

飛砂 saltation 層の解析

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎

金沢大学工学部 ○赤城 里至

1. まえがき 近年離岸堤などが築造され海岸侵食に歯止めがかけられ、さらにはCCZ構想として砂浜域の環境整備が進められている。砂浜が蘇ってくると今度は飛砂が活発になり、整備された施設の埋没などが問題になってきており、防砂柵などの対策が検討されている。流体中の砂粒子の運動という意味では共通の機構を持つ河川流砂の進んだ研究成果が応用できそうなものであるが、実は河川流砂の理論のほとんどが、流れを、砂を含まない清水流と近似してえられたもので、粒子の相対密度の小さい流砂には適用できても、相対密度が流砂より約 10^3 倍近くも大きい飛砂ではもはや清水流近似は成り立たない。すなわち流体が粒子を加速することだけでなく、運動粒子が流体を減速する反作用もきちんとカウントしなければならない。こうしたフィードバックを取り入れる試みが流砂でも最近PSI-セルモデルと乱流モデルの融合（ラグランジェ・オイラーカップリング）で試みられている¹⁾が、本報では粒子運動を粒子の存在確率密度、流体との相対速度の鉛直分布というオイラー量に変換した後乱流モデルと融合する方法を取り、またこの段階では高次乱流モデルは採用せず、混合距離モデルによった。なお、粒子の運動形態は掃流を対象とし、継続跳躍（successive saltation）として解析した。

2. 相互作用系とフィードバック機構 跳躍を繰り返す掃流粒子は砂面との反発時に流下方向運動量を鉛直上向きに変換され（Bagnoldの観察例などを見ると個々の跳躍は飛出し角がほとんど 90° に近い）、砂面との反発で流れ内に放りだされた粒子は流体の流速分布に応じて加速される。飛砂の場合、砂面で運動量が水平から鉛直に転換されるだけで、跳躍の継続を停止することは稀で、これは数回～10数回の跳躍で運動粒子と河床粒子を交換する流砂との大きな違いである。流体の乱れの影響を受けない掃流運動に限れば、跳躍運動の不規則性は単に初速度のそれに持ち込まれるだけである。しかし、これによって個々の跳躍高さ、跳躍距離及び粒子の存在高さが確率分布したものとなる。本報では初速度は上向き成分のみで（ v_0 ）、従来の知見に基づき摩擦速度程度で指数分布するものと仮定する（厳密には反発機構のモデル²⁾を持ち込まねばならない）。流速分布（ $U(y)$ ）が知られていると粒子を運動方程式で追跡することから、saltation運動中の粒子の存在高さ、その状態での粒子速度 U_p が計算され、流体との相対速度（ $U-U_p$ ）から各高さでの粒子に作用する抗力が求められる。不規則なsaltation多数個について計算し、単位面積当たりの運動個数が1個の状態での流体の各高さの層での平均抗力を求める。これの最上層からの累積（積分）がその高さでの運動量欠損（ $\Delta\tau$ ）となる（底面で最大 $\Delta\tau_0$ ）。ところで、大気境界層では清水流でReynolds応力分布が一定（ τ_0 ）で（constant shear layer）、掃流粒子を含むと上記の分だけReynolds応力が欠損、下方に向かって減少する。平衡状態の飛砂では新たに運動を始める粒子はないのでReynolds応力の底面外挿値は限界掃流力 τ_c に等しいはずである。欠損量は粒子数密度（ N ）に比例するから、 $N=(\tau_0-\tau_c)/\Delta\tau_0$ である。しかしながら、変化させられたReynolds応力分布（ $\tau(y)=\tau_0-N\Delta\tau$ ）は流速分布の変化を意味し、流速場が変化しているということは飛砂移動特性、移動量も異なっているはずである。流れ場の変質により再度流速分布を求め粒子軌跡を計算し直さねばならない。こうした繰り返し計算の収束するところが、混相流としての解である。

3. 数値計算の方法 次のような手順で定常な飛砂saltation層の解析を行なった。

- (1) 清水流近似：底面せん断応力 τ_0 を与える（一様分布）。
- (2) 混合距離モデルで流速場を計算する（清水流近似の場合は対数則となる）。
- (3) 平均初速度 $\overline{v_0}$ を与え、指数分布にしたがった乱数発生でsaltationの初期条件を設定する。
- (4) 不規則跳躍100個の計算を行ない（Runge-Kutta-Gill法）これらを接続して継続跳躍の数値模擬とする。この結果、出発点からの距離 x_i （間隔 Δx ）での粒子の存在高さ y_i 、速度 $U_{p,i}$ が与えられる。
- (5) その結果を高さ y_i で代表される層（厚さ Δy ）ごとに格納、存在個数、抗力の和を y_i ごとに求める（ L で除すと単位面積当たり高さ y_i ごとの存在個数分布や抗力変化が得られる）。
- (6) 飛砂による抗力の飛砂層最上層から下方への累積分（ $\Delta\tau$ ）だけ減じると飛砂密度が単位面積あたり1個の

場合についてのReynolds応力分布を求める。ここでは $y=0$ でのReynolds応力欠損分 $\Delta \tau_0$ を求める。

(7) 平衡粒子数密度を評価する： $N=(\tau_0-\tau_c)/\Delta \tau_0$

(8) 平衡飛砂saltation層内のReynolds応力分布を求める： $\tau(y)=\tau_0-N\Delta \tau$

(9) (2)に戻って手順を繰り返し、(7)で計算される N が収束した時点を混相流解とする。

(10) 平衡飛砂saltation層のReynolds応力 $\tau(y)$ 、流速 $U(y)$ 、粒子速度 $U_p(y)$ 、粒子存在確率密度 $f_p(y)$ の鉛直分布を求める。また、飛砂量は $U_p(y)$ と $f_p(y)$ の積の定積分(底面から飛砂層外縁まで)と N の積として与えられる。

4. 計算結果の例 図1～4に、平衡飛砂saltation層のReynolds応力 $\tau(y)$ 、流速 $U(y)$ 、粒子速度 $U_p(y)$ 、粒子存在確率密度 $f_p(y)$ の鉛直分布の計算例を示す。計算条件は、粒径 $d=0.05\text{cm}$ 、砂粒密度 $\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$ 、流体密度 $\rho_f=1.23\times 10^3\text{g/cm}^3$ 、 $u_* = 50\text{cm/s}$ ($\tau_0 = \rho_f u_*^2$)で、 $v_0 = u_*$ とした。また、抗力係数、付加質量係数、形状係数は球に対する値を用いた。限界掃流力については $\tau_{*c} = 0.1$ ($\tau_{*c} = u_*^2 / [(\rho_s / \rho_f - 1)gd]$)とした。これらの分布は数回の繰り返し計算で収束しているようである。

混相流としての取り扱いにより、流れの抵抗が増大することのほか、飛砂saltation層内で流速分布が対数則に比べ様化する事、清水流近似は飛砂の層厚さ、飛砂量などをかなり過大評価することが示された。

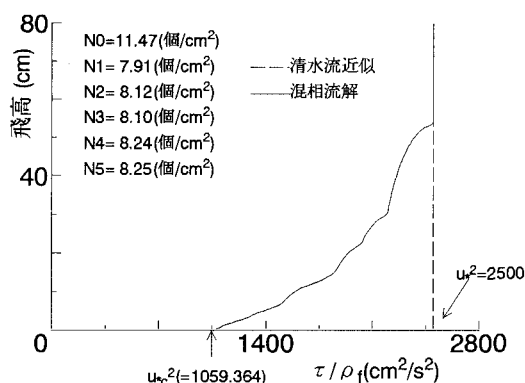


図1 Reynolds応力分布

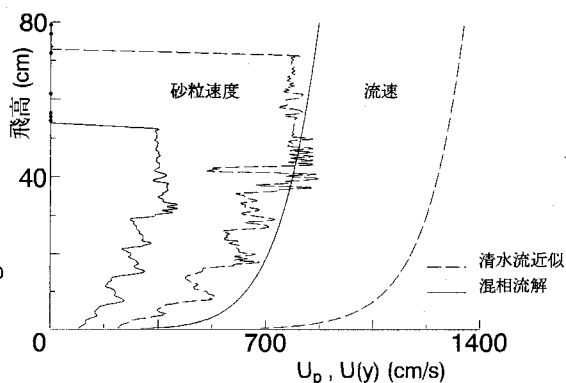


図2 流速分布及び砂粒速度分布

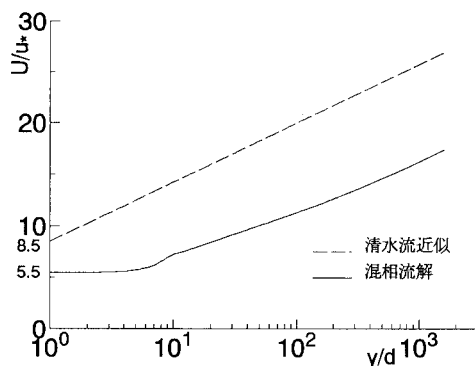


図3 流速分布の片対数表示

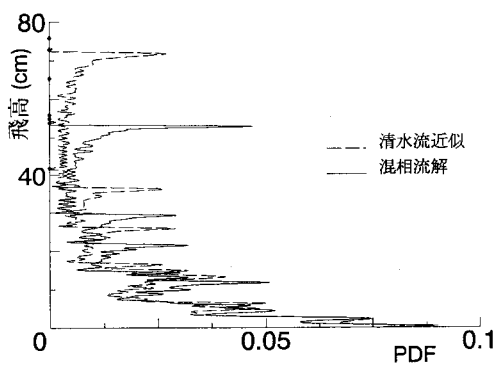


図4 砂粒の存在高さの確率密度分布

5. あとがき 砂面との衝突では鉛直上向きに飛び出す飛砂saltationの軌跡を数値計算し、各高さでの存在確率や抗力が求められると、それを形状抵抗として流れ場が再計算される。こうしたフィードバック機構を数値計算して平衡飛砂saltation層の解析を行なって飛砂量を予測する方法を提案した。系統的な計算からの特性把握、saltationの初速度を決定する砂面での反発、乱流構造の変化については経験的な知見を仮定しており、この側面のモデルの精度向上、さらに実験・観測による検証などが今後の課題である。

参考文献： 1) 後藤・辻本・中川：PSI-セルモデルによるSaltation層の解析，海岸工学論文集，39，pp.266-270，1992。

2) 辻本・中川：掃流粒子のSaltationの確率過程論的解析，土木学会論文集，345/II-1，pp.83-90，1984。