

Bed Material Load の流送機構に関する研究

関根正人¹・小川田大吉²・佐竹宣憲³

¹正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科
(〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 (現在, 日本工営 (株))

³学生会員 早稲田大学 理工学部土木工学科 (現在, 東洋建設 (株))

Bed material loadの運動は、従来よりbed loadとsuspended loadに分けて研究され、各々独立した運動として取り扱われてきたが、本研究では、このような人為的な分類を排して、Bed material loadの運動を一括して解析し、その流送特性を系統的に検討した。その結果、両者のいずれにも属さないタイプの運動が存在することや、従来の分類でいうsuspended loadが卓越する流れ場における底面付近の土砂移動についても、bed loadとは明らかに異なり、乱れの影響を強く受けた運動となっていること、などが明らかになった。これは、従来の考え方の枠組みを逸脱するものであり、従来理論に限界があることを示した。

Key Words : *bed material load, saltation, suspended load, turbulent velocity fluctuation, numerical simulation.*

1. 序論

河川を流送される土砂は、一般にBed material loadとWash loadに分類される。このうち、本研究で対象とするBed material loadは、河道を形成していた土砂の流送を指し、一連の運動を経て再び河道形成材料へと戻るため、Bed material loadとしての土砂移動は河道自体の時空間的变化と直接関係する。Bed material loadに関する従来の研究の根本的な考え方は、これを便宜上、掃流砂と浮遊砂に分けて取り扱おうとするものであり、流砂研究の最終的な目的は、その各々の流送土砂量の精度よい予測方法を確立することにある。このような点からすると、今日、数多くの研究の蓄積により、その目的は一応達成されたといえる。

しかし、いま、流送土砂量の予測という観点からではなく、土砂粒子の運動の理解という観点から、これまでの研究の流れを捉え直してみると、いくつかの問題点があることに気づく。まず、掃流砂が卓越し、浮遊砂が存在しない限界掃流力付近の流れにおける土砂移動に関しては、粒子スケールの運動の解析により、その流送土砂量のみならず、土砂の運動特性に到るまで十分な理解が得られていると考える。これに対して、浮遊砂が卓越する流れにおける

土砂移動に関しては、(1)河床面付近の薄い層内には掃流砂としての土砂移動が、それより上方では浮遊砂としての土砂移動があるとした取り扱いをし、(2)浮遊砂に関しては、その運動のランダム性から、いわゆる拡散現象と見なし、拡散方程式に基づく解析が行われてきた。その結果、有名なRouseによる濃度分布式が導かれる¹⁾などとして、浮遊砂量の予測が可能となったが、そもそも沈降する性質を持ち、かつ有限の大きさをもった土砂粒子の運動を、染料の拡散と同様の方法で解析できるのかという根本的な問題がある。また、Bed material loadが便宜上掃流砂と浮遊砂に分けられているに過ぎず、本来、一連の運動であることを考えると、掃流砂は運動方程式に基づいて、また、浮遊砂は拡散方程式に基づいてそれぞれ解析されるという点に、物理的な不整合がある²⁾と考える。また、掃流砂・浮遊砂という区分けをしたことに伴い、物理的な意味の明確でない基準点濃度という量を考えなければならなくなった点も問題である。この基準点濃度の予測精度は、浮遊砂量の予測精度に顕著な影響を与えるが、提案されている基準点濃度の予測式の間に1オーダー程の開きがあるのが現状であり、依然として解決し難い問題である。

このように、浮遊砂が卓越する掃流力範囲におけ

る土砂の運動を理解しようとする、従来の研究では必ずしも十分でない点が多々見られる。近年、上記の点に鑑みてか、数多くの研究がなされ、問題のいくつかは解消されつつある。まず、浮遊砂としての運動に限れば、1980年代中頃から、藤田・芦田³⁾、大本・平野⁴⁾、関根・吉川⁵⁾、中川・辻本・後藤⁶⁾によって、浮遊砂の運動を対象とした新たな研究が進められ、拡散方程式ではなく、運動方程式に基づく解析が行われた。ただし、新たな解析方法が示されるか、あるいは運動の一面が明らかにされたものの、運動特性の詳細な検討には至らなかった。さらに、中川・辻本ら⁷⁾は、Bed material load が掃流砂・浮遊砂が相互に入れ替わる運動であるとの認識から、Saltation model と確率論的手法とを組み合わせる用いることにより、Saltation から浮遊砂への遷移機構について検討し、掃流砂と浮遊砂の間の相互交換に関する考え方を示した。また、辻本⁸⁾は、その成果を基に、浮遊砂の挙動に関する確率論的検討を行い、濃度拡散係数についての興味深い結果を示している。このように、掃流砂・浮遊砂という区分けを前提とした枠組みの中での検討が、現在急速に進んでいる現状にある。

こうした近年の流砂研究の進展の中で、著者らは、次のような疑問点が残されていると考える。すなわち、これまで注目されてきた掃流砂あるいは浮遊砂としてのそれぞれの運動が卓越する掃流力範囲ではなく、その中間に位置するような掃流力に対応した土砂の運動は、掃流砂と浮遊砂が互いに滑らかに入れ替わる形式の運動ではなく、これまでの流砂の枠組みでは捉えられない異なる特性をもった運動になっている可能性がある。そして、これまで広く認識されてきた典型的な掃流砂あるいは浮遊砂が現れるのは、限られた掃流力範囲に対してであり、両者に関する知見だけでは全掃流力範囲にわたる土砂の運動を説明できないのではないかと考える。また、たとえ浮遊砂が卓越する掃流力範囲であっても、底面付近の土砂の運動は、典型的な掃流砂とは異なった特性を持つ運動となっている可能性がある。

本研究では、このような点を含むいくつかの疑問点に対する答えを見出し、かつ、従来研究における問題点を別の角度から解釈するためには、従来とは異なる視点からのアプローチが必要であると考え、従来の掃流砂・浮遊砂という便宜上の枠を取って取り去って、純粋に力学的興味から Bed material load としての土砂粒子の運動を検討し直すことを試みる。具体的には、限界掃流力付近から浮遊砂が卓越する掃流力までの幅広い範囲にわたる Bed material load と

しての一連の運動を、水流の乱れの作用を考慮に入れながら、同一の運動方程式に基づいて一括して解析し、土砂の運動特性を明らかにすることを目指す。ここでの解析は、実験による検討が容易でないことを考慮して、数値実験による検討を行うものとした。解析に用いたモデルは、著者らの Saltation model を基礎とし、水流の乱れの影響を考慮に入れて再構築されたものである。本論文では、掃流力の変化に伴い、水流の乱れが土砂の運動に及ぼす影響がどのように変化するかを系統的に評価し、掃流砂のみが生起する場合と、それとは異なる運動形式の土砂移動が生起する場合、さらには、これまで典型的な浮遊砂として認識されてきた運動が卓越する場合について、それぞれの境となる条件を探った。さらに、Bed material load を一連の土砂移動として見た場合の、土砂の移動速度分布や濃度分布などの流送特性が、どのように変化するかについて検討した。

2. 解析モデル

(1) 概要

Bed material load としての土砂の運動を一つの運動方程式に基づいて解析する上で特に重要となるのが、粒子に作用する水の乱れの影響であり、この点が従来の Saltation 運動の解析とは大きく異なる点である。そこで、本研究では、著者らの Saltation model に、簡略化された乱れの生成モデルを加えることで、新たな解析モデルを構築した。

本解析モデルの基になった著者ら⁹⁾の Saltation model の特徴は以下の通りである。すなわち、(1)マクロ的には平坦河床を想定するが、ミクロ的には土砂の粒径スケールでの凹凸が存在するランダム河床上での土砂の運動を解析する、(2)移動土砂粒子と河床構成粒子とのランダムな衝突に起因して生じる運動の三次元性を考慮できるような三次元モデルである、(3)土砂を球形粒子としてモデル化する、(4)時間平均の主流速分布については、水深方向に対数分布則に従って変化するものとし、二次流についてはこれを無視する、(5)ランダム河床を与えるため、移動を開始した粒子が再び河床に停止するまでの一連の運動を追跡できる。上記(1)のランダム河床モデルについては、実験事実に基づいて構築されたものであり、その適用性については既に検証済みである。なお、当初の解析モデルは、One and half way の粒子～流体モデルであったが、ここでは解析の簡略化のため、敢えて One way モデルのままに止めた。本論文では、紙面の関係から、上記の点の詳細については別論文⁹⁾を参照するものとして、新たにモデルに組み込

んだ sub-model についての説明のみを記す。

(2) 土砂粒子の運動方程式

土砂粒子の運動方程式⁹⁾は、式(1)のように表される。ここで、Basset項は無視している¹⁰⁾。

$$\rho\sigma_s V \frac{\partial \bar{u}_p}{\partial t} = \rho(\sigma_s - 1)V \bar{g} + \rho V \frac{\partial \bar{u}_f}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho C_D A |\bar{u}_r| \bar{u}_r \\ + \rho V C_M \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho C_L A \left((u_{rx})_T^2 - (u_{rx})_B^2 \right) \bar{i} \quad (1)$$

ここに、 ρ は水の密度、 A は粒径 D の球の投影面積($=\pi D^2/4$)、 V は粒子の体積($=\pi D^3/6$)、 \bar{u}_r は流体の粒子に対する相対速度ベクトル($=\bar{u}_f - \bar{u}_p$)であり、 $\bar{u}_r = (u_{rx}, u_{ry}, u_{rz})$ のように定義される。さらに、式中の $(u_{rx})_T$ および $(u_{rx})_B$ は粒子のtopおよびbottomにおけるベクトルの x 方向成分である。また、重力加速度を g 、河床傾斜角を θ とすれば、重力加速度ベクトル \bar{g} は $\bar{g} = (g \sin \theta, 0, -g \cos \theta)$ となり、 \bar{i} は鉛直上向きの単位ベクトル $(0, 0, 1)$ を表す。 C_D 、 C_L および C_M はそれぞれ抗力・揚力および付加質量係数である。抗力係数については、粒子Reynolds数 $R_{ep} (= |\bar{u}_r| D / \nu)$ の関数となることが知られており、ここでは次式の関係を用いる。

$$C_D = 24/R_{ep} + 3/\sqrt{R_{ep}} + 0.34 \quad (2)$$

揚力係数については、Wibergら¹¹⁾に倣って $C_L = 0.2$ とした。また、付加質量係数については、球形粒子を想定すれば、 $C_M = 0.5$ となる。

(3) 乱れの時系列データの生成

次に、本解析モデルにおける土砂粒子を取り巻く流体塊のLagrange的な乱れの評価法は、次の通りである。乱れの構造については、中川・瀬津¹²⁾らにより詳細な知見が得られており、本研究では、これらの乱流構造に関する研究成果を踏まえて、現象の理解のために最低限必要であり、かつ、それが土砂輸送の本質に関わると考えられる特性についてのみ考慮した簡易的なモデルの構築を心がけた。これは、モデル化に当たり、粒子と流体とのinteractionという極めて複雑な問題があり、これを十分な形でモデルに組み入れることが容易でない現状の下では、乱れのモデルをあまり複雑化させても解析精度の上での整合性がとれないと考えたためであり、本研究の目的である土砂の流送機構の本質を理解する上では、この程度のモデルで十分であると考えている。さら

に、土砂粒子についての運動方程式中の抗力・揚力については、厳密には粒子を取り巻く流体の速度および圧力の時空間的な不均一さの結果として生じるものであるが、従来より依拠されてきた式(1)では、経験的に定めた係数を用いてこれらの項を評価している。そこで、式(1)の運動方程式に基づく限り、流体の乱流成分の評価法ばかり厳密にすることには疑問があると考えている。

このような趣旨から、主流 x および鉛直 z 方向への乱れ成分の時系列データを次のように生成させることにした。

まず、 x 方向への乱れ成分 $u'_f(t)$ については、 δt 時間前の乱れ成分 $u'_f(t - \delta t)$ との間の自己相関関係が明らかにされていることから、マルコフ連鎖の考え方にに基づき、次のように定式化する。すなわち、

$$u'_f(t) = \rho_i u'_f(t - \delta t) + \phi_u \quad (3)$$

ここに、 ρ_i は自己相関係数であり、 T_L を乱れのLagrange的な寿命時間として、 $\rho_i = \exp(-\delta t / T_L)$ と定義される。また、 T_L は次のように与えることができる¹³⁾。

$$T_L = \begin{cases} \frac{0.52}{\sigma_u} \sqrt{zh} & (z/h \leq 0.6) \\ \frac{0.4}{\sigma_u} h & (z/h > 0.6) \end{cases} \quad (4)$$

また、式(3)中の ϕ_u はランダム成分である。式(3)より、 $u'_f(t)$ の生起確率密度分布は、式(5a)で表される条件付き分布として表され、これに基づき正規乱数を発生・処理することにより、 $u'_f(t)$ を生成させることができる。

$$p(u'_f(t) | u'_f(t - \delta t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma'_u} \exp \left[-\frac{(u'_f(t) - m_u)^2}{2\sigma'^2_u} \right]$$

$$m_u = \rho_i u'_f(t - \delta t)$$

$$\sigma'_u = \sqrt{1 - \rho_i^2} \times \sigma_u \quad (5a, b, c)$$

ここに、 σ_u は x 方向への乱れ強度である。

また、 z 方向への乱れ成分 $w'_f(t)$ については、同時刻の $u'_f(t)$ との間に強い相互相関性があることが知られており、相互相関係数 ρ_{uw} を用いて、式(3)と類似の関係が得られる。そこで、 $w'_f(t)$ についても式(6a)で表される確率密度分布に基づき生成させること

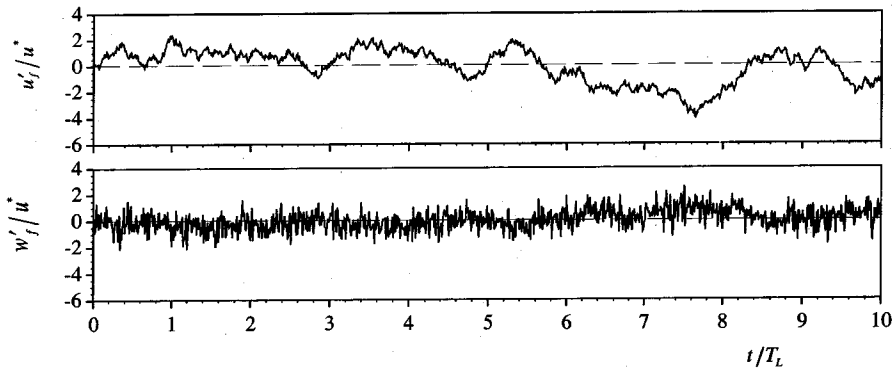


Fig. 1 生成された水の乱れの時系列データの一つ例 ($z=h/2, T_L=0.407\text{sec}$)

ができる。

$$p(w'_f(t) | u'_f(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma'_w} \exp \left[-\frac{(w'_f(t) - m_w)^2}{2\sigma_w'^2} \right]$$

$$m_w = \rho_{uw} (\sigma_w / \sigma_u) \times u'_f(t)$$

$$\sigma_w' = \sqrt{1 - \rho_{uw}^2} \times \sigma_w \quad (6a, b, c)$$

ここに、 σ_w は z 方向への乱れ強度である。乱れ強度については、中川・瀬津により次の関係式が示されている¹²⁾。

$$\begin{aligned} \sigma_u &= 2.30 u^* \exp(-z/h) \\ \sigma_w &= 1.27 u^* \exp(-z/h) \end{aligned} \quad (7a, b)$$

また、相互相関係数 ρ_{uw} については、式(8)で表される¹³⁾ことが知られている。

$$\rho_{uw} = \frac{\overline{u'_f w'_f}}{\sigma_u \sigma_w} = -\frac{0.342(1-z/h)}{\exp(2 \cdot z/h)} \quad (8)$$

以上のように、式(5)、(6)に基づき、生じさせた正規乱数を処理することにより、乱れの二成分を生成しようとするのが本モデルである。生成された乱れの時系列データの一つを Fig. 1 に示している。

なお、乱れの横断方向成分については、他の成分との相関関係が顕著でないこと、これを考慮することは瞬時的・局所的な流体の連続条件まで考えなければならず、複雑さを増すこと、さらには、この横断方向成分がここで対象とする土砂の流送特性の理解の上では重要とは考えられないこと、などの理由からこれを特に考慮することをしていない。最後に、前報¹⁴⁾で用いたモデルとの違いについて記す。前報では乱れ強度、相互相関係数、乱れの寿命時間等の特性量についてはその水深平均値を用いてモデル化したが、本モデルではこれらの z 方向への変化を

考慮した点に大きな相違がある。

3. Bed material load の運動に及ぼす水流の乱れの影響評価

本章では、次章の流送特性に関する検討に先立って、水流の乱れが Bed material load の運動軌跡に及ぼす影響についての詳細な検討を行うため、以下のような解析を行った。すなわち、ランダム河床上から、任意の初速度ベクトルで跳ね上がった土砂粒子 ($D=0.04\text{cm}$, $\sigma_s=2.65$) が、再び河床上に着地するまでの一跳躍分の運動を追跡した。初速度ベクトルの与え方を変えて数種類の解析を行ったが、ここでは、初速度ベクトルの大きさを 20cm/sec. 、その方向を上向きに 60° とした場合の結果のみを示す。なお、本研究では、掃流力を表わす指標として、摩擦速度と土砂の沈降速度の比 u^*/w_o をとることにする。

まず、Fig. 2 では、 $u^*/w_o = 0.5, 1.5, 2.0$ に対して得られた典型的な運動軌跡を示した。図中には、参考までに、乱れの影響を取り入れずに計算した Saltation 軌道を太線で併記してある。この図より次のことがわかる。Fig. 2 (a) に示した $u^*/w_o = 0.5$ における運動軌跡は、Saltation 軌道からのわずかな偏倚が見られる程度のもに過ぎない。これに対して、掃流力が増大し、 $u^*/w_o = 1.5, 2.0$ となった場合の運動は、Fig. 2 (b), (c) に示すように、Saltation 軌道からの偏倚としてとらえられる範囲を逸脱し、水流の乱れの影響を顕著に受けた揺れるような軌道となることがわかる。

次に、水流の乱れが運動軌跡にどのような影響を及ぼすかについて定量的に検討する。Fig. 3 には、Fig. 2 (a), (b) に示した軌道のうちの一つを例にとり、鉛直方向への運動について解析した結果を示す。図

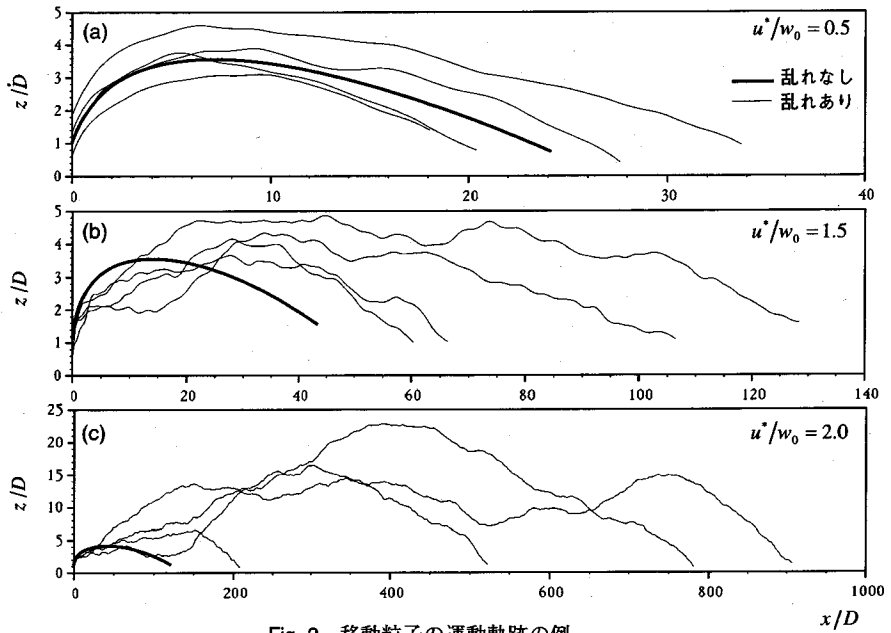


Fig. 2 移動粒子の運動軌跡の例

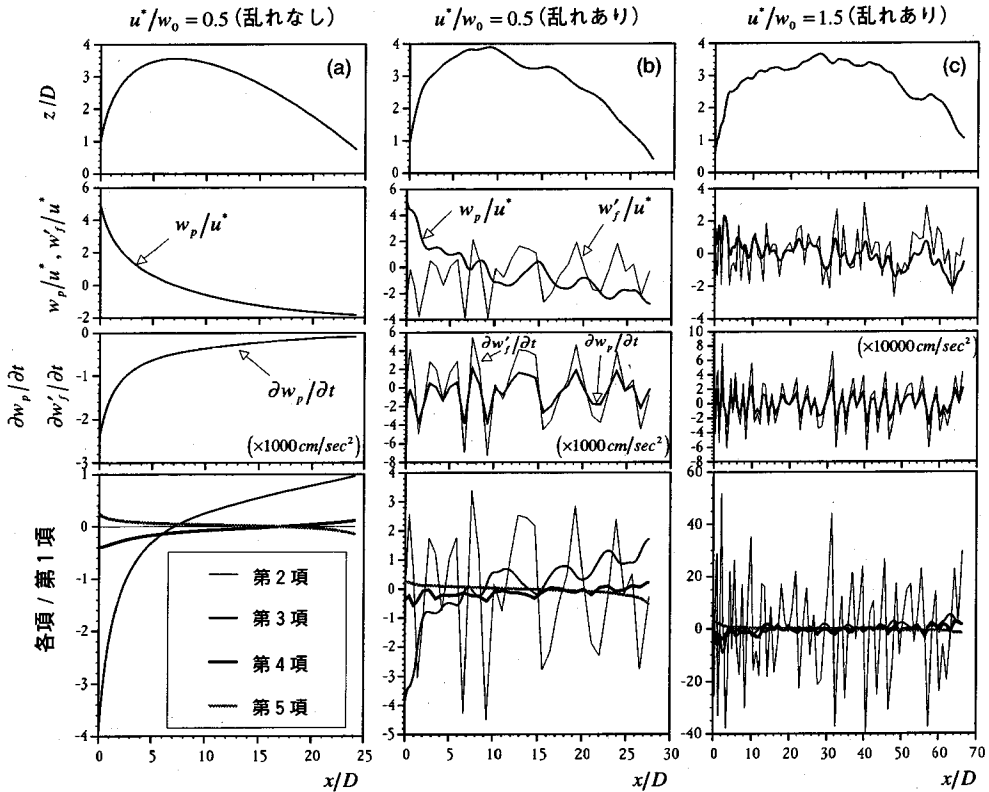


Fig. 3 一回跳躍における粒子の運動と水の乱れの影響の解析

には、土砂の移動中にどのような乱れを受け、その結果、運動方程式中の各項のオーダーがどのように変化したかを示している。なお、Fig.3 (a) には、Fig.3 (b) と同一の条件下で、乱れの影響を無視して行った解析結果を、参考のため併記した。Fig.3 より、次のことがわかる。すなわち、(1) u^*/w_0 の増大に伴い、水流の乱れに対する粒子の応答性がよくなる、(2) Fig.3 (b) より、いわゆるsaltation軌道からの偏倚は、瞬間的に強い乱れが生じた時に起こるわけではなく、むしろ大きな加速度を受けたときに起こると考えるべきである、(3) 運動方程式において、最も支配的であると考えられるのは、右辺第2項の水流の加速度項であり、掃流力の増加に伴い、この傾向は顕著となる。このことは、浮遊砂が卓越する領域における土砂輸送を、水流による拡散であるとした考え方の一端を裏付ける結果である。しかし、土砂の変動流速が水の乱れ成分と完全に一致することではなく、両者の相関関係が重力と乱れの作用との比を表わす u^*/w_0 の値によって変化する。このことが、従来の拡散理論において問題となった土砂の濃度拡散係数と水の乱流拡散係数との関係の、定量的な評価を難しくしている原因である。

以上のように、掃流力の増大に伴い、水流の乱れが土砂の運動に及ぼす影響は顕著になり、その軌跡はランダムなものとなることがわかる。

4. Bed Material Load の流送特性

(1) 運動軌跡

本研究では、Bed Material Load の流送特性を明らかにするために、広範囲にわたる水理条件および土砂粒径に対して、数値実験を行った。このうち本論文では、Table 1 に示す典型的な計算結果を例とし、これを用いて流送特性に関する検討を行う。

掃流力の変化に伴う運動の軌跡の変化を示したのがFig.4である。Fig.4には、それぞれの掃流力に対する軌跡のうち、典型的なものを表している。なお、図中の軌跡は、必ずしも移動開始から停止までのものを表しているわけではないことを付記する。

Fig.4より、以下のことがわかる。まず、Fig.4 (a) には、 $u^*/w_0 = 0.248$ ($\tau^* = 0.2$) に対する典型的なSaltation運動を参考までに示している（この場合に限る、比重 $\sigma_s = 2.5$ のガラスビーズを想定した計算結果である）。次に、 $u^*/w_0 = 0.5$ では、Fig.4 (b) のように軌跡に顕著なランダム性は現れず、その運動は依然としてSaltationであると判断される。しかし、掃流

Table 1 計算条件

case	u^*/w_0	D (cm)	h (cm)	h/D
A	0.248	0.5	20.0	40
B	0.5	0.04	20.0	500
C	1.0	0.04	20.0	500
D	1.5	0.04	20.0	500
E1	2.0	0.04	10.0	250
E2	2.0	0.04	20.0	500
E3	2.0	0.04	40.0	1000
F	4.0	0.04	20.0	500

Note : $\sigma_s = 2.5$, $\tau^* = 0.20$ (case A)
 $\sigma_s = 2.65$ (case B~F)

力が増大し、 $u^*/w_0 = 1.0$ となると、Saltation軌道に混じってランダムな跳躍が出現するようになる。その一跳躍間の移動距離は、粒径の数100倍に及ぶこともある。さらに、 $u^*/w_0 = 1.5$ になると、ランダムな大跳躍が頻繁に現れるようになるとともに、底面付近を移動する小跳躍にまで乱れの影響が現れ、典型的なSaltation軌道が見られなくなる。しかも、その跳躍高さが水深の5%に相当する $z/D = 25$ を越えることは稀であることから、この掃流力範囲における土砂移動が、典型的な掃流砂とも浮遊砂とも異なる第三の形式の運動となっていることがわかる。 $u^*/w_0 = 2.0$ および 4.0 では、運動のランダム性が強まり、従来より浮遊砂として捉えられてきた運動が卓越する。ただし、乱れの影響は底面付近の土砂移動にまで及んでおり、これは、浮遊砂が卓越する掃流力範囲であっても底面付近には掃流砂としての土砂移動があるとする従来の考え方とは矛盾する結果である。しかし、底面付近ほど水流の乱れ強度が大きく、活発な乱流混合が生じていることを考えれば、容易に予想できる結果であるといえる。

(2) 存在確率密度分布

Fig.4 に示したような一連の運動の解析を、数100~数1000個の粒子を対象に行い、得られたデータを統計処理することにより、土砂の流送過程に関する特性を知ることができる。

存在確率密度 $f(z/D)$ とは、ある高さ z/D に存在する移動土砂量の全移動土砂に占める割合を確率密度の形で表したものであり、

$$\int_0^{h/D} f(\zeta) d\zeta = 1; \quad \zeta = z/D \quad (7)$$

を満足する。さらに、これに移動土砂の総量を乗じ

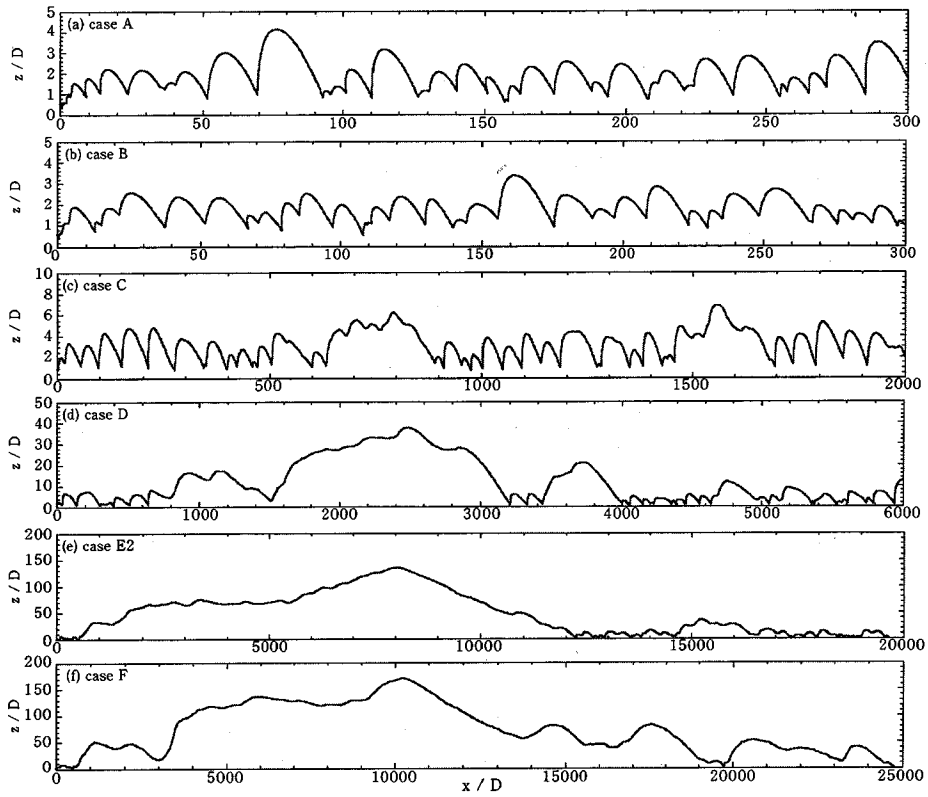


Fig. 4 Bed material load の運動軌跡

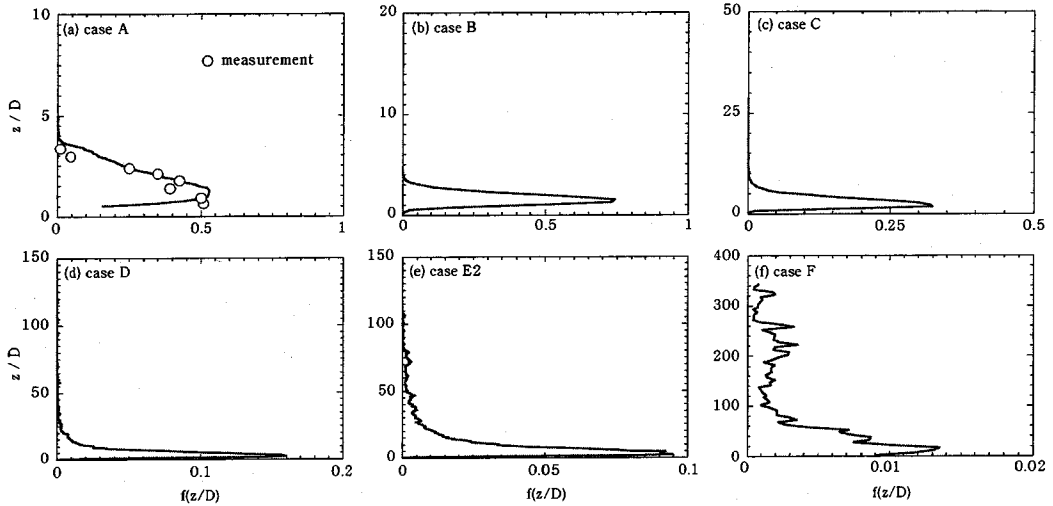


Fig. 5 存在確率密度分布

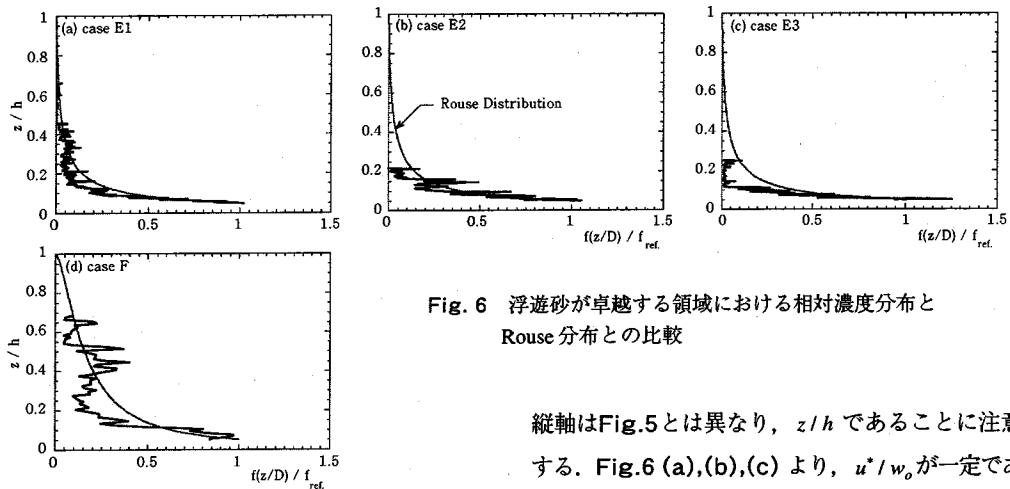


Fig. 6 浮遊砂が卓越する領域における相対濃度分布と Rouse 分布との比較

たものが濃度分布であるに注意を要する。

存在確率密度分布について検討した結果を Fig.5 に示す。図中の実線は、高さ方向に離散化された各区間毎の存在確率密度を求め、それを折れ線で結んだものであり、結果にばらつきが見られるのは、サンプリングしたデータの個数が必ずしも十分でなかったことを表している。しかし、本研究で目的とする検討を行うためには、この程度の結果でも支障はないと考えている。まず、Fig.5 (a) は、Saltation 運動に対する分布であり、関根らの実測値を○印で示している。また、Fig.5 (b),(c),(d),(e),(f) には、 u^*/w_o の増大に伴う分布形の変化が順に示されている。参考までに、Fig.5 の場合には $z/D=25$ の高さが水深の5%に相当する。Fig. 4 との関係から説明した通り、 $u^*/w_o=1.5$ 程度までは、従来より基準点高さとして定義されてきた高さを越えて土砂が移動することは稀である。

次に、浮遊砂としての運動が卓越する $u^*/w_o=2.0$ および 4.0 の場合を対象にして、分布の Rouse 分布との比較を試みる。Rouse により導かれた相対的な浮遊砂濃度分布式は、基準点高さを z_a 、その点での濃度を C_a として、式(8)で表される。

$$\frac{C(z)}{C_a} = \frac{f(z/D)}{f_{ref}} = \left(\frac{z_a}{h-z_a} \frac{h-z}{z} \right)^Z; \quad Z = \frac{w_o}{\kappa u^*} \quad (8)$$

ここに、 f_{ref} は $z=z_a$ における存在確率密度である。 u^*/w_o を一定 (=2.0) として水深・粒径比を $h/D=250, 500, 1000$ のように変化させることにより生じる相対濃度分布(存在確率密度の相対的な分布)の変化を、式(8)との関係で調べた結果が Fig.6 である。図の

縦軸は Fig.5 とは異なり、 z/h であることに注意を要する。Fig.6 (a),(b),(c) より、 u^*/w_o が一定であっても、水深・粒径比によって式(8)との対応関係が変化し、ある特定の h/D に対してのみ、分布が式(8)により比較的よく説明されることがわかる。たとえば、 $u^*/w_o=2.0$ の場合には $h/D=250$ がこれに相当する。これは、Fig.4, 5 からも推察されるように、土砂の運動が、拡散理論で取り扱うような水深スケールではなく、主として粒径スケールで起こっていることを表しており、粒径の影響がべき数の Z の中でしか反映されない式(8)によって、全ての h/D に対する結果を説明できると考えることに無理があることを意味する。また、Fig. 6 (d) では、Fig. 5 (f) に対応する $u^*/w_o=4.0$ の場合に得られた相対分布と、式(8)と比較したものである。得られた分布にはいくつかのピークがあるように見えるが、これは有意なものではなく、統計処理したデータ数の関係で現れたものと解釈している。この場合には、 $h/D=500$ のときに Rouse 分布と比較的よく一致する結果となった。さらに、Fig. 5 (f) より、 $z_o=0.05 \times h$ に相当する点付近では濃度(存在確率密度)勾配が急であり、このような位置で基準点濃度をとることにすれば、その値の予測が難しいこと、基準点濃度自体が水深・粒径比の影響を顕著に受ける可能性が高いこと、などがわかり、これらが従来の取り扱いをする上での問題点を生じさせていた原因であると考えられる。なお、参考までに、Fig. 6 (a),(b),(c) の結果を、縦軸を粒径による無次元高さとして整理すれば、これらの結果はほぼ一致することを確認している。以上のことから、Bed material load といえども粒径スケールの運動として捉えるべきであるという当然の結論が導かれる。

(3) 移動速度分布

u^*/w_o の変化に伴う移動速度分布 $u_p(z)$ の変化を調

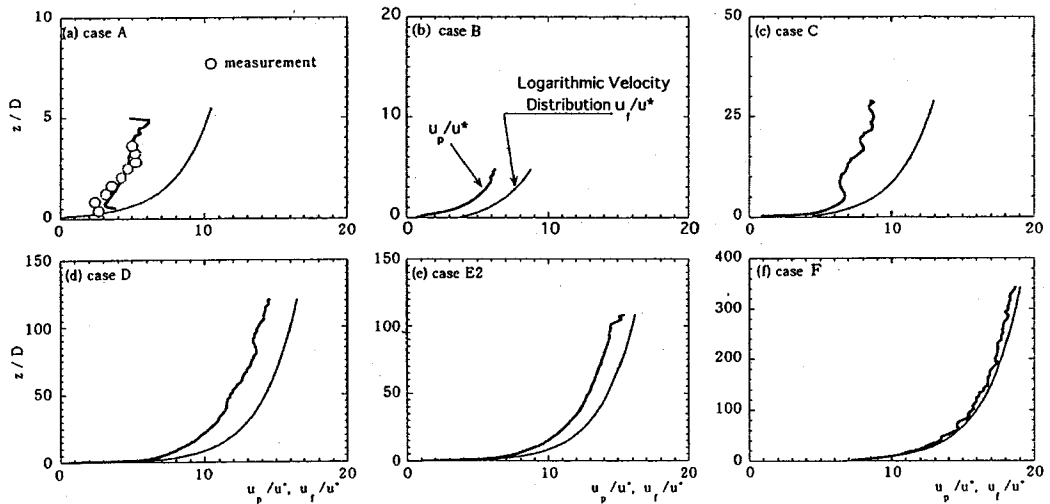


Fig. 7 移動速度分布

べた結果が Fig. 7 である。図中には、計算の際に想定した対数分布で表される水流の速度分布 $u_f(z)$ を、比較のために示している。また、Fig. 7 (a) には、Fig. 5 (a) と同様に、典型的な Saltation 運動に対して得られた実測値をあわせて示している。Fig. 7 より次のことがわかる。Bed material load は、その比重ゆえに自ずと沈降するような運動であり、重力に匹敵する水流の乱れの作用を受けることがない場合には、各高さ z における水流の速度まで加速される前に河床に戻るため、 $u_p(z)$ は $u_f(z)$ に比べて小さな値となる。掃流力が増大し、重力に匹敵する水流の乱れが連続的に生じるようになると、土砂の乱れに対する追従性がよくなり、結果として、水流の速度に近い移動速度で流送されることになる。たとえば、Fig. 7 (f) に示した $u^*/w_o = 4.0$ に対しては、 $u_p(z)$ は $u_f(z)$ に極めて近い値となっている。このことは、従来より浮遊砂の移動速度を水の流速に等しいとする考え方と一致するものである。

5. 結論

本研究では、限界掃流力から浮遊砂が卓越する掃流力範囲までの Bed material load としての土砂の運動を、従来とは異なる視点から一括して解析することを試み、その流送特性の一面を明らかにするとともに、これまでに得られている知見を別角度から解釈した。この解析に際し、粒子～流体モデルに属する簡略化された解析モデルを構築した。解析の結果として、Bed material load を掃流砂と浮遊砂に分けて取り扱おうとする従来の考え方の矛盾点や問題点が明らかになっ

た。本論文により明らかになった成果を以下に列挙し、結論とする。

- (1) Bed material load の運動の解析から、掃流砂あるいは浮遊砂がそれぞれ卓越する条件の中間に当たる掃流力範囲では、従来の掃流砂とも浮遊砂とも異なる形式の運動が存在することが明らかになった。
- (2) 従来の分類でいう浮遊砂が卓越する掃流力範囲では、底面付近の土砂移動は掃流砂であるとして取り扱われてきたが、本解析の結果、底面近傍の運動についても水流の乱れの影響を顕著に受け、明らかに Saltation とは異なるランダムな運動となっていることがわかった。
- (3) (2) で述べた掃流力範囲における土砂の濃度分布は、水深・粒径比 h/D の影響を受け、ある特定の h/D に対してのみ、いわゆる Rouse 分布と一致する結果となる。これは、Bed material load の運動についても、掃流砂と同様に粒径スケールの運動と捉えるべきであることを表している。

本研究では、現象の本質を理解することに力を置き、解析モデルもできるだけ簡略化されたものに止めた。しかし、乱れの生成モデルの如何によって、得られる結果に多少の定量的な差異がでることも予想される。ここで提案したモデルには、移動土砂粒子間の相互作用や、水流の乱流構造の変化など、重要な点が考慮されておらず、必ずしもこれで十分とは考えていない。ただし、本研究により明らかになった上記の結論については、これが根本から覆るものではないと考える。

最後に、本論で示した考え方に基づく研究の今後の展望について記す。本研究で行った計算を実行するためには、掃流力の増大に伴い膨大な時間が必要

であり、今後、実用的な面から、Bed material load の全流砂量を予測する方法を確立しようとする、計算上の問題も含めてかなりの障害が予想される。こうしたことを考慮に入れると、数学的な取り扱い上の煩雑さを回避するという理由から、Bed material load を便宜的に掃流砂と浮遊砂に分けて取り扱うことの利点が理解される。しかし、本研究で示したような土砂の運動の理解に主眼をおいた解析を、今後さらに進めることにより、実用的に有用な知見が得られる可能性があることが、本論文により明らかになったと考えている。

謝辞：本研究の遂行に当たり、江頭進治教授により組織された混相流研究グループにおける議論が極めて有益であり、これが本研究をとりまとめる一つのきっかけとなった。ここに記して構成員各位に謝意を表します。また、本研究は文部省科学研究費総合研究(A) (代表：芦田和男) の援助を受けたことを記す。

参考文献

- 1) Rouse, H. : Modern conceptions of the mechanics of turbulence, *Trans. ASCE*, Vol.102, pp. 463-543, 1937.
- 2) 芦田和男, 藤田正治: 平衡・非平衡浮遊砂量算定の確率モデル, 土木学会論文集, 第375号, pp. 107-116, 1986.
- 3) 大本照憲, 平野宗男, 石丸英伸: 開水路流れにおける粒子運動の数値シミュレーション, 第31回水理講演会論文集, pp. 593-599, 1987.
- 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, 第369号, pp. 109-118, 1986.
- 5) 中川博次, 辻本哲郎, 後藤仁志・井上裕介: 乱れの時系列特性を考慮した浮遊過程の確率論的解析, 水工学論文集, 第38巻, pp. 591-596, 1994.
- 6) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾, 旗持和洋: Bed material load における saltation から浮遊への遷移機構のモデル化, 第29回水理講演会論文集, pp. 509-514, 1985.
- 7) 辻本哲郎: 乱流による土砂輸送—浮遊砂の拡散係数に対する検討—, 第30回水理講演会論文集, pp. 637-642, 1986.
- 8) Sekine, M. and Kikkawa, H. : Mechanics of saltating grains, *Journal of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.118, pp. 536-558, 1992.
- 9) Wiberg, P. L. and Smith, J. D. : A theoretical model for saltating grains in water, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C4, pp. 7341-7354, 1985.
- 10) 関根正人, 吉川秀夫: 脈動流中の土砂の沈降特性に関する研究, 土木学会論文集, 第387号, pp. 209-218, 1987.
- 11) Wiberg, P.L. and Smith, J. D. : Model for calculating bed-load transport of sediment, *Journal of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 115, pp. 101-123, 1989.
- 12) Nezu, I. and Nakagawa, H. : *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR Monograph, 1993.
- 13) 中川博次, 辻本哲郎: 移動床流れの水理, 技報堂, 1986.
- 14) 関根正人, 小川田大吉: 掃・浮遊砂が混在する流れにおける土砂の運動に関する研究, 水工学論文集, 第38巻, pp. 597-602, 1994.

(1995. 2. 9 受付)

STUDY ON THE TRANSPORTATION PROCESS OF BED MATERIAL LOAD

Masato SEKINE, Daikichi OGAWADA and Yosinobu SATAKE

Bed material load has been analyzed under its classification into bed load and suspended load. But several problems arised associated with such a framework of analysis. In the present paper, the transportation process of Bed material load is studied through a unified simulation model which is constructed as an extension of original saltation model. As a result of this analysis, the influence of turbulent velocity fluctuation on the moving trajectory, a concetration distribution and a moving velocity distribution of sediment are all made clear. It's a first attempt to seek a unified theory of Bed material load in the literature.