

ISSN 0452-2982
UDC 533. 6. 07
537. 626
681. 527. 83

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-623

0.1m×0.1m磁力支持装置の試作

澤田秀夫・神田宏・末永尚史

1990年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

0.1m×0.1m磁力支持装置の試作*

澤田 秀夫** 神田 宏** 末永 尚史**

概 要

磁力支持天秤装置についての基本的な説明と、簡単な歴史について述べ、航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m磁力支持天秤装置の設計手法について述べた。磁力支持試験結果から、採用した磁気回路の評価結果、必要な電源容量、コイルの巻数、模型の位置姿勢測定センサーの組合せに妥当であったとの結論を得た。また、 γ 方向、 ψ 方向の測定精度の向上と、制御能力の向上が必要であることも判った。

1. はじめに

風洞試験において模型を測定部内部に支持することは基本的な問題である。多くの場合、模型は細い支柱により支持されるか(ストラット支持)、細い棒状のもので模型後方から支えられている(スティング支持)。いかなる支持法を採用しようとも、支持装置は模型周りに形成される流れ場を乱さないことが望まれる。しかしながら、現在実用化されている支持装置では支持用の支柱または棒状のものが模型の下または後方にあるので、大なり小なり必ず気流を乱すことになる。この支持装置の風洞試験結果への影響を支持装置干渉と呼んでいる。このため、十分注意して支持装置を設計することがきわめて重要になる。しかしながら、いろいろと工夫しても支持装置の干渉が十分無視できるほど小さくすることのできない場合も今までに数多く指摘されている¹⁾。特に、高迎角試験²⁾、動安定試験¹⁾の場合に問題になることが多い。

このような支持装置干渉を全く考慮しないで済む模型支持法として磁力支持が考案された。磁気による模型の支持であれば、模型を支えるための支柱の様なものが気流中に存在する必要もなくなり、模型後流を支柱が乱すようなことも無く、支持装置干渉量は完全に無いと言える。ただし、測

定部内部に発生する制御された磁場が気流に全く影響をおよぼさないという条件の下で成立することではある。通常マッハ数7程度までは風洞作動ガスの解離という現象は顕著には現れない。気流が局所的にでも電気的な性質を有しない限り磁場の気流への影響は考える必要はない。なぜならば、空気の場合磁化率はわずか 3.6×10^{-7} であり、この気流への影響は全く考えられない大きさである³⁾。このことから、通常、極超音速風洞と呼ばれる風洞よりも低いマッハ数の風洞、即ち、超音速風洞、遷音速風洞、低速風洞で磁力支持装置を用いれば磁気による気流への影響は全く考慮する必要はない。この意味で、磁力支持装置は干渉の無い支持装置と言うことができる。磁力支持では必要なだけの磁気力を模型に作用させるために要する電流を測定することにより、磁力支持されている模型に作用している空気力を測定した電流から評価することができる。このため、磁力支持装置は一般に磁力支持天秤装置と呼ばれることが多い。

本論文では磁力支持天秤装置の磁力支持の部分と、超音速以下の速度範囲の風洞で使用を念頭にいった磁力支持装置の設計、試作の結果について報告することにする。

2. 記 号

A	: 模型内磁石の断面積	(m^2)
A_s	: 横揺れモーメント用磁石断面積	(m^2)

* 平成2年3月31日受付

** 空力性能部

I	: 磁化の強さ	(T)
J	: 一般的電流	(A)
J_i	: コイル i に流す電流 ($i=0\sim 9$)	(A)
N_x	: コイル 0, 9 の電線の巻数	
N_y	: コイル 2, 4, 6, 8 の電線の巻数	
N_z	: コイル 1, 3, 5, 7 の電線の巻数	
n	: 一般的なコイルの巻数	
l	: ペアコイルの間隔の半分	(m)
m	: 磁石の磁荷	(Wb)
M	: 磁石の X 方向磁気モーメント	(Wb·m)
L	: コイルの自己誘導係数	(H)
F	: 磁石全体に作用する力	(N)
M	: 磁石全体に作用するモーメント	(N·m)
H	: 磁場の強さ	(AT/m)
S	: コイルの断面積	(m)
t	: 時間	(秒)
(x, y, z)	: 模型中心位置の座標	(m)
(θ, ψ, ϕ)	: 模型の姿勢	(radian)
η	: 比抵抗	(Ω m)
μ_{air}	: 空気の透磁率	(henrry/m)
添字		
x, y, z	: x, y, z 成分であることを示す	
f	: 模型内磁石の前方磁極部に作用する 量であることを示す	
r	: 模型内磁石の後方磁極部に作用する 量であることを示す	

3. 磁力支持天秤装置の歴史

磁力支持の考え方はすでに1940年代に始まり、米国NACAのAmes研究所で最初の試作が行われたが失敗に終わり、1957年にフランスのONERAと呼ばれる研究所で世界初の磁力支持装置が製作されたといわれている^{3,4)}。その後、世界各国で十数基の磁力支持天秤装置が製作され⁴⁾、1950年代から1960年代にかけて研究が行われた。しかしながら、1970年代になると磁力支持天秤装置の研究は下火になり、1980年代には有名な米国MITの磁力支持天秤装置はNASAのLangley研究所に移

管された^{4,6)}。

磁力支持天秤装置の研究が衰退した原因は磁力支持天秤装置の実用化の見込みが立たなかったためと言われている。試作された磁力支持天秤装置は全て小型のものであり、通常の風洞試験で利用することは困難であった。磁力支持天秤装置を大型化しようとする、莫大な電気エネルギーを消費し、装置もきわめて大きなものとなることが懸念され、実用化が断念されたものと考えられる。また、磁力支持天秤装置自体、航空機の開発において必須の装置と言うわけではなく⁷⁾、多大なエネルギーを消費する磁力支持天秤装置の開発は中止されて行ったものと考えられる。

一方、NASAのLangley研究所では1980年以降、MITの磁力支持天秤装置を受け取った他にAEDCの磁力支持天秤装置も借り、新たに磁力支持天秤装置の研究開発に乗り出した。文献6)によれば、磁力支持天秤の研究の意義は次のような情勢の変化によって現われてきたとしている。すなわち、低温風洞の様な小型で大きなレイノルズ数を出せる風洞が実用化され、比較的小型の磁力支持天秤装置でも実用的な試験に利用できるようになったこと、また、超電導技術の進歩により大型の磁力支持天秤装置でも実現が可能な状況になってきたことにあるとしている⁷⁾。さらにまた、磁力支持天秤装置には模型支持装置干渉をなくすばかりでなく、

1) 風洞試験効率の改善

これは風洞試験では模型の姿勢変化により支持装置の一部を交換したりすることに伴う風洞運転の停止が起こり、風洞運転効率の低下をもたらすと言われている。

2) 支持装置干渉の補償を行うために特別の試験を行う必要がなくなること。

3) 動安定微係数を測定するために特別な支持装置と模型を製作し、試験する必要がなくなること。

4) 今まで不可能と考えられてきた形状の模型、例えば非常に薄い板や円筒形状の模型などの風洞試験ができるようになること。

といった効果が挙げられる。このように、磁力支

持天秤装置の研究開発は風洞試験に関する広い分野にわたって意義のあることであるといえる。

NASAのLangley研究所では先の33cm角磁力支持天秤装置に吸い込み式の亜音速連続風洞を取り付け、磁力支持天秤装置の運転法、試験法に関する多くの研究を行ってきた⁸⁾。また、今までの磁力支持天秤装置の研究に関する文献をまとめた文献集も出し⁵⁾、研究環境の整備に努めていた。

4. 磁力支持天秤装置の制御法

図4-1は磁力支持天秤装置の制御法を表した簡単な図である。模型位置測定センサーは模型の位置姿勢を高速に測定する。測定されたデータは計算機に読み込まれ、模型が所定の位置または姿勢からずれてしまっていると判断すると、直ちにコイルに適切な量の電流を流す命令をコイル駆動用電源に伝える。コイル駆動用電源はこの命令に従って電流を流し、コイルに流れる電流により模型周りの磁場が変化して、模型に作用している磁気力が変化し、模型の位置姿勢が変化する。磁力支持天秤装置ではこの様な操作を高速で繰り返すことにより模型を所定の位置姿勢に保つことがで

きるようにしている。

このため、模型位置姿勢測定センサー、制御則、コイル駆動用電源、コイル系によって作られる磁気回路の設計は磁力支持天秤装置の設計の中心となるものである。各国の磁力支持天秤装置はそれぞれ全体として整合性の取れた形でこれらの要素を組み合わせていると言える。本論文では、航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m磁力支持装置に相当であると判断して取り入れた磁気回路の設計、コイル駆動用電源、模型位置姿勢測定センサー、制御系の検討結果について報告する。

5. 磁気回路の決定

前節で述べたように、磁力支持天秤装置の調査の段階では未だわが国には製作例が無く、外国にもわずかに十数基程しかなかった⁵⁾。また、外国の磁力支持天秤の多くは当時すでに運転を休止していて、わずかに米国NASAのLangley研究所に2基、英国Southernpton大学に1基、Oxford大学に1基が運転可能な状況にある磁力支持天秤装置であった。後に、ソビエトに世界最大の40cm×60cmの磁力支持天秤装置が稼働中であるとの情報を得たが¹¹⁾、詳細はわからない。詳細がわかっている運転中の磁力支持装置はさきに挙げた4基となるが、その中で最大の大きさの磁力支持装置が米国NASAのLangley研究所にある33cm角の磁力支持装置と言える。こうした状況を鑑み、先ず、文献調査ではわからない磁力支持天秤装置の技術的問題点を把握することを目的として、研究室レベルで製作、実験ができる程度の大きさのものにすることにした。

通常市販されているバイポーラ電源では容量は18V、±15A程度であり、これで十分に模型を支持し、高速気流中でも模型に作用する空気力を相殺できる磁気力を模型に作用させることのできる磁気回路が設計の目標となった。文献12)に詳しく紹介されている磁気回路と、英国のSouthernpton大学の磁力支持天秤装置を最も参考にして、航空宇宙技術研究所磁力支持天秤装置の磁気回路の構成を図5-1のように設計した。座標系としては図に示したように、磁気回路の中心軸をx軸と

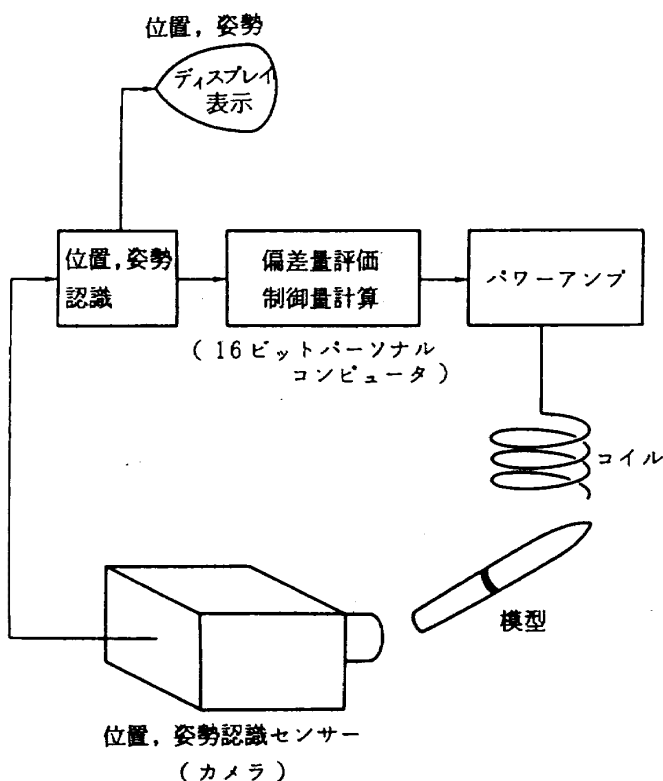
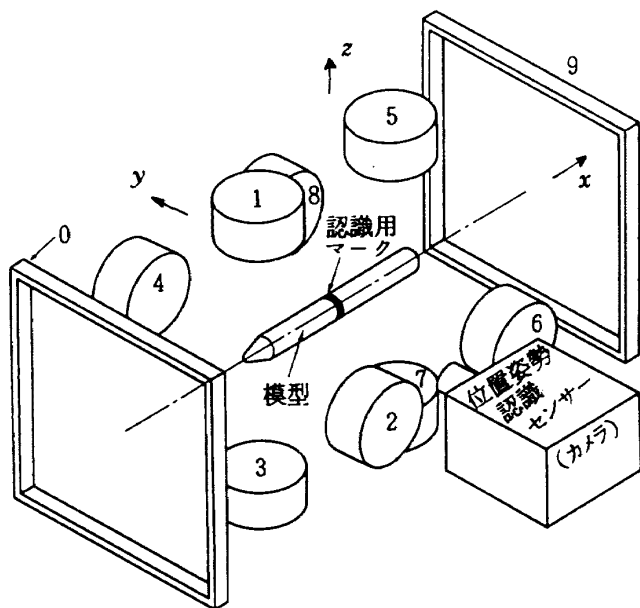


図4-1 磁力支持装置の制御概念図

して、これに直角上向き方向にz軸を、直角横方向にy軸を右手系をなすように構成している。座標系の原点は各軸に対称に構成されている磁気回路の中心点に置いている。本試験装置では、磁力支持天秤装置内の模型内部には円柱形の永久磁石を挿入し、この磁石に周りに設置したコイル系が発生する磁場により磁気力を作用させて、模型を一定の位置と姿勢を保たせる方法を採用した。磁気回路の設計では十分な経験が無く、できれば必



- 0, 9: 抗力用コイル (空芯コイル)
- 1, 3, 5, 7: 揚力, ピッチングモーメント用コイル
- 2, 4, 6, 8: 横力, ヨーイングモーメント用コイル

図5-1 航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m磁力支持装置コイル配置概念図

要磁気力の数倍の磁気力を作り出せる磁気回路の設計を考えたが、電源の容量が大きくなりすぎる、コイルが大型になると言う点から、むしろマッハ数1の気流中での支持は当面目標とはせず、まず、低速で使用できる磁力支持天秤装置の設計を行うこととした。最終的にまとまった目標は以下の通りとした。

1. 模型最大質量 : 125gr
2. 気流最高速度 : 30m/s
3. 模型抗力 : 0.25N
4. 磁石の残留磁束密度 : 0.84T
5. 磁石の大きさ : 直径 10mm
長さ125mm

図5-2は航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m磁力支持天秤装置の10個のコイルからなる磁気回路の構成である。各コイルに流す電流を制御して模型位置に作られる磁場を制御するようにしている。各コイルに流す電流を J_1, J_2, J_3, J_4 とし、更に J_1 と J_3, J_2 と J_4 は互いに等しい大きさの電流を流すものとした。近似的には中心P点に形成される磁場の強さと向きは図5-3の様な4つの電磁石を含む磁気回路を仮定して評価を行い、以下の式のように期待した。

$$H = \left(0, \frac{N_y}{2l} (J_2 + J_4), \frac{N_z}{2l} (J_1 + J_3) \right) \quad (1)$$

P点に磁化の強さIの永久磁石のS極を置くと、以下の磁気力が磁石に作用する。

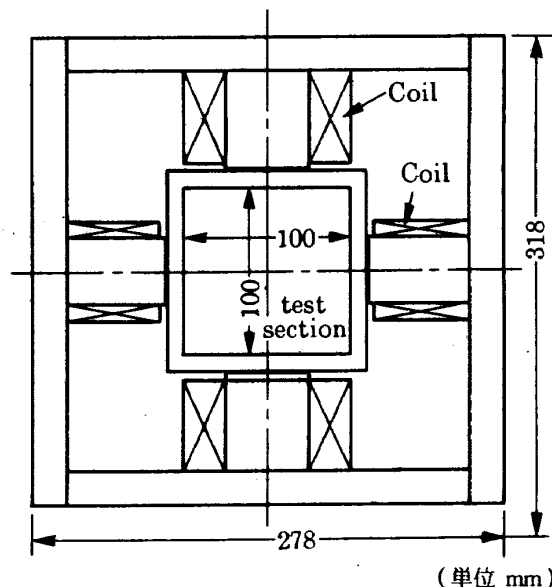
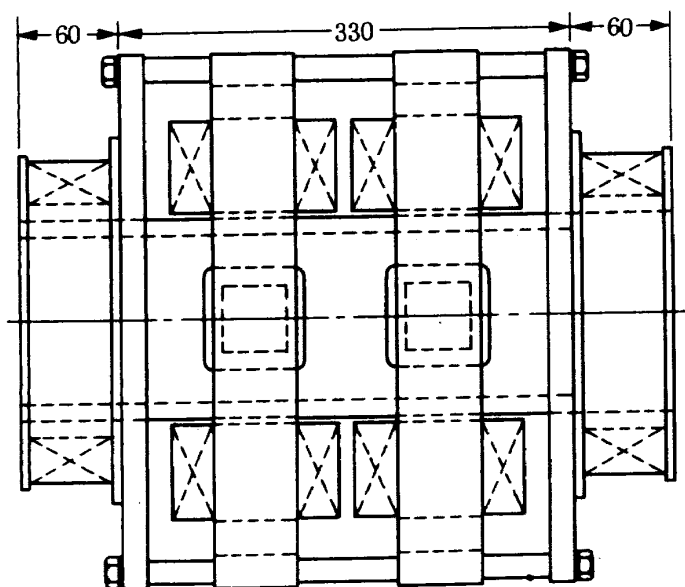


図5-2 航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m磁力支持装置コイル配置図

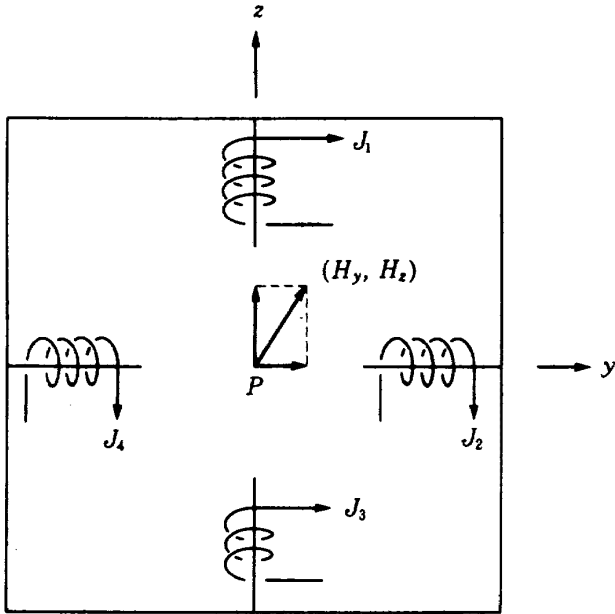


図5-3 前方コイル1, 2, 3, 4による磁気回路図

$$\begin{aligned} F_{zf} &= m \cdot H_{zf} \\ F_{yf} &= m \cdot H_{yf} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで

$$m = I \cdot A \quad (3)$$

と評価し、消磁力を無視することにする。ここで考えている永久磁石は円柱状でその長さは直径に比して8倍以上を考えている。このため、消磁力を無視しても磁力支持の設計精度の上では問題が生じることはない。また、模型後方のコイル番号5, 6, 7, 8のコイルからなる磁気回路ではこれと全く逆のことが起こり、以下の式ようになる。

$$\begin{aligned} F_{zr} &= m \cdot H_{zr} \\ F_{yr} &= m \cdot H_{yr} \end{aligned} \quad (4)$$

磁石に加わる磁気力は前後のコイル系によって発生する磁気力の和となるから、結局、模型に加わる y, z 軸方向の磁気力は以下の式ようになる。

$$\begin{aligned} F_z &= m \cdot (N_z/2l) \cdot (J_1 + J_3 + J_5 + J_7) \\ M_z &= m \cdot L \cdot (N_z/4l) \cdot (J_1 + J_3 - J_5 - J_7) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_y &= m \cdot (N_y/2l) \cdot (J_2 + J_4 + J_6 + J_8) \\ M_y &= m \cdot L \cdot (N_y/4l) \cdot (J_2 + J_4 - J_6 - J_8) \end{aligned} \quad (6)$$

この式から、永久磁石に z 方向の力を作用させるためにはコイル1, 3, 5, 7に同じ大きさの電流を流せば ($J_1 = J_3 = J_5 = J_7 = J_{\text{lift}}$)、電流の強さ J_{lift} に比例した z 軸方向の磁気力が永久磁石に作用することになる。また、 y 軸周りのモーメントを磁石に作用させるためにはコイル1, 3とコイル5, 7

に大きさが同じで向きの反対の電流を流せばよいことになる ($J_1 = J_3 = J_{\text{pitch}}, J_5 = J_7 = -J_{\text{pitch}}$)。また同様にコイル2, 4, 6, 8に同じ大きさの電流を流せば ($J_2 = J_4 = J_6 = J_8 = J_{\text{side}}$)、電流の強さ J_{side} に比例した y 軸方向の磁気力が永久磁石に作用することになる。さらに、コイル2, 4とコイル6, 8に大きさが同じで向きの反対の電流を流せば ($J_2 = J_4 = J_{\text{yaw}}, J_6 = J_8 = -J_{\text{yaw}}$)、 z 軸周りのモーメントを磁石に作用させることになる。

x 軸方向の磁気力は、コイル0と9の空心コイルによって作り出される。0, 9番のコイルには向きが反対で同じ大きさの電流を流すと ($J_0 = J_{\text{drag}}, J_9 = -J_{\text{drag}}$)、 x 軸上で $x=0$ の点には磁場の強さの x 方向成分が x 軸に沿った磁気勾配が発生し、その大きさは以下の式ようになる。

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} = -\frac{4J_{\text{drag}} \cdot a^2 \cdot L_x \cdot \{5a^2 + 3L_x^2\} \cdot N_x}{\pi \cdot \{a^2 + L_x^2\}^2 \sqrt{(2a^2 + L_x^2)^3}} \quad (7)$$

ここで $2a$ は正方形コイルの一辺の長さを表わし、 L_x はコイル0.9までの $x=0$ からの距離を表している。

その結果以下のような磁気力が磁石に作用する。

$$F_x = M \cdot \frac{\partial H_x}{\partial x} \quad (8)$$

すなわち、円柱形状の永久磁石をこの磁力支持天秤装置内に置くと x, y, z 軸方向の力と y, z 軸周りのモーメントを任意の大きさに磁石に作用させることができることを示している。しかし、この方法では、円柱形状磁石の軸周りのモーメント、すなわち、 x 軸周りのモーメントを発生させることはできない。磁力支持天秤装置で模型の横揺れモーメントを制御する機構は他の磁気力、磁気モーメントを発生させるものとは異なり、模型軸に直角方向の磁化された磁石が必要となる。参考文献13)には円柱形状の磁石にさらに円柱中心軸に直角な方向の小型の永久磁石を付着させて、横揺れモーメントを発生させる方法が提案されている。本研究ではこの方法を基に以下のような考察を施した。

図5-4のような小型の磁石を配置し、コイル2, 4に反対向きに同じ大きさの電流を流すと ($J_2 = J_f, J_4 = -J_f$)、図中に示されているような磁場内

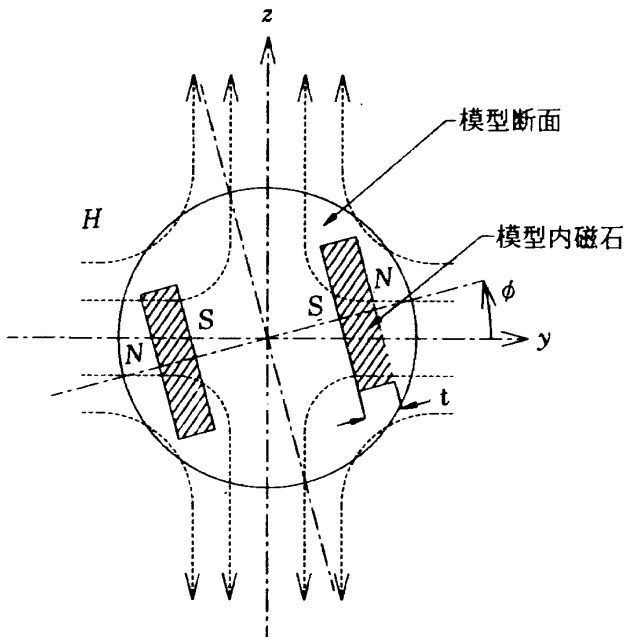


図5-4 横揺れモーメント発生用磁石配置図

に一对の磁石が置かれていることになり、この一对の磁石には J の大きさに比例した x 軸周りの同じ方向のモーメントが働く。その大きさは以下の式で表される。横揺れモーメント用磁石の断面積を A_s と表すと、

$$M_{xf} = 2A_s \cdot m \cdot t \cdot H_{yf} \cdot \sin \phi_f \quad (9)$$

円柱形状磁石の後部にも同じ様な一对の磁石を配置して、コイル6, 8に大きさが同じで向きが反対の電流を流す ($J_6 = J_r$, $J_8 = -J_r$)、この一对の磁石にも x 軸周りのモーメントが作用することになる。

$$M_{xr} = 2A_s \cdot m \cdot t \cdot H_{yr} \cdot \sin \phi_r \quad (10)$$

結局、

$$\phi_r = \phi_f + \pi/2 \quad (11)$$

となるように前後の磁石を組み合わせると、模型内部に置かれた円柱形状磁石には前後の一对づつある磁石により作用する x 軸周りのモーメントは

$$M_x = 2A_s m t \sqrt{(H_{yf}^2 + H_{yr}^2)} \cdot \sin(\phi_f + \tan^{-1}(H_{yr}/H_{yf})) \quad (12)$$

となる。よって、 J_f , J_r を制御することにより、全体の x 軸周りのモーメントを制御することができることを意味している。さらに、この電流によって形成される磁場は xz 面に関して対称であり、 y 軸方向の磁気力と z 軸周りのモーメントは発生しない。よって、コイル2, 4, 6, 8で制御してい

る y 軸方向の磁気力と z 軸周りのモーメントには影響を与えずに、模型に横揺れモーメントを作用させることができることを意味している。この制御法に関しては未だ確認試験を行っていない。

6. 電源容量の決定

前節の磁気回路の決定に続き、磁力支持天秤装置の必要な強さの磁場の形成が可能な電源が必要になる。電源の容量決定では、支持すべき模型に加わる重力、空気力を磁気力で相殺できるだけの磁場を形成できる必要から推定する。本試験装置では図5-1で示したようなロケット形状の模型を気流中で支持することを目標として電源容量を推定した。前節の(4), (5), (7)式より、必要な $N \cdot J$ は

$$N_z (J_1 + J_3 + J_5 + J_7) \geq F_z \cdot 2l/m$$

$$N_y (J_2 + J_4 + J_6 + J_8) \geq F_y \cdot 2l/m$$

$$N_z (J_1 + J_3 - J_5 - J_7) \geq M_y \cdot 4l/m/L$$

$$N_y (J_2 + J_4 - J_6 - J_8) \geq M_z \cdot 4l/m/L$$

$$N_x J_0 \geq \frac{F_x}{M} \cdot \frac{\pi a^3}{4L_x} \cdot \frac{\{1 + (L_x/a)^2\}^2}{5 + 3(L_x/a)^2} \cdot \sqrt{\{2 + (L_x/a)^2\}^3} \quad (13)$$

そこで、コイル1と3を直列につなぎ、このペアのコイルに ($J_{\text{lift}} + J_{\text{pitch}}$) の電流を流し、コイル5と7を直列につなぎ、このペアのコイルに ($J_{\text{lift}} - J_{\text{pitch}}$) の電流を流すと、

$$J_1 = J_3 = J_{\text{lift}} + J_{\text{pitch}}$$

$$J_5 = J_7 = J_{\text{lift}} - J_{\text{pitch}} \quad (14)$$

同様に、コイル2と4を直列につなぎ、このペアのコイルに ($J_{\text{side}} + J_{\text{yaw}}$) の電流を流し、コイル6と8を直列につなぎ、このペアのコイルに ($J_{\text{side}} - J_{\text{yaw}}$) の電流を流すと、

$$J_2 = J_4 = J_{\text{side}} + J_{\text{yaw}}$$

$$J_6 = J_8 = J_{\text{side}} - J_{\text{yaw}} \quad (15)$$

となる。また、コイル0と9を磁場を作る向きが反対になるように二つのコイルを直列につないでいるので、 J_{drag} なる電流は

$$J_0 = -J_9 = J_{\text{drag}} \quad (16)$$

となる。(4)式は

$$F_z = m \cdot (N_z/l) \cdot 2J_{\text{lift}}$$

$$M_y = m \cdot L \cdot (N_z/l) \cdot J_{\text{pitch}} \quad (17)$$

となる。(5)式は

$$\begin{aligned} F_y &= m \cdot (N_y/l) \cdot 2J_{\text{side}} \\ M_z &= m \cdot L \cdot (N_y/l) \cdot J_{\text{yaw}} \end{aligned} \quad (18)$$

となる。また、

$$F_x = -m \cdot L \cdot \frac{4L_x \cdot a^2 \{5a^2 + 3L_x^2\} \cdot N_x \cdot J_{\text{drag}}}{\pi \cdot \{a^2 + L_x^2\}^2 \sqrt{(2a^2 + L_x^2)^3}} \quad (19)$$

よって、

$$N_z \cdot J_{\text{lift}} \geq F_z \cdot l / (2m)$$

$$N_z \cdot J_{\text{pitch}} \geq M_y \cdot l / (mL)$$

$$N_y \cdot J_{\text{side}} \geq F_y \cdot l / (2m)$$

$$N_y \cdot J_{\text{yaw}} \geq M_z \cdot l / (mL)$$

$$N_x \cdot J_{\text{drag}} \geq \frac{F_x \cdot \pi \cdot \{a^2 + L_x^2\}^2 \sqrt{(2a^2 + L_x^2)^3}}{m \cdot L \cdot 4L_x \cdot \{5a^2 + 3L_x^2\} a^2} \quad (20)$$

となり、どの場合にも、 $(N \cdot J)$ には下限値が存在していることがわかる。一方、 $(N \cdot J^2)$ には上限値が存在している。例えば、電源容量を一定にすると、コイル1, 3を駆動するのに必要な電源の最大電流容量は N_z に反比例する。電源の大きさは、コイルの素線径が r とすると、近似的に、一つのコイル当り、

$$W \approx N_z \cdot 4\sqrt{S} \cdot \frac{\eta}{\pi r^2} \cdot J_z \quad (21)$$

と表すことができる。一方、自己インダクタンスは1, 3のペアコイルの場合で、

$$L_z = \mu_{\text{air}} N_z^2 \cdot S/l \quad (22)$$

ので、自己誘導による逆起超電力は

$$V = -\mu_{\text{air}} N_z^2 \cdot S/l \cdot dJ/dt \quad (23)$$

となる。さらに、これと同じだけの相互誘導にともなう逆起電力がペアコイルの各々に加わることになる。よって、電流を小さく抑えるには N_z を大きくすれば良いことになるが、 N_z^2 に比例してコイルの自己インダクタンスが大きくなり、コイルを駆動するのに要する電圧が大きくなり、結果的に電源の容量が大きなものになる可能性がある。磁力支持の制御が一定時間間隔 Δt で制御を繰り返している場合は、少なくとも Δt の間に電源の電流出力能力一杯の変化が可能な出力電圧を有した電源の選定が求められるであろう。この場合 dJ/dt は J に比例するといえる。よって、

$$V \geq (\mu_{\text{air}} N_z^2 \cdot S/l \cdot 2J/\Delta t) \times 2 \quad (24)$$

と表わされる。 N と J の許容範囲を評価する場合は F , W , V の設計上の上限値を与えることで評価できる。すなわち、1, 3のペアコイルに流す電流

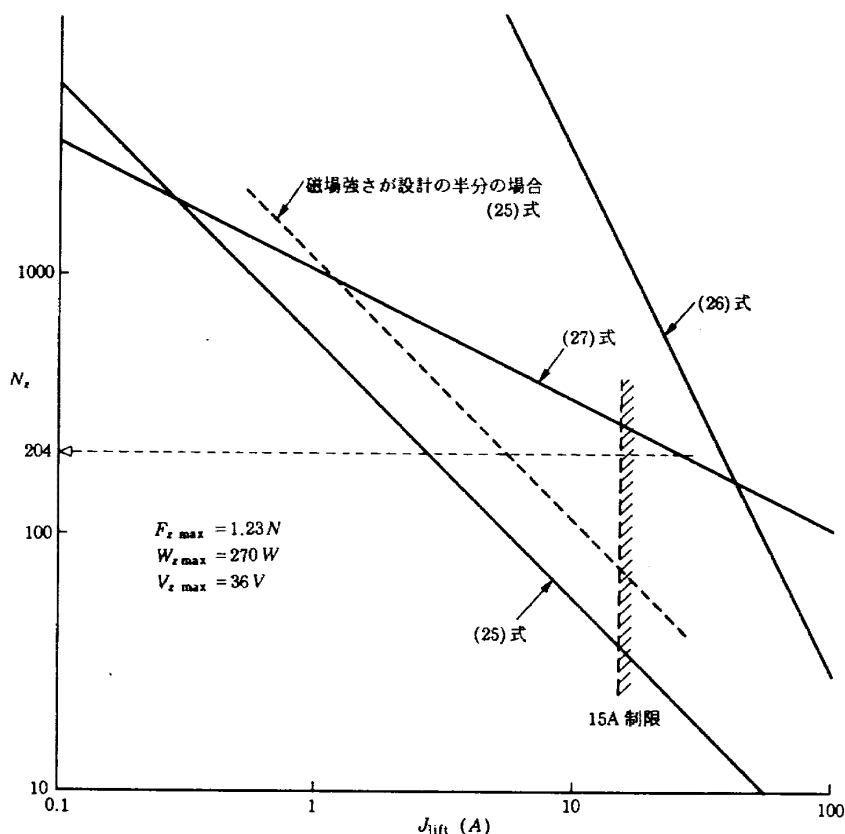


図6-1 電源容量決定図

表1 航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m 磁力支持天秤装置コイル系

コイル番号	銅素線直径 (mm)	巻数	直流抵抗 (Ω)	自己インダクタンス (mH)	コイル間磁場強度(T)		
					計算 $\times 10^{-4}$	測定 $\times 10^{-4}$	測定値/計算値
0	2	270	0.947	11.0	18 ^{注2}	18	1.0
1+3 ^{注1}	2	204×2	0.535	2.0	40	24	0.6
2+4	2	102×2	0.224	1.5	20	10	0.5
5+7	2	204×2	0.537	2.0	40	24	0.6
6+8	2	102×2	0.221	1.5	20	10	0.5
9	2	270	0.947	11.0	18 ^{注2}	18	1.0

(20°Cで)

注1) +印は直列結合であることを示す。

注2) 空芯コイル0,9では、コイル中心の測定とした。また、コイル形状は、83×83の正方形としている。

と巻数の関係を必要とする揚力の場合に限定して調べると、

$$N_z \cdot J_{\text{lift}} \geq F_{z \text{ max}} \cdot \frac{l}{2m} \quad (25)$$

$$N_z \cdot J_{\text{lift}}^2 \leq W_{z \text{ max}} \cdot \frac{\pi r^2}{4\eta\sqrt{S}} \quad (26)$$

$$N_z^2 \cdot J_{\text{lift}} \leq V_{z \text{ max}} \cdot \frac{ldt}{4\mu_{\text{air}} S} \quad (27)$$

となり、図6-1に示されるような(N_z , J_{lift})の領域が与えられた設計条件を満たす部分になる。すなわち、(N_z , J_{lift})はある組合せの範囲でのみこれらの条件を満たすことがわかる。他のコイルの電源容量、巻数の決定は同様にして評価でき、表1の様な組合せが選ばれた。

7. 模型位置姿勢測定センサーの決定

磁力支持天秤装置の制御は基本的には図5-1のように、何等かの測定装置を使って、模型の位置と姿勢を測定し、もし、模型が所定の位置、姿勢からずれていれば直ちに模型周りの磁場を制御して、模型に磁気力を作用させ、再び所定の位置、姿勢に模型を戻すように制御する。模型に磁気力を作用させるのは模型がどの位置でどのような姿勢をとっているか測定してから行われるので、模型が測定された時と模型に磁気力を作用させる時では時間遅れが存在している。この時間遅れが大き過ぎると模型の位置姿勢制御は困難になる。ま

た、測定には必ず誤差が含まれるが、この誤差が大き過ぎると適切な制御ができなくなる。このため、模型の位置と姿勢の測定では測定の精度と速度が重要となる。

文献3)の中に紹介されているセンサーの例から判断すると、測定位置精度は $\pm 40\mu\text{m}$ 以内、角度精度は $\pm 0.1^\circ$ 以内ならば他の制御系、コイル系が適切に設計されていれば磁力支持は可能であると考えられる。また、センサーの測定速度では、デジタル式の制御を採用しているNASA Langley研究所の場合、約4msec毎に制御を繰り返している¹⁴⁾。また、次節で述べる簡単なシミュレーションでは10msec迄ならば磁力支持できるという結果を得た。実際に稼働している上記例の磁力支持ではレーザー光線を使ったかなり大がかりな測定装置となっている。このため高価なものと推定された。そこで、本試験装置ではレーザー光源は採用せず、調光されたハロゲンランプによる光を使うことにした。光を模型に当て、レンズにより模型の像をCCDセンサーが配置されているスクリーン上に結ばせて、模型の位置、姿勢を測定する方法を独自に開発した。簡単な校正試験の結果、位置に関してはy方向の位置を除き $\pm 40\mu\text{m}$ の精度内に入り、姿勢に関しては θ は $\pm 0.1^\circ$ の精度があることが判明した。

全ての量に関しては必要な精度には達していないが、先ずこのセンサーを用いて磁力支持を試み

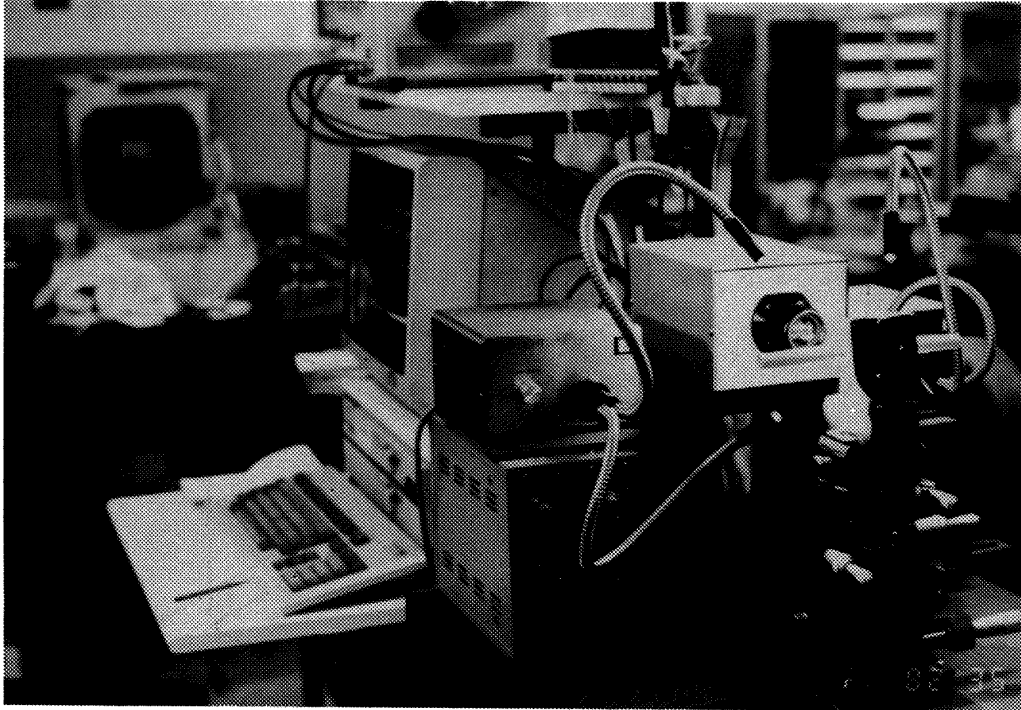


図7-1 模型位置姿勢認識装置

ることとした。図7-1は本磁力支持装置に用いた1次元 CCD センサーを使った模型位置姿勢認識装置である¹⁵⁾。

8. 制御系の設計

本磁力支持天秤装置の制御法は基本的にはアナログ制御の方法を演算操作のみをデジタル化したものとした。この理由は、アナログ制御法には様々な経験則がすでに存在していて、制御知識に乏しい本研究者が利用できる手法であった。また、文献14)には制御のブロック図が紹介されていて参考にできるという利点があった。制御系はPID制御と位相進み要素を組み合わせたものを用い、デジタル信号として取り込んだ模型の位置、姿勢はサンプリングをアナログ系の中に取り入れる形で図8-1の様にした。位置および姿勢の各自由度はそれぞれ独立に制御する方法を試みた。もちろん、磁場は前節で取り扱った様な単純な形での制御はされていないものと考えなくてはならないが、主要な部分については正しいことは前節の考察から判明している。また、この磁場の制御による模型位置姿勢制御を図8-2の様なモデル化を行い計算機でシミュレーション試験を行った¹⁶⁾。その結

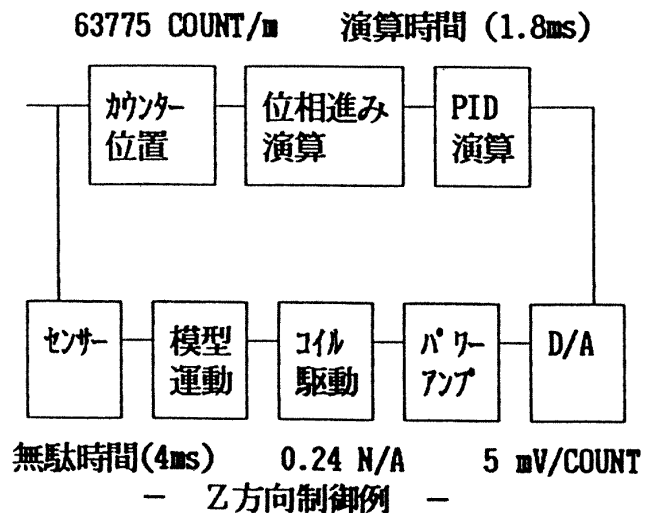


図8-1 制御流れブロック図

果、各制御要素を独立に調整し、その後それらを単純にまとめても基本的には制御が可能であることがわかった。図8-3はその時の試験結果である。但し、このシミュレーションでは抗力用コイルとしては0番のコイルだけを使用している。これは初期の設計では9番コイルを除いていたためである。

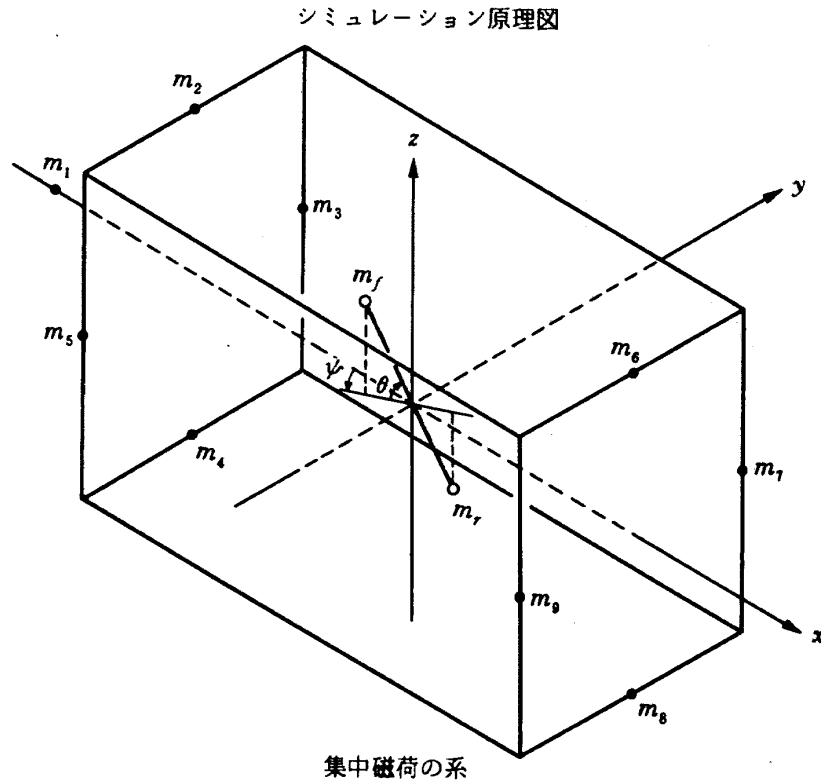


図8-2 計算機シミュレーション用モデル

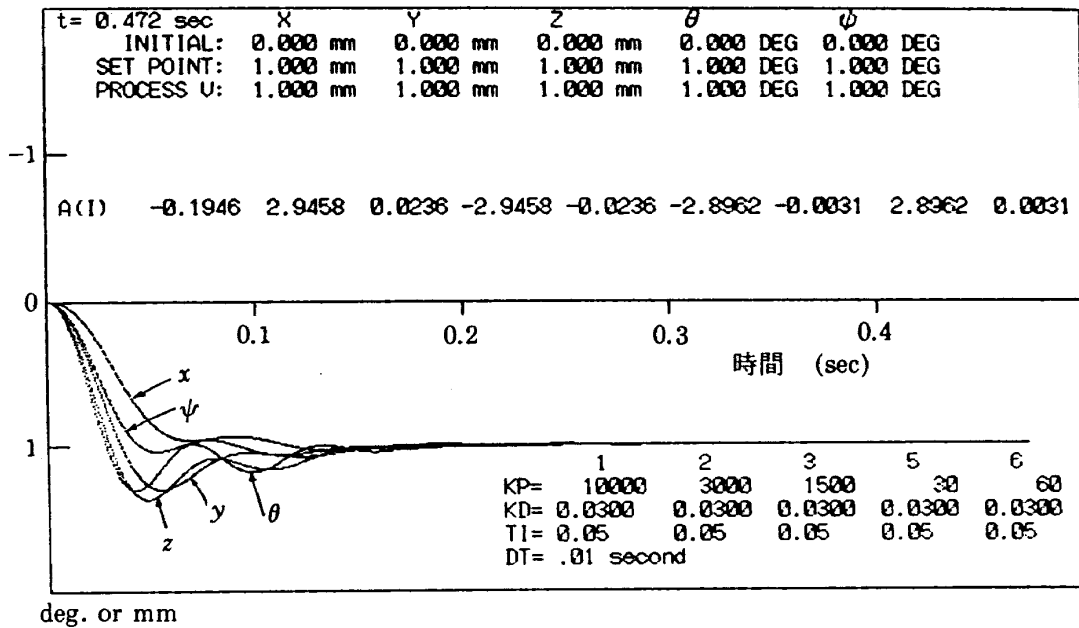


図8-3 シミュレーション結果

9. 磁力支持装置の運転結果

以上のような考察を下に、最初に縦方向の運動に関する3軸制御で実際の静止気流中で円柱模型の磁力支持を試み、その位置と姿勢を測定した結果が図9-1である。また、支持しているときの写真が図9-2である。横方向の運動に関しては全く制御を行わず、横方向のコイル2, 4, 6, 8に適切な電流を流し、模型が磁気力の反発により測定部

中心に安定的に位置するようにしてある。また、図9-3は円柱模型の制御で位相進み量を変化させて、 z, θ, x の定常振動を始めさせたり、止めたりしている例である。このように、模型の動的試験には磁力支持は有効であることが判る。図9-4は質量約125grのロケット模型を支持したときの写真である。迎え角は約-4度とっている。この場合はY方向、偏揺れ角も制御されていて、横揺れ角制御を除く5軸制御が行われているときのもの

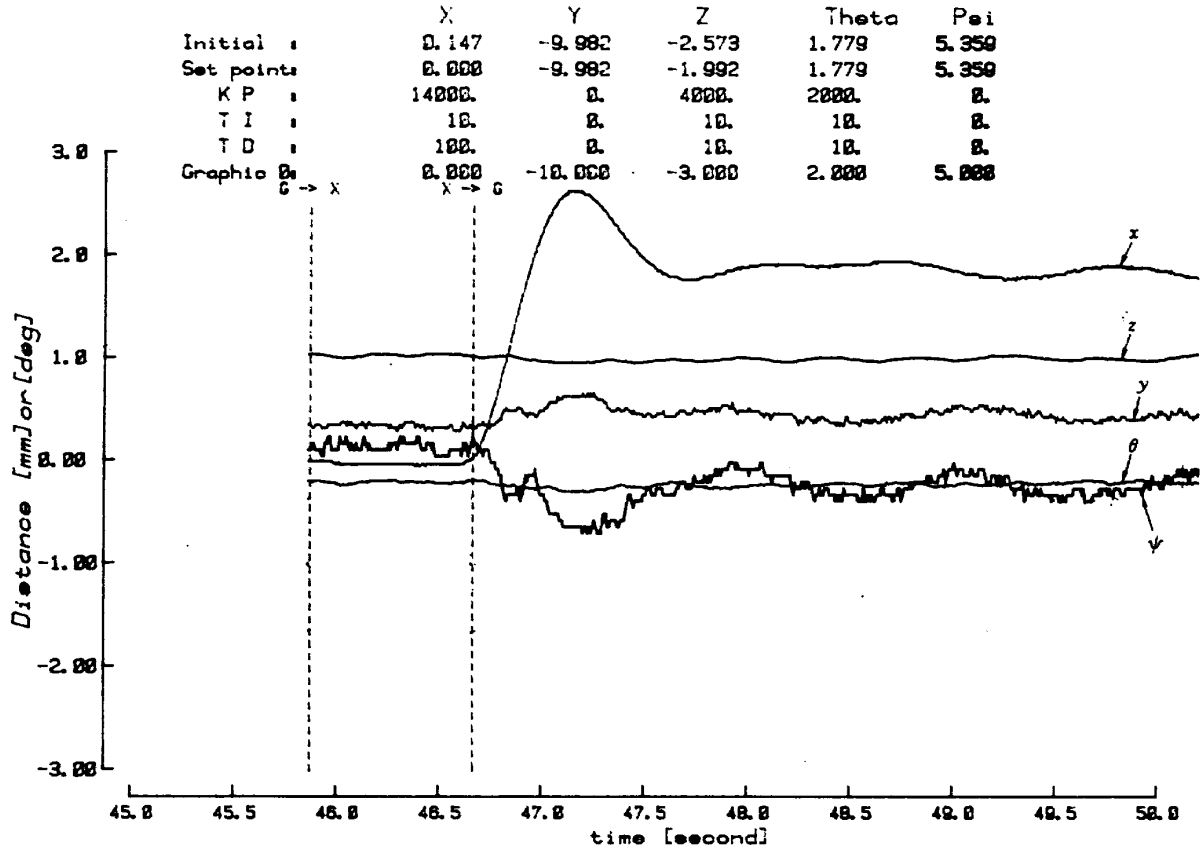


図9-1(その1) 3軸制御による模型支持結果
(静止気流中, x方向ステップ応答)

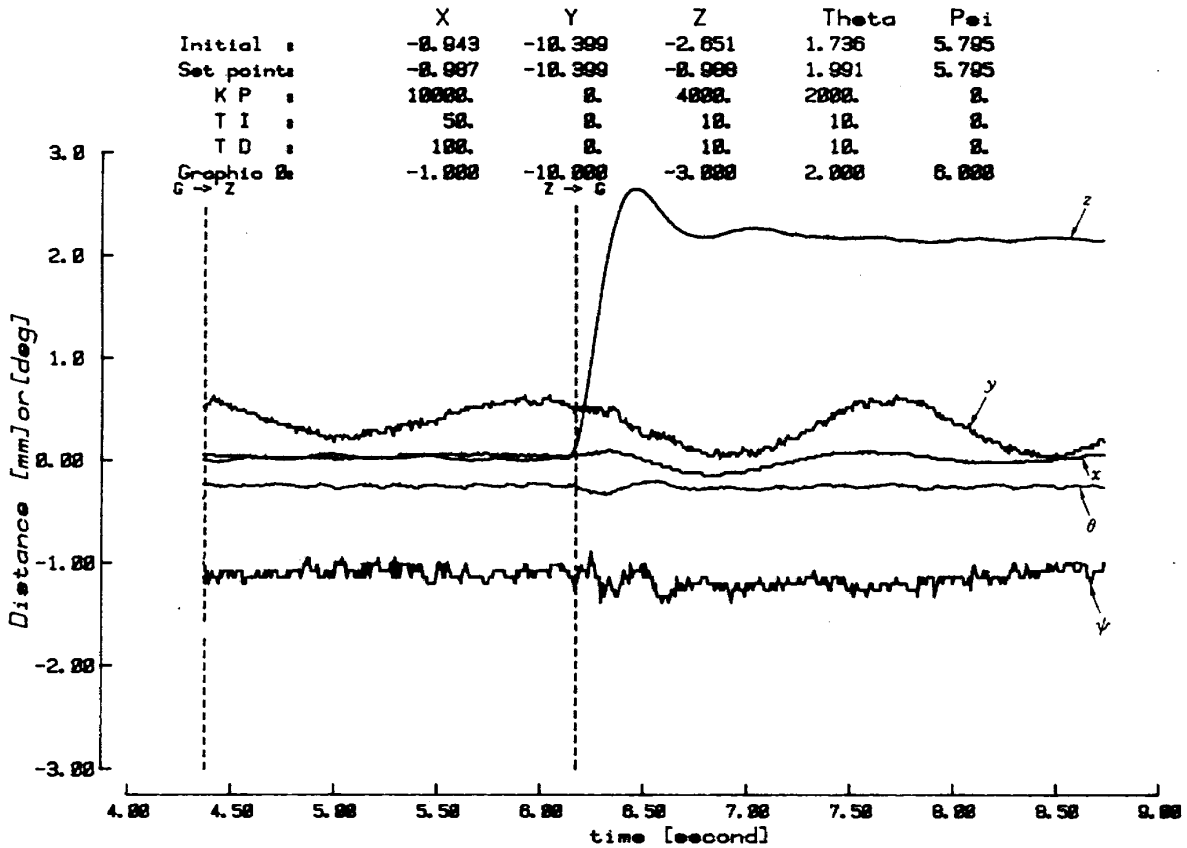


図9-1(その2) 3軸制御による模型支持結果
(静止気流中, z方向ステップ応答)

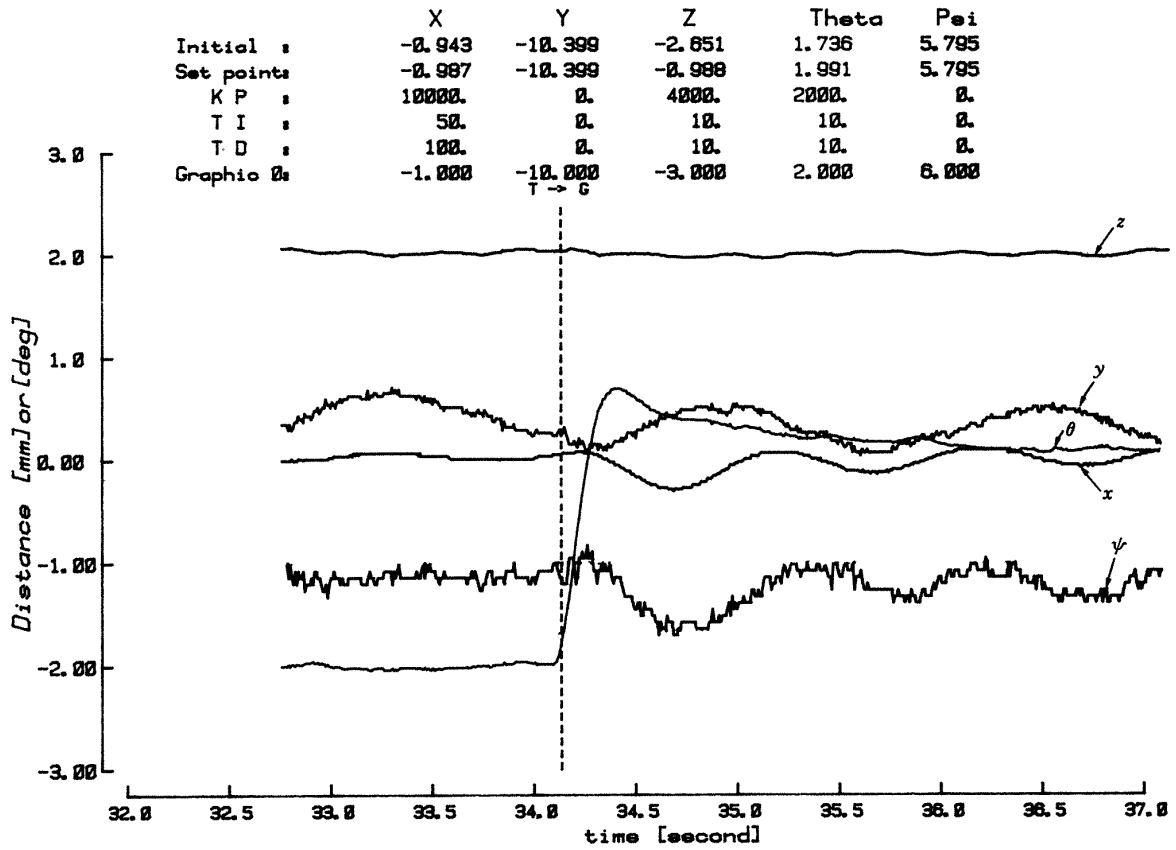


図9-1(その3) 3軸制御による模型支持結果
(静止気流中, θ 方向ステップ応答)



図9-2 3軸制御支持中の円柱模型

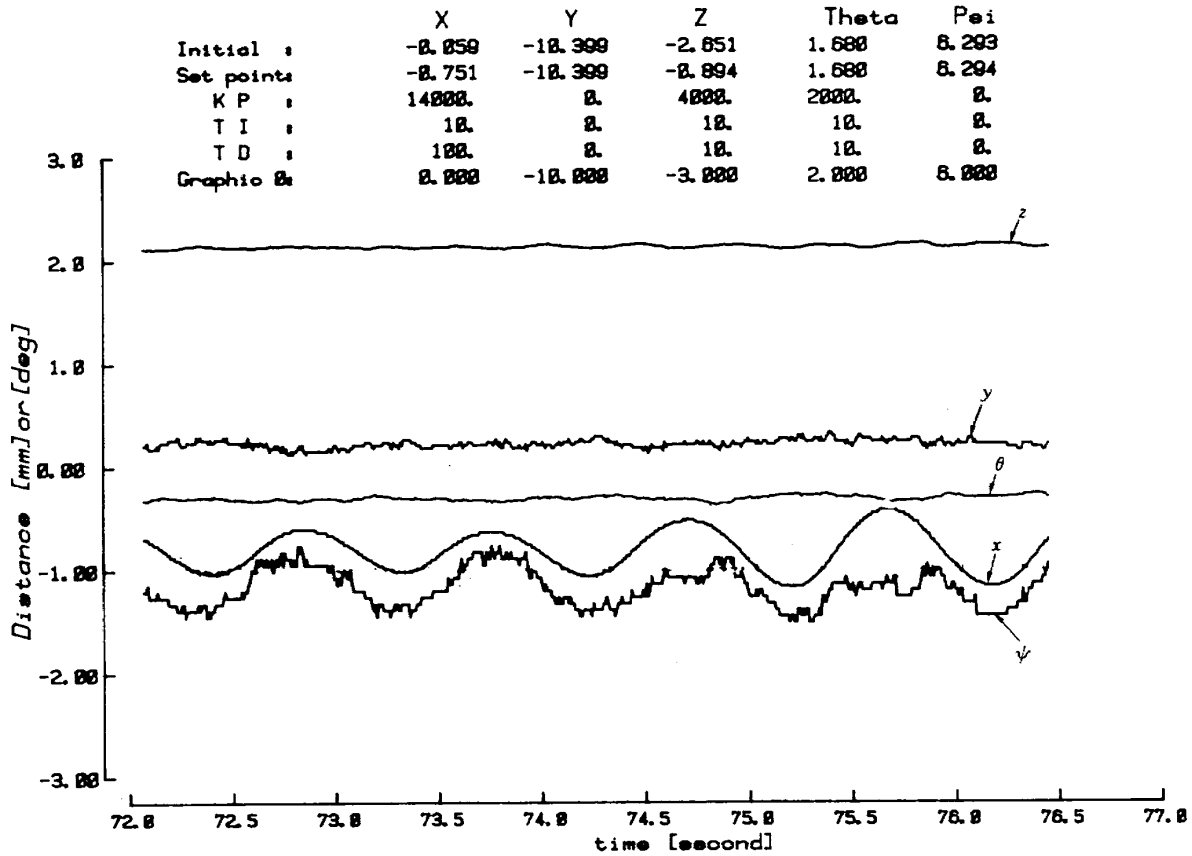


図9-3(その1) 3軸制御による模型の定常振動
(静止気流中, x方向の定常振動)

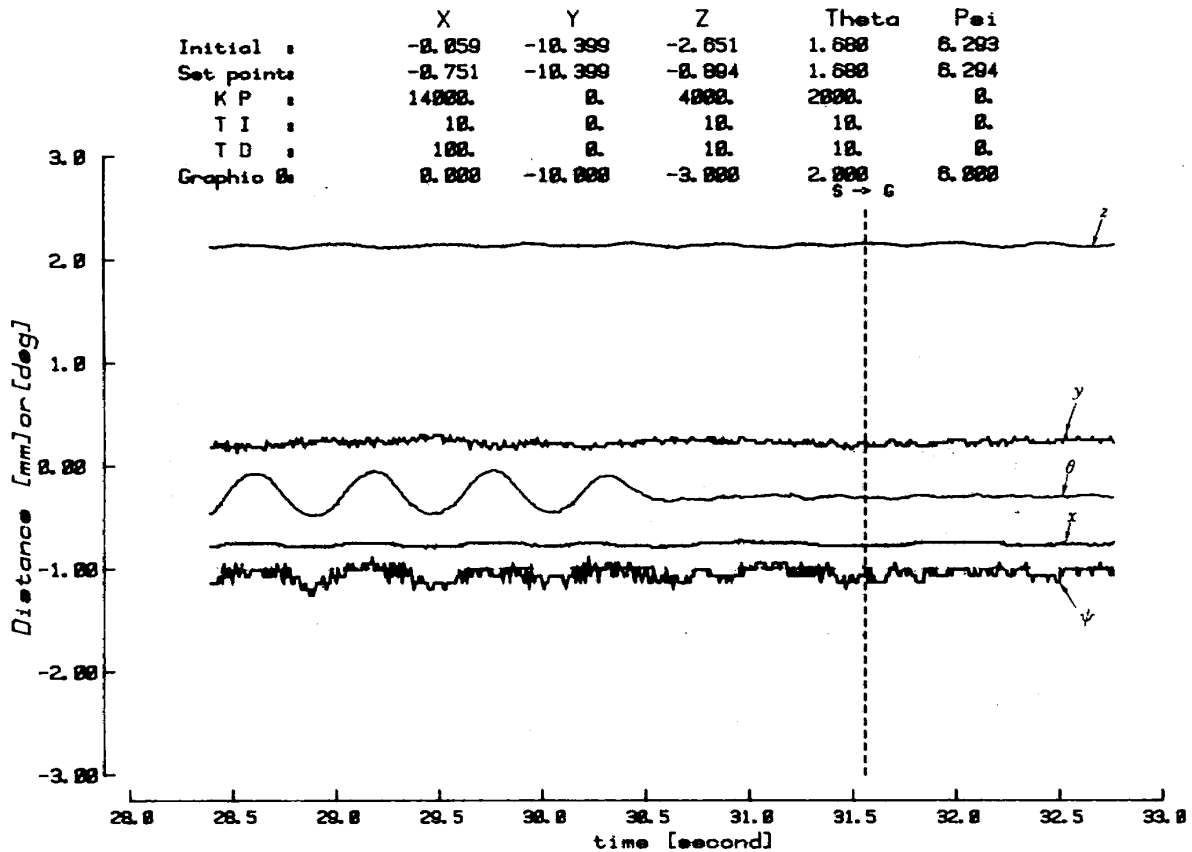


図9-3(その2) 3軸制御による模型の定常振動
(静止気流中, z方向の定常振動)

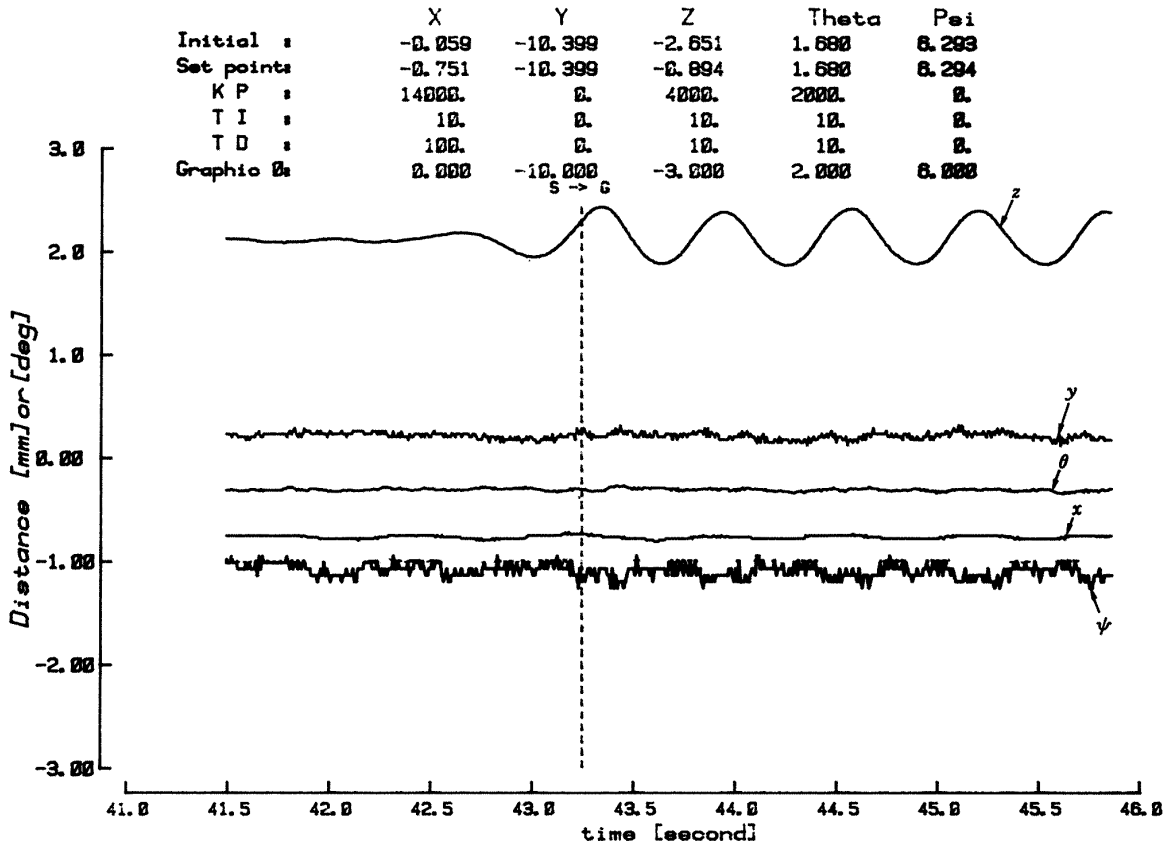


図9-3(その3) 3軸制御による模型の定常振動
(静止気流中, θ 方向の定常振動)

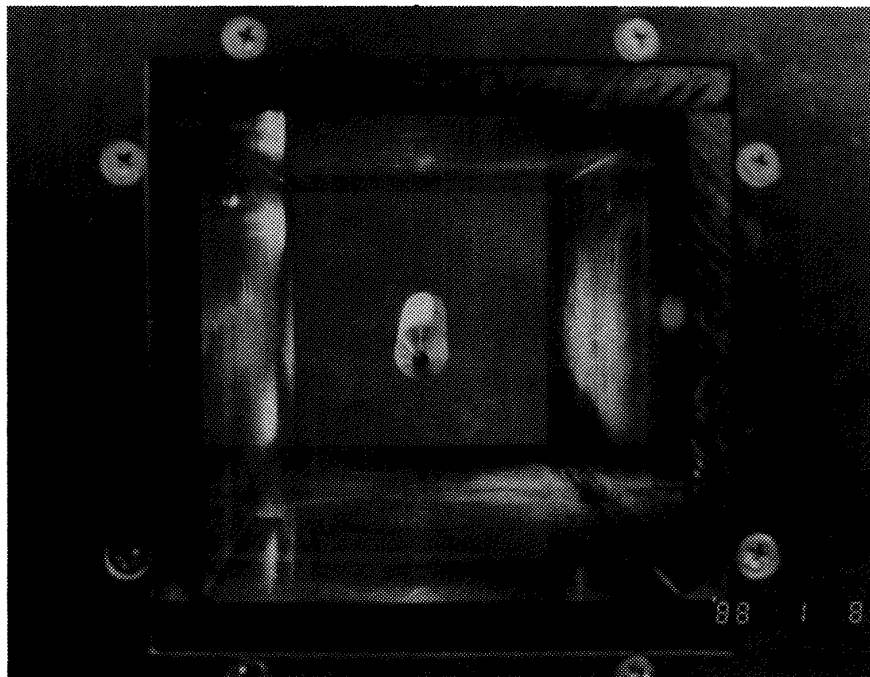


図9-4 5軸制御によるロケット模型支持(静止気流中)

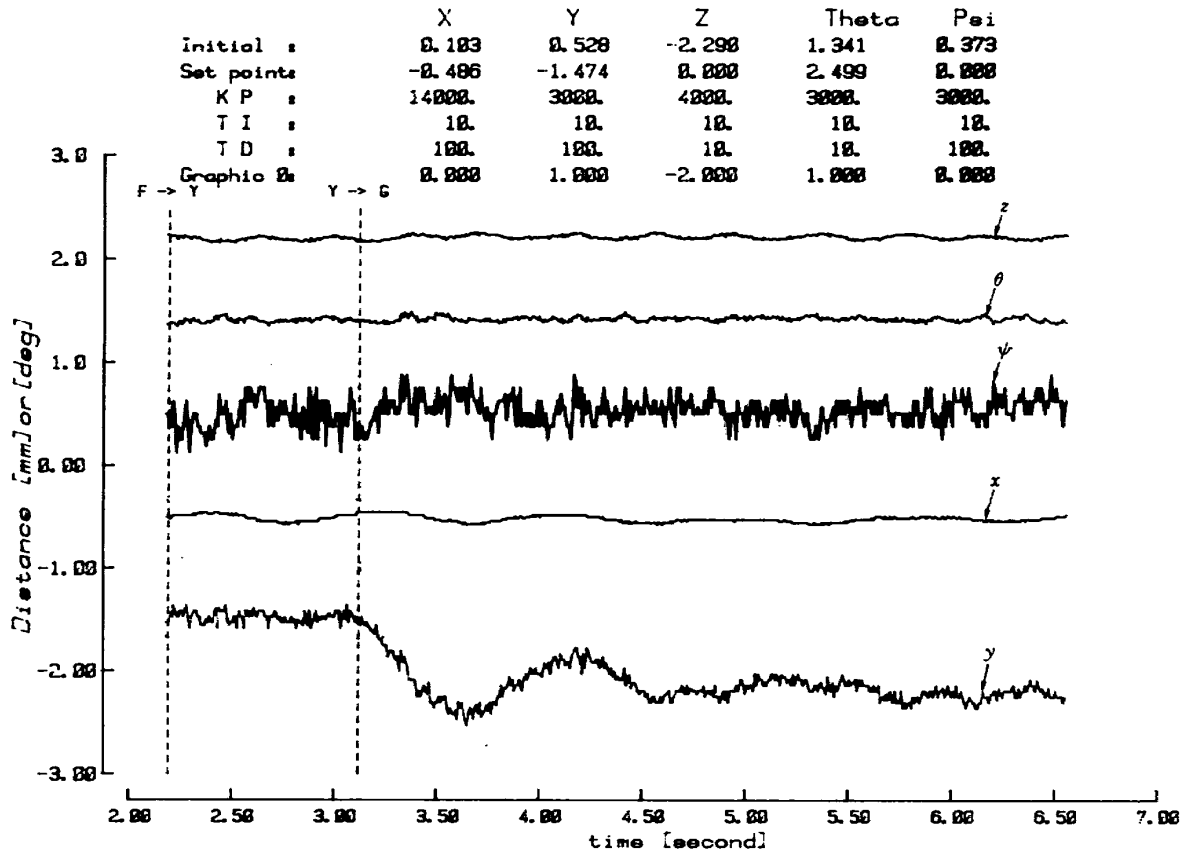


図9-5(その1) 5軸制御による模型支持結果
(静止気流中, y方向ステップ応答)

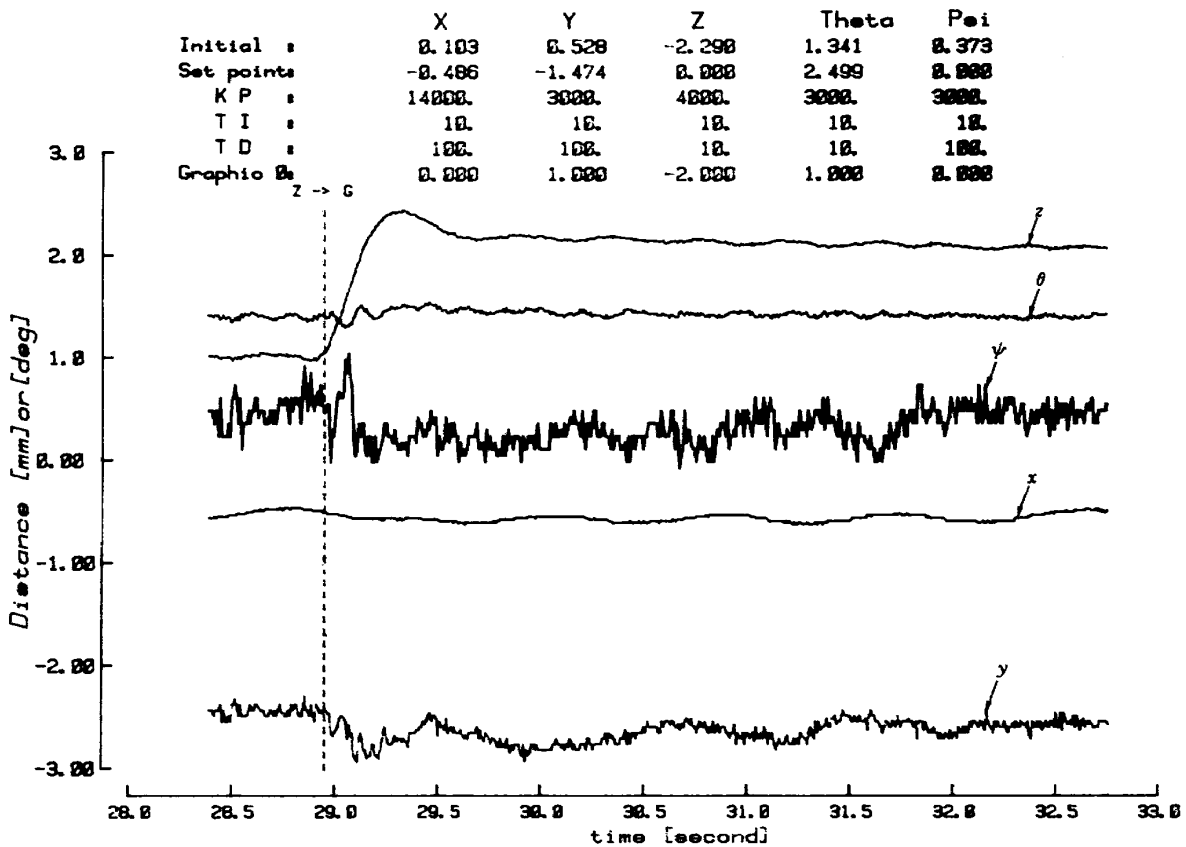


図9-5(その2) 5軸制御による模型支持結果
(静止気流中, z方向ステップ応答)

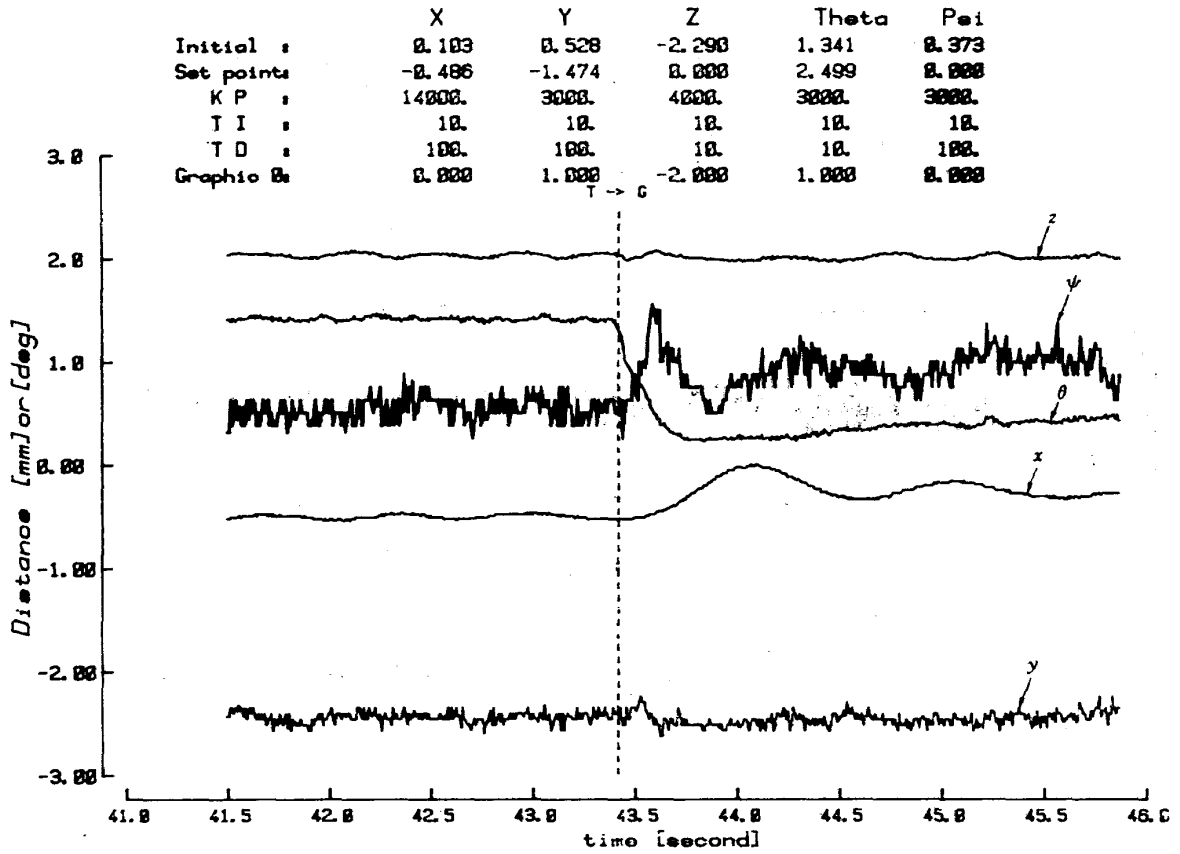


図9-5(その3) 5軸制御による模型支持結果
(静止気流中, θ 方向ステップ応答)

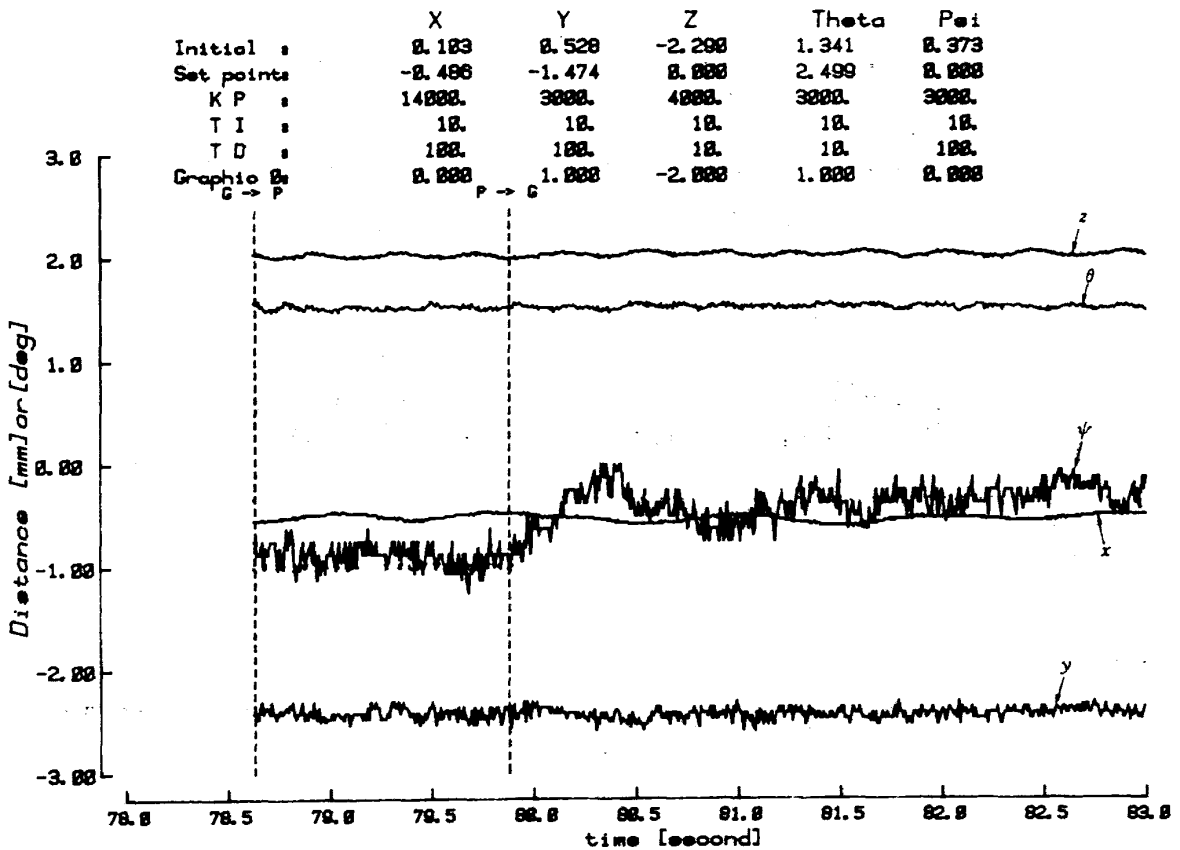


図9-5(その4) 5軸制御による模型支持結果
(静止気流中, ψ 方向ステップ応答)

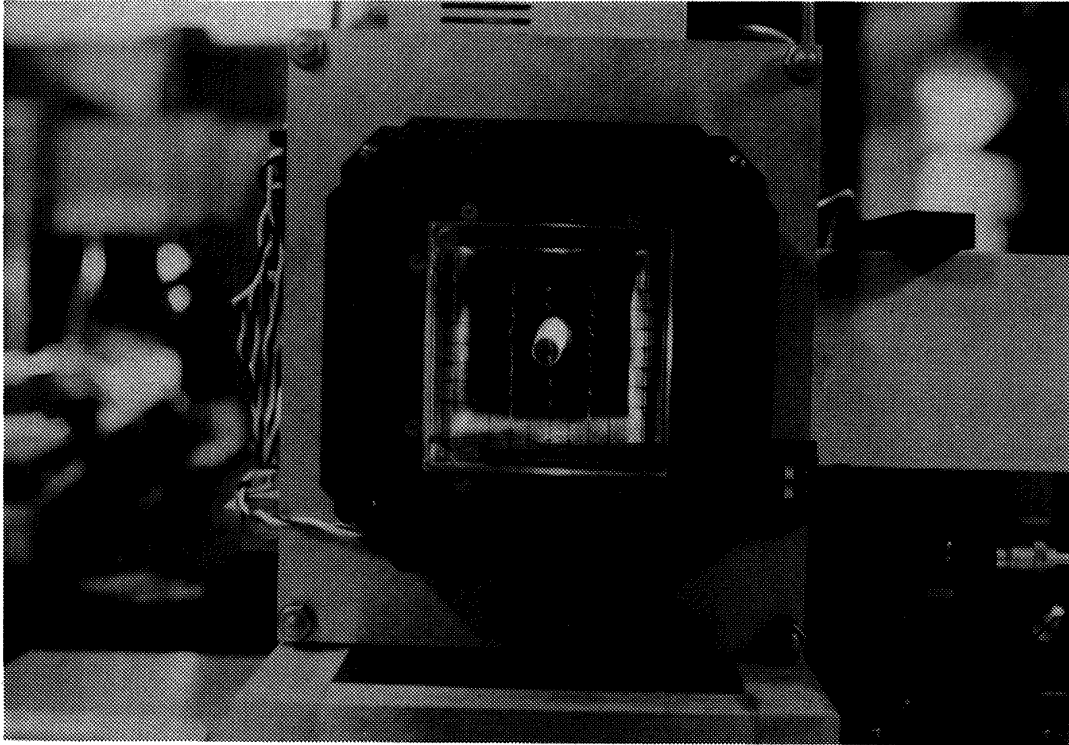


図9-6 気流中で支持されているロケット模型
(風速約10m/s)

である。迎角をステップ状に変化させたときの応答を示したものが図9-5である。PID制御における制御定数は模型を空中に支持した状態で少しずつ変えていき、最も適切なステップ応答になるところを決めている。図9-6は速度約10m/sの気流中に上記のロケット模型が支持されているときのものである。

10. むすび

以上、磁力支持天秤装置の歴史、目的、意義について述べ、航空宇宙技術研究所0.1m×0.1m磁力支持装置の設計法、若干の評価結果を述べた。その結果、ここで述べた設計法は磁力支持装置の設計に使用することができ、性能推定結果に関しては信頼できる結果を得ることが期待される。今後は模型位置姿勢測定装置の測定精度をYとψ方向に関してさらに上げることによって、より実用的な磁力支持装置に改善し、横揺れ角の制御に関しても実用化するようにさらに研究を続ける予定である。

参 考 文 献

- 1) Dietz, W. and Altstatt : "Experimental Investigation of Support Interference on an Ogive-Cylinder at High Incidence", AIAA Paper 78-165, Jan. 1978
- 2) Ericsson, L. E. and Reding, J. P. : "Review of Support Interference in Dynamic Tests", AIAA Journal, Vol.21, No.12, Dec. 1983
- 3) 高島一明 : 「風洞模型の磁力支持について」, 航技研技術資料 NAL N-19, Jan. 1975, pp. 41-60
- 4) Chrisinger, J. E., Tilton, E. L., etc : "Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnel Application", Journal of Royal Aeronautical Society, Vol.67, Nov. 1963
- 5) Boyden, R. P., Bricther, C. P. and Tchong, P. : "Status of Wind Tunnel Magnetic Suspension Research", SAE Technical Paper 851898, Oct. 1985

- 6) Kilgore, R. A. : "Advanced Experimental Techniques for Transonic Testing", Lecture 7, "Magnetic Suspension and Balance Systems", Lecture Series presented at the National Defense Academy, Oct. 1987
- 7) Britcher, C. P. : "Progress Toward Magnetic Suspension and Balance Systems for Large Wind Tunnels", Journal of Aircraft Vol.22, No.4, April, 1985, pp.264-269
- 8) Martindale, W. R., Butler, R. W., and Starr, R. F. : "Study on Needs for a Magnetic Suspension System Operating with a Transonic Wind Tunnel", NASA CR-3900, May. 1985
- 9) Johnson, W. G. Jr., and Dress, D. A. : "The 13-Inch Magnetic Suspension and Balance System Wind Tunnel", NASA TM-4090, 1989
- 10) Tuttle, M. H., Kilgore, R. A., Boyden, R. P. : "Magnetic Suspension and Balance Systems", A Selected, Annotated Bibliography, NASA TM-84661, 1983
- 11) A. V. Kuzin : "MSBS in the U. S. S. R.", MSBS Newsletter, No.6, Feb. 1990, pp.3-4
- 12) Stephen, T., Covert, E. E., etc : "Recent Developements in a Wind Tunnel Magnetic Balance", AIAA Paper 72-164, 1972
- 13) Goodyer, M. J. : "The Generation of Rolling Moments With the Superconducting Model", NASA CR-172520, 1985
- 14) Britcher, C. P. : "Digital Control of Wind Tunnel Magnetic Suspension and Balance Systems", ICIASF'87 RECORD pp.334-341, 1987
- 15) 神田 宏, 澤田秀夫, 末永尚史 : 「1次元C CD イメージセンサーを用いた模型位置姿勢測定装置の特性」, 第26回飛行機シンポジウム前刷り集, NOV. 1988
- 16) 澤田秀夫 : 「航技研0.1m×0.1m 磁力支持装置」, 第24回飛行機シンポジウム前刷り集, NOV. 1986

航空宇宙技術研究所資料623号

平成2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
