



サンプリングモアレ法を用いた球状粗面を有する浅水乱流の水面変動特性に関する考察

谷, 昂二郎
藤田, 一郎

(Citation)

土木学会論文集B1 (水工学) , 74(5):I_745-I_750

(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/20.500.14094/90007323>



サンプリングモアレ法を用いた 球状粗面を有する浅水乱流の 水面変動特性に関する考察

谷 昂二郎¹・藤田 一郎²

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:kojiro0531@gmail.com

²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

開水路乱流における自由水面を対象とした実験計測や数値計算は近年になってようやく現象把握に足る性能を備えつつある。しかしながら、自由水面挙動や水面変動のスケールに関する研究はあまり多くのがなく、未だその全容を把握するには至っていない。本研究ではサンプリングモアレ法と呼ばれる画像の位相解析に基づく計測法を用いて開水路粗面乱流上の自由水面に係る諸特性について詳細な検討を実施した。対象とした流れ場は、千鳥状に密に配置したガラス製の球状粗度を有する流れであり、相対水深の比較的小さい浅水流である。結果として水面変動の統計的性質や周波数特性などについていくつかの重要な知見を得た。

Key Words: shallow flow, open channel turbulence, sampling moiré method, free surface behavior

1. 序論

自由水面は河川のような開水路流れを特徴づける最も重要な要素の一つである。開水路乱流の自由水面を取り扱う研究において、興味の関心は主に二つあり、一つは変動の発生要因である。一般に取り扱われるような典型的な開水路流れにおいては、流れは完全発達乱流であり、境界層で占められる。従って、自由水面に変動を生じる要因としては、壁面近傍で生じた乱れが **bursting** により水面近傍まで輸送されることにより生じる圧力揺動^①や、あるいは壁面粗度要素の形状抵抗^②などが考えられる。また、自然河川においては風応力により風波が卓越するとの報告もある。

第二に、自由水面の時空間に亘る挙動である。これはすなわち、開水路乱流において発生する水面変動が、時間的・空間的にどのような挙動に支配されて発展するかということである。近年特に進展の見える話題であるが、例えば、Horoshenkov^③らは、プローブ型の容量式波高計を等間隔に配置して水面変動計測を行っており、水面変動の相互相関関数を用いた解析結果から、独自の水面波モデルを提案している。また、Dolcetti^④らは Horoshenkov^③らと同様の実験を行い、水面変動を波数・

周波数スペクトルを用いた考察から、開水路乱流上の自由水面は乱流および、乱流からの干渉を受けた重力波の両者の挙動を示すことを明らかにしている。加えて重要な結果として、勾配が大きい水理条件ほど、乱流としての振る舞いが不鮮明になるとしている。著者らも Dolcetti^④と同様に、実験計測^⑤・数値計算^{⑥⑦}の両方を用いて水面変動の波数・周波数スペクトル解析を行った結果、同様の傾向を有する結果を得ている。概して、**Froude** 数が大きいほど、あるいは壁面が粗いほど、重力波としての挙動が優位になるようである。ただし、どのような条件に依存して支配的な挙動が変化するかについては、未だに先に述べた傾向が報告されるのみである。また著者らは実河川における水面の自由水面挙動に関する検討^⑧も同様に行っているが、詳細についてまだ不明な点も多く、実験室規模でのより詳細な現象把握が望まれる。

本報では既報^⑤で示したものと同一の実験計測結果を用いて、水面変動の時間的・空間的な挙動や、統計的な性質、周波数特性などについての追加の解析を行い、より詳細な考察を与える。なお、計測はサンプリングモアレ法^⑨と呼ばれる画像の位相解析に基づく三次元計測手法によるものであり、従来は弾性体などの微小変位計測に用いられてきたものである。なお、計測対象は、底面

にガラスビーズを密に配置した球状粗面上を流れる浅水乱流で、水深一定の条件で、Froude 数を 3 パターンに変化させたものである。

2. 水面変動計測

(1) サンプリングモアレ法⁹⁾

本研究では、水面の微小な変動を計測する手法として、サンプリングモアレ法と呼ばれる手法を用いている。モアレ法とは、物体の表面上における格子パターンの位相変調から、物体の変位を推定する画像計測手法一般をさすものである。サンプリングモアレ法は位相シフトモアレ法と呼ばれるモアレ法の一種の計測原理を用いて単眼三次元計測を可能とした手法である。モアレ法では、何かしらの方法を用いて物体表面に投影あるいは貼付された格子パターンの位相変調を計測する必要がある。余弦波上の格子パターンを用いた場合、撮影された画像の輝度分布 I は次式で表される。

$$I = a \cos \phi + b \quad (1)$$

ここで、 a は輝度振幅、 b は背景輝度である。上式の未知数は3つであるので、最低3回、格子パターンをずらしながら（位相シフト）撮影を行えば、位相分布 ϕ が算出できる。格子の周期を N 分割して撮影を行った場合には、以下の式により位相分布 ϕ が求まる。

$$I_n = a \cos \left[\phi + \frac{2\pi}{N} \right] + b \quad (2)$$

$$\tan \phi = - \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin \left(n \frac{2\pi}{N} \right)}{\sum_{n=1}^N I_n \cos \left(n \frac{2\pi}{N} \right)} \quad (3)$$

変形前後の位相差 $\Delta\phi$ が既知であれば、物体表面法線方向の変位は位相差と比例の関係となる。

$$\delta = m \Delta\phi \quad (4)$$

ここで δ は物体表面の変位、 m は比例定数である。このとき、この比例定数 m は光学系の配置から定まるが、煩雑なキャリブレーションを要するため、高さが既知の物体を計測しておいて関係を得るのが簡便である。以上が位相シフト法の計測原理であるが、格子パターンをずらしながら複数回の撮影が必要であるため、水面のような動的に変化する対象には適用できない。一方、サンプリングモアレ法では1枚の撮影画像から開始位置をずらしながらある間隔で複数回ダウンサンプリングを行うことで、位相シフトされた画像を疑似的に複数枚生成する。これにより、複数回の撮影を行うことなく位相分布を取得でき、従って、水面などの対象にも適用が可能となる。

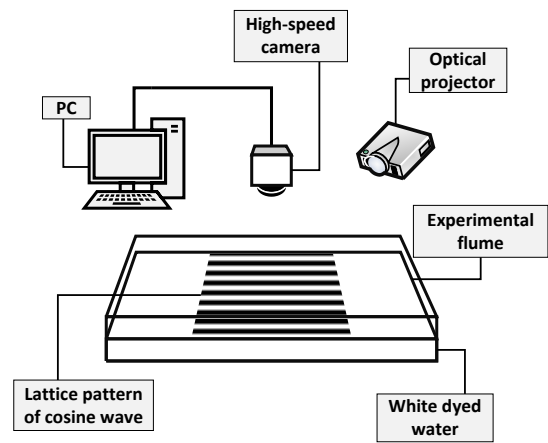
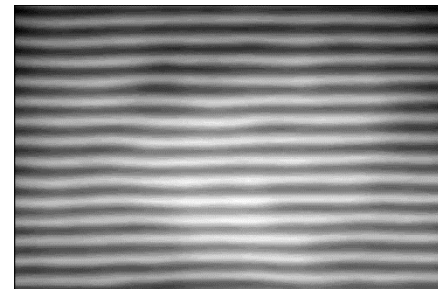
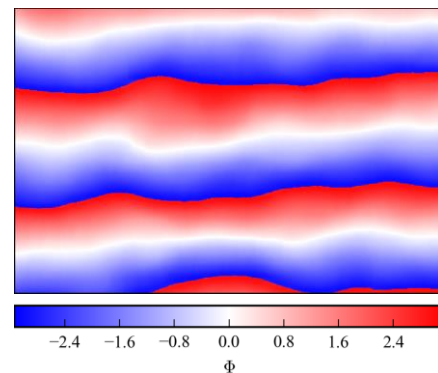


図-1 実験装置



(a) 元画像 (12 cm x 8 cm)



(b) 位相分布

図-2 サンプリングモアレ法による水面変動計測例

(2) サンプリングモアレ法による水面変動計測

図-1 に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。余弦波上の格子パターンをプロジェクタにより投影し、水路直上に設置した高速度カメラによりパターンが揺らぐ様子を撮影した。撮影のサンプリングレートは 100Hz である。なお、パターンの投影のために白色のポスターカラーにより水を着色している。図-2 に撮影画像の一例を示す。図-2(a)は実際に流水表面を撮影したものであるが、画像全域に亘って微小な位相変調が確認でき、水面のわずかな変動を捕捉できていることがわかる。図-2(b)は図-2(a)に示した画像から算出された位相分布である。投影格子の縞の位相変調を良好に再現できていることがわかる。なお、本実験に先立って実施した静止水面の計測では、0.2mm の変位を 0.07mm 程度の標準誤差で計測できることを確認している。

表-1 水理条件

Case	Water depth H (cm)	Roughness height k (cm)	Froude number F (-)	Reynolds number Re (-)	Surface velocity U_s (cm/s)	RMS wave height h'_{rms} (cm)
Case 1			0.47	6374	28.8	0.031
Case 2	2.89	1.7	0.59	7965	42.7	0.047
Case 3			0.70	9558	51.1	0.081

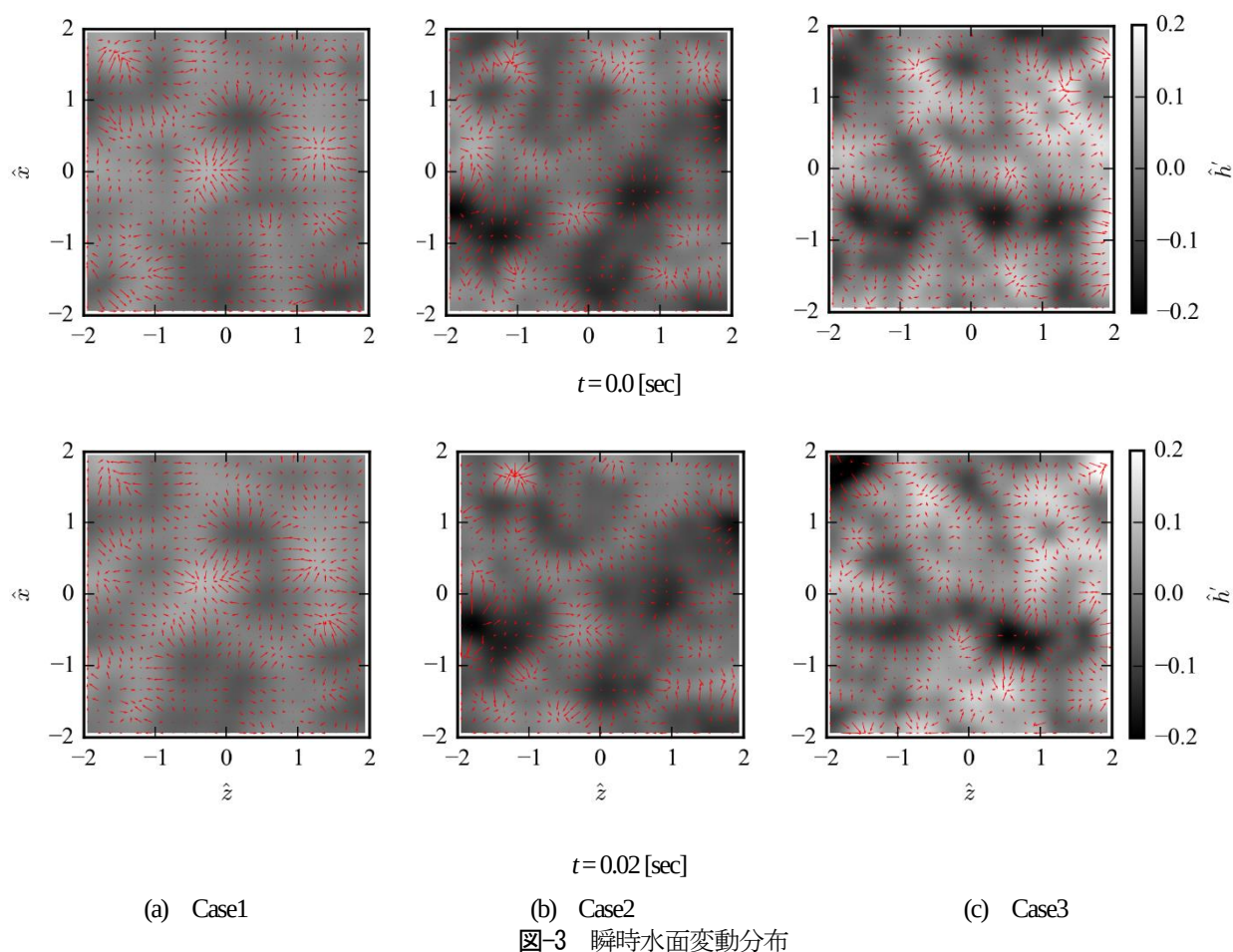


図-3 瞬時水面変動分布

(3) 水理条件

本研究で対象とした流れ場は底面に千鳥状に密に配置されたガラス製の球（直径 1.7cm）を底面粗度として有する開水路乱流である。水深はすべてのケースで粗度の頂点から 2.55cm と比較的浅い流れであり、粗度要素の形状抵抗が水面変動に直接寄与することが予想されるような条件といえる。上記の設定に加えて Froude 数を変化させて計 3 ケース行った実験の諸条件を表-1 に示す。なお表中で示した水深 H は粗度要素の頂点からではなく仮想原点からの値である。仮想原点の位置は既往研究^{10),11)}の値を参考に決定している。なお、次章以降特に断りのない限り、すべての物理量は無次元量で記述しているが、時間は $H/\sqrt{gH}$ 、距離は H をそれぞれ用いて無次元化しており、無次元化された物理量を表す変数には $\hat{h}$ のようにキャレットを付与している。なお、水路幅は 20cm

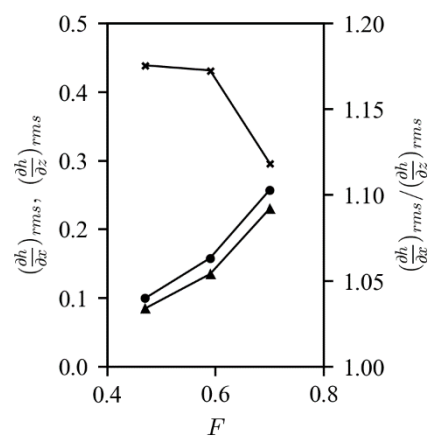


図-4 水面勾配の二乗平均平方根

(● : 主流方向, ▲ : 横断方向, × : 両者の比)

であり、水路中心のおよそ 10cm を計測範囲とした。

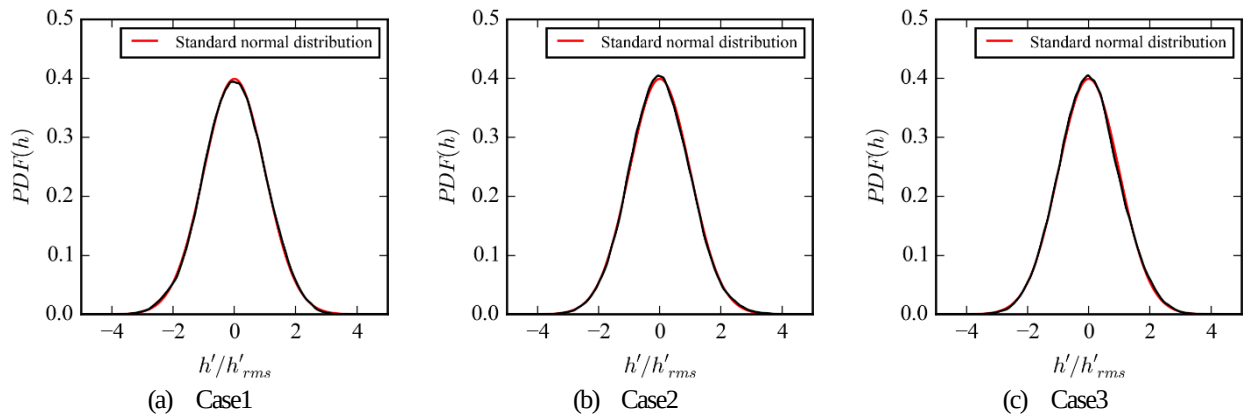


図-5 水面変動の確率密度関数

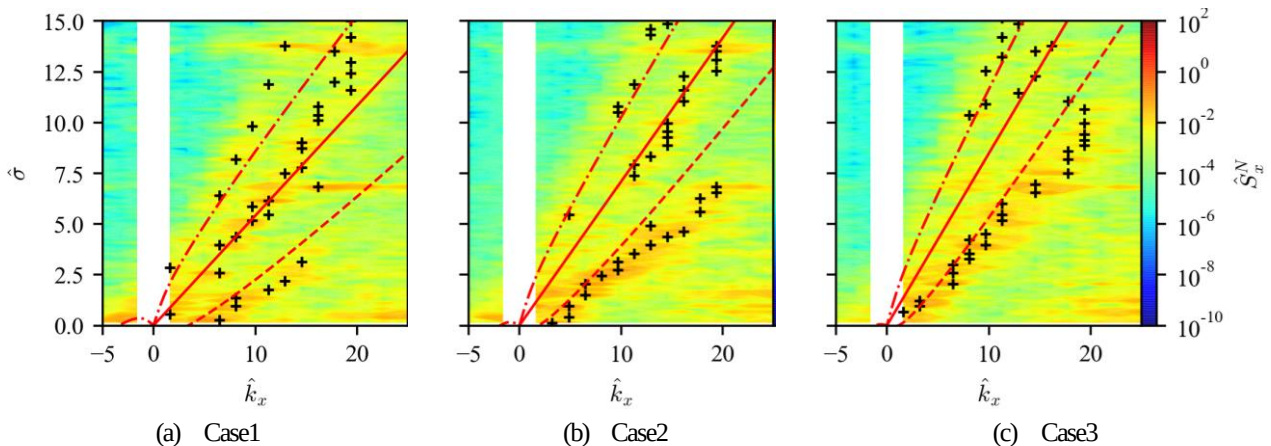


図-6 水面変動の正規化された波数・周波数スペクトル (実線：乱流，一点鎖線：前進波，破線：後退波)

3. 結果と考察

(1) 瞬時水面変動分布

図-3 にサンプリングモアレ法による水面変動計測により得られた瞬時水面変動分布および勾配ベクトルを示す。Froude 数が大きいケースほど波高が大きく変化していることがわかる。また何れのケースでも水深スケールの空間変動が支配的である。加えて、個々の波の移動に着目すると、流下方向に直進するだけでなく、横断方向にも速度を持って流下している様子が確認できる。図-4 に水面勾配の各成分の二乗平均平方(RMS; Root Mean Square)およびその比を示す。横断方向・主流方向共に Froude 数が大きくなるにつれて勾配の RMS が大きくなっており、これは波高の増大に従うものと考えられる。興味深いのは各方向成分の比が Froude 数の増大に伴い減少していることである。Froude 数が小さいケースほど主流方向の水面勾配が大きく、したがって主流方向にやや縮んだような波形が支配的であると考えられる。これは Froude 数が小さいほど水面の異方性が強化されているということを意味するが、Froude 数が小さく水面への乱流の寄与が大きいほど、水面近傍に現れる異方的な乱流の影響が大き

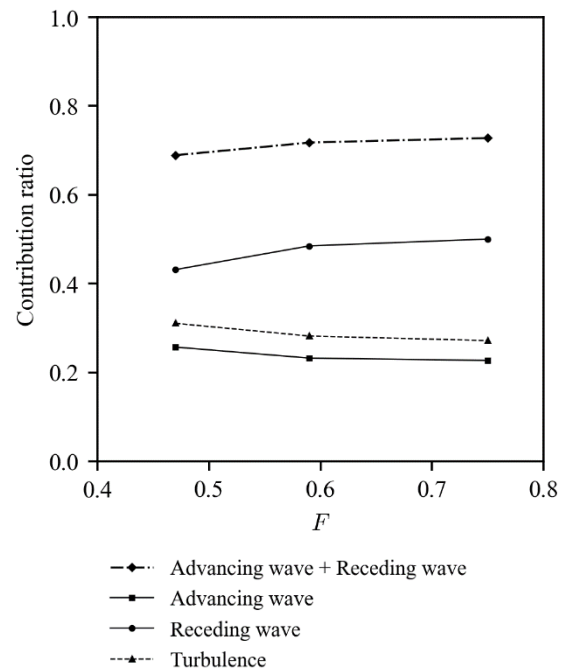


図-7 水面変動の全成分に対する各成分のエネルギー寄与率

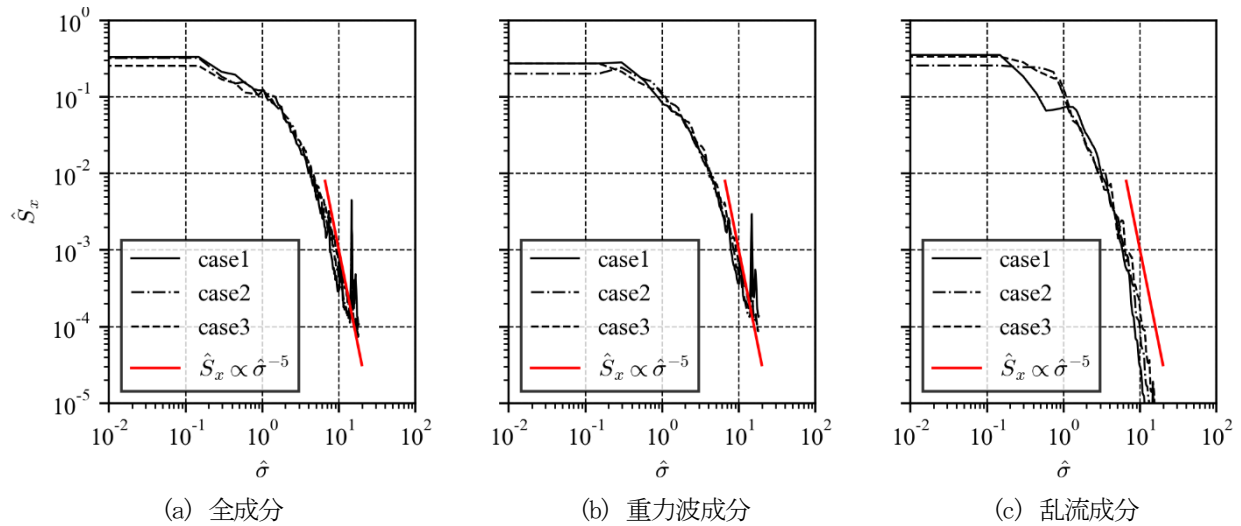


図-8 水面変動の正規化された周波数スペクトル

く現れたものと思われる。

(2) 水面変動の統計的性質

図-5 に水面変動 h' の正規化された確率密度関数(PDF; Probability Density Function)を示す。なお、確率密度関数の推定は Gaussian カーネルを用いたカーネル密度推定(KDE; Kernel Density Estimation)によるものである。何れも標準正規分布によく一致しており、したがって自由水面に生じる変動は正規性を有していると十分に言える。これは既報^{3,12)}でも度々報告される特性であり、個々の水面変動が他の要素に因らず発生していることを意味する。しかし実際には水面変動はある程度の範囲では相互に影響しあうと考えるのが自然であり、短時間の限られた範囲の変動について論じる場合にはこの限りではないと思われる。

(3) 自由水面挙動

既報との重複になるが本計測で対象とした流れ場における支配的な自由水面挙動を本報でも再度確認する。図-6 に水面変動の正規化された波数周波数スペクトルを示す。図中の+記号は各波数毎に推定された局所ピーク的位置である。なお、図中に赤で示した線はそれぞれ乱流および重力波の分散関係を示している。実線は乱流の分散関係であり、以下の式で表される。

$$\hat{c} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{k}_x} = F_s \quad (5)$$

$$F_s = U_s(gH)^{-0.5} \quad (6)$$

なお、ここに σ および k_x はそれぞれ角周波数および主流方向波数、 c は位相速度であり、 F_s は表面流速に対するFroude数である。点線および一点鎖線は表面流速からのドップラーシフトを受けた重力波の分散関係であり、以下の式で表される。

$$\hat{c} = F_s \pm (\hat{k}_x \cdot \coth \hat{k}_x)^{-0.5} \quad (7)$$

上式中の±は重力波が上流・下流の両方に伝播することを意味し、それぞれ前進波および後退波に相当する。図中の一点鎖線が前進波、破線が後退波をそれぞれ表している。いずれのケースにおいても、やや逸れる箇所はあるものの、スペクトルのピークは乱流・重力波のそれぞれの理論値上にまとまって表れている。しかし、Froude数が大きくなるにつれて乱流および前進波のエネルギーが相対的に小さくなり、後退波へとエネルギーがシフトしていることがわかる。これはFroude数の増大に伴って重力波が卓越するのに伴い、前進波との共鳴により後退波が著しく強化されたものと思われる。この傾向は既往の複数の実験^{4,5)}および数値計算^{6,7)}と共通している。

図-7 に重力波（前進波・後退波）の各成分の水面変動全成分に対するエネルギー寄与率を示す。波数・周波数スペクトルで確認されたのと同様にFroude数の増大に伴って後退波の占める割合が増加し、それに応じて乱流および前進波の占める割合が減少しているのが確認できる。この傾向は吉村らの滑面⁶⁾および球状粗面⁷⁾の数値計算によるものと同様であるが、それらの結果と照らすと乱流の占める割合が比較的過大である。乱流・重力波の水面変動への寄与率はFroude数および壁面粗度によって変化するものと考えられているが、いかなる関係に支配されるかは未だ明らかではなく、更なる広範に亘る条件下の計測および数値計算を行う必要がある。

(4) 周波数特性

図-8 に水面変動の正規化された周波数スペクトル(PSD; Power Spectrum Density)を示す。すべての成分から算出した通常のPSDに加えてスペクトルの分割により得られた重力波成分および乱流成分の周波数スペクトルも併せて示した。なお図中には以下の関係式も赤の実線で示した。

$$S \propto f^{-5} \quad (8)$$

ここで S は周波数スペクトル, f は周波数である。これはエネルギーの周波数密度が周波数の5乗に比例して減衰することを意味するが、このことは Dolcetti ら⁴⁾もプローブ型の波高計を用いた実験計測に基づくデータより算出した水面変動の周波数スペクトルの高周波領域に共通して現れる特徴として言及している。本研究で得られたデータにおいても、全成分および重力波成分の周波数スペクトルは高周波領域で式(8)によく一致する減衰特性を示している。一方で乱流成分ではより急峻な減衰特性を示しており、全成分と重力波成分が比較的に通った特性を示しているのに対して全く異なる周波数特性を有していることがわかる。従って式(8)で表される減衰特性は Dolcetti ら⁴⁾が実施した実験においても乱流成分は非常に不明瞭であり、重力の寄与分がはるかに卓越していたことも併せて考えれば重力波の特性に由来するものと考えるのが自然と思われる。

4. 結論

本研究では、サンプリングモアレ法と呼ばれる画像の位相解析に基づく面的変位計測手法を用いた球状粗面を有する浅水乱流の自由水面計測により、浅水乱流における自由水面に係る諸特性についてその詳細を検討した。波数・周波数スペクトルを用いた考察より、既往のいくつかの研究と同じく、自由水面は乱流・重力波の両者の性質を示し、Froude 数が大きくなるにつれて後退波が強化されることを再度確認した。水面変動の周波数スペクトルは、既往研究での指摘と同様に、高周波数領域で周波数の5乗に比例する減衰特性を示した。また、スペクトルの分離により得られた乱流・重力波の各成分について同様に周波数スペクトルを算出したところ、重力波成分は、全成分と同様の減衰特性を示したが、乱流成分は高周波領域でより急峻な減衰特性を示した。

今後は実験計測・数値計算の両方を視野により広範に亘る条件下での検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Komori, S., Murakami, Y. and Ueda, H. : The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.203, pp.103-123, 1989.
- 2) 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, 水工学論文集, 60 巻, pp.559-564, 2016.
- 3) Horoshenkov, K. V., Nichols, A., Tait, S. J. & Maximov, G. A. : The pattern of surface waves in a shallow free surface flow, *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 118(3), pp. 1864-1876, 2013.
- 4) 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
- 5) 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, pp.I_571-I_576, 2017.
- 6) 吉村英人, 藤田一郎: 直接数値計算による滑面開水路乱流における水面の乱れと波の特性に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, pp.I_625-I_630, 2017.
- 7) 吉村英人, 福本達也, 谷昂二郎, 藤田一郎: 球状粗面開水路乱流における水面変動の直接数値計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, pp.I_745-I_750, 2018.
- 8) 谷昂二郎, 藤田一郎: 河岸から撮影された動画像を用いた実河川の自由水面挙動に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, pp.I_805-I_810, 2018.
- 9) 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大: サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測, *Journal of the Vacuum Society of Japan* Vol.54, No.1, pp.32-38, 2011.
- 10) 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. R. Soc. London, Ser. A.*, 336(1640), pp.33–65, 1991.
- 11) K. M. Singh, N. D. Sandham, J. J. R. Williams : Numerical Simulation of Flow over a Rough Bed, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 133, Issue 4, 2007.
- 12) 横嶋哲, 中山昭彦: 水面変動を伴う開水路乱流の直接数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.712, pp.57-72, 2002.

(2018. 5. 31 受付)

CHARACTERISTICS OF FREE SURFACE FLUCTUATION OVER A SHALLOW ROUGH WALL TURBULENT FLOW USING SAMPLING MOIRE METHOD

Kojiro TANI and Ichiro FUJITA

Despite the remarkable improvements of flow measurement techniques and numerical models in recent years, the features of free surface fluctuations over rough wall turbulent flow have not been elucidated yet. In the present study, three dimensional measurement of time-dependent free surface profiles was performed in order to clarify characteristics of free surface over a shallow turbulent flow with a bed roughened by tightly packed glass marbles, by using the sampling moiré method. Some important results on statistical characteristics and decay characteristics of frequency spectrum of free surface fluctuations were obtained.