

水面変動を考慮した開水路乱流の LES

LES of Open-Channel Flow with Moving Free Surface

横嶋 哲, 神戸大院自然科学研究科, 〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, 970d925n@yku.kobe-u.ac.jp
 中山 昭彦, 神戸大院自然科学研究科, 〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, nakayama@kobe-u.ac.jp
 Satoshi YOKOJIMA, Kobe-University, Rokkodai, Nada, Kobe 657-8501, Japan
 Akihiko NAKAYAMA, Kobe-University, Rokkodai, Nada, Kobe 657-8501, Japan

In a calculation of turbulent flows with free surface using a turbulence model, it is found that there is a need to model new unknown correlation terms in the kinematic boundary condition of free surface. In this study, fundamental characteristics of these correlation terms and performance of typical modeling techniques for them have been investigated using open-channel flow DNS based on small-amplitude wave theory. It is found that at subcritical Froude numbers these terms do not have significant effects on the mean kinematic boundary condition. Scale similarity type model has a better correlation with DNS results than gradient-diffusion type model.

1. 緒論

粘性スケールまで解像する DNS 以外の乱流数値予測法では、流れ場に何らかの平均操作が施され、これにより失われた情報は Reynolds 応力あるいは SGS 応力としてモデル化される。対象流れが自由水面を有する場合、高さ関数や密度関数のような気液界面の挙動を表現するスカラー量の時間発展方程式が付加されることが多いが、この新たな方程式も非線形項を含むため、平均操作により新たな未知相関量が現れる。しかしながら一般にこの新たな「完結問題」はほとんど意識されておらず、最近になって数人の研究者によって取り上げられたに過ぎない⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

本報では、微小水面変動仮定に基づいた開水路乱流の DNS 結果⁽⁵⁾に空間フィルター操作を施し、LES 計算でモデル化が必要となる上述の SGS 相関項の基本特性の検討、モデル化の提案を行い、その予測性能を評価する。

2. 自由水面乱流 LES における新たな乱流完結問題

瞬時の水面位置 h を $x_2 = h(x_1, x_3, t)$ のように水平位置 (x_1, x_3) の一価関数で表現した場合、運動学的条件に微分演算と交換性のあるフィルター平均操作を水平面内で施すと

$$\partial \langle h \rangle / \partial t + \langle u_\alpha \rangle \partial \langle h \rangle / \partial x_\alpha = \langle u_2 \rangle - \partial \tau_{h\alpha} / \partial x_\alpha \quad (1)$$

が得られる。 $\langle f \rangle$ は f の空間フィルター平均量を表し、 $\alpha=1, 3$ である。式 (1) 中の $\tau_\alpha \equiv \langle u_\alpha h \rangle - \langle u_\alpha \rangle \langle h \rangle$ は平均化によって現れる未知相関で、このように自由水面乱流を対象とした LES では通常の運動量保存則中の SGS 応力に加えて、上述の τ_α にもモデル化が必要となる。ここでは微小振幅波理論に基づく開水路等流の DNS 結果⁽⁵⁾ ($Re_\tau \equiv U_\tau H / \nu = 180$, $Fr \equiv U_m / \sqrt{gH} = 0.3, 0.6, 0.9$, U_τ, U_m, H はそれぞれ壁面平均摩擦速度、平均流速及び平均水深を指す) に、 x_1-x_3 平面内の二次元空間平均操作を施し、 τ_α の基本特性及びそのモデル化について検討を行う。空間平均値は二次元 Gaussian フィルターを用いて、フィルター幅 $\Delta_{F1}^+, \Delta_{F3}^+$ と DNS 計算格子幅 $\Delta_1^+, \Delta_3^+ = (9, 4.5)$ の比 $r \equiv (\Delta_{F1}^+ / \Delta_1 = \Delta_{F3}^+ / \Delta_3) = 2, 4, 8, 12$ として算出した。

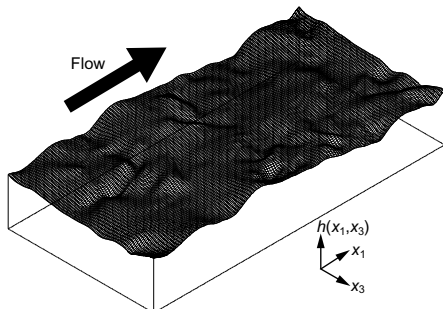


Fig. 1 Instantaneous free-surface elevation at $Fr = 0.6$.

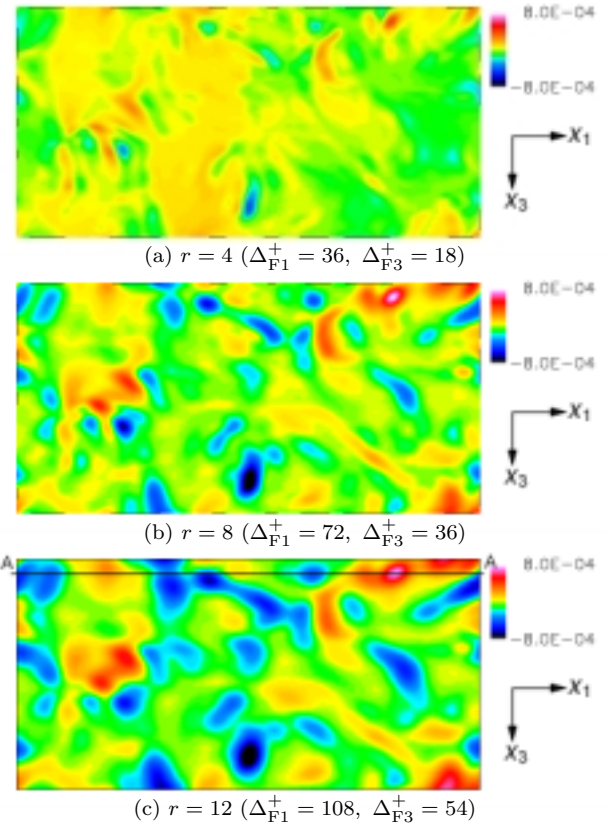


Fig. 2 SGS correlation term $\tau_1 / U_\tau H$.

3. SGS 相関の基本特性の検討及びモデルの評価

Fig. 1 に示す $Fr = 0.6$ の瞬時流れを対象として $r = 4, 8, 12$ の場合の τ_1 の等値線図を Fig. 2 に示す。なお、結果は U_τ 及び H を用いて無次元化されている。フィルターサイズが大きくなるにつれて τ_1 は増加するが $r=8$ と $r=12$ ではそれほど顕著な差は見られず、未知相関項 τ_α は $r=10$ ($\Delta_{F1}^+ = 90, \Delta_{F3}^+ = 45$) 前後のフィルターサイズの時に極大値をとると推察される。Fig. 3(d) 中の断面 A-A における式 (1) の収支を Fig. 4 に示す。時間変化項と移流項がほぼバランスするが、 $\langle u_2 \rangle$ の寄与も無視できない。SGS 項はこれらと比べると値は小さいが、例えば $x_1/H = 2$ 前後で値が増減していることが確認できる。

以下では τ_α のモデリングについて検討する。モデルとして、ここでは熱流束等に用いられる勾配拡散近似に基づく

$$\tau_\alpha = -C_{h1} \nu_{SGS} \partial \langle h \rangle / \partial x_\alpha \quad (2)$$

及び、スケール相似則型の

$$\tau_\alpha = C_B \langle h \rangle \langle u_\alpha \rangle - \langle \langle h \rangle \rangle \langle \langle u_\alpha \rangle \rangle \quad (3)$$

を考える。ここで ν_{SGS} は SGS 渦動粘性係数で、 C_{h1} 及び C_B

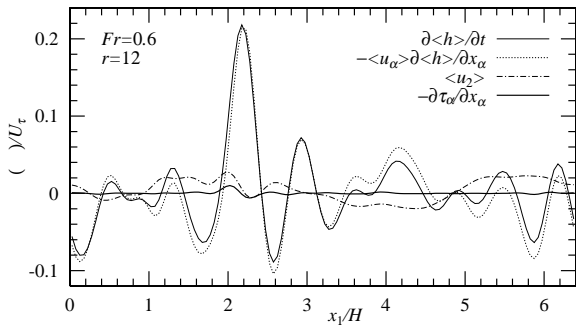


Fig. 3 Budget for $\langle h \rangle$.

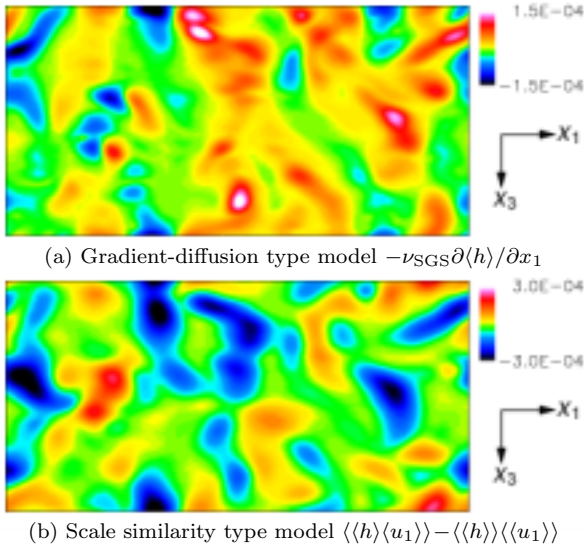


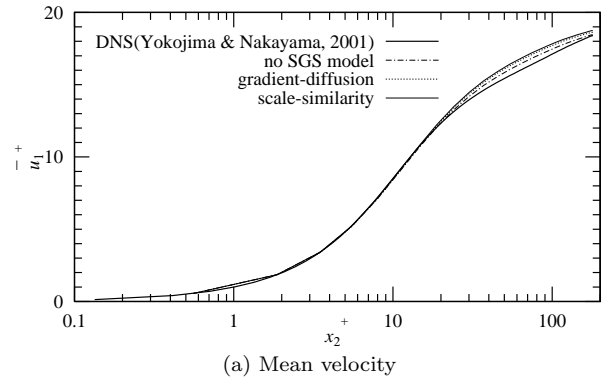
Fig. 4 Quantities related with modeling of SGS correlation term normalized by U_τ and H .

はモデル定数である。DNS 結果から算出された $r=12$ の場合の τ_1 (Fig. 2(c)) をターゲットとして式 (2),(3) から評価された τ_1 を Figs. 4(a),(b) に示す。Fig. 2(c) と Fig. 5(a) のスケール相似型モデル (式 (3)) の相関がかなり高いのに対し、Fig. 5(b) に示す勾配拡散モデル (式 (2)) の再現性が良くないことが認められる。これは SGS 応力の場合の backscatter に相当する現象が発生しているためである。勾配拡散型及びスケール相似型モデルの DNS 結果との相関係数はそれぞれ 0.1 – 0.5 及び 0.8 – 1.0 程度であり、空間フィルターが粗くなるほど相関は低下するが、Froude 数にはほとんど依存しない傾向が見られた。上述の各モデルの再現性は運動量保存則中に含まれる SGS 応力のモデリングで指摘されている傾向と類似しているが式 (1) には粘性項に相当する項は存在しないので、SGS 応力のモデリングの場合とは異なり、実際の LES 計算の際にスケール相似型モデル (式 (3)) を単独で使うことができる。

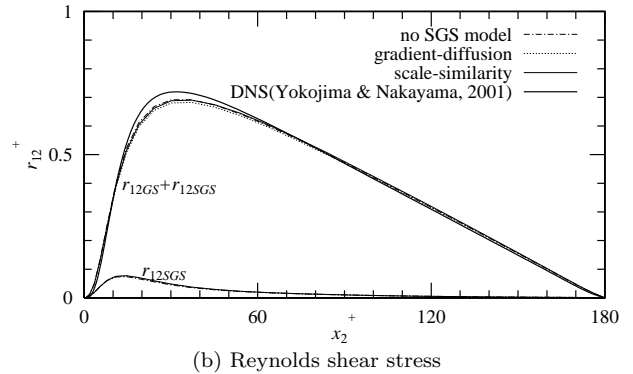
4. 開水路乱流の LES

ここでは前章で提案されたモデルを実際に LES に取り入れ、 τ_α が予測結果に与える影響を検討する。対象流れ場は前章の *a priori* test と同じく DNS 結果の存在する開水路等流である⁽⁵⁾。SGS 応力モデルには標準 Smagorinsky モデルを用いた。計算手法は DNS⁽⁵⁾ と同様で、計算格子数は DNS の 128^3 に対して 32^3 とした。 $Fr = 0.6$ の場合の平均流速、Reynolds せん断応力及び乱れ強度分布を Fig. 5 に示す。 τ_α を考慮しない場合の計算結果も併せて表しているが、計算結果は τ_α に対するモデルの有無やモデリング手法にあまり依存しない。

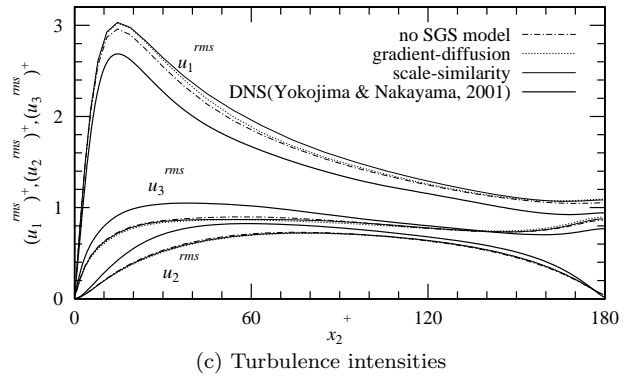
本報において τ_α の影響が小さい原因として、対象とした流れ場の特殊性が挙げられる。すなわち、流れ場は二次元等流であるため $r = 0$ 及び ∞ の両極で τ_α は消滅し、常流であるため水面変動は平均水深に比べて微小であり、Reynolds 数が低いた



(a) Mean velocity



(b) Reynolds shear stress



(c) Turbulence intensities

Fig. 5 LES calculation results of open-channel flow for $Fr = 0.6$.

めに SGS 成分が卓越するようなケースを設定するのが困難である。実際に工学上問題となるような流れ場では τ_α の影響が無視できない可能性は十分にあると考えられ、これらについては今後更に詳しい検討が必要である。

参考文献

- (1) 中山, 横嶋, “開水路流れ計算のための水面変動を考慮した乱流モデル”, 土木学会 水工学論文集 43(1999), pp.389-394.
- (2) Hodges, B.R. and Street, R.L., “On simulation of turbulent nonlinear free-surface flows”, J. Comput. Phys. 151(1999), pp.425-457.
- (3) Dimas, A.A. and Fialkowski, L.T., “Large-wave simulation (LWS) of free-surface flows developing weak spilling breaking waves”, J. Comput. Phys. 159(2000), pp.172-196.
- (4) Shen, L. and Yue, D.K.P., “Large-eddy simulation of free-surface turbulence”, J. Fluid Mech. 440(2001), pp.75-116.
- (5) 横嶋, 中山: DNS による水面近傍の乱流構造に対する Froude 数の影響の検討 土木学会 応用力学論文集 4(2001), pp.619-628.