

線形剪断が角柱周り流れに及ぼす効果

小園 茂平¹⁾・北島 崇雄²⁾・一木 武次郎³⁾

The Effect of Linear Shear Rate on the Flow around Rectangular Cylinders

Sigehira OZONO, Takao KITAJIMA, Takejirou ICHIKI

Abstract

Linearly sheared flow was generated by a multi-fan type wind tunnel, where the airflow is driven by a column of 11 fans, each of which is independently controlled by a computer. The effects of linear shear rate on the flow was investigated for rectangular cylinders with different depth-to-height ratios d/h . Here, d is the depth and h is the height of a cylinder. The depth-to-height ratio was varied in the range 0.2-3.0. The base pressure increases with increasing shear rate for shorter rectangular cylinders with $d/h=0.2-2.0$. The Strouhal number decreases with increasing shear rate for shorter rectangular cylinders, but it is not so sensitive to shear rate.

Key Words:

Linear shear, Rectangular cylinder, Depth-to-height ratio, Vortex shedding

1. はじめに

大気境界層中には、橋梁や高層ビル等の巨大構造物が埋没しており、大気境界層の流れが構造物に与える影響を調べることは重要である。大気境界層流自体は純せん断のみならず乱流や温度成層などの効果が含まれるので、生じた流れにどの効果が影響したかを同定するのは容易ではない。そこでこのような複雑な流動現象を単純化し、線形せん断という要素だけを考えることが行なわれている。

Kiya 他¹⁾は円柱を線形せん断流中に置きシアパラメータが $\beta=0\sim 0.25$ 、レイノルズ数が $Re=35\sim 1500$ の範囲で渦放出特性を調べた。曹他²⁾はマルチファン型風洞を使って $\beta=0\sim 0.3$ 、 $Re=1.0\times 10^4\sim 8.8\times 10^4$ の範囲で渦

放出特性を調べ、 β の増加につれてストローハル数の変化は小さいことや背圧が回復し渦放出が抑制されることを明らかにした。

本研究では、大気境界層を簡略化した線形剪断流をマルチファン型風洞で生成し、その中にいろいろな辺長比 d/h (d :奥行き, h (=50mm):高さ)の角柱を設置した。ストローハル数 St や背圧係数 C_{pb} などの渦放出特性に注目して純剪断が角柱周り流れに及ぼす効果を調べた。

2. 風洞装置と模型設置法

2.1 風洞装置

使用した風洞は、縦 11 個の送風機を持つ押し出し開放型のマルチファン型風洞で、測定部の寸法は主流方向長さ 3800mm、縦 1010mm、横 180mm である。各送風機で駆動された気流は分離されたダクトを通り

1)材料物理工学科 助教授

2)物質工学科 大学学部生

3)物質工学専攻 大学院生

縮流され測定部に押し出される。各縮流比は 1/2 である。ダクト壁の高さは $M_z=91.4\text{mm}$ である。乱れの回転成分を除くため 100mm のハニカムが吹き出し直前に設置されている。風速は 0~11m/s の範囲で制御できる。風速設定は回転数制御により行なわれ、各送風機はコンピュータで独立に制御可能である。

2.2 模型設置法

本研究で使用した角柱模型のサイズと辺長比 d/h の対応を表 1 に示す。模型の高さ h は全て 50mm とし、奥行き d を変えることによって辺長比を変えた。

表 1 模型のサイズと辺長比

$h(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	辺長比 d/h
50	10	0.2
	25	0.5
	30	0.6
	35	0.7
	50	1.0
	75	1.5
	100	2.0
	110	2.2
	125	2.5
	135	2.7
	150	3.0

図 1 のように、測定部入り口から角柱背面まで 3200mm、床面から角柱中心まで 500mm の地点に角柱を水平に設置した。背圧 P_b の測定のために、各模型の背面に一端を封じた静圧管を埋め込み(外径 3mm)、模型中央の位置にあわせて 0.3mm の静圧孔をあけ、シリコンチューブを経て差圧計に導き測定した。背圧係数 C_{pb} は $C_{pb}=(P_b - P_\infty)/(1/2 \rho U^2)$ で定義される無次元量である。ここで P_b は模型背圧、 P_∞ は模型中心レベルの基準静圧、 ρ は空気密度である。模型後流における渦の卓越周波数 f_v の測定には、X 型熱線流速計を模型中央から主流方向に $2h(100\text{mm})$ 、上方に $2.5h(125\text{mm})$ の地点に設置して変動気流を検知し、その時系列を FFT(高速フーリエ変換)によりスペクトル解析し求めた。ストローハル数 St は $St=f_v \times h/U$ で定義される無次元パラメータである。ここに f_v は卓越周波数、 U は測定地点での平均風速である。計測条件はサンプリング

周波数 200Hz、データ長は 10000 個で計測を行なった。 h に基づくレイノルズ数は $Re=1.65 \times 10^4$ であった。

端板は使用しなかった。有効アスペクト比は $180/50=3.6$ であった。閉塞率は 5.0% であった。アスペクト比や閉塞率による特性値の補正法は確立しておらず特性値の補正は行なっていない。

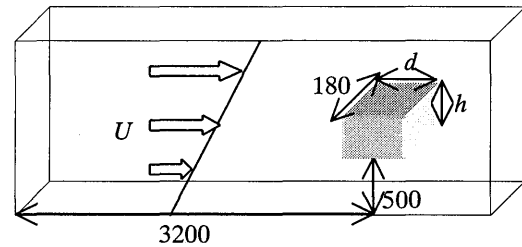


図 1 風洞内の模型の配置

3. 線形剪断流の生成

生成されるせん断流は $U=G \times z + U_0$ で表わされる。ここで G は平均流傾き、 z は模型中央からの座標、 U_0 は模型中央レベルの風速で、いずれの剪断流も $U_0=5\text{m/s}$ となるように設定した(図 2 参照)。剪断勾配(シアレート)は

$$\beta = \left. \frac{dU}{dz} \right|_{U_0} = \frac{G \times h}{U_0}$$

で無次元化して定義した。本研究では $G=2.75, 5.5, 8.25, 11\text{s}^{-1}$ となるような 4 種類の線形剪断流を生成した。図 3 に各傾き G に対する平均風速プロファイルの目標値と実測値を示す。縦軸は風洞床面からの高さ z_0 をダクト壁の高さ M_z で割って無次元化した。風洞のコア領域でより大きな傾きを得るため上下境界層に接するファンの流速を一様にした。いずれの傾き G でも目標値とよく一致する剪断流を生成できた。

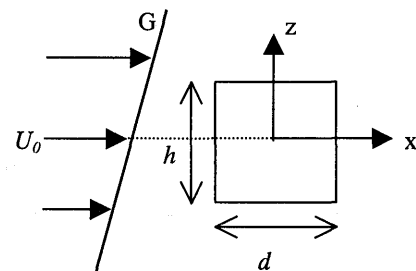


図 2 実験状況

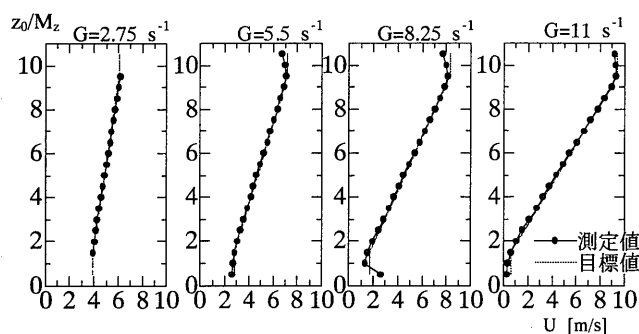


図3 平均風速プロファイル

各剪断流の風速変動 u の r.m.s. 値を図4に示す。風速変動 u の r.m.s. 値 u' は $u' = \langle (u^2) \rangle^{1/2}$ で定義される。ここに $\langle \rangle$ は平均操作を表す。一様流での乱れの強さは境界付近を除いて風洞のコア領域で約2.0%であった。傾き G が大きくなるにつれて r.m.s. 値が大きくなっている。 $G=11.0\text{s}^{-1}$ では風洞コア領域の乱れの r.m.s. 値は $u'=0.35\text{m/s}$ 程度だから $u'/U_0=7\%$ になり乱れの効果は無視できない。平均流傾き G とシアレート β の対応は表2のようになる。

表2 G と β の対応表

G [s ⁻¹]	2.75	5.5	8.25	11
β	0.0275	0.055	0.0825	0.11

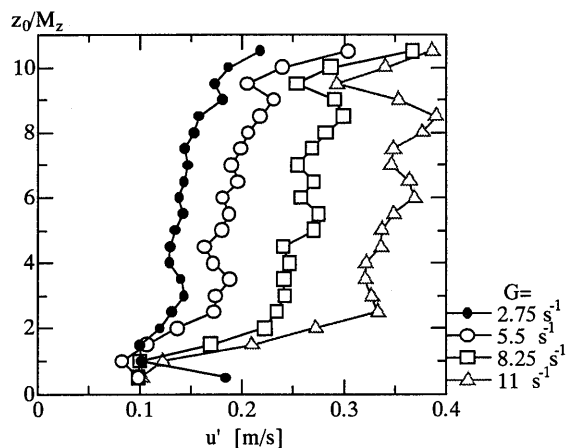


図4 風速変動 u の r.m.s. 値分布

4. 結果

4.1 背圧係数 C_{pb}

各辺長比 d/h における剪断勾配 β の増加に伴う背圧係数 C_{pb} の変化を図5に示す。 $d/h > 2.0$ の辺長比が大きな角柱ではあまり顕著な変化は見られないものの、どの d/h でも剪断勾配 β が大きくなるにつれて背圧が回

復していることから、線形剪断の効果によって渦が弱くなっているものと考えられる。しかし、 β が大きいときは乱れの強さの効果が加わるので注意を要する。

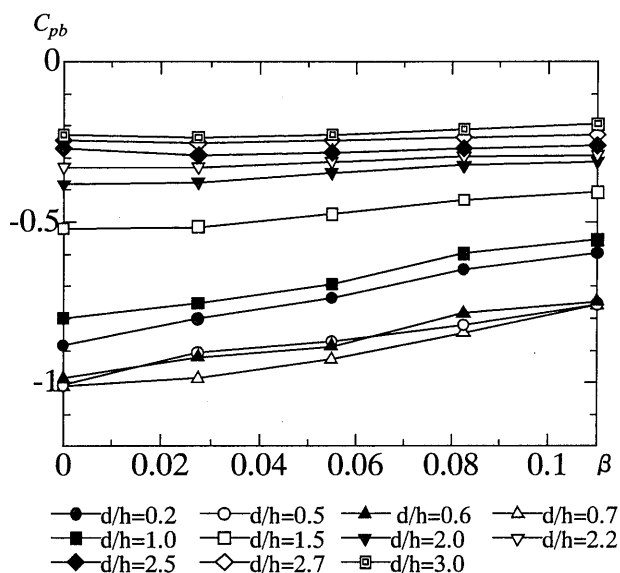


図5 背圧係数と剪断勾配

辺長比 d/h の増加に伴う背圧係数 C_{pb} の変化を図6に示す。辺長比が $d/h=0.6$ のあたりで背圧係数 C_{pb} は極小値をとり、その後 d/h の上昇とともに回復していく。過去の研究は、一様流のとき $d/h=0.6$ 付近で最も低い C_{pb} を取り(臨界面面)、渦が最も強くなると指摘している^{3), 4)}。本研究では、一様流 ($\beta=0$) のとき $d/h=0.7$ で極小値をとっているが(図中矢印 P_1)、勾配が大きくなるにつれ、その d/h の値は 0.6 (矢印 P_2) にシフトしていくことが読み取れる。これは、剪断勾配の効果と乱れの効果の両方が作用した結果と考えられる。

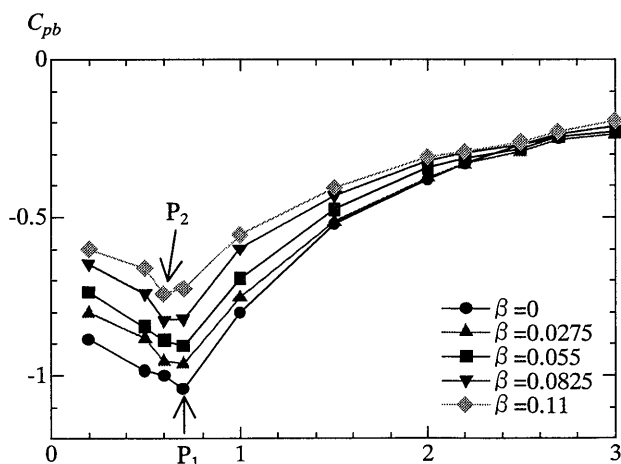


図6 辺長比 d/h と背圧係数の変化

4.2 ストローハル数 St

図7にシアレート β の増加にともなうストローハル数 St の変化を(a)に、代表として $d/h=0.6$ でのパワースペクトルの変化を(b)に示す。図7(a)より d/h が比較的小さい角柱ではシアレート β が増すにつれて、ストローハル数が低下する傾向がある。たしかに、図7(b)では $\beta=0.0825$ と $\beta=0.11$ において、ピークが低周波数にシフトしている。しかし、背圧のようにその変化は顕著ではない。 d/h が大きいときは β の変化にともないストローハル数は大きく増減し、その傾向は明らかではない。

ストローハル数 St と辺長比 d/h の関係を図8に示す。 d/h が小さい範囲 ($d/h < 2.0$) では St はいずれのシアレート β でも d/h の増加とともに減少しているが、 $d/h=2$ を越えたあたりから d/h によって増減し傾向を読み取り難い。図9は辺長比によって変動気流スペクトルがどのように変化するかを示している。 $d/h=0.6$ では明らかにピークが認められるが $d/h=2.2$ ではブロードなスペクトルになり、同定が困難になる。図8ではこのように明確に定まらないピークはシンボルを白抜きで表示した。これは、角柱前縁で剥離した気流が模型に再付着することによって、複数の流れのモードをとることに起因するものと思われる⁵⁾。

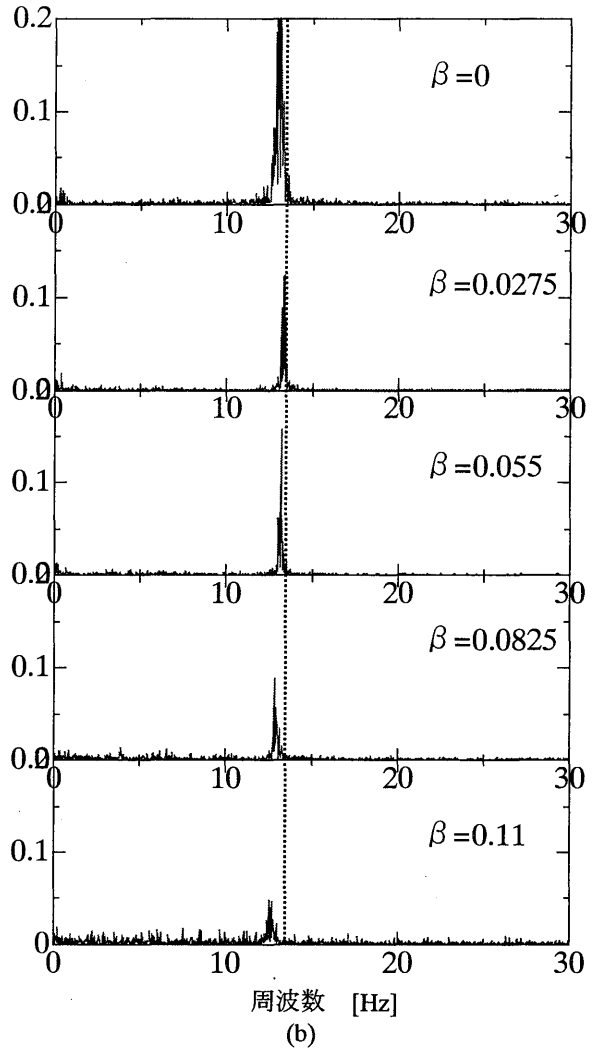


図7 β の増加に伴う St の変化 (a) とパワースペクトル ($d/h=0.6$) (b)

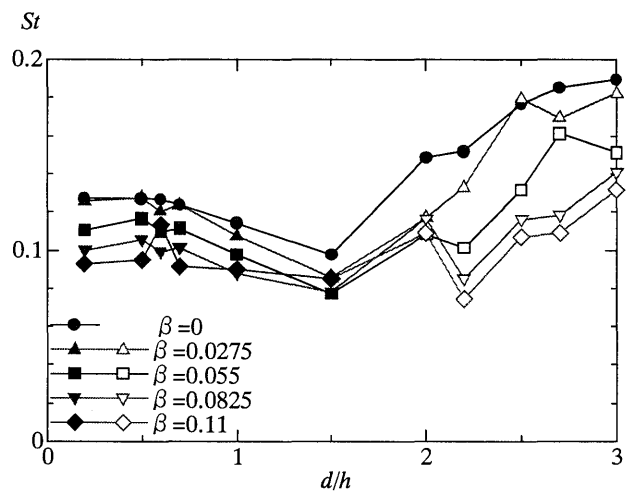
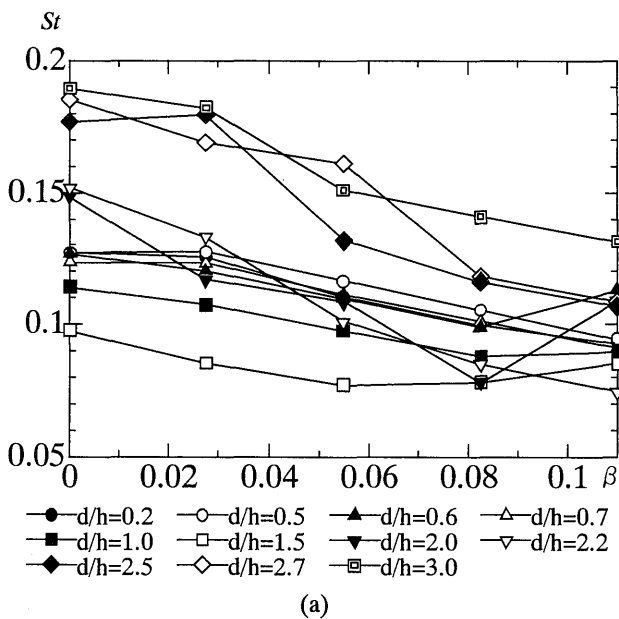


図8 d/h にともなう St 数の変化

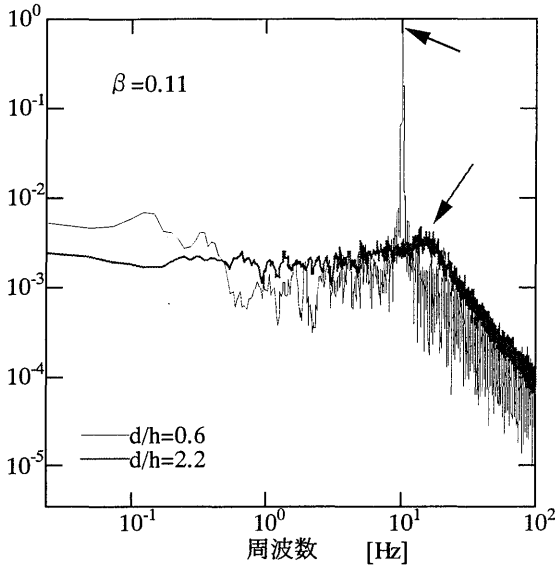


図9 $d/h=0.6$ と 2.2 でのパワースペクトル
(図中の矢印がピーク)

5 まとめ

線形剪断流中のいろいろな辺長比を持つ角柱周り流れに関する実験的研究を行なった。線形剪断が角柱からの渦放出にどのような影響を及ぼすか調べるために、流れの時間平均特性を調べた。ストローハル数と背圧係数を計測・検討した結果、以下のことが分かった

剪断勾配の効果

- ・ $d/h=0.2\sim 2.0$ では剪断勾配の増加にともない、背圧が回復する。したがって線形せん断によって渦放出が弱まる。

- ・ $d/h=0.2\sim 1.0$ ではせん断勾配の増加にともないストローハル数が低下する。

辺長比の効果

- ・ 背圧は $d/h=0.6\sim 0.7$ で極小値をとる(臨界面)。そ

の後 d/h の増加にしたがって回復する。 $d/h=0.6\sim 0.7$ 前後が β による変化が最も大きい。

- ・ $d/h=2.0$ を越えると、流れのモードが大きく変わるため、ストローハル数はばらついた値をとる。

剪断勾配の効果と乱れの影響を区別することと、低レイノルズ数で St の傾向を明らかにすることが今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、宮城弘守助手、博士前期課程1年の松尾忠輝君には多大なる助力をいただき深く感謝します。

参考文献

- 1) Kiya, M., Tamura, H., Arie, M.: Vortex shedding from a circular cylinder in moderate-Reynold-number shear flow, J. Fluid Mech. Vol. 141, pp. 721-735, 1980
- 2) 曹, 平野, 小園, 若杉: 線形せん断流中に置かれた円柱からの渦放出, 日本風工学会誌, 第 85 号, pp. 53-62, 2000
- 3) 中口, 橋本, 武藤: 日本航空宇宙学会誌, 第 16 巻, pp. 1-5, 1968
- 4) Bearman, P. W., Trueman, D. M.: An investigation of the flow around rectangular cylinders, Aero. Q. vol. 23, pp. 229-237, 1972
- 5) 岡島厚: 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, No.17, pp. 1-19, 1983