低速風洞用 60 cm 磁力支持装置の開発*¹

Development of a 60 cm Magnetic Suspension System

澤田 秀夫*²・国益 徹也*²
Hideo SAWADA and Tetsuya KUNIMASU

Key Words : MSBS, Wind Tunnel Testing, Balance

Abstract : A 60 cm Magnetic Suspension Balance System (MSBS), which has been developed in the National Aerospace Laboratory of Japan (NAL), is described in detail. Magnetic field in the MSBS is evaluated analytically and is compared with measured one. Available magnet kinds for the MSBS are selected analytically. The optimum ratio of diameter to length of cylindrical magnet for the MSBS is also evaluated. A model position sensing and the control systems are described with calibration test results. A model holding system is also shown, which is necessary for worker's safety at suspending a large and massive model. The control system is presented and the measured model position during suspension is examined. The balance accuracy is examined and its error of drag force can be improved by restricting the calibration test to an expected drag range. Flow of the 60 cm low-speed wind tunnel equipped with the MSBS is examined to be available for wind tunnel tests.

1. はじめに

磁力支持天秤装置とは磁気力で風洞模型を気流中に支持する装置で、模型支持に伴う支持装置と気流の干渉を避けるために考案された。模型に磁気力を作用させる磁場は第 1 図のように測定部周りに配置したコイルにより形成される。また、コイルに流す電流を測定すれば磁気力を評価でき、磁力支持装置は天秤機能も併せ持つ。磁力支持天秤装置の特徴は支持干渉が無いこと以外に、風洞試験における運動模擬能力の向上、新しい対象物の風洞試験等が挙げられる。このように本装置は他の試験装置には無い優れた特徴を持ちながら未だ普及していない。

磁力支持の考えは既に 1940 年代に始まり、1950 年代後半にフランス ONERA で世界初の磁力支持装置が製作された¹⁾。その後 1960 年代にかけて盛んに研究が行われたが、1970 年代になると下火になった。その理由は装置の実用化の見込みが立たなかったためといわれている。製作された装置は総て小型で通常の風洞試験で使用できなかった²⁾。装置を大型化すると、莫大な電気エネルギーを消費し、極めて大掛かりな物となることが懸念され、実用化が断念されたと考えられる。その後、低温風洞と呼ばれる小型でも大きなレイノルズ数を出せる風洞が実用化され、比較的小型の装置でも実用的試験に利用できるようになったこと、超電導技術の進歩により大型の装置でも実現が可能な状況になったこと等により、1980 年代に NASA Langley 研究センターで磁力支持天秤装置の研究が実施されたが³⁾、10 年

ほどで再び下火となった。磁力支持天秤装置に関する文献は参考文献 4) にまとめられている。

航空宇宙技術研究所では 1986 年に 10 cm 磁力支持天秤装置 (10 cm MSBS) の研究を開始し、翌年 10 月には縦方向の 3 軸制御による磁力支持に成功した^{5, 6)}。1989 年には吹き出し風洞に取付け 54 m/s の気流中で模型を支持した。その後 1992 年に横揺れ制御を含む 6 軸制御ができる装置に改良した⁷⁾。10 cm MSBS の研究と並行して⁸⁾、1991 年にはより大きな測定部を持つ装置として、第 2 図に示すような 60 cm 磁力支持天秤装置 (60 cm MSBS) を設計・製作した⁶⁾。1999 年には 60 cm MSBS を低速風洞に取付け、磁力支持された模型の風洞試験を可能にした⁹⁾。第 3 図に低速風洞測定部内で磁力支持されている飛行船模型の写真を示す。2000 年度からは気流検定を実施し、力較正試験を経て 60 cm MSBS を用いた実用的な風洞試験を実施した。本論文では 60 cm MSBS の構成と性能諸元について述べる。

2. 記号

(x, y, z) : 座標系 (m), 第 1 図参照

(ϕ, θ, ψ) : x, y, z 軸周りの回転角 (deg) (微小角に限る)

(F_x, F_y, F_z) : 力成分 (N)

(N_x, N_y, N_z) : モーメント成分 (N・m)

(H_x, H_y, H_z) : 磁場強さ成分 (AT/m)

(M_x, M_y, M_z) : 磁気モーメント成分 (Wb・m)

I_i : コイル i に流れる電流 (A), $i = 0, 1, \dots, 9$

n_i : コイル i の巻き数, $i = 0, 1, \dots, 9$

I_{lift} : コイル (1, 3), (5, 7) に流れる平均電流値 (A)

*¹ © 2002 日本航空宇宙学会

2000 年 10 月 13 日, 第 38 回飛行機シンポジウムにて講演。平成 13 年 9 月 6 日原稿受理

*² 独立行政法人航空宇宙技術研究所

第1図 磁力支持天秤装置のコイル配置例 (NAL 60 cm MSBS の場合)

第2図 60 cm MSBS コイル組上図

第3図 60 cm MSBS 内で磁力支持されている飛行船模型

I_{pitch} : コイル (1, 3), (5, 7) に流れる電流値の差の半分 (A)

I_{drag} : コイル (0, 9) に流れる電流 (A)

a : 正方形コイル 0, 9 の 1 辺の半分長 (m), 0.32 m

l : 磁極間隔 (m), 0.64 m

l_x : コイル 0, 9 の間隔の半分 (m), 0.37 m

V : 模型内磁石の体積 (m^3), または磁石領域を指す.

L : コイル (1, 3) と (5, 7) の x 方向距離 (m), 0.38 m

3. 60 cm 磁力支持天秤装置

3.1 磁力支持天秤装置の原理 力支持天秤装置は支持する模型とそれに磁気力を作用させる外部磁場を形成するコイル系、コイルを駆動するアンプ系、模型位置姿勢を計測する計測系、それを制御する制御系から構成される。磁力支持用模型には外形は風洞試験模型で、内部には外部磁場と干渉して磁気力を受ける磁性体か、超電導コイルのような電流を流し続けるコイルが必要である。本装置では永久磁石を用いたが、磁化用コイルを外部コイル系に加えて、外部磁場で磁化した軟鉄を利用する場合もある。いずれにしても強力な磁石がそれに代わるものを模型内部に組み込まなくてはならない。

3.1.1 磁気力の発生 模型が保持する磁気モーメントを M 、周りの磁場強さを H とすると、模型に作用する磁気力は以下ようになる。

$$N = \int_V M \times H dV \quad (1)$$

$$F = \int_V (M \cdot \nabla) H dV$$

ここで、積分領域 V は磁気モーメントを保持している領域を指す。

低速風洞用の装置では模型に作用する最大外力は重力である。静止空気中では F_z が重力に釣り合う必要があり (2) 式の関係が成り立つ。

$$mg = \int_V \left(M_x \cdot \frac{\partial H_z}{\partial x} + M_y \cdot \frac{\partial H_z}{\partial y} + M_z \cdot \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) dV \quad (2)$$

風洞試験で用いる飛翔体の多くは流線型に近く、流れ方向に長い。こうした模型内に保持される磁気モーメントでは、 M_x が M_y, M_z に比べ著しく大きい。この場合は (2) 式から M_x 及び $H_{zx} \left(= \frac{\partial H_z}{\partial x} \right)$ が大きいことが望ましい。

M_x の上限は、磁気モーメントを保持している永久磁石の性質、または磁化される材質により決まるため、大きな磁気力を得るには大きな H_{zx} を発生させる必要がある。

3.1.2 コイル系 本磁力支持天秤装置の各コイルの仕様と組合せを第1, 2表に示す。パワーアンプは2台で上下各1対の2組のコイルを -120 A から 120 A の範囲で独立に駆動する。左右各1対の2組のコイルは別のパワーアンプ2台により -60 A から 60 A の範囲で独立に駆動する。また、前後の空芯コイルも対で1台のパワーアンプにより -120 A から 120 A の範囲で駆動される。ただし、電圧限界の 130 V により制御速度に制限がある。

第2表の組合せのコイルは第4図で示すような磁気回路を形成して模型の支持に必要な磁場を作るものと近似できる。この磁気回路による磁場強さは (3) 式で評価できる。

$$H_z \cong \frac{n_1 \cdot I_1 + n_3 \cdot I_3}{\ell} \quad (3)$$

第 1 表 60 cm 磁力支持天秤装置コイル仕様

コイル番号	名称	巻き数	コイルコア寸法 (mm)	用途
0, 9	抗力コイル	50	620×620	抗力均衡
1, 3, 5, 7	揚力コイル	194	200×200	揚力均衡 縦揺れモーメント均衡
2, 4, 6, 8	横力コイル	100	200×200	横力均衡 偏揺れモーメント均衡 (横揺れモーメント均衡)

第 2 表 60 cm 磁力支持天秤装置コイル組合せ

釣り合わせる 作用力種類	コイル組合せ	電源種類
抗力 (F_x)	0 + 9	パワーアンプ (#5)
重力, 揚力 (F_z)	(1 + 3) + (5 + 7)	パワーアンプ (#1 + #2)
横力 (F_y)	(2 + 4) + (6 + 8)	パワーアンプ (#3 + #4)
縦揺れモーメント (N_y)	(1 + 3) - (5 + 7)	パワーアンプ (#1 - #2)
偏揺れモーメント (N_z)	(2 + 4) - (6 + 8)	パワーアンプ (#3 - #4)
横揺れモーメント (N_x)	(2 - 4) - (6 - 8)	1999 年度未装備

第 4 図 磁気回路図

コイル 1 と 3 は同一磁気回路内で磁束を互いに強めるように連結し同じ電流を流している。コイル 5 と 7 もコイル 1, 3 と同様に連結されている。コイル 1, 3 とコイル 5, 7 に同じ大きさ向きの電流 (I_{lift}) をコイルに流し, それぞれの磁極間に互いに反対の向きの H_z を発生させるようにコイルとパワーアンプを連結することにより, 測定部中心領域で H_{zx} を形成する。式 (3) から H_{zx} は (4) 式となる。

$$\left. \frac{\partial H_z}{\partial x} \right|_{x=0} \cong 2 \cdot \frac{I_{\text{lift}} \cdot n_{\text{lift}}}{L \cdot \ell}$$

$$n_{\text{lift}} = n_1 + n_3 = n_5 + n_7 \quad (4)$$

一方, コイル 1, 3 とコイル 5, 7 に同じ大きさで反対の向きの電流 (I_{pitch}) をコイルに流すと, 同じ向きの H_z を発生するので, 測定部中心領域でほぼ一定の H_z を得る。式 (1) から H_z は (5) 式となる。

$$H_z \cong \frac{n_{\text{lift}} \cdot I_{\text{pitch}}}{\ell} \quad (5)$$

横方向の磁気力を制御する磁場強さ H_y , 磁場勾配 H_{yx} も同様の方法で評価できる。

第 5 図 I_{lift} を変化した時の H_z vs. x 第 6 図 I_{drag} を変化した時の H_x vs. x

測定部前後の空芯コイル 0, 9 は互いに相手の磁束を減じるように連結して測定部中心で (6) 式のような H_{xx}

$$H_{xx} = \frac{4I_{\text{drag}}\ell_x (5a^2 + 3\ell_x^2) n_{\text{drag}} \cdot a^2}{\pi (a^2 + \ell_x^2)^2 \sqrt{(2a^2 + \ell_x^2)^3}},$$

$$n_{\text{drag}} = n_0 = n_9 \quad (6)$$

を得る。

実際に作り出した磁場勾配の計測例を第 5, 6 図に示す。計測結果は単位電流当たりの磁束密度に変換して示した。揚力用コイル (コイル 1, 3, 5, 7) と抗力用コイル (コイル 0, 9) により形成された磁場勾配 H_{zx} , H_{xx} はコイル電流と x に比例していることが判る。同様に横力用コイル (コイル 2, 4, 6, 8) による磁場勾配 H_{yx} もコイル電流と x に比例していることが確認されている。また, コイル 1, 3 とコ

イル 5, 7 に同じ大きさで反対の向きの電流をコイルに流すと、揚力用コイル (コイル 1, 3, 5, 7) により形成された磁場強さ H_z は x に依存せず、コイル電流にもほぼ比例していることが第 7 図から判る。

模型の運動は磁場で制御しており、磁場を形成する速さは速いことが望ましい。コイルに発生する逆起電力はコイルの巻き数の 2 乗とコイル電流の時間変化率の積に比例する。一方、測定部中心の磁場強さはコイルの巻き数とコイル電流の積に比例する。このため、本装置では、必要な磁場強さを決めた上で、コイルの巻き数を減らし、その分コイル電流を増加させ、必要な磁場強さを維持しながら逆起電力の増大を防ぎ、磁場制御速度の向上を計っている。

3.1.3 模型及び磁石 磁力支持天秤装置で風洞試験するには、先ず静止気体中で模型を浮揚させ、その後、気流を形成し空気力を測定する。ここでは静止気体中で模型を浮揚させる必要条件を検討する。60 cm MSBS では H_{zx} の上限が存在する。よって、最大 H_{zx} で模型を浮揚できる模型内永久磁石の磁気モーメントには最小値が存在する。様々な種類の市販の永久磁石には、減磁特性曲線という磁石の性能を表す曲線が提供されている。棒状の磁石を考えると、磁石に保持可能な最大磁気モーメントはおおよそ最大残留磁束密度 B_r (T) と磁石の体積 V (m^3) の積になる。よって、

最大浮揚力は B_r に V と最大 H_{zx} の積となる。一方、磁石の重さは重力加速度 g (m/s^2) と密度 ρ (kg/m^3) と V の積であり、最大浮揚力が重力より大きいためには、

$$\frac{B_r}{\rho} \geq \frac{g}{H_{zx}|_{\max}} \quad (7)$$

という条件が課せられる。(7) 式の右辺は装置固有の量であり、装置が決まれば値が確定する。また、左辺は磁石固有の量で、磁石を選べばその最大値も定まる。第 8 図は 60 cm MSBS で浮揚可能な代表的磁石を調べた結果である。図から Alnico 磁石、Fe-Cr-Co 磁石等が 60 cm MSBS に適しているといえる。

Alnico 磁石と Fe-Cr-Co 磁石は形状によって磁気モーメントが大幅に変わるので、その形状は重要である。模型内に収まる磁石形状には制約があり、性能を最大限に発揮する形状にできるとは限らない。第 9 図に 60 cm MSBS で円柱磁石の長さをパラメータに選び、直径を変化させたときの浮揚力から磁石自身に加わる重力を差し引いた実効浮揚力を示した。60 cm MSBS では Alnico 磁石は円柱磁石の長さが定まると最適な直径が存在する。直径が小さいところで、磁石寸法が 315 mm の場合に他の磁石と特性が異なっている理由は、60 cm MSBS では測定部中心から離れるにつれて H_{zx} の絶対値が小さくなり、長い磁石では磁石の端付近で H_{zx} の絶対値が小さくなるためである。

第 7 図 I_{pitch} を変化させた時の H_z vs. x

第 9 図 NAL 60 cm MSBS でのアルニコ 5 円柱磁石の最適形状

第 8 図 NAL 60 cm MSBS で利用可能な磁石の種類

希土類磁石も利用可能であるが、磁化するのに極めて強い磁場が必要で、薄い磁石しか入手できない。その上、連結作業には危険を伴い構造強度上も脆いという欠点があり、現時点では 60 cm MSBS では模型浮揚の主力磁石としては利用していない。

3.1.4 模型位置姿勢測定装置 当初、模型位置姿勢測定装置として 1 台のカメラで高速に模型の位置姿勢成分 (6 個) 総てを計測できる装置を開発した⁶⁾。しかし、カメラのレンズに垂直方向の位置姿勢変化は像の大きさ変化で評価するため、測定対象物体が離れると精度が悪い。60 cm MSBS ではこの欠点を除くためにカメラを模型の上方と横にそれぞれ設置して、像の大きさを使わず位置姿勢を評価

第 10 図 位置姿勢測定装置校正模型と校正装置

第 11 図 θ 変化による模型位置姿勢測定装置出力

している。

同一模型の位置姿勢を上記のように 2 箇所から測定する際に、照明も 2 方向から別々に行う。その結果、模型のある方向は 2 箇所から同時に照明されるので模型の反射光強度が強くなり、センサーの測定に影響が現れる。このため、各センサーが利用する光の波長域を予め定めて、フィルターを用いて互いにもう一方からの照明による反射光を検知しないようにした。実際には横からの測定では青色の光を、上方からの測定では赤色の光を用いた。

本模型位置姿勢測定装置の校正では磁力支持する模型と同じ形状の模型に同じマークを描き、同じ方法で塗装した特別の校正専用模型を使い、実際の測定部内部で校正する。模型の 6 軸校正装置を第 10 図に示す。ただし、模型の位置姿勢の計測に必要な部分から大きく離れた場所である模型先端や後縁部等は簡略化している。この校正模型を遠隔操作で動作する 6 軸ステージに設置し、計算機からの命令により指定の位置姿勢に設定し、模型位置姿勢測定装置の出力を読み取る。位置姿勢の校正試験結果の一部を第 11 図に示す。試験結果は各軸方向の変化に対しては線形な関係を示しており、分解能は位置では 0.06 mm 未満で、姿勢角では 0.04 度未満である。

3.1.5 制御法 磁力支持天秤装置の制御ブロック図を第 12 図に示す。各軸独立に二重位相進みと、比例積分制御により模型の位置姿勢を設定値に保持するように制御する。ノイズの模型位置姿勢測定信号への進入を防ぐため、カットオフ周波数が 10 Hz で 2 次のデジタルフィルターを介して位置姿勢を評価して制御に用いている。測定周波数は約 248 Hz である。模型の位置姿勢は運転中に任意に変えられて、モニター画面で模型位置姿勢変化を常時監視できる。制御の詳細は文献 6) を参照。

実際の磁力支持状態の例として、全長 480 mm の 6:1 回転楕円体模型が約 30 m/s の一様流中で磁力支持されている。

第 3 表 一様流中 (30 m/s) の磁力支持例

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	θ (deg)	ψ (deg)
平均値	0.000	0.006	0.000	0.200	-0.402
正側最大偏差	0.052	0.084	0.063	0.039	0.049
負側最大偏差	-0.081	-0.082	-0.049	-0.034	-0.047
標準偏差	0.023	0.024	0.015	0.011	0.015

第 12 図 NAL 60 cm MSBS で採用している制御ブロック図

 第 13 図 z のステップ応答 (単位: mm or degree)

 第 14 図 θ のステップ応答 (単位: mm or degree)

る時の状態の統計処理結果を第 3 表に示す．平均値は気流と平行に模型を設置するために設定した setpoint 値と一致している．

また，長さ 480 mm の 9.5° 円錐模型の静止気体中でのステップ応答を調べた結果を第 13, 14 図に示す．第 13 図に示すように， z 方向のステップ応答では，他の量は殆ど変化しない．一方，第 14 図から判るように， θ のステップ変化に対しては， x が影響され変化しているのが観測できる．今後は軸間干渉を低減する制御方法が待たれる．

3.1.6 模型把持装置 磁力支持天秤装置が大型になると，支持模型の寸法，質量が大きくなる．このため，模型を装置内で支える支持台は大きくなり，支持が達成された後に台を測定部から除去する作業は危険になる．磁力支持する際に制御が不適切だと模型は予期せぬ運動を行う．模型を磁力支持する際のこうした失敗を避け，自動的に台を除去する装置が模型把持装置である．模型把持装置は磁場や模型位置姿勢測定装置の測定に影響せず，強力に模型を把持できなくてはならない．

磁場への影響を避けるため，材料にはアルミニウム合金

第 15 図 把持装置把持部と開放中の模型

第 16 図 抗力較正試験の様子

と SUS304 を利用した．模型に加わる磁気力の変化により，装置の把持部分の位置が変化しないように油圧駆動を用いた．また，模型に加わる磁気力を監視できるように把持部下部に非磁性体でできた天秤を装着した．この天秤により把持中に模型に加わっている磁気力がどの程度のもか監視できる．また，着磁した磁石の磁気モーメントを評価するのに本把持装置とモニター用天秤を使用している．

模型が完全に磁力支持されたことを確認すると，把持装置の自動退避ボタンを押すことで把持装置は自動的に模型との衝突を避けながら測定部外部に退避する．試験終了後は把持準備ボタンを押すことで，把持装置は自動的に模型の把持部分に把持用部分を合わせ停止する．その後，把持命令ボタン操作により強制的に模型を把持する．模型が把持されたことを制御画面の模型位置姿勢変化から判断し，磁力支持制御を終了する．低速風洞に取り付けた 60 cm MSBS と把持装置の把持部の写真を第 15 図に示す．

3.2 力較正試験 模型に加わる磁気力を評価するには，磁力支持天秤装置のコイル出力と模型荷重の関係を求める必要がある．第 16 図のように模型にプーリーを介して糸で重りを吊り下げ，そのコイル出力と重りの関係を特定することが精度の高い力較正試験となる．抗力較正試験結果の例が第 17 図である．予測される空気力に応じて荷重範囲を決め，較正試験精度の向上と試験時間の短縮を図った．較正試験結果はほぼ直線的であるが，若干のヒステリシスが観測された．このような荷重に対するコイル電流のヒステリシス現象は磁気回路で生じたと推測され，今後回路の

第 17 図 抗力校正試験結果の例

第 18 図 60 cm MSBS を装備した低速風洞の風路線図 (単位: mm)

第 19 図 低速風洞に設置した 60 cm MSBS と把持装置

設計, 材料選定に十分注意が必要と考えている。ヒステリシスの影響を軽減する方策として, 測定部壁面内にホール素子を埋め込み磁場強さを直接計測し, 荷重と磁場強さの関係から校正直線を決定する方法が考えられる。

4. 磁力支持風洞

4.1 風洞概要 60 cm MSBS を装備した風洞は測定部断面が 60 cm 角, 循環式で大部分が木製の風洞である。縮流洞は縮流比 100/9 の鉄製で, 第 18 図に示すような風洞である。また, 動力は 11 kW 電動機で, 最高風速は 35 m/s

である。

60 cm MSBS の装備では, 既存の測定部の上流 1 m 部分を残し, その下流部分とコレクターを取り除き, 1.2 m 長さの 60 cm MSBS 用の木製測定部と, それに適合する新しく設計したコレクターを取り付けた。第 19 図は 60 cm MSBS を装備した低速風洞の測定部付近を写したものである。

4.2 気流検定結果 測定部気流速度評価では基準ピトー静圧管は測定部中心から 1033 mm 上流, 上壁から 60 mm 気流に入った所に設置し, 測定部中心位置の動圧との関係を予め求め, 風洞試験時の一様流動圧を推定している。

静圧係数の流れ方向の変化は 15 m/s 以上ではほぼ一定の変化率 ($-0.030/\text{m}$) を示しており, この結果は抵抗測定では浮力効果の補正に用いる。

別途校正した直径 5 mm の 5 孔ヨーメーターを用い測定部中心軸上の風向分布を風速約 20, 30 m/s の 2 通りで計測した。20, 30 m/s の時は吹き下ろし角は約 0.25 度であった。気流の偏揺れ角は測定部中心で風速に関係なく気流下流方向に向かって右方向へ約 0.3 度傾いている。

I 型の熱線プローブを用いて気流の乱れ強さを測定部中心位置で測定した。その結果, 2 kHz までの周波数域で評価すると, 25 m/s までは速度変動率が約 0.04% 程度を維持して, 風速 30 m/s で変動率の極大値 (約 0.06%) を持ち, 風速 35 m/s で再び変動率が 0.04% に戻る特性が得られた。低速風洞としては乱れ強さが十分に低い風洞と言える。

気流特性の断面内変化を評価するため, 風速 21, 29, 34 m/s において測定部中心から下流へ 441.4 mm の所で, 幅と高さ共に 90 mm の範囲で基準値に比べての総圧, 静圧係数の比, 風向について測定した。動圧比分布では基準ピトー静圧管の静圧を基準にして断面内総圧を計測し, 基準ピトー圧に対する測定位置の動圧の比を評価した。その結果, 動圧比は測定域総てで約 0.5% 以下の変化で, その分布形は不規則な模様を示した。静圧係数分布は測定部上方が下方に比べて静圧係数が低く, その差は約 0.008 程度であった。風向分布は上下, 左右方向の測定領域内での変化量は $\pm 0.1^\circ$ 以内に入っている。本検定試験では測定部中心を含む断面内の計測は行っていないが, 下流領域の結果から測定部中心でも同様に流れ場は一樣であることが期待できる。

5. ま と め

以上述べてきたように, 低速風洞用 60 cm 磁力支持天秤装置は, 実際に風洞気流中で模型を支持し, 抵抗値を計測できるようになり, 実用的風洞試験に利用できる段階にまで達した。また, 磁力支持天秤装置の開発の過程で以下のような知見を得た。

航空宇宙技術研究所が開発した 60 cm MSBS 形式のコイル配置では, 模型浮揚に必要な磁場は磁気回路を用いて評価し, 磁場制御が可能である。

磁気力発生用磁気モーメントには永久磁石を用い, 本装置で利用できる永久磁石の種類を示した。また, 円柱形アルニコ 5 磁石の適切な直径と長さの比を得た。

独自に開発した模型位置姿勢測定装置は、上方と横から同期して模型位置姿勢を高速、高精度に測定するもので、実際の磁力支持に利用できる。

磁性体材料の使用を避けて模型把持装置を製作することで、磁力支持中に模型の把持開放ができる。

制御装置は模型の位置姿勢の測定遅れを二重位相進みで補正し、その後 PI 制御により設定値との誤差を無くす制御を各軸独立で行い、実用的磁力支持を達成できる。

風洞試験では予め空気力の大きさを評価しておき、その空気力付近で力較正試験を実行することにより、抗力較正試験では誤差を小さくできる。

60 cm MSBS を装備した低速風洞の気流検定を実施し、15 m/s から 35 m/s まで測定部内の気流状態を確定し、一般的な低速風洞として十分使用可能である。

参 考 文 献

- 1) Chrisinger, J. E., Tilton III, E. L., Parkin, W. J., Cofin J. B. and Covert, E. E.: Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnel Application, J. Royal Aeronaut. Soc., **67** (1963), pp.717-724.
- 2) Dress, D. A.: Drag Measurements on a Modified Prolate Spheroid Using a Magnetic Suspension and Balance System, AIAA Paper 89-0648, 1989.
- 3) Britcher, C. P.: Progress toward Magnetic Suspension and Balance Systems for Large Wind Tunnels, J. Aircraft, **22** (1995), pp. 264-269.
- 4) Tuttle, M. H., Kilgore, R. A. and Boyden, R. P.: Magnetic Suspension and Balance Systems—A Selected, Annotated Bibliography, NASA TM-84661, 1983.
- 5) 澤田秀夫, 神田 宏, 末永尚史: 0.1 m×0.1 m 磁力支持天秤装置の試作, NAL TM-623, 1990.
- 6) Sawada, H., Kanda, H. and Suenaga, H.: The 10 cm×10 cm Magnetic Suspension and Balance System at the National Aerospace Laboratory, AIAA Paper 91-0397, 1991.
- 7) 澤田秀夫, 末永尚史, 鈴木孝行, 池田宣一: 航技研 10 cm×10 cm 磁力支持天秤装置横揺れ制御について, NAL TR-1164, 1992.
- 8) Sawada, H. and Suenaga, H.: Status of MSBS Study at NAL, NASA CP3247, 1994, pp. 275-289.
- 9) Sawada, H., Kohnno, T. and Kunimasu, T.: Status of MSBS Study at NAL, NASA/CP-2000-210291, 2000, pp. 659-673.

1) Chrisinger, J. E., Tilton III, E. L., Parkin, W. J., Cofin J. B. and Covert, E. E.: Magnetic Suspension and Balance System