水流の乱れが土砂粒子の沈降運動に与える影響

早稲田大学 理工学部　　関根 正人
早稲田大学 大学院　○ 田畑 智永
国土交通省　　藤井 和久

１．はじめに

乱流状態の水中を輸送される土砂粒子のうち，水流の乱れに追随した運動をするものを浮遊砂あるいはウォッシュロードと呼ぶ．しかし，土砂粒子の場合，たとえ微細なものであっても密度が大きいためにわずかずつとはいえ沈降するため，乱れに応答した変動をしつつも大局的には沈降するような軌跡を描くことになる．こうした沈降の過程に関しては，関根･吉川[1)]あるいは山坂･池田[2)]の研究がある．さて，河床を起源とした土砂の移動について見てみると，これは一般にBed material loadと分類され，従来より掃流砂と前述の浮遊砂とに分けその各々を独立に評価する手法がとられてきた．しかし，浮遊砂に関して言えば基準点濃度や濃度拡散係数の評価法に関して長きにわたって問題が提起されてきた経緯があり，また，最近の著者らの解析から，掃流力のある範囲においては典型的な掃流砂とも浮遊砂ともいえない土砂の移動形式があることもわかってきている[3)]．本研究は，こうした点に鑑み，今後に向けた解析の第一歩として，より現実に近い水流の乱れを再現するとされているＬＥＳモデルを適用し，これによって再現した乱れの場において土砂粒子の運動の追跡・解析することで，乱れが粒子の軌跡を大きく偏綺させるメカニズムについて探っていくことを目的とする．

２．解析の概要

本研究では，前述の通りＬＥＳ（ラージ･エディ・シミュレーション）モデルを適用して，乱流状態にある流れ場を再現し，この中を沈降する土砂粒子の運動を数値的に解析する．ここでは，解析の簡略化のため滑面上の乱流場を対象とし，河原[4)]の解析に倣って解析コードを作成した．計算領域は，計算負荷を軽減させるため長さ6cm，幅3cm，水深3cmの計算領域とし，ここに64 x 64 x 192個の計算格子をとるものとした．そして，計算領域の上下流端ならびに側端においては周期境界条件を適用した．計算は，10秒程度の助走計算を行い，乱れの発達を確認した後に，水面から土砂粒子を投入するものとし，運動方程式を解くことでその軌跡を追跡しつつ，必要な水流の乱れデータのサンプリングを行った．運動方程式をはじめとした土砂粒子の運動の解析方法については前報[3)]を参照されたい．

３．解析結果

本論文では，土砂の粒径を0.2mm(沈降速度が2.64cm/sec)とし，摩擦速度の沈降速度に対する比がu^*/w_o=1.3とした結果を例に説明する．**図-1**は水流の乱れの一例を示しており，ここで追跡した粒子が乱れの影響を受けて顕著な軌道のずれをみせたz=1.0(cm/sec)におけるデータを示している．次に，**図-2**には粒子の運動の解析結果を示す．ここでは，粒子の鉛直方向の運動に注目することにし，図には上から順に，粒子の軌跡を表すためにそのz座標の時間変化，粒子の移動速度に沈降速度を加えた値と水流の乱れの時間変化，さらには，運動方程式の各項のオーダー比較の結果をそれぞれ示した．**図-2(b)**よりわかる通り，ここで対象とした条件下では，粒子は平均的には沈降しつつ流体の乱れにかなり追随しながら輸送されることがわかる．一連の運動としてみた沈降速度は静水時のものより小さくなるが，強い乱れの影響を受けていないと考えられる時刻におけるそれは静水時のものから大きく変化していないこともわかる．さて，この軌跡を見ると，0.84 ～ 1.0secの間で急激な上昇運動が生じていることがわかる．これは，**図-2(c)**よ

キーワード　土砂の沈降過程，ＬＥＳ，浮遊砂，数値解析
連絡先　〒169-8555　東京都新宿区大久保3-4-1　Phone 03-5286-3401　Fax 03-5272-2915

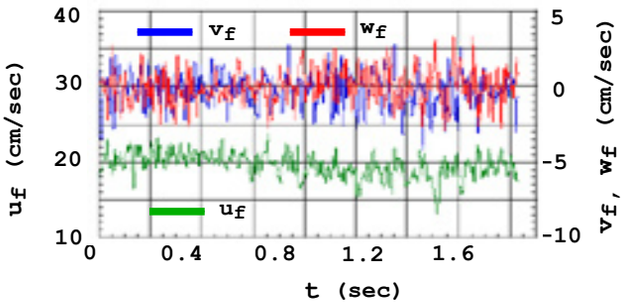

図 -1 流体の乱れデータの一例：(x,y,z)=(0,0,1)(cm)

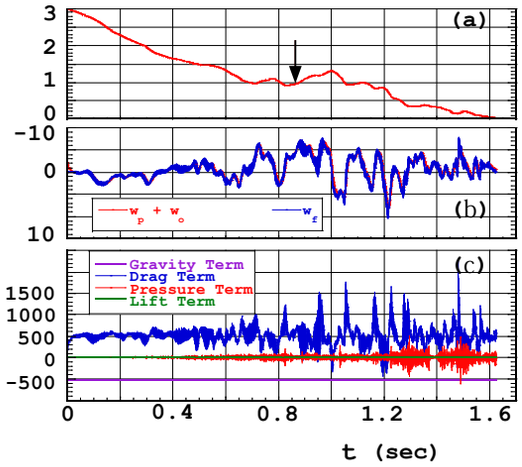

図 -2 土砂粒子の運動の解析結果：
(a) z_p の時間変化，(b) 静水中の沈降速度を加えた粒子の鉛直速度と流体流速の鉛直方向成分の時間変化，(c) z 方向への粒子の運動方程式中の各項のオーダー比較

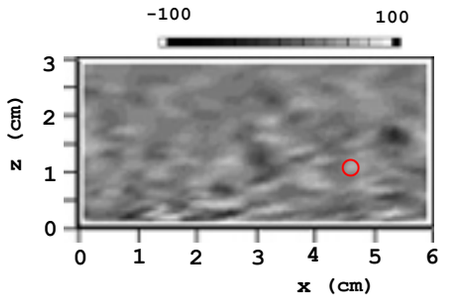

図 -3 y 軸周りの渦度のコンター図：
y=0(cm)，t=0.88 (sec)；m-sec unit

り，この時間帯の粒子の周辺には組織的でかつ規模の大きな上向き流れが生じていたことがわかる．また，図 -3 には，図 -2(a) に矢印を付した時刻 0.88sec における y 軸周りの渦度のコンター図を示している．図 -3 の○印がこの時刻における粒子の位置を示しており，この周辺に時計回りの強い渦が筋状に存在していることがわかる．そこで，このような粒子軌跡の上方への大きなずれはこうした上昇流の影響を強く受けたものと推察される．最後に，図 -2(c) より粒子の運動に及ぼす流体力の影響について簡単に考察する．この図より，鉛直方向の運動に関しては，重力と抗力が平均的にはほぼ同じ大きなオーダーの値をとり，揚力と圧力の項はそれに比べてかなり小さな副次的な値となる．特に揚力は河床面近傍を除くとほとんど無視できる．そこで，粒子の運動軌跡のずれは，水の上昇流の影響を直接的に反映した抗力の増大となって引き起こされるほか，水流の加速度の影響を反映した圧力項によっても修正が加えられ二次的な影響が現れるものと考える．

４．おわりに

本研究では，水流中を沈降する粒子の運動に及ぼす乱れの影響について，単一粒子の運動の追跡結果を例に説明してきた．対象とした計算領域が十分に大きなものではなく，周期境界条件の関係で生成される乱れのスケールが規定されてしまう恐れがあることや，粒子の存在に伴う水流の乱れ場への影響をフィードバックしていないこと，など今後に残されている問題点も少なくない．今後は，こうした点を手始めとして流砂モデルの再構築を目指した研究を継続的に進めていく予定である．

参考文献

1) 関根・吉川：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，No.387/II-8，209-218，1987.
2) 池田・山坂・木内・高橋：鉛直振動を受ける流体中の球の沈降速度，土木学会論文集，No.393/II-9，57-66，1988.
3) 関根･小川田・佐竹：Bed Material Load の流送機構に関する研究，土木学会論文集，No.545/II-36，23-32，1996.
4) 佐藤・河原・玉井：Smagorinsky モデルによる複断面直線開水路乱流の解析，土木学会論文集，No.628/II-48，115-130，1999.