

洪水時に発生した高水敷の洗掘原因

HYDRAULIC REASON FOR SCOURING ON FLOODPLAIN DURING FLOOD

渡邊康玄¹・大山史晃²

Yasuharu WATANABE and Fumiaki OYAMA

¹正会員 工博 北海道開発土木研究所 環境研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34)

²正会員 工学 北開水工コンサルタント 河川調査部 (〒062-0052 札幌市豊平区月寒東2-20-5-10)

Large-scale scouring was generated during the 1998 flood of the Shokotsu River resulting in revetment damage. The cause of this scouring of the flood plain was considered for the purpose of understanding the impact of flood to channels. It seemed that the scouring was caused by the formation of double-row bars. A linear stability analysis in unsteady flows is performed to understand the behavior of the sandbar formation. The stability analysis under unsteady flow conditions indicated that bar formation did not change so much and double-row bars formed during the flood. This result concurs with field observations.

Key Words : Flood disaster, Scouring, Sand bar, Double-row bar, Alternate bar, Stability analysis, Shokotsu River

1. はじめに

1997年の河川法の改正により、河川環境が河川整備の目的の一つとなり、平常時の河川環境の保全・創出を目的とした施策が進められている。しかし、河川環境は平常時の状態のみならず、洪水による攪乱や渇水の影響等を受けつつ成立している。一方で、集中豪雨による計画規模に匹敵する洪水が各地で頻発しており防災面での対策も進められている。洪水における河道へのインパクトを把握することは、「川の365日」を意識しつつ治水・利水・環境に関わる施策が策定されている現在、河道の維持管理を考える上で非常に重要な事項となっている。洪水の河道へのインパクトとしては、流れによる物質の流送や河床形状の変化あるいは河道そのものの移動が挙げられる。

防災面で見ると、河床形状の変化の大きな要因として砂州の形成があるが、河床に砂州が発生すると、流れはその影響を受けて蛇行し水衝部を形成する。また砂州の前縁部には局所的にかなりの深掘部が形成される。このように災害と砂州の発生形態とは密接に関係している。

一方自然環境から考えると、近年になってダムの洪水制御等による砂州の固定化が進み、河川生態系の保全のための河床形状の攪乱が必要不可欠であると指摘されている¹⁾。このことから、ダム放流等により人為的に洪水を発生させ、自然環境の復元を目指す動きも見られるようになってきている。人為的な洪水を発生させるためには、水資源の有効な利用を考慮する必要があり、河床の攪乱に対して効果的な洪水波形や継続時間を算定する必要がある。洪水の河道へのインパクトとして洪水時の砂州の挙動を的確に把握することは、防災および自然環境の両面から必要不可欠の課題となっている。

一級河川渚滑川において1998年9月に発生した計画高水位に達する規模の洪水の際に、高水敷に低水護岸の破壊を引き起こした規模の大きな洗掘が生じた。洪水の河道へのインパクトを把握することを目的として、この高水敷の洗掘原因を検討することとした。本研究は、洪水直後に行った現地踏査の結果を踏まえ、渡邊らの非定常流下の安定線形解析手法²⁾を用いて渚滑川の洪水時における砂州の挙動を検討し、高水敷上に発生した洗掘と砂州との関係について考察を行った結果を報告するものである。

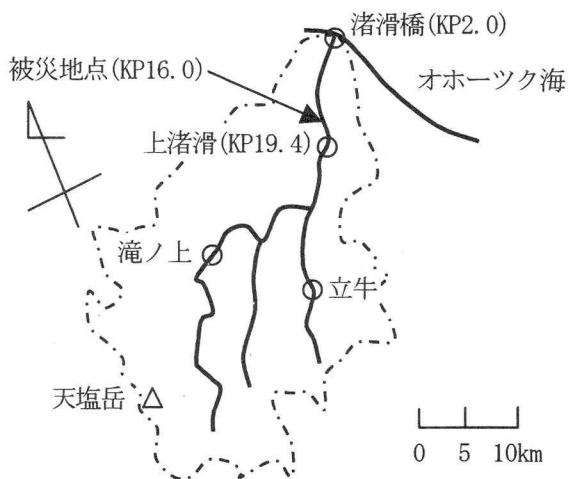


図-1 渚滑川流域概要

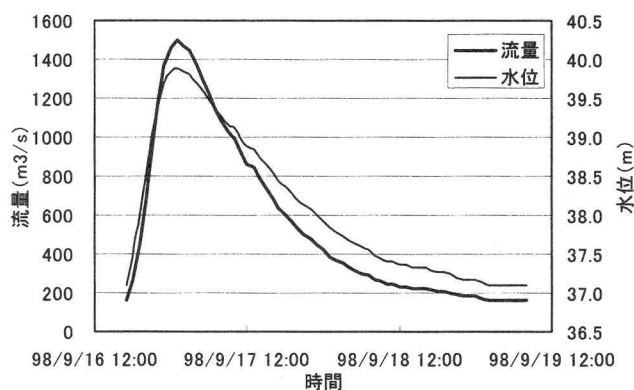


図-2 1997年9月洪水の上渚滑における流量と水位

2. 高水敷に生じた洗掘の概要

検討を行った洪水は1998年9月16～17日に渚滑川で発生した降雨出水である。渚滑川は、北海道東部に位置し、オホーツク海に注ぐ幹川流路延長84km、流域面積1,240km²の一級河川である。図-1に渚滑川の流域概要を示した。1998年9月の洪水は高水敷以上に増水し、下流部の上渚滑及び渚滑橋の各観測所で計画高水位を超え、観測史上最高水位を記録した³⁾。図-2は、この洪水の上渚滑における流量と水位の変化を示したものである。河口から19.4km上流に位置する上渚滑におけるピーク流量および水位はそれぞれ1,500m³/sおよび39.89mであり、計画流量および水位の1,300m³/sおよび39.68mを上回っている。なお、越水の被害は観測されていない。

洪水期間中に写真-1に見られる砂州が発生したと思われる大きな深掘部が高水敷に形成され、低水路護岸が崩れる被害が報告されている。この災害は、河口から約16km上流の右岸高水敷で発生した。図-3は、洗掘箇所周辺の河道形状を示すコンター図である。上から、洪水前の河床標高、洪水後の河床標高、および洪水前後の標高の違いすなわち洪水による洗掘深を、それぞれ示したものである。図中の白破線は、低水護岸法肩の位置を示



写真-1 高水敷の洗掘状況

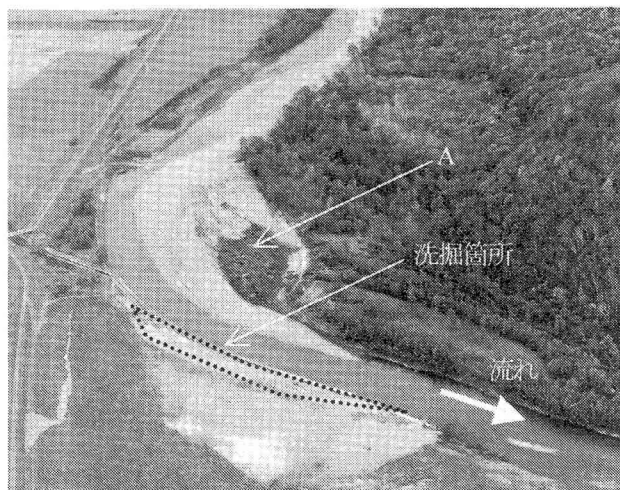


写真-2 洪水直後における洗掘箇所周辺の状況

しており、白破線より下が低水路、上が高水敷となっている。また、流れは右から左の方向に流れている。低水路護岸に沿って深さ1m程度で幅30m長さ250m程度の洗掘が生じたことがわかる。写真-1に見られるように、天端工の被災状況が低水路側に捲れあがるような状態でなく下部の土砂が流掃されたと思われる状態であったことから、護岸背面方向から低水路方向への戻り流れによる被災ではないと判断される。

洗掘箇所の状況をより広範に見ることとする。現地踏査により状況の把握を行ったが、ここでは写真を用いて述べることにする。写真-2は、洪水直後に撮影された航空斜め写真である。写真中「A」と記した洗掘箇所前面の砂州の両側を洪水流が流下した形跡が読み取れるとともに、現地踏査によって把握した「A」と記した砂州及び周辺の砂州上に生育していた植生の多くが流失あるいは倒伏していたことが確認できる。また、洗掘部直下流の高水敷が白っぽく写っているが、これは砂礫堆状の堆積が生じているためである。「A」と記した砂州は、高水敷高と同程度の高さとなっていた。洗掘発生位置及び植生の倒伏方向等から判断した洪水流の流向を図-4に示した。河床形状及び流向等から判断すると、「A」

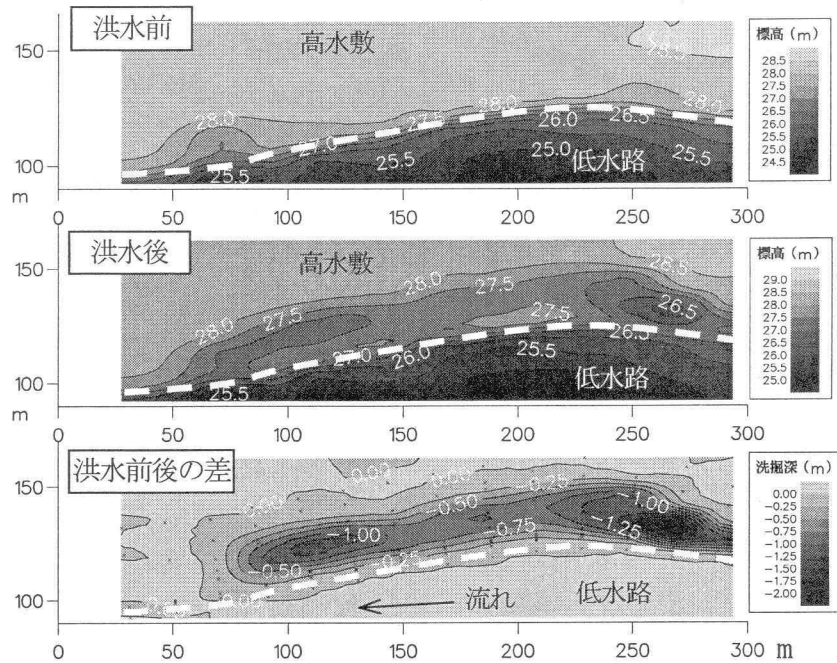


図-3 洗掘箇所周辺における洪水前後の地形コンター

と記した砂州は複列砂州河道に見られる河道中央部に形成される砂州であると考えられる。図-4について砂州、流向、被災箇所に着目し、模式的に表したものが図-5である。被災箇所は、砂州「A」の前縁部に位置していることがわかる。このことから被災の原因は洪水時の砂州前縁が護岸箇所位置していたためであると判断された。災害が、砂州の影響により生じたと判断されたことから、被災箇所を含む河道に形成される砂州の挙動について検討を行うことにした。

3. 非定常線形安定解析の概要

今回の洪水は、河床形状を形成するといわれる融雪出水等継続時間の長いものではなく、継続時間が数日単位の出水を対象としている。三輪⁴⁾、Tubino³⁾および渡邊²⁾は、非定常流れにおける砂州の挙動が定常流れにおける砂州の挙動と異なることを指摘している。このことから、砂州の挙動について洪水の非定常性を取り込んだ非定常線形安定解析²⁾を用いることとした。非定常線形安定解析の概要を以下に示す。

川幅 $2B^*$ の直線水路における拡散項を省略した非定常2次元浅水流式と連続の式および掃流砂を対象とした流砂連続式を、図-6および図-7に示す記号を用いて、 $(U, V) = (U^*, V^*) / \bar{U}_0^*$ 、 $D = D^* / \bar{D}_0^*$ 、 $H = H^* / (\bar{F}_0^* \bar{D}_0^*)$ 、 $(Q_{sx}, Q_{sy}) = (Q_{sx}^*, Q_{sy}^*) / (\Delta g^* d_s^*)^{1/2}$ 、 $(\tau_x, \tau_y) = (\tau_x^*, \tau_y^*) / (\rho^* \bar{U}_0^{*2})$ 、 $(x, y) = (x^*, y^*) / B^*$ で無次元化すると、(1)～(4)式となる。

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

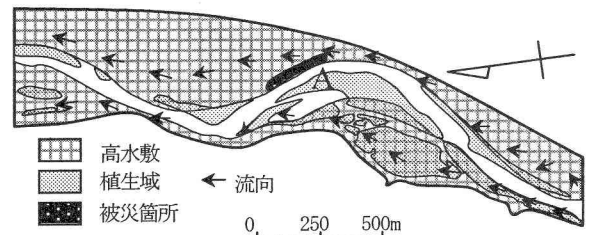


図-4 被災箇所付近の河道形状と
痕跡による流向

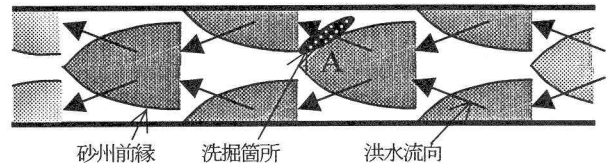


図-5 被災箇所付近の砂州形状と流れの模式図

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

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

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

ここで、 t^* ；時間、 x^*, y^* ；縦横断面方向座標軸、 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、 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、

$\bar{F}_0 = \bar{U}_0 / (g^* \bar{D}_0^*)^{1/2}$ 、 $\bar{\beta}_0 = B^* / \bar{D}_0^*$ 、 $\sigma = \sigma^* B^* / \bar{U}_0^*$ 、 $\bar{Q}_0 = (\Delta g^* d_s^*)^{1/2} / [(1-P)\bar{U}_0^* \bar{D}_0^*]$ 、 $\Delta = (\rho_s^* - \rho^*) / \rho^*$ 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。

ここで各諸量を、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 $U = U_0 + \varepsilon U_1$ 、 $V = \varepsilon V_1$ 、 $H = H_0 + \varepsilon H_1$ 、 $D = D_0 + \varepsilon D_1$ 、 $C_f = C_{f0} + \varepsilon C_{f1}$ 、 $\vartheta = \vartheta_0 + \varepsilon \vartheta_1$ 、 $\phi = \phi_0 + \varepsilon \phi_1$ 等で表現する。ここで、 C_f ；河床摩擦係数 ($= U_*'^2 / U^2$ 、 U_*' ；摩擦速度)、 ϑ ；無次元掃流力、 ϕ ；単位幅流砂量を $\sqrt{\Delta g^* d_s^*}$ 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 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、交互砂州形成に伴う摂動量 U_1 、 V_1 、 H_1 、 D_1 について、(5) 式で表現する。

$$\{U_1, V_1, H_1, D_1\} = \{\hat{U}_1, \hat{V}_1, \hat{H}_1, \hat{D}_1\} \{S_1, C_1, S_1, S_1\} E_1 + c.c. \quad (5)$$

ここで、 $S_1 = \sin(\pi y / 2)$ 、 $C_1 = \cos(\pi y / 2)$ 、 $E_1 = \exp(i\lambda x)$ であり、 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、 $\hat{U}_1$ 、 $\hat{V}_1$ 、 $\hat{H}_1$ を $\hat{D}_1$ で表し整理すると (6) 式が得られる。

$$\frac{\partial \hat{D}_1}{\partial t} + \mathbf{G}(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda) \hat{D}_1 = 0 \quad (6)$$

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。また $\mathbf{G}(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda)$ は、複素関数であり (7) 式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda) = & \frac{\bar{F}_0^2}{\bar{F}_0^2 f_H - 1} \frac{\partial f_H}{\partial t} + \\ & \frac{\bar{Q}_0 \phi_0}{\bar{F}_0^2 f_H - 1} \left[\frac{i\lambda}{1 - C_T} \left(\frac{2}{K} \Phi_T f_V D_0^{-1/2} + C_D \Phi_T + \Phi_D (1 - C_T) \right) - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \pi \left\{ \frac{1}{K} f_V D_0^{-1/2} - \frac{1}{2} \pi \frac{r}{\bar{\beta}_0 \vartheta_0^{1/2}} (\bar{F}_0^2 f_H - 1) \right\} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

ここで、(7) 式中の諸係数は、以下のとおりである。

$$f_V = -\frac{iK(-4ia_1\lambda^2 + a_2\pi^2 + a_3)}{(a_1a_4 + ia_3)D_0^{1/2}}, \quad f_V = \frac{2K\pi\lambda(a_2 + ia_1)}{(a_1a_4 + ia_3)D_0^{1/2}},$$

$$f_H = -\frac{4K^2\lambda(\bar{\beta}_0 c_{f0} + i\lambda D_0)(a_2 + ia_1)}{(a_1a_4 + ia_3)D_0}, \quad K = \left(\frac{\bar{\theta}_0 \Delta d_s}{C_{f0} \bar{F}_0^2} \right)^{1/2},$$

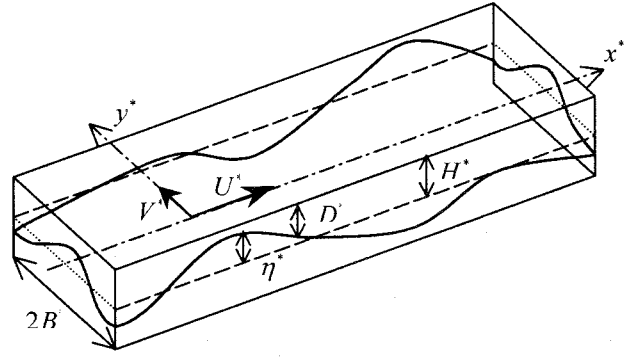


図-6 座標系模式図

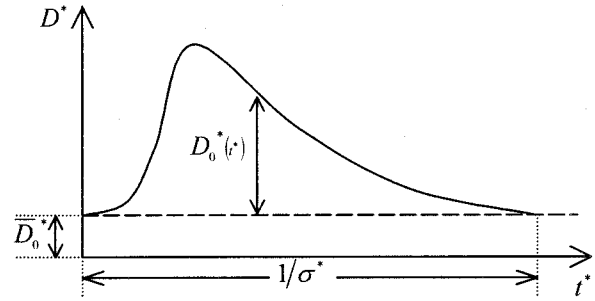


図-7 洪水波の模式図

$$C_T = \frac{\vartheta_0}{c_{f0}} \frac{\partial c_f}{\partial \vartheta} \bigg|_{\vartheta=\vartheta_0}, \quad C_D = \frac{1}{c_{f0}} \frac{\partial c_f}{\partial D} \bigg|_{D=D_0}, \quad \Phi_T = \frac{\vartheta_0}{\phi_0} \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta} \bigg|_{\vartheta=\vartheta_0},$$

$$\Phi_D = \frac{D_0}{\phi_0} \frac{\partial \phi}{\partial D} \bigg|_{D=D_0}, \quad a_1 = (C_T - 1)\lambda D_0,$$

$$a_2 = \bar{\beta}_0 c_{f0} (-3 + C_T + C_D D_0), \quad a_3 = 2\bar{\beta}_0 c_{f0} \{\pi^2 - 2(C_T - 1)\lambda^2\},$$

$$a_4 = \pi^2 + 4\lambda^2$$

(7) 式の解は、 $\mathbf{G}(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda)$ が t について独立である場合 (流れが定常状態) には (8) 式となり、基本的に従来と同様の結果^{6), 7)} を示す。しかし流れを不定流としているため D_0 が時間の関数であり、 $\mathbf{G}(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda)$ は t の関数となる。したがって解は (9) 式となる。

$$\hat{D}_1 = \exp[-\mathbf{G}t] \text{const.} \quad (8) \quad \hat{D}_1 = \exp\left[-\int_0^t \mathbf{G} dt'\right] \text{const.} \quad (9)$$

(8)、(9) 式の指数部の実数部は、摂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、言い換えれば、交互砂州の時間に関する増幅率 Ω (定常流： $\Omega_s = -\mathbf{G}$ 、非定常流： $\Omega_v = -\int_0^t \mathbf{G} dt'$) である。増幅率が正の値のとき交互砂州は発達し、負の値のときは減衰する。複列砂州の場合には、(5) 式の代わりに (10) 式を用いることにより、複列砂州の増幅率が得られる。

$$\{U_1, V_1, H_1, D_1\} = \{\hat{U}_1, \hat{V}_1, \hat{H}_1, \hat{D}_1\} \{C_2, S_2, C_2, C_2\} E_2 + c.c. \quad (10)$$

ここで、 $S_2 = \sin(\pi y)$ 、 $C_2 = \cos(\pi y)$ 、 $E_2 = \exp(2i\lambda x)$

表-1 検討に用いた諸元

川幅	基底流 の水深	ピーク 水深	河床 材料	河床 勾配	洪水継 続時間
320m	1.0m	3.1m	0.029m	1/420	32hr
$\bar{d}_{s0}$	$\bar{\beta}_0$	$\bar{g}_0$	g_c	τ_p	
0.029	160	0.05	0.05	0.22	

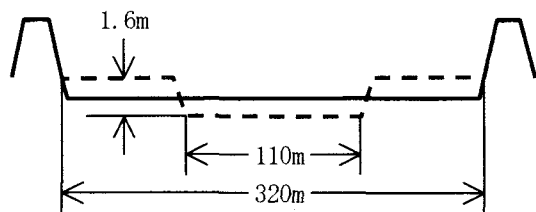


図-8 被災箇所近傍(KP15~17)の横断形状模式図

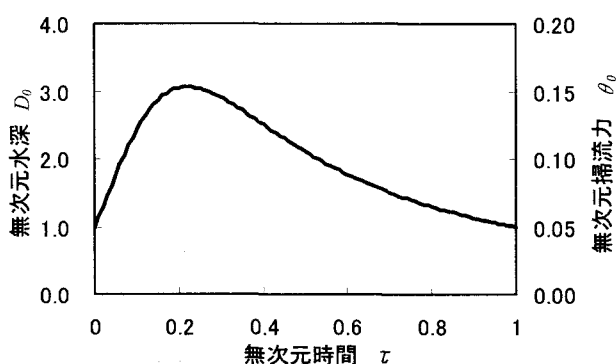


図-9 無次元水深および無次元掃流力の時間変化

である。

C_f, ϕ に具体的な関数形を与え、 $\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{g}_0$ および洪水波形である D_0 を入力することにより、任意の波数 λ の交互砂州についての増幅率が求まる。線形解析においては、各増幅率の中で最大の値 Ω を示した波数 λ の河床波が形成されることになる。

4. 安定解析の適用

検討に用いる断面形状は、縦断的にある程度の距離を持つ砂州の挙動を対象としていることから、被災箇所を挟む河口より上流15.0kmの地点から17.8kmの地点の河道形状を平均した断面とした。なお、高水敷における洗掘と砂州形成との対応を検討することから、堤間320mを川幅とし、それに合わせて河床高も低水路高と高水敷高の平均値とした。図-8の破線で示される断面形状を平均し、実線で表される断面形状を検討では用いている。

検討に用いた洪水のハイドロデータ D_0 は、検討対象区間において水位が観測されていないことから、直近の観測所である上渚滑における観測水位を用いることとした。しかし、対象区間と上渚滑における標高が異なるこ

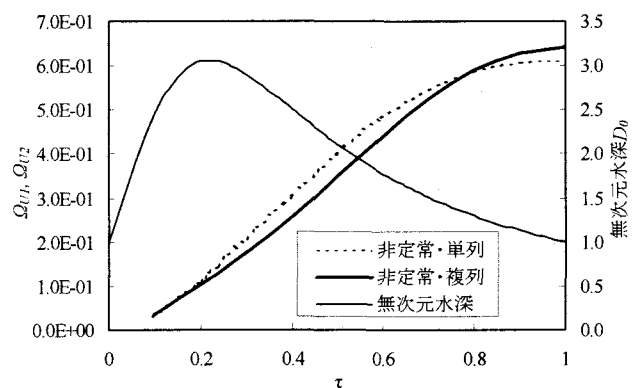


図-10 非定常流での砂州増幅率の時間変化

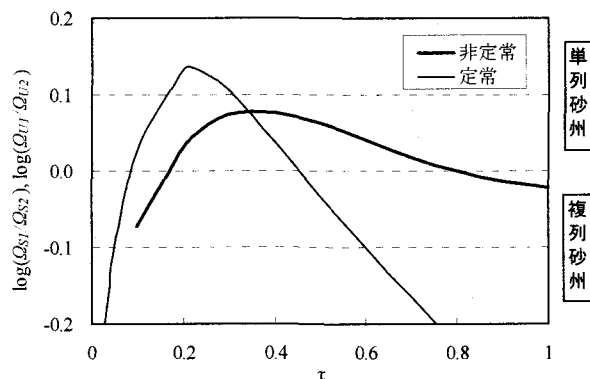


図-11 単列砂州および複列砂州の増幅率の比

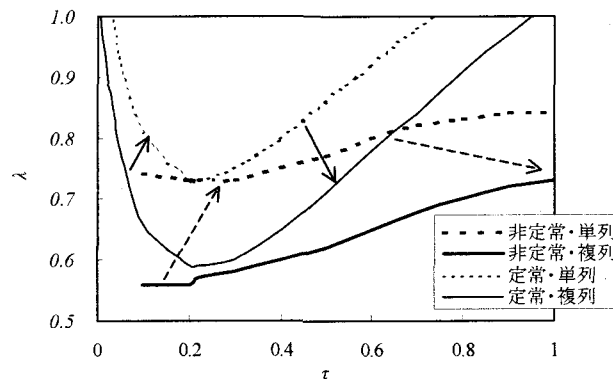


図-12 単列砂州および複列砂州の波数

とから、水深を算出する際に、図-8の破線で示される複断面の低水路高を上渚滑観測所における低水路高と置き換えて算出した。その結果が(11)式である。

$$D_0(\tau) = \left[\frac{1.11(\tau + 0.393)^2}{\tau^2 + 0.0864} - 0.986 \right]^{3/2} \quad (11)$$

このとき、基底流量の水深 $\bar{D}_0^*$ として $\bar{g}_0$ が限界掃流力 g_c となる水深を用い、洪水継続時間も $g_0 > g_c$ となる時間とした。検討に用いた諸元を表-1にまとめて記した。ここで、表中の τ_p は無次元時間 τ 表示の水位ピーク生起時間である。図-9は、(11)式で表される水深の時間変化を示したものである。なお、水面勾配が時間的に変化しないとしていることから、無次元掃流力も同じ曲線で表現される。

C_f, ϕ の具体的な関数形として、それぞれ (12) 式で表される Engelund ら⁸⁾ による摩擦係数および (13) 式で表される Meyer Peter – Müller⁹⁾ の流砂関数を用いることとした。

$$C_f^{-1/2} = 6 + 2.5 \ln \left(\frac{D}{2.5d_s} \right) \quad (12) \quad \phi = 8(\theta - \theta_c)^3 \quad (13)$$

図-10は、流れを非定常流として扱った場合の砂州増幅率すなわち、 Ω_{t1} の時間変化について、単列砂州 Ω_{t1} と複列砂州 Ω_{t2} の違いを示したものである。 τ が0.2付近すなわち水位ピーク頃まで単列砂州と複列砂州の増幅率がほぼ等しい。その後 τ が0.75付近まで単列砂州の増幅率がやや大きくそれ以降複列砂州の増幅率が大きくなっているが、全体的にはほぼ同じ傾向を示している。図-11は、 Ω_{t1} と Ω_{t2} の比の対数をとった値の時間変化を示したものである。この値が正の値を示すと単列砂州の領域、負の値を示すと複列砂州の領域にあることを意味する。なお、比較のため、流れを定常とした場合の増幅率の比すなわち Ω_{s1}/Ω_{s2} についても併記している。流れを定常とした場合に比較し、非定常とした場合の増幅率の比は変化が少なく、対数比で ± 0.1 以下であり場の状態が大きく変化しなかったと想定される。すなわち、定常とした場合では水位の変化により場の変化を引き起こし、それに伴って河床形態も大きく変化すると判断されるが、流れの非定常性を考慮すると河床形態が大きく変化しなかったものと考えられる。

次に、 λ の時間変化を図-12に示した。比較のため、流れを定常とした場合の時間変化も併記した。図中の矢印は、図-11において推定される砂州形態を考慮して、砂州波数曲線の単列から複列へあるいは複列から単列への移行を示したものである。非定常流とした解析では、定常流とした場合に比べて時間的な変化が小さい。さらに非定常流の場合について、砂州の形態が単列砂州と複列砂州の遷移的なものと考え、 λ は大きく変化せずほぼ0.55~0.75の値で推移しているものと考えられる。

図-4に示される範囲の砂州形状が図-5で表わされるとすると、堤々間の川幅を基準とした λ は0.6~0.7程度となり、今回の解析結果とはほぼ一致する。

このように、今回洗掘を受けた箇所について、砂州の増幅率および砂州波数の変化が洪水期間中に大きく変化しなかったことから、河床形態も変化せず、砂州の前縁の位置も大きく変化しなかったと推定される。このことにより、砂州「A」の前縁に位置する高水敷に洗掘が生じたものと考えられる。

5. おわりに

植生の倒伏状況から判読した流向、砂州を含む河床形状等、洪水直後の現地踏査の結果、高水敷に生じた規模

の大きな洗掘が複列砂州の形成によるものであると判断された。このことから、砂州の形成に洪水の特徴である非定常性を取り込んだ解析を行うこととした。洪水時の水理量を用いた解析の結果、現地踏査の結果とも一致し、洪水期間中河床形態に大きな変化が無く、砂州の発達が進められたと想定された。

一般に、高水敷は低水路河床に比べ敷高が高く、その分低水路に比べ掃流力が小さく、洗掘を受けづらいつと考えられている。しかし、計画高水位に達するような規模の洪水では、高水敷であっても砂州が形成され、規模の大きな洗掘が生じることがあり、複断面河道においても堤々間を河床と見なした考え方を行わなければならない場合があるとともに、河床形状を考える場合には洪水の非定常性を考慮することにより、洪水時の河床形態についてある程度把握できることを明らかにした。

謝辞：洪水後の現地踏査において北海道大学大学院長谷川和義先生から貴重な助言を頂いた。また、本研究で用いた航空写真、洪水流の流向データ、水位データおよび測量データは、国土交通省北海道開発局網走開発建設部治水課からいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 巖倉啓子、船木淳悟、馬場仁志：流況の変化が河道内植生に及ぼす影響に関する一考察、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第7部、pp.554-555, 1998.
- 2) 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.(投稿中)
- 3) 北海道開発局網走開発建設部：平成10年9月16日~17日発生(台風5号)洪水報告書
- 4) 三輪浩、池田香織、谷和憲：正弦波状流量変化による交互砂州の発達・変形過程、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第2部、pp.540-541, 2000.
- 5) Tubino, M. Growth of alternate bars in unsteady flow. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 1, 37-52, 1991.
- 6) Colombini, M. et al. Finite-amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.*, 181, pp.213-232, 1987.
- 7) 渡邊康玄、M. Tubino：掃流砂・浮遊砂を伴う流れの交互砂州発生に関する研究、土木学会水工学論文集第36巻、pp.7-14, 1992.
- 8) Engelund, F. and Hansen, E.: A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Copenhagen, Danish Technical Press, 1967.
- 9) Meyer – Peter, E., and Müller, R., : Formulas for Bed-Load Transport, *Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm*, pp.39-64, 1948.

(2001. 4. 16 受付)