

## 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, Katsuhiko 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滯筋の固定化、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顕われ始め、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 2,000m<sup>3</sup>/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 2,000m<sup>3</sup>/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付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滞り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。