河川技術論文集, 第18巻, 2012年6月

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

DEPOSITION OF FINE SEDIMENT AND CAPTURE OF PARTICULATE ORGANIC MATTER IN RIPARIAN VEGETATED AREA

尾花まき子[1]・内田考洋[2]・辻本哲郎[3]
Makiko OBANA, Takahiro UCHIDA and Tetsuro TSUJIMOTO

[1]正会員　博(工)　東京大学大学院特任助教　工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）
[2]学生会員　学(工)　名古屋大学大学院博士前期課程　工学研究科(〒464-8303 愛知県名古屋市千種区不老町)
[3]フェロー会員　工博　名古屋大学大学院教授　工学研究科（〒464-8303 愛知県名古屋市千種区不老町）

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.

Key Words : *Deposition, suspended sediment, particulate organic matter, riparian vegetation*

1．まえがき

河道内植生域は離散的障害物として流れを低減するほか，横断混合を誘起し，それらの相互作用によって流砂の堆積を促し生息場や物質循環素過程の場を提供している．また，粒状態有機物(以下，POM)を捕捉し，物質循環を通して生態系の形成に貢献している．植生域の土砂堆積はすでに解析がなされているが，POMの挙動は生態系にとって重要であるにも関わらず未だ運動機構の解明が不十分であり，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．本研究は，現地の植生域でのそれらの堆積・捕捉状況の観測を行い，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を観察し，どのような仕組みが出現しているのかを探り今後の解析上で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．

(1) 観測サイト

本研究で対象とする河川は，伊勢湾流域圏を流れる10本の一級河川のうちの一つである矢作川である．矢作川は，その水源を南アルプス南端，長野県下伊那郡に発し，巴川や乙川などの支川を合わせ，矢作古川を分派して三河湾に注ぐ幹線流路延長117km，流域面積1,830km^{2}の河川である．本研究では，特に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（**図-1**参照）．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．河床の骨格材料は粒径2-40cmの粗礫，粗石，巨石が基盤として存在し，その上を洪水によって運搬された細砂が厚く覆っている．また，草本植生が砂州全域に侵入しており，砂州の大部分にわたり草本植生の繁茂が確認できた．

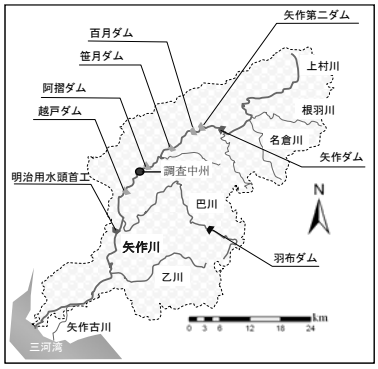
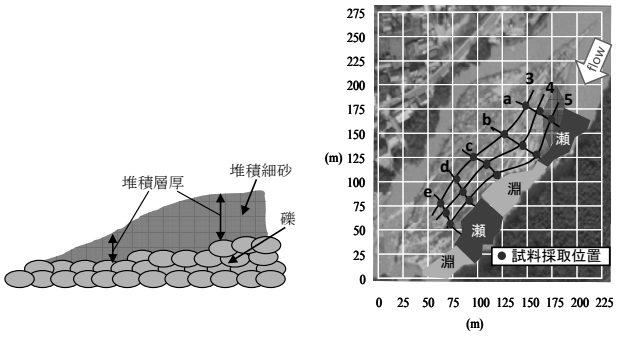


図-1 矢作川流域図と調査対象中州

(2) 観測概要

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．

植生調査は相観から優占している植生群落を抽出し，植生群落の任意の位置にコドラート(1m×1m)を設置して，その中の植生の本数を数え密度を得たほか，植生高さ，茎部の直径を計測した．砂州高低差測量では中州全体の地形の概略を把握するため，レーザーレベル((株)ソキア製)とGPS((株)ソキア製)を用いて，高低差に特徴的な違いが確認できる箇所を抽出し，調査時の水面を基準として高さを計測した．堆積層厚は現地での踏査から，基盤である礫上に細砂が堆積している様子が想定されたため（**図-2-a)**参照），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側線，横断方向に5側線を設け（**図-2-b)**参照），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．なお，中州の右岸側流路には梁が設置されていたため，中州右半分は調査対象外とした．



a) 砂州概念図と計測諸量　　b) 計測側線と計測点

図-2 観測対象砂州

(3) 中州型砂州の細砂堆積と粒状態有機物の捕捉状況

砂州全域には，ツルヨシ，シナダレスズメガヤ，オギ，ヤナギタデといった4種類の植生が主に分布しており，その中でもツルヨシ群落は砂州上流側や水際部分一帯に繁茂し砂州の約75%を占めていた．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（交点4-d）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（側線c-d）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-3**に細砂堆積厚さの結果を示す．高低差とほぼ同様の傾向を示しており，砂州中心からやや下流の白い部分において堆積層が最も厚い．これは，中州全面に繁茂する植生が縦断方向への流れの抵抗として働き流速が低減され，下流に向かうに従い限界掃流力以上の力が作用しなかったためであると推察できる．**図-4**に各側線の交点で採取した堆積土砂の中央粒径d_{50}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-5**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．有機物は，1.0mmを境に粗大有機物(以下，CPOM)と微細有機物(以下，FPOM)に分類される[1)]．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．次に，土砂と有機物の沈降特性を把握するために行った沈降試験の結果を**図-6**に示す．土砂の比重はすでに知られている2.65付近に集中しているが，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ことのほか，POM堆積は定性的には土砂堆積に依存すると推察される．

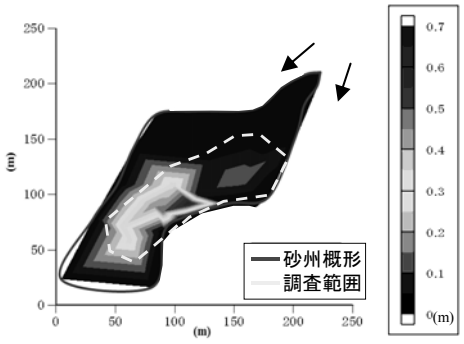


図-3 堆積層厚

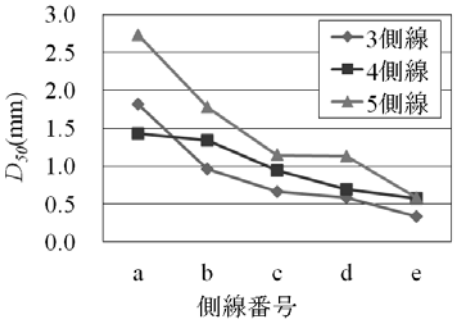


図-4 中央粒径d_{50}の平面分布

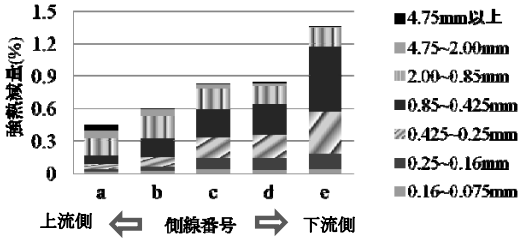


図-5 粒径別有機物含有率（縦断方向変化）

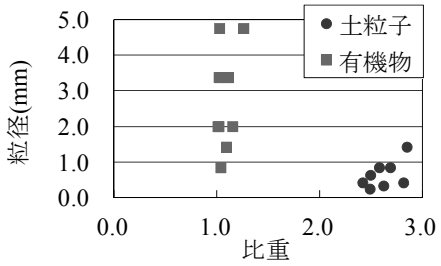


図-6 土砂と有機物の比重

3．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，用いる試料がそれぞれ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 実験に用いた試料の諸量

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

(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-7**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．

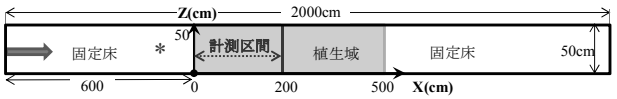


図-7 実験水路平面図（パターン①）

表-2 実験水理条件

Q (cm^3/s)	I_b	I_f	h_0 (cm)	u_{*0} (cm/s)	u_{*v} (cm/s)	S (kg)
6940	1/150	1/185	3.5	4.3	2.3	7.5

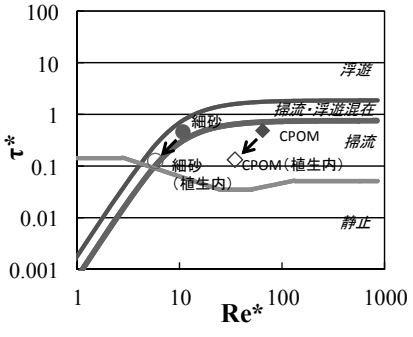


図-8 シールズダイアグラム(パターン①)

それぞれ水路勾配I_b，エネルギー勾配I_f，非植生域平均水深h_0，非植生域摩擦速度u_{*0}，植生域摩擦速度u_{*v}，土砂投入量Sである．u_{*v}は，植生域内外での底面流速を各々計測した後，u_{*0}と非植生域底面流速の比を植生域底面流速に乗じることにより算定した．**図-8**に示すシールズダイアグラムによるそれぞれの試料の移動形態は植生域内外で変化しており，細砂は植生域内で静止領域に達するが，CPOMは掃流状態で流送するような条件である．

(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）

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-9**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_b，エネルギー勾配I_f，断面平均水深h'，非植生域摩擦速度u_{*0}，植生域摩擦速度u_{*v}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-10**に示す．

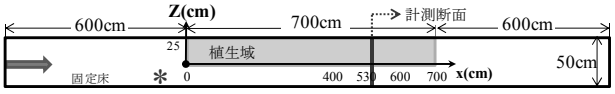


図-9 実験水路平面図（パターン②）

表-3 実験水理条件

Q (cm^3/s)	I_b	I_f	h' (cm)	u_{*0} (cm/s)	u_{*v} (cm/s)
6940	1/150	1/85	3.4	6.5	1.2

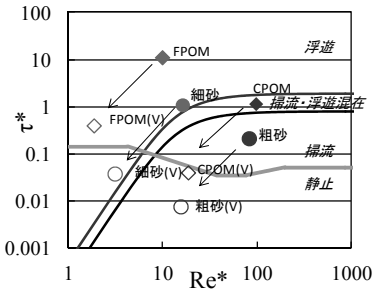


図-10 シールズダイアグラム(パターン②)

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1m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．

表-4 実験ケース

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

4．水理実験を通した植生域内土砂堆積と粒状態有機物の捕捉特性

(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-11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．Yalin[2]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漣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．

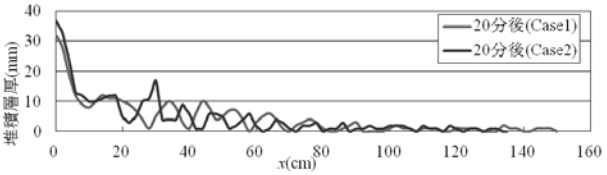
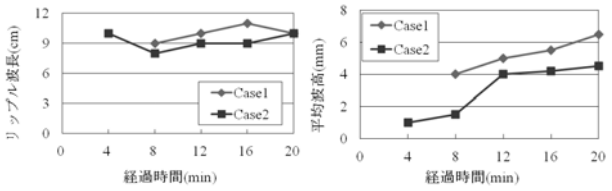


図-11 各ケースの堆積層厚（20分後）

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-12**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Case1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，Case1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．



a)波長　　b)平均波高

図-12 各ケースの砂漣波長と波高の時系列変化

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-13**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．

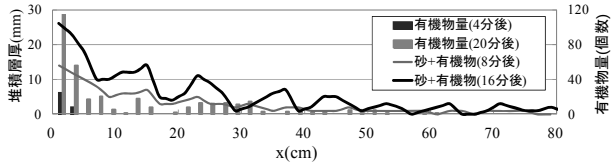


図-13 CPOM量の時系列変化(4分後，20分後)

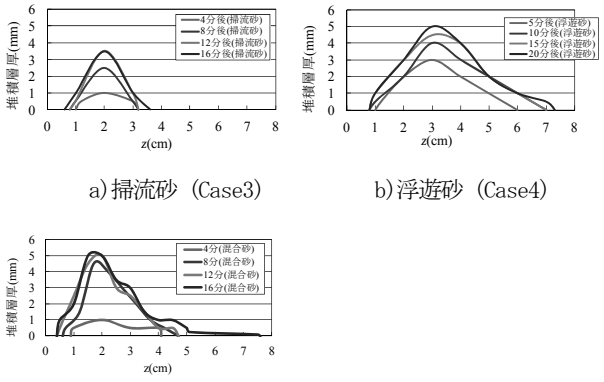
以上から，本パターンではモデルCPOMもFPOMも単独では植生域を浮遊，掃流形式で通過したが，土砂と混在させた場合にはCPOMは砂漣のトラフに捕捉される．これは砂漣の峰で流れが剥離し渦を形成，CPOMがこの渦に取り込まれることによる．このように停滞したCPOMが下流に進行する砂漣の中に埋没していくかたちでCPOMが堆積していく．一方，こうしたCPOMを取り込むことの複合作用として砂漣の伝播速度や波高は低減される．

(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-14**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]や辻本ら[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．



a)掃流砂（Case3）　　b)浮遊砂（Case4）

c)混合砂（Case5）

図-14 各ケースの堆積層厚の時系列変化(x=530cm)

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-15**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-16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．

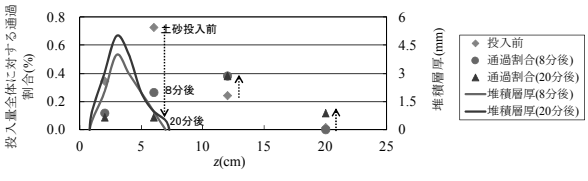


図-15 Case4(浮遊砂)のCPOM侵入割合の時系列変化(x=530cm)

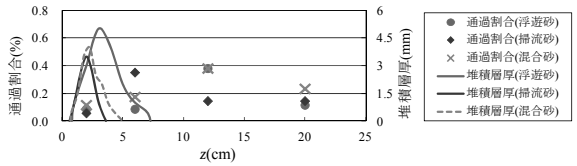


図-16 各ケース20分後のCPOM侵入割合(x=530cm)

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-17**に示す．

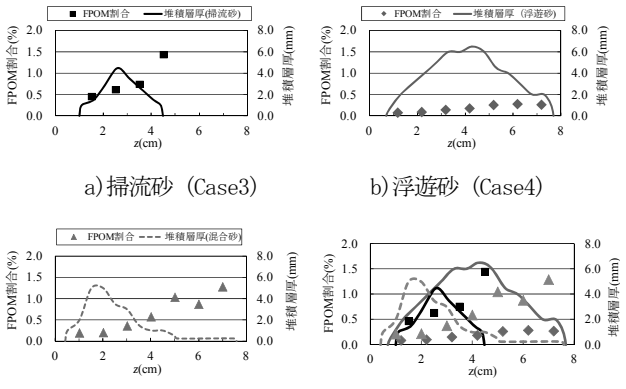


図-17 各ケースのFPOM堆積割合(x=530cm)

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

本研究では，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畝状構造が現れるが，掃流粗砂の場合も小規模の畝が形成される．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は土砂の畝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．

なお，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

1) 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.
2) 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.

(2012.4.5受付)