

# X線望遠鏡用スターセンサ姿勢計

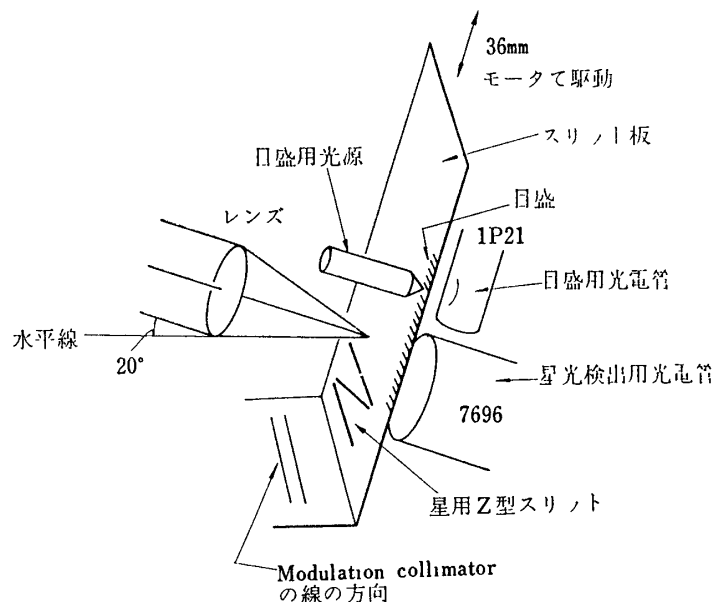
小田 稔・西村 純・宮本重徳  
小川原 嘉明・松岡 勝・和田雅美\*

## 1. 緒言

気球に実験装置を搭載して天球上の放射線源（Xスターなど）の位置を知るには、気球に搭載した実験装置の方向を時々刻々に知ることが必要である。われわれはX線源の位置およびその大きさを1'角の程度で決定したいと考え、これに必要な姿勢計を開発したので報告する。われわれが開発してきたX線望遠鏡は、X線検出器、modulation collimator、精密姿勢計より成る。ここに述べるスターセンサ姿勢計は、星の方向を基準にして観測装置の姿勢を迎角方向に約1'角、方位角の方向に約10'角の精度できめられるものである。これを使った実験は1968年9月19日、9月23日の2回にわたって行なわれ、前者は約7g/cm<sup>2</sup>、後者は約8g/cm<sup>2</sup>の高度に浮遊させることができた。この高度での観測器の運動は予定どおり回転（方位角）に関して10'角、迎角に関して1'角で決定することができたので、この姿勢計の原理、測定精度、実験結果について報告する。

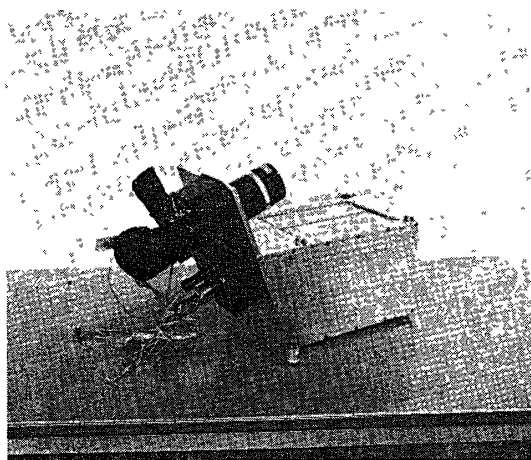
## 2. 原理

第1図(a)はスターセンサ姿勢計の原理を示すものである。レンズの光軸は地平線より20°上の方向を向いている。この角度は地平線からの光をさけるためと、ちょうど北斗七星

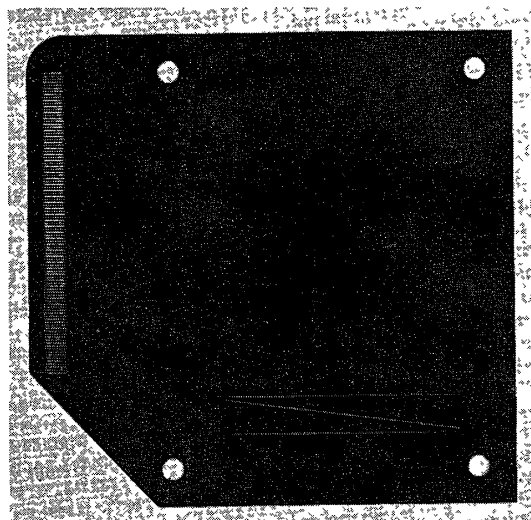


第1-a 図 スターセンサの原理図

\* 理化学研究所



第 1-b 図 Modulation collimator に取り付けられたスターセンサ



第 2 図 スリット板の写真

の方向をスターセンサが向くようにするという要求により決められた。また、modulation collimator の wire は第 1-a 図星用 Z 型スリットのうち平行な 2 本のものに平行に張られている。

さてこのスターセンサ姿勢計は星の光をとらえるレンズ（市販品の 35mm 一眼レフカメラ用望遠レンズ  $f=135\text{mm}$ ,  $F=2.0$ ）とスリットと星の光を電気信号に変える光電子増倍管、それに目盛用光源とそれを受光する光電子増倍管、そしてスリットを往復運動させる駆動システムより成り立っている。

スリットは第 2 図のごときのもので、星の位置を知るための Z 型スリットと、スリットの位置を知るための目盛信号用スリットがきざまれている。ここで目盛信号の役割は焦点面にきた星の光のスポットがスリット面上のどこにあるかを知るための物さしの役目をするものである。この目盛スリットを通して内蔵されたランプによる光を見るようにしてあるので、星のスポットが気球ゴンドラの動きに従って動き、星の信号を目盛信号と比較することによってそれを二次元座標の上に決めることができる。スリットの駆動システムはハート型のカムを用いて 36mm の長さをほぼ等速 ( $\sim 36\text{mm/sec}$ ) 往復運動させている。し

たがって出て来る目盛信号の間隔はほぼ等間隔である。

次にこのようなスターセンサ姿勢計の必要とする精度を考えよう。よく知られているように modulation collimator による X 線望遠鏡 [1] の視野は、細長い短冊状の視野が並んだものであり、この短冊状の視野の端よりどれだけの角度離れた所に X 線源があるとすると、観測された X 線検出器によるデータが最もよく説明できるかということにより X 線源の位置を求める。したがって X 線観測装置の姿勢は二次元的に  $1' \times 1'$  の程度で必要なのではなく、天球上のある方向はこの短冊状の視野の狭い方向の端よりどれだけ離れた角度となっているかを、 $1'$  角の精度で知ることができればよい。即ち一次元的な角度がわかればよい。これを第 1 図の様にこの modulation collimator の視野とほぼ直角を向いた光学望遠鏡で見た星の像より決定したいとき、必要な精度を求めよう。いま、もし目的とする X 線源の方向が天頂より  $5^\circ$  以内にあるとすれば、簡単な計算の結果天頂方向を軸とする回転角にして  $12'$ 、

modulation collimator の視野の長い方向の軸のまわりの回転角にして、短い視野の軸のまわりに  $1^\circ$  となる。これを modulation collimator の視野と直角な第 1 図のごとき光学望遠鏡で測定するときの星の像の位置の精度になおすと上下方向に  $1'$  角、左右方向に  $12'$  角の精度となり、この精度で同一視野に星が左右に  $1'$  以上はなれて 2 個以上見えておればよいことになる。

このスリット上での  $1'$  角は約 40 ミクロンに相当するからスリットの工作精度、往復運動に伴うガタの精度などは全てこれ以下に押えるようにした。スリットの幅は星用のものは 0.15mm (Z型 3本)、目盛用は 0.2mm 幅で 0.4mm ピッチで 101 本が刻まれている。これは 0.1mm のリン青銅板を photoetching (写真腐蝕) することにより作ったものである。

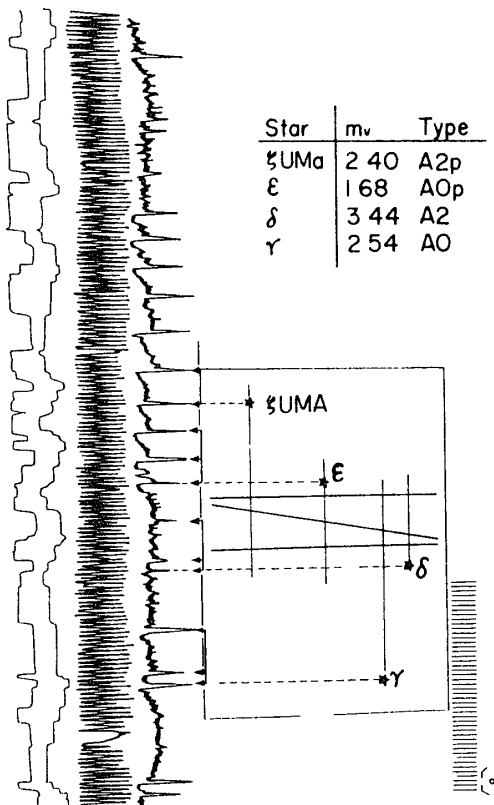
目盛用スリットの間隔は視野の角度にして、約  $10'$  角、星のスリットの平行な両側のスリット間隔は約  $2^\circ$  角で中に入った斜のスリットがあるため一つの星で三つのパルスが観測され、このパルスの間隔の比で方位かわかる。この  $2^\circ$  以内に二つ以上の星が入ればパルスが入り組んで判別がむずかしいが、パルス波高の違いや、それまでの気球ゴンドラの動きを追ってゆくことにより判別することは可能である。星の迎角は星の光が平行なスリットのいずれか一方を通るときに出すパルスが目盛信号のどこにあるかで知ることができる。以上より信号の読み取り精度を目盛と目盛の間隔の  $1/10$  にすれば  $1'$  角の精度になることがわかる。なお地上ではあらかじめ方向のわかった人工星を使ってこれらの星による信号がどのように目盛の信号と対応しているかを校正しておく。光電子増倍管で受けた星の光は約  $5 \times 10^3$  倍の増幅器を通してアナログ量のパルスをそのままテレメータで送る。ここで光電子増倍管はできるだけ低雑音の東芝 7696 を使用した。目盛の信号は目盛用ランプの強度で大きく変るか 1P 21 の光電子増倍管で受けたパルスを約 1000 倍に増幅してテレメータで送った。

### 3. 実験結果

現在のところデータ解析は途中であるが、スターセンサに関する基本的なデータは得られた。ここでは 1968 年 9 月 23 日の飛揚のデータについてその結果を述べる。

前にも述べたように、スターセンサの光軸は水平線より  $20^\circ$  上を向いている。これは水平線近辺にあると考えられる夜光を避け、また北斗七星を見やすくするためになされたものである。観測器の回転 (方位角) は「よりもどし方式の方向制御装置」[2] によりほぼ  $10^\circ$  の精度で北斗七星の方向をむくように設定されている。気球の飛揚は順調に行なわれ 17 時 30 分より約 12 時間  $9 \sim 8 \text{ g/cm}^2$  で水平浮遊を続けた後、水戸沖に切り落された。ここで扱ったのは 19 時 3 分～12 分の 9 分間のデータである。

第 3 図には受信後 photo-corder に記録された生のデータが示されている。このときは UMa  $\zeta$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$  がスリット面上にあったことが以下で述べる要領でわかる。各々の星はスリットが 1 回スキャンする毎に三つのパルスを形成する。ただし UMa  $\zeta$  は視野の端にかかっているため二つのパルスしか現われていないが、あとに述べるようにゴンドラの swing が小さいためデータとしては支障なく使える。スターセンサの光軸の方向は二つの星さえあれば気球の地理的位置がわからなくても決めることができる。各パルス波高は星の明るさに応じた大きさを示すが同じ visual magnitude でも星の spectral type で光電子増倍管の光電面の

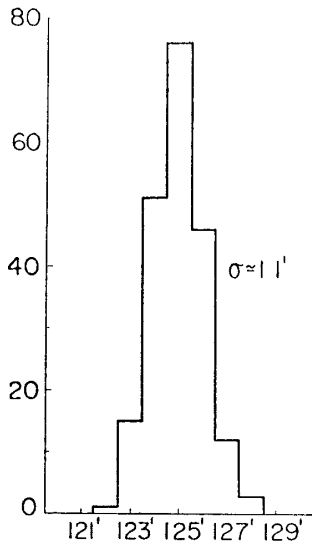


第3図 テレメータで受信後に photo-corder に記録された生のデータ、左から (1) X線アナログ信号, (2) X線デジタル信号, (3) 目盛信号, (4) スターセンサからのパルス. 右側はZ形スリット面上の星と目盛スリットの模式図が記録と対応してある. 表はここにあらわれた星の mv と spectral type を示した.

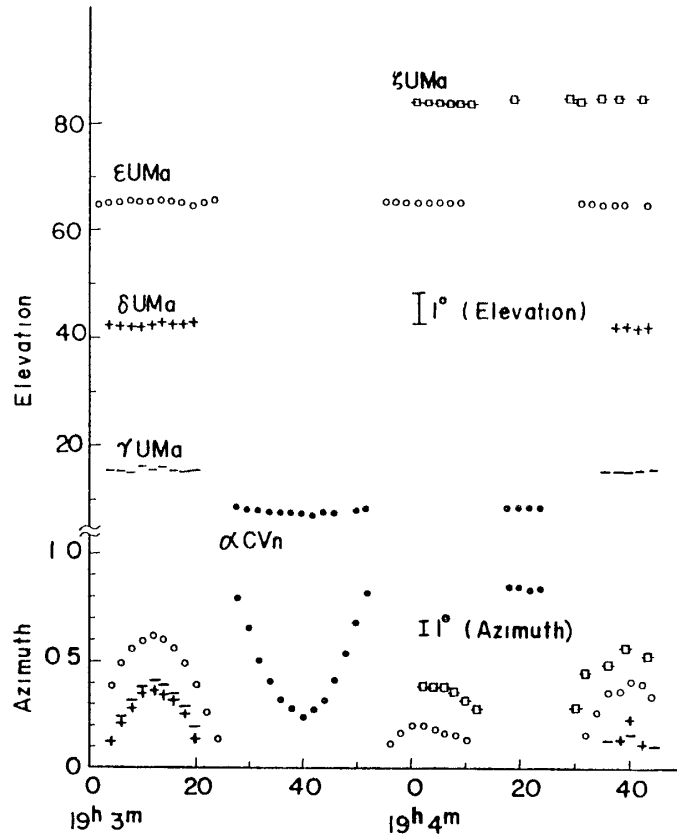
感度が違うためパルス波高が異なる (APPENDIX 参照) AO type の星を基準にすれば,  $S/N \approx 1$  となるのは北斗七星付近の星野では4等星よりやや暗い星となる.

さてデータとしては各星でできる三つのパルスが順序付けされた目盛のパルスの何番目にくるかを読みとる. このとき目盛の  $1/10$  の精度で読めば  $1'$  角の精度で迎角をきめることができるわけである. よみとり誤差は主として星によるパルスに星野の noise が重なるために必ずしも一定の形のパルスが現れないことによる. このパルスの位置のよみとり精度は以下の様にして求めた. 第2図の様なスリットを用いているので各々の星でできる三つのパルスのうち両端のパルスの間隔は, もし迎角があまり速く変らなければ ( $< 7'$  角/sec) 一定間隔のはずである. 迎角の変動の原因になる日周運動と pendulum motion はせいせい  $0.1'/\text{sec}$  だから, このパルス間隔をよみとった値はもしよみとり誤差がなければ一定でなければならない. この値を示したのが第4図である. この図がガウス分布しているものとする,  $\sigma = 1.1'$  となり, この値は二つのよみとり値の差であるので  $\sigma/\sqrt{2} \approx 0.8'$  が一回のよみとり精度とすることになる. 言い換えれば迎角決定の精度になる.

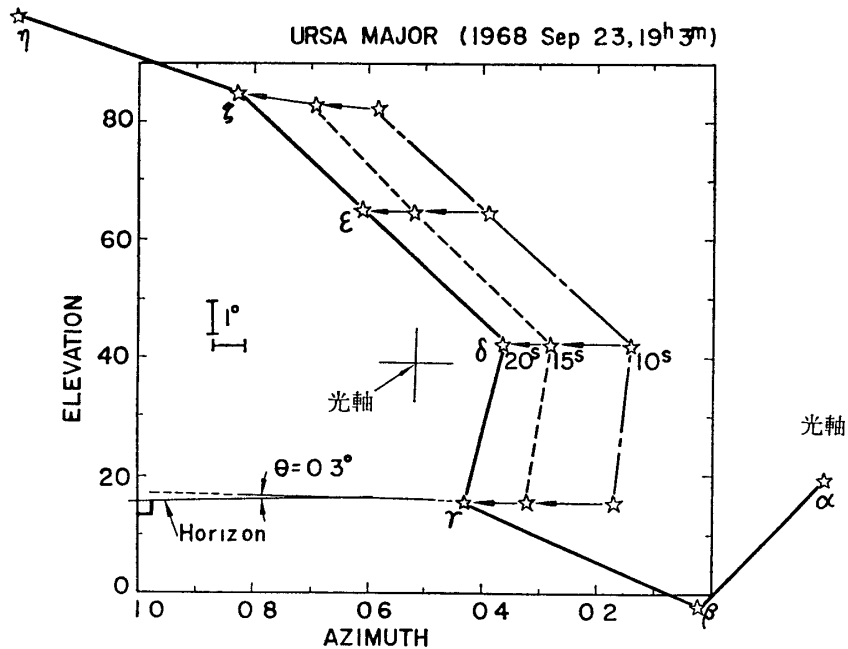
第5図は迎角と方位角のよみを時間にしたがってプロットしたものである. 縦軸のうち Elevation (迎角) はスターセンサの目盛の番号を意味し, Azimuth (方位角) は三つのパルス間隔の比を意味する. 各々の  $1^\circ$  角相当の長さか図中に示されている. Elevation の図では時間と共に日周運動の星の位置がわずかに変動している様子がわかる. 星が途切れているのは, Azimuth の図からわかのようにゴンドラの回転によって星の像がスターセンサの視野からはみ出してしまうからである. この様子をもう少しわかりやすく二次元の座標にプロットしたのが第6図である. 縦軸に Elevation, 横軸に Azimuth をとった座標には時々刻々 (約1秒毎) に星のレンズの焦点面上での位置をプロットすることができる. 第6図は三つの時刻の様子を示した. これから時々刻々にスターセンサの方向を知ることができる. 第6図で時間的に変動するのは主として廻転によることは明かであろう. おおのこの星は swing が少ければ廻転により水平線に平行な線上を動くから (ただし日週運動でわずかに迎角が変



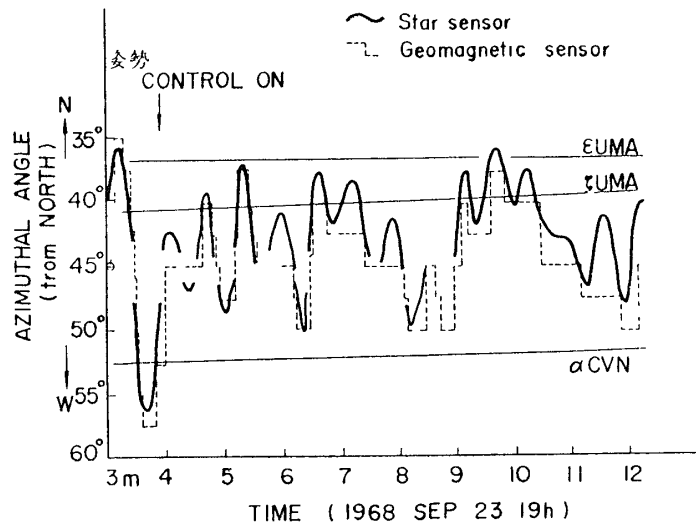
第 4 図 星のパルスの読み取り精度を示す。ここで示した $\sigma$ の $1/\sqrt{2}$ が迎角決定精度である



第 5 図 Elevation と Azimuth の時間的変動を示したデータ



第 6 図 Azimuth と Elevation の座標に星のデータをプロットした図。三つの異なる時刻のデータを示している



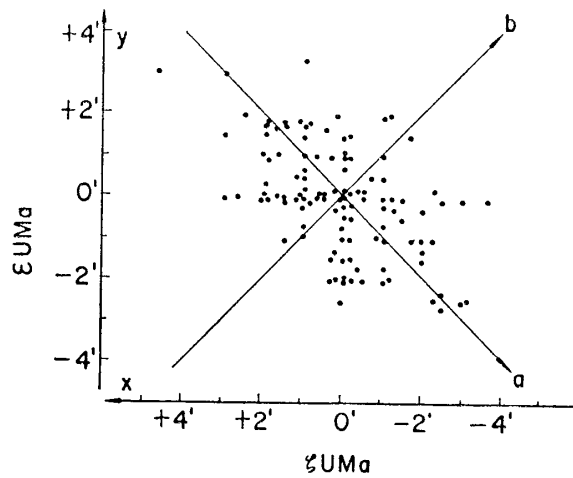
第7図 コンドラの回転の様子を時間的に示すデータ。波線は地磁気姿勢計の結果。

動するがこれは補正する) この動きと気球飛揚前の実験室での校正から求まっている水平線を比較することにより Gondola がどれだけ傾いていたかがわかる。ここで得られた値はほぼ  $0.3^\circ$  の傾きがあったことがわかった。

Modulation collimator で X線源を観測する場合 X線強度が弱いため、また X線源の方向が modulation collimator の透過度の同じ phase からきたものは時間的に重ね合わせる必要がある。Gondola の動きが不規則で速ければそれだけ重ね合わせがむずかしくなる。不規則でも方向姿勢計が精度よく追従できるくらいに動きがおそいか小さい場合は、その重ね合わせが容易になる。このためわれわれは、今回方向制御を使用してスターセンサの方向を大体  $10^\circ$  程度の精度で北斗七星の方向にむけた。第7図は各時刻にスターセンサの方位角がどうなっていたかを示したものである。前にもふれたようにここできめた方位角(ここでは各星とスターセンサの光軸のなす角)の誤差は約  $\pm 5'$  角である。同じ図に  $2.5^\circ$  精度をもつ地磁気姿勢計との同時測定の結果も示しておいた。この図から方向制御がかかってからは方位のふれは大体  $10^\circ$  以内の領域におさまっていることがわかる。また光軸は北から西に約  $43^\circ$  の方向を中心にふらふらしていたようである。図の切れ目は明るい星が、観測されていないために光軸の方位が出せなかったためである。図にあらわれた約 40sec の周期は Gondola のねじれによる回転の固有運動周期に対応する。

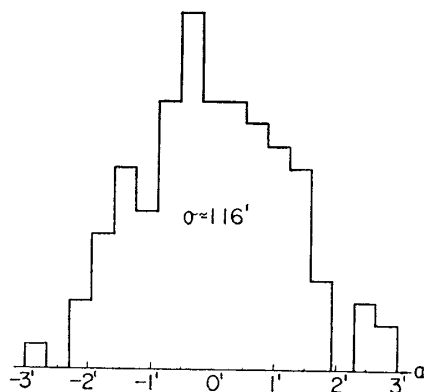
次に swing (pendulum motion) について述べる。

X線のデータを重ね合わせるのに注意すべきことは、どの程度の swing があるかである。Swing の周期は約 20m のつりひもに Gondola がぶら下っている単振動だとすると約 9sec になる。もし modulation collimator の直角方向(感度の高い方向)に swing があるとそのままその振幅の大きさが phase の“ずれ”になってしまう。この方向の swing がどれくらいあるかは、各星の迎角の変動を調べればよい。以下で modulation collimator の wire と平行な軸のまわりの swing の大きさを出す方法を述べる。

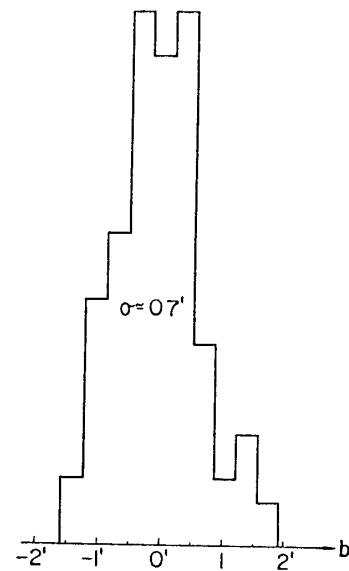


第8図 Swing を調べるための UMa  $\epsilon$  と  $\zeta$  の迎角の予想カーブからのずれの相関

まず各時刻のある星の迎角を日周運動と焦点面に結像された星の移動の軌跡（水平にある星以外は、回転によって焦点面上で直線上を動かない）とで補正する。さらに第6図に関して述べたようにスリット面上の水平線からどれだけゴンドラが傾いているかを知り、この傾きがあるために廻転によって生ずるみかけ上の迎角の変動を考慮に入れる。こうして星をきめれば swing がないうちに予想される迎角の trajectory を時間的に書くことができる。この予想カーブからデータがどれだけずれているかを調べるこ



(a) a 軸に対する分布



(b) b 軸に対する分布

第9図 第8図の分布

とによっていま、考えている swing を出すことができる。実際のデータでは水平浮遊中の静かな状態では swing が非常に小さく星の読み取り精度と同じくらいであったので、同時に見えている二つの星の迎角の位置の相関を調べることによって swing の大きさを推定した。第8図は二つの星 UMa  $\epsilon$  と  $\zeta$  についてこの予想カーブからの同時刻でのデータの迎角の“ずれ”の相関をとったものである。データの読みの誤差がなく swing があれば対角線 a 軸上に直線になるはずである。しかしデータに読みの誤差 ( $\pm 0.8'$ ) があるため a 軸上にバラつくことになる。もし、swing がなければ a, b, 軸の交点で読みの誤差だけの円状の分布

となるはずである。しかし第8図からわかるように少し  $a$  軸上に長く分布した形になっている。もう少し詳しく調べるため、 $a$  軸を横にし、その各目盛に対する分布を第9図(a)に示した。第9図(b)は逆に、 $b$  軸に対する分布である。それぞれの分布はガウス分布とすると  $\sigma_a = 1.16'$ 、 $\sigma_b = 0.7'$  (これは読みとり誤差を意味し前に述べた  $\sigma = 0.8$  と矛盾しない)。ここで  $x, y$  軸から  $a, b$  軸への座標変換で生じる長さの単位の変換は考慮してある。この swing の振幅は大体  $\sqrt{\sigma_a^2 - \sigma_b^2} \approx 0.9'$  であることを意味している。このデータは動揺計 [3] から出した同程度の高度での swing のデータとよく一致している。

#### 4. 結 語

我々はX線望遠鏡用スターセンサ姿勢計を開発し、それを気球に搭載してX線源の観測を行なった。この結果、姿勢計は完全に正常に動作し、X線望遠鏡の姿勢を予期の精度で決定することができた。その精度は迎角方向に  $1'$  角、方位角方向に  $10'$  角である。また気球搭載機器の swing をこの姿勢計を用いて測定したところ、水平浮遊中では約  $1'$  角であることがわかった。この姿勢計を用いることにより気球に搭載した観測装置で天球上の放射線源の位置を  $1'$  角程度の精度で決定することが可能になった。われわれは、この装置を用いたX線望遠鏡で白鳥座X線源を観測し現在データを解析中である。

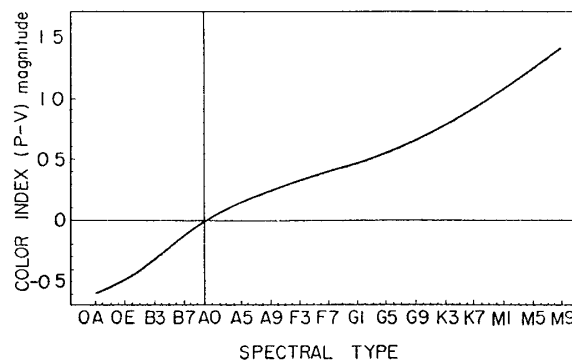
1969年2月13日 宇宙科学

#### 参 考 文 献

- [1] H Bradt, G Garmire, M Dda, G Spada, B V. Sreekantan, P Gorenstein and H Gursky  
Space Science Reviews 8, (1968), 471.
- [2] 西村 純ほか「よりもどし方向制御」宇宙航空研究所報告, 大気球特集号 (1969年) 第5巻第1号 (B) p. 132
- [3] 西村 純ほか「気球用搭載機器」宇宙航空研究所報告, 第4巻第1号 (B)

#### APPENDIX 光電管の色指数

恒星の等級は、一般に目で見えたものに近い値になっている。実際には目に近いスペクトルをもつ実視等級  $V$  を用いる。ここでは光電管を用いた場合の光電面の感度スペクトルでみ



第10図 光電管の色指数。AO型星で normalize してある



た等級を  $P$  とし  $V-P$  を計算する. ( $V-P$ ) を用いれば, 光電管による等級  $m_p$  は

$$m_p = m_v - (V-P)$$

として得られる.

$$(V-P) = 2.5 \log \alpha$$

の  $\alpha$  は

$$\alpha = \frac{\int F(\lambda) S_{11}(\lambda) d\lambda}{\int F(\lambda) V(\lambda) d\lambda}$$

となるが, ここに

$F(\lambda)$  有効温度  $T$  でのプランク分布

$V(\lambda)$   $V$  の感度スペクトル

$S_{11}(\lambda)$  photocathode  $S_{11}$  の感度スペクトル

なお,  $\int V(\lambda) d\lambda$  と  $\int S_{11}(\lambda) d\lambda$  は AO 型 (有効表面温度  $T=9450^\circ\text{K}$ ) のとき ( $V-P$ ) = 0 になるように合せた. 計算結果は第 10 図に示した. これから星の等級 ( $m_v$ , visual magnitude) にこの図の値を加えることにより, 光電管による等級が得られる.