

臨界断面を有する矩形柱周囲流れの数値シミュレーション

Numerical Simulation of the Flow around Rectangular Cylinders with Critical Depth

○林 健一 (三井造船), 大屋裕二 (九大応力研)

Ken-ichi HAYASHI* and Yuji OHYA**

*Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd., Tokyo 196-0012, Japan

**Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan

Three-dimensional numerical simulations of the flow around rectangular cylinders with different depth-to-height ratios, $d/h = 0.4, 0.5, 0.6$, are carried out by means of a finite difference method for the Reynolds number of 3000. The cylinder with $d/h = 0.5$, for the spanwise length of $10h$, show characteristic fluctuations in base pressure, with alternately high and low values respectively. This is caused by a sudden change in the flow pattern around the cylinder, associated with the vortex formation.

1. はじめに

矩形柱まわりの流れは、その断面辺長比 d/h (d , 主流方向の長さ; h , 高さ) によって様々な周囲流れや空力特性を示すことが知られている。中口ら¹⁾は、 $d/h = 0.6$ 付近で抗力係数 C_D と背圧係数 C_{pb} が著しいピークを示すことを明らかにした。その後、この現象の解明のため多くの風洞実験がおこなわれてきたが、大屋²⁾は、 $d/h = 0.4, 0.5, 0.6$ の矩形柱について背圧の長時間変化の測定から、図 1 に示すように $d/h = 0.5$ 矩形柱で不規則な時間間隔で交互に高圧と低圧となる二つの背圧値を示すことを明らかにし、さらにスモーク・ワイヤーによる矩形柱まわりの流れの可視化から、高圧と低圧の二つの背圧値に対応して、弱い渦形成と非常に強い渦形成を示す二つのフローパターンが存在すること、これらが不規則に入れ替わって現れることを明らかにした。

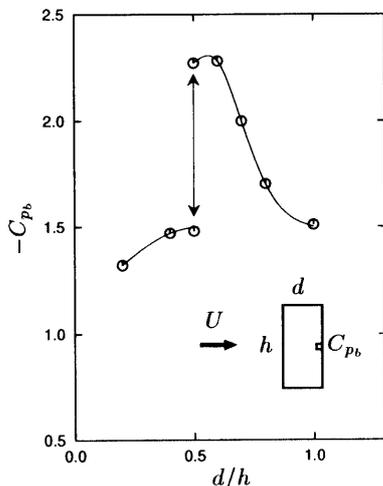


Fig.1 The base pressure coefficient, C_{pb} , variation with depth-to-height ratio, d/h . ○, Ohya.²⁾

その後、岡島ら³⁾は、 $d/h = 0.4 \sim 1$ の矩形柱についてレイノルズ数 $Re = 500 \sim 3 \times 10^4$ の範囲で背圧の測定をおこない、背圧値はレイノルズ数に強く依存して変わることを、とくに、 $d/h = 0.6 \sim 0.7$ 矩形柱では、 $Re = 2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ で高圧と低圧となる二つの背圧値が経時的に不規則に示すことを明らかにした。本研究では、大屋の風洞実験²⁾と同じように、辺長比 $d/h = 0.4, 0.5, 0.6$ の矩形柱まわりの流れについて数値計算をおこない、高圧と低圧の二つの背圧値に対

応して、弱い渦形成と強い渦形成を示す二つのフローパターンが存在し、これらが不規則に入れ替わる現象を確認することを目的とする。

2. 計算方法

基礎方程式は、矩形柱の高さ h , 流入速度 U および流体の密度 ρ ですべての変数を無次元化した三次元非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式と連続の式で、時間進行法には Euler の一次陽解法を、カップリングアルゴリズムには fractional step 法を用いた。対流項を含む空間微分には二次精度中心差分法を、圧力ポアソン方程式の解法には SOR 法を用いた。計算領域は、主流方向に $24h$ (矩形柱中心から上流側に $8h$, 下流側に $16h$)、高さ方向に $20h$, 矩形柱スパン方向に $10h$ とした。計算格子にはデカルト座標系のスタガード格子を用いた。格子分割数は、主流方向に (対象とする矩形柱の d に応じて) 238 から 250, 高さ方向に 210, 矩形柱スパン方向に 400 とし、矩形柱近傍に格子を引きつけるため、主流方向と高さ方向には不等間隔とした。格子点総数は約 2000 万点である。矩形柱の高さ h と流入速度 U に基づくレイノルズ数 Re は 3000, 時間刻みは $\Delta t = 2 \times 10^{-4}$ である。境界条件は、流入面に一様流入条件, 流出面に対流出条件, 上・下および左・右両端の面に free-slip 条件, 矩形柱の壁面には no-slip 条件とした。計算は九州大学基盤情報センターの FUJITSU VPP5000/64 を使い 16PE 並列でおこなった。

3. 計算結果

3.1 背圧係数の時間変化

計算によって得られた $d/h = 0.4, 0.5$ および 0.6 矩形柱に作用する抗力, 揚力, 背圧の時間平均値 (時間 $t = 200 \sim 1000$) を表 1 に、矩形柱スパン中央における背圧係数 C_{pb} の時間変化を図 2 に示す。

Table 1 Drag, r.m.s. of fluctuating lift, base pressure coefficient and Strouhal number

d/h	\bar{C}_D	$C_{L,rms}$	$-\bar{C}_{pb}$	S_t
0.4	2.49	0.482	1.80	0.146
0.5	2.84	0.929	2.39	0.142
0.6	3.05	1.59	2.74	0.146

表 1 より、 $d/h = 0.4$ から 0.6 へ辺長比 d/h が大きくなる

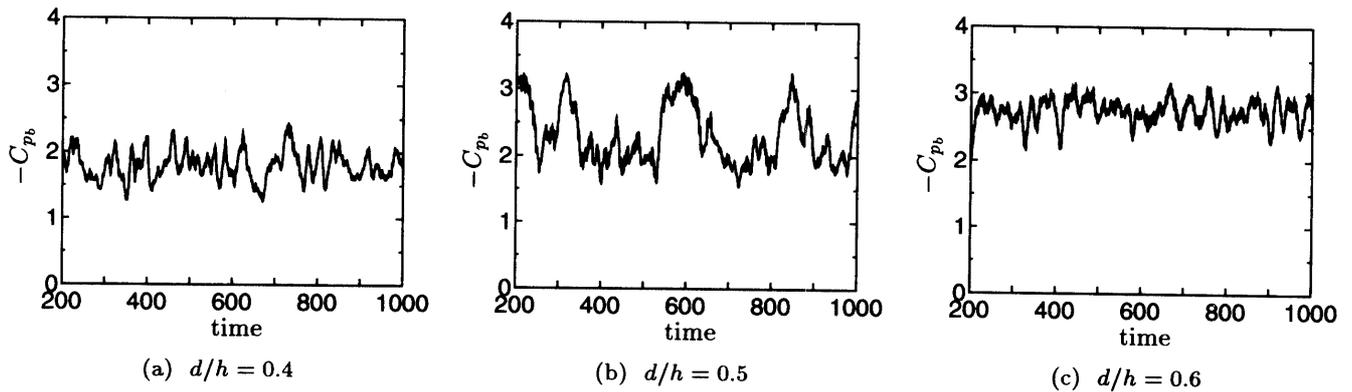


Fig. 2 Time histories of the base pressure coefficient, C_{pb} , with $Re = 3000$.

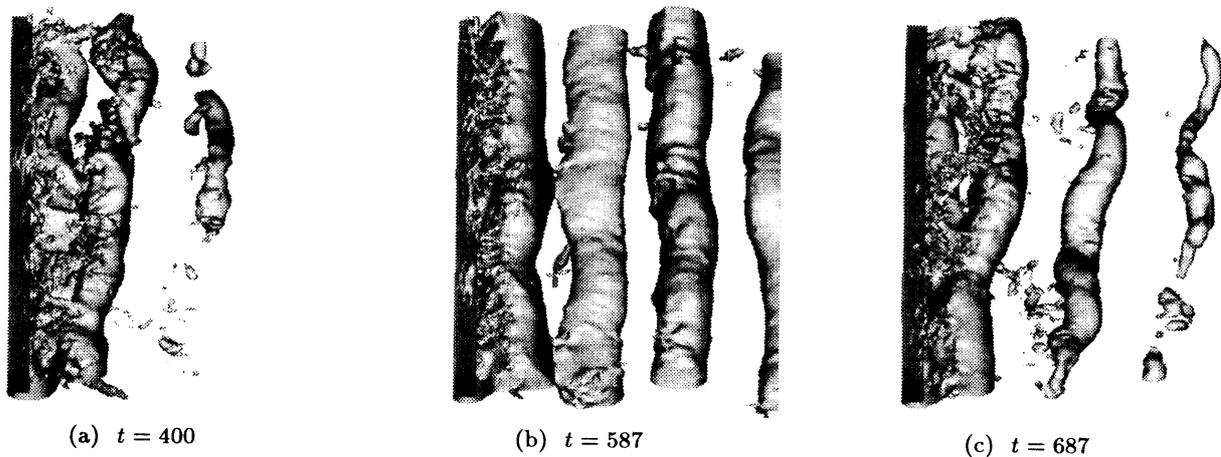


Fig. 3 Instantaneous pressure constant surface around a rectangular cylinder with $d/h = 0.5$.

のにもない抗力係数 C_D , 背圧係数 $-C_{pb}$ の時間平均値は一樣に大きくなっている。しかし、図 2 より、背圧係数 C_{pb} の値は一定ではなく、時間とともに不規則に変動している。図 2(a) より、 $d/h = 0.4$ 矩形柱では $\bar{C}_{pb} = -1.8$ 、図 2(c) より、 $d/h = 0.6$ 矩形柱では $\bar{C}_{pb} = -2.7$ を中心として変動している。図 2(b) より、 $d/h = 0.5$ 矩形柱では、 $C_{pb} = -2$ (高圧) と $C_{pb} = -3$ (低圧) の二つの値をそれぞれ中心とする変動が不規則な時間間隔で入れ替わっており、このため背圧係数の時間平均値は $\bar{C}_{pb} = -2.4$ となっている。高圧側の背圧値の変動は $d/h = 0.4$ 矩形柱と、低圧側の背圧値の変動は $d/h = 0.6$ 矩形柱とほぼ同じ値である。

3.2 流れの可視化

図 2(b) に示した $d/h = 0.5$ 矩形柱における背圧係数 C_{pb} の時間変化から、背圧が低圧で持続している時間 ($t = 400$)、背圧が高圧で持続している時間 ($t = 587$)、さらに背圧が低圧から回復して高圧となる時間 ($t = 687$) における矩形柱まわりの流れの瞬間等圧力面 ($C_p = -1.5$) を図 3 に示す。図 3(a) より、背圧が低圧で持続する流れでは、剥離せん断層の巻き込みが弱く、スパン方向に位相がずれているため、矩形柱の背後にやや斜めになった横渦が形成されている。この横渦の下流には同様な横渦はみられないことから、この横渦は弱い渦形成となっているのがわかる。図 3(b) より、背圧が低圧で持続する流れでは、剥離せん断層の巻き込みが強いため矩形柱の背後に、スパン方向に位相がそろった二次元的な横渦が形成されている。さらに、この横渦の下流にも同様な横渦列が続いていることから、この二次元的な渦は強い渦形成となっているのがわかる。図 3(c) より、背圧が低圧から回復

して高圧となる流れでは、弱い渦形成を示すフローパターン (図 3(c) の下側) と強い渦形成を示すフローパターン (図 3(c) の上側) がスパン方向に混在しており、この二つのフローパターンの中で大きな位相差が生じ、スパン方向に大きな揺らぎが生じる。この揺らぎによってスパン方向にフローパターンの入れ替わりが伝搬すると考えられる。

4. おわりに

臨界断面付近である辺長比 $d/h = 0.4, 0.5, 0.6$ の矩形柱まわりの流れについて数値計算をおこなった。その結果、高圧と低圧の二つの背圧値に対応して、弱い渦形成と強い渦形成を示す二つのフローパターンが存在し、これらが不規則に入れ替わることが確認できた。また、弱い渦形成を示す流れではスパン方向に三次元的な構造であるのに対し、強い渦形成を示す流れではスパン方向に二次元的な構造となることがわかった。

最後に、プログラムの並列化ならびに並列計算の実行に助言を頂いた富士通 (株) の上野潤一郎氏に感謝いたします。

引用文献

- 1) 中口, 橋本, 武藤: 日本航空学会誌 168 (1968) 1.
- 2) 大屋: ながれ 10 (1991) 210.
- 3) 岡島, 木村, 片山, 大津山, 男島: 土木学会構造工学論文集 44A (1998) 971.
- 4) 林, 大屋: 日本流体力学会年々会 2001 講演論文集 (2001) 609.