

水工学シリーズ 08-A-7

礫床河川の植生化とその制御
ー河床材料，河川地形，洪水かく乱の観点からー

群馬大学大学院 工学研究科 准教授

清水 義彦

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2008 年 8 月

清水 義彦

Yoshihiko SHIMIZU

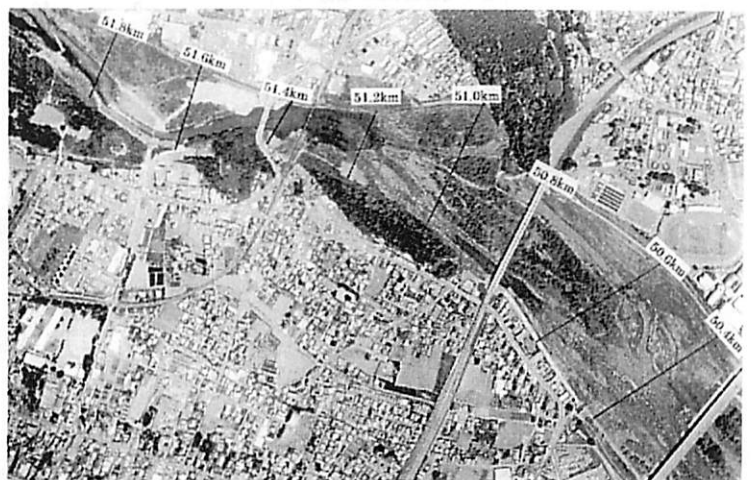
1. はじめに

始めに、著者の研究フィールドである利根川水系渡良瀬川礫床区間の風景を示す1枚の写真を紹介する。図－1は植物に覆われた中州を下流側から写したもので(図－2にその平面形状を示すと、51.2kmから50.6kmの間が注目した中州である)、河川横断面内を著しく占有する植物の繁茂状況がよく分かり、また、釣り人の背丈からそれらの高さが読み取れる。この写真の中には、主として3つの種類の植物が含まれていて、それは背丈の低い順に、草本類のツルヨシ(*Phragmites japonica*)、木本類のタチヤナギ(*Salix subfragilis*)、ハリエンジュ(*Robinia pseudo-acacia*)である(図－1でのハリエンジュの樹高は高いもので18m程度にもなる)。よく知られているように、植物の分布は、生息基盤の河床材料、水分特性、そして出水による影響(洪水のかく乱)などの物理環境のちがいを比高という指標で表現することにより、比高に応じて区分できると言われている。図－1で言えば、水際に近い砂礫州を占有するツルヨシ、やや比高の高い領域にあるタチヤナギ、さらに比高の高い箇所にあるハリエンジュという具合である。しかし、初期の遷移状態では、ツルヨシとタチヤナギは混在するし、ツルヨシの中にハリエンジュが侵入することも観察される。存在区分となる比高の範囲には案外幅があり、植物自身の成長特性の他、侵入・定着・競争という生態的な要因が絡んでいるため、植物分布を説明するのはそう簡単ではない。

しかしながら、今日的な話題となっている礫床河川の河道内樹林化は、河床材料、河川地形、洪水かく乱と言った物理環境に対する植物の応答として捉えることで説明できそうであり、本稿では、樹林化をもたらす代表種である木本類ハリエンジュに注目しながら、近年の河道内植生化の成立要因とその制御に向けた試みを紹介する^{1), 2), 3), 4), 5)}。



図－1 渡良瀬川礫床区間の風景(砂礫州の植生化)



図－2 中州の平面形状(狭窄部下流に位置する)

2. 最近の礫床河川の河道特性

昭和 40 年代頃からのわが国における礫床河川の特徴的な河道特性として、河道の一部が河床低下することにより生じる複断面化、あるいは、もともと低水路であった河床の一部が相対的に比高の高い河床となる高水敷化と言った特性があげられる^{6) 7) 8) 9)}。図-3 は渡良瀬川のセグメント 1 区間（河床勾配 1/130、図-2 の中州も含む）に見る河道横断面の変遷である。これによると、①低水路の一方的な河床低下、②砂礫州の一方的な河床上昇、③その双方が生じる場合でそれぞれ比高差が増し複断面化する様子が見られる。このうち、中州のように本来高い地点の河床上昇は比高差による掃流力低下のほか、植物繁茂（草本）による細粒河床材料（砂）の堆積効果が大きい。図-4 に中州の平面形状の変遷とその上の植物繁茂状況を示すと植物の占有が進む領域で河床上昇傾向にあり、とくに、

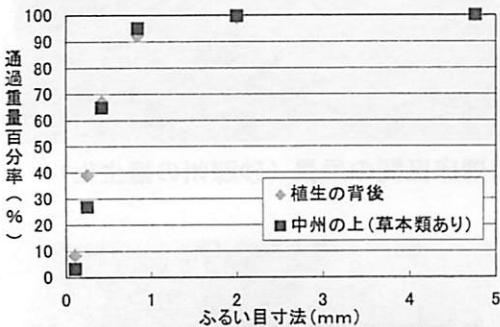


図-5 出水後に堆積した州上の砂

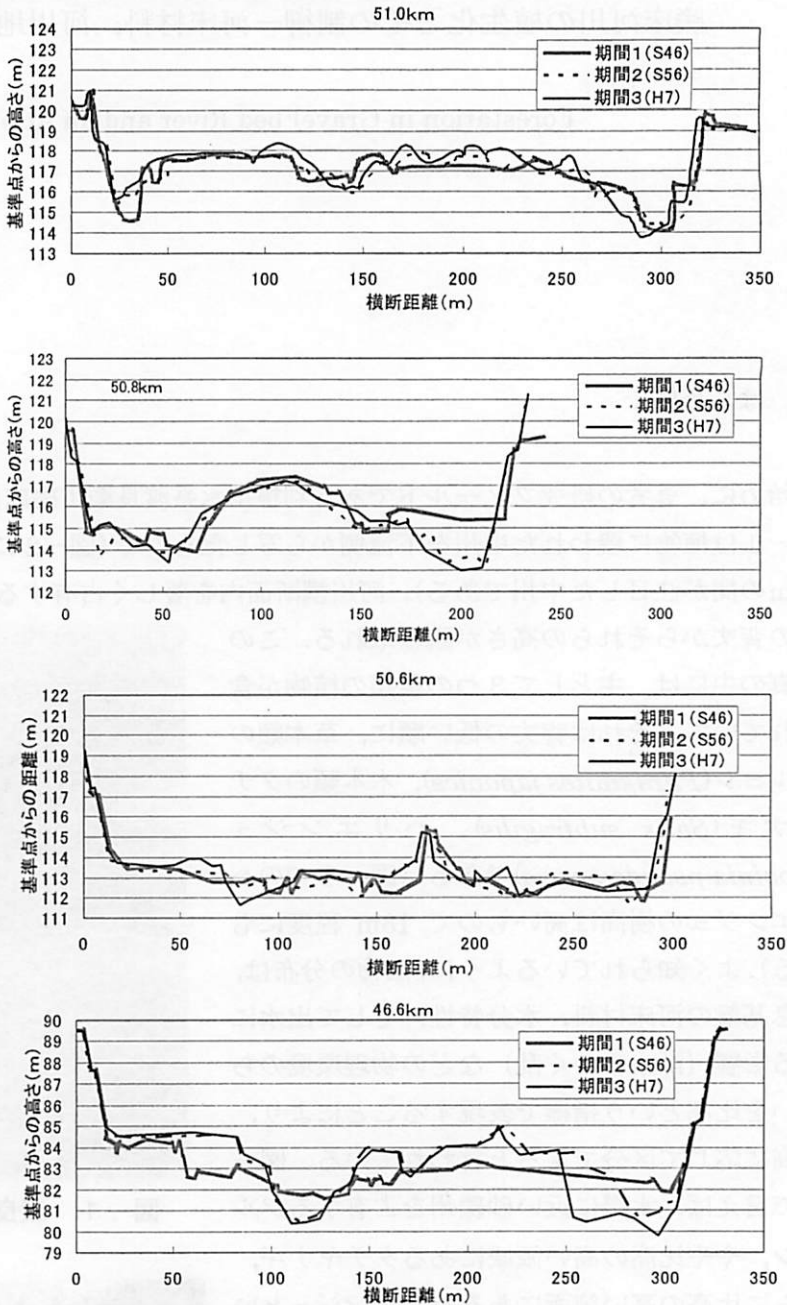


図-3 横断面形の変遷

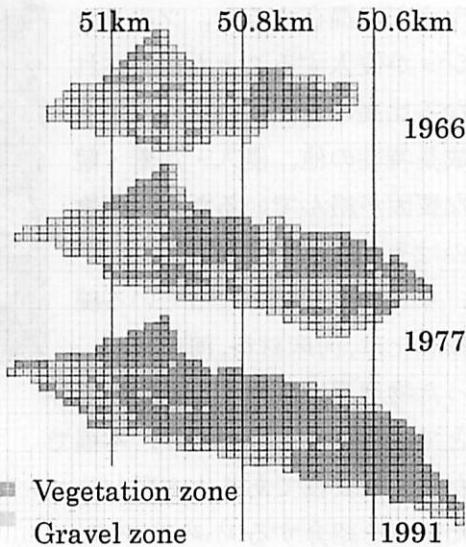


図-4 中州の平面形の変遷

図-4 から中州の面積拡大と植物繁茂の関係が読み取れる。また、砂州上では1回の出水で堆積厚が20cmぐらいになることも観察され、図-5に出水後に堆積した細粒分の粒度構成を示す。一方、低水路の河床低下が生まれる地形学的な構造については必ずしも十分に分かっていない。過去に盛んに行われた砂利採取の影響や河道への供給砂礫の量的・質的变化、洪水管理による外力規模の低減などに対し、河道がどのように応答するかは十分に検討されてなく興味深い研究課題である。渡良瀬川の場合には、交互砂礫州に特徴づけられた低水路の中で生まれる落差の大きな瀬の形成が横断面内比高差を生む要因となっている。図-6は、交互砂礫州による低水路の蛇行（矢印のように左岸から右岸へ向かう）によって右岸側低水路に大きな落差をもつ瀬の形成（下流側の矢印にあたる）と、これと左岸州との段差（比高差）、さらに、その左岸州の先端（下流端）で樹林化していることが読みとれる典型的な植生化の景観を示している。また、この落差の大きな瀬の形成は、砂礫州の固定化と中規模出水規模（低水路満杯程度）のもとに生じる局所洗掘が原因の1つとかなり単純化して捉え、数値計算から検討してみた¹⁰⁾。



図-6 落差の大きな瀬による横断比高差の発生

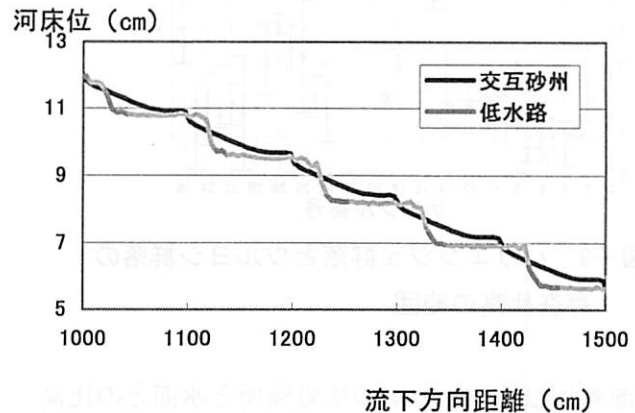


図-7 河床変動計算による低水路形成

すなわち、交互砂州を形成させた計算河床を初期条件として作り、その後、砂州形成流量の0.6倍程度の流量を通過させ、実験室規模スケールでの平面2次元河床変動計算を行った。計算結果が図-7であり、初期地形（太線；交互砂州の低水路に沿う河床位）と計算後の低水路（最深河床）を比較した。深掘れ部の顕著な河床低下（落差の大きな瀬の形成）と扇中央上流側での河床上昇（堆積）が生まれることで砂州波長が長くなる傾向となった。図-6にも見られるように、左岸州の上流側は礫の堆積傾向にあり、そこではツルヨシ群落がしばしば形成される。このような観察結果と数値計算結果は大まかに対応している。

3. 洪水の攪乱が河道の樹林化を促進させる

横断面内の比高差の拡大は河道内に安定域を作り、そこには、はじめ草本類が侵入・定着し易く、これが河道内樹林化の下地を生む。藤田・李ほか^{11),12)}は、多摩川永田地区における河道状況の変化と植生分布の遷移過程を調べ、その過程としては、①地形変化（比高差）の出現→②洪水によって比高の高い箇所に細粒土砂が堆積→③パイオニア的植生（草本類）の侵入→④比高+植生の効果で細粒土砂堆積が促進（②よりも効率よく細粒分を捕捉）→⑤比高差の拡大、木本類の侵入→⑥冠水頻度の低下と安定した樹林の形成として説明している（図-8）。こうしたプロセスが樹林化の素過程であり、複断面化によって比高の高い箇所では洪水時の攪乱規模が微弱になる一方、平水時には地下水位との比高差が増して表層の乾燥化を伴い、オギ、ハリエンジュ等木本の繁茂環境が成立する。このように冠水頻度と経験する洪水攪乱規模、また、根茎のあ

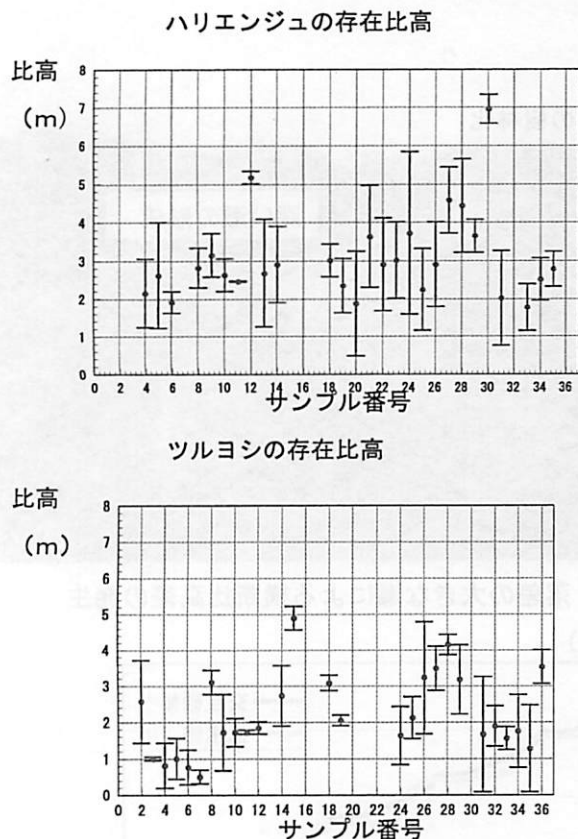


図-9 ハリエンジュ群落とツルヨシ群落の存在比高の範囲

る表層の湿潤状態等は、植物の生育箇所と水面との比高条件に支配され、1章でも述べたように、これが植物の住み分けをもたらす要因の1つである。たしかに、森林化、樹林化するには、図-8 にみる洪水攪乱を受けにくい物理環境が必要であるが、ハリエンジュ林の存在範囲の比高を調べて見ると、その比高の範囲はかなり広く（図-9；渡良瀬川における調査結果で、比高の定義は横断面内の最低河床からの高低差としている。参考のためツルヨシ群落についても併示する）、比高の小さな、洪水攪乱の生じやすい環境にもハリエンジュの林は形成されている。そこで、比高の小さな領域では、むしろ冠水すること、洪水攪乱を受けることがハリエンジュの群落形成にとって重要ではないかと考えた。そう考えるに至った理由を以下に述べる。

3.1 ハリエンジュ林の世代交代

図-10.11 はハリエンジュの樹林によって占有された、低水路に隣接した中州であり、河川管理上の問題から樹木の伐採工事が行われた。その際に年輪調査をしたところ、図-13 に示すように、年輪の多くが16年、15年となる結果であった。これは調査年から遡って考えると、昭和57年洪水（ピーク流量1596m³/sで、ここでの計画流量は3500m³/s）



図-8 多摩川における横断地形と植生の変化（藤田ほか 2003 を修正）

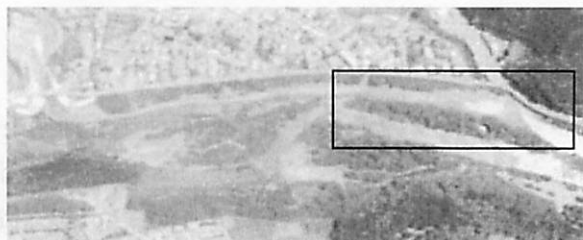


図-10 年輪調査した砂州の航空写真（中州で黒枠で囲まれた樹林地が伐採の対象）

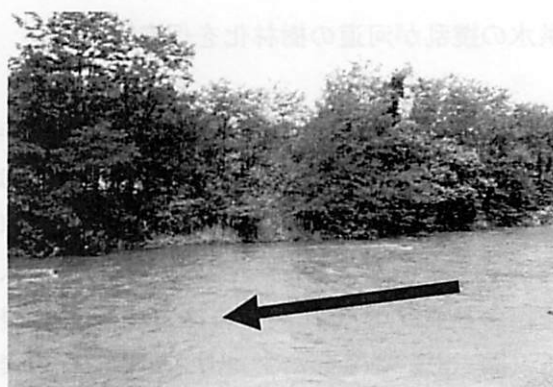


図-11 年輪調査した砂州（伐採前）（木本のほとんどがハリエンジュ）



図-12 年輪調査した砂州（伐採後）

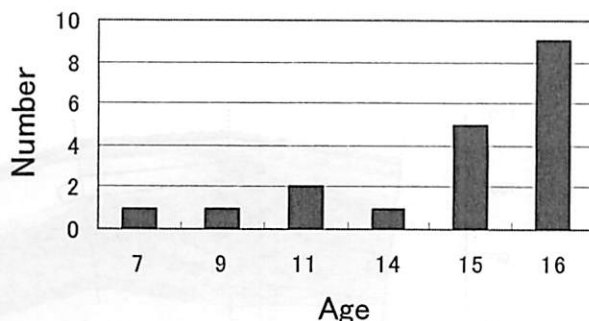


図-13 年輪と本数の関係

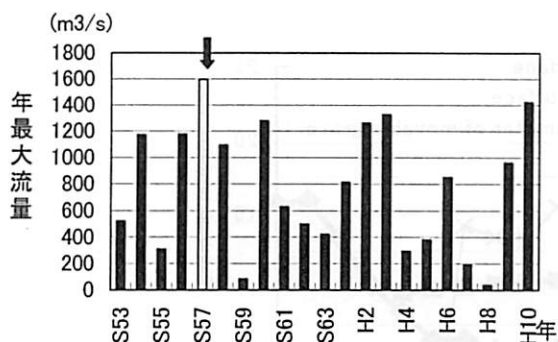


図-14 年最大流量の時系列

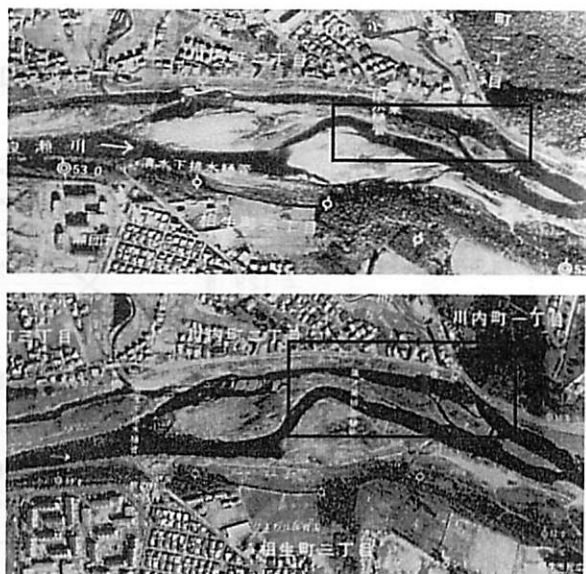


図-15 年輪調査した砂州の航空写真
(上が昭和 56 年，下が昭和 63 年に撮影)

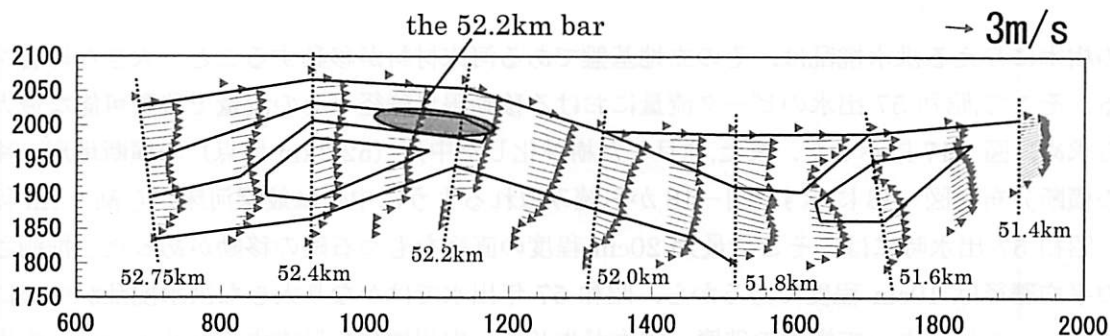


図-16 平面流計算による昭和 57 年洪水の再現（流速ベクトル図）

の直後に、ほとんどのハリエンジュが生まれたことを意味した（図-14）。ところで、昭和 56 年に撮られた航空写真（図-15）によれば、この時点で同中州にはかなりの樹木がすでに繁茂していた事実が認められた。したがって、ハリエンジュは昭和 57 年洪水での攪乱によって世代交代し、57 年洪水後からの新たな再生過程を経て現況の樹林地を形成したことが推測された。こうした世代交代はどの程度の洪水規模で生じるかを調べるには、当時の洪水流況を再現計算すれば推定可能である。そこで、昭和 57 年洪水が中州上の樹木に与えた攪乱を、昭和 56 年地形をもとに、ピーク時での洪水流量を与えて数値計算した。図-16 は平面流計算による主流速ベクトル図である。52.2km・52.4km 付近が注目している中州であるが、中州の左岸側に近接して滞筋が形成されているため、中州といえども約 4m/s 程度の早い流速が作用していることが分かる。

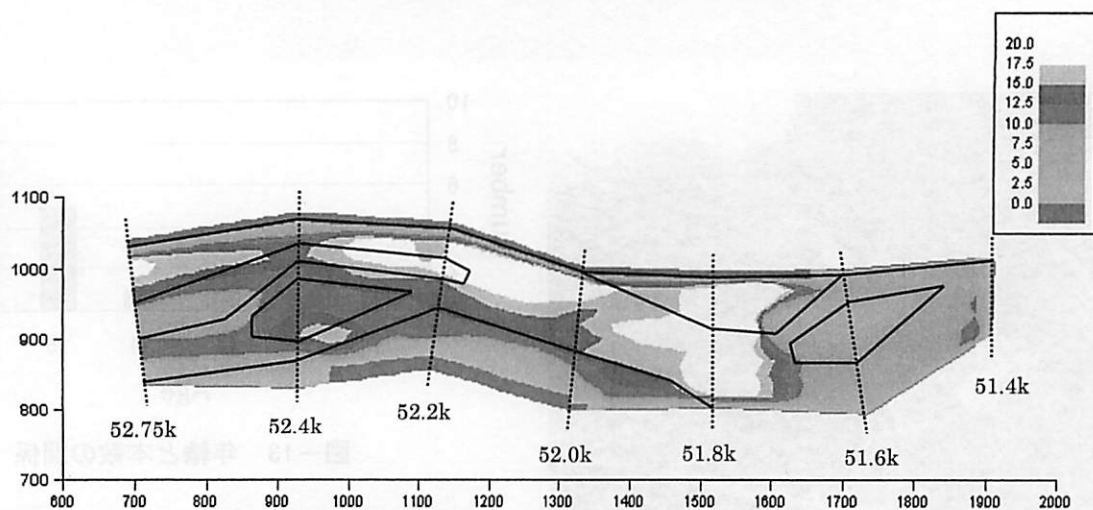


図-17 平面流計算による昭和 57 年洪水の再現（移動限界礫径のコンター図）

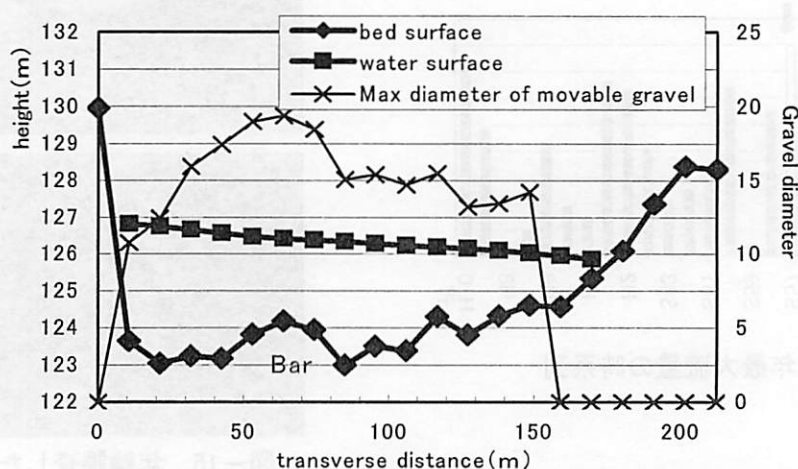


図-18 平面流計算による中州を含む横断面内の水位と移動限界礫径の分布

中州上の樹木に与える洪水攪乱は、その立地基盤である河床材料が移動することで大きな影響を与えると考えられる。そこで、昭和 57 出水のピーク流量における移動限界礫径（その流量で移動可能な最大の礫径）を計算から求め、図-17 に示した。また、注目した樹林化した中州（52.2km 地点）の横断地形、移動限界礫径と水位の横断分布を図-18 に示す。図-18 から読み取れるように中州は最深河床から高々 1m 程度の比高しかなく、昭和 57 出水時には、そこで最大 20cm 程度の直径をもつ石礫の移動があったと推測される。この区間での平均礫径は 10cm 程度であるから、昭和 57 年出水ではかなり大きな洪水攪乱が中州に与えられたことを意味し、これによって樹木の破壊、倒木が生じて、中州樹林を形成するハリエンジュの世代交代に及んだと推定された。

3.2 平成 10 年洪水による砂礫州上の樹木の破壊と攪乱

これまで考察から昭和 57 年洪水がハリエンジュ樹林地を破壊し世代交代を生んだという推論を得たが、洪水後の砂礫州がどのような状態で、樹木の破壊がどのようなであったかまでは過去に遡って検証することはできない。ところが、平成 10 年 9 月にも昭和 57 年洪水とほぼ等しい規模の洪水（ピーク流量で $1420\text{m}^3/\text{s}$ ）を渡良瀬川は経験した（図-14）。昭和 57 年で着目した中州とは異なる地点の中州（43.6km 地点、図-19）ではあるが、同じセグメント 1 に属す樹林化の顕著な砂礫州についての洪水前後の現地観測から、H10.9 洪水によって樹木の流出や倒木が顕著に生じたことが分かった（図-20）。流出したハリエンジュは砂礫州の水際に多く存在していたもので、そこには、切断された根茎の一部が露出して残っていた。一方、中州に残存する

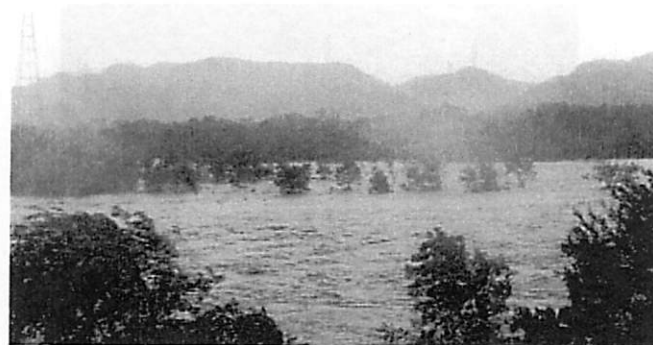


図-19 調査対象の中州（43.6km）の平成10年9月洪水前後の様子



図-20 平成10年9月出水後の中州（43.6km）での樹林地の攪乱

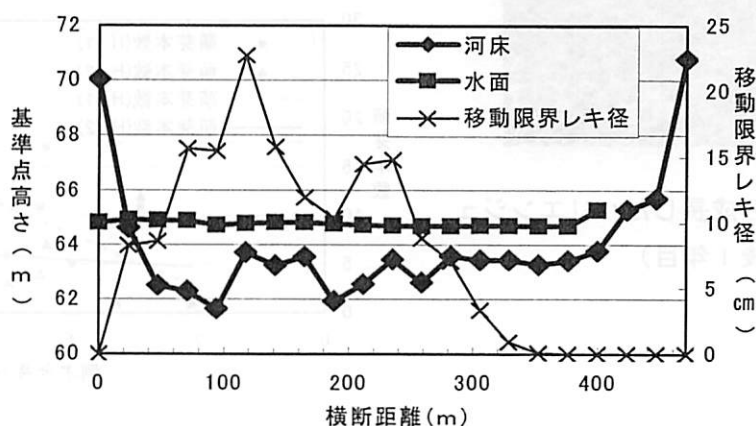


図-21 平成10年9月出水の中州上（43.6km）での移動限界礫径の横断分布

ほとんどのハリエンジュは倒木、傾斜しているものが多く、石礫によって倒木の一部が埋没している。表層を剥いでみると、新しい堆積層の中にハリエンジュの根茎が流出を防ぐように緊張した状態で存在するものが多く、このことから洪水中に一旦河床低下が生じて根茎の一部が露出しながら倒木化し、その後、石礫による堆積が生じて埋没したと考えられる。すなわち、河床低下がわずかであったため、樹木が流出することなく、そこに止まった。こうした樹木の倒木が生じる洪水外力の規模を、図-18と同様に平面流計算から評価し、移動限界礫径を指標として図-21に求めた。同図で横断距離100m-200mに調査した中州があり、そこでの移動限界礫径は最大で20cmになる。これは、昭和57年洪水が52.2kmの中州に与えた洪水攪乱に匹敵する規模であり、昭和57年洪水においても中州の上で樹木の倒木、傾斜が盛んに生じたことが推測された。

3.3 平成10年洪水後のハリエンジュ林の形成過程

平成10年洪水の1年後に、同中州（43.6km）での現地調査を実施した（H11.11月実施）。そこでは、ハ



図-22 平成 10 年 9 月出水後のハリエンジュの再生



図-23 倒木から成長したハリエンジュ
(洪水後 1 年目)



図-24 1 本の傾斜木から萌芽するハリエンジュ

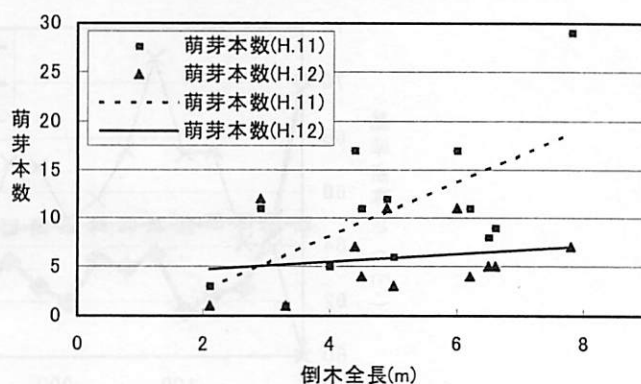


図-25 1 本の傾斜木からの萌芽本数

リエンジュの倒木、傾斜木のほとんどから萌芽が生じ、急激な密生度増加が起こっていることが認められた。図-22 は倒木したハリエンジュからの萌芽を示したもので、なかには幹が河床に埋没することで根茎化する様相も観察された。また、図-23 から分かるように洪水後 1 年で樹高はかなりの高さに生長するが、これは植物体の一部から萌芽する特徴（栄養繁殖）による。図-24 は 1 本の傾斜木から萌芽する様子で、それを 2 年間にわたって観察したものが図-25 である。図-25 は横軸に倒木 1 本の主幹全長をとり、その主幹から萌芽した本数を示したもので、例えば出水 1 年後（点線）に、全長 6 m の倒木（1 本）からの萌芽本数は 15 本程度となり、出水 2 年後（実線）には、その中の 8 本が淘汰されて 7 本に減少したことを表している。図-26 は 3 本のハリエンジュのサンプルについて、横たわった主幹からの萌芽本数を洪水後 3 年間調べたもので、主幹を根元から 1 m 間隔で区分して示している。これによれば 3 年後に新たに萌芽してくるものもあって成長過程はあまり鈍化していない。興味深いことは、萌芽して新たな幹が何本か成長してくれば、その重みによって主幹は河床により横たわるようになり、あたかも次の出水の堆積環境を待って根茎化するようにも見える。このような洪水後の急激な林の形成を見ると、比高の小さな箇所に繁茂するハリエンジュ林は、

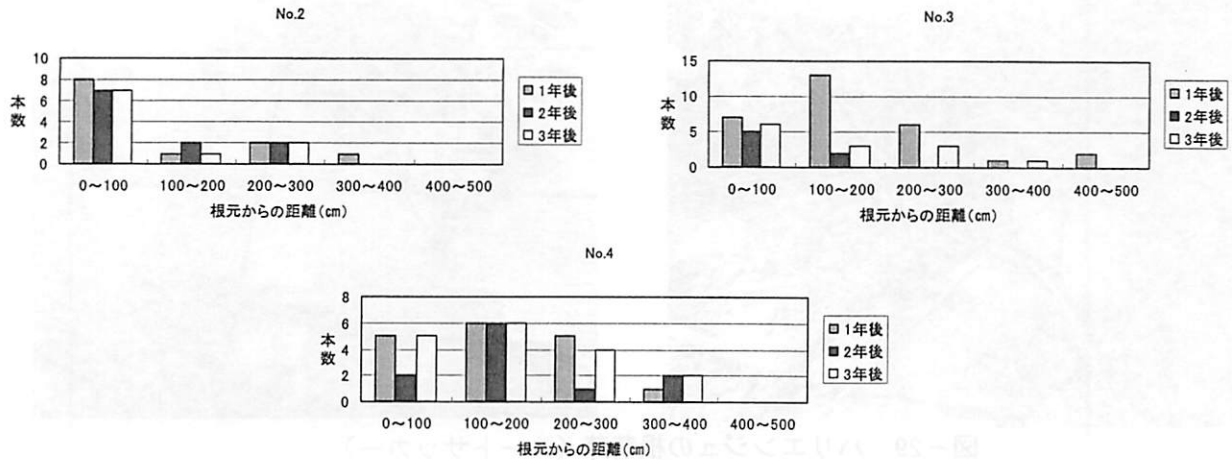


図-26 傾斜木からの萌芽本数の経年変化

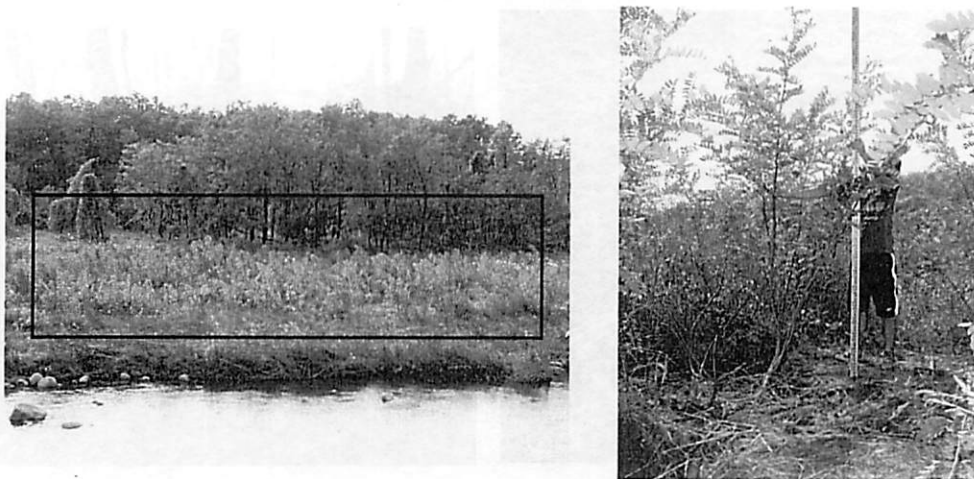


図-27 ハリエンジュ林の伐採・伐根後の様子

洪水のかく乱を受けることで戦略的に群落を維持、拡大しようとする特徴をもつと考えるのがよさそうである。著者は、洪水のかく乱が誘引となって生じる樹林化を、安定域での樹林化に対して「動的樹林化」と呼んで区別している（区別するために安定域での樹林化は「静的樹林化」と名づけている）。

3.4 洪水攪乱に対する植物の応答について

さて、ハリエンジュ林を伐採、伐根してもすぐに再生してしまうことが河川管理上の1つの問題となっている。これは丁寧に伐根しても河床の礫層内に破断して残る根茎が必ず存在し、これから萌芽するために起こる。図-27 (左) は伐採・伐根後に萌芽したハリエンジュの幼木、(右) は1年後に生長した様子を示したもので、この状況は洪水かく乱を受けた後の状態 (図-23) と酷似している。5mx5m の範囲で樹高を調べたものが図-28であり、52本のサンプルで平均高さは2.3m、単位面積あたりの本数は2.08 本/m²となった。また、ハリエンジュには、根萌芽 (ルートサッカー) を行う繁殖形態があり、1つの個体の根から新しい個体が生まれることにより個体数を増やしている (図-29)。とくに、礫層の上に堆積した細粒砂層内に水平に根を張ることが多く (図-30)、この場合、根萌芽によってハリエンジュは面的に拡大しやすいと推測される。渡良瀬川の観測区間ではハリエンジュの倒木群による河畔林が形成されている箇所がある (図-31)。年輪調査から16年のものが

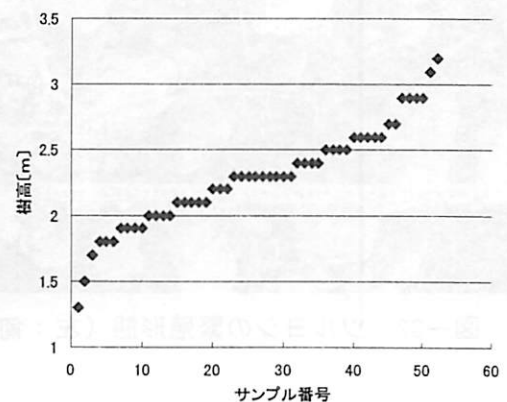


図-28 ハリエンジュ林の伐採・伐根後
1年目で萌芽したものの樹高分布



図-29 ハリエンジの根萌芽（ルートサッカー）

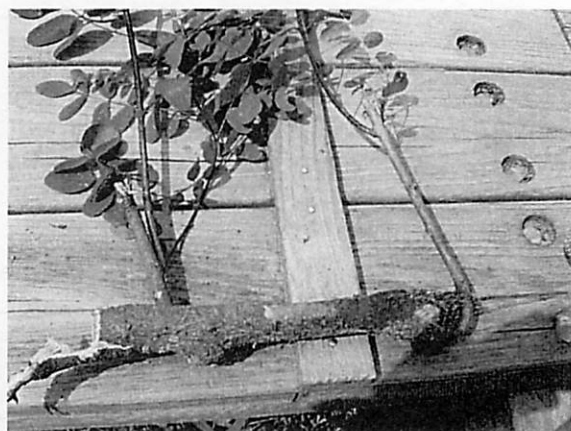


図-30 水平に根を張るハリエンジュ



図-31 ハリエンジの倒木群による河畔林

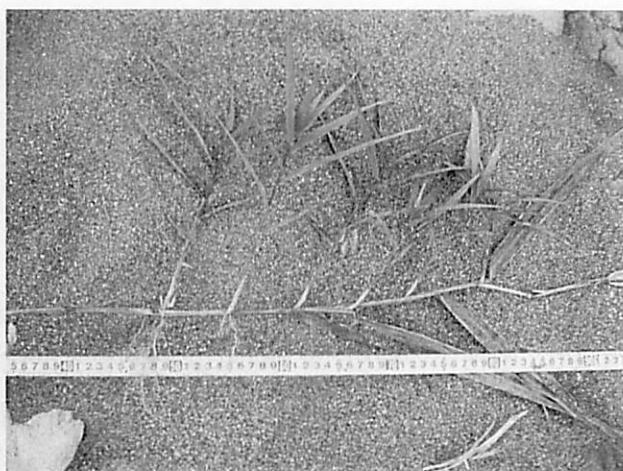


図-32 ツルヨシの繁殖形態（左：匍匐茎（ランナー）、右：埋没した茎からの萌芽）

多く読み取れて、これも昭和 57 年洪水後にハリエンジュが再生したことを示唆していた。すなわち、ハリエンジュ河畔林が形成される一つの理由に動的樹林化があると考えられる。

さて、はじめに見た図-1 の渡良瀬川の 3 つの植物（ツルヨシ、タチヤナギ、ハリエンジュ）を振り返ると、いずれも活発な栄養繁殖（胚・種子を経由せずに根・茎・葉などの栄養器官の一部が分離・生長して、独立した 1 つの個体になる生殖；vegetative propagation）を行うものである。ツルヨシは匍匐茎（ランナー；地上走出枝）を地上面に出して群落の面積拡大を行うことはよく知られているが（図-32 左）、直立したツルヨシの茎が出水中に流体力を受けて河床に横たわり埋没することによって、その後、茎から萌



図-33 出水後に埋没したタチヤナギの萌芽



図-34 砂礫州を占有するツルヨシ



図-35 表層の石礫に根を張るツルヨシとそのランナー



図-36 切断された根茎の一部から発芽するツルヨシ



図-37 礫の移動によって埋没したハリエンジュからの萌芽

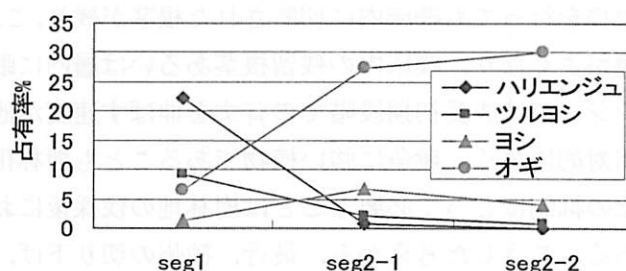


図-38 優先植物の面積占有率

芽すること、埋没した茎から根毛を出すことも観察され（図-32 右）、これはタチヤナギの萌芽（図-33）ハリエンジュの根萌芽による拡大過程とよく似ている。

ツルヨシが砂礫州を占有する状況を調べると、表層礫層の中で石礫を抱え込むように根茎が張っており、水中でもランナーを出して領域拡大を図っている（図-34,35）。瀬崎ほか¹³⁾によると、ツルヨシ根茎の貫入深さは40cm以上のあり25cm程度の礫（D₉₀に相当）が根茎に絡んでいることが多摩川の調査から報告されている。渡良瀬川での調査によれば、低水路の粗粒化が進み、表層で根茎の絡む材料が粗大化することでツルヨシ群落はいっそう流出しにくくなっている（図-35）。礫床で最近よく見られるツルヨシの過剰な繁茂についても、見方によっては粗粒化という物理基盤の環境変化を巧みに利用した植物の知恵

かもしれない。

以上の考察から、洪水の攪乱が植物体に与えるストレスになり、それに対する植物の応答特性が河川の植生化を促す大きな要因と言える。言い換えると、ツルヨシ、タチヤナギ、ハリエンジュなどは戦略的に洪水攪乱を受け入れて群落の維持・拡大を図っているのであろう（図－37）。これらを出水に対する攪乱依存種と見れば、それは礫床（セグメント1）に多く存在している（図－38；渡良瀬川において河川（ただし、水面と人工利用地を除く）における植物の占有面積率をセグメント別に示したもの）。

植生化の要因をまとめると、①出水によって植物体が流出しないこと（たとえ体の一部であっても残存すること）、②洪水後に土砂、砂礫の堆積環境となること、③洪水の攪乱が植物体に成長を促すストレスとなること（攪乱外力が植生にとって適度なものとなっている）の3つがポイントになる。このうち、①と③を生む背景は2章で述べた最近の河道特性の変化と経験する出水規模によっている。

4. 河川の植生化を制御する1つの試み

これまで述べてきたように、ここ最近の数十年におけるわが国の礫床河川の多くでは、低水路の河床低下と横断面内比高差の拡大によって、①非冠水領域や洪水攪乱の軽微な領域の出現と植物の過剰な繁茂、②低水路分担流量の増大によって低水路周辺に洪水攪乱が集中することがあげられ、こうした二極化が生じることによって治水的にも環境的にも問題が生じている。前者の例は本稿がテーマにしている河川の植生化であり、後者は例えば低水路の局所洗掘があげられ、とくに高水敷幅の少ない（削りしろのない）河岸近傍で河床低下（局所洗掘）は治水上の課題となっている。こうした問題が現れている渡良瀬川礫床区間では、長年、河岸防御と河道内樹林の繁茂が河川管理上の重要な課題として取り組まれてきた。しかしながら、樹林のほとんどを占めるハリエンジュは、丁寧な伐根を行っても礫床内に破断した根茎が残存し、翌年には著しい萌芽が生じ、2～3年で林の再生が生じている（図－27）。こうした状況を目の当たりにすると、現況の河川の植生化は不可逆的過程と言わざるを得なく、何らかの対策が必要である。しかしながら、樹林地の伐採後に丁寧な伐根を行っても礫床内に切断された根茎が残り、これを十分に取り除くことは難しいし、また伐採後は日射環境がよくなり、礫床内の残留根茎あるいは層内に眠っていた種子からの発芽が生じやすい。とくに、ハリエンジュでは成長初期段階での背丈を伸ばす速度が他の植物（伐採などのかく乱地に侵入しやすい植物）よりも相対的に早く、競争に強い植物であることも樹林化を生む代表種の一面である。

植生化の抑制にとって必要なことは樹林地の伐採後において、その領域に洪水のかく乱が効果的に生じることである。こうした考えから、最近、砂州の切り下げ、高水敷掘削を行って、冠水頻度の増加と掃流力の増大を通じて礫河原再生を目的とした河川工事がなされるようになってきて^{14), 15), 16), 17)}、その多くは低水路と隣接する砂州部分の比高を下げ、砂州上の冠水範囲を広げている。しかしながら、有意な洪水かく乱を得て、植生化を制御することは案外難しい。ここでは、著者らが検討した渡良瀬川での砂州掘削工事の事例を紹介する⁵⁾。

まず、掘削工事により砂礫州上で有意な洪水かく乱を得るためには、その領域を単に冠水させるだけではなく、ある頻度で流水環境となることが重要であり、しかも砂礫が動く状況もある頻度で実現させることが必要と考えた。それには、上流からの低水路流れを、直接、砂州内部に引き込む形で砂州の部分掘削を行い、中小洪水において砂州内部で洪水かく乱を生むことを期待した。そこで、渡良瀬川礫床区間にあって狭窄部下流に形成した中州（図－1，2）を対象に、平成18年度に砂州内部の部分掘削を行い、中小洪水時に中州内部に流水を導き有意な河床攪乱（流砂運動と河床変動、河岸侵食）を誘発することで樹林化の抑制と礫州再生をねらう工事を完了した。そして、工事完了後に生じた平成19年9月出水（台風9号）から掘削工事の効果評価を行い、その結果、河川の植生化を抑制する有効な1つの手段と認めることができた。以下ではその内容について述べる。

4-1 中州掘削工事の概要

対象とする中州（図-1, 2）は河床勾配 1/130 程度の礫床区間にあり狭窄部下流に位置する。低水路は中州で分岐し、右岸側低水路には中州先端付近から下流にかけて落差の大きな瀬が形成され、このため中小洪水では右岸側を集中して流れる。ここでの最深河床と中州との最大比高差は約 5.0m にもなり、これが中州の冠水頻度低下とともに攪乱規模も低下させている。一方、低水路で粗粒化が顕著に進み、その河床表層は 20cm 以上の石で覆われている。図-39 は河川工事で水流を切り回した際に現れた低水路の河床状況を示したもので、石礫による河床表層の粗粒化がよく分かる。図-40 は掘削前の中州の垂直写真（距離杭位置も併記）であり、掘削部分（掘削路）の上流端にある中州先端付近の横断ライン(1)と掘削路を予定する縦断ライン(2)について、掘削前の地形をレーザプロファイラ測量から調べた。図-41 は横断ライン(1)の地形（掘削前）を示したもので、掘削路の入り口上流端（中州上流端）は既往出水のフラッシュを受けやすく、新たに掘削を施さなくても良いものと判断した（170m 付近が掘削路の入り口に当たる）。一方、図-42 に示す掘削路予定の縦断ライン(2)から 50.8km 付近に 1m 程度の凸地形があるものの、51km から 100m 程度、50.8km から掘削路下流端まで急勾配な地形（1/70～1/100 程度）が存在し、ここに出水を導くことで有意な洪水攪乱が得られるものと判断した。中州掘削箇所は上流側低水路との位置関係を踏まえ、中小洪水時に低水路とつなぐ形で掘削路に流水が導かれるよう平面流解析で考慮した。樹木の伐採・伐根を行って掘削し、その掘削形状は幅 40m、中州を縦断する長方形（掘削前地形の縦断勾配を活かして深さは一律に約 1.0m～1.5m 程度下げた）で中州のやや右岸側に配置し、掘削路左右岸側は現状形状を残した。また、掘削路上下流端の中州も現



図-39 中州右岸側低水路の粗粒化

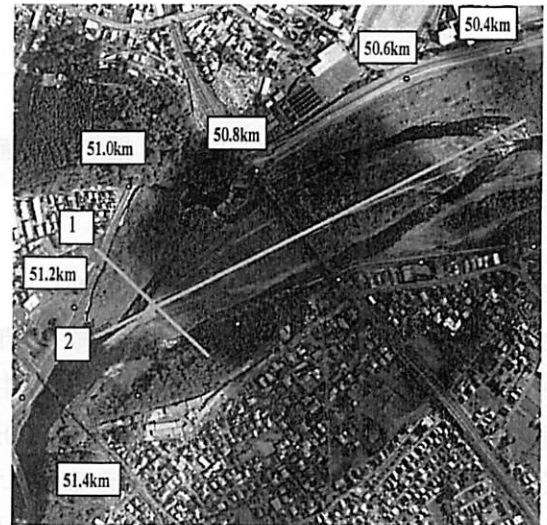


図-40 対象中州の平面形状



図-41 中州上流端の横断面形状

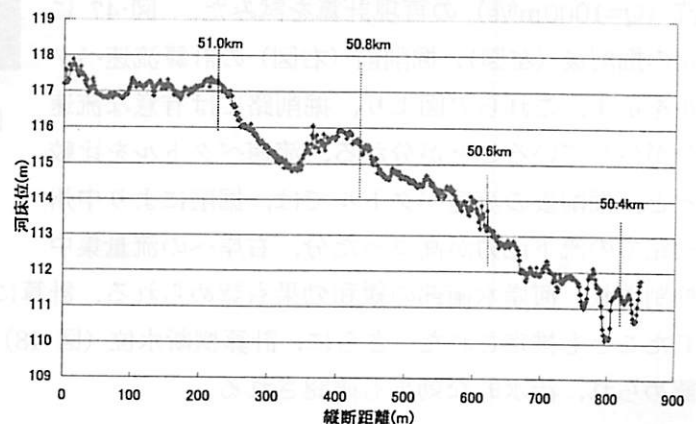


図-42 中州掘削前の縦断地形



図-43 中州内の掘削箇所

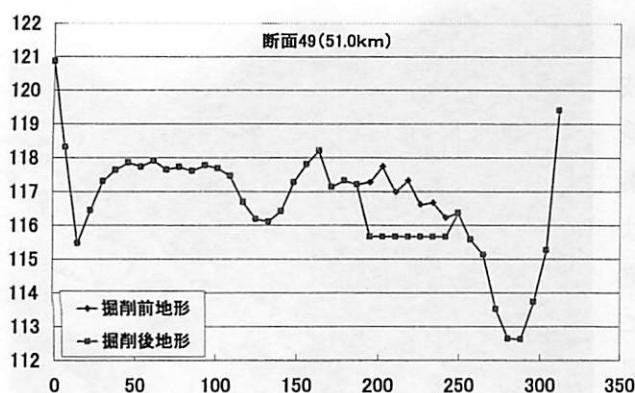


図-44 掘削の横断面 (51.0km)

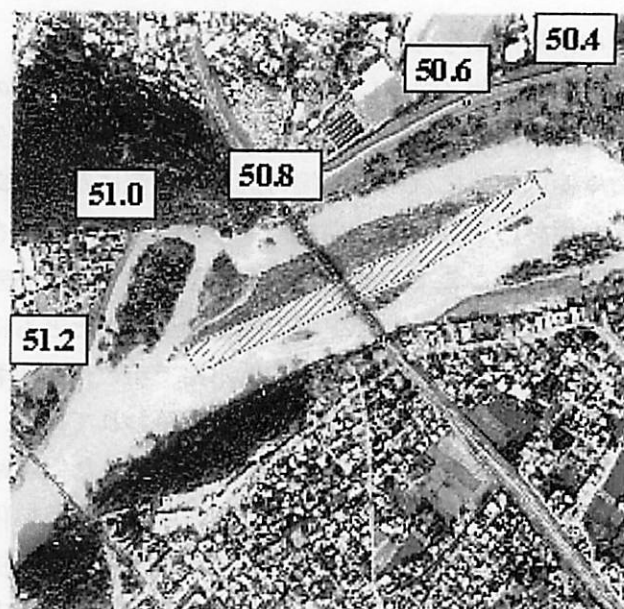


図-45 台風9号出水中の中州
(斜線部が掘削箇所で出水が導かれた)

4-2 台風9号出水による中州の洪水攪乱

さて、掘削工事後、中規模な出水を平成19年9月6日台風9号により経験した。流量規模は対象中州上流地点にある高津戸での流量観測により約 $1000\text{m}^3/\text{s}$ である。これは低水路満杯流量をやや越える規模である。出水中の状況を示す航空写真を図-45に示す(斜線部が掘削路に相当)。また、図-46に掘削路を流れ方向に見た9号出水前、出水中(ピーク流量時)の状況を示した。これらより出水時には掘削路に流水が導かれ完全に流路化した。また、今回掘削しなかった中州部分(掘削路左岸側、図-45参照)は全く冠水していないことも確認され、掘削しなければ平成13年出水時(台風9号出水規模よりもやや大きい)と同様、中州上で洪水の攪乱が全く生じないこと状況となる。

次に、対象区間(渡良瀬川 52.2 から 50.2km)において一般化座標系平面解析を用い台風9号ピーク時の洪水流($Q=1000\text{m}^3/\text{s}$)の再現計算を試みた。図-47に中州の掘削後(左図)、掘削前(右図)の計算流速ベクトルを示す。これらの図より、掘削路には有意な流速成分が生じていることが分かる。流速ベクトルを比較すると、掘削後の流速ベクトルでは、掘削により中州掘削路での流下能力が高まった分、右岸への流量集中が抑制され、河岸水衝部の緩和効果も認められる。計算によれば、中州の掘削路には最大 2.5m/s の流速が生じたことも推定された。さらに、計算横断水位(図-48)を掘削の有無で比較すると、掘削による水位低下が認められ、治水的な効果も確認される。

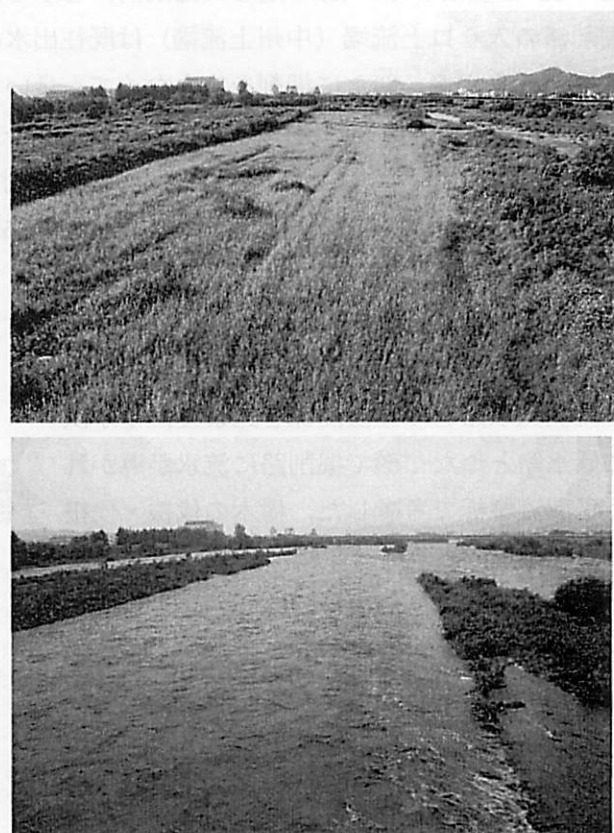


図-46 中州内の掘削箇所における出水前後の状況
(図-45 中の中州にかかる橋梁から下流を見る)

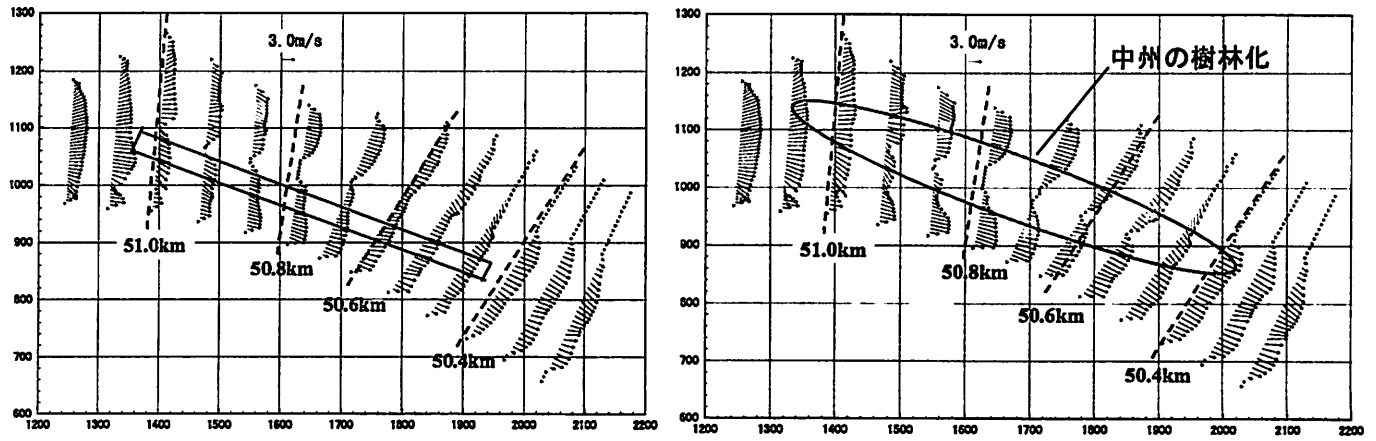


図-47 計算流速ベクトル（左；掘削した場合，右；掘削しない場合）

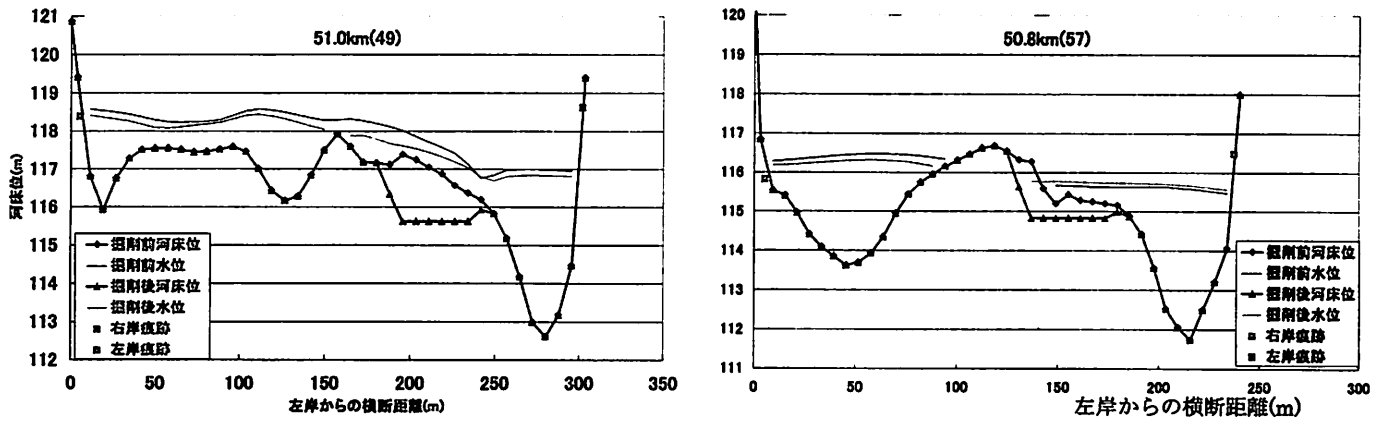


図-48 計算による横断水位の比較

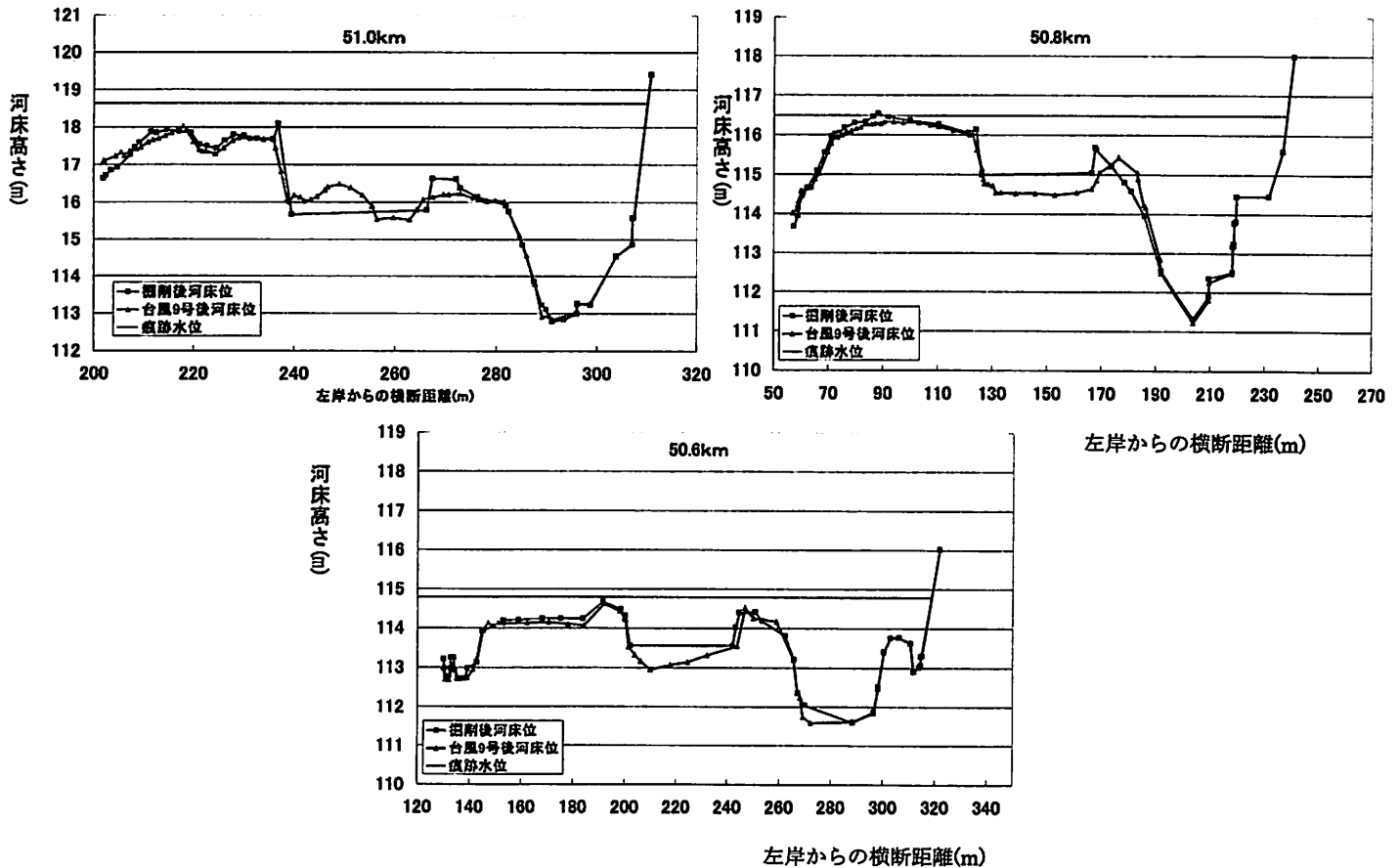


図-49 測量による出水前後の横断面形状の変化



図-50 出水後の中州掘削箇所の礫床化

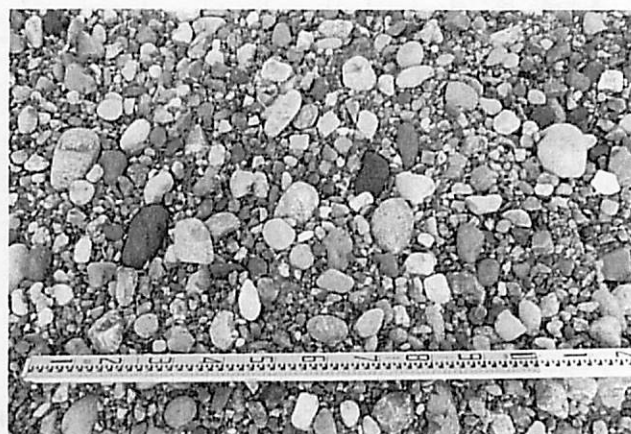


図-51(a) 出水後の中州掘削箇所の河床材料

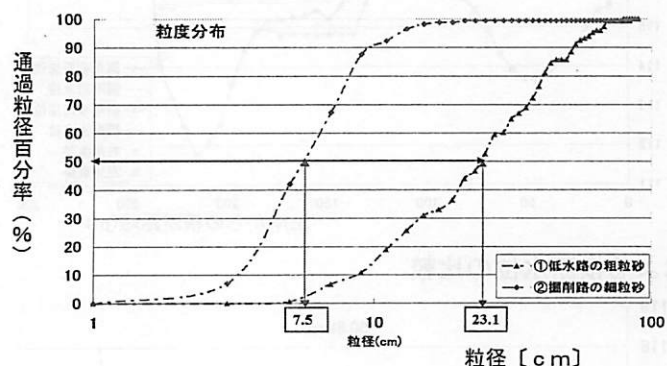


図-52 出水後の河床材料の粒度分布



図-51(b) 出水後の中州低水路側の河床材料

4-3 河床変動に関する考察

さて、図-49 に掘削路上流端に近い 51.0km，中央付近 50.8km，下流端付近 50.6km 地点における台風 9 号出水前後の横断地形の測量結果を，また，図-50 に出水後の掘削部周辺の礫床化を示す．これらより掘削路内で顕著な河床変動が生じていることが分かり，掘削路上流では右岸側の側岸侵食と堆積，その下流では河床低下傾向となって掘削路は出水前に比べ急勾配化した．出水後の現地調査から求めた河床材料の状況と粒度構成を図-51,52 に示す．これより，①掘削路の右岸低水路付近では低水路の粗粒化（図-39）を示す大きな石礫が表層に露出し（図-52 より平均粒径 23cm），一方，②掘削路河床では平均粒径 7.5cm の砂礫が表層に存在し，現地調査では深さ 1 m 程度掘削して採取したがほぼ同様な粒度構成であった．今回，掘削路で有意な河床変動が生じた要因の 1 つに，中州を構成する粒度構成が低水路に比べかなり細かいことがあげられる．そこで，粒度構成を考慮した河床変動解析を行った．掘削路に図-52 の細粒分（②），低水路周辺には図-52 の粗粒分（①）の粒度を初期河床として与える（深さ方向にもこれらの粒度構成を与える）．混合砂礫の河床変動計算では河床表層に交換層を設け交換層内の粒度を k 個のクラスに分け、各粒径ごとに単位幅流砂量を算定する．粒径ごとの体積占有率を考慮した芦田・道上の流砂量式¹⁸⁾は次式となる．

$$q_{BS*k} = \frac{q_{BSk}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_k^3}} = 17 \cdot P_k \cdot \tau_{*k}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right) \quad (1)$$

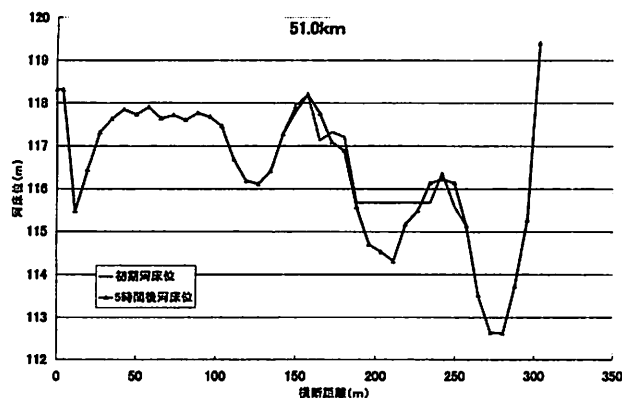


図-53 河床変動計算結果 (51.0km 横断面)

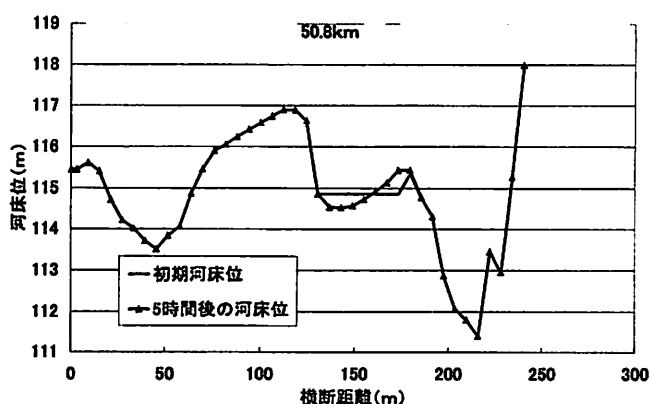


図-54 河床変動計算結果 (50.8km 横断面)

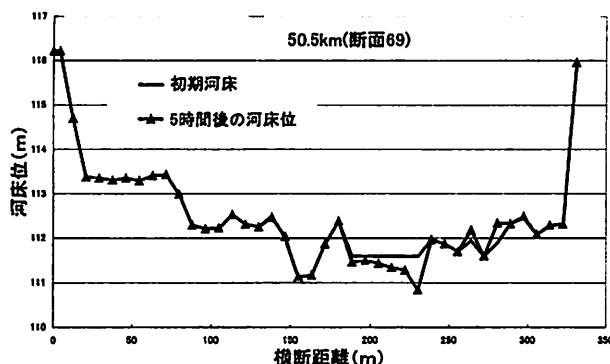


図-55 河床変動計算結果 (50.5km 横断面)

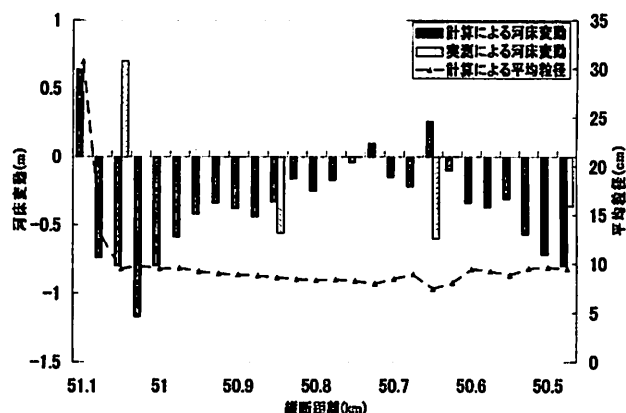


図-56 掘削路内の河床変動と粒度の縦断分布

ここに、 $\sigma/\rho \cdot 1$:河床材料の水中比重、 d_k : k クラスの粒径、 P_k : 交換層における第 k クラス砂の体積占有率、 τ_{*ck} : 粒径 k クラスの砂礫に対する無次元限界掃流力である。交換層における第 k クラスの粒径の体積占有率 P_k は河床上昇の場合(式(2))と河床低下の場合(式(3))に対して、それぞれ次のように表される¹⁹⁾。

$$P'_{k,i,j} = P'_{k,i,j} - P'_{k,i,j} \frac{\sum_{k=1}^N \Delta Z_{k,i,j}}{a} + \frac{\Delta Z_{k,i,j}}{a} \quad (2)$$

$$P'_{k,i,j} = P'_{k,i,j} - PB'_{k,i,j,L} \frac{\sum_{k=1}^N \Delta Z_{k,i,j}}{a} + \frac{\Delta Z_{k,i,j}}{a} \quad (3)$$

ここに i,j : 計算平面格子の番号、 $\Delta Z_{k,i,j}$: 各計算点の第 k クラス砂の Δt 間における河床変動量、 $PB_{k,i,j}$: 貯留層における第 k クラスの粒径の体積占有率、 L : 貯留層厚である。貯留層²⁰⁾において各層での第 k クラスの粒径の体積占有率を記憶させる。交換層の底面にかかる貯留層を第 L 層とすると、河床上昇の場合は第 L 層に交換層からの堆積分が加えられ、これに応じて粒度分布が変化する。一方、河床低下の場合には低下体積分が第 L 層から交換層に移動し(式(3)の右辺第2項)、貯留層の粒度分布は変化しない。河床変動計算を進めるにあたって、各粒径がそれぞれ交換層にあるもの以上に出ていかないという条件を課し、台風9号出水規模の流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ で一定に5時間通水した。また、上流端では河床変化がないように設定し下流端は一定水位のままとした。

図-53 から図-55 に計算された河床変動後の地形と変動前の地形の横断図を示すと、いずれの断面では河床低下傾向にあり、それも掘削路内で生じている。図-56 は掘削路内の河床変動量を縦断方向にプロットしたもので(棒グラフ)、合わせて平均粒径の値(点線)も示した。計算結果では、掘削路流入付近で堆積傾向となった。これは上流側低水路からの粗い石礫分①が掘削路内で掃流できず堆積したと考えられる。その下

流区間では逆に河床低下傾向が顕著となり、さらにその下流にかけて河床低下は鈍化してくる。掘削路内の河床材料の平均粒径は初期の細粒分（図-52の②）よりやや大きくなった。掘削路流入付近での大粒径材料①による堆積傾向は掘削路への流砂供給を抑制し、流砂の非平衡性からその直下流で顕著な河床低下を引き起こすが、掘削路内にある細粒分（②）の流砂量が次第に多くなることで非平衡性が緩和されてくる。洪水後の河床変動（実測値）は計算結果と流下方向にずれはあるが、その傾向は対応している。掘削路の河床では深さ1m以上は②の粒度構成があるものと推測されるので、しばらくは同規模の出水を受けても同様な河床変動傾向が生じると考えられる。しかし、河床低下につれて次第に大粒径成分の表層割合が多くなるので、やがて河床低下傾向は緩和されることが予想される。

今回の台風9号出水規模では、中州掘削箇所地点においては、掘削しない場合でも冠水したが、過去において同規模度（あるいはそれ以上の）の出水が生じ中州の一部が冠水した場合でも、有意な洪水攪乱が生じず、その結果、樹木繁茂は洪水後も全く軽減されなかった。このことは単に砂礫州上を冠水させるだけでなく、出水を導くことの有意性を示すものと言える。そして、砂礫州を構成する河床材料が細粒なことで河床の攪乱を巧く誘発できることがキーポイントとなっている。すなわち、砂州の掘削工事による礫床の再生と樹林化対策にとって、そこがどんな粒度構成であるかが重要な視点であると言える。

4-4 掘削工事の効果評価

樹林化した砂州上において掘削路を設けたが、樹林化対策の第1段階としては、表層の植生を剥がし表層細粒土層の除去を行うだけでも効果のある場合もある。しかし、ハリエンジュ林が形成する多くの場合、その根茎群は表層細粒土層よりも深い礫層部まで侵入している場合が多く（図-57, 58）、礫層そのものが洪水攪乱を受ける必要がある。そのためには石礫の移動を可能とする掃流力の確保が必要で一般には掘削を行う場合が多い。ただし、低水路との比高差を小さくして砂州の冠水頻度増加をねらう掘削工事はこれまで行われてきたが、その効果は必ずしも十分に発揮していないものも少なくない。掘削部分に流水を導き、洪水攪乱を河川のダイナミズムを利用して誘発させ、樹林化の対策と礫床の再生をねらう点に渡良瀬川での掘削工事の特色があり、台風9号出水を通じてその効果が検証された。

ここでは砂州幅の約半分に近い相当大的な掘削路を設けたが、出水を砂州上に導くには、より幅の小さな掘削でも効果があるか検討しておく必要がある。効果があれば、樹木伐採に使う重機の搬入路等を掘削路として利用するなど工事費用の面でも経済的である。また、河床材料の深さ方向の粒度構成が地形のかく乱を左右する1つの要因であるため、粒度の鉛直構造についても把握しなければならない。

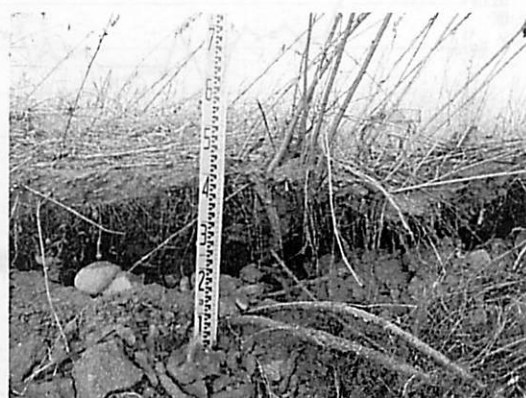


図-57 表層細粒土層と下部の礫層に伸びるハリエンジュの根茎



図-58 掘り起こしたハリエンジュの1個体から出る根茎

5. おわりに

土木学会水工学委員会では、昨年（平成19年）9月に、関東地方を襲った台風9号の調査団を設置し、主として多摩川、荒川、渡良瀬川について出水が河道に与えたインパクト調査と、これまでなされてきた治水・環境改善事業の効果評価を検討した²¹⁾。いずれの河川も礫床区間での河道内樹林化が顕著であり、今回の出水でも低水路内の砂礫州に繁茂したハリエンジュは

あまりフラッシュされていない。例えば、多摩川においては日野橋(40km)で観測史上最高の水位、流量を記録し、その下流で高水敷の被災（高水敷侵食と高水敷保護用籠マットがロール状に巻き上がった）が生じたが、その地点は低水路蛇行流れが低水路法線にあたる箇所であり、かつ対岸にある比高の高い樹林化した砂礫州によって低水路幅が縮小されていて、平面流解析からピーク流量時の低水路で 6m/s を越える高流速が生じている。こうした出水においても砂礫州の上のハリエンジュは根がついた状態での倒木、傾斜木として残存しており、ほとんど流出していない。むしろ、動的樹林化にみる速やかな林の再生が懸念された。さらに、厄介なことは、比較的大きな出水によってハリエンジュの倒木、傾斜木を生む



図-59 ハリエンジュの倒木、傾斜木と表層を覆う粗大な石礫材料

砂礫州の表層に粗大な粒径成分が堆積することである。埋没したハリエンジュは速やかな萌芽を見せる一方、埋没体はやがて根茎化する。それは粗大な石礫によって覆われていることによっていつそう流出しにくくなっている。渡良瀬川では、低水路の中で比較的、攪乱を受けやすい砂礫州でこうした事例がしばしば観察されている（図-59）。それは河川地形とともに、河床材料の観点から樹林化を考える格好の研究材料と著者は思っている。

本稿を終えるにあたって述べておきたいことは、著者は最近の外来種駆除の動きのように、人為的にハリエンジュを根こそぎ駆除したいとは決して思っていないことである。5月の河川調査で白く甘い香りを漂わせるハリエンジュの花に出会うのが楽しみであるし、何よりこの研究を通じて植物の生き方、生命力を教えてくれた。河川の植生化について問題は何かと言えば、それはバランスの崩れであり、河川地形、河床材料、それに見合う洪水かく乱と河川植生の成立の間に、本来あるべきバランスが崩れていることによる。その崩れは河川環境の側面だけではなく治水的な側面でも問題を生んでいる。

参考文献

- 1) 清水義彦・小葉竹重機・赤羽忠志・藤田浩・小松みわ子：渡良瀬川中流域における河道特性と河道内樹林化，第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，第4巻，pp.129-134，1998.
- 2) 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おける一考察，水工学論文集，第43巻，971-976，1999.
- 3) 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，河川技術に関する論文集，第6巻，59-64，2000.
- 4) 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，1099-1104，2001.
- 5) 清水義彦・岩見収二・石川陽介・佐藤文泰・磯田忠生・遠藤武志：洪水攪乱の誘発を目的とした中州掘削工事の効果評価とその考察，河川技術論文集，第14巻，pp.169-174，2008
- 6) 萱場祐一，島谷幸宏（1995）：扇状地河川における地被状態の長期的変化とその要因に関する研究，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，土木学会水理委員会基礎水理部会，pp.191-196，1995.
- 7) 建設省治水課・土木研究所：河道計画に関する研究（その3），第45回建設省技術研究会，pp.36-37，1992.
- 8) 河道変遷研究会（1998）：河道変遷特性に関する研究，（財）河川環境管理財団，pp.124-137

- 9) 河川生態学術研究会・多摩川研究グループ（2000）：多摩川の総合研究（永田地区を中心として），pp.133-156.
- 10) 清水義彦・長田健吾・高梨智子：交互砂州河道における低水路形成と河岸侵食に関する数値解析，水工学論文集，第 48 巻，pp.1027-1032, 2004.
- 11) 李參熙，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，42 巻，pp.977-982,1999.
- 12) 藤田光一・李參熙・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-65,2003.
- 13) 瀬崎智之・服部敦・近藤和仁・藤田光一・吉田昌樹：礫州上草本植生の流失機構に関する現地観測と考察，水工学論文集，44 巻，pp. 825-830, 2000.
- 14) 植木真生・福島雅紀・山下武宣：河道掘削および砂礫の敷設供給に対する河床の応答，河川技術論文集，第 13 巻，pp. 381-386, 2007.
- 15) 眞田淳二・浦上将人・前野詩朗・渡辺敏：2006 年 7 月出水を経験した旭川下流部礫河原再生箇所モニタリング結果と考察，河川技術論文集，第 13 巻，pp. 129-134, 2007.
- 16) 竹内義幸・青木研・渡邊雄二・加村大輔：四万十川入田地区における砂礫河原再生のモニタリング中間結果について，河川技術論文集，第 13 巻，pp. 119-122, 2007.
- 17) 藤田光一：河道変化を治水・環境保全の接点においた川づくりの考え方，水工学夏期研修会テキスト，水工学シリーズ 06-A-8, A-8-1～8-16，2006.
- 18) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 206 号，pp. 55-63, 1977.
- 19) 平野宗夫：Armoring をともなう河床低下について，土木学会論文集，第 195 号，pp. 55-65, 1971.
- 20) 社・砂防学会編：山地河川における河床変動の数値計算法，pp. 49-51, 山海堂，2000.
- 21) 土木学会水工学委員会台風 9 号調査団：平成 19 年台風 9 号出水の調査と今後の河川維持管理のあり方に関する調査研究，2008.