

CS-48

DSGSMの手法の違いによる3次元構造物まわりの流れ場の比較

清水建設(株)和泉研究室 正会員 ○野澤剛二郎
東京工業大学 正会員 田村 哲郎

1. はじめに

非定常で複雑な3次元な流れ場において、従来のSmagorinsky modelをラージ・エディ・シミュレーションに適用する場合にモデル係数が一定であるという欠点が存在するが、Germano¹⁾らによって提案されているdynamic subgrid-scale model (DSGSM)はその欠点を克服するものとして注目を集めている。しかしこのモデルの導出過程における仮定により、ローカルなモデル係数を求めるという本来の目的が失われる点が問題となる。この問題に対して幾つかの提案がなされているが²⁾、Piomelli³⁾が提案している手法を用いることにより比較的容易にローカルなモデル係数を求めることが可能である。本報ではDSGSMを3次元構造物まわりの流れに適用し、これらの手法による流れ場の違いについて調べるものとする。

2. 数値解析の概要

計算領域を図1に示す。領域分割法により全領域を4つに分割し(図中の①~④)計算を行っている。各格子系は等間隔の直交格子を用いており、各格子系間は境界で重なっている領域で各ステップ毎に値の交換を行っている。離散化の方法は空間に関しては2次精度の中心差分、ただし移流項には3次精度の風上差分(Kawamura-Kuwaharaスキーム)、時間に関しては前進差分を行っている。境界条件は底面と物体表面はnon-slip、側面および上面はslip、流入は一様流入、流出は移流型の境界条件を用いている。時間刻みは $\Delta t=0.002$ 、一様流入速度 U_0 と物体の一辺 B で求められるレイノルズ数 $Re=10,000$ で計算を行っている。

従来のSmagorinskyモデルにおいて定数(Smagorinsky定数)としているモデル係数を、DSGSMでは2つのフィルタ幅(格子幅 Δ の格子フィルタ"ー"と幅 $\hat{\Delta}(=\sqrt{3}\Delta)$ のテストフィルタ"・")を用いてローカルな変数として求める。Germanoらの方法を修正したLilly⁴⁾の方法で求められるモデル係数 C は次式のようにになる。

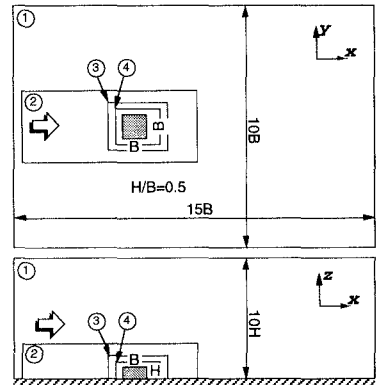


図1 計算領域

$$C = -\frac{L_{ij}M_{ij}}{2M_{mn}M_{mn}} \quad (1) \quad \text{ただし、} \quad L_{ij} \equiv \widehat{u_i u_j} - \widehat{u_i} \widehat{u_j}, \quad M_{ij} = \widehat{\Delta^2 |\widehat{S}| \widehat{S}_{ij}} - \widehat{\Delta^2 |\widehat{S}|} \widehat{S}_{ij}$$

本来この方法によりモデル係数 C を導出するにはモデル係数 C の空間的な変動が十分に滑らかであるか、あるいはhomogeneousな方向が最低ひとつ必要である³⁾。そこでPiomelliは局所的なモデル係数 C を求める方法を提案している。

$$C = -\frac{\left(L_{ij} - \frac{1}{3} L_{kk} \delta_{ij} - 2C' \widehat{\Delta^2 |\widehat{S}|} \widehat{S}_{ij} \right) \left(\widehat{\Delta^2 |\widehat{S}|} \widehat{S}_{ij} \right)}{2 \left(\widehat{\Delta^2 |\widehat{S}|} \widehat{S}_{mn} \right) \left(\widehat{\Delta^2 |\widehat{S}|} \widehat{S}_{mn} \right)} \quad (2) \quad \text{ただし、} \quad C' = C^{n-1} \quad (3)$$

今回の計算では(1),(2)式で求められるモデル係数を用いて計算を行っている。(3)式の他に C' を前進差分により外挿する方法も提案されているが、数値不安定性により計算が継続できなかった。以後(1)式による方法をCase1、(2)式による方法をCase2とそれぞれ呼ぶこととする。今回の計算ではCase2については $t=68$ (無次元時間)までCase1の条件で計算を行ない、その後条件を替えて計算を行っている。

3. 計算結果

1) モデル係数 C の空間分布 図2に $t=109$ におけるモデル係数 C の瞬間値の分布図を示す。後に述べるように両ケースの流況に差が出てきているために物体の前方の比較的定常な領域を除いて分布が異なっているものの、ともに領域全体は絶対値の比較的小さい値($|C| \leq 0.01$)で占められており、大きい値の領域はかなり狭い。物体の上方に負の比較的広い領域がどちらのケースにも存在しているが、shear-rate自体は小さいため負の乱流粘性としてはほとんど効いていないものと考えられる。

2) C と u の時間変動 図3に両ケースのモデル係数 C の時間変動を比較したものを示す。物体の中心位置から下流方向に $1B$ の位置 ($x=+1B$) を見ると、 $t=74$ 位まではほぼ同じ値を取っているが、それ以降は明らかに異なる変動をしている。

表1 $\overline{C^2}$ の比較

x	t	Case1	Case2
+1B	~74	9.63E-04	7.65E-04
+2B	~75	1.04E-03	9.50E-04
+4B	~78	2.64E-03	2.25E-03
+6B	~81	4.89E-03	4.09E-03

また両ケースの違いが明確となる時刻は、下流 ($x=+2B, 4B, 6B$) に行くにしたがい遅くなっており、 $x=+6B$ では $t=81$ 付近から違いが明らかになっている。しかし両ケースの違いが明確になる以前でも変動幅は Case1 の方が幾分大きくなる傾向が読み取れる (表1)。

一方、流れ方向の風速の時間変動に関しても両ケースの違いが明確になる時刻が下流に行くほど遅くなっていることがわかる (図4)。ただしモデル係数 C の場合よりも両ケースの差が明確となる時刻が多少遅くなっている。

3) C と u の時間平均 $x=+4B$ 中央断面におけるモデル係数 C の平均、風速 u の平均と変動の鉛直プロファイルを図5に示す。モデル係数 C の平均は比較的乱れの大きい範囲 ($z < 2B$) では Case1 の方が大きくなっており、また風速の変動は逆に Case2 の方が大きくなっている。このことは上で述べたモデル係数 C の変動幅と考え合わせると、Case1 の方が $|C|$ を過大に評価していると考えられる。また流れ方向の風速のスペクトルを見ると (図6)、 $|C|$ を過大に評価したことによる過剰な乱流粘性のために高周波数側で Case1 の方が小さくなっていると思われる。また $x=+4B$ でピーク周波数は Case1 の方が低周波数よりずれているが、これについてはさらに長い時間変動に付いて調べる必要があるものと思われる。

4. まとめ

2つの手法で DSGSM を用いた3次元物体まわりの流れの数値シミュレーションを行い、後流でのモデル係数 C ならびに風速変動を調べ、両手法による違いを確認した。ただし、3次精度の風上差分による数値粘性、あるいは正の乱流粘性のみを仮定している Smagorinsky model を DSGSM が使用するという問題について検討が必要である。

参考文献

- 1) M. Germano, U. Piomelli, P. Moin and W. H. Cabot, "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", Phys. Fluids A 3, 1760 (1991) .
- 2) S. Ghosal, T. S. Lund and P. Moin, "A local dynamic model for large-eddy simulation", Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs (1992) .
- 3) U. Piomelli, "Subgrid-scale models for large-eddy simulations, '94 Workshop on Mathematical Modeling of Turbulent Flows, I.I.S. Univ. of Tokyo (1994) .
- 4) D. K. Lilly, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method", Phys. Fluids A 4, 633 (1992) .

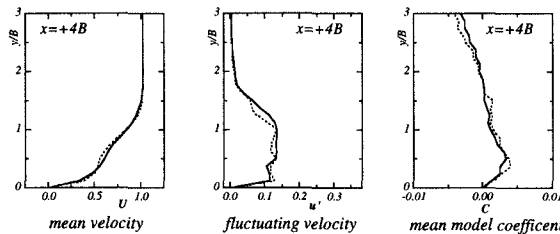


図5 鉛直プロファイル (中央断面、点線:Case1、実線:Case2)

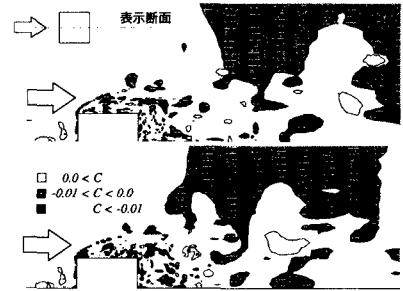


図2 モデル係数 C の瞬間値 (上: Case1、下: Case2)

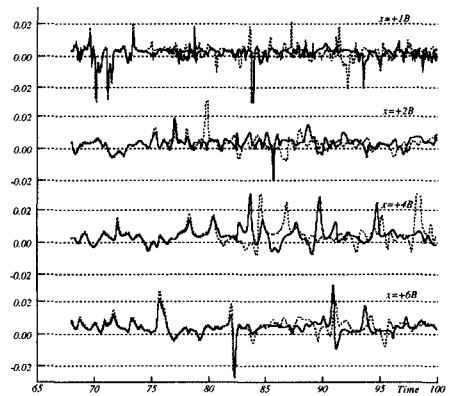


図3 モデル係数 C の時間変動 (中央断面、高さ H 、点線:Case1、実線:Case2)

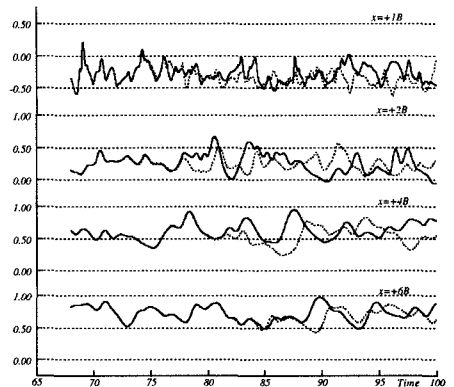


図4 風速 u の時間変動 (中央断面、高さ H 、点線:Case1、実線:Case2)

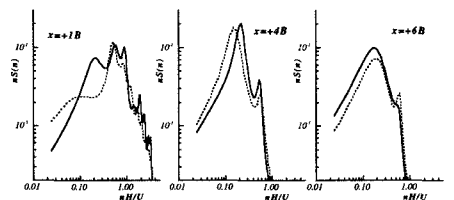


図6 風速 u のパワースペクトル (中央断面、高さ H 、点線:Case1、実線:Case2)