

粒子の移動速度と体積濃度分布に注目した bed material load の統一評価の試み

早稲田大学大学院 ○ 奥村響祐
 早稲田大学大学院 森 彩葉
 早稲田大学大学院 峰村諒太郎
 早稲田大学大学院 (当時) 西岡佳太
 早稲田大学理工学術院 関根正人

1. 序論

流砂に関する主な研究は1980年代まで行われて、当時の研究が現在の体系の基礎となっている。近年ではこれらを踏まえた河床変動計算等の技術の開発により、実務上必要な情報が計算によって得られるようになってきている。しかし、流砂現象の全てが当時の研究によって解明されたわけではなく、あくまでも限られた範囲内の体系化に留まっている¹⁾。例えば、Bed material loadの移動は河床を起源とする一つの運動であるにも関わらず、その複雑さから便宜的に掃流砂と浮遊砂に区別して取り扱われてきた。当研究室では、当時と比較し急速に発展している計測技術を用いて両者の区別を排した新たな統一理論の構築を目指して研究を続けている。これまでの研究から、ハイスピードカメラやPIV解析を用いて粒子と水流の同時計測を行うことにより、粒子の移動速度や体積濃度が、その運動形態に依らず河床から連続した分布として表されることを示してきた²⁾。本研究では、移動限界の概念を考慮に入れて結果を再構成している。また、関根ら³⁾が明らかにした掃流砂の移動層厚と掃流力の関係が、浮遊砂を含む掃流力範囲内でも成り立つと仮定し、両者の関係を調べ、既往研究との比較を行った。

2. 実験概要

実験はこれまでの研究と同様²⁾に、全長6.0 m、幅0.2 m、水路勾配1/150の亚克力製循環型開水路を用いた。水路の上流端から2.0 m、下流端から1.0 mを固定床区間とし、表面に高さ2 mmのピラミッド状の突起を有するゴム板を張り付けている。また、上流端から2.0~5.0 mの区間に深さ50 mmの凹部が設けられており、そこに表-1に示す模擬河床材料を充填することにより、移動床区間とした。本研究では、模擬河床材料として三

表-1 粒子特性

	粒径 D (cm)	水中比重 R	河床濃度 C_0	限界摩擦速度 u^*_c (cm/sec)	最終沈降速度 w_o (cm/sec)
ガラス	0.20	1.50	0.61	3.52	25.30
くるみ	0.15	0.28	0.48	1.22	5.05
ポリスチレン	0.20	0.02	0.61	0.43	2.20

種類の粒子を用いることにし、掃流力を表す指標の一つである摩擦速度 u^* と沈降速度 w_o の比のより広い範囲での検討ができるようにしている。具体的には、ガラス粒子を用いた実験では典型的な掃流砂、ポリスチレン粒子を用いた実験では浮遊砂が卓越した流れについて検討した。一方、くるみ粒子を用いた実験では両者が混在するような流れを作ることができ、これについての検討も行っている。各粒子の特性は表-1のとおりである。くるみ粒子の粒径は粒度試験より算出した $D_{60} = 1.5$ (mm)を代表値とした。また、実験中は動的平衡状態の流れが維持できるように留意し、模擬河床材料と同一の粒子を上流端から供給する際、その供給量が下流端で回収した流出量と等しくなるようにしている。各実験条件は表-2に示す通りである。

また、本実験はレーザー光源(カトウ光研社製)ハイスピードカメラ(カトウ光研社製)を用いてPIV解析を行った。水路壁面に平行にレーザーシートを設置し、その区間を、トレーサー粒子としてダイヤイオンHP20SS(三菱ケミカル社製)を流した状態でハイスピードカメラで撮影を行った。また、粒子の運動は、ハイスピードカメラで撮影した画像から、特定の時間間隔で粒子の位置を描画することにより、粒子の移動速度や存在位置を測定した。また、撮影された時間内の粒子群の位置から判断して、動くことのない粒子の頂部を河床面とし、その半粒径分だけ下を高さの基準として、これを理論河床と呼び、高さの基準とした。解析に当たっては、理論河床から情報の空間を一定の厚さを持つ複数の層に分割し、層毎の粒子の平均移動速度と体積濃度を算出してその鉛直分布を求めた。なお、粒子の体積濃度に関して、河床面より下を河床面濃度 C_0 とし、別途測定した値を用いた。

3. 流砂の運動特性と鉛直方向分布

まず最初に、粒子の移動層厚 h_s について考察を行う。ここでは、Sekineら⁴⁾の研究に倣って $u^*(1 - u^*_c/u^*)^{1/2}$ の式形で摩擦速度 u^* を考慮する。この指標は、摩擦速度が移動限界値に等しくなると0となる。図-1には、本実験の結果に加えて既往研究³⁾の結果もあわせて表している。また、図中の曲線は式(1)のように表される。この図より、粒子の移動層厚 h_s は移動形態に依らず同一の関係を満足することがわかる。

表-2 実験条件及び実験結果

	使用粒子	流量 Q (L/sec)	堰高 (cm)	水深 h (cm)	移動層厚さ h_s (cm)	摩擦速度 u^* (cm/sec)	A_p	B_p	k_p ($\times 10^{-4}$)
Case 1	ガラス	5	-	4.63	0.62	7.88	2.27	3.25	0.89
Case 2	ガラス	5.5	-	4.95	0.86	8.59	2.12	2.81	1.70
Case 3	くるみ	2	3.5	5.00	0.72	2.00	4.84	5.70	0.75
Case 4	くるみ	3	3.5	5.60	1.60	3.92	2.68	2.66	1.98
Case 5	ポリスチレン	2	6.8	8.30	1.79	1.45	2.78	2.80	0.78
Case 6	ポリスチレン	3	6.8	9.70	1.93	2.05	2.80	2.72	1.15

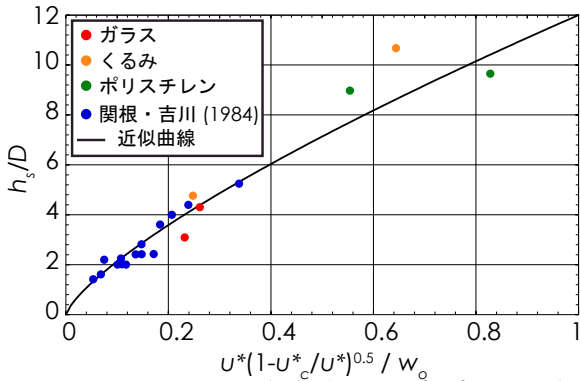


図-1 粒子の移動層厚 h_s と掃流力の関係

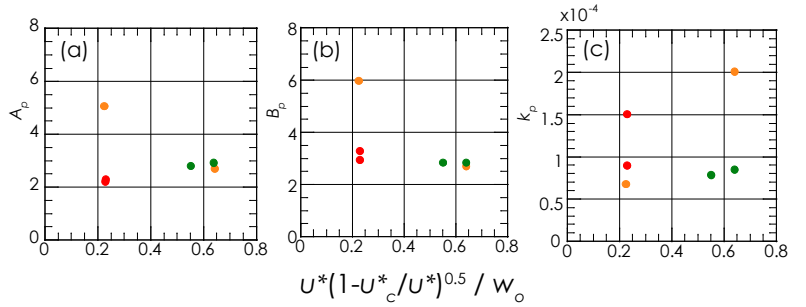


図-3 式中の係数 A_p , B_p および k_p の値

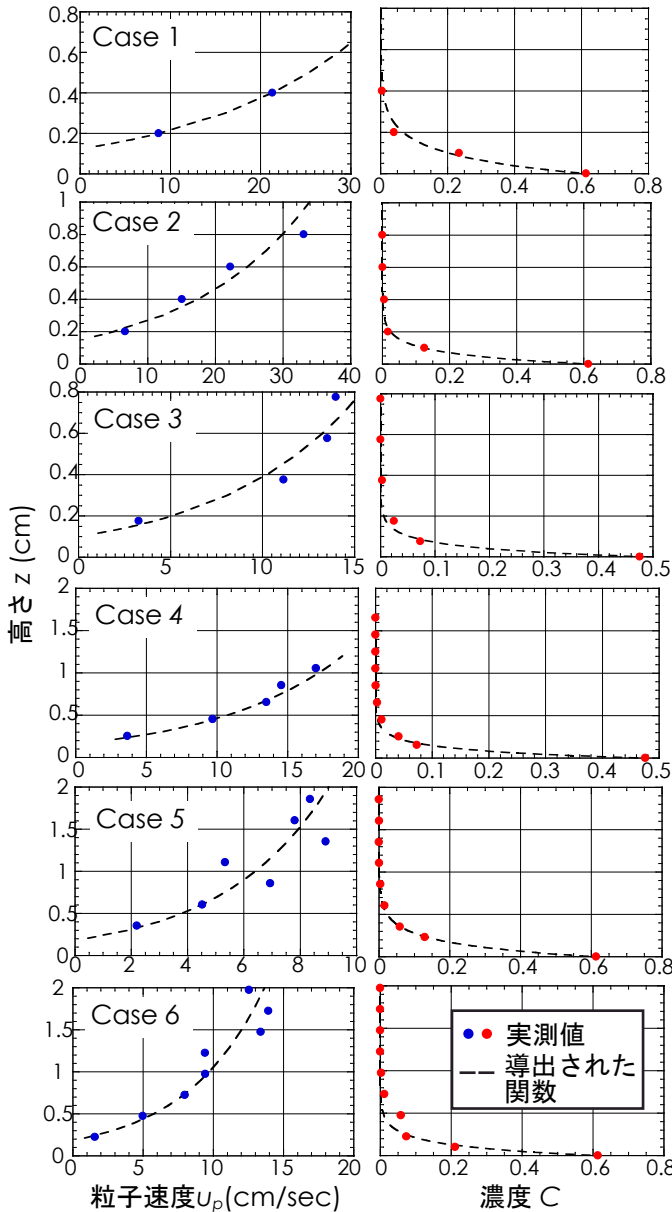


図-2 粒子の平均移動速度 u_p と体積濃度 C の鉛直分布

$$\frac{h_s}{D} = 12 \times \left(u^* \sqrt{1 - \frac{u_c^*}{u^*}} \right)^{3/4} \quad (1)$$

次に、図-2には、粒子の体積濃度と平均移動速度の鉛直方向分布を示す。この図より、粒子の体積濃度や平均移動速度は、運動形態に依らず河床から連続した鉛直方向分布となることがわかる。ここでは、粒子の移動速度 u_p ならびに体積濃度 C を表す関係を

次のような式形で表すことにする。 C_0 は底面での粒子の体積濃度を、 U_p は移動速度の移動層内の平均値をそれぞれ表す。

$$C(z) = C_0 \times \exp \left[-k_p \times \left(\frac{u^*}{w_o} \sqrt{1 - \frac{u_c^*}{u^*}} \right)^m \times \left(\frac{h}{D} \right)^n \times \frac{z}{h_s} \right] \quad (2)$$

$$u_p(z) = U_p \times \left(A_p - \frac{B_p}{\ln(10)} \right)^{-1} \times \left[A_p + B_p \times \log_{10} \left(\frac{z}{h_s} \right) \right] \quad (3)$$

$$\bar{U}_p = u^* \sqrt{1 - \frac{u_c^*}{u^*}} \times \left(\frac{h}{D} \right)^l \times \left[A_p - \frac{B_p}{\ln(10)} \right] \quad (4)$$

これらの式形に関しては現時点で完全なものとはいえないが、現検討段階としては、各指数を $l=1/4$, $m=-5/4$, $n=-3$ とすると、式中の係数 A_p , B_p , k_p は図-3に示すような値となり、ばらつきはあるものの掃流力に依らず概ね一定の値をとっていることも可能である。ただし、未だ検討の余地はあるため、指数の値とあわせて今後慎重に検討を行っていく予定である。最後に、得られた結果の整合性を確認するため、層毎に得られた体積濃度と平均移動速度に各層の厚さを掛けた積の総和を求め、これと下流端で測定された単位幅流砂量の値とを比較したところ、両者が比較的良好な対応関係にあることがわかった。

4. 結論

本論文は、計測の結果を踏まえて、Bed material loadの移動層厚、移動速度、体積濃度についての詳細な解析を行い、その結果をまとめたものである。既存の理論体系との整合性を確認するとともに、あくまでも仮にはあるものの、それぞれが表す関係式を誘導している。これにより少なくとも言えることは、移動形態に依らずBed material loadをひとつの移動として取り扱いことはできそうである、ということであり、体積濃度に関しては河床濃度と連続した鉛直分布になる、ということである。今後はさらに大きな掃流力にまで範囲を広げる必要があり、さらに検討を続けていく。

参考文献

- 1) 関根正人：「流砂研究の今後について考える」、砂防学会誌, 第75巻 第5号 (通巻364号), 1-2, 2023年1月。
- 2) 関根正人・西岡佳太・奥村響祐・森彩葉：Bed material loadの運動の特性と水流の乱流構造に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.82, No.16, 25-16036, 2026。
- 3) 関根正人, 吉川秀夫:掃流砂の流送機構に関する研究, 土木学会論文集, 第351号, II -2, pp.69-75, 1984年11月。
- 4) Sekine, M., Kikkawa, H.: Mechanics of Saltating Grains. II, Journal of Hydroraulic Engineering, Vol. 118, No. 4, 536-558, 1992。