

# JAXA 60cm磁力支持天秤装置における有翼模型の空気力評価法

## An Aerodynamic Force Estimation Method for Winged Models at the JAXA 60cm Magnetic Suspension and Balance System

澤田 秀夫\*2  
Hideo SAWADA

**Key Words :** wind tunnel test, magnetic suspension and balance system, aerodynamic force

**Abstract:** The aerodynamic performance of an AGARD-B model, as an example of a winged model, was measured in a low-speed wind tunnel equipped with the JAXA 60cm Magnetic Suspension and Balance System (MSBS). The flow speed was in the range between 25m/s and 35m/s, and the angle of attack and the yaw angle were in the range of [-8,4] and [-3, 3] degrees, respectively. Six components of the aerodynamic force were evaluated by using the control coil currents of the MSBS. In evaluating the drag, the effect of the lift on the drag must be evaluated at MSBS when the lift is much larger than drag. A new evaluation method for drag and lift was proposed and was examined successfully by subjecting the model to the same loads as in the wind tunnel test. The drag coefficient at zero lift and the derivatives of the lift and pitching moment coefficient with respect to the angle of attack were evaluated and compared with other source data sets. The obtained data agreed well with the corresponding values of the other sources. The side force, yawing moment and rolling moment coefficients were also evaluated on the basis of corresponding calibration test results, and reasonable results were obtained, although they could not be compared due to the lack of reliable data sets.

### 1. はじめに

6自由度制御が出来る磁力支持天秤装置（以降、MSBSと記す。）は世界でも数少なく、空気力測定の詳細についての報告も少ない<sup>1),2)</sup>。また、1980年代までのMSBSでは天秤機能の研究は少なく、十分に解明されているとは言いがたい<sup>3)</sup>。多くのMSBSでは詳細な天秤精度評価の報告は無く、JAXA 60cm MSBS<sup>4)</sup>の精度報告がされた程度である<sup>5),6),7)</sup>。また、それらの報告では姿勢角が一定で、荷重変化が一成分のみの場合が殆どであり、航空機模型の風洞試験で生じる姿勢変化を伴う複合荷重の評価が待たれる。

姿勢角変化と荷重変化毎の較正試験を広い範囲に亘り実施するのは非効率であり、MSBSを用いた風洞試験でどのような空気力評価法が適当か、実際の試験を通して課題抽出をする必要がある。JAXAでは、既に有翼模型としてAGARD-B標準模型を用いた6自由度制御による風洞試験<sup>8)</sup>を実施しているが、その試験では測定部周りの8箇所 で磁場を計測して空気力評価を試みている。その結果、無揚力時の抗力は他の文献と比較的良好一致を観たが、抗力の迎角に関する対称性が観られない等の課題が見出された。本試験では、磁力支持で直接制御するコイル電流値から空気力評価を試みたので報告する。

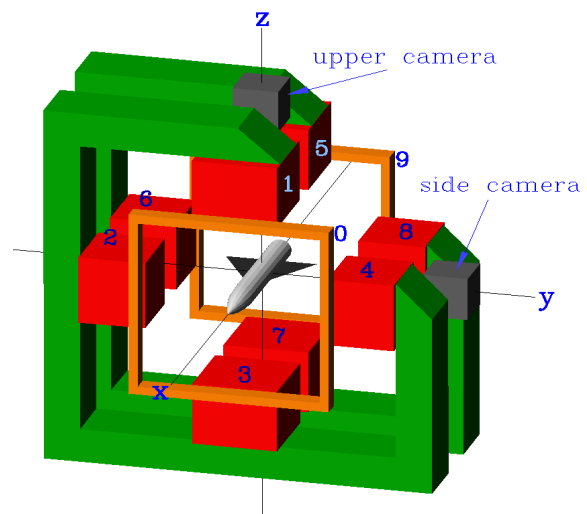


図1 JAXA60cm MSBSのコイル配置と座標系

### 2. 模型及びJAXA 60cm MSBS

JAXA60cm MSBSでは6自由度制御の場合、図1に示す座標系の各軸に平行な並進力と軸周りの回転トルクの合計6個の磁気力成分を制御する。本座標系は測定部中心に原点を取り、x軸は水平面内の風上方向とし、鉛直上方をz軸として、右手系を成すようにy軸を定めている。

有翼模型としては形状が公開されていて、信頼できる風洞試験データが多いAGARD-B標準模型を採用した。模型の寸法、及び内部構造の詳細は図2に示す。模型に

\*1©2009 日本航空宇宙学会  
平成18年4月5日、第38回日本航空宇宙学会年会講演会にて講演  
平成 年 月 日原稿受理

\*2宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

内装しているペア磁石は磁極の向きを含めて、模型中心に関して点対称に配置している。このため、磁石に作用する磁気力に関しては、ペア磁石の位置で $y$ 及び $z$ 方向に変化しない磁場に対して、ペア磁石の磁気モーメントは実効上零となる。また、主磁石は直径64mm、長さ260mmの円柱形で、その体積中心位置を模型中心とし、円柱中心軸を模型中心軸に一致するように設計した。更に、デルタ翼平面が水平面と一致する時を横揺れ角( $\phi$ )が零の時とした。座標原点に模型中心を設置し、風洞試験で測定する空気力はこの点に作用する力及びここで定義した座標軸周りのトルクとして評価した。

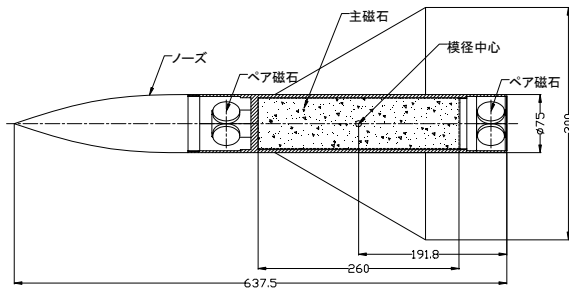


図2 スパン300mm、AGARD-B標準模型内磁石配置

JAXA 60cm MSBSでは横揺れ制御以外は模型内の主磁石とMSBSのコイルにより測定部内に形成された磁場との干渉により生ずる磁気力を利用している。一方、横揺れ制御では模型前後のペア磁石に磁場を作用させて模型中心軸周りのトルクを得ている。また、磁気力の座標軸方向成分を制御するコイルの組合せが決まっている。例えば、 $z$ 軸方向の磁気力成分は図1のコイル1、3、5、7に同じ大きさと向きの電流を流すことにより制御できる。また、 $y$ 軸周りのトルク成分は図1のコイル1、3と5、7に同じ大きさで反対向きの電流を流すことにより制御できる。

このような制御電流を纏めると、

$$\begin{aligned} I_{drag} &= (I_0 + I_9)/2, \\ I_{side} &= (I_2 + I_4 + I_6 + I_8)/4, \quad I_{lift} = (I_1 + I_3 + I_5 + I_7)/4, \quad \dots(1) \\ I_{roll} &= (I_2 - I_4 - I_6 + I_8)/4, \\ I_{yaw} &= (I_2 + I_4 - I_6 - I_8)/4, \quad I_{pitch} = (I_1 + I_3 - I_5 - I_7)/4. \end{aligned}$$

となる。ここで、電流 $I_i$ はコイル番号 $i$ に流す電流を示す。更に、電流 $I$ の下付け添え字 $drag$ 、 $side$ 、 $lift$ 、 $roll$ 、 $yaw$ 、 $pitch$ はそれぞれ模型に作用する抗力、横力、揚力、横揺れモーメント、偏揺れモーメント、縦揺れモーメントを制御するコイル制御電流を示す。また、コイル0と9、1と3、5と7の組合せでコイルを直接つなぎ、電流を同じにしている。更に、横揺れモーメント制御では模型前後のペア磁石に文献9)で示すような磁場を作用させるので、磁場は原点に関して点対称になる。このため、コイル2、4、6、8に流す電流は以下の条件を満たす。

$$(I_2 - I_4) = -(I_6 - I_8) \quad \dots(2)$$

この結果、

$$\begin{aligned} I_0 &= I_9 = I_{drag}, \\ I_1 &= I_3 = (I_{lift} + I_{pitch})/4, \quad I_5 = I_7 = (I_{lift} - I_{pitch})/4, \quad \dots(3) \\ I_2 &= (I_{side} + I_{yaw})/4 + I_{roll}, \quad I_4 = (I_{side} + I_{yaw})/4 - I_{roll}, \\ I_6 &= (I_{side} - I_{yaw})/4 + I_{roll}, \quad I_8 = (I_{side} - I_{yaw})/4 - I_{roll} \end{aligned}$$

となり、制御電流から各コイル電流は決まる。

実際に、各制御電流をコイルに流して測定部内部にできる磁場を測定した結果、期待した磁場が確かに形成されていて、以下の式が成立することを確認している<sup>4)9)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial x} &= h_{xx} \cdot I_{drag}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = h_{yx} \cdot I_{side}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = h_{zx} \cdot I_{lift}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial y} &= h_{yy} \cdot I_{roll}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial z} = h_{zz} \cdot I_{roll}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial y} \equiv 0. \quad \dots(4) \\ H_y &= h_y \cdot I_{yaw}, \quad H_z = h_z \cdot I_{pitch}. \end{aligned}$$

ここで、 $H$ は磁場強さを、下付け添え字 $x$ 、 $y$ 、 $z$ は図1に示す座標系の各軸成分であることを表す。また、 $h_{xx}$ 、 $h_{yx}$ 、 $h_{zx}$ 、 $h_{yy}$ 、 $h_{zz}$ 、 $h_y$ 、 $h_z$ は制御電流には依存せず、ほぼ位置のみの関数である。更に、 $h_{xx}$ 、 $h_{yx}$ 、 $h_{zx}$ 、 $h_y$ 、 $h_z$ は $x$ に関して対称となっている。一方、 $h_{yy}$ 、 $h_{zz}$ は横揺れ制御により $x$ に関して反対称となっている<sup>9)</sup>。

### 3. 空気力評価方法

図2に示す模型前後のペア磁石は座標原点に関して点対称に配置されているので、横揺れ制御電流が流れている時にのみ模型中心軸周りのトルクを発生させ、それ以外の制御電流に対して、全体としては磁気力を発生させない。更に、ペア磁石を構成する8個の小型磁石の合計体積と主磁石の体積の比が1/10程度であることを考慮すると、模型全体に作用する磁気力評価では横揺れトルク以外はペア磁石の存在を無視できると考える。このため、模型に作用する力を評価する場合、横揺れモーメント測定時以外はペア磁石の効果は無視する。

$x$ 軸に沿って磁気モーメント $m_0$ の微小磁石が $y$ 軸周りの回転 $\theta$ を取ると、磁気並進力 $F$ と磁気トルク $N$ は式(5)のように評価される。ここで、空間電流が存在しないことから、 $H$ は非回転的なので $h_{zx} = h_{xz}$ の関係を利用している。

$$\begin{aligned} f_x &= m_0 \cdot \cos \theta \cdot h_{xx} \cdot I_{drag} - m_0 \cdot \sin \theta \cdot h_{zx} \cdot I_{lift} \\ f_y &= m_0 \cdot \cos \theta \cdot h_{yx} \cdot I_{side} - m_0 \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad \dots(5) \\ f_z &= m_0 \cdot \cos \theta \cdot h_{zx} \cdot I_{lift} - m_0 \cdot \sin \theta \cdot h_{zz} \cdot I_{roll} \\ n_x &= m_0 \sin \theta \cdot h_y \cdot I_{yaw} \\ n_y &= -m_0 \sin \theta \cdot H_x - m_0 \cos \theta \cdot h_z \cdot I_{pitch} \\ n_z &= m_0 \cos \theta \cdot h_y \cdot I_{yaw} \end{aligned}$$

また、JAXA 60cm MSBSでは横揺れ制御が大きくない限り、 $H_x$ と $h_{zz}$ が $x$ に関して反対称性を維持するようにコイル電流を制御しているため、 $m_0$ が一定とみなせる場合、主磁石が占める領域(V)での積分は零となる。結局、主磁石全体に作用する $F$ と $N$ を求めると式(6)のように近似できる。

$$\begin{aligned}
F_x &= M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} \cdot I_{drag} - M_0 \cdot \sin \theta \cdot \bar{h}_{zx} \cdot I_{lift} \\
F_y &= M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{yx} \cdot I_{side} \\
F_z &= M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{zx} \cdot I_{lift} \\
N_x &= M_0 \sin \theta \cdot \bar{h}_y \cdot I_{yaw} \\
N_y &= -M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_z \cdot I_{pitch} \\
N_z &= M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_y \cdot I_{yaw}
\end{aligned} \quad \dots(6)$$

なお、平均記号付で示す量を以下に定義する。

$$\bar{h}_{xx} = \frac{1}{V} \int_V h_{xx} dV, \quad \dots(7)$$

$$M_0 = m_0 \cdot V$$

$F_x$ と $F_z$ の式から $\bar{h}_{zx}$ を消去すると、

$$F_x = M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} I_{drag} - F_z \tan \theta \quad \dots(8)$$

となり、 $F_x$ は $F_z$ の影響を受ける。模型の静止状態では抗力 $D$ （下流方向を正とする。）が $F_x$ と釣り合い、揚力 $L$ （鉛直上向きを正とする。）と模型重力 $W_0$ （鉛直下向きを正とする。）の和 $(W_0 - L)$ が $F_z$ と釣り合う。よって、

$$D = M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} \cdot I_{drag} - (W_0 - L) \tan \theta \quad \dots(9)$$

$$W_0 - L = M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_{zx} \cdot I_{lift}$$

と表せる。静止気体中では空気力が働かないので、

$$0 = M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} \cdot I_{drag} - W_0 \tan \theta \quad \dots(10)$$

$$W_0 = M_0 \cos \theta \cdot \bar{h}_{zx} \cdot I_{lift}$$

となる。ここで、制御電流の上付き添え字 $\theta$ は静止気体中で模型を支持する時の電流値を表す。

図2で示しているように、主磁石と模型の中心軸は一致させるように設計しているが、厳密には若干の差が残る。この差量を $\varepsilon$ 、模型の迎角を $\alpha$ とすると、 $\alpha$ は模型の頭上げ方向の回転が一般に正なので、

$$\theta = -\alpha + \varepsilon, \quad |\varepsilon| \ll 1 \quad \dots(11)$$

と表される。

$\alpha = 0$ の時の抗力較正試験では抗力の代わりに既知の荷重 $P$ を掛けるので、式(9)から

$$P = M_0 \cdot \cos \varepsilon \cdot \bar{h}_{xx} \cdot (J_{drag} - J_{drag}^0) \quad \dots(12)$$

と表せる。ここで、静止気体中で $\alpha = 0$ の時の制御電流を特に $J$ で表し、この時の $I_{drag}^0$ を $J_{drag}^0$ と表す。また、 $J_{drag}^0$ は $P=0$ の時の $J_{drag}$ を表す。 $P$ を変化させた時の $J_{drag}$ の変化を図3に示す。式(12)から期待されるように $P$ と $J_{drag}$ の関係は線形である。

一方、式(7)で $\alpha$ を変えたと、

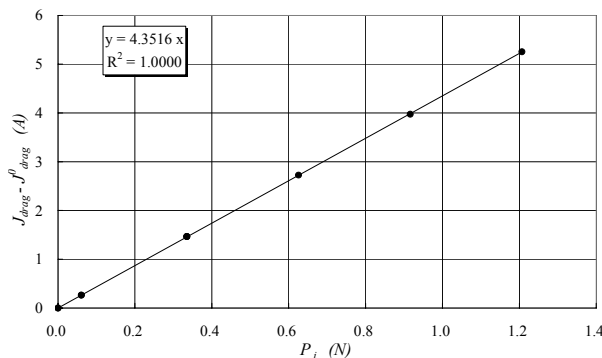


図3 抗力較正試験

$$W_0 \frac{\tan(\alpha - \varepsilon)}{\cos(\alpha - \varepsilon)} = -M_0 \bar{h}_{xx} I_{drag}^0 \quad \dots(13)$$

と表せ、 $\alpha = \varepsilon$ の時に $I_{drag}^0 = 0$ となる。本試験では $I_{drag}^0 = 0$ となる $\alpha$ から、 $\varepsilon$ は $-0.164$ 程度と分かる。 $J_{drag}^0$ を基準にすると式(13)から

$$-W_0 \cdot \left( \frac{\tan(\alpha - \varepsilon)}{\cos(\alpha - \varepsilon)} + \frac{\tan \varepsilon}{\cos \varepsilon} \right) = M_0 \bar{h}_{xx} (I_{drag}^0 - J_{drag}^0) \quad \dots(14)$$

を得る。左辺は式(12)の荷重に相当する。この相当荷重を横軸に、 $I_{drag}^0$ 変化を縦軸にとって、姿勢変化に伴う両者の関係を得ると図4のようになる。

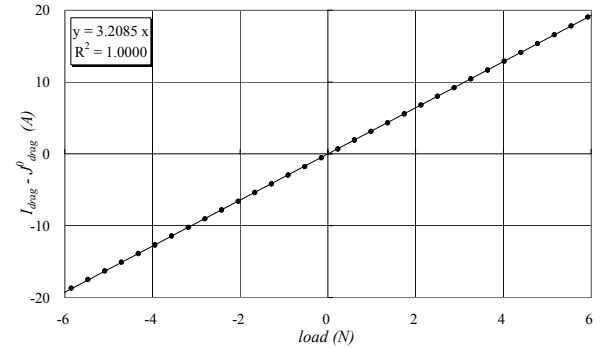


図4 姿勢変化に伴う見掛けのx軸荷重と抗力制御電流の関係

式(12)と(14)の試験結果は、それぞれの左辺を横軸に取り、縦軸に $(I_{drag}^0 - J_{drag}^0)$ を取れば、 $\varepsilon$ が十分小さいことから同じ勾配を示す筈である。実際の試験結果では、近似直線の勾配は $\alpha=0$ 時の抗力較正試験の方が、 $\alpha$ を変化させた時に比べて25%以上も大きい。この事実は式(6)が磁力支持状態の模型に作用する磁気力を完全には表していないことを示している。

磁石が大きく且つ強い場合は、周りの電磁石との相互作用を考慮しなくてはならない。例えば図1の上下の鉄心に磁石を近づければ、磁石自体が吸付く。定量的には、文献13)に鉄片上部に配置した2つの電磁石に電流を流すと、鉄片を持ち上げる力と電流が比例していることを示した図がある。(Fig.13 in Ref. 13) この現象は微小磁石と磁場の干渉ではない。そこで、式(6)の $F_z$ を修正して、以下のように表せると仮定する。

$$F_z = M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{zx} \cdot I_{lift} + \kappa(\theta) \cdot I_{lift} + F_z^0 \quad \dots(15)$$

$\kappa(\theta)$ は $\theta$ の大きさが大きくない範囲では

$$\kappa(\theta) = \kappa_0 + \kappa_c \cdot \cos \theta + \kappa_s \cdot \sin \theta \quad \dots(16)$$

と近似でき、 $F_z$ は

$$F_z = \{ \kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos \theta + \kappa_s \sin \theta \} \cdot I_{lift} + F_z^0 \quad \dots(17)$$

となる。式(15)の右辺第2、3項で付加された力はz軸方向以外にもx軸方向にも働くと考えるのが合理的であろう。ただし、コイル配置が $x=0$ のyz面に関して対称なため定数項は無視できると仮定する。また、 $\theta$ に関して基本的に反対称と考えられるので、 $F_x$ は以下のように仮定する。

$$F_x = M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} \cdot I_{drag} + (\lambda_s - M_0 \cdot \bar{h}_{zx}) \cdot \sin \theta \cdot I_{lift} \quad \dots(18)$$

静止気体中で浮揚している時の $F_z$ は模型重量 $W_0$ と下向き荷重 $W$ の合計荷重と釣り合う。 $\alpha=0$ の時に、揚力較正

試験で鉛直下向きに荷重 $W$ を課した時と荷重を掛けない時とを比較すると、

$$W = \{\kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos \varepsilon + \kappa_s \sin \varepsilon\} \cdot (J_{lift} - J_{lift}^0) \cdots (19)$$

となる。式(19)から予測されるように、図5では $W$ と $J_{lift}$ は線形な関係を示している。

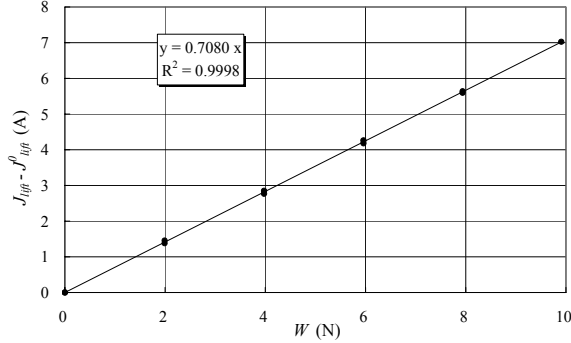


図5 揚力較正試験

$$A \equiv \frac{1}{k_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos \varepsilon + \kappa_s \sin \varepsilon} \cdots (20)$$

という定数を定義すると本試験では $A=0.708$ となる。一方、荷重を掛けず $\theta$ を変えると $I_{drag}^0$ は以下の様になる。

$$\frac{(W_0 - F_z^0) \tan \theta}{\kappa_0 + (\kappa_c + M_0 \bar{h}_{zx}) \cos \theta + \kappa_s \sin \theta} = -\frac{M_0 \bar{h}_{zx}}{\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}} I_{drag}^0 \cdots (21)$$

静止気体中で $\alpha$ を変えて $I_{drag}^0=0$ となる時は主磁石と $x$ 軸が平行な状態であるから、式(21)から求められる $\varepsilon$ は式(13)で求めた $\varepsilon$ と同じ値となる。一方、静止気体中で $\theta$ を変化させた場合の $I_{lift}^0$ は式(17)から、

$$\frac{J_{lift}^0}{A} = \{\kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos \theta + \kappa_s \sin \theta\} \cdot I_{lift}^0 \cdots (22)$$

と表せる。実際の $I_{lift}^0$ と $\theta$ の関係は図6のようになり、本試験では $\kappa_0=3.070$ ,  $M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c = -1.658$ ,  $\kappa_s = 0.0096$ と評価された。

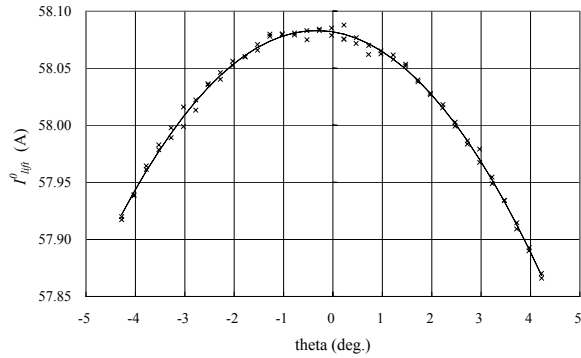


図6 姿勢変化に伴う揚力電流変化

式(18)を使い、無荷重の時を基準にして抗力較正試験に於ける力の関係を表すと、

$$P = M_0 \bar{h}_{xx} (J_{drag} - J_{drag}^0) \cos \varepsilon + (\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}) (J_{lift} - J_{lift}^0) \sin \varepsilon \cdots (23)$$

となる。実験結果からは $P$ を変化させても $J_{lift}$ は殆ど変化せず、また $\sin \varepsilon$ の大きさも小さいので、十分な精度で式(23)は式(12)と一致する。今、

$$B \equiv \frac{1}{M_0 \bar{h}_{xx} \cos \varepsilon} \cdots (24)$$

という定数を定義すると、本試験では $B=4.352$ となる。 $\varepsilon$ ,  $F_z^0$ ,  $\kappa(\theta)$ の評価結果から式(21)の左辺は任意の $I_{drag}^0$ に対して値を評価できる。左辺を縦軸に右辺の $I_{drag}^0$ を横軸にとると図7のようになる。この結果、左辺の量は $I_{drag}^0$ に比例しているため、その勾配を $C$ で表すと、

$$C = -\frac{M_0 \bar{h}_{xx}}{\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}} = 0.2080 \cdots (25)$$

なる関係を得る。

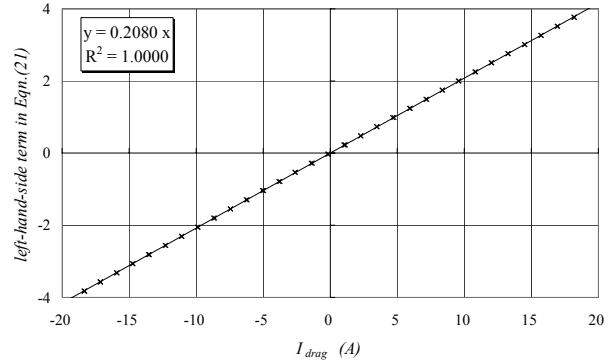


図7 式(21)左辺と抗力制御電流の関係

式(24)を使うと、

$$\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx} = \frac{-1}{B \cdot C \cdot \cos \varepsilon} = -1.105 \cdots (26)$$

となる。

磁気力に関する補正式(17)、(18)を使うと、空気力と磁気力と重力の関係は、

$$D = M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} \cdot I_{drag} + (\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}) \cdot \sin \theta \cdot I_{lift} \cdots (27)$$

$$W_0 - L = \{\kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos \theta + \kappa_s \sin \theta\} \cdot I_{lift} + F_z^0$$

となり、静止気体中では

$$0 = M_0 \cdot \cos \theta \cdot \bar{h}_{xx} \cdot I_{drag} + (\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}) \cdot \sin \theta \cdot I_{lift} \cdots (28)$$

$$W_0 = \{\kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos \theta + \kappa_s \sin \theta\} \cdot I_{lift} + F_z^0$$

となる。両者の差を取り $\alpha$ を用いて表すと、

$$D = M_0 \cdot \cos(\alpha - \varepsilon) \cdot \bar{h}_{xx} \cdot (I_{drag} - I_{drag}^0) \cdots (29)$$

$$- (\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}) \cdot \sin(\alpha - \varepsilon) \cdot (I_{lift} - I_{lift}^0)$$

$$L = -\{\kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos(\alpha - \varepsilon) - \kappa_s \sin(\alpha - \varepsilon)\} (I_{lift} - I_{lift}^0)$$

となる。上式の右辺は総て既知の量か、測定できる量であり、抗力と揚力は本式を用いて評価できる。更に、迎角が大きくなり、磁石の取付け角が小さければ、以下のように近似式が成り立つ。

$$\kappa_0 + (M_0 \bar{h}_{zx} + \kappa_c) \cos(\alpha - \varepsilon) - \kappa_s \sin(\alpha - \varepsilon) \cong \frac{\cos(\alpha - \varepsilon)}{A} \cdots (30)$$

$$M_0 \bar{h}_{xx} \cos(\alpha - \varepsilon) \cong \frac{\cos(\alpha - \varepsilon)}{B}$$

$$(\lambda_s - M_0 \bar{h}_{zx}) \sin(\alpha - \varepsilon) \cong \frac{\sin(\alpha - \varepsilon)}{BC}$$

この近似式を用いると、抗力と揚力は以下のように表すことができる。

$$L \cong -\frac{\cos(\alpha - \varepsilon)}{A} (I_{lift} - I_{lift}^0) \cdots (31)$$

$$D \cong \frac{\cos(\alpha - \varepsilon)}{B} \cdot (I_{drag} - I_{drag}^0) + \frac{\sin(\alpha - \varepsilon)}{B \cdot C} \cdot (I_{lift} - I_{lift}^0)$$

更に、抗力は揚力を使って表すと、

$$D \equiv \frac{\cos(\alpha - \varepsilon)}{B} \cdot (I_{drag} - I_{drag}^0) - \frac{A \cdot L}{B \cdot C} \cdot \tan(\alpha - \varepsilon) \quad \dots(32)$$

となる。式(31)又は(32)を用いる場合は、迎角零度での抗力較正試験と揚力較正試験の他に、静止気体中で模型迎角を変化させた時の制御電流を測ることで定数A、B、C、εを求めて揚力と抗力を評価できる。近似式(31)と元の式(29)の差を元の式を基準とした誤差として評価し、本試験におけるα変化に対する誤差変化を図8に示す。抗力では式(31)と(29)はほぼ同じであるが、揚力では迎角変化に伴い近似精度が変化する。ただ、迎角15度でも0.3%未満の誤差に止まる。

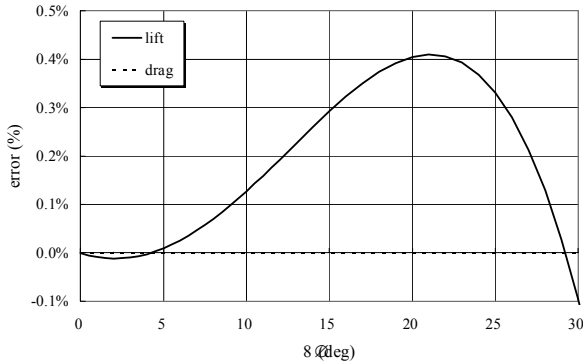


図8 姿勢変化時の近似式(31)の誤差

縦揺れモーメントの較正試験では模型後縁に錘を吊り下げるとF<sub>z</sub>が発生するので、純粋な縦揺れモーメントを模型に作用させることが困難である。また、式(6)を用いて縦揺れモーメントを評価すると、抗力評価と同様に大きな誤差を招く危険性が残る。較正試験ではI<sub>pitch</sub>に対する縦揺れモーメントの変化率は-0.335Nm/Aとなったが、式(6)を用いてh<sub>z</sub>から同じ変化率を計算すると-0.360Nm/Aとなり、8%ほど違う。

縦揺れモーメントが変化する合計4種類の力較正試験結果総てで、横軸に縦揺れモーメントを取り縦軸にI<sub>pitch</sub>を取ると図9のようになった。試験結果は総てほぼ一本の直線に載っている。この結果、本試験の多くは迎角が-4度から4度までであり、迎角零度で行った縦揺れモーメント較正試験結果の較正係数を利用してI<sub>pitch</sub>から縦揺れモーメントを評価することにした。しかし、迎角8度の較正試験結果の場合、大きさが0.15Nm以上では最大

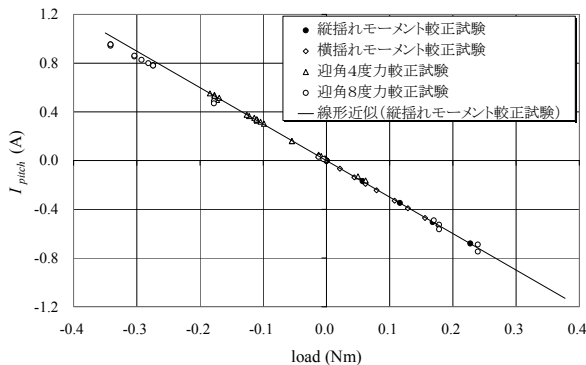


図9 縦揺れモーメント較正試験

で10%以上の誤差を示す場合があった。迎角の大きさが大きく、しかも大きな縦揺れモーメントが作用する場合の制御電流から縦揺れモーメントを高精度に評価する方法が待たれる。

#### 4. 空気力評価結果

本空気力評価方法が正しいものかどうか知るため、αが-4度と-8度で推定空気力に近い荷重を模型に掛けて風洞試験で得られた制御電流と同じ電流が得られるか調べた。揚力と縦揺れモーメントは、α=0での較正試験結果からの推定値に基づき模型前後に錘を吊るし、抗力相当荷重を変化させた。図10はその時の写真である。

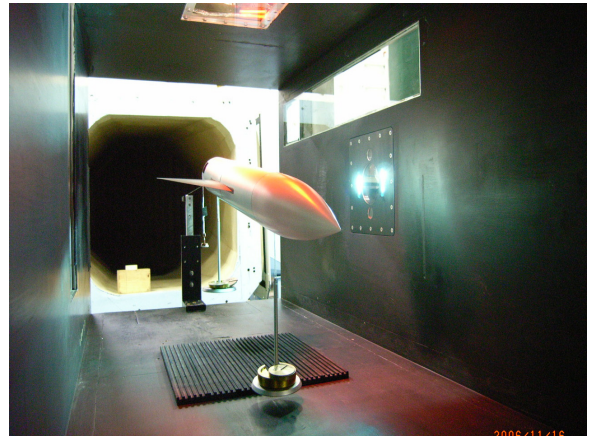


図10 荷重を掛けた状態のAGARAD-B模型 (θ=-8度)

図11は得られたI<sup>0</sup><sub>drag</sub>と抗力荷重の関係を示している。α=4度と8度の両方共に、式(29)による抗力推定結果の直線が揚力と縦揺れモーメントを受けた状態での抗力較正結果に近く、式(29)が有効であると判断した。以降の抗力、揚力評価では本推定方法を適用した結果を示す。

風速25m/sの場合にα=0で抗力、揚力、縦揺れモーメント較正試験を実施し、その時の既知の荷重と制御電流変化から、単純に空気力を推定する場合は、

$$L = -\frac{1}{A} \cdot (I_{lift} - I_{lift}^0) \quad \dots(33)$$

$$D = \frac{1}{B} \cdot (I_{drag} - I_{drag}^0) - L \cdot \tan \alpha$$

と表される。式(33)を用いてα変化に対してC<sub>D</sub>、C<sub>L</sub>を評

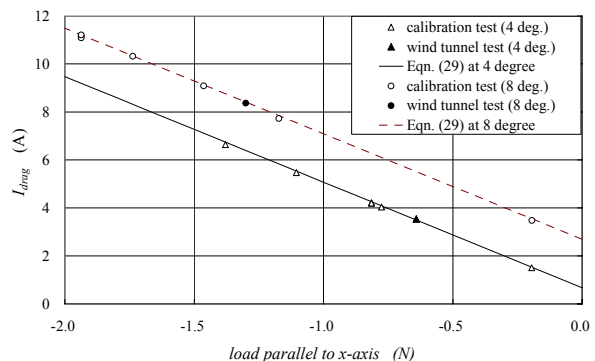


図11 抗力較正試験と風洞試験からの抗力推定値

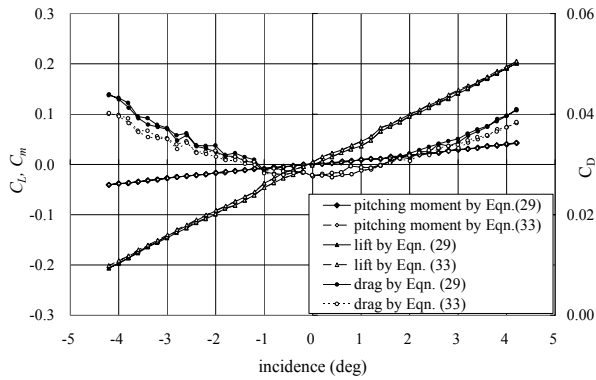


図12 迎角変化に対する縦3分力係数変化

価した場合と、式(29)を用いて評価した場合を図12に描いた。 $C_D$ では $\alpha$ の大きが大きくなるほど、両者の差が顕著になることが分かり、揚力の大きな模型で風洞試験をする場合は、式(29)の評価式を適用すべきである。

## 5. 空気力評価

**5.1 試験内容** 姿勢角は一樣流に対する角で、 $\alpha=0^\circ$ で、且つ、偏揺れ角( $\psi$ : z軸周りの回転角)が0度の時は機体軸が一樣流と平行な状態である。一樣流方向は測定部中心軸と完全に一致しているわけでないので、先ず模型を気流と平行に調整する必要がある。AGARD-B模型は上下左右で対称であるから、気流に平行な場合は気流中では主流に直角方向の流体力は作用しない。この性質を利用して、 $\alpha$ と $\psi$ を変更しても無風時と通風時で主流に直角方向の力を制御する制御電流が同じ値に維持されるように姿勢角を調整することで模型を気流に平行にできる。本試験では風速25m/sの時と無風時を比較して模型の姿勢角を調整した。

姿勢変更後4秒間待った後に約1秒間の平均電流を計測することを繰り返して姿勢角を変更していく計測(ここでは「スイープ計測」と呼ぶ。)と、約8秒間に亘り計測し平均を取る方法(「各点計測」と呼ぶ。)の2通

表1 試験内容

試験内容	変更対象	風速	$\theta$	$\psi$	$\phi$
		m/s	deg.	deg.	deg.
スイープ	$\alpha$	25	[-4,4]	0	0
スイープ	$\psi$	25	0	[-3,3]	0
スイープ	$\alpha$	25	[-4,4]	2	0
スイープ	$\alpha$	25	[-4,4]	4	0
スイープ	$\alpha$	35	[-4,4]	0	0
スイープ	$\alpha$	35	[-4,4]	0	0
各点計測	風速	[14,37]	0,-0.5,-2,-4	0	0
各点計測	風速	[14,37]	-2	2	0
各点計測	風速	25	0.0,1.0,2.0,3.0,4.0,4.5,0.5,5.5,6.0,6.5,7.0,7.5,8.0,8.5,8.85	0	0

りの方法で空気力を測定した。試験内容を表1に示す。

**5.2 風速25m/sで迎角変化させた場合** 風速25m/s、 $\psi=0^\circ$ で $\alpha$ を0.3度毎に約-4度から+4度まで一往復させた時の $C_D$ 、 $C_L$ 、及び縦揺れモーメント係数( $C_m$ 、 $C_m=T_y/qAc$ 、

$T_y$ : 模型頭上げ方向を正とするy軸周りのトルク(Nm)、 $c$ : 模型の基準翼弦長(m))の変化を図12に示す。

$I_{drag}$ を使い前節の評価法を適用しても $\alpha$ に対する $C_D$ の非対称性が若干認められた。図13には、この時の横3成分の横力係数( $C_Y$ 、 $C_Y=Y/qA$ 、 $Y$ : 横力(N))、偏揺れモーメント係数( $C_n$ 、 $C_n=T_z/qAc$ 、 $T_z$ : z軸周りのトルク(Nm))、及び横揺れモーメント係数( $C_l$ 、 $C_l=T_x/qAc$ 、 $T_x$ : x軸周りのトルク(Nm))の変化を示す。ここで、横3成分の符号はMSBS座標系に沿った方向の力成分を正として無次元化した。 $\alpha$ に依存した $C_Y$ と $C_n$ が若干ではあるが測定された。その主な原因はMSBSで模型制御に用いている模型位置姿勢測定用センサーの位置姿勢較正試験の時に、模型位置と姿勢を6自由度で変化させるステージのベースがMSBS座標系のx軸周りに約0.47度傾いた状態で実施していたことにあると考えている。この結果、横揺れ角( $\phi$ )が0.47度程取った状態で $\alpha$ を変化させたことになり、模型に作用する横方向の空気力成分が測定されたと考える。また、 $C_l$ では $\alpha$ が $-1^\circ$ から $1^\circ$ の範囲でほぼ零で、それ以外の試験範囲では約-0.0006という一定値を取っている。この原因は模型の左右のデルタ翼の取付け角に若干の差があったためと考えられる。

表2に通常の風洞試験で得られたAGARD-B模型の縦3分力と本試験結果を比較した。どれも近い値を示し、

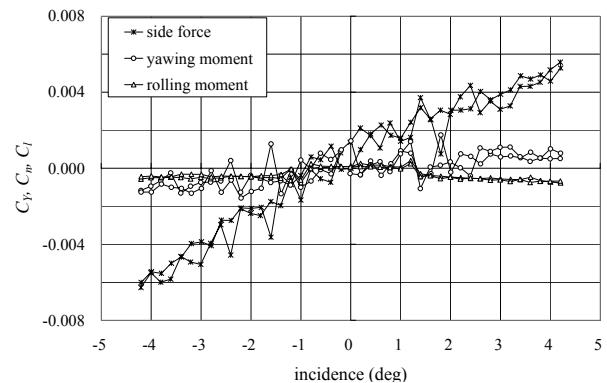


図13 迎角変化に対する横力成分係数変化

表2 AGARD-B模型の空力特性比較  
(文献[11]の値は図から外挿した推定値)

無揚力時	記号	present	Ref.[11]
抗力係数	$C_{D0}$	0.028	0.022~0.031
揚力傾斜	$C_{La}$	0.048	0.044~0.049
縦揺れモーメント傾斜	$C_{ma}$	0.009	0.009~0.011

MSBSの計測結果の妥当性が確認できた。

**5.3 偏揺れ角を取った場合の空気力評価** 風速25m/s、 $\alpha=0^\circ$ で $\psi$ 変化に対する本試験で得られた各空力係数の変化を図14に描いた。 $C_m$ 、 $C_l$ は $\psi$ 変化に対してほぼ零の状態を維持している。 $C_l$ は $\psi$ の正負で符号が逆転しているが、この原因は先に言及した $\psi=0.47^\circ$ の状態での $\psi$ を変化させたため、 $\psi$ が負の時に翼の有効迎角が正となり、正の時に翼の有効迎角が負となる為と考えられる。 $C_D$ は $\psi$ 変化に対してほぼ対称な変化を示している。 $C_Y$ と

本試験では、迎角と偏揺れ角を変えることで、縦方向変化だけでなく、横方向変化を含め縦横合計6軸の力成分をMSBSにより計測し、得られた姿勢変化に伴う空気力係数の変化を調べた。その結果、縦3分力に関しては、通常の機械式天秤で得られたものに近い結果を得ることができた。また、横3分力に関しては、得られた結果は模型周りに発生する流れを考慮すると、定性的には合理的なものであった。

**5.4 風速35m/sでの空気力評価** 本試験で実施した速度域ではAGARD-B標準模型の空力性能にはマッハ数効果は小さく無視でき、レイノルズ数効果も強く現れず、縦3分力の空気係数は風速の変化に対して殆ど変わらない<sup>10)</sup>。一方、風速が異なれば動圧が異なり、MSBSを用いた力測定値も変わる。このため、風速を変えても空気係数が変化しないか調べることで、力評価法の不適切な部分についての知見を得ることができる。

$C_n$ は $\phi$ の変化にほぼ比例して変化しており、合理的結果と考える。

図15には $\phi$ を0、2、4度の3通り取った時の $\alpha$ の変化に対する $C_D$ 変化と、 $\phi=0$ 度で迎角9度までの $C_D$ 変化を示した。大きな $\alpha$ に対しても、 $C_D$ は合理的な挙動を示し、 $\phi=0$ 度では迎角9度までの計測結果には合理性が認められる。また、 $\phi$ を3通り変えた場合の $C_D$ 変化は $\phi$ が大きくなるにつれて $C_D$ が全体的に大きくなり、これも合理的な挙動である。なお、 $\phi=4$ 度で $\alpha=4$ 度以上の $\alpha$ 増加に対して $C_D$ が急激に増加する挙動は、模型周りの流れがどのように変化するかを含め更に調べる必要がある。

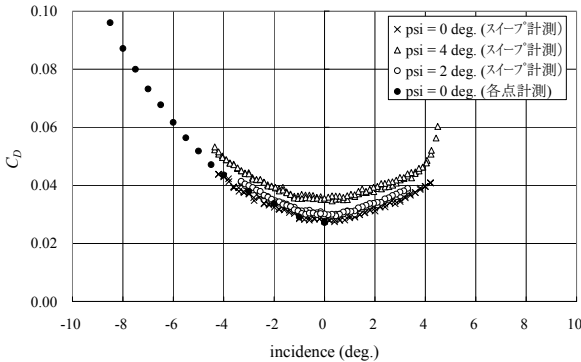


図15 迎角変化に対する $C_D$ 変化への偏揺れ角の影響

図16には $\phi=0, 2, 4$ 度の3通りの $\alpha$ の変化に対する $C_l$ 変化を示した。 $C_l$ 自体は小さいが、 $\alpha$ に対して規則的な変化を示している。この原因は $\phi$ を取ることで主翼の一方の前縁後退角が小さくなり、 $\alpha$ の増加に伴い片方の翼部分の揚力が他方の翼の揚力よりも増加して $C_l$ が大きくなるためである。

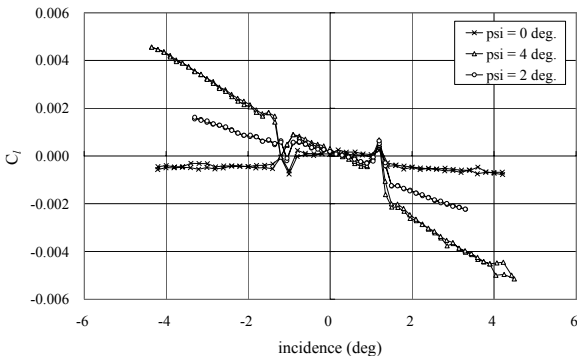


図16 迎角変化に対する $C_l$ 変化への偏揺れ角の影響

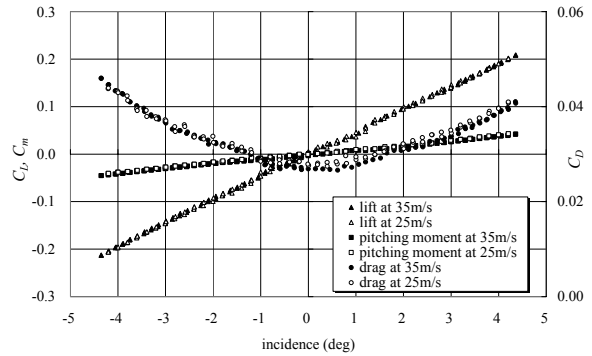


図17 迎角変化に対する縦3分力係数変化 (風速の違いによる評価結果の差異)

図17に風速25m/sと35m/sの2つの風速で測定された縦3分力の空気係数を示す。風速が25m/sから35m/sになると動圧と空力荷重はほぼ2倍になる。実際に計測された $C_L, C_m$ では風速25m/sと35m/sの試験結果の間には有意な差異は認められなかった。一方、 $C_D$ では迎角が $-1^\circ$ 以上の領域で、風速25m/sの $C_D$ の方が風速35m/sの $C_D$ よりも大きくなった。風速25m/sの $C_D$ では $\alpha$ に関する若干の非対称性が認められたが、風速35m/sの $C_D$ ではこの非対称性が更に顕著になった。このことは、前節で導いた揚力が大きい時の $I_{drag}$ からの抗力評価式(29)には更に改善す

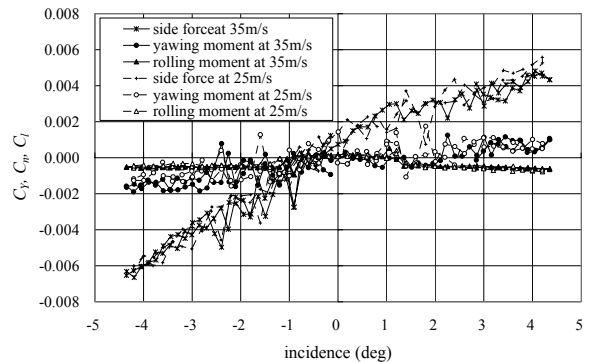


図18 迎角変化に対する横3分力係数変化 (風速の違いによる評価結果の差異)

べき点が残されていることを示唆している。今後の検討課題と考える。一方、迎角の変化に対しての横3成分の空力係数は図18の様になり、風速25m/sと35m/sの間で有意な差は認められなかった。

この結果、MSBSを用いて姿勢変化に伴う空気力変化の特徴を知ることは可能であると言える。また、MSBSを用いて測定される空気力は、抗力を除き通常の機械式天秤による測定結果と同程度の精度を期待できる。抗力評価に関しては、迎角を取り大きな揚力を発生する模型の場合には、今後更に改善する必要がある。

## 6. まとめ

JAXA 60cmMSBSを用いてAGARD-B標準模型を用いた有翼模型の風洞試験を実施した。風速は最高35m/sまで行い、迎角は約-8度から4度まで、偏揺れ角も-3度から3度まで変化させ、コイル制御電流を用いて空気力の評価を試み、以下の所見を得た。

- 1) 抗力評価では、揚力の影響を除く評価法を提案し、その妥当性を迎角-4度と-8度の荷重試験により確認した。しかし、得られた抗力係数の迎角に関する対称性に改善すべき課題が残った。
- 2) 揚力評価では迎角の影響を取り入れた評価法を提案した。
- 3) 縦揺れモーメント評価では迎角の大きさが8度程度の場合は迎角零度の較正試験結果から推定すると、10%以上の誤差が生ずる可能性があり、より高精度な縦揺れモーメント評価法が待たれる。
- 4) 空気力評価結果は他文献と比較し、零迎角時の抗力係数、揚力傾斜、縦揺れモーメント傾斜がほぼ同じ値を示すことを確認した。

- 5) 偏揺れ角変化に対する空気力変化、偏揺れ角を取った場合の迎角変化に対する空気力変化の測定結果は共に合理的挙動を示した。

## 参考文献

- 1) Goodyer, M. J. : "Southernmpton University's Contributions to the Technology of Magnetic Levitation Applied to Wind Tunnel Testing", C. P. Vol. 2, PICAST'1, Dec. 1993, pp.1006-1013
- 2) Stephens, T., Covert, E. E., Vlajinac, M., Gillian, G. D. : "Recent Developments in a Wind Tunnel Magnetic Balance", AIAA Paper No.72-164, 1972
- 3) Eskin, J. : "An Investigation into Force/Moment Calibration Techniques Applicable to a Magnetic Suspension and Balance System", NASA CR-181695, 1988
- 4) 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、pp.188-195、2002 年
- 5) 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一、溝口也寸志、岡田卓三:「JAXA 60cm 磁力支持天秤装置の 5 軸天秤較正試験結果」、日本航空宇宙学会論文集、第 52 巻、第 606 号、pp309-315、2004 年
- 6) 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一、溝口也寸志、岡田卓三:「ホール素子を用いた磁力天秤」、日本航空宇宙学会論文集、第 52 巻、第 611 号、pp.585-587、2004 年
- 7) 澤田秀夫, 国益徹也, 溝口也寸志、岡田卓三:「横揺れ制御を伴う磁力支持天秤」、日本航空宇宙学会論文集、第 53 巻、第 619 号、pp.385-390、2005 年
- 8) 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 巻、第 629 号、pp.276-278、2006 年
- 9) Sawada, H., Suda, S., and Kunimasu, T. : "NAL 60cm Magnetic Suspension and Balance System", ICAS 2004-3.1.2, August, 2004
- 10) 佐藤衛, 他 5 名:「二次元風洞における AGARD-B 標準模型の三分力試験」、NAL TM-639, 1991 年
- 11) Valk, H. and van der Zwaan, J. H. : "A Review of Measurements on AGARD Calibration Model B in the Transonic Speed Range", NAE Report, M.P. 197, 1960
- 12) Crane, J. F. W : "Performance Aspects of the R.A.E. Magnetic Suspension System for Wind Tunnel Models", RAE TR 68274, 1968