

礫床河川における流下有機物の動態に関する研究

STUDY ON CHARACTERISTICS OF MOVEMENTS OF ORGANIC MATERIALS IN GRAVEL RIVERS

戸田祐嗣¹, 浅野健², 池田駿介³, 端戸尚毅⁴

Yuji TODA, Takeshi ASANO, Syunsuke IKEDA and Naoki Hashido

¹正会員 学士(工) 東京工業大学助手 大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 修士(工) 三菱重工業株式会社

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科

⁴学生会員 学士(工) 東京工業大学 大学院理工学研究科

A field observation was performed to understand the characteristics of transport of dissolved and particulate organic materials in a gravel river. The results of the observation show that the fine particulate organic materials, termed FPOM, were transported toward river bed by local seepage flow, which yields the accumulation of FPOM in river bed. A series of laboratory experiments was conducted to know the effects of hydraulic conditions on the transport of FPOM. It was found that the cell-like structures of seepage flow are generated near the channel bed surface, which affects the rate and the total amount of the accumulation of FPOM in river bed.

Key Words : Gravel rivers, particulate organic matters, seepage flow, accumulation

1. はじめに

平水時の礫床河川において、礫表面に付着している藻類や、礫間隙に存在する有機物などは、これを餌とする水生昆虫類などの有機物源(エネルギー源)である。したがって、河床内有機物の動態を明らかにすることは、河川内の食物連鎖によるエネルギーの流れを把握する上で重要である。

河床への有機物の供給には2つの方法が考えられる。1つはその場で生産される有機物であり、これについては藻類の一次生産に関する研究¹⁾等が行われている。もう1つは流れに伴った溶存態有機物および粒子態有機物の供給である。溶存態有機物については河川の自浄作用に関する既往の研究²⁾等で、流下に伴う濃度変化の特性や多くの河川での濃度レベルに関する報告がなされている。本研究では、過去あまり検討されていない粒子態有機物の動態について、地形や流れとの因果関係に基づき解明することを目的とし現地観測を行った。また粒子態有機物の輸送メカニズムの詳細な特性について、数値計算および室内実験により検討を行った。

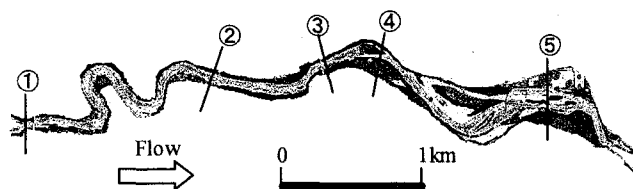


図-1 流下有機物計測区間

2. 現地観測

(1) 観測概要

現地観測は東京都青梅市に位置する多摩川中流域(河口より58~62km付近)の礫床区間で行った。観測期間は2001年8月8日~10日(流下有機物の調査は同年11月19日~21日にも実施)で、その前後には大きな降雨が無かった。以下に主要な調査項目を述べる。

a) 流下有機物量計測

図-1に示す約4kmの区間内に設けられた測線(Line ①~⑤)において流下有機物フラックスを計測した。この区間内に堰や大きな支川の合流はな

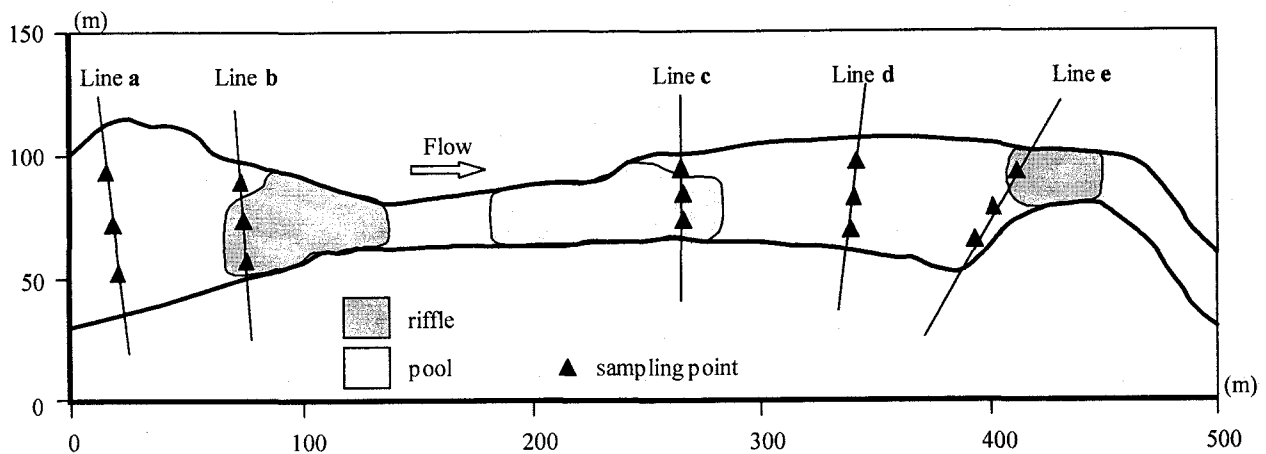


図-2 底質採取地点

河川水中有機物	河床内有機物
大きさ	大きさ
3mm以上 : リター	1.18mm以上 : CPOM
1.2μm~3mm : POC	1.18mm以下 : FPOM
1.2μm以下 : DOC	

図-3 本研究における有機物の分類

く、川幅は50～60m程度の範囲で変化している。河川を流下する葉、枝等の大きな有機物は、口径3mmのネットを一定時間放置することにより捕捉した。以下これをリターと称す。ネットの幅は1.5mで、一つの測線について、流路中心部および両側岸部の計3ヶ所に設置した。

ネットを通過する3mm以下の大きさの有機物量を計測するために、流路中心付近で採水(3時間間隔で24時間)を行った。採水はLine ①④⑤で実施し、試料は口径1.2μmのフィルター(ワットマン)でろ過し、残渣に含まれる有機物(以下、河川水中の粒子態有機物と称す)と、ろ液に含まれる有機物(以下、河川水中の溶存態有機物と称す)とに分類し、それぞれの炭素量POC(粒子態有機性炭素)、DOC(溶存態有機性炭素)をTOC計(島津製作所)を用いて計測した。

b) 河床内有機物量計測

河床内の有機物の堆積状況を把握するために、図-1中の測線④付近に河床内有機物量の調査領域を設定した(図-2)。この区間では瀬と淵が連続して存在している。図中▲印で示された地点の河床面積50cm×50cm、深さ20cmに含まれる底質を採取し、乾燥後、底質中の1.18mm以上の有機物(以下底質中のCPOMと称す)をピンセットで取り出して

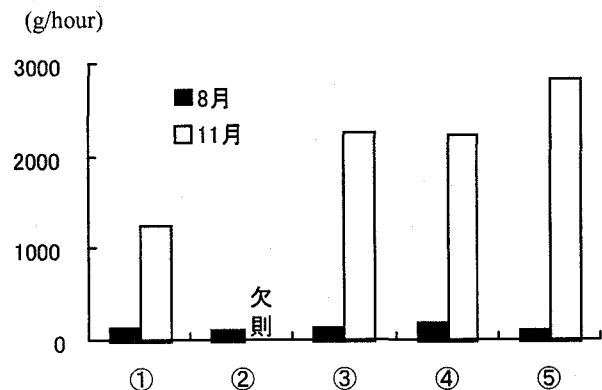


図-4 リターフラックス

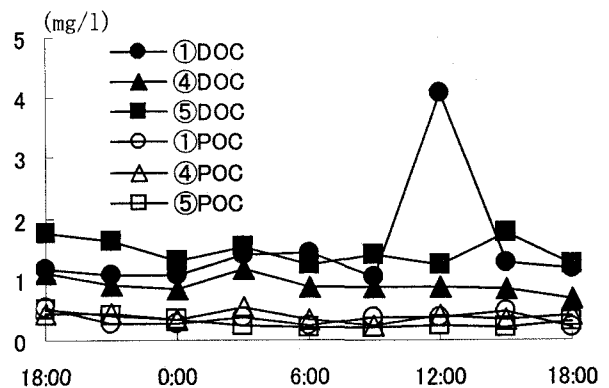


図-5 河川水中のPOC, DOC濃度

乾燥重量を計測した。また、1.18mm以下の底質について炭素含有量を計測した(以下底質中のFPOMと称す)。

図-3に本研究における大きさによる有機物の分類を示す。

(2) 観測結果および考察

a) 流下有機物量

図-4はLine ①～⑤におけるリターフラックスを

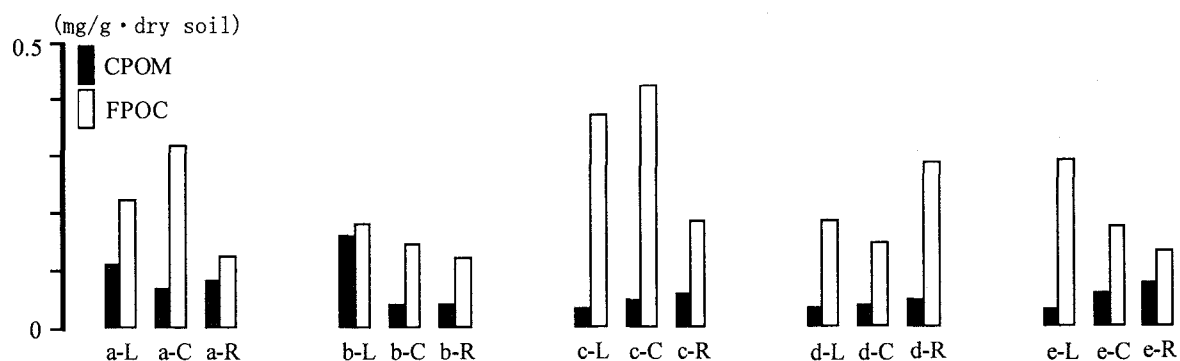


図-6 底質中のCPOM量, FPOC量

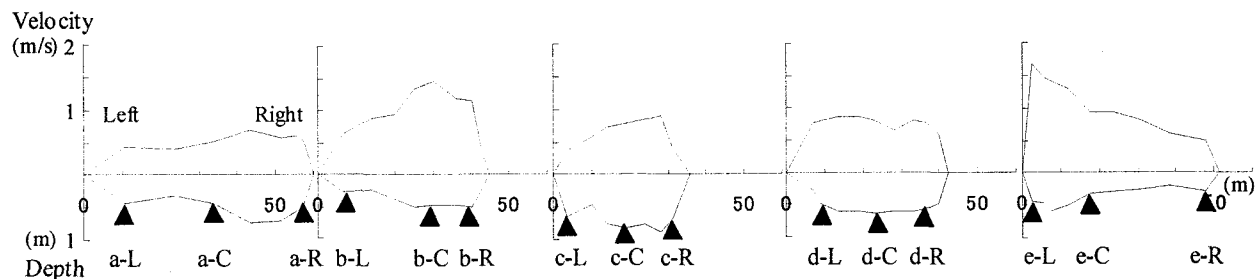


図-7 底質採取ラインにおける横断河床形状と水深平均流速分布

8月(夏季), および同年11月(秋季)について示したものである(秋期の測線②は欠測). 夏季におけるリターフラックスは, 5断面中最大でも約170g/hourであるのに対し, 秋季では各断面とも数千g/hourとなっており, 10~20倍に増加している. これは河岸付近にある落葉樹林からのリターの供給が秋季に急激に増加したことによるもので, 河川水中の有機物量の季節変化が顕著に表れている. リターフラックスを流量で除し, 河川水中のリター濃度を試算してみると, 約 2×10^{-3} mg/l程度の値となる.

図-5は河川水中のPOC, DOC濃度の時系列変化を示したものである. DOC濃度はPOC濃度の3~5倍程度の値を取っている. リター乾燥重量の50%程度が炭素重量であるとする, 夏季にリターとして河川水中に存在する有機性炭素濃度はPOC, DOC濃度と比較して2オーダーほど小さく, 河川水中の有機物はほとんどが微細粒子態有機物, 溶存態有機物として存在していることがわかる.

b) 河床内有機物量

図-6に単位重量底質中のCPOM, FPOC量, 図-7に底質採取ラインにおける横断河床形状と水深平均流速分布を示す. 底質中のCPOM量が多かった地点は, 比較的水深が浅く流速の小さい側岸部付近であることが分かる. CPOMは流速の大きい流心付近では巻き上げられて堆積できなかったと考えられ, CPOMの堆積機構について, 重力による沈降と河床面付近の乱れによる巻き上げのバランスが支配的な役割を

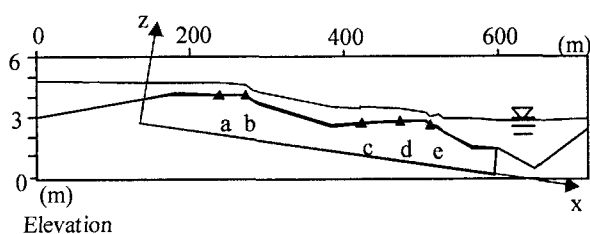


図-8 計算領域

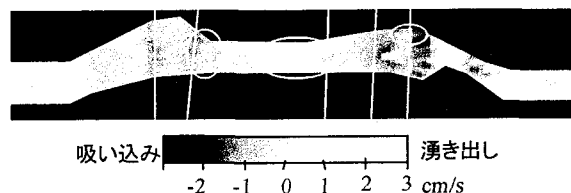


図-9 河床面における吸い込みと湧き出し

果たしているものと推測される. 一方, 底質中のFPOC量が多かった地点は, CPOM量が多かった地点とは異なっており, 全採取地点中最も流速の大きなe-L地点や流心付近においても比較的多くのFPOCが検出されている. これらのことはFPOMの堆積には, 沈降と巻き上げのバランス以外の機構が重要であることを示唆している. このFPOMの堆積機構として, 礫河床のように河床が間隙の多い構造をしている場合, 河床面での吸い込み(浸透流)によって輸送されてきた有機物が, 礫間隙に捕捉されるという可能性が考えられる. 次項でFPOMの堆積に対する浸透流の効果について述べる.

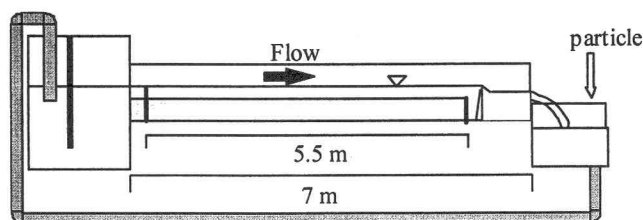


図-10 模型水路概略図

表-1 実験条件

case#	Fr	h (cm)	u (cm/s)	Q (l/s)	I	u* (cm/s)	d ₉₀ /h
case 1	0.55	6.8	45.3	14.2	1/340	4.4	0.36
case 2	0.35	6.0	26.4	8.7	1/1000	2.4	0.43
case 3	0.43	6.2	33.4	11.6	1/600	3.2	0.40
case 4	0.81	6.2	63.2	19.7	1/120	7.1	0.40

c) FPOM の堆積に対する浸透流の効果

本研究では浸透流を2つのスケールに分けて扱うことにする。1つは瀬と淵が連続して存在するという地形的な特徴に起因した瀬・淵スケールの大局的な浸透流であり、もう1つは河床礫の大きさや並びの影響を考慮しなくてはならないような局所的浸透流である。大局的浸透流について、数値計算により図-8に示す領域の浸透流構造を把握することを試みた。基礎方程式はラプラスの式とし、得られた速度ポテンシャルから河床面における水深方向の流速をダルシー則にしたがって算出した。ここで透水係数は10cm/sと仮定した。図-9に数値計算で得られた河床面におけるz方向の流速を示す。淵において湧き出しが卓越し、瀬付近で吸い込みが卓越する傾向がみられるが、湧き出しが卓越するc-c地点では底質中のFPOM量は最大であり、観測結果との関連性は不明確であった。一方の局所的浸透流の効果については、河床内と河床上の流れの構造やそれに伴う質量・運動量交換と関連しているため、現地観測から現象を把握することが困難である。そこで次章に述べる室内実験を行い、微細有機物の堆積と水理量と関連付けて検討する。

3. 室内実験

礫床を模した模型水路にて有機物を模した粒子を投入し、その堆積量や堆積速度、および河床面での交換について水理量と関連付けて検討する。

(1) 実験概要

図-10に模型水路概略図を示す。模型水路は水路長700cm、幅50cmの循環式可変勾配水路に、90%粒径24.7mmのほぼ一様粒径の礫を敷き詰め、高さ

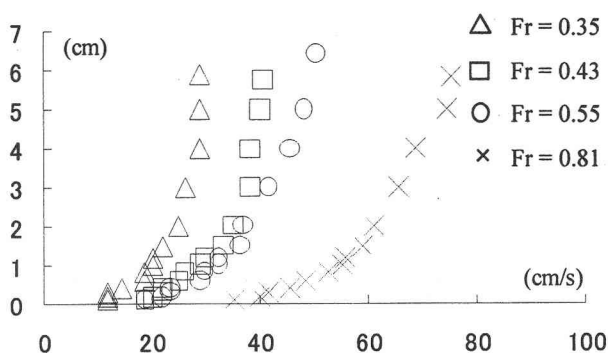


図-11 表層の流速分布

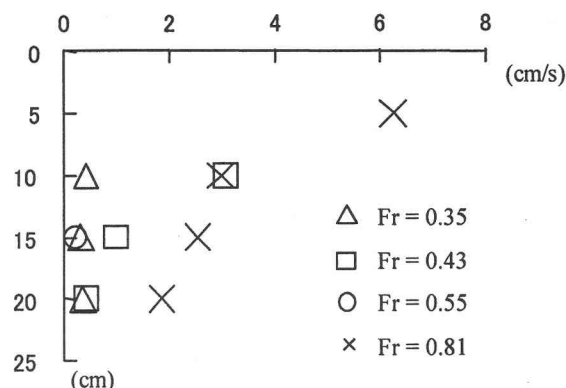


図-12 礫層内の流速分布



図-13 礫層内の流れの可視化写真

25cm、流下方向に550cmの浸透性河床区間を設けたものである。実験は礫層上の流れ（以下、表層と称す）が等流となるように流量、勾配を調節して行い、ここに粒径0.3mm、比重1.03のポリスチレンビーズを投入した。水深は固定し表層のFr数を0.35～0.81の範囲で変化させた4つのケースについて実験を行った。表-1に各ケースの実験条件を示す。

a) 流れ場の計測

表層の流速計測にはピトー管を用いた。礫層内の流速計測には、トレーサーとしてメタノールにより比重調整されたNaCl溶液を用い、2本の塩分

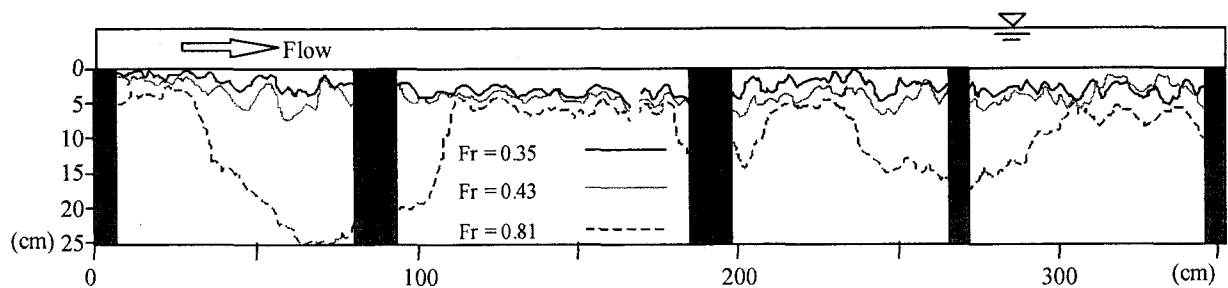


図-14 平衡時における粒子堆積形状

濃度計 (KENEK) の応答時間差から流速を算出した。塩分濃度計の電極は流下方向に 30 cm 離して設置した。また、礫層内の流れの空間的な構造を把握するために、河床内に染料を投入し、染料の脱色過程を水路側壁からビデオ撮影した。

b) 粒子堆積過程の計測

各ケースとも同量の粒子を下流端水槽に投入し、投入後の表層における粒子濃度を濁度計 (KENEK) を用いて時系列的に計測した。以下では表層の粒子濃度がほとんど変化しなくなった状態を平衡状態と呼ぶことにする。平衡に達した状態での礫層内の粒子堆積形状を水路側壁においてトレーシングペーパーに記録した。

c) 平衡時における底面付近の流れ

河床面から 1 cm の高さの面について、PIV により河床面付近の流れ場の構造を調べた。トレーサーには堆積実験に用いた粒子と同じものを用いた。

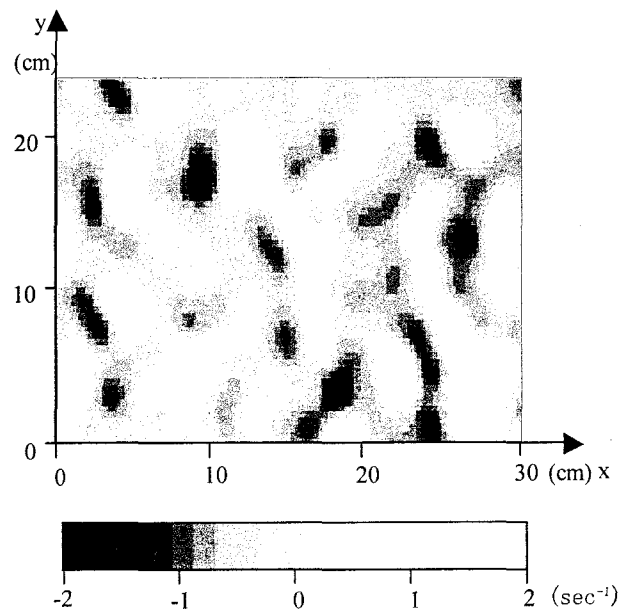


図-15 河床面付近の流れ場の発散

(2) 実験結果と考察

a) 粒子投入前の流れ場

図-11、図-12 に表層および礫層内の流速分布を示す。表層の流れ場について、河床面近傍以外はおおむね対数分布に従っているが、河床面近傍では礫層内との運動量交換が行われ、スリップ速度を有している。礫層内の流速分布においては、表層からの運動量輸送の影響を受け、深さ方向に指数的に減少する流速分布を示している。また、表層の Fr が大きいほど礫層内の深くまで運動量が輸送されていることがわかる。

図-13 は礫層内の流れ場を可視化したものである。礫層の最上層部から最下層部まで一様に染料を注入したところ、上層には数秒で染料が脱色される 30 ~ 50 cm 程度の大きさの領域がセル状に並んで現れており、この領域では表層との質量交換が盛んに行われていることが分かる。

b) 粒子堆積の様子

図-14 に平衡状態における堆積領域を示す。粒子の堆積形状は、波状の形状を示し、その波長はおおよそ 1 m 程度であった。上述の可視化実験により、礫

層内には表層との質量交換が盛んな 30 ~ 50 cm 程度の大きさの領域がセル状に並んで存在することが確認されており、波状に現れる粒子の堆積領域は、2 ~ 3 個ほどのセル群によって構成されている。このように礫河床への粒子の堆積に、河床近傍のセル状の流れの構造が密接に関連しているものと考えられる。

c) 河床面付近の流れ

図-15 は、最大の Fr 数 ($Fr=0.81$) のケースについて、PIV から得られた水平面内流速値の発散を示したものである。収束領域と発散領域が礫のスケール程度の間隔で交互に現れており、これに対応して河床面付近の吸い込みと湧き出しが存在していることを示唆している。粒子堆積実験で観察されたようなより大きな構造は、PIV による流れ場の計測からは確認することができなかった。

d) 礫層内への粒子捕捉速度

図-16 に表層粒子濃度時間変化を示す。表層粒子濃度の減少は、礫層内への粒子捕捉を表していると考えられる。粒子濃度の減少を、簡単なモデル式 $dC/dt = -kC$ で近似し、河床への粒子の取り込み速度

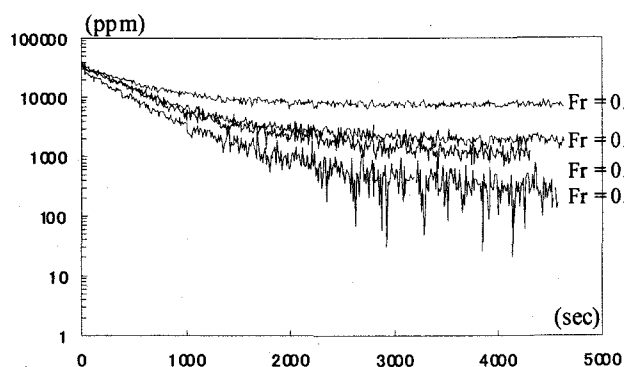


図-16 表層粒子濃度の時間変化

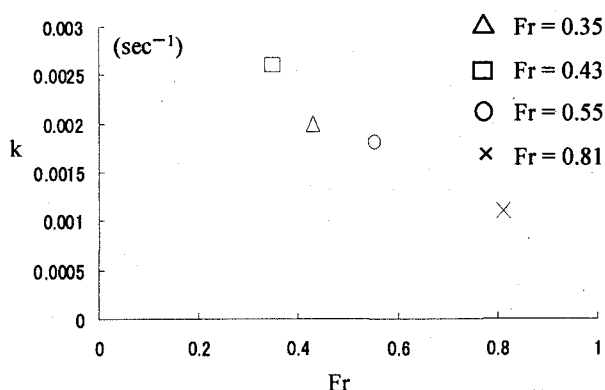


図-17 河床への粒子の取り込み速度

$k(\text{sec}^{-1})$ を算出した結果を図-17に示す。Fr数が小さいほど係数 k は大きくなり、礫層内への粒子捕捉速度が大きくなることがわかる。これは本実験ではFr数が小さいほど、表層との質量・運動量の交換が小さくなり、浸透流により一度河床へ取り込まれた粒子が、表層へ再浮上することなく河床内へと取り込まれていくことに起因している。

一方、現地観測では、表層のFr数の大きな地点において、河床内のFPOCが大きな値を示していた。このことは、本実験では礫層が一様粒径で構成されているため、礫の空隙のスケールが大きく、粒子が礫間隙に目詰まりを起こすことがなかったためと推察される。現地河川の様な混合粒径の河床では、礫層の空隙スケールが小さく、河床がフィルターとして作用し、微細粒子を捕捉するものと推察される。本実験による知見から、Fr数の増加に伴って運動量の質量・交換領域が大きくなり、表層の粒子が礫層内に盛んに運び込まれることが示されており、空隙のスケールがより小さくなると、河床のフィルター効果により、Fr数の大きなケースにおいて、微細粒子の河床への捕捉が活発に生じるものと推察される。このような混合粒径の効果については今後の課題である。

4. 結論

多摩川における河川内粒子態有機物量に関する現地観測から以下の知見が得られた。

(1) 河川水中の有機物はそのほとんどが微細粒子態有機物、溶存態有機物の形で存在する。

(2) 1mm以上の比較的大きな粒子態有機物の堆積メカニズムは、沈降と巻き上げのバランスが支配的である。

局所的浸透流による微細有機物の堆積に関する実験から以下の知見が得られた。

(3) 礫層内において、表層との質量・運動量交換領域は表層のFr数の増加に伴って大きくなる。

(4) 可視化により、礫層内に表層との質量交換が盛んに行われる領域がセル状に存在していることが確認された。

(5) 河床への粒子堆積過程は、セル状の質量交換領域と関連しており、その形状は波状を示す。

(6) Frの増加に伴い、礫層内への粒子捕捉速度は低下し、粒子濃度が平衡に達するまでの時間は長くなる。

参考文献

- 1) 例えば、戸田祐嗣・赤松良久・池田駿介：平坦床上の藻類の増殖と剥離に関する研究，水工学論文集第45巻pp1111-1116, 2001.
- 2) 例えば、川島博之・鈴木基之：浅い富栄養化河川水質シミュレーションモデル，化学工学論文集第10巻第4号，pp475-482, 1984.
- 3) 岩佐義朗・綾 史郎・中井俊夫：浸透性路床上の流れにおける物質輸送，京都大学防災研究所年報第29号B-2, 1986.
- 4) 中川博次・柁津家久：浸透性開水路乱流場における主流と浸透流との相互作用，土木学会論文報告集第244号，pp81-90, 1975.

(2002. 4. 15 受付)