

中小洪水による細粒河床材料の移動を伴う 河床変動特性と解析

(利根川上流八斗島周辺の河床変動の実態)

INVESTIGATION INTO THE CHARACTERISTICS OF THE RIVER BED
VARIATION AT YATTAJIMA AREA OF TONE RIVER WITH SEDIMENT
TRANSPORT OF FINE BED MATERIALS IN THE FLOOD

森田靖則¹・小宮山隆²・北野実紀³・

見上哲章⁴・小島崇⁵・渡邊明英⁶・幸弘美⁷

Yasunori MORITA, Takashi KOMIYAMA, Minori KITANO

Tetsuaki MIKAMI, Takashi KOJIMA, Akihide WATANABE and Hiromi YUKI

¹ 前国土交通省利根川上流河川事務所 (〒349-1198 埼玉県久喜市栗橋北 2-19-1)

² 国土交通省利根川上流河川事務所計画課 (同上)

³ 前国土交通省利根川上流河川事務所 調査課 (同上)

^{4,7} 正会員 (株)東京建設コンサルタント環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

^{5,6} 正会員 博士(工) (株)東京建設コンサルタント環境防災研究所 (同上)

This paper discusses the cause of sediment deposition at Yattajima observatory in Tone River which occurred due to the flood in September 2011, by using the data of river channel deformation obtained by aerial photos and surveying. Meanwhile, the triggers and actual phenomenon of sediment transport is verified by the horizontal 2-D river bed analysis.

By short and long-term river bed analysis, the water level, channel deformation, and the migration of sandbars during the flood could be reproduced. And it is clarified that the main cause of the sediment deposition is the decrease in main channel bed height at Nakanoshima section.

Key Words : water level and flow rate observation, river bed variation, channel deformation, Yattajima, aerial photographs, sand bar

1. はじめに

八斗島水位観測所は図-1 に示す利根川 181.5K 左岸に位置し、利根川の基準点として長期間安定した水位観測を行ってきた。しかし、平成 23 年 9 月の台風 12 号および 15 号の出水により、水位計設置箇所を含め周辺一帯に大量の土砂が堆積した(図-2)。両出水は、平均年最大流量が約 3,000m³/s の八斗島観測所において、2,000～2,500m³/s の小規模なものであったが、それまで右岸側から観測所の方向に流れていた滞筋が右岸側を直進するように変化するなど、大規模な河床変動をもたらした。水位観測を安定的に継続するため、河床変動の要因と発生機構を解析し、適切な対策に活かすことが急務となった。

そこで本研究では、航空写真や河道横断測量成果等の基礎資料から河道の変遷・砂州や中の島の形成について考察し要因分析を行った。また、河床変動解析モデルを用いて、短期・長期の土砂動態を再現することで、八斗島水位観測所の土砂堆積問題について検討を行った。

本研究の成果から河川管理上の課題についてもまとめている。

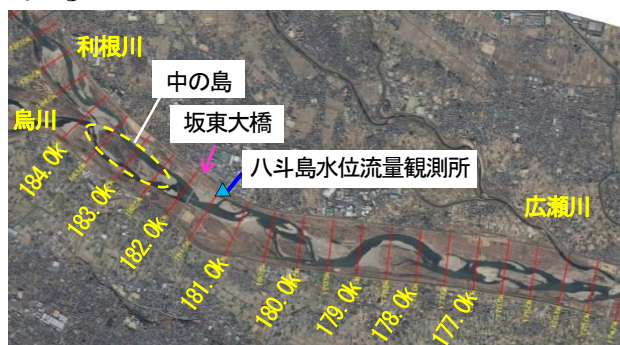


図-1 八斗島周辺の河道状況



図-2 平成 23 年台風 15 号の土砂堆積状況

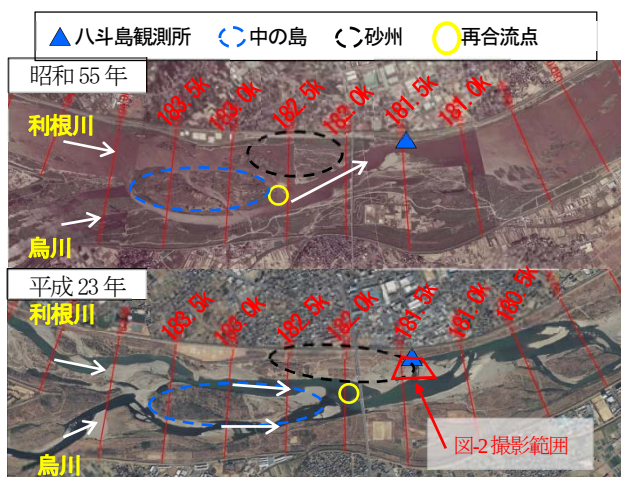


図-3 八斗島上流部の河道変遷(上:S55, 下:H23)

2. 要因分析

観測所の上流では右支川烏川の低水路と本川の低水路が合流し、両者の間には中の島が形成され、近年では樹木群の繁茂が顕著になっている。この合流点から観測所下流までの河道はほぼ直線的であり、長期的な砂州の移動により土砂が堆積した可能性が考えられた。図-3 に昭和 55 年と平成 23 年 9 月出水後の航空写真を示す。昭和 55 年の写真より 183.0K 付近の右岸が水衝部となりその下流は左岸方向へ流れがシフトし八斗島観測所は主流路であったことがわかる。また、昭和 55 年から平成 23 年の間に、中の島が発達し本川筋と烏川筋の再合流点及び中の島左岸側の砂州も下流へ移動し本川筋の滞筋は直進化していることがわかる。

図-4 は垂直写真と横断測量成果をもとに各年の滞筋線を判読し、重ね合わせたものである。合流点が経年的に下流へ移動するとともに、181.5K 左岸付近にあった滞筋の最接近点が H23 の出水後には 181K 付近に移動した状況がみられる。また、図-5 は上流区間について河床高を経年的に整理したものであり、図-6 は中の島(183.0K)の本川筋と烏川筋の平均河床高の経年変化を示している。中の島区間である図-5 の上と図-6 の河床高の経年変化をみると、右岸烏川筋の平均河床高はほとんど変化していないのに対し、左岸の本川筋は S57 から約 1.5m 河床が低下している。本川筋の河床低下により、低水路線形に沿った流勢が増大し直進化することで、再合流点下流では右岸側に滞筋が移動し、図-5 の下の八斗島観測所断面では左岸側へ土砂堆積を促進した可能性がある。

一方、観測所直上流の182K付近では、図-7に示すように平成8年から橋梁の架け替えが始まり平成11年に新橋の工事が完了した。平成19年に撤去された旧橋の橋脚は直径3mの円柱形×上下線に対し、新橋は長さ30m、幅6mの小判型の橋脚が設けられた。この橋脚により流れが整流され直進するようになったことも想定された。また、平成20年以降に、182～182.5K左岸において平均1.3m、最大2.5mの深さで河岸際の砂利採取が行われており、本川

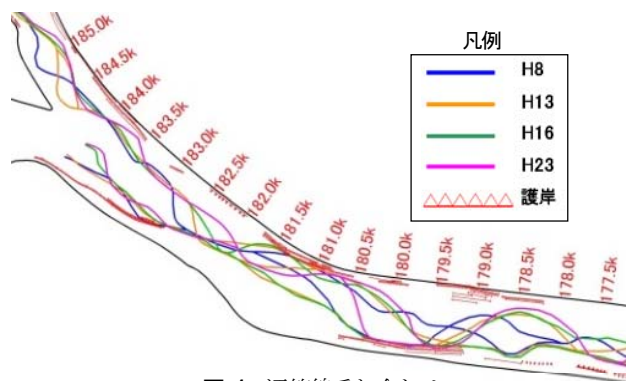


図-4 滞筋線重ね合わせ

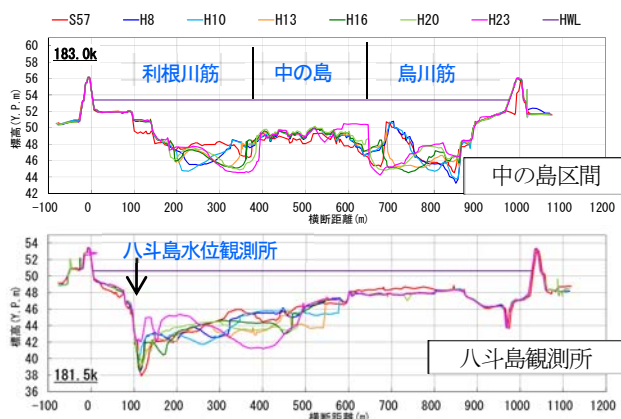


図-5 横断形状の経年変化(S57～H23, 上:183k, 下:181.5k)

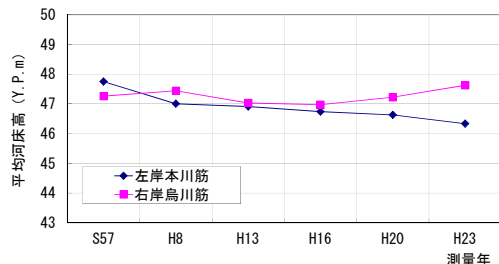


図-6 中の島区間(183.0k)の本川筋と烏川筋の平均河床高経年変化



図-7 新旧坂東大橋の橋脚と砂利採取位置(H17 撮影)

の洪水により輸送される土砂が低水路満杯以上の流量時に観測所方向に移動し易くなった可能性も考えられた。

3. 数値解析による再現

(1) 解析手法

上記の河床変動を再現するとともに将来の変化を予測するため、平面 2 次元の流況解析モデルと掃流砂・浮遊

砂モデルによる河床変動解析を行った。座標系は渡辺・福岡らの方法²⁾と同様に一般座標系とし物理成分表示形とした基礎式を使用した。離散化は有限差分法とし時間積分はHeun法を用いた。

流況解析は移流項を風上差分の一次精度、それ以外の項を中心差分で離散化した。また、レイノルズ応力項は渦粘性モデル(0方程式)とし、底面の抵抗はマンニングの粗度係数を用い、樹木の抵抗は樹高と福岡らの江戸川での研究²⁾を参考に透過係数を設定し評価した。

河床変動解析は、混合粒径を対象として移動限界粒径を修正エギアザロフ式で求め、掃流砂量を芦田・道上式で算出する一般的なモデルで解析を行ったところ、実態と比較して計算された変動量は過少になった。図-8に示す対象区間での河床材料調査によると、粒径は0.1mm～100mmオーダーの幅広い分布を有しており、2mm以下(砂以下)の細粒分の占める量は2割程度と比較的大きい。変動量が過少になった原因として、中小洪水では移動しない大粒径の遮蔽効果を過大評価し、細粒分の移動量が少なくなったためと考えられた。また、川幅1km、延長10kmの区間を長期間計算するため、横断方向の計算格子を低水路で10m程度、縦断方向に20mと粗くしたことから、隣接する格子の比高差が大きくなり側岸侵食が表現できず、合流点が下流へ移動する状況など、実態との不整合が生じる結果となった。

計算変動量が過少の問題に関しては、福岡らの常願寺川での現地実験を反映した表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法³⁾や、水理実験を行い粒径集団の役割を考慮した平均粒径から流砂量を算出する石神ら⁴⁾の解析法が挙げられる。本研究では、石神ら⁴⁾の2014改良版を基本に以下に示すように動かない大きな粒径は平均粒径から除き、遮蔽の度合いを調整し流砂量を算出した。

まず、流れから算出された有効掃流力に対して移動限界粒径を求める。

$$d_c = U_{*c}^2 / (\tau_{*c} s g) \quad (1)$$

ここに、 U_{*c} ：有効掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 d_c ：移動限界粒径である。粒径階 $i=1 \sim N$ について、(1)式より平均粒径 d_m が動く $d_m < d_c$ まで、 d_m (粒径階 $i=1 \sim k$, $k \leq N$)を作り直す。これにより、粒径集団($i=k+1 \sim N$)が移動せず面的に遮蔽すると考える。

次に、流砂量は移動可能な粒径集団($i=1 \sim k$)について、(2)式で算定する。

$$q_B = \sum_{i=1}^k [\alpha \cdot i_{ri} q_{Bi}] \quad (2)$$

ここに、 q_{Bi} ：従来型の芦田・道上式、 i_{ri} ：非遮蔽面の粒度構成比、 α ：遮蔽係数である。 i_{ri} の粒度構成比は、上述した移動可能な粒径集団で再整理した非遮蔽面の粒度構成比である。遮蔽係数 α は、移動可能な粒径集団の面積比であり、移動しない粒径集団($i=k+1 \sim N$)の遮蔽を

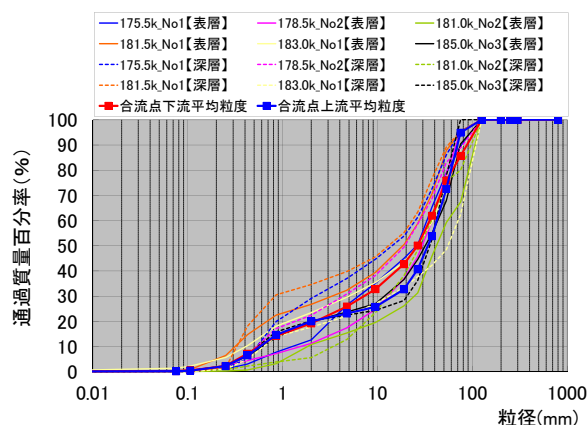


図-8 代表地点の粒度分布(H23河床材料調査結果)

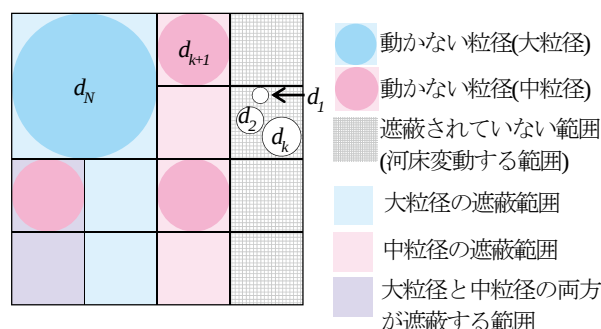


図-9 遮蔽範囲の計算概念図(遮蔽が粒径の2倍の場合)

考慮して設定する。本研究では遮蔽される面積は円換算面積の2倍程度までとし式(3)で表現した。

$$\alpha = \prod_{j=k+1}^N (1 - [1 + \kappa] A_j^{(N-j)}) \text{ and } (1 - [1 + \kappa] A_j^{(N-j)}) \geq 0 \quad (3)$$

なお、 A_j は以下のように推定した。

$$A_i = \frac{S_i}{\sum S_i}, \quad S_i = \beta_i i_o d_i^2, \quad \beta_i = \frac{d_i}{\gamma d_c} \text{ and } \beta_i \leq 1 \quad (4)$$

ここに、 $\kappa=1.0$ 、 $\gamma=0.4$ とした。

側岸侵食が表現できなかった問題に関しては、福岡、山坂らの斜面勾配の重力成分を既存の流砂量式に考慮する方法⁵⁾や、河岸横断形状を関数で現し河岸後退量を求める方法⁷⁾、河岸勾配と水中安息角の関係から土砂移動を行う方法⁸⁾などがある。本研究では福岡、山坂らの手法を用いた。その際、計算メッシュが若干粗いため河岸の急勾配を表現できない問題が生じたため、適宜メッシュ間の距離を斜面勾配が実態に沿うように修正した。

(2) 短期的な河床変動の検証

計算条件は表-1に示すとおりである。対象の洪水ハイドロは図-10に示す上福島と烏川(岩鼻+若泉)のH-Q流量を条件とし、H23.9洪水の再現計算を行った。初期河道地形は出水前のLPデータを基本に水面下を横断測量成果から内挿し設定した。

計算水位は図-11に示すように観測水位を良好に再現している。図-12は河床変動量の実績と計算値を比較したものである。青系色で示した洗掘範囲、赤系色で示した堆積範囲が概ね再現されており、観測所周辺の土砂堆

表-1 短期検証解析条件

項目	内容
対象洪水	H23.9洪水(台風12号+台風15号)
計算区間	利根川：175.5k~186.5k 烏川：0.0k~2.0k
河道条件	利根川：H20測量断面，烏川：H23測量断面
上流端流量	利根川：上福島HQハイドロ 烏川：岩鼻+若泉HQハイドロ
下流端水位	175.5k水位(一次元不定流モデル推定値)
粗度係数	H19.9洪水逆算粗度 (準二次元不等流モデル既往検討結果)
橋の橋脚	新坂東大橋の橋脚を考慮する
河床材料	H24河床材料調査成果 粒度区分10粒径
上流端供給土砂	総流砂：平衡給砂 浮遊砂：沈降・巻上げの動的平衡 粒度分布：合流点上流区間の粒度分布
交換層厚	400mm (最大粒径の2倍程度)

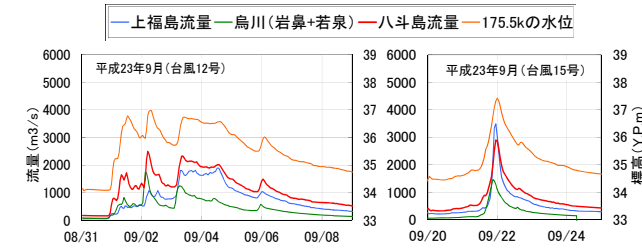


図-10 流量境界条件(左:H23 台風 12 号,右:H23 台風 15 号)

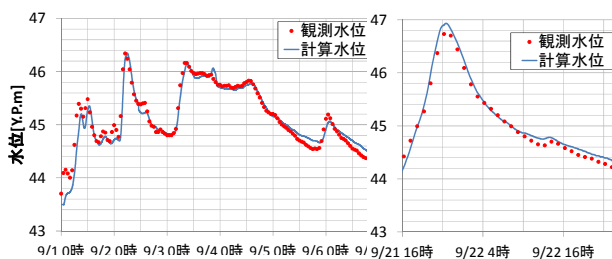


図-11 水位の再現性(左:H23 台風 12 号,右:H23 台風 15 号)

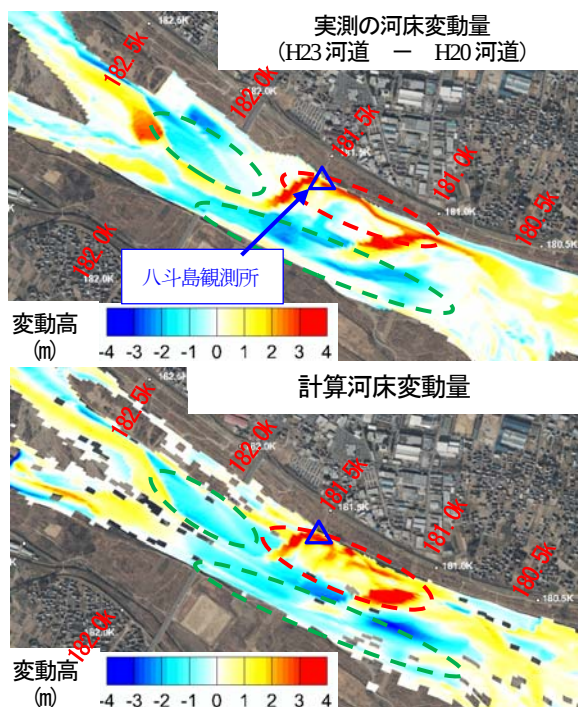


図-12 河床変動量の再現性(上:実績値, 下:計算結果)

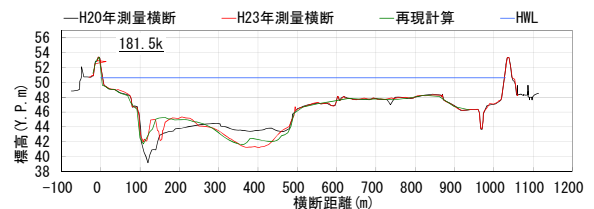


図-13 横断形状の再現(H23 台風 12 号, 15 号後)

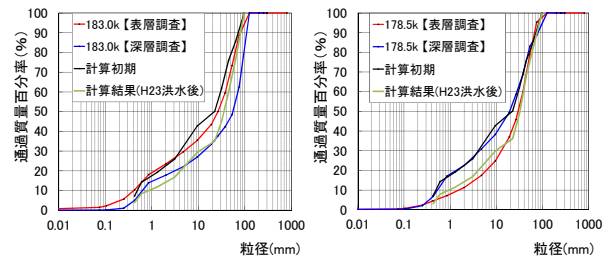


図-14 粒度分布の再現(H23 台風 12 号, 15 号後)

積，上流側の侵食，右岸側の洗掘傾向が表現できている。図-13 は観測所位置の横断面図を比較したものである。八斗島観測所の 181.5k の緑線で示す出水後の計算横断面形は、左岸側で大きく堆積し低水路右岸が洗掘しており、実測(赤線)と合致している。また、図-14 は粒度分布の変化について計算と実測を比較したものである。計算値は調査地点の表層と深層の粒度の範囲内に概ね収まり、洪水による河床材料の質的な変化を概ね再現している。

図-12 の河床変動結果と計算流速ベクトルを重ねたところ、観測所上流の砂州が洗掘され土砂が観測所方向に移動するとともに、右岸側の主流部から左岸に向かう流れにより、洗掘された土砂が八斗島観測所の左岸側に輸送されたと推測される。

(3) 長期的な河床変動の検証

長期的な観点から八斗島観測を含めた利根川上流区間の土砂動態の再現と、今後の河道維持管理に役立てることを目的に長期の河床変動解析の検証を行った。

初期河道は H8 の LP データと横断測量成果により設定し、橋梁の架け替え工事前の平成 8 年から平成 23 年までを対象期間とした。対象洪水は H23.9 洪水を含み平均年最大流量 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水とし、洪水の一連期間を抽出して繋ぎ合わせたハイドログラフを境界条件として設定した。橋脚の設置・撤去、および、砂利採取をその時期に合わせてモデルに取込み、それらの影響を計算に反映させた。河床材料は当時の粒度分布が不明なため、短期検証と同じ条件としたが、河道全体の土砂移動量が実績に比べて少ない結果となった。そこで、平成 23 年の河床材料調査による観測所近傍の比較的粒度の細かい調査結果を河道全体に設定するとともに、細粒分を砂州範囲に設定した。これらの計算条件を表-2 に示す。

図-15 に示す水位計算結果は概ね実測を再現している。図-16 は長期解析前後の変動量を示したものである。計算結果は全体的な河床の洗掘・堆積傾向、および変動量を比較的良好に再現している。赤丸で示した中の島下流

表-2 長期検証解析条件

項目	内容
対象洪水	H10～H23、9のピーク流量 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の主要洪水
河道条件	利根川：H8測量断面、烏川：H23測量断面
上流端流量	利根川：上福島HQ、烏川：岩鼻+若泉HQ
下流端水位	175.5k水位(一次元不定流モデル推定値)
橋の橋脚	新橋、旧橋：考慮する
砂利採取	H20～H23までの砂利採取量(平均掘削深)をH19.9洪水後、該当範囲の計算河床高から引く
河床材料	H23河床材料調査成果 粒度区分10粒径
上流端供給土砂	平衡給砂

部の砂州の延伸や緑丸で示した高水敷や砂州の侵食の様子も良好に再現されている。但し、本川上流域(オレンジ四角)では、堆積傾向が強く上流供給土砂が実績と比べて過剰であったと推察される。H23 洪水終了時の横断形状を図-17 に示す。181.5k における赤線で示した計算結果は桃色線の洪水後の横断形状を概ね再現している。また、178.5k における左岸の砂州の洗掘も再現されているが、河岸の侵食量は実績より過小評価の結果であった。

粒度分布については図-18 に示すように、概ね再現されている地点もあったが、同図に示すように全体的に計算結果は細粒化の傾向が大きく再現性に課題が残った。

図-19 に 177.5k～179.0k 地点の航空写真と計算河床高を示す。計算開始時の平成 8 年時点では 178.5k 付近では河道中央に砂州が形成されており、178.0k 付近で滞筋は合流し左岸よりを流れている。平成 23 年には 178.0k 左岸が水衝部となり河岸が侵食されている。また、右岸には広く砂州が発達している。この様子は計算結果についても同様の傾向が見られる。前述の河岸侵食を考慮することによって、滞筋の蛇行や砂州の移動といった現象を概ね説明することができた。

河床変動解析により長期的な河道の動態を概ね表現できたが、河岸侵食量や粒度分布の再現性については課題も確認された。

4. 人為的要因の影響分析

長期の河床変動計算において、坂東大橋の架け替えの有無を条件とし、計算期末の河道形状を比較することにより橋梁の影響を分析したところ、橋脚の後流域における土砂堆積形状が異なるだけで、観測所周辺に砂州が形成される状況は同じであった。また、砂利採取についても同様の検討を行った結果、砂利採取の影響も直下流の限定的なものであった。以上より、事業の人為的インパクトが八斗島観測所の土砂堆積に与える影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

利根川上流の八斗島観測所周辺において、比較的小規模な出水により土砂堆積した原因を河道基礎資料と数値

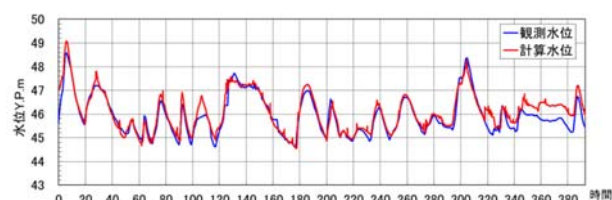


図-15 水位の再現(長期: H10～H23)

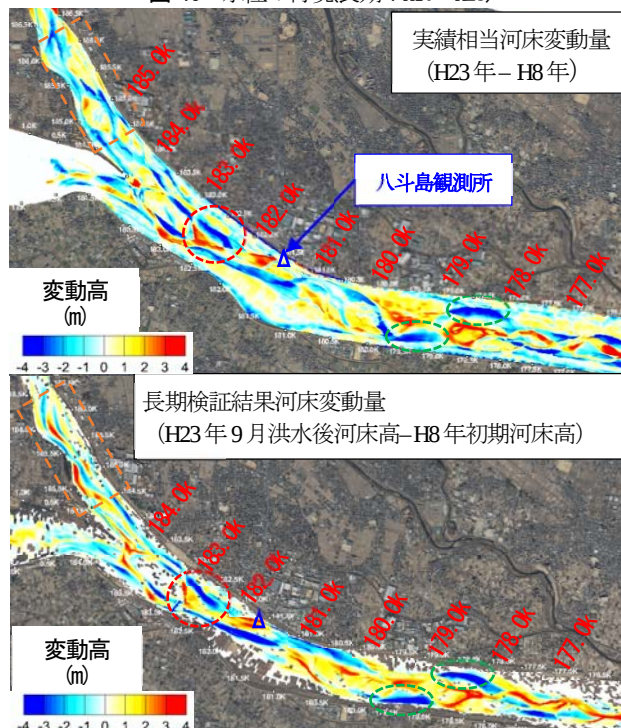


図-16 河床変動量の再現(長期:H10～H23)

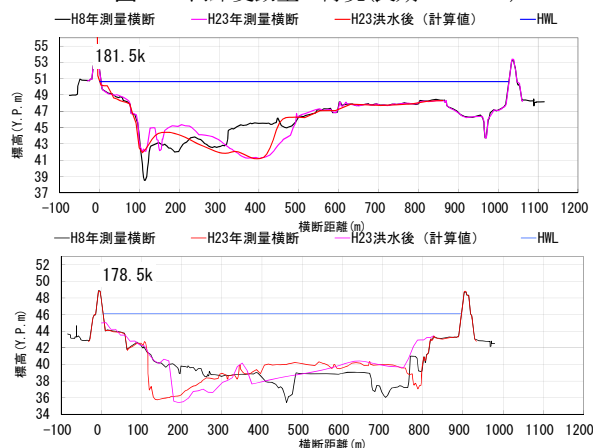


図-17 横断形状の再現(長期:H10～H23)

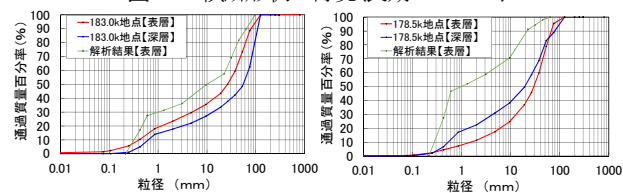


図-18 粒度分布の再現(長期:H10～H23)

解析から検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 細砂～粗石程度の幅広い粒度分布を有し、細粒分の割合が大きい河道の中小洪水による河床変動は、細粒分の土砂移動が重要と考え、移動しない大粒径による面的な遮蔽を考慮して流砂量を評価した。

これによる長期・短期の河床変動解析から、洪水時の水位や河道形状の変化、砂州の移動等が概ね再現された。

- 2) 中の島の形成・発達とこれに伴う利根川本川の河床低下により、烏川と本川の流路が分離されて中の島が下流側へ延伸し、砂州と滞筋流路の位相が下流に向かって前進したことで観測所付近の左岸側が砂州の堆積領域となったことなどが明らかとなった。

6. 解析結果を踏まえた河川管理上の課題

現況河道を初期条件とし、前述した15年間の洪水ハイドログラフを与えて河床変動予測計算を行ったところ、図-20に示すように観測所周辺では堆積傾向が進み、合流点がさらに下流へ移動するなど、河道の遷移過程が予測された。河川管理においてはこのような遷移を踏まえ、想定される状況に適切に対応する必要がある。当面は、観測所周辺の維持的浚渫と砂利採取箇所の工夫により八斗島観測所の観測環境の改善に努めることとしている。さらに、当該箇所では河床材料調査や流砂量観測、流況観測等の現地観測を実施しており、今後、これらの成果を解析に反映し解析の精度を高めていく予定である。また、現地状況のモニタリングを継続的に行い、河道遷移の状況や研究・解析の成果を踏まえ、堰など河川管理施設に配慮したより効率的な河道管理や、必要に応じより効果的な対策工の検討に反映させる。

謝辞：本研究を行うにあたり、群馬大学清水義彦教授より、幅広い観点から様々なアドバイスを頂いた。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺明英, 福岡捷二, Alex George Mutasingwa, 太田勝：複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常2次元解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.427-432, 2002.
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英, 田端幸輔, 風間聡, 牛腸宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価 水工学論文集, 第50巻, pp.1165-1170, 2006.
- 3) 長田健吾, 福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 4) 石神孝之, 箱石憲昭, 坂野章, 宮川仁, 櫻井寿之：河床材料の粒度分布幅の広い河川における河床変動特性の実験的検討および河床変動モデルの開発, 河川技術論文集, 第20巻, pp.265-270, 2014.
- 5) 石神孝之, 坂野章, 中西哲, 箱石憲昭：河床材料の空隙率および交換層厚変化を考慮した河床変動モデルの開発, 河川技術論文集, 第21巻, pp.131-136, 2015.

- 6) 福岡捷二, 山坂昌成：直線流路の交互砂州, 第27回水理講演会論文集, pp.59~69, 1972.
- 7) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄：河岸侵食を伴う河道変動の特性と数値解析法に関する研究, 土木学会論文集 No.621/II-47, pp.23-39, 1999.
- 8) 清水康行, 平野道夫, 渡邊康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.921-926, 1996.

(2016.4.4受付)

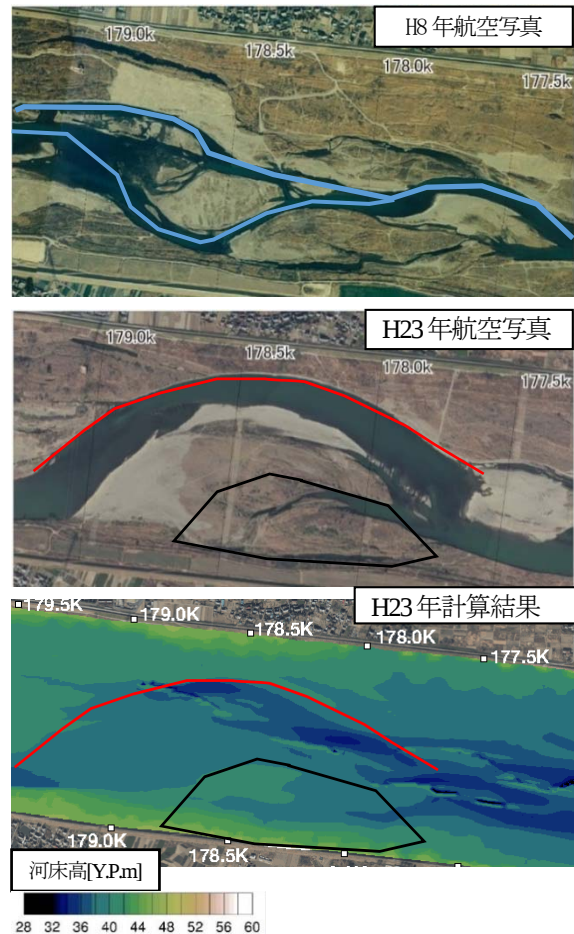


図-19 河岸侵食と滞筋の変遷

(上:H8撮影, 中:H23撮影, 下:H23解析結果)

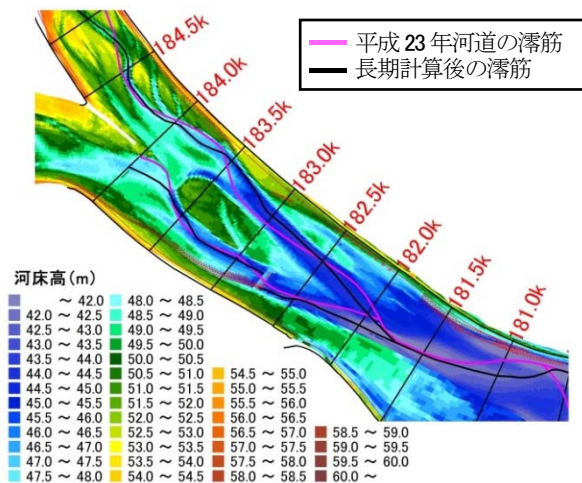


図-20 平成23年河道の滞筋と長期予測後の滞筋の変化