

シリコンデジタル太陽センサ (I)

河 東 田 隆・岸 真 人・二 宮 敬 虔

Digital Sun Sensors Using Silicon (I)

By

Takashi KATODA, Masato KISHI and Keiken NINOMIYA

Abstract: Electrical and optical properties of digital sun sensors using silicon were measured. Dark current of the sun sensors with so-called channel stopping region is smaller than that of sensors without channel stopping region. Pattern definition of each light-sensitive region is sufficiently good. Output signal, however, decreases as the incident angle of the sun light becomes large because of several reasons.

概 説

太陽を基準にして飛翔体の姿勢を決定するサンセンサは、軽量であること、低電力で動作すること、構造が簡単で故障が起きにくいこと等が要求される。

デジタル太陽センサは、以上の点でアナログ型センサに勝るのみならず、出力信号がデジタル出力であるため伝送系の影響を受けにくいこと、信号を電子計算機処理する場合、A-D変換器を必要としないなどの特徴を持っている。また、以上のような諸条件を満たす太陽センサを作製するには、少くとも現在ではシリコンを用いることが最善である。ここでは、シリコンを用いたデジタル太陽センサに関し、飛翔前に行った基礎的な検討結果を報告する。

1. デジタル太陽センサの構造

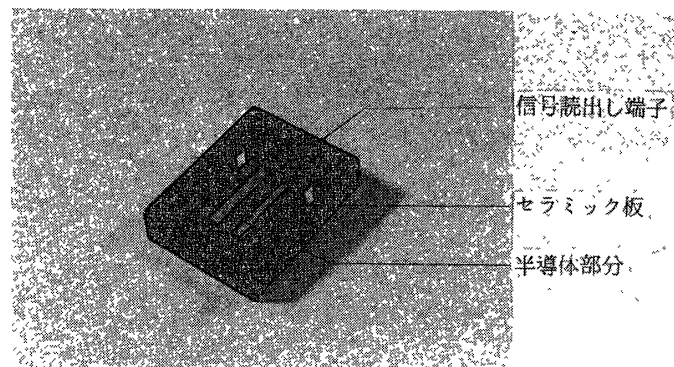
デジタル太陽センサは、グレイコードパターン之窗を持つフォトダイオード列（受光部

分) によって、飛翔体に対する太陽光角をデジタル化された電気信号に変換して出力する。

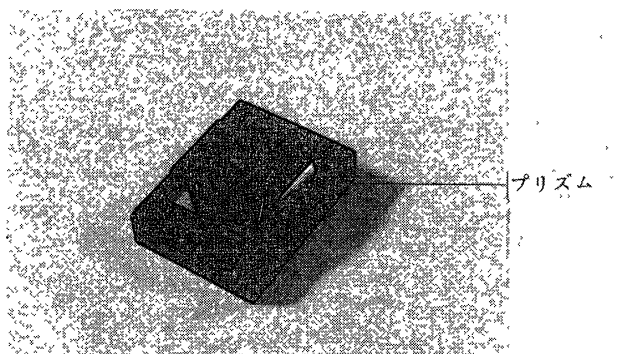
太陽光は、センサ素子に前置されたスリット、又はピンホールを通して入射する。前者をスリット系デジタル太陽センサと呼び、後者はピンホールと受光部分との間にレンズ群を持っているので、レンズ系デジタル太陽センサと呼ぶことにする。

スリット系デジタル太陽センサの原理は、図1に示すように視野拡張用プリズムの上面に幅 $100\text{ }\mu\text{m}$ のスリットが切っており、太陽光はこれを通して入射する。プリズムの厚みは 11 mm 、屈折率は 1.50048 である。受光素子に当る光が線状であるため、飛翔体のスピンの有無にかかわらず信号を取り出すことができる。また、プリズムを用いているので、視野角は ± 64 度と大きい。

レンズ系デジタル太陽センサは、前者のスリットの代りに直径 1.5 mm のピンホールを、またプリズムの代りに3群5枚、焦点距離 13 mm のレンズを用いて得られるスポット光を、飛翔体のスピンによって受光素子上を走査して、各ダイオード列から出力信号を得る。このため飛翔体は必ずスピンを行っていることが要求される。視野角は、 ± 32 度である。このタイプは、レンズにより入射光を集光しているので、スリット系に比較して S/N が大きい特徴を有する。



写真A プリズム装着前



写真B プリズム装着後

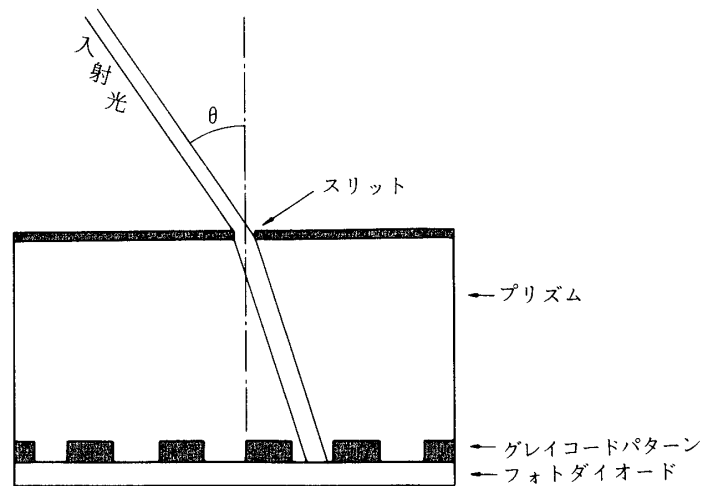


図1 デジタル太陽センサの原理

(1 番のダイオード列に沿ってとった断面。ダイオード列については図2 参照のこと)

2. センサの構造

受光素子は、n形シリコン基板上に形成された幅 $200\ \mu\text{m}$ 、長さ 18mm の9本のフォトダイオード列と、その上のグレーコードパターンに窓あけされた厚さ約 $5000\ \text{\AA}$ のアルミニウム蒸着膜のオーム性電極から成る。説明のためダイオード列に図2のように番号をつける。n形基板は、面指数 $\langle 111 \rangle$ で磷ドーピングされており、下面に金-アンチモンでオーム性電極を形成し、導電性エポキシでセラミック板に接着されている。p層はホウ素拡散によって作られる。アルミニウム蒸着膜に窓あけされているグレーコードパターン（光が受光面を走査しているときに、出力信号は1ビットずつ変化し、通常のバイナリーコードのように桁上りがない。これはコードの変化を最小にして信頼性を向上させる。）は、出力信号が入射光角度 θ に対し直線的に変化するように中心からの距離 x が次のような関係式を満たすように区切られている。

$$x = l \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{n} \right) \right\} \quad (1)$$

l : プリズムの厚み

n : プリズムの屈折率

実際の素子では、 l は 11.5mm 、 n は 1.50048 で1度毎に出力コードが1ビット変化するように窓あけされている。最小の受光部分の寸法は、縦 $260\ \mu\text{m}$ 、横 $90\ \mu\text{m}$ である。また素子に入射する光強度は $\cos \theta$ に従って減少するので、それを補正するために窓の幅は $\sec \theta$ に従って素子の中心から端に向かって広がられている。実際には、0度から ± 32 度までは 0.106 度の傾きを持つ直線で、それ以上は 0.56 度の傾きを持つ直線で近似されている。また

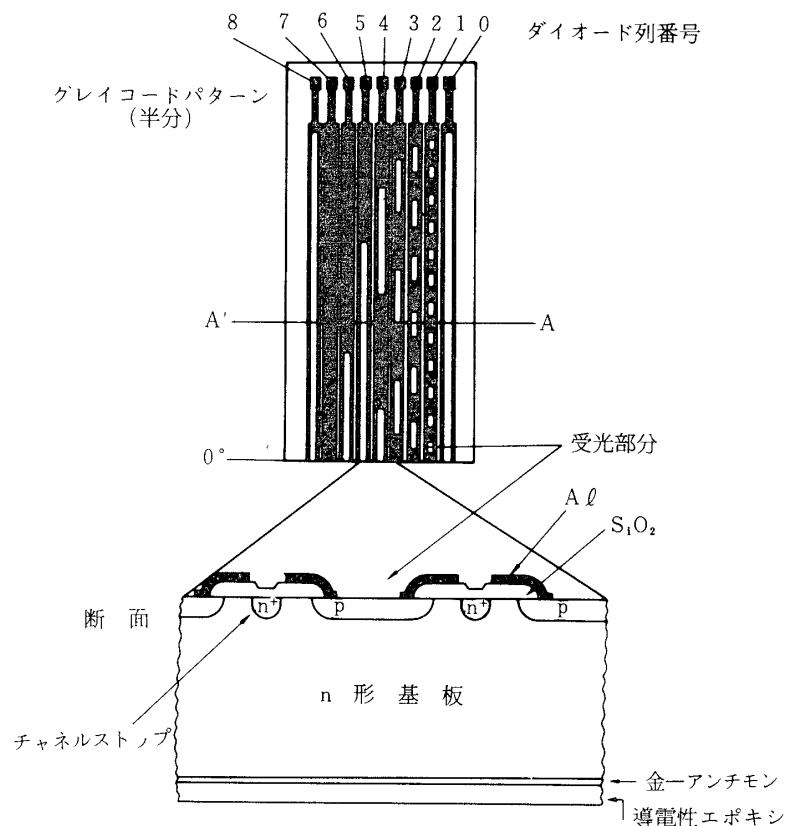


図2 受光素子

最近、各ダイオード列間の漏話、及び暗電流を減少させるために、各ダイオード列間には隣拡散により n^+ 形のチャネルストップを形成するようにした。

3. 信号の読出し

レンズ系センサでは、信号の読出しは飛翔体のスピンにより、スポット光がダイオード列0番に当りオンになった時に開始され、1番から順次読み出されてダイオード列8番がオンになった時に終了する。またスリット系センサをスピン型として用いる場合には、スリット光がダイオード列0番と8番を同時にオンにした時に、1番から7番までの信号を同時に読み出す。スリット系センサを2個組合せた非スピン型センサとして用いる場合は、太陽がセンサの視野内にある限り何時でも外部の信号によって読出しが可能である。

4. センサの諸特性

4.1 暗電流特性

暗電流は、センサ出力の S/N に重要な影響を与える。暗電流は、 $p-n$ 接合の空乏層内での生成による電流 I_B と、 S_i-SiO_2 界面での表面生成による電流 I_{SO} の和である。

表 1 各ダイオード列の暗電流測定例

試料番号 ダイオード列番号	チャンネルストップを持たない素子			チャンネルストップを持つ素子		
	D-23	E-76	F-76	SB-1-4	SB-1-5	SB-4-6
0	8	10	0.07	0.14	0.12	0.19
1	30	10	9.00	0.24	0.15	0.20
2	300	8	0.02	0.19	0.10	0.20
3	13	10	0.06	0.18	0.08	0.15
4	13	5	0.24	0.16	0.07	0.12
5	13	5	1.30	0.20	0.11	0.14
6	8	5	0.02	0.17	0.09	0.14
7	13	5	0.03	0.15	0.09	0.11
8	13	5	0.03	0.16	0.04	0.18

(nA)

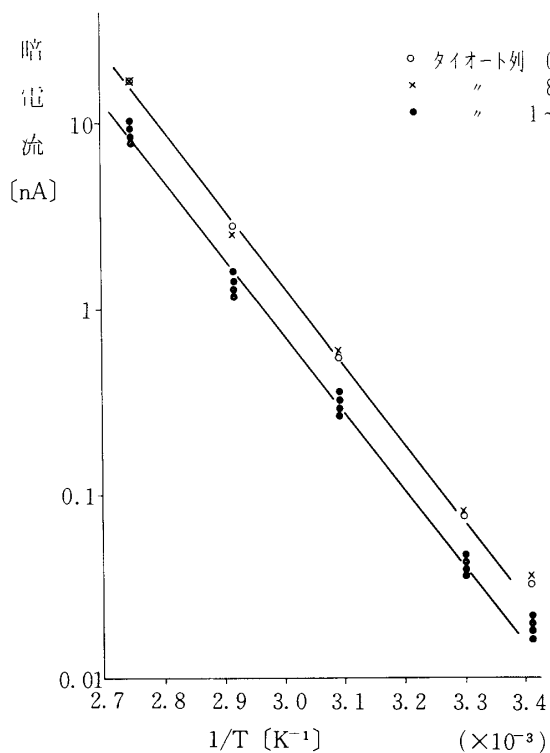


図 3-a 暗電流の温度変化
(チャンネルストップを持つ素子の場合)

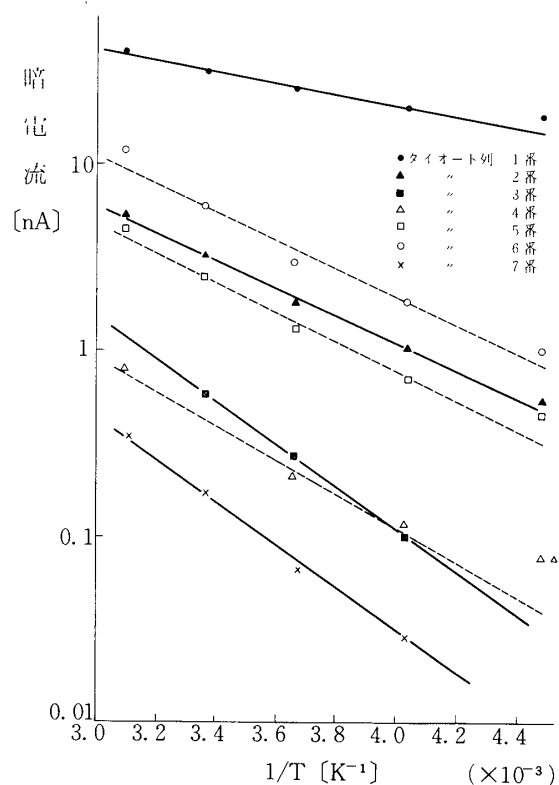


図 3-b 暗電流の温度変化
(チャンネルストップを持たない素子の場合)

$$I_B = q \cdot A \cdot W \cdot n_i / 2\tau \quad (2)$$

$$I_{SO} = q \cdot n_i \cdot S_0 \cdot B \quad (3)$$

ここで、 q は電子電荷、 n_i は真性半導体のキャリア密度、 W は空乏層幅、 A はダイオード面積、 B は界面電流に關与する面積、 τ は空乏層内での実効寿命、 S_0 は表面での再結合速度である。表1は各ダイオード列の暗電流の測定例である。また図3はチャネルストップを持つ素子(a)と持たない素子(b)の暗電流対温度($1/T$)特性である。チャネルストップを持たない素子は、暗電流の絶対値が大きいのみならず、各ダイオード列間のバラツキも大きい。それに対してチャネルストップを持つ素子は、暗電流の絶対値は小さく、かつ各ライン間のバラツキも非常に小さく、ほとんど一致している。これは室温及び光強度1 sun (1 sunは大気圏外での太陽光強度)における典型的な出力電流 $1.5 \mu A$ と比較して、4桁程度の差がありS/Nに関しては問題ない。

4.2 出力の温度特性

センサの出力は、温度に依存して変化する。ダイオードの直列抵抗は、半導体のキャリア濃度と移動度に依存しており、移動度がほとんど変化しないとすれば、キャリア濃度のみに依存する。キャリア濃度は温度に対して次のように変化する。

$$n \propto \exp(E/kT) \quad (4)$$

E は活性化エネルギー

図4は、センサの出力電流対温度特性のグラフである。バイアス電圧は10V、負荷抵抗1 M Ω 、光強度1/200 sunである。

これよりセンサ出力は、0 $^{\circ}C$ を中心に約15%程度変化することがわかる。これは後述するように、固定閾値の場合は精度に影響を及ぼす。

4.3 パターン特性

図5は、太陽光の入射角に対するダイオード列0番と1番のアナログ的な出力パターン特性である。理論的には、入射角度 θ

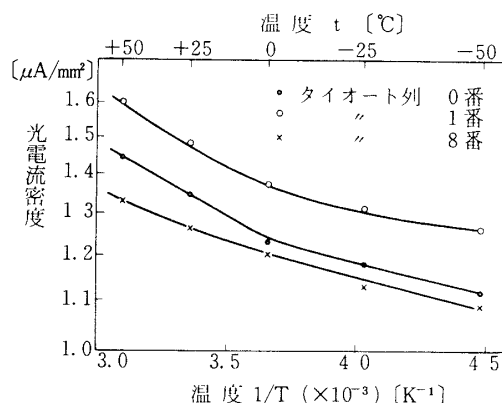


図4 出力電流の温度変化

による入射光量の減少をパターンの幅で補正してあるので、出力信号は角度に依存せず一定であるはずである。しかし実際の特性では、ゆるやかな波状の変化や視野の端付近で急激な減少が見られる。これは主に次の2つの原因によるものと考えられる。

1つは、パターンの補正曲線 $\sec \theta$ を直線で近似したため、その誤差がゆるやかな波状の変化となって現われることである。

また、もう1つは設計の際にはスリットの厚みを無視したが、実際のスリットは厚み ($W = 10 \mu m$ 程度) を持ったため $w \sin \theta$ の影をスリットが作ることである。

この2つを考慮し理論的に計算した出力は、図中の○印のようになり、実際の出力曲線とは傾向が一致する。

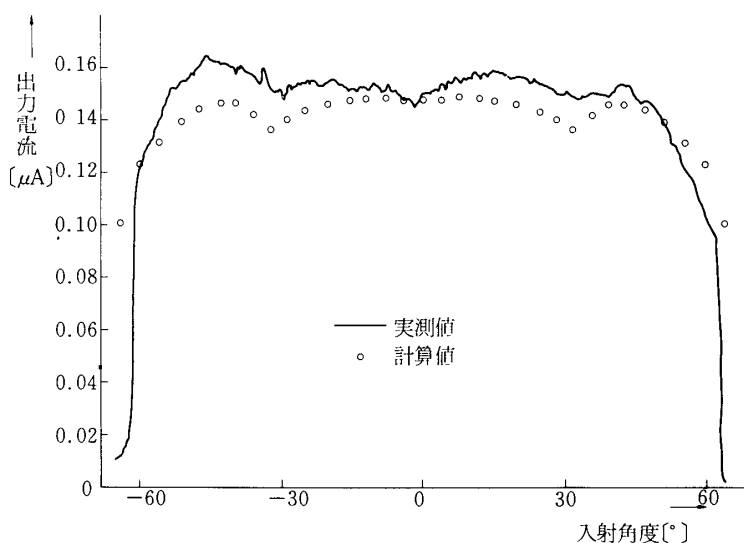


図 5-a パターン特性 (ダイオード列 0 番)

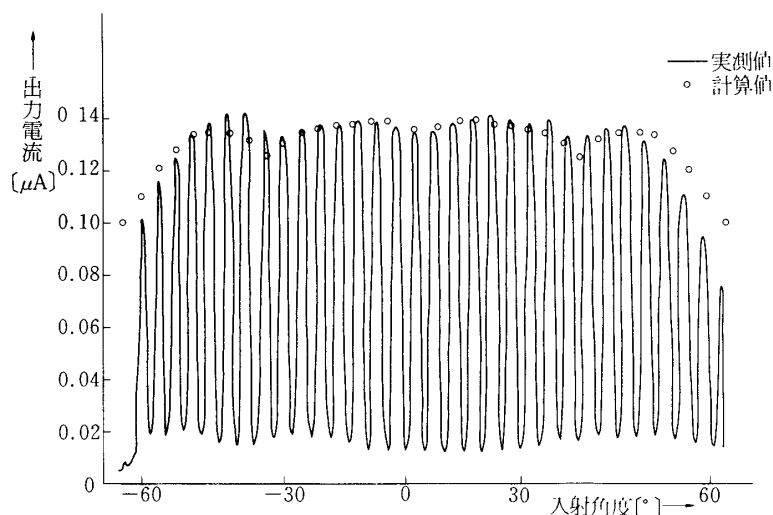


図 5-b パターン特性 (ダイオード列 1 番)

4.4 漏話特性

センサ素子内で各ダイオード列は独立でなければならない。すなわち各ダイオード列は、他のダイオード列に光が入射しているかないにかかわらず、そのダイオード列に入射する光量に従って出力信号を出さねばならない。しかし素子に入射する光が強い場合光の当たっていないダイオード列から、通常出力信号に比べると小さいが暗電流に比べると大きい出力電流が流れる。これは漏話電流として雑音の一部を形成し悪影響を与える。漏話電流の原因としては次のようなことが考えられる。

- (1) ダイオード列間の電氣的結合、
- (2) パターンを形成するアルミニウム膜の透過光、
- (3) 光学系の迷光

このうち、ダイオード列間の電氣的結合を減少させるため、ダイオード列間にチャンネルストップを形成した。チャンネルストップは、キャリア濃度 10^{20}cm^{-3} 程度に燐をドーピングした n^+ 領域で、幅は $20 \mu\text{m}$ 深さ $3 \mu\text{m}$ である。これは、 $p-n$ 接合部で発生したキャリアの横方向への拡散を阻止する。図6は受光面の間を光スポットが通過した場合の出力電流である。チャンネルストップを有する素子は、漏話電流が減少しており、チャンネルストップの効果があることがわかる。

(2) に関しては比較的その影響はないと考えられるが、(3) に関してはプリズムを使用し、半導体表面との間に間隙があることや、半導体表面がかなり光を反射しやすい状態であることを考えると無視できない。定量的な検討は今後行う予定である。

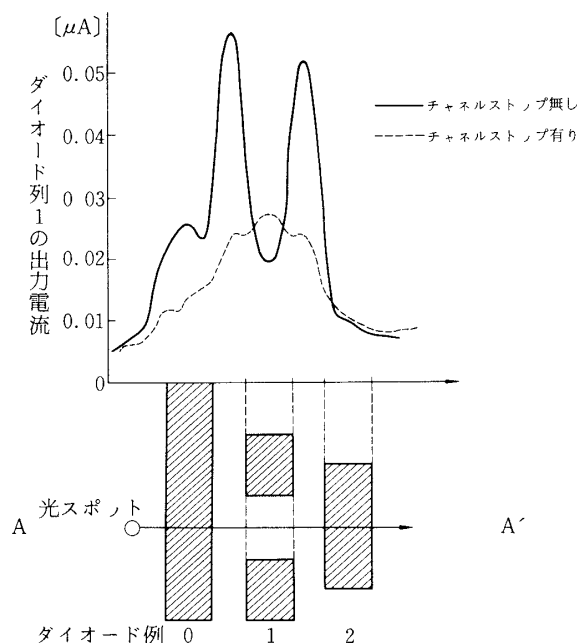


図6 漏話特性

(図2のA-A'間を光スポットが走査した場合のダイオード列1番の出力電流)

5. スリット光の幅と出力信号の誤差

素子面におけるスリット光の幅は、スリットの幅と太陽の視角 $\delta_s = 0.51$ とにより決る。スリット幅により決定される光の幅は、プリズムがある場合でも素子とプリズムの間に間隙が存在するので次のようになる。(図7参照)

$$\delta' = \delta - w \tan \theta \quad (5)$$

δ はスリット幅

w はスリット厚

太陽の視角による光の幅に対する効果は、プリズムと素子間隙がプリズムの厚み 1.0 mm に比べて 0.5 mm と小さいので、間隙の部分での広がりを無視してさしつかえない。よって

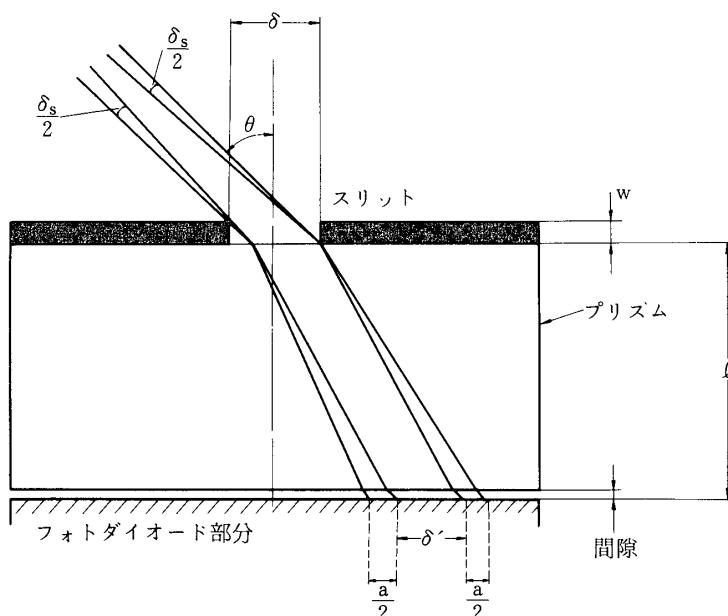


図7 スリット幅と太陽視角によるスリット光の広がり

太陽の視角による光の幅 a は、次のようになる。

$$a = l \left(\tan \left[\sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \sin \left(\theta + \frac{\delta_s}{2} \right) \right\} \right] - \tan \left[\sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \sin \left(\theta - \frac{\delta_s}{2} \right) \right\} \right] \right) \quad (6)$$

l はプリズムの厚み

光の幅は、これらの和で与えられ

$$L_s = \delta' + a \quad (7)$$

となる。この L_s 内でスリット光は、図8のような強度分布を持っている。スリット光が、ある受光部分の端を走査すると、出力信号は図8の下のように変化する。ここで出力信号がピーク 1/2 になった点において、太陽の中心が受光部分の端にあることがわかる。このことから、信号取出し回路の閾値をピーク値の 1/2 に設定することにより、光の幅 L_s の影響を蒙ることなく太陽中心の方向を求めることができる。

しかしながら、閾値を固定した信号取出し回路の場合、先の出力の温度特性、及びパターン特性の項で述べたように、センサ出力電流ピーク値が温度及び光入射角 θ により変化するので、その固定された閾値が各受光部分において常にその出力ピーク値の 1/2 になるとは限らない。温度による出力の変動を 15%、パターン特性の両端で出力特性が減少することによる変動を 30% とすると、出力電流は最大出力の約 60% に減少する。この場合、角度誤差は約 0.3 度となる。

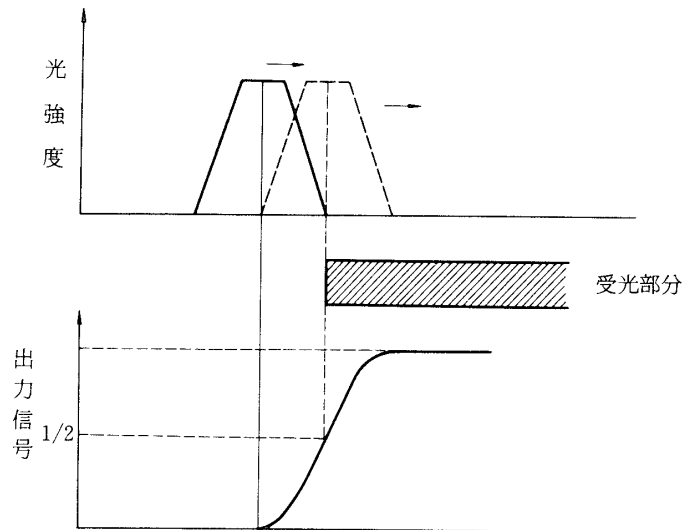


図8 スリット光の空間的分布と出力信号の関係

さらに精度を向上させるためには、何らかの方法で閾値を自動的に1/2に設定できるようにすることが必要である。特に後に述べるような直交する2個のセンサを用いた非スピン型センサでは、一つのセンサに光が仰角だけでなく、大きな方位角を持って入射する可能性がある。

センサ素子は、仰角に対しては $\sec \theta$ 近似で光量の減少を補正してあるが、方位角に対しては何ら補正がなされていないため、大きな方位角で入射する光に対しては素子に入射する光量が大幅に減少する。そのため閾値を固定しては、大きな視野角を確保することは困難であり、閾値の自動設定は必ず必要である。それは大きな困難なく実現し得ると思われる。

6. 非スピン型センサにおける角度検出

スピンをしない飛翔体の太陽角の検出は、直角に組合せた2個のスリット系センサにより実現できる。すなわち、仰角検出用と方位角検出用のセンサが必要である。この各々のセンサは、仰角（又は方位角）に対する視野と同等の視野を方位角（又は仰角）に対しても持つことが要求される。このセンサ対の出力角は、そのまま飛翔体から太陽を見る仰角ではない。これは以下に示すように、仰角と方位角は各々独立に検出できないからである。

図9では、センサに入射する光を1本の直線で代表させている。仰角 α 、方位角 A でスリットに入射した光は、プリズムで屈折を受け点Pを通りプリズムを出て、素子面の点Qに入射する。ダイオード列の中央を0とし（図2参照）そこからの距離 y を求めることによりセンサの出力角度を計算できる。プリズムの法線に対する入射光角度 θ は、次式で与えられる。

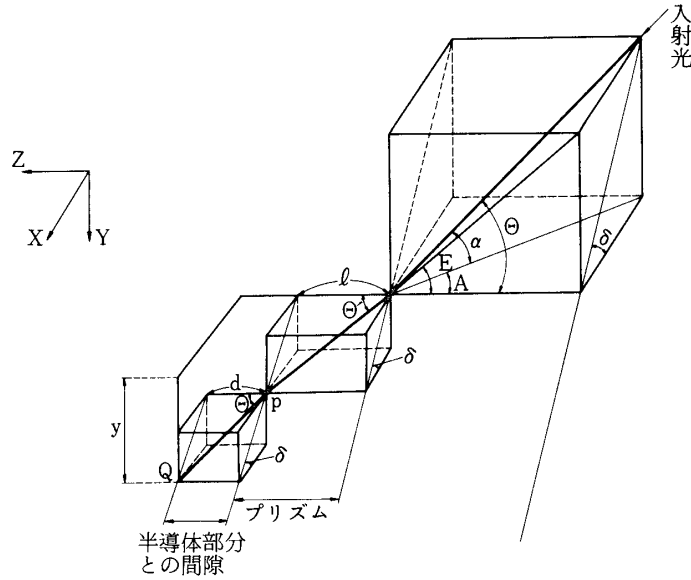


図9 入射光角と素子面上での距離 y の関係
(Y方向がダイオード列の方向)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\tan E}{\sin \delta} \quad (8)$$

ここで仰角 α 及び方位角 A と角 E 及び δ の関係は、次のようである。

$$\tan \delta = \frac{\tan \alpha}{\sin A} \quad (9)$$

$$\tan E = \frac{\tan \alpha}{\cos A} \quad (10)$$

屈折光の角度 θ' は

$$\theta' = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin \theta \right) \quad (11)$$

$$= \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\tan E}{\sin \delta} \right) \right\} \right\} \quad (11')$$

である。屈折光は、プリズム中をZ方向にプリズムの厚み l だけ進むうちに、Y方向に $l \sin \delta \tan \theta'$ だけ進む。次にプリズムを出て屈折しZ方向に間隙 d だけ進むうちにY方向には、 $d \tan E$ だけ進みセンサ素子に入射する。よってセンサ素子上での光の位置 y は、次のようになる。

$$y = l \sin \delta \tan \theta' + d \tan E \quad (12)$$

ここで、センサ素子上のパターンは、(1)式でも示した通りスリット光が照射した位置の中央(0点)からの距離 y_0 を単に角度コード E_0 に変換して出力とするように設計されており、出力の角度 E_0 は実際の仰角及び方位角ではない。しかも、プリズムと素子の間の間隙は霧としてあるので、 y_0 と E_0 の関係は次のようになる。

$$y_0 = l' \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin E_0 \right) \right\} \quad (13)$$

l' は、実際に作製した素子の設計の際に用いたプリズムの厚みで 11.5 mm である。ここで角度 E 及び A で入射した光が y_0 に当り、 E_0 を出力した場合を考え、式(12)の y に式(13)の y_0 を代入すれば、角度 E 及び A と E_0 の間に次のような関係式を得る。

$$\begin{aligned} \sin \delta \left\{ l' \tan \left(\sin^{-1} \left[\frac{1}{n} \sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\tan E}{\sin \delta} \right) \right\} \right] \right) \right\} \\ + d \tan E - l' \tan \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin E_0 \right) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

直角方向に組合されたもう一つのセンサに対する式は、この E と A を交換し、センサ出力角 E_0 を A_0 に変えればよい。この2式を連立させて解くことにより、センサ出力角 E_0 と A_0 から、 α と A を求めることができる。

実際には、この連立方程式を解析的に解くことは出来ないので、数値計算により近似解を求めることとなる。

このタイプの非スピン型センサは、1977年2月打上予定の MS-T3 試験衛星に搭載される。

ま と め

以上の検討の結果、シリコンディジタル太陽センサの特性及びそれを使用する場合に必要な重要な情報を得ることができた。チャネルストップは、暗電流特性及び漏話特性共に改善する。また2個のセンサを直角に組合せて用いる非スピン型センサの出力角から仰角及び方位角を求める式を導出した。実際には数値計算を行う必要がある。また、出力の温度依存性及びパターン特性から明らかになった出力の角度依存性の影響を蒙らずに精度を向上させるには、閾値の自動設定が必要であり、これは今後検討を要する。

最後に、当ディジタル太陽センサの研究開発に関し御指導ならびに御便宜をはかって下さった本研究所、野村民也教授、素子の設計及び製造に御協力下さった富士通研究所、測機舎(株)の方々、素子の特性測定に御協力下さった千葉工大の小山秀明(現在日本電気)、斉藤英和(現在富士精密電機)、斉藤次男の諸氏に感謝の意を表します。

1976年12月24日 新設部(工学)