5 一様流中にある角柱まわりの流れ —完全再付着型角柱および臨界形状について—

愛媛大工学部 鮎川恭三

日立製作所 浅野亮

愛媛大大学院 片山貴司

Visualization Study of the Flow Pattern around a Rectangular Cylinder
--- On the Geometry with Complete Reattachment and Critical Geometry---

Kyozo AYUKAWA*, Ryo ASANO*, Takashi KATAYAMA*

The flow pattern around a rectangular cylinder were observed by the visualization used tracer technique and by L.D.V. in the uniform flow of Reynolds number lower than 10^3 . Two different Strouhal numbers were found in the wake of the rectangular cylinder having width-to-height ratio of 5~8 at $Re=890$. Lower Strouhal number was caused by the vortex shedding from the side wall of the cylinder and higher one from trailing edges. The vortex shedding from the side wall seems to be the result of fluctuation of the shear layer separated from the leading edge. This vortex shedding from the side wall affected in the flow pattern of the wake at $Re=890$, but the influence of this vortex in the wake were weaker in the range of smaller Reynolds number.

1. まえがき

角柱まわりの流れは、角柱の形状により大きく変化する。アスペクト比 (l/b , l は角柱の流れに平行な辺即ち側面の長さ、 b は角柱の流れに垂直な辺即ち前面の長さ) が比較的小さい角柱では、前縁で剥離した流れが、直接角柱後方へ流れ込んで後流を形成し(完全剥離型)、アスペクト比の増加に伴い、後流の変動周波数に不連続な飛びを生じる臨界形状を経て、角柱前縁で剥離した流れが、周期的にいずれかの側面で再付着するようになる(周期的再付着型)。さらにアスペクト比が増加すると、再び臨界形状を経て、角柱両側面で再付着が定常的に生じるようになる(完全再付着型)²⁾。これらフローパターンの変

*Faculty of Engineering, Ehime University: Bunkyocho 3, Matsuyama 790

**Hitachi Ltd.: 4, Kanda, Chiyoda, Tokyo 101

化について、レイノルズ数10以上の場合は、臨界形状が $l/h=2.8$ および6の角柱付近である事、よにレイノルズ数の低下に伴い、 $l/h=2$ および3の角柱まわりのフローパターンに特異な変化が生じる事などが知られているが、本研究は、このようなレイノルズ数の低い領域における、未だ研究のすすんでいない完全再附着型角柱を中心に、各種アスペクト比の角柱まわりの流れをアルミ粉末懸濁法による可視化および、後流変動周波数測定により明らかにする事を目的とする。

2. 実験装置と実験方法

可視化に適当な10cm/sec程度以下の一様流を安定して実現できる循環式開水路を作製し用いた(図-1)。Test-sectionは幅290mm、深さ250mm、長さ2000mmの透明アクリル製開水路であり、Test-Section入口から900mm下流に角柱をネジによりとりつけた。この位置から800mm下流までは一様な流速が実現されている。角柱は、透明アクリルを角が鋭くなるように加工した。 h は8mmないし10mmであり、水路にとりつけたときの閉塞比は0.027ないし0.034である。スパン方向長さは200mmとし、水路水深はこれより1~2mm深くするように設定し、水面の波立ちおよび、角柱後方への3次元的な流れの巻き込みを防いだ。

可視化にはアルミ粉末懸濁法を用いた。光源は300Wのレフランプを3個ずつ水路の両側に並べ、2重のスリットを用いてほぼ均一な平行光線を、全長400mmにわたって得た。使用カメラは、ペンタックスM $\times$ および、Bolex H16SBMであり、いずれも水路上方に固定して撮影を行った。フィルムはASA 400ないし500のものを用い、必要に応じて増感現像を行った。

変動周波数の測定は、レーザドップラ流速計(DISA Type55Xモジュラ光学系、シードは市販のクレーミングパウダ、粒子均 $2\mu\text{m}$)あるいはホットフィルムプローブ(DISA Type55R34)により測定し

図-1 循環式開水路

図-2 座標系

図-3 オートパワースペクトル
 $l/h=5$ $Re=890$

図-4 オートパワースペクトル
 $l/h=8$ $Re=890$

図-5(a) $l/b=8$ $Re=890$ 図-5(d) $l/b=8$ $Re=890$ 図-5(b) $l/b=8$ $Re=890$ 図-5(e) $l/b=8$ $Re=890$ 図-5(c) $l/b=8$ $Re=890$ 図-5(f) $l/b=8$ $Re=890$

た速度変動とA/D変換後データプロセッサにより演算処理する方法をとった。測定位置は角柱背面から下流方向の距離を x として(図-2), $x/b=6.0\sim 11.5$, $y/b=0\sim 4.0$ の範囲である。

3. 実験結果と検討

(1) 完全再付着型角柱

$Re=890$ の場合の $l/b=5$ および8の角柱の後流と流れと直角方向にトラバースさせて各点で測定した速度変動のオートパワースペクトルを図-3および4に示す。 $l/b=5$ では、 $y/b=0$ 付近を除いて $St=0.125$ 付近にパワースペクトルのピークが唯一存在する。これに対し、 $l/b=8$ では、中心から離れた点においても複数のピークが見られ、その中でも特に2種の St に対するオートパワースペクトルのピークが大きい事がわかる。これら2種の St の値には倍数関係等はなく、また、高い方の St の値は中心寄で、低い方の St の値が外側寄で優勢である。同様の現象が $l/b=5.5$, 6の角柱でも生じており、これらの事から、 $l/b\geq 5.5$ の角柱では、その後流に2種の異なる原因によると思われる変動が生じ

ており, しかもそれらが後流の中心寄と外側寄に分かれて生じている事が予想できる。図-5のへけに約0.2秒間隔で連続的に撮影した $l/b=8$ の角柱まわりの流れの可視化写真を示す。側面の剥離後部が発達し, 分裂して独立した渦となり側面に沿って流れていく様子がわかる。この渦の発生周波数をホットフィルムにより測定した結果, その St 値は図-4に示した $l/b=8$ 角柱の後流で現れた2種の優勢な低い方の値($St=0.125$)と一致した。側面近傍および角柱後流の $x/b=7.5$, $y/b=2.5$ の両点における速度変動の相互相関をとった結果, 強い相関がある事も認められ, $l/b=8$ 角柱後流外側で強く現れる速度変動の St 値は, この角柱側面の渦発生によるものである事が確認できた。一方, 角柱後縁における渦発生も同時に生じており, この渦発生周波数が, 後流の中心寄で優勢な高い方の St 値とはほぼ一致する事を, 16mmムービーの目視による観察により確認した。後縁での剥離による渦発生の一側を図-6に示す。

図-6 $l/b=5.5$ $Re=890$ 図-7 $l/b=5$ $Re=310$ 図-8 $l/b=8$ $Re=310$

$Re=310$ の場合, $l/b \geq 5.5$ の角柱の後流では, 中心寄, 外側を問わず, 一種の St 数のみが優勢となるが, 逆に $l/b=5$ の角柱で2種の St 数が強く現れた。このレイノルズ数の場合の $l/b=5$ および8角柱まわりの流れの可視化写真を図-7および図-8に示す。いずれの場合も, 側面剥離渦は非常に弱く, またそこから発生する渦も非常に小さいが, $l/b=5$ 角柱では, 渦発生位置が角柱後縁に近いにめ, 後流においてもその影響が現れたのに対し, $l/b \geq 5.5$ の角柱では, 渦が発生後, 後縁に至る間に粘性により減衰するものと考えられる。

(2) 臨界形状

$Re=380, 720, 1100$ の場合の l/b と角柱後流における St の関係を図-9(a)-(c)に示す。黒塗りの丸は最も優勢に現れた St の値を示している。完全剥離型から周期的再付着型への臨界形状と思われる後流に複数の周波数成分の現れる角柱が, レイノルズ数が10以上の場合に比べ l/b の小さい角柱に移っている事がわかる。この臨界形状の前後でのフローパ

— Nakaguchi et al.
($Re = 2-6 \times 10^4$)
□ Okajima
○ Present Exp.

図-9(a) アスペクト
比とストロハル数の
関係 $Re = 380$

— Nakaguchi et al.
($Re = 2-6 \times 10^4$)
□ Okajima
○ Present Exp.

図-9(b) アスペクト
比とストロハル数の
関係 $Re = 720$

— Nakaguchi et al.
($Re = 2-6 \times 10^4$)
□ Okajima
○ Present Exp.

図-9(c) アスペクト
比とストロハル数の
関係 $Re = 1100$

ーンの変化について考察を行う。図-10(a)~(d)は完全剥離型角柱まわりのフローパターンを簡略化したものである。前縁で剥離した流れ(主流)により囲まれた剥離渦の背面に回り込んだ部分が主流によって強化され背面から剥れ、反対側の主流を引き込む事により次の渦生成を促進する。アスペクト比の増加に伴い主流が後縁近くを通過するようになり、剥離渦の背面に回り込んだ部分が小さく弱くなり、臨界形状に至ると、反対側面からの主流を引き込む事ができな程弱くなる。このため両側面後縁からの渦生成の周期的な関係はくずれ、後流は非常に不安定で複雑な状態となる。図-11に $Re = 1100$ の場合の臨界状態である $l/h = 2.5$ 角柱まわりのフローパターンの可視化写真を図-10(e)にそれを模式化した図を示す。可視化写真によってもわかるように、後流は、流速の遅い領域が帯状に連なるような様相を呈している。さらにアスペクト比が増加すると、主流の再付着により周期性が再び現れる。図-10(f)~(i)に周期的

図-10 フローパターン略図

再付着型角柱のフローパターンを示す。周期的再付着型から完全再付着型への臨界形状は16mm可視化フィルムの目視による観察により $Re=890$ の場合 $l/d=5$ 角柱付近と思われる。 $Re=530$ では、この角柱も完全再付着型に移行する事がStの測定により確認され、臨界形状はアスペクト比の小さい角柱に移るものと思われる。

図-11 $l/d=2.5$ $Re=1100$

4. 結論

(1) $Re \leq 890$ の完全再付着型角柱後流に、2種の異なる周波数成分が強く現れ、一方が角柱側面からの渦放出によるものである事を確認した。この渦は剥離剪断層の変動によるものと思われる。 $Re=890$ の時非常に顕著に現れるが、レイノルズ数の低下に従い、粘性の影響によってその変動は押えられる。

(2) 臨界形状はレイノルズ数の低下により l/d の小さい角柱に移行する。また臨界形状を中心に l/d によるフローパターンの変化を明らかにした。

文 献

- 1) 中口博, 橋本貴久, 武藤真理: 航空学会誌 16-168 (1968), 1
- 2) 溝口武人, 岡島厚: 土木学会論文報告集 312 (1981), 39
- 3) 岡島, 杉谷, 溝口: 流れの可視化 Vol.2 suppl (1982)
- 4) Okajima, A. J. Fluid Mech. 123 (1982), 379