河川砂州植生域による粒状有機物の捕捉機構と 細砂堆積の影響

尾花 まき子1・内田 考洋2・辻本 哲郎3

 1正会員 東京大学特任助教 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1) E-mail:obana@hydra.t.u-tokyo.ac.jp
 2学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8303名古屋市千種区不老町) E-mail: uchida.takahiro@a.mbox.nagoya-u.ac.jp
 3フェロー会員 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

E-mail: ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

河道内植生域は細砂や粒状有機物(POM)の捕捉帯として機能する.POMは河川生態系を支えるエネルギ ー源であるにも関わらず流下過程におけるその挙動や運動機構の解明は不十分であり、今後の生態系予測 評価に向けては、特に土砂との挙動特性の違いを明確にする必要がある.本研究では、現地砂州植生域で の土砂とPOMの堆積・捕捉状況の観測とそれらの素過程を単純化した室内水路実験によって、河道内植生 域でのPOM捕捉機構を明らかにするとともに、細砂の堆積がその捕捉機構に与える影響を考察する.

Key Words : Particulate organic matter (POM), Deposition, Riparian vegetation, Suspended sediment

1. まえがき

粒状有機物は、河川生態系を支えるエネルギー源であ り、水生動物の生息場形成や微生物へのエネルギーと栄 養塩の供給、下流域や海域への物質輸送などさまざまな 生態学的役割を担っている¹⁾. それらは,河川を流下す る過程で河川構造物や河川植生などの影響を受け、河川 縦断・横断・鉛直方向に連続的に変化し、生物群集へ影 響を与えている.また、その粒径により粗大有機物 CPOM (Coarse Particulate Organic Matter, >1mm) と微細有機 物FPOM (Fine Paticulate Organic Matter, 1mm~0.45 µm) に分 けられ、それに応じてさまざまな物理的作用や生物作用 を受けることが知られている。主にCPOMは、落ち葉や 小枝,水生植物や糸状藻類由来のものから構成され, FPOMはCPOMがさらに分解されたものでその起源は落 葉、倒流木、藻類などであり、いずれも底生動物や微生 物の餌資源として利用される. これらは、河川流下過程 におけるさまざまなスケールで供給・捕捉・分解・流出 という変換過程を経て下流・河口まで運搬される.また、

各景観での土砂や粒状有機物の捕捉・堆積には上流からの供給条件も重要である.特に、ダムや堰などの河川構造物は供給量に変化を与え、気候や地形などの流域環境 条件は質に影響を与える(図-1参照).

一方,河道内植生域は流下物質を捕捉・堆積させるため極めて重要な役割を担っている.土砂挙動については,

川幅縮小に関わる治水上の喫緊課題として、古くから研 究がなされ理解が進んでいる.植生域を河道内における 離散的障害物とみなした時、それは上流から下流への縦 断方向流れを低減させるほか、植生域と非植生域との境 界で横断混合を誘起させ、それらの相互作用として土砂 堆積が生じる.植生域での土砂堆積はすでに解析がなさ れ挙動特性の再現が可能となっているが、粒状有機物の 挙動は食物連鎖の礎として重要であるにも関わらず未だ 運動機構の解明は不十分であり、河床変動解析に取り込 む上で土砂との挙動特性の違いを把握する必要がある.



図-1 粒状有機物の変換過程と変化要因

本研究では、現地の植生域でのそれらの堆積・捕捉状 況の観測を行った結果に基づいて、その素過程を単純化 した実験水路を用いた基礎実験によって、土砂と粒度・ 比重の異なるPOMが単独あるいは混合状態で植生に捕捉される状況や出現する運動機構を観察し、今後のモデリングの方向性を探る.

2. 中州型砂州での現地観測

砂州植生域での土砂堆積構造と粒状態有機物の捕捉状 況を把握するため、河川の流れに対して出来る限り直角 に存在し植生が砂州全体を覆うような中州型の砂州を選 定して調査を実施した. 観測サイトとしては、中部地 方・矢作川中流域の河口より約 51km 地点に位置する中 州型砂州を調査対象砂州として選定した.砂州の縦断距 離は約 300m, 横断距離は約 100m, 河床勾配は 1/150, 洪水時には全水没するような砂州である. 観測は 2011 年 10 月 27 日と 11 月 1 日の平水時に、植生調査、砂州 高低差測量、堆積層厚の計測、堆積細砂採取を行い、採 取した試料を持ち帰り粒度試験と強熱減量試験、沈降試 験にそれぞれ供し、砂州上の粒径分布と場所に応じた粒 径別の有機物量および有機物比重を算定した. 目視によ り場所に応じた特徴的な違いが確認できる場を抽出し、 縦断方向に 3 測線(3-5),横断方向に 5 測線(a-e)を設け, その交点で検土杖を用いて堆積層厚を計測するとともに 深さ10cmまでの堆積細砂を採取した.

結果を概観すると、砂州高低差測量による縦断方向変 化は、砂州上流から中州中心やや後方に向かって最も比 高が高くなり、そこを頂点にして下流へ向かって緩やか に低くなる.横断方向変化は、特に砂州中央部(測線 cd) において水際から砂州内陸部に向かい約 2m に及ぶ 急激な比高の上昇が見られ、典型的な蒲鉾型形状をなし ていた. 図-2 に各側線の交点で採取した堆積十砂の中 央粒径 doの平面分布を示す. この図から堆積土砂の縦 断方向への粒度分布は、上流側で粗く下流へ向かうにつ れ細粒化していることが見てとれる.横断方向への粒度 分布においても水際部で粗く、内陸へ向かい細粒化する という傾向が確認できた.また、図-3 に粒径別有機物 含有率の縦断方向変化を一例として示す. この図から, 砂州下流側へ向かって有機物含有率は増加することが分 かる.内訳を見ると、上流側では主に CPOM の堆積割 合が高いのに対して下流側では FPOM が大部分を占め る.一方,0.16mm 以下の有機物が砂州にほとんど堆積 していないのは、洪水によって流されているものと考え られる. 沈降試験による土砂の比重はすでに知られてい る 2.65 付近に集中したが、POM は 1.02-1.26 の範囲で分 布した. 目視により運動形態を確認したところ、土砂は 集団でほぼ均一に沈降するのに対して, 0.85mm 以上の 土砂から抽出した木片や藻類由来の様々な形状の有機物 は、左右にひらひらと舞いながらゆっくりと沈降した. このように、土砂と POM では同じ粒径サイズであって

もその沈降動態は異なる.

以上の結果をまとめると、土砂や POM の堆積には植 生域が流れの抵抗として作用することによる縦断方向へ の土砂堆積と分級、異なる流速場が誘起する横断混合に よる植生域内への拡散が支配的である事のほか、POM 堆積は定性的には土砂堆積に依存すると推察される.



図-3 粒径別有機物含有率(縦断方向変化)

水理実験の概要

上述した現地調査結果から,場所に応じた土砂堆積・ 分級および粒状態有機物の捕捉には,特に①植生域内縦 断方向への土砂および有機物の輸送と②植生域と非植生 域が並存する場合での横断混合による影響が顕著である という流れの特徴を抽出した.そこで本章では室内水理 実験により,特に土砂と粒径・比重の異なる粒状態有機 物が単独あるいは混合状態で植生に捕捉される状況を, 上述した2つのパターンに着目してそれぞれどのような 仕組みが出現しているのかを観察した.

実験は、長さ 20m,幅 0.5m,高さ 0.3mの可変勾配式 循環水路で行った.河床材料は、粒径 2mmの砂を敷き つめ固定床とした.植生には、現地調査で優占していた ツルヨシを想定し、直径 0.25cm,高さ 10cmの竹串を千 鳥状に中心間隔 2cm で路床に敷いたアクリル板に挿し て円柱群植生モデルを作製した.土砂は 1.25mm(粗 砂)と 0.25mm(細砂)の 2 種類の篩分砂を用い、POM モデルとしては調査結果で得た値を参考にして比重 1.26 としたそれぞれ粒径と形の異なる PVC 粒子を 2 種類選 定した.2種類の PVC 粒子は、それぞれ CPOM、FPOM に相当すると想定した.各試料の諸量を表-1 に示す. 実験条件は、用いる試料が各々植生域および非植生域に て移動・非移動, 掃流・浮遊と変化する条件を選んだ.

表-1	実験に用い	いた試料の諸量
-----	-------	---------

実験試料	中央粒径 d ₅₀	比重	沈降速度	
	(mm)		(cm/s)	
粗砂	1.25	2.65	11.1	
細砂	0.250	2.65	3.13	
CPOM	1.50	1.26	5.50	
(非球形 PVC)				
FPOM	0.150	1.26	0.465	
(均一球形 PVC)				

(1) 植生域内の縦断方向輸送 (パターン①)

植生域内縦断方向輸送による土砂と粒状態有機物の堆 積特性を把握するため、円柱群植生モデルを水路幅一杯 に敷きつめ、4種類の実験試料のうち細砂と CPOM を用 いて実験を行った.植生モデルは、水路上流端から 6m の位置を起点に流下方向へ 5m 敷きつめ通水し、植生域 上流端から 2m の等流が確認できた区間を計測対象区間 とした(図-4 参照).また、植生モデルは非水没とな るよう流量を調節した.実験ケースは、細砂のみを流し た場合(Case-1)と細砂・CPOM 両方を流した場合 (Case-2)の2種類を設定し、いずれも植生域上流端よ り 2m 上流から 20 分間連続的に一定濃度で給砂を行い、 それぞれの堆積特性を比較した.本ケースの水理条件を 表-2に示す.

<		Z(cm)	2000cm	ı ——		>
\rightarrow	固定床	* 50 110	这間 。 植生	域	固定床	50cm
~	600	\longrightarrow_{0}	200	500	X(cm)	
	図	-4 実験:	水路平面図	(パタ	マーン①)	

-	_	~~~	~ ~		 · ·		2

ま_2

		Υ.C.	200010-			
Q	Ib	If	h ₀	u*0	u*v	S
(cm^3/s)			(cm)	(cm/s)	(cm/s)	(kg)
6940	1/150	1/185	35	13	23	75

宝驗水理冬件

 (cm/s)
 (cm/s)
 (cm/s)
 (kg)
 (kg)



(2) 植生域と非植生域が並存する場合の横断方向輸送 (パターン②)

植生域と非植生域が並存する現地河道での状況を想定 し、異なる流速場が引き起こす横断混合による土砂・粒 状態有機物の堆積特性を把握するため、水路の半幅に円 柱群植生モデルを敷きつめて実験を行った。用いた実験 試料は表-1 に示した 4 種類である。植生モデルは、水 路の片側にのみ水路上流端から 6m の位置を起点に流下 方向へ 7m にわたり敷きつめた(図-6 参照)。前節と同 じく植生モデルは非水没である。流れが平衡状態である のを確認した植生域上流端から 5.3m 地点を計測断面と した。本ケースの水理条件を表-3 に示す。それぞれ水 路勾配 I, エネルギー勾配 I, 断面平均水深 h, 非植生 域摩擦速度 u, 植生域摩擦速度 u, である。本条件での 土砂・POM それぞれのシールズダイアグラムによる運 動形式を図-7 に示す。

<u>.</u>	_ 600cm _	Z(c	m)	_ 700cm	_	>計	·測断面 →<	600cm	>
		25	植生域					50cm	ì
	固定床	* 0		400	53	600	700 x(cm)	50cm	V

図-6 実験水路平面図 (パターン2)

表-3 実験水理条件

Q (cm ³ /s)	Ib	$I_{\rm f}$	h ['] (cm)	u*0 (cm/s)	u∗ _v (cm/s)
6940	1/150	1/85	3.4	6.5	1.2



図-7 シールズダイアグラム(パターン②)

ここでは、CPOM と FPOM が粒径や混合状態の異なる 土砂の堆積に応じてどのように挙動し捕捉されるのかに 着目し、実験ケースを Case3~8 の 6 種類を設定した. 土砂は、粗砂・細砂およびそれぞれを等量混合した混合 砂にそれぞれ CPOM・FPOM を混合し、植生域上流端よ り lm 上流から 20 分間一定濃度で給砂した.実験ケー スを表-4 に示す.

Case	粗砂 (mg/l)	細砂 (mg/l)	CPOM (mg/l)	FPOM (mg/l)	投入土 砂質量 (kg)	土砂質 量割合
3	1578	-	78.9	-	8.0	
4	-	1262	98.6	-	8.0	-
5	789	789	98.6	-	12.0	0.5
6	1669	-	-	250	12.0	
7	-	1819	-	273	12.0	
8	947	947	-	284	12.0	0.5

表-4 実験ケース

水理実験を通した植生域内土砂堆積と粒状有 機物の捕捉特性

(1) 植生域内の縦断方向輸送 (パターン①)

本パターンでは、植生域内に堆積した土砂の堆積層厚 および CPOM の堆積個数を特徴的な変化が見出された 時間毎に計測した. なお、本条件ではモデル CPOM と FPOM は単独では植生域を浮遊・掃流形式で通過し植生 域内に堆積しなかったことを確認した. 以下、結果と考 察を述べる.

a) 浮遊砂堆積特性の比較 --Case1, Case2-

図-8 に各ケース 20 分後の堆積層厚を示す. 図の x 軸 の起点は植生域上流端である. 本条件では細砂は主に浮 遊形式で流送されており,両 Case とも植生域内上流端 で顕著な土砂堆積が見られ,砂漣が形成されそれが時間 的に下流へ発達していく様子が見てとれた. Yalin²の Ripples と Dune の区分図で本条件を確認したところ,植 生域内外ともに砂連形成領域内にあることから,植生域 内であっても摩擦速度を用いた領域区分に応じて砂漣が 形成される.



植生域上流端から 40~60cm 地点での砂漣の波長と平均波 高の時系列変化を比較した図-9 を見ると、波長は時間経過 に関わらずほぼ一定であるが、平均波高はいずれも増加傾 向である.特に Case2 は Casel に比べ波高は低い. 浮遊砂 と CPOM が同時に流送すると CPOM は砂漣のトラフに捕 捉され,浮遊砂は下流へさらに流送されるため砂漣は時間 的に発達する.すなわち CPOM の有無により下流へ伝播 される浮遊砂量の異なりが波高の減少を生じさせたと推察で きる.さらに波長の進行速度を計測したところ, Casel が 0.021(cm/s)であったのに対し Case2 は 0.013(cm/s)となり,約 1.6 倍の差があった.これも砂漣のトラフに捕捉された CPOM がその進行を低減させていると考えられる.



b) CPOM の捕捉特性

先にも述べたように、モデル CPOM と FPOM は単独 では植生域内に留まらず通過したが土砂と共に運搬され ると、CPOM は植生域内に形成された砂漣のトラフに捕 捉され堆積することが確認できた. 浮遊砂の堆積が初期 の時点では、CPOMは掃流形式で植生域内を通過するが、 砂漣が形成され始めるとその背後のトラフに捕捉され始 める. その間にも浮遊砂は連続的に輸送されているので, 捕捉された CPOM の上や背後にさらに浮遊砂が堆積し 堆積層厚は増すとともに砂漣も発達する. そして次の砂 漣のトラフに新たな CPOM が捕捉され、またその背後 に浮遊砂が堆積するという現象を繰り返す. 捕捉された CPOM 量の時系列変化を浮遊砂堆積層厚とともに示した 図-10 を見ると、上述した時間的な砂漣の発達にしたが いそのトラフに捕捉される CPOM が下流へ伝播してい く様子が分かる. このように、植生域内の砂漣形成が見 られる領域では CPOM が捕捉されやすい場が存在する ことが分かった.



図-10 CPOM 量の時系列変化(4分後, 20分後)

以上から、本パターンではモデル CPOM も FPOM も 単独では植生域を浮遊、掃流形式で通過したが、土砂と 混在させた場合には CPOM は砂漣のトラフに捕捉され る. これは砂漣の峰で流れが剥離し渦を形成、CPOM が この渦に取り込まれることによる. このように停滞した CPOM が下流に進行する砂漣の中に埋没していくかたち で CPOM が堆積していく.一方,こうした CPOM を取 り込むことの複合作用として砂漣の伝播速度や波高は低 減される.

(2) 植生域と非植生域が並存する場合の横断方向輸送 (パターン(2))

本パターンでは、植生域内に堆積した土砂の堆積層厚 と植生域境界からの堆積幅を計測した. CPOM は土砂堆 積があってもその上を掃流形式で通過するのみで堆積に は至らなかったが、植生域内への侵入を確認できたため その侵入割合を計測し、土砂とともに堆積した FPOM は篩分した後、強熱減量試験を実施し堆積重量割合を計 測した.

a)植生域内への土砂堆積特性

本条件では、粗砂は掃流形式、細砂は浮遊形式で流送 された. 図-11 に計測断面 (x=530cm) における掃流砂, 浮遊砂、混合砂の植生域内堆積層厚と堆積幅の時系列変 化を示す. 図中 x 軸の起点は、横断方向の植生域の始ま りである.この結果を見ると、いずれのケースも植生域 境界から約 1cm 内側に畝傍状の土砂堆積が確認でき, 時間的に堆積が発達することが分かる. 堆積層厚と堆積 幅は、掃流砂<混合砂<浮遊砂の順に増加していること が見てとれる. 側岸植生域への土砂堆積については古く から研究が進められており、浮遊砂および掃流砂それぞ れの堆積メカニズムは異なっていることが指摘されてい る. 浮遊砂粒子運動は流体運動と追随性が良く、横断方 向拡散の影響が卓越していることが、浮遊砂の堆積幅が 掃流砂の2倍となった要因と推察できる、一方、掃流砂 の植生域境界部への堆積は池田ら 3や汁本ら 4によって 確認されている低周波流速変動によるものと考えられる. その発生により主流域から植生域内およびその逆への掃 流力に変化が生じ、活発な流体の横断混合が起こること から掃流砂量も横断方向へ変化することが推察される. 混合砂として堆積した浮遊砂と掃流砂の堆積割合を調べ たところ、9対1であった.特に植生域内部に向かう横 断方向への堆積に着目すると、浮遊砂堆積の頂点の後方 付近に堆積する掃流砂割合が高いことが見受けられた. これより、掃流砂のみの流送時より浮遊砂と混合される 方が植生域内部まで掃流砂が運搬されることが分かった.





b) 植生域内への CPOM の侵入

CPOM の植生域内への侵入を観察していると、土砂堆積 層厚さの時間的発達に伴いその運動領域と侵入割合に変 化が見られたので、計測断面にて植生域を 4 つに区間分 けし、水路に投入した全 CPOM に対して植生域内のそ れぞれの区間を通過した CPOM の個数を計測した. 図-12 に浮遊砂堆積層厚と CPOM の植生域侵入割合の時系 列変化を示す. 植生域内に侵入する CPOM は、浮遊砂 投入前は x=5-10cm 区間への侵入割合が最も高かったの に対し、浮遊砂投入後時間的に堆積が発達するにしたが いその区間への CPOM 侵入割合は減少している. 一方、 時間経過とともに CPOM は植生域内部へとさらに運動 領域を広げ、植生域内部への CPOM の侵入が増加して いる様子が見てとれる.

図-13 に各ケース 20 分後の CPOM 侵入割合を示す.堆 積層厚さと幅の拡大に応じて,CPOM も植生域内部へ運 動領域を拡げることが見てとれる.CPOM は,前節で述 べた掃流砂と同様の形式で流送されるため植生域境界部 で発生する低周波流速変動の影響を受ける.すなわち, 植生域境界部での土砂堆積前後では,植生域内への CPOM 侵入率は変化し,特に土砂堆積後に減少するのは, 植生域内へ向かう横断方向流速が堆積層により減速され 掃流力も低下するためであると推測できる.





図-12 Case4(浮遊砂)の CPOM 侵入割合の時系列変化(x=530cm)



c) FPOM の捕捉特性

掃流砂,浮遊砂,混合砂とともに流した FPOM の植 生域内堆積割合を土砂堆積層厚と併せて図-14 に示す.



これらの結果から,植生域境界部での粒径が粗い土砂堆 積に伴い,FPOM 堆積割合は増加することが分かる.堆 積している状況を観察すると,FPOM は特に土砂間隙に 挟まって堆積している様子が見てとれた.また FPOM の植生域内部に向かう横断方向への堆積に着目すると, とくに土砂堆積の頂点付近後方に捕捉されやすい傾向に ある.FPOM の運動形式は,浮遊砂輸送と同じく流体運 動と追随性が良いため横断方向拡散の影響を強く受ける. 土砂堆積の頂点付近後方に捕捉されやすい要因としては, 植生域境界部に形成された堆積層により内側の植生域へ 向かう横断方向流速が減速され掃流力も低下するためと 推察されるが,その堆積過程の理解については未だ不十 分であるため引き続きの検討が必要である.

5. まとめ

本研究は、河道内植生域での土砂堆積と POM 捕捉に 着目し、現地観測によってその基本的特性を抽出した後、 室内水理実験で植生を伴う流れの水理的素過程(流速低 減と混合)ごとに、土砂と POM の堆積メカニズムを別々 にまたは相互関連について検討した、実験で明らかにさ れた特徴を以下に示す.

- ・非植生域から植生域への縦断的遷移を想定したケース では、浮遊砂が植生域に堆積、砂漣を形成し、時間的 に発達・下流に伝播する.モデル CPOM も FPOM も 単独では植生域を浮遊、掃流形式で通過するが、砂と 混在させた場合では、CPOM は砂漣のトラフに捕捉さ れ、砂漣が下流へ移動するためそれに取り込まれて堆 積する.一方複合作用で砂漣の伝播速度や波高は低減 される.
- ・非植生域に並行する植生域では、周知のような浮遊砂の横断混合による敵状構造が現れるが、掃流粗砂の場合も小規模の敵が形成される. CPOM は横断混合によって植生域まで運動領域を広げるが単独では堆積しない.砂を伴う場合はその堆積域で砂漣に捕捉されることが期待される. FPOM は土砂の敵状堆積に影響されその間隙に捕捉され堆積するが、CPOM のように植生域内部にまでに及ぶ運動領域の拡幅は確認できなかった.

本研究により,植生域内での縦断変化および横断混合に よる土砂動態に影響された POM の挙動が特徴付けられ た.今後,河床変動解析に取り込むことを意識したそれ らの相互作用のモデル化を早急に行いたい.

謝辞:本研究は平成23年度WEC応用生態研究助成を受けて実施したもので、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 吉村千洋,谷田一三,古米弘明,中島典明:河川生態系を 支える多様な粒状有機物応用生態工学9(1),pp.85-101,2006.
- Yalin, M.S: Geometrical Properties of Sand Waves, Jour. Hydraul. Div., Proc.ASCE, Vol.84, pp.105-119, 1964.
- 3) 池田駿介,太田賢一,長谷川洋:側岸部植生境界の周期渦の発生機構,土木学会論文集,No.443/II-18, pp.47-54, 1992.
- 4) 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.

(2012. 7.18 受付)

MECHANISMS OF CAPTURING PARTICULATE ORGANIC MATTERS AND THE INFLUENCE OF FINE SEDIMENTS DEPOSITION BY A SANDBAR VEGETATION

Makiko OBANA, Takahiro UCHIDA and Tetsuro TSUJIMOTO

River landscapes are characterized by an interrelating system of flow, sediment transport, morphology and vegetation. It is known that suspended sediment and particulate organic matter (POM) transported by flood are captured and deposited on sandbar with riparian vegetation. The purpose of this study is to clarify the characteristics of deposition of suspended sediment and POM on sandbars with riparian vegetation through field observation and laboratory experiments. The main results of this study are that the spatial changes in thickness of sediment deposition for respective size and specific weight have differences from the upper to lower part of riparian vegetation of sandbar. Also, it was clearly showed that the behavior of suspended sediment and that of POM have significant differences under the same condition. These results indicated that hydraulic and geomorphic roles of vegetation and suspended sediment.