

気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数 Drag coefficients of cylinders magnetically supported in axial flow

澤田秀夫¹、樋口 博²、国益徹也³、須田信一⁴
Hideo Sawada, Hiroshi Higuchi, Tetsuya Kunimasu, Shinichi Suda

SUMMARY

Drag coefficient of axial cylinders was measured without any support interference, utilizing JAXA 60cm MSBS(Magnetic Suspension and Balance System) at speeds from 20m/s to 35m/s. Drag coefficient depended on the fineness ratio of the cylinder but not on the Reynolds number within the range tested (50,000-100,000 based on the cylinder diameter). The drag coefficient increased proportionally with the fineness ratio larger than 4.13, corresponding to the turbulent boundary layer growth downstream of the reattachment line. The present data supersede those of two earlier sources by Hoerner and Eiffel at fineness ratios larger than 4.

Key words: bluff body aerodynamics, drag, wake, MSBS

1. はじめに

気流に平行に置かれた円柱では細長比が0から2付近まで大きくなるにつれて抵抗係数(C_D)が減少し、細長比2から3付近の値を越え、更に増すと抵抗係数は増加に転じるデータ(を記した文献1)と、ほぼ一定値を維持するという文献2)が見られる。円盤前縁から剥離した流れの円柱との干渉に注目した研究はあるが³⁾、全抗力を測定する際 尾部にスティングを取付ければ、後流とスティングの干渉を生じる。一方、円柱前部にスティングを取付けて後流を計測する場合は円柱前部の抗力への影響を判定することが困難である。ワイヤでの支持も角度調整や乱流擾乱などの問題がある。

磁力支持天秤装置は磁気ので風洞模型を支持し、模型に加わる空気力を計測するもので、支持干渉が無

く、円柱の後流と抵抗を同時に計測できる。そこで、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の60cm磁力支持天秤装置(60cmMSBS)を用いて、気流に平行に置かれた幾つかの細長比の円柱抵抗と後流を測定した。(図1参



図1 磁力支持中の円柱(直径45mm円柱)
(Figure 1 A magnetically suspended cylinder)

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 SG 工博
Aerodynamic Research G., the Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency, Dr. Eng.

²シラクース大学機械・航空宇宙生産工学部 教授 Ph. D.

Department of Mechanical, Aerospace, and Manufacturing Engineering, Syracuse University, Professor

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 SG

Aerodynamic Research G., the Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency

⁴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 SG 工博

Aerodynamic Research G., the Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency. Dr. Eng.

照) JAXAの磁力支持天秤装置と磁力支持風洞の詳細は文献4)を参照されたい。

2. 抗力係数測定試験

2.1. 円柱模型と風洞気流

本試験に用いた円柱は2種類で、直径(D) 25mmの円柱は長さ(L)が150mmで細長比(L/D)は6.00である。直径45mmの円柱は基本形状の長さが186mmで、この両端にプラスチック製の円柱端部を連結できるようにしている。3種類の円柱端部と基本形状の端部の組合せにより、9通りの細長比を実現した。図2参照。但し、円柱端部は後から製作したため、直径が基本模型のものより若干小さく、約0.15mmの段差が円周状に模型前後に存在している。試験した模型と細長比の組合せを表1に示す。

気流と平行になる様に直径45mm、長さ226mm (L/D=5.02)の円柱では模型後縁から275mm下流(x軸方向)で後流の総圧損失量が上下方向(鉛直上方をz軸の正とする。)と水平方向(y軸として、x,z軸と共に右手系をなす方向をy軸の正とする。)でそれぞれ対称になる様に姿勢角を調整した。調整後のy軸とz軸方向のu/U分布を対称軸に関して鏡像となるu/U分布と共に図3に描いた。y軸とz軸に関して対称性が確保されたことを確認した後、最終的に後流断面での総圧損失を測り、等高線が円形に近く、時間的平均流では軸対称流れが成

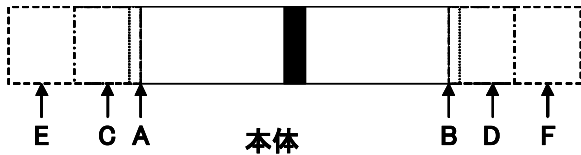


図2 直径45mm φ 円柱模型組立図

(Figure 2 Setup of 45mm diameter cylinder models)

表1 抵抗測定試験に用いた模型 (Table 1 models used in the drag measurement tests)

Model ID	Diameter (mm) (D)	Fineness ratio(L/D)	Coefficient (A/N)
#25-0	25	6.00	75.906
#45-0	45	4.13	39.234
#45+B	45	4.58	39.304
#45+A+B	45	5.02	39.274
#45+D	45	5.47	
#45+B+C	45	5.91	39.202
#45+F	45	6.13	39.175
#45+C+D	45	6.80	
#45+C+F	45	7.47	39.293
#45+E+F	45	8.13	39.290

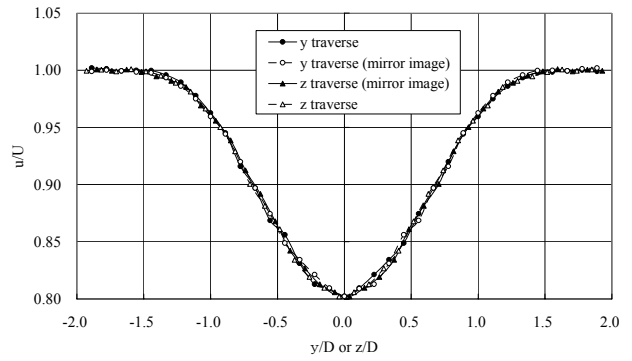


図3 45 φ 円柱後流y軸、z軸に関する対称性(x/D= 6.11) (Figure 3 Axial-symmetry of u/U in the wake of a 45mm diameter axial cylinder, x/D= 6.11)

立していることを確認した。図4に直径45mm円柱の後流のu/U分布を示した。測定位置は円柱後端から275mm下流位置である。図からほぼ軸対称流れが実現していることが伺える。

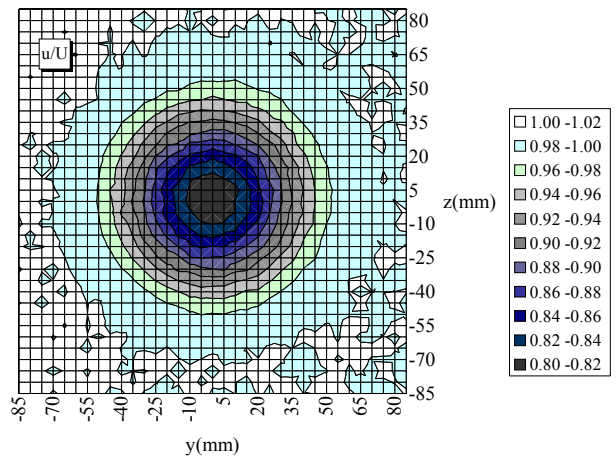


図4 直径45mm円柱後流測定結果 (x/D=6.11)

(Figure 4 u/U distribution over wake of the 45mm diameter cylinder, x/D= 6.11)

2.2. 天秤較正と測定精度評価

磁力支持天秤装置で抗力を測定するには、試験模型を用いて抗力較正試験を行う必要がある。試験は模型の後端からナイロン製の糸で、下流へ既知の重りで引き、この時の平均抗力コイル電流との関係を求めるものである。模型内部に入れている永久磁石が共通なので、抗力較正試験は総ての細長比の模型に対しては実施していない。計測した総てのケースで0.2%以内の誤差で一致している。表1にこの抗力較正試験結果も併せて示している。

測定した抗力係数に含まれる誤差はこの他に、動圧測定誤差、模型寸法誤差等がある。直径を基準長にしたレイノルズ数(一様流速U、円柱直径D、動粘性係数νとす

ると、レイノルズ数 Re_D は UD/ν と定義される。)が100,000では抗力係数で±0.005の総誤差が見込まれた。詳細な精度評価結果は付録Aを参照されたい。

2.3. 磁力支持模型の運動の影響

図5に細長比6.13円柱模型の36.5m/s気流中での支持状態を示す。縦軸の一目盛りは0.4mmに相当して、位置変動はほぼ±0.2mm以内に収まっていることが判る。風洞試験中は無風時に比べて模型の運動は図に示す様に大きくなっているが、一定時間の平均量を取ることで、こうした模型運動の影響を取り除くことが出来る。例えば、一様流方向(x軸)の運動を考え、有る時間間隔(T)の時間平均を取ることを考えると、磁力支持されている模型の運動方程式から、以下のような式を得る。

$$m \cdot \ddot{x} = F_m + F_{aero} \quad \dots (1)$$

$$m \cdot \frac{\dot{x}(T) - \dot{x}(0)}{T} = \bar{F}_m + \bar{F}_{aero}$$

ここで、 m は磁力支持模型の質量、 F_m と F_{aero} はそれぞれ模型に作用する磁気力と空気力のx方向成分を示す。また F の上付横棒は時間T間の平均量を表す。この式からx方向の模型速度成分が小さければ、平均時間間隔を十分長くすることにより、模型の運動の影響を小さくできることを示している。こうした条件を満たせば、模型の運動が観測されても、時間平均的には模型が完全に静止している時と同様に磁気力と空気力が釣り合っていると見なせ、平均コイル電流から模型に作用する平均空気力を評価できることを保障している。本試験の場合は約8秒間の平均を取ることで、模型の運動に伴う抗力係数に含まれる誤差は0.0006と評価された。詳細な定量的評価結果は付録Bを参照されたい。

2.4. 抗力測定結果

抗力測定試験は主に一様流風速(U)が約20~35m/sで実施した。総ての抗力は測定部中心の動圧で無次元化

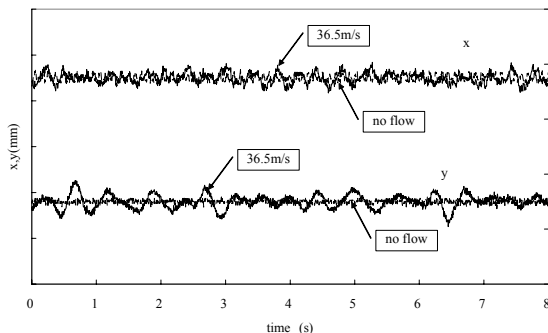


図5 模型位置姿勢の時間変化 (0.4mm/div)
fineness ratio : 6.13, flow speed : 36.5m/s
(Figure 5 Model position versus time)

され、浮力補正、阻塞効果補正が施されている⁵⁾。

直径45mm円柱の様々な細長比の場合で Re_D に対して抵抗係数を描いたものが図6である。較正試験で得られた最大偏差他の誤差要因から推定した誤差量を図中に誤差棒で示している。誤差範囲を考慮すると、この図から Re_D が60,000~100,000の範囲では、 Re_D 依存性は認められない。一方、細長比依存性に関しては、明らかに細長比が増大するにつれて抵抗係数も増加する傾向が伺える。

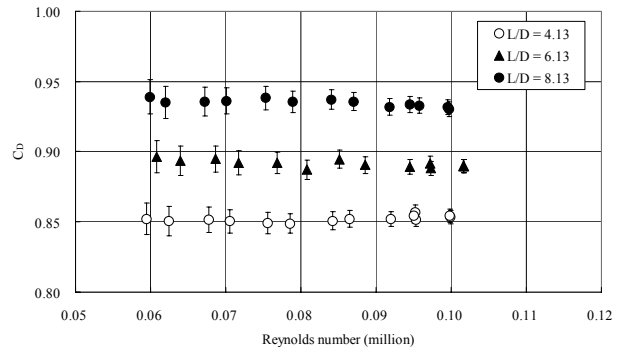


図6 抵抗係数のレイノルズ数依存性

(Figure 6 Drag coefficient versus Reynolds number)

取得データを Re_D に関して内挿または若干外挿して Re_D が100,000での抗力係数を求め、細長比との関係を図7に描いた。その結果、細長比4.13より大きい円柱の抵抗係数は細長比の増加に比例して抵抗係数が増大し、その比率は約0.0182であった。

後に述べるように円柱前縁で剥離した流れは少なくとも約1.5D以上下流で再付着し、乱流境界層を形成して下流へ流れていく。平板の乱流境界層の摩擦係数から再付着後の円柱表面の抵抗係数寄与分を評価して、細長比に対する増加率を求めると、境界層の1/7乗則近似⁶⁾及び対数則近似⁶⁾ではどちらも0.0167という値を示した。円柱全体の抵抗係数の細長比に対する増加率と、平板乱流境界層の摩擦係数から評価した抵抗係数増加

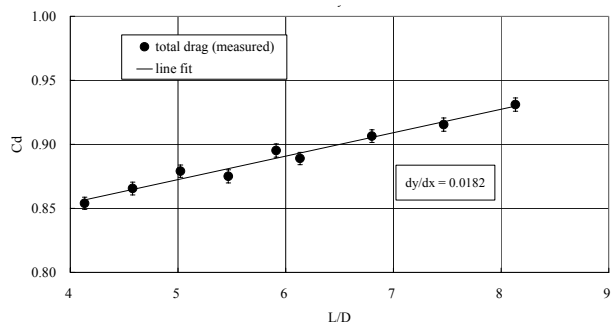


図7 抵抗係数の細長比依存性

(Figure 7 Drag coefficient versus fineness ratio)

率の間には若干の差異は残るが、前面及び底面圧力による抵抗寄与分が一定と仮定すると、細長比4.13~8.13の範囲における抵抗係数の細長比依存性は円柱長さの増加に伴う境界層摩擦抵抗の増加によると言える。

3. 後流計測

直径25mm円柱の後流計測では、後縁から10Dの位置で後流断面の総圧を計測し抵抗係数を評価した。総圧は一樣流の静圧を基準とした圧力係数に変換した。Betzの方法⁷⁾により後流から抗力係数を評価した結果、直径25mm円柱(細長比5)ではMSBS測定した結果より約1.6%小さく、細長比5.02の直径45mm円柱では約3%小さい結果を得た。後流から抗力係数を評価する場合は後流域の面積分となるため、3%程度の差異の主な原因は後流動圧測定精度と数値積分の誤差と考えられる。

直径45mm円柱の後流圧力損失を計測する際、ピトー管とその支持棒が後流にどの程度影響するかを評価するため、ピトー管を模型後縁から6.1D下流位置で、後流中心付近と後流外(中心から90mm離れた位置)及び、ピトー管とその支持棒を外した時の3通りで、円柱抗力係数を測定し比較した。図8から判るように三者は互いに誤差範囲内で同一値を取り、後流測定用ピトー管の影響は本試験精度では無視できた。

直径25mm円柱の後縁から0.04D, 2D, 4D, 10D下流の4点で熱線により後流を横切る直線上の速度分布を計測した結果を図9に示す。更に、変動成分のハースペクトルから2Dより下流で、模型中心軸から直角方向に1D迄広がる領域内では後流渦放出ストローハル数(渦放出周波数 f 、円柱直径 D 、一樣流速 U に対してストローハル数は fD/U で定義される。)と思われる0.185程度に対応する周波数(238Hz)で変動成分のピークを観測した。但し、総ての計測で観測は出来ていない。一方、10D下流では後流の内の殆ど

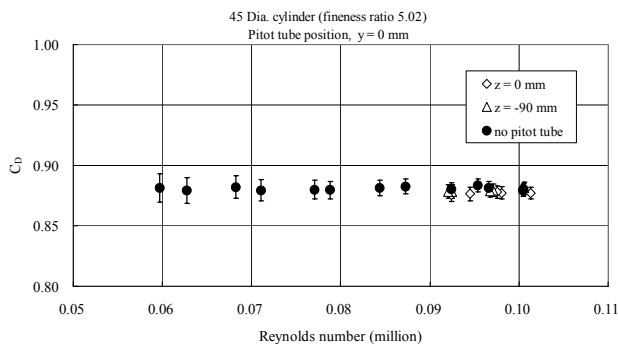


図8 後流測定用ピトー管の抗力係数への影響
(Figure 8 Drag coefficient versus Reynolds number, effect of a pitot tube for measuring pressure in wake)

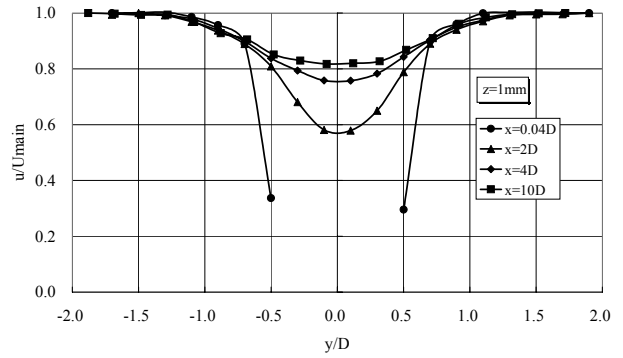


図9 直径25mm円柱後方の速度分布
(Figure 9 velocity distributions across the wake of 25mm diameter cylinder)

総ての観測位置でストローハル数を検出した。更に、後縁から1mm下流では乱流境界層の特徴により低周波変動成分のピークは観測できなかった。代表的な計測例を図10に示す。直径45mm円柱でも、後縁から1mm下流ではヘルムホルツ渦放出ストローハル数に対応する変動成分のピークは観測されなかった。

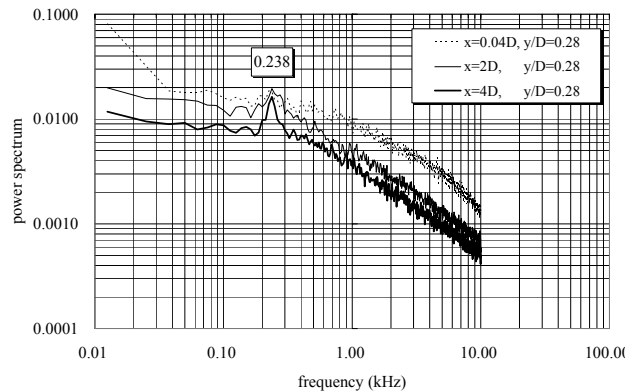


図10 直径25mm円柱に於けるストローハル数測定例
(Figure 10 Power density spectrum of velocity fluctuations in the wake of the 25mm diameter cylinder)

4. 後縁境界層測定結果

円柱後縁から1mm下流位置で、後流中心を通る水平軸(y軸)に沿って約1秒平均の速度分布と40ms間の速度変動を熱線で測定した。図11、12にはy軸に沿った平均速度比(u/U)分布と速度変動比のrms値(u_{rms}/U)を4通りの細長比について描いた。直径25mm円柱の場合は Re_D が50,000、直径45mm円柱の場合は100,000である。測定した平均速度分布から総ての細長比の円柱で、後縁までには流れは平均的には円柱表面に付着している。但し、細長比4.13の場合の速度分布は他のものに比べて、

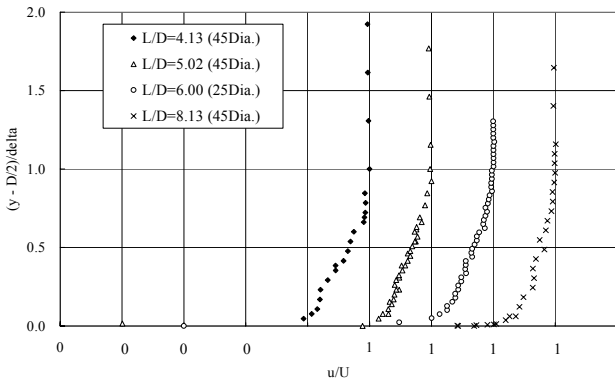


図11 平均速度分布の細長比依存性

(Figure 11 $\{y-(D/2)\}/\delta$ versus u/U , effect of fineness ratio)

$(y - D/2)/\delta$ が0.4以下で速度欠損部分大きい。また、同じ領域で、速度変動比のrms値は細長比4.13で最も大きく、細長比が増すにつれて減少している。多少不均一なプロファイルは短い平均時間のためと思われるが、円柱上で測定したOta⁸⁾らのデータと比較すると、shape factorはほぼ合っている。別の実験で一様流の乱流レベルは0.1%以下であった。図11に示した平均速度分布から運動量欠損に伴う抵抗係数寄与分を評価し、細長比に対して描き図13の●印で示す結果を得た。完全な軸対称流れの場合、抵抗係数は

$$C_D = 4 \frac{\theta}{R} - C_{pb} \quad \dots (2)$$

となる(付録C参照)。ここで、 θ は境界層の運動量厚さ、 R は円柱の半径、 C_{pb} は円柱底面の平均圧力係数であり、円柱周りの圧力は一様流圧力と仮定している。この結果、全体の抵抗(total drag)は運動量欠損に伴う抵抗と底面に作用する圧力抵抗(base drag)の和で近似できる。更に、運動量欠損に伴う抵抗は円柱前面にかかる圧力抵抗(forebody pressure drag)と円柱側面に作用する摩擦抵抗(friction drag)の和となる。図13には、磁

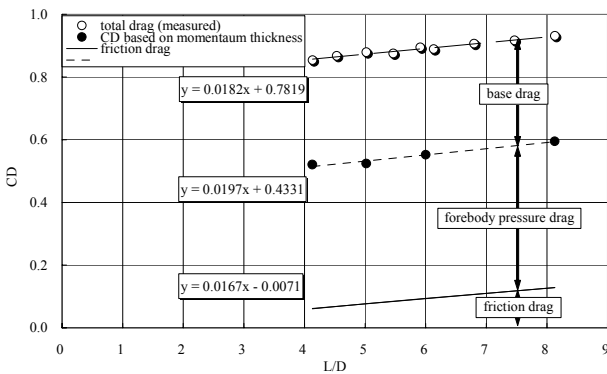


図13 運動量欠損に伴う抵抗係数の細長比依存性

(Figure 13 Drag coefficient based on momentum thickness versus fineness ratio)

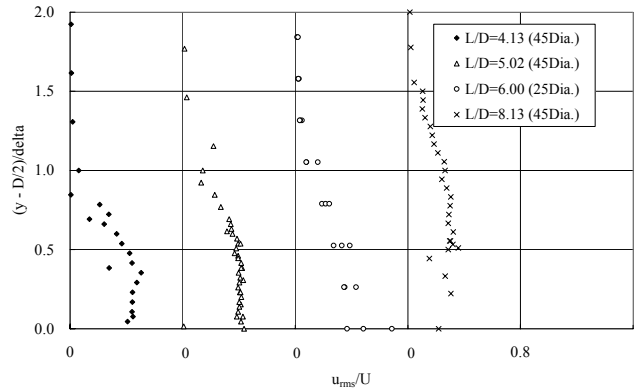


図12 速度変動のrms値と細長比の関係

(Figure 12 y/D versus u_{rms}/U , effect of fineness ratio)

力支持天秤で測定した全体の抵抗係数、模型後端での境界層速度分布測定結果から求めた運動量欠損に伴う抵抗係数、再付着位置を1.5Dとしてその後対数速度分布則に従う乱流境界層となった場合の摩擦抵抗の計3種類の抵抗係数を描いた。この結果、3種の抵抗係数の円柱細長比に対する増加率は互いに近い値であることが判った。また、付録Cに示すように底面抵抗は底面の圧力係数で近似的に決まるので、図13から底面圧力係数は約-0.35である。レイノルズ数が 10^5 付近で磁力支持を用いた支持干渉無しの球の背圧係数測定結果では約-0.40という報告があり¹²⁾、この値は合理的と考えられる。これらのことから、円柱前面にかかる圧力抵抗係数と底面抵抗係数は共に細長比に無関係にほぼ一定であると言える。

直径45mm円柱をスティング支持し、流速約30m/sでオイルフローにより表面流れを可視化した結果を図14に示す。図から模型前縁から再付着位置までの長さを測った結果、その長さはおおよそ1.6D~1.7Dであった。文献3)では再付着位置は1.5Dと記されていて、これに近い結果で

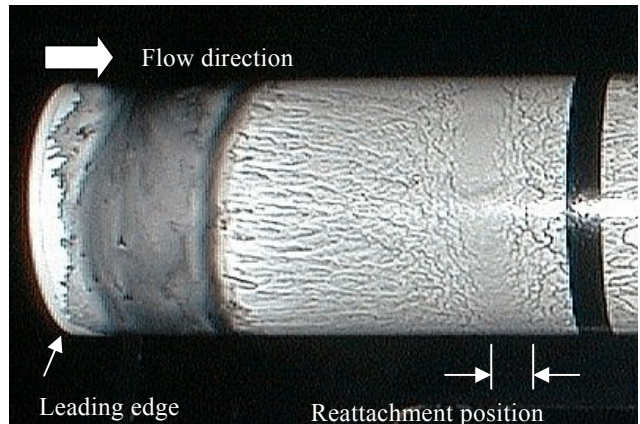


図14 オイルフローによる円柱表面流れの可視化結果

(Figure 14 flow pattern on 45mm diameter cylinder by oil-flow visualization)

ある。差異は一樣流乱れレベルやレイノルズ数の違いが影響したと考えられ、今後のさらなる考察予定項目である。

十分に発達した乱流境界層による後流の形成では、摩擦抵抗に細長比の影響が主に反映されていて、底面圧の抗力寄与は一定と考えられる。この結果、細長比4.13以上では、抵抗係数の細長比に対する増加率が一定で、乱流境界層による細長比に対する摩擦抗力の寄与分の抗力係数増加率が実験値にほぼ近い値となったものと考えられる。

5. 既存データとの比較

細長比変化に対する抵抗係数の変化について、本試験結果と共に文献1),2)のデータを図15に示す。図から判るように、Hoernerに引用されたEiffelのデータは細長比が4以上では抗力係数が増加していない。一方、Robersonのデータは細長比8で抗力係数は0.99を示している。本試験結果は細長比4付近では両者の結果とほぼ同じであるが、それより大きな細長比では両者と異なった値を取っている。既に記したように、本試験の抗力係数測定誤差は±0.005程度である。また、円柱の姿勢は後流を計測することで一樣流に平行に調整されている。なお、付録Dに示す様に、別の試験により同じ円柱が姿勢角0.6°だけ変化すると細長比8付近で抗力係数は高々約0.01増加する程度であることを確認している。また更に、本試験結果は磁力支持により円柱を支持していて、支柱干渉は存在しない。細長比8付近でのRobersonのデータと本試験結果との差量は0.06あり、測定誤差では説明できない。また、姿勢角の違いで説明するにはその差異は余りにも大きい。このことから、細長比8のRobersonのデータには模型支持方法の違いが現れた可能性があるものと考えられる。

一方、Hoernerが引用しているEiffelのデータ(参考文献2)の図21)は抗力係数が細長比4以上では細長比に依

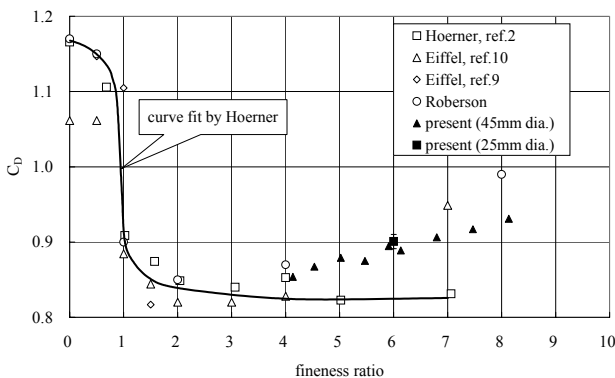


図15 円柱細長比に対する抗力係数変化
(Figure 15 Drag coefficient versus fineness ratio)

存しない傾向を示している。本試験結果は図15からも(詳細には図7から)、明らかに細長比依存性を示している。HoernerはEiffelの1907年のレポートを参照したようであるが、1907年の原典とは一致していない⁹⁾。Eiffelの1913年の風洞実験のレポート¹⁰⁾を見ると細長比依存性が出ています。摩擦抵抗を推測し差し引いたと思われるが、前者はよく引用されている事も鑑み、注意が必要である。

6. まとめ

気流と平行な姿勢の円柱抵抗を幾つかの細長比(4.13-8.13)について、JAXA60cmMSBSを用いて支持干渉の無い状態で試験を実施し、以下のことが判った。

- ✓ 直径を代表長にしたレイノルズ数で50,000~100,000では円柱の抵抗係数にレイノルズ数依存性は無い。
- ✓ 細長比4.13以上では、円柱前縁で剥離した流れは、1.5D以上下流で再付着し、その下流の円柱表面で乱流境界層が発達し、後縁に達している。
- ✓ 細長比4.13以上での円柱抗力係数の細長比依存性は、細長比増大による円柱長さの増加に伴う円柱表面に発達した乱流境界層の摩擦抵抗増加が主な原因である。

あとがき

本研究は平成15年度科学研究費補助金により実施された。

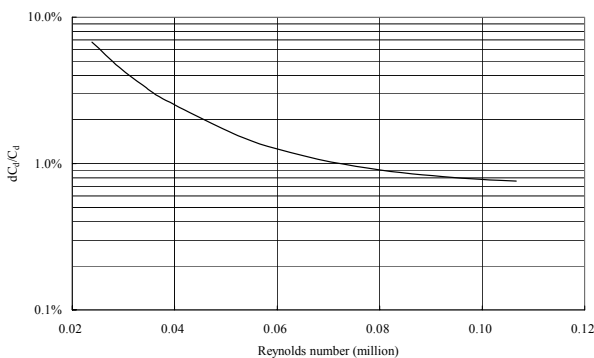
参考文献

1. J. A. Roberson and C. T. Crowe : "Engineering Fluid Mechanics," 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., 1997
2. S. F. Hoerner : "Fluid-Dynamic Drag", published by author, 1958, pp.3-12
3. K. Koeing and A. Roshko : "Study of Geometrical Effects on the Drag and Flow Field of Two Bluff Bodies Separated by a Gap," J. Fluid Mech. Vol. 156, 1985, pp.167-204
4. 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年5月号
5. Pankhurst,R.C. and Holder,D.W. : "Wind-Tunnel Technique", SIR ISAACPITMAN & SONS,LTD., 1952, pp.340-349
6. H.Schlichting,"Boundary-Layer Theory", 6th edition, McGraw-Hill, pp.596-606, 1968

7. 岡本哲史：「応用流体力学」、誠文堂新光社、1968, pp.260-262
8. T. Ota, "An Axisymmetric Separated and Reattached Flow on a Longitudinal Blunt Circular Cylinder" Journal of Applied Mechanics, June 1975, pp. 311-315.
9. G. Eiffel, "Recherches Expérimentales sur la Résistance de l'Air Exécutées à la Tour Eiffel," L. Maretheux, Impimeur, 1907
10. G. Eiffel: "The Resistance of the Air and Aviation," (translated by J. C. Hunsaker), London: Constable Co., Boston: Houghton, Mifflin & Co. 1913
11. 澤田秀夫、国益徹也、須田信一：「航技研60cm磁力支持天秤装置を用いた球形模型の抗力測定」、日本風工学論文集、Vol.98, 2004.1号
12. 澤田秀夫、国益徹也、須田信一、御簾納徹：「支持干渉の無い球の背圧測定結果」、日本風工学会誌、Vol.99, 2004.2号

付録A 抗力係数精度評価

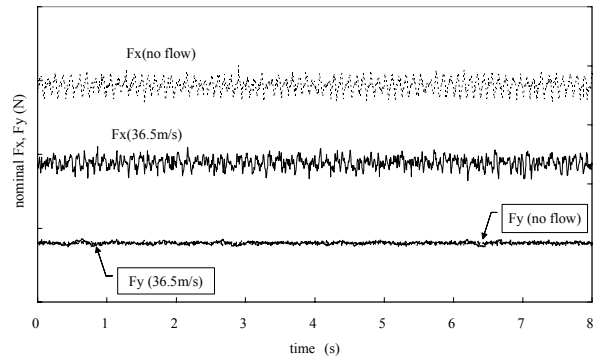
抗力係数の誤差評価では参考文献11)に記載されている磁力支持天秤装置の誤差評価方法を用いた。但し、誤差評価式において本試験レイノルズ数範囲での近似的な C_D 値として0.9を採用した。この結果、円柱直径を代表長としたレイノルズ数が0.1millionの時、約0.8%の誤差が予測される。図6,7,8にはこの誤差評価結果を誤差棒で示している。また、本試験のレイノルズ数範囲の誤差は図A-1に示す様にほぼ1%以下であることが期待できる。



図A-1 直径45mm円柱模型の誤差評価結果
(Figure A-1 Drag coefficient error evaluation result of a 45mm diameter cylinder)

付録B 模型位置姿勢変動の平均抗力への影響と非定常空気力について

模型に作用する磁気力は、模型を磁力支持する制御用



図B-1 模型に作用する磁気力の時間変化 (1N/div)
(Figure B-1 Nominal magnetic force versus time)

コイル電流から力較正試験結果を基に評価出来る。磁力支持されている模型には重力、磁気力の他に、気流中では空気力が作用している。模型が空中に一定の位置姿勢で静止している場合は、全体としてこれらの外力は釣り合い状態にある。実際には、模型は完全に静止状態にないので、平均加速度が十分小さくなるように、或る時間間隔で平均を取る。その結果、外力の時間平均値も十分小さくできる。図5の支持模型の質量は1.455kgである。抗力の場合、x座標測定値を25Hzのローパスフィルターに通した後、8秒間の平均加速度は 0.0005m/s^2 となり、平均外力は最大で 0.0007N となる。これは抗力係数で 0.0006 の誤差に対応し十分小さな値である。8秒間の抗力平均値を評価する場合は加速度の効果は無視できることを意味している。同様に、y軸方向に加わる外力(F_y)の8秒間平均値への加速度の効果は最大 0.00008N であった。図B-1は模型に作用している外力の成分の中、気流方向の F_x と気流に直角方向の F_y が気流中と静止気体中でどのように変わるかを示している。気流中では抗力に釣り合う磁気力が約1N発生している。磁気力成分 F_x の変動は大きいですが、静止気体中での F_x も同様に大きく、この変動力は流体に起因したものでない。一方、 F_y の時間履歴では平均的に静止気体中の F_y と同じ値を示している。また、 F_y では最大で 0.06N 程度の制御磁気力を示している。この結果、気流に直角方向の非定常空気力は高々 0.06N 程度の磁気力の大きさであることが伺える。実際に 0.1N 以下の非定常空気力を推定するには、模型位置の更に高精度な計測、コイル電流と模型位置の測定結果間での位相のずれを補償するデータ処理等の計測技術が求められる。

付録C 軸対称流れの抵抗係数評価

ここで考える物体は一樣流に平行に置かれた直径D、長さLの円柱とする。よって、流れは軸対称である。検査面Aとして、円柱から十分上流で円柱中心軸を共有する円

盤とその円周を通過する流線が円柱後縁面と接する同じ程度の大きさの円盤と交差する線で囲まれた円盤状の平面、これら2つを連結する流線で構成される円筒面状の曲面から成る閉曲面を採用する。

十分上流の円盤の検査面部分を A_0 、円柱後縁に接する円盤の検査面を A_1 、円筒状の面を A_s と名づける。 A_1 では速度は至る所一様流速で一定である。また、 A_s 上では圧力は静圧に一致している。よって、円柱に作用する抵抗(D)は以下のようになる。

$$D = \int_{A_0} \rho U^2 dA + \int_{A_0} p_\infty dA - \int_{A_1} \rho u^2 dA - \int_{A_1} p dA - \int_{A_s} p_\infty n_x dA \quad \dots (C-1)$$

ここで、 ρ は気体密度、 u は x 軸方向の局所速度成分、 p_∞ は一様静圧、 p は局所静圧、 n_x は検査面法線方向ベクトルの x 方向成分を表す。連続の式を考慮して(C-1)を変形すると、

$$D = \int_{A_1} \rho u (U_\infty - u) dA - \int_{A_1} p dA + \int_{A_0} p_\infty dA - \int_{A_s} p_\infty n_x dA \quad \dots (C-2)$$

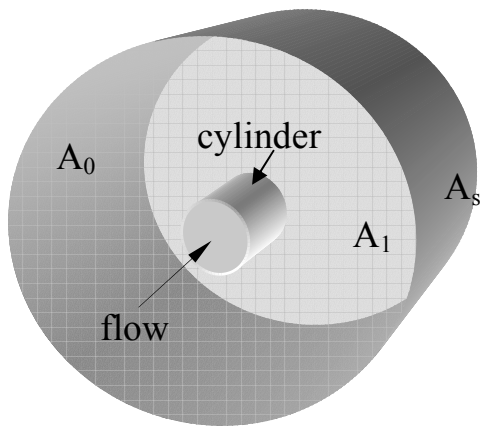
となる。更に、抗力係数 C_D に直して軸対称流れであることを考慮する。円柱中心軸を x 軸として、軸からの距離を r とすると、(C-2)式の円盤上の積分は、

$$C_D = \frac{4}{R^2} \int_0^{R_\infty} \left\{ \frac{u}{U_\infty} \left(1 - \frac{u}{U_\infty} \right) \right\} r dr - \frac{2}{R^2} \int_0^{R_\infty} C_p r dr \quad \dots (C-3)$$

ここで、 R_∞ は円盤状の検査面の半径であり、十分大きい値である。運動量厚 δ を導入すると、

$$C_D = 4 \left(\frac{\theta}{R} \right) - C_{pb} - \frac{2}{R^2} \int_R^\infty C_p r dr \quad \dots (C-4)$$

ここで、積分の上限を ∞ 印で記した。この意味は C_p が十分0になる地点までの積分であることを示す。円柱周りの流

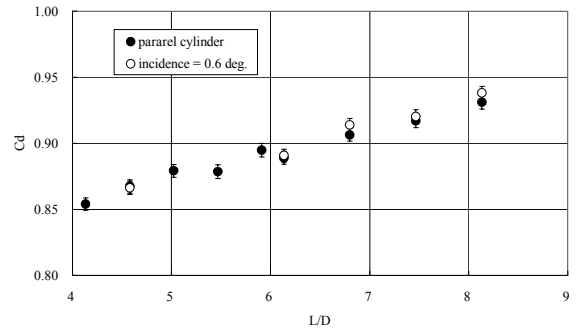


図C-1 気流に平行な円柱周りに設けた検査面A
(Figure C-1 Control volume A surrounding a cylinder parallel to flow)

れの静圧が円柱後端で一様流静圧に一致していると近似できる場合は(2)式になる。

付録D 模型姿勢角の抗力係数への影響

気流に対する模型の姿勢角がどの程度抗力係数へ影響するかを調べた。後流形状が軸対称になるように調整し、円柱がその姿勢の時を、気流に対して平行に円柱が設置されているとして、その姿勢からの変化角を円柱が気流に対して傾いている角度とした。気流に対して0.6度だけ傾いた姿勢の時の円柱の抗力係数をその細長比に対してプロットしたものが図C-1である。抵抗係数の差異としては、気流に対して円柱が傾いている時のほうが-0.001から0.008だけ大きな抵抗係数を示したが、誤差棒の範囲内の差異以内であり、有意な差としては認められなかった。



図D-1 直径45mm円柱抵抗係数への姿勢効果
(Figure C-1 Drag coefficient versus fineness ratio, effect of model attitude)