

# 迎角を持つ正方角柱からの渦放出特性に及ぼすレイノルズ数効果

小園 茂平<sup>a)</sup> · 菅 誠也<sup>b)</sup> · 平尾 歩<sup>c)</sup>

## Effect of Reynolds Number on Characteristics of Vortex Shedding from a Square Cylinder with Angle of Incidence

Shigehira OZONO, Seiya SUGA, Ayumu HIRAO

### Abstract

This paper deals with the flow around a square cylinder with different angles of incidence  $\alpha$ . Attention was focused on a range of Reynolds number below  $3.1 \times 10^4$ , for which a previous paper reported some Reynolds-number effect on Strouhal number only for  $11^\circ$ . We found that the skewness of the histogram of time series increases in keeping with Re for  $\alpha \sim 11^\circ$ . Furthermore, a distinct drop in the cross-correlation between velocity fluctuations and drag coefficient at around  $\alpha \sim 13^\circ$  suggested a remarkable difference between upper and lower vortex shedding from the rectangular cylinder.

**Keywords:** Angle of incidence, Vortex shedding, Effect of the Reynolds number, Drag coefficient

### 1. 序論

竜巻や台風に起因する構造物、車両の被害が報告され、その予測システムや災害低減対策構築の必要性が指摘されている<sup>1)</sup>。土木、建築で用いられる矩形断面構造物の耐風安定性に関して、動的空力特性に関する研究が数多く行われている。その基礎とも言うべき一様流中の静止角柱に限定しても、後流渦、時間平均および変動表面圧力および変動揚力・抗力などに関する数多くの研究が蓄積されてきた。しかし正方角柱周り、特に迎角のある場合の流れや変動圧力については不明な点が多い<sup>2)</sup>。これまでの研究で正方角柱周りの流れは迎角  $\alpha = 13^\circ \sim 14^\circ$  を境にして完全剥離型流れ、再付着型流れの2つのフローパターンに大別され、迎角  $\alpha = 11^\circ$  においてのみストローハル数のレイノルズ数依存性があること<sup>2)</sup>が報告されている。高レイノルズ数における正方角柱まわりの流れに関する研究は数値計算によるものが行われているが、実験的な研究は意外に少ない。

本研究では正方角柱のフローパターンの境界付近の流れ特性に及ぼすレイノルズ数の効果を明らかにすることを目的とし、風洞実験を行った。角柱にかかる抗力と角柱周りの流速を測定することで、フローパターンが変化する  $\alpha = 11^\circ \sim 15^\circ$  の迎角に着目し、どのようなレイノルズ数効果があるのか調べた。

### 2. 実験装置と方法

#### 2.1 実験装置

本実験では室内開放型押込式(エッフェル型)のマルチファン型風洞を使用した。この風洞の特徴は気流を多数の小さなファンで生成することである。一つのファンの直径は270mmで、縦11個×横9個=合計99個配置されており、それぞれ独立にパソコンで制御することができる。風速はモーターの回転数にほぼ比例し最大18m/sまで可能である。それぞれのファンで駆動された気流は、接続した矩形断面のダクトを通り縮流され、ハニカムで整流され測定部に流れこむ。測定断面において、平均風速は±2.0%以下の非一様性があり、乱れ強度は2.0%以下である。本風洞は8個の可搬洞をそなえており、測定部の断面の大きさは幅2540mm×高さ1800mmである。それらを組み合わせてファンの吹き出し口から最大15500mm離れた位置で測定することができる。本実験では2個の可搬洞を設置しハニカムから3500mm離れた地点に模型を設置し測定した。

図1に実験で使用した実験装置の正面図(後流側から見た図)を示す。2枚の端板(厚さ10mm、高さ1800mm)を主流方向と平行に設置した。端板は鉄枠によって補強した。端板には穴(直径20mm)を開け、模型を端板越しに両側の三分力検出器に固定した。模型は支持棒(直径6mm)とジグ(最大径75mm、高さ22mm)を介して三分力器で支持した。ジグのネジを緩めることで主流に対する模型の迎角を調節すること

a) 機械設計システム工学科 教授

b) 材料物理工学科 4年

c) 材料物理工学科 4年

ができる。

図2に実験装置の側面図を示す。模型は吹き出し口のハニカムから3500mm離れた地点の中央に設置した。二次元性を確保するために模型中心から端板の前縁(風上側)までは275mm、後縁(風下側)までは1175mmとした。端板前縁は斜めに削り、境界層の発達を抑えた。

模型は一辺 $d=75\text{mm}$ 、スパン長 $w=900\text{mm}$ の正方角柱を使用した。アスペクト比は $w/d=12.0$ である。応答性を良くするためにウッドラックで作製した。模型両端にはアルミパイプを取り付けた。アルミパイプは木製棒を通して補強した。模型と端板の間に2mmの隙間を確保した。

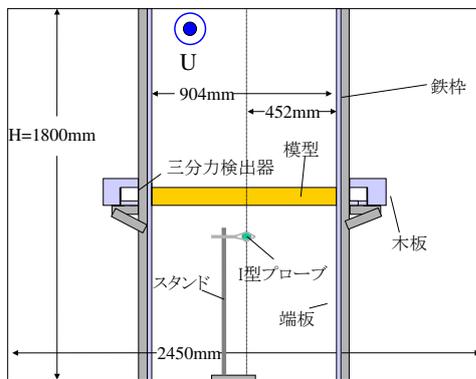


図1. 実験装置正面図.

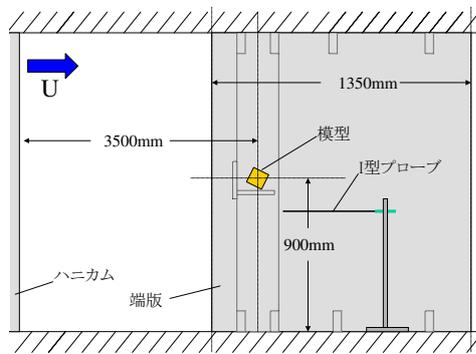


図2. 実験装置側面図.

## 2.2 測定方法

模型に加わる抗力 $F_D$  [N]と揚力 $F_L$  [N]、模型の後方の変動流速 $u$  [m/s]を測定した。流速は2、4、5、6、8、10m/sの6種類の一様流を入力し、模型設置位置での流速は $U=2.2、4.5、5.5、6.6、8.8、10.9\text{m/s}$ であった。Re数はそれぞれ $Re=Ud/\nu=1.1\times 10^4、2.2\times 10^4、2.8\times 10^4、3.3\times 10^4、4.4\times 10^4、5.5\times 10^4$ である。ここに $\nu$ は空気動粘性係数[m<sup>2</sup>/s]である。模型の迎角 $\alpha$ は $0^\circ\sim 45^\circ$ の範囲で測定した。三分力器は直流型歪増幅器(日章電機、DSA-100A)に接続

し、固有振動数のノイズをカットするために、ローパスフィルターは40Hzを通した。

I型熱線プローブを模型の中心から主流方向に105mm、鉛直下向きに170mmの位置に設置した(図3)。得られた電圧はKEYENCE社製のNR-600によりAD変換し、サンプリング周波数500Hz、データ長25000個を収集した。渦放出周波数 $f$  [Hz]は測定された変動流速 $u$  [m/s]のFFT解析によって求めた。

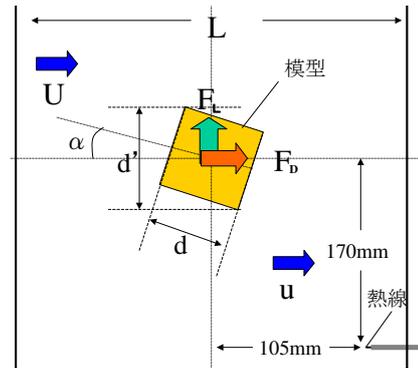


図3. 熱線の位置.

## 3. 結果

### 3.1 端板効果

本実験装置は端板の長さ $L$  [m]が模型の見付幅 $d'$  [m]に対して小さいときに、空気力が従来の値よりも急激に低下する現象が見出された。そこで端板サイズの効果に着目し、端板の長さがどれだけあればこのような遷移現象が起きないかを調べた。

図4は端板比 $L/d'$ を横軸にとり、抗力係数 $C_D$ の値を $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=45^\circ$ までプロットしたものである。抗力係数は以下の式で定義される。ここに $\rho$ は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]である。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 d} \quad (1)$$

$L/d' \simeq 4.4$ で $C_D$ の急激な低下が生じており、端板の背後からまわり込む三次元的な流れのモードに変化したことを示す。この結果から実験では端板の長さを模型の見付幅に対して十分大きくした。

### 3.2 ストローハル数

ストローハル数は以下の式で定義される。

$$St = \frac{fd}{U} \quad (2)$$

図5は迎角 $\alpha$ に伴うストローハル数の変化を示している。周波数のスペクトルに同等のピークが二つ現れた場合は、ピークの大きな方を線で結んだ。 $\alpha=0^\circ$ か

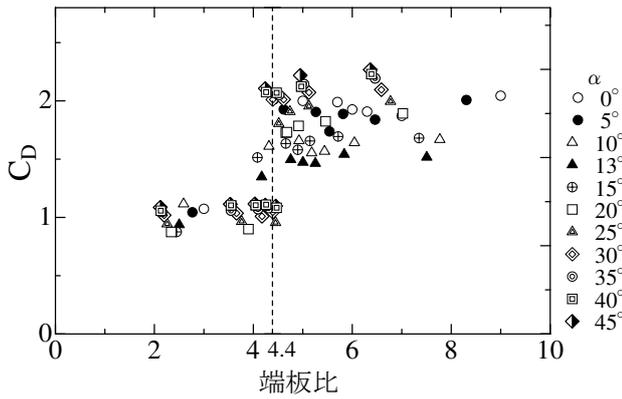


図 4. 端板比  $L/d'$  に対する  $C_D$ .

ら  $7^\circ$  まで  $St$  数は小さくなり、 $\alpha = 7^\circ$  から  $9^\circ$  にかけて急激に大きくなる。 $\alpha = 13^\circ$  で  $St$  数は最大値を示したのち  $\alpha = 45^\circ$  まで単調に減少した。既往の実験結果<sup>2,3,4)</sup>と比較すると  $\alpha = 13^\circ$  から  $45^\circ$  で小さな値をとったが、傾向は一致した。

図 6 はレイノルズ数に伴うストローハル数の変化を示している。 $\alpha = 11^\circ$  では  $Re = 1.1 \times 10^4 \sim 3.3 \times 10^4$  の範囲でレイノルズ数の増加に伴い  $St$  が減少し、レイノルズ数依存性が見られた。これは五十嵐の実験結果<sup>2)</sup>と同様であった。

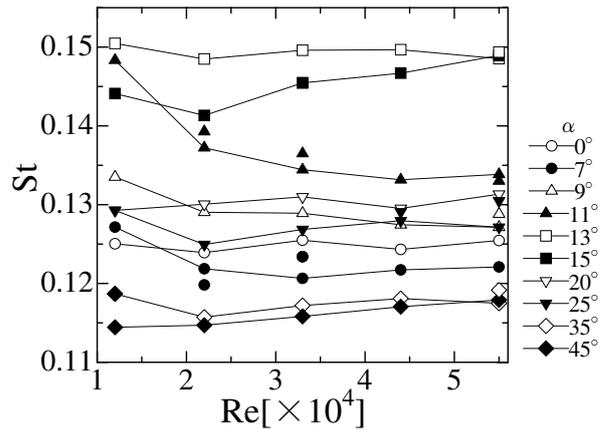


図 6.  $Re$  数に伴う  $St$  数の変化.

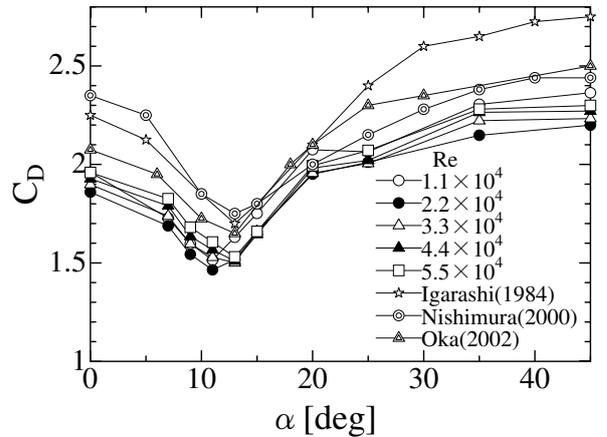


図 7. 迎角  $\alpha$  に伴う平均抗力係数の変化.

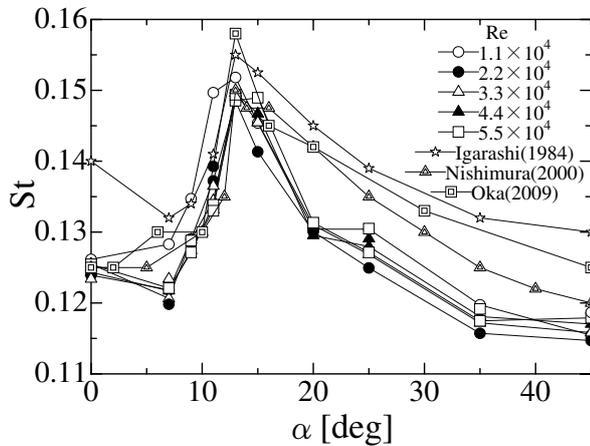


図 5. 迎角  $\alpha$  に伴う  $St$  数の変化.

### 3.3 平均抗力係数

図 7 は迎角  $\alpha$  に伴う平均抗力係数の変化を示している。 $\alpha = 0^\circ$  から  $11^\circ$ 、 $13^\circ$  にかけて  $C_D$  は減少し、 $Re = 1.1 \times 10^4$ 、 $2.2 \times 10^4$  は  $\alpha = 11^\circ$ 、 $Re = 3.3 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$  は  $\alpha = 13^\circ$  において最小値を示した、最小値からは  $C_D$  が急激に増加し、 $\alpha = 20^\circ$  以降は緩やかに増加している。既往の実験結果<sup>2,3,5)</sup>と比較すると全体的に小さな値をとったが、傾向は一致した。

### 3.4 変動抗力の歪度

抗力の時刻歴のヒストグラムから、ヒストグラムの歪度 (skewness) が迎角  $\alpha$ 、レイノルズ数によってどのように変化するかを調べた。ここに  $C'_D$  は抗力係数の rms 値である。

$$Sk = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_{Di} - \overline{C_D}}{C'_D} \right)^3 \quad (3)$$

図 8 は迎角  $\alpha$  に伴う  $Sk$  の変化を示している。 $\alpha = 0^\circ$ 、 $45^\circ$  の対称な場合はレイノルズ数によるばらつきはあるものの、 $Sk$  は 0 に近い値を示している。 $\alpha = 9^\circ$ 、 $11^\circ$  はばらつきがあり、レイノルズ数によっては大きな値を示している。 $\alpha = 9^\circ$  から  $25^\circ$  にかけて増加し、 $\alpha = 20^\circ \sim 25^\circ$  で最大値をとった。 $\alpha = 35^\circ$ 、 $45^\circ$  は  $Sk$  のばらつきが大きく、 $Sk = 0 \sim 0.5$  程度の値を示した。

図 9 はレイノルズ数に伴う  $Sk$  の変化を示している。 $\alpha = 9^\circ$ 、 $11^\circ$  はレイノルズ数増加に伴い  $Sk$  が増加している。ばらつきが大きかった  $\alpha = 35^\circ$ 、 $45^\circ$  はレイノルズ数の変化に伴う一貫した変化はみられなかった、

図 10~13 はいろいろな迎角のときの抗力の時刻歴とヒストグラムである。 $\alpha = 0^\circ$  のとき抗力の時刻歴は上下に偏ることなく変動しており、ヒストグラムに歪

みはほとんど見られなかった。 $\alpha = 11^\circ$  のときは振幅の大きさの変動は小さいが、レイノルズ数が大きくなるほどヒストグラムが歪んだ。 $\alpha = 20^\circ$  のときの時刻歴は抗力が間欠的に負側に偏って変動する区間があり、ヒストグラムは負側に歪んだ。 $\alpha = 45^\circ$  ときも抗力が間欠的に負側に偏って変動する区間があるが  $\alpha = 20^\circ$  ほどの偏りではない。

図 14 は  $\alpha = 11^\circ$ 、 $Re = 1.1 \times 10^4$  と  $Re = 5.5 \times 10^4$  のときの抗力と流速の時刻歴を拡大したものである。いずれのレイノルズ数でも流速と抗力は逆位相である。抗力が大きくなるときに二つのピークに分かれていることが分かる。抗力のピークを子細に見ると、 $Re = 5.5 \times 10^4$  では一方のピークが負側に偏り、歪みを大きくしている。

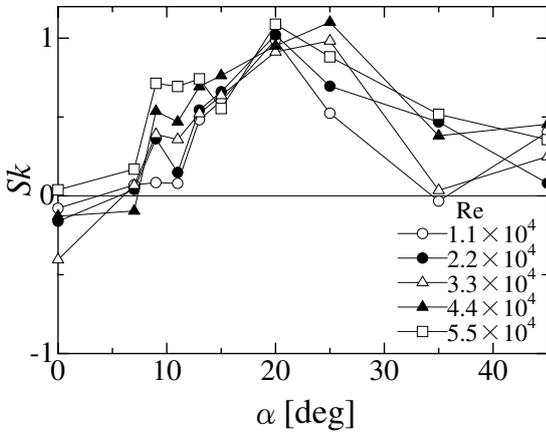


図 8. 迎角  $\alpha$  に伴う  $Sk$  の変化.

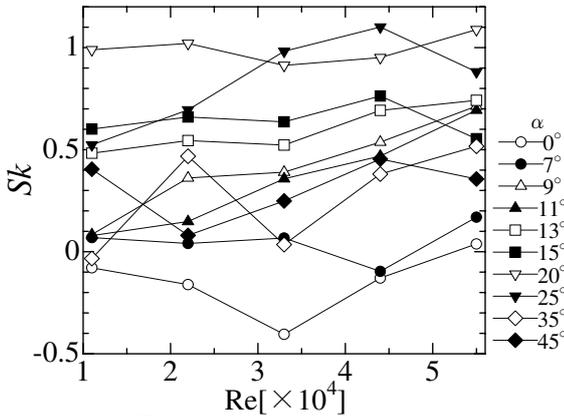


図 9.  $Re$  数に伴う  $Sk$  の変化.

### 3.5 抗力係数と流速の相互相関係数

後流下側の変動流速と抗力の相互相関係数  $r$  を次式で計算し、迎角とレイノルズ数によって  $r$  がどのように変化するかを調べた。 $u'$  は流速  $u$  の rms 値である。

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(C_{Di} - \overline{C_D})(u_i - \bar{u})}{C'_D u'} \quad (4)$$

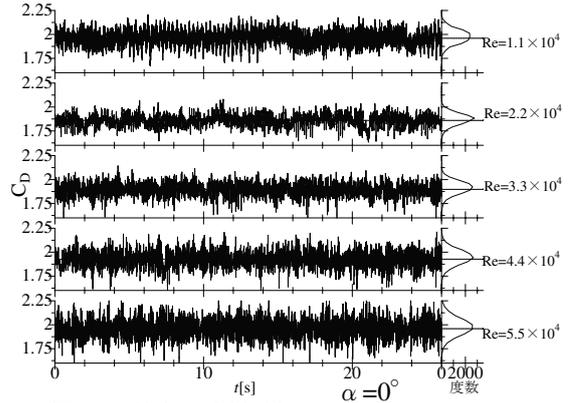


図 10. 抗力の時刻歴とヒストグラム,  $\alpha = 0^\circ$ .

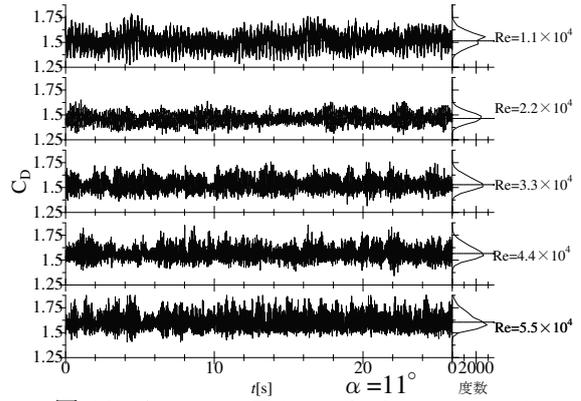


図 11. 抗力の時刻歴とヒストグラム,  $\alpha = 11^\circ$ .

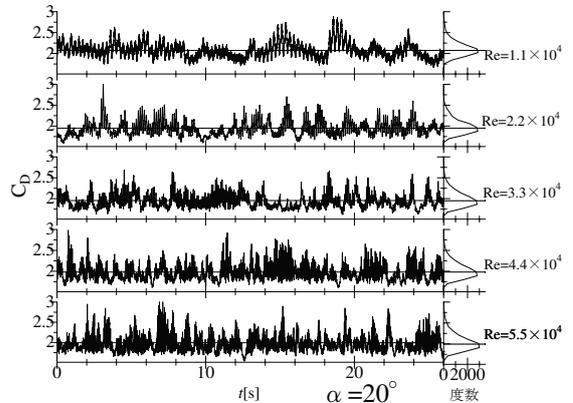


図 12. 抗力の時刻歴とヒストグラム,  $\alpha = 20^\circ$ .

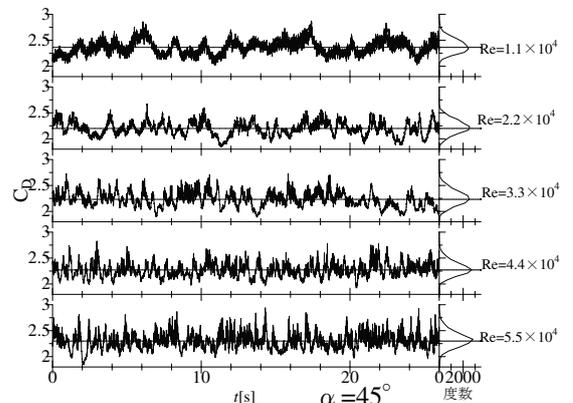


図 13. 抗力の時刻歴とヒストグラム,  $\alpha = 45^\circ$ .

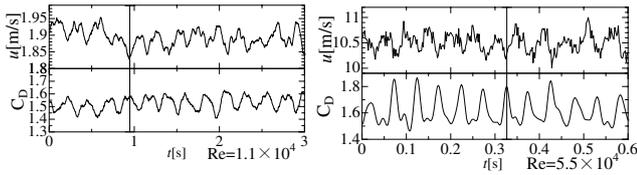


図 14. 抗力と流速の時刻歴,  $\alpha = 11^\circ$ .

図 15 は迎角  $\alpha$  に伴う相互相関係数  $r$  の変化である。 $\alpha = 0^\circ$ 、 $Re = 1.1 \times 10^4$  を除き、いずれも負の相関をとった。これは抗力が大きくなる時に角柱後下側の流速が小さくなることを示す。 $\alpha = 13^\circ$ 、 $45^\circ$  ではばらつきが小さい。 $\alpha = 13^\circ$  はいずれのレイノルズ数でも負の相関が強くなった。

図 16 はレイノルズ数に伴う相互相関係数  $r$  の変化である。 $\alpha = 7^\circ$ 、 $9^\circ$  は右下がり、 $\alpha = 13^\circ \sim 25^\circ$  は右上がりのグラフを示した。熱線プローブの位置と模型の剥離域の距離や速度変動の大きさがレイノルズ数の大きさによって変化したためと考えられる。

図 17 にいろいろな迎角の時の流速と抗力の時刻歴を示す。対称流れである  $\alpha = 0^\circ$ 、 $45^\circ$  では流速は抗力の 2 倍の周期で変動しており、円柱などと同様である。一方、非対称流れの  $\alpha = 13^\circ$ 、 $20^\circ$  では流速と抗力が同じ周期で変動しており、二つのピークが合成され、周期が 2 倍になるように見られる。これは、模型上辺の渦と下辺の渦放出の位相差が小さくなっていることが原因と考えられる。このことは両者の負の相関を強めている。

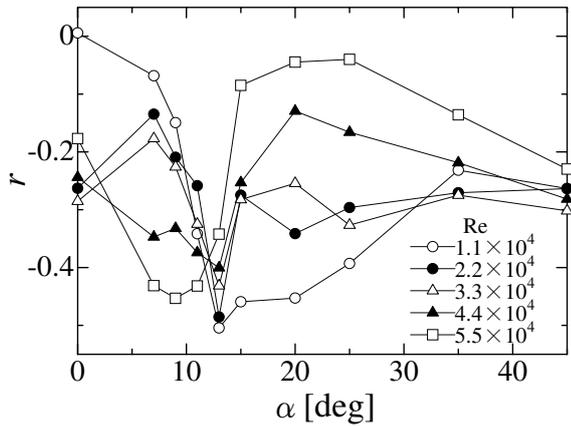


図 15. 迎角  $\alpha$  に伴う抗力係数と流速の相関係数.

### 3.6 抗力と揚力のリサージュ

図 18~22 はいろいろな迎角の時の揚力と抗力の時刻歴から求められたリサージュである。揚力係数は以下の式で定義される。

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 d} \quad (5)$$

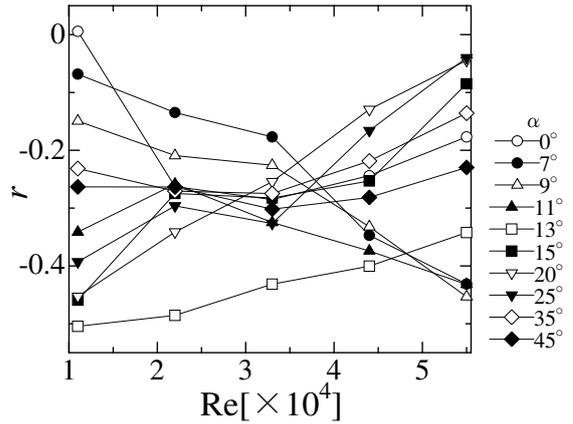


図 16. 迎角  $\alpha$  に伴う抗力係数と流速の相関係数.

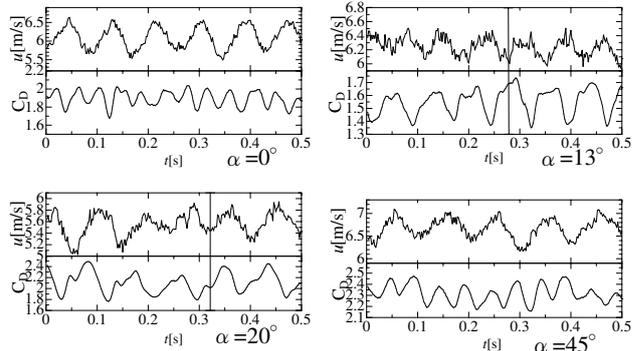


図 17. 抗力と流速の時刻歴,  $Re = 3.3 \times 10^4$

対称な場合の  $\alpha = 0^\circ$ 、 $45^\circ$  では揚力は抗力の 2 倍の周期で変動しており、リサージュはよく知られた 8 の字型になった。非対称な場合の  $\alpha = 10^\circ$ 、 $13^\circ$ 、 $20^\circ$  では揚力と抗力は同周期で変動しており、リサージュは逆涙滴型になった。再付着が起きると思われる  $13^\circ$  と  $20^\circ$  ではリサージュの下の部分は上の部分に比べて抗力が大きく出ている。揚力が負のときに抗力が大きい値をとり、模型上辺に比べて下辺で放出される渦が強く巻き込んでいる可能性がある。

ストローハル数にレイノルズ数効果が現れた  $\alpha = 11^\circ$  ではレイノルズ数が大きくなるにしたがって、再付着流れが生じやすくなり、上下の渦の巻き込みの強さの非対称性が強くなることを示唆している。

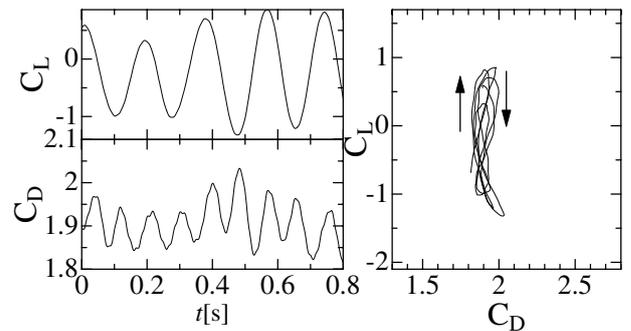


図 18. 揚力と抗力のリサージュ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $Re = 2.8 \times 10^4$ .

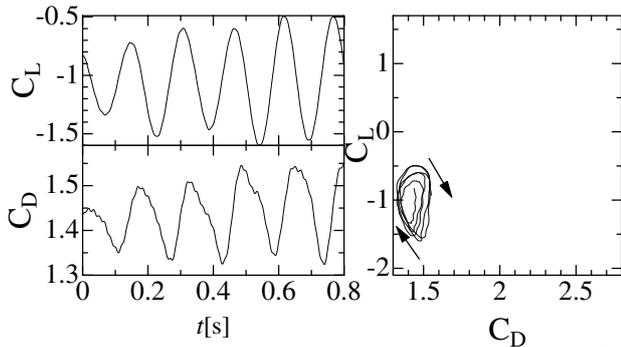


図 19. 揚力と抗力のリサージュ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $Re = 2.8 \times 10^4$ .

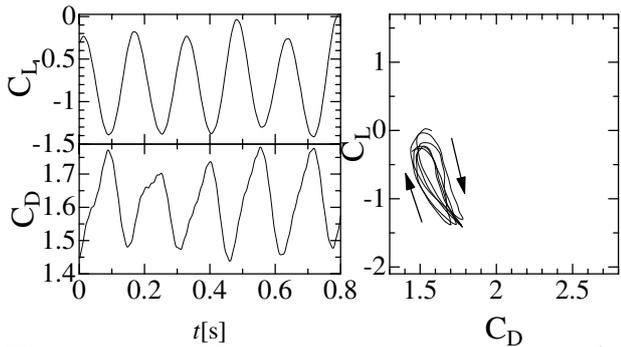


図 20. 揚力と抗力のリサージュ,  $\alpha = 13^\circ$ ,  $Re = 2.8 \times 10^4$ .

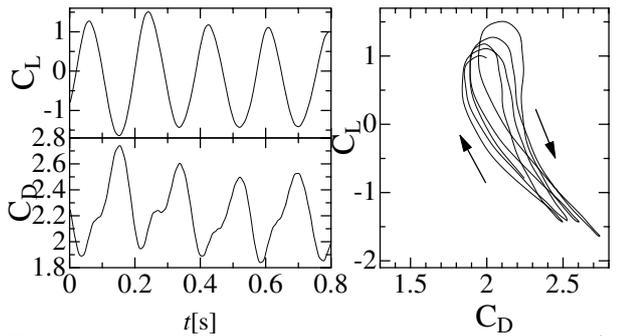


図 21. 揚力と抗力のリサージュ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $Re = 2.8 \times 10^4$ .

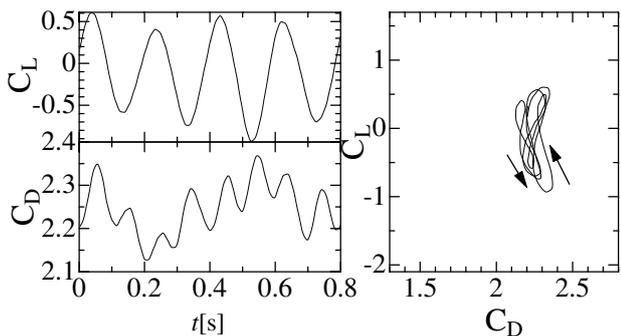


図 22. 揚力と抗力のリサージュ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $Re = 2.8 \times 10^4$ .

#### 4. 結論

$Re = 1.1 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$  における迎角を持つ正方形柱の渦特性を風洞実験で調べ、次のことが分かった。

(1) 迎角  $11^\circ$  において、 $Re = 1.1 \times 10^4 \sim 3.3 \times 10^4$  の範囲ではレイノルズ数が増加するにつれて、ストローハル数が減少した。

(2) 迎角  $11^\circ$  付近において、レイノルズ数が増加す

るにつれて、抗力の時刻歴のヒストグラムの歪度が増加した。

(3) 迎角  $13^\circ$  において、いずれのレイノルズ数でも後流下側の変動流速と抗力の負の相関が強くなった。

(4) 迎角  $11^\circ$  では、レイノルズ数が増加するにつれて、再付着が生じやすくなり、上下の渦の非対称性が強くなることが示唆される。

#### 謝辞

修士 2 年生の堀内佑太氏に研究のご協力を頂きました。ここに深謝します。

#### 参考文献

- 1) 白土博通, 前田耕治, 加藤嘉昭, 高杉祐二, 佐々木治: 非定常空気力特性の実験的解明 - その 2 二次元角柱の作用する非定常空気力特性 -, 日本風工学会誌第 35 巻 2 号, pp.130-138, 2010.
- 2) 五十嵐保: 正方形柱まわりの流れ特性, 日本機械学会論文集 (B 編)50 巻 449 号, pp.210-218, 1984.
- 3) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元静止正方形角柱の変動空気力特性, 第 16 回風工学シンポジウム, pp.255-260, 2000.
- 4) S. Oka, and T. Ishihara: "Numerical study of aerodynamic characteristics of a square prism in a uniform flow" J. Wind Eng. Aerodyn. vol.97, pp.548-559, 2009.
- 5) 岡新一, 石原孟, 藤野陽三: 一様流中に置かれた正方形角柱の空力特性と表面風圧に関する数値予測, 第 17 回風工学シンポジウム, pp.207-212, 2002.