

## 2011年9月音更川出水における砂州の発達と河岸浸食

Development of the sandbar to the riverbank erosion at the 2011 flood in Otofuke River

北見工業大学大学院 土木開発工学専攻 ○学生会員 福岡 将太 (Shota FUKUOKA)  
北見工業大学教授 社会環境工学科 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水深規模の深掘れや堆積を生じるため、発生形態は災害と密接に関係してくる。砂州が形成される河川の河床や河道形状を定量的に把握することは重要な課題である<sup>1)</sup>。また、近年増加している集中豪雨による洪水は、時間的な水位の変化が大きく、洪水時の砂州挙動を把握しようとする場合、流れの非定常性を考慮する必要があると考えられる。

本研究では2011年9月に生じた北海道十勝地方の十勝川支川の音更川を対象とし、洪水流が流れた部分の河床形状と河道法線形との関係を検討し、河道形状の挙動解析を行い、洪水の際に発生した河床洗掘と堆積による被災原因について検討を行った。河道平面形状の解析では得られる情報が限定的であるため、立体地形形状から解析を行うこととし、河道横断地形に対して二重フーリエ級数解析を行い、洪水前後の流路形状の違いを比較し考察を行った。また、砂州が明瞭に形成されていることから非定常流における砂州形成について線形安定解析を用いて検討を行い、被災と砂州の関係について考察を行った。

2. 洪水の概要<sup>2)</sup>

音更川は、上士幌町・士幌町・音更町を通過し、広大な畑作地帯を流下して帯広市街部で十勝川に合流する急流河川であり、流域面積740.3km<sup>2</sup>、流路延長93.5km、河床勾配約1/150~1/200の北海道十勝地方にある一級河川である。図-1に音更川の概要を示している。平成13年9月の洪水では、小規模な出水（音更地点ピーク流量約150m<sup>3</sup>/s）にもかかわらず、浸食幅10m以上の河岸浸食箇所が49箇所確認されており、比較的小規模な洪水においても河岸浸食が頻発しており、急流河川としては粒径が比較的小さく、河床が動きやすい傾向にある河川である。2011年9月1日に北上した台風12号や低気圧周辺の暖湿気の流入により、前線が活発化し、道内各地に記録的な大雨を降らせた。これに伴い、十勝川・音更川・札内川などの支川において流量が増加し、音更川では堤防の一部流出や河岸浸食が発生し、各地で内水被害が発生した。図-2は、河口から18.2km付近における河岸浸食による堤防流出後の写真である。

## 3. 洪水前後の河道形状

音更川では、河岸浸食に伴う堤防流出が生じた。今回、出水前における地形のレーザープロファイルデータと出水後の横断測量データが得られていた<sup>2)</sup>ことから、音更川において今回の出水前後でどのような地形変化が生じていたのかを把握することとした。洪水前後の河道地形変化がどのようにして災害と結びついたのかを検討するため、洪水前後の地形について二重フーリエ解析<sup>4)</sup>を用

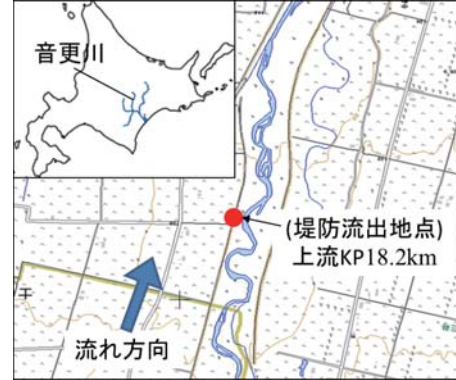


図-1 音更川の位置と被災箇所



図-2 河岸浸食による堤防流出

いて地形形状の解析を行った。図-3は、解析に用いた地形図であり、横断方向には5m、縦断方向には5mのメッシュデータを作成し、堤防流出地点および河岸浸食の発生した個所と解析範囲を薄い黄色で示している。解析範囲は河岸浸食による堤防流出と河岸浸食が発生した場所(KP15.0~KP20.0)とし、横断方向はKP15.0~KP20.0の横断データのうち、氾濫域の大部分が入るように275m幅を対象に各断面を1として20等分した。

## (1) 二重フーリエ解析方法

二重フーリエ解析は河床形状を(1)式で表した時の、 $\alpha_{ij}$ を求めるものである。

$$z = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J \alpha_{ij} \sin\left(i \frac{2\pi}{2B_v} n - \frac{\pi}{2} \frac{1 + (-1)^i}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{L} s - \sigma_{ij}\right) \quad (1)$$

ここで  $B_v$  は氾濫幅、 $i$  は砂州列数、 $j$  は単列の卓越波長を基本波長とした時の波数、 $\alpha_{ij}$  は砂州列  $i$ 、波数  $j$  の波の振幅、 $\sigma_{ij}$  は  $i=1, j=1$  の波に対する位相、 $L$  は基本波長でこの場合、交互砂州が卓越していると考えられたことから、 $i=1, j=1$  の波の波長としている。

## (2) 解析結果

表-1に二重フーリエ解析を行った結果を示す。洪水前は、かまぼこ型の形状を表す(2,0)（横断方向波数2，縦断方向波数0）の波が卓越している。洪水後は複列砂州

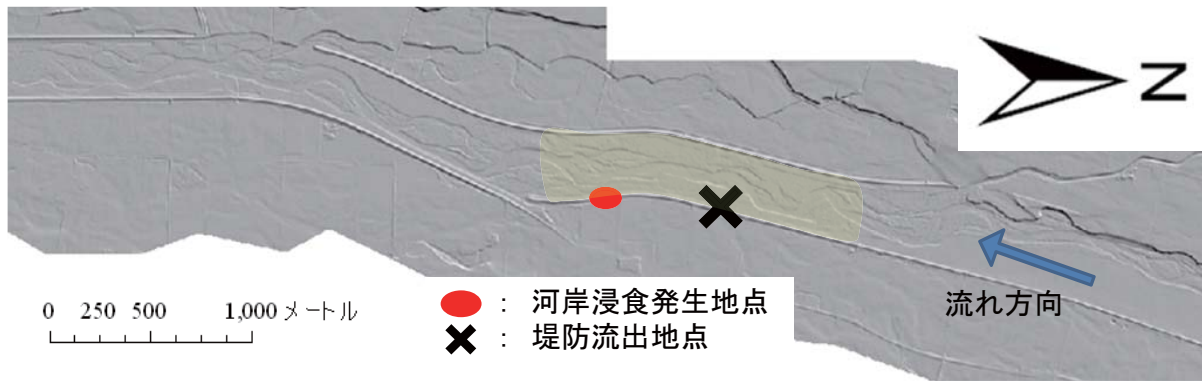


図-3 解析に用いた地形形状

表-1 洪水前後の波数解析結果

洪水前の地形			洪水後の地形		
波数		波高	波数		波高
横断	縦		横断	縦	
2	0	0.170	2	2	0.097
1	0	0.092	2	0	0.093
3	0	0.057	1	1	0.074

の形状を示す (2,2) の波が (2,0) の波よりも大きくなり、複列砂州が発達していることを示している。今回の堤防流出および河岸浸食は、複列砂州前縁に形成される局所洗掘が、砂州の成長に伴って生じ、この局所洗掘による河岸崩落によるものと推定される。

#### 4. 非定常流れにおける砂州の発達状況

今回の洪水は、非常に短時間に大流量が流下したことから、定常流を基にした既往の中規模河床形態の知見をそのまま当てはまることはできない。このことから、ここでは、渡邊ら<sup>5)</sup>が検討を行った非定常流における砂州の発達過程に関する手法を利用し、今回の洪水における砂州の発達過程を考察することとした。

##### (1) 非定常線形安定解析の概要<sup>5)</sup>

川幅  $2B^*$  の直線水路における非定常 2次元浅水方程式と連続の式および流砂の連続式は、座標軸を図-4 のようにとると、それぞれ (2) ~ (5) 式で表される。

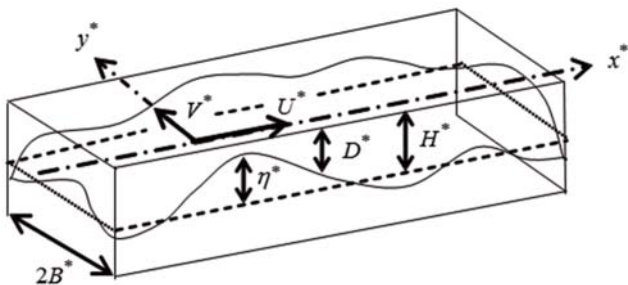


図-4 座標系模式

$$\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} + g^* \frac{\partial H^*}{\partial x^*} + \frac{\tau_x^*}{\rho^* D^*} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial V^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial y^*} + g^* \frac{\partial H^*}{\partial y^*} + \frac{\tau_y^*}{\rho^* D^*} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial D^*}{\partial t^*} + \frac{\partial(U^* D^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial(V^* D^*)}{\partial y^*} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta^*}{\partial t^*} + \left( \frac{\partial Q_{bx}^*}{\partial x^*} + \frac{\partial Q_{by}^*}{\partial y^*} \right) = 0 \quad (5)$$

非定常 2次元浅水方程式と連続の式および掃流砂の発生を対象とした流砂連続式を  $(U, V) = (U^*, V^*)/\bar{U}_0^*$ ,  $D = D^*/\bar{D}_0^*$ ,  $H = H^*/(\bar{F}_0^2 \bar{D}_0^*)$ ,  $(x, y) = (x^*, y^*)/B^*$ ,  $(Q_{bx}, Q_{by}) = (Q_{bx}^*, Q_{by}^*)/(\Delta g^* d_s^{*3})^{1/2}$ ,  $(\tau, t) = t^*/(1/\sigma^* B^*/\bar{U}_0^*)$ ,  $(\tau_x, \tau_y) = (\tau_x^*, \tau_y^*)/\rho^* \bar{U}_0^{*2}$  で無次元化すると、(6) ~ (9) 式になる。

$$\sigma \frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} + \bar{\beta}_0 \frac{\tau_x}{D} = 0 \quad (6)$$

$$\sigma \frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} + \bar{\beta}_0 \frac{\tau_y}{D} = 0 \quad (7)$$

$$\sigma \frac{\partial D}{\partial \tau} + \frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\bar{F}_0^2 H - D)}{\partial t} + \bar{Q}_0 \left( \frac{\partial Q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad (9)$$

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,  $\eta^*$ : 河床高 (=  $H^* - D^*$ ),  $\tau_x^*, \tau_y^*$ :  $x^*, y^*$  軸方向のせん断力,  $Q_{bx}^*, Q_{by}^*$ :  $x^*, y^*$  軸方向の掃流砂量,  $\rho^*$ : 水の密度,  $g^*$ : 重力加速度,  $1/\sigma^*$ : 洪水の継続時間である。また、 $\bar{F}_0^2 = \bar{D}_0^*/(g^* \bar{D}_0^*)^{1/2}$ ,  $\bar{\beta}_0 = B^*/\bar{D}_0^*$ ,  $\sigma = \sigma^* B^*/\bar{U}_0^*$ ,  $\Delta = (\rho_s^* - \rho^*)/\rho^*$ ,  $\bar{Q}_0 = (\Delta g^* d_s^{*3})^{1/2}/[(1-P) \bar{U}_0^* \bar{D}_0^*]$  であり、 $\rho_s^*, P, d_s^{*3}$ : 河床材料の単位体積重量・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表し、付いていないものは無次元量を表す。

次に各諸量を、洪水波形によって決定されるものと、河床変化に伴う摂動量に分け  $H = H_0 + \varepsilon H_1$ ,  $D = D_0 + \varepsilon D_1$ ,  $C_f = C_{f0} + \varepsilon C_{f1}$ ,  $\vartheta = \vartheta_0 + \varepsilon \vartheta_1$ ,  $\phi = \phi_0 + \varepsilon \phi_1$  等で表現する。 $\vartheta$ : 無次元掃流力,  $\phi$ : 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,  $C_f$ : 河床摩擦係数,  $\varepsilon$ : 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に小さいため、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。水面側壁に



図-5 音更観測所の水位

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  $U_1, V_1, H_1, D_1$  について、(10) 式で表現する。 $\{U_1, V_1, H_1, D_1\} =$

$$\{\hat{U}_1, \hat{V}_1, \hat{H}_1, \hat{D}_1\} \{Sin_1, Cos_1, Sin_1, Sin_1\} Exp_1 + c.c. \quad (10)$$

$Sin_1 = \sin(\pi y/2)$ ,  $Cos_1 = \cos(\pi y/2)$ ,  $Exp_1 = \exp(i\lambda x)$  で表され、 $i$ ; 虚数単位,  $c.c.$ ; 共役複素数,  $\lambda$ ; 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 (11) 式が得られる。

$$\frac{\partial \hat{D}_1}{\partial t} + G(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda) \hat{D}_1 = 0 \quad (11)$$

ここで、 $d_{s0} = d_s^*/\bar{D}_0^*$ ,  $\bar{\vartheta}_0$ ; 基底流の無次元掃流力である。(11) 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、(12) 式となる。

$$\hat{D}_1 = \exp[-Gt] const \quad (12)$$

流れが非定常流の場合は  $D_0$  が時間の関数であり  $G(\bar{d}_{s0}, \bar{\beta}_0, \bar{\vartheta}_0, D_0, \lambda)$  が  $t$  の関数となる。したがって (11) 式の解は、(13) 式のようになる。

$$\hat{D}_1 = \exp \left[ - \int_{t_0}^t G dt' \right] const \quad (13)$$

ここで  $t_0$ ; 洪水開始時間である。(12), (13) 式の指数部は、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、つまり砂州の時間に関する摂動量の増幅率  $\Omega$  である。定常流の場合の増幅率を  $\Omega_s$  として、(14) 式になる。

$$\Omega_s = -G \quad (14)$$

一方、非定常流の場合  $\Omega_u$  として、(15) 式で表す。

$$\Omega_u = - \int_{t_0}^t G dt' \quad (15)$$

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  $\lambda$  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  $\lambda$  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  $\lambda$  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。

(2) 計算条件

用いる水深の時間変化は、無次元掃流力が 0.05 を超えた時点の水深を基準として無次元化表示した (16) 式で表される水深を用いた。時間  $\tau$  は、洪水時洪水時継続時間であり、 $\tau = \sigma^*(B^*/\bar{U}_0^*)t$  の関係が成り立つ。またここで、洪水開始および終了を、土砂が移動する限界掃流力

表-2 計算条件

川幅	初期水深	ピーク水深	勾配	河床材料
275m	1.0m	2.5m	1/156	0.069m

$\vartheta_c$  が 0.05 となる時刻とする必要がある。水深  $\bar{U}_0^*$  として、 $\vartheta_0$  が  $\vartheta_c$  となる水深を用いた。計算条件を表-2 にまとめて示す。

$$D_0(\tau) = \left[ \frac{\alpha(\tau + \beta)^2}{\tau^2 + \gamma} - \delta \right]^{3/2} \quad (16)$$

未知数  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  は (17) 式～ (20) 式を用いて求める。

$$D_{0(0)} = 1, \tau = 0 \quad (17)$$

$$D_{0(1)} = 1, \tau = 1 \quad (18)$$

$$D_{0(\tau_p)} = D_{0p}, \tau = \tau_p \quad (19)$$

$$\frac{\partial D_{0(\tau_p)}}{\partial \tau} = 0, \tau = \tau_p \quad (20)$$

ここで、 $D_{0p}$ ; ピーク時の無次元水深、 $\tau_p$ ; ピーク時の時間とする。図-5 は、今回の洪水時の十勝川合流点から上流 9.1km に位置する音更での水位変化を示したものである。音更の観測所の水位を基に、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  を (16) 式を用いて求めると (21) 式のようになる。

$$D_0(\tau) = \left[ \frac{0.842(\tau + 0.0897)^2}{\tau^2 + 0.00683} + 0.00685 \right]^{3/2} \quad (21)$$

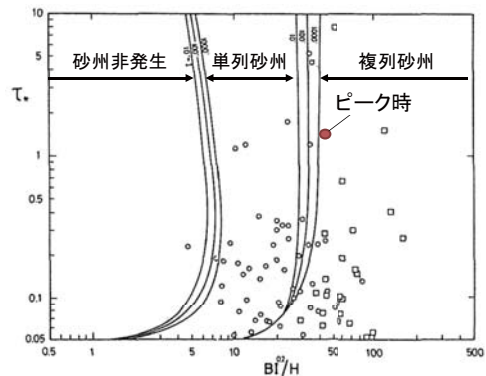


図-6 中規模河床形態の領域区分 (黒木・岸<sup>6)</sup>の加筆)

また、ピーク時の水量を用いて砂州領域区分に表すと、複数砂州領域にあることが判断できる (図-9)。なお、時間とともに複数砂州が単列砂州に移行することが知られていることから、非定常計算では、複数砂州と単列砂州の両方の場合で計算を行った。

(3) 解析結果

図-7 は増幅率  $\Omega_u$  の時間変化を示したものである。 $\Omega_u$  は、あらゆる値は  $\lambda$  の中で各時刻において最も大きくなる増幅率を示しており、無次元水深  $D_0$  の時間変化も示した。また、増幅率  $\Omega_u$  が 0 以下の値の場合、砂州が発生しない。単列砂州と複数砂州の場合でも洪水ピーク前からピーク頃までは増幅率がほぼ等しい。その後  $\tau$  が 0.3 付近から複数砂州の増幅率が大きくなっている。図-8 は波数  $\lambda$  の時間変化を示す。単列砂州の場合は  $\lambda$  は大きく変化せずほぼ 0.70~0.80 の値で推移している。複

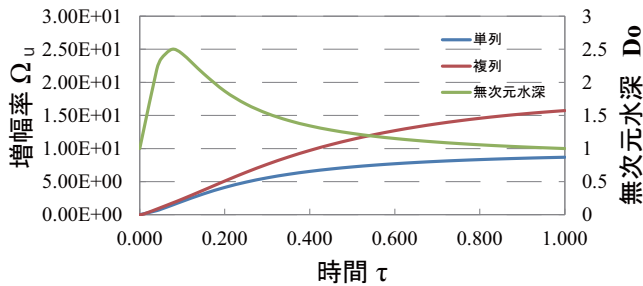


図-7 増幅率の時間変化

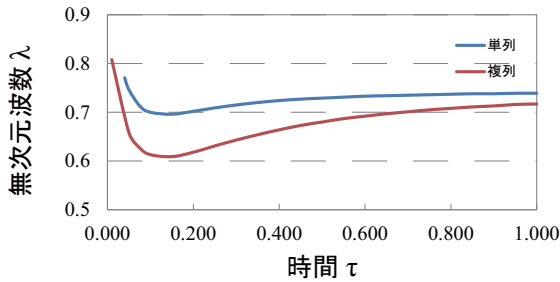


図-8 波数の時間変化

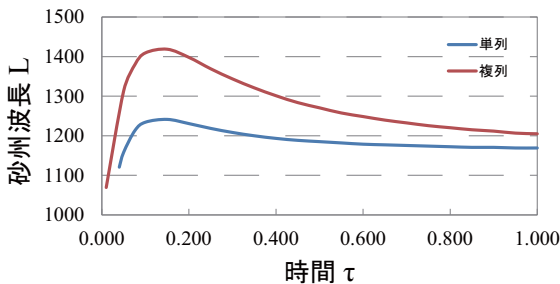


図-9 砂州波長の時間変化

列砂州では、洪水ピーク前までは $\lambda$ が0.8~0.6へと時間とともに減少し、その後の $\lambda$ は上昇している。図-9は砂州波長の時間変化を示す。複列砂州ではピーク時の砂州波長は約1400mであり、単列砂州ではピーク時の砂州波長は約1200mであった。2重フーリエ解析から求められた砂州波長は約1300mであり、単列砂州と複列砂州の値と概ね近い結果であることが得られた。

## 5. 終わりに

2重フーリエ解析結果より、洪水前のかまぼこ型の波が発達しているが、洪水後は複列砂州の波が発達している結果が得られた。また、砂州の形成に洪水の特徴である非定常性を取り込んだ線形安定解析を行い、洪水時の水理量を用いた結果、今回解析した区間では、複列砂州が発生している結果となった。また砂州領域区分では、複列砂州が形成される条件であると判断できたため、これらの解析結果から、今回の音更川出水における堤防流出は、複列砂州の前縁線に接する堤防に洗掘が生じたものと考えられる。

謝辞：本研究で用いた、地形データおよび測量データは、国土交通省北海道開発局帯広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) 大山 史晃, 渡邊康玄: 洪水時に発生した低水路の土砂堆積及び高水敷の河床洗掘と砂州形成との関係, 水工学論文集第46巻, pp713-718, 2002年2月.
- 2) 音更川のLPデータ及び資料提供: 帯広開発建設部治水課
- 3) 河川災害に関するシンポジウム, 自然災害研究協議会・土木学会水工学委員会, pp.9-23, 3月, 2011.
- 4) 長谷川和義, 山岡勲: 発達した交互砂州の性状に関する実験と解析, 土木学会, 水理講演会論文集第26巻, pp.31-38, Feb, 1982.
- 5) 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, pp172-173, 2001.
- 6) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集第342号, 1984.