

高水敷化した砂州上を流れる洪水流による安定な低水路幅の形成とその評価法

河道の長期的な変化 高水敷化した砂州河岸の洗掘
安定な低水路幅

中央大学研究開発機構 正会員 ○後藤 勝洋
中央大学研究開発機構 正会員 後藤 岳久
中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

1. 序論

低水路河岸の洗掘は堤防や河川構造物の被災の要因となるため、どの程度の洪水流量でどの程度の洗掘・拡幅が発生するか、その結果、どの程度の低水路幅があれば河道は安定するかを明らかにすることは重要である。安定な河幅に関する研究として、福岡¹⁾は、次元解析手法に基づき国内外の沖積地河川のデータを用い、安定河道の無次元流量と無次元河幅・水深の関係式(福岡の式)を導いた。福岡の式に基づき、河道条件の異なる様々な河川に対して、河道の安定性の評価やそれに向けた改修方策の検討がなされている。

図-1 に示す多摩川中流部は、河床勾配が 1/200～1/400 程度の急流河川で、昭和 40 年代以前は広大な砂州河道が形成されていたが、高度経済成長期の大量の砂利採取と固定堰(日野用水堰(45.2km)、四谷本宿堰(38.2km))の建設等により土砂移動量が減少し、経年的な河床低下に伴う砂州の高水敷化、低水路幅の縮小により、多摩川の特徴的な砂州河道は失われてしまった。しかし近年では、これまでの河川改修により、低水路河床高が維持されるようになったことに加えて、大規模洪水の頻発化に伴い高水敷化した砂州の河岸が洗掘され、低水路幅の拡大が生じ、かつての砂州河道に戻る傾向が見られる²⁾。

本研究では、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、長期にわたる実測データに基づく河道の変化の分析と、顕著な砂州河岸の洗掘が生じた令和元年 10 月の洪水(令和元年東日本台風)による解析を通して、砂州河岸の洗掘が生じ始める流量とその洗掘機構を明らかにする。さらに、令和元年 10 月洪水前後の河道断面について砂州河岸の洗掘が生じ始める流量に対する水面幅の変化を福岡の式で分析し、安定な低水路幅の形成がどのように生じたかを考察する。

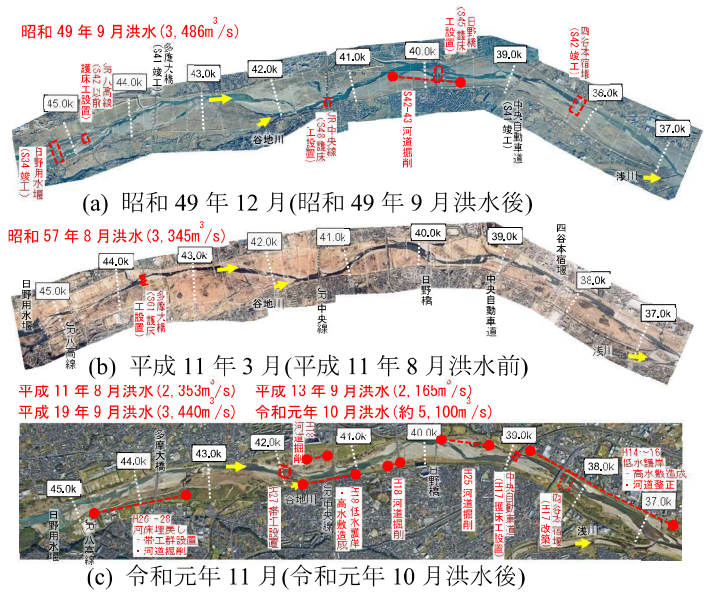


図-1 多摩川中流部(45.2～37.0km 区間)の河道の経年変化

2. 河道の長期的な変遷から見た低水路河床の安定化と低水路幅の回復

本章では、多摩川中流部におけるこれまでの洪水、河川改修に対する河道の長期的な変化から、低水路河床の安定化、低水路幅の回復過程について示す。図-2 は低水路平均河床高縦断分布の経年変化、図-3 は横断形状の経年変化を示す。

昭和 49 年河道(図-1(a))では、昭和 30 年代の砂利採取によって低水路が形成され、洪水に伴い河床低下が進行し、低水路が直線化している。低水路の河床低下は土丹を露出させ、さらなる河床低下を招いた。土丹は流水や石礫の移動等で剥がされやすく、土砂が堆積しにくいいため、図-2 に示すように、土丹の露出していない区間に比べて露出している区間では、昭和 49 年洪水(日野橋流量: 3,486m³/s)、昭和 57 年洪水(3,345m³/s)による河床低下量が著しく大きくなっている。図-3(a)より、両洪水によって、低水路の河床低下、砂州上の土砂の堆積が生じ、低水路河床と砂州の比高差が拡大している。昭和 57 年洪水後から平成 11 年まで、日野橋で 2,000m³/s を超える大規模洪水が発生していないため、砂州は殆ど冠水しなかった。このため、洪水流が低水路に集中して河床低下がさらに進行し、砂州の高水敷化、河道の二極化をもたらした。そして、図-1(b)に示す平成 11 年の河道は、低水路幅が狭まり、高水敷化した砂州上に樹木が繁茂し、多摩川の砂州河道の特性は失われていった。

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するようになり、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。JR 中央線上流～四谷本宿堰区間(42.2～38.2km)では、平成 11 年以降、図-2 に示す低水路の平均河床高の低下が抑制されて

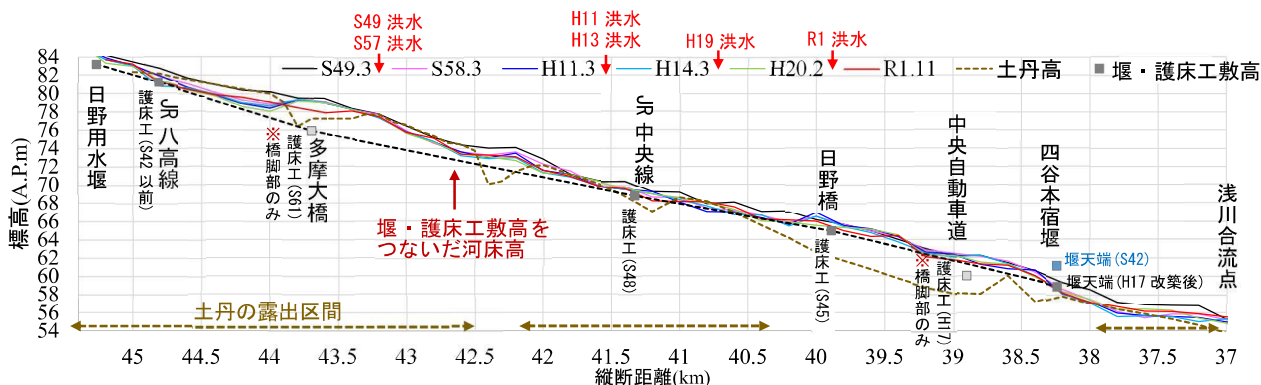
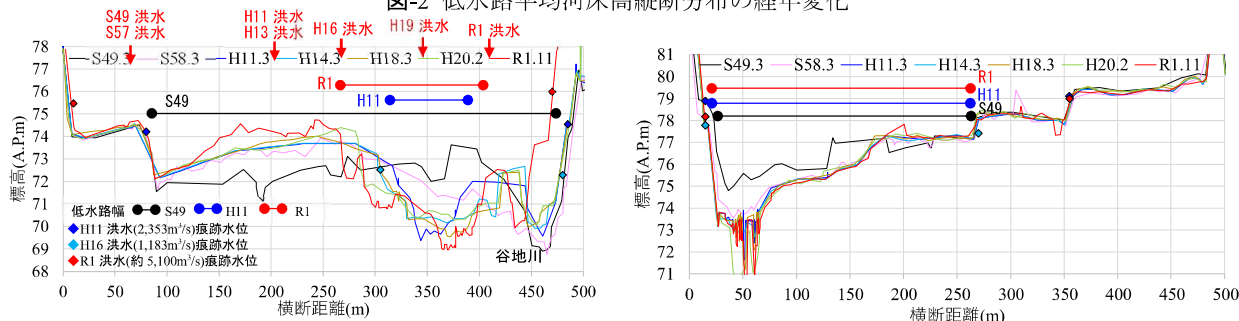


図-2 低水路平均河床高縦断分布の経年変化



(a) 41.8km (低水路幅が変化している断面)

(b) 43.0km (低水路幅が維持されている断面)

図-3 横断形状の経年変化

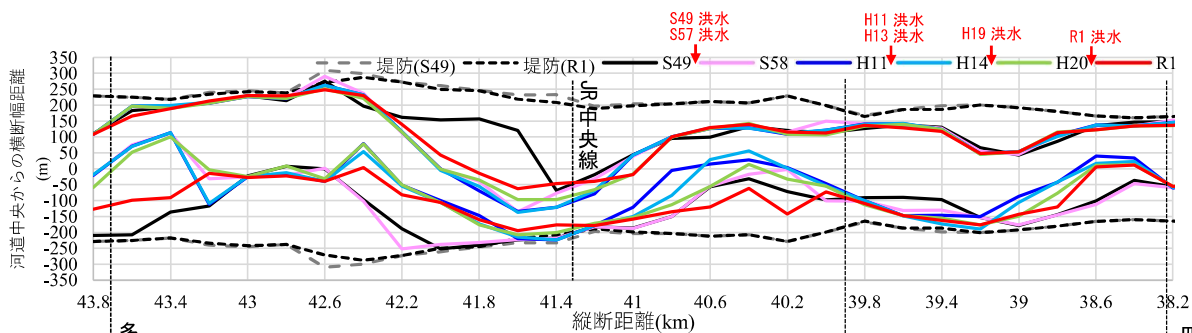


図-4 低水路河岸位置の経年変化

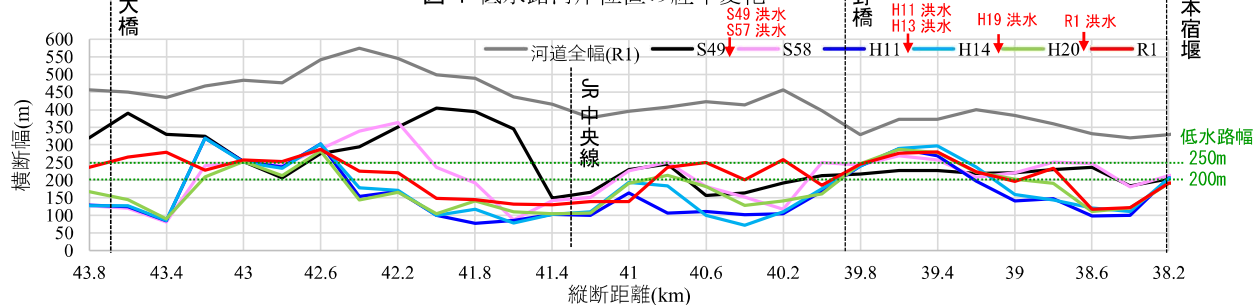


図-5 低水路幅の経年変化

いる。これは、多摩川の河床の縦断形は、河川横断構造物の改修に合わせて護床工の高さを計画的に決め、維持管理されてきたことと密接に関係している。日野橋(39.9km)、JR 中央線(41.35km)の橋梁付近の低水路の護床工の敷高によって、その上流の低水路河床高は敷高程度で維持されており、さらに、平成 13 年洪水によって被災した四谷本宿堰(38.2km)は、堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築し、縦断的に土砂移動が連続するように改善された。これらの改修により、低水路河床高の縦断形は、図-2 の黒い点線で示す堰・護床工の敷高をつないだ高さで維持された結果、図-3(a)に示すように、平成 11 年以降、頻発する大規模洪水によって砂州河岸の洗掘が促され、これにより、低水路幅が拡大し、砂州河岸から河床へ土砂が供給されることで、低水路河床高の安定に寄与している。

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、低水路河岸の位置は、昭和 49 年河道の低水路の範囲内で変化しており、砂州の高水敷化により低水路幅が狭まっていた区間(42.4~40.2km)では、平成 11 年以降の大規模洪水の発生とともに低水路幅が拡大している。砂州河岸の洗掘をもたらした洪水は、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水であり、それを下回る平均年最大流量規模の洪水(例えば、平成 16 年洪水($1,183\text{m}^3/\text{s}$))では、砂州河岸の洗掘

はほとんど生じていない。図-3(a)より、洗掘を受けた砂州河岸のほとんどは、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、昭和40年代の低水路幅に戻るように変化していることが分かる。一方、昭和49年以降、低水路幅が経年的に大きく変化していない区間(43.2～42.6km, 40.0～39.2km)では、図-3(b)、図-5に示すように低水路幅が200～250m程度で概ね維持されている。

3. 高水敷化した砂州河岸の洗掘機構

前章では、河道の長期的な変化の分析より、低水路河床の縦断高さが低水路護床工高さ等に規定されることでほぼ維持されている。これにより、洪水流量の増大は高水敷化した砂州の洗掘を促し、昭和40年代頃の低水路幅に戻るように変化していることが明らかとなった。そこで、準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS法)³⁾と非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法⁴⁾を用いて、戦後最大であった令和元年10月洪水の解析を行い、どの程度の流量で砂州河岸の洗掘が生じるか、その洗掘機構について考察する。

図-6は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-7は横断形状・横断面内流速分布の時間変化(40.6km)の解析結果を示す。図-6(a)(b)、図-7(a)(b)より、対象区間の低水路満杯流量は2,000m³/s程度であり、それを超えると、42.0km左岸、40.6km右岸周辺の高水敷化した砂州が冠水し、砂州河岸が洗掘を受け始める。さらに流量が増加すると、洪水ピーク付近(図-6(c)、図-7(c))では、高水敷化した内岸砂州上の水深が高くなることで、流速4.0m/s以上の主流が砂州河岸上を流下し、砂州河岸の洗掘が助長されている。平成11年以降では、低水路河床高がほぼ維持されるようになったこと、低水路満杯流量2,000m³/sを超える洪水が頻発したことによって、高水敷化した砂州の低水路寄りの河岸の洗掘が生じている。

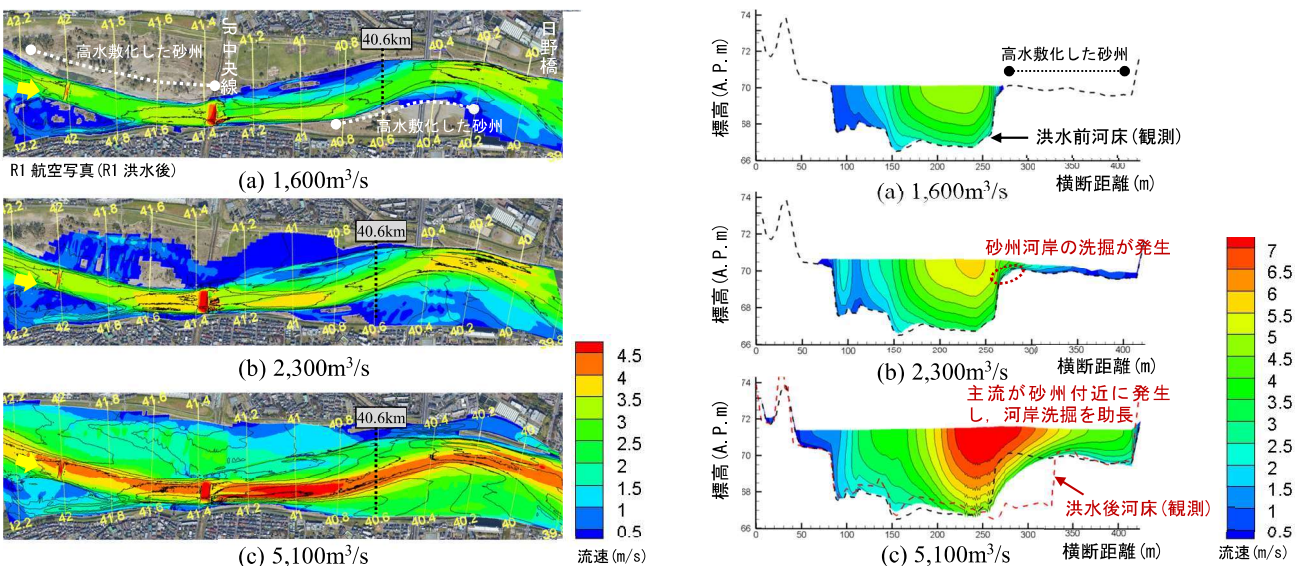


図-6 底面流速分布の時間変化の解析結果(42.2～40.0km) 図-7 横断形状と横断面内流速分布の時間変化の解析結果(40.6km)

4. 高水敷化した砂州河岸の洗掘を起こす流量と安定な低水路幅の関係

前章の分析結果より、流量2,000m³/s程度が低水路満杯流量に相当し、それを超えると高水敷化した砂州が冠水し、砂州上の流れにより河岸洗掘が促されることによって、昭和40年代の低水路幅(200～250m程度)に戻るように変化する機構が明らかとなった。福岡¹⁾の安定河幅の式が低水路の安定な河幅と流量の関係についても近似的に成立するものとし、低水路満杯流量2,000m³/sと低水路幅を用いて、安定な低水路幅について考察する。福岡の無次元流量と無次元河幅の関係式は式(1)に示される。

$$2.8 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} \right)^{0.4} \leq \frac{B}{d_r} \leq 6.33 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} \right)^{0.4} \quad (1) \quad \frac{h}{d_r} \leq 0.14 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} \right)^{0.38} \quad (2)$$

ここに、 Q : 河道形成流量、 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。対象区間は、低水路河床の縦断形が安定しつつあるJR中央線上流～四谷本宿堰区間(43.2～38.4km)のうち、令和元年10月洪水後の補修工事の影響が河床データに反映されている日野橋上下流区間(40.2～39.6km)を除く区間とし、 d_r は平成30年調査結果の当該区間の60%粒径(0.034m)、 I はエネルギー勾配である。

図-8は、令和元年10月洪水前と洪水後の河道(縦断200m間隔)に対して、2,000m³/s(低水路満杯流量)、5,100m³/s(令和元年10月洪水ピーク)流下時の無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深の関係を、令和元年10月洪水で砂州河岸の洗掘が生じた断面(42.2～40.4km, 38.6～38.4km)と洗掘が生じていない断面(43.2～42.4km, 39.4～38.8km)で区別してプロットしたものである。多摩川中流部では、令和元年10月洪水ピーク時(5,100m³/s)の水面幅はほぼ河道全幅となり、図-

8の無次元河幅で見ると、十分安定な河幅となっていることが分かる。

低水路幅に着目すると、令和元年10月洪水で砂州河岸が洗掘を生じた河道断面では、洪水前河道(赤の塗りつぶしの▲)の2,000m³/s 流下時の無次元水面幅は、平均式から下限式を下回る相対的に河幅の狭い領域にプロットされる。洪水後河道(青の塗りつぶしの▲)では、低水路幅が広がったことで、無次元水面幅は下限式を概ね上回る安定な河幅の領域にプロットされている。一方、令和元年10月洪水でも砂州河岸の洗掘が生じなかった河道断面では、洪水前、洪水後の河道(赤と青の白抜きの△)ともに、2,000m³/s 流下時の無次元水面幅は平均式から上限式の間相対的に河幅の広い領域にプロットされ、低水路幅は安定していることを示している。なお、洪水後河道で無次元水面幅が狭まっている断面も見られるが、これは砂州上の樹木の影響により河岸付近に土砂が堆積したためである。図-8に、実測データから明らかとなった、昭和49年以降、低水路幅が概ね維持されている断面の低水路幅200mと250mでの無次元水面幅と低水路満杯流量2,000m³/sでの無次元流量の関係をプロット(緑の▲)すると、それぞれ平均式、上限式付近にプロットされる。令和元年10月洪水で砂州河岸の洗掘が生じていない断面の無次元水面幅はこれらの低水路幅の間に集中しており、砂州河岸の洗掘が生じた断面もこの低水路幅の領域に近づくよう変化している。このことから、低水路満杯流量2,000m³/sと低水路幅200~250mを用いた無次元流量-河幅関係が安定な低水路の関係を満たしており、安定な低水路幅の目安になると考えられる。

福岡の無次元流量と無次元河幅の関係を低水路満杯流量時の無次元流量と低水路幅についても適用した結果、これまでの河川改修や大規模洪水の頻発化により、経年的に縮小していた低水路幅が、昭和40年代頃の安定な低水路幅に回復しようとしていることが明らかとなった。このように、長期的な実測データや解析結果から低水路河岸の洗掘が生じ始める洪水流量や経年的に維持されている低水路幅を捉えること、さらにそれらの条件に対して福岡の安定河道の関係式との比較分析を行うことにより、低水路河岸の洗掘の可能性がある箇所や、安定な低水路幅を目安に低水路幅がどの程度拡大(洗掘)することが必要かを評価することが可能であり、今後の河道・堤防管理に重要な情報を与える。

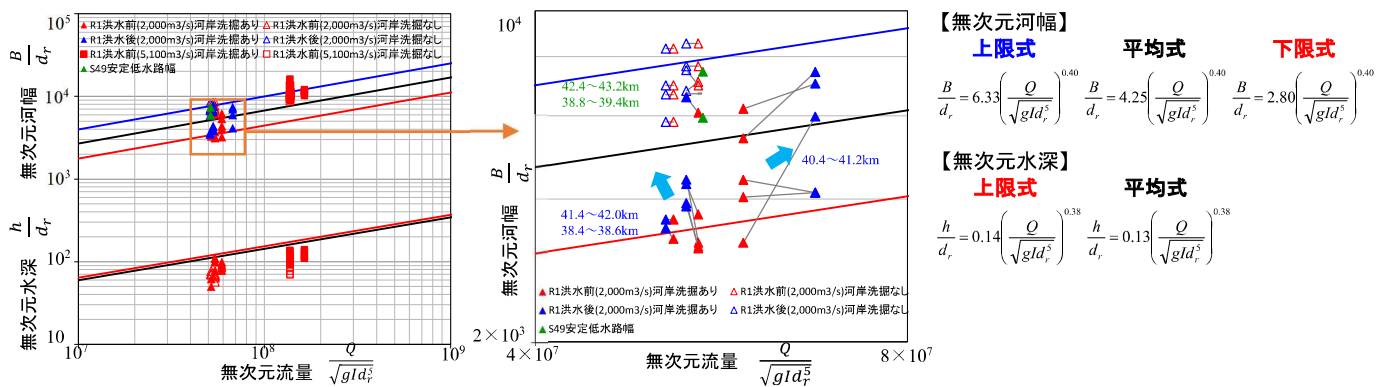


図-8 令和元年10月洪水前後河道に2,000m³/s, 5,100m³/sを流した場合の無次元流量と無次元河幅, 無次元水深の関係

5. 結論

本研究では、実測データに基づく長期的な河道の変遷、洪水流・河床変動解析から、低水路河床高が維持されるようになったことで高水敷化した砂州の低水路寄りの河岸の洗掘が促され、昭和40年代頃の低水路幅(200~250m程度)に戻るよう変化していること、低水路満杯流量2,000m³/sを超えると高水敷化した砂州上を洪水が流れ、砂州河岸の洗掘が生じ始めること、低水路満杯流量と経年的に維持されている低水路幅の関係は、河床の縦断形が安定した低水路にあっては、福岡の式に基づく安定河道の関係を満たすことを示した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.391-396, 2021.
- 3) 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.
- 4) 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_757-I_762, 2021.