

# 恒星の赤外スペクトル観測(II)\*

田中 済\*\*・小平桂一\*\*・辻 隆\*\*・尾中 敬\*\*  
長井 嗣信\*\*・渡辺鉄哉\*\*・末元善三郎\*\*\*  
矢島信之<sup>+</sup>・河野嗣男<sup>+</sup>・太田茂雄・粕 豊

## 概 要

1976年5月29日夜、15cm 気球望遠鏡 BAT-1 の3回目の飛揚を行ない、7個の恒星(主として低温赤色巨星)の1~2.5 $\mu$  領域における4色測光に成功した。これより $\alpha$  Boo の理論的エネルギー・フラックスを使って、 $\delta$  Vir,  $\sigma$  Lib,  $\delta$  Oph,  $\alpha$  Sco,  $\alpha$  Her の5個の赤色巨星と  $\alpha$  Aql のエネルギー・フラックスを決定し、さらに、line-blanketed model と比較して、赤色巨星大気の物理的パラメータを求めた。

## 1. 序

われわれの研究目的および経過についてはすでに文献[1]に述べられているので省略する。今回は1974年9月、1975年6月について15cm 気球望遠鏡 BAT-1 (Balloon-borne Astronomical Telescope) の3回目の飛揚である。今回えられたデータの質は良好で、4色測光の結果を Tsuji の line-blanketed model [2],[3],[4]と比較し赤色巨星大気のパラメータをきめることが可能となった。

第1表 BAT-1 諸元

主望遠鏡：口径 15 cm カセグレン型 合成焦点距離 180 cm (主鏡のみ 45 cm) 赤外測光器ダイヤフラム視野 3' 検出器 自然冷却 PbS (約 -50°C)
ガイド鏡：口径 5 cm 屈折 焦点距離 30 cm スター・センサ視野 1.° 5
架 台：スター・フォロー付逆フォーク式赤道儀

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

\*\* 東京大学 理学部

\*\*\* 東京大学 東京天文台

<sup>+</sup> 機械技術研究所

## 2. 観測装置

BAT-1の機構については文献[1]に報告されているので、ここでは第1表にその概要を示すにとどめる

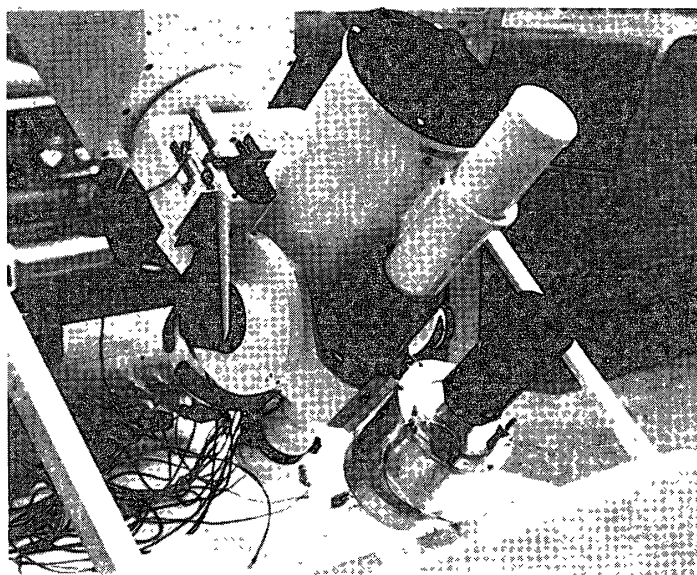
今回改良された点は次のとおりである.

- i) スター・フォロー検出部(ガイド鏡)の視野を $3^\circ$ から $1.5^\circ$ にあらため空のバックグラウンド・ノイズの低減をはかった.
- ii) スター・フォロー検出部, 回転セクタ位置での星像のボケを小さくし, レスポンスの改善をはかった(星像のボケとレスポンスの関係は文献[5]を参照).
- iii) 前回問題となった振子運動を防止するため, ゴンドラの形状および荷重のバランスに細心の注意を払った.
- iv) ICイメージ・センサによるテレビ・カメラ(レチコン・マトリックス・カメラ)をつけ, 観測中の星をモニタした.

このうちiv)は今回新たに設けられたもので, 本体とその周辺の電気系は機械技術研究所が, 送受信関係は宇宙航空研究所が担当した. 概要を第2表に示す.

## 3. 観測経過

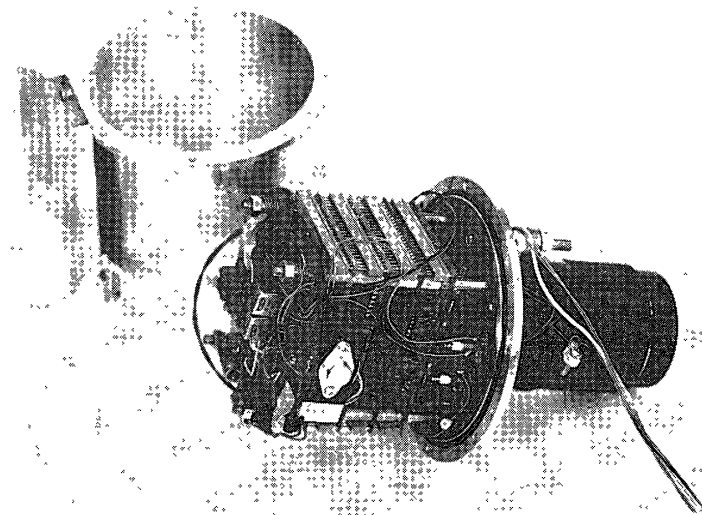
B<sub>5</sub>-70気球は1976年5月29日18時18分三陸大気球観測所から放球された. 20時3分基地東方120kmの洋上, 高度25kmでレベル・フライトに入り, 20時13分から30日2時12分まで, 第3表に示す10個の恒星を観測, うち7個の星について赤外測光データがえられた. ゴンドラは5時4分気球よりカットし, 鳥海山ろくに降下させたが, 6月1日良好な状態で回収された.



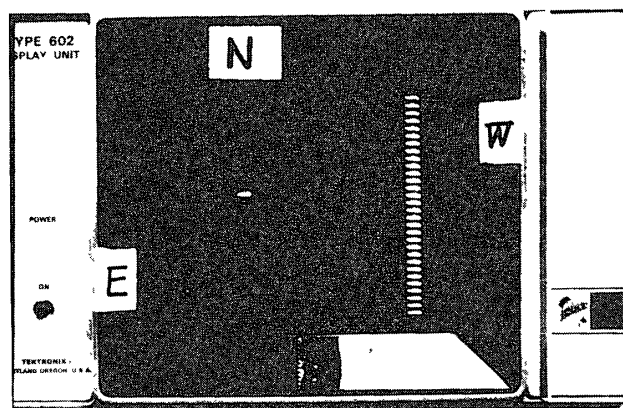
第1図 気球望遠鏡 BAT-1

第2表 テレビ・カメラ概要

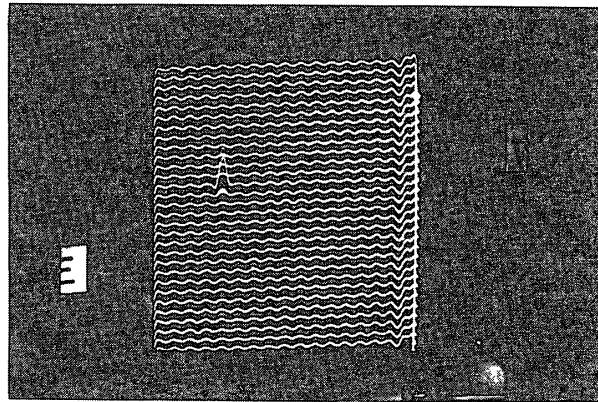
素子	レチコン	32 × 32
素子の間隔		100 $\mu$
レンズ	口径 50 mm, 焦点距離	135 mm
画角	1 $^{\circ}$ 36	(2.55/素子)
走査速度	5フレーム/秒	
温度コントロール		-20 $^{\circ}$ C (ペルチェ効果)
検出最微光星	実視等級で約3等	



第2図 レチコン・マトリックス・カメラ



第3図 テレビ受信の一例 (星は  $\alpha$  Sco)

第4図 テレビ波形モニタ (星は  $\alpha$  Sco)

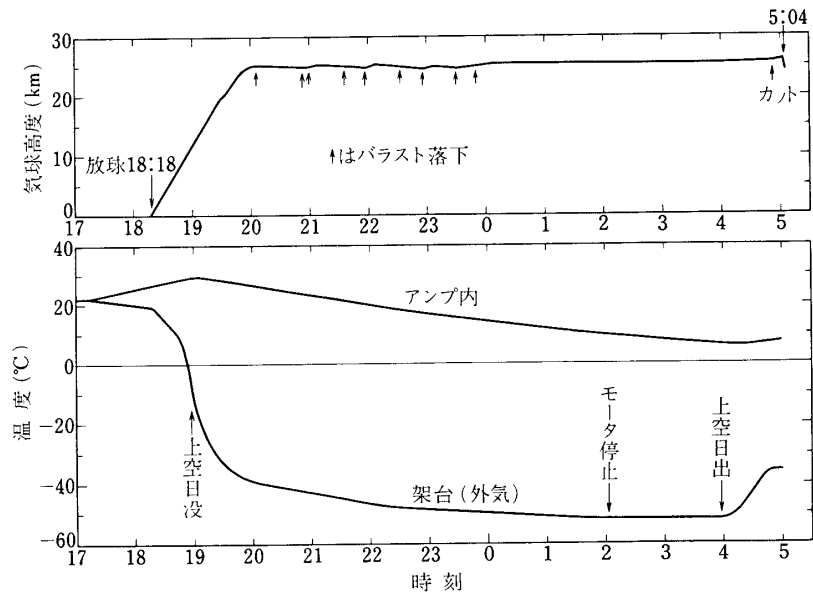
第3表 観測星のリスト

	BS 番号	赤 経 (1975)	赤 緯	実視等級	赤外等級 (2.2 $\mu$ )	スペクトル型
$\delta$ Vir	4910	12 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 3	+ 3° 32'	3 <sup>m</sup> 4	- 1. <sup>m</sup> 3	M 3 III
$\alpha$ Boo	5340	14 14. 5	+ 19 19	- 0 1	- 3 0	K 2 IIIp
$\sigma$ Lib	5603	15 2. 6	- 25 11	3. 3	- 1 4	M 4 III
$\delta$ Oph	6056	16 13. 0	- 3 38	2. 7	- 1. 2	M 1 III
$\alpha$ Sco	6134	16 27 9	- 26 23	0.9 - 1.8	- 3. 9	M 1 Ib
$\alpha$ Her	6406	17 13. 5	+ 14 25	3.0 - 4.0	- 3. 5	M 5 II
$\alpha$ Oph	6556	17 33. 8	+ 12 35	2.1	1. 7	A 5 III
$\eta$ Sgr	6832	18 15 9	- 36 46	3.1	- 1. 5	M 3 II
$\epsilon$ Sgr	6879	18 22 5	- 34 24	1.8	1 8	B 9 IV
$\alpha$ Aql	7557	19 49. 6	+ 8 48	0.8	0 3	A 7 V

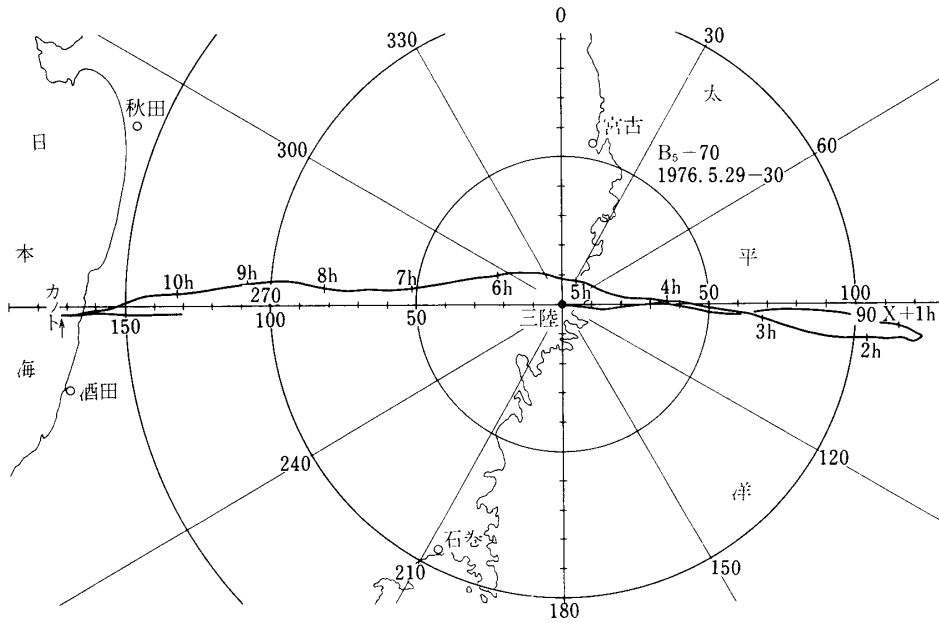
今回も周期7秒程度の小振幅の振子運動になやまされた。しかし、フォローのレスポンスが前回にくらべて2~3倍向上しており、検出部の視野が $\frac{1}{2}$ になったためバックグラウンド・ノイズが減ったこととあいまって、フォローの精度は一段と向上した。追尾誤差は良好なときは $\pm 0'6$ 、悪いときは $\pm 2'$ 程度であった。赤外測光器の視野半径は $1'5$ であるから、追尾の悪い時は多少の支障が生じた。

第2表のリストのうち、 $\alpha$  Ophと $\epsilon$  Sgrはテストのため視野に入れた星である。 $\eta$  Sgrは赤外観測を行なおうとしたが、周囲の微光星(銀河に近い青色の微光星がたくさんある)がセンサーの視野に入って光軸を少しそらす働きをしたため観測できなかった。このことはテレビ・カメラの画像を撮影した写真を後日解析して確かめられた。

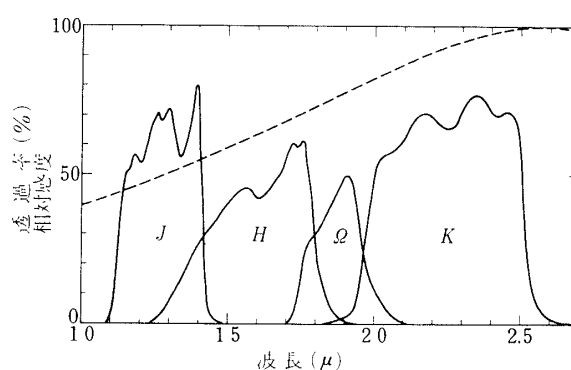
観測終了が2時12分と早くなったのは、望遠鏡駆動モータが低温( $-50^{\circ}\text{C}$ 以下)のため停止したことによるもので、積極的な保温対策を怠ったのが原因である。このため $\alpha$  Aqlは十分な観測時間がとれなかった。



第5図 B<sub>5</sub>-70 飛揚データ



第6図 B<sub>5</sub>-70 航跡図



第7図 干渉フィルタの透過特性(実線)とPbS検出器の感度特性(破線)

#### 4. データの解析

使用したフィルタの透過特性を第7図に示す。フィルタ単体の有効波長は $1.28\mu(J)$ ,  $1.59\mu(H)$ ,  $1.87\mu(\Omega)$ ,  $2.24\mu(K)$ であるが, 検出器(PbS)の感度および恒星のエネルギー分布を考慮した有効波長は第4表に示すように少しずれる。

PbSは自然冷却であるため, 温度の変化によって感度が変わる。われわれは $\alpha$  Booおよび $\alpha$  Herを3回,  $\alpha$  Scoを2回観測して感度の変化を求めた。大気吸収は無視できることがわかった。地上観測においてもKバンドの大気吸収は天頂で0.1以下であるが, 高度25 kmでは残存大気量が $1/40$ となり, 大気吸収はきわめて小さくなる。実際 $\alpha$  Scoは $\sec z = 3.77$ と $2.43$ ( $z$ は天頂距離)で観測しているが,  $J:H:\Omega:K$ の比率は測定誤差内で一致しており, 地上では吸収が大きく観測ができない $\Omega$ バンドにおいても吸収が無視できることがわかった。

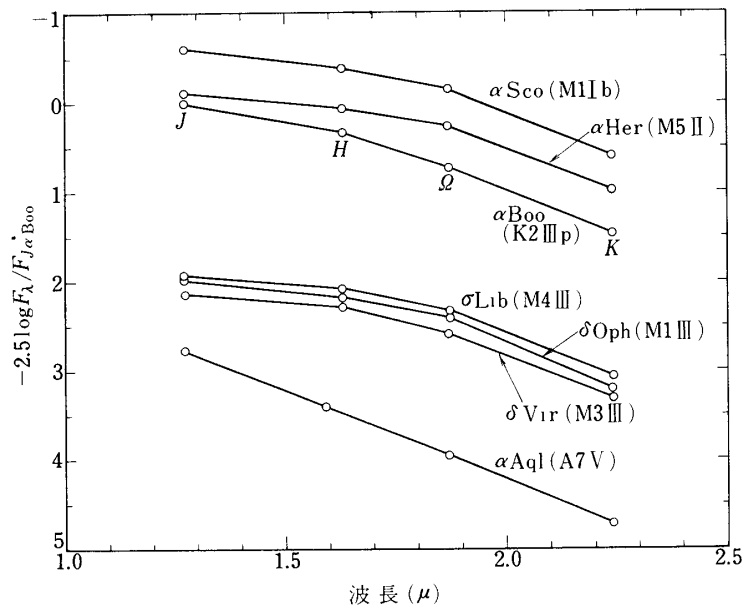
PbSの波長感度特性やフィルタの透過特性は, 上空では地上で測ったものと変化していると考えられる。よって上空で標準星を使って較正を行わなければならない。標準星としてはA型の $\alpha$  Aqlが適当と考えられるが, 実際には観測中にモータが停止し十分な積分時間がとれなかったことや, 温度変化による検出器の感度変化も不明なことを考慮し, 標準星としての使用を断念した。 $\alpha$  BooはK型星であるが, 地上観測によってエネルギー分布の測定が行なわれており(Blackwell et al., 1975 [6]), 観測結果をうまく説明できる理論的モデル(Mäckle et al., 1975 [7])ができていたので,  $\alpha$  Booを標準星とした。第4表および第8図はMäckle等のモデル(有効温度 $4260^\circ\text{K}$ , 表面重力の対数 $0.90$ )による連続光のフラックスに, Tsujiのモデルによる吸収線の影響を考慮に入れて各測光バンドにおける $\alpha$  Booのフラックスを計算し, これと他の恒星を比較してえたエネルギー分布である。Blackwell等の結果はちょうど $1\sim 2.5\mu$ の領域での観測が少なく, 理論的フラックスとくらべると長波長域の観測と短波長域の観測の誤差が, このあたりでギャップを生じさせていることがわかったので採用しなかった。

$\alpha$  Aqlはすでにのべたように検出器の感度変化が不明なため誤差の多い結果しかえられなかった。

第4表 各バンドにおけるエネルギー・フラックス  
 $-2.5 \log F_\lambda / F_{J\alpha\text{Boo}}$  (等級表示)

	<i>J</i> (1.27)	<i>H</i> (1.63)	<i>Q</i> (1.87)	<i>K</i> (2.24)
$\delta$ Vir	2.12 $\pm$ .03	2.29 $\pm$ .02	2.57 $\pm$ .05	3.31 $\pm$ .02
$\alpha$ Boo	0.00 $\pm$ .01	0.33 $\pm$ .01	0.73 $\pm$ .03	1.47 $\pm$ .01
$\sigma$ Lib	1.92 $\pm$ .05	2.07 $\pm$ .05	2.32 $\pm$ .10	3.07 $\pm$ .05
$\delta$ Oph	1.95 $\pm$ .03	2.17 $\pm$ .02	2.40 $\pm$ .05	3.19 $\pm$ .02
$\alpha$ Sco	-0.61 $\pm$ .01	-0.40 $\pm$ .01	-0.16 $\pm$ .03	0.60 $\pm$ .01
$\alpha$ Her	-0.11 $\pm$ .01	0.06 $\pm$ .01	0.26 $\pm$ .04	0.99 $\pm$ .01
$\alpha$ Aql	2.77 $\pm$ .20	3.41 * $\pm$ .20	3.96 $\pm$ .30	4.72 $\pm$ .20

( ) 内数字はPbS 感度, 星のエネルギー分布を考慮した各バンドの有効波長 (単位  $\mu$ ). ただし, \* での値は 1.59  $\mu$ .



第8図 観測よりえた各恒星のエネルギー・フラックス分布

第5表は A0V 型星のモデル (有効温度 9500° K, 表面重力の対数 4.0) [8] と  $\alpha$  Boo のモデルを比較することにより, エネルギー分布から測光等級を求めたものである. 原点は Johnson 等による  $\alpha$  Boo 測光結果 [9, 10] とできるだけ一致するように決定した. 観測星の多くは変光星であり, Johnson 等の結果と完全には一致しないが矛盾はないものと考えられる.

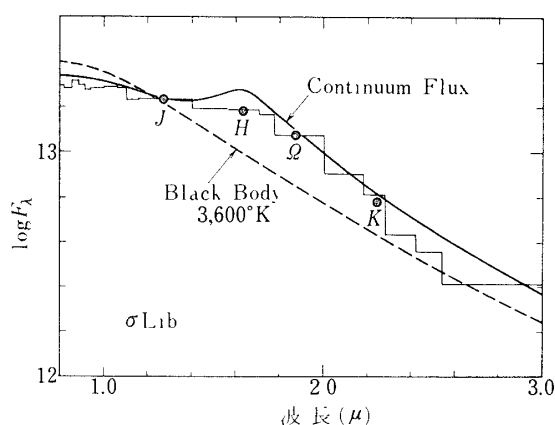
第5表 測光等級

	$J$ (1.27)	$H$ (1.63)	$\mathcal{Q}$ (1.87)	$K$ (2.24)
$\delta$ Vir	-0.11	-0.80	-1.12	-1.16
$\alpha$ Boo	-2.23	-2.76	-2.96	-3.00
$\sigma$ Lib	-0.31	-1.02	-1.37	-1.40
$\delta$ Oph	-0.28	-0.92	-1.29	-1.27
$\alpha$ Sco	-2.84	-3.49	-3.85	-3.87
$\alpha$ Her	-2.34	-3.03	-3.43	-3.48
$\alpha$ Aql	0.54	0.32 *	0.27	0.25

\* 有効波長  $1.59 \mu$ 

## 5. 考 察

第8図のエネルギー分布において、まずスペクトル系列による温度の差は明らかである。Hバンドにおけるハンプは $1.65\mu$ 付近の水素負イオンによる連続吸収極小に対応するM型星において $\mathcal{Q}$ バンドも上に凸であるが、これはH、KバンドがCO吸収帯によって下った効果によるものである。かつてストラトスコープII号の観測[11]で早期のM型星にも水蒸気の吸収がみとめられるとされたが、近年ではM6程度にならないとこの吸収はみとめられないというのが通説になっている[2]、われわれの観測でも水蒸気吸収のある $\mathcal{Q}$ バンドがM5型である $\alpha$  Herにおいてもさがっていないことはこの通説を確認したことになる。



第9図 観測より求めたエネルギー・フラックスと辻モデルの比較の一例

折線は分子の吸収を考慮したフラックスで、このフラックスとフィルタ関数の積を積分して観測と比較し大気のパラメータを決定した。



第9図は Tsuji の line-blanketed model によるフラックスと測光データを比較した一例である。Tsuji のモデルにフィルタ関数をかけて積分し、測光データと比較すると各恒星の大気の物理的パラメータが決定できる。第6表はその結果を示したもので、有効温度はかなりよくきまる。Johnson [9, 12] や Lee [13] はより低い温度を求めているが、高めの温度を採用するのが近年の傾向であって、これは水蒸気の吸収のあらわれ方などからも正当化される。表面重力については十分よくきまるとはいえないが、巨星と超巨星の区別ははっきりつく。乱流速度については3 km/s として計算したが、 $\delta$  Oph では4.5 km/s (この場合有効温度 3700°K) が、 $\alpha$  Sco では4 km/s がもっともよく一致する。乱流速度が大きいと CO などの吸収線の飽和がとけて吸収が急に大きくなるので、あまり大きな値はとりえない。元素組成については太陽組成で計算してある。炭素と酸素の比をかえて炭素をふやすとやはり CO や CN の吸収が強くなり、観測と一致しなくなる。

第6表 有効温度  $T_{\text{eff}}$  と表面重力  $g$ 

星 (スペクトル型)	$T_{\text{eff}}$ (°K)	$\log g$
$\delta$ Vir (M 3 III)	37 00 $\pm$ 100	0.5 $\pm$ 1.0
$\sigma$ Lib (M 4 III)	36 00 $\pm$ 200	0.5 $\pm$ 2.0
$\delta$ Oph (M 1 III)	38 00 $\pm$ 100	0.5 $\pm$ 1.0
$\alpha$ Sco (M 1 Ib)	37 00 $\pm$ 50	0.0 $\pm$ 1.0
$\alpha$ Her (M 5 II)	35 00 $\pm$ 50	- 0.5 $\pm$ 1.0

## 6. む す び

上空での観測は大気の吸収など複雑な要素がのぞかれるのできわめて精度のよい結果がえられる。われわれの観測波長域は決して広くないが、これでも有効な結果をみちびき出すことができたのは精度のよいデータがえられたことによる。特に Q バンドのデータは有効であった。一方理論的な面からいっても、赤外域は低温度星のエネルギーが大きいところであり、原子や分子の吸収も比較的単純で、精度のよいモデルが作れる。

幸い観測装置は良好な状態で回収されているので、次回は秋の星を観測する計画をたてている。改善を要する点は、まずモータの保温である。振子運動は現在のようなコントロール方法ではさげられないと考えられるので、測光器のダイヤフラムを現在の3' から5' とし、 $\pm 2'$  程度の追尾誤差にたえられるようにする。今回の経験から視野をひろげたことによる赤外バックグラウンドの増加は無視できると考えられる。また波長域の短い方にもう一つのバンド (I バンド、有効波長  $0.9 \mu$ ) をもうけて大気モデルとの比較を容易にしたい。

おわりに、この観測のために協力して下さった西村先生をはじめとする宇宙研気球観測所の方々に心からお礼を申し上げます。

1977年6月10日

## 参考文献

- [1] 小牧和雄, 小平桂一, 田中 濟, 末元善三郎: 宇宙研報告, **12**, 623, 1976
- [2] T. Tsuji: Proc. Japan Acad., **52**, 183, 1976
- [3] T. Tsuji: Publ. Astron. Soc. Japan. **28**, 543, 1976
- [4] T. Tsuji: *ibid.*, **28**, 567, 1976
- [5] 田中 濟: 宇宙研報告, **9**, 244, 1973
- [6] D. E. Blackwell, R. S. Ellis, P. A. Ibbetson, A. D. Petford, and R. B. Willis: Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **171**, 425, 1975
- [7] R. Mäckle, H. Holweger, R. Griffin, and R. Griffin: Astron. Astrophys., **38**, 239, 1975
- [8] D. Carbon and O. Gingerich: Theory and Observation of Normal Stellar Atmospheres; Proc. Third Harvard - Smithsonian Conference on Stellar Atmospheres, p. 377, M.I.T. Press, Cambridge, 1969
- [9] H. L. Johnson: Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya, **3**, 305, 1964
- [10] H. L. Johnson, R. I. Mitchel, B. Iriarte, and W. Z. Wisniewski: Comm. Lunar Plan. Lab., **4**, 99, 1966
- [11] N. J. Woolf, M. Schwarzschild, and W. K. Rose: Astrophys. J., **140**, 833, 1964
- [12] H. L. Johnson: Ann. Rev. Astron. Astrophys., **4**, 193, 1966
- [13] T. A. Lee: Astrophys. J., **162**, 217, 1970