波数 ($\lambda = 2\pi B^*/L^*$ 、 L^* ；砂州波長)である。

通常 $\sigma \ll 1$ であり慣性項を省略するとともに、 $\hat{U}_1, \hat{V}_1, \hat{H}_1, \hat{C}_1$ を $\hat{D}_1$ で表し整理すると(7)式が得られる。

$$\frac{\partial \hat{D}_1}{\partial t} + G(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\mathcal{G}}_0, D_0, \lambda) \hat{D}_1 = 0 \quad (7)$$

ここで、 $\bar{d}_{s0} = d_s^* / \bar{D}_0^*$ 、 $\bar{\vartheta}_0$ ；基底流の無次元掃流力である。(7)式の解は、 $G(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda)$ が t に独立である場合、すなわち流れが定常状態の場合には、(8)式となる。

$$\hat{D}_1 = \exp [-Gt]const \tag{8}$$

流れが非定常流の場合は D_0 が時間の関数であり $G(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda)$ は t の関数となる。したがって(7)式の解は、(9)式のようになる。

$$\hat{D}_1 = \exp \left[-\int_{t_0}^t G(t')dt' \right]const \tag{9}$$

ここで t_0 ；洪水開始時刻である。(8),(9)式の指数部は、振動量が時間的にどのように変化していくかを表すものであり、つまり砂州の時間に関する振動量の増幅率 Ω である。定常流の場合 Ω は(10)式になる。

$$\Omega = -G \tag{10}$$

一方、非定常流の場合は(11)式となる。

$$\Omega = -\int_{t_0}^t G dt' \tag{11}$$

増幅率が正の値のとき砂州は発達し、負の値の時は減衰する。増幅率の最大値を示す λ が、その時刻において最も発達する波数となる。また非定常流とした解析では、あらゆる値の λ がそれぞれの増幅率をもって各時刻において存在し、最も増幅率の大きな λ を卓越波数として時間的に変化しているものと想定している。

3 計算条件

検討に使用した洪水は、昭和 56 年 8 月に石狩川で発生した降雨出水である。出水時、河川流は明確な蛇行を示しており、はっきりした交互砂州が発生していたと判断される。そこで、石狩川の河口上流 kp26.6 にある石狩大橋でのハイドロデータを用い解析を行うこととした。図-1 は石狩大橋での流量と水位の時間変化を示したものである。この観測水位をもとにして、(12)式で表される水深を使用した。

$$D_0(\tau) = \left[\frac{1.176(\tau + 0.333)^2}{\tau^2 + 0.0667} - 0.960 \right]^{3/2} \tag{12}$$

ここで、時間 τ は洪水継続時間($1/\sigma^*$)で無次元化した値であり、 $\tau = \sigma^*(B^*/\bar{U}_0^*)t$ の関係が成り立つ。図-2 は(12)式で表される水深の時間変化を示したものである。 $\tau = 0.2$ において洪水ピークがおとずれる。また検討に用いる縦断形状は、縦断的にある程度の距離をもつ砂州の挙動を対象としていることから、石狩大橋の周辺河道区間において平均して算出した縦断勾配、川幅を水力条件として使用した。また、浮遊砂の卓越に影響する要因の一つである河床材料粒径 d_s^* に着目し、この区間での平均粒径である $d_s^* = 1.0\text{mm}$ の条件に加え、 $d_s^* = 5.0\text{mm}$ 、 $d_s^* = 0.1\text{mm}$ の場合においても解析を行い、それぞれの条件において砂州発生 of 挙動がどのように変化するかを調べることにした。表-1 に解析に使用した水力諸元をまとめて記している。

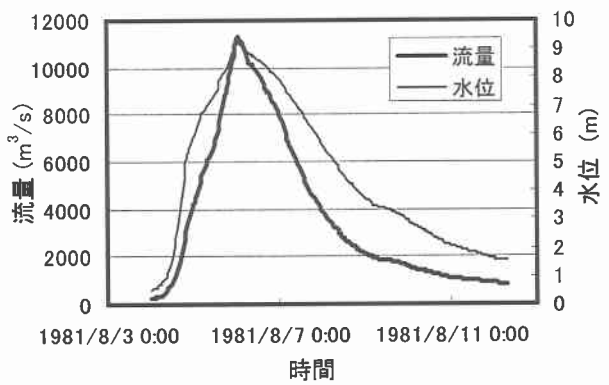


図-1 石狩大橋における流量と水位

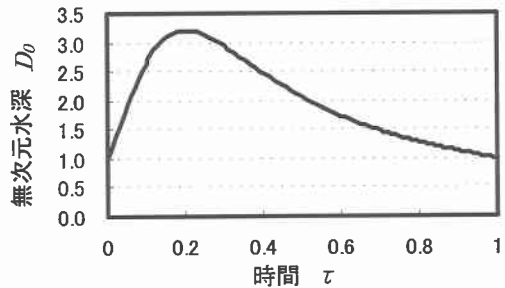


図-2 (12)式による無次元水深の時間変化

表-1 解析検討に用いた水力諸元

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
河床材料	5.0 mm	1.0mm	0.1mm

川幅	基底流の水深	ピーク水深	河床勾配
300 m	3.5 m	11.2 m	1/7000

	KP	ピーク水位	ピーク時刻	洪水継続時間
石狩大橋	26.6	9.23 m	1981/8/6 2:00	185 hr

4 解析結果

掃流砂のみの発生を考慮した場合、および、掃流砂と浮遊砂両方の発生を考えた場合における増幅率の時間変化を表したものが、図-3～8 である。各図は、横軸に洪水の経過時間を、縦軸に砂州の増幅率および、(12)式をもとに得られた無次元掃流力の値を示している。ここで、図-3, 4, 5 は洪水の各ステージにおける流量が一定に流下した場合、すなわち、定常流を想定した条件での増幅率 Ω_s の時間変化を表している。一方、図-6, 7, 8 は、流量の時間変化を取り込んだ場合、すなわち非定常流の条件での増幅率 Ω_u の結果を示したものである。ここで Ω_s 、 Ω_u は、あらゆる値の λ の中で各時刻において最も大きくなる増幅率を示している。

図-3, 6 は粒径を $d_s^* = 5.0\text{mm}$ としたときの解析結果であるが、流れを定常流、非定常流とした両条件ともに、浮遊砂の影響を考慮してもその影響が小さいため、掃流砂のみの場合と比較し増幅率にほとんど変化は表れていない。また定常流とした解析では、洪水ピーク後の $\tau = 0.5$

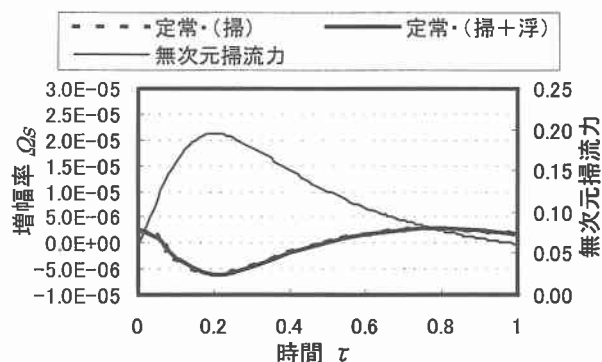


図-3 定常流での増幅率の変化《 $ds^*=5.0\text{mm}$ 》

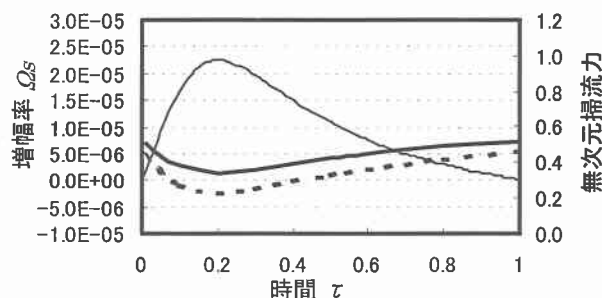


図-4 定常流での増幅率の変化《 $ds^*=1.0\text{mm}$ 》

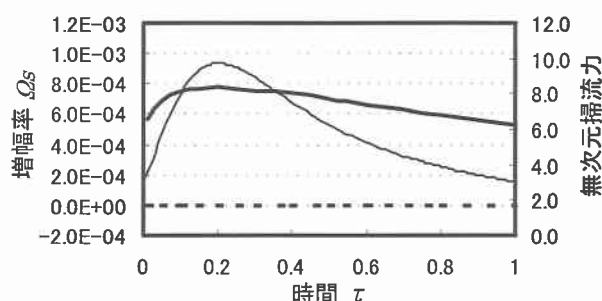


図-5 定常流での増幅率の変化《 $ds^*=0.1\text{mm}$ 》

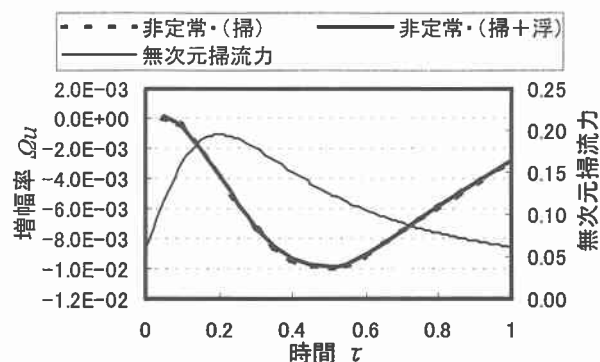


図-6 非定常流での増幅率の変化《 $ds^*=5.0\text{mm}$ 》

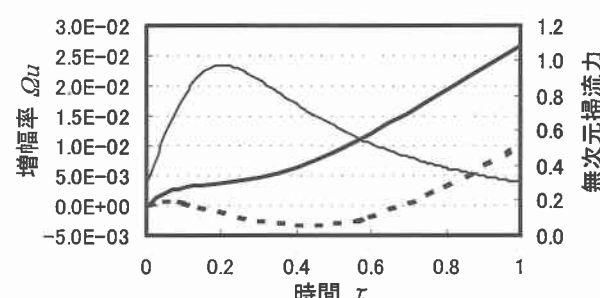


図-7 非定常流での増幅率の変化《 $ds^*=1.0\text{mm}$ 》

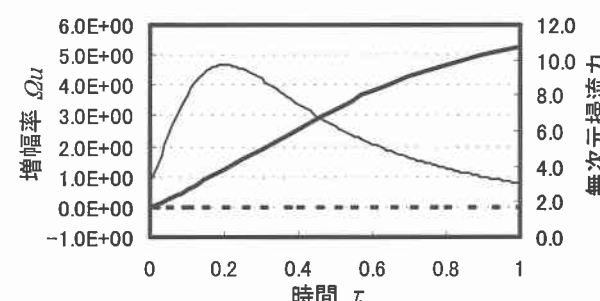


図-8 非定常流での増幅率の変化《 $ds^*=0.1\text{mm}$ 》

以降において増幅率が正の値に転じ、砂州の発生領域に入っているが、非定常流とした解析では、洪水期間中で常に砂州が発生していない結果となった。また、両解析ともに水位の上昇に伴い増幅率の減少が見られるが、非定常流での解析においては、増幅率の最小値が洪水ピーク時間の $\tau=0.2$ よりも遅れていることがわかる。

次に、石狩大橋付近の平均粒径である $d_s^*=1.0\text{mm}$ とした場合の解析結果を図-4,7 に示した。流れを定常とした解析では、掃流砂のみを考慮した場合に比べ、浮遊砂を考慮した解析の方が洪水期間中で常に増幅率の値が上回っている。また、水位の上昇に伴い増幅率が減少している。一方、非定常流を想定した解析では、浮遊砂を考慮した場合、時間変化で増幅率の値が上昇し続けている。一方、掃流砂のみを考慮した場合には水位の上昇に伴い増幅率が減少しており、洪水ピーク以降の $\tau=0.4$ 付近で増幅率は最小の値をとる。その後、増幅率は上昇し、 $\tau=0.7$ で砂州発生領域に入っている。

同様に、もっとも浮遊砂の卓越する $d_s^*=0.1\text{mm}$ とした場合の解析結果を図-5,8 に示した。流れを定常流、非定常流とした両条件ともに、浮遊砂を考慮した場合の

増幅率は、掃流砂のみとした場合と比較して、かなり大きな値をとっている。また定常流とした解析において、若干ではあるが水位の上昇に伴い増幅率も増大しており、 $d_s^*=5.0\text{mm}$ と 1.0mm のケースと逆の傾向を示していると言える。

次に、図-3～8 において、洪水期間中での砂州発生が長時間で確認された $d_s^*=1.0\text{mm}$ と $d_s^*=0.1\text{mm}$ のケースについて、増幅率が最大となる λ の時間変化を図-9～12 に示した。図-9,10 が定常流、図-11,12 が非定常流を想定した場合の結果を示している。

図-9,11 は、 $d_s^*=1.0\text{mm}$ とした場合の解析結果である。砂州が発生すると判断された時間を実線で、発生しない場合は、その時刻において最も増幅率が大きくなる時の λ 値を便宜上プロットし、破線で示した。流れを定常流とした解析では、掃流砂のみを扱った場合、洪水初期時間において砂州の発生が見られるが、 $\tau=0.1\sim0.5$ の間は砂州が発生せず、 $\tau=0.5$ 以降に砂州形成が再び生じ、 λ の値は $0.4\sim0.6$ へと上昇している。一方、浮遊砂を考慮した条件では、前者の結果と相反して、全ての時刻において砂州の形成が判断された。また λ は 0.1

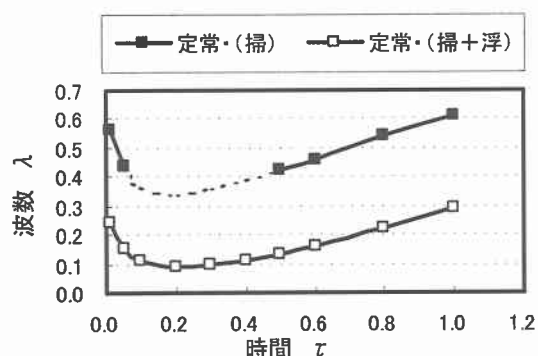


図-9 定常流でのλの変化《 $ds^*=1.0\text{mm}$ 》

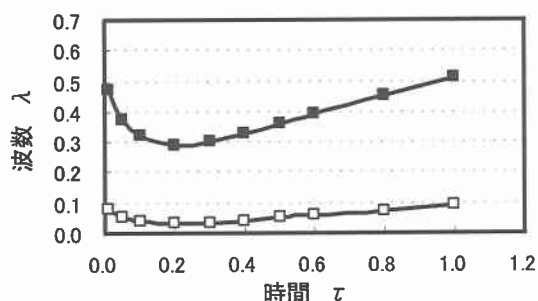


図-10 定常流でのλの変化《 $ds^*=0.1\text{mm}$ 》

～0.3の間で推移しており、両者を比較すると、λの時間変化が0.25～0.3の差を開いて推移している。同様に流れを非定常流とした条件での結果は、掃流砂のみを扱った場合、 $\tau=0.1$ まで砂州が発生しているが、それ以降は長時間砂州の発生が認められず、 $\tau=0.8\sim 1.0$ の時間において、 $\lambda=0.4\sim 0.5$ の値での砂州形成が判断された。浮遊砂を考慮した条件では、定常流とした解析と同じく、全ての時刻において砂州の発生が認められた。すなわち、掃流砂のみを考慮した条件では砂州の形成が見られなかった水深条件でも、浮遊砂を考慮したことにより砂州が形成されたことになる。また、洪水初期において掃流砂のみを扱った場合と比較してλの値に大きな差が見られないが、洪水後期で発生した砂州のλ値に関しては、0.25～0.35の大きい差が生じている。

また、定常流、非定常流とした解析の結果を比較した場合、掃流砂のみを与えた解析では、洪水初期時間に発生するλの値に顕著な差が生じており、非定常流としたケースの方がλの値が小さくなっている。同様に非定常流とした解析の方が、洪水ピーク直前の $\tau=0.1$ 以降から始まっている砂州の発生が認められない時間帯が長く続いている結果となった。一方、浮遊砂を考慮したケースにおいては、洪水ピーク前までの両者のλ値に大きな変化は見られないが、ピーク後からのλ値の変化が非定常流での解析の方が小さく、ほぼ一定値で推移していることがわかった。このように、定常流を想定した場合と、非定常流として扱った場合とでは、砂州の発生から非発生へと遷移する時間と過程、及びλの時間変化について大きな違いが見られる。

同様に、粒径を $d_s^*=0.1\text{mm}$ とした解析結果を図-10, 12に示した。掃流砂のみを扱った場合、定常流を想

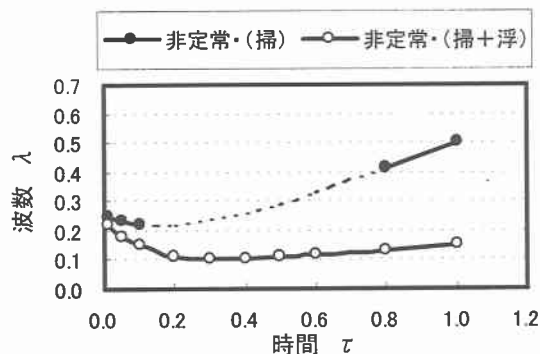


図-11 非定常流でのλの変化《 $ds^*=1.0\text{mm}$ 》

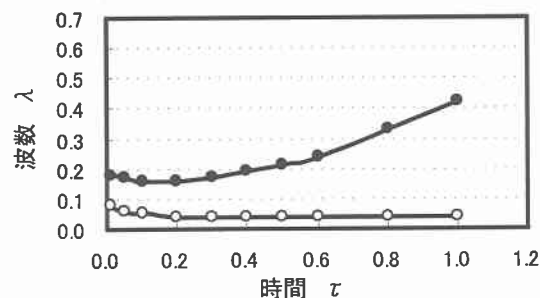


図-12 非定常流でのλの変化《 $ds^*=0.1\text{mm}$ 》

定した条件、非定常流とした条件ともに、粒径を $d_s^*=1.0\text{mm}$ とした解析結果とは異なり、洪水期間中、砂州の発生が継続されている結果となった。一方、浮遊砂を考慮した場合であるが、定常、非定常の条件ともに、 $\lambda=0.1$ 以下のかかなり長い砂州波長を持ち、洪水終了時まで砂州の形成を維持している。、粒径値を下げ、浮遊砂の影響を大きくした結果、全体的なλ値の減少が見て取れる。

5 おわりに

本研究では、洪水時に形成される砂州の挙動について、流れの非定常性、および浮遊砂の影響という観点のもとに検証を行った。その結果、水位の上昇期と下降期では、同一の水位であっても、流れの非定常性を考慮することによって砂州の状態が異なり、流れを定常とした解析と比較して、砂州波長の時間変化、および砂州の発生、非発生の遷移時間に大きな違いがあることを確認した。一方、浮遊砂の影響を考慮することにより砂州の波長が掃流砂のみの場合と比べて長くなるということ、また掃流砂のみを考慮した条件では洪水期間中に砂州の発生が認められなかった時間帯が存在したが、浮遊砂を考慮することにより、長い波長を持った砂州の発生が洪水中、継続して生じていることを確認した。

参考文献

- 1) 渡邊康玄、Tubino M.、Zolezzi G.：非定常流における交互砂州の安定解析、土木学会第56回年次学術講演会講演概要集第2部、2001。
- 2) 渡邊康玄、Tubino M.：掃流砂・浮遊砂の伴う流れの交互砂州に関する研究、水工学論文集第36巻、1992。