

恒星の赤外スペクトル観測*

小牧和雄**・小平桂一**・田中 濟**・末元善三郎**

概 要

気球望遠鏡BAT-1(口径15cm)による近赤外域多色測光観測が、1974年9月に引続き、1975年6月17~18日行なわれ、赤色超巨星 α Sco についての測光データを得ることができた。

1. 序 論

恒星大気の研究は観測および理論の両面から相補的になされなければならない。しかし、低温度星においては観測・理論の両面に次の様な困難点があり、温度の高い星に比べ研究が遅れている。すなわち、まず観測の面では、表面輻射がおもに赤外領域に分布するため、可視域の観測は効率の悪く、赤外域の観測も地上においては水蒸気等の大気吸収のために妨害される。また、理論の面では、大気モデルを作る場合に低温度のため分子の形成と吸収を考慮しなければならないことが問題を複雑にする。

しかしながら、理論においては、Tsuji [1], Auman [2]によるモデル大気をはじめとして、ここ10年来急速な進歩がなされた [3] [4] [5]。一方観測においても、Johnsonによる大気の窓を使った赤外測光観測 [6], Schwarzschild等による気球(Stratoscope)を使った赤外スペクトル観測 [7] 以来、赤外域における観測は盛んである [8] [9] [10]。とはいえ、モデル大気における分子の表面輻射および温度・圧力構造への効果は、有効温度、重力加速度、成分比等の諸パラメータに敏感であるため、その検証としてさらに信頼性の高い赤外域のデータを積み重ねて行くことが必要である。

表 1. 1974年9月の観測におけるスター・フォロー規正精度

天体名	木 星	α Ori	α Aql	α PsA	β Cet	α Cet	r Eri	δ Eri	r Cet
実視等級	-2.5	0.7	0.8	1.2	2.0	2.5	2.9	3.5	3.6
規正精度 (角度秒)	± 15	± 25	± 25	± 40	± 30	± 35	± 35	不能	不能

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東京大学 理学部

以上のような背景から、われわれは気球望遠鏡BAT (Balloon-borne Astronomical Telescope)による低温度星の観測をすすめているが、今回BAT-1として、小口径(15cm)の望遠鏡による赤色巨星を対象とした近赤外域測光を行なった。

なお、1974年9月に行なった観測では、スター・フォロワが3等星(r Eri)まで追尾することを確かめることができた(表1)が、赤外観測は電子回路の故障によりデータを得ることはできなかった。今回は前回の観測における反省をもとにしてすすめられた。

2. 観測装置

装置本体は逆フォーク式赤道儀架台に取り付けられた赤外測光用の主望遠鏡と、観測星を追尾するためのスター・フォロワ用ガイド望遠鏡とからなっている(図1, 2, 3)。

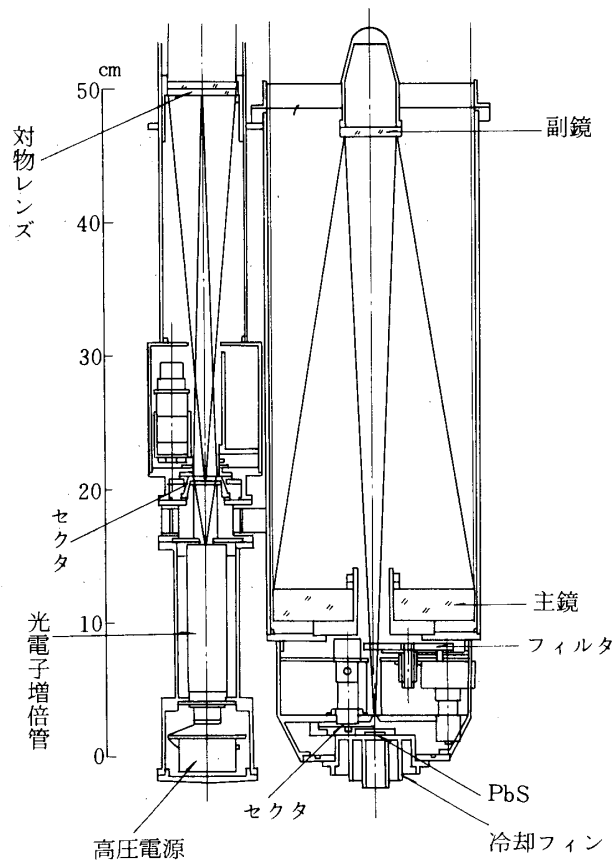


図1. 気球望遠鏡光学系

左がガイド鏡, 右が主望遠鏡



図 2. 気球望遠鏡の外観

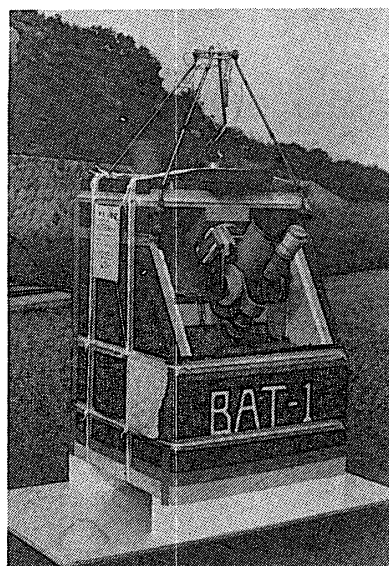


図 3. ゴンドラ全景

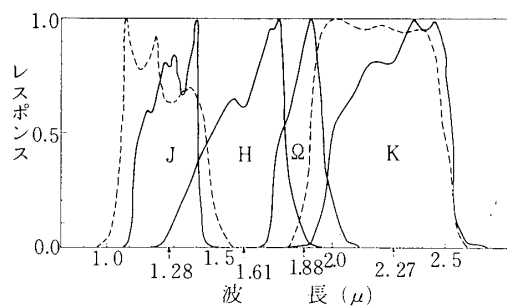


図 4. BAT-1測光系レスポンス曲線
 実線はBAT測光系，破線はJohnson
 測光系を示す。

主望遠鏡は口径15cmカセグレン式反射望遠鏡で，焦点距離は180cmである。主鏡・副鏡ともに球面鏡であるため球面収差が存在するが，最小錯乱円（径 $0'.7$ ）は充分ダイアフラム（径 $3'$ ）におさまっている。赤外測光装置は主鏡後方にとりつけられた4色のバンドパス干渉フィルタJ（ 1.28μ ），H（ 1.61μ ），Q（ 1.88μ ），K（ 2.27μ ）およびPbS検出器から成り立っている（かっこ内は白色光に対する測光系有効波長）。図4にBAT測光系の感度曲線がJohnsonの系[11]と比べて画かれているが，BAT系の方が巾が狭くかつ長波長よりである。この

4枚のフィルタはターレットに装填されゼネバ・ギヤによって順次回転交換する。PbS 検出器はフィンをつけ、自然冷却して ($-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$) 用いた。赤外信号は回転セクタを使って交流化し、同期アンプで増幅後、テレメータで地上に送られ、レコーダに記録される。

星の追尾はゴンドラ自体をよりもどし方式で規正した上で、田中の開発したスター・フォローを動作させて行なった。この原理は[12]に詳しいが、概略をのべると、5cm径、焦点距離30cmの屈折望遠鏡の焦点から少しずれた位置で半円形のセクタをまわし、ぼけた星像の光軸からのずれに対応する光電子増倍管の交流出力を位相検波して、赤経・赤緯2成分に分け、望遠鏡駆動系にサーボをかけるものである。

星をスター・フォローの視野中 (3°) に導くには、ポテンシオメータで望遠鏡の時角と赤緯を読み出しながら、地上コマンドで望遠鏡を操作する。

以上の観測装置の電源はその安定性からリチウム電池を用いた。

3. 観測経過

放球は宇宙航空研究所の協力のもとに、三陸大気球観測所において、1975年6月17日18時31分順調に行なわれた。なお、結露の予防のためにその直前までガイド鏡の鏡筒先端にまきつけたヒータで対物レンズをあたためた。気球は約90分後レベル・フライトに入り、以後25 km の定高度を真西方向にとんだ。

レベルに達したところで、 α Sco (M 11a) に望遠鏡を向け、装置が安定するのをまったが、この時点でゴンドラの振子運動によって、星が主望遠鏡ダイアフラムを出入りする影響が確認された。そのため以後の観測においては、スター・フォローの微調整をするなどして星がダイアフラム中に可能な限りおさまるように操作がなされた。

表2. 1975年6月観測星リスト

恒星名	赤 経	赤 緯	V *	K **	スペクトル型
α Boo	16 ^h 27.9 ^m	-26 ^o 23'	0. ^m 88	-3. ^m 86	M 11a
α Aql	19 49. 6	+8 48	0. 77	0. 27	A 7 IV
α Sco	14 14. 5	+19 19	-3. 06	-3. 03	K 2 III p

* 実視等級 ** 赤外 2.2 μ バンド等級

次に標準星として α Aql (A 7 IV) を観測したが、赤外域で暗いため (表2参照) 短時間の観測では有効なデータがえられる見込がないと判断し、再び α Sco を観測、のち標準星として α Boo (K 2 III) を1時間程観測した。

α Boo の観測の後、ゴンドラの方向規制がしだいに不調となり、 α Sco に一時向け得たものの、有効な観測継続が困難なまま、18日1時15分には望遠鏡の赤緯駆動モータが停止し、1時53分気球とゴンドラを切り離し、観測は終了した。

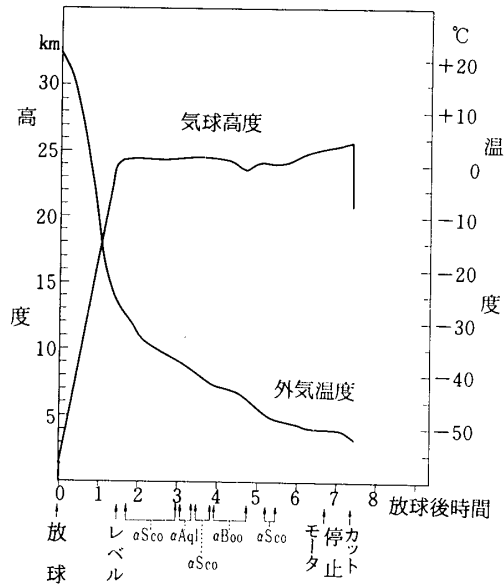


図5. BAT-1(1975) 高度・温度

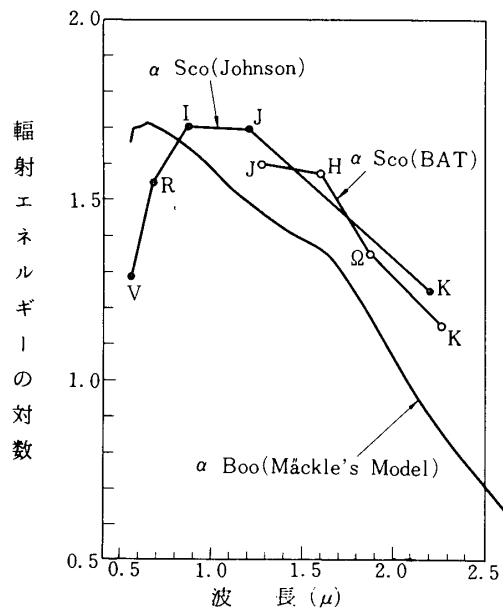


図6. α Scoのエネルギー分布

ゴンドラは山形県鶴岡市沖に着水し、18日中に無事回収された。

図5に気球高度および外気温度の変化を示した。モータは外気温が -50°C まで下がったところで停止しており、温度低下が停止の原因と考えられる。

4. 観測結果

データを解析して得られた $\alpha\text{ Sco}$ と $\alpha\text{ Boo}$ との輻射量の比は各バンドにおいて表3のようになる。以上の結果から、 $\alpha\text{ Boo}$ のエネルギー分布をあらかじめ知っていれば $\alpha\text{ Sco}$ のエネルギー分布曲線を得ることができる。 $\alpha\text{ Boo}$ は太陽よりも温度の低い星の標準星としてよく調べられているが[13][14]、ここではMäckeのモデル大気[14]を採用した。図6に $\alpha\text{ Sco}$ のエネルギー分布について、BAT-1による観測結果とともに、Johnsonの測光観測の結果を示す。

表3. $\alpha\text{ Sco}$ と $\alpha\text{ Boo}$ の輻射エネルギー F の比

	$J (1.28 \mu)$	$H (1.61 \mu)$	$\mathcal{Q} (1.88 \mu)$	$K (2.27 \mu)$
$\log F(\alpha\text{ Sco}) / F(\alpha\text{ Boo})$	0.152	0.203	0.195	0.286

これはいずれも Mäcke のモデルを基準にして、相対的にプロットしたものである。

BAT-1による結果は $\alpha\text{ Sco}$ の $H (1.61 \mu)$ 付近に突起があることを示している。これは早期M型星において、負水素イオン H^- が主要吸収源となっており、その連続吸収係数が 1.64μ 付近で極小値をとることと対応している。またJohnsonの結果と比べて J 、 K バンドで値が低くなっているのは、 $\alpha\text{ Sco}$ が可視域で0.9から1.8等にわたり、約1733日周期で変光することによると思われる。

なお、以上の解析においては、水蒸気等の上空大気による吸収の影響は考慮していないが、日周運動による星の高度変化はデータに有意な影響を与えていない。

今回の観測の成果は、 J 、 K バンドとその間にある比較的観測されることの少ない H バンド、および、そこに水蒸気の吸収帯があって地上からは観測することができない \mathcal{Q} バンドの4点を同時に観測し、 $J \sim K$ にわたる近赤外域におけるエネルギー分布の形を $\alpha\text{ Sco}$ という代表的な早期赤色巨星について得たことである。測光観測の性質上、今後ともより多くの精度の高いデータを得ることが必要である。

5. 今後の課題

本観測で最も問題となったのは、ゴンドラの振子運動による妨害であった。この妨害を受けない条件は、主望遠鏡のダイアフラム径から、星像径を差し引いた有効径を d とすると、星が光軸から $d/2$ 以上離れないことである。いま望遠鏡は静止した状態で正確に星に向けられているとすると、振子運動による星の見かけの運動の角速度は、光軸上で最大であるのに対して、フォロワの追尾角速度は光軸からの星のずれに起因する交流出力に対応しているので、フォロワ視野内で光軸から最もはずれたところで最大である。よって、星が $d/2$

だけ光軸から離れた時に、フォローの追尾角速度が振子運動による角速度よりも常に大であればよい。すなわち、 ω_f をフォロー、 ω_p を振子運動の角速度として、次の条件が満たされればよい。

$$\omega_f(d/2) > \omega_p(0). \quad (1)$$

振子運動を振巾 θ_0 、糸の長さ l の単振子と考え g を重力加速度とすると、

$$\omega_p(0) \sim \theta_0 \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2)$$

今回の観測では、 l はゴンドラをつるひもの長さとして30m、 d はダイアフラム径3'0から最小錯乱円の径0'7を差引いて2'3、 $\omega_f(d/2)$ は約3.0' /secであったから、(1)、(2)式より θ_0 は5'2よりも小さくしなければならない。したがってゴンドラ部では5'2よりも大きい振動が起っていたと思われる。今回の観測では前回の観測に比べ、フォローのレスポンスが悪く、 ω_f が小さくなっていたため問題が起きたものと推定される。因みに、前回の観測の際は $\omega_f(d/2)$ は22.5' /secと7倍強であった。

今後の対策としては、フォローのレスポンスを上げること、フォローの視野を3°から1°5にしてバックグラウンド・ノイズをへらしSN比を良くすること、およびゴンドラ内の重量配分を均等にして誘起振動を起しにくいようにすることがあげられる。

また、次回の観測では、工業技術院機械技術研究所の矢島氏等と協力して、固体撮像素子(レチコン)を使用したテレビ・カメラをファインダとして用いることも検討している。

謝 辞

気球の打上げ、その他の面で惜しみない協力をしていただいた西村純教授をはじめとする宇宙航空研究所大気球実験班の方々、また望遠鏡・ゴンドラ的设计・製作に尽力された三鷹光器株式会社中村氏に心から感謝の意を表する。

1976年5月31日

参 考 文 献

- [1] T. Tsuji: P. A. S. J. **18** (1966) 127
- [2] J. R. Auman: Ap. J. **157** (1969) 799
- [3] D. R. Alexander and H. R. Johnson: Ap. J. **176** (1972) 629
- [4] T. D. Faÿ and H. R. Johnson: Ap. J. **181** (1973) 851
- [5] F. Querci, M. Querci, and T. Tsuji: A. & Ap. **31** (1974) 265
- [6] H. L. Johnson: Bull. Tonantzintla and Tacubaya Obs. **3** (1964) 305
- [7] N. J. Woolf, M. Schwarzschild, and W. K. Rose: Ap. J. **140** (1964) 833
- [8] F. C. Gillett, F. J. Low, and W. A. Stein: Ap. J. **154** (1968) 677
- [9] H. L. Johnson and M. E. Méndez: Astron. J. **75** (1970) 785
- [10] R. W. Russel, B. T. Soifer, and W. J. Forrest: Ap. J. **198** (1975)L41
- [11] H. L. Johnson: Ap. J. **141** (1965) 923

- [12] 田中 濟：宇宙研報告 9 (1973) 244
- [13] D. E. Blackwell, R. S. Ellis, P. A. Ibbetsn, A. D. Petford, and R. B. Willis: M. N. R. A. S. 171 (1975) 425
- [14] R. Mäcke, H. Holweger, R. Griffin, and R. Griffin: A. & Ap. 38 (1975) 239