

気球望遠鏡BAT-1による低温度星の 近赤外域多色測光*

小 平 桂 一**・田 中 濟**・中 田 好 一**
渡 辺 鉄 哉**・尾 中 敬**・長谷川 哲 夫**

概 要

1974年から1978年にわたる15cm 気球望遠鏡BAT-1号(Balloon-Borne Astronomical Telescope)の5回のフライトによって、26個の恒星の近赤外域4色測光データがえられた。測光帯域の有効波長は低温度星に対し、 $J: 1.28 \mu\text{m}$, $H: 1.58 \mu\text{m}$, $\Omega: 1.87 \mu\text{m}$, $K: 2.22 \mu\text{m}$ である。観測星のスペクトル型はA0～M6におよぶ。 αCMa (A1V)を標準星として整約を行った結果をTsuji[1][2]の大気モデルと比較し、低温度星(K5～M6)大気の物理的パラメータ(有効温度 T_{eff} , 表面重力の対数 $\log g$, 乱流速度 ξ_t)を決定した。

はじめに

低温度星は主に近赤外域($0.7-3 \mu\text{m}$)で、そのエネルギーを放射している。したがって、この波長域での精度の良い測光観測が、低温度星の物理パラメータを決定する上で、大きな比重を持つことになる。ところが、これまでのところ、 $1 \mu\text{m}$ より長波長側では、適当な良い検出器がないこと、及び地上からでは地球大気の水蒸気による妨害があることなどが観測上の困難となっていた。特に、恒星の大気中で重要な役割を果たしていると考えられる水蒸気についての良質の情報を得ることは、地上からの観測ではむずかしい。われわれは、これらの問題点を考慮し、低温度星の物理量を精度良く決定するという目的で、気球高度(25km)からの恒星の近赤外測光を計画し、1974年より1978年まで5回のフライトを行ってきた。これらの観測から21個の低温度星、及び5個の比較星の地球大気の水蒸気の妨害のない良質な近赤外測光データが得られ、整約の結果、低温度星の物理量、特に有効温度について、まとまったものが得られたので、ここで、BAT-1計画全体についてのまとめを報告する。個々の装置、及びフライト、またその予備的なデータについてはすでに色々な形で報告があり([3]～[9])、データ解析についても、Tanaka[10]の報告があるが、ここでは、まずBAT-1計画全体をながめて、装置の改良点、及び問題点を整理し(第1章)、後半で、得られたデータから引き出される低温度星の物理量についての議論を行う(第2章)。

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東京大学理学部

第1章 観測装置および観測経過

1. スター・フォロワの開発と改良

気球から星を観測する場合、まず解決しなければならない問題は星の自動追尾である。われわれは1968年より太陽赤外スペクトルの観測を行うため、サン・フォロワを開発し、改良を重ねてきた。1972年に至ってその追尾精度は $10''$ 程度まで向上し、きわめて安定な制御が可能になった。これに力をえて、同年スター・フォロワの試作を行い、テストに成功した。その詳細は文献[3]を参照していただくのがよいが、ここでもその概要をのべる。

試作したフォロワは8 cmの屈折赤道儀を改造したもので、センサとして半円形セクタと光電子増倍管を使用している。その原理を図1, 2に示す。焦点を少しはずれたまいる星像を半円形の回転セクタで切ると、星像の中心がセクタの回転軸と一致していれば交流成分はないが、星像の位置がずれるに従って、交流成分がふえることを利用する。回転セクタに 90° はなれた位相検出器をつけ、光電子増倍管の出力を位相検波すれば、赤経・赤緯方向に分離した出力がとり出せる。図3はそのレスポンス曲線である。赤経・赤緯各軸には差動ギヤを介して各一對のマイクロモータがとりつけられており、バランス状態では一定のバイアス電圧により各モータが逆方向に回転し出力はゼロになっている。しかし、中点の電圧が変化するとそれに応じたアンバランスが生じ、軸が回転する。このようにして、モータの不感帯をさけることにより、リニアリティを向上させることができた。

このフォロワは、1974年BAT-1の第1回フライトで実用化された(図4)。実用化にあたって、観測星の光度に相当のひらきがあることに対応し、自動利得調整回路AGCを組み込んだ。AGCは対数アンプを使い、光電子増倍管出力の直流成分(これは星の光度に比例する)の10倍で交流成分を割り算するという方法によった。AGCによって生じた問題点

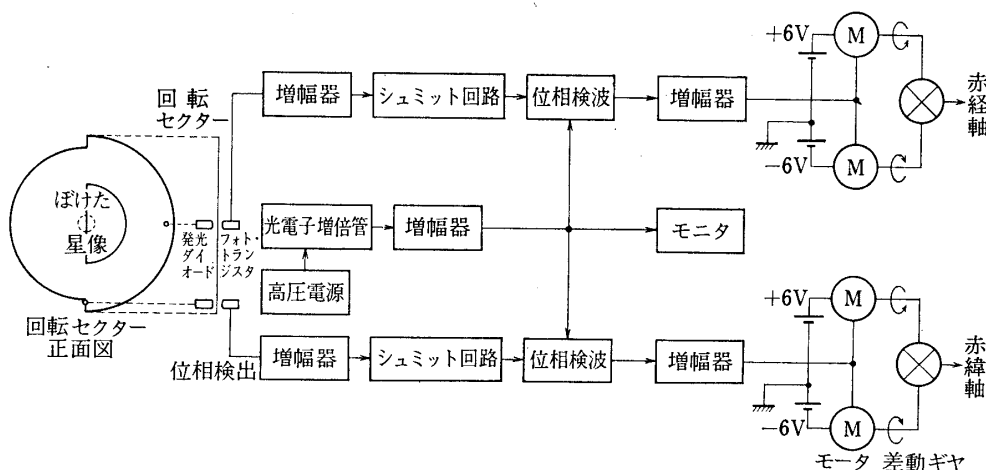


図1 試作スター・フォロワ・ブロック・ダイアグラム。実用機では自動利得調整回路AGCが加わり、第2回フライトからはバイアス電圧が $\pm 6V$ から $\pm 7.5V$ となった。

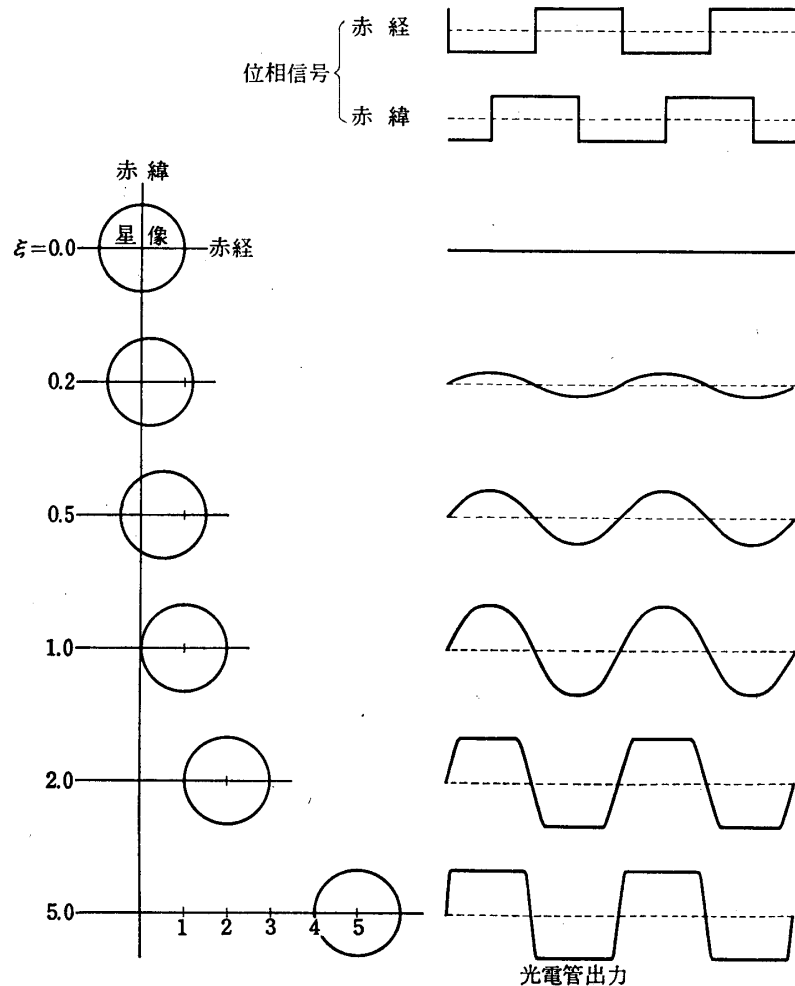


図2 スター・センサ出力波形. ξ は星像半径を単位とした星像中心のずれ.

はスカイ・バックグラウンドの影響である。星をとらえやすくするにはスター・センサの視野は広いほどよい。気球ゴンドラは、宇宙航空研究所西村研究室で開発された磁気（GA）センサを使った“よりもどし規正”により $\pm 1^\circ$ 程度の精度で方位制御がなされている。赤道儀の各軸にはポテンシオメータがとりつけられ、望遠鏡の姿勢を読み出すことができる。総合的な読み出しエラーは $\pm 1.5^\circ$ 程度と見積られるので、第1回フライトにおいては、センサの視野を 3° とした。ガイド望遠鏡は口径5 cmの屈折式で、光電子増倍管としてS20特性の浜松テレビ製R 374を使用した。が、 3° の視野に入ってくるバックグラウンドの量は最良の暗夜でも3等星に相当する。気球で上空に行った時の状態はこれに相当するが、東京での地上テストはこのままでは不可能であった。結局、AGCをはずして交流成分のみをとるという試作機と同じ方法でテストが行われた。1975年は地上テストで視野を狭くすることを

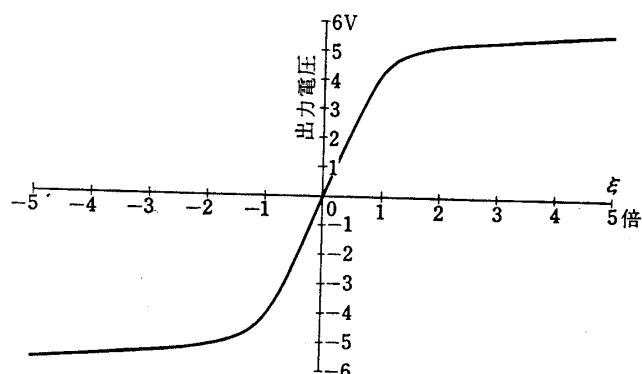


図3 スター・フォロー・レスポンス・カーブ. 横軸は星像半径を単位とした星像中心のずれ.

試み, 1976年からは機械技術研究所の協力により固体イメージ素子レチコンを使用したモニタ・テレビ・カメラがつけられたことにより[11], 本観測でも視野を 1.5° とした. 1978年の最終フライトではさらに 1° の視野がテストされ, 初年度にくらべて2~3等暗い6等に近い星までフォローさせることに成功した. これはまさにバックグラウンドの減少に対応する(視野面積 $1/9$, 等級で2.4等).

フォローの追尾精度は, 試作段階から最終フライトまでそれほど向上したとはいえない. 試作フォローでも $\pm 0.1'$ 角程度のフォローが実現しており, 実用機でも地上テストでは同程度の精度であった. しかし, フライト・テスト(第1回フライトは赤外測光用アンプ故障に

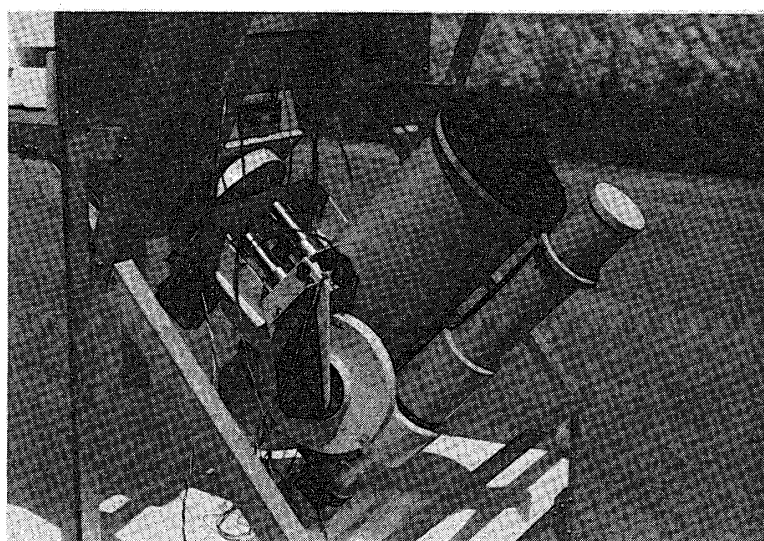


図4 気球望遠鏡BAT-1 オリジナル・スタイル

より、实际的にフォロウのフライト・テストとなった)では、条件のよい場合には $\pm 15''$ 角程度のフォローが実現したが、大部分は $\pm 1'$ 角、悪い場合は $\pm 2'$ となった。この原因は、ゴンドラの振り子運動とのカップリングにある。望遠鏡というかなり質量のあるものが振りまわされるのであるから、その反動がゴンドラに伝わり振動を起こすことは当然考えられる。この問題は後に機械技術研究所の矢島氏によって解析され、ゴンドラにダンピング要素がない場合サーボが不安定になることがわかったが、実際は、ゴンドラにはわずかではあるが空気抵抗やつりひもによるダンピングがあり、これによるわずかな安定領域にサーボ系を調整する試みがなされたことになる。フォロウの時定数を主にきめているものは、センサのセクタ面における星像の直径である。大きい場合は、図3のスロープがゆるやかになり時定数が増える。小さすぎると、モータ系の時定数(主として差動ギヤのガタによる)とのカップリングで発振する。各フライトごとに種々の星像サイズが試みられた(星像半径 $2' \sim 15'$)が、結局完全な解はみつからなかった。フォロウ・レスポンスのリニア部分の拡大のため、第2回フライトから差動モータにかけるバイアスを $\pm 6\text{ V}$ から $\pm 7.5\text{ V}$ にあげたが、これは一応効果があった。ゴンドラの振り子運動はつりひもによるもの(周期 ~ 10 秒)と、ゴンドラ自体のもの(周期 ~ 2 秒)とがあるが、前者はフォロウのレスポンスにくらべて十分遅いと考えられる。ゴンドラはよりもし規正がかけられているため、その時定数も考えなければならぬ。よりもし規正本来的時定数は1分程度にえらばれているので問題ないが、そのセンサとして使われているGAセンサが、ゴンドラの方位だけでなく仰角方向の変位にも感ずるため、ゴンドラに振り運動が生ずると、それに応じた速い振動を方位制御出力として出してしまう。これは、制御出力に高次の微分項が含まれていることと関連しており、各フライトごとによりもし規正の“かたさ”を変える試みがなされたが、これも完全な解決には至らなかった。

1978年、最終フライトにおいて特記すべきことは、架台の形式を赤道儀式から経緯台式に変えたことである(図5)。赤道儀式は、天体の時角と赤緯を与えれば天体がとらえられることと、イメージが回転しないので2軸で3軸制御の効果がえられることで採用されたのであるが、架台やゴンドラの形状をどうくふうしてもアクセスできる星野が南天にかぎられてしまうという難点があった。天頂付近(天頂距離 20°)は気球があるし、東西はゴンドラの柱でさえぎられてしまう。スター・センサや赤外測光器の感度から観測できる星は明るいものにかぎられるが、その上星野に制限があることは大きな障害となった。最終フライトでは、次に予定している30cm気球望遠鏡BAT-2が経緯台式であることの予備テストもかねて、経緯台式に改造を行った。望遠鏡の姿勢を高度、方位角で与える問題はマイクロコンピュータが解決したが、これについては後にのべる。経緯台化にともなって、望遠鏡の方位方向の自由度を $\pm 30^\circ$ に制限し、GAセンサを回転させることによって、ゴンドラ自体の向きをかえ、アクセスできる星野を天頂付近以外全天に広げた。しかし、ここで生じた問題がいくつかある。まず、架台の形が変わったことによって熱収支の状態が変化し、望遠鏡の温度が上昇した。これについては赤外測光装置の項でさらに述べることにして、もう一つは、オフセット量の問題である。BAT-1号設計にあたって、ガイド鏡と主望遠鏡の光軸が温度変化のため上空でずれるのではないかと心配から、フォロウ制御出力にあらかじめバイアスを与え、

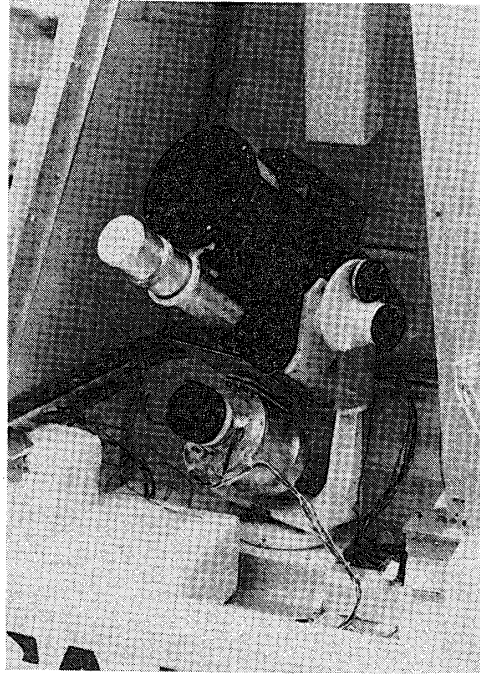


図5 気球望遠鏡BAT-1 最終スタイル

センサの光軸を見かけ上少しずらすくふうを行った。これは、第1～4回フライトにおいてはむしろフォロワのあばれの影響を少しでもへらすための調整機構として使っていたが、5回フライトではこれが本質的に必要になった。光軸のずれは設計がうまくいったためか予想に反してほとんど問題とならなかったが、星の日周運動のキャンセラとして役立つことになった。赤道儀式では星の日周運動の影響は一方向一定量であるから、星を使ってガイド鏡と主望遠鏡の光軸を調整しておけば、日周運動に対応するオフセット量はこの光軸調整に自然に含まれてしまう。モータにはそのずれに対応するバイアスが常にかかり、ほっておけば日周運動を追尾するはずである。しかし、経緯台式では日周運動の方向は方位高度によって変化し、時々刻々オフセット量をかえる必要が生じてくる。これも後に矢島氏よりサーボ系に積分回路を入れることにより補正できることが指摘されたが、最終フライトにおいてはオフセット調整によって行わざるをえなかった。

4節でのべるように、1～3回のフライトではモータにヒータをつけなかったため、氷りついてしまうというトラブルが生じた。サーボ系に使われているマイクロモータは差動式のためつねに回転している。その発熱が200 mW程度あり、モータ自体、気球用低温仕様のもので断熱材でおおっているため、周囲が -50°C 程度ではほとんど問題ない。しかし、上空の温度は明け方は -55° 程度となり、一つの天体を長い間観測していると、望遠鏡を動かすことがないから発熱も減り、まず差動ギヤが氷りつくらしい。ヒータをつけることは、放球時の過熱、望遠鏡への伝導による赤外バックグラウンドの増加など問題もあるが、第4、5回

フライトでは差動ギヤを含めたモータ・ユニットを本体から絶縁し、ハンダゴテ・ヒータにより差動ギヤを約 2 W で加熱，薄い断熱材でおおった。5 回フライトでは G A センサ回転テーブルのモータも同様の処置をとったが，きわめて好成績であった。

2. 赤外測光装置

赤外測光装置は，主望遠鏡の焦点部に組み込まれている。主望遠鏡は 15 cm カセグレン式反射望遠鏡で，主鏡の焦点距離 45 cm (F 3)，合成焦点距離 180 cm (F 12)，副鏡口径 3.7 cm である。主鏡および副鏡が共に球面であるため，焦点において最小錯乱円の直径 43" (0.38 mm) の球面収差がある。ガイド鏡も含めた光学系を図 6 に示す。全体は逆フォーク式赤道儀に乗っている (図 4)。

赤外測光器はフィルタ・タレット，チョッパ，赤外検出器，同期アンプからなる。フィルタ・タレットには 5 枚のフィルタが組み込まれるようになっている。フィルタは干渉フィルタで，第 1～3 回フライトでは 4 枚 (1 枚分は黒板でふさぎバックグラウンドのリファレンスにした)，第 4，5 回フライトでは 5 枚のフィルタが使用された。その透過率曲線を図 7 に示す。一部のフィルタは破損のため交換，また経年変化のため各フライトごとに透過率に多少

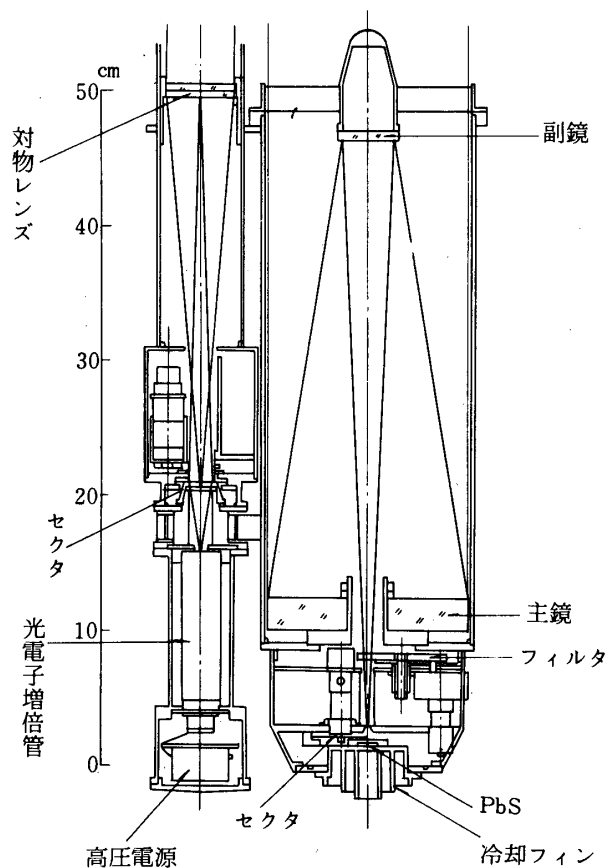


図 6 15 cm 気球望遠鏡 BAT-1 号光学系。左がガイド鏡，右が主望遠鏡。

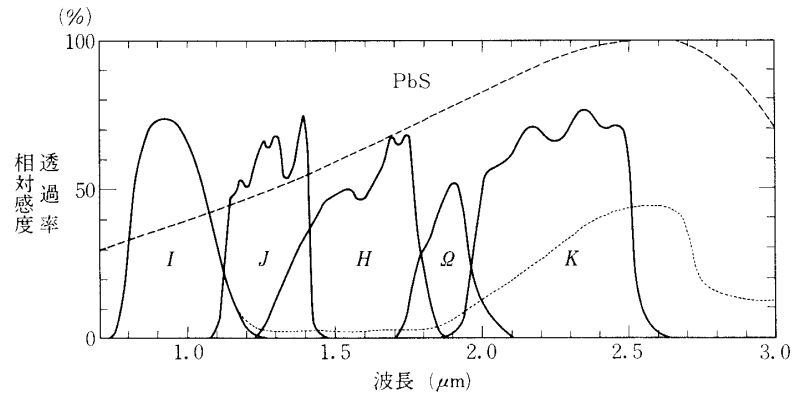


図7 フィルタの透過率と PbS の相対感度

の変化がみられるが、本質的な差はないと思われる。フィルタの名前は *J*, *K* は Johnson [13] の測光系, *H* は Lee [14] の測光系に準じてつけられているが、透過域、有効波長は少しずつ異なる。もともと地上観測ではフィルタの透過曲線だけでなく、地球大気の透過率もきいてくるので、そのままでは気球観測と比較できない。それが特に顕著なのが *Q* で、これは地球大気中の水蒸気によって地上観測できないバンドに対応している。フィルタ単体の有効波長は *J*: $1.28 \mu\text{m}$, *H*: $1.59 \mu\text{m}$, *Q*: $1.88 \mu\text{m}$, *K*: $2.25 \mu\text{m}$, であるが、天体のエネルギー分布を考慮すると変化し、表2に示される値となる。*I* フィルタは第4, 5回フライトのみに用いられたものであるが、図7に示すように $2 \mu\text{m}$ より長い波長に大きなもれがあり、整約には使用しなかった。主透過域の有効波長はフィルタ単体で $0.95 \mu\text{m}$ である。フィルタ・タレットはマイクロモータとジェネバギヤにより、15秒ごと（設計値）に順次切りかえられる。

チョッパは6枚羽根のセクタで、マイクロモータにより 150 Hz のチョッピングを行う。位相検出装置として、発光ダイオードとフォト・トランジスタによるフォト・インタラプタを使用した。ただし、1, 2回フライトでは光源として電球が使われた。この事情はフォロー・センサの位相検出でも同様である。また、上空では冷えて回転数が落ちるので、4, 5回フライトでは抵抗器をヒータとしてとりつけた。4回フライトの 450 mW はあたためすぎとわかり、5回フライトでは 150 mW とした。これはフォロー・チョッパ、フィルタ・タレットのモータにも共通である。

赤外検出器は PbS を使用した。型番はインフラレッド・インダストリー B3-SA2 である（新型番 1302）。これは、 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ の感光面をもつ常温用の素子である。PbS のうしろに放熱用のヒレをつけ、上空の低温（約 -50°C ）で自然冷却して使用した。ただし、最終回フライトにおいては超小型サーモ・モジュール（ $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ ）によって強制冷却した。結露防止のため、PbS およびサーモ・モジュールは真空のカプセルに入れ、放熱のため厚さ 10 mm の銅板にとりつけた。熱は鏡筒に伝わり、そこから放射の形で放散する。計

算では、温度上昇は 5°C 、冷却素子により 50°C 冷却され、最終的に PbS の温度は -95°C となるはずであった。地上実験では PbS の暗抵抗や感度の測定から、ほぼこれが実現することが確かめられたが、上空では思わぬ温度上昇要因のあることがわかった。これは、従来の逆フォーク赤道儀では、架台全体がまわりの温度で冷却されていたのに対し、経緯台としたことにより、ゴンドラ下部に収納されたエレクトロニクス系の熱が架台を通じて伝わり、架台が -30°C 程度になってしまったことによる。結局、最終的には従来と同じ -60°C 程度に冷却されたにとどまったが、もし自然冷却のままでは架台と同じ温度となり、感度の点で不利になったであろう。

ダイヤフラムは、第 4 回フライトを除いて視野 $3'$ (径 1.57 mm) とした。第 4 回フライトではフォロウの追尾の悪さを少しでもカバーするため、ダイヤフラム径を $5'$ としたが、場所による感度ムラが出て効果はなかった。ファブリ・レンズは焦点距離 5 mm のクォルツを使用した。

同期アンプは高入力インピーダンス・低ノイズ・プリアンプ、フィルタ回路、アテネッタ、位相検波回路、出力回路からなる (図 8)。位相信号はシュミット回路によって整形され検波回路に入る。プリアンプは PbS のバイアス用電源、負荷抵抗を含むが、バイアスは 4 回までは 22.5 V 、最終回は 45 V 小型積層電池を用いた。負荷抵抗も 4 回までは $4.7\text{ M}\Omega$ 、最終回は $10\text{ M}\Omega$ とした。プリアンプは初回フライトでは FET を用いたモジュール型オペアンプを使用した。2 回以後はモノリシック IC に変った。初回フライトではテスト中も IC 不良が多発し (フォロウ・アンプも含む)、放球直前にも IC が故障、充換のうえ放球したが、上昇中にまた IC が故障し赤外測光観測が不可能になった。これは放球待期時に断熱材でくるんだアンプ・ケースの中が高温となること、アンプ内に仕込んだ温度センサから知れたが、それによるダメージであろう。この頃の IC が劣悪であったことにもよるが、第 2 回フライトからは IC はすべてミリタリー・ランクを使用し、放球直前はアンプ・ケースの断熱材の一部に窓を作るなどの対策を行った。また、初回フライトでは電源はすべてマンガン電池を使用したため、使用始めは電圧が高く、アンプ内の定電圧回路の熱出力が多いことも原因とみて、以後はすべてリチウム電池を使用した。リチウム電池は出力電圧が一定であり、容量も大きいので、電源の軽量化に役立った。

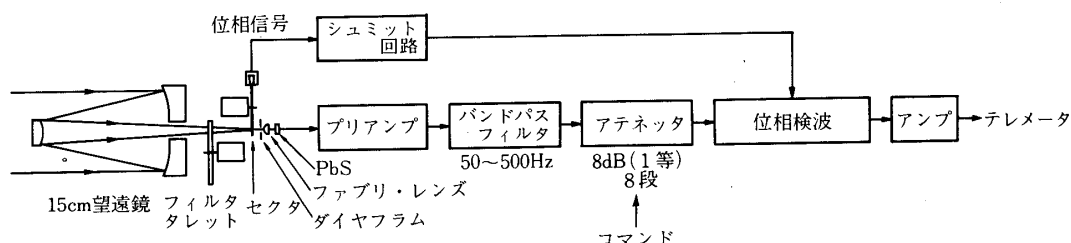


図 8 赤外測光系ブロック・ダイアグラム

3. テレメータ・コマンド系

テレメータは、1680 MHzのFM-FM標準方式のうち6チャンネルを使用した。われわれの専有チャンネルは、フォロー・モニタ、赤外、望遠鏡姿勢2チャンネルの計4チャンネルである。望遠鏡姿勢には時角・方位角のほか、校正のための電圧、温度も時分割で含ませる。初回フライトでこの時分割が星を補そくする場合にきわめてわずらわしいことがわかり、次回からは常に時角・方位角が出るモードを作り、これを共用コマンドの切換表示にも使用した。

最終回フライトでは望遠鏡の方位、高度角、およびゴンドラ (GA) の方位角をより正確に知りたいため、PCM方式をとり入れた。テレメータは非直線性とゼロ・ドリフトのため、精度は1%程度である。くわしい整約では校正も可能であるが、星をとらえる時点では間に合わない。ポテンシオメータそのものの精度は0.1%程度あるので、2進10ビットのADコンバータでデジタル化し、これをPCMにエンコードしてテレメータの14.5 KHz帯に乗せた。データは時分割とし、方位角 $\times 2$ 、高度のほか、赤外データを0.2秒のサイクルで伝送し、マイクロコンでCRT上に表示させた (図9, 10)。マイクロコンのメモリにはプログラム・スター128個のデータが入っており、これを番号で呼び出すことができる。気球の経度、緯度を適時与えれば、時計の読みから恒星時を求め、方位角、高度の計算を行い表示する。PCMで送られる情報はデコードされ、校正を行った後、表示がなされる。望遠鏡の姿勢と計算が合致するようにコマンドをすれば、レチコン・カメラに星が入ってくる (レチコン・カメラによる情報の処理は[12]参照)。PCM信号はデータ・レコーダに入れ持ち帰

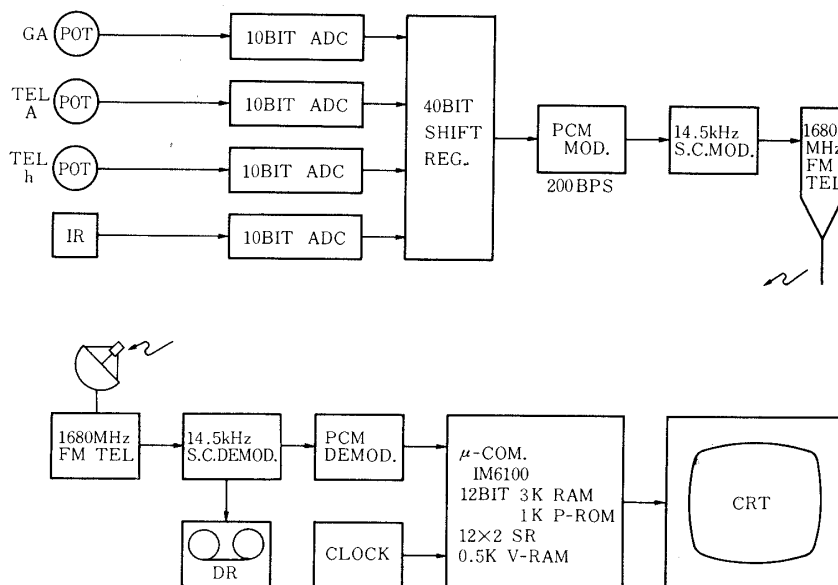


図9 PCM伝送システム・ブロック・ダイアグラム

```

*BAT-1 FIFTH FLIGHT*
Balloon  LONG= 140.58
          LAT = 38.56
Clock     JST = 1:24.7
          LST = 0:30.2
Gondola   AZIM=- 90.00
Telescope AZIM=- 12.23
          ALT = 60.12
Star      No. 46  ρ Per
          R.A. = 3:03.8
          DECL= 38.45
          AZIM=-101.57
          ALT = 60.12
Ag+At-As=- 0.26
Ht-Hs=    0.00
P.A.=    77.31

```

図10 CRT表示の例

り、現在はMTに移しかえられている。

コマンドは6チャンネルを2系統使用した。われわれの専用チャンネルはこのうち8チャンネルである。コマンドの項目は赤外ゲイン切換、フィルタ回転ON、OFF、高圧(センサ)ON、OFFのほか、望遠鏡の東西南北の制御に4チャンネル、これとオフセットを切りかえるために1チャンネルである。望遠鏡の粗動とオフセットの切換はテレメータの望遠鏡姿勢専用表示と時分割表示に対応している。最終回フライトではコマンド・システムが変わって15チャンネルとなったが、余分の3チャンネルのうち1チャンネルはレチコン・カメラに使用し、2チャンネルをGAセンサの方位コントロールに使用した。

4. 観測経過

5回にわたるフライトの日時などを表1に示す。図11は各回のおおまかなフライト・カー

表1 BAT—フライト・テーブル

回数	1	2	3	4	5
気 球	B ₅ — 59	B ₅ — 63	B ₅ — 70	B ₅ — 81	B ₅ — 87
放 球 日	1974.9.13	1975.6.17	1976.5.29	1977.9.16	1978.9. 1
放球時刻	21 ^h 11 ^m	18 ^h 31 ^m	18 ^h 18 ^m	17 ^h 44 ^m	18 ^h 16 ^m
観 測 始	22 48	20 07	20 13	19 23	20 26
観 測 終	翌 3 45	翌 1 42	翌 2 12	翌 3 19	翌 4 28
カ ャ ッ ト	翌 12 24	翌 1 53	翌 5 04	翌 5 46	翌 4 56
回収場所	気仙沼市東方海上	鶴岡市西方海上	鳥海山山ろく	月山山ろく	横手盆地
回収日付	1974.9.14	1975.6.18	1976.6. 1	1977.9.22	1978.9. 5
観測星数	7	3	10	14	22
測光星数	0	2	7	13	17

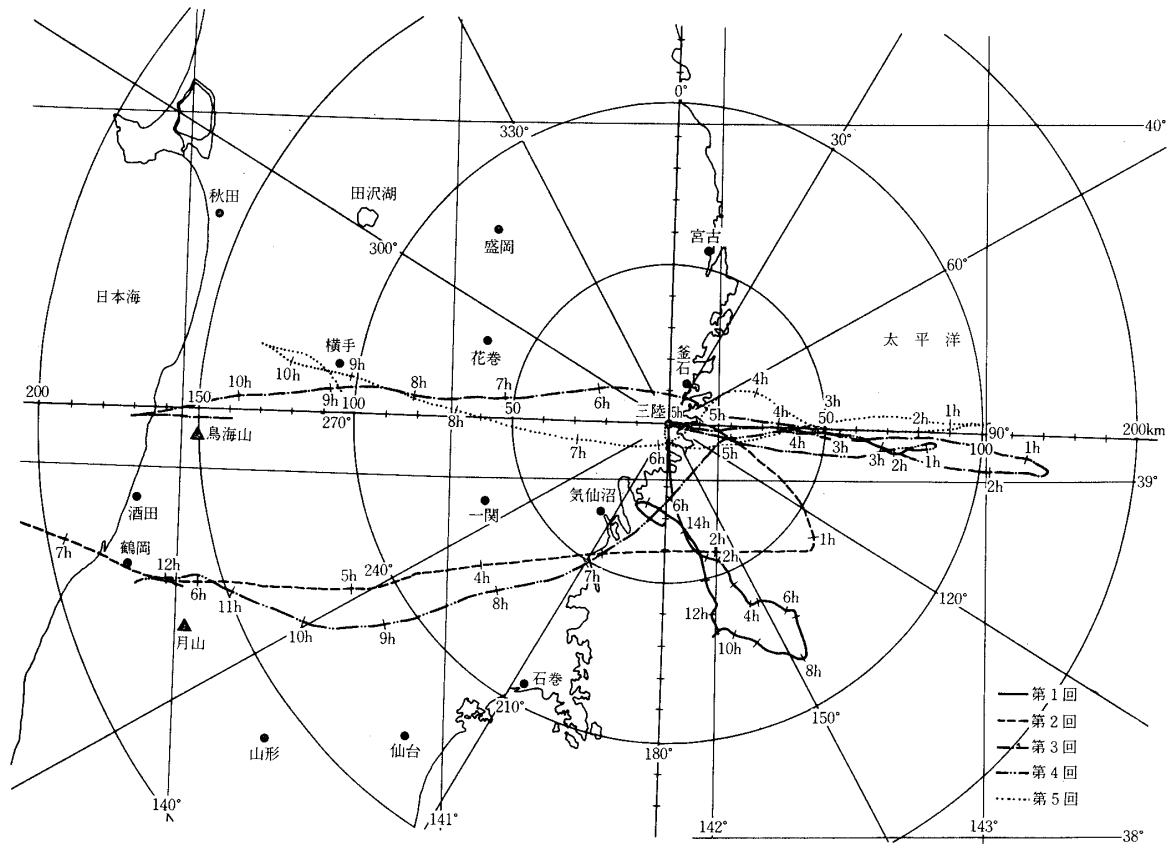


図11 航跡図

ブである。到着高度は各回ともほぼ25kmであった(図12)。きわめて幸運なことに全回収に成功し(初め2回は海上回収)、比較的軽微な破損で済んでいる。

観測開始時刻は初回のアンプ故障による遅れをのぞけば20時頃となっているが、終了時刻はいろいろである。初期のころは冷却のためモータが停止したことで観測を終了している。第4回フライトではフォロワ・センサの光電子増倍管ケースのエアタイトもれのため、高圧の放電が起っている。これはOリングのゴムが収縮したためで、シリコンゴムを使用して最終フライトを行った。

観測された星の数は回を追って増えているが、これは3回目はレチコン・カメラがつき、5回目はアクセス可能星野の増大とPCM伝送CRT表示の効果など、装置のたゆまざる改良と安定化によると考えられるが、われわれの熟練も大きな要素である。そしてこのことを可能としたのは装置の好条件での回収であり、そのために協力して下さった多くの市民の方々に深く感謝したい。

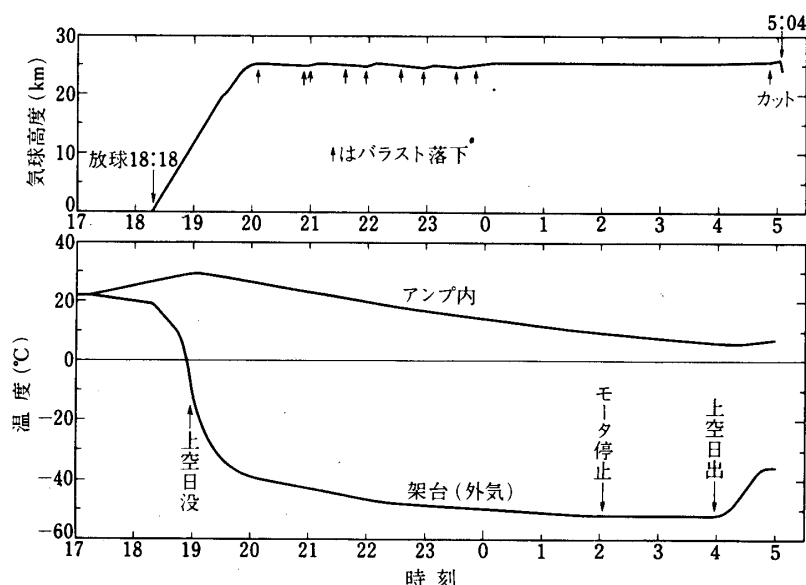


図12 気球高度と温度変化の一例. 1976. 5. 29 第3回フライト (B₅—70).

第2章 データ解析

1. 整 約

良好なデータがえられなかった第1, 第2回フライトを除く1976年から78年にわたる3回のフライトの結果, データの得られた星は, K 2—M 6型の巨星・超巨星が21星, A 0—G 8型の比較星が5星の合計26星である. その内, α CMa は以下の整約で標準星として用いられる. 特に断り書きの無い限り, 各等級はBAT—1系によるものとする. 整約手続きは次のとおりである.

i) 各フライトにおける測定器系の感度の時間変化は, 第2標準星を繰り返し観測することによって校正した.

ii) 異なる飛揚実験相互間の校正は, 各回共通に観測された非変光星のデータの系統差を最少とするように行った.

iii) 自然等級 $= -2.5 \log (\overline{F}_\lambda)_i$ ($i = J, H, Q$, および K) は, α CMa のエネルギー分布をもとに導き出した. ここで $(\overline{F}_\lambda)_i$ は帯域 i の平均エネルギー流束である. α CMa のエネルギー分布自身は, Hayes と Latham [15] による α Lyr の観測, および Latham [16] による $\lambda \lesssim 10800 \text{ \AA}$ の α Lyr と α CMa の相対観測に最も良く合うように, Kurucz *et al.* [17] の大気モデル ($T_{\text{eff}} = 10,000 \text{ K}$, $\log g = 4.0$) を選んで算出した.

iv) BAT—1系の測光等級は, A 0 V型星に対する Kurucz *et al.* [17] のモデル ($T_{\text{eff}} = 9,500 \text{ K}$, $\log g = 4.0$) で色指数が0となるように定め, 絶対値の原点は α CMa の J 等級が Johnson 系 [18], [19] と等しくなるように決めた.

可視域測光で第一標準星として利用される A 0 V型星 α Lyr の BAT—1 データは, 十分

表2 自然等級と測光等級

星 名	HR番号	スペクトル型	自 然 等 級 @				測 光 等 級			
			<i>J</i> (1.28)	<i>H</i> (1.58)	<i>Q</i> (1.87)	<i>K</i> (2.22)	<i>J</i>	<i>J-K</i>	<i>H-K</i>	<i>Q-K</i>
α Cet	911	M2 III	0.81	0.98	1.28	1.99	-0.53	1.00	0.39	-0.01
ρ Per	921	M4 II-III	0.52	0.67	0.87	1.62	-0.82	1.08	0.45	-0.05
τ^4 Eri	1003	gM3	1.34	1.49	1.71	2.47	0.00	1.05	0.42	-0.06
γ Eri	1231	M0 III	1.34	1.60	1.87	2.66	0.00	0.86	0.34	-0.09
α Tau	1457	K5 III	-0.63	-0.38	-0.02	0.71	-1.97	0.84	0.31	-0.03
α Aur	1708	G8 III+F?	-0.05	0.45	0.94	1.68	-1.39	0.45	0.17	-0.04
α Ori	2061	M2 Iab	-1.61	-1.37	-1.09	-0.37	-2.95	0.94	0.40	-0.02
η Gem	2216	M3 III	1.08	1.28	1.63	2.29	-0.26	0.97	0.39	0.04
α CMa	2491	A1 V	0.00*	0.80**	1.50	2.20	-1.34*	-0.02*	0.00**	0.00
α CMi	2943	F5 IV	1.01*	1.74**	2.40	3.06	-0.33*	0.13*	0.08**	0.04
δ Vir	4910	M3 III	1.31	1.45	1.78	2.47	-0.03	1.02	0.38	0.01
α Boo	5340	K2 III P	-0.89	-0.59	-0.14	0.54	-2.23	0.75	0.27	0.02
σ Lib	5603	M4 III	1.11	1.23	1.52	2.22	-0.23	1.07	0.41	0.00
δ Oph	6056	M1 III	1.14	1.32	1.60	2.35	-0.20	0.97	0.37	-0.05
α Sco	6134	M1 Ib	-1.42	-1.24	-0.96	-0.24	-2.76	1.00	0.40	-0.02
g Her	6146	M6 III	0.87 ⁺⁺	0.88 ⁺⁺	1.30 ⁺⁺	1.84 ⁺⁺	-0.47 ⁺⁺	1.21	0.44	0.16
α Her	6406	M5 II	-0.92	-0.78	-0.54	0.14	-2.26	1.12	0.48	0.02
α Lyr	7001	A0 V	1.40 ⁺ *	2.22 ⁺⁺⁺	2.83 ⁺	3.55 ⁺	0.06 ⁺ *	0.03 ⁺ *	0.07 ⁺⁺⁺	-0.02 ⁺
R Lyr	7157	M5 III	0.70 ⁺⁺	0.85 ⁺⁺	1.12 ⁺⁺	1.75 ⁺⁺	-0.64 ⁺⁺	1.13	0.50	0.07
γ Aql	7525	K3 II	1.62	2.00	2.27	2.97	0.28	0.83	0.43	0.00
α Aql	7557	A7 V	1.69*	2.42**	3.07	3.81	0.35*	0.06*	0.01**	-0.04
T Cep (JD 244 3768.0)	8113	gM6 e-9 e	1.22 ⁺⁺	1.25 ⁺⁺	1.62 ⁺⁺	2.11 ⁺⁺	-0.12 ⁺⁺	1.29	0.54	0.21
ϵ Peg	8308	K2 Ib	1.49	1.87	2.12	2.85	0.15	0.82	0.42	-0.03
μ Cep	8316	M2 Ia	0.80	1.03	1.28	1.89	-0.54	1.09	0.54	0.09
λ Aqr	8696	M2 III	1.78	1.95	2.12	2.91	0.44	1.05	0.44	-0.09
β Peg	8775	M2 II-III	0.34	0.46	0.77	1.51	-1.00	1.01	0.35	-0.04

* 有効波長は 1.26 μm .@ () 内は有効波長 (μm)* * 有効波長は 1.56 μm .

+ 積算時間不十分.

++ 絶対値には不完全な追尾のための誤差が含まれている.

な精度では得られなかった。

整約の結果得られた自然等級および測光等級を表 2 に示した。測光等級のうち、 J 、 H 、 K については Johnson - Lee 系での地上観測データのある星もあるので、図 13 で比較を行った。相対差は平均の関係のまわりに最大 ± 0.12 等級の散らばりを見せているが、その原因の一部は、しばしば生じた BAT-1 観測における追尾障害にあると思われる。しかしながら、この種の障害の色指数決定への悪影響は少なく、図 14 に見られるように、平均関係からの最大偏差は $(H-K)$ で ± 0.04 等級、 $(J-K)$ で ± 0.07 等級であり、一般に色指数の推定誤差は ± 0.05 等級程度と考えられる。Johnson - Lee 系との平均関係は、

$$(H-K)_{\text{Lee}} = 0.73 (H-K) - 0.04,$$

および

$$(J-K)_{\text{Johnson}} = 1.05 (J-K) + 0.03$$

である。

2. 観測の色指数系列

様々なスペクトル型に対して、BAT-1 で観測されたエネルギー分布の様子を図 15 に示した。近赤外域以外の波長域におけるエネルギー分布の概形も、Johnson *et al.* [19] の地上からの多色測光データによって加えてある。これを見ると、晩期型星のエネルギー分布曲線は、 H -イオン吸収の極小に当る H バンドのあたりで山を形成するが、それが Q バンドまでも延びて幅広い凸状をなしていることが知れる。しかも、この傾向はスペクトル型が K から $M5$ へと進むにつれて強くなり、それより晩期の g Her や T Cep では再び弱くなるのが見られる。特にこれが再び弱くなるのは、恒星大気中の水蒸気形成のためと考えられる。この図は、

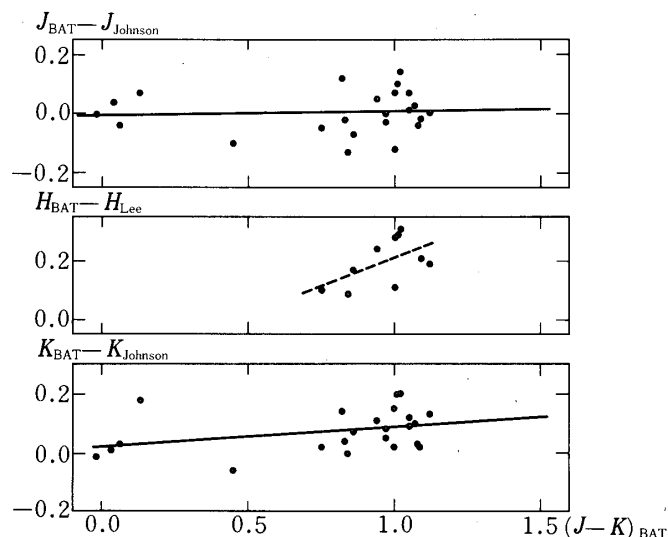


図 13 BAT-1 系と Johnson - Lee 系の測光等級の比較。直線は平均関係を示す。

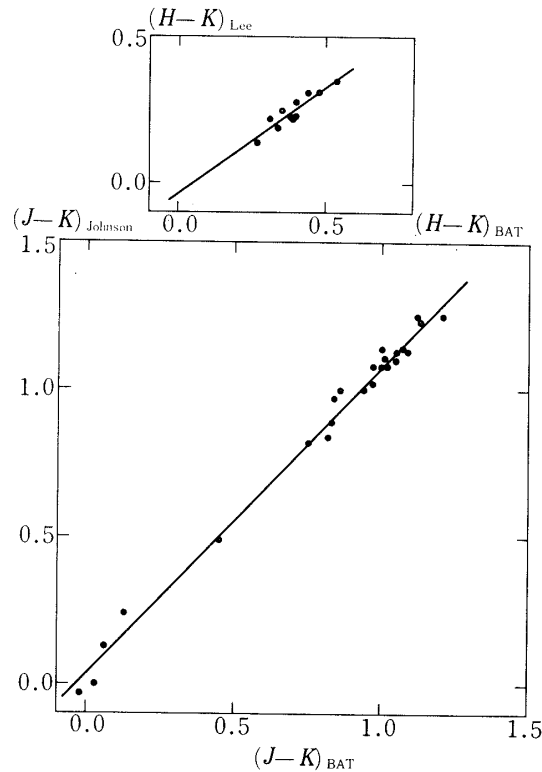


図14 BAT-1系とJohnson-Lee系の色指数の比較。直線は平均関係を示す。

晩期型星の測光特性を定量的に解析する上で、 \mathcal{Q} バンドがいかに重要であるかを如実に物語っている。実際に、上に考察したような事柄を、2色図の上で定量的に調べることができる。BAT-1系では4帯域で観測を行ったので、すべての組合せを考えれば6種類の色指数が得られるが、独立なのは3種類だけである。様々な独立な2色図表を作成してみた結果、 $(H-K)$ 対 $(J-K)$ 、および $(J-\mathcal{Q})$ 対 $(J-K)$ の組が最も有用と結論された。これらを図16と図17に示した。これらの図では縦軸の尺度が横軸のものの倍になっていることに注意されたい。一見して判ることは、いくつかの例外を除けば、観測点が割合にまとまった系列をなしている事実である。晩期型に進んで $1.9\ \mu\text{m}$ 帯に水蒸気吸収の影響の現われるのが、図17における $J-K \approx 1.1$ での系列の反転として明示されている。そこでのスペクトル型を調べてみると、恒星大気中の水蒸気が \mathcal{Q} 等級に影響を与え始めるのがM4-M5型と判明する。このスペクトル型は、Aaronson *et al.* [20]が地上観測における H_2O 指数の急激な増加から推定しているものと一致する。

一般的にはまとまった系列をなすにもかかわらず、 $(H-K)$ 対 $(J-K)$ の2色図上で平均系列から0.1等級以上も離れている特異観測点が存在する。これらの点に対応する星は、 μCep , $r\text{Aql}$, および ϵPeg である。 μCep については、Johnson-Lee系での $(H-K)$ および $(J-K)$ のデータがあって、それらは図14の平均的關係に良く従う。したがって、 μCep が2色図上の平均系列からはずれるのは確実である。Russell *et al.* [21]によれ

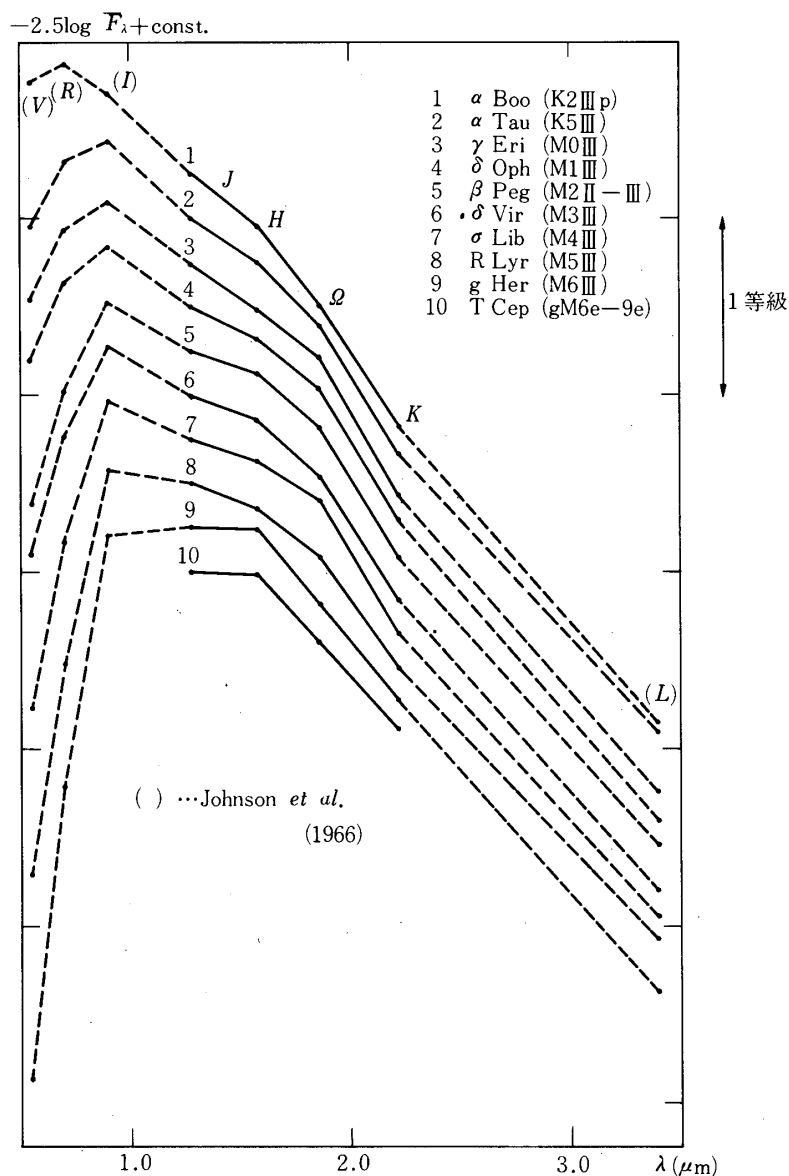


図15 BAT-1により観測された恒星のエネルギー分布.

観測範囲外の点は破線で近似的に示してある. そのデータは [19] 及びその絶対較正 [22] よりとった.

ば, μ Cep は $10 \mu\text{m}$ に顕著な過剰放射を行っており多量の微粒子にとり囲まれていると推定されるが, 今回観測された異常も, こうした現象と関連するものと思われる. r Aql, ϵ Peg については μ Cep のような特異性はまだ報告されていないが, 平均系列からの離れは推定観測誤差の 0.05 等級を大幅に上まわっていて, 何か類似の物理的原因があるものと推量される. 星間吸収による赤化の影響は, 2 色図の一部に矢印で示してあるが, スペクトル型などを考慮すると, 上述の星々の平均系列からの離れは, とても星間赤化では説明がつかない. Johnson [22] が既に述べているように, BAT-1 で観測したような明るい巨星の

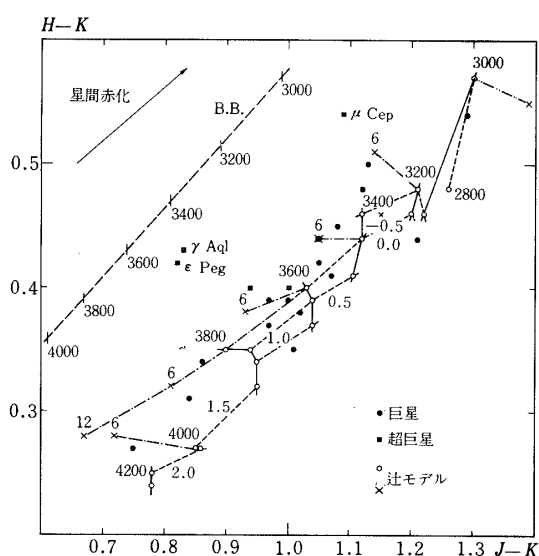


図16 $(H-K)$ 対 $(J-K)$ ダイアグラム. 黒丸は巨星, 黒四角は超巨星, 白丸とXは辻モデルの値を, それぞれ示している. B.B. は黒体ふく射を示し, 星間赤化(van de Hulst [27] No.15)は, 隅に矢印で示してある.

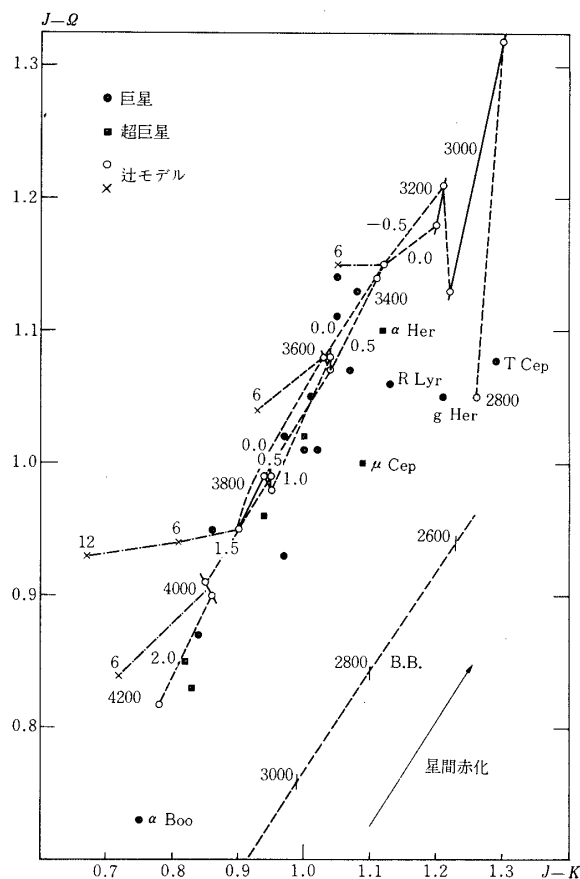


図17 $(J-Q)$ 対 $(J-K)$ ダイアグラム. 記号は図16と同じ.

星間赤化は無視できる程小さく, 超巨星の場合も同様に問題になる程大きくないと思われる. したがって, 以下の議論では星間吸収の補正は必要ないものとする.

3. モデルとの比較

前節で2色図上での晩期型星に対する観測的系列を得たので, これとモデル系列の比較を行う. 低温度巨星の大気モデル・グリッドで現在利用できるものでは, Tsuji [1], [2] のものが最も広汎かつ低温域にわたっているので, それを用いることとした. 有効温度が2800 K から4200 K にわたる様々な大気モデルの詳細なデータを, 辻氏のご好意によって貸与していただき, 理論2色図を算出した. 利用した大気モデルのパラメータやそれから計算された

測光特性を表 3 に示し、モデルの色指数系列は図16, 図17の観測的 2 色図に重ねて示した。両者の重なり具合を調べてみると、一般的に非常に良いと言えるが、 $(J - Q)$ 対 $(J - K)$ 図上の $J - K \approx 1.2$ の辺りでは、例外的に一致が悪い。さきに触れた $J - Q$ の反転が、観測系列ではモデル系列よりも小さな $J - Q$ の値で起っている。しかしながら、g Her と T Cep の観測点は再びモデル系列に近付いているので、上の不一致は、分子吸収帯計算に組み込ま

表 3 辻モデルグリッドとその色指数

モデル名	元素組成	$J - K$	$H - K$	$Q - K$	$J - Q$	$H - Q$	$J - H$
G 1 / 4200 / 2.0 / 3	太陽組成	0.78	0.25	-0.04	0.82	0.29	0.53
G 1 / 4000 / 1.5 / 3	太陽組成	0.85	0.27	-0.06	0.91	0.33	0.58
G 1 / 3800 / 1.0 / 3	太陽組成	0.95	0.34	-0.03	0.98	0.37	0.61
G 1 / 3600 / 0.5 / 3	太陽組成	1.04	0.39	-0.04	1.08	0.43	0.65
G 1 / 3400 / 0.0 / 3	太陽組成	1.12	0.44	-0.03	1.15	0.47	0.68
G 1 / 3200 / -0.5 / 3	太陽組成	1.21	0.48	0.00	1.21	0.48	0.73
G 1 / 3000 / -1.0 / 3	太陽組成	1.30	0.57	-0.02	1.32	0.59	0.73
G 1 / 2800 / -1.25 / 3	太陽組成	1.26	0.48	0.21	1.05	0.27	0.78
G 2 / 4200 / 2.5 / 3	太陽組成	0.78	0.24	-0.04	0.82	0.28	0.54
G 2 / 4000 / 2.0 / 3	太陽組成	0.86	0.27	-0.04	0.90	0.31	0.59
G 2 / 3800 / 1.5 / 3	太陽組成	0.95	0.32	-0.04	0.99	0.36	0.63
G 2 / 3600 / 1.0 / 3	太陽組成	1.04	0.37	-0.03	1.07	0.40	0.67
G 2 / 3400 / 0.5 / 3	太陽組成	1.11	0.41	-0.03	1.14	0.44	0.70
G 2 / 3200 / 0.0 / 3	太陽組成	1.20	0.46	0.02	1.18	0.44	0.74
G 2 / 3000 / -0.5 / 3	太陽組成	1.22	0.46	0.09	1.13	0.37	0.76
G 0 / 3800 / 0.5 / 3	太陽組成	0.94	0.35	-0.05	0.99	0.40	0.59
A / 4000 / 0.0 / 6	太陽組成	0.72	0.28	-0.12	0.84	0.40	0.44
A / 3800 / 0.0 / 12	太陽組成	0.67	0.28	-0.26	0.93	0.54	0.39
A / 3800 / 0.6 / 6	太陽組成	0.81	0.32	-0.13	0.94	0.45	0.49
A / 3600 / 0.0 / 6	太陽組成	0.93	0.38	-0.11	1.04	0.49	0.55
A / 3400 / 0.0 / 6	太陽組成	1.05	0.44	-0.10	1.15	0.54	0.61
A / 3800 / 0.0 / 3	太陽組成	0.90	0.35	-0.05	0.95	0.40	0.55
A / 3600 / 0.0 / 3	太陽組成	1.03	0.40	-0.05	1.08	0.45	0.63
B / 3400 / -0.5 / 3	太陽組成	1.12	0.46	-0.03	1.15	0.49	0.66
B / 3200 / -0.5 / 6	太陽組成	1.14	0.51	-0.07	1.21	0.58	0.63
C / 3400 / 0.0 / 3	O / C = 1.05	1.15	0.46	-0.07	1.22	0.53	0.69
C / 3000 / -1.0 / 3	O / C = 1.05	1.39	0.55	-0.05	1.44	0.60	0.84

* モデル名は (モデルシリーズ) / (有効温度(K)) / (表面重力の対数) / (乱流速度 (km/s)) で表現されている。文献 [1], [2] を参照のこと。

れた近似法が弱い吸収領域で低精度であることの反映とも考えられ、さほど重要視するには当らないとも思われる。この最も低温の部分を除けば、モデルと観測の一致は良いので、近赤外域観測に合うように個々の星の大気モデルのパラメータを定めることが可能である。両者の比較においては、利用できるモデルの色指数を、可能な場合には100 K間隔で内挿計算したものも用いた。また、色指数の差の自剰平均値を最小とするようなパラメータを求めるに当っては、各帯域に均等なウェイトがかかるように、

$$\Delta^2 = \{ [\Delta(J-K)]^2 + [\Delta(J-H)]^2 + [\Delta(J-Q)]^2 + [\Delta(K-H)]^2 + [\Delta(K-Q)]^2 + [\Delta(H-Q)]^2 \} / 6$$

を最小とした。ここで Δ は特定のモデルと特定の星の観測との差を意味する。 Δ^2 を最小とする最適モデルのパラメータを、 Δ の値と共に表4に与えた。2個のモデルに対して同一の Δ を得た場合には、2組のパラメータの平均値を採用してある。観測色指数の推定誤差が

表4 最適モデルのパラメータ

星 名	T_{eff} (K)	$\log g$	ξ_t (km/s)	Δ (等級)
α Cet	3750 ± 150	0.5	3.0	0.018
ρ Per	3400 ± 200	-0.5	3.0	0.024
τ^4 Eri	3550 ± 150	0.0	3.0	0.021
r Eri	3700 ± 200	0.0	6.0	0.027
α Tau	3950 ± 150	2.0	3.0	0.034
α Ori	3800 ± 100	0.0	3.0	0.031
η Gem	3800 ± 100	1.0	3.0	0.044
δ Vir	3700 ± 100	1.0	3.0	0.029
α Boo	4200 ± 200	2.0	3.0	0.053
σ Lib	3550 ± 150	0.5	3.0	0.024
δ Oph	3700 ± 100	0.0	3.0	0.007
α Sco	3700 ± 100	0.5	3.0	0.018
g Her	2800 ± 200	-1.25	3.0	0.034
α Her	3400 ± 100	-0.5	3.0	0.033
R Lyr	3400 ± 200	-0.5	3.0	0.064
r Aql	3900 ± 300	0.0	6.0	0.081
T Cep	2800 ± 300	-1.25	3.0	0.041
ϵ Peg	3900 ± 300	0.0	6.0	0.069
μ Cep	3600 ± 200	0.0	3.0	0.096
λ Aqr	3400 ± 200	0.0	6.0	0.007
β Peg	3700 ± 200	1.0	3.0	0.014

0.05 等級なので、この範囲で一致するモデルは可能範囲に入ると思われるので、その有効温度の範囲も第 3 表に加えた。最適モデルの Δ が 0.05 を大幅に越えているものには、 r Aql と μ Cep がある。また、 Δ が 0.05 と 0.07 の間に入るような、いささか悪い合致を示すものには、 α Boo, g Her, R Lyr, ϵ Peg がある。これらの星の有効温度の範囲は、 r Aql, μ Cep に対しては $\Delta < 0.1$, 残りの 4 者に対しては $\Delta < 0.07$ を基準にした。他の星々はすべて $\Delta < 0.05$ の精度で、その近赤外域測光特性を説明できるモデルに対応付けられた。この事実、近赤外域でのモデル比較が、晩期型星の研究に有効な手段であることを裏付けている。合致の良いモデルのほとんどは、通常の化学組成と 3 km/s の乱流速度をもつ系列に属しているのが判る。また、光度階級の差 (I ~ II と III の差) は大まかには表面重力の対数 $\log g$ の差に反映されているが、色指数はこのパラメータに比較的鈍感であり、表面重力の効果は乱流の効果と分離しがたいことが判る。 α Boo の合致が悪いのは、 $T_{\text{eff}} = 4200 \text{ K}$ よりも高温のモデルがグリッドに含まれていないのが原因と考えられる。 R Lyr の場合は、前述のように水蒸気吸収の成長がモデルで精度良く取り扱われていないために、合致の度合いが悪い。 r Aql と ϵ Peg の特異性については既に述べた。2 色図を検討してみると、 λ Aql と r Eri では 0 等級がわずかに明るいために、 6 km/s という比較的高い乱流速度を対応させる結果になり、スペクトル型の割合には低い有効温度が与えられていることが知れる。

以上の考察から、 $\Delta < 0.05$ の合致の場合には良く対応するモデルパラメータが求められたものとみなし、得られた有効温度は十分な意味を持っていると考える。表 5 には、こうして求めたスペクトル型に対する有効温度系列を示した。

表 5 BAT-1 のデータより得られた赤色巨星の有効温度

スペクトル型	T_{eff} (K)
K 2 III	(4200 ± 200)
K 5 III	3950 ± 150
M 0 III	3700 ± 200
M 1 III	3700 ± 100
M 2 III	3650 ± 250
M 3 III	3600 ± 200
M 4 III	3500 ± 200
M 5 III	3400 ± 200
M 6 III	2800 ± 300

* この値は図 18 に黒丸でプロットしてある。なお辻の結果も考慮して得られた温度—スペクトル系列の関係は図 6 中曲線で示されている。

4. 結果の検討

はじめに述べた様に、晩期型星においては、放射するエネルギーの主要部分が $0.7 \sim 3 \mu\text{m}$ の波長域に分布するので、近赤外域でのモデルと観測の一致は、有効温度決定の上で必要な条件である。他の波長域のエネルギー流束は上記領域のそれに比べると格段に小さいので、有効温度の決定においては高い精度を要求されない。また、特に $\lambda \geq 5 \mu\text{m}$ の領域の色指数は温度に鈍感であって、多少の観測誤差を前提とするとき、精密な合致を計ることは無意味である。Tsuji [2] は彼のモデルと観測との比較を行ったが、当時利用可能であった測光データのうち $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$ 領域の高精度データに重きを置いた。赤外側では J , H , K のデータはあったものの、 Q バンドにわたる大きな凸状のエネルギー分布曲線の山の型は不定のままで行われた。したがって、今回の近赤外域に重点を置いたモデルとの比較は、Tsuji [2] の研究と相補的に対をなすものである。両者ともに Tsuji のモデルに依っているので、第一の関心は、それぞれの比較から得られたスペクトル型に対する温度系列が矛盾するか、しないかと

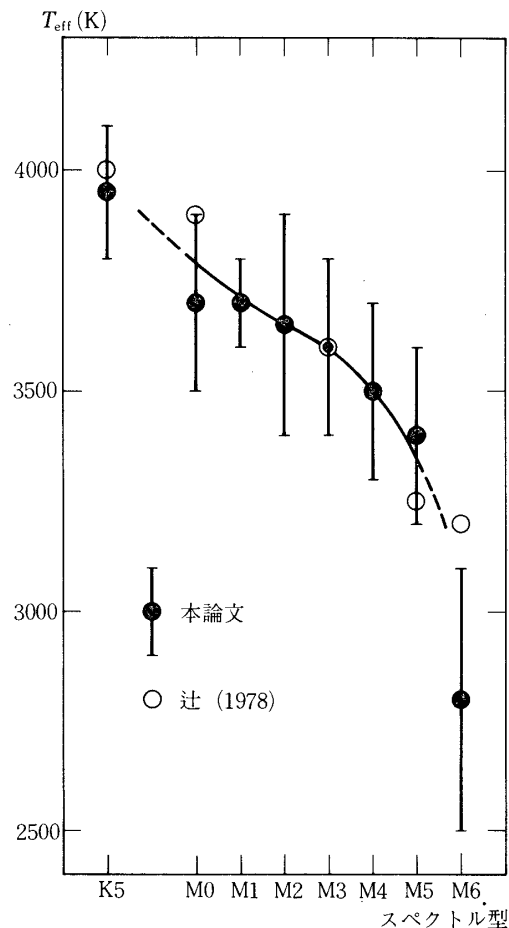


図18 BAT-1より得られたスペクトル型に対する有効温度系列。黒丸はこの観測によって得られた値で、白丸は Tsuji [2] による。横棒は有効温度の可能な範囲を示す。曲線はモデル比較より提案される温度・スペクトル型関係を示す。

いう点にあらう。その対比を図18に行った。これを見ると、M0—M5に対応する温度範囲が、Tsujiに較べて今回はやや狭いが、一般的な一致は良いと言える。そこで、両者の温度尺度を平均して得られる系列をもって、モデル比較より求まる系列の最も確からしいものとした。これを図18に曲線で示した。Scargle and Strecker [23]はカイパー飛行天文台からサーキュラー・バリアブル・フィルタを用いて晩期型星のスペクトルを観測し、Johnson [28]のモデルと比較している。彼らの観測星の多くが暗かったこともあって、モデルとの比較では星間吸収量もパラメータに加えている。その結果彼らが得た温度系列は、M0からM5にわたってほとんど温度変化が無いという、特殊なものであった。彼らの場合、用いられたモデルグリッドの規模が小さかったことや、測光の較正精度に多少の問題があるとはいうものの、我々の気球観測ともども、上空からの赤外測光データがM0—M5のスペクトル範囲に対し比較的狭い温度範囲を与えるという傾向は、考察に価するかも知れない。従来考えられてきたJohnson [18], [22]やLee [14]の温度系列では、ずっと広い温度範囲が対応している。Tsuji [2]は、 T_{eff} 対 $(R-I)$ 図における彼のモデル系列が、様々な手法で測られた恒星直径を基に算出される観測点の分布の上限界線にほぼ一致する、という事実を指摘したが、これは図6に示しに最適系列についても言えることである。さらに、Johnson [22]自身が彼の温度系列を導出するに当たって基本とした最初の温度系列、すなわち、彼の絶対測光とマイケルソン干渉計で測った恒星直径から求まる系列は、 T_{eff} 対 $(J-K)$ 図ではBAT-1系列に非常に近い、という事実も指摘しておきたい。この場合唯一の例外は β Pegであって、測られた恒星直径が大きすぎるという方向にずれている。

Tsujiの可視域の比較でも、また我々の近赤域の比較でも、M5より晩期ではモデルと観測の一致が悪くなるので、ここで得られた温度系列はM5までの巨星（光度階級Ⅰ—Ⅲ）に一応限るべきであろう。光度階級ⅠおよびⅡの超巨星について見ると、これらの観測点は $(H-K)$ 対 $(J-K)$ 図では系統的に平均系列より上に、また、 $(J-Q)$ 対 $(J-K)$ 図では、 μ Cepや α Herなどの晩期で下に、それぞれずれている。 $(H-K)$ 対 $(J-K)$ 図のこの傾向は、一見、表面重力が小さいか乱流速度が大きいことの効果として説明できそうであるが、それだけでは、 $(J-Q)$ 対 $(J-K)$ 図上の傾向を同時に説明し切れない。そこで我々は、こうした超巨星の現実の大気は、モデル大気計算に採用されている、平行平面成層、静水力学平衡、輻射平衡といったような古典的状況から、大幅にはずれているのではないかと考える。Tsuji [2]も、こうした古典的仮定を計算されたモデルについて検討してみて、M型中期より晩期型では危険になる、と述べている。最も明らかに不当となる古典的仮定の一つは、低表面重力の星における平行平面成層の仮定で、Watanabe and Kodaira [25], [26]によって調べられたように、球状大気を考える必要が生じる。水蒸気分子の形成が一般に気体圧の三乗に比例するのに対し、連続吸収の因となる H^- イオンの形成は二乗に比例するので、同じ温度成層では、低重力星で、つまり超巨星化するほど、水蒸気吸収帯は弱く見える。しかしながら、球状の幾何学的構造を考慮に入れると、低重力の星ほど放射の稀釈効果によって表面近くの温度が下がり、水蒸気の解離の温度依存性が強いために、その形成が促進される。この種の効果が、一見矛盾する超巨星の2色図上の振舞いの原因になっていると推定されるが、定量的な検討を行うためには、さらに現実的な球状大気モデルの計算を

待たねばならない。

お わ り に

以上のように、BAT-1の計5回のフライトにより、低温度星の近赤外測光の良質なデータが得られ、その大気のパラメータを精度よく決定することができた。これはこの計画の目的である低温度星の物理の解明に大きな意味を持つものである。BAT-1計画は昭和53年度をもって終了し、次年度からは、低温度星の近赤外域分光を目的としたフーリエ分光器を搭載したBAT-2計画がはじまる。BAT-1計画により得られた低温度星の情報をさらに発展させることが目的であるが、第1章で述べられたBAT-1における気球望遠鏡としての問題点を十分検討し、機械技術研究所の協力のもとに、より良いデータが得られるよう、計画を進めてゆく考えである。

謝 辞

有意義な討論を重ね、大気モデルのデータを提供して下さった東大天文学教室の辻隆氏に心から感謝の意を表する。また、宇宙航空研究所の西村純教授を始めとする気球工学講座の諸氏、ならびに機械技術研究所の矢島信之氏を始めとする諸氏、及び著者らの同僚である東大天文学教室の小牧和雄（現：国土地理院）、長井嗣信（現：気象庁）、吉田春夫の諸氏に、そのご協力に対しお礼申し上げる。東京天文台の末元善三郎、東大天文学教室の海野和三郎両氏の常々のご指導に負うところも大きかった。なお、必要な計算の一部は、東京大学大型計算機センターで行われた。

1979年5月9日

参 考 文 献

- [1] T. Tsuji : Publ. Astron. Soc. Japan **28** (1976) 543.
- [2] T. Tsuji : Astron. Astrophys. **62** (1978) 29.
- [3] 田中 済 : 宇宙研報告 **9** (1973) 244.
- [4] 小牧和雄, 小平桂一, 田中 済, 末元善三郎 : 宇宙研報告 **12** (1976) 623.
- [5] 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, 河野嗣男, 太田茂雄, 狛 豊 : 宇宙研報告 **13** (1977) 813.
- [6] 渡辺鉄哉, 尾中 敬, 吉田春夫, 田中 済, 小平桂一 : 宇宙研報告 **14** (1978) 943.
- [7] K. Kodaira, W. Tanaka, T. Onaka, T. Nagai, T. Watanabe, and Z. Suemoto : Tokyo Astron. Bull. 2nd Ser. No. **245** (1976) 2077.
- [8] K. Kodaira, W. Tanaka, T. Onaka, T. Watanabe, and H. Yoshida : Tokyo Astron. Bull. 2nd Ser. No. **251** (1977) 2889.
- [9] K. Kodaira, W. Tanaka, Y. Nakada, T. Onaka, T. Watanabe, and T. Hasegawa : Tokyo Astron. Bull. 2nd Ser. No. **256** (1978) 2939.
- [10] W. Tanaka : Publ. Astron. Soc. Japan **30** (1978) 637.
- [11] 矢島信之, 河野嗣男, 小平桂一, 田中 済, 太田茂雄, 狛 豊 : 宇宙研報告 **14** (1978) 953.

- [12] 小鍛冶 繁, 橋野 賢, 矢島信之 : 宇宙研報告 15 (1979) 305.
- [13] H. L. Johnson : Astrophys. J. 141 (1965) 923.
- [14] T. A. Lee : Astrophys. J. 162 (1970) 217.
- [15] D. S. Hayes and D. W. Latham : Astrophys. J. 197 (1975) 593.
- [16] D. W. Latham : Smithsonian Astrophys. Spec. Rept. No. 321 (1970).
- [17] R. L. Kurucz, E. Peytremann, E. H. Avrett : Blanked Model Atmospheres for Early - Type Stars, Smithsonian Institution Press, Washington, D. C. (1974).
- [18] H. L. Johnson : Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya 3 (1964) 305.
- [19] H. L. Johnson, R. I. Mitchell, B. Iriarte, and W. Z. Wisniewski : Commun. Lunar Planetary Lab. 4 (1966) 99.
- [20] M. Aaronson, J. A. Frogel, and S. E. Persson : Astrophys. J. 220 (1978) 442.
- [21] R. W. Russell, B. T. Soifer, and W. J. Forrest : Astrophys. J. 198 (1975) L41.
- [22] H. L. Johnson : Ann. Rev. Astron. Astron. Astrophys. 4 (1966) 193.
- [23] J. D. Scargle and D. W. Strecker : Astrophys. J. 228 (1979) 838.
- [24] H. R. Johnson : National Center for Atmospheric Research Technical Note STR-95, Boulder, Colorado (1974).
- [25] T. Watanabe and K. Kodaira : Publ. Astron. Soc. Japan 30 (1978) 21.
- [26] T. Watanabe and K. Kodaira : Publ. Astron. Soc. Japan 31 (1979) 61.
- [27] H. C. van de Hulst : Rech. Astron. Obs. Utrecht, 11 (1949) Part 1.