

砂礫州水際への植物種子と土砂の 堆積過程に関する実験的検討

DEPOSITION PROCESS OF PLANT SEEDS AND FINE SANDS ALONG THE SHORELINE OF GRAVEL BAR IN A RIVER

尾花まき子¹・内田考洋²・辻本哲郎³・知花武佳⁴

Makiko OBANA, Takahiro UCHIDA, Tetsuro TSUJIMOTO and Takeyoshi CHIBANA

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) 独立行政法人 国際協力機構 (〒102-8012 東京都千代田区二番町5-25)

³フェロー会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 博(工) 東京大学大学院准教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

The excessive growth of riverine trees and vegetation is an important issue for river management. This study focuses on the initial stage of vegetation growth. Hydraulic experiments were conducted to elucidate mechanism of plant seed deposition with fine sands along the straight shoreline in gravel bed river. In particular, the stage hydrographs and seed Settlement ability of seeds are carefully observed considering their effects on seed deposition. As a result, it is found that the descending stage of hydrographs greatly influences seed deposition. In addition, the behaviors of seeds are quite different whether seeds are transported individually or with fine sands. Consequently, the deposition mechanism is clarified identifying the differences in deposition process between seeds and fine sands.

Key Words : Deposition process, plant seeds, fine sand, shoreline, gravel bar, descending stage

1. まえがき

近年河道内での樹林化の進行や藪化面積の拡大は顕著に見られ、その原因や進行過程の究明は喫緊の課題となっている。本研究では、河川植生の成長過程における初期ステージである、砂礫州水際への種子の侵入・堆積過程に着目する。流水による種子散布が植物群落の形成に寄与することは知られており¹⁾²⁾、今までにも河川の流れと地形特性が種子の漂着に与える影響の検討がなされている³⁾⁴⁾が、河川水中での種子の運動形態や砂州上への堆積過程、また土砂との相互作用については未だ明らかになっていない。種子は、粒状有機物の一種でもあり、土砂と粒度・比重の異なる粒子としての取り扱いが可能なことから、河床変動解析に取り込むためのモデリングの試みがなされ始めており⁵⁾⁶⁾、今後の生態系動態予測への発展にはより現実にもった状況での把握すべき運動機構の抽出が必要である。ここでは、植物発生のトリガーとなる植物種子が流水散布され砂礫州水際に漂着

し堆積に至るまでの過程を対象を絞ったうえで、砂礫州水際地形を実験水路に再現した。多摩川水系浅川を対象とした地形条件と流況特性を参考にして条件設定を行い、種子が単独あるいは土砂と混合状態で砂州水際へ捕捉される状況を観察したほか、洪水規模やハイドロ形状(ピーク時間や減水時間の長さ)の違いが種子と土砂の堆積過程へ与える影響を探った。特に、種子の漂着にとって重要となる流量規模に応じた初期水位、減水期での浮遊から掃流、ハイドロ形状の緩急と変化する組み合わせで実験条件を選び、種子の土砂との挙動や堆積特性の違いを見出すことがポイントである。

2. 対象とする河川の地形・流況特性と植物種子

(1) 対象河川の地形・流況特性

本研究で対象とした多摩川水系浅川は、河道内に典型的な砂礫州を有する礫床河川である。東京都八王子市および日野市を流れる流路延長30.15km、流域面積



図-1 浅川の礫州を覆う細砂と水際植物

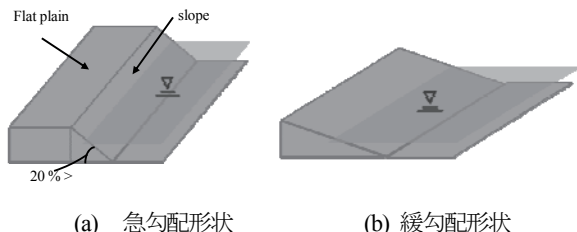


図-2 砂礫州の代表的な水際形状

156.1km²、平均河床勾配1/100-1/230の一級河川であり、多摩川の支流の一つである。河道内での植物の占有率は年々増加傾向にあり、発芽期には図-1に示すような砂州の外縁を覆うような植物分布が見られ、礫州は洪水によって運ばれた細砂に覆われている様子が観察される。そのような特性をもつ多摩川支川から2.0km地点にある砂礫州をモデル地点と選定した。著者らが今までに行った浅川での現地調査の結果⁷⁾では、浅川の表層礫の代表粒径は約5cmであり、礫州を覆う細砂は0.3-2mmに分布している。砂礫州の水際横断形状は、知花ら⁸⁾によると急勾配地形と緩勾配地形という2種類に大別されており、前者は急な水際勾配と平坦な台地状地形から構成され、後者は水際から高水敷にかけてなだらかな勾配をもち、その勾配は1/8-1/25に分布している（図-2参照）。本研究では、複数の河川で確認できるなだらかな勾配を持つ緩勾配水際地形を対象として検討を進める。一方、細砂や植物種子の輸送・堆積には、流況特性も重要な要素である。ここで想定する流量規模は、砂州が冠水するが基盤礫は動かず細粒分のみを駆動する中小規模洪水とした。特に、洪水の減水期での堆積特性に着目することから、国土交通省の水文水質データベースを利用して、浅川高幡橋水位観測所の過去10年間の結果から、対象洪水を抽出した上で水位と減水時間の関係を図-3のように整理した。洪水のピーク水位から平水位までの高さ H と減水にかかる時間 T を用いて減水率(H/T)を算出したところ、最小で0.03m/h、最大で0.066m/hとなりその差はおおよそ2倍である。

(2) 植物種子の選定

河川に散布されている植物種子は多数存在するが、その中でも①河川水中での沈降特性、②浅川を始めとした関東の礫河川に優占している種、という点に着目して、

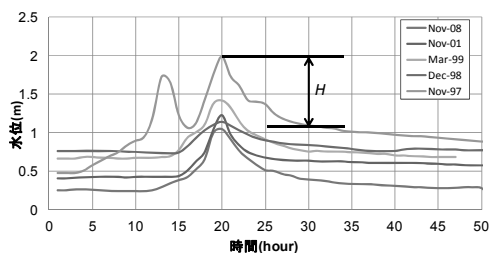


図-3 中小規模洪水でのハイドログラフ

表-1 選定種子の粒径・沈降速度

		種子直径(mm)	沈降速度Vs(cm/s)
沈 降 性	オオイヌタデ	2.0	2.97
	シナダレスズメガヤ	1.4	2.84
	ウシハコベ	1.0	2.64
	平均	1.5	2.80
浮 遊 性	メドハギ	2.0	-
	ヨモギ	2.0	-
	ミゾソバ	1.8	-
	平均	1.9	-

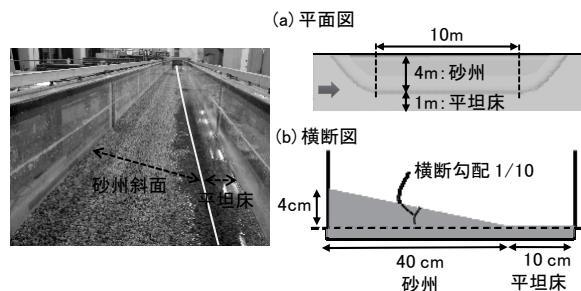


図-4 実験水路の概要

選定を行った。種子の沈降性は、浮遊性と沈降性に大別される⁹⁾。多摩川で採取された種子の沈降速度を計測した吉川らの結果⁹⁾を参考にして上記の視点を踏まえ、浮遊性種子はメドハギ、ヨモギ、ミゾソバを選定し、沈降性種子としてはオオイヌタデ、ウシハコベ、シナダレスズメガヤが持つ特徴を採用した。浮遊性種子は、いずれも粒径約1.5mmであり、沈降性種子は、粒径約1-2mm、沈降速度2.64-2.97cm/sで、これは細砂と同じ沈降速度を有する（表-1参照）。

3. 水路実験の設計

(1) 水路実験の概要

前章で述べた浅川の地形・流況特性、選定種子の特徴を基にして水路実験を企画した。

水路幅0.5m、長さ20m、高さ3mの可変勾配式循環水路中に、図-4に示すような砂州幅0.4m、斜面勾配1/10、砂州長さ10mの砂州を5.0mmの篩分砂(浅川の平均河床粒径の1/10を想定)を用いて作成し、そこへの種子と土砂の流下・堆積を再現した。低水路幅0.1m、河床勾配1/230と

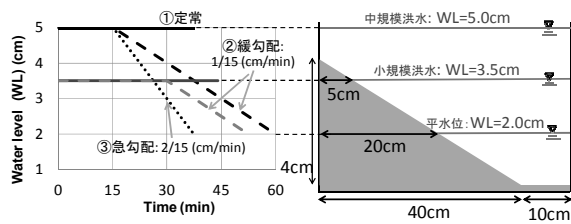


図-5 ハイドログラフと水位

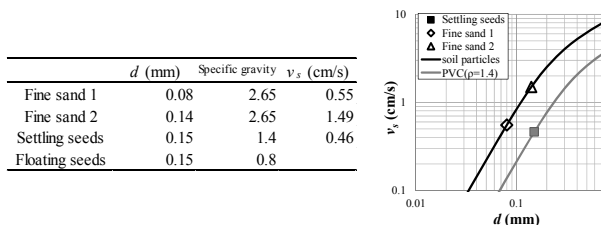


図-6 供給土砂と植物種子の諸量

し、浅川の河道特性を考慮している。ここでは、砂州が移動しない条件での水際への種子と土砂の堆積を見るため、流れが安定するよう砂州長さを十分長くとした。

実験では、砂州の全水没と非水没を想定した2種類の流量規模に応じた減水による堆積特性を比較できるように水理量を調整した。平水位では、低水路幅が30cm、砂州幅が20cmである。ハイドログラフは、図-5に示すように前章での検討から、定常・急勾配・緩勾配という3種類の減水勾配を想定し、その違いが堆積に及ぼす影響を検討できるように工夫した。相対水深 $h/d=10$ であるので、比較的水深が浅いところでの現象となっている。減水勾配は、浅川での減水率を参考にしてそれぞれの勾配間に2倍の違いがでるように調整した。

供給する種子と土砂は、いずれも浅川の河床材料の1/10になるよう調整した。種子モデルとしては、粒径0.15mmの2種類のPVC粒子を選定、比重1.4のものを沈降性種子(Settling seeds), 0.8のものを浮遊性種子(Floatable seeds)とした。沈降性種子の比重は、土砂の沈降性を表す摩擦速度と沈降速度の比を用いてそれが現地河川と同一になるよう調整した。なお、種子の形状は運動機構には影響を与えないものとみなし考慮していない。種子の堆積は、それと同じ沈降速度と粒径の土砂の堆積との相関が高いことが現地観測により示唆されている⁹⁾。このことから、土砂は沈降性種子の沈降速度 V_s と粒子径 d が各々同一になるよう調整した2種の粒径(Fine sand 1:0.08mmとFine sand 2:0.14mm)の篩分砂を選定した。このように、各々の違いによる堆積過程を検討できるように工夫している。図-6に供給土砂と種子の諸量を示す。

(2) 実験ケース

実験ケースは、前章で述べた流量規模・減水勾配・供給材料の違いによる砂礫州水際への堆積特性をそれぞれ比較するために、図-7のように準備した。砂州が全水没する中規模洪水を想定した6ケースと砂州に水際が現れ

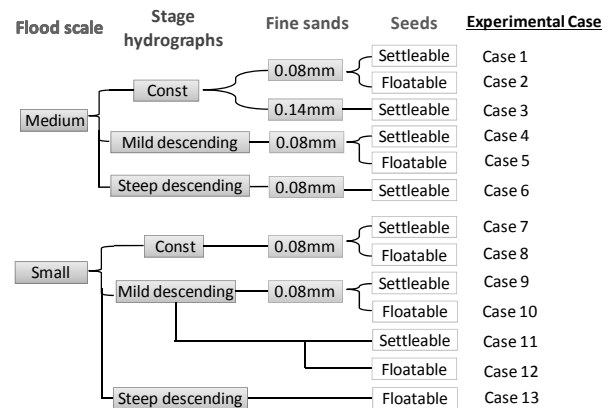


図-7 実験ケース

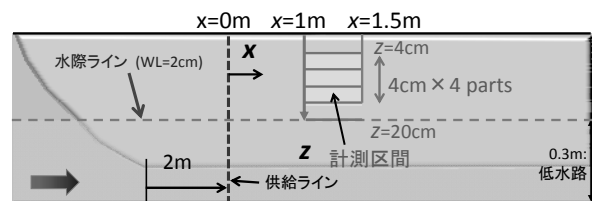


図-8 計測区間の概要(平面図)

る小規模洪水を想定した6ケースの合計13ケースからなる。Case-11-13においては、土砂は供給せずに種子のみ供給し、土砂と混合させた場合との違いを比較した。土砂と植物種子の供給濃度は、それぞれ土砂 $1160(g/m^3)$ 、植物種子 $290(g/m^3)$ となるよう設定し、全ケース同一濃度で実施した。これにより各ケースでの堆積率を比較できるようにしている。

(3) 実験・計測手法

流れが安定した砂州上流端から2m下流地点以降を計測区間に設定し、その起点から土砂・種子供給を水路横断方向に濃度一定に保ち行った。計測は、土砂供給地点から1m下流の50cm区間で行い、水路側壁から低水路に向かう横断幅を4区画に区切ったうえでそこで堆積した土砂・種子モデルを計測した。図-8に計測区間の概要を示す。ここでは、水路流下方向をx軸、横断方向をz軸とし、 $z=0-4cm$ 区間は側壁の影響を受けるため計測外とした。

(4) 土砂・種子モデルの移動形態

洪水のピークから平水位に減水する過程での土砂堆積では、減水に応じた水位変化が、横断面での各地点の掃流力を変化させ、ひいては供給材料の移動形態をも変化させることを考える必要がある。ここでは、前述した実験ケースで想定した流量規模を用いて、それに応じた土砂・種子の運動形態とそれが減水による水位の減少でどのように変化するかをShieldsダイアグラム(τ_{*z})より求めた。無次元掃流力の推定には、台形断面での斜面勾配や土砂の水中安息角の影響を考慮している。土砂2種

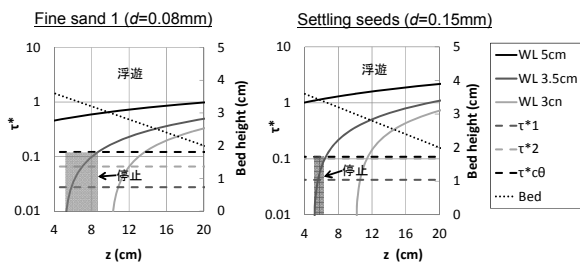


図-9 Shieldsダイアグラムによる各水位での底質の移動形態

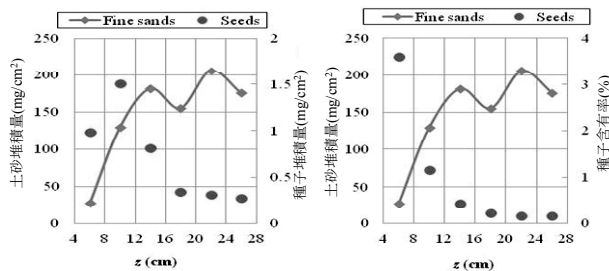


図-10 流量一定での土砂・種子の堆積重量(case1)

類と沈降性種子モデルについて求めたが、図-9には紙面の都合上、土砂0.08mmと種子モデルについて示す。図は、各地点(z軸)と各水位(WL=3.0, 3.5, 5.0cm)の時の移動形態を表し、 τ_{*1} は掃流限界、 τ_{*2} は浮遊限界、無次元限界掃流力 τ_{*c0} は停止限界であり、それらにより移動形態が判断される。

今回の条件では、土砂2種類と種子モデル共に浮遊状態で流送されるが、小規模洪水のピークである水位3.5cmの水際には、底質輸送は停止されると考えられる。種子モデルは、土砂より比重が1/2程度であることから浮遊状態で流送されやすいが、いずれも水際には停止限界に入る。また、ここで算定した τ_* と R_* をもとに、Yalin¹⁰⁾のRipplesとDuneの区分図で本条件を確認したところ、いずれの地点でもRipplesの形成領域に入っており、その形成が予測される条件下での実験である。

4. 植物種子と土砂の堆積過程

本章では、実験で得られた植物種子の堆積過程を、①土砂との挙動の違い、②土砂との相互作用、という点に着目して述べる。結果として示した指標は、土砂・種子の単位面積当たりの堆積重量および種子に関しては堆積土砂中に含まれる重量割合も算定した。結果はいずれも横断方向の堆積について検討しており、図に示す横軸は、水路側壁から低水路に向かう方向をz軸としている。

(1) 中規模洪水での堆積過程

中規模洪水を想定した実験ケースは、6種類である。砂州が全水没している状態から、減水率とピーク時間の長さを変えた時に起こる堆積特性の違いを抽出していく。

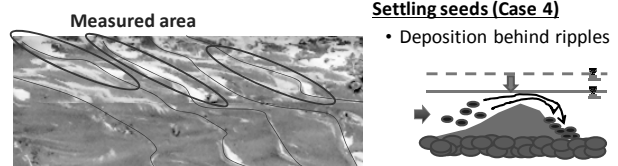


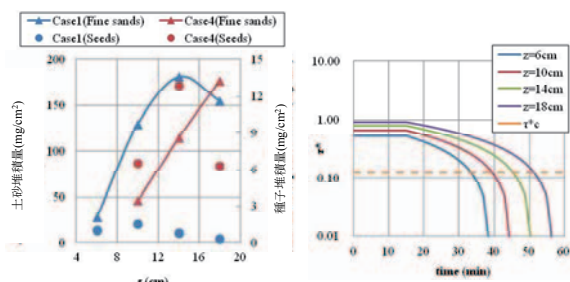
図-11 砂漣の背後に捕捉される沈降性種子の様子

(a) 土砂・種子の基本堆積特性

最初に、流量一定の定常状態でのCase1により、本実験での土砂・種子堆積の基本的特性を把握する。ここで行った実験では、いずれのケースでも、土砂は斜面上に堆積し、縦断方向に向かって砂漣を形成しながら時間とともに下流へ進行していく様子が見てとれた。前章で、砂漣が形成される条件であることは確認されているので、その条件のもとで議論を進める。図-10を見ると、土砂の堆積量は、低水路に向かって堆積量が多い。図-9から低水路に向かい τ_* は増加しており陸側より土砂移動が活発になることと斜面による重力効果の影響で低水路側へスライドしてくることによるものと推察される。沈降性種子は、比重が土砂の1/2であり堆積量自体は少ないが、堆積が確認された。特に、図-11に示すように、水深の浅いところで、砂漣の背後に形成される谷部に捕捉され堆積する様子が観察された。砂漣背後の剥離渦により捕捉された種子は、砂漣の進行に伴い砂に覆われ、また新たな種子がその背後に捕捉されるという運動を繰り返して堆積していく。図-10から種子は、土砂に比べより陸域側へ輸送され堆積、低水路側での堆積は微量であることが分かる。比重が小さいことにより種子の τ_* は低水路側で4倍程度増加するので、流量一定の条件ではそこにたとえRipplesが形成されていても剥離渦には取り込まれず流送される。また、沈降性・浮遊性種子ともに単独で供給した場合は、堆積せず下流まで流送されることを確認した。つまり、土砂との相互作用が種子堆積に大きな影響を与えているといえる。

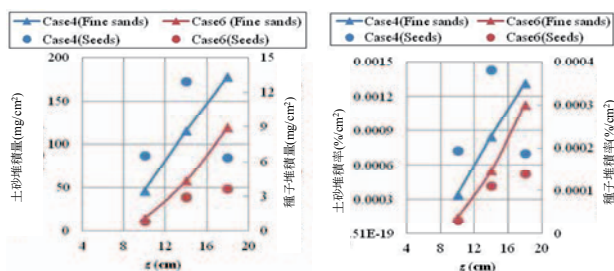
(b) 洪水ピーク時間と減水の効果 (case1,4,6比較)

次に、洪水のピーク時間の長さや減水率の違いが堆積特性に与える影響を示す。まず、定常状態のCase1と緩勾配で減水させた時のCase4の比較を行う。結果を図-12に示す。土砂堆積を見ると、いずれのケースも供給濃度は同じであるにもかかわらず、減水(Case4)は土砂堆積量を減少させている。横断方向への土砂堆積幅は、Case1のほうが砂州内陸側まで広がっていることから、これらはピーク時間の長さの差によるものと考えられる。Case4のピーク継続時間は、Case1の1/2倍となっており、その時間の差が横断方向の各地点にかかる τ_* を規定し内陸部への土砂輸送を減少させる。一方、沈降性種子は、Case4の方で最大で10倍の堆積増加が見られた。流量一定のときは、前章で述べたように水深が深いところでは τ_* が減少しきらず堆積できなかったが、減水に伴う τ_* の



a) Case1,4の土砂・種子堆積量 b)各地点での土砂 τ^* 時間変化(case4)

図-12 Case1と4の比較



a)土砂・種子の堆積量 b)土砂・種子の堆積率

図-13 Case4と6の比較

減少によりその過程でRipplesの背後に捕捉され堆積量が増加したと考えられる。Ripples波高を測定したところ最大で4cm程度であり、Ripplesが種子を捕捉できる波高と τ^* との関係性があることが示唆されている。

次に、緩勾配(Case4)と急勾配(Case6)の減水率の比較を行う。図-13に堆積量の結果を示し、図-14にそれぞれのケースでの種子 τ^* の時間変化を示した。土砂の堆積量の変化はほぼ見られないが、種子は緩勾配で減水する時の堆積量が多い。この2ケースは、ピーク流量の継続時間はいずれも15分で減水率が異なるだけであるので、土砂堆積量の変化がほぼないことから、土砂堆積には減水はあまり影響せず、それを規定しているのはピーク時間であると考えられる。他のケースを見ても、ピークの継続時間が土砂の堆積量を決定している結果となっている。一方、種子堆積はCase4で卓越していることから、堆積は減水率(各地点での冠水継続時間)と相関をもっていることが明らかになった。

(c) 浮遊性種子の堆積特性(case4,5比較)

沈降性種子については今まで述べてきたところであるが、ここで浮遊性種子の堆積特性を、Case4とCase5との比較により考察する。減水期が種子堆積を増加させることは前節の結果から明らかであるので、ここではその違いが見やすい緩やかな減水を伴う場合のケースを選定した。図-15で示すように、浮遊性種子は堆積するものの沈降性種子に比べては平均的に1/10程度であり、土砂の上をうっすらと覆うように堆積するため、横断方向にほぼ一定であることが見受けられ、内陸側へも輸送されや

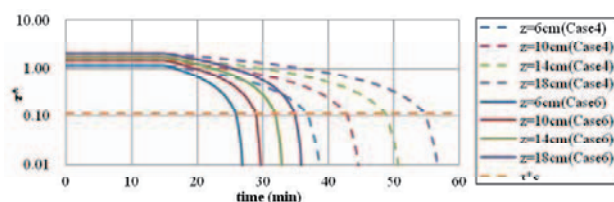


図-14 横断方向の各地点での種子 τ^* 時間変化比較(case4,6)

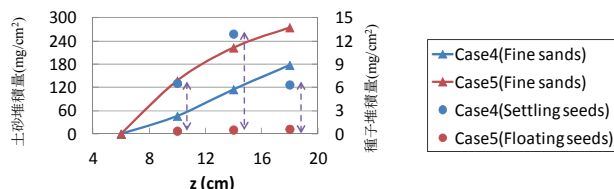
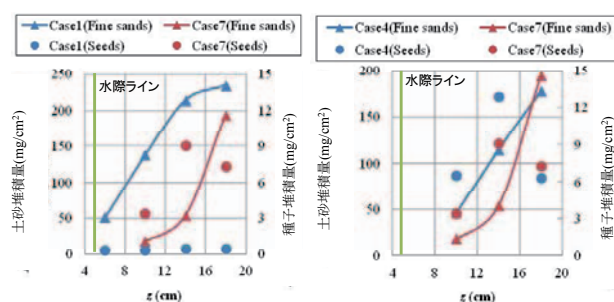


図-15 浮遊性種子の堆積 (case4,5)



a) Case1とCase7

b) Case4とCase7

図-16 沈降性種子堆積の比較

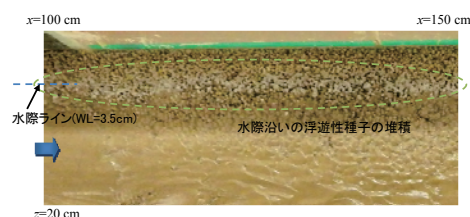


図-17 水際ラインの外側へ運ばれる種子モデル (case8)

すい。ただ、一定流量で流し続けた時には浮遊性種子の堆積は見られず下流へ全て流されたことから、減水はいずれの種子堆積にも寄与していると考えられる。

(2) 小規模洪水での堆積過程

小規模洪水を想定した実験ケースは、7種類である。ここでの特徴は、通水初期から水際が形成($z=5$ cm地点)されている点にある。中規模洪水の時とでは、同じ地点での初期水位が異なることから土砂輸送・堆積量が異なる。土砂にはそのような違いが現れることは明らかであるが、それが種子堆積に与える影響を考察する。

図-16に沈降性種子の堆積特性を比較できる3種類のケース結果を示す。Case7が小規模洪水での定常状態での条件である。土砂堆積はさきほど述べたようであるが、沈降性種子は水位が低いことによる τ^* の減少でCase1よりは堆積傾向にある。Case4とCase7の結果より、Case4の種子堆積量が卓越していることから、Case7の種子

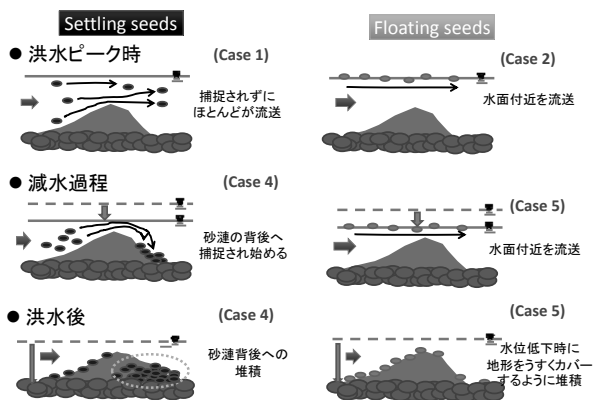


図-18 沈降性・浮遊性種子の土砂との相互作用（縦断方向）

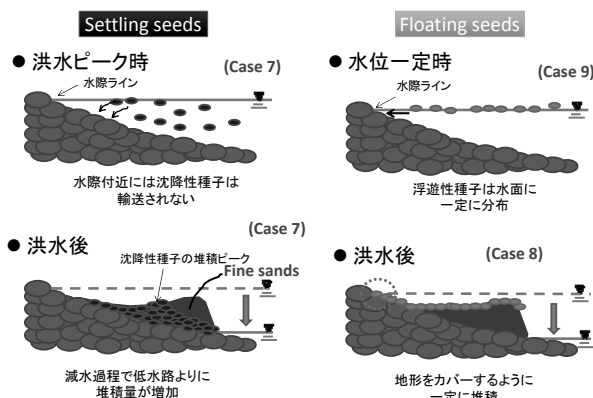


図-19 沈降性・浮遊性種子の土砂との相互作用（横断方向）

がRipplesに捕捉される水位であっても、減水期が堆積に寄与する効果の方が大きい。また、水際ライン上で観察された特徴的な結果として、図-17に示すように、本来の水際ラインの外側にまで種子が輸送され堆積した。これは水際の波の効果によるもので、その継続時間の増加に応じて堆積量も増加することが示唆された。

(3) 植物種子の堆積機構

本実験から得られた特徴的な種子の堆積に関わる運動としては、種子単独ではいずれも流送され堆積しないが、土砂との相互作用により堆積する過程が観察された。縦断方向への堆積を見ると、沈降性種子は砂漣の谷部に主に捕捉されその進行に伴い埋没し、新たな種子はその谷部に捕捉される。水際を伴う横断方向へは、沈降性種子は低水路側へ山上に堆積する土砂の手前部に主に堆積することが確認できた。一方、沈降性種子はいずれも減水末期に地形を覆うように動きを止める。このような作用は種子堆積のピーク位置を変えることが分かった。以上の様子を、図-18と図-19に図示した。

5. おわりに

本研究では、砂礫州水際の土砂・植物種子の輸送と

堆積について現地河川の地形・流況特性を基に水路実験を設計し、実験的に検討を行った。各横断面位置での掃流力変化と継続時間に応じた土砂・種子堆積特性との関係を整理し、種子の土砂との運動機構の相違とそれが起こる仕組みを明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- いずれのケースでも土砂は砂礫州斜面上へ堆積、縦断方向に砂漣が形成される条件下でそれは時間的に発達、横断方向へは低水路に向かって堆積量は増加する。
- ピーク時間が長いほど土砂・種子共に内陸部まで流送・堆積し、減水は特に種子堆積量の増加へは寄与するが、土砂の堆積へ与える影響は見られない。
- モデル沈降性種子は浮遊性種子より10倍多く堆積するほか、単体で流下する時は土砂と同じ挙動を示すが、土砂との混合状態では砂漣の谷に捕捉・堆積され単体時の挙動とは大きく異なる。

以上から種子の堆積には土砂との相互作用を含めて考えることが必須であり、今後はその運動機構のモデル化を進めるとともに、現地河川との対応状況についても検討していきたい。

謝辞：本研究は、文部科学省「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE）環境情報分野」の支援のもとに実施されました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Washitani, I.: Invasive alien species problems in Japan: an Introductory Ecological Essay, *Global Environmental Research*, pp.1-11, 2004.
- 2) 大石哲也, 角哲也, 藤原正季, 天野邦彦: 砂礫州における埋土種子分布とそれが植生成立に与える影響に関する研究, *水工学論文集*, 第53巻, pp.1159-1164, 2009.
- 3) 田所奈美, 知花武佳: 河原における植生の種子漂着場に関する研究, *河川技術論文集*, 第12巻, pp.465-470, 2006.
- 4) 宮脇真二郎, 戸田祐嗣, 花井駿介, 辻本哲郎: 航空写真・地形・流況データを用いた裸地砂州への植生の侵入・定着過程に関する研究, *河川技術論文集*, 第12巻, pp.471-476, 2006.
- 5) 尾花まき子, 内田考洋, 辻本哲郎: 河道内植生域での土砂堆積と粒状態有機物の捕捉について, *河川技術論文集*, 第18巻, pp.47-52, 2012.
- 6) 全造成, 尾花まき子, 辻本哲郎: 河道内植生域での砂と粒状有機物の輸送と堆積過程のモデル化, *河川技術論文集*, 第20巻, 2014.
- 7) 長井翔太郎, 尾花まき子, 知花武佳: 砂礫州の地形特性とその土壌特性が伏流水流動に与える影響, *河川技術論文集*, 第19巻, pp.555-560, 2012.
- 8) 知花武佳: 瀬一淵の地形特性とその底質構造, *水工学に関する夏期研修会講義集Aコース*, 第44回, pp.1-24, 2008.
- 9) Yoshikawa, M. Hoshino, Y. and Iwata, N.: Role of Seed Settleability and Settling Velocity in Water for Plant Colonization of River Gravel Bars, *Jour. of Veg. Science* 24, pp.712-723, 2013.
- 10) Yalin, M.S.: Geometrical Properties of Sand Waves, *Jour. Hydraul. Div., Proc. ASCE*, Vol.84, pp.105-119, 1964.

(2014. 4. 3受付)