

精密加速度計と残留推力特性

森 大吉郎・今 沢 茂 夫・若 原 洋 一

1. は し が き

L-4S-4号機において、第三段モータが燃焼終了後に切離された上段部に衝突するという事故が起きた。その原因として、低密度の上空では燃焼後のモータになおかなりの時間にわたって微小な推力が残り、これによりモータが加速されることが推察された。これを回避するために、L-4S-5号機にはレトロモータを設けたが、なおその残留推力による微小な加速度を実機において実測する目的で精密加速度計の開発が要望された。測定範囲は1gから0.001gまでの静的加速度を主眼とし、重量を0.8kg以内とすることが要求された仕様である。

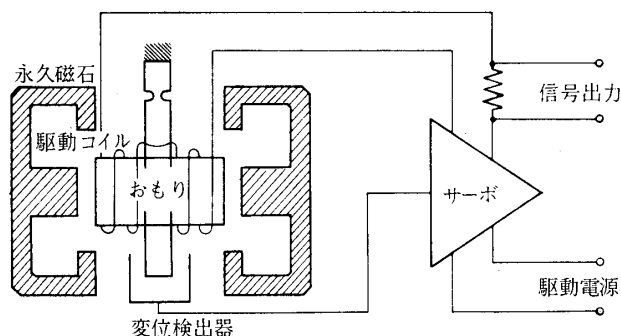
以下はその開発および実測結果に関する概略報告である。

2. 加 速 度 計 の 構 成

(1) 変換器

加速度変換器としてはサーボ加速度変換器（ENDEVCO社製Q-FLEX加速度計）を採用した。

その原理は第1図に示すEyestone-Wilson Sensorと呼ばれるサーボ平衡機構を持った1振動自由度系であって、ばね・おもり系には溶融水晶を用い、おもりの変位検出には電気容量型ピックアップ、サーボ復元力には電磁コイルを用いた構成である。



第1図 Eyestone-Wilson Sensor 原理図

この溶融水晶による振動系は振動が精密に1自由度系で、摩擦が無く、かつヒステリシス・不安定性・疲労性が少ないという特長を持っている。また感度と直線性が良く、横感度が小さいことも特長の一つである。

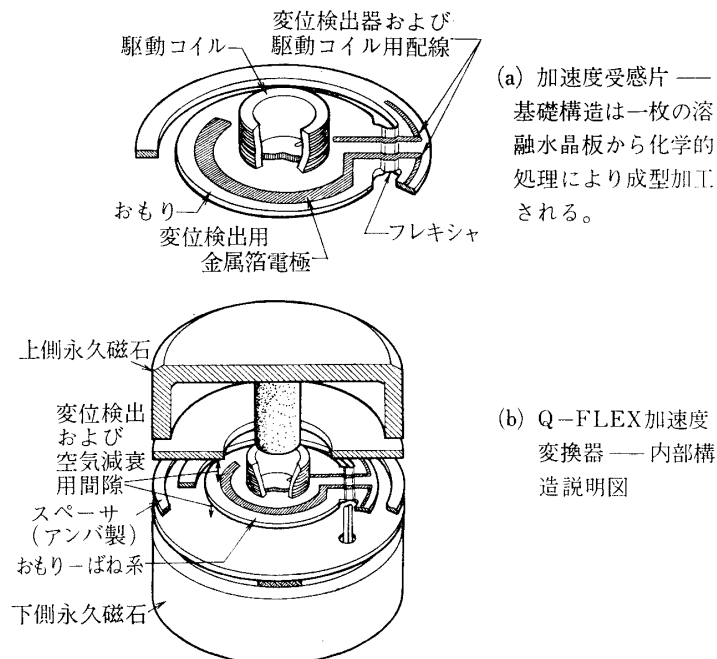
第 2 図には加速度変換器の模式図を、第 3 図には受感片の変位検出および復元サーボ回路を示す。

また、使用した加速度変換器（タイプ QA-116-16）の主要性能諸元を第 1 表に、その周波数応答特性を第 4 図に示す。

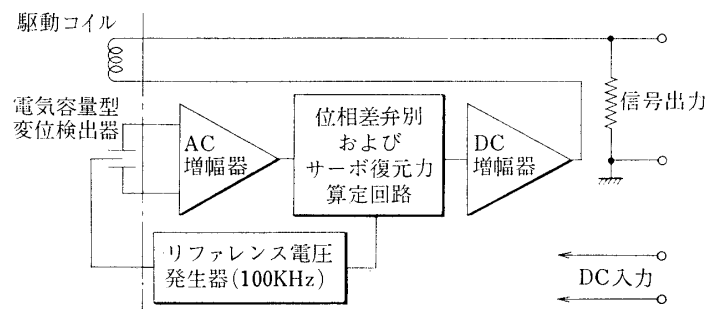
(2) 電気回路

優秀な加速度変換器の選定が第 1 の要点であるが、上記の変換器が 0.001 g から 1 g にわたって安定な感度を有しているのに対応して、広い範囲にわたって有意義な計測を実施できることが第 2 の要点である。その目的で安定な対数増幅器を組合せることにした。第 5 図にその特性を示す。

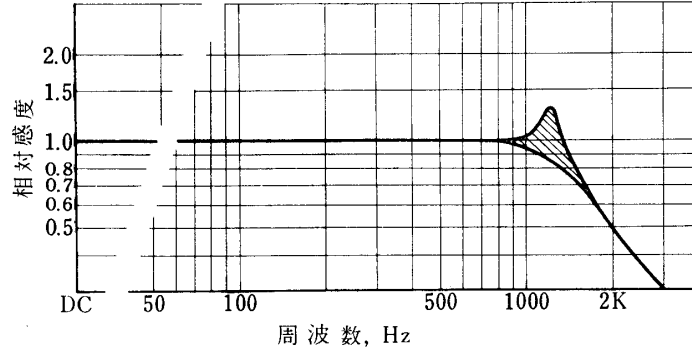
実際の使用に際してはテレメータ送信装置を介するので、精度向上の目的から校正電圧（4 レベル）を入れることとし、0.999 g、0.099 g、0.009 g、および 0 g に相当する校正電



第 2 図 加速度変換器模式図



第 3 図 受感片の変位検出回路およびサーボ復元回路



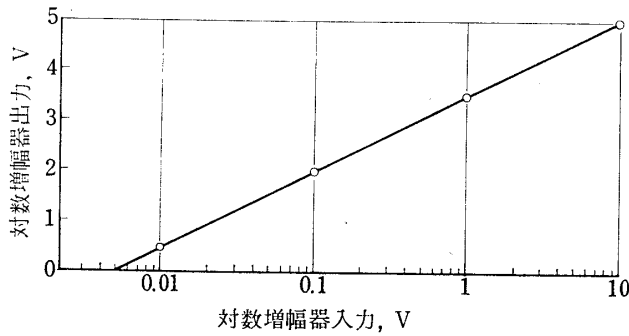
第4図 QA-116の周波数応答特性

第1表 Q-FLEX (QA-116-16) 主要性能諸元 (Nominal)

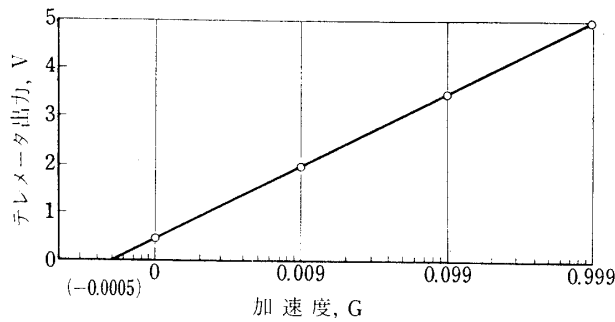
測定レンジ	±1 g	
励起電圧	28 VDC ±5%	
消費電流	17~25 mA _{max}	
出力抵抗	900 Ω	
周波数応答特性 (5%)	300 Hz	
受感片固有振動数	1000 Hz	
減衰比	約0.6 (air dumping)	
感 度	1 V/g (Noise 0-300 Hz: 0.0005 V _{rms})	
検出可能な最小加速度	0.000001 g	
励起電圧変化による感度変化	<0.005%/V (励起電圧 28 V _{DC} +5%)	
温度変化による感度変化	<0.01%/°F	
横 感 度	<0.002 g/g	
零不平衡	<0.05 g	
励起電圧変化による零シフト	<0.00005 g/V	
温度変化による零シフト	<0.0002 g/°F	
感度直線性	0.01% of reading	
環境条件	使用温度	-42°C~85°C
	耐静的加速度	100 g
	耐衝撃加速度	500 g, 11 msec 半正弦波, all axes
	耐振動加速度	50 g, ランダム・サイン, all axes
耐 湿	エポキシ・シール	

圧をパルス回路とリレー回路により 14 秒に 1 回の割合でそう入するようにした。なお 0g を測定レンジ内に納めるために 0.001 g 変換器の出力に相当のバイアス電圧をかけたものを増幅部の入力とした。

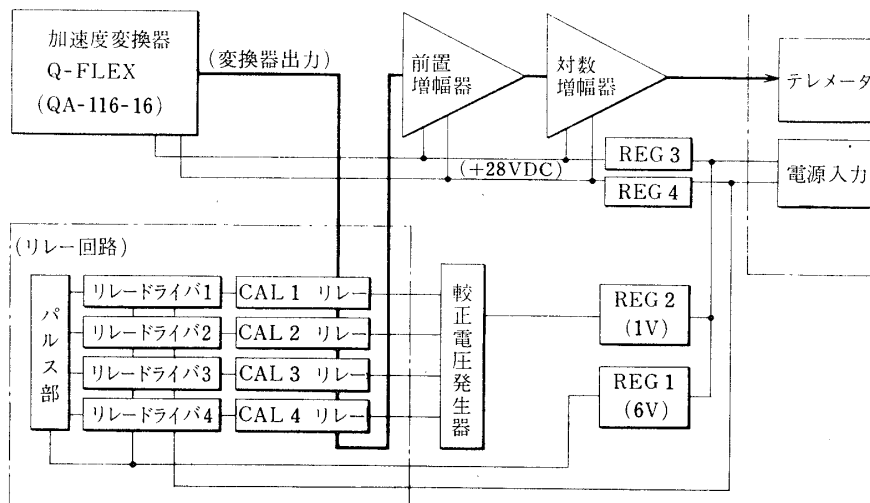
全体の構成を第 7 図に総合的な入出力特性を第 6 図に示す。また測定記録例を第 8 図に示す。



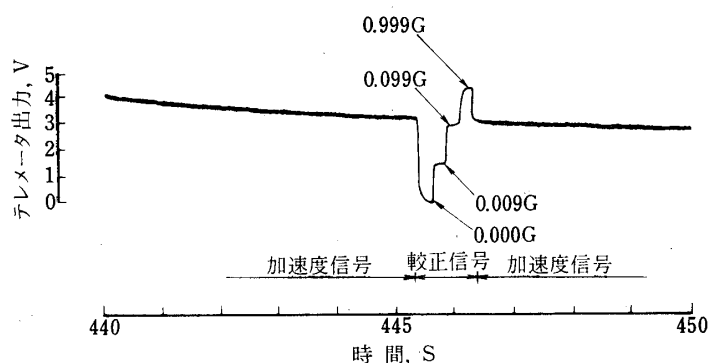
第 5 図 対数増幅器入出力特性



第 6 図 精密加速度計の総合入出力特性



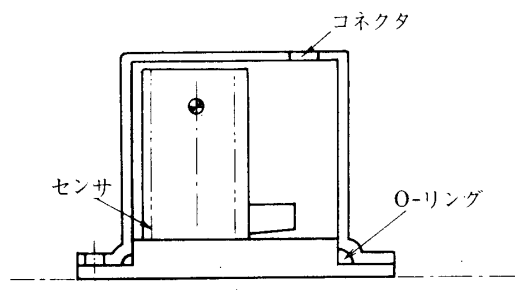
第 7 図 精密加速度計構成図



第8図 テレメータ記録例

(3) 気密式センサケース

変換器は真空に対するシールを持たないので高空の低密度の下で減衰特性が低下せぬよう第9図に示す気密式センサケースに納めて気密性を確保した。



第9図 気密式センサケース

3. 性能試験

搭載に先立って各種性能の確認試験を行った。

(1) 気密試験

変換器は前述のように気密式センサケースの中に入れて使用するが、軽い衝撃に対する応答を

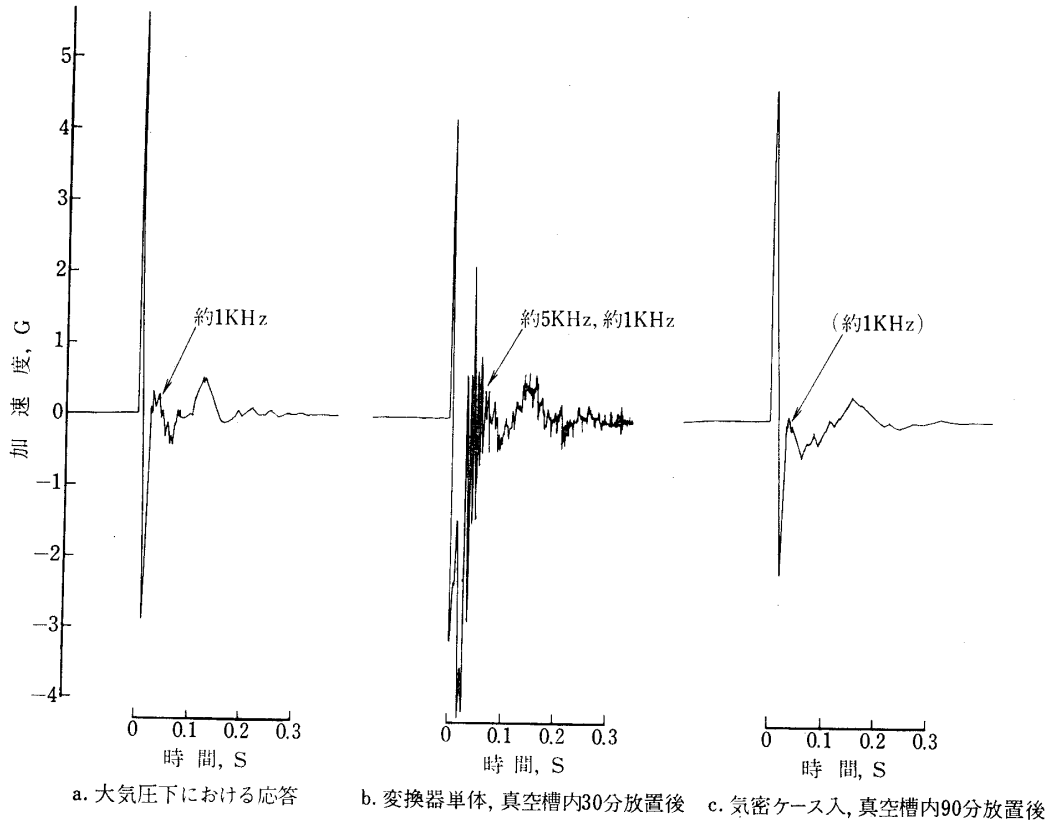
- a). 変換器単体・大気圧下
- b). 変換器単体・真空槽内 30分放置後
- c). 気密式センサケース入・真空槽内 90分放置後

の3通りの場合について測定、比較することにより、気密式センサケースの気密が変換器の減衰特性を十分保持するものであることを確認した。第10図に測定例を示す。空気減衰を除去した場合b). 受感片の固有振動(約1kHz)および取付板の固有振動(約5kHz)が顕著であるのに対し、気密ケース内c). では大気圧下 a). と同様空気減衰が効果的に働いていることが確認できる。

(2) 変換器の特性確認試験

変換器は第1表に示されている程度の零不平衡および横感度を持っていて、各変換器ごとの試験成績書にはその較正值が付してある。これを点検するために各変換器について感度・零不平衡・横感度を測定して較正值と比較した。その結果を第2表に示す。

表の零不平衡値は、 $\pm 1g$ の重力加速度に対する変換器出力をデジタル・ボルトメータにより0.1mVの単位まで読みとった値の中央値で、直線性の高いサーボ型変換器の場合比較的高い精度が得られる。*印を付した零不平衡実測値は、十分に水平と思われる台(精密ジ



第 10 図 衝撃に対する加速度変換器の応答例

第 2 表 変換器の感度・零不平衡および横感度測定例

() 内は試験成績書記載値

	感 度	零 不 平 衡	横 感 度
例 1	1068.2 mV/g (1064.9 ")	-9.7 mV -10.0 mV* (-9.7 ")	±0.0011 g/g* (<0.002 ")
例 2	1059.2 " " (1062.0 ")	-2.6 " -3.5 " * (-3.0 ")	±0.0006 " * (<0.002 ")
例 3	1083.4 " " (1083.0 ")	-0.2 " — * (0.0 ")	— * (<0.002 ")

ジャイロテーブル・誤差 0.0002 rad. 以下) に変換器を置いて測定した値であるが, 変換器側面の加工精度にも左右されるので確実性がやや不足している.

(3) 温度による零点移動

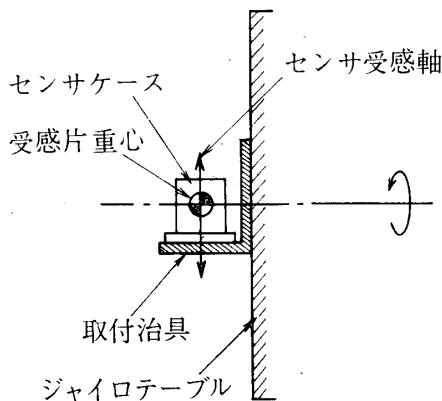
変換器出力は環境温度変化によっても零点移動するのでその大きさを測定した. その結果 30°C の温度変化に対し 0.0027 g 相当 (約 0.00009 g/°C) の零点変動が認められた. なお仕様書による値は「0.0002 g/°F=0.00011 g/°C 以下」である.

(4) 動作試験

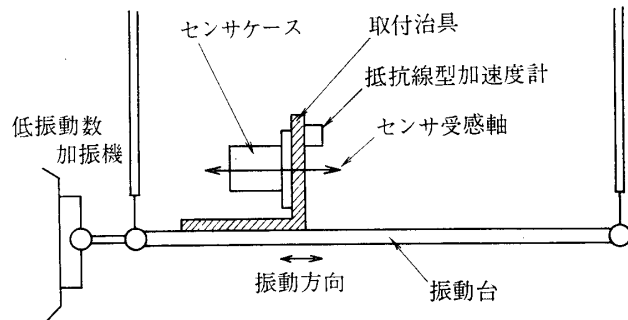
増幅器部をも含めた総合的な動作試験を行ない精密加速度計が正常に作動することを確認した。動作試験の概要は次の通りである。

〔動作試験1〕東大宇宙航空研究所計測部東口研究室の精密ジャイロテーブル上に精密加速度計を取付け、重力加速度を利用して $\pm 1g$ 、60秒周期の正弦波状加速度を加えて精密加速度計が正常動作することを確認した。動作試験概略を第11図に示す。

〔動作試験2〕明石製作所の低振動数加振機を借用して、振動加速度：0.1g および 0.01g 振動数：0.5Hz~5Hz の低振動数低加速度振動試験を実施し、精密加速度計の出力を加振加速度の読み・抵抗線型加速度計による計測等と比較することにより精密加速度計の動作が安定であることを確認した。動作試験概略を第12図に示す。



第11図 動作試験1



第12図 動作試験2

4. 測定精度の検討

精密加速度計が正常・安定に動作することは上記の諸試験により確認されたが、これを実機に搭載して精度良く微小加速度を測定するにはなお取付に際して細心の注意が必要である。測定精度に関連ある事項を以下に列挙し精度向上について検討した。

(1) スピン回転に伴う測定誤差

機体がスピン回転しているとき、加速度変換器の受感軸および受感片の重心位置がスピン回転軸から角度 θ_{rad} 、距離 d_{mm} だけずれていると〔第13図参照〕スピン回転数 f_{cps} のとき

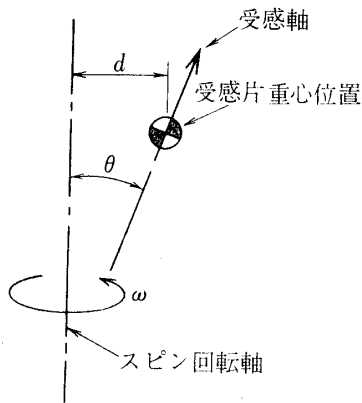
$$\omega = \frac{d \cdot (2\pi f)^2 \cdot \theta}{g_0} [g] \quad ; \quad g_0 = 9800 [mm/s^2]$$

に相当する零点変動を生ずる。

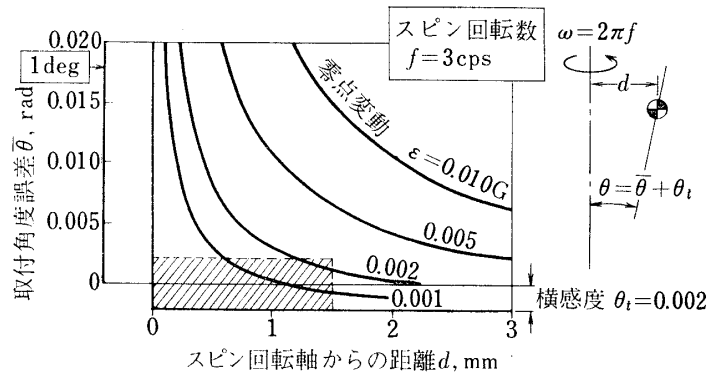
変換器の横感度を θ_i 、取付角度誤差を $\bar{\theta}$ とすると

$$\theta = \bar{\theta} \pm \theta_i < \bar{\theta} + \theta_i$$

となる。 $f=3ps$ 、 $\theta=0.001rad$ 〔第1表による〕のときの測定誤差 ω は、 d および $\bar{\theta}$ に対して第14図のようになり、機軸とスピン回転軸のずれを考慮すると可能な限り取付誤差を小さくすることが望ましい。



第 13 図 受感軸取付誤差



第 14 図 受感軸の取付誤差とスピンの回転に伴う零点変動

この要因に基づく測定誤差は算定しにくいがほぼ第 14 図の斜線部分に相当すると推定され、実機の記録からもスピンの回転数 4 cps のとき 0.0001 g 程度と推定できたので、十分精度良い取付ができたと推察される。

(2) その他の測定誤差

微小加速度の測定誤差には、零点変動・感度変化および読取誤差があるが、途中に対数変換部があるためにその前後で誤差のあらわれ方が異なる。ここでは第 8 図に示す如く約 14 秒に 1 回の割合で校正信号をそう入している所以对数変換部以後の誤差については検定が可能となり、また対数に比例した信号を取扱うために微小加速度についても絶対誤差ではなく相対誤差としてあらわれるという有利さがある。さらに変換器の感度変化および感度直線性の影響は諸元 (第 1 表) によりほとんど無視できるので、微小加速度の測定誤差は主として加速度変換器の零点設定誤差によるものと考えられる。

加速度変換器の零点設定誤差は前述のスピンの回転に伴う零点変動のほかには飛しょう中の環境温度変化および駆動電圧変化等による零点変動と、変換器の零不平衡値の測定誤差に基づく零点設定誤差に大別される。このうち後者は第 2 表によればほぼ 0.0004 g 以下と考えて良くしかも増幅部入力に 0.001 g 相当のバイアスをかけてあるので飛しょう中に実現される零加速度時の出力からこれを実測し補償することができる。(第 17 図参照)

前者については実測および補償が不可能であるが、飛しょう中の計測部の温度変化が 1°C 程度であることおよび性能諸元表 (第 1 表) から最大 0.0001 g 程度と考えられる。

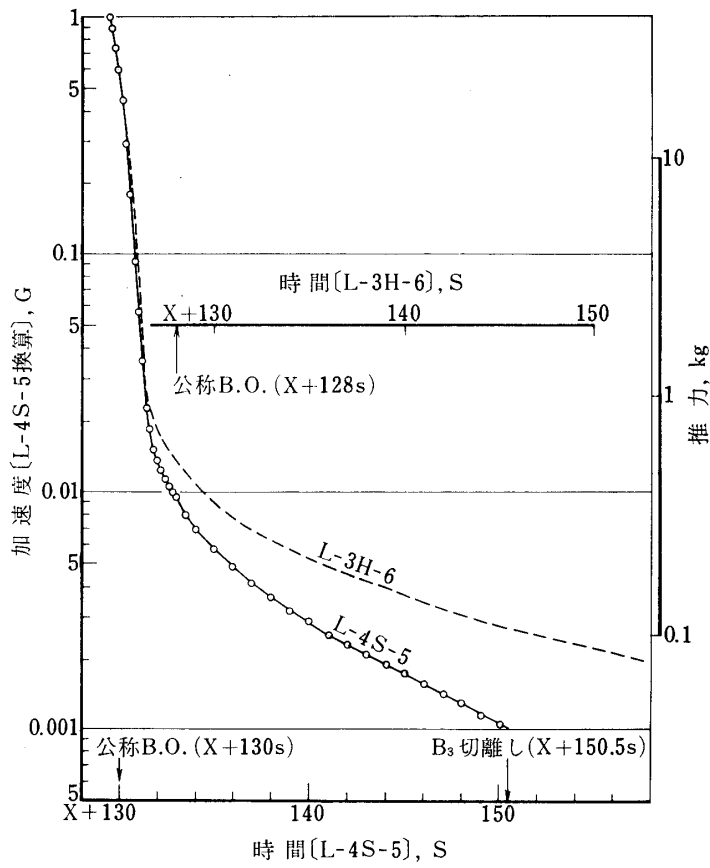
(3) 微小加速度の測定精度

以上の結果を総合して、L-4 S-5 号機搭載の精密加速度計については 0.0004 g の零点補正を行なった後最大 0.0002 g 程度であると推察される。(第 17 図参照)

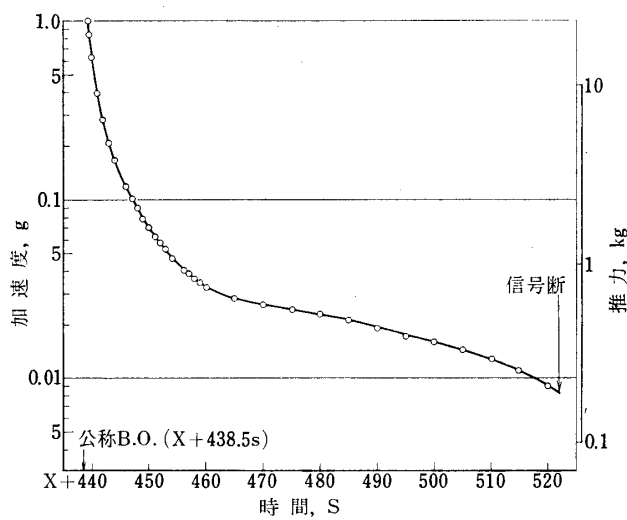
5. 測定結果

L-4 S-5 号機における精密加速度計の測定記録を第 15 図～第 17 図に示す。

第 15 図は第三段エンジン (500φ) 燃焼終了後の残留推力で、同じ精密加速度計を L-3H-6 号機に搭載して測定した同型エンジンの残留推力を併記してある。



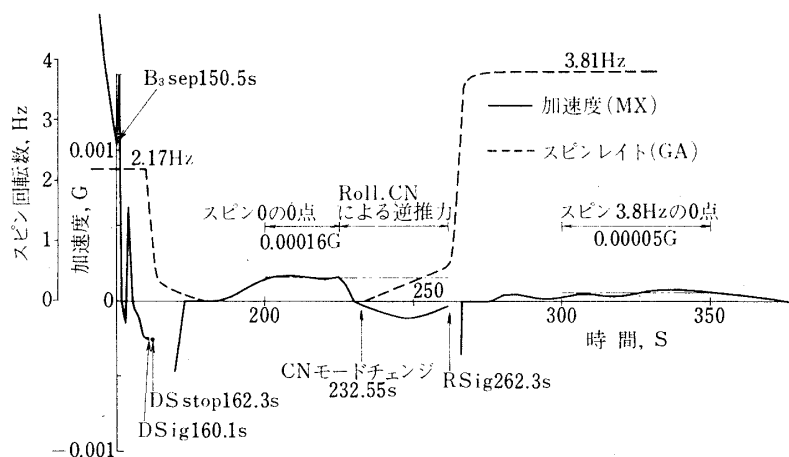
第15図 L-4S-5号機残留推力による加速度 (第3段エンジン)



第16図 L-4S-5号機残留推力による加速度 (第4段エンジン)

第 16 図は第 4 段エンジン (480φ 球形) 燃焼終了後の残留推力である。

第 17 図は第 3 段切離し (X+150.5s) から約 200 秒間の零加速度状態における精密加速度の記録で、零点変動の記録と見ることもできる。



第 17 図 L-4 S-5 号機微小加速度測定結果 (B₃ sep~380 sec)

6. むすび

Q-FLEX 加速度計の特徴は 2. (1). で詳述したが、これを実機に搭載する際に次の点について特に慎重な考慮が払われた。

第 1 点は 0.001 g から 1 g までの広い範囲の加速度を精度良く測定するために対数増幅器を導入したことである。このために負の加速度は測定不可能となったが、広範囲にわたって一定の精度での測定が可能となったことは大いに意義がある。

第 2 点はわれわれの場合に絶対値の計測が必要なことである。そのため 0 g の位置を正しく把握することが肝要である、変換器の零不平衡を精度良く知ることにより多くの時間を費した。さらに、飛しょう中に生ずるとされる誤差要因を列挙し、これらを最小限に抑え、残った不平衡量も実測記録から推定する方法を検討した。その一環として増幅回路の入口で変換器出力に 0.001 g 相当の零シフトを与えたことは期待通りの効果をあげた。

Q-FLEX 加速度計の利用については秋葉助教授より提案を受け、また上記 2 点については林 教授、東口教授よりご指導を受けた。実際の製作は松下通信工業の関、宮川、定本技師が担当された。ここに厚く誠意を表したい。

1972 年 5 月 8 日 新設部 (工学)