

乱流場における土砂粒子の沈降・分散過程

早稲田大学理工学部 正会員 関根 正人

早稲田大学大学院 学生員 ○田畑 智永

1. はじめに

前報¹⁾では、水流中を沈降する土砂粒子の運動に及ぼす乱れの影響を定量的に評価し、粒子が組織的な渦に取り込まれることと粒子軌道に偏倚が生じることを報告した。本研究においても、前報と同様に「LESモデル」を適用するが、その解析精度を上げること、計算領域を広げること、などの修正を加えることにし、水流の乱れが粒子の軌道を大きく偏倚させるメカニズムや土砂粒子群が分散する過程について明らかにすることを目的とする。

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群の運動を数值的に解析する。ここでは、解析の簡略化のために滑面上の流れ場を対象とすることにし、河原²⁾らの解析モデルを参考に開発した解析コードのうち、移流項の取り扱いに関してのみ森西³⁾の考え方による4次精度のスキームを導入することとした。計算領域として長さ9cm、幅3cm、水深3cmのものを想定し、ここに $96 \times 64 \times 96$ の計算格子を配置することにした。また、計算領域の上下流端ならびに側端には周期境界条件を適用した。計算は、乱れが十分発達させるための予備計算を行い、その後水面から土砂粒子(群)を投入し、運動方程式を解くことでその運動軌道を追跡した。その際、粒子の運動に関わるデータとあわせて水流のデータもサンプリングし、両者の間の相互相関性について考察を加えるものとした。

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を $u^*/w_0=1.3$ とした場合の解析結果を例に説明する。図-1には、本研究で再現した乱れについてのデータが示されており、左から順に、水流の乱れ三成分の時系列データ、複数地点でサンプリングされた乱れ強度とレイノルズ応力の水深方向分布の一例をそれぞれ示している。図-1(b)、(c)中の曲線ならびに直線はたとえば禰津⁴⁾らによって明らかにされている分布を表している。これらの図などから再現された水流に関しては概ね妥当なものと考えている。次に、図-2には粒子の運動の解析結果を3つの軸方向に分けて示した。この図には、上から順に、粒子の座標の時間変化（すなわち軌跡）、粒子の移動速度（鉛直方向に関しては静水中の沈降速度を加えた値）とそれに作用する水流の乱れの時間変動、運動方程式中の各項（重力のz軸方向成分の値で除した無次元量）のオーダー比較の結果がそれぞれ示されている。図-2中の2段目の図より、ここで対象とした条件下では、粒子は流体の乱れにかなりよく追従しながら移動していることがわかる。また、鉛直方向(z軸方向)の運動に着目すると、粒子は0.83secにおいて上昇流の影響を強く受け、その軌道を大きく変化させていることがわかる。なお、別途行った渦度に関する詳細な検討結果によれば、この時刻に粒子は組織的な渦に取り込まれていることが確認された。このように、粒子の軌道のずれは組織的な渦の影響下で生じているものと考えられる。さらに、運動方程式中の各項に注目すると、この運動は概ね重力と抗力とで運動が規定され、揚力や圧力項の影響は二次的であることもわかる。これは浮遊砂の運動において、河床面近傍でのみ揚力が無視できないとされる指摘と一致するものである。また、図-3には複数粒子を同時投入してその軌道を解析した結果の一部を示している。ここには20個分の粒子軌跡が描かれており、水流の乱れの影響を受けて大きく分散している様子を見て取ることができる。

4. おわりに

本研究では、著者らのこれまでの解析モデルを修正することを試み、LESモデルにより再現した乱流場についての検証を加え、その妥当性を確認した。また、乱流中を沈降する土砂粒子の運動軌道の解析を行うことにより、単一粒子の沈降運動に及ぼす乱れの影響などについて調べている。さらに、粒子を複数同時に投入する

キーワード 土砂の沈降過程，LES，土砂の分散，数値解析

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 Tel 03-5286-3401 Fax 03-5272-2915

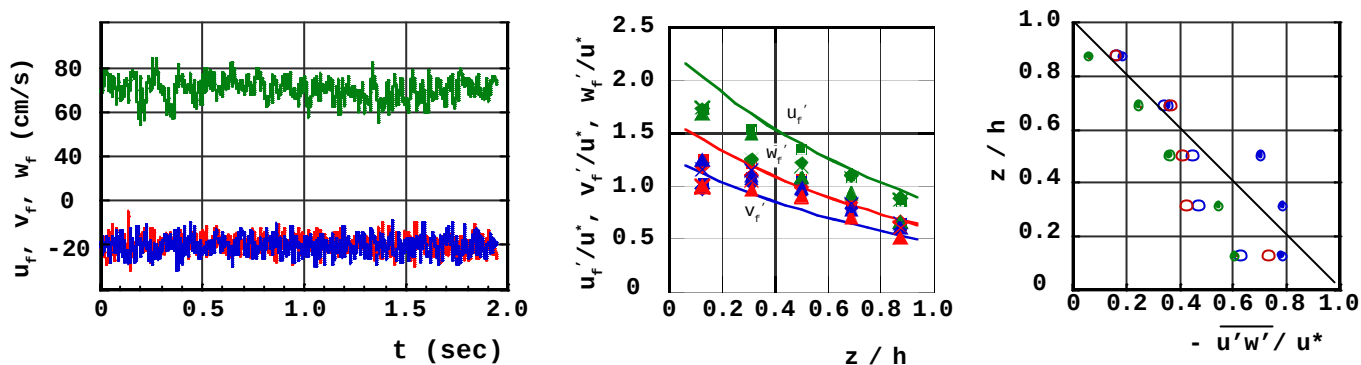


図-1 流体の乱れ: (a)時系列データat $(x, y, z) = (2, 1, 1)$ (cm), (b)乱れ強度, (d)Reynolds Stress

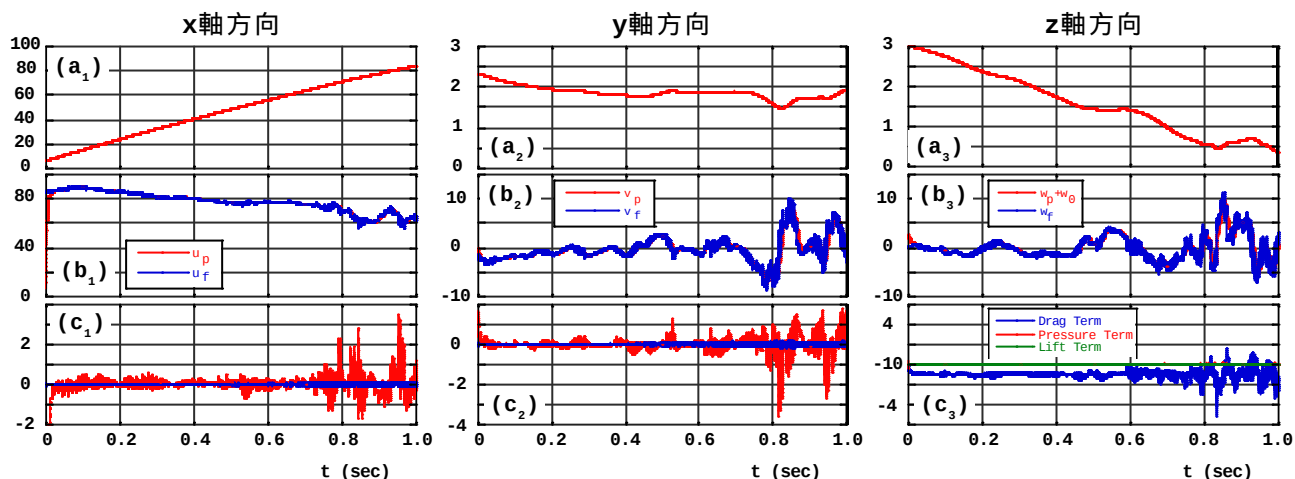


図-2 粒子の運動の解析結果: 上から順に粒子の軌跡, 移動速度と作用流速の比較, 運動方程式の各項のオーダー比較

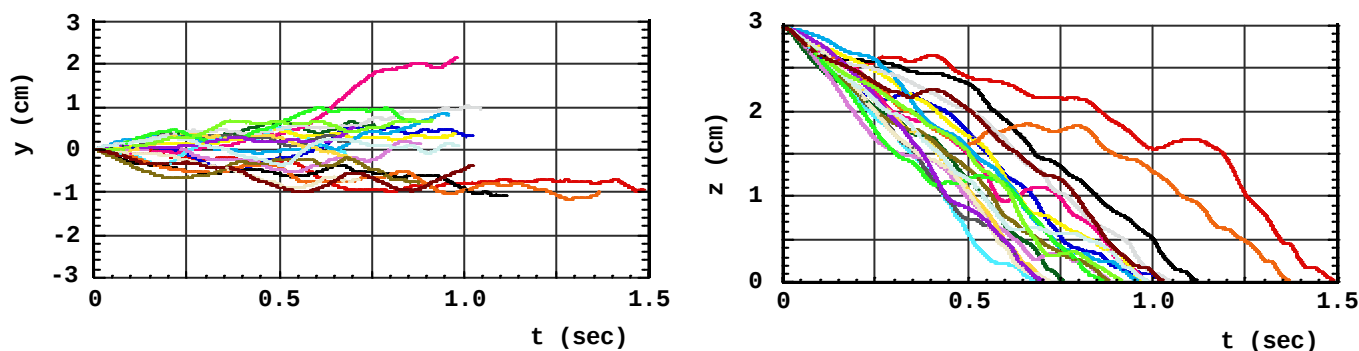


図-3 土砂粒子の沈降・分散過程 (左図の縦軸の値は粒子の初期位置からの変位を表す)

ことで粒子群の分散過程についての検討も一部行っている。このような同時追跡の場合には、水流中のコントロール・ボリューム内の土砂濃度がある程度大きくなり、土砂の存在が水流に及ぼす影響をフィードバックすることが必要になる。この点については現在検討中であり、ここでは考慮していない。また、本研究では図-3のような粒子群の運動軌跡の解析からいわゆる拡散(分散)係数を評価することを試みたが、未だ検討の最中であり今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 関根・田畑・藤井: 水流の乱れが土砂粒子の沈降運動に与える影響, 第58回年次学術講演会講演概要集, -147, 2003.
- 2) 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/ -48, 115-130, 1999.
- 3) 森西: 非圧縮性流体解析における差分スキームの保存特性 (第2報, スタガードおよびコロケート格子系の差分スキーム), 日本機械学会論文集 (B編), 62巻604号, 1996.
- 4) たとえば, I. Nezu and H. Nakagawa: Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR Monograph, 1993.