

2L7 磁力支持天秤装置を用いた動的風洞試験の可能性

○大林茂, 大嶋龍, 澤田秀夫 (東北大学流体科学研究所)

Capability of Dynamic Wind Tunnel Testing by Magnetic Suspension and Balance System
Shigeru Obayashi, Ryo Oshima and Hideo Sawada(Institute of Fluid Science, Tohoku University)

Key Words : Magnetic Suspension and Balance System, Dynamic Wind Tunnel Testing, Dynamic Stability Derivative

Abstract

The purpose of this study is to measure the dynamic stability derivatives by MSBS (Magnetic Suspension and Balance System), which has the capability of balance to evaluate aerodynamic force acting on a model by measuring the magnetic force without any mechanical supporting system. To measure the dynamic stability derivatives, accuracy of model movement and in-phase evaluation of aerodynamic force are necessary for apparatus. In this paper, a method to measure the dynamic stability derivatives by MSBS is described and its evaluation is conducted. The result shows that the MSBS can be used to measure the dynamic stability derivatives without any mechanical supporting system because measurements of attitude and moment of a dummy model in the pitch balance system indicate good performance.

1. 背景

近年の航空機には、全天候において安定して飛行する能力や運動性能が求められている。このような要求のもとで航空機の開発を行うには、それに加わる非定常空気力を計測することや、安定性を評価するための動安定微係数を正確に計測することが必要である[1]。これらの計測手法の1つとして挙げられるのが動的風洞試験である。動的風洞試験とは模型を風洞内で強制加振させ、その際に模型に加わる空気力やモーメントを計測するものである。世界ではこれまで、パラレル型ロボットマニピュレータ[2,3]やロータリー天秤装置[4]を使用した動的風洞試験が行われている。特に、ロータリー天秤装置においては、2つの回転軸を組み合わせることで様々な運動を可能とし、実際の航空機模型の動安定微係数測定が行われている[5]。しかし、風洞測定部内においてこれらの支持装置は模型同様激しく運動するため支持干渉の影響が強く、高精度な空気力の計測は困難である。このような測定精度の悪化を防ぐためには、支持干渉のない状態で模型の強制加振を正確に行うことが必要である。

支持干渉のない風洞試験装置として磁力支持天秤装置が挙げられる[6]。磁力支持天秤装置(Magnetic Suspension and Balance System : MSBS)は模型内の磁石と周辺の磁場を干渉させることで模型を浮揚させ、支持干渉のない状況での風洞試験を可能にする。それ以外にも、制御状態から模型に加わる空気力を評価できる天秤としての機能を持つこと、支持機構による模型の運動制限がないため最大6自由度の運動模擬能力があることが特徴として挙げられる[7,8]。これらの特徴を活かすことで、支持干渉のない動的

風洞試験が期待できる。

動的風洞試験に適用する装置に求められる性能として、多自由度の強制加振[9]、正確な運動模擬、位相遅れのない正確な空気力評価が可能なこと等が挙げられる。本稿では、MSBSを用いた動安定微係数の評価方法について述べるとともに、東北大学流体科学研究所が所有するMSBSの上記の性能について実験的に評価した結果を報告し、MSBSを用いた支持干渉のない動的風洞試験の可能性を示す。

2. MSBSの概要

2.1. コイル系

本試験で用いたMSBS[10]はアンプ系、コイル系、制御系、センサー系、及び永久磁石を内蔵した風洞模型で構成される。MSBSのコイル系は図1のように#0、#9の空心コイル及び#1~#8の鉄心コイルが風洞測定部中心に対して点対称に配置されている。座標系は図1においてx軸を上流、z軸を鉛直上向き、右手系を成すようにy軸を取る。永久磁石に加わる磁気力は次式で表される。

$$\mathbf{F} = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (1.2)$$

ここで \mathbf{F} は模型に作用する力 [N]、 \mathbf{N} は模型に作用するトルク [Nm]、 \mathbf{M} は磁気モーメント [Wbm]、 \mathbf{H} は磁場の強さ [AT/m]である。ここで、x軸に平行に置かれている様に磁化された円柱磁石の磁気モーメント \mathbf{M} はx成分のみとなるため、式(1.1)、(1.2)は以下の式となり、模型に加わる力およびトルクは各コイルに流す電流によって制御可能である。

$$F_x = M_x \frac{\partial h_x}{\partial x} I_{drag} \quad (1.3)$$

$$F_y = M_x \frac{\partial h_y}{\partial x} I_{side} \quad (1.4)$$

$$F_z = M_x \frac{\partial h_z}{\partial x} I_{lift} \quad (1.5)$$

$$N_y = -M_x h_z I_{pitch} \quad (1.6)$$

$$N_z = M_x h_y I_{yaw} \quad (1.7)$$

ここで h_i は i 方向の単位電流当たりの磁場強さ[AT/m/A]である. 図1に示すコイル配置において, 実際に磁場の計測を行った結果, 単位電流当たりの磁場分布は一定であることがわかっている[10]. 測定部中心付近の磁場強さ及びその勾配を以下に示す.

$$\frac{\partial h_x}{\partial x} = 8689.3 \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial h_y}{\partial x} = 28813.3 \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial x} = 28746.6 \quad (1.10)$$

$$h_y = 1630.8 \quad (1.11)$$

$$h_z = 1619.5 \quad (1.12)$$

また, I_{drag} , I_{side} , I_{lift} , I_{yaw} , I_{pitch} は表1に示すコイル電流の組み合わせによって決定される. 以上より, 模型に加わる5軸の磁気力は各コイルに流す電流値によって決定し, 各軸で独立した制御が可能である. さらに, 模型内に磁石を追加することで, 6軸全ての制御が可能になる[7].

2.2. 制御系

本装置の制御系は図2に示すように, 比例-積分制御器と二重位相進み補償器によって安定化される. 制御周波数は1240 Hzである.

コイル電流に対する模型の並進運動と回転運動の伝達関数はそれぞれ式(1.13), (1.14)のようになる.

$$G_{m,i}(s) = \frac{1.0 \times 10^3}{s^2} \left(\frac{M_x h_{i,x}}{m} \right) \quad (1.13)$$

$$G_{m,i}(s) = \frac{180}{s^2 \pi} \left(\frac{M_x h_j}{J} \right) \quad (1.14)$$

ここで, m [kg]と J [kgm²]はそれぞれ模型の質量と慣性モーメントであり, 下付き添字 i は'x', 'y', 'z', ' θ ', ' ψ 'を意味する. さらに式(1.14)中の下付き添字 j はピッチ方向では'z', ヨー方向の場合'y'となる.

図2中の G_c で示されるコイル系の伝達関数はパワーアンプとコイルのカスケード結合で表され, 各アンプ・コイルにおいてそれぞれの周波数特性を計測することで得られる.

センサー系の伝達関数はセンサーの時間遅れとして評価でき, 式(1.15)のようになる. またセンサーからの信号に含まれるノイズを除去するために式(1.16)で示されるカットオフ周波数100 Hzの2次のバターワースフィルタをかけている.

$$H_s(s) = e^{-Ls} \quad (1.15)$$

$$H_n(s) = \frac{(2\pi f_c)^2}{s^2 + 2f_c\pi s/\sqrt{2} + (2\pi f_c)^2} \quad (1.16)$$

さらに, フィルタ処理された模型の位置・姿勢情報は, 式(1.17)に示す2重位相進み補償器によって位相進み処理される.

$$H_p(s) = \left(\frac{p_b s + 1}{p_a s + 1} \right)^2 \quad (1.17)$$

$$p_b = \frac{2n_p T_p + T_s \times 10^3}{2 \times 10^3}, \quad p_a = \frac{2T_p + T_s \times 10^3}{2 \times 10^3}$$

ここで T_s はサンプリング時間であり, 制御パラメータ n_p と T_p は磁力支持模型のステップ応答によって実験的に決定される. 最終的にコイル系への命令は, 図2の目標値と位相進み処理された模型の位置・姿勢情報の差に基づいて式(1.18)で表される比例-積分制御器によって決定される.

$$K(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.18)$$

ここで k_p と T_i は比例ゲインと積分時間である.

また, 模型が任意の軸方向に運動した際に, 他の軸方向にも運動してしまう軸間干渉を防ぐため, 模型の位置・姿勢角に応じて電流値を追加している[11].

MSBSの制御特性は基本的に, 比例ゲイン k_p と位相進み量 n_p によって決定される. 目標値' r 'に対する応答' y 'は式(1.19)で表される.

$$\mathcal{L}[y] = \frac{G_m G_c K}{1 + G_m G_c K H_p H_n H_s} \mathcal{L}[r] \quad (1.19)$$

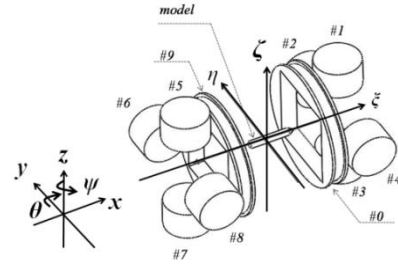


図1: MSBSコイル配置

表1: コイル電流組み合わせ

I_{drag}	$(I_{\#0} + I_{\#9})/2$
I_{side}	$(I_{\#2} + I_{\#4} + I_{\#6} + I_{\#8})/4$
I_{lift}	$(I_{\#1} + I_{\#3} + I_{\#5} + I_{\#7})/4$
I_{pitch}	$(I_{\#1} + I_{\#3} - I_{\#5} - I_{\#7})/4$
I_{yaw}	$(I_{\#2} + I_{\#4} - I_{\#6} - I_{\#8})/4$

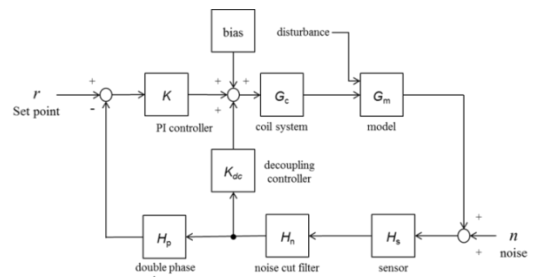


図2: MSBS制御系

3. 動安定微係数評価手法

3.1 模型の運動

動安定微係数を得るための模型の運動を示す。ここでは例としてピッチ運動について述べる。

ピッチ運動は模型の重心を原点としたy軸周りに回転する運動である。ピッチ運動におけるピッチ角 θ は次式で表すことができる。

$$\theta = \Delta\theta \sin(2\pi ft) \quad (3.1)$$

ここで $\Delta\theta$ はピッチ振幅 [rad], f は周波数 [Hz], t は時間 [sec]を表す。この運動による迎角 α と迎角変化率 $\dot{\alpha}$ は次式で表される。

$$\alpha = \theta \quad (3.2)$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\theta} \quad (3.3)$$

よって、ピッチ運動における非定常空気力測定では $\dot{\alpha}$ の効果とピッチ角変化率 $\dot{\theta}$ の効果による動安定微係数が同時に計測される。

3.2 原理

ここでは、3.1章に示した加振を行った場合の測定データから模型に作用する力、モーメントを評価し、動安定微係数を求める方法について述べる。例として、中心迎角が0 degreeの模型を $\alpha(t) = \theta(t) = \alpha_0 \sin(2\pi ft)$ でピッチ運動させる場合について考える。本装置では、センサーカメラの較正範囲が ± 3 degreeであることより、 $\alpha_0 \ll 1$ [rad]の場合について考え、式(1.2)~(1.7)が成り立つものとする。

まず、模型を気流に対して平行に設定した状態を基準とし、気流中で加振させた場合の運動方程式は以下のように記述できる。

$$J_Y \ddot{\theta} + (C_Y^{flow} + C_Y^{calm}) \dot{\theta} + (K_Y^{flow} + K_Y^{calm}) \theta = -M_x h_z |I_{pitch}^{flow} - I_{pitch}^0| \sin(2\pi ft - \tau^{flow}) \quad (3.4)$$

ここで、 J_Y は模型のy軸周りの慣性モーメント [kgm²], τ は位相遅れ量 [rad], C_Y はダンピング空気力係数 [Nms], K_Y は空気力剛性 [Nm]である。なお、上付き添え字 $calm$ は静止大気中での計測量、 $flow$ は気流中での計測量、0は模型に加わる荷重がなく、模型が静止している時の計測量をそれぞれ示し、絶対値記号は振幅を表すものとする。 $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$, θ は位相がそれぞれ90 degreeずつ異なるため、振幅と位相の関係より、以下の式が成り立つ。

$$C_Y^{flow} + C_Y^{calm} = \frac{-M_x h_z |I_{pitch}^{flow} - I_{pitch}^0| \sin \tau^{flow}}{2\pi f \alpha_0} \quad (3.5)$$

$$\tan \tau^{flow} = \frac{2\pi f (C_Y^{flow} + C_Y^{calm})}{(K_Y^{flow} + K_Y^{calm}) - (2\pi f)^2 J_Y} \quad (3.6)$$

同様に、静止大気中で模型に同じ運動をさせた場合、式(3.7)に示す運動方程式が成り立ち、結果的に式(3.8), (3.9)が成り立つ。

$$J_Y \ddot{\theta} + C_Y^{calm} \dot{\theta} + K_Y^{calm} \theta = -M_x h_z |I_{pitch}^{calm} - I_{pitch}^0| \sin(2\pi ft - \tau^{calm}) \quad (3.7)$$

$$C_Y^{calm} = \frac{-M_x h_z |I_{pitch}^{calm} - I_{pitch}^0| \sin \tau^{calm}}{2\pi f \alpha_0} \quad (3.8)$$

$$\tan \tau^{calm} = \frac{2\pi f C_Y^{calm}}{K_Y^{calm} - (2\pi f)^2 J_Y} \quad (3.9)$$

さらに、ピッチ運動における動安定微係数は式(3.5), (3.8)の差し引きすることで求めることができ、以下のようなになる。

$$C_{m_q} + C_{m_\alpha} = -\frac{2U_\infty}{Q_\infty S c^2} C_Y^{flow} = \frac{U_\infty M_x h_z (|I_{pitch}^{flow} - I_{pitch}^0| \sin \tau^{flow} - |I_{pitch}^{calm} - I_{pitch}^0| \sin \tau^{calm})}{\pi f \alpha_0 Q_\infty S c^2} \quad (3.10)$$

ここで、 Q_∞ は動圧 [Pa], S は模型の翼面積 [m²], c は平均翼弦長 [m]である。

つまり、気流中及び静止大気中において模型を強制加振させ、その時コイルに流れる電流値と模型のピッチ角を同時計測し、それらの振幅及び位相を評価することで、動安定微係数を求めることが可能となる。

3.3 同定法

動安定微係数を同定するために、次のようなローパスフィルタと最小二乗法を用いた手法でデータ処理を行う[12]。

(1)生データのフィルタ処理を行う。

(2)コイルに流れる電流値から模型に加わる磁気力を評価する。

(3)最小二乗法により、次式の正弦波回帰曲線のあてはめを行う。

$$y = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (3.11)$$

(4)模型の運動波形及び模型に加わる磁気力の波形より、3.2章の手法でダンピング空気力を求める。

(5)静止大気中及び気流中におけるダンピング空気力から動安定微係数を評価する。

4. 動的風洞試験に向けた性能評価

MSBSを用いた動的風洞試験の可能性を評価するためにピッチ方向における運動模擬精度、アンプ・コイル系周波数特性、空気力評価精度の評価試験を行った。それぞれの試験条件、手法、結果及び考察を4.1~4.3章に示す。

4.1. 運動模擬精度

動的風洞試験では、3.2章で述べたように静止大気中及び気流中において全く同じ運動を模型にさせる必要がある[13]。本試験では軸対称模型を静止大気中及び気流中(11 m/s)においてピッチ運動させ、その時の運動精度を評価した。

本試験で用いた軸対称模型を図3に示す。模型内部には直径8 mm、長さ60 mmの円柱ネオジム磁石を模型中心軸に合わせて挿入してある。動的試験に

MSBSを適用する場合、非定常な磁場変化により渦電流[14]が生じ、空気力評価に悪影響を及ぼす可能性があるため、磁石以外の部分は全て導電性の低い樹脂で模型を作製した。模型の全質量は 3.05×10^{-2} kg、慣性モーメントは 1.51×10^{-5} kgm²である。目標値に用いる入力波形の加振周波数は0.5, 1, 3, 7, 10, 15, 20, 25 Hzであり、振幅は2 degreeとした。計測点数は5500点とし、約4.5秒間の計測を行った。試験を行った結果、入力波形と模型の運動波形の周波数は全ての運動において一致したが、振幅特性は異なる結果が得られた。得られた振幅特性を図4に示す。ここで、振幅の評価には3.3章に示す最小二乗法による正弦波回帰曲線のあてはめを用いた。図4の結果から得られた各周波数における振幅比を用いて模型の運動波形振幅が2 degreeになるように入力波形振幅を調整した。その結果、運動波形振幅は図5に示すように振幅2 degreeに対して0.2 %以内の誤差に抑えることができた。また、静止大気中と気流中の運動における振幅誤差及びRMSE(Root Mean Squared Error)を図6に示す。振幅誤差は0.003 degree以下の誤差に抑えることができ、RMSEは0.015 degree以内に抑えることができた。この結果より、本装置のセンサーカメラの精度が約0.003 degreeであることを踏まえると、精度良く模型の運動を模擬することができていると言える。

しかし、模型に加わる空気力の非定常性が強くなると、位相差等が発生し、振幅の調整だけでは運動の誤差が大きくなってしまふことが予想される。静止大気中と気流中における運動の誤差は、制御系の外乱抑制性能に依存すると考えられるため、その性能について考察する。図2より、制御系の剛性は外乱入力 $D(s)$ から模型の変位・姿勢角出力 $Y(s)$ までの伝達関数で表され、次式で表される。

$$S(s) = \frac{D(s)}{Y(s)} = M_x h_{i,x} \times \frac{1 + G_m G_c K H_p H_n H_s}{G_m} \quad (4.3)$$

この式で表される剛性の大きさ $|S(s)|$ は周波数によって異なり、これが小さいほど外乱に対して模型は大きく揺れる事を意味する。式(1.19)で表される閉ループ系において、ゲイン余裕4 dB、位相余裕35 degreeとした場合の $|S(s)|$ を図7に示す。図7には、模型の質量と制御周波数がそれぞれ2倍の場合を合わせて示してある。図7より、本試験条件における模型の剛性は周波数が約10 Hz程度で最も小さい値を示したため、静止大気中と気流中における運動誤差は、どの周波数領域でも今回計測した誤差範囲内に収まることが期待できる。また、模型の質量が2倍の場合、剛性も2倍になることがわかったが、模型の質量が2倍になれば、式(3.12)や式(3.15)の慣性力項も2倍になるため、誤差量は同程度になると考えられる。加えて、模型の質量が大きくなると、模型に加わる磁気力は

大きくなるため、相対的に空気力評価精度が劣化することや高い加振周波数の試験が電力的に困難になることが予想される。よって、模型に加わる空気力の大きさを考慮し、できるだけ質量の小さい模型を製作するべきである。さらに、制御周波数が2倍の場合、20 Hz以下の領域では剛性が約1.7倍向上することがわかった。この結果より、模型に加わる空気力の非定常性が強い場合に、精度の高い運動模擬を行うためには、MSBSの制御周波数をできるだけ高くする必要があると言える。その点では、JAXAの60cm-MSBSの制御周波数が約250 Hz[15]であることを踏まえると、本装置の制御周波数は1240 Hzであるため、非定常空気力計測を考慮した動的風洞試験に適していると言える。

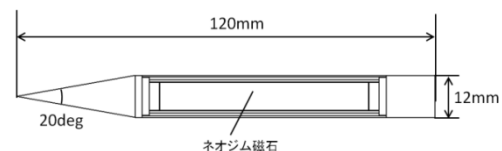


図3：軸対称模型

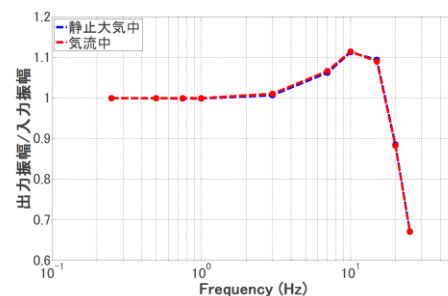


図4：振幅特性

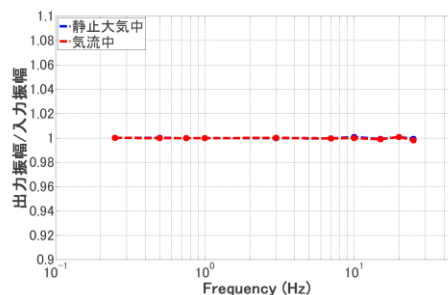


図5：入力波形調整後振幅特性

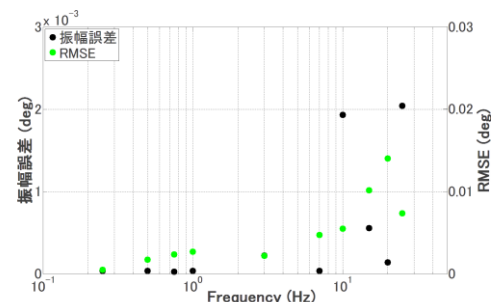


図6：静止大気中と気流中間の振幅誤差及びRMSE

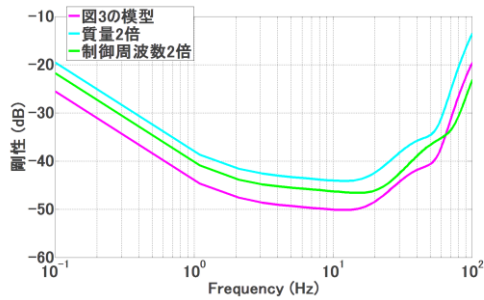


図7：制御系剛性比較

4.2. アンプ・コイル系周波数特性

コイルに流れる電流値は図2に示すように制御器によって計算されて決定する．そのため，模型に加わる磁気力は，その値を用いて評価することが可能である．しかし，実際に模型に加わる磁気力はアンプ・コイル系の特性によって変化してしまうため，模型に加わる磁気力を正確に評価するためには，これらの特性を予め知っておく必要がある．本試験では，制御器から出力される命令電流値を変化させ，その時アンプに入力される電流値，アンプから出力される電流値及び測定部中心に形成される磁場を計測することで，アンプ・コイル系の周波数特性を評価した．

本試験における入力波形の周波数は0.05, 1, 3, 7, 10, 15, 20, 30 Hzであり，振幅は3 Aとした．ピッチ方向のアンプ・コイル系に関する周波数特性の結果を図8, 9に示す．ここで，振幅特性については0.05 Hzの時に振幅比が1になるように補正を施している．図9, 10より，30 Hz以下の加振の場合，振幅特性は最大3 %，位相特性は最大21 degreeの差があることがわかった．ここで，アンプ入力，アンプ出力，磁場のそれぞれの特性について考察する．まず，アンプ入力までの特性は図9に示すように約0.0015 secのむだ時間要素に近似できるため，むだ時間が生じていると考えられる．次に，アンプ入力から出力までの特性は周波数が高くなるにつれ，振幅特性が高くなるが，位相特性には大きな変化はない．最後に，アンプ出力から磁場までの特性は振幅，位相共に大きな変化が見られないため，30 Hz以下であればコイル電流値から測定部に形成される磁場を評価できることがわかった．しかし，制御器から出力される電流値を用いて磁場を評価する場合，周波数毎に振幅及び位相特性が変化することから，電流値に補正を施す必要がある．図8, 9の磁場特性結果より得られる近似曲線を次式に示す．

$$A(f) = -6 \times 10^{-7} f^3 + 6 \times 10^{-5} f^2 - 0.0002 f + 1 \quad (4.1)$$

$$\varphi(f) = 0.0006 f^3 - 0.0209 f^2 - 0.5757 f - 0.7171 \quad (4.2)$$

模型に加わる磁気力を命令電流値から評価する際には，式(4.1), (4.2)を用いて値を補正する必要がある．

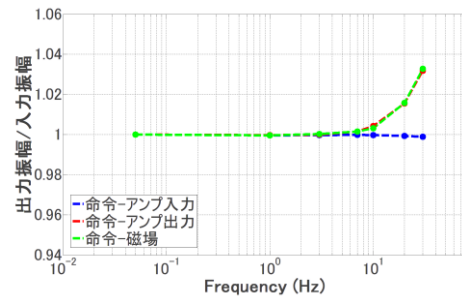


図8：アンプ・コイル系振幅特性

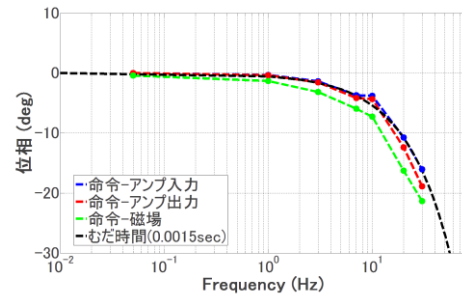


図9：アンプ・コイル系位相特性

4.3. 空気力計測精度

コイルに流れる電流値から空気力を正確に評価するため，コイルに流れる電流値と模型に加わる磁気力との関係性を評価する力較正試験を行った．さらに，その較正結果から動的空気力計測精度を評価した．試験には4.1章で使用した模型と同じものを用いた．

4.3.1. 力較正

ここでは，空気力によって模型に加わる空気力の代わりに既知の重りを用いて模型にトルクを生じさせることで，コイルに流れる電流値と模型に加わる磁気力の関係性を評価した．トルクが生じている状態で，模型が定常状態になったときの運動方程式は次式のようになる．

$$P = -M_x h_z (I_{pitch} - I_{pitch}^0) \quad (4.3)$$

ここで P は既知の重りによって生じるトルク[Nm]， I_{pitch} を示す． P を変化させた時の I_{pitch} の変化を図10に示す．式(4.4)で期待されるように P と I_{pitch} の関係は線形な関係が得られた．較正值は0.00545 Nm/Aとなった．

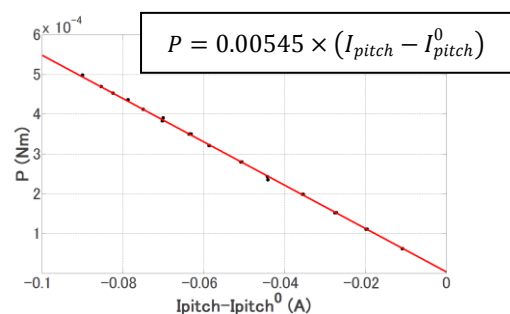


図10：アンプ・コイル系周波数特性

4.3.2. 動的空気力計測精度評価

静止大気中で模型を強制加振させることで、本装置の動的空気力計測精度を評価した。この時、模型の運動方程式より以下の式が得られる。

$$(2\pi f)^2 \Delta \theta J_Y = -M_x h_z |I_{pitch} - I_{pitch}^0| \quad (4.4)$$

ここで、模型に加わる空気力は微小であると仮定した。振幅は2 degree、周波数は3, 7, 10, 15, 20, 25 Hzとして模型を強制加振させ、模型のピッチ角変位と模型に加わるピッチングモーメント $M_{y,mag}$ を4096点計測した。得られたピッチ角変位と $M_{y,mag}$ は3.3章に示すようにフィルタ処理後、最小二乗法による正弦波回帰曲線のあてはめを行った。フィルタ処理は、通過帯域のリップル0.01%以内、遮断帯域の減衰量が-80 dB以上、遮断周波数が30 Hzの直線位相をもつFIRフィルタを用いた。 $M_x h_z$ の値には4.3.1章で得られた較正結果を用いた。模型に加わる磁気力と $(2\pi f)^2 \Delta \theta$ の関係を図11に示す。図11には式(4.1)で得られた補正値を用いて磁気力を補正した値を示している。この図の直線は回帰直線を示しており、その傾きが模型の慣性モーメントを表し、その値は $1.45 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$ になる。この値は計算値 $1.51 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$ と異なるが、この差は模型の寸法誤差、取り付け誤差、材料の比重誤差等によるものであると考えられる。計測された $M_{y,mag}$ は回帰直線にほぼ一致することがわかる。測定値の95%信頼区間は $1.55 \times 10^{-5} \text{ Nm}$ であった。この値は加振装置と天秤測定精度とパラメータ同定法を含めた総合的な精度を示している。本試験結果より、本装置では25 Hz以下であれば式(4.1)に示す電流値の補正と4.3.1章に示す力較正試験結果を用いることで、高い精度の加振及び空気力の評価が期待できる。JAXA遷音速動安定試験で用いられた加振装置及び天秤において同様の評価を行った場合、測定値の95%信頼区間は約0.5 Nmであった[16]。測定部や模型の大きさが異なるため、本装置の測定部の大きさがブロック比が一定になるように模型の寸法が小さいと仮定すれば、JAXA遷音速動安定試験における精度は約 $6.25 \times 10^{-5} \text{ Nm}$ になる。よって、本装置及び計測手法による動的力計測精度はJAXAで行われた動安定試験より高いと考えられる。しかし、本装置を低速風洞に適用した場合、模型に加わる空気力は小さくなり、空気力計測精度が悪化してしまうため、計測手法やパラメータ同定法を改善し、精度をさらに高める必要があると考えられる。

次に、模型の運動と磁気力の位相差を図12に示す。図12より、これらの間に大きな位相差が生じていることがわかる。この差は、4.2章で判明したむだ時間が主に影響していると考えられるため、式(4.2)で得られた補正値を用いて位相の補正を行った。その結果を図12に合わせて示す。位相に補正を施すことで、

位相差を約1 degree以内に抑えることができた。これらの角度のsin成分がダンピング空気力の誤差になるが、1 degree以内であればその誤差は0.015%以内に抑えられるため、位相に関しては補正を施すことで、高い精度で計測が可能であることがわかった。以上より、高精度な動安定微係数評価が可能である。

5. まとめ

本稿では、MSBSを用いた動安定微係数の評価方法について述べるとともに、東北大学流体科学研究所が所有するMSBSの上記の性能について実験的に評価した結果を報告し、MSBSを用いた支持干渉のない動的風洞試験の可能性を示した。実験的評価では軸対称模型を用いてピッチ方向の運動模擬精度、模型に加わる磁気力を正確に評価するためのアンプ・コイル系周波数特性、空気力計測精度の評価を行った。結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 運動模擬精度の評価では、入力波形を調整することで振幅誤差を0.2%以内に抑えることができた。模型に加わる空気力が変化しても、入力波形を調整することで、運動の誤差を抑えることが期待できる。
- (2) アンプ・コイル系周波数特性の評価結果を用いることで、コイルに流れる電流値から模型に加わる磁気力をより正確に評価できる。
- (3) 空気力計測精度の評価では、25 Hz以下の運動であれば、JAXA遷音速動安定試験で用いられた加振装置及び天秤よりも高い精度の空気力計測が期待できる。位相遅れについても、1 degree以内の誤差に抑えることができた。

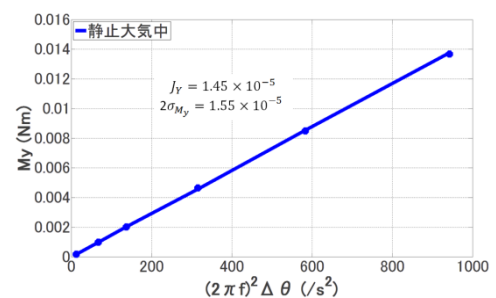


図11：空気力計測精度

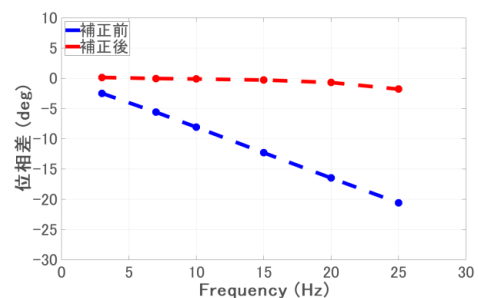


図12：位相差評価精度

以上より、MSBSを用いた支持干渉のない動的風洞試験の可能性が示唆された。本研究における今後の課題を以下に示す。

- (ア) 本装置を低速風洞に適用した場合、さらに高い精度で空気力を評価する必要があるため、計測手法やパラメータ同定法の改善が求められる。
- (イ) 6軸全てを制御した場合の動的風洞試験精度についても評価する必要がある。

参考文献

- [1] Greenwell, D. I., "A review of unsteady aerodynamic modelling for flight dynamics of manoeuvrable aircraft," AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Rhode Island, USA, AIAA-2004-5276 (2004)
- [2] Kawazoe, H., et al., "Ground Effect on the Dynamic Characteristics of a Wing-rock Delta Wing," the 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Portland, Oregon, USA, AIAA-2004-2352 (2004)
- [3] Beyers, M. E., "A New Concept for Dynamic Stability Testing," NRC,NAE LTR-UA-53, Ottawa, Sept.1980 (1980)
- [4] Beyers, M. E., Kilgore, R. A., "Rotary-Balance Testing for Aircraft Dynamics," AGARD, Report of WG11, No.265, pp. 98-115 (1990)
- [5] Dong-Kyu Lee, Jun-Seong Lee, Yoshiyuki Kawamura, "Dynamic calibration of magnetic suspension and balance system for sting-free measurement in wind tunnel tests," Vol.27, No.7, pp.1963-1970 (2013)
- [6] Bharathan, D.,Fisher, S. S., "Stability derivative measurements with magnetically suspended cone-cylinder models," 15th AIAA Aerospace Sciences meeting, December 1997(1977)
- [7] 澤田秀夫, 須田信一, 国益徹也, "AGARD-B模型の6自由度制御による磁力支持," 日本航空宇宙学会論文集, 第 54 卷, 第629号, pp.276-278 (2006)
- [8] Bergmann, A., Hübner, A. R., Löser, T., "Experimental and numerical research on the aerodynamics of unsteady moving aircraft," Elsevier Journal, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 44, pp.121-137 (2008)
- [9] 大嶋龍, 澤田秀夫, 大林茂, "磁力支持天秤装置による多自由度非定常運動の検証実験," 日本航空宇宙学会北部支部2014年講演会/第15回再使用型宇宙推進系シンポジウム講演論文集(CD-ROM), 2014.
- [10] Takagi, Y., Sawada, H., Obayashi, S., "Development of a Magnetic Suspension and Balance System for Supersonic Wind Tunnels," AIAA Paper 2014-1312, 2014.
- [11] 須田信一,澤田秀夫,国益徹也, "比例-積分制御と

二重位相進みによる磁力支持天秤装置制御系の制御定数決定法,"日本航空宇宙学会論集, Vol.53, No.614, pp.97-107 (2005)

- [12] 三輪等,上野真, "遷音速動安定試験装置の開発," 宇宙航空研究開発機構研究開発報告3,pp.1-49 (2004).
- [13] 谷一郎,小橋安次郎,佐藤浩, "流体力学実験法," 岩波出版,東京,1977,pp234-245.
- [14] ランダウ リフシツ, "電磁気学1", 東京図書, 東京, 1962, pp.231-242.
- [15] 澤田秀夫,国益徹也, "低速風洞用60cm磁力支持天秤装置の開発," 日本航空宇宙学会論文集,第50巻,第580号,2002.
- [16] 三輪等,上野真,米本浩一,志子田繁一, "遷音速動安定試験—その1試験装置と動的天秤の開発—", 第31回流体力学講演会,1999.11.