

UDC 621-50
531.76
53.083

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-147

浮動振子型加速度計の試作

大月正男・鈴木孝雄
円居繁治

1968年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-102 弾性支持片持板の振動	1967年3月	堀 武敏, 築地恒夫 越出慎一, 林 洋一
TM-103 結合梁の振動について	1967年3月	築地恒夫, 林 洋一
TM-104 平板翼模型の固有振動モードの測定	1967年4月	中井暎一, 森田甫之
TM-105 非定常境界層方程式を含む放物型微積分方程式の数値解法	1967年4月	関口清子
TM-106 動安定微係数測定用風洞天秤について	1967年5月	高島一明, 榊原盛三 原金成, 北出大三 金 正好
TM-107 プロペラ後流偏向型STOL機の風洞試験(II)	1967年6月	犬丸矩夫, 岡部祐二郎 北村清美, 川幡長勝 高橋 伴, 木村友昭
TM-108 インダクタンス型小型圧力変換器の試作とその応用	1967年7月	長洲秀夫, 柳沢三憲
TM-109 ロケットの飛しょう径路計算のためのプログラム	1967年7月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-110 二次元スラットおよびスロットッドフラップの実験的研究(I)	1967年8月	犬丸矩夫, 北村清美 川幡長勝
TM-111 リフトジェットVTOL機の離陸径路に関する近似解	1967年8月	西村博史
TM-112 極超音速風洞用ペブル加熱器の特性	1967年8月	橋爪 宏, 橋本 登
TM-113 リフトジェットエンジン試験設備(II)	1967年9月	森田光男, 岩部柱相 関根静雄, 武田克己
TM-114 五段遷音速軸流圧縮機の空力設計	1967年9月	藤井昭一, 松木正勝 五味光男
TM-115 燃料蒸発管に関する研究(I)	1967年9月	大塚貞吉, 鈴木邦男 田丸 卓, 乙幡安雄
TM-116 高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(I)	1967年9月	鈴木邦男, 相波哲朗
TM-117 ロケット用テレメータ機上装置の集積回路化	1967年9月	新田慶治, 松崎良継
TM-118 操縦桿レート信号によるアイアンバー下制御の安定効果とパイロットのモデルについて	1967年9月	村上 力, 真柳光美
TM-119 ペーン型気流方向検出器の特性	1967年11月	田畑浄治, 松島弘一 成田健一, 塚本憲男
TM-120 円錐管レンズの設計とその応用	1967年11月	山中龍夫, 奥 昶澄男
TM-121 大きなマトリクスの逆行列計算および連立一次方程式の計算のためのプログラミング技術	1967年11月	戸川隼人, 戸川保子
TM-122 NAL-7-P ロケットの強度および燃焼試験結果	1967年11月	竹中幸彦, 古田敏康 小川欽一, 朝田洋雄 豊原恒彦, 五代富文 湯沢克宜, 伊藤 克弥 西村久男
TM-123 “NAL-16・31” および “NAL-25・31” 二段ロケットの振動試験	1967年11月	中井暎一, 古 関昌次 田寺木一, 高木俊朗 安藤泰勝, 森田甫之 峯岸正雄, 菊地孝男 太田 幹
TM-124 吹出式超音速風洞の集合胴圧力制御について	1967年12月	外立政隆, 近藤洋史 原 亘利
TM-125 航技研 1m×1m吹出式超音速風洞におけるハーフモデル試験について	1968年2月	石原久蔵, 原 亘利夫 榊原盛三, 関根英夫
TM-127 2024-T3アルミニウム合金の3-bay 有孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1968年4月	飯田宗四郎, 猿本光明 斎藤信一郎
TM-130 リフトエンジンの自然吸込みについて	1968年4月	近藤 博, 大城章一郎
TM-131 遷音速タービン翼列二次元試験(III)	1968年5月	近藤 博, 襲田光弘 山崎紀雄, 古川 昇

浮動振子型加速度計の試作*

大月正男**・鈴木孝雄**

円居繁治**

将来誘導制御の実用に供しうること为目标として、高分解能でかつ測定範囲の広い加速度計を試作した。

これは、浮動振子型加速度検出部（加速度計本体）とこれを制御するアナログ方式のサーボ増幅器から成る零平衡方式のサーボ加速度計である。

本報告では測定範囲 $\pm 4G$ 、分解能 $1 \times 10^{-3}G$ を目标とした第一次試作について、その特性実験結果および、今後の性能向上に必要な基礎資料について述べる。

1. ま え が き

飛しょう体の加速度を測定し誘導制御を行なうためには、分解能が高かつ測定範囲の広い高精度加速度計が必要であり、ミッションにより異なるが、特に高精度を要する場合は、分解能 $1 \times 10^{-6}G$ 、測定範囲 $\pm 10G$ と実にダイナミック・レンジ 10^7 を有するものが要求されている¹⁾。

加速度計として一般によく用いられる慣性質量—機械的バネ系の質量に働く力を変位に変換して測定する方式では、高分解能のものは「弱いバネ」を用いるため大入力に対して直線性が失われ、したがって測定範囲が狭く、また固有周波数が低く、逆に「強いバネ」のものは固有周波数は高いが、単位入力当りの変位量が小であるため分解能が低い。ゆえに上記方式では、1個の加速度計で広い測定範囲を受け持ち、かつ高分解能であることはきわめて困難である。

一方、フィード・バックの原理を応用した零平衡方式のいわばサーボ加速度計では、電磁力により質量は常に零位置付近に拘束されるので、上記の方式では不可避なクロス・カップリング効果を軽減でき、またこの電磁的バネの等価ステイフネスはきわめて大なので、測定範囲は広く、固有周波数も高い。また本方式では変位を測定するのではなく、零位置に拘束するのに必

要な電磁力を得るための電流を測定するので、変位量が小であっても、元來電流測定はかなりの高精度で行なえるので分解能の高いものが得られる。したがって誘導制御用の広いダイナミック・レンジをもつ加速度計としてはこの方式のものが最適なものと考えられる。

高精度な加速度計を得るためには、もちろん高度な製作技術を必要とするが、構成形式についても十分な検討が必要とされるので、等3節に述べるごとき諸問題を明確にするため、さきに開発された1自由度積分ジャイロの浮動ジンバル構造の諸データを参考にし、分解能 $10^{-3}G$ 、測定範囲 10^4G を目標として、第一次試作を行なったので、これについて報告する。

2. 記 号

A_c ; 搬送波の振幅

A_D ; シアダンパ円筒部の表面積

A_G ; 増幅器の利得

A_S ; 信号波の振幅

C ; 粘性抵抗係数

C_2, C_6 ; フィルタ構成要素のキャパシタンス

$F_1(s)$; 第一フィルタの伝達関数（復調器出力波に含まれるキャリア周波数の2倍以上の成分を減衰させるためのローパス・フィルタ）

$F_2(s)$; 第二フィルタの伝達関数（第一フィルタだけでは取り除けない信号周波数よりも高い周波数成分を減衰させるためのローパス・フィルタ）

* 昭和43年8月14日受付

** 計測部

G ; 重力加速度を単位として測った加速度の単位
 (a/g)
 $G_a(s)$; $F_1(s)$ を含む増幅器の利得 (i_{tg}/e_{sg})
 J ; ジンバルの慣性能率
 $K(s)$; 系のエラスティック・リストレイント定数
 (T_1/θ_0)
 K_{sg} ; 回転角検出器 (SG) のスケール・ファクタ
 (e_{sg}/θ_0)
 K_{tg} ; トルク発生器 (TG) のスケール・ファクタ
 (T_3/i_{tg})
 L_1, L_3, L_5 ; フィルタ構成要素のインダクタンス
 M ; ジンバルの質量
 P ; ジンバルの Pendulosity
 R_1, R_3, R_4, R_5, R_6 ; フィルタ構成要素の純抵抗
 T ; トルク
 T_1 ; a_i が P に作用して生ずるトルク
 T_2 ; 慣性とダンピングによるリアクション・トルク
 T_3 ; TGによって生ずるトルク
 $z_2 \sim z_6$; フィルタ構成要素のインピーダンス
 a ; 加速度
 a_i ; 加速度計の入力軸にそった方向の加速度
 e_0 ; 加速度計増幅器の出力電圧
 e_{sg} ; SGの出力電圧
 f ; 周波数
 g ; 重力加速度
 i_{tg} ; TGのコントロール巻線に流れる電流
 j ; 虚数単位
 s ; ラプラスの演算子

ζ ; 減衰係数
 θ_0 ; ジンバルの回転角
 $\dot{\theta}_0$; ジンバルの回転角速度
 ν ; 動粘性係数
 ρ ; 密度
 ω ; 角周波数

3. 開発試作上の問題点

今回試作した加速度計は、図1に示すとき加速度計本体(加速度検出部)およびこれを制御するサーボ増幅器から成る零平衡方式の加速度計である。前者は高精度積分ジャイロの開発成果²⁾を利用して、その浮動ジンバル構造を応用した浮動振子型で、後者はアナログ方式のフィード・バック用増幅器である。

入力加速度がジンバルに取り付けられた不平衡質量に作用して、ジンバルを零位置から回転させようとする時、回転角検出器(以下SGと呼ぶ)の出力はサーボ増幅器で増幅され、トルク発生器(以下TGと呼ぶ)に電流がフィード・バックされ、ジンバルは零位置付近に拘束される。ジンバルは等価的に質量 M 、うでの長さ l なる振子と見なされ、 M と l の積 $M \cdot l$ をペンデュラスティ(以下 P であらわす)という。出力軸受の摩擦抵抗を極力小とするため、ジンバルは中空円筒状とし粘性油の中に浮かせる。またジンバルとケース間のクリアランスを利用して適当なダンピングを得ることができる。

本研究試作に関しての問題点は以下に列挙するとおりである。

1) 高分解能とするためには前記のとおり軸受の摩

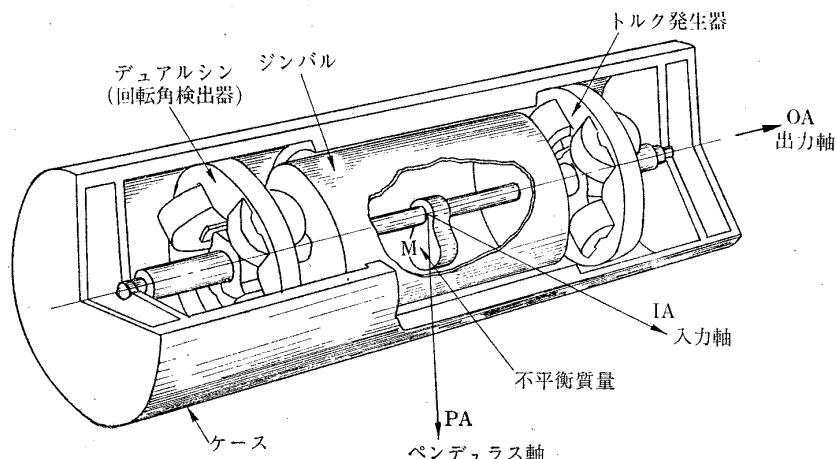


図1 浮動振子型加速度計原理図

摩擦抵抗を極力小とする必要がある。そのためジンバルを粘性油（温度を変化させ、その密度をかえる）中に浮かせるよう温度制御を行なう。ジンバルの重さと浮力がつり合う最適な温度に設定したとき、油の粘性（温度による）が加速度計の動特性上、そのダンピングとしてほぼ最適なものになっていることがのぞましい。この場合、「高分解能」を優先し、「ダンピング」はフィード・バック用増幅器の利得にもよるので最適な増幅器利得を見出すことで調整すればよい。

2) 加速度計のジンバルには不平衡質量を持たせてあるので、ジャイロのように完全な浮動とすることは困難であり、出力軸受の摩擦抵抗がジャイロの場合より大となると考えられる。したがって、出力軸まわりにディザーをかけて分解能を高める必要がある。SG兼トルク補償用TG（デュアルシン³⁾）の上にさらに巻線をほどこしてディザー用TGを設ける必要があるが、これらの間に相互干渉がないよう留意する必要がある。

3) 軸受のガタは出力の変動ときわめて密接な関係があるので、なるべく小とする必要がある。そのため精密宝石軸受を採用し、そのクリアランスも工作精度の限界である 0.5μ としたが実際どの程度になっているか測定する方法がない。したがって、出来上ったものを試験してみてから軸受の良し悪しがわかる。

4) 以上 1), 2), 3) によって分解能が決まるが、入力加速度の上限 a_{max} は、ペンデュラスティ P とTGの最大トルク T_{max} により決定される。すなわち、均合いの式 $Pa_{max} = T_{max}$ より $a_{max} = T_{max}/P$ となるから、 a_{max} を大とするためには T_{max} を大とし、 P を小とすればよいことがわかる。

TGとしては、ジャイロ等に用いられるマイクロシン型トルク発生器⁴⁾（トルカーともいう）を採用し、可能な限り巻線を増加して $T_{max} = 2.16 \times 10^4 \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ にできることがわかった。

a_{max} を大とするには P は小なることが望ましいが一方、分解能の面から考えると、微小入力加速度に対しても大きなトルクを発生する方が有利であるから、 P は大なることが望ましい。この P についての相反する要求を満足するために、マイクロシン型TGを備えたジャイロのジンバルに与えられる最小トルク T_{min} を参考にする*。加速度計の最小入力を 10^{-4} G とすれば、 $T_{min} = P \times 980 \times 10^{-4} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ となるが、加速度計のジンバルの浮動は問題点2) で前述したようにジャイロの場合より困難なので、 T_{min} をジャイロの場合の約5倍 ($0.5 \text{ dyne} \cdot \text{cm}$) にとれば、 $P \div 5 \text{ g} \cdot \text{cm}$ となる。

したがって $a_{max} = T_{max}/P \div 4 \text{ G}$ となるが、これをさらに大とするには、 T_{max} を大とするか、 P を小とするかであるが、現状ではこれが限度である。

5) 飛しょう体の推力軸方向の加速度の時間的变化は、SCOUT クラスの例⁵⁾ でも高々数 Hz のようであるから、動特性として一応 10 Hz を目標とした。本サーボ加速度計はほぼ二次系と考えられるので、固有周波数を高めるには、衆知のごとく慣性能率を小とするか、バネ定数（増幅器の利得に正比例する）を大とすればよい。ジンバルの慣性能率は、その構成要素であるSGおよびTGロータ、振子等の質量分布から最小 $58 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ 程度にしかできない。したがって、増幅器の利得を高めることにより等価のバネ定数を大きくして固有周波数を高める必要がある。しかるに、粘性抵抗係数、慣性能率を一定としたとき、増幅器の利得が高いほど減衰係数が小となるから、減衰係数が適当な値をとるよう粘性抵抗係数はあらかじめ相当大きくしておく。また増幅器の利得もかなり大幅に変更可変とすることがある。

6) 航空機等が内蔵する 400 Hz 電源を用いてSGを励磁するので、フィード・バック用増幅器は搬送波 400 Hz のACサーボ方式とするが、復調の際生ずる高調波を除去するためのローパス・フィルタおよび信号周波数以上のノイズ成分を除去するためのローパス・フィルタとして最適なものを設計する必要がある。

7) 以上の設計上の問題の他に、完成した加速度計の試験法が問題になる。すなわち高分解能であることを試験するためには、精密傾斜台を用い重力加速度の分力を利用する。現存する装置では 10^{-5} G （傾き角2秒）まで試験できるものがあるが防振**などの考慮が必要となる。

このように高分解能加速度計の試験はきわめて困難なものであり、製作技術、試験設備を考慮して、分解能 10^{-3} G (10^{-3} G の誤差は500秒の飛しょうにおいて約 5 m/sec 程度の速度誤差になる) を目標とした。また最大加速度は問題点4) で明らかにしたごとく 4 G が限度

* たとえば従来の積分ジャイロ（ハニウェル社 H I G 4 相当）では、角運動量 $H = 2 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm} / \text{sec}$ 、最小検出角レート $\Omega = 5 \times 10^{-6} \text{ rad/sec}$ であるから、最小トルク $T_{min} = H \times \Omega = 0.1 \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ となる。

** 文献^{6), 7)}によると、通常の実験室内では地殻運動のため、時として $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ G}$ の加速度が存在し、特に地下 $1, 100 \text{ ft}$ の岩塩廃抗中に設けた実験室内で $5 \times 10^{-6} \text{ G}$ 程度の加速度環境が得られる。

である。

新たに加速度計のために、その構成要素であるジンバル、SG、TGなどの型を作り直すことは大変な労力、費用がかかることなので、加速度計の構成要素としては必ずしも満足できるものではないが、現在製作可能なジャイロの構成要素を応用して、まず基本的な構成を有する浮動振子型加速度計の第一次試作を行ない、考察と実験によってさらに高精度なものを開発するための基礎資料を得ることとした。

4. 浮動振子型加速度計の解析

4.1 加速度測定の実理

図2および図3において、 a_i は P に作用してトルク T_1 を生じ、出力軸回りにジンバルを回転させようとする。ジンバルの回転角 θ_0 に比例した電圧 e_{sg} がSGに生じる。これを増幅してTGに負にフィード・バックしてジンバルに復元トルク T_3 を与える。

$$T_1 = Pa_i, \quad T_2 = T_1 - T_3 = J\ddot{\theta}_0 + C\dot{\theta}_0, \quad T_3 = K_{tg} i_{tg}$$

であり、定常状態においてジンバルはサーボ増幅器により零点付近に拘束され、 $T_1 = T_3$ となる。

ゆえに、

$$\begin{aligned} K_{tg} i_{tg} &= Pa_i \\ i_{tg} &= (P/K_{tg}) a_i \end{aligned} \quad (4.1)$$

したがって、TGに流れる電流 i_{tg} を測定することにより a_i が知れる。実際はTGに直列に入れた精密抵抗に生ずる電圧を測定する。

4.2 系の伝達関数

図3は図2をさらに各部の伝達関数を用いて表わしたもので、これより閉ループの伝達関数を求めると

$$\begin{aligned} i_{tg}/T_1 &= \frac{K_{sg} G_a(s) / \{s(1 + \frac{J}{C}sC)\}}{1 + [K_{tg} K_{sg} G_a(s) / \{s(1 + \frac{J}{C}sC)\}]} \\ &= \frac{1/K_{tg}}{1 + \{s(1 + \frac{J}{C}sC)/K(s)\}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} K(s) &= K_{tg} K_{sg} G_a(s) = K_{tg} K_{sg} A_G F_1(s) \\ &= K_{tg} K_{sg} A_G F_1(0) \{F_1(s)/F_1(0)\} \\ &= K(0) \{F_1(s)/F_1(0)\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここに、 $K(s)$ は系のエラスティック・リストレイント定数(バネ定数)であり、(4.3)式のように表わされるが、 $G_a(s)$ が $F_1(s)$ を含むため、その上限周波数に近づくにつれて $F_1(s)$ の影響を受けるため高い周波数範囲まで考えるときは、 s の関数と考えなければならない。(4.3)式において、 $K(0)$ および $F_1(0)$ は極めて低い周波数における $K(s)$ および $F_1(s)$ の値をあらわす。

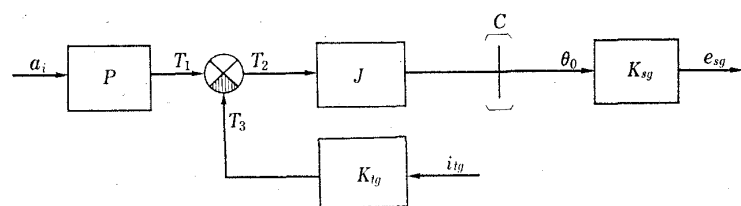


図2 Functional Block-diagram

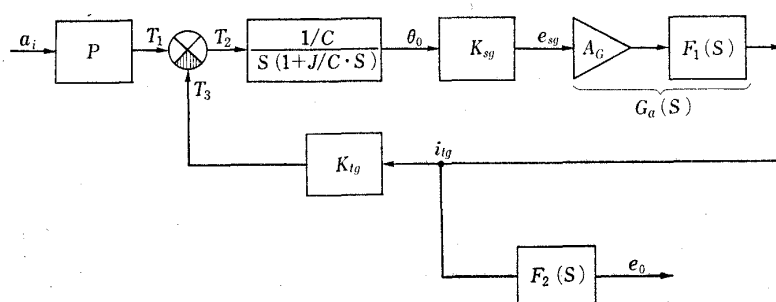


図3 Mathematical Block-diagram

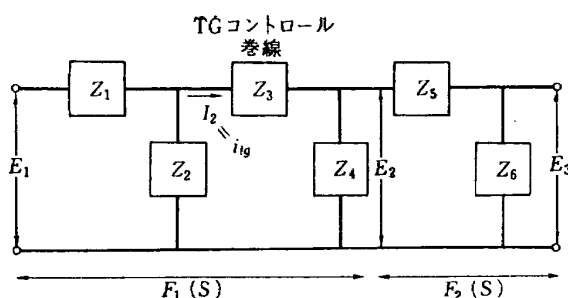


図4 フィルタ回路

(4.2)式に(4.3)式を代入し、かつ $Pa_i = T_1$, $i_{lg}F_2(s) = e_0$ なる関係を用いて

$$e_0/a_i = \frac{F_2(s)P/K_{lg}}{1 + [s(1 + \frac{J}{C})C / \{K(0)F_1(s)/F_1(0)\}]} \quad (4.4)$$

上式における $F_1(s)$, $F_2(s)$ を以下に求める。フィルタの回路は図4に示すとおりで、 $F_1(s)$, $F_2(s)$ 共カット・オフ特性の鋭いLCのローパス・フィルタとする。この場合

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= R_1 + L_1s \\ z_2 &= 1/(C_2s) \\ z_3 &= R_3 + L_3s \\ z_4 &= R_4 \\ z_5 &= R_5 + L_5s \\ z_6 &= R_6/(1 + R_6C_6s) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

であり、

$$\left. \begin{aligned} F_1(s) &= I_2/E_1 \\ F_2(s) &= E_3/I_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

であるから、図4の回路を解いて

$$\left. \begin{aligned} F_1(s) &= z_2(z_4 + z_5 + z_6)/\Delta \\ F_2(s) &= z_4z_6/(z_4 + z_5 + z_6) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

ただし

$$\begin{aligned} \Delta &= (z_1 + z_2)(z_2 + z_3 + z_4)(z_4 + z_5 + z_6) \\ &\quad - z_2^2(z_4 + z_5 + z_6) - z_4^2(z_1 + z_2) \end{aligned} \quad (4.8)$$

(4.7)式を(4.4)式に代入することにより系の厳密な伝達関数が得られた。この式は系の動特性を考える時に極めて有用である。

4.3 系の動特性を最良にするフィルタの設計

本加速度計の増幅器は400HzのACサーボ方式*であって、搬送波周波数 $f_c (=400\text{Hz})$ の波を、信号周波

数 f_s の波で振幅変調するもので、一般に $f_s \ll f_c$ なる範囲で用いる。 f_s の中に含まれる最高周波数を f_{sm} とすれば、増幅器は $(400 \pm f_{sm})\text{Hz}$ の周波数帯域の信号のみを忠実に増幅すればよく、低雑音、高利得、低ドリフトの増幅が可能になる。

変調波を復調した際に、 ω_s の他に $2\omega_c \pm \omega_s$, $4\omega_c \pm \omega_s$, ...などの高い周波数成分の波を生ずるので、復調器の直後に $F_1(s)$ を設け、これらを取り除く必要がある。

この場合、系の動特性を最良にするには、 $F_1(s)$ のカット・オフ周波数を高くし、 $2\omega_c \pm \omega_s$ 以上に対してのみきくようにし、かつ信号検出用にカット・オフ周波数の低い(ω_s のみ通過) $F_2(s)$ を設けて S/N 比を向上させるのが良いと考えられる。従来この種のACサーボ方式においては、 $F_1(s)$ に相当するフィルタのカット・オフ周波数を低くし、 $F_2(s)$ は用いないのが普通であるが、以下の考察により、上記の方法が最良と考えられる。

すなわち、系の閉ループ伝達関数は(4.2)式より

$$i_{lg}/T_1 = \frac{1/K_{lg}}{1 + \frac{C}{K(s)}s + \frac{J}{K(s)}s^2} \quad (4.9)$$

であるから、 $F_1(s)$ のカット・オフ周波数を高くしたときは信号周波数に対して $K(s) \approx K(0) = \text{一定}$ と考えられ

$$\omega_n = \sqrt{K(s)/J} \approx \sqrt{K(0)/J} \quad (4.10)$$

とかけるから、 J を一定としたとき $K(0)$ を大とすることにより ω_n の高い系が得られる。

しかるに、 $F_1(s)$ のカット・オフ周波数を低くしたときは、(4.3)式より $K(s) = K(0)\{F_1(s)/F_1(0)\}$ であるから本来定数であるべき $K(s)$ は、 $F_1(s)$ のためそのカット・オフ周波数以上では急激に小さな値となるため ω_n を高くすることはできない。また、考えている周波数範囲において $K(s)$ は大巾に変化するから、カット・オフ周波数の高いときのように、系を近似的に二次と考えることもできなくなる。

さて、 $F_1(s)$ のカット・オフ周波数を高くし、 $K(s) (\approx K(0))$ を大として ω_n を高めたとき、(4.9)式より

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{K(s)} \cdot J} = \frac{C}{2\sqrt{K(0)} \cdot J} \quad (4.11)$$

であるから、 ζ を適当な値(たとえば0.7)にするには、 C をあらかじめかなり大としておく必要がある。 C の

* 付録1参照

値としては $10^4 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$ 程度* は実現可能であり、 $J=58 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ とすれば $\zeta=0.7$ に対応する $K(0)$ は $0.86 \times 10^6 \text{ dyne} \cdot \text{cm/rad}$ が必要であり、このとき $f_n=19.4 \text{ Hz}$ となり、十分満足できる動特性が得られる。

なお上記の考察はあくまでも $K(s)=K(0)$ を仮定した場合であって、厳密には (4.5) 式 (s について七次になる) によらねばならない。後節、動特性の実験結果と理論計算との比較にはこの式を用いた。

4.4 加速度計の出力にあらわれる誤差

まず静的な場合について考える。(4.4) 式、(4.5) 式 (4.7) 式において $s=0$ とおけば、

$$e_0/a_i = F_2(0)P/K_{tg}$$

$$F_2(0) = R_4 \cdot R_6 / (R_4 + R_5 + R_6) = R_{456}$$

$F_2(0)$ は R_4 , R_5 , R_6 による合成抵抗 R_{456} と考えられる。

$$e_0 = Pa_i R_{456} / K_{tg}$$

ゆえに誤差の式は

$$\Delta e_0/e_0 = \frac{\Delta a_i}{a_i} + \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta R_{456}}{R_{456}} - \frac{\Delta K_{tg}}{K_{tg}} \quad (4.12)$$

上式において、第一項は加速度計の取付けミスアライメントなどにより生ずる誤差で、いまはこれがないものとする。第二項はペンデュラスティの変化による誤差で、内部温度変化によるジンバルの変形および軸受のガタによりみかけ上振子のうでの長さが変化するため生ずる。したがって、内部温度が一定になるように温度制御し、また軸受のクリアランスを極力小とする必要がある。第三項はTGに流れる電流を電圧に変換して測定するための抵抗の変化による誤差で、すぐれた特性のもの ($\Delta R/R=20 \text{ ppm}=2 \times 10^{-5}$ 程度) を用いれば、ほとんど問題なくできる。第四項は K_{tg} の非直線性に基づく誤差でマイクロシン型では1%程度と、これが全体の項の中で最も大きな値となることが予想される。

動的な場合は静的な場合に加えて、 $F_1(s)$, $F_2(s)$, C , $K(0)$ などにより影響を受けるが、使用可能な上限周波数が多少変動するだけであって、上限周波数(約20Hz)が目標周波数(約10Hz)の2倍にとってあるので動特性上余り問題はない。直線性等精度的な問題は静的な場合と同じである。

5. 特性実験

5.1 実験方法

(1) 分解能

バーニアで角度1分まで測定できる傾斜台に加速度計を取り付けて垂直面内で傾斜させ、重力加速度の分力を与えて分解能を調べた。1ステップ約3分 ($0.87 \times 10^{-3} \text{ G}$) ずつ手動で傾斜台を傾けた時の出力を記録した。

(2) 直線性

1G以下は(1)と同じ方法で、1G以上は遠心式加速度試験機で調べた。

(3) 固有周波数および減衰係数

動電型振動試験機のテーブル上に加速度計を取り付け、発生加速度を一定に保ちながら周波数を掃引して行なったとき、位相遅れが 90° になる周波数および出力変化のようすから求められる。

(4) 零点のドリフト

加速度計の電源スイッチ投入後約1時間経過後、さらに1時間にわたって零G状態で測定した。

5.2 実験結果および考察

以上のような方法で試作した加速度計の仕様を表1に、その特性図を図5, 6, 7, 8, 9に示す。

静特性、動特性とも予想したとおりの結果になった。

1G当りの出力は、(4.4) 式において、 $s=0$, $a_i=980 \text{ cm/sec}^2$ とおいて求められる。

表1 試作加速度計の仕様

加速度測定範囲	$\pm 4\text{G}$
分解能	10^{-3}G
ペンデュラスティ	$5.02 \text{ g} \cdot \text{cm}$
出力軸回りの慣性能率	$57.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
粘性抵抗係数	$10^4 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$
SGのスケール・ファクタ	5.05 V/rad
TGのスケール・ファクタ	$541 \text{ dyne} \cdot \text{cm/mA}$
増幅器の利得	$0 \sim 1100 \text{ mA/V}$
エラスティック・リストレイント定数	$0 \sim 3 \times 10^6 \text{ dyne} \cdot \text{cm/rad}$
出力感度	497 mV/G
直線性、ヒステリシス	共に1G出力の0.1%以下
固有周波数	20Hz 以上
外形寸法, 重量 (加速度検出部のみ)	$72 \text{ mm} \phi \times 104 \text{ mm}$, 654g

* 付録2参照

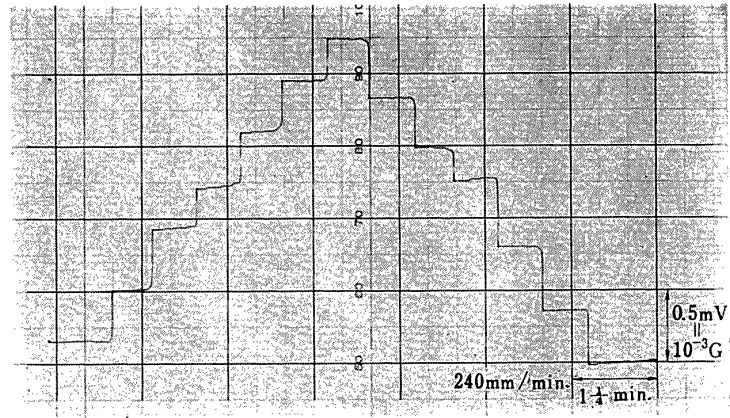


図 5 分解能試験

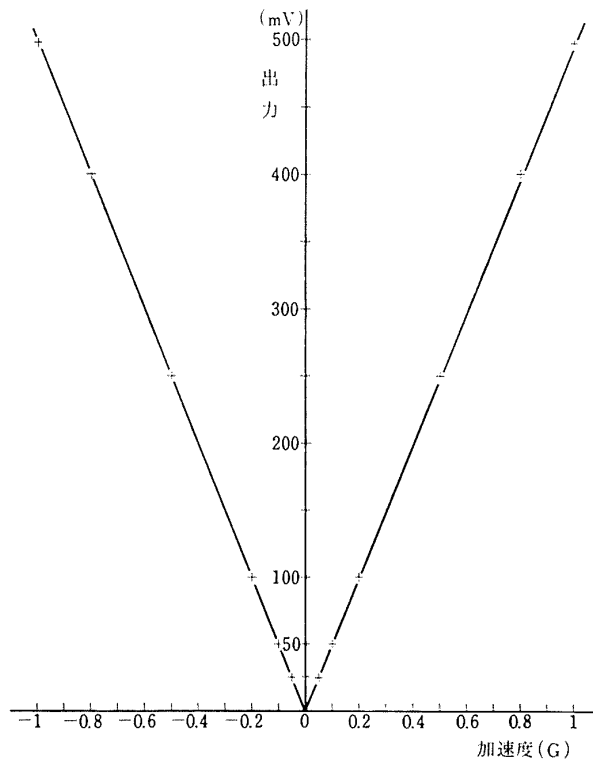


図 6 入出力特性 (1)

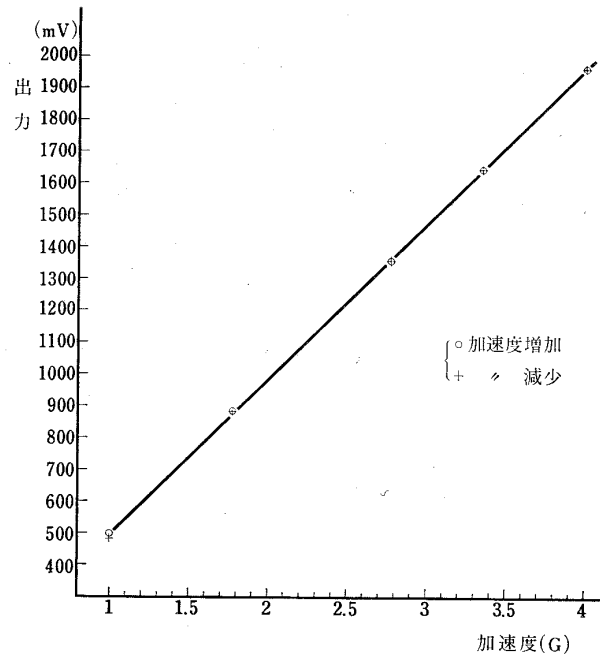


図7 入出力特性(2)

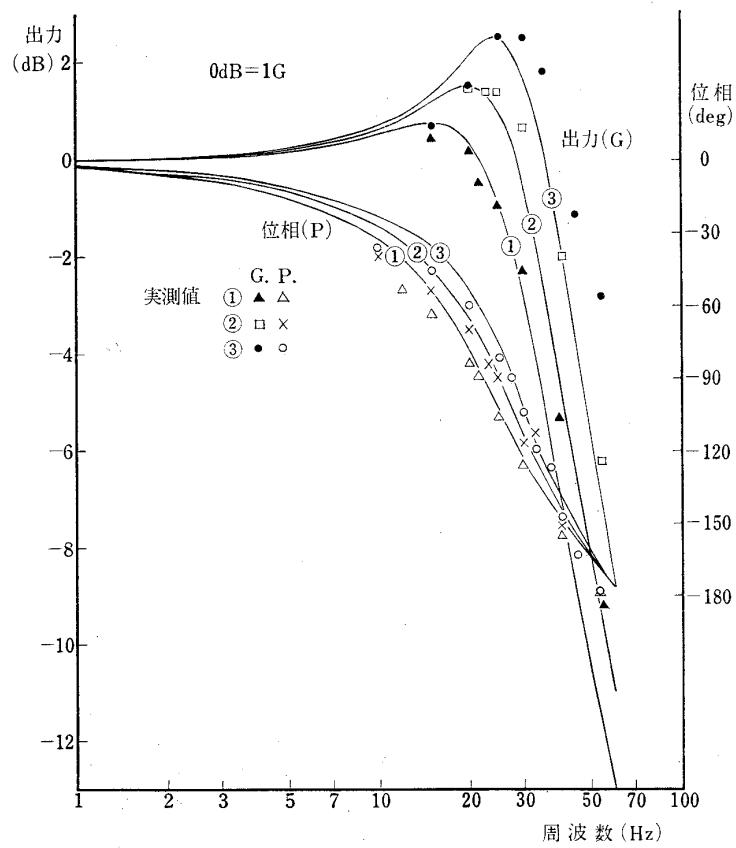


図8 動特性

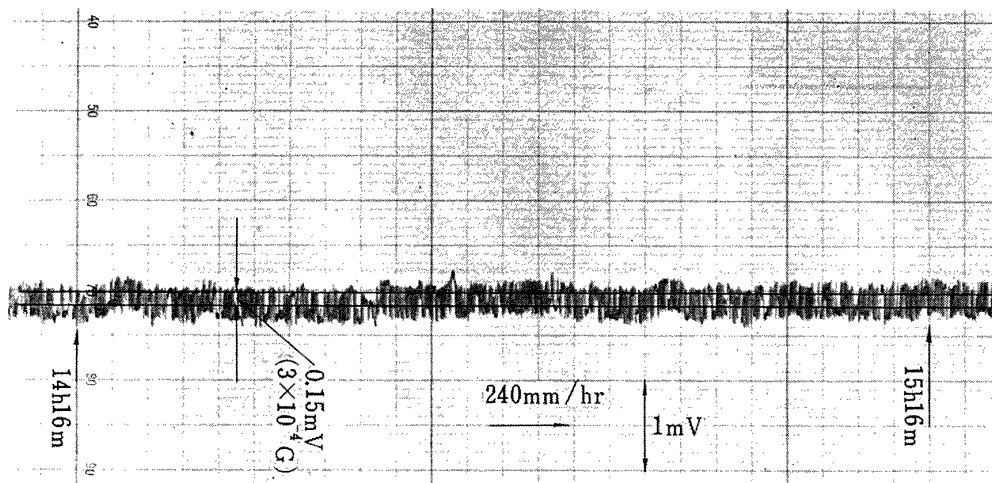


図9 ドリフト試験

$$e_0 = 980 F_2(0) P / K_{tg}$$

これに, $P = 5.02 \text{ g} \cdot \text{cm}$, $K_{tg} = 541 \text{ dyne} \cdot \text{cm} / \text{mA}$, $F_2(0) = 55.0 \Omega$ を代入すると

$$e_0 = 498 \text{ mV}$$

となり, 実験結果と良く一致する。

また動特性については, 4.3 節で予想したとおり $C = 10^4 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$ に対して, $\zeta = 0.7$ となる $K(0)$ が $0.86 \times 10^6 \text{ dyne} \cdot \text{cm} / \text{rad}$ でこの時 $\omega_n = 19.4 \text{ Hz}$ であったから, 実験のパラメータに用いた $K(0)$ に対してほぼ妥当な結果であった。

図5については, 粘性油の温度 76°C のとき分解能が最良で, ヒステリシスもフルスケール(4Gの値)の0.01%以下と極めて小さい。横軸は時間で記録紙送り速度は毎分 240mm である。

図6については, 1G以下の試験から直線性が1G出力の0.1%以下ときわめてすぐれていることがわかる。したがって検出精度は1Gの0.1% = 10^{-3} G である。

図7より, 1G以上では直線性0.5%と若干悪いが, 試験方法, 回転数の測定にも問題があると思われる。入力加速度 4Gまで直線性良好である。

図8では, 粘性油温度 76°C ($C = 1.11 \times 10^4 \text{ dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$) にて①②③の順に増幅器の利得 $Ga(0)$ を高く変えて実験したものでエラスティック・リストレイント定数 $K(0)$ もこの順に大となっている。実験のパラメータとした $Ga(0)$, $K(0)$ の値は

	$Ga(0) \text{ mA/V}$	$K(0) \text{ dyne} \cdot \text{cm} / \text{rad}$
①	406	1.11×10^6
②	504	1.38×10^6
③	627	1.71×10^6

である。図でプロット点が実験値, 実線は式(4.4)を0.5Hzおきに計算した値を連ねたものである。図からわかるように, $Ga(0)$ を変化することにより系の ω_n , ζ を任意の値に設定でき, したがって希望の動特性が得られる。本実験では比較的 ζ が小, したがってピークが高くなるような場合も示してあるが, 実際に用いる場合は $Ga(0)$ が①の値以下のところである。振動試験機で加速度一定として周波数を下げてくると, 周波数の二乗に反比例して振動テーブルの振幅が増大するため, 振動波形の歪が急激に増加する。したがって低い周波数でのデータが取れず, また実験値が理論曲線の上にきれいに乗らなかったものと思われる。

図9では1時間当りのドリフト量が最大 0.15mV であり, これは $3 \times 10^{-4} \text{ G}$ という極めて小さな加速度変化に相当することを示す。

6. む す び

以上浮動振子型加速度計を試作し, 特性実験と考察によりつぎのようなことが得られた。

(a) 第一次試作として $1 \times 10^{-3} \text{ G} \sim 4 \text{ G}$ を目標としたが, 広い測定範囲にわたり直線性良好, ヒステリシスもなく, 所期の目的を達成した。

(b) 粘性油の温度の決め方については, まず高分

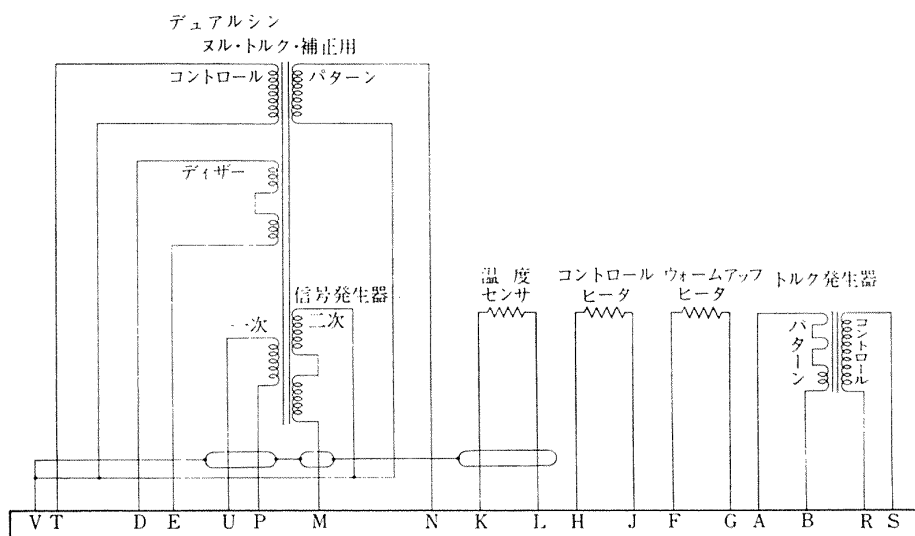


図 10 加速度計電気結線図

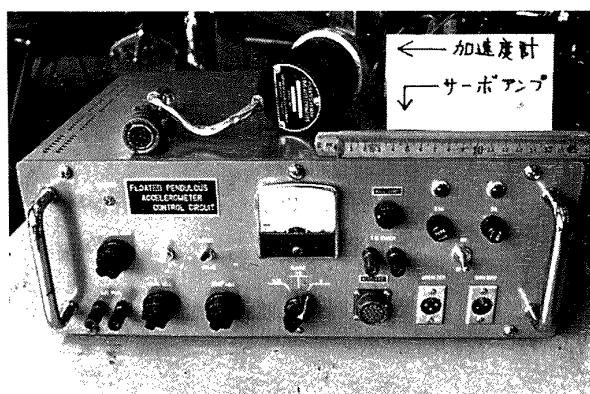


図 11 加速度計とサーボ増幅器の外観写真

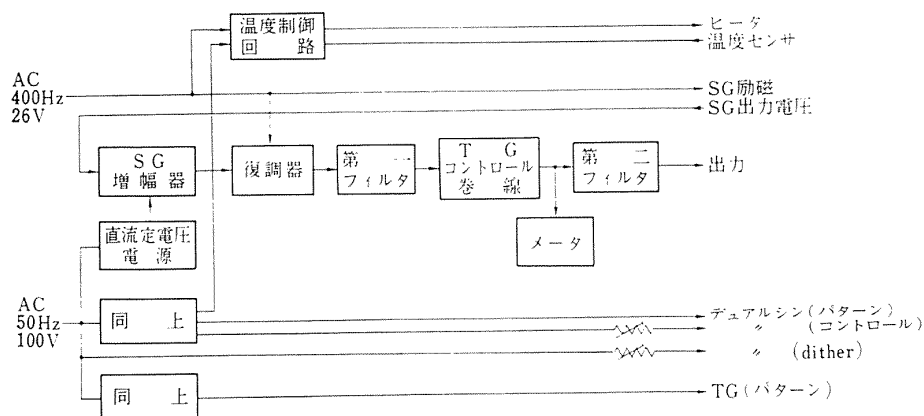


図 12 サーボ増幅器のブロック図

解能であることを優先し、最適なダンピングを得るには増幅器の利得調節によることとしたが、この方法で静特性、動特性とも満足できるものが得られた。

(c) 改良型デュアルシンにより、1個で①SG、②ヌル・トルク補正用TG、③デューザ用TGの三つの働きをさせたが、図10に示すごとくSG一次側を400Hz ACにて励磁、ヌル・トルク補正用およびデューザ用TGのパターンを共通としDCにて励磁、ヌル・トルク補正用TGコントロールはDC、デューザ用コントロールはAC 50Hz とすることにより相互の干渉もなく、それぞれの機能をはたすことができた。

(d) ペンデュラスティの決定に当てっては、ジャイロの場合の最小トルクに関するデータによったが、加速度計の場合にもこれが成立つことがわかった。

(e) 第二フィルタはおもに400Hzの搬送波の漏れを除去するためのものであるが、このカット・オフ周波数を50Hzとしても-12dB/octの割合では、400Hzにおいて-36dBの減衰度にしかない。第二フィルタのカット・オフ周波数が低いと信号周波数に対しても悪影響を与える。したがって、カット・オフ周波数を高く、また搬送波の漏れを小さくするためにも搬送波の周波数を高くする必要がある。

(f) さらに測定範囲を拡大し、また高精度とするにはジンバルのペンデュラスティを小とし、高精度可動コイル型トルク発生器を採用しなければならない。

(g) 図11に試作した加速度計とサーボ増幅器の外観写真を、また図12にサーボ増幅器のブロック図を示す。

終わりにあたり、この研究に関し助言をいただいた計測部 樋口部長および田畑室長また、製作にあたってご協力いただいた日本航空電子工業(株)の秋田技師長およびジャイロ課山田氏に感謝する次第である。

付 録

付録1 ACサーボ方式

搬送波および信号波の振幅および角周波数をそれぞれ A_c , ω_c および A_s , ω_s とすれば、振幅変調された波は

$$(A_s \sin \omega_s t) \cdot (A_c \sin \omega_c t) \\ = \frac{A_s A_c}{2} \left\{ \cos(\omega_c - \omega_s)t - \cos(\omega_c + \omega_s)t \right\}$$

とあらわされ、そのスペクトラムは $\omega_c - \omega_s$ と $\omega_c + \omega_s$ だけになる。

次に、この変調波を復調器にかけ、全波の位相検波

を行なうと

(復調器出力)

$$= A_c \sin \omega_c t \cdot (A_s \sin \omega_s t) \\ = \frac{2A_c A_s}{\pi} \left[\sin \omega_s t - \frac{1}{3} \left\{ \sin(2\omega_c + \omega_s)t \right. \right. \\ \left. \left. - \sin(2\omega_c - \omega_s)t \right\} - \frac{1}{15} \left\{ \sin(4\omega_c + \omega_s)t \right. \right. \\ \left. \left. - \sin(4\omega_c - \omega_s)t \right\} + \dots \right]$$

となり、そのスペクトラムは ω_s の他に $2\omega_c \pm \omega_s$, $4\omega_c \pm \omega_s$, ...などを含む。(A1図)

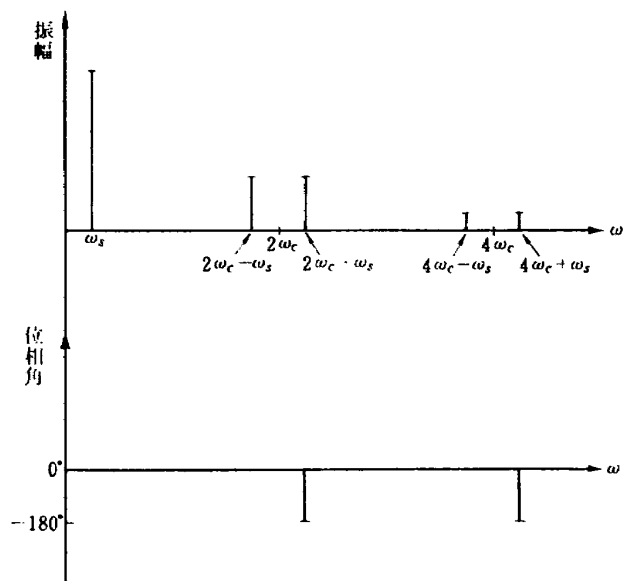


図 A1 復調器出力波の周波数スペクトラム

付録2 シアダンパー

図A2のごとく浮動ジンバルは円筒状とし、ケース(外筒)とのあいだに dx なるクリアランスを与え、そこに密度 ρ 、動粘性係数 ν なる粘性油を充填させるとき、円筒の表面部(黒くぬった部分、面積 A_D)に働

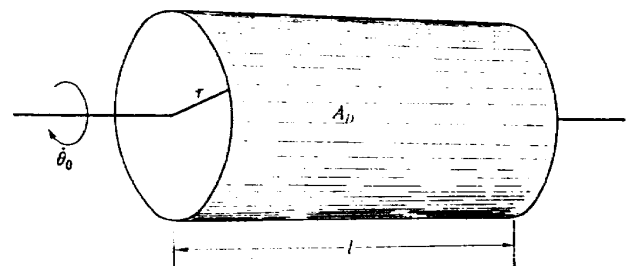


図 A2 円筒表面の粘性抵抗

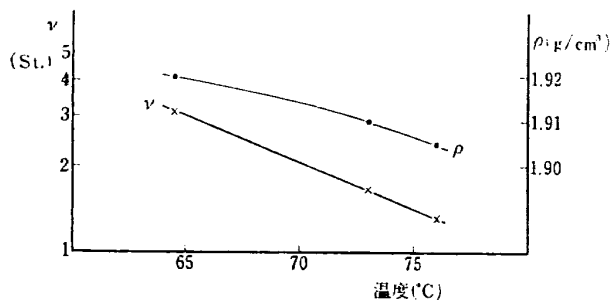


図 A3 温度対密度(ρ) 動粘性係数(ν)

粘性抵抗によるトルク T は、円筒の軸回りの角速度を $\dot{\theta}_0$ とすれば、

$$T = \rho \nu A_D \frac{r \dot{\theta}_0}{dx} r$$

$$= (2\pi \rho \nu r^3 l / dx) \dot{\theta}_0$$

$$= C \dot{\theta}_0$$

ただし

$$C = 2\pi \rho \nu r^3 l / dx$$

ρ , ν については、この粘性油の温度特性図(図A3)を参照し、 $r=17.48\text{mm}$, $l=20.15\text{mm}$, $dx=0.15\text{mm}$ として C を計算すると下記のようになる。

温度(°C)	$C(\text{dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{c})$
64.5	26,600
73.0	14,100
76.0	11,100

上記のごとく 76°C においても $10^4 \text{dyne} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}$ 以上の粘性抵抗係数が得られる。計算では SG, TG の

ータが取り付けられている円筒の左右両端部の粘性抵抗を無視したので、実験値はこの値より若干大となる。

文 献

- 1) M. Fernandez and G. R. Macomber; Inertial Guidance Engineering (1962) p.195, Prentice-Hall, Inc.
- 2) 田畑浄治, 大月正男, 鈴木孝雄, 秋田千秋, 堀内 禧次; 浮動式1自由度広角度積分ジャイロの開発について, 昭和43年度精機学会春季大会学術講演会前刷, p.311.
- 3) 1)と同じ p.58.
- 4) P.H.Savet; Gyroscopes: Theory and Design (1961)pp.340-344, Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
- 5) R.J.Mayhue; NASA ST-1 Flight-Test Results and Analyses, Launch Operations, and Test Vehicle Description, NASA TND-1240, (1962/6) pp.178-179.
- 6) E.J.Douze and J.D.Kerr; The Acceleration Environment Obtainable in Deep Holes, AIAA/AON Guidance and Control Conference (1965/8) pp.360-365.
- 7) W.M.Weil, W.E.Sroed and R.M.Barrows; Description of an Inertial Test Facility Located 1,100 feet below the Surface of the Earth, AIAA Guidance, Control and Flight Dynamics Conference (1967/8), AIAA Paper No. 67-538, pp.1-11.

TM-132 行列の最小固有値の一計算法	1968年5月	戸川 隼人, 戸川 保子
TM-133 フィラメント・ワインディング円筒の強度特性に関する研究	1968年5月	竹中 幸彦, 斉藤 浩一郎 古田 敏康, 藤島 鉦一郎 三本 茂夫, 小川 鉦一 越出 慎一, 朝田 洋雄 態倉 郁夫, 大竹 邦彦
TM-134 AGARD 標準模型 HB-1, HB-2 の超音速風洞試験	1968年5月	斉藤 秀夫, 石原 久蔵 原 亘利, 野田 順一 関 根 英夫
TM-135 歪ゲージの自己加熱による歪ドリフト	1968年5月	小川 鉦一, 遠藤 修司
TM-136 “NAL-16・31” および “NAL-25・31” 二段ロケット結合部の曲げ剛性試験	1968年5月	中井 暎一, 飯田宗四郎 高木 俊朗, 安藤 泰勝 菊地 孝男
TM-137 ロケットの三次元の運動の方程式および HITAC 5020 による軌道計算のためのプログラム	1968年5月	毛利 浩
TM-138 片持板の振動解析に関する考察	1968年6月	堀 武敏, 越出 慎一 林 洋一
TM-139 薄板構造の疲れき裂伝ば実験	1968年6月	竹内 和之, 野原 利雄 飯田宗四郎
TM-140 二次元スラットおよびスロッチェッドフラップの実験的研究 (II)	1968年7月	犬丸 矩夫, 北村 清美
TM-141 超音速二次元翼列予備実験風洞について	1968年7月	近藤 博, 坂口 一 八山 優, 高 森 晋
TM-142 二次元スラットおよびスロッチェッドフラップの実験的研究 (III)	1968年7月	犬丸 矩夫, 高橋 侔
TM-143 端面一体巻きフィラメント・ワインディング容器の静圧強度および疲れ強度	1968年8月	竹中 幸彦, 朝田 洋雄 野口 義男
TM-144 真ひずみ計の試作	1968年8月	竹中 幸彦, 朝田 洋雄 野口 義男
TM-145 スピンを伴うロケットの運動を計算するプログラム	1968年8月	戸川 隼人, 石黒登美子 山本 浩道
TM-146 双発STOL機の飛行試験 (実用運用包囲線および離着陸特性)	1968年8月	幸尾 治朗, 岡 遠一 塚野 雄吉, 鎌田 幸男 小野 孝次

注：欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料147号

昭和43年9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 一誠社綜合印刷株式会社
東京都武蔵野市御殿山1-6-10