

掃流粒子群の流動過程に関する 数値シミュレーション*

後藤仁志**・辻本哲郎***・中川博次****

確率過程モデルに基づく数値シミュレーションは、単一粒子の運動の重畳として粒子群の運動特性を評価するため、粒子間干渉を取り扱えないのが欠点である。本研究では、多数の砂粒子を同時に追跡することのできるシミュレーションコードを開発して、掃流層内の砂粒子群の流動機構における粒子間衝突の役割の重要性を、砂粒子レベルの力学に基づき明らかにした。

Key Words: *bed-load layer, stochastic model, interparticle collision, granular assembles, saltation*

1. 緒言

掃流砂の運動は、不規則な凹凸を有する河床面との接触により特徴付けられるため、そのモデル化には確率過程モデルが有効である。辻本・中川²⁾は、仮想反発面傾斜角を確率変数とする不規則継続跳躍モデルにより掃流砂のsaltation運動をモデル化し、河床面との衝突・反発過程の不規則性を考慮した数値シミュレーションを実施している。また、藤堂・関根・吉川³⁾は辻本・中川とほぼ同時期に独自のsaltationモデルを提案し、さらに彼らのモデルを3次元に拡張したシミュレーションを行なっている⁴⁾。これらのシミュレーションは、掃流粒子の運動をLagrange的に追跡するという点で同一の範疇に属するものであるが、Wiberg & Smith⁵⁾もほぼ同様の考え方でsaltationのシミュレーションを行なっている。

掃流砂の運動を特徴付けるもう一つの要因は、運動領域の偏在化するなわち掃流層の存在である。掃流砂は河床面付近に掃流層を形成して流送され、掃流層内では砂粒子同士が近接し、粒子間衝突が頻発する。この傾向は掃流力が大きい場合すなわち砂粒子数密度が大きい場合に特に顕著となり、粒子間衝突による運動量輸送が流れ場の構造を規定するようになる。

このように、掃流砂の流送過程の本質は、河床面との不規則衝突および粒子間衝突を繰り返す粒子群の流動にあるため、粒子運動の解明は掃流層の流動機構の理解に必須であるが、高濃度の粒子流における個々の粒子の運動、とりわけ粒子間衝突に伴う粒子の運動軌跡の変化の

把握は、現在の実験技術をもってしてもなお困難である。粒子間衝突の取り扱いについては、粒状体モデルによる数値シミュレーションが示唆的である。粒状体モデルとしては、粒子間の干渉をバネ・ダッシュポットで表現するCundall & Strack⁶⁾の個別要素法(Distinct Element Method; DEM)が一般的であるが、DEMは主として、構成要素が近接し、構成要素間の相対変位があまり大きくない場合に適用される手法である。掃流層内においては、各砂粒子が迅速に移動し、個々の砂粒子の位置が頻繁に変化するので、DEMの直接的適用は難しい。これに対して、Campbell & Brennen⁷⁾は剛体の力学を用いて粒子間衝突をモデル化したシミュレーションを提案し、比較的速い粒子流の動態を予測している。

本研究では、各個運搬が支配的な(掃流力が小さい)領域から集合流動に至るまでを統一的に記述するために、個々の砂粒子の不規則運動の確率論的な記述を基礎として、粒子間衝突による砂粒子運動の変化を考慮できるシミュレーションを実施する。具体的には、辻本・中川²⁾の不規則継続跳躍モデルとCampbell & Brennen⁷⁾の粒状体モデルを融合して、粒子間衝突を考慮することの可能なシミュレーションモデルを構築し、粒子群としての掃流層の力学特性を推定する。

掃流過程には、粒状体的な取り扱いが重要となる2つの事象が存在する。その第1は、本研究で取り扱う掃流粒子間の衝突であり、第2は、掃流粒子の衝突に伴う河床構成粒子群の挙動である。第2の問題は、掃流粒子の衝突に伴い河床構成粒子群がどのようにずれ動いて運動量を吸収するかという問題で、多数の砂粒子の同時接触を取り扱う必要が生じ、個別要素法が威力を発揮する。Anderson & Haff⁸⁾は飛砂粒子の底面への衝突過程を対象に個別要素法を用いた示唆的な研究を行なっているが、底質構成粒子群の挙動を詳細に再現するには膨大な計算が必要となり、掃流粒子間の衝突問題と底質構成粒

* 本論文の基本的な考え方は既発表¹⁾であるが、実験結果を追加し、適用範囲を拡大するとともに、シミュレーション結果の検討をより詳細にして取りまとめたものである。

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

**** 正会員 工博 京都大学教授 工学部環境地球工学教室

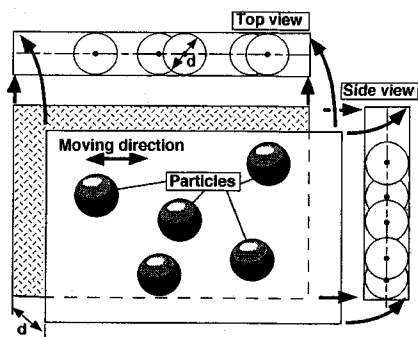


Fig. 1 砂粒子の2次元運動

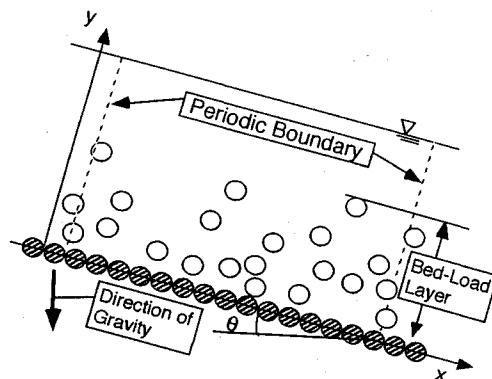


Fig. 2 計算領域

子群の挙動とを同時に検討することは困難である。そこで本研究では、粒状体としての複雑な性質の本質的部分を近似的に表現する手法として仮想反発面を想定する2次元反発モデル²⁾を導入し、saltation粒子群の挙動に焦点を絞り、河床構成粒子群の挙動に関しては従来の簡潔な取り扱いに若干の修正を加えて用いている。

なお、高濃度粒子流における粒子混入（すなわち流体・粒子間干渉）による流れ場の構造変化の取扱いに関しては、著者ら⁹⁾は既に、PSI-セルモデルによる固液混相流型のシミュレーションモデルを提案しているが、ここでは、粒子間干渉に問題を限定して論点を明確化するため、流れ場に関しては清水流近似を用いて、流速分布には対数則を仮定する。また、対象とする流れ場が主流方向に卓越した場であることから、Fig.1に示すような砂粒子1個分の奥行の空間で、砂粒子が2次元運動している状況を仮定する。

2. シミュレーションモデル

確率モデルによるシミュレーションでは、河床面との衝突・反発に伴う単一砂粒子の不規則運動を長時間にわたってLagrange的に追跡し、その重畳として平均的な運動特性を推定する方法が従来から用いられてきた。この方法では、追跡対象となる砂粒子が1個に限定されるため、粒子間衝突を厳密に扱うことができず、このことが粒子間衝突が卓越する掃流力の大きい領域への確率モデル適用の妨げとなってきた。ここでは、定常等流下の掃流層を対象として、河床面の不規則凹凸と衝突・反発を繰り返し、他のsaltation粒子と衝突しつつ運動する砂粒子を追跡するため、多数粒子の運動を同時に追跡することのできる数値シミュレーションを実施する。計算領域を模式的に示したのが、Fig.2である。斜線で示した河床構成粒子の中心は、全て同一平面（平均河床面）上に位置するものと仮定する。すなわち、河床面の凹凸の

スケールとして粒径程度のものを想定する。

ところで河床構成粒子の配列は河床における反発モデルとともに衝突・反発現象を支配する重要な因子であることから、これまでも種々の取り扱いが提案されている。例えば、辻本・中川²⁾は、saltation粒子があらかじめ決められたしきい値以下に落下するたびに仮想反発面傾斜角を乱数発生により求める方法を提案しているし、関根・吉川⁴⁾は、正規乱数によりあらかじめランダムな河床構成粒子の配置を求めてメモリに記憶させてから掃流粒子の運動を追跡している。関根らの方法は、現実の河床構成粒子の配列状況をかなり忠実に模擬したものであるが、多数の粒子が河床面付近で複雑に干渉する状況下では底面付近の砂粒子の挙動をさらに複雑化させ、計算を詳細化させる（砂粒子の追跡時間ステップを短くする）必要が生じるので、計算コストの面では不利である。後藤・渡辺・辻本・中川¹⁰⁾は、河床構成粒子配列モデルの相違によるsaltation粒子の運動の相違を検討し、規則的に配列された河床構成粒子群を用いた場合でも、反発係数を適切に設定すれば、ランダム配置された河床構成粒子群上における掃流粒子群の運動を近似的に表現することが可能であることを示している。

また、定常等流を対象とし、上下流端で周期境界条件を適用する。

(1) 単一砂粒子の運動モデル

単一砂粒子は、河床面の不規則凹凸との衝突・反発に起因する不規則継続跳躍を呈する。Saltationの運動方程式は、

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_s d^3 \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_s d^2 \sqrt{(U - u_p)^2 + (V - v_p)^2} (U - u_p) \dots (1)$$

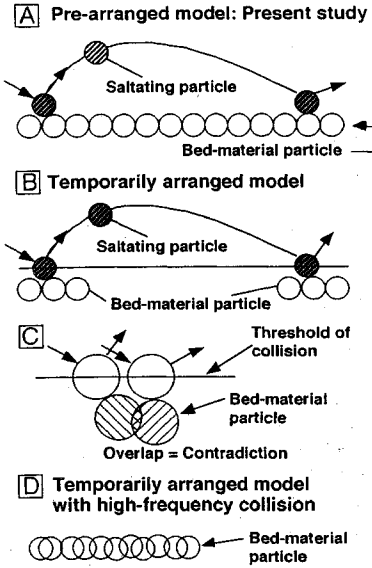


Fig. 3 河床面モデルの相違

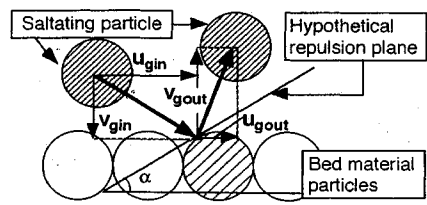


Fig. 4 河床面との衝突

傾斜角の確率分布を考慮した2次元反発モデル) が用いられてきたが (Fig.3[B]), 多数の砂粒子が同時に運動する際には、従来の方法ではFig.3[C]に示すような不都合が生じる。すなわち、2つの砂粒子の衝突位置が近接している場合には、想定した河床構成粒子に重なりが生じる可能性があり、結果としてFig.3[D]に示すような凹凸の小さな河床モデルを想定したこととなる。そこで本研究では、計算に先立って河床構成粒子の位置を一括して設定する方法を採った。

具体的には、式(1),(2)をRunge-Kutta法で解いて砂粒子の運動をLagrange的に追跡し、河床面との衝突が発生すれば、砂粒子と河床構成粒子との接触点を求めて仮想反発面傾斜角 α を算定し、衝突前後の砂粒子の速度 $(u_{gin}, v_{gin}), (u_{gout}, v_{gout})$ (Fig.4参照) の関係

$$\begin{bmatrix} u_{gout} \\ v_{gout} \end{bmatrix} = \Xi_0 \cdot \begin{bmatrix} u_{gin} \\ v_{gin} \end{bmatrix}; \quad \Xi_0 = \begin{bmatrix} e \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \sin^2 \alpha & (e+f) \cos \alpha \sin \alpha \\ (e+f) \cos \alpha \sin \alpha & e \cdot \sin^2 \alpha - f \cdot \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

により、衝突直後の速度を求め、再び式(1),(2)により砂粒子の運動を追跡する。ここに、 e, f :河床面での反発係数である。ところで、現実の河床における衝突・反発には種々の要因が複雑に関連している。移動床では河床は多数の砂粒子により構成された loose な性状を呈しており、saltation 粒子との衝突の際には河床構成粒子がずれて運動量の損失が生じる。さらに、衝突・反発は粒子の形状の影響、3次元性、摩擦の効果などの影響も受ける。ここでは、このように極めて複雑な河床面における衝突・反発事象を簡潔に表すモデルとして仮想反発面方向とその法線方向とに反発の法則を用いており、反発係数は先に述べた種々の効果を含む経験定数的な意味を持っている。

なお、衝突直後の移動速度の鉛直成分が一定の値 (粒径の0.1倍の突起を乗り越えるのに要するポテンシャルに相当する値) を下回るとき、運動停止と判断する²⁾。

(2) 粒子間衝突のモデル化

均一粒径 d の2つの粒子 (中心の座標 $(x_p, y_p), (x_p, y_p)$) の衝突について考える。衝突の発生条件は、砂粒子に重な

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{dv_p}{dt} \\ & = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 \sqrt{(U - u_p)^2 + (V - v_p)^2} (V - v_p) \\ & - \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g A_3 d^3 \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

で与えられる*。ここに、 u_p, v_p : 砂粒子の水平・鉛直方向の速度成分、 C_M : 付加質量係数、 σ : 砂粒子の密度、 ρ : 水の密度、 d : 砂粒径、 U, V : 平均流速の水平・鉛直方向の速度成分、 A_2, A_3 : 砂粒子の2次元、3次元の形状係数である。 C_D は抗力係数であって、

$$C_D = C_{D\infty} + \frac{24}{R_c}; \quad R_c = \frac{d \sqrt{(U - u_p)^2 + (V - v_p)^2}}{v} \quad (3)$$

で与えられる。なお、 $C_{D\infty}$ については、球に対する値0.4を、諸定数については標準的な値として¹⁾、 $C_M = 0.5$, $A_2 = \pi/4$, $A_3 = \pi/6$ を用いた。

河床面では、中心が平均河床面上に位置するように密に配置された河床構成粒子群との衝突を想定し、計算に先立って記録された河床構成粒子の座標とsaltation 粒子の位置とを比較しながら衝突の発生を判定する¹⁰⁾ (Fig.3[A])。従来の著者らのシミュレーション^{2), 9)}においては、saltation 粒子がしきい値以下に落下するたびに河床構成粒子の位置を乱数で決める方法 (仮想反発面

* 集合状掃流流動と言われるような極めて高濃度の土砂流は急勾配流路でよく観察されるが、本研究では体積濃度が1%程度の掃流層を対象として想定しているので、流路勾配は小さく ($\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx 0$ が成立し)、運動方程式中の重力項の流下方向成分は無視できる。

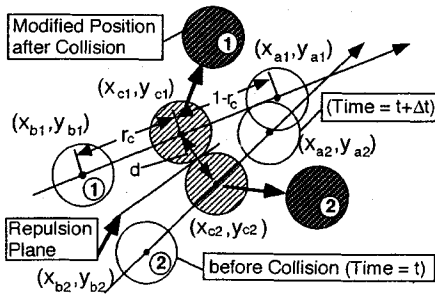


Fig. 5 粒子間衝突

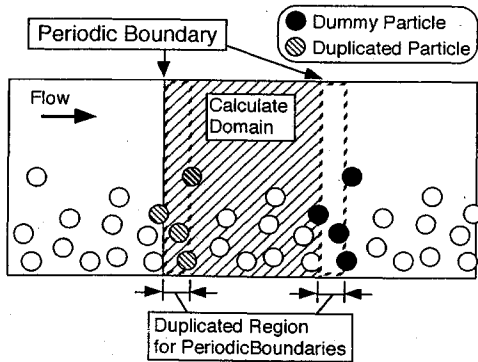


Fig. 6 周期境界条件

りが生じること、すなわち

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < d \dots\dots\dots (5)$$

であり、砂粒子の位置の更新が行われるたびに、式(5)を用いて全ての砂粒子について判定を行う。Fig.5は、衝突位置の算出について、粒子1,2を対象に示したものである。t, t+Δtにおける砂粒子の位置を(x_{b1}, y_{b1}), (x_{a1}, y_{a1}) (実際には粒子は重ならないから、(x_{a1}, y_{a1})は衝突位置を求めるための架空の位置である)とし、Δt秒間の砂粒子の運動軌跡を直線近似すると、

$$y_i = \frac{y_{ai} - y_{bi}}{x_{ai} - x_{bi}}(x_i - x_{bi}) + y_{bi} \quad (i = 1, 2) \dots\dots\dots (6)$$

$$x_i = x_{bi} + (x_{ai} - x_{bi}) \cdot r_c \quad (i = 1, 2) \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、r_c: 衝突前後の2点間の内分比である。衝突地点では、2粒子間の距離が、

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} = d \quad ; \quad r_c \leq 1 \dots\dots\dots (8)$$

を満足するから、(6),(7),(8)を連立させて、r_cを求めれば、衝突位置が決定される。衝突位置の砂粒子速度等の特性量は、内分比r_cを用いた線形補間により計算される。

衝突に伴う速度の変化については、以下のように考える。まず、砂粒子の共通接平面を仮想反発面として想定する。仮想反発面傾斜角φは、粒子1,2の衝突位置の座標(x_{c1}, y_{c1})を用いて、

$$\phi = \text{Arctan} \left(-\frac{x_{c1} - x_{c2}}{y_{c1} - y_{c2}} \right) \dots\dots\dots (9)$$

で与えられ、仮想反発面の鉛直、水平方向に関して運動量保存則と反発の法則を適用すると、衝突前後の砂粒子の速度の関係は、

$$\begin{bmatrix} u_1^{out} \\ v_1^{out} \\ u_2^{out} \\ v_2^{out} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \xi_1 & \lambda & \xi_2 & -\lambda \\ \lambda & \xi_3 & -\lambda & \xi_4 \\ \xi_2 & -\lambda & \xi_1 & \lambda \\ -\lambda & \xi_4 & \lambda & \xi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^{in} \\ v_1^{in} \\ u_2^{in} \\ v_2^{in} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= (1 + e_p) \cos^2 \phi + (1 - f_p) \sin^2 \phi \\ \xi_2 &= (1 - e_p) \cos^2 \phi + (1 + f_p) \sin^2 \phi \\ \xi_3 &= (1 + e_p) \sin^2 \phi + (1 - f_p) \cos^2 \phi \\ \xi_4 &= (1 - e_p) \sin^2 \phi + (1 + f_p) \cos^2 \phi \\ \lambda &= (e_p + f_p) \cos \phi \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。ここに、e_p, f_p: 砂粒子間の反発係数であり、添字 in, outは衝突前、後を示している。

(3) 周期境界条件

定常等流状態を想定してコントロール・ボリュームの側方境界を周期境界とすることにより、計算機の記憶容量を節約し、計算を効率化することが可能となる。ところが、砂粒子の運動は、粒子間衝突のために局所的に主流と逆向きとなることがあり、必ずしも一方向的ではないので、周期境界条件を満足させるには、若干の工夫を要する。具体的には、下流側の境界を通過してコントロール・ボリュームを出た直後に他の粒子と衝突し、流れを遡って再び下流側の境界を通過してコントロール・ボリュームに突入する粒子をどのように処理するかが問題である。ところで、周期境界条件の下では、下流側の境界を通過してコントロール・ボリュームから出た砂粒子は、その瞬間に上流側の境界を通過してコントロール・ボリューム内に入るものとして取り扱われるが、境界付近での逆方向への砂粒子の運動に対処するためには、下流側の境界を出て暫くの間は、砂粒子の運動を継続して追跡する必要があり、以下に述べる側方境界付近での砂粒子の二重化を行う必要がある。Fig.6は、砂粒子の二重化について模式的に示したものである。上下流の側方境界の右側に粒径の数倍の厚さの二重化領域を設定し、下流側境界に接する二重化領域においてダミー粒子を設定する。左右の二重化領域内を運動する一対の粒子の運動を完全に同期させ、片方の粒子が二重化領域の外部に存在する粒子と衝突した場合には、その結果をもう一方の粒子にも同様に反映させる。なお、二重化領域を出た粒子については、ダミー粒子を消去して、通常の追跡を継続する。

(4) 計算の流れ・計算条件

具体的な計算手順を、Fig.7に示す。まず、水理条件に応じて清水流中で単一砂粒子のsaltationを河床面との不規則衝突を考慮しつつ追跡して、その重畳として確率

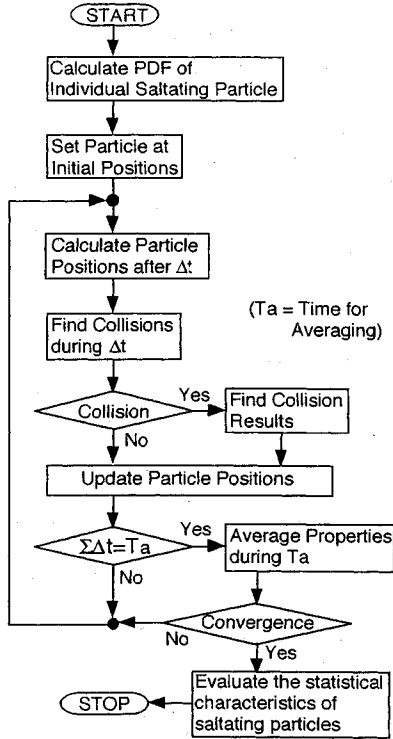


Fig. 7 計算手順

Table 1 計算条件/実験条件

Run	I_e	$h(\text{cm})$	$U_m(\text{cm/s})$	$u_* (\text{cm/s})$	τ_*
1	0.02	6.05	136.4	11.6	0.16
2	0.02	8.29	144.8	13.6	0.23

密度関数と移動速度を算定する。コントロール・ボリューム内に存在する砂粒子数は平衡状態を対象とし、スイス公式によって推定された掃流砂量より決定する。単一粒子追跡型のシミュレーションで得られた確率密度関数と移動速度に応じて砂粒子群の初期条件（位置と速度）を設定する。この際、コントロール・ボリューム内に整数個の砂粒子が存在するようにコントロール・ボリュームの流下方向の長さを微調整する。次に、運動方程式を用いて、粒子間衝突を考慮しながら時間方向に各砂粒子を追跡する。追跡中は、一定の時間 (T_a) が経過することに粒子の移動過程の追跡結果を統計処理して存在確率密度、移動速度などの特性量を算出し、計算結果の収束状況を判断する。

計算は、Table 1 (I_e :エネルギー勾配, h :水深, U_m :平均流速, u_* :摩擦速度, τ_* :無次元掃流力) の条件について粒径 $d=0.5\text{cm}$, 比重 2.60 のガラスビーズを対象に行われ、同一の粒子を用いた開水路における実験と比較され

た。掃流粒子として用いたものと同一のガラスビーズを河床面に敷き詰めた固定床を設置し、清水時の流速分布から求めた掃流力を用いてスイス公式により算定された流砂量を給砂し、砂粒子群の運動を側方からビデオ撮影して画像解析により運動軌跡を求め、砂粒子の存在確率密度及び移動速度を評価した。

なお、反発係数については、シミュレーション結果の実験結果との一致に配慮した試行錯誤的検討を通じて、 $e=0.7, f=0.4, e_p=f_p=0.8$ を用いることとした*。

ところで、砂粒子追跡の計算時間ステップ Δt は、計算の安定性と効率を支配する重要なパラメータである。 Δt を長く設定し過ぎると、1ステップ内に複数回の粒子間衝突が発生し、衝突判定も複数回必要となり、アルゴリズムが複雑化する。逆に、 Δt を短く設定し過ぎると、1ステップ内の複数回の衝突の発生は防げるが、定常状態に達するまでの計算時間が増大し、計算効率が低下する**。ここでは、1ステップ内に複数回の衝突が生じない範囲で、計算効率を必要以上に低下させないような時間ステップを試行錯誤的に検討し、 $\Delta t=0.002$ 秒を用いることとした。なお、追跡中に停止する砂粒子があった場合には、停止位置から新たな粒子を投入し、再度追跡を開始することとした。

3. 掃流粒子群の瞬間的挙動

シミュレーションから、時々刻々と変化する砂粒子群の位置と速度に関する情報が得られるが、膨大な計算結果を直ちに平均化処理したのでは、砂粒子群の各瞬間の挙動について具体的に理解することが難しい。そこで、シミュレーション結果の一部をコマ送り形式で示したのが、Fig. 8, Fig. 9 であり、 $\tau_*=0.23$ を対象に、AからJまで計10コマの連続画像を表示している。

Fig. 8 では、2, 5, 6の砂粒子の間で粒子間衝突に伴う運動量輸送が生じている。まず、Cにおいて下降中の粒子6と上昇中の粒子2が衝突・反発し、Dではそれぞれの鉛直方向の速度成分が逆転し、粒子6が上昇に、粒子2は下降に転じている。さらにEでは、粒子6との衝突により運動量を失って下降してきた粒子2が、粒子5と衝突して上向き運動量を獲得し、Fでは粒子5は降下して河床面と

* 土屋・青山¹²⁾は、路床の反発係数は移動床で0.5前後の値をとり、固定床で0.8程度にまで及ぶと報告している。反発係数は路床モデルや砂粒子の停止条件にも依存するため、既往の研究で用いられた値と単純に比較できないが、ここで用いた値も従来のシミュレーションで用いられた値の範囲を逸脱するものではない。

** 完全に同時に3個以上の砂粒子が衝突する場合には本モデルは適用できないが、一見すると3個以上の砂粒子の同時衝突が生じているように見える場合でも、時間スケール Δt を十分に小さく採れば2粒子間の衝突が段階的に生じていることがほとんどである。本シミュレーションの実行時には、3個以上の砂粒子の同時衝突は発生しなかった。

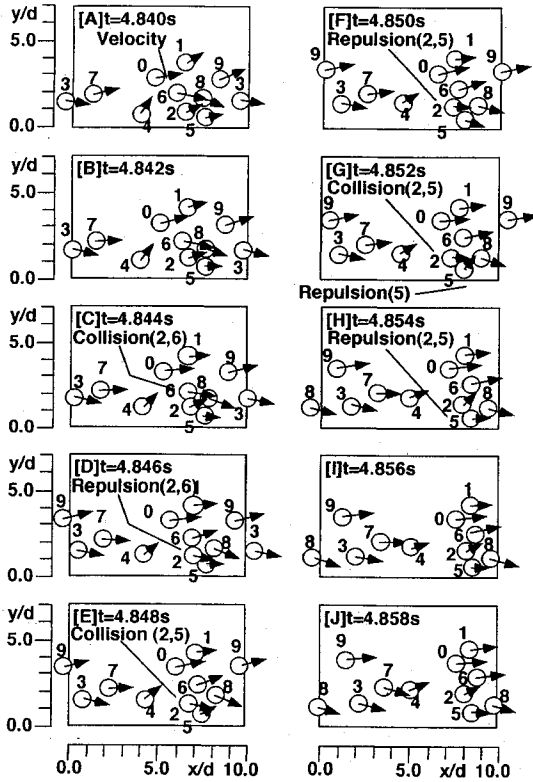


Fig. 8 砂粒子群の運動(1)

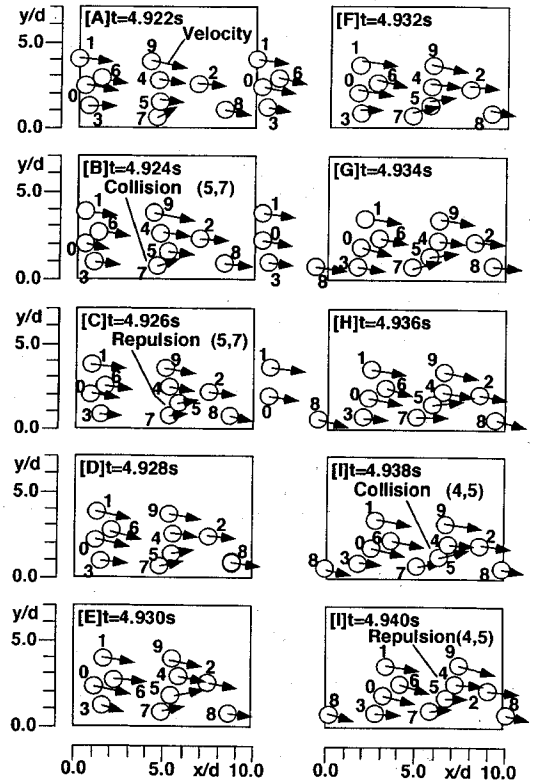


Fig. 9 砂粒子群の運動(2)

衝突して再び上昇に転じ、Gにおいて再度、粒子2と衝突して粒子2に運動量を供給している。一連の運動を通じて、中間部を運動する粒子2は、下層を運動する粒子5から供給された運動量を上層を運動する粒子6へと伝達する役割を果たしている。これと類似の現象が、Fig.9の粒子4,5,7の間にも見られる。すなわち、下層を運動する粒子7が河床面との衝突・反発により獲得した運動量の鉛直成分が、中間部を運動する粒子5を介して上層を運動する粒子4へと輸送されている。このように粒子間の多重衝突は、砂粒子の運動量の鉛直方向成分を下層部から上層部へと輸送する働きを果しているが、このことにより個々の砂粒子の運動自体も多様化しているものと推測される。具体的には、掃流層の上層部を運動する砂粒子は、下方からの運動量の供給を受けつつ長距離にわたり着地することなく運動を継続し、逆に、底面付近を運動する砂粒子は、衝突によって上方の砂粒子に運動量を供給することにより、自身の飛距離は短縮されるものと考えられる。

4. saltation軌跡の変化

次に、粒子間衝突が砂粒子の運動軌跡をどのように変化させているかを見るために、単一粒子追跡型(従来

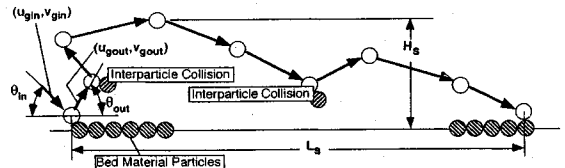


Fig. 10 saltationの諸元

型、以下では『単一型』と呼ぶ)のシミュレーションと複数粒子同時追跡型(以下では『複数型』と呼ぶ)の本シミュレーションとが予測するsaltation特性量(河床面との衝突直前・直後の砂粒子の速度 $(u_{gin}, v_{gin}), (u_{gout}, v_{gout})$, 入射角 θ_{in} , 反射角 θ_{out} , 飛距離 L_s , 飛高 H_s , Fig.10参照)の確率分布について比較することとする。

Fig.11は、河床面との衝突直前の砂粒子の速度について示したものであるが、単一型は複数型より鋭いピークを持った集中度の高い分布を示しており、分布の重心も単一型の方が複数型より大きくなっている。単一型では、河床面との不規則衝突・反発によるsaltationの初期条件の任意性(すなわち衝突直後の砂粒子速度の確率分布)に伴うsaltation軌跡の変化が、衝突直前の砂粒子速度を確率分布させる。これに対して、複数型では粒子間

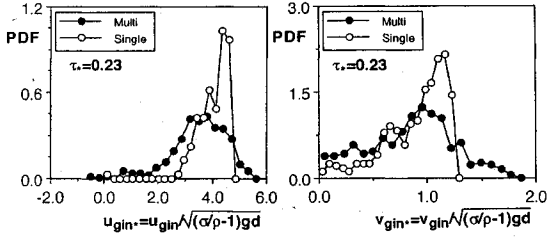


Fig. 11 衝突直前の砂粒子速度の確率密度分布

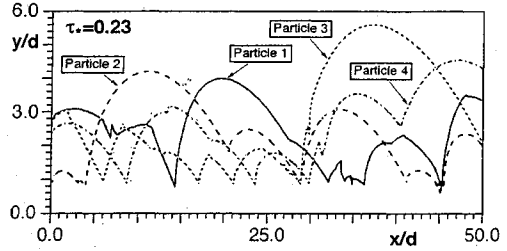


Fig. 14 saltation軌跡の例

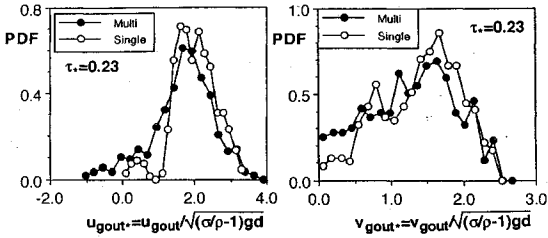


Fig. 12 衝突直後の砂粒子速度の確率密度分布

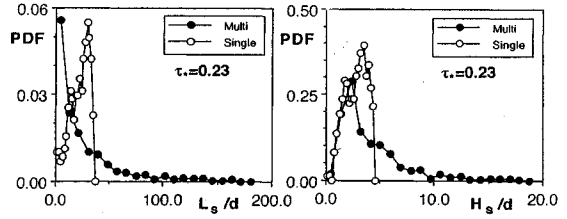


Fig. 15 飛距離と飛高の確率密度分布

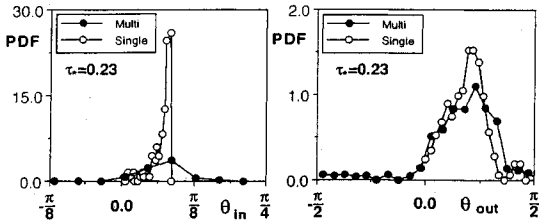


Fig. 13 入射角と反射角の確率密度分布

衝突により運動方向が種々に変化し、衝突の発生状況次第で単一型より大きな速度を持つ場合もあれば、小さな速度となる場合もあるため、確率密度分布は単一型と比べて偏平になる。また、複数型の重心が単数型より小さいのは、複数型では粒子間衝突により他の粒子に運動量を供給して減速された砂粒子が河床に到達する割合が多くなるためと解釈できる。Fig.12は、衝突直後の砂粒子の速度について示したものであるが、単一型と複数型の相違は、衝突直前の速度の場合 (Fig.11) に比べて小さくなっている。これは、saltationが河床面との衝突で初期化されることを示すものである。河床面との衝突による速度変換過程をシステムとしてとらえると、衝突直前の速度の分布というinputの特性は、河床面の不規則性というシステム固有の特性にかき消され、output (すなわち衝突直後の速度) のinputへの依存性は小さくなっているものと判断される。さらに、複数型ではu成分が負になる砂粒子が存在し、v成分についても分布は単一型と比べて小さい側にシフトしているが、これらのことも粒子間衝突の影響と考えられる。

Fig.13は、入射角と反射角について示したものである

が、Fig.11とFig.12を総合して言えたことと同様のことが言える。すなわち、saltationが河床面との衝突で初期化されることにより、入射角に見られる単一型と複数型との相違に比べて、反射角の分布の相違が著しく小さくなっている。さらに、複数型の入射角分布には単一型では見られない角度での衝突が存在し、複数型の反射角分布にも単一型では見られない負の値が確認される。これらのことは、粒子間衝突により砂粒子の運動軌跡が通常のsaltationから相当変形していることを示すものであり、粒子間衝突の影響の大きさを裏付けるものである。計算されたsaltation軌跡の例をFig.14に示す。

Fig.15は、飛距離と飛高について単一型と複数型とを比べたものであるが、Fig.8, Fig.9の砂粒子群の運動過程からも予測されたように、複数型は単一型と異なり、広範囲に分布しており、粒子間衝突に伴う運動軌跡の変化が顕著に現れた結果となっている。

5. 掃流粒子群の運動特性

これまでの議論で、掃流粒子群の瞬間的挙動およびsaltation軌跡の変化を通じて、掃流粒子群の流動過程において粒子間衝突が果たす役割の重要性が明らかとなったが、ここではさらに、砂粒子の鉛直方向存在確率密度と移動速度分布について検討する。

Fig.16は、砂粒子の鉛直方向存在確率密度について示したものであるが、複数型の予測結果は単一型と比べて、上層部が大きく、中間部で小さくなっている。このことは、Fig.8, Fig.9から明らかなように、上層部を移動する粒子は下方から上昇してくる砂粒子との衝突によって運動量を供給されて長距離にわたって跳躍し、粒子間

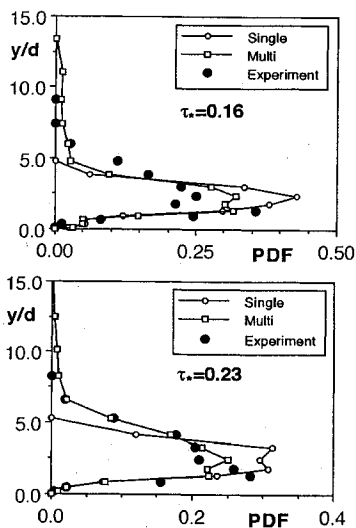


Fig. 16 砂粒子の鉛直方向存在確率密度

衝突のない単一型では到達できない高さまで到達するものが出現するためと解釈できる。 $\tau_s=0.16, \tau_s=0.23$ を通じて、実験値は複数型の傾向を支持しており、特に、掃流力が大きい $\tau_s=0.23$ における複数型と実験値の一致は極めて良好である。

Fig.17 は、砂粒子の移動速度の水平成分について、複数型、単一型を実験値と比較したものである。 $\tau_s=0.16, \tau_s=0.23$ を通じて、単一型、複数型とも実験値に対して過大な予測を与えているが、複数型は単一型より小さい移動速度を予測しており、単一型と比べれば実験値との対応も良い。実験値は底面付近で欠損傾向を示すが、単一型ではこうした傾向を全く説明できない。これに対して複数型の場合には、例えば $\tau_s=0.23$ において単一型と比較すると、顕著な欠損傾向を再現し得るものと思われる。一般に、移動速度の欠損は粒子間衝突の頻度が増加するほど顕著となるはずであるから、 $\tau_s=0.16$ では明瞭ではない欠損が、掃流力が大きく、衝突頻度も大きい $\tau_s=0.23$ において顕在化したものと考えられる。シミュレーションと実験との間で絶対値としての一致が不十分なのは、流体系と粒子系との干渉を考慮せず、流れ場を清水流近似しているためである。

なお、極めて高濃度の土砂流や粉体流においては、底面近傍に層状の流れを伴った saltation となることが実験的に確認されており（例えば、江頭・芦田・高濱・田野中¹³⁾、木藤・平野・橋本¹⁴⁾）、砂粒子の移動速度分布は底面近傍で上に凸、上方で下に凸な変曲点を有する分布となるが、本研究の条件では底面近傍に層状の流れは形成されず、砂粒子が全層的に分散した状態で流動す

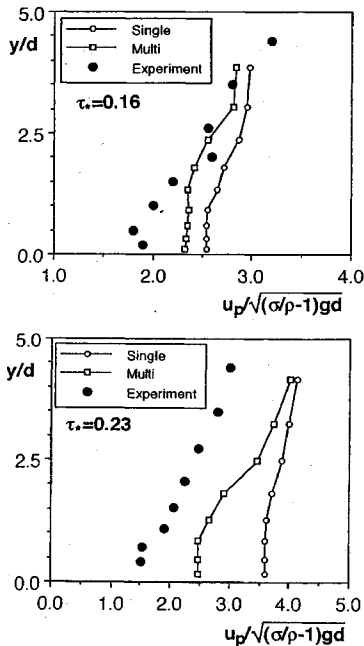


Fig. 17 砂粒子移動速度分布

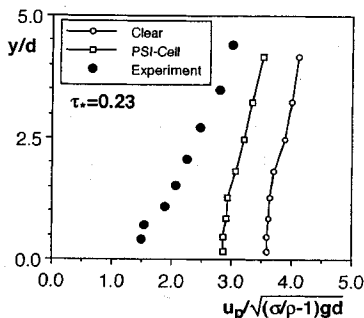


Fig. 18 PSI-セルモデルによる砂粒子移動速度分布

るため、移動速度分布に変曲点が存在しない。

Fig.18 は、流体・粒子間干渉のみを考慮したPSI-セルモデルによる著者ら⁹⁾の数値シミュレーションの結果であるが、流体・粒子間干渉は砂粒子の移動速度分布の分布形状をあまり変化させず、掃流層全体にわたって速度を低減させる傾向が示唆されている。したがって、ここで得られたFig.17の結果に、流体・粒子間の干渉を加味すると、実験値との一致が改善されるものと推測される。なお、分布形状の特徴すなわち底面付近の欠損傾向の再現性であるが、 $y/d=4.1$ における砂粒子速度で規格化された移動速度分布を示す Fig.19 を見ると、単一型ではうまく説明できない欠損傾向が複数型では良好に説明されており、底面付近の移動速度分布の決定機構に粒子間衝突が大きく関与していることが理解できる。

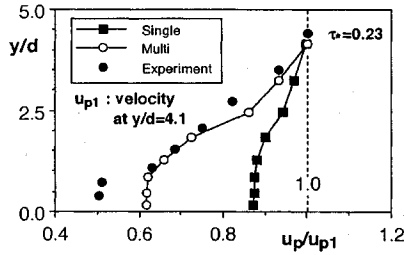


Fig. 19 規格化された砂粒子移動速度分布

6. 結語

本研究では、掃流層を対象に多数粒子同時追跡型のシミュレーションを実施して、粒子間衝突が流動機構に果たす役割について、多角的に考察した。ただ、流れ場については清水流近似を仮定した取り扱いとし、流体・粒子間の干渉については考慮していないため、移動速度については過大評価を与える結果となったが、粒子間衝突による掃流運動の多様化について詳細な理解が可能となった。今後は、シミュレーションのコードの改良を進めて、さらに高濃度の掃流層における粒子間衝突の影響の推定を行なうとともに、PSI-セルモデルを用いた著者ら⁹⁾の数値シミュレーションとの融合を図って、流体・粒子間の干渉効果を含めた掃流層の内部構造の予測へと発展させたい。

謝辞：シミュレーションコードの作成にあたり、京都大学大学院・渡辺幹広君（現、鹿島建設）の協力を得たことを付記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：粒状体モデルによる掃流粒子群の挙動に関する数値解析，水工学論文集，第37巻，pp. 611-616, 1993.
- 2) 辻本哲郎・中川博次：掃流粒子の Saltation の確率過程論的解析，土木学会論文集，第345号，pp. 83-90, 1984.
- 3) 藤堂正樹・関根正人・吉川秀夫：土砂の掃流機構に関する基礎的研究，第27回水理講演会論文集，pp.299-304, 1983.
- 4) 関根正人・吉川秀夫：掃流砂の停止機構に関する研究，土木学会論文集，第309号，pp. 105-112, 1988.
- 5) Wiberg, P. L. and Smith, J. D.: A theoretical model for saltating grains in water, *Jour. Geophys. Res.*, 90(4), 7341-7354, 1987.
- 6) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29, No. 1, pp.47-65, 1979.
- 7) Campbell, C. S. and Brennen, C. E.: Computer simulation of granular shear flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 151, pp.167-188, 1985.
- 8) Anderson, R. S. and Haff, P. K.: Simulation of eolian saltation, *Science*, 241, pp.820-823, 1988.
- 9) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：PSI-セルモデルによる Saltation 層の解析，海岸工学論文集，第39巻，pp. 266-270, 1992.
- 10) 後藤仁志・渡辺幹広・辻本哲郎・中川博次：底質の幾何的配列が掃流運動に及ぼす影響，海岸工学論文集，第40巻，pp.296-300, 1993.
- 11) たとえば，中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理，土木学会新体系土木工学 23，技報堂出版，310p., 1986.
- 12) 土屋義人・青山俊樹：水流による砂礫 Saltation の機構，京都大学防災研究所年報，第13号B，pp.199-216, 1970.
- 13) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル，京都大学防災研究所年報，第33号，B-2, pp.293-306, 1990.
- 14) 木藤賢一・平野宗夫・橋本晴行：急勾配水路における乾燥粉体流の特性，水工学論文集第37巻，pp.617-622, 1993.

(1993.8.4. 受付)

NUMERICAL SIMULATION OF BED-LOAD TRANSPORT AS GRANULAR ASSEMBLES

Hitoshi GOTOH, Tetsuro TSUJIMOTO and Hiroji NAKAGAWA

Stochastic simulation of bed-load transport, in which the saltating particles are traced independently one another by a Lagrangian model, neglects the interparticle collision explicitly. Refined simulation of bed-load particles as granular assemblies is proposed to investigate the detail structure of the bed-load layer; the motion of bed-load particles is traced simultaneously in streamwise and vertical two-dimensional plane with considering particle/particle interactions. Important role of interparticle collision is demonstrated through a series of snapshots of the instantaneous motion of moving particles; and statistical characteristics of the geometrical parameters of saltation. Good agreements between the present simulation and experiments on the existing probability density and the velocity profile of moving particles indicate the importance of the interparticle collision in bed-load layer.