

波・流れ共存場における砂漣上の浮遊砂濃度分布

八 木 宏*・首 藤 伸 夫**

1. はじめに

近年、河口閉塞など河口部周辺の漂砂現象の解明が工学的に重要な問題になっており、河口全体を対象にしたような海浜変形実測、および予測が行われている。このような河口周辺及び碎波帯等の地形変化に関し、より精度良い変形予測を行うためには、波・流れ共存場での砂移動量を定式化することが必要である。

著者らの一人はすでに波・流れ共存場での砂漣上の漂砂量に関して渦運動に注目した浮遊砂中心の漂砂量モデルを提案しているが、今回はさらに精度良く正味の移動方向と移動量を推定するために、砂漣近傍の浮遊砂濃度の詳細な測定を行い、砂漣上の浮遊砂量分布を求めた。また、その結果と砂漣形状伝播との整合性を考慮して、掃流砂の検討を行った。

2. 実験方法

実験装置は図-1に示す様にU字管振動流装置である。上下流に定常流の流入流出口があり振動流・一様流共存場が設定出来る様になっている。また水路中央部には厚さ5cm、長さ180cmにわたり中央粒径0.075cmの砂が敷いてある。実験は平坦床の状態から平衡状態に砂漣が発達するまで振動流と一様流を与え、平衡と判断される時点で水路中央部の砂漣一波を選び、砂漣形状の測定、及び浮遊砂濃度の測定を行った。浮遊砂濃度の測定には写真機とスリットストロボ装置を用い、一周期を16分割した各位相ごとに砂漣の上下流2領域の砂粒子静止画像をそれぞれ撮影し、砂粒の個数を測定する事で求めた。今回行った実験条件の諸元を表-1に、得られた砂漣の形状及び進行速度を表-2に示す。行った実験の領域は、波のみの特性量を使って金子(1980)¹⁾の領域区分図によって判断するとBrick-Patternの領域に当たるが、本実験では明らかに規則的な2次元砂漣が形成された。

写真撮影による濃度測定方法では、そのDATA数の膨大さ故に一位相・一領域に対する標本数に限界がある。今回の場合一位相・一領域に対して10枚の写真か

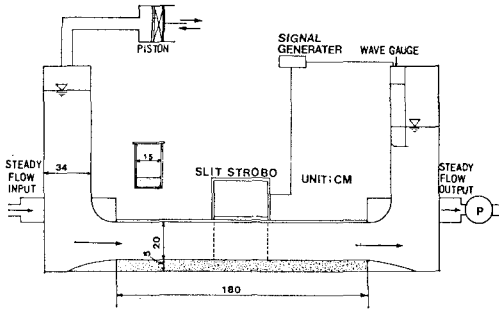


図-1 実験装置

表-1 実験条件

粒径 (cm)	比重	周期 (sec)	流速振幅 (cm/s)	定常流速 (cm/s)
0.075	2.65	3.03	28.33	5.41

表-2 砂漣形状の特性

砂漣波長 λ (cm)	砂漣波高 η (cm)	砂漣の非対称度 (α/λ)	砂漣進行方向	砂漣進行速度 (cm/s)
20.0	3.3	0.60	下流方向	4.57×10^{-8}

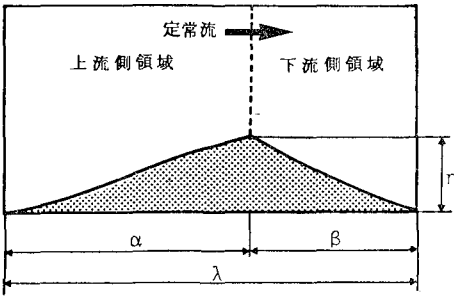


図-2 砂漣形状の諸量

ら浮遊砂濃度を決定する。一枚の写真を、砂漣長の1/40の長さを一辺とする小領域に分割し、各小領域内の砂粒子数を数える。10枚分についての平均値を、その位相時における浮遊砂の砂粒子個数濃度空間分布とする。本論文では実現象に対する理解のしやすさという点から個数濃度を用いたが、用いた砂を中央粒径(d_{50})を直径とする球と考えることで近似的に体積濃度に変換できる。

* 学生会員 工修 東北大学大学院工学研究科
** 正 会 員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

こうして得られる浮遊砂濃度分布はかなり不連続なものになるので、これを修正し連続的な濃度分布とする。ある位置、ある時刻での濃度の発生確率が、その点周りに正規分布をなすと仮定し、その発生確率でその周辺の濃度に重みを付けて平均した。ある位置の濃度の影響範囲は試行錯誤の結果、2つ隣の格子までとした。

また、砂漣の近傍では砂漣形状と濃度を定義する格子がうまく一致しないために浮遊砂濃度を精度よく定義できない。そこで浮遊砂濃度 Flux を求める時には、砂漣表面形状を一つの軸とする直交曲線座標系で濃度を定義し直した。この様に濃度を定義すると場所的に濃度を定義する面積が異なってしまう物理的におかしいように思われるが、この浮遊砂濃度は、鉛直方向に積分された浮遊砂濃度 Flux を求めるのが目的なので、最終的な結果には、定義した面積の違いによる影響は含まれないと考えられる。よって、本研究で求めた浮遊砂濃度 Flux は砂漣形状に沿う様な Flux である。

3. 実験結果と考察

(1) 浮遊砂濃度の空間分布

図-3は、砂漣上の浮遊砂濃度の空間分布を、振動流速が下流向きから上流向きに反転する位相0から、 $\pi/8$ 位相ごとに半周期にわたって示したものである。砂漣頂からの掃流砂の放出(図中a、位相 $\pi/8$)、隣接砂漣からの砂粒子の移動状況(図中b、位相 $3/8\pi$)、及び剥離渦による巻き上げ(図中c、位相 $3/4\pi$)等が良く分かる。本実験の場合、粒径が比較的大きく沈降速度の大きい砂粒子を用いたので、砂漣頂付近の高濃度領域における掃流砂の運動が卓越していた。

次に、砂漣一波長上を砂漣頂を境に上流側と下流側の2領域に分け、各領域に含まれる浮遊粒子総数の経時変化を図-4に示す。図中では(実線+白丸)が上流側粒子数、(点線+黒丸)が下流側粒子数、(一点鎖線+四角印)が粒子数合計の変化を示している。これから上下流各領域で浮遊粒子数の経時変化にはその大きさには差があるものの、明らかに3種類のPeakが存在することがわかる。すなわち、

1) 砂漣頂からの掃流砂の放出 (P_1)

流速と位相差を持つ底面剪断力によって、流速反転直後から $\pi/4$ 位相の間に生ずる。

2) 剥離渦による底面からの巻き上げ (P_2)

$3/8\pi \sim 3/4\pi$ までにかけての、最大流速出現の前後に発生する剥離渦の巻き上げによって生ずる。

3) 隣接砂漣からの移動 (P_3)

上記現象の半周期後に隣接する砂漣の P_1 , P_2 の影響によって生じる。

に、それぞれに相当すると、写真等による観察から確認

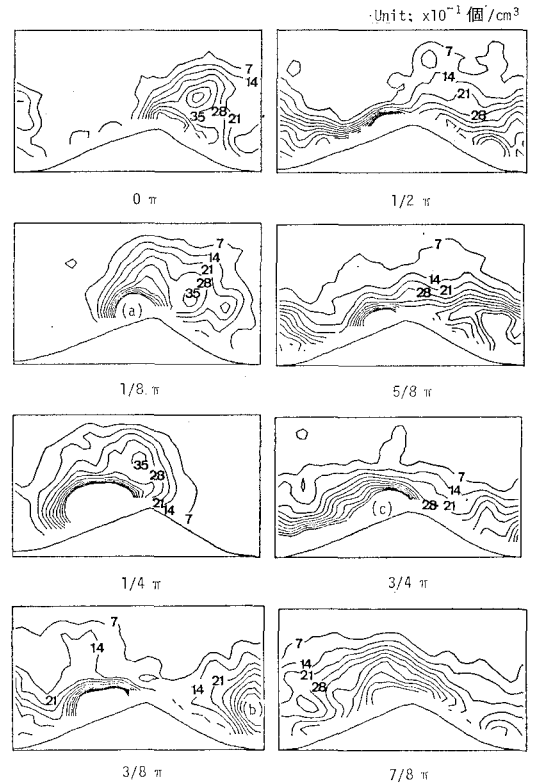


図-3 浮遊砂濃度の時空間分布

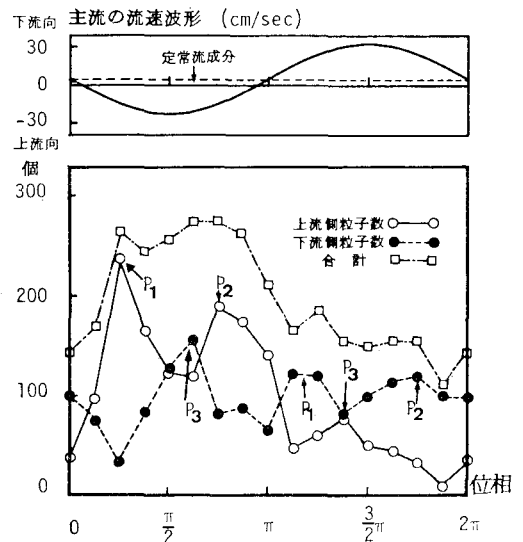
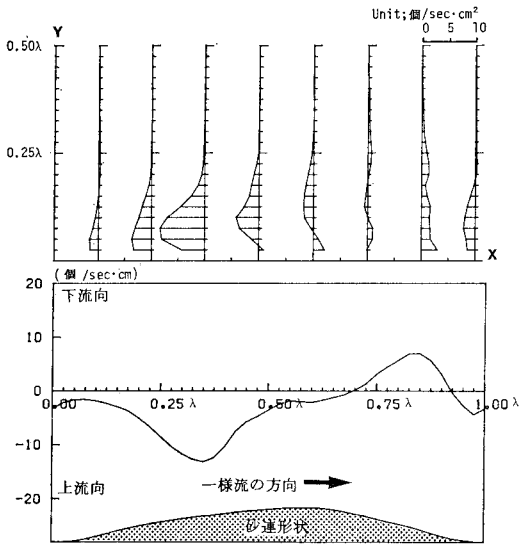


図-4 浮遊粒子数の経時変化

された。上流側と下流側で浮遊砂濃度 Peak を比較すると、 P_1 は上流側で大きく、 P_3 は下流側の方が大きくなっている。 P_3 は、 P_1 が隣接砂漣まで移動することによって生じたものなので、 P_1 の影響は下流領域の方が大きいと言えます、これは、上流向き漂砂を裏付ける定性的な根拠



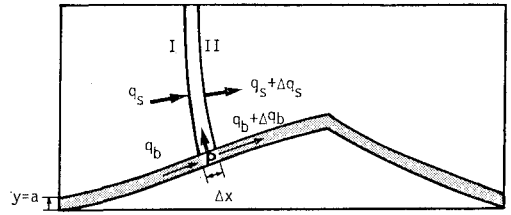
図—5 浮遊砂濃度 Flux の鉛直分布と浮遊砂量分布

である。よって、砂連上の砂移動は定性的には、これらの浮遊砂濃度の Peak が基本となって現象が生じていると言える。

(2) 砂連上の浮遊砂量分布と Pick-up function

今回浮遊砂濃度測定の対象とした領域では、砂粒子と水粒子の速度差は小さいと考えられるので、実験から得た浮遊砂濃度分布と数値計算から求めた流速値から砂連上の浮遊砂濃度 Flux を算出してみた。数値計算法としては Ismail・首藤 (1985)²⁾ と同様に渦素子法を用いている。この様にして求めた浮遊砂濃度 Flux の一周期平均値の鉛直分布を示したのが 図—5 の上図である。図は砂連上の代表的 8 測線についてその鉛直分布を示してある。図から砂連上流面上で強い上流向き Flux, 下流面上で弱い下流向き Flux が一周期平均で生じていることが判る。図—4 から、下流面上の方が隣接砂連からの影響度が大きい事がわかっている。よって、振動流に一樣流を加えた事で生じた非対称な流速場が、砂連背後に非対称な剝離渦を形成し、それが、上下流向に移動しようとする砂に対する制限の差を引き起こしたためと考えられる。また 図—5 の下図はそれを鉛直方向に積分したものの水平分布であり、浮遊砂量の場所的な分布に相当するものである。図から明らかなように、平均的には上流向き漂砂を示し、砂連形状と浮遊砂量分布には $\pi/2$ の位相差があることがわかる。

以上は浮遊砂量についての検討であるが、総漂砂量を求めるには底面ごく近傍での掃流砂量を正確に見積ることが重要になる。そのために、まず掃流砂層と浮遊砂層との間の砂粒子交換 Flux (Pick-up function) を求める。掃流砂層と浮遊砂層に明確な区別があるわけではなく、本研究の場合、一周期間に砂連が移動する領域、及



図—6 Pick-up function の考え方

び底面ごく近傍の写真撮影では浮遊砂濃度測定が不可能な領域を便宜的に掃流砂層とし、それより上方を浮遊砂層とした。一般に微小領域で砂粒子の収支を考えると、(1) 式が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Cu) + \frac{\partial}{\partial y}(C(v-w_0)) \\ = -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{C'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{C'v'}) \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

C : 浮遊砂濃度 w_0 : 沈降速度

(1) を鉛直方向に積分すると (2) 式の様になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} - (C(v-w_0)) \Big|_{y=a} = -\frac{\partial q'}{\partial x} - (\overline{C'v'}) \Big|_{y=a} \\ \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$M = \int C dy$: 領域内の浮遊砂の体積

$q = \int C u dy$: 平均的な浮遊砂量

$q = \int \overline{C'u'} dy$: 水平渦動拡散による浮遊砂量

河床波上の漂砂では、水平方向の渦動拡散効果が小さいと仮定してこの項を省略し、(2) 式で掃流砂層からの浮上沈降 Flux をまとめて Pick-up function と定義する。Pick-up function の基本的な考え方は 図—6 に示す。よって 図—6 に示す様な砂連形状に沿う、砂連表面と直交する方向に積分された領域で次式に示すような砂粒子の連続の式を考え、Pick-up function $P(x, t)$ を求める。

$$P(x, t) \cdot \Delta x = \frac{\partial M}{\partial t} + (q_2 - q_1) \dots\dots\dots(3)$$

Δx : 領域の底面の長さ

q_1, q_2 : I, II を通過する浮遊砂量

このようにして求めた Pick-up function を空間的に積分して平均化し、その経時変化を示したのが 図—7 (a) である。3-(1) で指摘した濃度 Peak 1, 2 に対応した浮上時間があることがわかる。また、一周期にわたり積分して平均化した Pick-up function の場所的な変化を示したのが 図—7 (b) である。砂連頂付近に平均的な浮上領域、その外側にそれに対応した沈降領域がある。これから砂連上の漂砂を一周期平均で考えると、砂連頂付近で浮上、その谷側で沈降という砂粒子の交換を行いながら、正味の漂砂方向に移動すると考えられる。

(3) 掃流砂量の算定

一周期平均で図-7 (b) に示すような分布型を Pick-up function が持つとすると、砂漣頂付近に浮上領域があり、砂が平均的には失われて行くから、砂漣は次第に減衰するはずである。実現がそうならないのは砂漣形状を維持する掃流砂が存在するからである。そこで (2) で求めた Pick-up function と砂漣の進行速度から (4) 式のように掃流砂を見積った。ここで、砂漣進行速度及び砂漣形状は実験から求めたものを用いている。

$$(1-\gamma)\frac{\partial}{\partial t}(Ax\cdot\eta)=-P+(q_{b1}-q_{b2}) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$\eta=\sum A_j\cdot\cos(K_jx-\sigma_jt)+B_j\cdot\sin(K_jx-\sigma_jt)$$

$$K_j=2\pi j/L, \quad \sigma_j=2\pi j/T$$

T : 砂漣伝播の周期 η : 砂漣形状

L : 砂漣波長 P : Pick-up function

q_{b1}, q_{b2} : I, II 面を通過する掃流砂量

厳密に言えば掃流層内にも濃度の場所的变化があるが、これを無視して掃流層内では一定と仮定し、静止状態の砂粒子の実質率 $(1-\gamma)$ に等しいとした。(間隙率 $\gamma=0.4$) 図-8 (a) はこれをもとにして求めた掃流砂量の場所的な変化率の分布である。図中の点線が、(4) 式中の形状成分の寄与 $(\partial\eta/\partial t)$ 、一点鎖線が Pick-up function の寄与、実線がその合計を示している。また、(5) 式のように考えれば、掃流砂の場所的な変化率を積分することによって、掃流砂の場所的な変動成分が求まる。

$$q_b=\int \frac{\partial q}{\partial x} dx + q_{b0} \quad \cdots\cdots(5)$$

q_b : 掃流砂量 q_{b0} : 正味の掃流砂量

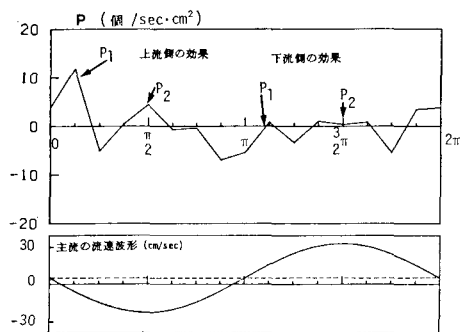


図-7 (a) 場所的に平均化した p の経時変化

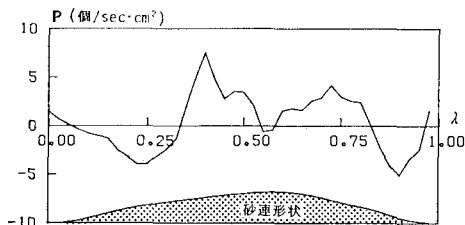


図-7 (b) 一周期平均の p の場所的变化

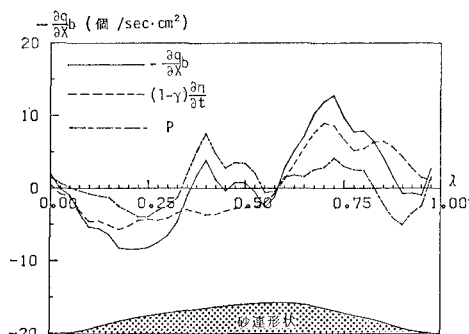


図-8 (a) $\partial q_b/\partial x$ の場所的变化

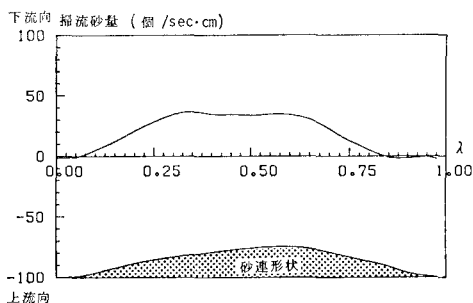


図-8 (b) 掃流砂量の変動成分

この結果を示したのが、図-8 (b) である。以上の様にして掃流砂の場所的な変動成分まで求めたわけだが、総漂砂量を求めるにはさらに正味の掃流砂量 (q_{b0}) がわからなければならない。これは底面の平均的な剪断力等に関係すると考えられるが、今後十分な検討が必要だと思われる。

4. おわりに

本研究で得られた主要な結果は次の通りである。

(i) 砂漣近傍における浮遊砂濃度の詳細な測定を行い、濃度の空間的分布特性から砂漣上の砂移動を支配する3つの濃度 Peak の性質を示した。

(ii) 数値計算から求めた流速値を用いて砂漣上の浮遊砂濃度 Flux を算出し一周期平均の浮遊砂量分布、及び浮遊砂層と掃流砂層の間の砂粒子の交換状況を示す Pick-up function を求めた。これから、一周期平均で考えると砂漣頂付近で掃流砂層から浮遊砂層への浮上が起こり、その谷側で沈降が起きている事がわかった。

(iii) (ii) で求めた Pick-up function と砂漣形状との整合性から掃流砂量の推定を行った。これから、砂漣上の掃流砂の移動状況を知ることができた。

以上、波・流れ共存場において正味の漂砂が上流向きとなる場合について砂粒子の運動の詳細な検討を行った。今後さらに広範囲の条件で実験を行うことで砂漣上の総漂砂量を正確に推定する事が可能になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 金子 新: 振動流中で形成されるサンド・リップルの波長, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 207~210, 1980.
 - 2) Ismail Aydin・首藤伸夫: 波と流れによる砂連上の流況, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 278~277, 1985.
 - 3) Nielsen, P., I. A. Svendsen and C. Staub: Onshore-off-shore sediment movement on a beach, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1475~1492, 1978.
 - 4) M. Sawamoto, T. Yamashita and Y. Akiyama: Stability theory of sand rippled due to wave action, Coastal Eng. in Japan, Vol. 29, pp. 119~123, 1986.
 - 5) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司: シート・フロー状態の底質移動に関する研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 202~206, 1980.
 - 6) Kennedy, J. F.: The mechanics of Dunes and Antidunes in Erodible-Bed Channels, Jour. of Fluid Mech., Vol. 16, Part 4, pp. 521~544, 1963.
 - 7) 田中 仁: 波・流れ共存場の乱流構造と漂砂現象に関する研究, 東北大学学位論文, 1984.
-