

I-B2

正方形角柱まわりの流れのLESにおける風上差分法の数値粘性の影響

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

角柱のような鈍い物体まわりの流れのLESにおいては、数値安定性の確保を目的として移流項に風上差分法が使われる。しかし、正方形角柱を対象とした場合、物体の抗力係数が過大に評価されるなど、実験結果が正しく再現されないことが多い^[1]。この原因のひとつとして、風上差分法の人工数値粘性により前縁から剥離した剪断層の挙動が正しく再現されていないことが考えられる。正方形角柱の前縁から剥離した流れは、角柱側面に再付着することなく後流まで伸長し、渦を形成するが、渦の角柱背後における形成位置、渦の巻き込みの強さが抗力係数等に強く影響してくる。そこで、本研究ではLESによる2次元正方形角柱まわりの流れと実験結果と比較することで、風上差分法から生ずる数値粘性が剥離剪断層の挙動に与える影響について検討する。

2. 計算の概要

計算対象は一辺が D 、スパン方向の長さが $4D$ の正方形角柱で、流入は一樣流（流速 U_0 ）とする（ $Re=U_0 D/\nu=22,000$ 、 ν : 動粘性係数）。領域分割法により、デカルト座標系でも大きく歪んだ格子を作らずに角柱近傍の格子解像度を上げている（角柱風上面で $D/200$ 、側面で $D/100$ 、背面で $D/50$ ）。角柱表面では滑りなしの条件とし、角柱のスパン方向(z)と主流直交方向(y)には周期境界条件、流出境界には移流型の条件を用いている。

SGSモデルはSmagorinsky型のdynamicSGSモデルを用いるが、乱流粘性と分子粘性の和を正とし、モデル係数による数値不安定性を排除する。支配方程式の離散化は、空間に2次の中心差分、時間にEulerの1次陽解法とし（ $\Delta t=0.0008$ ）、移流項には3次精度の風上差分法を用いる。本研究では、風速の4階微分で表される3次精度風上差分法の数値粘性項の係数 α とLESのフィルタ幅 Δ をパラメータとして計算を行っている（Table.1）。フィルタ幅 Δ を格子幅 h の2～4倍、係数 α をK-Kスキーム^[2]の $1/2 \sim 1/6$ （K-Kスキームでは $\alpha=3$ ）とすることで風上差分法の数値粘性の影響を相対的に小さくし、かつ、数値的に安定な解を求めることができる^[3]。

3. 計算結果

3.1 周期的成分に対する影響 本研究では、ストローハル数成分に基づくフェーズ平均を用いて、風速の変動成分を周期的成分とそれ以外のランダム成分に分けて考察を行う^[4]。いずれのケースも10周期分以上のデータをもとに統計量が求められている。角柱の側面（ $x=0$ ）における風速変動の周期的成分は主流（ $\tilde{u}\tilde{u}$ ）、主流直交方向（ $\tilde{v}\tilde{v}$ ）ともにLyn^[4]の実験結果と比較して大きく、ここで示した以外のケースでも同様である（ $\tilde{u}\tilde{u}$ のピーク値で0.358～0.468、 $\tilde{v}\tilde{v}$ のピーク値で0.0143～0.0223）。これは、周期的な渦の放出に伴う剥離剪断層の上下運動の幅が実験と比べて大き

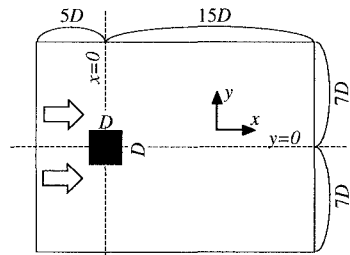


Fig.1 計算領域

Table.1 α と Δ をパラメータとする計算ケース

	$\alpha=3$	$\alpha=1$	$\alpha=0.5$
$\Delta/h=1$	K1	U1	—
$\Delta/h=2$	K2	U2	H2
$\Delta/h=4$	K4	U4	H4
no LES	K0		

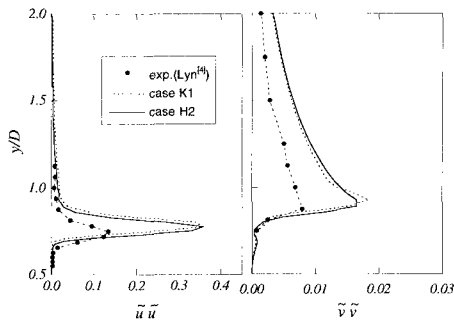


Fig.2 角柱側面における変動風速の周期的成分の比較

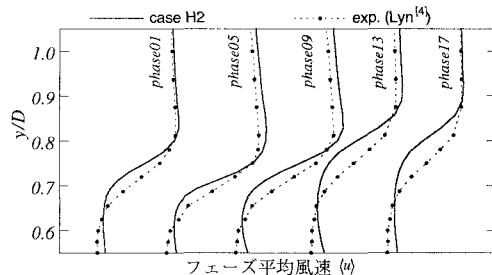


Fig.3 角柱側面におけるフェーズ平均風速の周期的な変動

keywords : 風上差分法, ラージエディシミュレーション, 剥離剪断層, 正方形角柱
連絡先 : 〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2, TEL 03-3508-8101, FAX 03-3508-2196

ために、フェーズ平均された風速の変動が大きくなるのが原因である (Fig.3)。ただし、計算ケース間の差は小さく、パラメータである係数 α 、フィルタ幅 Δ との間に相関は見られない。

3.2 剥離剪断層の発達に与える影響 代表的な二つのケース (case K1, H2) について角柱側面における風速変動のランダム成分の分布の遷移を見ると (Fig.4)、風上側で実験と比べて $u''u''$ 、 $v''v''$ 成分ともに過小評価されている。ただし、case H2の方が変動の成長が早く、他のケースを見ても α が小さいほど大きくなる傾向にある (Table.2)。角柱の前縁から剥離した流れは、乱流遷移に伴って変動量が大きくなり、さらに、その変動域が主流直交方向に広がる。そこで、剥離剪断層の運動量厚さに比例する渦度厚さの下流方向への変化を実験と比較する (Fig.5)。渦度厚さは $\delta_w = [\partial \langle u \rangle / \Delta u] / \partial y]_{max}^{-1}$ で定義される ($\langle u \rangle$: フェーズ平均風速、 Δu : 最大平均風速差)。 $x/D=0.125$ 付近までは両ケースはほぼ同じだが、その後の成長具合に差が見られる。 $x/D=0.375$ における渦度厚さを各ケースで比較してみると、パラメータ α 、 Δ に対する相関が見られ、求められている抗力係数 C_D とも強い相関関係がある (Fig.6)。さらに、主流方向風速のスパン方向の変動のエネルギースペクトルを比較すると、case K1 では主流方向の位置に拠らずスパン方向への3次元的な変動が抑制されている。このことから、case H2と比べてcase K1の方が乱流遷移が阻害され、剥離剪断層の発達が遅れるものと考えられる。

4. まとめ

LESの移流項に用いた3次精度風上差分法の数値粘性が正方形角柱まわりの流れに与える影響を調べるために、フィルタ幅と風上差分法の数値粘性項の係数をパラメータとして、角柱側面の剥離剪断層の挙動を実験と比較した。その結果、風速変動の周期的な成分については、剥離剪断層のフラッピングの幅が大きいために全てのケースで実験よりも過大に評価されていた。また、側面のランダム成分と渦度厚さを調べ、数値粘性の影響が小さい方が剥離剪断層の発達が早く、実験結果に近いことがわかった。剥離剪断層の発達の遅れは抗力係数の過大評価と相関があり、抗力係数等を求めるうえで数値粘性の影響の低減が重要であることが確かめられた。

参考文献 [1] Rodi, W., Ferziger, J. H., Breuer, M., and Pourquie, M.: Status of large eddy simulation results of a workshop. *J. Fluids Eng.* Vol.119, pp.2248-262, 1997. [2] Kawamura, K. and Kuwahara, K.: Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness. *AIAA*, Vol.84, No.0340, 1984. [3] 野澤, 田村: 角柱まわりの複雑乱流場に対するLES適用法の提案とその課題、土木学会論文集, 1998年4月。[4] Lyn, D. A.: *ERCOTAC Database*, Case 43, 1992.

Table.2 角柱側面($x=0$)における変動風速のランダム成分($v''v''$)のピーク値の比較

	$\alpha = 3$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0.5$
$\Delta/h=1$	0.0140	0.0227	—
$\Delta/h=2$	0.0185	0.0216	0.0257
$\Delta/h=4$	0.0172	0.0211	0.0261
no LES	0.0224		

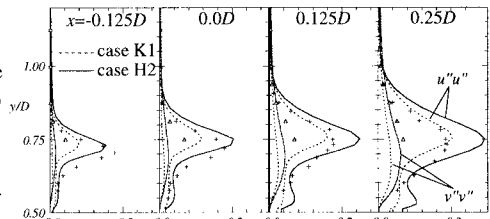


Fig.4 角柱側面における変動風速ランダム成分の分布の遷移 (シンボル, Lyn^[4]; ライン, 本計算)

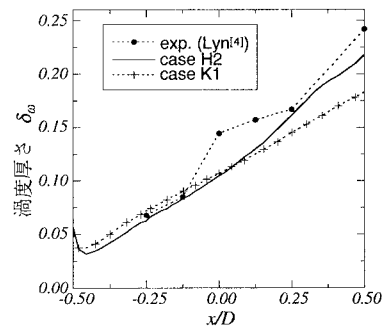
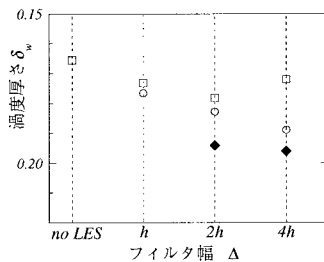
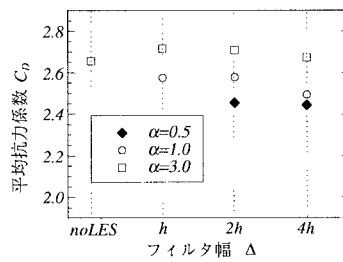


Fig.5 角柱側面における渦度厚さ δ_w の主流方向への変化



(a) 渦度厚さ



(b) 平均抗力係数

Fig.6 角柱側面($x=0.375$)の渦度厚さ δ_w と平均抗力係数 C_D に対する α と Δ の影響

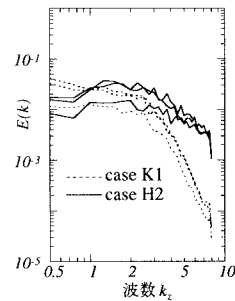


Fig.7 角柱側面の主流方向の風速のスパン方向のエネルギースペクトル