

低水路側岸部に植生を有する複断面開水路 に生じる組織渦と横断方向浮遊砂輸送

ORGANIZED HORIZONTAL VORTICES AND LATERAL SEDIMENT TRANSPORT IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOWS WITH BANK VEGETATION

池田駿介¹・河村一弘²・福元正武²・佐野貴之³

Syunsuke Ikeda, Kazuhiro Kawamura, Masatake Fukumoto and Takayuki Sano

¹フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²学生員 学士(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

³正会員 修士(工) 水資源開発公団徳山ダム建設所 (〒501-0603 岐阜県揖斐郡揖斐川町上南方631-1)

It has been known that organized horizontal vortices are generated at the junctions of main channel and flood plains for two-stage channels, and they yield sediment transport between main channel and flood plains. In the present laboratory tests, it was found that the relations of the organized vortices and lateral suspended sediment transport in compound open channel flow with bank vegetation.

Numerical computations were performed by employing SDS-2DH turbulence model. For channels with bank vegetation, it was found that sediment transport is closely correlated with large scale horizontal vortices which are generated in the main channel and deposition rate takes a maximum value in the vegetation area.

Key Words : *compound open channel flow, organized horizontal vortex, bank vegetation
laboratory tests, suspended sediment, numerical computation*

1. 序論

複断面河道では高水敷と低水路の水深差のため横断方向に主流速差が生じ、低水路・高水敷境界部に周期的で大規模な組織渦が発生する。その組織渦は横断方向の運動量輸送や物質輸送に大きな影響を与えることが知られている^{1),2)}。一方で河道内の植生は流れ場を大きく変化させる。実河川でよく見られる低水路側岸部のみが植生に覆われている河道では、植生の抵抗により植生帯内部で流速が最小となり、植生帯の低水路側の渦が高水敷側の渦を巻き込んで流れることが福岡ら³⁾によって指摘されている。

浮遊砂輸送に関しては、芦田ら⁴⁾が直線複断面水路における流れの特性と浮遊砂の輸送・堆積過程について検討を行い、横断方向の拡散係数を算定している。また清水ら⁵⁾は、片側植生帯を有する開水路において、LESに基づく平面二次元流数値計算から流れ場の非定

常構造を抽出し、浮遊砂輸送の影響を検討している。

既に著者ら⁶⁾は複断面開水路に発生する組織渦の流れの構造と運動量輸送について、低水路側岸部の植生の影響にも着目して、室内実験と数値計算を行い比較検討を行った。乱流モデルとして、水深に比べ水平スケールが大きい浅い流れ場に対して開発された SDS-2DH モデル(灘岡・八木⁷⁾)を用い、SDS-2DH モデルが主流速分布、横断方向レイノルズ応力分布、組織渦の卓越渦波長など複断面開水路の流れを再現できることがわかった。本研究では、相対水深比を小さくすることにより($h_f/h_m=0.17\sim0.23$)、水深スケール以下の乱れや2次流の影響が弱い複断面流れ場(この比が0.30を越えると2次流の影響などが顕著となる)を対象として浮遊砂を移流拡散させて、室内実験とSDS-2DHモデルに浮遊砂の輸送方程式を組み込んだ数値計算を行い、浮遊砂の輸送機構について考察する。

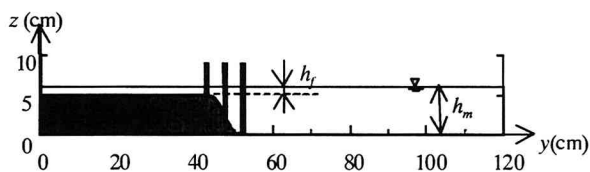


図-1 水路横断面図

表-1 実験条件

	植生なし	植生あり
Case	J	K
低水路水深 h_m (cm)	6.0	6.5
高水敷水深 h_f (cm)	1.0	1.5
低水路最大流速 u_m (cm/s)	22.6	31.8
高水敷最小流速 u_f (cm/s)	7.6	12.4

2. 実験概要

室内実験の概要を以下に記す．図-1は，実験水路の横断面図，記号の定義を表したものである．水路上流端から流下方向に x 軸，右岸側壁から横断方向に y 軸，低水路底面から鉛直上向きに z 軸を取る．実験には長さ12m，幅1.2mの循環式可変勾配水路を用いた．低水路・高水敷は耐水ベニヤを敷き，低水路側岸部は発泡スチロールを用いて低水路と高水敷を余誤差曲線で接合した．Case Kでは低水路側岸部に模擬植生として直径5mmの木製円柱を縦横5cm間隔で格子状に3列設置した．低水路河床面には粒径1.0mmの珪砂を張り付け，細かい乱れを発生させて浮遊砂の巻き上げを促している．水路床勾配は 4.6×10^{-4} (1/2170)である．

また，浮遊砂には塩化ビニル粒子（比重1.4，平均粒径130～150 μ m，沈降速度0.35～0.46cm/s）を用いた．本実験は砂漣が発達しやすい水理条件のため，低水路で堆積が生じない程度に十分な濃度で循環させた．

実験条件を表-1に示す．計測は，等流状態を確認し，組織渦が十分に発達した横断面($x=7.5$ m)で行った．容量式波高計を用いて組織渦の通過に伴う水面変動を測定した．流速はレーザー流速計を用いて流下方向流速成分を鉛直方向に1～5点測定した．粒子を含む流れであるためLock Ditecterを用いて流速成分のみを抽出した．粒子濃度は濁度計（KENEK社製）を用いて鉛直方向に1～6点測定した．また，レーザー距離計（KEYENCE社製）を用いて高水敷上の堆積厚を一定時間間隔で測定し，粒子の堆積速度を求めた．

3. 数値計算概要

本解析で用いたSDS-2DHモデルとは，乱れを水深ス

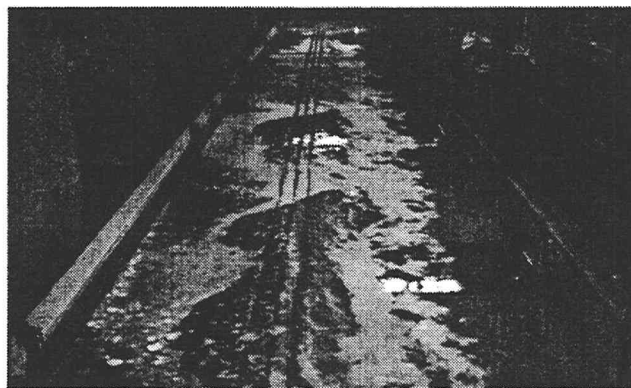


写真-1 Case Kの流れの様子（流れは紙面上から下）

ケール以下の3次元性が強い乱れ（以下SDS乱れ）と水深スケール以上の大規模な乱れに分離し，前者を乱れエネルギーの輸送方程式を用いた1方程式モデルで解析し，後者については水深平均浅水流方程式を直接計算する方法である．このモデルはLESモデルの一種であるが，フィルタスケールを水深としている点に特徴がある．基礎方程式系は付録-1に記す．

浮遊砂の運動に関する基礎方程式は，浮遊砂濃度に関する3次元の輸送方程式に水深平均操作を施して導かれた平面2次元の輸送方程式である．このことから，従属変数は水深平均濃度 C であり，河床面の巻き上げ，堆積フラックスは濃度の鉛直分布に指数分布を仮定することで評価した⁸⁾．浮遊砂の輸送方程式は付録-2に記す．

計算領域は y 方向に120cmとし， x 方向には発達する渦の波長が周期境界条件の影響を受けないように植生のない場合は720cm，植生がある場合は1500cmとした．計算格子幅は $\Delta x=2.0$ cm， $\Delta y=1.0$ cmとし，時間ステップは0.01秒とした．境界条件については，上下流端を周期境界条件，左右水路壁でslip条件とした．

初期条件はSDS乱れのみによる水平混合作用を考え，横断方向に流速分布が流下方向に一樣に存在している場を与えた．なお，このとき主流速に最大流速の1%の擾乱を与えた．浮遊砂濃度の初期値は主流速分布と同様に，SDS乱れによる拡散のみを考慮して横断方向の濃度分布を求め，この分布が流下方向に一樣に存在しているとして与えた．

4. 実験及び数値解析結果

(1) 主流速分布と浮遊砂濃度分布

図-2は水深平均された時間平均主流速分布と時間平均浮遊砂濃度分布の実験結果である．Case Jでは主流速分布，浮遊砂濃度分布ともに境界部に変曲点をもつ分布形となっている．これは水深平均浮遊砂濃度が摩擦速度 U_* に対応しているためである．Case Kでは主流

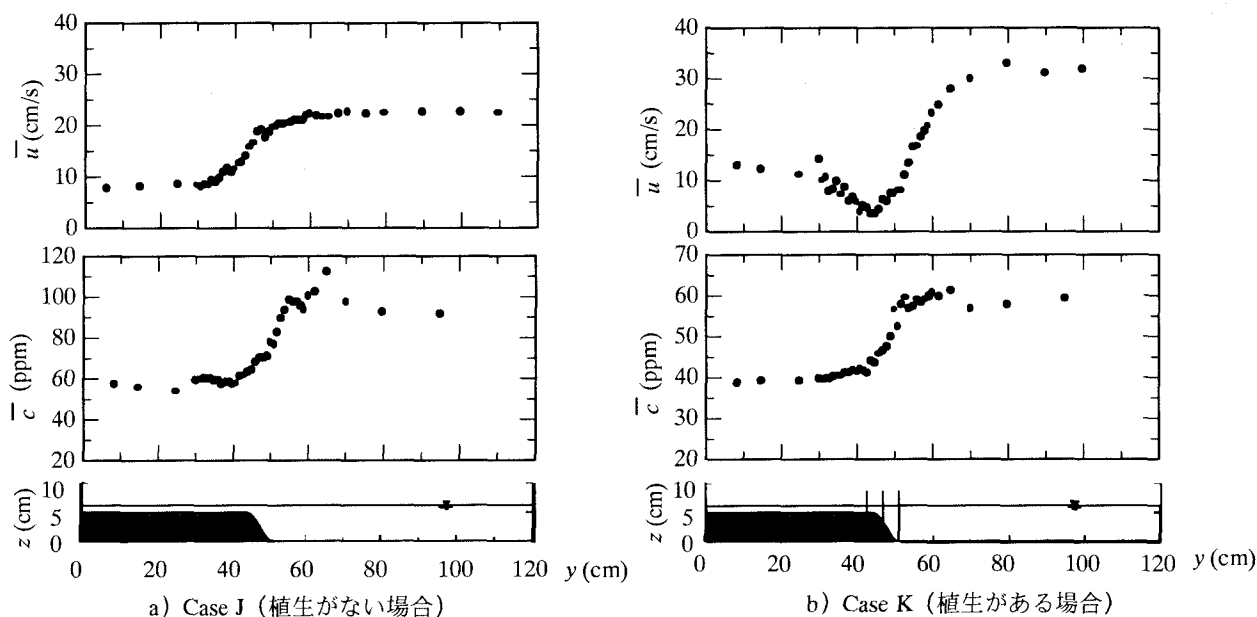


図-2 水深平均された時間平均主流速分布 (上) および時間平均浮遊砂濃度の横断分布 (下) (実験結果)

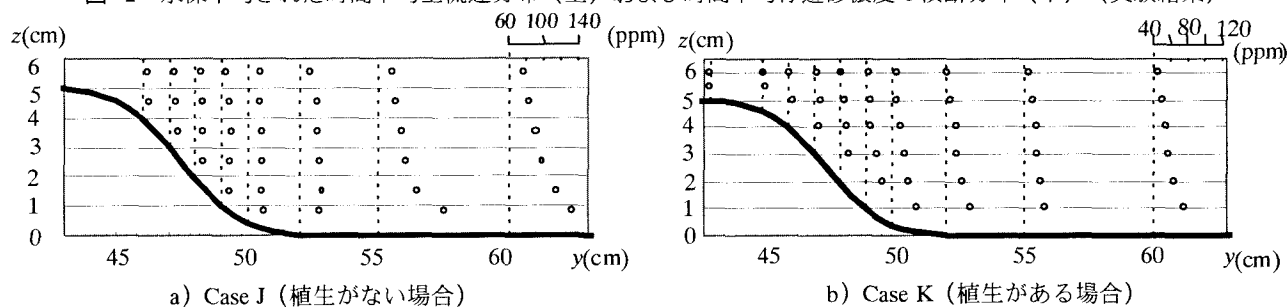


図-3 境界部の時間平均浮遊砂濃度の鉛直分布 (実験結果)

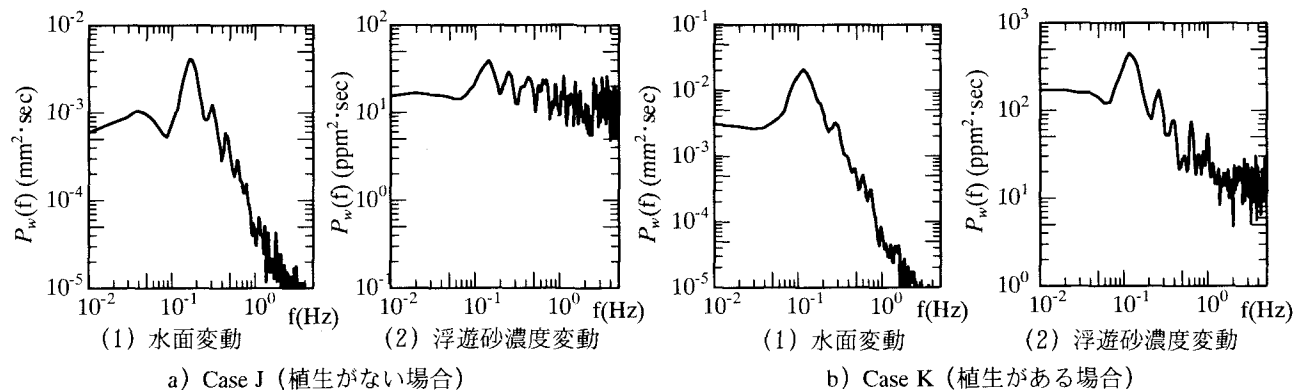


図-4 境界部のパワースペクトル (実験結果)

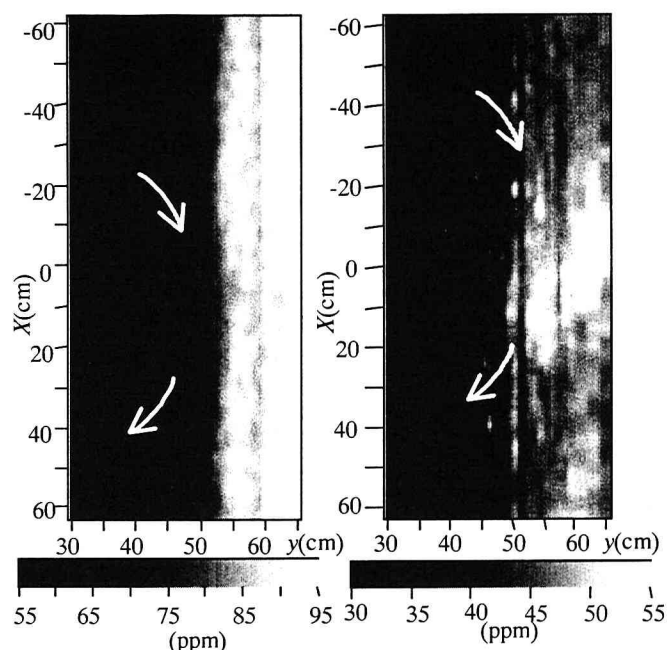
速分布と浮遊砂濃度分布が同様な分布形になっていない。それは組織渦によって、浮遊砂が植生帯内部に活発に輸送されているためである。

図-3は境界部の時間平均浮遊砂濃度鉛直分布の実験結果である。Case Jでは境界部から離れた低水路 ($y \geq 55$ cm)で鉛直方向の浮遊砂フラックスは平衡状態であるため鉛直分布はほぼ指数分布である。一方、堆積傾向にある低水路・高水敷境界部では浮遊砂濃度は鉛直方向に様に近い分布となり、沈降の影響が現れている。Case Kでは広範囲で様に近い分布になっている。これは植生帯がある場合には組織渦の横断方向ス

ケールが大きくなり、浮遊砂が横断方向に強く輸送され非平衡の領域が広がったためであると考えられる。

(2) 組織渦に伴った水面・浮遊砂濃度の変動

図-4は実験による境界部での水面変動および、浮遊砂濃度の変動のパワースペクトルである。Case Kでは写真-1に示すとおり、高水敷側の渦は低水路側の渦によって支配されているため、低水路側の渦による水面変動を測定した。水面変動のパワースペクトルはCase Jでは約6秒、Case Kでは約9秒でピーク値を持ち、組織渦の周期に対応している。また、浮遊砂濃度



a) Case J (植生がない場合) b) Case K (植生がある場合)

図-5 組織渦に伴う水深平均浮遊砂濃度のアンサンブル平均像 (矢印は流れの向きに対応)

変動のスペクトルのピークは水面変動のピークとほぼ同じ周波数で生じていることから浮遊砂濃度が組織渦と対応して変動していることがわかる。

図-5は条件付抽出アンサンブル平均法²⁾により得られた組織渦の通過に伴う水深平均浮遊砂濃度である。アンサンブル平均像のX軸は渦の中心を基準としてある。濃度分布パターンは波高計によって得られた渦波長(Case J:77cm, Case K:103cm)とほぼ一致している。図-6, 図-7は数値計算による瞬間濃度分布と瞬間流速分布で、計算領域内の浮遊砂の全巻き上げフラックスと全沈降フラックスが釣り合った時間のものである。瞬間濃度分布は実験値であるアンサンブル平均像と同様の分布パターンを示している。また、Case KはCase Jに比べて、分布パターンが低水路よりになり、濃度分布も明瞭になっている。この瞬間濃度分布を瞬間流速分布と対応させると、組織渦によって渦中心より下流側では高濃度の浮遊砂が低水路から高水敷に輸送され、逆に渦中心より上流側では低濃度の浮遊砂が高水敷から低水路に輸送されていることがわかる。この水平方向輸送によって局所的に底面において鉛直方向のフラックスのバランスが崩れ、洗掘・堆積が生じる。

(3) 堆積速度

写真-2にCase Jの実験開始から11日後の堆積状況と、Case Kの実験開始から5日後の堆積状況を示す。高水敷及び植生帯内に白く写っているのが塩化ビニル粒子である。図-8は実験期間中の堆積厚の時間変化から算出した正味の堆積速度とその計算結果である。実

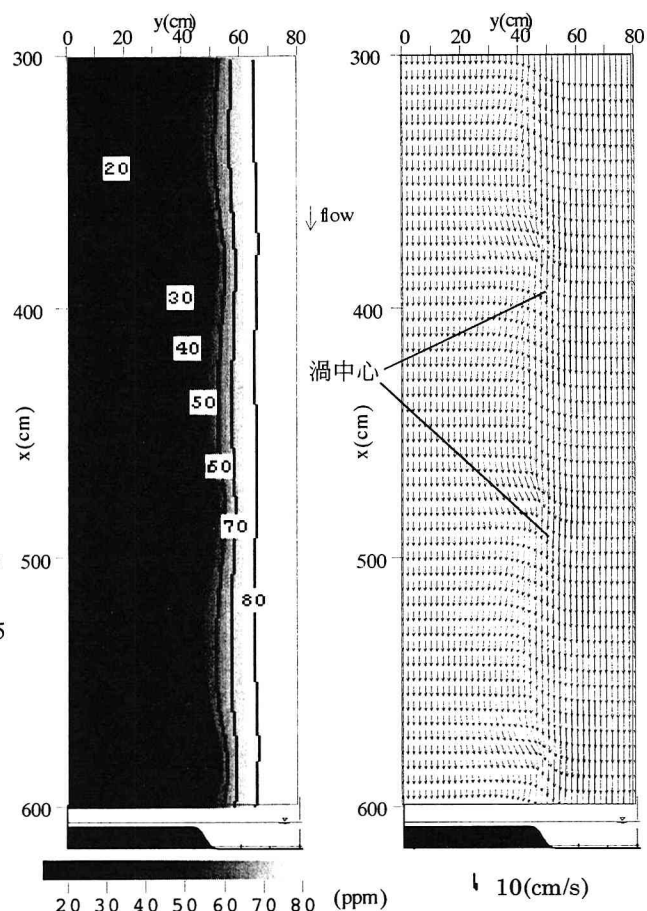


図-6 水深平均浮遊砂濃度の瞬間分布(左)と瞬間流速ベクトル(右) (Case J)

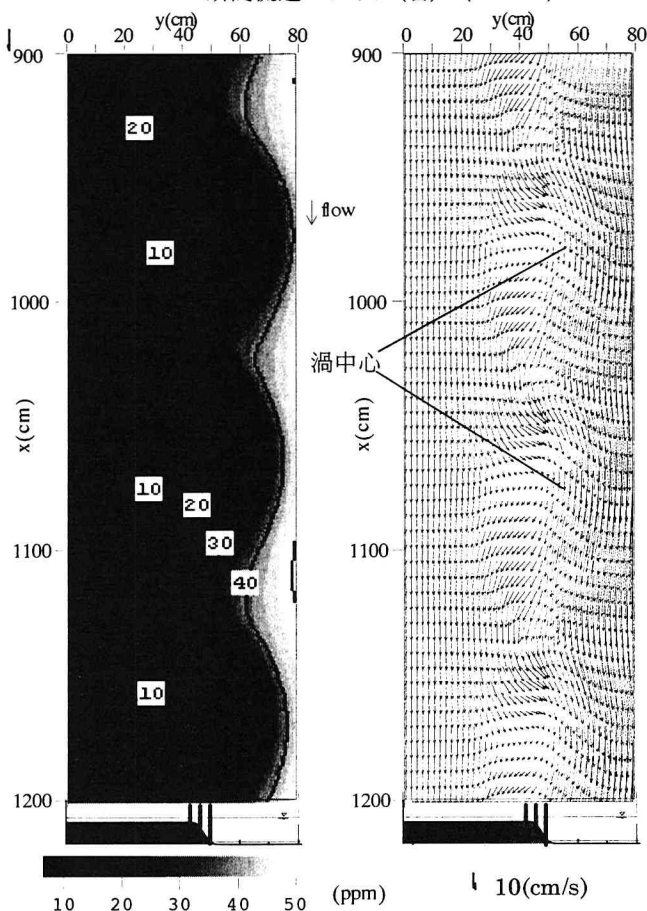
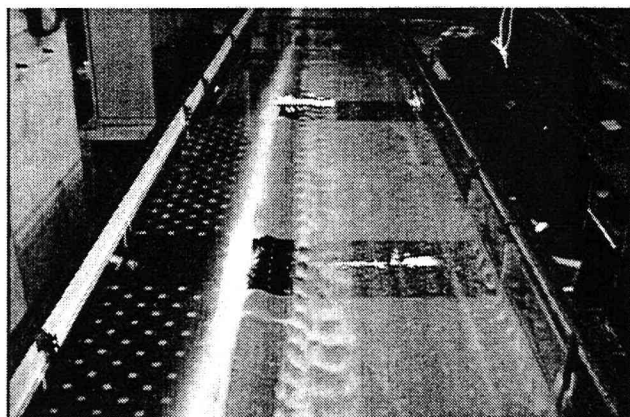
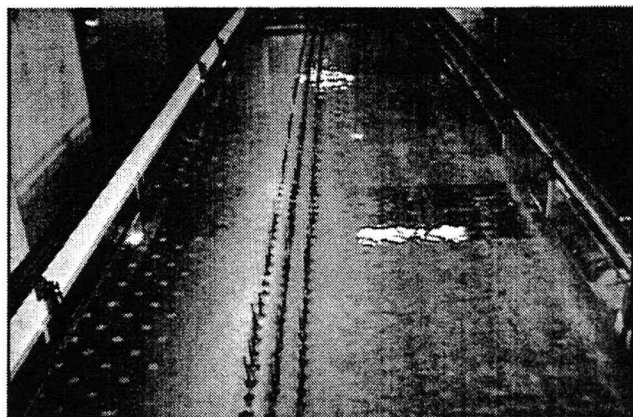


図-7 水深平均浮遊砂濃度の瞬間分布(左)と瞬間流速ベクトル(右) (Case K)

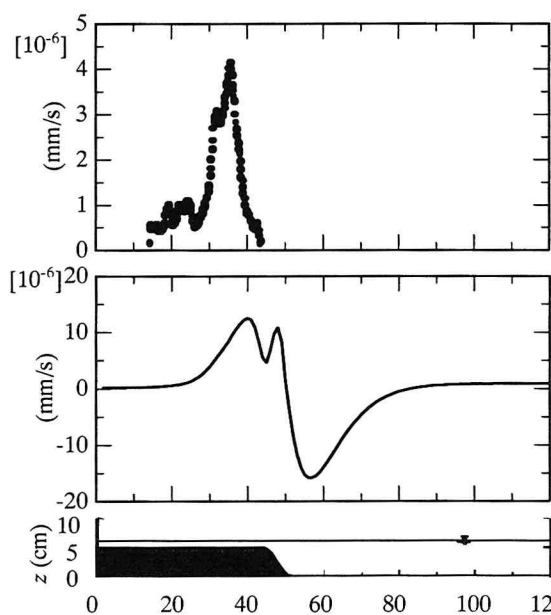


a) Case J (実験開始から 11 日後)

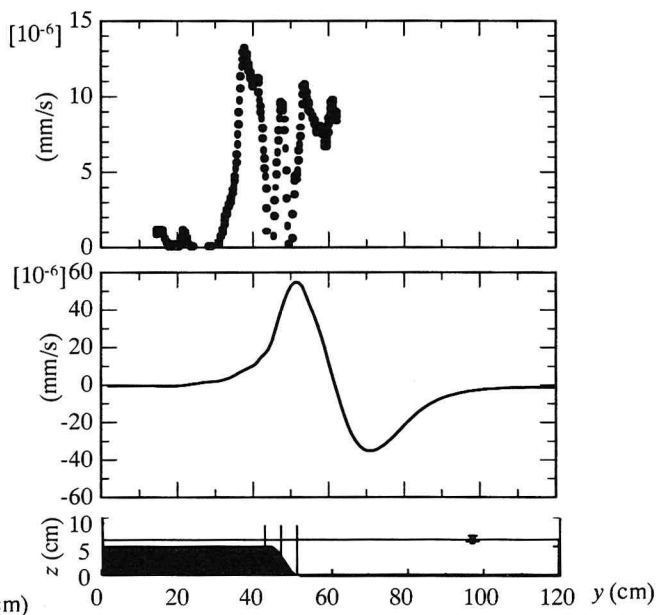


b) Case K (実験開始から 5 日後)

写真-2 浮遊砂の堆積状況



a) Case J (植生がない場合)



b) Case K (植生がある場合)

図-8 正味の堆積速度の実験値 (上), 計算結果 (下)

験は固定床で行っているの洗掘を生じないが、数値計算は洗掘・堆積の両方を考慮しているので、低水路側で洗掘が生じている。Case Jでは高水敷肩部に堆積し、Case Kでは低水路・植生境界から植生帯内部にかけて堆積している。Case Kのピーク値は実験条件が違うもののCase Jの約3倍となっている。これは植生帯が存在すると、植生がない場合に比べて渦のスケールが大きくなり⁶⁾横断方向輸送量が増加し、さらに植生帯が流速をより減少させ、浮遊砂をより堆積させるためである。また、計算では両Caseとも堆積速度のピーク位置が若干低水路側にずれているが、これは計算では斜面での堆積や河床変形が流れに及ぼす影響を考慮していないことも一因であると考えられるが、詳細は今後調べる予定である。計算値は実験値の約3倍となっているが、これは計算では底面から十分な浮遊砂の供給があるとしているためであり、それを考慮すると妥当な評価といえる。

組織渦との関連において浮遊砂の堆積機構を考察する。先述のように組織渦に伴って高濃度の流体が高水敷に乗り上げる際、底面摩擦によって流速が低下し、浮遊状態を保てなくなった粒子が沈降する。瞬間的な堆積速度が最大となるのは主流速が最小値を取り、かつ横断方向流速が負から正に転じ、摩擦速度が最小となる瞬間である。これはこの地点の濃度が最大となる時刻とほぼ等しい。逆に最も洗掘が進むのは横断方向流速・主流速ともに最大となって摩擦速度が最大となり、濃度が相対的に低い位置である。

このように堆積が生じる位置でも、渦の通過に伴って瞬間的に洗掘と堆積を繰り返している。しかし、組織渦が流下方向に非対称な構造を有していることに起因して、堆積が生じる位置では沈降フラックスが巻き上げフラックスを上回っている時間の方が長い。このことが時間平均的に堆積を生じさせる大きな要因となっている。

5. 結論

複断面開水路において、低水路側岸部に植生帯がある場合とない場合に関して、浮遊砂の輸送過程に着目した室内実験と SDS-2DH モデルを用いた数値計算を行い、以下の結論を得た。

1. 組織渦構造に対応した浮遊砂濃度の分布パターンが室内実験でアンサンブル平均法により示され、数値計算で再現できた。
2. 複断面河道では、組織渦に伴って低水路の側岸部付近が洗掘され高水敷肩部に堆積が進む。
3. 低水路側岸部に植生帯を有する複断面河道では、低水路・植生境界から植生帯内部にかけ堆積が進む。

謝辞：この研究は文部省科学技術研究費基盤研究(A)(2)(11305035, 代表:池田駿介)の補助を受けている。記して謝意を表す。

付録-1 基礎方程式系

数値解析に用いた SDS-2DH モデルの基礎方程式系は以下に示すように、水深平均された連続式, x, y 方向の運動量保存式, および SDS 乱れエネルギー k の輸送方程式である⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] - f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \right) - f_y \\ \frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_{kh} + P_{kv} + P_{kd} - \varepsilon \\ f_x &= \left(\frac{C_f}{h} + \frac{aC_d}{2} \right) u \sqrt{u^2 + v^2} \\ f_y &= \left(\frac{C_f}{h} + \frac{aC_d}{2} \right) v \sqrt{u^2 + v^2} \\ P_{kh} &= \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \\ P_{kv} + P_{kd} &= \left[\left(C_f + \frac{ahC_d}{2} \right) (u^2 + v^2) \right]^{1.5} / l \\ \varepsilon &= C_\mu^{3/4} k^{3/2} / l \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad l = ch \end{aligned}$$

ここに, t : 時間, η : 基準水平面から水面までの高さ, h : 水深, u, v : それぞれ x, y 方向の水深平均流速, k : SDS 乱れによる乱れエネルギーの水深平均値, C_f : 底面摩擦係数, g : 重力加速度, ν_t : 渦動粘性係数, f_x, f_y : それぞれ植生と底面摩擦による抗力の x, y 成分, a : 植生密度パラメーター, C_d : 植生の抗力係数, σ : 乱流モデル係数(=1.0), ε : 乱れエネルギー消散率, P_{kh}, P_{kv}, P_{kd} : それぞれ水平セン断, 底面摩擦, 植生による乱れエネルギー生産, l : 乱れの長さスケールである。 C_μ, α はモデル定数であり, それぞれ 0.09, 0.1 とした。植生に関する定数は実験から, $a=0.0286(\text{cm}^{-1})$, $C_d=1.20$ とした。底面抵抗係数 C_f は以下の式で与えた⁸⁾。

$$C_f = gn^2/h^{1/3}$$

ここに, n : Manning の粗度係数である。

付録-2 浮遊砂の輸送方程式

$$h \left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \right) = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + V_s E - C \alpha_s V_s$$

ここに, V_s : 浮遊砂の沈降速度, α_s : 水深平均濃度と底面での浮遊砂濃度を関係づける係数, E : 無次元巻き上げ速度, ε_h : 水平方向の浮遊砂の乱流拡散係数, α_s, E, u, v はそれぞれ以下の式で与えた。

$$\alpha_s = \frac{V_s h}{\varepsilon_z \left[1 - \exp \left(-\frac{V_s}{\varepsilon_z} h \right) \right]} \quad E = K \left(\frac{u_*}{V_s} \right)^2 \quad u_* = \sqrt{C_f (u^2 + v^2)}$$

ここに, u_* : 摩擦速度, ε_z : 鉛直方向の浮遊砂の乱流拡散係数, K : 係数である。

浮遊砂の乱流拡散係数 $\varepsilon_h, \varepsilon_z$, および巻き上げ速度を決める無次元係数 K は以下のように定めた。まず, 低水路・高水敷境界部から十分離れた低水路における粒子濃度の鉛直分布を最小二乗法により指数分布で近似し, 鉛直方向の乱流拡散係数 ε_z を同定する。この値を水平方向の拡散係数 ε_h にも準用し空間的に一様に与え, これを SDS 乱れによる浮遊砂の拡散係数とする。そして濃度の鉛直分布の近似式から与えられる底面濃度を用い, 巻き上げ速度と堆積速度が等しいとして K を定めた。

参考文献

- 1) 木下良作: 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題, 土木学会論文集, No.345/II-1, pp.1-19, 1984.
- 2) 池田駿介, 村山宣義, 空閑健: 複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.
- 3) 福岡捷二, 渡辺明英, 上坂恒雄, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造 - 利根川新川通昭和56年8月洪水 -, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.79-88, 1995.
- 4) 芦田和男, 藤田正治, 劉炳義: 複断面開水路における浮遊砂の流送・堆積機構(2), 京都大学防災研究所年報第31号B-2, pp.1-13, 1988.
- 5) 清水義彦, 辻本哲郎, 小葉竹重機: 平衡植生流れと浮遊砂輸送に関する数値計算, 土木学会水工学論文集, 第41巻, pp.845-850, 1997.
- 6) 池田駿介, 佐野貴之, 福元正武: 低水路側岸部に植生を有する複断面開水路に発生する水平渦と運動量輸送, 土木学会水工学論文集, 第43巻, pp.815-820, 1999.
- 7) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DH モデルを用いた開水路水平セン断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 8) 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.

(1999.9.30 受付)