浅水状態で水面変動のある 自然礫床粗面乱流のLES解析

LARGE EDDY SIMULATION OF NATURAL GRAVEL BED FLOW WITH WATER SURFACE FLUCTUATION IN SHALLOW WATER CONDITION

岡西健史¹・藤田一郎²・小田崇裕¹
Tateshi OKANISHI, Ichiro FUJITA and Takahiro ODA

¹ 学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 正会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Three dimensional open-channel turbulent flows with rough wall beds composed of randomly distributed gravel particles were simulated by using a large eddy simulation model for a relatively shallow water condition. The bathymetry of an actual rough bed was measured by a photogrammetric method and the digital data thus obtained was directly introduced into the LES. An immersed boundary method was incorporated to the model for reproducing such an arbitrary boundary condition. Experimental examinations were also conducted to evaluate the simulation. It was made clear that the correlation between water surface fluctuation and velocity fields become higher for larger Froude number. The effect of gravel size on the turbulent scale was revealed by comparing integral scale in different direction. In addition, a new method to visualize volume of fluids passing through a horizontal plane was devised to investigate large scale turbulence structures that interact with water surface.

Key Words: LES, rough wall turbulence, water surface fluctuation, gravel bed, flow visualization

1. はじめに

河川の流れは流体力学的には境界面が粗面で構成される開水路乱流とみなせるが、流れが自然条件の中に晒されるため、実際には風や日照、あるいは降雨の影響を受けて複雑に変化する。このような自然の影響がない場合でも、乱流場特有の多スケールの現象が内在するため、流れは非常に複雑なものとなる。ただ、このように河川流に影響を及ぼすあらゆる事象は、最終的には河川表面に現れることが多い。内部流れが水表面に現れる典型的な例としては、以下のようなものがある。河床波下流で生じる剥離渦が要因と考えられるボイル渦、橋脚の存在によって発生する馬蹄形渦が水面に到達した結果現れる湧昇流、複断面の境界線に沿って発生する大規模な水平渦や湧昇流¹⁾、あるいは洪水時に並列らせん流の生成に伴って観測される縦筋などである。さらに、勾配の急な山地河川では洪水時に水面全体が跳ね上がるような現象も観察されている。これは、河床面に存在する比較的大きな石などの粗度要素や地形的な凹凸面に高速の流れが衝突することによって生じたものと考えられる。逆に微細な構造に目を向ければ、気液界面における表面更新渦²⁾の生成も対象となる。

このように、河川表面には様々な事象が現れるが、

河川工学的に特に有意義であったのは、等間隔で並んだ縦筋から洪水流の内部構造を推定した木下ら³⁾の研究であろう。また、近年では水面に現れた凹凸の移流速度を表面流とみなし、非接触的に画像計測で計測する手法などの開発を河川工学的な応用例として挙げることができる⁴⁻⁶⁾。ただ、これまでの研究の進展を鑑みると、水面変動そのものに対する検討は、計測技術や数値解析手法などが未熟であったために十分でなかったのも事実である。すなわち、基本的には平均水位や平均水面勾配が重要であるため、その変動に関する検討はあまり行われてきていない。例えば、水面変動の誘因となる乱流構造の特性、水面変動場の移流特性、水面近傍での気体吸収における水面変動の役割、あるいは粗面と滑面における水面変動の違いなどについては不明な点が多い。

このような背景から、著者らは河床面が半球粗度要素で構成される場合について、これまで実験的・数値解析的な検討を進め、浅水状態で発生する水面変動のパターン分類などを行ってきた^{7,8)}。本研究では、河床面が自然の礫で構成された浅水状態の粗面乱流を対象とし、水面変動の計測手法やLES (Large Eddy Simulation) モデルに新たな改良を加えて検討を行った。

図-1 実験装置の概要

(a) 元画像 (b) 多重合成画像(10 フレーム)

図-2 水面形状抽出の流れ

2. 可視化実験と画像解析

(1) 実験装置

本研究では、水路全長約6m、水路幅30cmの可変勾配型循環式直線水路を用いて実験を行った。礫は水路上流端から約1.5m下流の位置より約4mの区間に敷き詰めている。また、撮影は礫の効果による乱流場が十分に発達したと思われる上流端から約4.5mの位置で行っている。図-1に実験装置の概略を示す。シリコンチューブ内部から上流方向へ照射されたレーザー光膜により水路中央部の縦断面内の可視化を行い、2台の同期をとったハイスピードカメラ (HAS500 と HAS550) を用いて内部流速場(下段カメラで)と水面変動(上段カメラで)の同時計測を行う。画像のサンプリングは500Hzで行い、1024x992画素のモノクロ連続画像を約17秒間(約8500フレーム)取得した。前報¹⁰⁾では透明アクリルボックスを用いて水中からのレーザー照射を行ったが、ボックスの抵抗が無視できない場合があったため、先端に透明な円形のアクリル板をはめ込んだシリコンチューブを用いた。内部流速場計測の対象は水路中央の縦断面とし、水面変動は計測領域上部に設置した鏡にレーザー光膜

(a) 左アングル (b) 右アングル

(c) ステレオ計測結果

(d) 格子点補間後 (e) 底面データ

図-3 LES に用いる DEM データの取得法

と水面の交わる箇所を写し出し計測する。

(2) 水面変動の計測

水面変動は鉛直光膜と水面の界面形状を以下の手順で抽出して計測した。図-1の上段カメラで得られた瞬間画像(図-2(a))ではトレーサ粒子が粒状に分布しており、そのままでは水面形状を切り出せない。そのため、まず、図-2(b)に示すように連続10フレームの画像を順次多重合成する。次に、水平方向にのみ平滑化処理を行い(図-2(c))、メディアンフィルタでノイズ除去後(図-2(d))、二値化処理を行うことでスムーズな水面形状を取得した(図-2(e))。以上の処理を撮影した全画像に対して行い瞬時の水面形とし、水面変動を求める。内部流速場の解析には三枚連続画像による時空間微分法を用いたPIVを使用した⁹⁾。

3. LES による粗面乱流場の再現

(1) 解析モデル

水面の変動も含めた開水路乱流の数値解析モデルとしては、著者らが開発してきた LES モデルを利用した。このモデルでは、密度関数を用いて気相・液相の界面である水面の変動を表し、底面形状は埋めこみ境界法 (IBM) で表現する。詳細なモデル内容については、吉村・藤田^{10,11)}を参照されたい。本研究では、後述のように不規則な河床形状を自動的に計算に組み込む工夫を追加した。

(2) 粗面データの取得

本研究では河床面のデータを、実際に自然石の礫を平面に敷き詰めたものから取得することとした。DEM (digital elevation model) データは2つのアングルから撮影したデジタル画像を用いてステレオ画像計測により求めた。この手法では、高さの情報が離散的にしか得られないため、LES の計算格子の配置点での高さデータを最近傍 4 点のデータを用

表-1 水理・解析条件

H(cm)	Fr	Re	Um(cm/s)	Slope
5	0.15	5250	10.5	0.00035
5	0.3	10500	21.0	0.0014
5	0.4	14000	28.0	0.0025
5	0.6	21000	42.0	0.0056

の方向成分であり、底面データは2次元なので添字は I, K のみである。ここで、図-4(b)のように右側に壁がある場合を考えると、 x 軸の風下側の壁の位置は次式で計算される。

$$x_{wall} = x_I + \frac{y_J - h_{I,K}}{h_{I+1,K} - h_{I,K}} \Delta x \quad (1)$$

この位置が隣のグリッドよりも近い点にあれば、風下には壁があることがわかる。このような判定を上下・左右・前後の方向で行うことにより、その点がどのような位置にあるかを判別できる。境界面は曲面も含んでいるが格子単位の大きさで見たときは局所的に平面とみなしている。

壁面に最も近い格子点の流速は、3軸方向のそれぞれ風下、風上の点の計6点を使用して三次元補間する。壁面がない場合は補間点と隣接セルとの距離はグリッド距離 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ であるが x 軸の風下と y 軸の下側には壁面があるので壁までの距離 d_x, d_y とすると速度の補間式は

$$u_{I,J,K}^{m+1} = \left(\frac{1}{\Delta x} u_{I-1,J,K}^{m+1} + \frac{1}{d_x} u_{bw} + \frac{1}{d_y} u_{bs} + \frac{1}{\Delta y} u_{I,J+1,K}^m + \frac{1}{\Delta z} u_{I,J,K-1}^{m+1} + \frac{1}{\Delta z} u_{I,J,K+1}^m \right) / L \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{d_x} + \frac{1}{d_y} + \frac{1}{\Delta x} + \frac{1}{\Delta y} + \frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta z} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで壁面上の速度 u_{bs}, u_{bs} は non-slip 境界条件により $u_{bs}=u_{bs}=0$ であり、 m は計算ステップである。原点に近い点は計算済みなのでステップが進んだ値を用いている。他の成分についても同様に処理する。

(4) 解析条件

解析は表-1 に示した実験の水理条件に合わせて行った。河床面の粒径(d)は 1.0cm と 1.5cm の二通りとした。解析空間は流れ方向 40cm, 横断方向 20cm である。計算格子数は流れ方向 150, 横断方向 80, 鉛直方向 100 とした。流れ方向, 横断方向は等間隔格子, 鉛直方向は最下点から底面最大点まで 20, そこから水面まで 70, 気層は 10 の不等間隔格子である。平均水深は 5cm で固定し、フルード数を 0.15, 0.3, 0.4, 0.6 の 4 通りとした。流れ方向, 横断方向に関しては周期境界とした。気層の上面にはフリースリップ条件を与えた。

図-4 速度補間の例

いた線形補間から求めた。補間後のデータを図-3(d)に示した。このデータを基に各グリッドに固体占有率の値 0~1 を与えて 0.5 の等数値面を描くと図-3(e)のような底面画像が得られた。礫と礫の間の細い隙間などは再現できていないが、不規則な高さ分布を持つ擬似粗面を生成することができた。なお、平面的な凹凸パターンはそのまま高さ分布を増減することにより、模擬的に粒径高さを変化させた。

(3) DEM データの LES への組み込み

以上のプロセスで得られた DEM データを LES に組み込むために IBM(Immersed Boundary Method)を用いる。そのためには、各グリッドの属性、すなわち、流体グリッドか固体グリッドかあるいは中間グリッドかを予め調べておく必要がある。そのための壁面判定の第一ステップとして各グリッドが DEM データの底面高さ以上かどうかをグリッドの上下方向で調べる。まず、グリッドが DEM データより下方にあれば壁面内と判定し、流体内部であれば、各軸方向(3方向)にそのグリッド以上の高さの DEM データがあるかどうかを検索する。

一例として、図-4(a)に示すような境界面があった場合の青丸で示した点 (I,J,K) の補間速度を考える。壁面との境界面の速度補間には隣接する格子セルの速度と壁面上のゼロ速度を用いた多方向線形補間を用いる。 x 軸, y 軸, z 軸はそれぞれ流れ方向, 鉛直方向, 横断方向とする。添字 I,J,K は軸 x, y, z

図-5 平均流速分布の比較

図-6 平均流速分布の比較：対数プロット

3. 実験と解析の比較

(1) 平均流速分布

画像計測(PIV)と LES による流れ方向の平均流速分布を外パラメータで無次元化して比較したのが図-5 である。PIV はある一つの縦断面のデータであるのに対し、LES はすべての鉛直断面の平均という点異なるが、フルード数の違いにかかわらず、どのケースも粒径毎に普遍的な分布を呈している。後述のレイノルズ応力分布から求めた摩擦速度を用いて内部変数による比較を行ったのが図-6 である。ここでは、フルード数毎の摩擦速度の値が比較的一致していた PIV($d=1.0\text{cm}$)と LES($d=1.5\text{cm}$)を比較した。粒径が異なるもの同士を比較したのは、LES の場合には河床面凹凸の最大の変動幅を 1.5cm としていたために、平均粒径では 1.0cm 程度と考えられるからである。図-6 より、PIV と LES は必ずしも完全には一致していないが、フルード数の増加に従って対数プロット上で滑面分布からのずれが大きくなる特徴を再現することができた。

(2) レイノルズ応力分布

図-7 にレイノルズ応力分布を比較した。上述の

図-7 レイノルズ応力分布の比較

図-8 水面変動と内部流速の関係

ように PIV と LES ではデータの取得方法が異なるため PIV にはばらつきが見られるが、全体的には良好な結果が得られている。

(3) 水面変動の発生要因

水面変動の発生要因を調べるために、実験データを用いて内部流との関係を調べる。図-8 の上段は画像計測で得られた水面変動の時系列データを示す。このデータにはなだらかな変動の中に急激に変

図-9 水面変動と鉛直流速成分の相互相関(PIV)

図-10 水面変動と鉛直流速成分の相互相関(LES)

化する図中の点 A から点 B のような変動が含まれている．この変動に着目して同時計測している内部流の特徴をタイムラインで示したのが図-8 の中段の図で、縦の破線の位置の時系列が上段のプロットである．タイムラインは高さの異なる水平線から擬似的に水素気泡（トレーサ）を連続的に発生させた状態を表しており、中段の図には上段の矢印で示した時点のトレーサ分布が示されている．すなわち、これは注目点の水位が最も低いレベルから急上昇する直前のトレーサの状態に対応している．このときの縦断面内の PIV データを下段に示す．コンターは鉛直流速成分をさす．これらより、実際に水面が急上昇する直前には上流側の水面下に大規模な上昇流の塊が存在していることがわかる．具体的に水面を押し上げようとしているのは、中段図で点 B と記した上昇中の流体塊とみなせ、この場合は大きく時計回りに回転しながら上昇している．このような上昇流体塊と水面変動の組み合わせは、他のケースでも数多く見られた．

そこで、水面の着目点における水面変動 h'_i と流体内部の各点における鉛直方向速度変動 $v'_i(x,y)$ の相互相関係数 $R_{hv}(x,y)$ を計算して比較した． $R_{hv}(x,y)$ は次式で表される．

$$R_{hv}(x,y) = \frac{\sum_{i=0}^N (h'_i - \bar{h}_m) (v'_i(x,y) - \bar{v}_m(x,y))}{\sqrt{\sum_{i=0}^N (h'_i - \bar{h}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=0}^N (v'_i(x,y) - \bar{v}_m(x,y))^2}} \quad (4)$$

ここで、 N は全データ数、ある物理量 a に対する時間平均値を a_m で表している．

水面形と内部流速の同時計測実験から得られた相関分布を図-9 に示す．着目点の上流側で強い正の相関、下流側で負の相関が明瞭に現れている．強い正の相関領域 (0.2 以上) は水面から水深の5分の一程度の深さにまでは及んでいるが、底面付近には届いていない．これは、水面が下方から接近してくる上昇流を感じていないことを意味する．上昇流は基本的には河床面で生成されるはずであるが、水面変動に影響を及ぼすのは水面にかなり接近してきた渦塊であることを確認できた．粒径による違いはあまり見られないが、大粒径の相関領域の方が若干深く広がっているように思える．

同様の解析を LES の結果に基づいて行なったのが図-10 である．正の相関領域は実験のように深い場所までは広がっていないが、上流側で正、下流側で負の領域となっている点は実験値と一致している．このことから、本 LES 解析では渦塊による水面変動の発生をある程度再現できたものと考えている．ちなみに、棚津・中山¹²⁾の滑面乱流に対する研究では、本実験とほぼ同じ水深でも実験が行われているが、フルード数が 0.6 程度の場合でも水面変動と鉛直流速成分の相関値は最大 0.04 程度であり、今回の粗面乱流よりはかなり小さい値となっている．これは、滑面の場合には水面変動に影響を及ぼすような強い上昇流が発生しにくいことを意味しており、粗面乱流との違いが明確であることが

わかった。

4. 平面的な上昇流体塊の特性

(1) 二次元仮想トレーサ法

以上、鉛直断面内での特徴に注目してきたが、以下では LES の結果を用いて空間的な現象について調べる。水面に影響を及ぼす上昇流体塊の分布状況やその特性を調べるために、水面近くの水平断面を上向きに通過する流れを把握する可視化法を考案した。この方法は、図-8(中段)で示した水素気泡を模擬するトレーサを水平面内に拡張したものである。実験では実現不可能であるが、任意の平面全体から連続的に仮想トレーサを注入する状況に相当する。具体的には、局所的な流れに追従する200x200個のトレーサを連続的に注入し、微小時間後にトレーサ群が形成する幾何形状を比較する。粒径1.5cm、フルード数0.4のケースについてこの方法で得られた結果を図-11(a)に示す。平面は水深の8割の高さである。この図では水平面を貫通して上昇してきた流体塊がコブ(bump)のように表現されており、その平面的な分布もよくわかる。bumpの形状は円形か楕円であり、これより棒状の流体塊が貫入してきたことを推定できる。

(2) 水面近傍二次元平面内の特性量の分布

図-11(a)の瞬間における平面内の変動流速ベクトルと流れ方向の流速分布を図-11(b)、鉛直軸をもつ渦度分布を図-11(c)、水平軸をもつ渦度分布を図-11(d)に示す。流速と渦度は平均流速、平均水深で無次元化し反時計回りを正とした。Bumpのある場所では相対的に低流速であり、底面からのイジェクションであることがわかる。渦度の構造は単純ではないが、水平渦の分布がbumpによく対応しており、ローリングしながら流体塊を盛り上げている。同時にbump部分では鉛直軸をもち回転方向の異なる成分でも構成されていることがわかる。

5. おわりに

任意形状のDEMデータを組み込めるLESモデルを開発し、粒径に対して比較的水深が浅く水面変動のある粗面開水路乱流へ適用した。このモデルで粗度抵抗を解析できることを示した後、水面変動と内部流速の相互相関関係についても実験結果を再現できることを明らかにした。また、上昇渦塊の空間分布を示す可視化法を提案し、水面変動を引き起こす流体塊の渦度成分の構造を示すことができた。また、今後は波紋の追従性を確認することにより非接触型の表面流速計の発展に役立つと考えられる。

参考文献

- 1) 池田駿介・村上宣義・空閑健：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.

図-11 水平断面における特性($y=0.8H$, $Fr=0.4$, $d=1.5cm$)

- 2) Nezu, I. & Nakayama, T.: Relationship between turbulent structure near the free-surface and surface-wave-fluctuations, Environmental and Coastal Hydraulics, IAHR/ASCE, pp.245-250, 1997.
- 3) 木下良作・宇民正・上野鉄男：洪水時河川に現れる大規模渦について, 第23回乱流シンポジウム講演論文集, pp.329-334, 1991.
- 4) 藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, 38巻, pp.733-738, 1994.
- 5) Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, Water Resources Research, 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.
- 6) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 7) 古谷勇樹・藤田一郎：速度場と水面変動の同時計測システムを用いた粗面乱流場における水面波形の移流特性に関する一考察, 水工学論文集, 54巻, pp.997-1002, 2010.
- 8) 古谷勇樹・藤田一郎：埋め込み境界型LESを用いた半球粗面乱流場における水面変動と移流特性に関する検討, 水工学論文集, 55巻, pp.S 1027-S 1032, 2011.
- 9) 藤田一郎：時空間微分法の高精度化とその検証, 可視化情報, Vol.23, Suppl. No.1, pp.25-28, 2003.
- 10) 吉村英人・藤田一郎：境界埋め込み法を取入れたLESによる開水路粗度乱流場の上昇剥離渦の解析, 水工学論文集, 51巻, pp.769-774, 2007.
- 11) 吉村英人・藤田一郎：水面変動を考慮した粗面乱流場のLESおよびPIVによる解析, 水工学論文集, 52巻, pp.1015-1020, 2008.
- 12) 瀬津家久・中山忠暢：自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, No.586/II-42, 51-60, 1998.

(2012.9.30 受付)