半球粗度粗面が生成する水面形のパターン分類と その特性に関する基礎研究

CLASSIFICATION AND CHARACTERISTICS OF WATER SURFACE PROFILES GENERATED BY HEMISPHERE ROUGHNESS ELEMENTS

岡西健史¹・藤田一郎²・古谷勇樹³

Tateshi OKANISHI, Ichiro FUJITA and Yuki FURUTANI

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)

³ (株) 日本総合研究所 (〒102-0082 東京都千代田区一番町 16 番)

In open-channel turbulent flows with a rough wall, water surface profiles can be affected by the relative size of roughness element to a water depth and arrangement of roughness elements. In order to find characteristics of water surface profiles under various hydraulic conditions, an experimental study by using a simple surface flow visualization technique and a numerical study based on a large eddy simulation model that can take into account of water surface deformation were conducted for a rough wall boundary. Hemisphere particles were used as candidate of roughness elements for simplicity of establishing several particle distribution densities. It was made clear that water surface pattern can be classified by five types: flat, ripples, advection, parallel and cross. For sparse roughness elements, LES was conducted successfully to reproduce the above surface patterns.

Key Words: rough-wall turbulence, surface profile, LES, immersed boundary method, hemisphere roughness

1. はじめに

河川や開水路の水面は気液界面を構成する境界面であり、様々な外的・内的要因により多様な変形状態を呈する。外的要因の中で影響が大きいのは風であり、風速の増大とともに風波が発達する。次いで、橋脚や水制などの河川構造物によっても後流や剥離渦の影響で水面は変動が激しくなる。あるいは、船やボートの移動に伴って発生する航跡波の影響もある。津波の遡上やダムブレイクなどに伴う水面の大変形も急激な流量の変化という外的要因の結果の現れである。これらの外的要因に対し、内的要因による変動は流水内部や河床の状態が水面に現れるものである。内的要因の中でも水面の変形や変動が大きいのは反砂堆上の水面やshoot & poolなどのように河床の大変形に伴って生じるものである。また、高流速が生じる洪水流においては白波やうねりを伴った水面変動が発生する場合もある。一方、平均的には平面的な水面で観察されるのがボイル渦や流水内部の乱流変動によって生じる変動（以降、水面波紋と呼ぶ）であり、その物理スケールは他の要因と比べると相対的に小さい。洪水時には、以上に示した様々な要因によって発生する水面変動が複合的に重畳し、さらに複雑な水面の状況が出現する。

このように河川や開水路の水面は様々な要因によって変形したり変動したりするが、本研究では特に内的要因による水面変動に着目して基礎的な検討を行う。内的要因は換言すれば、開水路粗面乱流による水面への影響と見なせる。粗面乱流の研究は古い歴史¹⁾を有しているが、粗面の形態が多様であること、近年になって画像計測²⁾ (PIVやPTVなど) などの精密な計測法が発達してきたこと、さらには数値解析手法が粗面を厳密に取り扱えるようになってきたことも背景となって新たな研究が進められるようになってきた。このことは、最近になってもレビューペーパー³⁾が出されていることからわかる。とりわけ礫床河川^{4, 5)}に関する研究は活発であるが、最近の研究においても、水面変動を取り扱った例はわずかしかない。例えば、Cooperら^{6, 7)}やNicholsら⁸⁾は、平均粒径を変化させた礫床開水路の水面に音波を照射し、反射波の特性から水面変動を間接的に計測する手法を開発し、河床面の抵抗特性との関連性について検討を行っており、内的要因の工学的利用として注目している。この他に重要な内的要因として、電波流速計や画像計測による非接触型の表面流計測への利用がある。これらの手法ではいずれも水面波紋の移流速度が表面流速を代表するものと仮定して計測が行われており、電波流速計に関しては

図-1 粗度要素の配置パターン

稲垣ら⁹⁾，画像計測に関しては藤田ら¹⁰⁾ がいずれも ADCP による計測結果と比較して妥当な結果，すなわち，水面波紋の表面流追随性を確認する結果を得ている。

一方，数値解析による研究においては個々の粗度要素を境界条件として組み込むことが可能となり，棧粗度¹¹⁻¹³⁾ や半球粗度^{14, 15)} を対象とした LES による解析例が示されている．本研究では，疎から密に配置した半球粗度を対象とし，疎密の違いが水面の変動パターンに及ぼす影響について検討する．粗度要素配置の違いによって生じる水面変動はそれぞれが水面変動の素過程を表しており，礫床河川の水面変動はこれらの素過程が混在したものと考えられる。

2. 水面変動のパターン分類

(1) 水面変動の可視化法

実験に用いた水路は，長さ約 6m，幅 0.3m，の全面ガラス張りの循環式開水路である．粗度要素には半径 1.5cm の木製の半球を用い，図-1 に示すように最も稠密に配置したパターンを C，それから千鳥状に 1 つおきに間引いたパターンを B，さらに間引いたパターンを A とした．水面変動のパターン分類は二次元的な水面形に対する精度の高い計測が困難なため，定性的に行った．すなわち，図-2 に示すように下流側の水面から上流に向けて斜めにハロゲン光源を照射し，水面に投影された光源を上流側に設置したビデオカメラで撮影して水面のパターンを比較した．撮影は外光を遮断した暗室状態で行っているため，水面で反射した光源光の散乱状態のみを抽出できる．光の散乱分布は定性的に局所的な水面勾配の分布に対応していると見なせる．

図-3 に典型的なパターンが得られた時の水表面

図-2 水面パターンの可視化法

図-3 水面パターンの分類（画像）

の瞬間画像を示した．水路底面の色は，半球粗度を黒色に塗りつぶしているため，配置パターン C では黒色であるが，配置パターン A や B では，粗度要素を取り除くために底面に横断方向に貼り付けた両面テープが現れている．そのため，底面はまだら模様になっている．図-3 では，水面の目視観察の結果から水面のパターンを Advection (A)，Cross (C)，Parallel (P)，Ripple (R)，および Flat (F) の 5 通りに分類しているが，底面色も混在しており瞬間画像だけでは識別しにくい．そのため，ここでは散乱光の揺らぎの状態を画像処理し，水面パターンの違いを抽出することとした．具体的には，撮影した画像の各画素における輝度値 (0~255) の時間変化から輝度分散値の分布を求めた．撮影には，300fps のハイスピードカメラ (512x384 画素) を用い，約 15 秒間のデータを処理した．図-3 に示したケースに対する画像処理結果を図-4 に示した．これより，輝度値の分散 (σ^2) で比較すると水面のパターンを明瞭に識別できることがわかる．以下，各ケース

図-4 水面変動のパターン分類(処理後)

の特徴を記す。

(2) 水面パターン分類

図-4 より最も輝度の分散値が高いのは Advection であることがわかる。それは、このパターンでは時々刻々、水面波紋が流れ方向に移流し散乱光がゆらぐためである。このパターンは粗度に対する相対水深が大きく、レイノルズ数が大きい場合に生じる。Cross は、個々の粗度要素の圧力抵抗による効果が独立して水面に現れるパターンであり、千鳥状に配置された粗度要素上の水面のみが盛り上がる。Parallel は、粗度要素の圧力抵抗による水面の盛り上がり横方向につながったパターンであり、位相のずれた定常的な波面が流れ方向に並ぶ。Ripple は水面にさざ波程度のわずかな変動（実験水路では側壁から発生するが多い）が生じるパターン、Flat はさらに水面が平穏になるパターンであり、両者の差はあまりないが、図-4 からわかるように Ripple では水面の揺らぎにより、輝度分散値が光源スポットの周辺で高くなる。特に、Cross や Parallel では、水面の勾配が大きい波面からの散乱光の揺らぎが激しく分散値が大きくなるのに対し、粗度の影響を受けた局所的な水面勾配が小さい地点では散乱光の向きが安定するため分散値が小さくなる。この特性から、定常的な水面パターンの特徴を分散値分布の形で抽出することが可能となっている。

(3) 各水面パターンの発生条件

上の分類は、粗度要素によって発生する典型的な水面パターンであり、河床面粗度の配置が複雑な場合にはこれらの基本的なパターンが重なり合った水面変動が発生すると考えられる。そこで、これら

図-5 水面パターンの発生条件

のパターンが生じる条件をフルード数 (Fr) と相対粗度高さ (h/D : h は半球粗度を無視した河床からの水深, D は半球高さ) を尺度として調べ、図-5 にプロットした。実験は各水理条件で等流状態が実現するように、水路勾配を調整しながら行った。配置パターンにより水面パターンの現れ方は異なるが、相対粗度高さが同程度であれば、フルード数の増大につれて Flat, Ripple, Parallel, Cross, Advection の順に水面パターンが変化するのが基本的な傾向である。ただし、Ripple や Parallel は疎配置のパターン C 以外では発生しにくい。特に Parallel は、隣り合う粗度要素が一体化して抵抗要素となるものであり、その発生は狭い領域に限られている。また、Cross や Advection は配置パターンによらず、フルード数が 0.4 程度以上で発生するが、相対粗度高さが増大すると、Cross から Advection に移行する傾向が見られる。以上のことから、浅水状態の礫床河川では様々な水面パターンが混在するが、流量が増大し水深が増すと、個々の粗度要素の配置に起因する水面パターンは消滅し、粗度配置に依存せずに水面全体が流下する Advection の水面パターン

図-6 輝度分布の時空間プロットによる水面パターンの移流特性の比較;ピクセルサイズ:約 0.28(cm/pixel), 赤線は主要なパターンの勾配

に変化していくものと思われる。

(4)水面波紋の移流特性(可視化実験)

各水面パターンの表面に現れる波紋の移流特性を調べるために、水路の中央を縦断する幅 1pixel, 長さ 136pixel (約 38cm) の線分上の輝度の時間変化を図-6 に時空間表示した。水面に現れる斜め方向のパターンは、すべて底面付近で発生した剥離渦が水面に到達し、そこで生じた揺らぎが痕跡となって表面流速で移流された結果現れたものと考えられる。Flat では右上に向かう平行に並んだ弱い縞パターンを確認できる。Ripple では Flat と同様の縞パターン(緩勾配のパターン)に加えて急な傾きのパターンが現れている。これは、側壁などで発生した微小な波の影響である。Parallel では、定常波の影響が強いがわずかに移流を表すパターンを見出せる。Cross には複数の傾きのパターンが混在している。Advection でも複数パターンが混在しているが、継続性のある斜めパターンが全面的に生じている。非接触型の流速計測で検出しているのは、この Advection の水面パターンの移流速度である。Advection の移流速度が表面流速を代表することは実河川や実験水路で確認し^{10,14)}、数値解析でも再現しているが¹⁵⁾、Advection に至るまでの水面パターンの再現性については検討が不十分である。そこで、以下では、最も水面パターンの変化が現れた配置パターン C を対象として数値解析による検討を行う。

3. LES による水面パターンの再現シミュレーション

(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

図-7 底面形状(配置パターン A)

ルとしては、著者らが開発してきたラージエディシミュレーション (LES) モデルを利用した¹²⁻¹⁵⁾。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¹³⁾を参照されたい。

(2) 解析条件と解析対象

図-7にIBM法で再現した配置パターンCの底面形状を示した。周期境界条件下で8つの半球を底面に取り付けた状態となっている。計算格子数はx軸方向(流れ方向)に85, y軸方向(横断方向)に100, z軸方向(鉛直方向)に100である。気相は水深の50%程度の厚さをとった。なお、本モデルによる乱流流速場の再現性は古谷ら¹⁵⁾により確認されている。

(3) 水面パターン

実験において典型的な各水面パターンが得られたケース(表-1)を対象として解析を行った。図-8に得られた瞬間的な水面パターンを示した。明るい色の部分が高い水位の場所に相当する。Flat では水面がほぼ平坦となっており、部分的に底面から到達した渦による水面の揺らぎを確認できる。Ripple では、水面は平面的なもの図-3に示され

図-8 LES による水面パターン再現結果
(色の濃淡は水位変化を定性的に表す)

表-1 計算条件

水面形	Slope	Q(l/min)	Re	H(cm)	H/D	F_r	U(m/s)
ADVECTION	1/250	600	33333	7.7	5.13	0.50	0.434
CROSS	1/100	450	25000	4.85	3.23	0.75	0.518
PARALLEL	1/100	150	8333	2.8	1.87	0.57	0.301
RIPPLE	1/500	600	33333	10.3	6.87	0.32	0.325
FLAT	1/500	150	8333	4.3	2.87	0.30	0.195

たようなパターンは現れていない。これは解析を全方向周期境界で行っており、側壁から発達する微小波を再現できないためである。Parallel の条件では、図-4 に示したような流れ方向に位相がずれ、横方向に水面がつながった水面パターンを良好に再現できた。Cross でも粗度要素上の水位が局所的に上昇する水面パターンが良好に得られた。Advection のケースでは粗度要素の位置とは無関係

図-9 剥離渦(第2不変量の等値面)の水面
への到達及び移流(Flat): t は無次元時間

係に水面全体に凹凸が分布しており、可視化画像と類似したパターンが得られたが、表面張力の影響などを考慮していないためか、微細なスケールの変動までは捉えられなかった。

図-9 では水面変動に影響を及ぼす上昇剥離渦を FLAT のケースで示した。 $t=0$ では水面下にあった渦(a)が $t=1.05$ では水面に到達し(b)、水面を局所的に変形させ(c)、 $t=3.05$ ではそれが下流に移流している様子(d)がわかる。このような様子は他のケースでも確認できた。

(4) 水面波紋の移流特性(数値解析)

次に、図-6 に対応する水面波紋の移流特性について考察する。可視化実験では水面の輝度変化に着目したが、その変化を生じさせるのは局所的な水面勾配である。そこで、ここでは定性的なパターンの比較を行うために解析領域の中央重断面における水深の時空間プロットを示した(図-10)。白い部分が高水位、暗い部分が低水位の場所に対応する。スケールはケース毎に変化させている。横軸の長さ(時間軸)は無次元時間 20 である。図より、各時空間プロット上に波紋の移流を示す斜め方向のパターンが現れていることがわかる。Flat では定常的なわずかな水面のうねりの上に斜め縞パターンが乗っている。Ripple も変動幅は非常に小さい。微細パターンは数値的な不安定性による可能性がある。Parallel は水面変動が最も大きく 25%程度の幅がある。明瞭な定常波のために不明瞭であるが、実験と同様に定常波の間に波紋の移流を確認できる。Cross には 15%程度の変動幅が見られ、定常的なうねりの間に勾配の異なる 2 つの移流波紋を確認できる。これも可視化実験によるパターンの傾向と一致する。Advection では定在的なうねりはなくなり、ほぼ一定勾配の縞パターンが現れている。

図-10 水面波紋の移流特性(横軸:無次元時間
=20, 解析領域長さ=31.2(cm))

以上の特性は、微細な違いを除けば概ね図-6 に示した特性と一致している。

5. おわりに

本研究では、粗度要素として半球粗度を用いた開水路粗面流れのうち、粗度高さに対する相対水深が比較的小さな常流範囲の水理条件を対象とし、水面パターンの違いについて実験と数値解析による検討を行った。その結果、水面のパターンを Flat, Ripple, Parallel, Cross および Advection の5通りに分類できることを示した。また、IBMで河床形状を表現し、水面を密度関数で表すLESに基づく数値解析モデルを、各パターンで典型的な例に適用して比較したところ、平面的なパターンだけでなく水面波紋の移流特性についても、可視化実験で確認できた特性を概ね再現できることがわかった。側壁の影響や表面張力による微細な水面変動が特徴的なRippleの再現では十分でない点も見られたが、礫床河川の水面変動を考察する上では重要な問題ではない。本論文では紙面の都合上示していないが、一定水深のもとで、流速を増大させた場合にも実験で見られた水面パターンの変遷を再現できることを確認している。本研究で対象としたのは、浅水状態の礫床河川の水面で典型的に表れる水面パターンと見なせるため、今後は、実際の礫床状態における水面パターンや波紋移流特性について実験および数値解析による検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Grass A. J.: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, *Journal of Fluid Mechanics*, 50, pp.233-255, 1971.
- 2) Adrian, R. J. and Westerweel, J.: *Particle Image Velocimetry*, Cambridge University Press, 2011.
- 3) Jimenez, J.: Turbulent flows over rough walls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, pp.173-196, 2004.
- 4) Roy, A. G., Belanger, T. B., Lamarre, H. and Kirkbride, A. D.: Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow

- structures in a gravel-bed river, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.500, pp.1-27, 2004.
- 5) Mignot, E., Barthelemy, E. and Hurther, D.: Double-averaging analysis and local flow characterization of near-bed turbulence in gravel-bed channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.618, pp.279-303, 2009.
- 6) Cooper, J. R., Tait, S. J., Horoshenkov, K. V.: Determining hydraulic resistance in gravel-bed rivers from the dynamics of their water surfaces, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.31, Issue 14, pp.1839-1848, 2006.
- 7) Cooper, J. R. and Tait, S. J., : The spatial organization of time-averaged streamwise velocity and its correlation with the surface topography of water-worked gravel beds, *Acta Geophysica*, Vol.56, No. 3, pp.614-641, 2008.
- 8) Nichols, A., Tait, S., Horoshenkov, K., Shepherd, S. and Maximov, G.: An airborne acoustic method to monitor the hydraulic characteristics of shallow water flows, *Proceedings of 33th IAHR Conference*, pp.817-824, 2011.
- 9) 稲垣達弘・島田友典・横山洋・三宅洋：十勝川千代田実験水路における各手法別の流量観測，*河川技術論文集*，第17巻，pp.41-46, 2011.
- 10) 藤田一郎・原浩気・萬矢敦啓：河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築，*水工学論文集*，55巻，pp.S 1177-S 1182, 2011.
- 11) Ikeda, T. and Durbin, P. A.: Direct simulations of rough-wall channel flow, Report No.TF-81, *Flow Physics and Combustion Division*, Stanford University, 2002.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.

(2011.9.30 受付)