

ISSN 0389-4010  
UDC 533. 6. 07  
621. 318

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1164

航技研10cm×10cm磁力支持天秤装置  
横揺れ制御について

澤田秀夫・末永尚史  
鈴木孝行・池田宣一

1992年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 航技研10cm×10cm磁力支持天秤装置 横揺れ制御について\*

澤田 秀夫\*<sup>1</sup> 末永 尚史\*<sup>1</sup>  
鈴木 孝行\*<sup>2</sup> 池田 宣一\*<sup>2</sup>

## Rolling Moment Control in the NAL 10 cm × 10 cm Magnetic Suspension and Balance System\*

Hideo SAWADA\*<sup>1</sup>, Hisashi SUENAGA\*<sup>1</sup>,  
Takayuki SUZUKI\*<sup>2</sup> and Nobukazu IKEDA\*<sup>2</sup>

### ABSTRACT

To have control the rolling moment acting on a model suspended in National Aerospace Laboratory (NAL) 10 cm × 10 cm Magnetic suspension and Balance System (MSBS), two extra pairs of small magnets were attached perpendicular to the model axis at the both front and rear sides of it. Side force, yawing moment, and rolling moment acting on the model are controlled by the currents passing through the system's four side coils. Test results indicate the roll angle is suitably controlled using this method. An analytical approximation for estimating the rolling moment with the existing arrangement of magnetic moments and charges is described. This approximation correlates well with several experimental results. The NAL MSBS has the capability of controlling model motion with six degrees of freedom.

**Keywords:** Wind Tunnel Testing, Magnetic Suspension

### 概 要

航空宇宙技術研究所10cm×10cm磁力支持天秤装置における横揺れ制御のために、模型の横揺れ角測定、磁場制御、模型内磁石に横揺れ制御用の改修を試みた。横揺れ角の測定では白色円筒状模型表面に円筒の母線と平行な直線状の黒い線を新たに書き加え、良好な横揺れ角測定を可能にした。磁場制御では横揺れ制御用の磁場制御と横揺れ以外の磁場制御が互いに強く干渉しないように、測定部中心を通る鉛直断面に関して対称な成分の磁場により横揺れモーメントが発生するような磁場制御を取り入れた。また、模型内磁石では横揺れモーメント発生用に、一対の小型希土類磁石を模型内の棒磁石の前後に配置した。簡単な磁荷配置のモデルで制御された横揺れモーメントの評価を試みた。試験結果から横揺れ制御が確かに行われていることが確認された。また、モデルから推測された磁場により発生された横揺れ

\* 平成4年3月27日受付 (received 27 March 1992)

\*1 空力性能部 (Aircraft Aerodynamics Division)

\*2 武蔵工業大学 (Musashi Institute of Technology)

モーメントが横揺れ角に依存すること、適当な磁場の条件の下では、支持されている模型の偏揺れ角を安定な状態にできることが確認された。このことから、このモデルは横揺れ制御用の模型の設計に利用できることが判った。

## 1. はじめに

航空宇宙技術研究所の10cm×10cm磁力支持天秤装置では制御された磁場を作り出すために図1のようなコイル配置を採用している。磁気力を模型に作用させるために、模型内に模型中心軸上に円筒形の棒磁石を取り付けている。このようにして、外部のコイルが作り出す磁場を制御することで、模型の軸回りモーメント(横揺れモーメント)を除く力とモーメントが模型に作用するようになっている。しかし、そのように模型に取り付けられた棒磁石だけでは、外部磁界を変化させても棒磁石の軸回りモーメントを発生させることはできない。模型の横揺れ制御には、何らかの方法で、模型中心軸に直角な方向に着磁された永久磁石、またはそれに代わる手段を特別に付け加える必要がある。本論文では文献(1)で検討した横揺れ制御法に修正を加え、試験した結果について報告する。その方法は一对の小型磁石を図2の様に模型内の棒磁石の前後に取り付け、図1中の2, 4, 6, 8番に相当するコイルである4つの横力用コイルを独立に制御して、互いに干渉の少ない制御された横力、偏揺れモーメント、横揺れモーメントを磁石に作用させるものである。小型磁石を取り付ける方法は文献(2)で既に提案されているものである。また、模型内の棒磁石の断面形を工夫して横揺れモーメントを発生させる研究も文献(3)で行われている。

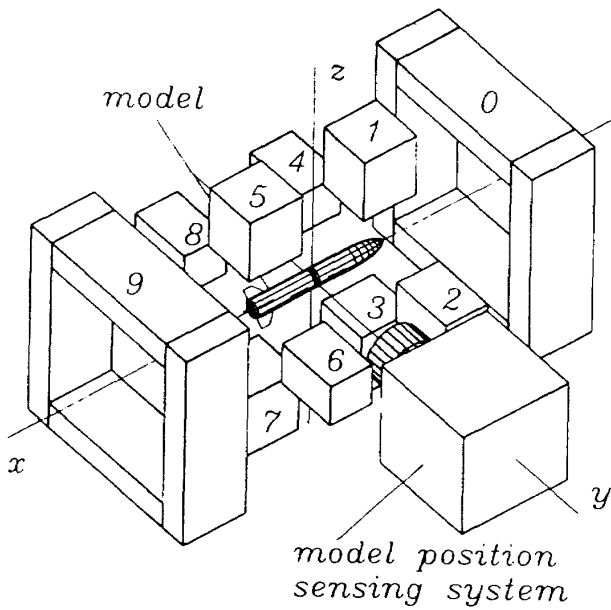
## 2. 記号

- $I_i$  : コイル電流(単位:A)  
( $i$ …図1のコイル番号に対応)
- $I_{roll}$  : (8)式 横揺れモーメント発生用電流  
(単位:A)
- $I_{bias}$  : (9)式 横揺れモーメント発生用電流  
(単位:A)
- $M$  : 横揺れモーメント発生用小型磁石の磁

- 気モーメント(単位:Wb·m)
- $m$  : 横揺れモーメント発生用小型磁石の磁荷(単位:Wb)
- $m_i$  : 磁荷(単位:Wb)  
( $i$ …図1のコイル番号に対応)
- $m_{roll}$  : (3)式(単位:Wb)
- $m_{bias}$  : (5)式(単位:Wb)
- $N_{roll}$  : 模型に作用する横揺れモーメント  
(単位:N·m)  
 $x$ 軸右回りに作用するモーメントを正とする。
- $r$  : 横揺れモーメント発生用小型磁石の位置(単位:m)
- $t$  : 横揺れモーメント発生用小型磁石の厚み(単位:m)
- $w$  : 横力用コイル位置(図4参照)(単位:m)
- $x, y, z$  : 座標系(右手系)(単位:m)  
(図1参照)
- $\nu$  : 模型前後にある横揺れモーメント発生用小型磁石の取付角の差  
(単位:rad, または, 度)
- $\mu$  : 透磁率(単位:henry/m)
- $\phi$  : 模型横揺れ角(図4参照)  
(単位:rad, または, 度)  
 $x$ 軸右回りの角度を正とする。
- $\phi_{sensor}$  : 磁力支持天秤装置コントローラー表示部出力値の $\phi$ (単位:rad, または, 度)

## 3. 航技研10cm×10cm磁力支持天秤装置の横揺れ制御の原理

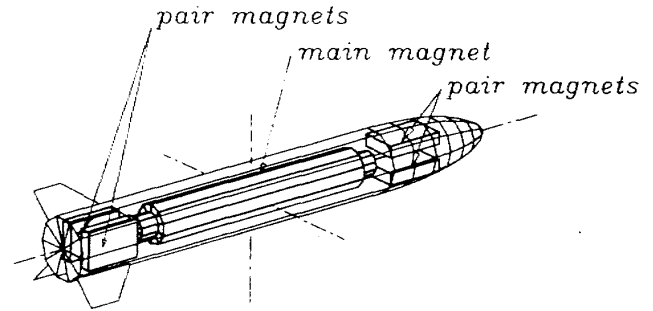
文献(1)では、横揺れ制御用に付加した小型磁石は水平面に平行な磁場の中に完全に含まれるという条件の下で横揺れモーメントが評価された。実際の航技研10cm×10cm磁力支持天秤装置の中の磁場分布は図3のようになっていることが測定により判った。この場合は、小型磁石は模型の横揺れ



Coil arrangement of the NAL's 10cm MSBS

図1 コイル配置図

角によっては鉛直方向の磁場の中に入れられる場合もある。このため、文献(1)の評価法では、正しく模型に加わる横揺れモーメントを評価することはできない。そこで、本論文では、上下左右にコイルが点対称に配置されていて、それらが磁極になっているとみなし、それらによって磁場が形成さ



magnet arrangement in a model

図2 模型内小型磁石配置図 (見取り図, 3次元的)

Magnetic field intensity

current in coil 0,9 : 4.0A	current in coil 2 : 4.0A
current in coil 1,3 : -4.0A	current in coil 4 : -4.0A
current in coil 5,7 : 4.0A	current in coil 6 : -4.0A
	current in coil 8 : 4.0A

→ 200 G

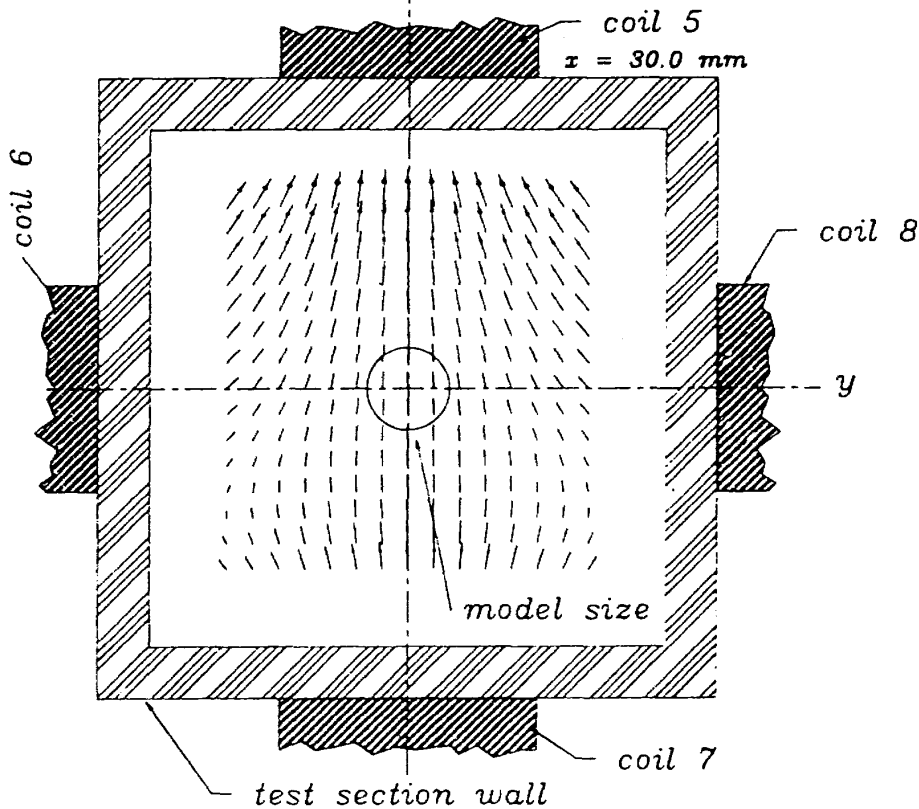


図3 磁力支持天秤内の磁場分布

れるというモデルを考えることにする。その様子は丁度、図4の様な磁荷の配置で近似される。一对の小型磁石は図中では磁気モーメント  $M$  で表している。その大きさは  $mt$  と表すと、 $m$  と  $t$  は対をなしているそれぞれの小型磁石の磁荷と厚さを表している。模型の横揺れ角を  $\phi$  とする。模型後部の一对の磁石によって受ける模型の横揺れモーメント  $N_{roll}$  は以下ようになる。

$$N_{roll} = \frac{m_{roll}}{4\pi\mu_{air}} \cdot mwt\sin\phi \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{(w^2+r^2-2wrcos\phi)^3}} - \frac{1}{\sqrt{(w^2+r^2+2wrcos\phi)^3}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $m$  の下付け添え字は図1のコイルの番号に対応している。 $w$ 、 $r$  は図4を参照されたい。

同様に、模型前部の一对の小型磁石により発生する横揺れモーメントは、この磁石の取り付け角を模型後部の磁石よりも  $\nu$  だけ大きいとすると、同様に

$$N_{roll} = \frac{m_{roll}}{4\pi\mu_{air}} \cdot mwt\sin(\phi+\nu) \cdot$$

$$\times \left\{ \frac{1}{\sqrt{(w^2+r^2-2wrcos(\phi+\nu))^3}} - \frac{1}{\sqrt{(w^2+r^2+2wrcos(\phi+\nu))^3}} \right\} \quad (2)$$

と表される。本試験で製作した模型では、この  $\nu$  が  $\pi/2$  となるように設定した。横揺れモーメントを発生させるために使用した前後それぞれ一对の磁石の模型中心からの距離は約3.5mm、横力用コイルまでの距離は約60mmである。以後の解析では、このことから  $(r/w)$  の2乗の項を1に比べて無視することにする。

今、上下流の横力用コイルに

$$(m_2+m_4) = -(m_6+m_8) = m_{roll} \quad (3)$$

なる条件を満たすように電流を流すと、模型に作用する横揺れモーメントは以下のように近似的に評価することができる。

$$N_{roll} = \frac{3}{2} \cdot \frac{m_{roll}}{\pi\mu_{air}w^2} \cdot \frac{r}{w} \cdot mt \cdot \sin(2\phi) \quad (4)$$

$(r/w)$  の2乗の項を無視せずに評価した場合のグラフが図5である。この場合は横揺れモーメントを  $\{m_{roll} \cdot mt / (4\pi\mu_{air}w^2)\}$  で無次元化している。この図は  $\phi$  が  $\pi/4$  の所でこの磁石の配置では最も

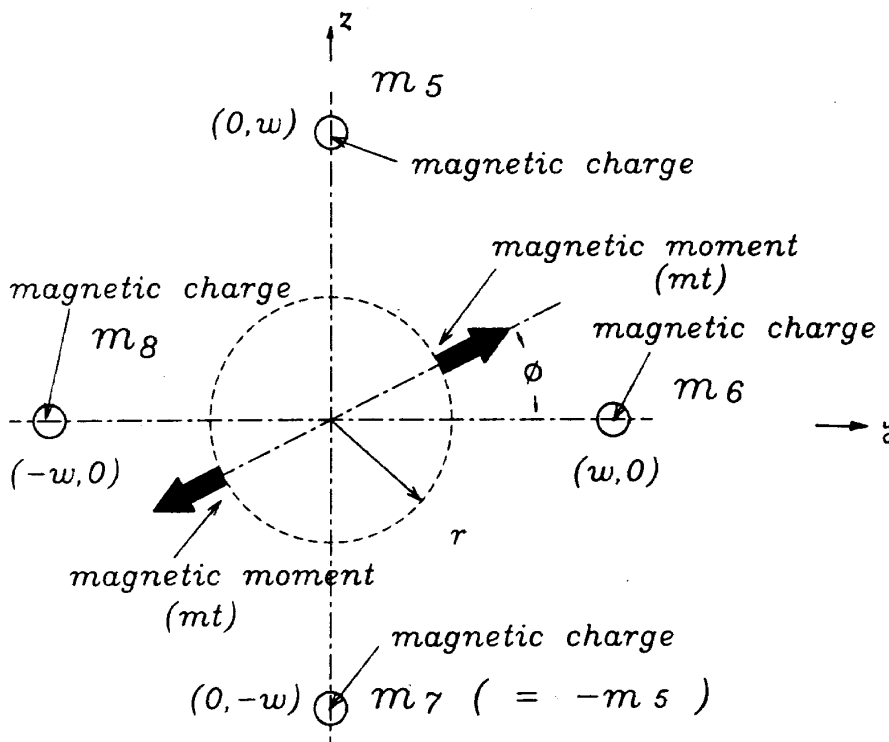


図4 横揺れモーメント評価用解析モデル

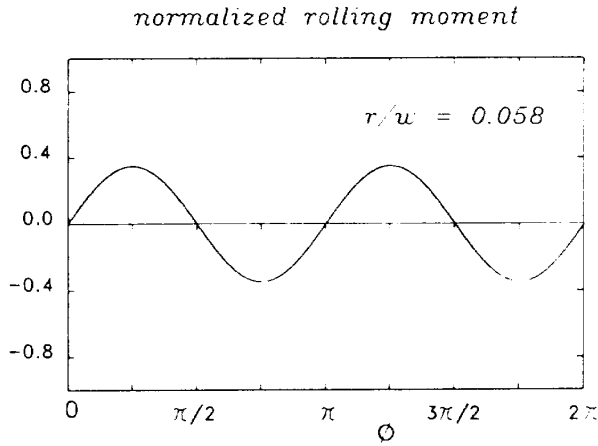


図5 横揺れモーメント解析的評価結果

効率的に横揺れモーメントを模型に作用させることができることを示している。しかしながら、 $\phi$ が変化すると同じ  $m_{roll}$  の強さ、即ち同じコイルに流す電流の大きさでも、模型に作用する横揺れモーメントの大きさは変化することになる。このことは横揺れ角の制御においては、 $\phi = \pi/4$  からの変位量が大きいほど回復操作に要するモーメントを大きくする制御に相当する。このため、航技研 10cm×10cm 磁力支持天秤装置で採用している比例積分制御 (PI 制御) の比例制御部分で、コイルに流す電流に応じた横揺れモーメントが同じになるように  $\sin(2\phi)$  で出力値を割ってその効果を補正することが考えられる。ただし、この場合は  $\phi$  が 0 と  $\pi/2$  では解析上はコイルに流す電流に依らず横揺れモーメントは 0 であるから、最大出力電流が流れるようにしておく必要がある。現在までの所、未だこの補正操作は本制御系には組み込んでいない。一方、上下流の横力用コイルに

$$(m_2 + m_4) = (m_6 + m_8) = m_{bias} \quad (5)$$

なる条件を満たすように電流を流すと、模型に作用する横揺れモーメント  $N_{bias}$  は以下のように近似的に評価することができる。

$$N_{bias} = \frac{35}{32} \cdot \frac{mt \cdot m_{bias}}{\pi \mu_{air} w^2} \cdot \left(\frac{r}{w}\right)^3 \cdot \sin(4\phi) + O\left(\left(\frac{r}{w}\right)^4\right) \quad (6)$$

図6は先と同様に数値的に求めた横揺れモーメントの図である。この場合も横揺れモーメントを  $\{m_{roll} \cdot mt / (4\pi \mu_{air} w^2)\}$  で無次元化している。

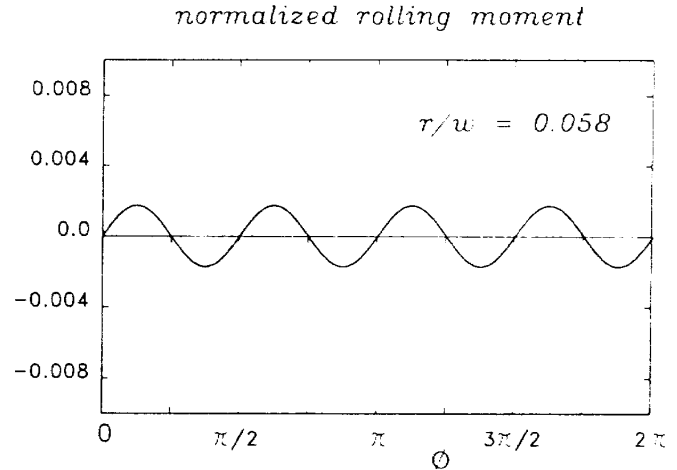
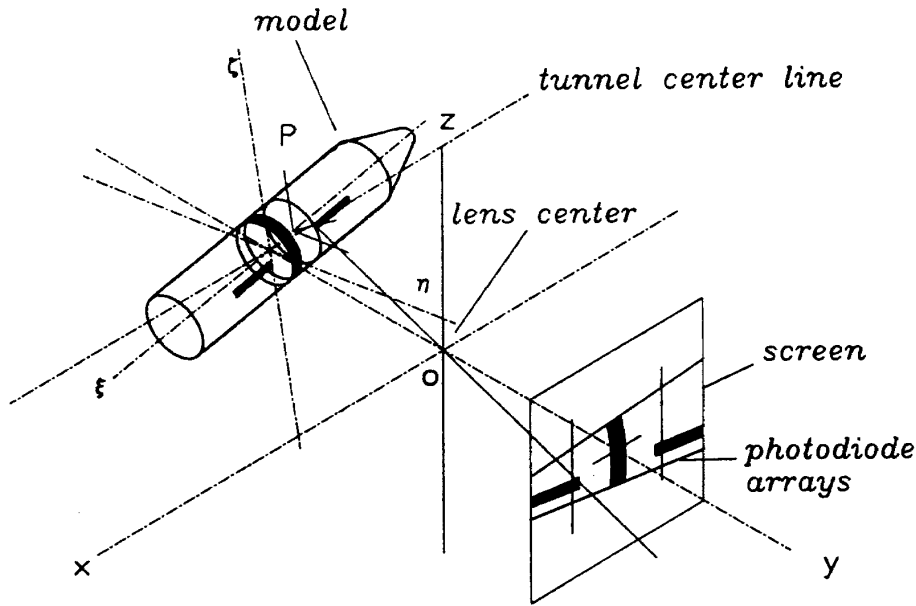


図6 バイアス電流の横揺れモーメントへの効果の評価結果

この図から、 $\phi = \pi/4$  がこの模型の横揺れ運動における安定な角度であることが判る。実際に、この条件を満たすようなコイルへの電流制御を行うと  $\phi = \pi/4$  付近で安定になっていることが実験によっても確認された。航技研 10cm×10cm 磁力支持天秤装置の偏揺れ角制御と横方向の制御は  $m_6$  と  $m_8$  を反対符号にし、模型前部の方の横力用コイルでも同様にしている。このことは、常に偏揺れ角制御と横方向の制御のために流す電流によって生じる横力用コイルの  $m_6$  と  $m_8$  の和は常に零となっており、(3), (5)式から、これらの制御は横揺れ角の制御に模型中心軸が風洞軸上にある限りは影響しないことになる。横力用コイルの磁荷の大きさはコイルに流す電流の大きさに比例するので、電流を制御することで模型の横揺れ角を制御することができることになる。以上の原理に基づいて横揺れ角制御用の電流制御プログラムを構成し、横揺れ角制御の試験を行った。

#### 4. 航技研 10cm×10cm 磁力支持天秤装置の横揺れ角測定法、及び横揺れ制御用模型

図7の様に模型表面に模型中心軸と平行な黒色の線を描き、この線の位置の変化を2本の垂直な1次元 CCD センサーにより測定し、横揺れ角を評価している。測定原理の詳細は文献(4)を参照されたい。



principle of model position sensing at the NAL's MSBS

図7 横揺れ角測定原理の図

図8は横揺れ角測定センサーの較正試験結果である。較正試験は縦揺れ角，偏揺れ角が0度の時に限って行った。較正試験に用いた模型は横揺れ制御用の模型と同じ直径が16mmのプラスチック製のものである。図9は較正試験の様子を写した写真である。大きな横揺れ角になると幾分直線からずれてくるが，制御特性には影響が認められなかった。以後の図中の横揺れ角は全てこの較正試験結果を基にして以下の式に従って修正している。

$$\phi_c = \phi_{sensor} \times -0.8314 \quad (7)$$

ここで， $\phi_c$  は x 軸方向に右回りを正としている。先に示したように，横揺れ制御用模型では中心軸上の一本の永久磁石の他に図2で示したような一对の小型磁石を前または後または両方に付加する必要がある。この方法に従って供試模型を設計，製作した。磁石の配置は図10の様になっている。さらに，一对の磁石は互いに反発するような磁極の向きに配置される。この様な配置で，できるだけ強い磁石であるように磁石材質として希土類磁石を採用している。小型磁石の大きさは14.5mm×9.6mm×3.0mmである。模型内の棒磁石は既存のアルニコ5系の磁石を利用した。しかし，強力な小型磁石に接近して配置されているのである

Calibration test results in roll angle

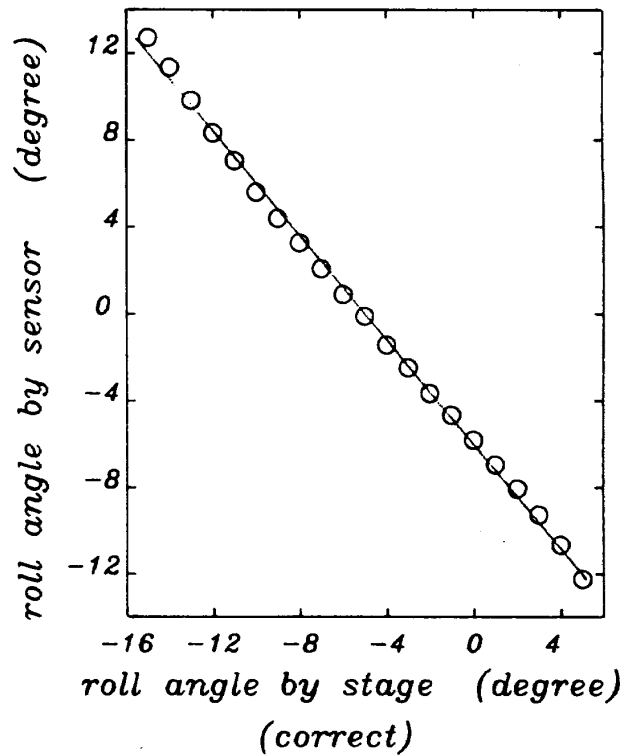


図8 横揺れ角較正試験結果

から，最大エネルギー積の大きな希土類磁石を使用するのが望ましいと考える。但し，棒磁石磁極付近での磁場強さは測定結果では最大約0.03Tで

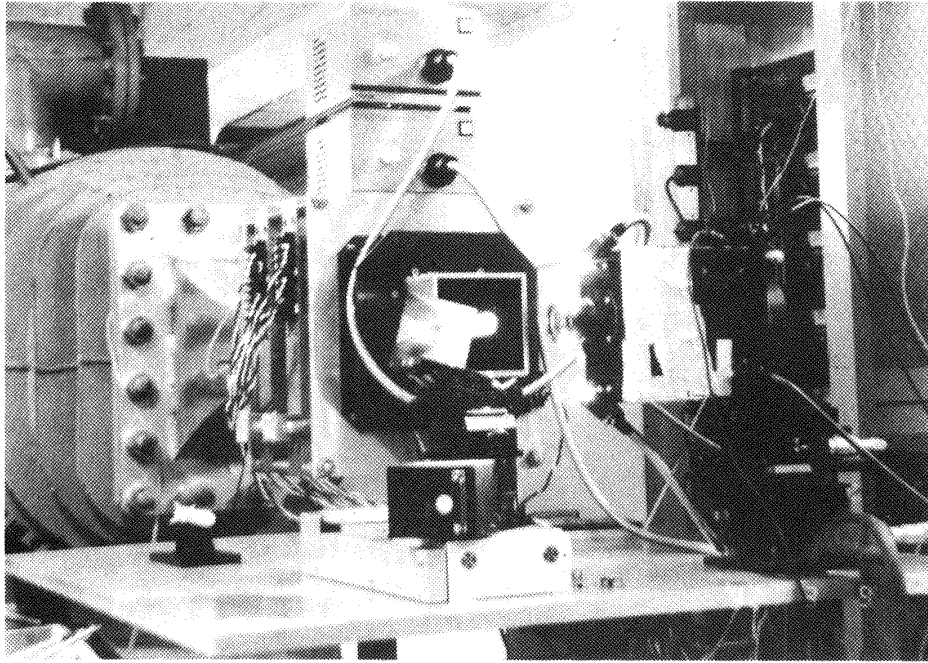


図9 横揺れ角校正試験

*a model for roll angle control*

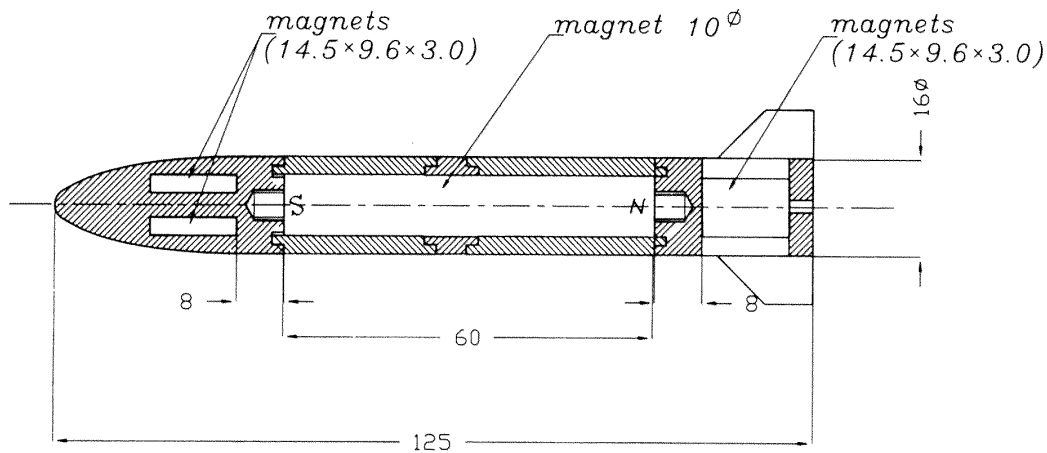


図10 横揺れ角制御用模型の設計図

あり、アルニコ 5 系でも充分使用できる範囲ではある。図11はこの横揺れ制御用模型の写真である。

模型の製作法としては、図10の様な方法は望ましくないことが判明した。この模型では前後に取り付ける小型磁石の相対的角度は模型中心の棒磁石に切られているネジに依り決まるため、前節で示した $\nu$ の角度を精度良く設定することはできない。このため、横力用コイルに流す電流と作用させる横揺れモーメントの関係を補正する精度が落ちる。また、磁石にネジを切っているため、模型前後の小型磁石を取り付けている部分に加わる力

がこの磁石のネジの部分に加わることになる。実験では模型の制御は常に安定な状態で行う場合ばかりではないので、模型が測定部壁に激しくぶつかるともある。このような場合は、棒磁石のネジの付け根部分には大きな力が作用し、この部分から磁石が折れてしまう事があった。磁石を強度部材として使用した点に問題があり、今後はこのような設計は避ける必要のある事が判った。

## 5. 試験結果

図11の模型を使って、先に示した横揺れ制御の



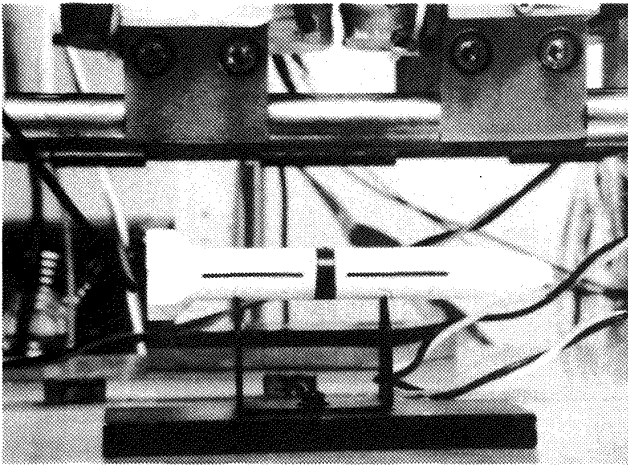


図11 横揺れ制御用模型

手法が正しく実現されているかを調べる試験を行った。試験は全て、横揺れ角を除き模型の姿勢、位置は同じにするようにした。但し、若干の模型軸方向の変位は存在している。模型の位置はほぼ測定部の中心で、磁力支持装置のコイル配置の中心付近に設定されている。試験では、磁力支持天秤の各コイルに流れる電流をコイル駆動用パワーアンプの電流モニター端子から電圧の形で測定した。電流モニターの精度は約1%であり、天秤の力較正試験での電流モニターとしては精度上利用できないが、横揺れ制御特性を調べるのにこの精度内で利用することとした。模型の横揺れ角は磁力支持天秤制御装置に入力した設定値とした。また、模型に既知の横揺れモーメントを加える場合には、天秤によって測定された半田を丸めた重りを吊り下げた。重りの精度は0.2gである。図12のように、重りは模型の外周に直径0.13mmの釣り糸で吊り下げられた。このため、模型に横揺れモーメントを作用させた場合、模型には重りの重力分の力が下向きに作用していることになり、純粋に横揺れモーメントだけを作用させたことにはなっていない。

### 5.1 横揺れモーメントと横揺れ制御電流の関係

模型に加えらるる横揺れモーメントと横揺れ制御電流の関係を調べた。試験では4つの横力用コイルに流れている電流の平均値から、横揺れモーメントの発生に關与する横揺れ制御電流として、

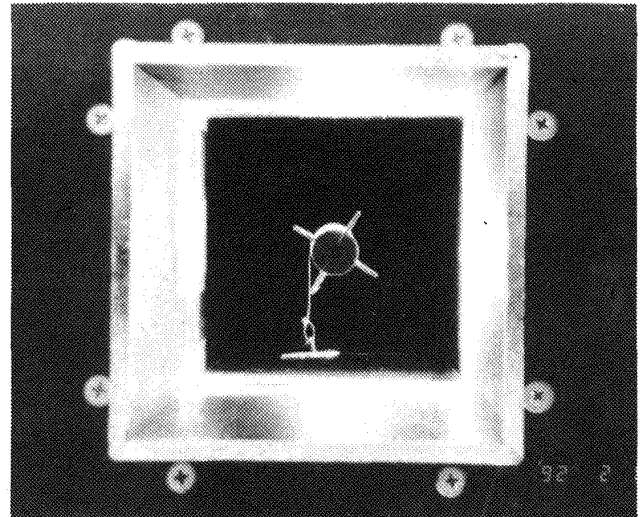


図12 横揺れモーメント較正試験

以下の式に相当する値を評価し、設定横揺れ角との関係を調べた。

$$I_{roll} = (I_2 - I_4) - (I_6 - I_8) \quad (8)$$

模型には5種類の重りを吊り下げて、模型に横揺れモーメントを作用させた。模型が静止した状態では、外から正の横揺れモーメントが模型に作用しているので、それに釣り合う形で、磁気力による負の横揺れモーメントが模型に作用している。模型は完全な軸対称物体になっていると期待することはできないので、横揺れ角による重力に起因した模型に作用する横揺れモーメントの変化が存在している。そこで、重りを吊り下げていない状態を基準として、横揺れ制御電流と重りにより模型に加えた横揺れモーメントとの関係に直すと図13の様になる。両者はほぼ比例関係にあるが、横揺れ角に強く依存している。図5に示されているように、また、式(4)からも判るように、横揺れモーメント評価のモデルの解析からも、横揺れ制御電流とそれにより模型に作用する横揺れモーメントとは比例関係にあるが、比例定数は横揺れ角に依存することが推測されている。

### 5.2 バイアス電流の効果

バイアス電流の効果を評価するために、模型には重りを吊り下げずに、できるだけ大きな範囲にわたって、約1度毎に模型の横揺れ角を設定し、横揺れ制御電流を測定した。試験パラメータとして、式(6)に相当するバイアス電流有り、とバイア

## Rolling moment calibration test results

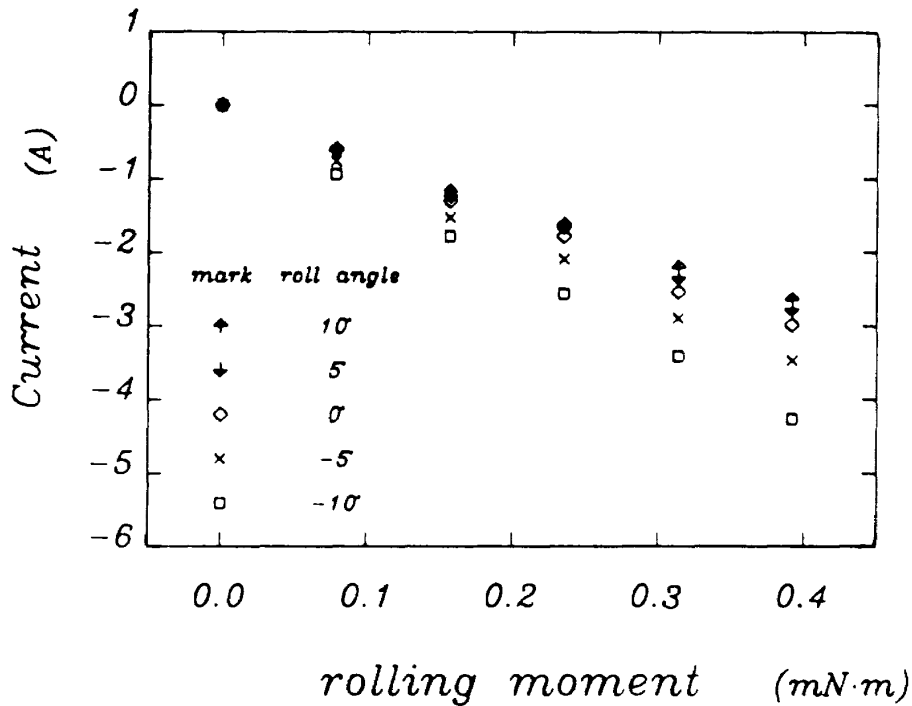


図13 横揺れモーメントと横揺れ制御電流の関係

ス電流無しの場合を試験し、両者を比較した。ここで、バイアス電流は以下の式で定義される。

$$I_{bias} = (I_2 - I_4) + (I_6 - I_8) \quad (9)$$

図14が横揺れ制御電流と模型の横揺れ角の関係を示している。図から、バイアス電流の有り無しで横揺れ制御電流の大きさが違っている。また、その違いの大きさは横揺れ角に依存している。バイアス電流有り、無しの両者の差異を取ることで、横揺れ角による重力に起因した横揺れモーメントの変化の影響は除かれる。バイアス電流有りの場合に測定された横揺れ制御電流はバイアス電流により模型に作用している横揺れモーメントと釣り合うように余分に横揺れ制御電流が流されている。バイアス電流有りの横揺れ制御電流から、バイアス電流無しの結果を差し引いたものが図15である。この図から、バイアス電流により模型に作用している横揺れモーメントと横揺れ角の関係を評価できる。図13から、負の横揺れ制御電流をコイルに流すことは模型に負の横揺れモーメントを磁気力により作用させていることになる。このことから、図15では、横揺れ角が約-10度付近では、

バイアス電流による横揺れモーメントに釣り合うように、負の横揺れ制御電流を余分にコイルに流している。即ち、負の横揺れモーメントを模型に作用させている。よって、この場合はバイアス電流により模型に正の横揺れモーメントが作用している。同様に、横揺れ角が12度以上では余分な横揺れ制御電流は正であり、バイアス電流により模型に作用している横揺れモーメントは負である。このことから、バイアス電流により模型に作用する横揺れモーメントと横揺れ角の関係では図15の傾きとは逆となり、安定な関係にあることが判る。この事実は図6に示されている $\phi = \pi/4$ 付近の関係に近いことが読み取れる。この関係から、逆に、模型内の磁石の配置から定まる横揺れ角と、模型表面に描いたマークから定めた横揺れ角との関係が求められ、約10度の違いが両者の間にはあることが判る。

## 5.3 横揺れ角制御に伴う干渉

模型が測定部中心軸上にある時は、横揺れモーメント評価のモデルの解析から、本論文で述べている横揺れ制御は、 $z$ 方向位置、 $y$ 方向位置、縦

### Bias effect in roll angle control

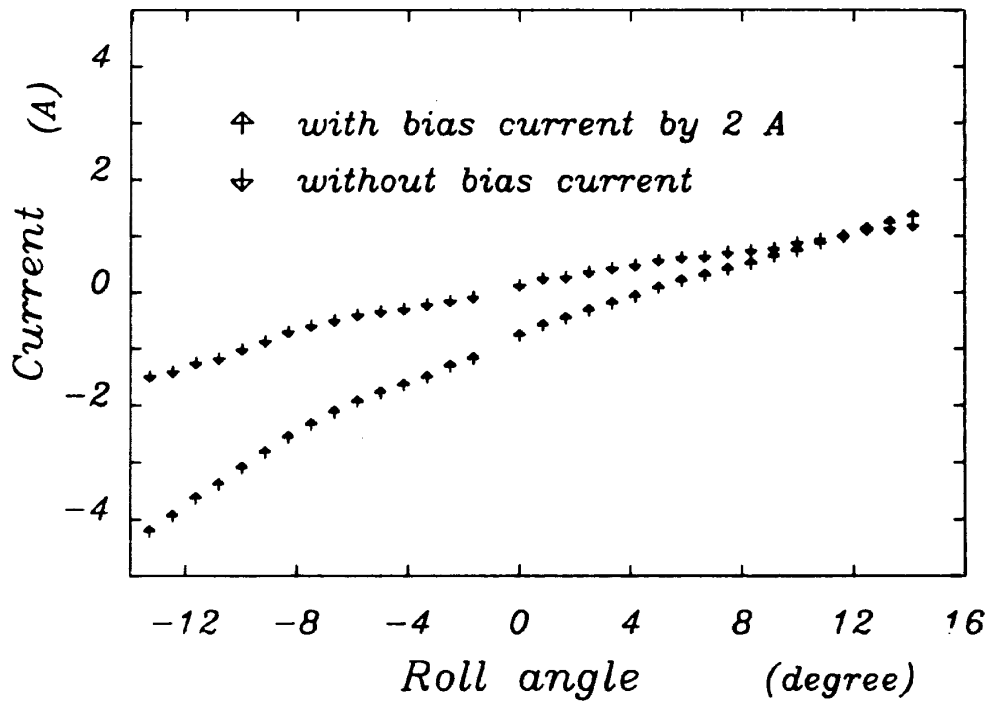


図14 バイアス電流による横揺れモーメントと横揺れ角の関係

### Bias effect in roll angle control

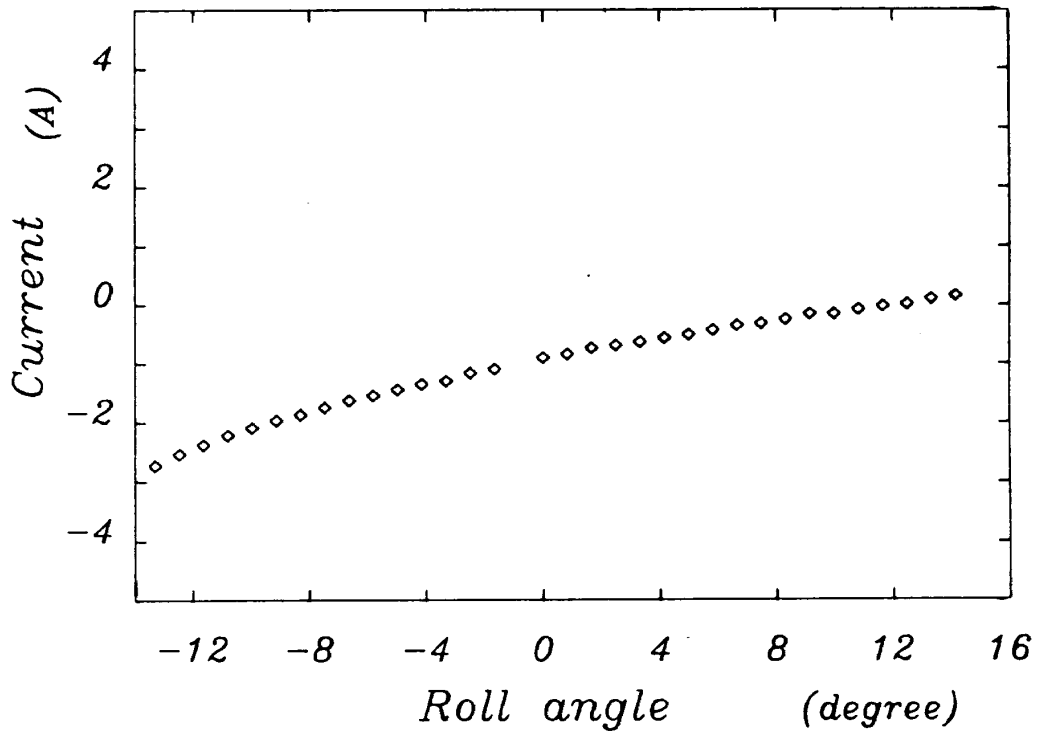


図15 バイアス電流による横揺れモーメントと横揺れ角の関係

Coil current change with roll angle  
without bias current

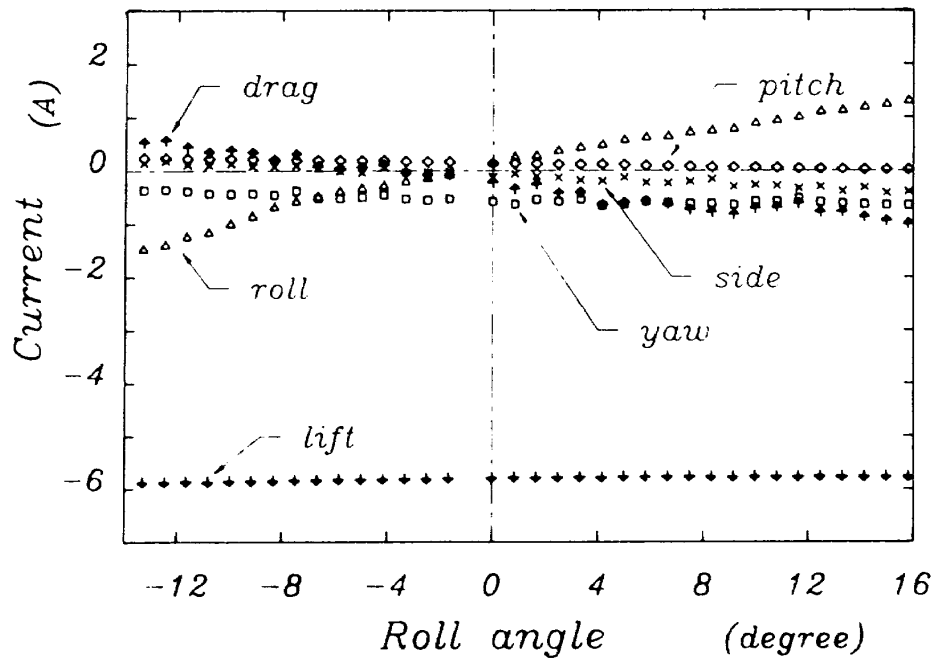


図16 横揺れ角制御に伴う干渉  
(バイアス電流無し)

Coil current change with roll angle  
with bias current by 2 A

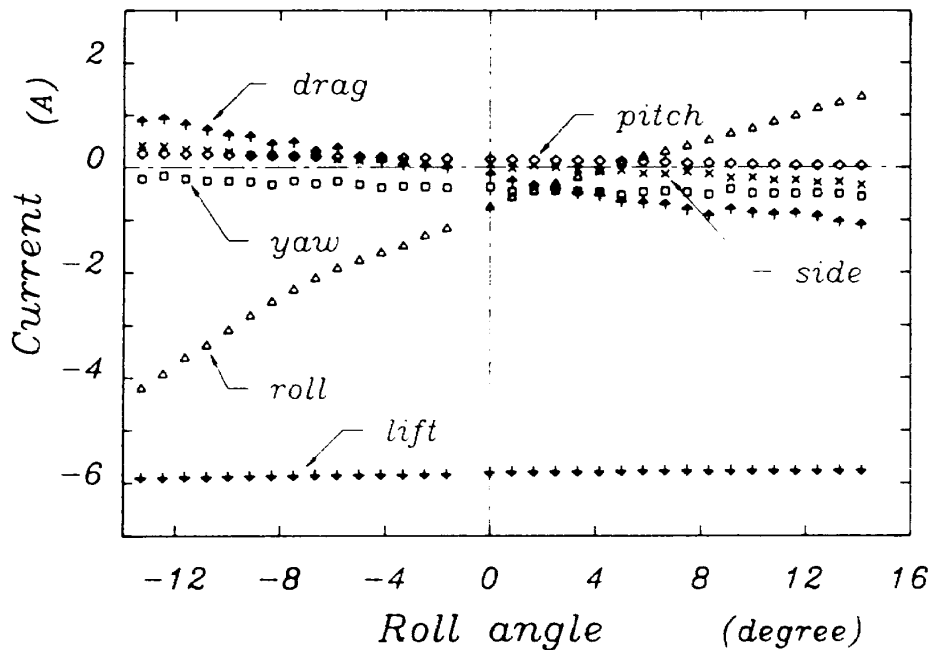


図17 横揺れ角制御に伴う干渉  
(バイアス電流有り)

揺れ角，偏揺れ角の制御には影響しない。図16，17はバイアス電流の有る時と無い時の測定された各制御電流を模型の横揺れ角に対して描いたものである。図中では， $x$ ， $y$ ， $z$ 方向，縦揺れ角，偏揺れ角，横揺れ角の制御電流をそれぞれ，drag，side，lift，pitch，yaw，rollで示している。横揺れ制御電流を除く各制御電流は横揺れ角に依存しているが，その依存の強さは $x$ 方向の制御電流以外は小さく，解析結果とよく合う。 $x$ 方向の制御電流が横揺れ角に他の制御電流よりも強く依存している。この原因は模型内の主磁石（図2参照）の $x$ 方向の位置が丁度 $x=0$ の点になく，何れか一方に幾分ずれていることにあると考えられる。主磁石の中心が $x=0$ からずれていると，横揺れ制御電流により磁化された $m_2$ ， $m_4$ ， $m_6$ ， $m_8$ の磁荷により主磁石には $x$ 軸方向の力が作用することになる。このため，この力と釣り合うように抗力用コイルに電流を流す必要が生じたためと考えられる。

#### 5.4 横揺れモーメントと横揺れ角の関係

模型に外部からの一定の横揺れモーメントを作用させた状態で横揺れ角と，横揺れ制御電流の関係を調べた。試験はバイアス電流有り，無しの場合を行った。模型が完全な軸対称でないことに起因する横揺れ角に依存した横揺れモーメントの効果を除くため，それぞれの場合で，横揺れモーメント用の重りを吊り下げないときの試験結果との差を取った。このことにより，バイアス電流の有り無しの効果も同時に原理的には消されていることになる。磁力支持天秤により模型に作用している横揺れモーメントと横揺れ角の関係を直して描いた図が図18である。図から，バイアス電流有り，無しの効果が未だ若干残っている。その効果は横揺れ角に依存せず，ほぼ一定である。横揺れ角に対する横揺れモーメントの関係はこの効果を見無視すると，バイアス電流の有り無しに関係なくほぼ同じといえる。式(4)から一定の横揺れモーメントを発生させるのに必要な横揺れ制御電流は

### Coil current for roll angle control with constant rolling moment

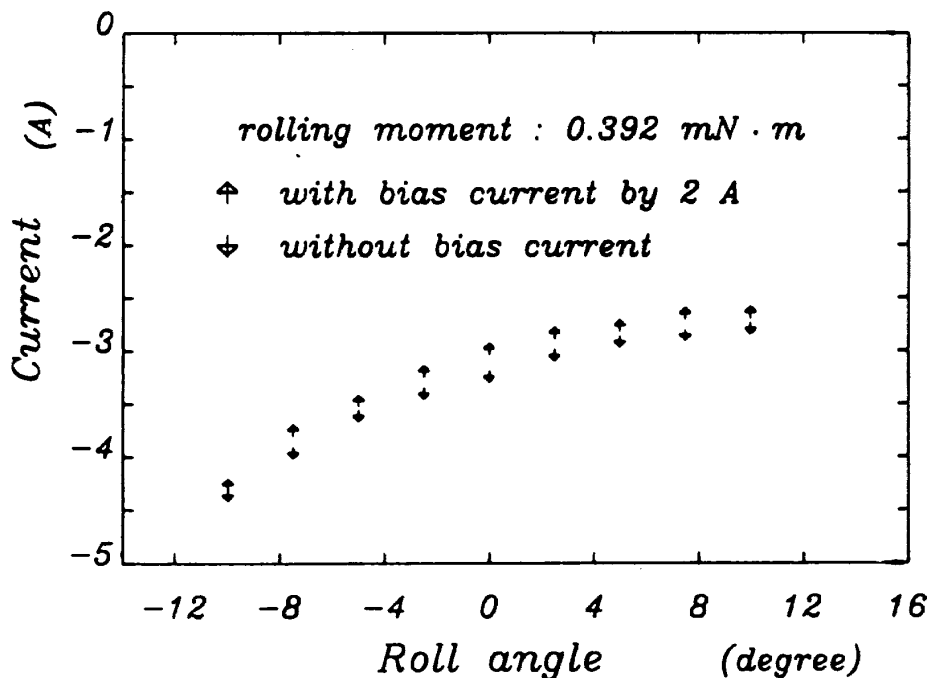


図18 バイアス電流の効果を除いた時の横揺れモーメントと横揺れ角の関係

sec (2φ) に比例する。先に指摘したように横揺れ角10度付近を  $\phi = \pi/4$  に対応させると、図の横揺れ角に対する横揺れ制御電流の関係は、極一部ではあるが、丁度この関係に近い。

以上のことから、先に述べた横揺れモーメント評価のモデルは横揺れ制御の模型設計に利用できると判断される。

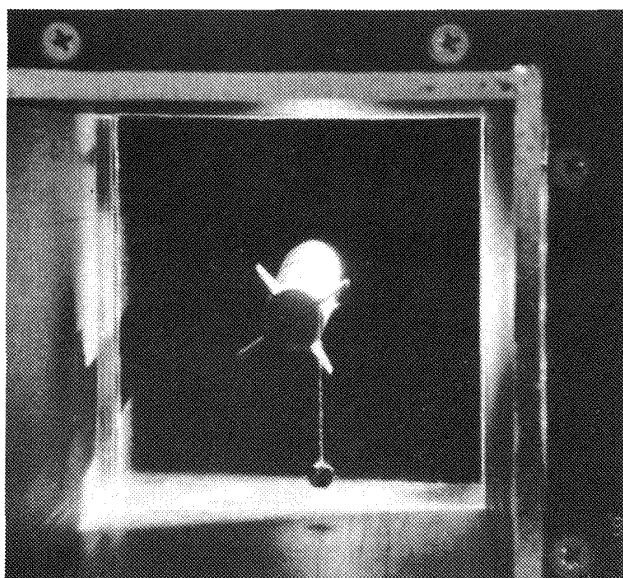


図19 横揺れ制御中の模型の写真

図19は模型が実際に横揺れモーメントを外部からかけられた状態で、迎角、偏揺れ角を取った状態で支持されているときの写真である。模型の質量は約98gで、右後部に黄銅製のナット2個を糸で吊り下げている。質量は約0.7gで、約 $3.9 \times 10^{-5}$  N・mの横揺れモーメントを受けていることになる。このことから、模型の中心軸が風洞中心軸に一致していなくても横揺れ角制御はできることが確認された。図20は横揺れ角を約1.66度だけ変化させる命令を与えたときの模型の横揺れ角の時間変化を示している。約±0.1度の横揺れが残っているが、制御自体は安定に行われていることが判る。

## 6. む す び

今回の試験から、航技研 10cm×10cm 磁力支持天秤装置では、支持する模型内に図2に示すような磁石を付け加え、4つの横力用コイルに適切な量の電流を流すことで、横揺れ制御が可能であることが実験的に確認された。この結果、航技研 10cm×10cm 磁力支持天秤装置は6軸全ての制御が可能となった。

### *Response in roll angle for step input*

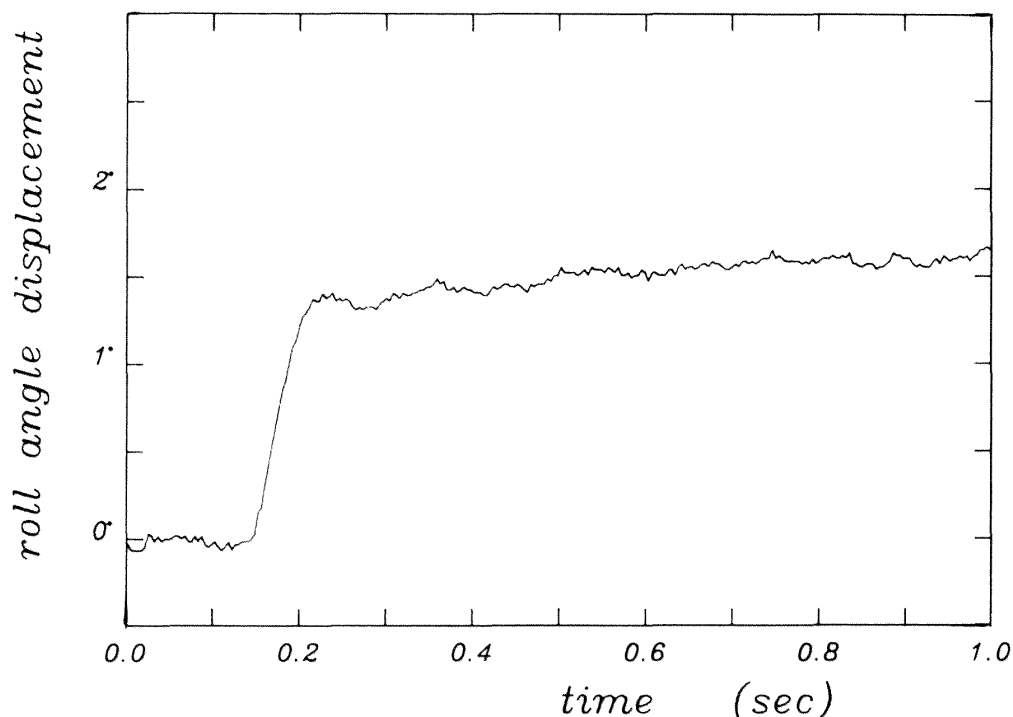


図20 横揺れ角のステップ変化応答

本論文で用いた横揺れモーメント発生の方法では横揺れモーメントは横揺れ角に依存している。また、横力用コイルに適当に(9)式を満たすように電流を流すと、模型は横揺れ角に関して安定になることが実験的に確かめられた。更に、横揺れ角制御を除く、 $y, z$ , 方向の制御、縦揺れ角、偏揺れ角制御への影響は小さい。これらの現象は本論文中で提案した横揺れモーメント評価のモデルから予め推測された。

本論文の中で用いた横揺れモーメント評価のモデルは横揺れ制御模型の設計に利用できる。

### 参 考 文 献

- 1) 沢田秀夫, 他2名: 「0.1m×0.1m 磁力支持天秤装置の試作」, 航空宇宙技術研究所資料 NAL TM-623, 1990年6月.
- 2) M. J. Goodyer: "THE GENERATION OF ROLLING MOMENTS WITH THE SUPER-CONDUCTING SOLENOID MODEL", NASA CR 172520, 1985.
- 3) M. J. Goodyer: "Roll Control Techniques on Magnetic Suspension Systems", Aeronautical Quarterly, Vol.18, Feb. 1967, Pt. 1, pp.22~42.
- 4) H.SAWADA, 他2名: "THE 10CM×10CM MAGNETIC SUSPENSION AND BALANCE SYSTEM AT THE NATIONAL AEROSPACE LABORATORY", AIAA Paper 91-0397, Jan., 1991.

---

## 航空宇宙技術研究所報告1164号

平成4年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---



