

細長比1.27から1.79までの気流に平行な円柱の抵抗と背圧

Drag and Base Pressure of Axial Cylinder at Fineness Ratios from 1.27 to 1.79

澤田秀夫¹、国益徹也²、須田信一³、御簾納徹⁴、樋口博⁵
Hideo SAWADA, Tetsuya KUNIMASU, Shinichi SUDA, Touru MISUNOU, Hiroshi HIGUCHI

SUMMARY

Drag and base pressure of axial circular cylinder with a 110mm diameter model were measured without any support interference, utilizing the JAXA 60cm MSBS (Magnetic Suspension and Balance System) at speeds from 8m/s to 15m/s. The drag coefficient depended on the fineness ratio of the cylinder (1.27-1.79) but not on the Reynolds number within the tested range (45,000-110,000). The drag coefficient took a minimum value around the fineness ratios from 1.6 to 1.8. The base pressure coefficient took a maximum value around the same fineness ratio region and showed Reynolds number dependency at fineness ratios from 1.27 to 1.55 but not at the ratios from 1.65 to 1.79.

Key Words : Wake, Axis-symmetric Flow, Base Pressure, Drag, Flow Measurements

1. はじめに

気流に平行に置かれた円柱では細長比(円柱長さ L (m)、円柱直径 D (m)とすると、細長比(fineness ratio)は L/D と定義される。)が円板に相当する値である0から大きくなるにつれ、後流を含む円柱周りの流れが大きく変化することが知られている^{1),2)}。円柱の抵抗係数(抵抗 F_D (N)、一様流動圧 q (Pa)、円柱断面積 S (m^2)とすると、抵抗係数 C_D は $F_D/(qS)$ と定義される。)は細長比が0の場合、約1.17と言われており²⁾、細長比が大きくなるにつれて、抵抗係数は一旦減少し、その後増加に転じることが知られている。更に、細長比が4以上では円柱前縁部分から剥離した流れが再付着し、その後乱流境界層に近い流れを形成する。この結果、細長比が増加すると、その増加に伴う再

付着部分の抵抗増加分に相当する抵抗係数の増加を示すことが分かっている³⁾。また、細長比1.27以上4未満の抵抗係数測定結果は文献4)、5)に示されており、既存の計測値とは細長比2付近で大きく異なった値を示している。細長比が2付近でのこのような抵抗係数の細長比依存性を決定している要因は粘性抵抗の変化によるのではなく、流れが円柱前縁から剥離して形成する大きな後流とその中に含まれる円柱自身との間で起こる複雑な干渉によるものと考えられる。当然、こうした干渉は円柱後縁の圧力(背圧)にも強く影響し合っているものと考えられる。しかしながら、模型後縁に後方からステイングのようなもので支持するのでは、正しい背圧を測定できる保証は無く、信頼できる背圧測定結果が求められる。こうした

-
1. 宇宙航空研究開発機構、総合技術研究本部、空気力学研究G 先進空力実験セクション 工博
Aerodynamic Research G, the Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency, Dr. Eng.
 2. 宇宙航空研究開発機構、総合技術研究本部、空気力学研究G 先進空力実験セクション
Aerodynamic Research G, the Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency
 3. 宇宙航空研究開発機構、総合技術研究本部、空気力学研究G 先進空力実験セクション 工博
Aerodynamic Research G, the Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency
 4. NEC エンジニアリング株式会社モバイルブロードバンド事業部 センサシステム部
NEC Engineering, Ltd Mobile Broadband Division Sensor Systems Department, Engineer
 5. シラキュース大学機械航空宇宙工学部 教授 Ph. D.
Department of Mechanical and, Aerospace Engineering, Syracuse University, Professor

場合の背圧測定では、支持の影響を受けることの無い磁力支持による計測が適切と考える。宇宙航空研究開発機構（JAXA）の60cm磁力支持天秤装置（以降、60cmMSBSと呼ぶ。）を用い、図1に示す様に、支持干渉の無い状態で模型を支持しながら、NECエンジニアリング製の無線伝送機器を用いて模型の背圧計測を実施した。なお、JAXAの60cmMSBSと磁力支持風洞の詳細は文献6)を参照されたい。

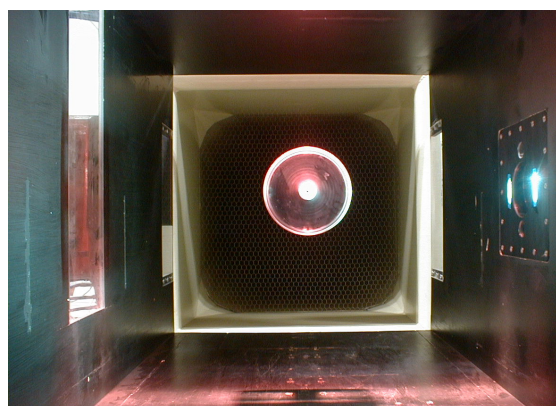


図1 磁力支持中の円柱（直径110mm円柱）
(Figure 1. A magnetically suspended cylinder model.)

2. 抗力係数測定試験

2.1. 円柱模型と風洞気流

文献3)で示されている細長比4以上の試験では直径が45mmの模型を用いたので、模型断面積は測定部断面の大きさ（600mm角）に比して小さく、阻塞比（円柱断面積 S (m²)、測定部断面積 A (m²)とすると、阻塞比は S/A と定義される。)は0.44%であった。一方、JAXA 60cmMSBSの模型位置姿勢センサーの性能上の制限から、模型全長が140mm以下にできないので、細長比を小さくするために円柱直径を増やすことにし、細長比2付近の試験を行うために模型直径を110mmにした。模型長さは基本模型の前後に薄い円板状のスペーサーを取り付けて変化させ、表1に示す複数の細長比で試験を実施した。円柱直径が大きいため阻塞比が2.64%になり、阻塞効果の影響を考慮する必要がある。細長比2以下では前縁で剥離した流れが模型後縁までに再付着しない場合もあるので、大き

表1 抵抗測定に用いた模型の細長比
(Table 1. Model fineness ratios used in the drag measurements.)

Diameter (mm) (D)	Blockage ratio (%)	Fineness ratio(L/D)
110	2.64	1.27, 1.31, 1.35, 1.41, 1.55, 1.62, 1.68, 1.79

な剥離域を伴う阻塞効果があると思われる。このため、Maskell が提案している鈍頭物体に対する blockage factor の値⁷⁾を使って阻塞効果の補正を施した。

模型が気流に平行かどうかの確認は模型直径が大きいため、後流域が大きく全体の総圧分布を測定して、一様流方向の速度分布が同心円状に変化することを確認する方法は非効率となる。このため、模型の姿勢を変化させたときに模型に作用する空気力の変化から気流に平行な模型の姿勢角を決定した。模型に加わる揚力、横力は非常に小さいが、変化そのものは十分に捉えることはできた。なお、模型の抗力測定精度は文献3)と同じ方法で評価した。また、一様流乱れは0.1%未満である。

2.2. 抗力測定結果

抗力測定試験は風速(U)が7 m/s から15 m/s までの範囲で実施し、文献3)のデータとレイノルズ数（一様流速 U (m/s)、円柱直径 D (m)、動粘性係数 ν (m²/s)とすると、レイノルズ数 Re は UD/ν と定義される。)が100,000で比較できるようにしている。総ての抗力は測定部中心の動圧と模型断面積の積により抵抗係数の形に無次元化され、更に、浮力効果補正を施した。

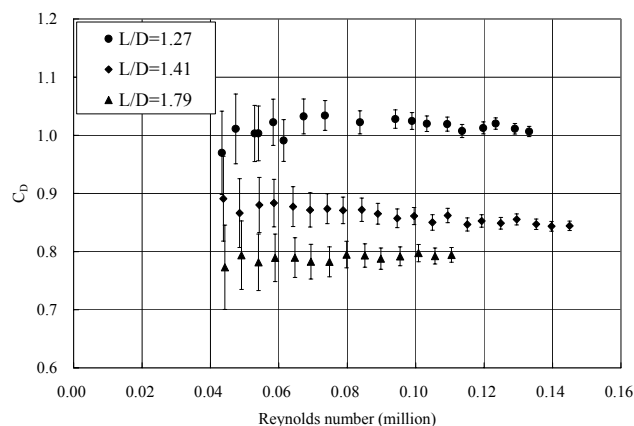


図2 抵抗係数のレイノルズ数依存性
(Figure 2. Drag coefficient versus Re .)

抵抗係数のレイノルズ数依存性を調べると図2の様になり、誤差を考慮するとレイノルズ数40,000から100,000までの範囲では有意なレイノルズ数依存性は観られない。また、文献3)の直径45mm円柱模型の場合でも、このレイノルズ数域ではレイノルズ数依存性は観られていない。

鈍頭物体の阻塞効果の補正方法は現在でも重要な研究課題であり、確実に補正できる方法は無い。しかしながら、実用上しばしば利用される方法として、前節に触れたMaskellの方法がある⁷⁾。この方法は半実験式で正方形断面をした板状物体の阻塞効果評価結果を基にして提

案されたものであり、多くの鈍頭物体の阻塞効果補正に適用できるとしている。文献7)では **blockage factor** として 2.5 の値を用いれば、Maskell の方法による補正結果と実用上同等な結果が得られるとしているので、この値を用いて阻塞効果の影響を調べた。また、流線型物体の阻塞効果補正法⁸⁾も本測定結果に適用した。本試験の阻塞効果はこれら2つの評価結果の間に在ると考えることができる。図3にこれらの評価結果を示す。○印の磁力支持天秤装置による抵抗測定結果に Maskell の **blockage factor** を適用した結果を●印で示し、流線型物体の阻塞効果補正を施したものを◆印で示した。Maskell の **blockage factor** を適用した補正結果では、抵抗係数は測定値の5%から7%ほど減少するという結果を得た。一方、流線型物体の阻塞効果の補正を施すと、Maskell の **blockage factor** を適用した場合の約半分で2.5%程の減少にとどまる。このため、抵抗係数の値は阻塞効果に伴い2.5%から7%程度の誤差が見込まれると推定される。なお、阻塞比0.44%に相当する直径45mmの模型では、同様の評価をすると阻塞効果の影響は一般的な流線型物体の阻塞効果補正方法⁸⁾を適用した場合も Maskell の **blockage factor** を適用した場合もほぼ同じであり、また阻塞効果自体が小さく抵抗係数の値は殆ど変わらない。

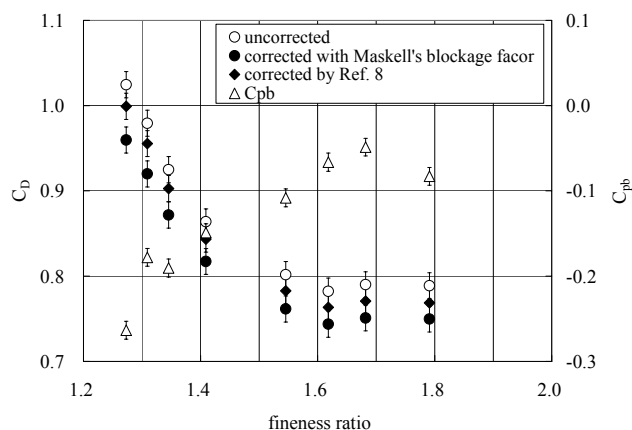


図3 抵抗係数と背圧係数の細長比依存性
(Figure 3. Drag and base pressure coefficients
Versus fineness ratio from 1.27 to 1.79.)

この様に阻塞効果による誤差を考慮に入れても、細長比が1.27から1.55付近まで増加するにつれて、抵抗係数は急速に減少し、細長比1.6から1.8辺りではほぼ一定値になる。直径45mmの模型による細長比が4以上の抵抗係数の値が0.85以上であることを考慮すると、細長比1.6から1.8付近で極小値を取っているものと推定され、その値は少なくとも0.8以下であると言える。この辺りの細長比における流れは、円柱前縁で剥離した流れが再附着する場合に相当すると考えられ、後流構造が複雑に変化

しているものと予想される。細長比が1.27から1.5までの間の流れでは前縁で剥離した流れはもはや模型表面に再附着することは無いと期待されるので、時間平均の抵抗係数変化の原因は後縁の時間平均圧力が細長比の増加に伴い増加するためと考えられる。詳細は3.2章において論じる。

3. 背圧測定試験

3.1. 模型と伝送機器

背圧測定には NEC エンジニアリング製無線伝送機器を用いた。仕様はサンプリング速度が最大12.5kHz、4ch同時サンプリング、12 bit AD変換、測定信号はデジタルデータとして伝送可能な双方向無線LAN方式である。本機器は磁力支持天秤装置内の強い変動磁場内で、データ送信を可能とするようにしており、磁力支持中の模型内に格納された圧力変換器からの出力をA/D変換してから送信することにより、磁場の影響を受けずに正確に伝送することが可能である。

本試験では圧力変換器は500Pa FSの差圧型1台を用い、電源には電池を利用して模型中心軸上の前後の圧力差を測定した。模型の圧力孔は模型上流側と後流側の円板中心部分に直径0.5mmの穴を明け、ビニールチューブにより差圧型圧力変換器の両端に接続した。上流側圧力は模型が気流に正対しているため総圧に対応し、下流側は模型後縁の中心点の圧力（ここでは背圧と呼ぶ）となる。

模型内部の磁石として外径100mm、内径75mm、高さ100mmの円環磁石を利用し、図4のように円環内部に伝送機器、圧力変換器、電源を組み込んだ。模型の細長比は長さ140mmの基準模型の後縁部に4種類のスペーサーを組み合わせて追加する方法で変化させた。スペーサーを変更する毎に圧力測定用のパイプも変更し、表1の細長

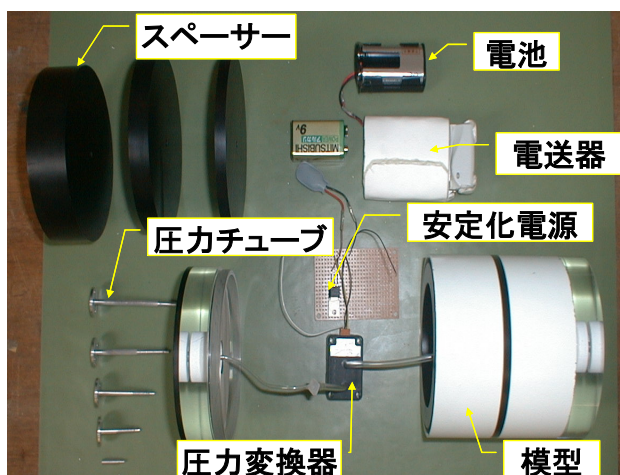


図4 圧力伝送システムと模型
(Figure 4. A pressure telemeter system and a model.)

比に対して背圧測定を実施した。差圧型圧力変換器はMKS社のバラトロン型圧力変換器698A11Tで較正した。

3.2. 背圧測定結果

約4秒間にわたり計測した背圧を平均して、一様流静圧を基準にした圧力係数 (C_{pb} , $C_{pb}=(P_b-P_s)/q$, P_b : 背圧, P_s : 一様流静圧, q : 一様流動圧) に変換し、細長比に対して得られた圧力係数を図3にプロットした。抗力係数とは反対に細長比が1.27から1.6まで増大するにつれて C_{pb} は急速に増加し、その後、細長比が更に増えると減少に転じている。このため、細長比1.6から1.8の間で極大値を取っていると考えられる。文献3)で模型後縁部の境界層から抵抗係数を評価した結果によると、 C_{pb} は細長比4以上では-0.35程度と評価されている。この結果、 C_{pb} は細長比1.8以上4付近までは細長比の増大につれて減少すると考えるのが合理的である。文献7、9)によると、模型背面部の圧力分布はほぼ一定であることが報告されている。このことから細長比1.27から2付近までは模型背圧の変化が円柱の抗力係数の変化の原因であると言える。

図5に示す様に、細長比1.27から1.55までは背圧の圧力係数には有意なレイノルズ数依存性が観られるが、2章で指摘した様に、この細長比範囲では抵抗係数には有意なレイノルズ数依存性は観られていない。一方、抵抗係数が極小値を取る付近の細長比では C_{pb} には有意なレイノルズ数依存性は観られなかった。

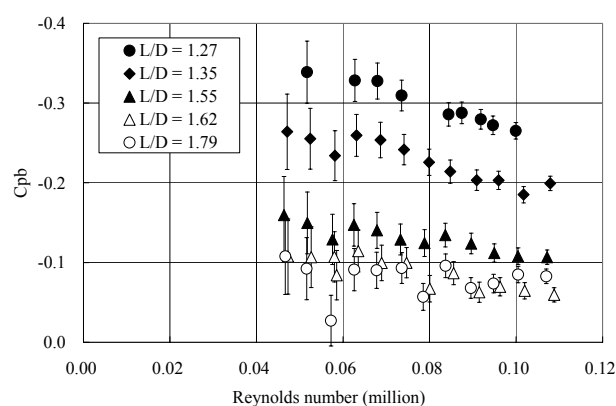


図5 背圧係数のレイノルズ数依存性

4. まとめ

磁力支持天秤装置を用いて支持干渉の無い状態で、レイノルズ数100,000で気流に平行に磁力支持した直径110mm円柱の抵抗係数及び背圧の圧力係数と細長比の関係を測定した。その結果を以下にまとめる。

(1) 細長比1.6から1.8付近で抵抗係数は極小値を取り、背圧の圧力係数は極大値を取る。

- (2) 抵抗係数の極小値は0.8以下であり、背圧係数の極大値は約-0.05である。
- (3) 細長比1.27から2付近までは模型背圧の変化が円柱の抗力変化の原因である。
- (4) 背圧の圧力係数のレイノルズ数依存性は細長比1.27から1.55の間では観測されるが、1.65以上1.79以下では観測されない。これは文献5)で検討したように付着間際のせん断層がレイノルズ数の影響を受けるためと思われる。今後の検討を要する。

あとがき

本研究は平成17年度科学研究費補助金により実施されたものである。また、背圧計測はNECエンジニアリング(株)との共同研究により実施されたものである。

参考文献

- 1) J. A. Roberson and C. T. Crowe: "Engineering Fluid Mechanics," 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., p. 441, (1997)
- 2) S. F. Hoerner: "Fluid-Dynamic Drag", published by author, pp.3-12, (1958)
- 3) 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、Vol.29, No.4, pp.55-62, (2004)
- 4) H. Higuchi, H. Sawada, P. Van Langen: "Flow over a Magnetically Suspended Cylinder in an Axial Free Stream", AIAA-2005-1078, (2005)
- 5) H. Higuchi, P. Van Langen, H. Sawada, C. E. Tinney: "Axial Flow over a Blunt Circular Cylinder with and without Shear Layer Reattachment", Journal of Fluid and Structures, 22, pp.949-959, (2006)
- 6) 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、第50巻、第580号、pp.188-195, (2002)
- 7) E. C. Maskell: "A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel", ARC R.&M. No.3400, (1965)
- 8) R. C. Pankhurst, D. W. Holder: "Wind-Tunnel Technique", Sir Issac Pitman & Sons, Ltd, pp.340-348, (1952)
- 9) J. R. Roberson, et al.: "Turbulence Effects on Drag of Sharp-Edged Bodies", J. Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp.1187-1203, (1972)