

水表面データから水面下の流れは予測可能か？

静岡大学 正会員 ○横嶋 哲

1. 要約

現地計測等で比較的容易に得られる水表面上の観測データから水面下の流れの数値予測は可能かどうかを検討するため、完全発達二次元開水路乱流を対象として数値実験を行った。[i] 乱流の誤差過敏性のためたとえ初期条件が“完全”でも、水表面データと数値予測で生み出される水面下流れがいずれ整合しなくなること、[ii] 多くの開水路流では水面下の流れの大半は水面の挙動に関係なく底面近傍の現象で決まること、が瞬時レベルでの水表面データからの水面下流れの予測可能性を非常に困難にしていることが確認された。

2. 対象流れ・対象流れ・計算ケース

対象は底が粘着壁、水面が滑り面で近似される、二次元開水路等流である（図1）。 x_1, x_2, x_3 はそれぞれ主流、鉛直、横断方向を、 u_i は x_i 方向瞬時速度成分を表す。水平な二方向には周期条件を課した。

本報では二種類の計算結果を比較することで、表題項目を議論する：参照計算は通常の直接数値計算 (DNS) であり、主計算では、水面上でせん断ゼロの条件を課す代わりに参照計算から得られた“観測”データを与える（図2）。“観測”データのディスクへの書き出し・読み込みはバイナリ形式のまま行われたので、この操作によるデータ劣化はない。両計算では同じ初期条件を用い、同じ時間に渡って統計量を算出した。

Re 数は底面平均摩擦速度と水深 H を基準として 395、断面平均流速を用いれば約 8000 である。用いた計算格子解像度は $(\Delta x_1^+, \Delta x_2^+, \Delta x_3^+) = (39, 0.25 - 17.7, 13)$ で、最小スケールの運動を完全に捉えるには十分ではないが、底面近傍の乱れ強度分布等、流れの概要は再現できる。問題の簡潔化のため SGS 応力モデルは用いていない。添字 + は粘性スケールで無次元化された量を表す。数値計算法については文献1) を参照されたい。

3. 計算結果・考察

図3に参照計算から得られた主流方向変動流速の時系列を示す。バッファ層から対数域にかけて激しい速度変動が見られる。図4は参照計算と主計算の主流方向流速のズレの時系列である。粘性時間で600程度でまずバッファ層上部で（このスケールで認識できる程度の）ズレが生じ、それが全領域に伝わったように見える。

図5では乱れ強度 u_i^{rms} 及びエネルギー散逸率 ϵ の分布を比較する。参照計算と主計算の差は水面近傍でのみ現れ、水面で“観測”データを与えた場合に乱れ強度の水平成分が減少し、散逸率が急増する（図5(b),(d)）。応力収支の検討から、この相違は主計算で散逸率の水平成分が水面近傍で急増したためとわかった。つまり課された“観測”データと水面下の流れが時間の経過とともに整合しなくなり、水面直下で両者が激しく干渉があったことが推測される。参照計算と主計算は解析的には完全に同一解を生むシステムであり、図4, 5で見られた両者の差は、数値解析の過程で不可避な誤差が乱流の誤差過敏性により増幅したためである。

両計算の差が水面近傍にのみ現れる点も表題を論じる上で非常に重要である：つまり対象流れでは水面下の大半は“観測”データに無関係に、底面近傍の現象で決まる^{2,3)}。この場合、水面に現れる瞬時の情報の大半は水面下の過去の流況の一部であることも、瞬時レベルでの水表面データからの水面下の予測を困難にしている。

これらより逆に、(a) 問題 [i] を避けるために瞬時レベルではなく何らかの平均レベル（平均量を水面上で与えて水面下の平均流況を予測）、及び (b) 水面が対象流れ場の形成に主体的に関わる状況（激しい水面変動、水面の大変形、底面の影響を無視等）、であれば、水表面データから水面下流れの予測に意義を見出せることがわかる。もし観測データそのものではなく、その統計的性質のみを境界条件として規定し、残りの自由度で問題 [i] を吸収できれば、DNS/高解像度 LES レベルでも予測可能性が高まる。

謝辞

河原 能久 先生 (広島大)、中山 昭彦 先生 (神戸大)、Blair Perot 先生 (UMass Amherst)、渡邊 明英 先生 (広島大) からは多くの貴重な助言を賜った。記して謝意を表す。

キーワード 乱流, 数値予測, 数値実験, 自由水面, データ同化, 境界条件, 乱流の誤差過敏性

連絡先 〒432-8561 浜松市城北3-5-1 静岡大学工学部システム工学科 Phone 053-478-1258(直通)

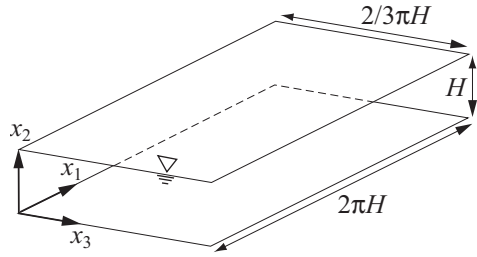


図 1: 検討対象とした開水路等流の概要.

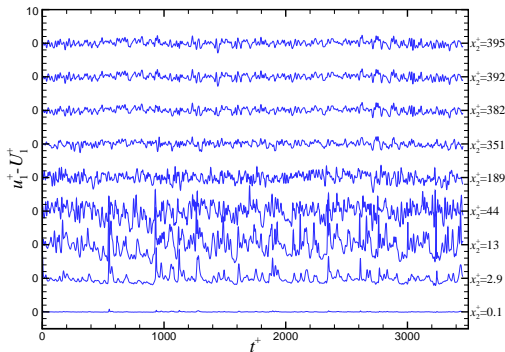
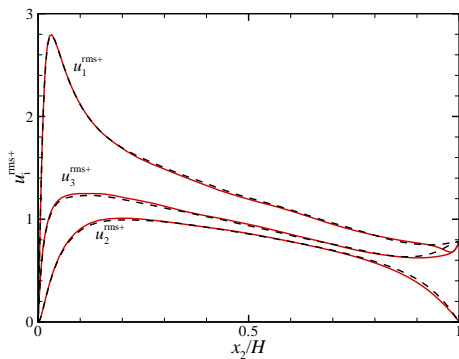
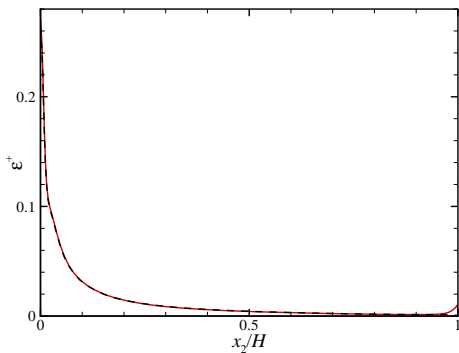


図 3: 参照計算から得られた、ある鉛直軸上の 9 点での主流方向流速の変動成分の時系列分布.



(a) Turbulence intensities



(c) Energy-dissipation rate

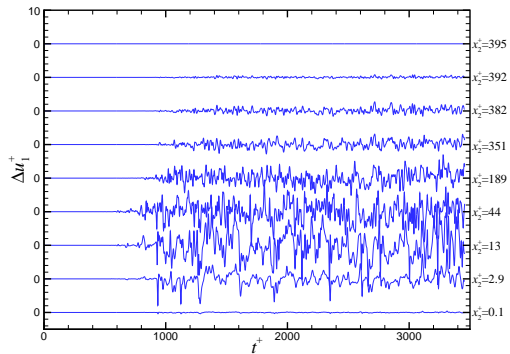
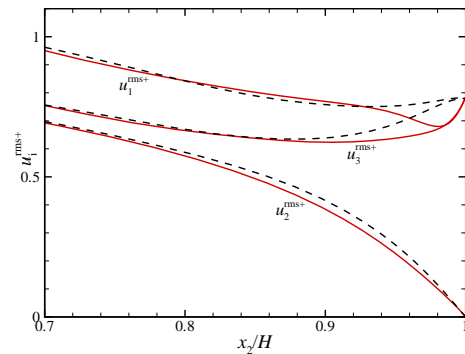
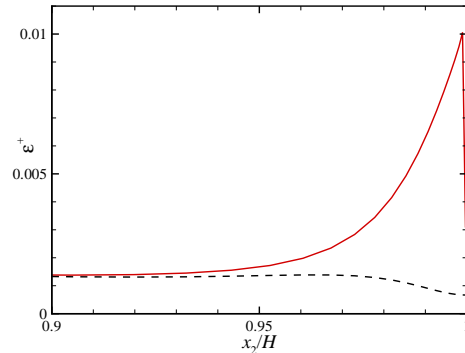


図 4: 参照計算と主計算との主流速のズレの時系列.



(b) Turbulence intensities enlarged near the free surface



(d) Energy-dissipation rate enlarged near the free surface

図 5: アンサンブル平均統計量の比較: - - - -, 参照計算; —, 主計算.

参考文献

- 1) 横嶋, 日本流体力学学会年会, AM05-20-002, 2005.
- 2) Jiménez and Pinelli, *J. Fluid Mech.*, **389**, 335, 1999.
- 3) Baggett, *CTR Annu. Res. Briefs*, 123, 1997.