

UDC 531. 76 :  
533. 6. 071. 3

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-210

小型加速度計による風洞模型姿勢角の測定

原 亘 利

1971 年 12 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

|        |  |          |                                  |
|--------|--|----------|----------------------------------|
| TM-170 | JR エンジン燃焼器に起きた振動燃焼                             | 1970年2月  | 鈴木邦男, 石井浅五郎<br>山中国雅              |
| TM-171 | 缶形燃焼器(低圧低温系)試験設備による航空計器の氷結(着氷)試験               | 1970年3月  | 鈴木邦男, 相波哲朗<br>本間幸吉, 服部宣夫         |
| TM-172 | 自動追尾型風向風速測定器                                   | 1970年3月  | 川橋長勝, 中谷輝臣                       |
| TM-173 | FA-200改機の動安定微係数                                | 1970年3月  | 遠藤浩, 林良生<br>海老沼幸成, 中谷輝臣          |
| TM-174 | 遷音速風洞動安定測定装置の構造と作動                             | 1970年4月  | 小橋安次郎, 河野長正<br>西武徳, 宮沢政文         |
| TM-175 | NAL-16・31D型ロケットの研究試作                           | 1970年5月  | 五代富文, 近藤洋史<br>中井暎一, 田畑浄治         |
| TM-176 | 非対称自由流線の一計算法                                   | 1970年5月  | 高橋 侖                             |
| TM-177 | 小型固体ロケットモータの振動燃焼実験 —パルス法による中周波振動燃焼の研究—         | 1970年5月  | 五代富文, 伊藤克弥<br>西村久男, 湯沢克宜<br>柴藤羊二 |
| TM-178 | 大型低速風洞動安定微係数測定装置                               | 1970年5月  | 広岡貫一, 遠藤浩<br>戸田亘洋, 岡部祐二郎         |
| TM-179 | 風洞天秤の試作  | 1970年5月  | 金成正好, 北出大三                       |
| TM-180 | ジェットエンジン燃焼器出口ガス流の乱れの測定(II) —レーザのドップラ効果を利用する方法— | 1970年5月  | 相波哲朗                             |
| TM-181 | 航空機の乗り心地について                                   | 1970年6月  | 幸尾治朗                             |
| TM-182 | 排気系障害板の模型実験                                    | 1970年9月  | 田辺義一                             |
| TM-183 | ロケット模型の大型低速風洞試験                                | 1970年9月  | 近藤洋史, 高橋 宏<br>桑野尚明               |
| TM-184 | 金属線へ衝突する液滴の現象                                  | 1970年9月  | 田丸 卓, 乙幡安雄                       |
| TM-185 | 推進エンジン用空気取入口の予備実験                              | 1970年9月  | 近藤 博, 石賀保正                       |
| TM-186 | NAL-25・31型ロケットの試作と飛しょう試験                       | 1970年11月 | 宇宙研究グループ                         |
| TM-187 | 推力300kg シンバル液体ロケットエンジンの揺動特性(I)                 | 1970年11月 | 檜崎哲二, 中野富雄<br>橋本亮平, 竹花真一郎        |
| TM-188 | 自由飛行模型 FFM-10の空力微係数におよぼす機体弾性変形の影響について          | 1970年11月 | 河崎俊夫, 河本 巖<br>戸田 勸               |
| TM-189 | 燃料蒸発管に関する研究(III) —管内の燃料・空気二相流への熱伝達—            | 1970年12月 | 田丸 卓, 乙幡安雄<br>鈴木邦男               |
| TM-191 | 大型電子計算機プログラム・ライブラリ                             | 1970年12月 | 戸川隼人, 磯部俊夫                       |
| TM-192 | 極超音速風洞M9ノズル較正試験                                | 1971年1月  | 長洲秀夫, 橋本 登<br>穂積弘一, 松崎貴至         |
| TM-194 | 航空機のSTOL性に関する一考察                               | 1971年1月  | 田辺義一                             |
| TM-195 | 曲面壁上の噴流に対する噴出孔形状, 配列の効果について                    | 1971年1月  | 西村英明, 白井 弘<br>井上重雄, 三村富嗣雄        |
| TM-196 | NAL-16H型ロケットの研究試作                              | 1971年1月  | 宇宙研究グループ                         |
| TM-197 | 二次元煙風洞について                                     | 1971年1月  | 高橋 宏, 戸田亘洋<br>白井正孝,              |
| TM-198 | 等高線を描かせるプログラム                                  | 1971年2月  | 磯部俊夫                             |
| TM-199 | 航空機用ヒーターの燃焼器の開発実験                              | 1971年2月  | 堀内正司, 本間幸吉<br>矢萩恵一               |
| TM-202 | 単発STOL実験機に関する研究 —テレメータ実験局の電界強度測定—              | 1971年6月  | 幸尾治朗, 小野孝次<br>矢沢健司, 塚野雄吉         |

# 小型加速度計による風洞模型姿勢角の測定\*

原 亘 利\*\*

## 概 要

静的風洞試験時における模型姿勢角の測定方法として、小型加速度計を供試模型内に組み込み、直接姿勢角を測定する方式を試みた。また、その実用性を調べるための実験を航空宇宙技術研究所・吹出式超音速風洞で行ない、所期の性能が得られることを確認した。

本方式の原理は、地球重力場内に置かれた加速度計の出力が、その鉛直面内の傾き角度の正弦に比例して変化することを利用し、逆に加速度計出力より姿勢角そのものを求めようとするものであり、そのためには加速度計の静特性をあらかじめ知る必要がある。

実験に使用した加速度計は、小型化が割合に容易な片持梁式のもので、予備実験では一般に市販されている定格値2.0gのものを、本実験では0.5gのものを特に製作させて使用した。

模型組み込み前に行なった加速度計単体の静特性試験の結果、使用角度範囲( $\theta = -20^\circ \sim 0^\circ \sim +20^\circ$ )の非直線性は、二種類とも0.2%以内で、また10分間のドリフト値を含めた角度分解能は、2.0g加速度計の場合5'以内、0.5g加速度計の場合1.5'以内であった。

本方式を用いた実風洞での試験はAGARD-B標準模型内に上記加速度計を組み込んで行ない、通風試験中の模型姿勢角について、スティングの傾き角を測定し、さらに天秤、スティング等のたわみ補正を行なう従来の方式と本方式とで同時に測定して比較したが、すべての実験で0.1°以内の偏差に入っていることを確めた。また、この実験により、加速度計を用いる内装角度計方式が十分に実用になり、さらにその取り扱いの簡便さの点で従来の方式より優れていることが判った。

## 1. ま え が き

風洞試験により、供試模型の静的な空力特性を調べ

る場合、一般的には設定された風洞気流内に模型を入れ、気流方向と模型との相対的な角度を変化させながら、模型に作用する空気力を天秤で測定し、単位角度当りの揚力傾斜( $C_{L\alpha}$ )、モーメント傾斜( $C_{m\alpha}$ )などの空力係数の値を求めて供試模型の空力特性を評価している。この場合、通常の風洞では気流方向と風洞軸は平行であるので、気流に対する模型の迎角( $\alpha$ )および偏揺れ角( $\phi$ )は風洞測定部の模型姿勢角を測定することによって求められる。

上記のように風洞試験では、模型姿勢角を入力量として、その角度に対する空気力変化を測定するのであるが、模型姿勢角も同時に測定値の一つとして求められるため、実験精度の点からも正確な角度測定法が要求されている。

一般の高速風洞では供試模型の支持方法として、スティング・ストラット方式が多く用いられており、当研究所の遷音速風洞、吹出式超音速風洞などにおいてもこの方式を採用している。この場合、模型姿勢角を測定する方法として、スティングの根元または模型支持装置駆動部にポテンショメータを取り付け、これをスティングの傾き角や回転角に連動させて角度信号を検出している。しかしこの方式では模型に働く空気力によって生じる天秤やスティング部分の撓み角度分が誤差として入るため、天秤出力から求めた空力荷重によって推定的な角度補正を行なう必要がある。また、風洞実験では、各種試験の要求により幾種類かの天秤、スティングの中から適当なものを選び、組み合わせるため、すべての場合に対する撓み補正量を求めておかなければならず甚だ繁雑となる。また模型支持系の各接続部分に生じる機械的なたわみ補正のような線形的取り扱いが出来ないため完全な角度補正を行なうことは難しい。

これらの問題点を取り除くため、角度計を模型内に組み込み、姿勢角を直接測定する方法が今までに研究されてきたがまだ実用までに到っていない。<sup>1)</sup>

通風中の風洞内では急激な圧力変化、温度変化など

\* 昭和46年10月2日受付

\*\* 空気力学第二部

を伴い、また模型が空気力によって絶えず励振されるため、内装角度計方式を実行する場合、多くの困難が予想される。我々はこれらの使用条件を考慮し、各種の角度変換器について調査を進めてきた。

現在考えられる角度変換器としては、振子型のものが最も簡単な方法であるが、この方法は可動部分があるため小型化するほど、摩擦によるヒステリシスの影響が大きくなる。今回試験した加速度計方式は、地球重力を利用する点で同じ系統のものと考えられるが、おもりの移動範囲が片持梁の撓み範囲内であるため、原理的に摩擦の影響が非常に小さく、容易に高分解能の特性が得られるものと思われる。

本方式の開発に先立ち、吹出式超音速風洞での使用状態を考え、使用角度範囲および静的角度精度の初期目標値を次のように定め、変換器の選択および計測法などについて検討した。

使用角度範囲： $0^{\circ} \sim \pm 20^{\circ}$ 以上

静的角度精度： $0.1^{\circ}$ 以内

## 2. 加速度計

### 2.1 加速度計による模型姿勢角測定法

加速度計は図1に示すような長方形断面の片持梁の一端に質量  $M$  (g) のおもりを取り付けた構造で、この場合、梁の厚み方向に加速度  $G$  が加わると、梁の根元には  $M \cdot l \cdot G$  (g-cm) の曲げモーメントが作用する。加速度計は、この曲げ荷重によって生じる梁固定端の歪量を抵抗線歪ゲージで検出して、電圧信号として取り

出すものである。この場合、梁固定端の歪量  $\epsilon$  は次式のように表わすことが出来る。

$$\epsilon = \frac{M \cdot l \cdot G}{E \cdot Z} \quad (1)$$

ここで

$\epsilon$  : 梁固定端の歪量

$B$  : 梁の横幅 (cm)

$t$  : 梁の厚み (cm)

$l$  : 梁固定端からおもりの重心までの距離 (cm)

$M$  : おもりの質量 (kg)

$E$  : 梁材のヤング率 (kg/cm $\cdot$ sec $^2$ )

$Z$  : 梁の断面係数 ( $Z = \frac{1}{6} B t^2$ ) (cm $^3$ )

$I$  : 梁の断面二次モーメント ( $I = \frac{1}{12} B t^3$ ) (cm $^4$ )

$k$  : 梁のばね定数 ( $k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3}$ ) (kg/cm)

$G$  : 梁の厚み方向に加わる加速度

$g$  : 重力の加速度 (980cm/sec $^2$ )

とすると、この素子の固有振動数  $f_0$  は次式で表わされる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \text{ (Hz)} \quad (2)$$

加速度計素子は、抵抗線歪ゲージを梁の固定端附近の両面にそれぞれ2枚ずつ、合計4枚接着し、それぞれの歪ゲージを一辺とした、ブリッジ回路を構成し、梁の変形歪によるゲージの抵抗値変化を利用し、電圧信号として出力を得るものである。この場合、使用する歪ゲージは有限の大きさを持っており、梁の固定端

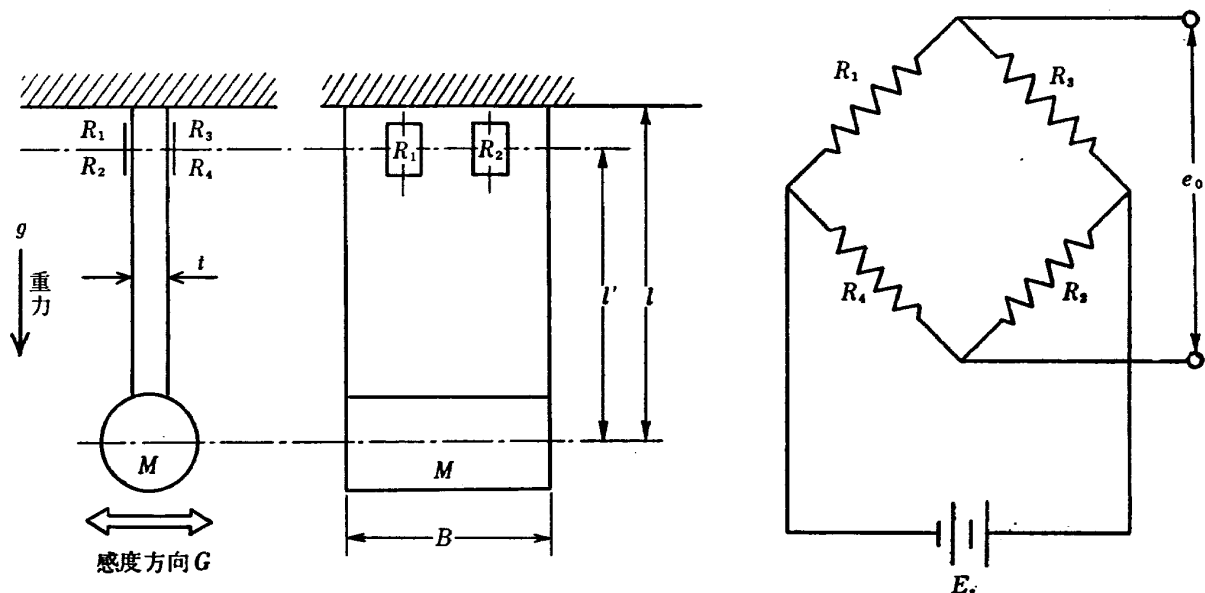


図1 加速度計概念図

位置にゲージ中心線を合わせることは、一般的に不可能の場合が多い。今ゲージ中心線位置が梁の自由端方向にずれている場合の、この位置での歪量を考え、その値を $\epsilon'$ とすると、(1)式の $l$ の値の代りに $l'$ を入れ、

$$\epsilon' = \frac{M \cdot l' \cdot G}{E \cdot Z}$$

と表わすことが出来る。ここで $l'$ はゲージ中心位置から梁自由端のおもり重心位置までの距離の値をとる。

また、この時のブリッジ出力端の電圧 $e_0(V)$ は

$$e_0 = \frac{M \cdot l' \cdot G}{E \cdot Z} \cdot K \cdot E_s \quad (V) \quad (3)$$

として得られる。

ここで

$e_0$ : 歪ゲージ・ブリッジの出力電圧 (V)

$K$ : 歪ゲージのゲージ率

$E_s$ : ブリッジ励起電圧 (V)

(3)式のように、加速度計出力は梁の厚み方向に加わる加速度 $G$ の大きさに比例する。いま、この加速度計のおもりを真下に、地球重力の方向に合わせ、この位置で出力電圧が0(V)になるように調整し、その後加速度計を鉛直面内で角度 $\theta(\text{rad})$ だけ傾斜させると、この時の出力電圧 $e_0$ は次式の通りとなる。

$$e_0 = \frac{M \cdot l' \cdot g \sin \theta}{E \cdot Z} \cdot K \cdot E_s \quad (V) \quad (4)$$

ここで $E, Z, l', g, K, E_s$ などは定数と考えてよいから次式のように一まとめにすることができ、

$$K_A = \frac{M \cdot l' \cdot g \cdot K \cdot E_s}{E \cdot Z} \quad (V) \quad (4')$$

(4)式は(4')式のように簡単な形で表わすことができる。

$$e_0 = K_A \cdot \sin \theta \quad (V) \quad (4')$$

逆に出力電圧から角度 $\theta(\text{rad})$ を求める場合は

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{e_0}{K_A} \right) \quad (\text{rad}) \quad (5)$$

として求められる。また、 $\theta$ の絶対値の小さな範囲では、 $\sin \theta \approx \theta$ とみなして、加速度計出力と角度との関係を直線と考えて $\theta$ の値を求めても大きな誤差とはならない。この場合の比例定数としては(4')式の $\theta=0$ における微分値をとり、

$$\left. \frac{de_0}{d\theta} \right|_{\theta=0} = K_A \quad (V/\text{rad}) \quad (6)$$

の値を使用すればよく、また $\theta$ を度単位で求める場合は、

$$\left. \frac{de_0}{d\theta} \right|_{\theta=0^\circ} = \frac{\pi}{180} K_A \quad (V/o)$$

の値を使用することにより、 $\theta$ の値が近似的に求めら

れる。また風洞のデータ処理の場合のように電子計算機が使用出来る時は、最初に $e_0$ より $\sin \theta$ の値を求め、その後 $\sin^{-1} \theta$ の計算を行なわせることにより簡単に正しい $\theta$ の値が求められる。

この加速度計を実際の模型内に組み込んで、角度計として使用する場合は、加速度計の感度方向が素子のたわみ方向のみであるから、感度方向を模型機体軸に合わせ、かつ模型機軸の移動面が鉛直面内にある必要がある。また水平面内の角度変化に対しては感度を持たないため、曲りスティングを使用する試験や、模型を水平に移動する場合には使用出来ない。

模型がその機軸の回りに $\phi^\circ$ だけバンクするような試験の場合は、図2のごとくもう一個の加速度計を模型内に組み込むことにより、バンク角 $\phi$ も同時に測定することが出来る。この場合の迎角( $\alpha$ )および偏揺れ角( $\phi$ )は $\theta$ および $\phi$ より次式により与えられる。<sup>1)</sup>

$$\alpha = \tan^{-1} (\tan \theta \cdot \cos \phi) \quad (7)$$

$$\phi = \sin^{-1} (\sin \theta \cdot \sin \alpha) \quad (8)$$

しかし、ここで注意しなければならないことは、加速度計が模型に固定された状態でバンク角をとると、加速度計素子のおもり位置が横向きとなり梁の横幅方向にも荷重が加わり、この状態で姿勢角 $\theta$ が変化すると、梁の厚み方向のたわみ変形と横幅方向の荷重が合成され、素子にねじれ応力が働く。この場合、歪ゲージ位置にもねじれ歪が加算され、出力特性にも若干影響することが考えられる。素子の剛性がある程度大きい場合は、このねじれ変形量は非常に小さく、また4枚の歪ゲージ出力のねじれ歪分が逆極性で加え合わされるため、ねじれの影響は現われない。しかし、おもりの位置が下向きでない状態は素子の強度的な面から好ましくないため、加速度計の取り付けにおいては、 $\theta=0^\circ$ でおもりの方向が下向きになるような方法を講じるべきであると思う。

実験に使用した加速度計は二種類で、それらの諸元は表1の通りである。加速度計素子はいづれもベリリウム銅合金( $E=1.4 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ )を梁材として使用し、定格値の歪量が $1,000\mu$ になるように設計している。

0.5g 加速度計の場合、高感度化のため、梁の長さ $l$ およびおもりの質量 $M$ が大きくなり、素子全体の強度がやや小さくなったので、過負荷時の破損を防ぐ方法として、おもり周囲の間隙を調節し、120%以上の負荷が素子に伝わらない構造とした。以上の理由により、0.5g 加速度計の場合、外形寸法が若干大きくなったが、 $22 \times 22 \times 35 \text{ (mm}^3\text{)}$ とまだ充分に小型であるため、模型組み込みに対する困難はないものと考えられる。

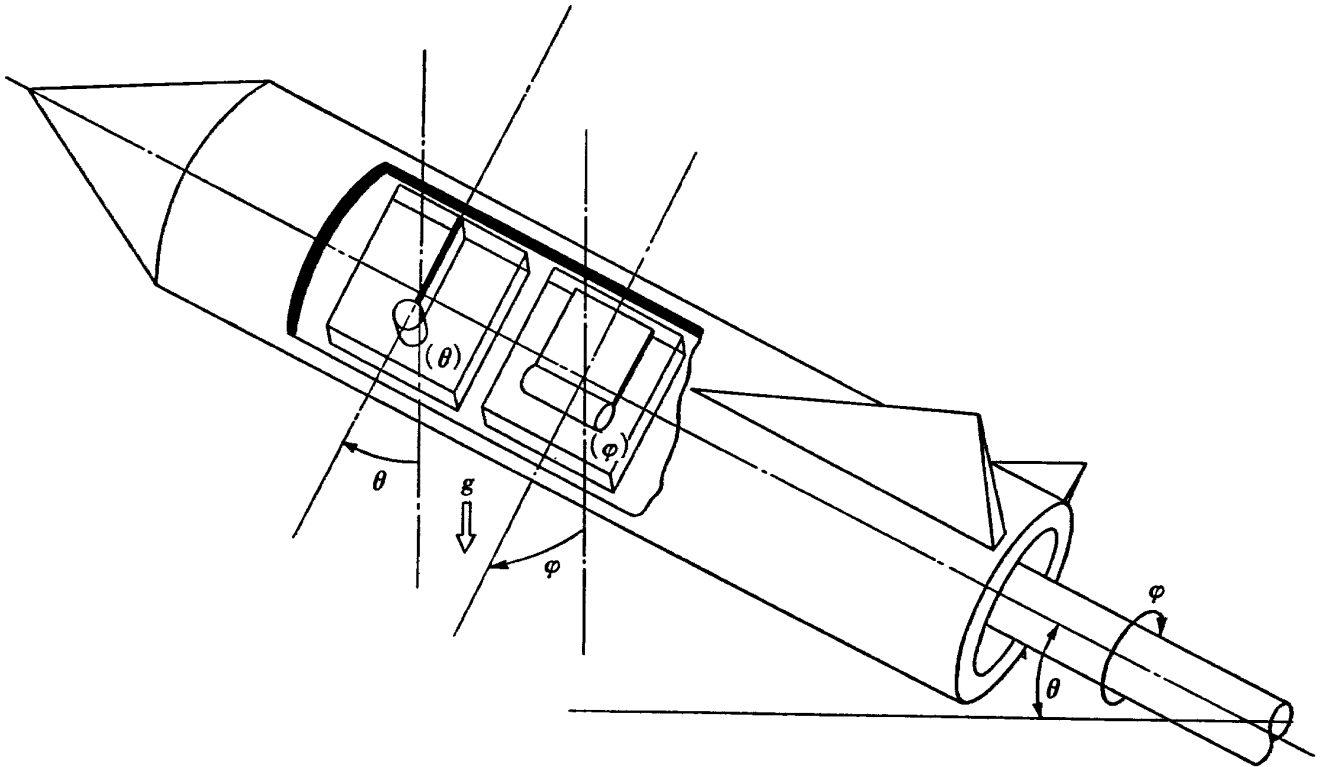


図 2 加速度計による内装角度計方式概念図 (θ) θ 測定用 (φ) φ 測定用

表 1 加速度計の諸元

|                     | 単 位    | BA-2G型<br>(市 販) | BA-05G型<br>(特 注) |
|---------------------|--------|-----------------|------------------|
| 外 形                 | mm     | 20×20×25.5      | 22×22×35         |
| 梁 厚 (t)             | mm     | 0.15            | 0.15             |
| 梁 長 (l)             | mm     | 11.3            | 16.5             |
| 梁 幅 (B)             | mm     | 8.5             | 8.5              |
| Mass 重量 (M)         | g      | 8.0             | 20.0             |
| 固有振動数               | Hz     | 45              | 17               |
| 感 度                 | mv/v·g | 0.43            | 2.0              |
| ダンピング<br>ファクター(20°) |        | 0.7             | 0.7              |

また、これら加速度計は完全密閉構造とし、中に制動用のシリコン油を充填して使用しているため、外界の温度変化、気圧変化などには有利に動作するものと考えられる。周囲温度20°Cにおけるダンピングファクターは両者とも0.7程度が得られている。

ここで、風洞実験時における模型振動に対して考えてみる。

通常の静的風洞試験では、模型姿勢角が静止している状態か、若しくは角速度が非常に小さく静特性に影

響しない範囲内の現象を扱うため、模型姿勢角測定の周波数応答はごく低域のみで充分である。しかし、加速度計を供試模型内に組み込んで高速気流中での模型姿勢角を測定しようとする場合、気流の乱れなどにより模型が絶えず励振されるため、加速度計出力にもかなりの振動成分が重畳し、測定精度に影響するものと予想する。この場合の振動成分は、実際の模型角度変動分と、質点移動による加速度変化分が加え合わされたものと考えられるが、当所遷・超音速風洞の場合のように供試模型がスティングにより後方から支持される時の振動方向は模型機軸に対して略直角方向と考えられるので、角度変化量はごく僅かなものと思う。しかし、質点移動による加速度変化量は振幅および周波数の関数として増す傾向にあり、また加速度計の三軸方向の感度比が完全に零でないため、加速度計の周波数応答がこの振動周波数に対して十分に低くないときは、角度信号のS/N比を低下させるものと考えられる。

このような場合、高域振動成分を除去して目的信号のみを得る方法として最も簡単な方法は、測定系の周波数応答を下げることによって行なうことが出来る。また本方式のように出来得る限り高感度の加速度計を使用したい時は、加速度計素子自体の制動係数を大きくして高域の減衰を得ることが衝激荷重に対しても有

利と考えるが、今回の実験では適正な遮断周波数を見出すなどの理由により、測定系に電氣的低域濾波器を用いて振動成分を除去することにした。

低域濾波器の遮断周波数を決める場合、それぞれの使用状況に合わせて行なわなければならないが、当所吹出式超音速風洞の場合、模型振動の下限が 15Hz 程度で、また測定目的とする模型角度変化が 2°/sec の連続変化で使用しており、この角度変化に対する信号の遅れを生じさせないため、とりあえず遮断周波数を 4 Hz (-3db) として使用することにした。

加速度計は、素子の微小な歪現象を利用して出力信号を検出するため、その信号レベルは非常に低く、このままのレベルで信号を取り扱うことは他の外乱などを受けやすく、測定精度上好ましくない。一般に低レベル信号の計測では、増幅器を用いて一度適当な電圧レベルまで高めた後、測定または A-D 変換などの必要な処理を行なっている。この場合、今回使用する加速度計のように、直流励起方式のブリッジ出力を測定する場合は、信号に直流成分を含むため、その増幅には直流から必要な周波数帯域まで一様に増幅出来る高性能な直流増幅器が必要となってくる。直流増幅器は原信号を忠実に増幅するものでなければならないが、本実験の場合のように直流レベルの測定を重要視するときは特にドリフト値の小さな増幅器が必要である。この実験で加速度計出力信号用に使用した増幅器は、現在吹出式超音速風洞で六分力計測用として使用しているものと同種のもので、その性能は表 2 の通りである。

表 2 直流増幅器の性能

|       |                                    |
|-------|------------------------------------|
| 入力抵抗  | 最小 10MΩ (750pf でシャント)              |
| 出力抵抗  | 0.2Ω DC                            |
| 周波数特性 | ±1% (DC~2KHz), 1db (20kHz まで)      |
| 出力電圧  | ±10VDC または 20KHz までの AC ピーク        |
| 利得    | 0, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 |
| ドリフト  | 温度一定 ±2.5μV R.T.I., 温度係数 ±1.0μV/°C |
| 直線性   | ±0.01%                             |
| 内部雑音  | 3.5μV r.m.s R.T.I. (0~250KHz)      |
| 同相除去比 | 130db (平衡入力, 利得1000)               |
| 電源    | 105~125VAC, 50~400Hz, 5W           |

2.2 静特性試験

静特性試験は加速度計を傾斜台の上に載せ、台を傾斜させることにより、重力加速度の感度方向成分が変化することを利用して行なった。傾斜台は入力量の基準となるものであるから、その傾き角度が正確に読み取れるものでなくてはならない。この試験では図 3 に示すように、クリノメータの回転部分に加速度計を固定して、任意の傾き角を得ている。この方法による角度設定精度は 30'' 以内である。

加速度計の出力信号を測定する場合、前述のように、微小信号のまま取り扱うことは、精度上好ましくないので、静特性試験の場合も風洞で使用するときと同じ直流増幅器 (1000倍) と低域濾波器を接続した状態で出力電圧を測定し、後で増幅器の倍率および加速度計励起電圧の値で除した値を加速度計の感度として表

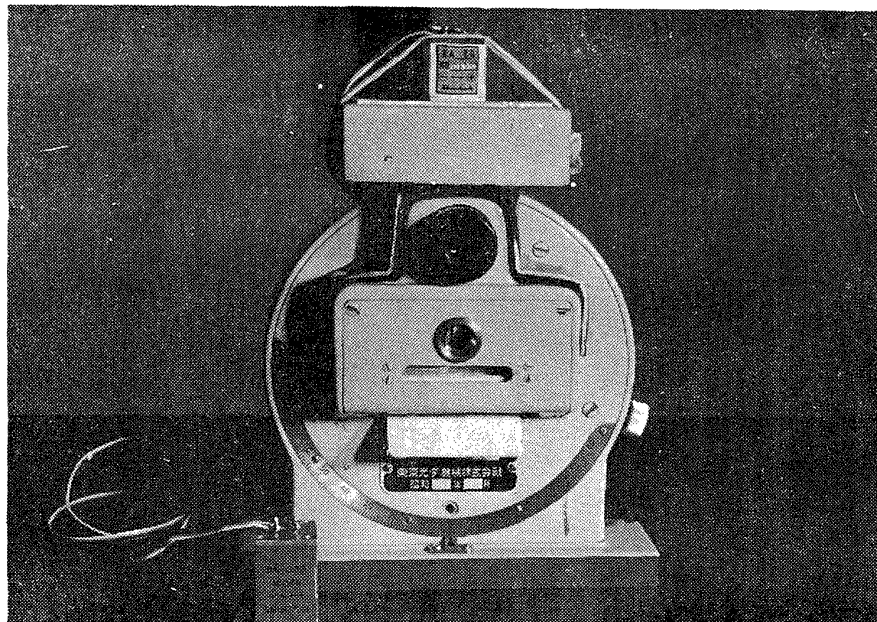


図 3 角度校正装置

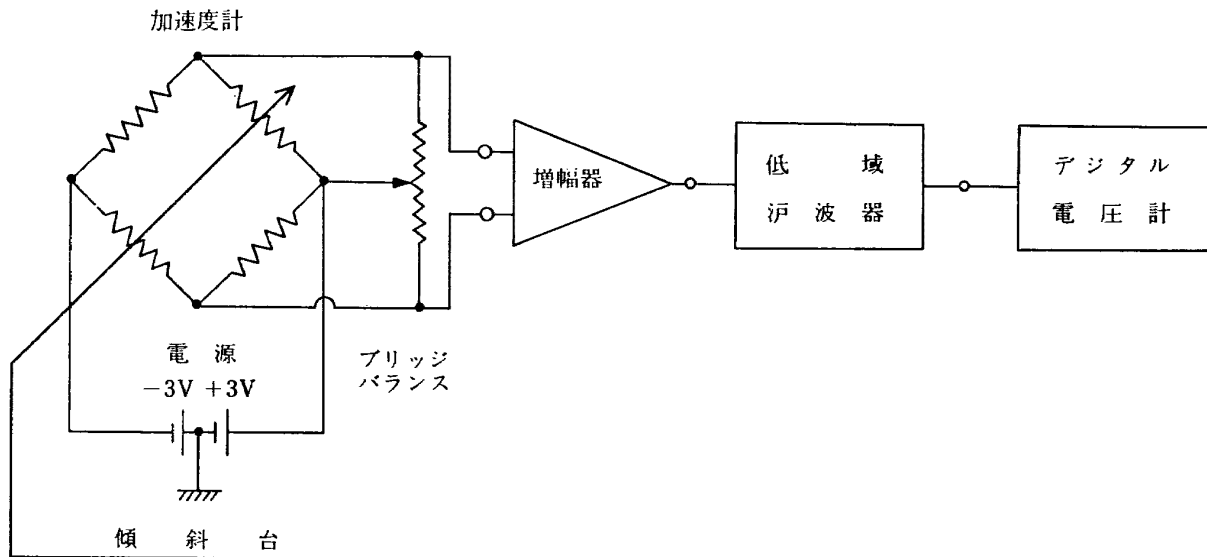


図4 角度較正ブロック図

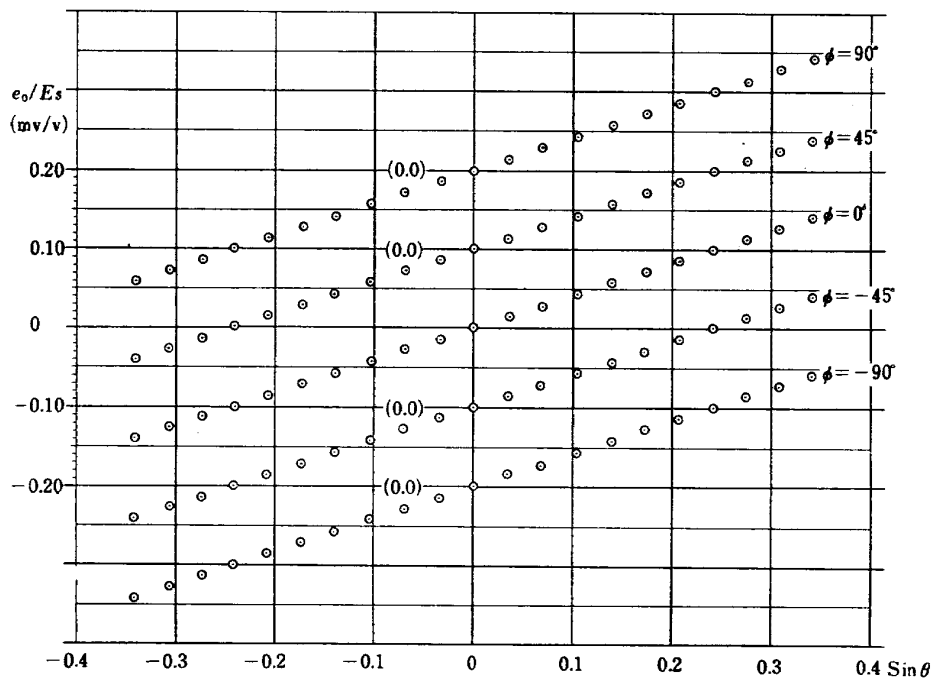


図5 2.0g型加速度計の出力特性

示している。測定系の構成は図4の通りである。また後述のドリフト試験の場合も本測定系と同じ構成で行ない、電圧計の代わりに自動平衡計器で記録したことを付記する。

### 2-2-1 2.0g 加速度計

図5は2.0g 加速度計の出力特性についての試験結果である。この場合バンク角の影響を見るため、バンク角 $\varphi$ をパラメータとして試験を行なったが、その影響はほとんど見られなかった。なお各測定点の間隔は $2^\circ$ 間隔で行なっているが、実験結果の表示は全て $\sin\theta$ の目盛を横軸として使用している。

図6に $\varphi=0^\circ$ の場合の角度範囲 $\theta=-20^\circ\sim+20^\circ$ における非直線性の様子を示す。ここで非直線性 $\varepsilon_1$ は次式により定義する。

$$\varepsilon_1 = \frac{e_o(\theta) - \{a_0 + a_1(\sin\theta)\}}{2a_1(\sin 20^\circ)} \times 100\%$$

ただし

$e_o(\theta)$ : 角度 $\theta^\circ$ における出力測定値 (V)

$a_0 + a_1(\sin\theta)$ :  $\theta = -20^\circ \sim +20^\circ$ の各点の測定値より最小二乗法で求めた近似直線上の角度 $\theta^\circ$ における電圧値 (V)

とする。



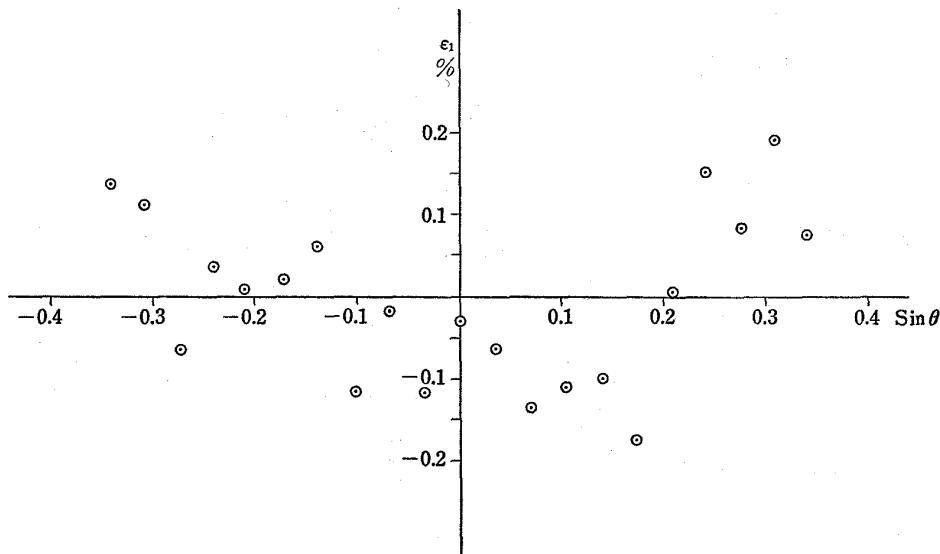


図 6 2.0g 加速度計の非直線性 ( $\phi=0^\circ$ )

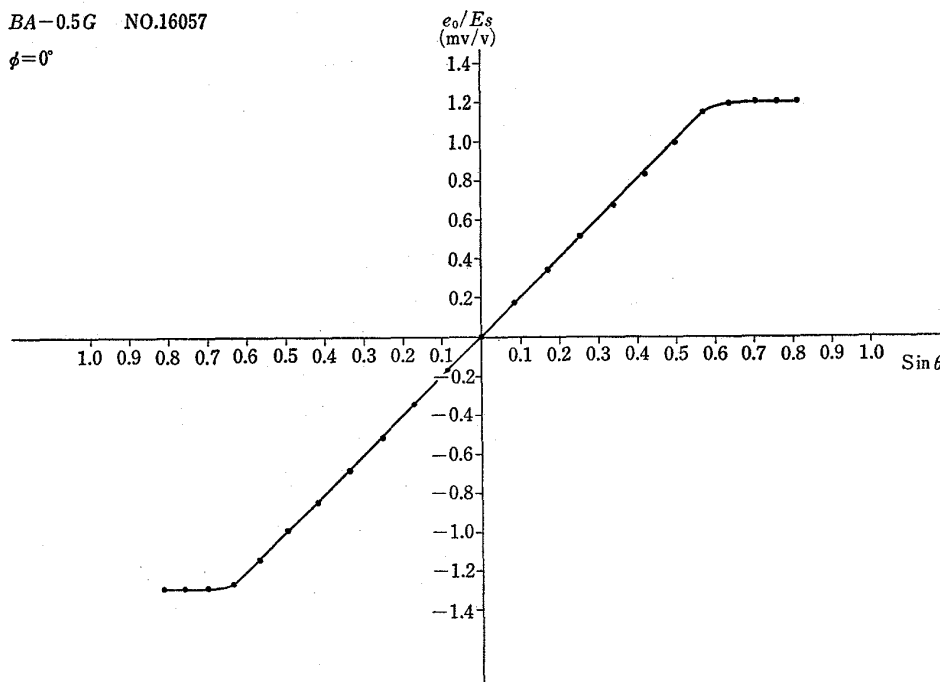


図 7 0.5g 加速度計の測定範囲

### 2.2.2 0.5g 加速度計

0.5g 加速度計は容量が小さいため、使用可能な角度範囲に制限がある。使用出来る角度範囲は素子のおもりがストッパに接触するまでで、角度範囲についての試験結果を図7に示す。

出力特性に関する試験は2.0g 加速度計の場合と同じ方法で行ない図8の結果を得た。0.5g 加速度計の場合バンク角の影響が若干見受けられる。先に述べたように、本加速度計素子の剛性が小さくなったため、ブリッジ回路におけるねじれ歪に対する補償が充分でなくなり、正規のたわみ歪信号にねじれ歪の出力が加

算されて、見かけ上の感度増加と同じ効果を与えている。バンク角  $\phi$  と感度変化との関係は図9の通りであるが、使用状況により感度特性が変化することは測定器として好ましいことではない。

$\phi=0^\circ$  における使用角度範囲 ( $\phi=-20^\circ \sim +20^\circ$ ) の非直線性は図10に示す通りであるが、2.0g 加速度計に比べて全域において安定したデータが得られている。

以上二種類の加速度計の出力特性について調べたが、いずれの場合も、ヒステリシス現象は特に認められなかった。

### 2.2.3 分解能・ドリフト・温度効果

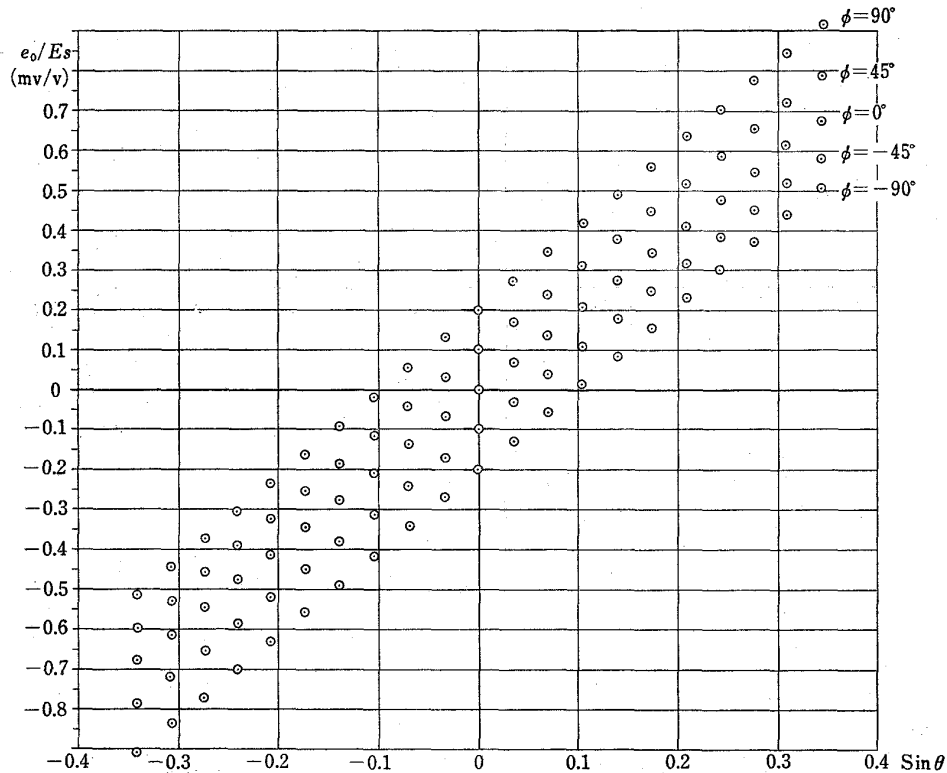


図 8 0.5 g 型加速度計の出力特性

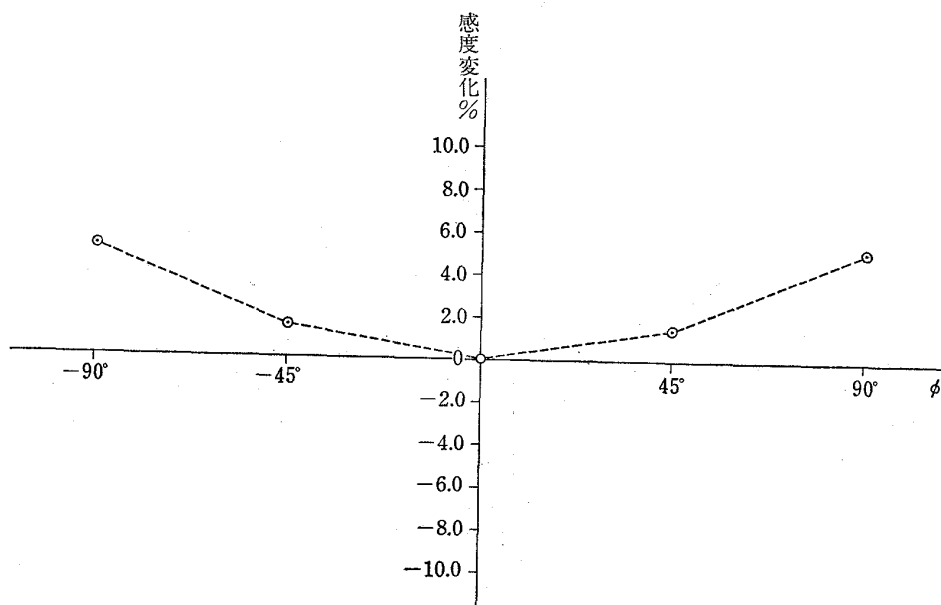


図 9 0.5 g 型加速度計のバンク角による感度変化

抵抗線歪ゲージを使用する変換器の性能は、そのドリフト値の大きさで決定するといっても過言ではない。特に出力信号の直流分について計測する場合は、そのドリフト値が直接測定精度に影響し、また短時間のドリフト変化は分解能特性にも影響して来る。図11は、周囲温度一定 (25°C) の条件で、二種類の加速度計の分解能と経時ドリフトの様子を記録したものである。10分間のドリフト値は両者ともほとんど差がない

が、角度分解能の点から見た場合0.5g加速度計の方が、4倍程度有利になることは当然である。

温度効果試験は、二種類の加速度計を同時に液槽内に浸し、液温を6°C~35°Cまで変化させた時、それぞれの加速度計の出力移動量を記録して、後で等価角度量に変換して表示した。結果は図12の通りである。

### 2.3 周波数特性

加速度計の周波数特性は素子の固有振動数と制動係

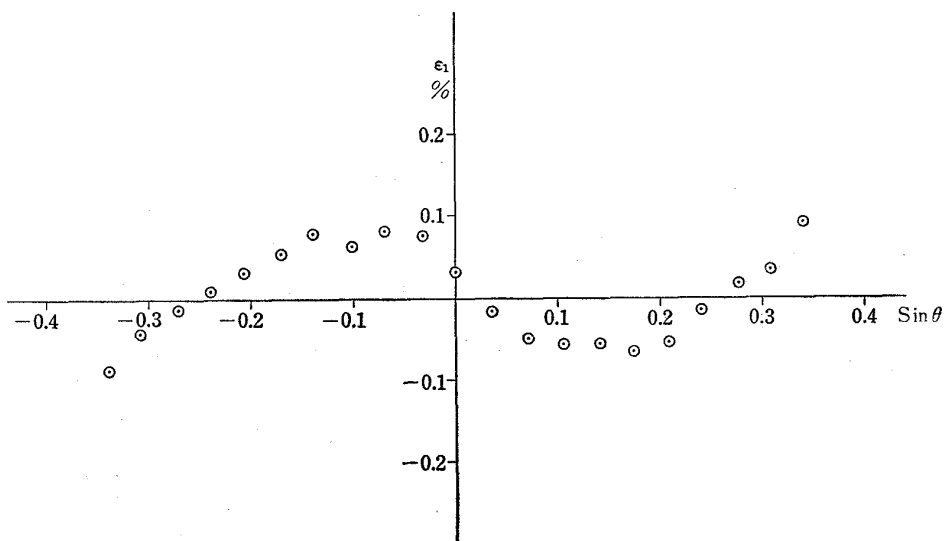
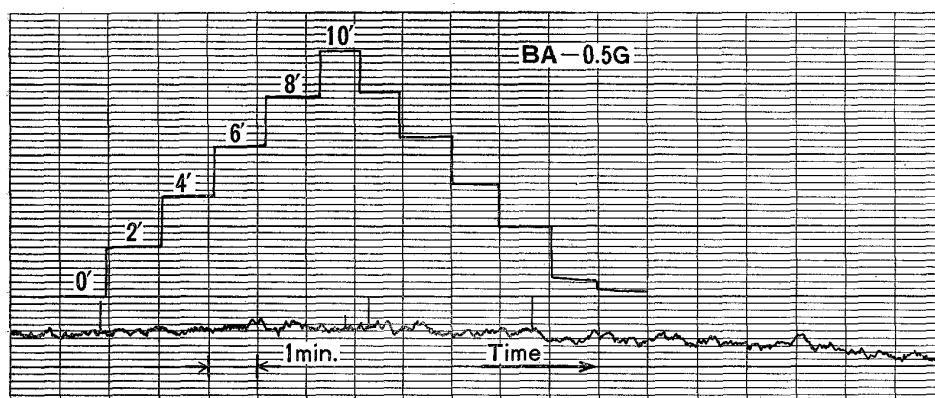
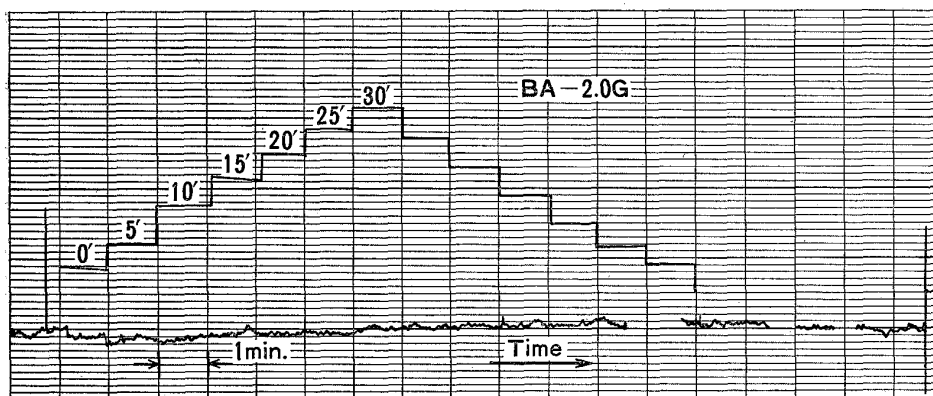


図 10 0.5 g 加速度計の非直線性 ( $\phi=0^\circ$ )



Drift and Resolution (BA-0.5G)



Drift and Resolution (BA-2.0G)

図 11 分解能およびドリフト特性

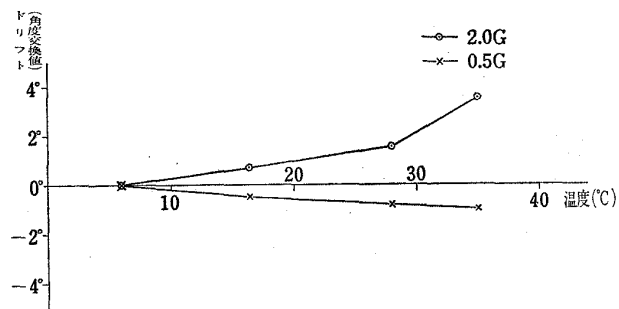


図 12 温度効果試験

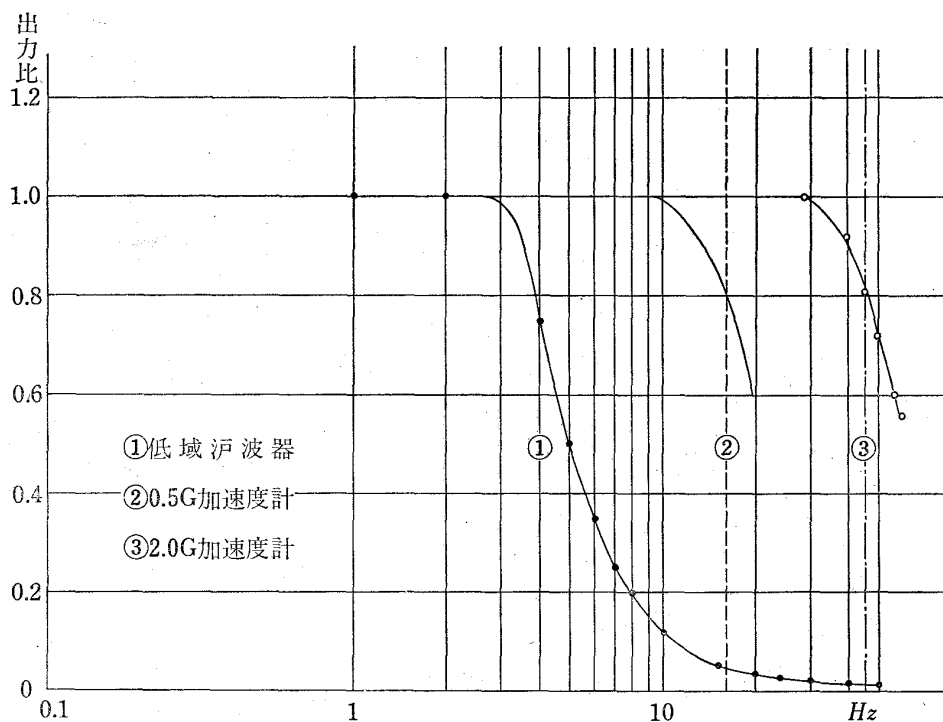


図 13 周波数特性

数の値によって決定する。今回の場合のように、準静止状態の模型角度測定に加速度計を使用するときは、出来る限り高域の応答を抑えて、信号/雑音の比を高めて測定の方が精度的に有利であるので、本方式の実験に使用する測定系には低域濾波器を使用している。図 13 に加速度計と低域濾波器の周波数特性を示す。図に見る通り、低域濾波器の遮断周波数が最も低い値であるから、計測系全体の周波数応答はこの濾波器の特性とほぼ同じと考えてよい。

また、加速度計は油制動しているため、使用温度が上昇すると制動不足となり、振動的な特性を持つようになるため、加速度計の使用温度はなるべく 20°C 以下で使用することが好ましい。

### 3. 風洞実験

加速度計方式による内装角度計の実用性と使用時の問題点を調べるため、AGARD-B 標準模型内に前記小型加速度計を組み込み、当所吹出式超音速風洞で実験を行なった。AGARD-B 模型の超音速風洞試験結果は、既に文献<sup>2)</sup>で詳しく報告されているが、諸外国の風洞などでも本模型の風洞試験が数多くなされており、比較するデータが豊富であることと、本模型の空力荷重が割合に大きいため、スティングなどの撓み量を考慮する試験に適當と考え本模型を選んだ。

今回の風洞試験では、特に模型姿勢角について、従来の方式と加速度計方式の両方式で同時に測定し、そ

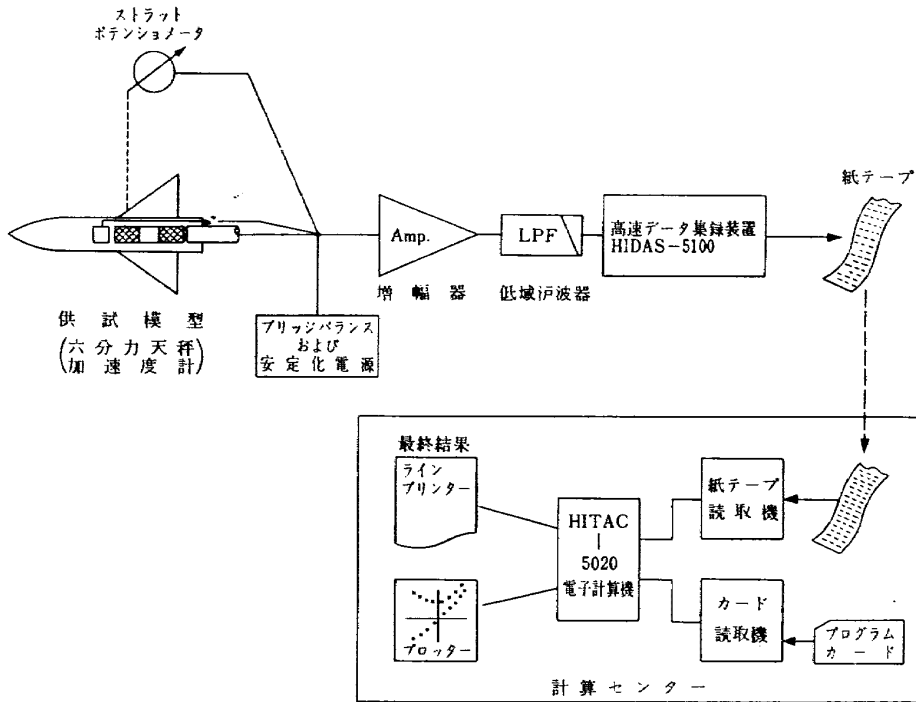


図 14 データ処理系統図

の値を比較することにした。

吹出式超音速風洞の一回の通風時間<sup>1)</sup>は、その空気源の大きさによって制限されているが、通常の実験では一定速度の気流を20秒間程度通風し、その間に所定の模型姿勢角範囲に対する必要が空力データを計測している。後述の実験データは、このような一回ごとの通風試験に番号を付けて区別している。

また、この実験で集録した AGARD-B 模型の三分力特性に関する整理方法は、文献<sup>2)</sup>とほぼ同じであるが、データ集録過程で大幅な改造が行なわれたので、本方式に特に関係のある部分の説明を以下に付け加えた。

### 3.1 データ処理方式

改造前の吹出式超音速風洞のデータ処理方式については、文献<sup>3)</sup>に報告した通りであるが、従来のアナログ記録方式では、風洞で得られたデータ信号をデジタル量に変換するまでの間で誤差が生じ易いため、現在は風洞実験中に直接デジタル量に変換してデータを集録している。全体のデータ処理系統図は図14の通りであるが、このような測定系ではアナログ量の信号を取り扱う部分で誤差が入り易く、特に低レベル信号を増幅する直流増幅器の性能による影響が大きい。従来使用してきた増幅器では、その増幅度、安定性の点で不十分であったため、特にこの点での改良にも力を入れて行なった。

現在使用中のデータ処理システムの総合的な精度は変換器の部分を除き、定格入力  $\pm 10\text{mV}$  に対して0.2%以内である。

### 3.2 加速度計の組み込み

模型内への加速度計組み込みは図15および図16に示すように、模型胴体内の天秤取付用スリーブの前方に金具で固定し、スリーブと一体として模型内に挿入し、模型外側から8本のビスで固定している。また模型の天秤への取り付けは従来通り4本のマウントピンで行なう。

### 3.3 実験結果

吹出式超音速風洞におけるこのシリーズの実験は、全部で8回行なった。その内訳は2.0g加速度計を使用した実験2回と0.5g加速度計を使用した実験6回であるが、0.5g加速度計を使用した  $M=2.78$  の実験中のスターティングロードによって加速度計出力の零点が移動したため、今回の実験は一応このマッハ数までで中止した。

各実験結果から、その角度測定値について、従来の方式による測定値  $\theta_1$  と本方式で測定した値  $\theta_2$  を比較して加速度計別に表示すると図17(A), (B)および図18(A), (B)の通りとなる。図(A)では  $\theta_1$  と  $\theta_2$  をそれぞれ横軸および縦軸に直接プロットしているが、より詳細な測定値のばらつきを見るため図(B)では  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の差を拡大して縦軸にプロットした。なお図17で2.0g加速度計を使

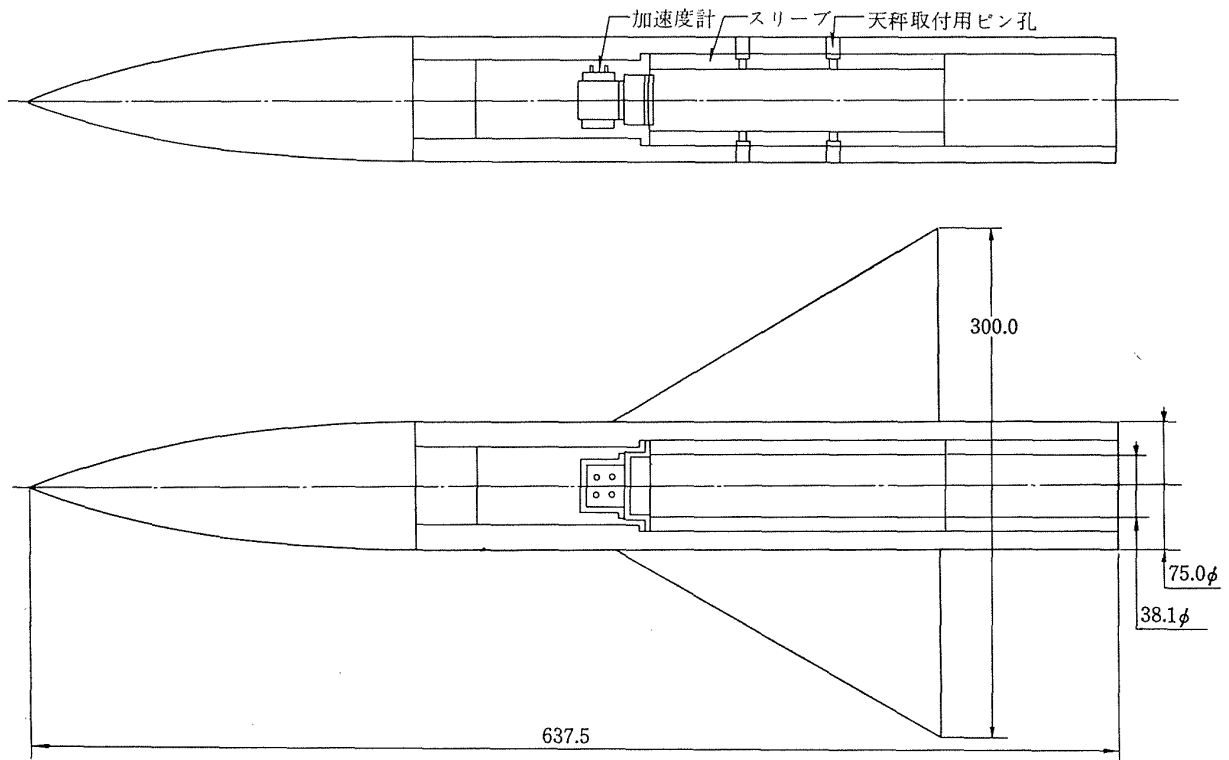


図 15 加速度計取付説明図

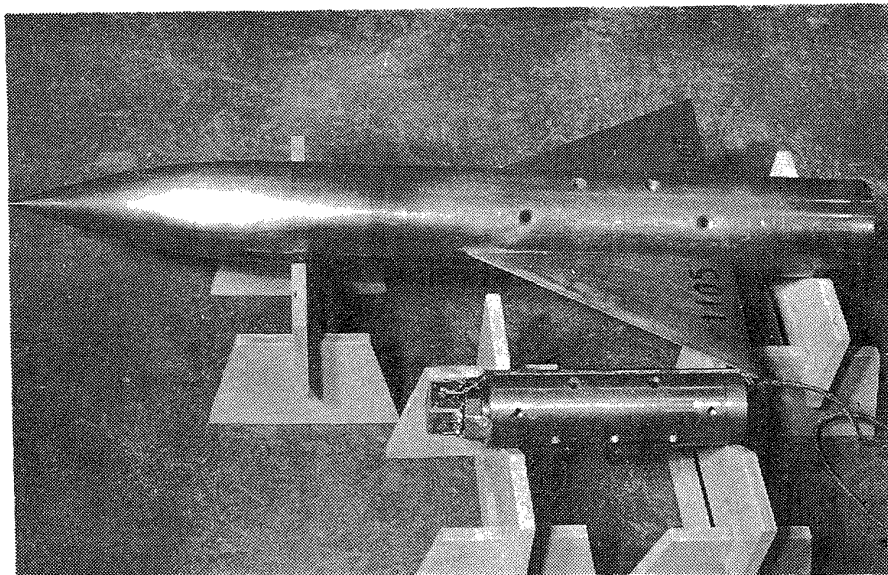


図 16 供試模型と加速度計

用した実験データの  $M=1.99$  における  $+4^\circ$  附近の測定値が一点飛び離れているが、これは  $\theta_1$  のデータ信号に衝撃的な雑音が重畳し、誤差を生じたものである。また図 18 では  $0.5g$  加速度計を使用したデータの内  $M=2.78$  の測定値を割愛したことを付記する。

以上の実験により、 $2.0g$  加速度計を使用した場合の  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の偏差は最大  $0.25^\circ$  程度、 $0.5g$  加速度計を使

用した場合は  $0.1^\circ$  以内に入ることが判った。また  $M=1.5\sim 2.5$  の間ではマッハ数増加に伴うデータのばらつき増加は見られなかった。

表 3 は実験で得られた三分力特性について本方式で測定した角度を用いて整理した値であるが、文献<sup>2)</sup>の結果および諸外国の実験結果と非常によく一致していた。

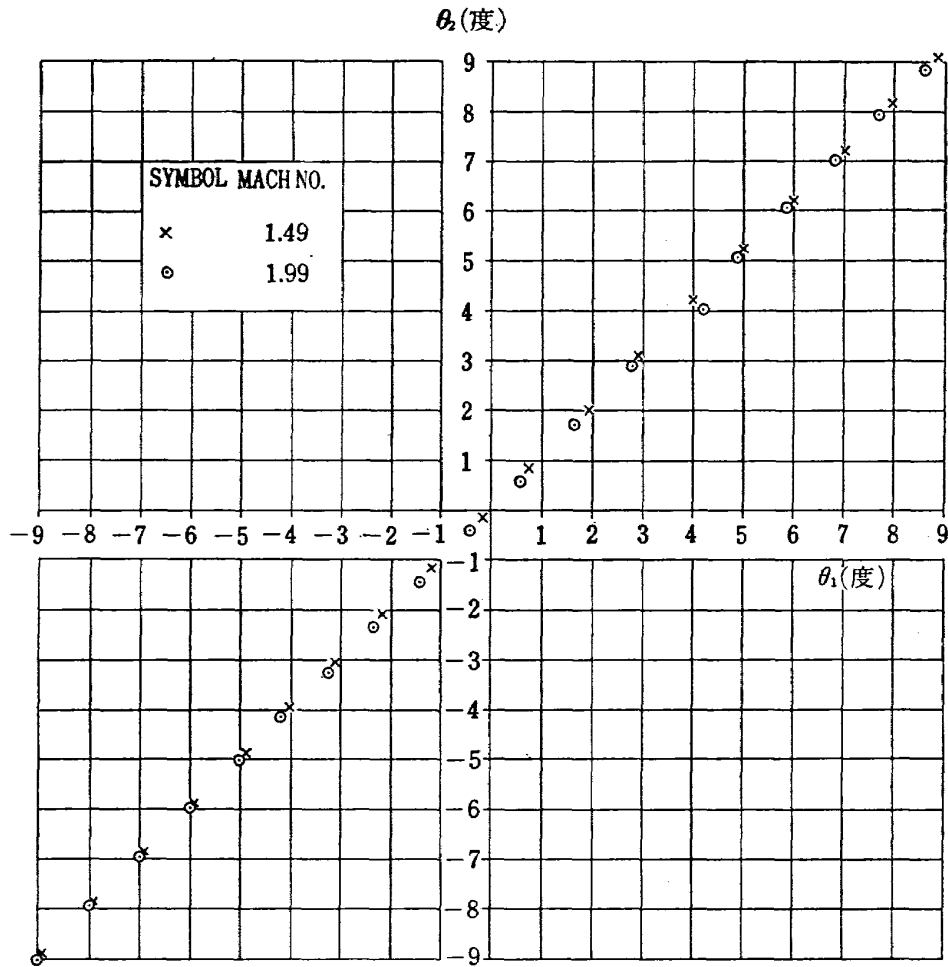


図 17 (A) 加速度計内装方式と従来の方式による角度測定値の比較  
 ( $\theta_1$ : 従来の方式による測定値  $\theta_2$ : 加速度計による測定値)  
 2.0 g 加速度計使用 Run No. 5531~5532 M 1.49, 1.99

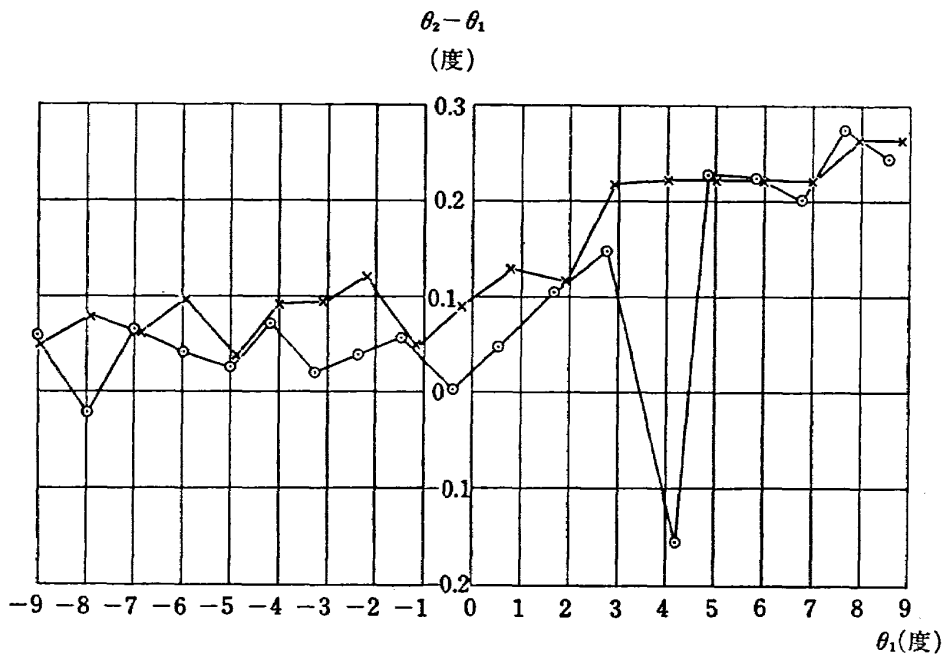


図 17 (B) 加速度計内装方式と従来の方式による角度測定値の比較  
 2.0 g 加速度計使用 Run No. 5531~5532 M1.49, 1.99

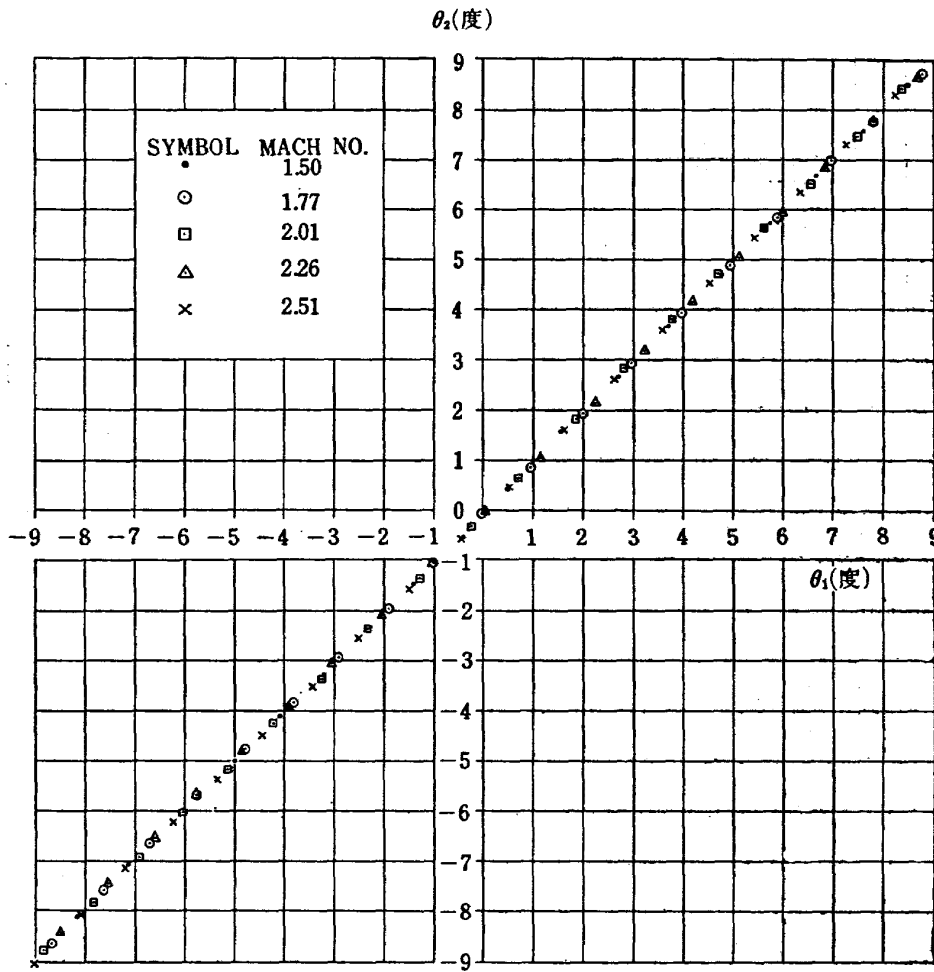


図 18 (A) 加速度計内装方式と従来の方式による角度測定値の比較  
 ( $\theta_1$ : 従来の方式による測定値  $\theta_2$ : 加速度計による測定値)  
 0.5 g 加速度計使用 Run No. 5715~5719 M1.5~2.5

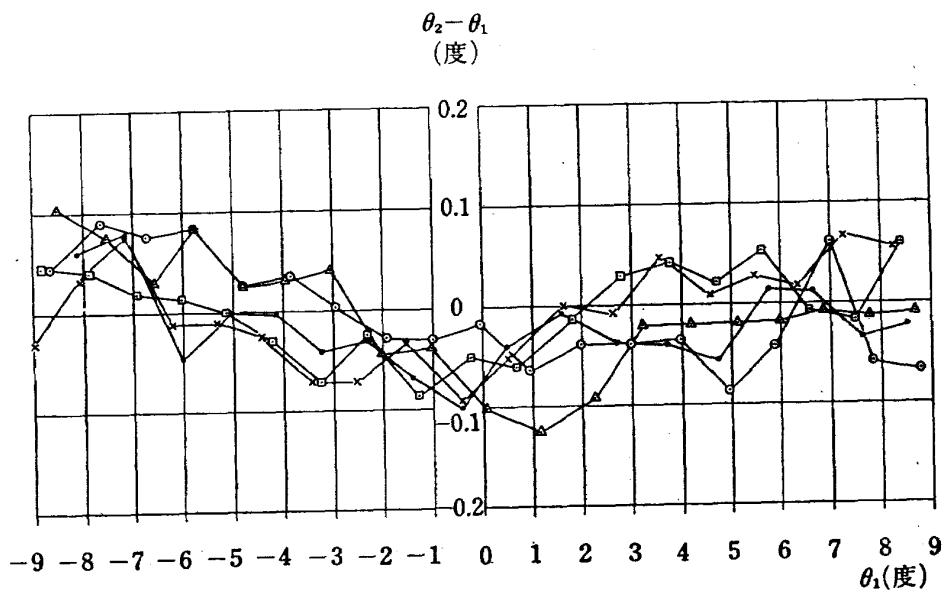


図 18 (B) 加速度計内装方式と従来の方式による角度測定値の比較  
 0.5 g 加速度計使用 Run No. 5715~5719 M1.5~2.5



表 3 加速度計内装 AGARD-B 模型実験一覧表

\* 2 g 加速度計使用      \*\* 0.5 g 加速度計使用

| 実験番号   | M    | $p_0$<br>(kg/cm <sup>2</sup> a) | q<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $R \times 10^6$<br>(模型全長<br>基準) | $C_{L\alpha} \left( \frac{1}{\text{deg}} \right)$ | $C_{m\alpha} \left( \frac{1}{\text{deg}} \right)$ | $C_{Dr. \text{min}}$ | $C_{Db}$ | $C_D$  |
|--------|------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---|---|----------------------|----------|--------|
| 5531*  | 1.49 | 1.595                           | 0.685                      | 15.6                            | 0.0439  | 0.0050  | 0.0490               | 0.0241   | 0.0249 |
| 5532*  | 1.99 | 2.196                           | 0.790                      | 18.4                            | 0.0371  | 0.0055  | 0.0390               | 0.0174   | 0.0216 |
| 5715** | 1.50 | 1.535                           | 0.658                      | 15.1                            | 0.0445  | 0.0050  | 0.0470               | 0.0225   | 0.0245 |
| 5716** | 1.77 | 1.846                           | 0.736                      | 16.7                            | 0.0400  | 0.0060  | 0.0425               | 0.0184   | 0.0241 |
| 5717** | 2.01 | 2.190                           | 0.778                      | 18.0                            | 0.0370  | 0.0060  | 0.0390               | 0.0156   | 0.0234 |
| 5718** | 2.26 | 2.568                           | 0.778                      | 18.9                            | 0.0343  | 0.0063  | 0.0350               | 0.0145   | 0.0205 |
| 5719** | 2.51 | 2.981                           | 0.753                      | 19.7                            | 0.0310  | 0.0070  | 0.0340               | 0.0123   | 0.0217 |
| 5720** | 2.78 | 3.900                           | 0.798                      | 22.6                            | 0.0300  | 0.0070  | 0.0320               | 0.0103   | 0.0217 |

#### 4. 結 論

小型化が容易な片持梁式の加速度計を供試模型内に組み込むことにより、六分力天秤の操作と同程度の手軽さで、内装方式の角度測定が可能であることが実験で判った。また 0.5 g 程度の加速度計を使用すれば、常用の角度範囲で 0.1° 以内の角度精度が得られるものと思われる。

実験の当初、温度ドリフトの点でやや心配であったが、吹出式超音速風洞の場合のように、連続した計測時間が短い場合はドリフトによる零点の移動は認められず、長時間に亘って使用する場合でも、零点確認操作を随時行なうだけで、十分な精度を保つことが出来るものと考えられる。

表 4 加速度計の角度計としての性能

|                      | 単 位   | 2g 加速度計     | 0.5g 加速度計 |
|----------------------|-------|-------------|-----------|
| 角度測定範囲               | 度     | -90° ~ +90° | -40 ~ +38 |
| 測定誤差                 | 分     | 10.0        | 4.0       |
| -20° ~ +20° における非直線性 | %     | 0.19        | 0.09      |
| 感 度                  | mV/V° | 0.007       | 0.034     |
| 固有振動数                | Hz    | 45          | 17        |
| 分 解 能                | 分     | 2.5         | 1.0       |
| ドリフト (10 分 間)        | 分     | 5.0         | 1.5       |
| 外形寸法                 | mm    | 20×20×25.5  | 22×22×35  |

今回の実験で、通風中の模型振動に対しては低域濾波器が非常に有効であることが判ったが、過大入力時の防護と併せて制動効果の優れた加速計の開発が今後の課題として必要と思う。

今回使用した加速度計の角度変換器としての性能は表 4 の通りであるが、本加速度計の外形寸法が充分に小型である特長を生かし、内装天秤内に組み込んで使用出来れば、その使用範囲がさらに広がるものと考え現在検討している。

本稿の最後にあたり、この実験推進に終始御指導いただきました空気力学第二部の谷室長、高島室長をはじめ吹出式超音速風洞関係の方々に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 小橋安次郎, 長州秀夫, 高島一明, 波木井深: 風洞用角度計の試作実験, 航技研報告 TR-3 (1960.8)
- 2) 高木廣治, 谷 喬, 斎藤秀夫, 新井 忠: 1m × 1m 吹出式超音速風洞における AGARD 標準模型 B の三分力試験, 航技研資料 TM-20 (1963.7)
- 3) 原 亘利, 高島一明, 関根英夫, 中正夫, 戸川保子: 吹出式超音速風洞におけるデータの処理方式について(II), 航技研資料 TM-60 (1965.9)
- 4) 航空宇宙技術研究所空気力学第二部: 1m × 1m 吹出式超音速風洞の計画と構造, 航技研報告 TR-29 (1962.10)
- 5) 服部敏夫工業計測器, 技報堂 (昭和30年7月)

|        |   |          |                                   |
|--------|---|----------|-----------------------------------|
| TM-203 | 固体ロケットの比推力測定の標準化                          | 1971年6月  | 五代富文, 岡部祐二郎<br>清水昭紀, 伊藤克弥<br>西村久男 |
| TM-204 | サーボ機構の温度応用改善用デジタルコントローラについて               | 1971年7月  | 小川鑛一, 島村正人<br>(日本大学)              |
| TM-205 | 自由飛行模型FFM-10の動安定微係数の推定について                | 1971年7月  | 河崎俊夫, 河本 巖                        |
| TM-206 | 静止衛星の軌道保持シミュレーションシステムの構成(I) —地球の重力場による摂動— | 1971年8月  | 松島弘一                              |
| TM-207 | 対称スピン衛星用ニューテーション・ダンパの解析                   | 1971年9月  | 村上 力, 狼 嘉彰                        |
| TM-208 | 薄板継手構造の強度についての実験 —接着およびリベット継手—            | 1971年11月 | 池田為治, 熊倉郁夫<br>竹内和之                |
| TM-209 | 試作接着面応力センサの校正試験                           | 1971年11月 | 大竹邦彦, 遠藤修司<br>野口義男                |

---

## 航空宇宙技術研究所資料210号

昭和46年12月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)44-9171(代表) ㊦182

印刷所 第一印刷株式会社  
東京都新宿区富久町58

---

