

II-203 河床波上の流れの乱流構造に関する研究

早稲田大学 理工学部 正員 関根 正人
 東亜建設工業(株) 正員 服部 陽一
 早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫

1. はじめに 河床波上の流砂現象を考えるに際して、平坦河床上の現象と最も異なるのは、その乱流構造の複雑さであり、組織的な渦の存在に起因する土砂粒子の運動の非平衡性である。本論では、このような非平衡の流砂(特に浮流砂)現象を解明するに当って不可欠な河床波上の流れの乱流構造(特に組織渦)に関する詳細な情報を得ることを目的とした。

2. 実験概要 実験には全長6.5m,高さ30cm,幅8cmの亚克力製水路を用い、河床構成材料として平均粒径0.2mmでほぼ均一な砂を用いた。実験条件は表1に示す通りである。実験は、水路床上に5cm程度の砂を平坦に敷いた水路床に、給砂を行ないながら一定流量の水を流し、ほぼ平衡な河床波が数

流量	$Q=2.1(1/s)$
平均水路床勾配	$I_0=1/280$
平均水深	$h=6.3(cm)$
フルード数	$Fr=0.54$
レイノルズ数	$Re=1.02 \times 10^4$

表1 実験条件
 波にわたって形成されたことを確認した後に通水を止め、乾燥させ、若干の修正を加えた後に塩化ビニール系接着材を用いて固結化し、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行なった。乱れの計測にはX型境界層用Hot-Filmを用いて行ない、上流端から4.5m付近に形成されたほぼ二次元の河床波を測定対象とした。

3. 平均流速及び乱れ強度 主流方向をx,鉛直方向をzとし、各方向への速度成分をu,vとすると、平均流速 \bar{u} ,乱れ強度 $\sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}$,レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の各分布は図1のようになる。図1-(a)のようにcrestからtroughにかけて剝離域が見られ、このことはポリスチレン粒子を用いて可視化した写真(shutter speed 1/60秒)からもわかる。一方、同図(b)(c)よりわかるように、河床波のCrest付近から剝離域の上縁付近にせん断層が形成され、ここで形成された乱れがほぼ同一の高さを保ち、かつ減衰しながら次のcrestへと移動して行くことがわかる。このことは、Raudkivi¹⁾や祢津らの段落ち部の流れに関する結果と一致する。次に、図2に流線(流れ関数 $\psi = \int u dz$, q :単位幅流量)及び流速ベクトルを示した。なお、再付着点は $x=455.4cm$ 付近と考えられ、Crestから再付着点までの距離は $X_R \approx 7cm$ ($X_R/\Delta \approx 4$, Δ :波高)となり、祢津らによる段落ちの結果より小さくなった。

4. 底面せん断力及び境界層厚 底面せん断力 τ_0 の算定に当っては内外径比0.6のピトー管を用い、Hwang³⁾らの方法によって求めた。また、これを検討する意味からPrandtlの境界層方程式を解き、流速分布から求めた境界層厚 δ 及び上記の測定により求めた摩擦速度 $u_* (= \sqrt{\tau_0/\rho})$ との比較を行なったのが図3である。なお、式の解法に当っては圧力勾配の与え方を工夫するとともに、再付着点からの δ の急激な発達を把握し難かったことから、再付着点の下流側で初期条件 δ_0 を与えて計算した。図3より実測値と計算値は比較的良く一致しており、また、 δ については再付着点付近から急激に発達した後、Crestへ向って流れが加速されるに伴って δ が薄くなり、流速分布が一様化することがわかる。

5. 組織渦の検出 本研究では、Euler的なHot-Filmによる測定のほかに染料あるいはポリスチレン粒子を用いて流れの可視化を行なった。この結果が写真1及び図4であり、図4は上流から投入したポリスチレン粒子の軌跡である。この図より注目すべきことは、先に示した剝離域の外縁にせん断面が存在すること、及び、河床波のcrest付近や再付着点付近から水面に向けて周期的に上昇流が存在すること、等である。そこで、これを定量的に評価するために各測点での乱れのパワースペクトルをとり、その特性を検討した。この結果が図5であり、図中の各プロットは各測点でのスペクトルが図6のどのタイプに属するかを示している。Type1は明瞭な卓越周波数 $f_p (= 4Hz, Strouhal数 St = \Delta \cdot f_p / \bar{u} = 0.17)$ を示すもの、Type2はType1の卓越周波数のほかに

2倍の周期に相当する位置にもピークが見られるもの、Type3は通常のせん断乱流場で得られるスペクトルである。図5より、組織渦の移動径路としては主に図中の矢印で示したものが考えられ、特に再付着点の下流側の河床波背面上では、剝離域で生じている周期的な渦の合体・破壊の結果として卓越周期の2倍の間隔で乱れが伝達されていくことがわかる。また、crest部上方に見られる上昇流は、剝離域内に生じている循環を打ち消す向きの流れと考えられる。

6. 浮流砂濃度 乱流計測を行なった固定河床波上に、河床波を形成させた移動床の場合に得られた浮流砂量とほぼ同量の土砂を上流から供給し、これを内径4mmの銅管を用いたサイフォンで採取することにより濃度分布を測定した。この結果が図7であり、定性的には渦の経路に沿って高濃度となるとともに、Crestに向って濃度が一様化する傾向にあることがわかる。

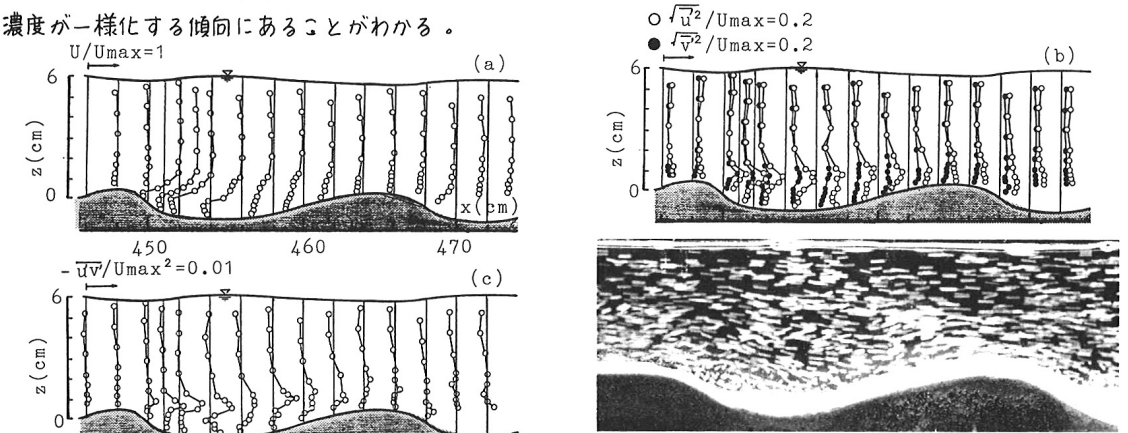


図1. 平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力 ($U_{max}=53.8$ (cm/s))

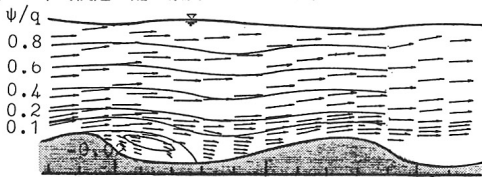


図2. 流线、速度ベクトル

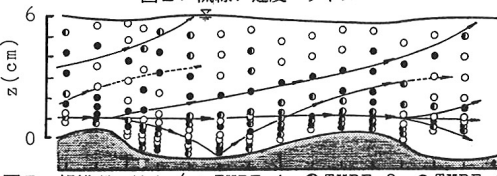


図5. 組織渦の検出 (●TYPE-1, ◐TYPE-2, ○TYPE-3)

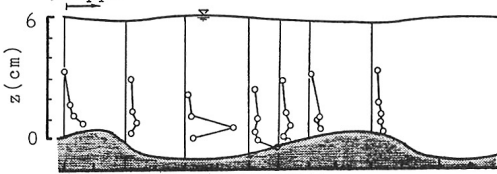


図7. 浮流砂濃度分布

7. 結び 本論では、河床波上の流れの乱流構造に関して検討を加えた。今後はさらに測定を重ねるとともに乱れの空間的な相互相関性についてや、乱流構造と土砂の浮流機構との関係について検討していきたい。

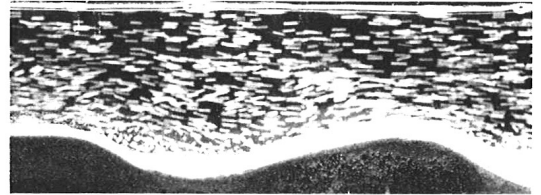


写真1

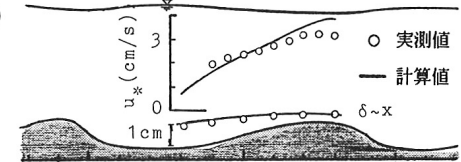


図3. 底面せん断力、境界層厚

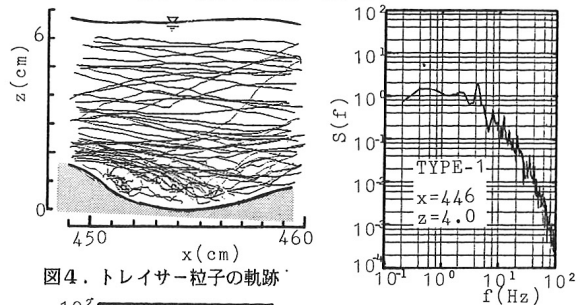


図4. トレイサー粒子の軌跡

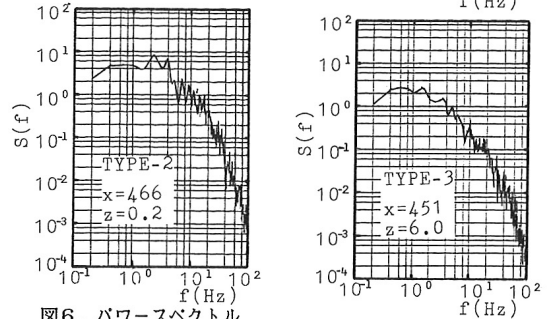


図6. パワースペクトル

<参考文献> 1) A.J.Raudkivi: STUDY OF SEDIMENT RIPPLE FORMATION, ASCE(1963). 2) 禰津 中川ら: 開水路段落ちにおける剝離流の乱流構造に関する研究, 第30回水講(1986). 3) Li-San Hwangら: SHEAR MEASUREMENT TECHNIQUE FOR ROUGH SURFACES, ASCE(1963)