誘導用浮動振子磁力支持型加速度計の諸特性*

—誘導用浮動型慣性センサに用いる磁気軸受方式の研究(第4報)—

滝 沢 実** 鈴木 孝雄** 大 月 正 男**

Performances and Characteristics of Floated Pendulum
Accelerometers with a Passive Magnetic Suspensions—Studies on a Magnetic Suspension System for
Floated Inertial Sensors (4th Report)—

Minoru TAKIZAWA, Takao SUZUKI, Masao OTSUKI

Single Degree of Freedom Floated Pendulum Accelerometers with a three-axis passive magnetic suspensions applied to the output axes had been developed at NAL in order to develop more precise inertial sensors such as floated gyros and floated accelerometers which will be used in the inertial navigation system. The design and the performances within $\pm 1G$ region of the above accelerometers were described in the third report. This study is precise measurement of the performances of the accelerometers (MSA-1, MSA-2) in high static acceleration region ($\pm 12G$) and of the frequency response of the MSA-1. The magnetic suspension rotor core of the MSA-1 is made of ferrite, and that of the MSA-2 is laminated supermaloi. The main results obtained are as follows.

(1) The performances of the accelerometers in the acceleration region are ; non-linearity coefficient $7 \times 10^{-5} G/G^2$ (MSA-1), $7 \times 10^{-4} G/G^2$ (MSA-2), short term repeatability $\pm 4 \times 10^{-4} G$ (MSA-2).

(2) The magnetic suspensions can be acted normally in high static acceleration disturbance ($\pm 15G$), and the optimum material of the suspension rotor core is ferrite which has such properties as high permeability, high saturation of magnetic flux density, minimum eddy current loss, etc.

(3) The frequency response of the MSA-1 obtained is about 17 Hz when the accelerometer is adjusted to the optimum dynamic condition.

1. 緒 言

人工衛星打上げ用ロケット等の誘導用浮動型慣性センサ(積分ジャイロ, 加速度計)の高精度化の研究の一環として, これまでに一対の自己制御型八極磁気軸受方式^{1)~4)}で構成する非接触型の自己制御型三次元磁気軸受を出力軸受に適用した誘導用浮動振子磁力支持型速度計の試作研究を行った⁵⁾。前報告では本加速度計の設計の概要ならびに $\pm 1g$ 領域における分解能, 再現性, 直線性, さらに本磁気軸受の作動特性について報告した。

本実験は, 本加速度計(MSA-1, MSA-2)**の高加速度領域($\pm 12g$)における直線性, 再現性を, また静的高加速度外乱($\pm 15g$)における直線性を測定した。さらに, 本実験では本加速度計の周波数応答特性を測定した。本報告では, 本加速度計の概要, 上述した諸特性

実験とその結果について述べる。

2. 浮動振子磁力支持型加速度計の概要

本加速度計はこれまでに研究した自己制御型八極磁気軸受方式を浮動型慣性センサの出力軸受に適用する有効性の評価のために, また人工衛星打上げ用ロケットの誘導用加速度計として必要な性能を目標として試作したものである。本加速度計系の構成・動作原理図を図1に, ダイナミックブロック線図を図2に示す。本加速度計の特徴は出力軸まわりに振子の作用をなすジンバルをジンバルケース内に充満した高粘性, 高密度油[†]中に浮動させ, 出力軸受にかかる負荷を軽減すると同時に, ジンバルの三軸方向変位を磁力で拘束し, 出力軸まわりの回転を円滑にする自己制御型三次元磁気軸受を出力軸受に備

*** magnetically suspended accelerometer: MSA-1は磁気軸受ロータ材にフェライト系材を使用, 2はロータ材にスーパーマロイ積層材を使用, 詳細は第3報参照。

† 油の密度はジンバルの平均密度に等しくなるように精密に温度制御($\pm 0.3^\circ C$ 以内)され, 油による浮力とジンバルの重量が平衡状態にされる。

* 原稿受付 昭和52年2月2日, 昭和50年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和50年11月24日)にて発表。

** 正会員 航空宇宙技術研究所(調布市深大寺町1880番地)

図1 浮動振子磁力支持型加速度計系の構成・動作原理図

図2 浮動振子磁力支持型加速度計系のダイナミックブロック線図

図3 高加速度領域実験装置

えていることである。また本加速度計はトルク平衡方式によって零位法で動作するものである⁶⁾。したがって、加速度の計測は入力加速度 a_i と零位平衡サーボ増幅器を介して回転力発生器 TG にフィードバックされる電流 i_{ig} との比例関係 (定常状態において、 $a_i \cdot P = K_{ig} \cdot i_{ig}$

が成立)を利用して、 i_{ig} の測定により a_i を知ることができる(図2参照)。本加速度計の動作原理の詳細については文献5),6)を参照されたい。

3. 特性実験

3.1 高加速度領域における直線性、再現性

3.1.1 実験装置と実験方法

1) 遠心式加速度試験機と作動・計測回路系

本加速度計の高加速度領域 ($\pm 12g$) における性能実験には高精度遠心式加速度試験機を使用し、遠心加速度を基準入力とした。この試験機の総合精度は $\pm 12.5g$ の領域で設定加速度の10万分の1である。一方、静的な高加速度外乱下の直線性の実験では環境試験用遠心式加速度試験機⁷⁾を使用した。この試験機の精度は、回転精度0.1%、再現性0.9%である。図3は遠心式加速度試験機の作動・計測回路系図である。加速度計出力は7けたを有する積分型デジタル電圧計(精度は100mV~10Vの範囲で、入力電圧の $\pm 0.0055\%$)で、TGコイルに直列に結線した読取抵抗の端子間電圧として測定した。また加速度計の出力波形はオシロスコープで、磁気軸受励磁電流は交流電圧計でそれぞれモニタした。

2) 試験機搭載型加速度計作動装置(パッケージ)

上記の加速度試験機を使用する場合、回転系と静止系との間の必要な電力、信号の授受はスリッリングを通して行われる。それゆえ、特に高精度の性能実験を行う場合にはスリッリング等で生ずると考えられる電氣的雑音を極力除去する必要がある。この問題を解決するた

図4 パッケージ構成ブロック図

表1 パッケージの性能, 諸元

構成要素	性能, 諸元
内部直流定電圧源	定電圧源: $\pm 35\text{ V}$, $\pm 15\text{ V}$, $+5\text{ V}$ 外部供給電圧 (28 V, DC) $\pm 3\text{ V}$ の変動に対して安定度 $\pm 0.1\%$ 以下
回転角検出器励磁電源	励磁電圧: $5\text{ V}_{\text{rms}} \pm 1\%$ 以下 励磁周波数: $12.8\text{ kHz} \pm 0.02\%$ 以下 正弦波ひずみ率: $\pm 1\%$ 以下 電力: 1.5 W
電位平衡サーボ増幅器	最大出力: $130\text{ mA}/15\text{ g}$ (1.2 W 以上)
磁気軸受共振回路	共振容量及び励磁電流読取抵抗はすべて固定
パッケージ形状寸度, 重量等	形状寸度: $222 \times 212\text{ (mm)}$ 重量: 約 1 kg フレーム及びブロック材料: 硬質アルミニウム

図5 直線性 (MSA-1)

図6 直線性 (MSA-2)

表2 MSA の出力感度と非直線性係数

加速度計 a_{IA} の向き 係数	MSA-1		MSA-2	
	一方向	+方向	一方向	+方向
出力感度 $B\text{ (V/g)}$	0.811 387	0.810 961	0.876 182	0.871 369
非直線性係数 $C/B\text{ (g/g}^2\text{)}$	6.96×10^{-5}	-2.64×10^{-6}	6.69×10^{-4}	1.51×10^{-4}

備考 振子軸 (PA): 水平線と並行 (出力軸は垂直方向)
出力軸方向加速度 (外乱): -1 g

めに, 加速度計の作動回路系の信号系路を含む多くの部分を小形, 軽量化したパッケージを試作した. 本パッケージの構成ブロック図を図4に, その性能諸元を表1に示す.

3.1.2 実験結果とその考察

1) 直線性

前報でも述べたように, 本加速度計の出力 $f(x)$ は入力加速度 x に関して非直線性であり, 次式のような x の多項式近似で表せる⁸⁾.

$$f(x) = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + \dots \quad (1)$$

式(1)の各係数 $A, B, C, D, \dots$ は各基準入力加速度とそれらに対応して測定された加速度計出力値を用いて,

最小二乗法より求められる. ここに, B : 加速度計出力感度 (単位: V/g), A/B : バイアス出力 (g), C/B : 二次の非直線性誤差係数 (g/g^2), D/B : 三次の非直線性誤差係数 (g/g^3) である. 三次以降の係数が極めて小さい場合にはそれ以降の高次項は省略できる. 図5,6は高精度遠心式加速度試験機を用いて測定した MSA-1 および 2 の基準入力に対する出力の非直線性誤差を示す. 各図中の実線は最小二乗法で求めた非直線性誤差 $\varepsilon(x) = (C/B)x^2$ の実験曲線である. 実験値は $\varepsilon(x) = \{(f(x)/B) - (A/B) - x\}$ として求めたものである. 表2は最小二乗法で求めた MSA-1, 2 の B および C/B の数値を示す.

図5, 6 および表2から, MSA-1 の非直線性誤差係数

図7 再現性 (MSA-2)

表3 MSA-2の出力感度の再現性

測定数 n	入力 (g)	出力感度 B_n (V/g)	δn^2
1	0 → -12	0.872 041	21.41×10^{-8}
2	←	0.872 588	0.71×10^{-8}
3	→	0.872 486	0.03×10^{-8}
4	←	0.872 543	0.15×10^{-8}
5	→	0.872 599	0.91×10^{-8}
6	←	0.872 602	0.97×10^{-8}

$$\bar{B} = \frac{\sum B_n}{n} = 0.872\,503$$

$$\sum \delta n^2 = 24.18 \times 10^{-8}, \quad \delta n = B_n - \bar{B}$$

$$B = \bar{B} + E$$

$$E = \pm 0.728 \sqrt{\frac{\sum \delta n^2}{n(n-1)}} = \pm 6.5 \times 10^{-5}$$

$$\therefore B = 0.872\,503 \pm 6.5 \times 10^{-5} \text{ (V/g)}$$

ただし、 B : 出力感度、 E : 確率誤差

はMSA-2のそれより一けた小さく、良好な直線性が認められる。この理由としては、第3報でも述べたように、MSA-1および2の磁気軸受材料の違いにより、交流励磁によってロータ表面に誘起されるうず電流効果（出力軸まわりに不確定トルクを発生させる一要因となると考えられる）が、2より1の方が少ないことによるものと思われる。したがって、本磁気軸受の磁心材料はスーパーマロイ積層材より交流特性の優れたフェライト系磁性材料の方が適しているものといえる。

2) 再現性 (short term stability)

再現性を評価するために、高精度遠心式加速度試験機を用いて基準入力加速度を $0 \text{ g} \rightarrow -12 \text{ g} \rightarrow 0 \text{ g}$ を1周期として3回繰返して与え、各入力に対応する加速度計出力を測定し、その平均値の確率誤差を求めた。本実験ではMSA-2の実験のみにとどまったが、その結果を図7に示す。また表3は本実験結果より求めたMSA-2の出力感度 B の再現性を示したものである。

図8 $a_{0A} \approx a_{IA}$ 時の a_{IA} 対 $\varepsilon(a_{IA})$ (MSA-1) 図9 $a_{0A} \approx a_{IA}$ 時の a_{IA} 対 $\varepsilon(a_{IA})$ (MSA-2)

図7から、MSA-2の再現性は確率誤差の最大値で評価すると、 $\pm 5 \times 10^{-4} \text{ g}$ 以下であり、良い再現性が認められる。また表3から、MSA-2の B の再現性は $\pm 6.5 \times 10^{-5} \text{ (V/g)}$ 以内にあることがわかる。

3) 静的加速度外乱下の直線性

本実験は許容静的加速度外乱（出力軸方向に作用する最大静的加速度外乱、 $\pm 15 \text{ g}$ ）に対して、本磁気軸受が出力軸受として正常に機能し得るかを検証するために行ったものである。本実験では環境試験用遠心式加速度試験機を使用した。実験方法は、加速度計の入力軸と出力軸が加速度試験機の回転アームの回転面（水平）内で回転アーム軸（遠心加速度の方向）とのなす角度をそれぞれ 45° となるように取付け、入力加速度 a_{IA} と出力軸方向加速度（外乱） a_{0A} が同時に、ほぼ同じ大ききで印加される状態で本加速度計の直線性を測定した。図8,9はそれぞれMSA-1および2の入力加速度に対する出力の非直線性誤差を示す図である。各図における実線は測定値より最小二乗法で求めた実験曲線であり、実験値は3.1-2)節で述べた同じ方法で求めた。表4は実験結果から最

表4 $a_{0A} \approx 0 \sim \pm 16g$ 時の直線性係数

加速度計 a_{IA} の向き 係 数	MSA-1		MSA-2	
	一方向	+方向	一方向	+方向
出力感度 B (V/g)	0.808 205	0.811 238	0.868 505	0.862 936
非直線性係数 C (g/g ²)	-1.22×10^{-4}	-1.78×10^{-4}	10.23×10^{-4}	-5.54×10^{-4}

備考 振子軸: 沿直線と並行 (出力軸は水平方向)
出力軸方向加速度 a_{0A} (外乱): 約 $0 \sim \pm 16g$

図10 閉回路系の周波数応答 (MSA-1)

小二乗法で求めた 加速度計出力感度 B と非直線性誤差係数 C/B の値である。

図8,9および表4から, 入力加速度の大きさと等しい大きさの静的加速度外乱を印加した場合でも, MSA-1, 2の直線性はそれぞれ実験精度 (0.1%) と同程度であることがわかる。このことは $\pm 15g$ の許容静的加速度外乱に耐え得るように設計した本磁気軸受がその領域において十分に機能することが検証されたものと思われる。すなわち, 本磁気軸受が許容静的加速度外乱の領域で機能を果たさなくなった場合 (例えば出力軸がストッパに接触した場合) には, このような良好な直線性は得られないからである。

3.2 周波数応答特性

本加速度計系 (閉ループ系) は二次の振動系と考えられ, その伝達関数は次式で与えられる⁶⁾。

$$\frac{e_o(s)}{a_i(s)} = \frac{\frac{PR}{K_{tg}}}{\frac{J}{K}s^2 + \frac{C}{K}s + 1} \quad (2)$$

式(2)より, 入出力関係式は次式となる。

$$|e_o(j\omega)| = \frac{\frac{PR}{K_{tg}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{J}{K}\omega^2\right)^2 + \left(\frac{C}{K}\right)^2}} \times |a_i(j\omega)| \quad (3)$$

ただし, $K = K_{sg} \cdot K_{tg} \cdot G_a$

さらに, 本加速度計系の固有角振動数 ω_n , 減衰係数 η はそれぞれ次式で与えられる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}}, \quad \eta = \frac{C}{2\sqrt{KJ}} \quad (4)$$

ここに, e_o : 加速度計出力, a_i : 入力加速度, P : ペンデュラスティ, R : i_{tg} の読取抵抗, J : ジンバルの出力軸まわりの慣性能率, C : 出力軸まわりの粘性抵抗係数, K : サーボ系のステイフネス, K_{sg} : 回転角検出器の出力感度, K_{tg} : 回転力発生器の出力感度, G_a : サーボ増幅器の出力感度, ω : 入力加速度の角周波数である。

実験は, 第3報で述べた分解能実験と同様の方法で, 本加速度計が備えているコマンド用回転力発生器に任意に周波数に変えられる正弦波電流 (振幅 $0.4563g$ の振動加速度に相当) を印加し, 周波数応答特性を調べた。実験結果の一例を図10に示す。同図の理論値は式(3)に同図に示した諸数値を代入して求めたものである。

図10から, MSA-1の周波数応答特性は理論値と大要一致し, 式(3)によって記述されることがわかる。また, ほぼ最適に近い系 ($K = 19.2 \times 10^5 \text{ dyn} \cdot \text{cm/rad}$) において, 本加速度計系の周波数応答は 17 Hz 程度といえる。

4. 結 言

- (1) 自己制御型三次元磁気軸受を出力軸受に適用した浮動振子磁力支持型加速度計は高加速度領域 ($\pm 12g$) において, 直線性, 再現性に関して高精度の性能を有することが明らかとなった。また $\pm 15g$ の許容静的加速度外乱下においても, 本磁気軸受は正常に機能し, 本加速度計の高性能を保証し得ることが検証された。
- (2) 第3報において, 本磁気軸受の磁心材料は, 高透磁率, 高実効飽和磁束密度の特性を有し, かつ交流損失の極く微小なフェライト系磁性材料が最適であることを述べたが, 本実験に関してもその見解の正当性が確認された。

(3) 本加速度計系の周波数応答特性は系のステイフネスを最適に近い状態に設定したとき、約 17 Hz であることが明らかとなった。また本加速度計系の伝達関数は二次の振動系で記述されることが検証された。

「誘導用浮動型慣性センサに用いる磁気軸受方式の研究」に関する報告は本報告をもって一応完結する。これまでの研究を通して、自己制御型八極磁気軸受方式の動作理論を解明し、その設計に必要な資料を得た。さらに本磁気軸受方式を浮動振子型加速度計に適用し、人工衛星打上げ用ロケットの誘導用センサとして必要な基本性能を満たす加速度計を実現し、浮動型慣性センサの出力軸受に本磁気軸受方式を適用することが極めて有効であることを実証した。本磁気軸受方式は種々の応用が考えられるが、一例として誘導用浮動型積分ジャイロ（特にストラップダウン方式用積分ジャイロ）⁹⁾¹⁰⁾に応用すれば、その高精度化が期待できよう。

最後に、本報告に関する研究を遂行するに当たり、試験機搭載型加速度計作動装置（パッケージ）の製作に関して御協力をいただいた鈴木裕氏（元日本航空電子工業（株））ならびに日本航空電子工業（株）ジャイロ部の遠藤武、久英俊の各氏に厚く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 滝沢 実，大月正男，鈴木孝雄：自己制御型八極磁気軸

受方式の理論解析——誘導用浮動型慣性センサに用いる磁気軸受方式の研究（第1報），精密機械，**40**, 7 (1974) 557.

- 2) 滝沢 実，大月正男，鈴木孝雄：誘導用浮動型慣性センサに用いる自己制御型八極磁気軸受方式の理論解析，航空宇宙技術研究所報告，TR-338 (1973-9).
- 3) 滝沢 実，大月正男，鈴木孝雄：自己制御型八極磁気軸受方式の実験的研究——誘導用浮動型慣性センサに用いる磁気軸受方式の研究（第2報），精密機械，**41**, 6 (1975) 604.
- 4) 滝沢 実，大月正男，鈴木孝雄：誘導用浮動型慣性センサに用いる自己制御型八極磁気軸受方式の実験的研究，航空宇宙技術研究所報告，TR-393 (1974-11).
- 5) 滝沢 実，大月正男，鈴木孝雄：自己制御型八極磁気軸受方式の浮動振子型加速度計への応用——誘導用浮動型慣性センサに用いる磁気軸受方式の研究（第3報），精密機械，**43**, 3 (1977) 355.
- 6) 鈴木孝雄，大月正男，円居繁治：トルク平衡方式による浮動振子型加速度計の研究，精密機械，**40**, 7 (1974) 583.
- 7) 大月正男，鈴木孝雄，田畑浄治，円居繁治：搭載機器用環境試験装置の特性，航空宇宙技術研究所資料，TM-99 (1967-2).
- 8) M.S. Sapuppo, P.J. Pijoan and J. H. Buchanan : Testing the Precision Accelerometer, AGARD-ograph, No. 128, (Inertial Component Testing; Philosophy and Methods, 283.
- 9) 大月正男，新宮博公，鈴木孝雄，円居繁治，田畑浄治：ストラップダウン方式用広角度積分ジャイロの研究，航空宇宙技術研究所報告，TR-349 (1975-11).
- 10) A.W. Lawrence et al. : The Design of an Advanced Strapdown Gyroscope, NASA CR-86341, 15 February (1970).

精密工学系大学院の研究テーマの調査結果

会誌編集委員会では昭和 50 年 5 月に続いてこの 3 月に精密工学系大学院（工学部）の昭和 52 年度における研究テーマについてアンケートをお願いしました。

誌面の許す限り順次に回答を掲載する予定です。

アンケートにご協力いただいた大学の関係者の方々にこの欄をかりてお礼申しあげます。

頭書の D は博士課程を，M は修士課程を，テーマのあとのカッコ中の人名は指導教官名を示す。

大阪大学 (1)

- D EEM による超精密数値制御加工法の研究
(井川直哉・森 勇蔵)
- D 改良形 DMDH とその応用 (牧之内三郎)
- M Cu/(001) Ni 二層蒸着薄膜に関する基礎的研究 (川辺秀昭)
- M LEC-GaP 結晶中の微小欠陥に関する研究
- M 疲労き裂伝ば機構に関する研究—疲労き裂伝ば挙動に及ぼす疲労硬化・軟化特性の影響
- M (001) 銅単結晶の交差条痕近傍における変形機構
- M 輪郭切削における寸法精度適応制御に関する研究
(津和秀夫)
- M 精密切削面の精度限界要因の研究
- M サファイア単結晶の摩耗機構

- M サファイア単結晶の超精密研摩法の開発
- M 切断加工の基礎研究
- M 高出力窒素紫外レーザを用いたパルスルミネッセンス法およびホトクロミズム法による管内流れの測定 (山田朝治)
- M 可変周波数偏移レーザドップラ流速計による純流体素子内の非定常流測定
- M 低温における KCl-KBr 固溶体の硬化および軟化
- M 焼結機械部品の寸法精度に関する研究

(井川直哉・森 勇蔵)

- M 表面間の相互作用力に関する研究
- M Elastic Emission Machining の基礎研究
- M 脆性材料の微小破壊特性に関する研究
- M 粉末粒子の静電加速による特殊加工法の研究
- M 基準面なしの形状精度測定法に関する研究
- M 高精度回転装置の試作
- M 多目的システムにおける効用関数の構成とその応用
(牧之内三郎)
- M 多変数システム同定とその応用
- M 大規模システムにおける情報構造と分散型意思決定の方法論
- M 差分法による工作物熱変形の推定
- M 輪郭切削における工作物熱変形適応制御
- M 故障診断の自動化に関する研究
- M 記号処理による部品形状設計