

CS 125

低レイノルズ数における偏平矩形柱周りの数値計算

北九州高専 正員 中山龍三

九大応力研 正員 中村泰治 大屋裕二 小園茂平

1. まえがき

偏平矩形柱周りの流れは剥離せん断層の側面への再付着および後縁での渦の干渉など複雑な様相を呈する。著者等は先に、レイノルズ数 $Re=1000$ における偏平矩形柱周囲流の特性を調べ、その渦放出は単一の剥離せん断層の不安定に起因するimpinging-shear-layer instability (ISLI)に支配されていることを、風洞実験および数値解析で確認している^{1,2)}。ここではより低いレイノルズ数での周囲流を数値解析し、ISLIが発現する下限のレイノルズ数を調べた。レイノルズ数 $Re=200\sim400$ で、断面辺長比 $d/h=3\sim10$ (h :物体高さ、 d :流れ方向長さ)における矩形柱の周囲流を物体適合格子上で差分法を用いて数値計算し、以下の結果が得られたので報告する。

2. 計算方法

2次元非圧縮粘性流れに対する基礎方程式は連続の式(1)とN-S eqs. (2)を無次元化し次の通りである。

$$\text{div } \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\partial \mathbf{v} / \partial t = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \text{grad } p + \Delta \mathbf{v} / Re \quad (2)$$

連続の式(1)の代わりにMAC法に従って(2)の両辺の発散をとり、圧力についてのPoisson方程式(3)を導く。

$$\Delta p = -\text{div}(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \partial(\text{div } \mathbf{v}) / \partial t + \Delta(\text{div } \mathbf{v}) / Re \quad (3)$$

(2)と(3)が差分化されて解くべき基礎式である。(3)の空間項は中心差分とし、SOR法を用いて逐次近似して圧力を求める。圧力の収束判定条件は相対誤差で 10^{-6} としている。(2)の差分化で時間微分項に対してはEulerの陰解法で時間刻みは $\Delta t=10^{-3}$ である。(2)の空間微分項のうち対流項は三次精度風上差分³⁾を適用し、他は中心差分を用いた。境界条件は、速度について物体表面上でno-slip条件、遠方境界では一様流($u=1, v=0$)とし、圧力はすべて外挿で与えている。計算格子にはThompson等が開発した物体適合格子を用いている。

3. 計算結果

* $Re=200$ のフローパターンとストローハル数: 前縁からの剥離バブルは両側面で上下対称に形成された。剥離バブルは定常で形を変えず、その下流に再付着した流れは再び後縁から剥離し、上下で互いに干渉し合って下流にカルマン渦列を形成する(図1)。このフローパターンはOkajima et al.⁴⁾の可視化実験の結果とよく一致している。図2には $d/h=5, 8, 10$ の揚力変動を示す。 $f_v h/U$ (f_v :渦放出振動数)で定義したストローハル数 $St(h)$ は、辺長比を変えてもほぼ一定値の0.14となる。 $f_v d/U$ で定義されたストローハル数 $St(d)$ は辺長比に関して線形的に増加する。平行して行った風洞実験の値と共に図3に示す。計算結果は実験と良く一致している。

* $Re=400$ のフローパターンとストローハル数: $d/h=3, 6, 5, 9$ のフローパターンを図4に示している。前縁から剥離したせん断層は側面上に再付着して剥離バブルを形成する。これらの剥離バブルから分裂した渦は側面上を流下し、後縁で形成される渦と干渉して下流で規則的なカルマン渦列となっている。側面上の渦の数をみると三つの矩形柱でその比は1:2:3となっている。図5にはそれぞれの揚力変動を示す。これらのストローハル数 $St(d)$ はそれぞれ0.51, 1.07, 1.47でほぼ1:2:3となってステップ的に増加している。最小値の0.51はISLIの基本的な無次元周波数として知られる0.6に近い(図6)。

Lane & Loehrke⁵⁾は水槽で矩形柱周囲流を可視化観察し、剥離バブルの長さが $Re=325$ 付近を境に急変することを見いだしているが、上記の結果はこの事実と対応している。

4. まとめ

偏平矩形柱の辺長比 $d/h=3\sim10$ の周囲流を数値解析した結果以下のことが判った。周辺流の特性はレイノルズ数 $Re=200$ と400の間で変化し、400ではすでにISLIに支配された流れとなった。

<参考文献>

- 1) Nakamura, Y., Ohya, Y., & Tsuruta, H.: J. Fluid Mech., Vol. 222(1990), 437
- 2) Ohya, Y., Nakamura, Y., Tsuruta, H., Nakayama, R.: J. Fluid Mech., Vol. 236(1992), 445
- 3) Kawamura & Kuwahara: AIAA 84-0340(1984)
- 4) Okajima, A., Ueno, H., Nagahisa, T., & Katoh, K.: Trans. Japan Soc. Mech. Engrs B 56(1981), 577
- 5) Lane, T. C. & Loehrke, R. I.: Trans. ASME, J. Fluids Engng, 102-4(1980), 494

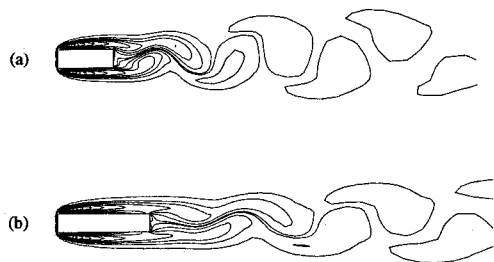


図1. $Re=200$ (a) $d/h=3$, (b) 5
のフローパターン

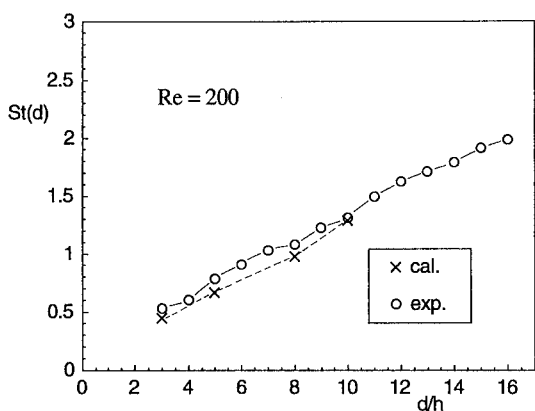


図3. $Re=200$ のストローハル数

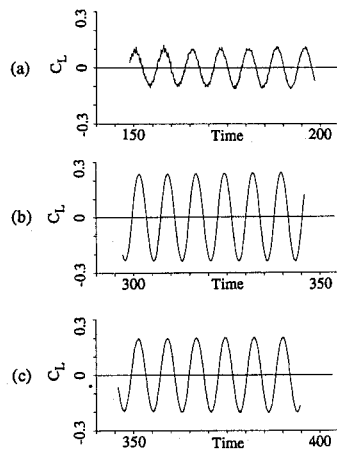


図2. $Re=200$ (a) $d/h=5$, (b) 8, (c) 10
の揚力変動

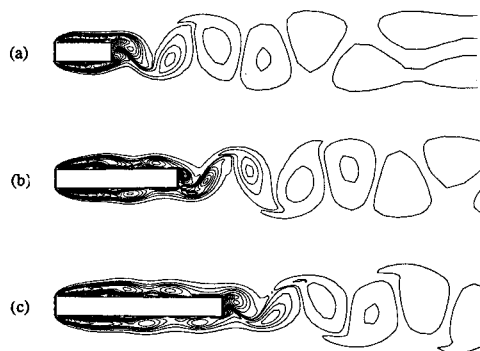


図4. $Re=400$ (a) $d/h=3$, (b) 6.5
(c) 9のフローパターン

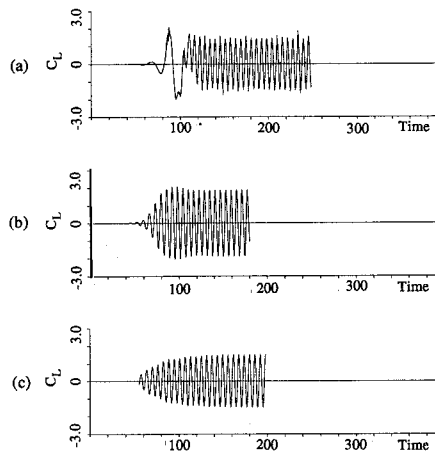


図5. $Re=400$ (a) $d/h=3$, (b) 6.5, (c) 9
の揚力変動

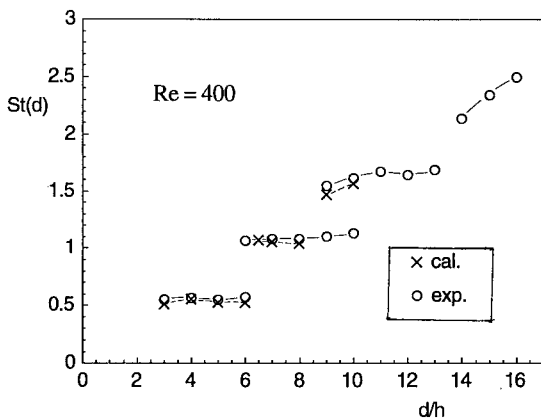


図6. $Re=400$ のストローハル数