



粗な配置の棧粗度開水路で生じる水深規模の振幅を有する水面波の特性

東川, 真也
谷, 昂二郎
藤田, 一郎

(Citation)

土木学会論文集B1 (水工学) , 74(5):I_739-I_744

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007322>



粗な配置の棧粗度開水路で生じる水深規模の 振幅を有する水面波の特性

東川 真也¹・谷 昂二郎²・藤田 一郎³

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)
E-mail: 189t129t@stu.kobe-u.ac.jp

² 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)
E-mail: kojiro0531@gmail.com

³ 正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: ifujita@kobe-u.ac.jp

開水路粗面乱流の研究は、河川乱流の特性や抵抗則を検討するための基礎研究として古くから数多くの研究が行われてきている。その中には粗面抵抗を単純に与えられる棧粗度を人工粗度として用いる研究があり、棧粗度間隔と流水抵抗の関係などが論じられてきた。しかしながら、従来の研究では粗度要素に対する相対水深が大きい流れ場を対象とするケースがほとんどであり、相対水深の小さい浅水状態に関する研究例はないに等しい。そこで、本研究では特に粗度間隔が大きな粗度配置を対象とし、水面形の三次元計測を中心として実験的検討を行った。その結果、水理条件によって水面形状は複雑に変化し、ケースによっては平均水深と同程度の振幅を有し、先鋭的な波峰が千鳥状に配置される定常波動場が発生することを明らかにした。

Key Words: *strip roughness, surface waves, open channel turbulence, large surface deformation*

1. はじめに

近年の我が国では豪雨による洪水被害が多発しているが、河川の洪水対策を考える上で重要な点の一つに実際の洪水現象の詳細な観測がある。我が国の河川は河道延長が短く流達時間が短いため、洪水は豪雨と同時的に発生することが多い。そのため、流量計測を含めた洪水観測は大雨の中で実施せざるを得ず、実際には詳細な流れの把握は容易ではない。ただし、河川監視カメラ等が設置されている場合は、映像を確認することができ、流速・流量が大きいほど、また勾配が急なほど水面の変動が大きくなる様子を見てとれる。

このような洪水時の水面変動を引き起こす要因として考えられるのは、1)高レイノルズ乱流場における流れそのものの変動、2)水面付近の乱流変動が引き起こす重力波、3)河床で生成されるボイル渦の水面への衝突、4)河岸などからの反射波、5)橋脚など水没しない河川構造物により生じる後流、6)河床波や水没した河川構造物(帯工、水制など)による形状(圧力)抵抗、7)風による風応力の発生、などである。これらのうち、最も変動のスケール

が小さいのは1)の乱流起因の変動であり、視覚的には波紋として認識される¹⁾。この波紋の移流速度が表面流速を代表するものとして画像計測に基づく流速計測法が種々開発されているのは周知の通りである²⁾⁶⁾。逆に最も大きな水面変動が発生する可能性が高いのは、6)の形状抵抗によるものであり、その中でも最も極端な例としては、高速流条件下で発生する三角波があり⁷⁻¹⁰⁾、その波高は水深規模になるとも言われている。このように、実際の洪水時には時間空間的に変動幅の大きな水面形状が生成されるため、水位を定義する場合には注意が必要である。すなわち、圧力水位計などで計測している対象は、大きな変動幅を有する水位の河岸付近における平均的な値にすぎないことを認識しておく必要がある。

一方、このような洪水流、即ち開水路粗面乱流場に関する研究は古くて新しい研究対象であり、固定床や移動床における乱流特性や抵抗則に関する膨大な既往の研究があるのは周知のことである¹¹⁻¹³⁾。しかしながら、従来は面的な水面変動や大きく変化する水面形状を正確に計測することが技術的に困難であったため、水面変動場に関する知見は多いとは言えない¹⁴⁾が、近年においては可視

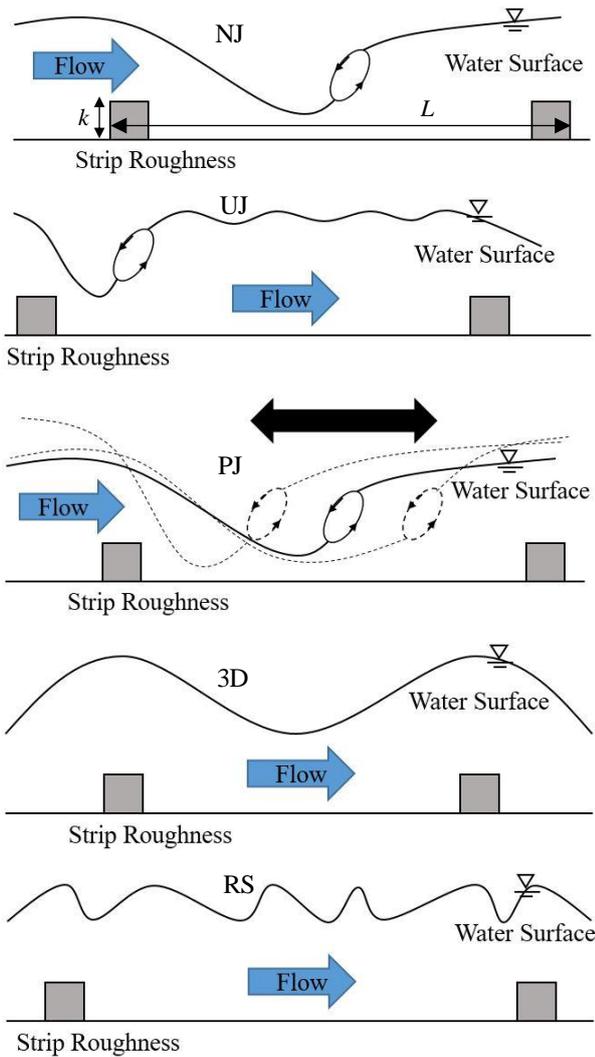


図-1 粗配置棧粗度流れにおける水面形の遷移状況

画像計測技術や撮影装置の発達などにより、二次元的な水面形を容易に取得することが可能となってきた^{14,15)}。そこで、本研究では、粗面乱流場を再現できる流れ場として最も単純な棧粗度乱流を対象とし、水面が著しく変形する水理条件に対する実験的検討を行った。

2. 棧粗度による水面変動実験の概要

(1) 水理条件の設定概念

棧粗度を人工粗度として用いた開水路乱流の実験についてはこれまで多数の研究例があるが、着目点は棧粗度間隔と流水抵抗の関係やその場合の内部乱流場の変化にあった^{16,17)}。従来の研究の知見によれば、棧粗度の高さを k 、棧粗度の間隔を L とした場合、アスペクト比 L/k が 6~7 程度のとき流水抵抗が極大となるが、それは粗度要素で剥離した流れが下流側の粗度要素付近に再付着するため、強い乱れエネルギーが生成されることに要因があるなどとされた。アスペクト比がさらに大きい場合には、

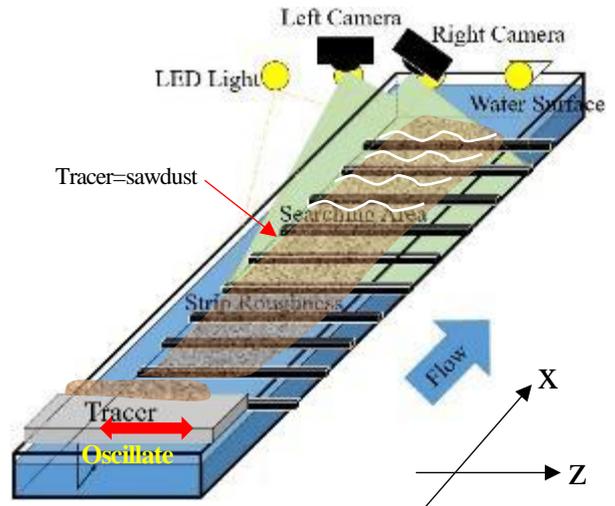


図-2 実験装置

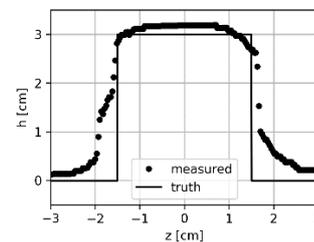


図-3 ステレオ計測の精度検証

個々の粗度要素で生成される剥離流れは、剥離泡を形成するために上下流の粗度要素の影響を受けず、孤立粗度的な乱流場になることが知られている。

しかしながら、従来の研究では粗度要素に対する相対水深が大きく、低フルード数の実験が大半のため、水面変動や水面の変形は無視できる程度であった。これに対し、本研究では棧粗度のアスペクト比を 20~30 程度と非常に大きくし、水深は粗度高さの数倍程度となるように設定した。これは、従来の視点からは孤立粗度の範囲であるが、相対水深が小さくなると個々の粗度要素間の水面変形が著しくなる現象を見出した。ここで設定した粗度間隔は、移動床において周期的に生じる砂堆や反砂堆による抵抗を極めて擬似的に模したものと考えることもできる。この実験の有利な点は、時々刻々形状や場所が変化する移動床実験に比べ水面波の位置を固定でき、詳細な計測や検討が可能となる点といえる。

(2) 浅水状態の棧粗度流れの特徴

粗度要素に対する相対水深が小さく、粗度間隔が大きい場合、流量を徐々に増した場合に生じる水面形の模式図を図-1 に示す。流量が小さい場合には、各粗度要素の下流側に跳水が生じるのみ (NJ: Normal Jump) であり、その意味では孤立的な流れ場と言える。流量を増大させると、波状的な跳水(UJ: Undular Jump)を経て場合によっては粗度間の跳水が周期振動(PJ: Periodic Jump)を始める

表-1 水理条件

Lk	I	U_m (m/sec)	Fr_m	h_m/k	Surface pattern	Run
20	1/50	0.32-0.68	0.61-0.80	3.06-8.2		
		0.43	0.614	5.51	3D	20_50_19
		0.46	0.651	5.67	3D	20_50_21
	1/100	0.28-0.61	0.6-0.82	3.52-9.09		
		0.47	0.618	6.6	3D	20_100_25
		0.52	0.657	7.13	3D	20_100_30
	1/200	0.26-0.56	0.49-0.62	3.73-9.96		
		0.47	0.567	7.81	3D	20_200_30
		0.46	0.53	8.52	3D	20_200_32
30	1/50	0.4-0.74	1.94-0.96	2.17-7.52		
		0.51	0.769	4.89	3D	30_50_20
		0.58	0.763	6.56	3D	30_50_31
	1/100	0.44-0.65	1.38-0.83	2.22-8.61		
		0.476	0.575	7.78	3D	30_100_30
		0.59	0.702	8.3	3D	30_100_38
	1/200	0.26-0.48	0.44-0.58	3.86-11.6		
		0.43	0.426	11.54	3D	30_200_40

18),19). さらに流量を増大させると粗度要素間で波高が平均水深程度となる定在波(3D)が生じるモードが出現する。これより流量を増すと水面は変動しながらも平均的には平坦で乱れた(RS: Random Flat Surface)となり、相対水深の大きな従来研究で対象とされた流れに至る。本研究では、特に流量増大の途中で発生した定在波に焦点を絞って検討を進めた。

(3) 実験装置の概要とステレオ計測システム

実験には、長さ 20m, 幅 90cm, 高さ 30cm で可変勾配の開水路を用いた。この水路で流せる最大の流量は 45L/s であり、流量は水路の上流端に取り付けた四角ゼキより求める。水路流入部には、四角ゼキからの落下流による水面変動を軽減させるために、人工芝を用いた緩和区間上に長さ 1.8m, 厚さ 1cm のスタイロフォーム板を浮かべた。これにより、流入部の乱れによる水面変動は十分に抑制できた。粗度要素としては、断面が正方形で一辺が 0.9cm のステンレス製角柱を用いた。実験では、水面の変形を面的に捉えるために、図-2 に示すように二台のデジタルカメラ(カシオ, EX-100PRO)を水路上方に設置し、水面のステレオ撮影を行った。デジタルカメラは、アンドロイド端末を介して同期撮影が可能であり、4000x3000 画素の静止画をフレームレート 30 fps で連続 30 枚取得した。ステレオ計測には、フリーソフトの StereoScan(AgiSoft 製)を利用した。対象となる水面波の波高は、数センチ程度であったため、予備計測として 0.8mx0.8m の平板上に一辺が高さ 3cm, 縦 3.5cm, 横 3.0cm の木片の直方体を格子状に 9 個並べ、この対象面に対するステレオ撮影を行って計測精度を確認した。計測においては、二台のデジタルカメラの基線長を 20cm, 立方体を配置した対象面からのカメラの設置高さを 1.15m, 左方のカメラを対象面に対して垂直方向、右方のカメラを斜め方向に向けて撮影した。ソフトウェアで視差画像を生成したところ、左方のカメラが必ずしも対称面に対し正確に垂直に設置できていなかったために対象面に傾き

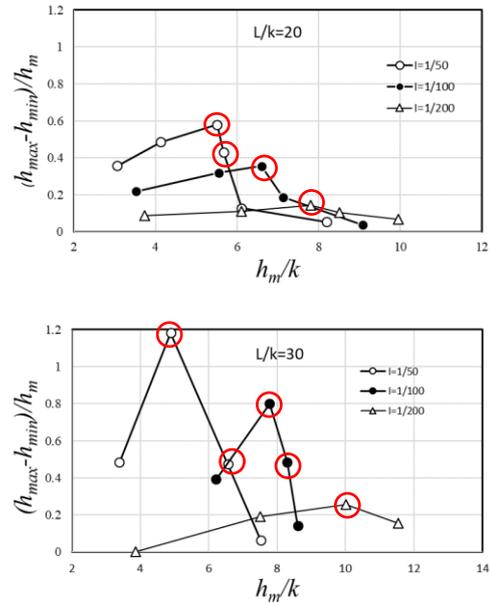


図-4 水面の変形プロセス:赤丸は 3D

が現れたため、平均の仮想水面位置を表す平面 $P(x, z)$ を次式に基づいて最小二乗法により推定し、傾きの補正を行った。

$$P(x, z) = \alpha x + \beta z + \gamma \quad (1)$$

さらに、元の水面高さ分布 $h_0(x, z)$ から式(1)の分布を差し引き、平均水深 h_m (この予備計測では仮の値) を加算することで、水面高さ分布 $h(x, z)$ を算出した。立方体部分を抽出した結果の一例を図-3 に示すが、鋭角的な形状は完全には再現できていないが、全体的な形や高さは良好に計測できていることがわかる。

水面形の計測には以上の手順で設定したステレオ計測システムを水路上方に組み立て、4 個の LED ランプで水面を照射して水面での明度を保った。水面形の可視化には、水路幅と同程度のサイズのフルイを軽量スタイロフォームで挟み込むことで作成し(網目のメッシュサイズ 1.5mm, 縦 80cm, 横 1.0m, 高さ 10cm), フルイの上にトレーサとして微細なおが屑を面的にのせて手で振動させ、観測断面の上流から一様に落下させることにより実現した。水面の可視化法としてはプリミティブな方法であるが、水面がおが屑の膜で旗めくような状態の画像を取得できた。おが屑は軽量のため、トレーサの投入による流れ場への影響は無視できる。

(4) 水理条件

以上の検討を踏まえて、多数の予備実験を繰り返した結果、対象とする水理条件を表-1 のように設定した。栈粗度アスペクト比 L/k は、20 および 30 の 2 通り、勾配は 1/50, 1/100 および 1/200 とし、順次、流量を変化させて水面形の計測を行った。表中の Run 30_50_20 は、例え

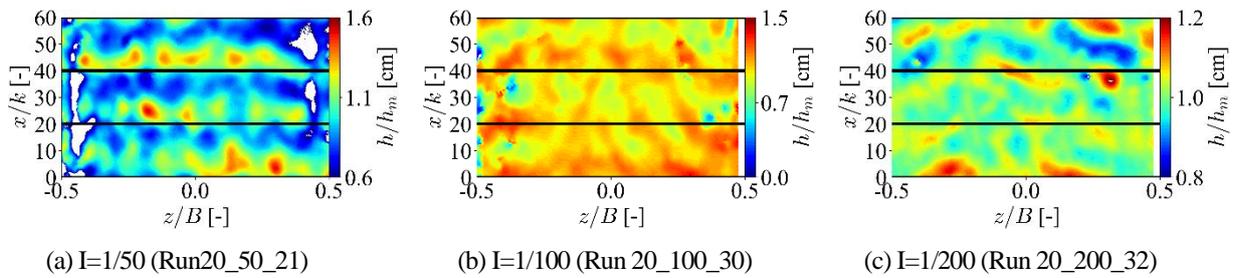


図-5 $L/k=20$ のケースに対する水面形のステレオ計測結果 (3Dのみ)

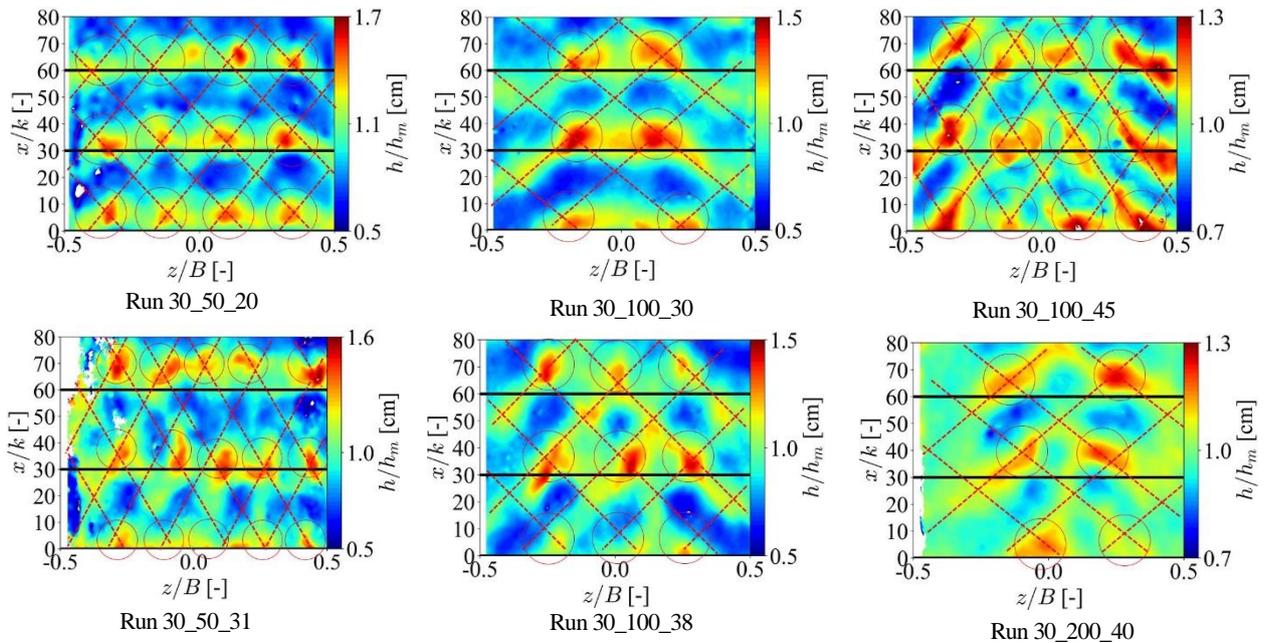


図-6 $L/k=30$ のケースに対する水面形のステレオ計測結果 (3Dのみ)

ば、棧粗度アスペクト比が 30、勾配が 1/50、流量が 20L/s であることを示す。

3. 可視化解析結果

(1) 流速 (流量) 増大に伴う水面形の変化

図-1 に示したように、底面に粗配置の棧粗度を設置した流れでは、典型的には水面形状を 5 つのパターンに分類できる。ただし、PJ については発生条件が限られてくることわかっている¹⁹⁾。各棧粗度アスペクト比の水路条件のもとで、流量を加えて相対水深(h_m/k)を上昇させると様々なパターンが生じるが、各ケースで発生する流れの最大水深(h_{max})と最小水深(h_{min})の差を平均水深で無次元化した結果を図-4 に示す。この場合の計測は、メジャーを使った比較的簡易な計測であったが、相対水深の増大につれて最大・最小の水深の差が急激に大きくなり、ピーク時にはパターンが 3D となった。ピークを迎えた後、水深差は小さくなっていった。今回の実験の範囲では、波高の振幅は棧粗度アスペクト比が大きいほど大きくなり、最大では平均水深の 6 割程度まで増大した。ま

た、ピーク波形が出現する粗度高さに対する相対水深 h_m/k は、勾配の増加とともに小さくなり、勾配 1/50 では $h_m/k=5$ 程度であった。このように水面変形があるモードで卓越してくる現象は、流れ場が本来有している波動場の波長と周期的な形状抵抗の波長 (棧粗度間隔) が同程度となり、ある種の共鳴現象が生じたためと考えられる。このような傾向は移動床における反砂堆上の水面の盛り上がり現象、さらには三角波との類似性があると見なせる。

(2) ステレオ計測結果

平面的な水面形を比較するために、棧粗度アスペクト比 20 の場合の水面形状のステレオ計測結果を図-5 に示す。図中の横断方向の黒い線は水路底面に棧粗度があることを示す。ここでは水面形の分類としては 3D としているが、粗度による形状抵抗で棧粗度間の水面が線状に盛り上がる中、流れの不安定性のために波峰に凹凸が生じて 3D 的な水面形状を呈している。図-5 に示しているのは、瞬間値であるが、多少の揺らぎはあるものの定在

波と見なせる場が現れている。

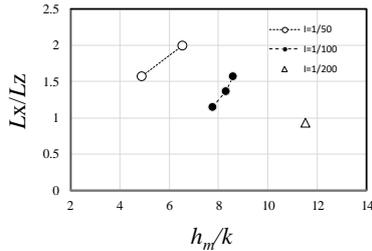


図-7 卓越水面波の縦横比の特徴 (3Dのみ)

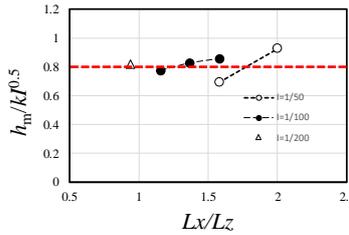


図-8 卓越水面波の特徴 (3Dのみ)

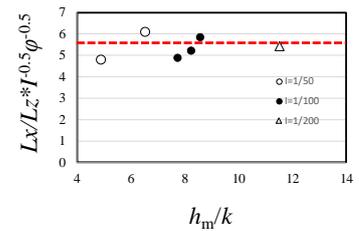


図-9 卓越水面波の縦横比, 相対水深, 勾配の関係 (3Dのみ)

次に、棧粗度アスペクト比 30 の場合の水面形状のステレオ計測結果を図-6 に示す。棧粗度間隔が広がると前者のケースとは全く異なって個々の波峰の先鋭度が増していることがわかる。各波峰は図に記入した補助線からわかるように千鳥状に発生しており、勾配が一定であれば流量の増大（あるいは相対水深の増大）に伴ってその数が増えている。これは、流れ方向の波長が固定された状態で、横断方向の波長が変化したと見なすことができる。あるいは、図中の補助線は斜め方向に進む衝撃波的な波の方向と一致しているが、左右からの波の交差ヶ所で2つの波が重なり合い、局所的に水面が盛り上がっていると見なすこともできる。

(3) 卓越モード時の特性

上述のように棧粗度アスペクト比が 30 のとき発生した規則的な配置の波形について、相対水深と波峰間の波形の縦横比 L_x/L_z の関係を図-7 に示した。 L_x は流れ方向の波長で棧粗度間隔に一致する。 L_z は、横断方向の波長である。図より、概ね $L_x > L_z$ であり、流れ方向の波長の方が大きいことがわかる。また、勾配が急になり、相対水深が小さいほど、波長の縦横比は大きくなるのがわかる。図-8 は、相対水深と水路勾配の影響も加味した無次元パラメータ $(h_m/k)I^{0.5}$ を用いて卓越水面波形の変化をプロットしたものであるが、このパラメータは波長の縦横比によらず、平均として 0.8 程度となっている。これより、卓越波形が生じる条件として

$$\frac{h_m}{k} \approx (0.8)I^{-1/2} \quad (2)$$

が得られる。また、図-9 に示すように速度係数 ($\phi = U_m/u_s$) を用いて整理すると、相対水深によらない以下の関係式が得られた (u_s は平均水深から算出した摩擦速度である)。

$$\frac{L_x}{L_z} \approx 5.5I^{1/2}\phi^{1/2} \quad (3)$$

これは、勾配の増大や速度係数の増大により、流れ方向に伸びた波形が生じることを示唆している。

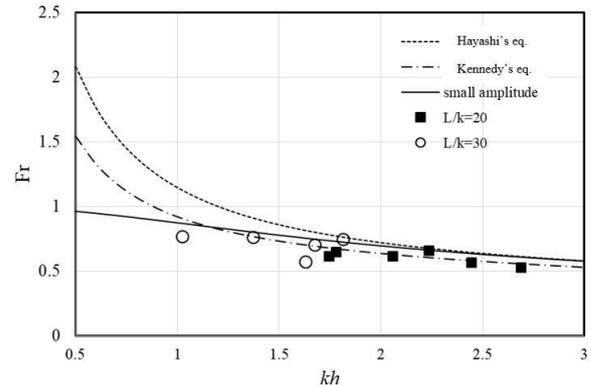


図-10 反砂堆発生条件との比較

(4) 三角波の発生条件との比較

図-5 で得たような規則的な配置の波は、移動床水理における三角波との類似性を指摘できる。ここでは、既往の研究で示されている定在波や反砂堆の発生条件と本実験の結果を比較してみる。図-10 にいくつかの理論式との比較を行った。微小振幅波理論における波速と流速のバランスから得られる次式である η 。 k は棧粗度の間隔を用いた波数 $k=2\pi/L$ である。

$$Fr^2 = \frac{1}{kh} \tanh(kh) \quad (4)$$

また、林⁹⁾によれば反砂堆の発生限界は以下の式で表せられる。

$$Fr^2 = \frac{1}{khtanh(kh)} \quad (5)$$

また、Kennedy⁹⁾によると、反砂堆の卓越波数式は以下に示す式で表される。

$$Fr^2 = \frac{2 + \tanh(kh)}{(kh)^2 + 3kh \tanh(kh)} \quad (6)$$

今回の棧粗度実験で得られた 3D に対する条件は、無次元波数が 1 から 2.5 の間で概ね従来理論に一致した。理論値から若干外れているプロットは水理条件が完全に共鳴条件に一致していなかったためと考えられる。すなわち、流量制御を慎重に行い、最大波高が得られる条件で比較すればよい。本研究では予め設定していた流量のみ

で実験を行ったため、共鳴という観点から見て中途半端な状態で計測を行った可能性がある。

4. あとがき

本研究では、従来は対象とされたことのない粗配置の棧粗度流れで生じる水面形状に関する実験と考察を行った。その結果、規則的な波峰列を有する水面形状は三角波と類似性があることがわかった。このような水面の大変形を有する流れ場の内部構造は、移動床条件下では内部流の可視化が困難であり、また、時々刻々と河床形状が変化するために安定した計測が行えない。これに対し、棧粗度流れでは波面を固定できるために、可視化画像解析が容易になる。今後は、速度場の変化に焦点を絞って研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 谷昂二郎, 藤田一郎, 吉村英人: サンプリングモアレ法を用いた開水路粗面乱流の面的水面変動計測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, I_571-I_576, 2017.
- 2) 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, pp105-114, 2011.
- 3) 藤田一郎, 能登谷祐一, 霜野充: マルチコプターから撮影されたブレ動画の高精度補正に基づく Aerial STIV の開発, 土木学会論文集 B1 Vol.71 No.4, pp.I-829-I-834, 2015.
- 4) Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B. and Hauet, A. : Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves. *J. Hydro-Environ. Res.* Vol.5, pp.301-312, 2011
- 5) Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B.: Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrolics*, Vol.394, pp.42-52, 2010.
- 6) 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, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 7) 山田正, 池内正幸, 堀江良徳: 不規則底面をもつ開水路流れに関する研究, 水理講演会論文集, 第28巻, pp.149-155, 1984.
- 8) 長谷川和義: 溪流の淵・瀬の水理とその応用, 水工学に関する夏期研修会講義集, 33-A-9, pp.1-22, 1997.
- 9) 長谷川和義, 山口甲, 伊賀久晃, 辻珠希: 急流河川における三角状水面波列の発生条件について, 土木学会北海道支部論文報告集大 66 号, B-1, 2009.
- 10) 井上卓也, 長谷川和義, 渡部靖憲, 船木淳悟: 三次元的な反砂堆上の水面波に関する実験的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2, pp.I_739-I_746, 2015.
- 11) Grass, A. J., Stuart, R. J. and Mansour-Tehrani, M.: Vortical structures and coherent motion in turbulent flow over smooth and rough boundaries, *Philos. Trans. Royal Soc. of London A*. Vol.336 (1640), pp 33-65, 1991.
- 12) 禰津家久, 中山忠暢, 藤田正樹: 粒径の大きな粗度上の開水路流れの乱れと水面変動, 応用力学論文集, Vol.1, pp.709-718, 1998.
- 13) Dolcetti, G., et al.: Frequency-wavenumber spectrum of the free surface of shallow turbulent flows over a rough boundary, *Physics of Fluids*, Vol.28, 105105, 2016
- 14) 星野 剛, 安田 浩保, 利根川 明弘: 動的光切断法を用いた河床波形成過程における水面・水底面の幾何学形状の計測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.I_883-I_888, 2016.
- 15) 三戸部佑太, 大島香織, 渡部靖憲: 面的波浪水面形状計測法の開発と碎波への適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 66, No. 1, pp.086-090, 2010.
- 16) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 104, pp. 33-44, 1964.
- 17) 富永晃宏: 棧粗度の相対棧間隔が開水路の乱流構造に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.163-168, 1992.
- 18) 谷昂二郎, 藤田一郎, 能登谷祐一: 浅水状態の棧粗度乱流場における水面変動のパターン変化に関する画像計測による検討, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, I_559-I_564, 2016.
- 19) 衣笠恭介, 藤田一郎, 能登谷祐一, 谷昂二郎: 浅水状態の棧粗度乱流場の水面パターン分類に対する SVM の適用, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_679-I_684, 2017.

(2018.5.31 受付)

CHARACTERISTICS OF SURFACE WAVES WITH DEPTH-SCALE AMPLITUDE IN SHALLOW WATER UNDER SPARCELY ARRANGED STRIP ROUGHNESS

Shinya HIGASHIKAWA, Ichiro FUJITA, and Kojiro TANI

Turbulent open channel flow with strip roughness is one of the fundamental flows representing rough wall turbulence. This phenomenon and the relation between roughness spacing and flow resistance of relatively large water depth have been discussed so far. However, surface flow features under shallow water conditions have not been investigated in detail especially in the case of large roughness spacing. In this research, three dimensional water surface profile was quantified stereoscopically by visualizing water surface with fine sawdust. It was found that water surface shape changes complicatedly depending on hydraulic conditions. It was also found that in some cases, stationary wave patterns are generated where sharp wave peaks are arranged in a staggered manner. These stationary wave patterns have an amplitude of the same order as the water depth. Such water surface features have a similarity to those of triangular waves observed in anti-dune condition.