

K-10-11号機太陽センサデータ処理回路 (SASE)

東 口 實・小尾新三*・吉本聖志*

Data Processing Circuit of Solar Sensor Borne on K-10-11 Rocket

By

Minoru HIGASHIGUCHI, Shinzoo OBI and Seiji YOSHIMOTO

Abstract: The data processing circuit to obtain sun orientation error voltage applied for the 3-axis attitude control system of the K-10-11 rocket is described. 2-set of four solar cells are utilized for sources of each fine and coarse attitude error sensors. A combination of sum and/or difference of 4 of solar cells produces pitch and yaw error voltage outputs. Then combination of fine and coarse error outputs provides the sensitivity of 2.5 V/degree about zero error position, and the output voltage greater than 4 volts having proper polarity up to $\pm 90^\circ$ error angle.

From flight test results, the offset voltage appeared in the output of this processing circuit was about 40 mV (1 arc-sec in sun orientation error) and the unbalance in solar cell outputs induced from solar intensity variation was estimated.

概 要

K-10-11号機の三軸姿勢制御に使用した太陽角誤差電圧出力データ処理回路について述べる。4個の太陽電池を二組使用して精粗の姿勢誤差出力を得ている。太陽電池4個の出力の和差をとることによりピッチ、ヨー誤差出力を得ている。また精粗誤差出力を組合わせて零付近で2.5 V/度の出力を、また $\pm 90^\circ$ の範囲で対応する極性の4V以上の出力電圧を得ている。

飛しょう実験の結果この回路の出力オフセットは40mv(1'角)であり、太陽光強度の変化による太陽電池出力の不均衡を評価できた。

1. はじめに

サンセンサエレクトロニクス部(SASE)はファイン(高精度), コース(広視野)の2種類のサンセンサ(SAS)出力を増幅演算し, 太陽中心を目標点としたロケットの姿勢誤差

* 日本電気株式会社, 宇宙開発事業部

角をピッチ，ヨーの電圧信号出力の形で姿勢安定制御装置（CNE）に供給する。サンセンサエレクトロニクス部の演算精度はロケットの姿勢精度を定める大きな要因であり，このため、回路構成や使用部品等に演算精度向上のための配慮がなされている。

2. 構成と演算機能

サンセンサエレクトロニクス部は6個のブロック（プリアンプ部，ファインセンサ演算部，コースセンサ演算部，コースセンサ切り離し部，HK部，電源部）で構成されている。図1に信号処理部分を示す。

サンセンサからの各セグメント出力（ファインセンサ系A，B，C，D；コースセンサ系a，b，c，d）は，まず，プリアンプ部で適切な演算電圧に増幅される。増幅された信号のうち，ファインセンサ系信号はファインセンサ演算部で演算されてピッチ・ヨー成分の誤差信号となり，コースセンサ系信号はコースセンサ演算部でピッチ・ヨー毎に演算されて，それぞれの誤差信号となる。このコースセンサ系誤差信号は，コースセンサ切り離し部を介してファインセンサ演算部に入力され，ここでファインセンサ系誤差信号に加算される。このようにして作成された信号がピッチ，ヨーの誤差信号出力となる。なお姿勢誤差角が小さく，ファインセンサの視野内に目標が充分入っている場合は，コースセンサ切り離し部でコースセンサ系信号が切り離され，精度の良いファインセンサ系信号のみが誤差信号として出力される。

HK部はサンセンサエレクトロニクス部の入出力及び内部の状態をモニタするもので，ここから16チャンネルのPAM信号をテレメータモニタ用として出力する。なお誤差信号出力のテレメータモニタはファインセンサ演算部最終端のモニタ用バッファアンプからピッチ，ヨー毎に出力されている。電源部は集中電源から+18V，-18Vの2系統の電圧を受け，+12V，-12V，+5Vの3系統の安定化電圧を作り各部に供給している。

図1に示す演算増幅器の配置構成は演算の高精度化を目的として設計されたものであり，また各ブロックにはブロック毎に独特の配慮がなされている。以下主要ブロックの概要を述べる。

2.1 プリアンプ部

プリアンプ部はゲイン（ K_1 ）約34倍（±10%可変）の増幅器8個で構成されている。

微小信号を扱うプリアンプ部はオフセットドリフトの影響が大きい。このためレーザトリミングされたハイブリッドICをスクリーニングして使用し，さらに熱的配慮を行なってジャンクションの温度上昇をおさえ，結果的に入力換算オフセットドリフトを全環境条件下で±500 μ V程度におさえている。

ゲインを定める主な抵抗（演算増幅器の入力抵抗，フィードバック抵抗）には125 $^{\circ}$ C，500時間のバーンインスクリーニングを施した低温度係数の金属皮膜抵抗を使用し，全ての環境条件においてゲインの変動を 10^{-3} 程度におさえている。

2.2 ファインセンサ演算部，コースセンサ演算部

プリアンプ部で適当な大きさまで増幅した個々の太陽センサの信号の和，差をとってピッチ，ヨー姿勢誤差信号として出力する。この演算は次式であらわされる。

$$\text{ピッチ誤差信号出力} = K_1(A + B - C - D) + K_2(a - b)$$

$$\text{ヨー 誤差信号出力} = K_1(A - B + C - D) + K_2(c - d)$$

ここでコースセンサ出力, ファインセンサ出力は太陽センサそれ自身の出力ではなくプリアンプで適当にそのはらつきを修正された出力であり, $K_2/K_1 = 3,074$ に設定してある. また各プリアンプの利得は $K_1 = 34$ の標準値に対して表1に示す補正を最終的に行なった. また両出力ともにその大きさが5Vをこえないようにリミタを入れてある.

また図1でファインセンサ最終段には並列に2個の増幅器があり, 一方は誤差信号出力モニタ用のバッファ増幅器であって, $-5V \sim +5V$ の誤差電圧を $0V \sim 5V$ のテレメータ電圧に変換している.

各演算部のアンプはオフセットをおさえるためにスクリーニングされたICを用い, かつゲインの安定化のためにプリアンプと同じく, 低温度係数の抵抗器を 125°C , 500時間のバーンインを施して使用している.

表1 センサ出力の補正

ファインセンサ		コースセンサ	
素子	補正值	素子	補正值
A	0.9832	a	0.9794
B	1.0874	b	0.9659
C	0.9524	c	0.9474
D	1.0338	d	0.9368

2.3 コースセンサ切り離し部

コースセンサ切り離し部は, ピッチ, ヨー毎に, 下記の条件を同時に満足した場合にコースセンサ系信号を切り離す.

(1) ファインセンサプリアンプ出力の総和が3Vより大きい, すなわちファインセンサに太陽光が充分入射していること. ここで3Vは姿勢誤差角の 1.2° 相当である.

(2) ピッチ, ヨーそれぞれについて, コースセンサ差出力 ($K_2(a-b), K_2(c-d)$: の部分) が2.4Vより小さいこと. これは 2.9° の姿勢誤差に相当する.

この切離し動作はピッチ, ヨーそれぞれで独立に行なわれ, コースセンサの条件あるいはファインセンサの条件のいずれが満足されなくなっても再びコースセンサ出力がファインセンサ出力に加算される. すなわち可逆的に動作する.

2.4 HK部 (動作状態の監視)

HK部は, 16チャンネル差動入力型マルチプレクサを用いてセンサエレクトロニクス部の入出力及び各部の信号を時分割して0.5フレーム/秒でテレメータに出力する. 太陽センサ単体の出力を個々に高精度で直接モニタするためにプリアンプ部と同等の配慮がなされており入出力特性は表2に示す精度を持っている. ここでHK部の回路は演算部とは独立して居り, 回路に不具合を生じて相互に影響を与えないようになっている.

3. 装置の条件

本装置は太陽電池4セグメント電圧出力形式のファインセンサ, コースセンサ信号を受けてピッチ, ヨー姿勢誤差を次の規格で出力する.

表-2 HK入力特性

1. HK入出力特性

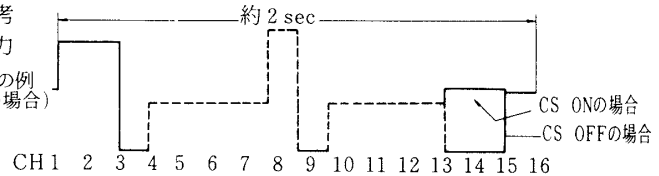
チャンネル番号	信号名	信号源	ゲイン	備考	実測値 1				実測値 2					
					校正用入力電圧	出力電圧規格値	出力電圧実測値		校正用入力電圧	出力電圧規格値	出力電圧実測値			
							9/17 特性検査				9/17 特性検査			
1	+12V	+12Vライン	20/35		—	1.40 ± 0.11V	+4.37V		—	—	—	—	—	—
2	-12V	-12Vライン	-20/55		—	—	+4.37V		—	—	—	—	—	—
3	O	40kΩで入力抵抗ネットワーク	20		—	±0.05V 11p内	0.00V		—	—	—	—	—	—
4	A	フェインセンサ接続ネットワーク	—		100 0mV ² 00 ± 0.11V	—	+1.99V		250 0mV ⁵ 00 ± 0.20V	—	+4.98V		—	—
5	B	—	—		—	—	+1.99V		—	—	+4.98V		—	—
6	C	—	—		—	—	+1.99V		—	—	+4.98V		—	—
7	D	—	—		—	—	+1.99V		—	—	+4.98V		—	—
8	-12V	K.f.a	-20/40		Aのみ100mVの範囲	1.70 ± 0.17V	+1.65V		Aのみ250mVの範囲	4.20 ± 0.35V	+4.12V		—	—
9	O	40kΩで入力抵抗ネットワーク	20		—	±0.05V 11p内	0.00V		—	—	—		—	—
10	a	フェインセンサ接続ネットワーク	—		100 0mV ² 00 ± 0.11V	—	+1.99V		250 0mV ⁵ 00 ± 0.20V	—	+4.98V		—	—
11	b	—	—		—	—	+1.99V		—	—	+4.98V		—	—
12	c	—	—		—	—	+1.99V		—	—	+4.98V		—	—
13	d	—	—		—	—	+1.99V		—	—	+4.98V		—	—
14	SP CUT OFF	エッジセンサ切り離し	20/20		接続時にLCA切り離し時 0V	—	2.5 ± 0.5V ± 0.05V J1B	+2.53V 0.00V	—	—	—	—	—	—
15	CS CUT OFF	切り離し	20/20		—	—	2.5 ± 0.5V ± 0.05V J1B	+2.53V 0.00V	—	—	—	—	—	—
16	Y AW T M ON T	ヨー姿勢誤差モニター	20/20		変動誤差0で2.5V	—	2.50 ± 0.10V	+2.48V	—	Aのみ150mVの範囲	0.5 ± 0.3V	+0.58V		—

2. フレーム周期

規格	9/17 特性検査		
2.00 ± 0.10sec	1.983sec		

○参考
HK出力

1フレームの例
(実測値1の場合)



(1) 出力特性

- (a) 出力電圧：2.5V/1deg(無負荷)，ただし±5V(±10%)の値において飽和特性を持つこと。
- (b) 出力インピーダンス 2kΩ以下

(2) モニタ信号

- (a) 項目：ピッチ姿勢誤差，ヨー姿勢誤差，内部動作状態(HK)
- (b) 出力電圧：0~5V
- (c) 出力インピーダンス 5kΩ以下

(3) 電源

電源電圧	平均消費電流
+18V (+4, -2V)	0.5A以下
-18V (+2, -4V)	0.3A以下

(4) 環境条件

- (a) 温度 0~40°C
- (b) 衝撃 軸方向 +40G(5ms以上)
- (c) 振動 軸方向 5~35Hz ±1mm
 - 35~200Hz ±5G
 - 200~2000Hz ±10G

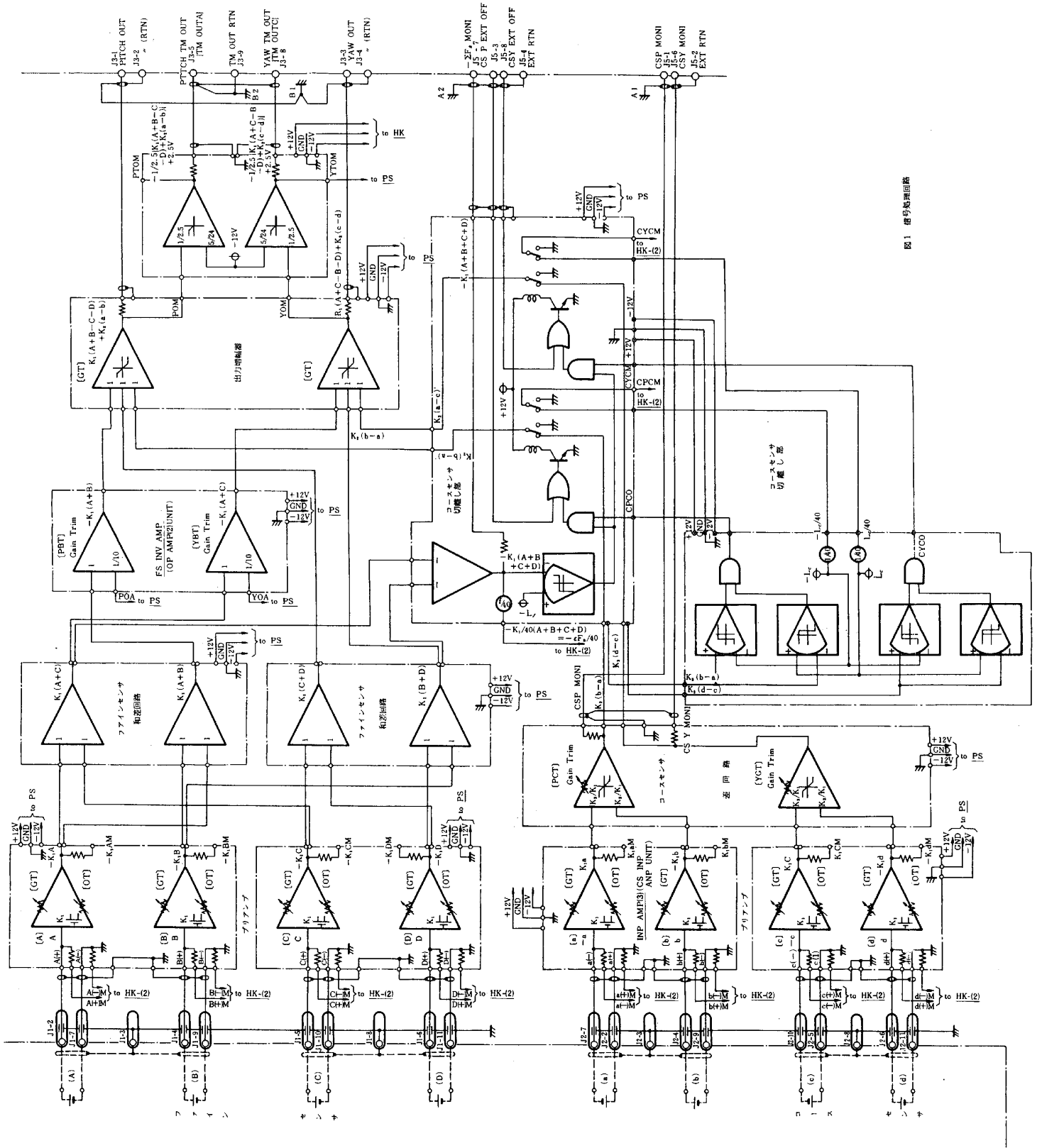


図1 信号処理回路

- (d) 加速度 軸方向 +40G ~ -10G
横方向 ±10G

- (e) 気密 10²mmHg 20分

上記条件下において、充分の性能が得られること

4. 回路の安定度

本装置は上記のように使用各部品についてかなりの吟味を行ない、また抵抗については125℃ 500時間のバーンインを行なう、演算増幅器について同様のバーンインを行なうなど高度の選別を経たものを使用した。その結果非常に安定した装置となっている。装置組立後試験における零点安定度は図2に示す通りであり、装置設計にあたって予測した零点オフセット許容値(160mV)に対してはるかに小さな値となっている。これは製作上のこまかい注意も寄与していたものと言える。

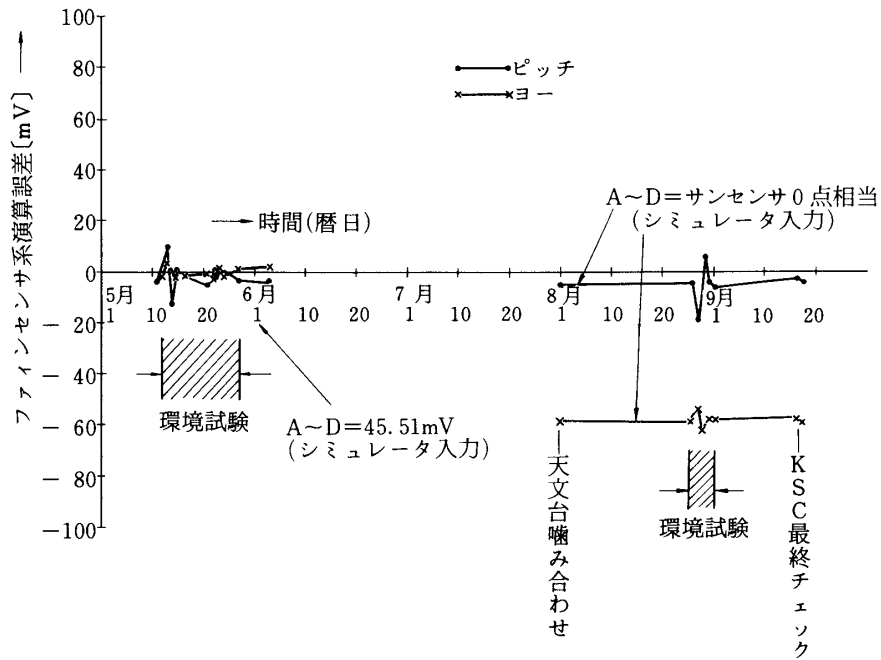


図2 サンセンサエレクトロニクス部ファインセンサ系演算誤差(経時変化)

5. 飛しょう試験結果

K-10-11号機の制御は安定に行なわれたが、ピッチヨー両軸に関してともに17'角のオフセット誤差を生じていたことがわかった。飛しょう前に観測器(SUV)と1'角程度までの光軸合わせとその確認を行なったにもかかわらずである。

飛しょうデータにもとづいてこの原因の検討を行ない、これが信号処理エレクトロニクス部の変動に起因するものでなく、上空で太陽センサの出力電圧に不平衡を生じたためと推論できた。

姿勢制御は発射後140秒から400秒の間、±20'角の幅の間にロケットの機軸を安定に保持している。以下は太陽センサ単体出力のデータをHKモニタから読み取り、姿勢誤差モニ

タ出力と比較して、オフセットの原因を追及し、また信号処理回路の安定度を求めた。

5.1 飛しよう試験データの問題点

信号処理回路出力のテレメータデータを詳細に解析した結果、次のようなくいちがいを生じていた。

(1) 太陽センサ単体出力電圧が予想された値よりも総体に7~30%程度小さく、かつばらつきが大きくなっている。すなわち発射後384秒附近の姿勢変化の小さい部分で読み取ると表3に示す値が得られる。図3がテレメータ記録である。

表3 太陽センサ単体出力の比較（発射後384秒）

太陽電池素子	実 測 値	予 測 値	比
ファイソ A	29mV	38.2mV	0.76
" B	29	35.5	0.82
" C	32	39.8	0.80
" D	26	37.3	0.70
平 均	29mV	37.7mV	0.77
コ ー ス a	156mV	169	0.93
" b	147	168	0.87
" c	151	172	0.88
" d	153	170	0.90
平 均	152 mV	170	0.89

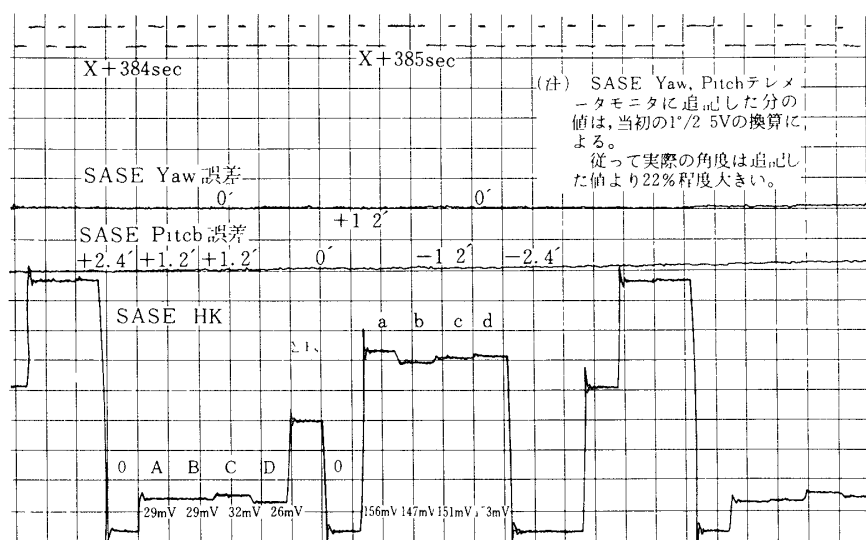


図3 X+384sec 付近のSASE飛しようデータ

(2) ファインセンサについてその構造上、出力電圧には次の関係式が成立する。(附録参照).

$$AD/BC = 1$$

しかし表4に示すように飛しょう試験データではこの関係が成立していない。

表4 ファインセンサ出力電圧の検定

條 件		A	B	C	D	AD/BC	
飛しょう結果, 発射後	384 秒	29	29	32	26	0.81	
	307 秒	29	37	24	26	0.85	
調整試験時	誤 差	0	38.2	35.5	39.8	37.3	1.01
	ピ ッ チ	-20'	31.1	29.6	45.2	43.0	1.00
	誤 差	+20'	43.8	42.2	32.1	30.4	0.99
	ヨ ー	-20'	32.6	40.6	32.9	41.2	1.01
	誤 差	+20'	44.3	28.7	45.3	29.3	1.00

5.2 姿勢誤差零位置のオフセット

観測器 (SUV) の姿勢検出器データが零の位置に対する、太陽センサ信号処理出力を読み取ると表5に示すようになる。ここに示した値は予測値に対する姿勢誤差の値であり、表3にも見るようにファインセンサ出力が78%になっていることを考慮するとピッチ、ヨーともに14'角のオフセットがあったものと推定される。

すなわちロケットの機軸は太陽の中心からピッチ、ヨー両方向に14'角はなれた点を中心として±25'角(出力低下を補正して)の範囲を走査していたことになる。

表5 オフセット角

発射後時刻	姿 勢 誤 差	
	ピ ッ チ	ヨ ー
240 秒	+ 10.8'	+ 10.8'
250 秒	+ 12'	+ 12'
352 秒	+ 10.8'	+ 12'
平 均	+ 11.2'	+ 11.6'

表6 姿勢誤差電圧の検定
(0.031' / mV)

発射後時刻	姿 勢 誤 差 よ り		HK よ り	
	ピ ッ チ	ヨ ー	ピ ッ チ	ヨ ー
384 秒	50 mV	0	91 mV	20 mV
307 秒	650 mV	-550 mV	646 mV	-535 mV

5.3 演算精度

HKモニタ信号から得られる太陽センサ単体の出力電圧信号を用いて、演算誤差の検討を行なった。表4の飛しょう結果に対応して表6が得られ、演算誤差は角度に換算しても1'角以下と言える。

6. 結 言

太陽センサ信号処理回路についてその構成、飛しょう結果について述べた。太陽センサ[3]にも述べられているように、太陽センサ単体の感度の変化が一様でないことから姿勢の原点のオフセットは生じたと言えよう。しかし全体としてみて信号処理回路と同様の、あるいはそれ以上の安定度に対する配慮を太陽センサのそれぞれの素子特性にはらうべきであったことは否めない。

アナログ演算増幅器回路について、このK-10-11号機における成果から、一回路当たりドリフトを20 mV以下と見積ることが可能と言ってよい。これは最大出力5Vに対して0.4%以下であり、抵抗、ICなどの効果的な選択によって得られる精度と言えよう。

1976年10月6日 計測部

参 考 文 献

- [1] サンセンサエレクトロニクス部(SASE)ハードウェア概要, 日本電気株式会社 R(K-10-11)-065 (昭51-2-27)
- [2] K-10-11 SASEフライトデータの解析, 日本電気株式会社 R(K-10-11)-067 (昭51-2-27)
- [3] 西, 東, 山口: 姿勢制御用太陽センサの指向特性について, 宇宙研報告, 本号.

附 録 ファインセンサの出力電圧について

ファインセンサでは4個の太陽電池素子が格子状に配列してあり、図4に示すように太陽光が照射していると考えられる。太陽光照射正方形の一边を 2α 、太陽電池要素間のすきまを 2β とすると、ピッチ偏位を p 、ヨー偏位を q として要素A~Dに対する照射面積 $S_A \sim S_D$ は次のようになる。

$$S_A = (\alpha + p - \beta)(\alpha + y - \beta)$$

$$S_B = (\alpha + p - \beta)(\alpha - y - \beta)$$

$$S_C = (\alpha - p - \beta)(\alpha + y - \beta)$$

$$S_D = (\alpha - p - \beta)(\alpha - y - \beta)$$

太陽電池誘起電圧は、照射面積に比例するので、各要素の誘起電圧を $V_A \sim V_D$ とすると、各電池の特性が同じ場合次の関係式が成立する。

$$\frac{V_A \cdot V_D}{V_B \cdot V_C} = \frac{S_A \cdot S_D}{S_B \cdot S_C} = 1$$

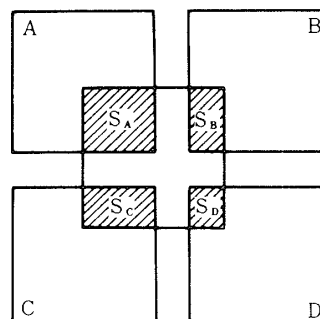


図4 ファインセンサ(太陽センサ)出力の幾何学的関係