

第II部門 波動場における多孔質体近傍の流動特性に関する粒子画像解析

大阪市立大学 工学部 学生会員 小塚 泉
 大阪市立大学大学院 工学研究科 正会員 中條 壮大

1. 研究背景

石積み堤や消波ブロック防波堤といった多孔質構造物は、直立護岸に比べて反射波の影響が少なく、静穏な港湾環境を整備する上でよく利用される。長周期波浪は小さな波高でも大きな揺動を与えるために、その低減が望まれているが、そこでも多孔質構造物の利用が注目されている¹⁾。多孔質構造物による波浪減衰には、構造物壁面による粘性抵抗、間隙部で生じる渦による乱流抵抗が考えられている²⁾が、そのモデリングには一方向充填層通過流の圧力損失に関する知見が応用されており、直接的に評価されてはいない。また、多孔質構造物には高波浪時に部材の流失や地盤洗掘による沈下による被災が生じる。こうした被災メカニズムの解明にも多孔質構造物内部の流動を直接計測する必要がある。

2. 研究目的

本研究では、波動場に設置された多孔質体模型の間隙部および周辺に形成される流動について、屈折率整合法を併用した画像計測手法により多点同時計測を行う。これにより波浪場の各位相で生じる微細流動を明らかにし、その結果に基づいて波浪減衰・応力発生メカニズムの一端を明らかにする。

3. 実験概要

図-1 に示すように、 x, y, z 各方向の長さが $4.0 \times 0.2 \times 0.4\text{m}$ の水槽内にシリコンで作成した多孔質体模型を配置する。多孔質体模型は、直径 $D=2.0\text{cm}$ のシリコン球を 204 個接着し、 x, y, z 各方向の長さが $0.072 \times 0.105 \times 0.2\text{m}$ となるように作成した。多孔質体の沖側端部、ガラス面を原点とし、流軸方向に x 軸を、鉛直上向きに z 軸を、これらと直交する方向に y 軸を取るよう座標系を設定する(図-2)。プランジャー式造波装置の移動速度は正弦関数となるように PC 制御され、表-1 に示す周期と波高の波を作成した。多孔質体間隙部の流動を計測するために、流体にはシリコン球と同じ屈折率となるように調整された NaI 水溶液を用いた。NaI 水溶液には水粒子に追従するポリ塩化ビニルのトレーサーを投入し、可

視化用連続光源 (DPSS Green Laser DPGL-5W:日本レーザー製) によって照らされた断面内のトレーサーの運動を高速度カメラ (Phantom Miro 320:ノビテック社製) で撮影した。計測断面は、模型内に取り込まれた気泡などの映り込みを考慮して $y=3.25\text{cm}$ の面とした。撮影された画像のサイズは 1000×860 pixel で、撮影間隔 $\Delta t=1/300\text{s}$ 、シャッター速度は $1000\mu\text{s}$ で、計測時間は約 27.6s で計 8290 枚を撮影した。撮影された画像中の各トレーサーの運動は PTV アルゴリズムである Super-Resolution KC 法により解析した。PTV ではトレーサーの存在位置の流速を得るので、任意点上の流速を得るために計測値を逆距離荷重法により補間することで任意の点での流速データを得た。この時の補間領域の半径は 0.4cm とした。

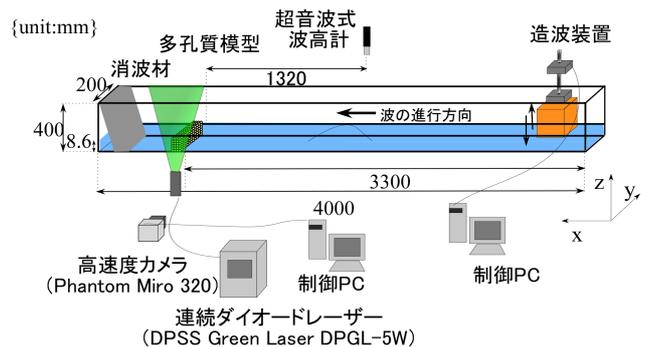


図-1 実験装置の概要

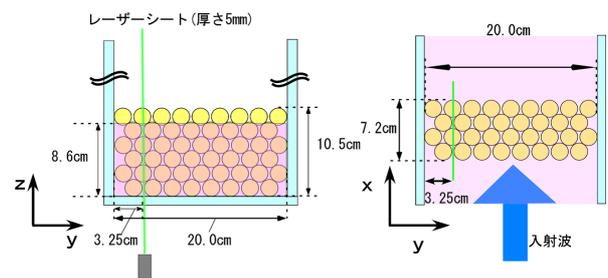


図-2 多孔質体模型の諸元;(左) 通水断面図 (右) 平面図

表-1 実験条件

水深 h [m]	0.086	波形勾配	0.009
波高 H [m]	0.013	充填率 ϵ [%]	57
周期 T [s]	1.55	動粘性係数 ν [m^2/s]	0.9×10^{-6}
波長 L [m]	1.39	フルード数 Fr	0.98
波速 U [m/s]	0.90	粒子レイノルズ数 Re	1344
水粒子速度 u [m/s]	0.026	模型縮尺 (フルード則)	1/50

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{hg}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{uD}{(1-\epsilon)\nu} \quad (2)$$

ここに、 D はシリコン球の直径 ($=2.0\text{cm}$)、 u は波高と周期から求まる最大水粒子速度 ($=\frac{\pi H}{T}$)、 g は重力加速度 ($9.81[\text{m/s}^2]$) を表す。

4. 実験結果

波動場では主流成分が時間変動するため、乱れの定義には工夫がいる。ここでは約 0.023s のウィンドウによる移動平均操作を行い、平均流と乱れを定義した。図-3 に示すのは多孔質体間隙部の平均値としての流速と乱れ強度（どちらも水平速度成分）の変化であり、時間軸は多孔質体沖側端における水粒子速度の位相で表している。同図から多孔質体沖側端における鉛直平均の水粒子速度と多孔質体間隙部平均の流速の間には位相差が生じていることが観測される。乱れ強度は沖向き位相において、流速が最大となる位相付近の前後で乱れ強度が少し小さくなる傾向がある。

図-4、図-5 それぞれに、多孔質体間隙部平均の乱れ強度とせん断速度の位相変化を示す。両図を比べると乱れ強度の増減とせん断速度の増減には相関が有るとわかる。各時刻における乱れ強度とせん断速度との関係を散布図で示したのが図-6 である。両者の相関係数は 0.59 となり比較的高い正の相関を示した。

5. 結論

以下に本研究で得られた知見を示す。

- 間隙部の流れも入射波と同じ周期で変動するが、入射波と位相差が生じている。
- 速度波形は、沖向き位相で正弦波よりもやや尖った波形を示した。また、多孔質体間隙部における沖向き流れは岸向き流れよりも小さく（流速振幅でおよそ 0.76 倍）、正弦波からのずれは特に減速位相において顕著に見られた。これには多孔質体通過時の波高減衰が影響していると推測される。
- 乱れ強度と平均流成分のせん断速度の位相変化の相関は比較的高い値を示した。

参考文献

- 1) 平石哲也ら、港湾空港技術研究所資料、No. 1205、16p、2009。
- 2) P.L.-F. Liu et al., J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., pp.322-331,1999。

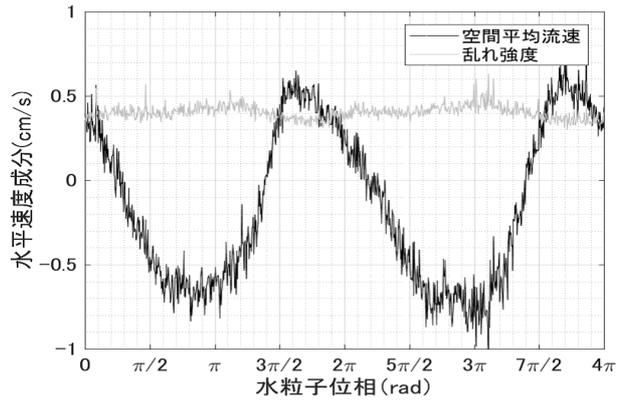


図-3 多孔質内部平均流速（水平成分）

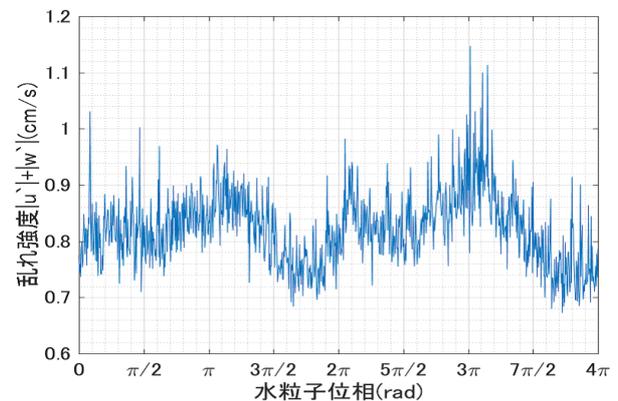


図-4 乱れ強度の位相変化

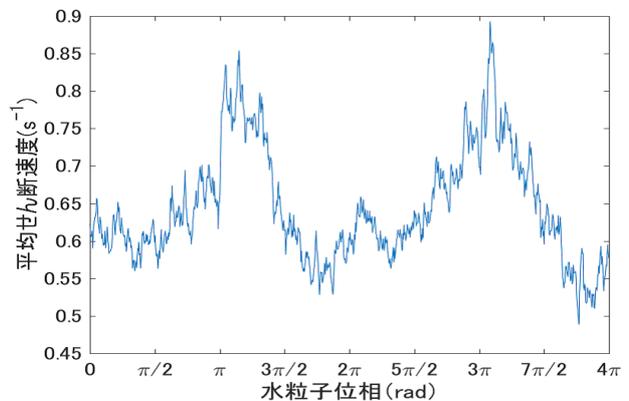


図-5 せん断速度の位相変化

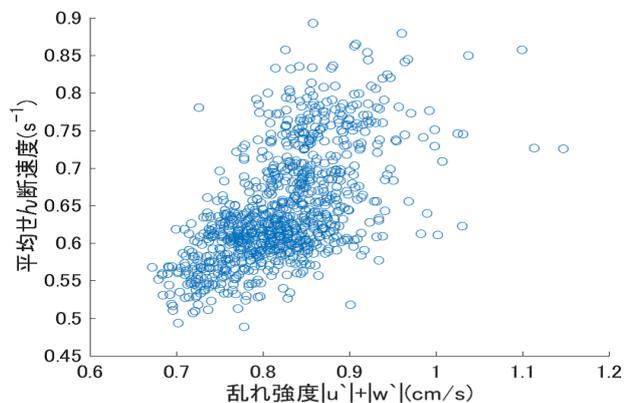


図-6 各時刻の乱れ強度とせん断速度の関係