

UDC 629.76.054.058.47 :  
550.380.8

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-187

ホール効果を用いた地磁気式姿勢計の研究

木村 茂・田畑浄治・松崎良継

1969年12月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- |         |   |           |   |
|---------|---|-----------|---|
| TR-166  | DPF バルブを用いた ジンバルエンジン駆動<br>用油制御系の基礎的解析<br>Fundamental Analyses of Gimbal-Engine<br>Positioning Hydraulic Control System<br>Made Use of DPF Servovalves   | 1968年11月  | 畑山茂樹, 輿石 肇                              |
| TR-167  | アブレーションによるよどみ点空力加熱の減<br>少の測定<br>Measurements of Heat Transfer Reduction<br>by Ablation at Stagnation Region   | 1968年11月  | 野村茂昭                                    |
| TR-168  | 角度測定周波数測定併用のトラッキングシス<br>テムの計算処理に関する研究<br>On the Orbit Determination Procedures for<br>the Doppler Frequency Measurement with<br>Angular Measurement Tracking System                                   | 1968年11月  | 鳥海良三, 松本一夫人<br>樋口一雄, 戸川隼人<br>木村武雄       |
| TR-169  | VTOV 機操縦研究設備<br>Design and Construction of VTOL Flight<br>Simulator System  | 1968年12月  | 樋口一雄, 百名盛之典<br>三好節子, 岡部正靖<br>山本六郎, 川原弘  |
| TR-170  | STOL 機の縦の自動安定制御方式に関する<br>研究 (I) 姿勢制御方式の解析<br>System Studies on Automatic Longitudinal<br>Stabilization Control Systems for STOL<br>Aircraft<br>Part 1 Automatic Attitude Control<br>Systems           | 1968年12月  | 堀川勇壮, 森 幹彦                              |
| TR-171T | Simple Flow Characteristics Across a Strong<br>Shock Wave   | Feb. 1969 | Kenneth K. Yoshikawa                    |
| TR-172  | 高速における円錐体および三角翼の動安定係<br>数の測定<br>Measurement of Dynamic Stability Deriva-<br>tives of Cones and Delta-Wings at High<br>Speed   | 1969年2月   | 柳沢三憲                                    |
| TR-173T | Coupling Effect of Radiative Heat on Con-<br>vective Heat Transfer  | Feb. 1969 | Kenneth K. Yoshikawa                    |
| TR-174  | Navier-Stokes 方程式に対する差分法<br>Difference Method for Navier-Stokes Equa-<br>tion   | 1969年4月   | 三好 甫                                    |
| TR-175  | 低レイノルズ数における NACA 0012 翼型<br>の失速特性について<br>—失速フラッタの研究II—<br>Stalling Characteristics of the NACA 0012<br>Aerofoil Section at Low Reynolds Num-<br>bers  | 1969年6月   | 中村泰治, 磯貝紘二<br>江尻 宏                      |
| TR-176  | 軸流回転機の翼の振動について<br>(I) 固有振動数, 振動形および振動応力分<br>布<br>On the Vibration of Turbomachine Blades<br>(I) Natural Frequency Mode and Stress<br>Distribution   | 1969年7月   | 宮地敏雄, 星谷昌二郎<br>祖父江靖, 網干三郎<br>岩部柱相, 武田克己 |
| TR-177  | 固体ロケットモータの推力大きさ制御の究研<br>—特性と小型モータによる実験—<br>Thrust Magnitude Control of Solid Rocket<br>Motors<br>—Characteristic Analysis and Small<br>Motor Tests  | 1969年7月   | 五代富文, 湯沢克宜<br>伊藤克弥, 西村久雄                |
| TR-178  | 測度最大の可制御領域を与える二次形式評価<br>関数の最適重みマトリクスに対する必要条<br>件<br>Necessary Conditions for the Optimal<br>Weighting Matrices of Quadratic Perform-<br>ance Index to Maximize the Measure<br>of the Controllable Set | 1969年7月   | 川幡長勝                                    |

# ホール効果を用いた地磁気式姿勢計の研究\*

木村 茂\*\*・田畑浄治\*\*\*・松崎良継\*\*

## A Magnetic Attitude Measuring Instrument Applying the Hall Effect

By Shigeru KIMURA, Johji TABATA  
and Yoshitsugu MATSUZAKI

Sensing devices which detect the attitude of a vehicle in the terrestrial magnetic field using the direction sensitive properties of semiconductor Hall elements for lines of magnetic force have been produced experimentally. A Hall element consisting of InSb of 10 to 15 micron thickness has sufficient output voltage for application to a telemetry transmitting system by being placed between magnetic concentrators of high permeability material rods 25 millimeters or more in length and has excellent linearity with regard to direction sensitivity, with an angular uncertainty of one degree for the azimuth angle in the direction perpendicular to the meridian. Concentrators of permalloy PC whose coercivity is very small, brought about successful results in the frequency characteristics of the sensing devices. The FRP enclosure vehicle hull which contains the sensing device did not affect the sensor's performance, but the steel enclosure of 1.8 millimeter thickness caused the sensitivity of the sensing device to decrease by 60%, while an iron block at a distance of 30 centimeters or more did not disturb the output signal of the sensing device. This attitude sensor is especially useful for a small rocket because of its tiny size and the very simple construction.

### 1. まえがき

ロケットの飛しょう時の姿勢は、飛しょう実験において最も求めたい測定項目の一つである。飛しょう体の姿勢の検出器として最も普通なものはジャイロスコープ（フリージャイロ、積分ジャイロ等）であって、きわめて精度の高いものが得られる。しかし、インバータ、復調増幅器、ケーシング増幅器等各種の付属回路類を要し、構成が複雑で寸法重量とも大きく、価格もかなり高価である。また一部の観測ロケットには倍周波型磁力計を搭載して地磁気に対する角度を測定する方法が用いられている<sup>1)</sup>。これは、非線形素子の磁心に励振巻線と出力巻線を巻き、励振巻線に交流を通して励振させ、地磁気が重畳されることによって出力巻線に得られる高調波を検波して地磁気の方角と大きさを求め、これを姿勢の検出に用いるものである。この方式も、高周波交流電源、炉波器、検波増幅器等を要し、小型ロケットに搭載するには容積重量、取扱い

等の面で限界があると思われる。

そこで NAL-16（直径 160 mm）、NAL-7（直径 70 mm）級のロケットにも搭載できる程度に小型軽量で、かつなるべく簡易に姿勢が測定できる方式について検討した結果、半導体ホール素子の利用に着目し、これを用いて地磁気方向を検出し姿勢を求める方法について可能性を確かめることとした。

ホール素子は単独では地磁気に対する出力が小さいので、高透磁率材料からなる磁気集束器を用いることによって感度を高め十分な出力を得ることができた。このような検出器を試作して、まず単体としての諸特性を実験的に求め、実用上十分な性能を有することを明らかにし得たのでここに報告する。

### 2. 原 理

半導体ホール素子を地球磁界の中におき、磁力線に対する素子の向きを変えると発生するホール電圧が変化する。ホール電圧  $V_H$  は次式で表わされる（図 1 参照）。

$$V_H = \frac{R_H}{d} \int_H I_c B \cos \theta \quad (1)$$

\* 昭和 44 年 11 月 5 日受付

\*\* 計測部

\*\*\* 宇宙開発事業団

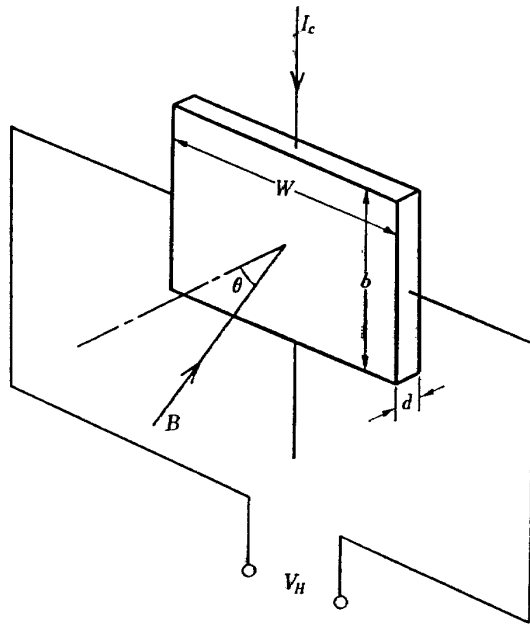


図 1 原理図

- $R_H$ : ホール係数  
 $d$ : 素子の厚さ  
 $f_H$ : 素子の形状係数 (素子の長さとの幅の比に関する量)  
 $I_c$ : 制御電流 (入力電流)  
 $\theta$ : 素子面の垂線と磁力線とのなす角  
 $B$ : 磁界の磁束密度

したがって、 $I_c$  と  $B$  が一定の場合は、ホール電圧は  $\cos \theta$  に比例する。このようなホール素子を飛ばしうに搭載すれ地球磁界に対する飛ばしう体の方位を求めることができ、機体座標の直交 3 軸に沿っておのの素子を配置すれば各出力の関係から空間における飛ばしう体の姿勢を求めることができるはずである。

地磁気の大きさは微弱なので素子単独では出力としてのホール電圧が小さく実用が困難であるので、磁気集束器を用いる。すなわち、図 2 のような全長  $l$  の高透磁率材料の棒の中央部にわずかな空隙  $l_a$  をおき、その中にホール素子をはさむように置くと、磁気利得  $K$  は

$$K = 0.2 \frac{l}{l_a} \quad (2)$$

で与えられる<sup>2)</sup>。集束器を用いた場合の出力電圧は

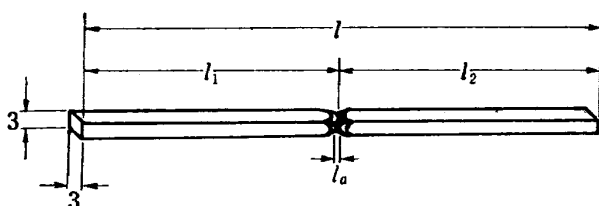


図 2 集束器概略図

$$V_H = K \frac{R_H}{d} f_H I_c B \cos \theta \quad (3)$$

で示すことができる。

さらに、検出器としての性能上、地磁気に対する出力電圧および角度の分解能が大きいことが望ましいので、ホール素子材料としては前者のために最大磁束密度感度  $(V_H/B)_{\max}$  が大きく、後者のために検出可能な最小磁界変化の小さいものを選んだ方がよい。 $(V_H/B)_{\max}$  は、制御電流  $I_c$  による素子内の熱発生量の限界によって定まり、素子半導体が単一 carrier のみを有する場合、または  $n$  型の場合には  $(mR_H)^{1/2} = m\rho^{1/2}$  に比例する<sup>2)3)</sup>。ただし、 $m$  は電子移動度、 $\rho$  は抵抗率で  $R_H = m\rho$  の関係がある。また、角度分解能については、原理的に素子内で発生する雑音によって制限されると考えられる。(3) 式を書き直して

$$V_H = V_{Hm} \cos \theta \quad (4)$$

ただし、 $\theta$  以外の量を一定とし、

$$V_{Hm} = K \frac{R_H}{d} f_H I_c B$$

とおく。上式より

$$\Delta V_H = -V_{Hm} \sin \theta \cdot \Delta \theta \quad (5)$$

最小検知角変位  $\Delta \theta$  は、それに対する出力電圧変化  $\Delta V_H$  が雑音電圧  $e_N$  以上となったとき検出可能である。素子内の雑音電圧は、熱雑音  $\bar{e}_T$  とショット雑音  $\bar{i}_s$  からなると考え、これらはおのおの次式で示される<sup>4)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \bar{e}_T^2 &= 4kTR_2 \Delta f \\ \bar{i}_s^2 &= 2eI_H \Delta f \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$k$ : Boltzmann 常数

$T$ : 絶対温度

$R_2$ : 素子の出力抵抗

$\Delta f$ : 帯域幅

$e$ : 電子電荷

$I_H$ : ホール電流

素子の負荷抵抗  $R_L$  が出力抵抗  $R_2$  に比して十分大きい場合、 $I_H \doteq \frac{V_H}{R_L}$  と考えてよい。(6) 式を用いて

$$e_N^2 = \bar{e}_T^2 + (R_L \bar{i}_s)^2 = 2 \Delta f (2kTR_2 + eV_H R_L) \quad (7)$$

いま、 $(\Delta V_H)^2 = e_N^2$  とすれば

$$(\Delta \theta)^2 = \frac{2 \Delta f (2kTR_2 + eR_L V_{Hm} \cos \theta)}{V_{Hm}^2 \sin^2 \theta} \quad (8)$$

検出器の分解能を  $\theta = 90^\circ$  における最小検知角  $\Delta \theta_1$  であらわすとすれば (8) 式より

$$(\Delta\theta_1)^2 = \frac{4kTR_2\Delta f}{\left(K\frac{R_H}{d}f_H I_c B\right)^2} \quad (9)$$

素子の制御電流方向の長さを  $b$ , ホール電圧方向の長さを  $w$  (図 1) とすれば  $R_2 = \rho \frac{w}{bd}$  であるから (9) 式は

$$(\Delta\theta_1)^2 = \frac{4kT\Delta f\rho\frac{w}{b}d}{(KR_H f_H I_c B)^2} \propto \frac{\rho}{R_H^2} = \frac{1}{m^2\rho} \quad (10)$$

$\Delta\theta_1$  を小さくするには  $m\rho^{1/2}$  が大きいことが必要である。すなわち, 最大磁束密度感度および分解能のいずれの点からも  $m\rho^{1/2}$  の大きい素子が望ましいことになる。

常温で使用されるおもなホール素子材料の特性値の例を表 1 に示す。これによると Ge が  $m\rho^{1/2}$  の値は最も高いが, 温度依存性が大きいのが欠点である。また Si は出力インピーダンスが非常に高く使いにくい。InAs は温度特性がよいのが利点であるが, InSb の方が移動度が高く安定であるのと<sup>2)</sup>, われわれの目的に適した小型のものが入手容易であるので, これを用いることにした。

表 1 ホール素子材料の特性

材 料	$\frac{m}{(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec})}$	$\frac{\rho}{(\Omega\cdot\text{cm})}$	$\frac{R_H}{(\text{cm}^3/\text{C})}$	$m\rho^{1/2}$
Ge	3,600	25.0	87,000	18,000
Si	1,700	100.0	170,000	17,000
InAs	36,000	0.0173	600	4,600
InSb	60,000	0.005	350	4,200

集束器の材質としては, なるべく初透磁率  $\mu_0$  が高く, 保磁力  $H_c$  の小さいものが効果的と考えられるが, 最初の試作はフェライト (TDK 製 Q<sub>1</sub>B 材) を用い, のちにパーマロイ PC のものを試作し, 比較を行なった。Q<sub>1</sub>B の  $\mu_0$  は 560,  $H_c$  は  $0.4O_e$ , パーマロイ PC は  $\mu_0$  が 15,000 程度,  $H_c$  が  $0.04O_e$  以下である。

### 3. 検出器性能計算値

#### 3.1 出力電圧

(3) 式より, 出力電圧最大値は  $\theta=0^\circ$  における値で

$$V_{Hm} = K\frac{R_H}{d}f_H I_c B \quad (11)$$

InSb 素子を用いれば表 1 によって  $R_H=350\text{cm}^3/\text{A}\cdot\text{sec}$ 。フェライト集束器を用いて試作したものについて

は,  $d=10\mu$ ,  $b=0.2\text{mm}$ ,  $w=0.3\text{mm}$ ,  $\therefore b/w \approx 0.67$  したがって文献 3) p. 16 より  $f_H=0.6$  程度と考えられる。集束器の全長  $l=50\text{mm}$ , 空隙  $l_a=50\mu$  とすれば, 磁気利得は  $K=0.2\frac{l}{l_a}=200$  となる。地磁気水平成分は約  $0.3O_e$  で, 空中での透磁率は 1 であるから  $B=3\times 10^{-5}\text{Wb}/\text{m}^2$ 。また, 制御電流は  $I_c=20\text{mA}$  とする。これらの値を (11) 式に入れると

$$V_{Hm}=2.52\times 10^{-3}\text{V}$$

すなわち, 水平面内で南北方向に対して  $\pm 2.5\text{mV}$  程度の出力が期待でき, これはロケットのテレメータ装置によって容易に送信できるレベルである。

#### 3.2 分解能

(8) 式を用いて, 最小検知角  $\Delta\theta$  を計算する。用いる諸数値は次のようにとる。

$$k=1.38\times 10^{-23}\text{W}\cdot\text{sec}/^\circ\text{K}, \Delta f=10\text{Hz}$$

$$T=300^\circ\text{K}, V_{Hm}=2.52\times 10^{-3}\text{V},$$

$$R_2=30\Omega, e=1.60\times 10^{-19}\text{C}, R_L=5\times 10^7\Omega$$

$R_L$  は検出器出力を増幅するための増幅器の入力抵抗である。

$\theta=90^\circ$  の場合の最小検知角  $\Delta\theta_1$  は (9) 式により計算され,

$$\Delta\theta_1=0.00307'$$

となる。また,  $\theta=0^\circ$  では (8) 式によれば  $\Delta\theta$  が無限大となるので, 次式を用いて求める。

$$\begin{aligned} e_N &= V_{Hm} - V_{Hm} \cos\theta\Delta\theta \\ &= V_{Hm} \cdot 2 \sin^2 \frac{\Delta\theta}{2} \approx V_{Hm} \frac{(\Delta\theta)^2}{2} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta\theta \approx \sqrt{\frac{2e_N}{V_{Hm}}} = \sqrt{\frac{2}{V_{Hm}} \sqrt{2\Delta f(2kTR_2 + eV_{Hm}R_L)}} \quad (12)$$

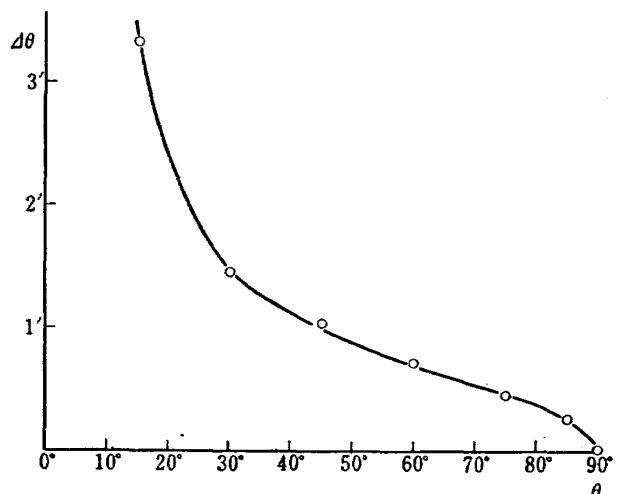


図 3 分解能 (計算値)

数値を入れると  $\Delta\theta \approx 1^\circ 17'.3$  となる。

その他の  $\theta$  についての計算値を図 3 に示す。

3.3 測定精度

検出器固有の理論的な分解能は前節の通りであるが、角度検出の精度は実際に使用する状態では、出力電圧  $V_H$ 、制御電流  $I_c$  の測定、設定の精度によって定まる。(3) 式を書き直して

$$\cos \theta = \frac{V_H}{K \frac{R_H}{d} f_H I_c B} \quad (13)$$

$V_H$ 、 $I_c$  の測定または設定の誤差  $\delta V_H$ 、 $\delta I_c$  によって  $\theta$  の誤差  $\delta\theta$  を生ずるとすれば

$$|\delta\theta| = \left| \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\delta V_H}{V_{Hm}} \right| + \left| \cot \theta \frac{\delta I_c}{I_c} \right| \quad (14)$$

$\delta V_H$ 、 $\delta I_c$  にはこの実験で用いたデジタル電圧計および直流電流計の精度をあてるとすれば、

$$\delta V_H = \pm 5 \times 10^{-5} \text{ V}$$

$$\delta I_c = \pm 4 \times 10^{-5} \text{ A}$$

$$V_{Hm} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ V}$$

$$I_c = 2 \times 10^{-2} \text{ A}$$

$\theta = 90^\circ$  における精度は

$$\delta\theta_1 = \frac{\delta V_H}{V_{Hm}} = 2 \times 10^{-2} \text{ rad} = 1^\circ 09' \quad (15)$$

で示される。その他の  $\theta$  について上記の数値を (14) 式に入れて計算した値を図 4 に示す。ただし  $\theta = 0^\circ$  については

$$|\sin \theta \cdot \delta\theta| \approx (\delta\theta)^2 = \left| \frac{\delta V_H}{V_{Hm}} \right| + \left| \cos \theta \frac{\delta I_c}{I_c} \right| \quad (16)$$

により求めると  $|\delta\theta|_{\theta=0^\circ} = 0.149 \text{ rad} = 8^\circ 32'$

すなわち、角度の測定誤差は  $\theta = 90^\circ$  近くでは約  $1^\circ$  であるが、 $\theta = 0^\circ$  付近ではかなり大きくなる。

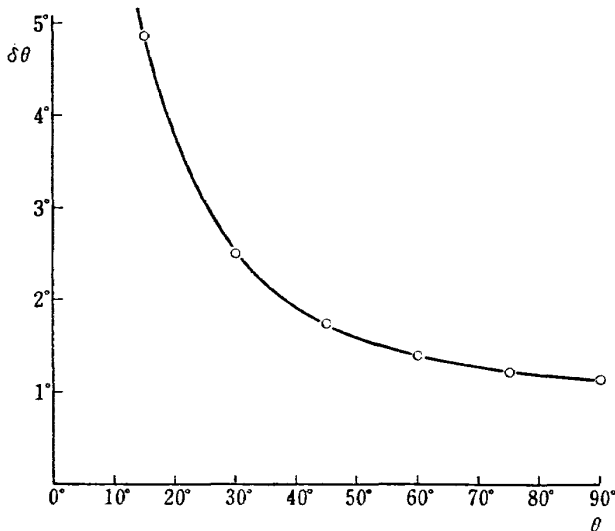


図 4 精度 (計算値)

4. 実験

実験に使用したホール素子は図 5a、図 5b に示す平面形をした  $n$  型 InSb でフェライトの磁気集束器をつけたものは厚さ  $5 \sim 10 \mu$ 、入力抵抗  $15 \sim 60 \Omega$ 、出力抵抗  $20 \sim 60 \Omega$  であり、パーマロイの磁気集束器をつけたものは厚さ  $1.5 \sim 2 \mu$ 、入力抵抗  $480 \sim 700 \Omega$ 、出力抵抗  $320 \sim 900 \Omega$  である。磁気集束器は図 2 に示す形状のフェライトおよびパーマロイの角棒をホール素子の両側に密着させたものでフェライトでは  $l_1 = l_2 = 5 (l=10)$ 、 $17.5 (l=35)$ 、 $25 (l=50)$ 、 $50 (l=100)$  mm の対称形のもの、 $l_1 = 5$ 、 $l_2 = 30 (l=35)$ 、 $95 (l=100)$  mm の非対称 3 種類を作り、パーマロイにつ

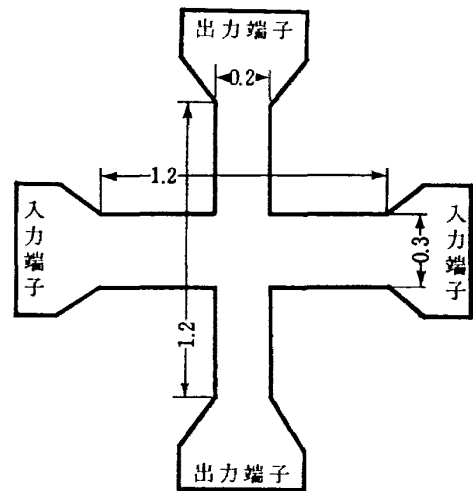


図 5a 素子平面図 (n 型 InSb)

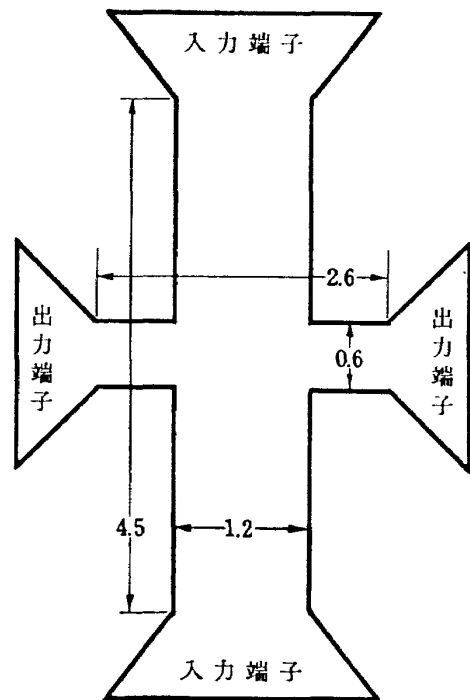


図 5b 素子平面図

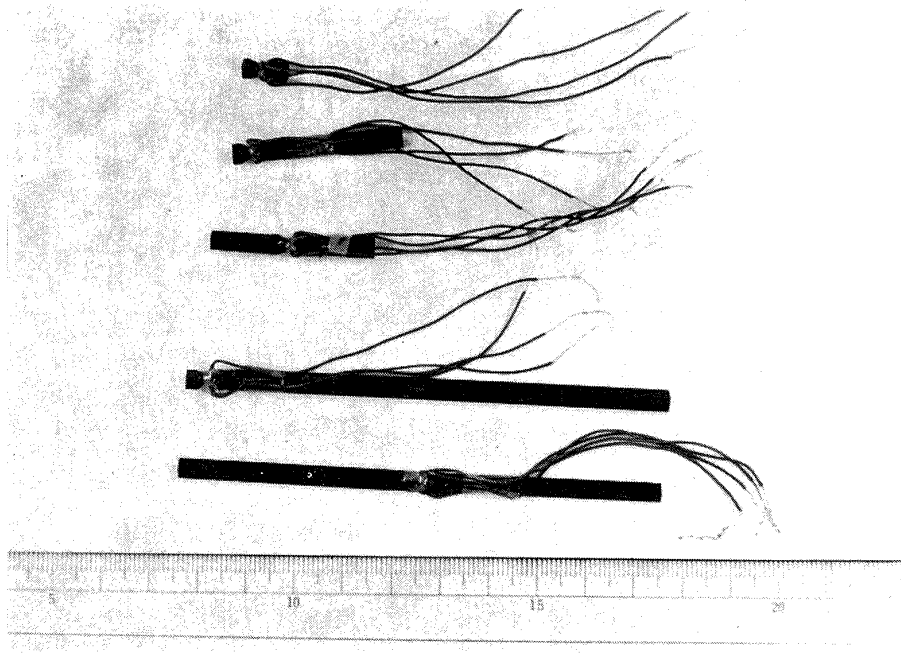


図 6a フェライトの集束器をつけた検出器

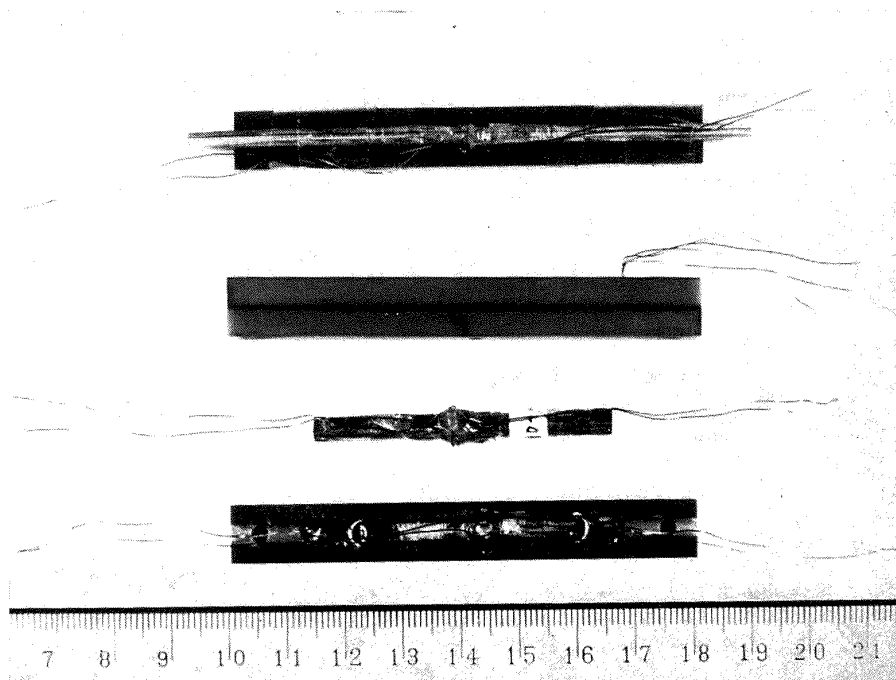


図 6b パーマロイの集束器をつけた検出器

いては  $l_1=l_2=17.5$  ( $l=35$ ),  $25$  ( $l=50$ ),  $50$  ( $l=100$ )mm の対称形3種類を作った。図 6a, 図 6b はこれら検出器の写真である。これら各検出器について最初に単体としての諸特性, 磁性体の影響, 検出器相互間の影響およびロケットに搭載した状態について実験を行なった。以下順にその結果につき述べる。

#### 4.1 検出器単体の直線性および出力電圧

前述の各検出器を一定磁界(地球磁界)中 ( $\theta=0^\circ$ ) に

おき, 素子に流す制御電流  $I_c$  を  $0\sim 40$  mA まで変化させ, それに対する出力電圧をデジタル電圧計にて測定した。その結果を図 7 に示す。横軸は制御電流  $I_c$  で, 縦軸はホール電圧  $V_H$  である。各検出器とも制御電流に比例して発生するホール電圧は直線的に増加しておりフェライトのものについては  $40$  mA まで, パーマロイのものについては  $15$  mA まで略々完全に直線性を示していることがわかる。以後の実験については

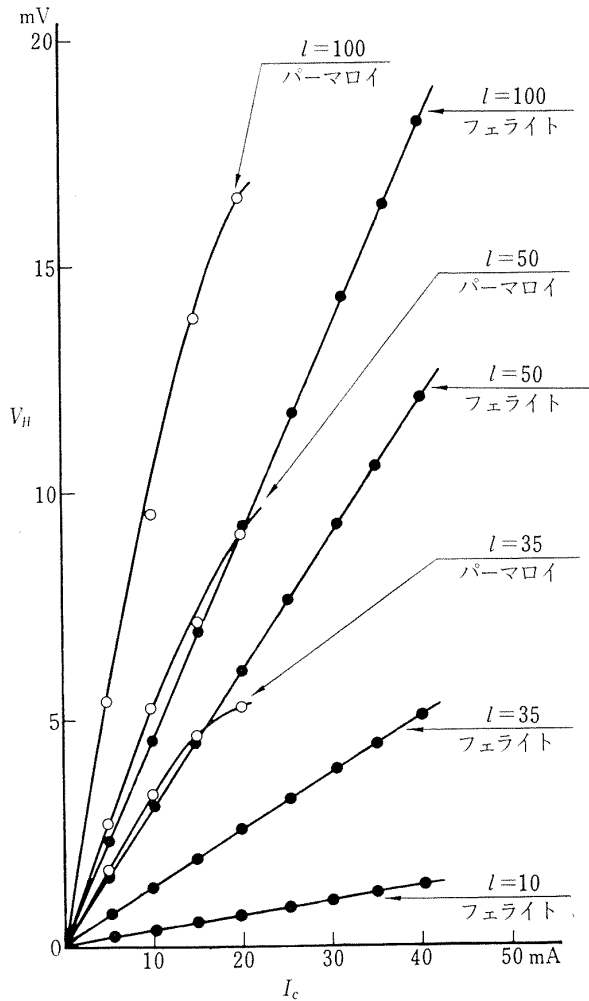


図 7 制御電流  $I_c$  と出力電圧  $V_H$

制御電流はフェライトのものについては 20 mA, パーマロイのものについては 8 mA に固定して行なった。

次に、これらの各検出器を実験室（地球磁界）内において光学割出台（Leitz 製、角度にして 2" までの精度）のテーブル面上約 1m の高さの所に水平にとりつけ鉛直軸まわりに回転させ、10° おきにその出力電圧を測定した。図 8 は実験中の写真である。測定結果は出力電圧の大小はあるがすべての検出器について完全な余弦曲線となり (3) 式を十分満足するものであることが実験的に確認された。これは各検出器が地磁気に対して完全な直線性を有することを証明している。その一例としてフェライトの集束器をつけた  $l=50\text{ mm}$  のものを図 9 に示す。横軸は角度（方位角） $\theta$  を、縦軸は出力電圧  $V_H$  を示してある。また表 2 には同図における実験値およびそれに対応する余弦曲線の計算値が示してある。

また、上記実験結果、各素子に密着させた磁気集束器の長さ  $l$  に対する出力電圧最大値の関係を図 10 a, 図 10 b に示す。この値は 3.1 節の計算で予期された程度以上の値を示し、実用上十分なレベルである。同

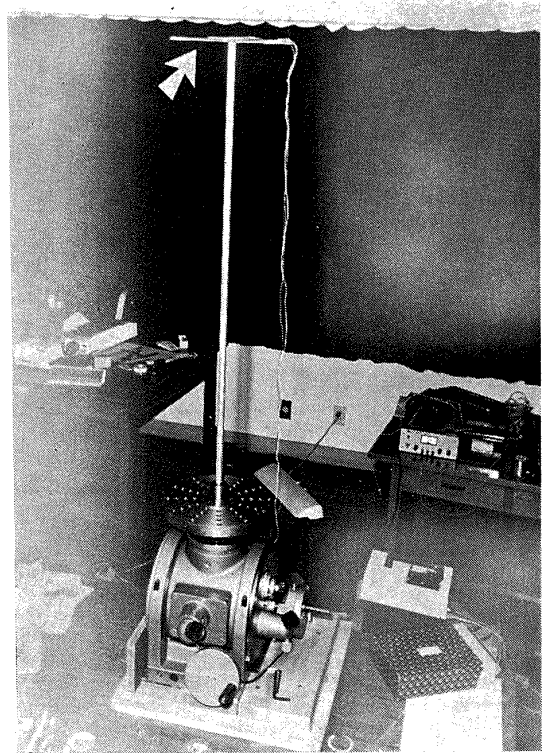


図 8

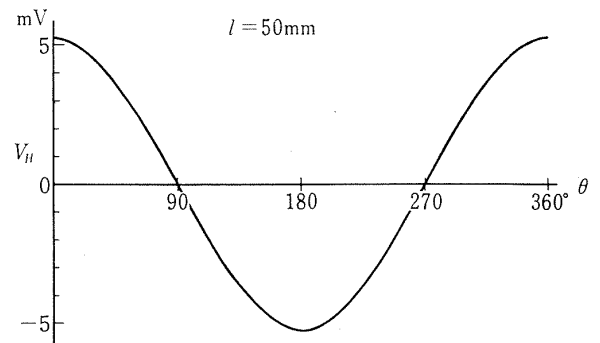


図 9 地磁気に対する出力曲線（水平分力）

表 2 出力電圧と対応する余弦曲線の数値

$\theta$	$V_H$ mV	$5.20 \cos \theta$	$V_H - 5.20 \cos \theta$
0°	5.21	5.20	+0.01
30°	4.50	4.50	0
60°	2.57	2.60	-0.03
90°	0.04	0	+0.03
120°	2.57	2.60	-0.03
150°	4.48	4.50	-0.02
180°	5.20	5.20	0
210°	4.51	4.50	+0.01
240°	2.64	2.60	+0.04
270°	0.02	0	+0.02
300°	2.57	2.60	-0.03
330°	4.50	4.50	0
360°	5.20	5.20	0



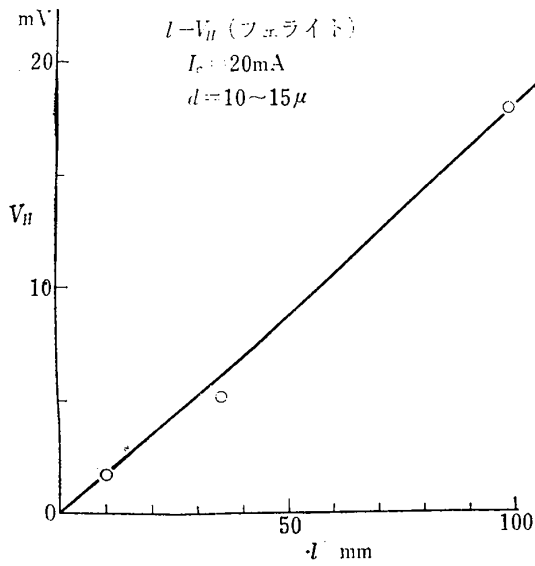


図 10 a 集束器長さに対する最大出力電圧

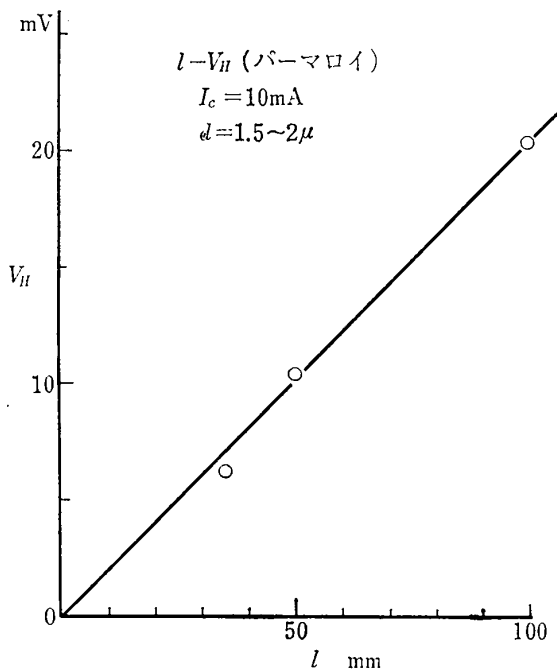


図 10 b 集束器長さに対する最大出力電圧

図 a はフェライトの集束器をつけたものであり、b はパーマロイの集束器をつけたものである。図 10 および 7 からわかるようにおのおのの出力電圧は多少バラツキがあるが、集束器の長さにはほぼ比例しているといえる。このバラツキは素子と集束器との空隙  $l_a$  が製作上つねに同一とはならないため (2) 式の  $K$  の値が多少変化することと素子自体の特性のバラツキによるものと考えられる。

#### 4.2 温度特性

各検出器を恒温槽に入れ、槽内温度を  $0\sim 80^\circ\text{C}$  まで  $5^\circ\text{C}$  おきに段階的に変化させ、各温度における出力電圧を測定した。ただし、検出器の向きは  $\theta=0^\circ$  である。その結果を図 11 に示す。横軸に温度、縦軸には  $25^\circ\text{C}$  における出力電圧を基準とした値に対する大きさを百分率で示してある。図に示すように出力電圧は低温になれば上昇し、高温になるにしたがって減少する傾向がある。これは素子 InSb のもつ特性である。しかし実際に小型ロケットに搭載し、使用する場合はベークライトかプラスチック等で検出器を密封し、打ち上げ時の衝撃や加速度から保護する必要があるので、このような処置をほどこしたもの (今回はベークライトで密封した) について、さる 43 年 9 月種子島実験場における NAL-16-H-1 の飛しょう実験データを基にして恒温槽内の温度を変化させてその温度特性を調べた。その結果を図 12 に示す。横軸に飛しょう時間、縦軸に温度 (検出器周囲温度) 変化、および出力電圧の変化率を示してある。図中点線は温度を、実線は検出器の出力電圧の変化率を示しており、記号の同じものがあいつている。このように飛しょう時

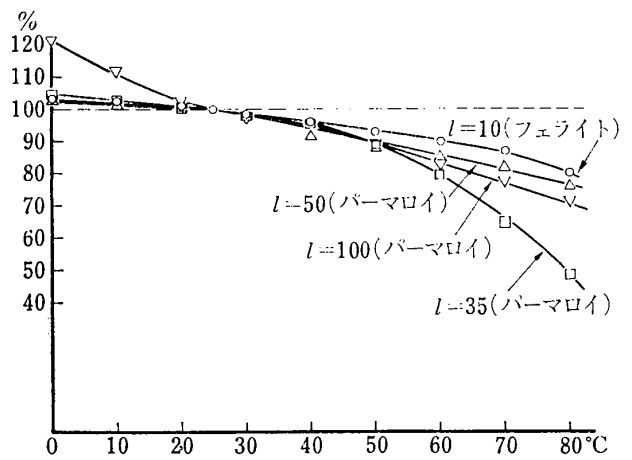


図 11 温度特性

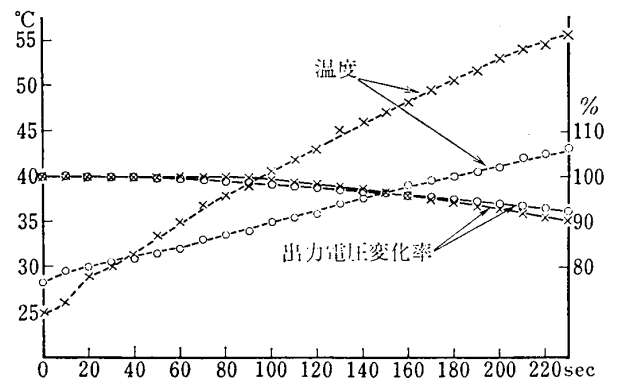


図 12 飛しょう時間と温度特性

間が割合に短かく、かつ検出器単体をベークライト等で密封すれば素子自体の温度変化が小さくなり、したがってその出力電圧の変化も小さく実用上温度による影響は非常に少ないことがわかった。

#### 4.3 周波数特性

ロケットが高速で回転運動する場合でも確実に計測するには、その応答性がよく、かつ変化しないことが望ましい。そこで検出器単体を回転テーブルの上に乗せ、テーブルを 0.02 c/s (1.2 rpm) から最大 3 c/s (180 rpm) まで回転させ、その出力電圧  $V_H$  を電磁オシログラフに記録し、その記録から読みとった結果を図 13 に示す。横軸に周波数 (回転数)、縦軸には 0.02 c/s における出力電圧  $V_H$  を基準にとり、それに対する百分率で出力電圧  $V_H$  を示してある。図からわかるように出力電圧はフェライトの磁気集束器をつけたものは集束器の長さに略々比例して減少する傾向があり、 $l=10$  mm の場合でも 3 c/s で約 4%、 $l=100$  mm では約 20% も減少する。これに対してパーマロイ PC の磁気集束器をつけたもので  $l=35, 50$  mm のものはほとんど減少することなく、 $l=100$  mm のものでも 3 c/s でわずかに約 3% の減少にすぎない。これは前述 (2 節) のようにパーマロイ PC の保磁力  $H_c$  がフェライトのそれよりはるかに小さくヒステリシスが小さいためと考えられる。この結果より磁気集束器の材質としてはフェライトよりもパーマロイを使用した方がより有利であることがわかる。

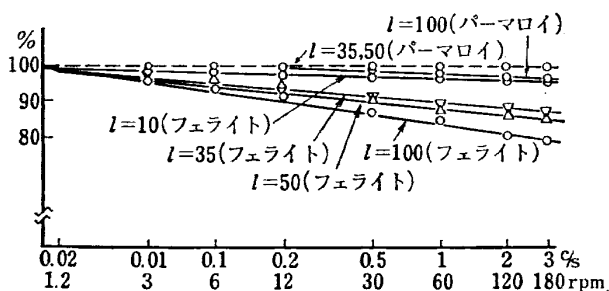


図 13 周波数特性

#### 4.4 磁性体の影響

ロケットの本体は大部分は強磁性体である鉄鋼類を使用する機会が多い。磁性体の近傍にこの姿勢計をおき姿勢計測をする機会が多いので、近傍にある磁性体の影響について実験的に確かめた。実験方法は図 14 に示すように鉄のブロック (直径 27 cm, 高さ 35 cm) を検出器の近辺におき、この鉄のブロックからどのくらい離れば正常な出力電圧を示すか調べた。すなわ

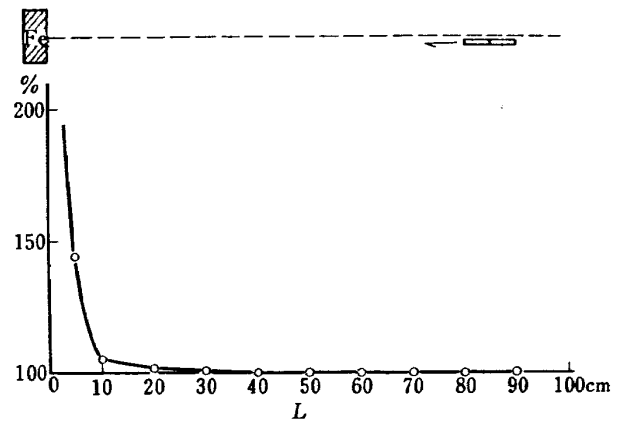


図 14 磁性体の影響

ち、まず各検出器を磁性体の影響のない状態でその出力電圧を測定し、その値を基準値とする。次に検出器を徐々に磁性体 (鉄のブロック) に近づけ、その出力電圧の変化を調べたものが図 14 に示す曲線である。横軸は検出器と磁性体との距離、縦軸は出力電圧の変化率をとってある。この図は実験を行なった各検出器の中で最も影響の大なるもの、すなわち、 $l=100$  (フェライト) で最大出力を出したのものについてかいたもので他のものはこれより小さい。この結果、各検出器は磁性体より約 30 cm 離せばその影響はほとんどないことが明らかである。

#### 4.5 検出器相互間の影響

前節で磁性体の影響について実験的見地から論じたが、小型ロケットの場合、計測装置はノーズコーンの内部のせまい空間に設置されることが多い。その場合各検出器には強磁性体であるフェライトまたはパーマロイ等の磁気集束器があるので各検出器単体間における相互影響があることは容易に考えられる。すなわち、取付け方法が不適當であると測定精度が低下するような場合も起こり得る。そこでわれわれは検出器相互にどの位接近すれば干渉が起こるか、つまり検出器単体間の距離をどのくらい離せば相互の影響がなく正しい値を示すかを実験的に調べた。測定中の検出器に他の検出器を近づけ、両者の間隔  $r$  を 5, 10, 20, 30, 40, 50 mm にとり検出器の出力電圧の変化を調べた。その結果を図 15a に示す。図からわかるように、 $r$  が 30 mm\* 以上離れば相互影響は全くないが 30 mm 以下になると相互影響が少しずつ出はじめ、ゼロ点の移動が起こり、その出力電圧も幾分増

\* 図には一方向のみを示してあるが検出器の向きには関係なく 30 mm 離ればよいことが実験でわかった。

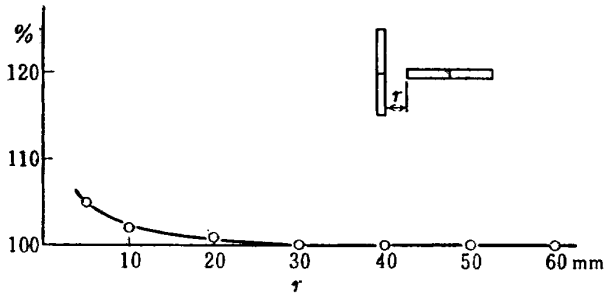


図 15 (a) 検出器相互間の影響

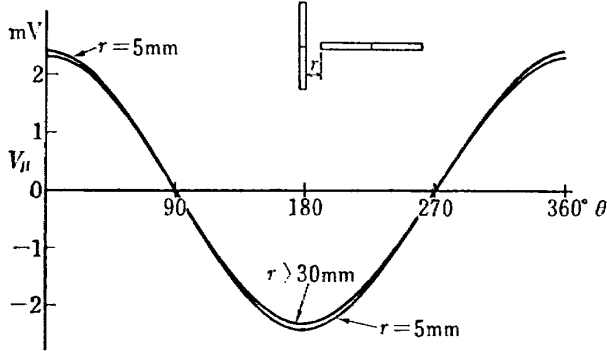


図 15 (b) 検出器相互の干渉

加する傾向がある。その中で最も近づけた  $r=5\text{ mm}$  の結果を図 15b に示す。これはゼロ点が約 3% 移動したがそのずれを除いた出力曲線を示している。図からわかるようにその出力電圧は最大出力において約 2.5% 増加する。この図は集束器の長さ  $l=50\text{ mm}$  の場合を示すが磁気集束器の長さが長い程その影響は大になることが実験的に確かめられた。以上の結果より小型ロケットのノーズコーンの内部のように小さなスペースでも十分使用できることがわかった。

#### 4.6 ロケット機体材質の影響

実際のロケットのノーズコーンを使用して実機に搭載したと同様な状態にしてその材質の影響を測定した結果について述べる。実験に使用したノーズコーンは FRP (160φ, 厚さ 6 mm), ステンレススチール (160φ, 厚さ 1.8 mm), ジュラルミン (160φ, 厚さ 3.6 mm) および薄い鉄板 (厚さ 0.4 mm) を円筒形 (160φ) にまるめたもの 4 種類である。実験中ノーズコーンの下端は厚い鉄板でおおった。その際の検出器出力を図 16 に示す。図に示すようにノーズコーンを使用せず、つまり検出器をそのまま露出して得たデータが図の“なし”と記したものでこの値を基準とした。FRP の場合は当然であるが明らかに基準値に対して何らかの差も認められない。これは金属類が全く使用されていないためである。次にジュラルミンの場合はその最大出力値が基準値の約 93% となり、出力電圧は数 % 小さくなる。また薄い鉄板の場合は約

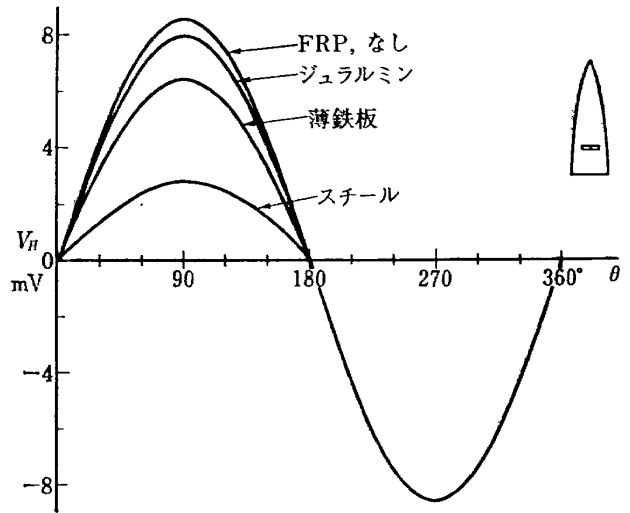


図 16 ロケット機体材質の影響

75%, スチールの場合は約 25% となってしまいます。ただし、NAL-16-H ロケットのノーズコーンに使用されているスチール (SUS 27) オーステナイト系ステンレス鋼の場合、焼なまし状態では非磁性を示すので出力電圧は約 60% に減少するだけである。これらの結果ノーズコーンの材質はできる限り金属類を除き FRP 系が望ましいことがわかる。

### 5. まとめ

小型ロケットに搭載し、小型軽量で簡易にその飛しょう時における姿勢測定を行なう方法としてホール効果を利用する検出器について試作実験を行ない実用可能性を検討した。そのおもな結果を述べる。

1. 半導体ホール素子 (この場合は InSb) に高透磁率材料であるフェライトまたはパーマロイ PC の磁気集束器を密着させることにより、地球磁界において発生するホール電圧を著るしく大きくすることができる。その値は大体集束器の長さに比例し、かつ地球磁界に対する直線性も良好である。
2. 磁気集束器材料としてはフェライトとパーマロイ PC の 2 種類について比較実験をしたが、前者に比べ後者の方が予想通り非常に優れていることがわかった。
3. 得られた実験結果より集束器の大きさは 3 mm 角で長さ  $l=50 (l_1=l_2=25)\text{ mm}$  ぐらいでテレメータ装置により容易に送信できる程度の出力電圧が得られる。
4. 測定精度は磁界に直角な方向において  $1^\circ$  程度が期待され、分解能は十分大きい。しかし  $\theta=0^\circ$  付近では測定値に数度の誤差が生ずるので飛しょう体 3 軸に

ある一定角度（例えば  $45^\circ$ ）ずらしたもう一組の検出器をとりつけ感度が悪くなった場合、その方に電気的に切り換えを行えば測定精度は一段とよくなる事が期待できる。

5. 動特性はフェライトの集束器をつけたものよりパーマロイ PC をつけたものがはるかに優れており、実用上十分なものである。また、温度特性も検出器をベークライトかプラスチックで密封する等の処置をほせば実用上あまり温度の影響は受けない。

6. ロケット機体材質としてはFRPが望ましいが、内部の磁性材料の影響は約 30 cm 離し、また検出器相互干渉をさけるには 30 mm 離せばよい。

このような検出器は従来のものに比べきわめて小型軽量、かつ、ソリッドで取り扱いも容易である。また付属器としては電池等の直流電源のみを要し、出力電圧は従来のテレメータ用増幅器に接続すればよく、きわめて簡易な構成で使用でき、その大きさは検出器単体の長さがベークライトで密封した場合で約 80 mm であるのでこれを別々に 3 軸にとりつけられる空間があればよいのが大きな特徴である。

これらの結果から本方式の検出器は十分実用性があり、特に小型ロケット用として有望であると考えられる。今後はさらに、これら検出器を飛しょう体 3 軸に配置して搭載し、各検出器出力を合成処理して姿勢を直接に求め得るような方式について検討する予定である。

おわりに本研究について終始ご指導いただいた樋口計測部長に感謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 加藤愛雄他；カップ 8 型 11 号機によるロケットの姿勢測定，生産研究，15 巻 7 号 (1963) pp. 127-129
- 2) N.P. Milligan and J.P. Burgess; Hall-Effect Devices for Low Level Magnetic Detection, Solid-State Electronics, Vol. 7 (1964) pp. 323-333
- 3) 片岡照栄他；ホール効果の計測・制御・情報処理技術への応用，電気試験所調査報告 158 号 (昭 41 年)。
- 4) たとえば W.R. Bennett; Electrical Noise (1960), pp 86- , McGraw-Hill.

TR-179	テフロン非定常アブレーションの測定 Measurements of Transient Ablation of Teflon	1969年8月	野村茂昭
TR-180	鈴鹿山脈付近における乱気流の観測 Measurement and Analysis of Atmospheric Turbulence over the Suzuka	1969年8月	竹内和之, 小野幸一 山根皓三郎, 岡遠一 外崎得雄
TR-181	振動翼における表面非定常圧力の測定 —失速フラッタの研究(Ⅲ)— Unsteady Surface Pressure on an Oscillating Aerofoil at High Mean Angles of Attack with Special Reference to Stall Flutter	1969年8月	中村泰治, 磯貝紘二 江尻宏
TR-182	点束縛のある板の振動について On the Natural Vibration of Plates Restrained at Several Points	1969年9月	塙武敏, 多田保夫 泉日出夫, 越出慎一
TR-183	軸流圧縮機動翼取付部の強度についての実験的研究 —隙間のあるピン接合部— Experimental Investigation of Strength of Axial Flow Compressor Blade Root —Pin Joint Lug having Clearance between Pin and Pin Hole—	1969年9月	池田為治, 山岸崇
TR-184T	An Improved Method of Designing and Calculating the Minimal Wave Drag Configuration by Supersonic and Moment-of-Area Rules	Oct. 1969	Kenneth K. Yoshikawa
TR-185	FRP ロケットノーズコーンの赤外線輻射による加熱実験	1969年11月	小川鑛一, 遠藤修司
TR-186	ロケット搭載用伝送線路型アンテナの解析	1969年12月	田畑浄治, 桜井善雄 三浦雅男, 松崎良継 塚本憲男

---

## 航空宇宙技術研究所報告187号

昭和44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 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2-27-12

---

