

第II部門 丘地形上気流の LES 解析における壁面モデルの検証

神戸大学工学部建設学科

学生員 ○笠井 大彰

神戸大学大学院工学研究科

正会員 中山 昭彦

1. 緒言

土木工学における環境流体を考える上で、工場排水、都市開発による風向の変化等を正確に予測することが必要である。この問題に対し、近年のコンピューター技術の発展に伴い CFD(computational fluid dynamics) による解決策が考えられ、中でも流れの大規模構造を解析するために LES(Large-Eddy-Simulation)が有効な手法だといえる。LES により流れの大規模構造の解析をする場合、壁面近傍における解像度が最重要問題となる。平坦な境界に適用できるモデルは提案されているが、複雑な形状の境界上流れについては検証されていない。本研究では壁面近傍構造のモデル化を行い、複雑地形上流れに適用し、その妥当性を検討する。

2. 数値解析手法

支配方程式は、非圧縮性流体における質量保存式である連続の式の物理量と Navier-Stokes の運動方程式の物理量にそれぞれフィルタをかけて空間平均したものである。本研究では、空間微分とフィルタ操作に互換性¹⁾があるものとし、解析を行う。乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルを用い、変数の格子配置にはコロケート格子、境界適合座標系にはシグマ座標系、粘性項には応力(速度の1階空間微分に動粘性係数を乗じたものの次元)の中心差分、対流項には Quick 法、圧力解法には SOR 法、計算アルゴリズムには fractional-step 法、時間進行には Adams-Bashforth 法を用いている。

本研究では、平坦地形において適当な結果を示した以下の2つの壁面モデルを検討する。

1つ目のモデルは代数式として、式(1)の滑面における対数則を用いる。式(1)により摩擦速度を求め、無次元距離 y^+ を式(2)から求める。そして式(3)のような場合分けを行い、それにより求まる τ_w を壁面応力に置き換えることにより、壁面モデルとする。

$$\frac{U_1}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_* y_1}{\nu} \right) + A \quad (1) \quad y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (2) \quad \begin{cases} \tau_w = \frac{u_1 \nu}{y_1} & y^+ \leq 10 \text{ のとき} \\ \tau_w = \rho u_*^2 & y^+ > 10 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 U_1 は壁面最近傍格子における速度の主流方向、奥行き方向の合成成分、 y_1 は壁面最近傍格子における鉛直方向距離である。 κ はカルマン定数、 ν は動粘性係数、 A は積分定数である。

もう一つのモデルは式(4)より求まる τ_w である。 C_s は式(6)から求まる u_* により、式(5)を用い求める。

$$\tau_w = C_s u_1^2 \quad (4) \quad C_s = \frac{\rho}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_* y_1}{\nu} \right) + A \right)^2} \quad (5) \quad Adp = B \rho u_*^2 \quad (6)$$

ここで、 u_1 は壁面最近傍格子における主流方向速度、 ρ は密度、 dp は圧力差、 A 、 B はそれぞれ主流方向断面積、鉛直方向断面積で本解析では簡易的に最大断面積の値を用いている。

解析に使用する地形(図-1)は Almeida により定められた丘の形状²⁾を奥行き方向に相似な3次元地形に拡張し、周期丘としたものである。計算領域は丘高さを $h = 3.3$ とし、(主流方向長さ、鉛直方向長さ、奥行き方向長さ)=($9.0h, 3.035h, 4.5h$)、格子数は(主流方向、鉛直方向、奥行き方向)=(60, 20, 40)である。

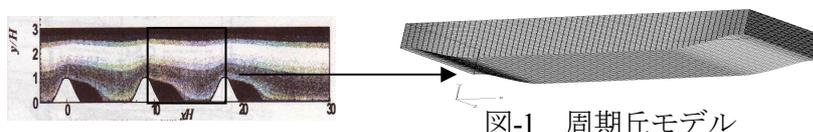


図-1 周期丘モデル

比較対象としては, Temmerman and Leschziner による dynamic subgrid-scale model を用いた LES の wall-resolving 数値解析³⁾を用いる. 丘頂上部における速度と丘高さを基準とするレイノルズ数は 10595 である.

3. 結果と考察

丘の頂点部の高さを h , 主流方向座標を x としたとき, $x/h = 1.0, 5.0, 8.0$ の断面における平均流速, レイノルズ応力, 主流方向速度変動はそれぞれ以下の図-1, 2, 3 のようになる. 以下の図において, \circ , \square は壁面モデルにそれぞれ式(3), 式(4)を用いたものである. また, 破線は壁面モデルなし, 実線は比較対象結果である.

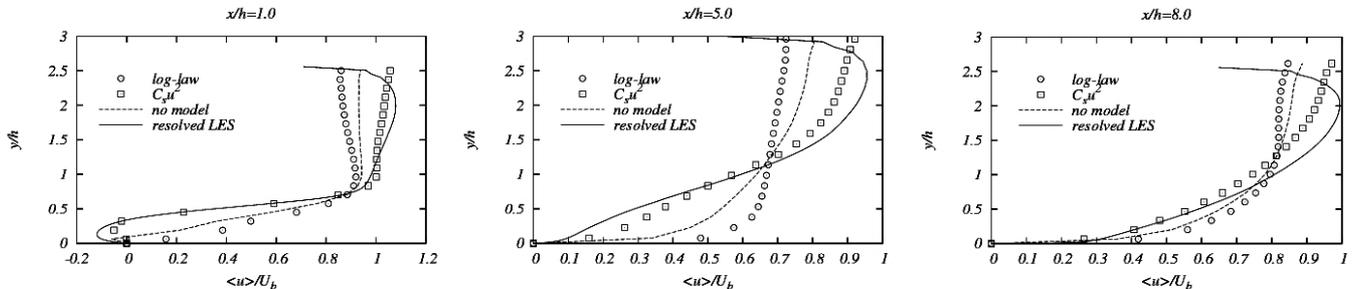


図-2 平均流速分布

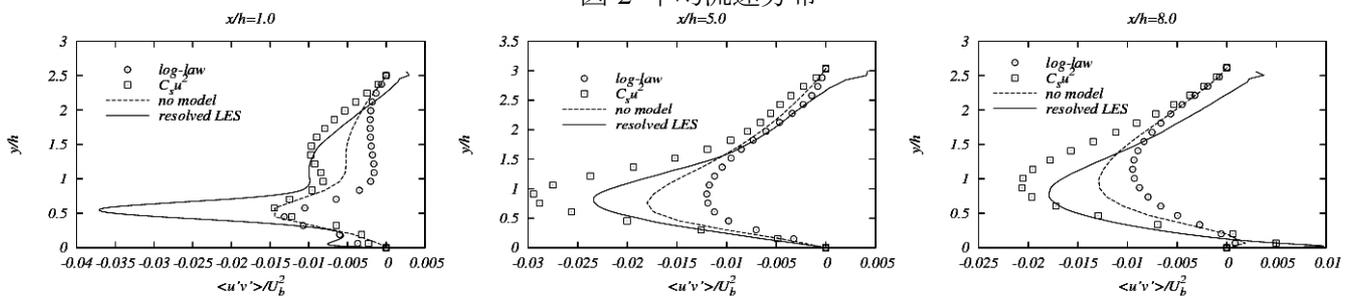


図-3 レイノルズせん断応力

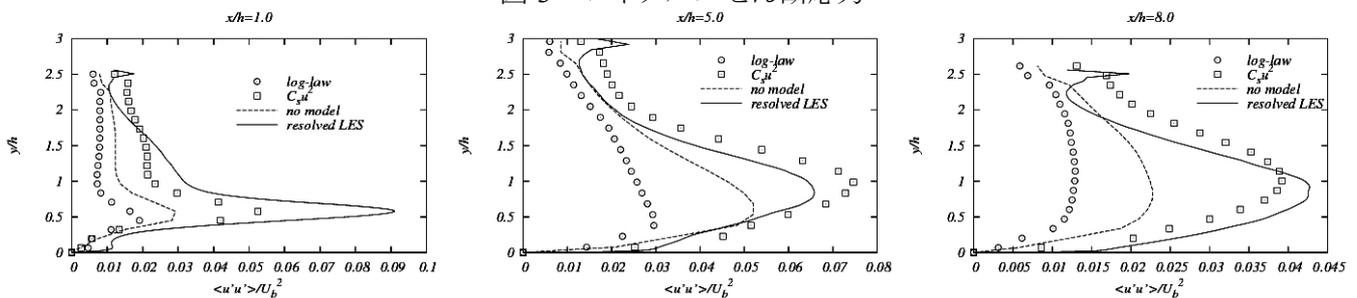


図-4 速度変動

壁面モデルに式(3)を用いた解析結果は壁面モデルなしの場合よりも resolved LES の解析結果との差異が大きくなったが, 式(4)を適用したものは比較対象の resolved LES の結果に近づく形になった. 式(4)ケースにおいては, 主流方向のみのモデリングであったので, 奥行き方向にも同様のモデリングを行うことが考えられる. また地形の鉛直成分が主流方向に対して変化しているので, 摩擦速度を主流方向と鉛直方向に分割してモデリングすることがより合理的であるといえる. さらに, 瞬時による流速分布の対数則との関係を解析することにより, 瞬時におけるより合理性のある代数式から c_s を求めることが可能になることがいえる. また, $x/h = 1.0$ におけるレイノルズせん断応力, 速度変動が特に比較対象と差異が大きいことから, 逆流域において, 検討する必要があるといえる.

参考文献

- 1)北野有哉, 中山昭彦: LES における動的境界条件の導入, 応用力学論文集, Vol.9, pp.773-782, 2006.08
- 2)ERCOFTAC データベース([http://cfd.me.umist.ac.uk/ercoftac\(C81\)](http://cfd.me.umist.ac.uk/ercoftac(C81))))
- 3)Temmerman L. and Leschziner M. A.: Large eddy simulation of separated flow in a streamwise periodic channel constriction, Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Stockholm, 2001 June 27-29.