

# 科学衛星磁気試験装置

斎藤 成文・野村 民也・二宮 敬虔  
村 守 清\*・道野 敏夫\*\*・渡辺 勝己\*

## Magnetic Moment Test-Equipment for Scientific Satellites

By

Shigebumi SAITO, Tamiya NOMURA, Keiken NINOMIYA, Kiyoshi MURAMORI,  
Toshio MICHINO and Katsumi WATANABE

**Abstract:** In the design and construction of an artificial satellite, it becomes necessary to measure accurately the magnetization of the satellite and the components, and to demagnetize or compensate for it. For these purposes, we have developed a magnetic moment test-equipment for our scientific satellites.

The equipment consists fundamentally of a spherical and a circular pick-up coils surrounding the rotating body under test. Another spherical coil is provided to cancel the geomagnetic field inside the pick-up coils or to generate a uniform magnetic field of up to 60 oersted. The functions of the equipment are (1) measurement of the magnetic moment (magnitude and direction) of a satellite, (2) semi-quantitative localization of its position, (3) measurement of the magnetic moment of the components, (4) demagnetization, and (5) to provide a uniform magnetic field for other experiment. It can perform these functions even in the presence of a relatively large environmental noise. The measurement operation is simple. Therefore, it provides a practical means for the magnetic test of a satellite.

In this report, the principles of the measurement, the outline of the construction of the equipment, and the results of the test measurement are presented.

### 概 要

科学衛星の設計製作に関連して、衛星や部品の磁気モーメントを正確に測定するとともに、その磁氣的補償や消磁を行なう必要が生じる。筆者らは、これらを目的とした科学衛星磁気試験装置を設計製作した。

本装置は基本的には、球面および円形の検出コイルより構成され、その内部で被試験体を回転することによって検出コイルに生じる誘起起電力を検出する方法による。地磁気の消去あるいは 60 エルステッドまでの一様磁界を発生するために、同じ球面上に別のコイ

---

\* 日立製作所横浜研究所

\*\* 日立製作所戸塚工場

ルが設けられている。本装置の機能は、(1)衛星の合成磁気モーメント(大きさと方向)の測定、(2)磁気モーメントの局在分布の半定量的解析、(3)部品のもつ磁気モーメントの測定、(4)消磁、および(5)その他の実験のための一様磁界の発生、である。本装置の特徴は、比較的外来雑音の多い環境においても、高感度にかつ簡便に上記諸機能をはたしうる点にある。

本装置の完成を機会に、本報告では、測定方法の原理、装置の概要、および各機能の試験結果について報告する。

## 1. 緒 言

衛星の搭載機器等により現われる磁気モーメントの成因には、永久磁石によるもの、軟磁性体より発せられるものおよび電子回路の電流によるものが挙げられる。これらの磁気モーメントは、スピン安定衛星においては宇宙空間を飛ばし中地球磁場と作用するためにプリセッショントルクを発生して、スピン軸方向のドリフトを生じ衛星の姿勢制御を行なうのに大きな障害となる。したがってあらかじめ地上において衛星に残留する磁気モーメントを測定して磁氣的平衡をはかっておくことが必要である。

磁気モーメントの測定法にはトルクを測定する方法[1],[2]、Field Mappingによる方法[3]および衛星を回転させる方法[4]が行なわれている。これらはそれぞれ一長一短がある。科学衛星等の小形衛星や搭載機器、部品の測定には操作が簡単で短時間に測定できる、雑音が容易に除去できる、較正が簡単かつ正確であるなどの点で回転法が有用であるとの判断のもとに、回転法による磁気試験装置の設計、製作を行なった。

装置の設計は外来雑音の多い環境でも微小磁気モーメントの測定が行なわれ、また合成磁気モーメントの局在分布の解析、衛星、搭載部品等の消磁試験および球形コイルによる均一磁界中での物理試験が行なえるようになっている。

装置の完成を機会に、本報告では設計過程の検討結果、衛星搭載部品の測定例も含めて、測定方法、装置の構成、試験結果についてその概要を報告する。

## 2. 測 定 方 法

各測定の原理、測定の方法、手順について概説する。

### 2.1 球形検出コイルによる磁気モーメントの測定

球形検出コイル内で磁気モーメントを回転させると、磁気モーメントによる磁束が検出コイルと鎖交することによりコイル内に誘起電圧が発生する。この電圧を測定することにより磁気モーメントを求めることができる。誘起電圧と磁気モーメントとの関係は測定される磁気モーメントの種類により異なり以下に説明するとおりである。

#### 2.1.1 磁石等により発生する一定磁気モーメントの測定\*

これは衛星の有する磁気モーメントの大半を占められると思われるもので、永久磁石等の残留磁気により発生する。これらのモーメントと誘起電圧との関係は次のように求められる。

回転体の渦電流より発生する磁気モーメントを除くため無磁界中で測定が行なわれる。図

\* 電子回路等に流れる一定電流によって発生する磁気モーメントも含める。

1 に示す球形コイルによって球内に発生する磁界  $H$  は (1) 式に示す均一磁界となる [5].

$$H = \frac{NI}{3R} \quad [\text{AT/m}] \quad (1)$$

ただし,  $N$ : 球形コイル全巻数  
 $I$ : 球形コイル電流  
 $R$ : 球形コイル半径  
 $H$ : 球形コイル軸方向磁界.

そこで球形コイル軸を地磁気方向に一致させて地磁気を消去することによりコイル内を無磁界とすることができ.

図 1 に示す球形コイルにはこれと同軸に検出用球形コイルが巻かれている. このコイルと内部の円形コイルとの間の相互インダクタンス  $m$  は (2) 式で与えられる.

$$m = \frac{\mu_0 N_i N_s S \cos \theta}{3R} \quad [\text{H}] \quad (2)$$

ただし,  $N_r$ : 円形コイル巻数  
 $N_s$ : 球形検出コイル巻数  
 $S$ : 円形コイル面積  
 $\theta$ :  $Z$  軸と円形コイル面垂直方向  $n$  との成す角  
 $\mu_0$ : 真空の透磁率.

内部円形コイルに電流  $I_r$  を流し (3) 式に示す磁気モーメント  $M$  を発生させる.

$$M = \mu_0 N_r S I_r \cdot n \quad [\text{Wb} \cdot \text{m}] = Mn \quad [\text{Wb} \cdot \text{m}] \quad (3)$$

(3) 式の  $M$  によって発生する磁束が球形コイルと鎖交する数は (2) 式を用いれば (4) 式で与えられることがわかる.

$$\phi_s = \frac{N_s M \cos \theta}{3R} \quad [\text{Wb}] \quad (4)$$

図 1 に示すように円形コイル ( $M$ ) を  $X$  軸の回りに  $\omega$  なる角速度で回転させると球形検出コイルには (5) 式で示す電圧  $e$  が誘起される.

$$e = -\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{N_s \omega M}{3R} \sin \omega t \quad [\text{V}] \quad (5)$$

したがって (5) 式により, 誘起電圧を測定することにより回転軸と直角方向の磁気モーメントを求めることができる\*.

本装置では  $\omega$  を一定 (1 Hz) にし (6) 式に示すように電圧波形の最大値を測定する.

\* 回転軸方向の磁気モーメント成分は球形検出コイルと鎖交する磁束を発生しないのでこのままでは測定できない.

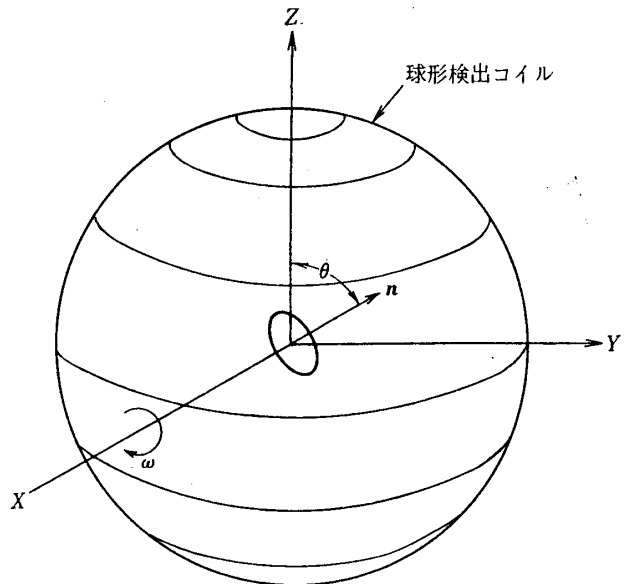


図 1 測定原理

$K$ は  $M$  の既知のコイルにより較正される.

$$E = \frac{N_s \omega M}{3R} = KM \quad [\text{V}] \quad (6)$$

ただし,  $E$ : 誘起電圧の振幅

$K$ : 定数

さて実際の衛星の有する合成磁気モーメントは次に示すように, その大きさと方向が測定される.

合成磁気モーメントの中心が衛星内任意の点にあっても (2) 式は成り立つので, 図 2 に示すように磁気モーメントの中心が球形検出コイルの中心にあると考えると (6) 式の関係は変わらない.

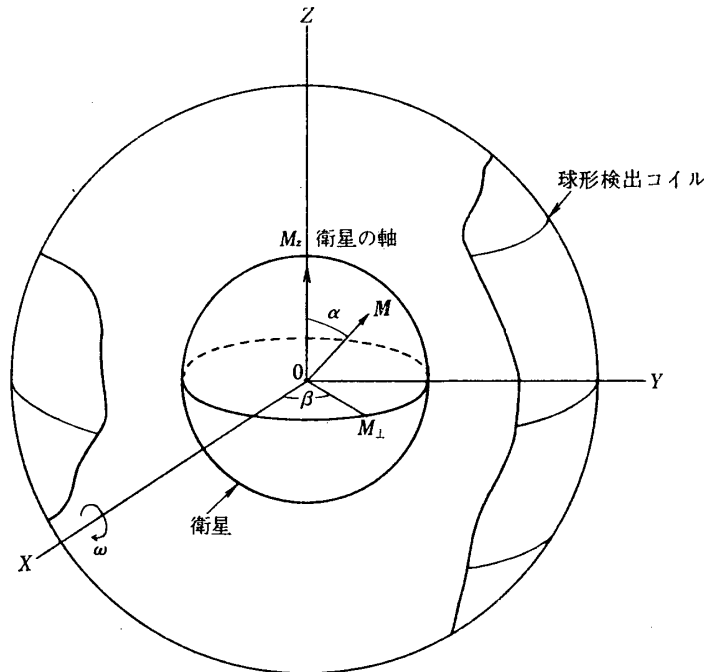


図 2  $M$  の大きさと方向の測定

図 2 において,  $X$  軸と  $\beta$  なる方向に  $M$  がある場合  $X$  軸回りに  $\omega$  なる角速度で回転させると, 球形検出コイルには (7) 式で示す電圧  $e$  が誘起される.

$$e = KV \sqrt{M_z^2 + (M_{\perp} \sin \beta)^2} \cdot \sin \left( \omega t + \tan^{-1} \frac{M_{\perp} \sin \beta}{M_z} \right) \quad [\text{V}] \quad (7)$$

ただし,  $M_z$ :  $M$  の  $Z$  軸成分

$M_{\perp}$ :  $M$  の  $XY$  面内成分.

出力電圧振幅  $E$  は (8) 式となる.

$$E = KV \sqrt{M_z^2 + (M_{\perp} \sin \beta)^2} = KM \quad [\text{V}] \quad (8)$$

したがって衛星を  $Z$  軸の回りに回転して各場合の  $E$  を測定することにより,  $M, M_z$  を求め

ることができ、またこの操作から  $\beta$  を決定することもできる。

次に  $\alpha$  を求める。

(7) 式で  $\beta=90$  度の場合は出力電圧は (9) 式となる。

$$e = KM \sin(\omega t + \alpha) \quad [\text{V}] \quad (9)$$

ただし、

$$\alpha = \tan^{-1} M_x / M_z \quad (0 \leq \alpha < \pi).$$

したがって基準信号として (10) 式を発生させ、これと比較することにより  $\alpha$  を求める\*。

$$e_s = K_s \sin \omega t \quad (10)$$

実際の装置においては (10) 式の信号はレゾルバより発生させ、(9) 式との信号の位相差をカウンタで数え  $\alpha$  を求めている。またモニタとしてマークが付けてあり図 3 のように  $\alpha$  を求めることができる。

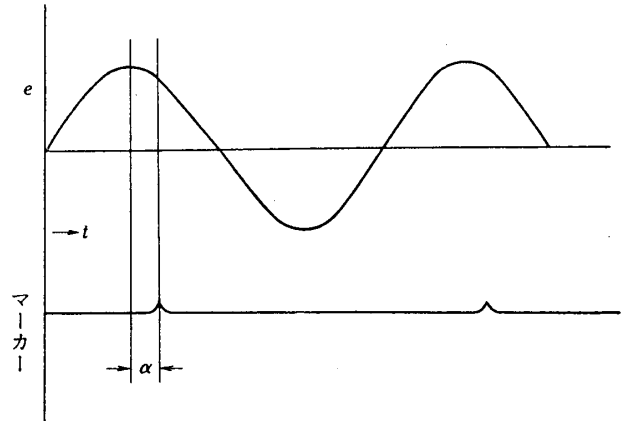


図 3  $\alpha$  の測定

### 2.1.2 軟磁性体等により発生する磁気モーメントの測定

衛星内に軟磁性材料が含まれると地磁気により磁化され磁気モーメントが発生する。これら磁性体の分布の合成が図 4 に示すごとき形（長軸と短軸との比が大きい棒状等）であれば

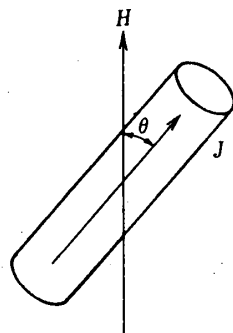


図 4 棒状磁性体の磁化

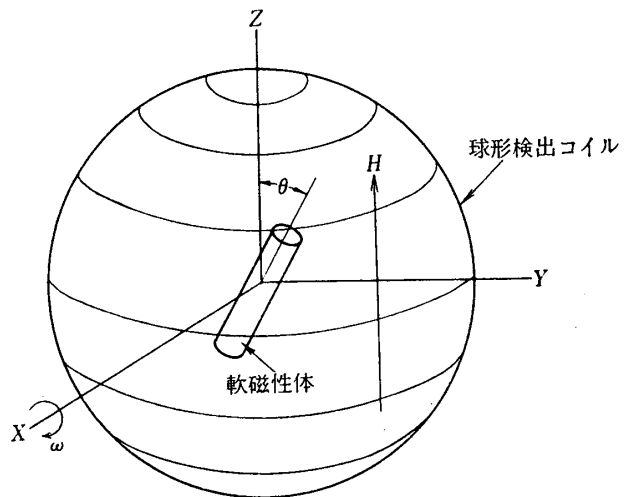


図 5 測定原理

\* 図 2 において誘起電圧の最大値は  $M$  が球形検出コイル面を切るときに発生する。したがって (10) 式のレゾルバあるいは図 3 のマークの基準信号は、衛星の軸（図 2 の Z 軸）が検出コイル面を切るときに  $e_s$  の最大値あるいはマークが発生するように設定して置く。 $e_s$  の最大値は 1 回転につき 2 回おこるので、あらかじめ極性の既知な磁石により校正しておく。

次のように測定することができる\*。

図 4 において棒状磁性体の磁化は、長軸方向だけを考えると (11) 式となる [6]。

$$J = \frac{\chi}{1 + \chi N} H \cos \theta \quad [\text{Wb/m}^2\text{W}] \quad (11)$$

ただし,  $\chi$ : 磁性体平均磁化率

$N$ : 長軸方向平均反磁界係数

$H$ : 外部磁場

$\theta$ :  $H$  と  $J$  の成す角度

$J$ : 長軸方向平均磁化。

全体の磁気モーメントは (12) 式となる。

$$M = VJ = M_0 \cos \theta \quad [\text{Wb} \cdot \text{m}] \quad (12)$$

ただし,  $V$ : 磁性体体積

$M_0$ : 長軸方向に磁化されたときのモーメント

図 5 に示すように球形コイル軸と地磁気方向を一致させコイル内に任意の磁界  $H$  (本装置では 0~60 oe) を発生させる。同図において X 軸の回りに,  $H$  によって磁化されている磁性体を  $\omega$  なる角速度で回転させると

$$\phi_s = \frac{N_s M_0 \cos^2 \theta}{3R} \quad [\text{Wb}]$$

であるから球形検出コイルに誘起される電圧は (13) 式となる。

$$e = KM \sin 2\omega t \quad [\text{V}] \quad (13)$$

したがって (13) 式より誘起電圧を測定することにより, 回転軸と直角方向成分の磁気モーメントの大きさを求めることができる\*\*。磁性部分が衛星内で任意の方向, 任意の点にある場合は 2.1.1 項と同様な操作をすることにより大きさ, 方向を求めることができる。

## 2.2 円形検出コイルによる磁気モーメントの測定

円形検出コイルによる測定は, 衛星搭載部品等の磁気モーメントを分解能良く測定すること\*\*\* および衛星の合成磁気モーメントの局在分布を半定量的に求めるためのものである。

### 2.2.1 磁気モーメントの大きさ, 方向の測定

測定対象を搭載部品等形状の小さいものとするならば, 図 6 に示すように円形検出コイル

\* 外部磁場と磁性体の内部磁化とのなす角度は, 磁性体の形状が球状に近づければ小さくなり, これに起因するトルクは小さくなる。実際の衛星においてこのトルクが影響してくるのはその形が棒状 (スピン軸方向成分の) になる場合である。

\*\* 実際の測定では回転体 (衛星) に生ずる過電流により発生する誘起モーメントの大きさによってこの測定の分解能が制約される。この誘起モーメントによる電圧  $e_i$  [4] および (13) 式の  $e$  は

$$\begin{aligned} e_i &\propto \omega^2 H \sin 2\omega t \\ e &\propto \omega J(H) \sin 2\omega t \end{aligned}$$

なる式で表わせるので  $\omega, H$  を変えて  $e_i, e$  の区別をする必要がある。

\*\*\* 回転法による測定において, 誘起電圧  $S$  と外乱雑音  $N$  との比は検出コイルの半径を  $R$  とすると次式となる。

$$S/N \propto 1/R^3$$

したがって球形検出コイルよりもコイル径を小さくした円形検出コイルの方が分解能があがる。

の中心に磁気ダイポールモーメントがあると近似して、そのモーメントと誘起電圧の関係を求めることができる。

図 6 において磁気ダイポールモーメント  $M$  による円形検出コイル上の任意の点の磁界  $H_r$  は (14) 式で示される。

$$H_r = \frac{M \cos \theta}{2\pi r^3 \mu_0} \quad (14)$$

$M$  を  $X$  軸の回りに角速度  $\omega$  で回転すると円形検出コイルには (15) 式の電圧が誘起される。

$$\begin{aligned} e &= 4N \int_0^{\pi/2} r \omega \cos \theta \frac{M \cos \theta}{2\pi r^3} r d\theta \cdot \sin \omega t \\ &= \frac{N\omega}{2r} M \sin \omega t \quad [\text{V}] \end{aligned} \quad (15)$$

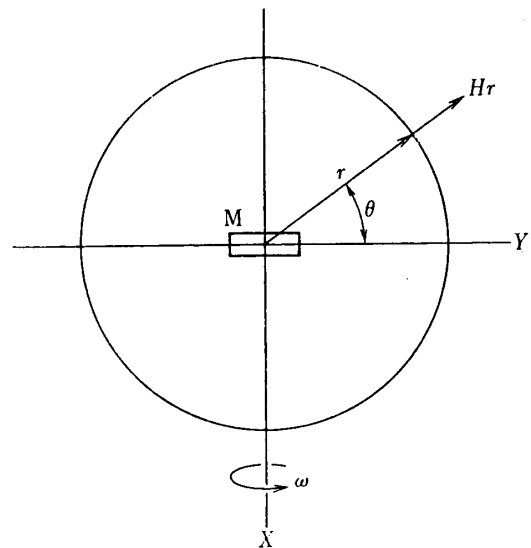


図 6 円形検出コイルによる測定原理

ただし、 $N$ ：円形検出コイル巻数。

したがって球形検出コイルの場合と同様に操作することにより磁気モーメントの大きさと方向を測定できる。

### 2.2.2 磁気モーメントの局在分布の解析

第 2.1.1 項で述べたよう、球形検出コイルにおいては、それに通電したときに球内は均一磁界となるから、磁気モーメントの測定の際被試験体はその均一磁界内のいずこに設置されても検出コイルから見た関係は変わらないので、正弦波の同じ大きさの電圧が誘起される。すなわち被試験体の合成磁気モーメントの大きさと方向のみが測定され、その局在分布は検出されない。これに対して円形検出コイルの場合は、そのコイルに通電したときに発生する磁界は不均一分布をなし、したがって磁気モーメントの局在する位置によって誘起電圧の波形が異なる。図 7 は磁気モーメントが局在した場合の球形検出コイルおよび円形検出コイルによる出力波形の実測例である。次に円形コイルによる解析法について示す。

最初に球形検出コイルの測定により被試験体の合成磁気モーメントの方向を測定して、出力電圧振幅が最大となる位置に被試験体を固定する。この場合局在しているモーメントは図

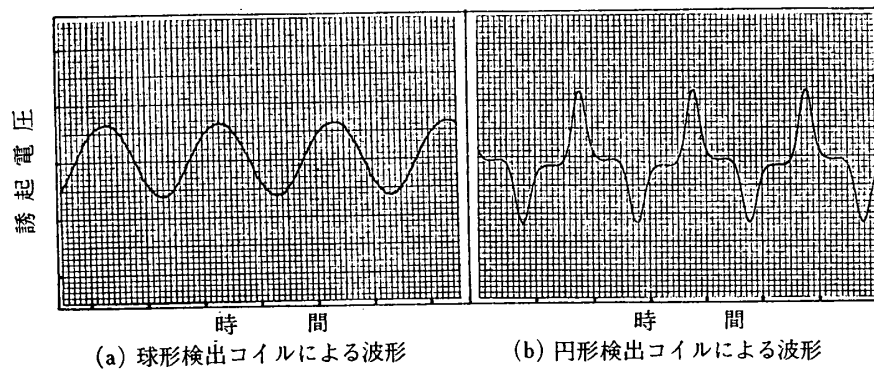


図 7 合成磁気モーメントが局在した場合の出力波形

8に示すように  $XY$  面に平行になっている（つまり回転軸に垂直になっている）。ここで同図に示すように  $XY$  面に平行なモーメントが中心より  $X, Y, Z$  軸にそってシフトした場合\*, 円形検出コイルの波形は各シフトした方向によって図9に示すような波形になることがその磁界分布より想定される。すなわち中心にある磁気モーメント  $M_0$  による波形が正弦波であ

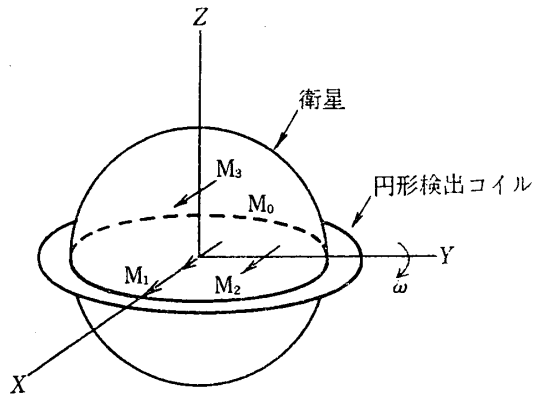


図8 局在分布の測定

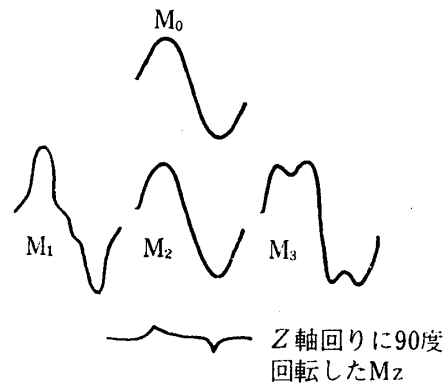


図9 波形の変化

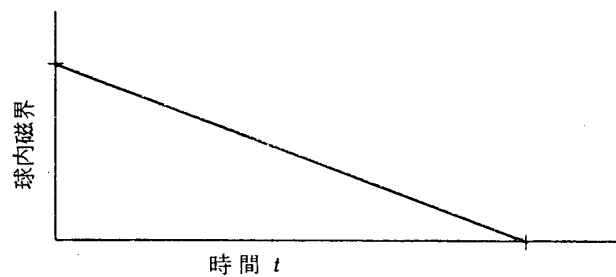


図10 減少磁界

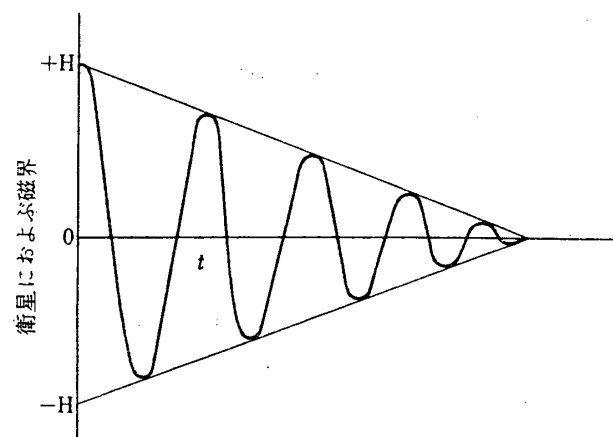


図11 消磁磁界

\*  $XZ$  面内のモーメントによる出力波形は  $M_1$  か  $M_3$  による二つの基本波形に分けられる。したがって  $XZ$  面内で注意の方向を向いている磁気モーメントによる波形はこれらの合成である。



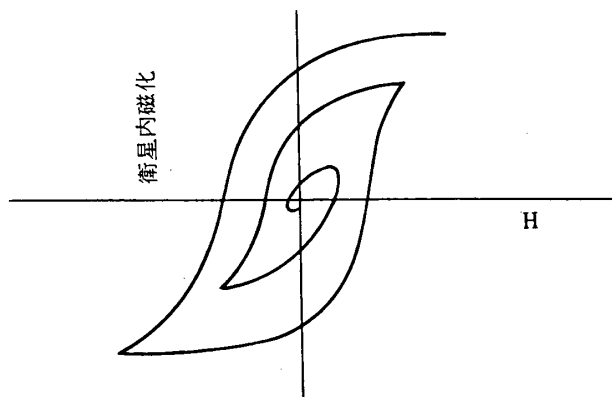


図 12 ヒステリシス減磁曲線

るのに比べて  $M_1$ ,  $M_3$  による波形は独特な型となる。また  $M_2$  による波形は正弦波に類似したものであるが、この場合は被試験体を Z 軸の回りに 90 度回転させて測定することにより特徴ある波形を得ることができる。

これらの基本波形およびマーカ信号と出力波形の位相差を使って被試験体の合成磁気モーメントの局部的位置を解析することができる。

### 2.3 消磁試験

衛星の消磁を行なうには球形コイル内に強磁界を発生させ、その中で衛星を回転させながら磁界を減少させて行なう。この場合衛星には図 10 に示すように、大きさの減少する磁界が正負交互にかかることになり図 12 に示すように直流消磁をすることができる。

## 3. 装置の構成

本装置の外観を図 13(a), (b) に示し、ブロックダイアグラムを図 14 に示す。本装置は大別して、球内に均一磁界を発生させるコイル、誘起電圧を検出するコイル等のコイル装置部とコイル信号を処理し表示する電子回路部および衛星を回転させる駆動装置部より成っている。微小磁気の測定ゆえ擾乱磁界を考慮して、コイル装置はすべて非磁性体を使用し、また駆動装置はコイル装置よりできるだけ遠くに設置し、衛星支持部（ジンバル）は非導体を使用した。

衛星をジンバルに設置させるために球形コイルはその支持部より半球を開くことができる構造となっている。

### 3.1 コイル装置

球形コイル群は図 13(a), (b) に示すように同軸的に分割巻され、円形コイルは球形コイルと同軸的に中心に設置されている。

#### 3.1.1 均一磁界発生用コイル

球内磁界の不均一度は、中心より半径 0.8 m のゾーンで 0.1% 以下になるように設計されている。球内中心における磁界の強さは (1) 式で示す関係が実測とよく一致した (図 15 参照)。

地磁気を打消すには、ターンテーブルとコイルの角度を調節し、コイル軸と地磁気方向を

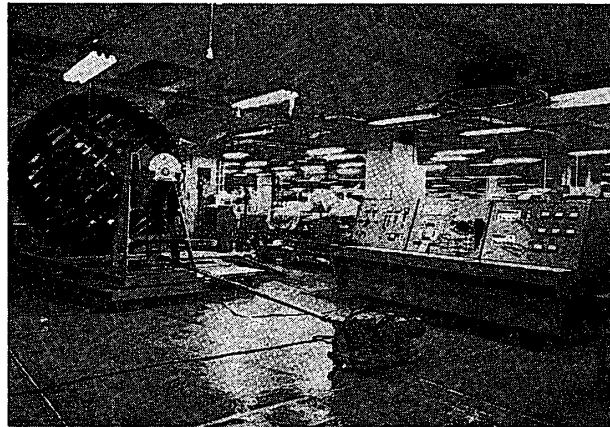


図 13(a)

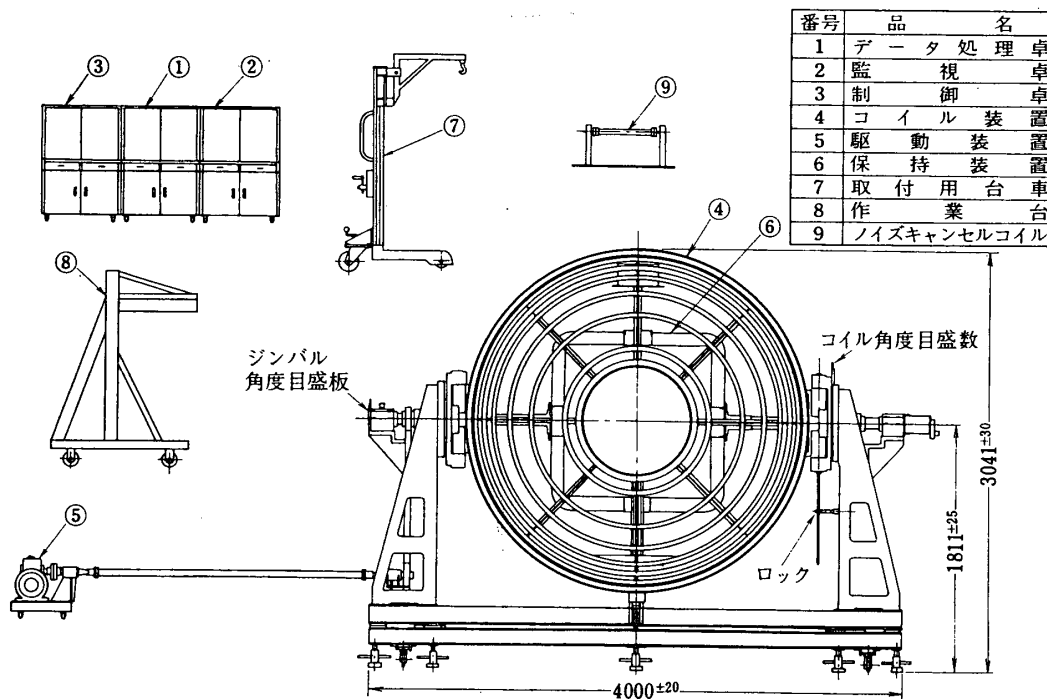


図 13(b) 科学衛星磁気試験装置構成図

一致させることにより行なう。

コイル仕様；

球形コイル中心部直径 2.5 m

全巻数 9,600 回 (60 回×10 層×16 分割コイル)

ただし、強磁界発生の際は 10 層、地磁気打消しの際は 2 層を使用する。

### 3.1.2 検出用コイル

コイル仕様；

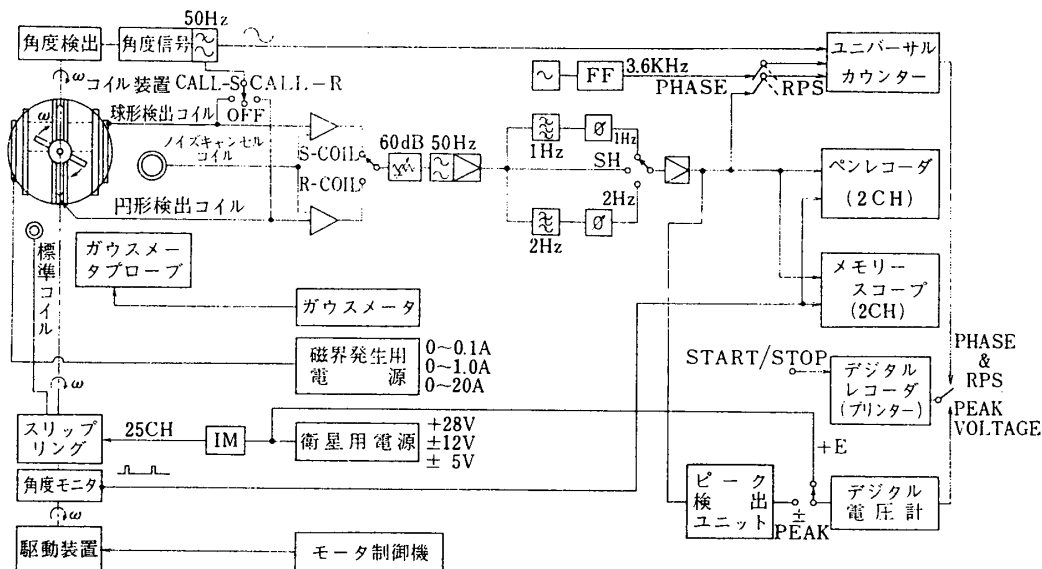


図 14 ブロニックダイアグラム

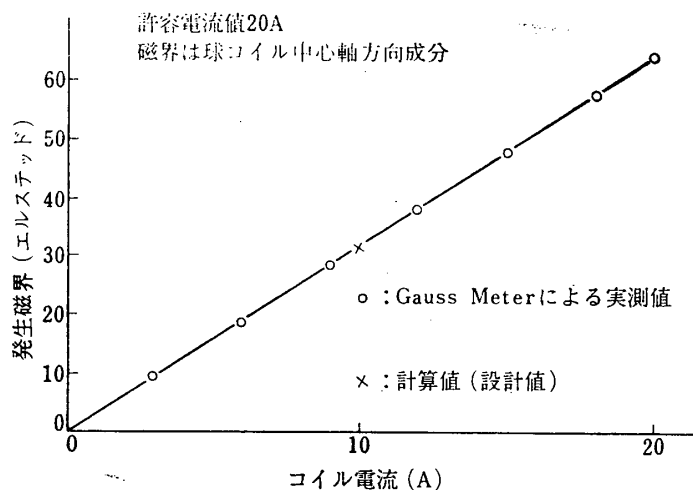


図 15 強磁界発生コイル，電流—磁界曲線

球形コイル：中心部直径 2.5 m 全巻数 9,600 回

円形コイル：直径 1.85 m 巻数 3,600 回

### 3.2 電子回路

本装置の電子回路のブロックダイアグラムを図 14 に示す。同図に示される計測機器は、制御部、データ処理部および監視部に分けられ操作卓にまとめられている(図 13(a) 参照)。回路の各機能を示すと次のようになる。

#### 3.2.1 雑音の消去

回転法においては、信号の中に含まれる雑音レベルによって分解能が決まるので、でき得

る限り雑音レベルを小さくしなければならない。ここでは雑音に対する検討結果を含めて雑音の消去について示す。

検出コイルおよび電子回路に誘起される雑音成分を大別すると次の二つになる。

- i) 蛍光灯, 電子機器等より発する 50 Hz 成分
- ii) じょう乱磁界により発生する低周波成分

図 16 は雑音除去回路としてトウインTのトラップ回路 (50 Hz) とアクティブフィルタ (35

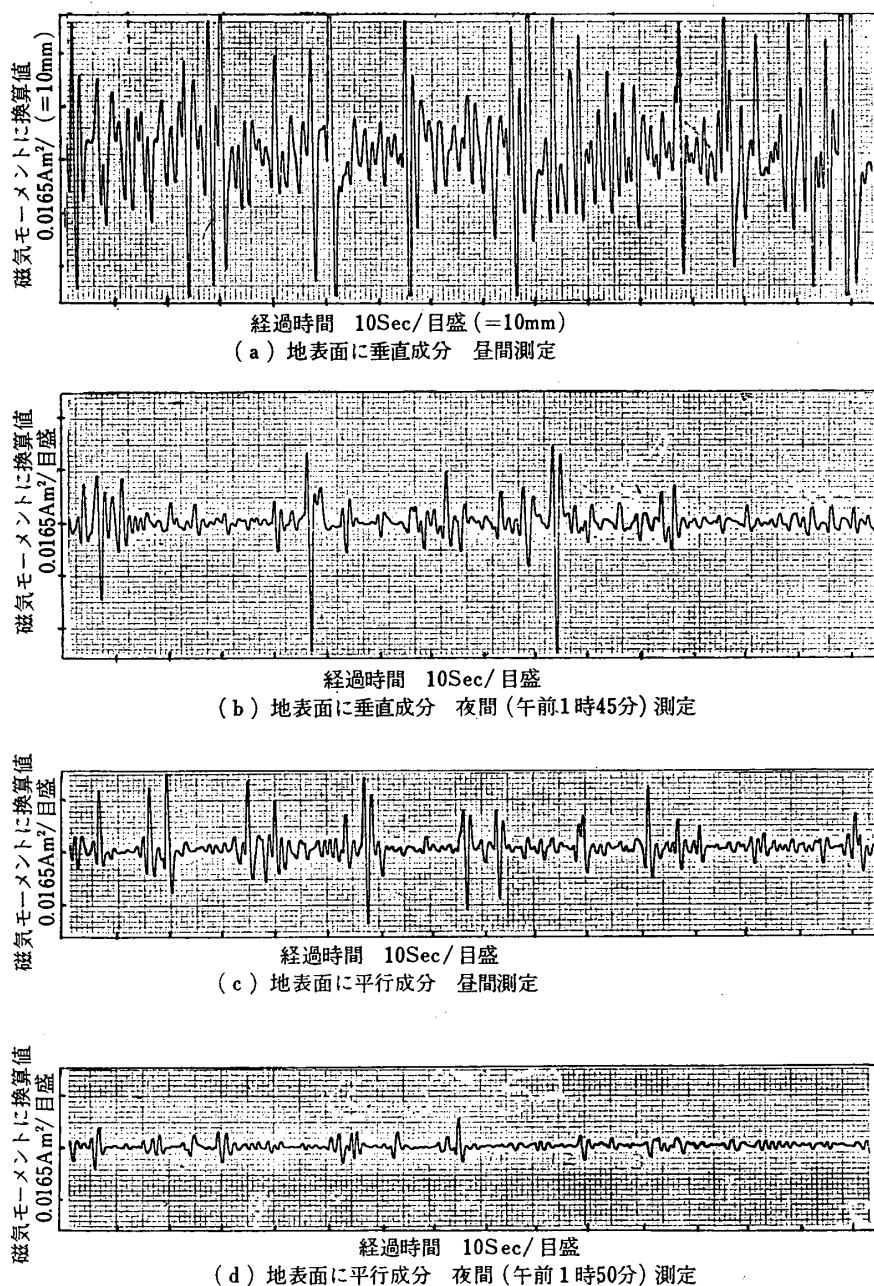


図 16 じょう乱磁界の測定

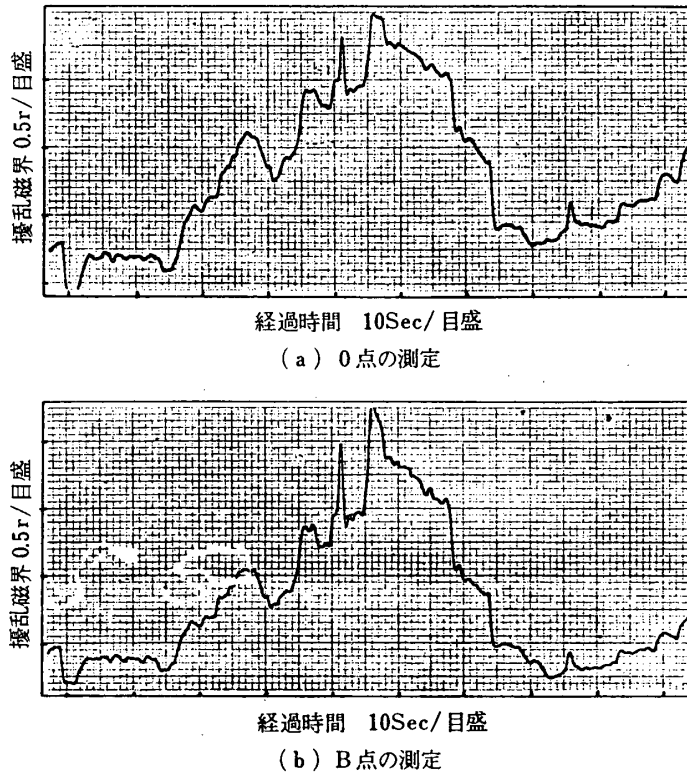


図 17 じょう乱磁界の測定

同形のガウスメーター 2 台 (Bell 620 型) により, 2 点間 (O, B 間隔 5 m) のじょう乱磁界をプローブにより検出し, 1 Hz のフィルター (B. P. F.) を通した後に記録したものの。

プローブ方向は地磁気方向と垂直方向したがって検出磁界は地表面にほぼ 45 度方向成分。

Hz L. P. F., 1 Hz B. P. F.) を通したあとの検出コイルの雑音波形である。同図に示すように 50 Hz 成分は完全に除去されるが, 1 Hz の信号成分に近いものは除去されない。これらは図 17 に示すじょう乱磁界の変動によるものと思われる。じょう乱磁界方向は図 16 に示すように地表面に垂直成分が大半を占めその大きさは真夜中になると減少する。

信号成分に近い雑音を消去する方法として, 雑音検出コイルを併設して\* 図 14 のように信号処理することが有効である。すなわち検出コイルの雑音と雑音検出コイルの雑音が逆位相に, また同レベルになるように調節することにより図 18 に示すように 1 Hz 付近の雑音を大半打消すことができた。

### 3.2.2 その他の電子回路および記録, 表示

検出コイルの出力波形はペンレコーダおよびメモリースコープで観察され, またそのピー

\* じょう乱雑音の分布は図 16 に示すように 5 m 範囲内ではあまり変化なく平等とみてよいので, 本装置では雑音検出コイルは球形コイルより 5 m 離して配置してある。この場合被測定モーメントの雑音検出コイルへの影響は球形コイルの  $2/100$  以下 (最悪方向) で, これは較正しておけば問題ない。

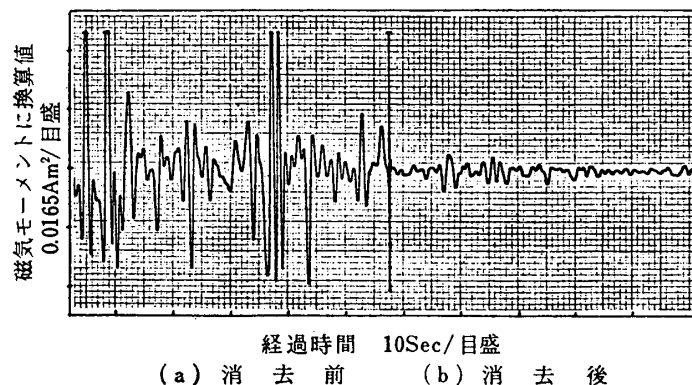


図 18 1 Hz 付近の雑音消去

ク値はデジタル電圧計で直読でき、かつプリントアウトできる。

磁気モーメントの方向 (図 2 に示す角度  $\alpha$ ) を測定する際に、(9) 式および (10) 式の信号が電子回路により位相ずれを起さないように調節しておく必要がある。このために位相調節器が入っており、レゾルバー信号を基準として調節を行なう。 $\alpha$  はレゾルバー信号とコイル信号との位相差ではかられ、この位相差は 3.6 KHz のクロックパルスを 10 進計数カウンタで数えることにより直読でき、かつプリントアウトできる。また、この関係がモニタできるようにマーカ発生器が付けてあり、ペンレコーダおよびメモリスコープで観察できる。

局在分布の測定回路は波形が変形しないように考慮されている (4.7 項参照)。

衛星用電源が設けられており、スリッピング (24 チャンネル) を通して衛星の動作中の測定が可能である。

### 3.3 駆動装置

ジンバルは FRP を、シャフトはステンレス (sus 27) を使用し、駆動は離れて配置されたモーターよりユニバーサルジョイント、タイミングベルトを使用して行なわれる。回転数は  $1 \text{ Hz} \pm 1\%$  に制御でき、10 進計数カウンタで直読でき、かつプリントアウトできる。

## 4. 測定結果および考察

各装置の調整、較正のあとに次のような測定結果を得た\*。

### 4.1 誘起電圧と磁気モーメント

標準磁気モーメントとして (3) 式で示される円形コイルより発生するものを使用して、1 Hz で回転させて誘起電圧と磁気モーメントとの関係を球形コイルおよび円形コイルについて測定して、図 19 に示した。これらの較正直線より未知の磁気モーメントは、その誘起電圧を測定することにより直ちに磁気モーメントの大きさに換算することができる。

同図は標準磁気モーメントの大きさを変えて電子回路の直線性もみている。磁性モーメントの測定範囲の上限は球形コイルでは  $20 \text{ Am}^2$ 、円形コイルでは  $2 \text{ Am}^2$  である。

\* 測定環境は鉄筋建物の 2 階、周囲は交換機等の製作現場、近く (200 m) を東海道線、横須賀線などが走っている。

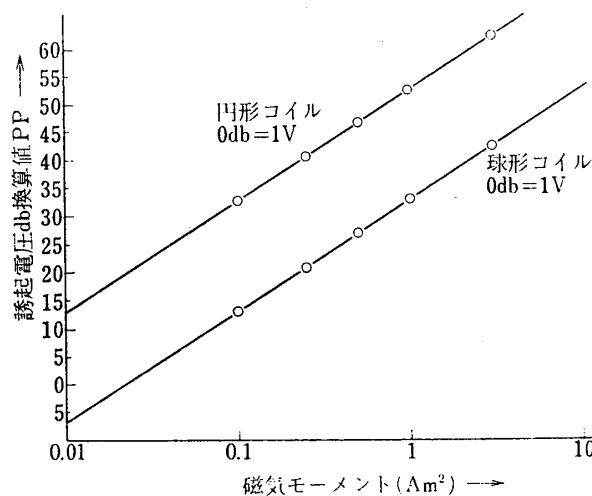


図 19 誘起電圧と磁気モーメント標準コイルによる測定

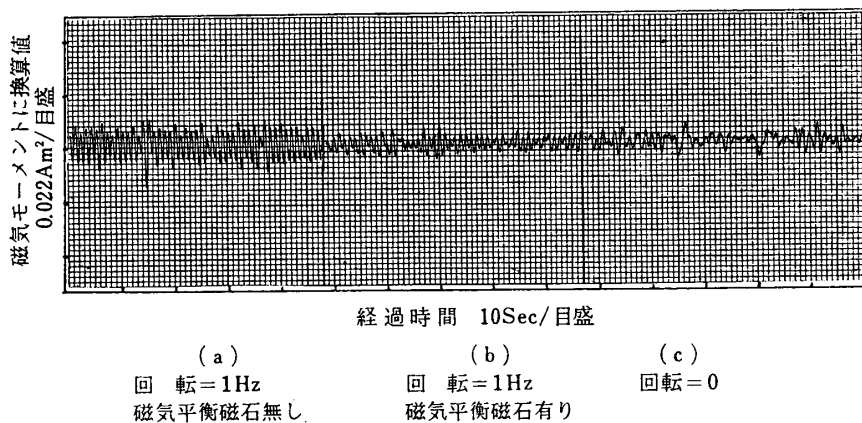


図 20 球形コイルの雑音レベル

#### 4.2 微小磁気モーメント

外部じょう乱雑音を打消した後における球形コイルの雑音電圧を、図 19 によってモーメントに換算し図 20 に示した。

図中、1 Hz で回転させたときは (a) に示すように回転させないとき (c) に比べて 1 Hz の雑音電圧が増加している。これは回転軸および取付けボルト(ステンレス sus 27)のわずかな残留磁気によるものである。これを打消すために微小磁石をジンバルに設置した。このときの雑音電圧は同図 (b) に示すようにほとんど打消すことができた。雑音レベルはこの測定環境で約  $0.008 \text{ Am}^2$  である。図 21 に測定モーメントに対する雑音の影響を示す。

円形検出コイルによる微小磁気モーメントの測定例を球形コイルによって測定した場合と比較して図 22 に示す。

$S/N \propto 1/R^3$  なる関係にあるので円形コイルによる測定がやや精度が上がる\*。

\* 測定結果であまり差がないのは、回転軸、取付ボルト等の残留磁気の不均一分布の回転雑音を円形コイルの場合完全に磁気平衡とりにくいため。

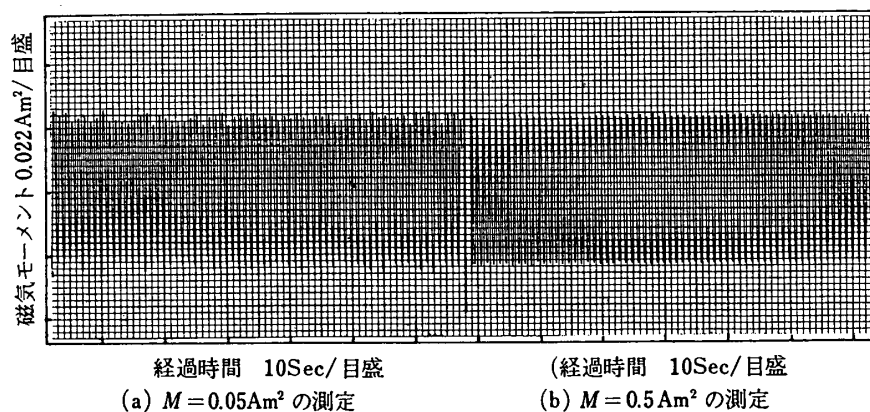


図 21 S/N

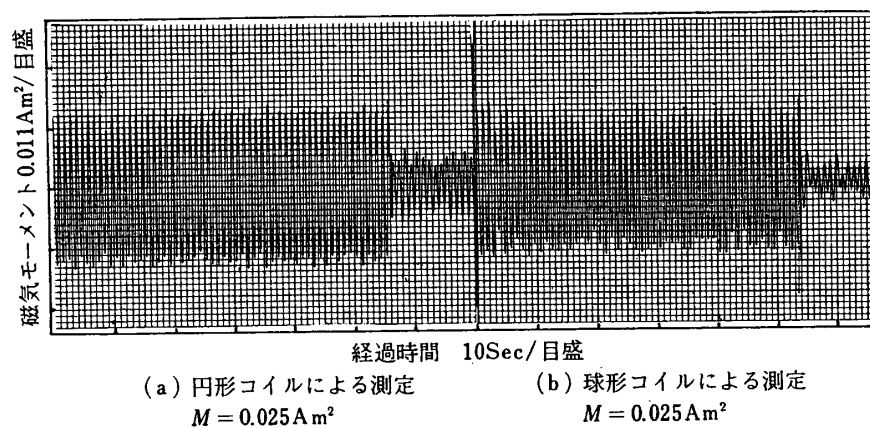


図 22 微小モーメントの測定

#### 4.3 大きさと方向

図 23, 24 は任意の方向に模擬用磁気モーメントを取り付け、第 2.1.1 項の方法によりその大きさおよび方向を測定した結果である。

図 23 により、 $M=0.835 \text{ Am}^2$ 、 $M_z=0.275 \text{ Am}^2$ 、 $\beta=0$  度を得る。 $M_z$ 、 $M$  点付近は測定点を増し、精度を上げる。

図 24 により  $\alpha=19$  度を得る。この値はレゾルバーの信号によりカウンタで正確に読みとられる。

#### 4.4 軟磁性体により発生する磁気モーメント

第 2.1.2 項に示したように、磁性体が反磁界の小さい形状で保持力の小さい材料(45% パーマロイ、純鉄等)の場合には、地磁気により磁化されて図 25 に示すように、(13) 式で表わされる 2 Hz の誘起電圧を発生し、 $\theta=\frac{\pi}{4}$  およびこれと 90 度ずつ回転した位置において最大となる。

図 25 に示す測定時の雑音は約  $0.017 \text{ Am}^2$  (無磁界回転時はこの約 1/2) 磁性体より発生する磁気モーメントは約  $0.1 \text{ Am}^2$  である。



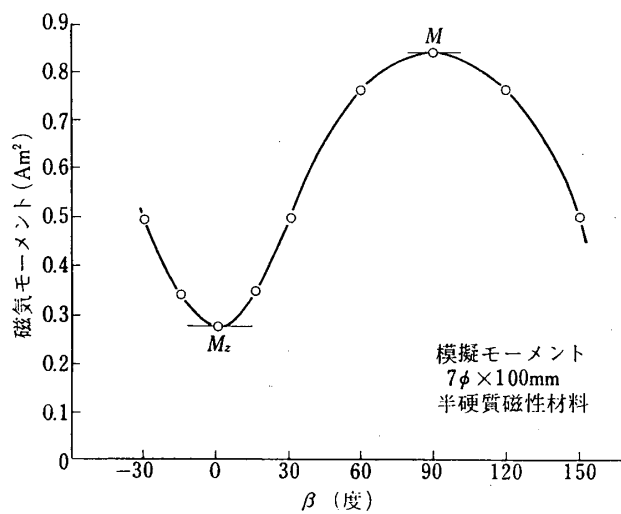
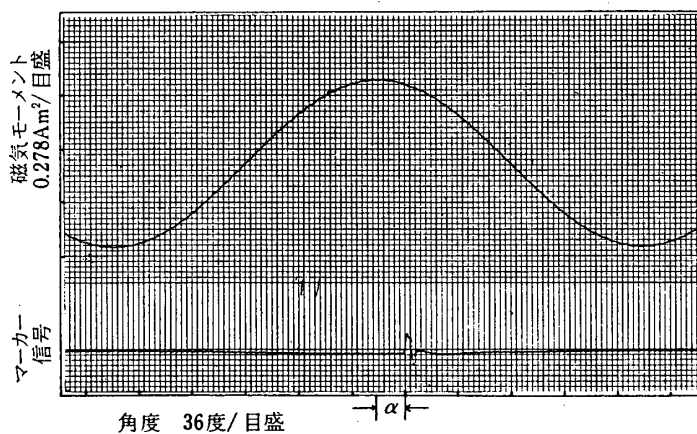
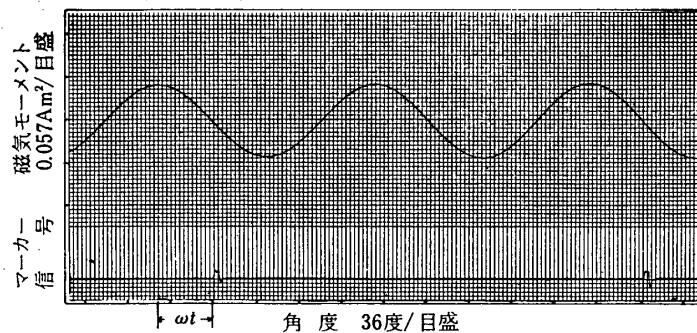
図 23  $M, M_z, \beta$  の測定図 24  $\alpha$  の測定

図 25 地磁気により磁化された磁性体のモーメント  
磁性体: 0.5 t×6×300 mm パーマロイ

#### 4.5 衛星搭載部品の測定例

ラッチングリレー（シグマ 800 形）3 個を同方向に並べて測定した結果を図 26 に示す。

図 26 の誘起電圧およびマーカより図 27 に示した値が得られた。

図 28 にテレダイナリレ 5 個を並べた場合および図 29 に地磁気中でのキャノンコネクタ 3 個を磁化しやすい方向に並べた場合の結果を示す。いずれも雑音レベルと同等で検出されなかった。

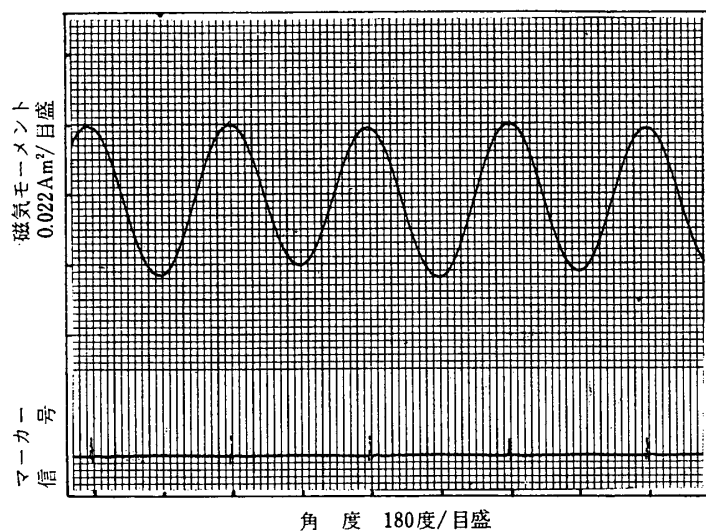


図 26 ラッチングリレーの測定結果

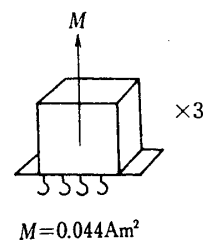
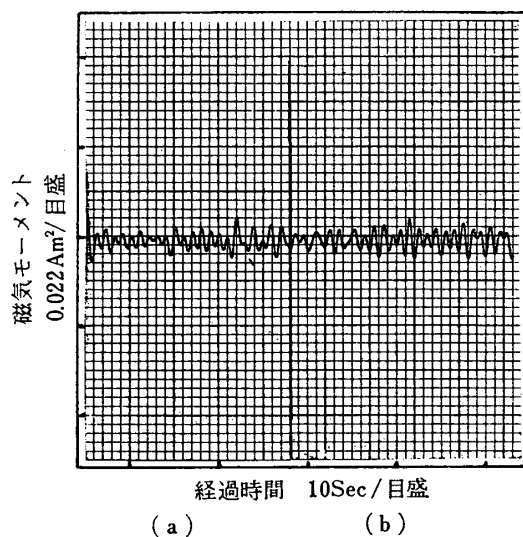
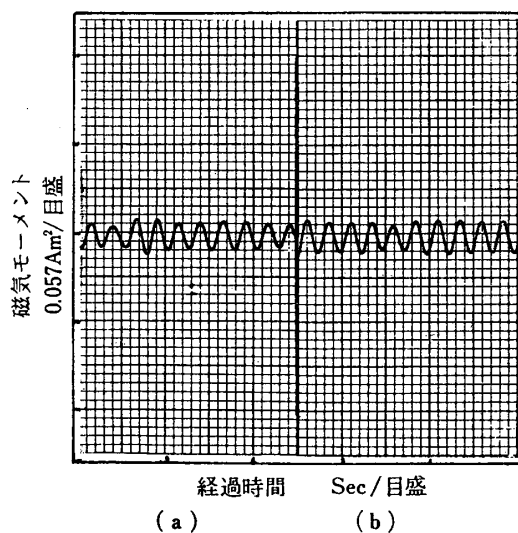


図 27 ラッチングリレーの磁気モーメント

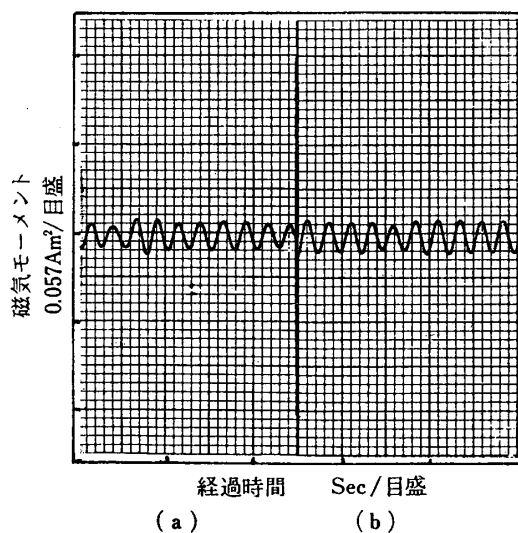


(a) 雑音レベル



(b) テレダイナリレー 5個

図 28 テレダイナリレーの測定結果



(a) 雑音レベル

(b) キャノンコネクタ 3個

図 29 キャノンコネクタの測定結果

#### 4.6 消磁試験結果

磁界減少直線を図 30 に示す。

被消磁物を 1 Hz で回転しながら図 30 に示す減少磁界により直流消磁を行なった結果を図 31(a), b) に示す。(a) は保持力の比較的大きい半硬質磁性材料, (b) は軟磁性材料である。これらの保持力, 形状の被消磁物ならば, ほぼ完全に消磁できる。

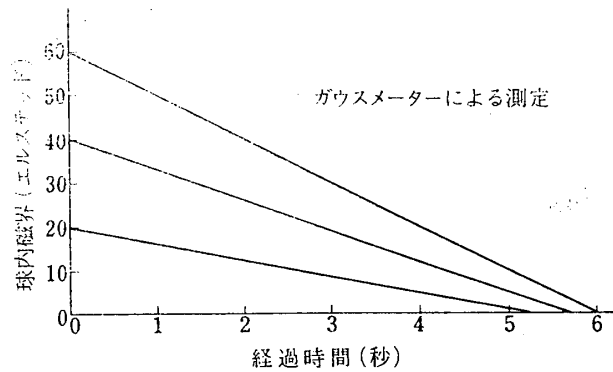


図 30 磁界減少直線

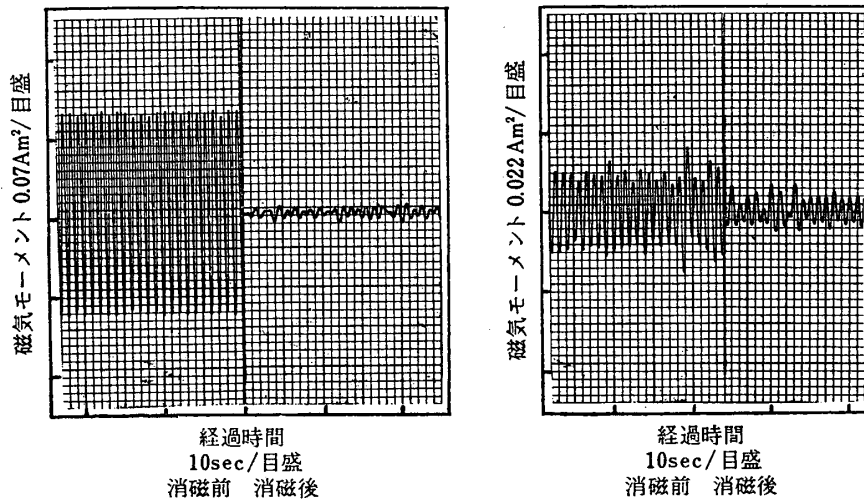


図 31 消磁試験結果

#### 4.7 局在分布の測定結果

波形検出回路の伝送特性を図 32 に示す。同図より検出回路による波形の変形はほとんど無いことがわかる\*。

上記の回路により第 2.2.2 項で述べた基本波形を模擬モーメントを使い測定した結果を図 33 に示した。図中  $M_{13}$  は  $M_1$  と  $M_3$  の波形を重ね合わせたものに等しい。これらの基本

\* 波形特性をよくするために、フィルタ、カップリングコンデンサなどを減らしているため、この測定においては外乱雑音レベルが上がることを避けられない。

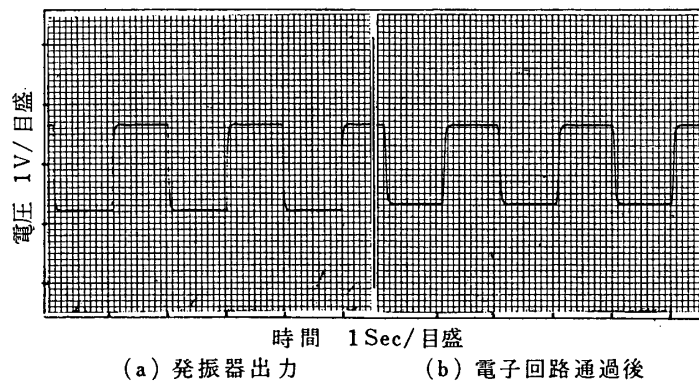


図 32 電子回路の特性

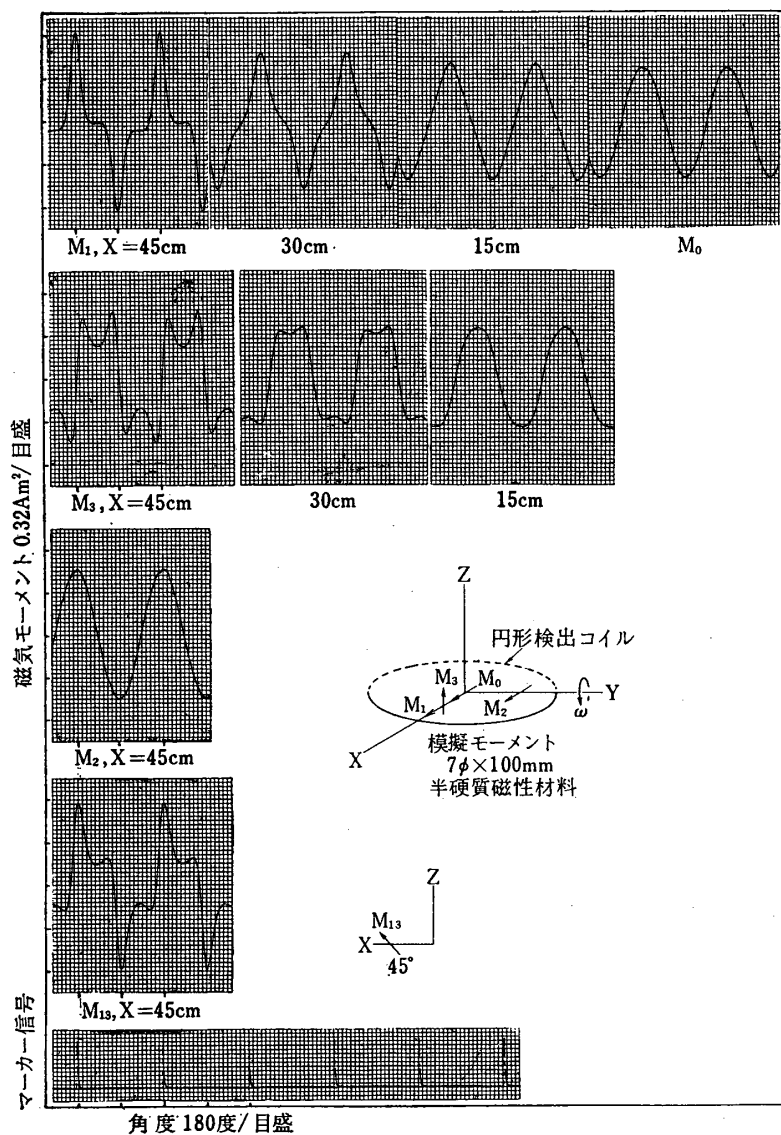


図 33 局部的位置における基本波形

波形およびマーカ信号を使って、被試験体の合成磁気モーメントの局部的位置を第 2.2.2 項の方法により解析できる。

## 5. 結 言

回転法では磁気モーメントからの信号はきわめて鋭い周波数スペクトルを有しているので、商用交流およびじょう乱磁界等による雑音をフィルタおよびトラップ回路により十分に除去でき、また 1 Hz の信号と同周波数成分の外部雑音は雑音検出用コイルを併設して信号処理を行なうことにより取り除くことができた。したがって雑音の多い環境においても比較的容易に微小磁気モーメントの測定が可能である。本装置においては球形検出コイルの測定で雑音レベルを  $0.008 \text{ Am}^2$  (磁気モーメント換算) 以下にすることができた。測定値は 1 Hz ごとに何回も繰り返されて記録されるので、平均化することにより測定精度を上げることができる。

信号の検出は球形コイルと円形コイルを使用している。球形コイルでは被試験体内の合成磁気モーメントがその中心より任意の点、任意の向きにシフトして存在していてもこれに無関係にその磁気モーメントの大きさと方向が正確に測定できる。これに対して円形コイルでは合成磁気モーメントが回転中心よりシフトして存在することにより独特な波形が生じ、その基本波形およびマーカ信号を用いて磁気モーメントの局在分布の解析を行なうことができる。

磁気モーメントの較正は標準コイルにより発生する磁気モーメントを使って簡単かつ正確に行なうことができ、被試験体の誘起電圧は直ちに磁気モーメントに換算される。球形検出コイルでは  $0.022 \text{ Am}^2/\text{V}$ 、円形検出コイルでは  $0.0023 \text{ Am}^2/\text{V}$  となる。磁気モーメントの測定範囲は、磁氣的姿勢制御用部品の試験も考慮して、球形コイルで  $0 \sim 20 \text{ Am}^2$  まで直線性よく測定可能である。

磁界発生用コイルは球形コイルを用いているため、球内の磁界の均一度は高く (0.8 m ゾーン内で 0.1% 以下)、地磁気を十分に打ち消すことができ、 $0 \sim 60$  エルステッドの均一磁界中での物理実験が可能である。また強磁界より一定の割合で磁界を減少させながら被試験体を 1 Hz で回転させることにより、被試験体の残留磁気の直流消磁が容易に行なえる。

被試験体の大きさは  $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}$  以内、重量は  $100 \text{ kg}$  以内を対象に設計された。被試験体をジンバルに設置するために、コイル装置はその支持点より半円球に開くことができる構造となっている。また被試験体の動作時の測定は、外部電源よりスリップリング (24 チャンネル) を通して電力を供給しつつこれを実行することができる。ソーラーセル系の試験は将来ソーラーシュミレータの増設によりこれを行なうことができる。

以上、本装置の概略を説明した。これにより科学衛星および衛星搭載機器、部品等の磁気試験がじょう乱雑音の多い環境でも高感度にかつ簡便に行なえるものと思われる。

最後に、本装置の設計に当り有益な助言とご討議をいただいた東京大学宇宙航空研究所平尾教授、林教授ならびに日立製作所中央研究所原研究員に感謝の意を表わす。

1971 年 7 月 8 日 新設部(工学)

## 参 考 文 献

- [1] J. C. Boyle and J. M. Greyerbiehl, A Method for the Measurement of Extremely Feeble Torques on Massive Bodies, NASA TN D-3711, 1966.
- [2] Barry E. Tossman, Resonance Technique for Mesurement of Satellite Magnetic Dipole Moment, JPL Technical Memorandum No. 33~216.
- [3] R. Moskowitz and R. Lynch, Magnetostatic Mesurement of Spacecraft Magnetic Dipole Moment, IEEE Transactions on Space, vol. 2, No. 2, April 1964.
- [4] C. Usiskin and R. Wilks, Measuring the Magnetic Dipole of a Satellite, Sixth Symposium on Ballistic Missile and Aerospace Technology.
- [5] J. E. Everett and J. E. Osmeikhian, Spherical Coils for Uniform Magnetic Fields, J. Sci. Instrum., Vol. 43, 1966.
- [5] 竹山説三, 電磁気学現象理論, p. 273, 丸善.