

磁力支持天秤装置を用いた 6:1 回転楕円体の抗力測定

6:1 Axial-Symmetric Ellipsoid Drag Measurement with a Magnetic Suspension Balance System

澤田秀夫¹、国益徹也²、原田賢哉³
Hideo Sawada, Tetsuya Kunimasu, Kenya Harada

SUMMARY

Drag of a 6:1 axial-symmetric ellipsoid model parallel to tunnel flow was measured with the NAL 60cm MSBS (Magnetic Suspension and Balance System). The obtained values ranged from 0.045 to 0.055 at Reynolds number of 1 million with reference length of the model. They were compared with data sets of another source measured with a MSBS. The comparison shows that the obtained drag coefficients lie between those of 5 and 8 fineness ratio ellipsoids at Reynolds numbers more than 0.8 million. The drag was also estimated through the wake survey without the support interference. The values of the drag were near to the obtained ones with the MSBS. The observed wake looks like circle in its contour lines because of the support interference free. The flow separation was observed at about 96% chord position from nose of the model by the oil paint visualization.

Key words : Drag, Wake, Streamline Body, Wind Tunnel Testing, Magnetic Suspension and Balance System

1. まえがき

回転楕円体の抵抗は、物体長さを基準としたレイルス数に依存して変化するとともに、細長比にも依存して変化することが知られている。例えば、文献¹⁾ではレイルス数が 10^5 では、細長比5程度で最小の抵抗係数を示すとしている。しかも細長比4以上8以下で、レイルス数が 10^5 から 10^6 迄では、最大断面積を基準とした抗力係数が0.1以下と極めて小さい値をとり²⁾、抵抗を低く抑える必要のある飛行船、航空機胴体等の基本形状として広く利用されている。低い抵抗の一つの理由は、回転楕円体表面流れが後縁近くまで剥離せず、低い圧力抵抗を期待できることである。また、学術的にも、広い範囲にわたってポテンシャル流れに近い流れを期待できる上に、境界層遷移といった基本的流れの特徴を備えたもので、レイルス数変化に伴う抵抗係数の変化は乱流遷移に伴う抵抗係数の増加や、剥離の抑制による抵抗係数の減少も見られ、球の場合と同様に興味深いものである。

しかしながら、レイルス数が 10^5 辺りの回転楕円体の試験結果は球程多くは報告されていない。その原因の

一つは回転楕円体の抵抗係数が球の1/10程度と極めて小さいために、風洞試験での正確な測定が困難なためと推測できる。模型を測定部に支持するための支持装置は模型周りの流れに必ず何らかの影響をしておき、この影響を支持干渉と呼んでいる。計測対象の抵抗係数が小さく、支持干渉量が大きければ、測定量と同程度以上の支持干渉量となる可能性が高くなり、正確な抵抗係数の測定は殆ど期待できないことは容易に推測できる。有意な計測結果を得ようとすれば、十分大きな模型を十分小型の支持装置を用いて試験する必要があり、特別に大きな風洞で慎重な試験が求められ、小型の風洞で汎用的な支持装置を用いて試験する場合は、正しい結果が得られない危険性が高い。

航空宇宙技術研究所では世界最大の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、風洞試験計測装置としての利用を進めている。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

¹ 独立行政法人 航空宇宙技術研究所 流体科学センター 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 Group, Fluid Science R.C., National Aerospace Laboratory of Japan, Dr. Eng.

² 独立行政法人 航空宇宙技術研究所 流体科学センター 先進的風洞技術グループ
Research Assistant, Innovative Wind Tunnel Technology Group, Fluid Science R.C., National Aerospace Laboratory of Japan

³ 独立行政法人 航空宇宙技術研究所 成層圏プラットフォームプロジェクトセンター 飛行試験計画グループ 研究員 工博
Researcher, Flight Experiment Planning Group, Stratospheric Platforms P. C., National Aerospace Laboratory of Japan, Dr. Eng.



図1 60cm 磁力支持天秤装置と 6:1 回転楕円体模型
(Fig.1 6:1 ellipsoid model and the 60cm MSBS)

ものである。本装置を用いることにより、支持干渉の無い状態で風洞模型の空力特性を測定できるので、回転楕円体の様な極めて小さい抵抗係数を計測するには適している。

試験に当たっては 60cm 磁力支持天秤装置の模型位置姿勢センサによる計測に適した模型細長比と測定部の大きさを考慮した結果、6:1 回転楕円体を採用した。航空宇宙技術研究所の 60cm 磁力支持天秤装置とそれを装備した風洞（磁力支持風洞）の詳細は文献 3 を参照されたい。

2. 6:1 回転楕円体模型と風洞気流

6:1 回転楕円体模型は全長 480mm、最大直径 80mm で、内部に直径約 55mm、厚さ 35mm の円柱アルコ 5 磁石を 8 個連結し、模型中心軸に沿って入れている。模型外殻はアルミニウム製で、最下流部には M4 のネジを切っている。内部の磁石は直径 16mm のテフロン円柱を介して、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ようにした。模型の全質量は約 6.49kg である。模型表面には模型中心軸に直角に黒い帯状の模様を描き、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、ヤリで整形し、仕上げに

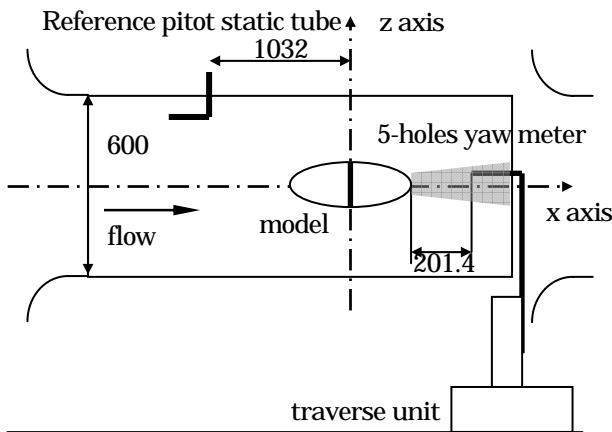


図2 測定部内模型の位置関係 (単位:mm)
(Fig.2 Model and tubes arrangement, unit:mm)

1500 番の研磨ペーパーをかけて、表面の滑度維持に努めた。模型表面の黒帯のマークは、60cm 磁力支持天秤装置の模型位置姿勢センサにより模型の流れ方向の位置を計測するために必須のものである。図 1 に航空宇宙技術研究所 60cm 磁力支持天秤装置により磁力支持されている 6:1 回転楕円体模型を示す。

気流測定は、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。模型の回転角は y 軸回りを縦揺れ角()、z 軸回りを偏揺れ角()とした。図 2 に示すように、座標原点は基準としているピトー静圧管の下流 1032mm にある。測定部断面形は 60cm 角のまま壁は固体壁であるため、気流は下流に進むにつれて加速される。測定結果から、座標原点では圧力係数で約 -0.030 /m (測定部中心位置換算動圧で無次元化)を示した。このため、本試験の天秤計測データには阻塞効果修正の他に浮力効果分の補正を施している⁴⁾。総ての試験では模型が気流と並行になる様に模型の姿勢を、風洞較正試験結果に基づいて調整した。

3. 60cm 磁力支持天秤装置による力計測

磁力支持天秤装置では、支持している模型の位置と姿勢を常時測定部外部から非接触で計測し、周囲のコイルと電磁石に流す電流制御を介し、模型周りの磁場を適切に制御することで模型の位置と姿勢を所定の状態に保つ様にしている。このため、測定部に気流が流れている時は模型に加わる外力に空気が含まれているが、無風時には空気が含まれないことになり、模型に作用する磁気力に両者の場合に差異が生じる。航空宇宙技術研究所の磁力支持天秤装置では、特に磁力支持天秤装置の中心軸に平行な力は装置の前後に配置し

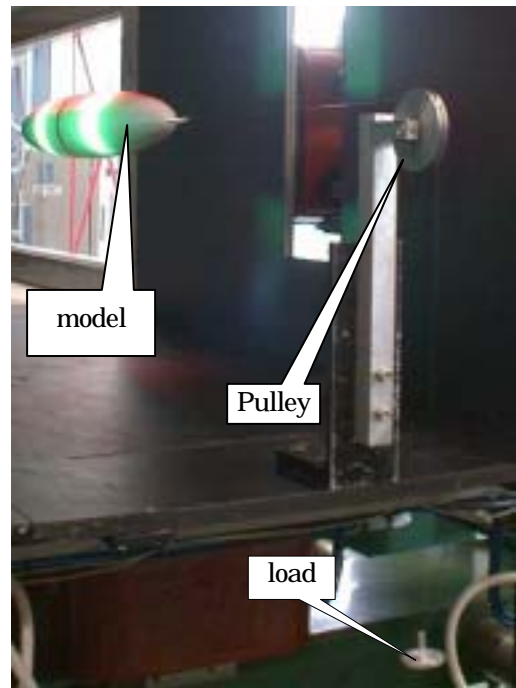


図3 力較正試験
(Fig. 3 Force calibration test)

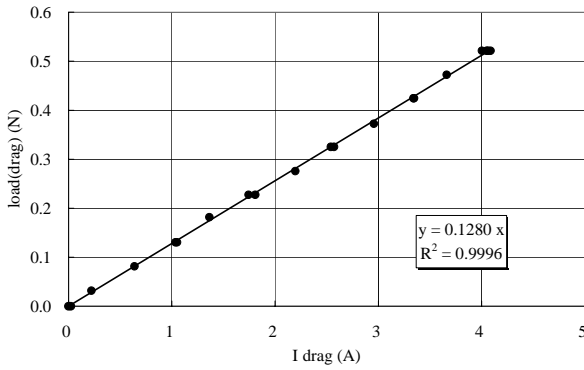


図4 抗力較正試験結果
(Fig. 4 Drag calibration test result)

ている空芯コイルが作り出す中心軸方向(x軸)の磁場強さ成分のx方向の変化率に比例するように設計した。このため、空芯コイルに流している電流(I_{drag})と模型に加わる風洞中心軸方向の力は比例することが期待される。

この比例係数に当たる値を評価する力較正試験を行った。力較正試験では、測定部最下流位置に、アルミ製台座と、非着磁性の軸受けを図3の様に設置し、太さ0.13mmの釣り用ナイロン糸の一端に予め精密天秤で計測しておいた重りを吊し、プーリーを介して、もう一端を模型の最後部のネジ穴に埋め込みネジを介してつないだ。模型の位置と姿勢を保つために変化した空芯コイルの電流を約8秒間計測し、その平均値と荷重の関係を図4に示す。荷重と平均空芯コイル電流とはほぼ線形であることが判る。抵抗測定試験では、通常の風洞試験と同様に、先ず、無風時の基準データを測定し、風洞を動かす、所定の送風機回転速度での基準ポート静圧管の出力を測定し、同時に抗力コイルに電流を流すパワーアップの出力電圧を約8秒間計測し、その時間平均を求める。この操作を繰り返し、風速9m/s~35m/sでパワーアップ平均出力電流を測定し、最後に再び風洞を止め、無風時の圧力変換器出力と抗力用コイル電流を風洞時の測定と同様に測定した。風洞温度は風洞運転時間と共に上昇するので、予め約20m/sの風速で20分以上運転しておき、気流温度の急激な変化を避けるようにした。気流温度は、数回試験途中に電子式温度計を気流内に差し込んで測定した。計測の再現性を評価するため、日を改めて試験を合計6回実施した。

4. 模型定常支持状態

模型に加わる空気が小さい場合は、スティング支持では模型はほぼ完全に空間に固定されていると見なす事ができるであろう。一方、模型を磁力支持している場合は、模型を空間に完全に固定しているわけではな

表1 定常支持状態の模型平均位置姿勢
(Table 1 Model position in steady state)

	x(mm)	y(mm)	z(mm)	θ (deg)	ψ (deg)
average	0.000	0.006	0.000	0.200	-0.402
max.dev.	0.052	0.084	0.063	0.039	0.049
mini.dev.	-0.081	-0.082	-0.049	-0.034	-0.047
STD	0.023	0.024	0.015	0.011	0.015

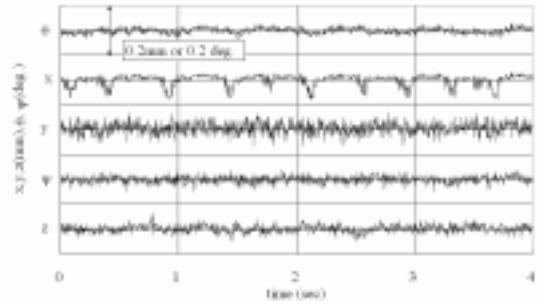


図5 定常支持状態の模型位置姿勢 (風速 30.5m/s)
(Fig. 5 Model position vs. time in steady state
(flow speed:30.5m/s))

い。模型の僅かな変位を測定部外部に設置している模型位置姿勢測定センサーにより高速、高精度に計測し、磁力支持天秤装置のコイル系の制御電流を調整して模型位置姿勢を高速で元に戻している。

ここでは30.5m/sの気流中で定常支持状態の模型位置姿勢測定結果の一例を示す。表1では約16.5秒間にわたり、模型の平均位置姿勢、最大偏差を示す。平均量は設定値の通りであり、標準偏差は0.5割程度に対応している。模型の位置姿勢はどれも±0.1mm、±0.1度未満の変位しか示していないが、表1に示す運動をしていることは確かである。この程度の運動が模型表面の流れや後流に影響を及ぼすかは不明であり、本報告では影響が無いものとして計測結果を論じることとする。

図5に4秒間の模型位置姿勢の時間履歴を示す。模型の流れ方向の変位(x)に周期的な比較的大きな変動が観測されている。この原因は模型位置姿勢センサーの出力に一定のノイズが入り、見かけ上のx方向の変位が観測されたとして抗力コイル電流は調整される。しかし、模型位置が変化しない限り、抗力コイル電流が変化しても十分な時間の平均を取れば、平均抗力コイル電流値に変化は現れない。その結果、模型抗力に影響しない。

5. 抗力係数測定結果と考察

模型の最大断面の面積(直径80mmの円)を基準面積に採用した時の抵抗係数(Cd)とレイノルズ数(基準長:模型全長)の関係を図6に示す。レイノルズ数が 8×10^5 (本試験で風速27m/s)以上では、それ未満の速度域に比

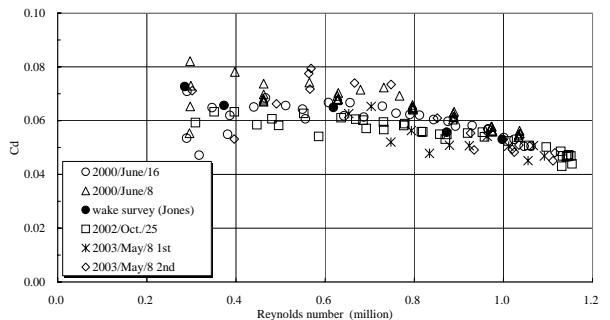


図6 6:1 回転楕円体模型抵抗係数とレイノルズ数の関係
(基準長: 模型長(l), d: 模型直径)
(Fig 6 Drag coefficient of 6:1 ellipsoid vs. Reynolds number
(reference length: model length (l), d: max. diameter))

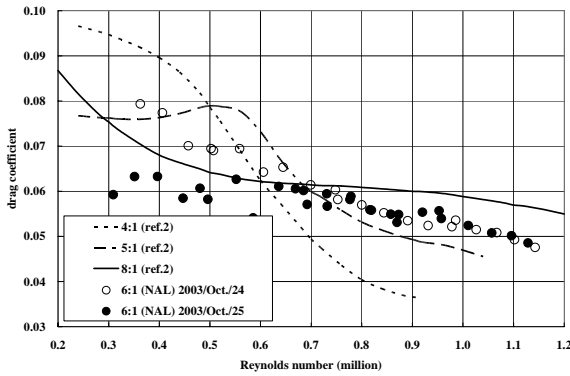


図7 細長比と抵抗係数の関係

(Fig. 7 Relation between fineness ratio and drag coefficient)

べて再現性の高い結果を得ている。レイルス^{*}数が 1×10^6 では、本模型の抗力係数は0.045~0.055の間にあると言える。文献2には本試験と磁力支持天秤装置による同様な軸対称模型の抵抗係数評価結果が記載されている。文献2の図8を読み取りソフトし直して、そこに2002年に実施した試験結果を書き込んだものが図7である。図から、細長比6の本測定結果は文献2の細長比8と5のデータの間位置しており、文献2の結果と合理的な関係を示していることが判る。文献2ほど抵抗値を確定できなかった原因は、再現性の悪さにある。その再現性を悪化させている最大の要因は無風時の抗力コイル電流の変動である。図4の抗力校正試験結果では無荷重時の抗力コイル電流の変動は0.13A、抗力換算で最大0.012Nとなっている。これは最大風速36m/sの時の抗力係数で0.003の変化に相当している。抗力コイル駆動用パワーアップは最大で120Aの定常電流を流せる能力があり、0.13Aはその約1/1000に相当し、これ以上の安定性を期待するのは、60cmMSBSでは実際困難と考えている。計測抵抗値の更に良い再現性を確保するには、後に述べるような模型に対する新たな工夫が必要と考えている。

レイルス^{*}数が 5×10^5 以下では再現性はそれ以上のレイルス^{*}数域よりも悪い。 3×10^5 (本試験で風速9m/s)では、再現性は特に悪い。この原因の一つとしては、抗

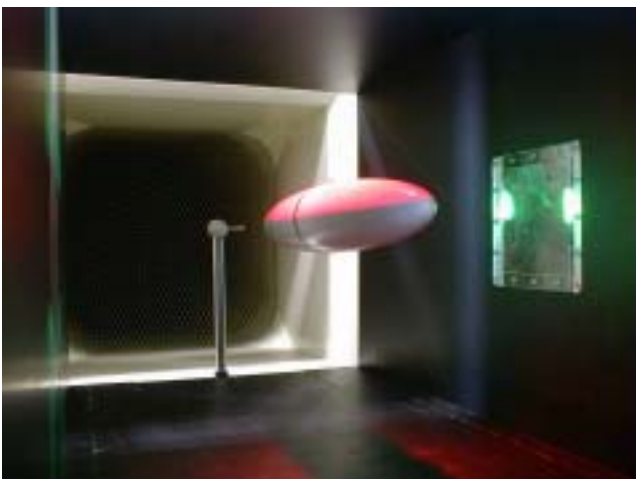


図8 5孔ヨーメータによる後流計測試験

(Fig. 8 Wake survey test with 5 holes yaw meter)

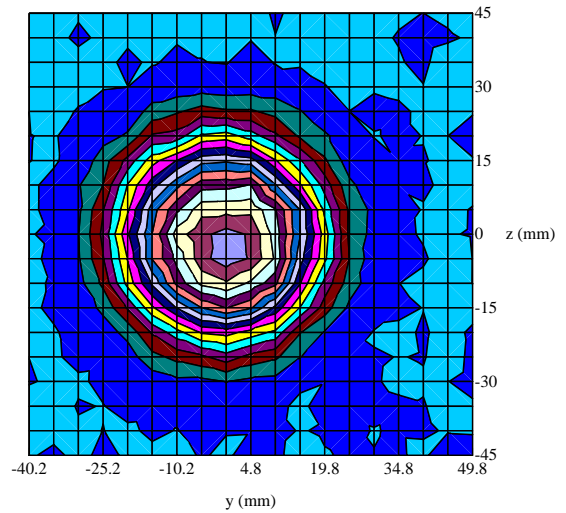


図9 6:1回転楕円体模型の後流の動圧比分布 (風速21m/s、2%毎の等高線)

(Fig. 9 Contours of dynamic pressure ratio to reference one at x=0 of 6:1 ellipsoid model at 21m/s in flow speed)

(Contours are depicted every 2% change)

力自体が小さく、低い動圧(10m/s程度の風速)では、抗力計測誤差が動圧の大きい場合に比べて拡大していることが考えられる。

精密な抵抗係数の測定では、高い精度での動圧計測の他にも、試験の条件に合わせた磁力支持用模型の設計が求められる。これは丁度、通常の風洞試験でも測定部の大きさ、天秤の容量に合わせて模型を設計するのに似ている。空気力を高精度で測定しようとするならば、磁気モーメントが小さい模型内装磁石の使用が望ましい。磁気モーメントが小さい磁石を使えば同じ抗力コイル電流でも、その体積に比例して小さいx方向の力しか作用しないので、高精度の試験が可能である。但し、小

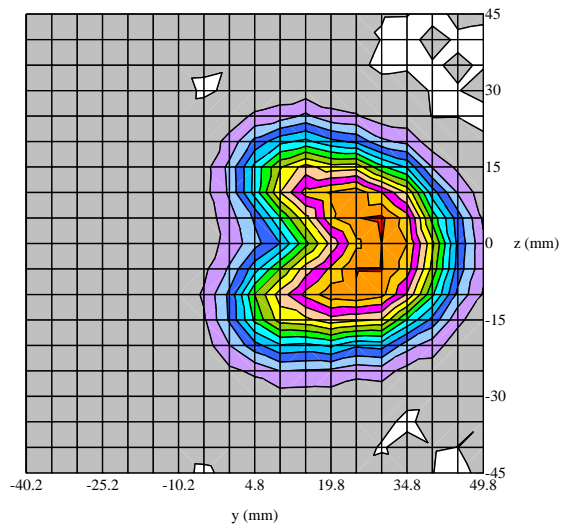


図10 動圧比分布 模型偏揺角3°

(風速30m/s、等高線2%毎)

(Fig. 10 Contours of dynamic pressure ratio to reference one at x=0 of 6:1 ellipsoid model with yaw angle of 3 deg. at 30m/s in flow speed)

(Contours are depicted every 2% change)

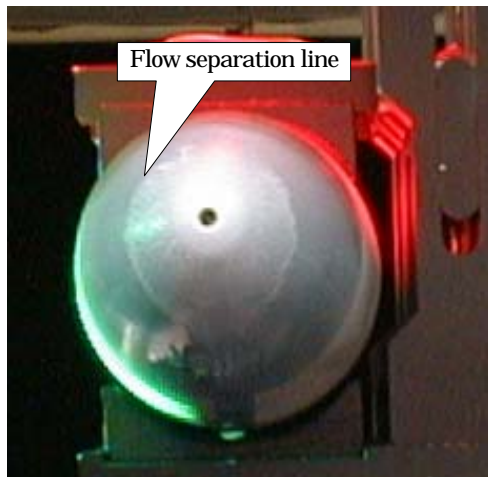


図 11 模型後縁部の流れの剥離模様 (flow speed 30m/s)
(Fig. 11 Flow separation around trailing edge)

さい磁気E-マットの磁石に適した様に、模型質量を小さくする必要があります。例えば、模型の総ての寸法を元のもの半分にすれば、測定精度は現状の2倍に向上することが期待できる。

6. 後流計測による抵抗測定

磁力支持天秤装置による抗力測定とは別に、同じ模型を気流と平行に磁力支持した状態で、模型の後流の総圧損失を測定し、模型に加わっている抗力を Jones の方法を用いて評価した。後流測定位置は図 2 を参照されたい。また、図 8 には後流計測の状態を示している。x 軸に垂直な面内で水平方向に 90mm、鉛直方向に 90mm の幅で総圧損失量を直径 5mm の 5 孔エーメータの総圧計測用孔を利用して、上下左右 5mm 毎に計測した。後流静圧の影響を評価するため (Jones の方法⁵⁾)、静圧管を用いて静圧分布も測定した。得られた結果を図 6 中に印で示す。後流計測による模型抵抗の推定は信頼性の高いものであるが、3次元単体模型の場合は著者の知る限り初めてのケースであり、その精度は何の程度期待できるか不明であるが、磁力支持天秤装置で計測した結果とは、レイノルズ数が 6×10^5 以上では 10% 程度の差以内に入っている。図 9 に後流の動圧比：

$$= (\text{後流総圧} - \text{一樣流静圧}) / \text{一樣流動圧}$$

を示す。図に示されている様に、後流の形状は円形に近く、模型直径程度の後流の広がり観測された。

模型が気流に対して傾いた場合の後流の状態についても計測したので、図 10 に示す。模型は z 軸周りに 3 度回転させた状態で後流を計測した。模型から縦渦が流れ出て、後流の断面形状が円形から、ハート型へ変形しているのが観測される。

7. 模型表面流れの可視化試験結果

模型表面流れの状態を知る目的で、予備的に油膜法を用いた可視化試験を行った。粘度調整の結果、30m/s 以上で模型最下流付近に流れの剥離に伴う油膜模様の変化を観測した。図 11 に風速 30m/s での油膜模様を示す。模様位置は、約 96% 模型長位置に対応し、円形に近いものであった。円からの変形の原因は、模型

が気流と完全に並行でないこと、重力により油膜が下方に流れたためと考える。本磁力支持天秤装置では、模型表面中心部の模様を計測し、その位置姿勢を評価するので、通常の油膜法では模型後部の限られた部分のみの可視化にしか適用できない。磁力支持でも、模型表面の流れの可視化は必要であり、今後、本磁力支持天秤装置に適した可視化法を工夫する必要がある。

8. むすび

航空宇宙技術研究所の 60cm 磁力支持天秤装置を用いて、6:1 回転楕円体の抵抗、後流、境界層剥離位置を支持干渉の無い状態で測定した。測定結果には浮力効果補正、壁干渉修正を施し、無限に広がった一様流中に置かれた 6:1 回転楕円体の諸量に変換して、他の風洞試験結果とも比較できるようにした。本試験結果から得られた所見は以下の通りである。

- 6:1 回転楕円体が気流とほぼ並行に置かれた時の抵抗係数を磁力支持天秤装置を用いて測定した。レイノルズ数が 1×10^6 では 6:1 回転楕円体模型の抗力係数は 0.045 ~ 0.055 の間にあった。
- レイノルズ数が 0.8×10^6 以上での抵抗係数は、他の文献結果の 5:1 と 8:1 細長比回転楕円体の抵抗係数の間にあることが判った。
- 測定結果の信頼性を高めるため、磁力支持状態で後流計測により抵抗係数を別に評価した。2つの手法により推定した抵抗係数は試験した風速では互いに近い値を示した。
- 後流計測では、支持干渉が無いため、気流に平行に模型が置かれた状態では円形に近い後流断面を観測した。
- 支持干渉の無い状態で、流れの可視化を試みた結果、30m/s で 96% 模型長の付近で流れが模型から剥離していることが判った。

本磁力支持天秤装置による抵抗係数の評価結果には、用途によっては未だ満足できない大きさの誤差が含まれており、今後更に精度の高い測定法を開発する必要がある。一つの方法としては、磁石の質量を含めた模型質量を出来る限り小さくすることが考えられる。

参考文献

1. S. F. Hoerner : "Fluid-Dynamic Drag", published by author, 1958, pp.6-16
2. M. Judd, M. Vlainac and E.E.Covert : "Sting-free drag measurements on ellipsoidal cylinders at transition Reynolds numbers", J. Fluid Mech. (1971), Vol.48, pp.353-364
3. 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、2002 年、5 月、pp.188-195
4. R. C. Pankhurst and D. W. Holder : "WIND-TUNNEL TECHNIQUE", SIR ISSAC PITMAN&SONS, LTD., 1948, pp.333-349, pp.378-381
5. 谷 一郎 : 「流れ学」、岩波全書、1970、pp.37-38