

床面に設置された有限正方角柱上面の流れの PIV 解析

小園 茂平¹⁾・大瀬 裕子²⁾・宮城 弘守³⁾・小田 純子⁴⁾

PIV Analysis on Vortical Structure Generated on the Top of a Surface-Mounted Square Cylinder of Finite Length

Shigehira OZONO, Yuko OSE, Hiromori MIYAGI, Junko ODA

Abstract

The flow around a surface-mounted square cylinder was investigated through PIV (Particle Image Velocimetry) analysis. At several levels close to the top surface, planar velocity fields were measured to get a clear picture of the separated flow and its relevance to the wake. The PIV measurements reveal that there were a pair of vortices created on the top of the cylinder. The line vortices separated from the upstream top edges extend downstream in the upward direction. It was found that separated shear layers from the side edges growing downstream were also extended beyond the top of the cylinder, but there is no trace of the "switching" ever reported in recent studies.

Key Words:

Switching, Square cylinder, PIV, Boundary layer

1. はじめに

床面に設置された有限柱体の周囲流の研究は建築や土木の構造物などに関連して重要である。一側面が近寄り流れに直角な場合の研究は、これまでに二三なされている。

有限長角柱と円柱に関する研究が Sakamoto¹⁾によりなされアスペクト比や境界層特性などの影響が調べられ、アスペクト比が角柱では 2.0 以上、円柱では 2.5 以上の時、アーチ型からカルマン型への渦放出に変わると報告している。同様に有限長角柱に関する研究が岡本²⁾によりなされ、アスペクト比が 1.0, 2.0 でアーチ

型, 7.0 以上でカルマン渦型の渦放出になることが指摘され、抗力や再循環領域の変化と関連して論じられている。

同じく有限長角柱が床面に設置され、かつ対角線が近寄り流れに平行な場合の研究は、最近、建築構造物に関連し風工学分野で多くの研究が報告された。

Katsura³⁾ は立方体の模型を床面に設置した風洞実験により、陸屋根面の対角線方向に風が当たっていても、屋根面に加わる風圧力は瞬間的には対称に作用せず、ほぼ逆の位相をもって変動することを示している。河井ら⁴⁾ は同様に高さが一辺の半分の正方角柱模型を用いた風洞実験により、Katsura と同様の結果を示した。さらに、屋根面に加わる風圧力の時系列データを用いた詳細な解析から、風圧力が対称に作用しない原因として、両側の円錐渦が一对となって振動するいわゆる“ゆらぎ”という現象があると指摘している。谷池ら⁵⁾

1) 宮崎大学工学部材料物理工学科 助教授

2) 宮崎大学工学部材料物理工学科 4 年

3) 宮崎大学工学部材料物理工学科 助手

4) 宮崎大学工学部物質工学専攻大学院生

6) は同様の構造物周りの流れの可視化を行ない、陸屋根面上に形成される円錐渦は互いに逆の回転方向を持つ一対の渦が存在するのではなく、一方の円錐渦ができていいる時には他方の円錐渦は消える状態が不規則にスイッチして現れる(以下, "スイッチング現象")と述べている. 谷池らの可視化実験では, 屋根隅角部から剥離した気流の流れのみに着目しており, それ以外の空間の流れは不明である.

本研究では回流水槽と PIV 解析装置を使用し, 陸屋根面上に見られる円錐渦のゆらぎやスイッチング現象に着目しつつ, より広い後流領域についても観察した.

2. 実験装置

2.1 実験状況

図 1 のような状態で実験を行なった. 長方形(縦 600mm×横 800mm, 厚さ 10mm)の亚克力製の設置板を水槽側面に平行に 10cm 離し, かつ水槽床面に鉛直に立てた. 設置板の上流先端はテーパーをつけた. 角柱上面の流れの観察に適するように角柱を設置板上に直角に取り付けた. 角柱の上流角部先端を設置板先端から 150mm の距離に設置した. 3 種の木製正方角柱モデルを使用した. アスペクト比は $h/a=0.5\sim 2.0$ の範囲であった. ここに a は角柱上面の 1 辺の長さで $a=50\text{mm}$, h は角柱高さで $h=25, 50, 100\text{mm}$ である. モデル表面は照明やレーザー光の反射を抑えるため, つや消し黒色に塗装した.

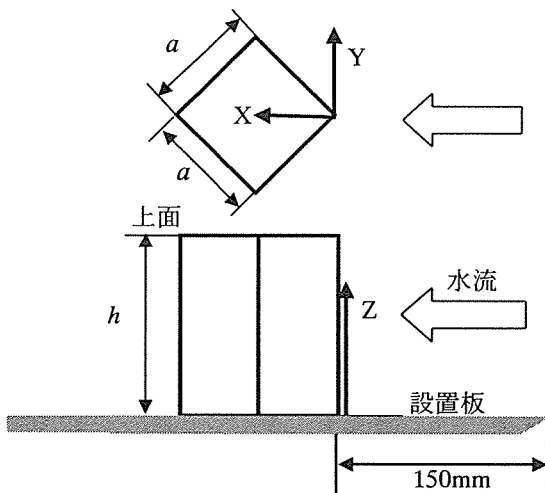


図 1 正方角柱モデル

2.2 回流水槽と PIV 解析システム

実験に使用した水槽は鉛直回流型で, 3 面ガラス貼りの開水路測定部を持ち, 長さは 4.0m, 幅は 0.4m, 高さは 0.6m であり, 実験中の水深は 0.4m に保たれた. インペラーの回転数をコンピュータで制御して 0.09~1.00m/s の範囲の流速が可能である. 測定部の上流端には制波板と水面加速装置が備えられていて, 自由表面の定在波を抑え, 鉛直方向の流速分布を一様化している. 装置の仕様では流速 0.75m/s の時, 境界層付近を除き, 乱れ度が 1.0% 以下, 非一様性が $\pm 1.0\%$ 以下となっている. PIV 解析システムは図 2 に示した機器類で構成され, 測定・解析の概要は以下のとおりである.

流体中に浮遊させた微細なトレーサ粒子(不定形ナイロンパウダー, 平均粒径 $50\mu\text{m}$, 比重約 1.0)にダブルパルス Nd:YAG レーザーのシート光を 2 時刻連続して照射し, 粒子からの散乱光を CCD カメラで撮影した. この画像はコンピュータのメモリー上に 2 時刻の画像として別々に記録される. 次に, これらの粒子画像から移動量を求め速度ベクトルが決定される. 本実験に使用する PIV 解析システムでは“画像相関法”と呼ばれる処理が採用されている. この方法では, 複数の粒子が写った探査領域の輝度値パターンの移動量から撮影領域のすべての探査領域の速度ベクトルが算出される. これを Tecplot(Amttec 社製)で後処理し, 渦度分布や流跡線を得た.

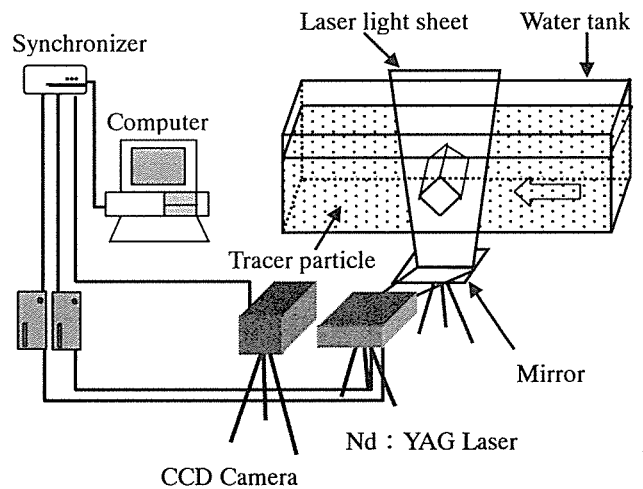


図 2 PIV 解析システム

3. 実験結果と考察

3.1 境界層の厚さ

正方角柱は境界層の中に置かれるので、周囲流は高さ h と境界層厚さ δ の両方に依存する. 例えば谷池ら⁶⁾によると, 陸屋根上のスイッチング現象は乱れの大きな勾配流中では見られないとしている. 端板の前縁から発達する境界層厚さをモデル設置位置において知るために, 角柱モデルを取り付ける前にピトー静圧管によって平均流速分布を調べた. その結果を図3に示す. モデル設置位置の境界層の厚さは約 20mm であった. 平行して, PIV 解析によってモデル設置位置付近の渦度の分布を調べた. 設置板付近の渦度の集中している領域はピトー管による計測とおよそ符合した.

滑面平板に沿う乱流境界層について次の実験式⁷⁾を適用してみた.

$$\delta(x) = 0.38(U \cdot x / \nu)^{1/5} \cdot x \quad (Re < 10^7)$$

ここに, $\delta(x)$; 境界層厚さ(m), U ; 平均流速(m/s), ν ; 水の動粘性係数(m²/s), x ; 先端からの距離(m)である. 今, $U=0.5\text{m/s}$, $\nu=1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, $x=165 \times 10^{-3}\text{m}$ より境界層厚さ $\delta(x)=6.5\text{mm}$ となった. 計測値 20mm と比較すると大きな差がある. これは, 端板先端や端板表面の粗さが乱れを助長したものと考えられる.

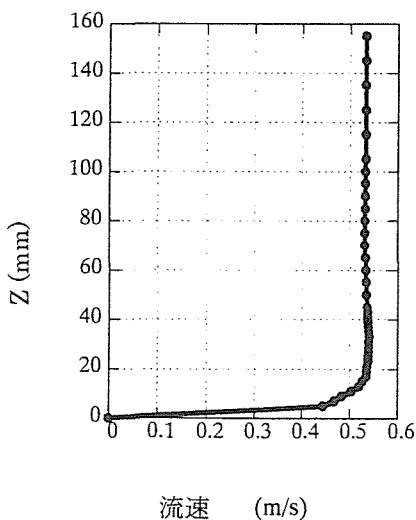


図3 流速分布

3.2 絵の具を用いた流れの可視化

正方角柱全体や上面の流れを定性的に把握しておくため, 可視化実験を予備的に行なった. 図4の写真では, 正方角柱上面の4辺の稜線に沿って水彩絵の具を塗布してモデル全体の流れの様子を可視化した. モ

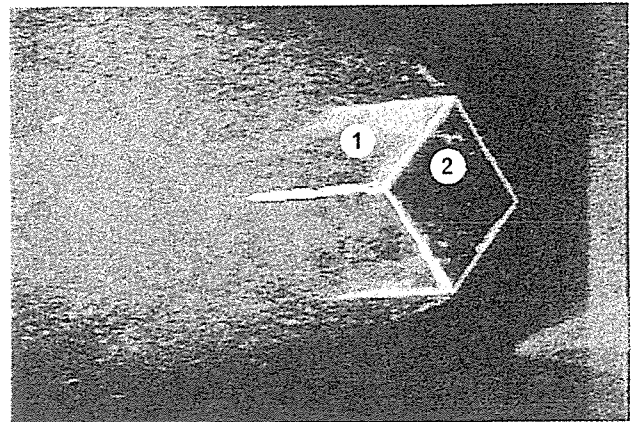


図4 後流全体の可視化 ($h/a=2.0$).

絵の具を4辺に塗布

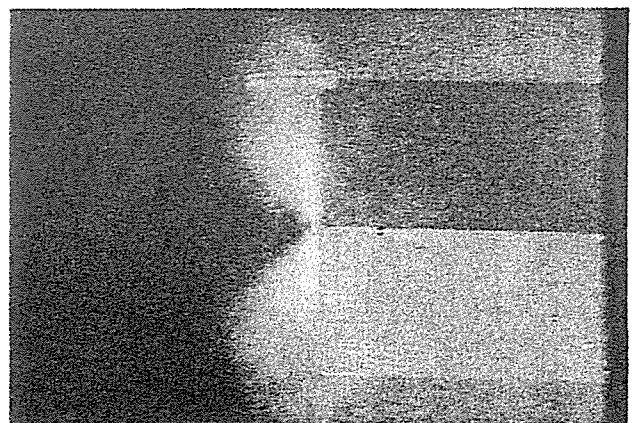


図5 上面の流れの可視化 ($h/a=2.0$).

絵の具を上面前縁直下に塗布



図6 図5と同様 ($h/a=2.0$)

デルに接近した流れは角柱側面の稜線で剥離し、モデル後方には複雑に乱れた領域が形成されている。上前縁の絵の具が溶出して下流側の面を屋根の後縁方向へ向かう壁面に沿う流れ①や、その流れの一部の屋根面に沿う逆流②などの二次流れが観察される。

次に、上前縁直下の側面に幅 10mm 程度絵の具を塗布して上面の流れを可視化した(図 5, 6)。流れを下流側から観察した図 5 によると、上面の対角線付近を境に左右対称な流れ構造が見える。上面を斜め後方から俯瞰した図 6 によると、上面の前縁中央付近から下流に伸びる一対の円錐状の渦が見える。左右の構造の境界は常時明瞭に判別された。図 6 に示されるように、この境界は定常的に対角線にとどまらず不規則な“ゆらぎ”が観察された。

3.3 PIV 解析結果

3.3.1 角柱上面に平行な面内の流れ

角柱上面に平行な面内の流れを上面からの距離 Z が①2mm, ②5mm, ③10mm の各レベルで撮影した(図 7)。それぞれの距離での結果を図 8 に示す。矢線は速度ベクトル, 等高線は $\omega_z = (\partial v / \partial x) - (\partial u / \partial y)$ で定義される渦度分布を示している。

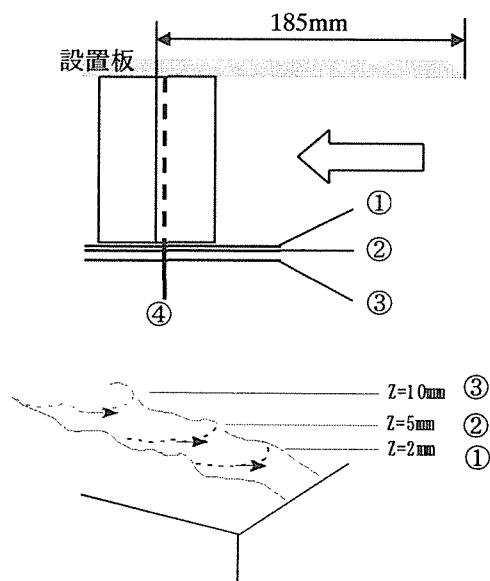
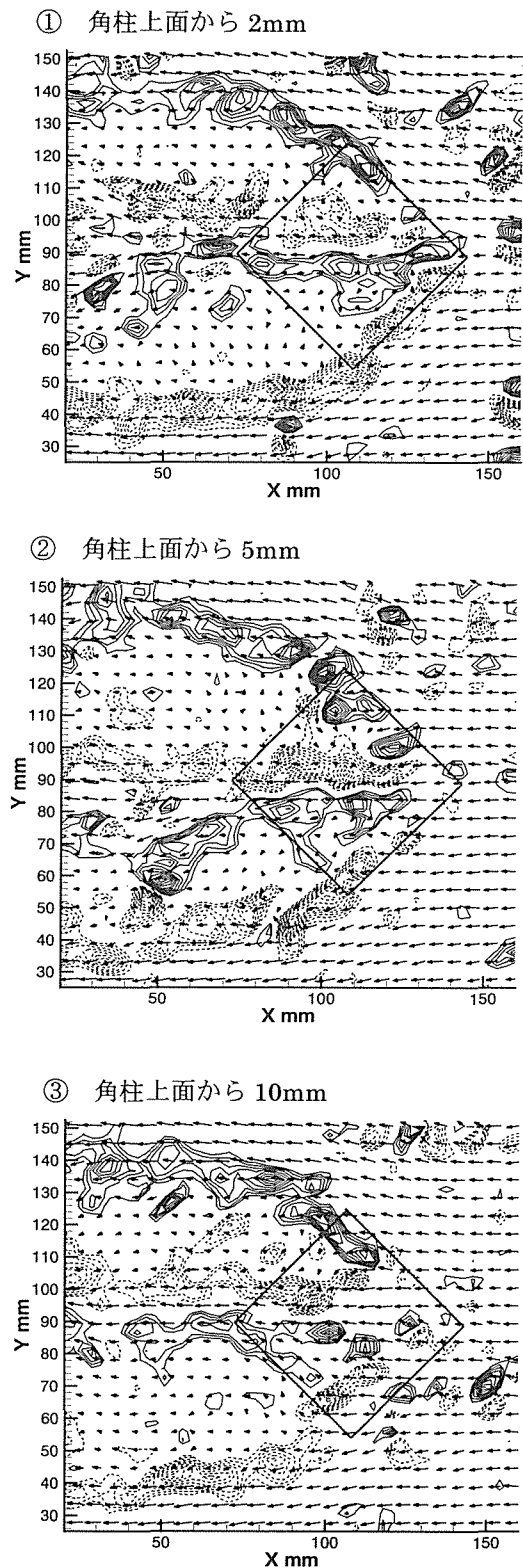
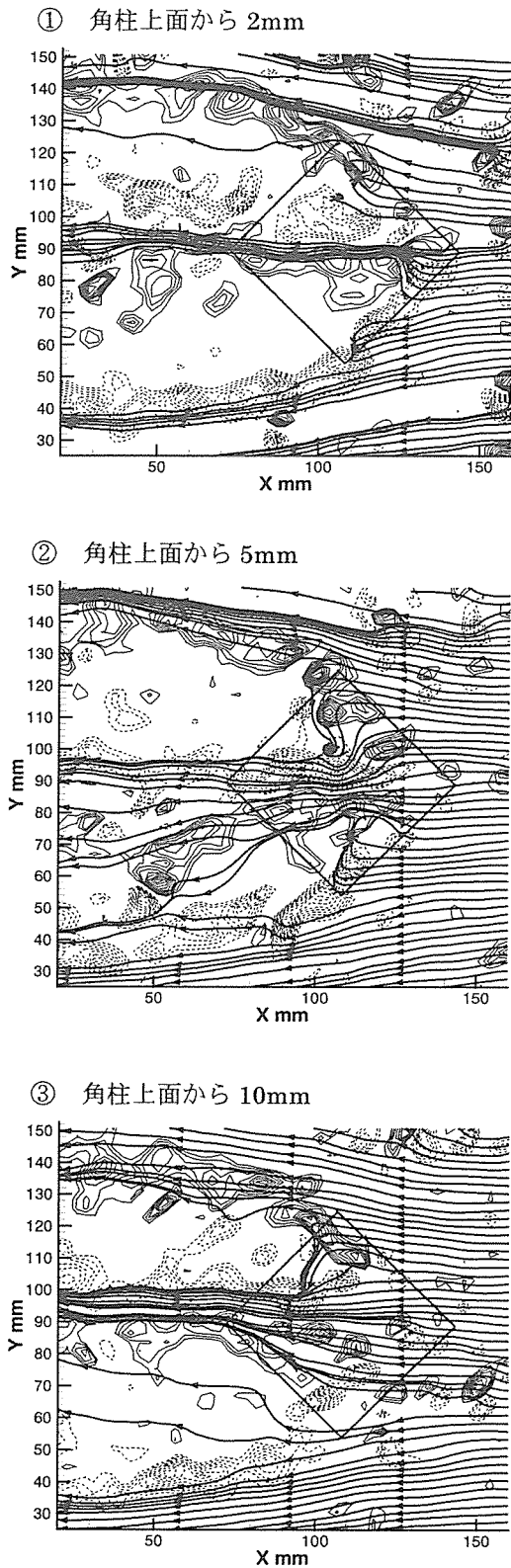


図 7 粒子画像撮影断面



注) 渦度は実線が正(反時計回り),
破線が負(時計回り)を表す。

図 8 角柱上面に平行な面内の流れ成分 ($h/a=2.0$)



注) 流跡線は上流端に等間隔に設定した起点から下流方向にたどるように描いた。

図9 角柱上面の流跡線解析結果 ($h/a=2.0$)

渦度の大きい四つの領域が主流と平行に広がっている。渦度の符号は対角線に対して対称である。

外側の上下の渦領域は側面角部からの剥離せん断層の一部と考えられる。①では最も下側の渦領域は二つに分かれ、上流側の部分はよどみ点が上方にずれて、先端角部から剥離したせん断層の一部と考えられる。

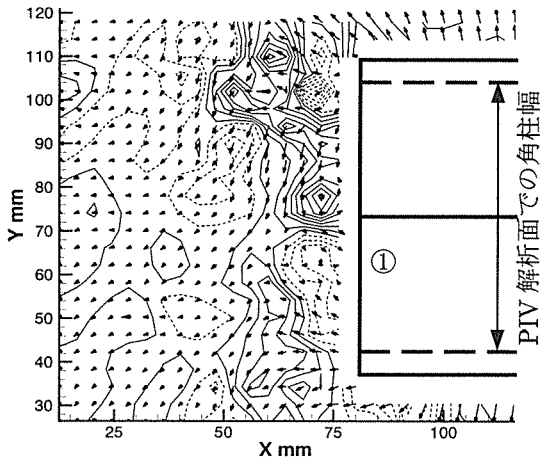
中央の一対の渦領域は上面前縁に発している。この渦領域は時間的にわずかに上下にゆらぐものの渦度の符号自体は変化しない。すなわち渦構造は安定している。上面からの距離を5mm (②)、10mm (③) と離してゆくと、渦領域が下流側に移動している。これは、図7に示すように渦糸が下流方向の斜め上側に向かって伸びていることを示す。このことは絵の具を用いた可視化 (図6) の結果にも符合する。

ここで改めて図8のベクトルに注目してみる。上面の後縁に近い領域では、流速は遅くかつ方向が複雑に変化している。流跡線を見るとこのような複雑な流れの範囲が明確化される。図9の①~③は図8の①~③に対応し、上面から離れるにつれて流跡線の通過しない領域が下流側に移動していることが分かる。この流跡線の通過しない領域は再循環領域に対応しているものと思われる。

3.3.2 角柱上面に直交する面内の流れ成分

可視化実験と角柱上面に平行な面のPIV解析結果を総合すると、上面に一対の渦が確かに存在し、その渦糸は斜め上方下流に伸びている。したがって、流れ直角面内の渦度にもその一対の渦が明確に現れるはずである。そこで、接近流と上面の双方に直角な方向からレーザーシート光を照射し(図7, ④)、その粒子画像をモデル下流の水流中に設置した鏡に反射させて撮影した。

図10は4秒間、60枚の画像の中の代表的なパターンである。鏡に写した画像のため左右が反転している。互いに逆向きの一対の渦領域がわずかに認められる。角柱上面の対角線(①)付近を境に上側には反時計回りに回転するパターンが、下側には時計回りに回転する流れパターンがベクトルからも読みとれる。鏡の見付け面積はモデルより大きくモデルからの距離も十分に



注) 渦度は実線が正(反時計回り), 破線が負(時計回り)を表わす ($h/a=2$).

図 10 角柱上面に直交する面内の流れ成分

取れなかったのにより正確な計測は今後の課題である.

4. まとめ

対角線が主流に平行な有限正方角柱上面(陸屋根面)の円錐渦のゆらぎやスイッチング現象を水槽を使用した PIV 解析によりとらえることを試み, 以下の結果を得た.

- 1) 可視化実験により, 上面の左右の前縁から発達した剥離せん断層が上面中央の対角線を越えてゆらぐ現象が確認できた.
- 2) レベルを変化させて上面の流れを PIV 解析した. 前縁から発する渦度の集中した領域が二つ見られ, それらは対角線に関し対称的で互いに逆符号である. この領域はレベルが高くなると下流方向に移動することから, 渦糸が下流斜め上方に伸びているこ

とが判明した.

- 3) h/a の異なるモデルによる円錐渦への影響は確認できなかった.

PIV 解析において, さらに撮影面を工夫することによって三次元渦構造を明らかにすることが今後の課題である.

参考文献

- 1) H. Sakamoto, M. Arie: Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 126, pp. 147-165, 1983.
- 2) 岡本史紀, 松永勝秀: 平面壁上の有限長角柱まわりの流れ, 日本機械学会論文集 (B 編) 55 巻 512 号, pp. 1091-1096, 1989.
- 3) Katsura, J: A Wind Tunnel Test of Pressure Distribution on Box-Japan Research Seminar Wind Load on Structures, pp. 97-108, 1970.
- 4) 河井宏允, 西村元吾, 草柳拓人: 陸屋根上の円錐渦と負圧変動について, 第 13 回風工学シンポジウム, pp. 149-154, 1994.
- 5) 谷池義人, 谷口徹郎, 両角達郎: 種々の陸屋根面上に形成される円錐渦のスイッチング現象解析, 第 15 回風工学シンポジウム, pp. 305-310, 1998.
- 6) 谷口徹郎, 谷池義人: 陸屋根面上の円錐渦に関する可視化風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, No. 488, pp. 31-37, 1996.
- 7) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, pp. 323-325