

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-534

ストラップダウン型慣性計測装置用
加速度計の試作とその特性

滝 沢 実 ・ 鈴 木 孝 雄 ・ 大 月 正 男

1984 月 6 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ストラップダウン型慣性計測装置用 加速度計の試作とその特性*

滝 沢 実** 鈴 木 孝 雄** 大 月 正 男**

概 要

人工衛星打上げ用ロケットの慣性誘導システムに関する研究の一環として、実時間シミュレーションによる慣性誘導システムの総合評価実験に使用するためのストラップダウン型慣性計測装置(Inertial Measuring Unit: IMU と略す)用加速度計を試作した。本加速度計はさきに試作した誘導用浮動振子磁力支持型加速度計¹⁾と同型のもので、1自由度トルク平衡方式浮動振子磁力支持型加速度計であり、ロケットの誘導制御用として必要な基本性能を満足する性能(分解能 $7 \times 10^{-7} G$ 、非直線性誤差係数 $1.06 \times 10^{-4} G/G^2$ 、安定性 $\pm 1.3 \times 10^{-5} G$ 、 G :重力加速度)を有するとともに、内蔵のコマンド用トルク発生器により、シミュレーション時の模擬加速度入力を発生させることができる。本報告では、IMU用加速度計の概要および模擬加速度入出力特性実験とその結果について述べる。

1. 結 言

人工衛星打上げ用ロケットの慣性誘導システムに関する研究²⁾の一環として、これまでにストラップダウン型IMUの主構成の一部を成す座標基準系(ジャイロ系)が航空宇宙技術研究所において研究試作され、その性能特性が評価された。³⁾一方、誘導用加速度計の高精度化の研究により、人工衛星打上げ用ロケットの慣性誘導に必要な基本性能* (分解能、直線性、安定性)を満足する誘導用浮動振子磁力支持型加速度計を得た。¹⁾実時間シミュレーションによる慣性誘導システムの総合評価実験に使用するストラップダウン型IMUは上記の座標基準系に3個の加速度計と制御回路から成る加速度計測系を加えることにより完成する。このIMUに用いる加速度計は誘導制御用として必要な基本性能を有するとともに、シミュレーション計算機で解いた飛しょう体の加速度に対応して加速度計出力が得られることが必要である。さきに試作した誘導用浮動振子磁力支持型加速度計は誘導制御用として必要な基本性能

を有するとともに、内部にコマンド用トルク発生器を備えていることにより、上記のような要求を満足している。

本研究は慣性誘導システムの実時間シミュレーション総合評価実験に使用するためのストラップダウン型IMU用加速度計を得ることを目的とし、誘導用浮動振子磁力支持型加速度計(Magnetically Suspended Accelerometer: MSA-1)と同型のもを2個製作し、それらの基本性能を評価するとともに、内蔵したコマンド用トルク発生器による模擬加速度入出力特性評価実験を実施した。本報告では、IMU用加速度計の動作原理、基本性能の概要および模擬加速度入出力特性評価実験とその結果について記述する。

2. IMU用加速度計の動作原理と特徴

本加速度計と同型の誘導用MSAの構成と動作原理の詳細については文献1)で記述しているので、こ

* 分解能: $1 \times 10^{-5} G$ 、非直線性誤差係数(直線性): $1 \times 10^{-4} G/G^2$ 、安定性(再現性): $\pm 1 \times 10^{-4} G$ 程度⁴⁾

* 昭和59年5月22日受付

** 計測部

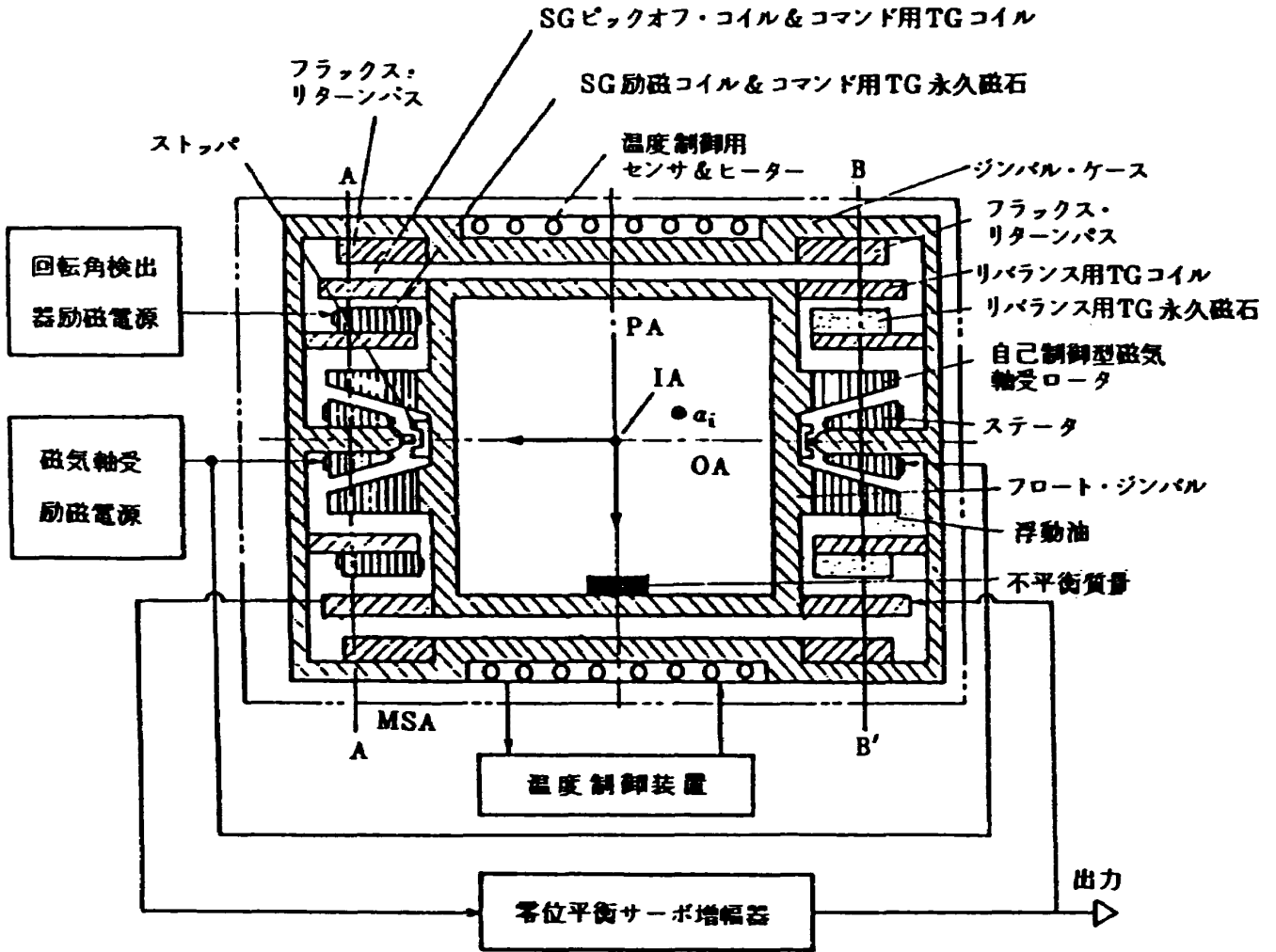


図1 浮動振子磁力支持型加速度計の構成・動作原理図

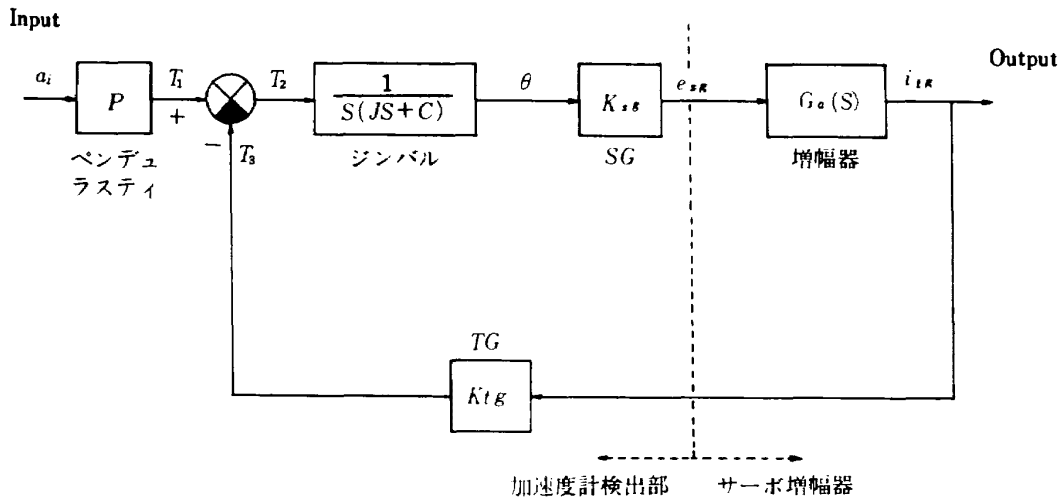


図2 MSA系の伝達関数系

ここではその概要について述べる。

図1は本加速度計の構成・動作原理図であり、図2は本加速度計をアナログ・トルク平衡方式で作動させる場合の伝達関数系である。本加速度計の特徴は、図1に示されるように、出力軸まわりに振子の

作用をなすジンバル・フロート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、出力軸軸受の負荷を軽減すると同時に、浮動ジンバルの三軸方向変位を磁力で拘束し、かつジンバルの出力軸まわりの回転を円滑にするために自己制御型(交流



図3 MSA-3および4の外観写真

共振型)磁気軸受を備えている。また図2に示されるように、本加速度計はサーボトルク平衡方式による1自由度加速度計であり、入力加速度 a_i と零位平衡サーボ増幅器を介して平衡トルク発生器(リバランス用トルク発生器)にフィードバックされる電流 i_{tg} の比例関係(定常状態では $a_i \cdot P = K_{tg} \cdot i_{tg}$ が成立つ。ここに、 P :ペンデュラスティ、 K_{tg} :リバランス用トルク発生器の感度)を利用して、 i_{tg} の測定により a_i を知ることができる。さらに、本加速度計は内蔵したコマンド用トルク発生器に外部から基準電流を与えることにより模擬入力加速度の作用をジンバルに与えることができる。図3は今回製作したIMU用加速度計の外観写真である。

3. IMU用MSAの基本的性能及び機能

表1はIMU用MSAの性能・機能諸元を示す。MSA-1は昭和47年度に誘導用加速度計として試作したものであり、MSA-3, 4は今回製作した加速度計である。同表に示した分解能値はMSAに内蔵したコマンド用トルク発生器を利用して測定した値であり、その測定方法については次章で述べる。また非直線性誤差係数及び安定性については短期安定性評価試験法¹⁾によって測定した値である。図4は安定性実測値をグラフで示したものである。

表1及び図4に示されるように、MSA-3及び4はMSA-1とほぼ同等の性能及び機能特性を有していることがわかる。これらの加速度計の基本性能(分解能, 直線性, 安定性)は人工衛星打上げ用ロケットの誘導制御用加速度計に必要な性能を満足

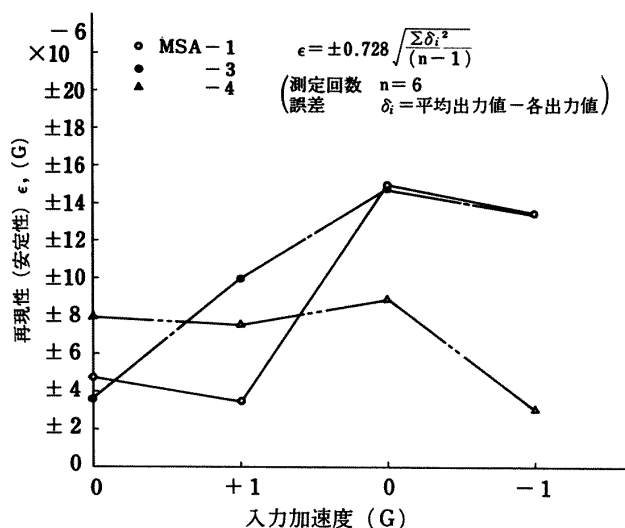


図4 MSAの再現性(短期安定性)

するものである*。

4. コマンド用トルク発生器による模擬加速度入出力特性評価実験

4.1 模擬加速度入出力系の動作原理

図5はコマンド用トルク発生器によって模擬加速度を入力する場合のMSAの動作原理を示す機能ダイアグラムである。同図において、入力加速度 $a_i = 0$, 出力軸まわりの外乱トルク δT_{OA} が微小で省略できるとすれば、模擬加速度入力に対するMSA系の伝達関数は次式で表わすことができる。

$$\frac{i_{TGR}(S)}{i_{TGC}(S)} = \frac{K_{TGC}}{K_{TGR} \left\{ 1 + \frac{C}{K(S)} S + \frac{J}{K(S)} S^2 \right\}} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $K(S) = K_{SG} \cdot G_{amp}(S) \cdot K_{TGR}$: 零位平衡サーボ系の電磁的バネ定数, K_{SG} : 回転角検出器の感度, $G_{amp}(S)$: 零位平衡サーボ増幅器のゲイン, C : 浮動油によるジンバルの出力軸まわりの粘性抵抗係数, J : ジンバルの出力軸まわりの慣性モーメント, i_{TGR} : リバランス用トルク発生器へのフィードバック電流, K_{TGR} : リバランス用トルク発生器の感度, i_{TGC} : コマンド用トルク発生器に与える模擬加速度相当の基準電流, K_{TGC} : コマ

* P1脚注参照

表1 MSAの性能・機能諸元

諸元	単位	MSA-1	MSA-3	MSA-4	備考
1. 性能					
分解能	G	3.3×10^{-7}	5×10^{-7}	7×10^{-7}	* コマンド用トルク発生器をリバランス用トルク発生器として使用したときのデータ。以下のカッコ内の値についても同様。
非直線性係数	G/G ²	5.1×10^{-5} (1.8×10^{-5})*	1.03×10^{-5} (2.6×10^{-6})	1.06×10^{-5} (1.46×10^{-5})	
安定性	G	$\pm 1.5 \times 10^{-5}$ ($\pm 1.8 \times 10^{-5}$)	$\pm 1.3 \times 10^{-5}$ ($\pm 2.8 \times 10^{-5}$)	$\pm 0.9 \times 10^{-5}$ ($\pm 0.55 \times 10^{-5}$)	
2. 機構特性					
出力感度	mA/G	8.105726 (10.406470)**	10.342844 (19.702548)	7.745435 (14.09281)	** この感度の逆数がコマンド用トルク発生器の入力感度となる。
ペンデュラスティ	gr-cm	0.98	1.10	1.00	*** 80℃で最適設計されているが、IMUで用いる場合、74℃で作動させる。
慣性モーメント	gr-cm ²	713 (組)	54.4	52.6	
粘性抵抗係数	dyn-cm-sec	9730	14680	8930	+ MSA-1と同程度
振子自由度	deg	+14 -14	+15 -17	+17 -17	
作動温度	℃	74***	74	74	
サーボ系のゲイン	dyn-cm/rad	—————	6.87×10^6	5.78×10^6	
外形寸度	mm	56φ×80	56φ×80	56φ×80	
周波数応答	Hz	41	————— +	————— +	
重量	grw	425	430	425	
3. 磁気軸受特性					
ロータ材質		フェライト	フェライト	フェライト	
ステータ材質		スーパーマロイ積層	スーパーマロイ積層	スーパーマロイ積層	
ラジアル・スチフネス	grw/μm	0.73	0.73	0.73	
スラスト・スチフネス	grw/μm	0.12	0.063	0.063	
ラジアル・ストップ間隙	μm	30	20	20	
スラスト・ストップ間隙	μm	90	60	55	
励磁電圧	V _{rms}	2	2	2	
励磁周波数	Hz	1500	1500	1500	
制御型式		自己制御型	自己制御型	自己制御型	
試作・製作	年度	47	50	50	

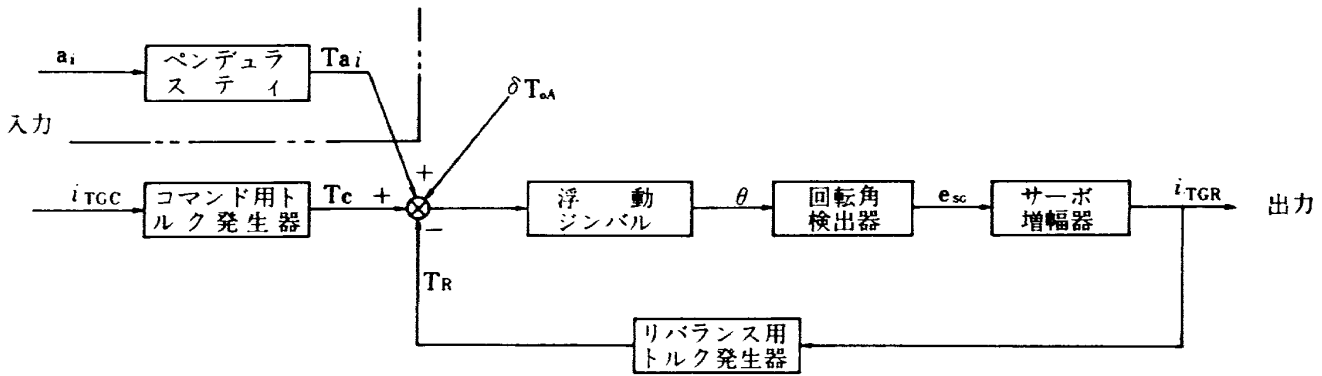


図5 模擬加速度入力によるMSAの機能ダイアグラム

ンド用トルク発生器の感度, $S=j\omega$, ω : 入力基準電流の角周波数

式(1)は定常状態において次式で表わせる。

$$i_{TGC} \cdot K_{TGC} = i_{TGR} \cdot K_{TGR} \quad \dots\dots(2)$$

一方, MSAに入力加速度 $a_i (S)$ が印加される場合, MSA系の伝達関数は式(1)と同様に次式で与えられる。

$$\frac{i_{TGR}(S)}{a_i(S)} = \frac{P}{K_{TGR} \left\{ 1 + \frac{C}{K(S)} S + \frac{J}{K(S)} S^2 \right\}} \quad \dots\dots(3)$$

ここに, P : 浮動ジンバルのペンデュラスティ (等価振子の腕相当長と不平衡質量の積)

式(3)は定常状態において次式で表わせる。

$$a_i \cdot P = i_{TGR} \cdot K_{TGR} \quad \dots\dots(4)$$

したがって, 式(2)と式(4)から, 次式を得る。

$$i_{TGC} \cdot K_{TGC} = a_i \cdot P \quad \dots\dots(5)$$

式(5)において, a_i を模擬入力加速度 a_S とおけば, a_S は次式で表わすことができる。

$$a_S = \frac{K_{TGC}}{P} \cdot i_{TGC} \quad \dots\dots(6)$$

それゆえ, 基準電流 i_{TGC} をコマンド用トルク発生器に入力することにより, MSAに模擬加速度を印加することができる。

4.2 模擬加速度入出力特性実験装置

図6は模擬加速度入出力特性実験装置の機能ブロック図である。図6に示されるように, この実験装置は, 基準電流入力装置 (定電流発生器), 被試験体MSA, MSA駆動電子装置及びMSA出力読取表示装置から構成される。基準電流入力装置に用いた高精度定電流発生器 (John Fluke 社製) は出力電流作動領域が6桁あり, 最大レンジを5mAとした場合, 分解能 (最小出力値) は0.01 μ A, 安定度は0.005%である。またMSA出力読取表示装置として使用したデジタル電圧計 (武田理研製 D. V. M, TR-6567) は7桁の作動領域を有し, 精度は $\pm 0.0055\%$ (100mV~10Vレンジ) である。

4.3 模擬加速度入出力特性実験とその結果

(1) MSA出力の時間的変動 (ドリフト) 特性の評価

図6に示した実験装置において, MSAを作動させ, コマンド用トルク発生器への基準電流入力をゼロ, 入力加速度をほぼゼロの状態にしてMSA出力のドリフト特性を測定した。その結果の一例を図7に示す。同図に示されるように, MSA-3のドリフト特性は約 $5 \times 10^{-6} G / \text{時間}$ であることが認められる。一般に高精度加速度計の性能評価試験では, 試験機の基盤振動や基盤の傾斜変動等に最深の注意がはらわれる。特にドリフト特性の評価試験では試験機の基盤の傾斜変動は加速度計出力に見かけ上のドリフトとして現われる。基盤傾斜変動の主な原因としては日照による建物の南側膨張による傾斜があり, その傾斜による重力成分は $10^{-5} G$ 位になると

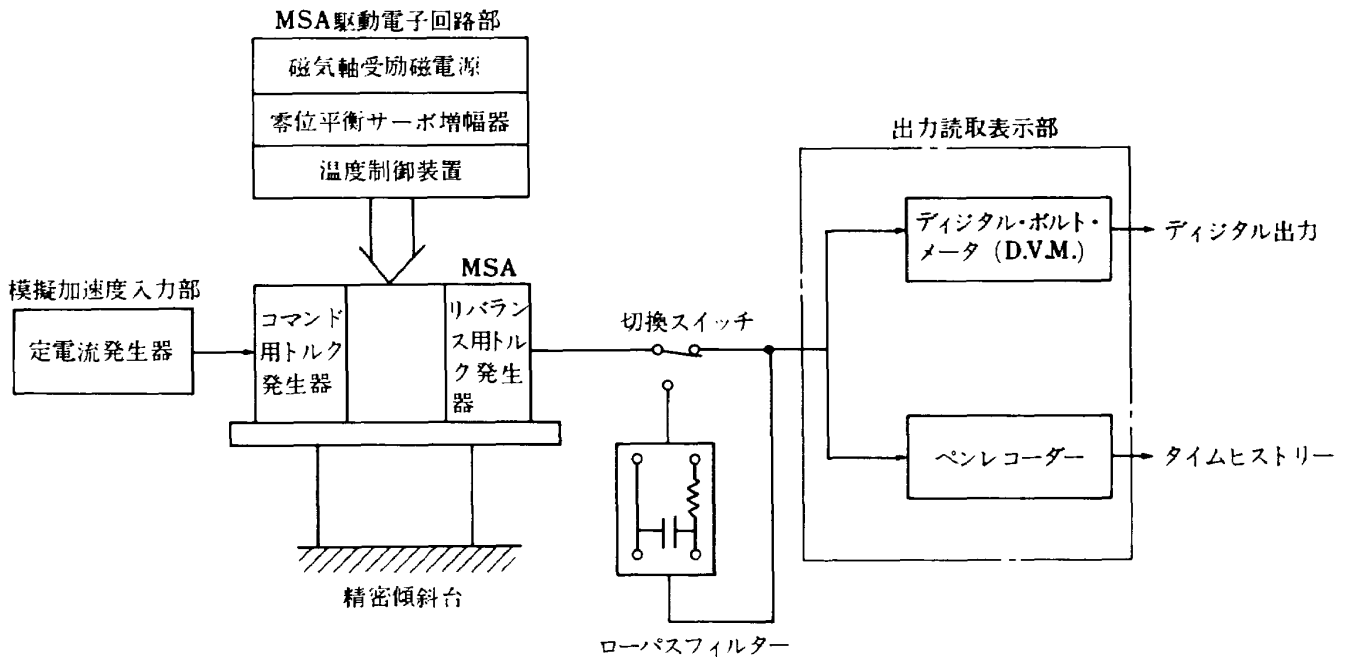


図6 模擬加速度入力特性評価実験装置

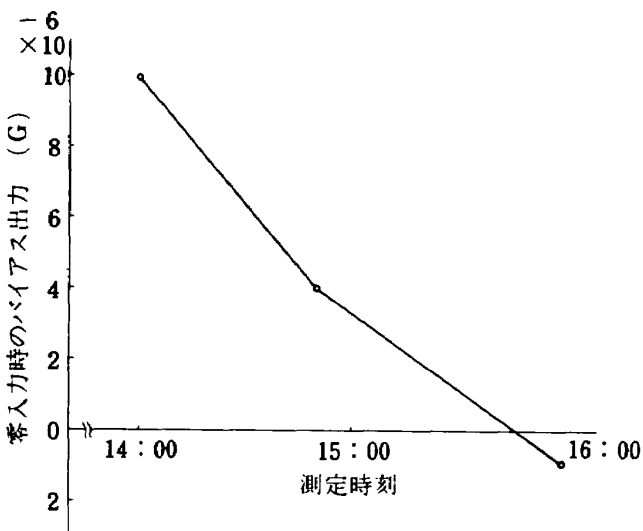


図7 MSA-3のバイアス・ドリフト特性

いう報告がある⁵⁾。高精度試験機の基盤は通常建屋の床と隔離して地面上に設置されるが、今回の実験では試験機を建屋のコンクリート床面上に置いたため、図7に示した結果には不可避的な建屋の基盤傾斜変化の影響も含まれているものと考えられる。

(2) 微小模擬加速度入力による再現性の評価

図6に示した実験装置において、入力加速度をほぼ0Gの状態ではMSAを作動させ、コマンド用トルク発生器への基準電流入力を0.1, 0.2, 0.3 μA (0.1 μA の入力はMSA-1のコマンド用トルク発生器の感度が0.0104A/Gであるため、 1×10^{-5} Gの模擬加速度入力に相当する)とステップ状に変

化させ、そのときのMSA出力をペンレコーダで記録した。図8はMSA-1に対する実験結果の一例を示す。

同図に示されるように、コマンド用トルク発生器による微小模擬加速度入力に対するMSA-1の応答はMSA-1が良好な再現性* (1×10^{-6} G程度)を有していることを示していると同時に、コマンド用トルク発生器を利用することにより、微小な模擬加速度入力を再現できることがわかる。

(3) 分解能(最小検出感度)の評価

本実験は今回製作したMSA-3, 4の最小検出感度、すなわち分解能を評価するために実施した。実験は、図6に示した実験系において、ペンレコーダとDVMの前に時定数2.4秒のローパスフィルターを挿入し、試験機の基盤振動による外乱加速度の影響を除いた状態で、コマンド用トルク発生器に0~0.1 μA の基準電流入力し、加速度計の出力をペンレコーダで記録した。実験結果の一例として、図9にMSA-4に対する測定結果を示す。MSA-4のコマンド用トルク発生器の入力感度は0.01 μA で 7×10^{-7} Gである。図9に示されるように、ゼ

* MSA-1, 3, 4の再現性(安定性)については短期安定性試験により定量的に評価している。その結果については表1を参照されたい。

ロ入力時の出力にドリフトが多少認められるが、 $0.01\mu\text{A}$ ($7 \times 10^{-7}\text{G}$ 相当)の基準電流入力に対して、MSA-4は明確に応答することが認められる。MSA-3についてもMSA-4と同様の結果

が得られた。MSA-1の分解能は $3.3 \times 10^{-7}\text{G}$ 程度であるから、MSA-3及び4の分解能はMSA-1と同程度であることが検証された。

(4) 低模擬加速度入力に対する入出力特性の評価

この実験は、コマンド用トルク発生器による模擬加速度入力に対する加速度計の出力を測定し、出力値を基準値にしたときの模擬加速度入力特性を評価するために行った。実験では、上記(2)の実験条件と同様な状態で、コマンド用トルク発生器に $0 \sim \pm 1\text{G}$ 相当の基準電流を入力し、それぞれの入力電流値に対する加速度計出力を測定した。実測出力値はあらかじめ測定したMSAの感度を用いて出力加速度値として高精度で変換できる。そこで、これを基準値にとり、入力電流に相当する模擬入力加速度値と比較すれば、コマンド用トルク発生器による模擬加速度入力特性(誤差、相対誤差及び再現性)が評価できるものと考えられる。

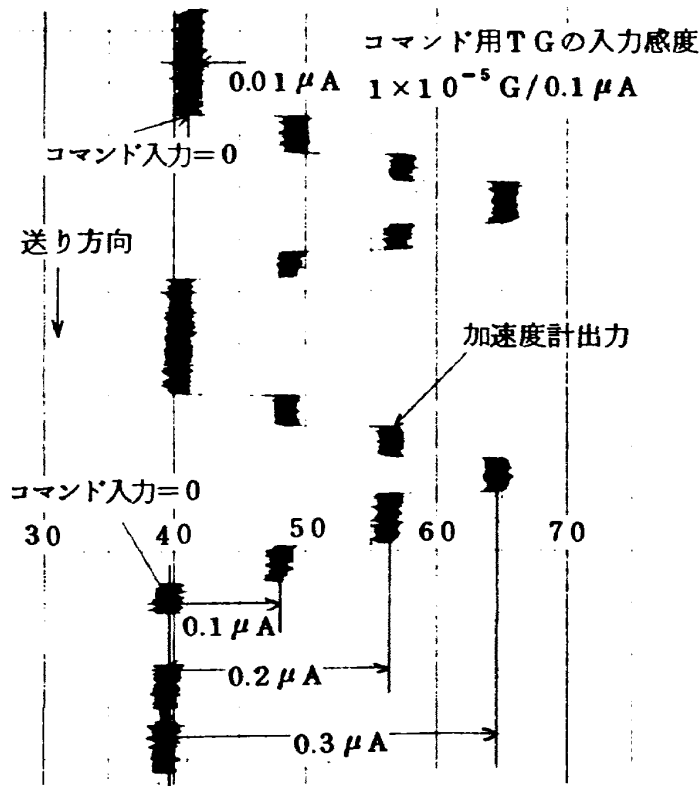


図8 微小模擬加速度入力の再現性(MSA-1)

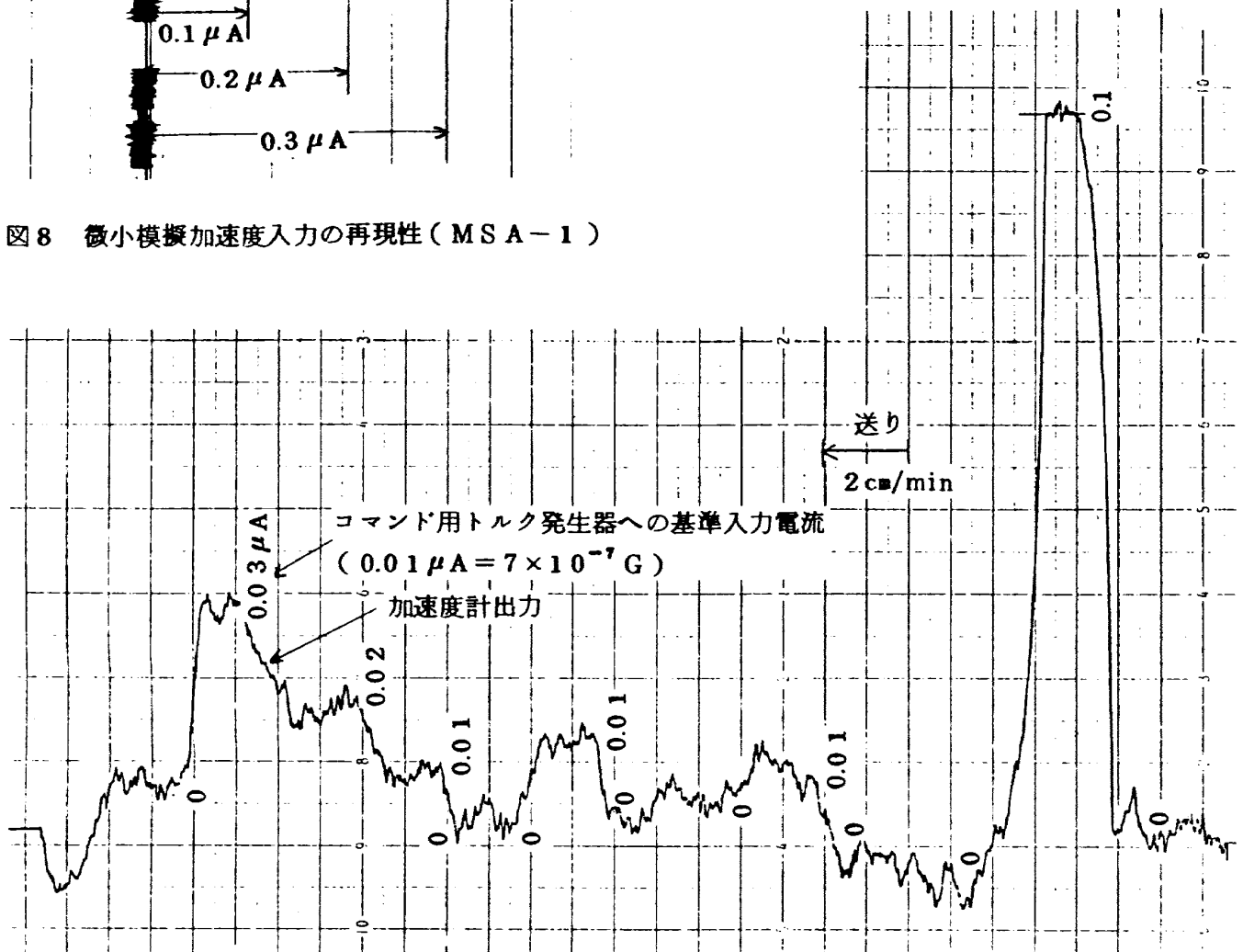


図9 微小模擬加速度入力による分解能実験結果(MSA-4)

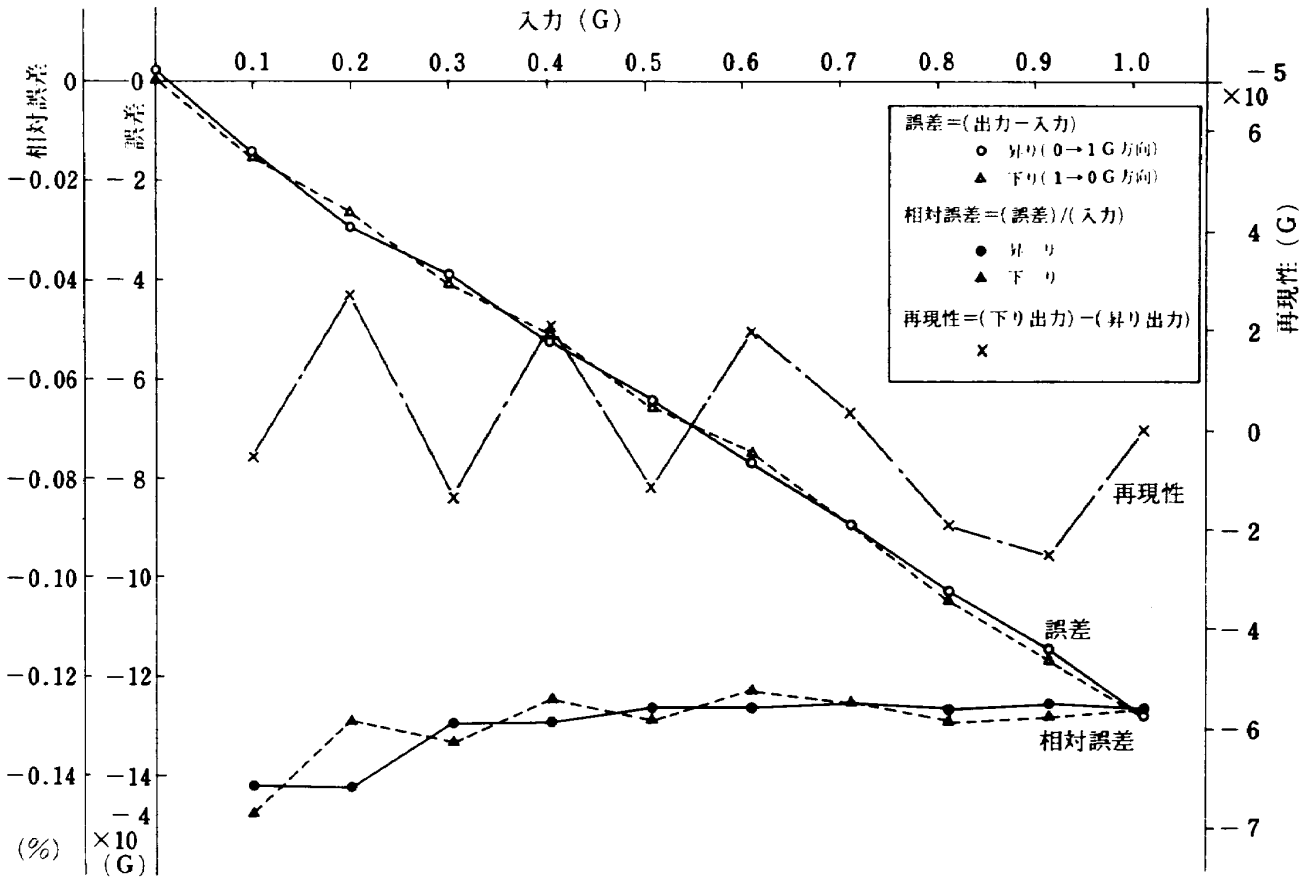


図 10 低模擬加速度入力に対する入出力特性 (MSA-4, 正方向)

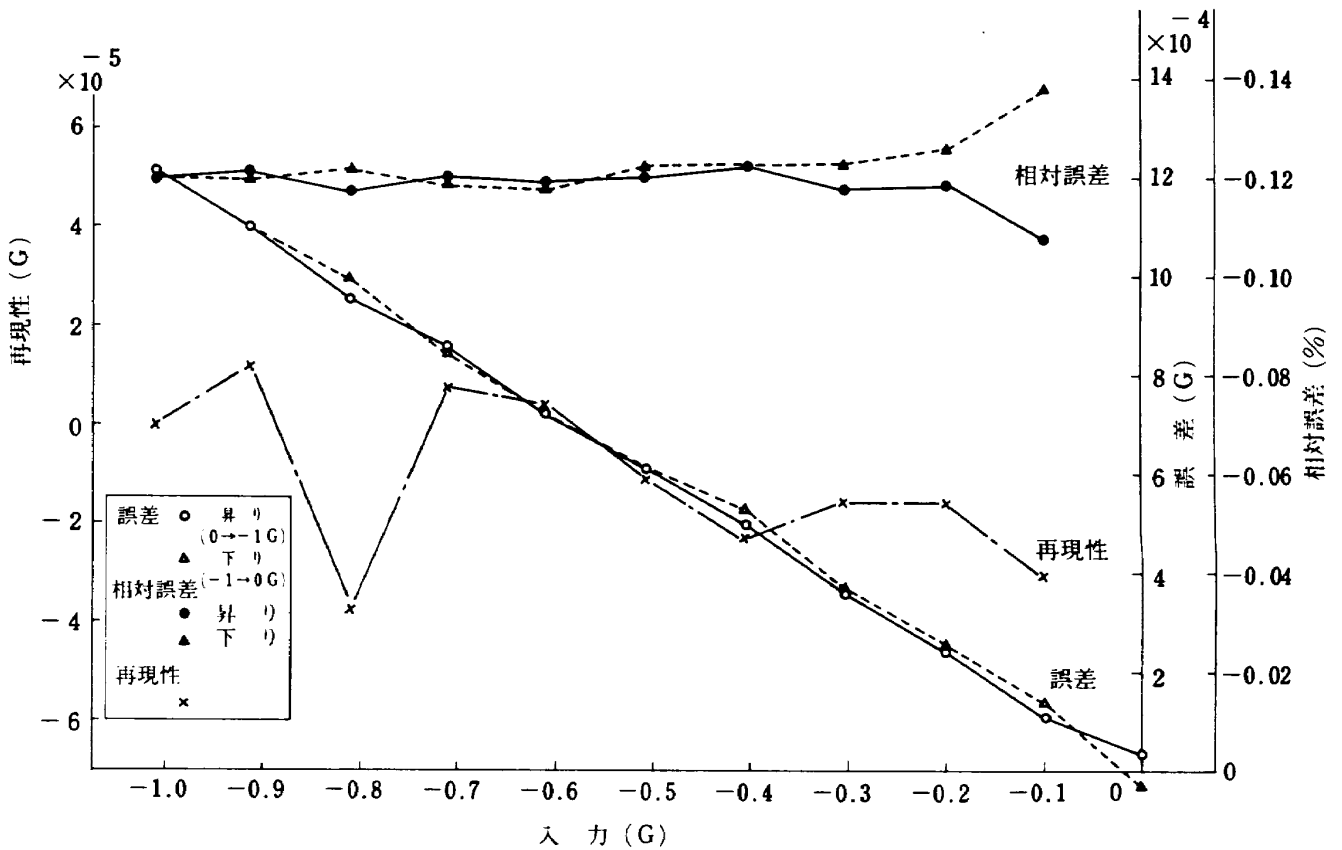


図 11 低模擬加速度入力に対する入出力特性 (MSA-4, 負方向)

以上の方法によって実測したMSA-4に対する入出力特性を図10, 11に示す。それぞれの図に示されるように、MSA-4に対する入出力相対誤差は -0.14% 以下、再現性は $\pm 4 \times 10^{-5} G$ 以内にあることが確認できる。ここに、誤差=出力値相当加速度-入力電流値相当加速度、相対誤差=誤差/入力電流値相当加速度、再現性=(OG→ $\pm 1 G$ 測定方向の出力値相当加速度)-($\pm 1 G$ →OG測定方向の出力値相当加速度)と定義した。

5. 結 言

人工衛星打上げ用ロケットの慣性誘導システムの研究の一環として製作したストラップダウン型慣性計測装置(IMU)用浮動振子磁力支持型加速度計(昭和47年度に試作した誘導用浮動振子磁力支持型加速度計と同型)の動作原理の概要と特徴、その性能・機能諸元および内蔵したコマンド用トルク発生器による模擬加速度入出力特性実験とその結果について述べた。

本研究の結論は次のように要約できる。

(1) 慣性誘導システムの実時間シミュレーション総合評価実験に使用するためのIMU用加速度計; MSA-3, 4はMSA-1と同程度の性能、すなわち安定性: $\pm 1.3 \times 10^{-5} G$ 程度、分解能: $7 \times 10^{-7} G$ 程度、非直線性誤差係数: $1.06 \times 10^{-4} G/G^2$ 程度の性能を有することが確認された。

(2) MSA-1, 3および4は内蔵したコマンド用トルク発生器に外部から基準電流を印加することにより、模擬加速度を高精度(入出力相対誤差: 0.14% 以下、再現性: $\pm 4 \times 10^{-5} G$ 以内、ただし $\pm 1 G$ 領域)で与えることができることが検証された。

(3) MSA-3のゼロ入力時出力の時間変動(ドリフト)特性は約 $5 \times 10^{-6} G$ /時間程度であることが確認された。

(4) コマンド用トルク発生器に微小基準電流を印加することにより、微小模擬加速度入力を再現性良く与え得ることが検証された。

(5) 以上の結果、MSA-1, 3および4は実時

間シミュレーションに使用するためのIMU用加速度計として必要な性能・機能を備えているものといえる。

なお、MSA-1, 3および4は、昭和56年度に実施された航空宇宙技術研究所と宇宙開発事業団の共同研究:ロケットの慣性誘導システムに関する実時間シミュレーション総合評価実験⁶⁾に供され、所期の目標が達成された。

参 考 文 献

- 1) 滝沢実, 大月正男, 鈴木孝雄; 誘導用浮動振子磁力支持型加速度計の研究, 航空宇宙技術研究所報告 TR-644, (1980年12月)
- 2) 新田慶治, 大坪孔治, 森英彦, 小口美津夫; 慣性誘導システムの研究(その1) — 航技研における研究の流れと今後の計画 —, 第21回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 46~49, (1977年10月)
- 3) 大月正男, 新宮博公, 円居繁治; ストラップダウン方式用ジャイロ・パッケージの研究試作, 第20回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 220~223, (1976年10月)
- 4) 大月正男, 新宮博公, 鈴木孝雄; ストラップダウン方式の慣性機器誤差によって生ずる飛しゅう径路誤差の一考察, 航空宇宙技術研究所資料 TM-225, (1972年5月)
- 5) 鈴木孝雄, 円居繁治, 大月正男; 二軸傾斜台(サーボテーブル)を用いた加速度計の高分解能試験, 第18回計測自動制御学会(SICE)学術講演会講演集, pp. 145~146, (昭和54年8月)
- 6) 新田慶治, 大坪孔治, 森英彦, 小口美津夫, 鈴木孝雄, 新宮博公, 円居繁治, 萩原強, 池内正躬, 太原雅彦, 後藤壮輔, 田中俊輔, 池田茂, 竹内憲夫; 慣性誘導システムに関する研究 — ストラップダウンシステムの評価とシステム試験 —, 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団共同研究成果報告書, (昭和56年3月)

航空宇宙技術研究所資料 534号

昭和59年6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)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12
