

中央大学博士論文

多摩川中流部における
洪水流と河川改修による河道の長期的変化及び
治水と河川環境の調和に関する研究

Katsuhiko Gotoh

後藤 勝洋

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
都市人間環境学専攻

令和4年度

2023年3月

学位請求論文要旨

多摩川中流部における洪水流と河川改修による河道の長期的変化及び治水と河川環境の調和に関する研究

Study on harmonization with flood control and river environment viewed from long-term changes of river channel due to flood flows and river channel improvements in the middle reach of Tama River

都市人間環境学専攻 後藤 勝洋

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Katsuhiro Gotoh

研究背景と目的

沖積地を流れる自然河川は、大規模洪水時の流れとそれに伴う土砂移動によって河道の縦横断面形が形成され、その後の洪水による土砂移動とともに河道形状は変化しながらも、河道断面形のある程度の変動幅の中で長期的に安定している。しかし、砂利採取等の河道改変、治水や利水を目的とした河川改修は、河道における土砂移動量の時間的・空間的な不連続性をもたらすことになり、その結果、低水路河床高の低下と低水路幅の縮小化、いわゆる河道の二極化を生じさせ、河床洗掘や河岸侵食の進行、河川構造物の被災をもたらしている。河道の二極化は、高水敷(砂州)上の樹林化、砂州や瀬・淵などの生物の生息・生育・繁殖場(ハビタット)を縮小・消失させるなど河川環境面への影響も大きい。

本研究の対象とする多摩川中流部(日野用水堰～大丸用水堰：45.2～32.4km)の複断面河道においては、洪水時の低水路の土砂移動の不連続性が治水と河川環境へ与える影響は深刻である。河道の土砂移動量を改善することによって、治水と河川環境を一体的に捉えた河川管理を実行することが課題である。多摩川中流部は、河床勾配1/200～1/400の急流河川であり、昭和30年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の建設によって土砂移動量が減少し、多摩川特有の砂州河道を消失させた。浅川合流点より上流区間(45.2km～37.0km)では、日野用水堰(45.2km)で土砂移動が制限されることで河床低下が進行し、洗掘を受けやすい土丹の露出に伴う滲筋の固定化、河道の二極化、河川構造物の被災、高水敷化した砂州の樹林化等の問題が顕在化してきた。一方、浅川合流点より下流区間(37.0～32.4km)では、最大支川である浅川(37.0km 合流)からの土砂流入に加え、大丸用水堰(32.4km)及び京王線橋梁(35.1km)が洪水流と土砂移動の阻害要因となり、低水路内の不規則な砂州(中州)の発達、流れの不安定化によって河岸・護岸被災がもたらされている。これらの問題に対して、浅川合流点上流区間では、低水路河床の安定化を図るため、既設横断構造物の護床工の活用と固定堰の改築、河床の埋戻しによる二極化の解消・河道掘削・帯工群の設置の一体的な整備等により、計画的に河川改修が進められた。その結果、大規模洪水を経て、低水路河床縦断面形が維持され、低水路幅の拡大が生じ、これに伴い昭和40年代の砂州河道の回復が見られる。

本研究では、多摩川中流部のこれまでの河川改修や大規模洪水に対する河道の長期的な変化を分析し、浅川合流点上流区間の低水路が安定化する機構、合流点下流区間の低水路の不安定化の要因を明らかにする。そして、浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を合流点下流区間に活用して、河道の土砂移動量を制御し低水路の安定化を図る河道改修技術を提案する。さらに、低水路砂州河道の安定した断面形が、自然河川の河道形状である「船底形断面形」を呈し、それが生物のハビタットの形成に寄与することを示し、「船底形断面形」が治水と河川環境の調和した河道断面形となり得ることを明らかにする。

本論文の内容と成果

本論文は6章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、本論文の構成を示した。

第2章「既往研究と本研究の位置づけ」では、治水と河川環境の観点から関係する既往の研究についてとりまとめ、それらの成果と課題を踏まえた本研究の位置づけを示した。

洪水流と河道形状に関する研究は、洪水流によって河道形状がどのように変化し、どこにどのような問題が生じたか、その対策はどうあるべきかといった視点から、一つの対象洪水による調査研究が中心であり、長期間にわたる洪水流と河川改修を受け続けた河道と河川環境の変化、それらの相互関係について調査した研究はほとんど行われていない。その理由は、河川管理者である国土交通省や自治体は、河道のデータを観測し続けてきたものの、それらのデータを分析できる技術が十分でなかったためであり、近年ようやく洪水の履歴と人間活動による治水(河道の安定)と河川環境に及ぼす長期的な影響評価ができる段階となってきた。長期にわたる実測データに基づく治水と河川環境の調査研究は、今後の河川の適切な管理を行っていく上で極めて重要な情報を与える。

計画規模の洪水流に対して河道断面形の作り方について、福岡(2010)は、河川の河幅や断面形がどのような洪水流と河道の特性量によって決まっているかを明らかにすることが河川管理上重要であるとの考えの基に、国内外の沖積地河川の無次元計画流量と安定な無次元河幅・無次元水深の関係式(福岡の式)を導いた。そして、自然河川の河道形状である「船底形断面形」を基本に、福岡の式を満足する河道断面形が、治水と河川環境の調和した望ましい河道断面形であるという考え方を示している。そのため、「船底形断面形」が、生物のハビタットとの関係から見ても治水と河川環境の調和した河道断面形となり得るかを、実河川で実証することが求められている。

多摩川における河道と植生の関係に関して、李、藤田ら(1999)は、洪水流とそれに伴う河道の変化による植生の生育環境への影響と、植生の土砂堆積作用などによる河道への影響を水理学的に分析し、それらの相互作用により礫河原が樹林化する機構を検討しているが、今なお未解明の課題が多く残されている。一方、河川における生物のハビタットに関しては、国内外で様々な評価手法が提案されているが、そのほとんどは平水時の流況やある年代の植生・物理環境場における評価手法であり、洪水時の流況、それによる河道の変化に対する生物のハビタットの評価手法は確立されていない。

長い歴史を持つ治水事業と比べて、河川環境の整備と保全は新しい事業対象(河川法の目的)であったこともあり、河川環境事業が先進的に取り組まれてきた多摩川においても、河川環境は地先の問題として捉えられ、治水と河川環境は一体ではなく、別々の事業として実施されることが多かった。そのため、本研究では、過去の度重なる洪水の作用と改修工事を受けて変化を遂げてきた多摩川中流部において、長期にわたる実測データの分析と精度の高い洪水流・河床変動解析に基づいて、安定な河道や生物のハビタットがどのように形成されて来たかを水理的視点で詳細に検討し、多摩川の治水と河川環境を一体的に扱う河川管理の重要性について論じる。

第3章「多摩川中流部の複断面河道の長期的変遷、低水路河道断面の安定化の機構」では、多摩川中流部(日野用水堰～大丸用水堰)を対象に、過去74年間(昭和22年～令和2年)の実測データを用いて、河川改修や洪水等に対する河道の長期的変化、それらを踏まえた低水路の安定・不安定化の機構、河道の変化と植生の変化の相互関係、低水路の安定化の機構と「船底形断面形」の関係について検討している。

多摩川中流部における洪水履歴として、昭和49年～令和元年の過去46年間で $2,000\text{m}^3/\text{s}$ (日野橋観測所)を超える大規模洪水が6回(昭和49年、昭和57年、平成11年、平成13年、平成19年、令和元年)発生している。昭和57年洪水後から平成11年までの17年間は、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水は発生しておらず、平成11年以降、発生頻度が高くなっている。このため、多摩川中流部の河道の変化を考える上で、平成11年を一つのポイントと捉え分析を行った。

浅川合流点上流区間(45.2～37.0km)では、平成11年以降、大規模洪水の頻発化とともに、これまでの河川改修による効果が頭われ始め、低水路河床高がほぼ維持されている。この低水路河床高の安定を保つ機構について以下に示す。JR中央線上流～四谷本宿堰区間(42.2～38.2km)では、日野橋(39.9km)、JR中央線(41.35km)の橋梁に護床工が設置されており、その上流の低水路河床高が護床工の敷高程度に達すると河床低下が抑制されるようになった。

さらに、四谷本宿堰(38.2km)は、平成 13 年 9 月洪水で被災したため、堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築されたことで、河道の流下能力、土砂移動量が改善された。これにより、当該区間の低水路河床高は、ほぼ一定間隔で設置された堰や横断構造物の護床工の敷高に規定され、低水路河床高の縦断形がほぼ維持されることで、平成 11 年以降の洪水規模の増大により、高水敷化していた砂州河岸の洗掘が促され、その土砂が河床へ供給されることで、低水路河床が安定化することが明らかとなった。これにより、低水路河床と砂州河岸の比高差の安定は、洪水による砂州河床の攪乱を適度な頻度でもたらし、比高差 2.0m 程度以下の砂州上では新たな樹木群落の定着・拡大が抑制され、そこにはオギ原等の草本群落が動的に保たれていることが分かった。一方、JR 八高線～多摩大橋区間(44.8～43.8km)では、多摩大橋の護床工(昭和 61 年設置)が JR 八高線の護床工(昭和 42 年以前設置)と比べて設置年度が遅く、これらの護床工の敷高の差により河床縦断勾配が他の区間より大きいため、河床低下が継続していた。このため、平成 26～28 年に、多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、砂礫による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結果、低水路河床高は概ね維持され、低水路幅が広がったこともあって、昭和 40 年代の砂州河道が回復しつつある。

このような低水路河床縦断形の維持機構によって低水路幅が拡大している区間(42.4～40.4km)では、流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度が低水路満杯流量となり、それを超えると高水敷化した砂州河岸上に主流が乗り上げ、砂州河岸の洗掘により低水路の拡幅を促している。このことから、平成 11 年以降の $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える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 年代の低水路幅に近づくように変化していることが明らかとなった。さらに、低水路幅の回復に伴い、低水路の河道断面形が安定な断面形に近づくにつれて、「船底形断面形」を呈するようになることを示した。

一方、浅川合流点下流区間(37.0～32.4km)では、その下流端に固定堰部が 6 割を占める大丸用水堰(32.4km)、その上流には河積阻害の大きい京王線橋梁(35.1km)が存在し、それらが上流河道及び浅川からの流入土砂の流下を妨げるため、それら横断構造物の直上流に土砂が堆積し、大規模な砂州(中州)を形成している。大丸用水堰直上の中州は、その高さが固定堰部の敷高に規定されて、比高差が経年的に増大している。中州の比高差の増大は、中州上に植生を繁茂させ、それが洪水時の流速を低減、土砂の捕捉・堆積を助長する。それにより、比高差がさらに上昇した中州上では樹木が繁茂し始め、洪水時の中州の自然な移動を妨げている。このように大丸用水堰は、敷高の高い固定堰部が広いために、河道の流下能力が低いことに加え、低水路内に発達した中州の不規則な形状による洪水時の滯筋への流れの集中や偏流、それに伴う水衝部位置の変化が護岸や河岸侵食被災をもたらしており、大丸用水堰の改築の緊急性が高いことが明らかとなった。

第 4 章「浅川合流点上流区間の低水路安定化の機構を用いた合流点下流区間の河道改修技術」では、第 3 章で明らかとなった浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を、合流点下流区間の低水路安定化を図るための技術として活用し、その効果を洪水流・河床変動解析法を用いて評価している。

浅川合流点下流区間の河道流下能力と土砂移動の改善を図るため、大丸用水堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築する対策を技術的に検討した。すなわち、浅川合流点上流区間の低水路河床縦断形が堰・護床工等の敷高に規定されて安定していることを踏まえ、堰上流の京王線橋梁(35.1km)の護床工の敷高と堰下流の低水路河床高が経年的に安定している 31.0km 付近の低水路平均河床高をつないだ河床縦断形を改修目標として、その河床縦断形における大丸用水堰地点(32.4km)の高さを、堰改築後の床止め工の敷高として設定した。

堰改築による効果を検証するため、橋梁や堰等の横断構造物周辺の流れと土砂移動を精度良く解析可能な非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析を行った。洪水流の解析法は、水深積分の枠組みで三次元流れを再現できる、竹村ら(2019)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)による掃流砂の解析法と、長谷部ら(2022)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

価した非平衡流砂運動に基づく解析法を用いた。本解析法を令和元年10月洪水に適用した結果、実測の洪水水面形の時間変化、流量ハイドログラフ、河床の洗掘・堆積傾向を十分説明できることを確認した。

令和元年10月洪水の流量ハイドログラフ2波形分を外力として、現況河道と堰改築後河道の解析結果を比較し、堰改築による効果を評価した。その結果、堰改築後河道では、洪水ピーク時の水面形が計画高水位を下回り、河道の流下能力が向上すること、現況河道に比べて堰を通過する流砂量が増加し、堰上下流の土砂移動が改善されることを示した。また、砂州の移動が妨げられなくなったことで、現況河道で見られた低水路内の不規則な砂州(中州)の発達は解消され、交互砂州河道が回復することにより、堰直上流の砂州の比高差は0.9m程度に抑えられ、これは樹木が繁茂しやすい比高差(2.0m程度以上)と比べて十分に低く、砂州上の樹木の繁茂は抑制される。以上のことから、大丸用水堰を切り下げて床止め工に改築し、低水路河床の縦断形を是正することにより、河道の流下能力と土砂移動の改善をもたらし、低水路の安定化に大きく寄与することを明らかにした。

第5章「安定した砂州河道と生物のハビタットの形成の関係」では、第3章で示した低水路の安定に伴い形成される「船底形断面形」について、多様な植生の維持と洪水時の魚類の避難場所の形成の観点から分析し、「船底形断面形」が治水と河川環境の調和した河道断面形となり得ることを考察している。

安定した砂州河道と植生の生育場の関係について、多摩大橋上下流区間(44.0~42.8km)、JR中央線上流区間(42.0~41.6km)を対象に、砂州上の植生を一年生草本群落、オギ群落(多年生草本群落)、樹木群落に区分し、それぞれの生育範囲を砂州の比高差、冠水・河床変動が生じる流量(解析結果)との関係で分析した。分析の結果、「船底形断面形」では、砂州の比高差に応じて、植生の棲み分けがなされ、洪水による冠水・攪乱が適度な頻度で発生することで、樹木群落の拡大が抑制され、オギ原等の草本群落の生育場が動的に保たれていることを示した。

洪水時の魚類の避難場所については、洪水時に魚類が高流速に反応して避難行動をとっているとの知見(東ら・1999、傳田ら・2009)を踏まえ、第4章で行った解析結果を用いて河道の底面流速を指標とし、多摩川の代表的な魚種(アユ、オイカワ)を対象に分析を行った。対象魚種の遊泳速度(0.7~1.5m/s程度)以下の低流速域を、魚類の避難場所となる可能性のある領域とみなし、洪水流量に応じて低流速域が形成される河道の特徴を考察した。分析の結果、「船底形断面形」に改修された多摩大橋周辺(44.2~43.4km)の右岸砂州は、流量の増加に応じて水面幅が広がることで、底面流速の増加が緩やかであり、それにより低流速域が時空間的に連続して形成されるため、洪水時の魚類の避難場所・経路となる可能性があることを示した。

以上のことから、「船底形断面形」は、治水(河道の安定)と河川環境(良好な生物のハビタットの形成)の調和した河道断面形となり得ることを明らかにした。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を示した。多摩川中流部では、長期間にわたり実施されてきた河川改修が洪水時の土砂移動量の改善に寄与し、既設の横断構造物の護床工や改築された堰、帯工群等の横断構造物が一体となって機能することで、適切な低水路河床縦断形が維持され、低水路幅の回復とともに河道の安定化、良好な生物のハビタットの形成につながっていることを水理的・河川工学的手法で明らかにしている。この低水路の安定化の機構を検討対象区間下流部の低水路の不安定区間に適用することにより、河道の流下能力と土砂移動の連続性の改善が図られ、これは治水と河川環境を一体的に扱う河川管理の重要性を示すものであり、両者の調和した河道形状である「船底形断面形」の回復につながっている。

本研究は、精度の高い洪水流・河床変動解析手法を用いて、洪水流と土砂移動、河川構造物の関係、及びそれらが治水と河川環境に与える影響を適切に評価し、その結果に基づき河川構造物の設計法を提案、実施しており、これは河川防災技術のための「デジタルツイン」技術の好例になると考える。

目次

第1章 序論	1
1-1 研究背景と目的	1
1-2 本論文の構成	4
参考文献	6
第2章 既往の研究と本研究の位置付け	8
2-1 既往の研究	8
2-1-1 安定な河道の形成に関する既往の研究	8
2-1-2 洪水に対する河道の変化と植生の応答関係に関する既往の研究	12
2-1-3 生物のハビタットの評価に関する既往の研究	14
2-2 治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題	20
2-2-1 治水と河川環境の調和を目指した川づくりに関する経緯	20
2-2-2 治水と河川環境の調和を目指した河川管理における課題	21
2-3 第2章のまとめと本研究の位置付け	23
参考文献	27
第3章 多摩川中流部の複断面河道の長期的変遷, 低水路河道断面の安定化の機構	33
3-1 概説	33
3-2 多摩川中流部の河道の特徴	34
3-2-1 多摩川中流部の河道の特徴	34
3-2-2 令和元年10月洪水後の土丹の調査	48
3-3 浅川合流点より上流区間の河道の長期的変遷, 低水路河道の安定化の機構	63
3-3-1 砂利採取, 固定堰の建設による砂州河道の変化	74
3-3-2 土丹の露出に伴う濬筋の固定化・深掘れと砂州の高水敷化による河道の二極化の進行	75
3-3-3 大規模洪水の発生, 河川改修に伴う低水路河床高の維持, 砂州河道の回復	76
3-3-4 高水敷化した砂州河岸の洗掘機構	80
3-4 浅川合流点より下流区間の河道の長期的変遷, 低水路河道の不安定化の要因	84
3-4-1 砂利採取, 固定堰の建設による砂州河道の変化	91
3-4-2 浅川の河道の変化, 多摩川本川への土砂流出	91
3-4-3 浅川からの土砂流入, 橋梁, 固定堰による低水路内の砂州の発達, 河道の不安定化	93
3-5 低水路の安定化と船底形断面形の形成	96
3-6 第3章のまとめ	102
参考文献	104

第4章 浅川合流点上流区間の低水路安定化の機構を用いた合流点下流区間の河道改修技術	106
4-1 概説	106
4-2 大丸用水堰の改築による浅川合流点下流区間の低水路の安定化の考え方	107
4-3 非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法	111
4-3-1 準三次元洪水流解析法と非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法	111
4-3-2 解析条件	122
4-3-3 令和元年10月洪水の再現解析結果と観測結果の比較	128
4-4 大丸用水堰の改築による浅川合流点より下流区間の低水路の安定化	135
4-4-1 解析条件	135
4-4-2 大丸用水堰の改築による低水路の安定化効果，周辺河道への影響の評価	137
4-5 第4章のまとめ	150
参考文献	151
第5章 安定した砂州河道と生物のハビタットの形成の関係	152
5-1 概説	152
5-2 多摩川の生物の生息・生育状況	153
5-2-1 多摩川における植物の生育状況の長期的変化	153
5-2-2 多摩川における魚類の生息状況の長期的変化	157
5-3 安定した砂州河道と植生の生育場の関係	160
5-3-1 砂州上の植生の生育条件	160
5-3-2 「船底形断面形」と多様な植生の生育場の形成の関係	166
5-4 安定した砂州河道と洪水時の魚類の避難場所となる低流速域の形成の関係	170
5-4-1 洪水時の魚類の挙動，分析方法	170
5-4-2 洪水時の魚類の避難場所の分析	171
5-4-3 低水路の安定化が魚類の避難場所の形成に及ぼす効果	179
5-5 第5章のまとめ	188
参考文献	189
第6章 結論	190
6-1 本研究の結論	190
6-2 今後必要な調査研究	194
謝辞	196

第1章 序論

1-1 研究の背景と目的

沖積地を流れる自然河川は、大規模洪水時の流れとそれに伴う土砂移動によって河道の縦横断形が形成され、その後の中小洪水では縦断的に連続した土砂移動とともに河道は変化しながらも、河道断面形のある程度の変動幅の中で長期的に安定している¹⁾²⁾。一方、治水や利水を目的として実施されてきた河川改修やダム・固定堰等の横断構造物の建設、砂利採取等の河道改変は、土砂移動量を減少、制限させ、それらが縦断的に不連続となることで、河床洗掘や河岸侵食の進行、それに伴う河川構造物の被災・不安定化、土砂堆積による河積阻害などの問題を引き起こしている。また、縦断的に不連続な土砂移動は、低水路河床の低下と低水路幅の縮小化を生じさせ、それらが河道の二極化、樹林化を促す。そして、低水路幅の狭まった河道は、砂州や瀬・淵などの生物の生息・生育・繁殖場(ハビタット)を縮小・消失させることから、土砂移動の不連続性は治水上の問題だけでなく、河道を基盤とする河川環境の問題にも大きく影響している。特に老朽化した横断構造物の周辺では、土砂移動の不連続性に起因する上記のような治水と河川環境上の問題が顕在化しており、さらに、近年の気候変動に伴う洪水の激甚化・頻発化は、流域内の土砂移動を活発化させるため、全国的にそれらの問題を深刻化させている。そのため、流れと土砂移動の連続性を改善し、洪水時の流下能力、河道の安定性を確保し、かつ、良好な生物のハビタットの形成を図るための河道と老朽化した横断構造物の改修技術の確立が求められている。

我が国における、治水と河川環境の調和を目指した川づくり³⁾については、平成2年に建設省河川局(当時)による通達『多自然型川づくり』の推進について⁴⁾が出されたことで、“河川が本来有している生物の良好な生息・生育環境に配慮し、あわせて美しい自然景観を保全あるいは創出する”多自然型川づくり⁵⁾が始められた。その後、平成9年に河川法が改正され、河川法の目的に「治水」、「利水」に加え、「河川環境の整備と保全」が位置づけられたことを契機として、「多自然型川づくり」が「河川砂防技術基準(案)計画編」に明記され、すべての川づくりの基本として実施されるようになった⁴⁾。平成18年には「多自然川づくり基本指針」が通達され、「多自然型川づくり」から普遍的な川づくりとしての「多自然川づくり」へ展開され、「多自然川づくり」は河川の調査、計画、設計、施工、維持管理等の河川管理に係るすべての行為に適用されるものとされている⁵⁾。このように、すべての川づくりの基本は「多自然川づくり」であり、治水と河川環境の調和のもとに河川管理は行われるものとされている一方で、治水と河川環境の整備・保全は依然として別々の事業として実施されることが多く、特に河川環境の整備・保全については、樹林化した砂州の切下げなどの局所的な対策にとどまり、河川全体の改善を見据えたものとなっていない³⁾⁶⁾。これに対して本研究では、河道縦横断形状を形成する大規模洪水時の流れと土砂移動に着目し、それらを制御して適切な河床縦断形を維持することで、治水と河川環境を一体として河

川全体の改善を図る河道改修技術について検討する。

治水と河川環境の調和した河道断面形について、福岡¹⁾²⁾⁷⁾⁸⁾は、次元解析手法に基づき、安定な沖積地河川のデータから安定河道の無次元流量と無次元断面諸量の関係式(福岡の式)を導き、自然河川の河道形状である「船底形断面形」がその安定河道の関係式を満足していることを示している。「船底形断面形(図 1-1)」は、低水路河床と河岸が縦横断的に緩やかに連続する河道断面形状であり、現行の河道計画の基本断面形となっている複断面河道と比べて、水際付近が多様な流れ場や河床地形となることから、生物のハビタットの形成に寄与すると考えられる。このことから、「船底形断面形」を基本に、福岡の安定河道の関係式を満足する河道断面形が、治水と河川環境の調和した望ましい河道断面形であるという考え方が示されている¹⁾²⁾⁷⁾⁸⁾。さらに、福岡の式に基づく安定河道形状と高精度な洪水流・河床変動解析^{9)~13)}とを一体的に検討することにより、「船底形断面形」を基本形とした河道設計の実践的な検討が進められている^{14)~19)}。

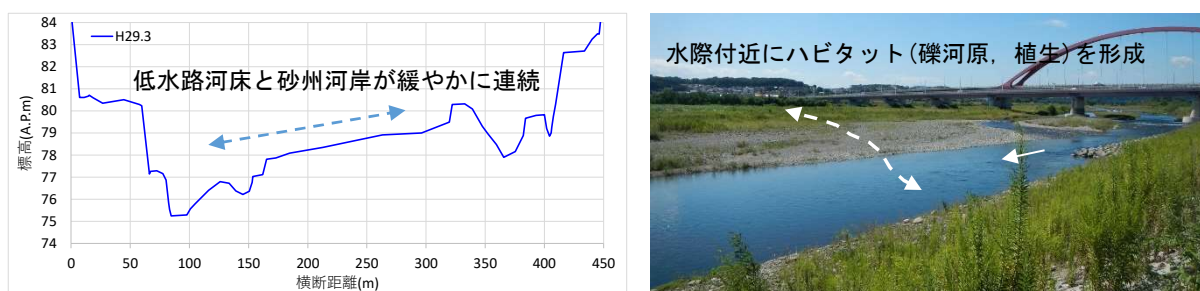


図 1-1 船底形断面形 (多摩川 43.6km の横断図, 現地の状況)

本研究が対象とする多摩川中流部(図 1-2: 日野用水堰～大丸用水堰区間(45.2～32.4km))は、河床勾配 1/200～1/400 の急流河川であり、多摩川最大支川である浅川が合流(37.0km)し、昭和 20 年代には広大な砂州河道(図 1-2 (a))が形成される土砂移動の活発な河川であった。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の建設によって土砂移動量が減少し、それにより、低水路河床の経年的な低下と低水路幅の縮小化が生じ、特徴的な砂州河道を消失させた(図 1-2 (b))。その後、浅川合流点より上流区間(45.2km～37.0km)では、上流の日野用水堰(45.2km)で土砂移動が制限されることにより、洗掘を受けやすい土丹の露出に伴う滯筋の固定化、河床低下が進行し、河道の二極化、河川構造物の被災、砂州の樹林化等の問題が顕在化してきた。一方、浅川合流点より下流区間(37.0～32.4km)では、浅川からの土砂の流入に加え、その下流の河積阻害の大きい京王線橋梁(35.1km)及び大丸用水堰の固定堰(32.4km)が洪水流と土砂移動の阻害要因となり、低水路河床高の縦断形が経年的に堆積し、低水路内に大規模な砂州(中州)、滯筋を発達させ、それが洪水の度に不規則に変化することで、河岸・構造物の被災²¹⁾をもたらしている(図 1-2 (b), (c))。

これらの問題に対して、浅川合流点より上流区間では、固定堰の改築²⁰⁾や、既設の低水路

護床工の活用と砂礫による河床の埋戻し・帯工群の設置・河道掘削(図1-1:船底形断面形への改修)の一体的な整備による河床縦断面形の是正¹⁶⁾²²⁾等の河川改修が計画的に進められた。その結果、その後の大規模洪水を経て、低水路河床高の縦断面形が維持され、縮小化していた低水路幅が拡大するようになり、砂州河道が回復する傾向が見られる(図1-2(c))。

このことから、大規模洪水に対する災害が少なく、かつ、治水と河川環境の調和した川づくりを行うためには、これまでの洪水流や河川改修に対する河道の長期的変化を把握し、その知見を河川管理に活かすことが重要と考える。

本研究では、第一に、経年的な河川改修や大規模洪水による河道の長期的変化を分析し、浅川合流点上流区間の低水路が安定化する機構を明らかにするとともに、安定化した砂州河道の河道断面形が「船底形断面形」を形成することを示す。また、浅川合流点下流区間については、経年的に低水路河床高が上昇し、低水路内に不規則な砂州が発達することで河道が不安定化する要因を明らかにする。第二に、浅川合流点上流区間で明らかとなった河道の安定化の機構を合流点下流区間に活用することで、土砂移動量を制御し低水路の安定化を図る河道改修技術について検討する。最後に、安定な砂州河道に形成される「船底形断面形」が、良好な生物のハビタットの形成にも寄与することを示し、治水と河川環境の調和した河道断面形となり得ることを明らかにする。

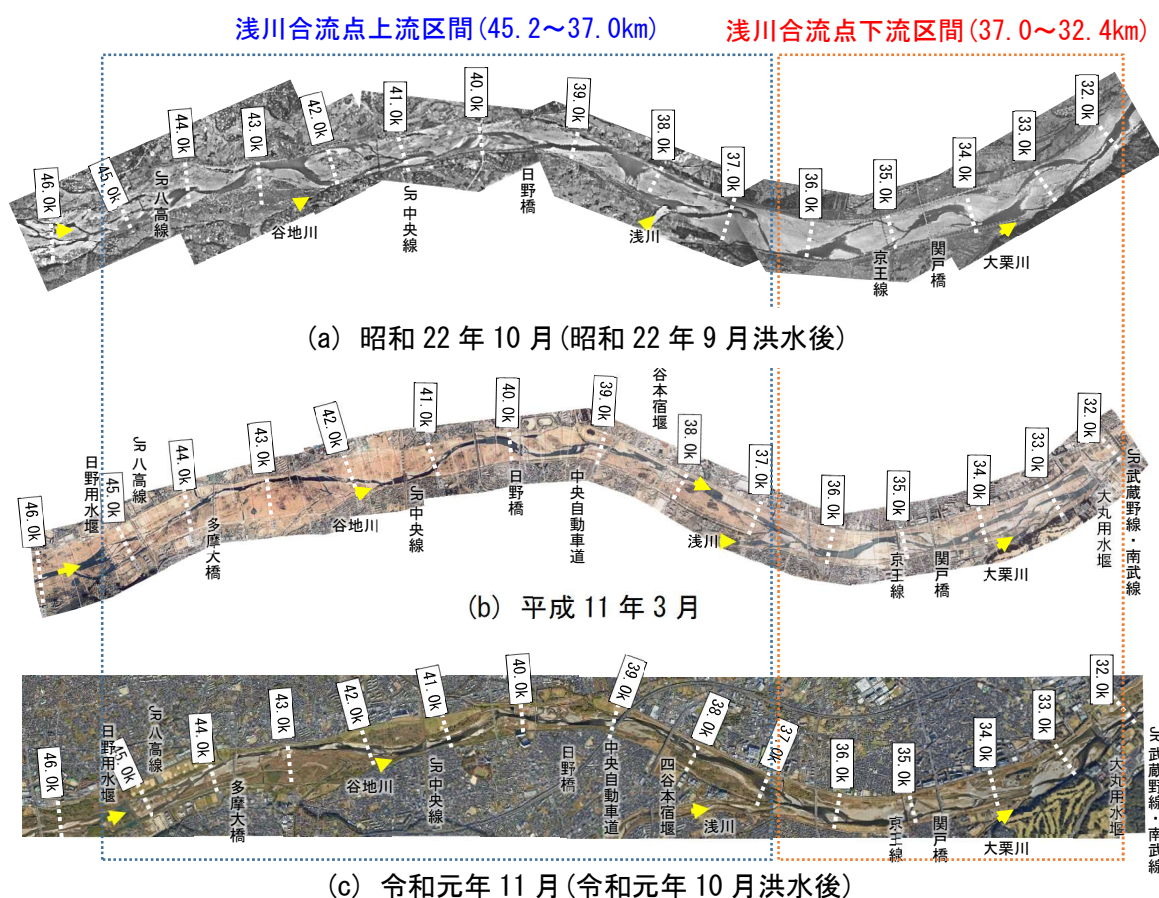


図1-2 多摩川中流部の検討対象区間(日野用水堰~大丸用水堰)の河道の変化

1-2 本論文の構成

図 1-3 は本論文の構成を示す。本論文は全 6 章で構成され、各章の概要を以下に示す。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的、本論文の構成を示す。

第 2 章「既往研究と本研究の位置づけ」では、治水と河川環境の整備・保全の観点から「安定な河道の形成」、「洪水に対する河道の変化と植生の応答関係」、「生物のハビタットの評価」に関する既往の研究と、治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題をとりまとめ、それらの研究の知見、課題を踏まえた本研究の位置づけについて示す。

第 3 章「多摩川中流部の複断面河道の長期的変遷、低水路河道断面の安定化の機構」では、多摩川中流部(日野用水堰～大丸用水堰)を対象に、過去 74 年間(昭和 22 年～令和 2 年)の実測データを用いて、これまでの河川改修や洪水等に対する河道の長期的変化、河道の変化と植生の変化の相互関係について分析する。浅川合流点より上流・下流区間の横断構造物とそれによる土砂移動状況の違いに着目し、大規模洪水と経年的な河川改修による影響・効果を把握・評価し、浅川合流点上流区間の低水路が安定化し、砂州上の樹林化が抑制され、砂州河道が回復する機構を明らかにする。また、安定した砂州河道の河道断面形が、低水路河床と砂州河岸が縦横断的に連続した自然の河道形状である「船底形断面形」を形成することを示す。浅川合流点下流区間については、最大支川である浅川からの土砂供給とその土砂移動を妨げる横断構造物により、低水路内の砂州(中州)が不規則に発達し、洪水の度に河岸・構造物の被災をもたらしている河道の不安化の要因について明らかにする。

第 4 章「浅川合流点上流区間の低水路安定化の機構を用いた合流点下流区間の河道改修技術」では、第 3 章で明らかとなった浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を活用し、合流点下流区間の低水路の安定化を図るための河道改修技術を提案する。具体的には、浅川合流点下流区間の流れと土砂移動の阻害要因となっている大丸用水堰を切下げて床止め工に改築し、堰上下流の流れと土砂移動の連続性を改善する対策の効果、影響を評価する。流砂運動の非平衡性を考慮した準三次元洪水流・河床変動解析法を用いて、計画高水流量に相当する令和元年 10 月洪水と同規模の洪水外力に対して、堰改築後の河道の流下能力、土砂移動状況が改善され、安定な砂州河道の形成に寄与することを示す。

第 5 章「安定した砂州河道と生物のハビタットの形成の関係」では、第 3 章で示した低水路の安定化に伴い形成される「船底形断面形」について、生物の生息・生育・繁殖場(ハビタット)の形成との関係を分析し、「船底形断面形」が治水(河道の安定)と河川環境(良好な生物のハビタットの形成)の調和した河道断面形となり得ることを明らかにする。特に、これまでほとんど研究が行われていない洪水による生物のハビタットへの影響に着目し、第 4 章で行った洪水流・河床変動解析結果を用いて、適度な洪水による冠水・攪乱により多様な植生の生育場が動的に保たれている砂州環境や、洪水時の魚類の避難場所となり得る低流速域が形成される砂州河道の特徴について分析する。

第 6 章「結論」では、本論文で得られた成果を総括し、今後の課題を示す。

第1章 序論

- ・ 研究の背景と目的

第2章 既往の研究と本研究の位置づけ

- ・ 「安定な河道の形成」, 「洪水に対する河道の変化と植生の応答関係」, 「生物のハビタットの評価」に関する既往の研究の成果と課題
- ・ 治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題
- ・ 既往の研究と課題を踏まえた本研究の位置づけ

第3章 多摩川中流部の複断面河道の長期的変遷, 低水路河道断面の安定化の機構

- ・ 浅川合流点より上流区間の低水路の安定化の機構
- ・ 浅川合流点より下流区間の低水路の不安定化の要因
- ・ 低水路の安定化と「船底形断面形」の形成の関係

第4章 浅川合流点上流区間の低水路安定化の機構を用いた合流点下流区間の河道改修技術

- ・ 大丸用水堰の改築による浅川合流点下流区間の河道の安定化技術の提案
- ・ 非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法による技術の評価

第5章 安定した砂州河道と生物のハビタットの形成の関係

- ・ 安定した砂州河道(船底形断面形)と植生の生育場の関係
- ・ 安定した砂州河道(船底形断面形)と洪水時の魚類の避難場所となる低流速域の形成の関係

第6章 結論

- ・ 研究の結論と今後の検討課題

図 1-3 本研究の構成

参考文献

- 1) 浅野文典, 福岡捷二: 沖積地河川における安定な川幅・水深-治水と環境の調和を目指した河道断面の決め方, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1021-1026, 2010.
- 2) 福岡捷二: これからの河川管理を考えるー自然河川に学ぶ, 河川, 平成 23 年 8 月号, pp.3-7, 2011.
- 3) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 4) 多自然川づくりレビュー委員会: 多自然型川づくりの課題と今後のあり方, 2006.
- 5) 国土交通省河川局: 多自然川づくり基本指針, 2006.
- 6) 河川法改正 20 年 多自然川づくり推進委員会: 提言『持続性ある実践的多自然川づくりに向けて』, 2017.
- 7) 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.
- 8) 福岡捷二: 治水と環境の調和した治水適応策としての河幅, 断面形の検討方法, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.5-10, 2010.
- 9) 福岡捷二: 洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.1-6, 2006.
- 10) 福岡捷二: 土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術-実務上の課題と調査・研究の方向性, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp.1-6, 2008.
- 11) 福岡捷二: 河道設計のための基本は何かー水面形時系列観測値と洪水流ー土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp. 83-88, 2011.
- 12) 福岡捷二: 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.253-258, 2014.
- 13) 福岡捷二: 洪水流の水位と流量の今日的考え方ー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化するー, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_355-I_360, 2017.
- 14) 大賀祥一, 森脇孝洋, 榊井芳樹, 福岡捷二: 江の川上流部における治水と環境の調和した河道断面形に関する評価, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.137-142, 2011.
- 15) 福岡捷二: 札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究, 北海道河川財団研究所紀要(XXIV), pp.123-164, 2013.
- 16) 小澤太郎, 福島陽介, 海津義和, 後藤岳久, 福岡捷二: 多摩川上流部における治水と環境が調和した総合的な河道管理, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.471-476, 2013.
- 17) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二: 複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.277-282, 2014.
- 18) 後藤岳久, 福岡捷二, 植田彰: 太田川放水路下流部に形成された船底形河道の河岸沿い

- 干潟保全のための技術検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I_1093-I_1098, 2014.
- 19) 長谷部夏希, 山口広喜, 後藤岳久, 福岡捷二: 船底形河道における低水路と高水敷の境界付近での細粒土砂の堆積機構—安定な船底形河道の設計に向けた検討—, 河川技術論文集, 第20巻, pp.463-468, 2021.
 - 20) 下條康之, 石川武彦, 福岡捷二: 多摩川水系における河川横断構造物の予防保全に向けての具体的検討, 河川技術論文集, 第17巻, pp.329-334, 2011.
 - 21) 瀬尾敬介, 米沢拓繁, 荒木茂, 福岡捷二: 台風18号の小洪水がもたらした河岸災害の教訓と維持管理の必要性, 河川技術論文集, 第21巻, pp.265-270, 2015.
 - 22) 大浪裕之, 下條康之, 後藤勝洋, 福岡捷二: 令和元年洪水被災分析と土丹が露出する河道条件下における河川横断工作物の保全対策, 河川技術論文集, 第27巻, pp.129-134, 2021.

第2章 既往の研究と本研究の位置づけ

2-1 既往の研究

本章では、治水と河川環境の整備・保全の観点から、「安定な河道の形成」、「洪水に対する河道の変化と植生の応答関係」、「生物のハビタットの評価」に関する既往の研究と、治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題をとりまとめ、それらの研究の知見、課題を踏まえた本研究の位置づけについて示す。

2-1-1 安定な河道の形成に関する既往の研究

(1) 安定な河道形状に関する既往の研究

洪水流を安全に流し、河道の安定性を高め、維持管理のしやすい河道形状を検討することは、河川管理上最も本質的な重要課題である。安定な河道断面形状に関する力学的な研究として、その先駆け研究となる Lane¹⁾は、河岸の斜面に作用する限界掃流力と河岸の安息角との関係を考慮した静的平衡状態の河道断面形状を導いている。しかし、Lane の理論式は、川幅と水路中央の水深の比が一定値の関係となるため、実河川の河道形状を説明できていない。Parker²⁾は、河岸の斜面上で掃流砂が生じている場合、重力の効果により流砂は河道中央に移動し、河道幅は広がり続けることになるため、安定な断面形状は維持できないという問題点を指摘した。それに対する Parker の安定河道の理論式は、河岸の斜面に作用するせん断力の算定にあたり乱れによる横断方向の運動量輸送を考慮することで、河岸が静的平衡状態で、低水路が動的平衡状態となる安定断面形状を導出している。さらに、池田ら³⁾は Parker の理論式を混合粒径に拡張し、実際の礫床河川に近い条件の動的安定断面形状を提案している。しかし、これらの研究では、断面形状や流砂量が縦断的に変化しない理想的な直線河道を仮定し安定な河道形状を求めているため、土砂移動が著しい我が国の実河川に適用するには課題がある。

現地河川における安定な河道形成に関する研究として、福岡ら⁴⁾、塚本ら⁶⁾は、日本有数の石礫急流河川である常願寺川の砂州上に濬筋を再現した水路を掘削し、大規模な現地実験を行っている。この実験結果から、石礫河川では洪水流により河床が洗掘され、流れの掃流力に耐えうる大粒径(巨石・粗石)の河床材料が河床表面に出現し、その周りに中小様々な粒径の河床材料が留まることで、広い範囲の粒度分布を有する安定な河床を形成することを明らかにしている。さらに流量が増加すると、砂礫が流されて河岸を構成する巨石が安定を失い崩れ落ち、これが繰返し起こることで水路幅が徐々に広がっていき、やがて河床・河岸ともに河床材料の移動しない静的に安定した河道形状(図 2-1)を形成する機構を実証している。

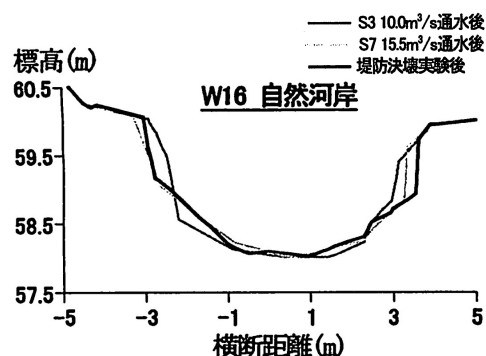
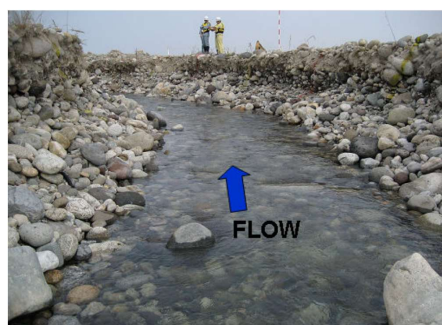


図 2-1 常願寺川現地実験で形成された石礫河川の安定河道形状(現地の状況, 横断面図)⁵⁾⁶⁾

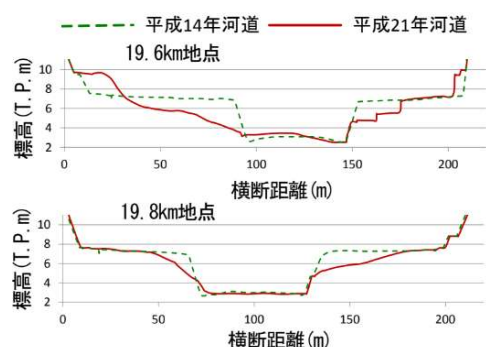


図 2-2 遠賀川で整備された船底形河道(現地の状況, 横断面図)¹⁹⁾

沖積地の自然河川では、河道形成流量に相当する大規模洪水の流れと土砂移動によって河道の縦横断面形が形成されており、河道形成流量以下の中小規模の洪水に対しては、河道断面形のある程度の変動幅の中で変化しながらも、長期的に見て安定な河道を維持している⁷⁸⁾。福岡ら^{7~10)}は、自然河川の河道形成流量とそれによって形成される安定河道形状の力学関係に着目し、国内外の安定な沖積地河川のデータを用いた次元解析手法に基づき、安定河道の無次元流量と無次元断面諸量の関係式(福岡の式)を導いている。そして、自然河川の河道断面形状である「船底形断面形」がその安定河道の関係式を満足していることを示している。船底形断面形(図 2-2)は、低水路河床と河岸が縦横断的に緩やかに連続する河道断面形状であり、現行の河道計画の基本断面形となっている複断面河道と比べて、水際付近が多様な流れ場や河床地形となることから、生物の生息・生育・繁殖場(ハビタット)の形成に寄与すると考えられる。このことから、「船底形断面形」を基本に、福岡の安定河道の関係式を満足する河道断面形が、治水と河川環境の調和した望ましい河道断面形となり得ることが論じられている^{7~10)}。さらに、福岡の式に基づく安定河道形状と高精度な洪水流・河床変動解析^{11)~15)}とを一体的に検討することにより、船底形断面形を基本形とした河道設計の実践的な検討^{16)~21)}が進められている。例えば、福岡ら¹⁷⁾は、急流石礫河川で河道の二極化が問題となっている札内川において、石礫河川の河床変動解析法²²⁾と福岡の式を用いた治水と河川環境の調和した河道縦横断面形状の決定法を提案し、その方法に基づき設定された船底形河道が、流下能力の不足している河道や二極化が顕著な河道の改修に対して有効

であることを示している。小澤ら¹⁸⁾は、著しい河床低下により河道の二極化、樹林化等の問題が顕在化している多摩川中流部において、治水と河川環境の調和した河道が昭和40年代の河道に見出されることを示し、昭和40年代の河道を目標とした河道縦横断形状(船底形河道)を福岡の式に基づき設定し、その河道の安定性を非定常準三次元洪水流解析法により評価している。それらの検討結果を踏まえ、多摩川中流部では治水と河川環境の調和を目指した総合的な川づくりが進められている²³⁾。また、笹木ら¹⁹⁾は、船底形断面形に改修された遠賀川(図2-2)において、改修前後の河道における洪水流・河床変動解析結果を比較することで、船底形河道の有効性について検討している。その結果、船底形河道は、改修前の複断面河道と比べて、流速横断勾配が緩やかになり、洪水流を断面全体で流せるようになることで洪水時の流況が改善されること、また、掃流砂量の縦断的な変化が小さくなり、河床変動が軽減されることを示している。これらの船底形断面形に改修された河川については、近年の河道形成流量に相当する大規模洪水を含む洪水に対して、長期的な視点で河道の安定性を評価する必要がある。さらに、船底形断面形における生物のハビタットの形成状況とその経年変化を評価し、船底形断面形が治水と河川環境の調和した望ましい河道断面形であることを実証することが求められる。

急流河川では、土砂移動が激しく、洪水や河川改修、横断構造物の設置等による影響が河道の縦断形に顕われやすいため、河道の縦断形をどのように安定させるかは重要な課題となっている。特に激しい土砂生産・移動区間への対策が求められる砂防分野では、砂防堰堤や流路工等の構造物の設置を基本とした安定化工法が検討されている。阿部ら²⁴⁾は、流路工の安定に影響を及ぼす交互砂州の発生を抑制するため、水理実験に基づき帯工の設置方法を明らかにし、木村ら²⁵⁾は、交互砂州の発生が抑制される限界流路長と流量、断面形状の関係から、直線流路が維持される帯工の縦断的な設置間隔の理論式を提案している。帯工の構造的な研究として、原田ら²⁶⁾²⁷⁾は海外の工法²⁸⁾²⁹⁾を参考にして、河岸に対して直線部と斜面部を組み合わせた構造の帯工に着目し、その新たな帯工が河床の安定機能に加えて、生物のハビタットとなる瀬淵構造の形成にも寄与することを大型水理実験により検証している。一方、近年では河川技術の発展とともに、老朽化した横断構造物の改築や被災した構造物の復旧工事に合わせて、流下能力や土砂移動の改善を図る先進的な検討が行われるようになってきた。例えば、横断構造物が多く設置されている多摩川では、固定堰である二ヶ領宿河原堰(22.4km)、二ヶ領上河原堰(25.8km)の可動堰化や四谷本宿堰(38.2km)の床止め工化が行われ³⁰⁾³¹⁾、また、多摩川の支川浅川では、連続して設置された床固群の改築と巨石の配置による土砂捕捉効果を狙った河床高回復実験とを連携した取組みが実施されており³²⁾³³⁾、上下流区間を一体とした河床縦断形の安定化対策が進められている。

上述のように、安定な河道の縦断形の形成に向けた構造物の設置方法・工法等に関する技術的な研究が行われている。しかし、それらの研究成果は、実河川での検証に至っていない場合や、直近の数洪水程度の短期的な検証にとどまることが多く、大規模洪水を含む洪水に対する長期的な視点での河道の安定性について十分な検証は行われていない。また、縦断的

に安定状態となった河道において、どのような横断面形状が形成されるか、それが自然河川の河道断面形である「船底形断面形」の特徴を示す河道形状となるかについて、長期的な実測データに基づく検討は行われていない。一方で、実河川においては、大量の土砂移動を伴う大規模洪水の発生と、長い年月にわたって実施されてきた河川改修やダム・固定堰等の横断構造物の建設、砂利採取等の河道改変による影響を受け続けてきた結果として、現在の河道の縦横断面形が形成されている。そのため、河道の長期的変化を踏まえ、これまでの洪水や経年的な河川改修を経て、それらの影響や効果が河道の形成、安定の過程にどのように顕われているかを分析し評価することが重要である。そのような河道の長期的な分析評価が、水文・河道データの観測体制が整備され、それらのデータが蓄積されてきたことで可能となってきた。次節では、河道の長期的変化と洪水、河川改修の関係について評価を行った研究について述べる。

(2) 洪水と河川改修に対する河道の長期的変化とその評価に関する既往の研究

白井ら³⁴⁾³⁵⁾は、利根川上流部を対象に、明治時代より舟運路確保や治水を目的に設置されてきた水制に着目し、水制の設置等の河川改修が治水・河川環境面に与えてきた機能を、長期的なデータに基づき評価している。その結果、現在の利根川の河道形状が水制による土砂の堆積や河岸の保護の効果によって形成され、水制によって形成された高水敷が洪水時の流速を減じ堤防の安定に大きく奇与し、水制の周囲でワンド、砂州などの多様な水際環境が創出されるなど、水制が長い年月にわたり治水と河川環境の調和した河道の形成に機能してきたことを明らかにしている。また、岩谷ら^{36)~38)}は、利根川下流部における明治時代以降の河道改修の経緯を過去の工事資料等に基づいて詳細に調査し、各代表洪水の水理量、河道形状の経年変化から、洪水流と河川改修に対する河道の変化・応答関係について分析している。その結果、経年的に実施されてきた浚渫、低水路拡幅の影響が、河積と摩擦速度の縦断分布や低水路と高水敷の相対水深の変化に顕われており、それにより低水路河床の堆積や深掘れを生じさせていることを明らかにしている。また、各改修段階の河道、計画高水流量に対して福岡の無次元河道形成流量と無次元河幅・水深の関係式^{7)~10)}に適用(図 2-3)することで、河川改修に応じて無次元河幅と無次元水深が安定河道の状態に対してどのように変化してきたかを把握することが、河川改修の効果を評価する重要な指標となり得ることを示している。このように、これまでの洪水や河川改修による影響や効果を河道の長期的な変化・応答から読み解き評価することは、今後の河川管理を合理的に進める上での有益な情報を提供している。

一方、上記の研究は、主に利根川下流部の河床勾配の緩やかな低平地河川を対象としており、土砂移動が激しく、洪水や河川改修による影響が河道の縦断形に顕われやすい急流河川について、洪水や河川改修に対する河道の縦断形の長期的な変化・応答を分析・評価した研究はほとんど行われていない。

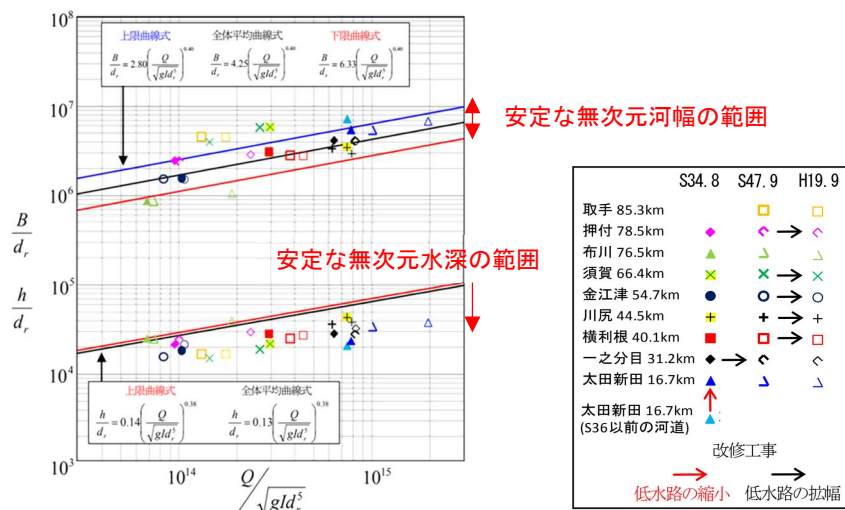


図 2-3 改修前後の無次元河道形成流量と無次元河幅・水深の関係³⁸⁾

2-1-2 洪水に対する河道の変化と植生の応答関係に関する既往の研究

河道内の植生は、生物のハビタットとして重要な生息基盤となる一方で、河道の樹林化やそれに伴う洪水流の流下阻害、植生の多様性の低下等の治水と河川環境の両方の問題を引き起こすため、適正な植生管理が求められている。河道の樹林化の機構を明らかにし、適正な植生管理に資するため、洪水に対する河道の変化と植生の応答関係やそれらの評価指標に関する研究が行われている。

李ら⁴⁰⁾、藤田ら⁴¹⁾⁴²⁾、瀬崎ら⁴³⁾は、礫床河川の樹林化の機構を明らかにし、それを踏まえた植生管理手法を検討するため、多摩川中流部(永田橋地区、秋川合流点地区、日野橋地区)を対象に、安定植生域(樹木に代表される長期間(10年以上)にわたり安定的に存在する植生域)に着目し、洪水に対する安定植生域の応答関係の調査研究を行っている。調査結果より、ハリエンジュ、オギ群落等の安定植生域を、「地下水位(平水位)からの比高」と「表層細粒土の堆積厚」の2つの主要な生育条件を指標として3つの植生タイプ(図 2-4)に分類した上で、礫床河川の樹林化が、洪水による礫河原上の表層細粒土層の堆積と、それに伴う河道の複断面化と植生の繁茂、植生の流速低減効果による更なる土砂の堆積作用によって、樹木群落の立地環境(比高、冠水状況)が整ったことによることを明らかにしている。そして、それらの礫河原から安定植生域へ遷移するシナリオ(図 2-4)をモデル化し、洪水による植生の消長を予測評価する手法(植生消長シミュレーション)を提案している。

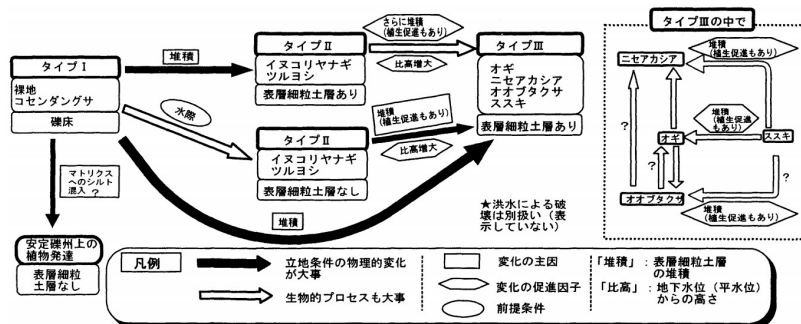
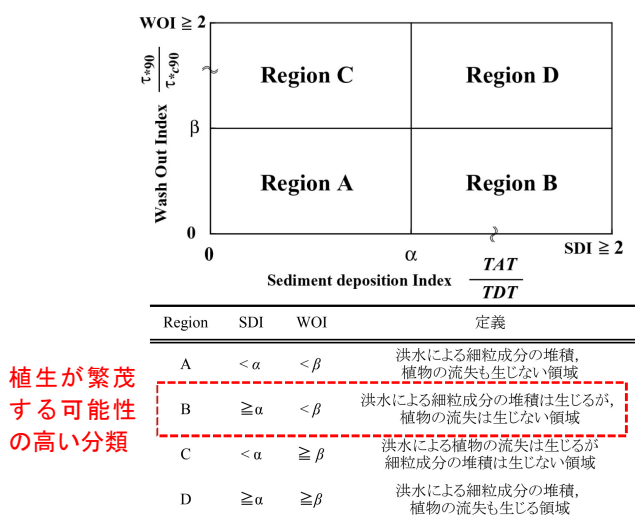


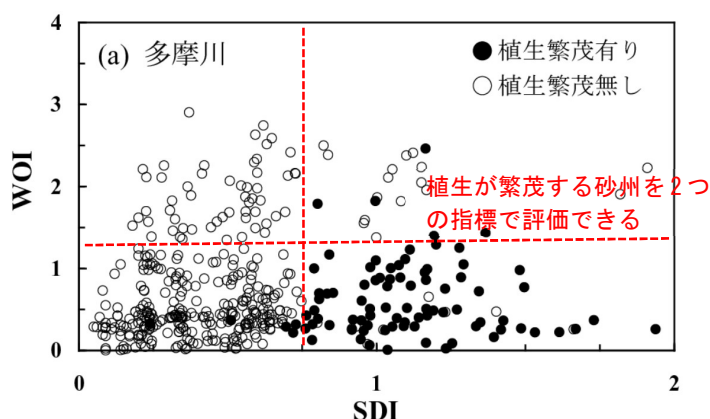
図 2-4 礫河原から安定植生域へ遷移するシナリオ⁴²⁾

清水ら^{44)~48)}は、李ら⁴⁰⁾の提案した礫床河川の樹林化の機構に加えて、洪水の攪乱によって倒伏・傾木した樹木(ハリエンジュ)の地下茎から繁殖・拡大がさらに活発化する動的な樹林化の機構を明らかにし、洪水によって樹木が破断・倒伏するか、流失するかによって樹木の繁殖状況が異なるため、樹木の破壊形態を評価することが河道・植生管理に重要であることを示している。田中ら^{49)~52)}、八木澤ら^{53)~56)}は、樹木(タチヤナギ、ハリエンジュ)の引倒し実験、荒川、多摩川における洪水後の樹木の破壊状況調査に基づき、洪水による樹木の破壊形態の違いに着目して樹木の破壊・流失機構をモデル化し、砂州の樹林化の可能性を評価する指標を検討している。樹木の破壊(破断・倒伏)の評価指標(BOI)については、樹木の破断・倒伏破壊の限界モーメントと関係する樹木の胸高直径を用いて指標化し、樹木の流失の評価指標(WOI)については、樹木が生育する砂州の河床材料(84%粒径)が移動する限界掃流力を用いて指標化し、それら2つの指標により樹林化の可能性の高い砂州を評価する手法を提案している。さらに、砂州上の植生の繁茂による細粒土砂の堆積作用に着目し、土砂堆積の評価指標(SDI)を、洪水減衰期における細粒土砂が堆積する時間(土粒子の沈降速度が摩擦速度より卓越する時間)で指標化(図2-5)し、樹林化の初期段階における砂州上の植生繁茂状況を評価する手法を提案している⁵⁵⁾。

これらの研究成果は、洪水流とそれに伴う河道の変化によって植生の生育状況(比高、水分・冠水条件)が影響を受けることに加え、植生による流れへの影響や土砂堆積作用などが河道形成に影響しており、それらの河道の変化と植生の遷移の相互関係を評価・把握することが河道・植生管理に重要であることを示している。一方で、実河川において、それらの河道の変化と植生の遷移の相互関係を考慮して、長期的な視点からこれまでの洪水や河川改修による河道の変化と植生の応答関係、植生の消長による河道の形成・安定化への影響を分析した研究はほとんど行われていない。



土砂堆積の評価指標(SDI)と植生の流失評価指標(WOI)による植生繁茂状況の分類



多摩川における土砂堆積の評価指標(SDI)と植生の流失評価指標(WOI)による植生繁茂状況の関係

図2-5 土砂堆積の評価指標(SDI)と植生の流失評価指標(WOI)に基づく植生繁茂の評価⁵⁵⁾

2-1-3 生物のハビタットの評価に関する既往の研究

(1) 生物のハビタットの評価手法に関する既往の研究

河川における生物及び生物の生息・生育・繁殖場(ハビタット)の評価手法については、国内外で様々な手法が研究開発されている。生物を指標とした代表的な評価手法としては、イギリスで開発された「RIVPACS(River In Vertebrate Prediction and Classification System)」, 「RIVPACS」を基にしてオーストラリアで実用化された「AUSRIVAS(AUSTRALIAN RIVER Assessment System)」, アメリカの「HABSCORE」などがある⁵⁷⁾⁵⁸⁾。これらの手法は、魚類や水生昆虫を評価指標として、対象区域とリファレンス(人為的な影響を受けていない未改変の区域)に生息する生物相や生息密度を比較し、対象区域における人為的な影響のない場合の潜在的なハビタットの質を評価する手法である。一方、生物の指標を一定の手順に基づきスコアリング(点数化)して評価する手法の例として、アメリカで開発された「IBI(Index of Biological Integrity)」⁵⁷⁾⁵⁸⁾や日本の「平均スコア法」⁵⁹⁾⁶⁰⁾がある。「IBI」は、水質汚染などの人為的な影響に関係すると考えられる生物指標の項目(例えば、水質汚染に耐久性のある(ない)生物種など)を選定してそれぞれ点数化し、その合計点から各地点の評価を行う手法である。「平均スコア法」は、イギリスで開発された「BMWP法」を日本向けに改良した手法で、底生動物の科毎に設定された水質汚染への耐性を表わすスコアを用いて、各地点で出現した科の合計スコアを科数で割った平均スコアで水環境を評価する手法であり、環境省⁵⁹⁾や国土交通省(河川水辺の国勢調査)⁶⁰⁾で実施する水環境評価の一指標となっている。生物を指標とした評価手法は、対象区域の生物の生息状況を調査する必要がある、それには生物を専門とする調査員と労力を要するという課題がある。また、調査結果が必ずしも対象区域全体の生物の生息状況を捉えられていないなどのデータの信頼性や、選定した生物種の妥当性、局所的に分布する種に対する評価の取り扱いなどの問題も指摘されている⁵⁷⁾⁵⁸⁾。

そのため、生物のハビタットの基盤となる河道の物理環境を指標とした、生物調査より簡易的で実用性の高い評価手法が開発されている。その代表的な手法として、イギリスの「RHS(River Habitat Survey)」がある⁵⁷⁾⁵⁸⁾。「RHS」は、“河川の特徴と質を物理的特徴に基づいて調和・データ蓄積・解析・評価するシステム”と定義されており、河川をリーチスケール(500m)に区分して比較的簡便な調査を行い、河床勾配や標高、河岸形状、瀬・淵の数などの基礎的な物理環境データを用いて評価するものである⁶¹⁾。「RHS」により得られたデータは、「HQA(Habitat Quality Assessment)」(ハビタットの多様性の観点から点数化)、「HMS(Habitat Modification Scores)」(人為的な改変の程度の観点から点数化)により点数化し、流域内のリファレンス(ハビタットとして重要な場所、人為的な影響の小さい場所)の設定などに用いられる。「RHS」は日本の河川でも試行され、その適用性が確認されている⁶²⁾⁶³⁾。

また、特定の生物の生息適正を物理環境でモデル化して生息適地となる区域の定量的な評価を行う方式として、アメリカで開発された「HEP(Habitat Evaluation Procedure)」, 「PHABSIM (Physical Habitat Simulation)」などがある⁵⁷⁾。「HEP」の基本的な考え方は、対

象地域の物理環境がある生物のハビタットとしてどの程度適してしているかを生息場適性指数(HSI (Habitat Suitability Index))を用いてモデル化し、その地域の HSI に面積を乗じた利用可能生息場面積を算出し、その経年変化や改修前後の変化を評価するものである⁶⁴⁾⁶⁵⁾。

「HEP」の河川版とも言える「PHABSIM」(図 2-6)も同様の考え方であり、対象河川内の水深、流速、底質などの物理環境に対する対象魚類の生息場適性指数(HSI)より、重み付きの利用可能生息場面積を算出し評価するものである⁶⁶⁾。我が国では、「PHABSIM」が 1994 年に導入されて以降、同手法が魚類のハビタット評価の代表的な手法となり、魚類のハビタットの保全に配慮した必要流量の検討、河川改修による効果・影響の評価(図 2-6)等、河川事業にも実用されつつある^{67)~70)}。「PHABSIM」の改良を行った研究^{71)~74)}も多数行われており、伊藤ら⁷⁵⁾、松永ら⁷⁶⁾は、「PHABSIM」を使用する際の大きな課題となっている、魚種ごとの生息場適正指数(HSI)がない場合でも適用可能な評価手法として、流速・水深・底質などの物理環境の多様性を示す指標(生物環境多様性指数：EED(Eco-Environmental Diversity))を用いた評価手法を提案している。

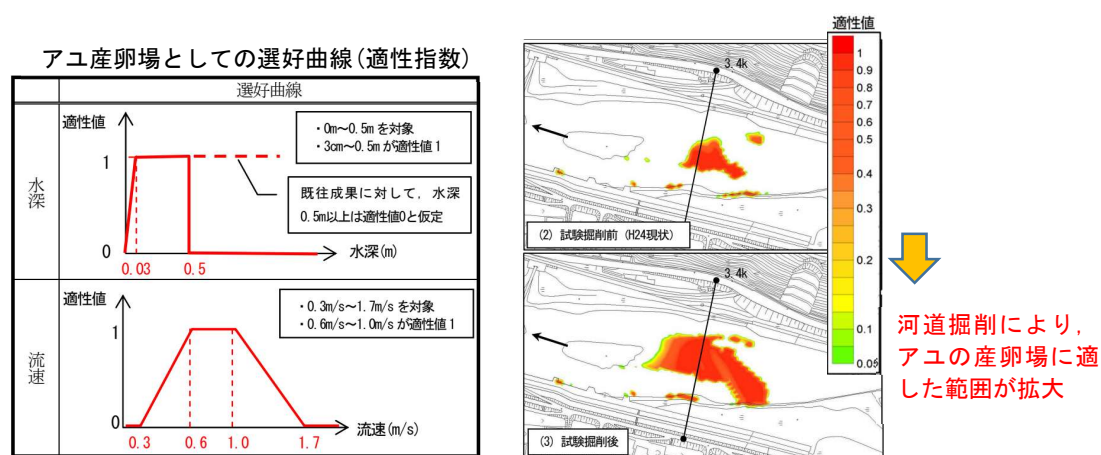


図 2-6 PHABSIM による改修前後のアユの産卵場の評価(評価に用いた生息場適性指数、評価結果)⁷⁰⁾

国土交通省国土技術政策総合研究所⁷⁷⁾では、河川環境管理への実践的な活用を目的とした、「河川環境管理シート」(図 2-7)による河川環境の評価手法を開発(2018 年にマニュアル「実践的な河川環境の評価・改善の手引き(案)」⁷⁸⁾を公開)した。本手法の基本的な考え方は、草地や自然裸地、瀬・淵などの生物のハビタットに関わる指標を縦断 1km 区間ごとに定量的に整理(面積、延長など)し、それらの指標の高低で各区間を点数化し、評価点の高い区間を環境保全の目標となる「代表区間(リファレンス)」として選定するとともに、代表区間を参考にしてその他の区間の環境の改善を図ろうとするものである。「河川環境管理シート」は、具体的な環境目標、管理方針の設定に役立つとともに、河川水辺の水国調査結果(河川環境基図)や航空写真などの既存データを有効に活用し比較的容易に作成できることから、全国の河川で試行的に導入されている⁷⁹⁾。

◆基本情報2-1：生物の生息場の分布状況（全川の中央値に基づき評価）

距離標		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
典型性	1. 低・中草生地																						
	2. 河辺性の樹林・河畔林	-	-	-	-	-	-	-	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3. 自然裸地	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4. 外来植物生育地	△	△	×	△	△	△	△	△	△	△	×	×	△	×	×	△	×	×	×	×	×	×
	5. 水生植物帯	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	△	○	△	○	△	△	△	△	△	△
	6. 水際自然度	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	7. 水際の複雑さ	○	○	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	8. 連続する瀬と淵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	△	△	△
	9. ワンド・たまり	○	○	○	-	-	-	○	○	○	○	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	10. 湛水域	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	△	○	△
	11. 干潟	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	12. ヨシ原	△	○	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
特殊性	磯河原の植生帯	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	湧水地	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	
	海浜植生帯	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	塩沼湿地	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
生息場の多様性の評価値		3	3	2	0	3	3	4	4	4	3	1	3	2	2	1	1	2	2	5	6	6	

注) 生息場の多様性の評価値は、全川の中央値を基準として陸域・水際部・水域の物理環境を○・△・×で評価し、○の数から×の数を差し引いた数値。

図2-7 河川環境管理シートに基づく生物のハビタットの評価結果(抜粋) 78)

これらの生物のハビタット評価手法は、主に平水時の流況や、ある年代の植生図・物理環境場を基本としたハビタットの評価手法として有効性が認められ、河川管理にも適用されつつある一方で、洪水時の流況、それによる河道の変化のダイナミクスな影響に対する水域のハビタットの評価手法は確立されていない。その一要因として、実河川における洪水時の魚類等の調査が困難であることから、洪水時の魚類等の挙動が十分に把握されていないためと考えられる。近年、魚類に発信機を付けたテレメトリー調査が実用化され、実河川における洪水時の魚類の挙動がある程度分かってきた。次節では、洪水時の魚類の避難行動に関する研究について述べる。

(2) 洪水時の魚類の避難行動に関する既往の研究

洪水時の魚類の挙動については、洪水時のデータの取得が困難なことから、特に実河川における調査研究は限られている。しかし近年、実験水路での調査やテレメトリー(遠隔計測装置)等の高度な観測技術を用いた実河川での魚類の追跡調査が行われるようになった。東ら⁸⁰⁾は、岩木川水系平川(青森県)、加治川(新潟県)で、テレメトリー法によるウグイ、サクラマスを対象とした洪水時の追跡調査を行っている。その調査結果より、洪水時にウグイは砂州上のワンドやその付近の植生帯などの流速の遅い場所に避難することを明らかにしている。そして、流速の増加とともにウグイは留まることができなくなり、数 km～数 10km 程度下流へ流されるなど、洪水による魚類への影響は大きいことを示唆している。サクラマスの追跡調査では、サクラマスは淵や堰周辺の湛水域に避難した後、流速の増加に応じて砂州上の冠水した樹林帯(ヤナギ林)でやり過ごす個体を確認している。本流部の流速 2.0m/s 程度に比べて、樹林帯では流速 0.5m/s 程度の低流速域となっており、砂州上の樹林帯は洪水時の魚類の重要な避難場所となっている。また、河川構造物周辺のたまりや淵等の河床・河岸の微地形では、大規模洪水時の魚類の避難場所として機能しきれていないことを指摘した上で、水際から堤防にかけて草本類から木本類に移行するような河道構造が魚類にとって重要であることを論じている。また、傅田ら⁸¹⁾による千曲川でのニゴイの追跡調査(図2-8)においても同様に、ニゴイは流速の変化に反応して、河岸や砂州・高水敷上の低流速域

(0.5~1.5m/s 程度)に移動し、流速の低下に従って本流へ戻る行動をとることを明らかにしている。その上で、魚類のハビタットの保全を目的とした河川整備にあたり、低水路河床と河岸、高水敷が緩やかに連続するような河道形状に配慮する必要性を指摘している。

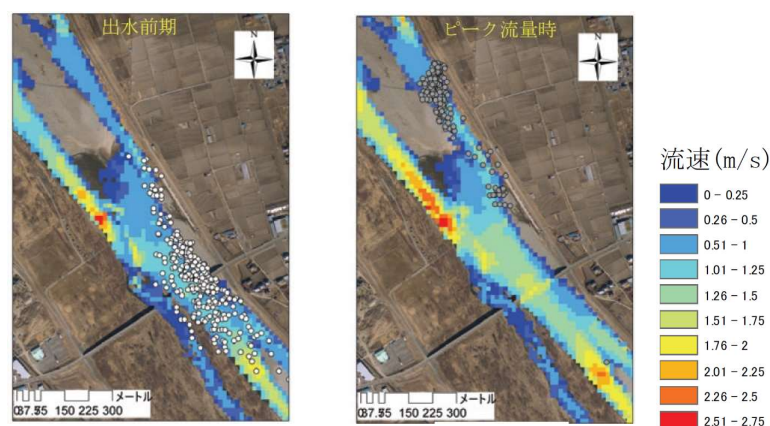


図 2-8 洪水時の魚類の位置と流速分布⁸¹⁾

青木ら⁸²⁾による、複断面開水路における流量変化に対する魚類(ウグイ)の行動調査では、ウグイは低水路河岸の底面付近の低流速域を選好して遊泳し、高水敷から低水路へ落ち込む流れに反応して、低水路河岸から高水敷へ移動する行動をとることを観察している(図 2-9)。このような遊泳行動は、流速が体長の4倍以上になると明確に現れることから、魚類は遊泳能力を超える流速に反応して下流に流されないように、流れの上流側へ避難する行動をとることを明らかにしている。

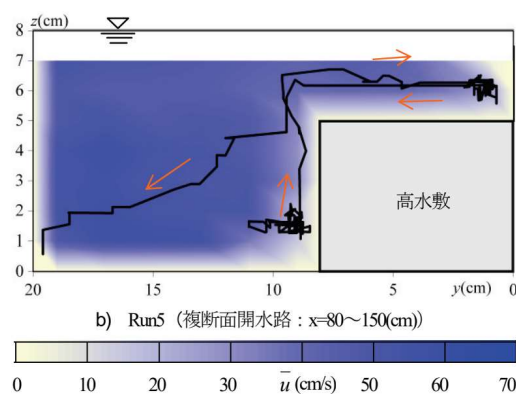


図 2-9 時間平均流速コンターと魚の遊泳軌跡図⁸²⁾

魚類の避難場所の特徴に関する調査研究として、Harvey BC ら⁸³⁾は、アメリカのカリフォルニア北西部を流れる Little Jones Creek(川幅 8m 程度の溪流)でサケ科魚類を対象とした調査を行い、洪水時にサケ科魚類は大きく移動することはなく、多くの個体が支川や大型倒木の下流でやり過ごしていることを確認している。Makiguchi ら⁸⁴⁾は、台湾台中の Chichiawan Stream(川幅 10m 程度の溪流)でマスの追跡調査を行った結果、マスは平水時、洪水時ともに

巨石付近の利用頻度が高いことを示している。また、Koizumiら⁸⁵⁾は、札内川ダムの試験放水事業を利用して増水時の本川、支川の魚類調査を行った結果、本川増水時に支川が溪流魚の避難場所となっていることを明らかにしている。

これらの調査研究結果より、洪水による魚類への影響は大きいことから、支川やワンド・たまり、巨石、砂州、水際植生や樹木などによって、洪水時の魚類の避難場所となるような低流速域が洪水流量に応じて連続的に形成される河道構造が重要となる。

(3) 砂州と生物のハビタットの関係に関する既往の研究

河川が本来有している自然環境の役割を見直し、これまでの河川管理のあり方や川のあるべき姿について検討するため、平成7年に、生態学と河川工学の学識者が共同して総合的な研究を行う「河川生態学術研究会」が創設された⁸⁶⁾。同研究会では、全国の代表的な河川を研究フィールドとした河川別の研究グループのもと、それぞれの河川の特徴や抱える課題を研究テーマとした先進的な研究が進められている(令和4年時点で、11の研究グループが完了し、5つの研究グループが実施中)。このうち、木津川研究グループ(平成10年～平成21年)では、砂州の生態系の構造と機能(図2-10)の解明を目的とした研究が行われた⁸⁷⁾⁸⁸⁾。

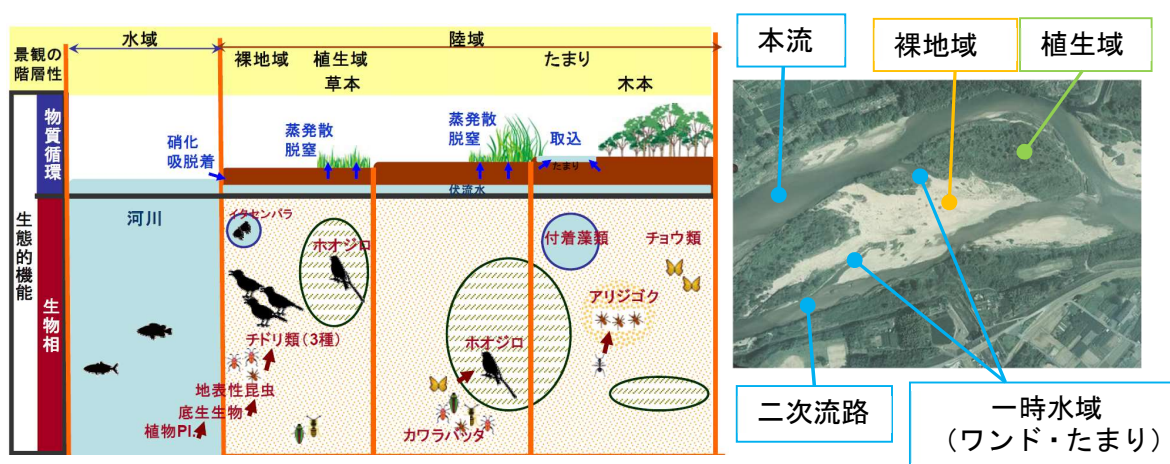


図 2-10 木津川における砂州の景観要素と機能の関係⁸⁸⁾

砂州の生物のハビタットの機能に着目した研究として、江崎、松良、遠藤ら⁸⁸⁾、山岸ら⁸⁹⁾は砂州構成砂礫の粒径に応じてチドリ類やアリジゴクの棲み分けがなされていること、なだらかな水際裸地が冠水頻度に応じた植生域(エコトーン)を形成させ、それが昆虫類の多様性、チドリ類の採餌場に寄与していることを示し、洪水とそれに伴う土砂移動による砂礫の分級や微地形(マウンド等)の形成、植生の生育等が砂州上の生物のハビタットの形成に大きく影響していることを明らかにしている。また、福原、谷田ら⁸⁸⁾は、砂州の水際部や砂州周辺に形成されるワンド、たまりなどの一時水域が魚類(特に稚魚)や底生動物の重要な生息場、増水時の避難場所となっていること、一時水域の水位変動が陸域(砂州水際)に藻類やデトリ

タスを供給し、それが昆虫類の餌場を提供していることを明らかにしている。一方、砂州内の伏流水流動による水質浄化(脱窒)機能に着目した研究として、安佛、片貝、鷺見、辻本、中島、三田村⁸⁸⁾、尾花ら⁹⁰⁾は、砂州内の伏流水の流動が砂州構成材料や植生の影響を受けており、裸地域では硝化や不飽和土壌からの溶脱による硝酸態窒素濃度の増加が促され、植生域では脱窒による硝酸態窒素濃度の減少が卓越することを明らかにし、植生が点在する砂州で特に水質浄化(脱窒)機能が高いことを示した。木津川における砂州の生態的機能に関する研究は、砂州の裸地域、植生域、一時水域などの景観要素(図 2-10)が流れや土砂移動とともに安定的に形成され、それらが有機的に連結されている砂州構造が、生物のハビタットやそれらを支える栄養・物質循環の場にとって重要であることを示唆している。

砂州と生物のハビタットの関係に関する研究は行われている一方で、砂州の安定性と生態的機能を評価し、治水と河川環境の両面から機能性の高い砂州の構造を評価した研究は行われていない。そのため、自然河川の河道形状である「船底形断面形」を呈する砂州河道が、治水(河道の安定)と河川環境(多様な生物のハビタットの形成)の両面から望ましい河道形状であることを実河川で検証することが求められる。

2-2 治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題

2-2-1 治水と河川環境の調和を目指した川づくりに関する経緯

我が国における、治水と河川環境の調和を目指した川づくり⁹¹⁾については、平成2年に建設省河川局(当時)による通達『多自然型川づくり』の推進について」が出されたことで、“河川が本来有している生物の良好な生息・生育環境に配慮し、あわせて美しい自然景観を保全あるいは創出する”「多自然型川づくり」が始められた。その後、平成9年に河川法が改正され、河川法の目的に「治水」、「利水」に加え、「河川環境の整備と保全」が位置づけられたことを契機として、「河川砂防技術基準(案)計画編」に“河道は多自然型川づくりを基本として計画する”ことが明記され、多自然型川づくりがすべての川づくりの基本として実施されるようになった⁹²⁾。平成17年には、「多自然型川づくりレビュー委員会」より、これまでの取り組みと課題を踏まえ、提言「多自然川づくりへの展開(これからの川づくりの目指すべき方向性と推進のための施策)」が発出され、この提言を受け翌年の平成18年に「多自然川づくり基本指針」が通達された。この通達により、特別なモデル事業であるかのような誤解を与える「多自然型川づくり」から脱却し、普遍的な川づくりとしての「多自然川づくり」が展開されることとなった⁹³⁾。多自然川づくりは、“河川全体の自然の営みを視野に入れ、地域の暮らしや歴史・文化との調和にも配慮し、河川が本来有している生物の生息・生育・繁殖環境及び多様な河川景観を保全・創出するために、河川管理を行うこと”と定義され、河川の調査、計画、設計、施工、維持管理等の河川管理に係るすべての行為に適用されるものとされている⁹³⁾。

多自然川づくりに関する技術資料として、平成18年の通達「多自然川づくり基本指針」における多自然川づくりの考え方を踏まえ、特に河道を大幅に改変することの多い中小河川を対象とした河道計画の考え方を示した「中小河川に関する河道計画の技術基準」が平成20年に策定(平成22年改訂)され、その解説書として具体的な事例を用いて説明した「多自然川づくりポイントブック」が発行されている。また、「河川砂防技術基準(案)」の各編(調査・計画・設計・維持管理編)や、災害復旧事業及び改良復旧事業を実施する際の基本方針となる「美しい山河を守る災害復旧基本方針」においても、多自然川づくりの考え方が反映され、改定されている⁹⁴⁾。

一方、平成29年に発出された「河川法改正20年 多自然川づくり推進委員会」の提言『持続性ある実践的多自然川づくりに向けて』では、これまで進められてきた河川環境施策についてレビューし、多自然川づくりの取り組み状況や課題、それらを踏まえた今後の対応方針についてとりまとめている⁹⁵⁾。本提言によると、全国の河川で多自然川づくりの優良な事例が生み出されてきた一方で、多自然川づくりの考え方が十分徹底されていない課題の残る事例も多く、治水、利水に比べ、河川環境の整備・保全の目標設定や評価方法の検討が進んでいないなど技術的な課題も指摘されている。

2-2-2 治水と河川環境の調和を目指した河川管理における課題

上記のとおり、すべての川づくりの基本は「多自然川づくり」であり、治水と河川環境の調和のもとに河川管理は行われるものとされている。しかし、長い歴史を持つ治水事業と比べて、河川環境の整備・保全は、平成9年の河川法の改正で目的化された新しい事業対象であったこともあり、河川環境は地先の問題として捉えられ、治水と河川環境は一体ではなく、別々の事業として実施されることが多い。河川環境の整備・保全については、例えば、樹林化した砂州の切下げなどの局所的な対策にとどまるなど、河川全体の改善を見据えたものとなっていない⁹¹⁾⁹⁵⁾。多自然川づくりの技術資料においても、例えば、川幅の設計の考え方については、“河川が有している自然の復元力を活用するため、十分な川幅を確保する”ことが記述されるにとどまる⁹⁴⁾⁹⁶⁾。そのため、掘削した砂州上に土砂が再堆積し、樹木が繁茂するなど課題の残る改修事例も見られ⁹⁷⁾、治水と河川環境を一体とした河川全体の改善を図る抜本的な対策技術は確立されていない。

我が国の河川の河道計画は、低水路と高水敷からなる「複断面形」を標準的な河道断面形とすることで、洪水時の堤防近辺の流速を抑え、堤防の安全性を確保し、平常時には低水路に安定して水を流下させ、高水敷の空間利用が図られてきた。しかし、治水や利水を目的として経年的に実施されてきた河川改修やダム・固定堰等の横断構造物の建設は、河道内の土砂移動量を減少させ、それらの時間的・空間的な不連続性をもたらした。その結果、低水路河床高の低下と低水路幅の縮小化を伴う河道の二極化を生じさせ、河床洗掘や河岸侵食の進行やそれに伴う河川構造物の被災・不安定化、土砂堆積による河積阻害などの問題を引き起こしている。また、河道の二極化は、高水敷(砂州)上の樹林化、砂州や瀬・淵などの生物の生息・生育・繁殖場(ハビタット)を縮小・消失させるなど河川環境面への影響も大きい。近年の気候変動に伴う洪水の激甚化・頻発化は、流域内の土砂移動を活発化させるため、全国的にそれらの問題を深刻化させている。このため、治水と河川環境を一体的に捉えた河川管理のための課題として、土砂移動の連続性を改善し土砂移動量を回復することが重要となる。そして、現在の洪水外力と土砂環境の変化に適応した、治水上、河川環境上も望ましく、かつ維持管理のしやすい、治水と河川環境の調和した河道断面形について明らかにすることが求められている⁹¹⁾¹⁰⁾。

一方、洪水流の観測に比べて、土砂移動量の観測は困難なため、洪水時の土砂移動の実態はよく分かっていない。それに対して、河川管理者である国土交通省や自治体は、洪水流や河道のデータを継続的に観測し続けており、グリーンレーザやドローン等の無人航空機(UAV)技術、縦断的に密に設置された「危機管理型水位計」など、近年の観測体制・技術の向上とともに、昨今の大規模洪水を含む洪水前後のデータが取得され、洪水や河川改修に対する河道の変化・応答を分析可能なデータが蓄積されてきた。加えて、洪水流や河床変動の解析技術の進展により、実河川を対象とした数値解析による洪水流と土砂移動現象の説明が可能になってきた。福岡^{11)~15)}は、観測精度の高い洪水水面形の時間変化を説明するよう

に洪水流・河床変動解析を行うことで、多くの河川で洪水水面形の時間変化や流量ハイドログラフ、流速場、河床変動量などの洪水諸量を工学的に十分な精度で算出できることを示している。このような長期的な実測データ、精度の高い洪水流・河床変動解析に基づく治水と河川環境の調査研究は、今後の河川の適切な管理を行っていく上で極めて重要な情報を与える。

2-3 第 2 章のまとめと本研究の位置づけ

本章では、治水と河川環境の整備・保全に関係する研究として、「安定な河道の形成」、「洪水に対する河道の変化と植生の応答関係」、「生物のハビタットの評価」に関する既往の研究、及び治水と河川環境の調和を目指した河川管理における課題について整理した。以下に得られた知見、課題を示す。

古くから安定な河道断面形状に関する研究が行われ、安定河道の河幅、水深の理論式が提案されている。しかし、これらの理論式は、断面形状や流砂量が縦断的に変化しない理想的な直線河道などの条件を仮定して導出しているため、縦横断的な土砂移動が著しい我が国の実河川に適用するには課題がある。福岡らは、急流石礫河川である常願寺川で大規模現地水路実験を行い、巨石等の大粒径の河床材料が核となって河床が安定し、流量規模に応じて水路幅が広がることによって安定な河道形状を形成する過程を明らかにしている。

沖積地の自然河川における安定河道は、河道形成流量に相当する大規模洪水によって河道の縦横断形が形成され、河道形成流量以下の洪水に対しては、河道断面形のある程度の変動幅の中で変化しながらも、長期的には安定な状態を維持している河道である。福岡は、自然河川の河道形成流量とそれによって形成される安定河道形状の力学関係に着目し、国内外の沖積地河川のデータを用いた次元解析手法に基づき、安定河道の無次元流量と無次元断面諸量の関係式(福岡の式)を導いている。そして、自然河川の河道形状である「船底形断面形」を基本に、福岡の式を満足する河道断面形が、治水と河川環境の調和した望ましい河道断面形であるという考え方を示している。これにより、福岡の式に基づく安定河道形状と高精度な洪水流・河床変動解析を一体的に検討することにより、船底形河道を基本形とした河道設計の実践的な検討が進められている。これらを踏まえ、船底形河道に改修された河川について、近年の河道形成流量に相当する大規模洪水を含む洪水に対して、長期的な視点での河道の安定性や生物のハビタットの形成状況を評価し、船底形断面形が治水と河川環境の調和した河道として望ましい河道形状であることを実証することが求められる。

急流河川では、土砂移動が激しく、洪水や河川改修、横断構造物の設置等による影響が河道の縦断形に顕われやすいため、河道の縦断形をどのように安定させるかは重要な課題である。砂防分野では、直線流路を維持するための帯工群の設置間隔などの理論的な検討が水路実験に基づき行われているが、実河川で検証するには至っていない。また近年では、老朽化した横断構造物の改築や被災した構造物の復旧工事に合わせて、河道の縦断形を是正し流下能力や土砂移動の改善を図る先進的な検討が行われている。それらの検討は、短期的な検証にとどまっていることから、大規模洪水を含む洪水に対する長期的な効果について十分な検証を行い、河道改修技術として確立することが求められている。また、縦断的に安定状態となった河道において、どのような横断面形状が形成されるか、それが自然河川の断面

形状である「船底形断面形」の特徴を示す河道形状となるかについて、長期的なデータに基づく検討は行われていない。

実河川においては、大量の土砂移動を伴う大規模洪水の発生と、長い年月にわたって実施されてきた河川改修やダム・固定堰等の横断構造物の建設、砂利採取等の河道改変による影響を受け続けてきた結果として、現在の河道の縦横断面形が形成されている。そのため、河道の長期的な変遷を踏まえ、これまでの洪水や経年的な河川改修を経て、それらの影響や効果が河道の形成、安定の過程にどのように顕われているかを分析し評価することは、今後の河川管理を合理的に進める上で有益な情報となる。利根川下流部における長期的な河道形成の研究では、明治以降の浚渫・低水路の拡幅、水制等の河川改修と大規模洪水が河道形成に及ぼしたきた影響を実測データと数値解析を用いて力学的に説明し、河川改修に応じて無次元河幅と無次元水深が安定河道の状態に対してどのように変化してきたかを見るのが河川改修の効果を評価する指標となり得ることを示している。一方、利根川下流部における研究では河床勾配の緩やかな低平地河川を対象としており、土砂移動が激しく、洪水や河川改修による影響が河道の縦断面形に顕われやすい急流河川について、このような長期的な河道の形成、安定化の分析評価を行い、河道の縦断面形の安定に資する知見を得ることが重要となる。

河道内の植生は、生物のハビタットとして重要な生息基盤となる一方で、河道の樹林化やそれに伴う洪水流の流下阻害、植生の多様性の低下等の治水と河川環境の両方の問題を引き起こすため、適正な植生管理の視点から洪水に対する河道の変化と植生の応答関係に関する研究が行われている。それらの研究成果より、洪水流とそれに伴う河道の変化によって植生の生育状況(比高、水分・冠水条件)が影響を受けることに加え、植生による流れへの影響や土砂堆積作用などが河道形成に影響しており、それらの河道の変化と植生の遷移の相互関係を評価・把握することが河道・植生管理に重要であることを示している。一方、実河川において、それらの河道と植生の相互関係を考慮して、長期的な視点からこれまでの洪水や河川改修による河道の変化と植生の応答関係、植生の消長による河道の形成・安定化への影響を分析した研究はほとんど行われていない。

生物のハビタットの評価については、生物や物理環境を指標として、環境保全の目標となるリファレンスとの比較評価による方式(「RIVPACS」、「HABSCORE」など)や、地点・区間毎の環境を点数化して相対的な評価を行う方式(「IBI」、「RHS」など)、特定の生物の生息適正を物理環境でモデル化して生息適地の定量的な評価を行う方式(「HEP」、「PHABSIM」など)等、様々な評価手法が国内外で提案されている。我が国では、データの取得が比較的容易な物理環境を指標とした評価手法の適用例が多く、特に魚類のハビタットの代表的な評価手法として、アメリカで開発された「PHABSIM」が魚類のハビタットの保全に配慮した必要流量の検討、河川改修による影響の評価等、河川管理に実用されつつある。しかし、これらの生物のハビタット評価手法は、主に平水時の流況や、ある年代の植生図・物理環境場を基本としたハビタットの評価手法として実用されている一方で、洪水時の流況、それによ

る河道の変化のダイナミクスな影響に対する水域のハビタットの評価手法は確立されていない。それは、実河川における洪水時の魚類等の調査が困難であり、洪水時の挙動が十分に把握されていないことが一要因となっていると考えられる。

一方、近年では魚類に発信機を付けたテレメトリー調査が実用化され、実河川における洪水時の魚類の挙動がある程度分かってきた。それによると、魚類は遊泳能力を上回る高流速に反応して避難行動をとり、支川やワンド・たまり、巨石、砂州、水際植生や樹木などによって形成される低流速域が魚類の避難場所となり得ることが明らかとなっている。そして、そのような避難場所がない場合、魚類は洪水流によって数 km 程度下流へ流される場合や、洪水後に陸域に取り残されて斃死することもあり、洪水による魚類への影響は大きい。このことから、洪水流量に応じて魚類の避難場所となり得る低流速域が形成される河道構造を明らかにし、それらに配慮した川づくりのための知見を得ることは、魚類の個体群の維持に重要となる。そのためには、河床・河岸形状やその周辺に生じる詳細な 3 次元的な流れ場を、魚類の移動性を考慮して広域的に捉える必要がある。調査結果によって明らかとなった知見と、洪水時の河床の状態や流れ場の時空間的な変化を高精度に再現できる洪水流・河床変動解析法とを組み合わせた検討が重要となる。

砂州と生物のハビタットの関係については、生態学と河川工学の学識者が共同して研究を行う「河川生態学術研究会」の木津川研究グループ(平成 10 年～平成 21 年)で総合的な研究がなされており、砂州の形状や比高、河床材料、砂州周辺の水域(ワンド・たまり)等に対する生物(鳥類、昆虫類、植生)のハビタットの選好性や、水質浄化(脱窒)機能の高い砂州の条件(比高、植生、伏流水の流動)等の評価が行われ、生態的機能の高い砂州の構造が明らかになっている。しかし、砂州の安定性と生態的機能の評価し、治水と河川環境の両面から機能性の高い砂州の構造を評価した研究はほとんど行われていない。

治水と河川環境の調和を目指した河川管理における課題として、すべての川づくりの基本は「多自然川づくり」であり、治水と河川環境の調和のもとに河川管理は行われるものとされている一方で、河川環境は地先の問題として扱われ、治水と河川環境は一体ではなく、別々の事業として実施されることが多い。治水や利水と比べて、新しい事業対象(河川法の目的)である河川環境の整備・保全是、技術的な蓄積がまだ十分でなく、治水と河川環境を一体とした河川全体の改善を図る抜本的な対策技術は確立されていない。

治水や利水を目的として経年的に実施されてきた河川改修やダム・固定堰等の横断構造物の建設は、河道内の土砂移動量を減少させ、それらの時間的・空間的な不連続性をもたらした結果、低水路河床高の低下と低水路幅の縮小化を伴う河道の二極化を生じさせ、河床洗掘や河岸侵食の進行や河川構造物の不安定化・被災、高水敷化した砂州の樹林化、砂州や瀬・淵などの生物のハビタットの縮小・消失など、治水と河川環境の両方の問題を引き起こしている。このため、治水と河川環境を一体的に捉えた河川管理のあり方として、土砂移動の連続性を改善することが重要となる。そして、気候変動に伴う洪水外力、土砂環境の変化に適

応し、維持管理のしやすい、治水と河川環境の調和した河道断面形について明らかにすることが求められている。

本研究では、既往の研究、治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題を踏まえ、以下に着目した検討を行う。

- ①第3章では、急流河川である多摩川中流部を対象に、長期的な実測データに基づき、これまでの河川改修や大規模洪水に対する河道の変化や、河道と植生の変化の相互関係を分析し、それらによる土砂移動、河道形成に及ぼす影響を評価することで、低水路が安定化する機構を明らかにする。また、河川改修や洪水によって低水路が安定化している区間について、河道断面形が自然河川の河道形状である「船底形断面形」を形成していることを分析する。
- ②第4章では、第3章で明らかとした低水路の安定化の機構を活用し、低水路の不安定区間に対して、固定堰を改築して流れと土砂移動を制御・改善し、低水路の安定化を図るための河道改修技術を、非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法を用いて検討する。
- ③第5章では、第3章で明らかとした安定した砂州河道に形成される「船底形断面形」について、良好な生物のハビタットの形成に寄与していることを示し、「船底形断面形」が治水と河川環境の調和した河道断面形となり得ることを明らかにする。本分析では、これまでほとんど研究が行われていない洪水による生物のハビタットへの影響に着目し、既往の調査研究で明らかとなっている洪水時の魚類の挙動を踏まえ、魚類の避難場所となり得る低流速域や高茎草本群落(オギ群落)が安定的に形成される砂州河道の特徴を、第4章で行った解析結果を用いて明らかにする。

参考文献

- 1) Lane E.W. : Design of Stable Channels, Transactions of the American Society of Civil Engineers, pp.1234-1260, 1953.
- 2) Gary Parker : Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part2. The gravel river, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 89, Part 1, pp.127-146, 1978.
- 3) 池田駿介, Gary Parker, 千代田将明, 木村善孝 : 直線礫床河川の動的安定形状とそのスケール, 土木学会論文集, 第 375 号, pp.117-126, 1986.
- 4) 福岡捷二, 寺沢直樹, 山崎憲人, 塚本洋祐 : 巨石を有する礫床河川の水理, 河川技術論文集, 第 13 卷, pp.339-344, 2007.
- 5) 福岡捷二, 長田健吾, 安部友則 : 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集 第 52 卷, pp.643-648, 2008.
- 6) 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 卷, pp.7-12, 2008.
- 7) 福岡捷二 : これからの河川管理を考えるー自然河川に学ぶ, 河川, 平成 23 年 8 月号, pp.3-7, 2011.
- 8) 浅野文典, 福岡捷二 : 沖積地河川における安定な川幅・水深-治水と河川環境の調和を目指した河道断面の決め方, 水工学論文集, 第 54 卷, pp.1021-1026, 2010.
- 9) 福岡捷二 : 温暖化に対する河川の適応技術のあり方-治水と河川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.
- 10) 福岡捷二 : 治水と河川環境の調和した治水適応策としての河幅, 断面形の検討方法, 河川技術論文集, 第 16 卷, pp.5-10, 2010.
- 11) 福岡捷二 : 洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術, 河川技術論文集, 第 12 卷, pp.1-6, 2006.
- 12) 福岡捷二 : 土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術-実務上の課題と調査・研究の方向性, 河川技術論文集, 第 14 卷, pp.1-6, 2008.
- 13) 福岡捷二 : 河道設計のための基本は何かー水面形時系列観測値と洪水流ー土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化, 河川技術論文集, 第 17 卷, pp. 83-88, 2011.
- 14) 福岡捷二 : 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第 20 卷, pp.253-258, 2014.
- 15) 福岡捷二 : 洪水流の水位と流量の今日的考え方ー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化するー, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_355-I_360, 2017.
- 16) 大賀祥一, 森脇孝洋, 榊井芳樹, 福岡捷二 : 江の川上流部における治水と河川環境の調和した河道断面形に関する評価, 河川技術論文集, 第 17 卷, pp.137-142, 2011.

- 17) 福岡捷二：札幌川の河道変遷を考慮した治水と河川環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究，北海道河川財団研究所紀要(XXIV)，pp.123-164，2013.
- 18) 小澤太郎，福島陽介，海津義和，後藤岳久，福岡捷二：多摩川上流部における治水と河川環境が調和した総合的な河道管理，河川技術論文集，第 19 卷，pp.471-476，2013.
- 19) 笹木拓真，宮原幸嗣，福岡捷二：複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化，河川技術論文集，第 20 卷，pp.277-282，2014.
- 20) 後藤岳久，福岡捷二，植田彰：太田川放水路下流部に形成された船底形河道の河岸沿い干潟保全のための技術検討，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_1093-I_1098，2014.
- 21) 長谷部夏希，山口広喜，後藤岳久，福岡捷二：船底形河道における低水路と高水敷の境界付近での細粒土砂の堆積機構—安定な船底形河道の設計に向けた検討—，河川技術論文集，第 20 卷，pp.463-468，2021.
- 22) 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(水工学) Vol.68，No.1，pp.1-20，2012.
- 23) 大浪裕之，下條康之，後藤勝洋，福岡捷二：令和元年洪水被災分析と土丹が露出する河道条件下における河川横断工作物の保全対策，河川技術論文集，第 27 卷，pp.129-134，2021.
- 24) 阿部宗平，渡辺正幸，泉岩男，池谷浩：単列砂礫堆形成領域での横工の効果，新砂防，34 卷，2 号，pp.27-34，1981.
- 25) 木村喜代治，高橋迫夫，長林久夫：流路工における床固工の間隔に関する研究，新砂防，43 卷，2 号，pp.22-24，1990.
- 26) 原田守啓，高岡広樹，大石哲也，萱場祐一，藤田裕一郎：平面形状の異なる帯工周辺の河床変動特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69，No.4，I_1177-I_1182，2013.
- 27) 原田守啓，高岡広樹，大石哲也，萱場祐一：新しい河道安定工法の実用化に向けた調査研究の取り組み，河川技術論文集，第 19 卷，pp.87-92，2013.
- 28) U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation : Rock Weir Design Guidance , RECLAMATION, Managing Water in the West, 2016.
- 29) D.L.Rosgen : The Cross-Vane, W-Weir and J-Hook Vane Structures...Their Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration, Wetlands Engineering & River Restoration 2001(ASCE), Sec.26, Chap.3, pp.1-22, 2001.
- 30) 福岡捷二，海野修司，成田一郎，辰野剛志，西本直史：多摩川二ヶ領宿河原堰の改築による堆積土砂の移動，水工学論文集，第 48 卷，pp.1081-1086，2004.
- 31) 下條康之，石川武彦，福岡捷二：多摩川水系における河川横断構造物の予防保全に向けての具体的検討，河川技術論文集，第 17 卷，pp.329-334，2011.
- 32) 平塚真理子，佐々木智之，福島陽介，福岡捷二：平山床固改築及びその下流部の河道整

- 正による河川整備効果, 河川技術論文集, 第19巻, pp.111-116, 2013.
- 33) 遠山和広, 米沢拓繁, 福岡捷二: 多摩川水系浅川における河床高回復現地実験による効果の検証, 河川技術論文集, 第22巻, pp.205-210, 2016.
- 34) 白井勝二, 福岡捷二: 利根川河道の形成に果たした水制の役割—治水・環境機能の評価—, 河川技術論文集, 第9巻, pp.185-190, 2003.
- 35) 白井勝二, 福岡捷二: 明治以来の利根川改修による河道の変化とその要因の水工学分析, 河川技術論文集, 第12巻, pp.217-222, 2006.
- 36) 岩谷直貴, 茂呂康治, 福岡捷二: 利根川下流部における布川狭窄部周辺河道の経年変化とその解析, 水工学論文集, 第56巻, pp.1135-1140, 2012.
- 37) 岩谷直貴, 福岡捷二, 銭谷秀徳: 利根川下流部における河道改修の経緯とその効果, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1003-I_1008, 2013.
- 38) 岩谷直貴, 福岡捷二, 銭谷秀徳: 利根川下流部における河川改修の効果算定法に関する研究, 河川技術論文集, 第19巻, pp.171-176, 2013.
- 39) 李参熙, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡辺敏, 山本晃一, 望月達也: 礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割, 水工学論文集, 第42巻, pp.433-438, 1998.
- 40) 李参熙, 藤田光一, 山本晃一: 礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ—多摩川上流部を対象にした事例分析より—, 水工学論文集, 第43巻, pp.977-982, 1999.
- 41) 藤田光一, 渡辺敏, 李参熙, 塚原隆夫: 礫床河川の植生繁茂に及ぼす土砂堆積作用の重要度, 河川技術論文集, 第4巻, pp.117-122, 1998.
- 42) 藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也: 扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No. 747, II-65, pp.41-60, 2003.
- 43) 瀬崎智之, 服部敦, 近藤和仁, 徳田真, 藤田光一, 吉田昌樹: 礫州上草本植生の消失機構に関する現地調査と考察, 水工学論文集, 第44巻, pp.825-830, 2000.
- 44) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行, 岡田理志: 礫床河川の河道内樹林化に関する一考察, 水工学論文集, 第43巻, pp.971-976, 1999.
- 45) 清水義彦, 小葉竹重機, 岡田理志, 新船隆行, 岩崎工: 洪水攪乱によるハリエンジュの破壊・再生と河道内樹林化について, 河川技術論文集, 第6巻, pp.59-65, 2000.
- 46) 清水義彦, 小葉竹重機, 岡田理志: ハリエンジュによる動的河道内樹林化について, 水工学論文集, 第45巻, pp.1099-1104, 2001.
- 47) 清水義彦, 長田健吾: 礫床河川における河道内樹林地の洪水破壊について, 河川技術論文集, 第8巻, pp.301-306, 2002.
- 48) 清水義彦, 長田健吾, 金文姫: 礫床河川における近年の洪水攪乱と植生破壊規模に関する考察, 河川技術論文集, 第9巻, pp.377-382, 2003.
- 49) 田中規夫, 八木澤順治, 青木信哉, 福岡捷二: 河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化, 河川技術論文集, 第13巻, pp.177-182, 2007.

- 50) 田中規夫, 八木澤順治, 佐々木寧, 福岡捷二: 河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.649-654, 2008.
- 51) 田中規夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 砂礫洲上における繁茂場所の相違が樹木の洪水時流失限界に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.631-636, 2009.
- 52) 田中規夫, 八木澤順治, 福岡捷二: 樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した 砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案, 土木学会論文集 B, Vol. 66, No.4, pp.359-370, 2010.
- 53) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 砂州上に繁茂する植生の洪水時流失限界評価, 第 14 巻, pp.139-144, 2008.
- 54) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 砂礫洲上樹木の破壊形態の相違を考慮した樹林化判定手法に関する研究, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp.153-158, 2009.
- 55) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 土砂堆積指標を考慮した砂礫州の樹林化評価に関する研究, 河川技術論文集, 第 18 巻, pp.65-70, 2012.
- 56) 八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 河道内植生の洪水による破壊および破壊規模に応じた再生拡大過程を考慮した植生動態モデル, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.393-398, 2013.
- 57) 中村太士, 辻本哲郎, 天野邦彦監修, 河川環境目標検討委員会編集: 川の環境目標を考える—川の健康診断—, 技報堂出版, 2008.
- 58) 村上まり恵, 黒崎靖介, 中村太士, 五道仁実, 楯慎一郎, 西浩司, 樋村正雄: 物理環境による河川環境診断(I)—リファレンスとの乖離度による評価, 応用生態工学会, 11 巻, 2 号, pp.133-152, 2008.
- 59) 環境省: 水生生物による水質評価法マニュアル-日本版平均スコア法-, 2017.
- 60) 国土交通省: 令和 2 年度河川水辺の国勢調査結果の概要[河川版](生物調査編), 2022.
- 61) Environment Agency: River Habitat Survey 1997 Field Survey Guidance Manual, 1997.
- 62) 大石哲也, 天野邦彦, 尾澤卓思: RHS・HQA の適用による円山川河川環境評価の検討, 応用生態工学会, 8 巻, 2 号, pp.179-191, 2006.
- 63) 中嶋崇志, 山下雄二, 金山明広: RHS・HQA を用いた河川環境評価: 埼玉県・神流川の下久保ダム下流区間での事例, 応用生態工学会, 13 巻, 1 号, pp.37-47, 2010.
- 64) 土門晋, 田村英記, 佐合純造, 前田研造: 千葉県一宮川を対象とした簡略化した環境評価手法による河川断面の決定, リバーフロント研究所報告, 第 18 号, pp.79-86, 2007.
- 65) 糠澤桂, 白岩淳一, 風間聡: 河川水温を考慮した HSI モデルによる水生生物の生息環境評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, I_1255-I_1260, 2016.
- 66) 小出水規行, 藪木昭彦, 中村俊六: IFIM/PHABSIM による河川魚類生息環境評価—豊川を例にして—, 河川技術論文集, 第 6 巻, pp.155-160, 2000.
- 67) 関根雅彦, 後藤益滋, 伊藤信行, 田中浩二, 金尾充浩, 井上倫道: 生息場評価手法を用いたホタル水路の建設, 応用生態工学, 10 巻, 2 号, pp. 103-116, 2007.
- 68) 永矢貴之, 白石芳樹, 筈瀬明日香, 鬼束幸樹, 東野誠, 高見徹, 東均, 秋山壽一郎: 流況—生息環境評価モデルに基づく最適河道断面の選択手法の提案, 環境工学論文集, 45

- 卷, pp. 39-50, 2008.
- 69) 竹原茂信, 内田臣一, 木村勝行: 矢作川豊田大橋付近における河道掘削案に対する水生昆虫の生息環境としての評価, 愛知工業大学研究報告, 第 44 号, pp.155-162, 2009.
- 70) 福井洋幸, 北川照晃, 深草新, 大屋彩, 稲若孝治, 松尾至哲: PHABSIM によるアユ産卵環境評価法の検証および改善策の提案, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_1003-I_1008, 2016.
- 71) 楊継東, 関根雅彦, 浮田正夫, 今井剛: 行動モードを考慮した魚の生息環境評価手法に関する研究, 土木学会論文集, No.671, VII-18, pp.13-23, 2001.
- 72) 知花武佳, 玉井信行: 生息域の季節変動に着目した魚類生息域適性基準に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.1145-1150, 2002.
- 73) 田代喬, 伊藤壮志, 辻本哲郎: 生活史における時間的連続性に着目した魚類生息場の評価, 河川技術論文集, 第 8 巻, pp.277-282, 2002.
- 74) 知花武佳, 辻本哲郎, 玉井信行: 物理環境の階層構造を考慮した魚類生息場評価手法の開発, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.1567-1572, 2004.
- 75) 伊藤浩文, 関根雅彦, 中村好希, 神野有生, 山本浩一, 樋口隆哉, 今井剛: 中小河川における魚類生息場評価のための生態環境多様性指数の提案, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, No. 1, pp. 1-11, 2016.
- 76) 松永晋平, 関根雅彦, 加藤琢己: DHABSIM を用いた島田川における河川浚渫が魚類生息場に与える影響予測評価, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.349-354, 2020.
- 77) 福島雅紀, 鈴木淳史, 諏訪義雄, 川瀬功記, 田中孝幸, 堂菌俊多: 環境管理における対策実施優先区間の選定について, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp.609-614, 2017.
- 78) 実践的な河川環境の評価と改善の考え方に関する検討会: 実践的な河川環境の評価・改善の手引き(案), 2019
- 79) 中村圭吾, 白尾豪宏: 河川環境管理シートによる河川環境の定量化と多自然川づくり, 水環境学会誌, 第 45 巻(A), 第 4 号, pp.119-123, 2022.
- 80) 東信行, 鴨下真吾, 佐原雄二, 関泰夫, 渡辺勝栄: 増水時における河川魚類の挙動と河川構造, 環境システム研究, Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 81) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎: 魚類自動追跡システムの現地実証実験と魚類行動特性の把握, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.1, pp.1-14, 2009.
- 82) 青木宗之, 瀬崎薫貴, 福井吉孝: 複断面開水路における流量変化と魚の行動に関する実験的研究, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.4, pp.166-182, 2013.
- 83) Harvey BC, Nakamoto RJ, White JL: The influence of large woody debris and a bankfull flood on movement of adult resident coastal cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki*) during fall and winter. *Can J Fish Aquat Sci* 56: 2161-2166, 1999.
- 84) Makiguchi Y, Liao LY, Konno Y, Nii H, Nakao K, Gwo JC, Onozato H, Huang YS, Ueda H: Site fidelity and habitat use of Formosan landlocked salmon (*Oncorhynchus masou formosanus*)

- during typhoon season in the Chichiawan stream, Taiwan assessed by nano-tag radio telemetry. *Zool Stud* 48: 460-467, 2009.
- 85) Koizumi I., Kanazawa Y. and Tanaka Y.: The fishermen were right: experimental evidence for tributary refuge hypothesis during floods. *Zoological Science*, 30, 375-379, 2013.
 - 86) 河川生態学術研究会：川の自然環境の解明に向けて-河川生態学術研究会の概要-, 2022.
 - 87) 河川生態学術研究会木津川研究グループ：木津川の総合研究, 2003.
 - 88) 河川生態学術研究会木津川研究グループ：木津川の総合研究Ⅱ, 2009.
 - 89) 山岸哲, 松原始, 平松山治, 鷺見哲也, 江崎保男：チドリ 3 種の共存を可能にしている河川物理, 洪水にともなう砂礫の分級, 応用生態工学, 12 巻, pp.79-85, 2009.
 - 90) 尾花まき子, 辻本哲郎：砂州河川の景観と河川生態系の構造にもとづく生態的機能評価へのアプローチ-木津川下流セグメントを例にして-, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1183-1188, 2009.
 - 91) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
 - 92) 多自然川づくりレビュー委員会：多自然型川づくりの課題と今後のあり方, 2006.
 - 93) 国土交通省河川局：多自然川づくり基本指針, 2006.
 - 94) 国土交通省水管理国土保全局：美しい山河を守る災害復旧基本方針, 2018.
 - 95) 河川法改正 20 年 多自然川づくり推進委員会：提言『持続性ある実践的多自然川づくりに向けて』, 2017.
 - 96) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について, 2010.
 - 97) 原田守啓, 角田美佳, 赤堀良介, 永山滋也：自然堤防帯河川の高水敷掘削後の土砂再堆積, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp.173-178, 2018.

第3章 多摩川中流部の複断面河道の長期的変遷，低水路河道断面の安定化の機構

3-1 概説

本章では，多摩川中流部(日野用水堰～大丸用水堰：45.2～32.4km)を対象に，過去74年間(昭和22年～令和2年)の実測データを用いて，これまでの河川改修や洪水等に対する河道の長期的変化，河道の変化と植生の変化の相互関係について分析を行った．浅川合流点より上流・下流区間の横断構造物と土砂移動状況の違いに着目し，大規模洪水と経年的な河川改修による影響・効果を把握・評価し，浅川合流点より上流区間(日野用水堰～浅川合流点：45.2～37.0km)の低水路が安定化し，砂州河道が回復する機構を明らかにした．一方，浅川合流点より下流区間(浅川合流点～大丸用水堰：37.0～32.4km)については，上流河道や浅川からの流入土砂の移動が横断構造物によって妨げられることで，横断構造物上流の低水路河床高が上昇し，低水路内の砂州(中州)や滯筋が不規則に発達し，河道が不安化する要因を明らかにした．さらに，低水路河床の安定化した砂州河道では，低水路幅の拡大とともに，河道断面形が低水路河床と砂州河岸が縦横断的に連続した自然河川の河道形状である「船底形断面形」を形成することを示した．

3-2項では，多摩川中流部の対象区間の特徴として，洪水や河川改修履歴，特徴的な土質層である土丹(上総層)の露出状況，河川環境等についてとりまとめ，3-3項以降の分析に関わる基本情報を整理している．3-3項では，浅川合流点上流区間のこれまでの河川改修や大規模洪水等に対する河道の長期的変化と低水路の安定化の機構について，3-4項では，浅川合流点下流区間の河道の長期的変化と低水路の不安定化の要因について，実測データに基づき分析・考察する．3-5項では，低水路が安定化している浅川合流点上流区間を対象に，安定した砂州河道の断面形が「船底形断面形」を形成することを，福岡の無次元流量と無次元河幅・水深の関係式(福岡の式)を用いて分析している．

3-2 多摩川中流部の河道の特徴

3-2-1 多摩川中流部の河道の特徴

(1) 対象区間の概要

図 3-1 は、多摩川流域図、図 3-2 は、低水路平均河床高の縦断形と河床勾配を示す。多摩川中流部(羽村取水堰～調布取水堰：54.0～13.3km)は、河床勾配が約 1/200～1/700 と急勾配であり、洪水流やそれに伴う土砂移動の著しい河道区間である¹⁾。しかし、高度経済成長期に大量の砂利採取(昭和 39 年に禁止)²⁾³⁾、水利用のための固定堰の建設が行われ、上流からの土砂移動量が制限、減少したため、低水路の経年的な河床低下が生じている。これにより、河床には新第三紀層(土丹)が広く露出しており、土丹は流水や流砂の衝突によって剥がされやすく、表面が滑らかなため、土砂が堆積しづらいという特性を持つ⁴⁾⁵⁾⁶⁾。土丹が露出した河床では、低水路濬筋部の固定化に伴う局所洗掘が進行し、河道の二極化、河川構造物の不安定化・被災、高水敷(砂州)の樹林化等、治水と河川環境の両面から問題が顕在化している³⁾⁵⁾⁶⁾。

図 3-3 は、本研究の対象区間を示す。本研究では、上記の河川管理の問題に対して経年的に河川改修が行われ、かつ、水位・流量データの観測体制(図 3-3 の水位観測地点参照)が充実し、河道データ、改修工事の履歴等の資料が整っている日野用水堰(45.2km)～大丸用水堰(32.4km)区間を対象とする。対象区間では、最大支川である浅川が 37.0km 付近で合流し、浅川合流点を境とした上流・下流区間で、横断構造物の特徴とそれに影響される土砂移動状況に違いが見られる。そのため、浅川合流点より上流・下流区間の土砂移動状況の違いが河道の長期的変化の中で河道の形成や安定化にどのような影響を及ぼしてきたかを、両区間を対比させて分析できるため、研究対象区間としての重要性は高い。

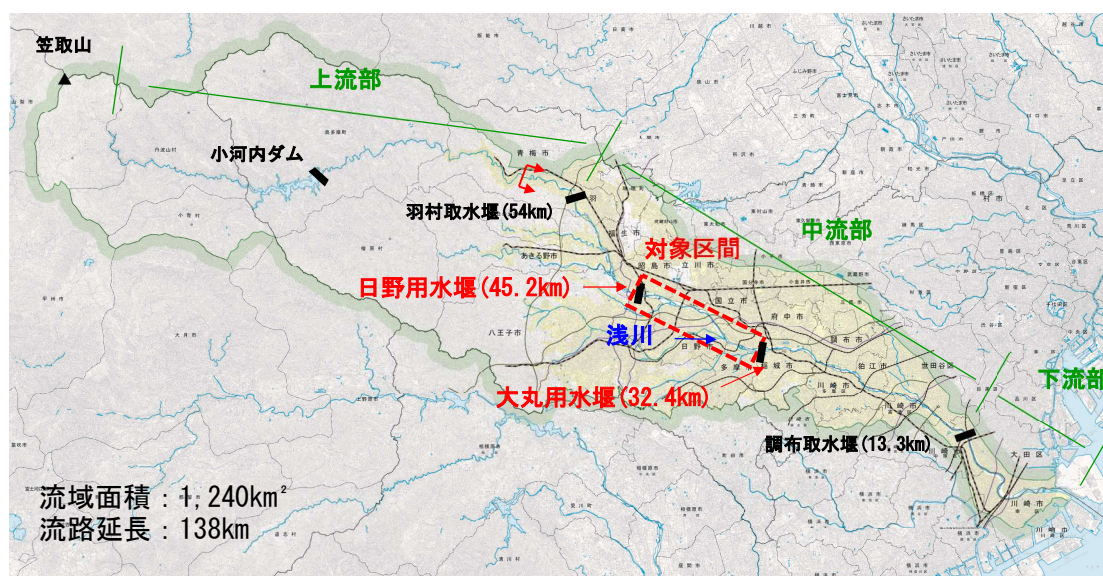


図 3-1 多摩川流域図

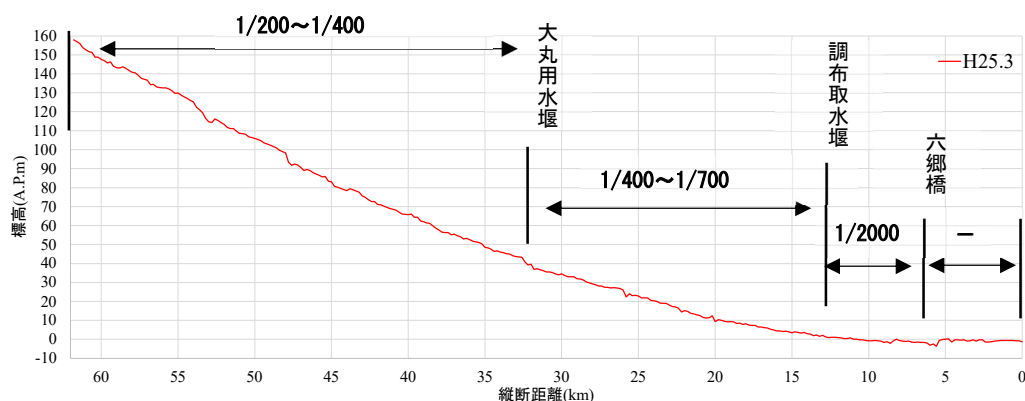


図 3-2 多摩川の低水路平均河床高の縦断形と河床勾配

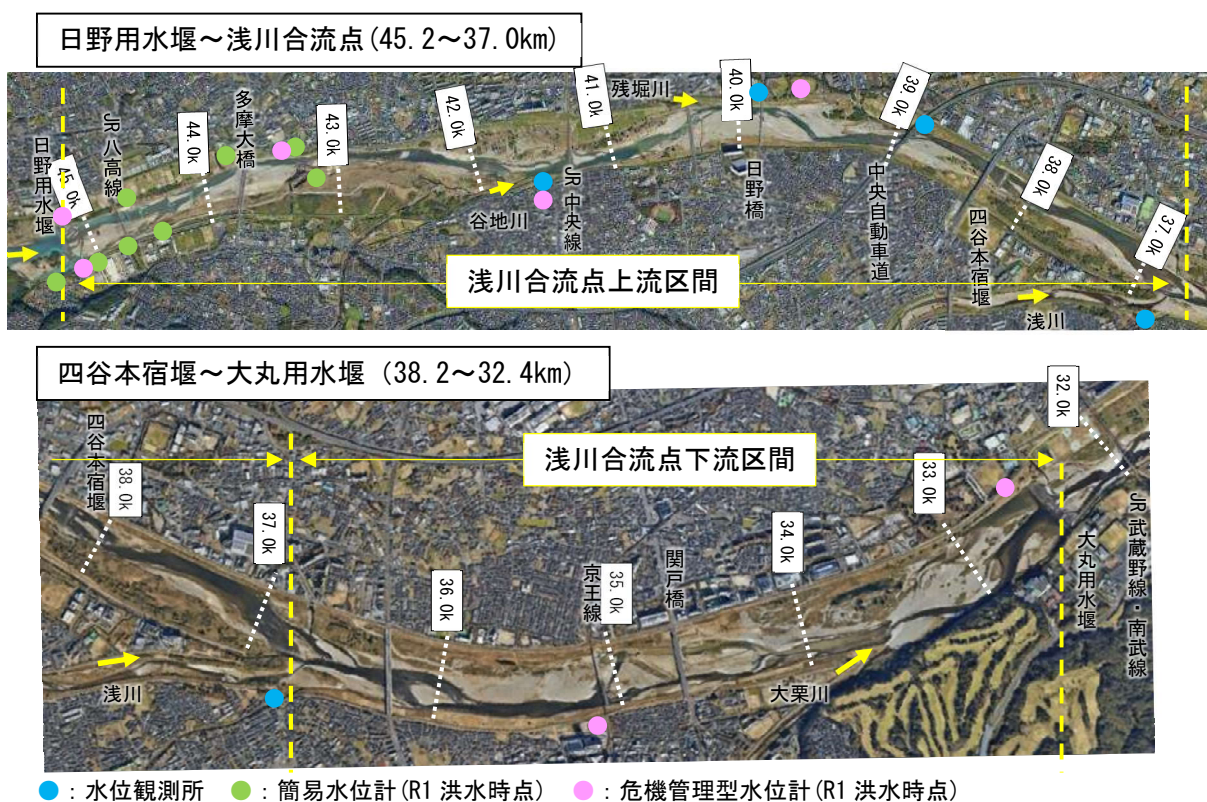
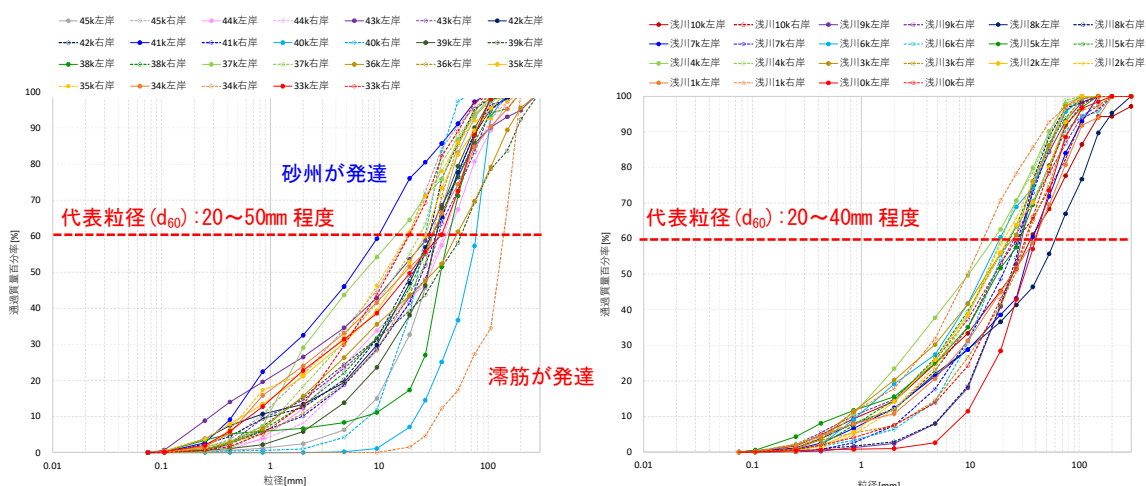


図 3-3 多摩川中流部の研究対象区間(日野用水堰～大丸用水堰:45.2～32.4km)

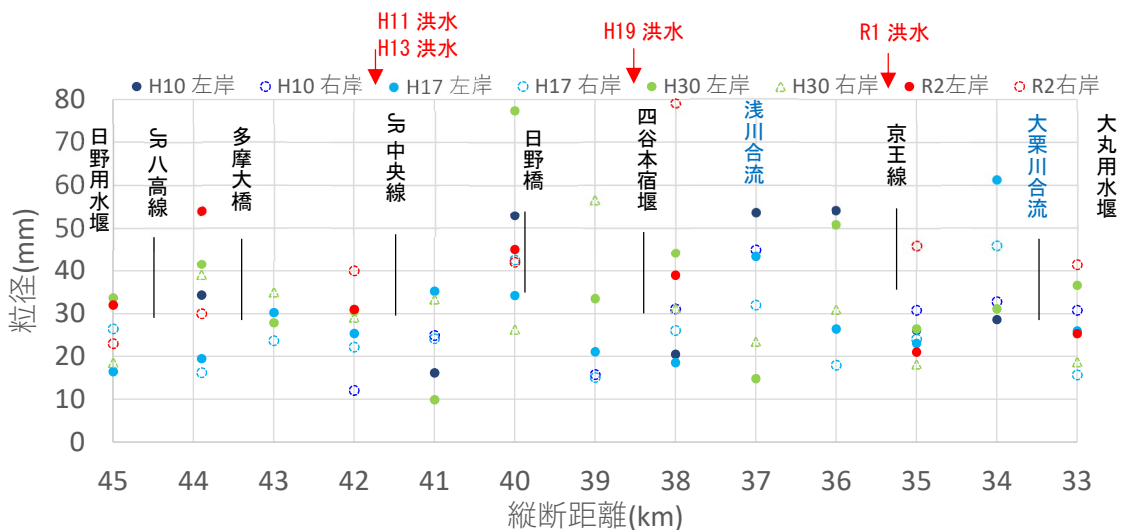
図 3-4 は、多摩川中流部(45～33km)、浅川(10～0km)における河床材料の粒度分布(平成 30 年調査結果)、図 3-5 は、同区間における代表粒径(d_{60})の縦断分布の経年変化を示す。当該区間の低水路左右岸の粒度分布は、代表粒径(d_{60})で 20～50mm 程度(粗礫)、浅川の代表粒径(d_{60})で 20～40mm 程度(粗礫)であり、砂礫河川を呈している。当該区間では、砂州が発達している河岸付近の粒径は細かく、滞筋が発達している河岸付近の粒径は粗いなどの局所的な傾向の違いは見られるものの、全体的な粒度分布は縦断的に大きく変わらない。また、図 3-5 より、多摩川・浅川ともに代表粒径は経年的に大きく変化していない。



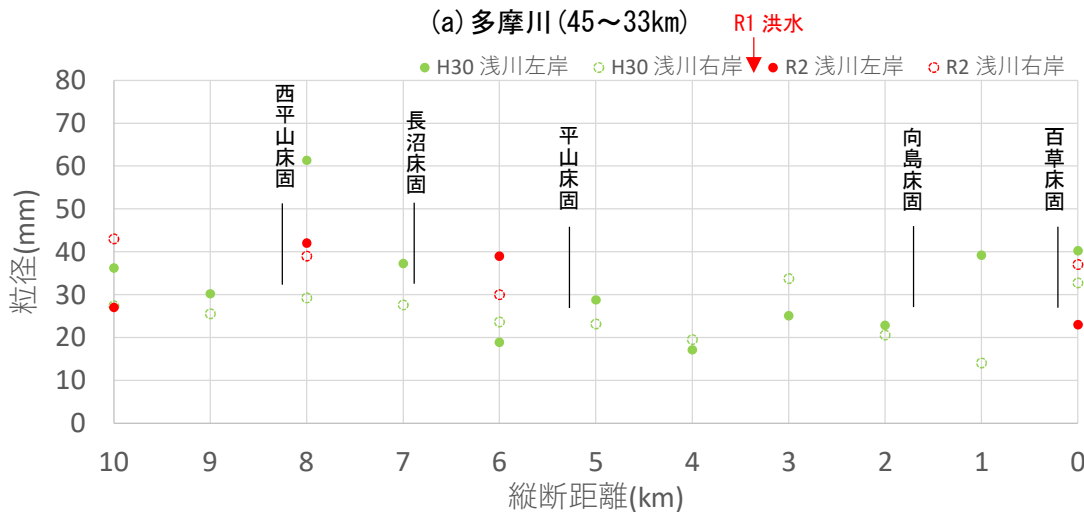
(a) 多摩川 (45~33km)

(b) 浅川 (10~0km)

図 3-4 多摩川, 浅川における河床材料の粒度分布 (平成 30 年調査結果)



(a) 多摩川 (45~33km)



(b) 浅川 (10~0km)

図 3-5 多摩川, 浅川における代表粒径 (d60) の縦断分布の経年変化

(2) 多摩川中流部における洪水履歴

図 3-6 は、多摩川中流部の日野橋地点(本川 39.9km)、浅川の高幡橋地点(浅川 2.0km)、浅川合流後の石原地点(本川 27.7km)における洪水履歴(各年の最大観測流量)¹⁾²⁾⁷⁾を示す。多摩川中流部では、昭和 49 年～令和元年の過去 46 年間で日野橋地点の流量が 2,000m³/s、石原地点の流量が 2,500m³/s を超える大規模洪水が 6 回発生している。このうち、3 洪水(昭和 49 年 9 月洪水、昭和 57 年 8 月洪水、平成 19 年 9 月洪水)は整備計画目標流量規模(日野橋 3,800m³/s)に相当し、令和元年 10 月洪水⁷⁾⁸⁾は計画高水流量(日野橋 4,700m³/s)を超える既往最大規模の洪水であった。

昭和 57 年洪水以降、平成 11 年までの長期間にわたり、日野橋地点で 2,000m³/s を超える大規模洪水は発生しておらず、平成 11 年以降、大規模洪水の発生頻度が高くなっている。このことから、多摩川中流部の河道の長期的変化を分析する上で平成 11 年は一つのポイントとなると考えられる。浅川も多摩川本川と同様に、平成 10 年以降、整備計画目標流量(1,100m³/s)に近い規模の洪水が多く発生している。

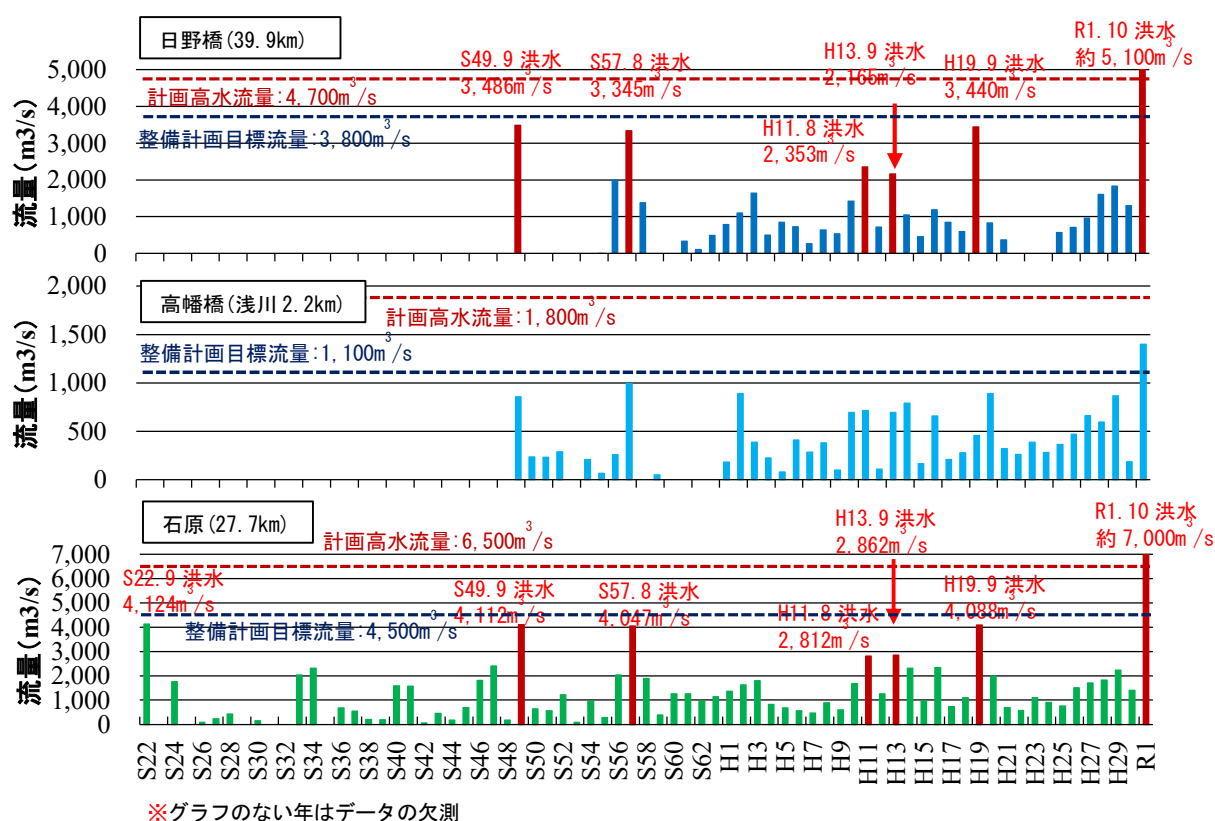


図 3-6 多摩川中流部の洪水履歴¹⁾²⁾⁷⁾

(日野橋(本川 39.9km) , 高幡橋(浅川 2.2km) , 石原(本川 27.7km) の各年の最大観測流量)

本研究の主要な対象洪水となる令和元年10月洪水⁸⁾の概要を以下に示す。図3-7は、日野用水堰～大丸用水堰区間周辺(46.0～32.0km)における令和元年10月洪水のピーク水位縦断分布(観測水位及び痕跡水位)を示す。図3-7より、令和元年10月洪水では、大丸用水堰上流(34.2～32.4km)や京王線橋梁上流(37.0～35.4km)における観測・痕跡水位が計画高水位(HWL)を超過している。これは後述するとおり、大丸用水堰の固定堰や京王線橋梁の橋脚が洪水流や土砂移動の阻害要因となっており、それらの横断構造物の上流で土砂が堆積し、河積阻害をもたらしているためである⁹⁾。そのため、浅川合流点より下流区間では流下能力不足が課題となっている。一方、浅川合流点より上流区間(45.2～37.0km)では、局所的に観測水位が計画高水位を超過している地点が見られるが、全体的な水面形は計画高水位に到達する直前に留まっており、流下能力が確保されていることが分かる。

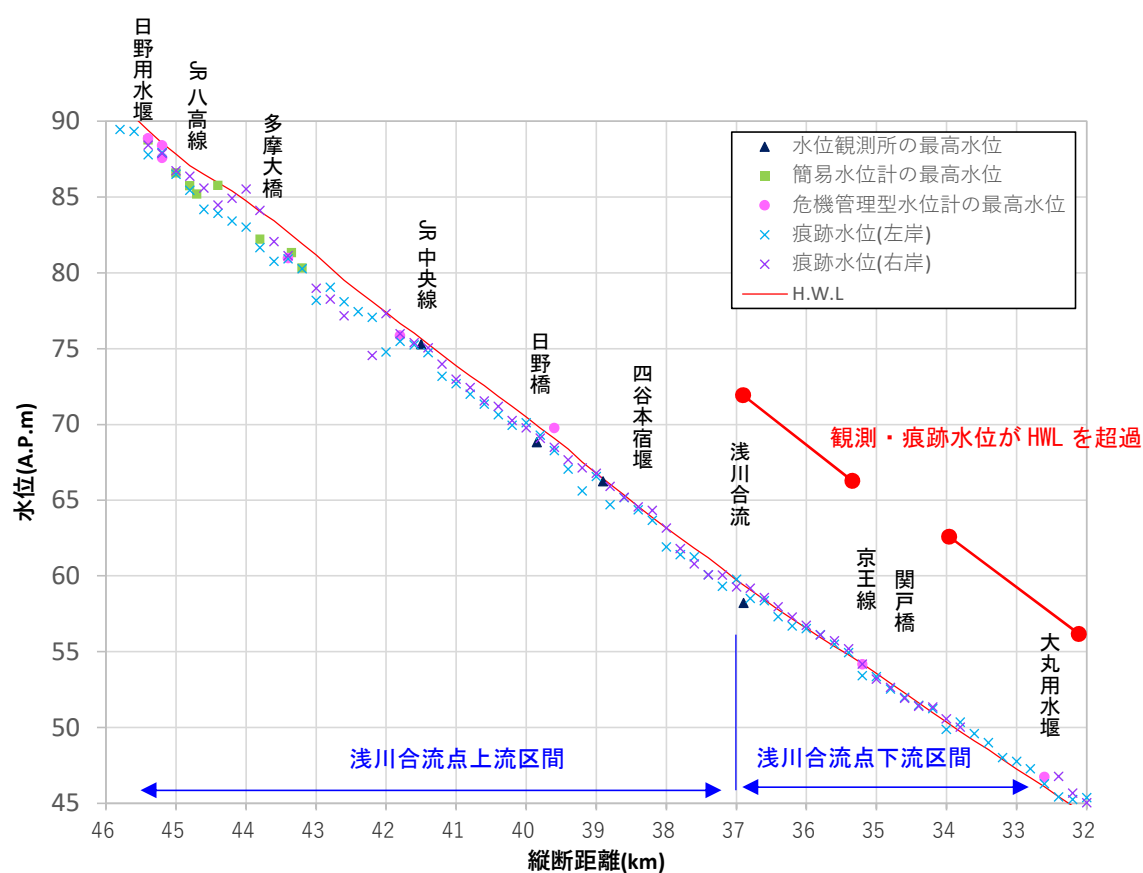


図3-7 多摩川中流部の令和元年10月洪水のピーク水位縦断分布 (46～32km)

(3) 砂利採取と土丹の露出の状況

多摩川中流部では昭和 39 年の禁止まで低水路内で大量の砂利採掘が行われていた¹⁾²⁾³⁾。図 3-8 は、多摩川における砂利採取位置図(昭和 38 年)、図 3-9 は、砂利採取許可量(昭和 37~38 年度)を示す。図 3-8、図 3-9 より、多摩川中流部では広範囲で砂利採取が行われており、特に多摩橋~日野橋区間(51.0~39.9km)で砂利採取許可量が多い³⁾。図 3-10 は、砂利採取前後の低水路平均河床高の縦断図(測量データの存在する 40.0km より下流区間)を示す。図 3-10 より、日野橋~大丸用水堰区間における昭和 49 年河道の低水路平均河床高は、砂利採取前の昭和 29 年と比べて 0.5~2.5m 程度低下しており、砂利採取による影響は大きい。



図 3-8 多摩川における砂利採取位置図(昭和 38 年)²⁾

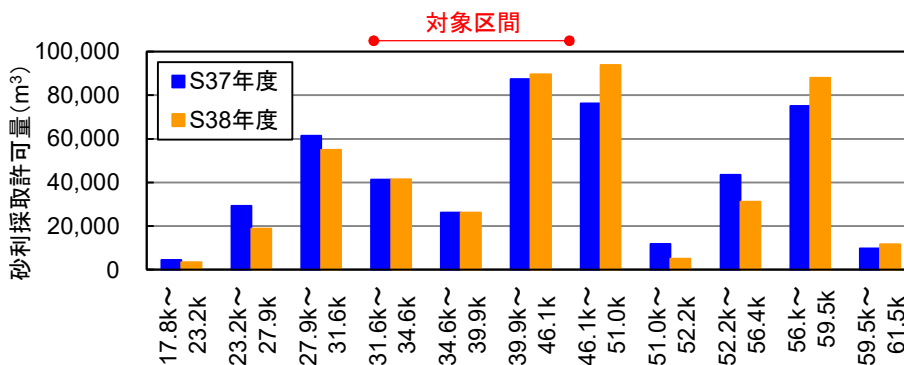


図 3-9 多摩川における砂利採取許可量(昭和 37~38 年度)³⁾

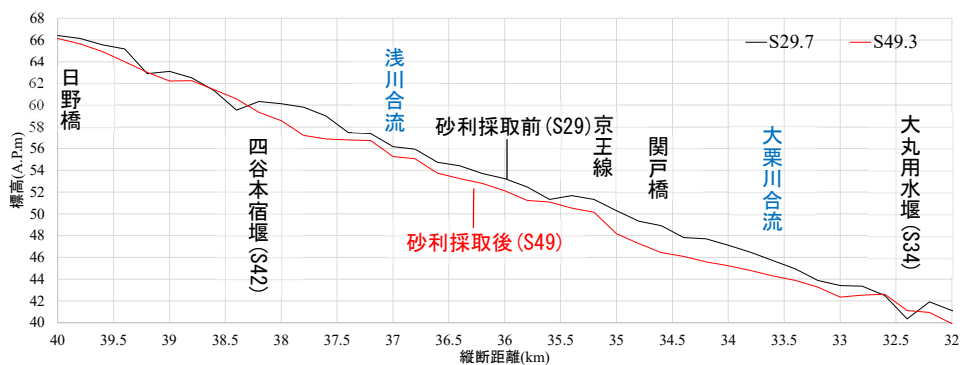


図 3-10 多摩川中流部の砂利採取前後の低水路平均河床高の縦断図(40~32km)

土丹(上総層)とは、新第三紀(約2千万年前)に海底に堆積し形成された砂岩・泥岩が露頭したもので、流水や石礫の衝突で剥がされやすく、表面が滑らかで洪水中に流下する砂礫が堆積しにくいいため、土丹が一度露出すると河床低下が急速に進行する⁴⁾⁵⁾⁶⁾。多摩川流域は土丹の連続した地層となっており、特に大量の砂利採取が行われた多摩川中流部では、土丹の分布が低水路河床高の縦断形に大きく影響している。図3-11は、平成24年の調査結果¹⁰⁾による土丹の露出状況、図3-12は、最深河床高と土丹高(河道中央付近の高水敷におけるボーリング調査結果¹⁰⁾)の縦断分布を示す。特に48.0~40.4km区間(昭和水堰~立日橋)の土丹の露出が顕著であり、大量の砂利採取が行われた区間(図3-9)と合致している。図3-12より、JR八高線橋梁(44.8km)などの横断構造物の下流で河床低下が著しく、土丹の洗掘が進んでいる。多摩川中流部では、縦断方向に年代の異なる土丹(平山層、連光寺層等)が分布しており、各層の岩質(砂質、シルト質)が異なることから¹⁰⁾、次節3-2-2で示すとおり、各場所で土丹の洗掘に対する強度も異なっている。

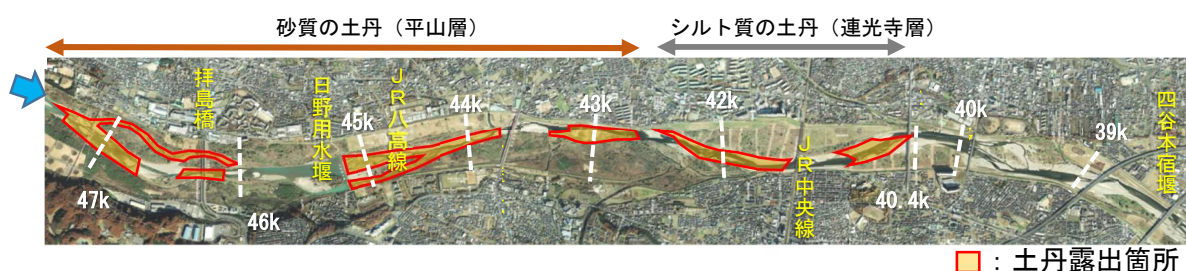


図 3-11 多摩川中流部における土丹の露出状況(平成24年調査結果)¹⁰⁾

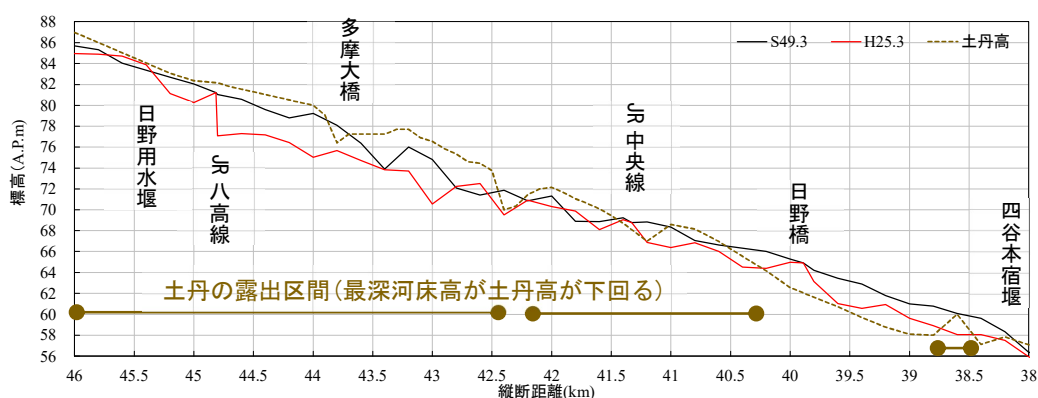


図 3-12 多摩川中流部における最深河床高と土丹高の縦断図(河道中央のボーリング調査結果)

(4) 対象区間の主要な河川改修，河川構造物

図 3-13，表 3-1 は，対象区間である日野用水堰～大丸用水堰区間(45.2～32.4km)における主要な河川改修の履歴¹²⁾を示す。当該区間では，昭和 30 年代に大量の砂利採取が行われ，水利用のために上流 45.27km 地点に日野用水堰(昭和 34 年竣工，図 3-14 参照)，38.24km 地点に四谷本宿堰(昭和 42 年竣工，但し，堰自体は昭和 22 年より存在)，下流 32.4km 地点に大丸用水堰(昭和 34 年竣工，図 3-15 参照)などの固定堰を有する取水堰が建設されたことで，土砂や砂州の移動が制限され，砂州河道が変質していった。JR 八高線(44.82km)，日野橋(39.9km)，JR 中央線橋梁(41.35km)，京王線橋梁(35.1km)などでは，洪水流に伴う河床低下から橋脚を保護するために，それぞれ昭和 42 年頃，昭和 45 年，昭和 48 年，昭和 34 年頃に護床工が施工された。多摩大橋(43.7km)では，昭和 61 年に橋脚周辺のみ護床工が設置された。

近年の主要な河川改修として，図 3-16 は，四谷本宿堰(38.24km)の改築事業¹¹⁾の概要を示す。同堰は，平成 13 年 9 月洪水によって，堰中央部が流失する被災を受けた。そのため，平成 17 年に堰の敷高を 2.3m 切り下げ，床止め工に改築し，河道の流下能力と土砂移動の改善が図られた。また，図 3-17 は，多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)の河川改修事業³⁾⁶⁾¹²⁾の概要を示す。同地区では，平成 26～28 年に，露出した土丹の著しい洗掘による橋梁等の河川構造物の安全性の低下，河道の二極化，高水敷(砂州)の樹林化等の対策として，昭和 40 年代の河床縦断形(図 3-17 の JR 八高線と JR 中央線の護床工の敷高をつないだ河床縦断形)の復元を目標とし，砂礫による河床の埋戻しと高水敷化した砂州の切り下げ，埋戻し後の河床高維持のための連続的な帯工群の設置等の大規模な改修が行われた。

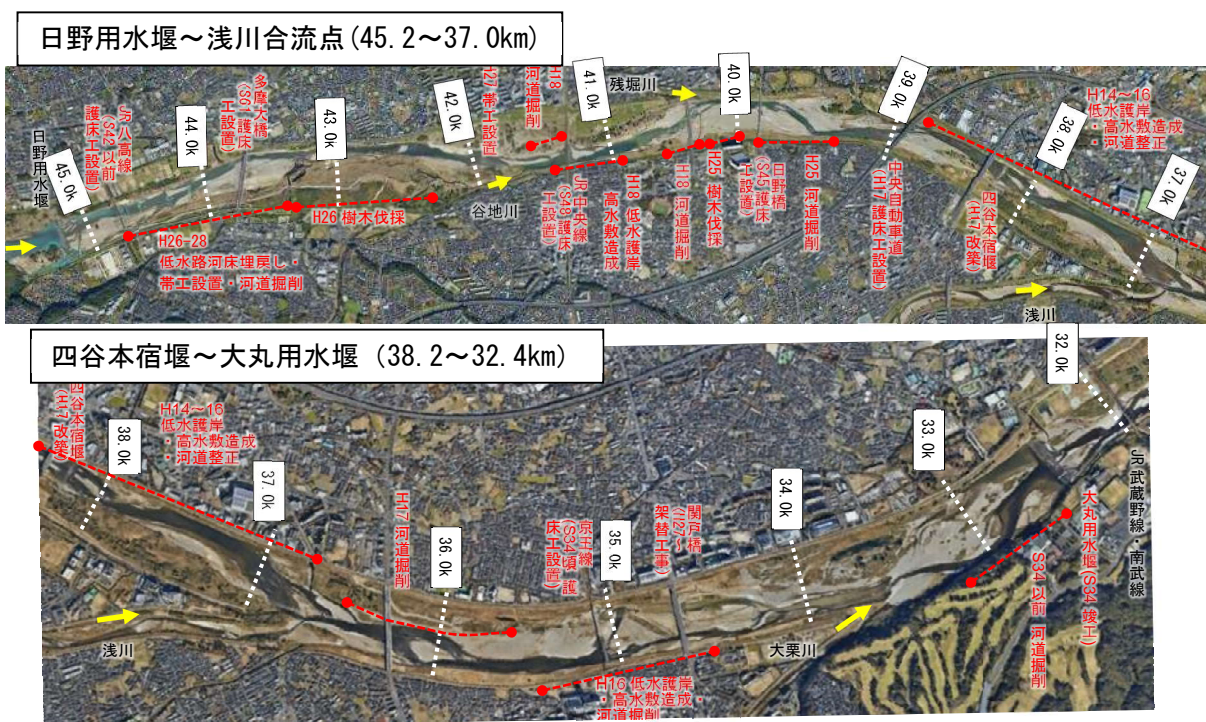


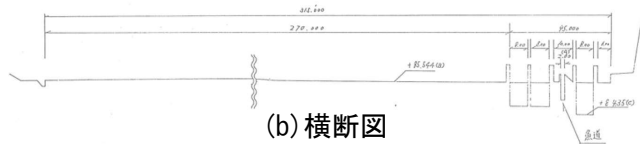
図 3-13 多摩川中流部の主要な河川改修の履歴

表 3-1 日野用水堰～大丸用水堰区間(45.2～32.4km)における主要な洪水、河川改修の履歴¹⁾²⁾

年	主要な洪水	河川改修 等
昭和 39(1964)年		砂利採取禁止
～昭和 44(1969)年		(昭和 41 年)多摩川水系工事実施基本計画策定 多摩川上流河川工事(日野橋(39.85km)～61.8km) ・無堤部築堤護岸床固, 旧堤の補強
昭和 49(1974)年	昭和 49 年 9 月洪水(日野橋 3,486m ³ /s) ・四谷本宿堰(38.2km)右岸袖部被災 ・大丸用水堰(32.4km)左岸袖部被災	(昭和 50 年)多摩川水系工事実施基本計画改訂
昭和 57(1982)年	昭和 57 年 8 月洪水(日野橋 3,345m ³ /s) ・京王線(35.1km)橋脚根固工被災 ・大丸用水堰(32.4km)左岸袖部被災	
平成 11(1999)年	平成 11 年 8 月洪水(日野橋 2,353m ³ /s) ・四谷本宿堰(38.2km)下流護床工損傷 ・京王線(35.1km)橋脚根固工被災	(平成 12 年)多摩川水系河川整備基本方針策定 (平成 13 年)多摩川水系河川整備計画策定
平成 13(2001)年	平成 13 年 9 月洪水(日野橋 2,165m ³ /s) ・四谷本宿堰(38.2km)下流護床工の崩壊, 堰中央部の破壊・流出	
平成 17(2005)年		四谷本宿堰(38.2km)の改築 ・堰敷高の切り下げ(切下げ高 2.3m(61.2m→58.9m)) ・36.8～38.8km 区間の水衝部対策(高水敷造成, 低水護岸整備), 右岸砂州の切り下げ, 洗掘部の埋戻し
平成 18(2006)年		立日橋上流右岸砂州(40.6～40.8km)の切り下げ JR 中央線上下流(41～41.6km)右岸水衝部対策 JR 中央線下流(41.4～41.6km)左岸河道掘削 多摩大橋(43.7km)左岸低水護岸整備
平成 19(2007)年	平成 19 年 9 月洪水(日野橋 3,440m ³ /s) ・JR 中央線(41.35km)下流護床工流出 ・JR 八高線(44.8km)下流護床工沈下 ・日野用水堰(45.2km)下流護床工流出 ・京王線(35.1km)橋脚低水護岸の洗掘・損傷	JR 中央線(41.35km)下流護床工補修
平成 20(2008)年		JR 八高線(44.8km)下流護床工補修
平成 21(2009)年		JR 中央線上流(41.8～42.0km)右岸築堤・護岸
平成 25(2013)年		日野橋下流左岸(39.3～39.9km)の砂州掘削
平成 26(2014)年		日野用水堰下流～JR 八高線(45.2～44.83km)上流右岸護岸整備
平成 26(2014)年 ～28(2016)年		多摩大橋周辺地区河川改修 ・帯工設置(A1: 44.74km 左岸, A2: 44.7km 右岸, B1・B2: 44.6km, C: 44.3km, D: 44.1km, E: 43.9km, J: 42km) ・河床埋戻し(JR 八高線～多摩大橋(44.8～43.7km)) ・河道掘削(44.4～43.4km 右岸砂州) ・JR 八高線護床工補修 等
平成 27(2015)年		43.6km 左岸水衝突部対策
令和 1(2019)年	令和元年 10 月洪水(日野橋約 5,100m ³ /s) ※計画高水流量(4,700m ³ /s)相当 ・日野橋(40km)護床工崩壊, 橋脚沈下	(令和 2 年～)日野橋護床工の補修, 橋梁架替事業



(a) 全景



(b) 横断面図



(c) 縦断面図 (可動堰部)

図 3-14 日野用水堰 (45.27km) の構造諸元

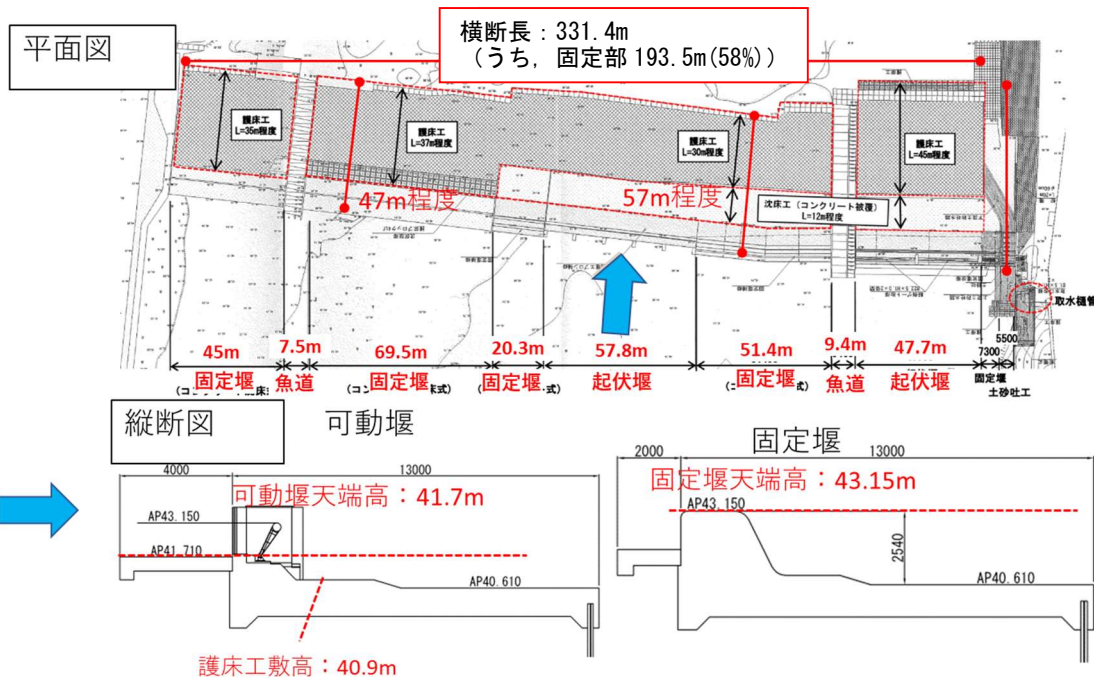


図 3-15 大丸用水堰 (32.4km) の構造諸元

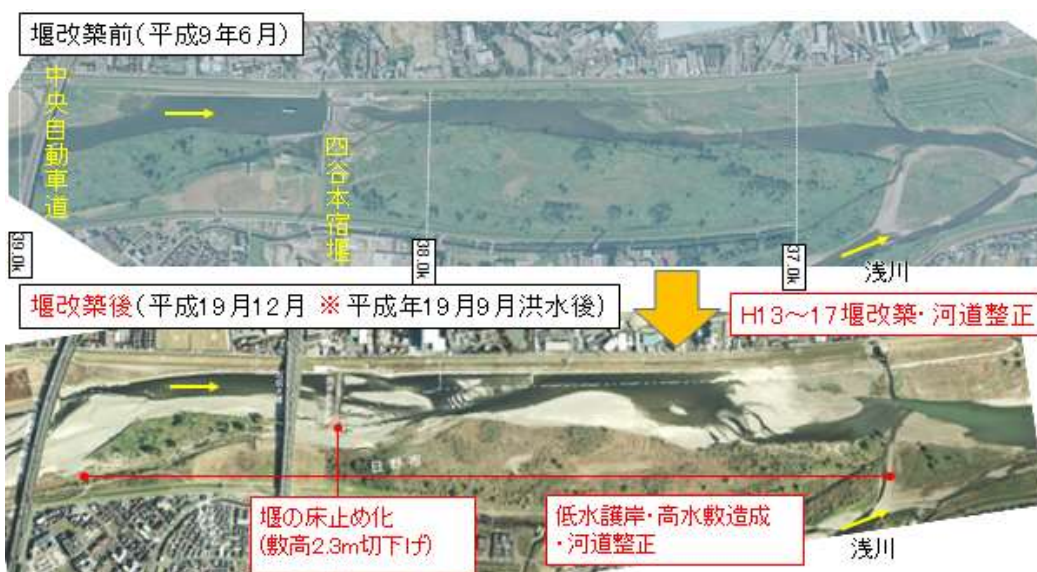


図 3-16 四谷本宿堰 (38.24km) の改築事業の概要

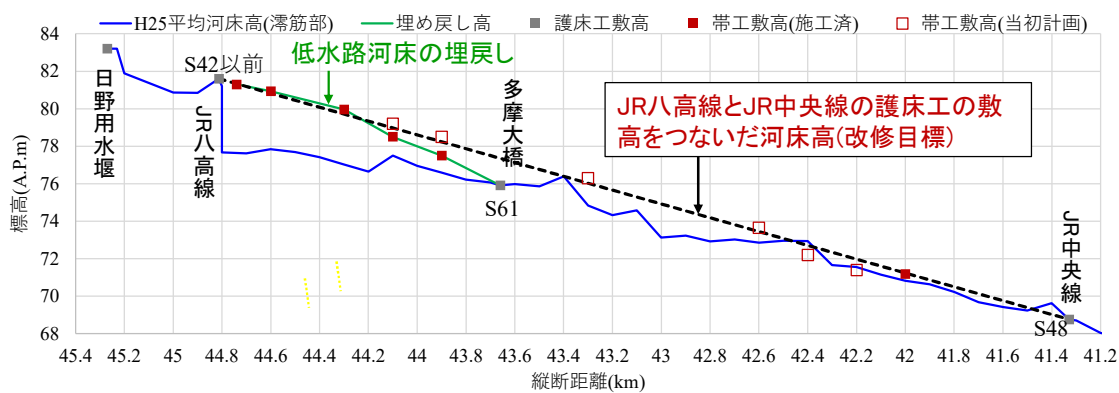


図 3-17 多摩大橋周辺地区 (44.8~43.4km) の河川改修事業の概要¹³⁾

(5) 河川環境と河川環境管理計画

多摩川中流部は、広大な礫河原が存在し、河原特有のカワラノギク、カワラニガナ等の希少な植物やカワラバッタやエゾエンマコオロギ等の希少な昆虫、礫河原に営巣するイカルチドリ、コチドリ等の重要な生物のハビタット(生育・生息・繁殖場)となっている。また、緩やかに蛇行する低水路に形成される瀬・淵や、横断構造物上流の湛水域、砂州上に形成される一時水域(ワンド、たまり)などが、多摩川の代表魚種であるアユをはじめとした多様な魚類のハビタットとなっている¹⁾。

一方、多摩川では、昭和40年代の多摩川沿川の急激な都市化に伴うオープンスペースの減少、高水敷の利用ニーズの拡大を背景に、河川環境の保全と利用の調和を図ることを目的として、昭和55年に「多摩川河川環境管理計画」¹⁾¹⁴⁾が全国に先駆けて策定された(平成13年に改定)。「多摩川河川環境管理計画」に基づき、多摩川の高水敷における河川環境の自然度(主に植生と鳥類の生育・生息状況)や人工施設(公園・運動場等)の整備状況等を踏まえ、図3-18、表3-2に示すように人工系空間と自然系空間に区分される8つの機能空間が設定・配置されている。これらの機能空間のうち「生態系保持空間」は、生態学的な観点から動物や植物などの生息・生育場として特に保全する必要があると認められた区域として設定され、表3-3に示すように、研究対象区間(45.2~32.4km)の多く(左右岸の河川延長の約5割)が「生態系保持空間」に設定されており、河川環境の重要度は高い。「生態系保持空間」は、重要な環境要素(表3-3)に基づき設定されており、学術研究目的以外の人の侵入や人為的な改変を原則禁止として管理されてきた¹⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。

図3-19は、多摩川における植生の面積率の経年変化を示す。これは、植生図(河川水辺の国勢調査結果及び多摩川河川敷現存植生図)を用いて、高水敷(砂州)全体に占める植生区分(草本類、木本類、自然裸地等)及び人工施設の面積率を1km区間毎に集計し、植生区分の面積率の縦断カウンター図で表示したものである。図3-19より、「多摩川河川環境管理計画」策定時である昭和51年河道に比べて平成17年河道では、大丸用水堰上流で木本類(樹木)の面積率が7倍程度に増加しており、砂州・高水敷の樹林化が顕著である。このように、計画策定以降、河道と河川環境の経年的な変化に伴い、計画策定当時と現状で差異が生じている¹⁶⁾。現在では、多摩大橋周辺地区(44.8~43.4km)や浅川合流点地区(36.8~38.2km)の「生態系保持空間」で、河道掘削・樹木伐採等による礫河原の再生等の改修事業、維持管理活動が行われている。このことから、多摩川の河道と河川環境をどのように管理していくか、治水と河川環境の調和した河川の整備・維持管理のあり方を明らかにすることが課題となっている。

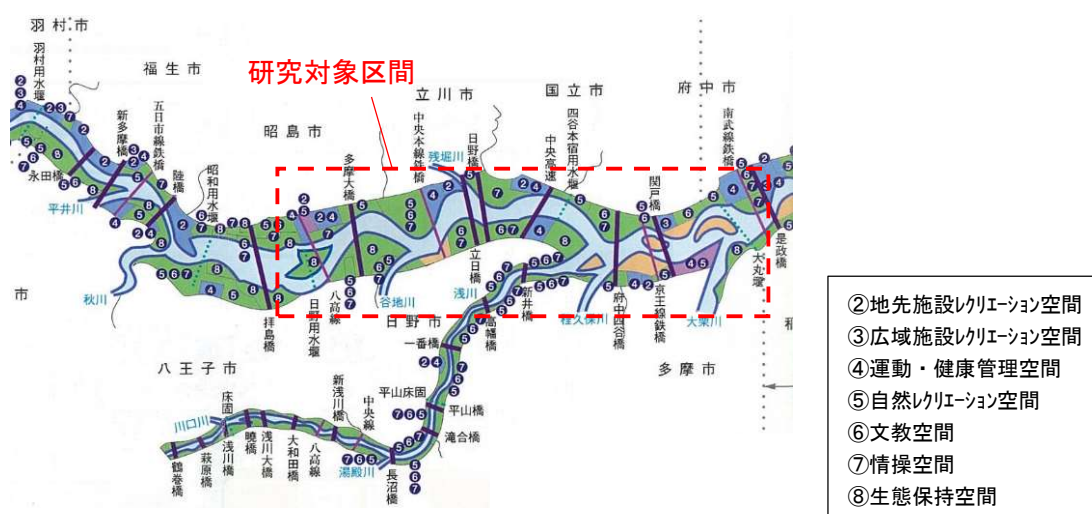


図 3-18 多摩川河川環境管理計画の機能空間配置 14)

表 3-2 多摩川河川環境管理計画の各機能空間の特徴 14)

区分	空間名	機能（期待する利用形態）	
—	①避難空間	災害時に沿川住民が避難できるよう、安全な広場が確保できる空間 (※平常時は、②・③・④空間として使われている場所が対象)	
利用系空間	②地先施設レクリエーション空間	児童公園や親水広場など、近隣の住民が身近に憩える空間	
	③広域施設レクリエーション空間	総合公園、自由広場など広域の住民がレクリエーションを楽しめる空間	
	④運動・健康管理空間	運動広場や球技場など健康増進のための公共施設が整備された空間	
自然系空間	利用型	⑤自然レクリエーション空間	原っぱ、水遊び場、釣り場など多摩川の自然を生かしたレクリエーション空間
		⑥文教空間	自然観察広場、水辺の楽校など多摩川の自然環境を教育の一環として学ぶことのできる空間
	保全面	⑦情操空間	身近な自然を保全もしくは保護することで、住民の情操観念を育成する空間
		⑧生態保持空間	学職経験者など専門家による生態学的な観点から、動物や植物などの生息・生育場として特に保全する必要があると認められた区域

※他、複合機能空間として、②③④複合空間、②③④⑤⑥複合空間、⑤⑥⑦複合空間が設定されている。

表 3-3 対象区間内に設定されている生態系保持空間とその設定根拠¹⁵⁾

地区名/場所	設定根拠 (重要視される環境要素)
大栗川合流点 (32.4~33.7km 右岸)	<ul style="list-style-type: none"> ・オギ群落, ヨシ群落など滞水域特有の植生域 ・貴重な植物 (ササバモ, ミゾコウジュ, ミクリ, コゴメヤナギ, カワヂシャ, タコノアシ, カワラサイコ) ・野鳥 (ミコアイサ, オカヨシガモ, イカルチドリ, カワセミ, 猛禽類 (オオタカ, ノスリ等))
浅川合流点 (36.8~38.2km 右岸)	<ul style="list-style-type: none"> ・多摩川におけるカワラヨモギ-カワラサイコ群集の最大の生育地 ・貴重な植物 (カワラサイコ, コゴメヤナギ, カワラハハコ, ミクリ, カワラノギク, ヒメハギ) ・ヨシガモ
谷地川合流点 (41.7~45.2km 右岸)	<ul style="list-style-type: none"> ・広大な自然植生域(オギ原等) ・貴重な植物 (ササバモ, カワラニガナ, エゾノカワヂシャ, ミゾコウジュ, オノエヤナギ, コゴメヤナギ, ハリコウガイゼキショウ, エゾノサヤヌカグサ, タコノアシ, カワヂシャ, カワラサイコ) ・鳥類 (イカルチドリ, カワセミ, ササゴイ等) ・第三紀層の露頭

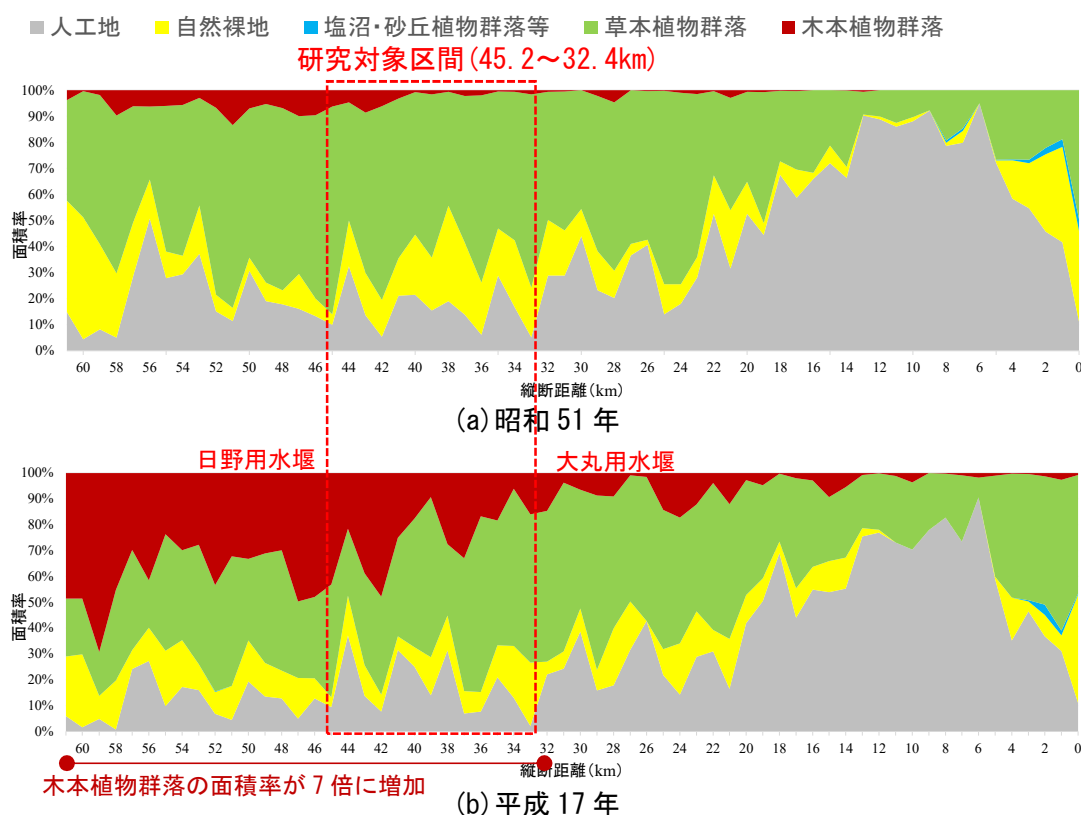


図 3-19 多摩川における植生の面積率の経年変化

3-2-2 令和元年10月洪水後の土丹の調査

(1) 土丹の洗掘状況の調査

1) 調査の目的

多摩川中流部の拝島橋～日野橋区間(46～40km)は、昭和30年代の大量の砂利採取の影響により低水路河床の広範囲に土丹が露出しており、それが経年的な河床低下を助長し、河道の変化や構造物の安定性に大きな影響を及ぼしている³⁾⁵⁾。図3-20は、令和元年10月洪水前後の航空写真、横断測量結果から判読したJR八高線～JR中央線区間(44.8～41.4km)における土丹の露出箇所を示す。計画高水流量(日野橋 4,700m³/s)を上回る既往最大規模であった令和元年10月洪水(日野橋 約 5,100 m³/s)では、低水路河岸や砂州が侵食・洗掘され、土丹が広範囲に露出した⁶⁾¹²⁾。

土丹河床の洗掘は、主に砂礫の衝突・摩耗によって生じることから、洪水流の掃流力によって生じる砂礫河床とは洗掘機構が異なっている¹⁷⁾¹⁸⁾。そのため、4-2項で後述する洪水流・河床変動解析モデルを用いた検討にあたっては、令和元年10月洪水における土丹の洗掘状況を考慮する必要があると考えられる。土丹の洗掘状況を把握するため、令和元年10月洪水による土丹の露出が顕著であったJR八高線下流の帯工設置区間の左岸砂州(図3-20：44.7～43.3km)を対象に現地調査を行った。



図3-20 令和元年10月洪水後の土丹の露出箇所(JR八高線～JR中央線区間)

2) 調査方法

現地調査では、①土丹の露出範囲、表面の状況、②土丹の高さ、洗掘深を観測し、どのような場所の土丹がどの程度洗掘されたかを調査した。各調査項目の調査方法を以下に示す。

①土丹の露出範囲、表面の状況

土丹の表面の状態を観察（写真撮影）し、土丹の露出範囲（表面が滑らかな土丹）と洗掘範囲（溝状洗掘を受けた土丹）の境界の位置を記録する（図3-21）。

表面が滑らかな土丹：露出(洗掘量は小さい)した土丹

溝状の洗掘が生じた土丹：洗掘を受けた土丹

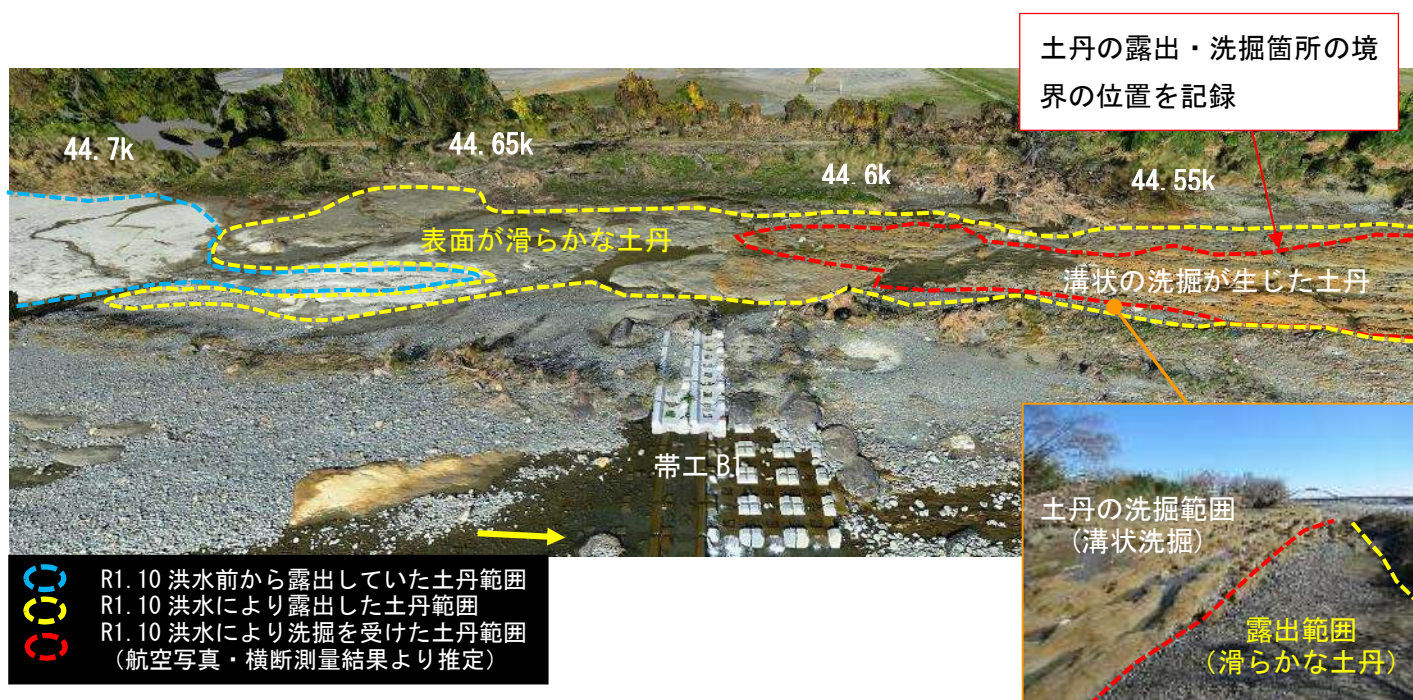


図3-21 土丹の露出範囲、表面の状況の調査方法

②土丹の高さ，洗掘深

図3-22に示すように，土丹の露出箇所における詳細な土丹の形状(高さ分布)，洗掘深を，トータルステーションを用いた測量により計測する．また，洗掘を受けていない土丹の高さを把握するため，図3-23に示すように，土丹の露出箇所と露出していない箇所(砂礫層)の境界付近に着目し，土丹の露出していない箇所に土丹表層と考えられる強固な地盤に達するまでスコップを貫入することで，土丹の高さを計測する．

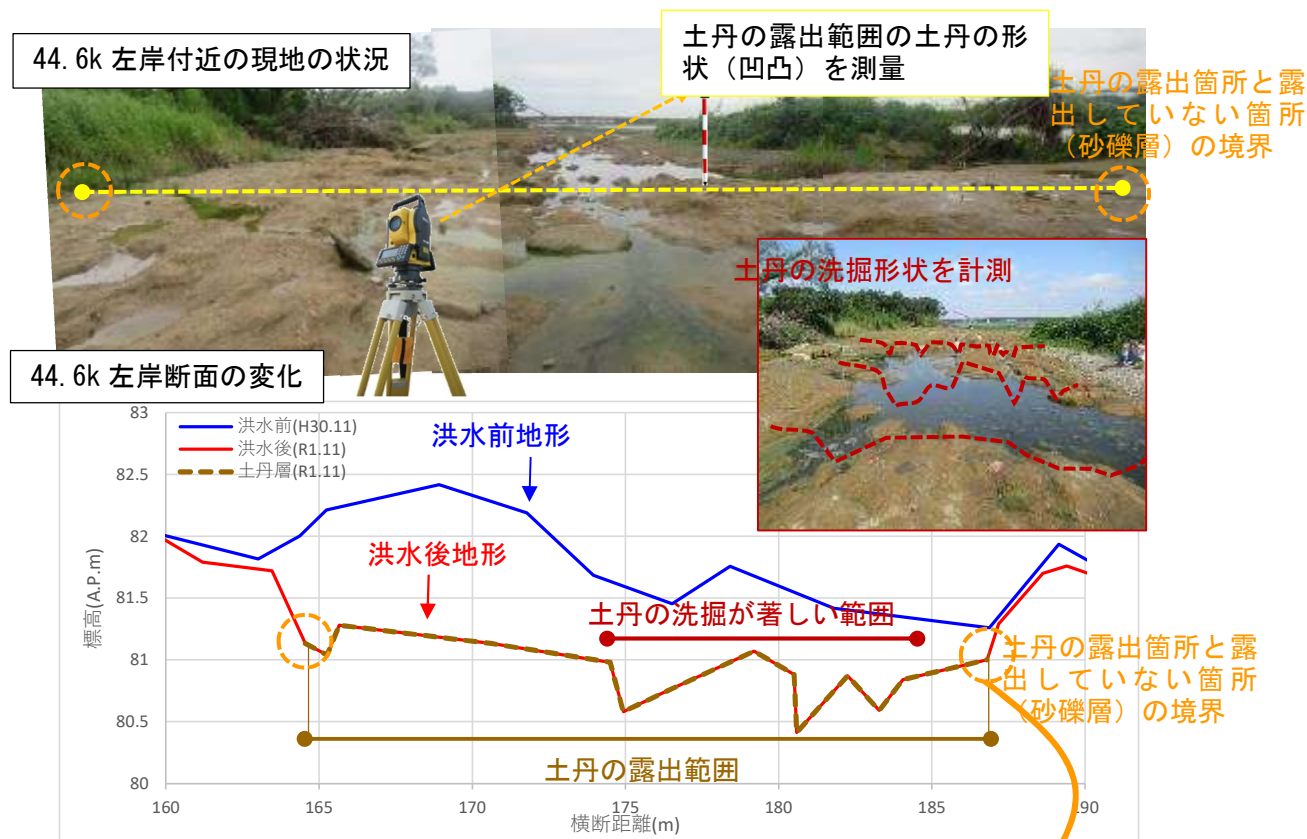


図3-22 土丹の高さ，洗掘深の調査方法

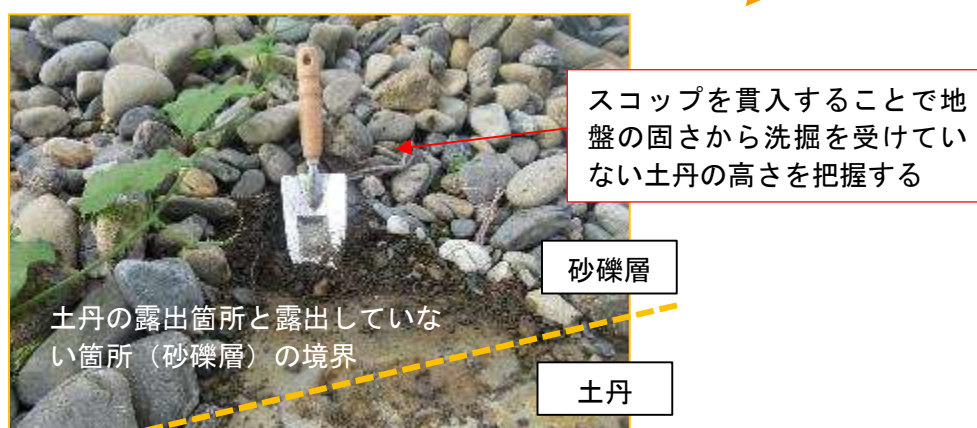


図3-23 洗掘を受けていない土丹の高さの把握方法(スコップ貫入調査)

3) 調査結果

調査は令和 2 年 8 月 3 日に実施した。図 3-24 は調査実施箇所と実施状況を示す。

①土丹の高さ分布

図 3-25～図 3-27 は、土丹高、洗掘状況の調査結果(44.65～44.35km)を示す。これらの調査結果より、スコップの貫入により把握した洗掘を受けていない土丹の高さは、露出しているが明確な洗掘痕が見られない土丹(摩耗痕のある土丹を含む)の高さと同程度であることから、明確な洗掘痕が見られない土丹はほとんど洗掘を受けていないと推察される。

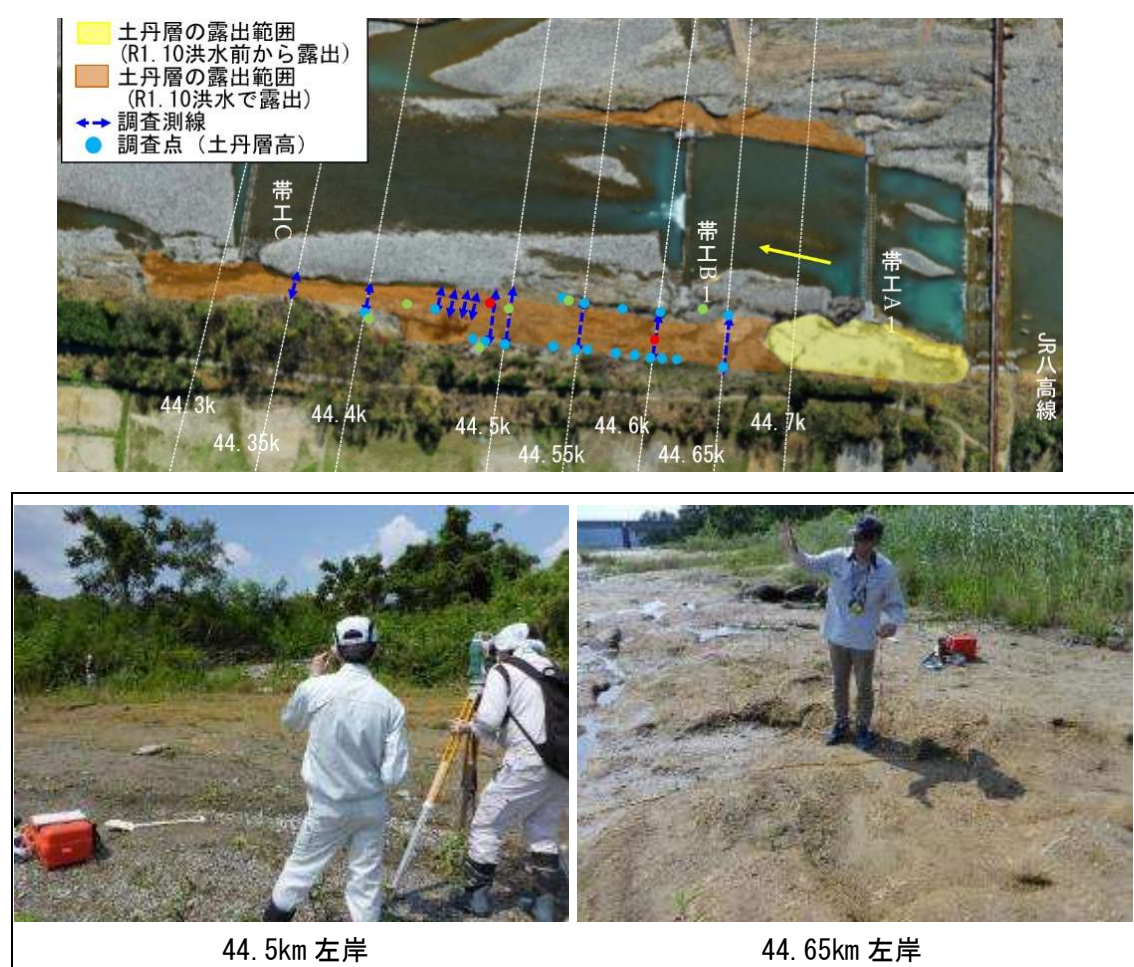


図 3-24 現地調査実施箇所と実施状況(令和 2 年 8 月 3 日)

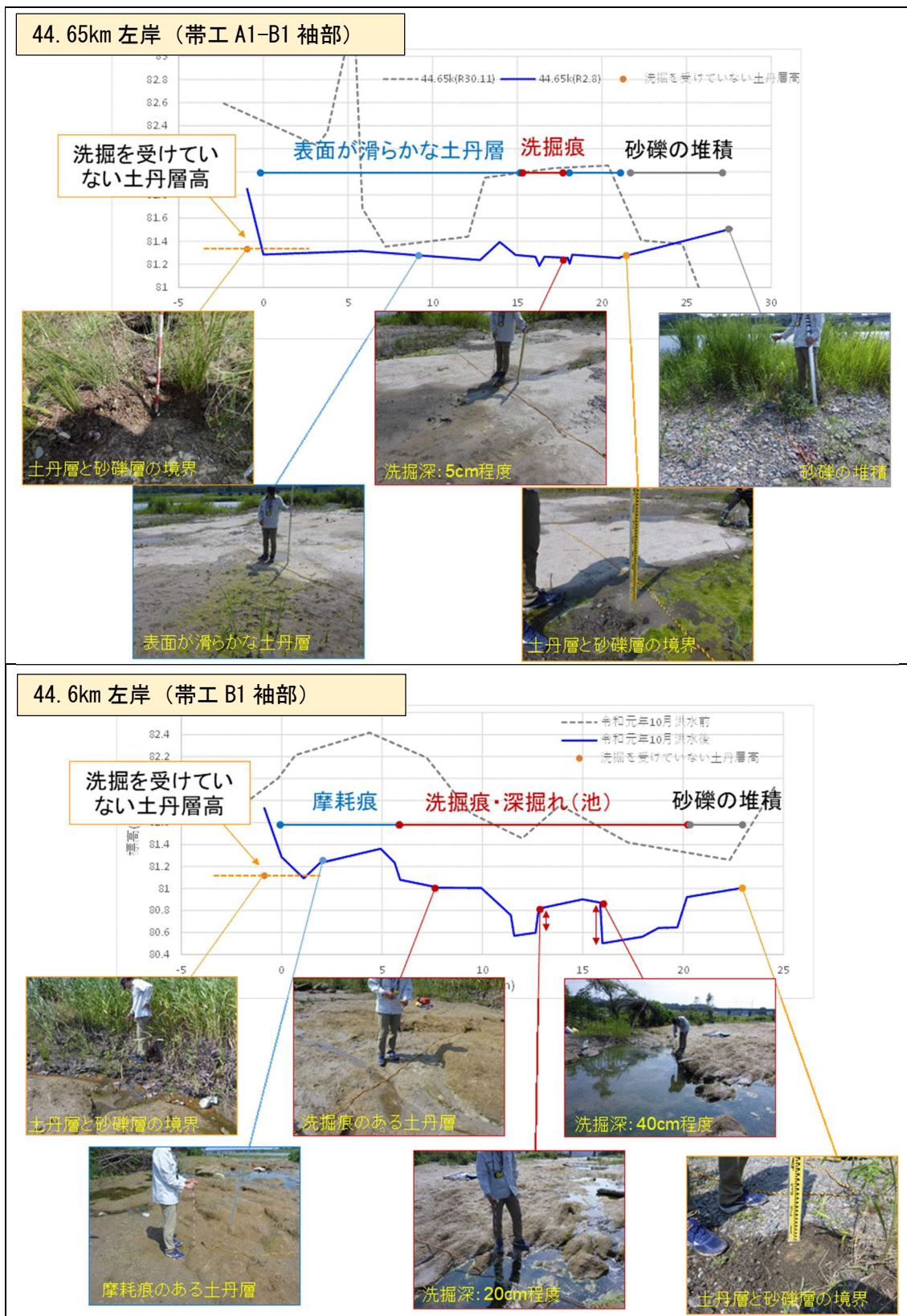


図 3-25 土丹高, 洗掘状況の調査結果 (44. 65km, 44. 6km)

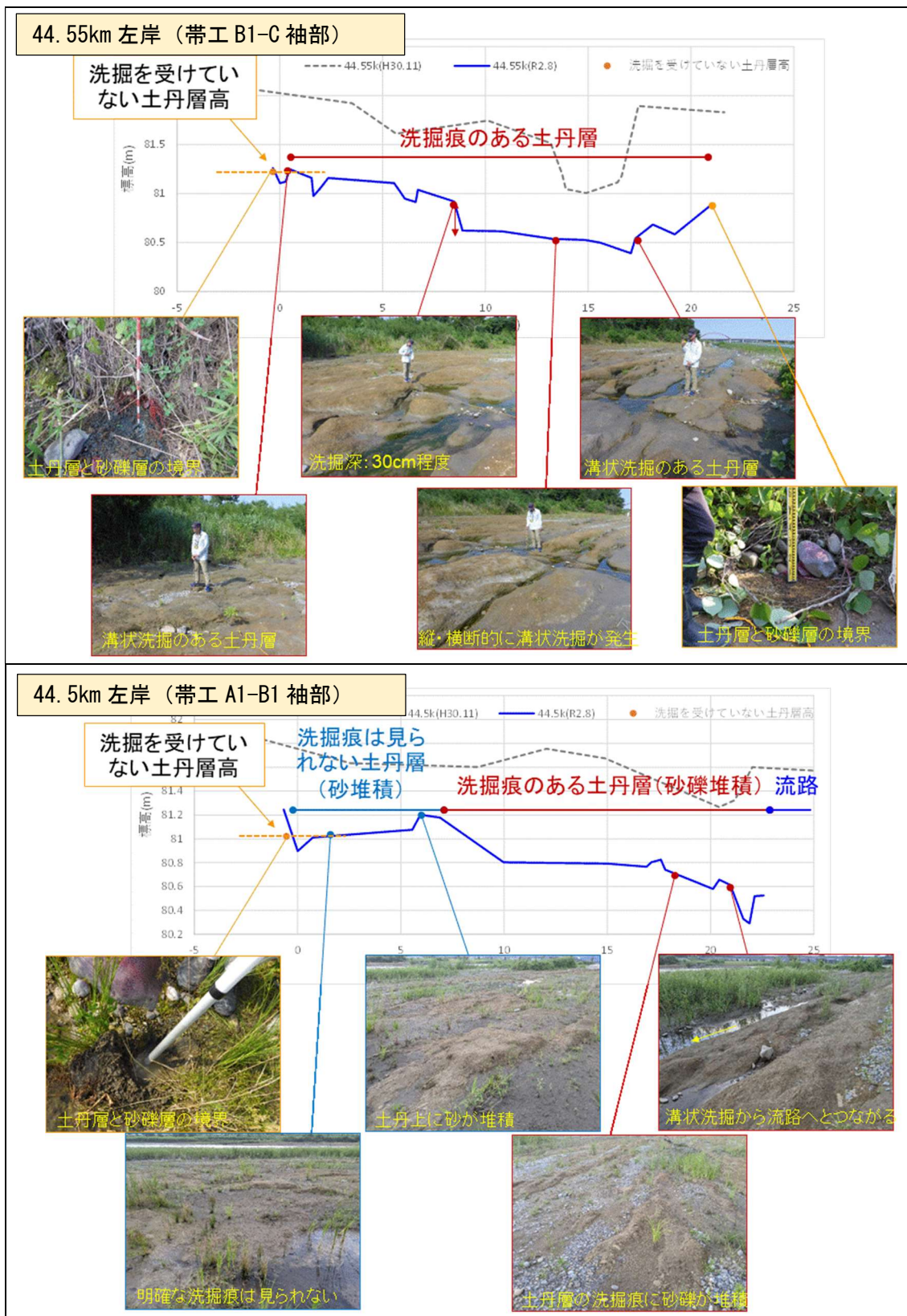


図 3-26 土丹高, 洗掘状況の調査結果 (44.55km, 44.5km)

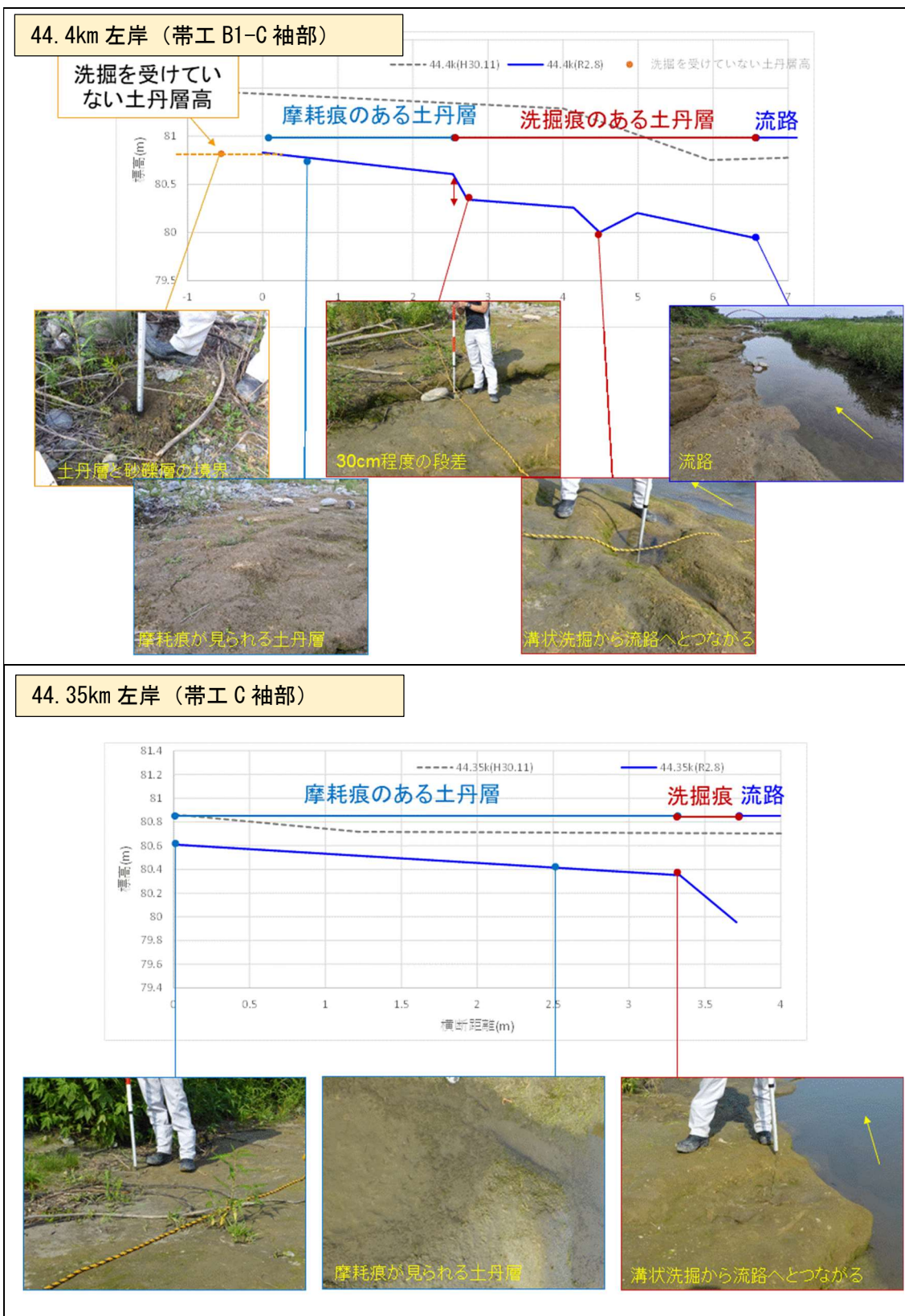


図 3-27 土丹高, 洗掘状況の調査結果 (44.4km, 44.35km)

図3-28は、調査結果による洗掘を受けていない土丹高と、既往ボーリング調査結果(河道中央, 左岸堤防)¹⁰⁾による土丹高の縦断分布(44.65~44.4km 区間)の比較を示す。図3-28より、今回の調査結果による土丹高は、河道中央と左岸堤防の土丹高の間にプロットされており、調査結果が概ね妥当であることを示している。当該区間の左岸砂州の土丹高の縦断分布は、河道中央の土丹高と同程度の縦断勾配で緩やかに傾斜する分布を表している。

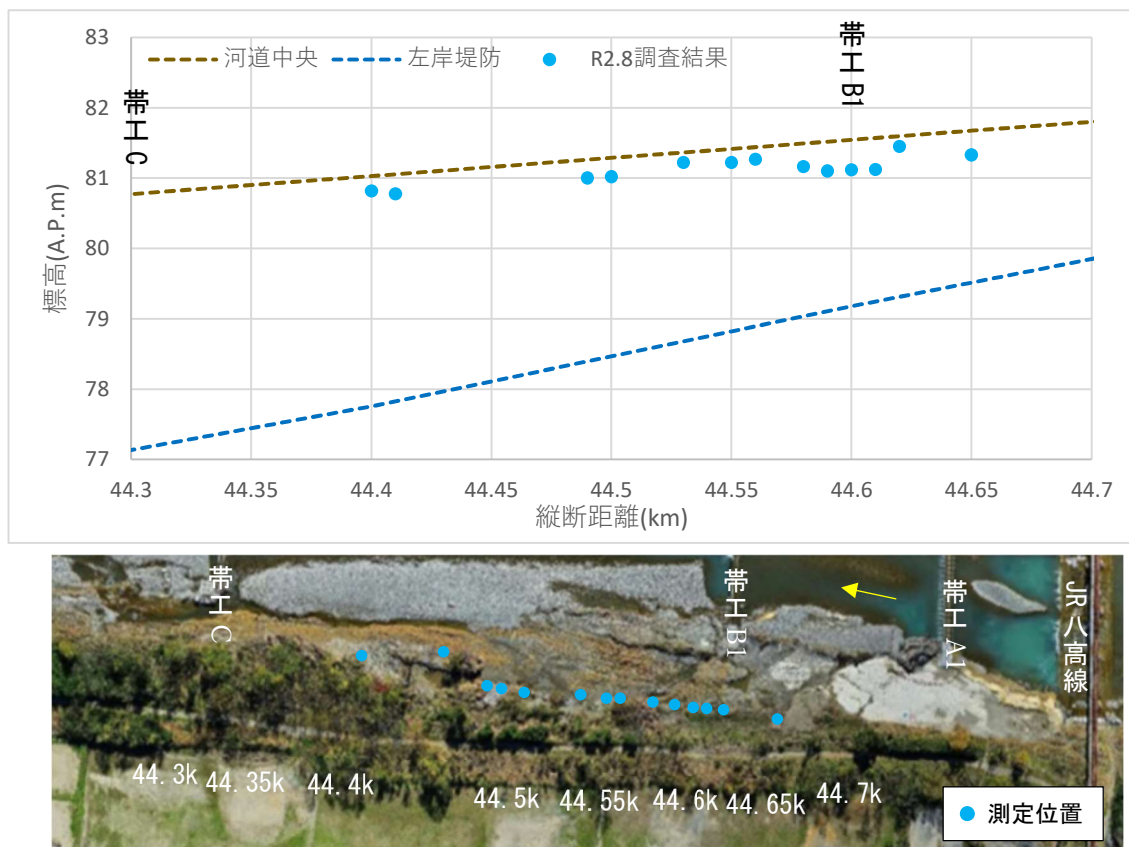


図3-28 洗掘を受けていない土丹高の縦断分布(44.65~44.4km 区間)

②土丹・砂礫層の洗掘量

44.65～44.35km 左岸区間の土丹の洗掘状況の調査結果を踏まえ、砂礫層・土丹層の洗掘量を推定した。図 3-29 に示すように、明確な洗掘痕のない土丹は洗掘を受けていない土丹とみなして、それらの高さ分布を横断的に線形補間することで洗掘を受けていない土丹の高さの横断分布を推定した。次に、令和元年 10 月洪水前後の横断形状と推定した土丹高の高さ関係から、洪水前後の洗掘範囲のうち、土丹高を上回る範囲を砂礫層の洗掘面積、土丹高を下回る範囲を土丹層の洗掘面積として算定した。なお、本分析にあたっては、今回実施した現地調査の測量結果よりも洪水前後で実施されている横断測量結果の方が調査測線の対応が正確なため、この横断測量結果を用いて洗掘量の分析を行うものとした。

図 3-30、図 3-31 は、44.6km 左岸断面、44.4km 左岸断面における令和元年 10 月洪水による砂礫層・土丹層の洗掘深の推定結果を示す。当該断面は国土交通省による定期横断測量の測線となっており、過去の横断測量結果を重ねた結果、土丹の洗掘箇所と推定された範囲は、これまでの洗掘深を上回る最深河床の箇所(過去の洪水による洗掘履歴がなく、砂礫が再堆積した層ではない)と一致しており、これらの土丹は今回の洪水で始めて洗掘が生じたことを示している。図 3-32 は、各測線で推定した砂礫層・土丹層の洗掘面積の縦断分布を示す。図 3-32 より、土丹の洗掘量が大きい区間は、現地で顕著な溝状の洗掘が見られた帯工 B1 左岸袖部付近(44.55～44.6km)、帯工 C 左岸袖部(44.3km)である。これは、帯工を迂回する流れによる影響が大きかったものと考えられる。44.65～44.3km 左岸左岸区間の洗掘面積(約 18～38m²)に対して、土丹の洗掘面積(約 0.2～3.7m²)は 1 割未満と小さく、洗掘を受けた低水路河岸、砂州のほとんどは砂礫層であったと推察される。

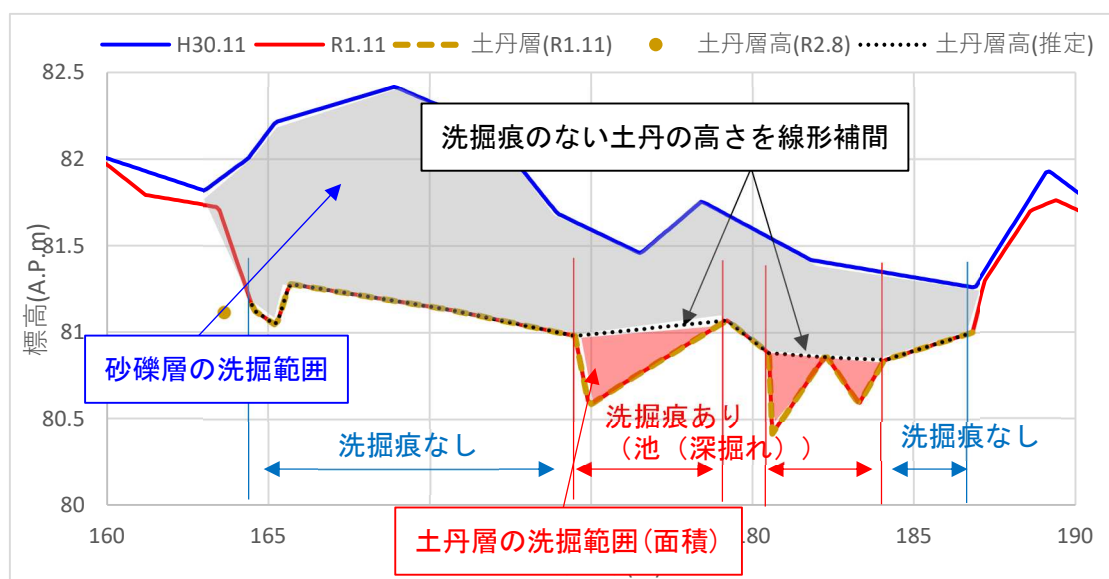


図 3-29 洗掘を受けていない土丹の高さ、洗掘範囲の推定方法

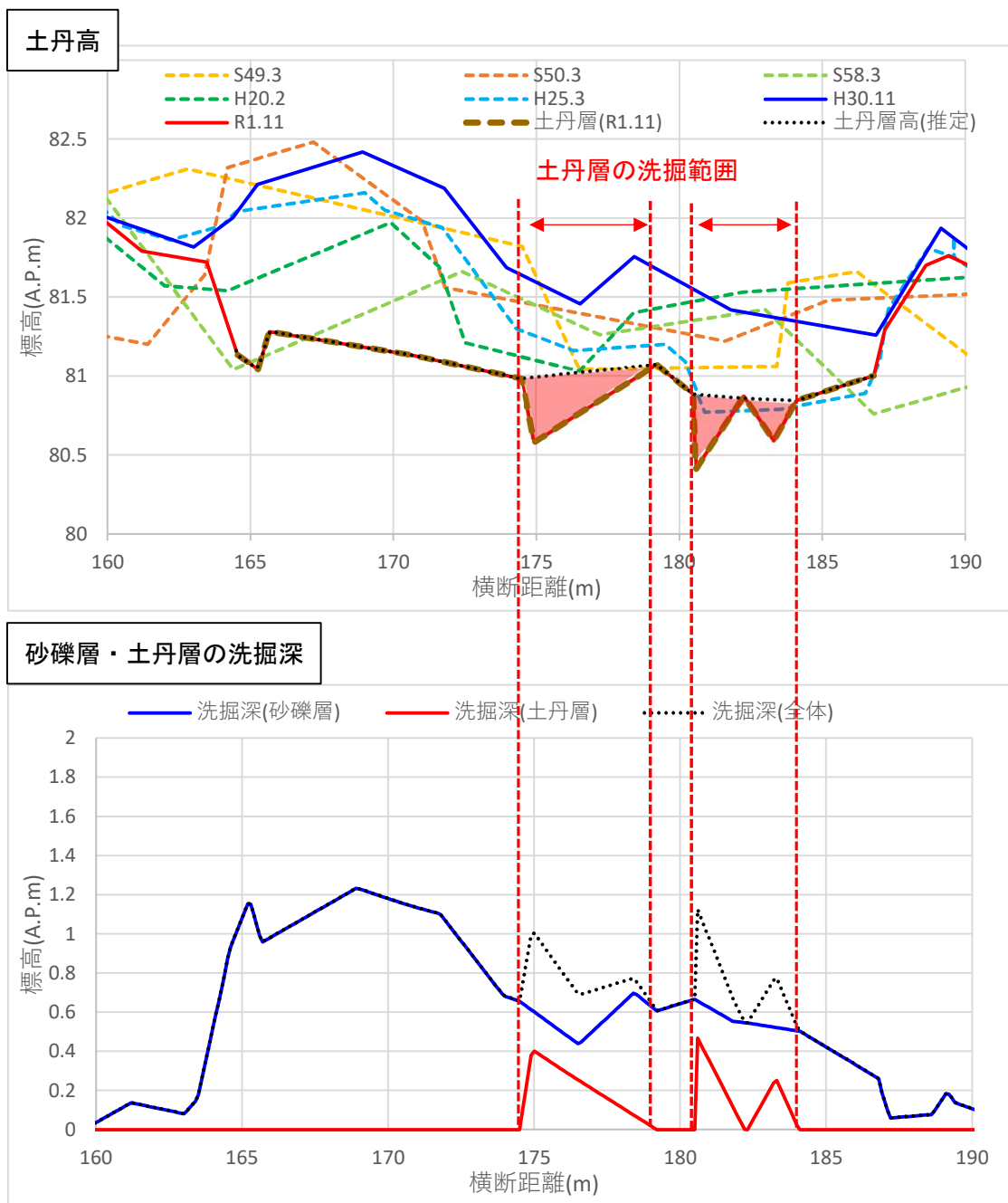


図 3-30 令和元年 10 月洪水による砂礫層・土丹層の洗掘深 (44.6km 左岸)

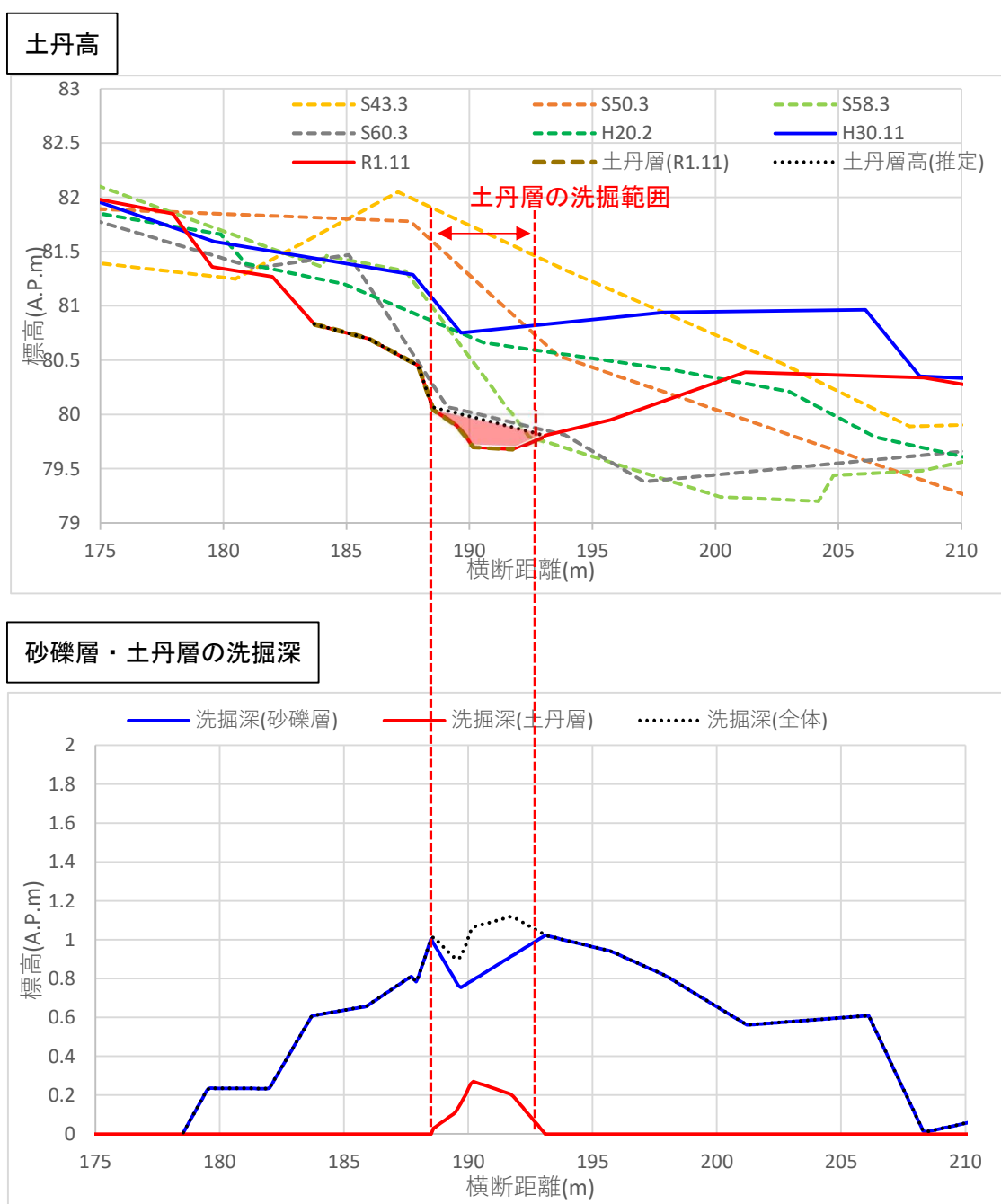


図 3-31 令和元年 10 月洪水による砂礫層・土丹層の洗掘深 (44.4km 左岸)

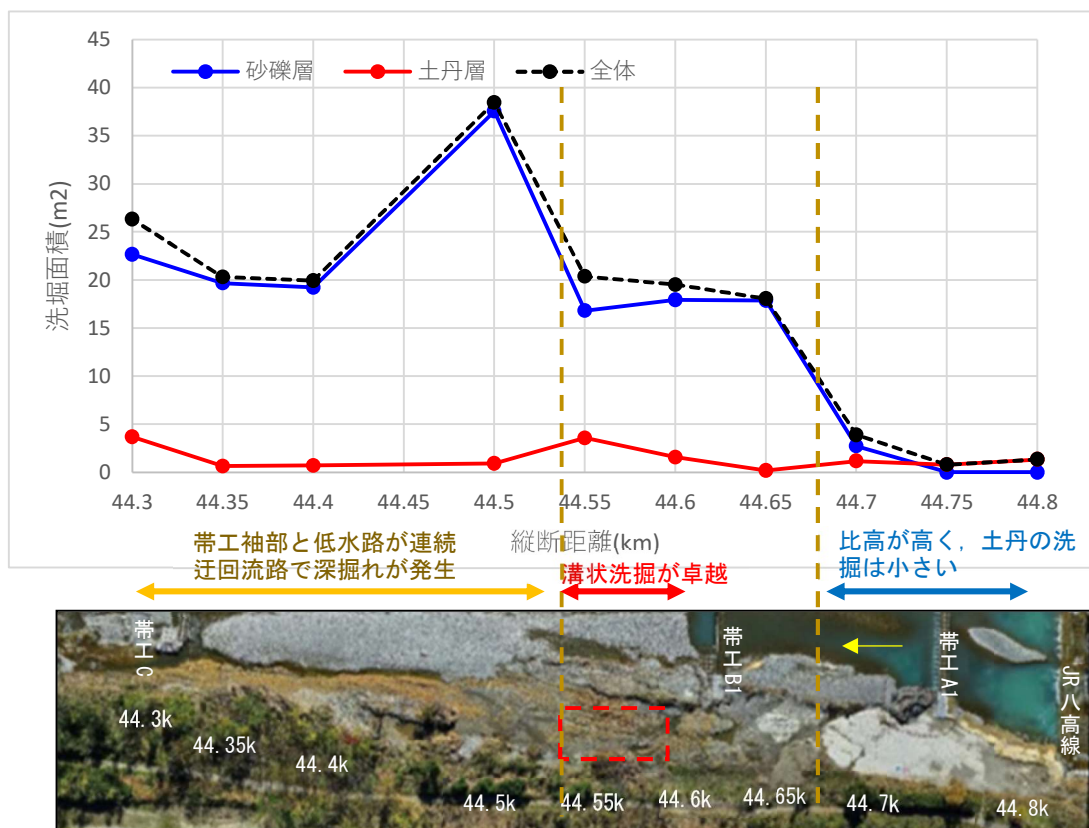


図 3-32 令和元年 10 月洪水による砂礫層・土丹層の洗掘面積の縦断分布

(2) 土丹の強度調査

令和元年10月洪水では、河床に露出した土丹のうち、帯工A1袖部の土丹は洗掘を受けず、帯工B1～C袖部の土丹は溝状の洗掘を受けるなど、場所によって土丹の洗掘状況に違いが見られた。ここでは、土丹の洗掘に対する強度を定量的に調査し、土丹の分布や岩種による土丹の強度の違いについて分析した。

土丹の洗掘に対する強度の指標として、針貫入試験結果から換算した圧裂引張強度¹⁸⁾を用いた。これは、土丹の洗掘が主に砂礫の衝突によるものと考えられることから、衝突時の土丹の変形に伴う引張応力が土丹の引張強度を超えると亀裂が生じ、そこから洗掘が拡大していく機構を想定し、引張強度を指標とした。圧裂引張強度は、調査の簡便さ、土丹を極力乱さないことを考慮し、針貫入試験により、針貫入勾配(貫入荷重/貫入長)を測定し、圧裂引張強度との以下の関係式より換算した。

$$\sigma_T = 0.0335 \times N_p^{0.9282} \quad (3-1)$$

ここに、 σ_T ：換算圧裂引張強度(MPa)、 N_p ：針貫入勾配(N/mm)である。

土丹の強度の評価は、侵食されにくいとされる圧裂引張強度の基準値 0.25MPa を目安として¹⁸⁾、基準値以上を相対的に強度が大きい土丹、基準値以下を強度が小さい土丹とした。

図3-33は、土丹調査位置、表層の圧裂引張強度の調査結果を示す。調査はJR八高線～多摩大橋区間(44.8～43.7km)の砂州上に土丹が露出している15箇所で行った。また、帯工袖部の12箇所約10mのボーリング調査を行い、地中の土丹の強度についても鉛直方向1m毎に調査を行った。



図3-33 土丹調査位置、表層の圧裂引張強度の調査結果⁶⁾

図 3-34 は、帯工 A1 左岸袖部(44.7km 付近)のボーリング調査結果、図 3-35 は、帯工 B1 左岸袖部(44.6km 付近)のボーリング調査結果を示す。図 3-34 より、帯工 A1 左岸袖部の土丹の圧裂引張強度は、帯工袖部法面部のシルト岩質の土丹で 0.664MPa であり、侵食されにくいとされる基準値(0.25MPa)より高い。その周辺に広く分布している砂岩質の土丹の圧裂引張強度は 0.231 MPa であり、基準値を若干下回るものの比較的強度は高い。ボーリング調査結果より、帯工 A1 左岸袖部では強度の高い土丹が 1.5m 程度堆積し、その下に強度の低い土丹が厚く堆積している。当該箇所土丹は、令和元年 10 月洪水以前から露出していたが、経年的にほとんど洗掘を受けていない。これは、帯工 A1 左岸の河床高が高いことから洪水による冠水頻度が低いため、土丹の乾湿に伴う風化による強度の低下が進んでいなかったためと推察される。令和元年 10 月洪水に対しても洗掘が生じなかったことから、シルト岩質の土丹で、河床高の高い風化の影響を受けていない土丹は高い強度が維持されていると考えられる。

一方、図 3-35 より、帯工 B1 左岸袖部では、局所的に分布しているシルト岩質の土丹の圧裂引張強度は 0.396MPa と高いものの、その周辺に分布する砂岩質の土丹の圧裂引張強度は 0.121MPa と、相対的に強度が低い。ボーリング調査結果より、表層に砂礫が堆積し、砂礫層の下に強度の低い土丹が断続的に堆積しているため、砂礫層が流出し土丹が露出すると洗掘を受ける可能性がある。前述の現地調査結果においても、帯工 B1 左岸袖部は令和元年 10 月洪水で砂礫層のほとんどが掃流されたことで、土丹が露出したと考えられる。当該箇所土丹は、ほとんどが弱固結の砂岩質であり、上流の帯工 A1 左岸袖部に比べて河床高が低く、冠水頻度が高いため、今後の洪水により洗掘が進行する可能性は高いものと推察される。このことから、縦断的に近い箇所に分布している土丹であっても、岩種や分布箇所の河床高(乾湿に伴う風化の程度)によって洗掘に対する強度が異なることが明らかとなった。

以上の調査結果より、令和元年 10 月洪水において、帯工 A1 左岸袖部(44.7km 付近)の洪水前から露出していた土丹は強度が高く洗掘が生じておらず、本洪水で土丹が露出した区間についても、洗掘を受けた層のほとんどは土丹上に堆積していた砂礫層であったと考えられる。よって、4-2 項の洪水流・河床変動解析モデルを用いた検討にあたっては、河床変動解析に土丹の洗掘特性を考慮する必要性は小さく、強度の高い土丹は洗掘が生じない設定を行い、他は砂礫河床として河床変動解析を行うことが妥当であると考えられた。

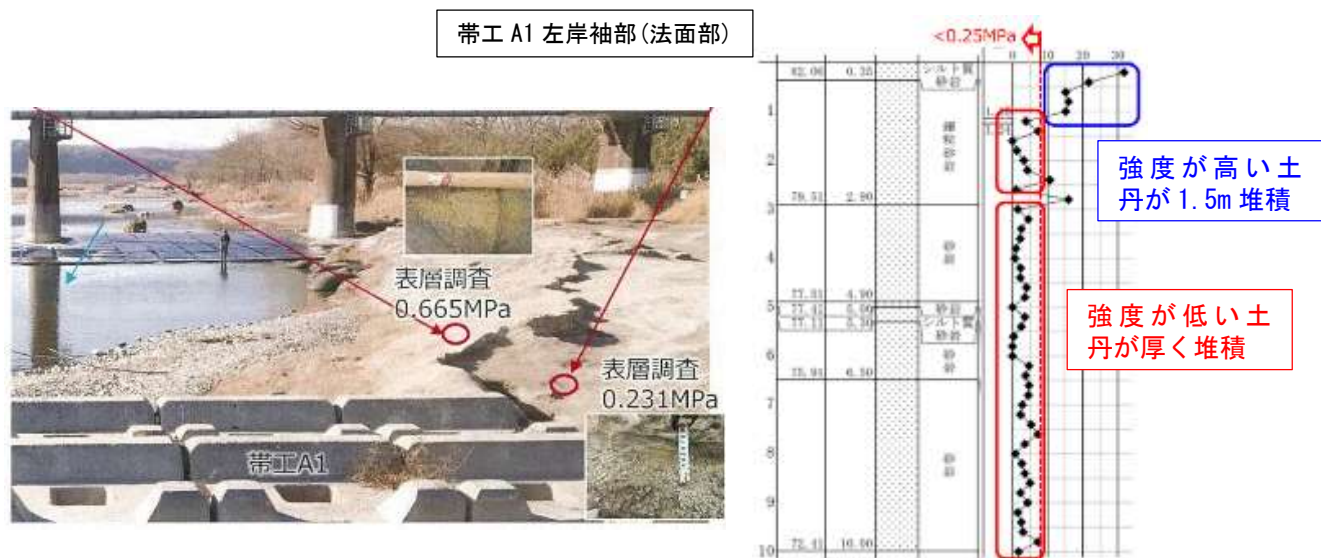


図 3-34 土丹の強度調査結果 (帯工 A1 左岸袖部 : 44.7km 付近)

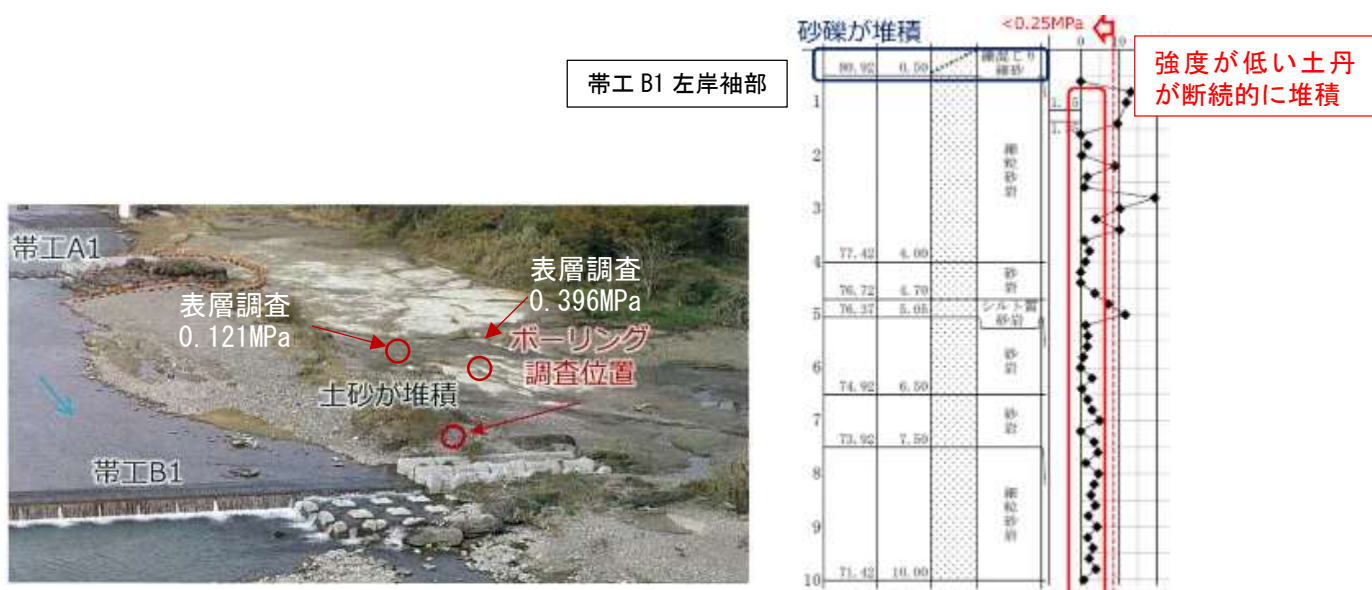


図 3-35 土丹の強度調査結果 (帯工 B1 左岸袖部 : 44.6km 付近)

3-3 浅川合流点より上流区間の河道の長期的変遷，低水路の安定化の機構

浅川合流点より上流区間(日野用水堰～浅川合流点：45.2～37.0km)を対象に，洪水水位・流量データ，航空写真，横断測量結果，植生図等の実測データに基づき，これまでの河川改修や洪水等に対する河道の長期的変化，河道と植生の変化の相互関係を分析する．当該区間は，昭和30年代の日野用水堰(45.2km)の建設と大量の砂利採取等により河床低下が進行し，低水路河床の土丹の露出とともに特徴的な砂州河道が失われたが，大規模洪水と河川改修を経て，近年，低水路河床高が維持され砂州河道が回復する傾向が見られる．この河道の変化に着目し，低水路河床高の縦断形が何に規定され維持されるようになったか，どのような機構で低水路が安定化し砂州河道が回復しているかを明らかにする．

図3-37は，航空写真による河道の経年変化，図3-38は，低水路平均河床高の経年変化，図3-39は，最深河床高の経年変化，図3-40は，横断形状と樹木分布の経年変化，図3-41は，各洪水による土砂侵食量・堆積量の縦断分布，図3-43は，河川水辺の国勢調査結果及び多摩川河川敷現存植生図による植生の経年変化(JR八高線～JR中央線区間：44.8～41.4km)を示す．図3-41の侵食量・堆積量は，図3-42のように，低水路河床，河岸，高水敷に区分し，洪水前後の横断面積の変化から算定した．図3-43の植生図は，植生区分を一年生草本，多年生草本，低木，高木群落で分類し，多摩川の樹林化の主要因となっているハリエンジュ群落を赤の網掛けで表示している．また，同図には昭和49年河道(昭和49年洪水前)の低水路の河岸位置を青い点線で表示しており，低水路内に形成されていた砂州の範囲(高水敷化する前の砂州の範囲)が分かるように示している．

ここで，図3-36は河道断面形に関する定義を示す．図3-36は，昭和41年河道の横断面と，河道の二極化が進行した平成11年河道の横断面を重ねたものである．本研究における低水路の範囲の捉え方として，中小洪水で河床変動が生じている範囲を低水路の範囲とみなすものとした．具体的には，平均年最大流量(日野橋：約 $1,200\text{m}^3/\text{s}$)規模の洪水(昭和58年8月洪水($1,358\text{m}^3/\text{s}$)，平成3年9月洪水($1,302\text{m}^3/\text{s}$)，平成10年8月洪水($1,426\text{m}^3/\text{s}$)，平成16年10月洪水($1,183\text{m}^3/\text{s}$))に着目して，それらの洪水の痕跡水位や洪水前後の横断測量結果から洪水流が流下し，河床変動(河床低下)が生じている範囲を低水路の範囲として特定した．低水路平均河床高は低水路の範囲の平均河床高，砂州の比高差は低水路平均河床高と砂州の高さの高低差から求めている．なお，多摩川中流部では，図3-36の平成11年河道のように，河道の二極化に伴い砂州が高水敷化している区間が多く，そのような区間の低水路河岸を本研究では“高水敷化した砂州河岸”と記述している．

- 本研究における低水路の範囲の捉え方：
 中小規模の洪水で河床変動が生じている範囲

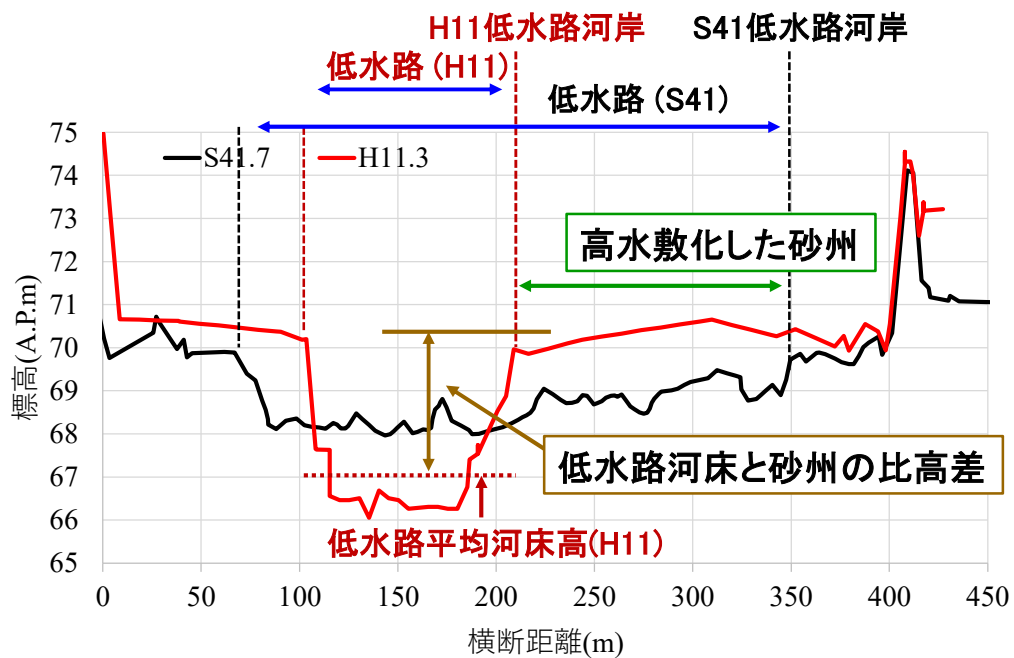
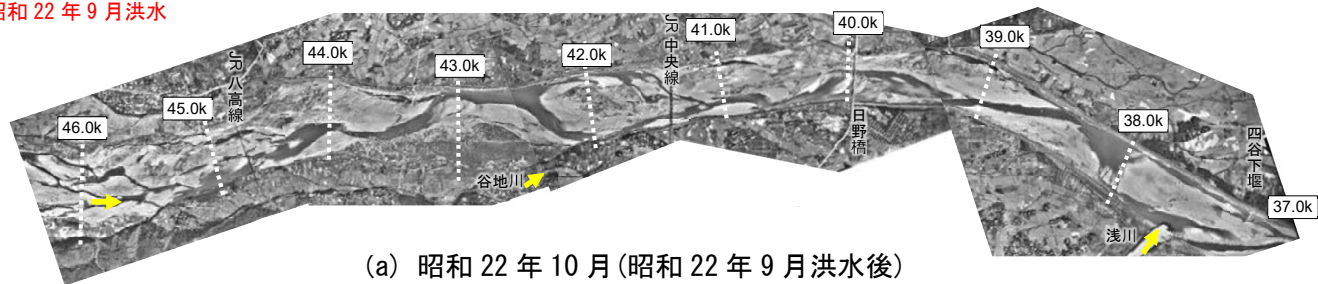


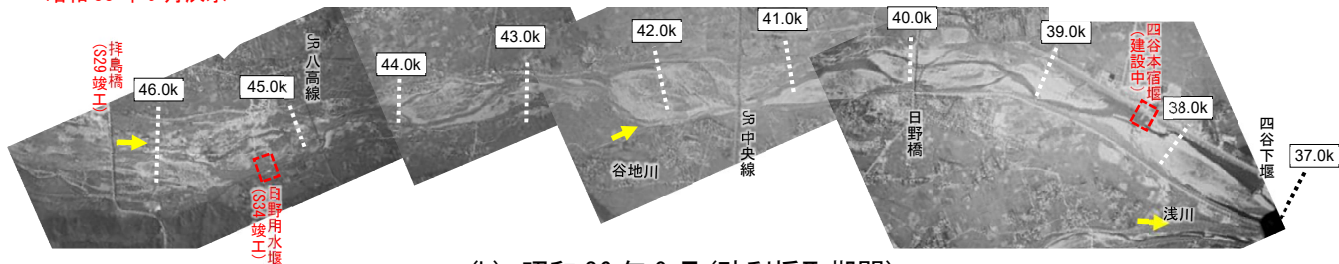
図 3-36 河道断面形に関する定義

昭和 22 年 9 月洪水



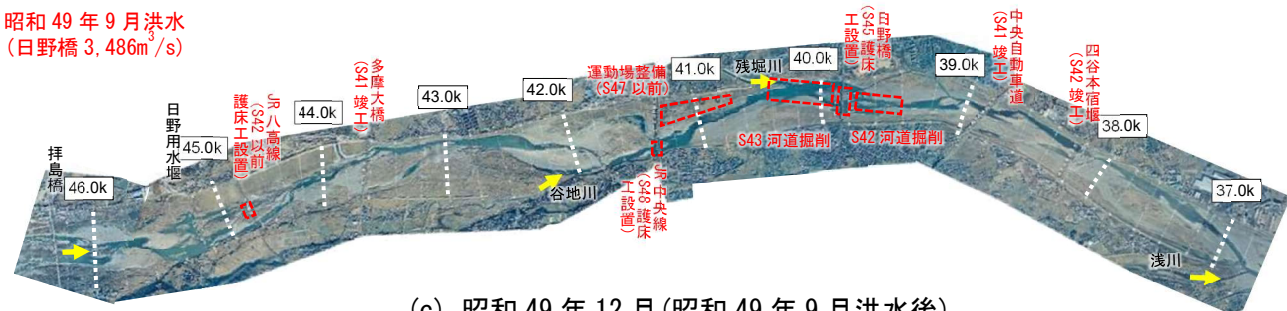
(a) 昭和 22 年 10 月 (昭和 22 年 9 月洪水後)

昭和 33 年 9 月洪水



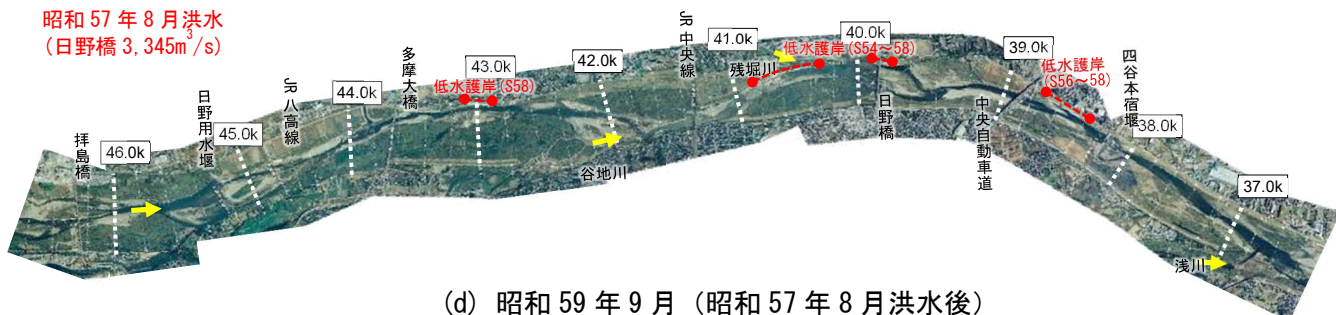
(b) 昭和 36 年 9 月 (砂利採取期間)

昭和 49 年 9 月洪水
(日野橋 3,486 m^3/s)



(c) 昭和 49 年 12 月 (昭和 49 年 9 月洪水後)

昭和 57 年 8 月洪水
(日野橋 3,345 m^3/s)



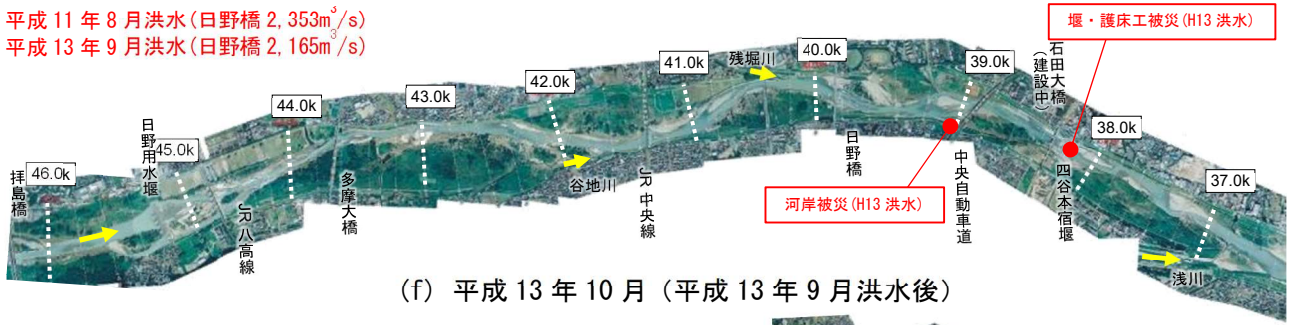
(d) 昭和 59 年 9 月 (昭和 57 年 8 月洪水後)



(e) 平成 11 年 3 月 (平成 11 年 8 月洪水前)

図 3-37(1) 日野用水堰～浅川合流点区間(45.2～37.0km)の河道の経年変化

平成 11 年 8 月洪水(日野橋 2, 353m³/s)
平成 13 年 9 月洪水(日野橋 2, 165m³/s)

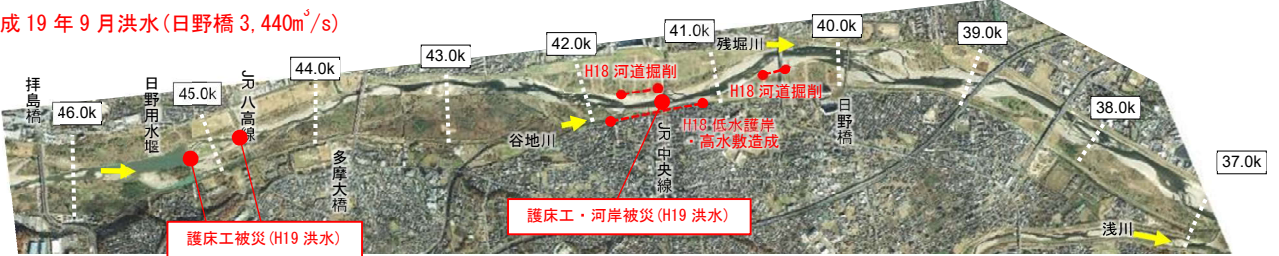


(f) 平成 13 年 10 月(平成 13 年 9 月洪水後)



(g) 平成 17 年 5 月

平成 19 年 9 月洪水(日野橋 3, 440m³/s)



(h) 平成 19 年 10 月(平成 19 年 9 月洪水後)



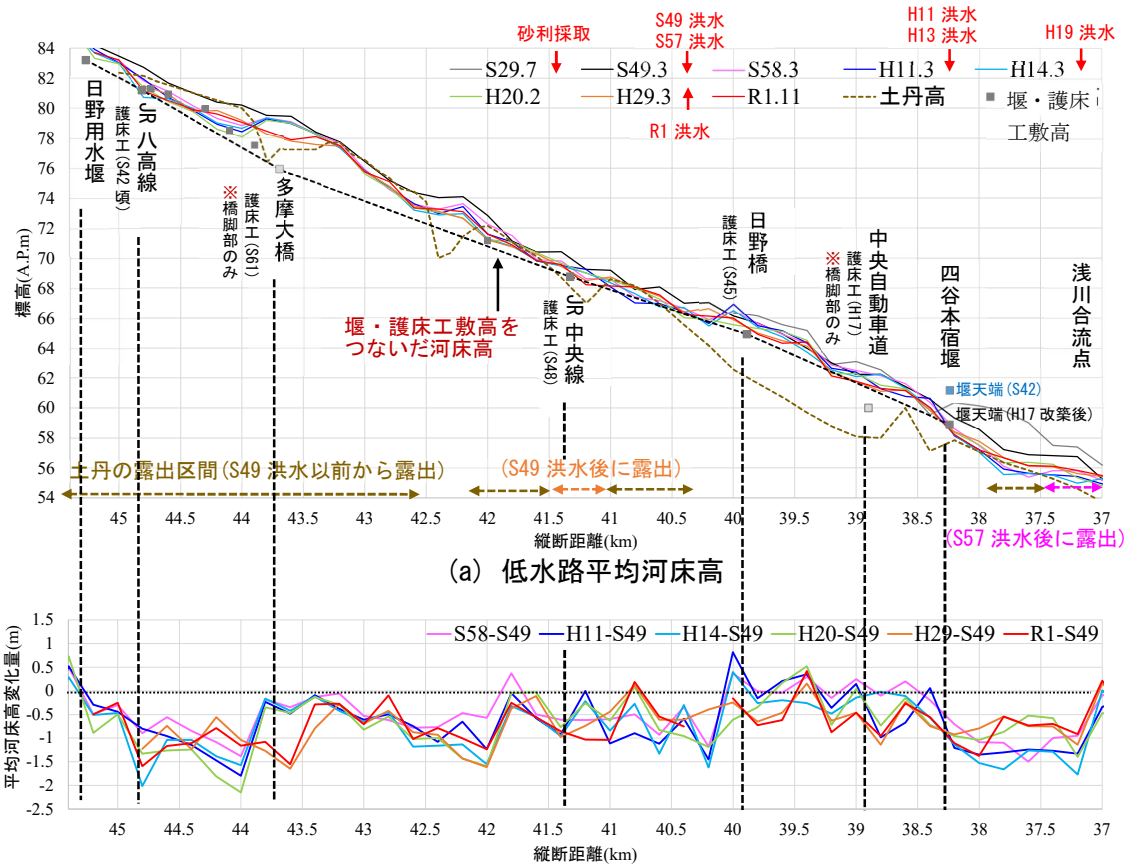
(i) 平成 30 年 4 月

令和元年 10 月洪水(日野橋約 5, 100m³/s)



(j) 令和元年 11 月(令和元年 10 月洪水後)

図 3-37(2) 日野用水堰～浅川合流点区間(45.2～37.0km)の河道の経年変化



(b) 低水路平均河床高の変化量（昭和49年河道の低水路平均河床高を基準とした河床高の変化量）

図3-38 低水路平均河床高，低水路平均河床高変化量の経年変化（日野用水堰～浅川合流点）

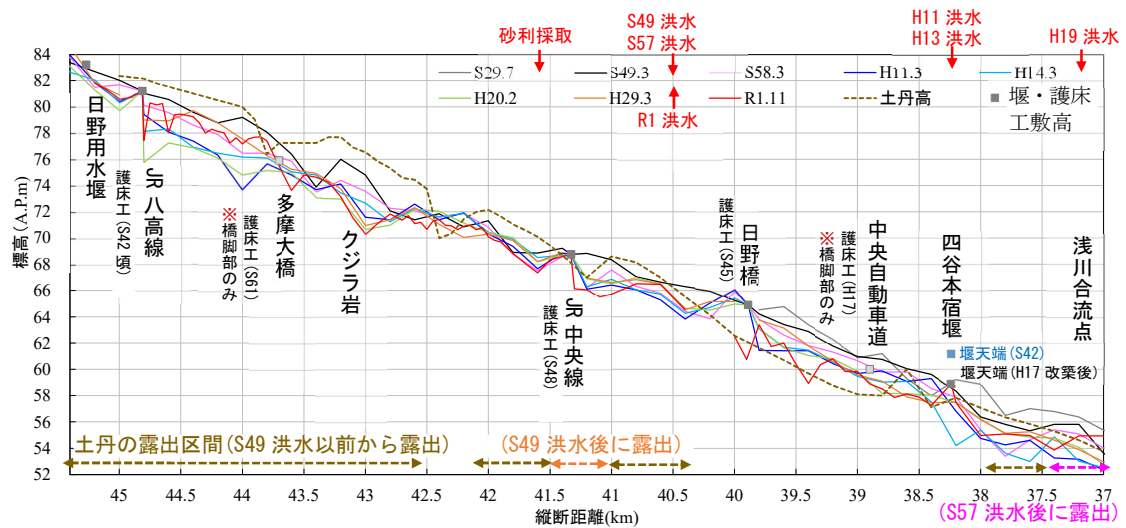
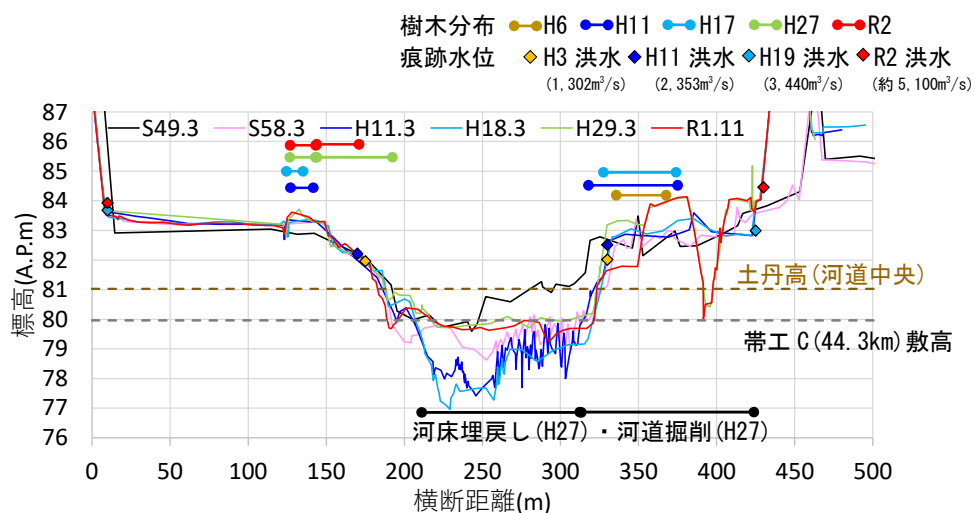
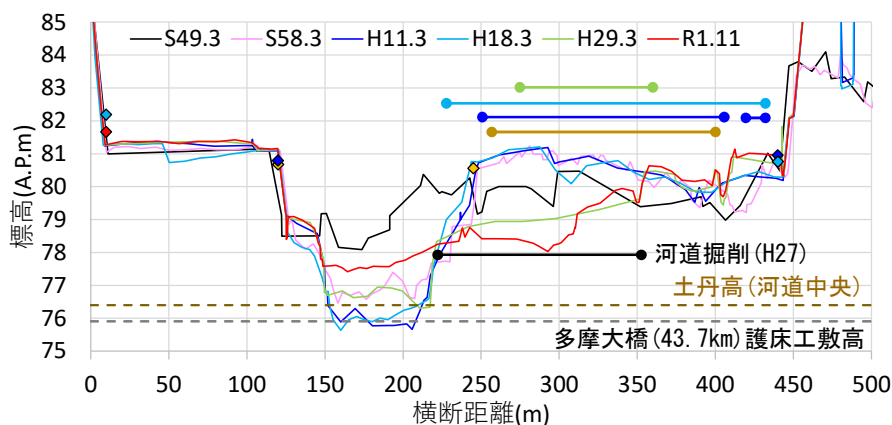


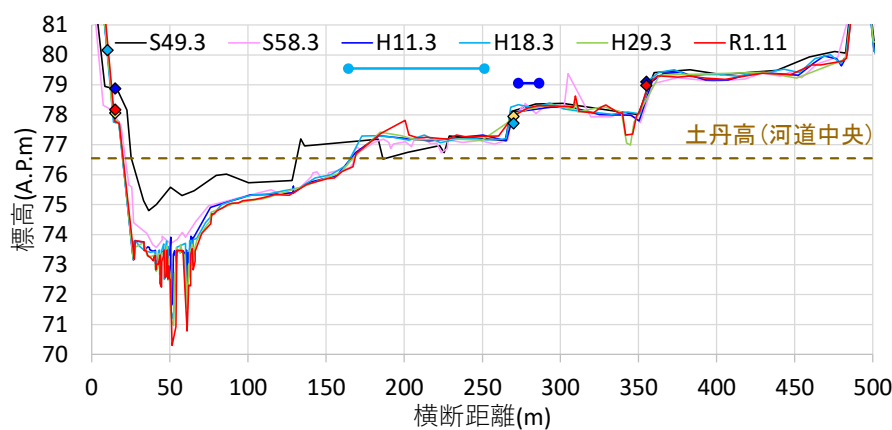
図3-39 最深河床高の経年変化（日野用水堰～浅川合流点）



(a) 44.4km(帯工 C 直上流)

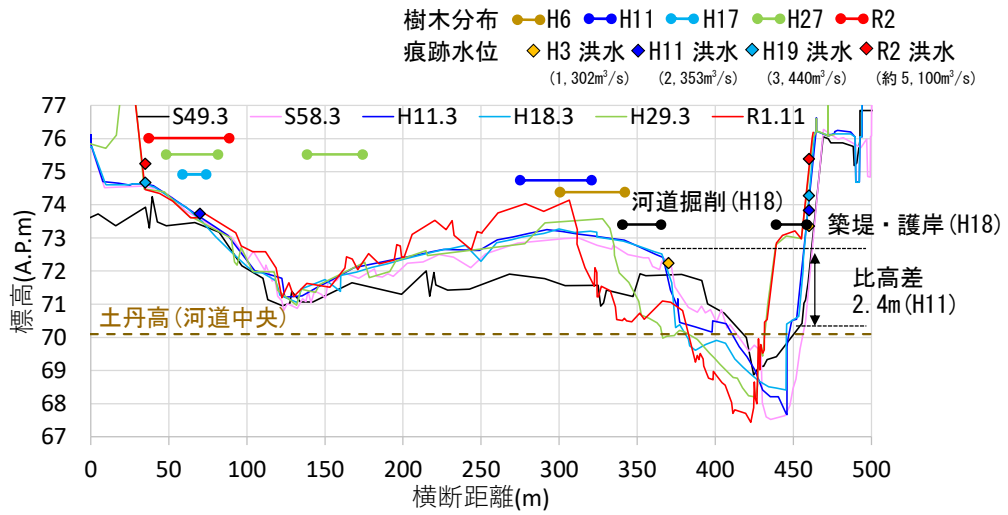


(b) 43.8km(多摩大橋直上流)

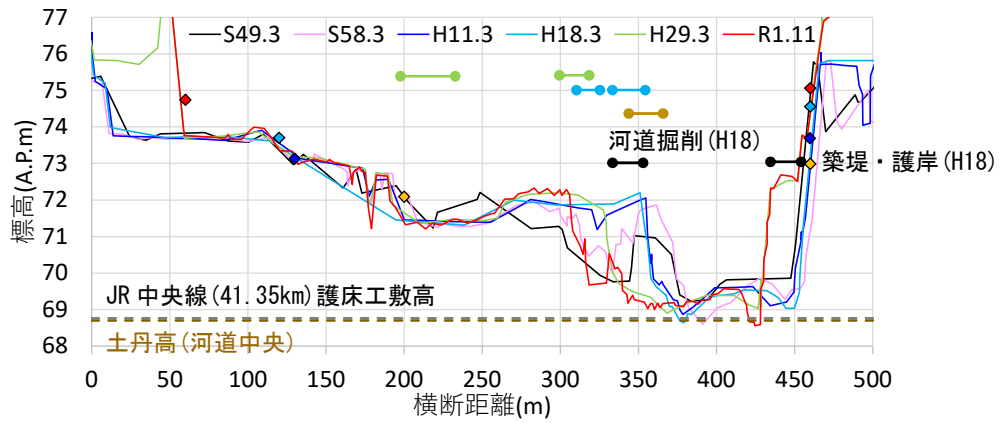


(c) 43.0km(多摩大橋下流)

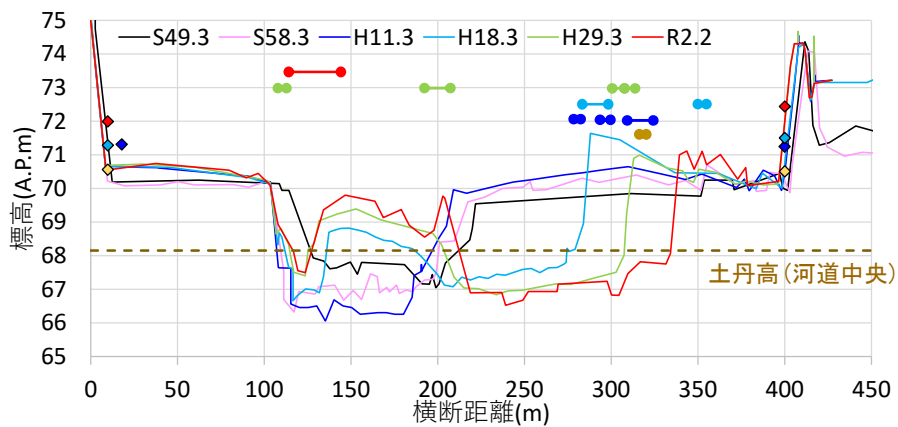
図 3-40(1) 横断形状と樹木分布の経年変化



(d) 41.6km(JR 中央線上流)

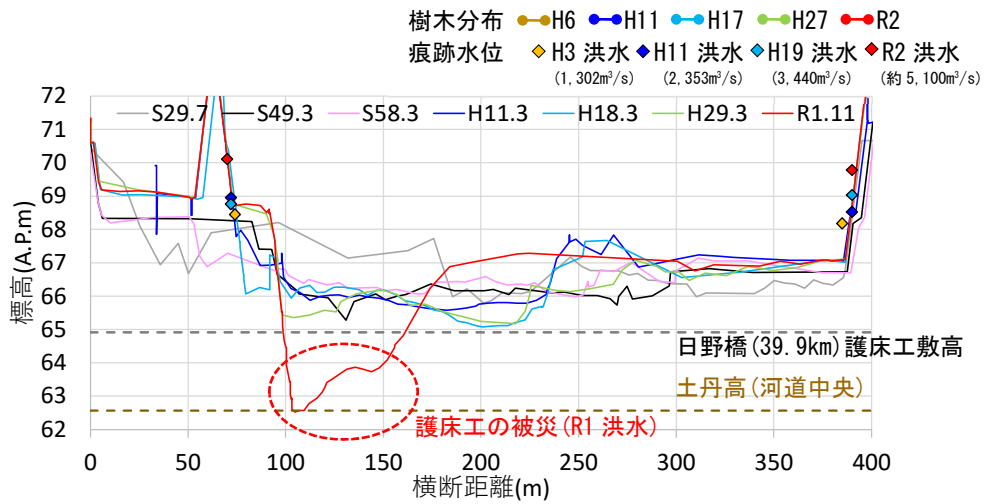


(e) 41.4km(JR 中央線直上流)

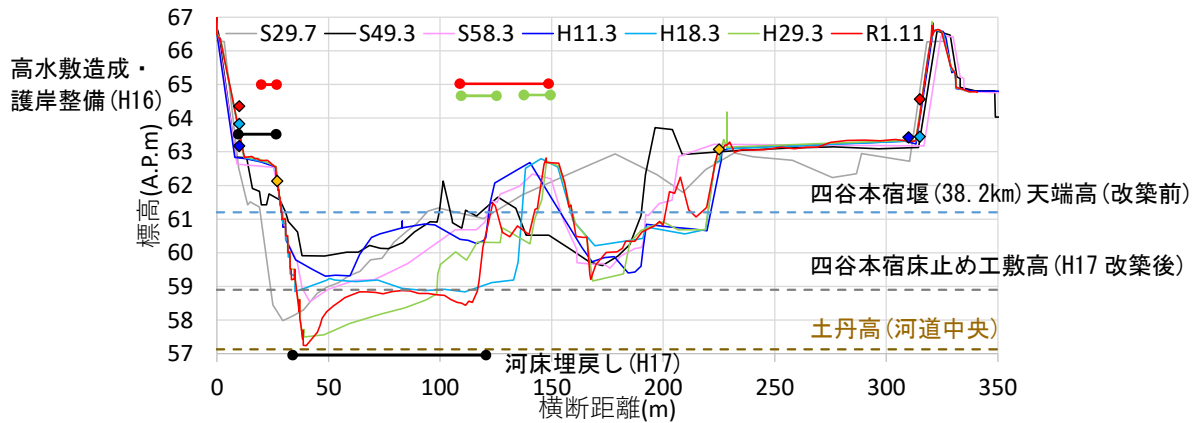


(f) 40.8km(日野橋上流)

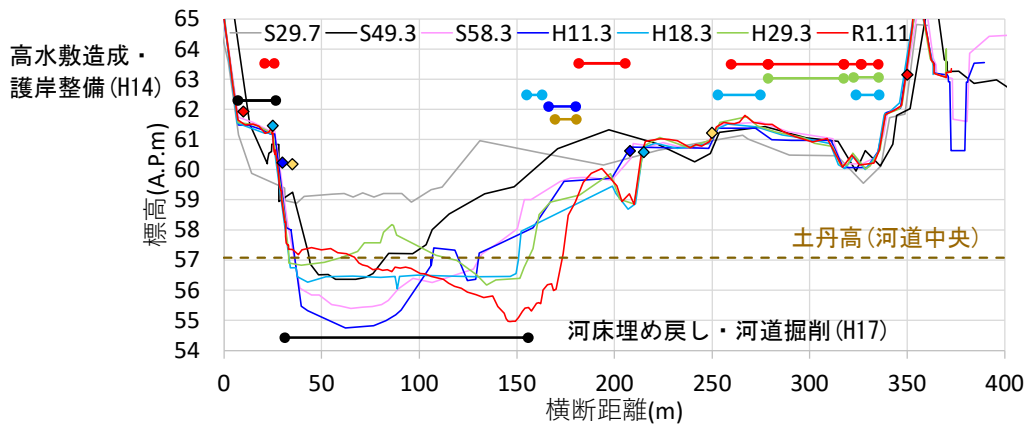
図 3-40(2) 横断形状と樹木分布の経年変化



(g) 40.0km(日野橋直上流)



(h) 38.4km(四谷本宿堰直上流)



(i) 38.0km(四谷本宿堰直下流)

図 3-40 (3) 横断形状と樹木分布の経年変化

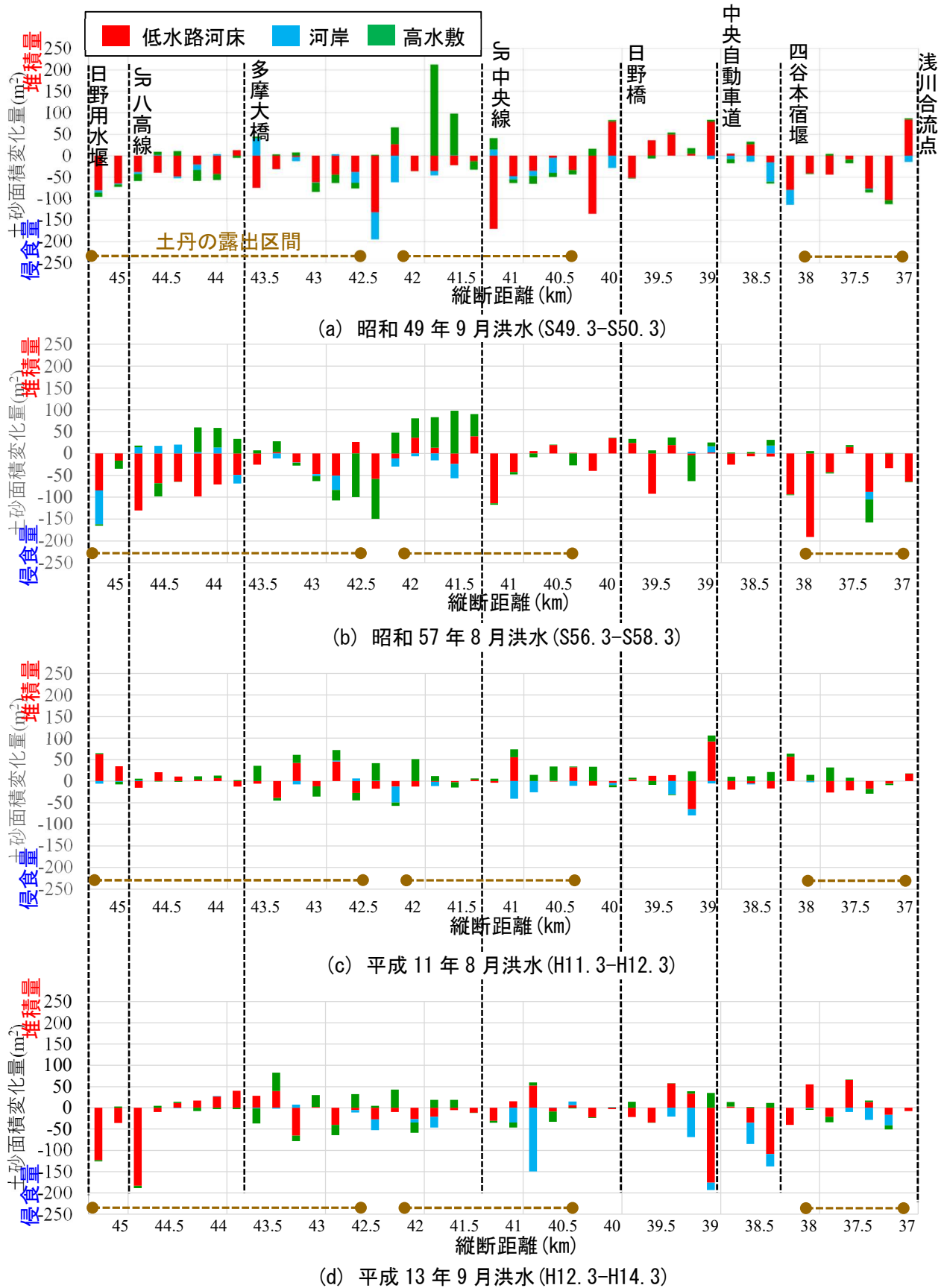


図3-41(1) 各洪水による土砂侵食量・堆積量の縦断分布

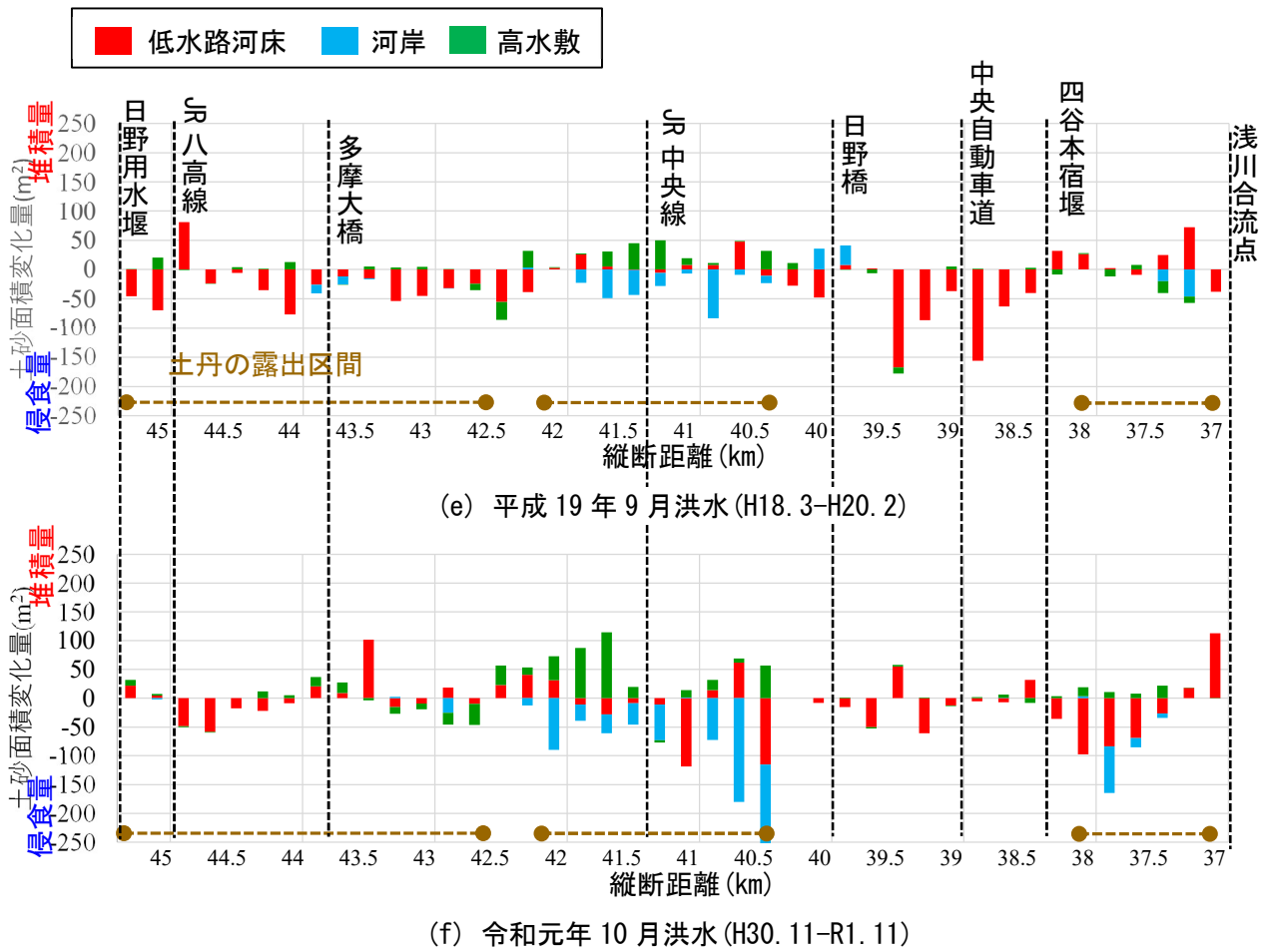


図 3-41 (2) 各洪水による土砂侵食量・堆積量の縦断分布

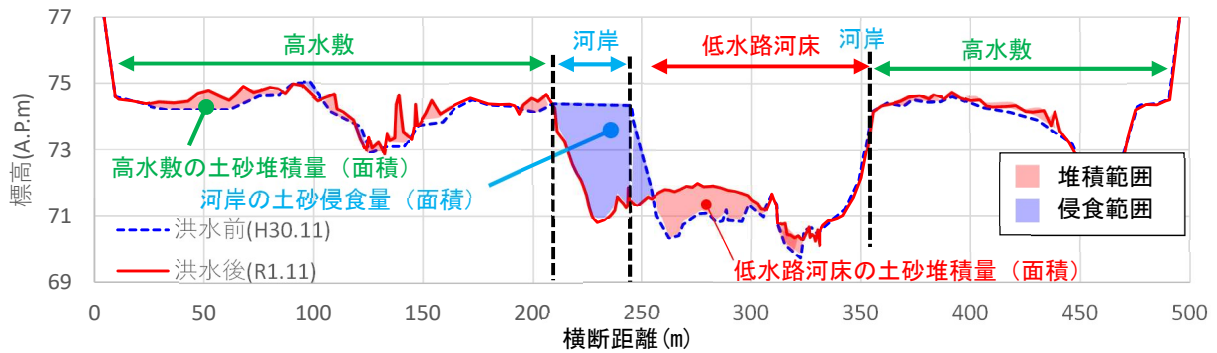


図 3-42 土砂侵食量・堆積量の算定イメージ

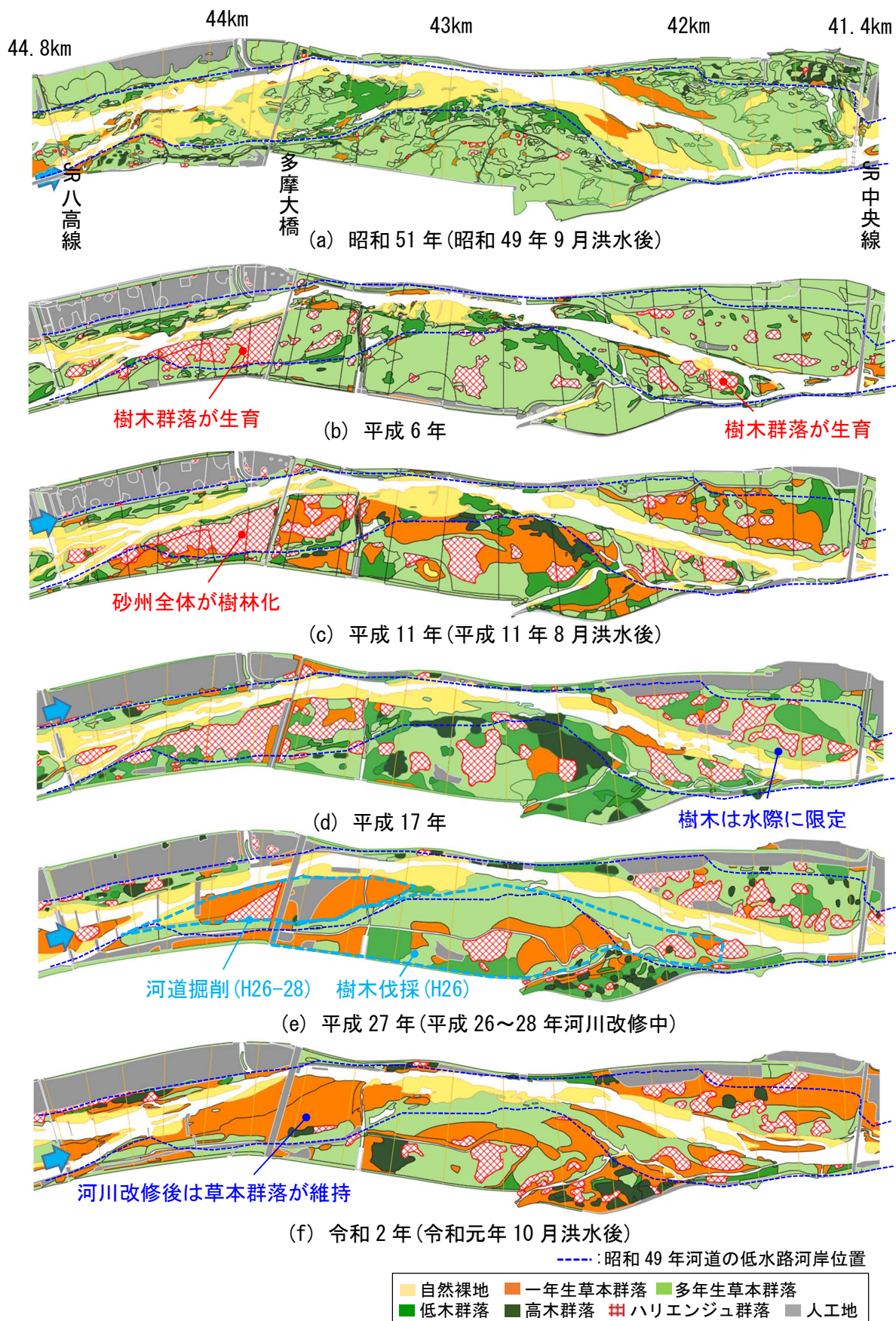


図3-43 浅川合流点上流区間における植生の経年変化(昭和51年~令和2年)

3-3-1 砂利採取、固定堰の建設による砂州河道の変化

多摩川中流部では、高度経済成長期に大量の砂利採取が行われ、さらに水利用の活発化のため、当該区間の上流 45.27km 地点に日野用水堰(昭和 34 年竣工)、下流 38.24km 地点に四谷本宿堰(昭和 42 年竣工、但し、堰自体は昭和 22 年より存在)が建設された¹²⁾。これら昭和 30~40 年代の大規模な人為的改変に対する河道の変化について以下に分析考察する。

図 3-37 (a) に示す昭和 22 年河道(昭和 22 年 9 月洪水後)では、砂州の移動を妨げる横断構造物がないため、JR 中央線(41.35km)より上流区間は複列砂州を有する複雑な流路が形成され、JR 中央線より下流区間は連続的な交互砂州が形成される特徴的な砂州河道を呈している。図 3-40 (g)~(i) に示す昭和 29 年河道の横断形状より、この時点の河道には明確な低水路(滯筋)は形成されておらず、河道全体に亘って流れが生じる流路幅の広い砂州河道であった。

その後、昭和 30 年代に大量の砂利採取、水利用のための日野用水堰(45.27km)、四谷本宿堰(38.24km)の固定堰が建設された。これらの大規模な人為的改変により、図 3-38 に示す 40.0~37.0km 区間(砂利採取前の昭和 29 年のデータが取得されている区間)の低水路平均河床高の経年変化を見ると、昭和 29 年河道と比べて砂利採取後の昭和 49 年河道の河床高は 0.5~2.5m 程度低下しており、砂利採取等の影響が河床低下に顕著に顕われている。また、砂利採取前後の昭和 29 年河道と昭和 49 年河道(昭和 49 年 9 月洪水前)の横断形状(図 3-40 (g)~(i))を比較すると、砂利採取により河道の一部が掘削されたことで、昭和 49 年河道には人工的な滯筋が形成され、河道が複断面化する傾向が見られる。図 3-37 (b) に示す砂利採取期間中の昭和 36 年河道は、砂利採取量(図 3-9)が多い拝島橋~日野橋区間(46.0~40.0km)で低水路が直線化し、昭和 22 年河道に見られた大きく蛇行した砂州河道は単調化している。特に日野用水堰(45.27km)により土砂移動が制限されている、堰下流の JR 八高線(44.8km)~43km 区間の低水路の直線化が顕著であり、これにより、洪水流が滯筋に集中し河床低下が進行したため、JR 八高線上下流や 43km 周辺などでは低水路河床に土丹が露出した。

昭和 39 年に砂利採取が禁止され、昭和 41 年に日野橋(40.0km)より上流が直轄区間に編入されたことで、該当区間では河川改修が本格的に行われ始める¹²⁾。日野橋上下流(40.4~39.4km)では、昭和 42~43 年に河道掘削が行われ低水路が直線化したこと、四谷本宿堰(38.24km)が砂州の移動を制限していることで、昭和 22 年河道(図 3-37 (a))に比べて昭和 49 年河道(図 3-37 (c))は砂州の縦断的なスケールが小さくなり単調化している。また、JR 中央線上下流(42.2~41.0km)をまたぐように形成されていた広大な複列砂州は、JR 中央線下流左岸に運動場が整備(昭和 47 年以前)されたこと、砂利採取と土丹の露出に伴い滯筋が右岸側に固定化したことにより、砂州の移動が制限されるようになり、その後、砂州は固定化(高水敷化)している。大規模な砂利採取後の昭和 40 年代には、洪水に伴う河床低下から橋脚を保護するため、JR 八高線(44.8km、昭和 42 年頃設置)、日野橋(39.9km、昭和 48 年設置)、JR 中央線(41.35km、昭和 45 年設置)の橋梁の低水路に護床工が設置された。

3-3-2 土丹の露出に伴う滯筋の固定化・深掘れと砂州の高水敷化による河道の二極化の進行

浅川合流点より上流区間では、昭和30年代の砂利採取を切っ掛けとして低水路河床に土丹が露出し始め、昭和49年9月洪水(日野橋 $3,486\text{m}^3/\text{s}$)、昭和57年8月洪水(日野橋 $3,345\text{m}^3/\text{s}$)の2度の大規模な洪水を経験した。そして、昭和57年の洪水以降、平成11年まで、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水は発生していない(図3-6)。土丹の露出した河道に発生した大規模洪水と、その後、長期間にわたり大規模洪水が発生していないことによる河道の変化への影響について以下に分析考察する。

図3-39に示す最深河床高の経年変化より、昭和49年9月洪水前の昭和49年河道は、JR八高線～日野橋上流区間(44.8～40.4km)、四谷本宿堰下流～浅川合流点区間(38.0～37.0km)において、河床高が土丹高(河道中央付近の高水敷におけるボーリング調査結果¹⁰⁾)を下回っており、低水路河床に土丹が露出している。図3-38に示す低水路平均河床高の経年変化、図3-41(a)、(b)に示す低水路河床の洗掘量(赤の棒グラフ)の縦断分布より、土丹の露出している区間では、昭和49年9月洪水、昭和57年8月洪水による低水路の河床低下量が土丹の露出していない区間に比べて著しく大きく、土丹の露出が河床低下を助長していることが分かる。図3-40(a)～(f)に示す土丹の露出区間の横断形状の変化を見ると、両洪水(洪水前：黒線、洪水後：ピンク線)に伴う、低水路の河床低下、砂州上への土砂堆積が顕著であり、低水路河床高と砂州高の比高差が拡大し、低水路河道が二極化する傾向が見られる。これにより、昭和57年8月洪水後の昭和59年河道(図3-37(d))では、比高差の高くなった砂州上に植生が繁茂し、砂州が高水敷化し始めていることが分かる。

その後、昭和57年の洪水以降、平成11年までの17年間、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水が発生していないが、低水路平均河床高(図3-38)は経年的に低下している。図3-40(a)～(f)に示す横断形状の経年変化より、土丹が露出している区間では、この期間中に発生した平均年最大流量規模(約 $1,200\text{m}^3/\text{s}$)の洪水(平成3年9月洪水(日野橋 $1,183\text{m}^3/\text{s}$)の痕跡水位を参照)では高水敷化した砂州はほとんど冠水していない。このことから、中小洪水に伴う洪水流が低水路(滯筋)に集中したことで、低水路の河床低下が進行したものと考えられる。図3-37(e)に示す平成11年河道では、砂州の高水敷化と河道の二極化に伴い低水路幅が狭まっており、かつての砂州河道が失われている。

次に、河道と植生の変化の相互関係について分析する。昭和51年～平成6年の植生の変化(図3-43(a)～(b))を見ると、昭和51年河道(図3-43(a))では、昭和49年9月洪水で砂州が攪乱を受けたことにより、低水路内に自然裸地(砂州)が広く分布し、砂州の高さに応じて自然裸地、一年生草本群落、多年生草本群落が横断的に遷移する多様な植生域が形成されている。この時点で、ハリエンジュを含む樹木群落はほとんど生育していない。しかし、平成6年河道(図3-43(b))では、多摩大橋上下流区間(44.4～43.4km)やJR中央線上流区間(42.2～41.4km)の砂州上にハリエンジュ群落が生育するようになってきている。樹木群落が生育している箇所は、昭和49年洪水以前(図3-37(a)～(c))は複列砂州が形成されていた場所であり、昭和49年、昭和57年の大規模洪水が砂州上の旧流路を流下したことで、土砂堆積が生じ

やすい立地条件であった。実際に、**図 3-40 (b), (d)**に示す横断形状・樹木分布の経年変化(43.8km,41.6km)より、ハリエンジュ群落の生育箇所は、両洪水により層厚 0.5~1m 程度の土砂堆積が生じている。これにより、細粒表土層が礫河床上に形成され、低水路河床高との適度な比高差(土壤乾湿条件)が生じたことで、ハリエンジュの生育に適した砂州環境¹⁹⁾が形成されたものと考えられる。

3-3-3 大規模洪水の発生、河川改修に伴う低水路河床高の維持、砂州河道の回復

平成 11 年以降、平成 11 年 8 月洪水(日野橋 2,353m³/s)、平成 13 年 9 月洪水(日野橋 2,165m³/s)、平成 19 年 9 月洪水(日野橋 3,440m³/s)、そして計画高水流量(日野橋 4,700m³/s)を上回る規模の令和元年 10 月洪水(日野橋 約 5,100m³/s)と、大規模洪水が多く発生するようになった。さらに、平成 13 年 9 月洪水で被災した四谷本宿堰(38.24km)の床止め工への改築(**図 3-37 (g)**)や、河道の二極化の著しい多摩大橋周辺地区(44.8~43.4km)における礫河床の埋戻し・帯工群の設置・河道掘削等の大規模改修(**図 3-37 (i)**)など、河川改修が進められてきた。これまでに実施されてきた河川改修と平成 11 年以降の大規模洪水に対する河道の変化について以下に分析考察する。

低水路平均河床高の経年変化(**図 3-38**)より、平成 11 年以降、JR 中央線上流~四谷本宿堰区間(42.2~38.4km)では河床低下が抑制される傾向が見られる。これは、JR 中央線(41.35km)や日野橋(39.9km)等の橋梁には、橋脚を保護するための護床工が設置当時の最深河床高程度の高さで設置されているため(**図 3-39** の最深河床高参照)、**図 3-40 (e), (g)**の護床工直上流の横断形状の経年変化(41.4km, 40.0km)に示すように、平成 11 年以降に低水路平均河床高がそれらの護床工の敷高程度に達したことで、河床高が概ね下げ止まったものと考えられる。これにより、当該区間では、低水路河床高の縦断形が**図 3-38**に示す堰・護床工の敷高をつないだ高さ(黒い点線)に近づくように変化し、ほぼ維持されていることが分かる。つまり、低水路河床高の縦断形が、横断構造物の敷高に規定されていることを表わしている。

JR 中央線橋梁と日野橋の護床工(昭和 48 年、昭和 45 年設置)は、著しい河床低下が生じた昭和 49 洪水 9 月洪水より前に設置されたため、これらの護床工の間の区間(41.2~40.0km)は護床工の敷高に規定され、昭和 40 年代河道の比較的緩やかな河床勾配(1/380 程度)で安定している。また、JR 中央線上流~四谷本宿堰区間(42.2~38.4km)では、高水敷化した砂州が冠水するような大規模洪水が平成 11 年以降に発生し出したことと、平成 17 年に四谷本宿堰(38.24km)の天端高を 2.3m 切下げて床止め工に改築したことを契機として、**図 3-41 (c)~(f)**に示すように、平成 11 年以降の洪水では低水路河床の洗掘量(赤の棒グラフ)に比べて砂州河岸の洗掘量(青の棒グラフ)が卓越する傾向が見られる。これは、堰・護床工の敷高に規定されて低水路河床高が維持されるようになったことで、**図 3-40 (f)**の横断図(40.8km)に示す砂州高と痕跡水位の高さ関係より、高水敷化した砂州が平成 11 年以降の 2,000m³/s 規模の洪水で冠水し、砂州上を流れる洪水流によって砂州水際部が洗掘を受けるようになったためと考えられる。このように、高水敷化した砂州河岸からの洗掘土砂が低水路河床に供給

されることで、低水路河床高の安定に寄与するとともに、砂州河岸が洗掘され低水路幅が広がることで、砂州河道が回復しつつあると考えられる。特に既往最大規模の令和元年 10 月洪水では、図 3-40 (d)～(f)に示すように、JR 中央線上下流区間(42.2～40.4km)で横断幅 20～40m 程度の高水敷化した砂州河岸の洗掘が生じた。洗掘を受けた砂州河岸のほとんどは昭和 49 年洪水以降に堆積した土砂であり、縮小化していた低水路幅が回復し、昭和 40 年代頃の砂州河道に戻ろうとする傾向が見られる。

当該区間下流側の四谷本宿堰～浅川合流点区間(38.2～37.0km)については、低水路河床に土丹が露出しており、さらに四谷本宿堰が上流からの土砂供給を制限しているため、低水路平均河床高(図 3-38)は平成 13 年 9 月洪水後の平成 14 年まで経年的に低下していた。しかし、平成 13 年 9 月洪水で被災した四谷本宿堰を床止め工に改築(平成 17 年竣工：図 3-16)¹¹⁾し、堰上下流河道の低水路河床の是正、高水敷の造成(図 3-37 (g))が行われた。その結果、その後の平成 19 年 9 月洪水では、堰下流に土砂が供給され河床の堆積が生じ(図 3-38, 図 3-40 (i)), 低水路幅の拡大とともに砂州の発達・移動が見られることから(図 3-37 (h)), 堰上下流の土砂移動が改善していることが分かる。堰天端高を 2.3m 切下げたことで、堰上流の中央自動車道橋梁(平成 17 年に橋脚に護床工を設置)までの区間(39.8～38.4km)では、平成 19 年 9 月洪水により低水路の河床低下が生じているが(図 3-38), その後の令和元年 10 月洪水では大きな河床低下は生じておらず、図 3-40 (h)に示す堰直上流河道の低水路河床高は床止め工の敷高程度で概ね安定している。

一方、当該区間上流側の JR 八高線～多摩大橋区間(44.8～43.8km)では、多摩大橋の橋脚に護床工が設置されているものの、図 3-38 より、平成 11 年以降、平成 19 年 9 月洪水後の平成 20 年まで河床低下が継続している。これは、JR 八高線の護床工が昭和 42 年頃に設置されたのに対して、多摩大橋の護床工が設置されたのは昭和 61 年と遅く、JR 八高線～多摩大橋間では昭和 49 年 9 月洪水、昭和 57 年 8 月洪水を経て河床低下が進行していた。このため、JR 八高線と多摩大橋の護床工の敷高の高低差が大きく、それらに規定されて他の区間と比べて河床勾配が急勾配(1/250 程度)となっていたため、低水路平均河床高は護床工敷高をつなぐ高さ(図 3-38 の黒い点線)に漸近するように河床低下が継続している。図 3-40 (b)の横断図(43.8km)に示す砂州高と痕跡水位と高さ関係より、多摩大橋周辺における高水敷化した砂州では、整備計画目標流量規模(日野橋 3,800m³/s)に相当する平成 19 年 9 月洪水でも殆ど冠水していないことが分かる。これにより、多摩大橋周辺の河道では低水路に洪水流が集中し、砂州河岸からの土砂供給がなかったことが河床低下をさらに助長したことで、河道の二極化が進行したものと考えられる。

このため、多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、平成 26～28 年に、河川構造物の安全性の低下、河道の二極化、樹林化等への対策として、昭和 40 年代の河床縦断形(図 3-17 の JR 八高線と JR 中央線の護床工の敷高をつないだ河床縦断形)の復元を目標とし、砂礫による河床の埋戻しと高水敷化した砂州の切り下げ、埋戻し後の河床高維持のための連続的な帯工群の設置、砂州・高水敷(43.4～42.4km)の樹木伐採等の大規模な河川改修が行われた(図

3-37(i)³⁾⁶⁾¹³⁾. その結果, 改修後に発生した令和元年10月洪水では, 改修区間(44.8~43.4km)の低水路河床高(図3-38, 図3-40(a))は帯工群によって概ね維持されている. 帯工群により埋め戻した低水路河床縦断形が維持されていることと, 河道掘削を行った区間(44.4~43.4km)では低水路幅が広がったことで土砂移動が改善し, 砂州が発達・移動している(図3-37(j)). このように改修区間では, 河床の埋戻しと帯工群, 低水路幅の拡幅が一体的に機能しており, 改修目標としていた昭和40年代の砂州河道に戻る傾向が見られる.

次に, 当該区間の河道と植生の変化の相互関係について, 低水路の安定化との関係に着目して考察する. 図3-44は, 平成11年の植生図と平成12年の測量結果より分析した, 草本群落と樹木群落の生育箇所の砂州の比高差と堆積層厚の関係(詳細は5-2項で示す)を示す. 図3-44より, 樹木群落は, 比高差が2m以上, 昭和49年以降, 堆積している砂州上に生育していることが分かる. このことから, 樹木が繁茂する条件として, 当該区間では砂州の比高差が2m程度以上であることが目安になると考え, 砂州の樹林化の要因について以下に考察する.

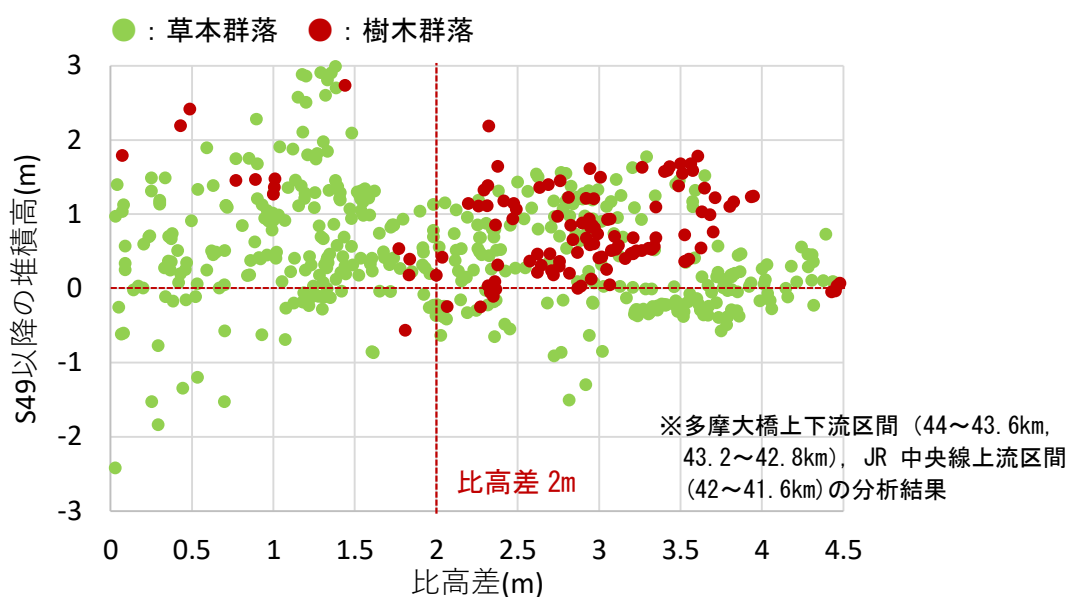


図3-44 草本群落と樹木群落の生育場所の比高差と堆積層厚の関係
(H11 植生図-H12 横断図)

平成6年河道(図3-43(b))より樹木群落の生育が見られた JR 中央線上流区間(42.2~41.4km)の砂州上では, 平成11年~平成17年(図3-43(c), (d))でハリエンジュ群落は拡大しているものの, その生育範囲は砂州の水際付近に限定されており, その後の平成27年河道(図3-43(e))では樹木群落の分布は大きく変化していない. 図3-40(d)に示す横断図・樹木分布(41.6km: JR 中央線上流)と図3-44より, 樹木が生育している砂州は, 低水路河床高との比高差が2.0~3.0m程度であるのに対して, 樹木が生育していない砂州の比高差は2.0m

を下回っており、主にオギ群落などの多年生草本類が占優している。前述のとおり、JR 中央線上流区間は、平成 11 年以降、護床工等に規定され低水路河床高が維持されるようになったため、水際部の局所的に河床高の高い箇所を除いて、低水路河床と砂州の比高差も樹木の生育に適さない 2.0m 程度以下で概ね安定している。これにより、平成 11 年以降に生じた 2,000m³/s を超える洪水で砂州が冠水し、砂州河床が適度な頻度で攪乱を受けるため、これが新たな樹木群落の定着・拡大を抑制し、オギ群落等の草本類の生育場が動的に保たれているものと考えられる。令和元年 10 月洪水後の令和 2 年河道(図 3-43(f))では、洪水により砂州上の植生が攪乱を受け、平成 27 年河道(図 3-43(e))で見られたパッチ状の小規模な樹木群落は消失しており、旧流路に位置する河床高の低い砂州では一年生草本群落(オオブタクサ群落)に遷移し、相対的に比高差の高い水際付近ではオギ群落が生育している。

一方、高水敷化した砂州全体が樹林化している多摩大橋上下流区間(44.6~43.4km)では、図 3-40(b)に示す横断図・樹木分布(43.8km : 多摩大橋直上流)より、土丹の露出に伴う低水路の河床低下が著しく、平成 11 年河道で樹木が生育している砂州と低水路河床との比高差が 3.0m 以上に達している。図 3-40(b)に示す砂州高と痕跡水位の関係より、平成 11 年 8 月洪水による 2,000m³/s 規模の洪水で砂州がほとんど冠水しないため、砂州上の植生は攪乱を受けない。このため、平成 17 年河道(図 3-43(d))では、砂州全体にハリエンジュ群落が増殖し、洪水による自然の営力では砂州上の樹林化を抑制できない状態となっていた。その後、平成 26~28 年の河川改修により、高水敷化した砂州の切り下げ(43.4~42.4km)、砂州・高水敷(43.4~42.4km)の樹木伐採が行われ、河川改修中(43.8km 付近の砂州の一部が掘削前のため、ハリエンジュ群落が局所的に残る)の平成 27 年河道(図 3-43(e))では、切下げた砂州上には水際に入植しやすい一年生草本群落(オオイヌタデ-オオクサキビ群落)が生育し、樹木伐採後の砂州・高水敷上には多摩川中流部の代表的な多年生草本類である広大なオギ原が再生している。令和元年 10 月洪水後の令和 2 年河道(図 3-43(f))では、切下げた砂州上は洪水により裸地化した後(図 3-37(f) : 洪水直後の航空写真)、一年生草本群落(オオイヌタデ-オオクサキビ群落、オオブタクサ群落)に遷移し、オギ原を再生した砂州・高水敷上ではオギ群落は概ね維持されており、砂州の比高差に応じた多様な植生の生育場が回復しつつある。

以上のことから、低水路河床の安定は、低水路河床と砂州の比高差の維持とそれに伴う適度な頻度で洪水による攪乱を受ける砂州環境の回復をもたらし、それが砂州の樹林化の抑制と多様な植生の生育地の形成に寄与していることを示している。

3-3-4 高水敷化した砂州河岸の洗掘機構

本節では、低水路河床高の維持に伴い、高水敷化した砂州河岸の洗掘(低水路幅の拡大)が促される機構について、実測データと洪水流・河床変動解析結果に基づき分析する。

図 3-45 は、平成 11 年以降、低水路平均河床高が概ね維持されている JR 八高線～四谷本宿堰区間(45.0～38.2km)の低水路河岸位置の経年変化(昭和 49 年～令和元年)、図 3-46 は、同区間の低水路幅の経年変化を示す。図 3-45、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いることが分かる。図 3-46 より、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、大規模洪水の発生とともに低水路幅が拡大している。前述のとおり、洗掘を受けた砂州河岸のほとんどは、昭和 49 年 9 月洪水以降に土砂が堆積し高水敷化した砂州であり(図 3-40 (d)～(f))、昭和 40 年代の低水路幅に戻るように変化している。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(45.0～44.8km, 43.2～42.6km, 40.0～39.2km)では、低水路幅が 200～250m 程度で概ね維持されている。また、河川改修が行われた多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、計画高水流量規模に相当する令和元年 10 月洪水に対しても、改修後の低水路幅を維持している。

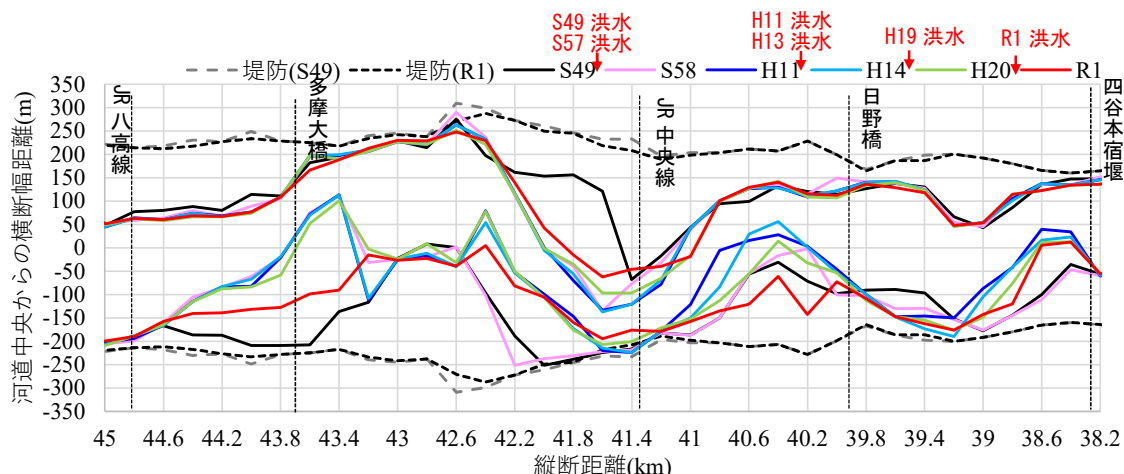


図 3-45 JR 八高線～四谷本宿堰区間の低水路河岸位置の経年変化(昭和 49 年～令和元年)

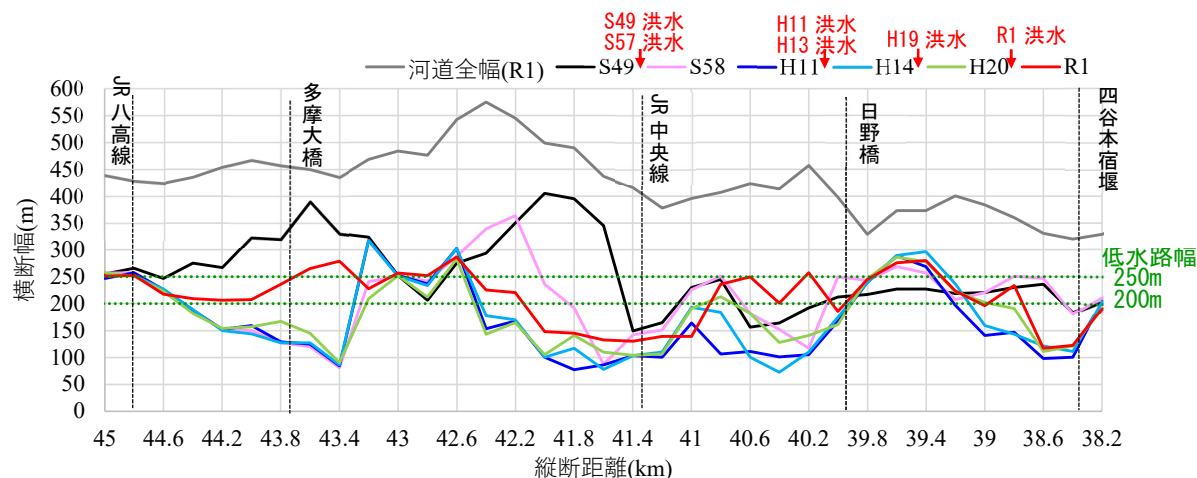
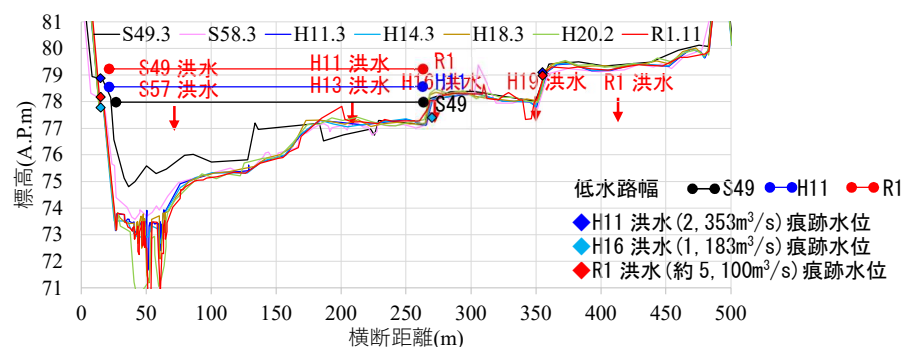
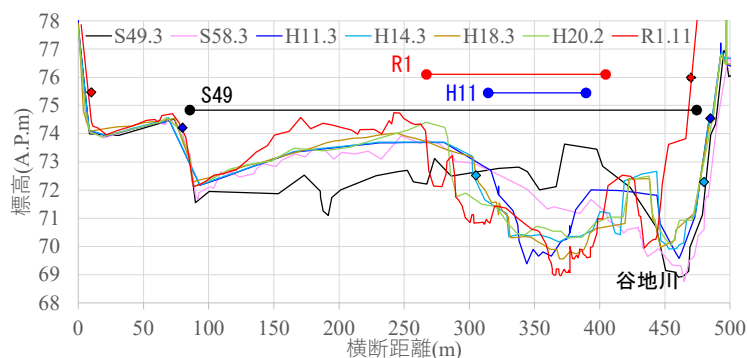


図 3-46 JR 八高線～四谷本宿堰区間の低水路幅の経年変化(昭和 49 年～令和元年)

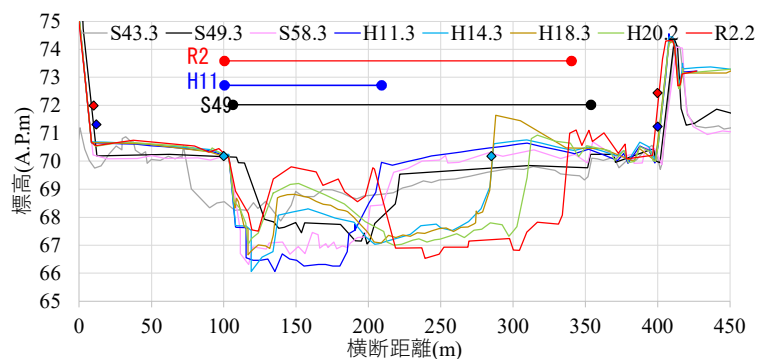
図 3-47 は、低水路幅が経年的に維持されている断面(43.0km)と低水路幅が変化している断面(41.8km, 40.8km)の横断形状と低水路幅の経年変化を示す。図 3-47 (b), (c)に示す低水路幅が変化している断面の横断形状の経年変化, 図 3-45 に示す低水路河岸位置の経年変化より, 砂州河岸の洗掘をもたらした洪水は $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水であり, それを下回る平均年最大流量規模の洪水(例えば, 平成 16 年 10 月洪水($1,183\text{m}^3/\text{s}$))では砂州河岸の洗掘はほとんど生じていない。



(a) 43.0km (低水路幅が維持されている断面)



(b) 41.8km (低水路幅が変化している断面)



(c) 40.8km (低水路幅が変化している断面)

図 3-47 横断形状と低水路幅の経年変化

高水敷化した砂州河岸の洗掘機構について考察するため、準三次元洪水解析法(Q3D-FEBS法)及び非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法(解析手法については、4-2項で後述する)を用いて、砂州河岸の著しい洗掘が生じた令和元年10月洪水の解析を行った。

図3-48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3-49は、41.8km、40.6km断面の横断形状・横断面内流速分布の時間変化の解析結果を示す。

図3-48、図3-49より、当該区間の低水路満杯流量は $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 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始め、砂州河岸の洗掘が生じる。さらに流量が増加すると、洪水ピーク付近(図3-48(c)、図3-49(c)、(f))では、高水敷化した砂州上の水深が高くなるにつれて洪水流の直進性が増し、流速 4.0m/s 以上の高速流が砂州河岸付近に発生することで、それが砂州河岸の洗掘を助長している。このことから、当該区間では、平成11年以降、低水路護床工等によって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 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水が頻発したことによって、高水敷化した砂州河岸の洗掘が促されるようになり、それにより、河道が二極化する前(昭和40年代)の低水路幅に戻るように変化していると考えられる。

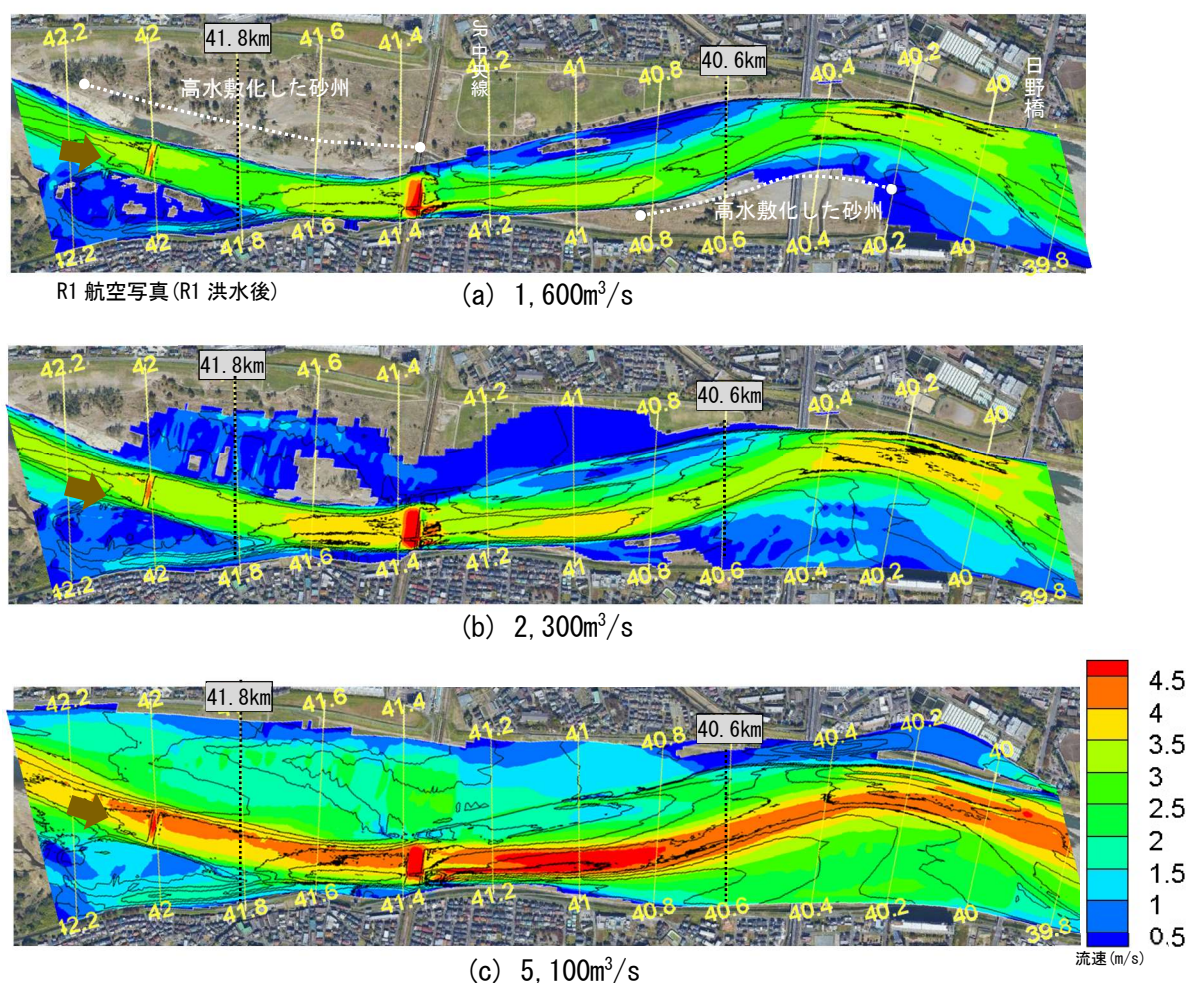


図3-48 令和元年10月洪水による底面流速分布の時間変化の解析結果(42.2~40.0km)

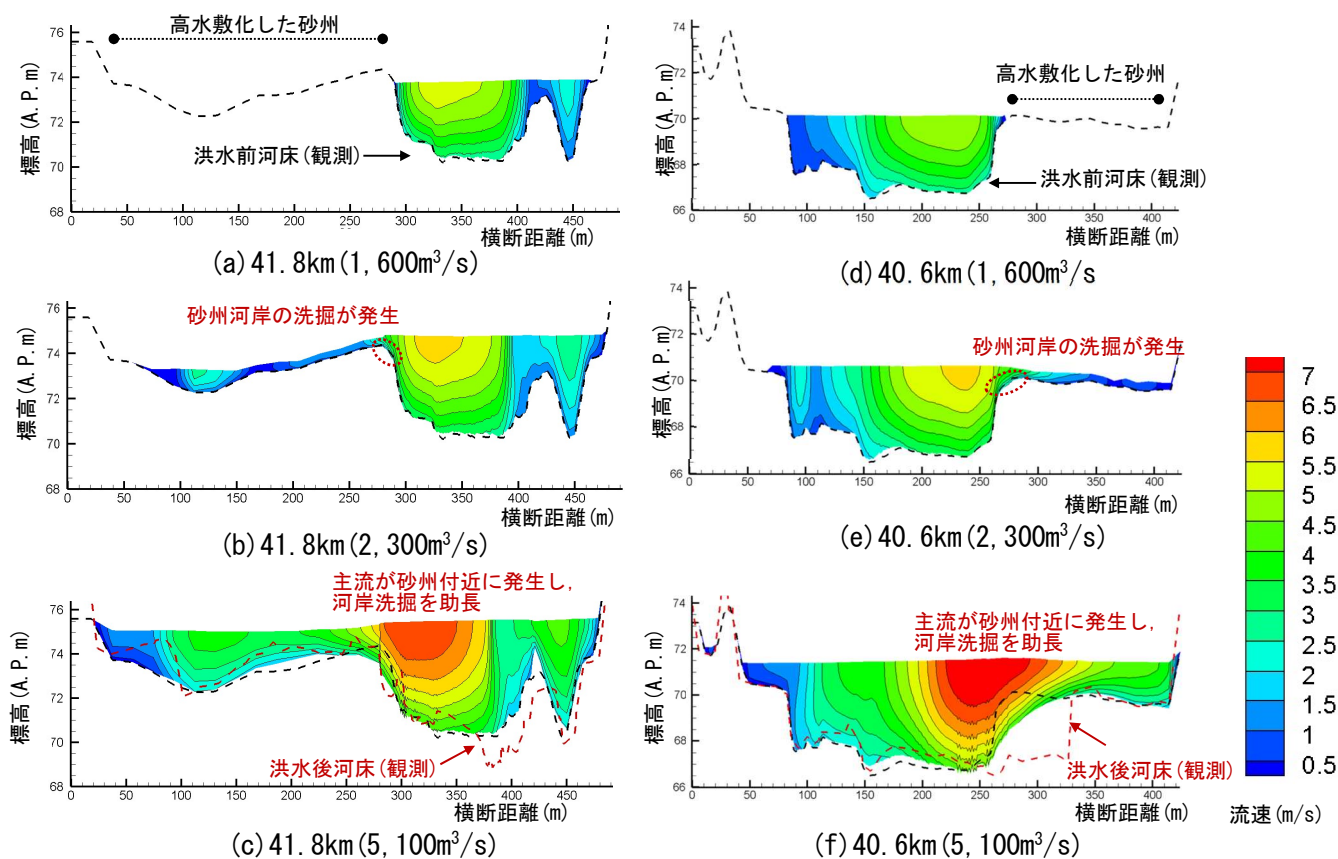


図 3-49 令和元年 10 月洪水による横断形状と横断面内流速分布の時間変化の解析結果
(41.8km, 40.6km)

3-4 浅川合流点より下流区間の河道の長期的変遷，低水路の不安定化の要因

浅川合流点下流から大丸用水堰までの区間(37.0~32.4km)を対象に，河川改修や洪水に対する河道の長期的変化を分析し，当該区間の低水路が不安定化している要因を明らかにする．当該区間では，35.1km 地点に京王線多摩川橋梁の下り線(下流側)が大正14年に，上り線(上流側)が昭和39年に架橋され，堤間幅は約358mに対して，幅1.83mの15本の橋脚が河道内に設置されている．京王線多摩川橋梁(図3-50)の下流34.6km地点には関戸橋が昭和12年に，昭和46年には関戸橋の上流側に新関戸橋が竣工している．さらに下流の32.4km地点には，昭和34年に大丸用水堰(図3-15)が建設されている．同堰は，可動堰部(天端高41.71A.P.m)と，可動堰部(低水路の平均河床高程度)に対して1.4m程度河床高がかさ上げされた固定堰部(天端高43.15A.P.m)からなり，固定堰部は堰全幅331.4mの約70%を占めている．このため，当該区間における河道の長期的変化の分析にあたっては，浅川からの土砂供給とこれらの横断構造物が土砂移動に及ぼす影響に着目し，低水路内に砂州(中州)や滯筋が不規則に発達し，河岸や構造物の被災をもたらす要因について考察する．

図3-51は，浅川合流点下流区間における航空写真による河道の経年変化，図3-52は，低水路平均河床高の経年変化，図3-53は，最深河床高の経年変化，図3-54は，横断形状と樹木分布の経年変化，図3-55は，植生の経年変化を示す．

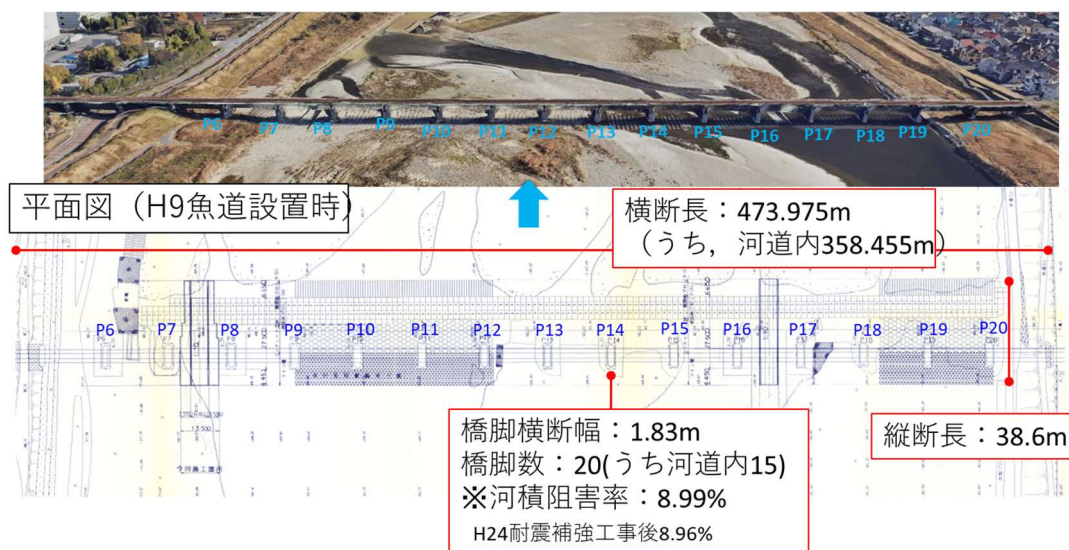
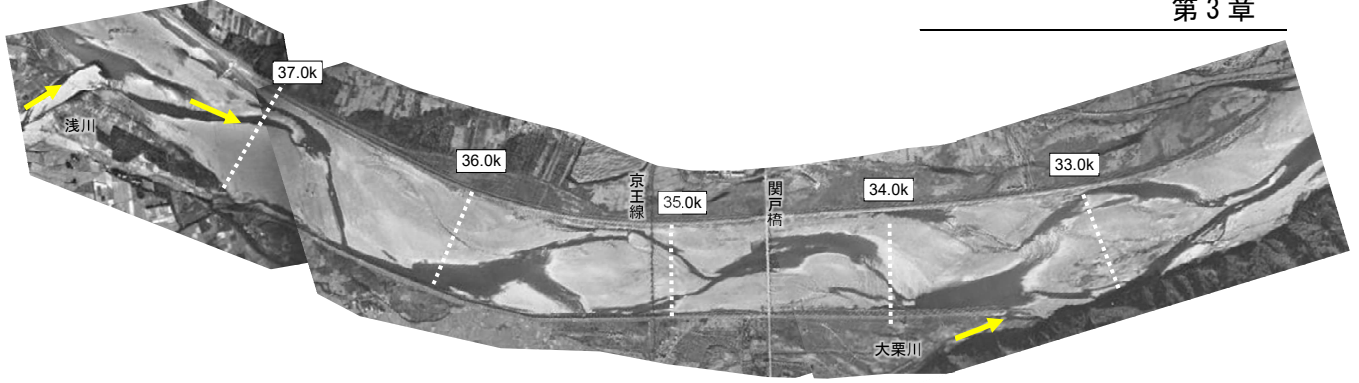
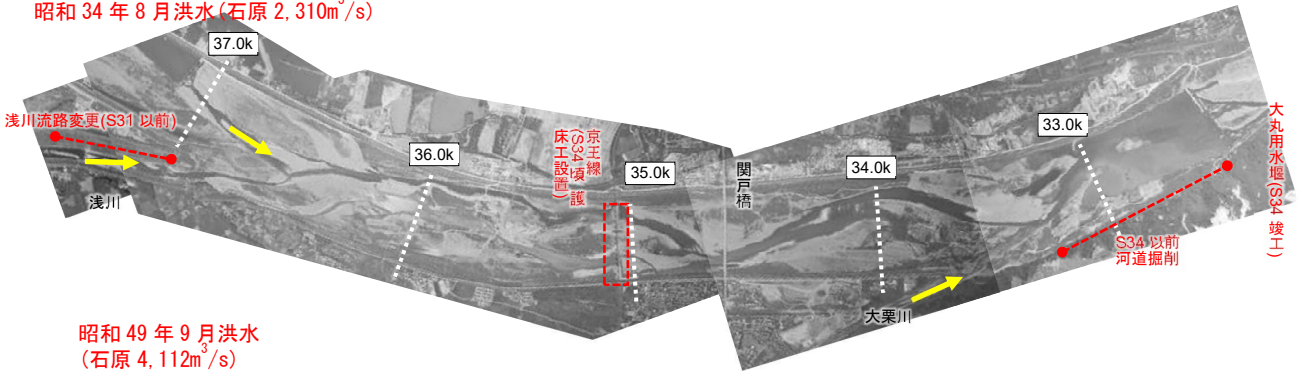


図3-50 京王線橋梁(35.1km)の構造諸元



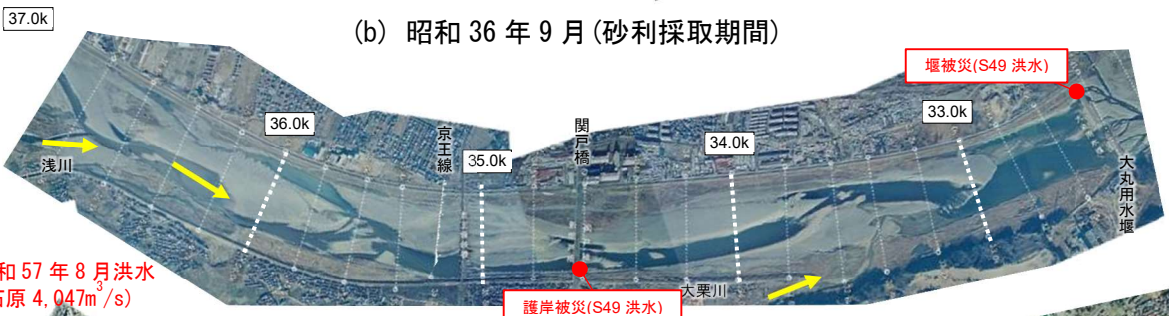
(a) 昭和 22 年 10 月(昭和 22 年 9 月洪水後)

昭和 33 年 9 月洪水(石原 2, 042m³/s)
昭和 34 年 8 月洪水(石原 2, 310m³/s)



(b) 昭和 36 年 9 月(砂利採取期間)

昭和 49 年 9 月洪水
(石原 4, 112m³/s)

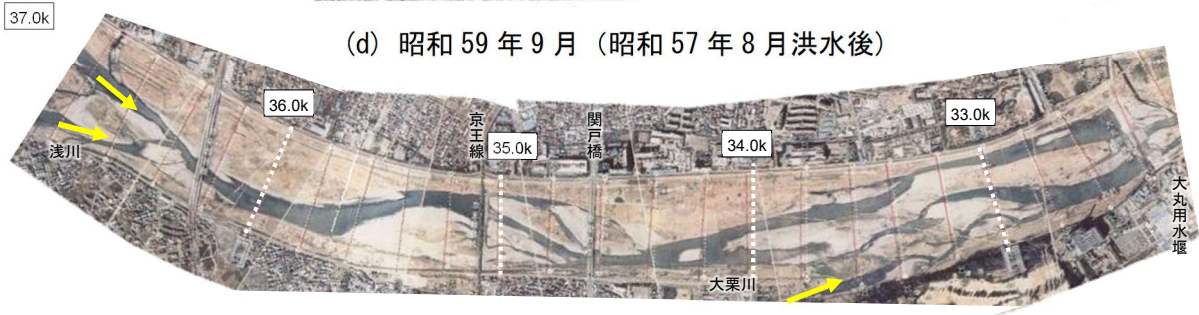


(c) 昭和 49 年 12 月(昭和 49 年 9 月洪水後)

昭和 57 年 8 月洪水
(石原 4, 047m³/s)



(d) 昭和 59 年 9 月(昭和 57 年 8 月洪水後)



(e) 平成 11 年 3 月(平成 11 年 8 月洪水前)

図 3-51(1) 浅川合流点~大丸用水堰区間(37.0~32.4km)の河道の経年変化

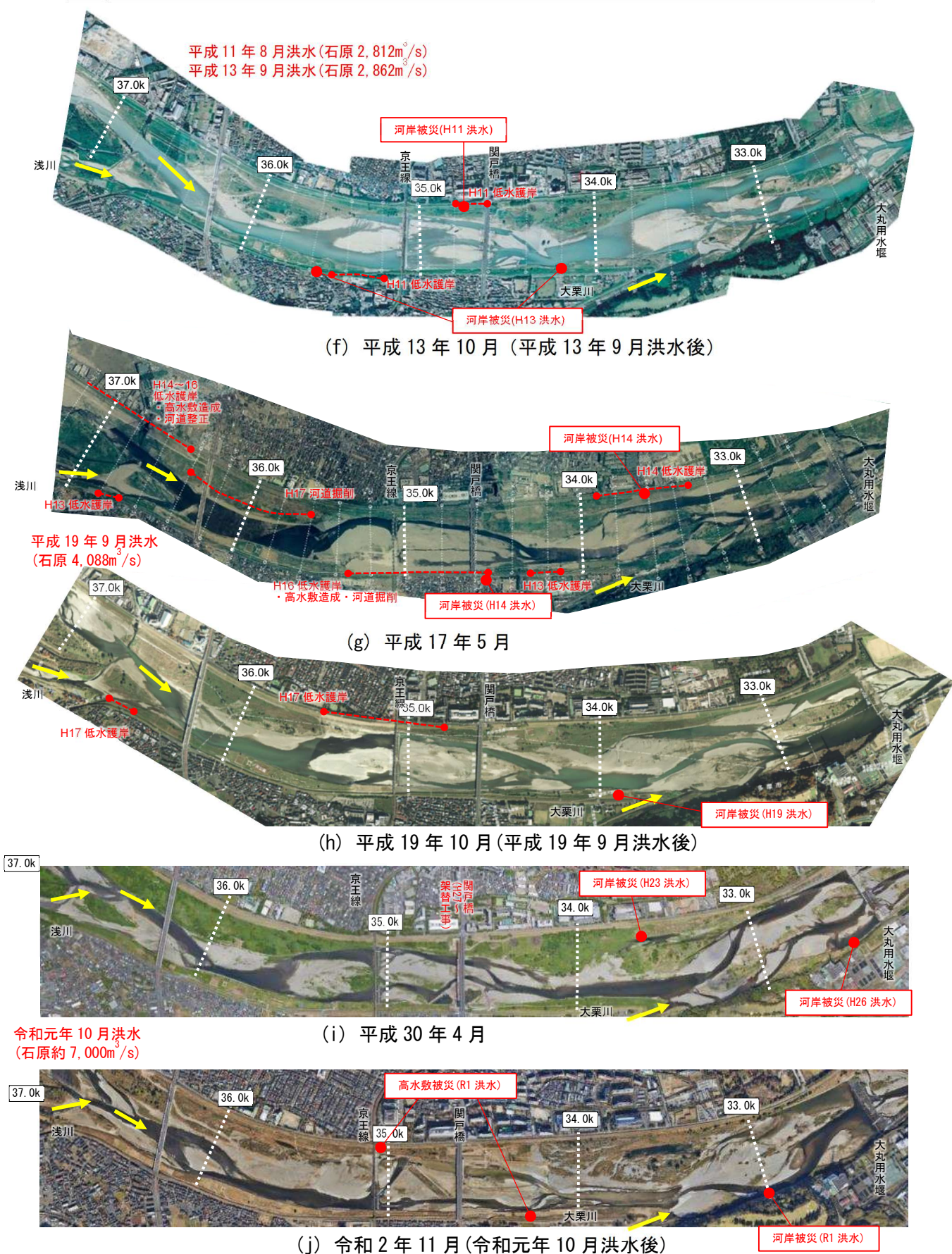
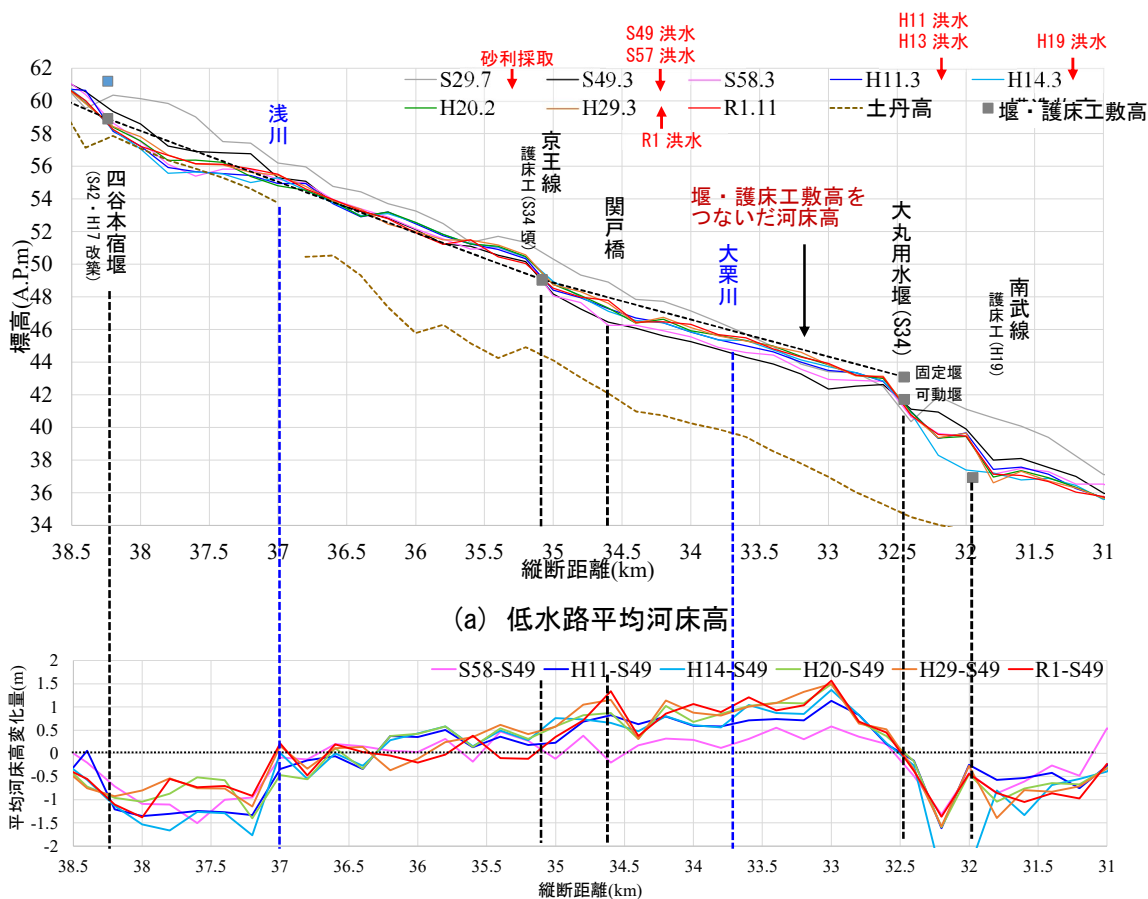


図 3-51 (2) 浅川合流点～大丸用水堰区間(37.0～32.4km)の河道の経年変化



(b) 低水路平均河床高の変化量（昭和49年河道の低水路平均河床高を基準とした河床高の変化量）

図3-52 低水路平均河床高，低水路平均河床高変化量の経年変化（四谷本宿堰～南武線下流）

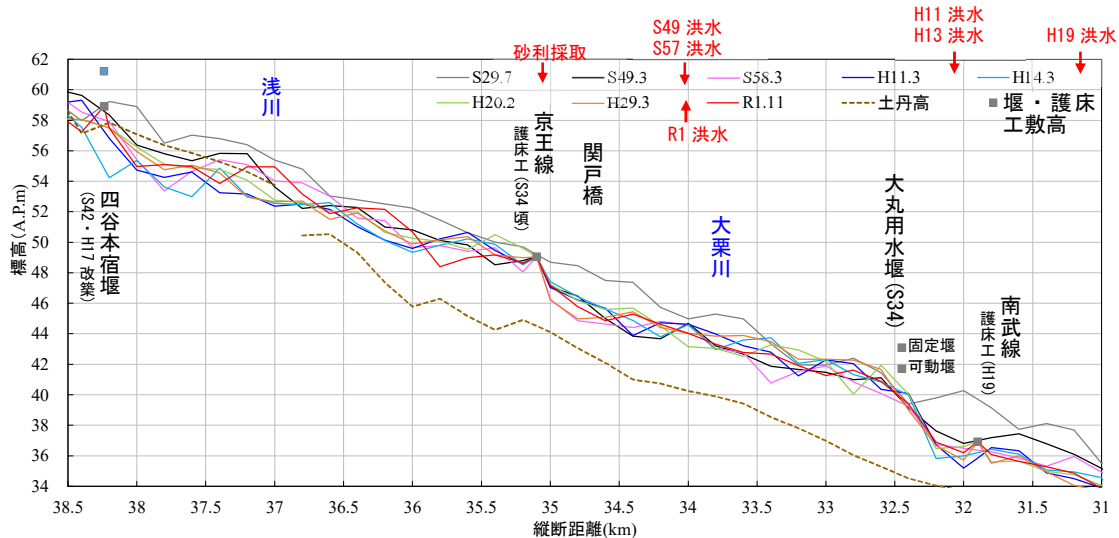
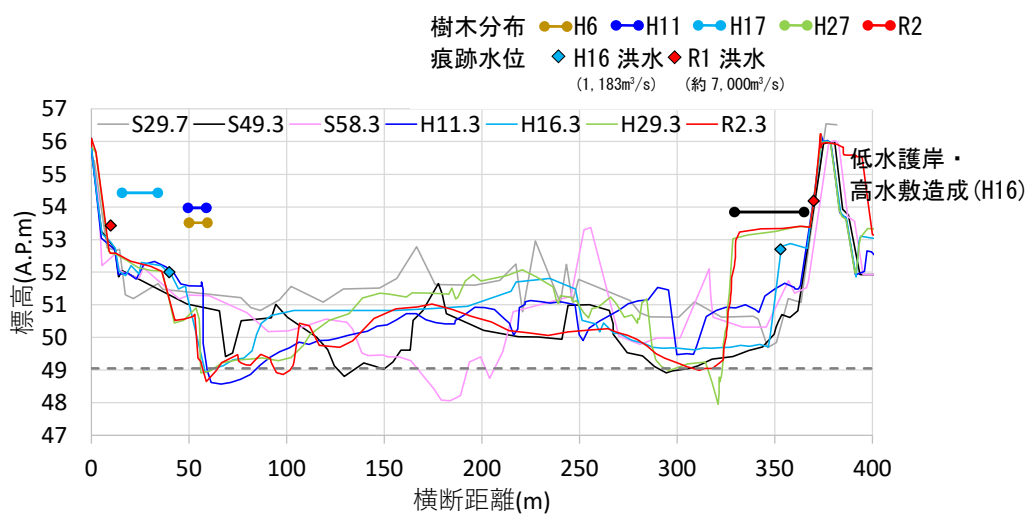
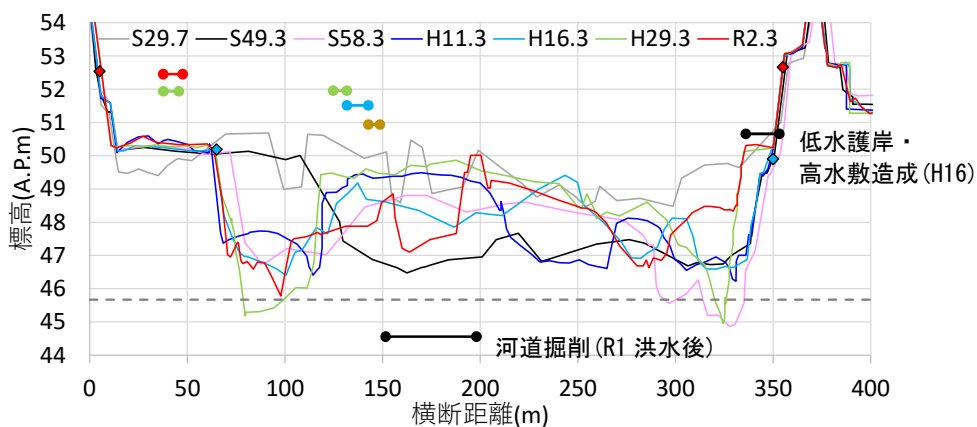


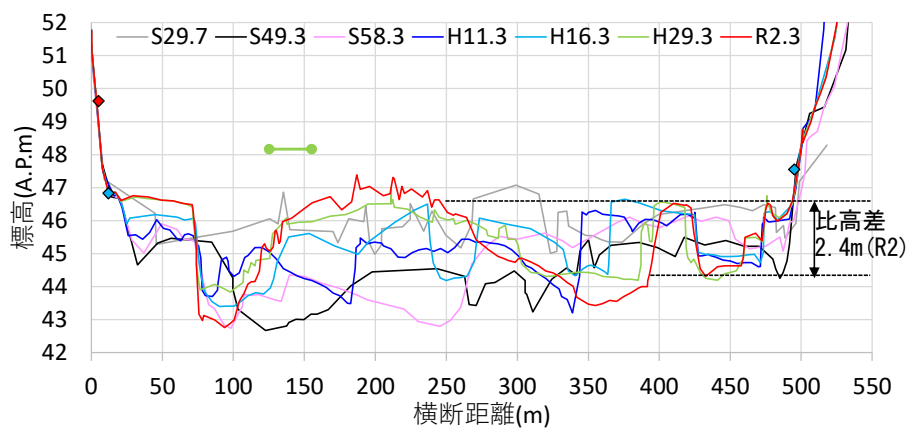
図3-53 最深河床高の経年変化（四谷本宿堰～南武線下流）



(a) 35.2km(京王線直上流)

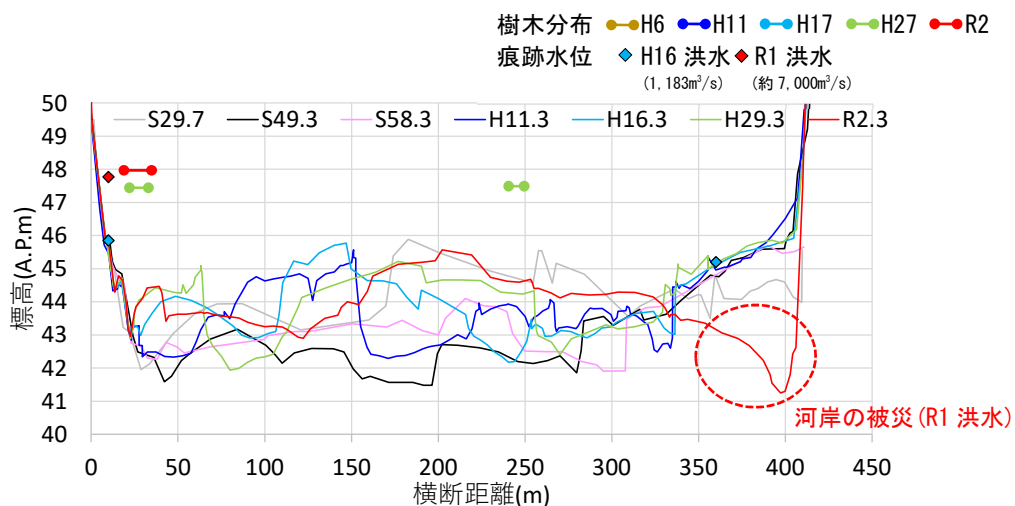


(b) 34.8km(京王線直下流・関戸橋直上流)

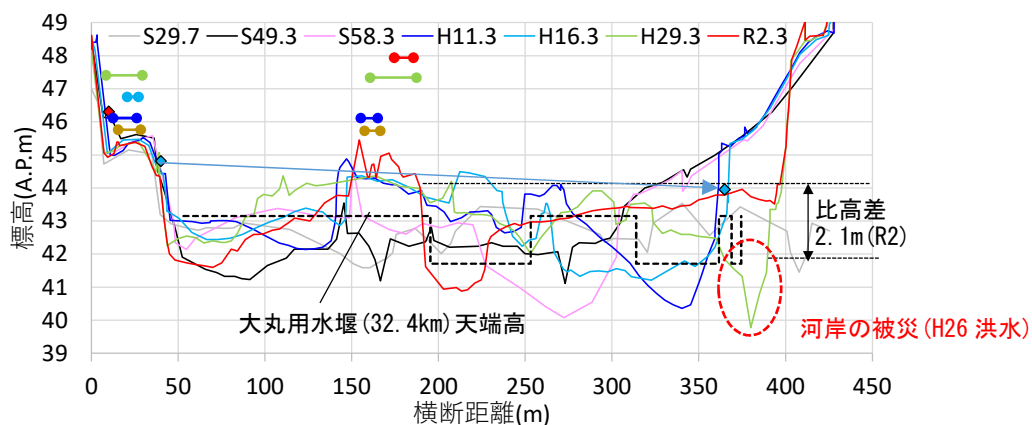


(c) 33.6km(大丸用水堰より約1km上流)

図 3-54(1) 横断形状と樹木分布の経年変化



(d) 33.0km(大丸用水堰より約500m上流)



(e) 32.6km(大丸用水堰直上流)

図 3-54(2) 横断形状と樹木分布の経年変化

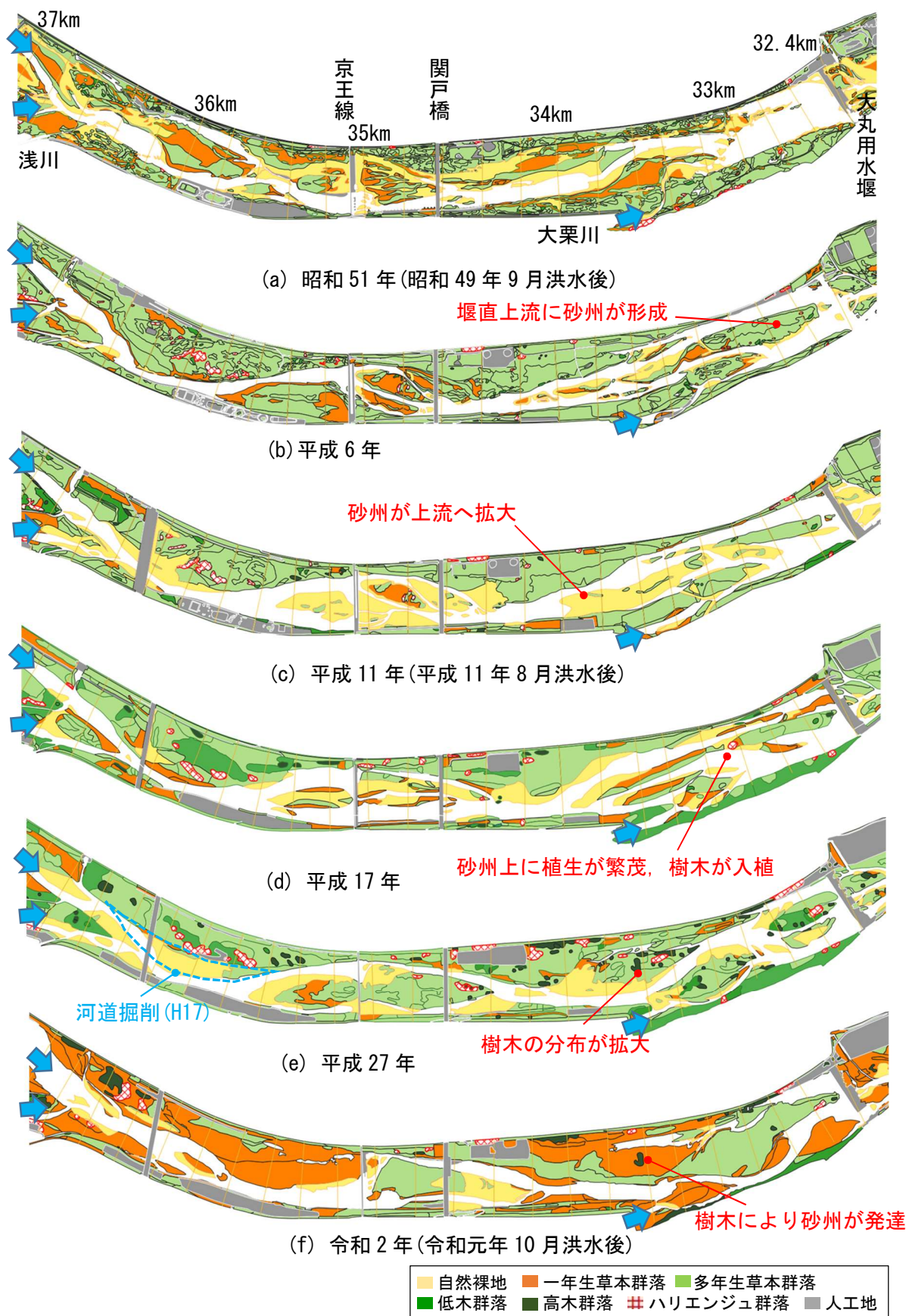


図3-55 浅川合流点下流区間における植生の経年変化(昭和51年～令和2年)

3-4-1 砂利採取、固定堰の建設による砂州河道の変化

浅川合流点下流区間についても前項 3-3 で示した合流点上流区間と同様に、**図 3-51 (a)**に示す昭和 22 年河道(昭和 22 年 9 月洪水後)では、広大な交互砂州河道が形成されている。京王線橋梁(35.1km)直上流には、河道中央に砂州(中州)が形成されており、低水路内に設置された多数の橋脚が流れと土砂移動を妨げることで、上流河道で土砂が堆積しやすい状況となっている。**図 3-51 (b)**より、昭和 30 年代の大量の砂利採取、大丸用水堰(32.4km、昭和 34 年竣工)の建設が行われ、また、浅川の合流位置が現在の位置(37.0km)に変更(昭和 31 年以前)されたことで、昭和 36 年河道では、大丸用水堰直上流に顕著な土砂の堆積(砂州の形成)はまだ見られないものの、砂州の移動に伴う澗筋の変化が生じている。**図 3-52**に示す低水路平均河床高の経年変化より、当該区間の昭和 49 年河道(昭和 49 年 9 月洪水前)の河床高は、砂利採取前の昭和 29 年河道と比べて 0.5~2.5m 程度低下しており、砂利採取の影響は大きい。**図 3-54**に示す低水路の横断形状の変化を見ると、昭和 49 年河道は砂利採取および大丸用水堰建設に伴う堰直上流の河道掘削により人工的に低水路(澗筋)が形成され、河道が複断面化している。

なお、**図 3-53**に示す最深河床高の経年変化より、当該区間の土丹高(図中の土丹高は、左右岸の堤防下のボーリング調査結果¹⁰⁾による土丹高の平均値を表示)は、澗筋の河床高と比べて十分低いため、砂利採取以降も低水路河床に土丹はほとんど露出していない。そのため、砂礫河床が維持されている当該区間は、土丹の露出した浅川合流点上流区間と比べて、低水路の河床低下や澗筋の固定化などが発生しづらいと言える。

3-4-2 浅川の河道の変化、多摩川本川への土砂流出

図 3-56は、浅川(9.0~0km)の低水路平均河床高の経年変化を示す。**図 3-56**より、急流河川(河床勾配 1/170~1/220)である浅川は、経年的に河床低下傾向にある⁴⁾²⁰⁾²¹⁾。これらの洪水に伴い洗掘された土砂が多摩川本川に供給されている。この浅川からの土砂流入と多摩川本川の上流河道から流下してくる土砂によって、**図 3-57**に示す浅川合流点より下流区間(37.2~32.6km)の土砂侵食・堆積量(洪水前後の横断測量結果より算定した概算値)を見ると、合流点下流河道では昭和 49 年~平成 19 年の間に発生した大規模洪水で 2~13 万 m³程度の土砂堆積が生じている。一方、既往最大洪水規模であった令和元年 10 月洪水では、浅川、多摩川本川ともに顕著な河床低下が生じた。

浅川も多摩川本川と同様に、横断構造物の下流等で低水路河床に土丹が露出している箇所があり、河床低下や構造物の安全性等の問題を引き起こしている⁴⁾²⁰⁾²¹⁾。そのため、浅川では、被災・老朽化した床固の改築(平成 13 年百草床固、平成 15 年長沼床固、平成 16 年西平川床固、平成 24 年平山床固)による低水路河床の是正²⁰⁾や、平成 21 年には低水路に配置した巨石による砂礫の捕捉効果を活かした河床高回復現地実験(4.2km、4.4km 地点)²¹⁾が行われており、浅川の土砂移動状況の改善が図られている。これらの改修により、浅川からの土砂供給は今後も期待されるものと考えられる。

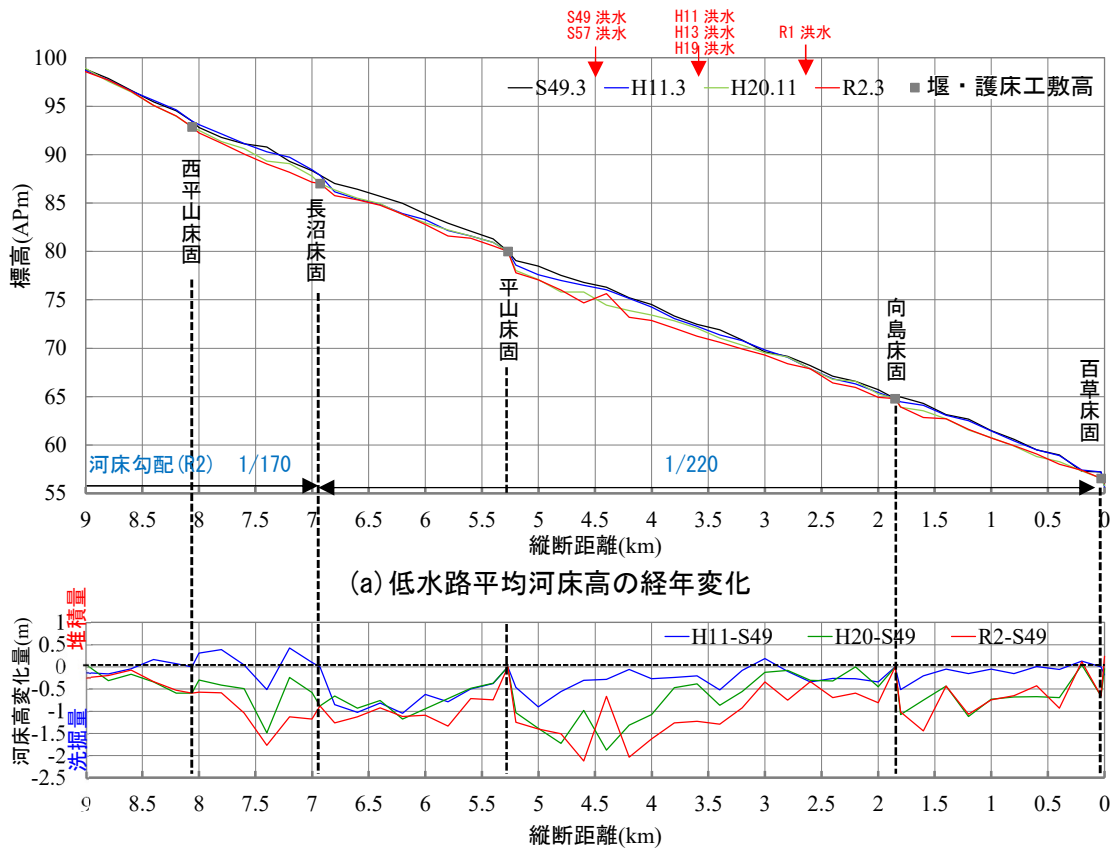


図3-56 浅川の低水路平均河床高，低水路平均河床高変化量の経年変化

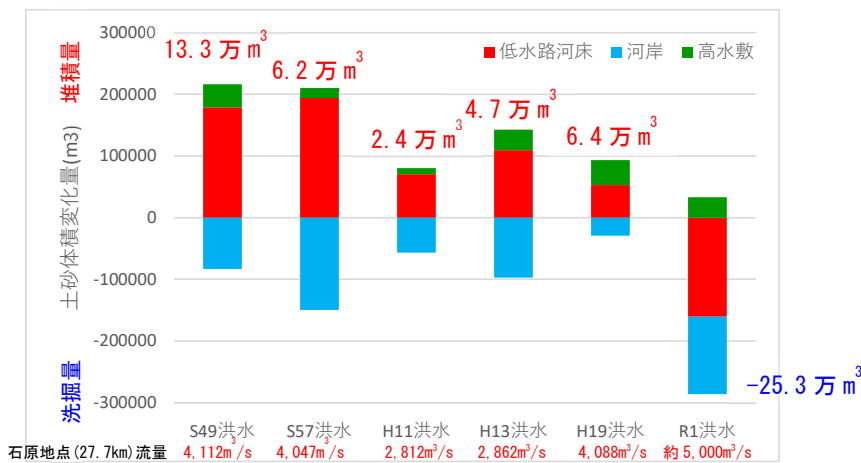


図3-57 各洪水による浅川合流点～大丸用水堰区間（37.2～32.6km）の土砂侵食・堆積量

3-4-3 浅川からの土砂流入, 橋梁, 固定堰による低水路内の砂州の発達, 河道の不安定化

図 3-52 に示す低水路平均河床高の経年変化より, 浅川合流点下流区間の低水路河床高の縦断形は, 昭和 49 年以降, 固定堰や橋脚護床工の敷高(図 3-52 に示す黒い点線)に規定され, 上昇し続けていることがわかる. 前項 3-3 で示した浅川合流点上流区間では, 横断構造物に規定され, 低水路河床が安定化する方向に河道が応答していたのに対して, 合流点下流の当該区間では, 浅川からの土砂供給に加えて固定堰等の横断構造物によって土砂移動を妨げられることで, 低水路内に大規模な砂州(中州)が発達し低水路河床が不安定化する方向に河道が応答している. この低水路が不安定化する要因について以下に分析考察する.

図 3-51 (c) に示す昭和 49 年河道(昭和 49 年 9 月洪水後)では, 昭和 49 年 9 月洪水(石原(27.7km)4,112m³/s)により, 大丸用水堰の固定堰によって妨げられた土砂が堰直上流に堆積し始めているものの, 区間全体では交互砂州の形態をまだ保っている. しかし, 図 3-51 (d) に示す昭和 57 年 8 月洪水後(石原 4,047m³/s)の昭和 59 年河道では, 固定堰直上流の低水路内に縦断的に連続した砂州(中州)が形成され始めたことで, 関戸橋~大丸用水堰区間(34.6~32.4km)では交互砂州河道が失われつつある. 図 3-54 (e) に示す横断図(32.6km : 大丸用水堰直上流)より, 固定堰直上流の昭和 58 年の砂州高は, 固定堰の天端高程度に達していることがわかる. これにより, 固定堰の高さに規定されて堰直上流に土砂が堆積し, 砂州が上流方向へ縦断的に拡大し始めたものと考えられる. 昭和 57 年 8 月洪水では, 河道中央に発達した砂州により, 大丸用水堰の左岸側に向かう直線的な滯筋が形成され, そこに洪水流が集中したことで堰左岸袖部の被災をもたらした.

その後, 図 3-51 (f)~(j) より, 平成 11 年以降に発生した大規模洪水に伴い, 当該区間に流入している土砂により, 低水路内の砂州が大丸用水堰からその上流の関戸橋付近(34.6km)まで連続するように広がっている. 砂州の拡大と滯筋の発達に伴い, 関戸橋付近から堰上流区間(34.6~32.6km)では, 砂州の形状や水衝部の位置が大きく変化している. このような砂州の波長や波高の拡大に伴う水衝部の位置の不規則な変化により, 洪水時の滯筋への流れの集中や偏流が, 洪水の度に構造物や河岸の被災をもたらしていると考えられる. 河岸の被災は, 平成 23 年 9 月洪水(石原 1,078m³/s)や平成 26 年 10 月洪水(石原 1,390m³/s)のような平均年最大流量(石原で 1,500m³/s 程度)以下の比較的小規模な洪水であっても, 水衝部となる河岸に洪水流が直接あたることで発生しており, 低水路が極めて不安定な状態となっている⁹⁾.

一方, 京王線橋梁(35.1km), 関戸橋(34.6km)の上流区間(35.6~34.6km)では, 図 3-51 (c)~(j) に示すように, 橋梁の上流に経年的に砂州(中州)が形成され, 昭和 49 年以降発生している洪水の度に, 砂州の形状の変化に伴って滯筋の位置も顕著に変化している. 京王線橋梁直上流(図 3-54 (a)), 関戸橋直上流(図 3-54 (b))の横断形状を見ると, 河道中央に形成された砂州の高さは, 昭和 49 年以降経年的に上昇しており, 平成 29 年には左右岸の高水敷の高さ程度にまで達している. 滯筋の位置は砂州の発達の影響を受け変化しているが, 滯筋の河床

高は橋梁の護床工程度で概ね維持されている。この橋梁の直上流に形成された比高差の大きい砂州が洪水の度に拡大・変化し、洪水時の滞筋への流れの集中や砂州と橋脚による偏流をもたらすため、図 3-58 に示すように京王線橋梁・関戸橋周辺も大丸用水堰上流区間と同様に河岸・高水敷の被災が頻発している。

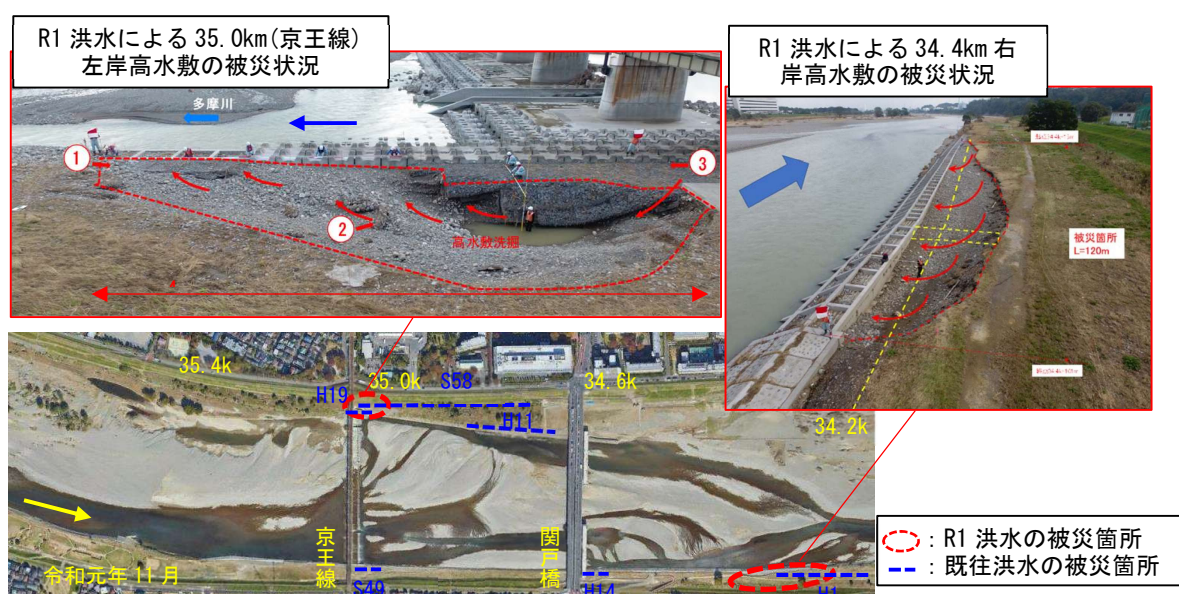


図 3-58 京王線橋梁・関戸橋周辺の被災状況

次に、当該区間の河道と植生の変化の相互関係について、低水路の不安定化との関係に着目して考察する。昭和 49 年 9 月洪水後の昭和 51 年河道(図 3-55 (a))では、区間全域で自然裸地(砂州)と一年生・多年生草本群落(オギ群落、ツルヨシ群落等)が横断的に遷移する多様な植生分布を呈しており、樹木群落はほとんど生育していない。昭和 57 年 8 月洪水以降、大丸用水堰の固定堰上流では低水路内に砂州が形成・拡大し始め、その後、長期間大規模洪水が発生していない平成 6 年河道(図 3-55 (b))では低水路内の砂州上に植生が繁茂している。固定堰直上流の砂州は、砂州高が高いため多年生草本群落(オギ群落、ツルヨシ群落等)が生育し、上流に行く程、砂州の高さがまだ相対的に低いため、一年生草本類や自然裸地へと縦断的に遷移している。

平成 11 年以降、大規模洪水が多く発生するようになり、平成 11 年 8 月洪水直後の平成 11 年河道(図 3-55 (c))では、低水路内の砂州上の植生のほとんどが洪水による攪乱を受け、自然裸地に遷移している。しかし、平成 17 年河道(図 3-55 (d))では固定堰直上流の砂州上に樹木(ヤナギ類、ハリエンジュ)が生育し始め、平成 27 年河道(図 3-55 (e))ではパッチ状の樹木群落の分布が急速に拡大しつつある。これは、砂州高の経年的な上昇に伴い砂州上に植生が繁茂し、それが洪水時の流速を低減させ、砂州上での土砂の捕捉・堆積を助長したことで、図 3-54 (c)～(e)に示す堰上流区間の横断形状の経年変化より、砂州が樹木の生育に適した

比高差(浅川合流点上流区間の砂州上の樹木の生育状況より 2.0m 程度以上)に発達したためと考えられる。令和2年河道(図 3-55(f))では、令和元年10月洪水により、砂州上の植生のほとんどが草本群落に遷移している。しかし、本洪水により、特に樹木が繁茂していた比高差の高い砂州では、砂州高(図 3-54(c)～(e))はさらに上昇しているため、今後、樹木が再繁茂し、これがさらなる砂州の発達とそれに伴う低水路の不安定化を助長する可能性がある。

以上のことから、低水路内の砂州(中州)の不安定な発達の主要因となっている大丸用水堰の改築の緊急性が高いことが明らかとなった。

3-5 低水路の安定化と船底形断面形の形成

3-3-4 節で示した高水敷化した砂州河岸の洗掘機構より、浅川合流点上流区間の低水路が安定化している区間においては、流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 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、砂州上を流下する洪水流により砂州河岸の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。本項では、低水路の安定化と「船底形断面形」の形成の関係について、(3-2)、(3-3)式の福岡²²⁾²³⁾²⁴⁾²⁵⁾の無次元流量と無次元河幅・水深の関係式(福岡の式)を用いて考察する。

$$2.8 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} \right)^{0.4} \leq \frac{B}{d_r} \leq 6.33 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} \right)^{0.4} \quad (3-2) \quad \frac{h}{d_r} \leq 0.14 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} \right)^{0.38} \quad (3-3)$$

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。安定な沖積地河川のデータを用いた次元解析手法から導かれた福岡の式(図 3-59)より、無次元河幅が上限式と下限式の間が存在する場合、河道形成流量を安全に流下させる安定な無次元河幅の範囲内にあるとされる。福岡の式を用いた既往の研究²²⁾²³⁾において、自然河川の河道形状である「船底形断面形(図 3-60)」について、無次元流量の変化に対する無次元河幅の関係が安定河道の関係を満たしており、「船底形断面形」があらゆる流量に対して安定な河幅を有している河道断面形であるという特徴が示されている²⁴⁾²⁵⁾。

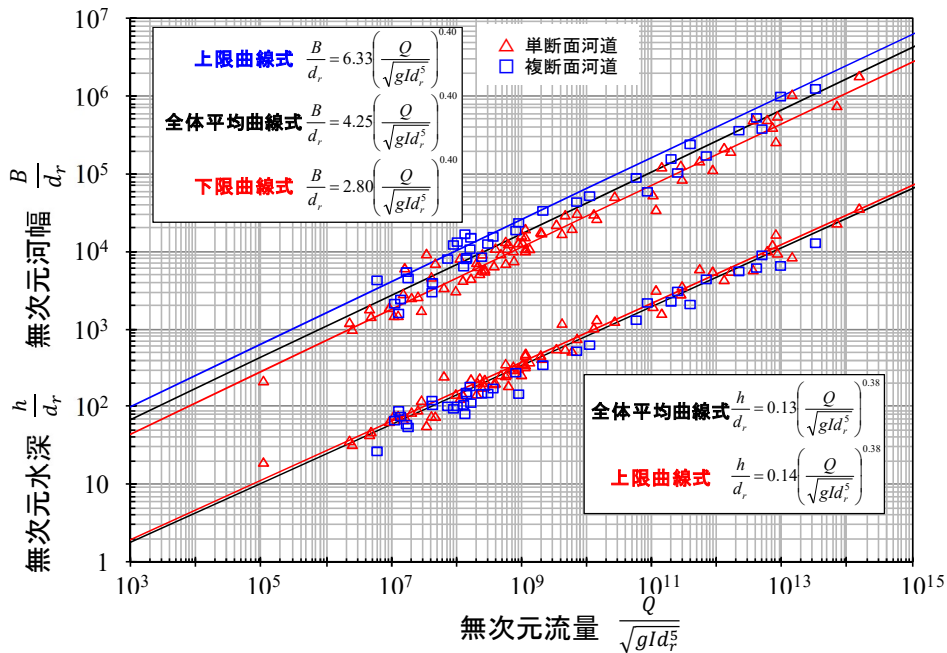


図 3-59 基本方針河道の無次元計画流量と無次元河幅、無次元水深の関係(福岡の式)²⁴⁾

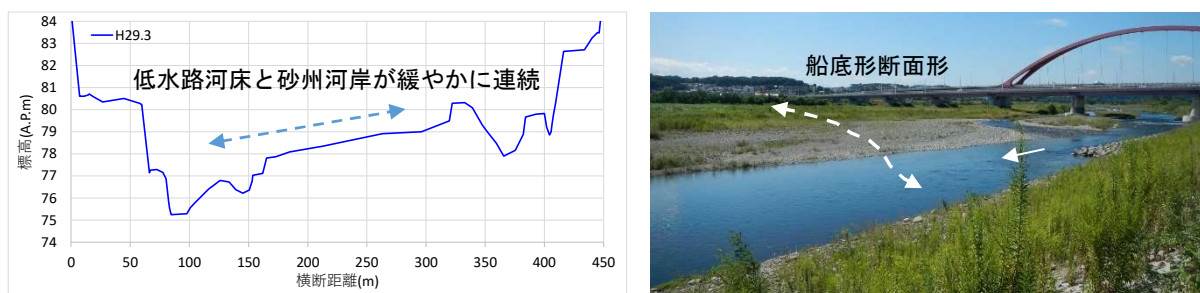


図 3-60 船底形断面形（多摩川 43.6km の横断図，現地の状況）

本項では，低水路の安定化によって低水路幅が回復している区間(42.0～40.4km)の河道断面形が「船底形断面形」に近づくように変化していることを明らかにする．また，「船底形断面形」の実洪水に対する安定性を評価するため，河川改修によって「船底形断面形」に整備された区間(44.0～43.4km：図 3-60)³⁾について，計画高水流量を超える規模の令和元年 10 月洪水に対して「船底形断面形」を維持しているかを分析する．ここでは，「船底形断面形」を形成しているかを判断するための指標として，福岡の式を用いて，対象区間の河道断面形が，無次元流量の増加とともに無次元河幅が福岡の式に平行するように変化する「船底形断面形」の特徴²⁴⁾²⁵⁾が顕われているかを分析するものとした．分析にあたり，代表粒径 d_r は平成 30 年調査結果の当該区間内の平均粒径の 60%粒径(0.034m)，勾配 I はエネルギー勾配(解析結果)を用いた．

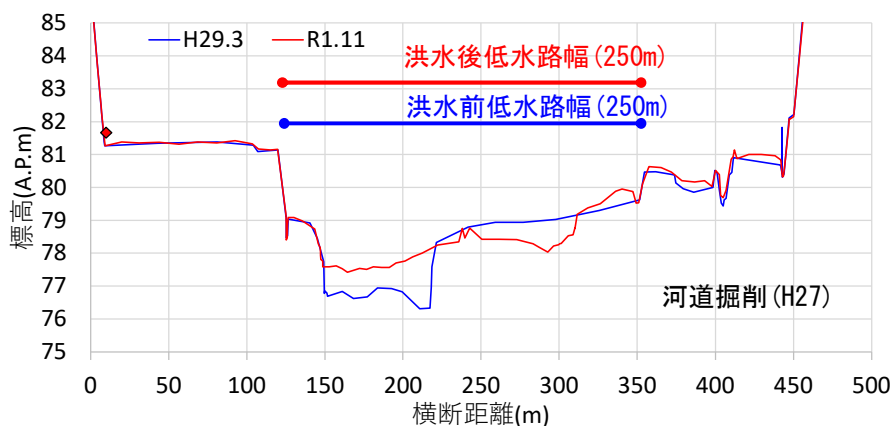
図 3-61 は，河川改修により「船底形断面形」に整備された多摩大橋周辺地区の河道断面(43.8km)，令和元年 10 月洪水で高水敷化した砂州河岸の洗掘(低水路幅の拡大)が生じた JR 中央線上下流区間の河道断面(40.4km，41.6km)における令和元年 10 月洪水前後の横断形状，低水路幅の変化，図 3-62 は，同断面における令和元年 10 月洪水前後の河道に対して洪水流解析を行った結果から求めた，無次元流量と無次元河幅・水深の関係を示す．図 3-61 (a) より，「船底形断面形」に改修された河道断面(43.8km)では，令和元年 10 月洪水に対して低水路幅が維持されているのが分かる．これは，前節で示した昭和 40 年代以降，経年的に維持されている低水路幅(200～250m 程度)と同程度の十分な低水路幅が確保されているためと考えられ，河川改修の効果が顕われている．これにより，「船底形断面形」の河道断面形もほぼ維持されている．図 3-62 (a) より，同河道断面の無次元流量と無次元河幅の関係は，洪水前後で大きな変化はなく，平均式から上限式の間で安定な河幅の領域内にプロットされ，無次元流量の増加に応じて無次元河幅は福岡の式に概ね平行して変化しており，洪水前後で「船底形断面形」の特徴は維持されているのが分かる．また，無次元流量と無次元水深の関係も，福岡の式を下回る安定な水深の領域を福岡の式に平行して推移している．

図 3-61 (b) より，JR 中央線下流区間の河道断面(40.4km)では，令和元年 10 月洪水によって高水敷化した砂州河岸が洗掘され，低水路幅が洪水前の 2 倍の 200m 程度となり，昭和

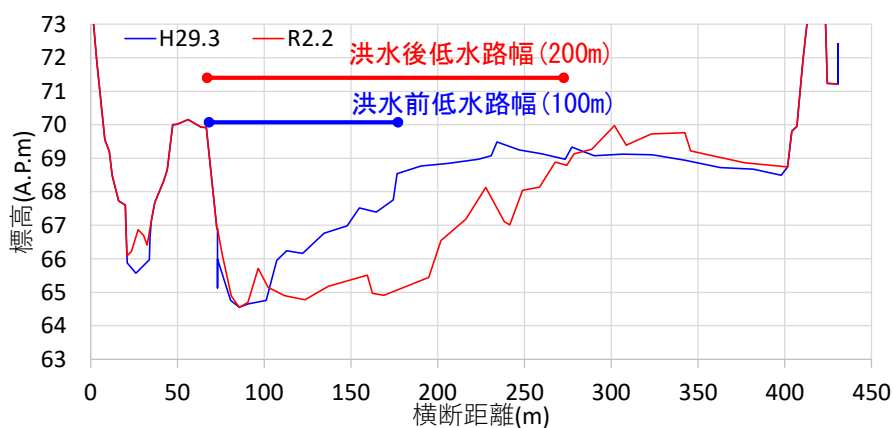
40 年代の安定な低水路幅(200~250m 程度)相当の十分な幅に広がっている。これにより、砂州河岸の断面形に低水路河床と砂州が連続する「船底形断面形」の特徴が顕われているのが分かる。図 3-62 (b) より、同河道断面の無次元流量と無次元河幅の関係は、洪水前の河道は無次元流量の増加に対して無次元河幅が急変する傾向が見られたが、洪水後の河道では安定な低水路幅の領域に収まるようになり、無次元流量の増加に応じて無次元河幅が福岡の式に平行して変化する「船底形断面形」の特徴が顕われている。そして、無次元流量と無次元水深の関係も、洪水後河道では福岡の式に対してより平行の関係を維持して、安定な水深の領域を推移するようになった。

一方、図 3-61 (c) より、JR 中央線上流区間の河道断面(41.6km)では、令和元年 10 月洪水によって低水路幅は広がっているものの、切り立った砂州河岸の形状を維持している。そのため、図 3-62 (c) より、同河道断面の無次元流量と無次元河幅の関係は、洪水前後で大きく変化しておらず、平均式から下限式の間と比較的水面幅の小さい領域内にプロットされており、無次元流量の増加に対して無次元河幅が急変する傾向が見られることから、「船底形断面形」の特徴は顕われていない。この要因として、図 3-63 の令和元年 10 月洪水前後の航空写真に示すように、JR 中央線下流区間(40.8~40.4km)では、右岸側の砂州河岸付近の樹木の分布がまばらであるのに比べて、JR 中央線上流区間(42.0~41.4km)では、左岸側の砂州河岸付近の樹木の分布は局所的ではあるものの、河岸に沿って縦断的に連続しているのが分かる。このため、JR 中央線上流区間では、図 3-61 (a) に示すように、砂州上の樹木によって砂州河岸の洗掘が抑制されたことで、低水路幅(130m 程度)が十分に広がらなかったものと考えられる。これは「船底形断面形」の形成に、昭和 40 年代頃の低水路幅程度(200~250m 程度)を目安とした十分な低水路幅が必要であることを示唆するものである。

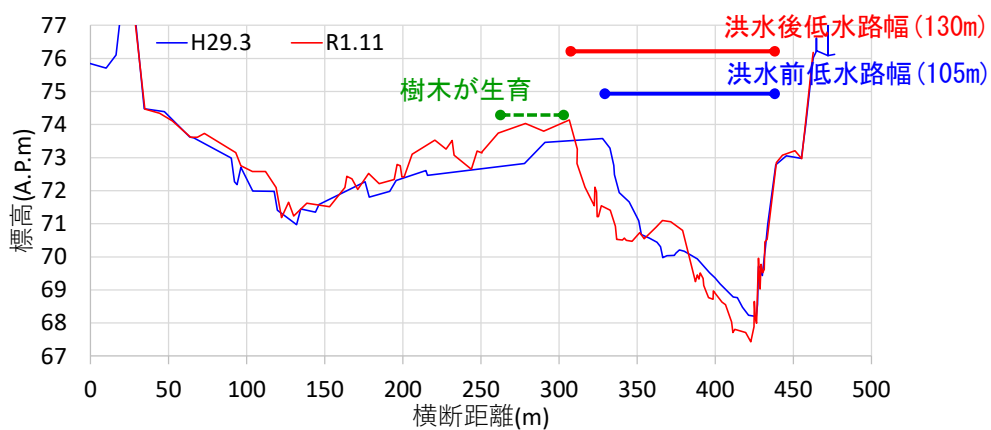
以上のことから、低水路河床が安定した砂州河道では、洪水規模に応じて低水路幅が安定な幅(当該区間では昭和 40 年代頃の低水路幅)に近付くように広がっていき、砂州河岸と低水路河床が横断的に連続する砂州が形成するのに十分な低水路幅に達すると、「船底形断面形」を形成し得ることを示した。そして、「船底形断面形」を形成した河道では、計画高水流量規模の令和元年 10 月洪水に対しても、その低水路幅及び低水路断面形をほぼ維持しており、「船底形断面形」が安定性の高い河道断面形であることを顕している。一方、JR 中央線上流区間では、洪水によって高水敷化した砂州河岸の洗掘が生じているものの、砂州河岸付近に生育する樹木により河岸洗掘が抑制されるため、「船底形断面形」が形成されるのに十分な低水路幅まで広がりきれていない。そのため、JR 中央線上流区間(42.0~41.4km)の砂州河岸付近の樹木を伐採することは、砂州河岸の洗掘に伴う低水路幅の回復を促し、「船底形断面形」の形成により低水路の安定性を高める対策として有効と考えられる。



(a) 43.8km(河川改修により船底形断面河道に整備された断面)

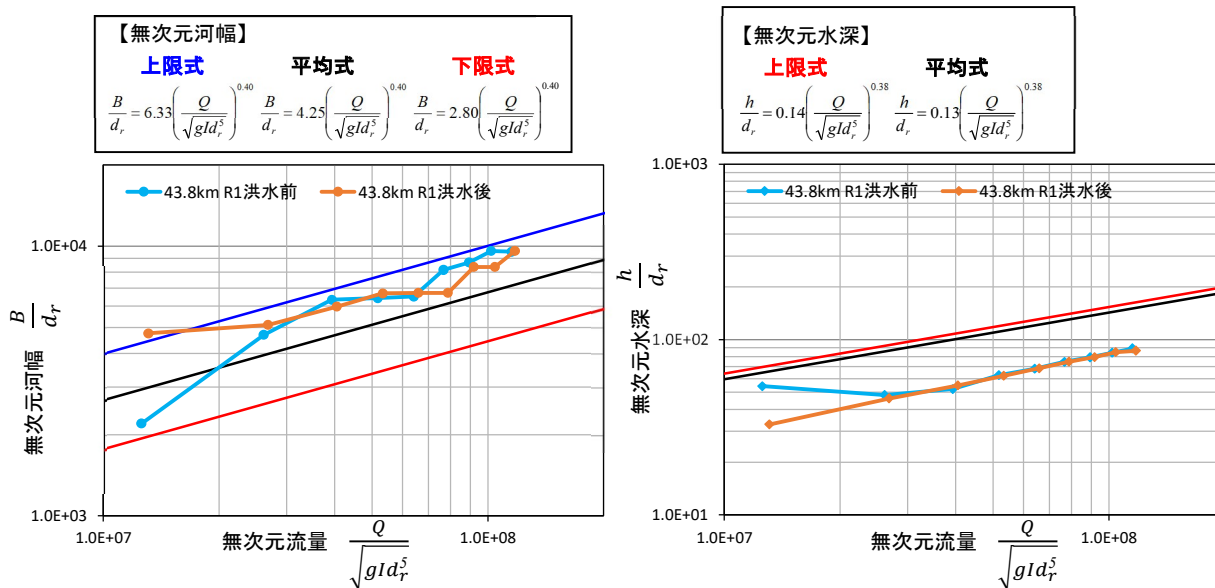


(b) 40.4km (令和元年 10 月洪水で砂州河岸の洗掘が生じた断面)

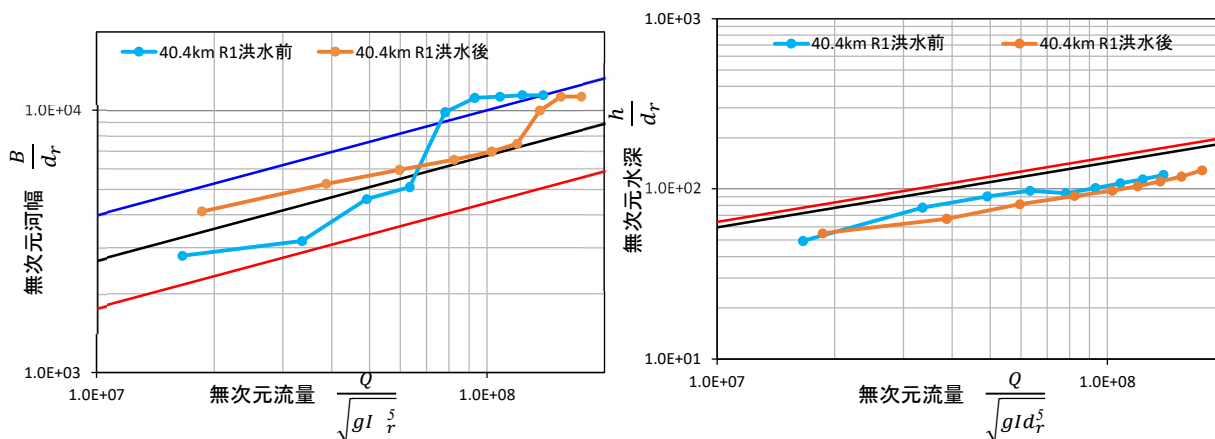


(c) 41.6km (令和元年 10 月洪水で砂州河岸の洗掘が生じた断面)

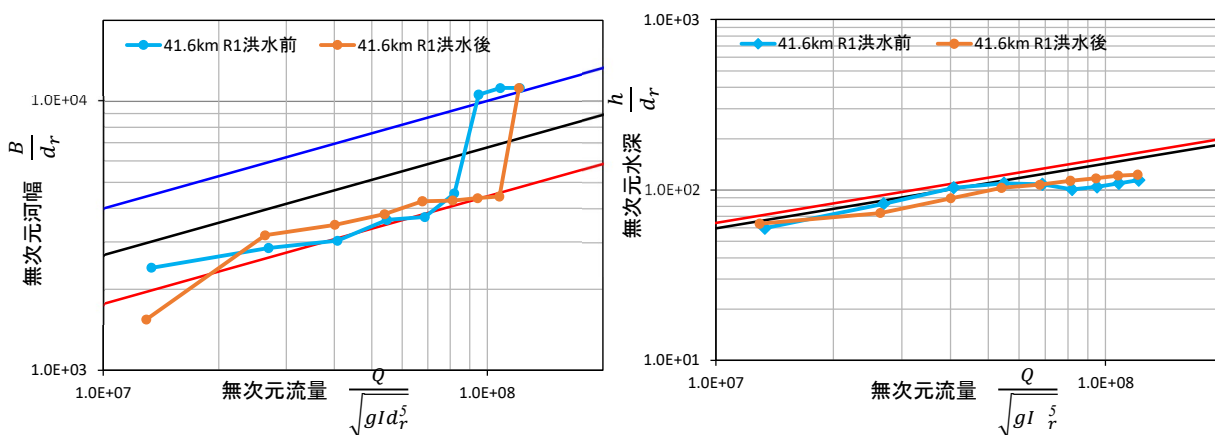
図 3-61 令和元年 10 月洪水前後の横断形状, 低水路幅の変化



(a) 43.8km(河川改修により船底形断面河道に整備された断面)



(b) 40.4km (令和元年10月洪水で砂州河岸の洗掘が生じた断面)



(c) 41.6km (令和元年10月洪水で砂州河岸の洗掘が生じた断面)

図3-62 令和元年10月洪水前後河道における無次元流量と無次元河幅・水深の関係(解析結果)



(a) 令和元年 10 月洪水前 (平成 30 年 4 月)



(b) 令和元年 10 月洪水後 (令和元年 11 月)

図 3-63 令和元年 10 月洪水前後の JR 中央線上下流区間の状況

3-6 第3章のまとめ

本章では、多摩川中流部(日野用水堰～大丸用水堰)を対象に、過去74年間(昭和22年～令和2年)の実測データを用いて、これまでの河川改修や洪水等に対する河道の長期的変化、河道と植生の変化の相互関係、それらを踏まえた低水路の安定・不安定化の機構、低水路の安定化と「船底形断面形」の関係について分析を行った。以下に明らかとなったことを示す。

浅川合流点より上流区間(45.2～37.0km)では、平成11年以降、大規模洪水の頻発化とともに、これまでの河川改修による効果が顕われ始め、低水路河床高がほぼ維持されるようになり、低水路幅の拡大に伴い昭和40年代の砂州河道に戻るように変化していることが明らかとなった。この低水路の安定化の機構について以下に示す。

JR中央線上流～四谷本宿堰区間(42.2～38.2km)では、日野橋(39.9km)、JR中央線(41.35km)の橋梁付近に護床工が設置されており、その上流の低水路河床高が護床工の敷高程度に達することで、河床低下が抑制されるようになった。さらに、四谷本宿堰(38.2km)は、平成13年9月洪水で被災したため、堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築されたことで、河道の流下能力、土砂移動が改善された。これにより、当該区間の低水路河床高は、ほぼ一定間隔で設置された堰や横断構造物の護床工の敷高に規定され、河床高の縦断形がほぼ維持されている。そして、低水路河床高が維持されることで、平成11年以降の洪水規模の増大によって、高水敷化した砂州河岸の洗掘が促され、洗掘土砂が河床へ供給されることで、低水路幅の拡大とともに低水路が安定していることが明らかとなった。また、低水路河床と砂州河岸の比高差の安定は、洪水による砂州河床の攪乱を適度な頻度でもたらし、比高差2.0m程度以下の砂州上では新たな樹木群落の定着・拡大が抑制され、そこにはオギ原等の草本群落の生育場が動的に保たれていることが分かった。

一方、JR八高線～多摩大橋区間(44.8～43.8km)では、多摩大橋の護床工(昭和61年設置)がJR八高線の護床工(昭和42年以前設置)と比べて設置年度が遅く、2つの護床工の敷高の高低差が大きくなっており、それらの敷高に規定されて河床勾配が相対的に急勾配となっていたため、河床低下が継続していた。このため、平成26～28年に、多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、砂礫による河床の埋戻しと高水敷化した砂州の掘削(船底形断面河道整備)、連続的な帯工群の設置等の河川改修が行われた。その結果、その後の令和元年10月洪水では、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ることが分かった。

このような低水路河床縦断形の維持機構によって低水路幅が拡大している区間(42.4～40.4km)では、流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度が低水路満杯流量となり、それを超えると高水敷化した砂州河岸が冠水し始め、砂州河岸付近に高速流が発生することで、砂州河岸の洗掘により低水路の拡幅を促している。このことから、平成11年以降の $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える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年代の低水路幅に近づくように変化していることが明らかとなった。さらに、低水路幅の回復に伴い、低水路の河

道断面形が安定な断面形に近づくとつれて、「船底形断面形」を呈するようになることを示した。

次に、浅川合流点下流区間(37.0～32.4km)における低水路の不安定化の要因について示す。当該区間では、その下流端に固定堰部が6割を占める大丸用水堰(32.4km)、その上流には河積阻害の大きい京王線橋梁(35.1km)が存在し、それらが上流河道及び浅川からの流入土砂の流下を妨げるため、それら横断構造物の直上流に土砂が堆積し、大規模な砂州(中州)を形成している。大丸用水堰上流の砂州は、その高さが固定堰部の高い敷高に規定されて上昇し、さらに堰右岸側の可動堰部の上流で滞筋が発達することで、砂州の比高差が経年的に増大している。砂州の比高差の拡大は、砂州上に植生を繁茂させ、それらが洪水時の流速を低減、砂州上の土砂の捕捉・堆積を助長する。それにより、比高差がさらに上昇した砂州上では樹木が繁茂し始め、洪水時の中州の自然な移動を妨げている。このように大丸用水堰は、敷高の高い固定堰部が広いために、洪水の流下能力が低いことに加え、低水路内に発達した砂州の不規則な形状による洪水時の滞筋への流れの集中や偏流、それに伴う水衝部位置の変化が護岸や河岸侵食被災をもたらしており、大丸用水堰の改築の緊急性が高いことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：多摩川水系河川整備計画，2001.
- 2) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所企画，新多摩川誌編集委員会編著：新多摩川誌，2001.
- 3) 小澤太郎，福島陽介，海津義和，後藤岳久，福岡捷二：多摩川上流部における治水と環境が調和した総合的な河道管理，河川技術論文集，第19巻，pp.471-476，2013.
- 4) 米沢拓繁，福岡捷二，鈴木重隆：水衝部の河床表層材料と河床洗掘の関係の調査研究，河川技術論文集，第13巻，pp.345-350，2007.
- 5) 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化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.
- 6) 大浪裕之，下條康之，後藤勝洋，福岡捷二：令和元年洪水被災分析と土丹が露出する河道条件下における河川横断工作物の保全対策，河川技術論文集，第27巻，pp.129-134，2021.
- 7) 国土交通省関東地方整備局：第3回多摩川河川整備計画有識者会議，2022.
- 8) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：台風第19号 令和元年10月11日～13日出水概要 一多摩川，鶴見川，相模川一，2019.
- 9) 瀬尾敬介，米沢拓繁，荒木茂，福岡捷二：台風18号の小洪水がもたらした河岸災害の教訓と維持管理の必要性，河川技術論文集，第21巻，pp.265-270，2015.
- 10) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：第2回多摩川・浅川河道管理検討会，2013.
- 11) 下條康之，石川武彦，福岡捷二：多摩川水系における河川横断構造物の予防保全に向けての具体的検討，河川技術論文集，第17巻，pp.329-334，2011.
- 12) 佐久間清和，澁谷慎一，福岡捷二：2019年台風19号洪水に対する「改良型袋詰玉石工」の洗掘防止効果，河川技術論文集，第26巻，pp.413-418，2020.
- 13) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：第7回多摩川・浅川河道管理検討会，2020.
- 14) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：多摩川河川環境管理計画，2001.
- 15) 財団法人河川環境管理財団：多摩川河川環境管理計画報告書，1980.
- 16) 後藤勝洋，柏木才助，塩井直彦，池田有希：多摩川の河川環境管理に関する研究，リバーフロント研究所報告，第27号，pp.1-9，2016.
- 17) 財団法人河川環境管理財団，河川環境総合研究所：河道特性に及ぼす粘性土・軟岩の影響と河川技術，河川環境総合研究所資料，第29号，2010.
- 18) 国土交通省北海道開発局，国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：岩盤河床における河床低下危険度評価の手引き(案)，2017.
- 19) 李参熙，藤田光一，塚原隆夫，渡辺敏，山本晃一，望月達也：礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割，水工学論文集，第42巻，pp.433-438，1998.
- 20) 平塚真理子，佐々木智之，福島陽介，福岡捷二：平山床固改築及びその下流部の河道整

- 正による河川整備効果, 河川技術論文集, 第19巻, pp.111-116, 2013.
- 21) 遠山和広, 米沢拓繁, 福岡捷二: 多摩川水系浅川における河床高回復現地実験による効果の検証, 河川技術論文集, 第22巻, pp.205-210, 2016.
 - 22) 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.
 - 23) 福岡捷二: 治水と環境の調和した治水適応策としての河幅, 断面形の検討方法, 河川技術論文集, 第16巻, pp.5-10, 2010.
 - 24) 福岡捷二, 坂口達哉: 無次元流量に対する無次元河幅・水深のとり範囲と整備途上河川への適用, 水工学論文集, 第56巻, pp.1423-1428, 2012.
 - 25) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二: 複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第20巻, pp.277-282, 2014.

第4章 浅川合流点上流区間の低水路安定化の機構を用いた合流点下流区間の河道改修技術

4-1 概説

第3章では、浅川合流点上流区間(日野用水堰～浅川合流点：45.2～37.0km)において、改築した堰や低水路護床工、帯工などの横断構造物の敷高に規定され、低水路河床高の縦断形が維持されるようになり、それにより、大規模洪水に伴い高水敷化した砂州河岸の洗掘(低水路幅の拡大)が促されることで、低水路が安定化することを明らかにした。一方で、浅川合流点下流区間(浅川合流点～大丸用水堰：37.0～32.4km 区間)では、低水路河床高の縦断形が河積阻害の大きい京王線橋梁の護床工や大丸用水堰の固定堰の敷高に規定され、それらの横断構造物の上流で砂州(中州)が発達し、さらに砂州上に繁茂した植生や樹木が洪水時に土砂を捕捉することで、低水路に大規模で不規則な砂州が形成され、それが洪水時の滯筋への流れの集中や偏流、それに伴う構造物や河岸の被災をもたらしていることを明らかにした。本章では、浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を活用し、合流点下流区間の低水路の安定化を図るための対策として、大丸用水堰の敷高を切り下げて床止め工に改築して低水路河床の縦断形を是正し、河道の流下能力と土砂移動を改善する河道改修技術について検討した。多摩川中流部の橋梁や堰等の横断構造物周辺の流れと土砂移動を精度良く解析可能な非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法を用いて、令和元年10月洪水を外力とした解析を行い、堰改築による浅川合流点下流区間の安定化の効果と周辺河道への影響を評価した。

4-2項では、大丸用水堰の改築による浅川合流点下流区間の低水路の安定化の考え方について示す。4-3項では、非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法を示し、令和元年10月洪水の再現解析を行い、解析結果の再現性を確認する。そして、4-4項では、本解析法を用いて、大丸用水堰の改築による浅川合流点下流区間の低水路の安定化の効果について評価する。

4-2 大丸用水堰の改築による浅川合流点下流区間の低水路の安定化の考え方

第3章での分析結果より，浅川合流点下流区間(37.0～32.4km：図4-1)では，浅川からの土砂流入と土砂移動を阻害する大丸用水堰の固定堰の存在により，図4-2に示すように，経年的な低水路河床高の上昇，低水路内の砂州(中州)，濘筋の不規則な発達，砂州上の樹木の繁茂による低水路の不安定化がもたらされており，堰の改築の緊急性が高いことが明らかとなった．一方，浅川合流点上流区間(45.2～37.0km)では，計画的に設置・改築されてきた堰や低水路護床工，帯工によって低水路河床高の縦断形が規定され，それが低水路の安定に寄与している．この浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を活用し，浅川合流点下流区間の河道の流下能力，土砂移動状況を改善し，低水路の安定化を図るため，大丸用水堰を切下げて床止め工に改築する対策を技術的に検討する．



図4-1 浅川合流点下流区間の現況河道

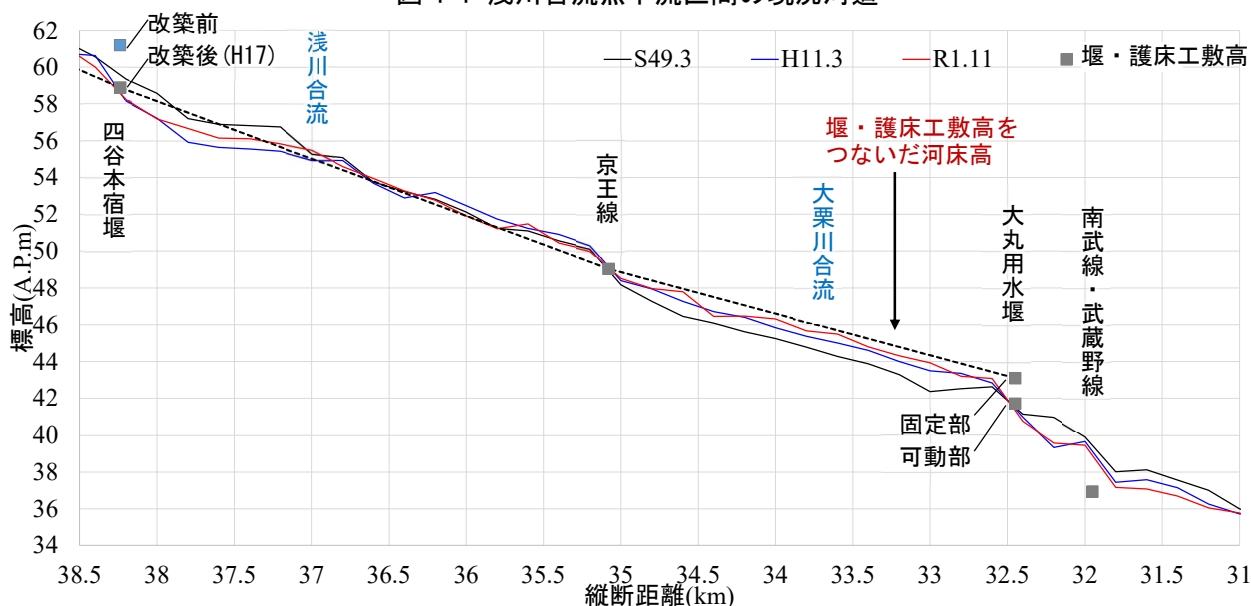
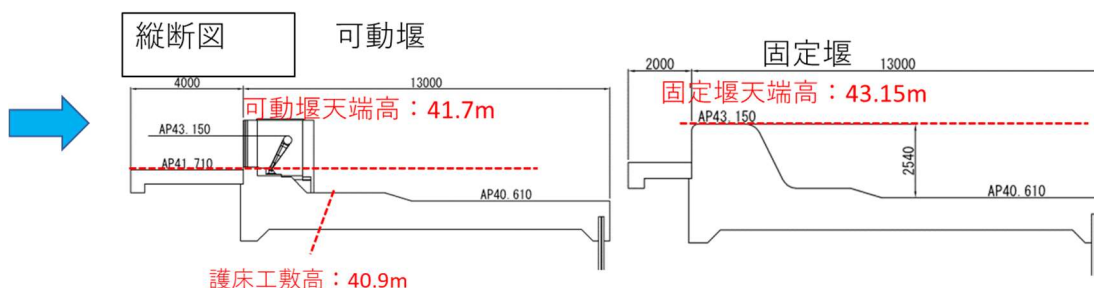


図4-2 浅川合流点下流区間の低水路平均河床高縦断分布

図 4-3 は、現状の大丸用水堰の構造諸元(平面図・縦断図)、図 4-4 は、改築後の同堰(床止め工)の構造諸元、図 4-5 は、低水路平均河床高縦断分布の比較、図 4-6 は、現況河道と堰改築後河道の河床高コンターの比較を示す。浅川合流点下流区間の河道の流下能力と土砂移動状況を改善するため、図 4-3 に示す現状の大丸用水堰の固定部の天端高(43.15 A.P.m)、可動部の天端高(41.7 A.P.m)を切り下げて、図 4-4 に示すように、堰全面を床止め工に改築する。床止め工の敷高は、計画高水流量に対して流下能力を満足すること、低水路河床が長期的に安定することを条件として設定する。そのため、浅川合流点上流区間の低水路河床縦断形が堰・護床工等の横断構造物の敷高に規定されて安定していることを踏まえ、床止め工の敷高についても同様の考え方にに基づき、適切な低水路河床縦断形を設定し、それを改修・維持管理の目標とするものとした。具体的には、図 4-5 に示すように、堰上流の京王線橋梁(35.1km)の護床工の敷高(49.05A.P.m)と、堰下流の低水路河床高が経年的に安定している 31km 付近の低水路平均河床高(36.0A.P.m)をつないだ低水路河床縦断形を改修目標として、その低水路河床縦断形を維持できるように、大丸用水堰地点(32.4km)における河床高を改築後の床止め工の敷高(40.7A.P.m)として設定した。その結果、現状の固定堰の敷高を 2.4m 程度切下げるものとした。堰の改築に合わせて、堤外水路を整備して取水機能を確保するものとし、安定的な取水を可能とするため、堰の 1km 程度上流の 33.3km 付近右岸を取水口として、その付近に帯工を低水路河床縦断形が連続するように設置(敷高 43.3A.P.m)することで、取水時の水位を確保するとともに、堰の切下げに伴う横流河道の河床低下を抑制する。また、河岸侵食が顕著であった右岸側の侵食対策として高水敷(横断幅 50m 程度)を造成する。そして、図 4-5、図 4-6 に示すとおり、堰改築後河道では、現況河道において流れの抵抗となり、低水路の不安定化の要因となっている比高の高い砂州(中州)を切下げて、京王線橋梁～大丸用水堰区間(35.1～32.4km)の低水路河床縦横断形が連続するように是正するものとした。

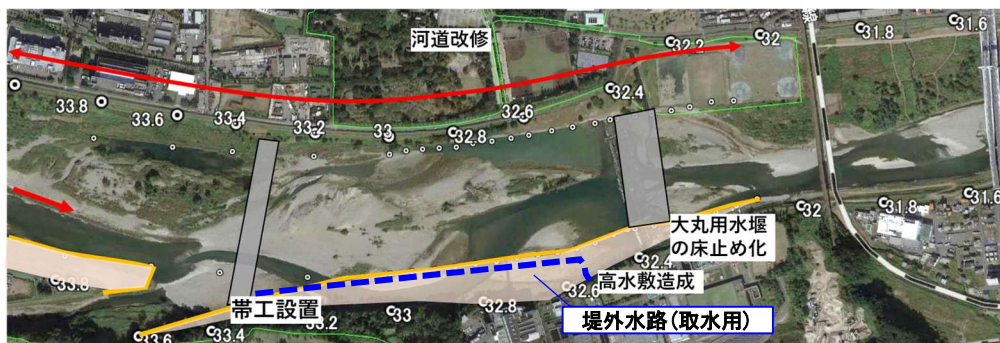


(a) 平面図

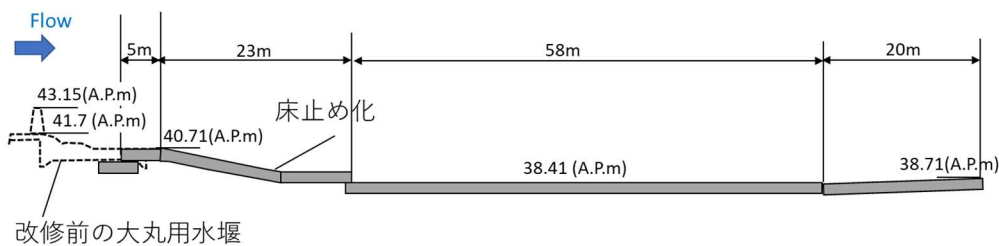


(b) 縦断面図

図 4-3 現状の大丸用水堰の構造諸元



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図 4-4 改築後の大丸用水堰(床止め工)の構造諸元

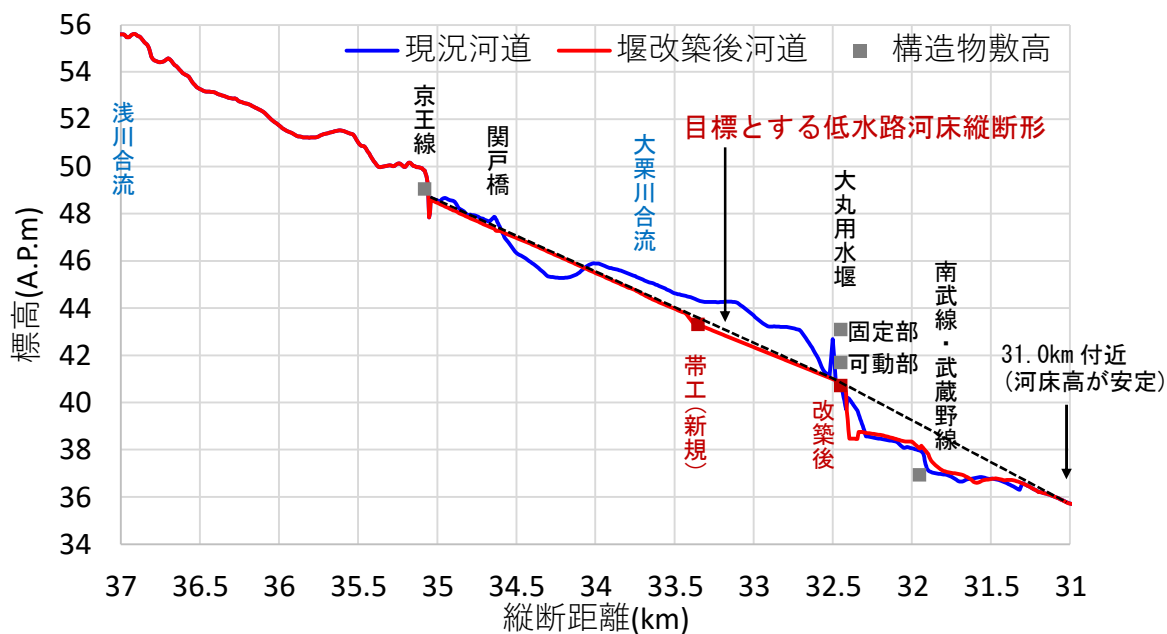


図 4-5 現況河道と堰改築後河道の低水路平均河床高縦断分布

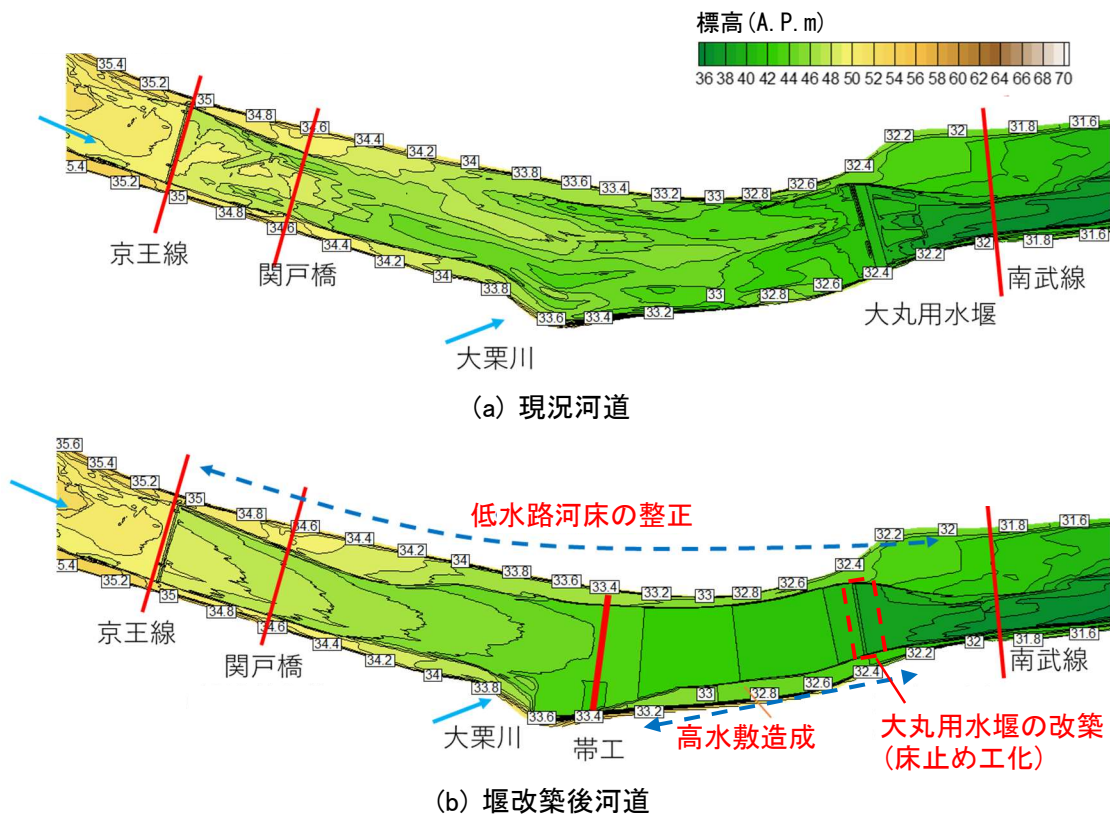


図 4-6 現況河道と堰改築後河道の河床高コンター

4-3 非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法

4-3-1 準三次元洪水流解析法と非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法

図 4-7, 図 4-8 に, 本研究で用いる解析法のフローチャートと枠組みを示す. 本研究では, 橋梁や堰等の横断構造物が複数設置された多摩川中流部の流れと土砂移動を精度良く解析するため, 水深積分の枠組みで三次元流れを再現できる, 竹村ら¹⁾による準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS 法)を用いる. この解析法では, 流速鉛直分布を式(4-1)で示す三次式で仮定し, 水深平均流速に加え, 水面流速・底面流速を解析することで, 三次元流れを解析する. 流れの乱流成分については, エネルギーの鉛直分布を式(4-2)で示す 3 次式と仮定し, 水深平均の乱れエネルギー K に加え, 水面での乱れエネルギー k_s , 底面での乱れエネルギー k_b を解き, 乱れの 3 次元性を計算する(図 4-8(a)).

河床変動解析法については, 掃流砂・浮遊砂のそれぞれの粒子の運動方程式と連続式を解くことにより, 掃流砂と浮遊砂を一体的に計算する, 非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法²⁾を用いる. 掃流砂運動の解析には, 粒子の跳躍運動に基づいて定式化された長田・福岡の解析法³⁾⁴⁾⁵⁾を用いる. 浮遊砂の解析には, 流れの乱れ成分による粒子の運動を計算し, 掃流砂から浮遊砂への遷移過程と浮遊砂から河床への堆積過程を考慮した非平衡流砂運動をモデル化した長谷部ら⁶⁾による解析法を用いる(図 4-8(b)). 以下に準三次元洪水流解析法と非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法について示す.

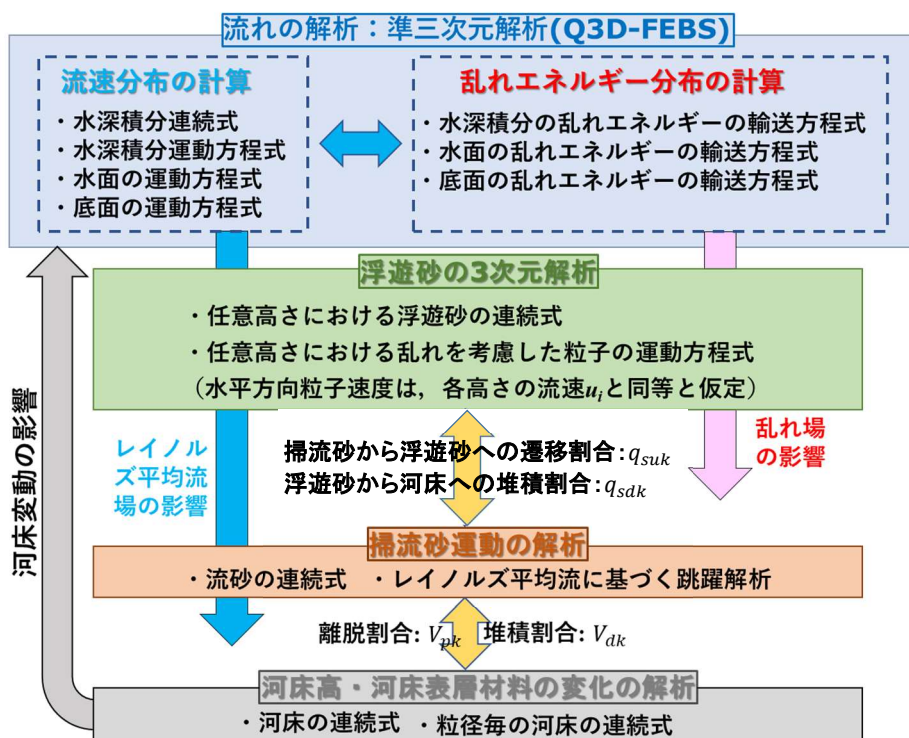
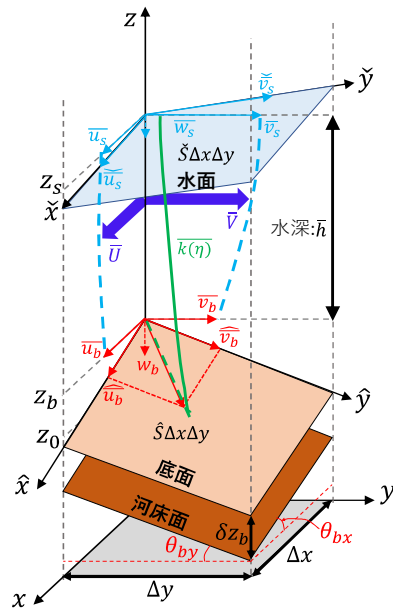
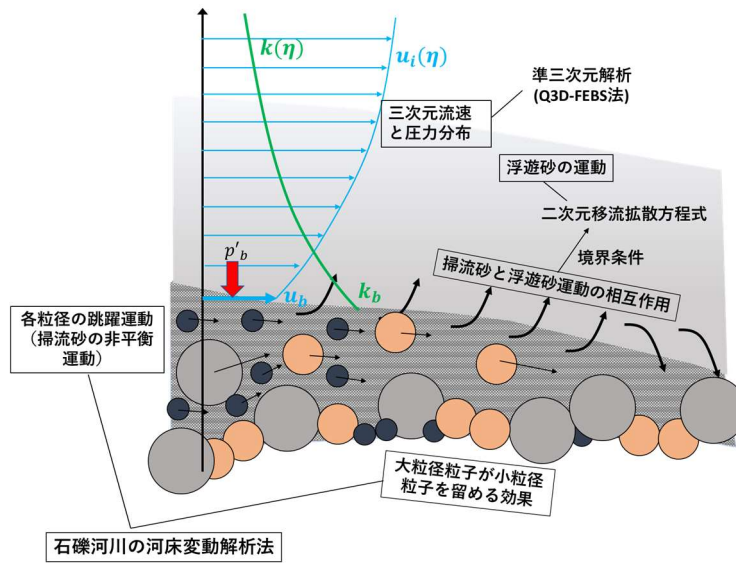


図 4-7 本解析法のフローチャート



(a) 座標系と流速・乱れエネルギーの鉛直分布の定義



(b) 河床変動解析法の枠組み

図 4-8 本解析法の枠組み

(1) 準三次元洪水流解析法 (Q3D-FEBS 法)

流速と乱れエネルギーの鉛直分布の定義式

$$u_i(\eta) = U_i + \Delta u_i(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta u_i(4\eta^3 - 3\eta^2) \quad (4-1)$$

$$k(\eta) = K + \Delta k(12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + \delta k(-4\eta^3 + 3\eta^2) \quad (4-2)$$

ここに, $i, j=1, 2$ (x, y 方向), $u_i(\eta)$: 任意高さの i 方向流速, $\Delta u_i = u_{si} - U_i$, $\delta u_i = u_{si} -$

$u_{bi}, \eta = (z_s - z)/h$, U_i : i 方向水深平均流速, u_{si} : i 方向水面流速, u_{bi} : i 方向底面流速, h : 水深, z_s : 水位, $\Delta k = k_s - K$, $\delta k = k_s - k_b$ である.

デカルト座標系 (x, y, z, t) におけるレイノルズ平均された連続式(式(4-3))と3次元運動方程式(式(4-4))をシグマ座標系 (x^*, y^*, η, t^*) に変換することで, 水深積分連続式・運動方程式に加え, 水面と底面での運動方程式を導出している.

デカルト座標系におけるレイノルズ方程式

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4-3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4-4)$$

$$\tau_{ij} = -2\rho\nu_t s_{ij}, \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4-5)$$

デカルト座標系 (x, y, z, t) をシグマ座標系 (x^*, y^*, η, t^*) への変換は, 式(4-6)から式(4-8)を用いて行われる.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial t^*} \frac{\partial t^*}{\partial t} + \left(\frac{\partial z_s}{\partial t^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial t^*} \right) \frac{1}{h} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \quad (4-6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_i} = \frac{\partial \phi}{\partial x_i^*} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_i^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i^*} \right) \frac{1}{h} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \quad (4-7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{1}{h} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \quad (4-8)$$

シグマ座標系 (x^*, y^*, η, t^*) に変換された連続式と三次元運動方程式を式(4-9)から式(4-11)に示す.

シグマ座標系におけるレイノルズ方程式

$$\frac{\partial u h}{\partial x^*} + \frac{\partial v h}{\partial y^*} + h \frac{\partial w_\eta}{\partial \eta} + \frac{\partial h}{\partial t^*} = 0 \quad (4-9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_i}{\partial t^*} + u \frac{\partial u_i}{\partial x^*} + v \frac{\partial u_i}{\partial y^*} + w_\eta \frac{\partial u_i}{\partial \eta} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i^*} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_i^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i^*} \right) \frac{1}{h} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ix}}{\partial x^*} + \left(\frac{\partial z_s}{\partial x^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial x^*} \right) \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{ix}}{\partial \eta} \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{iy}}{\partial y^*} + \left(\frac{\partial z_s}{\partial y^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial y^*} \right) \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{iy}}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{iz}}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (4-10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t^*} + u \frac{\partial w}{\partial x^*} + v \frac{\partial w}{\partial y^*} + w_\eta \frac{\partial w}{\partial \eta} \quad (4-11)$$

$$= -g + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{iz}}{\partial x^*} + \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_i^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i^*} \right) \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{iz}}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial \eta}$$

$$w_\eta = \frac{1}{h} \left[\left(\frac{\partial z_s}{\partial t^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial t^*} \right) + \bar{u} \left(\frac{\partial z_s}{\partial x^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial x^*} \right) + \bar{v} \left(\frac{\partial z_s}{\partial y^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial y^*} \right) - w \right] \quad (4-12)$$

式(4-13)に示すデカルト座標系 (x, y, z, t) の乱れエネルギーの輸送方程式についても、式(4-14)のようにシグマ座標系 (x^*, y^*, η, t^*) に変換する。

デカルト座標系における乱れエネルギーの輸送方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P_k - \epsilon + \frac{\partial F_{ki}}{\partial x_j} \quad (4-13)$$

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, F_{ki} = \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i}, \epsilon = C_d \frac{k^{3/2}}{l}$$

シグマ座標系における乱れエネルギーの輸送方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t^*} + u \frac{\partial k}{\partial x^*} + v \frac{\partial k}{\partial y^*} + w_\eta \frac{\partial k}{\partial \eta} = P_k - \epsilon + \frac{\partial F_{ki}}{\partial x_i^*} + \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_i^*} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i^*} \right) \frac{1}{h} \frac{\partial F_{ki}}{\partial \eta} - \frac{1}{h} \frac{\partial F_{kz}}{\partial \eta} \quad (4-14)$$

$$F_{ki} = \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i^*}, F_{kz} = -\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{1}{h} \frac{\partial k}{\partial \eta} \quad (4-15)$$

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} + \tau_{zi} \left(\frac{\partial w}{\partial x_i^*} - \frac{1}{h} \frac{\partial u_i}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{zz}}{h} \frac{\partial w}{\partial \eta} \quad (4-16)$$

ここに、 k は乱れエネルギーであり、 l は乱れスケールである。

水深積分された連続式、運動方程式は、式(4-9)、式(4-10)を水深積分することにより、式(4-17)、式(4-18)のように得られる。運動方程式には、水深平均流速からの偏差成分による運動量交換の水深平均値の項が式(4-19)で考慮されている。

水深積分連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (4-17)$$

水深積分運動方程式

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}' h}{\partial x_i} - \frac{p'_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h T_{ij}}{\partial x_j} \quad (4-18)$$

$$\begin{aligned} T_{ij} &= -\rho \overline{u'_i u'_j} - 2\rho \nu_t S_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad u'_i = u_i - U_i \\ \overline{u'_i u'_j} &= \int_0^1 u'_i u'_j d\eta = \frac{13}{35} \Delta u_i \Delta u_j - \frac{2}{35} (\Delta u_i \delta u_j + \Delta u_j \delta u_i) + \frac{3}{35} \delta u_j \delta u_i \end{aligned} \quad (4-19)$$

ここで、 \bar{p}' は圧力の非静水圧成分の水深平均値、 p'_b は底面での圧力の非静水圧成分、 ρ : 密度、 g : 重力加速度、 τ_{bi} : 底面に作用するせん断応力、 ν_t : 渦動粘性係数の水深平均値である。

水面での水平方向の運動方程式は、式(4-10)を $\eta=0$ とすることで導出される (式(4-20)).

水面の水平方向運動方程式($\eta=0$)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} &= -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial z_s}{\partial x_i} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \Big|_s + \frac{\nu_{ts}}{\rho} \frac{\partial^2 u_{si}}{\partial z^2} \Big|_s \\ \frac{\partial^2 u_i}{\partial \eta^2} \Big|_s &= 24 \Delta u_i - 6 \delta u_i, \quad \nu_{ts} = l_d \sqrt{k_s} \end{aligned} \quad (4-20)$$

ここで、 ν_{ts} は水面での渦動粘性係数である。

水面での圧力の非静水圧成分の鉛直勾配 $\frac{\partial p'}{\partial \eta} \Big|_s$ は、水面での鉛直方向の運動方程式より、移流項・水平せん断力項を無視すると式(4-21)から計算される。

水面の鉛直方向運動方程式($\eta=0$)

$$\frac{1}{\rho h} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \Big|_s = u_{sj} \frac{\partial w_s}{\partial x_j} \quad (4-21)$$

同様に、底面での水平方向の運動方程式は、同様に式(4-10)を $\eta=1$ とすることで導出される (式(4-22)).

底面の水平方向運動方程式($\eta=1$)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} &= -g \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'_b}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \Big|_b + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{bi} - \tau_{oi}}{\delta z_b}, \quad \delta z_b = c_{zb} h, c_{zb} = 0.03 \\ \frac{\tau_{bi}}{\rho} &= -\frac{\nu_{tb}}{h} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \eta} \Big|_b, \quad \nu_{tb} = l_d \sqrt{k_b}, \quad l_d = 0.07h \end{aligned} \quad (4-22)$$

ここで、 ν_{tb} は底面での渦動粘性係数である。

底面での圧力の非静水圧成分の鉛直勾配 $\frac{\partial p'}{\partial \eta} \Big|_b$ は、底面での鉛直方向の運動方程式より、非定常項・水平せん断力項を無視することで式(4-23)から計算される。

底面の鉛直方向運動方程式($\eta=1$)

$$\frac{1}{\rho h} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \Big|_b = u_{bj} \frac{\partial w_b}{\partial x_j} \quad (4-23)$$

また、式(4-22)における底面でのせん断力の鉛直勾配項は、底面流速の高さに作用するせん断力 τ_{bi} と河床面に作用するせん断力 τ_{0i} を用いて算定する。河床面に作用するせん断力 τ_{0i} は底面流速と摩擦係数を用いて式(4-24)で表す。

$$\frac{\tau_{0i}}{\rho} = c_b^2 u_{bi} |u_b| \quad (4-24)$$

ここで、等流状態を仮定すると流速鉛直分布は式(4-25)で表せることから、摩擦係数 c_b はマンニングの粗度係数を用いて式(4-26)で表せる。

$$\frac{u-U}{\sqrt{\widehat{\tau}_b}/\rho} = \frac{1}{\kappa} (1-3\eta^2), \quad \widehat{\tau}_b = \frac{\hat{\tau}_0}{1+C_{zb}} \quad (4-25)$$

$$c_b = \frac{C_0}{1-2C_0/\kappa} \sqrt{1+c_{zb}}, \quad C_0 = \sqrt{gn^2/h^{1/3}} \quad (4-26)$$

水深積分の鉛直方向の運動方程式

底面における圧力の非静水圧成分は、水深積分された鉛直方向の運動方程式(式(4-27))より求める。ここで、式(4-27)の運動方程式では非定常項・水平せん断力項を省略している。

$$\frac{p'_b}{\rho} = \frac{\partial W U_j h}{\partial x_j} + \hat{S} \frac{\widehat{\tau}_{bz}}{\rho} \quad (4-27)$$

$$\frac{\bar{p}'}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{p'_b}{\rho} + \frac{U_i h}{12} \frac{\partial \delta w}{\partial x_i} \quad (4-28)$$

水深平均の鉛直方向流速は、任意高さの連続式(式(4-29))を水深積分した式(4-30)より求める。

$$w_\eta = w_{\sigma\eta} + u_k \left(\frac{\partial z}{\partial x_k} \right) \Big|_\eta, \quad w_{\sigma\eta} = \frac{\partial z_b}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\int_{z_b}^{z\eta} u_k dz \right) \quad (4-29)$$

$$W h = h \left(\frac{\partial z_m}{\partial t} + U_k \frac{\partial z_m}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ h^2 \left(\frac{\Delta u_k h}{10} + \frac{\delta u_k h}{20} \right) \right\} \quad (4-30)$$

水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式

水深積分された乱れエネルギーの輸送方程式は、式(4-14)を水深積分することによって得られる(式(4-31))。ここで、乱れの生産項 P_k と拡散項は式(4-2)で示した乱れエネルギーの鉛直分布を用いて、式(4-32)、式(4-33)により算定する。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + U_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = P_k - C_d \frac{K^{3/2}}{l_d} + \frac{v_t}{h \sigma_k} \frac{\partial^2 K}{\partial x_j^2} + \frac{1}{h^2} \frac{v_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial k_b}{\partial \eta} \quad (4-31)$$

$$P_k = 0.5h\nu_t \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{12}{15h^2} (2\Delta u_i \Delta u_i - 7\delta u_i \Delta u_i + 8\delta u_i \delta u_i) \right\} \quad (4-32)$$

$$\frac{\partial k_b}{\partial \eta} = 12\Delta k - 6\delta k, \quad C_d = 0.1, \quad l_d = 0.07h \quad (4-33)$$

水面の乱れエネルギーの輸送方程式

水面での乱れエネルギーの輸送方程式は式(4-14)を $\eta=0$ とすることで得られ (式(4-34)), 右辺第 3 項における水面での乱れエネルギーの鉛直勾配は, 式(4-2)で定義した乱れエネルギーの鉛直分布を用いて式(4-35)から算定する.

$$\frac{\partial k_s}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial k_s}{\partial x_j} = -C_{ds} \frac{k_s^{3/2}}{l_{ds}} + \frac{v_{ts}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k_s}{\partial x_j^2} + \frac{1}{h^2} \frac{v_{ts}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k_s}{\partial \eta^2} \quad (4-34)$$

$$\frac{\partial^2 k}{\partial \eta^2} \Big|_s = 24\Delta k - 6\delta k, \quad C_{ds} = 0.1, \quad l_{ds} = 0.07h \quad (4-35)$$

底面の乱れエネルギーの輸送方程式

底面での乱れエネルギーの輸送方程式も同様に, 式(4-14)を $\eta=1$ とすることで得られ(式(4-36)), 右辺第 4 項における底面での乱れエネルギーの鉛直勾配は, 式(4-2)で定義した乱れエネルギーの鉛直分布を用いて式(4-37)から算定し, 底面での乱れの生産項は, 河床面に作用するせん断応力 τ_{oi} と底面での流速鉛直勾配を用いて式(4-38)のように表す.

$$\frac{\partial k_b}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial k_b}{\partial x_j} = P_{kb} - C_{db} \frac{k_b^{3/2}}{l_{db}} + \frac{v_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k_b}{\partial x_j^2} + \frac{\hat{S}}{h^2} \frac{v_{tb}}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k}{\partial \eta^2} \Big|_b \quad (4-36)$$

$$\frac{\partial^2 k}{\partial \eta^2} \Big|_b = 48\Delta k - 12\delta k \quad (4-37)$$

$$P_{kb} \approx \hat{S} \tau_{oi} \frac{\partial u_i}{\partial z} \Big|_b, \quad C_{db} = 0.06, \quad l_{db} = 0.032h \quad (4-38)$$

(2) 非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法

掃流砂の解析方法

斜面に沿う方向の掃流砂量 \hat{q}_{bik} は, 単位面積当たりの掃流砂体積 V_{bk} と斜面に沿う i 方向の粒子の平均移動速度 \hat{u}_{pik} との積で表せられるものと定義する(式(4-39)).

$$\hat{q}_{bik} = V_{bk} \hat{u}_{pik} / \cos \theta_{bj} \quad (4-39)$$

ここで, k は粒径階である. 砂粒子の平均移動速度 \hat{u}_{pik} は, 長田・福岡の解析方法³⁾⁴⁾⁵⁾と同様に, 準三次元解析から求まる三次元流況と各計算格子で定義される河床勾配を条件として, 砂粒子の跳躍解析に関する 3 次元運動方程式 (式(4-40)) を計算して求める.

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial \hat{u}_{pik}}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d_k^2 (\hat{u}_{bi} - \hat{u}_{pik}) |\hat{\mathbf{u}}_b - \hat{\mathbf{u}}_{pk}| - A_3(\rho_s - \rho) g_i d_k^3 \quad (4-40)$$

$$\hat{u}_{pik} = \frac{1}{T_{sal}} \int_0^{T_{sal}} \hat{u}_{pik} dt, T_{sal} = 10.0(s) \quad (4-41)$$

ここに、 $i=1,2,3$ (x,y,z 方向), A_3, A_2 は 3 次元, 2 次元の形状係数($= \pi/6, \pi/4$), $\rho_s(=2.65)$ は砂粒子の密度, $C_M(= 0.5)$ は付加質量係数, d_k は粒径, \hat{u}_{pik} は跳躍解析における砂粒子の移動速度の瞬間値, $C_D(= 0.4)$ は抗力係数, g_i は重力加速度である. T_{sal} は粒子の平均移動速度を求める際に平均化する時間である(式(4-41)). また, 跳躍解析における移動粒子と河床面との衝突の際に用いる反発係数は, $e=0.7$ を用いている.

単位面積当たりの掃流砂体積 V_{bk} は, 式(4-42)に示す掃流砂に関する連続式から計算する. この連続式には, 河床の砂粒子が単位面積・単位時間当たりに離脱する量 V_{pk} と単位面積・単位時間当たりに河床に堆積する量 V_{dk} に加え, 単位面積・単位時間当たりに掃流砂から浮遊砂に遷移する量 q_{suk} を考慮することで, 掃流砂量の時空間変化が浮遊砂への遷移量に反映され, 掃流砂と浮遊砂を一体的に解析する. なお, 本解析では, 浮遊砂から掃流砂へ直接的に遷移させずに, 後述の式(4-45)のとおり, 沈降した浮遊砂は一旦河床に堆積するものとして取り扱った.

$$\frac{\partial V_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bjk}}{\partial x_j} = (V_{pk} - V_{dk} - q_{suk}) \hat{S} \quad (4-42)$$

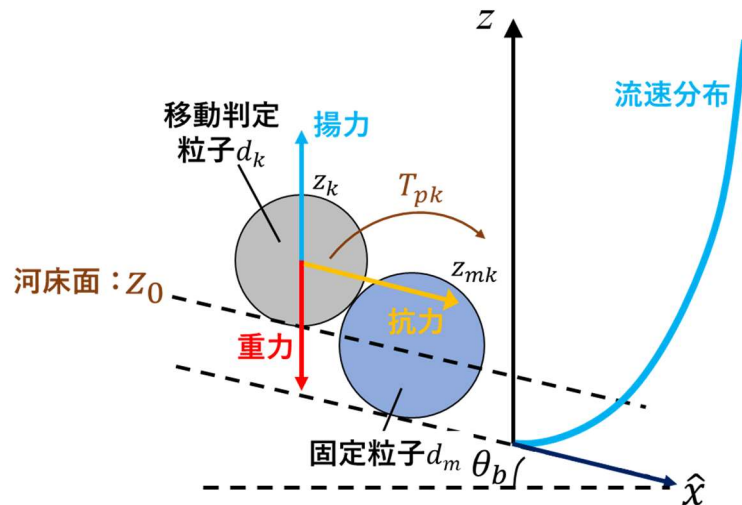


図 4-9 離脱時間の算定方法

砂粒子の単位面積・単位時間当たりの河床からの離脱量 V_{pk} および単位面積・単位時間当たりの河床への堆積量 V_{dk} についても, 長田・福岡の解析方法³⁾⁴⁾⁵⁾と同様に計算しており, 離脱量 V_{pk} については, 図 4-9 に示すように, 離脱判定対象の粒子が, 流体力によって固定粒子を乗り越えるまでの時間 T_{pk} を計算し, 式(4-43)より評価する.

$$V_{pk} = \varepsilon_p \left(\frac{p_k}{A_2 d_k^2} \right) \left(\frac{A_3 d_k^3}{T_{pk}} \right), \varepsilon_p = 0.01 \quad (4-43)$$

ここで, p_k は粒径階 k の河床表層の存在割合である.

砂粒子の単位面積・単位時間当たりの河床への堆積量 V_{dk} については、移動している粒子が停止するまでの平均時間 T_k を用いて式(4-44)より評価する.

$$V_{dk} = V_{bk}/T_k \tag{4-44}$$

各粒径の平均停止時間 T_k は、砂粒子の跳躍解析を試行回数回(=80 回)行い、粒子が停止するまでの平均的な距離と粒子速度から求める.

格子平均の河床高の時間変化は、式(4-45)で表される河床の連続式より計算され、各粒径の河床表層での存在割合は、各粒径集団に対する河床の連続式(式(4-46))より計算される.

ここで、 q_{sak} は浮遊砂の河床への堆積量、 p_{k0} は河床表層下の粒度の存在割合、 d_m は平均粒径である.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{A_2 \hat{S}}{A_3} \sum_{k=1}^{kmax} (V_{pk} - V_{dk} - q_{sak}) \tag{4-45}$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial t} = -\frac{A_2 \hat{S}}{A_3 d_m} (V_{pk} - V_{dk} - q_{sak}) - p'_k \frac{A_2 \hat{S}}{A_3 d_m} \sum_{k=1}^{kmax} (V_{pk} - V_{dk} - q_{sak}) \tag{4-46}$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} > 0, p'_k = p_k, \quad \frac{\partial z_b}{\partial t} \leq 0, p'_k = p_{k0}$$

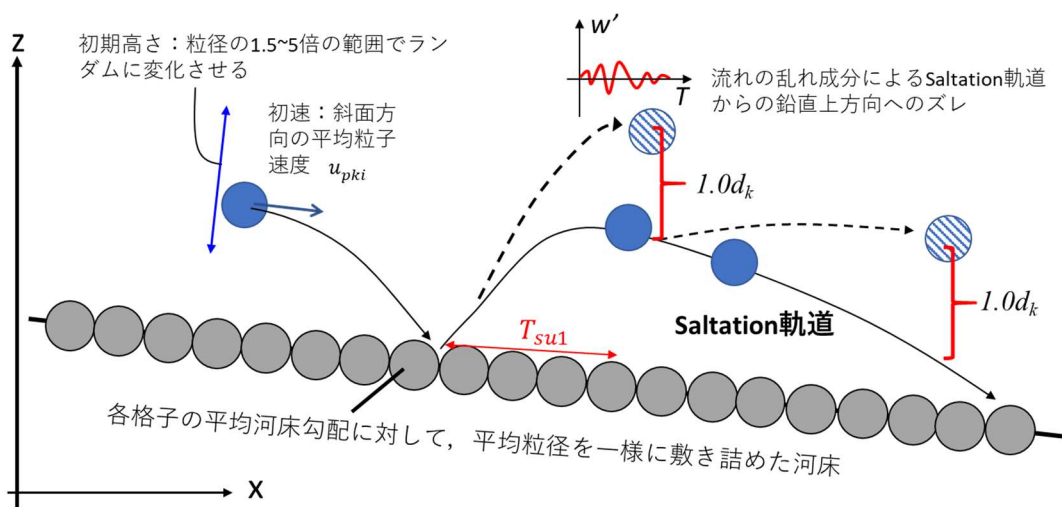


図 4-10 本解析法における掃流砂から浮遊砂への遷移割合の評価方法

掃流砂から浮遊砂への遷移割合の評価方法

浮遊砂の運動は流れの乱れ成分の影響を大きく受け、粒子がランダム的な挙動を伴いながら流速に追従している状態と定義されている. 従って本解析では、掃流砂が浮遊砂に遷移する量 q_{suk} を、図 4-10 に示すように、跳躍運動(掃流運動)状態の粒子が流れの乱れ成分により、ランダム的な挙動を伴って上向き方向に輸送される単位時間当たりの個数割合を計算することで評価する(式(4-47)).

$$q_{suk} = \frac{N_{suk}}{N_{max} T_{suk}} V_{bk} \quad (4-47)$$

ここで、 N_{suk} はランダムな挙動を伴って上向き方向に輸送された粒子の個数、 N_{max} は試行回数、 T_{suk} は粒子が浮上するまでに要した時間である。

具体の計算方法として、本解析では、まず、底面付近での流れの乱れ成分を考慮した跳躍解析(式(4-48))と、レイノルズ平均流場のみを考慮した一般的な跳躍解析(式(4-40))を同時に試行回数回行う。そして、レイノルズ平均流場のみを考慮した跳躍解析の各粒径粒子の最大跳躍高さに対して、流れの乱れ成分を考慮した跳躍解析の方が粒径の 1.0 倍以上高い位置まで浮上した状態を浮遊砂状態になったものと見なし、その個数 N_{su} を数えた。 T_{su} は上記の判定高さに達するまでに要する時間である。

式(4-48)は、流れの乱れ成分を考慮した跳躍解析の運動方程式である。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial \hat{u}_{ptki}}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d_k^2 (\hat{u}_{bi} + \hat{u}'_{bi} - \hat{u}_{ptki}) |\hat{\mathbf{u}}_b + \hat{\mathbf{u}}'_b - \hat{\mathbf{u}}_{ptk}| - A_3(\rho_s - \rho) g_i d_k^3 \quad (4-48)$$

ここで流れの乱れ成分 \hat{u}'_{bi} は、図 4-11 に示すように、平均値 $\mu = \hat{u}_{bi}$ 、分散 $\sigma^2 = \overline{u'_{bi} u'_{bi}}$ の正規乱数 $N(\mu, \sigma)$ で与え、分散 ($\sigma^2 = \overline{u'_{bi} u'_{bi}}$) は乱れ強度であるので、乱れの等方性を仮定して底面での乱れエネルギーを用いて式(4-49)で評価する。

$$\overline{u'_{bi} u'_{bj}} = \frac{2}{3} k_b \quad (4-49)$$

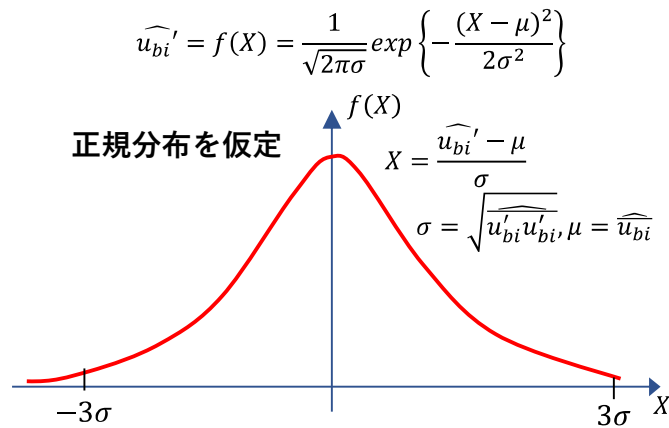


図 4-11 本解析法における乱れの定義

上記の跳躍解析を行う際の粒子の初速度は、式(4-40)で求めた粒子の平均移動速度 \hat{u}_{pik} とし、粒子の初期高さは粒径の 1.0~3.0 倍の範囲でランダムに設定した。また、試行回数 N_{max} は 100 回とした。

また、単位面積・単位時間あたりに浮遊砂が河床に堆積する量 q_{sdk} は、各粒径の沈降速度

w_{sk} と浮遊砂領域での最下層の浮遊砂濃度 C_{sb} との積で表現する(式(4-50)). ここで, 本検討では浮遊砂の鉛直分布を簡易的に直線分布と仮定し, 最下層の浮遊砂濃度 C_{sbk} を水深平均の浮遊砂濃度 C_{sak} の2倍とした.

$$q_{sdk} = w_{sk} C_{sbk} \quad (4-50)$$

浮遊砂の挙動は式(4-51)に示す水深積分の浮遊砂濃度の移流方程式により計算する.

$$\frac{\partial C_{sak} h}{\partial t} + \frac{\partial C_{sak} U_j h}{\partial x_j} = q_{suk} - q_{sdk} \quad (4-51)$$

4-3-2 解析条件

解析法の再現性を確認するため、令和元年 10 月洪水の再現計算を行う。表 4-1 は解析条件、図 4-12 は解析対象範囲及び作成した解析格子を示す。解析対象範囲は、対象区間(日野用水堰～大丸用水堰:45.2~32.4km)をカバーすること、上下流の境界条件として適切なデータが取得されている水位観測点を設定することを考慮して、上流端は拝島橋(46km)、下流端は二ヶ領上河原堰上流(26km)までとした。上流端境界条件には、45km に設置された簡易水位計の観測水位データ、下流端境界条件には、石原観測所(27.6km)の観測水位データを与えるものとした。浅川(37km 右岸合流)からの土砂供給を考慮するため、多摩川本川への土砂供給に影響すると考えられる、河床変動の大きい浅川 4.0km 地点までの区間を対象区間に加えた。浅川下流端の本川合流部では、図 4-13 に示すように、多摩川と浅川の解析格子を接続させ、流速や水深、流砂量等の解析結果を境界条件として受け渡す方法を採用した。浅川の上流端境界条件には高幡橋観測所(浅川 2.2km)の観測水位データを与えた。また、大栗川(33.7km 右岸合流)については、低水路幅が 40m 程度(本川の 1/8 程度)と小さく、流入土砂による本川への影響は小さいと考えられることから、報恩橋観測所(大栗川 0.6km)の流量のみ合流点に与えるものとした。

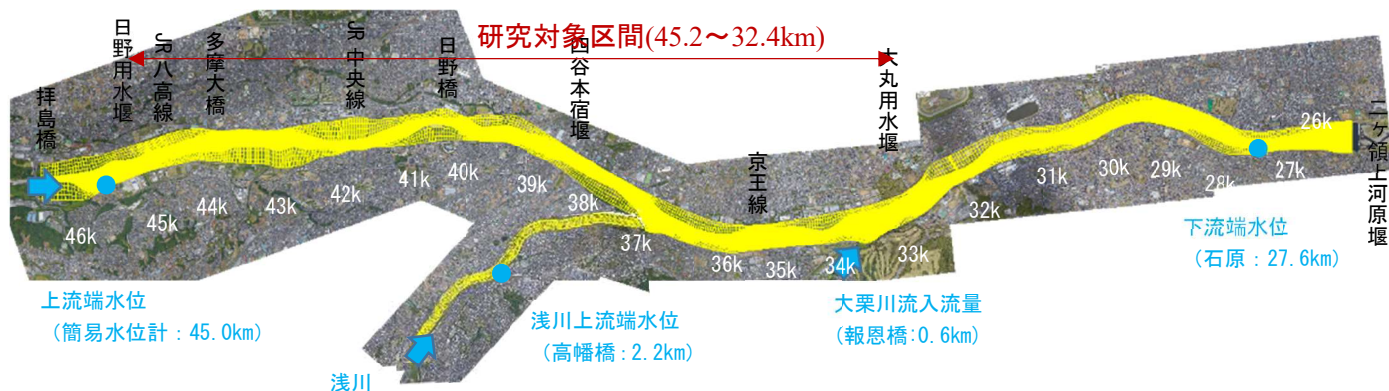


図 4-12 解析対象範囲と作成した解析格子

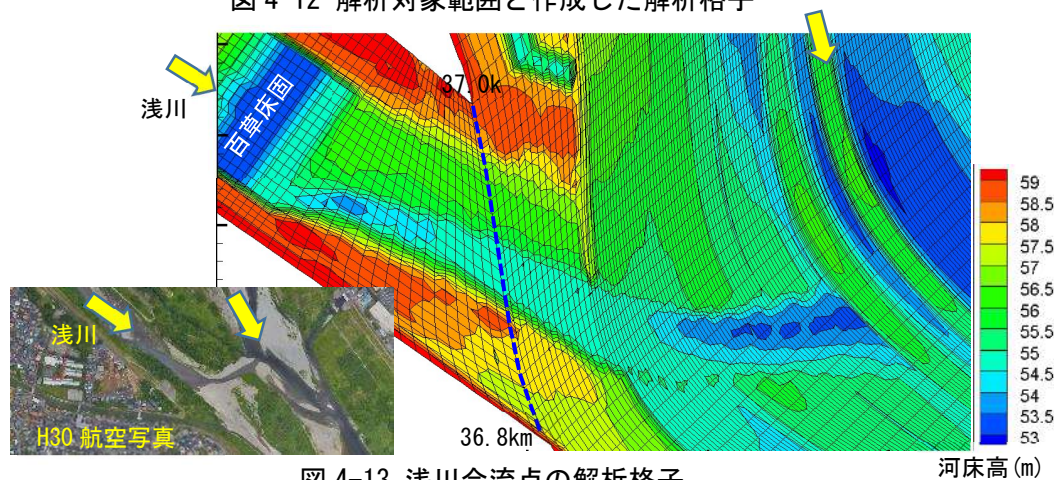


図 4-13 浅川合流点の解析格子

表 4-1 令和元年 10 月洪水再現計算の解析条件

対象洪水	令和元年 10 月洪水(2019/10/12 6:00~10/13 6:00)
解析対象範囲	【多摩川】 46~26km(拝島橋~二ヶ領上河原堰) 【浅川】 4~0km
上下流端境界条件	【多摩川】 上流端：45km 簡易水位計水位 下流端：石原観測所(27.7km)水位 【浅川】(本川 37km 付近合流) 上流端：高幡橋観測所(2.2km)水位 【大栗川】(本川 33.7km 付近合流) 流入流量：報恩橋観測所(0.6k)流量
河道データ	令和元年 10 月洪水前の河道 【多摩川 46~41.35km(JR 中央線)】 LP 測量データ (平成 30 年 1 月計測) 【その他(浅川含む)の区間】 横断測量データ(平成 29 年 3 月計測)
解析格子サイズ	【多摩川】(2,537×193 格子) 縦断格子間隔 44.9~41.3km(JR 八高線~JR 中央線)：5m 間隔 河川構造物：2.5~5m 間隔 その他の区間：10m 間隔 横断格子間隔 低水路：1~2m 間隔 高水敷：1~5m 間隔 【浅川】(485×27 格子) 縦断格子間隔 10m 間隔 河川構造物：5m 間隔 横断格子間隔 低水路：3~5m 間隔 高水敷：3~5m 間隔
河床材料粒度分布	解析対象区間の平均粒径(平成 30 年度調査(1km 間隔・左右岸)) (解析粒度区分(9 区分)：0.5mm,1mm,3mm,7mm,14mm, 28mm,45mm,64mm,138mm)
粗度係数	【低水路】 0.026 【高水敷】 0.035
樹木群透過係数	樹木群落の占有面積が高い：40m/s " 中程度：50m/s
本解析で考慮した構造物	【堰・床止工】日野用水堰(45.2km), 四谷本宿堰(38.2km), 大丸用水堰(32.4km), 百草床固(浅川 0.1m), 向島床固(浅川 1.9m) 【橋脚護床工】JR 八高線(44.8km), JR 中央線(41.3m), 日野橋(39.9km), 京王線(35.1km), 関戸橋(34.6km), 武蔵野線・南武線(31.9km) 【帯工】帯工 A1(44.74km), 帯工 A2(44.7km), 帯工 B1・B2(44.6km), 帯工 C(44.3km), 帯工 D(44.1km), 帯工 E(43.9km), 帯工 J(42.0km) 【橋脚】京王線(35.1km), 関戸橋(34.6km), 武蔵野線・南武線(31.9km) 【低水護岸】多摩川・浅川 ※構造物の形状を解析格子に反映し、敷高以下の河床低下が生じない設定
土丹	強度が高く、令和元年 10 月洪水で洗掘していない土丹(44.8~44.7km 左岸, 43.2~42.7km 右岸)は、洪水前の河床高以下の河床低下が生じない設定

解析格子は、令和元年10月洪水前にLP測量データが計測されている多摩川46.0～41.3km区間はLP測量データ(平成30年1月計測)を用いて作成し、浅川を含むその他の区間は横断測量データ(平成29年3月計測、縦断200mピッチ)を補間して作成した。解析格子サイズは、河川構造物の形状が再現できる空間解像度とした。対象区間内で考慮する必要のある河川構造物は、堰や護床工、帯工などがあるが、特に京王線橋梁(35.1km)、関戸橋(34.6km)、JR南武線・武蔵野線橋梁(31.9km)は、橋脚の径間長が短く、流れと土砂移動に対する阻害要因となっていることから、これらの橋梁及び橋脚周辺の流れ場を再現できる解析格子サイズを設定する必要がある。図4-14の京王線橋梁(横断幅1.83m、縦断長7.45m)の橋脚に示すように、橋脚を縦・横断方向に3分割し、橋脚間の横断格子幅を2m程度とすれば、橋脚周辺の流れ場を再現できると考えた。その結果、多摩川の横断格子間隔は低水路で1～2m程度、高水敷で1～5m程度(横断格子数193)に設定した。多摩川の縦断格子間隔は、堰や護床工、帯工等の横断構造物が設置されている区間では縦断2.5～5m程度と細かく設定し、河川改修により帯工等の横断構造物が連続して設置されているJR八高線～JR中央線区間(44.9～41.3km)も同様に縦断5m程度、それ以外の区間では縦断10m程度(縦断格子数2,537)とした。浅川の解析格子サイズは、横断格子間隔は低水路、高水敷ともに3～5m程度(横断格子数27)、縦断格子間隔は床止工が設置されている区間で5m程度、その他の区間で10m程度(縦断格子数485)とした。堰や護床工、帯工などの構造物は、設計図面の構造諸元を参照して、敷高や縦・横断形状を解析格子で再現した(図4-15：大丸用水堰の例)。



図4-14 京王線橋梁(35.1km)の橋脚とそれを再現するための解析格子

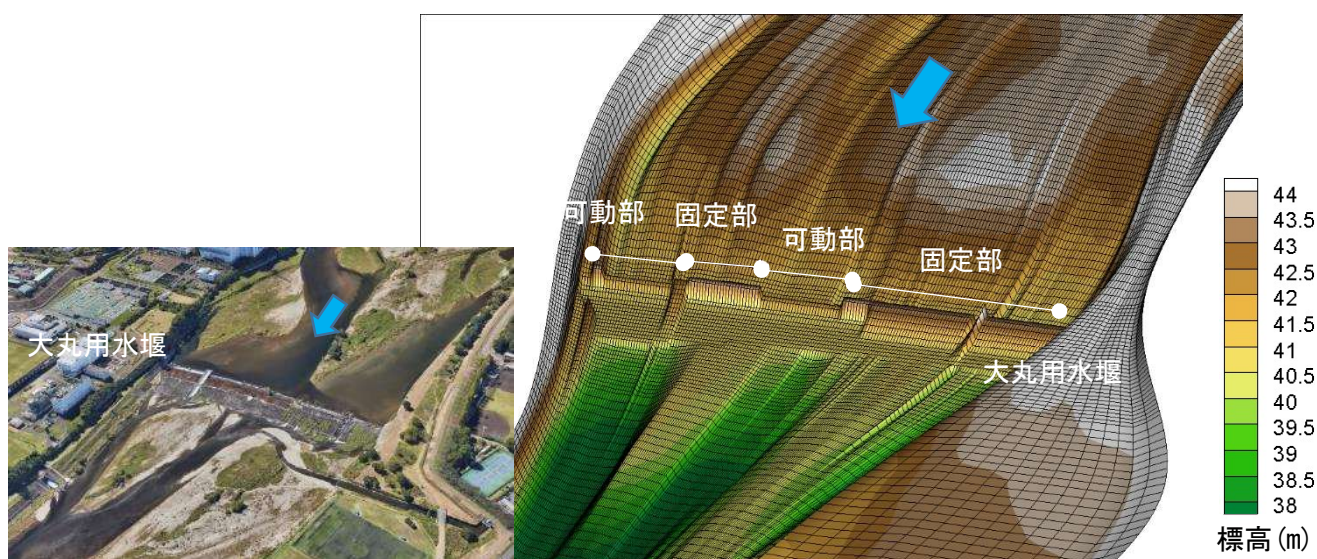


図 4-15 解析格子で再現した大丸用水堰

図 4-16 は、実測データと解析に用いた河床材料粒度分布(平成 30 年度調査結果)を示す。実測の粒度分布は、大丸用水堰より上流の 33~46km 区間と下流の 32~26km 区間、浅川 0~4km 区間のそれぞれの区間平均の粒度分布を示しており、各区間の平均的な粒度分布にほとんど差は見られない。そのため、本解析では、全区間の平均的な粒度分布を初期値として与えるものとし、9 区分(0.5mm,1mm,3mm,7mm,14mm,28mm,45mm,64mm,138mm)の粒度分布を設定した。

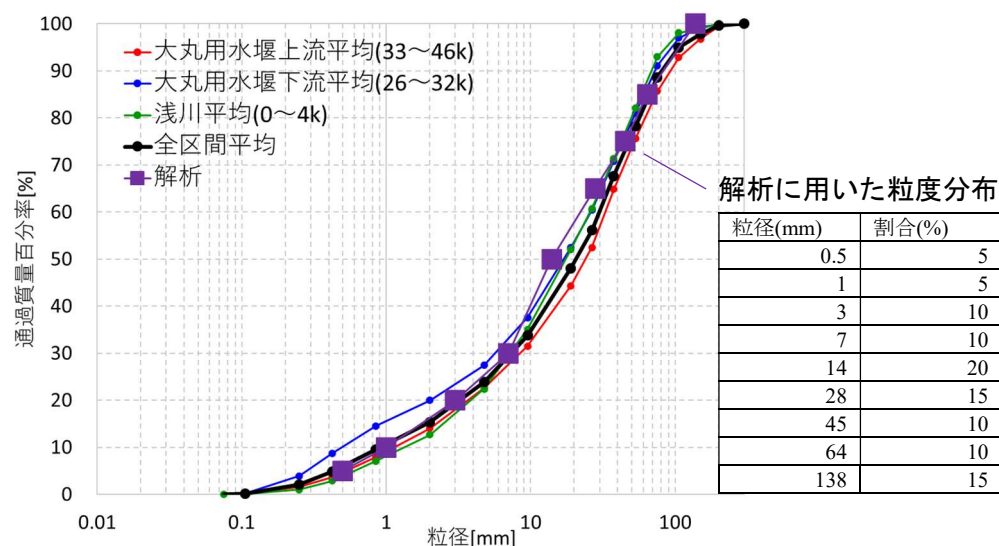


図 4-16 実測の区間平均の河床材料粒度分布と解析で設定した粒度分布 (平成 30 年度調査)

粗度係数は、多摩川水系河川整備計画の検討資料における設定値を参考に、低水路 ($n=0.026$)と高水敷($n=0.035$)を区別して設定した。樹木群透過係数については、福岡ら⁷⁸⁾による分析結果を踏まえ、図 4-17 に示すとおり、令和元年 10 月洪水後にまとまった樹木群落が残存している箇所に対して、樹木群落の占有面積に応じて樹木群透過係数(40~50m/s)を設定した。土丹については、3-2-2 節の調査結果より、令和元年 10 月洪水で砂州・高水敷上に露出した土丹の多くは洗掘を受けておらず、洗掘を受けた層のほとんどは土丹上に堆積していた砂礫層であったと考えられた。このことから、洪水前から広範囲に露出し、かつ洪水により洗掘を受けていない 44.8~44.7km 左岸、43.2~42.7km 右岸の土丹(図 4-18)については、洪水前の河床高以下の河床低下が生じない設定とし、他は砂礫河床として河床変動解析を行うものとした。



高水敷上の多くを樹木群落が占める場合
樹木群透過係数 $K=40\text{m/s}$



高水敷上の半分程度を樹木群落が占める場合
樹木群透過係数 $K=50\text{m/s}$

図 4-17 樹木群透過係数の設定

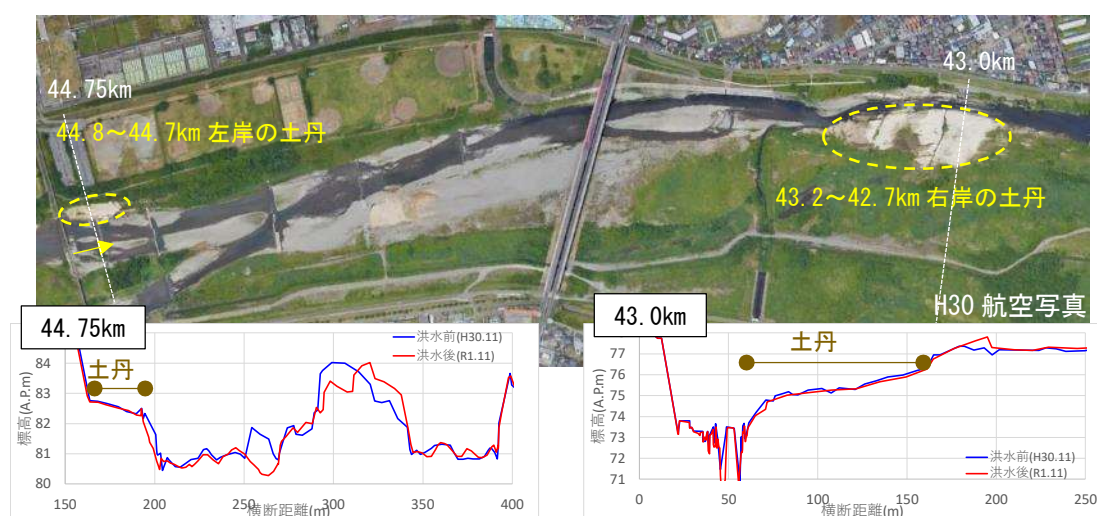
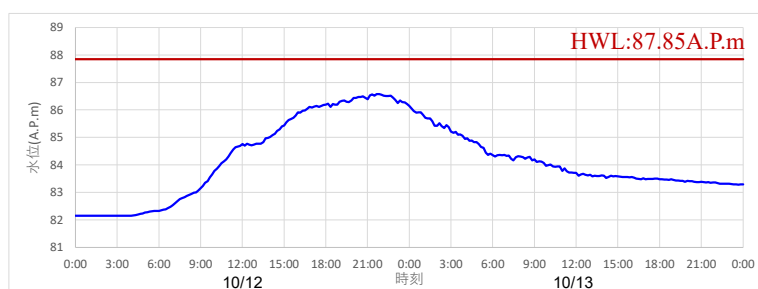
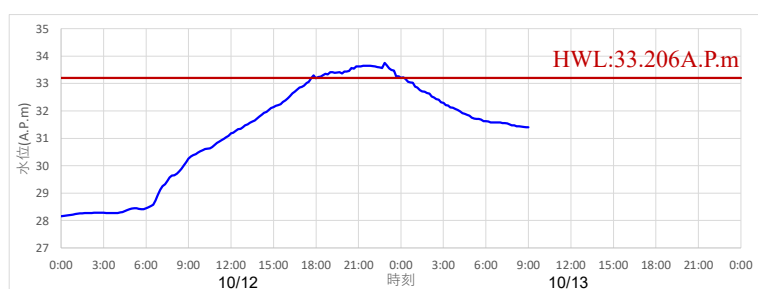


図 4-18 令和元年 10 月洪水前から露出していたが洪水により洗掘を受けていない土丹

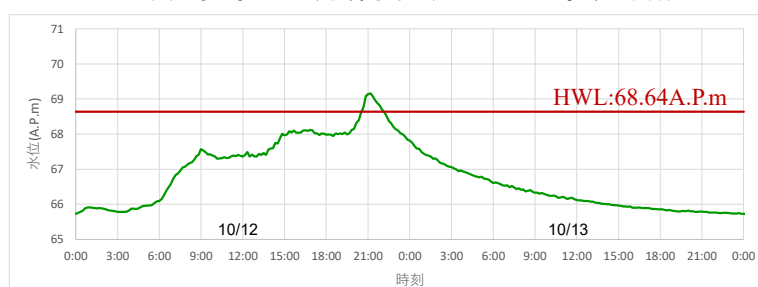
図 4-19 は、上下流端の境界条件とする令和元年 10 月洪水の観測水位，流量データを示す。水位データは 10 分間隔で観測されている。大栗川流入流量データ(0.6km 報恩橋観測所)は 1 時間間隔の観測データで、観測期間が限られていたため、10 分間隔で観測されている同地点の水位データを用いて水位-流量(H-Q)関係からデータを補間し、10 分間隔の流量データを作成した。



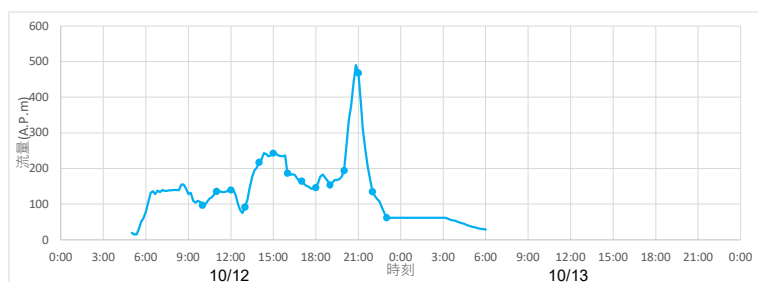
(a) 多摩川上流端水位 (45km 簡易水位計)



(b) 多摩川下流端水位 (27.7km 石原観測所)



(c) 浅川上流端水位 (2.2km 高幡橋観測所)



(d) 大栗川流入流量 (0.6km 報恩橋観測所)

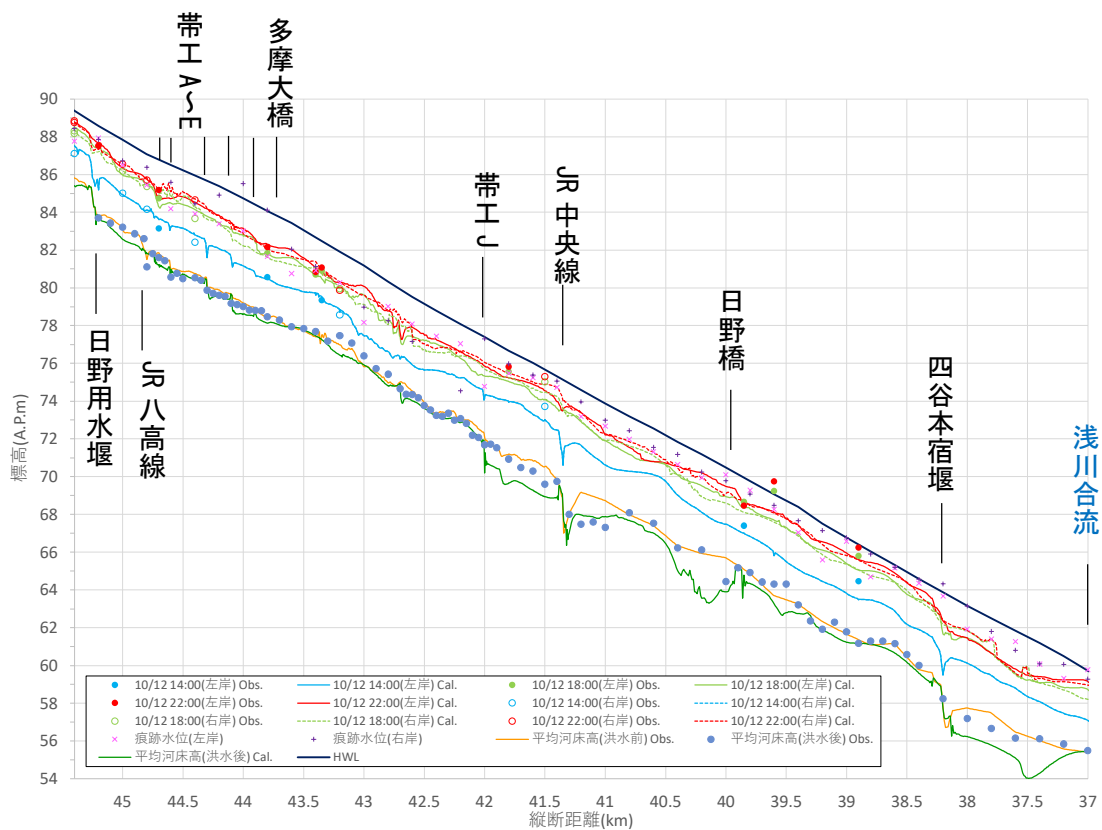
図 4-19 上下流端の境界条件とする令和元年 10 月洪水の観測水位，流量データ

4-3-3 令和元年10月洪水の再現解析結果と観測結果の比較

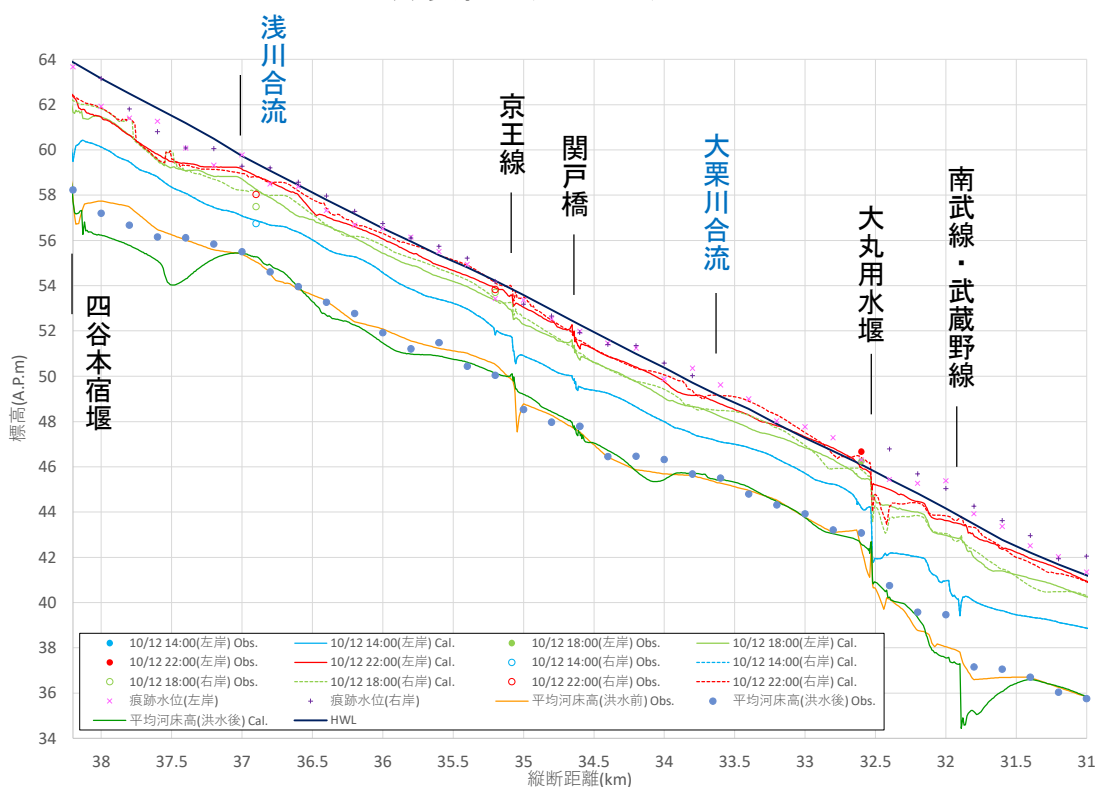
解析法の再現性を確認するため、令和元年10月洪水の再現計算を行った。図4-20、図4-21は、多摩川及び浅川の対象区間における令和元年10月洪水時の水面形時系列と洪水前後の低水路平均河床高の縦断分布の実測値と解析結果の比較を示す。多摩川・浅川ともに、解析水面形は観測水面形の時間変化を概ね説明できている。図4-22は、実測と解析の水位ハイドログラフの比較を示す。図4-22より、解析水位は洪水の増水期に観測水位との数cm～数10cm程度の差異が生じる地点はあるものの、観測水位ハイドログラフの全体的な変化傾向や洪水ピーク付近の水位を概ね再現できている。図4-23は、実測と解析の流量ハイドログラフの比較を示す。図4-23より、解析流量も解析水位と同様に、洪水の増水期に観測流量との差異が生じ、解析流量の方が若干低いものの、観測流量ハイドログラフの全体的な変化傾向や洪水ピーク付近の流量を概ね再現できている。解析結果より、多摩川の日野橋地点(39.9km)のピーク流量は約5,000m³/s、石原地点(27.6km)のピーク流量は約6,000m³/s、浅川の高幡橋地点(2.2km)のピーク流量は約1,200m³/sであり、1時間間隔の観測流量では捉えることができない洪水ピーク期の詳細な流量変動を捉えられている。

図4-24は、多摩川本川の令和元年10月洪水前後の河床変動コンターの観測結果と解析結果の比較、図4-25は、低水路平均河床高の変動高縦断分布の観測結果と解析結果の比較を示す。観測結果の河床変動コンターは、日野用水堰～JR中央線区間(45.2～41.4km)は洪水前後のLP測量結果を用いて作成し、JR中央線～大丸用水堰区間(41.4～32.4km)は洪水前後の横断測量結果(縦断200mピッチ)を用いて作成している。図4-24より、河床変動の解析結果は、実測による全体的な洗掘・堆積の傾向を概ね説明できている。横断測量結果では捉えられない京王線橋梁(35.1km)や大丸用水堰(32.4km)等の構造物周辺の河床変動の状況を捉えられている。図4-25より、低水路平均河床高の変動高の解析結果は実測と比べて洗掘量が大きく、特にJR中央線上流区間(42.4～41.4km)や四谷本宿堰～浅川合流点区間(38.2～37km)で差異が大きい。これは、図4-26に示す洪水前後の横断形状の変化の観測結果と解析結果の比較(41.6km, 38.0km)を見ると、実測と解析で洗掘量の差異が大きかった区間は、低水路幅が狭いため、砂州河岸の洗掘が顕著に生じており、解析結果は実測に比べて河岸洗掘量が大きい。実測で河岸の洗掘が比較的抑えられている要因として、砂州河岸付近に樹木が生育しているため、樹木の根系が砂州地盤内に活着し、それが洗掘に対する抵抗になったものと考えられる。解析では樹木群落の根系による洗掘抵抗は考慮していないため、実測に比べて河岸洗掘量が大きくなっている。図4-27は、浅川の令和元年10月洪水前後の河床変動コンターの観測結果と解析結果の比較、図4-28は、低水路平均河床高の変動高縦断分布の観測結果と解析結果の比較を示す。浅川の解析結果は、実測と比べて河床洗掘量は大きいものの、全体的な洗掘・堆積の傾向を概ね説明できている。

以上のことから、本解析法を令和元年10月洪水に適用した結果、実測の洪水水面形の時間変化、流量ハイドログラフ、河床の洗掘・堆積傾向を十分説明できることを確認した。次項では、この解析法を用いて、大丸用水堰の改築による効果、影響について検証を行う。



(a) 多摩川 (45~37km)



(b) 多摩川 (38~31km)

図 4-20 洪水水面形の観測結果と解析結果の比較 (多摩川)

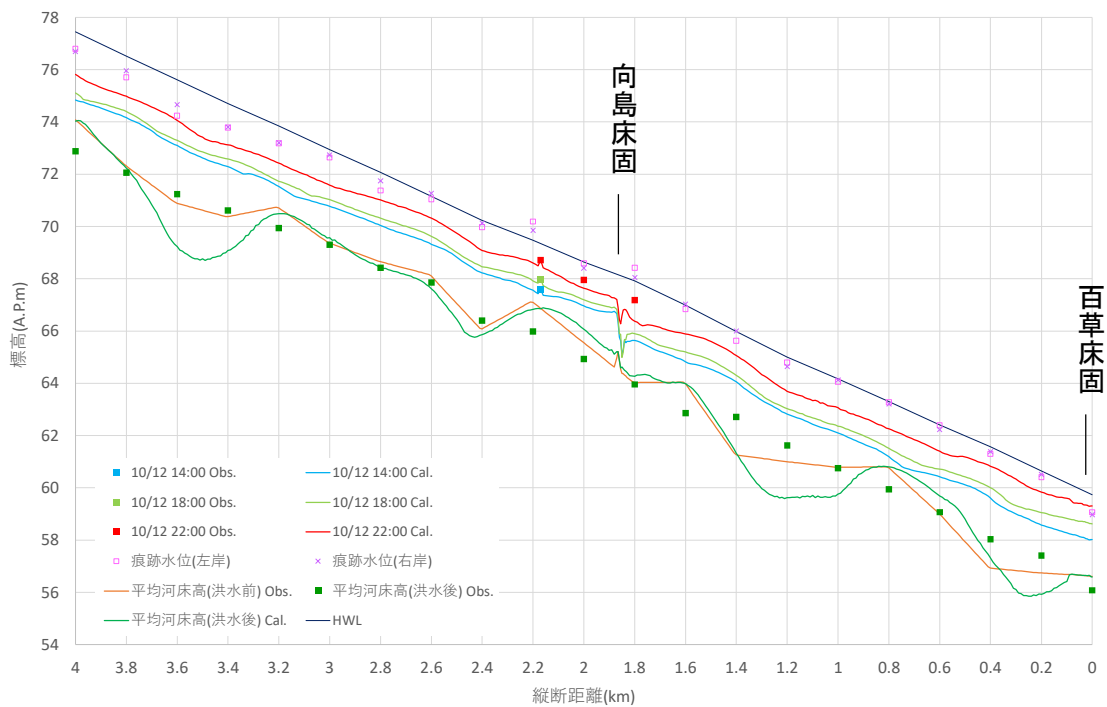


図 4-21 洪水水面形の観測結果と解析結果の比較 (浅川)

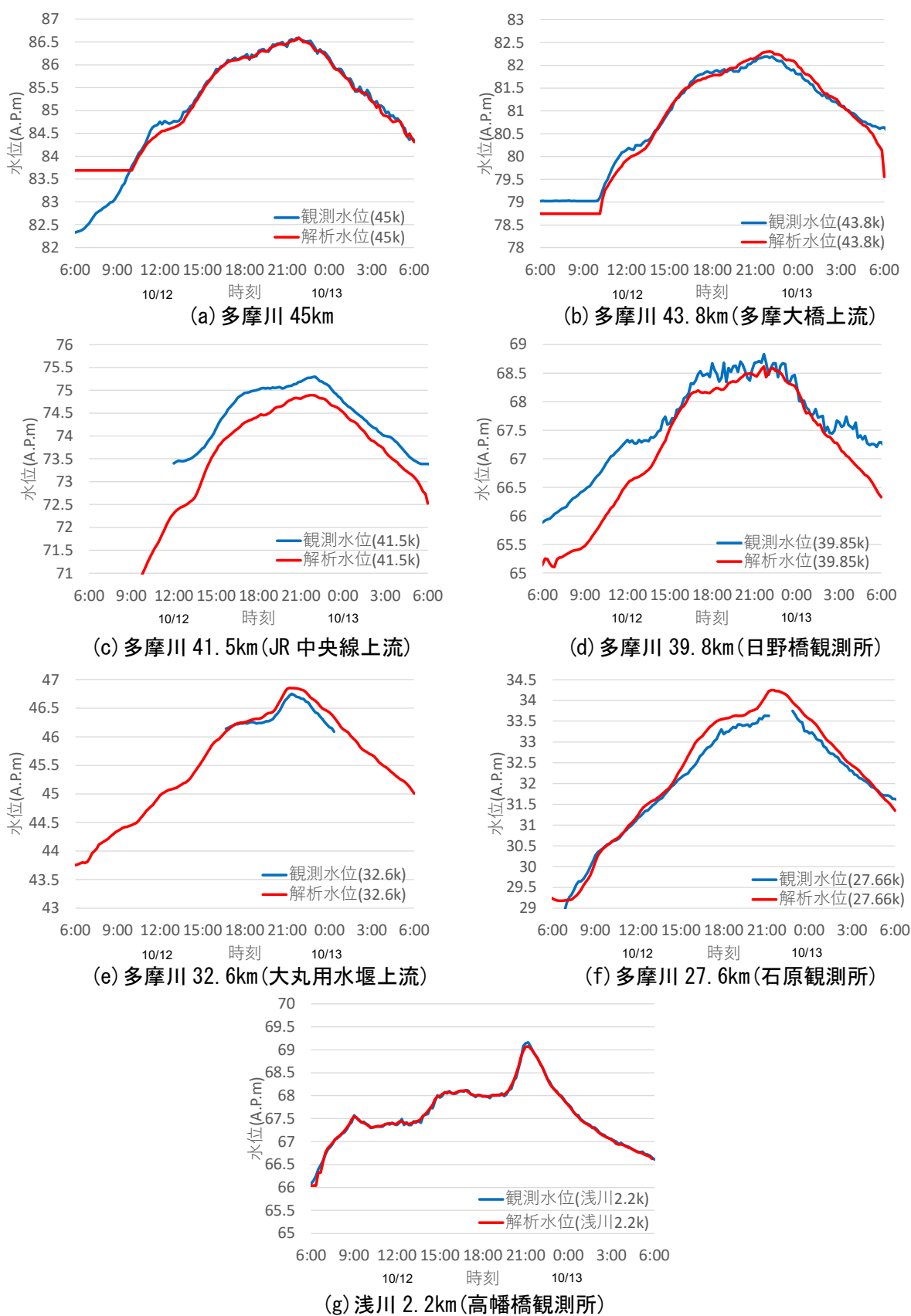
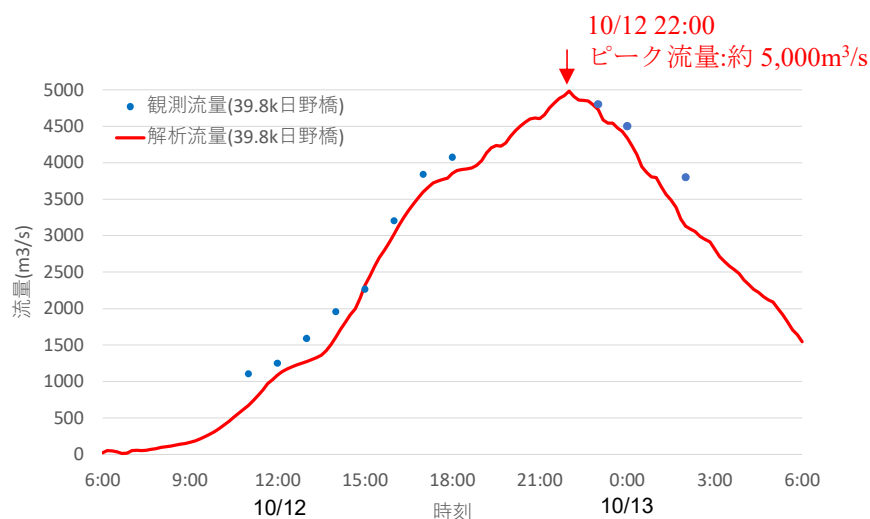
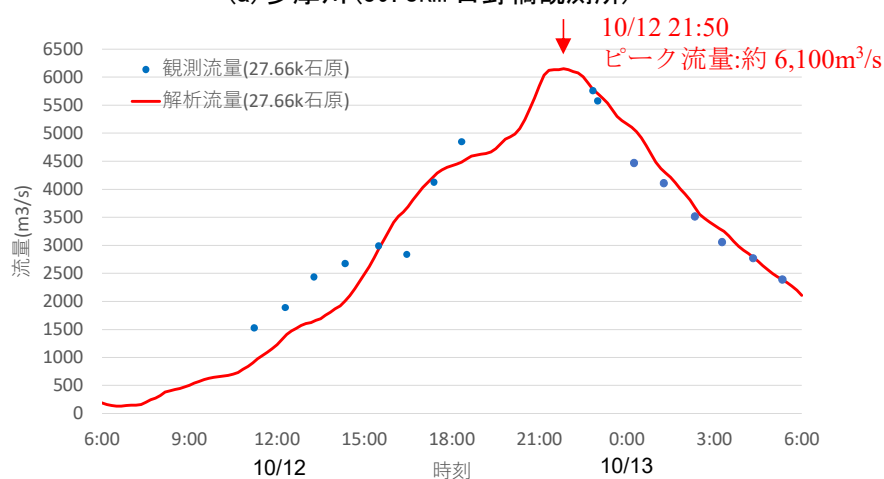


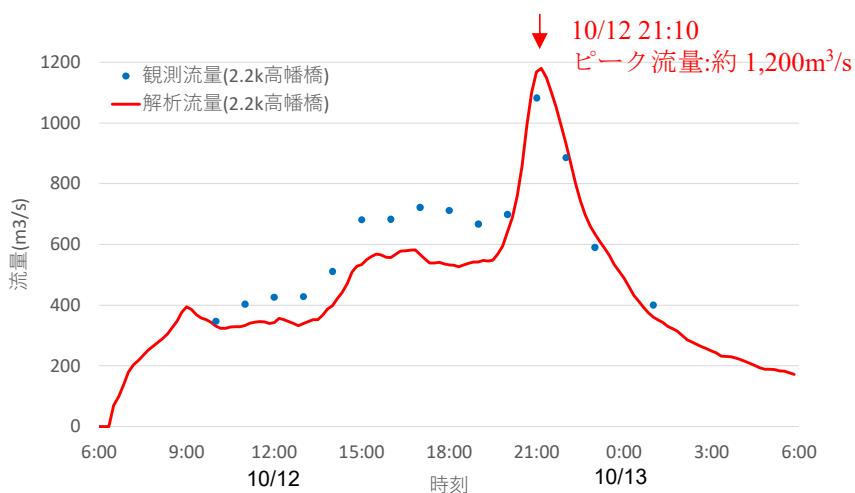
図 4-22 水位ハイドログラフの観測結果と解析結果の比較



(a) 多摩川 (39.8km 日野橋観測所)



(b) 多摩川 (27.6km 石原観測所)



(c) 浅川 (2.2km 高幡橋観測所)

図 4-23 流量ハイドログラフの観測結果と解析結果の比較

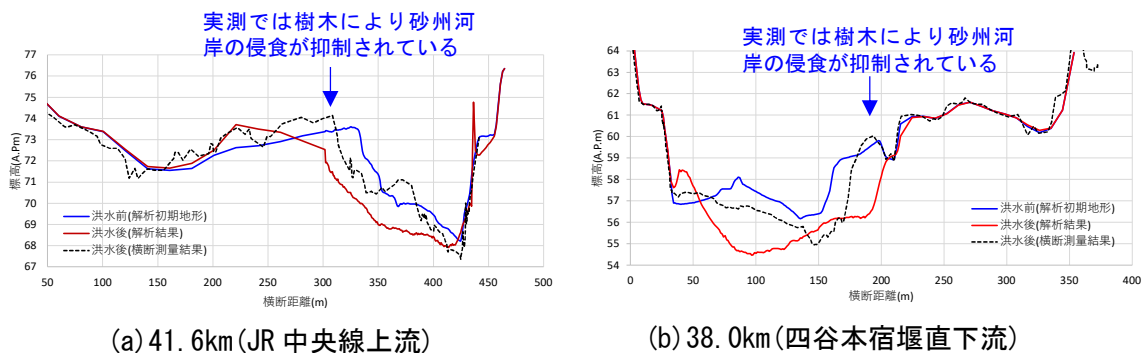


図 4-26 令和元年 10 月洪水前後の横断形状の変化の観測結果と解析結果の比較 (41.6km)

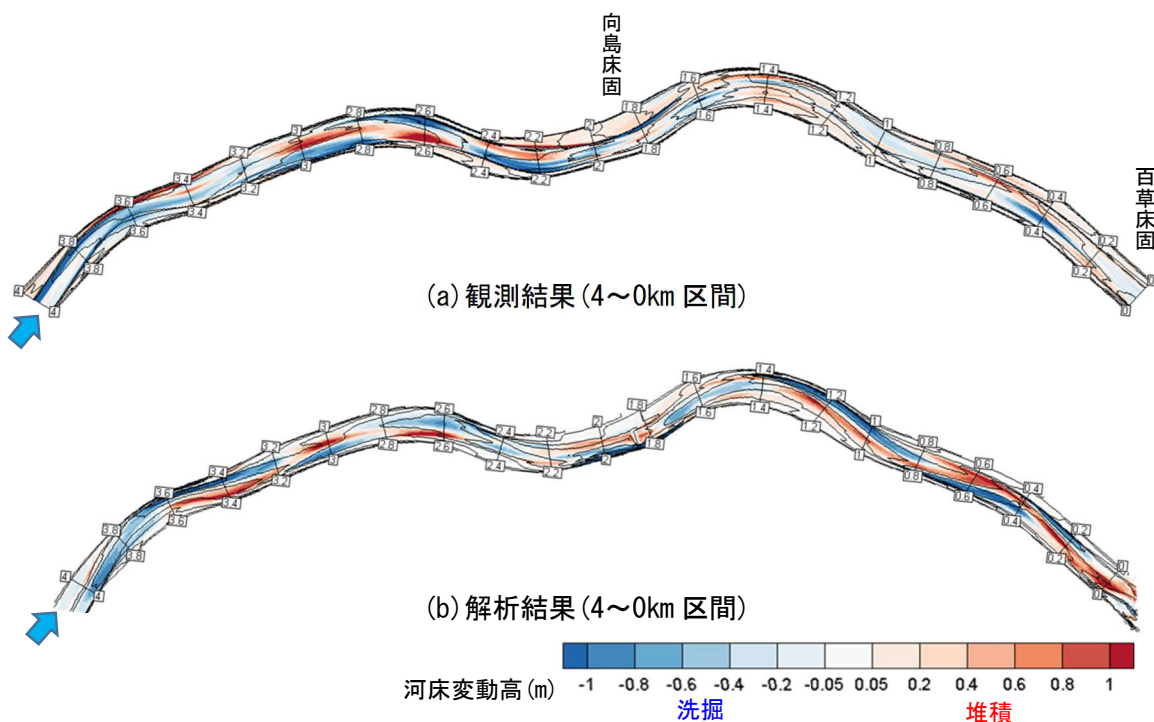


図 4-27 令和元年 10 月洪水前後の河床変動コンターの観測結果と解析結果の比較 (浅川)

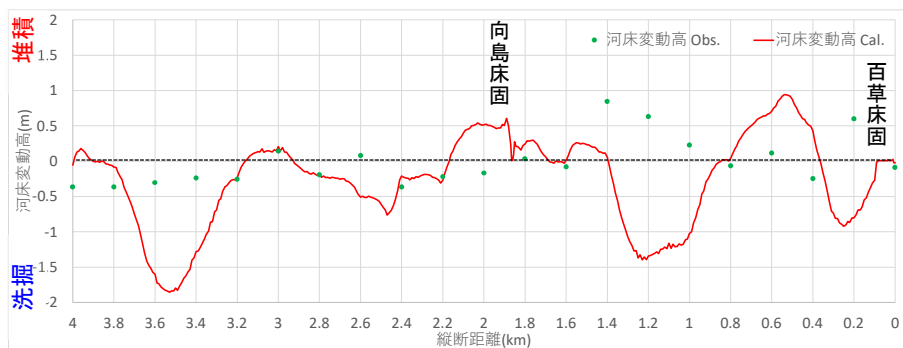


図 4-28 令和元年 10 月洪水前後の低水路平均河床高の変動高縦断分布の観測結果と解析結果の比較 (浅川)

4-4 大丸用水堰の改築による浅川合流点より下流区間の低水路の安定化

4-4-1 解析条件

大丸用水堰の改築による効果，影響について，解析法を用いて検証を行う．図 4-29 は，解析対象範囲，表 4-2 は，大丸用水堰改築後河道の解析条件を示す．表 4-2 の解析条件には，前項で行った令和元年 10 月洪水の再現解析からの変更点を赤字で示している．

本解析では，大丸用水堰の改築による効果を評価するため，令和元年 10 月洪水後に実施された測量結果(令和元年 11 月 LP データ，令和 2 年 3 月横断測量データ)を用いて現況河道(令和元年 10 月洪水後の河道)を再現した河道モデルを基本に，①大丸用水堰を改築していない現況河道の解析(ケース 2-1)，②大丸用水堰を床止め工に改築した後の河道の解析(ケース 2-2)の 2 ケースの河道条件で，解析結果の比較評価を行う．洪水外力は，前節 4-3-3 の令和元年 10 月洪水の再現解析から求めた流量ハイドログラフを与えるものとし，堰改築後河道の安定性を評価するため，図 4-30 に示すように 2 波形のハイドログラフを与えて解析を行った．

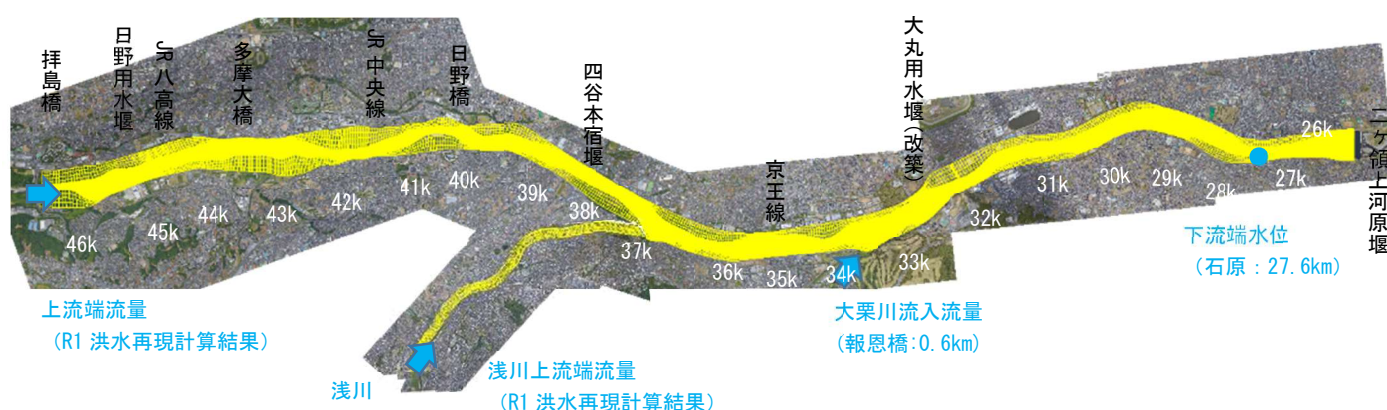


図 4-29 解析対象範囲と作成した解析格子

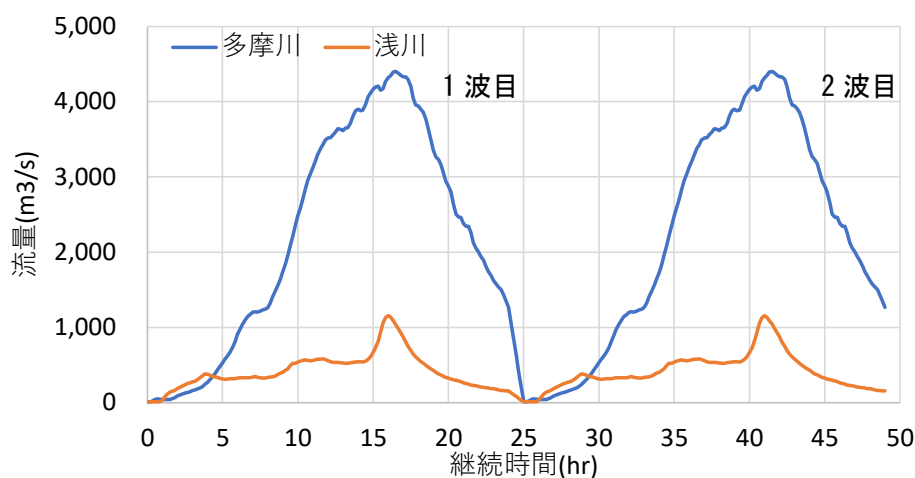


図 4-30 解析で与えた流量ハイドログラフ(令和元年 10 月洪水再現解析流量)

表 4-2 大丸用水堰改築後河道の解析条件

対象洪水	令和元年 10 月洪水(2019/10/12 6:00~10/13 6:00)
解析対象範囲	【多摩川】 46~26km(拝島橋~二ヶ領上河原堰) 【浅川】 4~0km
上下流端境界条件	【多摩川】 上流端：解析流量(令和元年 10 月洪水再現解析結果) 下流端：石原観測所(27.7km)水位 【浅川】 (本川 37km 付近合流) 上流端：解析流量(令和元年 10 月洪水再現解析結果) 【大栗川】 (本川 33.7km 付近合流) 流入流量：報恩橋観測所(0.6k)流量
河道データ	現況河道(令和元年 10 月洪水後の河道) 【多摩川 46~35.0km(京王線)】 LP 測量データ (令和元年 11 月計測) 【その他(浅川含む)の区間】 横断測量データ(令和 2 年 3 月計測)
河川改修	大丸用水堰(32.4km)の床止め工化(固定堰を 2.4m, 可動堰切を 1.0m 下げ) 大丸用水堰の上流(33.3km)に帯工を設置 大栗川合流点~大丸用水堰区間(33.6~32.2km)の右岸高水敷の造成(水衝部対策) 京王線~大丸用水堰区間(35.1~32.4km)の低水路河床の是正(砂州の切下げ)
解析格子サイズ	【多摩川】 (2537×193 格子) 縦断格子間隔 44.9~41.3km(JR 八高線~JR 中央線)：5m 間隔 河川構造物：2.5~5m 間隔 その他の区間：10m 間隔 横断格子間隔 低水路：1~2m 間隔 高水敷：1~5m 間隔 【浅川】 (485×27 格子) 縦断格子間隔 10m 間隔 河川構造物：5m 間隔 横断格子間隔 低水路：3~5m 間隔 高水敷：3~5m 間隔
河床材料粒度分布	解析対象区間の平均粒径(平成 30 年度調査(1km 間隔・左右岸)) (解析粒度区分(9 区分)：0.5mm,1mm,3mm,7mm,14mm, 28mm,45mm,64mm,138mm)
粗度係数	【低水路】 0.026 【高水敷】 0.035
樹木群透過係数	樹木群落の占有面積が高い：40m/s " 中程度：50m/s
本解析で考慮した構造物	【堰・床止工】 日野用水堰(45.2km), 四谷本宿堰(38.2km), 床止め工に改築した大丸用水堰(32.4km), 百草床固(浅川 0.1m), 向島床固(浅川 1.9m) 【橋脚護床工】 JR 八高線(44.8km), JR 中央線(41.3m), 日野橋(39.9km), 京王線(35.1km), 関戸橋(34.6km), 武蔵野線・南武線(31.9km) 【帯工】 帯工 A1(44.74km), 帯工 A2(44.7km), 帯工 B1・B2(44.6km), 帯工 C(44.3km), 帯工 D(44.1km), 帯工 E(43.9km), 帯工 J(42.0km), 大丸用水堰上流帯工(33.3km) 【橋脚】 京王線(35.1km), 関戸橋(34.6km), 武蔵野線・南武線(31.9km) 【低水護岸】 多摩川・浅川 ※構造物の形状を解析格子に反映し, 敷高以下の河床低下が生じない設定
土丹層	耐力が高く, 令和元年 10 月洪水で洗掘していない土丹層(44.8~44.7km 左岸, 43.2~42.7km 右岸)は洪水前の土丹高以下の河床低下が生じない設定

※4-3 で行った令和元年 10 月洪水の再現解析からの変更点を赤字で表示

4-4-2 大丸用水堰の改築による低水路の安定化効果，周辺河道への影響の評価

(1) 堰の改築による低水路の安定化効果

図 4-31 は，現況河道と堰改築後河道における令和元年 10 月洪水のピーク時(洪水 1 波目)の水面形の解析結果の比較を示す。図 4-31 より，現況河道では，大丸用水堰の固定堰(32.4km)により堰上流の水面形が堰上げられ，堰上流河道の水位が計画高水位(HWL)を超えている。一方，堰改築後河道では，水面形の堰上がりが解消され，水面形が河床とほぼ平行となることで計画高水位を下回っており，必要な流下能力を満足しているのが分かる。図 4-32 は，現況河道と堰改築後河道における洪水ピーク時(洪水 1 波目)の流砂量の縦断分布の比較を示す。図 4-32 より，堰改築後河道では，堰を通過する掃流砂量が現況河道と比べて多くなっており，堰上下流の土砂移動状況が改善されているのが分かる。これは，堰を切り下げ，堰上流河道の河床縦断形を是正したことにより，堰上流の水面形が現況河道と比べてやや急勾配となり，堰改築後河道の掃流砂量・浮遊砂量が縦断的に多くなったためである。

次に，堰改築後河道の低水路河床の安定性について考察する。図 4-33 は，現況河道と堰改築後河道における洪水 1 波目のピーク時の低水路平均流速の縦断分布の比較，図 4-34 は，洪水前後の低水路平均河床高縦断分布の変化の比較を示す。堰改築後河道では，関戸橋～大丸用水堰区間(34.6～32.4km)の水面勾配が現況河道と比べて急勾配となったため，図 4-33 に示すように，同区間における洪水ピーク時の低水路平均流速が，現況河道と比べて平均的に 0.5m/s 程度大きくなっている。これにより，堰改築後河道では，図 4-34 に示すように，洪水 1 波後の低水路河床高は関戸橋(34.6km)から 34km 付近でやや河床低下が生じており，その洗掘土砂が下流(33.3km 付近)に堆積している。洪水 2 波後の堰改築後河道の低水路河床高を見ると，関戸橋直下流で局所的に河床低下が生じているものの，改修区間全体として大きな河床低下は生じておらず，概ね安定しつつあることが分かる。一方，関戸橋より上流では，現況河道と堰改築後河道で洪水水面形(図 4-31)は大きく変化していないため，低水路平均流速(図 4-33)もほとんど変化しておらず，低水路河床高の変化量(図 4-34)の差も小さい。このことから，堰改築による影響は関戸橋より上流にはほとんど及んでいないことが分かる。

図 4-35 は，堰改築後河道の洪水前後の河床高コンターの变化を示す。図 4-35 より，堰改築後河道では，砂州の移動が妨げられないため，現況河道で見られた低水路内の不規則な砂州の発達は解消されているのが分かる。そして，関戸橋～大丸用水堰区間では，赤線の砂州の前縁線で示すように，規則的な砂州が形成され始めており，昭和 49 年以前(図 3-51(c))まで見られた交互砂州河道が回復する傾向が見られる。

以上のことから，堰改築後河道は，計画高水流量規模の令和元年 10 月洪水に対して必要な流下能力を満足していること，令和元年 10 月洪水 2 波形分の外力に対して低水路河床高が概ね安定する傾向が見られることから，設定した低水路河床縦断形及び床止め工の敷高は妥当であったと言え，堰改築による河道の流下能力の向上と土砂移動の改善が期待できることを示した。

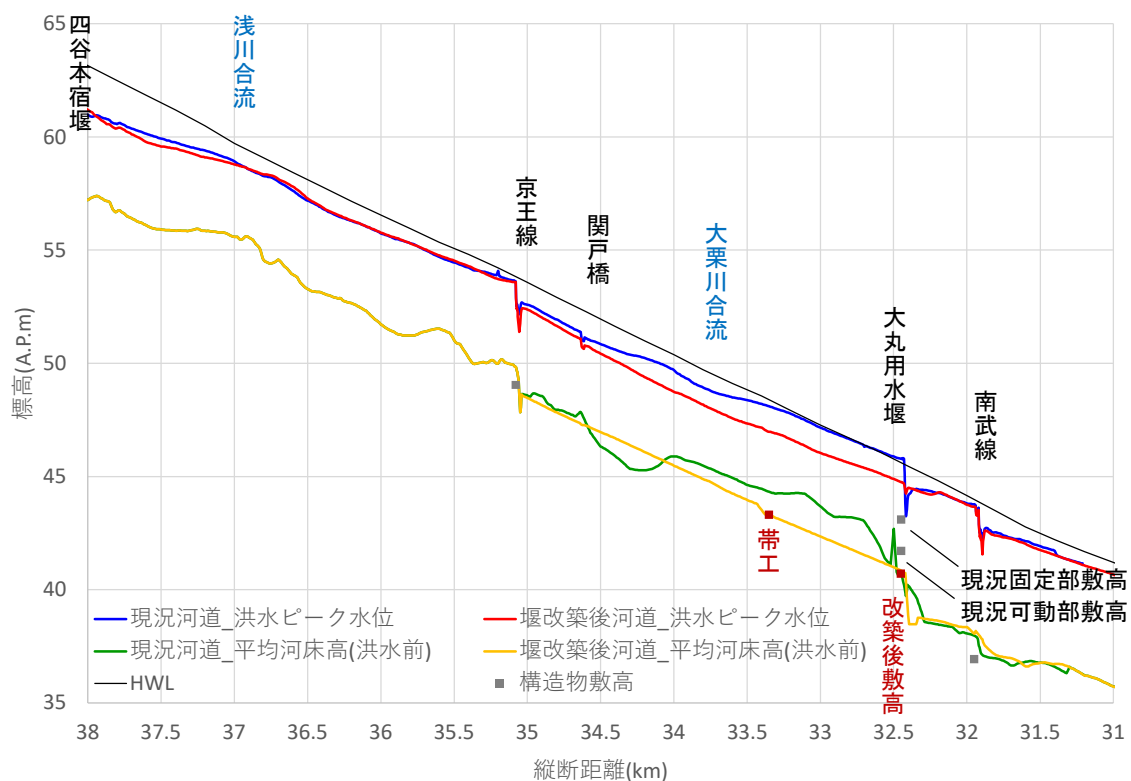


図 4-31 現況河道と堰改築後河道における洪水水面形の解析結果(洪水 1 波目ピーク時)

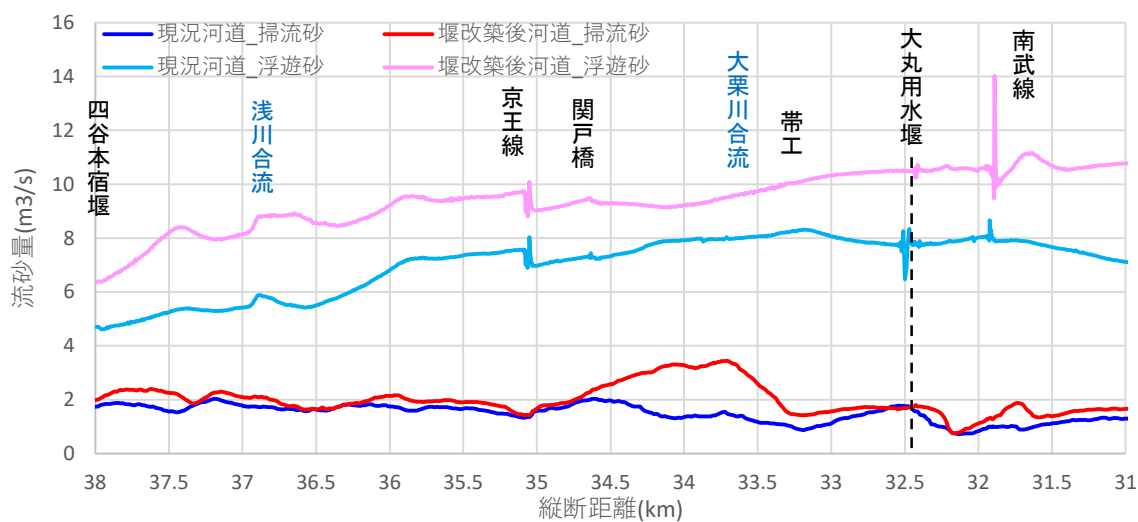


図 4-32 現況河道と堰改築後河道における流砂量縦断分布の解析結果(洪水 1 波目ピーク時)

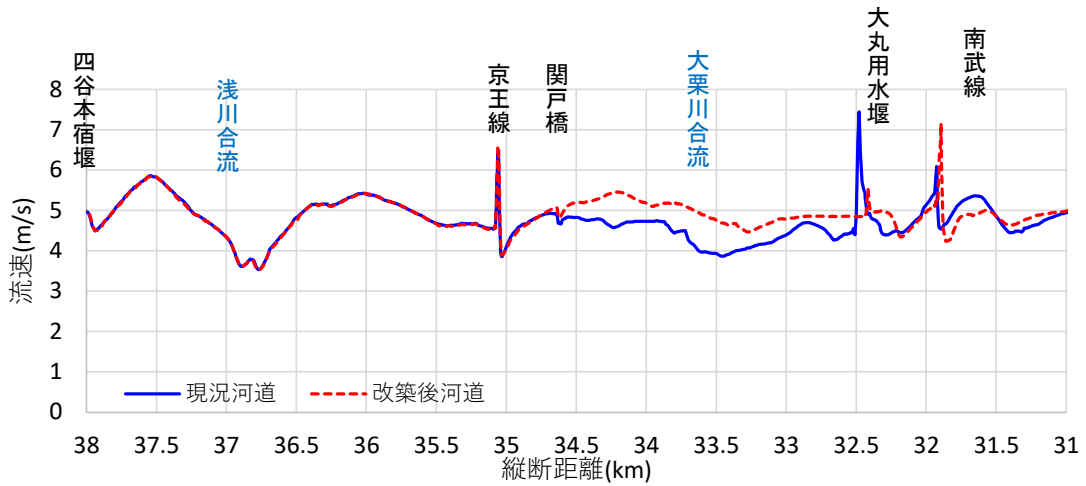
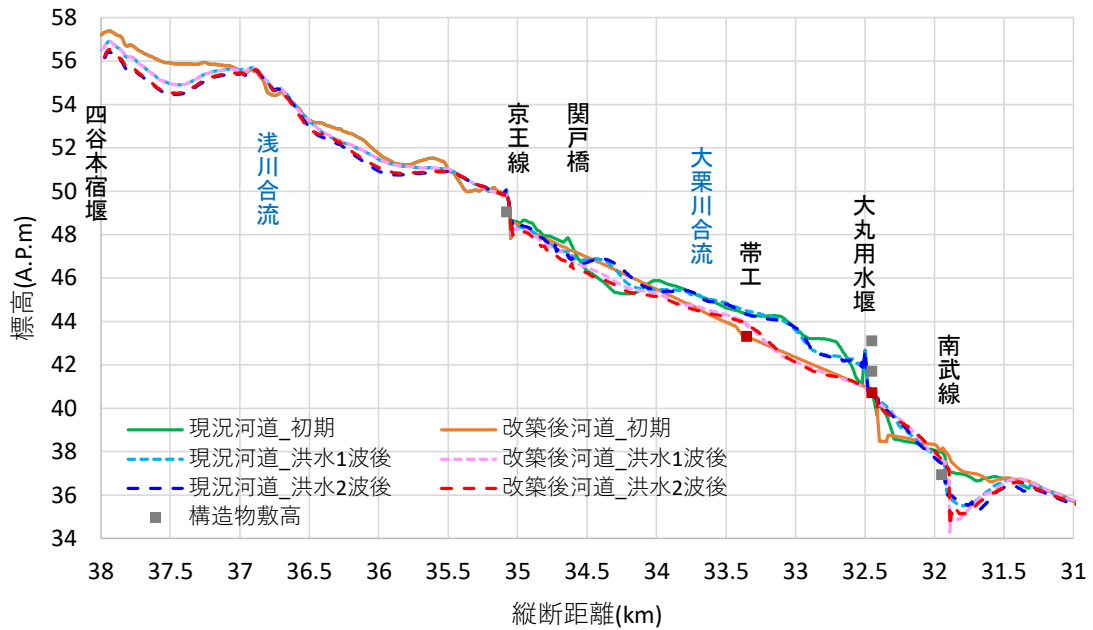
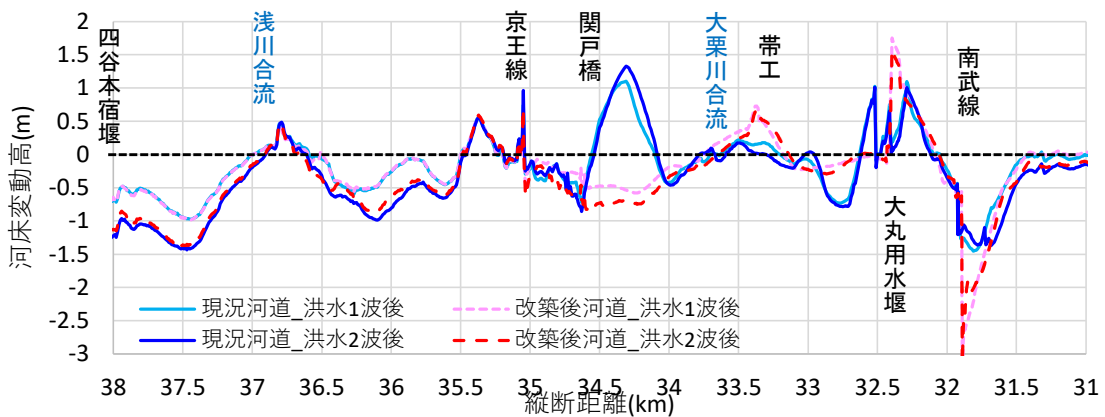


図 4-33 現況河道と堰改築後河道における低水路の平均流速縦断分布の解析結果
(洪水1波目ピーク時)



(a) 低水路平均河床高



(b) 洪水前後の低水路平均河床高の変化量

図 4-34 現況河道と堰改築後河道における洪水前後の低水路平均河床高縦断分布の変化の解析結果

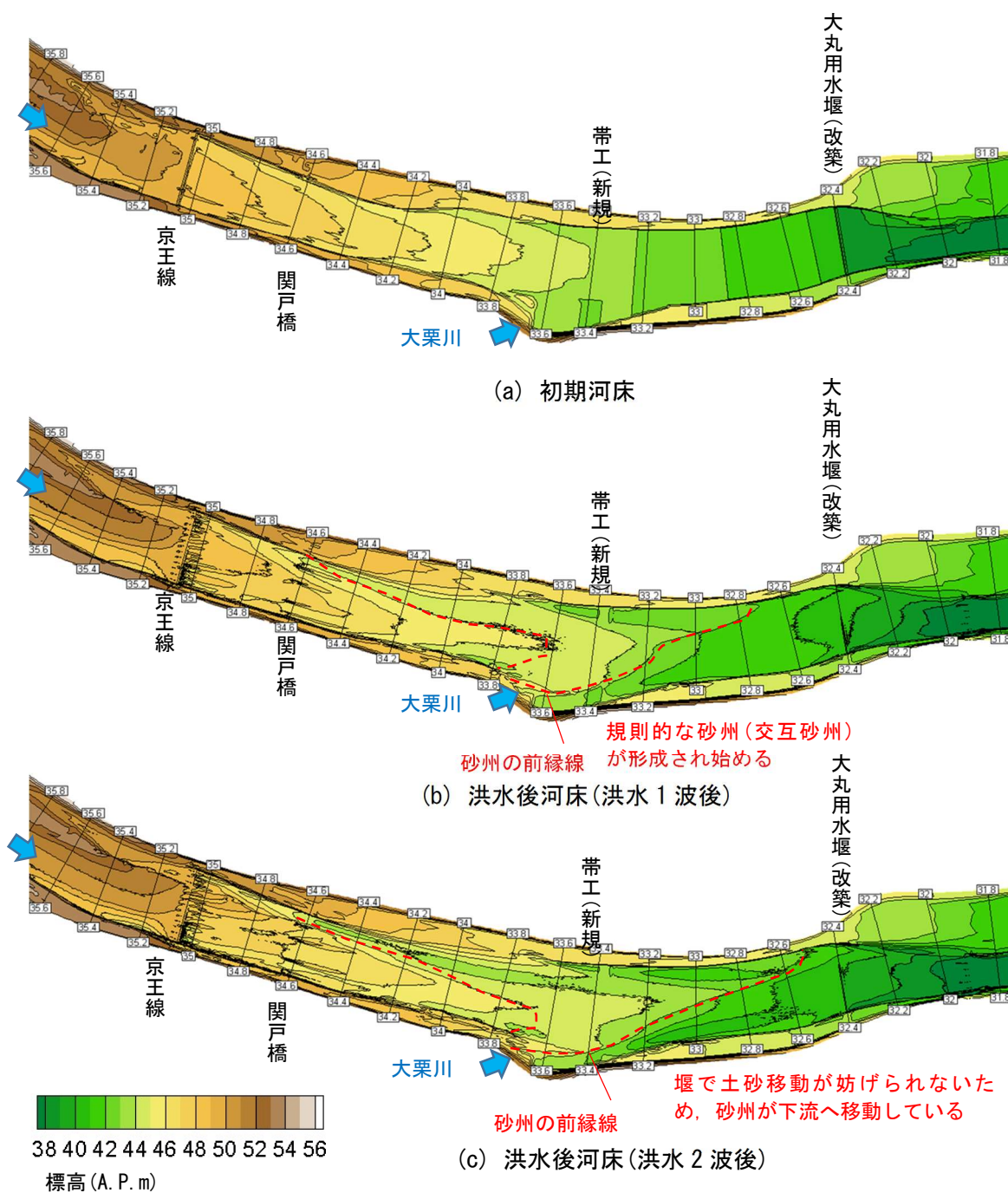
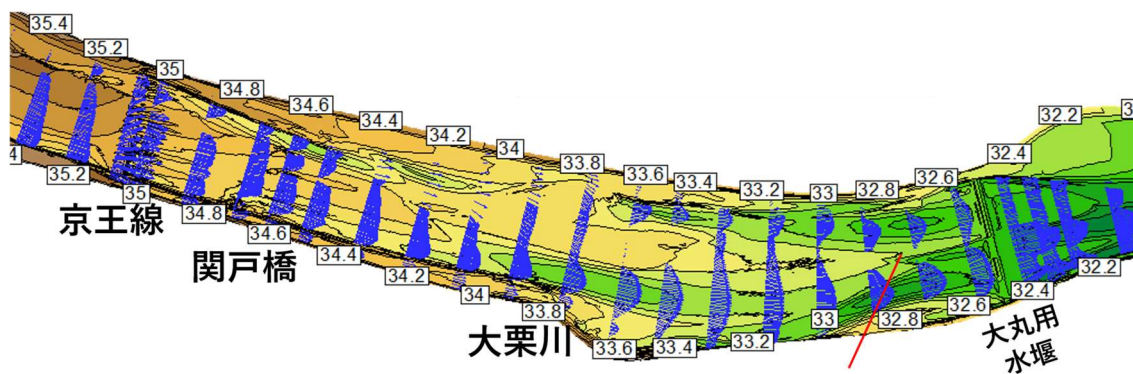


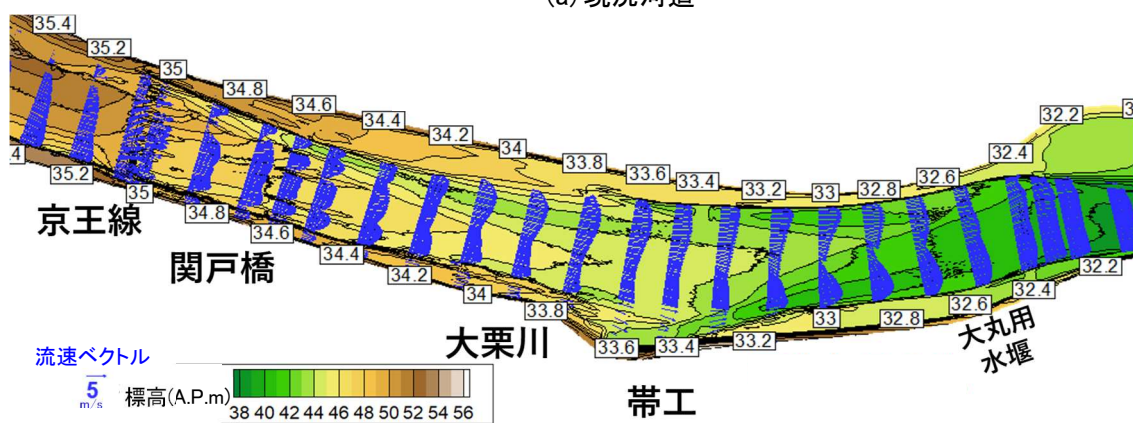
図 4-35 堰改築後河道の洪水前後の河床高の変化の解析結果

次に、堰改築後河道の砂州の発達状況を見るため、**図 4-36** は、現況河道と堰改築後河道における令和元年 10 月洪水ハイドログラフ 2 波形分を通水し河床変動解析を行った後の河床形状に、平均年最大流量規模の流量($1,400\text{m}^3/\text{s}$)を通水した場合の流速ベクトルを示す。**図 4-36 (a)** より、現況河道では、平均年最大流量時に関戸橋～大丸用水堰区間(34.6～32.6km)の低水路中央の発達した砂州の影響を受け、流れが右岸沿いの滞筋に集中しており、過去に被災が生じた右岸河岸が水衝部となっていることから、今後の洪水での河岸の被災が懸念される。一方、**図 4-36 (b)** に示す洪水 2 波通水後の堰改築後河道では、平均年最大流量で低水路全体に洪水流が流れており、砂州の影響による流れの集中は改善されていることが分かる。**図 4-37** は、現況河道と堰改築後河道における堰直上流の断面(32.6km)の洪水 2 波通水後の横断形状の比較、**図 4-38** は、同断面の平均年最大流量時の代表粒径(60%粒径 d_{60})に対する無次元掃流力分布の比較を示す。**図 4-37** より、現況河道では、固定堰直上流で低水路河床との比高差の高い(2.3m 程度)砂州が形成されている。**図 4-38** より、現況河道の堰上流の砂州上(横断 180m 付近)では、平均年最大流量時に代表粒径(d_{60})に対する無次元掃流力が 0.05 を下回っており、土砂が移動しない状況にある。一方、堰改築後河道では、床止め工に改築したことで砂州の移動が妨げられないため、**図 4-37** より、堰直上流に形成された砂州は低水路河床との比高差が 0.9m 程度に抑えられている。**図 4-38** より、砂州全体が平均年最大流量規模で冠水し、代表粒径(d_{60})に対する無次元掃流力が 0.1 を超え活発な土砂移動が生じる。この砂州の比高差(0.9m 程度)は、樹木が生育しやすい比高差(2.0m 程度以上)と比べると十分に低く、平均年最大流量規模の発生頻度(2 年に 1 回程度)で攪乱を受けるため、堰改築後の低水路内の砂州上には樹木の繁茂は抑制されるものと考えられる。

以上のことから、大丸用水堰を切り下げて床止め工に改築することは、洪水の流下能力と土砂移動状況の改善をもたらし、現況河道で見られた低水路内の不規則な砂州の発達と砂州の比高差の拡大、それに伴う砂州上の樹木の繁茂が抑制されることから、低水路の安定化に大きく寄与するものと考えられる。



(a) 現況河道



(b) 堰改築後河道

図 4-36 現況河道と堰改築後河道における洪水後河床の平均年最大流量時の流況の解析結果

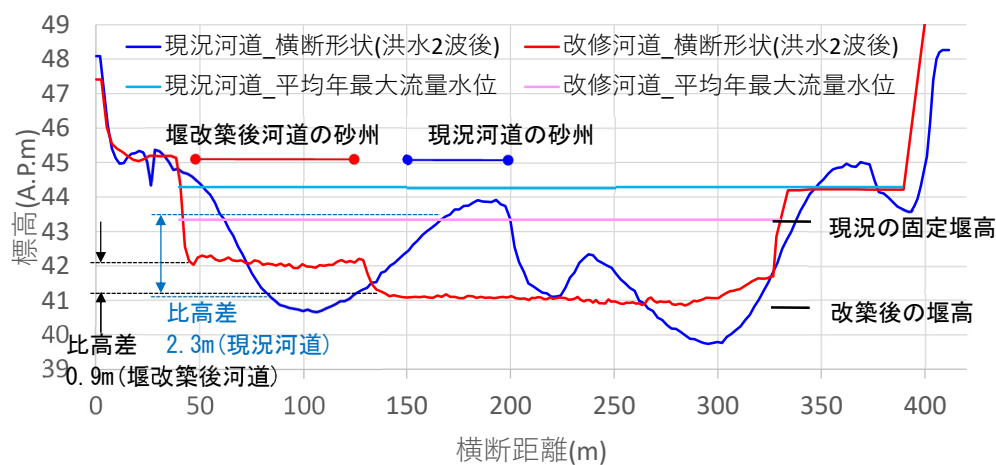


図 4-37 現況河道と堰改築後河道における堰直上流断面 (32.6km) の洪水後の横断形状の解析結果

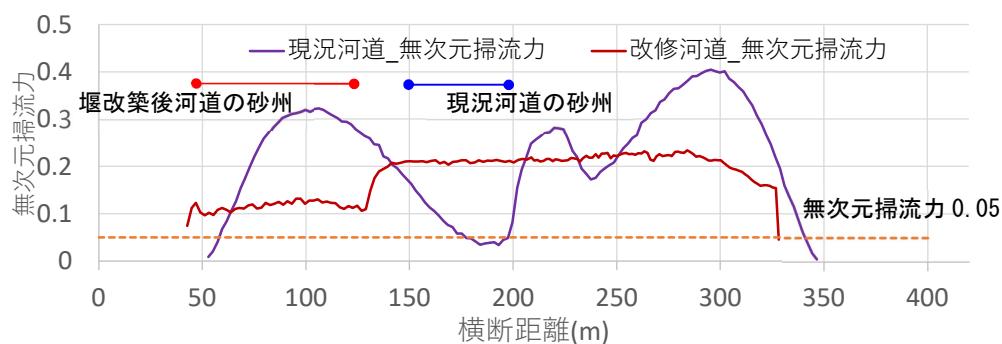


図 4-38 現況河道と堰改築後河道における堰直上流断面 (32.6km) の平均年最大流量時の無次元掃流力分布の解析結果

(2) 堰の改築による周辺河道、既設構造物への影響

堰の改築に伴う低水路河床の低下が周辺河道や既設構造物に及ぼす影響について分析する。図4-39は、堰改築後河道に対する令和元年10月洪水の1波目の洪水ピーク時の水深平均流速コンター、図4-40は、洪水前後(洪水1波後、2波後)の河床高の変化量コンターを示す。図4-39、図4-40より、堰改築後河道では、堰上流で河道が緩やかに湾曲しているため、右岸外岸側の水衝部(33.2~32.6km)で洗掘が生じ、左岸内岸側(34~33.4km)で堆積が生じることで砂州が徐々に発達し、下流へ移動しているのが分かる。砂州及び滯筋の発達に伴う河床の洗掘・堆積は、洪水1波後と2波後で若干下流へ分布が移動しているものの、大きくは進行していない。

堰の改築による上流の京王線橋梁(35.1km)への影響について分析する。図4-41は、現況河道と堰改築後河道における京王線直上流断面(35.2km)の洪水前後の横断形状の比較、図4-42は、京王線直下流断面(35.0km)の洪水前後の横断形状の比較を示す。図4-41より、京王線橋梁直上流断面(35.2km)では、橋脚が河積阻害となって砂州(中州)が発達しているものの、現況河道と堰改築後河道で大きな変化は見られないことから、堰改築による影響はほとんど顕われていない。一方、図4-42より、京王線橋梁直下流断面(35.0km)では、橋脚による流れ、土砂移動への影響が横断的な河床形状の変化に顕われており、現況河道、堰改築後河道ともに右岸沿いの滯筋で局所洗掘が生じている。これは、京王線橋梁の直上流に発達した砂州の影響により、砂州右岸の滯筋に流れが集中するためであり、堰改築の有無に関わらず生じる問題である。このため、京王線橋梁についても、橋梁の改築に合わせて、橋脚による河積阻害を改善するための対策を検討することが望まれる。

次に、堰の改築による上流の関戸橋(34.6km)への影響について分析する。図4-43は、現況河道と堰改築後河道における関戸橋直上流断面(34.8km)の洪水前後の横断形状の比較、図4-44は、関戸橋直下流断面(34.6km)の洪水前後の横断形状の比較を示す。図4-43、図4-44より、関戸橋直上下流では、現況河道と堰改築後河道ともに河床低下が生じている。特に関戸橋直下流断面(34.6km)では、堰改築により水面勾配(図4-31)がやや急勾配となり、それに伴い流速(図4-33)が大きくなるため、堰改築後河道の方が河床洗掘が大きくなっている。このことから、堰改築後の河床変動の状況をモニタリングしながら、必要に応じて関戸橋下流区間の護岸の根入れや、河床を維持するための帯工の設置を検討することが望まれる。

更に、堰の改築による下流の南武線橋梁(31.9km)への影響について分析する。図4-45は、現況河道と堰改築後河道における南武線橋梁直上流断面(32.0km)の洪水前後の横断形状の比較、図4-46は、南武線橋梁直下流断面(31.8km)の洪水前後の横断形状の比較を示す。図4-45と図4-34の低水路平均河床高縦断分布より、大丸用水堰の直下流河道では、堰高とその直下流の河床高の高低差を埋めるように堰を通過した土砂が堆積し、堰上下流の低水路河床高の縦断形が連続するように変化しており、低水路河床の安定化の効果が顕わ

れている。一方、**図4-46**、**図4-34**より、南武線橋梁直下流(31.8km 付近)では、洪水に伴う河床低下が生じている。これは、南武線橋梁付近では低水路幅が狭くなっており、低水路に洪水流が集中するためであり、堰改築の有無に関わらず現況河道でも生じている問題である。上述のとおり、堰の改築により、堰上下流の土砂移動が改善されたことで、下流河道への土砂供給量が増加し、それが南武線下流の低水路河床高の安定化にも寄与することが期待されるが、京王線橋梁の上流と同様に、南武線橋梁の上流も土砂が堆積することが懸念される。このため、堰改築後の河床変動の状況をモニタリングしながら、必要に応じて南武線橋梁付近の低水路幅を拡幅するなど河道の是正を検討することが望まれる。

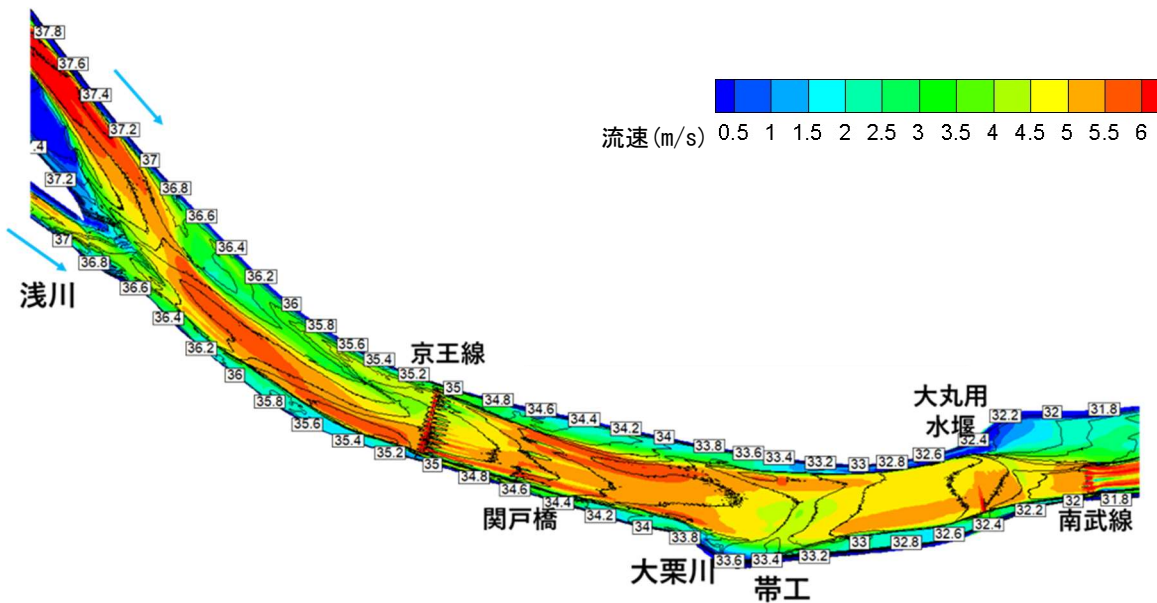
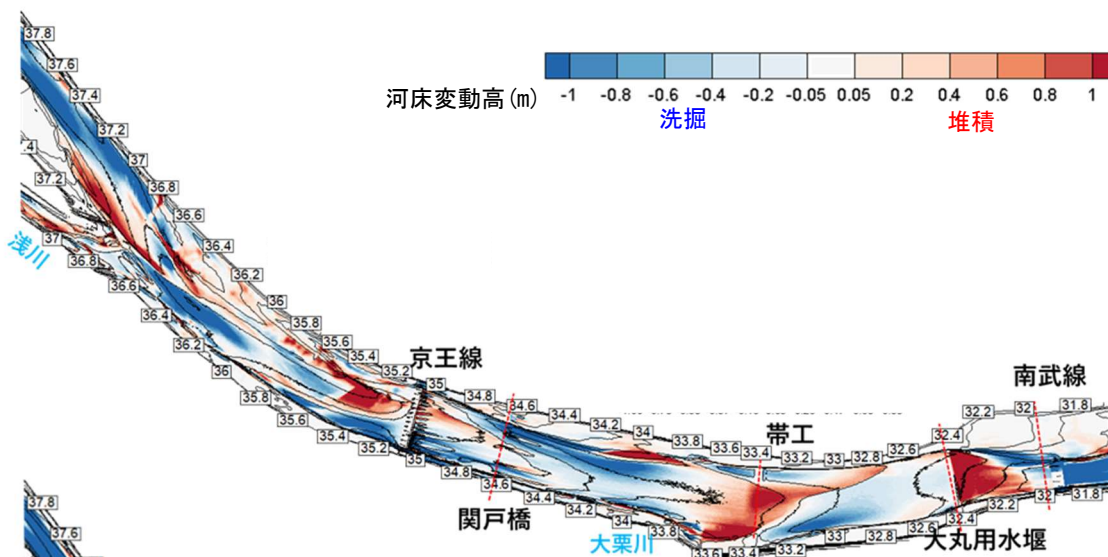
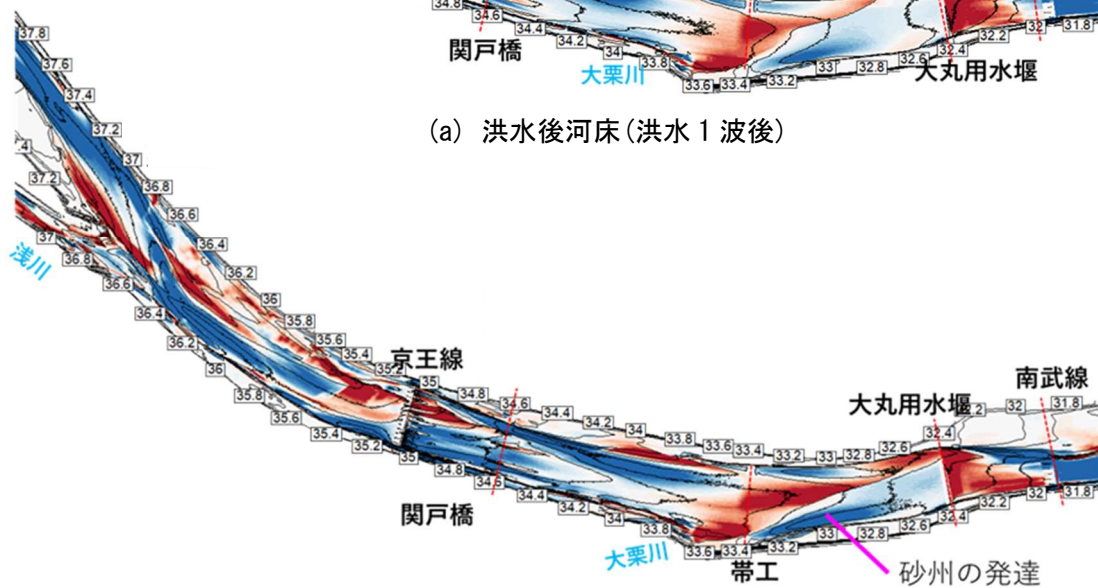


図 4-39 堰改築後河道における洪水ピーク時の水深平均流速コンターの解析結果

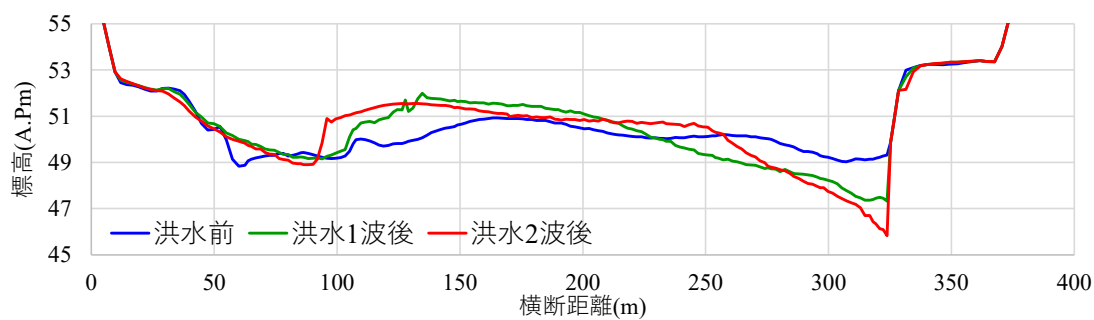


(a) 洪水後河床(洪水 1 波後)

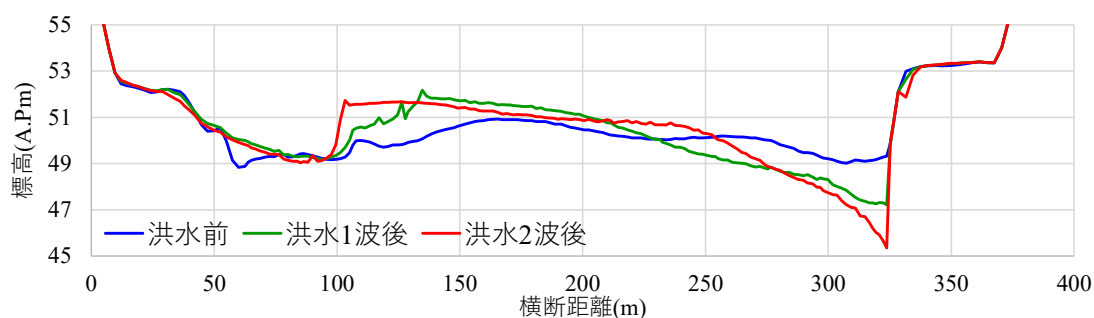


(b) 洪水後河床(洪水 2 波後)

図 4-40 堰改築後河道における洪水前後の河床変動コンターの解析結果

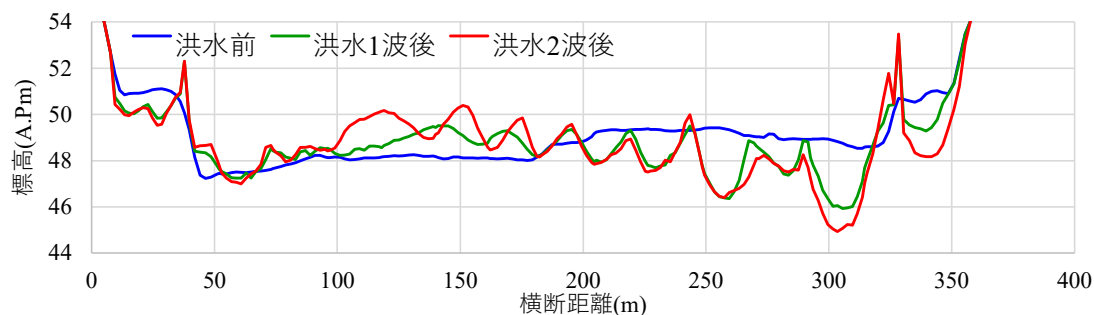


(a) 現況河道

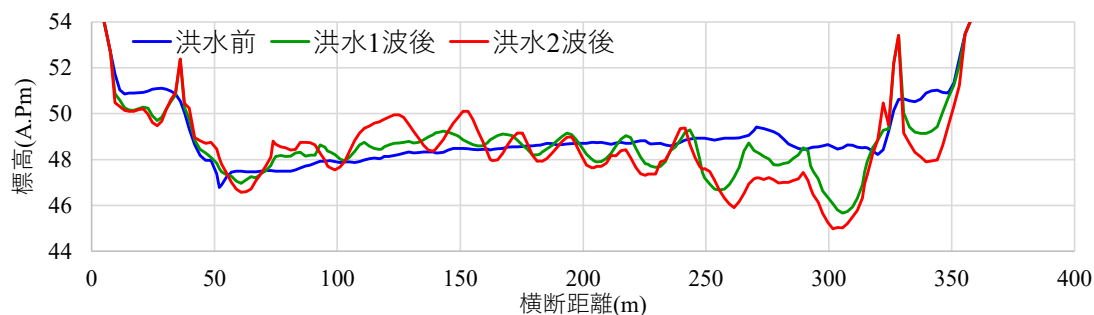


(b) 堰改築後河道

図 4-41 現況河道と堰改築後河道における京王線直上流断面(35km)の洪水前後の横断形状の解析結果

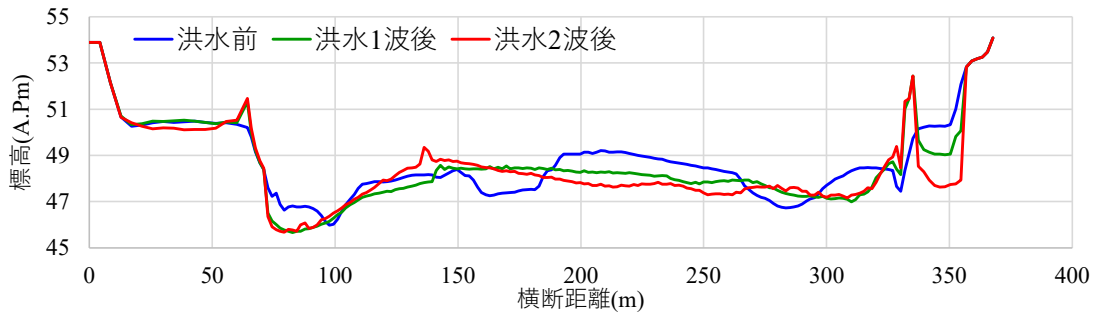


(a) 現況河道

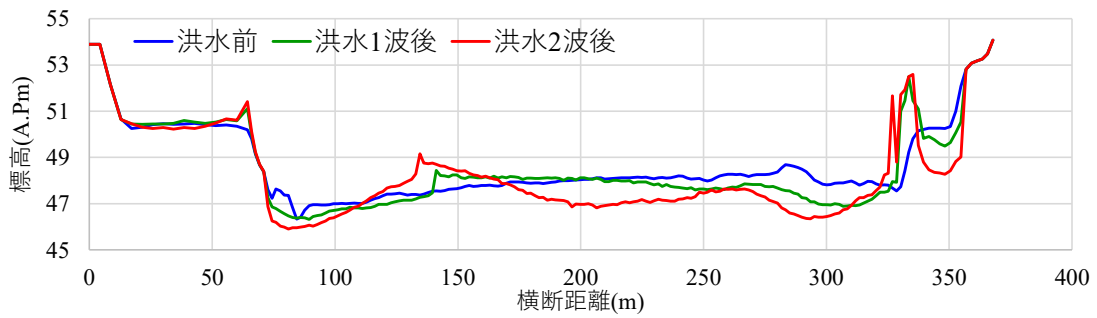


(b) 堰改築後河道

図 4-42 現況河道と堰改築後河道における京王線直下流断面(35km)の洪水前後の横断形状の解析結果

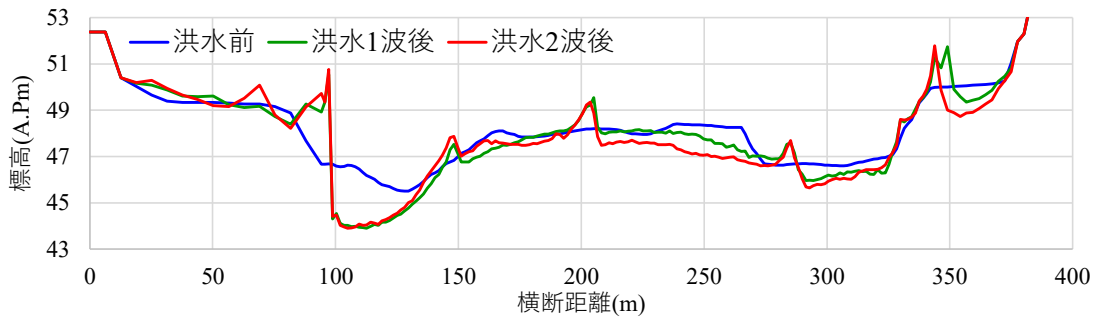


(a) 現況河道

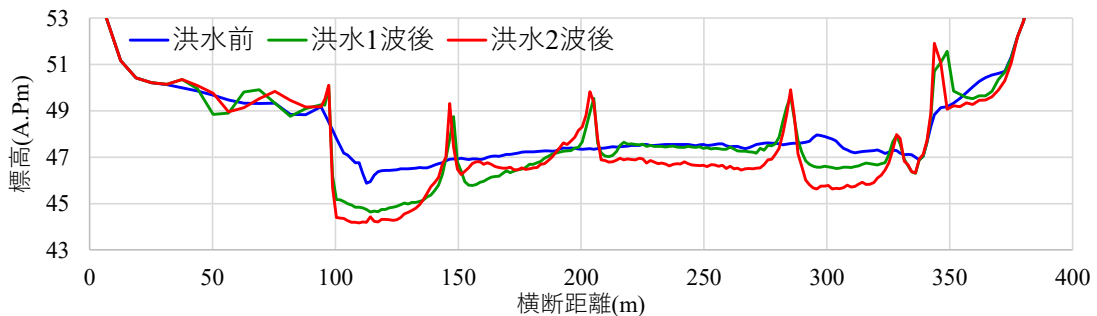


(b) 堰改築後河道

図 4-43 現況河道と堰改築後河道における関戸橋直上流断面(34.8km)の洪水前後の横断形状の解析結果

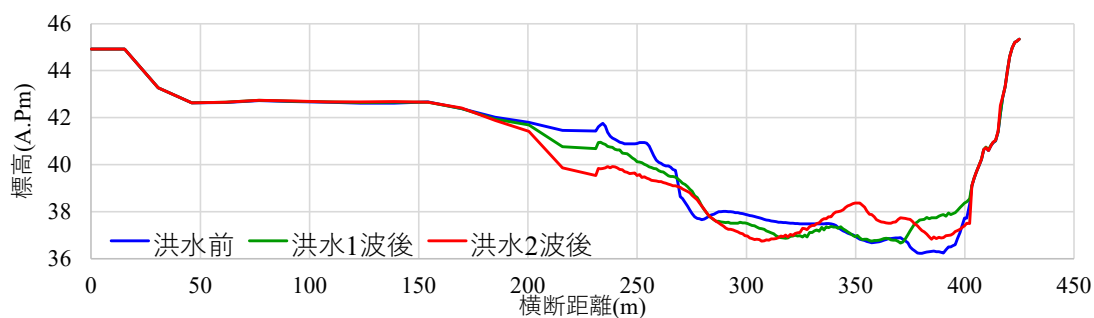


(a) 現況河道

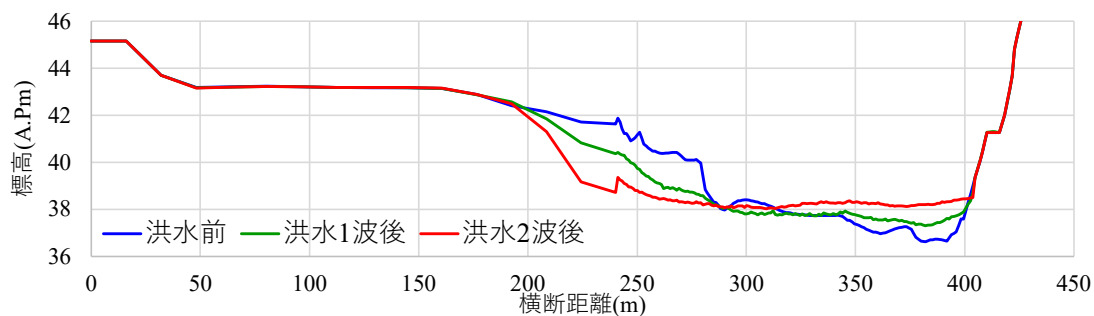


(b) 堰改築後河道

図 4-44 現況河道と堰改築後河道における関戸橋直下流断面(34.6km)の洪水前後の横断形状の解析結果

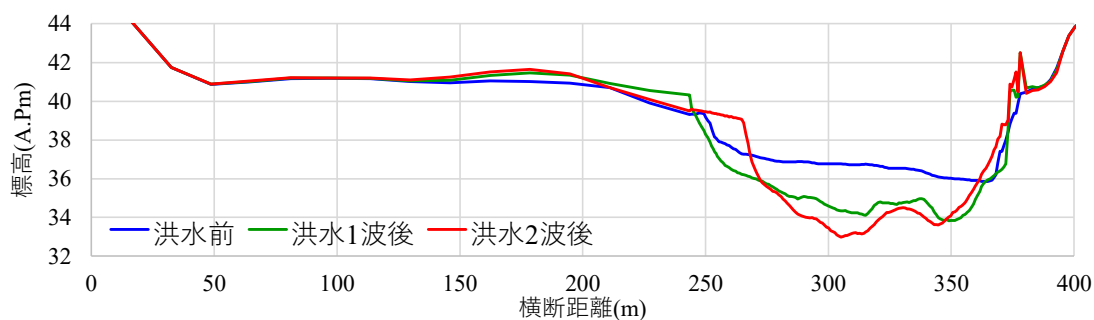


(a) 現況河道

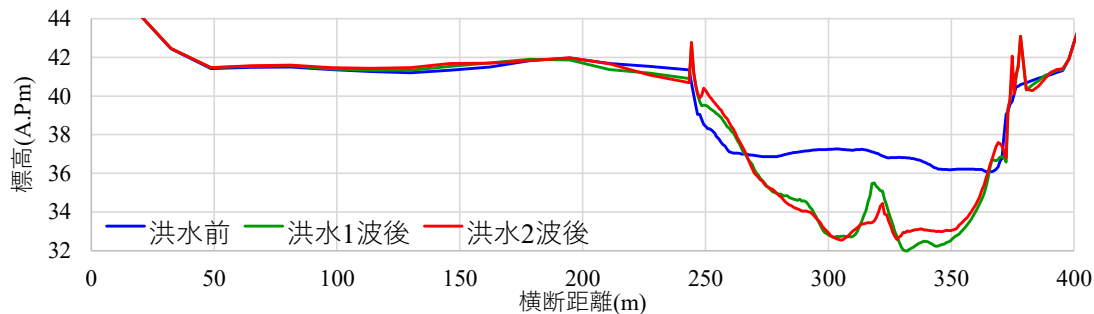


(b) 堰改築後河道

図 4-45 現況河道と堰改築後河道における南武線直上流断面(32.0km)の洪水前後の横断形状の解析結果



(a) 現況河道



(b) 堰改築後河道

図 4-46 現況河道と堰改築後河道における南武線直下流断面(31.8km)の洪水前後の横断形状の解析結果

4-5 第 4 章のまとめ

本章では、第 3 章で明らかとなった浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を活用して、合流点下流区間の低水路の安定化を図るための河道改修技術を検討し、その効果を洪水流・河床変動解析法を用いて評価した。以下に明らかとなったことを示す。

浅川合流点下流区間の河道の流下能力と土砂移動の改善を図るため、大丸用水堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築する対策を技術的に検討した。浅川合流点上流区間の低水路河床縦断形が堰・護床工等の敷高に規定されて安定していることを踏まえ、その安定機構に基づき、堰上流の京王線橋梁(35.1km)の護床工の敷高と堰下流の低水路河床高が経年的に安定している 31.0km 付近の低水路平均河床高をつないだ河床縦断形を改修目標として、その河床縦断形における大丸用水堰地点(32.4km)の高さを、堰改築後の床止め工の敷高として設定した。

堰改築による効果を検証するため、橋梁や堰等の横断構造物周辺の流れと土砂移動を精度良く解析可能な非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析を行った。洪水流の解析法は、水深積分の枠組みで三次元流れを再現できる、竹村ら(2019)による準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS 法)を用いた。河床変動解析法については、長田・福岡(2012)による掃流砂の解析法と、長谷部ら(2022)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した非平衡流砂運動に基づく解析法を用いた。本解析法を令和元年 10 月洪水に適用した結果、実測の洪水水面形の時間変化、流量ハイドログラフ、河床の洗掘・堆積傾向を十分説明できることを確認した。

令和元年 10 月洪水の流量ハイドログラフ 2 波形分を外力として、現況河道と堰改築後河道の解析結果を比較し、堰改築による効果を評価した。その結果、堰改築後河道では、洪水ピーク時の水面形が計画高水位を下回り、河道の流下能力が向上すること、現況河道に比べて堰を通過する流砂量が増加し、堰上下流の土砂移動が改善されることを示した。また、堰改築後河道では、砂州の移動が妨げられなくなったことで、規則的な砂州(交互砂州)が形成され始め、現況河道で見られた低水路内の不規則な砂州(中州)の発達は解消される。これにより、堰直上流の砂州の比高差は 0.9m 程度に抑えられ、これは樹木が繁茂しやすい比高差(2.0m 程度以上)と比べて十分に低く、平均年最大流量規模の洪水により砂州全体で活発な土砂移動が生じるため、砂州上の樹木の繁茂は抑制される。以上のことから、大丸用水堰を切り下げて床止め工に改築し、低水路河床の縦断形を是正することにより、河道の流下能力と土砂移動の改善をもたらし、低水路の安定化に大きく寄与することを明らかにした。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 福岡捷二: 札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究, 北海道河川財団研究所紀要(XXIV), pp.123-164, 2013.
- 5) 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.
- 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.I_967-I_972, 2022.
- 7) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, pp.607-612, 2007.
- 8) 中井隆亮, 須藤純一, 福岡捷二: 樹木群スケール, 河道スケールと樹木群透過係数の関係, 河川技術論文集, 第16巻, pp.431-436, 2010.

第5章 安定した砂州河道と生物のハビタットの形成の関係

5-1 概説

本章では、第3章で示した低水路の安定化に伴い形成される「船底形断面形」について、多様な植生の生育場の維持と洪水時の魚類の避難場所の形成の観点から分析し、「船底形断面形」が治水と河川環境の調和した河道断面形となり得ることを考察した。

5-2項では、多摩川流域の生物の生息・生育状況として、植物の生育状況と魚類の生息状況について、河川水辺の国勢調査結果等を用いて長期的な変化を概観した。5-3項では、安定した砂州河道と植生の生育場の関係について、砂州上の植生を一年生草本群落、オギ群落(多年生草本群落)、樹木群落に区分し、それぞれの生育範囲を砂州の比高差と解析結果から求めた砂州の冠水・河床変動が生じる洪水流量を関係付けて分析し、「船底形断面形」を形成している砂州河道では多様な植生の生育場が動的に保たれていることを考察した。そして、5-4項では、これまでほとんど研究が行われていない洪水時の魚類の避難場所の形成に着目し、洪水時に魚類が高流速に反応して避難行動をとっているとの知見を踏まえ、多摩川の代表的な魚種(アユ、オイカワ)を対象に、第4章で行った解析結果を用いて、それらの遊泳速度以下の低流速域を魚類の避難場所となる可能性のある領域とみなし、洪水流量に応じて低流速域が形成される河道の特徴を、「船底形断面形」と関係付けて考察した。

5-2 多摩川の生物の生息・生育状況

多摩川の生物の生息・生育状況を把握するため、昭和51年から作成されている植生図(平成17年以降は河川水辺の国勢調査結果)や平成7年から実施されている魚類の河川水辺の国勢調査結果を用いて、植物の生育状況と魚類の生息状況の長期的な変化の傾向を概観した。

5-2-1 多摩川における植物の生育状況の長期的変化

多摩川でこれまでに作成されている植生図(表5-1)を用いて、多摩川の植物の生育状況の経年変化を概観する。図5-1は、多摩川(61~0km)における植生の面積率の経年変化を示す。これは、植生図より高水敷全体に占める植生区分(草本類、木本類、自然裸地等)及び人工施設の面積率を1km区間毎に集計し、植生区分の面積率の縦断コンター図で表示したものである。植生の生育状況は、その生育基盤となる河道の特性と密接に関係することから、河道の特性の類似する区間を縦断的に区分したセグメント区分(表5-2)¹⁾に着目し、縦断的な植生の生育状況の違いやその経年変化を分析した。図5-1より、下流のセグメント3(デルタ:6~0km区間)、2-2(自然堤防帯~デルタ:13.2~6.0km区間)、セグメント2-1(谷底平野~自然堤防帯:32.4~13.2km区間)の下流区間では、高水敷のグラウンド等の人工施設の整備が進んでおり、人工地の面積割合が大きい。セグメント2-1の上流区間(二ヶ領宿河原堰より上流)からセグメント1(扇状地~谷底平野:61.8~32.4km区間)にかけて、上流に行くに従って、縦断的に高水敷の自然地(自然裸地、植物群落)の面積割合が増加する傾向が見られる。また、支川が合流する区間では草本植物群落の面積割合が高く、支川合流点の氾濫原として多様な植物の生育場が維持されている特徴と符合している。

植生の経年的な変化を見ると、セグメント1の区間(61.8~32.4km区間)において、木本植物群落の面積割合の増加が顕著であり、河道の樹林化が顕在化している。この多摩川における河道の樹林化の要因について、李・藤田²⁾らは、昭和49年、昭和57年の大規模洪水による礫河原上の細粒土砂の堆積がハリエンジュ群落の生育に適した立地環境(比高、冠水状況)を形成したこと、また、知花⁴⁾、原田⁵⁾は、多摩川で連続的に設置されている堰の下流1km付近でそのような細粒土砂が堆積しやすい河道の状態になっていることを明らかにしている。セグメント1の区間における木本植物群落の拡大は、平成17年(図5-1(c))まで進行しているが、それ以降は概ね安定しつつあり、洪水に伴って自然裸地と草本植物群落の間で遷移を繰り返している。平成17年以降、礫河原再生事業(平成13年:永田橋上流(52km付近)、平成24年:睦橋上下流:(49km付近)、平成26~28年:多摩大橋上下流(44km付近)、平成24年、26年:浅川合流点(37km付近))の効果が顕われ始め、木本植物群落から自然裸地、草本植物群落に遷移している。

以上のことから、多摩川の植生の生育状況を長期的に見ると、昭和51年以降、セグメント1区間で河道の樹林化が進行していたが、平成17年以降は、樹林化はほぼ収束する傾向

が見られ、全川の的に大規模洪水に伴って自然裸地と草本植物群落が遷移する、動的に安定した状況となっている。

表 5-1 多摩川で作成されている植生図の一覧

作成年	出典	備考
昭和 51(1976)年	とうきゅう浄化環境財団(多摩川河川敷現存植生図)	昭和 49 年 9 月洪水後
平成 6(1994)年	建設省京浜工事事務所(多摩川河川敷現存植生図)	
平成 11(1999)年	建設省京浜工事事務所(多摩川河川敷現存植生図)	平成 11 年 8 月洪水後
平成 17(2005)年	国土交通省京浜河川事務所(河川水辺の国勢調査(河川環境基図))	
平成 22(2010)年	国土交通省京浜河川事務所(河川水辺の国勢調査(河川環境基図))	
平成 27(2015)年	国土交通省京浜河川事務所(河川水辺の国勢調査(河川環境基図))	
令和 2(2020)年	国土交通省京浜河川事務所(河川水辺の国勢調査(河川環境基図))	令和元年 10 月洪水後

表 5-2 各セグメントとその特徴¹⁾

項目	セグメントM	セグメント1	セグメント2		セグメント3
			2-1	2-2	
地形区分					
河床材料の代表粒径	さまざま	2cm以上	3cm~1cm	1cm~0.3mm	0.3mm以下
河岸構成物質	河床河岸に岩が出て いるところが多い	表層に砂, シルトが 乗ることがあるが薄 く, 河床材料と同一 物質が占める	下層は河床材料と同一, 細 砂, シルト, 粘土の混合物		シルト・粘土
勾配の目安	さまざま	1/60 ~ 1/400	1/400 ~ 1/5,000		1/5,000 ~ 水平
蛇行程度	さまざま	曲がりが少ない	蛇行が激しいが, 川幅水深比 が大きいところでは 8 字蛇行 または島の発生		蛇行が大きいものも あるが小さいものも ある
河岸侵食程度	非常に激しい	非常に激しい	中, 河床材料が大きいほうが 水路は良く動く		弱, ほとんど水路の 位置は動かない
低水路の平均深さ	さまざま	0.5~3m	2~8m		3~8m

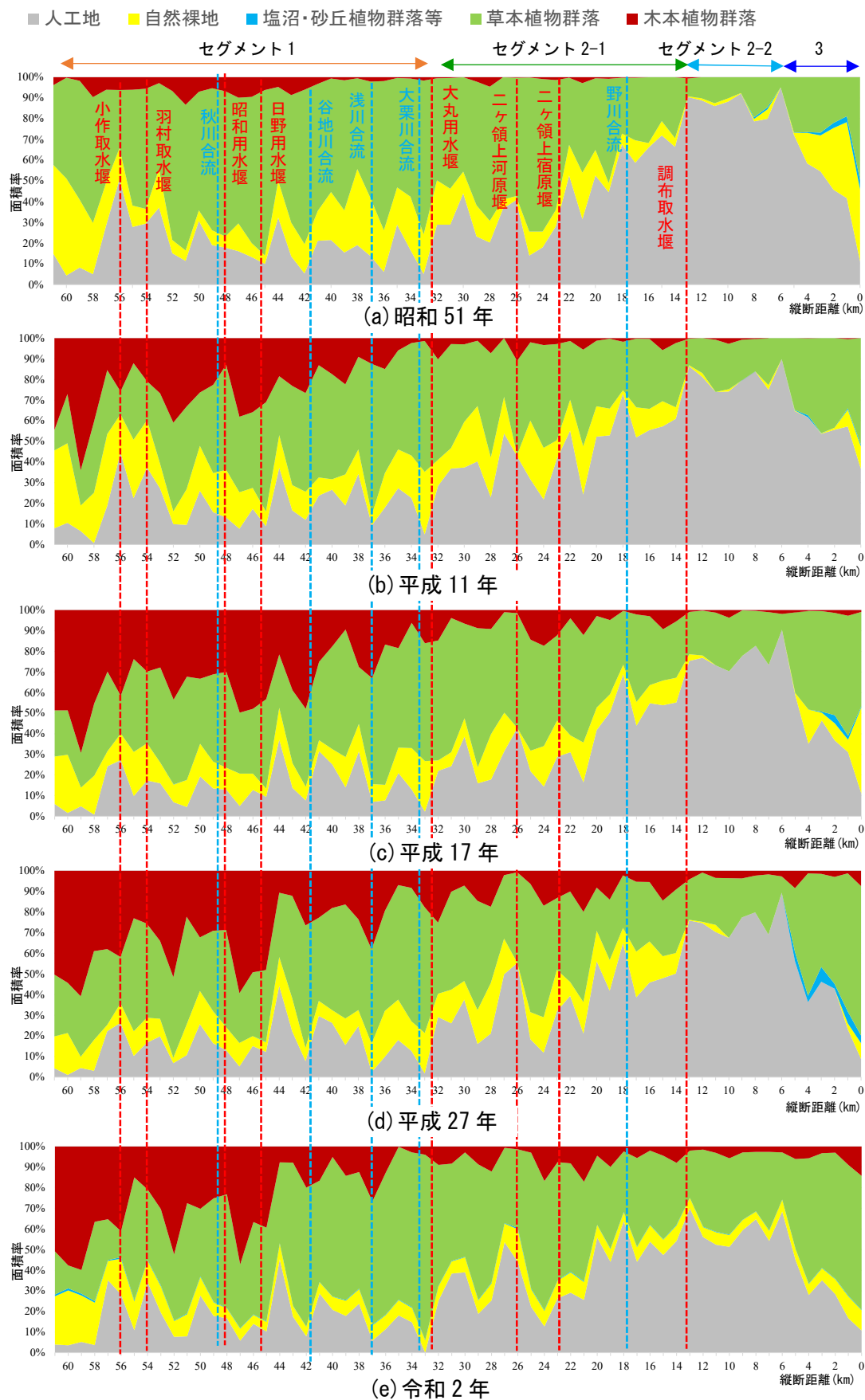


図5-1 多摩川における植生の面積率の経年変化

次に、砂州・高水敷上の植物群落の面積率が高いセグメント 1 区間(62～32km)における、木本群落(樹木)と代表的な多年生草本群落であるオギ群落の経年変化について示す。図 5-2 は、縦断 1km ピッチで集計した樹木群落の面積の経年変化(昭和 51 年～令和 2 年)、図 5-3 は、オギ群落の面積の経年変化を示す。図 5-2 より、樹木群落は、昭和 51 年から平成 17 年にかけてセグメント 1 の全区間で拡大しており、特に羽村取水堰下流～JR 中央線区間(54～41km)の樹林化が顕著であり、土丹が露出し、河道の二極化が進行した区間と対応している。前述のとおり、平成 17 年以降は樹木群落の拡大はほとんど収まっている。

図 5-3 より、オギ群落は、秋川合流点～大丸用水堰区間(49～32km)で生育しており、日野用水堰上流～JR 中央線区間(46～41km)が主要な生育場となっている。特に広大なオギ原が生育していた多摩大橋下流(44～42km)では、樹木群落の拡大にともなってオギ群落は減少しているが、全体的に概ね維持しており、安定性の高い植物群落であることが伺える。なお、令和元年 10 月洪水直後の令和 2 年は、砂州上の植生の多くが洪水による攪乱を受け裸地化し、一年生草本群落に遷移したため、オギ群落も全体的に減少しているが、今後、一年生草本群落から多年生草本群落であるオギ群落の遷移する可能性は高い。

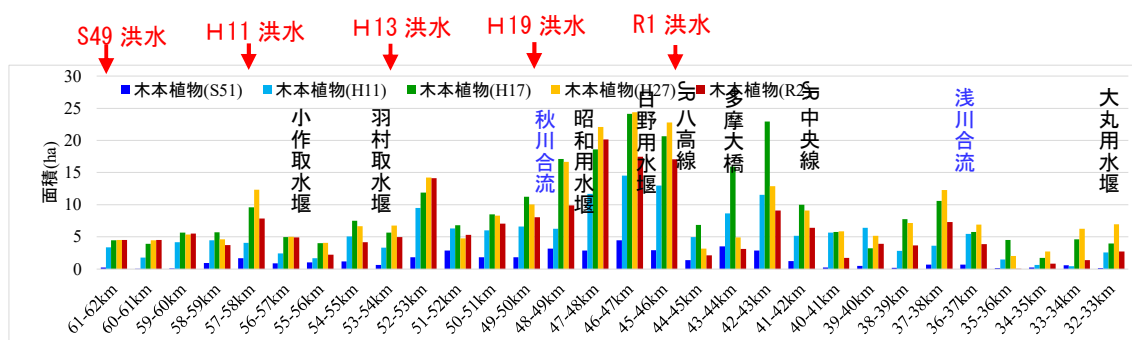


図 5-2 多摩川中・上流部(セグメント 1)における樹木群落の面積の経年変化

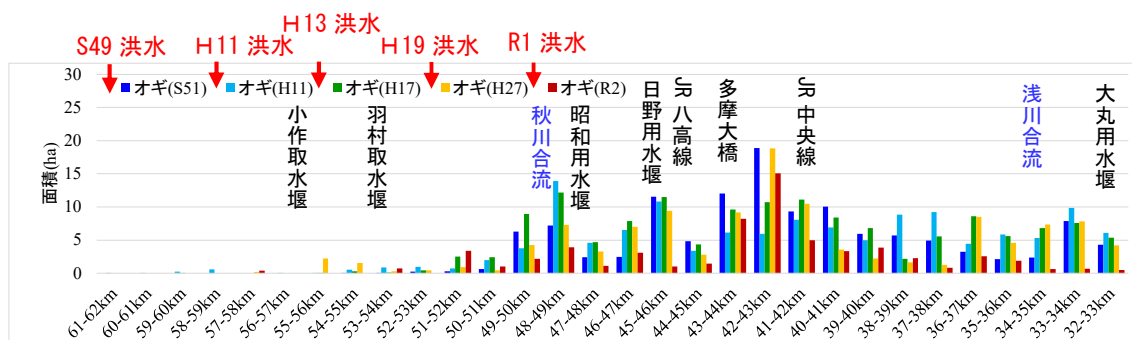


図 5-3 多摩川中・上流部(セグメント 1)におけるオギ群落の面積の経年変化

5-2-2 多摩川における魚類の生息状況の長期的変化

(1) 魚類の生息状況の長期的な変化

河川水辺の国勢調査結果を用いて、多摩川の魚類の生息状況を概観する。図5-4は、多摩川流域における河川水辺の国勢調査による魚類調査の位置図を示す。多摩川流域では、平成4年以降、概ね5年周期で計6回（平成4年、7年、13年、18年、23年、28年）の魚類調査が、16箇所の調査地区（うち、2箇所が浅川）で実施されている。本研究では、データフォーマットが概ね統一されている2～6回目の調査データを用いて、平成7年～平成28年における魚類の生息状況の経年変化について分析を行った。分析にあたっては、魚類の生息状況は縦断的な河道特性の違いに関係していると考えられることから、河道の特性の類似する区間を縦断的に区分したセグメント区分(表5-2)¹⁾に着目した。多摩川では、セグメント1(扇状地～谷底平野)が61.8～32.4km区間(調査地区⑭～⑨)、セグメント2-1(谷底平野～自然堤防帯)が32.4～13.2km区間(調査地区⑧～⑤)、セグメント2-2(自然堤防帯～デルタ)が13.2～6.0km区間(調査地区④～③)、セグメント3(デルタ)が6.0～0km区間(調査地区②～①)に区分される。

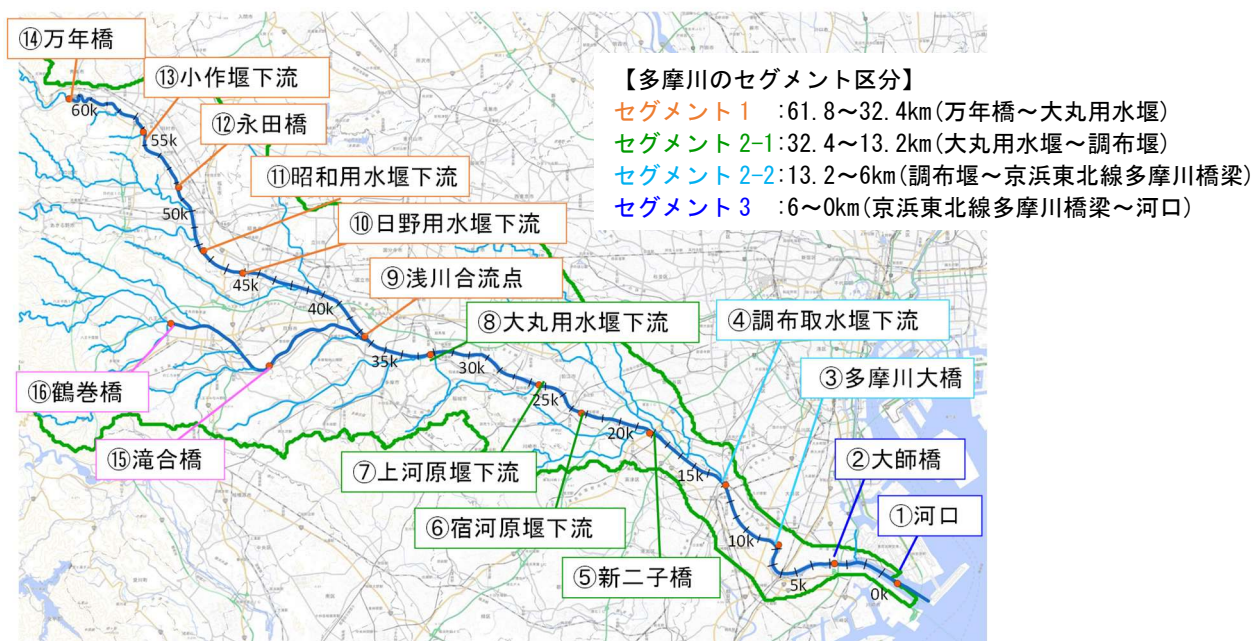


図5-4 多摩川流域における魚類調査（河川水辺の国勢調査）位置図

図 5-5 は、多摩川における魚類(在来種・外来種別)の確認種数の経年変化を示す。各調査地区の魚類の生息状況は、在来魚種に着目すると、確認種数が経年的に微小に増加する傾向にある地区(③多摩川大橋、⑥宿河原堰下流、⑦上河原堰下流、⑭万年橋)、各調査年で変動している地区(①河口、③多摩川大橋、⑨浅川合流点)が見られるものの、全体的に同一セグメントの平均確認種数程度で推移しており、長期的に見て大きく変化していない。外来魚種については、比較的上流の調査地区で1~2種程度確認されているが、経年的に大きく増加していない。また、同一セグメント内の調査地区では、在来魚種の確認種数が概ね同程度であり、淡水魚と海水魚の両方が生息するセグメント3(①河口、②大師橋)を除くと、上流のセグメント程、確認種数がやや高い傾向が見られる。都市部を流下し両岸にグラウンドが整備され、河床形状が単調である下流部に比べて、上流部は自然河岸が残り、交互砂州とともに瀬・淵やワンドが形成されていることから、魚類の生息場の多様さが種数に関係しているものと考えられる。

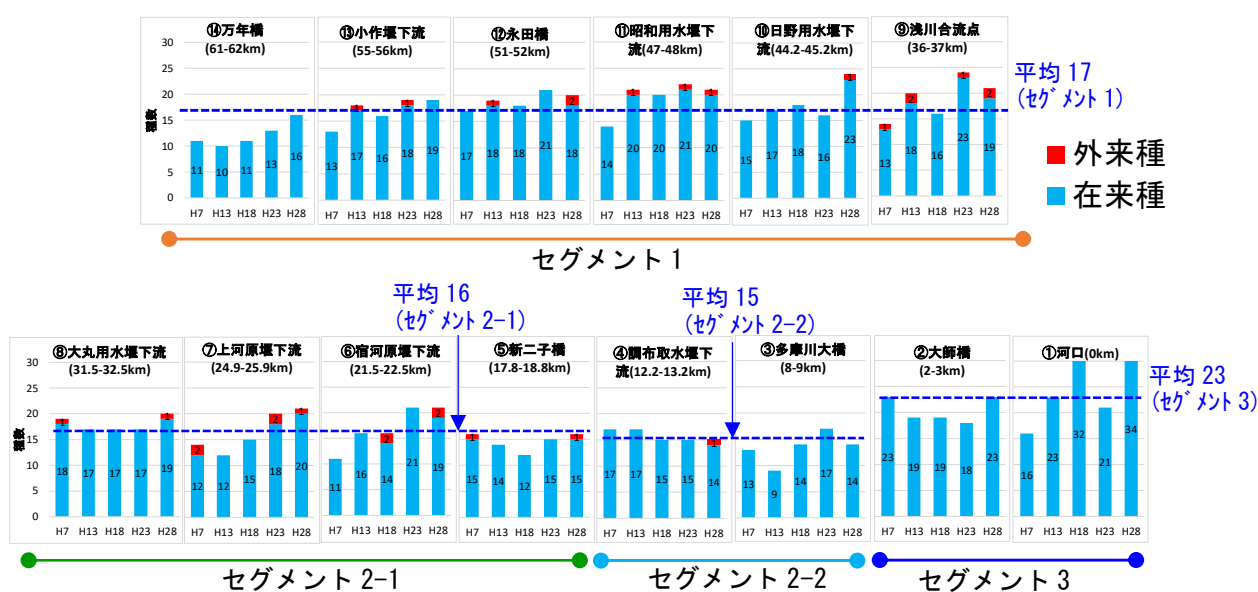
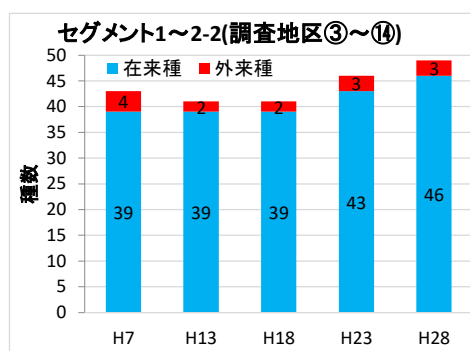


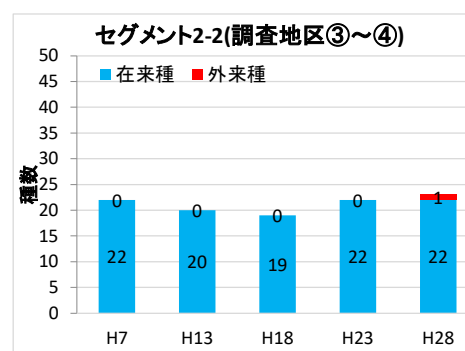
図 5-5 多摩川本川の魚類の確認種数の経年変化 (平成 7 年~28 年)

図 5-6 は、セグメントごとの魚類の確認種数の経年変化を示す。なお、セグメント 3 (調査地区①~②) は、海水魚を含むため、他のセグメントとは種数、種の構成が異なることから、ここでは除外した。図 5-6(a) より、セグメント 1~2-2 の調査地区全体の在来魚種の確認種数は、平成 7 年~平成 18 年の間で横ばいであり、平成 18 年以降、増加しつつある。外来魚種の確認種数は経年的に大きく変化していない。セグメント毎の魚類の確認種数の経年変化を見ると、セグメント 2-2(図 5-6(b))は種数が概ね横ばいとなっており、セグメント 2-1(図 5-6(c))は平成 13 年以降、種数が経年的に微小に増加し、セグメント 1(図 5-6(d))も平成 7 年以降、種数が経年的に微小に増加する傾向が見られる。以上のこ

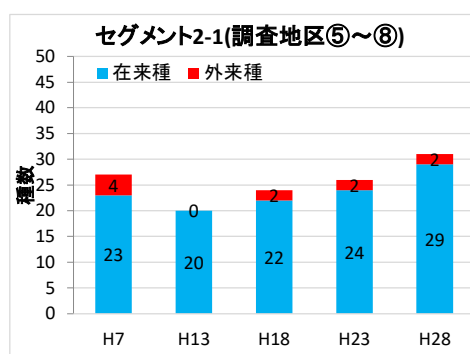
とから、セグメント毎に見た魚類の確認種数は、平成 7 年～平成 13 年以降、経年的に微増する傾向にあり、河川改修や洪水によって魚類の生息場が短期的に変化した場合でも、5 年間隔のスパンで見ると、魚類の生息状況は概ね安定していると推察される。



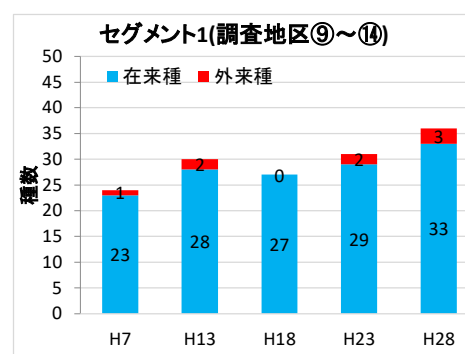
(a) セグメント 1～2-2 (調査地区③～⑭)



(b) セグメント 2-2 (調査地区③～④)



(c) セグメント 2-1 (調査地区⑤～⑧)



(d) セグメント 1 (調査地区⑨～⑭)

図 5-6 多摩川本川のセグメント毎の魚類の確認種数の経年変化

5-3 安定した砂州河道と植生の生育場の関係

安定した砂州河道と植生の生育場の関係について、多摩川中流部の代表的な植生である広大なオギ原が経年的に維持されている多摩大橋上下流区間(44.0~42.8km)、JR中央線上流区間(42.0~41.6km)を対象に、砂州上の植生を一年生草本群落、オギ群落(多年生草本群落)、樹木群落に区分し、それぞれの生育範囲を砂州の比高差、解析結果による砂州上の洪水・河床変動が生じる洪水流量との関係で分析し、低水路の安定化が、多様な植生の生育場の動的な維持につながっていることを考察した。

5-3-1 砂州上の植生の生育条件

植生の生育条件については、李・藤田らの研究²³⁾より、平水位(地下水位)からの「比高差」と表層細粒土層の「堆積厚」の関係で分類できることが示されている。ここではその知見を参考にして、図5-7に示すとおり、植生が生育している箇所の砂州の高さと低水路平均河床高の高低差、すなわち「比高差」と、礫河原上に細粒土層が堆積する要因となった昭和49年9月洪水、昭和57年8月洪水以降の河床高に対する昭和49年の河床高からの河床高の差、すなわち「堆積厚」を指標に、オギ群落に代表される草本群落及びハリエンジュ、ヤナギ類等の樹木群落の生育条件を分析した。

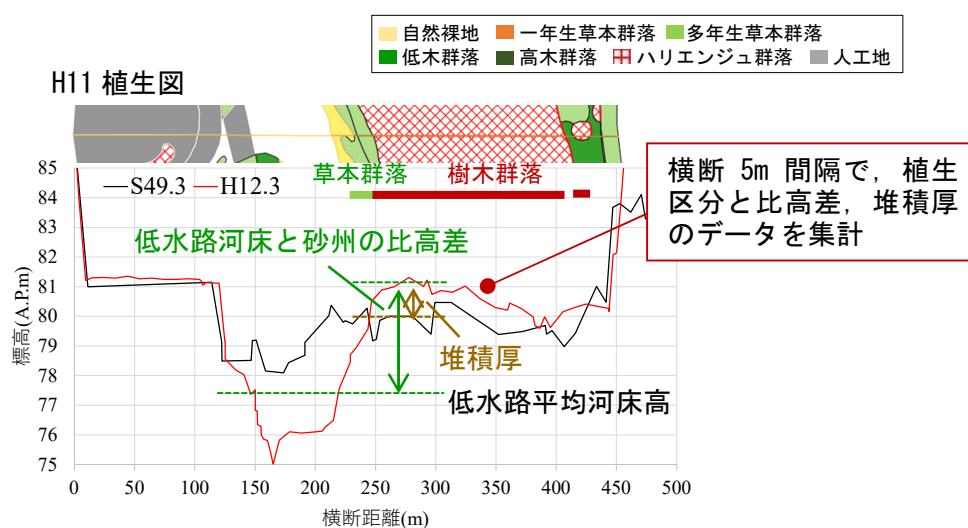


図 5-7 砂州上の植生の生育場の「比高差」と「堆積厚」の算定イメージ

図5-8は、広大なオギ原が形成されている多摩大橋上下流区間(44~43.6km, 43.2~42.8km)、JR中央線上流区間(42~41.6km)を対象とした、草本群落、樹木(木本)群落の生育場の比高差と堆積厚の関係の経年変化を示す。これは、図5-7に示すとおり、各年代の植生図(昭和51年、平成11年、平成17年、令和2年)とその直近の年代の横断測量図(昭和50年、平成12年、平成18年、令和2年)を重ね合わせて、横断5m間隔の植生と河床高

のデータを作成し、各点の比高差と昭和 49 年以降の河床高の堆積厚の関係をプロットしたものである。図 5-8 より、樹木群落は平成 11 年以降生育し始め、比高差 2~4m 程度、堆積厚 0~2m 程度の砂州上に生育していることが分かる。これは、樹木群落の代表的な種であるハリエンジュの生育に、根茎を広げるための細粒表土層が必要であること、根茎の生長を妨げる地下水からある程度の比高差が必要であることと合致している²⁾³⁾。一方、草本群落は、比高差 1~4m 程度、堆積厚 0~2m 程度の範囲に生育しており、令和 2 年(図 5-8 (d))では、平成 26~28 年の多摩大橋周辺地区(43.4~44.2km)の河川改修により砂州が切下げられたことで、堆積厚-2~0m における分布が拡大している。比高差 2.0m 程度以上の草本群落は、樹木群落の生育条件とほぼ重なっているため、樹木群落へ遷移する可能性があることを示唆している。

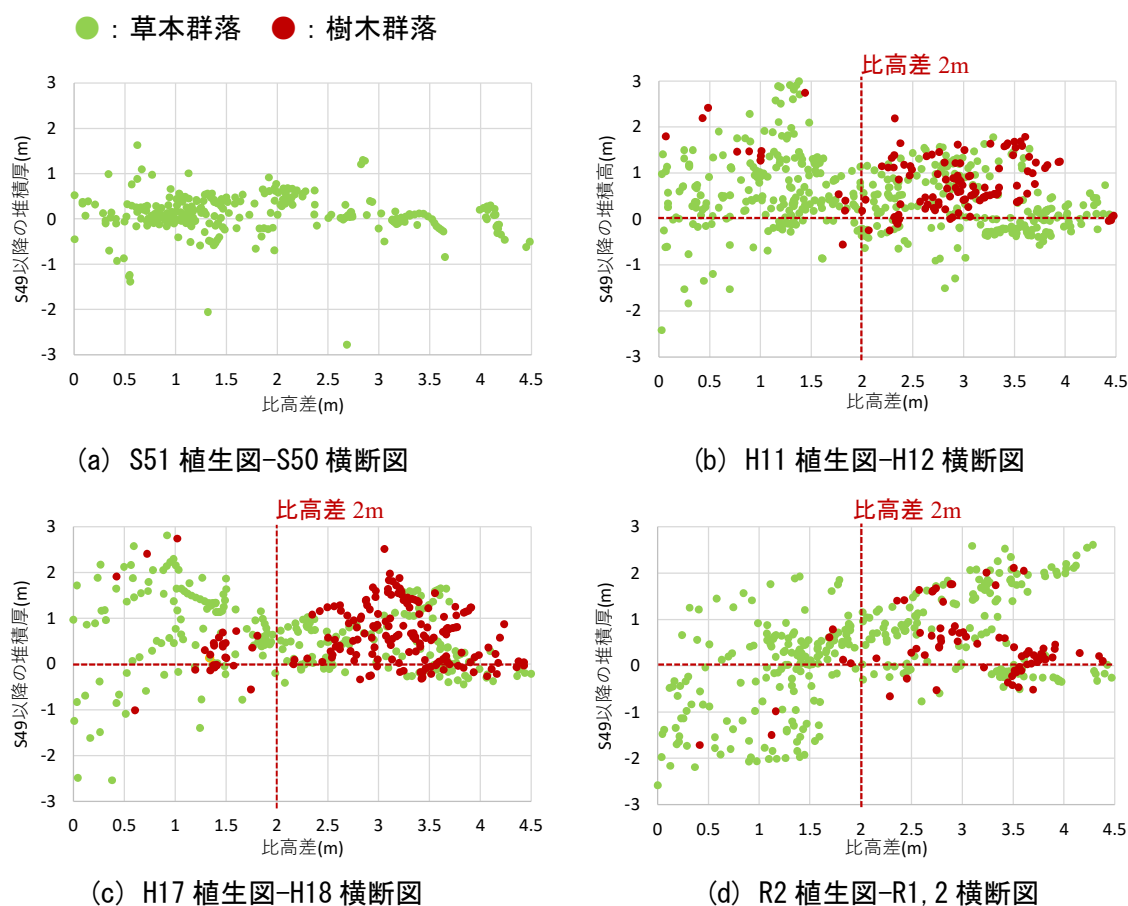


図 5-8 草本群落・樹木群落の生育場の比高差と堆積層厚の関係の経年変化

植生の生育条件となる低水路河床と砂州の比高差について、第 4 章で実施した洪水流・河床変動解析の結果を用いて分析し、当該区間の砂州の比高差の持つ水理的な特徴を考察した。

図 5-10 は、JR 八高線下流～JR 中央線区間(44.4～41.4km)を対象とした砂州の比高差と冠水開始流量(解析結果)の関係、図 5-11 は、砂州の比高差と、代表粒径(d_{60})が無次元掃流力 0.05 に達した時の移動開始流量(解析結果)の関係を示す。代表粒径(d_{60})は、図 5-9 に示す解析に用いた粒度分布(解析対象区間の平均的な粒度分布)を用いた。図 5-10、図 5-11 より、樹木群落の生育場の比高差の下限の目安値となる 2.0m に着目すると、比高差が 1.5～2.0m の砂州は、流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度で冠水し、流量 $2,500\text{m}^3/\text{s}$ 程度で代表粒径(d_{60})が移動し攪乱が生じる可能性がある。流量 $2,000\sim 2,500\text{m}^3/\text{s}$ の洪水は、平成 11 年 8 月洪水(日野橋 $2,353\text{m}^3/\text{s}$)の規模に相当し、46 年間(昭和 49 年～令和元年)の最大観測流量データを用いたハーゼン法によると、5～8 年に 1 回程度の発生確率である。これにより、平成 11 年以降、比較的高い頻度で発生している $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える大規模洪水によって、比高差 2.0m 以下の砂州が攪乱を受けることを顕わしている。一方、砂州の比高差が 3.0m 以上になると、流量 $3,500\text{m}^3/\text{s}$ 程度を超える洪水でないと、砂州上の冠水、攪乱がほとんど発生しない。流量 $3,500\text{m}^3/\text{s}$ の洪水は、平成 19 年 9 月洪水(日野橋 $3,440\text{m}^3/\text{s}$)の規模に相当し、20 年に 1 回程度の発生確率である。このため、砂州の比高差が 3.0m 以上になると、攪乱を受ける頻度が著しく低下することになる。

上記の砂州の比高差の持つ水理的な特徴を踏まえ、植生の生育場との関係を考察する。

図 5-12 は、砂州の比高差とそれに対する冠水開始流量の解析結果(図 5-10 に示す平均値)と代表粒径(d_{60})の移動開始流量の解析結果(図 5-11 に示す平均値)、植生の生育範囲の関係を示す。植生の生育範囲は、令和 2 年の植生図と横断測量結果から求めており、一年生草本群落(オオブタクサ群落、オオイニタデ-オオクサキビ群落)、オギ群落(多年生草本群落)、樹木群落(ハリエンジュ群落、ヤナギ類等)の生育範囲(比高差)の集計値を示している。図 5-12 より、比高差が 1.0m 程度以下の砂州では、一年生草本群落が優占している。これは、流量 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度(平均年最大流量規模：発生確率 1/2 年)で砂州が冠水し、流量 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ 程度で代表粒径(d_{60})が移動し砂州河床が攪乱を受けるため、砂州が洪水によって裸地化した後、速やかに一年生草本群落に遷移するためと考えられる。この比高差の範囲では、洪水による冠水・攪乱が 1～2 年に 1 回程度発生するため、自然裸地と一年生草本群落の遷移が短期的に繰り返されることで、オギ等の多年生草本群落は定着しづらくなっている。次に、比高差 1.0～2.0m 程度の砂州では、一年生草本群落とオギ群落が生育している。これは、流量 $1,500\sim 2,500\text{m}^3/\text{s}$ 程度(平成 11 年 8 月洪水規模：発生確率 1/3 年～1/8 年)で砂州が冠水し、流量 $2,000\sim 3,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度(発生確率 1/5 年～1/13 年)で砂州河床が攪乱を受けることから、樹木の定着・拡大が抑制されており、経年的に一年生草本群落から多年生草本群落に遷移することで、オギ原等(多年生草本群落)の生育に適しているものと考えられる。

また、比高差 3.0m 程度以上の砂州では、流量 $3,500\text{m}^3/\text{s}$ 程度(平成 19 年 9 月洪水規模：発生確率 1/20 年)以上の洪水でないと砂州が冠水せず、砂州河床の攪乱がほとんど生じないため、経年的に草本群落から樹木群落に遷移しやすく、砂州が樹林化する可能性が高い。

以上のことから、各植生区分の生育範囲は、砂州の比高差とそれに応じた洪水による冠水・攪乱流量の関係で概ね説明できることを示した。これにより、砂州の比高差について洪水による冠水・攪乱流量及びその発生確率を関係付けることは、植生に配慮した河道管理を考える上で重要な指標となり得る。

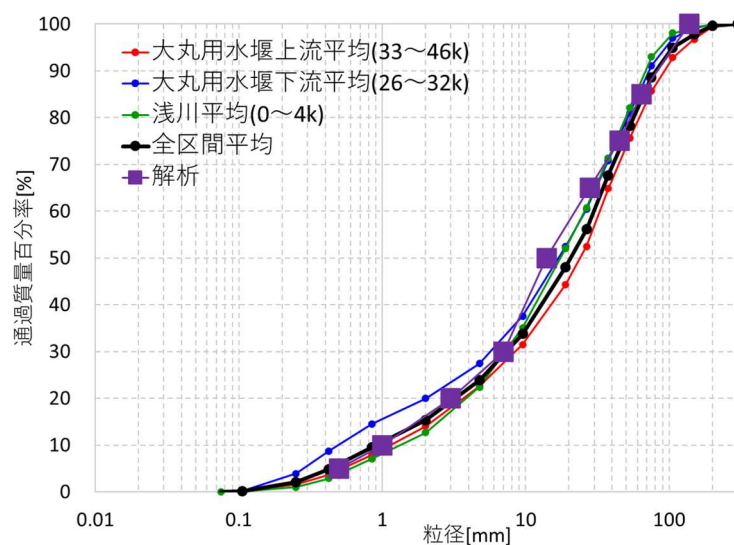
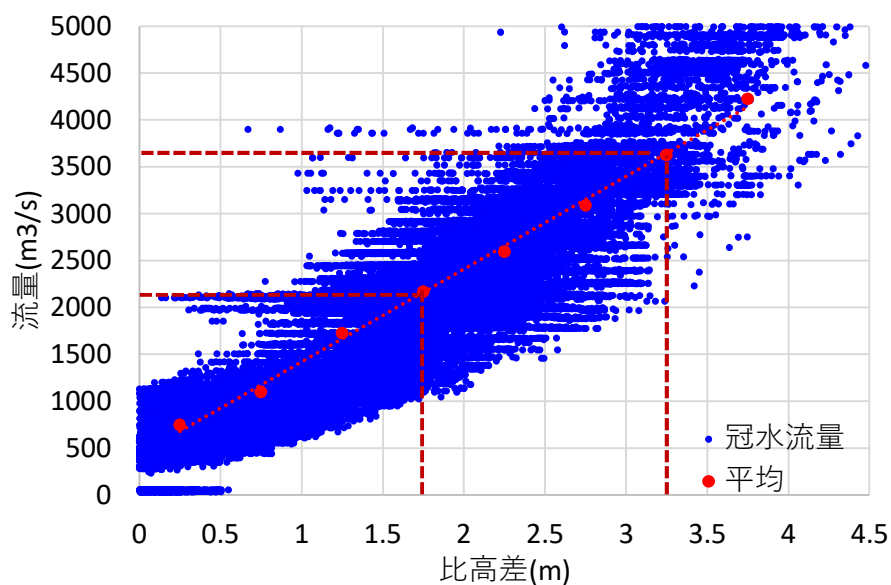
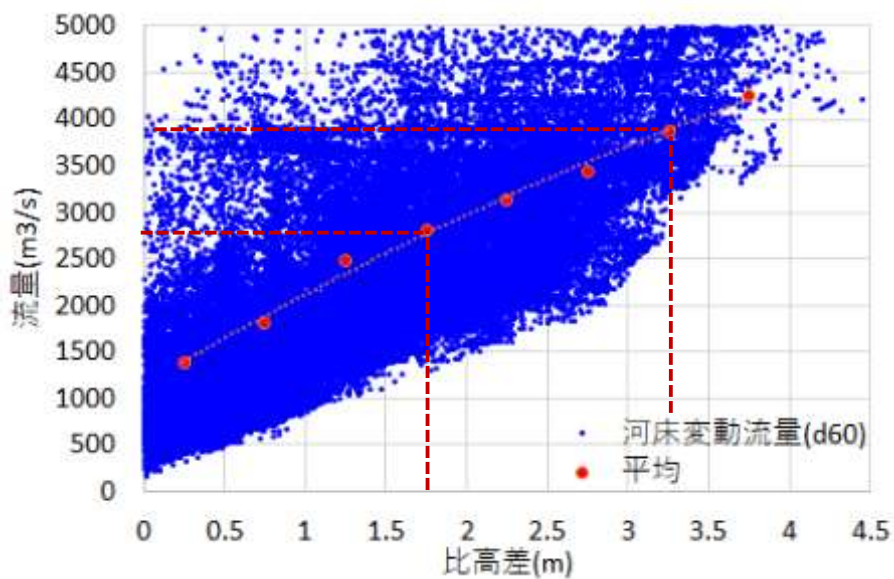


図 5-9 解析に用いた粒度分布



※JR 八高線下流～JR 中央線区間(44.4～41.4km)の各解析格子(2～5m 間隔)の解析結果

図 5-10 解析結果による砂州の比高差と冠水開始流量の関係



※JR 八高線下流～JR 中央線区間(44.4～41.4km)の各解析格子(2～5m 間隔)の解析結果

図 5-11 解析結果による砂州の比高差と代表粒径 (d_{60}) の移動開始流量の関係

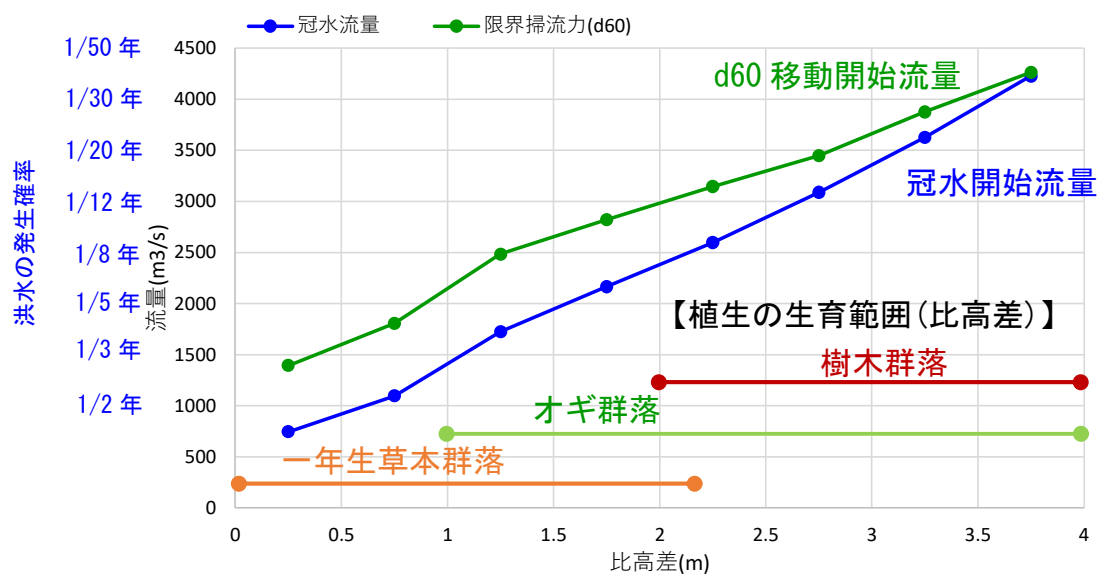


図 5-12 砂州の比高差と冠水開始流量, 代表粒径 (d60) 移動開始流量, 植生の生育範囲の関係

5-3-2 「船底形断面形」と多様な植生の生育場の形成の関係

前節では、植生の生育条件として、草本群落、樹木群落の生育範囲を砂州の比高差とそれに応じた洪水による冠水・攪乱流量及びその発生確率の関係で概ね説明できることを示した。ここでは、第3章で示した低水路の安定化に伴い形成される「船底形断面形」について、植生の生育条件を踏まえ、多様な植生の生育場の形成との関係を分析した。

図5-13は、浅川合流点上流区間のうち、JR八高線～JR中央線区間(44.8～41.4km)における植生の経年変化、図5-14は、多摩大橋上流(43.8km)、多摩大橋下流(43.2km)、JR中央線上流(41.6km)の各断面における低水路河床と砂州の比高差で表した横断形状と植生分布の経年変化を示す。図5-13、図5-14に示す植生図・分布は、植生区分を一年生草本、多年生草本、低木、高木群落で分類しており、図5-13では樹林化の主要因となっているハリエンジュ群落を赤の網掛けで表示している。3-3-3節で示したとおり、当該区間では、平成11年頃(図5-13(b))には砂州上に樹木群落(ハリエンジュ群落)が広く繁茂していたが、平成11年以降、大規模洪水の発生に伴って河川改修の効果が顕れ始め、低水路河床と砂州の比高差の安定化とともに、樹木群落の拡大が抑制されるようになり、草本群落の生育場が保たれつつある(図5-13(c), (d))。

図5-14(a)より、平成26～28年の河川改修により河道断面形が「船底形断面形」に改修された多摩大橋上下流区間の河道断面(43.8km)に着目すると、河川改修前の平成11年の河道断面(平成11年植生)では、低水路河床と砂州の比高差が3.0m以上に達しており、図5-12より、この比高差では流量 $3,500\text{m}^3/\text{s}$ 程度(発生確率1/20年)以上の洪水でないと砂州が冠水し、攪乱を受けないため、砂州全体が樹林化していた。それが「船底形断面形」に改修された後の平成29年の河道断面(平成27年植生)では、水際付近から高水敷にかけて砂州の比高差が2.0m以下となっており、一部、河道掘削前(平成27年植生の横断距離280～360m区間)のため、樹木群落が残るものの、水際付近の比高差が低い(1.0m以下)砂州上には一年生草本群落、高水敷付近のやや比高差の高い(2.0m程度)砂州上には多年生草本群落(オギ群落)が生育している。令和元年10月洪水後の令和元年の河道断面(令和2年植生)では、砂州の比高差に応じて、自然裸地、一年生草本群落、多年生草本群落(オギ群落)に横断的に遷移する特徴的な環境(エコトーン)が形成されており、「船底形断面形」が多様な植生の生育場の形成に寄与していることが分かる。

図5-14(b)より、多摩大橋下流の広大なオギ原が生育している区間の河道断面(43.2km)では、低水路河床に土丹が露出しているため、経年的に滲筋の河床低下が進行していたものの、平成11年以降、河床低下は概ね収まりつつある。右岸砂州の横断形状は、河床高が横断的に緩やかに連続している「船底形断面形」の特徴が顕れており、経年的にほぼ安定している。それにより、植生の横断分布も、砂州の比高差に応じて、自然裸地、一年生草本群落、多年生草本群落(オギ群落)、樹木群落に連続するように遷移(エコトーン)しているのが分かる。オギ原に着目すると、平成29年、令和元年の河道断面(平成27年、令和2年植

生)では、比高差 1.0~2.0m の砂州上に生育しており、**図 5-12** より、この比高差の範囲は、流量 1,500~2,500m³/s 程度(発生確率 1/3 年~1/8 年)の洪水で砂州が冠水し、流量 2,000~3,000m³/s 程度(発生確率 1/5 年~1/13 年)の洪水で砂州河床が攪乱を受けることで、樹木群落の拡大が抑制されるため、オギ原が動的に保たれていると考えられる。また、**図 5-13 (d)** より、多摩川大橋下流のオギ原が生育している区間(43.4~42.2km 右岸)では、河床高が横断的に連続している「船底形断面形」の特徴により、樹木の生育範囲が高水敷上の河床高(比高差)の高い箇所に限定されている。当該区間では、「船底形断面形」を呈する砂州形状やそれを規定する低水路幅が経年的に維持されていることから、オギ原の生育場が今後も保たれるには、低水路河床高(砂州との比高差)が維持されることが重要であり、滲筋に露出した土丹の対策が課題となる。

図 5-14 (c) より、JR 中央線上流区間の河道断面(41.6km)では、平成 11 年以降、JR 中央線橋梁の護床工に規定されて低水路河床高、砂州の比高差が維持されるようになったため、樹木群落の生育範囲(**図 5-13 (b)~(d)**)は砂州の水際付近の比高差が 3.0m 程度の領域にほぼ限定されている。令和元年 10 月洪水後の令和元年の河道断面(令和 2 年植生)では、洪水により砂州上の植生が攪乱を受け、比高差の低い(2m 以下)砂州上では一年生草本群落に遷移し、相対的に比高差の高い(2m 程度)水際付近ではオギ群落が生育しており、草本群落の生育場が動的に保たれていることが分かる。一方、当該区間では、3-5 項で示したように、令和元年 10 月洪水に対して、砂州河岸付近に生育する樹木により河岸洗掘が抑制されたため、「船底形断面形」が形成されるのに十分な低水路幅まで広がりきれず、切り立った砂州河岸形状を呈している。このため、**図 5-13 (b)~(d)** に示すように、JR 中央線上流区間(42.2~41.4km)の左岸砂州では、上記の「船底形断面形」が形成された区間で見られるような、水際から高水敷・堤防付近にかけて、自然裸地、草本群落、樹木群落が連続的に遷移する良好な植生の生育場(エコトーン)は形成されていない。特に水際付近に生育する樹木群落は、洪水時の河積阻害をもたらし、必要な河積を確保(低水路の安定化)するための低水路幅の拡大を抑制するなど、治水上の影響も懸念される。

以上のことから、「船底形断面形」では、砂州の比高差に応じて、植生の棲み分けがなされ、洪水による冠水・攪乱が適度な頻度で発生することで、樹木群落の拡大が抑制され、良好な草本群落の生育場(エコトーン)の形成に寄与している。さらに、「船底形断面形」は、樹木の生育範囲が高水敷・堤防付近の河床高(比高差)の高い箇所に限定されることから、治水上、河川環境上も管理しやすい河道断面形であることを示している。

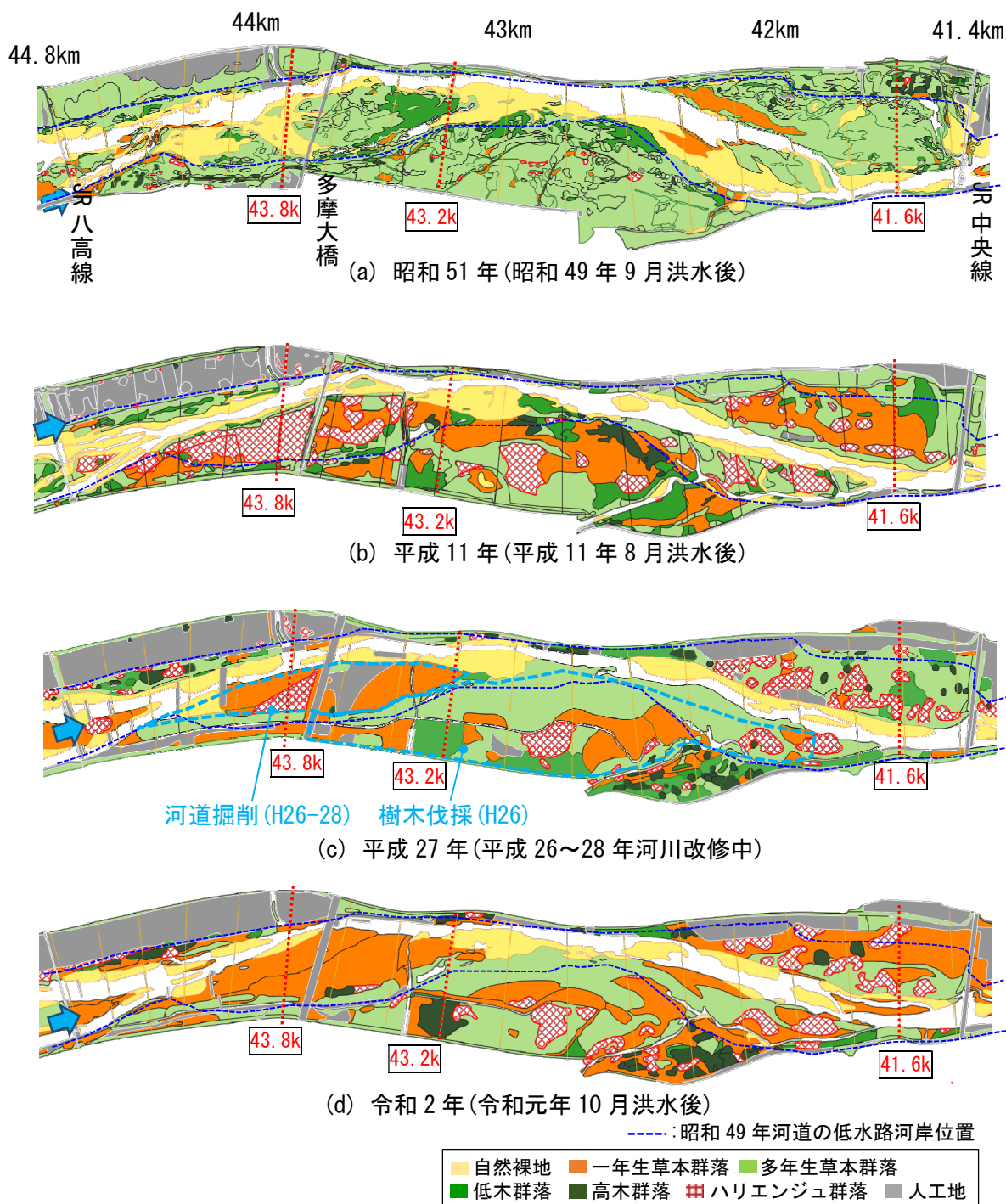


図 5-13 浅川合流点上流区間における植生の経年変化 (昭和 51 年~令和 2 年)

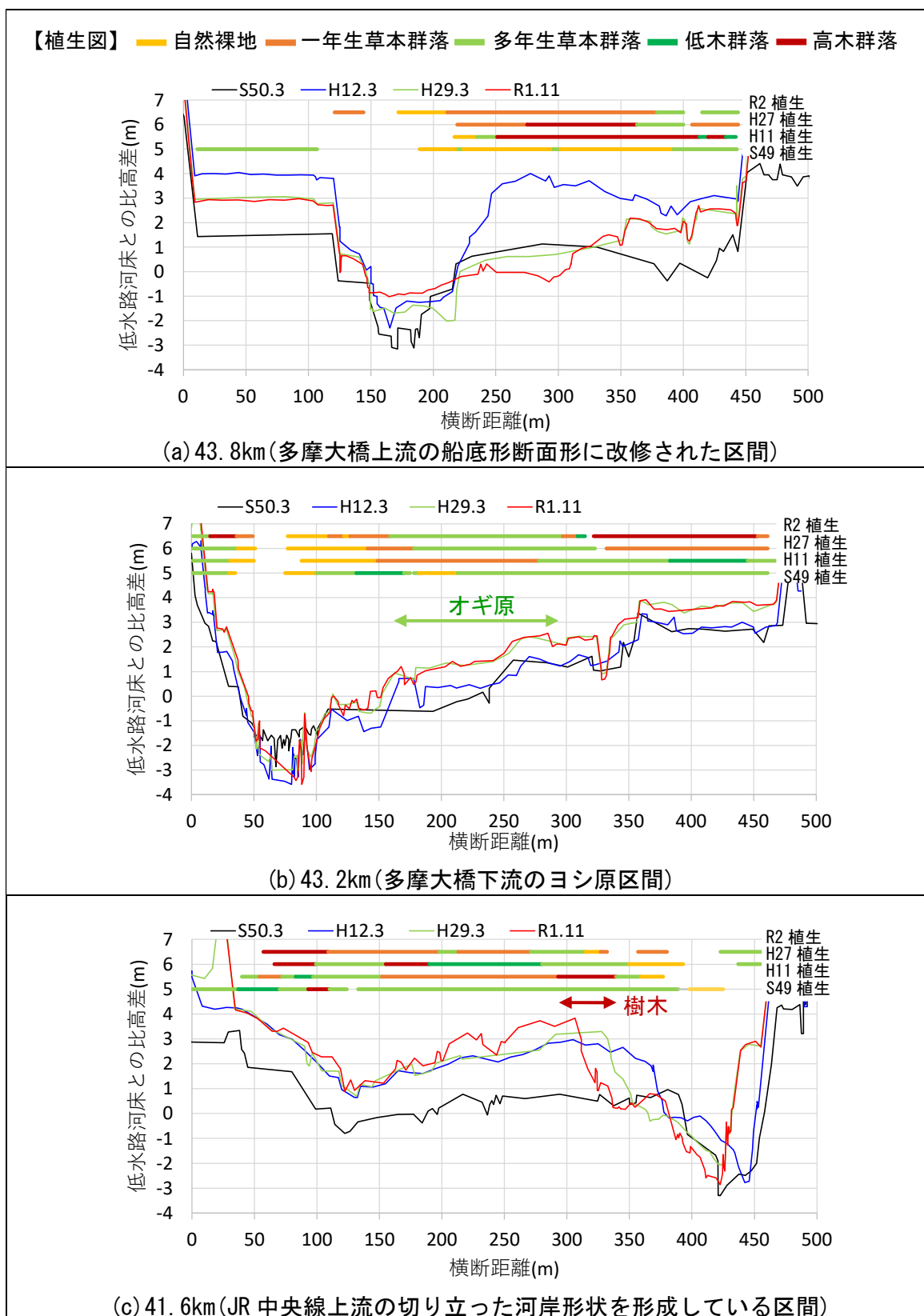


図 5-14 低水路河床と砂州の比高差で表した横断形状と植生分布の経年変化

5-4 安定した砂州河道と洪水時の魚類の避難場所となる低流速域の形成の関係

洪水時の魚類の避難行動に関する既往研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾より、魚類は遊泳能力を上回る高流速に反応して避難行動をとること、支川やワンド・たまり、巨石、砂州、水際植生や樹木などによって形成される低流速域が魚類の避難場所となり得ることが明らかとなっている。そして、それぞれの魚類の生息場付近にそのような避難場所がない場合、魚類は洪水流によって大きく下流へ流され、急激な流れと高濃度の濁水によって死に至るなど、洪水流がもたらす魚類への影響は小さくはないと考えられる。そのため、洪水流量に応じて魚類の避難場所となり得る低流速域が形成される河道構造が魚類個体群の維持にとって重要となる。実河川における洪水時の魚類の避難行動がある程度明らかになってきた一方で、洪水時の流況観測密度が限られるため、流況と場所の関係が明らかでなく、どのような河道構造が魚類の避難場所として重要であるか、そのような場所が洪水に対して安定的に維持されるか等、十分明らかにされていない。そこで本研究では、魚類の避難場所となり得る低流速域の評価に、高精度の洪水流況解析結果が活用できると考えた。

本項では、洪水時の魚類の避難行動に関する知見を踏まえ、第4章で行った詳細な河岸・河道形状を考慮した洪水流の解析結果を用いて、第3章で明らかにした安定した砂州河道に形成される「船底形断面形」と洪水時の魚類の避難場所となる低流速域の形成の関係について分析した。

5-4-1 洪水時の魚類の挙動、分析方法

対象魚種は、平成28年の魚類調査結果(河川水辺の国勢調査)より、多摩川中流部の対象区間周辺の調査地区(日野用水堰下流地区(45.2~44.2km)、浅川合流点地区(37.0~36.0km)、大丸用水堰下流地区(32.5~31.5km))で確認個体数の多い「アユ」と「オイカワ」を代表的な魚種として選定した。

東ら⁶⁾、傅田ら⁷⁾、青木ら⁸⁾による調査研究より、魚類が高流速に反応して避難行動をとっていることを踏まえ、洪水時の「底面流速」を指標として、洪水時の魚類の避難空間となり得る底面流速の低い領域を分析し、その場所の河道の特徴を考察する。表5-3は、対象魚種の遊泳速度の推定値を示す。魚類の遊泳速度には、長時間遊泳可能な速度である「巡航速度」と、数秒間しか持続できない最大遊泳速度である「突進速度」の2種類の速度があり、それらの速度は魚類の体長と概ね関係付けられている⁹⁾。本研究では、魚道的设计などに用いられている魚類の体長と遊泳速度の関係を適用して、平成28年の魚類調査で捕獲された個体の平均体長に対する遊泳速度を推定した。洪水流の流速が対象魚種の突進速度以上になると魚類が流れに対抗した移動が困難になると考えられることから、突進速度を魚類の遊泳可能流速の上限の目安値として、洪水流の流速が対象魚種の突進速度以下の領域を魚類の避難場所となる可能性のある「低流速域」として評価するものとした。

評価指標とする底面流速は、4-4項で実施した準三次元洪水流・河床変動解析結果を用いる。本解析では、令和元年10月洪水後の現況河道の地形(令和元年後LP測量、令和2年横断測量)を、縦断間隔5~10m程度、横断間隔1~2m程度の空間解像度で詳細な低水路河床・砂州河岸形状を再現した。流量条件は、令和元年10月洪水の多摩川本川及び浅川の流量ハイドログラフ(再現解析流量)を与える。

表 5-3 対象魚種の遊泳速度の推定値

魚種	平均体長 (H28 調査結果)	巡航速度※1	突進速度※2	備考 (巡航速度・突進速度 の調査結果) ⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾
アユ	8.6cm (4.1~16.1cm)	0.43~0.6m/s	1.0~1.5m/s	巡航速度 1.1m/s (体長 11.4cm) 突進速度 1.2~1.78m/s (体長 6.6~11.4cm)
オイカワ	7.1cm (2~11.8cm)	0.14~0.21m/s	0.71m/s	巡航速度 0.65m/s (体長 6~12cm) 突進速度 2.0m/s (平均体長 7.8cm)

※1:魚類が長時間遊泳可能な速度

巡航速度の算定式⁹⁾: アユ: 体長×5~7, オイカワ(紡錘形魚類): 体長×2~3

※2:魚類が数秒間しか持続できない最大遊泳速度

突進速度の算定式⁹⁾: アユ: 体長×12~18, オイカワ(紡錘形魚類): 体長×10

5-4-2 洪水時の魚類の避難場所の分析

本分析では、低水路の安定・不安定が洪水時の魚類の避難場所(低流速域)の形成に及ぼす影響について比較分析するため、「船底形断面形」の河道改修が行われ、低水路が安定化しつつある①JR 八高線~JR 中央線区間(44.8~41.4km)、低水路内に不規則な砂州が発達している②浅川合流点~大丸用水堰区間(37.0~32.4km)の2区間を対象区間とした。

(1) JR 八高線~JR 中央線区間における洪水時の魚類の避難場所の分析

図 5-15 は、JR 八高線~JR 中央線区間(44.8~41.4km)における解析結果による底面流速分布の時間変化、図 5-16 は、多摩大橋周辺(43.8km)の横断面内流速分布の時間変化を示す。底面流速は、平面底面流速と鉛直底面流速の合成速度である。当該区間の特徴として、多摩大橋上下流(44.2~43.4km)の右岸砂州は、平成 27~28 年の河川改修で切下げられ、低水路河床と砂州が横断的に緩やかに連続する「船底形断面形」に改修されている。また、当該区間の右岸高水敷上(44.6~42.4km)には、旧流路を活用して湿原環境を再生し、多摩大橋周辺の河川改修中の迂回流路を兼ねた「せせらぎ水路」が整備されている¹²⁾。

図 5-15(a) より、低水路(滯筋)では、流量 300m³/s 時に底面流速 1.5m/s を超える高流速域となっており、比較的小規模の洪水でも魚類の遊泳速度を超える流れが生じている。底面流速 1.5m/s を下回る低流速域は、河岸付近と多摩大橋周辺(44.2~43.2km 付近)の右岸砂州上に形成されている。多摩大橋周辺の右岸砂州は、「船底形断面形」に改修されたことで、

図 5-16 に示すように低水路河床と砂州が横断的に緩やかに連続しているため、水位の増加に対して横断的に連続した低流速域が形成されている。これにより、アユ、オイカワとともに、砂州上に形成されたそれぞれの遊泳能力(アユ：1.5m/s 程度以下、オイカワ：0.7m/s 程度以下)に対応した低流速域へ避難できるものと考えられる。

平均年最大流量規模に相当する $1,100\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-15 (b))では、多摩大橋周辺の右岸砂州や JR 中央線上流(42.6～42.2km 付近)の右岸砂州上に低流速域が形成される。JR 中央線上流の右岸砂州上には、図 5-17 に示す昭和 49 年河道の黄色点線で示す複列砂州河道の旧流路跡が、図 5-15 に示す現況河道にも残っており、それらの旧流路と支川の谷地川の流路がつながっている。そのため、オイカワの遊泳能力(0.7m/s 程度以下)にも対応した低流速域が、流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ 時に比べて比較的広範囲に形成されている。流量が $2,100\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-15 (c))に達すると、多摩大橋周辺の右岸砂州上の流速が高まり、高水敷が冠水し始める。この段階で図 5-16 (c)に示すように、右岸砂州上の水面と高水敷上の「せせらぎ水路」の水面が横断的につながり始める。更に「せせらぎ水路」と下流の JR 中央線上流にある右岸砂州上の旧流路及び谷地川が縦断的につながることで、縦横断的に連続した低流速域が形成されるようになる。そして、流量が $2,900\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-15 (d))に達すると、高水敷上の冠水範囲は広がるものの、「せせらぎ水路」周辺の低流速域は維持されている。また、JR 中央線上流(42.4～41.4km)の左岸の高水敷化した砂州が冠水し始め、低流速域が広範囲に形成される。JR 中央線上流の左岸砂州上にも、昭和 40 年代頃の複列砂州河道の旧流路跡(図 5-17)が残っており、上流から流れされてきた魚類が漂着することで、それらの避難場として機能する可能性が考えられる。

既往最大洪水規模に相当する流量 $4,400\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-15 (e))においても、高水敷上の「せせらぎ水路」周辺では、オイカワの遊泳能力(0.7m/s 程度以下)に対応した低流速域が維持されている。図 5-18 に示す当該区間の魚類調査結果(平成 28 年～令和 2 年、国土交通省京浜河川事務所提供)より、「せせらぎ水路」で捕獲されたオイカワの個体数が令和元年 10 月洪水前後で 4 倍程度に増加していることから、「せせらぎ水路」が洪水時の魚類の避難場所として機能していることを示唆している。

以上のことから、JR 八高線～JR 中央線区間(44.8～41.4km)では、「船底形断面形」に改修された砂州やかつての複列砂州の旧流路、高水敷上に整備された「せせらぎ水路」の周辺に、魚類の遊泳速度相当(0.7～1.5m/s 程度以下)の低流速域が形成され、それらの低流速域が洪水流量の増加とともに縦横断的に連続することで、それらが洪水時の魚類の避難場所として機能する可能性があることを示した。

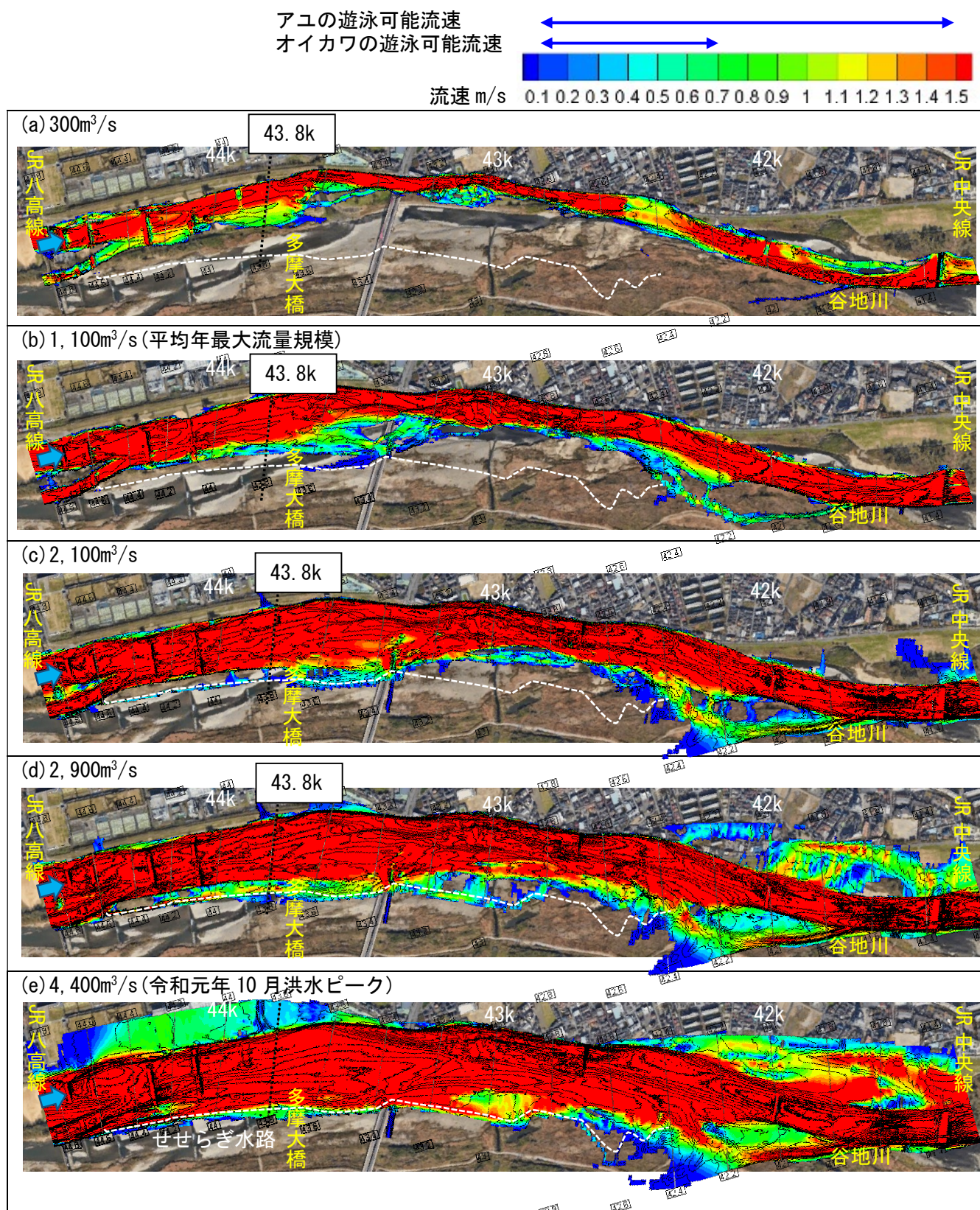


図 5-15 解析結果による底面流速分布の時間変化 (JR 八高線～JR 中央線区間)

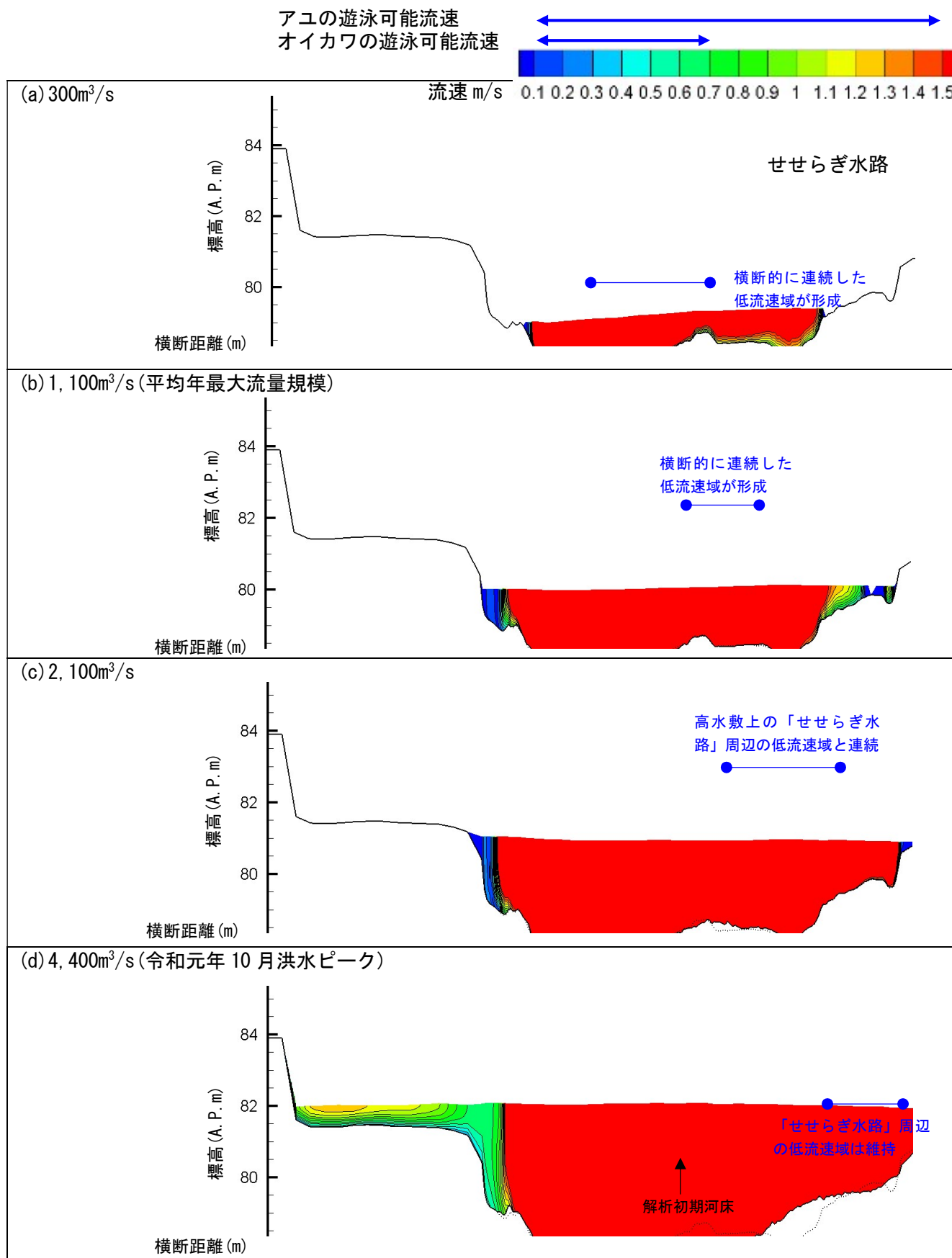


図 5-16 解析結果による横断面内流速分布の時間変化 (多摩大橋周辺 : 43.8km)



図 5-17 昭和 49 年代河道（JR 八高線～JR 中央線区間）

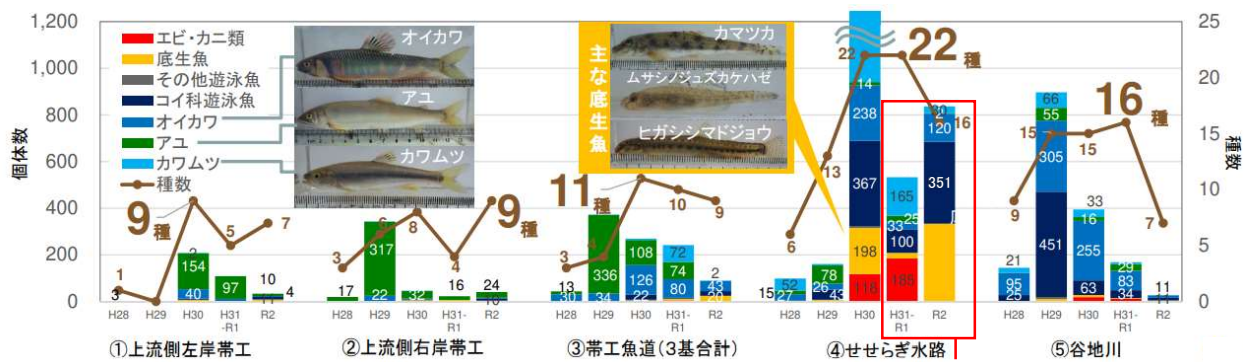


図 5-18 多摩大橋周辺地区の魚類の生息状況(平成 28～令和 2 年調査結果)

データ出典：国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所

(2) 浅川合流点～大丸用水堰区間における洪水時の魚類の避難場所の分析

図 5-19 は、浅川合流点～大丸用水堰区間(37.0～32.4km)における解析結果による底面流速分布の時間変化、図 5-20 は、大丸用水堰上流(33.6km)の横断面内流速分布の時間変化を示す。当該区間の特徴として、3-4 項で示したとおり、本川上流河道と最大支川である浅川からの流下土砂量が多く、京王線橋梁(35.1km)の橋脚や大丸用水堰(32.4km)の固定堰が土砂移動を阻害するため、これらの横断構造物上流に土砂が堆積し、低水路内に比高差の高い不規則な形状の砂州(中州)が発達している。

図 5-19 (a) より、流量 $600\text{m}^3/\text{s}$ では、低水路内の流速分布が砂州の影響を受け複雑に変化しており、低水路全体として底面流速が魚類の遊泳速度を超える高流速域にはまだ達していない。砂州河岸の近傍や、京王線橋梁、大丸用水堰の上流の左岸堤防沿いに広がるワンド・たまり周辺で、アユの遊泳能力($1.5\text{m}/\text{s}$ 程度以下)、オイカワの遊泳能力($0.7\text{m}/\text{s}$ 程度以下)に対応する低流速域が広く形成されている。平均年最大流量に相当する $1,400\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-19 (b))では、低水路(滯筋)のほとんどは $1.5\text{m}/\text{s}$ を超える高流速域となるが、冠水した砂州の河岸部やワンド付近には低流速域が残されている。流量が $2,600\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-19 (c))に達すると、低水路内の低流速域は比高差の高い砂州上に限定されるようになるが、高水敷が冠水し始めることで、高水敷上に低流速域が形成されるようになる。既往最大洪水規模の流量 $5,300\text{m}^3/\text{s}$ (図 5-19 (d))では、低水路全体がほぼ高流速域となり、低流速域は高水敷上の河床高の高い箇所限定される。図 5-20 に示す大丸用水堰上流(33.6km)における横断面内流速分布より、流量 $2,600\text{m}^3/\text{s}$ 程度までは河道中央の砂州(中州)付近に低流速域が形成されているが、流量 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ を超えると低流速域は消失してしまう。これにより、この比高差の高い砂州上に形成される低流速域は、高水敷上の低流速域と横断的に不連続となるため、砂州上に避難していた魚類は流量の増加とともに洪水流によって流されることになる。

以上のことから、浅川合流点～大丸用水堰区間(37.0～32.4km)では、低水路内に発達した砂州(中州)によって広範囲に低流速域が形成され、洪水時の魚類の避難場所となる可能性はあるが、流量の増加とともに低水路内の砂州上の低流速域と高水敷上の低流速域が分断されるため、大規模洪水時には魚類の避難場所は不連続で限定的となることを示した。

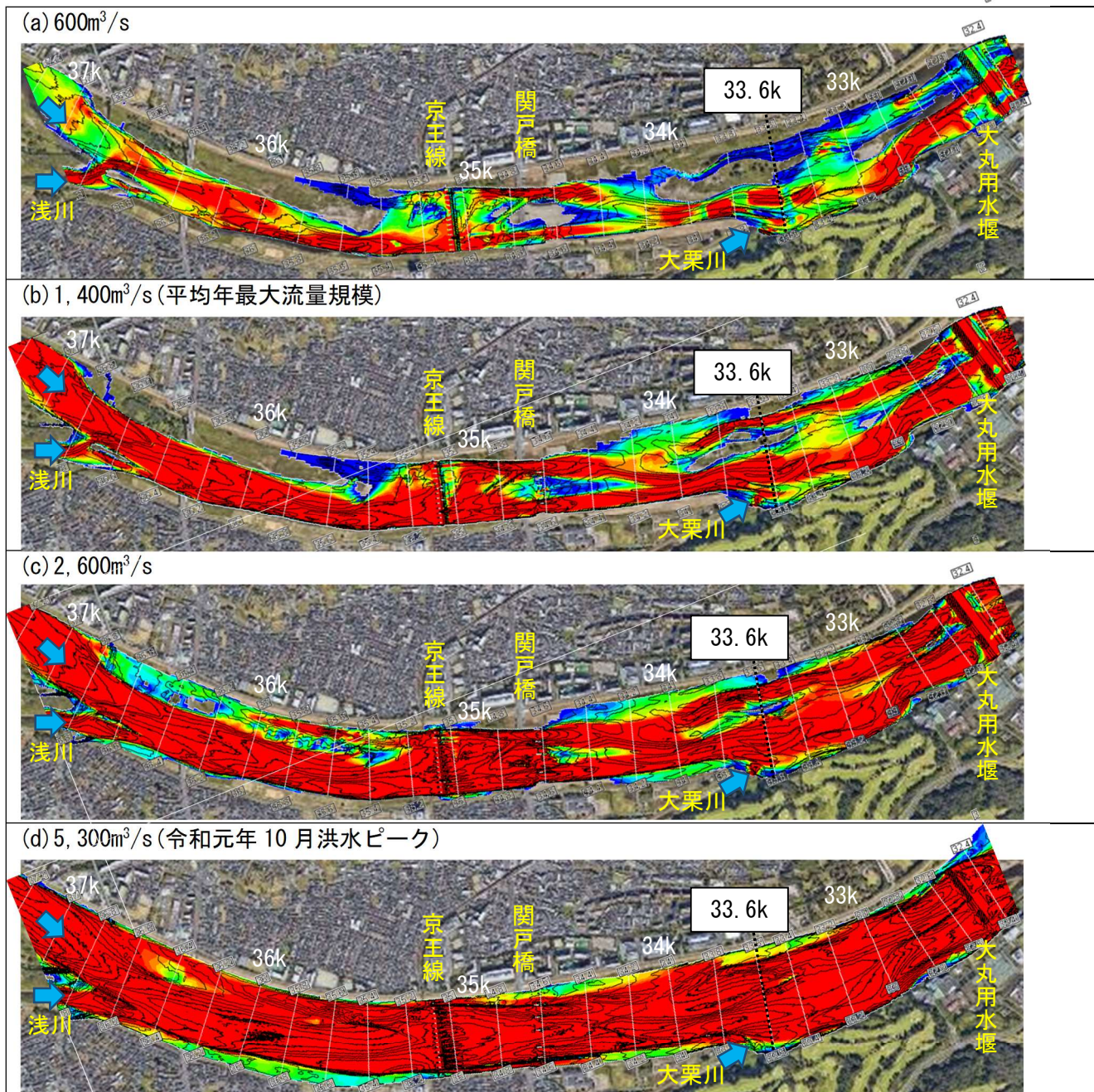
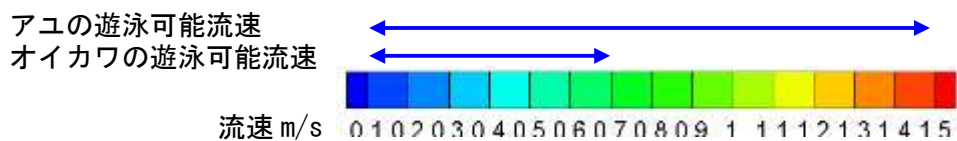


図 5-19 解析結果による底面流速分布の時間変化（浅川合流点～大丸用水堰区間）

アユの遊泳可能流速
オイカワの遊泳可能流速

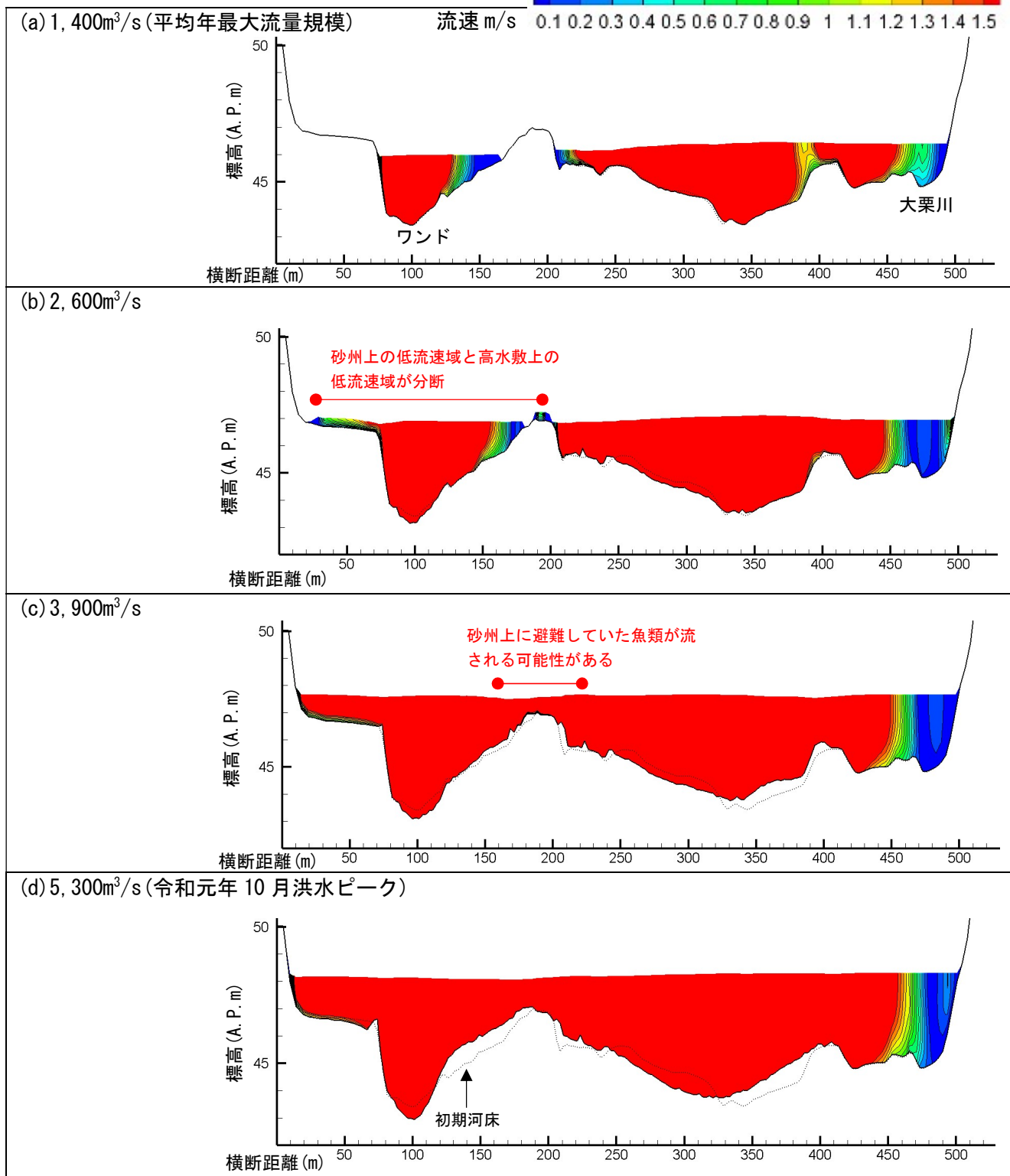
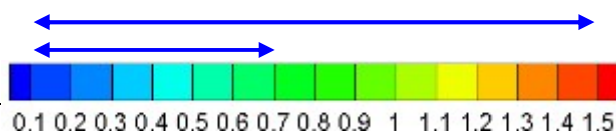


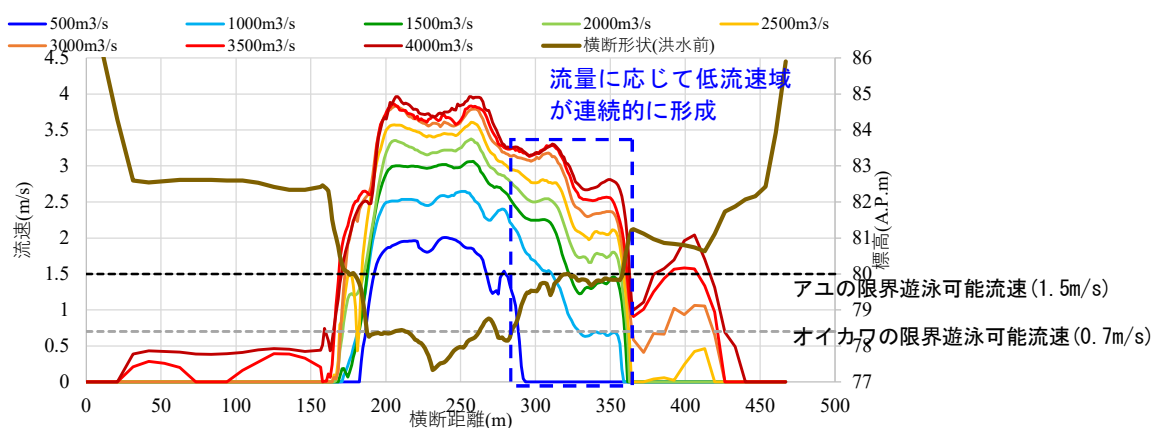
図 5-20 解析結果による横断面内流速分布の時間変化 (大丸用水堰上流 : 33.6km)

5-4-3 低水路の安定化が魚類の避難場所の形成に及ぼす効果

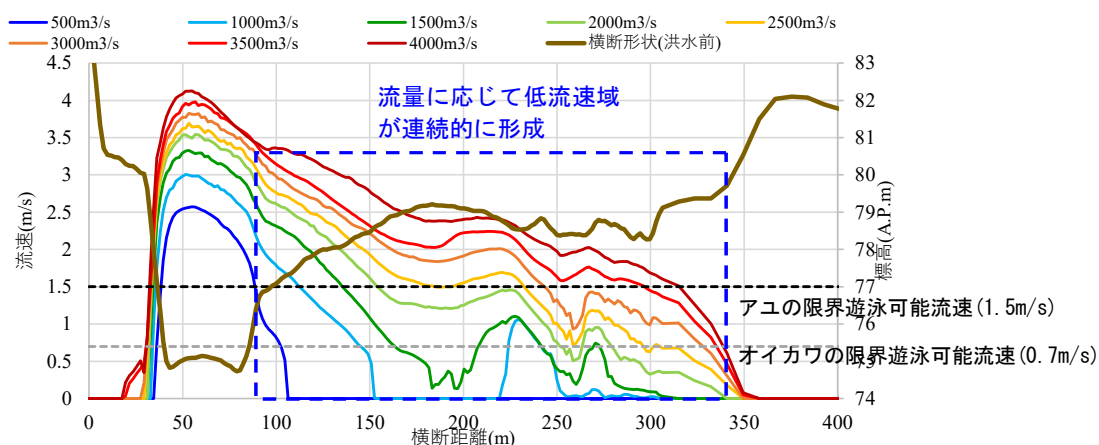
(1) 「船底形断面形」と低流速場の形成の関係

本節では、「船底形断面形」に改修され低水路が安定しつつある多摩大橋上下流区間(44.2～43.4km)と、砂州河岸が切り立った断面を呈している JR 中央線上流区間(42.2～41.4km)を対象に、魚類の避難場所となり得る低流速場が形成される砂州河道の特徴について分析する。図 5-21 は、砂州の横断幅が狭い船底形断面(44.0km)、砂州の横断幅が広い船底形断面(43.4km)、砂州河岸が切り立った断面(41.8km)における、解析結果による流量の変化に対する底面流速の横断分布の変化、図 5-22 は、同断面における砂州上の各点(横断 20m ピッチ)の流量の変化に対する底面流速の変化を示す。砂州の横断幅が狭い船底形断面(44.0km)では、図 5-21 (a) より、3,000m³/s 程度までの洪水流量に対して、右岸砂州上(横断距離 100～340m)で底面流速がアユの限界遊泳能力 1.5m/s 以下の低流速域が連続的に形成されている。これは図 5-22 (a) に示すように、「船底形断面形」は水位・流量の増加に応じて水面幅が広がるため、流量の増加に対する底面流速の増加が緩やかという特徴を顕している。砂州の横断幅が広い船底形断面(43.4km)では、図 5-21 (b)、図 5-22 (b) より、4,000m³/s 以上の洪水流量に対して、右岸砂州上(横断距離 280～360m)で底面流速 1.5m/s 以下の低流速域が維持されている。当該断面は、44.0km(図 5-21 (a)、図 5-22 (a))と比べて砂州の横断幅が広いため、流量の増加に対する底面流速の増加がより緩やかであり、広い範囲の流量に対して魚類の避難場所として機能することが期待される。一方、砂州河岸が切り立った断面(41.8km)では、図 5-21 (c)、図 5-22 (c) より、低水路幅が狭く洪水流が集中しやすいため、流量の増加に対する底面流速の増加が速い。また、当該断面では、1,500m³/s 程度を超える洪水流量に対して、低水路と砂州上の低流速域が不連続となるため、魚類の避難場所とはなり得ない。

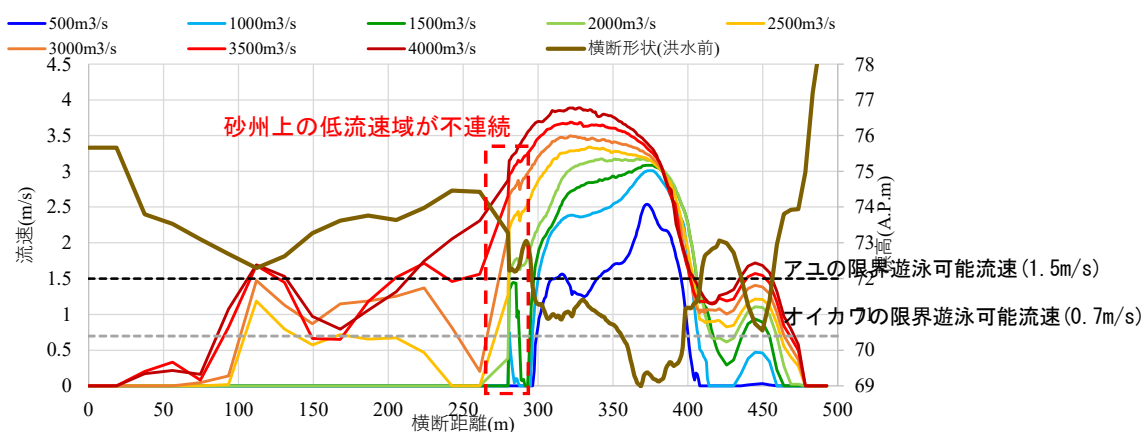
以上のことから、「船底形断面形」は、流量の増加に対する底面流速の増加が緩やかであり、洪水流量に応じて魚類の避難場所となり得る低流速域が時空間的に連続して形成される。



(a) 44.0km(砂州の横断幅が狭い船底形断面)

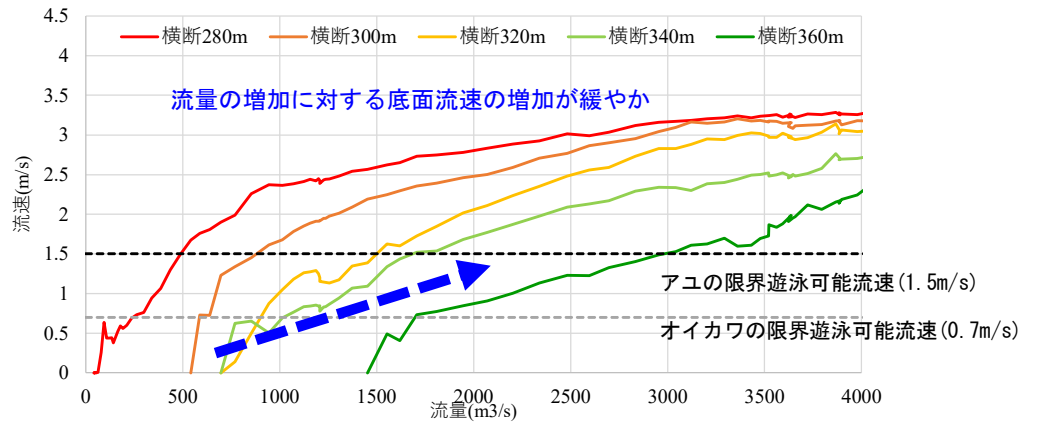
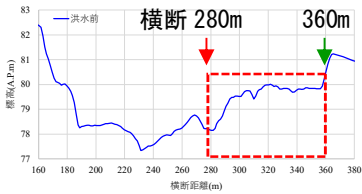


(b) 43.4km(砂州の横断幅が広い船底形断面)

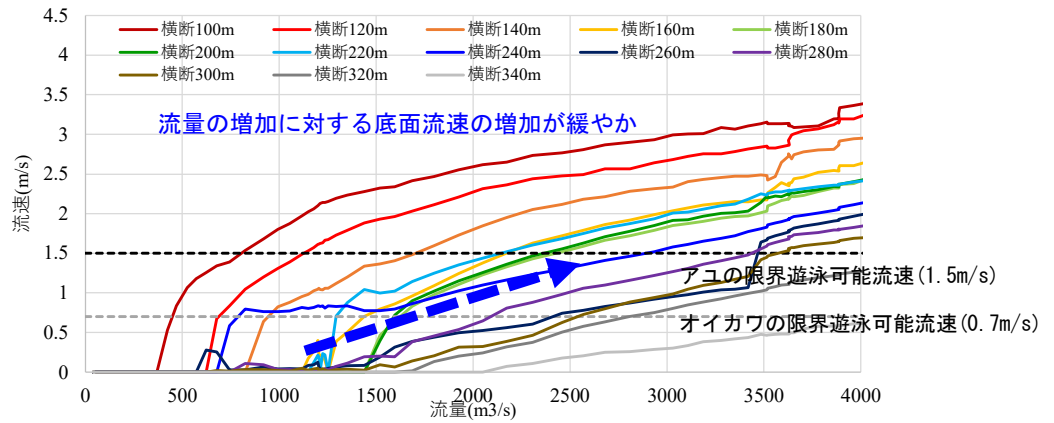
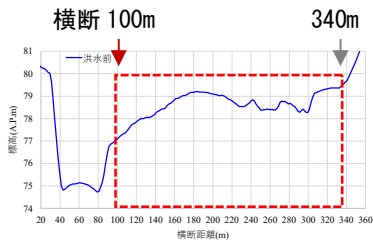


(c) 41.8km(砂州河岸が切り立った断面)

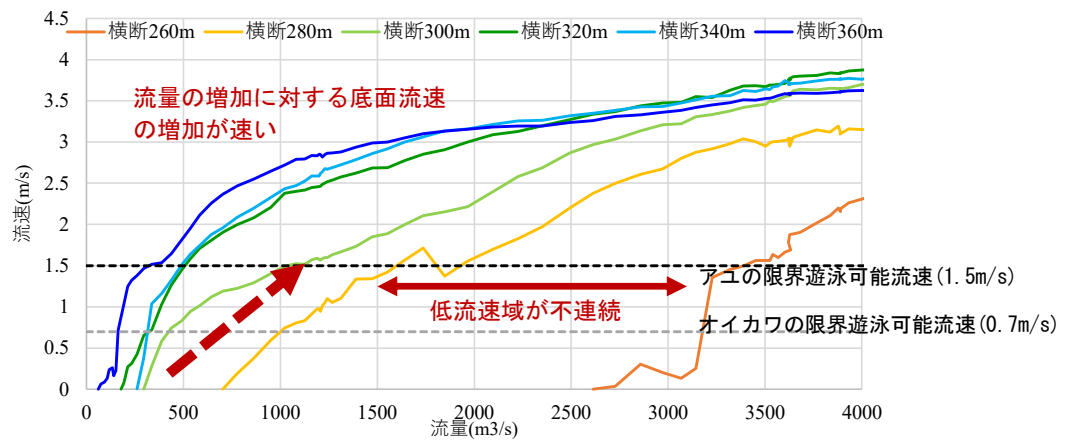
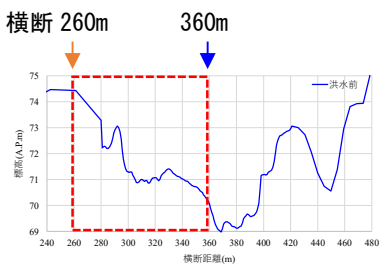
図 5-21 解析結果による流量の変化に対する底面流速の横断分布の変化



(a) 44. 0km(砂州の横断幅が狭い船底形断面)



(b) 43. 4km(砂州の横断幅が広い船底形断面)



(c) 41. 8km(砂州河岸が切り立った断面)

図 5-22 解析結果による砂州上の各点(横断 20m ピッチ)における流量の変化に対する底面流速の変化

(2) オギ原による低流速域の形成

前項 5-3 で示したとおり，多摩川中流部の低水路が安定化しつつある JR 八高線～JR 中央線区間(44.8～41.4km)では，砂州の比高差に応じて植生の棲み分けがなされ，洪水による冠水・攪乱が適度な頻度で発生することで，オギ原を代表とする草本群落が動的に維持されている．オギ原内を流下する洪水流の流速については，福岡ら¹³⁾による現地水路実験の調査結果より，オギ原内の下層の流速は 0.2～0.4m/s 程度であり，オギ原上の流速(1.5m/s 程度)に比べて低い流速域が形成されることが明らかとなっている．このことから，洪水流によって倒伏していない状態のオギ原は，魚類の避難場所として機能する可能性があることを示唆している．ここでは，多摩川中流部の砂州上に広く生育しているオギ原が，どの程度の流況であれば洪水時の魚類の避難場所となり得るかを分析する．

洪水時にオギ等の高茎草本類がどの程度の流況で倒伏するかの一つの判定基準として，福岡ら¹⁴⁾¹⁵⁾による現地観測及び水路実験の結果より，**図 5-23** に示す草丈水深比と水面勾配との関係が提案されている．この高茎草本類の倒伏判定基準を，広大なオギ原が生育している多摩大橋～JR 中央線区間(43.6～41.4km)に適用した場合，**図 5-24** に示す令和元年 10 月洪水の洪水水面形の解析結果より，流量 2,300～4,400m³/s 時の水面勾配 1/270～1/260 程度に対して，オギが倒伏する草丈水深比は 0.75 程度となる．ここで，オギの草丈を 2.0m 程度と仮定すると，水深 1.5m 程度が当該区間のオギの倒伏判定の目安となる．これを踏まえ，オギ原が生育している砂州上の水深が 1.5m 程度に達するまでの間は，オギ原が洪水流によって倒伏せずに低流速域を形成している状態にあるものと考え分析を行った．

図 5-25 は，JR 八高線～JR 中央線区間(44.8～41.4km)における解析結果による水深分布にオギ群落分布(令和 2 年植生図)を重ねたものを示す．**図 5-25** より，多摩大橋下流(43.4～42.2km)のオギ原は，流量 1,500m³/s 程度で冠水し始め，流量 2,900m³/s 時でもほとんどが水深 1.0m 以下のため，オギ原が倒伏する流況に達していない．そして，流量 4,400m³/s 時では，水深が 1.5m を超え，洪水流によってオギ原が倒伏する流況になっている．このことから，多摩大橋下流のオギ原では，流量 1,500m³/s～3,000m³/s 程度に対して倒伏していないため，オギ原内に低流速域が形成されるものと推定され，魚類の避難場所として機能する可能性があることを示唆する．なお，流量が 3,000m³/s を超える大規模洪水時には，オギ原内の水深が 1.5m を超えオギが倒伏する．そのため，倒伏したオギ原は洪水流の阻害要因とはならないものと推察され，当該区間のオギ原が治水面でも大きな問題とならないと考えられる．

広大なオギ原が，平均年最大流量規模(1,500m³/s 程度)の洪水から流量 3,000m³/s 程度の大規模洪水に対して，魚類の避難場所となり得ることは，魚類の個体群の維持にとって重要である．「船底形断面形」を形成している断面では，流量の増加とともに水面形が横断的に連続し，オギ原への避難経路が形成されると考えられることから，船底形河道に形成されたオギ原が特に遊泳能力の低い仔稚魚の避難場所として機能することが期待される．

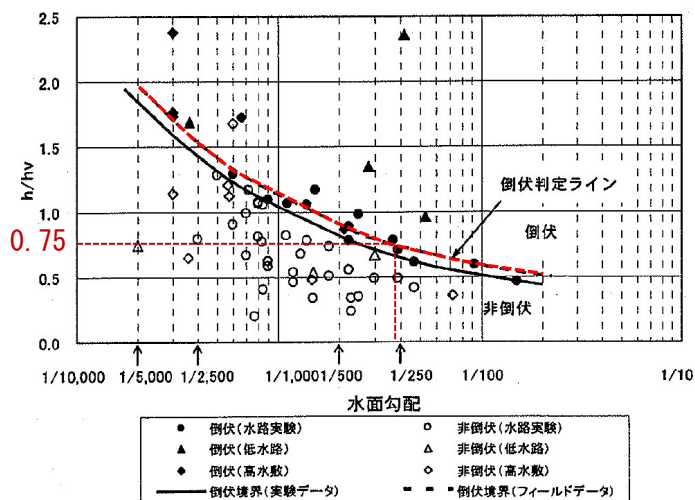


図 5-23 草丈水深比(h/hv)と水面勾配による倒伏判定グラフ¹⁵⁾

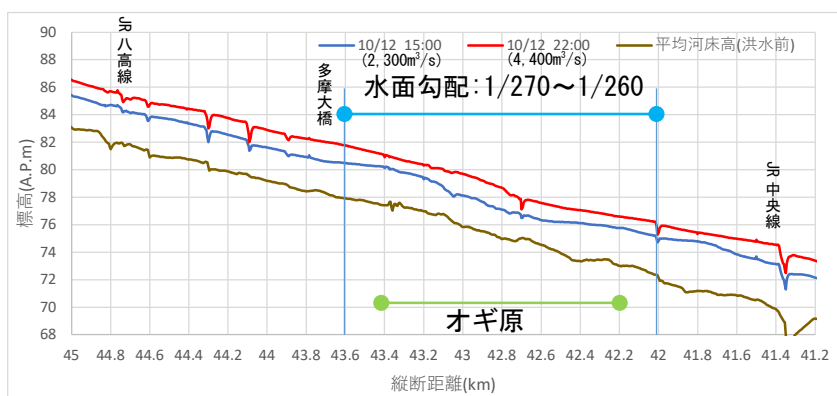


図 5-24 解析結果による令和元年 10 月洪水の水面形

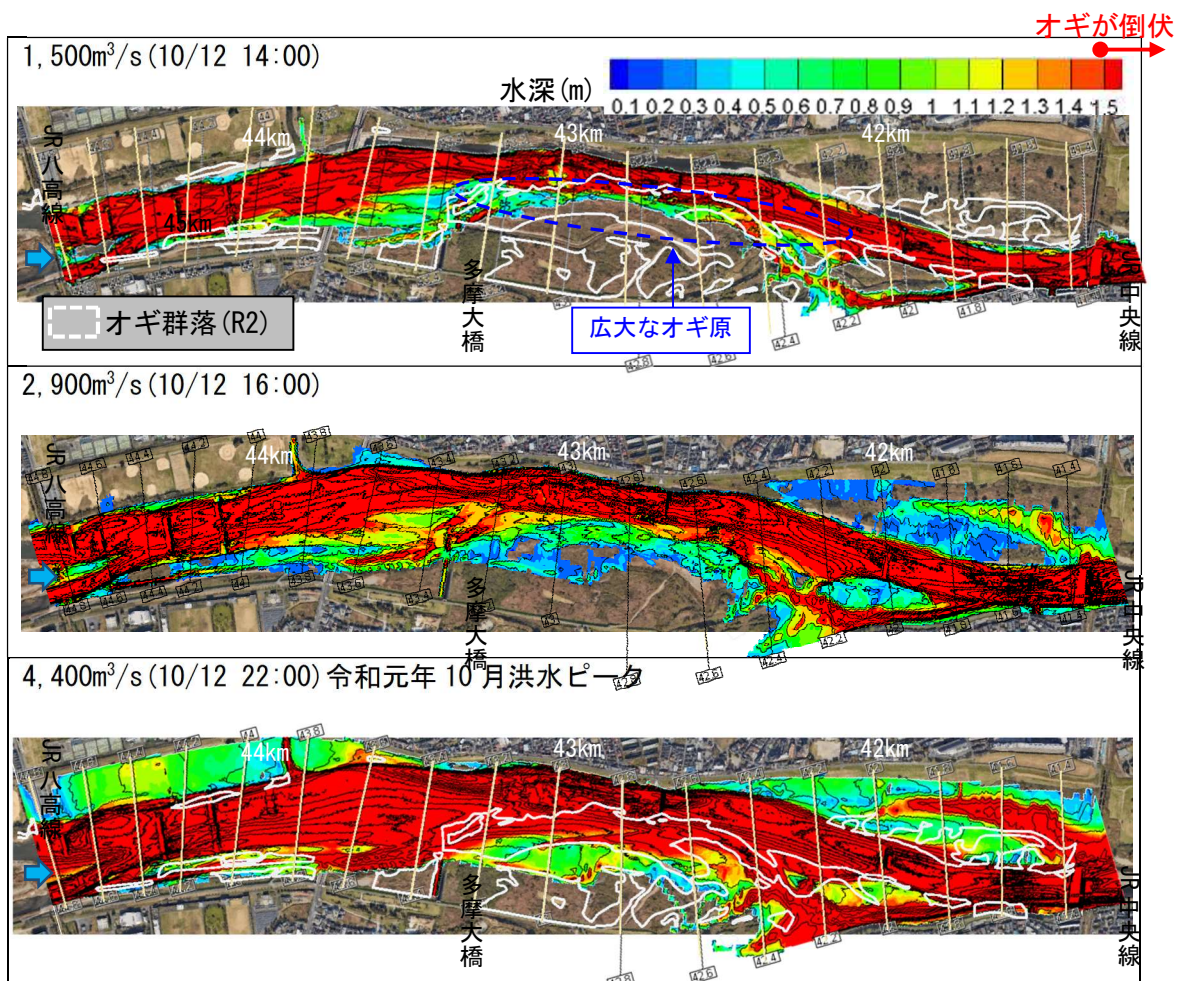


図 5-25 解析結果による水深分布とオギ群落分布 (令和 2 年植生図)

(3) 大丸用水堰の改築による低流速域の形成にもたらす効果

4章では、大丸用水堰(32.4km)を切下げて床止め工に改築することで、砂州の移動が妨げられなくなり、堰上流の低水路内の不規則な砂州(中州)の発達が消滅され、かつての交互砂州河道が回復し得ることを示した。ここでは、大丸用水堰改築後河道における令和元年10月洪水の流量ハイドログラフ2波形を通水した後の解析結果を用いて、堰の改築による低水路の安定化(交互砂州河道の回復)が魚類の避難場所の形成にもたらす効果について分析を行った。

図5-26は、解析結果による堰改築後河道(令和元年10月洪水2波形通水後)の底面流速分布の時間変化を示す。図5-26(a)の流量600m³/s時の堰改築後河道では、低水路内に流速1.5m/s以下(アユの限界遊泳能力)の低流速域はほとんど形成されておらず、低水路河岸部に限られている。これは、堰改築後河道では、低水路内の比高差の大きい砂州(中州)の発達が消滅され、洪水流が低水路全体を流れるようになったためであり、図5-19(a)に示す現況河道の底面流速分布と比べて、低流速域が限定的となっている。図5-26(b)～(d)より、堰改築後河道では、流量の増加に伴って低流速域は低水路河岸から高水敷上へ横断的に連続して広がっているのが分かる。これは、堰改築後河道では、規則的な交互砂州の形成に伴って、低水路河床と砂州、高水敷が横断的に連続する横断形状(船底形断面形)を呈するようになったためである。図5-27は、堰改築後河道における堰(床止め工)上流34.0km断面の流量の変化に対する底面流速の横断分布の変化、図5-28は、現況河道における堰上流33.6km断面の流量の変化に対する底面流速の横断分布の変化を示す。堰改築後河道(図5-27)では、流量の増加に応じて左岸砂州上に流速1.5m/s以下の低流速域が横断的に連続して形成されており、現況河道(図5-28)で見られる、流量の増加とともに砂州上の低流速域と高水敷上の低流速域が不連続となる状況が改善されているのが分かる。

以上のことから、大丸用水堰の改築による低水路の安定化は、かつての交互砂州河道を回復させ、低水路河床と砂州、高水敷が横断的に連続した河道断面形(船底形断面形)の砂州河道が形成されることにより、洪水時の魚類の避難場所の安定的な形成に寄与するものと考えられる。

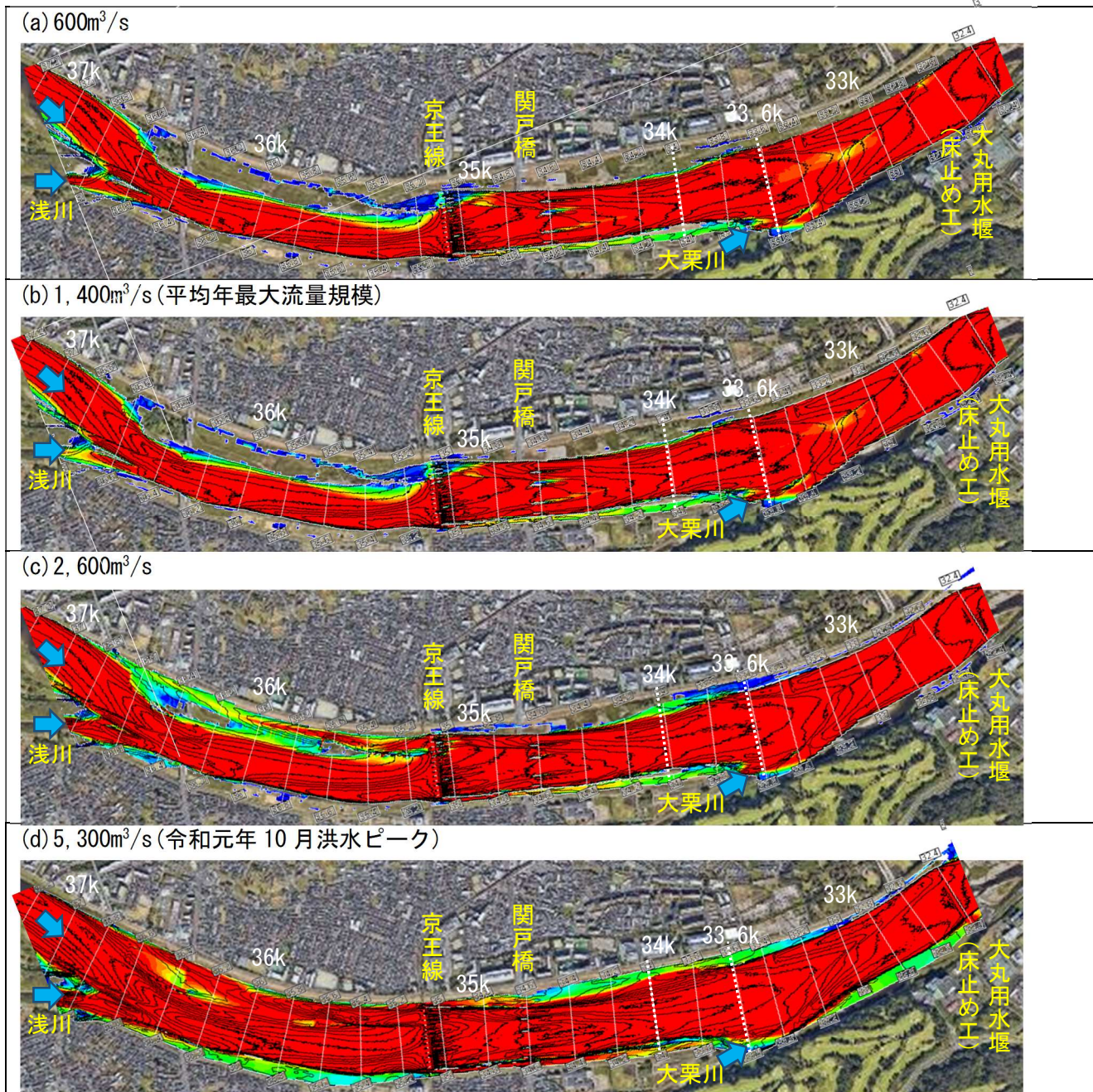
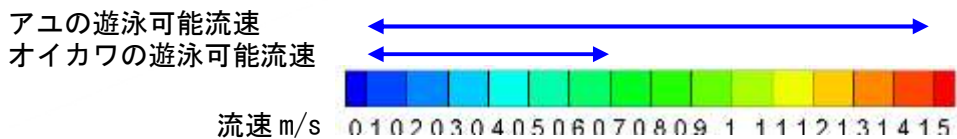


図 5-26 大丸用水堰改築後河道の解析結果による底面流速分布の時間変化（浅川合流点～大丸用水堰区間）

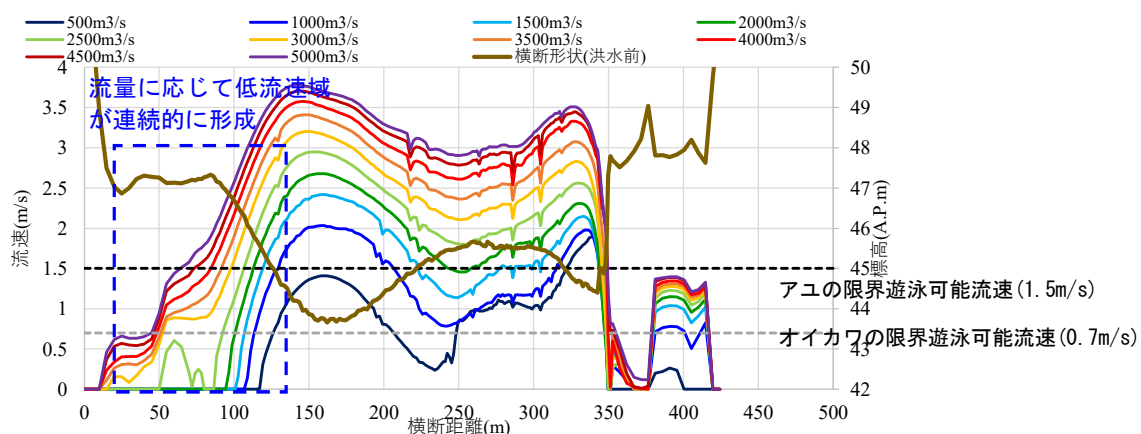


図 5-27 大丸用水堰改築後河道の解析結果による流量の変化に対する底面流速の横断分布の変化（大丸用水堰上流：34.0km）

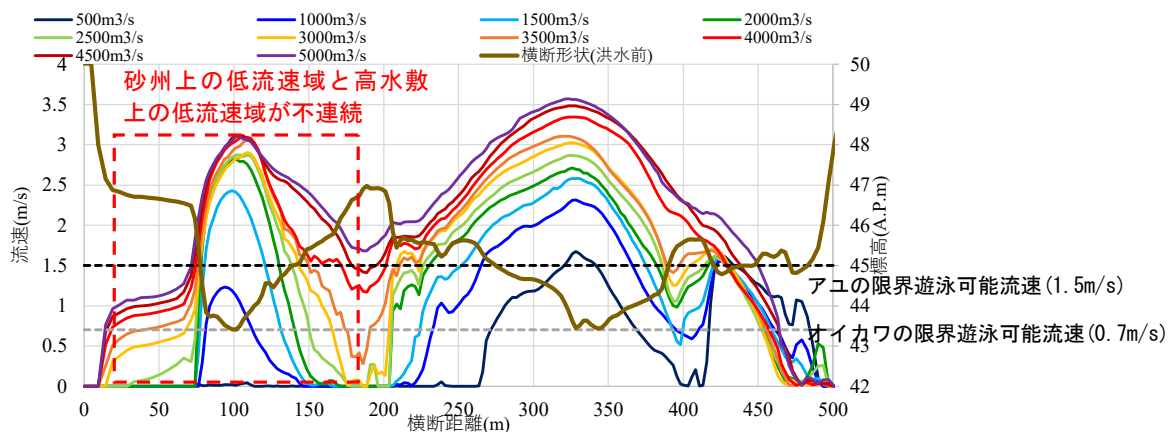


図 5-28 現況河道の解析結果による流量の変化に対する底面流速の横断分布の変化（大丸用水堰上流：33.6km）

5-5 第5章のまとめ

本章では、第3章で示した低水路の安定に伴い形成される「船底形断面形」について、多様な植生の生育場の維持と洪水時の魚類の避難場所の形成の観点から分析し、「船底形断面形」が治水と河川環境の調和した河道断面形となり得ることを考察した。以下に明らかにしたことを示す。

安定した砂州河道と植生の生育場の関係について、多摩大橋上下流区間(44.0~42.8km)、JR中央線上流区間(42.0~41.6km)を対象に、砂州上の植生を一年生草本群落、オギ群落(多年生草本群落)、樹木群落に区分し、それぞれの生育範囲を砂州の比高差、冠水・河床変動が生じる流量(解析結果)との関係で分析した。分析の結果、各植生区分の生育範囲を砂州の比高差で概ね説明することができ、「船底形断面形」では、砂州の比高差に応じて、植生の棲み分けがなされ、洪水による冠水・攪乱が適度な頻度で発生することで、樹木群落の拡大が抑制され、オギ原などの草本群落の生育場が動的に保たれていることを示した。

洪水時の魚類の避難場所については、洪水時に魚類が高流速に反応して避難行動をとっているとの知見(東ら・1999, 傳田ら・2009)を踏まえ、第4章で行った解析結果を用いて河道の底面流速を指標として、多摩川の代表的な魚種(アユ, オイカワ)を対象に分析を行った。対象魚種の遊泳速度(0.7~1.5m/s程度)以下の低流速域を、魚類の避難場所となる可能性のある領域とみなし、洪水流量に応じて低流速域が形成される河道の特徴を考察した。分析の結果、「船底形断面形」に改修された多摩大橋周辺(44.2~43.4km)の右岸砂州は、流量の増加に応じて水面幅が広がることで、底面流速の増加が緩やかであり、それにより低流速域が時空間的に連続して形成されるため、洪水時の魚類の避難場所・経路となる可能性があることを示した。一方、浅川合流点下流区間(37.0~32.4km)では、流量の増加とともに低水路内の砂州(中州)上の低流速域と高水敷上の低流速域が分断され、魚類の避難場所が不連続で限定的となる。それが、第4章で検討した大丸用水堰改築後の河道では、低水路河床と砂州、高水敷が横断的に連続(船底形断面形)することで、魚類の避難場所の安定的な形成に寄与することを示した。なお、これらは平均的な体長の魚類(アユ:8.6cm, オイカワ:7.1cm)を対象とした分析結果であり、「船底形断面形」が遊泳能力の低い仔稚魚の避難場所としても機能するかは捉えられていない。仔稚魚に対しては、ワンドや冠水したヨシ・オギ原などの周辺の止水域・低流速域が重要な避難場所となり得る。このため、「船底形断面形」を形成した砂州上のオギ原は、洪水流量に応じて水面形が時空間的に連続し、オギ原への避難経路が確保されることから、魚類の個体群の維持にとって重要度が高いと考えられる。

以上のことから、「船底形断面形」は、治水(河道の安定)と河川環境(良好な生物のハビタットの形成)の調和した河道断面形となり得ることを明らかにした。

本章の結果は、生物のハビタットを保全しつつ、治水上安全な川づくりのための検討にあたり、本研究で用いた高精度の洪水時の流況、河床変動を解析できる「準三次元洪水流・河床変動解析法」の有効性が高いことを示すものである。

参考文献

- 1) 山本晃一：沖積河川-構造と動態-, 技報堂出版, 2010.
- 2) 李参熙, 藤田光一, 山本晃一：礫床河道における安定植生域拡大のシナリオ -多摩川上流部を対象にした事例分析より-, 水工学論文集, 第 43 卷, pp.977-982, 1999.
- 3) 藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No. 747, II-65, pp.41-60, 2003.
- 4) 知花武佳, 山下貴美子, 工藤美紀男, 柳澤亘：横断構造物が河川地形に及ぼす影響とそこに見られる治水・環境両面の特性, 河川技術論文集, 第 15 卷, pp.231-236, 2009.
- 5) 原田大輔, 知花武佳, 山下貴美子：ハリエンジュの生育特性に着目した多摩川の樹林化河道形成機構, 第 16 卷, pp.231-236, 2010.
- 6) 東信行, 鴨下真吾, 佐原雄二, 関泰夫, 渡辺勝栄:増水時における河川魚類の挙動と河川構造, 環境システム研究, Vol.27, pp.793-798, 1999.
- 7) 傳田正利, 天野邦彦, 辻本哲郎：魚類自動追跡システムの現地実証実験と魚類行動特性の把握, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.1, pp.1-14, 2009.
- 8) 青木宗之, 瀬崎薫貴, 福井吉孝：複断面開水路における流量変化と魚の行動に関する実験的研究, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.4, pp166-182, 2013.
- 9) 財団法人ダム水源地環境整備センターダム編, 中村俊六編著, 広瀬利雄編著：魚道の設計, 山海堂出版, 1991.
- 10) 鈴木興道：魚の住みやすい川づくりに資する魚類の生息分布とその場の流速, 土木学会論文集, No.593, II-43, pp21-29, 1998.
- 11) 鈴木興道：魚道の設計に資する淡水魚類の耐久遊泳速度, 土木学会論文集, No.622, VII-11, pp107-115, 1999.
- 12) 志賀久枝：多摩大橋周辺における治水と環境の調和した川づくり, 平成 29 年度スキルアップセミナー関東, 2017.
- 13) 福岡捷二, 渡辺明英, 盛谷明弘, 日比野忠史, 大村靖人：オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性, 第 3 回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.245-250, 1997.
- 14) 福岡捷二, 島谷幸宏, 田村浩敏, 泊耕一, 中山雅文, 高瀬智, 井内拓馬：水流による高水敷上のヨシ原の倒伏・変形と粗度係数に関する現地実験, 河川技術論文集, 第 9 卷, 2003.
- 15) 福岡捷二, 成田一郎, 服部敦, 狩野晋一：洪水時の高茎草本の挙動と粗度係数, 河川技術論文集, 第 11 卷, pp.237-242, 2005.

第 6 章 結論

6-1 本研究の結論

本研究では、多摩川中流部の経年的な河川改修や大規模洪水に対する河道の長期的な変化、河道の変化と植生の変化の相互関係を分析し、浅川合流点上流区間の低水路が安定する機構、合流点下流区間の低水路が不安定化する要因を明らかにした。そして、浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を活用して、合流点下流区間の土砂移動を改善し低水路の安定化を図る河道改修技術について検討した。さらに、低水路の安定した砂州河道の断面形が自然河川の河道形状である「船底形断面形」を形成し、それが生物のハビタットの形成に寄与することを示し、「船底形断面形」が治水(河道の安定)と河川環境(良好な生物のハビタットの形成)の調和した河道断面形となり得ることを明らかにした。

以下に、本研究の主な結論を示す。

第 1 章 「序論」 では、本研究の背景と目的、本論文の構成について示した。

第 2 章 「既往研究と本研究の位置づけ」 では、治水と河川環境の整備・保全の観点から「安定な河道の形成」、「洪水に対する河道の変化と植生の応答関係」、「生物のハビタットの評価」に関する既往の研究と、治水と河川環境の調和を目指した川づくりにおける課題をとりまとめ、それらの研究の知見、課題を踏まえた本研究の位置づけを示した。

第 3 章 「多摩川中流部の複断面河道の長期的変遷、低水路河道断面の安定化の機構」 では、多摩川中流部(日野用水堰～大丸用水堰)を対象に、過去 74 年間(昭和 22 年～令和 2 年)の実測データを用いて、これまでの河川改修や洪水等に対する河道の長期的な変化、河道の変化と植生の変化の相互関係、それらを踏まえた低水路の安定・不安定化の機構、低水路の安定化の機構と「船底形断面形」の関係について検討を行った。

浅川合流点より上流区間(45.2～37.0km)では、平成 11 年以降、大規模洪水の頻発化とともに、これまでの河川改修による効果が顕われ始め、低水路河床高がほぼ維持されるようになり、低水路幅の拡大に伴い昭和 40 年代の砂州河道に戻るように変化していることが明らかとなった。この低水路の安定化の機構について以下に示す。

JR 中央線上流～四谷本宿堰区間(42.2～38.2km)では、日野橋(39.9km)、JR 中央線(41.35km)の橋梁付近に護床工が設置されており、その上流の低水路河床高が護床工の敷高程度に達することで、河床低下が抑制されるようになった。さらに、四谷本宿堰(38.2km)は、平成 13 年 9 月洪水で被災したため、堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築されたことで、河道の流下能力、土砂移動が改善された。これにより、当該区間の低水路河床高は、ほぼ一定間隔で設置された堰や横断構造物の護床工の敷高に規定され、河床高の縦断形がほぼ維持され

ている。そして、低水路河床高が維持されることで、平成 11 年以降の洪水規模の増大によって、高水敷化した砂州河岸の洗掘が促され、どの土砂が河床へ供給されることで、低水路幅の拡大とともに低水路が安定していることが明らかとなった。また、低水路河床と砂州河岸の比高差の安定は、洪水による砂州河床の攪乱を適度な頻度でもたらし、比高差 2.0m 程度以下の砂州上では新たな樹木群落の定着・拡大が抑制され、そこにはオギ原等の草本群落の生育場が動的に保たれていることが分かった。

一方、JR 八高線～多摩大橋区間(44.8～43.8km)では、多摩大橋の護床工(昭和 61 年設置)が JR 八高線の護床工(昭和 42 年以前設置)と比べて設置年度が遅く、これらの護床工の敷高の差により河床縦断勾配が他の区間より大きいため、河床低下が継続していた。このため、平成 26～28 年に、多摩大橋周辺地区(44.8～43.4km)では、砂礫による河床の埋戻しと高水敷化した砂州の掘削(船底形断面河道整備)、連続的な帯工群の設置等の河川改修が行われた。その結果、その後の令和元年 10 月洪水では、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ることが分かった。

このような低水路河床縦断形の維持機構によって低水路幅が拡大している区間(42.4～40.4km)では、流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度が低水路満杯流量となり、それを超えると高水敷化した砂州河岸上に主流が乗り上げ、砂州河岸の洗掘により低水路の拡幅を促している。このことから、平成 11 年以降の $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える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 年代の低水路幅に近づくように変化していることが明らかとなった。さらに、低水路幅の回復に伴い、低水路の河道断面形が安定な断面形に近づくにつれて、「船底形断面形」を呈するようになることを示した。

次に、浅川合流点下流区間(37.0～32.4km)における低水路の不安定化の要因について示す。当該区間では、その下流端に固定堰部が 6 割を占める大丸用水堰(32.4km)、その上流には河積阻害の大きい京王線橋梁(35.1km)が存在し、それらが上流河道及び浅川からの流入土砂の流下を妨げるため、それら横断構造物の直上流に土砂が堆積し、大規模な砂州(中州)を形成している。大丸用水堰上流の中州は、その高さが固定堰部の高い敷高に規定されて上昇し、さらに堰右岸側の可動堰部の上流で滞筋が発達することで、中州の比高差が経年的に増大している。中州の比高差の拡大は、中州上に植生を繁茂させ、それらが洪水時の流速を低減、中州上の土砂の捕捉・堆積を助長する。それにより、比高差がさらに上昇した中州上では樹木が繁茂し始め、洪水時の中州の自然な移動を妨げている。このように大丸用水堰は、敷高の高い固定堰部が広いために、洪水の流下能力が低いことに加え、低水路内に発達した中州の不安定な形状による洪水時の滞筋への流れの集中や偏流、それに伴う水衝部位置の変化が護岸や河岸侵食被災をもたらしており、大丸用水堰の改修の緊急性が高いことが明らかとなった。

第 4 章「浅川合流点上流区間の低水路安定化の機構を用いた合流点下流区間の河道改修技術」では、第 3 章で明らかとなった浅川合流点上流区間の低水路の安定化の機構を活用して、合流点下流区間の低水路の安定化を図るための河道改修技術を検討し、その効果を洪水流・河床変動解析法を用いて評価した。

浅川合流点下流区間の河道の流下能力と土砂移動の改善を図るため、大丸用水堰の敷高を切り下げて、床止め工に改築する対策を技術的に検討した。浅川合流点上流区間の低水路河床縦断形が堰・護床工等の敷高に規定されて安定していることを踏まえ、その安定機構に基づき、堰上流の京王線橋梁(35.1km)の護床工の敷高と堰下流の低水路河床高が経年的に安定している 31.0km 付近の低水路平均河床高をつないだ河床縦断形を改修目標として、その河床縦断形における大丸用水堰地点(32.4km)の高さを、堰改築後の床止め工の敷高として設定した。

堰改築による効果を検証するため、橋梁や堰等の横断構造物周辺の流れと土砂移動を精度良く解析可能な非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析を行った。洪水流の解析法は、水深積分の枠組みで三次元流れを再現できる、竹村ら(2019)による準三次元洪水流解析法(Q3D-FEBS 法)を用いた。河床変動解析法については、長田・福岡(2012)による掃流砂の解析法と、長谷部ら(2022)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した非平衡流砂運動に基づく解析法を用いた。本解析法を令和元年 10 月洪水に適用した結果、実測の洪水水面形の時間変化、流量ハイドログラフ、河床の洗掘・堆積傾向を十分説明できることを確認した。

令和元年 10 月洪水の流量ハイドログラフ 2 波形分を外力として、現況河道と堰改築後河道の解析結果を比較し、堰改築による効果を評価した。その結果、堰改築後河道では、洪水ピーク時の水面形が計画高水位を下回り、河道の流下能力が向上すること、現況河道に比べて堰を通過する流砂量が増加し、堰上下流の土砂移動が改善されることを示した。また、堰改築後河道では、砂州の移動が妨げられなくなったことで、規則的な砂州(交互砂州)が形成され始め、現況河道で見られた低水路内の不規則な砂州(中州)の発達は解消される。これにより、堰直上流の砂州の比高差は 0.9m 程度に抑えられ、これは樹木が繁茂しやすい比高差(2.0m 程度以上)と比べて十分に低く、平均年最大流量規模の洪水により砂州全体で活発な土砂移動が生じるため、砂州上の樹木の繁茂は抑制される。以上のことから、大丸用水堰を切り下げて床止め工に改築し、低水路河床の縦断形を是正することにより、河道の流下能力と土砂移動の改善をもたらす、低水路の安定化に大きく寄与することを明らかにした。

第 5 章「安定した砂州河道と生物のハビタットの形成の関係」では、第 3 章で示した低水路の安定に伴い形成される「船底形断面形」について、多様な植生の維持と洪水時の魚類の避難場所の形成の観点から分析し、「船底形断面形」が治水と河川環境の調和した河道となり得ることを考察した。

安定した砂州河道と植生の生育場の関係について、低水路が安定しつつある多摩大橋上

下流区間(44~42.8km), JR 中央線上流区間(42~41.6km)を対象に, 砂州上の植生を一年生草本群落, オギ群落(多年生草本群落), 樹木群落に区分し, それぞれの生育範囲を砂州の比高差, 冠水・河床変動が生じる流量(解析結果)との関係で分析した. 分析の結果, 「船底形断面形」では, 砂州の比高差に応じて, 植生の棲み分けがなされ, 洪水による冠水・攪乱が適度な頻度で発生することで, 樹木群落の拡大が抑制され, オギ原を代表とする草本群落の生育場が動的に保たれていることを示した.

洪水時の魚類の避難場所については, 洪水時に魚類が高流速に反応して避難行動をとっているとの知見(東ら・1999, 傳田ら・2009)を踏まえ, 第4章で行った解析結果を用いて河道の底面流速分布を分析し, これを指標として多摩川の代表的な魚種(アユ, オイカワ)を対象に分析を行った. 対象魚種の遊泳速度(0.7~1.5m/s 程度)以下の低流速域を, 魚類の避難場所となる可能性のある領域とみなし, 洪水流量に応じて低流速域が形成される河道の特徴を考察した. 分析の結果, 「船底形断面形」に改修された多摩大橋周辺(44.2~43.4km)の右岸砂州は, 流量の増加に応じて水面幅が広がることで, 底面流速の増加が緩やかであり, それにより低流速域が時空間的に連続して形成されるため, 洪水時の魚類の避難場所・経路となる可能性があることを示した. 一方, 浅川合流点下流区間(37.0~32.4km)では, 流量の増加とともに低水路内の砂州(中州)上の低流速域と高水敷上の低流速域が分断され, 魚類の避難場所が不連続で限定的となる. それが, 第4章で検討した大丸用水堰改築後の河道では, 低水路河床と砂州, 高水敷が横断的に連続(船底形断面形)することで, 魚類の避難場所の安定的な形成に寄与することを示した. また, 「船底形断面形」を形成した砂州上のオギ原は, 洪水流量に応じて水面形が時空間的に連続し, 低流速域となるオギ原への避難経路が確保されることから, 魚類の個体群の維持にとって重要度が高いと考えられた.

以上のことから, 「船底形断面形」は, 治水(河道の安定)と河川環境(良好な生物のハビタットの形成)の調和した河道断面形となり得ることを明らかにした.

多摩川中流部では, 長期間にわたり実施されてきた河川改修による効果や影響が, 洪水に伴う低水路河床高や低水路幅の応答に顕われている. これまでに蓄積されてきた実測データに基づき, このような河道の長期的変化を分析することは, 今後の河川管理を進める上で有益な情報を与える. 本研究では, 既設の横断構造物の護床工や改築された堰, 帯工群等の横断構造物が一体となって機能することで, 適切な低水路河床縦断形が維持され, 低水路幅の回復とともに河道の安定化, 良好な生物のハビタットの形成につながっていることを水理的・河川工学的手法で明らかにした. これは, 多摩川中流部では, 適切な低水路河床縦断形を維持するように治水対策を計画的に行ってきたことが, 河川環境の整備・保全にもつながっていたことを示すものである. このことから, 本研究の提案する多摩川中流部の治水と河川環境の調和のあり方は, 河道の長期的変化からその河道本来の適切な低水路河床縦断形を明らかにし, それを目標に改修, 維持管理していくことが基本となる.

本研究は、精度の高い洪水流・河床変動解析手法を用いて、洪水流と土砂移動、河川構造物の関係、及びそれらが治水と河川環境に与える影響を適切に評価し、その結果に基づき河川構造物の設計法を提案、実施しており、これは河川防災技術のための「デジタルツイン」技術の好例になると考える。

6-2 今後必要な調査研究

我が国では、横断構造物の老朽化に伴う河道の流下能力不足と土砂移動の問題を抱える河川は多く、それらの河川に対して、本研究で検討した河道改修技術の考え方を適用し、治水と河川環境の調和した河川改修、維持管理に役立てることが期待される。そのため、本研究の成果の精度の向上や技術の一般化に向けた、今後必要な調査研究の検討課題について以下に示す。

第 4 章では、浅川合流点下流区間の低水路の安定化技術として、大丸用水堰の改築による効果を、計画高水流量を超える令和元年 10 月洪水を外力として、洪水流・河床変動解析を用いて評価し、河道の流下能力、土砂移動の改善、低水路の安定化に有効であることを示した。この結果を踏まえ、現在、大丸用水堰の改築事業が着手されている。そのため、大丸用水堰の改築事業後、対策の効果や上下流の低水路河道、既設の橋梁の安定性に及ぼす影響について、大規模洪水に加えて、発生頻度の高い中小洪水を含む外力に対して、長期的に分析、評価する必要がある。

また、本研究で提案した河道改修技術の基本となる低水路河床縦断形を維持するための横断構造物(低水路護床工、帯工、床止め工)について、敷高や縦断的な設置間隔、横断的な設置範囲などの適切な設定方法について技術的に検討することが重要となる。そのためには、まだ河道の安定化対策が検討されていない上流の堰(昭和用水堰(48.0km)、羽村取水堰(54.0km))までの区間や、土砂移動量の多い浅川などの支川を含めた検討を行い、様々な河道特性、土砂移動条件を考慮した検討を行う必要がある。本研究では、河道改修技術の事例として、JR 中央線～日野橋区間では、①既存の低水路護床工を活用し、設置当時(昭和 40 年代)の河床縦断形を維持する技術事例、四谷本宿堰や大丸用水堰では、②老朽化した固定堰を床止め工に改築し、堰上下流の土砂移動を制御して河床縦断形を是正する技術事例、JR 八高線～多摩大橋区間のような低水路河床に土丹が露出し河道の二極化が深刻な区間では、③低水路河床の埋戻し、河道掘削(高水敷化した砂州の切下げ)、埋め戻した河床高を維持するための帯工群の設置の一体的整備により、河道の二極化が顕在化する前(昭和 40 年代)の河床縦断形を再生する技術事例の 3 パターンの技術事例を示している。それらの技術事例毎に、どのような河道特性や土砂移動条件、課題に対して適用できるかを明らかにすることが重要となる。

第 5 章では、洪水時の魚類の避難場所となる砂州構造について、実河川における既往の調査研究の知見を踏まえ、解析結果による底面流速を指標として分析し、「船底形断面形」を

呈する砂州河道で形成される時空間的に連続した低流速域が魚類の避難場所として機能する可能性があることを示している。この分析結果は、生物のハビタットを保全しつつ、治水上安全な川づくりのための検討にあたり、本研究で用いた高精度の洪水時の流況、河床変動を解析できる「準三次元洪水流・河床変動解析法」の有効性が高いことを示すものである。本研究で示した魚類の避難場所(低流速域)となり得る砂州は、洪水流による河床変動の影響を受けるため、安定的に形成されるものではないと考えられることから、本解析法を用いて、洪水時の流速場や河床の変化を考慮して、遊泳能力の低い仔稚魚を含む魚類の安定な避難場所(ワンドや堤外水路など)のつくり方を検討することが重要である。

また、「船底形断面形」に改修された区間、低水路幅の回復に伴い「船底形断面形」が形成されつつある区間について、令和元年10月洪水以降の中小洪水を含む洪水外力に対して、河道形状、生物の生息・生育状況をモニタリングし、河道の安定性、生物のハビタットとしての機能を長期的に評価する必要がある。

謝辞

私は、平成16年3月に広島大学大学院を修了後、財団法人リバーフロント整備センター(現 公益財団法人リバーフロント研究所)に入社し、約15年間、河川環境や水辺空間の整備・保全等に関する実務経験を積んできました。そして、令和元年9月より中央大学大学院に再進学する機会をいただき、多くの方々に支えていただきながら、3年半をかけてどうにか本論文をまとめることができました。ここに記して感謝の意を示します。

中央大学研究開発機構 福岡捷二教授には、私が進学する切っ掛けをつくっていただき、また、私の経験を尊重しながらも、学術的・社会的意義の高い課題である「治水と河川環境の調和」を研究テーマとして与えていただきました。そして、私がどれ程の研究者、社会人としてそぐわない姿勢、行動をとり、多大なご迷惑をおかけしたにも関わらず、最後までご指導いただきました。ここに深甚なる感謝の意を表します。福岡捷二教授には、私が広島大学の学生だった頃から、土木技術者としてのあるべき姿、日常から物事を考えること、知的好奇心を持つことなど、様々な面においてご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

主査である中央大学理工学部 榎山和男教授には、解析法や研究のとりまとめ方などについて貴重なご指摘とご助言をいただきました。心より御礼申し上げます。

中央大学理工学部 手計太一教授、志々目友博教授、鎌倉稔成教授、東京大学大学院工学系研究科 知花武佳准教授には、ご多忙の中、論文審査を通じて様々な視点からの確かかつ本質をついたご指摘とご助言を賜りました。ここに御礼申し上げます。

国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所の皆様には、本研究にあたり、貴重な資料、データのご提供をいただきました。ここに御礼申し上げます。

中央大学研究開発機構 後藤岳久准教授、竹村吉晴准教授、高鍛裕也助教、琉球大学(前中央大学研究開発機構)福田朝生准教授、国土交通省国土政策総合研究所(前 中央大学研究開発機構)田端幸輔主任研究官には、研究内容について議論し、多くのアドバイスをいただきました。心より感謝致します。特に後藤岳久准教授のご指導、ご協力なしでは、本論文をまとめることなど到底できるものではなく、ここで感謝の意を言葉では言い尽くせません。

仲井いく子様には、研究室生活を送る上で、私が研究に専念できるように色々ご配慮をいただきました。厚く御礼申し上げます。また、研究室の学生皆様には、現地調査のご協力をいただくとともに、研究に対する熱心な姿勢、日々行われている議論が私の刺激となり、研究へのモチベーションを維持することができました。研究室の学生皆様に感謝致します。

小野武彦氏(前 公益財団法人リバーフロント研究所 代表理事)、柏木才助氏(前 公益財団法人リバーフロント研究所 業務執行役)、そして、公益財団法人リバーフロント研究所の土屋信行氏を始め皆様には、私が退職し大学へ再進学することについてご理解、後押しをいただき、多大なご支援を賜りました。心より御礼申し上げます。

最後に、私の研究を理解し、常に支え続けてくれた妻 千佳子に心より感謝致します。本当にありがとうございました。