

I - B 379

LES による矩形柱周りの流れの 3 次元数値シミュレーション

金沢大学工学部 正 員 岡島 厚

金沢大学大学院 塩谷 篤

1. まえがき 一様流中に置かれた断面比 $D/H=0.60$ 付近における矩形柱周りの流れにおいて、「中ロビーク」⁽¹⁾と呼ばれる現象や断面比 $D/H=0.50$ において 2 種類の流れパターンが不規則に変化する事が明らかにされている⁽²⁾。しかし、このような矩形柱の流体力特性や流体力の不規則性の発生機構については不明なことが多く、更なる解明が必要である。本研究では Smagorinsky モデルを用いた LES による 3 次元数値シミュレーションを試みた。最初に、計算結果を実験と比較して計算の精度の検証を行い、次に得られた時系列データにウェーブレット解析を適用することにより、ブラフボディ周りの流れにおける非定常性の解明への有効性を検討した。

2. LES 基礎方程式 代表長さ H と代表速度 U で無次元化され、filtering 操作を施された非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式は次式のように表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} k_{sgs} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{1}{Re} + \nu_{sgs} \right) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、Leonard 項 L_{ij} + Cross 項 C_{ij} をゼロとし、Reynolds 応力項 R_{ij} に SGS モデルとして広く使われている Smagorinsky モデルを採用している。従って、SGS 乱流渦粘性は次式で与えられ、フィルター幅に Van Driest 型の減衰関数 f_v を乗じる。

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}, \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

式(2)中の Smagorinsky 定数 $C_s=0.094$ 、フィルター幅 $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 、減衰関数 $f_v = 1 - \exp(-y^+/25)$ とした。

3. 数値計算方法 計算領域は一様流中に置かれた矩形柱断面の流れ場を対象とし、代表長さである角柱の前面辺長を H とすると、断面比 $D/H=0.60$ では $28H \times 11H \times 4H$ とし、格子分割は $77 \times 63 \times 21$ とした。境界条件は、流入条件を一様流入、流出条件を対流境界条件とした。流れ垂直方向では slip 条件、スパン方向には周期境界条件を適用した。角柱の壁面速度分布には Linear-power low 型の 2 層モデルを用いた。

差分格子は Staggard 格子とし、計算アルゴリズムとして HSMAC 法を、時間進行法は対流項を 2 次精度 Adams-Bashforth 法により陽的に、その他の項を Crank-Nicolson 法により陰的に取り扱う半陰解的な解法とした。空間微分項の差分近似法として LES では対流項には一般に中心差分が用いられるが、計算の安定性を優先させて QUICK スキームを使用した。その他の項には 2 次精度中心差分を用いた。

計算はレイノルズ数 $Re=2.2 \times 10^4$ 、時間間隔を $\Delta t=0.002$ の一定とし、断面比 $D/H=0.20 \sim 1.0$ まで変化させて行った。

4. 計算結果

4.1 矩形柱の流体力及びフローパターン 図 1 にそれぞれの断面比における抗力係数 C_d 及び揚力係数 C_l の時間波形を示す。Ohya の実験結果⁽²⁾と同様に、各々の波形から 2 つの異なる流体力の変化が観測される。断面比 $D/H=0.60$ における異なる 2 つの流体力の変化を確かめるために、角柱近傍の流れ場を図 2 に示す。揚力変動が大きく、連続的に高い抗力値をとる低圧モードでは、角柱後方にはく離せん断層を強く巻き込んでいる。一方、揚力変動・抗力値が小さく、背圧係数 C_{pb} が回復する高圧モードでは、はく離せん断層の巻き込みが弱く、物体から少し離れた位置で渦を形成している。この異なる流体力の変化は渦の形成位置の違いに依るものであることが分かる。また、各々の断面比における抗力値が小さい低圧モードでは 2 次元性が強く表れている。

断面比 D/H に対する C_d , C_{pb} の変化を図 3 に、計算された流体力と実験値の比較を表 1 に示す。それぞれの結果は各特性値の平均値で示したが、本計算は「中ロビーク」の現象を精度良く捉えている。しかし、実際には流体力は波線で示した範囲内で変動しており、図 1 の変動波形の最大・最小値間を 25 等分した小分割領域の頻度分布図中の(図 4)ピーク値が「中ロビーク」を構成していると言える。また、計算によって得られた流体力も実験値とほぼ一致した。しかし、 $D/H=0.40$ ではストローハル数 St が若干小さい値を取るが、これは Smagorinsky 定数 C_s が流れ場ごとに異なること、対流項への風上差分の適用、スパン方向の格子解像度の粗さの影響といった計算上の要因によるものと考えられる。

4.2 ウェーブレット解析 本計算の St 値などは長時間にわたる FFT 解析によって算出されたものであり、抗力の変化に伴う St 値の微妙な変化は現れ難い。そこで、各々の時刻周辺の信号のみを変換するウェーブレット解析を用

Keywords: Large Eddy simulation, Rectangular Cylinder, Vortex Shedding, Wavelet analysis

〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20 金沢大学工学部機能機械工学科 Tel. 076-234-4744 FAX 076-234-4746

いて周波数解析を行った。ウェーブレット関数には、時刻と周波数に関する不確定が最小の関数であり、時間領域・周波数領域における局在性がよいgabor関数を用いた。図5に図1の Cl の変動波形にウェーブレット変換を施した解析結果と Cd の変動波形に移動平均を施した変動波形を示す。時刻 $t=620.0\sim 680.0$ 付近のウェーブレット変換係数の強さは極端に輝度が弱く、その時の Cd 値が低いことと良く対応している。一方、輝度が強い領域では St 値が幾分大きく見えるが、顕著な違いは現れなかった。

5. まとめ LES計算によって様々な矩形柱の流体力の不規則性や流力特性を求めた。計算結果は実験とほぼ一致した。揚力のwavelet解析を用いた解析結果は Cd の変動波形と揚力の強さを示すwavelet変換係数の変化は良く対応した。しかし、 Cd に対応する St 値の変化は顕著には認められなかった。

参考文献 (1) 中口, 橋本, 武藤, 航空宇宙学会誌, 第16巻, 第168号, 1968.

(2) Ohya, A., J. Fluid Structures, 8, pp.325-330, 1994.

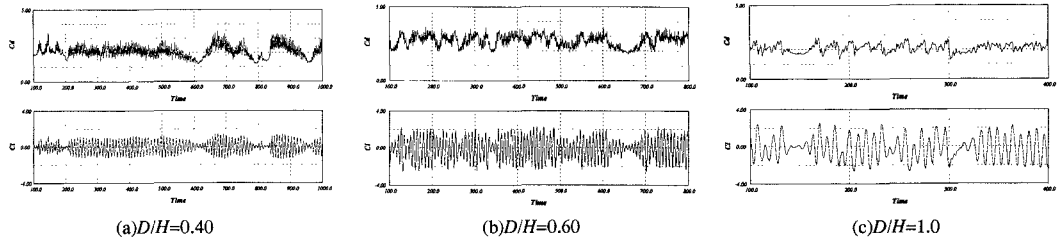


図1 抗力及び揚力係数の変動波形

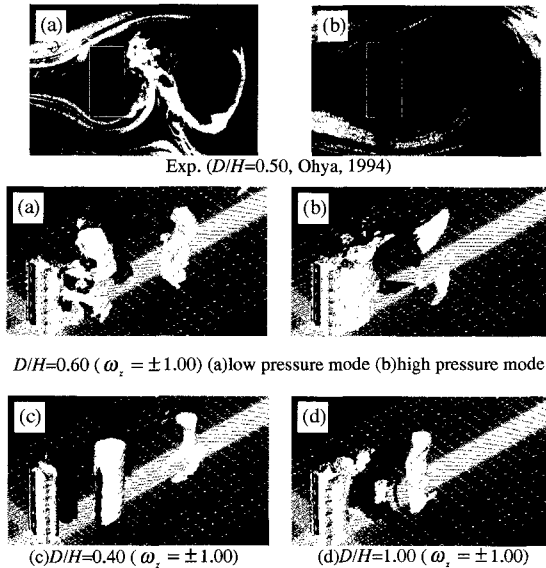


図2 フローパターン

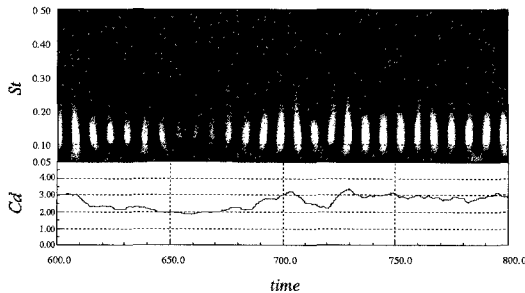


図5 wavelet変換係数の等高線図及び平滑化された抗力変動波形 ($D/H=0.60$)

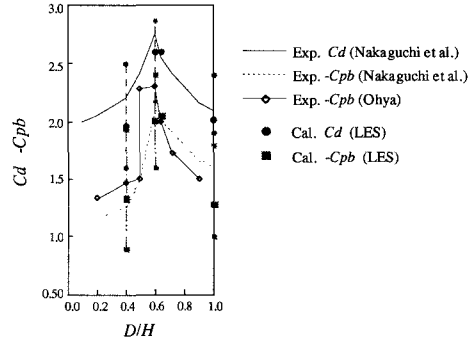


図3 断面比 D/H に対する $Cd, -Cpb$ の変化

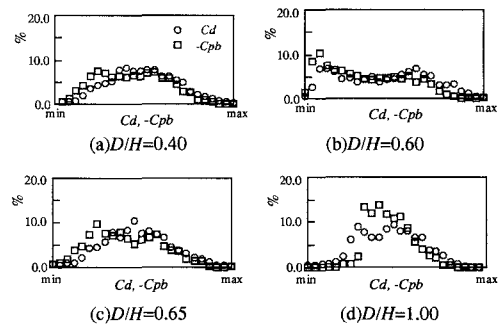


図4 $Cd, -Cpb$ の頻度分布

表1 流体特性値の比較

D/H	Cd	Cl'	Cpb	St	X_2
0.40	2.097	0.519	-1.391	0.107	2.212
0.40(Exp)	2.200		-1.400	0.135	2.000
0.60	2.601	1.135	-2.009	0.130	0.959
0.60(Exp)	2.900		-2.150	0.126	1.000
1.00	2.120	1.332	-1.391	0.122	1.079
1.00(Exp)	2.156		-1.400	0.122	

