

森林化・樹林化の進んだ河道における 河川景観管理に関する研究

1. はじめに
2. 碓床河川における最近の河相特性
3. 河道内樹林化について
 - 3.1 樹林化の実態
 - 3.2 州の現地調査
 - 3.3 樹林化の形成過程とシナリオ
4. 州の樹林化が周辺地形・粒度構成に与える影響
5. 樹林化が流況特性に与える影響
6. まとめと今後の課題

参考文献

群馬大学 工学部

清水 義彦

群馬大学 工学部

小葉竹重機

桐生自然觀察の森・運営委員長

津久井芳雄

1. はじめに

近年、河川内の植生がしばしば樹林化して河川景観そのものが本来の姿から変質している。ここで言う河川景観とは、単に視覚的意味でのものではなく、水流・流砂・地形と植生の相互作用系が河川空間を創造し、そこに生態系が成立している姿をさす¹⁾。そして、今日の河川整備・管理の理念はこうした河川景観と調和のとれた形で、河川の満たすべき機能、すなわち、治水・利水・環境をバランスよく整備・管理することにある。ところで、河道に与える外力インパクトの低減、すなわち、降雨自身の問題の他に、上流域での砂防施設の向上、ダム・貯水池での洪水管理と土砂の扦止、様々な低水の需要などによって、植生の繁茂が進み、河道内森林化・樹林化の問題がクローズアップされてきた。こうした河道内植生が繁茂した状況は、見慣れてくるとそれが緑豊かな自然環境のごとく認識されてしまうことも少なくない。しかし、場合によってはそれが河道において必ずしも自然な姿ではなく、河相そのものの固有な性質やそこでの潜在的な生態系、そして河川の満たすべき機能を消失させていることも強く認識しなければならない。

こうした観点に鑑み、本研究では樹林化の顕著な礫床河川に注目して、樹林化を促す最近の河道特性、現地調査にもとづく樹林化の実態把握、及び樹林化の形成過程の考察を行い、そのシナリオを作成する。一方、水流・流砂・地形の相互作用系に与える樹林化の影響は樹林化河相形成を知る上で興味深い問題で、本研究では、その素過程についての理解を河床変動計算を用いた数値解析より進める。

さらに、河道管理の問題としては、樹林化が流況特性に及ぼす影響評価が重要である。樹林化の進んだ河川を例に、現地の樹木密生度にもとづいて、一般化座標系平面2次元流計算を適用した数値解析からその流況特性を定量的に評価する。そして、最後に、本研究から得られた成果にもとづいて適切な樹木管理のあり方についての考察をまとめる。

2. 磯床河川における最近の河相特性

単列交互砂州地形から特徴づけられる磯床河川の中には、堤防による拘束によって平面変化が緩慢で、堤防付近の縦侵食（深掘れ部の発生）と、これを繋ぐ形でみお筋を形成しているものが多い。近年、洪水発生頻度や規模の低減、また、高水敷整備、河道横断構造物の存在などにもよって、砂州地形の移動を伴うような河床変動が生じにくく、とくに磯床では砂州の固定化が顕著に進んでいる河道も少なくない。ここでは、そうした特徴が抽出された利根川水系渡良瀬川の近年の河道特性（昭和40年以降）をあげて、砂州の固定化（低水路の固定化）に伴う河道特性を概観する。

対象とした渡良瀬川（流域面積2,600 km²）の調査区間は利根川合流点からの52.4 kmから43 kmの約10 kmで、ここには河岸砂州や中州によって形成された陸地部に豊富な植生が存在している。平均河床勾配1/140、平均粒径71.8 mmで、セグメント特性が1に分類される磯床河川である。図1は調査区間の平面形の変遷を示したもので、過去にはやや複列的な砂州形態であったものが、最近では明確な低水路を

もつ単列型に変わってきた。しかも、堤防付近の水衝部位置の変化はなく、そこでは経年的な縦侵食が生じている。51.4 km付近は狭窄部となってその下流には安定して中州が形成されている。狭窄部の存在や堤防による横侵食の抑制によって、平面形の経年的な変化はあまり生じていないことが特徴である。**図2**は調査区間上流（高津戸、56 km）での年最大流量の時系列を見たもので、調査区間での計画流量は3500 m³/sである。同図には草木ダム（78 km）によるダム調節を除いた流量も併せて示している。不等流計算によれば約1000 m³/s程度がこの付近の現況の低水路満杯流量であり、低水路満杯か、あるいはそれをやや越える程度の出水に抑えられ、ダム調節は治水上効果的に機能している。一方で、この規模の出水では、砂州のフラッシュはほとんど起こらない。こうした流量規模が後述するように河道内樹林化を産む一つの要因となっている。

さて、建設省が実施している河道の縦横断測量、工事記録及び航空写真などのデータベースをもとに、河道の特性変化を大まかに掴むため、**表1**に示す形で整理してみた。ここで、すべての年度にわたって上記の調査データが整っているわけではないので、河道変化が緩慢でその間の差違を無視し得る年度を一つの期間として扱った（期間1（昭和41～51）、期間2（昭和52～平成2）、期間3（平成3～7））。**表1**において、断面形状の欄に、“複”とあるのは、その期間において複断面と見なすことでき、変化の大きさとして示される最大深さ（H.W.L.から断面内最深河床までの深さ）、最大高低差（断面内の最大比高差）は、これらを調査区間内の各断面について調べてみたのち、相対的に大、中、小の3つのランクに分けている。低水路の位置はその期間に右岸側、左岸側、流路中央のいずれにあるか、また、現況断面が複断面であるものは、低水路、高水敷に相当する領域の経年的河床変動の傾向を矢印で示した。

こうした表の作成より、平面形では経年に低水路が一本化して交互に左右岸につながること、低水路の河床低下・高水敷の上昇から横断面形の複断面化が生じていることなど、河道変化の大まかな特徴が抽出された。**図3**はそれぞれの期間における測量横断面図を重ねあわせたもので、期間1（昭和46年）に比べると、最近では断面内の高低差が顕著になり、低水路、高水敷の区分が明瞭になってきている。**図4**は、現況（平成8年）と昭和46年、及び現況と昭和56年の測量横断面から求めた面積変化（河床変動量）を示したものである。これを見ると、縦断方向に、河床低下、河床上昇が交互に生じ、この程度のスパンでほぼバランスしているようである。一方、この間、砂州の移動がほとんどないことから、現況の断面を基準にして高水敷、低水路に分割してそれぞれの面積変化から河床変動を評価したものが**図5**である。これから**図4**の河床変動のトレンドは低水路での河床低下傾向、高水敷での上昇傾向から構成されていることが分かる。こうした複断面化傾向によって低水路満杯に必要な流量規模は経年に大きくなっている（**図6**）。**図7(a)、(b)**は同じ流況（平成9年流況を与えた）のもとに、同一地点での横断形の経年変化によって冠水範囲と頻度がどの程度変わるかを見たものである。昭和46年においては水面域が広く中州も冠水を経験しているが（**図7(a)**）、平成8年の断面において水面域は低水路内に限定され、水際や水面の広さも少ない（**図7(b)**）。

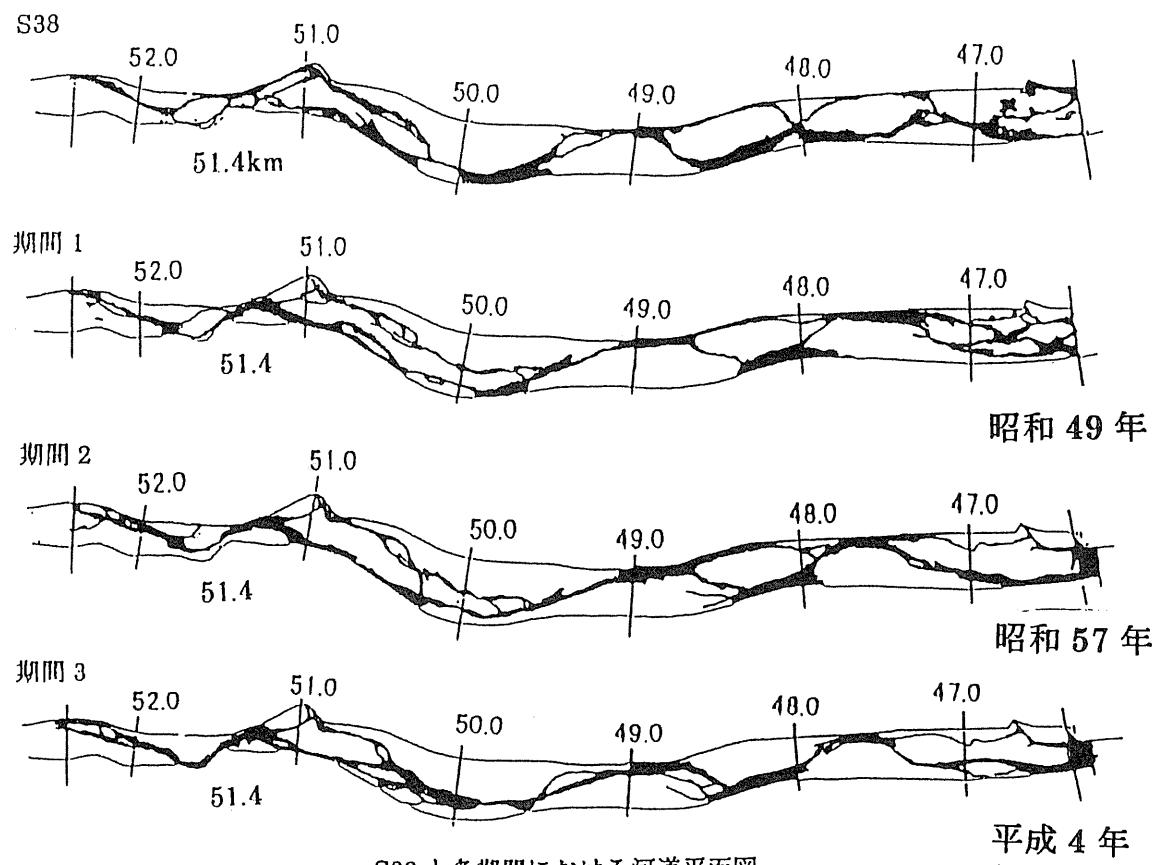


図 1 渡良瀬川の平面形の経年変化

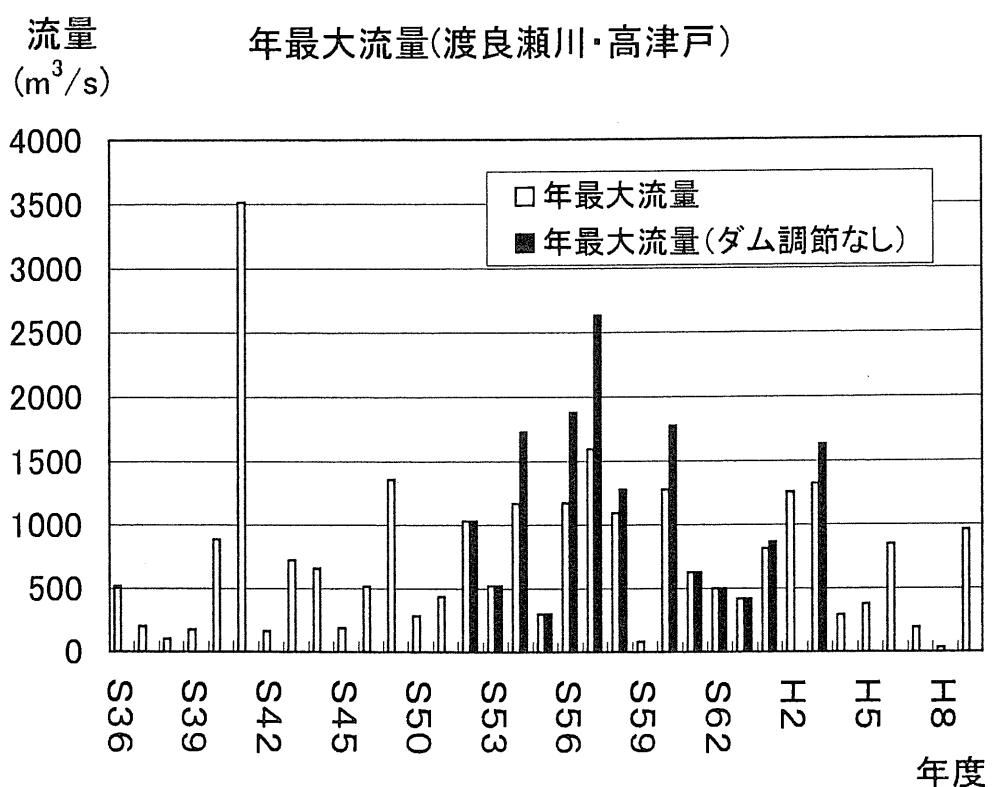


図 2 年最大流量の時系列

表1 調査資料のまとめ

河道形状の変遷について

地点 (km)	断面形状		変化の大きさ		水路位置の概略図						河床の上下変動		人工的な地形変化に関する要因 (年、位置、工事内容)	
	期間名		最大	最大	期間1		期間2		期間3		低水路	高水敷		
	1	2	3	深さ	高低差左	中	右	左	中	右	左	中		
46.4				大	中	○		○	○	○	↓	↑		
46.6	複	複	複	大	大	○	○	○	○	○	↓	↑	期間1~2左岸 グラウンド整備 S62 高水敷伐採工事	
46.8	複	複	複	中	大		○		○	○	↓↑	↑	※ H6左岸 H1中州 高水敷伐採工事	
47	複	複	複	中	中	○	○	○	○	○	↓↑	↑	※ H6左岸 H1中州 高水敷伐採工事	
47.2	複	複	複	少	中	○		○		○	↓	↑	H6左岸 高水敷伐採工事	
47.4	複	複	複	大	大	○		○		○	↓	↑↑	H6左岸 高水敷伐採工事	
47.6	複	複	複	中	中	○	○	○	○	○	↓	↑	S63右岸 高水敷伐採工事	
47.8	複	複	複	少	少	○		○	○	○	↓↑	↓	H4右岸 河道堆積土砂除去工事	
48	複	複	複	中	少	○	○	○	○	○	○	↓	↑	S63中州 高水敷伐採工事
48.2	複	複	複	中	大	○	○	○	○	○	↓	↑	H2左岸 高水敷整正工事 期間1~2中州 S63中州 高水敷伐採工事	
48.4	複	複	複	超	超	○	○	○	○	○	↓	↑	※ 期間1~2中州 S63中州 高水敷伐採工事	
48.6	複	複	複	中	少	○	○	○	○	○	↓↑	↓	期間1~2中州 H1中州 高水敷伐採工事	
48.8				中	中	○	○	○	○	○	↓↑	↓↑	H1右岸 H4右岸 高水敷伐採工事	
49	複	複	複	少	中	○		○	○	○	↓	↑↑	期間1~2右岸 グラウンド整備	
49.2	複	複	複	少	中	○		○	○	○	↓↑	↓↑	期間1~2右岸 グラウンド整備	
49.4	複	複	複	中	中	○	○		○	○	↓↑	↑	期間1~2右岸 グラウンド整備	
49.6	複	複	複	中	中	○	○		○	○	↓↑	↑	期間2~3左岸 グラウンド整備	
49.8	複	複	複	中	中		○	○	○	○	↓↑	↓↑	期間1~2左岸 グラウンド整備	
50	複	複	複	大	大	○		○	○	○	↓↑	↓	期間1~2左岸 グラウンド整備	
50.2	複	複	複	中	少		○	○	○	○	↓↑	↓	H5中州 堆積土砂除去工事	
50.4	複	複	複	中	少	○	○	○	○	○	↓	↑	期間1~2左岸 高水敷伐採工事 H5中州 堆積土砂除去工事	
50.6				少	少	○	○	○	○	○	↓	↑	期間1~2左岸 高水敷伐採工事	
50.8	複	複	複	中	中	○	○	○	○	○	↓	↑	※ 期間1~2左岸 H1中州 高水敷伐採工事	
51	複	複	複	少	中	○	○	○	○	○	↓↑	↑	H9中州 高水敷伐採工事	
51.2	複	複	複	少	中	○		○	○	○	↓	↑		
51.4				中	中	○		○	○	○	↓	↓		
51.6	複	複	複	中	中	○	○	○	○	○	↓	↑	H7左岸 高水敷伐採工事	
51.8	複	複	複	少	中	○	○	○	○	○	↓	↑↑	H7左岸 高水敷伐採工事	
52	複	複	複	少	中	○		○	○	○	↓	↓		
52.2				少	少	○	○	○	○	○	↓	↑		
52.4	複	複	複	少	中	○		○	○	○	↓	↑		

河床変動の表示記号
↓:洗掘 ↑:堆積 ↓↑:両方 ※:なし

断面形状の表示記号
単断面:無記入
複断面:「複」と記入

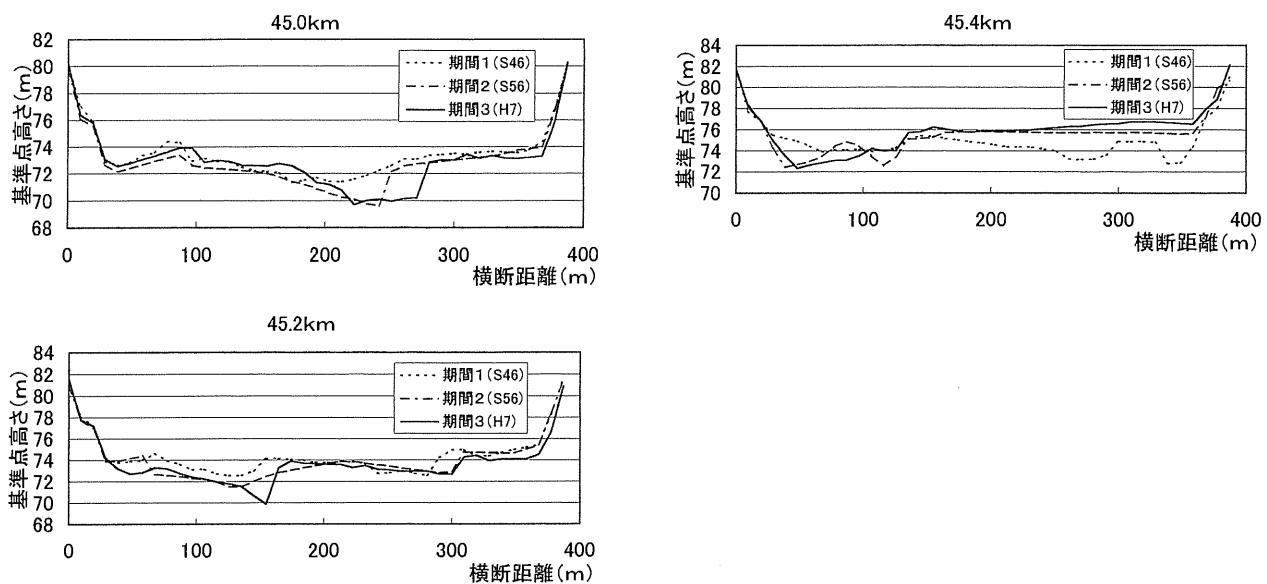


図3 横断面の経年変化

横断面内の河床変動

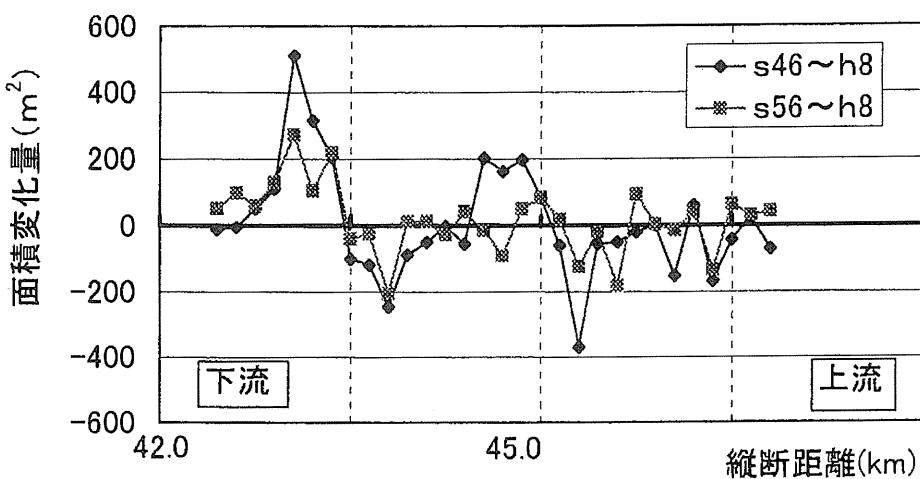


図4 経年的な横断面積の変化（河床変動）

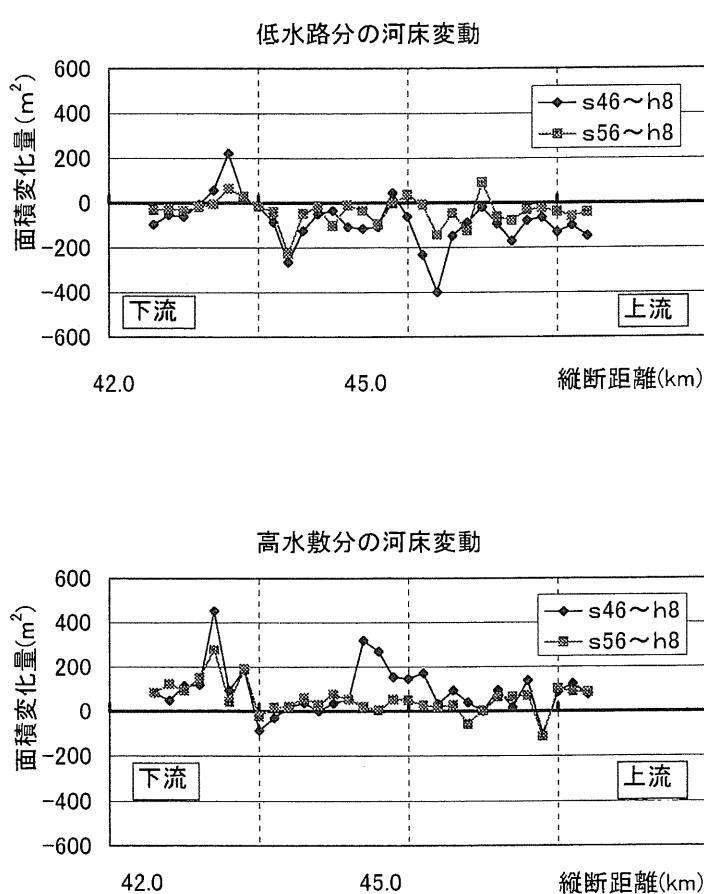


図5 低水路・高水敷分の横断面積の経年的な変化(河床変動)

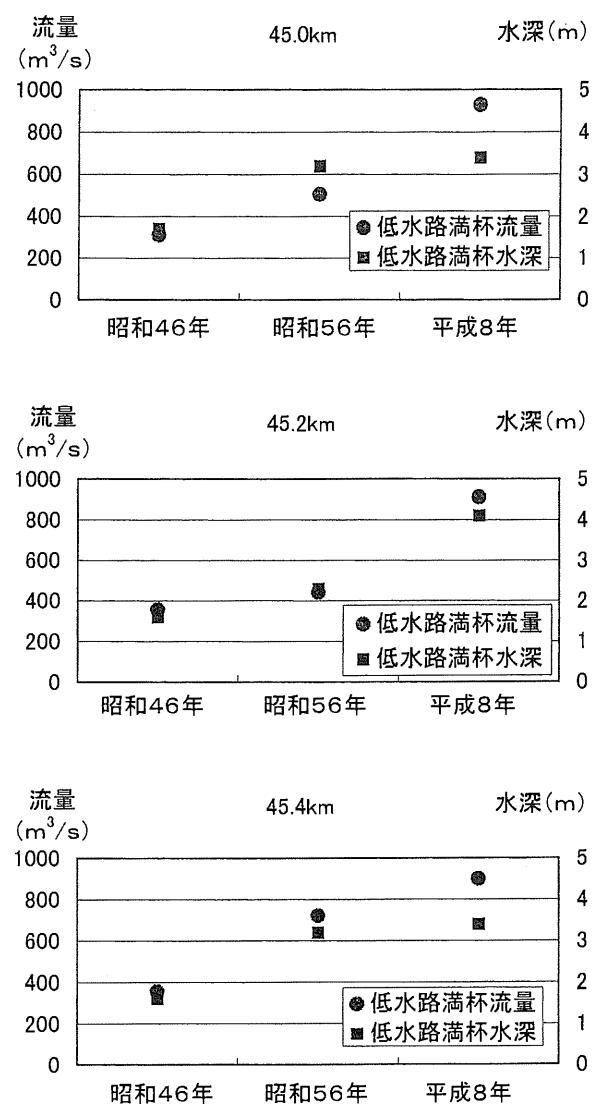
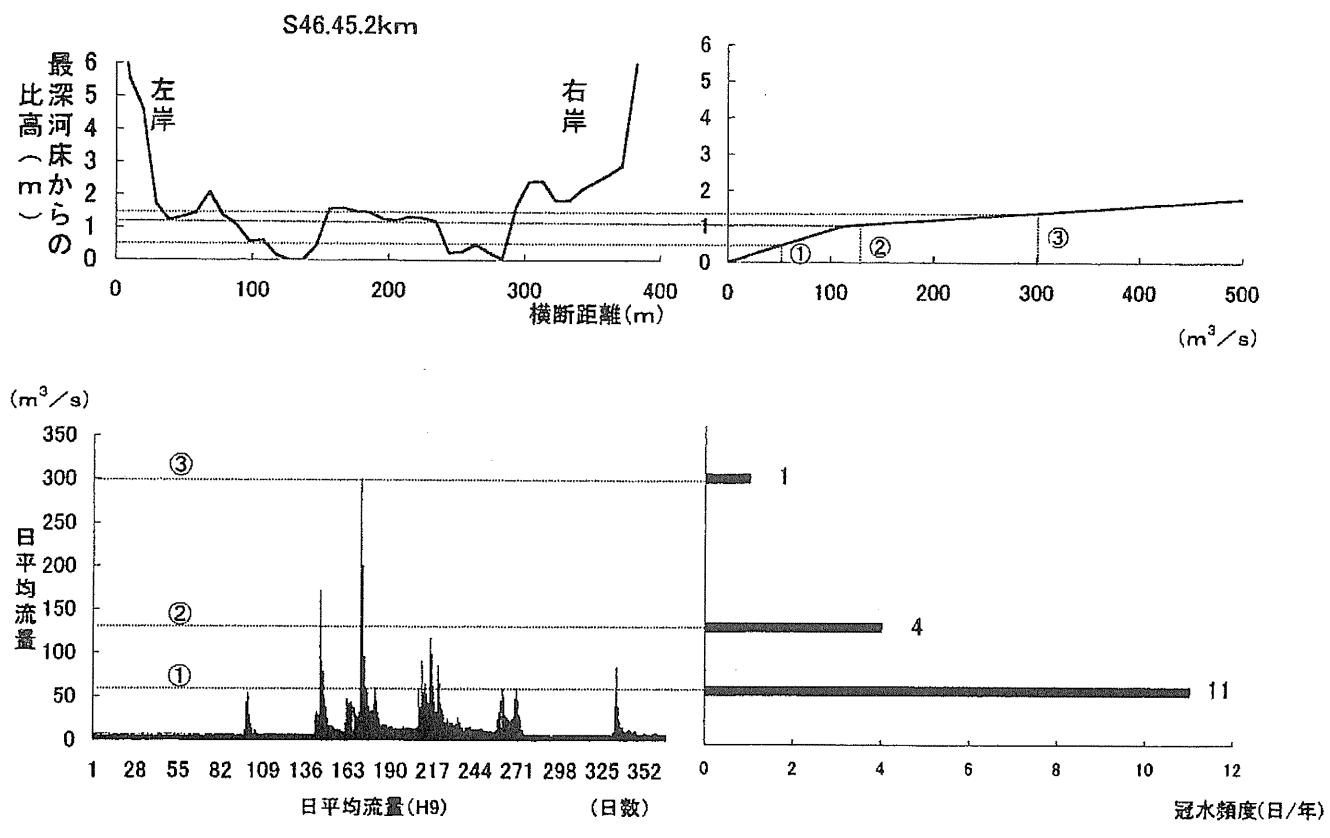
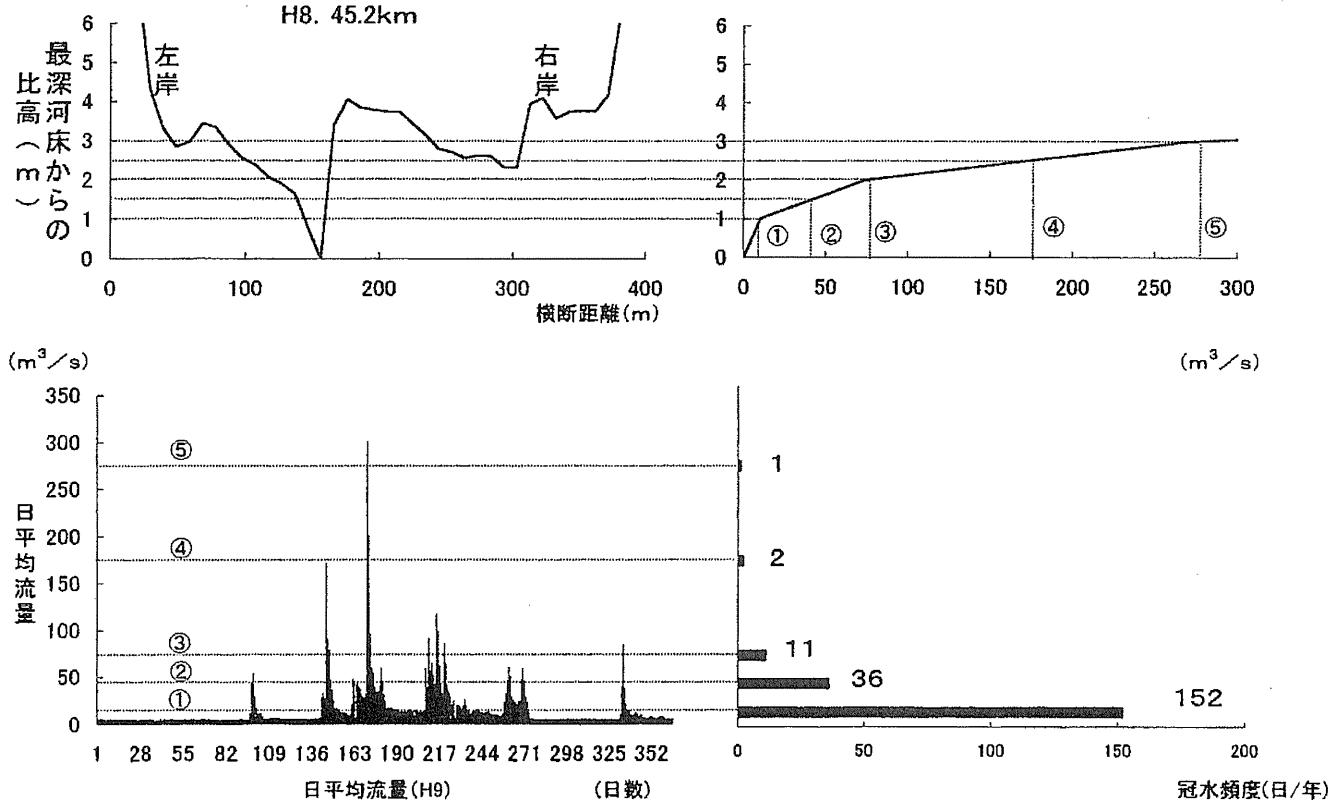


図6 低水路満杯となる流量規模の経年的なちがい



(a) 昭和46年の横断面



(b) 平成8年の横断面

図7 同一流量規模 (H 9) による冠水頻度のちがい (昭和 46 年と平成 8 年の横断面の比較)

3. 河道内樹林化について

近年、河道内植生の著しい繁茂によって森林化・樹林化が進み、河川管理上の懸案事項となっている箇所が少なくない²⁾。とくに、礫床河川特有の玉石川原が草本類、木本類によって占有されてくる状況は河相固有の景観構造とともにそこでのハビタートをも変質させている。さらに、河道内の森林化・樹林化と流れ、土砂輸送との相互作用系が生み出す地形変化、樹林化した状況で大規模出水時の疎通阻害の懸念など様々な水理学的問題があり、これらに対して十分な解答が得られていないのが現状である。本節では、セグメント1の河相をもつ礫床河川の樹林化として、渡良瀬川からその実態と形成過程を考察する。ここでは森林化・樹林化を引き起こす代表種としてハリエンジュ（ニセアカシア）に注目している。

3.1 樹林化の実態

対象とした渡良瀬川の調査区間（利根川合流点からの52.4 kmから43 kmの約10 km）では、ハリエンジュやヤナギ類に占有された交互砂州や中州、高水敷が豊富に存在している（写真1）。

そこで、調査区間内の幾つかの州に注目して樹林化の進行状況を調べた。写真2に注目した州の例を示す。図8(a)、(b)は州に占める植生地、裸地の割合を経年的に示したもので、先述した3つの期間で表現した（期間1：昭和41から51まで、期間2：昭和52から平成2まで、期間3：平成3から平成7）。いずれも冬季に撮影された過去の航空写真より求めたものであるが、年輪調査や伐採記録などから判断して、その植生地のほとんどがハリエンジュの樹林である。図8(a)より、陸地部（州）の面積拡大とともにその中の樹林地の占める割合が経年的に増加していることが分かる。

図9には、州における植生地の経年占有力状況を平面形（いずれも州の左側が上流側で横断測量側線も入れた）で示し、図10には対応する定期横断測量結果を重ねあわせた。これらの図より、植生の占有とともに州の比高が高くなり、一方、低水路の河床低下も進むことが認められる。この中で、とくに中州V（51.4 km）は狭窄部下流に位置し、上流側では狭窄部直下のため、出水によるフラッシュをしばしば受けているが（写真2参照）、下流にかけては州の比高の増加とともにフラッシュの規模、頻度が低下して安定したハリエンジュ樹林を形成している。また、陸地部の面積拡大、堆積過程（州の河床上昇）が生じていることが注目される。こうした傾向は比高差のある河道地形を産み、先に見た複断面化傾向とともに低水路固定、低水路河床低下を促進させている。



写真1 調査区間内の状況

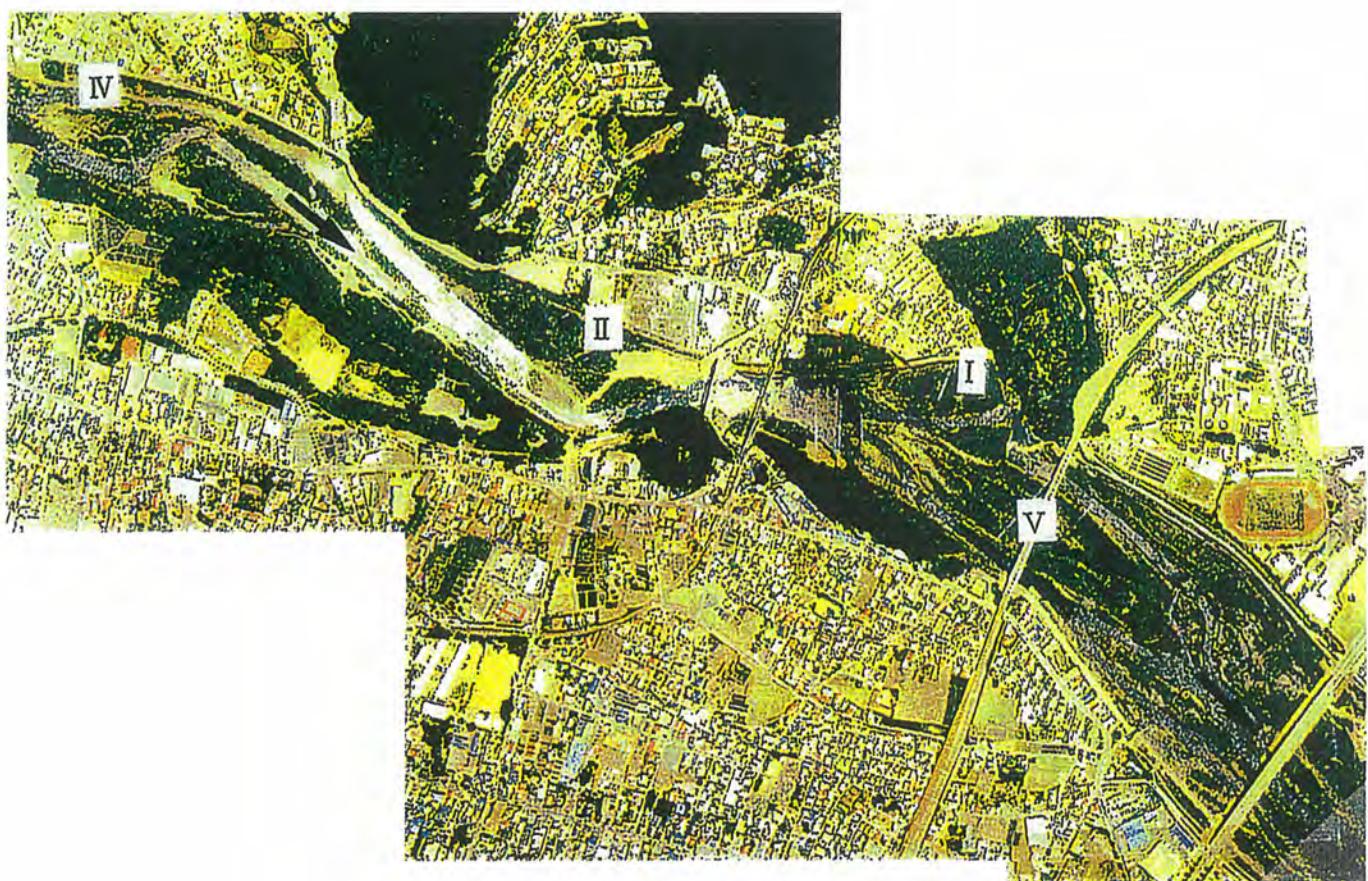


写真2 調査対象の州と植生繁茂の状況

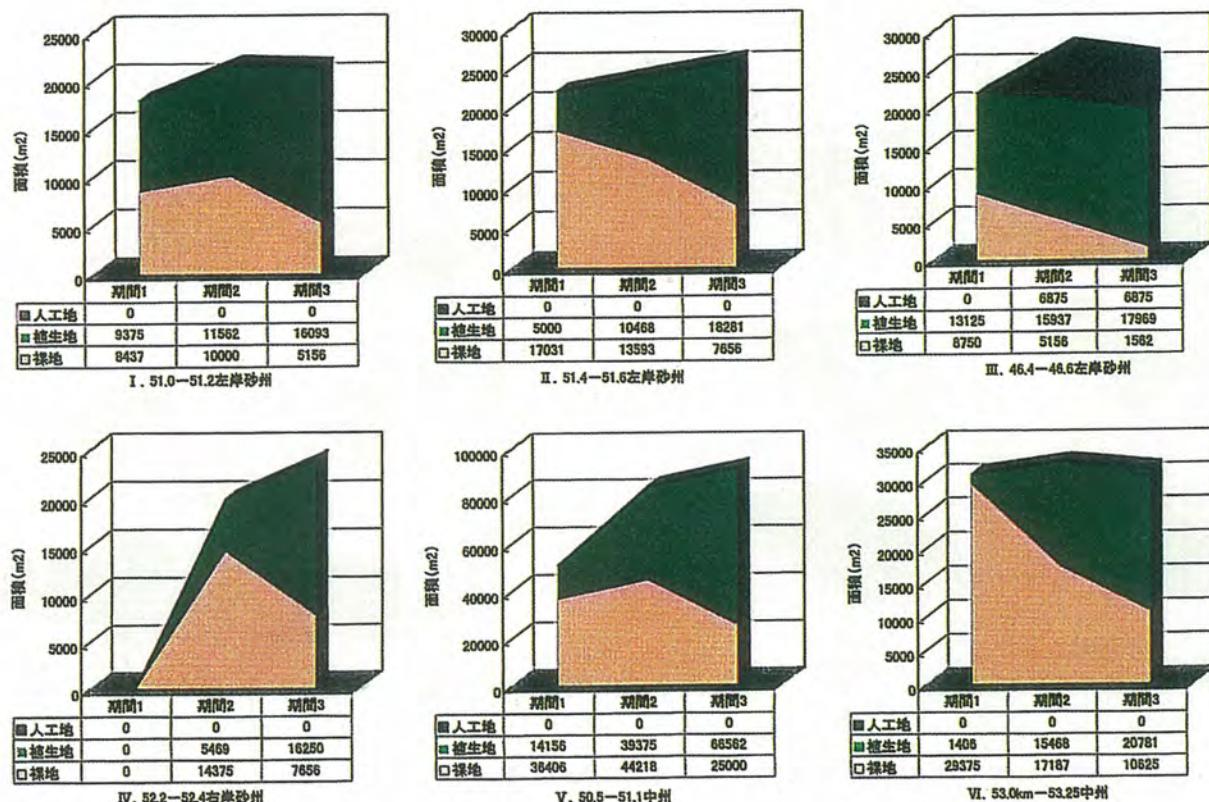


図8(a) 州における樹林地の経年的な面積変化

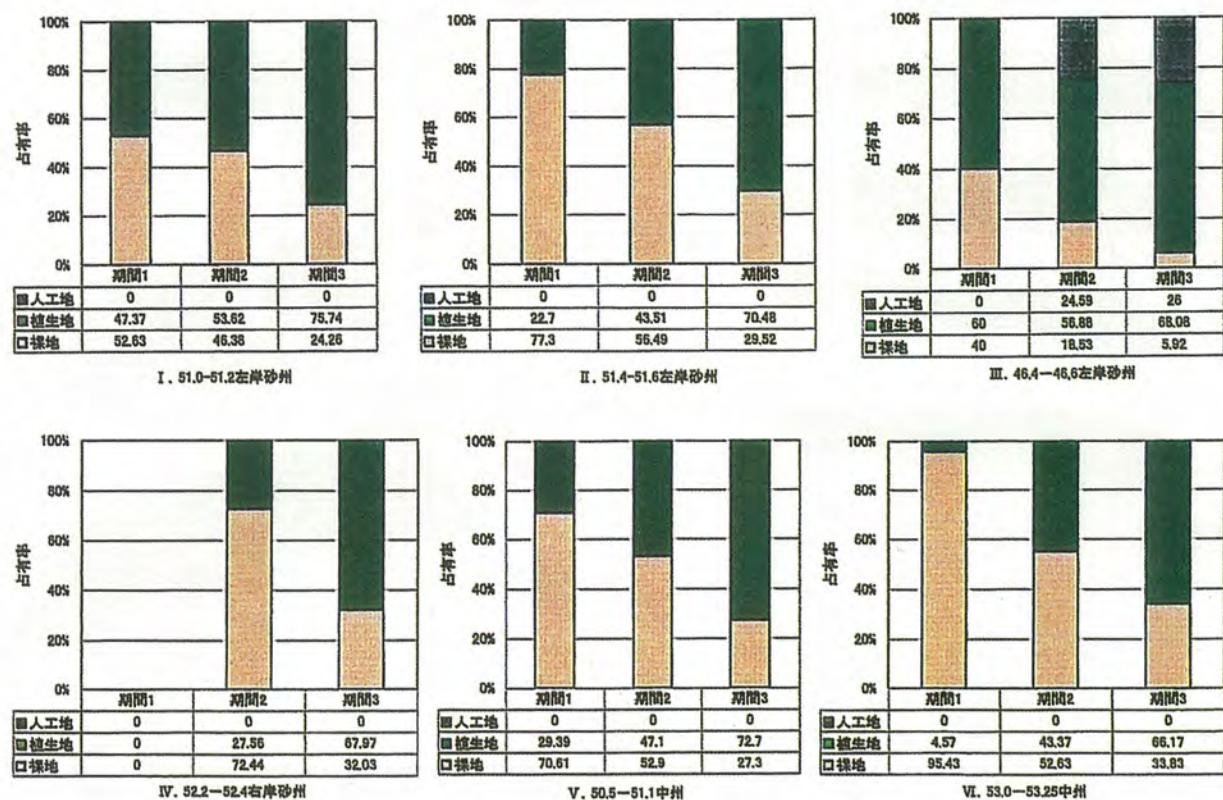


図8(b) 州における樹林地の占有割合

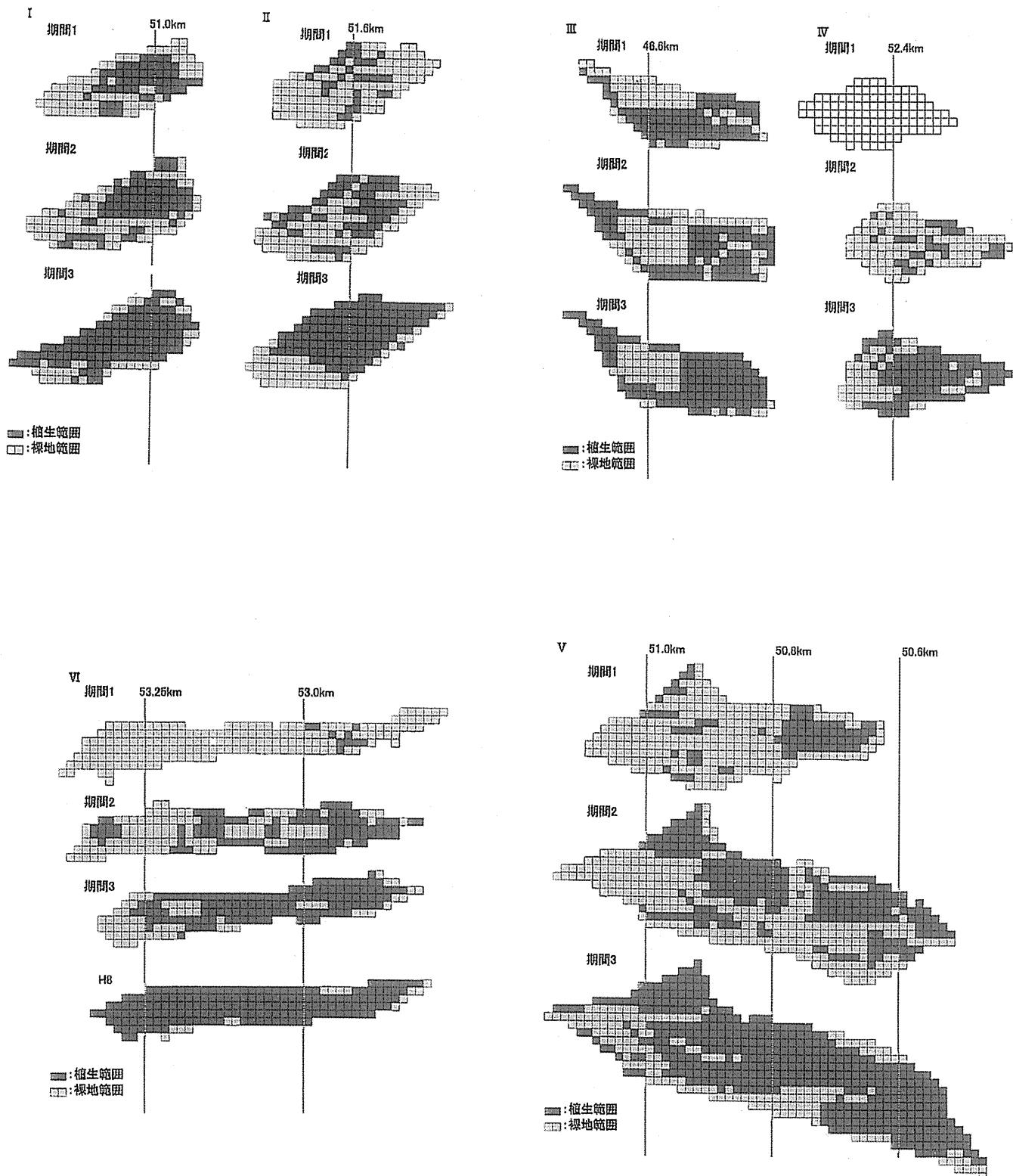


図9 州における樹林地の変遷

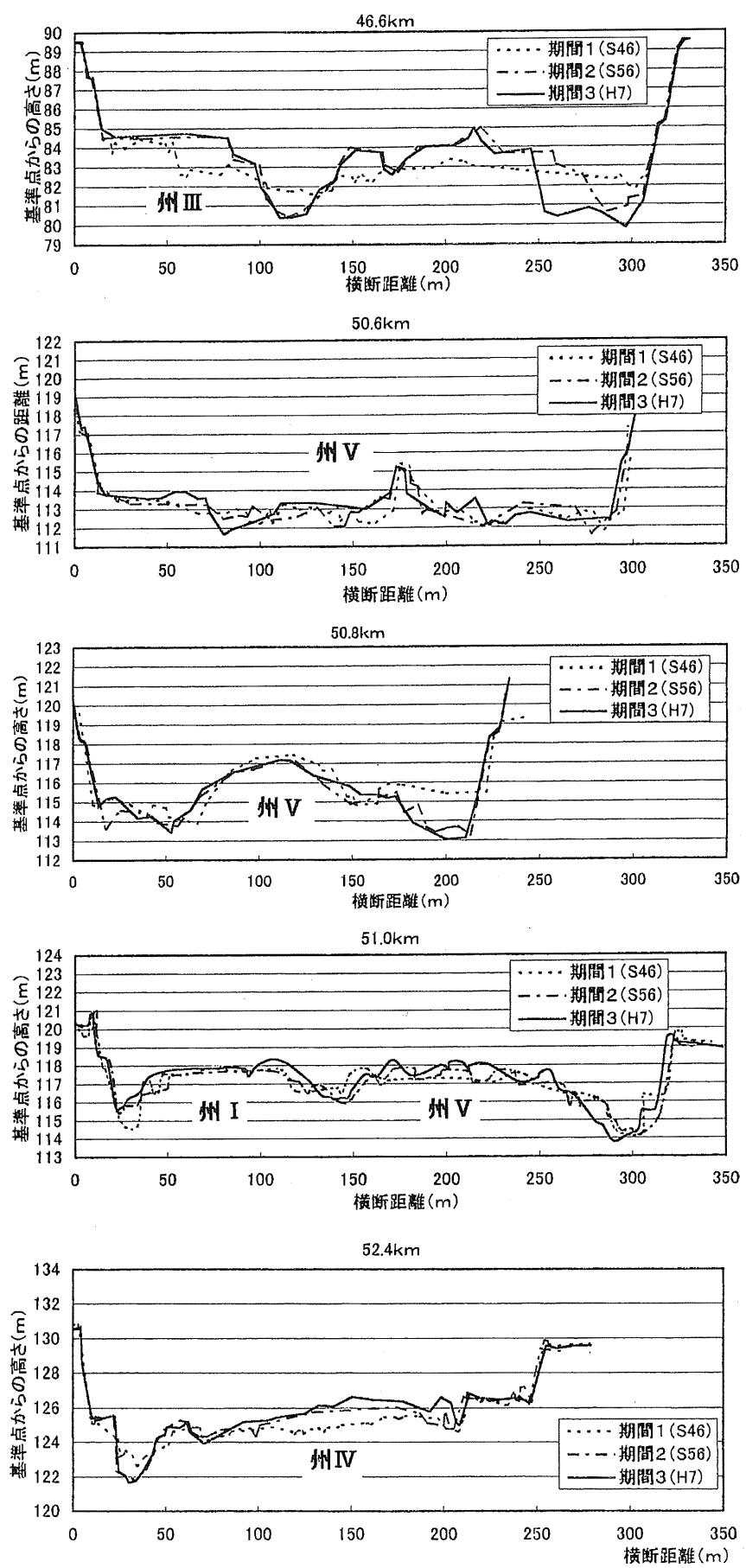


図10 樹林化の進行と横断面形状の変化（図9の定期横断面測量による）

3.2 州の現地調査

ハリエンジュの樹林地の特徴を掴むため現地調査を行った。図11に観測地点（1）、（2）の位置を示す。観測点（1）の州上は低水路水際から、玉石（ただし、まばらに草本類が存在）、草地、林地に区分される。図12(a)には観測点（1）の横断高さ（最深河床との比高差）と、植生の分布状況をAからDに分けて示した。このうち、州上のBは最も草本類の密生度が高く、背丈の高い草で1.5m程度である。その背後Cがハリエンジュの樹林地となっており、樹林地内でも草本類が存在するが、Bに比べて草の平均的な背丈は低い。一方、A、Dは草本類がまばらにあり、表層は粗い礫が露出している。図12(b)は観測点（2）の横断図で、(a)、(b)から注目すべき点は、州上において表層が数十cmの厚さをもつ細粒砂層で覆われていることである。この細粒砂層の上では草本類やハリエンジュの繁茂が著しい。それぞれの地点での河床材料を調べた結果を図13(a)、(b)、(c)に示す。低水路の表層は図13(a)、①に示すようにセグメント1に象徴される粗い礫床で、礫間隙を図13(b)の①に示す細粒分がマトリックスとなって埋めている。中州肩の表層③は植生の疎らな礫床で、同様にこうした細粒分がマトリックスの構成材料となって間隙を埋めている。図13(c)に示すように、細粒砂層の構成材料は1mm以下の細砂が80%占めている。こうした均質な細砂は河原でも繁茂した草地があれば存在している。図13(d)には観測点（2）における細粒砂層の粒度分布を示した。

調査区間や下流の横断面（43.6 km）について平成8年度の冠水頻度を調べたものが図14である。ハリエンジュ樹林はほとんど冠水しない領域に存在し、一方、河原の植生は年間61日は冠水する。年平均流量における水面から高さを比高とすれば（図15）、ハリエンジュ樹林地は平均して2m程度の比高にある。

ハリエンジュは表層に細砂やシルト分の堆積がない、礫河原であっても、表層下部の礫間を埋める粗砂があれば生育できるが（写真3、4）、この場合、礫間隙を縫って地下茎を張り、連結した形で木が生育している（写真5）。しかし、表層下部に埋没している礫によって根の広がりが疎外され、地下茎は容易に拡大できず、林の形成はなかなか進まない。

一方、樹林地の表層を構成する細粒砂層によって、ハリエンジュはその層内で根を平面的に拡大することが容易で（写真6）、その結果、林が形成される。細粒砂層では礫がほとんどなく、土壌は容易に掘り起こすことができる程度に柔らかい。そこでは林での日傘効果もあって適当な水分を保持でき、また、その表層は枯れ草や落葉などによって腐葉土化するようである。観測地以外での樹林地でもこうした細粒砂層の存在が確認でき、細粒砂層が作られることが樹林化を促す要因の一つになるものと推測された。

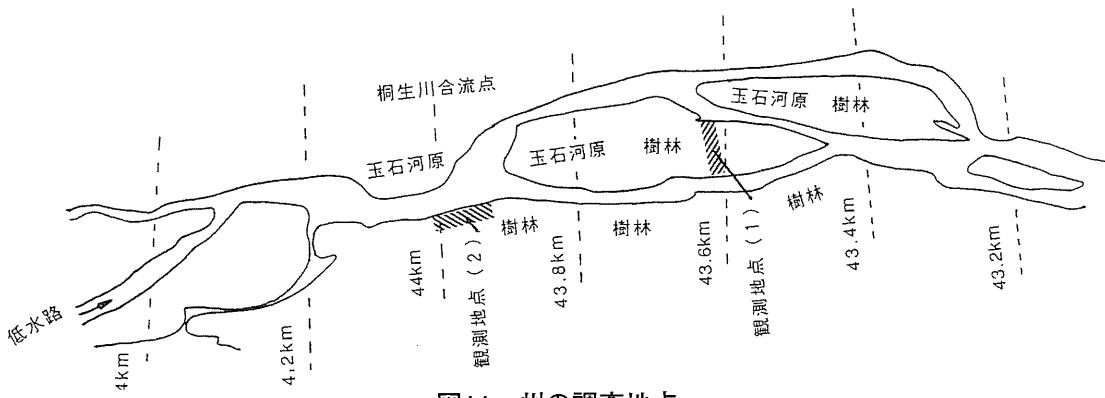


図11 州の調査地点

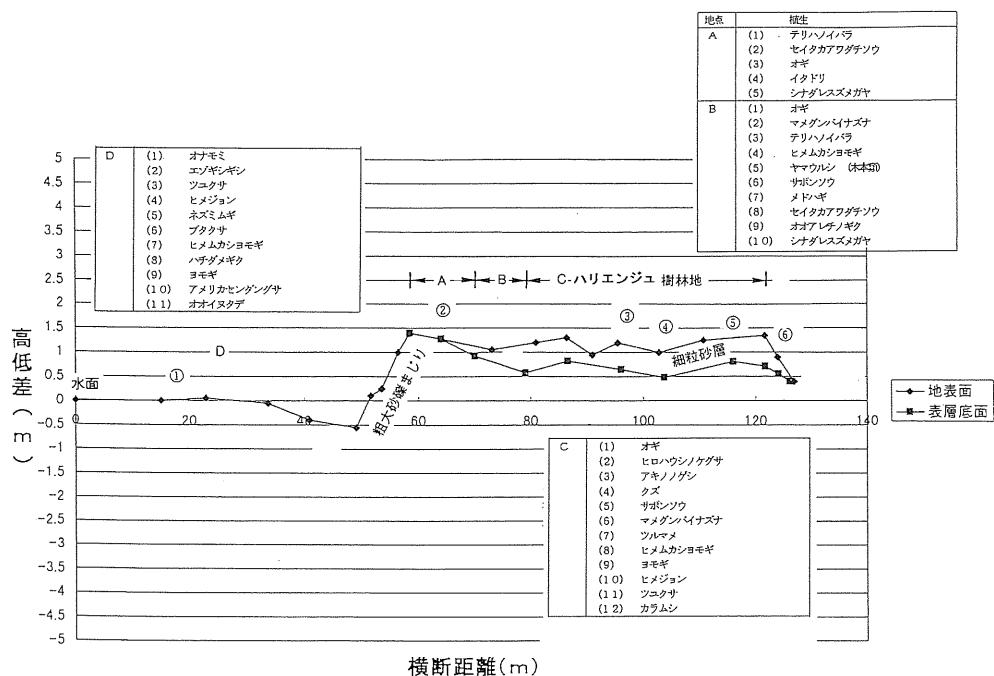


図12(a) 観測地点の横断面内比高差と植生の状況（観測点（1））

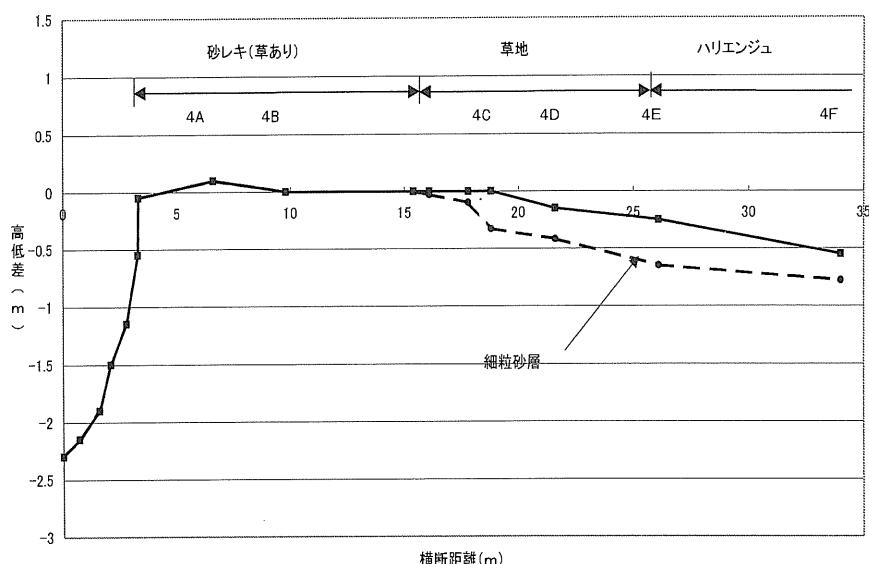


図12(b) 観測地点の横断面内比高差と植生の状況（観測点（2））

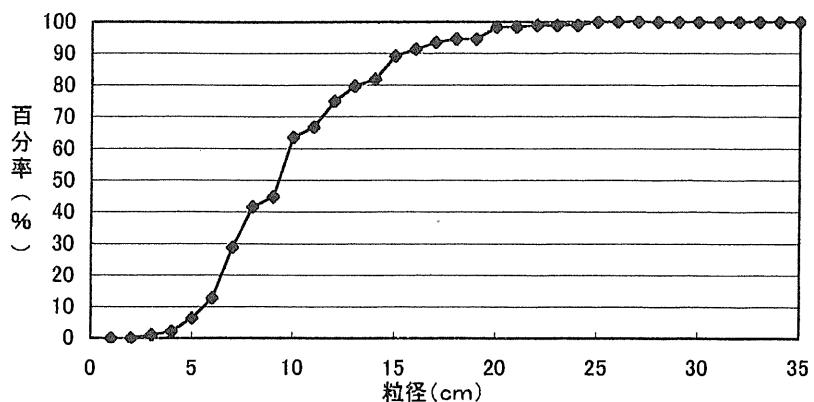


図13(a) 低水路水際 (①) の河床材料 (粗粒分)

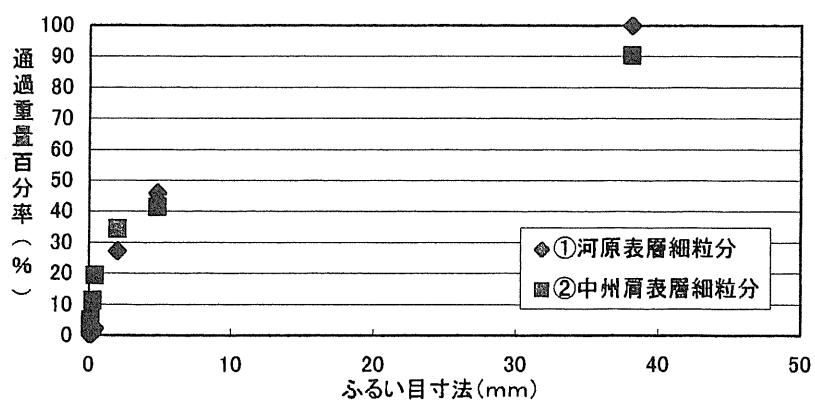


図13(b) 低水路水際 (①)、中州肩 (②) の河床材料 (細粒分)

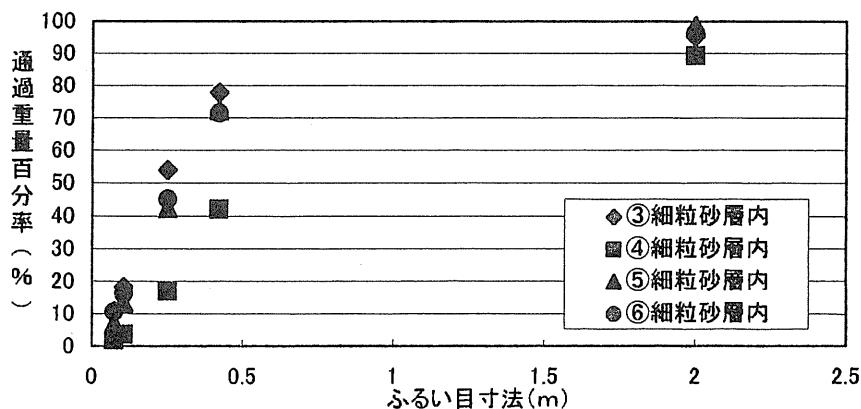


図13(c) 細粒砂層の河床材料 (観測点 (1))

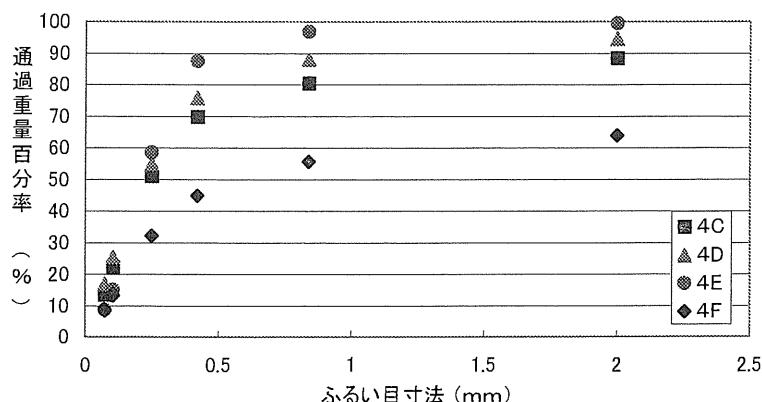


図13(d) 細粒砂層の河床材料 (観測点 (2))

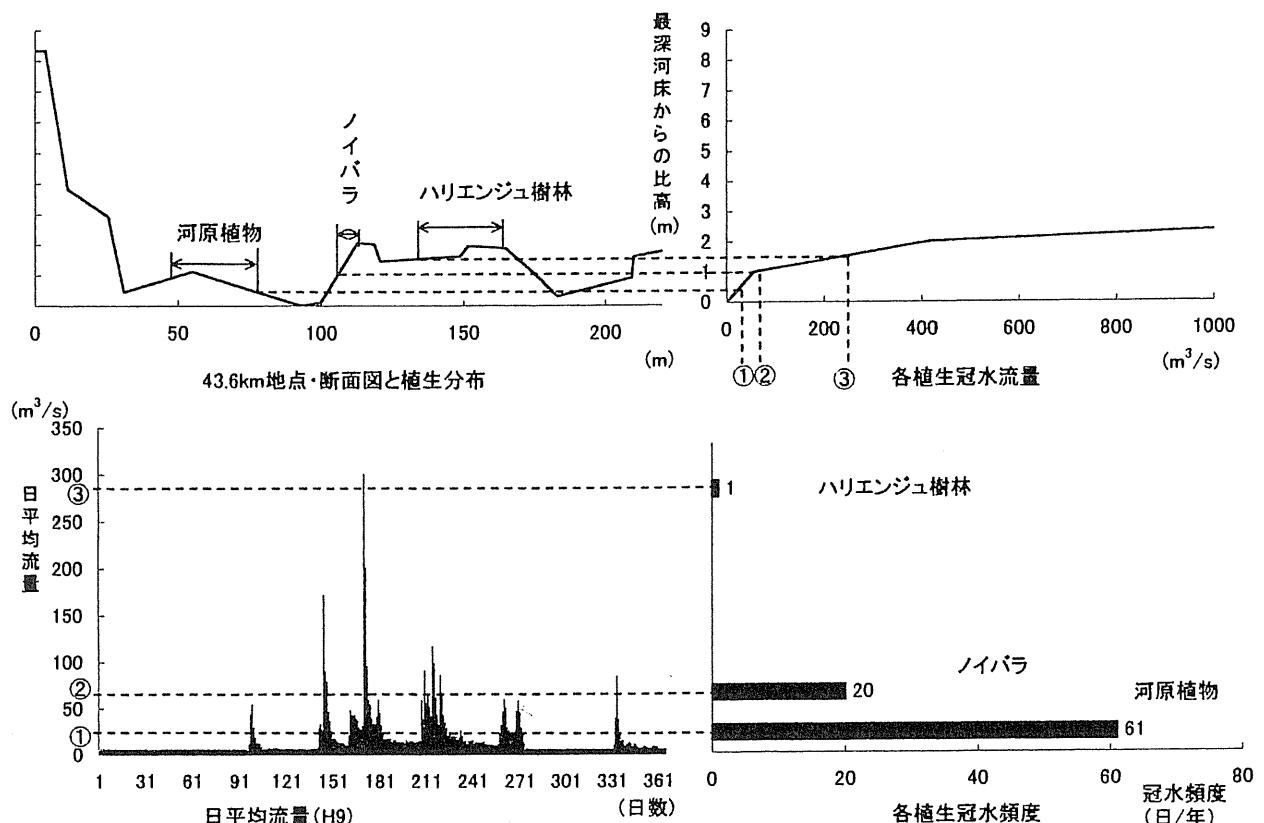


図14 調査地点での州の冠水頻度（平成9年度流況）

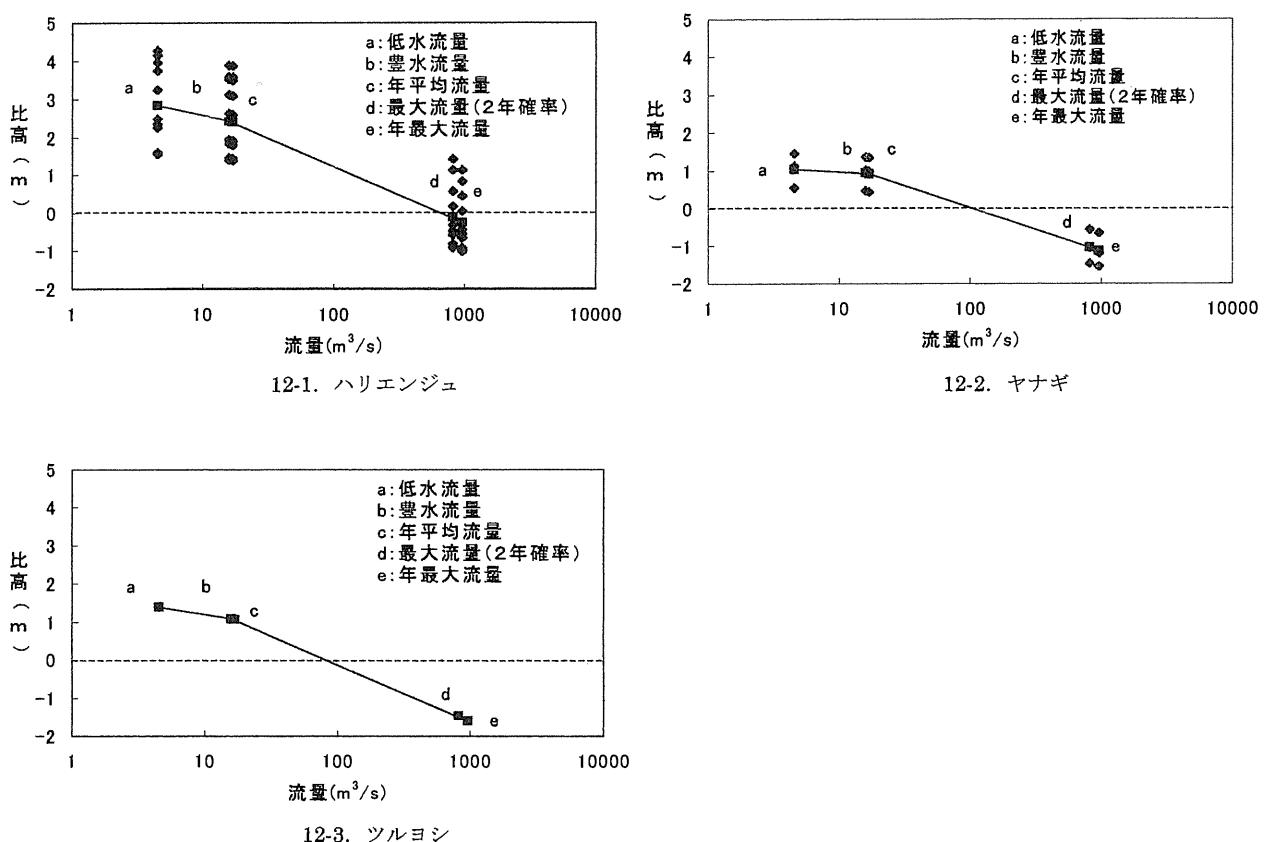


図15 各流量での水面からの植生の比高



写真3 磯川原にあるハリエンジュ

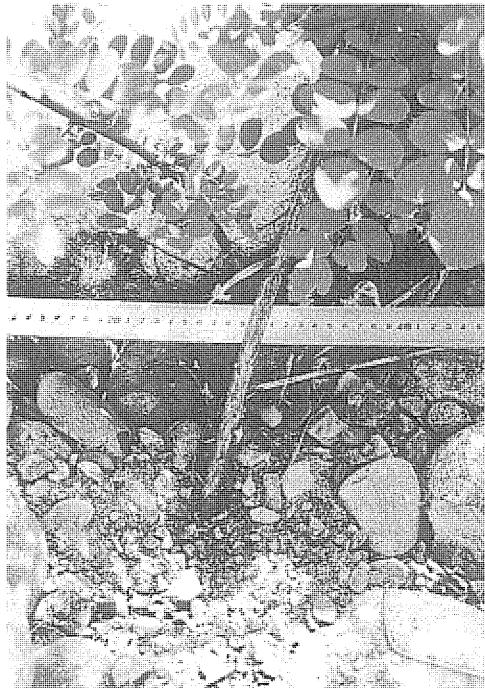


写真4 磯川原にあるハリエンジュ

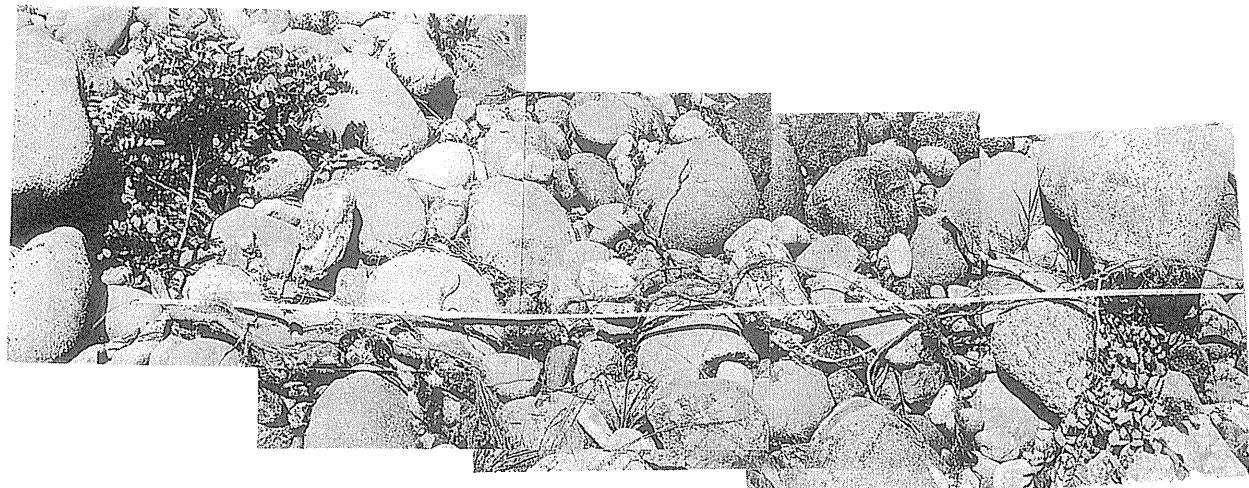


写真5 根が連結した磯川原のハリエンジュ（磯層にある根を掘り出したもの）



写真6 細粒砂層内のハリエンジュの根（30cm程度の深さで根の周辺を掘り起こした）

3.3 樹林化の形成過程とシナリオ

細粒砂層の存在が樹林化の形成要因の一つであることが示唆された。細粒砂層は塚原ら³⁾、李ら⁴⁾、藤田ら⁵⁾が指摘する“表層細粒土層”と同様なものと考えられ、彼らは表層細粒土層厚と植生群落との相関を調べ、オギ、ハリエンジュの繁茂にとってそれが大きな役割を持っていることをすでに指摘している。ただし、ここでの細粒砂層にはウォッシュロードのようなシルト分はわずかで、図13(c)、(d)が示すように平均粒径が0.3 mmから0.5 mm程度の細砂からなる均質な材料特性をもっている。このような細砂分はセグメント1の河道では河床構成材料の一部であり、低水路水際の礫間隙や河原の草地表層などにも、その堆積分を見ることができる。従って、セグメント1の河道では、樹林地内に堆積した細砂も洪水時には河道内で移動し、低水路・州（高水敷）間で交換される河床材料であり、ウォッシュロード的な要素は少ないものと推測される。

さて、細砂が州上に堆積するプロセスがキーポイントとなるが、それは次のように推測される。セグメント1の河道では、小規模出水時（低水路満杯流量をやや超える程度）における摩擦速度・沈降速度比が2～3以上となり、この程度の細砂は低水路において容易に巻き上がり、浮遊砂として輸送される（図16）。ここで重要な点は低水路と堆積地点となる州上との比高差が大きいことで、州上、高水敷にやや冠水する程度の小規模出水時では低水路では摩擦速度・沈降速度比が浮遊限界を大きく上回るのに対し、州上・高水敷ではそれが小さく細砂は沈降か、あるいは掃流砂運動となることである。

細砂の堆積は比高差よりも植生の減速による効果が本質なのであろうか？木本類では相当に繁茂しない限り（あるいは木に相当な流出物が引っかかる限り）、浮遊した細砂の沈降を産むほどの透過係数は期待しにくい。実際、ハリエンジュやヤナギがかなり繁茂した場合でも平均して1 m×1 m格子内に木1～2本程度の密生度である。しかし、比高差の小さい河原においても草本類がかなり密生すれば洪水の減水時に細砂をトラップすることが可能と思われる。この場合、草は洪水中にその背丈をほとんど寝かせることから、補足される細砂は掃流砂として流れているものが限界掃流力以下となって堆積するものと推測される。実際、河原の草本類が倒伏し河床表層を被覆することで細砂を堆積させることが洪水痕跡においてしばしば見られる（写真7、図17）。ただし、比高差がなければ、冠水頻度も高くなり持続的に堆積層を形成するまでには至らない。

細砂の州への堆積は、例えば、図10の横断図に見るよう比高差をますます助長させている。一方、本来、低水路河床にも存在する細砂が一方的に州、高水敷に運ばれることは低水路河床低下の一要因にも成りうることが示唆される。調査地点とした渡良瀬川において州がやや冠水する程度の出水は不等流計算より1000 m³/s規模となり、こうした小規模出水が経年的によく起っていること（図2）が、ここでの樹林化を促進させている。

年平均流量時における水面からの高低さを比高として（図15）⁶⁾、李らに倣って比高—細粒砂層厚の関係^{4), 5)}からハリエンジュの存在領域を求めた（図18）。ハリエンジュの樹林地では比高1.3 m、細粒砂層厚0.2 m程度が樹林地形成の下限値となっている。一方、細粒砂層厚がなくとも、比高が1 m程度であって

はハリエンジュは単木として生育できるが、樹林地の形成にはなかなか至らない。以上、渡良瀬川での河道調査を踏まえ、セグメント1の河道においてハリエンジュが河道内樹林化を引き起こすシナリオをまとめたものが図19である。

まず、何らかの要因によって比高差のある河道地形が産まれる。これは交互砂州波高の発達であったり、河道幅の局所的な狭まりによって中州が産まれたりすることがきっかけとなることがある。あるいは、流量コントロールや土砂供給の低下に伴って低水路の固定化や河床低下が進み、流路内の比高差が産まれてくることもありえる。ともに冠水頻度が場所的に極端に異なる状況が生じてくる。こうした時点において小規模出水を受けると、比高差にもとづく掃流力の違い、とくに、低水路での摩擦速度・沈降速度比が大きいために、低水路から比高の高いところに細砂が輸送される。そこでは掃流力も弱まって堆積傾向となる。堆積した地点には、礫床にも存在できる草本類が進入し草地を形成する。同時にハリエンジュも進入できるが、細粒砂層がない、あるいはそれが薄い状況では礫床でのハリエンジュと同様に、容易に林を形成できない。また、林ができるので日陰が少なく共存する草本類の生育環境はきわめて良好である。このため次の出水を受けるまでに、かなり密生度の高い草地が出現する。

こうした状況で次の小規模出水を受けると、比高差にもとづく細砂の堆積と併せ、草本類によるトラップも加わって堆積が促進され、細粒砂層が形成されてくる。そこでは、平水時にハリエンジュの地下茎が層内を平面的に広げ、新たな幹を出して成長し樹林地を形成する。林ができると草本類は日傘効果からその成長が弱まるが、それでも表層の草地が密生して細粒砂層を被覆し出水時の流失を防いでいる。小規模出水が続くかぎり、細砂の堆積は比高差、草地によるトラップによって生じ、その結果さらなる比高差が産まれ、複断面化が生じる。こうした状況では細粒砂層のある州上は、ますます冠水頻度が少なくなり、樹林地が安定的に持続する。

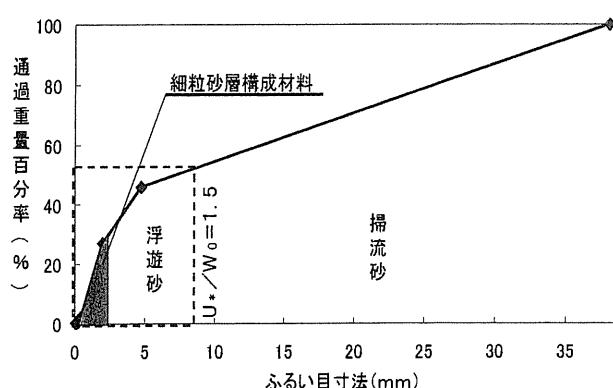


図16 低水路表層付近の細粒分の粒度構成と浮遊限界

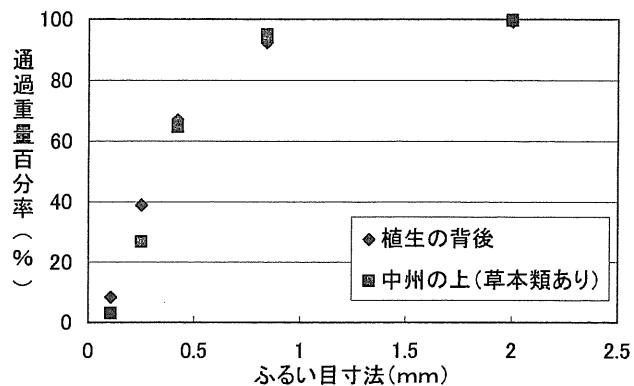


図17 出水後に堆砂した細砂の粒度構成

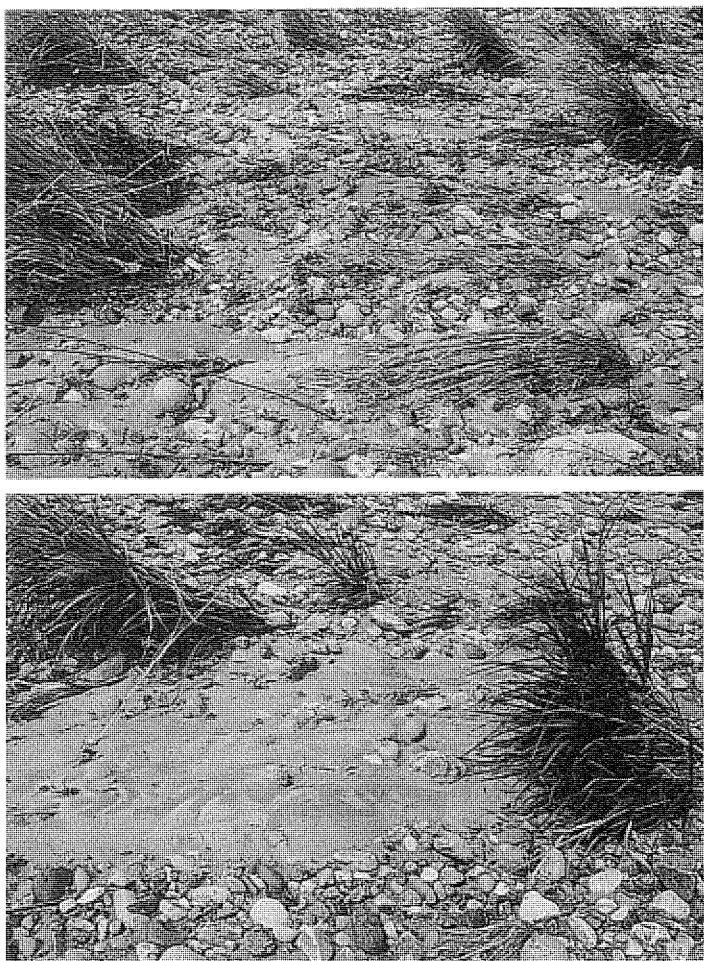


写真 7 (a) 出水後に堆砂した細砂



写真 7 (b) 出水後に堆砂した細砂

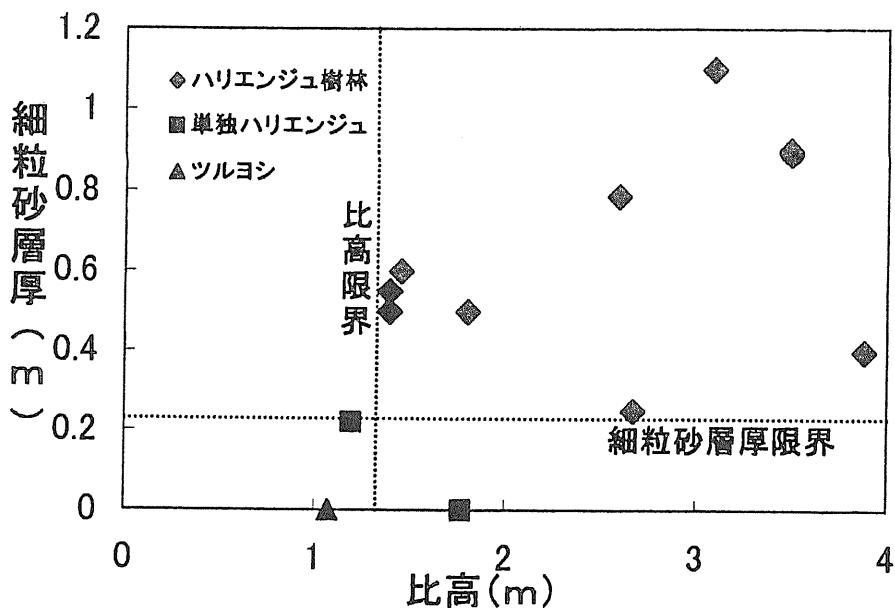


図18 比高、細粒砂層厚から見たハリエンジュの存在領域

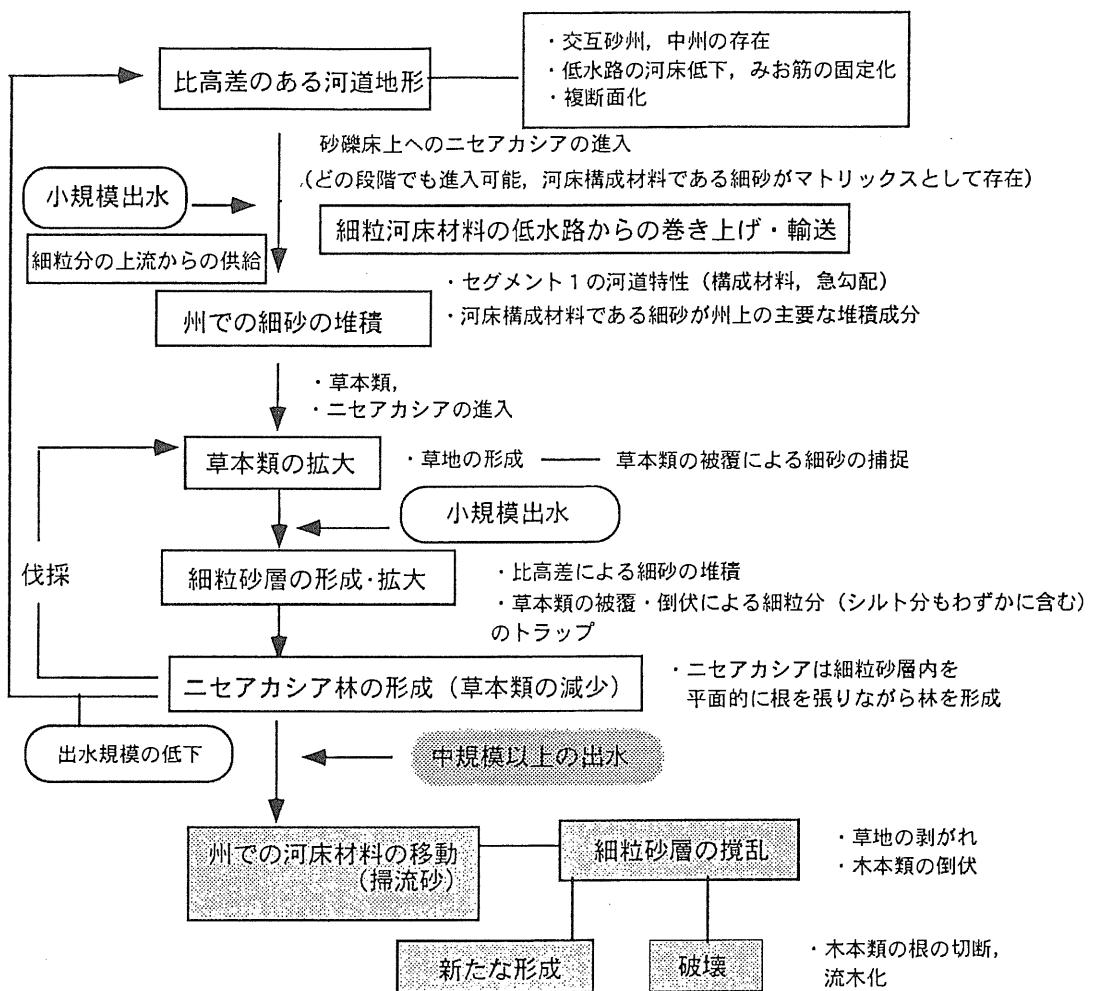


図19 樹林化のシナリオ

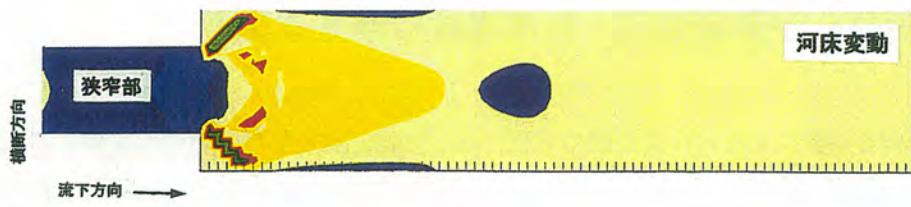
4. 州の樹林化が周辺地形・粒度構成に与える影響

渡良瀬川の例でも見たように、狭窄部の下流には、比較的安定した中州の形成がしばしば見られる。これは、狭窄部における掃流砂輸送が川幅の拡大による掃流力低下によって土砂堆積を起こすことで生まれる。中州の地形形成と粒度構成、さらにそれらに及ぼす植生の影響を知るため、平面2次元計算の河床変動計算からその特徴を説明する。

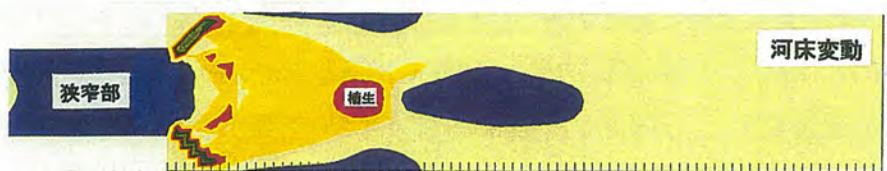
平面2次元計算においては、流れ場では $k - \epsilon$ モデル（植生がある場合にはその形状抵抗を運動量式、乱れエネルギー、及びその逸散率の式にも考慮した）を用い^{7), 9)}、河床変動には粒径別流砂量公式（芦田・道上式を援用）を用い、横断勾配と流れの偏向を考慮して流砂の方向を求めている。また、河床変動による分級の効果は平野に倣って交換層内で起きるとした⁹⁾。計算では実験室規模の水理条件（水路勾配1/150、流量700 cm³/s、平均粒径0.175 cm（粒径0.3 cmと0.05 cmの細砂を各々50%とした）とした。**図20**の上段は計算後4分で、ほぼ安定した場合の河床高さの変動分（元河床を差し引いたもの）と粒径分布を示したもので、狭窄部下流に堆積部を生じ、堆積部を越えた下流にはわずかな河床低下（流路中央）が見られる。中州の形成の他、とくに、狭窄部の出口から左右とも側岸に向けて伸びた帶状の堆積部も形成されるが、こうした特徴は渡良瀬川の例でも見ることができる（**写真2**参照）。

狭窄部出口付近から下流にかけては、狭窄部内での土砂の掃き出しによって顕著な河床低下が生まれる。粒度構成を見るとそこでは粗粒化が顕著であり、下流に向けての河床上昇とともに、粒度構成も小さくなってくる。とくに、中州の堆積部は細粒分から構成されている。

堆積部先端付近の河床の高い領域に植生が繁茂したとして、同規模出水を受けた後の河床変動結果を**図20**の中段に示した。植生域ではさらに細粒分からなる堆積地形が生まれ、その州下流では河床低下と粗粒化が促進される。さらに堆積した箇所（先の植生配置の上流側）に植生が繁茂し、同じ規模の出水を受けた後の河床変動が**図20**の下段である。植生の繁茂した中州の下流左右側で、堆積微地形が帶状に伸びた形で生まれる。そこで粒度構成も細かく、こうした水際には比高条件（**図15**）から見てヤナギなどの木本類が侵入し、植生帯を形成することが予想される。一方、アーマー化した河床低下領域も顕著に生まれ低水路を明確にし（テラス地形の形成）、中州植生周辺との比高差が大きくなってくる。流量規模の同じ出水の繰り返しでも平水時に植生が侵入・繁茂することで比高差の顕著な河道形成が出現していく。



中州地形の形成



中州形成後に植生域を配置した出水後の変化



さらに植生域が拡大した状況での出水後の変化

河床変動 (cm)

■ -0.5--0.25	■ -0.25-0	■ 0-0.25
■ 0.25-0.5	■ 0.5-0.75	■ 0.75-1
■ 1-1.25	■ 1.25-1.5	

粒径 (cm, 平均粒径 0.175cm)

■ 0.05-0.075	■ 0.075-0.1	■ 0.1-0.125	■ 0.125-0.15
■ 0.15-0.175	■ 0.175-0.2	■ 0.2-0.225	■ 0.225-0.25
■ 0.25-0.275	■ 0.275-0.3		

図20 狹窄部下流の中州形成と粒度構成に与える植生の影響

5. 樹林化が流況特性に与える影響

樹林地が出水時にどの程度の抵抗になるか、渡良瀬川を例として、中州・河岸砂州に樹木が繁茂した場合を数値計算から評価してみる。

用いた計算法は長田¹⁰⁾によって開発された一般化座標系を用いた平面流計算で、流速の反変成分そのものを未知量として扱う方法である。粗度係数 n は過去の洪水痕跡結果から得た値として0.032程度とし、上流端で流量、下流端では水位 - 流量曲線を設定して水位を与えた。また、樹林地では、樹木による形状抵抗 (F) を

$$F = \frac{1}{2} \rho \lambda C_D (u^2 + v^2) h$$
$$\lambda = \frac{nd}{s^2}$$

とおく。ここに、 u 、 v ；縦・横断方向流速、 h ；水深、 ρ ；水の密度、 C_D ；形状抵抗係数でほぼ1.0、 λ ；樹木の密生度で面積 (s^2) あたりの樹木本数 (n) と平均幹径 (d) から与える。こうした樹木の形状抵抗 F を平面流基礎式に運動量吸収項として取り込む。一方、植生が平面的に存在すれば、流速差にもとづく運動量の水平混合が生まれる。清水ら¹¹⁾は、植生の形状抵抗を k 、 ϵ の輸送式にも考慮した $k - \epsilon$ モデルで植生流れを計算しているが、ここでは、渦動粘性係数 (ϵ) を簡便なものとして次式で与えた。

$$\epsilon = \alpha u_* h$$

ここに、 u_* ；摩擦速度、 h ；水深、 α ；定数（0.2～0.3程度）である⁸⁾。計算にあたって仮定は以下のようである。

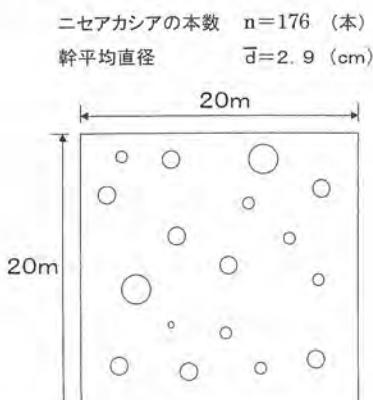
- ・樹木地は非水没とする。
- ・流水に対しての樹木の変形や破壊及び流失は考えていない。
- ・樹木群の平均的な密生度は樹林化の顕著な州の現地調査により求められた平均幹径と単位面積あたりの根元幹本数から評価している（図21）。

これらの仮定のもとに、現況の植生分布を参考に、狭窄部（51.4 km）前後の州に樹木の効果を入れた（写真2参照）。

はじめに、平成10年台風5号（流量1420 m³/sで計画高水流量の0.4倍程度）の再現計算を行い、洪水痕跡結果と比較する。図22は洪水時の航空写真と流速ベクトル図を合わせたものである。洪水規模が小さいため、狭窄部下流の中州では若干冠水している程度で、図23の水位縦断曲線を見ても植生の影響による水位の上昇はほとんど生じていない。図23には建設省が実施した痕跡水位結果も併せて表示してあるが、計算水位との対応も良く、粗度係数の設定を含めて計算の妥当性が認められる。次に、さらに流量規模を上げて（計画洪水流量、3500 m³/sを想定）、樹林地の影響を調べてみる。

図24に流速ベクトル図、図25に水位縦断曲線を描く（ともに樹木の影響を入れた場合と入れない場合を示す）。これより、狭窄部下流の中州周辺の地形、および樹林地の抵抗を受けて横断方向に流速差のある

平面せん断層が形成され、中州を挟んで左右に主流が分かれる様子が示されている。水位は樹木のない場合に比べ、中州前面で 1.5 m 程度の上昇が推定された（水位の横断分布を図26に示す）。この値は上述の仮定のもとに推定されたもので、実際には河床材料の移動に伴う樹林の流失を伴うであろう。その場合、樹林の破壊として、樹木の流失は州先端あるいは州水際から始まって、その後、樹林地すべてが破壊されるのか、あるいは一部が残り得るのかといった問題が懸念される。一部の樹林地が残り得た場合、流木群を引き止めていっそ遮蔽効果を拡大するし、また、それ以上の上流側流下物の樹林地による捕捉も考えられ、懸念される以上の水位上昇も起こしかねない。こうした地点では適切な樹木管理が必要である。図27には樹林地の密生度を変えて、中州前面での水位上昇分を計算した。また、図28には、計画規模出水時（ピーク流量時）に移動限界にある礫径の分布について示した。樹木のある中州を避け、左右に分かれたみお筋で、70 cm 以上の巨礫が動き得る状況が推定されている。



樹林地の現地調査

図21 計算で取り込んだ樹林の密生度

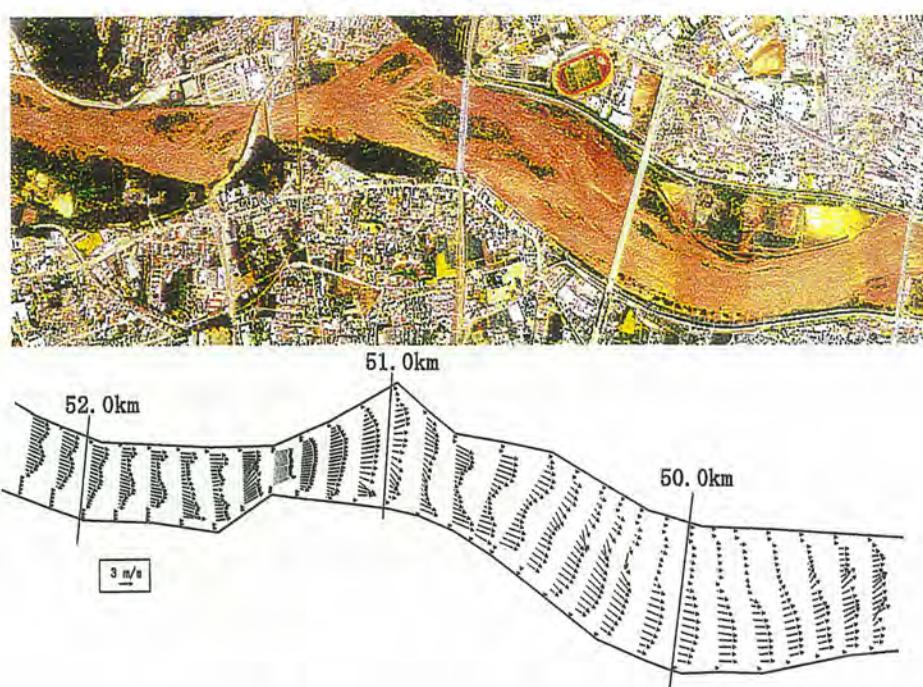


図22 平成10年5号台風の再現計算（平面流況）

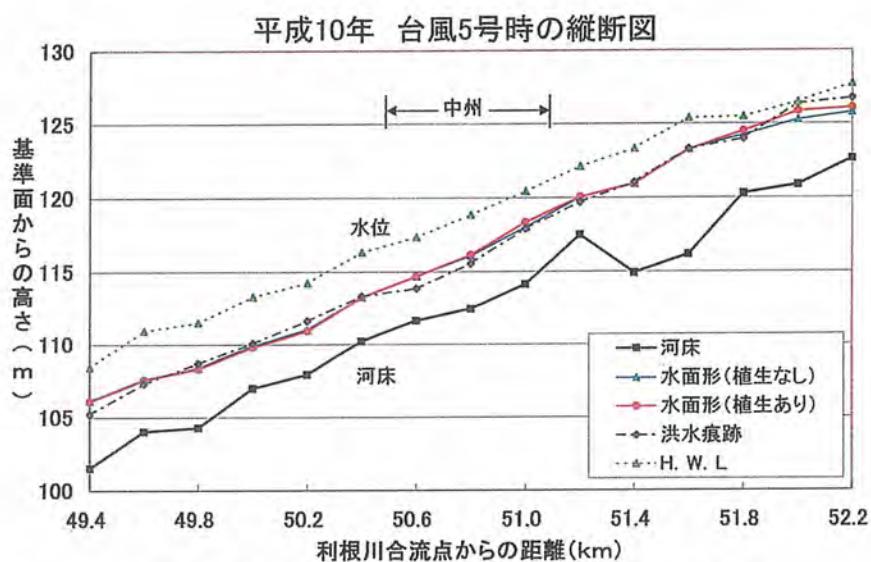


図23 平成10年5号台風の再現計算（水位縦断曲線）

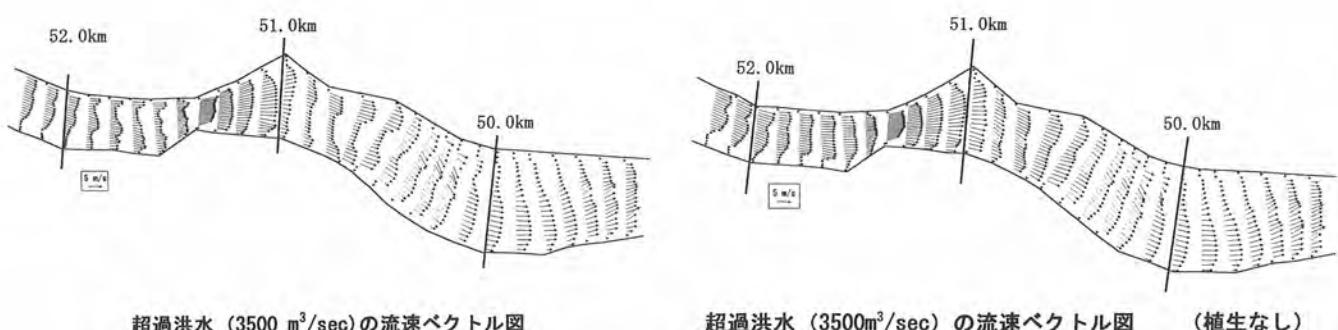


図24 計画流量規模での平面流況

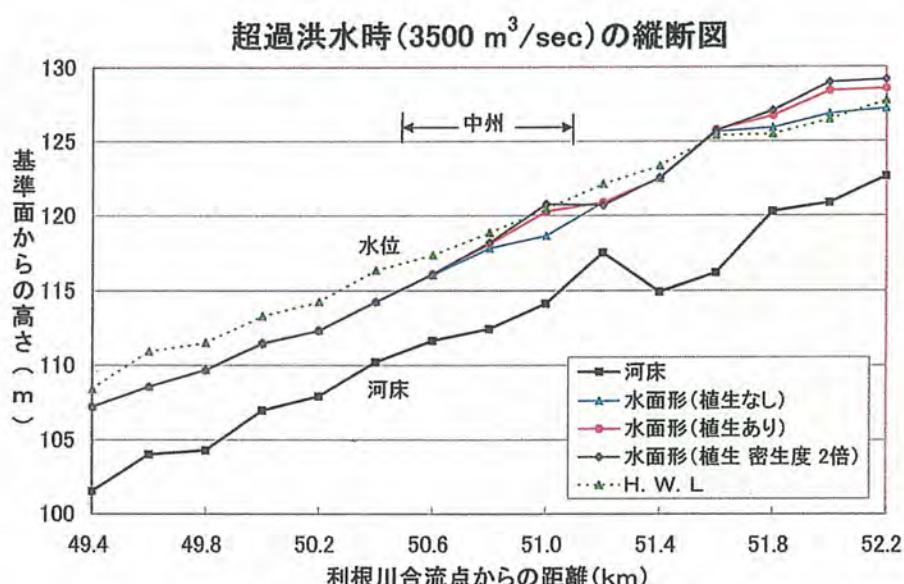


図25 計画流量規模での水位縦断曲線

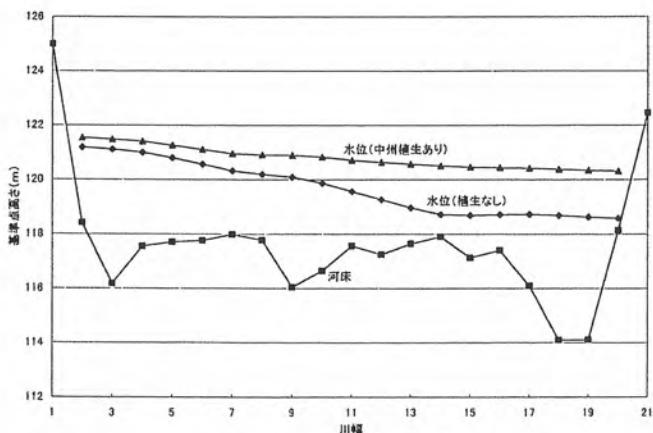


図26 計算横断面水位

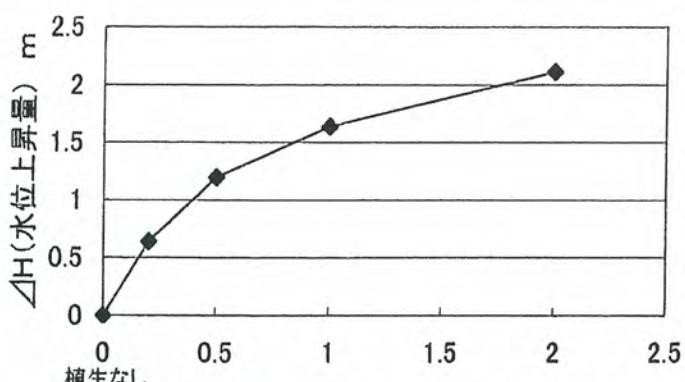


図27 樹木群密生度による水位上昇分の推定値（計算値）

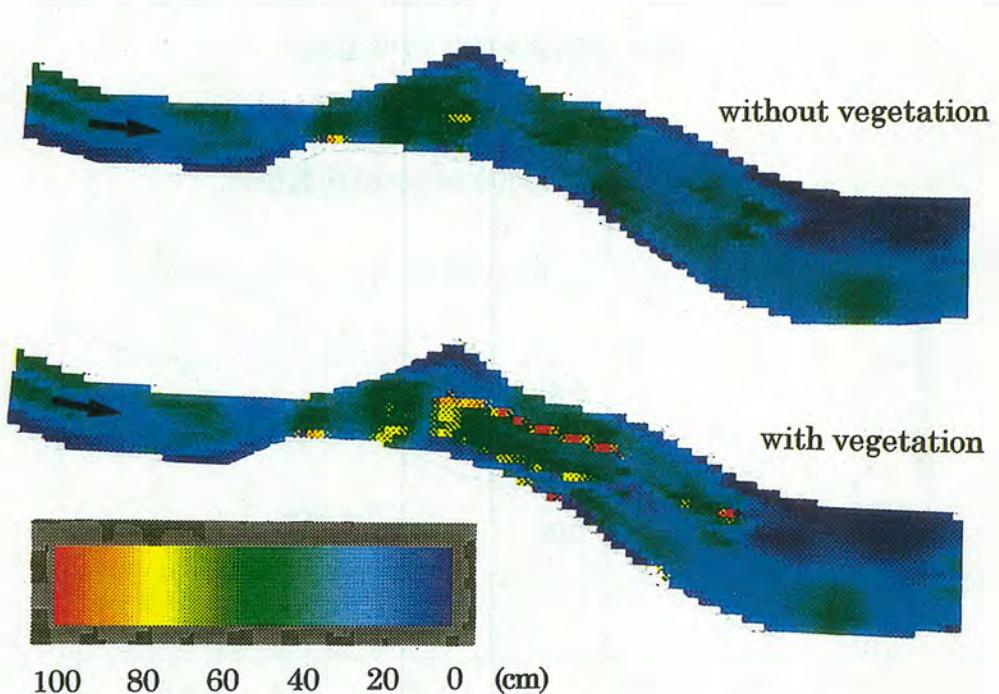


図28 植生の有無による移動限界礫径分布のちがい（計画流量規模）

6.まとめと今後の課題

本研究では、ハリエンジュ樹林に注目した樹林化形成要因について検討してきた。また、樹林化が河道地形、流況特性に与える影響も合わせて検討した。河道疎通能力が低下するような地点では、堆積地形の形成から変化に富んだ河相が生まれる。ここでは、その例として、狭窄部下流の中州を話題として樹林化による流況変化を述べた。こうした地点では、樹木の伐採を含めた管理が必要と言える。

ただし、樹林地となってしまった州では伐採が面的な拡大（密生度の増加）を広げる懸念がある。

図29は過去に伐採された地点とそうでない地点での樹木本数と根元幹直径の関係（ともに、20m格子内でのサンプリングによる）を見たもので（図30に示した根元幹直径と樹高の関係から樹高も分かる）、伐採が行われると密生度の高い灌木林が形成されることも有り得る。これは、ハリエンジュでは、切り株から数本の新たな幹が成長すること、また、周辺の根茎からも新たな幹を成長させることにもとづいている（写真8）。とくに、ハリエンジュ樹林は地下茎からの拡大が強く、樹木管理としては表層河床材料の攪乱（細粒砂層の破壊）も必要である。

一方、ハリエンジュ樹林地では根茎の発達から河岸侵食を防止する働きもありそうである。写真9は観測地（2）での平成10年5号台風による低水路自然河岸付近のフラッシュで、州水際沿いに露出した根茎群が侵食を抑制している。また、写真10は観測地（2）下流左岸の自然高水敷にある樹林地が出水によって洗われた後の状況で、樹齢15年以上のハリエンジュ樹林の地下茎（直径10cm程度のものも存在）が堅固に張り河岸侵食を抑制していた。断面疎通能力の面から問題のない箇所では、こうした自然河岸の侵食防止に寄与する樹林地の効果も、河岸侵食量の予測とともに定量的に評価して行かねばならない。同時に、樹林地の破壊を水理学的に評価する試みが今後の課題として残る。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、建設省関東地方建設局渡良瀬川工事事務所から河道調査資料を頂き、河道特性変遷研究会（財・河川環境管理財團）では本研究テーマについて有意義なご意見・ご討議を頂いた。また、資料整理・解析には、群馬大学大学院・新船隆行君、岡田理志君、岩崎工君、井野正人君（現・（株）建設環境研究所）の協力を頂いた。記して謝意を表します。

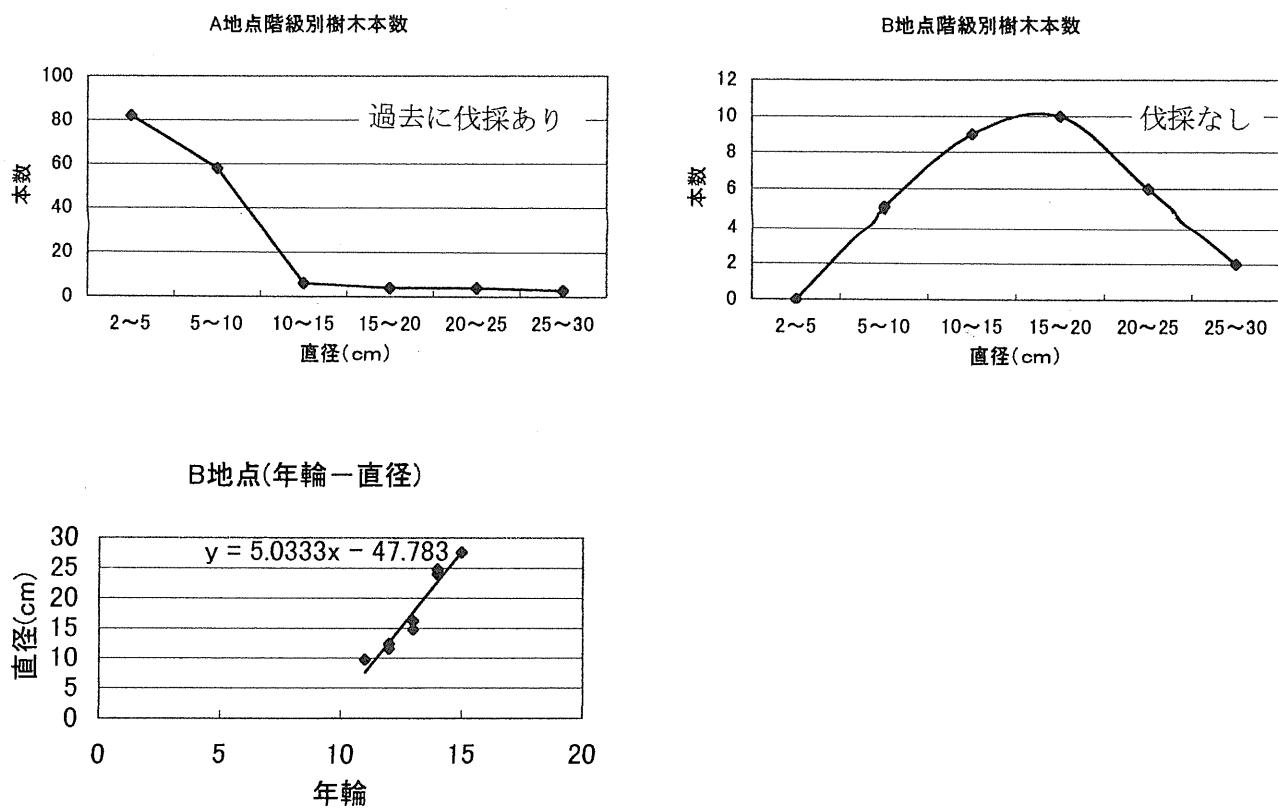


図29 ハリエンジュ樹林地における根元幹直径別木本数

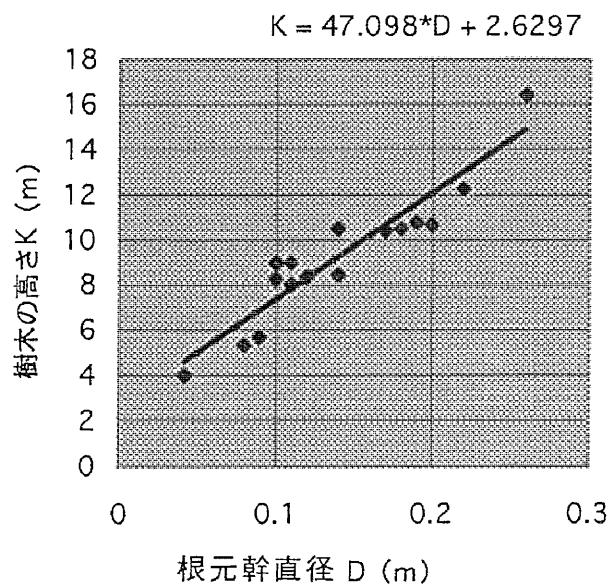


図30 ハリエンジュの根元幹直径と樹高との関係

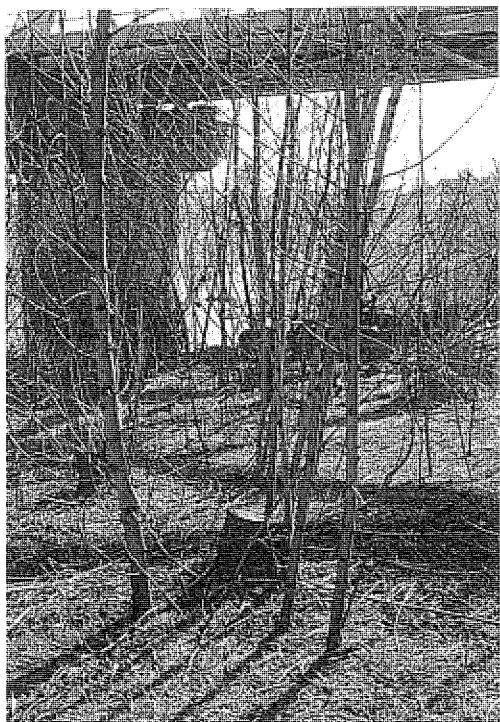


写真8 伐採後のハリエンジュの成長（切り株、周辺の表層からも新たな幹が生まれる）



写真9 樹林地自然河岸の侵食（ハリエンジュの根茎の絡まりによる侵食抑制）



写真10 出水によって露出した低水路河岸のハリエンジュの根茎

参考文献

- 1) 辻本哲郎：河川景観の変質とその潜在自然への回復，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（新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム），pp.147-152, 1998.
- 2) 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について，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（新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム），pp.129-134, 1998.
- 3) 塚原隆夫，藤田光一，望月達也：植生が繁茂した河川水際への細粒土砂堆積の特性，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（新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム），pp.259-264, 1997.
- 4) 李參熙，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.
- 5) 藤田光一，渡辺敏，李參熙，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，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（新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム），pp.117-122, 1998.
- 6) 辻本哲郎，岡田敏治，村瀬尚：扇状地河川の川原の植物調査と河道特性－手取川における調査－，水工学論文集、37巻、pp.207-214、1993.
- 7) 清水義彦，小葉竹重機，茂木宏一，小松みわ子：植生が繁茂した砂州周辺の土砂輸送に関する基礎的研究，水工学論文集，第41巻，pp.837-844, 1997.
- 8) 清水義彦，辻本哲郎：植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析，水工学論文集，第39巻，pp.513-518, 1995.
- 9) 辻本哲郎，辻倉裕喜，村上陽子：植生周辺の微細地形と表層粒度構成，河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，No.4, pp.123-128, 1998.
- 10) 長田信寿：流路変動過程の数値解析とその応用に関する研究，京都大学学位論文，1998.