

水理量縦断分布に基づく礫床河道掘削後の 河道変化要因分析と事前察知の可能性

ANALYSIS BASED ON LONGITUDINAL PROFILE OF FRICTION VELOCITY
FOR A GRAVEL RIVER BED VARIATION AFTER EXCAVATION

佐藤慶太¹・武内慶了²・服部 敦³

Keita SATO, Yoshinori TAKEUCHI and Atsushi HATTORI

¹正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 交流研究員(〒305-0804 つくば市旭1)

²正会員 修(工) 同上 研究官

³正会員 博(工) 同上 室長

To confirm the applicability of river bed variation estimating with quasi-2D non-uniform flow calculation, we investigate relationship of actual river bed variation and longitudinal profile of friction velocity ratio of after to before river bed excavation. In the result, reach-scale profile of the ratio gives acceptable agreements with actual river bed variation after excavation. Furthermore, to estimate river bed variation around bend section, we also conduct the flood flow computation with a general-coordinate 2D current model. The result indicates that noted river bed degradation after excavation is involved in progress of gravel bar after river improvement plan, and shows the importance of monitoring in excavated river.

Key Words: gravel river, excavation, river bed variation, longitudinal profile of friction velocity

1. はじめに

近年、河道掘削後の出水によって局所的な河床変動が顕在化し、周辺構造物の治水機能に影響する事例が複数報告されている。これに限らず、河道掘削後の河道は例えば、川幅縮小や河岸再形成等の様々な応答(河道変化)¹⁾を示す可能性があり、これらの河道変化の発生場所や変動量の予測法、抑制する方法等を確立することは、今後の河道管理を考える上で重要な課題と考えられる。

これらの河道変化のコントロールと流下能力向上・治水機能維持の評価を1つの手法で行えることが望ましい。現在では、河道の流下能力の評価や改修計画断面の設定は、準2次元不等流解析法が適用されるのが一般的であり、改修計画立案時には、設定した河道の摩擦速度を利用して簡易的に河床安定性を評価し、必要に応じて河道形状等にフィードバック(再設定)する方法が取られている²⁾。この評価法については、基本的な考え方・目安が示されているものの、冒頭に述べたような事例を踏まえると、その改善が必要である。

過去に大規模な河道掘削が行われた五ヶ瀬川水系北川では、平均年最大流量程度の洪水により顕著な河床変動が生じている。本論文では、これを1事例として取り上げ、

まず、北川の河道掘削前後の河道水理特性の変化とそれに伴う河床変動特性との関係について調べる。次に、その結果から、準2次元解析法による摩擦速度の縦断分布の変化から起こり得る1次元的な河床変動を簡易的に判断する方法(読み方)について提案する。さらに、この中で最も顕著な河道変化を示した本村地区湾曲部周辺については、平面流解析を合わせて実施し、摩擦速度の空間分布からその河道変化を予測することを試みた。

2. 五ヶ瀬川水系北川における河道改修の概要³⁾

流域面積587.4km²、幹線流路延長50.9kmの北川は、五ヶ瀬川水系最大の支川である。河口部付近の五ヶ瀬川合流点から上流へ約15kmの区間では、典型的な谷底平野が形成されており、9.0~12.0キロポスト(以下、k.p.とする)に位置する野地区・本村地区で大きく蛇行する(図-1)。これらを含む4.2~15.0k.p.までの区間は、河床勾配1/1,500~1/1,000、25.8~35.4mmの中礫を中心とした河床材料となっており、セグメント2-1に分類される。

北川の河道改修は1948年頃から行われており、本村地区湾曲部では、堤防整備とともに外岸(左岸)濡筋部の河床高との比高が4m程度あった内岸(右岸)高水敷が外

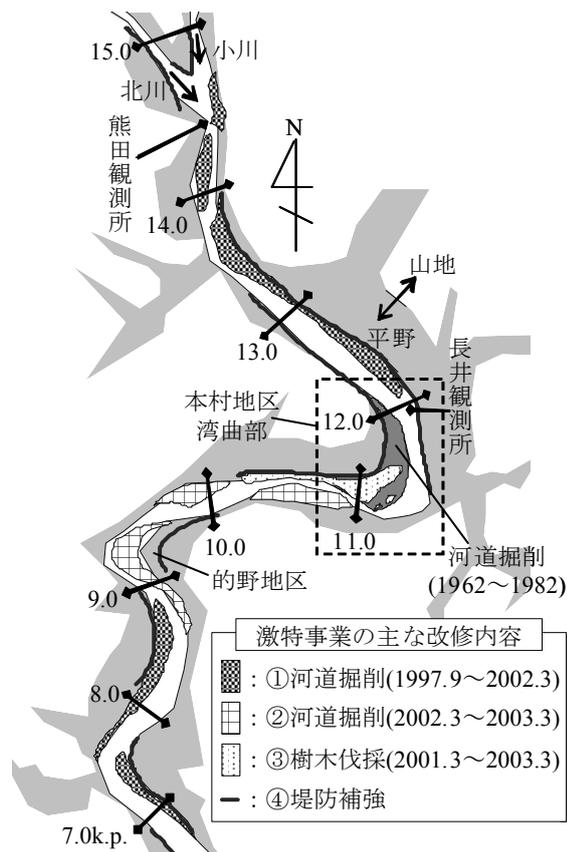


図-1 本村地区周辺の河道平面形状と河道改修の概要
 (①の期間のうち、激特事業採択後1~2年間でほぼ全区間掘削、その後は主に整地等、樹木伐採位置は、紙面の都合上、本村地区周辺のみを図示)

岸濠筋と同程度の高さまで掘削されている(図-1, 1962~1982年掘削)。その後、1997年9月の既往最大洪水(図-2, 熊田観測所: 約 $5,100\text{m}^3/\text{s}$)を契機に採択された激甚災害対策特別緊急事業(以下、激特事業と呼ぶ)が実施されている。そこでは、本村地区湾曲部(11.0~12.0k.p.)を除いた五ヶ瀬川合流地点から上流15kmのほぼ全川にわたる河道掘削が行われており、樹木伐採、堤防嵩上げ等も合わせた大規模河道改修が行われた(図-1, ①~④)。河道掘削は激特事業実施初期から約6年にわたり実施されており、その履歴としては、まず、事業初期(採択後1~2年間)に的野地区下流と本村地区上流区間(図-1①, 以下、河道掘削①とする)で、事業最後の1年間に的野地区~本村地区湾曲部下流部(同図②, 以下、河道掘削②とする)でそれぞれ河道掘削が行われた。この間の河道変化は1990年以降、12回にわたる横断測量でほぼ50m間隔(一部200m)に計測されており(図-2)、縦断的に密に得られている。なお、湾曲部周辺の樹木伐採・間伐は、①~②の期間に実施されている(同図③)。

3. 摩擦速度縦断分布を用いた簡易的な河床変動予測法の提案

平均年最大流量を対象とした準2次元解析結果に基づい

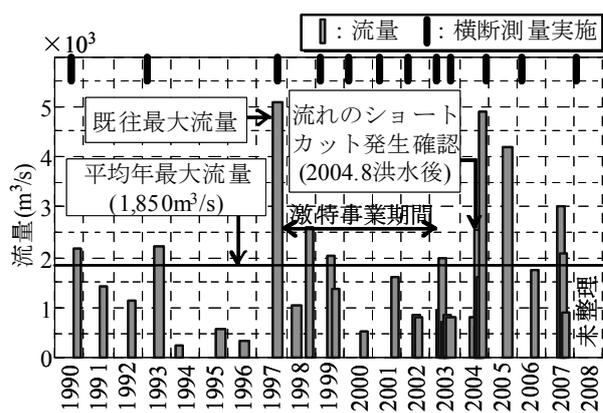


図-2 熊田観測所における既往洪水と横断測量時期
 (1997年以降は $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上を図示、2006年からは熊田観測所廃止のため、長井観測所のデータ利用)

て河道掘削前後の水利諸量縦断分布の変化とそれに伴う河床変動特性の変化を河道縦断的に調べる。そこから、摩擦速度縦断分布を用いた簡易的な河床変動予測方法について提案する。なお、分析に先立って、既往洪水の痕跡水位の再現計算を行い、河道条件の設定等の妥当性を確認しているが、その結果は紙面の都合上、省略する。

(1) 激特事業前の水利縦断特性と河床変動特性

激特事業前における平均年最大流量流下時の水位や河床高、摩擦速度等の水利諸量の縦断分布を示す(図-3(a))。これを見ると、1990.7~1997.9の期間に既往最大洪水を経験しているにもかかわらず、両者の水位縦断分布はほぼ一致している。また、この期間の河床高変動量(図-4上図)を縦断的に見ると、局所的に大きな変動を示してはいるものの、平均的に50cm程度の変動幅となっている。約7年間の河床変動としては比較的小さく、安定的な河道が形成されていたと見なすことができる。ただし、激特事業前の河道掘削区間である本村地区湾曲部上流(11.4~12.2k.p.)では河床上昇を示しており、同区間の摩擦速度を見ると、下流に向かって摩擦速度が減少する縦断形状となっている(図-3(a))。一般的に、河床高は摩擦速度の縦断的な増減に応じて低下・上昇する²⁾ことが指摘されており、これに対応した河床変動であることが分かる。しかしながら、それよりも小さなスケールで現われる河床変動に対しては必ずしも摩擦速度の増減に対応しておらず、数kmスケール(リーチスケール程度)で摩擦速度の縦断変化を捉えることが重要である。

(2) 激特事業着手~完了後の水利縦断特性と河床変動特性

図-3(b)に激特事業前、途中段階、完了後(1997.9~2003.3河道)の水利諸量の変化を示す。河道掘削①~②の進捗に伴い、段階的に水位が低下しており、事業完了後には縦断的に1~1.5m程度低下している。特に本村地区湾曲部周辺より下流の水位低下量の違いは、それぞれ途中段階の2001.3河道では9.0k.p.下流の河道掘削、2003.3河

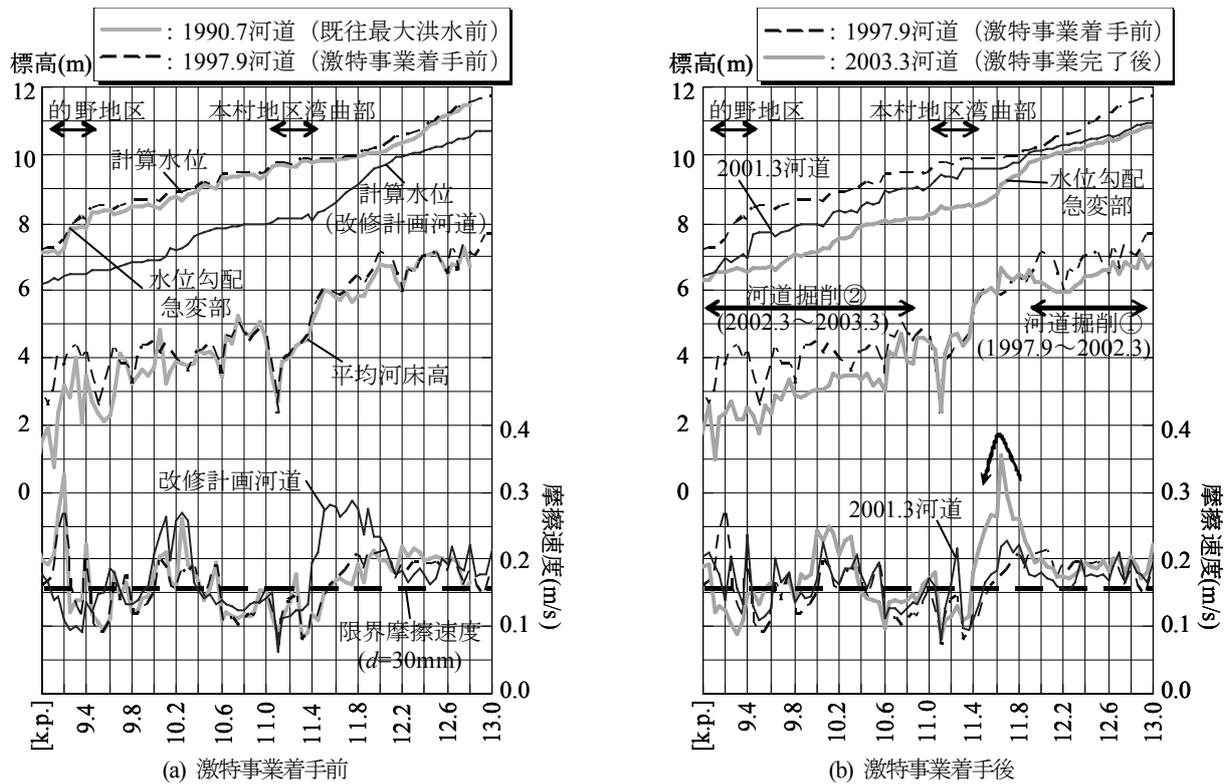


図-3 激特事業前後の河道水理特性の変化

(平均年最大流量流下時、1997.9河道の水位・平均河床高・摩擦速度は両図で同一、右図①～②は図-1に対応)

道では9.0～11.0k.p.区間の河道掘削の効果によるものである。河道掘削が実施されていない11.0～12.0k.p.の区間は、縦断的には相対的に河床が高くなるため、2003.3河道の水位はそのような河床高に合わせた縦断形状となっている。これにより、事業前は的野地区周辺に位置していた水位勾配急変部が、本村地区湾曲部の直上流部（11.6～12.0k.p.）に移動している。

摩擦速度に関しては、2001.3河道では1997.9河道と比べてほぼ同様な値、縦断形状となっているのに対して、2003.3河道は変動量が大きく、縦断分布も鋭敏に増減する区間（同図、11.4～11.8k.p.の矢印）が一部現われた。これらの変化は、1997.9河道と各河道の水位縦断勾配の違いに対応しており、特に河道掘削②が水位・摩擦速度縦断形の変化に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

激特事業期間中においては、人為的な河道掘削①以外には、河床高の大きな変化が見られなかった。これは、摩擦速度の縦断形状が安定的な河道と見なすことができた1997.9河道とほぼ同じであるためと推察される。一方、事業前と同程度の最大外力（図-2、2004年10月洪水）を受けた事業完了後の河道は、全体的に河床変動幅が大きくなるとともに、事業着手前に河床上昇傾向を示した区間で河床低下が発生する等、事業完了前後で河床変動特性が大きく変化している（図-4 上図、2003.3～2008.1）。また、最も大きな河床低下を示した11.8k.p.は河道掘削②の上流端から1km程離れた場所に位置しており、顕著な河床変動が掘削区間の端部で生じていない点は、本事例の特徴である。

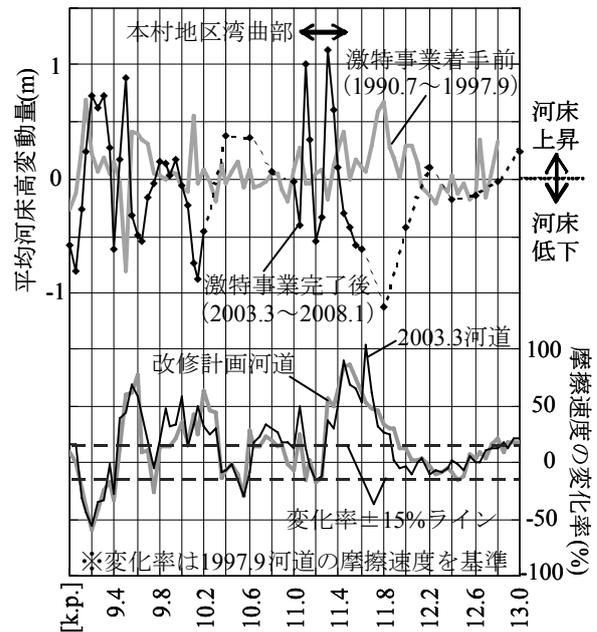


図-4 激特事業前後の河床変動特性の変化と摩擦速度の変化率の関係（平均河床高変動量の実線は50m間隔、点線は200m間隔の横断測量実施区間）

(3) 摩擦速度縦断分布による河床変動の簡易予測法の提案

図-4 下図に、1997.9河道の摩擦速度 U_{*a} を基準とした2003.3河道の摩擦速度 U_{*b} の変化率($=U_{*b}/U_{*a}-1$)の縦断分布を示す。そこでは、河道計画において河床安定の簡易的な判断指標²⁾となっている変化率±15%の基準ライン

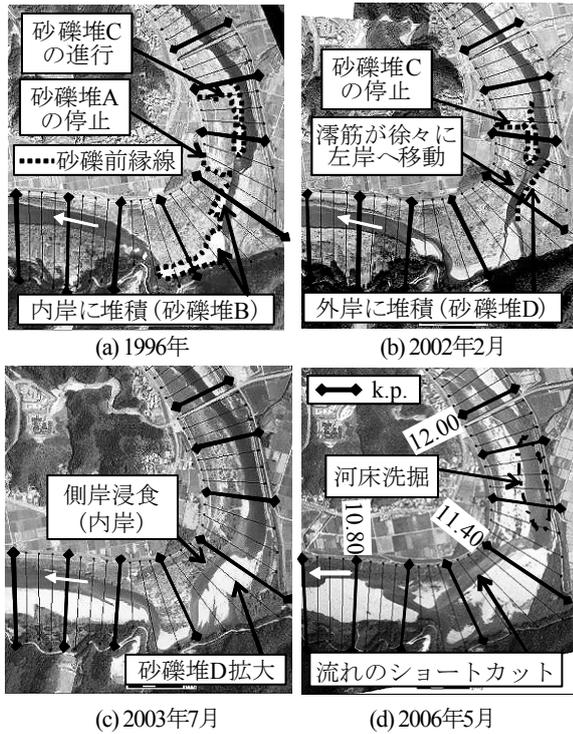


図-5 本村地区湾曲部における河道の経年変化 (a)~(c)については、文献③を基にコメントを追記

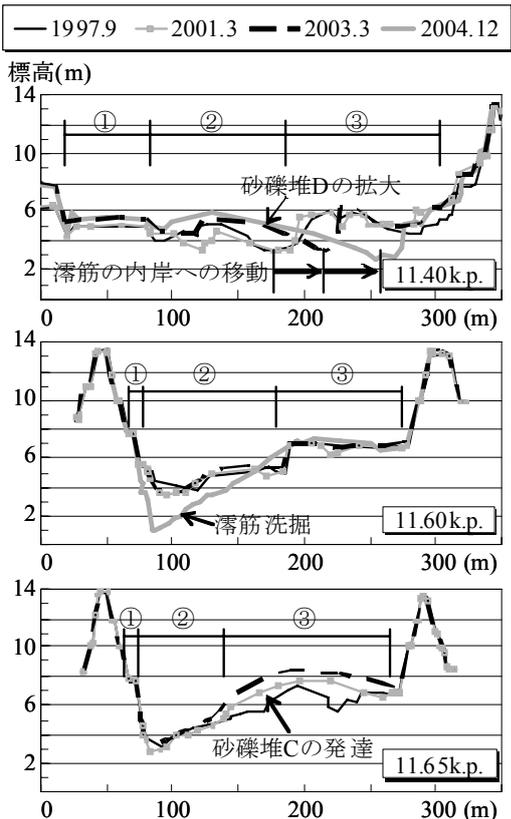


図-6 本村地区湾曲部周辺の横断形状の経年変化 (①~③は断面変化量算出の分割領域を表す)

も示している。2003.3以降の河床高変動量の縦断分布と合わせて見ると、縦断的に1km程度のスケールで現われる変化率の増減区間と河床低下・上昇区間が概ね対応し

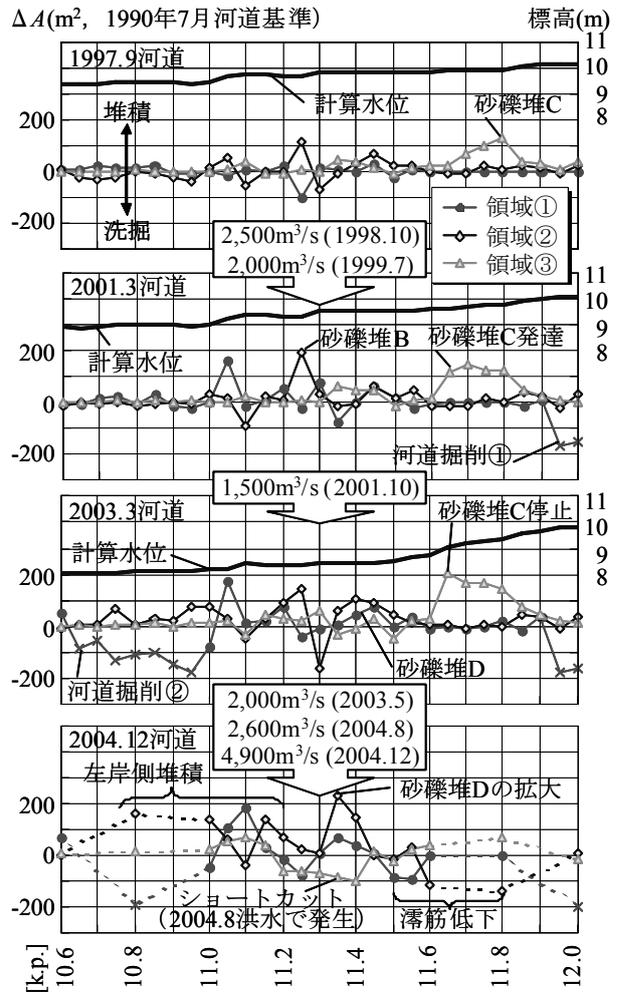


図-7 湾曲部周辺における断面変化量 ΔA の縦断分布の経年変化と出水履歴 (計算水位は図-3(b)と同一、出水履歴は1998年以降のピーク流量 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ 以上を記載、2004.12河道の点線は200m間隔横断測量実施区間)

ていることが分かる。摩擦速度の縦断形状では不明瞭であった $9.0\sim 9.8\text{k.p.}$ 区間においても、同様の傾向が明確に現われている。このように基準ラインのみにとらわれず、リーチスケール程度の縦断形状から河道掘削後の河床変動を予測する(読む)ことが重要である。

(4) 簡易予測法の適用性と限界

上述した方法を改修計画時点の河道変化予測に適用する。1997.9河道の横断形状を基に設定された改修計画河道における平均年最大流量流下時の水理諸量縦断分布を図-3(a)に示す。水位や摩擦速度の縦断形状は、激特事業完了後の2003.3河道と概ね一致しており、改修計画河道の摩擦速度の変化率も2003.3河道とほぼ同じ縦断分布を示している(図-4下図)。このため、上述したような考察を通じて、河床低下・上昇区間あるいは顕著な河床変動が生じ得る縦断的な位置を概ね想定することが可能であり、それに従えば、本村地区湾曲部とその直上流部は着目すべき区間の1つとなる。実際に各区間においては、堆積・洗掘などの治水機能低下への影響も懸念される現

象が生じており（図-5(c),(d)），危険箇所の1次抽出法としての基本的な有効性を有している。しかしながら，この予測法は縦断的に密に測量された横断形状の情報から得られたものであり，測量の縦断間隔の違いによる摩擦速度の縦断分布の変化について今後も検討する必要がある。また，準2次元解析結果からは後述する湾曲部周辺の河道変化を予見させる水理特性の変化は確認できず，湾曲部の河道変化に対しては平面流解析が必須である。

4. 平面流解析に基づく湾曲部周辺の河道変化予測

本村地区湾曲部周辺で生じた河道変化の実態を整理するとともに，平面流解析に基づく摩擦速度の空間分布から，その河道変化を予測することを試みる。

(1) 本村地区湾曲部周辺における河道変化

本村地区湾曲部内岸の高水敷掘削（図-1）以降から激特事業完了直後までの河道変化は，文献3)において概ね4つの砂礫堆（図-5，砂礫堆A～D）の動きとして捉えられる。ここでは，これらの砂礫堆の経年的な挙動を縦断的・定量的に把握するために，横断面内を濬筋部とその左右岸の3領域（図-6，領域①～③）に分割してそれぞれの河床高を算定する。各領域は，1990年の航空写真や植生の繁茂状況を参考に主に地被状況の違いで分割されており，1横断測線の算定幅と分割位置は各年代間で同一とし，各領域の河床高データの経年変化を見るために，1990年河道を基準とした河床高変化量 Δz を求めた。ただし，分割領域の算定幅が小さい場合には，断面全体の河床変動への寄与が小さいにも関わらず，大きな河床高変化を示す可能性があるため，変化量を評価する指標として，各領域の河床高変化量 Δz に各算定幅 B を乗じた量 ΔA （ $=\Delta z \cdot B$ [m²]，以下，断面変化量と呼ぶ）を採用した。

図-5や図-6とともに，断面変化量の縦断分布（図-7）を経年的に見てみると，まず，激特事業着手前（1990.7～1997.9）では，ほぼ停止している砂礫堆Aの動きは変化量として現れないものの，この間発生した既往最大洪水等による砂礫堆BやCの発達が顕著である（河道変化I）。次に，事業着手後（1997.9～2003.3）では，河道変化Iに加えて砂礫堆Dの発達及び湾曲部濬筋の内岸への浸食開始（河道変化II）が始まっている。最後に，事業完了後（2004.12）に顕在化した変化としては，湾曲部内岸砂州の浸食拡大や外岸砂礫堆Dの拡大，湾曲部直上流部の濬筋洗掘，2004.8洪水で発生した流れのショートカット（図-2）が挙げられ（河道変化III），これ以降大きな変化は無かった。断面変化量を見ると，2003.3河道までは砂礫堆Cの発達が最も大きく，激特事業完了以降の2004.12河道では，砂礫堆C対岸の濬筋低下や砂礫堆Dとその下流部における堆積が顕著であることが分かる。また，事業完了後は，平均年最大流量程度の出水後においても図-5(c)のように砂礫堆Dが拡大するなどの河道変

化が生じており，河道掘削②をきっかけとして湾曲部の河道変化特性が大きく変化している。さらに，治水機能のみならず生態系への影響も懸念される流れのショートカット（図-5(d)）は，過去約60年間の航空写真による河道変遷調査³⁾において1度も確認されておらず，このことも河道掘削②の影響の大きさを表している。このように，準2次元解析結果からは縦断的な洗掘・堆積区間として抽出されたものの，その変化実態はそれのみにとどまらず，いくつもの河道変化が複合的に生じていた。

(2) 平面流解析に基づく湾曲部周辺の摩擦速度空間分布

湾曲部周辺を対象とした平面2次元流況解析を実施し，得られる摩擦速度の空間分布から，上述した河道変化IIIの予測を試みる。ここで用いる解析モデルは，長田⁴⁾による非定常性を考慮した一般座標系流れの連続式・運動方程式をベースとし，移流項に対しては3次精度差分式を適用した。計算条件の概要としては，同一セグメントの3.8～14.8kp.の区間を対象とし，激特事業完了（2003.3河道）後の河道条件で，熊田観測所における2003年5月出水時のハイドロデータを与えている。この洪水はピーク流量が平均年最大流量とほぼ同程度（図-2）である。また，河道掘削の有無による水量分布の違いを見るために，1997.9河道で同一流量ハイドロデータを与えた計算も別途実施した。なお，計算結果の妥当性については，各河道条件下において発生した洪水痕跡水位と計算水位の比較を通じて確認している。

図-8(a)には，洪水流量ピーク時の本村地区周辺の摩擦速度のコンター図を示す。両河道の結果を見ると，2003.3河道における結果は，1997.9河道に比べて摩擦速度が全体的に大きく，河道掘削前後の違いを明確に表しており，摩擦速度の縦断的な増減区間が準2次元解析結果の縦断分布（図-3）とも概ね一致している。特に，準2次元解析結果において鋭敏な縦断変化が現われた11.6kp.付近では，平面流解析においても左岸濬筋部を中心に局所的に増大した分布を示している。その縦断位置は砂礫堆Cの前縁線に相当しており，発達した砂礫堆が左岸濬筋部への流れの集中を引き起こし，河道掘削②と相まってこのような摩擦速度の空間分布を形成したと考えられる。

(3) 湾曲部周辺の河道変化予測

上記の平面2次元解析結果を基に，模擬的に河床変動量を推定し，濬筋洗掘と流れのショートカット発生について予測することを試みた。ここで対象とする洪水は，激特事業完了後（2003.3河道）から，流れのショートカット発生が確認されるまでに発生した平均年最大流量以上の2洪水（2003年5月と2004年8月洪水）とする。河床高の時空間変化を求めるためには，厳密には計算領域全体において河床高変化に関する連続式を解く必要があるが，ここでは，以下の方法で簡易的に算定する。まず，河床材料粒径 $d=30$ mmとした移動限界摩擦速度（岩垣式）より

大きい摩擦速度を示す計算メッシュにおいてのみ、芦田・道上式を用いて単位幅当たりの掃流砂量 q_b を求める。次に、流速ベクトルと計算メッシュの縦断方向が概ね一致することを確認し、その方向に流砂が運ばれると仮定して、各メッシュの実質的な砂礫量（流入量と流出量の和）の増分 Δq_b を各時間ステップで求め、それらの総和 $\Sigma \Delta q_b$ を堆積・洗掘の指標とした。

その結果（図-8(b)）、1997.9河道においては湾曲部で顕著な堆積場所は見受けられないものの、2003.3河道では摩擦速度が局所的に増大した濡筋部で洗掘傾向、その下流の湾曲部外岸側に堆積傾向が現われており、濡筋洗掘により発生した河床材料が湾曲部外岸に堆積したことを示している。このため、後者の河道条件においては、図-5や図-6に示される濡筋部の河床洗掘と砂礫堆Dの拡大は予測可能であると考えられる。ただし、これらの河道変化の要因である摩擦速度空間分布の形成には、1997.9（改修計画立案）以降に発達した砂礫堆Cが大きく関与しており、その発生位置と変動量等を適切に予測するためには、抽出された危険箇所付近において詳細な河道変化モニタリングを実施することが重要である。また、流れのショートカットが生じた湾曲部内岸では、平面流解析においても洗掘傾向を示す明確な結果は得られておらず、その発生を直接予測することは困難であった。当時、現地では砂礫堆D拡大の時期に合わせて内岸側が側方浸食された形跡が確認されている³⁾。このことから、激特事業における樹木伐採（図-1③）に伴い、砂州上の流れに対する抵抗が減少し掃流力が増大したことや、砂州が裸地化したため、砂州上の砂礫が移動し易くなったことも発生要因として考えられる。そのため、この現象発生メカニズムを理解するためには、これらの物理的な変化を河道条件に取り込んだ上で、上記の側方浸食過程を考慮した河床変動解析が必要である。なお、河道管理の観点からは、モニタリング等により、現地で生じ得る河道変化を定性的にでも想定しておくことが重要である。

5. おわりに

本論文で得られた主要な結果を下記に示す。

- ①五ヶ瀬川水系北川を対象として、河道掘削後の河床変動と掘削前後の摩擦速度の変化率との関係を調べたところ、両者の数km程度の縦断変化が概ね対応していた。そこから準2次元解析結果に基づく水理諸量縦断分布を利用した河道掘削後の河床変動の簡易予測法を提案した。
- ②平面流解析の結果、湾曲部周辺の顕著な河床変動には、直近の河道掘削のみならず、それ以前の河道掘削区間で進行した河道変化も関係していたことが示された。このことは、危険箇所として抽出された区間における継続的な河道変化モニタリング実施の重要性を示唆している。

今後は、横断測線の縦断間隔の違いによる摩擦速度縦断分布の変化にも着目しつつ、河床変動が顕在化した他

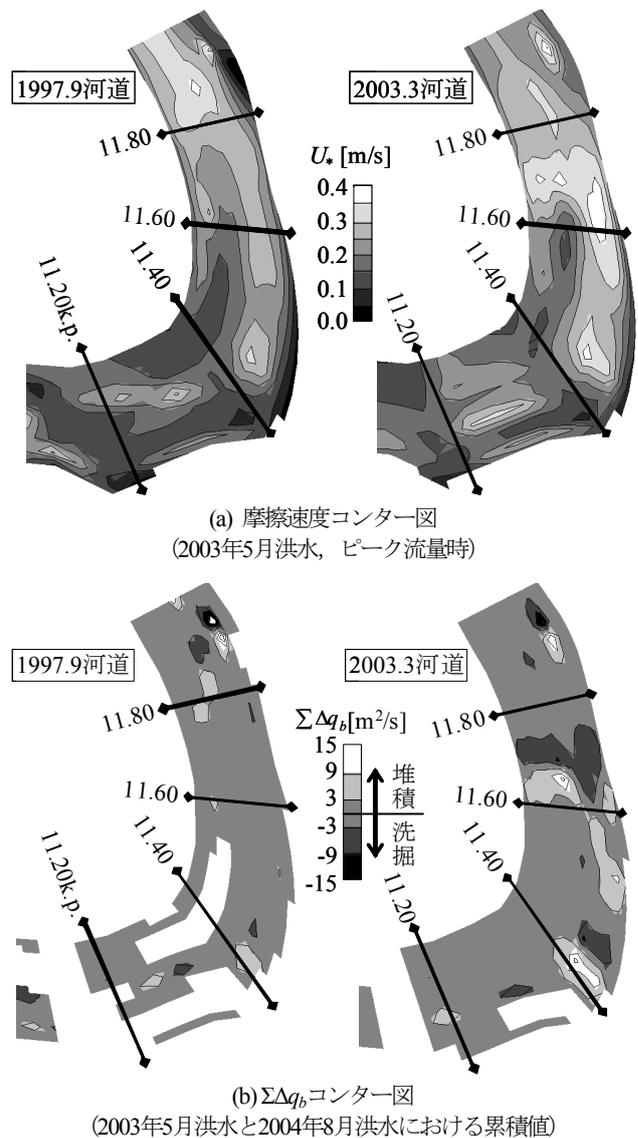


図-8 本村地区湾曲部周辺の摩擦速度の空間分布と堆積・洗掘位置の関係 ((b)では $\Sigma \Delta q_b$ が有意な値にならない場合は白抜きとした)

事例の分析を進める。さらに、顕著な河床変動を抑制する河道掘削方法等についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 藤田光一：河道セグメント2における川幅縮小のメカニズムと予測技術～掘削後の河道応答を「もっと読もうとする」河川技術のために～、第43回水工学に関する夏期研修会講義集、pp.A-7-1-A-7-20, 2007.
- 2) (財) 国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き、山海堂、pp.21-74, pp.139-162, 2002.
- 3) 河川生態学術研究会北川研究グループ：北川総合研究－激特事業対象区間を中心として－、pp.1.5.1-1.5.21, pp.2.2.1-2.2.16, 2004.5.
- 4) (社) 土木学会：水理公式集例題プログラム集（平成13年版）第2編可川編例題2-8, 2001.

(2010.4.8 受付)