

第II部門 水面変動を考慮した限界流近傍開水路乱流の LES

神戸大学工学部

学生員 ○松村 友宏

神戸大学大学院自然科学研究科

正会員 中山 昭彦

1. 序論

土木建設工学で問題となる河川や海岸の流れには水面があるので、水面を持たない管路流れに比して性質が大きく変化する。特に水面変動は瞬時の乱れと相互作用しているため水面の影響を考慮する場合と考える場合では計算結果に何らかの違いが生じる可能性がある。しかしながらこれまでの瞬時の乱れを考慮した開水路乱流計算は水面をスリップ壁や微小振幅波理論等で近似する事が多かった。更には水面変動とフルード数には密接な関連がありながらも常流での計算に留まっている。そこで本研究では環境水流の LES 計算の適用を目標として、砕波を伴わないような平坦開水路乱流について LES 計算を行いどの程度の精度と信頼性で再現できるかを調べる。検証にあたっては中山の実験¹⁾や Yokojima の DNS 計算の結果²⁾を用いる。水面変動強度の検証には前述したものに加え、Nakayama *et al.* の実験³⁾および Hodges *et al.* の LES 計算結果⁴⁾を用いる。

2. 水面変動を考慮した LES 法の概要

本研究では中山により提唱された修正 HSMAC 法⁵⁾を用いて水面変動の影響を考慮する。SGS モデルとしては従来から用いられてきた標準 Smagorinski モデルを用いている。Navier-Stokes 方程式の空間差分に関して、粘性項は 2 次精度中心差分を用い、移流項には 3 次精度風上差分を行った。時間進行には 2 次精度の Adams-Bashforth 法を用いている。計算格子には直交 Staggered 格子を用いた $49 \times 41 \times 112$ の不等間隔格子を用い、それぞれの領域長さは $12.0 \times 6.4 \times 3.5$ である。

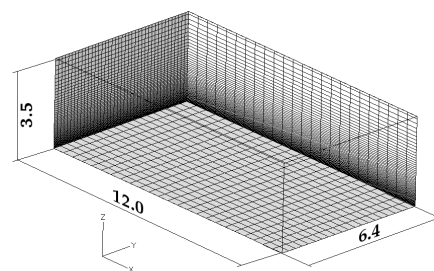


図-1 計算領域

3. 計算条件の概要

本計算では平均水深と断面平均流速を基にしたフルード数で 1.23，同様の基準におけるレイノルズ数で 20000，水路床勾配を 0.0040 とし中山の実験条件¹⁾に合致させている。計算格子の主流方向および横断方向は周期条件とする。水面では圧力を零とし、水面曲率に応じた表面張力を導入している。本計算では局所的に水面勾配が急になり計算が不安定になることを考慮して、本研究ではウェーバー数を 100 と仮定して計算を行った。標準 Smagorinsky モデルにおける係数 C_s は 0.10 とした。

4. 計算結果

本 LES により計算された結果を実験および既往の DNS 計算結果とともに図-2 から図-5 に示す。平均主流速，流速変動，レイノルズ応力の各値は壁変数により無次元化されている。壁変数の算定に必要な摩擦速度は流速と水深は水路全体の圧力差から求めた。

図-2 より，線形則領域では実験値および DNS 計算値よりも小さな値である事が分かる。これは LES が空間平均値を計算しているために発生する傾向である。対数則領域においては LES が実験値および DNS 計算値を再現する傾向にある。また中山¹⁾は流速分布が水面近傍で対数則から逸脱する現象 (Wake 現象) を指摘しているが、本研究では再現されなかった。

図-3 に流速変動成分についての比較を示す。これより本 LES 計算値は実験値に見られる傾向を捉えることができたと言える。個々の成分に関しては主流方向の流速変動成分 u_{rms} が実験値よりも過大に計算され，横断方向の流速変動成分 v_{rms} と鉛直方向の流速変動成分 w_{rms} が実験値 3dh よりも過小である。

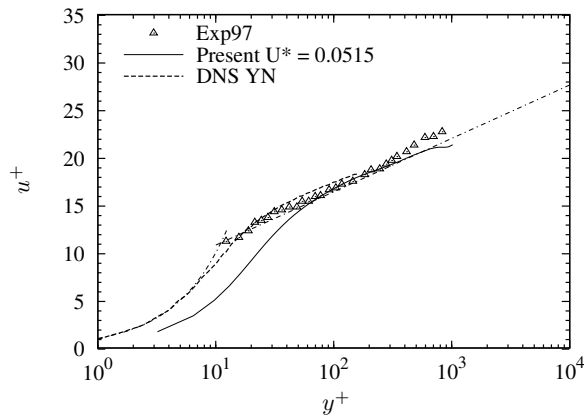


図-2 Fr=1.23 の平均主流速分布

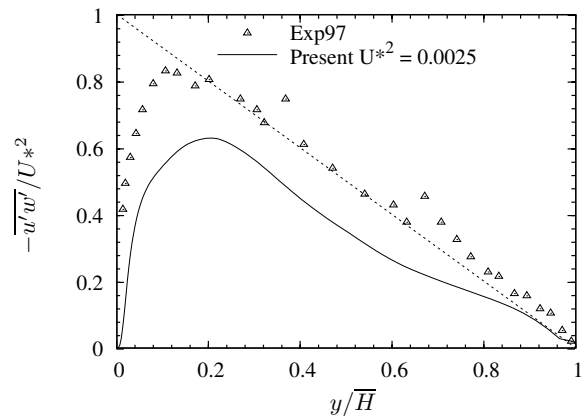


図-4 Fr=1.23 のレイノルズ応力の分布

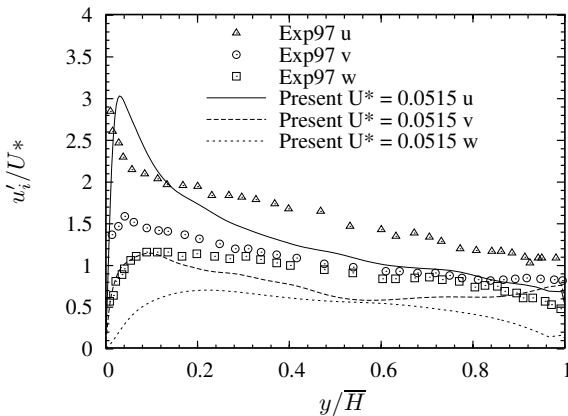


図-3 Fr=1.23 の流速変動成分の分布

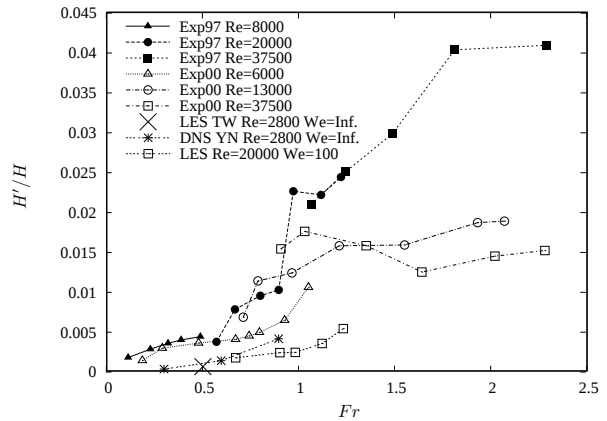


図-5 水面変動強度分布

図-4 にレイノルズ応力成分の GS 成分と SGS 成分を合わせた分布を示す。図-3 同様に壁面近傍と水面近傍でレイノルズ応力が零に近付くという傾向を再現している。また本 LES 計算値は実験結果に比べ低い傾向にある。

図-5 は水路の平均水深と流入面での主流速度から求めたフルード数と既往の研究との比較図である。これより本研究では既往の研究で見られるフルード数の増加と水面振動強度の相関を捉えることが出来た。中山¹⁾や中瀬³⁾の実験結果では限界流近傍で水面振動強度の大幅な増加が見られるが、本研究ではこの傾向について再現できていない。

5. 結論

水面変動を考慮した LES により開水路乱流を計算した結果、本 LES は実験および DNS 計算の傾向をおおよそ再現することができたと考える。水面変動強度に関して本法が実験を定量的に再現しなかった理由にはウェーバー数を 100 と仮定した事が考えられる。ウェーバー数を実験条件に近づければ実験結果を再現できるのでは無いかと考える。

参考文献

- 1) 中山 忠暢: 自由水面近傍の乱流構造と組織渦の水理特性に関する研究, 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻修士論文, 1996.
- 2) Yokojima, S.: Modeling and Simulation of Turbulent Open-Channel Flows Emphasizing Free-Surface Effects, *Kobe University Doctor of Engineering*, 2002.
- 3) NAKAYAMA, A., NAKASE Y. and FUJITA, I.: CALCULATION OF OPEN-CHANNEL FLOWS WITH LARGE VARIATION OF FREE SURFACE USING TWO-EQUATION TURBULENCE MODEL, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 47, 2003.
- 4) Hodeges, B. R. and Street, R.L.: On Simulation of Turbulent Nonlinear Free-Surface Flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 151, 1999.
- 5) 中山 昭彦, 崎尾 幸司: 修正 HSMAC 法による開水路乱流のシミュレーション, 応用力学論文集, Vol. 7, 2004.