

非定常流れ場における掃流過程に関する実験的検討

京都大学工学部 正 員 中川博次
 京都大学大学院 学生員 後藤仁志
 京都大学大学院 学生員 〇仙波 克

1. はじめに 実際の移動床場は非定常・非一様な場であり、これまでの定常等流下での流砂モデルを援用するに当たっては、援用に伴う誤差がどの程度であるかを知る必要がある。本研究は、その手始めとして、空間的には一様で時間的に非定常な場である振動流・一方向流共存場における掃流過程について、時間軸上に展開された確率モデルを通して実験データに基づき考察することを目的とする。

2. 実験概要 実験は、上下流端に一方向流の流出入口を有するアクリル製の重力式U字管振動流装置(図-1)を用いて行われた。水路水平部の移動床区間のほぼ中央 20cmX20cmの領域を水路上方からビデオカメラで撮影して、砂粒子の移動状況を記録し、ビデオ画像から砂粒子の移動開始時刻と運動軌跡を読み取ることににより、種々の特性量を把握した。実験条件を表-1に示す。

3. 実験結果 pick-up rate 及び deposit rateの位相別変化を図-2に示す。pick-up rateは、加速期の初期に急増して $\pi/3$ 付近で最大値をとった後、緩やかに減少し、非対象分布となっている。pick-up rateは、U字管の水面の移動速度に対してばかりでなく、底面付近の流速に対しても位相の進みを示している。一方、deposit rateの位相別分布は、pick-up rateのそれと線対称の(すなわち pick-up rateの分布を折り返したような)関係にあり、緩やかに増加して急に減衰する特性を有し、pick-up rateに比べて広い範囲に分布している。

次に、moving periodの特性を図-3に示す。moving periodは、平均値・標準偏差とも、どのケースも単調減少傾向を示しており、(i)早い時刻に移動を開始した砂粒子ほど平均的には長時間移動すること、(ii)移動時間のばらつきは移動開始時刻が早いほど大きいことが理解できる。(ii)については、移動開始時間が長いほど河床面に不規則に存在する突起と衝突する回数もふえ、急激な衝突で運動量を奪われ停止してしまう砂粒子が生じることと関係していると思われる。

4. pick-up rateからdeposit rateへの変換過程 空間的に非一様・時間的に定常な場合の掃流過程における中川・辻本の非平衡流砂モデルのdeposit rateは、式(1)で定義される。ここに、 $p_s(x)$ は pick-up rate、 $f_s(\eta | x)$ は位置 x でpick-upされた砂粒子のstep length η の確率密度関数である。

一方、空間的には一様で時間的に非定常な場合の掃流過程における時刻 t の瞬間deposit rateは、式(2)で与えられる。ここに、 $p_s(t)$ は時刻 t のpick-up rate、 $f_r(\tau | t)$ は時刻 t に pick-up された砂粒子の moving period τ の確率密度関数である。式(2)は、式(1)を時間軸上で展開したものと考えられ、時間を変数として式(1)と同様の形式で記述される。

次に、moving period の確率密度関数を実験結果から検討する。まず、移動開始時刻の条件付き moving periodの確率密度関数(実測例:図-4)を式(3)で近似する。ここに、 T_m は移動開始時刻 ξ での平均 moving period、 T_0 は $\xi=0$ における T_m 、 T_c は平均moving period T_m の移動開始時刻 ξ 軸上での平均値、 t_p は分布がピークをとる時刻である。決定すべきパラメータは T_0 、 T_c 、 t_p であるが、これらのパラメータと $f_r(\tau | \xi)$ との関係を概念的に示したのが図-5である。moving periodの確率密度関数は移動継続時間 τ と移動開始時刻 ξ との同時確率密度関数として定義され、この同時確率密度関数を $\xi=\xi_0$ 平面で切った切り口(図-4(a))が移動開始時刻 ξ_0 の条件付き確率密度関数となっている。図-4(a)のハッチを施した部分が実験から得られる分布であり、実線が近似曲線を示している。また、個々の砂粒子の moving periodの移動開始時刻別の平均値が $T_m(\xi)$ であり、更にこれを ξ 軸方向に平均化すると T_0 が求められる。この関係は図-4(b)の $\xi-T_m$ 平面に示されている。この関係を調べたのが図-6であるが、指数分布が概ね良好な近似を与えることがわかる。

Hiroji NAKAGAWA, Hitoshi GOTOH, Masaru SENBA

pick-up rateをsin型の分布で与え、式(2)を数値積分すると、図-7のようなdeposit rateが得られる。計算結果(図-7)と実験結果(図-2)を比較する。(i)実験結果からは、振動流の影響が強まるに連れて $\hat{p}_d/\hat{p}_s$ の増加が認められるが、計算による $\hat{p}_d/\hat{p}_s$ のほぼ一定ないしは漸減の傾向にあり実験結果と一致しないものの、(ii)実験結果にみられる両分布の交点の降下は、良好に再現されており、(iii)実験結果に見られる両分布のピーク間のlagの増加についても、良好に再現されている。

5. おわりに 本研究では、pick-up rateの時間変化からdeposit rateの時間変化への変換過程についての解釈が時間軸上で可能であることを示し、実験データを用いてmoving periodの確率密度関数を決定することで、先の変換過程にみられる定性的性質がほぼ再現可能であることが示された。今後は、実験データの収集に努めるとともに、モデル化の検討を更に進めたい。

表-1

Run	水深H(cm)	u_c (cm/sec)	U_m (cm/sec)	流速比 U_m/u_c	周期T(sec)
1	7.0	18.0	32.81	1.82	4.0
2	10.5	18.0	41.01	2.28	4.0
3	14.0	18.0	43.74	2.43	4.0

注) U_m = 粒子に作用する流速振動の代表値 ($y=d/2$ における値), u_c = 一方向流の平均流速

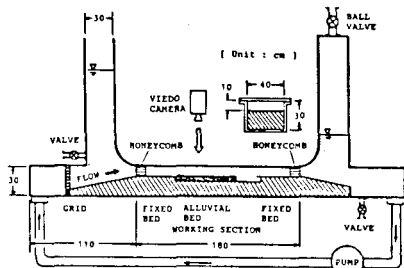


図-1

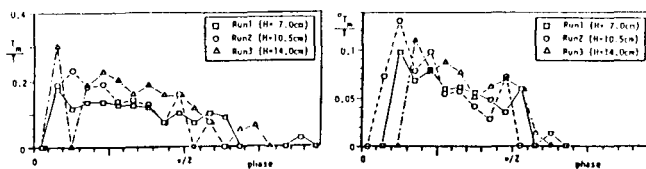


図-3

$$p_d(x) = \int_0^{\infty} p_u(x-\lambda) f_m(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$p_d(t) = \int_0^{\infty} p_u(t-\tau) f_m(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$f_m(t|\xi) = \begin{cases} \frac{1}{t_p/2 + T_m(\xi)} \frac{t}{t_p} & (0 < t \leq t_p) \\ \frac{1}{t_p/2 + T_m(\xi)} \exp\left(-\frac{t-t_p}{T_m(\xi)}\right) & (t_p < t) \end{cases} \quad (3)$$

$$T_m(\xi) = T_0 \exp\left(-\frac{\xi}{T_c}\right)$$

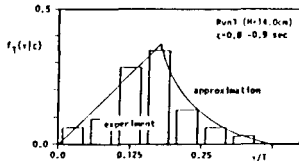


図-4

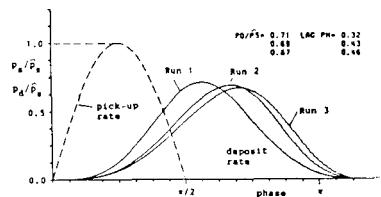


図-7

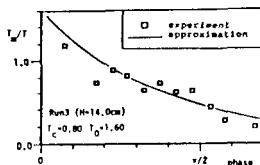


図-6

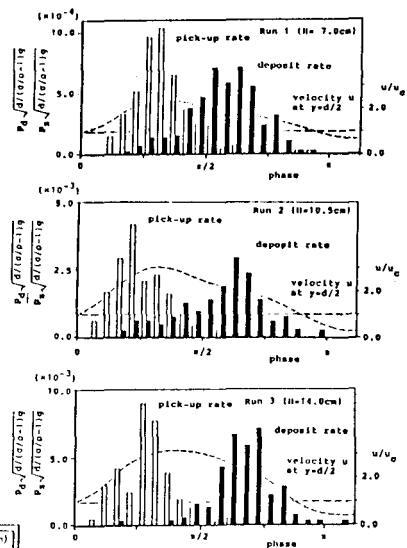


図-2

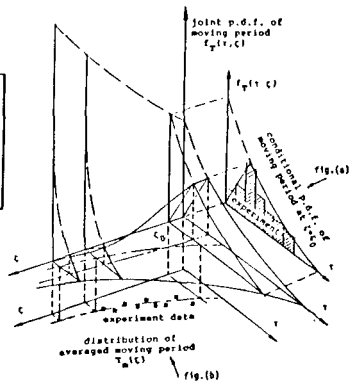


図-5