

# 河床勾配変化が浸食地形に与える影響

サムナー 圭希<sup>1</sup>・井上 卓也<sup>2</sup>・清水 康行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社 水工リサーチ (〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目2-7)

E-mail:t-sumner@suiko-r.co.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail:inoue-t@ceri.go.jp

<sup>3</sup>フェロー 工博 北海道大学工学研究院教授 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: yasu@eng.hokudai.ac.jp

河川のショートカット工事は、洪水時の流下能力を向上させ氾濫を軽減する効果がある。一方で、人為的な河床勾配の変化は河床を急激に低下させ、時にキャニオン地形を形成させることもある。現在、多くの河川では床止工などを設置して河床低下対策を行い河床安定を図っている。しかし、河床勾配の変化によってどのようなプロセスを得て河床が低下しキャニオン地形を形成したのかについては時代が古いこともありほとんど記録が残っていない。本研究では、人為的に河床勾配が変化した場合において、砂礫床と泥炭床の河床変動過程の相違を把握するため数値計算を行い検証した。結果、砂礫床の場合河床勾配の変化は計算開始すぐに平滑化され一定勾配に近づいた。一方、泥炭床においては泥炭露出箇所の浸食が進行し、勾配変化点は周期的ステップ地形を形成しながら上流移動した。また、実際にキャニオン地形が出現した夕張川下流の再現計算を行なった結果、泥炭床の浸食によるキャニオン地形が形成され、上流へ浸食しながら移動する過程をある程度再現することができた。

**Key Words :** new waterway project, erosional morphology, numerical simulation, cyclic step, peat layer

## 1. はじめに

河川におけるショートカット工事(捷水路)、新水路事業や砂利採取などの人為的な河川改修は全国各地で実施されている。特に河川のショートカットは、洪水時の流下能力を向上させ氾濫を軽減する効果があり、今日の我々の生活に大きく貢献している。その一方で、河川改修等によって本来の河床勾配を変化させた場合、河床が急激に低下することがある。例えば、夕張川下流のようにナイアガラの滝のようなキャニオン(図-1)が出現した河川もあり、対策として床止工などが設置されている(図-2)。

町田ら<sup>2)</sup>によると、人為介入は河川地形システムに影響を及ぼすと述べており、砂利採取で土砂が失われた河床は、バランスを取るために上流・下流側へ影響が波及する。また、勾配変化点での特徴的な現象として、変化点上流では粗砂が堆積することも確認されている<sup>3)</sup>。砂鉄川におけるショートカット後の河川環境のハビタット予測<sup>4)</sup>や、床止工設置における流れと河床変動の数値計算<sup>5)6)</sup>など、ショートカットによる河川への影響についてはすでに研究されている。



図-1 新水路に出来たナイアガラ(石狩川治水史より)



図-2 現在の清幌床止(2016年9月)

キャニオンが出現した夕張川下流の河床は、砂礫床とは異なりほとんどが泥炭質である。これまでの河床変動解析では、砂礫床を取り扱った事例が多く見られるが、泥炭床を対象に解析している事例はほとんどない。土質工学用語辞典<sup>7)</sup>によると、一般に50%以上の有機成分を含むものを高有機質土と呼び、未分解で繊維質なものを泥炭としている。泥炭地はその90%が北半球の寒冷地に分布しており、日本ではその大部分が北海道に分布している。泥炭性軟弱地盤対策マニュアル<sup>8)</sup>によると、泥炭は軟弱粘土に比べて、高含水比、高間隙比および高圧縮性を有するのが特徴である。現地にて夕張川KP6.5右岸の泥炭を確認ところ、腐敗した有機物が重なりあい、粘着質が混入したふかふかした土であった(図-3)。KPとは本川合流点からの距離(km)を示すものである。

本研究では、泥炭床の河床変動過程は砂礫床とどう違うのか、キャニオンはどのように形成され上流移動したのかという2つの疑問を解明するため数値実験を行なった。また、本モデルが泥炭床からなる夕張川下流のショートカット後の河床浸食地形を再現できるか検討した。

## 2. 数値解析法

### (1) 泥炭床の浸食速度

本研究の数値計算モデルは、iRICソフトウェアのソルバーNays2DH(<http://i-ric.org/ja/software/18/>)と同じ非定常の平面2次元流況計算を採用している。流れの基礎式および砂礫床の河床変動手法については、Nays2DHのホームページに記載されており、ここでは省略し泥炭床の河床変動手法に関する部分のみ記載する。また、流砂の連続式については井上<sup>9)</sup>の数値計算法を用いており、これも省略する。

本研究では、泥炭床は微小の流速でも浸食は生じると考えて、関根ら<sup>10)</sup>によって提案された、摩擦速度に依存する浸食予測式が適用できると考えた。粘着性土河床の浸食速度は、摩擦速度の3乗、水温および水含有率の2.5乗に依存することが関根らによって確認されており、これを泥炭床に適用した以下の式を用いる。

$$E_p = \Theta u^*{}^3 \quad (1)$$

$$\Theta = \alpha(T)R_{wc}{}^{2.5} \quad (2)$$

ここで、 $E_p$  は粘着性土の浸食速度(泥炭床に転用)、 $\Theta$  は粘土鉱物の種類や水温などに依存する係数、 $u^*$  は摩擦速度、 $\alpha$  は水温の係数、 $T$  は水温、 $R_{wc}$  は水含有率である。

粘着性土の表面は、常に平滑とは限らず波状の河床が形成されることがあり、そこに掃流砂として移動してきた砂が凹部に引っ掛かるように堆積すると関根らは述べている。そこで、泥炭床の浸食速度は河床の砂礫被覆面

積の割合が影響すると仮定し、以下の式を用いる。

$$\frac{\partial \eta_p}{\partial t} = -E_p = -\Theta u^*{}^3 (1 - P_c) \quad (3)$$

ここで、 $t$  は時間、 $\eta_p$  は泥炭床の標高、 $P_c$  は被覆率である。被覆率は、泥炭床の巨視的な凹凸高さ $L$ と砂礫層厚 $\eta_a$ の比<sup>11)</sup>を用いて表す。

$$P_c = \begin{cases} \eta_a/L & \text{for } 0 \leq \eta_a < L \\ 1 & \text{for } \eta_a \geq L \end{cases} \quad (4)$$

なお、関根らの研究によると表面凹凸の高さは粒径の3から7倍に相当する。そこで本研究において $L$ は粒径の3倍<sup>10)</sup>とした。

### (2) トータルの河床変化高

トータルの河床変化高 $\eta$ は、砂礫層厚の変動と泥炭床の浸食を併せた以下の式で算出する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \frac{\partial \eta_p}{\partial t} \quad (5)$$

## 3. 砂礫床と泥炭床の比較

### (1) 計算条件

ここで、縦断方向の侵食過程を解明することを目的としているため、水路幅が狭い条件で数値実験を行った。図-4に数値実験の縦断図を示す。水路は、長方形断面矩形水路とし水路全長は30m、水路幅0.1m、上流10mと下



図-3 夕張川の泥炭

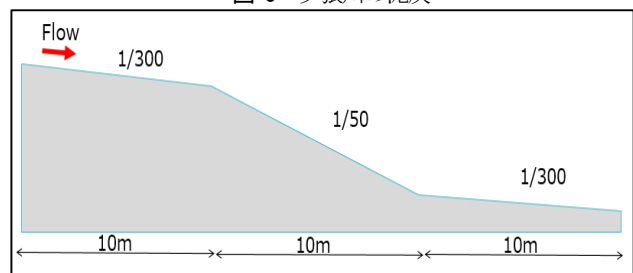


図-4 数値実験の河床勾配(縦断図)

流10mの河床勾配を1/300, 中流10mの河床勾配を1/50としてショートカットした区間と想定した。格子サイズを0.1m×0.1mとした。上下流端には助走区間として10mずつ延長させた。粒径0.77mm, 単位幅流量を0.0125m<sup>2</sup>/s, マニング粗度0.012とした。

関根らの研究<sup>12)</sup>では, 室内実験の結果から  $R_{wc}$  が1の場合の係数  $\Theta$  は  $0.78 \times 10^{-5}$  から  $3.89 \times 10^{-5}$  の値であった。本研究では, 計算時間節約のため  $\Theta$  に大きめの値0.5を用いている。ただし,  $\Theta$  を0.005にした時と,  $\Theta$  を0.5にした時で同じような地形が形成されることを確認している。泥炭床は砂礫床との比較対象であるため, 水温および水含有率の値は一定であるとし, また泥炭床は粘着性土よりも摩擦速度の影響が顕著であると仮定した。係数  $\Theta$  の値の妥当性については, 今後検討すべき課題である。砂礫床の無次元限界せん断力は岩垣の式<sup>13)</sup>から算出し0.034, 泥炭床の無次元限界せん断力は河床粗度に伴い変化する井上らの式<sup>14),15)</sup>に適合させると0.025である。

表-1に数値実験の計算条件を示す。case1\_aは砂礫床, case1\_pは泥炭床を設定した。給砂量はcase1\_a, case1\_pともに勾配1/300である上流端条件の単位幅平衡流砂量  $5.71 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  とし, 100時間の計算を行なった。

## (2) 計算結果

図-5, 図-6にcase1\_a, case1\_pの計算結果をそれぞれ示す。全ケースともに最終河床勾配は一定となり, 上流側は河床低下が著しい結果となった。case1\_a, case1\_p

表-1 case1の計算条件

ケース	河床タイプ	単位幅給砂量(m <sup>2</sup> /s)
case1_a	砂礫床	$5.71 \times 10^{-6}$
case1_p	泥炭床	$5.71 \times 10^{-6}$

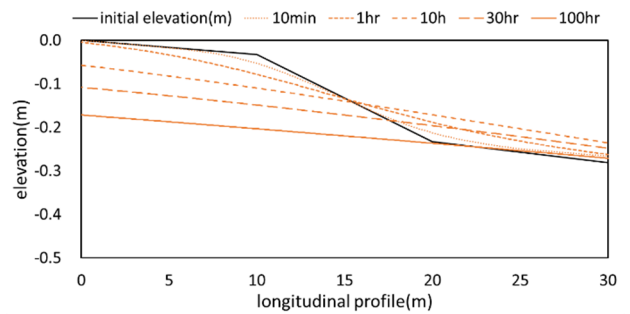


図-5 砂礫床の計算による河床高の時間変化 (case1\_a)

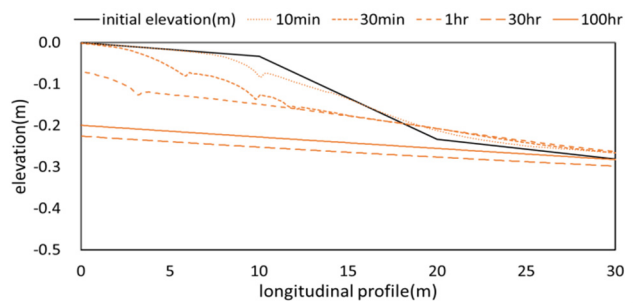


図-6 泥炭床の計算による河床高の時間変化 (case1\_p)

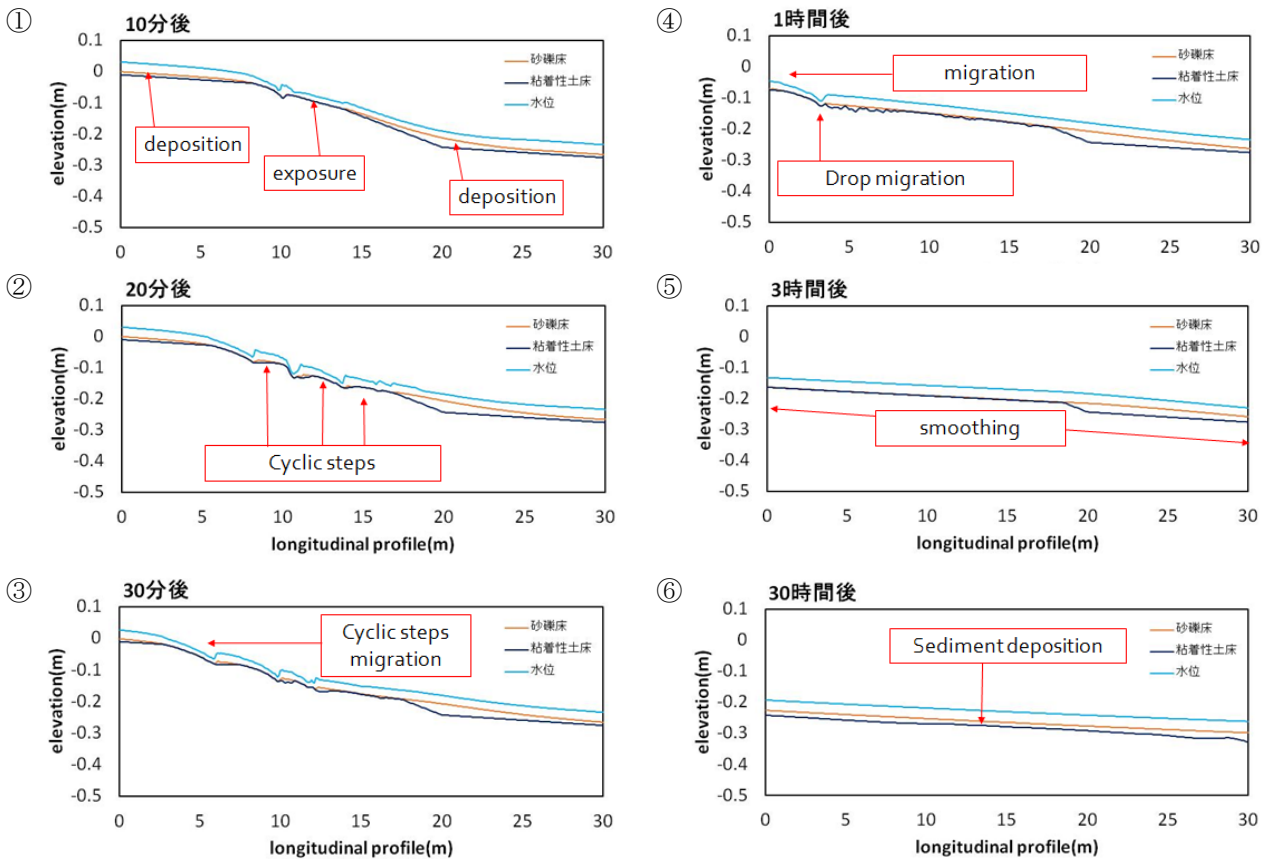


図-7 計算によるキャニオン化の形成プロセス

の計算結果を比較すると、最終河床勾配は勾配1/300の平衡状態に近づいたもののその河床低下過程は異なった。砂礫床は早い段階から勾配が一定になり、最終的な勾配は1/302であった。一方、case1\_pの泥炭床の場合は、中流部上流側の勾配変化により流れが常流から射流に遷移する地点から浸食が生じ、河床に落差ができ周期的ステップのような地形が形成された。このステップ地形は、時間の経過とともに上流側へ移動しながら浸食を繰り返す、最終的には全区間で河床低下して一定の河床勾配となった。一度低下した河床は、30時間後で勾配が1/300より緩い勾配1/384になり、次第に砂礫が堆積して平衡状態に近づいていき、100時間で勾配1/357となった。

### (3) 勾配変化がある河床による浸食地形

case1\_pの計算結果から、勾配変化がある河床での浸食地形の形成プロセスは以下のように推測される(図-7)。

- ① まず勾配が緩い河床に砂礫が堆積し、急勾配箇所泥炭床が露出し、露出部の流速が速い箇所の浸食が始まる。
- ② 河床が浸食したことにより、流下方向の流速に分布が生まれ常流から射流、射流から常流と連続的に遷移しステップ地形を形成し河床に落差ができる。
- Parker and Izumi<sup>16)</sup>は、粘着性土におけるステップ形状を解析的に導いており、河川急流部において周期的ステップ地形が形成されることが確認されている。計算結果からも急勾配部に周期的ステップ地形が形成され、これと一致する。
- ③ またParker and Izumiは、ステップ地形が上流に移動することも述べているが、周期的ステップが浸食しながら上流に移動しているのが確認された。鉛直方向の浸食が進行し、砂礫の堆積層まで近づくとその地点の河床勾配は緩くなり流速は遅くなるので、泥炭床は砂礫層へと遷移し始める。
- ④ 泥炭床-砂礫床遷移の上流移動を繰り返すことにより、河床の落差は大きくなっていく。
- ⑤ これは遷移した砂礫床の勾配と初期河床高の差が上流に向かって大きくなるからである。河床は砂礫層に遷移したことにより、やがて一定となる。
- ⑥ 最終的に河床は給砂量に対して平衡状態になる。河床勾配は一定量給砂することにより、河床はその給砂量に応じ平衡を維持しようとして結果、浸食性河床の勾配は一定となり動的平衡状態になると考えられる。この計算結果から、泥炭床は砂礫床と河床低下過程が異なるが、最終的には両方も一定勾配になり同じ浸食地形に近づいていくと考えられる。

## 4. 夕張川下流の河床低下の再現

### (1) 夕張川の概要

夕張川は、北海道の道央地帯に位置する石狩川水系の支川である。本研究で対象としている夕張川下流部の低平地は、明治初頭には泥炭分布域にあわせて湿原が広



図-8 夕張川 (Google Map)

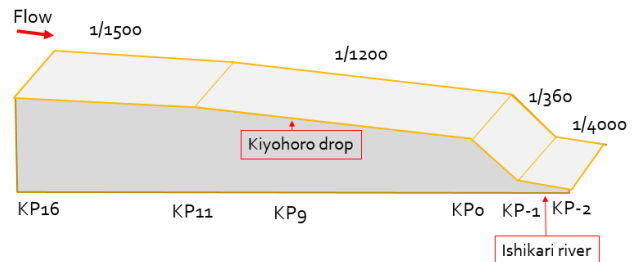


図-9 夕張川の初期河床勾配

がっており軟弱な土地であった。また、融雪出水や洪水によって毎年氾濫が起こる不安定で湿潤な環境におかれていた。低平地の洪水氾濫を防止する治水対策として、千歳川に合流していた夕張川を直接石狩川に切り替える夕張川新水路事業が昭和11年に完成し通水している。しかし、通水から一年後、KP2.2付近で落差4mのナイアガラの滝のような洗掘が発生し、洗掘は1日に5~7mの速度で上流に移動した。新水路事業では、農業用サイフォンと清幌橋の洗掘防止のために、事業のなかでKP8地点に床止工を設置していた。しかし、想定していた以上の洗掘が生じたため第2基目の床止を下流側に施工した。河床勾配1/1200で実施された河道は1/4000にまで緩やかになり、清幌床止で落差が大きくなっている。

### (2) 計算条件

石狩川合流点から夕張川新水路区間(KP-2からKP16栗沢頭首工)を対象に河床勾配を人為的に変化させた場合の再現計算を行なう(図-8)。計算モデルは、case1\_pで使用した泥炭床の浸食速度式を採用する。粘土鉱物の種類や水温などに依存する係数 $\Theta$ は、前段で行なったcase1\_p同様0.5とした。計算の水路形状は、夕張川捷水路工事の計画諸元<sup>1)</sup>から低水路敷幅を72mの矩形断面とし、水路全長は18kmとした。格子サイズを100m×72mとした。水路の河床勾配は、新水路設置時の河床勾配<sup>2)</sup>に合わせKP0からKP11まで1/1200、KP11からKP16まで1/1500、また石狩川合流地点KP-1からKP0まで1/360、石狩川本川KP-2からKP-1の河床勾配を1/4000とした(図-9)。流量は1973年から2014年までの平均年豊水流量の40m<sup>3</sup>/s、給砂量は勾配1/1200の単位幅平衡流砂量である2.67×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>/sとした。粒径は昭和43年の河床材料篩い分

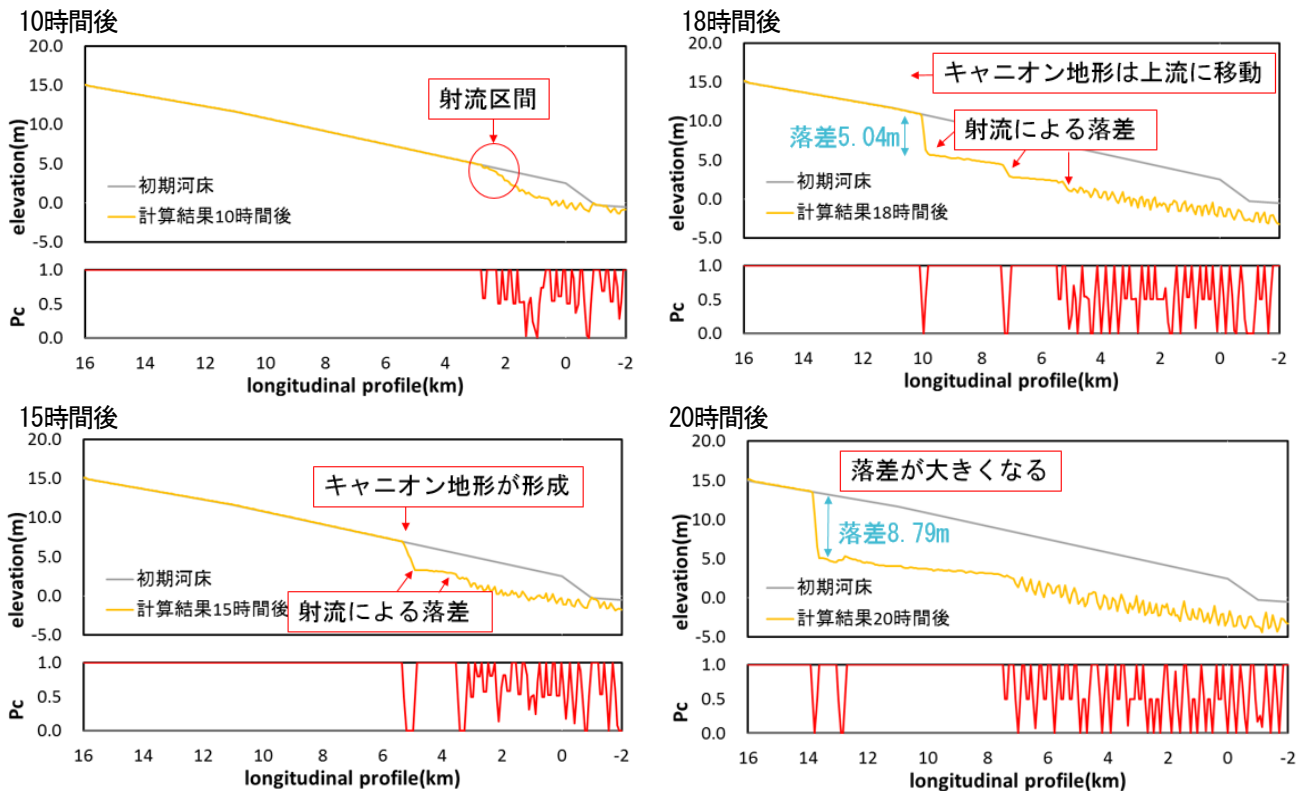


図-10 計算による河床高と被覆率の縦断面図

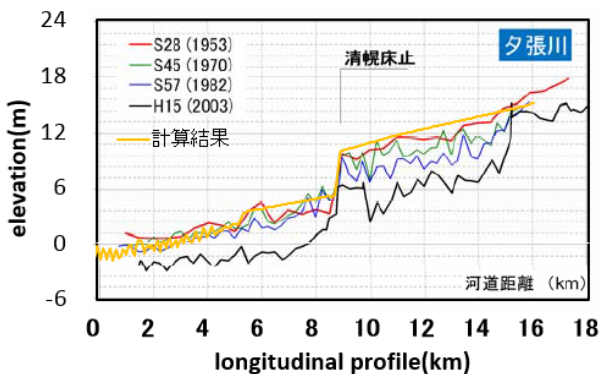


図-11 実測と計算結果の平均河床高の比較

け試験表から単一粒径1mm, マニング粗度は0.025とした。

### (3) 計算結果と考察

図-10には計算開始から10時間以降の河床高と被覆率Pcの計算結果を示す。KP0付近の勾配変化点から泥炭床が露出し浸食が生じ、射流から常流へ遷移する区間ではステップのような地形が形成された(10時間後)。被覆率のグラフをみると、泥炭床が浸食したKP3より下流区間では砂礫が堆積している地点と泥炭床が露出している地点が混在しているのがわかる。15時間後には、射流によって形成された落差が明確になりKP5.3付近にキャニオン状の地形が形成されその落差は3.64mであった。KP5.3付近のキャニオンより上流側は、砂礫が堆積しているため浸食されず平坦河床のままであった。18時間後には、キャニオン地形はKP10まで上流に遡り、その時

のキャニオンの落差は5.04mであった。20時間後には、キャニオンはKP13.84でその落差は8.79mとなる。この結果、キャニオン地形の移動速度は、18時間で1.59km/h、20時間で1.94km/hと加速され、上流に移動するにつれてキャニオンの落差が大きくなるといった河床変動の特徴が数値計算で表現できた。

現地でキャニオン地形が出現した当時(1937年)の河床高の記録が残っていない。そこで現存する1953年から2003年までの実測の平均河床高<sup>17)</sup>とキャニオン地形が清幌床止に達した時の計算結果の平均河床高を比較した(図-11)。実測が残っている中で最も古い1953年の平均河床高と比較してみると、清幌床止直下流からKP6.5区間の河床高は、実測よりも1m程度高く計算されているものの、夕張川下流の河床低下の特徴である、下流から浸食が始まりキャニオンが形成され、それが上流へ遡る様子のある程度表現できたといえる。また、前述した泥炭床の計算結果(case1\_p)とは異なり、ステップ地形が上流移動し続けながら河床低下されるのではなく、キャニオン地形が上流移動し浸食地形を形成した。これは再現計算を行なった夕張川下流の河床勾配がcase1\_pよりも緩やかであり、周期ステップ地形が形成される条件として常流と射流が交互に混在する流れとなっていないためと推測できる。今回の数値計算では、粘土鉱物の種類や水温などに依存する係数や流量パラメータの妥当性については予測の域から出ておらず、今後の十分な検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に列記する。

- ① 河床勾配を変化させた場合に、砂礫床と泥炭床の河床変動過程の相違を把握するため数値計算を行なった。その結果、砂礫床の場合は河床のバランスを維持するために計算開始直後から勾配は平滑化され一定勾配になった。一方泥炭床の場合は、砂礫によってバランスをとり砂礫床と同様に一定勾配に近づく傾向になったがその過程は異なった。泥炭床は摩擦速度の影響により周期的ステップのような地形を形成し、そのステップ地形は上流へ移動しながら落差がある浸食地形を形成することがわかった。
- ② キャニオン地形が出現した夕張川下流に泥炭床の浸食モデルを使用し河床変動の再現計算を行なった。その結果、石狩川合流付近の勾配変化点から射流による浸食が生じ、その浸食地形は徐々に加速しながら上流へ移動し落差が大きいキャニオン地形を形成した。その現象は夕張川下流のショートカットによる河床低下過程をある程度表現できるものであった。ただし夕張川下流でキャニオン地形が出現した1937年当時の河床高や流量データが残っていないことや粘土鉱物の種類や水温などに依存する係数など諸条件の妥当性については今後検討の余地がある。

### 参考文献

- 1) 山口甲, 品川守, 関博之: 捷水路, 北海道河川防災研究センター, 1996.
- 2) 町田尚久: 荒川中流河道への人為的インパクトに対する河川地形システムの応答, 地球環境研究, Vol.15, 2013.
- 3) 青木拓也, 池田裕一: 勾配・川幅の変化点近傍での河床変動に関する基礎的研究, 土木学会関東支部技術研究発表会, Vol.32-2, 111-112, 2005.
- 4) 劍崎浩高, 田村秀夫, 田中久義, 萱場祐一, 林尚: 砂鉄川におけるショートカット後の河床変動に関する検討, リバーフロント研究所報告, 第15号, 2004.
- 5) 清水康行, 藤田陸博, 平野道夫: 連続床止め工を有する複断面河道における流れと河床変動計算, 水工学論文集, 第43巻, 1977.
- 6) 山下彰司, 清水康行, 渡邊康玄: 急流河川の床止め近傍の河床変動, 北海道開発局技術研究発表会, 第35回, 1991.
- 7) 地盤工学会: 土質工学用語辞典, 1985.
- 8) 寒地土木研究所: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル, 2010.
- 9) 井上卓也, 清水康行, Gary Parker, 山口里実, 伊藤丹: 給砂量と岩床侵食地形の関係, 土木学会論文集B1, 70(4), 1039-1044, 2014.
- 10) 西森研一郎, 関根正人: 粘着性土の浸食過程と浸食速度式に関する研究, 土木学会論文集B, Vol.65, No.2, 127-140, 2009.6.
- 11) 田中岳, 泉典洋: 部分的に覆礫した岩盤河川における総流砂量と流れの抵抗則, 土木学会論文集B1, 69(4), 1033-1038, 2013.
- 12) 関根正人, 西森研一郎, 藤尾健太, 片桐康博: 粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察, 水工学論文集, 第47巻, 2003.
- 13) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究, (I)限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 41, 1-21, 1956.
- 14) Inoue, T., Izumi, N., Shimizu, Y., and Parker, G.: Interaction among alluvial cover, bed roughness, and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, 2014.
- 15) 井上卓也, 泉典洋, 米元光明, 旭一岳: 軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験, 河川技術論文集, 17, 77-82, 2011.
- 16) Parker, G. and Izumi, N.: Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed, *Journal of Fluid Mechanics*, 419, 203-238, 2000.
- 17) 五十嵐武, 柏木才助, 岩田直人: 夕張川等の低平地における水循環に関する研究, リバーフロント研究所報告, 第25号, 2014.

(2016. 9. 30受付)

## AN INFLUENCE OF EROSIONAL MORPHOLOGY BY BED SLOPE CHANGE

Tamaki SUMNER, Takuya INOUE and Yasuyuki SHIMIZU

The new waterway projects such as shortcut and gravel extractions have been carried out all over the country. The shortcuts have lowered river water surface elevation at the time of flood and they suppress the flooding. On the other hand, the riverbed elevations rapidly decrease due to bed slope changed artificially and canyons are formed in several rivers. However, little is known about how riverbed degradation occurs or how the canyon is formed by change of the bed slope. In this study, we conducted numerical simulations to evaluate the deformations of alluvial bed and peat bed in bed slope being changed. The results suggest that the bed slope become constant on the alluvial bed and the erosion proceeds at the bare peat bed, they also propose the upstream migration of the peat bed slope is what forms cyclic steps morphology. Moreover, we carried out numerical simulation of reproduction of Yubari river bed degradation by shortcut. We confirmed the possibility of the reproduction using the peat bed model.