

## 磁力支持天秤装置を用いた9度円錐の抗力、後流計測 9-Deg. Cone Drag and Wake Measurements with a MSBS

澤田 秀夫<sup>1</sup>、国益 徹也<sup>2</sup>、須田 信一<sup>3</sup>  
Hideo Sawada, Tetsuya Kunimasu, Shinichi Suda

### SUMMARY

Drag coefficient of 9.5 deg. cone was measured by NAL 60cm MSBS(Magnetic Suspension and Balance System). The measured drag coefficient is 0.22 at Reynolds number ranged from 0.5million to 1.0 million. The coefficient has the same values as one evaluated by wake survey. The wake of the model was also examined with 5-holed yaw meter and static tube. The averaged velocity ratio to the main flow speed showed axially symmetric distribution about x-axis. The pressure coefficient varies with the distance from model base as indicated in other source. But, the stagnation point of the wake bubble is nearer to the model base than in the source. The velocity ratio profile in the radius direction looks to keep the similarity as in turbulent axially symmetric wake enough downstream. The pressure coefficient distribution with distance from x-axis shows existence of outer and inner regions. The coefficient derivative with respect to the distance keeps constant in the outer region. The coefficient keeps constant in the inner region. The outer region goes to reduce its dimensions downstream and disappears around the most downstream measured position.

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

#### 1. はじめに

航空宇宙をはじめとする様々な分野における飛翔体の基本的空力特性を知る上で、低速流れに於ける軸対称鈍頭物体の抵抗及び後流は重要な研究課題である。このため、球や円盤に関しては多くの試験結果が文献のとして報告されている。一方、それら以外の鈍頭物体の抵抗や後流についての試験結果に関する文献は極限られている。J. R. Carvert は円盤、

先にフェアリングを付けた円柱の他に4種類の円錐の後流を計測した。円盤は頂角180度の円錐であり、先にフェアリングを付けた円柱は頂角0度の円錐に相当しているとしている。彼の試験結果から、これらの模型の後流は循環領域の上下流の両方で相似であると主張している。また、後流ストローハル数を定義すると、模型の頂角に依存せずに、総て同じ値をとるとしている。気流に平行に置かれた円錐では、細長比が0から2

<sup>1</sup>独立行政法人 航空宇宙技術研究所 流体科学研究センター 先進的風洞技術グループ グループリーダー 工博  
Group Leader, Innovative Wind Tunnel Technology G., Fluid Science R.C., National Aerospace Laboratory of Japan, Dr. Eng.

<sup>2</sup>独立行政法人 航空宇宙技術研究所 流体科学研究センター 先進的風洞技術グループ 研究補助員  
Research Assistant, Innovative Wind Tunnel Technology G., Fluid Science R.C., National Aerospace Laboratory of Japan

<sup>3</sup>独立行政法人 航空宇宙技術研究所 流体科学研究センター 先進的風洞技術グループ 航空宇宙特別研究員 工博  
Researcher, Innovative Wind Tunnel Technology G., Fluid Science R.C., National Aerospace Laboratory of Japan, Dr. Eng.

付近まで大きくなるにつれて抵抗係数が減少することが知られている。

本報告では9.5°円錐模型の磁力支持天秤装置を用いた抗力測定試験結果について報告する。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2,3を参照されたい。

2. 抗力測定試験

2-1 9.5°円錐模型と風洞気流

9.5°回転円錐模型は全長480mm、最大直径80mmで、内部に直径約25mm、長さ150mmの円柱アルニコ5磁石を2個連結し、模型中心軸に合わせて入れている。模型外殻は一部を除きアルミニウム製で、最下流部にはM4のネジが切られている。内部の磁石はM4ネジ部から埋め込みネジを用いて前方に押しつけられ、磁力支持中に模型に対して相対的な運動を生じない。模型の全質量は約1.36kgである。磁石を着磁した後に、図1に示す模型表面写真の様な模様を描き、その上に透明艶消し塗料を全体に塗り、最後に表面を1500番の研磨ペーパーで仕上げた。この際、つなぎ部分に段差が発生しないように、塗料を盛り、ヤスリで整形し、仕上げに1500番の研磨ペーパーをかけて、表面の滑度維持に努めた。

使用した風洞は循環式で測定部断面が60cm角の木製風洞である。動力は11kWの電動機で、最高風速は約35m/s程度である。

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

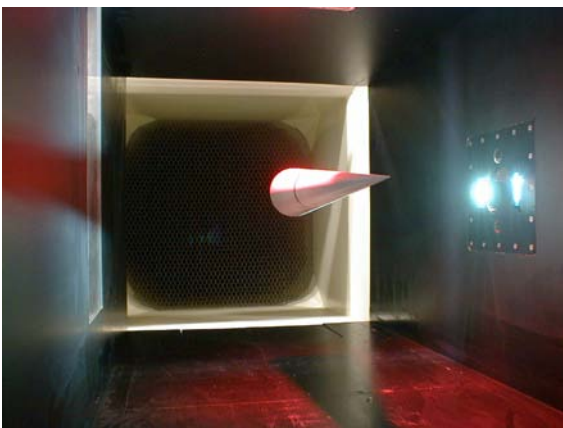


図1 磁力支持中の9.5°円錐模型

標軸としては、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。風洞の詳細は文献1を参されたい。総ての試験では模型が気流と並行になる様に、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

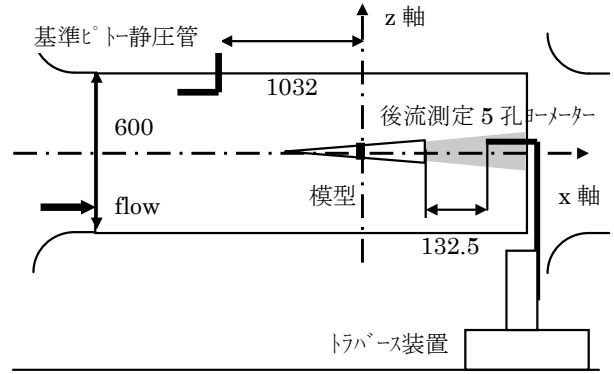


図2

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、ほぼ完全に直線となっており、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。

抗力測定試験は風速約10~32m/sで実施し、更に、風速15、20、30m/sでは後流計測も行った。計測された抗力は、磁力支持風洞の気流較正要領書に従って、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4)の時とは異なり、若干の運動が観測された。このため、約16秒間の支持データを取得、データの変化についてヒストグラムを用いて運動を評価した。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。ヒストグラムからは、模型の運動は設定位置を支持中心として正規分布の形状に近い分布をしていた。分布の平均値と標準偏差を表1に示す。標準偏差から、流速30m/sでは位置は±0.1mm、姿勢では±0.05°程度の設定誤差が含まれていることが指摘できる。模型の位置の変位は有効迎角にも影響するので、位置を含めた模型の姿勢保持能力の改善が求められる。

x(mm)	y(mm)	z(mm)	□(deg)	□(deg)
average	0.001	-0.002	0.002	0.049

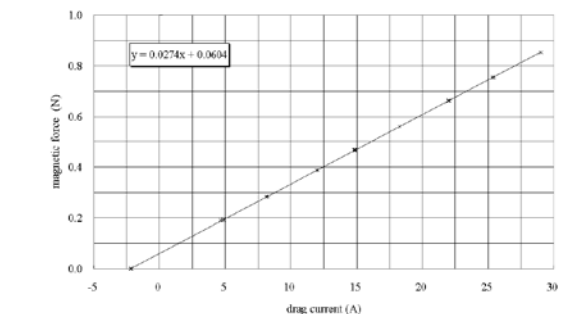


図3 抗力較正試験結果

max	0.216	0.186	0.271	0.254	0.033
mini	-0.260	-0.234	-0.293	-0.119	-0.297
標準偏差	0.071	0.061	0.098	0.059	

0.052

表1 抵抗測定試験中の模型位置姿勢(U=30m/s)

9.5°円錐模型の抵抗計測結果の例が入手できず、DACOMによる抗力推定結果と比較した。また、後縁から232.5mm位置での後流計測による抵抗係数推定結果とも併せて比較検討した。図4にレイノルズ数に対する上記3つの手法で評価した抵抗係数を表した。磁力支持天秤と後流計測による抵抗係数はほぼ一致したが、DACOMによる抗力推定値はこれよりも約20%程大きい。この差異は有意な差異である。DATCOMの底面抗力係数を推定する式の根拠となったと考えられるデータが文献5の3章図37に記されている。本試験では図の横軸の値は0.11から0.13程度で、図の実験式とは15%程度異なっている。実験式の近似を横軸0.11付近の測定値に近づけると、磁力支持天秤装置による計測結果と近い値が得られる。様々なfore-body drag coefficient に対する、スティング干渉のないベース圧抵抗評価が待たれる。

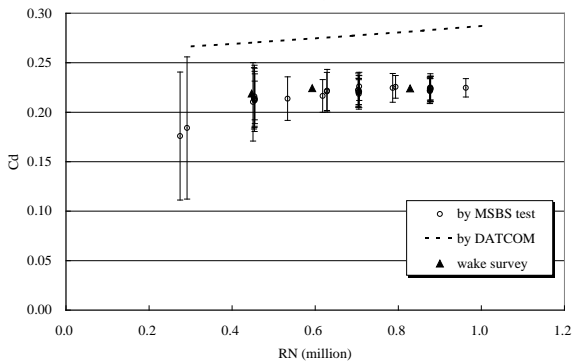


図4 レイノルズ数に対する9.5°円錐模型抗力係数

### 2-3 後流測定結果

後流計測では、図5に示す様に新たに座標系原点を模型底面中心へ平行移動した。以降のx座標値は総て、新しい座標系のものである。9.5°円錐模型の後流計測では、後縁から132.5mmで断面の総圧、静圧分布を計測し、そこから、下流の4地点(132.5、152.5、182.5、232.5mm)で、yz面内の45度傾きx軸を通過する直線上で(図6参照)一次元的な総圧と静圧を計測した。また、x軸に沿ってx=112.5mmから247.5mmまで2.5mm毎に同様の計測をした。

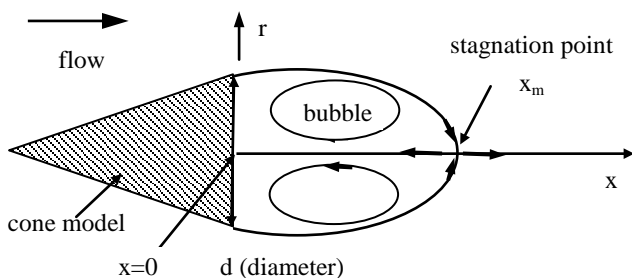


図5 後流の平均化流れのモデル (by J.R.Calvert<sup>6)</sup>)

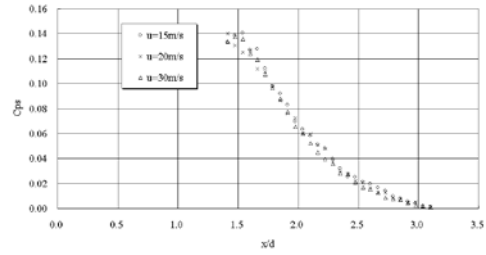


図7 x軸に沿った圧力係数変化

総圧と静圧は共に、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、2秒間の積分時間で圧力を計測した。図6は流速30m/sでの後流の速度比を示しており、模型が運動をしているにもかかわらず、明瞭な軸対称性が認められる。この結果、

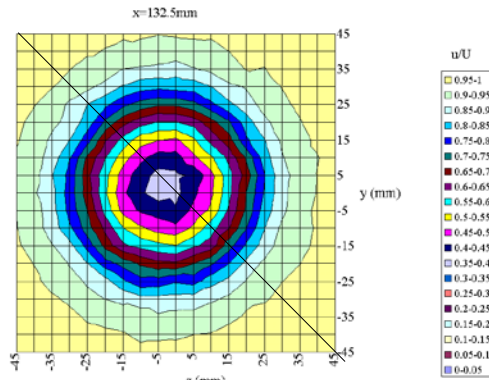


図6 後流速度比分布 (x=132.5mm)

抗力の計測では、後流の端が最も測定できる図中の傾いた直線上で総圧と静圧を計測し、Jonesの方法により抗力係数を求めた。

x軸上の静圧係数分布では、図7に観られるように、試験のレイノルズ数には依存せず、模型底面からの距離と底面直径の比に対して一定の関係を示している。

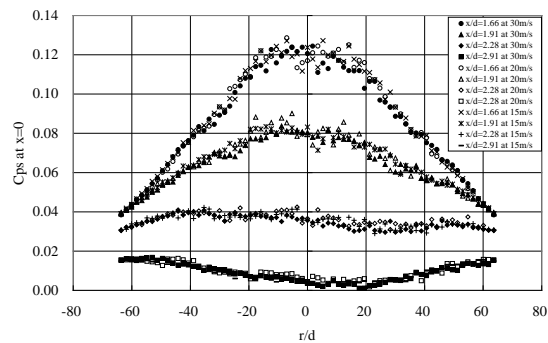


図9 軸に直角方向の静圧分布

この計測結果は参考文献7の図4と、変化の様子は一

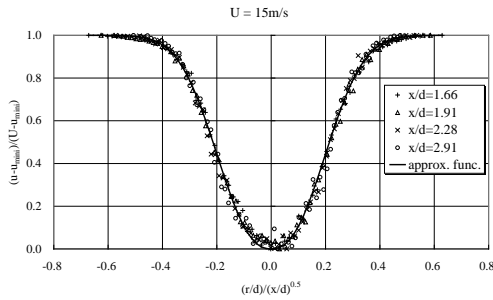


図10 速度比の動径方向分布

致するが、本計測結果の方が若干左へx/dがずれた状態になっていて、底面下流にできるバブルの大きさが小さく、円柱模型のバブルよりも小さいことを示している。参考文献6の模型は底面直径が50mmで支持はスティングタイプで直径約3mmの円柱を6本のワイヤで固定しているということである。本試験の支持は磁力支持であり、支持装置の干渉はあり得ないが、圧力計測用の5孔ヨーメータ、静圧管は底面の流れに影響を及ぼす可能性は有る。このため、5孔ヨーメータを後流計測状態にして、磁力支持天秤装置の抗力コイル電流が5孔ヨーメータのx方向の位置によって、変化するかどうか調べた。その結果、後流測定の一つの流速では全く抗力電流の平均値の変化は現れなかった。しかし、抗力が不変でもバブルの形状が変形する可能性もあり、バブル内の可視化などを通して、計測機器による影響の有無を今後確定したい。

x軸上の速度分布は図8に示す様に、模型底面に近づくにつれて急速に流速を落とすことが確認できた。外挿すると、ほぼ121.5mm付近で速度が0m/sとなる岐点が存在している。速度の変化の様子は参考文献7の図3と似ているが、底面からの位置関係は異なっている。参考文献7では、局所Cps=0が局所風速0の岐点となっていると仮定しているが、本実験では、岐点で、局所Cps=0とはならない。これは、局所静圧が径方向に軸から離れるにつれて減少するので、後流軸上では一様流静圧よりも高い静圧で流速は0となるためである。本実験では後流軸上の局所Cpsが最大の所が岐点に対応している。

x軸に直角方向の分布として、静圧と動圧を計測した。静圧分布を図9に示す。静圧分布の特徴としては、或範囲では静圧は直線的に変化するが、或r/dよりも内側ではほぼ一定の値を維持していることである。この静圧が一定となっている幅は上流へ行くにつれて減少し、先の岐点付近で消滅する様に観察される。

どの主流速度でも測定位置が同じなら、速度比(局所速度/主流速度)分布は同じ値となっており、試験したレイノルズ数範囲ではレイノルズ数効果は現れていない。一方、測定位置により、速度比は明確に異なっているが、図10に示す様に、流れ方向の相似性の

特徴は維持されていると観られる。図10に示した近似曲線の式は以下の通りである。下式の係数-28、指数1.2は図10に描かれた計測点に合うように目視にて決めた量である。

$$\frac{u - u_{\min i}}{U - u_{\min i}} = 1 - \exp \left\{ -28 \cdot \left( \frac{(r/d)^2}{x/d} \right)^{1.2} \right\}$$

模型の後流最低速度比を岐点からの距離を模型直径で無次元化した量に関してプロットしたものが図11である。層流軸対称後流と、参考文献7の乱流混合による模型の十分下流に於ける後流最低速度比の変化則について、図上横軸が1.6で測定値と一致するようにして当てはめてみたが、乱流混合の方がより測

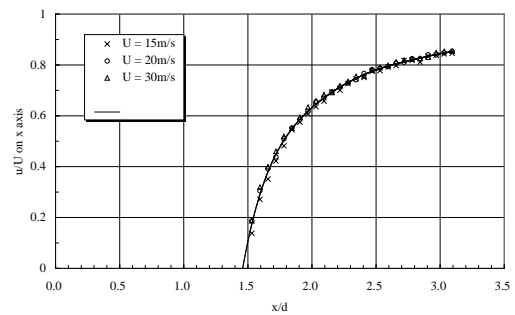


図8 x軸上の速度比分布

定値に近いが、乱流後流に適合する変化則が成立しているかは図11からは確認できない。

### 3. まとめ

9.5°円錐模型の抵抗係数を60cm磁力支持天秤装置で測定した。その結果、抵抗係数は、レイノルズ数が0.5~1.0millionの範囲ではほぼ0.22±0.02である。

この値は、後流計測からJones方法で評価したものと一致する。

9.5°円錐模型の後流を、底面直径の1.4倍から3倍の底面からの距離で、総圧と静圧を計測した。その結果、2秒間の平均化から得られた平均値では、後流は軸対称で、静圧のx軸上の分布は他の文献データと類似の傾向を示すが、岐点位置は異なっている。速度分布はほぼ同じ傾向を示す。

x軸に垂直な方向の速度変化には、主流速度による影響は現れず、相似な速度分布に近いものが観測された。一方、静圧の分布では、後流断面は内外二つの領域に分けられ、内側の流域では圧力は一定で、外側の領域ではx軸からの距離に対する圧力変化率がxの位置毎に負の一定値を示す。また、計測した最下流では、外側の領域は消滅して、この間、後流の構造が変化しているものと考えられる。

### 参考文献

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、10月

澤田秀夫、河野敬、国益徹也：「60cm磁力支持装置の低速風洞への適用」、日本航空宇宙学会第31期年会講演会前刷り集、2000年、3月、pp.222-225

澤田秀夫、国益徹也：「航技研60cm磁力支持天秤装置」、第38回飛行機シホシヰム前刷り集、2000年10月

原田賢哉、澤田秀夫、高橋 侖：「飛行船風洞試験における支柱干渉の影響」、第32回航空宇宙学会年会講演会前刷り集、2001年、4月

S.F. Hoerner ;”FLUID-DYNAMIC DRAG”, (1958), pp.3-19

J. R. Calvert;”Experiments on the low-speed flow past cones”, J. Fluid Mech. (1967), Vol.27, part 2, pp.273-279

L. M. Swain;”On the Turbulent Wake behind a Body of Revolution”, (1929), Proc. Roy. Soc. London A 125,pp. 647-659

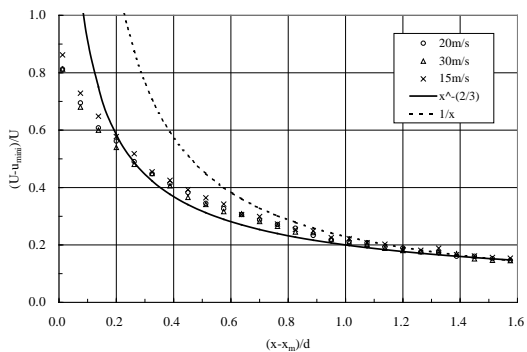


図11 後流中心部の軸方向速度分布