

風洞実験用 6 軸制御磁力支持天秤装置の開発

Development of a 6-Axis Control Magnetic Suspension and Balance System for the Wind Tunnel Experiments

CM02004 呉 鍾彬 (指導教員 河村 良行 教授)

Jongbin OH, (Prof. Yoshiyuki KAWAMURA)

Abstract

The Magnetic Suspension and Balance System (MSBS) makes the wind tunnel experiments free from support interference. This equipment makes it possible to support an aerodynamic model in the center of the test section by the magnetic forces. In wind tunnel experiments, the aerodynamic forces acting on a model is measured by detecting the coil currents which control the magnetic field. We have studied development of the MSBS since 1997. Recently we have succeeded in developing the MSBS which can control 6 axes. This MSBS has the test section of 33cm×40cm. Recently we have developed the control method to support a model in center of the test section. We performed the wind tunnel experiments of a 2:1 cylindrical model, in which the axis of the cylindrical model is parallel to the direction of the flow, using the MSBS. We calculated the drag coefficients which were in good agreement with data obtained in a conventional wind tunnel experiment.

Key Words : Magnetic Suspension and Balance System, Magnetic Levitation, Wind Tunnel Experiments

1. 緒言

一般的に、3次元模型に及ぼす空力特性を測定する風洞実験を行う場合には、支柱やワイヤ等により模型を支持する必要がある。この状態で風洞実験を行うと気流と支持装置とが干渉し、流れには支持部の影響が現れる。磁力支持天秤装置はこの支持干渉の問題を解決するために考案されたものである。

磁力支持天秤装置で使用する模型には主小型永久磁石が内蔵されている。主小型永久磁石と模型のトータル重さは測定部の上下に設置されている揚力用大型永久磁石の磁極により測定部中心で重力と釣り合い、測定部内の磁場を制御することで模型は支持される。磁場は揚力用大型永久磁石の周囲に設置されているコイルに電流を流すことで形成される。また、模型の位置姿勢検出を行い、磁場を制御することで模型は測定部中心に支持される。その時コイルに流れる電流を測定することで各軸方向の力を測定することが可能である。

我々は1997年から測定部断面40cm級の磁力支持天秤装置の研究を開始し、5軸制御による直径70mm程度の球体模型の風洞実験を行える段階にある。また、今まで、5軸制御用磁力支持天秤装置を用いて風洞実験を行ったが、実験中に模型がz軸回転方向の制御が出来ないため、静止状態の風洞実験が出来なかった。このような結果より、現在風洞実験による静止状態の球体にかかる力を明らかにするため、6軸総ての制御が出来る磁力支持天秤装置の研究を行っている。

本報告では力較正試験による本装置の性能、ステップ応答における軸間干渉、6軸制御法、6軸制御用磁力支持天秤装置を用いた円柱形模型の風洞実験結果について述べる。

2. 装置の概要

2-1. 装置

6軸制御用磁力支持天秤装置の構成をFig.1に示す。この磁力支持天秤装置は高さ33cm、幅40cmの測定部を有する。

装置は主に、パソコン(PC)、電流制御装置、空芯コイル(外形180mm、内径140mm、厚さ20mm、巻き数255回、インダクタンス6.89mH)、揚力用大型永久磁石(外径150mm、内径50mm、厚さ25mm、残留磁束密度1.066T、希土類サマリウム磁石)、模型内部の主小型永久磁石(直径35mm、長さ40mm、残留磁束密度1.35T、希土類ネオジム磁石)及び、位置・姿勢検出器から構成されている。また、6軸制御を行うため模型内部の主小型永久磁石を2つ使用し、模型の形状を円柱形に設計した。

位置姿勢制御はFig.1に示す様にx、y、z、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 軸の合計6軸の制御まで可能である。模型の制御方法には6軸それぞれに対してPID制御を用いる。各コイルに供給できる電流は±10Aの範囲である。

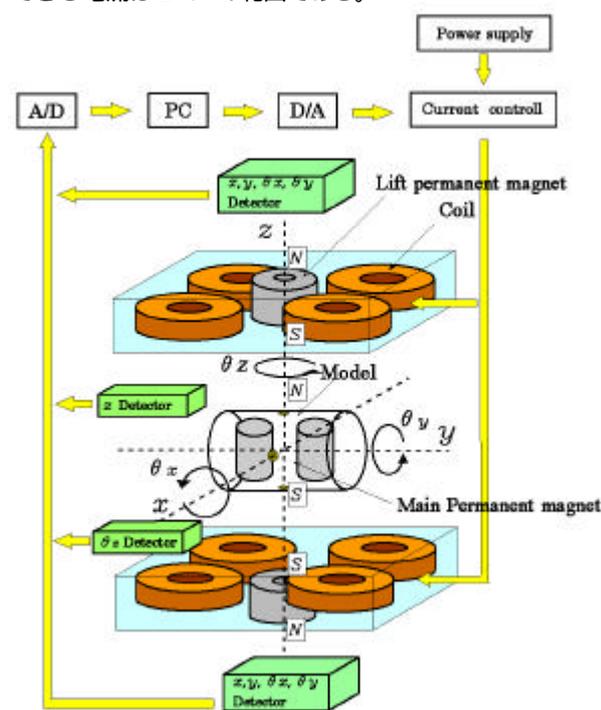


Fig.1 Composition of MSBS

この装置の特徴として、模型に作用する重力と等しい磁気力を装置に設置されている揚力用大型永久磁石により得ることができるので、模型の支持に消費する電力はほぼ 0 であり、装置全体の消費電力が抑えられていることが挙げられる。また、模型を支持制御する磁場は全て空芯コイルにより形成されるので、ヨークを使用する場合に問題となるヒステリシスの影響を受けないので、比較的容易に高精度な測定が可能である。また、コイルのインダクタンスが下がるのでコイル電流の立ち上がり時間が早くなり制御速度の高速化がより容易となる。加えて、装置の軽量、小型化が可能になる、などの点である。

2-2. 6 軸制御用 2:1 円柱形模型

6 軸制御を行うため、模型の内部に内蔵されている主小型永久磁石は磁場の軸対象性を崩す目的で Fig.2 に示すように 2 つ内蔵されている。模型の形状は Fig.2 の様に、主小型永久磁石が 2 つ内蔵できる円柱形に製作した。また、磁石を含む模型の総質量を 862[g] にすれば磁力支持天秤装置の上下に設置されている揚力用大型永久磁石と測定部中心で磁気力が釣り合うので、模型の外装部は 284[g] に設計する必要がある。そのため、模型外装部の材料には軽く加工性に優れているケミカルウッドを使用している。

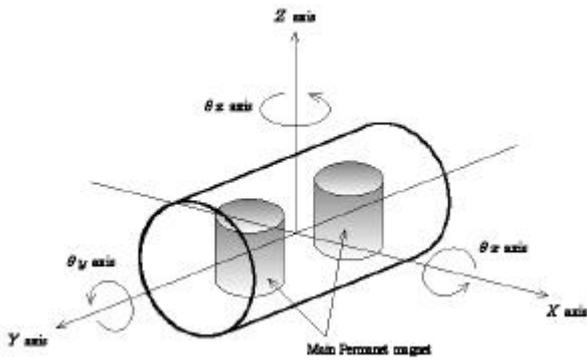


Fig. 2 2:1 cylindrical model for 6-axis control

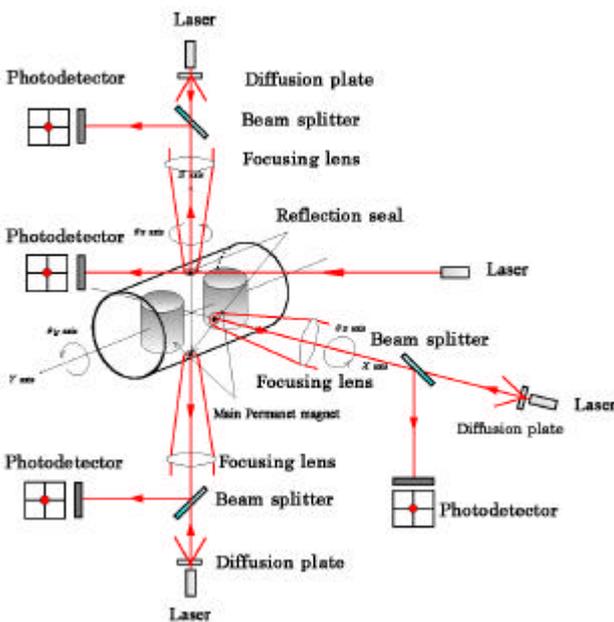


Fig. 3 Composition of X, Y, Z, x, y and z axis detector

3. 実験

3-1. 位置姿勢検出器の較正試験

位置姿勢検出器の構成を Fig.3 に示す。模型の位置姿勢検出の方法として、z 軸は模型の上端に水平にレーザー光を照射し、その対面にある光検出器に照射された光量値の変化から検出する。

x、y、x、y 軸の位置姿勢検出は Fig.3 に示すように、模型の上側の中心及び下側の中心に直径 4mm の反射シールを貼り、その部分にレーザー光を照射し、その反射光を 4 分割光検出器に受けさせ検出する。また、6 軸制御用の z 軸の位置姿勢検出器は上下側に設置されている位置姿勢検出器と同様な検出器を使用し、模型の中心に直径 4mm の反射シールを貼り、真横からその反射光を検出する。

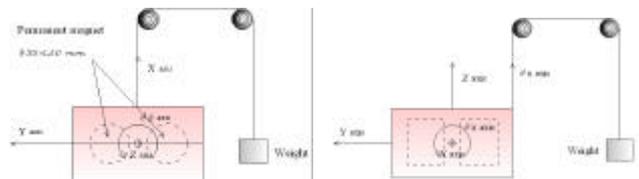
位置姿勢検出器の較正試験は較正試験用模型を磁力支持天秤装置の測定部の中心に設置し、模型を z、x、y 軸に 0.2 mm ずつ移動させ ±1 mm 範囲内で光検出器の電圧変化値の測定を行う。

3-2. 静的力較正試験

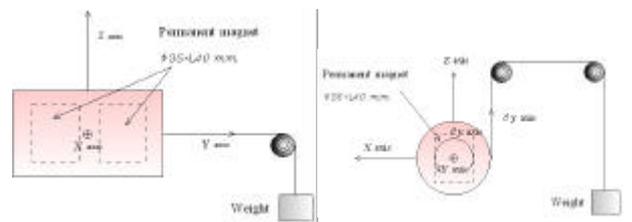
磁力支持天秤装置を使用する風洞実験において模型に作用する空気力を測定するには、実験前に軸単位で模型に作用する磁気力とコイル電流との関係式を求めておく必要がある。この作業は一般的な天秤装置の力較正試験と同じである。力較正試験は Fig.4 の様に直接模型に重りを吊り下げ、その時のコイル電流を測定して関係式を求める方法で行う。

3-3. ステップ応答

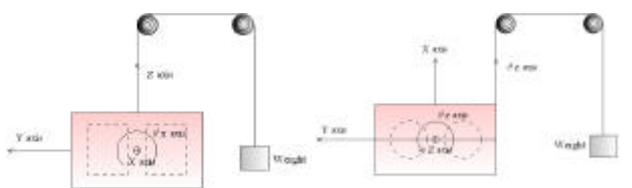
模型にステップを与えた時に理論通り磁気力が作用することはなく、例えば y 軸方向に磁気力を作用させると x



(a) X, x calibration method



(b) Y, y calibration method



(c) Z, z calibration method

Fig. 4 Calibration method for applied force or torque on the model

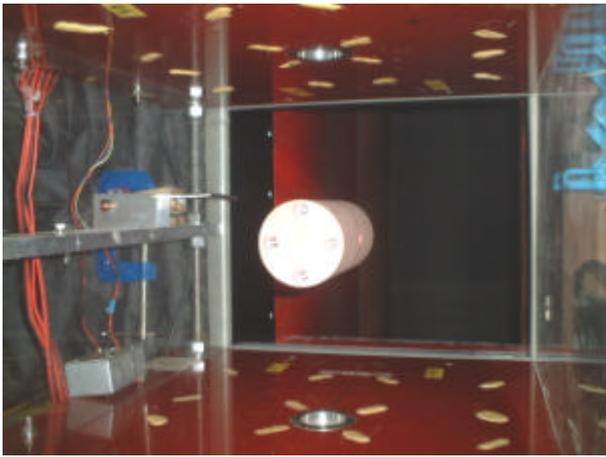


Fig. 5 Wind tunnel experiment of a 2:1 cylindrical model

軸にトルクが生じてしまうなどの干渉が生じる場合がある。この軸間の力及びトルクの干渉は即ち、天秤の測定誤差として現れる。従って、軸間の干渉の度合いを調べておく必要がある。

最適 6 軸制御を行うため、各軸安定制御ゲイン値は理論値から試行錯誤した最適安定値である。各軸についてステップ応答の測定を行うことにより、PID 制御による制御精度と軸間干渉が明らかになると考えられる。

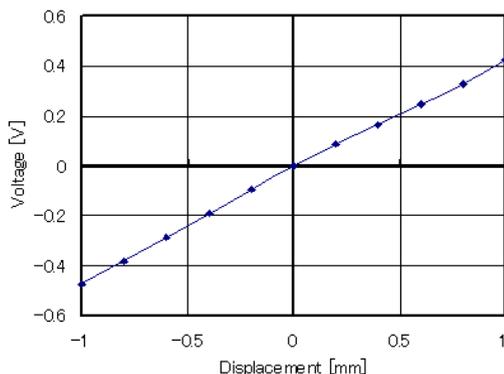
3-4. 2:1 円柱形模型の風洞実験

磁力支持天秤装置による風洞実験用の模型として直径 70mm、長さ 140mm の円柱形模型（長さ対直径の比 2:1）を製作した。風洞実験で使用した風洞は開放型押し込み式で絞り比が 18、風速分布が $\pm 1\%$ 、乱れ強さが 0.1 以下のものを使用した。実験は先ず円柱形模型を磁力支持し、無風状態時の基準となるコイル電流を測定した上で風速 0 m/s ~ 25 m/s の間を 1 m/s 間隔でコイル電流の測定を行い、これを 5 回繰り返す。その 2:1 円柱形模型の風洞実験の様相を Fig.5 に示す。

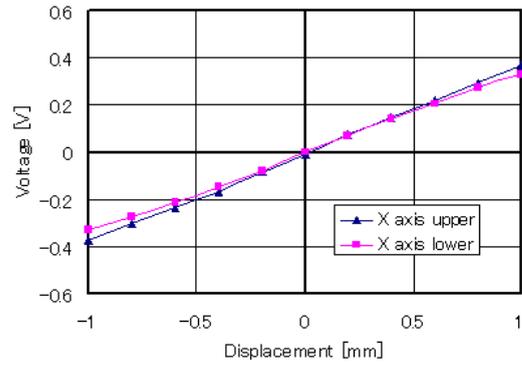
4. 実験結果及び考察

4-1. 位置姿勢検出器の較正試験

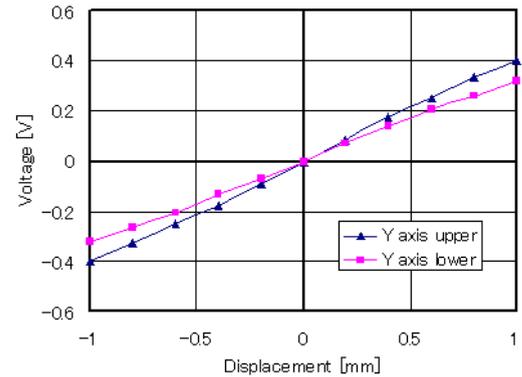
位置姿勢検出器は磁力支持天秤装置で模型の支持精度に大きく影響をするので、模型の位置姿勢検出量を調べることで支持精度を向上させることが可能である。この測定結果から上下の位置姿勢検出器の検出量に差がある事が分かった。このような結果は模型の支持誤差や磁力支持天秤装置の軸間干渉として現れるので上下位置検出器の補正が必要である。検出量の差の補正は制御プログラムの方で



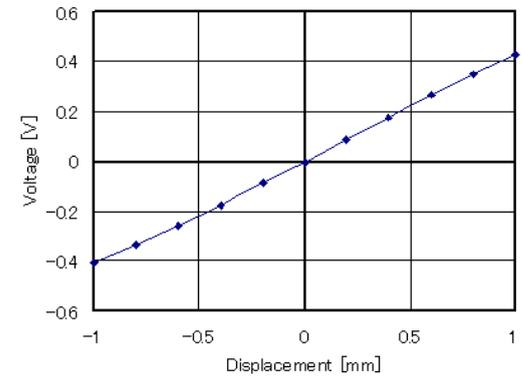
(b) Calibration test of Z axis sensor



(b) Calibration test of X axis sensor



(b) Calibration test of Y axis sensor



(b) Calibration test of Z axis sensor

Fig. 6 Calibration test of position sensor

行った。位置姿勢検出器の z、x、y、z 軸較正試験結果を Fig. 6 に示す。

4-2. 静的力較正試験

位置姿勢検出器の較正試験結果より補正された状態で各軸の静的力較正試験を行い、その結果を Table.1 に示す。静的力較正試験結果より磁力支持天秤装置の支持可能な範囲は z 軸に 1.22[N]、x 軸に 2.16[N]、y 軸に 2.03[N]、z 軸に 0.02[N]、x 軸に 0.14[N·m]、y 軸に 0.22[N·m] であることが分かる。

Table. 1 Static force calibration

	X axis	Y axis	Z axis
Support range [N]	± 2.16	± 2.03	± 1.22
Standard deviation [N]	0.0031	0.005	0.0237
	θ_x axis	θ_y axis	θ_z axis
Support range [N·m]	± 0.14	± 0.22	± 0.02
Standard deviation [N·m]	0.0005	0.0001	0.0003

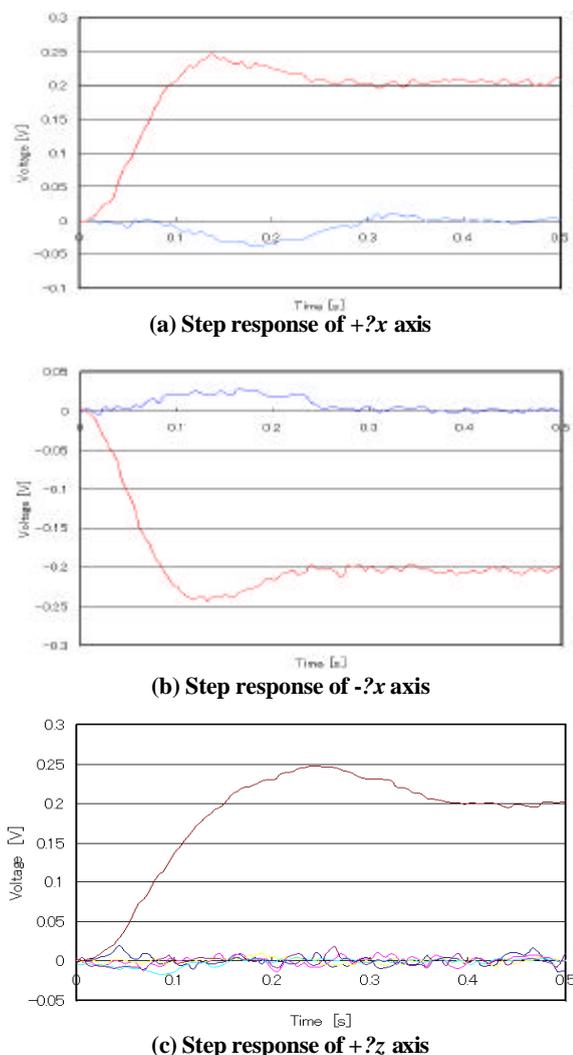


Fig. 7 Interference of step response between different axes

4-3. ステップ応答

ステップ応答の測定結果は位置姿勢検出器の較正結果より補正された値を用いて軸ごとに行った。その結果、軸間干渉が最も大きかった+ x軸と- x軸ステップ応答と現在研究を行っている z軸の測定結果を Fig.7 に示す。+ x軸のステップ応答の結果、他の軸に比べて-y軸の干渉が最も大きかった。- x軸の場合にも同様に+y軸の干渉が最も大きかった。これらの結果より水平軸と回転軸の間の干渉が大きいことが分かる。また、z軸のステップ応答の結果、他の軸の干渉はノイズ程度であることが分かる。

4-4. 2:1 円柱形模型の風洞実験結果

実験中、風速が 10 m/s に達するあたりから模型が z 軸方向に微振動を起こしていた。このような現象は静的力較正試験結果からも分かるように z 軸方向の模型に与えられる磁気力が小さかったためである。今後このような問題を改善するため、より強い磁気力を模型に与えるための研究が必要である。そのためには模型内部の永久磁石の配置、永久磁石のより高い残留磁束密度、コイル電流制御装置の改良が考えられる。測定結果から円柱形模型の抗力係数とレイノルズ数の関係を求めたものが Fig.8 である。測定の結果、「流体の力学」9 章第 2 節に述べられているように、円柱形の寸法の割合 $l/d = 2$ の場合には抗力係数 C_D が 0.85 であることから、磁力支持天秤装置を用いた円柱形の風洞実験結果がこれによく一致していることが分かる。

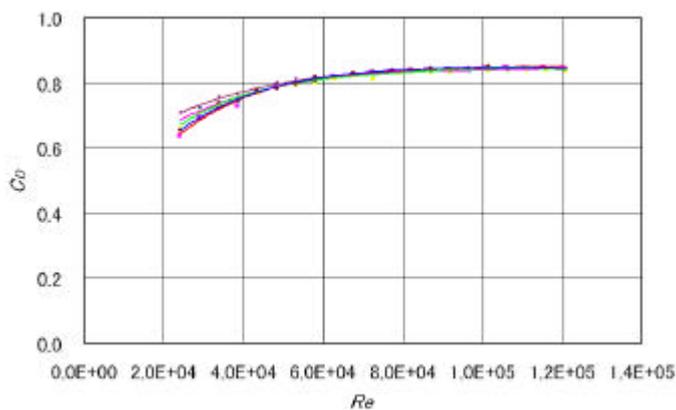


Fig. 8 Wind tunnel experiment result of a 2:1 cylindrical model

5. 結言

6 軸制御を可能にするため、z 軸の位置検出器を製作した。また、模型には軸対象性を崩すため、主小型永久磁石を左右に二つ内蔵させた。本報告では 6 軸制御の可能性とその結果について報告した。その結果 6 軸制御は可能であったが、風洞実験中風速が 10 m/s に達するあたりから模型が z 軸方向に微振動を起こしていた。このような現象は z 軸方向の模型に与えられる磁気力が小さかったためである。

位置姿勢検出器の検出量の補正を行った上で、各軸ステップ応答を行った結果、水平軸と回転軸の間の干渉を完全に取り除くことは出来なかったが、z 軸のステップ応答の結果より軸間の干渉がノイズ程度であることから 6 軸制御の可能性が明らかとなった。現在 z 軸位置検出器と z 軸回転検出器の二つが設置されており、この二つの位置姿勢検出器を使用することで模型の静止状態と z 軸回転運動の風洞実験が可能となった。

謝辞

機械加工の製作の指導をして下さった工作センターの先生方、研究を進めていく上で、指導していただいた河村良行先生、溝田武人先生、及び知能機械工学科の先生方に謝意を表します。

参考文献

- [1] 中山泰喜：「流体の力学」株式会社養賢堂(1993/11/20) Page 131-135.
- [2] 澤田秀夫、国益徹也、須田信一：「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」、第 34 回流体力講演会発表(2002/9/18)。

これまでの研究業績

- [1] 河村良行、権彰起、高橋貴臣、武永智靖、呉鍾彬、鳥井浩平：「福岡工業大学低電力軽量 40cm x 40cm 磁力支持天秤装置の開発」、風工学会平成 15 年度年次研究発表会。
- [2] Jongbin OH, Kouhei TORII, Yoshiyuki KAWAMURA, Taketo MIZOTA ; “ Development of 6-axes Magnetic Suspension and Balance System in Fukuoka Institute of Technology ”, 7th International Symposium on Magnetic Suspension Technology (2003), Page 262-267.
- [3] 河村良行、武永智靖、呉鍾彬、高橋貴臣、権彰起、溝田武人：「低電力 40cm 級磁力支持天秤装置の開発」、2004 年風工学会論文集、第 98 号平成 16 年 1 月。