

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

森本 有祐¹・立松 明憲²・福岡 捷二³・竹村 吉晴⁴

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 博士課程前期課程 都市人間環境学専攻

(〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27) (Corresponding Author)

E-mail: a17.w64p@g.chuo-u.ac.jp

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)

E-mail: tatematsu-a2ga@milt.go.jp

³フェロー 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)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

⁴正会員 中央大学研究開発機構 機構准教授 (同上)

E-mail: takemura@tamacc.chuo-u.ac.jp

本研究は、前報の非平衡掃流砂運動の役割に続いて、洪水流の三次元性に伴う非平衡浮遊砂運動の河床変動に与える影響を検討している。解析結果から、安倍川下流域では洪水減水期に浮遊砂量が相対的に大きくなり、浮遊砂と掃流砂が砂州上に広く堆積することにより砂州と滞筋との比高差を大きくするとともに、平均河床高の上昇を引き起こすことを考察した。さらに、砂州上の流れと滞筋の流れが混合することで、砂州側縁では二次流が発達し滞筋から砂州に向かう流れが形成されることで、砂州側縁に浮遊砂が顕著に堆積し、砂州の横断方向への移動が生じて滞筋幅が縮小する機構が確認された。しかし、実際に起きている網状流路の大規模な変動を説明するには至っていないことから、これを説明するための今後の課題をまとめている。

Key Words: gravel bed, braided river, suspended load, non-equilibrium sediment transport, three-dimensional flood flows

1. 序論

安倍川は静岡県を流れる扇状地河川であり、中下流域では石礫から砂までの幅広い粒度分布の網状流路が形成されている。安倍川では砂利採取が廃止になった昭和43年以降、中下流域において土砂が堆積する傾向にある。土砂堆積は、河道の流下能力の低下を招き、また、網状流路の滞筋の移動によって河岸や堤防が侵食される懸念がある。これまでも安倍川では、高水敷が侵食されるなどの被害がしばしば起きている。このような問題に対応するために、安倍川の洪水時の土砂移動・河床変動機構を説明できる技術が求められている。

従来の網状流路の河床変動解析には、倉林・清水¹⁾や竹林ら²⁾、Lotsari et al.³⁾の研究等が挙げられる。倉林・清水¹⁾は、水路幅と水路勾配が一樣でかつほぼ均一砂からなる実験水路での網状流路の発達・減衰過程等を平面二

次元解析、平衡流砂量式を基にした解析法により説明している。Lotsari et al.³⁾は、Tana River 下流域の5 km区間において、網状流路の変化を詳細に調査し、倉林・清水とほぼ同様の解析法に浮遊砂量の解析手法を取り入れて再現計算を行っている。彼らの解析は、対象区間全域での1

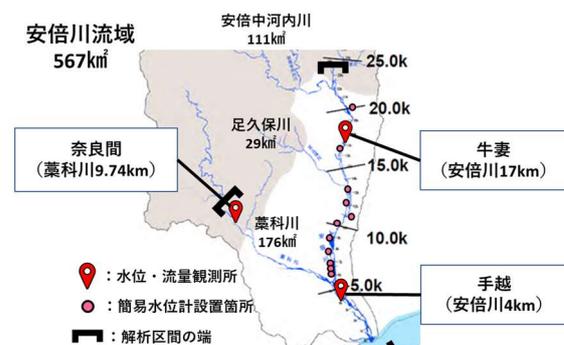


図-1 安倍川の流域図

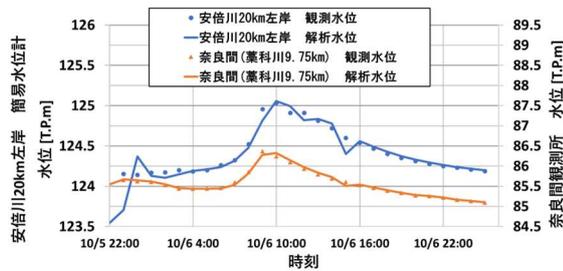


図-2 上流端境界条件の水位ハイドログラフ

年間の総堆積量及び総洗掘量の実測値を説明できたものの、滞筋位置の変化を十分に説明できず課題とされている。さらに竹林ら²⁾は、混合粒径河床において滞筋や砂州上での粗粒化・細粒化の違いについて数値解析で検討している。

著者らは、安倍川網状流路における洪水時の滞筋の変化等には、時間・空間的に変化する流れの三次元性や掃流砂・浮遊砂の非平衡性の影響が重要と考え研究を進めてきた⁴⁾。これまで流れを非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS⁵⁾)、掃流砂量を非平衡流砂モデル(修正長田・福岡モデル⁶⁾)により計算することで、安倍川6km～8kmにおける洪水前後での滞筋の変化を再現できること、安倍川網状流路における砂州の移動や滞筋の変化に対して掃流砂の非平衡性が重要な役割を持つことを示してきた⁷⁾。一方、浮遊砂の影響については十分な検討ができていない。長谷部⁸⁾らは掃流砂が浮遊砂へ遷移する割合を乱れを考慮した粒子の運動方程式から求めることで掃流砂と浮遊砂の非平衡運動を一体的に計算可能な解析法を構築し、洪水時に複断面蛇行流れが生じ、複雑な三次元流が形成される石狩川河口部の洪水流河床変動を説明している。

本研究では、上述した著者らの解析法に長谷部らの浮遊砂の解析法を導入することで、掃流砂・浮遊砂間の相互作用を考慮して平成26年洪水の網状流路形成に及ぼす浮遊砂の役割を明らかにする。

2. 解析条件と解析手法

解析対象洪水は、近年の主要洪水である平成26年10月の台風18号洪水とした。図-1に安倍川の流域図と各観測所の位置を示す。基準地点である手越(安倍川4km)観測所において、ピーク流量は3480m³/sを記録している。解析対象区間は、本川は河口から22km区間とし、支川葦科川は合流点～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、図-2に示す安倍川20km左岸の観測水位ハイドログラフを、葦科川には奈良間観測所(9.75km)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験潮場の潮位ハイドログラフを与えた。解析

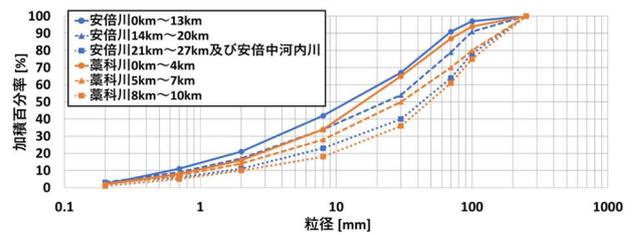


図-3 解析に用いた河床材料粒度分布

で得られる時系列水面形を、痕跡水位や簡易水位計による観測時系列水面形とほぼ一致するように決めることで、多くの河川で洪水流や河床変動をほぼ再現できる⁹⁾。安倍川でもこの方法を用いる。粗度係数は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を図-3に示す。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。解析に使用したメッシュは、著者らの論文⁷⁾の解析条件と同様に、滞筋の幅を縦横断的に5分割する程度に設定している。

安倍川、葦科川、安倍中河内川の上流域からの流入土砂量は、解析区間上流端から平衡流砂量式で求めた掃流砂量を流入させている。水制工は複数地点で設置されている。計算では水制の配置と高さを地盤高として与え、そこでの地盤高は変化しないものとして考慮した。

3. 解析結果と考察

(1) 安倍川下流域の滞筋の移動の解析結果

図-4に安倍川4.75km～4.5km周辺における洪水増水期から減水期までの解析河床高のコンター図を示す。右岸沿いの滞筋及び砂州に注目する。時間の経過とともに砂州が右岸側に移動し、滞筋の幅が狭まっていることがわかる。図-5は図-4に示す側線①～③の洪水ピーク時(10/6 9:00)と洪水減水期(10/6 15:00)における解析横断面形状と横断面内の主流速コンター及び二次流の速度ベクトルの分布を示している。図-5の砂州と滞筋の範囲は、図-4のコンターの値が0m以上の場所を砂州、0m以下の場所を滞筋として定めたものである。図-5(a), (b)の滞筋内の主流速を見ると、洪水ピークよりもむしろ減水期の方が流速が大きくなっている。これは断面①、②では洪水減水期に、砂州の側縁が右岸に向かって移動して滞筋の幅が狭くなったこと、さらには砂州の比高差が増し、滞筋に水が集中し水深が大きくなっていることが理由である。また、洪水減水期に滞筋と接続する砂州の側縁部の勾配が急になったことで、砂州から滞筋に流入す

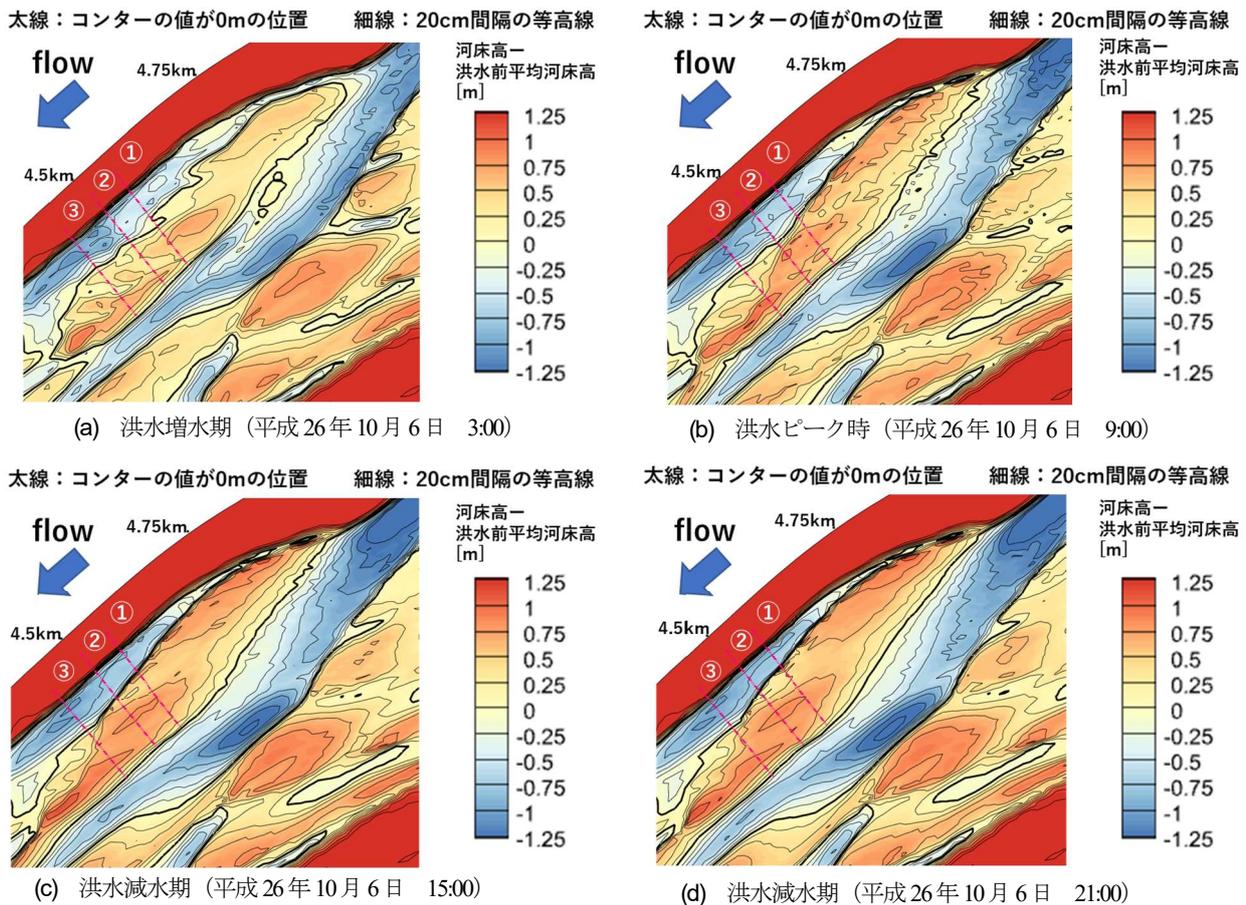


図4 安倍川 4.5km～4.75km 周辺における洪水増水期～洪水減水期までの解析河床高の変化のコンター図

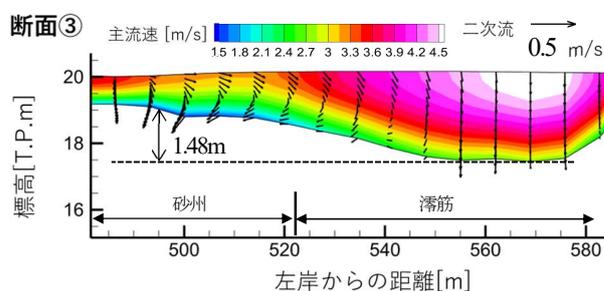
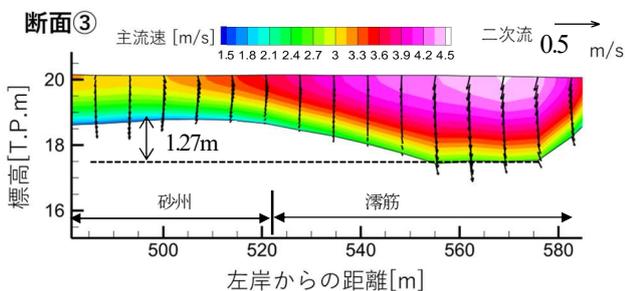
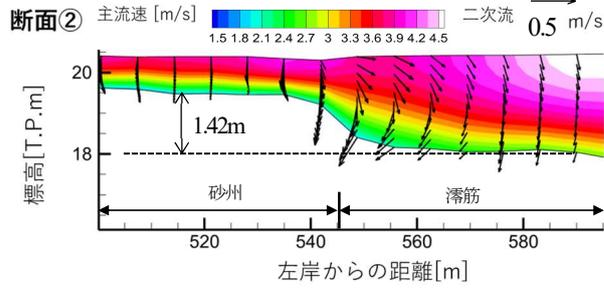
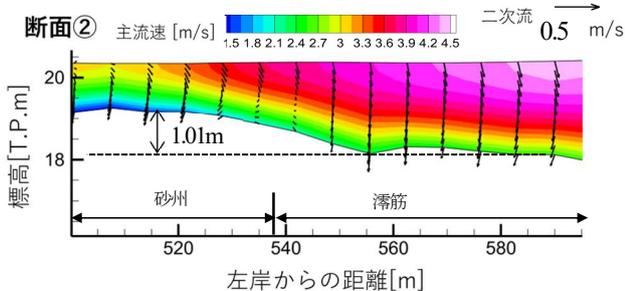
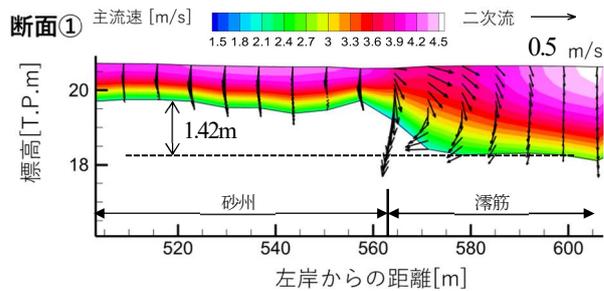
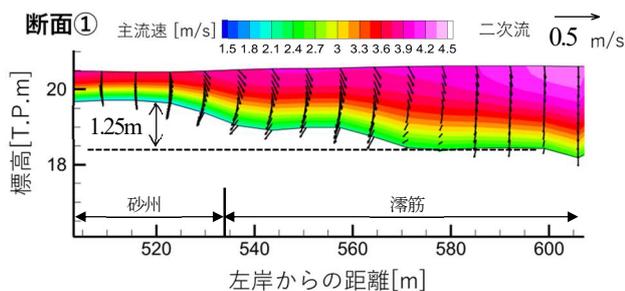
る流れによって時計回りの二次流が発達していることも確認できる。

図-6には、図-4に示した範囲での洪水ピーク時と洪水減水期における各粒径の掃流砂量（実線）と浮遊砂量（破線）の縦断分布を示している。図-6(a), (b)を比較すると、掃流砂の中で割合が大きい粒径 8mm～70mmは、洪水ピークから減水期にかけて掃流砂量が大きく減少している。一方、浮遊砂は 0.2mm～0.7mm が中心となるが、浮遊砂量は洪水ピークから減水期にかけて減少量が掃流砂量に比べて小さいことがわかる。このように、洪水ピーク以降、浮遊砂量は掃流砂量に比べて時間的に緩やかに減少するため、洪水減水期には浮遊砂が全流砂量中に占める割合が増加することになる。したがって、洪水減水期の砂州の移動や滞筋の変化に対して浮遊砂が大きく影響することになるものと考えられる。

図-7に洪水増水期から洪水減水期における浮遊砂の単位面積、単位時間当たりの浮上量と沈降量の差を示す。図中の実線は図-4のコンターの値が 0m の位置であり、砂州と滞筋の境界を示している。これによると、洪水増水期からピーク時までの時間帯（図-7(a), (b)）では、滞筋を中心に浮上量が顕著になっている。洪水減水期の時間帯（図-7(c), (d)）では、砂州上で沈降量が卓越することが確認できる。掃流砂も浮遊砂と同様に洪水減水期には砂州上に堆積する傾向にあり、図-4(b), (c)に示したよ

うに洪水ピーク時から減水期にかけて掃流砂と浮遊砂両方の影響を受けて砂州が高まっている。図-5(a), (b)に砂州と滞筋の比高差を示しているが、断面②では砂州の高さが 1.01m から 1.42m と 40cm 以上上昇している。また、図-7(c)に示す水位、流量が時間的に最も急に減少する時間帯では、砂州の側縁において浮遊砂の沈降量が大きくなっており、図-4(a), (b)に示した砂州の横断方向への移動と滞筋幅の縮小の要因となっている。図-5(b)に示した通り、比高差の大きい砂州と滞筋の境界部では砂州上の流れと滞筋の流れの流速差が大きくなり、複断面流れのように境界での混合流れによって発生した時計回りの二次流にしたがって、浮遊砂が滞筋から砂州側縁へ輸送され堆積した。一方、掃流砂は滞筋の流れが砂州に乗り上げる部分で大きく堆積する傾向がある。このため、砂州の移動に対して浮遊砂と掃流砂とは影響の仕方が異なると考えられる。

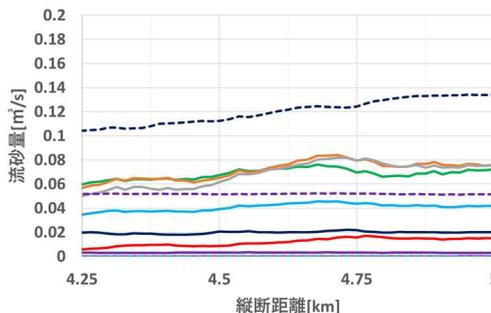
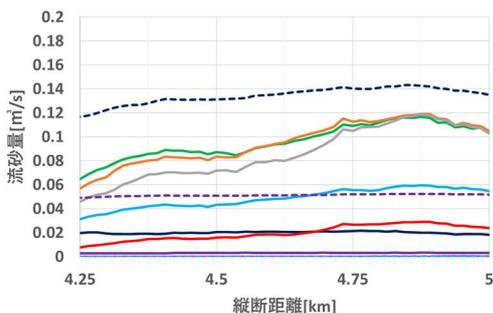
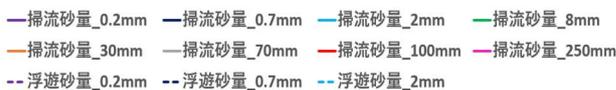
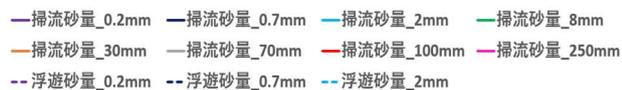
このように安倍川下流域では、減水期に浮遊砂量が相対的に大きくなり、これらが砂州上や流れの鉛直構造の影響を受けて砂州の側縁部など比高差が大きい河床に堆積し、掃流砂とともに砂州の構造を変化させながら移動するものと考えられる。また、洪水減水期において砂州上に浮遊砂が堆積して砂州を高めることが、安倍川下流域の平均的な河床上昇の原因になっていると考えられることができる。



(a) 洪水ピーク時 (平成 26 年 10 月 6 日 9:00)

(b) 洪水減水期 (平成 26 年 10 月 6 日 15:00)

図-5 安倍川 4.5km~4.75km の右岸の砂州、澁筋における側線①~③の洪水ピーク時と洪水減水期における横断面形状と横断面内の主流速と二次流流速の分布



(a) 洪水ピーク時の縦断的な流砂量分布 (平成 26 年 10 月 6 日 9:00)

(b) 洪水減水期の縦断的な流砂量分布 (平成 26 年 10 月 6 日 15:00)

図-6 安倍川 4.5km~4.75km 周辺の各粒径の縦断的な掃流砂・浮遊砂量分布

(2) 河床変動の解析結果と実測の比較

図-8(a), (b)は安倍川下流域 3km~5km 区間の解析対象洪水前後の網状流路の変化を示す航空写真である。洪水前は 5km~4km の区間にて澁筋が河道中央に位置している。一方、洪水後の澁筋は 4.5km 周辺で右岸と左岸に向かって二手に分岐し、4km 周辺では左右岸に沿って澁筋

が形成されるように河床変動が発生している。図-9に河床変動解析を行った後の解析河床に平水時流量を流した際の水深コンターを示しており、図-8(b)と澁筋を比較することができる。これによると、解析では 4km~5km 間の澁筋は河道中央と左岸沿いの 2 本が形成されており、図-8(b)に示す実際の洪水後の河床形状を表現できていない。先の研究⁷⁾で洪水時の網状流路の変形において掃流砂については説明力は高いことがわかっている。勾配の

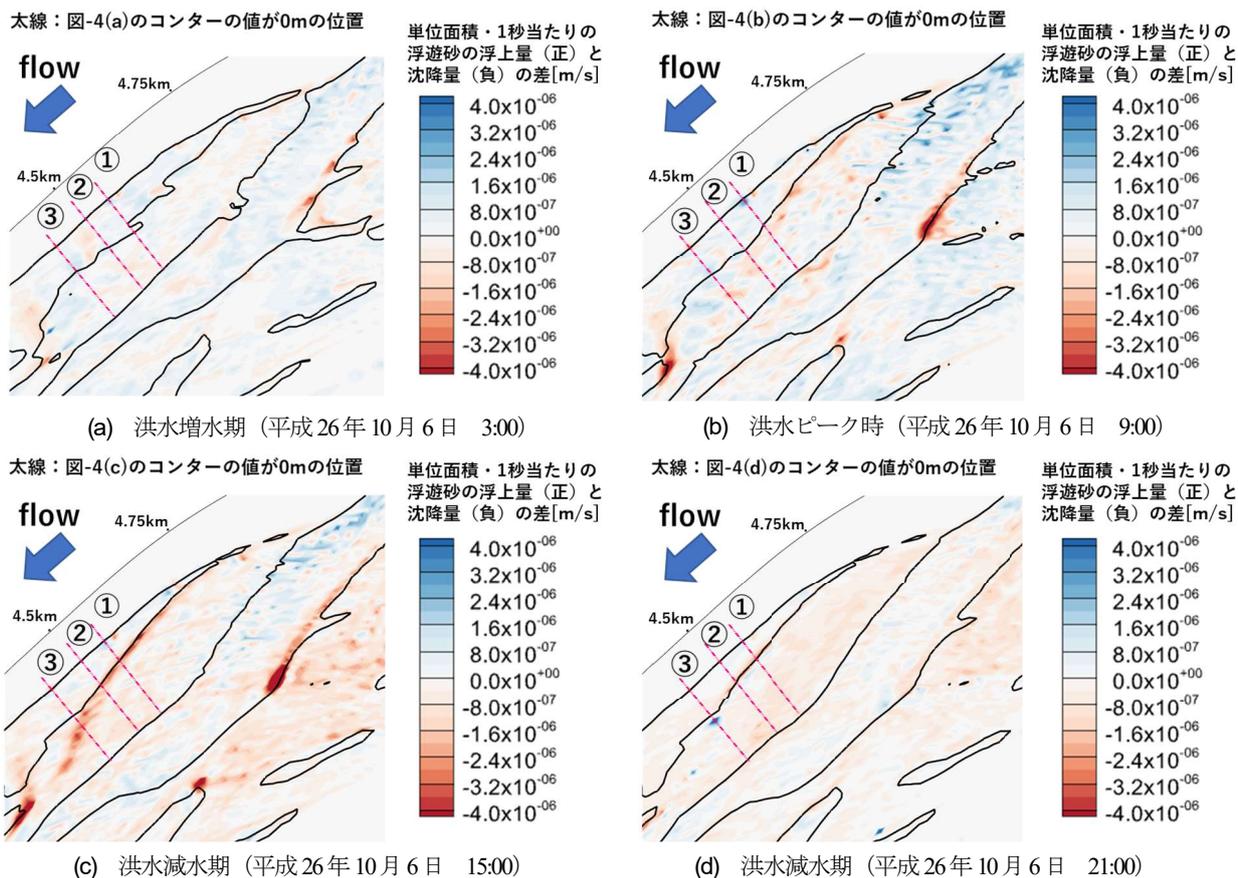


図-7 安倍川4.5km～4.75kmにおける洪水増水期～洪水減水期までの浮遊砂の浮上量と沈降量の差の変化

緩い下流区間では浮遊砂の挙動が濤筋，砂州の変形に重要であることから，ここでは浮遊砂を中心に解析結果を分析し，精度向上に向けた河床変動解析の課題を示す。

(3) 現状の河床変動解析の課題

3 (1)で示したように濤筋や砂州の変形に及ぼす浮遊砂の役割については，洪水減水期に砂州上に堆積し濤筋との比高差を高めるとともに，砂州側縁で鉛直的な流れ構造が形成され浮遊砂粒子が河床に堆積する結果，砂州及び濤筋が横断的に変形することが明らかになった。しかし，図-8と図-9に示した通り，本研究では左右岸に分岐する大規模な濤筋を再現するには至らなかった。

今回の解析条件では上流端から流入する土砂量を平衡流砂量で与えており，土砂の流入量を十分に考慮できていない。特に上流で生産された細かい土砂に起因する浮遊砂が勾配の緩くなる下流域に堆積し，これが大規模な河床変動に関係していると考えられる。河川上流からどのような浮遊砂量ハイドログラフで浮遊土砂が流入するかを検討する必要があり，今後の検討課題とする。

4. 結論

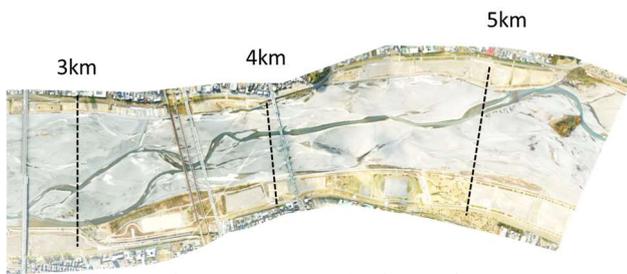
本研究では，流れの三次元性や掃流砂・浮遊砂の相互

作用と非平衡性を考慮した解析モデルを用いて，河床上昇がみられる安倍川下流域における浮遊砂の影響を検討した。解析で得られた三次元的な流れ構造の時間変化や浮遊砂の堆積傾向の分析から，洪水減水期に砂州側縁に二次流が発達し，それに伴う鉛直下向きの流れにより浮遊砂の堆積傾向が強まることで砂州の移動に影響を及ぼすことが確認された。

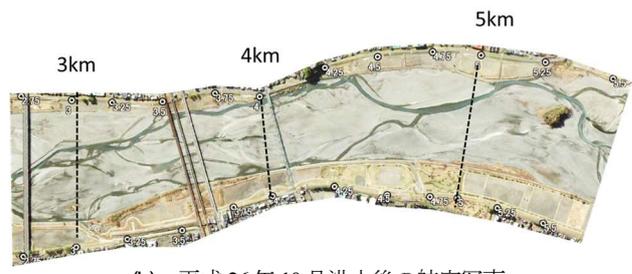
安倍川下流域の網状流路の河床変動解析には，本解析法のように時間的に変化する砂州周辺の流れの三次元構造に与える浮遊砂の影響を適切に考慮する必要がある。本解析では実測の河床変動の再現の精度は良好でないものの，河川上流域から供給される浮遊土砂量を適切に考慮することによって，下流域の網状流路の河床変動解析の改善を図っていくことが次の段階である。

土砂水理学の分野では，掃流砂に関係する研究に比して，浮遊砂の研究は相対的に少ない。これは実験水路では激しい浮遊砂の移動に伴う河床変動の研究を実施することが困難であることと関係しており，実河川での浮遊砂研究が必要とされる。

今後は，支川及び本川上流域から流入する土砂の量と質について実測し，河床変動解析の上流端境界条件である浮遊砂量ハイドログラフや粒度分布の与え方の信頼度を高め，本解析法の精度向上と現地河川での浮遊砂現象



(a) 平成 26 年 10 月洪水前の航空写真



(b) 平成 26 年 10 月洪水後の航空写真

図-8 平成 26 年洪水前後の安倍川 3km～5km の航空写真

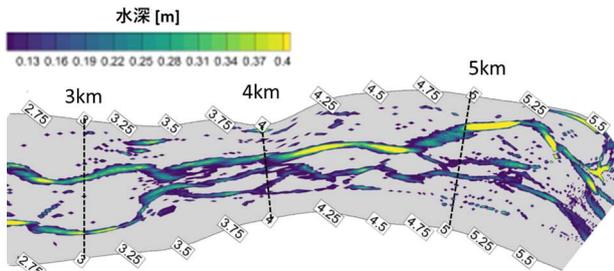


図-9 河床変動解析後に平水時流量を流した際の水深コンター図

の解明に努める。

参考文献

- 1) 倉林弘志, 清水康行: 浮州の形成を考慮した網状流路における河床変動計算, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.743-748, 2002.
- 2) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士: 混合砂河床における網状流路の数値解析, 水工学論文集, 第 47 巻, pp631-636, 2003.
- 3) Lotsari, E., Wainwright, D., Corner, G.D., Alho, P. and Käyhkö, J.: Surveyed and modelled one-year morphodynamics in the braided lower Tana River, *Hydrological Processes*, Vol.28, pp.2685-2716, 2014.
- 4) 長田健吾, 福岡捷二, 岡田昌之: 石礫河川の二次元河床変動解析法を用いた安倍川網状流路の数値解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.769-774, 2010.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 森本有祐, 竹村吉晴, 福岡捷二, 立松明憲: 安倍川洪水における掃流砂と浮遊砂の非平衡運動による網状流路の発達, 水工学論文集, 第 66 巻, pp.757-762, 2021.
- 8) 長谷部夏希, 後藤岳久, 福岡捷二, 榊井正将: 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, 水工学論文集, 第 67 巻, 2022 (投稿中)
- 9) 福岡捷二: 洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見えるか—, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, pp.I_355-I_360, 2017.

(Received May 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

THE INFLUENCE OF SUSPENDED LOAD ON RIVER BED VARIATION IN THE BRAIDED RIVER OF THE ABE RIVER

Yusuke MORIMOTO, Akinori TATEMATSU,
Shoji FUKUOKA and Yoshiharu TAKEMURA

We have studied the role of non-equilibrium sediment transport of bed load on bed variations of the braided channels in the middle and lower reaches due to flood flows in the Abe River, which is composed of a wide grain-size distribution of bed materials including gravels. This paper focuses on the role of non-equilibrium sediment transport of suspended load which is greatly affected by the three-dimensional flood flows on bed variation. Our calculations showed that the amount of suspended load is relatively large in the flood descending period, and the tendency for bed load and suspended load to accumulate on the sandbars resulted in a large specific height difference between the sandbars and channels. We also confirmed that secondary flows develop at the side edges of sandbars due to the flow mixing between the flow over the sandbars and the flow in the channels promote the deposition of suspended load at the side edges of sandbars, and it causes the lateral movement of the sandbar and reduction of the width of the channel.