

第II部門

球あるいは半球状粗面を有する流れのDNS解析

神戸大学大学院工学研究科 ○学生員 福本 達也 神戸大学大学院工学研究科 正会員 藤田 一郎
 神戸大学大学院工学研究科 学生員 吉村 英人 神戸大学大学院工学研究科 学生員 谷 昂二郎
 神戸大学大学院工学研究科 学生員 能登谷 祐一

1. はじめに

開水路における粗面乱流に関しては従来、数多くの研究が行われているが、その多くは実験的な研究であり、石礫間の空隙を含めた流れの構造に言及した数値解析による研究¹⁾は多くない。本研究では千鳥状に密に配置した球から成る粗面を対象とし、浅水状態における流れの詳細をDNS解析により考察する。特に、各球間の空隙の影響を検討するために球状粗面に加えて半球状粗面についても解析を行い、その違いを調べた。

2. 解析条件概要

本解析では、球あるいは半球の頂点からの水深が直径 D の2倍という浅水状態を対象とした。これは今後粗面で発生した乱れが水面に及ぼす影響を調べるためであるが、本研究ではまず内部流を詳しく調べるために、水面は rigid lid とし、摩擦レイノルズ数 Re^* を 400 とし解析を行った。本研究では、速度スケールとして摩擦速度 u^* 、長さスケールとして球の底面から水面までの高さ H で無次元化し、重力項を省略した Navier-Stokes 方程式を用いた。流れは圧力勾配で駆動させた。粗度の形状は埋め込み境界法(IBM)で与え、球の表面に non-slip 条件を課した。流れの境界としては主流方向 (x 軸) と横断方向 (z 軸) に周期境界条件を与えた。格子解像度等に関する条件は表-1 に示す通りである。なお計算領域は $4\sqrt{3}H$ (主流) $\times H$ (鉛直) $\times 4.0H$ (横断) とした。

3. 球の配置と Streak 構造

図-1 に球を密に配置した計算領域と球の頂点付近における主流方向流速分布の瞬間値を示す。横断方向に並んだ縦筋(streak)構造が良好に計算されていることがわかる。同様の構造は半球のケースでも確認している。

4. 平均乱流場の特徴

ここでは流れが十分発達した後、無次元時間で球状粗面では 30 秒間、半球状粗面では 25 秒間のデータを用いて空間平均した結果を示す。平均流速の鉛直分布を示したのが図-2 である。図には仮想原点を y_a^+ だけ下方に変化させたプロットを示しているが、対数域が直線となる条件は球では $y_a^+=0.25k^+$ 、半球では $y_a^+=0.20k^+$ であった。また、相当粗度 ks^+ は CASE1 では 130、CASE2 では 90 となった。粗度高さに対する相当粗度の比は既往の研究とも同程度であった。河床付近では滑面の粘性底層に類似した領域を確認できるが、この領域の占める割合は球状粗面(CASE1)で相対的に大きい。粗度が水深に占める割合を考慮しても、この違いは明らかである。すなわち、球状粗面の方が半球状粗面に比べ、粗度要素が外層へ及ぼす影響が大きいものと考えられる。以上のように球の間の空隙の有無により粗度要素が流れに及ぼす影響に違いを生じさせていることが確認できる。

表-1 解析条件

ケース名	CASE1	CASE2	
河床形状	球状粗面	半球状粗面	
粗度高さ k^+	133.3	80.0	
全格子数	34160640		
格子数 (N_x, N_y, N_z)	556	192	320
格子解像度 ($\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$)	4.98	0.4~4.0	5

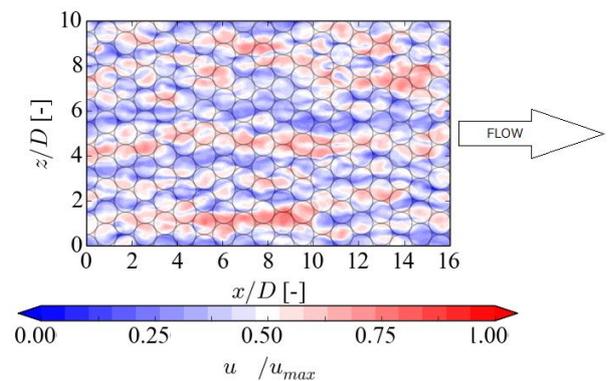


図-1 球状粗面(CASE1)の配置と Streak 構造

キーワード: DNS, 粗面乱流, 浅水流

Tatsuya FUKUMOTO, Ichiro FUJITA, Hideto YOSHIMURA, Kojiro TANI, Yuichi NOTOYA

ifujita@kobe-u.ac.jp

図-3 にはせん断応力分布を示す。粘性せん断応力は粗度頂点で最大となるのに対し、レイノルズ応力はその少し上方でピークをとっている。両ケースとも全せん断力は直線分布に従っているが、球状粗面の方が半球状粗面に対して粘性せん断力が占める割合が大きく、レイノルズ応力は相対的に小さな値をとっている。

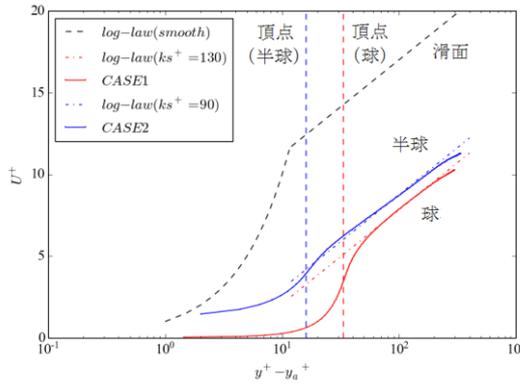


図-2 平均流速分布の比較

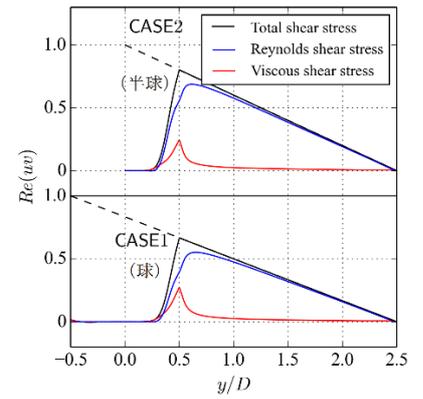


図-3 せん断応力分布

これは、球状粗面においては粗度間が流速で満たされており、半球の底面に相当する高さにおいてもその境界が流動場で構成されていることが要因と思われる。

図-4 に示したのは乱れ強度の比較である。特に鉛直・横断方向の乱れ強度に差が生じている点特徴的である。そのため、図-5 に示した乱れエネルギー分布では全体的に半球の方が大きな値をとっていることがわかる。図-6 には圧力変動強度を比較した。球状粗面は半球のケースより底面に近づくほど強度が減少している。これは、球の間の空隙が圧力変動を緩和しているためと考えられる。

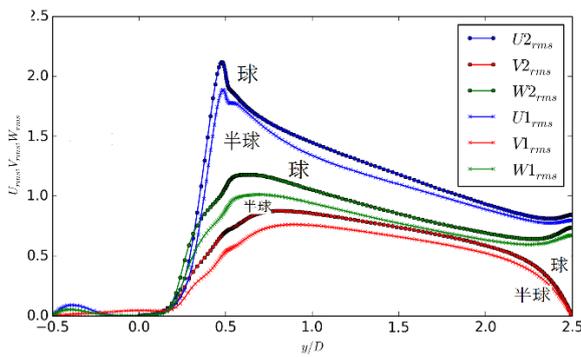


図-4 乱れ強度分布

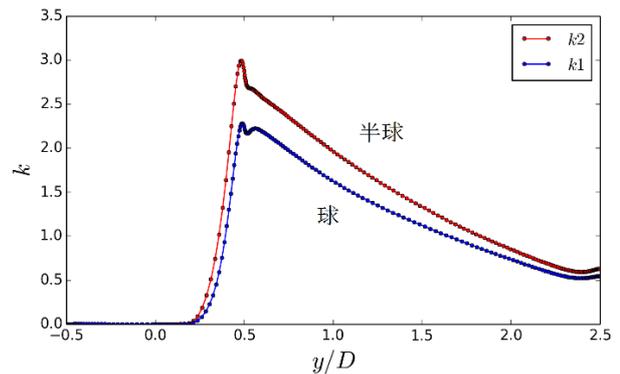


図-5 乱れエネルギー分布

5. おわりに

本研究では浅水状態における粗面流れに関する基礎研究の一環として、球状粗度および半球状粗度上の流れに関する DNS 解析を行った。その結果、河床間における空隙の有無により得られる内部流に差異が生じることがわかった。今後は LES による解析や水面変動を考慮した解析を行い、本解析結果との比較や考察を進めていく予定である。なお、本研究では神戸大学計算科学教育センターが所有するスーパーコンピュータである π -コンピュータを使用して、計算領域を 1344 個に分割して並列計算を行っている。

参考文献

1) K.M. Singh, N.D. Sandham, J.J.R. Williams : Numerical Simulation of Flow over a Rough Bed, Journal of hydraulic engineering, Volume 133, Issue 4, pp.386-398, 2007.

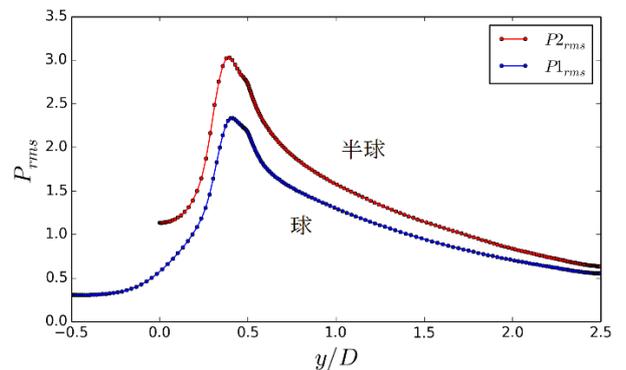


図-6 圧力乱れ強度