

洪水流による砂州の移動・変形と 砂州粒度構成の変化

SANDBAR MOVEMENT AND TRANSFORMATION BY FLOODS AND GRAIN COMPOSITION CHANGES

忠津 哲也¹・下條 康之²・内田 龍彦³・福岡 捷二⁴

Tetsuya TADATSU, Yasuyuki SHIMOJO, Shoji FUKUOKA and Tatsuhiko UCHIDA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所
(〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

³正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴フェロー Ph. D 博(工) 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The movement and development of the local scour is associated with the sandbar movement and transformation. The local scour around the river structure increases the risk of the structure failures. Therefore it is important for structures maintenance and management to clarify the characteristics and grain compositions of the sandbar. So, we surveyed the grain composition of sandbar in the Tama River in 2008. And we show the movement and transformation of the sandbar during the 2007 flood, which is the largest Tama River flood in recent years, using the digital map data and the cross section survey data. Then, the characteristics of sandbar movement and transformation and grain size composition of the sandbar are discussed. And we develop numerical model for bed and grain composition variation during the 2007 flood by the quasi-3D flow and bed variation model with segment mixture.

Key Words : sandbar transformation, grain size distribution, surface image analysis, sediment mixture, bed variation analysis

1. 序論

河道に形成されている砂州が洪水中に移動・変形すると、それに伴って砂州周辺の局所洗掘も移動、発達する。局所洗掘の移動、発達は河川構造物の安全性を低下させ、被災の危険性を増大させる懸念がある。多摩川の二ヶ領宿河原堰(22.4km)の上流では戦後最大級であった平成19年9月洪水(表-1参照)において、局所洗掘の移動、発達が要因の一つとなって、堰の上流側護床工の破壊や湾曲外岸部に設置されていた巨石護岸が被災した¹⁾。そのため、河川構造物の維持管理においては局所洗掘の位置や大きさ、深さの時間変化を知って、構造物の被災に備えることが重要となる。

著者らは、平成19年9月洪水による二ヶ領宿河原堰周辺の砂州や局所洗掘の変動機構について、実測データや河床変動解析を用いて検討を行ってきた^{2,3)}。その結果、護床工に被害を及ぼしたと考えられている局所洗掘深の発達やその移動は、砂州の変形の影響を大きく受けてい

ることが明らかになった。そのため、洪水流による砂州の変形と局所洗掘の移動、及び洗掘深の発達のメカニズムを明らかにすることが必要である。このためには、砂州の状態(形状や粒度構成等)について詳細な調査、検討が必要なことから、平成19年9月洪水後の平成20年12月に多摩川の24.6km付近の左岸に形成されている砂州(図-1参照)を対象に、河床材料の平面的、鉛直的な構成について現地調査を実施した。

本研究では、洪水流による砂州の変形について詳細に把握すると共に、現地調査から砂州の平面的、鉛直的な粒度構成について明らかにする。また、平成19年9月洪水を対象に、混合粒径を考慮した河床変動解析を行い、現地調査結果と比較・検討する。

2. 砂州の現地調査の概要

現地調査は平成20年2月に図-1に示す多摩川の24.6km付近の左岸側に形成されている砂州を対象に行った。調

調査地点は砂州を形成する河床材料の平面的な特性を把握するため、砂州の上流面(A1,B1,B2,B3,C1,C2)と中間位置(A2,A3,B4,B5,C3)の計11地点で行った。図中の記号は調査地点を場所的な特徴で区別しており、水面下をA(△)、水際をB(○)、砂州上をC(□)で示し、数字は各特徴別に小さい方が上流を示している。また、各地点における鉛直方向の河床材料特性についても約30cm間隔の掘削を行い検討した。

粒度分布は河床材料画像解析(全11地点)とふるい分け試験(A1,A2,A3,B3,B4の計5地点)によって分析した。画像解析では1.2m×1.2mの枠を用いて河床表層や掘削した表面を撮影し、調査後、枠内における河床材料の面積百分率を算出し粒度分布を得た。ただし、水面下(A1,A2,A3地点)や掘削した表面が水に浸かる場合には、掘削土砂を撮影している。

表-1に示すように、今回の調査以前における石原観測所(27.8km)での観測流量は、平成19年9月洪水が最も大きく、次いで平成20年8月洪水が大きい。両者とも平均年最大流量を大きく上回っている。図-1には表-1で示す航空写真を基に平成19年9月洪水前後における砂州の形状を示す。砂州形状の変化は平成20年8月洪水(破線から写真の形状)に比べ平成19年9月洪水による変形(実線から破線)の方が大きいことが分かる。そのため、調査結果は、平成19年9月洪水を大きく反映した砂州形状のもので行われたと考えられる。

3. 数値地形データを用いた砂州の形状変化

洪水流による砂州形状の変化と砂州の粒度構成の関係を把握するため、変化の大きかった平成19年9月洪水における洪水前後の砂州形状を検討する。本研究では、航空レーザー測量による緻密な数値地形データを用いて砂州を三次元的に再現する。しかし、航空レーザー測量では図-2に示すように、陸上部については横断測量データによる河床高を再現しているが、水面下については再現できていない。砂州形状の変化に伴って水際線は変動するため、各調査地点の河床変動量や砂州の移動、変形を明らかにするには、水面下の河床高も把握する必要がある。そこで、水面下に関しては、200m間隔で測られている横断測量データを用いて縦断方向に線形補間して地盤高を求めた。

図-3(b),(c)に調査対象とした砂州周辺の河床高コンターを示す。用いたデータは表-1に示すように、洪水前は平成18年の数値地形データ(5mメッシュ)と平成18年3月の横断測量データ、洪水後については平成19年(洪水後)の数値地形データ(1mメッシュ)と平成20年2月の横断測量データである。図-3には3つの砂州が形成されているが、これらは図-3(a)で示すように平成19年9月洪水によって大きく変動していることが確認できる。また、図

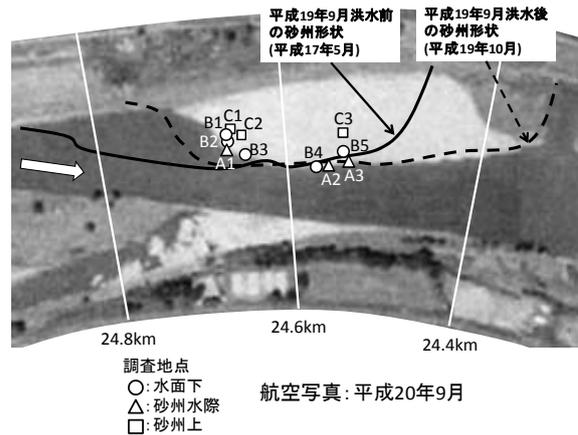


図-1 調査対象砂州と調査地点

表-1 基礎データと時系列

年月	年最大流量	航空写真	横断測量	数値地形データ
平成17年	5月	○		
	8月	1646		
平成18年	3月		○	○(平成18年) 5mメッシュ
	10月	1034		
平成19年	9月	4088		○(洪水以降) 1mメッシュ
	10月		○	
平成20年	2月		○	
	8月	3752		
	9月		○	
				現地調査

平成10年以降における平均年最大流量: 2099m³/s

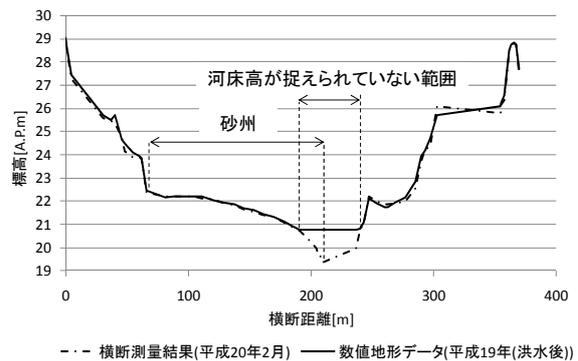


図-2 数値地形データと横断測量データ (24.6km)の比較

図-3(b),(c)の白破線で示す洪水前後の砂州形状を比較することで、砂州が移動し変形していることが分かる。表-2に洪水前後における各砂州の波長と波高を示す。波高は砂州の形成している区間内における最深河床高と砂州の最大河床高の差、波長は白破線で示した砂州形状における上下流端の縦断距離とした。波高は最下流部の砂州を除いて洪水後に大きくなっており、波長は各砂州で大きくなっていることが分かる。このように、密に測られた数値地形データと横断測量データを用いることで、砂州の形状や変形を詳細に検討することができる。

4. 調査結果

ふるい分け試験と画像解析の結果を比較する。図-4に

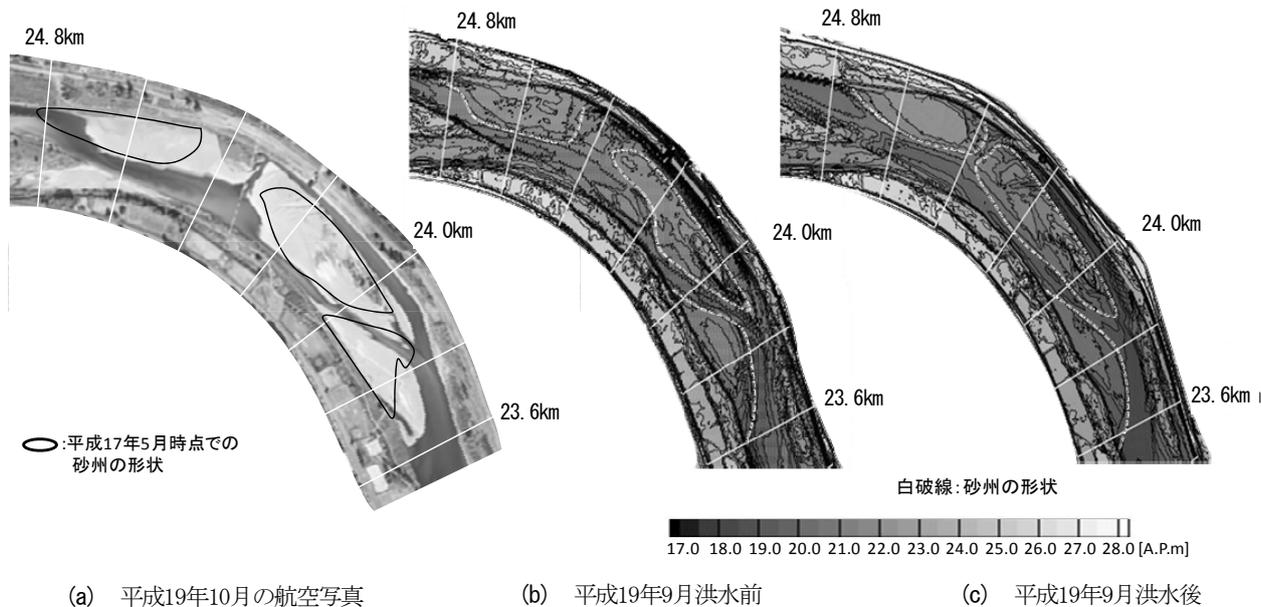


図-3 調査対象砂州周辺の河床形状

B3地点におけるふるい分け試験と画像解析による粒度分布を示す。画像解析の結果は、粒径の粗い範囲でふるい分け試験の結果よりも細かく、粒径が約5mm以下は計測できていない。これは、画像解析では河床に埋もれている粗い河床材料粒径を小さく見積もってしまうことや、細かい粒径を捉えることが困難であることが影響しているためである⁴⁾。しかし、石礫河川のような大粒径が重要な役割を果たす河川において、大きな粒径集団における測定結果は比較的良く、調査が容易であるため、河床材料と河床変動の関係を検討するために有効な手段であることが知られている⁴⁾。本調査においても比較的大きな河床材料が砂州形成に重要な役割を果たしていると考えられるため、調査が容易である画像解析法が全調査地点で用いられている。

図-5(a)は砂州水際(B)と砂州上(C)における表層の粒度分布から砂州上の平面的な位置の違いによる粒度構成を示している。実線は上流面、破線は中間位置を示しており、砂州の表層では上流面で河床材料が粗くなっている。これは、砂州の移動に伴って上流側では河床高が低下し、細かい粒径が抜け出したためである。一方、下流側では上流から運ばれてくる細かい河床材料が堆積することで粒度分布が細くなる。

図-5(b)は砂州上の上流面C1,C2における鉛直方向の粒度分布を示している。C1,C2の河床面は洪水流による砂州の移動によって図-6に示すように平成18年以降低下している。そのため、表層より下の粒度分布は平成18年以前に形成されたものと考えられる。表層より下では、一回目の掘削面(30cm)に比べ二回目の掘削面(50cm, 60cm)における河床材料の方が粗い。洪水中に掃流されている砂礫は、洪水減衰期において粗い礫から留まりやすくなる。そして、移動を停止した粗い砂礫の上を相対的に小

表-2 波高と波長

対象砂州		波高[m]	波長[m]
23.8km右岸	H18	3.26	453
	H19	2.35	480
24.2km河道中央	H18	4.16	621
	H19	5.74	641
24.6km左岸	H18	2.81	480
	H19	3.00	499

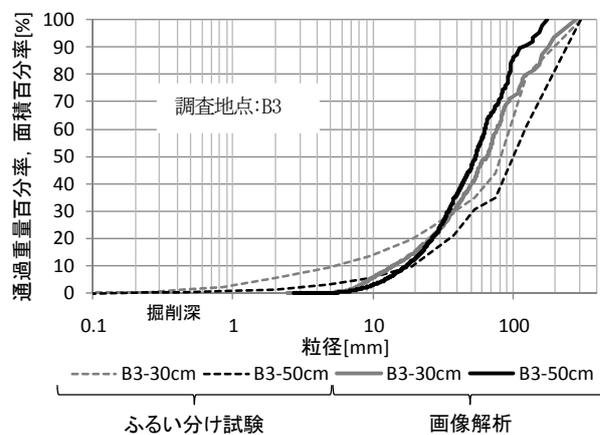


図-4 ふるい分け試験と画像解析の比較

さい砂礫が掃流、停止することで図-5(b)のような鉛直構造が形成されたと考えられる。

図-5(c)は砂州上中間地点のC3における鉛直方向の粒度分布である。この地点の表層より下ではC1,C2と異なり二回目の掘削面(50cm)の粒度分布が一回目(30cm)に比べて、細くなっている。C3では図-6に示すように、河床高が上昇しており、その上昇量は二回目の掘削深(約50cm)とほぼ同じであることから、二回目の掘削面は平成19年9月洪水前の表層付近を捉えていたことが考え

られる。洪水前のC3地点は図-1に示すように砂州の下流側に位置しており、図-5(a)の検討から洪水前のC3地点の表層付近の粒度分布は小さかった可能性が高く、平面的な粒度構成の影響が鉛直方向の粒度分布の変化に表れたと考えられる。

図-5(d)は砂州側岸(B3,B4,B5地点)における鉛直方向の粒度分布である。砂州側岸では鉛直方向の粒度分布の差が小さい。調査対象の砂州は湾曲外岸部に形成されており、側岸では常に大きい流速が接していたことが考えられる。そのため、側岸では細かい砂礫が留まりにくく、鉛直方向の差が小さくなったと考えられる。

このように、現地の砂州形状を把握しながら、砂州を構成する河床材料について平面的、鉛直的に調査することで砂州の形状、移動特性を把握することができる。この特性を踏まえた上で、洪水流による砂州の変形、移動について検討することが砂州河道の河床変動の把握に重要である。

5. 混合粒径を考慮した準三次元洪水-河床変動解析

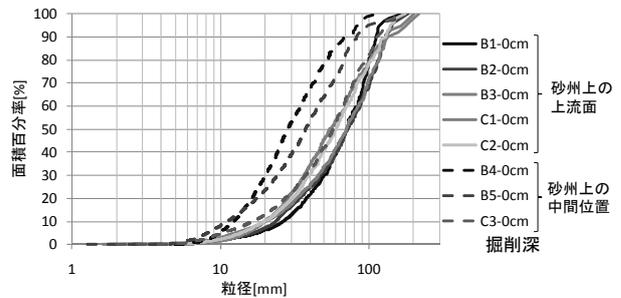
平成19年9月洪水を対象に混合粒径を考慮した河床変動解析を行い、現地調査より明らかになった洪水流による砂州の変形と砂州の粒度特性の調査結果と比較する。

(1) 計算方法

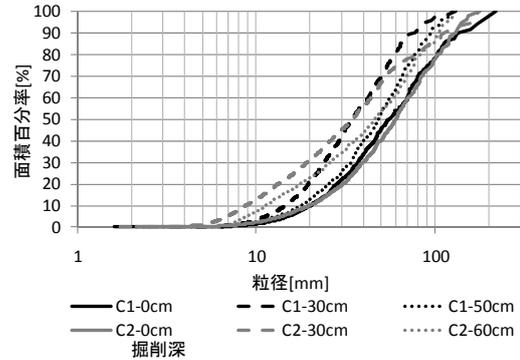
解析区間は二ヶ領宿河原堰(22.4km)と二ヶ領上河原堰(25.8km)を含む21.6km~28.0kmとしている。現地河道は砂州周辺においては図-3に示すように湾曲している。湾曲外岸部や砂州下流に形成されている局所洗掘部においては、流れの鉛直流速分布構造が複雑になることが考えられる。そのため、本研究では、流れの解析において静水圧分布を考慮せず鉛直流速分布を求めることができる、渦度方程式を用いた準三次元解析法³⁾⁵⁾⁶⁾を用いる。河床変動解析では流砂の連続式と平衡流砂量式として芦田・道上式⁷⁾を適用した。また、粒度分布における各粒径階の代表粒径に対する限界掃流力は芦田・道上による修正Egiazaroff式⁷⁾より算出した。堰、構造物区間においては河床高が構造物の敷高以下にならないようにしている。粒度分布の計算では河床表層に交換層⁸⁾を設けている。また、堆積土砂の鉛直方向の粒度分布の変化を考慮するため、交換層の下の層(堆積層⁹⁾もしくは貯留層と呼ばれる)についても、連続式により、粒度分布を計算する。河床面近傍で粒度分布の鉛直方向変化が大きくなると考えられることから、堆積層は河床変動に追従して高さを変化させている。

(2) 解析条件

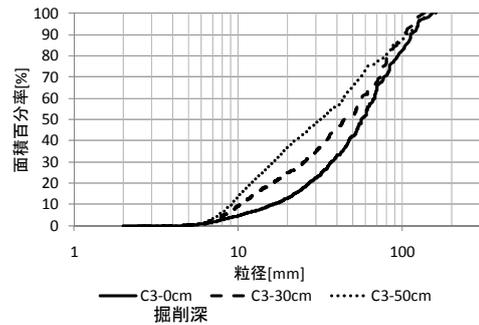
初期河床形状データの作成には3章で示した洪水前の数値地形データと横断測量データを用いる。計算メッ



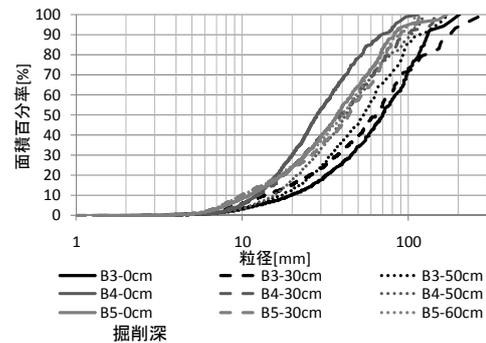
(a) 砂州上の平面位置の違いによる粒度分布



(b) 砂州上の上流面における鉛直方向の比較



(c) 砂州上の中間位置における鉛直方向の比較



(d) 砂州側岸における鉛直方向の比較

図-5 各調査地点における粒度分布の比較

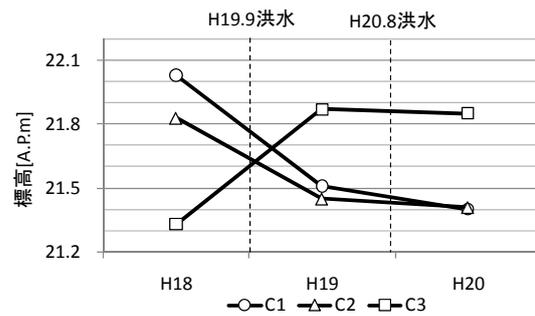


図-6 調査地点の河床高変化時系列

シユは二ヶ領宿河原堰から二ヶ領上河原堰区間において縦横断方向に幅が約10mになるように作成している。境界条件は図-7に示すように上流端に25.0km, 下流端に21.6kmで観測された水位ハイドログラフを再現するように与えている。粗度係数は低水路に0.022, 高水敷に0.027を与えている。交換層厚は最大粒径程度の0.1m(図-8)とし, 交換層の下には0.2mの層(堆積層)を鉛直方向下向きに26層設けている。初期の粒度分布については図-8に示すように平成17年度に23.0km, 24.0km, 25.0km周辺で調査されている結果を平均した粒度分布を6つの粒径階に分割し, 交換層以下において同一に与えた。

(3) 解析結果と観測結果の比較

図-7に観測と解析の水位ハイドログラフの比較を示す。二ヶ領宿河原堰上流(22.5km)の解析水位の時間変化は, 初期を除いて観測値を再現している。観測水位が初期に低いのは洪水前に行われた二ヶ領宿河原堰のゲート操作を考慮せず, 全解析時間でゲートを全開としているためと考えられる。流量については, 図-9に示すように, 解析流量(25.0km)が石原観測所(27.8km)における観測流量を再現している。図-10に調査を行った砂州の周辺における解析終了時の河床形状を示す。図-3(c)で示した実測による洪水後の砂州形状と比較して解析による砂州は下流への移動量が多い。砂州の河床高が上流側に比べ砂州中間や下流側で高くなっていることは実測を再現している。

図-11に調査砂州周辺における表層の平均粒径コンターを示す。図-5(a)に示した上流面で粗く, 下流方向に細くなっていく実測での河床材料の傾向を解析結果は説明している。図-12(a)にC1,C2における鉛直方向の粒度分布を示す。C1,C2は図-13に示すように洪水期間中において河床高が低下し続けているため, 表層より下の層では初期の一定の粒度分布のままである。このように, 河床面近くであっても河床が低下する砂州の上流部などでは, 直前の洪水によって形成された河床材料でないため, 砂州の粒度構成を明らかにするためには, 継続的な河床変動を調べていく必要がある。一方, C3では図-13に示すように, 洪水減衰期に河床高が上昇(約20cm)している。そのため, 図-12(b)の実線と破線で示す粒度分布は洪水減衰期に堆積した河床材料である。図-12(b)に示すC3での鉛直方向の粒度分布は, 深いほど細かい傾向にある。これは図-5(c)の特徴と同様である。堆積分の粒度分布が堆積前の表層付近の粒度分布(C3-30~50cm)よりも粗いのは, 洪水ピーク付近に上流から運ばれた相対的に大きい河床材料が堆積したためである。表層付近(C1-0~10cm)が最も粗いのは洪水減衰期の終盤に粗粒化した影響である。

このように, 混合粒径を考慮した河床変動解析を行い, 現地調査結果の平面的, 鉛直的な砂州の粒度構成について傾向を捉えることができた。しかし, 河床形状や粒度

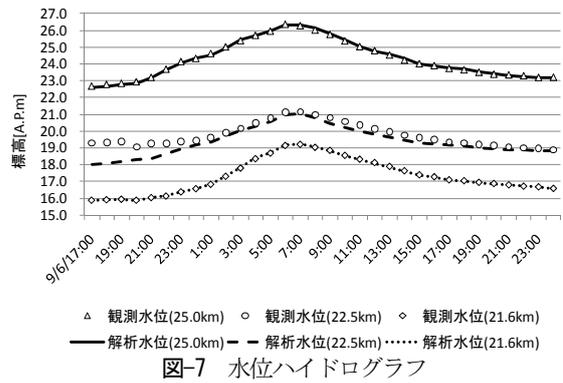


図-7 水位ハイドログラフ

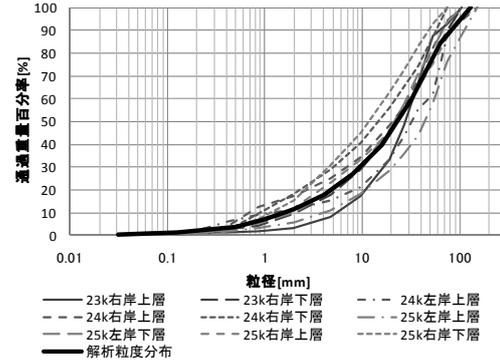


図-8 解析で用いた粒度分布



図-9 流量ハイドログラフ

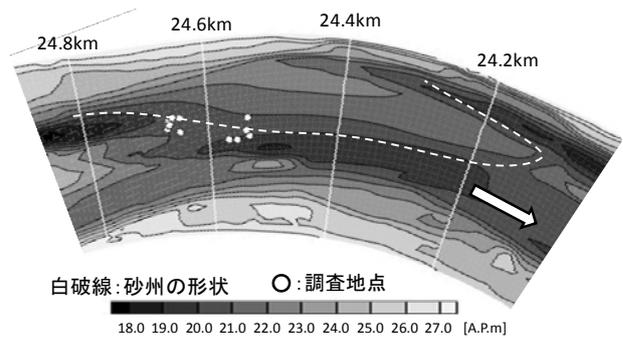


図-10 解析終了時の砂州形状

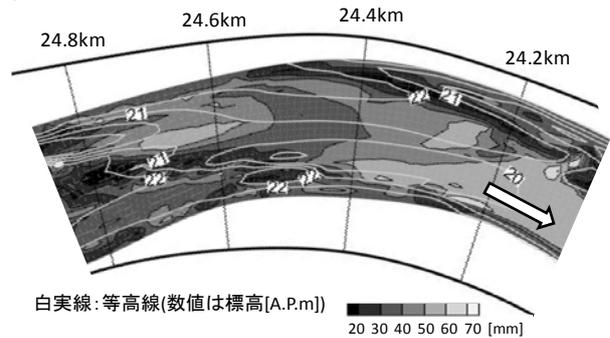


図-11 平均粒径コンター(解析終了時)

分布の定量的な精度は低い。これは、初期条件における河床材料の条件を平面、鉛直に対して一定に与えていることが要因の一つであると考えられる。

7. 結論

本研究では、平成19年9月洪水を対象に、密な地形情報と河床材料に関する現地調査の結果を基に砂州の形状変化と粒度特性について検討し、河床変動解析を用いて砂州の変形と粒度構成の再現を試みた。

- (1) 数値地形データと横断測量データを用いることで洪水前後における砂州の移動と変形を三次元的に把握することができた。洪水前後の砂州の形状から、調査を行った砂州の洪水流による形状の変化や波高、波長の発達について定量的に示した。
- (2) 砂州を構成する表層の河床材料は上流域で粗く、中流域で細かいことを示した。粒度の鉛直方向の構造は砂州の形成過程によって異なることを示した。
- (3) 混合粒径を考慮した河床変動解析を行い、平面的、鉛直的な粒度構成の傾向を捉えることができた。しかし、現地調査による実測値と比較すると、河床変動量に課題を有する。また、砂州を構成する粒度分布は経年的に洪水を受けることで形成されるため、経年的な砂州の移動、変形について検討することが重要と考えられる。

謝辞：本研究の一部は、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業の支援によって行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 第12回多摩川水系河道計画検討委員会資料，国土交通省京浜河川事務所，2007.
- 2) 忠津哲也，鈴木研司，内田龍彦，福岡捷二：洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増大について，河川技術論文集，第15巻，pp. 249-254，2009.
- 3) 忠津哲也，内田龍彦，石川武彦，福岡捷二：洪水時の砂州の変形と河川構造物周辺の局所洗掘，水工学論文集，第54巻，pp. 829-834，2010.
- 4) 塚本洋祐，福岡捷二，須賀正志，澤原和哉，長田健吾：石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状，河川技術論文集，第14巻，pp. 7-12，2008.
- 5) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用，水工学論文集，第53巻，pp. 1081-1086，2009.
- 6) 岡村誠司，内田龍彦，福岡捷二：一般座標系における渦度方程式を用いた準三次元解析，第36回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，II-1，2009.
- 7) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp. 59-69，1972.
- 8) 平野宗夫：Armoringをともなう河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，pp. 55-65，1971.
- 9) 芦田和男，江頭隼治，劉炳義：二層モデルによる複断面河道の流れおよび河床変動の数値解析，京都大学防災研究所年報，第35号，B-2，pp. 1-22，1992.

(2010. 4. 8受付)

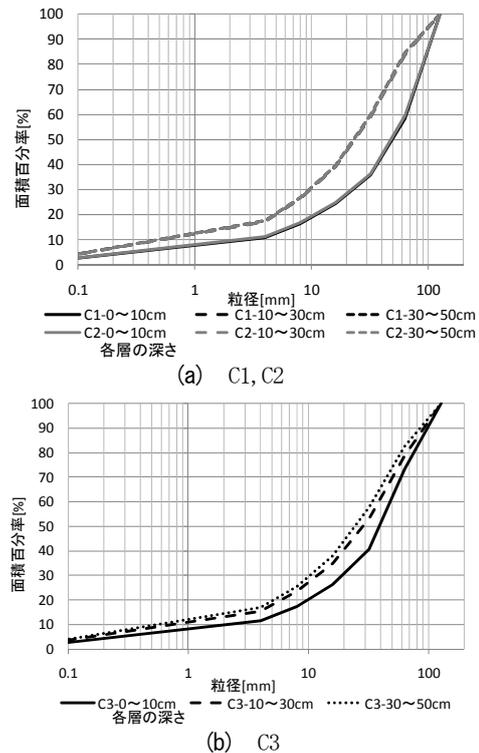


図-12 解析終了時における鉛直方向粒度分布

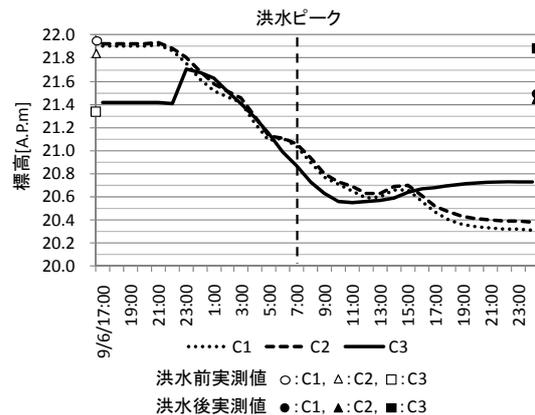


図-13 C1, C2, C3を含むメッシュにおける洪水期中の河床高変化