

気流に平行な円柱における支持干渉の影響

Support-Interference Effects on Cylinders Magnetically Supported in Axial Flow

- 許斐 涼, 早大院, 東京都新宿区大久保 3-4-1, E-mail: barucasaiko@ruri.waseda.jp
杉浦 裕樹, JAXA, 東京都調布市深大寺東町 7-44-1, E-mail: sugiura.hiroki@jaxa.jp
手塚 亜聖, 早大院, 東京都新宿区大久保 3-4-1, E-mail: mechaero.tezuka@cls.waseda.jp
Ryo KONOMI, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo
Hiroki SUGIURA, JAXA, 7-44-1 Higashi-machi, Jindaiji, Chofu-shi, Tokyo
Asei TEZUKA, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo

Support-interference effects of sting on a cylinder with a fineness ratio 1.68 in axial flow were examined experimentally, using JAXA 60cm magnetic suspension and balance system (MSBS). Drag coefficients of the cylinder with support interference were smaller than those without any interference for the Reynolds numbers from 1.0×10^5 to 2.0×10^5 . Particle image velocimetry (PIV) was used to measure velocity distribution in a plane parallel to the freestream. A sting behind the cylinder influenced vortex structures of the wake. It was revealed that turbulence intensity of the shear layer separating from the leading edge gradually decreased with the gap width between the cylinder and the sting.

1. はじめに

気流に平行に支持された円柱において、前縁で剥離した流れは約 $1.5D$ (円柱直径 D) 以上下流で再付着して乱流境界層を形成しながら下流へ流れていく⁽¹⁾。また、細長比 (fineness ratio, 円柱長さ L , 円柱直径 D とすると L/D で定義される) が 0 から増加するにつれて抵抗係数 (抵抗 F , 一様流動圧 q , 円柱断面積 A とすると抵抗係数 C_D は $F/(qA)$ で定義される) が減少し、その後増加に転じることが知られている。このとき C_D が極小値を取るときの細長比を 2 から 3 の間とする文献^{(2), (3)}と、細長比を 1.7 程度とする文献⁽⁴⁾が見られる。細長比が 4 以上になると再付着した流れが形成する乱流境界層の粘性の影響に伴い、抵抗係数が徐々に増加することが判っている⁽¹⁾。

円柱前縁で剥離した流れが $1.5D$ 付近で再付着することが知られているが⁽⁵⁾、細長比が 1.5 から 2 付近における抵抗係数が細長比に強く依存している要因のひとつはこの流れの再付着の有無があると推察される。こうした干渉は円柱周りの流れのみならず、円柱後方の流れからも影響を受けると考えられている。したがって、模型を後方からスティングのようなもので支持してしまうと、スティングが流れに影響を与えてしまい、正確な抗力等を測定できないと考えられるが、このような支持干渉の影響はいまだ十分に解明されていない。

そのため、本研究では支持の影響を受けることの無い磁力支持天秤装置 (MSBS, Magnetic Suspension and Balance System) による抗力測定および非接触計測法である PIV による可視化を実施した。

2. 研究目的

本研究では、後流を含んだ円柱周りの流れが大きく変化すると考えられる細長比付近を持つ円柱 ($L/D=1.68$) を用い、スティングが有る場合と無い場合における円柱の抗力測定と PIV 計測による断面内の流れ場計測をすることで、後方に存在するスティングが円柱周りの流れに及ぼす影響を検証することを目的とした。

筆者らは球・円錐等基本形状の支持干渉の無い風試データを CFD 検証等に有効なデータベースとして提供中である⁽⁶⁾。本研究もその一環で、CFD 検証のための基礎データとしての価値を有すると考える。

なお、抗力測定におけるレイノルズ数 (Re 数) の範囲は $6.7 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^5$ 、PIV 計測での Re 数の範囲は $3.5 \times 10^4 \sim 6.5 \times 10^4$ と異なっ

ている。

3. 風洞および計測模型

MSBS は模型を磁力力で支持するため、支持干渉が無く、模型にかかる空気を計測する天秤機能を併せ持つ。本実験で使用した宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の 60cmMSBS は、測定部周囲に配置された 10 個のコイルに電流を流すことで風洞測定部に磁場を形成して模型に磁力力を作用させる。同装置を設置している風洞は $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ の測定部断面を持つ大気圧・循環式であり、最大風速は 45m/s 、一様流乱れ強さは 0.1% 未満である。測定部は前後 2 つの部分から構成されている。測定部上流部分はアルミ合金製で長さ 1m あり、側壁には観察用のアクリル製窓が取り付けられている。MSBS は長さ 1.2m の木製測定部下流部分を囲むように設置されている (Fig. 1)。模型の位置・姿勢は測定部の上部および側部に設置された模型位置姿勢測定用カメラにより測定し、約 248Hz で模型位置を制御している。この MSBS の詳細は文献⁽⁷⁾を参照されたい。

計測した模型は、直径 110mm 、長さ 140mm の基本形状部分を持つ円柱の下流側に長さ 30mm および 15mm の円柱端部を連結し、全長 185mm 、細長比 1.68 の大きさを有したものである。なお、基本形状部分と円柱端部、および円柱端部同士の結合部分に存在する段差はそれぞれ 0.1mm 以下とした。また、円柱模型内部には外径 100mm 、内径 75mm の円環状の永久磁石を模型中心軸に合わせて平行に挿入している。模型の全質量は約 4.3kg である。



Fig. 1: MSBS test section

4. 抵抗係数測定試験

4.1 天秤較正

MSBS では抗力コイル電流値を力に換算することで抗力を測定する必要がある。試験方法は、模型を磁力支持した状態で模型背面の中心からナイロン製の糸を介して下流側へ既知の錘で引き、錘と平均抗力コイル電流の関係を求めるものである。天秤較正試験結果を Fig. 2 に示す。較正直線に対する試験結果の標準誤差は 0.004N であった。

抗力測定で得られる抵抗係数には天秤較正における誤差以外にも、模型寸法誤差、動圧測定誤差等が存在する。誤差評価の結果を Fig. 3 に示す。今回の誤差評価において模型寸法誤差は通常の $\pm 0.1\text{mm}$ とした。また、動圧測定に用いた圧力変換器の最大誤差は $\pm 2\text{Pa}$ であった。Fig. 3 を見てみると、本試験における抵抗係数の誤差は最大でも 3% 以下であることが分かる。抵抗係数誤差の評価方法の詳細は文献(1)を参照されたい。

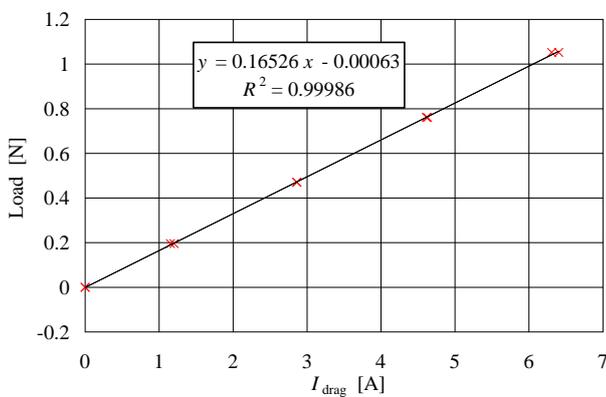


Fig. 2: Drag calibration test result

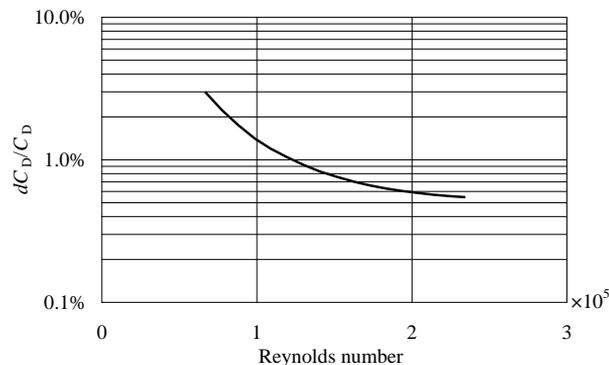


Fig. 3: Evaluated drag coefficient error

4.2 抗力測定試験結果

模型の支持に使用されるスティングが模型の抗力結果に与える影響を検証するため、円柱の後方にダミーのスティングを設置することで円柱がスティングで支持されている状態を再現し、このときの円柱に働く抗力を支持干渉の無い円柱の場合のものと比較した。試験に用いたスティングは直径 15mm、長さ 480mm のアルミ合金製で、表面を黒塗りすることで MSBS の模型位置姿勢の制御に影響を及ぼさないように配慮している。スティングの先端と円柱背面との距離 (以下、“gap” と呼ぶ) は模型制御に支障が無いようにするため密着させず、gap が 2mm および 0.5mm となるようにスティングを固定して試験を実施した。

抗力測定試験で使用している座標系は、測定部中心から上流方向に x 軸正方向、鉛直上方を z 軸正方向とし、これらと右手系をな

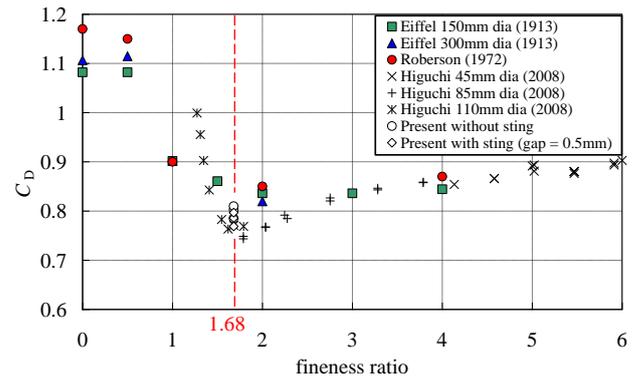


Fig. 4: Drag coefficient versus fineness ratio

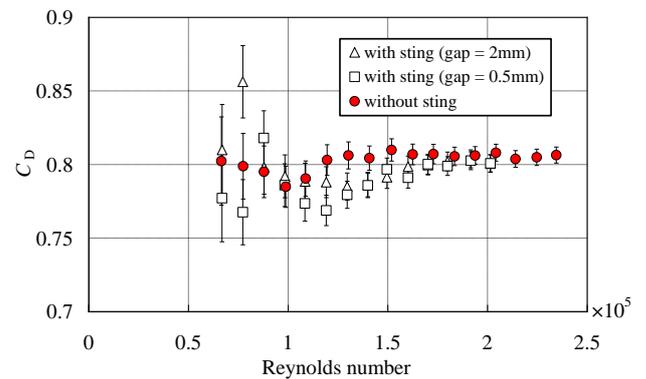


Fig. 5: Drag coefficient versus Reynolds number

すように y 軸を設定した。また、 y 軸および z 軸周りの回転角をそれぞれピッチ角 (θ)、ヨー角 (ψ) とする。実施した風速 (U) は 9m/s から 29m/s までの範囲であり、この範囲は Re 数 (円柱直径 D 、一様流速 U 、動粘性係数 ν を用いて UD/ν と定義した) では 6.7×10^4 から 2.0×10^5 の範囲に対応する。得られた抗力から抵抗係数を算出する際、浮力効果補正および阻塞効果補正を施している⁽⁸⁾。

抵抗係数の細長比依存性を文献(2)、(3)および(4)のデータとともに Fig. 4 に示す。Eiffel のデータは $Re = 1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ と見積もられている⁽⁴⁾。Roberson らは、 $Re > 1.0 \times 10^4$ で C_D はほぼ一定となると報告している⁽³⁾。Eiffel および Roberson らのデータでは、 $L/D = 2 \sim 3$ 付近で $C_D \approx 8.5$ の極小値を取り、その後 C_D が増加している。一方、Higuchi らは、MSBS を用いた風洞実験を実施し、 $L/D \approx 1.7$ で C_D は極小となりこのときの値が約 7.5 であると報告している。本試験では $L/D = 1.68$ の円柱模型の抗力測定を実施し、 $Re = 1.0 \times 10^5$ 、 1.2×10^5 および 1.5×10^5 における C_D を Fig. 4 にプロットした。得られた C_D が他の試験データと近い値を示していることが見て取れ、本試験データが有効なものであると判る。

Fig. 5 は各試験条件における抵抗係数の Re 数依存性を示している。 $Re \geq 1.0 \times 10^5$ の範囲においてスティングが円柱の後方に存在する場合 (以下、“スティング有り円柱”と呼ぶ)、gap が小さくなるほど後方にスティングの無い円柱 (以下、“スティング無し円柱”と呼ぶ) に比べて抵抗係数が小さくなるが見て取れる。スティング無し円柱では $Re \approx 1.0 \times 10^5$ で C_D が極小値を取ったのちに Re 数に伴って C_D が増加し、 $Re \geq 1.2 \times 10^5$ では C_D が約 0.81 でほぼ一定に推移している。スティング有り円柱では、gap = 0.5mm のときは $Re \approx 1.2 \times 10^5$ で C_D が極小となり、その後増加に転じる。一方、gap = 2.0mm の円柱の C_D は $1.2 \times 10^5 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$ の範囲で極小値を示しているが、このときの C_D の変化は gap = 0.5mm と比べ

て緩やかである。Re 数が大きくなると、スティングが有る円柱と無い円柱の C_D は近い値を示しており、Re 数の増加に伴いスティングの影響が小さくなることが予測される。上記に記した C_D の変化の違いは、スティングが円柱背面の再循環領域に干渉することで円柱の背圧に影響を与えるためであると考えられる。再循環領域内の流れ構造の違いが抵抗係数に及ぼす影響を理解するためには、模型背面の圧力分布を測定することで円柱の背圧変化を明らかにしていく必要がある。

5. PIV 計測

5.1 MSBS 制御への影響

MSBS では CCD ラインセンサーを用いて模型位置姿勢を計測しているため、PIV 計測ではレーザーシートの照射が模型の制御に悪影響を及ぼすことが懸念された。実際、予備試験ではレーザーシートの散乱光がセンサーに入射し、Fig. 6 で示すようにセンサーの出力には入射光によるパルス状の信号が現れた。この影響を回避するため、予測され得る位置姿勢変化よりも大幅に大きな変化を示す出力を無視した。この操作を施すことにより、模型を磁力支持することが可能となった。

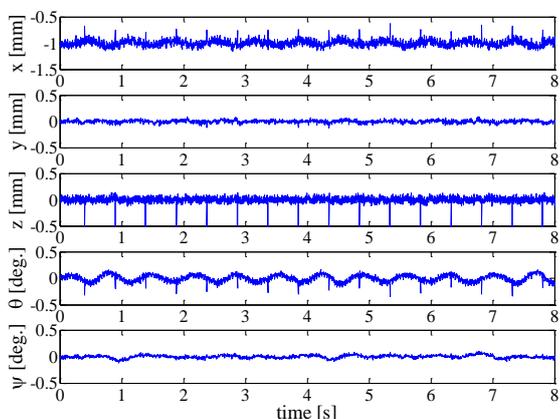


Fig. 6: Time variation of model position and orientation

5.2 PIV システム

本実験では、円柱中心軸を通り、気流に平行な断面内の 2 次元 PIV 計測を行えるようにレーザーシート光面を設定した。計測には LaVision 社製の 2D-PIV システムを採用し、光源にはダブルパルス Nd:YAG レーザー (250mJ/Pulse, 532nm) を使用した。PIV 用のカメラは 2048×2048 画素の冷却型高解像度 CCD カメラで、模型位置姿勢用の照明による影響を抑えるためにレンズの先端に狭帯域のバンドパスフィルタ (532nm) を取り付けた⁹⁾。

PIV 用カメラは測定部側壁上部に設置し、窓ガラスを通して模型が画像中心に写るようにカメラの傾斜を調整した。レーザーシートは拡散筒の側壁から入射し、風洞測定部の下流側に設置したミラーに反射させることで測定部に到達させた。このとき、傾斜のある PIV 用カメラに対して垂直となるようにレーザーシートを 30.8° 回転させた (Fig. 7)。また、平均粒径 1 μ m のセバシン酸ジオクチルをシードとして使用し、ミラーより下流側から風洞内に挿入した。

5.3 計測条件および PIV 処理方法

PIV 試験では円柱背面の中心を原点とし、下流方向に x 軸正方向、レーザーシート面上における上方向を y 軸正方向とする座標系を設定した。試験における代表的な一様流速 U を約 5m/s ($Re = 3.5 \times 10^4$) とし、スティング無し円柱、gap = 0.8, 1.5, 3.5mm のスティング有り円柱の 4 通りを計測した。なお、スティングの固定装置は下流側から照射されるシート光面が通過するように設計し、

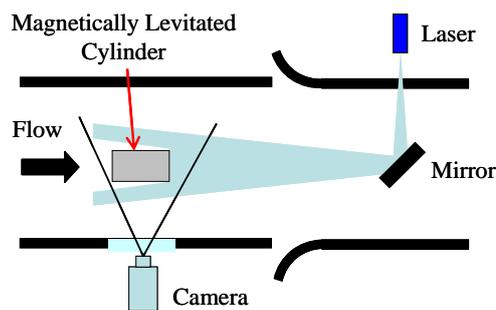


Fig. 7: PIV system setup



Fig. 8: A magnetically supported cylinder in axial flow with a dummy sting set behind the cylinder

シート光面の回転角度に応じた傾斜を付けて設置した (Fig. 8)。レーザーパルスの時間間隔は 120 μ s に調整し、PIV データの基本取得フレーム数はスティング無し円柱では 100 枚、スティング有り円柱では 500 枚とした。このときのサンプリングレートは 2Hz である。今回の計測ではレーザーシート光が上部カメラへ入射することによる模型制御への影響を最大限取り除くため、シート光は主に模型の下部に当たるように調整した。

PIV のデータ処理では、FFT 相互相関法を解析アルゴリズムとし、検査領域を 32×32 画素 (50% オーバーラップ) に設定した。誤ベクトルを除去する際には、速度ベクトルの大きさおよび相関画像の SN 比による制限のみを施した。

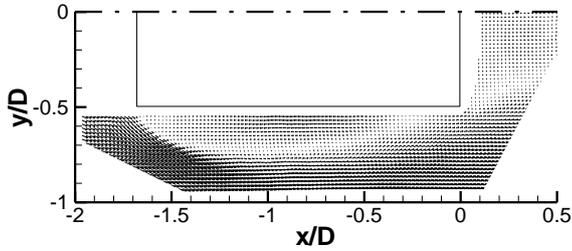
5.4 計測結果

Fig. 9 は、 $Re = 3.5 \times 10^4$ における円柱周りの平均流速分布を示している (平均フレーム数: スティング無し 100 枚, gap = 0.8mm のスティング有り 500 枚)。どちらの場合も円柱前縁で剥離した流れが後縁付近で再付着している様子が捉えられている。平均流速分布に関してはスティングの干渉による大きな影響は見られない。

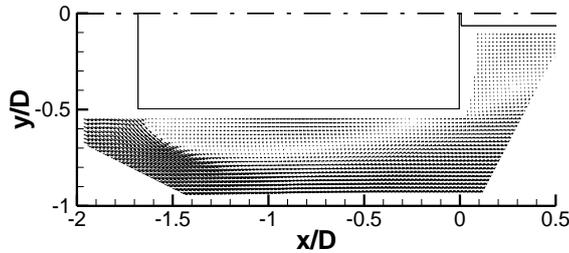
また、平均化した流れ場における流線を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の円柱背面付近に着目してみると、スティング無し円柱では後縁の周囲に形成される渦が背面中心部にまで到達している様子が観測される。一方、スティング有り円柱では、後縁付近の流れがスティングの表面に沿った渦を形成している様子が伺える。これらの平均流れ場の構造の違いから、円柱背面付近の再循環領域にスティングが干渉することで模型の背圧に影響を受け、結果として円柱に作用する抗力に差異が生じるものと推測される。

Fig. 11 に $Re = 3.5 \times 10^4$ における円柱周りの流れの乱流強度分布を示す (平均フレーム数: スティング無し 100 枚, スティング有り 500 枚)。スティング無し円柱と gap = 3.5mm のスティング有り

円柱では、前縁から剥離した流れ場にも乱れのピークが認められ、 $x/D = -1$ よりも下流まで乱れが大きいままである。一方、 $gap = 1.5$, 0.8 のスティング有り円柱では前縁付近にのみ乱れのピークが確認され、 $x/D = -1$ 程度よりも下流では乱れが小さくなっている。この結果から gap の値が小さくなるにつれて剥離した流れ場の乱れが早く減衰していくことが判る。したがって、以上の結果は後方に存在するスティングが後流ばかりでなく、円柱周りの流れ全体に影響を及ぼす可能性を示唆している。

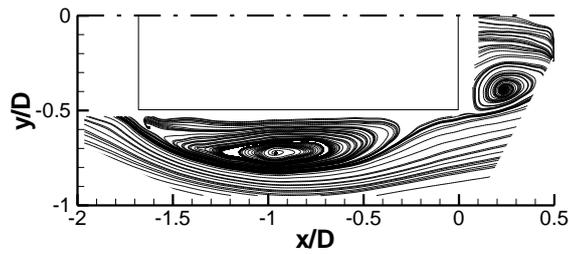


(a) without dummy sting

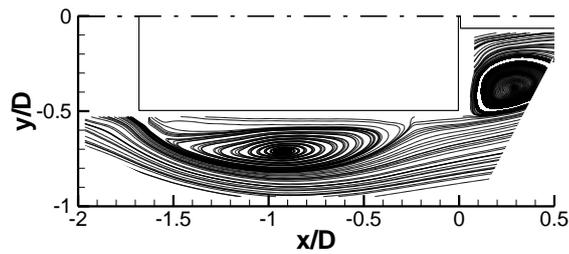


(b) with a dummy sting (gap = 0.8mm)

Fig. 9: Average velocity distribution ($Re = 3.5 \times 10^4$)

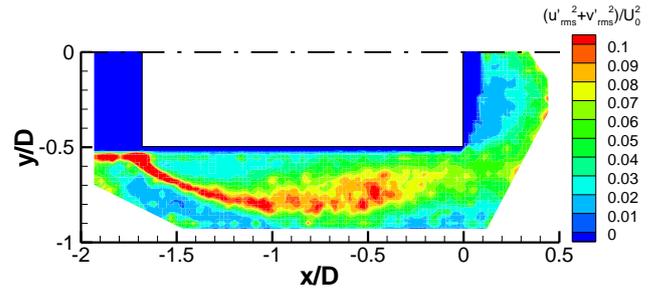


(a) without dummy sting

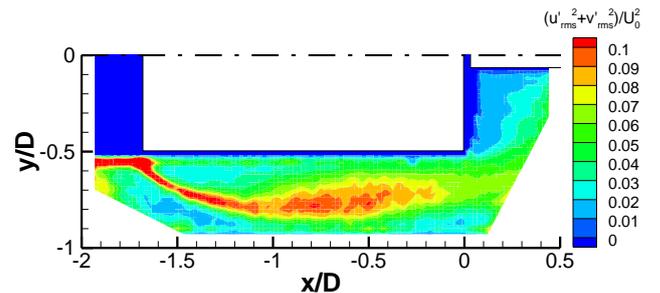


(b) with a dummy sting (gap = 0.8mm)

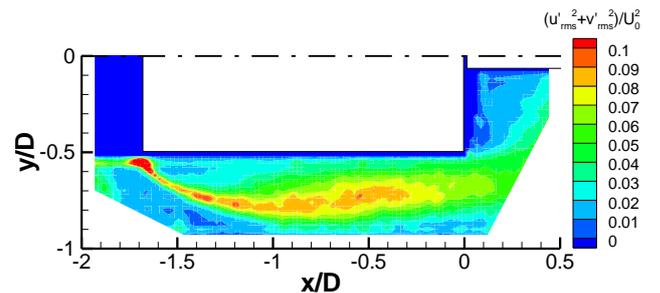
Fig. 10: Streamlines at averaged flow field ($Re = 3.5 \times 10^4$)



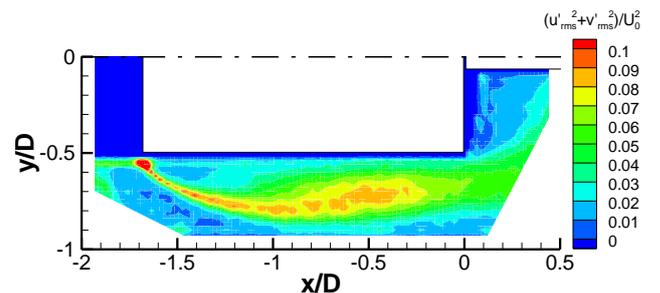
(a) without dummy sting



(b) with a dummy sting (gap = 3.5mm)



(c) with a dummy sting (gap = 1.5mm)



(d) with a dummy sting (gap = 0.8mm)

Fig. 11: Turbulence intensity distribution ($Re = 3.5 \times 10^4$)

6. まとめ

JAXA60cm 磁力支持天秤装置を用いて直径 110mm, 細長比 1.68 の円柱を気流に平行に支持し、模型後方からのスティング支持と同様の状況における円柱に作用する抗力および円柱周りの流れ場の計測を実施した。その結果、以下のことが判明した。

- Re 数が $1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ の範囲では後方にスティングが存在することで円柱の抵抗係数が小さくなる。

- C_D が極小値を取るときの Re 数は円柱とスティングの間の距離で異なる。
- 平均流れに対する流線の様子から、スティングの存在が円柱背面付近の渦形成に影響を与え、この流れ場の違いが背圧や抗力に影響を与えるものと考えられる。
- 乱流強度分布から剥離領域における乱れの依存性が示され、スティングの影響が円柱周りの流れ場全体に影響を与えることが伺える。

謝辞

本研究を実施するにあたり、早稲田大学の前島陽平氏および電気通信大学の小森雄太氏、大川恭平氏、柿崎広平氏には実験準備からデータ計測まで多大なご協力を賜りました。また JAXA 風洞センターの鈴木幸一氏、加藤裕之氏には PIV 計測に関してのご助力とご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 澤田秀夫, 樋口博, 国益徹也, 須田信一, “気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数”, 日本風工学会論文集, 4-29 (2004), pp. 55-62.
- (2) Eiffel, G., “The Resistance of the Air and Aviation,” (translated by Hunsaker, J. C.), London: Constable Co., Boston: Houghton, Mifflin & Co., (1913), pp. 65-68.
- (3) Roberson, J. A. and Crowe, C. T., “Engineering Fluid Mechanics,” 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., (1997), pp. 481-502.
- (4) Higuchi, H., Sawada, H. and Kato, H., “Sting-free measurements on a magnetically supported right circular cylinder aligned with the free stream,” Journal of Fluid Mechanics, 596 (2008), pp. 49-72.
- (5) 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一, 御簾納徹, 樋口博, “気流に平行な円柱の背圧と細長比の関係”, 流体力学講演会講演集, 37 (2005), pp. 255-258.
- (6) 磁力支持風洞試験データベース, <http://jaxamsbs.jaxa.jp>
- (7) 澤田秀夫, 国益徹也, “低速風洞用 60cm 磁力支持装置の開発”, 日本航空宇宙学会論文集, 50-580 (2002), pp. 188-195.
- (8) Pankhurst, R. C. and Holder, D. W., “Wind-Tunnel Technique,” SIR ISAACPITMAN & SONS, LTD., (1952), pp. 340-349.
- (9) 加藤裕之, 樋口博, 澤田秀夫, 国益徹也, 橋本拓郎, “気流に平行に磁力支持された円柱の PIV 計測”, 可視化情報シンポジウム講演論文集, 37 (2006), pp. 101-104.