

砂漣上の浮流砂に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE SUSPENDED-LOAD OVER A RIPPLED BED

関根 正人*・吉川 秀夫**

By Masato SEKINE and Hideo KIKKAWA

In the flow over a rippled bed, there exists a systematic eddy motion over the crest or from the reattachment point etc., and so the turbulence structure is very complicated. Since the suspended-load in such a field is affected considerably by such an eddy motion, the characteristics of the suspended-load distribution are more complicated than that in a flow over a flat-bed and vary throughout the wave length. In this paper the simultaneous measurement of the concentration and two components of the water velocity was made and both characteristics of the water flow and the suspended-load were quantitatively estimated. As a result, the mechanism of the suspended-load, particularly the effect of a systematic eddy motion on the suspended-load is revealed and it is found that only near the crest, the concentration distribution can be approximately estimated by the equation proposed by authors in the case of the equilibrium condition.

Keywords : suspended-load, systematic eddy motion, reattachment point, simultaneous measurement

1. 序 論

河床に河床波が形成されている場合の流れにおいては平坦床の場合と異なって、クレスト部あるいは再付着点付近から周期的に上昇流が発生し、これが土砂の巻き上げにとって重要な役割を果たすことから、このような場における土砂の浮流を考えるにあたっては、この複雑な乱流構造を明らかにすることが不可欠である。このことに関して、これまで Raudkivi¹⁾ や板倉ら²⁾ により実験的に研究されてきたが、必ずしも十分とはいえず、しかも浮流砂との関係を定量的に評価するには至っていない。また、このような場における浮流砂の濃度分布についてその変化過程を調べた研究は少なく、数断面で測定した分布を既知の濃度分布式と比較することがなされているにすぎない。このような点に鑑み、本論では、最も単純な固定化した二次元の河床波上の流れを対象とし、一波長内の約 210 (21 断面×10 点) の測点で流れの二成分に濃度を加えた三量についての同時計測を行い、このような場における浮流砂の内部機構、とりわけ組織渦が土

砂の浮流に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とする。

2. 実験概要

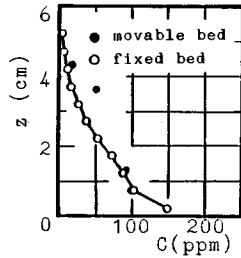
実験には、全長 6.5 m、幅 8 cm、高さ 30 cm のアクリル製水路を用いた。実験は、まず、水路床上に平均粒径が 0.2 mm でほぼ均一な砂を 5 cm 程度平坦に敷き詰めた後、給砂を行いながら一定流量の水を流し、ほぼ平衡な河床波が数波にわたって形成されたことを確認してから、主にそのうちの一波を対象として、流速分布・濃度分布・流砂量等を含めて必要な水理量を測定した。実験条件を表-1 に示す。次に、以上の測定終了後通水を止め、乾燥させ、若干の修正を加えた後に塩化ビニール系接着剤を用いて河床波を固結化し、その表層に同一砂を貼り付けて得られた固定床上で、同一の水理条件下で測定を行った。その詳細は次のとおりである。流速の測定には 2 チャンネルの熱線流速計システムを用い、プローブとしては X 型境界層用プローブを使用した。濃度の測定には発光ダイオードとフォトトランジスタを内蔵した光学系の濃度計を用いた。実測には上流端から 4.5 m 付近に形成されたほぼ二次元の河床波を対象とし、そのうちのほぼ一波長について約 210 の測点で、流速の二成分と濃度とを合わせた三量についての同時計測

* 正会員 工修 早稲田大学助手 理工学部土木工学科
(〒160 新宿区大久保 3-4-1)

** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科
(同上)

表一 実験条件

流量	$Q=2.2(1/s)$
平均水路床勾配	$1_0=1/200$
平均水深	$h=6.3(\text{cm})$
フルード数	$Fr=0.54$
レイノルズ数	$Re=1.02 \times 10^4$



図一 クレスト部の濃度分布

を行った。なお、同時計測に先だって、清水中における流速の測定や濃度のみの測定を行っており、同時計測により得られたデータの精度あるいは信頼性に問題がないことを確認したうえで解析を行っている。また、得られたデータはデータレコーダーに記録した後、サンプリング周波数を、同時計測および濃度のみの測定の場合には濃度計の応答性を考慮して 50 Hz、流速のみの測定の場合には 200 Hz とし、2048 個のデータを AD 変換し、統計処理した。また、底面せん断力の測定には内外径比 0.6 のピトー管を用い、Preston の方法を修正した Li-San Hwang ら³⁾ の手法によって求めた。

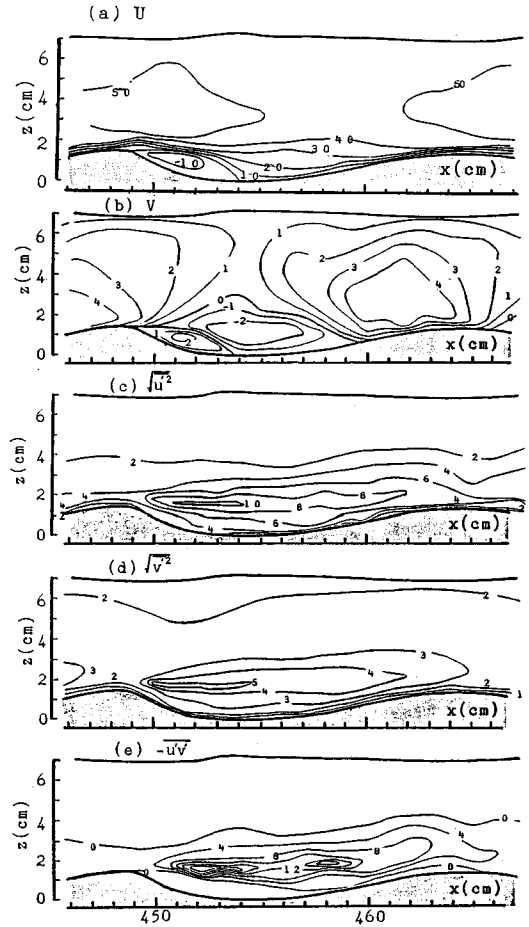
なお、上記の固定床上での実験の際には上流側から土砂を供給することになるが、これについては移動床で得られた浮流砂の分布状況に近い流れの場を再現するため、図一に示すようにクレスト部の濃度分布が移動床の場合と等しくなるように調整している。また、測定対象とした河床波の前後では、一波長単位でみた浮流砂の分布がほぼ平衡状態にあり、かつ土砂の堆積も微量であることを確かめたうえで測定を行っている。

3. 流れの特性量の評価

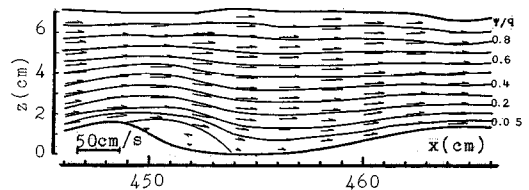
(1) 流速分布特性^{注1)}

主流方向に x 軸、これと直交する方向に z 軸をとり、流速の各方向成分の平均値および変動分を U, u' および V, v' とする。図二に平均流速 U, V および乱れ強度 $\sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}$ 、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の等値線図を示す。

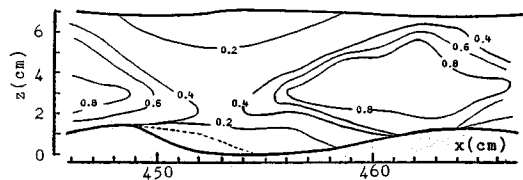
この図より、平均流速 U については次のことがわかる。①クレストの背後には剝離域が生じ、再附着点は $x = 455.4$ [cm] 付近で、クレストからの距離 X_R は 6.4 cm ($X_R/\Delta=3.8, X_R/\lambda=0.38, \Delta/\lambda=0.1, \Delta$: 河床波の波高, λ : 波長) である。図三には参考までに流線と流速ベクトル図を示した (図中の Ψ は流れ関数で、実測の U を使って $\Psi = \int_0^z U dz$ から求めている, q : 単位幅流量)。②再附着点付近から新たに境界層が発達



図二 平均流速・乱れ強度 (cm/s)、レイノルズ応力 (cm²/s²) の等値線図



図三 流線および速度ベクトル図

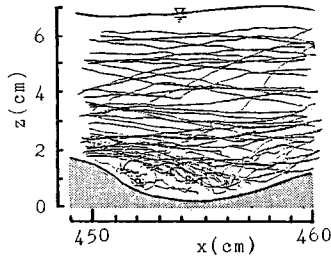


図四 v の超過確率分布 Prob. [$v|v>v_0$]

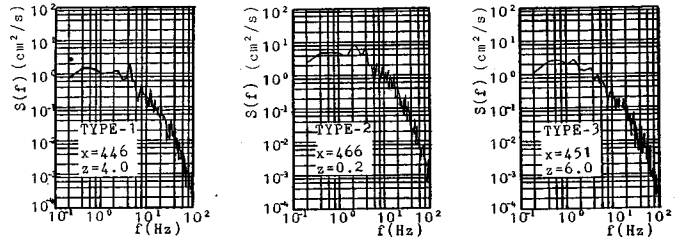
し、クレストへ向けて流れが加速されるのに伴い、 U の鉛直方向分布が一様化していくことがわかる。

鉛直方向への平均速度 V については、剝離域の上方

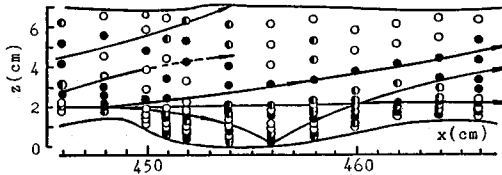
注1) 本節では、流速分布特性を表わすグラフとして、特に清水中で実測したデータを処理した結果を示している。



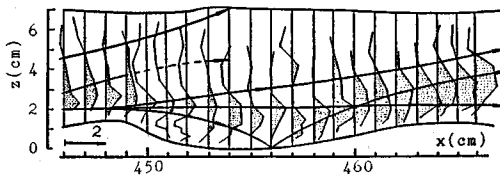
図—5 トレーサー粒子の軌跡



図—6 乱れ v' のパワースペクトル



図—7 組織渦の移動経路 (●TYPE—1, ◐TYPE—2, ○TYPE—3)



図—8 乱れ v' の skewness

から再付着点のやや下流側の底面付近にかけて下降流が、また、河床波の背面(上流側斜面)上で上昇流がそれぞれ生じていることがわかる。このことをさらに定量的に評価するため、流速の鉛直方向成分 $v(=V+v')$ と粒子の沈降速度 w_0 との比較から、沈降速度 w_0 以上の v が生じる確率 $\text{Prob.}[v|v \geq w_0]$ を求め、図—4に示した。この図より、剥離域の上方ではこの確率が0.2程度であるのに対し、河床波の背面上ではほぼ全域で0.5を越えることがわかり、特に後者でみられる上向流は土砂の上方への輸送を考えるうえで重要であると考えられる。

乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$ およびレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ については次のことがわかる。剥離流線の外縁付近にはせん断層が形成され、ここで生成された乱れが下流側のクレストへ向かってほぼ水平に、かつ減衰しながら移動していくことがわかる。なお、レイノルズ応力に関して $x=458$, $z=1.5$ [cm] 付近にもピークが存在するが、これは上流側の剥離域上縁付近から移動してきた渦と再付着点付近から間欠的に発生する上昇流とがこの点付近で混合し合うためと考えられ、このことは後述する土砂の拡散にとっても重要である。

なお、図—2(a), (e) よりわかるように最大流速が

水面下に生じ、その関係でレイノルズ応力も半水深付近から水面にかけてほぼ0に近い負の値となった。これは、本研究では最も単純な二次元の河床波を対象としており、このような河床波を形成させる配慮から水路幅を比較的小さくしたため側壁の影響が現われたものと考えられる。

(2) 組織渦²²⁾の検出

本研究では、熱線流速計による Euler 的な流速測定と合わせて、染料およびポリスチレン粒子を用いた流れの可視化を行った。その結果の一例が図—5であり、これはトレーサーとして投入したポリスチレン粒子の軌跡を表わしている(図—5はビデオ解析の結果得られたクレストから再付着点付近にかけての粒子軌跡である)。図—5あるいはビデオ解析の結果から、クレストの上方から下流側のクレスト上方の水面付近へ向かう流れ、および再付着点付近から下流側クレスト上方へ向かう流れ、の主に2つの顕著な上昇流が周期的に存在していることがわかった。

以上の結果をもとに、このような組織的な渦を定量的にとらえ、かつその移動経路を明らかにするために、各測点での流速データを用いて乱れ v' のパワースペクトルをとり、その特性を検討した。その結果が図—7であり、図中のプロットは各測点で得られたパワースペクトルがその性質により図—6に示した3つのタイプのいずれに属するかを示している。すなわち、Type 1は明瞭な卓越周波数 f_p ($=4$ Hz) を示すもの(この f_p に対応するストローハル数は $S_t = \Delta \cdot f_p / \bar{U} = 0.17$ (\bar{U} : 断面平均流速) となり、板倉²⁾による値とほぼ一致する)であり、Type 2は上記の4 Hzのほかにその2倍周期に相当する2 Hzの位置にもピークを示すものである。これに対し、Type 3は明瞭なピークを示さず、通常のせん断乱流場で得られるスペクトルである。図—7中の矢印を付けた実線は、同じ卓越周波数をもつ点を通して渦が移動していくと考えた場合に得られた組織渦の移動経路であり、これは図—5に示したトレーサー粒子の上昇軌跡

注2) ここでは、クレストからの剥離渦と再付着点付近から発生するボイルとをあわせて組織渦とよぶこととした。

とも一致する（なお、ビデオ解析の結果得られた粒子の上昇周期は約0.25秒で、スペクトル解析の結果とも一致する。また、 $x=454$ [cm] 付近の水面についても同一周期で上下に変動していることがわかってる）。

また、乱れ v' の生起確率分布について検討したところ、必ずしも正規分布とはならず、正負にひずんだ分布となることがわかった。そこで、その分布の skewness ($= \frac{|\sum_{i=1}^N (v_i - V)^3 / N|}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (v_i - V)^2 / N)^{3/2}}}$) の値を調べ、その結果を図-8に示した。図中の着色部分はその点の分布が正にひずんでいることを示し、この値が大きいほど正の相対的に大きな v' が存在することを意味すると考えられ、これによっても上昇流の移動経路を知ることができる。このような観点から、図-8では skewness の分布と図-7上で得られた組織渦の移動経路（矢印を付けた実線）との比較を行った。その結果、両者がよい対応関係にあることがわかり、ビデオ解析（図-5）、スペクトル解析（図-7）および v' の生起確率分布特性（図-8）の三点から組織渦の移動経路が図-7、8中の矢印を付けた実線で表わせることが明らかになった。

(3) 静圧および底面せん断力分布

図-9には静圧分布および底面せん断力（図中は摩擦速度 u_* ）分布を示した。静圧分布については、静圧管による実測結果と図-3に示した流線から算出した結果をプロットで示しているが、ほぼ全域で実線で示した静水圧分布と一致することがわかり、本研究で対象とした流れでは遠心力の影響が無視できるものと考えられる。

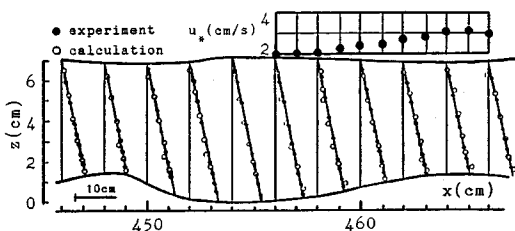


図-9 静圧および摩擦速度の分布 $p/\rho g, u_*$

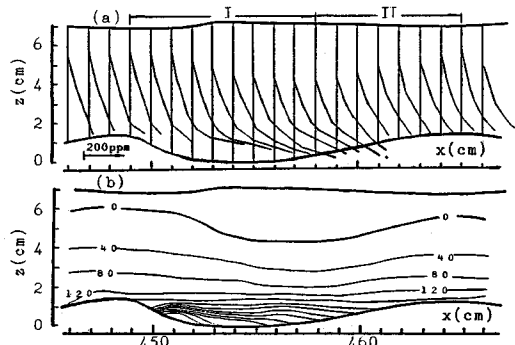


図-10 浮流砂の濃度 (a) 分布, (b) 等値線図

底面せん断力の流下方向変化については、実測より u_* が同図中のプロットのようになり、再付着点付近からクレストにかけて増加すること、およびクレストよりわずかに上流側にピークが現われることがわかる。

4. 浮流砂の分布特性

(1) 濃度分布特性

固定化した砂漕上で、濃度計を用いて測定した浮流砂の濃度分布を図-10(a)に、等値線図を図-10(b)に示す。この図より、上流側クレスト部から再付着点のやや下流側 ($x=458$) にかけての区間 (I) では濃度重心が低下し、かつ濃度勾配の大きな分布へと変化していくのに対し、河床波の背面上の区間 (II) では逆に濃度重心が上昇し、濃度勾配の小さな分布へと変化することがわかった。特にクレスト付近では流速分布と同様に濃度も一様化する傾向にあると考えられる。なお、剥離域内では全般的に高濃度となっているが、これはこの領域に取り込まれた土砂が剥離渦の回転運動の影響によりこの域にとどまるためであり、特に $x=451$ 付近で 600 ppm 以上の高濃度となるのは、このことと合わせてこの点付近に若干の堆積が生じていたためと考えられる。

濃度 c の生起確率密度分布を調べたのが図-11であり、正規分布とは性質を異にする分布となることがわか

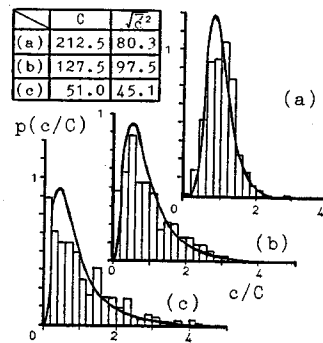


図-11 濃度の生起確率密度分布 (I) $p(c/C)$

((a) $x=452, z=1.0$, (b) $x=449, z=0.3$, (c) $x=446, z=2.5$)

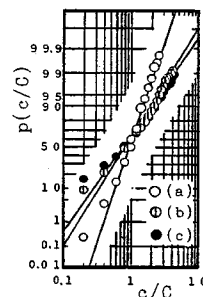


図-12 濃度の生起確率密度分布 (II) $p(c/C)$

る。図中の曲線は式(1)で表わされる対数正規分布を示したものであり、この分布を対数確率紙上に描いたのが図-12(図中の実線が式(1)に対応)である。

$$p\left(\frac{c}{C}\right) = \frac{1}{(c/C)\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{\{\log(c/C)-m\}^2}{2\sigma^2}\right] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m 、 σ^2 は $\log(c/C)$ についての平均値および分散である。この図-11, 12より濃度 c の生起確率密度分布が対数正規分布で近似できることがわかる。

濃度変動 c' の周期性については、前章で検討した水の乱れの周期性ほど明瞭な傾向が現われないため、ここではその性質を記すにとどめる。①図-10(a)に示した区間(I)では、図-8よりわかるように流速の鉛直方向成分 v の作用よりも重力の作用の方が卓越するため、底面近傍を除いて濃度変動には明瞭な周期性がみられないのに対し、区間(II)では逆に v の作用が卓越するため濃度変動も周期性を示す。②区間(II)で示す卓越周期は約1.0秒で、水の乱れの0.25秒の約4倍となる。このことは、土砂が一周単位位の渦の作用には十分追従できないため、結果的に数周期分に相当する渦の作用によって周期的な土砂の輸送が行われているものと考えられる。

(2) 土砂の輸送量の分布特性

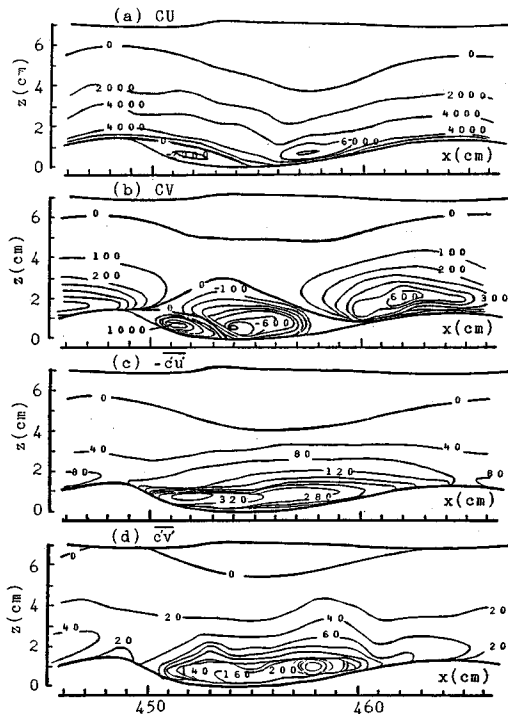


図-13 土砂輸送量の等値線図 (単位: ppm cm/s)

前節では土砂の濃度分布特性について検討したが、本節では、水と粒子の移動速度が一致ずるとして土砂の輸送量の分布特性について検討する。図-13には、同時計測の結果として得られた CU 、 CV 、 $\overline{c'u'}$ 、 $\overline{c'v'}$ の等値線図を示した。この図より次のことがわかる。

平均流による土砂の輸送には次の3つのパターンが考えられる。第一に、クレスト上方を通過した土砂の大半は、剥離域に取り込まれるか、あるいは剥離流線に沿って流下し、水よりも慣性が大きいため再付着点およびその下流側の底面曲線の変曲点付近にかけての区間($x=455\sim 458$)で底面に衝突し、その一部は剥離域内に取り込まれるもの、それ以外はさらに下流側へ運ばれ、背面上に存在する上向きの流れによって再び上方へ輸送される。第二に、剥離域内に取り込まれた土砂は、この領域にとどまった後、逆流速によって上流側クレスト部へ運び上げられ、主流部へフィードバックされる。第三に、上記以外の粒子は、一波長間では底面と接触することなく主流部の流れに乗って下流側に運ばれる。なお、 $x=458$ 付近に CU の最大値が生じるが、これは、図-10(a)で示したように底面付近では濃度 c が剥離域から下流側クレストにかけて減少するのに対し、図-2(a)で示したように流速 U が逆に増加していくため、この点付近の領域では土砂が底面付近に押しつけられる形で輸送されていることがわかる。

輸送量の変動分 $\overline{c'u'}$ 、 $\overline{c'v'}$ については、全域で $\overline{c'u'} < 0$ 、 $\overline{c'v'} > 0$ となるほかに、 $\overline{c'v'}$ が再付着点付近を中心として正の大きな値となることに注目する必要がある。このことは移動床の場合にはさらに顕著に現われるものと考えられるが、固定床の場合にもこの領域で乱れによる土砂の巻き上げが生じていることがわかる。なお、 $x=458$ 付近で $\overline{c'v'}$ が最大値をとるが、これは前章でも記したように、この点付近で2つの経路をとって移動してきた渦がぶつかり、混合が活発になるためと考えられ、レイノルズ応力がこの点付近で最大値をとることに対応している(図-2(e)参照)。

(3) 拡散係数の評価

図-14には、次式より算出した水の運動量拡散係数 ϵ_r 、粒子の濃度拡散係数 ϵ_{sx} 、 ϵ_{sz} の分布を示した。

$$-\overline{u'v'} = \epsilon_r \frac{\partial U}{\partial z}, \quad -\overline{c'u'} = \epsilon_{sx} \frac{\partial C}{\partial x}, \quad -\overline{c'v'} = \epsilon_{sz} \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots (2)$$

図-14(a)中の破線は、せん断力が直線分布し、かつ流速が対数分布則に従うとして得られる次式に、実測の u_* を代入して得られる ϵ_r の分布($x=0.4$)である。

$$\epsilon_r = x u_* z (1-z/h) \dots\dots\dots (3)$$

この図より、実測による ϵ_r がクレスト付近の底面近傍では大きくなるものの近似的には式(3)で表わされる

分布と一致することがわかる。これに対し、同図(a)と(c)の比較から ϵ_r と ϵ_{sz} とが必ずしも一致せず、ほぼ全域で $\epsilon_r > \epsilon_{sz}$ となることがわかる。このことは、砂粒子の拡散の場合には染料の拡散の場合と異なって、粒子に働く重力の効果が無視できないことを表わしていると考えられる。また、 ϵ_{sz} 自体の分布については、傾向として、図-7に示した組織渦の移動経路に沿って大きな値となることがわかる。なお、 ϵ_{sz} については、 $\partial C / \partial x$ が小さく、かつその符号を変えるため、図-14(b)のような分布となるが、次節で詳細に記すように x 方向への拡散は z 方向への拡散に比べて無視できる程度であり、 ϵ_{sz} の値自体にはあまり意味がないものと考えられる。

(4) 二次元拡散方程式の各項のオーダー比較

流砂量の連続を考えるにあたって、本章(2)で示した CU のみを考えて $q_s(x) = \int_0^{h(x)} CU dz$ より各断面を通過する土砂の単位幅輸送量 q_s を求め、比較したところ、全断面で必ずしも一致しないことがわかった。これは、他の輸送量 CV , $\overline{c'u}$, $\overline{c'v}$ の値が場所的に変化するとともに、全体に対してそれらが占める割合が変化するためである。そこで、このような流れの場に対する連続の式として二次元の拡散方程式を考え、この式の適合性を検討するとともに式中の各項のオーダー比較を行った。

二次元の拡散方程式は、 $(dx \cdot dz)$ の control-volume 内に単位時間当たりに入出入りする浮流砂量のつり合いを考えることにより次式で表わされる。

$$\frac{\partial(CU)}{\partial x} + \frac{\partial(CV)}{\partial z} = w_b \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial(-\overline{c'u})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{c'v})}{\partial z} \dots\dots\dots(4)$$

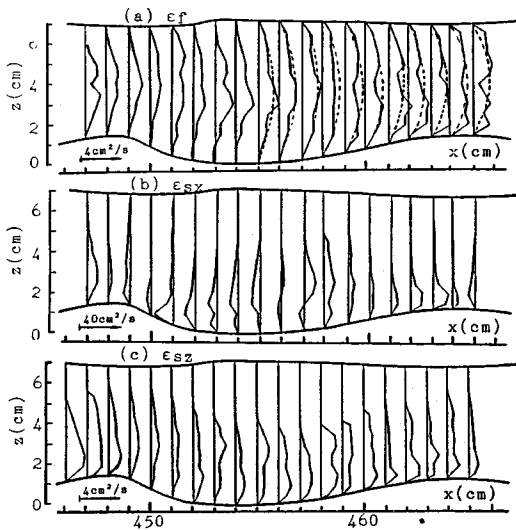


図-14 拡散係数の分布 (単位: cm²/s)

ここに、式(4)の左辺の二項は平均流による移流項、右辺第一項は重力による輸送項、右辺第二・三項は拡散項である。各測点で式(4)の適合性を検討したところ、各項の受け持つ比率は後述するように変化するものの、ほぼ全域で式(4)が満足されていることがわかった。

式(4)の各項の分布およびそのオーダー比較を行ったのが図-15である。まず、図-15(a)~(c)より、各項の分布についてもその性質により、図-10(a)に示した2つの領域に分かれることがわかる。区間(I) ($x=449\sim 458$)では、 $\partial(CU)/\partial x < 0$, $\partial(CV)/\partial z > 0$ となり、かつおのおのが大きな値となるほか、拡散項・重力項および各辺の和も相対的に大きくなり、土砂の交換が活発であることがわかる。これに対し、区間(II) ($x=458\sim 465$)では $\partial(CU)/\partial x > 0$, $\partial(CV)/\partial z < 0$ となり、各項が全般的に小さく、土砂の出入りは少なくなっている(なお、全領域にわたり右辺第一項は負、右辺第三項は正)。次に、図-15(d)は重力項を1とした場合の各項の比を示しているが、この図より、全般的に、平均流による移流項と重力項の占める割合が高く、近似的には両者の間でつり合いが保たれていること、右辺第二項が無視できること、などがわかるほか、特にクレスト付近では他の領域に比べて左辺第一項および右辺第二項の占める割合が小さくなり、かつ右辺第三項による拡散項の占める割合が大きくなるのが明らかになった。

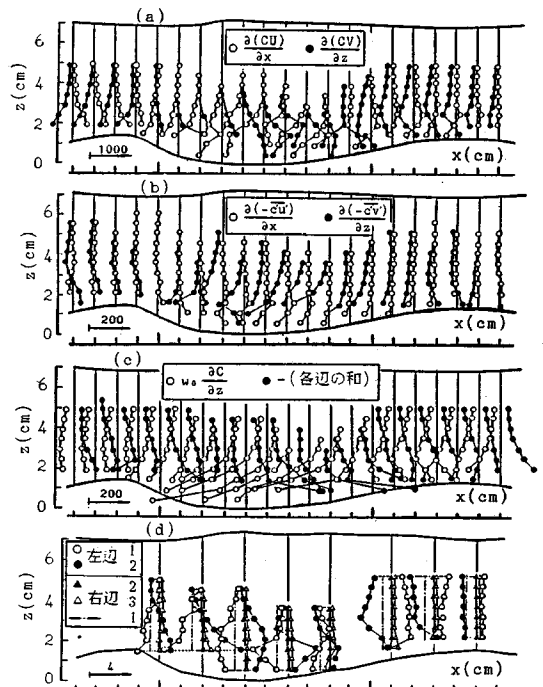


図-15 拡散方程式の各項の分布とそのオーダー比較 (単位: ppm cm/s/cm)

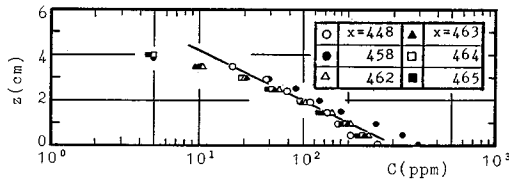


図-16 クレスト付近の濃度分布

なお、このことは傾向として、クレスト部の分布特性が平坦床上のものに近づくことを意味すると考えられ、次節では、このことを考慮して、この付近の濃度分布と平坦床の場合に得られた平衡浮流砂濃度分布との比較を行う。

(5) クレスト部の濃度分布

前節で記したように、クレスト部の濃度分布が平坦床での分布に漸近する傾向があるため、本節では前報⁷⁾で得られた平衡浮流砂濃度分布との比較を試みる。その結果が図-16であり、図中のプロットが実測の濃度分布である。これより、再付着点直後の $x=458$ での分布を除いてほぼ同一の分布となることがわかる。また、図中の実線は前報で得られた平衡浮流砂濃度分布を表わしたものであり、その計算にあたっては、その分布を特徴付ける拡散係数 ϵ_s (一次元拡散方程式: $\epsilon_s \cdot \partial C / \partial z + w_0 C = 0$) を一波長平均の水理量を用いて評価することにした (すなわち、たとえば、流れの場を示す1つの指標である摩擦速度については、クレスト部の局所的な値をとるのではなく、形状抵抗分を含めた一波長平均の値をとることにしたが、このことは移流項による輸送分を拡散項で、言い換えれば ϵ_s を大きくとることにより補正していることに相当し、結果的に $\epsilon_s > \epsilon_{sz}$ となる)。この図より、図中の実線と実測結果とが一致することがわかり、上記のように一波長平均の水理量を用いれば、クレスト部の濃度分布についても近似的に平衡浮流砂濃度分布式により表わせることが明らかになった。

5. エネルギー面からの現象の把握

本章では河床波上の非平衡浮流砂現象をエネルギーの面から検討する。すなわち、河床波の一波長内の数断面にわたって、その断面を単位時間当たり通過する浮流砂のもつ全エネルギー $E_s(x)$ を求め、その流下方向変化を調べた。

任意点 (x, z) を通過する浮流砂のもつエネルギー $e(x, z)$ は運動エネルギー $e_k(x, z)$ と位置エネルギー $e_p(x, z)$ の和の形で表わされ、そのおのおのを次のように定義する。

$$e_k(x, z) = 1/2 \cdot \rho (\sigma_s - 1) \cdot (C + c') \{ (U + u')^2 + (V + v')^2 \} \\ + 1/2 \cdot \rho (\sigma_s - 1) [CU + \{ U^2 + 3/2 \cdot (V^2 + \bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) \} + 3U(U\bar{c}'u' + V\bar{c}'v')] \quad (5)$$

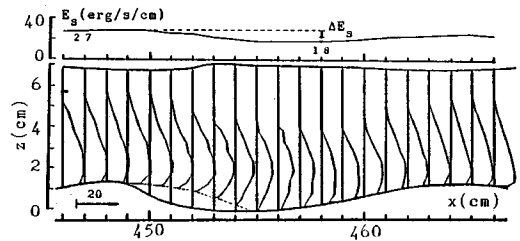


図-17 浮流砂のもつエネルギー分布 (単位: erg/s/cm²)

$$e_p(x, z) = \rho (\sigma_s - 1) \cdot (C + c') \{ (U + u')^2 + (V + v')^2 \}^{1/2} \cdot g \{ z + \eta(x) \} = \rho (\sigma_s - 1) g \{ z + \eta(x) \} \cdot [CU + \{ 1 + (V^2 + \bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) / 2 U^2 \} + \{ \bar{c}'u' + \bar{c}'v' \} (V/U)] \quad (6)$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ_s は砂の比重、 g は重力加速度であり、 $\eta(x)$ は基準面 (ここでは河床波のトラフ部の河床面) から測った各断面の河床面高さである。以上の二式より、各断面を単位時間当たり通過する浮流砂のもつエネルギーの総和 $E_s(x)$ は次式で表わされる。

$$E_s(x) = \int_{\eta(x)}^{h(x) + \eta(x)} e(x, z) dz \\ = \int_{\eta(x)}^{h(x) + \eta(x)} \{ e_k(x, z) + e_p(x, z) \} dz \quad (7)$$

ここに、 $h(x)$ は各断面の水深である。図-17には、以上の式より算出した $e(x, z)$ の分布および $E_s(x)$ の流下方向変化を示した。なお、剝離域内に存在する土砂については、粒子の軌跡から単に循環しているにすぎないと判断されることから、上記の計算では、剝離域内の土砂のもつエネルギーを流送される土砂のもつエネルギーから除外している。図-17より、河床波上を流送される土砂のエネルギーについても前述した区間 (I)、(II) でその性質が異なり、区間 (I) ではエネルギーが減少するのに対し、区間 (II) では増加し、一波長間では、平均河床勾配に相当する程度の損失はあるものの、ほぼ元のエネルギー・レベルまで回復することがわかる。このように性質を異にする理由としては、粒子に働く重力と流れによる流体力の効き方が両区間で異なるため、次のように考える。区間 (I) では、流れは下向きであり (図-2(b)), かつ沈降速度を越える v の生起確率が低い (図-5) ことから、流体力よりも重力の作用が顕著となり、流れから供給されるエネルギーよりも重力による位置エネルギーの減少の方が大きい結果としてエネルギー・レベルが低下する。これに対し、区間 (I) の後半から区間 (II) の前半に相当する再付着点付近から河床波の背面にかけての領域は、組織渦の移動経路にあたり (図-7, 8), 乱れによる混合が活発 (エネルギー供給が大) である (図-2(e), 図-13(d)) ことに加

えて、上昇流の影響で大きな上向きの流体力が働いている(図-19)ため、土砂の巻き上げが生じ、エネルギー・レベルの上昇が促進される。さらに、区間(II)の後半にあたる河床波の背面からクレストにかけての領域では、平均的な流れが上向きであり、かつ沈降速度を越える v の生起確率が高いことから、平均流による上向き輸送が顕著となり、結果としてエネルギー・レベルが元の値近くまで回復するものと考えられる。

なお、区間(I)について上記のことを確かめるため、次のような概算を行った。すなわち、クレスト部を通過する土砂が、その分布形を保ったままで代表流速 U_r で流下し、その間沈降速度 w_0 で降下するものとして、エネルギー最小となる断面に到達するまで(その間の距離 L_r) に失う位置エネルギー ΔE_s を

$$\Delta E_s = \rho(\sigma_s - 1) \cdot \int_{n_{crest}}^{n_{crest} + n_{crest}} CU dz \times \frac{L_r}{U_r} w_0 g \dots (8)$$

により概算すると、式(5)~(7)より算出したエネルギー差(=9.0 erg/s/cm)のほぼ80% ($\Delta E_s = 6.29$ (erg/s/cm))となった。このことより、区間(I)のエネルギーの大半が位置エネルギーの減少分であることがわかる。

次に、以上の説明の妥当性を検討するため、各断面で土砂がおのこの分布を保つのに必要な鉛直方向への流体力について検討する。流体力の算定にあたっては、土砂の軌跡などから直接求めることが容易でないため、任意点 (x, z) を中心とした図-18に示すような control-volume を考え、これについての土砂に関する運動量方程式から求めることにした(なお、ここでは、運動量に関して、相互に影響し合うもの土砂と水とを分けて扱うことが可能であるとしている)。図-18の辺上の任意点において control-volume 内に持ち込み、あるいは持ち出される運動量の鉛直方向成分 $m_z(x', z')$ は、

$$m_z(x', z') = \rho(\sigma_s - 1) \cdot \frac{(C + c') \cdot \{(U + u')^2 + (V + v')^2\}^{1/2} (V + v')}{+ c' v' U + c' u' v'} \dots (9)$$

で表わされる。これより、図-18中の M_{z0} , M_{z1} , M_{z2} , M_{z3} は式(9)を各辺上で積分した値としなり、たとえば M_{z0} は、

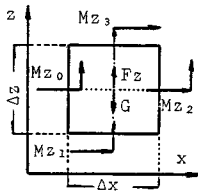


図-18 概念図

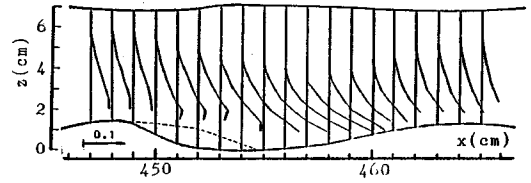


図-19 流体力 f_z の分布 (単位: dyn/cm³)

$$M_{z0} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} m_z \left(x - \frac{\Delta x}{2}, z' \right) dz' \dots (10)$$

で表わされる。また、control-volume 内に存在する土砂に働く重力 G は式(11)で表わされる。したがって、以上の式をもとに運動方程式を立てると次の式(12)のようになる。

$$G = \rho(\sigma_s - 1) g \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} C(x', z') dz' dx' \dots (11)$$

$$(M_{z2} + M_{z3}) - (M_{z0} + M_{z1}) = F_z - G \dots (12)$$

したがって、単位体積当たり作用している流体力 $f_z (= F_z / \Delta x \cdot \Delta z)$ は次式によって求めることができる。

$$f_z = \{(M_{z2} + M_{z3}) - (M_{z0} + M_{z1}) + G\} / (\Delta x \cdot \Delta z) \dots (13)$$

実測結果から算出した f_z の分布を図-19に示す。この図より、前述のとおり再付着点付近から河床波の背面にかけての組織渦の移動経路に沿って f_z が大きくなっていることがわかり、土砂の鉛直方向への輸送に及ぼす組織渦の影響が明らかになった。

最後に、参考までに流体が一波長流下する間に失うエネルギー ΔE_w を、この実験例について算出すると、流速分布が一波長ごとに復元性のあるものとすれば、これは位置エネルギーの減少分と一致し、次のようになる。

$$\Delta E_w = \rho q \lambda I_e g = 1.56 \times 10^4 \text{ [erg/s/cm]} \dots (14)$$

ここに、 I_e はエネルギー勾配である。これより、土砂が流体との間で行うエネルギー授受量(≈8 erg/s/cm)は流体の損失エネルギー ΔE_w の0.05%程度にすぎないことがわかる。

6. 結 論

本論では、砂漣上の非平衡浮流砂現象を対象として、その内部機構を明らかにするため、流速と濃度の同時計測を行った。以下に得られた主な結論を示す。

(1) 砂漣上の流れの特性については図-2~9に示したが、このような流れの場における浮流砂を考えるうえで重要な組織渦については、その移動経路が図-7, 8中の矢印線のようになることがわかった。そのほか、再付着点付近から砂漣の背面にかけては特に複雑な乱流構造となっていること、および、その背面上では粒子の沈降速度を越える大きさの v が高い確率で生じていること、などが明らかになった。

(2) 浮流砂の分布特性については図—10~16に示した。これより、その分布特性が再付着点のやや下流側の $x=458$ 付近を境にその性質が異なり、その上流側にあたる区間 (I) では、流れは下向きであり、流れによる作用よりも重力の作用の方が顕著であることから濃度重心が低下していくのに対し、砂漣の背面上に相当する区間 (II) では、組織渦の影響により混合が活発で、流れも上向きであることから、平均流および乱れからのエネルギー供給 (あるいは流体力) が大きくなり、これによる影響が重力によるものより顕著となる結果、濃度重心が上昇するものと考えられる (浮流砂のエネルギー・レベルについても同様のことがいえる)。

(3) 二次元の拡散方程式についてその適合性を確かめるとともに各項のオーダー比較を行った。その結果が図—15であり、全般的に移流項と重力項とでつり合いがとれる形となり、拡散項の占める割合が小さいことがわかった。なお、再付着点付近では乱れによる巻き上げが生じることにより拡散項が相対的に大きくなることが予想され、本研究で行った固定床での実験でも図—13(d) および図—15(b) に示したようにその傾向が現われているが、移動床の場合には、上流側からの土砂の輸送に加えて局所的な堆積・洗掘が生じることから、このような場合には再付着点付近を中心として拡散項の占める割合がさらに高くなることが推察される。

(4) クレスト付近の濃度分布は図—16に示すように近似的に前報で得られた平衡浮流砂濃度分布式で説明できることがわかり、その際の拡散係数 ϵ_s の評価にあ

たっては一波長平均の水理量を用いればよいことを示した。

(5) 図—17には砂漣の一波長内の各断面を単位時間当たり通過する浮流砂のもつエネルギーについてその流下方向変化を、図—19には単位体積中に存在する浮流砂に作用する流体力の分布をそれぞれ示したが、これにより流れ (特に組織渦) が浮流砂の移動に及ぼす影響が明らかになった。

今後は、掃・浮流砂が共存する流れの場について、流砂全体を統一的に扱うことを目的として、掃・浮流砂間の遷移機構や流砂の移動速度分布などを含めた流砂全体の内部機構を明らかにしていくつもりである。

最後に、本研究の遂行にあたり、服部陽一君 (東亜建設工業 (株), 当時早稲田大学理工学部学生), 桑原紀博君 ((株)日建設計, 当時同大学学生) の協力を得た。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Raudkivi, A. J. : Study of Sediment Ripple Formation, Proc. ASCE, HY6, pp.15~33, 1963.
- 2) 板倉忠興 : 河川における乱流拡散現象に関する研究, 北海道大学学位論文, 1984.
- 3) Li-San-Hwang, Emmett M. Laursen, M. : Shear Measurement Technique for Rough Surfaces, Proc. ASCE, HY2, pp.19~37, 1963.
- 4) 関根正人・吉川秀夫 : 浮流砂理論の再検討, 土木学会論文集, No. 369, pp.109~118, 1986.

(1986.11.29・受付)