

I-A 160

Bluff body まわりの流れの LES における風上差分法の影響の検討

清水建設 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 我々が対象とする構造物の数値シミュレーションは、高 Re 数流れであり、剥離や再付着などを伴う複雑で非定常な流れ場である。このような流れ場を直接法 (DNS) でシミュレートするのは非現実的であり、また Large Eddy Simulation (LES) を用いた場合でも現在の計算機能力では境界層や剥離剪断層等を十分に解像度することは困難である。十分な解像度が得られない場合には風上差分法等により数値粘性を確保しないと、流速等に非物理的な振動が生じることがある^[1]。一般に、数値的安定性を確保する手段として3次精度の風上差分が用いられることが多く、比較的良好な結果を出しているが、エネルギーの散逸過程など物理的な理解が十分には得られておらず、特に LES と併用した場合に数値粘性が乱流粘性に及ぼす影響は明らかにされていない^[2]。本研究では平板上に置かれた物体まわりの流れの LES に風上差分法を用い、その数値粘性が流れ場に及ぼす影響について調べる。本研究で用いられる風上差分は K-K スキーム、UTOPIA スキーム、梶島が提案している上流補間法^[3]である。

2. 基礎方程式 LES の基礎方程式には非圧縮の N-S 方程式と連続の式に対してフィルタリング操作を施したものをを用いる。subgrid-scale model (SGS モデル) として dynamic SGS モデルを用い、Lilly の提案している手法^[4]によりモデル係数 C を算出する。Reynolds 項には Smagorinsky モデルを用い、Leonard 項と Cross 項の和はゼロとする。モデル係数 C を算出する際、本来は一樣な方向に平均化操作を行い、モデル係数 C の変動に伴う数値的不安定性を免れる手段を取るが、本研究では局所的に求められた値をそのまま使っており、特に平均化操作は行っていない。test-filter と grid-filter の比は一律に $\sqrt{3}$ とする。乱流粘性項は次式の右辺第2項を除いた形で表すことが出来る。

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-2C\Delta^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{ii} \delta_{ij} \right), \quad \text{ここで } \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad |\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 Δ は grid-filter 幅を表す。

3. 計算条件 離散化はレギュラー格子に対して空間に2次の中心差分、時間に1次の前進差分を行っている。対流項の風上差分は、K-K スキーム (式 (2)、 $\alpha=3$)、UTOPIA スキーム (式 (2)、 $\alpha=1$)、上流補間法^[3] (式 (3)) の3通りで行う。

$$c \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_i \approx c_i \frac{-u_{i+2} + 8u_{i+1} - 8u_{i-1} + u_{i-2}}{12h} + \alpha |c_i| \frac{u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{12h} \quad (2)$$

$$c \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_i = \frac{1}{2} \left(\left[c \frac{\partial u}{\partial x} \right]_i^* + \left[c \frac{\partial u}{\partial x} \right]_i \right) \quad (3), \quad [g]_i^* = \left[g - s \frac{\partial g}{\partial x} + \frac{s^2}{2} \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} - \frac{s^3}{6} \frac{\partial^3 g}{\partial x^3} + \dots \right], \quad s = \Delta t \cdot u \quad (4)$$

式中の c は移流速度、 h は格子幅を表す。K-K スキーム、UTOPIA スキームの数値粘性は (2) 式の右辺第2項で、 $(\alpha c h^2)$ に比例するため、数値粘性としては K-K スキームの方が大きいことになる。上流補間法は (4) 式の右辺第4項まで表現する。このとき第1項の中心差分項を除いた残りの項を数値粘性項と考える。数値粘性の leading term は第2項で $(\Delta t u^2)$ に比例するが、Taylor 展開となっている残りの項を加えることにより、精度はより高くなる。

計算領域を Fig.1 に示す。一辺の長さ D 、高さ $0.5D$ の正方形柱の物体が床面に置かれている。流入は一樣、流出は移流型の境界条件、床面と物体表面は Werner-Wengle の人工壁面境界条件^[5]を与え、それ以外は slip 条件としている。計算は物体を中心にして3つの領域に分けて計算されている。それぞれの領域は等間隔の直交格子系からなり、格子幅は物体に近い方から $D/40$ 、 $D/20$ 、 $D/10$ である。物体の長さ D 、流入流速 U で表される Re 数=10,000、 $\Delta t=0.002$ である。SGS モデルの grid-filter 幅 (Δ) は h 、 $2h$ の二通りで計算を行っている。今回行った計算の一覧を Table.1 に示す。

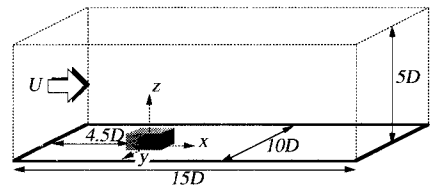


Fig.1 計算領域

Table.1 計算ケース一覧

	$\Delta = h$	$\Delta = 2h$
K-K スキーム	case A1	case A2
UTOPIA スキーム	case B1	case B2
上流補間法(USI)	case C1	

4. 計算結果 case-B1、C1 では非物理的な振動が生じたために、十分な平均化時間が取られていない。これは解像度が十分に確保されていないこと、モデル係数 C の変動が大きく数値的安定性が確保されていないことが原因と思われる。Fig.2 に主流方向の平均風速分布を示すが、A2 の結果は A1 とほとんど変わらなかったため、ここでは省略する。屋根面 ($x=0.0$) での平均風速は各ケースであまり違いが見られないが、変動風速を見ると (Fig.3 (a))、 $B1 > C1 > A1$ となっている。 $z=0.7D$ 付近のピーク値で見ると B1 は実験値よりもかなり大きく、逆に A1 は実験値よりもかなり小さい結果となっている。物体の屋根面に働く平均風圧係数の分布を見ると (Fig.4)、A1 は風圧係数の分布がフラット

であるのに対して、B1、C1は下流に行くに従い圧力が徐々に回復しているのが分かる。A1は屋根面での圧力回復が見られないことから、物体前縁で大きく剥離した剪断層が屋根面で再付着しておらず、後流（ $x=1D$ ）においても大きな逆流域を形成している。各ケースで比較してみると、屋根面で乱流粘性と比べて数値粘性が卓越している場合（Fig.5）、剥離剪断層の乱れが抑制され、再付着が遅れると考えることができる。一方、後流においてC1の数値粘性は乱流粘性と同レベルに抑えられているが、非物理的振動が生じてしまっている。

乱流粘性がgrid-filter幅の自乗に比例しているため、grid-filter幅を大きく取るcase-A2とB2では乱流粘性も大きくなる。屋根面中央では依然としてA2の数値粘性は大きく、改善はあまり見られないが、後流では数値粘性と乱流粘性が同レベルとなっており後縁付近から後流の平均風圧係数等にA1と差が見られ、改善されている。B2では数値粘性が相対的には小さくなっているものの、B1に比べてかなり大きな値となっている（Fig.5）。このため屋根面での圧力回復はB1に比べて遅れている。しかし、B1で見られていた非物理的な振動は抑制されている。

5. まとめ 対流項に高精度の風上差分法を用いたLESをbluff bodyまわりの流れに適用し、数値粘性が流況に与える影響を調べた。今回の計算のように十分な解像度が得られない場合には、数値粘性の増加に伴い数値的不安定性を抑制する効果があるが、前縁からの剥離剪断層の乱れが抑えられる結果、屋根面への再付着しにくくなることから分かった。この結果、屋根面の圧力回復が遅れることになる。また、grid-filter幅を格子幅に対して大きく取ることにより、乱流粘性の効果を相対的に数値粘性に対して高めることで解に改善が見られた。非物理的な振動を抑え、かつ数値粘性が抑制された解を得るには、さらに格子解像度を増して計算を行う必要がある。

参考文献 [1] W.Rodi, etc, Workshop on Large Eddy Simulation of Flows past Bluff Bodies, Germany (1995) [2] 高桑他, 「角柱周りの剥離流れに関するLES」, 第9回数値流体力学シンポジウム, 223 (1995) [3] 梶島, 「非圧縮流れのための上流補間法」, 日本機学会論文集B編60巻578号, 3319 (1994) [4] D.K.Lilly, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method", Phys. Fluids A4, 633 (1992) [5] H.Werner, and H.Wengle, "Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Over and Around a Cube in Plate Channel", Proceeding of 8th Symposium on Turbulent Shear Flows, 19-4 (1991) [6] 近藤, 流体計算と風荷重評価シンポジウム資料, 日本建築学会耐風設計資料小委員会 (1994) [7] 河井, 流体計算と風荷重評価シンポジウム資料, 日本建築学会耐風設計資料小委員会 (1994)

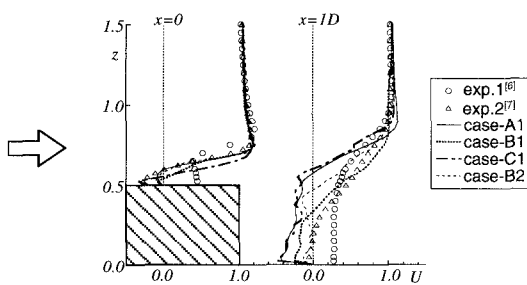


Fig.2 主流方向の平均風速分布 ($y=0.0$)

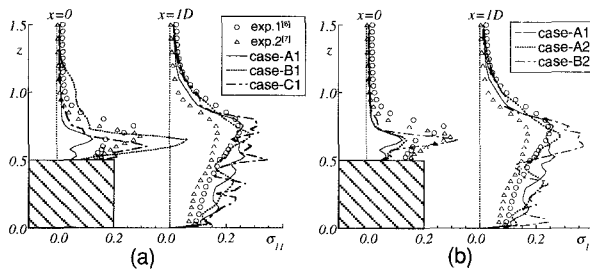


Fig.3 主流方向の変動風速分布 ($y=0.0$)

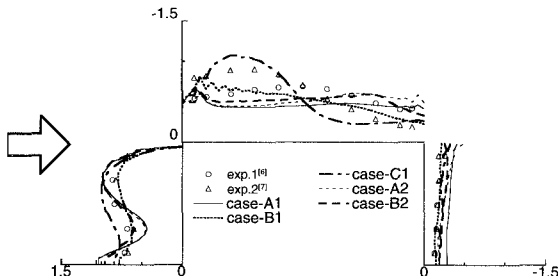


Fig.4 物体に働く平均風圧係数 ($y=0.0$)

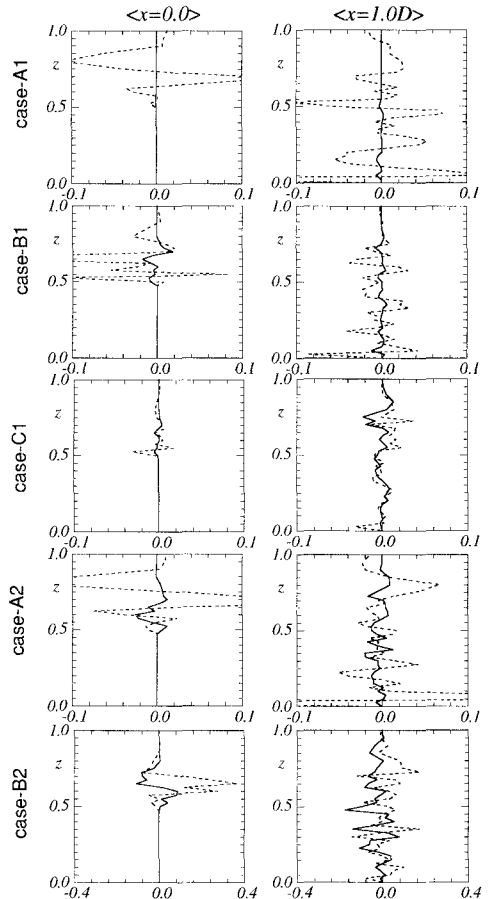


Fig.5 乱流粘性項と数値粘性項の比較 ($y=0.0$)
(実線：乱流粘性項、破線：数値粘性項)