

磁力支持天秤装置を用いた5:1円柱模型の抗力測定結果

澤田 秀夫(航技研)、国益 徹也(航技研)、須田 信一(航技研)

Slender Model Drag and Wake Measurements by a Magnetic Suspension and Balance System

Hideo Sawada, Tetsuya Kunimasu, Shinichi Suda (National Aerospace Laboratory)

Key words: wake, axially symmetrical flow, fluid measurement, drag

Abstract

Drag coefficient of a 5:1 cylindrical model was measured in the support interference free by NAL 60cm MSBS(Magnetic Suspension and Balance System) at speeds from 6m/s to 35m/s. Wake was also measured with a pitot tube at 4.2 model diameters downstream the model base at flow speeds of 20m/s and 30m/s. The measured drag coefficient is 0.90 ± 0.01 at Reynolds number based on model diameter ranged from 80000 to 140000. The wake diameter (99% dynamic pressure ratio) is about 3 times as much as the model one at measured point when the Reynolds number ranges from 40000 to 140000.

1. はじめに

磁力支持天秤装置とは、磁気力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、支持干渉が無い、模型の運動が容易であること等から、風洞試験装置の中でも特にその実現が期待されているものである。航空宇宙技術研究所では図1に示すような世界最大級の測定部を持つ60cm磁力支持天秤装置の特長を活かし、60cm角測定部を持つ低速風洞へ移設した。¹⁾

MSBSの実用性を評価するために基本形状の軸対称模型を数種類製作し、実際の風洞試験を試みている。一昨年度は他のMSBSでの試験結果が報告されている回転楕円体模型の抵抗、後流計測を実施し、昨年度は詳細な後流計測結果が報告されている円錐模型の抵抗、後流測定結果を報告した。^{2),3)} 円柱模型では細長比が0は円盤を意味し、細長比が大きくなるにつれて抵抗係数が減少し、更に増大すると抵抗係数はどのような挙動を示すか興味深い。本報告では、NAL60cmMSBSの天秤機能較正基準模型として使用している5:1円柱模型の抗力測定試験結果について報告する。また、気流中に支持されている模型の支持状態が測定結果に影響を及ぼしているかどうかについても検討したので報告する。航空宇宙技術研究所の磁力支持天秤装置と磁力支持風洞の詳細は文献1を参照されたい。

2. 抗力測定試験

2-1 5:1円柱模型と風洞気流

5:1円柱模型は全長300mm、直径60mmで、内部に直径約55mm、長さ245mmの円柱アルミ磁石を模型中心軸に合わせて挿入されている。模型の全質量は約4.8kgである。図1に示す写真の様な模様を模型表面に描き、模型の位置姿勢を測定している。模型表面

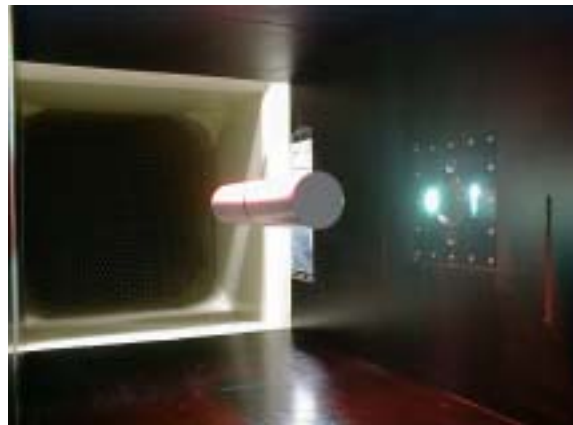


図1 磁力支持中の5:1円柱模型

状態、磁石内装方法は他の模型と同様の処理をしたので文献2,3を参照されたい。また、風洞の基本仕様も文献2を参照されたい。

気流測定は、図2に示す様に、上流測定部上壁にピト静圧管を設置し、常時動圧を計測している。座標軸

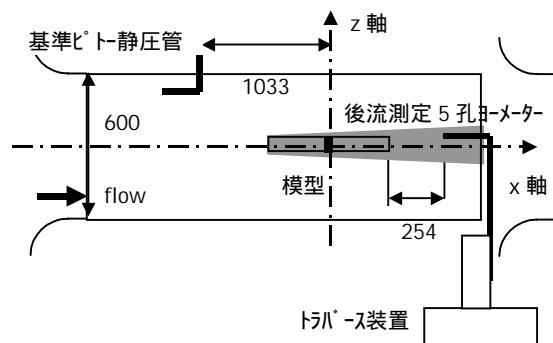


図2 測定部等の位置関係 (単位:mm)

としては、磁力支持天秤装置用測定部中心に原点を置き、下流方向にx軸、鉛直上向きにz軸、これらと右手系を成すようにy軸を取ることで構成している。総ての試験では、直近の風洞較正試験結果に従って、模型が気流と平行になる様に、直近の気流検定結果を基に、模型の姿勢をy軸周りに -0.05° 、z軸周りに 0.15° だけ回転させた。

2 - 2 抗力測定結果

模型の抗力を測定するために、先ず試験模型を用いて抗力較正試験を行った、試験方法は総ての磁力支持模型に共通で、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、この時の抗力コイル電流との関係性を求める方法をとっている。図3はこの抗力較正試験結果の図である。試験範囲では、ほぼ直線となっており、抗力コイル電流のモータ電圧を2秒間計測し、その平均値から、模型に加わっている空気力を評価した。

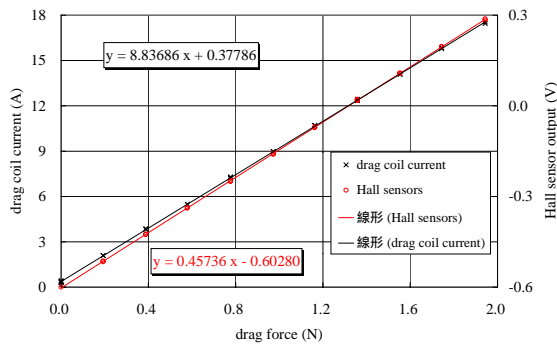


図3 抗力較正試験結果

抗力測定試験は風速約6~32m/sで実施し、更に、風速10、20、30m/sでは後流計測も行った。計測された抗力は、測定部中心の動圧により無次元化され、浮力補正、阻塞効果補正を施している。

模型の支持状態は、6:1、4:1回転楕円体模型の時と同様に模型の運動は観測されなかった。模型支持状態を確認するため、約8秒間の支持データを取得、データの変化について調べた。平均値は気流に対して平行になるように設定した設定値の通りの値であった。平均値、最大値、最小値、標準偏差を表1に示す。標準偏差から、流速30m/sでは位置は $\pm 0.03\text{mm}$ 、姿勢では $\pm 0.02^\circ$ 程度の設定誤差が含まれていることが指摘できる。

表1 抵抗測定試験中の模型位置姿勢(U=30m/s)

	x(mm)	y(mm)	z(mm)	θ (deg)	ψ (deg)
average	-0.001	0.000	0.001	0.154	-0.051
max	0.074	0.125	0.087	0.219	0.003
mini	-0.063	-0.084	-0.091	0.071	-0.103
標準偏差	0.027	0.028	0.026	0.020	0.017

抗力較正試験結果を利用して、実際の細長比5の円柱模型の抵抗係数を測定部中心位置での流れの動圧で無次元化して求め、模型直径を基準長に取ったレイノルズ数に対して描いたものが図4である。レイノルズ数約38000が風速10m/sに対応している。印は抗力電流を用いて抗力を評価した場合で、印はホール素子を用いて別に抗力を評価したものである。較正試験で得られた最大偏差に相当する力から求めた誤差棒をどちらの印にも書き込んでいる。動圧が高いとこの分の誤差は計測結果に影響しないが、風速10m/s未満の試験結果では大きな誤差範囲を予測する必要が出てくる。20m/s以上試験で得られたCd値はレイノルズ数と無関係にほぼ一定と見れるので、それらを単純平均すると、抗力電流によるCdは0.902、ホール素子によるCdは0.895となり、約0.007の差異を示した。鈍頭模型としてはほぼ同じ値を示していると判断している。

一方、風速10m/s未満では、抗力電流によるCdは0.9付近でばらついているが、ホール素子によるCdはレイノルズ数が小さくなるにつれて、Cd値も減少する傾向を示している。両者の誤差棒は重なり合っている部分があり、その部分はレイノルズ数依存性を示しているが、結論付けるためには更に高精度の試験が、別に模型周りの流れ場の計測との関係性を調べる必要がある。

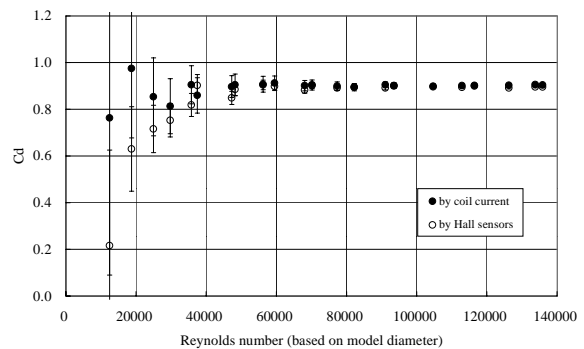


図4 レイノルズ数に対する5:1円柱模型抗力係数

5:1円柱模型の過去の抵抗計測結果例は入手できなかったが、通常の模型支持装置を用いて、最長比0.5,1,2,4,8の計測されたデータが文献4の表8.6に掲載さ

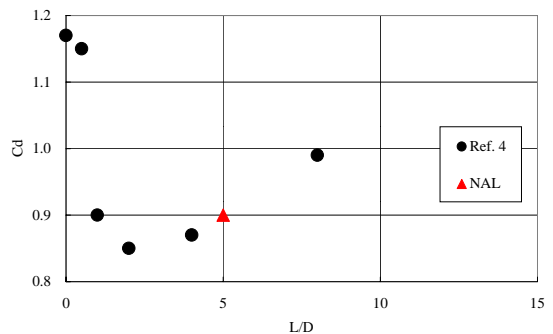


図5 円柱細長比に対する抗力係数変化 (参考文献4、表8.6から引用、グラフ化)

れており、これと比較することができた。その結果、細長比5の円柱模型であるから、今回測定された抵抗係数の値は図5中に三角形で示され、文献4が主張している値に近い値を得た。一方、文献4では直径を基準長に取ったレイルス数で10000以上ではほぼ一定であるとの主張に対しては、図4からは50000以上では確かに一定であるが、それ未満では明確にレイルス数に対して独立であるとは主張しがたい結果を得た。

2 - 3 後流測定結果

5:1円柱模型の後流計測では、後縁から254mmの位置で後流断面の総圧を計測し、模型周りの流れを評価することを試みた。総圧は基準ピト静圧管の静圧に対する差圧として計測し、その後、模型中心位置の静圧を基準とした圧力係数に変換した。二次元的なyz面上の総圧分布の予備計測結果から、0.1秒の積分時間の計測では変動が顕著に現れたため、1.3秒間の積分時間で圧力を計測した。図6は流速20m/sでの後流の動圧比を示しており、軸対称性に若干の歪みが認められる。これは、模型が若干気流に対して平行ではない事を示している。また、模型の直径60mmに対して、後流の広がりが大きく、幅190mm、高さ170mmの測定域から後流の左下部分がはみ出している。後流動圧が一樣流動圧に戻る位置（99%動圧比等高線）はほぼ半径90mmの円となり、後流の大きさは模型直径の約3倍となっている。既存のyz面の後流トルバース装置は90mm×90mmのため、図6は4つの部分に分割して計測し、その後重ねて描いたものである。風速10m/sと30m/sでは、幅90mm、高さ170mmの測定域で後流測定をした。図7,8に測定結果を示す。図6,7,8から、後流の大きさは風速が10m/sから30m/sにかけては殆ど変わらないことを示している。

模型上流部が吻頭形状になっている場合のNAL60cmMSBSで支持しながらPIVにより後流を計測した結果があり、これと比較してほぼ2倍近くに

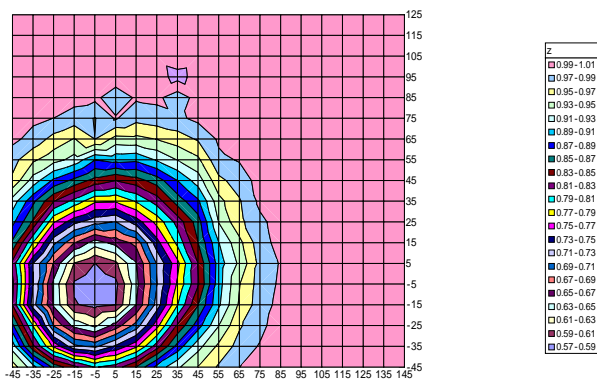


図6 後流動圧比分布 (x=254mm)
U=20m/s、0.02毎の等高線、最外円が99%動圧比

なっており、図6,7,8の結果と併せて考えると、風速10m/sから30m/sでは、前縁部から剥離した流れは、模型表面に付着することなく下流へ流されているものと予想される。⁵⁾

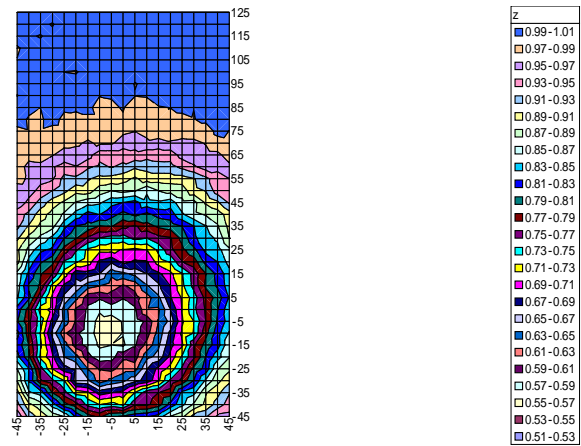


図7 10m/s時の動圧比測定結果
0.02毎の等高線、最外円が99%動圧比

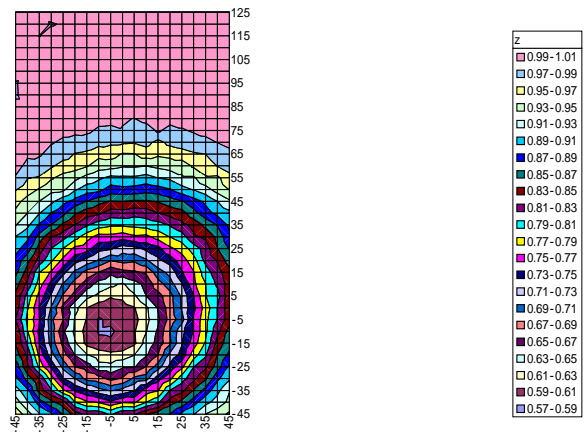


図8 30m/s時の動圧比測定結果
0.02毎の等高線、最外円が99%動圧比

図9はz軸に沿った後流の動圧比を描いたものである。異なる風速20m/s、30m/sに対してもほぼ同じ曲線を描いていて、図4で得られたこの風速域での抗力係数のレイルス数非依存性と符合している。Z=45mm付近

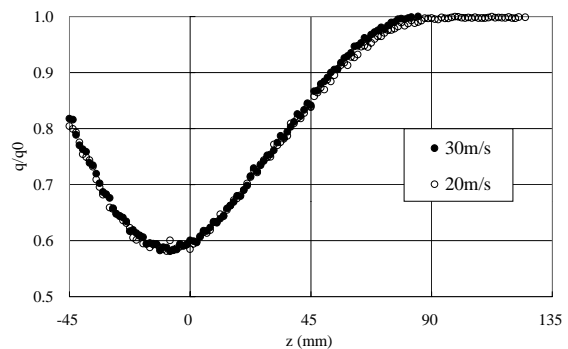


図9 z軸に沿った動圧比変化

から90mmにかけて両者は若干不一致を示すが、Cd値の違いとして認識できるほどの違いにはならない。また、 $z=-5\text{mm}$ を対称線として、左右の形を比較すると、動圧比の曲線は対称性から若干ずれている。このため、この形状を基にして、軸対称な後流の動圧比曲線を求めることはできないので、後流の測定した動圧比から、近似等高線をもとめ、この等高線から抵抗値を推定することを試みた。図10は風速30m/s時の測定点から推定した動圧比が0.8の位置と、それらに近い楕円を描いた。また更に、動圧比0.60から1.0まで0.05毎に、推定楕円を併せて描いた。動圧比0.65の時を除いて、総ての楕円は長軸が45度傾いた場合が測定値に良く合うこと、長軸と短軸の長さの比は総ての場合とも約1.08～1.1程度であることが判った。この結果、模型は模型後方から見て右上方から若干の α を受けていると判断される。

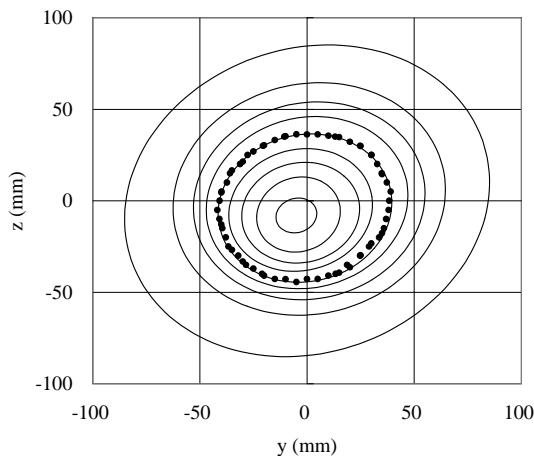


図10 30m/s時後流動圧比等高線に対する近似曲線
0.05毎の等高線、最外円が100%動圧比

この推定曲線から、Betzの方法により抗力係数を求めると、0.839となり、MSBSにより測定した値より0.06程小さい。後流断面の約50%しか測定できていない点を考慮すると、Cd値で0.06、MSBS測定Cd値の7%の差異は推定精度限界内と考えられる。以上から、今回の後流計測結果から得られた、模型後縁から模型直径の4.2倍下流位置で後流領域の直径が模型直径の約3倍に達して、面積でも2倍以上有るという結果は十分信頼できる。後流の領域が模型の直径よりも十分大きいことから、細長比5:1円柱模型では模型前縁部で剥離した流れは、模型表面に再付着することなく下流へ流されて後流を形成していると考えられる。

3. まとめ

細長比5:1円柱模型が気流と平行な姿勢の時の抗力係数を様々な流速で、NAL60cmMSBSを用い、支持

干渉のない状態で測定した。また、風速10m/s、20m/s、30m/s時の模型から下流254mmでの後流の動圧を計測し、後流の状態を調べた。その結果、以下のことが判った。

- ✓ 細長比5:1円柱模型の抵抗係数を60cm磁力支持天秤装置で測定した。その結果、抵抗係数は、直径を基準長にしたレイノルズ数で80000～140000の範囲では 0.90 ± 0.01 である。
- ✓ 5:1円柱模型の後流を底面直径の4.2倍の距離で、総圧を計測した結果、レイノルズ数で40000～140000では模型直径の3倍程度の広がりがある。

今回の試験では、模型の姿勢を正確に気流と平行にできなかったため、後流の等高線が円形から変形して楕円形となり、軸対称後流を計測できなかった。また、予想以上の大きな後流領域となっており、後流領域の全体を計測できず、後流から求めるCd値に大きな誤差を含むことになった。次回の試験では、後流断面形状を円形にするように模型姿勢を調整し、模型の大きさもより適切な直径にして再度試験をする必要性を感じている。

また、10000より大きいレイノルズ数では、抵抗係数にレイノルズ数依存性がないと文献4では主張しているが、精度的に不十分であるがレイノルズ数依存性を示す様な試験結果を得た。今後、風速が6m/s程度での測定精度を上げて、レイノルズ数依存性について調べる必要がある。

参考文献

1. 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
2. 澤田秀夫、国益徹也、原田賢哉：「磁力支持天秤装置を用いた回転楕円体模型の抗力測定結果」、第32回流体力学講演会前刷り集、2000年、pp.171-174、10月
3. 澤田秀夫、国益徹也、須田信一：「磁力支持天秤装置を用いた細長模型の抗力、後流計測」、第32回流体力学講演会前刷り集、2001年、pp.233-236、9月
4. P.M.Gerhart, R.J.Gross："Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison-Wesley Publishing Company, 1985, pp. 536
5. H.Higuchi and H.Sawada and etl.: unpublished, private communication