

水工学シリーズ 08-A-6

多摩川の河道修復，北川の激特事業に見る
河道掘削後の地形および河床材料の変化

土木研究所 水工研究グループ
河川・ダム水理チーム 主任研究員

福島 雅紀

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2008 年 8 月

多摩川の河道修復、北川の激特事業に見る河道掘削後の地形および河床材料の変化

Changes in Riverbed Topography and Riverbed Materials after River Improvement Works of Two Rivers — 1. Gravel-bar Restoration Works in the Nagata District in the Tama River ／ 2. Large-scale Improvement Work in the Kita River —

福島 雅紀

Masaki Fukushima

1. はじめに

1990年に建設省によって出された通達「多自然型川づくりの推進について」は、より質の高い河川環境の創造と保全を呼びかけたものであり、公害により悪化した水質を改善するために制定された水質汚濁防止法（1970年）、1970年代中頃以降の景観に配慮した護岸などの普及から、一步進めた形でより質の高い河川改修の推進を謳ったものであると考えることができる。その後、1994年にまとめられた環境政策大綱の中では質の高い環境を備えた国土の実現、1995年の河川審議会答申では今後の河川整備の方向として「生物の多様な生息・生育環境の確保」、「健全な水循環系の確保」が示された。1997年には、1962年に制定された河川法が改正され、その目的に「河川環境の整備と保全」が加えられた。また、地域の意見を反映した河川整備計画が導入されたのもこの改正の時であり、現在109水系ある直轄河川では河川整備計画の策定作業が進められている。このような背景の中、多自然型川づくりの実施数は1990年以降増加し、2002年度末には累計で約28,000件の事業が行われてきたが、その中には改善の余地が残された事例が多かったことも指摘されている（多自然型川づくりレビュー委員会、2006）。この指摘を踏まえ、モデル事業のような印象を与える「型」から脱却し、普遍的な川づくりの姿として、「多自然川づくり」と改称されたことは記憶に新しく、そこに示された方向性から感じられるキーワードは「空間」、「時間」、「人」であった。河川が本来の姿を形成するために必要な「空間」スケール、河川が「空間」スケールに応じた形への変化するために必要な「時間」スケール、その「空間」と「時間」の中で河川に係わる「人」の活動を常に意識することが主張されている。

学術的な取り組みに目を向けると、1995年に「河川生態学術研究会」、1997年に「応用生態工学研究会（応用生態工学会）」が設立され、上述した事業の増加に伴って、河川環境に関する研究も数多く実施されるようになってきた。島谷（2008a, b）は、このような活動に伴う技術の発展を表1.1のように整理している。河道内の流れや河床の変化を一次元的に扱うことで十分であった従来型河川技術に比べ、徐々に事業目的が多様化してきたことを表現したものである。例えば、減災型河川技術においては、単純な氾濫計算に加え、堤防が決壊した後の氾濫水到達時間、湛水する水位の時間変化などの予測が避難経路の情報と合わせて解析される事例も報告されている（川口ら、2006）。また、環境統合型河川技術では、それらに加えて、景観、生態系の変化、親水性に与える影響を予測する必要性から、河道の微地形の変化を初め、表層河床材料、植生、瀬淵構造などを予測する技術が、より木目の細かい河川技術として求められるようになった。例えば、大沼ら（2007）は植生による細粒土砂の堆積を考慮した2次元河床変動計算モデルを、藤田ら（2008）は表層河床状態の変化を予測するために空隙の変化を考慮した河床変動モデルを提案している。

表 1.1 環境意識の醸成に伴う事業目的の変化と必要とされる技術の変遷（島谷、2008を一部変更）

事業目的	流下能力の確保	河川構造物の安全性	下流河川の流量低減	氾濫被害の軽減	景観の保全・再生	生態系の保全・再生	親水性への配慮
従来型河川技術	○	○	—	—	—	—	—
減災型河川技術	○	○	○	○	—	—	—
環境統合型河川技術	○	○	○	○	○	○	○

河川生態系の保全にとって、連続性が重要であることは生態学的によく知られており、上流と下流、水域部と陸域部、河道と堤内地など、それぞれをつなぐ取り組みが今後の河川環境の整備と保全にあたっての方向性として指摘されている（中村，2008）．人間活動は、このような河道の連続性を分断する形で河川生態系に影響を与えることがあり、その影響を少しでも軽減するような施策が積極的に進められている．身近な例を挙げると、取水等のために設けられた堰、床止め等への魚道の設置は、魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業として全国的に展開されてきた（国土交通省河川局，2005）．また、土砂の連続性の視点に立つと、1998 年 7 月の河川審議会総合土砂管理小委員会報告「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の提言は大きな意味を持つ．流域の源頭部から海岸までの一貫した土砂の運動領域を「流砂系」という概念で捉え、その流砂系を一貫した形で総合的に土砂の管理を行うことの必要性が述べられている．近年、上流部では流入土砂を堆積させないダム運用方法、土砂の流れを阻害しない砂防ダムの構造が検討されるなど、実際に土砂を通過させる砂防ダムの建設も進められている．その時、海岸まで含めた土砂の連続性をより確実なものとするためには、中流域における土砂の移動を円滑なものとするのが望まれる．しかし、河道区間において実施されてきた河道掘削事業から見ると、上流からの土砂供給が増加することは負の影響として見られる可能性もある．一方で、河床材料が適切に更新される効果、砂が河床を流れることで生じる河床を構成する礫の研磨効果などは、河川環境上重要であることが指摘されている．ダムのアセットマネジメントの観点からも、ダムからの排砂が本格的になる時代は近いと考えられ、その影響を適切に評価する河川技術も環境統合型河川技術と言えよう．

本報告では、河川生態学術研究会の調査対象河川の中から著者もグループのメンバーの一人として参画した多摩川および五ヶ瀬川水系北川での調査結果を中心に整理した．上述した内容からすると、その一部の話題提供となるが、第 2 章では多摩川永田地区の河道修復事業について、第 3 章では北川で実施された大規模な河川改修事業について紹介する．それぞれについて、事業の背景、事業実施にあたっての基本的考え方、事前の予測結果、事業実施後の地形および河床材料の変化について紹介する．第 4 章では、それぞれの事業の中でキーとなった河原が維持される仕組みについて、その中の一つの過程として重要な河床表層状態の変化、特に透礫層の形成メカニズムおよびその破壊過程について実験的に検討した結果について報告する．

2. 永田地区における河道修復事業

2. 1 多摩川永田地区の概要

永田地区は、多摩川の上中流部に位置する約 1.6km の区間であり、永田橋と羽村大橋に挟まれた区間である．1975 年当時の永田地区は、広い礫河原と水深の浅い平らな滞筋の扇状地特有の河道形状であった（河床勾配：1/250、川幅：300m 程度、河床材料の平均粒径：3.7cm）．しかし、大量の砂利採取が行われたこと、利水施設等の整備により上流からの土砂供給量が減少したこと、さらには河川流量が安定したことにより、河道形状が複断面化し低水路が固定された（写真 2.1）．図 2.1 に示す横断測量結果を見ると、経年的に高水敷が形成されるとともに、低水路が局所的に洗掘されてきた状況を確認できる．なお、その川幅は最も狭い



写真 2.1 永田地区の変遷

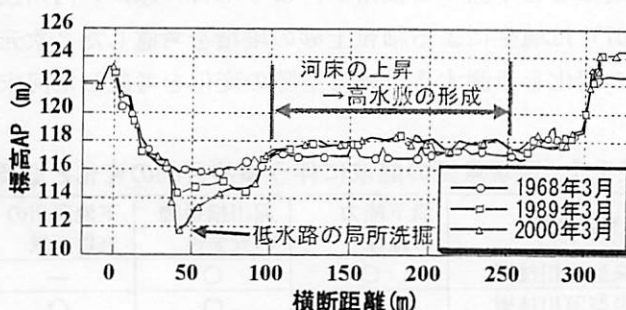


図 2.1 代表的な断面形の変化 (52.8km 地点)

部分で50m程度まで縮小した。また、永田地区の上流から河床低下が進行することで河床勾配も1/350程度と緩勾配化してきている。

2. 2 河道修復事業の基本的考え方

上記の状況を踏まえ、河原環境とそこに生息する生物の復元を目的とした河道修復事業が提案され、その目標像として、カワラノギクが広く分布した戦後の礫河原がイメージされた。しかしながら、洪水攪乱頻度等の周辺状況が変化した中で、例えば河川改修によって礫河原のみを造成しても、その河川景観が維持されないことはしばしば見られる。このような景観を維持するためには、河原が維持される仕組み、そこにカワラノギクが繁茂するための仕組みを回復・維持することが不可欠である。そこで、石橋ら(2001)を参考にし、以下に示す基本的な考え方に基づいて河道修復計画が立てられた。また、その考えに基づいて、河道修復後の地形、植物の分布、昆虫の生息状況などの変化がモニタリングされている(海野ら, 2006)。

- ① **エコシステム・レストレーション**…生物の生息する場、または特定の生物種など、対象物のみの保全・復元にとどまらず、対象物とその生息場が形成・維持される仕組み(エコシステム)を理解することに努め、その仕組み自体も保全・復元する。
- ② **インパクト・レスポンスを考慮した修復**…修復の対象とする地域のみ限定せず、その地域を含む広い領域の状況を把握し、その地域に生じている現象について主要因(インパクト)の作用の仕方、その結果として生じた変質(レスポンス)の過程と機構に着目して、具体的な修復案を提案する。
- ③ **アダプティブ・マネジメント**…修復実施後もモニタリングを行い、修復という新たなインパクトに対するレスポンスから仕組みの理解をさらに深め、修復手法の改善や実施手順の調整を適宜実施する。ただし、ここで注意しなければならないのが、「適宜」が「場当たりの」にならないように留意し、モニタリング結果を仕組みの理解に適切に反映し、その仕組みに基づいて計画的に修復を進めていくことが重要である。なお、目標イメージとしたカワラノギクが広く分布した礫河原は景観に着目した指標であり、「ランドスケープ目標」と呼ばれた。一方、河原が維持される仕組みを回復することは「システム目標」と呼ばれた。アダプティブ・マネジメントにおいては、両者の目標の達成状況を確認することが重要であり、次節に示す河原の維持される仕組みに基づいて達成状況の評価指標が提案された。

2. 3 河原が維持される仕組み

ランドスケープ目標については、永田地区に占める礫河原の面積の割合、カワラノギク等の河原生物の繁茂面積、個体数などを指標として、その達成状況を確認できる。しかしながら、システム目標の達成状況については容易に確認することができない。また、ランドスケープ目標は、ここ数年の出水の発生状況によって、大きな出水がない場合などは一時的にランドスケープ目標が達成されていない状況も発生する。そのような場合に、ランドスケープ目標からは河原の維持状況を適切には確認できず、システム目標の達成状況を確認する必要がある。以下では、河原が維持される仕組みについて説明し、河道修復事業で用いた指標について示す。

図2.2には、河川地形を決定付ける河道内の主要要素(土砂、水、植生)、およびそれぞれの関連性を示す。また、そこに加えられる外力として、自然的攪乱としての洪水、人為的攪乱としての河川改修事業等が示されている。河原が維持されるためには、この自然的攪乱である洪水の発生頻度を確保することが重要であることは共通認識となってきたが、図2.3は洪水に加え、植物と土砂との関係も含めて河原が維持される仕組みを模式的に示した図面である(藤田ら, 2003を一部変更)。なお、それらの関係に加え、河床表層状態の変化についても触れた。河床表層の状態は図2.4のように整理することができるが、渡辺ら(1998)によって指摘されたように透礫層の存在が植物の繁茂を抑制することは北川における観察結果などからも確認されている(福島ら, 2006)。

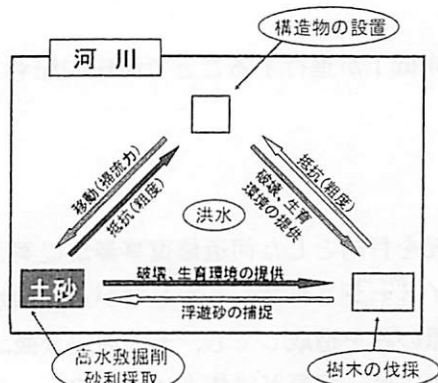


図 2.2 河川地形を決定付ける要素とそれらの関係

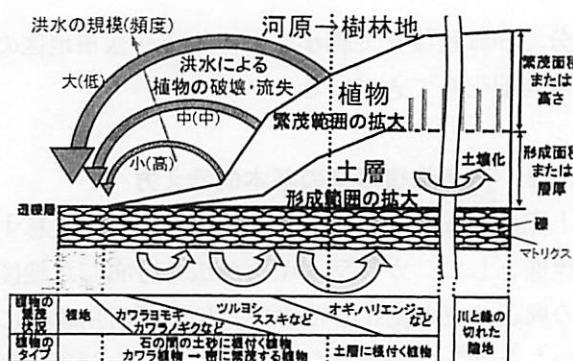


図 2.3 河原が維持される仕組み

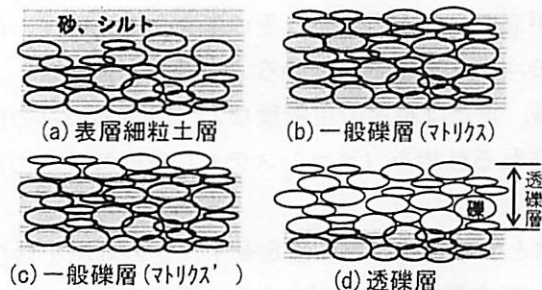


図 2.4 河床表層状態の分類

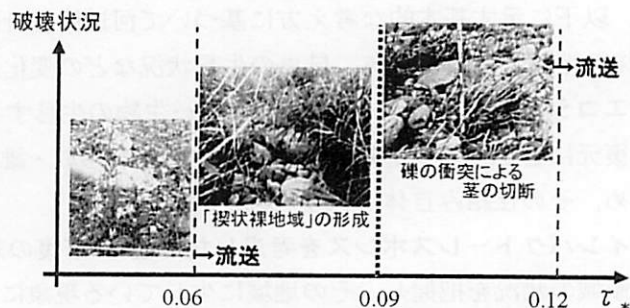


図 2.5 植物の破壊と掃流力の関係

瀬崎ら (2000) は、ツルヨシを対象として、その破壊過程を明らかにするとともに、各過程の発生外力を 50% 粒径に対する無次元掃流力を用いて評価した (図 2.5)。それによると、「倒伏→礫の群落内への侵入→楔状裸地域の形成→礫の衝突による根元近傍での茎の切断→茎を失った根株の流失」のプロセスを経て、ツルヨシ群落は破壊される。また、最終過程まで残った根株は最大粒径規模の礫を覆うようにして根茎を延伸しているため、その流失によって完全に裸地化する外力は、最大粒径の限界掃流力 ($\tau_* = 0.10 \sim 0.12$) とほぼ等しくなる。一方、根茎が地中深くまでしか伸長しないカワラノギクなどの河原植物は、限界掃流力 ($\tau_* = 0.06$) 程度で流失して裸地化する。密に繁茂する植物の群落内には、出水時に濁水中の土砂が沈降・堆積しやすく、それが土層を形成すると、土層に根付く植物 (例えば、オギ、ハリエンジュ) に遷移するようになる (李ら, 1999)。このような密に繁茂する植物は、河原植物より流失しにくく、土砂堆積を促進することでその繁茂面積をさらに拡大する。その結果、河原植物の生長を阻害し、その個体数を減少させる。河原植物は、個体数が少なくなり過ぎると、出水後の再繁茂が困難になり、絶滅が危惧される状態になるが、そこまで減少する以前に再裸地化するという適度なサイクルを保つように仕組みが機能していれば、河原は再形成・維持される。この状態が本来の意味の河原であろうが、通常は裸地を河原と表現することが多い。

李ら (1999a) は、永田地区の土層に根付く植物が安定的に繁茂し続けている理由として、低水路の河床高から 2~4m も高くなった高水敷上で植物の破壊・裸地化が生じにくくなったことを挙げている。永田地区に見られるようにハリエンジュが流れ方向に連続的に伸びる一塊の群落を形成すると、パッチ状の小群落群に比べ破壊されにくくなること (服部ら, 2001a)、さらに仮に部分的にハリエンジュが倒伏しても、根茎から直ちに再萌芽し、2~3 年程度で群落が再形成されること (服部ら, 2001b; 清水ら, 2001) も上述の妥当性を裏付けている。

以上より、河原が維持される仕組みに基づくと、修復事業においては、植物の破壊発生頻度を回復することがキーとなると考えられる。そこで、掃流力によって植物の破壊の有無が判別できると仮定し、流量ごとに河原に作用する掃流力とその生起確率を算定することで、掃流力の生起確率を求めた。この掃流力の生起確率を地点ごとに算定することで、システム目標の達成状況を確認した。藤田ら (2003) は、システム目標の達成状況を確認するためには、出水の発生シナリオを作成した上で、長期的な地形変化を予測することが

重要であることを述べているが、ここでは現状の状態を確認するものとして、掃流力の発生頻度を事業計画策定時のシステム目標の指標とした（服部ら，2003）。

2. 4 河床低下の発生機構

永田地区を含む約 12km 区間の低水路平均河床高の縦断形の経年変化を図 2.6 に示す。砂利採取は、1920 年代（関東大震災）以降から盛んに行われ、1967 年に全面禁止された（皆川ら，2000）。この期間に永田地区と河辺地区で河床が著しく掘り下げられたようであり、著しい河床低下が認められる。なお、1920 年代に採取された河床材料の粒度分布（高田，1927）は現在とほぼ同じである。1967 年以降では、出水に起因する河床変動によって永田地区では河床低下が生じたが、河辺地区では逆に上昇している。これらの状況から、狭窄部によるせき上げを受ける河辺地区を掘り下げたため礫が堆積するようになり、それより下流への流砂量が減少し、そのため堰や床固めの直下流に位置する永田地区で河床低下するようになったと推定される。また永田地区では、難侵食性の岩盤（以下、土丹層）が低水路河岸に一部を除き連続して露出している。砂利採取によって土丹層上に堆積する砂礫層が薄くなり、1967 年以降の河床低下の進行に伴って河岸に露出することで、低水路幅が拡がりにくくなったと推定された。

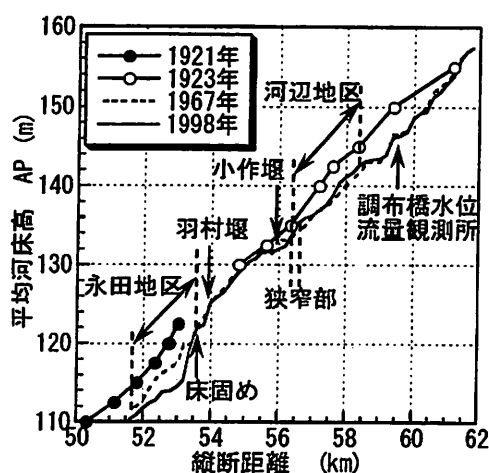


図 2.6 1920 年代以降の河床縦断形の変化

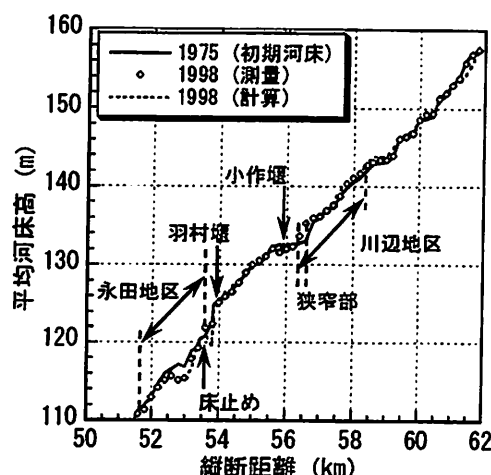


図 2.7 河床変動計算値と実測値の比較

これらの推定の妥当性は一次元河床変動計算によって確認されている。図 2.7 に示すように河辺地区での堆積（実測値約 6,500 m^3 /年に対して計算値 6,700 m^3 /年）と永田地区の河床低下（実測値約 5,600 m^3 /年に対して計算値 5,160 m^3 /年）を良好に再現できた。この際、上流端からの礫供給量 Q_{bin} は地形の再現性が最も良くなるように設定しており、24 年間の平均値で 11,700 m^3 /年とした。なお、以上の値は全て実質体積であり、以降も同様とする。また上述の供給量および侵食・堆積量より、羽村堰を越えて永田地区へ供給される量 $Q_{bNagata}$ が Q_{bin} の概ね半分となっていることを確認できる。

これらの結果は、ランドスケープ目標を満たすように思われる 1960～70 年代であっても、仕組みが機能しなくなる原因となった砂利採取による掘り下げが既に完了しており、 $Q_{bNagata}$ が半減しているため、システム目標とできるような河道状況ではないことを示唆する。さらに遡って 1920 年代のような横断形状に戻すことも、その形状が現状と大きく異なることに起因する諸問題（例えば、埋め戻しに用いる河床材料、小作堰での取水や治水安全性に与える影響など）の観点から非現実的である。つまり、過去の河道状況の中からシステム目標を満たすものを選定できないため、現状の河道状況をベースとして新たな河道状況を設定しなければならなかった。修復目標の設定において、河道の人為的攪乱が認められるものの、その程度があまり大きくないと予想されている高度経済成長期以前の河道状況を参考にすることが提案されたが、本事例はシステムの復元を軸に据えると、実現性のある河道状況が設定できない場合があることを示すものである。

2. 5 河道修復事業の概要

多摩川では既に砂利採取が禁止されており、このまま手を加えずに放置しても半減している $Q_{bNagata}$ が回復し河床が上昇し始める可能性もある。そこで、上述した河床変動計算によって、 Q_{bin} を上述の設定値と同一と仮定して、過去 24 年間の出水が同様に繰り返す発生するというシナリオのもと、将来の河床縦断形状を予測した。その結果として、図 2.8 に河床高の縦断分布、図 2.9 に $Q_{bNagata}/Q_{bin}$ の経時変化を示す。河辺地区とその上流では河床が上昇し続け、それに伴って $Q_{bNagata}$ が増加すること、さらに $Q_{bNagata}/Q_{bin}$ が 90% 程度となった年では、1920 年代と河床縦断形がほぼ一致する結果が得られた。これらの結果は、1920 年代の河床縦断形状がまだ人為的攪乱が小さく動的平衡に近い状態であったと考え、近年 24 年間の河床変動から設定した Q_{bin} が概ね妥当な値であること、さらに砂利採取によって河床が掘り下げられたことで、動的平衡状態を大きく逸脱した礫の堆積しやすい縦断形状に変えられたことを裏付けるものである。さらに、永田地区では、 $Q_{bNagata}$ が 80% 以上まで回復するのに 100 年程度を要する上、そこまで回復しても低水路幅が現状と同じく狭いままであれば、ほとんど河床は上昇しないことが確認された。実際、現地でも河床の低傾向が進行していることを考慮すると、河床低下から上昇に転ずる可能性は極めて低いと推察される。

そこで、高水敷の一部を掘削し低水路幅を拡げるとともに、掘削面の一部には河原を造成した（以下、造成河原）。また、後述するように河原が維持される仕組みが早期に回復するように砂礫を敷設し永田地区への供給量を増加させた。図 2.10 に、この修復事業の概要を整理した。図 2.11 にはシステム目標の達成状況を示す指標について、河原を造成した 52.0km 断面を例として無次元掃流力の生起確率を示した。なお、ここで修復目標としたのは、計画当時に低水路内で河原が維持されていた砂州（河原頂部）の無次元掃流力の生起確率分布である。拡幅直後は一時的に無次元掃流力が低下するが、将来的には拡幅区間の上流側から土砂が堆積し、河床勾配が増加することで無次元掃流力が増加し、修復目標を満たす箇所が河原頂部のみから造成河原の部分まで拡大することが期待された。ただし、そのためには河床形状が平行移動する形で河床が上昇に転じる必要がある。

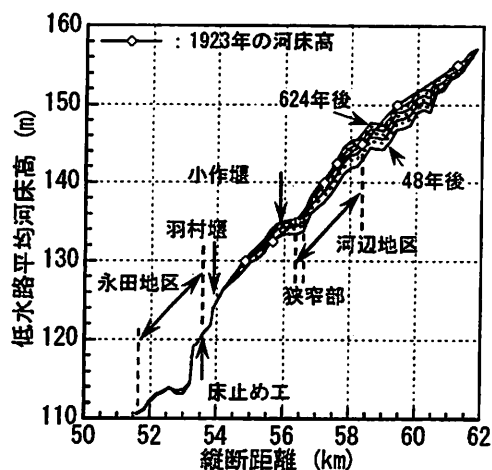


図 2.8 今後の河床変動の予測結果

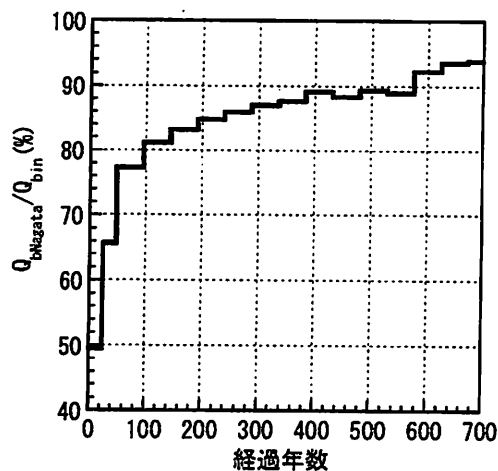


図 2.9 永田地区の礫供給量の経時変化

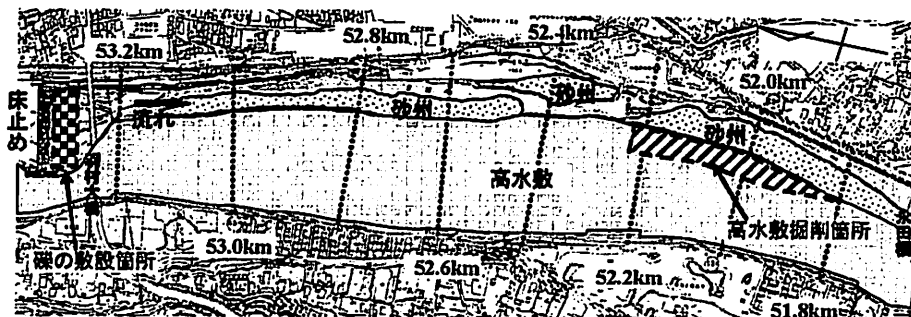


図 2.10 多摩川永田地区の修復実施状況

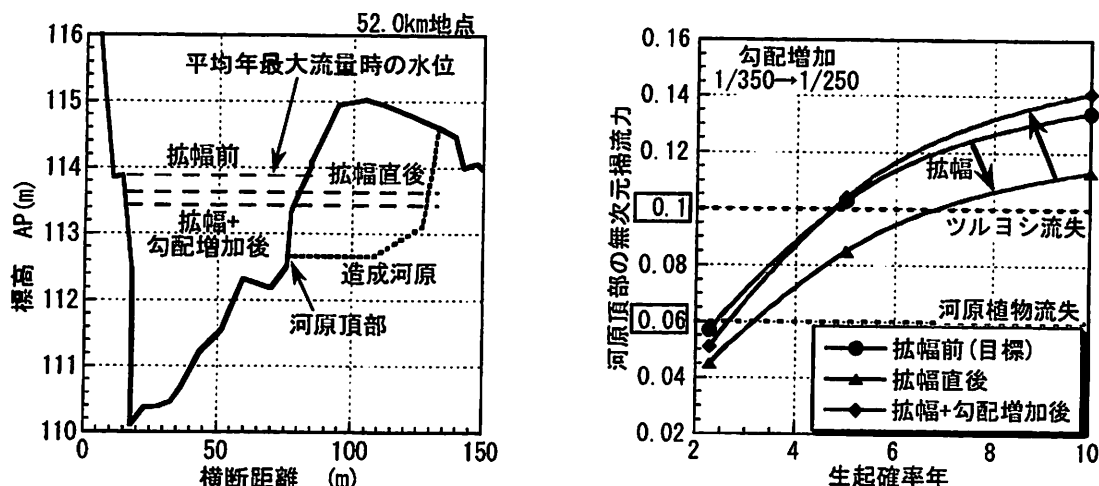


図 2.11 低水路幅の拡大状況(左図)と河道修復による無次元掃流力の生起確率分布の変化(右図)

2. 6. 河道修復事業実施後のモニタリング内容と結果

2. 6. 1 主な調査項目

事業実施後は、修復事業の基本的考え方に基づいて、生物調査と物理調査が実施されている。生物調査の結果については、文献 16 などに整理されている。次節以降、主に地形と河床材料に関連した物理調査の結果について述べる。

2. 6. 2 事業の進捗と出水の発生状況

図 2.12 は、59.5km 地点にある調布橋水位・流量観測所（以下、調布橋）で観測された出水の発生状況である。調布橋から永田地区の間には大きな支川の流入はないが、小作堰（56.0km）、羽村堰（54.0km）の 2 つの取水堰（いずれも東京都の管理）が存在する。永田地区直上流に位置する羽村堰での取水量は $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、多摩川本川からの水を玉川上水へと全て流入させた後、 $2\text{m}^3/\text{s}$ を維持流量として本川に戻すという形で運用している。これが平水時の運用であるが、出水時には堰を越流、もしくは本川流量が $200\text{m}^3/\text{s}$ を越えると堰の一部に設けられた投渡堰が取り払われるため、調布橋で観測された流量がほぼ出水時の流量と考えてよい。小作堰は可動式のローラーゲートを有しているが、土砂は堆積するため、毎年 1 万 m^3 程度（見掛けの体積）の土砂が維持浚渫されている。この浚渫された土砂が永田地区に敷設・供給されている。

図には、2001 年以降に実施された礫の敷設量および敷設時期も示した。2001 年冬期は、適切な敷設量など不明な点が残されており試験的に礫の敷設が行われたため、他の年に比べて量が少ない。また、2004 年冬期は周辺関係者等との調整が間に合わずに実施できなかったため、敷設量がゼロとなっている。河原環境を修復するための事業において、敷設に係る工事が別の河川環境に悪影響を与えては本末転倒である。そこで、事前に事業の説明会を開催するなど、事業実施にあたっての問題点を抽出し環境上の配慮も行っているが、敷設した後の景観の悪化などを指摘する声もあり、今後解決しなければならない課題もある。なお、冬期 2 月末までに礫の敷設を完了するようにしているのは、魚類への影響を最小限に抑えるためであり、敷設時には水流を分断しないような配置を検討した上で、敷設後小出水時に細粒分が流出しにくいように水際には大きめの礫を配置するなどの配慮をしている。大玉の配置は 2005 年以降であるが、2005 年に敷設した砂礫の供給場所は、小作堰からの搬出土砂に加え、上流の白丸ダムで堆砂対策のため浚渫された土砂も敷設している。その割合は 5:5 であり、粒度分布は平均粒径にして 2~3 倍であり、後述するように永田地区における歩留まりが良かったのもこのためと考えられる。一方、高水敷の掘削は、2 段階に分けて実施されており、2001 年 3 月から 6 月にかけて高水敷上の樹木、主にハリエンジュの抜根・伐採、2002 年 12 月から 3 月にかけて掘削作業を完了している。

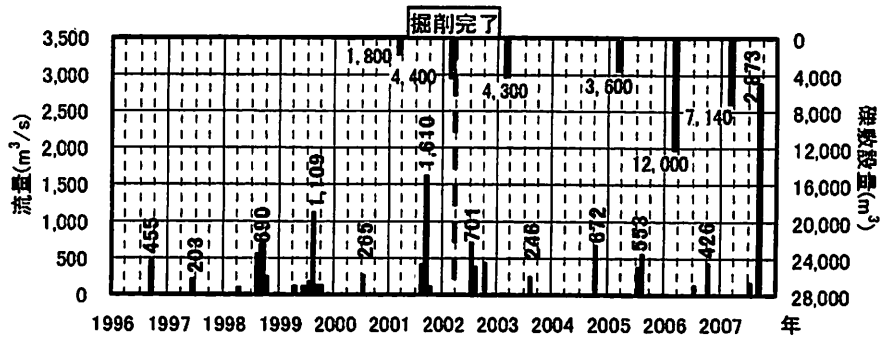


図 2.12 出水の発生状況と事業の進捗状況（調布橋水位流量観測所，59.5km，2007 年は暫定値）

2. 6. 3 地形および河床材料の変化

事業実施後，少なくとも年に一度の割合で地形および河床材料を調査した．特に，地形に関しては，流量が $200\text{m}^3/\text{s}$ を超えた場合に河床材料が動く と推算されていたため，調布橋において同値以上の出水が発生したと判断された場合には，地形調査を実施している．地形調査にあたっては，200m 間隔の距離標を 8 分割し 25m 間隔の測線を設けて，低水路内の地形を RTK-GPS を用いて測量した．図 2.13 は，この測量結果から算出した低水路内平均河床高の変化を示す．この図面のみからは読み取りにくい点もあるが，高水敷の掘削に伴い平均河床高が 1m 程度低下し，その後大きな変化がなかった拡幅区間が 2007 年出水によってほぼ埋め戻されたことを確認できる．また，この 7 年間での変化は最大 1m 程度であることも確認できる．さらに，羽村大橋下流の 52.6～53.2km 区間では 2004 年 12 月に最も河床が低下しているが，それ以降上昇傾向に転じており，過去 30 年間の地形変化を考えると，礫を供給した効果と言える．図 2.14 に示す最深河床高の変化を見ると，2001 年 8 月 30 日には 52.8km，52.3km 付近に深い淵を確認できるが，2001 年 9 月出水後は 2m 程度あった淵が 1m 以下となり，1m 以上の淵が確認できなくなっている．2004 年 12 月 10 日時点では一時的に 52.6～53.2km 区間の河床が低下し淵が形成されたように見えるが，低水路河岸や河床表層には土丹層が露出して いたことから，土丹層の比較的硬い部分が侵食されずに残ることで形成される地形と考えられた．なお，52.8km 左岸にも土丹層が露出しており，事業開始前に見られた深い淵は土丹層によって側岸への侵食が制限されることで形成される地形であると推定された．一方で，拡幅区間および永田地区下流では 2007 年 1 月までは安定もしくは上昇傾向であった河床が 2007 年 9 月出水によって大きく減少したことを確認できる．

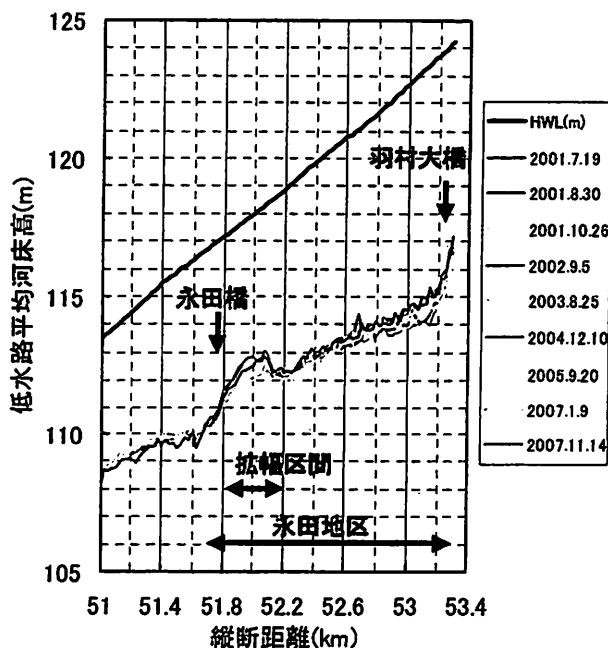


図 2.13 低水路平均河床高の変化

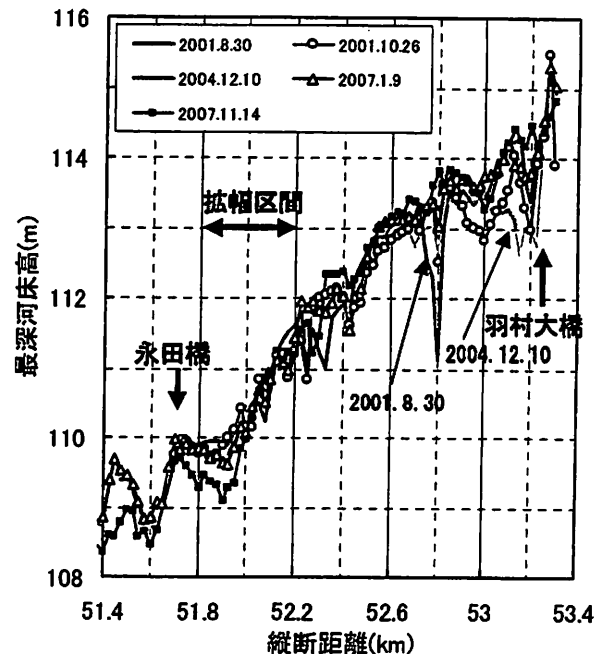


図 2.14 最深河床高の変化

図 2.15 は平均面積法により土砂収支を算定した結果である。永田地区 51.7～53.2km, 拡幅区間 51.8～52.2km, 下流区間 51.0～51.65km, 全域 51.0～53.2km の4つの区間に分けて, それぞれの区間の土砂量の変化を示した。永田地区の土砂量に注目すると, 礫の敷設量が少なかった2001年, 敷設量がゼロであった2004年に大きく土砂量が減少している。この減少量を見ると, 2.4節で示した永田地区で不足する量として推定された5,500m³とほぼ等しい量の減少が見られ, これは一次元河床変動計算による推定結果を裏付けるものと考えられた。次に, システム目標の達成状況を見ると, 図 2.13 に示したように51.8～52.2km区間の河床勾配は増加しているが, 2007年9月出水で掘削面にのみ土砂が堆積し, 2m程度盤下げされた河床が1m程度上昇したことを確認できる(図 2.16)。したがって, 当初想定したような地形の平行移動による河床の上昇は達成されておらず, 今後は攪乱頻度の低下に伴って植生の繁茂, ひいては樹林化が懸念される。したがって, 指標による評価を行うまでもなく, システム目標は達成していない状況へと変化したことが分かる。ただし, 大量の砂礫が堆積することで広大な河原が形成されており, 一部に透礫層が形成されていることから河原植物, 特に造成河原から散布された種子によるカワラノギクの実生が期待される。

図 2.17 には, 事業実施後に河床材料および供給砂礫の粒度分布を線格子法によって調査した結果を示す。また, 比較のため, 過去に京浜河川事務所によって実施された調査結果も合わせて示した。(a)を1960年代, (b)を事業実施前, (c)を事業実施後として見ると, 1960年代から事業実施前は大きな変化はない。事業実施後はやや粗粒化しているように見える。これは, 現地調査の際に敢えて粗粒化していると判断される地点(直径60cm程度の礫が多数見られる箇所)を調査したためであり, 図 2.6 に示した砂利採取後の河床低下に伴って徐々に見られるようになったアーマー化した箇所と考えられる。調査法の違いのため, 事業実施前にはこのような場所での調査は行っていないと考えられ, 河床材料に大きな変化はないと考えてよいと判断される。また, 図 2.17 (c)の凡例にある最初の数字は西暦の年を表す。2002年から2004年にかけて, 河床材料に大きな変化が生じていないことを確認できた。

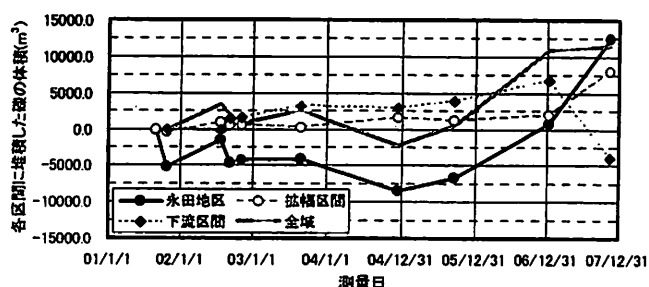


図 2.15 土砂収支の変化

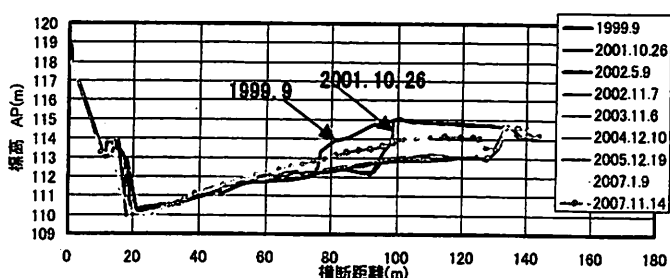
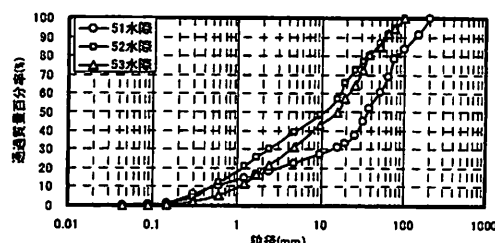
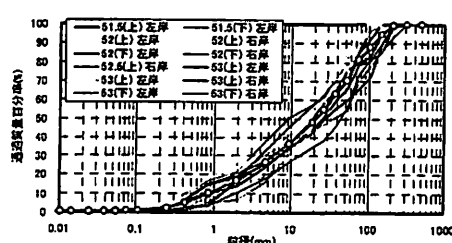


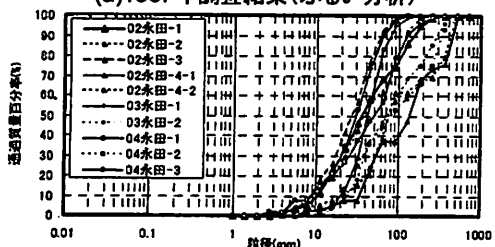
図 2.16 横断形状の変化 (52.0km 地点)



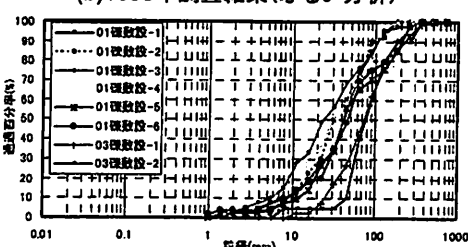
(a)1967年調査結果(ふるい分析)



(b)1998年調査結果(ふるい分析)



(c)2000年以降永田地区調査結果(線格子法)



(d)供給砂礫の粒度分布(線格子法)

図 2.17 河床材料の粒度分布の変化

3. 五ヶ瀬川水系北川における激特事業

3. 1 北川の概要

北川は、大分県にある傾山（標高 1,602m）を水源として、北から南へ流れる本川に、北東から南西へ流れる左支川の小川が熊田で合流し、宮崎県北川町と延岡市を北から南に流下し、五ヶ瀬川の河口部左岸に合流する宮崎県最北端の河川である（図 3. 1）。流域は、五ヶ瀬川水系に属し、上流部に大分県宇目町、宮崎県北浦町、中流部に北川町、下流部に延岡市の 1 市 3 町に及ぶ流域面積 587.4km²、流路長 50.9km の一級河川である。1997 年に熊田観測所で既往最大のピーク水位となる TP. 16.79m（ピーク流量 5,000m³/s）の出水（以下、1997 年 9 月出水）が生じ、谷底平野のほぼ全域が冠水する甚大な被害を受けたことから、河川激甚災害対策特別緊急事業（以下、激特事業）に採択された。この激特事業では、支川の小川合流点（15.05kp）から河口までが激特事業の対象区間となり、築堤、高水敷の掘削、樹木群の伐採など河積増加を主とする大規模な河川改修事業が行われた。この区間での谷底平野の幅は堤間距離の 2～3 倍程度と狭く、そのため河道は山付部分で方向を変え数 km ごとに蛇行を繰り返している（写真 3. 1）。著者が現地調査の対象とした本村地区（11～12km）と的野地区（8.8～9.8km）は、そのような湾曲部であり、湾曲の向きを除き平面形状は類似している。また、本村地区は約 20 年前に、的野地区では激特事業で河川敷の掘削が行われた。ちなみに、本村地区では激特事業によって樹木が間引きされている。両地区を含む 4.2～16km 区間の河道特性は、河床材料の平均粒径が 20～40mm、河床勾配が約 1/1200、平均年最大流量は 1,850m³/s である。



図 3. 1 五ヶ瀬川水系北川の位置図(宮崎県 HP から)



写真 3. 1 航空写真で見る北川の谷底平野

3. 2 激特事業の基本的考え方

表 3. 1 に示すように、北川流域では過去度重なる洪水が発生しており、地形的な要因から洪水時には谷底平野一面が濁水によって覆われる。北川流域では、「ナイルは氾濫の賜物」と言われたように、同様な効果が期待されてきたからかもしれないが、伝統的に守られてきた霞堤が流域に多数存在する。実際、洪水時に湛水する地域には田畑が多く存在し、霞堤周辺には竹林などの樹木が多く見られる。流木等の流下物を濾過した上で肥沃な土壌（浮遊物）の恩恵のみを受けようとした先人の知恵と考えられる。また、日本の河川が世界の河川に比べて大きな河状係数を持つことはよく知られているが、北川の河状係数は 650 程度であり、日本の河川の中で見ても大きな河状係数（ $Q_{\max}/Q_{\min}$ ）を持つ。すなわち、狭い谷底平野の中で平水時の流量からは想像も出来ない程の大きな出水が発生しやすい状況にあり、このことも霞堤が長期にわたって活用されてきた理由の一つと考えられる。さらに、霞堤周辺などの低い堤防部分には上述した竹林などの樹木群で守られた場所があり、水害防備林としての役割も果たしていたようである。

1997 年 9 月出水は、1955 年以降の観測史上最大の出水となった。北川流域での霞堤は、山地と河川で囲まれた地区の下流側に位置する。堤内地の下流側に霞堤を配置することで、浸水時の流速を低減させ、農地への被害を最小限に抑え、減水期には速やかな排水を期待したと考えられるが、1997 年 9 月出水時には、地区の上流側の堤防を越水、2 箇所堤防が決壊し、堤内地への浸水が見られたことから、家屋・事業所など

表 3.1 過去の出水の発生状況

順位	出水年月日	最高水位 (TPm)	流域平均6時間 雨量(mm)
1	1997(H9)年 9 月 16 日	16.79	232
2	1957(S32)年 9 月 7 日	15.52	231
3	1961(S36)年 10 月 26 日	15.42	186
4	1966(S41)年 8 月 15 日	15.02	156
5	1971(S46)年 8 月 30 日	14.60	172

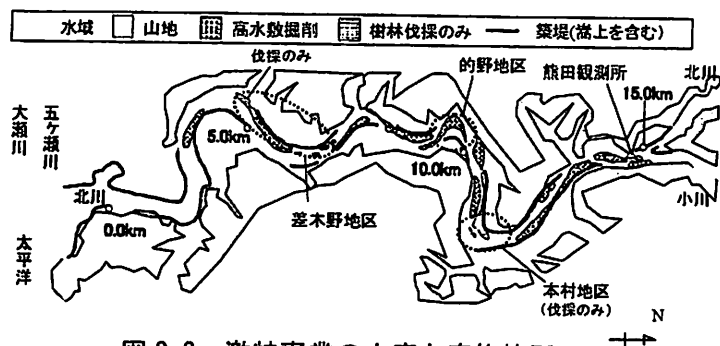


図 3.2 激特事業の内容と実施箇所

の倒壊・浸水、交通網の寸断等が広範囲にわたって発生した。上述したように、この出水を契機として、激特事業に採択され、緊急的な河川改修を実施することとなった。

その計画策定にあたり、安全な川づくりに加えて、北川の豊かな自然を損なうことのない質の高い河川整備を行うことを趣旨として、「北川『川づくり』検討会」(以下、検討会)が設立され、激特事業の基本方針として、以下の内容が決定された。河川法の改正が 1997 年 6 月に行われ、その後、初めての大きな災害であったことも北川の川づくりが熱心に議論された背景にあらう。図 3.2 は、北川流域の平面図に激特事業の内容と位置を示したポンチ絵である。

(1) 築堤—霞堤方式の踏襲—

再度災害防止の観点から、既往最大規模となった 1997 年 9 月出水時のピーク流量 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ を安全に流下させることを改修計画の目標とし、沿川に住宅地が密集する河口から 4km 区間では連続堤方式を、沿川に主に農地が立地する 4km から上流区間では霞堤方式を踏襲する計画とした。ただし、霞堤方式を採用する区間については、完全に浸水させないことは困難にしても、その影響を緩和するため、出来る限り河道内の水位を低下させることが望まれた。

(2) 河道内掘削—水域部の生物への影響に配慮—

河道内掘削においては、水域での個々の生物やその生息・生育場の環境に直接影響することに配慮し、基本的に高水敷陸域部の掘削を中心に行うこととした。また、改修後においても現存する河原としての環境が復元されることなどを旨とした改修を行うこととした。そのため、高水敷掘削面の高さは「平水位+1.0m以上」を基本とした。

(3) 河畔林の伐採方法—保全すべき河畔林の設定—

河畔林の伐採においては、その機能を整理することで、「水防林」、「魚付き林」、「修景林」と分類した。水防林については、改修後の堤防法線形との関係で河積を阻害するものもあり、必要最小限の水防林が残されることとなった。魚付き林については、山付部にある魚付き林は保全し、改修後の低水路水際にある魚付き林については必要最小限の伐採を行うものとした。修景林については、ヒアリング等で把握された、地域の景観を維持する上で重要と認識されている樹林もしくは樹木を保全することとなった。

3. 3 事業実施後の地形変化の予測

3. 3. 1 検討会による予測

河川改修にあたり検討会では河道形態へ及ぼす影響が議論された(九州地方建設局ほか, 1999)。具体的には、川幅、河床縦断形、湾曲部の淵の形状について、それぞれの変化が予測された。拡幅後の川幅については、一般的に縮小、拡大、安定のいずれかになることが考えられるが、改修前後の摩擦速度に大きな違いがないとして、川幅の変化は少ないものと考えられた。河床縦断形については、河床が上昇、低下、もしくは安定することが一般的に考えられるが、局所的な摩擦速度の増減があるものの、河床縦断形も大きな変化はないとされた。湾曲部の淵の形状については、検討会メンバーの既往の知見などに基づいて、淵の形成場

所はほとんど変化しないが、河床が全体的に低下する傾向になると予想された。図 3.3 はその概念図を示し、改修前（現況）に土砂移動が活発であった領域で高水敷の再形成が生じると予測され、低水路部の河床から高水敷（灰色部分）へと土砂が供給され、その結果として低水路部の河床高が低下すると考えられた。前述したように、淵は北川を特徴付ける重要な河川景観の一つであり、その変化を予測することは重要であった。

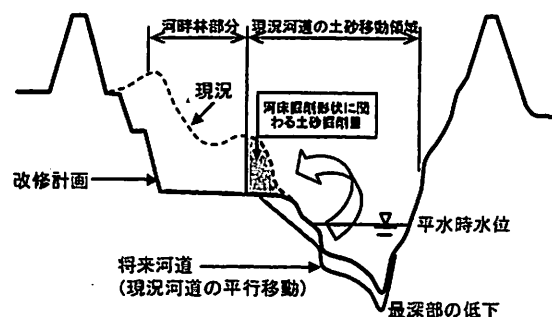


図 3.3 湾曲部横断形状の変化に関する概念図

3. 3. 2 北川研究グループによる予測結果

検討会が激特事業の基本方針を検討したのに対して、北川研究グループは、河川生態学術研究会の研究目的の一つであるインパクト・レスポンスの課題に答える場所として、1999 年に発足した。現在までに二つの研究フェーズを終え、第 1 フェーズ（1999～2002 年）では、激特事業のインパクト・レスポンスを予測することを中心に研究が実施された。本節では、その時に実施された研究テーマ「高水敷掘削後の再形成プロセスに関する研究」について報告する。ちなみに、第 2 フェーズ（2003～2007 年）のテーマは河川の維持・管理のあり方についてであり、その成果を現在取りまとめ中である。3.4 節では主に第 2 フェーズで実施した調査結果について報告する。

的野地区では、図 3.4 に示すように横断距離 400～500m の範囲で 2001～2002 年に高水敷が掘削された。掘削完了直後の 2003 年 5 月末に平均年最大流量相当の出水（以下、2003 年 5 月出水）が発生し、写真 3.2 に示すように平坦であった掘削面上に砂礫堆が形成された。2003 年 5 月出水の生起確率が 2～4 年であることを考えると、この変化は掘削後数年で発生し得る変化の一パターンであると考えられた。一方、本村地区では図 3.5 に示すように約 20 年前に高水敷の比高を平水位＋約 1m に掘削するような激特事業と同様な掘削が行われている。写真 3.3 には、掘削前も含めて、掘削後の地形変化を示す航空写真を列挙した。1980 年頃に掘削が行われていることから、2000 年以降の変化を見ることは掘削後 20 年程度で起こり得る変化の一パターンと考えられた。さらに、的野地区では高水敷掘削時に、堆積構造および地層の年代測定を実施したところ、数百年スケールで形成された高水敷であることが確認された。図 3.6 は縦断測線に沿った地層断面を示す。地層の下位には砂礫堆によって形成されたと判断される砂層と礫層の互層が見られる。その砂礫堆の上位には細砂層が存在する。砂礫堆は C～F にかけて（以下、砂礫堆 α）と A～B にかけて（以下、砂礫堆 β）の 2 つ存在し、前縁部の比高は両者とも 3～4m で本村地区の観測結果とも一致する。地表面は、砂礫互層の高さによらず、細砂の堆積によって比高 4～5m の比較的平坦な地形となっている。下位の砂礫互層中の砂層に着目すると、砂礫堆 α の D～E 間では水平で薄い砂層（以下、水平互層）であるのに対し、砂礫堆 α、β の前縁付近では垂直あるいは傾斜した厚い砂層（以下、鉛直互層）であることが分かる。この鉛直互層、水平互層は本村地区で実施したトレンチ調査でも類似した構造が確認されており、礫層の間に砂層が挟まれることで比高の増加が急激に進むことから、E～F 間では砂礫堆 α の比高が急激に増加したことを示唆する。また、砂礫堆 β は長期間にわたって停滞していたと考えられ、下流側の厚い細砂層はその際に形成されており、一度の出水で大きな比高を持つ砂礫堆が形成されたと類推される。

このような鉛直互層は、横断測線中にも見られる。図 3.7 には各地層を主要構成材料に応じて、細粒砂（シルト、微細砂、細砂：0.125mm 以下）、粗粒砂（中砂、粗砂、極粗砂：0.25～2mm）、礫（2mm 以上）の 3 つに区分し、地層俯瞰図として示している。砂礫堆 α の鉛直互層は左斜め下向きのハッチで示すベルト状の領域に分布し、それより水際側は水平互層が形成されている。すなわち、湾曲部水際側では砂礫堆が速く拡大し、湾曲部内岸側で拡大速度が遅くなる。これは、現在の本村地区における砂礫堆 A、B の拡大過程と共通点が多く、本村地区の地表面に細粒土砂がさらに堆積したものが的野地区の地層構造であり、的野地区の高水敷は本村

地区の将来の姿を示すものと考えられる。図 3.7 に☆印で示される 40m 離れた鉛直互層両端の砂層に含まれる表層の有機物を採取し、AMS 法(Accelerator Mass Spectrometry)による炭素年代測定を行った。この結果、水際側の地層は $AD960 \pm 60$ 年(94%精度)に形成され、内岸側の地層は $AD1420 \pm 25$ 年(95%精度)に形成されたことが分かった。両砂層間には 5~20m の間隔でさらに 3 つの砂層が存在し、その年代差が約 400 年であることから、かなり大規模な出水時に砂礫堆の拡大と縮小を繰り返しながら、徐々に形成されたものと考えられた。

一方、ベルト状領域より内岸側には砂礫堆 α が到達せず比高 0~1m の礫層上に 3m 以上の厚い細粒砂層が形成されている。この細粒砂層の有機物数点について年代測定を行った結果、約 300 年前に形成された地層であり、ここ 300 年以内で 3m の細粒砂層が堆積したことが分かった。すなわち、掘削前の野地区の変化は掘削後数百年程度で起こり得る変化のパターンであると考えられた。

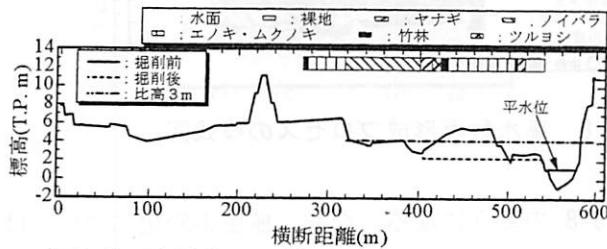


図 3.4 的野地区の横断形状の変化 (9.4km)

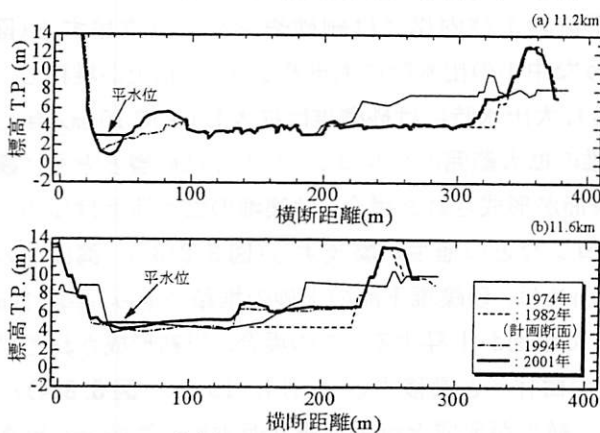


図 3.5 本村地区の横断形状の変化

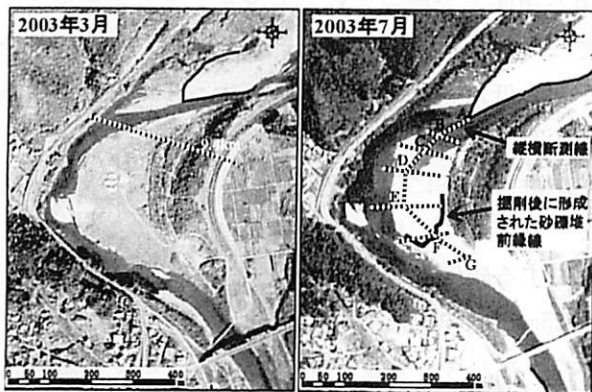


写真 3.2 的野地区の掘削後の変化



写真 3.3 本村地区の掘削後の変化

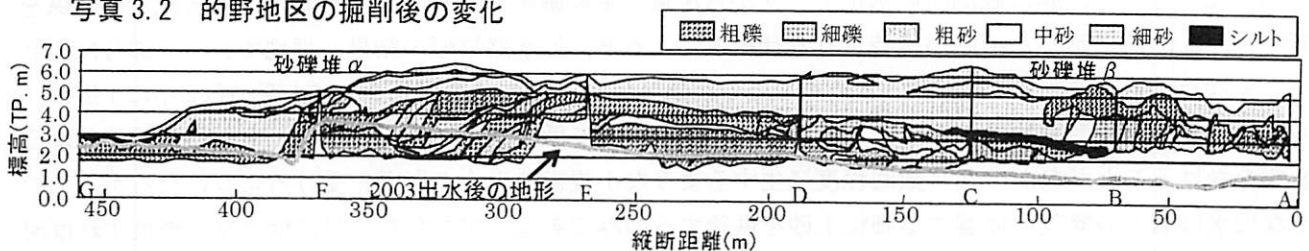


図 3.6 的野地区縦断測線(A-B-C-D-E-F-G)上の地形変化



図 3.7 的野地区の地層構造調査結果

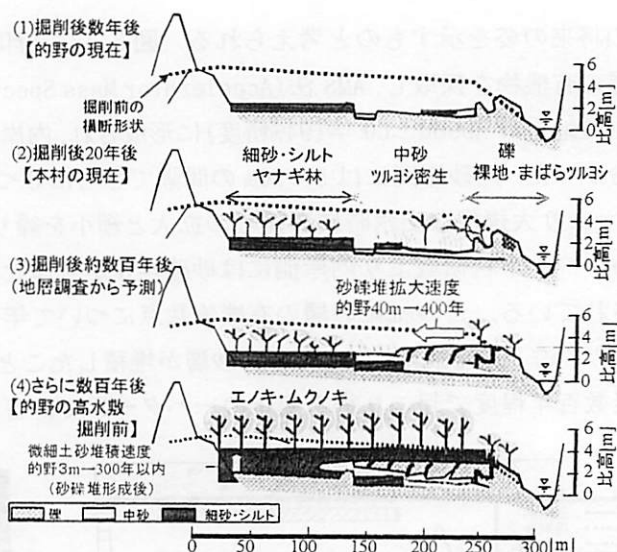


図 3.8 高水敷再形成プロセスの模式図

以上から、高水敷掘削後の河道の変化を予測すると図 3.8 のようになる。なお、植生の変化については、服部ら（2003）を参照されたい。掘削後数年で、掘削面上の礫が全面的に移動するような出水によって、掘削面上に砂礫堆が形成される。その際、砂礫堆前縁部下流および内岸には細砂やシルトが堆積する（図 3.8(1)）。砂礫堆下流もしくは内岸には、礫が移動しないような中小の出水時にも砂やシルト・粘土が堆積し、ツルヨシ、ヤナギを主体とする植生が形成される（図 3.8(2)）。大出水時には砂礫堆は拡大し（平均 10cm/年）、上流もしくは外岸側に次の砂礫堆が形成される。この砂礫堆の拡大範囲のツルヨシ・ヤナギは砂層とともに礫層下に埋没する。砂礫堆によって比高 3m に近い高さの地表面が形成された場合、砂礫堆の拡大速度は極めて小さくなり、砂礫堆の背後や表面には細粒砂が堆積しツルヨシなどの植生が繁茂する（図 3.8(3)）。湾曲部の内岸など砂礫堆が到達するまでに極めて長期間を要する箇所では、砂礫堆下流の土砂の堆積が進み（平均 1cm/年）、砂礫堆が到達する前に礫が移動しないような比高まで地面が上昇する。この場合、当初形成されたツルヨシ・ヤナギの群落が比高の増大に伴って、エノキなどの樹林へと遷移する（石川，1991）（図 3.8(4)）。

北川におけるシステムを整理すると、河川敷は大別して、植生が形成と流失を繰り返す河原領域と、比高の高い河川敷が再形成されるプロセスによってエノキ林に至る領域とで構成されると捉えることができる。ツルヨシやヤナギの分布域は、河川敷の比高が増加する中で一時的に存在するものであるから、砂州の変形が活発でない本来の北川では、それほど広くなかった。しかし、低水路拡幅後河川敷が元の状態に戻るまでには数百年単位の期間を要することから、エノキが生育する比高の高い河川敷に代わってヤナギやツルヨシの分布する低湿地が長期間、広い範囲に形成される。その理由は、以下に示す低水路拡幅前後の攪乱頻度の違いから説明できる。9.4km に位置するの野地区の横断面を一例として、掘削前の裸地表面に相当する比高約 1.7m と掘削後の表面に相当する比高 1m の地点で植物が流失する頻度を算出し図 3.9 に示した。算出にあたっては、芦田・道上の混合粒径の限界掃流式を用い、 $d_m=25\text{mm}$, $d_{60}=30\text{mm}$, $d_{90}=70\text{mm}$ として浅根茎植物と深根茎植物の流失限界を算出した。準二次元不等流計算によってエネルギー勾配と水位を求め、無次元掃流力を算出した。さらに、熊田観測所の水位データから流量の生起確率を推算し、無次元掃流力と流量の関係を整理した。2.3 節に示した河原が維持される仕組みによると、低水路拡幅の結果、裸地であった部分は比高が小さくなっているにもかかわらず、ヨモギなどの浅根茎植物の流失頻度は 0.9 年に 1 度から 2 年に 1 度に、ツルヨシなどの深根茎植物は 1.2 年に 1 度から 6.5 年に 1 度に低下することが分かる。もちろん掘削前はその影響を受けることがなかった年数回程度発生するような小規模の出水の影響を受けるようになるが、このような出水は植生の繁茂を促進する細粒土砂を供給するのみである。すなわち、単に低水路を掘削すれば河原領域が拡大するわけではなく、洪水攪乱の頻度に着目して掘削幅を検討すべきである。

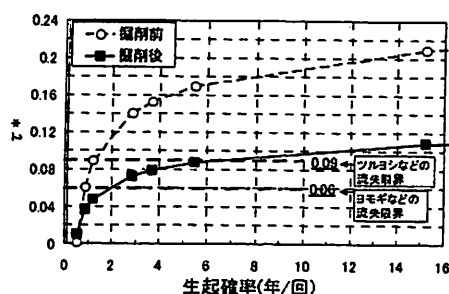


図 3.9 裸地域での掘削前後の攪乱頻度の違い

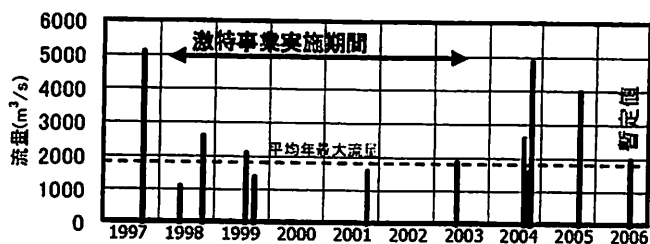


図 3.10 出水の発生状況(熊田水位観測所, 14.6km)

3. 4 激特事業実施後のモニタリング内容と結果

3. 4. 1 主な調査項目

3.3 節では、事業実施前および実施中の地形変化から、事業実施後の起こり得る高水敷の再形成パターンを整理した。本節では、その予測結果の検証を行うために実施した調査結果について述べる。地形変化について考察する上で重要なことは2 節でも述べたように、マクロな地形変化を把握した上である特定の区間の地形変化を見ることが重要である。次節では、横断測量結果から4~15.5km 区間の低水路平均河床高の変化を理解した上で、的野および本村地区周辺で生じた地形変化について言及する。また、局所的な地形変化に伴う河床材料の変化は見られるものの、掘削前後で主材料に大きな変化が見られていない。一方、河床表層の状態について、礫間を埋めるマトリクスの割合が大きく変化した。その変化は植生の繁茂と関係が深く、河床表層状態と植生の繁茂状況、透礫層と浮遊砂の関係について述べる。

3. 4. 2 激特事業実施後の地形変化

図 3.10 は 1997 年以降の主な出水の発生状況を示す。図 3.11 (b), (c) には、主に高水敷の掘削が実施された 4km 地点よりも上流区間について、堤間における平均河床高の変化を示す。参考までに、図 3.11 (a) には 1990 年と 1997 年 9 月出水後の河床縦断面形を比較した。1990 年河道は $5,000\text{m}^3/\text{s}$ クラスの大規模出水を受けているにもかかわらず、河床高がほとんど変化していない。激特事業実施期間(2003 年 3 月以前)に $2,000\text{m}^3/\text{s}$ クラスの中規模出水が数回発生していることから、図 3.11 (b) の変化は人為的な影響による変化のみを表現しているとは考えにくい。高水敷の掘削状況をよく反映しており、出水に伴う地形変化はそれほど大きくなかったものと考えている。しかしながら、2003 年 5 月出水に伴う地形変化は、前述したように地形測量を実施するまでもない程に大きな変化が確認されている。2003 年 3 月以降の横断測量は激特事業が完了したこともあり、8.0~13.0km 区間の比較的限定された区間のみで、必ずしも全ての測線は実施しない条件で実施された。その結果が図 3.11 (c) に整理されている。一般的に河道の変化は人工的な改変後が最も動きやすいと言われるが、9.2~9.3km 区間で堆積、10.9km 地点で侵食、11.1km 地点で堆積、11.6~12.0km 区間で侵食とそれぞれの区間で顕著な変化傾向を確認することができる。図 3.11 (a), (d) は、激特事業実施前後で平均年最大流量時の水位、それに対応する摩擦速度の縦断分布の変化をそれぞれ準二次元不等流計算によって算定した結果であり、上述した河床高の変化を適切に説明できる。

図 3.12 は写真 3.2 の測線に沿って計測した縦断形状の変化を示す。2003 年 7 月 31 日の測量結果が図 3.6 の出水後の地形に相当するが(横軸の向きが逆であることに注意されたい)、2004 年 9 月 15 日までは発達傾向にあった砂礫堆の発達を図 3.8 で予測した方向から外れてきている。その理由を考えると、1980 年頃に実施された本村地区での高水敷掘削の区間が限定的であったこと、2004 年 10 月出水後に的野地区内岸に堆積した砂州が再度掘削されていることの 2 点が考えられる。2 点目については、土砂の堆積による河道内水位の上昇が懸念されることから、霞堤を通じた堤内地への浸水を軽減するため、今後も実施される可能性がある。また、本村地区よりも上流の区間で同様に土砂の堆積が確認された箇所、砂利の有効利用の観点から砂州の掘削が実施されている。これは、理由の 1 点目と関連するが、このような上流区間での土砂の堆積と

除去のインパクトは高水敷の再形成に大きく影響しているものと考えられた。

流下能力確保の観点からは、高水敷の再形成が進まないことは歓迎すべきであるが、次に示すような問題を含んでいることに注意したい。図 3.13 は、9.3km および 11.6km 地点の断面形状の変化を表す。また、写真 3.4 は 2006 年 5 月に撮影された航空写真である。2003 年 5 月出水以降、内岸をショートカットする流れが維持されており、本村地区では完全に内岸をショートカットする流れが発達し、外岸にあった淵はワンド化した。検討会で目標とした淵の保全が十分に達成されない可能性が生じてきた可能性があることを指摘できる。また、検討会における予測では、激特事業実施前後で平均河床高の縦断分布に大きな変化はないとしていた。確かに図 3.11(c) の結果からは 11.6km 地点の平均河床高は事業実施後で大きくは低下していないが、横断面図に見られるように左岸側が 3m 程度局所的に低下しており、護岸の被災等が懸念された。

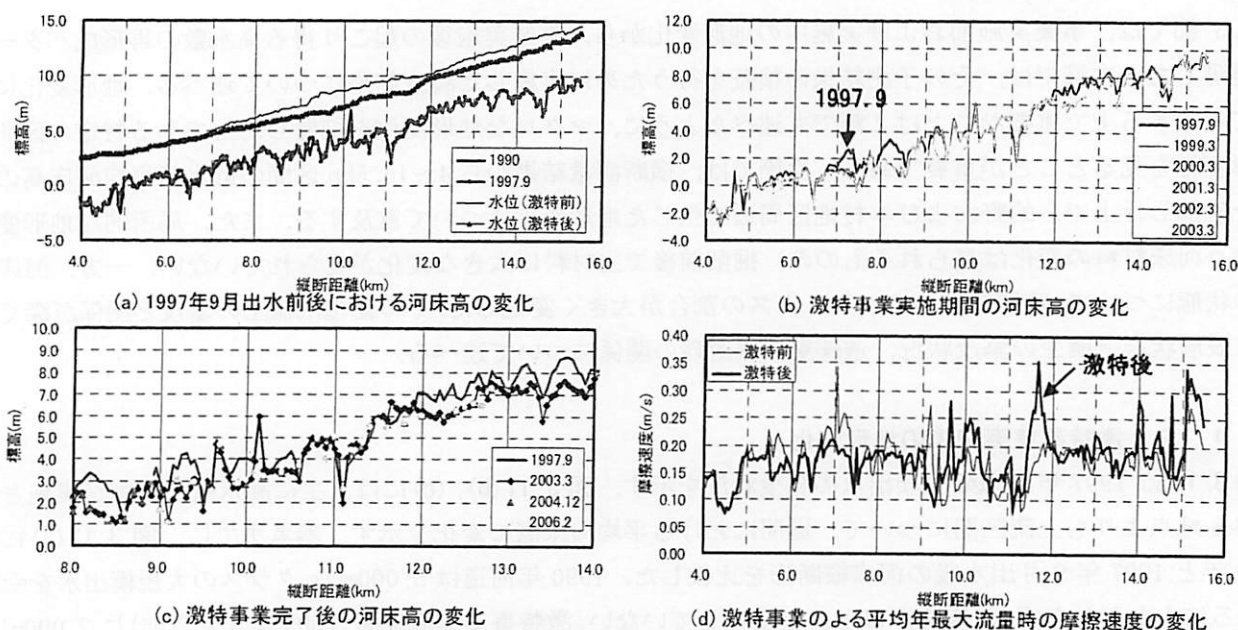


図 3.11 激特事業実施前後での河床縦断形および水理量の変化

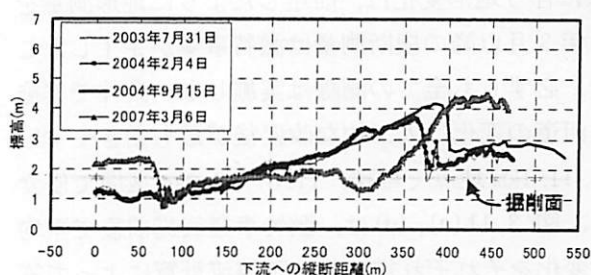


図 3.12 的野地区縦断測線に沿った地形変化

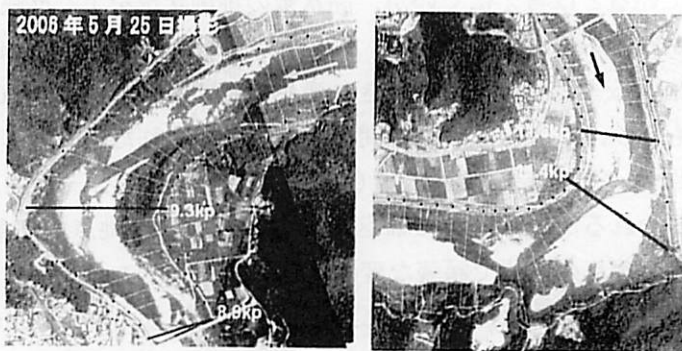


写真 3.4 的野地区の激特事業後の地形変化

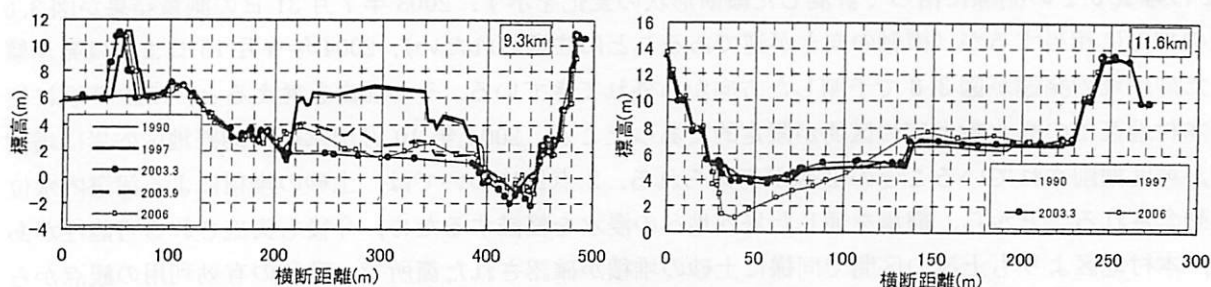


図 3.13 的野地区における代表断面の形状変化 (9.3km, 11.6km)

3. 4. 3 河床材料の変化（透礫層の形成と更新層厚の意義）

図 3.14(a) は、1999～2002 年にかけて 9.75km 地点の水際で採取された河床材料の粒度分布を表す。激特事業実施期間において大きな変化がなかったことを確認できる。なお、1km 程度の間隔で同様な調査が行われているが、河床を構成する主材料に大きな変化は生じていない。図 3.14(b) は、後述する透礫層調査において LC, LD, LE 測線上で調査された粒度分布である。これを見ると、透礫層部分、すなわち表層の粒度分布は 2002 年までの結果と同様な粒度分布を持つことを確認でき、激特事業実施後も河床材料に大きな変化は生じていないことが確認できる。ここで注目すべき点は「透下部」と表記した透礫層を取り除いた下層の河床材料が 10% 程度の細粒分（2mm 以下）を持つことである。この細粒分が徐々に河床表層まで堆積してくると透礫層から一般礫層になるが、激特事業実施後は現地で一般礫層の分布が拡大した印象を受けた。

河原の形成において出水に伴う河床の攪乱は重要であるが、河床表層の状態も植物の繁茂しやすさを決める上で重要な要素となる。河床表層の分類については図 2.4 で示した通りであり、透礫層の存在は植物の繁茂を抑制することが知られている（渡辺ら、1998）。図 3.15 は池田（1982）を参考にして透礫層の形成メカニズムを整理した模式図である。従来は礫間からの砂の抜け出しにより透礫層が形成されると考えられていたが、図に示すように礫が選択的に堆積することで形成されることを指摘している。2004 年 10 月出水後には、中規模河床波型透礫層に加え、小規模河床波型透礫層も確認された。図 3.16 には、地形と透礫層厚に関する調査測線を示す。

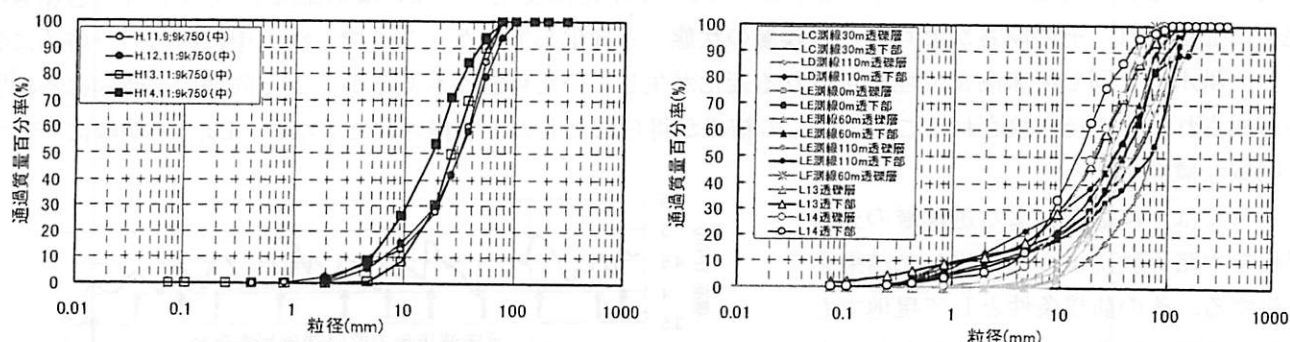
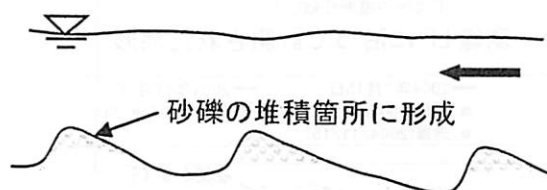
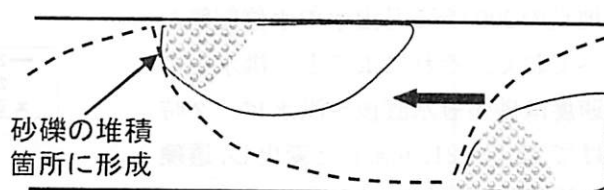


図 3.14 河床材料の粒度分布の変化（右図：2004 年度調査結果）



(a) 小規模河床波型（断面図）



(b) 中規模河床波型（平面図）

図 3.15 透礫層の形成メカニズム



図 3.16 調査測線（2003 年 7 月 8 日撮影）

図の丸で囲んだ部分に形成された透礫層の特徴は、池田（1982）の指摘したように砂礫が堆積した箇所であった。2003 年 5 月出水は激特事業完了後に生じた初めての指定水位以上の出水であり、多量の土砂が上流から供給され、当該地区に堆積したことが出水後の横断測量結果によっても確認されている。また、LC, LD, LE 測線上では中規模河床波型透礫層と分類できるが、LF 測線では図 3.17 に見られるような波長 17m, 波高 0.5m 程度の河床波が観測され、小規模河床波型透礫層も一部で形成されていた。これは、2004 年 10 月に発生した出水（1997 年 9 月出水規模相当）によって形成されたものであり、的野内岸（LB 測線）でも同様な河床波の発生と透礫層の形成が確認されている。以上述べてきたように、透礫層は掃流によって流送されてきた砂礫が堆積する環境で形成される地形であることが現地でも確認された。

次に、形成された後の透礫層の変化についても調査した。図 3.18 は、図 3.16(b)の調査測線 LC 上で標高および河床表層の状態（約 10m 間隔で測定）を調査した結果である。2004 年 6 月時点においては、2003 年 5 月出水によって砂州が形成されて以来、砂州が冠水するような出水を受けておらず、砂州の形成直後と同様な状態であり、10cm 程度の厚さの透礫層が測線全体で確認された。その後、2004 年に発生した数回の出水によって徐々に上流から土砂が充填されると同時に、その下流側の透礫層厚さも薄くなってきている。一方、砂礫堆前縁部では砂礫が堆積し、その部分には厚い透礫層が形成されたことが確認された。縦断距離 50～140m 区間においては、2004 年 8 月に発生した出水等によって河床が 20cm 程度上昇したが、その部分の透礫層厚さはほとんど変化していない。これは、礫の堆積に伴って透礫層が一時的に形成された後、洪水減衰期に再び充填された可能性が高い。それを示唆するように、地形変化の少ない縦断距離 0～50m 区間の透礫層は完全に充填され、その厚さがゼロの一般礫層の状態へと変化していた。ここで、洪水中に河床が一時的に低下し、洪水前と同じ河床高まで埋め戻される変化が生じていた可能性もあるが、上と同様に一時的に透礫層が形成され、その後充填されることで、この結果が得られたものと類推された。なお、LD, LE 測線についても同様な傾向であった。

4 章では、浮遊砂による透礫層の充填過程を水路実験によって再現した結果を報告する。その前提条件として現地でも土砂が浮遊する条件であったことを、本村地区上流で計測された横断測量結果とその地点の 2003 年 5 月出水の水位記録から述べておく。それによると、洪水時の摩擦速度は砂州冠水直後～洪水ピーク時に掛けて 13.8～21.4cm/s と変化し、透礫層内に堆積した細粒土砂（粒径 1mm 程度）の沈降速度が 9.8cm/s 程度であること、また、充填された土砂に 1mm 以下の粒径も多く含まれていたことから、冠水直後は完全な浮遊状態ではないが、洪水ピーク時には浮遊する条件であったことを確認できる。

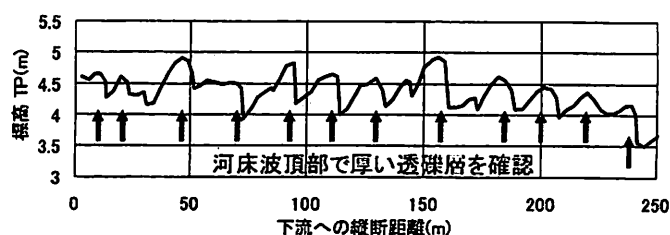


図 3.17 測線 LF に沿って計測された地形

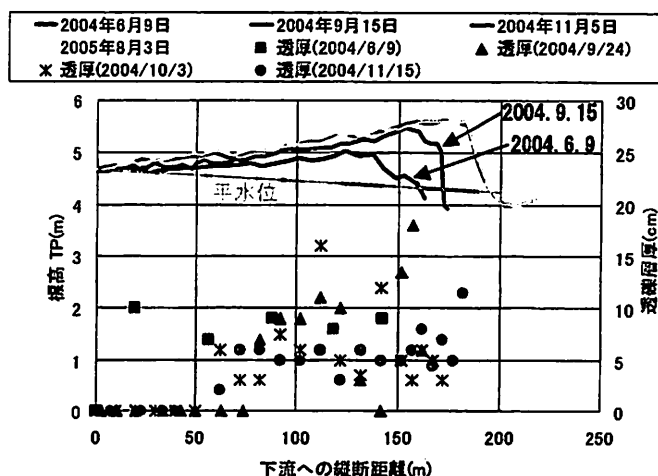


図 3.18 LC 測線上における標高と透礫層厚の変化

4. 透礫層への土砂の充填

4. 1 水路実験による透礫層の充填速度予測式の提案

透礫層は砂礫が堆積する箇所に形成され、上流から浮遊してきた細粒土砂が間隙に堆積することで上流から徐々に一般礫層へと変化していく。この変化の速度を把握することは河原が維持される仕組みをより詳細

に把握する上で重要である。最近ではダムの排砂問題とも関連して一層重要性が増している。そこで、透礫層が一般礫層へと変化する過程を水路実験によって再現し、その充填速度を調べた。河床を構成する礫の移動の有無、縦断的な冠水頻度の違いについて実験と現地で異なる点はあるが、充填速度に関しては現地と同様な現象が生じていると考えている。

実験では図 4.1 に示す閉水路を用い、整流区間から約 5m 上流の水路天井に接続された土砂供給口から一定量の給砂量になるように細砂を供給しながら、表 4.1 の実験条件のもと充填速度を測定した。ここで、表中の流速は断面内平均流速であり、上流端流量を変えることで調整した。河床材料の粒径としては礫 17.5mm、ビー玉 15mm、粗砂 2mm、細砂 0.25mm を用いた。測定にあたっては、側壁の影響を除去するため、水路中央部における充填速度を測定した。通水途中に適当な時間間隔で上流側から砂鉄を流下させ、ある時間間隔で黒い砂鉄の層を薄茶色の砂層の間に挟む。通水後にドライアイスによって水路中央部の河床（50cm×50cm、厚さ 9cm 程度）を凍結させ、周辺の河床材料を取り除き、層構造を露出させ、細粒土砂の充填速度を算出した。ケース 1 は、細砂が堆積する前に粗砂が堆積する場合を想定したものであるが、道上ら（1994）が指摘したように、粒径が 1 オーダー以上小さい材料でない場合には礫の下層まで充填されず、その後細砂が給砂されても粗砂表面に留まり礫の下層までは沈み込むことはなかった。

図 4.2 は、ケース 3 および 4 について、露出された層構造を示す。上流側の砂鉄層の間隔が下流側のそれに比べて広く、上流側の充填速度の方が下流に比べて速いことが分かる。現地では河床を構成する骨格部分である礫層が攪乱を受けることなどもあり、必ずしも実験と同じ条件ではないが、透礫層が上流から徐々に充填されていく状況は現地と類似していた。実験中の観察結果によると、浮遊砂のうち河床の隙間に落下した土砂は再び巻き上がることがなく、縦断方向に土砂濃度の鉛直分布を計測した結果からも、下流に向かって濃度が低下している状況を確認できた。また、ビー玉を使った実験は現象を見やすくするために行ったが、通水後水槽から水を抜く際に水みちが形成され、砂鉄の層構造が崩れたため、自然の礫に比べ層構造が見えにくくなった。なお、充填速度については自然の礫を用いたケースと同程度であった。表 4.2 には、図 4.2 の層構造から算出した充填速度を示す。ケース 2 については砂鉄層を確認できた縦断距離 5.8m のみの結果を示した。

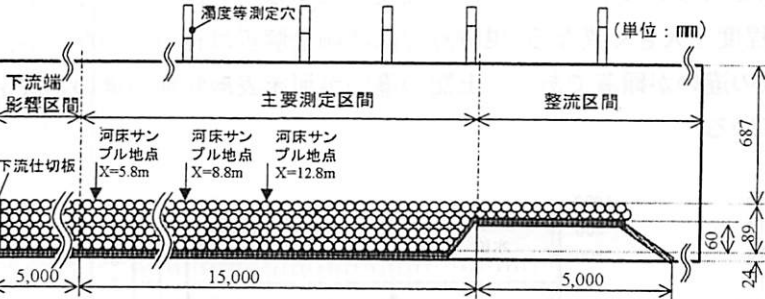


図 4.1 実験水路の概要（全長 25m、幅 1m、高さ 0.8m）

表 4.1 実験条件

ケース	河床材料	給砂材料	流速 (m/s)	設定濃度 (mg/l)
1	礫＋粗砂	細砂	1.0	300
2	礫	細砂	1.0	100
3	礫	細砂	1.0	300
4	ビー玉	細砂	1.0	300

表 4.2 透礫層への土砂の充填速度

ケース	縦断距離 (m)	実験値 (mm/min)	底面濃度 (%)	予測値 (mm/min)	予測値 実験値
Case2	5.8	0.3	0.004	0.4	1.5
	5.8	0.7	0.011	1.1	1.7
Case3	8.8	0.8	0.024	2.3	3.0
	12.8	1.8	0.033	3.2	1.8
	5.8	0.6	0.011	1.1	1.8
Case4	8.8	1.0	0.024	2.3	2.3
	12.8	1.6	0.033	3.2	2.0

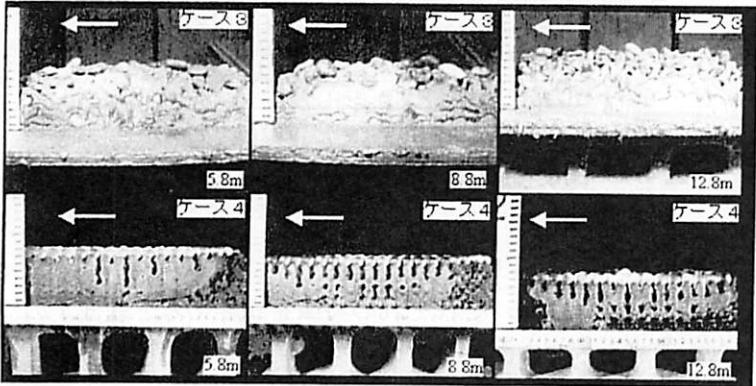


図 4.2 透礫層内への土砂の充填状況

李ら（1999b）の研究を参考にして、礫層内への土砂の充填速度を予測する式（4.1）を作成した。李らは高水敷上に繁茂する植生群落内へ浮遊砂を含んだ水塊が進入した時の、細粒土砂（粒径 0.1～0.2mm）の堆積過程を再現するために検討し、流下方向に向かって徐々に堆積厚が薄くなる点を再現した。水路実験においても、透礫層が上流側から充填され、下流に向かって充填速度が遅くなる点が類似していた。

$$V_f = C_b w_0 / (1 - \lambda) \lambda_g \tag{4.1}$$

ここで、 C_b は底面濃度、 w_0 は対象とする細粒土砂の沈降速度、 λ は細粒土砂の空隙率、 λ_g は礫の空隙率である（詳細は福島ら（2003）を参照されたい）。また、実験時の測定結果によると、礫の空隙率は 0.34 であり、ビー玉を配置した際にもこの空隙率に近くなるように体心立方格子として配置した。式 4.1 を使って充填速度を算出するためには、底面濃度と沈降速度を求める必要がある。沈降速度は Rubey の式から 3.3cm/s と算定した。底面濃度は、摩擦速度と鉛直平均濃度から算定した。摩擦速度については、相当粗度を粒径の 2 倍とし、対数分布則が流速の計測値にフィットするように算定した。このようにして得た結果が表 4.2 である。この結果は多少過大評価であるが、洪水中に形成された透礫層がどの程度の時間で土砂によって充填されるかを概算するのに有効である。

4. 2 Q-Qs 曲線と透礫層の関係

エネルギー勾配が 1/400、水深が 2m、減衰時に鉛直平均濃度が 300mg/l の状態が 1 時間継続したと仮定すると、洪水中に形成された透礫層のうち 13cm 程度が砂で充填され、徐々にマトリクス状態へと変化することを予測できる。ここで、河床材料の空隙率を 40%、細粒土砂の粒径を 0.25mm とした。この仮定は通常の河川でも一般的に生じうる現象であることから、礫層の移動に伴って形成された 10cm 程度の透礫層は 1 回の洪水で容易に充填されることが理解される。

図 4.3、図 4.4 は、多摩川永田地区 52.0km 地点左岸および北川の野地区 9.4km 右岸でそれぞれ出水中に計測された濁度の変化を水位ハイドロと重ね合わせた結果である。それぞれ年間数回程度発生する規模の出水である。多摩川では濁度のピークが水位ハイドロのピークとほぼ一致するのに対して、北川では濁度のピークが水位ハイドロのピークに比べて 3 時間ほど明らかに早い。また、同程度の発生頻度の出水であるにもかかわらず、多摩川の濃度が北川のその 2 倍程度と大きく異なる。現時点では詳細な解析は行っていないが、両河川の現地踏査を行うと、透礫層の分布域の違いが顕著であり、上記の違いが河床表層状態の違いを決定付ける大きな要因の一つではないかと感じている。

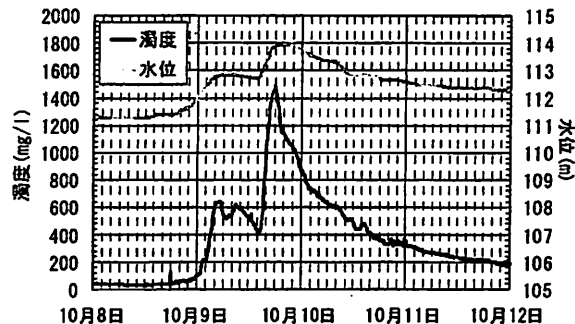


図 4.3 濁度・水位の時間変化（多摩川，2004 年）

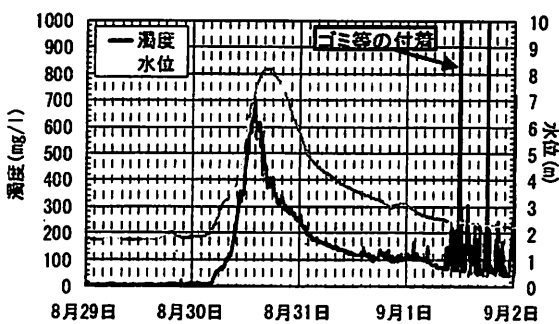


図 4.4 濁度・水位の時間変化（北川，2004 年）

5. おわりに

以上、多摩川および北川で実施された河川改修の事例を紹介した。それぞれの特徴をまとめると表 5.1 のようになる。目的、目標像は全く異なるが、それらを達成するためには、その状態が維持される仕組みを理解することが重要であり、その仕組みを機能させるために現在の社会構造の中で実施できることを十分に議

論した上で、具体的な改修計画を立案し、将来的な変化を予測している。さらに、順応的管理に向けて、生物情報に加えて、生物の生活基盤となる物理情報がモニタリングされている。今後、環境統合型河川技術を育てていくためには、このモニタリング作業を丁寧に行い、維持管理にその結果を適切にフィードバックしていくことが求められると考える。今回、具体的な改修計画の立案および将来の変化予測にあたって従来型河川技術（準二次元不等流計算、一次元河床変動計算など）を活用したが、多摩川永田地区（52.0km 断面）で見られた掘削面への土砂の堆積、北川本村地区（11.6km 断面）で見られた護岸前面での局所的な河床低下を予測することはできていない。現在、ここ十年程度の計算技術の急速な進歩に伴って、植生群落内への細粒土砂の堆積等を考慮した平面二次元河床変動モデルなど複雑な現象を表現できる河川技術の開発が進んできているが、これらの技術を実務上利用できる技術へと昇華させていく作業が今後必要である。そのためにも上述したような一つ一つの現象を丁寧に見て理解を深める作業が不可欠となる。近年、河川管理の重要性が叫ばれているが、護岸等の設計においても設計のための河川技術ではなく、管理のための河川技術が求められている。これは、河川環境を維持管理することに極めて類似しており、環境統合型河川技術はそのような河川構造物の維持管理にも活用される技術として発展させていくことが重要であろう。1 章で述べたように、ダムからの排砂と整備計画河道の維持管理の問題は、今後河川技術者が立ち向かわなければならない、治水の点からも環境の点からも重要な課題である。多摩川の事例は上流からの土砂供給量が増加した時の変化を、北川の事例は一連区間の河道を短期間に掘削した後の変化をそれぞれ扱った事例として、その変化に対する理解を深めるための材料として大いに参考となろう。

表 5.1 多摩川と北川の事業の比較

	多摩川	北川
目的	河原環境の復元、河原生物の回復	流下能力の増大、河川環境の保全（治水と環境の両立）
目標像	カワラノギクの繁茂した戦後の礫河原（過去への回復→復元）	既往最大流量を流下可能な河積の確保、激特前の河川環境（現状維持→保全）
事業内容	高水敷の掘削（低水路の拡幅）、礫の敷設・供給	高水敷の掘削、築堤、樹木群の伐採
現状	河床の上昇（深掘れ部の解消）、河原の拡大	出水時の河道内水位の低下、湾曲部流況の変化（瀬淵構造の変化）
懸念	掘削面の比高の増大→再樹林化、礫敷設の継続性	瀬の消失、局所洗掘→護岸の被災、堆積土砂掘削の必要性

謝辞

本研究は多摩川および北川における河川生態学術研究会の総合的な調査研究の一環として実施されたものである。東京都水道局羽村取水所、宮崎県延岡土木事務所、国土交通省京浜河川事務所、国土交通省延岡河川国道事務所には調査にあたって多大な協力をいただいた。また、ここで示した主な結果は、著者が国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室に所属していた時に得たものであり、北川の成果とりまとめにあたっては、現在河川研究室に所属する武内慶了研究官にお世話になった。ここに記して、協力していただいた方々への謝意を表します。

参考文献

- 1) 池田宏(1982)：透礫層の成因に関する水路実験，地形，第3巻，第1号，pp. 57-65.
- 2) 石川慎吾(1991)：揖斐川の川辺植生Ⅱ．扇状地域の砂礫堆上の植生動態，日本生態学会誌，Vol. 41，pp. 31-43.
- 3) 石橋良啓・池内幸司・尾澤卓思(2001)：良好な河川環境の保全・復元に向けて，河川技術論文集，第7巻，pp. 7-12.
- 4) 海野修司・齋田紀之・伊勢勉・末次忠司・福島雅紀・佐藤孝治・藤本真宗(2006)：多摩川永田地区における河道修復事業実施後の生物群集と物理基盤の変化，応用生態工学，第9巻，第1号，pp. 47-62.
- 5) 大沼克弘・藤田光一・佐藤泰夫・西本直史・松本洋忠・井上優(2007)：セグメント2河道を対象とした河道掘削後の河道変化予測に基づく治水・環境機能の一体的評価に向けた試み，河川技術論文集，第13巻，pp. 375-380.

- 6) 川口広司・末次忠司・福留康智(2005) : 2004 年 7 月新潟県刈谷田川洪水・破堤氾濫流に関する研究, 水工学論文集, 第 49 巻, pp. 577-582.
- 7) 北川研究グループ(2004) : 北川の総合研究―激特事業区間を中心として―, (財)リバーフロント整備センター.
- 8) 九州地方建設局・宮崎県・財団法人リバーフロント整備センター(1999) : 北川「川づくり」検討報告書.
- 9) 国土交通省河川局(2005) : 魚がのぼりやすい川づくりの手引き, 国土交通省 HP.
- 10) 島谷幸宏(2008a) : 環境統合型の技術としての多自然川づくり, RIVERFRONT, Vol. 62, pp. 2-5.
- 11) 島谷幸宏(2008b) : 多自然川づくりの技術展開と課題, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp. 385-390.
- 12) 清水義彦・小葉竹重機・岡田理志(2001) : 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.
- 13) 瀬崎智之・服部敦・近藤和仁・徳田真・藤田光一・吉田昌樹(2000) : 礫洲上草本植生の流失機構に関する現地調査と考察, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 301-306.
- 14) 高田昭(1927) : 多摩川産砂利及砂に関する調査, 土木試験所報告, 第 9 号, 内務省土木試験所, pp. 71-92.
- 15) 多自然型川づくりレビュー委員会(2006) : 多自然川づくりへの展開, 国土交通省 HP.
- 16) 多摩川研究グループ(2006) : 多摩川の総合研究―永田地区の河道修復―, (財)リバーフロント整備センター.
- 17) 中村太士(2008) : 河川環境の整備と保全の今後の方向性―つなぐ取り組みを中心として―, 河川, pp. 45-48.
- 18) 服部敦・瀬崎智之・吉田昌樹(2001a) : 礫床河道におけるハリエンジュ群落の出水による破壊機構と倒伏発生予測の試み, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp. 321-326, 2001.
- 19) 服部敦・瀬崎智之・徳田真・近藤和仁・吉田昌樹・藤田光一(2001b) : 植物群落の変化(出水によるハリエンジュの倒伏・流失とその後の再萌芽), 千曲川の総合研究―鼠橋地区を中心として―, 河川生態学術研究会千曲川研究グループ, (財)リバーフロント整備センター, pp. 587-635, 2001.
- 20) 服部敦・瀬崎智之・福島雅紀・伊藤政彦・末次忠司(2003) : 五ヶ瀬川支川北川における河道掘削による河原形成システムの変質について, 水工学論文集, pp. 991-996.
- 21) 服部敦・瀬崎智之・伊藤政彦・末次忠司(2003) : 河床変動の観点で捉えた河原を支える仕組みの復元―多摩川永田地区を事例として―, 河川技術論文集, 第 9 巻, pp. 85-90.
- 22) 福島雅紀・末次忠司・瀬崎智之(2006) : 透礫層の形成とその充填過程に関する研究, 水工学論文集, 第 50 巻, pp. 985-990.
- 23) 藤田光一・李参熙・渡辺敏・塚原隆夫・山本晃一・望月達也(2003) : 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. 41-65.
- 24) 藤田正治・Muhammad SULAIMAN・Jazaul IKHSAN・堤大三(2008) : 河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp. 13-18.
- 25) 道上正規・藤田正治・北川豊広・三村光太郎(1994) : 空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂, 水工学論文集, 第 38 巻, pp. 609-614.
- 26) 皆川朋子・島谷幸宏(2000) : 多摩川永田地区及び千曲川鼠橋地区における河原率にみる洪水による破壊・再生, 第 4 回研究発表会講演集, 応用生態工学研究会, pp. 13-16.
- 27) 李参熙・藤田光一・山本晃一(1999a) : 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.
- 28) 李参熙・山本晃一・望月達也・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏(1999b) : 扇状地礫床河道における安定植生域の形成機構に関する研究, 土木研究所資料, 第 3266 号, pp. 51-111.
- 29) 渡辺敏・藤田光一・塚原隆夫(1998) : 安定した砂礫州における草本植生発達の有無を分ける要因, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 439-444.