

DSGSMによる3次元構造物まわりの流れのラージ・エディ・シミュレーション

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

1. はじめに

近年計算機の発達に伴いラージ・エディ・シミュレーション（LES）を用いた3次元非定常流れの数値解析が盛んに行なわれている。しかし従来よりsubgrid-scale modelとして使われてきたSmagorinsky modelには幾つかの欠点があると言われている。1) 壁近傍でのSGS応力の漸近挙動を正しく評価するために経験的な壁関数を乗ずる必要がある。2) 流れ場によって異なるSmagorinsky定数を用いる必要があり、複雑な流れ場、層流の乱流遷移問題への適用が難しい。3) モデルの定義上backward scatterを評価できない。これらの欠点を修正するモデルが幾つか提案されているが、なかでもGermano¹⁾らが提案したdynamic subgrid-scale model (DSGSM)は注目を集めている。このモデルは上記の欠点に対する有効な方法と見られているが、計算不安定性のために一方向にモデル定数を平均化する必要がある。このためLESの3次元的な局所性が失われ、複雑な3次元形状の流れ場に適用が困難となる。本研究ではDSGSMの問題点を改良したLilly²⁾の方法と従来のSmagorinsky Modelを用いて層流中の平板上に置かれた3次元構造物まわりの流れの解析を行なった。3次元構造物まわりの流れは層流からの遷移過程、複雑で様々な流れ性状を含み、瞬間的、局所的なSGS応力の評価が必要で、この問題によって2つのモデルの比較検討を行なった。

2. 数値解析の概要

計算領域を図1に示す。計算領域を物体の近傍とそれ以外の2つの領域に分け、それぞれを $\Delta_f=1/28$ 、 $\Delta_c=1/14$ の等間隔の直交格子とし流速と圧力を同一の格子点に定義する。空間に2次精度の中心差分、時間にMAC法に準ずる方法で陽的に離散化している。また移流項には計算の安定化の為に3次精度の風上差分を用いている。境界条件は文献3)と同様で、時間刻みは $\Delta t=0.002$ 、一様流入速度 U_0 と物体の一边 B で求められる $Re=1,200$ で計算を行なっている。

Lillyの方法によるDSGSMはSGS応力 τ_{ij} は次のように表される。

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} + 2C \bar{\Delta}^2 \bar{S} \bar{S}_{ij}, \quad C = L_{ij} M_{ij} / 2 M_{ij} M_{ij}, \quad L_{ij} = -\widehat{\widehat{u_i u_j}} + \widehat{u_i} \widehat{u_j}, \quad M_{ij} = \widehat{\Delta^2} \left| \widehat{\widehat{S}} \right| \widehat{\widehat{S}}_{ij} - \bar{\Delta}^2 \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij}$$

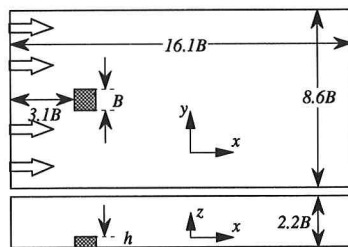
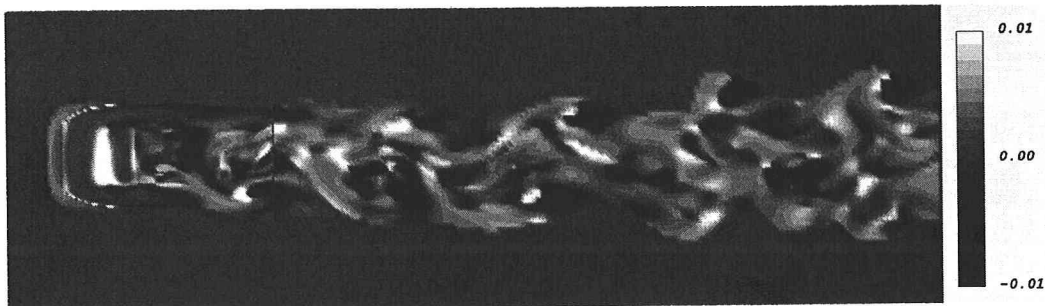


図1 計算領域

テストフィルタ($\widehat{\quad}$)による値は格子フィルタ($\bar{\quad}$)の値の空間平均で求めている。テストフィルタと格子フィルタの幅の比は2としている。 C の値を求めるためにGermanoらの方法では空間的、時間的に平均を行なうが、本研究では局所的な値をそのまま使っている。Smagorinsky定数は $c_s=0.10$ として計算を行なっている。

3. 計算結果

図2に C の水平断面での空間分布を、図3に C の時刻歴を示す。 C の値は局所的、瞬間的には0.04を超えるこ

図2 Cの瞬間値の空間分布（水平断面、 $z=8h/7$ ）

ともあるが平均的には0.005程度である。また局所的、瞬間的に負値を取り、backward scatterを評価できることが示された。Lillyの方法では局所的にCの値が過大になり計算不安定となる点は克服されているものの、上面近くで $C=1.0$ のオーダーの値が見られた。これは上面近くで流れが一樣な層流と成っており M_y が小さい値を取る為であると考えられる。しかしひずみ速度自体が十分に小さいため計算に影響は与えない。図4はCと流れ方向の流速の変動のパワースペクトルを示しているが、ピーク位置の周波数が一致しており、Cの変動と流れの組織的な構造³⁾との間に何らかの関連性があると考えられる。

図5はスパン中央でのプロファイルをDSGSMとSmagorinsky Modelで比較を行なっている。平均流速（図5(a)）に関しては差異はそれほど大きくはないものの、乱れ（図5(b)）は30%以上違いがあり瞬間的な流れ場が重要なLESでは問題となる。Cの平均値（図5(c)）は大きいところでも $C=0.005$ 程度でありSmagorinsky定数 $c_s=0.10$ ($C=c_s^2=0.01$)はこの流れ場では平均値としてかなり大きい。Smagorinsky Modelでは $z/B=0.5$ 以上で乱流粘性 (ν_{sgs})（図5(d)）が過大になっているのに対して、底面近くでは逆に過小となっている。これはSmagorinsky Modelが上方で過大なC値を用いているのに対して、底面近くでVan-Driest型の壁関数を用いており、これが必ずしも流れ場と一致していない為であると考えられる。

4. まとめ

層流中の平板上に置かれた3次元ラフネスまわりの流れの解析をDSGSMで行なった。Lillyの方法を用いて計算不安定性を避けることが出来た。Smagorinsky Modelの結果と比較してDSGSMは壁近傍をふくめて妥当な結果を示している。本研究では比較的低レイノルズ数な流れの解析であったが、計算不安定性や平均的な流れ場の差異を調べるためにはさらに高いレイノルズ数の流れの解析を行なう必要がある。

<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) D. K. Lilly, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method", Phys. Fluids A 4(3), 633 (1992).
- 3) 野澤剛二郎、田村哲郎、「LESによる平板上の3次元物体後流の解析」第7回数値流体力学シンポジウム, 1993

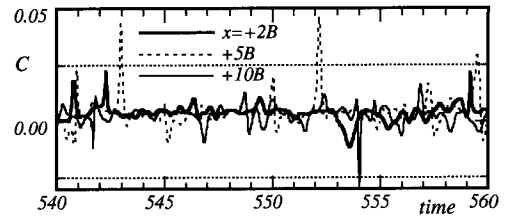


図3 Cの時刻歴（スパン中央、 $z=h$ ）

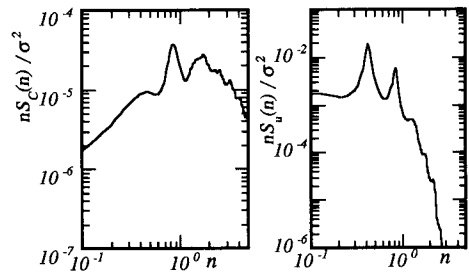


図4 C、流れ方向の流速(u)変動のパワースペクトル（物体後面から6B、スパン中央、 $z=h$ ）

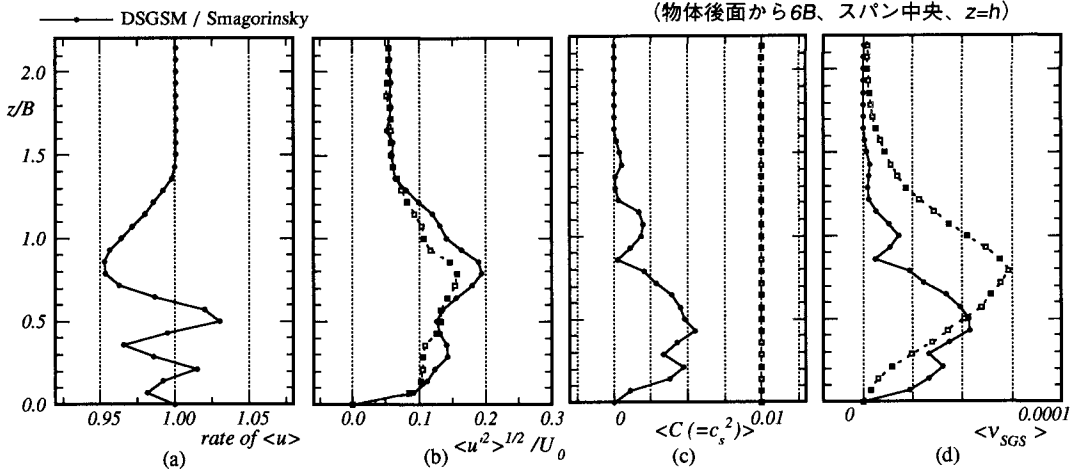


図5 物体後面から4B、スパン中央での平均と乱れプロファイル —○— DSGSM、---□--- Smagorinsky model
(a)DSGSMとSmagorinsky modelの平均流速の比、(b)流速の乱れ、(c)Cの平均、(d) ν_{sgs} の平均