

京都大学大学院 学生員 ○東 哲久  
 京都大学大学院 正会員 原田 英治  
 京都大学大学院 正会員 田崎 拓海

1. はじめに

流砂・漂砂の運動機構解明に向けて、高精度な数値解析により粗面移動床境界層の乱流構造の検討が進められてきた。例えばStoesser et al.<sup>1)</sup>はLESを用いて格子状に配置した3層の球体上部および内部の乱流構造を検討し、乱流の大部分は球体の直上にある粗面下層で発生すること、およびsweepとejectionが移動床上部と間隙間の運動量交換を担う主要な機構であることを示した。しかし、水理実験によるその検証は少ない。本研究では、間隙の有無が移動床上部の乱流場に及ぼす影響を考察するため、砂粒子スケール(底面凹凸程度)の解像度で移動床上部の流れ場の時空間構造を詳細に検討した。間隙の有無による2つのケースを設定し、RIM-PIV (Refractive Index Matching-Particle Image Velocimetry)を用いた2次元流速測定を行った。

2. 実験方法・水理条件

図-1 に実験装置の模式図を示す。水を入れた水槽にトレーサー粒子を一樣に散布し、水槽を振動台の上に設置して水平方向に加振させ水槽内に定在波を発生させた。振動数 $f$ は1次モードの場合を考え、 $f=1.0\text{ Hz}$ と設定した。アクリル板で水槽内を2つに区切り、撮影方向から見て手前側の奥行き10 mmの領域に移動床を作成した。直径10 mmの球形ビーズを用いて、図-2に示すケース(a)とケース(b)の2種類の移動床(厚さ30 mm)を形成した。ケース(a)ではビーズを3層重ね、ケース(b)ではレジンを表面にビーズを埋め込んだ。堆積層の奥行き方向中央の鉛直断面にレーザーシートを投影し、振動台の動きに同期させたハイスピードカメラで粒子画像を撮影した。撮影範囲は約 $36 \times 36\text{ mm}$ で、ビーズが横方向に約3.5個、縦方向に約1.5個収まるよう調整した。主要な実験パラメータを表-1に示す。移動床表面のビーズの最も高い位置を通る水平線の撮影領域中央を原点とし、水平方向に $x$ 軸を、鉛直上向きに $y$ 軸を設定する。

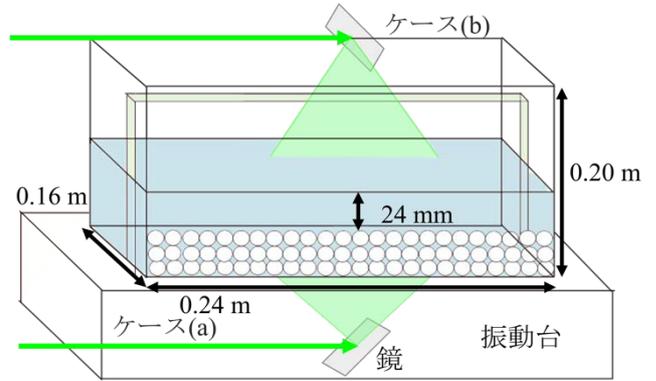


図-1 実験装置(模式図)

ケース(a):間隙あり      ケース(b):間隙なし

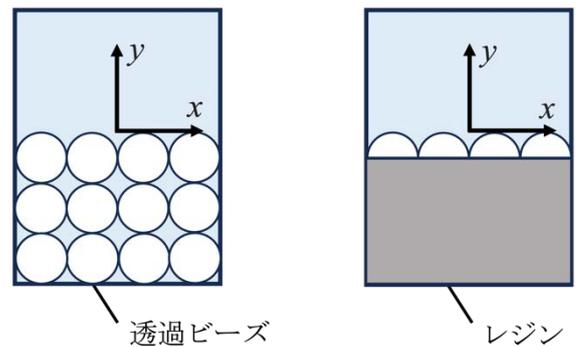


図-2 移動床の形成法

表-1 実験パラメータ

振動片振幅	(a) 12 mm, (b) 9 mm
画像サイズ	1024 × 1024 pixel
ベクトル間隔	0.5 mm 程度
撮影時間間隔	0.001 秒

3. 実験結果

30回実施した各撮影から3周期分の位相の波形を取り出し、合計90周期の速度ベクトルのアンサンブル平均を算出した。ここで、本研究で用いるアンサンブル平均流速 $\bar{u}$ を

$$\bar{u}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{90} \sum_{n=1}^{90} \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)_n \quad (1)$$

で定義する。ここで、 $\mathbf{r}$ : 空間座標、 $t$ : 時刻、 $\mathbf{u}$ : 流速の計測値である。また流速の変動成分 $\mathbf{u}'$ を

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}} \quad (2)$$

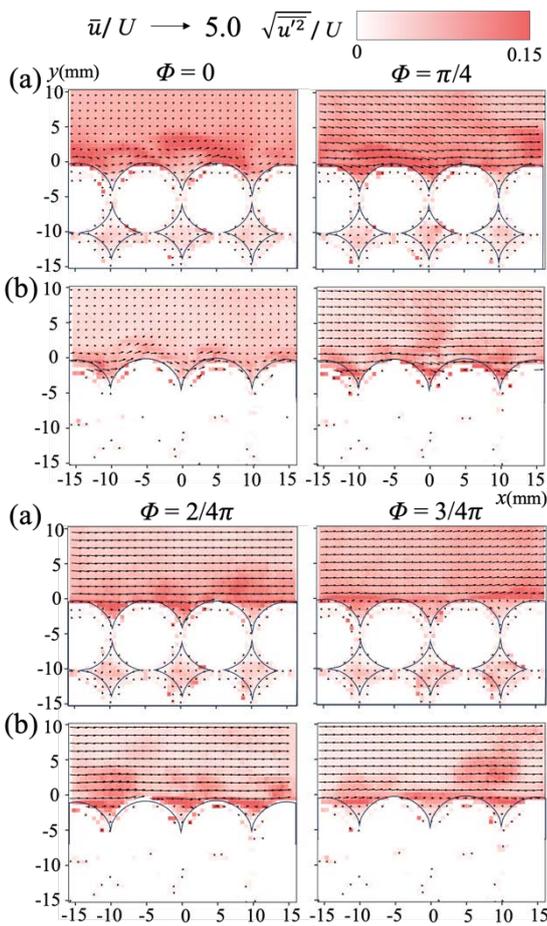


図-3 アンサンブル平均流速ベクトルとx方向の変動強度の空間分布

で定義する。両ケースの流れ場を比較するため、境界層外部の最大流速  $U$  を代表流速とし無次元化を行った。

図-3 にアンサンブル平均流速ベクトルと  $x$  方向の変動強度  $\sqrt{u'^2}/U$  の空間分布の位相変化を示す。加速位相(位相  $\Phi = 0, \pi/4$ )における移動床表面において、ケース(a)の方が  $\sqrt{u'^2}/U > 0.10$  の大きい  $x$  方向の変動強度を示す範囲が厚い。間隙の有無によって、減速位相(位相  $\Phi = 2\pi/4, 3\pi/4$ )における  $\sqrt{u'^2}/U > 0.10$  の領域の厚さに差は見られない。

図-4 に撮影範囲の水平方向中心( $x = 0$  mm)の  $x$  方向の乱れ強度と  $y$  方向の乱れ強度の和の高さ位相変化を示す。 $y \geq 0$  mm と  $y \leq 0$  mm の2つの範囲に分けて考察する。 $y \geq 0$  mm において、ケース(a)の方が  $x$  方向の乱れ強度と  $y$  方向の乱れ強度の和が大きいことがわかる。 $y \leq 0$  mm において、加速位相における  $x$  方向の乱れ強度と  $y$  方向の乱れ強度の和は両ケースで概ね等しいのに対し、減速位相ではケース(a)の方が  $x$  方向の乱れ強度と  $y$  方向の乱れ強度の和が大きい傾向にある。

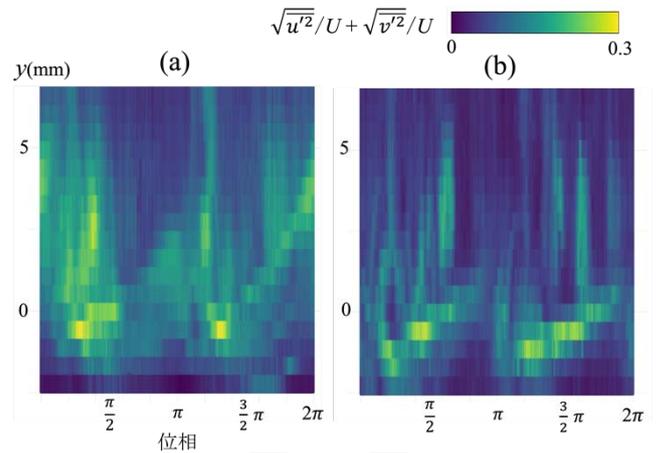


図-4 変動強度  $\sqrt{u'^2}/U + \sqrt{v'^2}/U$  の高さ位相分布

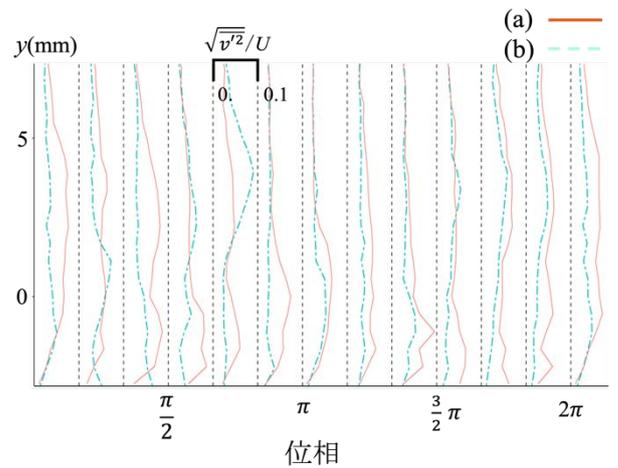


図-5  $y$  方向変動強度の鉛直分布

図-5 に撮影範囲の水平方向中心の  $y$  方向の変動強度の鉛直分布を位相毎に示す。間隙の有無で  $y$  方向の変動強度を比較すると、ほぼ全ての位相でケース(a)がケース(b)よりも大きい。

#### 4. おわりに

本研究では、間隙が移動床上部流の乱れに与える影響を考察するため、間隙がある移動床をケース(a)、間隙がない移動床をケース(b)とし、振動流下で各ケース30回の計測を行った。その結果、ケース(a)の方が時間変化、空間変化を通して  $x$  方向の変動強度、 $y$  方向の変動強度が大きい傾向にあることから、間隙が移動床上部の乱れを大きくすることが示唆された。今後は河川における移動床を想定し一方向流下で実験を行うなど、実験条件を変更して検討を深めたい。

#### 参考文献

- 1) Stoesser, T., Fröhlich, J., Rodi, W. : Turbulent open-channel flow over a permeable bed. *Proceedings of 32nd IAHR Congress, 1-6 July 2007, Venice, Italy, 2007.*