

# ロケット搭載用マルチ地平線センサ\*

豊田 実\*\*・石堂 正弘\*\*・飯田 泰久\*\*

## 1. 序

ロケットの姿勢検出は、ロケットの姿勢制御や宇宙観測データの解析に必要である。ロケットの姿勢検出装置としては地磁気センサ、地平線センサ、サンセンサ、スターセンサなどがあり、これらを2つ以上組み合わせることにより、ロケットの姿勢が決定される。私達は、このうち地平線センサについて検討してきた [1][2]。その結果、単一地平線センサをロケットに搭載した場合、ロケットの全高度で（またはロケットの姿勢が予想した状態からずれた時においても）精度の良い検出をすることはむずかしいといえる。この場合、検出精度の低下はもちろん、センサ視野が全く地球を走査しなくなり姿勢検出不能となることもある。そこでマルチセンサについて検討する必要がある。ここでは、2つの地平線センサを用いた場合の動作範囲、検出精度等について検討する。

## 2. 地平線センサの原理

地球は約 270 K の黒体放射に相当するのに対して、宇宙空間は約 4 K の黒体放射に相当する。そこでロケットに搭載した赤外線検出器をスピンによりロケット軸のまわりに回転させ（センサ視野が地球上を走査する）、地平線でこの赤外線量の差を検出する。ただし、この場合の地平線とは地表の凹凸を避けるため高度約 30 km の CO<sub>2</sub> 夜光層をいう（CO<sub>2</sub> の放射赤外線波長は 14.9 μm）。これからロケット・1 回転の間にセンサ視野が地球を見ている時間の割合が求められ、ローカルな天頂に対するロケットのなす角度（ピッチ角）が求められる。

2つの地平線センサをロケットに搭載したときの、ロケットと地球との幾何学的関係を Fig. 1 に示す。ここで、ピッチ角を  $\beta_r$ 、2つのセンサのロケットに対する設定角をそれぞれ  $\gamma_1, \gamma_2$  とした。ロケットのスピンに伴い、設定角  $\gamma_1$  のセンサ視野は P<sub>1</sub> 点で天空から地球に入り、Q<sub>1</sub> 点で天空へ出る。同じく設定角  $\gamma_2$  のセンサ視野は P<sub>2</sub> 点で天空から地球に入り、Q<sub>2</sub> 点で天空に出る。センサには、Fig. 2 (a) に示すような赤外線方形波入力が入り、これに対応した出力が出る。出力を微分波形で取り出すと同図 (b) のようになる。ここで、 $a$  はロケットの 1 周期 (sec)、 $b$  はセンサ視野が地球を見ている時間 (sec) を示している。これからセンサ視野が地球を見ている角度  $2\theta$  が次式で求められる：

$$2\theta = 2\pi \times (b/a) \quad [\text{rad.}] \quad (1)$$

\* 宇宙研特別事業費による論文

\*\* 神戸大学 工学部

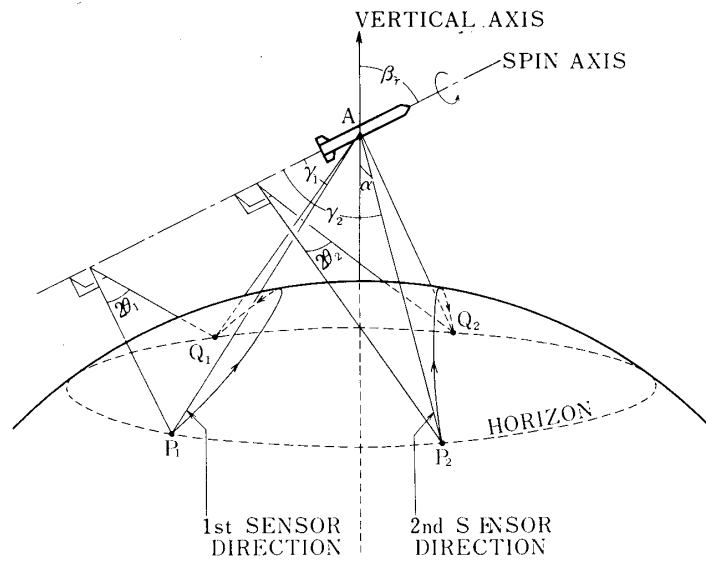


Fig. 1

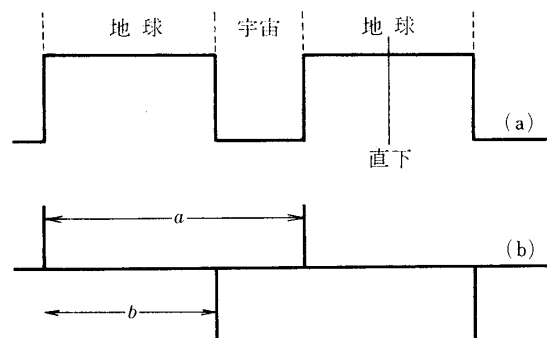


Fig. 2

さらに、スピン1周期でロケットの姿勢が変わらないとすると、次の関係が成立する。

$$\cos \alpha = \cos \gamma_i \cdot \cos \beta_r + \sin \gamma_i \cdot \cos \theta_i \cdot \sin \beta_r, \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

$$\sin \alpha = \frac{R+h'}{R+h} \quad (3)$$

ただし、 $\beta_r$ : ピッチ角,  $\gamma_1, \gamma_2$ : 2つのセンサのそれぞれの設定角,  $\theta_1, \theta_2$ : 2つのセンサが地球を見る角度,  $\alpha$ : 地平線方向と鉛直線のなす角度,  $R$ : 地球の半径,  $h$ : ロケットの高度,  $h'$ : CO<sub>2</sub>層の高度である。これらより、一つの地平線センサのみが動作範囲に入っている場合のピッチ角は次式で与えられる。

$$\beta_r = \cos^{-1} \left\{ \frac{\cos \alpha \cdot \cos \gamma_i + \sin \gamma_i \cdot (\sin^2 \gamma_i \cdot \cos^2 \theta_i - \cos^2 \gamma_i \cdot \cos^2 \theta_i + \cos^2 \alpha)^{1/2}}{\cos^2 \gamma_i + \sin^2 \gamma_i \cdot \cos^2 \theta_i} \right\} \quad (4)$$

この場合、ロケット高度のデータが必要である。

また、2つの地平線センサが動作範囲にあるときのピッチ角は次式で求められる。

$$\beta_r = \tan^{-1} \left( \frac{\cos r_1 - \cos r_2}{\sin r_2 \cdot \cos \theta_2 - \sin r_1 \cdot \cos \theta_1} \right) \quad (5)$$

この場合、ロケット高度のデータは必要ない。

また、ピッチ角が求められると、(2)、(3)、(5)式からロケット高度が次式で求められる。

$$h = \frac{R + h'}{\{1 - (\cos r_1 \cdot \cos \beta_r + \sin r_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \beta_r)\}^{1/2}} - R \quad (6)$$

### 3. マルチ地平線センサの設定角

単一の地平線センサをロケットに搭載し、そのセンサ視野が地球の表面を走査する場合、精度の悪い場所が2つある。一つは地球の中央附近を走査する場合であり、他の一つは地球の端を走査する場合である[3]。前者においてはロケットのピッチ角の変化に対して、 $a/b$ がほとんど変化しないことによる。言いかえると感度が非常に悪い走査領域であり、後者においてはセンサ視野の中に地球が入ってくる幾何学的立ち上り時間が大きいことによる。ここでロケットが飛翔する場合を考えると、時間とともにロケット高度が変り、ロケットの姿勢が少しずつ変る（時間とともにピッチ角が小さくなる）。このため上記の領域をセンサ視野が走査することになって精度の低下することがあり、センサの設定角を決定することはむずかしい。これらのことを避けるためマルチセンサ方式を用いるが、このための必要条件は次のようなものである。

#### (1) 動作範囲が広い。

- ロケットの飛翔する全高度で、少なくとも一つのセンサ視野は地球上の精度の良い領域を走査する。
- 予定のピッチ角から少々はずれても、少なくとも一つのセンサ視野は地球上の精度の良い領域を走査する。
- センサ、テレメータ等の周波数特性のため、ロケット・1回転中に地球を見ている割合があまりに小さいと良くない、また大きすぎても良くない（出力を微分波形でとり出す場合は、2つの正、負パルスがあまり近づかないようにすること）。地球表面の温度パターン計測の場合、 $a/b$ はある程度以上大きいと都合がよい。

#### (2) 姿勢検出感度が大きい。

(3) 設定角誤差や、データの読みとり誤差がピッチ角算出にあまり影響しない。

#### (4) 信号立ち上り時間が短い。

#### (a) マルチ地平線センサの動作範囲

地平線センサ視野がロケット・1回転中に地球を見る割合を対地比とよび、ESR (Earth Scanning Ratio) で表わすとすると(1)、(2)式から次のようになる。

$$ESR = \frac{a}{b} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\cos \alpha - \cos \gamma_i \cdot \cos \beta_r}{\sin \gamma_i \cdot \sin \beta_r} \right), \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

ピッチ角を  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  にしたときの, ESR と設定角の関係を高度をパラメータにして ( $\sim 400\text{km}$  まで) 計算した結果を Fig. 3 に示す. 図において  $ESR=0$  とはセンサ視野が全く地球を走査しなくなる設定角であり, 他方  $ESR=1.0$  とはセンサ視野が地球上のみを走査し天空を全く見なくなる状態である. したがって, 少なくとも  $0 < ESR < 1$  でなくてはならない. さらに地平線信号の伝送系の帯域幅制限による波形の歪みを考えると対地比は 0.15 以上,

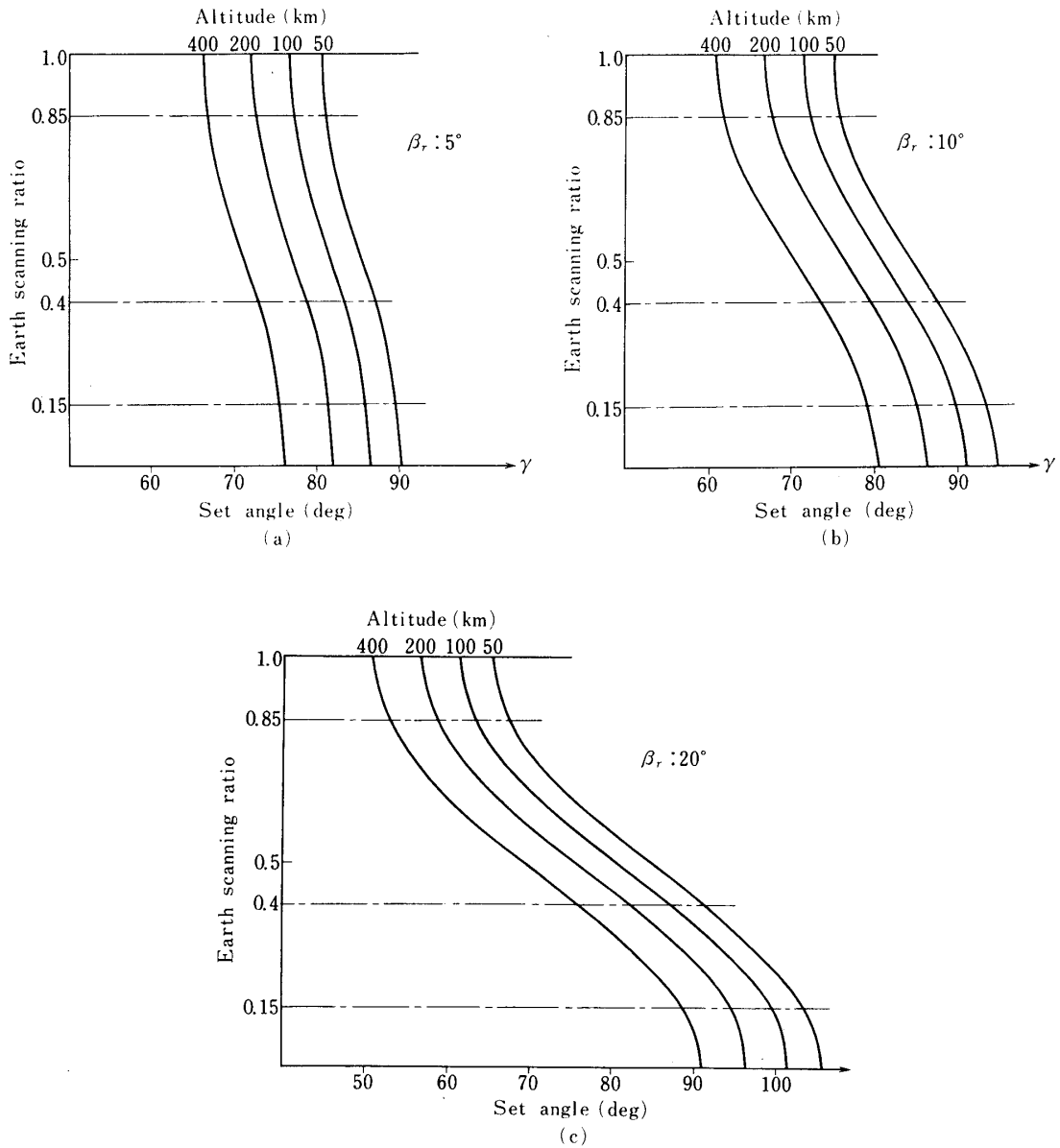


Fig. 3

0.85以下となることが望ましい。この制限のもとに、2つのセンサの動作範囲について考える。一例としてロケットの到達高度を400kmとして、200kmを境にして2つのセンサが異なる高度領域で働くとした場合、各ピッチ角に対する設定角の範囲をFig.3等から求めて図示したのがFig.4(a)である。言いかえると、この図は各設定角に対するセンサの動作範囲を示している。Fig.4(a)によると、マルチセンサ方式でもピッチ角 $8^\circ$ 以下ではセンサは一つしか働かず、 $4^\circ$ 以下では検出不能となることがわかる。逆にピッチ角が大きい場合は、設定角は広い範囲で選ぶことができる。地表の温度パターン計測をするときは対地比を大きくしたい。そこで対地比を0.4以上、0.85以下にとった場合の動作範囲を図4(b)に示す。この場合、(a)図に比べて動作範囲の右側がせまくなっていることがわかる。

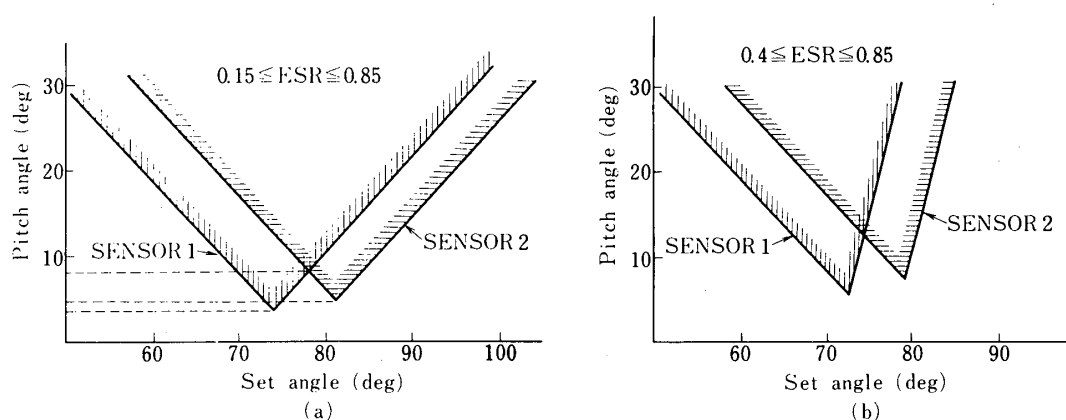


Fig. 4

### (b) 姿勢検出感度

地平線センサの場合の姿勢検出感度とはピッチ角の変化分 $\Delta\beta_r$ に対する、ロケット・1回転中にセンサ視野が地球を見る角度の変化分の半分 $\Delta\theta_i$ をいう。(2)式から検出感度は次式で示される。

$$\frac{\partial\theta_i}{\partial\beta_r} = \frac{\cos\alpha \cdot \cos\beta_r - \cos r_i}{\sin\theta_i \cdot \sin r_i \cdot \sin^2\beta_r}, \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

この関係をピッチ角 $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ について、高度をパラメータとして図示したのがFig.5である。これによるとセンサの設定角によっては感度が0になる高度があり、また、ピッチ角が大きくなるに従い、感度は小さくなることがわかる。ピッチ角の変動や高度が変化するときにおけるこのような感度低下を避けるため、マルチセンサ方式を採用し、互いに相おぎなって動作範囲を広げるのである。前の例と同じく、到達高度400kmのロケットについて $|\partial\theta/\partial\beta_r| > 0.5$ となる設定角範囲をFig.6に示す。図においてセンサ1が200km以下で常に $|\partial\theta/\partial\beta_r| > 0.5$ となり、センサ2は200~400kmで常に $|\partial\theta/\partial\beta_r| > 0.5$ となる領域を示している。したがってFig.4とFig.6を重ねて、この2つの条件を満足する領域内で最も動作範囲が広く、検出感度のよいセンサ設定角を2つ選ばばよい。このような条件を満たす領域

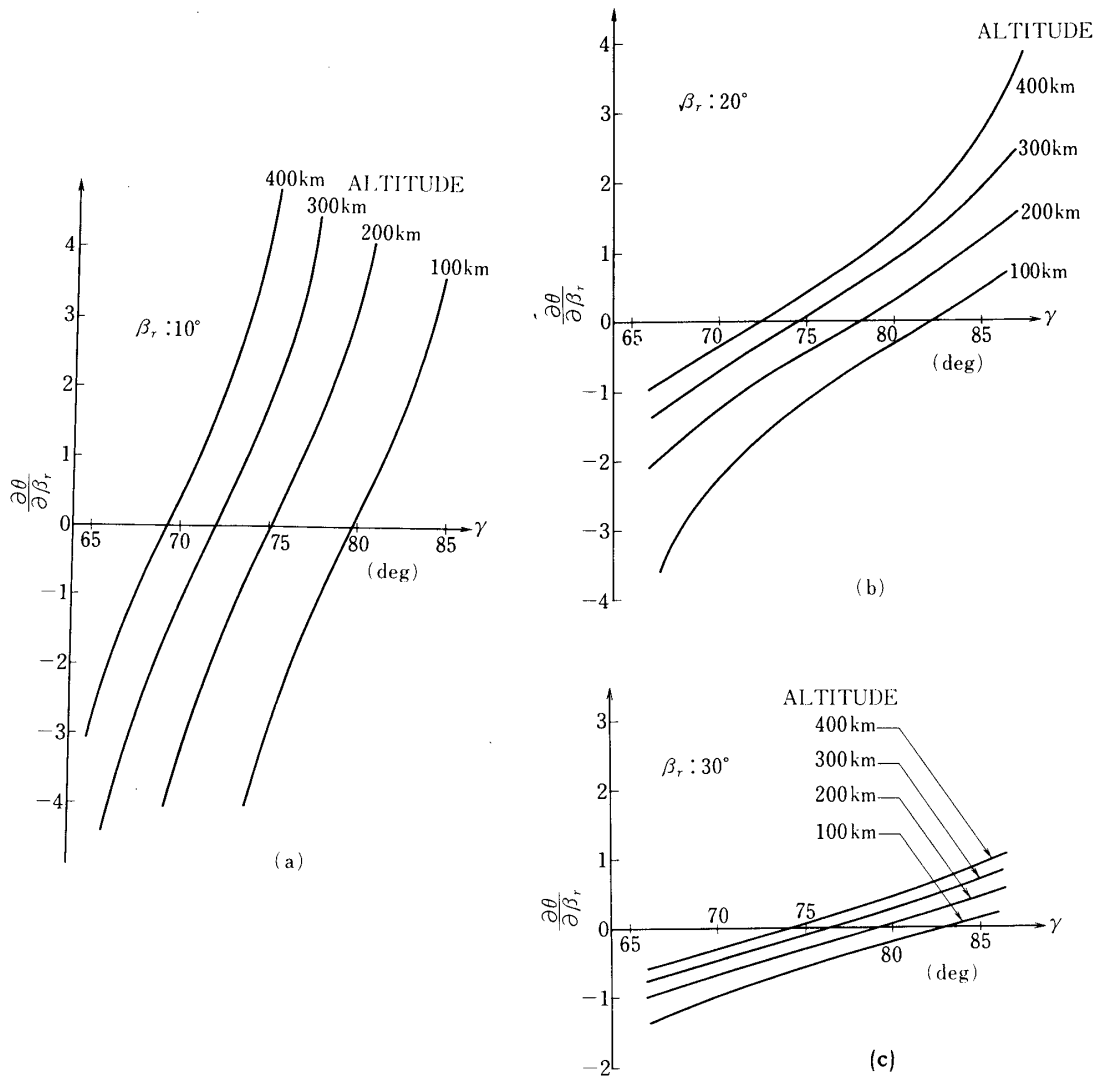


Fig. 5

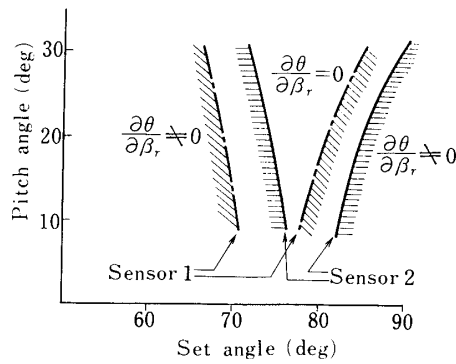


Fig. 6

は、上記の例の場合、各センサにつき設定角約 $77^\circ$ の両側に1つずつ存在する。したがって、2つのセンサについて領域の選定の仕方は4つあることになり、一番良いものを選べばよい。

### (c) 信号立上り時間

地平線センサの瞬時視野は検出素子の受光面積と光学系の焦点距離により決り、 $(d_1 \times d_2) / f^2$ で表わされる。ここで $d_1, d_2$ は素子の寸法、 $f$ は焦点距離である。この瞬時視野が地平線に接してから完全に地平線内に入り込むまでの時間を立ち上り時間という。立ち上り時間はロケットの高度、ピッチ角、設定角によって異なるが、短いほどよく、また全高度にわたって一定であることが望ましい。設定角をパラメータとしてピッチ角 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ に対する各高度での立ち上り時間を Fig. 7 に示す。これによるとピッチ角 $30^\circ$ では設定角は $65^\circ \sim 85^\circ$ の間で任意に選ぶことができ、立ち上り時間については1つの地平線センサで十分である。他方、ピッチ角が小さくなるとマルチセンサ方式により高度を分担して受けもつ必要のあることがわかる。

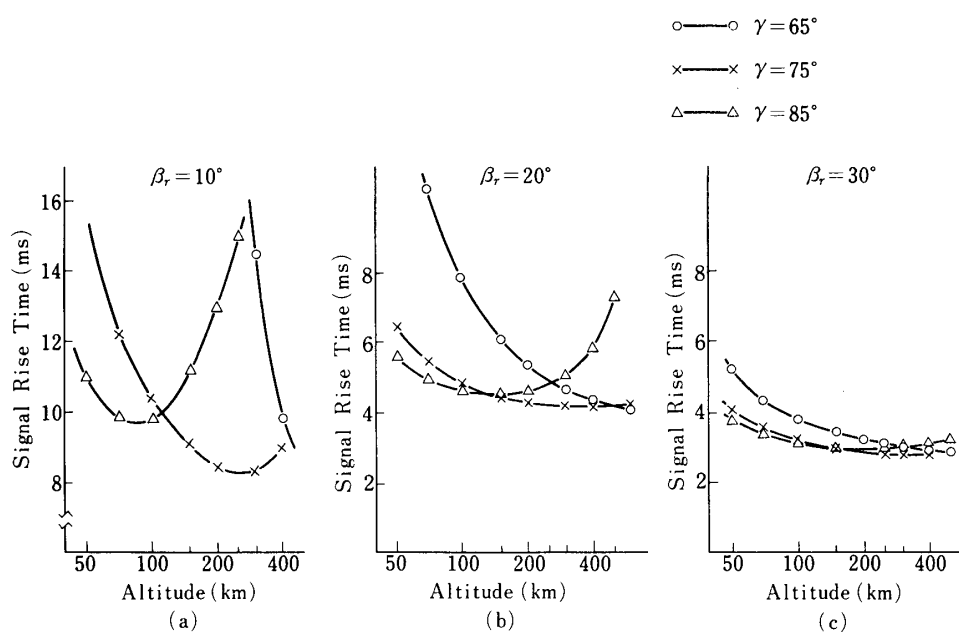


Fig. 7

### (d) マルチセンサ検出精度

上記のセンサ動作範囲の考察から、2つのセンサが同時に動作範囲内にある場合がある。この場合、2つのセンサの情報を同時に用いると(5)式から高度データを用いずにピッチ角が求められ、また(6)式から高度が求められる。このときの検出精度について次に考える。(5)式から設定角に対するピッチ角の変化率は次式で示される。

$$\frac{\partial \beta_r}{\partial r_1} = \frac{\cos^2 \beta_r [\sin r_1 (\sin r_2 \cos \theta_2 - \sin r_1 \cos \theta_1) - \cos r_1 \cos \theta_1 (\cos r_1 - \cos r_2)]}{(\sin r_2 \cos \theta_2 - \sin r_1 \cos \theta_1)^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \beta_r}{\partial r_2} = \frac{\cos^2 \beta_r [\sin r_2 (\sin r_2 \cos \theta_2 - \sin r_1 \cos \theta_1) - \cos r_2 \cos \theta_2 (\cos r_1 - \cos r_2)]}{(\sin r_2 \cos \theta_2 - \sin r_1 \cos \theta_1)^2} \quad (10)$$

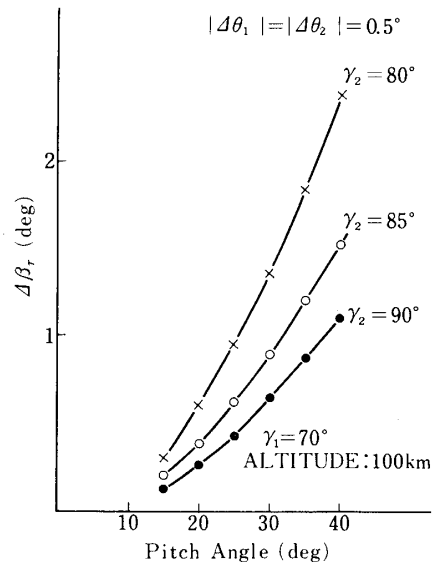
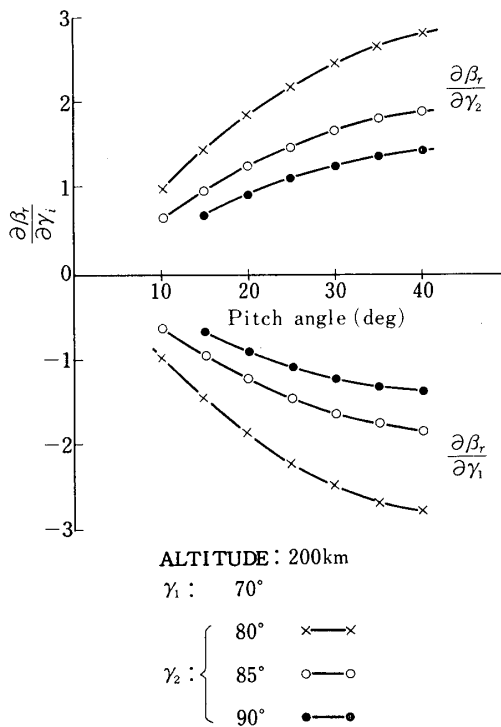
設定角誤差を  $\Delta r_1, \Delta r_2$  とすると最大ピッチ角誤差は次のようになる。

$$\Delta \beta_r \leq \left| \frac{\partial \beta_r}{\partial r_1} \cdot \Delta r_1 \right| + \left| \frac{\partial \beta_r}{\partial r_2} \cdot \Delta r_2 \right| \quad (11)$$

$r_1$  を  $70^\circ$  とし,  $r_2$  を  $80^\circ, 85^\circ, 90^\circ$  とした場合の  $\partial \beta_r / \partial r_1$  と  $\partial \beta_r / \partial r_2$  の計算結果を Fig. 8 に示す。また, 設定角誤差を  $0.5^\circ$  とした場合のピッチ角最大誤差を Fig. 9 に示す。もし  $\Delta r_1$  と  $\Delta r_2$  が同符号なら誤差はほとんど 0 となる。Fig. 9 によると 2 つのセンサの設定角は離れているほど誤差が小さい。また, ピッチ角が小さいほど精度はよい。この精度は  $(r_1 - r_2)$  の値によって変るが, 高度や  $r_1$  にあまり依存しない。

次に読取り誤差  $\Delta \theta_1, \Delta \theta_2$  のピッチ角誤差への影響について考える。(5)式から

$$\frac{\partial \beta_r}{\partial \theta_1} = -\cos^2 \beta_r \cdot \frac{(\cos r_1 - \cos r_2) \sin r_1 \cdot \sin \theta_1}{(\sin r_2 \cos \theta_2 - \sin r_1 \cos \theta_1)^2} \quad (12)$$





$$\frac{\partial \beta_r}{\partial \theta_2} = \cos^2 \beta_r \cdot \frac{(\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2) \cdot \sin \gamma_2 \cdot \cos \theta_2}{(\sin \gamma_2 \cdot \cos \theta_2 - \sin \gamma_1 \cdot \cos \theta_1)^2} \quad (13)$$

読取り誤差  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$  による最大ピッチ誤差は次のようになる。

$$\Delta\beta_r \leq \left| \frac{\partial \beta_r}{\partial \theta_1} \cdot \Delta\theta_1 \right| + \left| \frac{\partial \beta_r}{\partial \theta_2} \cdot \Delta\theta_2 \right| \quad (14)$$

$\gamma_1 = 70^\circ$  とし  $\gamma_2 = 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$  とした場合の  $\frac{\partial \beta_r}{\partial \theta_1}$  と  $\frac{\partial \beta_r}{\partial \theta_2}$  の計算結果を Fig. 10 に示す。また  $|\Delta\theta_i|$  を  $0.5^\circ$  とした場合の最大ピッチ角誤差を Fig. 11 に示す。この場合も  $\Delta\theta_1$  と  $\Delta\theta_2$  が同符号の最大ピッチ角誤差はほとんど 0 となる。Fig. 11 によると、この場合も 2 つのセンサ設定角の角度差は大きいほどピッチ誤差は小さく、またピッチ角が小さいほど精度の良いことがわかる。また、単一のセンサを用いた場合、センサ視野が地球の中央を走査するときに見られる感度の低下が、2 つのセンサを用いたときには Fig. 9, Fig. 11 からわかるように現われない。

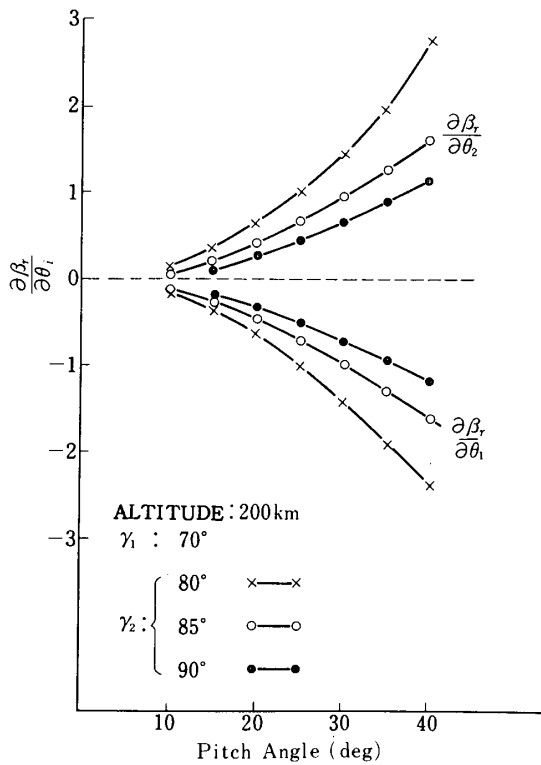


Fig. 10

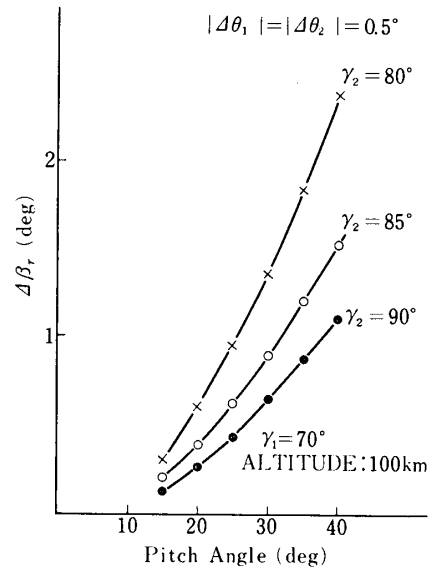


Fig. 11

#### 4. 結 言

マルチセンサとはいっても、ここでは 2 つのセンサの場合について検討したのであるが、この場合でもセンサ設定角を上記の方法で決定することにより、地平線検出可能な高度とピッ

チ角の範囲は相当広くなるといえる。センサの数は多いほど良いが、上記の2つのセンサの場合の結果からみて、ロケットの場合2つまたは3つのセンサを搭載すれば十分であると考えられる。

1975年9月30日

#### 参 考 文 献

- [1] 豊田, 松本, 石堂, 大出: 昭和46年宇宙観測シンポジウム, p. 189
- [2] 豊田, 石堂, 飯野: 昭和47年宇宙観測シンポジウム, p. 32
- [3] 豊田, 石堂, 飯野: 東京大学宇宙航空研究所報告, 第10巻, 第3号, p. 677