

洪水時における網状砂州の移動による水衝部の 変化とそれに伴う水面模様の変化

DEFORMATION OF WATER EXPOSED POINT AND WATER SURFACE BY
BRAIDED RIVERBEDS DUE TO FLOOD FLOWS

森本有祐¹・立松明憲²・福岡捷二³・竹村吉晴⁴

Yusuke MORIMOTO, Akinori TATEMATSU, Shoji FUKUOKA and Yoshiharu TAKEMURA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学部都市人間環境学専攻
(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27)

²正会員 国土交通省 中部地方整備局 静岡河川事務所 (〒420-0068 静岡県静岡市葵区田町3丁目108)

³フェロー会員 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27)

⁴正会員 中央大学研究開発機構 機構准教授 (同上)

安倍川は中下流域に網状流路を持つ扇状地河川であり、洪水時における水衝部の移動機構の理解と予測が河川管理上の課題になっている。水深が浅く地形の起伏の大きい網状流路では、洪水時の水面模様や砂州の形状や水衝部位置等が反映されやすいと考えられている。両者の関係性の解明は洪水時における河岸の侵食危険箇所の推定等、危機管理上重要な情報になる。本研究では、安倍川網状流路を対象とした非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析に基づき、洪水時の砂州の挙動と水衝部位置の移動機構、水衝部の移動状況と洪水時の解析水面の模様の変化を検討した。この結果、洪水減水期には流砂の非平衡性が強まり、砂州と水衝部の移動が活発になることを示した。さらに、洪水減水期では流れが砂州から滞筋へ落ち込む箇所の水面に線状の筋が形成され、水衝部の移動にしたがって水面模様も下流へ移動する傾向が見られることから、水面模様の時間変化から水衝部の移動状況が把握可能であることを解析と実測から示した。

Key Words: braided riverbeds, flood flows, water surface variation, flow attack point, Abe river

1. 序論

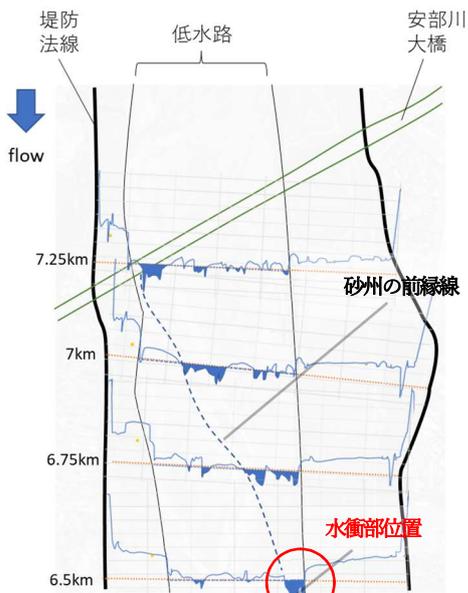
安倍川は、中下流域に石礫から砂まで幅広い粒度分布で形成された網状流路を持つ扇状地河川である。安倍川は河床勾配に対して粒径が比較的小さく、土砂移動が活発な河川である。そのため、河岸や堤防の侵食対策を検討する上で、洪水時の砂州の移動に伴う水衝部位置の変化を把握することが求められている。

木下は、洪水中に撮影された水面の映像データを用いた水面流速分布の解析手法によって河床形状および流況を推定できる可能性を示している¹⁾。

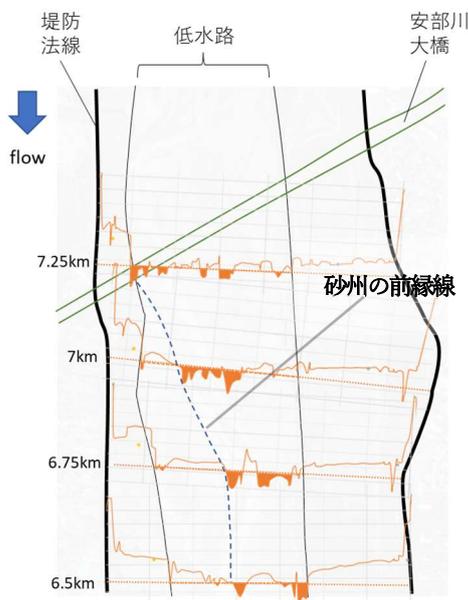
図-1は平成12年9月洪水(手越観測所 観測ピーク流量: 3190 m³/s)前後の安倍川6.5km~7.25km区間における横断測量結果を縦断的に並べ、砂州および滞筋の位置を示したものである。横断面図において塗りつぶされている箇所は、低水路平均河床高より低く、平水時に流水があると見られる箇所を示す。また、図中の破線は横断

面図からわかる砂州の前縁線を示しており、図-8(a)の安倍川の航空写真から見られる滞筋の波長の長さとおおむね一致している。洪水前(図-1(a))は、7.5km~6.5km右岸にかけて砂州が存在しており、その前縁線は7.25km右岸から6.5km左岸にかけて形成されている。洪水後(図-1(b))になると、初期段階の水衝部の位置であった6.5km左岸では砂州の前縁線が右岸側に移動している。これは、洪水中の砂州の前進により水衝部位置が下流に移動したものと推定できる。図-2に平成12年9月洪水時の安倍川7km~6.5km区間を撮影した航空写真を示す。これによると、安倍川7km右岸付近から安倍川6.75km左岸にかけて線状の模様が形成されており、図-1(a)に示した砂州の前縁線と同様な形状の水面模様が現れていることが分かる。この水面模様は、流れが砂州から滞筋に落ち込むことにより形成されたものと考えられる。

安倍川の網状流路は、地形が複雑な三次元性を持つことに加え、粒径が砂から石礫まで幅広い粒度分布を持つ。これまで著者らは、近年の主要洪水である平成26年10月



(a) 平成12年9月洪水前



(b) 平成12年9月洪水後

図-1 平成12年9月洪水前の安倍川7.25km～6.5kmにおける横断測量結果

の台風18号洪水を対象に竹村・福岡²⁾のQ3D-FEBS, 修正長田・福岡モデル³⁾, 後藤・福岡の乱れによる掃流砂から浮遊砂への巻き上げを考慮した浮遊砂輸送モデル⁴⁾を用いて, 洪水流の非定常性と三次元性, 粒径別の流砂の非平衡運動を考慮し, 安倍川流路の洪水流・河床変動解析を行い, 現地で行っている洪水流・河床変動を説明してきた⁵⁾. その結果, 本解析手法では地形変化に応じた三次元的な流れ場が高精度に計算できる. 洪水時の砂州や河岸の水衝部の移動状況が水面の様相として反映されている可能性が高い. 安倍川は粒径が比較的大きく川幅水深比が大きいため, 図-3に示す黒木・岸の中規模河床形態の領域区分図において示された単列砂州, 複列砂州と比べて分類が大きく異なっており, この領域に



図-2 平成12年9月洪水時の安倍川7km～6.5kmにおける水面を撮影した航空写真

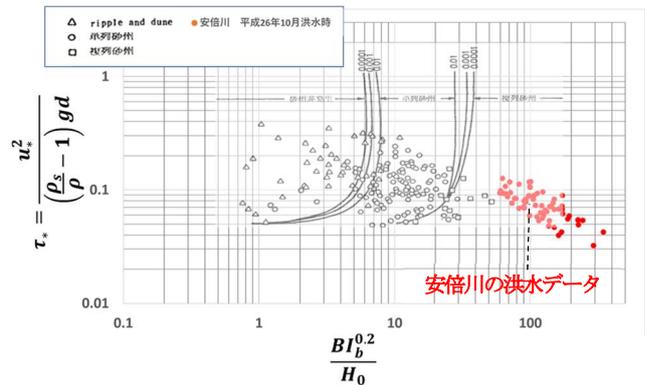


図-3 黒木・岸の中規模河床形態の領域区分図と安倍川の洪水データの比較

において河床変動の影響が水面に現れる可能性が高い.

本研究では上述の解析結果と観測データに基づいて, 洪水時の流れの水面模様と河床形状の時間変化から水衝部の移動状況の把握を目的としている.

2. 平成26年10月洪水による安倍川網状流路の河床変動解析

(1) 解析条件と解析手法

最初に, 本研究で用いる著者らによる安倍川網状流路の洪水流河床変動解析の概略を示す.

図-4と図-5に安倍川の流域図と各観測所での観測, 解析流量ハイドログラフを示す. 解析対象とした平成26年10月洪水では基準地点である手越観測所(安倍川4km, 計画高水流量6000 m³/s)において, ピーク流量は3480 m³/sを記録した. 解析区間は, 本川は河口から22km区間とし, 支川藁科川は合流点～10km区間, 支川安倍中河内川は合流点～5km区間とした. 上流端境界条件には, 安倍川20km左岸の観測水位ハイドログラフ, 藁科川9.75km(奈良間)の観測水位ハイドログラフを与えた. 安倍中河内川の上流端境界条件には, 流出解析で求めた流量ハイドログラフを与えた. 下流端境界条件には焼津

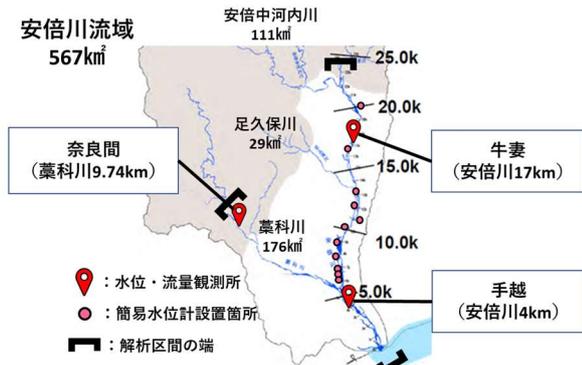


図-4 安倍川の流域図

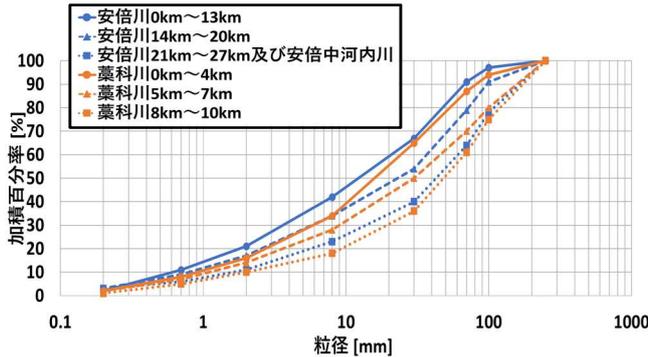


図-6 安倍川、葦科川の解析に使用した粒度分布

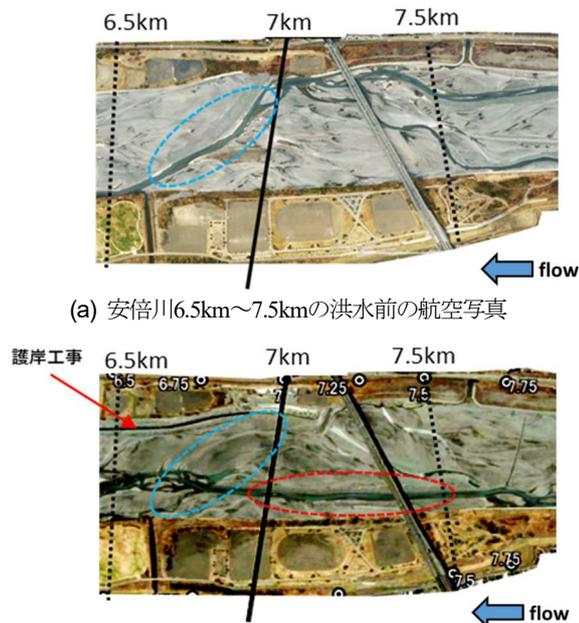


図-8 安倍川6.5km～7.5km区間における実際の洪水前後の航空写真と洪水後の水深コンター図

験潮場の潮位ハイドログラフを与えた。粗度係数は、各時間の解析水面形が痕跡水位や図-4に示す水位観測所及び簡易水位計から得られた観測水面形とほぼ一致するように調整しており、解析区間全域において $0.025m^{-1/3} \cdot s$ を用いた。解析に用いた河床材料粒度分布は図-6に示す通りであり、安倍川、葦科川は平成16年度～平成26年度の河床材料調査結果に基づいて縦断的に区切って設定した。安倍中河内川については安倍川22km右岸側にお

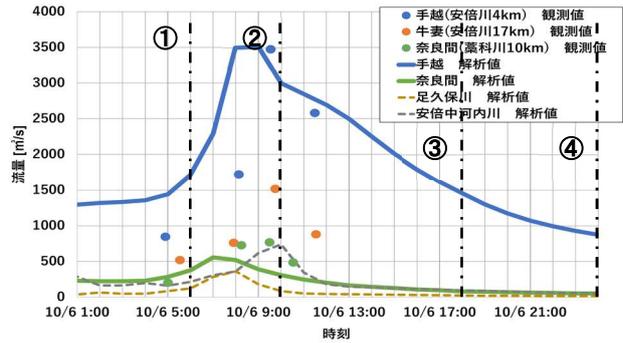


図-5 安倍川の観測・解析流量ハイドログラフ

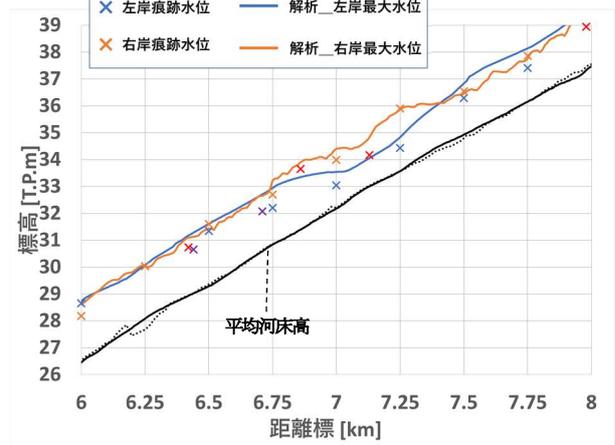


図-7 安倍川6km～8kmの観測水面形と解析水面形の比較

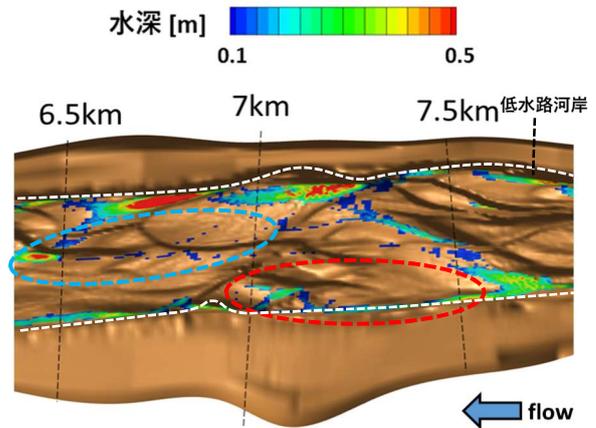
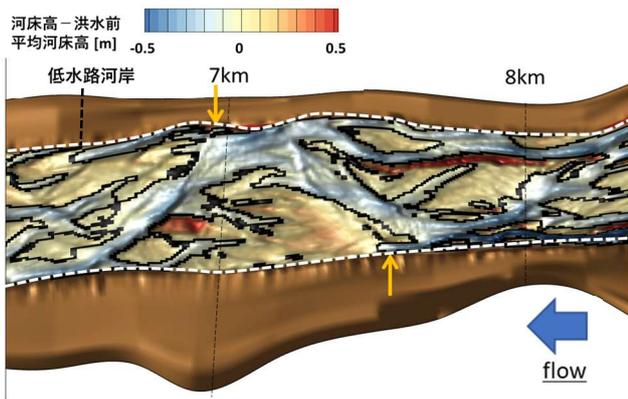


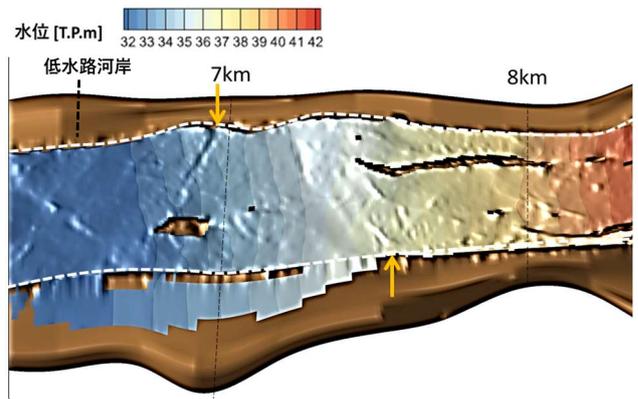
図-9 洪水後の解析水深コンターの解析結果

ける河床材料調査結果を基に与えた。洪水前の地形は、平成25年度のLP測量データ、横断測量データに基づいて与えた。

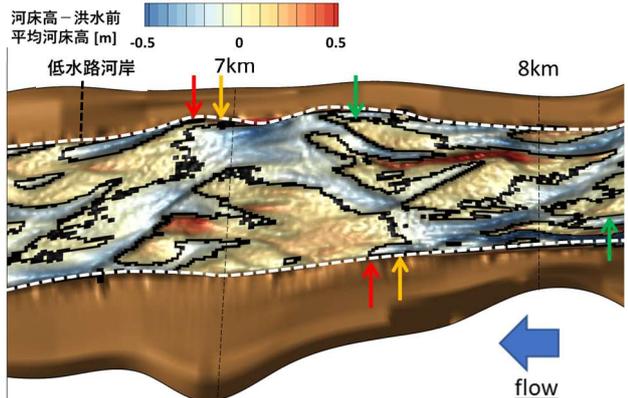
解析手法については、流れには竹村・福岡²⁾のQ3D-FEBS、流砂量及び河床変動量には修正長田・福岡モデル³⁾、後藤・福岡の乱れによる掃流砂から浮遊砂への巻き上げを考慮した浮遊砂輸送モデル⁴⁾を用いた。図-7は観測水面形と解析水面形の時間変化の比較を示している。図-7は観測水面形と解析水面形の時間変化の比較を示している。解析水位は各時間の観測水位をほぼ説明できている。



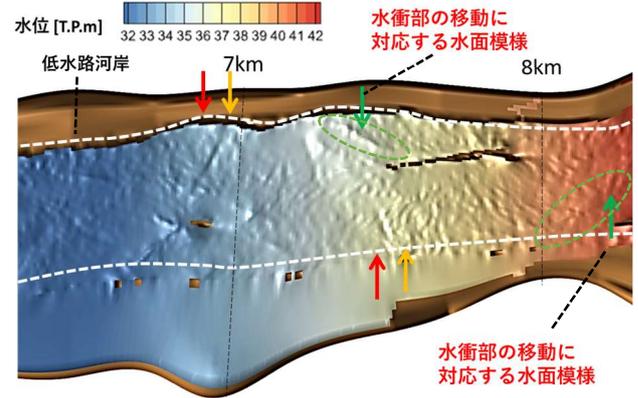
(a) 洪水増水期 (図-5 ①) の地形コンター



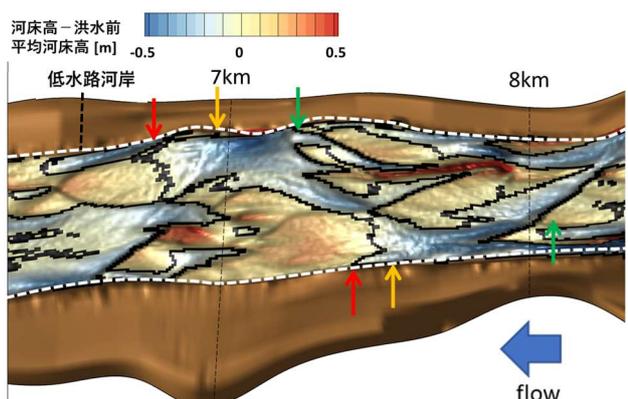
(b) 洪水増水期 (図-5 ①) の水面形状と水位コンター



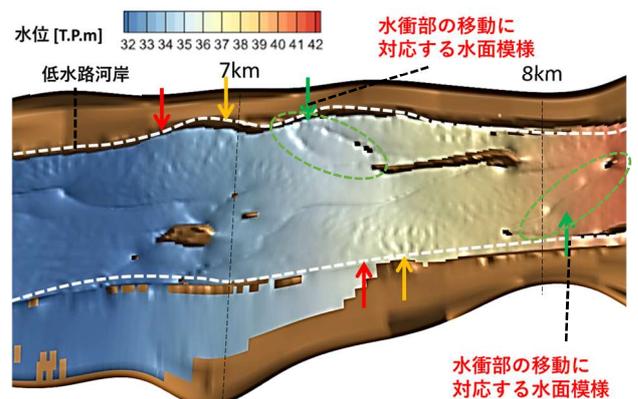
(c) 洪水ピーク直後 (図-5 ②) の地形コンター



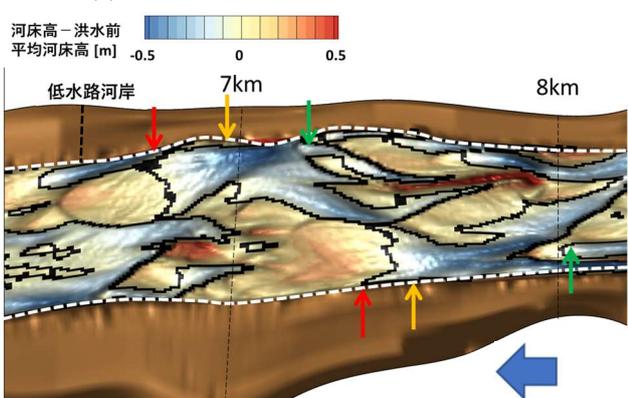
(d) 洪水ピーク直後 (図-5 ②) の水面形状と水位コンター



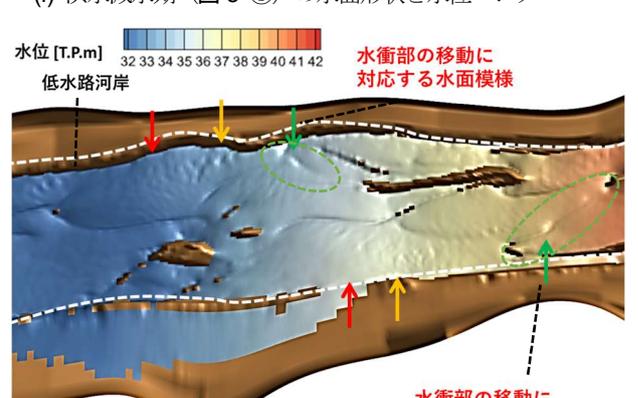
(e) 洪水減水期 (図-5 ③) の地形コンター



(f) 洪水減水期 (図-5 ③) の水面形状と水位コンター



(g) 洪水減水期 (図-5 ④) の地形コンター



(h) 洪水減水期 (図-5 ④) の水面形状と水位コンター

図-10 安倍川6.5km~8kmにおける河床形状および河床高コンターと水面形状及び水位コンターの時間変化

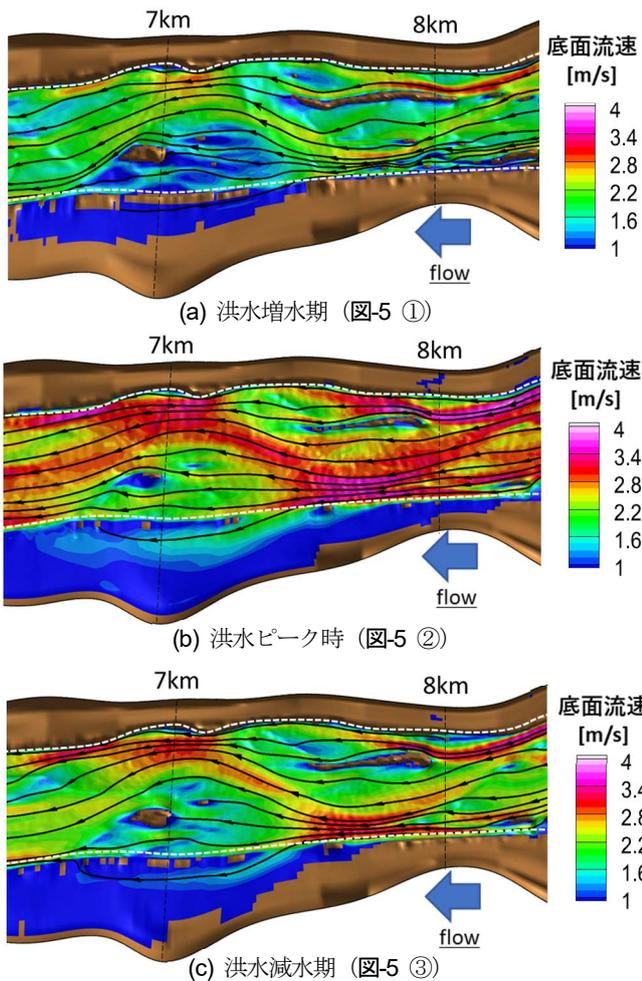


図-11 安倍川7km～8kmにおける底面流速コンターと流跡線の時間変化

図-8(a), (b)は安倍川6.5km～7.5km区間の洪水前後の平水時の航空写真である。また、図-9は解析で得られた洪水後の河床に平水時の流量を流した際の解析の水深コンターである。図中の茶色の箇所は河床面を示している。図-8(a), (b)を見ると、洪水前には6.5km～7kmの青い破線で囲った箇所に右岸から左岸へ蛇行する滞筋が形成されており、洪水後も同様の形状の滞筋が確認できる。また、7km～7.5kmの左岸では洪水前に砂州が形成されていたが、洪水後の解析水深は左岸沿いの滞筋の発達を確認できる。図-9の赤い破線で囲った箇所を見ると図-8(b)と同様に左岸沿いに滞筋が形成されており、青い破線で囲った箇所では図-8(b)に見られた右岸から左岸へ蛇行する滞筋が表れている。このように、解析結果が洪水後の滞筋形状を説明できていることがわかる。本解析結果は洪水時の実測の水面形や洪水前後での滞筋の変化をおおむね説明できており、洪水時の河床変動を精度よく再現できていると考えられる。次章では、本解析結果に基づいて洪水時の網状砂州の移動による水衝部の変化とそれに伴う水面模様の変化の関係を考察する。

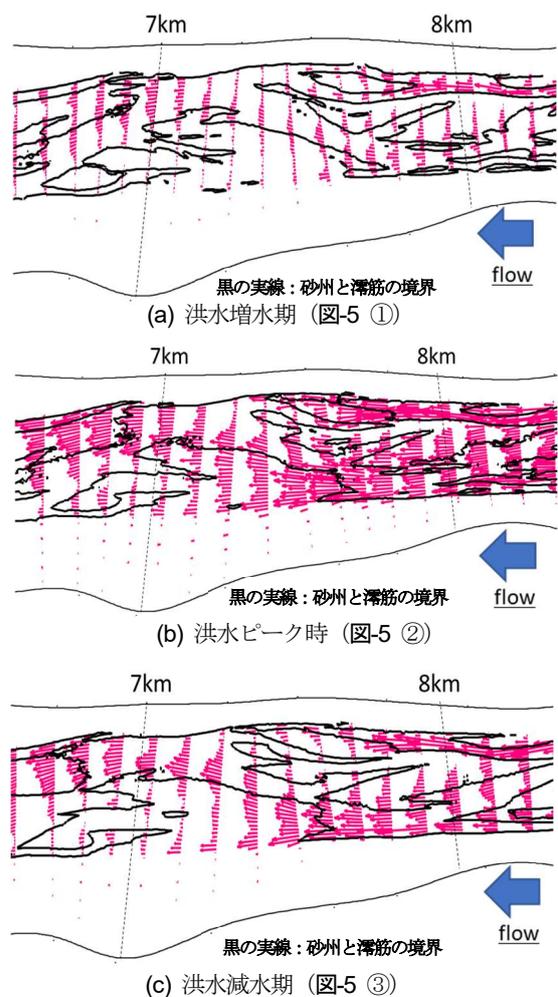


図-12 安倍川7km～8kmにおける単位幅当たりの全掃流砂量ベクトルの時間変化

3. 安倍川網状砂州の移動による水衝部の変化と水面模様の変化の関係

(1) 安倍川網状流路の河床変動解析に基づく洪水時の砂州、水衝部位置の変化と水面模様の変化の関係

図-10は、安倍川6km～8kmにおける洪水増水期（10/6: 6:00）、洪水ピーク直後（10/6 10:00）、洪水減水期（10/6 18:00, 10/7 0:00）の解析による陰影をつけた地形コンター図と水位コンター図を示している。図-10(a),(c),(e),(g)の地形コンターは河床高から洪水前の平均河床高を差し引いた値であり、赤く表示された箇所が砂州、青く表示された箇所が滞筋、黒の実線が砂州の境界線を示している。洪水前には7.25km右岸、7.5km左岸に水衝部が位置しており、白の破線で示す低水路河岸と砂州の境界線が重なる箇所が水衝部の上流端、下流端と判定している。図中の黄の矢印は洪水前の水衝部の下流端位置を示している、赤の矢印は各時刻における水衝部の下流端位置を示している。

まず図-10(a),(c)を見ると、洪水増水期から洪水ピーク

直後までは砂州及び水衝部位置の移動は約50m程度と比較的小さい。この時、図-10(b),(d)に示す水面模様は、洪水ピーク直後になると図中の緑の矢印で示す箇所に線状の筋が表れ始める。河床形状と対比して見ると、流れが砂州から濡筋に落ち込む箇所で線状の水面模様が見られ、砂州の境界線に沿って局所的に水位が低下することで形成されていることが分かる。

次に、洪水減水期（図-10(e)~(h)）になると砂州が下流へ大きく前進し、水衝部位置が図-10(c)に示した場所からさらに約100m程度下流に移動している。さらに、洪水ピーク直後（図-10(c)）から洪水減水期（図-10(e),(g)）の7.25km右岸、7.5km左岸の水衝部を見ると、濡筋における河床高が低下しており、砂州と濡筋の間の比高差が増大する傾向が見られる。この時の水面模様（図-10(f),(h)）を見ると、砂州が前進することで図中の緑の矢印で示す水面の筋も同様に洪水ピーク直後（図-10(d)）からさらに下流へ移動していることが分かる。また、図-8(h)の洪水減水期では、図-10(f)に比べて水面の線状の筋がより明瞭になっている。これは、水深が小さくなったことに加え、上で考察したように洪水減水期では砂州と濡筋の比高差が増大し、その影響が表れたものと考えられる。このことから、安倍川網状流路では洪水時の砂州の移動、発達状況が水面模様の時間変化に表れ、これに基づき水衝部位置の変化が推測可能と考えられる。

図-11に安倍川7km~8kmにおける底面流速分布と流跡線を示している。図-11(a),(c)に示す洪水増水期と洪水減水期はほぼ同程度の流量であるが、濡筋における底面流速を比較すると洪水減水期の底面流速の方が大きく、洪水ピーク直後の濡筋の底面流速をおおむね維持していることが分かる。これは図-10に示したように洪水減水期では砂州と濡筋とで比高差が増大したために、洪水増水期よりも主流が濡筋に集中しやすくなったためであると考察される。また流跡線を見ると、洪水ピーク直後は比較的直線的なのに対し、洪水減水期になると流跡線が濡筋に沿って蛇行しており、水衝部への攻撃角が大きくなっている。

図-12は安倍川7km~8kmにおける単位幅当たりの全掃流砂量ベクトルの分布を示す。上述した理由から洪水減水期には水衝部で大きな底面流速が維持され、攻撃角も大きいことから、図-12(c)に示すように掃流砂量が場所的に大きく変化しており、流砂の非平衡性が強まっている。本研究で用いた解析手法では掃流砂の移動速度ベクトルを求める際に三次元のsaltation解析を行っているため、従来の掃流砂量式と比較して河床勾配の影響を十分に取り入れて掃流砂量分布を求めることができ、図-10(c)に示す流砂の非平衡性が解析結果に表れている。このことが、図-10(e)~(h)で示したように洪水減水期に

において砂州と水衝部の移動が活発になった理由であり、その影響は水面模様の変化として顕れている。

4. 結論

本研究では、流れの三次元性や掃流砂・浮遊砂の相互作用と非平衡性を考慮した解析モデルを用いて、洪水中の安倍川網状流路における流れと河床の変化を解析し、水衝部位置の変化と水面模様の変化の関係を考察した。解析結果の分析から、濡筋と砂州の比高差が拡大した洪水減水期において、流れが砂州から水衝部へ落ち込む箇所で筋状の水面模様が現れ、減水期における水衝部の移動距離と水面模様の変化距離がおおむね一致し、一洪水で少なくとも100mは下流へ移動することを示した。また現地地の洪水流航空写真の撮影結果と砂州の縦横断面形の観測結果の比較した結果、実際の洪水中の水面模様の位置と砂州の形状が解析結果と同様の関係となっており、洪水中の水面模様と水衝部の移動状況が推測可能であることを示した。

本研究で検討した水面模様と河床変動の時間変化の関係性が明らかになれば、洪水中に河岸侵食が進行する水衝部において流砂の非平衡性がどのように生じているかが計算結果から検討できるようになり、河岸の防護策に役立てることができると考えられる。

今後、洪水増水期から減水期にかけて水面模様の時間的な変化を現地で確認し、本研究で得られた洪水時の砂州と水衝部の変化と水面模様との関係について、現地観測と解析によってさらに考察を深めていきたい。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，第345号，pp.1-19，1984。
- 2) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集B1（水工学），Vol.75，No.1，pp.61-80，2019。
- 3) 竹村吉晴，久保宜之，岡田将治，福岡捷二：洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究，河川技術論文集，第26巻，pp.669-674，2020。
- 4) 長谷部夏希，後藤岳久，福岡捷二，榎井正将：掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用，土木学会論文集B1，Vol.78，No.2，I_967-I_972，2022。
- 5) 森本有祐，立松明憲，福岡捷二，竹村吉晴：安倍川網状流路の洪水時の河床変動に及ぼす浮遊砂の影響，土木学会論文集B1，Vol.78，No.2，I_871-I_876，2022。

(2023. 3. 24受付)