

神戸大学大学院自然科学研究科

正会員 ○ 中山 昭彦

神戸大学大学院自然科学研究科

学生員 横嶋 哲

1. はじめに

LES 法による乱流のシミュレーションは計算機の発達とともに現実的になり、実問題への応用が可能になりつつある。水面が変動する開水路乱流に適用するにあたって、LES の前提である空間フィルタリングでは、流れ場自体が変動することを考慮に入れなければならない。運動方程式の空間フィルタリング操作は体積積分によるオイラー平均であるので、厳密には水面の中と外を識別する条件平均が必要になる¹⁾。水面変動が小さい場合、微小振幅波理論を用いると、流速、圧力の水面近傍での値の定義は可能になるので条件平均は必要なくなる。従って境界条件は流れ場内の空間フィルターの極限である面積平均によりフィルタリングすることにより得られる。この境界条件のフィルタリングから、フィルターサイズ以下の大きさの水面変動による未知の相関項が発生する²⁻⁴⁾。本報告ではこの未知の相関項のモデル化について提案とその検証を行う。検証には著者らが行った DNS の結果⁵⁾を用いる。データを用いサブグリッド水面変動による付加項のモデルを評価したこれらを用いたLする。

2. 自由水面のフィルタリング

開水路流において、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互換のあるフィルター平均操作を水平面内で施すと

$$\frac{\partial \langle h \rangle}{\partial t} + \langle u_\alpha \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_\alpha} = \langle u_2 \rangle - \frac{\partial \tau_{h\alpha}}{\partial x_\alpha} \tag{1}$$

が得られる。ここで $\langle \rangle$ はフィルター平均を表し、

$$\tau_{h\alpha} = \langle u_\alpha h \rangle - \langle u_\alpha \rangle \langle h \rangle, \quad \alpha = 1, 3 \tag{2}$$

はフィルターサイズ以下のスケールの変動による項で、モデル化が必要である。この項を SGS 相関項と呼ぶ。次にこの SGS 相関項のモデルについて検討する。

3. サブグリッド水面変動項の特性とそのモデル化

SGS 相関項はスカラー拡散における流束のような働きをする項で、そのモデルとしてまず考えられるのが勾配拡散理論に基づくモデル

$$\tau_{h\alpha} = -C_{h1} v_{SGS} \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial x_\alpha} \tag{3}$$

である。ここで v_{SGS} は SGS 渦動粘性係数で、 C_{h1} はモデル定数である。水面変動にスケール相似則をあてはめると

$$\tau_{h\alpha} = C_B (\langle \langle h \rangle \langle u_\alpha \rangle \rangle - \langle \langle h \rangle \rangle \langle \langle u_\alpha \rangle \rangle) \tag{4}$$

で表されるモデルが得られる。 C_B はモデル定数である。

以下ではこれらのモデルの評価を行う。

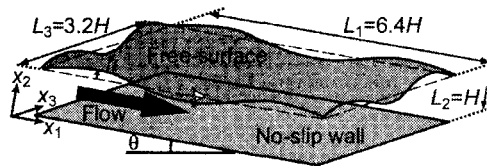


図-1 開水路等流のLES計算

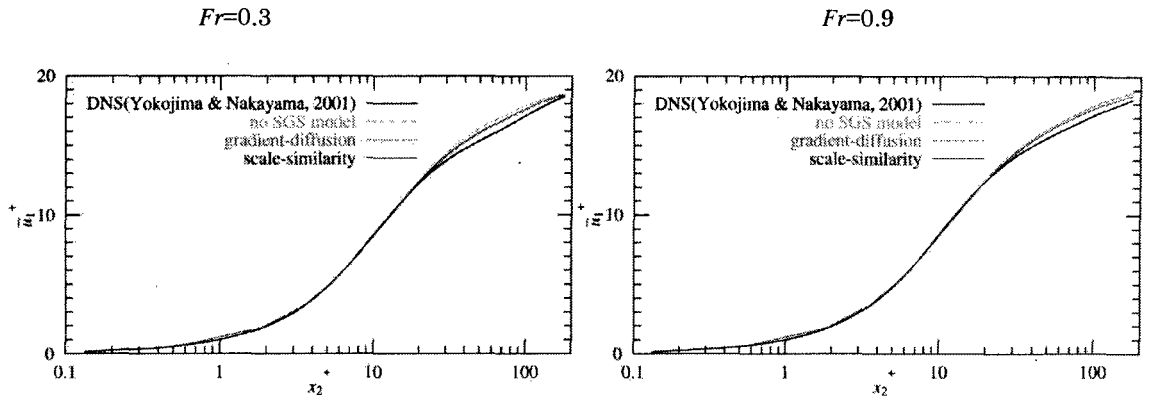


図-2 平均流速分布

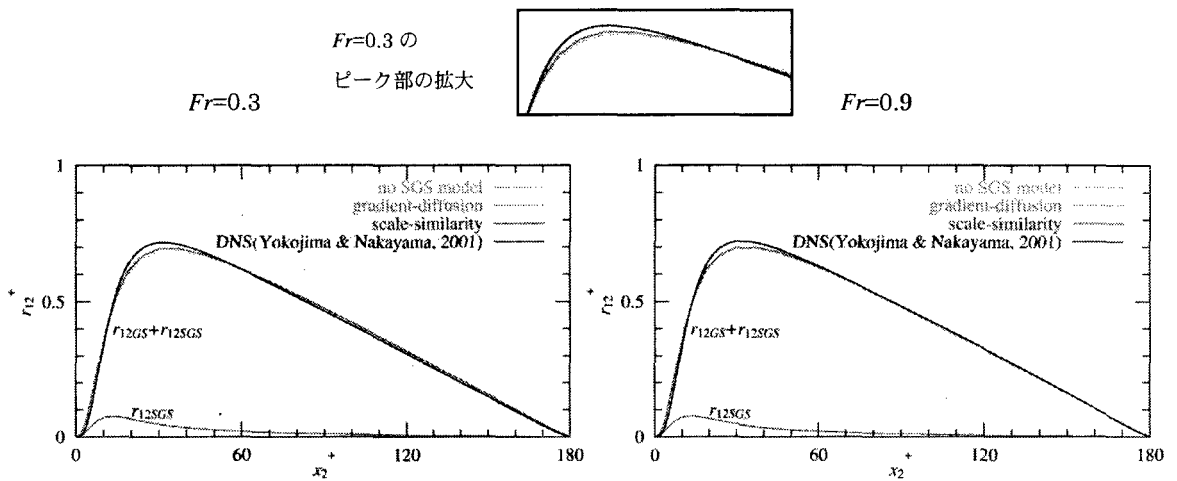


図-3 レイノルズ応力分布

4. LES 計算による SGS 相関項モデルの評価

前節で説明した SGS 相関項のモデルを評価するために実際に LES 計算を行った。計算を行った流れは図-1 に示してある。条件は文献 5) の DNS と同一であるが、計算格子の解像度は 1/4 にとっている。SGS 応力モデルには標準 Smagorinsky モデルを用いている。図-2,3 はフルード数 $Fr=0.3$ と 0.9 の計算結果である。水面変動の SGS 相関項には前節で説明した二つのモデルを用いた結果とモデルなしの結果も合わせて示してある。図-3 には SGS 応力の大きさも示しているが、全体の応力に比べ約 10%と小さいためモデルの影響は小さい。またモデル間の差は小さいが SGS 相関項モデルを組み込んだ計算結果は DNS に近くなっている。勾配拡散型モデルとスケール相似則モデルでは後者が DNS に近い結果になっている。

参考文献

- 1) Brocchini, M. and Peregrine, D.H., "The dynamics of strong turbulence at free surface. Part 2. Free-surface boundary conditions," *J. Fluid Mech.*, **449**, 255-290, 2001.
- 2) Hodges, B.R. and Street, R. L., "On Simulation of turbulent nonlinear free-surface flows," *J. Comput. Phys.*, **151**, 425-457, 1999.
- 3) Dumas, A. A. and Fialkowski, L. T., "Large-wave simulation(LWS) of free-surface flows developing weak spilling breaking waves," *J. Comput. Phys.*, **155**, 172-196, 2000.
- 4) Shen, L. and Yue, D.K.P., "Large-eddy simulation of free-surface turbulence," *J. Fluid Mech.*, **400**, 75-116, 2001.
- 5) 横嶋哲, 中山昭彦, 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, 応用力学論文集, **4**, 619-628, 2001.