

# 岩盤河川の蛇行流路における乾湿風化の影響

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 博（工） 株式会社水工リサーチ（〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条7丁目1-27）  
E-mail: t-sumner@suiko-r.co.jp

<sup>2</sup>正会員 博（工） 広島大学先進理工系科学研究科准教授（〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1）  
E-mail: inouetakuya@hiroshima-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>4</sup>フェロー 博（工） 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

山地河川では、基盤面の下刻や側刻による蛇行の発達が顕著にみられる。岩盤の侵食要因は、主に砂礫の衝突磨耗によるものが支配的であるが、岩盤面が乾湿や凍結融解などの機械的な作用により風化することでも発生する。本研究では、数値計算モデルを用い、岩盤床を有する河道湾曲部における乾湿風化の影響について解明を試みた。数値計算モデルは、流下方向の砂礫移動量と河岸の横勾配から横方向の岩盤侵食を考慮し、数値実験では供給土砂量に変化を与え計算を行った。数値実験の結果、河道横断面内において、二次流の影響による内岸の固定砂州の形成、砂礫と岩盤の境界における局所洗掘および風化による側刻がみられた。摩耗侵食による河床低下が進行すると、風化は低水路全体に影響を及ぼした。また、土砂供給が少ない場合、河道が全体的に露岩するため湾曲部の内岸側において風化が進行することが明らかとなった。

**Key Words :** *bedrock, meandering, numerical simulation, wet-dry weathering*

## 1. はじめに

山間地を流れる河川は、穿入蛇行によって発達し流域の地形を形成していく。穿入蛇行は、下刻による掘削蛇行と側刻による生育蛇行の相互作用により発達が進行する。蛇行流路の横断的な地形の特徴として、側刻により外岸が切り立っており、内岸は固定砂州が形成され緩やかな滑走斜面が形成されている。典型的な穿入蛇行は、四国の四万十川<sup>1),2)</sup>、静岡県の大井川<sup>3)</sup>や、アメリカ合衆国アリゾナ州に流れるコロラド川のホースシューベンド等が挙げられる。また、十勝川水系十勝川の支流である然別川の中流部は、河床低下によって側岸に岩盤が露出しており、蛇行部では砂礫の磨耗によって側刻が進行している<sup>3)</sup>。

河道に存在する岩盤は、様々な侵食プロセスによりその地形が形成される。既往研究<sup>4)</sup>によって、流水のせん断力による侵食よりも流砂の衝突磨耗による侵食の方が支配的であることが確認されている。穿入蛇行は、主にこの流砂の衝突や磨耗によって発達しているが、本来岩盤床を研磨する役割を持っている流砂は、ある一定量増加すると、堆積によって岩盤床を保護する役割へと変化する<sup>5)</sup>。しかし、十分な土砂供給があった場合において

も、岩盤床上に砂州状の堆積物が形成しそのトラフ部分では岩盤の露出と侵食が見られており<sup>6)</sup>、岩盤の侵食地形と砂礫の空間的な分布の関係性は複雑であることを示唆している。特に、岩盤を有する蛇行河川では、流れに偏りがあることからその複雑さは増す。蛇行形成の要因については、実験<sup>7),8),9)</sup>や数値解析<sup>3)</sup>によって解明を試みているが、未だ不明な点が多い。

鈴木・池田<sup>10)</sup>によると、愛知県乳岩川の蛇行部に風化による剥離痕が見られ、また、カリフォルニア州のPescadero Creekの湾曲部外岸では、スレーキングと岩盤のベンチが確認<sup>11)</sup>されており、岩盤の侵食地形は風化の



図-1 風化によって変色した岩盤の表面（釧路川 KP70.5）

影響も考慮すべきと考える。岩盤は、乾湿や凍結融解の繰り返しによって風化し、岩盤表面の劣化が起こる<sup>12),13),14),15)</sup>。河岸にスレーキングが見られる釧路川の岩盤ベンチ (図-1) は、風化によって茶色に変色しており、風化が進行し岩盤が破壊され剥離した表面は、岩盤強度が大きく灰色と変化している。風化の影響を考慮した岩盤侵食地形について研究<sup>16),17)</sup>は行われているが、蛇行流路を対象とした知見は少ない。本研究では、岩盤河川の蛇行流路における下方および側方侵食と乾湿風化の相互作用について数値解析による分析を試みた。

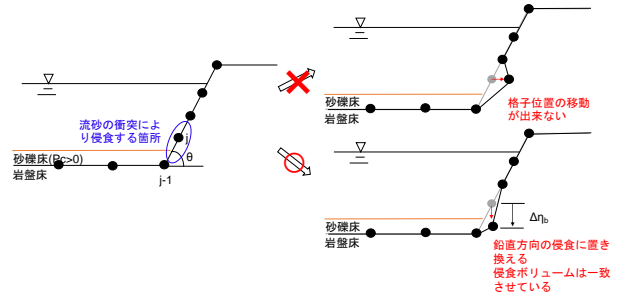


図-2 岩盤の側方侵食のイメージ図

## 2. 数値計算モデル

本研究は、iRIC Nays2DHを改良し一般座標系の平面2次元計算を行う。流れの基礎式はNays2DHマニュアル<sup>18)</sup>、流砂の基礎式は既往文献<sup>19)</sup>に示されているため省略し、ここでは岩盤の侵食と風化の基礎式について記述する。

### (1) 岩盤の下方侵食

流砂の衝突による岩盤の侵食速度は、以下の式で表される<sup>15)</sup>。

$$E_v = \beta_c \sigma_{TN}^{-2} \left( \frac{d}{k_s} \right)^{0.5} q_b (1 - P_c) \quad (1)$$

ここで、 $E_v$ は鉛直方向の岩盤侵食速度、 $\beta_c$ は摩耗定数、 $\sigma_{TN}$ は引張強度、 $d$ は粒径、 $k_s$ は岩盤床の等価粗度高さ、 $q_b$ は単位幅流砂量 ( $x$ および $y$ 方向流砂量の合成ベクトルの絶対値)、 $P_c$ は砂礫が岩床を被覆している面積割合であり、 $P_c$ は各格子における岩床の巨視的な粗度高さと砂礫厚の比で表される。なお、岩盤上において $q_b$ は必ずしも平衡流砂量にならないことに注意する必要がある<sup>19)</sup>。

### (2) 岩盤の側方侵食

Mishra et al.は、流砂が岩盤の側壁を侵食することを実験的に示すと伴に、移動境界座標を用いた数値解析モデルを提案している<sup>7)</sup>。しかし、このモデルでは境界以外の側方侵食を考慮できない。そこで、計算格子内のどの地点でも岩盤の側方侵食を考慮できるように、モデル化を行う (図-2)。本モデルは、側方侵食速度が流砂量と岩盤角度に依存すると仮定し、流砂が存在しない地点では侵食は発生しないこととする。横断方向の岩盤角度を $\theta$ とすると、 $j$ 地点の側方侵食速度は、 $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ の時は $j-1$ 地点の流砂量に依存し、 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ の時は $j+1$ 地点の流砂量に依存すると考えられる。また、岩盤床の角度 $\theta$ が $0^\circ$ の時、 $j$ 地点に側方から衝突する粒子は存在せず、 $\theta$ が $90^\circ$ の時に側方からの衝突確率は本来の値になる。つまり、側壁の侵食速度 $E_l$ は以下のような関係が成り立つと仮定できる。

$$E_l \propto \begin{cases} C_r \sin \theta q_{b,j-1} & \text{for } 0^\circ < \theta \leq 90^\circ \\ C_r \sin \theta q_{b,j+1} & \text{for } 90^\circ < \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $C_r$ は流砂の側壁への衝突確率である。

本来、 $j$ 地点は式(2)の侵食速度に応じて横へ移動する。しかし、平面2次元計算において、内部格子の位置を動かすのは困難である。そこで、便宜的に側方侵食速度を鉛直方向の侵食速度へ置き換えることとする。

$$E_{lv} = \begin{cases} \beta C_r \sin \theta q_{b,j-1} & \text{for } 0^\circ < \theta \leq 90^\circ \\ \beta C_r \sin \theta q_{b,j+1} & \text{for } 90^\circ < \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\beta = \beta_c \sigma_{TN}^{-2} (d/k_s)^2$ である。

また、岩盤河川ではしばしば側壁にオーバーハング地形が形成されているが、本モデルは、三次元性を有するオーバーハング地形を評価することは出来ないため、この点については今後の課題とする。

### (3) 岩盤の乾湿風化

岩盤強度は、乾湿の繰り返し吸水膨張によって指数的に低下する<sup>15)</sup>。

$$\frac{\sigma_{TN}}{\sigma_{T0}} = \exp \left( -C_{dw} \frac{W_{a0}}{\sigma_{T0}} N \right) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{TN}$ は風化後の引張強度、 $\sigma_{T0}$ は風化前の引張強度、 $W_{a0}$ は初期吸水率、 $N$ は乾湿サイクル数、 $C_{dw}$ は定数である。乾湿サイクル数 $N$ によって低下した引張強度 $\sigma_{TN}$ は、式(1)、(3)に代入される。

乾湿サイクルは一定時間乾燥と湿潤を繰り返したものを1サイクルと設定する。岩盤は、岩盤強度の低下により、最終的に岩盤の結合力が消失し細粒化する。そこで、細粒化の閾値 $\sigma_{TC}$ を設定し、岩盤強度 $\sigma_{TN}$ が閾値を下回った場合、岩盤が時間 $T_w$ の間に風化深さ $D_w$ だけウォッシュロードとして除去されると仮定する<sup>17)</sup>。したがって風化による侵食速度は以下の式で表される。

$$E_w = D_w / T_w \quad \text{when } \sigma_{TN} < \sigma_{TC} \quad (5)$$

なお、風化深さを除去した後の岩盤強度はフレッシュな初期の状態に再設定する。

岩盤河床高 $\eta_b$ の時間変化は、下方・側方侵食と乾湿風化を考慮して以下の式で表される。また、下方や側方に侵食された岩盤についてもウォッシュロードとして除去されると仮定している。

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -E_v - E_{lv} - E_w \quad (6)$$

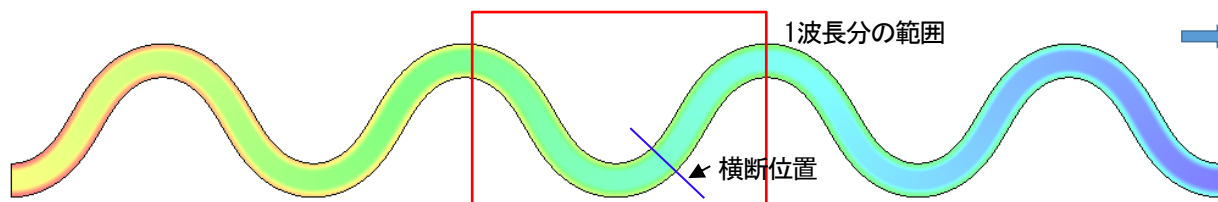


図-3 初期河床の平面形状

### 3. 計算条件

計算は、対象河川であるPescadero Creek<sup>11)</sup>の条件を基にサインカーブの蛇行流路とし、蛇行角度60度の1波長350mとし水路に4波長を設定した(図-3)。水路の横断形状は複断面(図-4)とし、低水路幅は15m、河岸の高さは5m、高水敷幅は2m、河床縦断勾配は0.003である。計算の格子数は、流下方向201、横断方向30格子とした。風化の影響を把握するため、河床が乾燥と湿潤を繰り返す条件とし、また、Pescadero Creekでは出水時に0.5mから最大3.0m水位が上昇することから、最大流量と最小流量で水位差が明確に分かるよう最大流量は100m<sup>3</sup>/s、最小流量5m<sup>3</sup>/sとした。洪水のハイドロを想定し、上昇期、洪水ピーク維持期間、減衰期、最小流量維持期間をそれぞれ5時間設定した山型のハイドロを1,000時間(図-5)与えた。乾湿サイクル数 $N$ は、乾湿状態と湿潤状態がそれぞれ30分間以上になった場合にカウントアップする設定とした。

初期河床は、河道全体に岩盤床を設定し、上流端から砂礫を供給することとした。供給する河床材料の粒径 $d$ は10mmの単一粒径とした。岩盤床の等価粗度高さは、砂礫床と同様の粗度と仮定し粒径の2倍である0.02mを設定した。流砂による摩耗と乾湿による風化に関わるパラメータの値はInoue et al.<sup>15)</sup>を参考に、 $C_{dw}$ の値は0.21、 $\beta_c$ は0.00035とする。また、Pescadero Creekの岩盤強度 $\sigma_{T0}$ は0.5MPa程度、吸水率 $W_{a0}$ は0.5とした。さらに、岩盤強度の最小値は約0.2~0.3MPaであることから、この値を下回ると細粒化すると仮定し細粒化の閾値 $\sigma_{Tc}$ は0.27MPaとした。なお、乾湿サイクルが3回繰り返されると細粒化が起こる設定としている。風化深さ $D_w$ は0.01m、時間 $T_w$ は0.05secとし、乾湿の繰り返しによる0.05m前後のスレーキングが現地(釧路川や豊平川など)にて確認されていることから、乾湿サイクルによる細粒化は0.05m以上侵食しないよう設定した。側壁への衝突頻度 $C_r$ は本来流砂の進行方向によって変化するが、側壁への衝突頻度についての知見が少ないため、本研究では流砂の50%が衝突すると仮定して簡易的に0.5とした。

数値実験は、単位幅給砂量を変化させた4ケースを行った(表-1)。

### 4. 計算結果と考察

#### (1) 砂礫の堆積厚と岩盤侵食の平面的な分布

図-6に、各ケースの水路中央に位置する1波長分の岩盤床変化高コンター図と砂礫層厚コンター図を示す。給砂量が多いRun1は、ほぼ低水路全体に砂礫が堆積しており、岩盤は湾曲部外岸で多く侵食した。Run2は、Run1に比べ全体的な砂礫の分布が少なく、また、岩盤は外岸より低水路中央寄りに侵食した。Run3とRun4は、内岸側に砂礫が堆積しているが、0.2m程度と砂礫層は薄い。Run1やRun2とは対照的に、内岸側で深く岩盤が侵食しているが、外岸の湾曲部に沿った侵食もみられた。全ケースにおいて、湾曲部における二次流の影響により、砂礫は内岸に堆積する結果となっている。

#### (2) 湾曲部の岩盤侵食地形

各ケースの湾曲部における侵食地形の横断図を図-7に示す(横断位置は図-3参照)。Run1からRun4を通し

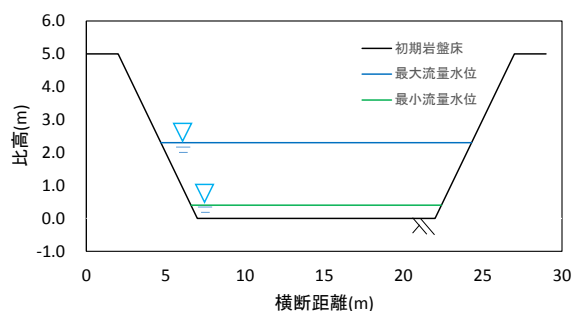


図-4 蛇行水路の横断形状

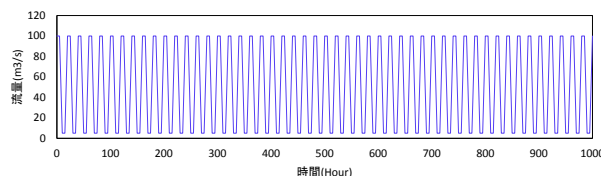


図-5 ハイドログラフ

表-1 実験ケース

	単位幅給砂量(m <sup>2</sup> /s)
Run1	0.0010
Run2	0.0006
Run3	0.0002
Run4	0.0001

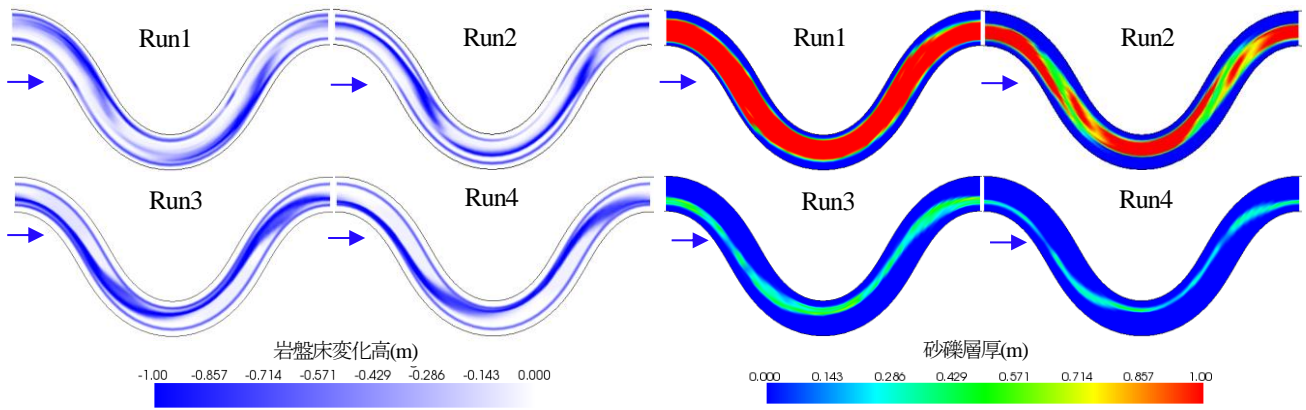


図-6 各ケースの岩盤床変化高コンター図(左)と砂礫層厚コンター図(右)

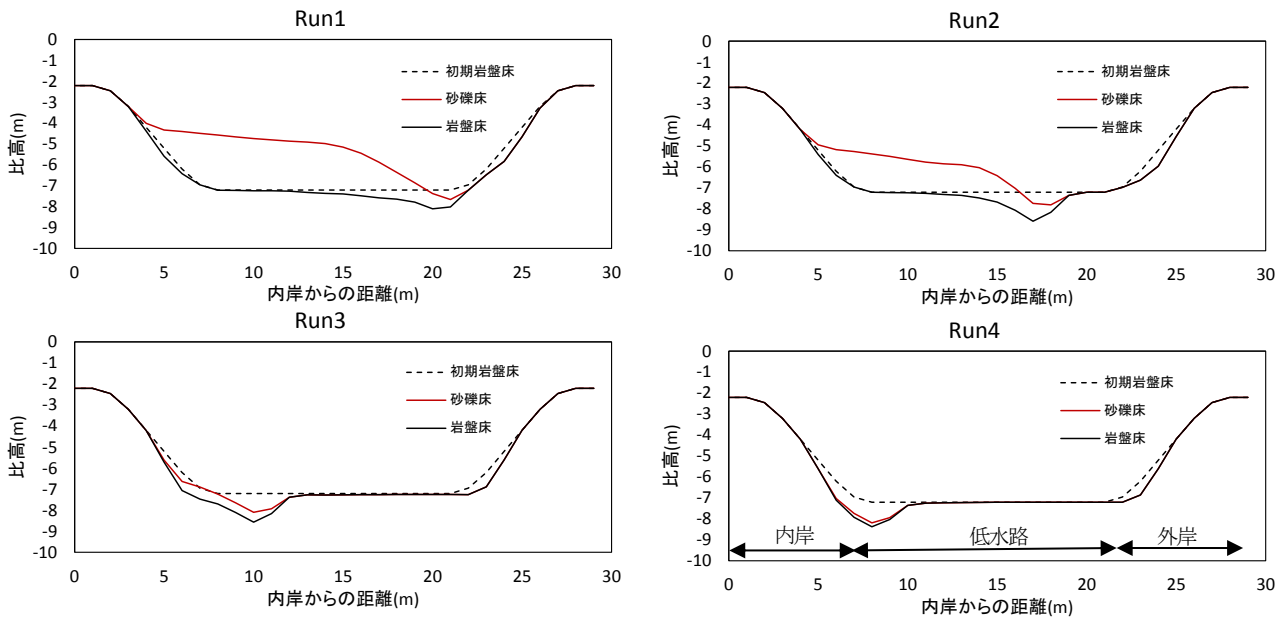


図-7 各ケースの湾曲部における侵食地形の横断面図

て、給砂量に比例して内岸に形成される砂州が大きくなり、砂礫と岩盤の境界において滞筋が形成された。これは、砂州の縁付近で被覆率が1以下になり、式(1)の下方侵食が生じるためである。同様の現象は、田口らの一様湾曲水路を用いた実験<sup>8)</sup>でも観測されている。Run2~Run4の外岸付近の岩盤が侵食されずベンチとして残った。これは、二次流の影響により流砂が外岸付近を通過しないためである。また、外岸付近を流砂が通過しないにも関わらず、河岸が侵食したのは、乾湿の繰り返しによる風化消滅(細粒化とウォッシュロードとしての流出)が生じたためである。

Pescadero Creekの現地調査では、岩盤河川の湾曲部において岩盤のベンチと外岸のスレーキングが見られ、内岸は砂礫が堆積していた<sup>11)</sup>。このことから、Run2の計算結果はPescadero Creekの侵食地形を定性的に再現していると考えられる。つまり、Pescadero Creekの土砂供給は、低水路全体が砂礫で覆われる流砂量(Run1)に比べ、おおよそ半分程度と推測される。将来的に土砂供

給が減少すれば、Run3やRun4のように内岸付近に滞筋が形成される可能性がある。

### (3) 風化の影響範囲

対象横断の風化による河床低下量(風化消滅深)を抽出し、図-8に示す。給砂量が多いRun1とRun2は、風化による河床低下は、露岩箇所である外岸に多く見られた。Run1では、他ケースと比べて風化範囲は更に外岸に及んでおり、これは、砂礫の堆積によって水位が上昇し、乾湿風化範囲も広がったと考えられる。

給砂量が少ないRun3とRun4では、砂礫の堆積量が少ないため、露岩している両岸において風化による河床低下が見られた。また、Run3では低水路内において、砂礫の摩耗侵食による滞筋の発達により水位が変動し風化範囲が低下したことにより、岩盤ベンチでも風化による河床低下が発生している。これは、条件によっては、風化が河道全体の地形に影響を与える可能を示している。Run4では低水路内の岩盤床は風化しておら

ず、この理由としては、Run4では給砂量が少ないため侵食速度が小さく、最小流量時に低水路内の岩盤が乾燥状態にならなかったためであることが推測される。

全ケースにおいて、岩盤侵食深が大きい滞筋部では風化による細粒化（消滅）は見られない。これは滞筋部が常に水に浸かっていたためである。風化は、乾湿の繰り返しが多い河岸部で主に発生し、磨耗侵食は流砂の集中しやすい滞筋部で発生する傾向にある。このことから、磨耗侵食と風化による細粒化の位置はあまり一致しないことが分かる。また、Run1とRun2では、内岸は外岸に比べて風化の消滅深が小さい。これは、砂礫が十分に被覆している状態では、風化消滅が起こらないためである。一方、土砂供給の少ないRun3とRun4では内岸も露出するため、内岸でも風化消滅が生じている。鈴木・池田による乳岩川の現地調査<sup>1)</sup>では、砂礫の堆積は少なく、湾曲部内岸において風化による剥離痕が確認されており、Run3またはRun4の計算結果と類似した傾向を示している。また、Run3の風化消滅深のコンター図（図-9）から湾曲部内岸において、わずかに風化範囲の拡大が確認された。湾曲部流れは、外岸寄りであり外岸の水位が高く、最大流量時の横断方向の水位差が外岸と内岸で0.25m、最小流量時の横断水位差は0.05mであり、内岸側の低水路が乾燥状態になりやすくなったためと考えられる。

#### (4) 横方向の侵食の影響

図-8の横断面図に、側方侵食による侵食量を青線で示した。全ケースの計算結果から、側方侵食は深く滞筋になった箇所周辺で発生している。Run1とRun2は、滞筋より内岸の横勾配が砂礫被覆の影響により緩やかとなり、横勾配の急な滞筋部外岸のみ側方に侵食した。河床が砂礫床であり河岸が岩盤である然別川では、流砂の衝突や摩耗により外岸の岩盤が削られ、蛇行が発達する傾向を示しており、Run1では、然別川の侵食と同様の傾向を示した。Run3とRun4は、内岸側の流砂によって形成された滞筋周辺の横勾配が急勾配となり、滞筋の両側で側方侵食が発生した。以上のように、モデル化により滞筋の横断方向侵食を計算できる可能性が示された。しかしながら、然別川の湾曲部<sup>3)</sup>では河岸のオーバーハングが確認されており、本モデルでは、三次元性の強い現象については評価することができない。この点は今後の課題とする。

### 5. まとめ

本研究では、乾湿風化を考慮した岩盤侵食モデルに、新たに横方向の侵食を考慮し、岩盤床を有する蛇行流路を対象に数値実験を行った。実験ケースは給砂量に

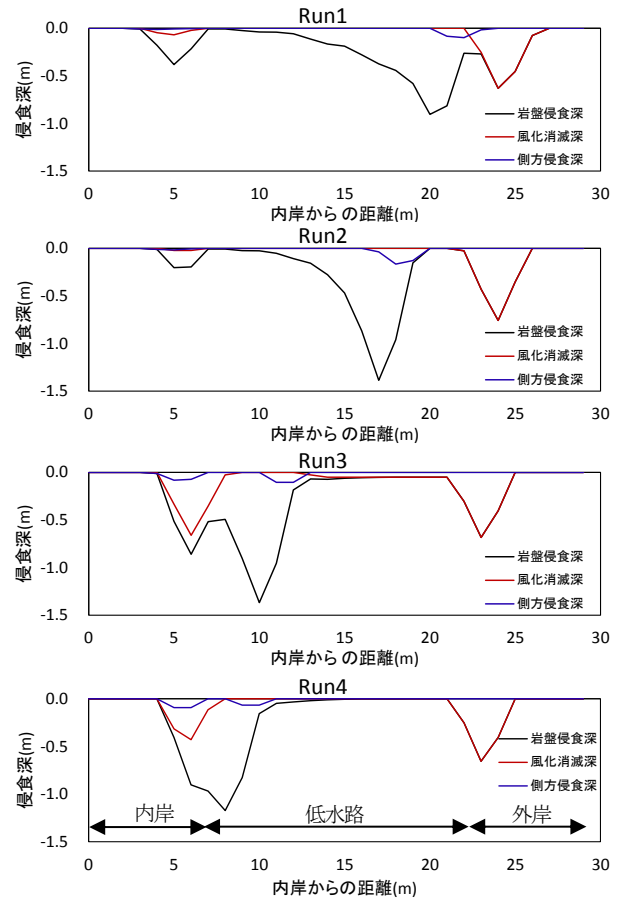


図-8 各ケースの岩盤侵食深、風化消滅深および側方侵食深の横断面図

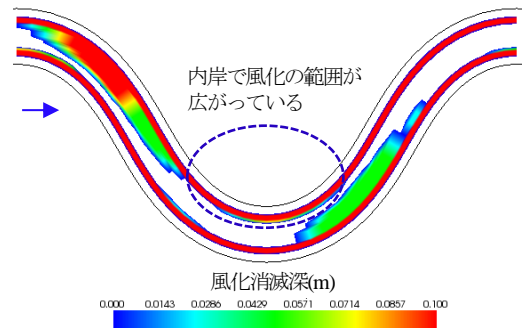


図-9 Run3の風化消滅深のコンター図

変化を与え、岩盤侵食地形の影響について解明を試みた。

本研究で得られた知見を以下に列記する。

- 1) 給砂量が多い場合、二次流の影響による内岸に固定砂州が形成され、流砂衝突による下方および側方侵食、乾湿風化による細粒化は主に外岸付近で発生した。
- 2) 摩耗侵食による河床低下量が増加すると、風化は低水路全体に影響を及ぼした。また、流砂の摩耗侵食による滞筋部においては風化の影響が確認されなかった。
- 3) 給砂量が少ない場合、内岸に流砂による滞筋が形成され、両岸の風化による側刻がみられた。

## 参考文献

- 1) 林千夏, 池田宏: 四万十川中流の穿入蛇行の成り立ち, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 第1巻, pp.43-50, 2001.
- 2) 柏木日出治: 四万十川流域における地形発達史とその土木地質学的意義について, 地学雑誌, 720号, 19-27, 1961.
- 3) Inoue, T., Parker, G., and Stark, C.P.: Morphodynamics of a Bedrock-Alluvial Meander Bend that Incises as it Migrates Outward: Approximate Solution of Permanent Form, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016.
- 4) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E.: River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply, *Geophysical Monograph-American Geophysical Union* 107, pp.237-260, 1998.
- 5) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E.: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 6) サムナー圭希, 井上卓也, 清水康行: 岩盤床上の砂州形成に伴う侵食地形, *土木学会論文集B1*, 72(4), pp.817-822, 2016.
- 7) Mishra, J., Inoue, T., and Shimizu, Y.: Simulations of Lateral Erosion in Bedrock Channels, *Journal of applied mechanics*, JSCE Vol. 19, pp.527-536, 2016.
- 8) 田口真矢, 小林素直, リマアドリアーノ, 泉典洋: 一樣湾曲水路における部分的に砂礫被覆した岩盤河床の侵食に関する実験的研究, *土木学会論文集B1*, 74(4), pp.1039-1044, 2018.
- 9) 関根正人, 佐藤裕, 芦澤徳波, 吉川文崇: 河道湾曲部で発生する粘着性河床の変動プロセスに及ぼす掃流砂礫の影響, *土木学会論文集B1*, 74(5), pp.931-936, 2018.
- 10) 鈴木睦仁, 池田宏: 愛知県豊川上流の乳岩川における平滑な岩盤河床の成因について, 筑波大学水理実験センター報告, No.19, pp.45-56, 1994.
- 11) Johnson, K. N., and Finnegan, N. J.: A lithologic control on active meandering in bedrock channels. *Geological Society of America Bulletin*, 127(11-12), pp.1766-1776., 2015.
- 12) 磯安奈, 森井俊広: 乾湿繰り返し作用を受ける泥岩の強度特性, 新潟大学農学部研究報告, 第56巻2号, pp.119-127, 2004.
- 13) 松倉公憲: 地形学からみた風化研究の問題点と今後の課題, *地学雑誌*, 126(3), pp.271-296, 2017.
- 14) 日下部祐基, 伊東佳彦, 佐藤博知: 岩石の凍結融解による強度劣化の推定方法と現地観測による検証, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会, 平成24年研究発表会公演予稿集, 第32号, 2012.
- 15) Inoue, T., Yamaguchi, S., and Nelson, J. M.: The effect of wet-dry weathering on the rate of bedrock river channel erosion by saltation gravel, *Geomorphology*, 285, pp.152-161, 2017.
- 16) Hancock, G. S., Small, E. E., & Wobus, C.: Modeling the effects of weathering on bedrock-floored channel geometry. *Journal of Geophysical Research*, 2011.
- 17) サムナー圭希, 井上卓也, 人見美哉, 清水康行: 乾湿風化を考慮した岩盤侵食モデルの構築, *土木学会論文集B1*, 74(4), pp.1045-1050, 2018.
- 18) Shimizu, Y., Takebayashi, H., Inoue, T., Hamaki, M., Iwasaki, T. and Nabi, M.: Nays2DH Solver Manual, <https://i-ric.org/en/>.
- 19) Inoue, T., Mishra, J., and Parker, G.: Numerical simulations of meanders migrating laterally as they incise into bedrock, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 12, e2020JF005645, 2021.

(Received June 30, 2021)

(Accepted September 3, 2021)

## EFFECTS OF WET-DRY WEATHERING IN MEANDERING CHANNELS OF BEDROCK RIVERS

Tamaki SUMNER, Takuya INOUE and Yasuyuki SHIMIZU

In mountain-river, the development of bedrock meanders due to incision and lateral erosion are commonly observed. The dominant factor in bedrock erosion is the collision-based abrasion by bedload. And it is also caused by weathering of the bedrock surface by mechanical effects such as wet and dry, freezing and thawing. In this study, we attempted to clarify the effects of wet-dry weathering in a channel bend with bedrock using a numerical model. The numerical model considers lateral bedrock erosion based on the amount of sediment transport in the downstream direction and the lateral slope of the riverbank. Numerical experiments were conducted by varying the amount of sediment supplied. The results of numerical experiments showed that the formation of fixed bars on the inner bank due to the influence of secondary flows, local scouring at the boundary between sediment and bedrock, the lateral erosion due to weathering was observed on the outer bank. The weathering affected the entire river channel as bed degradation due to abrasion erosion progressed. In addition, in the case of bedrock with low sediment supply, the erosion by weathering progressed on the inner bank upstream of the bend because the entire river channel is exposed.