

II-16

分級を考慮した浮遊砂を伴う流路の横断面形成過程

北海道大学工学部 正 員 長谷川 和 義
北海道大学大学院 学生員 水 子 龍 彦

1. はじめに

著者ら¹⁾²⁾は、沖積河川中下流部にみられる細砂・シルト河川の平衡断面形成過程に関する諸問題を、浮遊砂横断拡散に着目して解析してきた。単一粒径砂に関しては、摩擦速度/沈降速度の比がある値以上であるとき、拡散浮遊砂が側岸斜面上の掃流砂と動的に平衡し、浸食停止の生ずることが実験および理論解析により明らかにされている。本研究は、これらの現象を混合粒径の効果を考慮して解析しようとするものである。粒径混合が考慮され

ると、その構成割合の変化すなわち分級作用が扱いうるようになり、それがもたらす興味深いふるまいを解析できるようになる。単一粒径の場合には、横断面形は浮遊砂底面濃度との連立関係によって決まるが、混合粒径の場合にはさらに粒度構成割合が変数として加わり、平衡に至る過程が一通りではない可能性がでてくる。本研究は、こうした多重平衡解の可能性を探るところに眼目がある。解析対象は、過年度におこなわれた側岸浸食実験、および1981年石狩川洪水における月形地点の河岸浸食データである。

2. 基礎方程式

Fig. 1に本研究で用いた軸と記号の定義を示す。

2-(1) 流砂連続式： δt 時間内の単位面積の砂の実績の変化は「掃流砂の出入りの差」と、「砂の浮遊量と沈降量の差」の和であると考え(1)式をたて、浸食時・堆積時の空隙率の違いを考慮して、(2)、(3)式を得る。ここに、 λ ：原河床の空隙率、 q_{By} ：総横断方向流砂量、 q_u ：総巻き上げ量、 $w_0 \cdot C(\xi)$ ：沈降速度*底面濃度の総量であり、 q_{By} は長谷川の横断方向流砂量式、 q_u は遮蔽効果を考慮した板倉式、 w_0 はRubey式により与える。

$$\int_0^{\xi(x,y,t+\delta t)} \{1-\lambda(x,y,z,t+\delta t)\} dz - \int_0^{\xi(x,y,t)} \{1-\lambda(x,y,z,t)\} dz = -\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} \delta t - \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \delta t - \{q_u - w_0 \cdot C(\xi)\} \delta t \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_0} \left\{ \frac{\partial q_{By}}{\partial y} + \{q_u - w_0 \cdot C(\xi)\} \right\} \quad (\text{浸食}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_a} \left\{ \frac{\partial q_{By}}{\partial y} + \{q_u - w_0 \cdot C(\xi)\} \right\} \quad (\text{堆積}) \quad (3)$$

2-(2) 粒径別流砂連続式：河床変動に河床構成割合 P_i を乗じ、粒径別の掃流砂と浮遊砂を考慮して(1)と同様に(4)式をたて、(5)、(6)式を導いた。(1)で用いた記号にサフィックス"i"をつけて、粒径別であることを示している。 a は交換層厚であり、ここでは最大粒径を与えている。異粒径の砂が混ざり合うとその混合状況により空隙率が変化するが、今回の計算では浸食・堆積のいずれにも $\lambda=0.515$ (RUN6)、 $\lambda=0.550$ (1981年洪水)を与えた。

$$\int_0^{\xi(x,y,t+\delta t)} \{1-\lambda(x,y,z,t+\delta t)\} \cdot P_i(x,y,z,t+\delta t) dz - \int_0^{\xi(x,y,t)} \{1-\lambda(x,y,z,t)\} \cdot P_i(x,y,z,t) dz = -\frac{\partial q_{Bxi}}{\partial x} \delta t - \frac{\partial q_{Byi}}{\partial y} \delta t - \{q_{ui} - w_{0i} \cdot C_i(\xi)\} \delta t \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{1-\lambda_a}{1-\lambda_0} \cdot \frac{P_{i0}}{A} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{1}{A(1-\lambda_0)} \left\{ \frac{\partial q_{Byi}}{\partial y} + \{q_{ui} - w_{0i} \cdot C_i(\xi)\} \right\} \quad (\text{浸食}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{P_{i0}}{A} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{1}{A(1-\lambda_0)} \left\{ \frac{\partial q_{Byi}}{\partial y} + \{q_{ui} - w_{0i} \cdot C_i(\xi)\} \right\} \quad (\text{堆積}) \quad (6)$$

Analysis on a formation process of a channel cross section with suspended sediment considering sorting by Kazuyoshi HASEGAWA and Tatsuhiko MIZUKO

水 理 条 件	流量 $Q(m^3/sec)$	0.034
	水面勾配 I	1/150
	空 隙 率	
	原河床 λ_0	0.515
粒 径 (mm)	堆 積 λ_a	0.515
	d1	0.08
	d2	0.12
初 期 半 幅	d3	0.24
	B (m)	0.43
差 分	横断面 Δy (m)	0.02
	間隔 時間 Δt (sec)	0.1

TABLE 1 Calculation condeitions

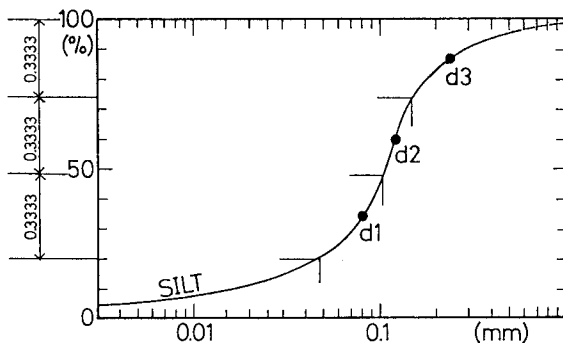


Fig.2 Percentage finer by volume

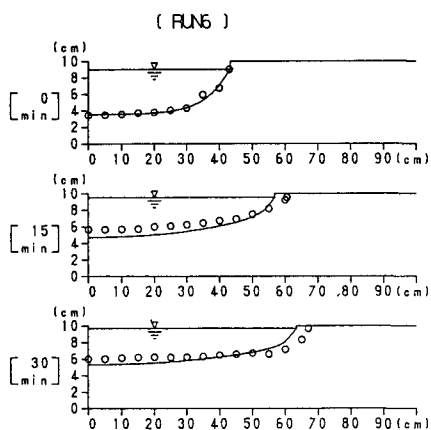


Fig.3 The cross sectional forms

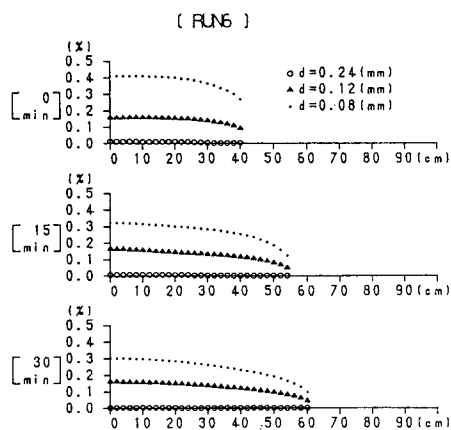


Fig.5 Concentration for each size particle

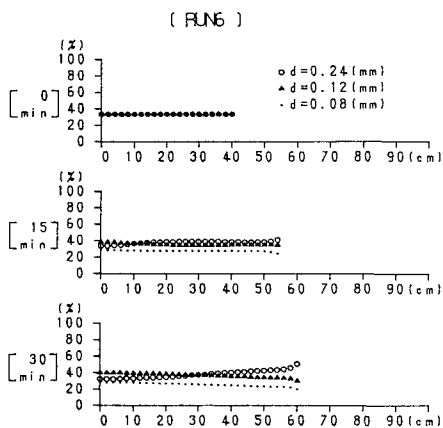


Fig.4 Fraction of each size particle

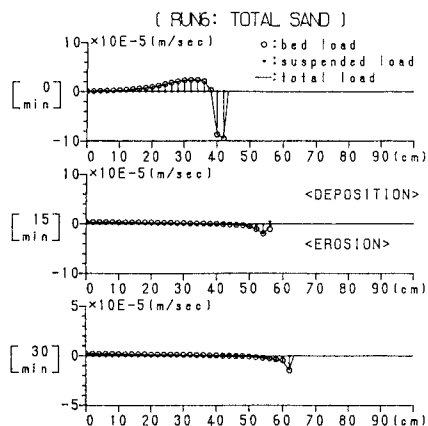


Fig.6 Erosion rate caused by bed load and suspended load (Total volume)

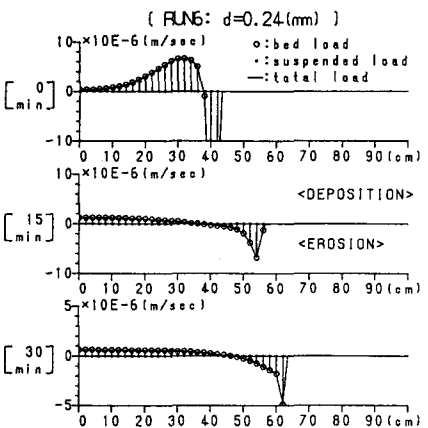
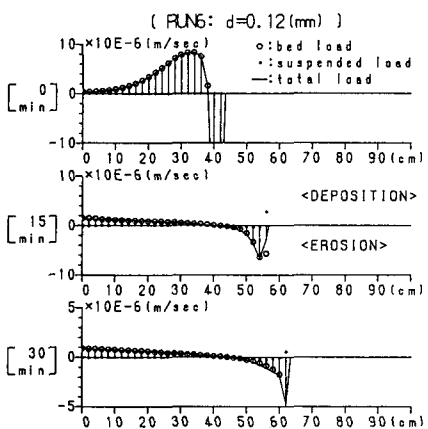
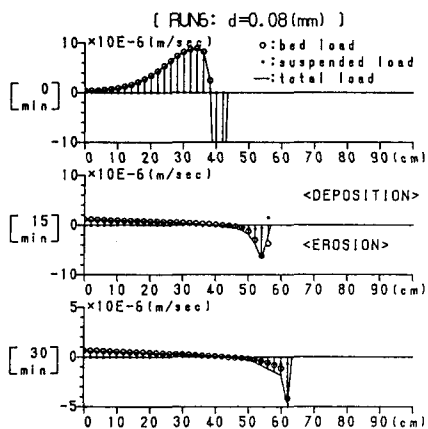


Fig.7 Erosion rate caused by bed load and suspended load (Each particle volume)

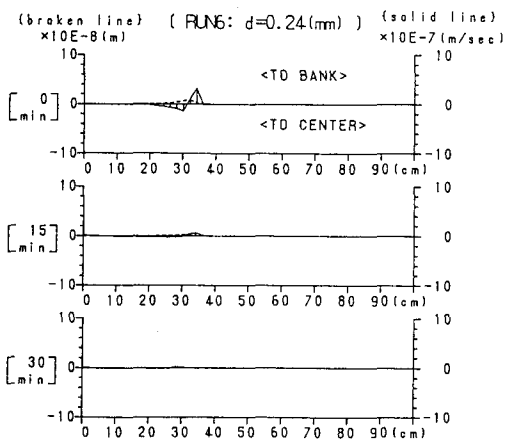
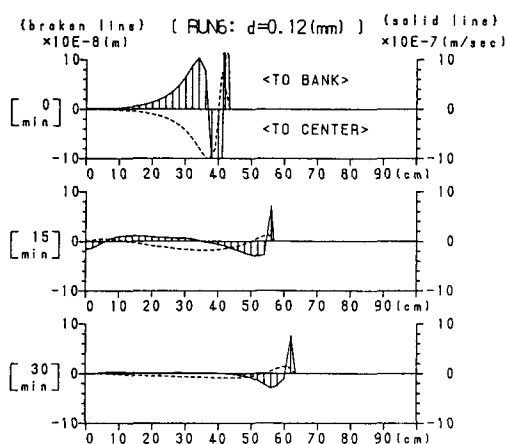
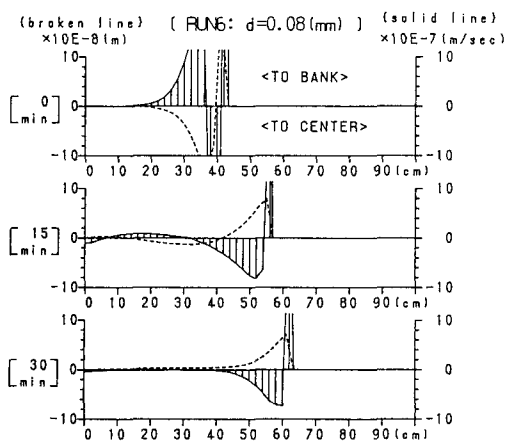


Fig.8 Distribution of J_{yi} and $-\frac{\partial J_{yi}}{\partial y}$

水 理 条 件	流量 $Q(m^3/sec)$		8834.0
	水面勾配 I		1/670
	空 隙 率	原河床 λ_0	0.550
		堆 積 λ_a	0.550
	粒 径 (mm)	d1	0.083
		d2	0.130
		d3	0.250
	初期半幅 $B(m)$		110.0
差分	横断面 $\Delta y(m)$		5.0
間隔	時間 $\Delta t(sec)$		0.25

TABLE 2 Calculation conditions

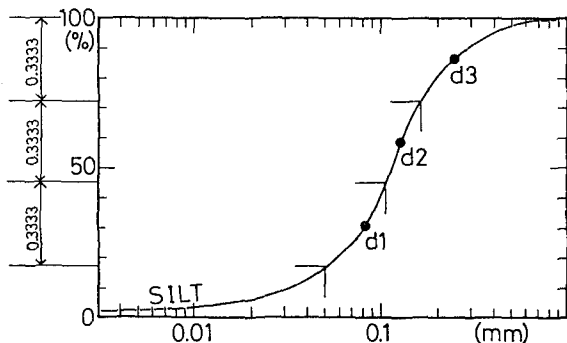


Fig.9 Percentage finer by volume

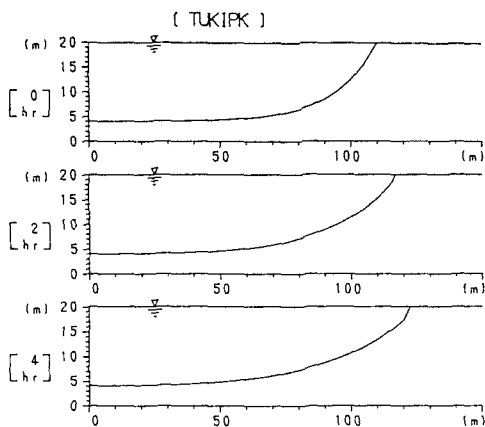


Fig.10 The cross sectional forms

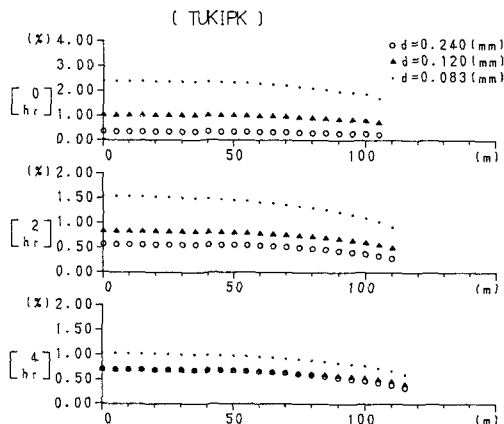


Fig.12 Concentration for each size particle

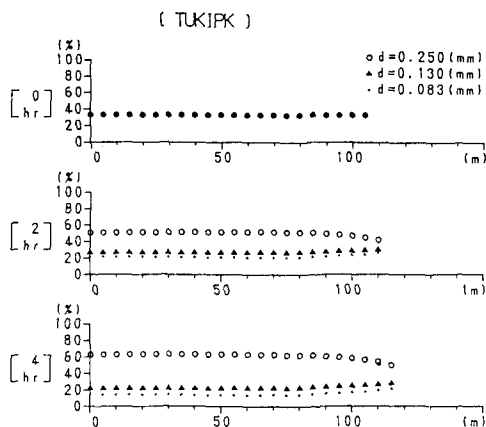


Fig.11 Fraction of each size particle

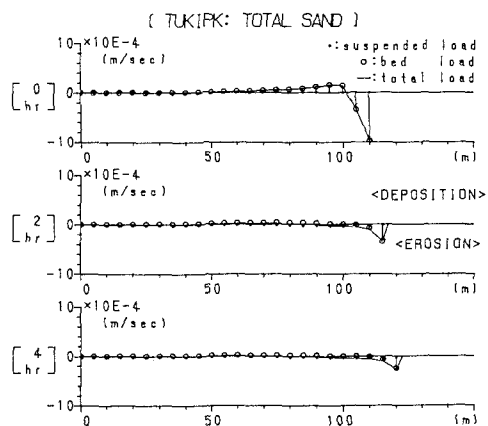


Fig.13 Erosion rate caused by bed load and suspended load (Total volume)

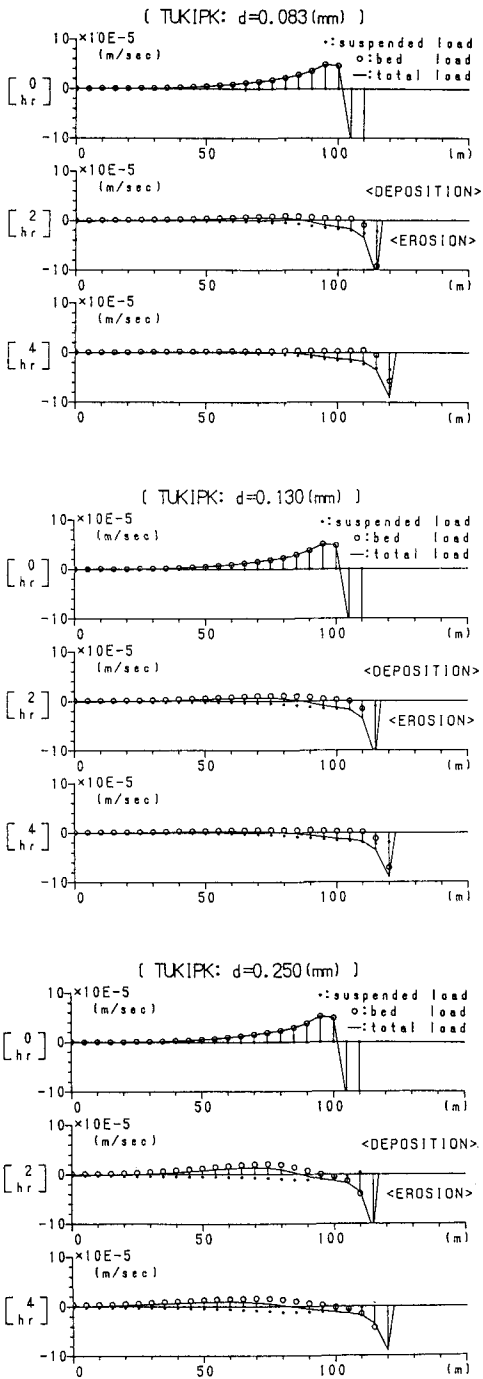


Fig.14 Erosion rate caused by bed load and suspended load (Each particle volume)

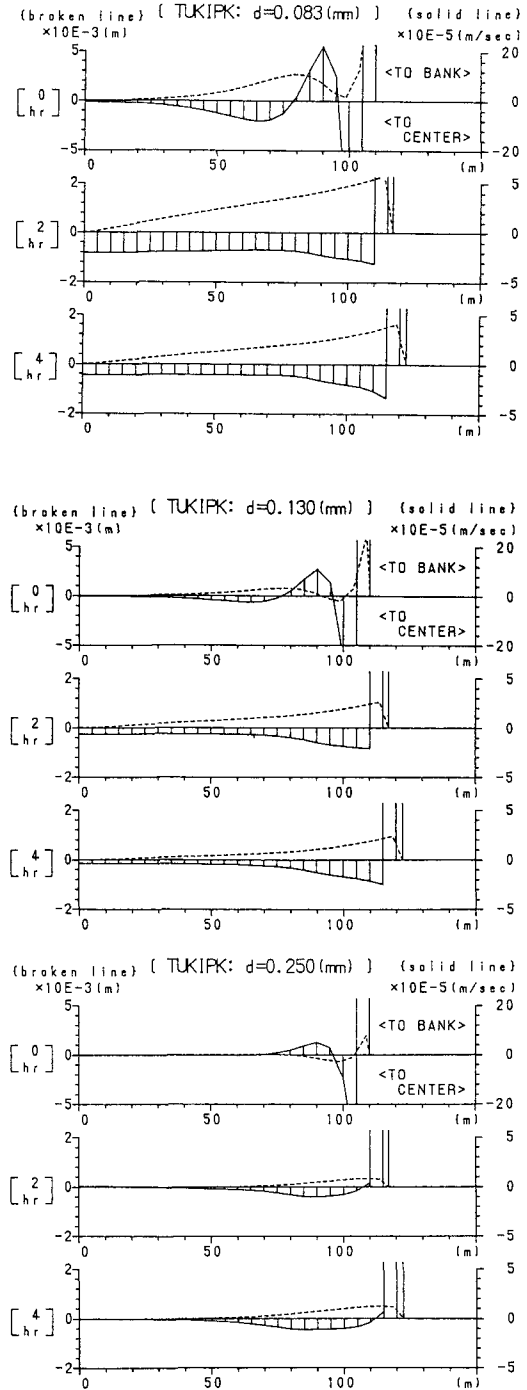


Fig.15 Distribution of J_{yi} and $-\frac{\partial J_{yi}}{\partial y}$

2-(3)濃度方程式：擬似的に等流状態を想定し、流下方向に平衡が達せられているとすると、濃度方程式は、粒径別に(7)式ようになる。これに(8)式で近似した鉛直濃度分布を代入して、河床から水面まで積分・整理すると、(9)、(10)式を得る。ここに J_{yi} は、横断方向の水深全体にわたる粒径別拡散フラックスである。

$$\frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon_y \frac{\partial C_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_z \frac{\partial C_i}{\partial z}) + w_{oi} \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0 \quad (7) \quad \frac{\partial C_i(\zeta)}{\partial t} = \frac{\left\{ \exp\left(\frac{w_{oi}h}{\varepsilon_z}\right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\} \cdot C_i(\zeta) - \frac{\partial J_{yi}}{\partial y} - (q_{ui} - w_{oi} \cdot C_i(\zeta))}{\frac{\varepsilon_z}{w_{oi}} \left\{ \exp\left(\frac{w_{oi}}{\varepsilon_z}\right) - 1 \right\}} \quad (9)$$

$$C_i(\zeta) = C_i(\zeta) \cdot \exp\left\{-\int_{\zeta}^z \frac{w_{oi}}{\varepsilon_z} dz\right\} \quad (8)$$

$$(\zeta \leq z \leq \zeta + h)$$

$$J_{yi} = \varepsilon_y \left\{ \frac{\varepsilon_z}{w_{oi}} \left\{ \exp\left(\frac{w_{oi}h}{\varepsilon_z}\right) - 1 \right\} \frac{\partial C_i(\zeta)}{\partial y} - \left\{ \exp\left(\frac{w_{oi}h}{\varepsilon_z}\right) \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right\} C_i(\zeta) \right\} \quad (10)$$

(1)～(3)の微分方程式を差分形にして、連立常微分方程式をたてる。これをRunge-Kutta-Gill法により計算した。 q_{By} (掃流砂)と J_{yi} (フラックス)の空間差分は各分割区間の中間点を用いておこなう計算の安定をはかった。

3. 計算結果と考察

Fig.2～Fig.8は実験に関する、Fig.9～Fig.15は洪水ピーク時の水理量を継続的に与えたときの月形地点における計算の結果である。横断面形の変形過程 (Fig.3, Fig.10) によるといずれも時間とともに拡幅が進むばかりで、停止する様子がみられない。しかし、RUN6の結果は、実測値と非常によく合っている。一方、月形における拡幅速度はかなり大きく、単一粒径のシミュレーションにおいて動的平衡が起きたことと著しい違いを見せている。掃流砂・浮遊砂それぞれによる浸食・堆積割合を示したFig.6, Fig.13は、この様子をよく説明している。即ちいずれも側岸で浸食を果たす役割を果たしており、とりわけ掃流砂による浸食割合の大きいのが分かる。これを粒径別にみたのがFig.7, Fig.14である。いずれの粒径においても中央部で堆積、側岸部で浸食をおこなっている。側岸部に注目するとRUN6では、 $d=0.083\text{mm}$ の浮遊砂のわずかな堆積が認められるほかは、すべて浸食となっており、特に掃流砂による浸食がどの粒径でも圧倒的に大きくなっている。月形地点では、浮遊砂による影響もかなり増大しているが、注目されることは、 $d=0.083\text{mm}$, $d=0.130\text{mm}$ という二つの小粒径の浮遊砂が側岸においても浸食の役割を果たしていること、逆に、 $d=0.250\text{mm}$ の浮遊砂がかなり大きい堆積を引き起こしていることである。 U^*/w_{oi} の大きさからみれば、当然、前二者の堆積性が強いはずであるが逆になっている。これには、次に述べる粒度構成比の変化が密接にかかわっている。粒度構成比 (Fig.4, Fig.11) は時間の経過とともに、RUN6、月形の双方で小粒径砂の割合が小さく、大粒径砂の割合が大きくなっている。場所的な変化では、RUN6の側岸部で大粒径砂の割合が増し、月形では小粒径砂の割合がいくぶん回復している。しかし、全体として大粒径砂の割合が圧倒的に高く、このため浮遊砂の巻き上げ量が増えることにつながる。これが、大粒径浮遊砂の側岸堆積の原因をなしているものと思われる。河床底面濃度 (Fig.5, Fig.12) は、どの粒径もせん断力の小さくなる側岸ほど小さくなっている。小粒径砂は、構成割合が低くなっているために、時間とともに濃度の減少が大きくなっている。拡散フラックスの動向 (Fig.8, Fig.15) を見ると、RUN6では最小粒径砂において、ようやく岸向きフラックスが認められるが、月形では全粒径ともに岸向きが起こっている。それにもかかわらず、小粒径の浮遊砂堆積が起こり得ない原因は今のところよく分かっていない。いずれにしても、一度大きな割合を占める粒径が現れると、その粒径に関しては動的平衡が生ずる一方、他の粒径砂は浸食が続き、ますますその比率を小さくしていく。この様な方向での平衡化が真の現象か否かは疑問である。

4. おわりに

今回のシミュレーション結果は、粒度構成比が現象に大きな影響を与えることを明らかにしている。粒径加積曲線による代表粒径の選び方によって結果が変化する可能性がある。今後、これらを解明することが課題である。

参考文献：1) 長谷川・望月 (1988)：浸食・堆積過程にある流路の浮遊砂底面濃度について、第32回水理講演会論文集、2) 長谷川・水子・石川 (1989)：分級効果を考慮した鉛直及び横方向浮遊砂拡散に関する研究、土木学会北海道支部、論文報告集、II-14など