

# 隅切を有する正方形角柱の空力特性に与える溝深さの影響

小出 昌和\*<sup>1</sup> 岡永 博夫\*<sup>2</sup> 青木 克己\*<sup>3</sup>

## Effect of Grooves on the Aerodynamics around Corner-cut Square Cylinder

by

Masakazu KOIDE\*<sup>1</sup>, Hiroo OKANAGA\*<sup>2</sup> and Katsumi AOKI\*<sup>3</sup>

(received on September 30, 2006 & accepted on January 24, 2007)

### Abstract

In this paper, we describe the drag reduction of square cylinders with corner cuttings and with grooves, such as riblets, on the surface. We carried out wind-tunnel tests for the measurements of the drag coefficient and the surface pressure acting on a square section of the cylinders with chamfered corners and with grooves. In addition, the flow visualization by spark tracing was carried out. From the results, the drag coefficient decreased as the depth of grooves increased. Compared with the square cylinder without grooves, the drag reduction of the square cylinder with grooves of 10% depth is about 10%, the drag reduction of the square cylinder with chamfered corners is about 30%, and the drag reduction of the square cylinder with chamfered corners and with grooves of 10% depth is about 35%.

**Keywords:** Square cylinder, Grooves, Corner cuttings, Drag coefficient, Pressure distribution, Spark-tracing method

### 1. 緒論

構造物や構造部材の基本断面形状の一つである正方形断面形状を有する物体周りの流動特性は以前から多くの人により研究が進められている。建築分野、特に耐風構造分野において多くの実験、解析が報告されている。

角柱周りの剥離流れの制御を目的として Naudascher<sup>[1]</sup>は角柱の周りやコーナー部に様々な形状をつけた実験的解析を行っている。角柱の形状と抗力の関係についての報告として溝田<sup>[2]</sup>は角柱のアスペクト比を変化させた場合の抗力係数の変化についてまとめている。角柱の抗力係数はアスペクト比がおおよそ 0.62 付近で最大になることを明らかにしている。抗力低減あるいは後流領域の制御を目的とした研究として田村<sup>[3]</sup>は正方形角柱のコーナー部に 1/6 の隅切や隅丸を施し、抗力低減への影響を検討しているが、これによると隅切角柱の抗力係数はおおよそ 1.4、隅丸角柱の場合はおおよそ 1.3 になることを報告している。倉田<sup>[4]</sup>も同様、正方形角柱のコーナー部形状を変化させることにより抗力低減を図っている。彼らは切り落とし形状をコーナー部に用いているが、切り落とし形状で抗力係数が、一般に円柱の抗力係数 1.2 よりも低くなることを明らかにしている。このように柱状物体に対する抗力低減およびその流動特性は種々の観点から研究が行われており、その組み合わせでさらなる効果が期待される。一方、構造物の基本形状として円柱も挙げられるが、円柱の周囲に軸方向の溝をつけることにより抗力低減、後流領域の制御を目的とした実験が青木<sup>[5][6]</sup>によって

行われている。これは円柱の表面構造を変化させることで抗力低減を狙ったものである。しかしながら角柱の表面構造を変化させて抗力低減を図った報告はあまりない。角柱表面に溝を付ける場合、断面と直角に付ける方向（軸方向）と正方形の断面に沿って付ける方向（横方向）とが考えられる。著者らは予備実験において正方形角柱の縦方向に溝を付けた角柱の抗力低減について調べたが、角柱では流れがコーナー部において剥離してしまうために縦溝が流れに及ぼす影響はほとんどないことが確認した。一方柱状の横溝に構造物について注目してみると、それらの多くにはベランダ等がついている。このベランダ等は横溝のような表面に溝を付けた、すなわち凹みを付けた構造物としてみなすことができる。そこで著者らは正方形角柱と 10% の隅切を施した隅切角柱に流れに平行な横溝を施した溝付角柱の抗力について報告してきた<sup>[7]</sup>。その報告では横溝を深くしていくごとに抗力係数が低くなることを実験的に明らかにしたが、抗力低減のメカニズムについては言及していない。

そこで本研究は正方形角柱の抗力低減の基礎研究として、正方形角柱に隅切、横溝を施した場合の流動特性ならびにそのメカニズムを実験的に明らかにすることを目的としている。

### 2. 実験方法

実験は吸込み形風洞を用いて行った。風速は 15~20m/s ( $Re = 4.5 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^5$ ) の範囲を用いている。この風速の範囲における風洞の乱れ度はおおよそ 0.3% である。抗力の測定は日章電機株式会社製の歪型 3 分力測定器を用いた。本実験では流れ方向を X 軸、鉛直方向を Z 軸と定義している。X 軸方向の歪量に相当した流体力 D を計測しそれを抗力係数  $C_D$  に無次元化して比較を行った。実験

\* 1 東海大学大学院工学研究科機械工学専攻院生

\* 2 東海大学工学部機械工学科助教授

\* 3 東海大学工学部機械工学科教授

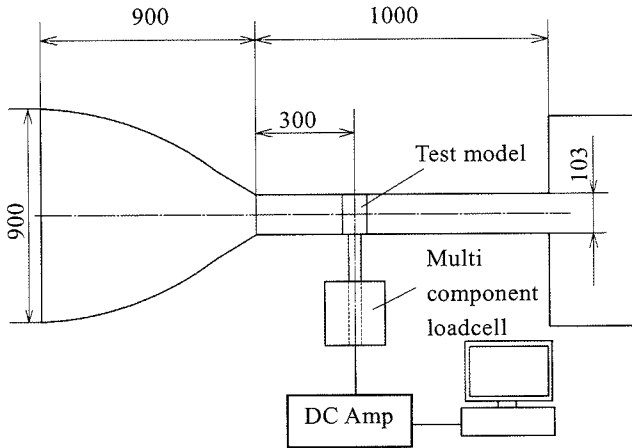


Fig.1 Experimental apparatus

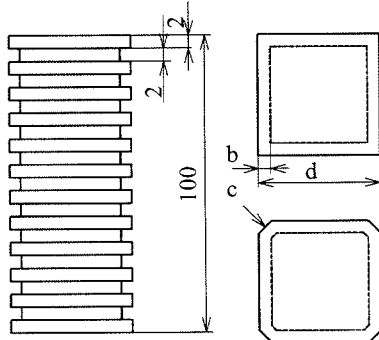


Fig.2 Test models for drag measurement

Table.1 Parameters for test models

Type	Shape	Depth of Grooves b (%)
S0	Square	0
S1	Square	2.5
S2	Square	5.0
S3	Square	7.5
S4	Square	10.0
C0	Corner-cuttings	0
C1	Corner-cuttings	2.5
C2	Corner-cuttings	5.0
C3	Corner-cuttings	7.5
C4	Corner-cuttings	10.0

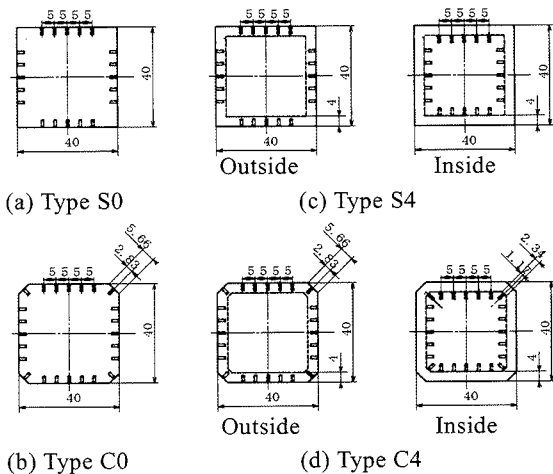


Fig.3 Position of pressure measurement holes

装置の概略図を図1に示す。

抗力測定用供試角柱は ABS 樹脂製の中実正方形角柱で、端面板を用いることで Z 軸方向に無限に長い 2 次元角柱を想定している。端面板と供試角柱とのすき間は角柱の上下におよそ 1.5mm で、抗力係数に影響しないことを確認している。図 2 に抗力測定用供試角柱の概略図を示す。1 辺の長さ  $d=40\text{mm}$ 、高さ  $H=100\text{mm}$  である。隅切角柱の隅切量  $c$  を  $4\text{mm}$  ( $c/d=10\%$ ) で一定としている。正方形角柱、隅切角柱ともに溝深さ  $b=0\text{mm}$ ,  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$  ( $b/d=0\%$ ,  $2.5\%$ ,  $5.0\%$ ,  $7.5\%$ ,  $10.0\%$ ) の溝深さを施したものを用意し抗力を測定する。角柱の形状についてまとめたものを表 1 に示す。

図 3 は角柱の表面圧力測定に用いた供試角柱の一部であり表面圧力測定点を示している。図に示したように角柱の一边に 5 つ、隅切角柱のコーナー部には 1 つ、測定孔を設けてある。測定孔は上下に設置された端面板の影響がでないように角柱のほぼ中央に設置してある。溝深さは 10% のもののみで測定している。測定孔は図 4 のように圧力測定部に内径  $1\text{mm}$  の穴をあけ、またその穴を開通させるため角柱底面から内径  $2.5\text{mm}$  の穴をあけて、その穴から  $500\text{mm}$  程度の導圧チューブを接続している。圧力は導圧チューブから孔切替装置を介してマンオメータを用いて測定した。

抗力係数  $C_D$ 、圧力係数  $C_P$  及びレイノルズ数  $Re$  は以下の式を用いて求める。

$$C_D = \frac{2D}{\rho AU^2} \dots\dots\dots (1) \quad C_P = \frac{2(P - P_0)}{\rho U^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $D[\text{N}]$  は 3 分力測定器より測定される X 方向の歪量から算出した抗力、 $P[\text{Pa}]$  は角柱表面の圧力、 $P_0[\text{Pa}]$  は角柱真横の風洞側面の圧力、 $\rho [\text{kg/m}^3]$  は空気密度、 $A [\text{m}^2]$  は測定物体の溝部分を考慮した投影面積、 $U [\text{m/s}]$  は平均流速、 $d[\text{m}]$  は角柱の代表長さ、 $\nu [\text{m}^2/\text{s}]$  は動粘度である。

角柱周りの流れを可視化するために火花追跡法を用いて可視化を行った。図 5 にその概略図を示す。火花追跡法はパルスジェネレーターと高電圧パルストランスを用いた。パルスジェネレーターでは出力パルスの周期と本数が任意に設定することができる。また高電圧パルストランスではこの装置に内蔵されている 2 次コイルの組み合わせにより高電圧パルスの電圧を設定することができる。これらの高電圧パルスの電圧は電極間距離や主流速度などの条件に最も合う最適なものを選ぶ必要が

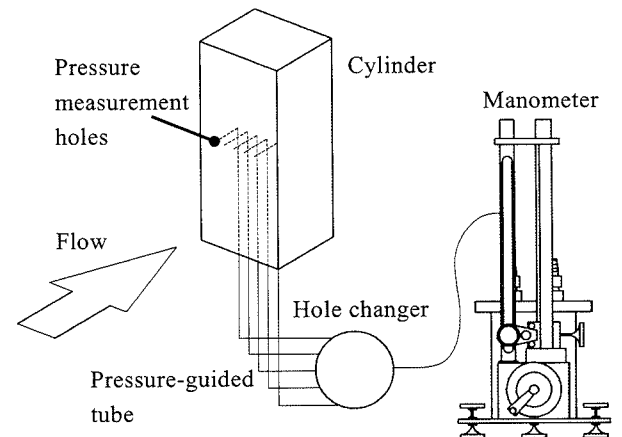


Fig.4 Apparatus for surface pressure measurement

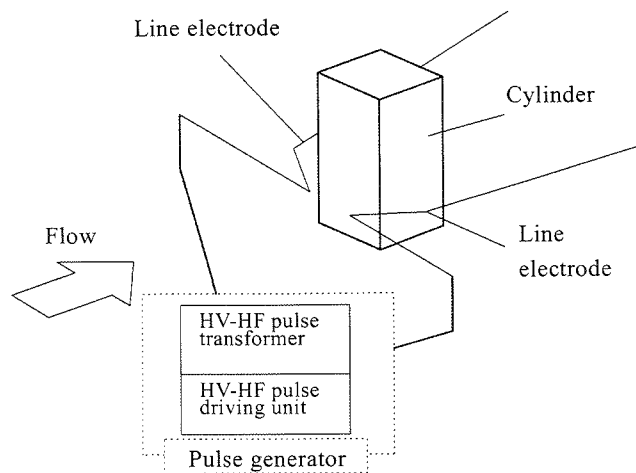


Fig.5 Apparatus for spark tracing

Table.2 Characteristics of high voltage pulse generator

Maker	SUGAWARA LABORATORY.S.INK
Driving unite type	PG-305B/MM-305A <sub>A</sub>
Pulse transformer type	UPT-300A
Pulse supply	AC100V, 50~60Hz, 1kW
Pulse frequency range	1Hz~50kHz
Output voltage	20kV <sub>p</sub> , 50kV <sub>p</sub> , 100kV <sub>p</sub> , 125kV <sub>p</sub> , 250KV <sub>p</sub>
Pulse width	0.5~1.2 μ sec
Input pulse energy	0.1, 1.25, 3.5, 4 joule/pulse
Pulse number	200max, at 0.1joule/pulse
Trigger delay time	1 μ ~999, 999 μ sec at 1 μ s, step
Trigger signal	0.5-10V <sub>p</sub> , pulse mechanical contact
Oscillator accuracy	5 × 10 <sup>-5</sup>

ある。本研究では株式会社菅原研究所のパルスジェネレーター、高電圧パルストランスを使用している。これらの装置の概要を表2に示す。電極の設置方法は線状電極とし、電極には直径が0.7mmのタングステンワイヤーを用いた。測定条件はパルス間隔150[μs]、パルス本数50[本]、電圧250[kV]である。

### 3. 実験結果

図6、図7に3分力測定器より得られた正方形角柱、隅切角柱の抗力係数とレイノルズ数の関係を示す。正方形角柱の抗力係数は今回実験を行ったレイノルズ数の範囲では、およそ2.0になっていてレイノルズ数にほとんど依存していないことが分かる。正方形角柱は一般に10<sup>6</sup>まで抗力係数は2.0付近で安定していることが知られており本実験の妥当性が証明できる。隅切角柱の抗力係数も今回実験を行ったレイノルズ数の範囲ではレイノルズ数にほとんど依存していないということが分かった。正方形角柱、隅切角柱ともに今回実験を行った範囲ではレイノルズ数にほとんど影響しないので、形状ごとに整理し比較を行った。図8は溝深さと抗力係数の関係を示している。プロットは本実験より得られた各形状の抗力係数を全て平均したものを表している。

溝の影響について着目すると正方形角柱の抗力係数は溝の深さが2.5%、5.0%、7.5%、10.0%と増えていくにつれて低くなっており、特に10.0%の溝深さの場合ではおよそ10%の減少が見られた。隅切角柱では溝深さが2.5%~7.5%の範囲では溝を深くしていくにつれて抗力係数は正方形角柱ほどではないが溝を深くしていくごとに徐々に抗力係数が低くなっていくことが分かる。溝深さが10.0%の隅切角柱の抗力係数は7.5%の溝深さの抗力係数からあまり減少していない。

溝なしの隅切角柱の正方形角柱に対する抗力係数は30%の減少しており、10%の溝付隅切角柱の場合は35%の減少である。しかし溝なしの隅切角柱からの減少量は7%で正方形角柱に同様の溝深さを施したType S4の10%の減少量と比べると溝による抗力低減効果が小さい。これは溝による抗力低減効果よりも隅切による影響が大きいためではないかと推察される。

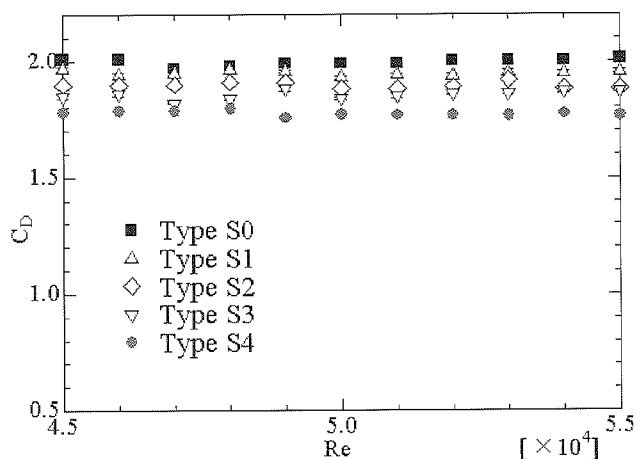


Fig.6 CD of square cylinders

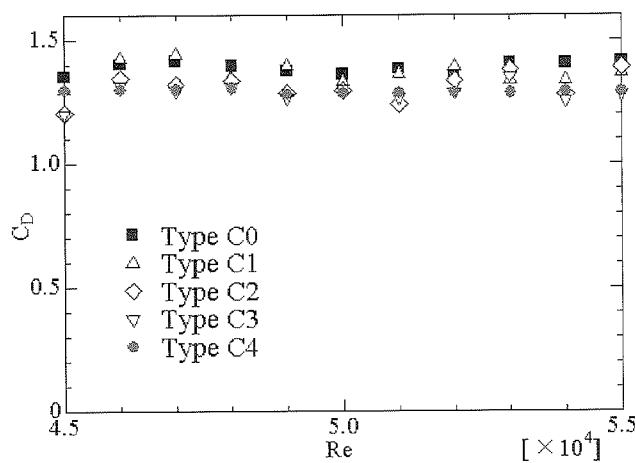


Fig.7 CD of corner-cuttings cylinders

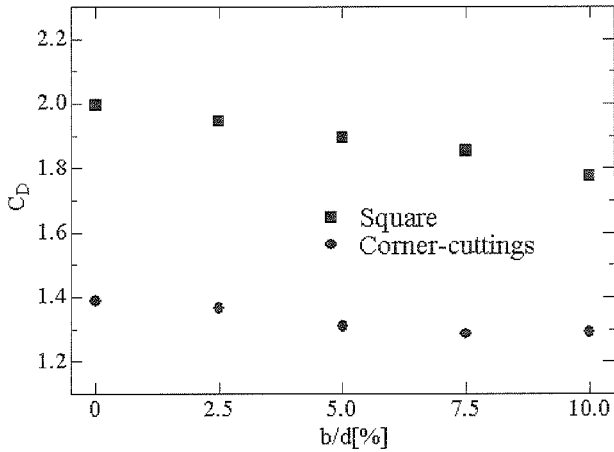


Fig.8 Relationship between  $C_D$  and grooves

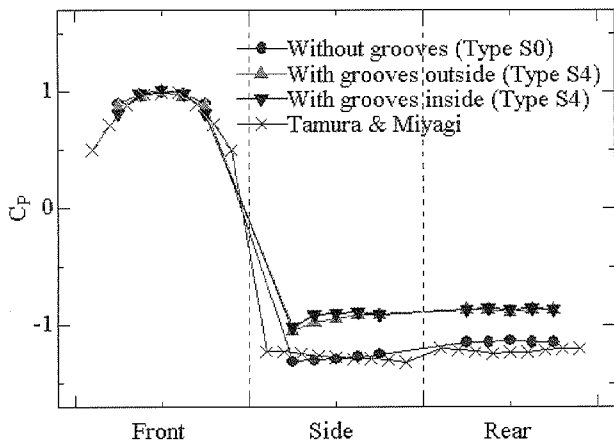


Fig.9 Pressure distribution of square cylinders

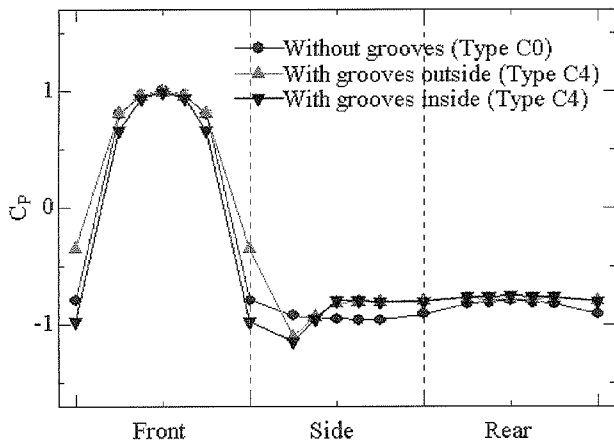


Fig.10 Pressure distribution of corner-cuttings cylinders

Table.3  $C_D$  calculated from pressure distribution

Shape	$C_D$
Square without grooves	2.0
Square with grooves	1.8
Corner-cuttings without grooves	1.4
Corner-cuttings with grooves	1.3

図9, 図10は正方形角柱, 隅切角柱周りの圧力分布図を示す。正方形角柱の圧力分布を見てみると, 同様の実験を行っている田村らとほぼ同じ値を表しており本実験の妥当性を示している。また溝付正方形角柱の圧力分布を見てみると溝の内側, 外側で大きな違いは見られなかった。溝の影響について注目すると角柱の側面から背面にかけて溝の場合は溝なしの場合と比べて圧力係数の回復が見られた。これが抗力係数の減少に影響していると考えられる。

隅切角柱に注目してみると, 溝がある場合は正方形角柱ほど圧力の回復は見られなかったが同様に圧力が回復していることが分かる。また溝の有無によって前面のコーナー部に圧力係数の大きな変化が見られる。

これらの圧力分布を積分し抗力係数を算出した結果を表3に示す。測定点が少なく参考程度にしかならないがこの値と三分力測定器を用いて行った実験との結果を比較するとほぼ似た値を示しており, 抗力低減の理由を示しているものと考えられる。

次に火花追跡法による溝なし正方形角柱周りの可視化結果を図11に載せてあるが, それらから正方形角柱の後流部において火花が大きく乱れており, 流れの逆流が起こっていることも確認できる。また流れが角柱の左右に大きく振られていることが分かる。これより角柱周りでは流れが複雑であることが分かる。またその他の角柱周りの流れの可視化結果を図12に示す。(a)は溝なし正方形角柱, Type S0, (b)は7.5%溝の正方形角柱, Type S3, (c)は溝なし隅切角柱, Type C0, (d)は7.5%溝付隅切角柱, Type C3の可視化画像の一例を表している。流れが角柱の左右に大きく振れるため数枚の写真では流れの変動をとらえきれない。そこで図13のように角柱前面から流れが剥離する角度を剥離角 $\theta_A$ と定義し, それぞれの可視化画像から剥離角を読み取り比較を行った。その結果を図14に示す。プロットは各形状の剥離角の平均値を示している。図中のエラーバーからも流れが角柱の左右に大きく振れ, 流れが複雑であることが推察できる。正方形角柱 Type S0, S3 と比べて隅切角柱 Type C0, C3の方が剥離角の平均値が小さくなっていることが分かる。

溝による剥離角への影響を見てみると Type S0 は約  $47^\circ$ , Type S3 は約  $42^\circ$  であり剥離角が小さくなっている。隅切角柱も同様に比較を行うと Type C0 は約  $32^\circ$ , Type C3 は約  $28^\circ$  であり正方形角柱同様, 溝を付けた方が剥離角が小さくなっていることが分かる。しかしながら剥離角のエラーバーが大きく, また測定に用いた可視化画像も約10枚であるため今後さらなるデータの構築が必要であるが, 溝を施すことにより剥離角が小さくなる傾向は見てとれる。

次に溝による角柱の後流領域への影響について調べるために図13のような角柱後部の剥離幅 $l$ が最も大きかった長さを剥離幅と定義しこれを比較する。各形状の剥離幅についてまとめたものを表4に示す。値は可視化画像から読み取った平均値であり, また角柱一辺の長さの比で表してある。剥離幅は正方形角柱が最も大きく25%であり, 次に溝付の正方形角柱の20%, 隅切角柱は溝の有無に関わらずともに15%であり, 隅切角柱において溝による剥離幅への影響は確認できなかった。この表から正方形角柱に溝を施すことにより剥離幅が小さくなるが, 隅切角柱では溝が剥離幅へ及ぼす影響はほとんどないことが分かった。これは前述したように隅切角柱では溝よりも隅切の効果の方が影響が大きいことが理由だと考えられる。



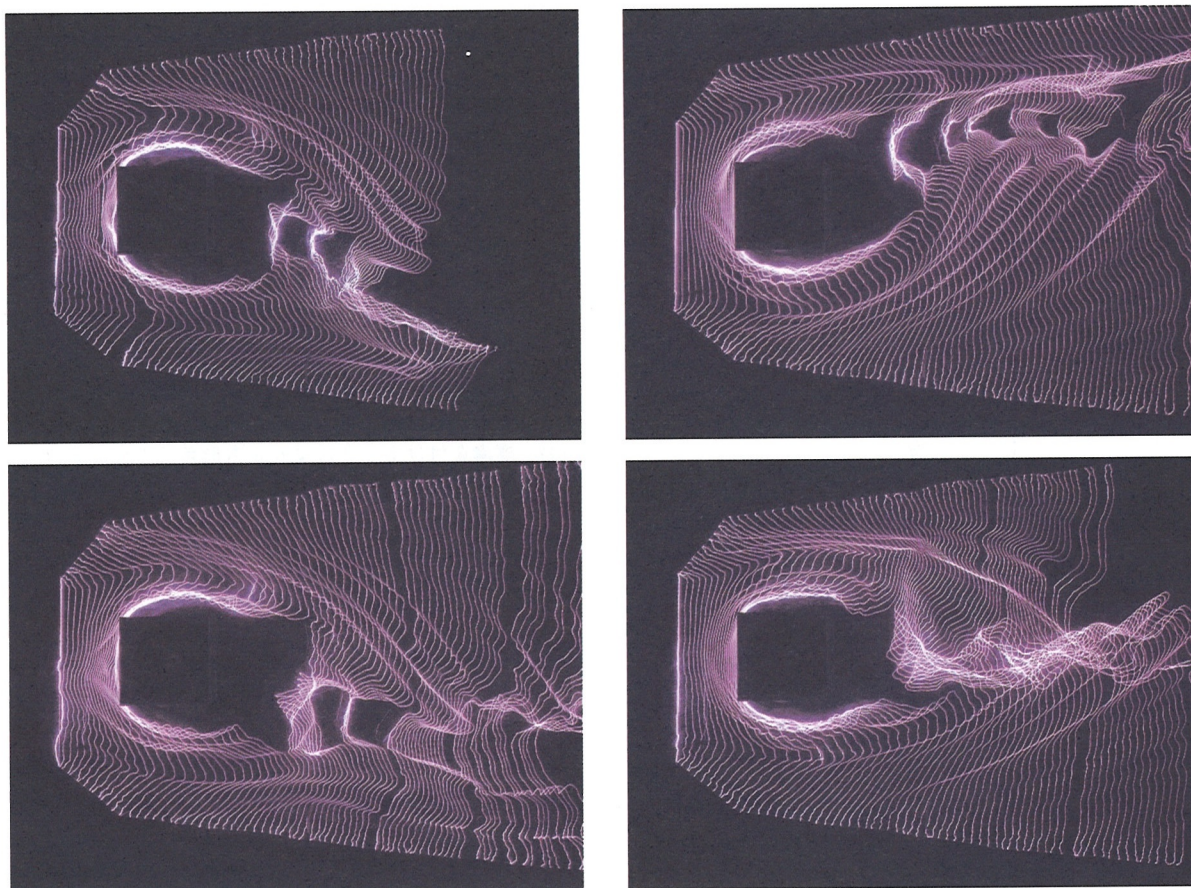
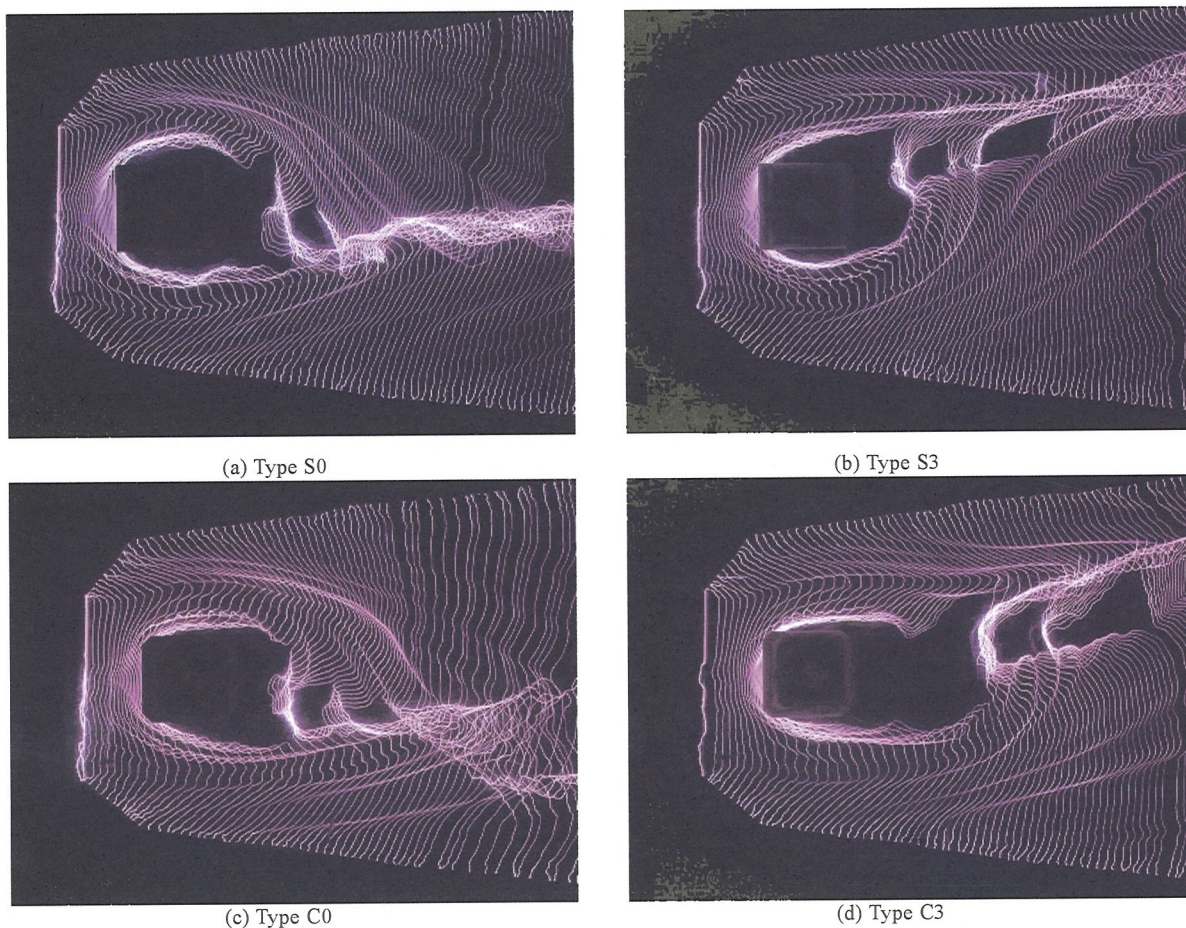


Fig.11 Visualization results around the square cylinder without grooves by spark tracing



(a) Type S0

(b) Type S3

(c) Type C0

(d) Type C3

Fig.12 Visualization results around the test models by spark tracing



4. 結論

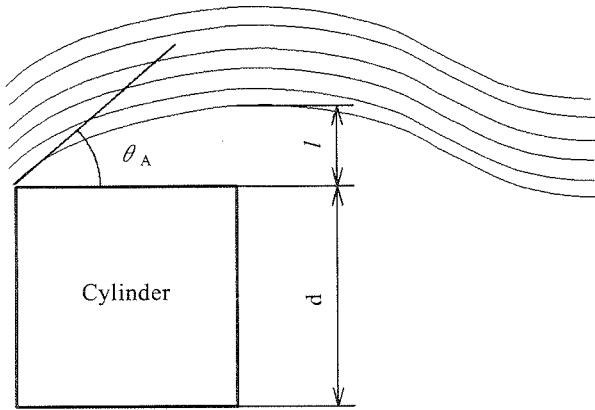


Fig.14  $l/d$  dimensionless distance from the side of a cylinder

正方形角柱に横溝及び隅切を施すことによる抗力への影響、また火花追跡法による可視化実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 正方形角柱は横溝を深くしていくごとに抗力係数が低くなることが明らかとなった。
- (2) 隅切角柱は横溝を正方形角柱と同様に深くしていくごとに抗力係数が低くなっていったが正方形角柱ほど低減効果はない。
- (3) 横溝を付けることで角柱後方において圧力係数の回復が確認された。
- (4) 横溝を付けることにより正方形角柱の後流領域は小さくなるが隅切角柱の後流領域はあまり変わらないことが明らかとなった。

参考文献

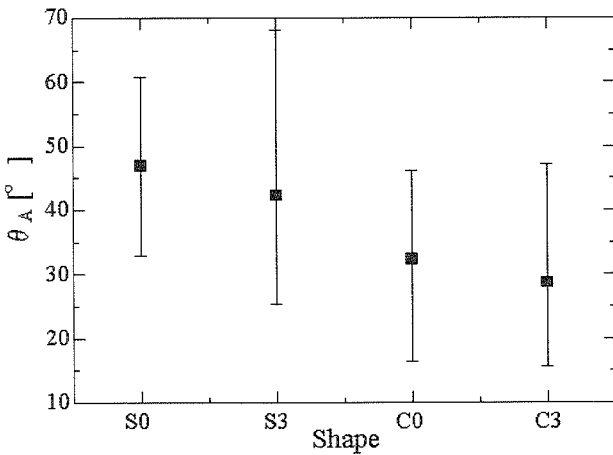


Fig.13 Separation angle

Table.4 Dimensionless distance ( $l/d$ ) from the side of a cylinder to the share layer

Type	$l/d$
Type S0	25%
Type S3	20%
Type C0	15%
type C3	15%

- [1] F. Naudascher B. Fey : 「Exploratory study on damping of galloping vibrations」, J. of Wind Eng. Ind. Aero., Vol. 8, pp.211～222, 1981 年.
- [2] 溝田武人, 岡島厚 : 「角柱周りの時間平均流れに関する実験的研究」, 土木学会論文報告集, 第 312 号, pp. 39～47, 1981 年.
- [3] 田村哲郎, 宮城哲夫 : 「正方形角柱の空力特性に与える隅角部形状効果の物理機構に関する系統的研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 巻, pp. 51～58, 1998 年.
- [4] 倉田光雄, 大和英肇, 安富善三郎, 木田輝彦 : 「迎え角のある場合の正方形断面角柱の抗力軽減におよぼす切り落とし量の効果について」, 日本機械学会論文集 B 編, 第 68 巻, 886 号, pp. 1087～1094, 2002 年.
- [5] 青木克巳, 李相根, 沖真 : 「溝付円柱周りの流れと抵抗」, 日本機械学会論文集 B, 第 64 巻, 617 号, pp. 18～24, 1998 年.
- [6] K. Aoki, K. Yoshida, H. Okanaga : 「EFFECT OF DRAG REDUCTION FOR THE SURFACE STRUCTURE OF CIRCULARCYLINDER」, ISFV12, 2006 年
- [7] 小出昌和, 岡永博夫, 青木克巳 : 「溝を施した隅切を有する正方形角柱の流動特性」, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会講演論文集, pp. 349～350, 2006 年
- [8] Kenny C. S. Kwok, Peter A. Bailey : 「Aerodynamic Devices for tall buildings and structures」, J. Eng. Mech., Vol. 113 No. 3, pp. 349～365, 1987 年.