

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

藤田光一¹・李参熙²・渡辺敏³・塚原隆夫⁴・山本晃一⁵・望月達也⁶

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所環境研究部河川環境研究室長（〒305-0804つくば市旭一番地）

²工博 元筑波大学連携大学院（韓国建設技術研究院水資源環境部）

³正会員 農修 元土木研究所河川部河川研究室（株）ウエスコ

⁴正会員 工修 元土木研究所河川部河川研究室（国土交通省中国地方整備局河川部河川計画課）

⁵正会員 工博 元土木研究所次長（財）河川環境管理財団

⁶正会員 元土木研究所河川部河川研究室長（兵庫県理事）

多摩川の扇状地礫床河道部における安定植生域（樹林地に代表される安定的に存在する密生植生域）の拡大の実態を調べた。それより、安定植生域形成が河道の複断面化過程で現れた高水敷で起こったこと、1981～1983年にかけての洪水により礫河原上に薄く広く堆積した「表層細粒土層」が安定植生域を担う植物群落（ハリエンジュやオギなど）の急増を可能にしたこと、複断面化と先駆的植物による高水敷上流速の低減効果が表層細粒土層の堆積を水理的に可能にしたことを明らかにし、安定植生域拡大の包括シナリオを得た。これを基に、安定植生域の消長を大局的に予測するモデルを構築・検証し、安定植生域形成を促進・阻害する諸要因の影響度を計算により調べ、植生動態を河川管理へ反映させる考え方を提案した。

Key Words : *instream vegetation, wood land expansion, site factor, Robinia pseudo-acacia, flood, top fine-sediment layer, deposit, erosion, river-bed variation, gravel bar, the Tama river*

1. 序論

主に日本の河川において最近数十年間に生じた河道変化は、横断形状に着目すると図-1に示すように3つないし4つのタイプに分類できる^{1),2)}。各タイプとも植物の繁茂を伴う変化であるが、特にタイプⅢあるいはⅢ'の変化においては、裸地の礫床いわゆる白州河原が広範囲に植生にとって代わられる現象が起こるため、植物繁茂が起こす河道変化としては規模が大きい。こうした河道変化は、樹林などの密生した植物による粗度の増大に直結し、粗度の増大は洪水時の流況変化をもたらす、河積が変わらなければ水位上昇につながるため、治水上重要な意味を持つ。また、これらのタイプの河道変化については、萱場・島谷³⁾が雫石川の、李ら⁴⁾が多摩川の実態を分析しており、近年の“樹林化”の進行と白州河原の大幅な減少が、河川の自然環境に重要な影響を及ぼしていることを指摘している。

河川には治水安全度の確保と、河川特有の自然環境の保全が求められ、また、河道内植生の維持管理に際しても、それにかかるコストの縮減を十分考慮した方式が求められるようになってきている。このような中で適切な河道計画・管理を実行するには、河道内植物の動態について理解を深め、機構を解明し、その予測を可能にすることが求められる。

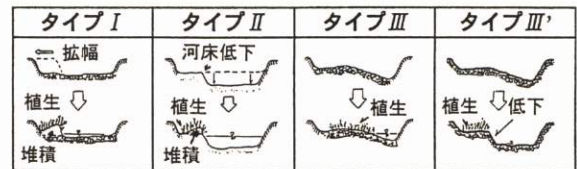


図-1 横断形状についての河道変化パターン^{1),2)}

ところで、図-1に示したような河道変化は、日本だけでなく米国の河川でも観察されている²⁾。その代表的な原因については、1)非常に大きな洪水により強制的に拡幅された川幅のその後の縮小過程^{5),6)}、2)治水、利水、発電などを目的とした上流のダム建設により洪水あるいは平水流量（と土砂供給）の変化が短期間に起こった河川での川幅縮小過程⁷⁾、のいずれかを軸に検討されることが多いようである。このうち後者については、上流ダム建設がもたらした河道変化がその河川の元々の自然環境を看過できない程度まで改変させたととらえ、それを軽減するための措置を科学的な現象理解を踏まえて施すことが自然環境再生の鍵であるという考え方の起点になっている場合が少なくない。このような流れに沿って多くの研究が行われている^{8),9),10),11),12)}。

ダム建設が下流河道の自然環境に大なり小なり影響を与えていることは日本においても同じであり、



図-2 多摩川流域・水系と調査地区

ダムによる流量・土砂制御が下流河道の自然環境に与える影響やフラッシュ放流の役割についての研究が行われている^{3),13)}。しかし、ダム直下流はさておき、さらに下流の沖積平野河道区間まで来ると、ダム(群)が河道に与える影響を決定的とは言えなくなることが一般的である。これは、日本の地形が米国よりはるかに複雑であり、ダムが相対的に小規模で流域内に分散して造られるためである。加えて多くの沖積河道区間では、河川改修や建設骨材確保などのために改変が加えられてきている。さらに、礫の河道に有意な変化を起こすためには一定以上の規模を持つ洪水が必要となり、そのような洪水が毎年起こるとは限らないことから、河道変化を見る上では、洪水発生頻度の経年的偏りの影響も考慮する必要がある。このようなことから著者らの一人¹⁴⁾は、沖積平野河道区間に起こった図-1のタイプⅢ、Ⅲ'を検討対象にする場合、最初から特定の要因だけに着目する方法論を避け、関係しそうな種々の要因を広く考慮して個々の事例をきめ細かく分析することが必要としている。

他方、日本においては、河道内植物の基本特性についての知見が蓄積されてきている^{15),16),17)}。本研究と関係の深い礫床河道について、流水・流砂といった河川固有の作用とのかかわりを強く意識した植物研究としては、たとえば、石川^{15),18),19)}(文献15)は6章2,3節)、倉本ら²⁰⁾の研究がある。最近では、河川の植物についての知見を適切な環境管理に生かすという、より応用的・実践的な研究、問題提起、提案も目立つようになった^{21),22),23),24),25)}。また、水理学的観点からの研究も活発に行われており^{16),17)}(文献16)は3章、文献17)は3章1節)、最近ではたとえば池田ら²⁶⁾、清水ら²⁷⁾、福岡ら²⁸⁾、辻本ら^{29),30)}の研究があり、相当複雑な河床・植生条件についても、流れと浮遊砂、掃流砂、河床変動、河床材料変化を計算できる手法が整いつつある。以上の研究成果は、上記のきめ細かな分析にも役立つものと期待される。しかし、個々の河道内植物に関する知見や水理計算手法が植生動態予測に直接結びつく状況にはまだなっておらず、このギャップを埋めるには、実河川の植物動態の全体像をとらえる枠組みを強く意識しながら、事例の検証を重視しつつ、学際的、定量的なアプローチをさらに進める必要がある。

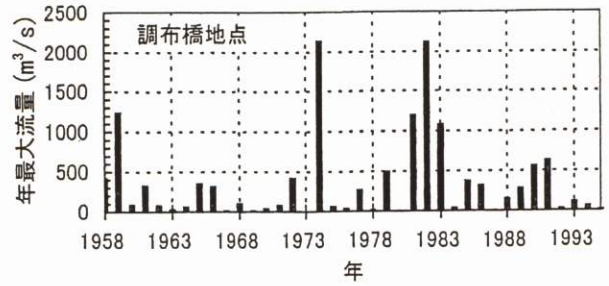


図-3 調布橋地点の年最大流量

表-1 調査対象地区の概要

調査地区名	永田橋地区	秋川合流地区	日野橋地区
距離標	51.0~53.0km	48.4~49km	39.0~41.0km
セグメント区分	セグメント1	セグメント1	セグメント1
河床勾配	1/220	1/220	1/280
平均川幅	280m	470m	370m
平均低水路幅	150m	310m	240m
河床材料平均粒径	35 mm程度	35 mm程度	30-35 mm程度

以上に示した状況を踏まえ、本研究では、まず、多摩川の扇状地礫床河道区間を研究対象に選び、そこで起こった植生繁茂・樹林化の過程を集中的に追跡し、生物および河川水理の観点から詳細に分析した。得られた知見を忠実に反映させて、植生繁茂・樹林化の基本メカニズムの解明と植生消長の予測モデルの構築を行った。このモデルを用いたシミュレーション結果に基づき、扇状地礫床河道内の植生消長を河道計画・管理に反映させる方途を考察した。なお本研究においては、こうした研究目的に合うという観点から、個々の現象のモデル化について精緻さを追究するよりも、植生動態と河川の作用が結合された絵を粗くてもよいから描いてみることを優先させた。

2. 多摩川扇状地河道部における安定植生域拡大の実態

(1) 調査地区における河床形状変化

a) 調査地区の概要^{4),31),32),33)}

図-2に多摩川流域・水系を示す。多摩川の流域面積は1,248.6km²であり、山地部には首都圏の上水源として1957年竣工した総貯水量1.9億m³の小河内ダムがある。ダム上流の流域面積は262.9km²で、調布橋流量観測所(図中a)から見て61%、石原流量観測所(図中c)から見て25%を占める。多摩川本川に沿っては用水堰が多く設置されている。多摩川では古くから砂利採取が行われていたが、1964年には河口から万年橋(調布橋より2kmほど上流)まで、ついで1968年にはその上流部についても禁止された。

図-3には、流量年表より調布橋地点の年最大流量の経年変化を示す。データが無い年については羽村堰での本川への放流量(洪水時)のデータを用いた。図から、1960年以降、1974年、1982年の洪水が飛

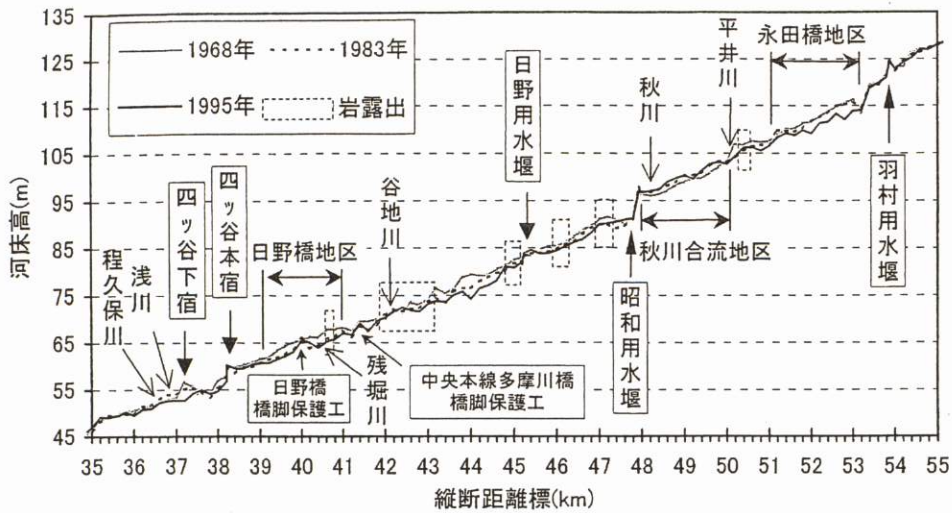
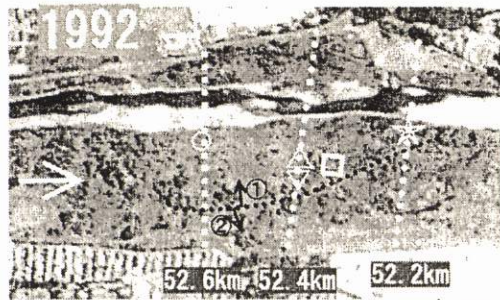
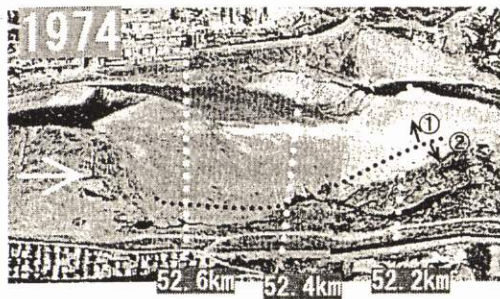


図-4 最深河床縦断形の経年変化



代表地点○52.6A △52.4A ▽52.4B ☆52.2A
□ 方形区(詳細調査用) ①② 領域

写真-1 植生繁茂状況の変化(左:永田橋地区,右:日野橋地区)

び抜けて大きく、ついで1981年、1983年にやや規模の大きい洪水が出ていること、これ以外の年には小規模の洪水しか起こっていないことがわかる。

本研究では、集中的な調査・分析を行う対象として3つの調査地区(永田橋、秋川合流、日野橋)を選定した。その位置と概要を図-2と表-1に示す。これらの地区においては、砂利採取が禁止された1964年以降、護岸や橋梁のような局部的の工事を除けば河床に人為的なインパクトがなく、また河道内樹木の伐採も一部を除けば無かったので、調査対象として適している。

b) 河床縦横断形の経年変化

最深河床高の縦断形の経年変化を図-4に示す。なお、本論文ではすべて、横断測量はその年の早春

(2月、3月)に、航空写真(後出)はその年の秋(出水期後)に行われている。この図を見るとわかるように、3地区を含む一連区間(35-55km)の河床変動は次のような一貫した傾向を示している。1)横断構造物(堰、床止め、橋脚保護のための帯工的構造物など)に挟まれた区間では、上流側の横断構造物に近づくほど河床低下が大きくなり、逆に下流側の横断構造物の近傍では、河床低下が小さいか、安定さらには上昇傾向にある場合もある。2)ただし、岩が河床に広く露出している場所においては、1)と無関係に河床変化が少なくなる場合がある。3)有力な支川の合流は河床上昇に寄与する場合がある。

各調査地区の河床変動も、これら1)~3)の傾向から逸脱しない。すなわち、横断構造物(羽村用水堰

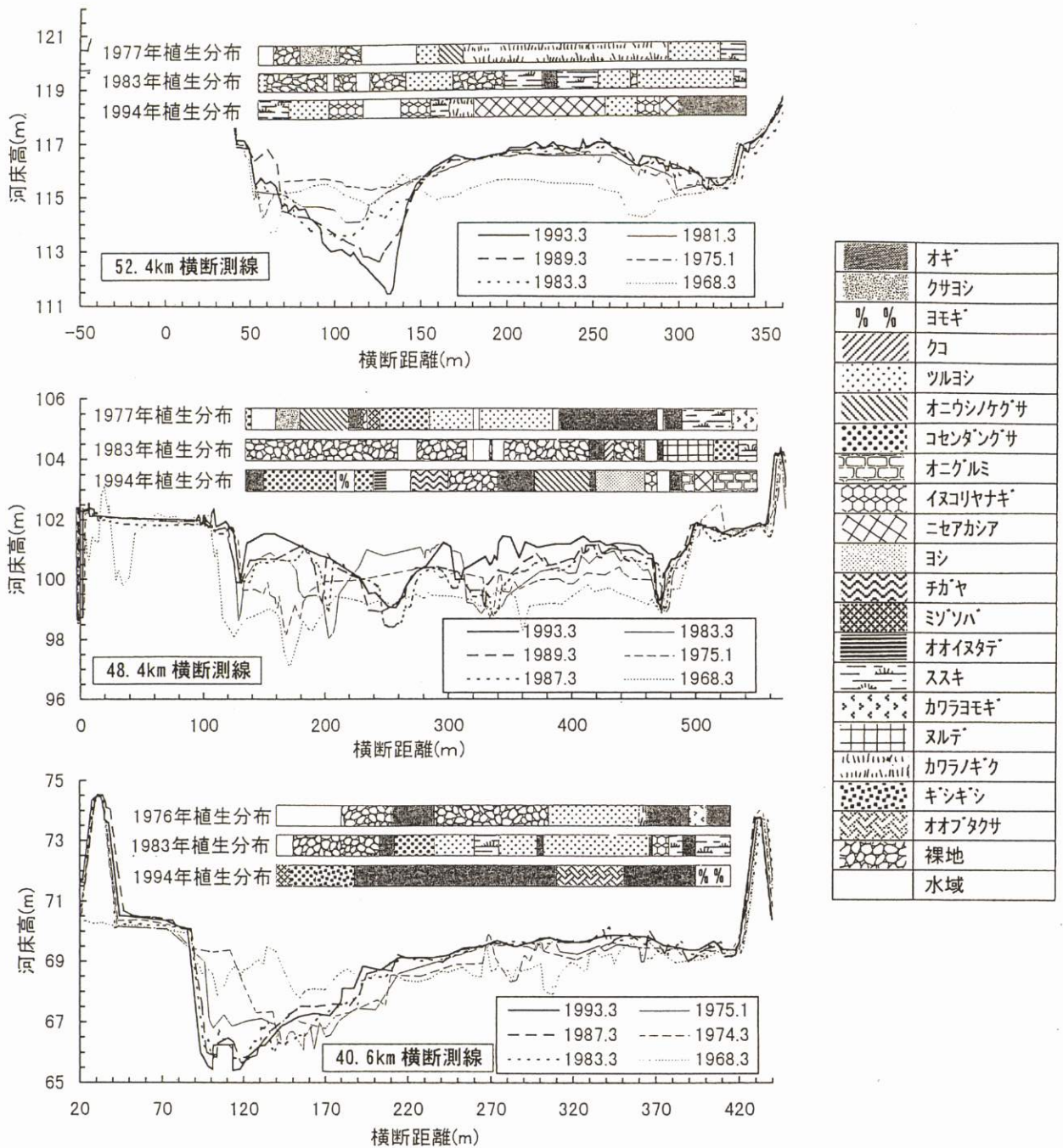


図-5 横断形状と植生横断分布の経年変化（上：永田橋地区 52.4km 横断測線，中：秋川合流地区 48.4km 横断測線，下：日野橋地区 40.6km 横断測線）

関連床止め群)のすぐ下流に位置する永田橋地区では河床低下が明瞭であり、横断構造物(昭和用水堰)のすぐ上流で有力な支川(秋川)が合流する秋川合流地区では河床が上昇ないし安定であり、下流の横断構造物(四谷本宿用水堰)からやや離れた位置にある日野橋地区では河床低下傾向が見られる。また、これらのことから、3調査地区における河床変動が一連区間で現れうる河床変動傾向を概ね包含しているとも言える。

図-5に3地区の代表横断測線での横断形状を示す。以後特に断らない限り、横断測線上の距離は左岸距離標からのものである。永田橋地区については、1968年当時河床は概ね平坦であったが、1975年まで

の間に河床の右岸寄り部分が上昇したため、そしてその後は左岸寄り部分が低下したため、結果として現在は複断面的形状が現れていることがわかる。秋川合流地区に関しては、全川幅に比べ幅の狭い高水敷が1968年当時から安定的に存在し、高水敷の間に広い低水路状の河床が広がっている。低水路部分の河床は大局的に見ると平坦であり、その中で太く安定的な滞筋が形成されることはなく、滞筋は横断的にかなり細かく変動している。低水路河床高は平均的には上昇傾向にある。3つ目の日野橋地区は、永田橋地区と同じような複断面化過程をたどっている。

(2) 植生繁茂状況の変化

写真-1に、永田橋地区と日野橋地区の1974年と1992年の航空写真を示す。永田橋地区については52.2kmから52.6km横断測線にかけて、日野橋地区については40.5kmから40.9km横断測線にかけて右岸側に広がっていた広大な白州（裸地礫床）が、密生した植生域にとって代わられている。これらの植生域は最近10年以上安定的に存在している。本研究では、こうした植生域を“安定植生域”と呼ぶことにする。安定植生域は後述のように草本だけでも木本だけでも限らないので、ここでは両者を区別せずに「安定植生域」と括った。なお、秋川合流地区では一方向的な安定植生域拡大は起こっていないが（後述）、比較対象として検討に入れた。

次に、河床横断形状と奥田ら^{34),36)}、曾根³⁵⁾による植生図から読み取った植生横断分布との関係を見る。図-5(上)から、永田橋地区52.4km測線においては、1994年にはニセアカシア（ハリエンジュとも呼ぶが、本論文ではニセアカシアを用いている）やオギなどの安定植生域が右岸の高水敷に発達し、この場所で1977年当時優勢であったカラノギク群落大幅に縮小していることがわかる。このことは、裸地礫床に近い地被状態にあった河床のうち（カラノギク群落は密生度が低く地被的には裸地礫州に近い）、複断面化に伴い高水敷になった部分に安定植生域が広がったことを示している。日野橋地区40.6km測線についての図-5(下)を見ると、1976年には、複断面化に伴い形成された右岸高水敷において右岸堤防沿いにオギが繁茂し、その左は裸地とツルヨシ、オギが存在しており、1983年には裸地の多くがツルヨシにとって代われ、1994年にはほぼ全面的にオギで被われる状況となっている。日野橋地区においても、永田橋地区と同様、高水敷になった部分（右岸高水敷）に安定植生域が広がったと言える。一方、48.6km測線についての図-5(中)から、秋川合流地区については、永田橋地区や日野橋地区で見られたような、横断形状変化と安定植生域拡大とのわかりやすいマクロな対応関係は見られず、河床地形と植生分布状況が時間的・空間的に細かく変動していることがわかる。

植生変化の意味の理解や機構解明のためには、植物群落の種類ごとに動態を詳細に把握することが必須である。そこで、前出の1977（日野橋は1976）、1983、1994年現存植生図^{34),35),36)}を用いて、永田橋地区の52.2～52.6km測線間の低水路中央より右岸側（面積8.3ha）、秋川合流地区の48.4～48.6km測線間の低水路内（面積23.9ha）、日野橋地区の40.4～41.2km測線間の低水路中央より右岸側（面積13.2ha）における各植物群落の総面積を算出し、その時間変化を分析した。結果を図-6に示す。なお、この図を作成する際には、3時点平均の占有面積が対象面積の2～3%程度に満たない種を分析から除外した。本研究で用いる植物の和名と学名を付録注1にまとめて示しておく。表-2には、図-6から読み取ることのできる植生変化の全体的な傾向をまとめて示す。これらから以下のことがわかる。

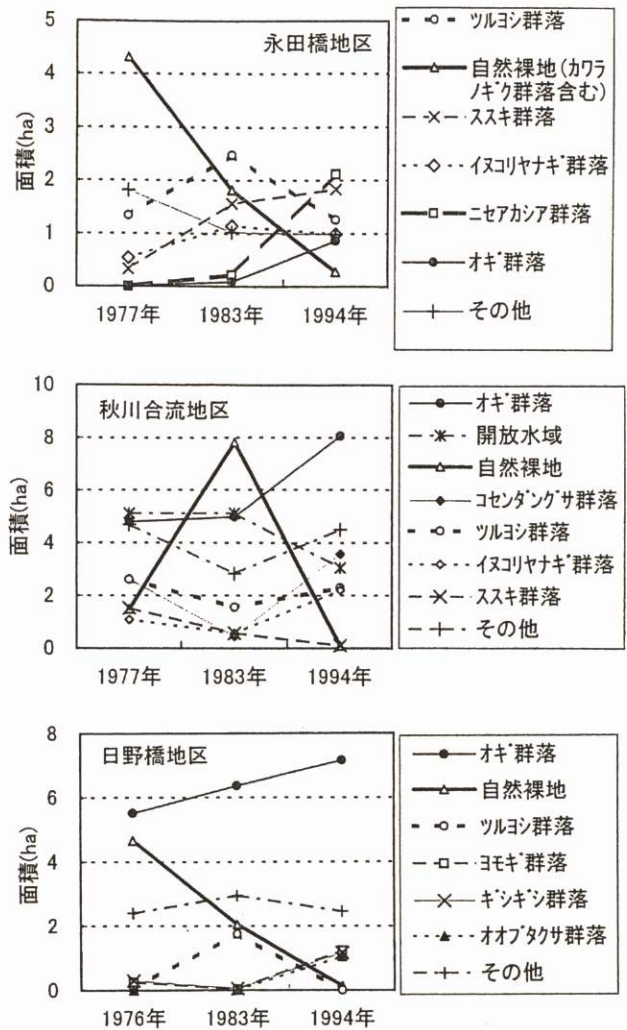


図-6 各植物群落の占有面積変化（上：永田橋地区，中：秋川合流地区，下：日野橋地区）

表-2 1977（1976）～83～94年の植生変化傾向

代表的地被状態 (植物群落)	永田橋地区 日野橋地区	秋川合流地区
自然裸地（被度の低い群落を含む）	↓	↓
ツルヨシ、イヌコリヤナギ、コセンダングサ	↓	↓
オギ、ニセアカシア、オオボタクサ	↑	↑

注) 矢印の上向きは占有面積の増加を，下向きは減少を表す。
 注) -----▶ 1977（1976）年から1983年の変化
 —————▶ 1983年から1994年の変化

各地区の植物群落の変化には永田橋・日野橋地区と秋川合流地区で明瞭な違いがある。この違いは、図-3と表-2の対比から、1982年洪水に対する応答の違いを表しているといえることができる。すなわち、秋川合流地区では、1982年洪水により特に表の二段目の植物が破壊されて自然裸地が作られ、そこに同じ植物が回復することにより表-2の変化が起こっているのに対し、他の2地区では1982年洪水が自然裸

地の増加にあまり寄与せず、むしろ表-2における三段目の植物の増加のきっかけになった可能性が高い。そして安定植生域を主に担ったのは、この三段目の植物（ニセアカシア、オギ、オオブタクサ）と言える。これらのことは、河床上昇傾向にある区間ほど洪水による植物群落の破壊と洪水後の再生という変動が活発であり、逆に、河床低下傾向にある場所では洪水が大きな植物破壊作用を持ちにくく、むしろ洪水が新たな植生繁茂を助長することを示唆するものである。また、図-5(上,下)、図-6、表-2を総合すると、永田橋地区では遅くとも1975年に、日野橋地区では遅くとも1974年に河道形状が複断面的になっているにもかかわらず、安定植生域の拡大が顕著に起こったのは1983年以降であったと言える。このことは、植生図作成よりも高い頻度で撮影された航空写真の分析からも確認されている（文献37)pp.44）。

以上に示された3つの調査地区での植生変化と河床変動の実態は、植生動態の背後にある仕組みを理解する上で、洪水と河床変動の影響を考慮することの重要性を強く示唆するものと言える。

3. 安定植生域の形成過程における植物群落と立地条件との関係

(1) 現地調査の内容

河川に生育する植物の空間分布が、その立地条件（たとえば、(微)地形特性、地下水位からの高さ、冠水頻度、水面からの比高、土壌、河床材料など）と密接な関係を持っていることは知られており、これに関して多くの研究が行われている^{38),19),18),39),40),41)}。このことを踏まえ、本研究では、立地条件と植生生育状況との相関を対象地区について確認するだけでなく、両者の関係に基づいて、河川固有の頻繁な立地条件変化に伴う植生変化をどこまで予測できるかの見通しを得ることを目指した。

このためには、植生生育状況と立地条件という2つの情報を数m以下という高い空間解像度の下で重ね合わせることが必要と考え、各地区それぞれに数本ずつベルト・トランセクト（河道の横断方向に引かれたある幅を持つ線）を設け、その線に沿って各種情報を集め重ね合わせて分析するという手法を採用した。表-3に、設けたベルト・トランセクトの位置を、建設省の距離標表示による横断測線名で示す。ベルト・トランセクトの幅はおおよそ2mである。

ベルト・トランセクト沿いの立地条件調査の項目は、植物群落、河床高、河床面の地下水位からの比高、河床表面状態である。植物群落の同定に際しては、相観に基づき優占種により群落名を決めた。ほとんどの調査は植物が成熟サイズにまで成長した8月以降において実施した。植生調査時期は表-3に示されている。過去の河床高については、ベルト・トランセクトと同じ横断測線上で建設省が行った横断測量成果を用いた。地下水位からの比高は、当該地点の河床高と平水時の水位との差とすることを原則とした（「地下水位=平水時の水位」と仮定）。た

表-3 設けたベルト・トランセクトと調査時期

地区名	ベルト・トランセクト位置	植生・立地条件の調査範囲	植生調査時期	表層河床状況の調査時期
永田橋	52.2km 横断測線	低水敷中心線から右岸堤防	1997年8月25日	1997年8月25日
	52.4km 横断測線	低水敷中心線から右岸堤防	1997年8月25日	1997年8月25日
	52.6km 横断測線	低水敷中心線から右岸堤防	1997年4月30日, 5月14日	1997年4月30日, 5月14日
秋川合流	48.4km 横断測線	低水敷内	1997年10月18日	1997年10月18日
	48.6km 横断測線	低水敷内	1997年10月20日	1997年10月20日
日野橋	40.6km 横断測線	低水敷中心線から右岸堤防	1997年10月9日	1997年10月9日
	40.8km 横断測線	低水敷中心線から右岸堤防	1997年10月8日	1997年10月8日

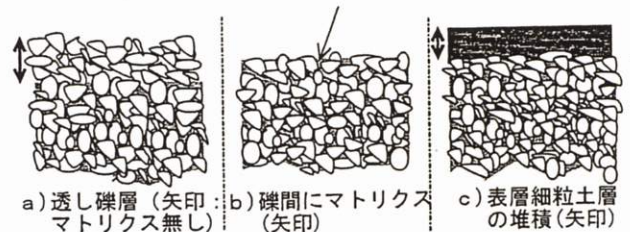


図-7 河床表面状態の分類

だし、永田橋地区については、右岸高水敷の下に不透水と見なせる層が平水位より高い位置に分布していることから、地下水観測用井戸の水位データを加味して補正した。地下水位データは文献42)による。立地条件のうち河床表面状態については特に重要なので次に詳しく調査法を述べる。

最初に河床表層の細粒土砂堆積状態の判定を行った。調査対象の高水敷では、礫床面の上に種々の厚さで中砂粒径以下の細粒土砂が堆積するパターンが多く見られ、この層の有無が河床状況の特徴づける重要な項目と考えられた。そこで、まず、対象地点の河床が図-7に示すパターンa, b, cのいずれに当たるかを観察により判定した。ここで、細粒土砂とは2mm以下粒径の河床材料（砂粒径以下）と定義した。なお、実際の粒径は、後述するように2mmよりもだいぶ小さい。ここでの2mmという数字は検土杖がささるという観点で定めたものである。図中のパターンc「表層細粒土層の堆積」と判定される堆積層を、以後「表層細粒土層」と呼ぶ。次に、表層細粒土層がある場合にだけ、検土杖でその厚さを測定し、その粒度を調べた。検土杖測定は、測定点付近の3~6点で行い、その最大値を表層細粒土層厚とした。パターンb「礫間にマトリクス」およびパターンa「透し礫層（マトリクス無し）」と判定された場合には、表層細粒土層厚を0とし、測定点付近の表面に存在する礫の粒径を測定した。

(2) 発達する植物群落と立地条件との関係

a) 分析方法

前節で述べた現地調査から、立地条件を表す3つ

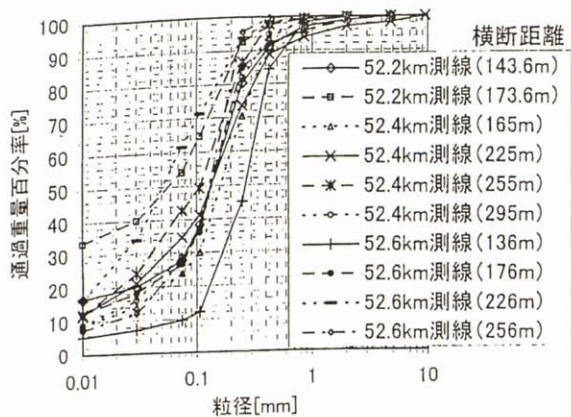


図-8 表層細粒土層の粒度分布 (永田橋地区)

の重要な因子、すなわち地下水位からの比高 (以後「比高」と略称する)、表層細粒土層厚、表層材料粒径が得られる。このうち表層材料粒径は、本研究対象地区の場合、表層細粒土層の有無によりほぼ決まる。図-8は、永田橋地区で採取された表層細粒土層のサンプルの粒度分布を重ねて示したものであり、この図から、表層細粒土層の平均粒径が0.15mm程度で、細砂を中心にシルト・微細砂から中砂という分布幅を持つことがわかる。一方、表層細粒土層が無い場合、表層材料は礫となる。以上から、本分析では表層材料粒径を直接は取り上げないこととした。

以上より残った2つの有力な因子、すなわち表層細粒土層厚を横軸、比高を縦軸に取った座標上での各群落の分布状況を調べることにより、立地条件と植物群落との関係进行分析することとした。以後、この座標を「比高-堆積厚座標 (図)」と呼ぶ。

ベルト・トランセクト沿いには数多くの植物群落が存在するが、ここでは、2(2)に述べたと同じ基準により、分析対象とする植物群落の種類を表-2、図-6に示した群落だけに絞った。また、表-3に示す調査時期からわかるように、得られた結果は現時点 (1997年) についてのものである。なお、分析におけるベルト・トランセクト沿いのデータのピッチについては、最も粗いデータ項目に合わせ、日野橋地区、秋川合流地区では5m、永田橋地区では10mとした。

b) 比高-堆積厚座標図から見た植物群落の各種類の特徴

植物群落の各種類について比高-堆積厚座標にプロットした結果を図-9に示す。なお、図中で年のついたプロットは、過去に遡って調べた結果である。これについては4(2)a)で述べ、ここでは現時点のデータに基づいた分析だけを行う。なお、図-9の全データは、比高-堆積厚座標において概ね一様に分布し、大きな偏りのない母集団である。

まず、比高-堆積厚座標上の植物群落各種類の分布状況が、図-10、表-4に示すタイプI、II、IIIに分けられることがわかる。タイプIは、同座標上の左端すなわち堆積厚が0の領域に分布する。タイプIIは、堆積厚0で低比高 (0~30cm程度) の領域と、ある程度の比高を持ち堆積厚10cm程度以上の領域に分かれて分布する。タイプIIIは、堆積厚が0でなく低

比高 (50cm程度以下) でない領域に広く分布する。各タイプに該当する群落は表-4中に示されている。タイプIIIの中でも、群落の種類によって少し違いがある。特に、ススキは比高150cm以下にほとんどなく、堆積厚も他の3つに比べ小さい領域 (10cm前後) が分布の中心になっていることから、III型をサブカテゴリーに分ければ、ススキ (III-1) とそれ以外 (III-2) というように設定できそうである。

以上3タイプそれぞれの分布域は、一部重複する部分もあるが、全体的にはお互いに異なったものと見ることができる。このことは、これら3タイプのうちどれが発達するかが、立地条件によって強く規定されることを示している。また、各タイプに属する群落の種類を見ると、表-2の1段目がタイプIに、表-2の3段目にある群落の種類がタイプIIIに、表-2の2段目の群落がタイプIIにほぼ対応している。このことは、これらのタイプ分けが3調査地区で起こった植生変化パターンの違いを説明する上でも重要であることを示している。

なお、図-9、図-10に示された比高-堆積厚座標図上での群落各種類の分布特性が、それらの生活型に関して従来定性的に言われていた特徴とも矛盾しないことが確認されている (文献37) pp.73-74)。また、表層細粒土層は、図-8に示したようにシルト以下の粒径を3割ぐらい含んでいる。この条件は、礫床や良く分級された中砂層などシルト分をほとんど含まない立地に対して、水分保持や栄養塩の点で圧倒的に有利な植物生育環境を与える。この点からも、比高-堆積厚座標における堆積厚という指標の重要性が理解される。

(3) 安定した植生域拡大の原因となった立地条件変化についての考察

図-6や2(2)に示したように、対象区間の安定植生域拡大を主にもたらしたのはオギ、ニセアカシア、オオバタクサ、ススキの繁茂である。図-10からわかるように、これらはいずれもタイプIIIに属し、このタイプは、表層細粒土層厚が0の場所には存在していない。したがって、礫床の裸地の状態から安定植生域が拡大する過程においては、必ず表層細粒土層の形成 (堆積) が起こらなければならない。すなわち、タイプI分布域からタイプIII分布域への立地条件の変化である。

この立地条件変化は、細粒土砂堆積により一足飛びに起こったとも考えられるが、タイプII分布域への変化を経て起こったことも考えられる。すなわち、礫床裸地にタイプIIの植物群落が定着・発達し、そこに細粒土砂が堆積することにより、比高-堆積厚座標上の位置がタイプII、IIIの重複分布域に移動し、次第に、タイプIIIの群落に遷移したという過程である。または、細粒土砂が堆積した場所にタイプIIの群落が形成され、そこが次第にタイプIIIの群落に遷移したという過程である。

一方、タイプIIIに属する4種の群落の中での変化は、基本的には生物学的な遷移が主と考えられる (文献37) pp.75-76)。

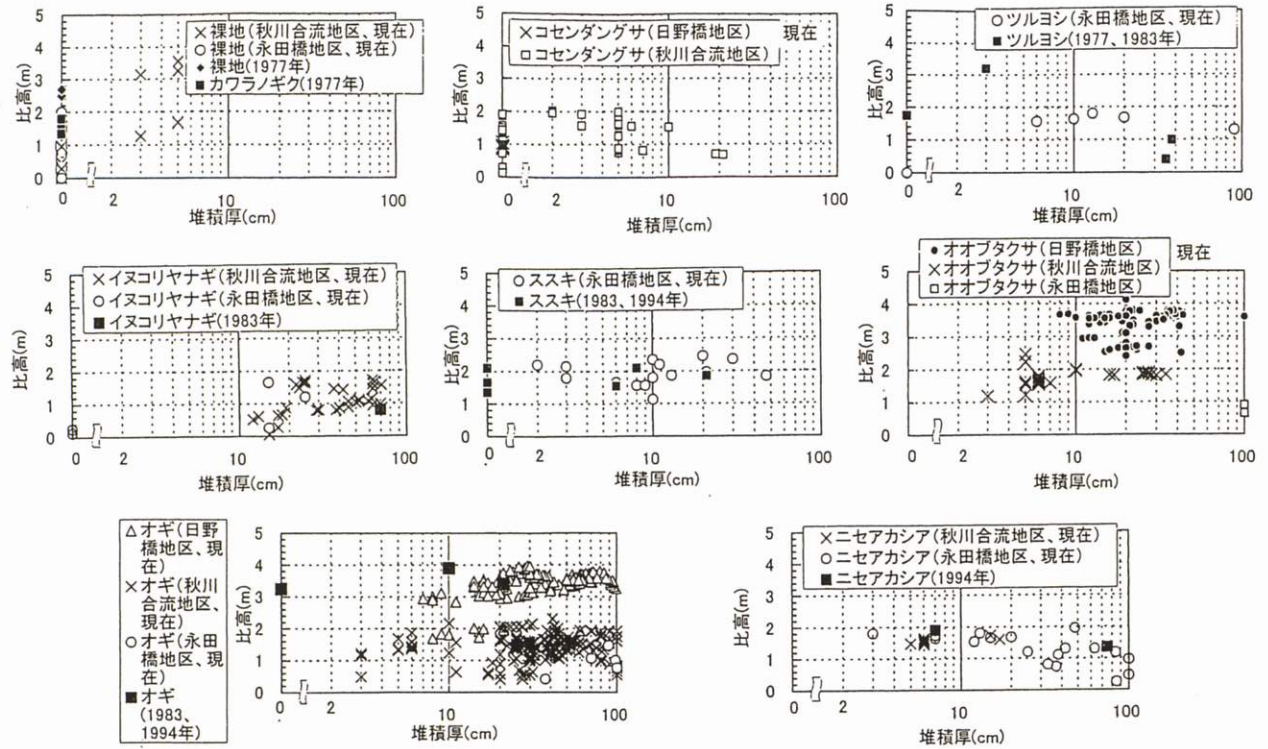


図-9 各群落の比高-堆積厚座標における分布

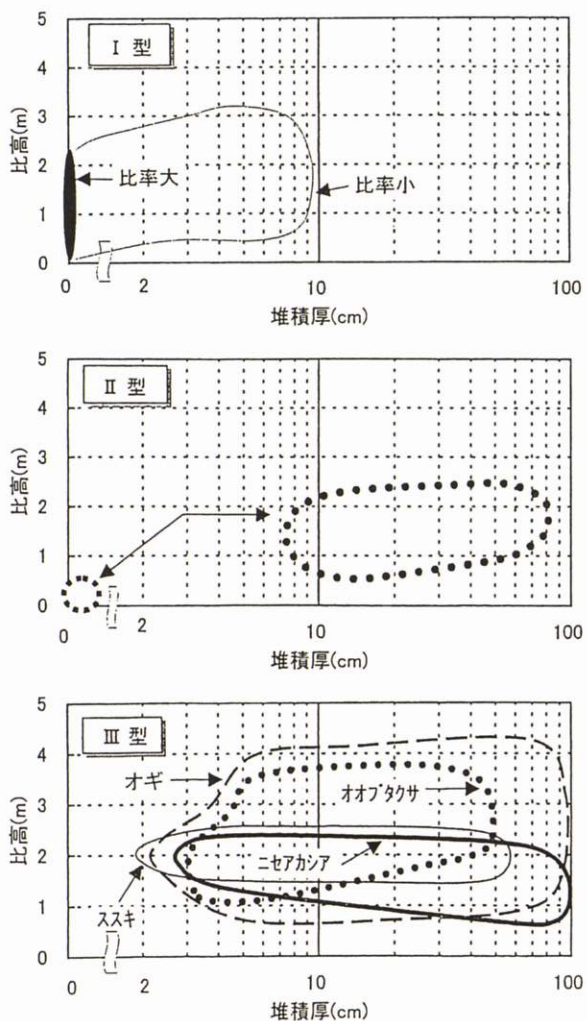


図-10 各タイプの比高-堆積厚座標上の分布域

表-4 比高-堆積厚座標を用いた植物群落のタイプ分けの試み

I型	裸地およびカワラノギク、コセンダングサを優占種とする群落が該当	比高によらず、ほとんどの場所では、堆積厚0である。図-10(上)参照。一部薄い(10cm程度以下)表層細粒土層厚を持つ場合がある。
II型	ツルヨシ、イヌコリヤナギ群落	2つの離れた存在領域を持つ。すなわち、堆積厚0で比高が30cm以下の場所と、堆積厚10cm程度以上で比高が概ね50~100cm以上の場所に分布する。図-10(中)参照。
III型	ススキ・オギ・オオバクサ・ニセアカシア群落	堆積厚0の場所に存在しない(ただしススキは堆積厚ほぼ0の場所にも存在し得る可能性がある)。比高および0近くの場所には存在しない。堆積厚数cm以上、比高50cm程度以上の場所に幅広く分布する。図-10(下)参照。 ススキをIII-1型、それ以外をIII-2型と細分することもできそう。この場合は、III-1型は、低比高に存在せず(150cm程度以上)、堆積厚が薄い(10cm前後が多い; 0でも繁茂不可能でない可能性も)ことが特徴となる。

以上を踏まえ、礫床の裸地的地被(タイプI)から安定植生域形成(タイプIII)に至る道筋についてのシナリオおよびタイプIIIに属する4種類の群落間の変化の方向を総合して図示すると、図-11のようになる。この図で、黒矢印は立地条件の物理的変化が主役となった変化を、白矢印は生物学的プロセスも主役となった変化を表す。この図は、タイプIIIへの移行に関して、立地条件の物理的変化の重要度が高く、どこかのパスでそれを経る必要があることを示している。一方、立地条件の物理的変化を受けて群

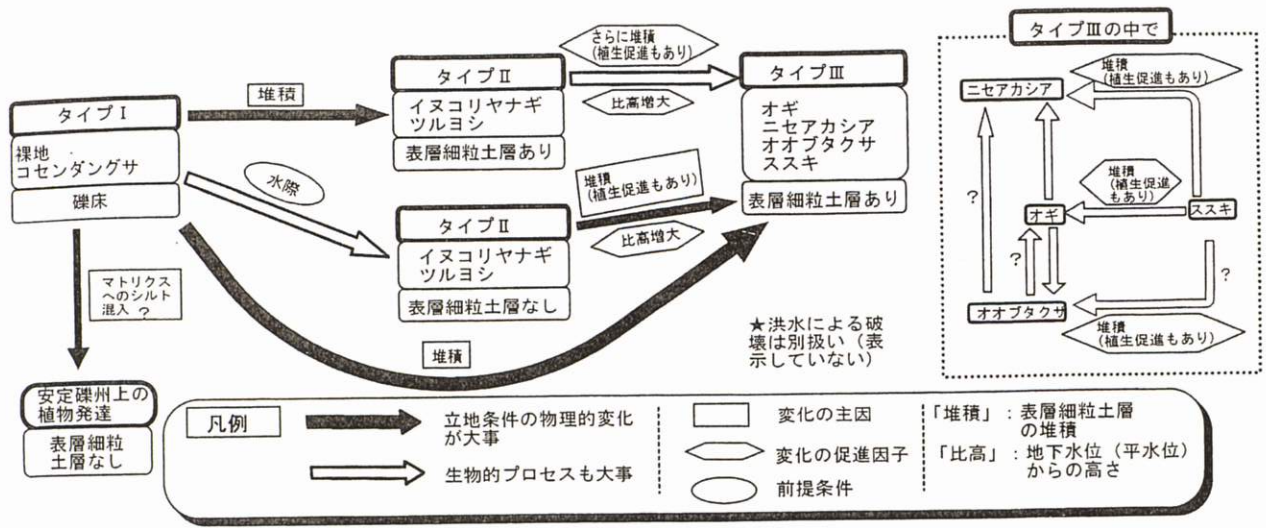


図-11 礫床裸地から安定植生域への変化の道筋についての考察

落の種類が変化する場合にどの種になるか、あるいはタイプⅢ、Ⅱそれぞれに属する群落間の変化については、生物学的プロセスも重要になる(文献37)pp.75-76)。なお、図-11では、洪水による破壊に伴う変化は入れていない。このプロセスについては5(1)で取り上げる。

4. 安定植生域の形成を支配した立地条件の形成機構

(1) 表層細粒土層の堆積性状と堆積過程

本章では、前章で安定植生域拡大にとって不可欠であるとされた「表層細粒土層」の堆積機構を、永田橋地区の52.2km~52.6kmを対象を絞り詳細に調べ、その結果を前章までの知見と合わせ、安定植生域拡大のシナリオを提示し、5章の検討の土台とする。

まず、洪水営力の履歴を調べるため、年最大洪水流量データを用いて、複断面形状や樹木を考慮した準2次元の不等流計算⁴³⁾により、各年の高水敷最大水深を代表地点について求めた。代表地点は、写真-1(左)中に示されている52.4A(52.4km測線の横断距離215m地点)、52.4B(同235m地点)の2地点である。結果を図-12に示す。この図から、1974年以降に有意な高水敷流の作用を受けたのは1974、1981、1982、1983年の4洪水だけであることがわかる。

図-13に、永田橋地区における右岸高水敷の横断形状の経年変化と、検土杖により測定した表層細粒土層厚の横断分布を合わせて示す。さらにこの図には、最近(1993年に)測定された河床高から表層細粒土層厚分を鉛直下方に下げた位置のラインも併記されている。1993年の横断測量結果は、最近の測量結果の中で最も精度が高いと判断され、また、前述のように、対象としている高水敷に少なくとも1993年以降河床変動を起こすような洪水が発生していない。これらのことから、このラインは、{表層細粒土層下端の高さ} = {礫層表面の高さ}を表していることになる。以後、このラインを「礫層表面高」と呼ぶことにする。

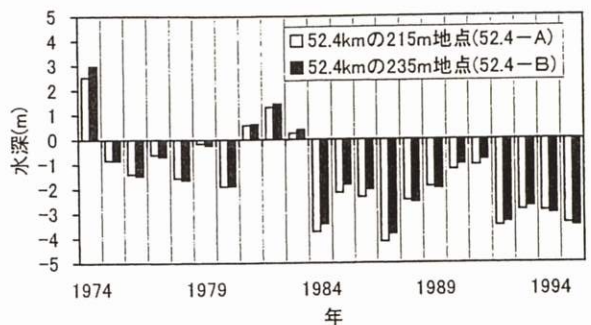


図-12 年最大高水敷水深 (永田橋地区)

と呼ぶことにする。

図-13から、大きく見ると表層細粒土層の堆積域を2つに分けることができる。1つは、表層細粒土層厚が数cmから60cm程度までの範囲であり、図中では①の範囲として示してある。もう一つは、表層細粒土層が厚さ1m程度に及ぶ範囲であり、図中では②の範囲として示してある。これら2つの範囲は写真-1(左)にも示されている。後者②はいずれの横断測線においても右岸寄り(右岸堤防沿い)に位置している。また②の範囲では、礫層表面高が1981年当時の河床高よりも低く、1968年当時の河床高よりも低くなっている場所も見られる。このことは、②の範囲では表層細粒土層がかなり古くから(少なくとも1981年以前、古いものは1968年以前)形成されていたことを示している。一方、上記①の範囲では、礫層表面高が概ね1981年(出水期前)当時の河床高あるいは1983年(出水期前)当時の河床高と一致している。このことは、①の範囲の表層細粒土層の堆積は②の範囲のそれに比べ新しく、古くとも1981年(出水期前)以降であることを示している。

本研究の対象期間(1974年以降)に急速な安定植生域の拡大が見られたのは範囲①においてであり、範囲②の多くの場所では1968年当時あるいは1974年当時すでに密生した植生が繁茂し、そこでは研究対象期間以前から安定的に植生が存在する条件が備えられていたと見ることができる(写真-1(左)参照)。

そこで以後の検討では、もっぱら領域①に焦点を当てることにする。

図-13から、領域①の範囲にある表層細粒土層は、場所により種々の厚さを持っている（数cmから60cm程度まで）ことがわかる。52.4km測線の☆印の位置（横断距離190m地点付近）のように厚さ0の場所もある。また、52.6km測線の河畔堆積物とみなされる範囲（図中の★印）を除けば、低水路右岸肩からの距離に応じて厚さが徐々に低減するような特徴は見られない。全体として、100～150m程度の幅広い横断範囲に概ね一様に薄く堆積していると見ることができる。

永田橋地区においては、砂利採取が1964年以降行われていないので、図-12の高水敷への冠水記録（一部図-3も参照）と図-13との比較を通して、河床高変化と表層細粒土層堆積がどの洪水により起こったかを推定することができる。まず1968年から1981年（いずれも出水期前；以後も同様）にかけての大きな河床上昇は、この間に有意な高水敷流を起こした1972年と1974年洪水によるもの（後者の影響が圧倒的に大きい）と考えられる。1981～1983年の間の小さな河床上昇は、1981、1982年洪水による堆積である。1983～1993年の間の河床上昇は、1983年以外有意な洪水が無かったことから、1983年洪水による堆積と考えられる。上述のように礫層表面高が1981年あるいは1983年当時の河床高に対応していることから、表層細粒土層は1981年、1982年、1983年の3洪水中あるいは1983年の洪水中に形成されたと判断できる。同様にして、表層細粒土層の基盤となる礫層表面は、1974年洪水、あるいは1982年洪水により形成されたことになる（ここで、1981年洪水は他の2つに比較して流量が小さく、高水敷上の礫を動かす力が弱かったことから、除外した）。

以上の分析結果は、領域①の代表4地点（52.6A（52.6km測線の横断距離145m地点）、52.4A、52.4B、52.2A（52.2km測線の横断距離154m地点）：写真-1(左)参照）で行った高水敷掘削による堆積構造調査によっても直接確認することができた（文献37）pp.87-91）。この調査によれば、1974年洪水で形成された礫層の粒径は1～30cm程度で細粒土層を挟んでいない。また、1982年洪水がもたらした礫層が存在する場合、その厚さが15～30cm程度で粒径は10cm程度以下であった。そして、この礫層の上に表層細粒土層が乗り、その下に細粒土層がもう一つ存在し、さらにその下に1974年洪水に伴い形成された礫層が存在するというパターンが観察された。

(2) 表層細粒土層形成に伴う立地条件の変化と植生変化との時間的關係

a) 発達する植物群落の種類と立地条件との過去の時点における關係

前節(1)に示したように、代表地点では1～1.5m程度の深さまで堆積構造がわかっている。また、これと横断測量結果とを対比させることで、各時期の河

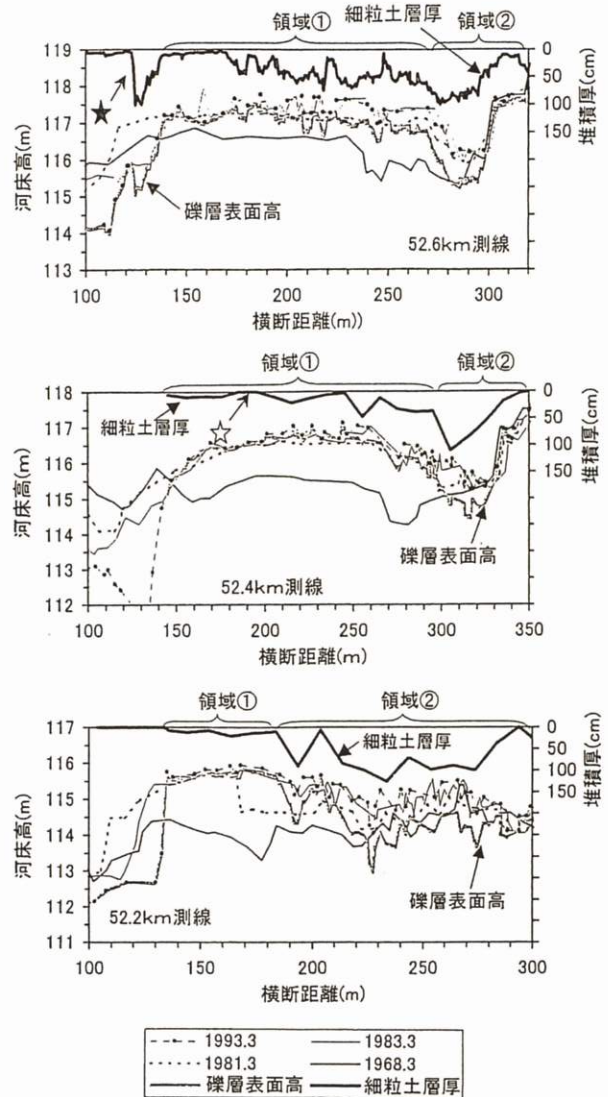


図-13 河床横断形状と表層細粒土層の横断分布（上：永田橋地区52.6km測線，中：同52.4km測線，下：同52.2km測線）

床表面の材料を推定することができる。一方、奥田らの植生図^{34),35),36)}から、過去3時点（1976または1977、1983、1994年）の植物群落を任意の位置について知ることができる。以上の情報を組み合わせることにより、過去の3時点の立地条件（河床表面材料）と植物群落各種類との関係を整理できる。この結果を、比高-堆積厚座標図上に表したものが、図-9の年のついたプロットである。これを見ると、過去の3時点における植物群落各種類と立地条件との関係（比高-堆積厚座標図上）は、概ね現時点についての関係と整合し、両者に大きな相違は無い。図-9、図-10の關係がこの20年程度の間においても概ね成立していた可能性が高いと言える。

なおヤナギについては、種子の発芽時期の立地環境が、その後の成長や群落形成に大いに関係するといわれているので⁴⁴⁾、上述の長い時間スケールでの立地条件の変化と植物群落との關係性を調べるとい方法が妥当でない可能性もあるので注意を要する。

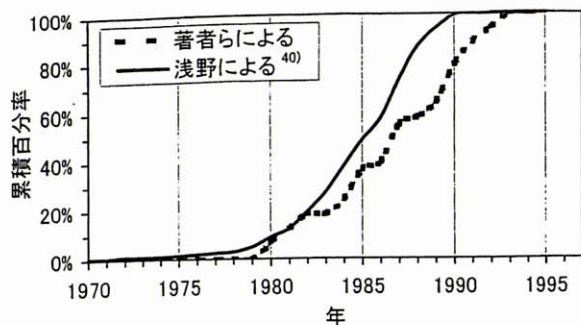


図-14 ニセアカシア成立年

b) ニセアカシア群落の拡大と表層細粒土層堆積との時間的關係

図-14に、52.35km横断測線上の右岸距離標から150m付近を中心とした25×23mの方形区(写真-1(左)参照)で行ったニセアカシアの樹齢調査結果から推定されるニセアカシアの成立年の頻度分布を示す。浅野⁴⁵⁾は、永田橋地区のより広域で(51.7～53.2kmの右岸高水敷全域)ニセアカシアの樹齢調査を行っており、その結果も合わせて図示されている。この図から、ニセアカシアの成立が本格的に始まるのが1981～1983年頃であることがわかる。前節(1)で結論づけたように、永田橋地区右岸高水敷(領域①)では、1981年から1983年の間に表層細粒土層の堆積が起こり、河床表層材料が礫主体から細砂層に変化している。この結果は、表層細粒土層が堆積すると相前後してニセアカシア群落拡大し始めたことを示すものである。

以上a)b)の結果は、「表層細粒土層の堆積が安定植生域拡大の引き金になる」、「裸地の地被(タイプI)から安定植生域(タイプIII)への移行が起こるために表層細粒土層の形成が不可欠である」という3章の考察結果を強く支持するものである。

(3) 表層細粒土層形成の水理的機構

a) 本節のねらい

表層細粒土層が永田橋地区の右岸高水敷の領域①に堆積した機構を水理的に明らかにし、安定植生域拡大現象を全側面にわたって説明することを試みる。

永田橋地区の上流の右岸高水敷は下流に比べ高く、そこでは多くの流量が低水路を流下するのに対し、そこから下流に向かうにしたがって、高水敷が低くなるとともに低水路河積も若干減少するため、低水路を流れていた水が右岸高水敷に溢れ出す形になる。このような流況の下では、対象としている高水敷に土砂を含む低水路からの流れが広く流入することになる。そこで、以下では、洪水時に低水路から高水敷へ一方向的に水と土砂が運ばれる状況を前提に、細粒土砂堆積の水理条件を調べていく。なお、最近の研究から精緻な水理モデルの適用が可能になっているが^{16),17),26),27),28),29),30)}、ここでは最も単純化した水理モデルで検討を行っている。これは、第1章の最後で述べたように、植物と河川の作用との結合を図り植生動態の全体像を得るには、現段階では、各過程の表現を本質から外れない範囲で単純化しておい

た方が有利と考えたからである。

以下の検討では、表層細粒土層の粒径を図-8より0.15mmとおく。

b) 裸地礫面への堆積が可能であったかの検証

右岸高水敷の代表地点として52.4A地点を取り上げ、以下の水理検討を行った。複断面形状や樹木を考慮した準2次元の不等流計算から、代表地点の摩擦速度 u_* を種々の流量について次式により算出した。

$$u_* = \sqrt{g(H_{nu} - z_{nu})I_{enu}} \quad (1)$$

ここで、 g ：重力加速度、 H_{nu} ：不等流計算水位、 z_{nu} ：当該地点の河床高、 I_{enu} ：不等流計算によるエネルギー勾配、である。この u_* を用いて、粒径0.15mmの土砂が礫面を完全に覆っているとした場合の基準面平衡土砂濃度 C_a をItakura・Kishiの式⁴⁶⁾より算出した。次に、代表地点における土砂濃度 C をやはり流量との関係で設定した。この際、以下の3つ仮定を設けた。①ここで対象としている平均粒径0.15mmの細砂は、ウォッシュロードの一部とみなせる。②上記a)で述べた流況より、低水路を流下してきたウォッシュロードはほぼそのまま当該地点に流入すると考えられることから、代表地点でのウォッシュロード濃度は主流部(低水路)の土砂濃度に等しいと近似できる。③ウォッシュロードのうち、対象土砂(平均粒径0.15mmの細砂)の濃度 C (断面平均：体積)は流量 Q と、 $C = \alpha Q$ の関係を持つ。ここで、 Q [m³/s]：洪水流量、 α [s/m³]：流域からの細粒土砂供給の活性度を表す係数である。 α 値については情報がほとんどないので、河川の多くの地点における全SS濃度と流量との関係に関する既存の実測資料⁴⁷⁾を参考に、 $\alpha = 2.0 \times 10^{-7}$ 、 $\alpha = 2.0 \times 10^{-8}$ の2ケース(以後、前者を濃い条件、後者を薄い条件と呼ぶ)を設定した。

以上から、式(2)により堆積速度 R_D が計算される。

$$R_D = \frac{(C_b - C_a)w_0}{(1 - \lambda)} \quad (C_a < C_b \text{ の時}) \quad (2a)$$

$$R_D = 0 \quad (C_a \geq C_b \text{ の時}) \quad (2b)$$

ここで C_b は底面濃度であり、式(3)～(5)で η を介して鉛直平均濃度 C と結びつけられる。なお、本検討は堆積が可能であったかを調べることを目的としているので、負の R_D 値は想定していない。また、 w_0 ：対象土砂の沈降速度(対象とする細粒土砂の粒径 $d_{gs} = 0.15\text{mm}$ より、0.0167 m/sとおいた)、 λ ：堆積土砂の空隙率(0.4とおいた)である。

$$C_b = \eta C \quad (3)$$

$$\eta = \frac{6Z}{1 - \exp(-6Z)} \quad (4)$$

$$Z = \frac{w_0}{\beta k u_*} \quad (5)$$

ここで、鉛直混合に関する拡散係数と渦動粘性係数の比 β を1、カルマン定数 κ を0.4とおく。なお η については、1を大きく越える場合、ウォッシュロード

一時的流送形態としての特徴を失い、着目しているごく近傍だけの堆積を議論していることになり、本検討の目的（広範囲での表層細粒土砂堆積の水理メカニズム）からは無意味となるので、 $\eta > 3$ の場合 $\eta = 3$ に固定した。なおこのような状況が起こるのは、ここでの計算対象の場合、水深がごく薄い場合（+cmのオーダー）に限られる。洪水流量の時間変化に起因する R_D の時間変化から、堆積厚 D_{ts} は、次式により計算される。

$$D_{ts} = \int R_D dt \quad (6)$$

以上の計算手法を用いて、1981～1983年頃の河床形状の代表として1983年（出水期前）河床形状を与えて、堆積厚 D_{ts} を計算したところ、1982年洪水の減水期において流入土砂が濃い条件でも1mmに満たないという計算結果となった。これは、堆積が起こる条件 [$C_a w_0 < C_b w_0$] が、非常に狭い流量範囲（高水敷水深が数十cm程度以下に相当）にしか存在しないからである。以上から、植生が無い裸地礫床面を想定した場合、実際に起こった広範囲での表層細粒土層形成は水理的に説明できないと言える。

c) 植生を持つ礫面への堆積が可能であったかの検証 1: $C_a=0$ の仮定を設けての検討

礫面に何らかの植物が繁茂していたと想定した場合に対象土砂が有意に堆積する可能性を調べる。まず、礫面上の植生層による底面流速の低減により $C_a = 0$ になったと仮定し、基本的にはb)に述べたと同じ方法で、代表地点52.4Aでの1982年洪水のハイドログラフによる対象土砂の総堆積厚を計算した。なお、 $C_a = 0$ の仮定の妥当性についてはd)で後述する。ただし、本検討では、広範囲に起こった表層細粒土層の堆積が植生の存在によりはじめて可能になることを示そうとしている。このため、ここでは、以下のように、細粒土砂の高水敷への流入の最上流端だけでなく、そこから下流に向けての堆積厚の減少も合わせて計算し、堆積が広範囲に起こりうるかも併せて調べられるようにする。

対象にしている高水敷河床上の流れについて等流を仮定し、細粒土砂濃度の鉛直分布が局所平衡を保つと仮定すると、土砂に関する連続の関係から次式が得られる⁴⁸⁾。

$$v \frac{dC}{dx} = -\frac{\sigma w_0 C_b}{h} \quad (7)$$

ここで、 x ：流下方向の座標、 v ：鉛直平均流速、 h ：水深、である。また、 σ は、浮遊砂巻き上がり（浮上能）の植物による抑止効率（細粒土砂の捕捉効率）を表すために導入した係数であり、1～0で変化させる。植物により完全に $C_a = 0$ となる場合は $\sigma = 1$ となる。一方、そうでない場合、たとえば $\sigma = 1/2$ の場合は、 $C_a = 0$ の場合に期待できた堆積速度 $C_b w_0$ のうち半分が再浮上し、結果として堆積速度が $C_b w_0 / 2$ に落ちる状況に対応する。 σ を導入したのは、実際の河床面には植物が空間的に一様に繁茂していない場合があり得ること、あるいは植物

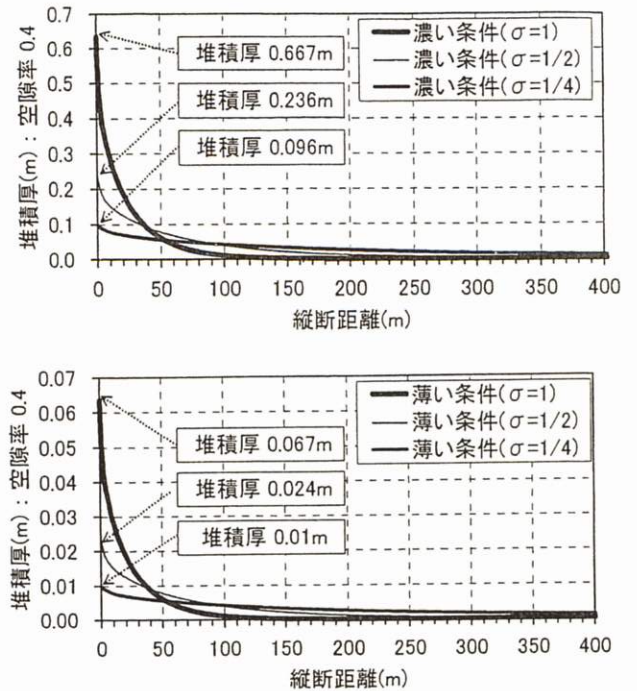


図-15 細粒土砂堆積厚の縦断分布（上：ウォッシュロード供給が濃い条件，下：ウォッシュロード供給が薄い条件）

の底面流速低減効果が $C_a = 0$ の条件を作り出すには至らない場合があり得ることを想定し、実際に起こり得る幅の広い条件で堆積厚の計算を行いたかつたからである。

式(7)と式(3)を連立させ、 $x=0$ で $C = C_0$ という境界条件を用いると、次式が得られる。

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{\eta \sigma w_0 x}{hv}\right) \quad (8)$$

$$C_b = \eta C_0 \exp\left(-\frac{\eta \sigma w_0 x}{hv}\right) \quad (9)$$

$x=0$ での C や C_b が前項b)で扱った濃度に相当する。このことから C_0 は当然次式により与えられる。

$$C_0 = \alpha Q \quad (10)$$

堆積速度 R_D は式(11)から、堆積厚 D_{ts} は式(6)から計算される。

$$R_D = \frac{C_b \sigma \cdot w_0}{1 - \lambda} \quad (11)$$

以上により、細粒土砂の堆積厚とその流下方向変化が算出される。

前項b)の条件設定を踏襲して堆積厚の流下方向分布を求めた。鉛直平均流速 v は次式により求めた。ここで n はマンニングの粗度係数であり、 $n=0.045$ とした。

$$v = \frac{1}{n} (H_{nu} - z_{nu})^{2/3} \sqrt{I_{enu}} \quad (12)$$

また、 $h = H_{nu} - z_{nu}$ である。 σ については、1, 1/2, 1/4の三種類を設定した。その他は、前項b)と同じ方法で計算を行っている。1982年洪水についての堆積厚の計算結果を図-15に示す。この図から、植物

の細粒土砂捕捉効率 σ が相当大きな影響を与えることがわかる。 α について濃い条件を設定した図-15(上)を見ると、 σ が1に近い、すなわち密な植生が空間に一樣に繁茂している場合、最大の堆積厚は60cm以上に達しているが、有意な堆積厚（たとえば3cm以上）が見られる範囲は100mをやや下回る。一方、 σ が1/4になる、たとえばある小区画を見たとき植物の被覆率が1/4でしかない場合、（空間的に均した）最大堆積厚は10cm程度となるものの、3cm以上の堆積厚の範囲は250mに及ぶ。また図-15(下)から、 α について薄い条件を設定すると、 α 値が小さくなる分だけ堆積厚が小さくなることがわかる。以上から、細粒土砂の堆積に及ぼす σ と α の影響が大きいことが明確になった。

さて、以上の結果を前記b)の結果と比較すると、 σ と α に不確かな部分があるとはいえ、河床面が植物を持つことにより細粒土砂を捕捉する能力が備われば、植物が無いときに比較して、観察されたような表層細粒土砂堆積が起こる可能性が非常に高まると言える。

d) 植生を持つ礫面への堆積が可能であったかの検証
証2： $C_a=0$ という仮定の妥当性の検討

図-16には、多摩川と千曲川、利根川、鬼怒川、小貝川の代表地点で行った植物群落の形状調査に基づき推定した透過係数K値の大体の幅を示している⁴⁹⁾。透過係数Kは、流速を v 、エネルギー勾配を I_e と置いたとき、 $v = K\sqrt{I_e}$ で定義される。なお図中のK値は、流れによる倒伏により植物高さが1/4になった状態までを想定している。一方、基準面濃度式⁴⁶⁾から判断すると、概ね $u_* / w_0 < 1$ が満たされると $C_a = 0$ の条件が成立すると言える。そこで対象土砂について、 $u_* = K\sqrt{I_e} / \phi$ を用いて、 $u_* / w_0 = 1$ となるK値（以後 K_c 値と呼ぶ）を求め、図-16中に示した。ここで、 ϕ は流速係数であり、 $\phi = 13$ とした。流量によって当該代表地点（52.4A）の I_e が少し変化するので、 K_c 値は幅を持って表示されている。 $K < K_c$ が $C_a = 0$ の条件に対応することを理解して図-16を見ると、調査した代表地点の植物群落については、カラヨモギ群落などK値が大きい（密度が低い）一部の群落を除くと、植物の存在により $C_a = 0$ の条件が作られる可能性が充分あると判断できる。

図-17は、表層細粒土層厚の横断分布の拡大図に、1983年（11月から翌年の2月にかけての調査³⁵⁾に基づく）の植物群落の分布を重ね合わせたものである。この分布の木本と多年草については、1981～1983年の3洪水発生時の植生状況を概ね表していると判断できる。この図から、52.4km測線の表層細粒土層が無い範囲（横断距離190m地点付近）は裸地（植生無し）に当たり、また、52.6km測線の表層細粒土層厚が薄い範囲（横断距離140～170m地点辺り）はカラノギク群落に当たることがわかる。そして、数十cmの厚さを持つ表層細粒土層が存在する場所で

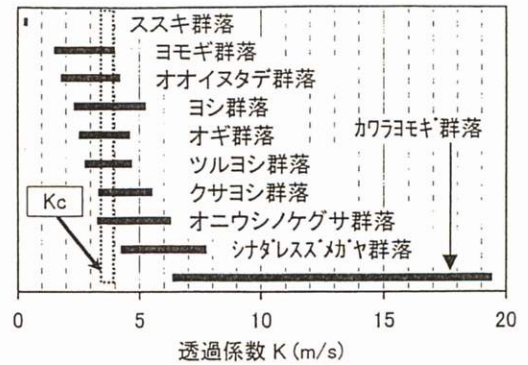


図-16 各植物群落のK値の推定結果と52.4A地点についての K_c 値

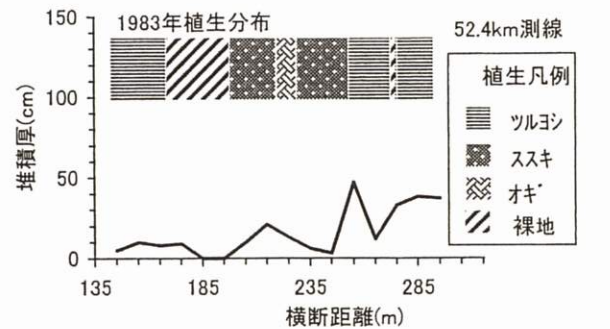
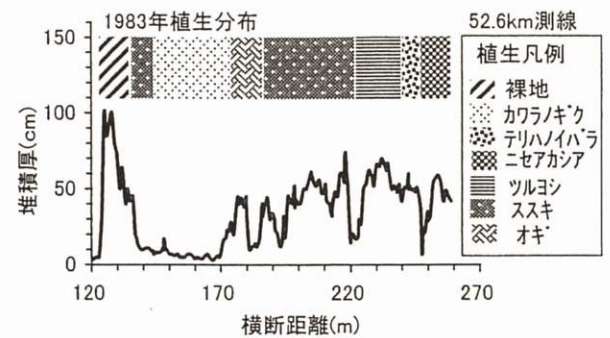


図-17 表層細粒土層厚とそれが堆積した時点の植生の横断分布(上：52.6km、下：52.4km)

は、主にススキ群落とツルヨシ群落が繁茂している。このことは、植物の有無やK値の大きさと表層細粒土層厚がよく対応していることを示している。

以上により、礫面における植生繁茂を想定すれば、対象細粒土砂の堆積を水理的に説明できること、そうした植生繁茂が実際にあった可能性が高いこと、実際の表層細粒土層厚の空間分布も堆積時の植生繁茂の有無・程度とよく対応していることが示された。

e) 礫面上に繁茂した植生が流失しなかったかの検証

対象土砂の堆積を水理的に可能にする植物が洪水前の礫面にあったとしても、洪水により流失してしまえば、その効果は期待できない。洪水による植物流失の主な原因は植物の基盤である河床表層材料の移動であると考えられ、永田橋地区でもそのような観察がなされている⁵⁰⁾。このことから、対象3洪水のピーク時に河床表層材料が大規模に移動し得たかどうか、植物流失の可能性を判断する上で最も重要な情報と考えられる。4(1)で述べたように、1974

年洪水で形成され、1981年出水期前にも河床表面を構成していた礫層の粒径は1~30cm程度であった。最も大きな1982年洪水のピーク時に発生した代表地点付近の摩擦速度は0.23m/s程度である。上記礫層の平均粒径を15cmとすると、無次元掃流力は0.022となり、限界掃流力をはるかに下回る。実際には、植物の流速低減効果により、表層礫はさらに動きにくかったと推定される。

以上から、代表地点の表層礫が対象3洪水により大規模に移動させられる水理条件は成立しておらず、洪水前、礫面上に植物があった場合、それが全面的に流失することは無かったと判断できる。

(4) 安定植生域拡大のシナリオ

以上の調査・分析結果を総合することにより、多摩川の永田橋地区(52.2~52.6km)の領域①における安定植生域拡大のシナリオが次に示す通り提示できる(図-5(上)も再度参照されたい)。

1)1974年洪水により永田橋地区の右岸側に粒径1~30cmの礫を主体とする材料が堆積し、それ以前比較的平坦であった河床横断形状がやや複断面的になった。この段階で、上記の右岸側堆積域に植生はほとんど無かった。2)1975年~1980年にかけて、左岸の滯筋部がやや低下し、複断面化が明確になりつつあった。この間に、高水敷状となった右岸河床部が冠水する洪水は生じなかった。3)上記2)の時期に、高水敷状となった右岸河床部に裸地を除くタイプⅠ(カワラノギクなど)、タイプⅡ(ツルヨシなど)のように表層細粒土層を必要としないか、タイプⅢ-1(ススキ)のように、薄い表層細粒土層があれば繁茂できる植物が群落を広範囲に構成した(本拡大過程においては、“パイオニア的”植物と言える)。ただし、裸地のままの場所も部分的に残った。4)1981, 1982, 1983年洪水により、右岸河床部が冠水し、ウォッシュロードが流入し、上記3)の植物が繁茂している場所に有意な細砂堆積(表層細粒土層の形成)が起こった。なお植物が無い場所には細砂堆積は起こらず、カワラノギクなど密生度が低い植物繁茂範囲の堆積厚も薄かった。これは、研究対象地区が扇状地河道でかなりの急勾配であるので、礫床裸地に細粒土砂が有意な厚さで堆積することは、複断面効果を前提にしても不可能であったからである。5)3洪水が発生する前に繁茂していた植物の基盤である1~30cmの礫は、この3洪水によって広範囲に移動することはなく、これらの植物は洪水中大規模な流失を起こさなかった。6)1984年以降(早ければ1982年以降)、こうして形成された表層細粒土層にタイプⅢの植物群落が生着し始め、急速に拡大した。7)なお、これと並行して、左岸低水路部の河床低下が速まり、複断面化が一層明確になった。8)1984年以降、右岸高水敷が広く冠水する洪水は起きていないので、そこでの立地条件に大きな変化はなく、上記6)の過程が基本的には現在に至るまで継続している。ただし、最近、図-11の右に示すタイプⅢの中での生物的遷移が起こり始めている。

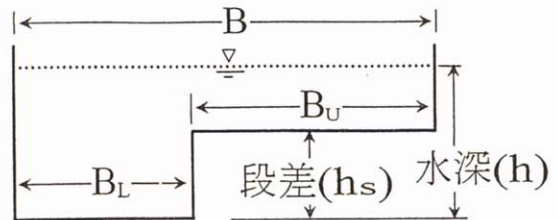


図-18 シミュレーションで想定した河床横断形状

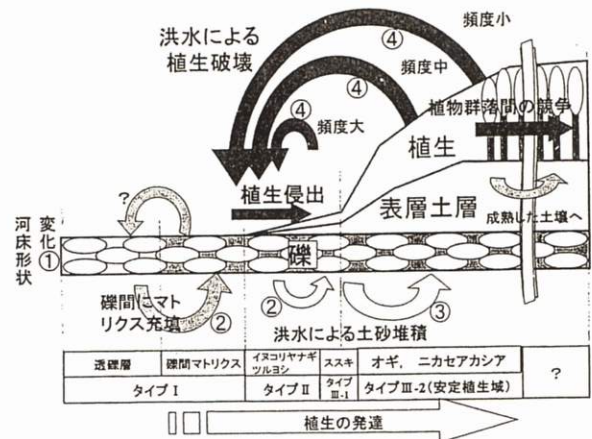


図-19 シミュレーションにおける植生消長現象のとらえ方

5. 安定植生域消長のシミュレーション

(1) シミュレーションの基本構成

ここでは、4(4)に示したシナリオをシミュレーションの基本的枠組みとする。まず、図-18に示す計算対象河道(縦断方向一様)を取り上げ、上流に隣接する単断面形状からこの河道形状に移行し、流れの状態が縦断方向に概ね平衡に至った辺りの河道区間を対象にする。そして、右岸側の高い方の河床上での植生消長についてシミュレーションを行う。植生消長の現象を図-19に示す①~④の過程に分けてとらえ、それぞれについて次のように定量記述を行う。①河床変動と礫床裸地の形成：洪水により有意な河床変動が起こり、前と異なる形状を持つ河床が形成される。河床表面は礫床で裸地である。本予測モデルでは、この過程の結果形成される礫床裸地の河床を所与の条件とし、河床形状が変化する場合には、そのつど新しい河床形状を与える。②パイオニア的植物の繁茂：裸地の礫床面に、立地条件の変化をほとんど伴わず発芽・定着できる植物が先駆的に繁茂する。表-4のタイプⅡ、Ⅲ-1の植物群落がこれに当たる。これを、ここではパイオニア的植物の繁茂と呼ぶ。植物繁茂という点では、表-4のタイプⅠに属する群落が先駆的に繁茂するものと言える。しかしその中には、4(3)d)で述べたように、次の③の過程である表層細粒土層の堆積に寄与しない($C_a = 0$ とならない)ほど密生度が低いものが多い。

く含まれると考えられるので、ここで言う「パイオニア的植物」には入れていない。ここでの「パイオニア的植物」は、来るべき表層細粒土層の堆積に寄与できる植物だけを対象にしていることになる。礫床の裸地が形成されてから（過程①あるいは後述の過程④）、過程①、④のいずれも起こらない条件で時間 T_{pr} が経過した後にパイオニア的植物が繁茂し始めるとする。③表層細粒土層の堆積と安定植生域の形成：これは、前記②の状態のところから洪水が作用し、表層細粒土層（粒径 d_{is} ）が堆積する過程である。表層細粒土層の厚さ D_{is} が D_c （安定植生域の形成に必要な表層細粒土層厚の最低値）を上回った時にすぐに安定植生域（表-4のタイプⅢ-2の植物群落）が形成されるとする。実際には時差があるが、安定植生域の持続期間に比べ小さいとして無視した。 D_{is} の計算は当該高水敷が冠水状態にある場合にだけ行い、裸地礫床の場合4(3)bの結果から堆積速度0とし、前記②の定義によるパイオニア的植物が繁茂している場合には、4(3)cの方法により行う。後者の場合、 D_{is} は $x=0$ の値を採用する。 D_{is} の計算に必要な高水敷河床部分へ流入する細粒土砂の鉛直平均体積濃度は式(10)により与え、高水敷上の摩擦速度 u_{*u} は、流量 Q （与えられる）から等流計算により得られる水深 h を用いて、 $u_{*u} = \sqrt{g(h-h_s) \cdot I_b}$ により求める。 I_b は河床勾配である。④洪水による植物の流失：植物の基盤を構成する河床表面の礫（粒径 d_R ）に関する無次元掃流力 τ_* が τ_{*ce} （植生立地への有意な攪乱となるためのしきい値）を越えたとき過程④が起こり、植物が全面的に（表層細粒土層がある場合にはそれも一緒に）流失し、再び礫床裸地に戻るとする⁵⁰。ここで $\tau_* = u_{*u}^2 / (s \cdot g \cdot d_R)$ 、 s は水中比重である。本過程では、河床表面付近の礫の大規模な移動（当該区間での、あるいは上流からの）に伴い植生流失は起こるが、有意な河床変動は起こらず河床形状は概ね変わらないとする。有意な河床変動を伴う場合、過程①になる。

(2) シミュレーションの有効性と限界

多摩川永田橋地区の52.2-52.6km付近における右岸高水敷上の1974年洪水直後から1996年までの植生変化について、シミュレーションモデルの検証を行った。流量は、調布橋の実測洪水流量ハイドログラフを $200\text{m}^3/\text{s}$ ピッチの階段状波形で与えた。河床形状は、実際の河床形状を概ね再現するように、 $B_L = 70\text{m}$ 、 $B_U = 200\text{m}$ とし、複断面化の進行に合わせ段差（高水敷高） h_s を2mから4mまで段階的に変化させた。また、 n_L （低い方の河床の粗度係数）を0.035に固定し、 n_U （高い方の河床の粗度係数）を0.035（～1980年）と0.045（1981年～）とした。その他のパラメータは以下のように設定した。 $T_{pr} = 3[\text{year}]$ 、 $d_{is} = 0.15[\text{mm}]$ 、 $\lambda = 0.4$ 、 $\alpha = 2.0 \times 10^{-7}$ 、 $D_c = 3[\text{cm}]$ 、 $\beta = 1$ 、 $\kappa = 0.4$ 、 $\sigma = 1/3$ 、

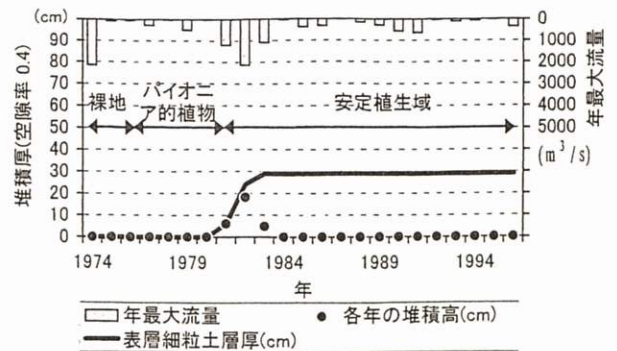


図-20 永田橋地区 52.2km～52.6km 付近の右岸高水敷についての検証計算結果

$\tau_{*ce} = 0.05$ 、 $d_R = 15\text{cm}$ 、 $I_b = 1/250$ 。

図-20に、表層細粒土層厚、その各年の堆積高、地被状態（礫床裸地か、パイオニア的植物が繁茂した状態か、安定植生域の状態かの別）、年最大洪水流量の経年変化を示す。計算によれば、1981年、1982年、1983年洪水により礫床裸地に表層細粒土層が堆積し、これを契機に安定植生域が現れ、以後、計算対象の最終年である1996年までこの状況が継続する。この図の内容は、4(4)に示した植生変化過程、表層細粒土層の堆積過程と一致する。このことは、本シミュレーションモデルが礫床扇状地河道の安定植生域消長を予測する道具として有用である可能性を示すものと言える。

ここで、本モデルがいくつかの限界を抱えていることにも留意しておく必要がある。まず、植物の成長には気象条件や生物的競争、種子散布と定着など多くの要因が関わっている。その中で立地条件だけを軸にモデルが構成されているため、この構成が大きな問題を起こさないように、暗黙のうちに予測対象を絞っていることになり、また予測の解像度が粗く設定されている（すなわち礫床裸地、パイオニア的植物、安定植生域という3つの状態しか扱えない）。また、本予測モデルは、河道セグメント1（扇状地礫床河道）を前提にしており、自然堤防帯（セグメント2）やデルタ（セグメント3）を対象とする場合、本モデルを土台から再構成する必要が出てくる。さらに、本モデルでは実際の2次元的な洪水・土砂流を1次元的にとらえていること、植生破壊の取り扱いが単純化されていることから、前述の解像度の粗さとあいまって、計算される植生変化は時空間的に相当マクロなものにとらえておく必要がある。この点は、次のステップとして水理モデルの精緻化^{16),17),26),27),28),29),30)}を図る必要がある。

ただし、河川的作用による立地条件変化に伴う植生変化の特性を理解することが河道内植物の動態理解の出発点であるから、そこだけに力点を置いた本モデルにも充分意義があろう。また、3種類であっても植生に関する予測情報があれば、治水・自然環境両面からの河道管理に役立つはずである。さらに本モデルについては、河川的作用から植生変化まで

表-5 感度分析で設定した基本量

項目	基本量	項目	基本量	項目	基本量
Q	確率過程	B _L	70m	B _U	200m
h _s	0.5-5.0m	n _L	0.035	n _U	0.035
T _{pr}	3year	d _{ts}	0.15mm	w ₀	0.0167m/s
λ	0.4	α	2.0×10 ⁻⁷ s/m ³	D _c	3cm
β	1	κ	0.4	σ	1/3
τ* _{ce}	0.05	d _R	6cm	I _b	1/250

が包含されているにもかかわらず、条件設定や各過程の表現が単純化されているため、植生動態に与える種々のパラメータの影響を見通しよく分析・理解しやすいという特長を認めることができる。次節では、こうした本モデルの特徴を生かす形で感度分析を行う。

(3) 植生動態についての感度分析

a) 感度分析の方法

多摩川永田橋地区の52.2km～52.6km付近の河道を踏襲して基本条件を設定し、この基本条件からパラメータ値をずらした時の計算結果のずれを考察した。1つのパラメータ値をずらした場合、他のパラメータ値は基本条件のまま固定する。以後、基本条件で設定した各パラメータ値を「基本量」と呼ぶ。基本量を表-5に示す。

洪水流量については、多摩川永田橋地区における39年間（1958年-1996年）の年最大流量のデータ系列が2変数対数正規分布に従うと仮定してパラメータ同定を行い、同定されたパラメータ値を用いて、標準正規乱数表による1000年間の流量データ系列をMonte Carlo法により発生させた。本感度分析では、このピーク流量の洪水が各年に1回しか発生しないとし、流量ハイドログラフは相似の三角形に単純化して与えた。初期条件は、礫床裸地（植物なし）、表層細粒土層厚0である。過程①は計算初期のみに起こるとし、計算途中での有意な河床形状変化は想定しなかった。（付録注2参照）

b) 感度分析の結果

図-21に、基本条件下で計算された1000年間の表層細粒土層厚の時間変化が段差h_s=2.5mについて示されている。図の上段には発生させた各年の洪水ピーク流量が示されている。基本条件においてはD_{ts}>D_c=3cmの場合安定植生域が形成されると判断するので、この図から、安定植生域がいつ存在する計算になっているかを容易に読みとることができる。計算結果は、表層細粒土層0の状態が続いた後、表層細粒土層の堆積が起こって安定植生域繁茂の条件が整い、その後、表層細粒土層厚が漸増するが、洪水により突然0に戻るといった変化パターンをとる。また、表層細粒土層が達する最大の堆積厚は20～50cm程度で地形変化という観点からはさほど大きなものにならず、自然堤防が形成されないという扇状地河道の特性にかなった結果になっている。

次に、計算期間に対して安定植生域が存在する期間の総計の割合を「安定植生域の存在期間割合」と

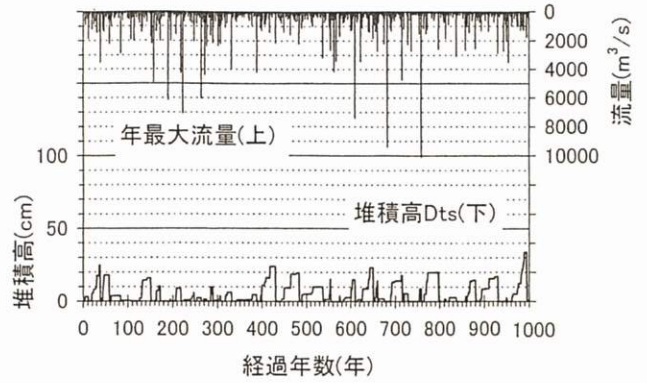


図-21 基本条件下で計算された1000年間の表層細粒土層厚の時間変化 (h_s=2.5m)

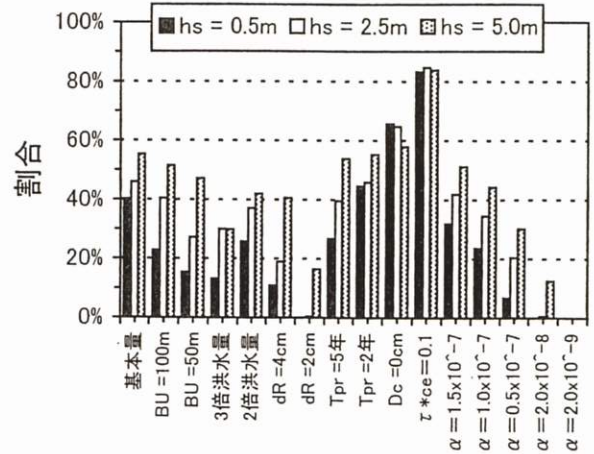


図-22 安定植生域の存在期間割合

呼び、この性質を調べる。1からこの割合を引いた値は、非安定植生域（礫床裸地かパイオニア的植物繁茂のどちらか）の存在期間割合になる。図-22に計算結果を示す。図では、基本量を与えた場合の計算結果を左端に示し、その右に、パラメータ値を基本量からずらしたときの結果も示している。まず、基本量を与えたときの結果に着目すると、安定植生域の存在期間割合は40～50%となっており、安定植生域が全期間の半分弱程度で存在する計算結果となっている。興味深いのは、h_sを0.5mから5mまで変化させても、存在期間割合が大きくは変わらないことである。各パラメータが安定植生域の存在期間割合に与える影響については、川幅の縮小（B_Uの減少）、洪水流量の増大、表層礫の粒径d_Rの減少が存在期間割合の減少をもたらす。D_cの減少、τ*_{ce}の増大が存在期間割合の増大をもたらす。一方、パイオニア的植物が繁茂するまでの時間T_{pr}の影響は、上記のパラメータに比べ小さいと言える。これらのことは、植物の繁茂特性を考える上で洪水による攪乱が重要であることを定量的に示すものといえる。各パラメータについて実際に起こりうる変化の幅を考えると、河床表面に関する特性量であるd_Rとτ*_{ce}に対する感度が特に鋭敏と言える。

図-22には、αを減少させる、すなわち流域から

ウォッシュロード的に供給される細粒土砂の濃度が減じた場合の影響も示されている。これを見ると、 α 値が減少するにつれ、安定植生域の存在割合が減少し、非安定植生域が卓越するようになることがわかる。特に α 値が1/10以下になると、安定植生域の存在割合は激減する。このことは、流域から供給される細粒土砂の濃度が高い河川ほど、植物繁茂の活性度が高いことを示唆している。

次に、安定植生域の一回の存在期間すなわち安定植生域が継続して存在する期間について、その平均値を算出し整理した。この平均値は期待値に当たる。以下ではこれを「安定植生域の持続期間」と略称する。図-23に、安定植生域の持続期間の平均値を段差 h_s との関係で示す。この図からわかるように、存在期間割合の場合と異なり、持続期間は段差 h_s によって大きく変化する。このことから、植物繁茂特性を存在割合と持続期間の両方からとらえる必要があることが理解される。基本量の下での計算結果を見ると、安定植生域の持続期間は8年から60年程度まで変化している。基本量の下での計算結果で見ると、段差0.5~1.5mぐらいまでは大きな変化がないが、段差が1.5m~2mを越えると持続期間が伸び始め、この傾向が段差4mぐらいまで続く。段差が4.5mを越えると、状況がもう一段変化し、持続期間の急激な増加が起こる。このように、基本量により表現したモデル河道については、段差2mぐらいと段差4mぐらいに植物繁茂の基本特性を変化させる遷移点があるようである。

基本量からパラメータ値を変化させた場合の影響については、川幅縮小、 d_R 減少、 τ_{*ce} の減少が安定植生域の持続期間を減少させることがわかる。なお、図にはないが、 T_{pr} と D_c の変化は大きな影響を持たなかった。洪水流量が3倍になるという条件変化に対しては、持続期間が減少する上に、持続期間が一定に近い傾向を示すようになる。

以上の感度分析結果から、予測の質を向上させる上で重要な現象をある程度特定することができる。まず、川幅や流量、段差は予測結果に大きな影響を与えるが、所与の条件とできるので、モデル改良という点からはさほど重要ではない。残るパラメータの中で影響度が大きい d_R の設定に関しては、こうした植物変化予測に見合う精度を得るために、河床表面の礫の構成、それを作る混合粒径の挙動、さらに境界条件となる礫供給の変遷などを改めて詳細に検討する必要がある。影響度が大きいもう1つのパラメータ τ_{*ce} の設定についても、植物流失の実態調査例を増やし、流失機構のさらなる一般化・定量化、実態に応じた条件の細分化を通じて、精度を向上させる必要がある。

一方、同じ河床面でも生物過程の方により深く関係する T_{pr} と D_c は、 d_R と τ_{*ce} に比べ予測結果への影響度が小さい。これは、河床表面の生物過程にかかわる現象よりも、洪水と土砂移動が起こす河床表面の物理変化の支配力がより大きいためとも解釈で

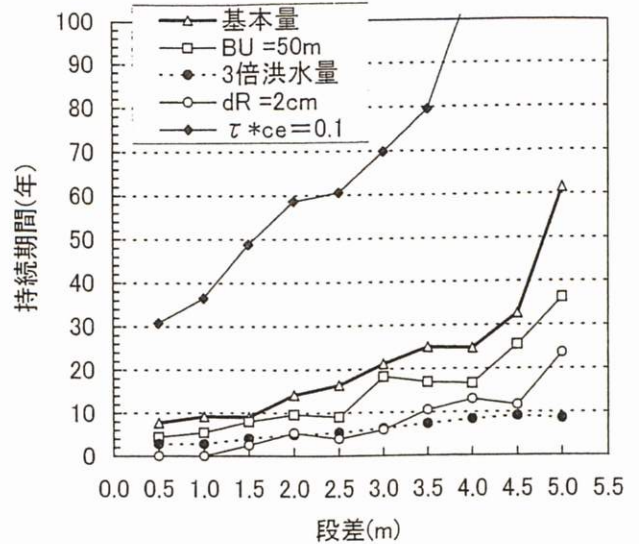


図-23 安定植生域の持続期間の平均値と段差 h_s との関係

きる。ただしこの結果は、提示した予測モデルの枠組みの下で得られたものであり、物理現象と生物現象のうちどちらが優位かをここで一般的に結論づけることはできない。重要なことは、このような検討による物理過程と生物過程の位置づけの把握を通じて、個々の河道区間で展開される植生動態の質への理解を高めることであろう。

(4) シミュレーションの河道計画・管理への応用についての考察

まず、感度分析結果に基づき、植生動態をとらえる上での重要事項を述べる。第一は、植物繁茂状態の変動の激しさと、変動の時間スケールの持つ意味である。シミュレーション結果から明らかのように、植物状態は裸地から安定植生域まで大きく変動し、しかもその時間スケールが10年以内から条件によっては数百年に及ぶレベルまで分布する。このことは、河道内の植物を通して自然環境を理解する場合、ある一時点の、そして1つの状態をもって判断をするのでは足りないこと、その変動幅と時間スケールを充分意識し、変動中での各時点の植生の位置づけを総体的に理解しなければならないことを示している。このような視点は、本予測モデルを生かすことで自ずと得られると期待できる。

第二は、植物の状態が洪水に強く影響され、洪水の出方が確率的であるため、植物状態を決定論的に予測することができないという特質である。このことは、植物状態そのものの予測においては、非決定論的な見方をする必要のあることを意味し、予測結果の解釈や利用もこの視点を常に念頭に置かなければならない。

これらの特質を受けて、河道計画・管理を念頭に植物繁茂状態の予測を行う際には、2つのアプローチが考えられる。1つは、洪水の出方についてシナリオをいくつか用意し、それぞれについて計算を行

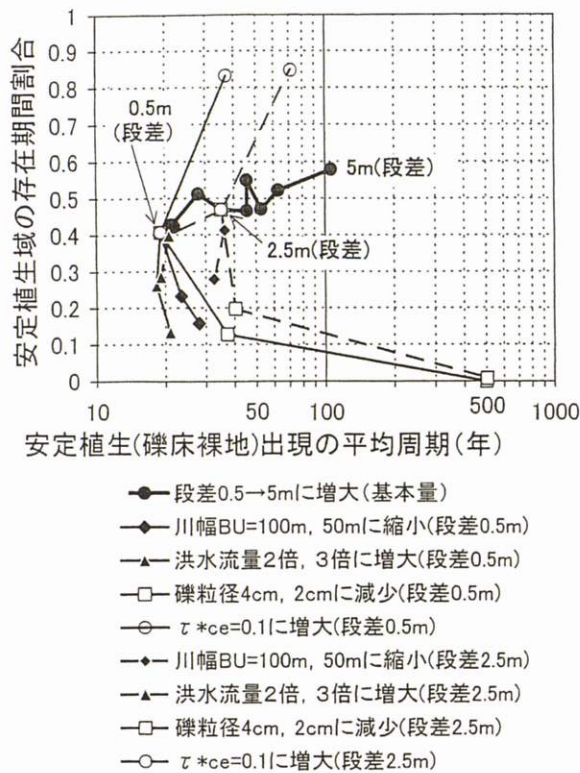


図-24 植生動態に関する河床場特性把握図

い、全ての計算結果を総合的に吟味しながら、河道計画・管理の方針を検討するというものである。立てられる方針は、その後の洪水の出方に応じて柔軟に対応する形になるであろう。このアプローチは直接的でわかりやすいが、洪水シナリオの違いによる結果の差が大きくなる可能性が高く、河道計画・管理のための判断を行うことを困難に感じる局面も出てこよう。

もう1つは、長期的なシミュレーションを行い、計算結果の平均的な諸量を基に、対象とする河道上で展開される植生動態の長期的全体像を評価するというアプローチである。これには、感度分析のところで述べた存在期間割合や持続期間などが評価指標となろう。この方法の背後には、個々の植生動態を河道計画・管理の対象にする前に、好ましい植生動態（関連する微地形変化も含む）が長期的に展開される場（ここではこれを“河床場”と呼ぶ）の設定をまず行おうという考え方がある。当然、河床場は、植生動態現象と影響し合うのではなく、それを全体的に規定するものでなければならないから、その設定スケールは川幅、低水路幅、高水敷高さ、平面形など高位のレベルになる。この意味で、本アプローチは河道計画につながりやすいと言える。

図-24は、上記2つ目のアプローチに役立てることをねらったもので、「植生動態に関する河床場特性把握図」と名付けている。この図では、対象とする河床場の植物繁茂特性が2つの指標すなわち1)安定植生域（または礫床裸地）出現の平均周期（横軸）、2)安定植生域の存在期間割合（縦軸）により表現される。ここで1)の平均周期は、安定植生域と

非安定植生域の持続期間の平均値を合計したものである。当該河床場がこの図のどの位置に来るかで、その河床場上で展開される植生動態の特性を大まかに知ることができる。すなわち、図の上に来るほど陸地的状況が卓越する（河原的状況が起こりにくい）河床場、図の右に来るほど安定な（入れ替わりが遅い）河床場と判断できる。図上には、種々のパラメータを変えたときに、把握図上のプロット点がどう移動するかが示されている。この図から、段差や川幅、流量、表層礫粒径など直接、間接に河道計画・管理の対象となる条件の変化が当該河床場の植生動態に与える影響を読み取ることができ、望ましい植生動態の確保のために河床場が持つべき条件を検討することができる。このようなアプローチを通じて好ましい河床場を確保するための河道計画・管理の基本方針を定め、これに第一のアプローチであるシナリオに基づく予測を組み合わせ、特に河道管理、環境保全の面できめ細かさ、具体性を加えることが、シミュレーションの現実的応用法になると考えられる。

6. 結論

多摩川の扇状地礫床河道部における安定植生域の拡大と河床変動の実態を調べたところ以下のことが明らかになった。1)安定植生域の拡大を主に担ったのはニセアカシア、オギ、オオボタクサなどの群落であり、その多くは複断面化に伴い現れた高水敷的河床部分に定着した。2)河床が上昇傾向にあるか低下傾向にあるかによって、各植物群落の動態は明瞭に異なる。3)立地条件を地下水水位からの比高と表層細粒土層（礫床表面に堆積した細砂層）の厚さからなる比高-堆積厚座標図で表現し、裸地を含む植物群落を3タイプ（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）に分けた場合、各タイプの立地条件は明瞭に異なる。安定植生域拡大過程において表層細粒土層の堆積が本質的な役割を果たす。4)これらの結果に基づき、礫床の裸地的地被（河原）から安定植生域形成に至る道筋が明らかになった（図-11）。5)表層細粒土層の堆積は、礫床上に繁茂したパイオニア的植物による細砂捕捉効果により水理的な説明ができる。6)以上を総合して、安定植生域拡大の全体的シナリオが得られた（4(4)）。

次に、このシナリオに沿って、安定植生域の消長を予測するモデルを構築し（図-19）、多摩川の研究対象地区に適用しモデルの有効性を確認した上で感度分析を行った。この結果以下の成果を得た。1)植生動態の予測結果に強く影響するパラメータが明確になり、また、予測の質をさらに高めていく上で重要な現象（過程）が特定できた。2)河道内の植生動態を河道計画・管理に反映させていくために2つのアプローチ、すなわち洪水の出方について複数のシナリオを用意して予測計算を行い、結果を総合的に吟味するというものと、好ましい植生動態が長期的に展開されるような河床場の設定を行おうとする

ものがあることを示し、本予測モデルが両方に役立つことを示した。3) 第二のアプローチに役立つ「植生動態に関する河床場特性把握図」を提案した。

謝辞：本研究は、横浜国立大学の奥田重俊教授らによる過去3時点での植生図と、建設省関東地方建設局京浜工事事務所による過去の洪水および河床データがあって可能になりました。また本研究は、多摩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ります。以上の関係各位に対し、心からの謝意を表します。

付録

注1) 本研究でとりあげた植物の和名と学名は以下の通り。

カワラノギク *Aster kantoensis*; コセンダングサ *Bidens pilosa*; ツルヨシ *Phragmites japonica*; イヌコリヤナギ *Salix integra*; ヨモギ *Artemisia princeps*; ススキ *Miscanthus sinensis*; オギ *Miscanthus sacchariflorus*; オオブタクサ *Ambrosia trifida*; ハリエンジュ/ニセアカシア *Robinia pseudo-acacia*.

注2) 1000年間という超長期となると、境界条件や環境条件が不変ではあり得ず、マクロな河床形状変化の速度が比較的小さい礫床河道においても、低水路幅など有意な河床変動(過程①)が起こる場合もあろう。これらを想定していない本計算に純粋な予測としての意味はさして無い。しかし、現象を支配している洪水の頻度が低いため、この程度の超長期の計算を行わないと、各河床場の持つ植物繁茂に関する特性を統計的に有意な形で客観的、定量的に比較することは難しい。こうした分析を可能にする道具として、大局的な河道形状を固定し、河床表面の状態変化に起因する植生変化現象だけに焦点を当てた超長期計算には意義がある。本計算の意図もここにあり、超長期の計算結果を予測結果としてそのままらえているわけではない。

参考文献

- 1) 建設省河川局治水課, 土木研究所: 河道特性に関する研究—その3—, ~河床変動と河道計画に関する研究~, 第46回建設省技術研究会報告, pp.600-651, 1992.
- 2) 藤田光一, John A. MOODY, 宇多高明, 藤井政人: ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小, 土木学会論文集, No.551/II-37, pp.47-62, 1996.
- 3) 萱場祐一, 島谷幸宏: 扇状地河川における地被状態の長期変化とその要因に関する基礎的研究, 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, 建設省土木研究所, pp.191-196, 1995.
- 4) 李參熙, 山本晃一, 島谷幸宏, 萱場祐一: 多摩川扇状地河道部の河道内植生分布の変化とその変化要因との関連性, 土木学会環境システム研究論文集, Vol.24, pp.26-33, 1996.
- 5) Schumm, S.A. and Lichty, R.W.: Channel widening and flood-plain construction along Cimarron River in southwestern Kansas, *USGS Professional Paper*, 352-D, pp.71-88, 1963.
- 6) Osterkamp, W. R. and Costa, J. E.: Changes accompanying an extraordinary flood on a sand bed stream, in Mayer and Nash eds. *Catastrophic flooding*, London, Allen and Unwin, pp.201-224, 1987.
- 7) Williams, G.P. and Wolman, M.G.: Downstream effects of dams on alluvial rivers, *USGS Professional Paper* 1286, pp.31-56, 1984.
- 8) Collier, M., Webb, R. H. and Schmidt, J. C.: Dams and rivers—Primer on the downstream effects of dams, U.S. Geological Survey, Circular 1126, 1996.
- 9) Auble, G.T., Friedman, J.M. and Scott, M.L.: Relating riparian vegetation to present and future streamflows, *Ecological Applications*, Vol.4, No.3, pp.544-554, 1994.
- 10) Johnson, W.C.: Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: patterns and causes, *Ecological Monographs*, Vol.64, No.1, pp.45-84, 1994.
- 11) Scott, M. L., Friedman, J. M. and Auble, G. T.: Fluvial process and the establishment of bottomland trees, *Geomorphology*, Vol. 14(4), pp.327-339, 1995.
- 12) Kondolf, G. M. and Wilcock, P. R.: The flushing flow problem: Defining and evaluating objectives, *Water Resources Research*, Vol.32, No.8, pp.2589-2599, 1996.
- 13) 角哲也, 塚原千明, 柏井条介: ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察, *ダム技術*, No.143, pp.40-51, 1998.
- 14) 藤田光一: 河道計画が目指すべき方向と技術的課題, 水工学シリーズ98-A-2, 土木学会水理委員会・海岸工学委員会, 1998.
- 15) 奥田重俊, 佐々木寧編: 河川環境と水辺植物—植物の保全と管理—, ソフトサイエンス社, 1996.
- 16) 河川の植生と河道特性に関する研究連絡会(座長砂田憲吾): 河川の植生と河道特性, (財)河川環境管理財団・河川環境総合研究所編, 1995.
- 17) 河川生態環境評価基準の体系化に関する研究グループ(研究代表者 玉井信行): 河川生態環境評価基準の体系化に関する研究, (財)河川環境管理財団編, 1996.
- 18) 石川慎吾: 揖斐川の河辺植生II, 扇状地の砂礫堆上の植生動態, *日本生態学会誌*, Vol.41, pp.31-43, 1991.
- 19) 石川慎吾: 揖斐川の河辺植生, I. 扇状地の河床に生育する主な種の分布と立地環境, *日本生態学会誌*, Vol. 38, pp.73-84, 1988.
- 20) 倉本宣, 加賀屋美津子, 可知直毅, 井上健: カワラノギクの個体群構造と実生定着のセーフサイトに関する研究, *ランドスケープ研究*, 60巻5号, pp.557-560, 1997.
- 21) 倉本宣: 多摩川におけるカワラノギクの保全生物学的研究, *ランドスケープ研究*, 61巻1号, pp.48-55, 1997.
- 22) 鷺谷いづみ, 矢原徹一: 保全生態学入門, 文一総合出版, 1996.
- 23) 井出久登, 武内和彦, 加藤和弘, 篠沢健太: 生態的特性に配慮した河川空間の設計・計画のための支援システムの開発, 河川美化・緑化調査研究論文集, 第6集, (財)河川環境管理財団・河川環境総合研究所, pp.53-96, 1998.
- 24) 中越信和, 井上雅仁: 改修河川における植生とその環境保全機能の回復に関する研究, 河川美化・緑化調査研究論文集, 第6集, (財)河川環境管理財団・河川環境総合研究所, pp.131-174, 1998.
- 25) 島谷幸宏, 萱場祐一, 山本晃一, 李參熙: 河道内樹林化動態モデルに関する基礎的研究, *環境システム研究*, Vol.25, pp.409-413, 1997.
- 26) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響, *土木学会論文集*, No.447/II-19, pp.25-34, 1992.
- 27) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, *土木学会論文集*, No.447/II-19, pp.35-44, 1992.
- 28) 福岡捷二, 渡辺明英, 津森貴行: 樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析, *土木学会論文集*, No.491/II-27, pp.41-50, 1994.

- 29) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次: 側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.99-108, 1994.
- 30) 辻本哲郎, 北村忠紀: 植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程, 土木学会水工学論文集, 第40巻, pp.1003-1008, 1996.
- 31) 市川新: 多摩川: そのエコバランスー都市と河川環境の均衡をめざしてー, ソフトサイエンス社, 第1章, pp.21-37, 1997.
- 32) (有)国土開発調査会(建設省関東地方建設局監修): 荒川・多摩川・鶴見川・相模川その治水と利水, 4章, pp.105-117, 1983.
- 33) 建設省関東地方建設局京浜工事事務所: 多摩川誌, (財)河川環境管理財団, 山海堂, 1986.
- 34) 奥田重俊, 曾根伸典, 藤間熙子, 富士堯: 多摩川河川敷現存植生図, とうきゅう浄化環境財団, 1979.
- 35) 曾根伸典: 多摩川河川敷現存植生図, とうきゅう浄化環境財団, 1984.
- 36) 奥田重俊, 小松聡子, 畠瀬頼子: 多摩川河川敷現存植生図, 建設省京浜工事事務所/河川環境管理財団, 1995.
- 37) 李參熙, 山本晃一, 望月達也, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡辺敏: 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3266号, 1999.
- 38) 倉本宣: 多摩川河川敷植物群落の帯状分布とその人間活動による変化, 造園雑誌, Vol.47, No.5, pp.257-262, 1984.
- 39) 辻本哲郎: 手取川扇状地区間の河原の植物群落と河道特性, 金沢大学日本海域研究所報告, 第25号, pp.83-99, 1993.
- 40) 宇多高明, 藤田光一, 佐々木克也, 服部敦, 平館治: 河道特性による植物群落の分類, 土木研究所資料, 第3249号, 1994.
- 41) Hupp, C. R. and Osterkamp, W. R.: Bottomland vegetation distribution along Passage Creek, Virginia, in relation to fluvial landforms, *Ecology*, Vol.66, No.3, pp.670-681, 1985.
- 42) 河川生態学術研究会多摩川グループ(総括リーダー; 小倉紀雄): 地下水位観測データ(未公開資料), 1997.
- 43) 建設省河川局治水課監修, (財)リバーフロント整備センター編集: 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 山海堂, 第2章2節, 1994.
- 44) 竹原明秀: ヤナギ類の生態, 植物と自然, 18(1), pp.11-15, 1984.
- 45) 浅野文: 河川敷の森林化と河川の安定に関する研究, 環境部部外研究員研究発表会論文集, 建設省土木研究所, 1996.
- 46) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, *Proc. of ASCE, J. of Hyd. Div.*, Vol.106, No.HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 47) 建設省河川局監修, 日本河川協会編: 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説(調査編), 山海堂, pp.282, 1997.
- 48) 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, pp. 259-264, 1997.
- 49) 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, pp.117-122, 土木学会水理委員会河川部会, 1998.
- 50) 李參熙, 渡辺敏, 望月達也, 藤田光一, 塚原隆夫: 礫床上の植物群落の破壊と河床材料の移動, 土木学会第52回年次学術講演会VII, pp.286-287, 1997.

(1999. 8. 11 受付)

MECHANISM AND SIMULATION OF THE EXPANSION AND EXTINCTION OF STABLE VEGETATION AREAS IN A GRAVEL-BED ALLUVIAL FAN RIVER

Koh-ichi FUJITA, Samhee LEE, Satoshi WATANABE, Takao TSUKAHARA, Koichi YAMAMOTO and Tatsuya MOCHIZUKI

Significant and monotonous expansion in luxuriant, stable vegetation areas like wood-lands has been observed in gravel-bed reaches of the Tama River. Changes in vegetation, substrate and channel shape in micro- and macro-scale was traced carefully together with hydrologic and hydraulic conditions experienced. A scenario for the expansion was obtained, where the positive effect of floods by forming a "top fine-sediment layer" necessary for the stable vegetation growth was emphasized, as well as their negative effect by disturbing and removing a gravel surface with vegetation. A simple but comprehensive simulation model based on the scenario was developed and used for identifying hydrologic, geomorphic and fine-sediment-supply conditions encouraging or discouraging the growth of stable vegetation.