

大規模洪水による高水敷化した砂州河岸の洗掘に伴う船底形断面形の形成

FORMATION OF SHIP-BOTTOM-SHAPED CHANNEL DUE TO SCOURING OF IMMOBILIZED SANDBAR RIVERBANKS BY LARGE FLOODS

後藤勝洋¹・後藤岳久¹・瀬尾敬介²・福岡捷二³
Katsuhiko GOTOH, Takahisa GOTOH, Keisuke SEO and Shoji FUKUOKA

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

²非会員 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フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

多摩川中流部では、河川横断構造物を計画的に設置・改修してきたことで、近年、低水路河床高の縦断形が維持され、低水路幅の拡大とともに河道が安定化している。本稿では、多摩川中流部の長期的な実測データと準三次元洪水流・河床変動解析を用い、洪水エネルギー分布の視点から、高水敷化した砂州河岸の洗掘により低水路幅が拡幅されることで、河道断面形が自然河川の河道形状である「船底形断面形」を形成する機構を明らかにする。高水敷化した砂州河岸の洗掘を受けているJR中央線上下流区間では、河道が二極化する前の昭和40年代の低水路幅に戻るように変化している。これは、河道全体で洪水エネルギーが適切に分担されるように、河道断面形が低水路河床と高水敷(砂州)が緩やかに連続する「船底形断面形」に近付いているためと考えられる。一方、「船底形断面形」に改修された多摩大橋周辺地区では、洪水流量に応じて、緩やかな洪水エネルギー分布が保たれており、無次元流量と無次元水面幅・水深の関係も連続的に変化していることから、計画規模であった令和元年10月洪水に対して安定な河道形状を呈している。

Key Words : sediment transport, riverbank erosion, stabilization of river channel, ship-bottom-shaped channel, energy distribution of flood flows

1. 序論

多摩川中流部(図-1)は、河床勾配が1/200~1/400程度の急流河川であり、昭和30年代以前は土砂移動が活発で、自然の豊かな広大な砂州河道が形成されていた。しかし、高度経済成長期の大量の砂利採取(昭和39年に禁止)や水利用のための固定堰(日野用水堰(45.2km)、四谷本宿堰(38.2km))の建設によって土砂移動量が減少し、洗掘を受けやすい土丹層の露出に伴い低水路の河床低下が進行し、砂州の高水敷化、低水路幅の縮小化により、特徴的な砂州河道の姿は失われていった。多摩川中流部の土砂移動の不連続が治水と河川環境へ与える影響は深刻であり、土砂移動状況を改善し、維持管理しやすい河道の形成が急務となっていた。そのため、多摩川中流部では、河川横断構造物の敷高を計画的に設定し改修してきたことで、近年では、低水路河床高の縦断形が維持されるようになり、大規模洪水に伴い高水敷化した砂州河岸が洗掘され、低水路幅の拡大とともに河道が安定しつつある¹⁾。

本稿では、多摩川中流部の日野用水堰~浅川合流点区間(45.2~37.0km)を対象に、まず長期にわたる実測データ

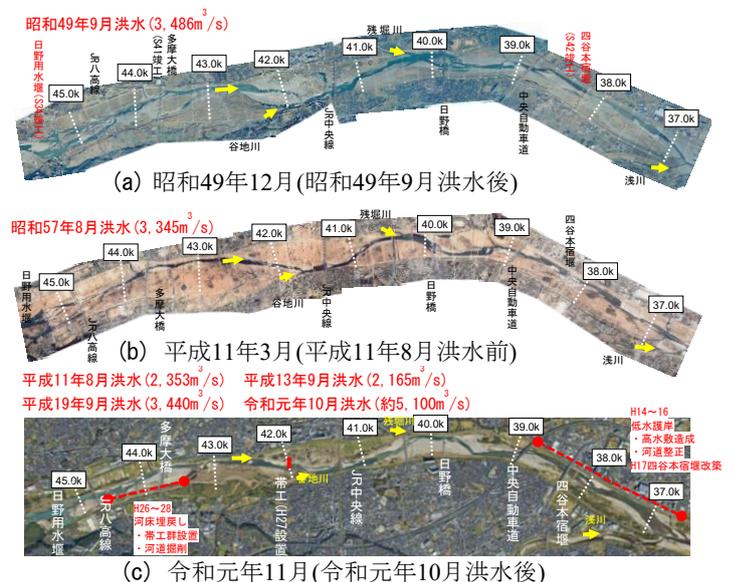


図-1 多摩川中流部(45.2~37.0km区間)の河道の経年変化

を用いて、近年では、低水路河床高が安定化したことにより、高水敷化した砂州河岸が洗掘され、昭和40年代の低水路幅が回復してきていること、それにより河道断面形が自然河川に見られる「船底形断面形」²⁾に近付いて

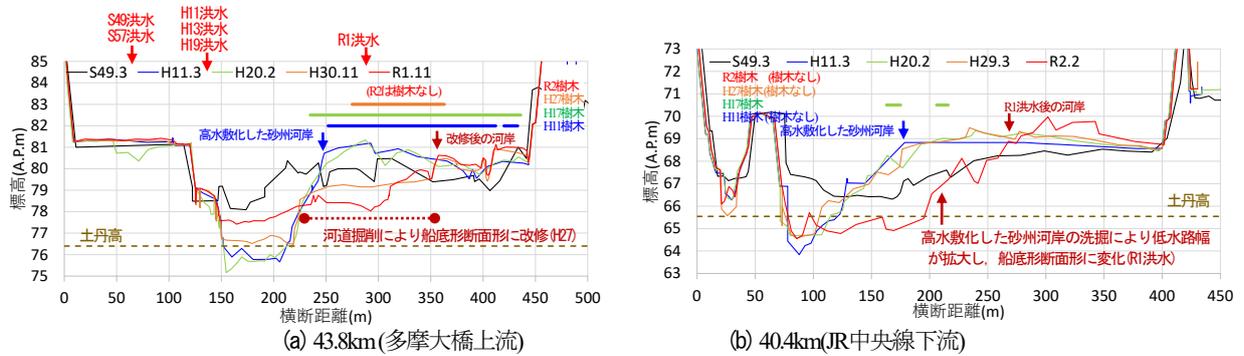


図-2 横断形状と樹木分布の経年変化



図-3 低水路平均河床高縦断分布の経年変化

いることを明らかにする。さらに、計画高水流量規模に相当し、高水敷化した砂州河岸の顕著な洗掘が生じた令和元年10月洪水(令和元年東日本台風)を対象とし、準三次元洪水流・河床変動解析を用いて、大規模洪水に対して低水路幅が拡幅され、「船底形断面形」を形成する機構を考察し、断面内の洪水流のエネルギー分布の観点から安定な河道断面形の形成について論じる。

2. 河道の長期的変化から見た低水路河床高の安定化と昭和40年代の低水路幅の回復

本章では、既報¹²⁾で明らかにした多摩川中流部の低水路河床高の安定化の機構について述べ、河道断面形が「船底形断面形」を形成することを実測データに基づき示す。福岡¹⁾によれば、「船底形断面形」とは、自然河川の河道形状に近い低水路と砂州を含む高水敷が緩やかに連続した河道断面形と定義されている。多摩川中流部の河道では、図-2の横断図に示すとおり、河川改修や洪水に伴う河床の安定化の中で、高水敷化した砂州河岸が洗掘され低水路幅が拡大することにより、低水路河床と砂州及び高水敷化した砂州が縦横断的に緩やかに連続した河道断面形に変化している。本稿ではこれを「船底形断面形」と呼んでいる。

(1) 多摩川中流部の低水路河床高の安定化の機構

図-2は横断形状(43.8km, 40.4km)と樹木分布の経年変化、図-3は対象区間(日野用水堰～浅川合流点:45.2～37.0km)の

低水路平均河床高縦断分布の経年変化を示す。多摩川中流部では、昭和30年代に行われた大量の砂利採取や固定堰の設置により、図-2(a)(b)、図-3に示すとおり、低水路の河床低下が進行し、河道が二極化したことで低水路幅が狭まっており、高水敷化した砂州上に樹木が繁茂したことで、特徴的な砂州河道は失われた(図-1(b))。

平成11年以降、平成11年洪水(2,353m³/s)、平成13年洪水(2,165m³/s)、平成19年洪水(3,440m³/s)、令和元年10月洪水(約5,100m³/s)と大規模洪水が多く発生し、河川改修の効果が低水路河床高や低水路幅に顕われ始めた。すなわち、当該区間の低水路河床高は、堰や横断構造物の護床工の敷高(図-3の黒い点線)に規定されほぼ維持されるようになった。低水路河床高が維持されることにより、平成11年以降、頻発する大規模洪水では高水敷化した砂州河岸の洗掘が助長され(図-2(b))、低水路河床への土砂供給と低水路幅の拡大が促されることで低水路の安定化に寄与している。

一方、河道の二極化が著しかった多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、平成26～28年に砂礫による低水路河床の埋戻しと高水敷化した砂州の掘削、連続的な帯工群の設置等による「船底形断面河道」への改修が行われた。それ以降、帯工群によって低水路河床高は概ね維持されており、低水路幅が広がったことで、昭和40年代の砂州河道が回復しつつあり、砂州の比高差に応じて洪水による冠水・攪乱を適度に受けることで砂州の樹林化も抑制されている(図-1(c)、図-2(a))。

(2) 低水路河床高の安定化に伴う低水路幅の回復、船底形断面形の形成

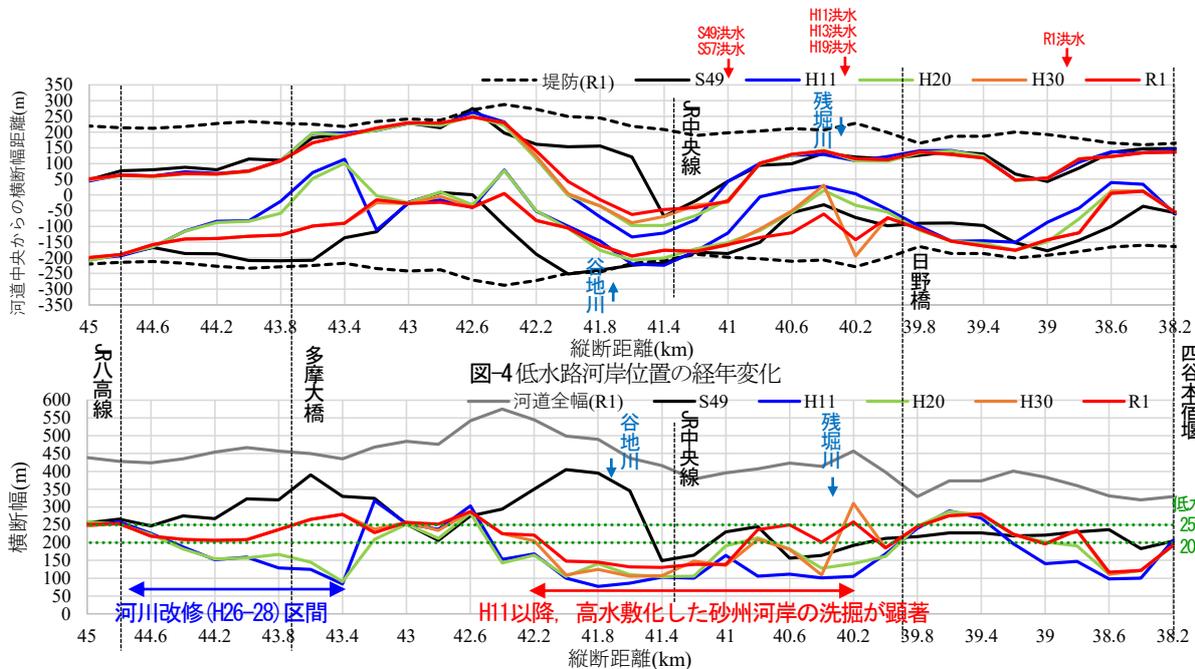


図-4 低水路河岸位置の経年変化

図-5 低水路幅の経年変化

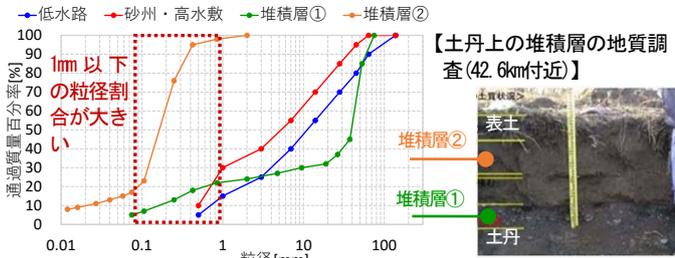
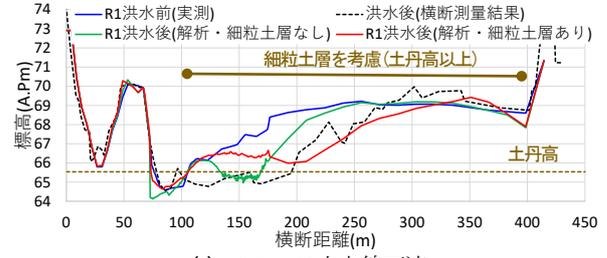


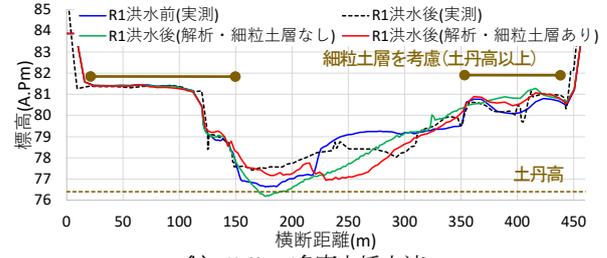
図-6 砂州(土丹上の堆積層)の粒度分布の設定

図-4は低水路河岸位置の経年変化、図-5は低水路幅の経年変化を示す。図-4、図-5より、45.0～44.8km、43.2～42.6km、40.0～39.2km区間では、昭和49年以降、低水路河岸の位置がほとんど変化していない。多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)やJR中央線上下流区間(42.2～40.2km)では、砂州の高水敷化に伴い低水路幅が顕著に狭まっていたが、平成11年以降では、低水路幅が拡大し、回復しつつある。昭和49年以降、低水路河岸の位置が経年的に大きく変化していない区間では、図-5より、低水路幅が200～250m程度で概ね維持されている。多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)においても、平成26～28年の河川改修により昭和40年代の低水路幅に拡幅されたことで、図-2(a)、図-5より、計画規模に相当する令和元年10月洪水に対して低水路幅は維持されており、これにより、「船底形断面形」はほぼ保たれている。

一方、砂州の高水敷化により低水路幅が狭まっていたJR中央線上下流区間(42.2～40.2km)では、低水路河床高が維持されるようになったことで、図-2(b)、図-5より、平成11年以降の大規模洪水の発生とともに高水敷化した砂州河岸が洗掘を受け、低水路幅が拡大している。洗掘を受けた河岸のほとんどは、昭和49年洪水以降に土砂が堆積し高水敷化した砂州であり、河道が二極化する前の昭和40年代の低水路幅に戻るように変化している。40.4km断面(図-2(b))では、令和元年10月洪水によって高水敷化した砂州河岸の顕著な洗掘が生じ、低水路幅が洪



(a) 40.4km(JR中央線下流)



(b) 43.8km(多摩大橋上流)

図-7 令和元年10月洪水後の河床変動解析結果、観測結果の比較水前の2倍の200m程度となり、昭和40年代の低水路幅(200～250m程度)相当の幅に広がっている。その結果、河道断面形が、低水路河床と高水敷(砂州)が緩やかに連続する「船底形断面形」に変化している。

3. 洪水エネルギー分布から見た高水敷化した砂州河岸の洗掘による船底形断面形の形成の機構

前章の実測データの分析より、JR中央線上下流区間(42.2～40.2km)では、近年の低水路河床の安定化と大規模洪水の頻発により、高水敷化した砂州河岸が洗掘を受け、低水路幅が回復し、「船底形断面形」が形成されつつある。一方、昭和40年代の低水路幅に拡幅し、「船底形断面形」に改修された多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、観測史上最大の令和元年10月洪水に対しても、「船底形

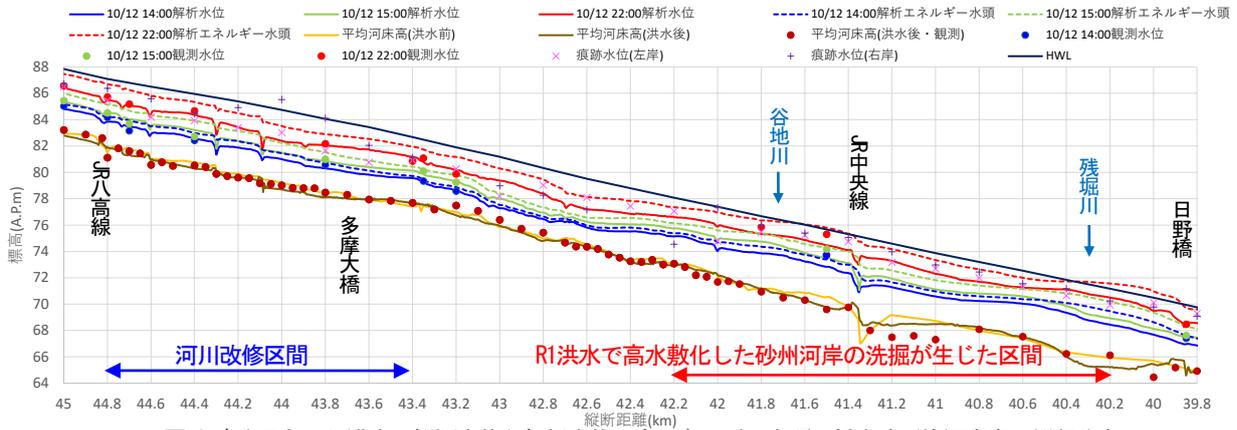


図-8 令和元年10月洪水の観測水位と解析水位・全エネルギー水頭、低水路平均河床高の縦断分布

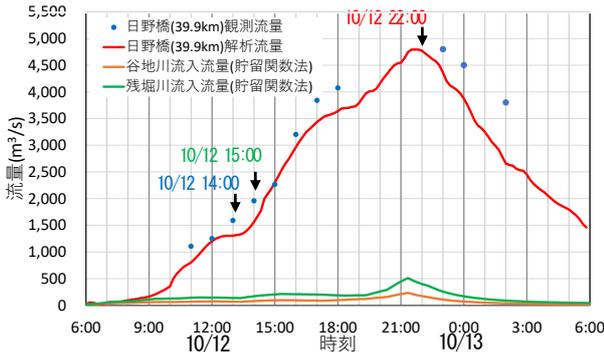


図-9 令和元年10月洪水の観測流量と解析流量、支川流入量ハイドログラフ

断面形」が維持されていた。このことから、本章では、この二つ特徴的な区間に着目し、令和元年10月洪水を対象とし、準三次元洪水流・河床変動解析結果による洪水エネルギー分布と無次元流量と無次元河幅・水深の関係式(福岡の式³⁾)を用い、両区間の検討結果を比較することで、安定な河道断面形とされる「船底形断面形」の形成機構について考察する。

(1) 解析方法と解析条件

洪水流解析法については、水深積分の枠組みで三次元流れを再現できる竹村ら(2019)⁹⁾による準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS法)を用いた。河床変動解析法は、長田・福岡(2012)⁹⁾による掃流砂の解析法と、長谷部ら(2022)⁹⁾による浮遊砂の解析法を組み合わせ、掃流砂と浮遊砂の運動を一体的に評価する解析法を用いた。

また、河床変動解析においては、砂州河岸の洗掘を評価するためには、砂州河岸部の粒度分布を適切に考慮することが重要となる。図-6は多摩川中流部42.6km付近の砂州で実施された土質調査結果(平成21年国土交通省)を示しており、当該区間の土丹層の上には、経年的な洪水によって、粒径1mm以下の細粒分を多く含む細砂・シルト混じりの砂層(図-6の緑・オレンジ線の粒度分布)が堆積している。このため、本解析では、土丹層の高さ(河道中央のボーリング調査結果)より高い砂州(高水敷)の範囲(図-7の茶線)に対して、これらの細粒土層を含む粒度分布を設定した。具体的には、低水路の粒度分布(対象区間の平均的な粒度分布：図-6の青線の粒度分布)に対

して、1mm以下の割合を2倍にした粒度分布(図-6の赤線の粒度分布)を砂州(高水敷)に与えるものとした。

(2) 洪水エネルギー分布から見た高水敷化した砂州河岸の洗掘による船底形断面形の形成の機構

図-7は令和元年10月洪水の解析結果及び実測による横断形状(40.4km, 43.8km)の変化、図-8は観測水位と解析水位・全エネルギー水頭、低水路平均河床高の縦断分布、図-9は観測流量と解析流量、支川流入量ハイドログラフを示す。図-8、図-9より、解析結果は、実測の洪水水面形・流量の時間変化を概ね説明できている。

図-7(a)に示す高水敷化した砂州河岸の顕著な洗掘が生じた40.4km断面では、細粒土層を考慮した解析結果(赤線)は細粒土層を考慮していない解析結果(緑線)と比べて砂州河岸の洗掘状況の再現性が大きく改善されており、洪水後に形成された実測(黒点線)の「船底形断面形」をほぼ再現できている。また、図-7(b)に示す43.8km断面では、洪水後の実測と比べて解析結果は河床洗掘量が小さくなっているものの、洪水後も維持されている低水路幅や「船底形断面形」は概ね再現できている。本解析結果を用いて、「船底形断面形」が形成される機構を以下に考察する。

図-10、図-11は、多摩大橋周辺地区(45.2~43.0km)、JR中央線上下流区間(42.2~40.0km)の底面流速分布の時間変化、図-12、図-13は、同区間内の代表断面(43.8km, 40.4km)における横断形状・横断面内流速分布の解析結果を示す。さらに、洪水流の持つエネルギーに着目するため、図-8、図-12、図-13には、水面形に速度水頭($(u^2+v^2+w^2)/2g$)を付加した全エネルギー水頭を示している。ここに流速 u,v,w は、図-8では断面内の平均値、図-12、図-13では水深平均値を用いた。

まず、「船底形断面形」に改修されて以降、低水路幅が維持されている多摩大橋周辺地区について考察する。当該地区の43.8km断面に着目すると、図-10、図-12に示すように、各流量段階に対して、流速分布及び全エネルギー水頭の分布形が低水路と高水敷で横断的に緩やかに連続した状態を維持しており、洪水ピーク時もその分布形は大きく変化していない。このことから、「船底形断

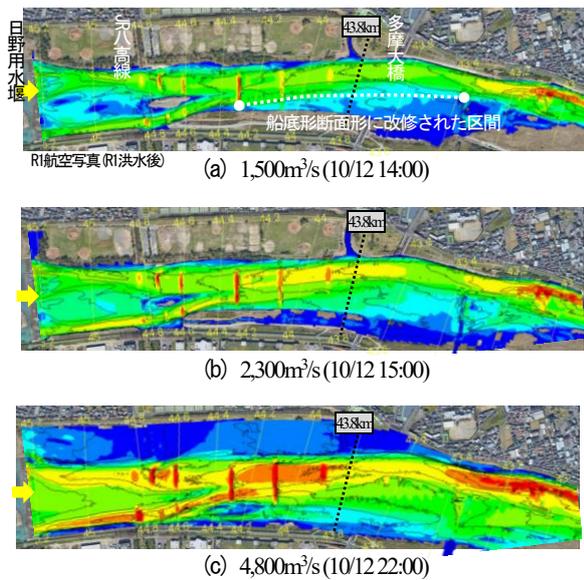


図-10 底面流速分布の時間変化の解析結果(45.2~43.0km)

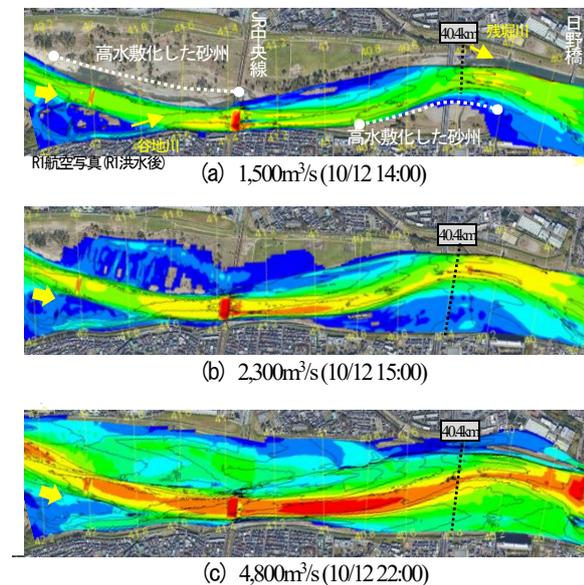


図-11 底面流速分布の時間変化の解析結果(42.2~40.0km)

面形」が、河道全体で洪水エネルギーを適切に分担している河道形状であることが分かる。

図-14は、福岡³⁾の安定河道の無次元流量と無次元河幅・水深の関係式と、令和元年10月洪水の解析結果から得られた各断面(43.8km, 40.4km)における無次元諸量の時間変化の関係を示す。福岡の無次元流量と無次元河幅・水深の関係式は式(1), (2)に示される。

$$2.8 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.4} \leq \frac{B}{d_r} \leq 6.33 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.4} \quad (1)$$

$$\frac{h}{d_r} \leq 0.14 \left(\frac{Q}{\sqrt{g I d_r^5}} \right)^{0.38} \quad (2)$$

ここに、 Q : 流量, B : 河幅, h : 水深, I : 勾配, d_r : 代表粒径($=d_{60}$), g : 重力加速度である。河幅 B , 水深 h は各流量時の水面幅とその水面幅全体での平均水深, 代表粒

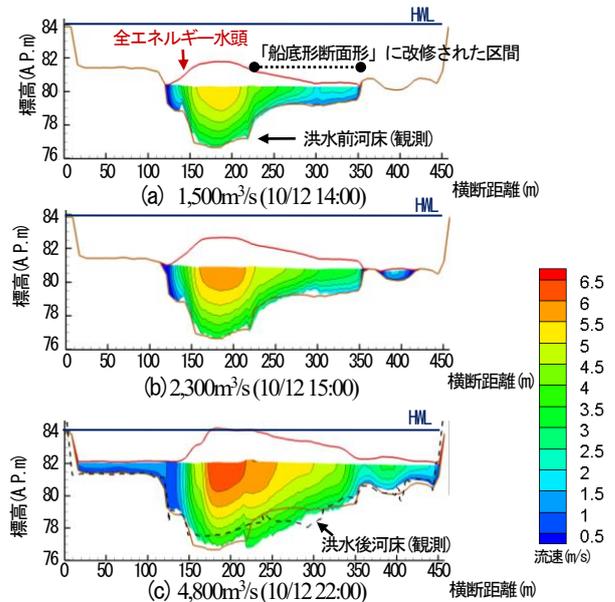


図-12 横断形状と横断面内流速分布・全エネルギー水頭の時間変化の解析結果(43.8km)

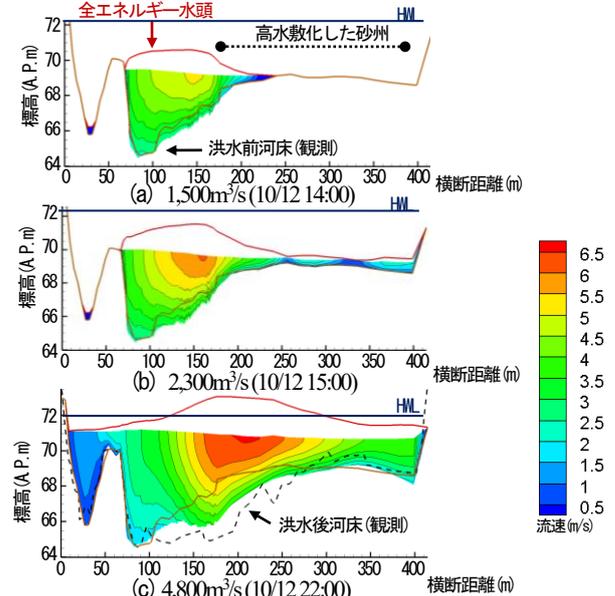


図-13 横断形状と横断面内流速分布・全エネルギー水頭の時間変化の解析結果(40.4km)

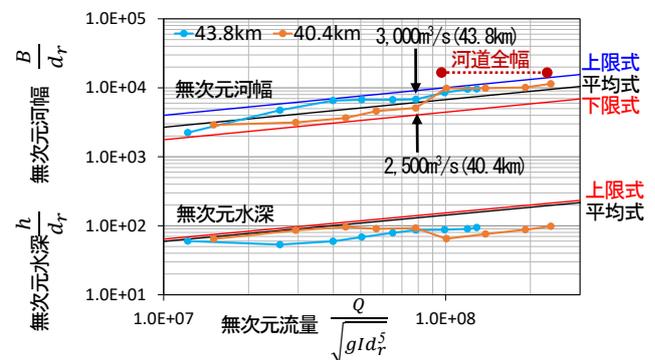


図-14 令和元年10月洪水時の無次元流量と無次元河幅, 無次元水深の関係

径 d は平成30年調査結果の60%粒径, 勾配 I はエネルギー勾配を与えた。

「船底形断面形」に改修された43.8km断面では、無次元流量と無次元水面幅・水深の関係(図-14の青線)を見ても、無次元水面幅は福岡の式の上限式と下限式の間、無次元水深は上限式を下回るそれぞれ安定な水面幅・水深の領域にプロットされ、無次元流量の増加に応じて福岡の式に概ね平行するように連続的に変化している。洪水流量が3,000m³/s程度を超えると、水面幅は河道全幅となり、洪水流の横断面内のエネルギー分布(図-12(c))からも、低水路と高水敷で洪水エネルギーが分担され、安定河道の関係を満足している。

一方、高水敷化した砂州河岸の洗掘が生じたJR中央線上下流区間では、図-11(a)(b)、図-13(a)(b)より、洪水流量が2,000m³/s程度を超えると、42.0km左岸、40.6km右岸周辺の高水敷化した砂州が冠水し、砂州河岸の洗掘が生じ始めている。この時、低水路と高水敷化した砂州上の流速差は大きく、全エネルギー水頭も砂州河岸付近をピークとして横断的な変化の大きい分布形となっている。その後、洪水流量の増加に伴い、砂州上の水深が高くなることで、洪水ピーク時(図-11(c)、図-13(c))には、高速流(主流)が高水敷化した砂州河岸付近に発生し、それが砂州河岸の洗掘を促している。その結果、全エネルギー水頭の分布形が横断的に緩やかになっており、低水路に集中していた洪水流のエネルギーが河道全体で適切に分担されるように高水敷化した砂州河岸の洗掘が生じ、河道形状が「船底形断面形」に変化している。

図-14より、高水敷化した砂州河岸の洗掘が生じた40.4km断面(赤線)では、無次元流量が低い段階では無次元水面幅が平均式と下限式の間領域内にプロットされていたが、流量が2,500m³/s程度を超えると、水面幅が急増しほぼ河道全幅となるため、平均式と上限式の間領域内で変化するようになる。また、河道全幅での平均水深は小さくなるため、無次元水深は福岡の式の平均式を下回る安定な領域内にプロットされる。この時間帯では、十分広がった水面幅となり、安定河幅の関係を満足しているが、高水敷化した砂州河岸はなお洗掘を受け低水路幅は拡大していた。このことは、令和元年10月洪水の流量規模に達したことで、低水路幅が安定幅に拡がり、「船底形断面形」を形成されたことを示している。

4. まとめ

本稿では、多摩川中流部を対象に、長期的な河道の実測データを分析した結果、JR中央線上下流区間(42.2～40.2km)では、低水路河床高の縦断面形が維持されるようになったことで、平成11年以降、大規模洪水によって高水敷化した砂州河岸の洗掘が促され、河道が二極化する前の昭和40年代の低水路幅に回復しつつあること、それに伴い、河道断面形が「船底形断面形」に変化していることが明らかとなった。

この「船底形断面形」の形成機構について、令和元年10月洪水の洪水流・河床変動解析結果を用い、洪水エネルギー分布の観点から考察した結果、JR中央線上下流区間では、河道全幅での無次元流量と無次元水面幅の関係は安定河道の関係を満足し、この時、洪水エネルギーが河道全体で適切に分担されるように高水敷化した砂州河岸が洗掘され、低水路河床と高水敷(砂州)が連続する「船底形断面形」に変化していることが明らかとなった。一方、「船底形断面形」に改修された多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、洪水流量に応じて、洪水エネルギーが緩やかな分布形となっており、洪水エネルギーが低水路と高水敷で適切に分担される状態が保たれており、無次元流量と無次元水面幅・水深の関係も安定河道の領域内で連続的に変化していることから、計画規模である令和元年10月洪水に対して安定な河道形状を呈している。

上記のように、実測データに基づく河道の長期的な変化の分析と、高精度な準三次元洪水流・河床変動解析法による大規模洪水時の河道縦横断面形の変化とそれに伴う洪水流のエネルギー分布の応答関係、安定河道の無次元流量と無次元河幅・水深の関係(福岡の式)とを合わせて河道縦横断面形を評価することは、治水と河川環境の調和した「船底形断面形」を基本とした新たな河道設計、維持管理のための重要な情報を与えることを示した。

参考文献

- 1) 後藤勝洋, 下條康之, 後藤岳久, 福岡捷二: 多摩川中流河道の洪水被害と対策, 改修工事に対する河道の長期的(昭和22年～令和元年)変化・応答, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.1_391-1_396, 2021.
- 2) 後藤勝洋, 寺西浩三郎, 後藤岳久, 福岡捷二: 多摩川中流部における河道の長期変遷(1947年～2020年)から見た低水路河道の安定・不安定と河川植生の相互関係の分析, 河川技術論文集, 第28巻, pp.217-222, 2022.
- 3) 福岡捷二: 温暖化に対する河川の適応技術のあり方-治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.4, pp.471-489, 2010.
- 4) 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.
- 5) 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, Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 6) 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, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, pp.1_967-1_972, 2022.

(2023.3.24受付)