

恒星の赤外スペクトル (III)*

渡邊鉄哉**・尾中敬**・吉田春夫**
田中濟**・小平桂一**

概要

1977年9月16日夜、15 cm 気球望遠鏡 BAT-1 の4回目の飛揚を行い、13個の恒星(主として低温赤色巨星)の近赤外領域(0.9~2.5 μm)における5色測光に成功した。前回(1976年5月)と共通に観測された星については色指数に関して良い一致が見られた。 α CMa の理論的エネルギー・フラックスを用いて赤色巨星のエネルギー・フラックスを決定し、さらに line-blanketed model atmosphere と比較することにより赤色巨星の物理的パラメータを求めた。

1. 序

われわれの研究目的及び経過については、文献[1], [2]を参照されたい。今回はBAT-1 (Balloon-borne Astronomical Telescope) の4回目の飛揚であり、成功を収めた前回(1976年5月, 文献[2], [3])の時観測した星の一部と秋の星を観測することを目的とした。これらの測光データを Tsuji (文献[4], [5], [6]) の line-blanketed model と比較することにより赤色巨星の物理的パラメータ(有効温度, 表面重力等)が求まる。

2. 観測装置

BAT-1 の機構及びモニタ用レチコン・カメラに関しては、文献[1], [2], [3]に述べられているので第1表に概要を示す。今回の改良点は以下の通りである。

- i) 測光器のダイヤフラムを3' から5' に改め追尾誤差に耐えられるようにした。
- ii) Iバンド(有効波長0.9 μm)を設け短波長測の測光を行うようにした。
- iii) 望遠鏡ドライブ・モータ及びチョッパの積極的な保温を施した。
- iv) モニタを容易にするため、レチコン・カメラのレンズにF比の小さいものを使用し、画角を1.4 ($f=135$ mm) から2.2 ($f=85$ mm) に広げた。

3. 観測経過

放球は1977年9月16日17時44分、三陸大気球観測所からB₅-81気球を使って行われた。19時06分基地東方85 km の洋上でレベル・フライトに入り、19時23分から17日3

*宇宙研特別事業費による研究論文

**東京大学理学部

第1表 BAT-1 諸元

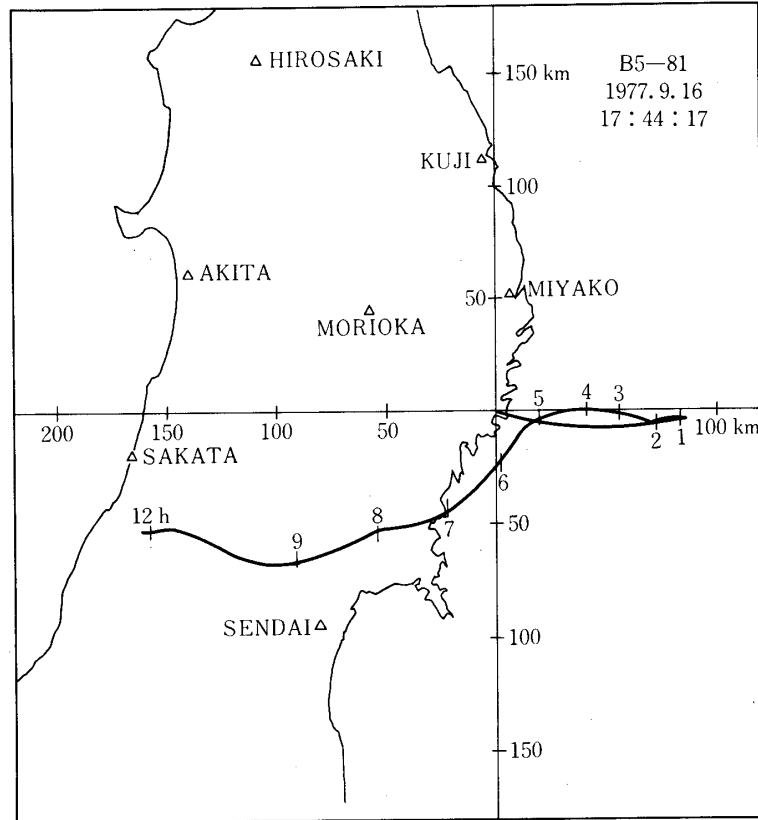
| | |
|-------|---|
| 主望遠鏡 | 口径 15 cm カセグレン型 (主鏡 F 3) 合成焦点距離 180 cm 赤外測光器ダイヤフラム視野 5' 検出器 自然冷却 PbS (約 -50°C) |
| ガイド鏡 | 口径 5 cm 屈折 焦点距離 30 cm スター・フォロア検出部視野 1°.5 |
| 架台 | スター・フォロア付逆フォーク式赤道儀 |
| 視野モニタ | レチコン・カメラ, 視野 2°.2 |

第2表 観測星のリスト

| | HR番号 | 名前 | 赤経 (1977) | 赤緯 (1977) | 実視等級 | スペクトル型 |
|----------------|------|---------------|--------------|--------------|-----------|----------|
| | | | h m | | | |
| α Cet | 911 | Menkar | 3 01.1 | + 4° 00' | 2.5 | M2 III |
| τ^4 Eri | 1003 | | 3 18.5 | -21 50 | 3.7 | gM 3 |
| γ Eri | 1231 | Zaurak | 3 57.0 | -13 34 | 2.9 | M0 III |
| α Tau | 1457 | Aldebaran | 4 34.6 | +16 28 | 0.9 | K 5 III |
| α Ori | 2061 | Betelgeuse | 5 54.0 | + 7 24 | 0.4 - 1.3 | M 2 I ab |
| α CMa | 2491 | Sirius | 6 44.2 | -16 41 | -1.5 | A 1 V |
| δ Oph | 6056 | Yed Prior | 16 13.2 | - 3 38 | 2.8 | M 1 III |
| ϵ Oph | 6025 | Yed Posterior | 16 17.1 | - 4 38 | 3.2 | G 9 III |
| α Sco | 6134 | Antares | 16 28.0 | -26 23 | 0.9 - 1.8 | M 1 Ib |
| α Her | 6406 | Ras Algethi | 17 13.6 | +14 25 | 3.0 - 4.0 | M 5 II |
| γ Aql | 7525 | Tarazed | 19 45.2 | +10 33 | 2.7 | K 3 II |
| α Aql | 7557 | Altair | 19 49.7 | + 8 48 | 0.8 | A 7 V |
| ϵ Peg | 8308 | Enif | 21 43.1 | + 9 46 | 2.4 | K 2 Ib |
| λ Aqr | 8698 | | 22 51.4 | - 7 42 | 3.8 | M 2 III |

時 19 分まで、第 2 表に示す 14 個の恒星を観測、うち 13 個の星について赤外測光データが得られた。ゴンドラは 5 時 46 分にカットし月山東方に降下させたが、9 月 22 日無事回収された。

レチコン・カメラの画角の拡張は、星像の検出に優秀性を発揮し 13 個もの星の測光を可能にした。今回は、荷重のバランスにも細心の注意を払ったが、ゴンドラの形状が前回とわずかに異なり、さらにレスポンスが速過ぎたためか、フォロアの追尾とよりもどし規正の間にカップリングが生じ振子運動することとなり、十分には安定した測光が行えなかった。ダイヤフラムを拡張したことに関しては上記のカップリングのため確然とはしないが、スカイ・バックグラウンドを多く拾うようになった点で効果はなかった。観測終了時刻が 3 時 19 分と

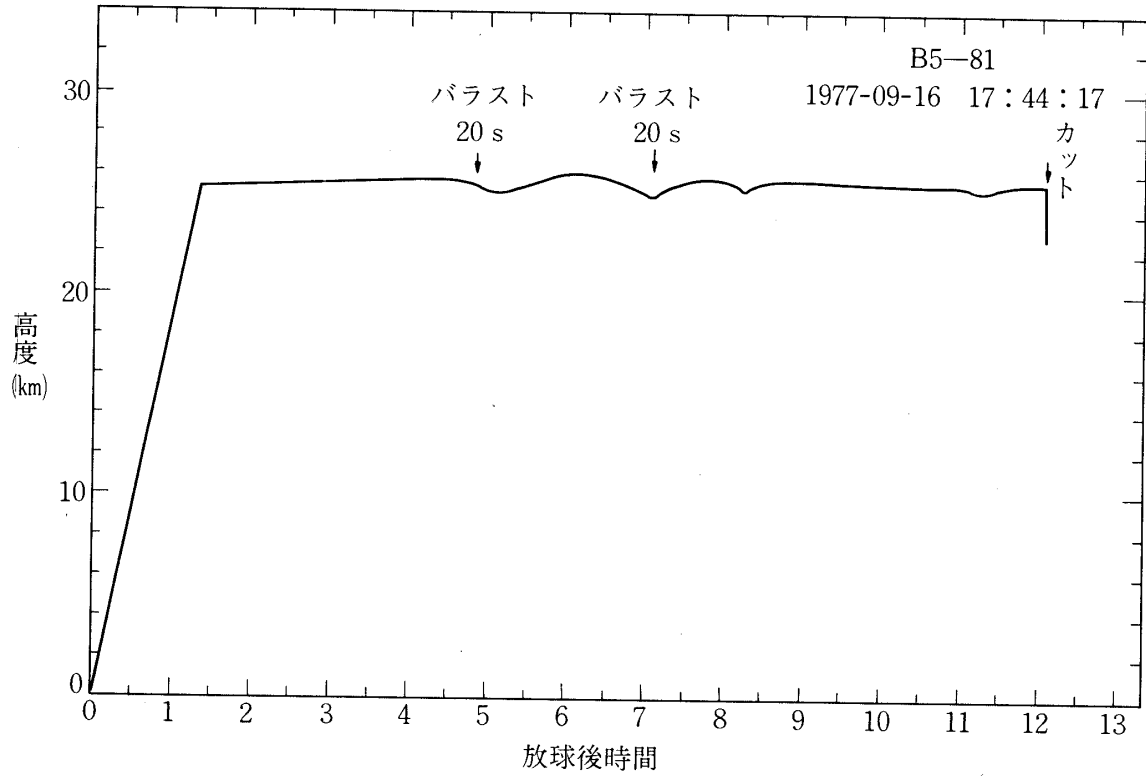
第1図 B₅-81 航跡図

なったのはその後フォロア追尾精度が格段に悪くなったためであり、フォロア高圧電源の放電によるものと考えている。第1, 2, 3図にB₅-81気球の飛揚データを示す。温度変化に関して、外気の最低温度が3°程度高いほかは昨年とほぼ同様の変化を示している。

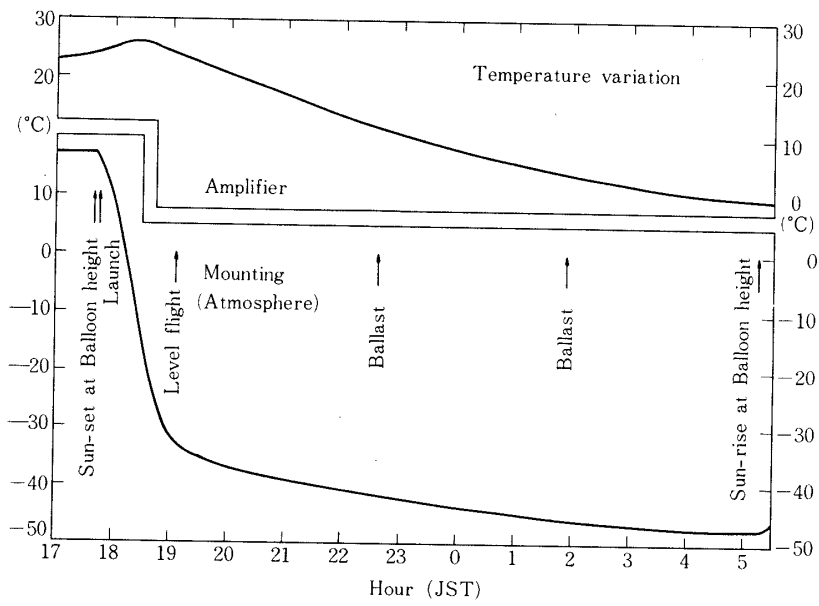
使用したフィルタの透過特性とPbSの相対感度は第4図に示した通りで、J, H, Q, Kの各バンドの特性は昨年とほぼ同様である。今回新設のIバンドの特性は、図の実線が望ましかったのであるが、実際の特性は図の点線のように、2.6μm付近の波長域にかなり漏れがある。従って今回はIバンドのデータは参考のみにとどめることとした。

4. 観測結果とその解析

PbSが自然冷却であること並びに測光系の配置も温度によって変わると考えられることを考慮して、測光系の感度変化をε Peg及びα Cetを3回づつ観測して補正を行った。今回感度が徐々に悪化したのは、保温のし過ぎによるチョッパの回転数の増加や測光系の配置の変化によるファブリ・レンズへの光の当り方の低下が原因と思われる。又、これらの星の繰り返し観測から、各バンドのふれの比率は誤差内で一致しており、大気吸収による減光は無視できる。

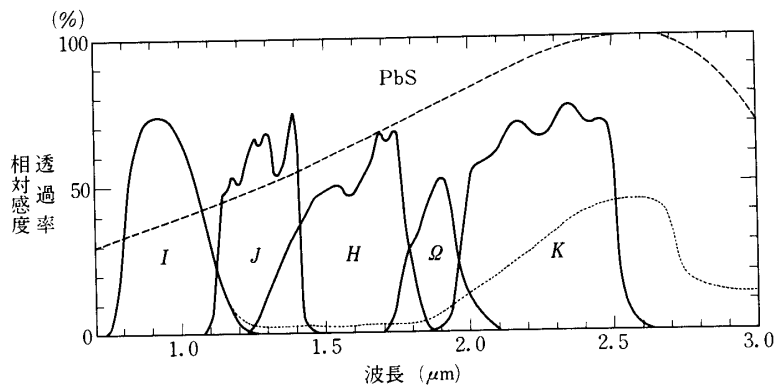


第2図 B₅-81 飛揚データ



第3図 温度変化

上空における PbS の波長感度特性やフィルタの透過率は、地上での測光とは必ずしも一致しないので、標準星との比較により、エネルギー・フラックスを決定した。今回の観測では標準星として α CMa を用いた。 α CMa のエネルギー・フラックスの理論的モデルとしては、Kurucz et al. (文献 [7]) の LTE, line-blanketed model atmosphere の中より有効温



第4図 フィルタの透過率と PbS の相対感度

第3表 各バンドにおけるエネルギー・フラックス $-2.5 \log F_{\lambda} + \text{const.}$

| | J(1.28) | H(1.58) | Q(1.87) | K(2.22) |
|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| α CMa | 0.00 \pm 1* | 0.80 \pm 4** | 1.50 \pm 9 | 2.20 \pm 4 |
| α Sco | -1.41 \pm 2 | -1.24 \pm 5 | -0.93 \pm 9 | -0.27 \pm 5 |
| α Her | -0.91 \pm 3 | -0.77 \pm 6 | -0.54 \pm 10 | 0.11 \pm 7 |
| ϵ Peg | 1.49 \pm 4 | 1.88 \pm 8 | 2.13 \pm 13 | 2.84 \pm 7 |
| δ Oph | 1.14 \pm 6 | 1.31 \pm 8 | 1.59 \pm 19 | 2.33 \pm 8 |
| α Aql | 1.69 \pm 3* | 2.45 \pm 6** | 3.08 \pm 12 | 3.80 \pm 6 |
| r Aql | 1.62 \pm 6 | 2.01 \pm 9 | 2.28 \pm 12 | 2.96 \pm 8 |
| α Cet | 0.83 \pm 3 | 1.01 \pm 8 | 1.29 \pm 9 | 1.97 \pm 8 |
| λ Aqr | 1.78 \pm 5 | 1.96 \pm 9 | 2.13 \pm 14 | 2.90 \pm 8 |
| τ^4 Eri | 1.34 \pm 6 | 1.50 \pm 8 | 1.72 \pm 12 | 2.46 \pm 7 |
| r Eri | 1.34 \pm 5 | 1.61 \pm 7 | 1.88 \pm 16 | 2.65 \pm 10 |
| α Ori | -1.59 \pm 3 | -1.34 \pm 5 | -1.07 \pm 9 | -0.36 \pm 5 |
| α Tau | -0.63 \pm 4 | -0.37 \pm 6 | 0.00 \pm 9 | 0.73 \pm 6 |

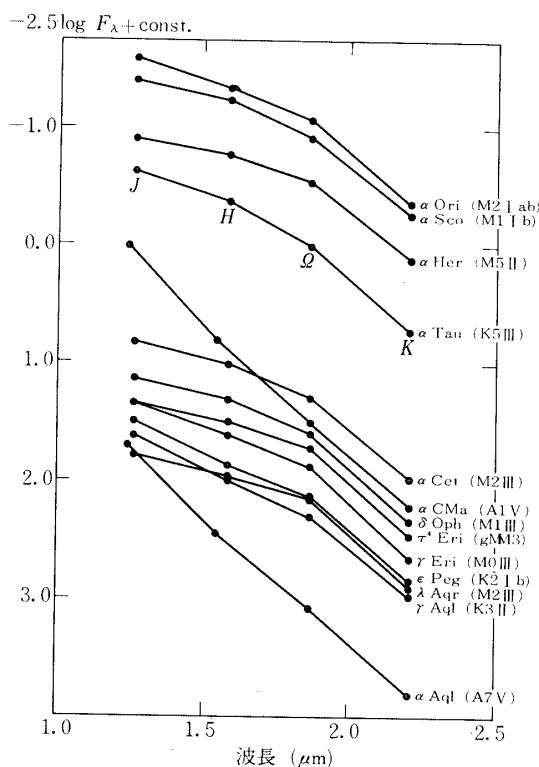
注:() 内数字は各バンドの有効波長(単位 μm)

ただし *での値は 1.26 μm .

**での値は 1.56 μm .

const. は α CMa の J等級で 0.00 となるように選んだ。

度 10 000.K, 表面重力の対数 4.0, (太陽化学組成, 乱流速度 2 km/s) のモデル大気を採用した。このモデルは、特に α CMa のモデルを目指したものではないが、このモデルから得られる放射は、Latham (文献 [8]) 等の可視光から 10 800 \AA までの狭帯域測光 (特にパッシュェン・スロープ及びバルマ・ジャンプ) の結果とよく一致する。 α CMa について



第5図 エネルギー・フラックスの波長分布

は、金属元素の存在比が高い等の問題点があるが、特に赤外域に関しては、観測精度よりも大きい誤差はないと思われる。他に α CMa のモデルとしては、Fowler (文献 [9]) のものがあるが、赤外域は波長間隔も荒く、パッセン・ジャンプより長波長側の観測が合っていないので採用しなかった。

得られたエネルギー・フラックスの分布を第3表及び第5図に示す。第2表の中で、 ϵ Oph は δ Oph の位置の確認のため使用したもので赤外観測は行わなかった。第3表よりわかるように、暗い星では S/N 比が悪く、かなり大きな誤差範囲がついている。今回測光した星の中には、昨年と共通した星が4星あるが、昨年積算が十分行われず S/N 比が悪かった α Aql を除いた他の3星 (α Sco, α Her, δ Oph) については、色指数の間に大変良い一致が見られる。

第4表に A0V型の星のモデル (文献 [10], 有効温度 9500 K, 表面重力の対数 4.0) と α CMa のモデルを比較し、 α CMa の J等級でわれわれの測光結果を Johnson 等 (文献 [11], [12]) の結果に合わせた測光等級を示す。昨年との共通星で比較すると系統的に 0.08 等級程度のずれを生じているが、これは昨年と今年の標準星の違い (昨年は α Boo が標準星) による測光等級の原点の違いによるものと考えられる。フィルタ関数が Johnson の系と完全には一致しないこと 又、観測星の多くが変更星であることを考えると、Johnson 等の結果と完全には一致しないが矛盾はないものと思われる。

第4表 測光等級

| | $J(1.28)$ | $H(1.58)$ | $Q(1.87)$ | $K(2.22)$ |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| α CMa | -1.34 * | -1.32 ** | -1.32 | -1.32 |
| α Sco | -2.75 | -3.36 | -3.75 | -3.79 |
| α Her | -2.25 | -2.89 | -3.36 | -3.41 |
| ϵ Peg | 0.15 | -0.24 | -0.69 | -0.68 |
| δ Oph | -0.20 | -0.81 | -1.23 | -1.19 |
| α Aql | 0.35 * | 0.31 ** | 0.26 | 0.28 |
| γ Aql | 0.28 | -0.11 | -0.54 | -0.56 |
| α Cet | -0.51 | -1.11 | -1.53 | -1.55 |
| λ Aqr | 0.44 | -0.16 | -0.69 | -0.62 |
| τ^4 Eri | 0.00 | -0.62 | -1.10 | -1.06 |
| γ Eri | 0.00 | -0.51 | -0.94 | -0.87 |
| α Ori | -2.93 | -3.46 | -3.89 | -3.88 |
| α Tau | -1.97 | -2.49 | -2.82 | -2.79 |

(注) * 有効波長 1.26 μm

** 有効波長 1.56 μm

5. 考 察

第5図のエネルギー・フラックスの分布を見てわかるようにスペクトル系列による温度の差、および、早期M型星に水蒸気が存在しないという昨年の結論を追認できたことになる。

Tsuji (文献 [4], [5], [6]) の line-blanketed model にフィルタ関数をかけて積分したものと測定結果と比較することにより、各赤色巨星の物理的パラメータを決定することができる。結果を第5表に示す。Iバンドは参考にとどめたので、3個の色指数 ($H-J$, $Q-J$, $K-J$) より4個のパラメータ (有効温度, 表面重力の対数, 乱流速度, 化学組成) を決定するのは不可能であるが、化学組成は太陽化学組成に近く、乱流速度は吸収線の飽和が解けるのであまり大きな値はとりえないという状況を考慮して求めた。得られた結果は、Tsuji (文献 [5], [6]) 同様、従来の値に対して有効温度が高くなっている。

6. む す び

低温赤色巨星及び超巨星の放射のエネルギーの大きな近赤外領域を、大気の妨害のない気球高度から観測し、理論的なモデルとつぎ合わせることで、これらの星の物理的パラメータ、大気の構造を解明することができるようになった。さらにわれわれの測光系の信頼性を高めるためには他の測光系、例えば Johnson (文献 [11], [12]) や Lee (文献 [13])、との比較・校正ということが重要になってくるが、それには残念ながらまだ観測星の数が足りない。

幸い、観測装置は無事回収されているので、同装置を用いてさらに多くの星を観測したい。

第5表 有効温度 T_{eff} と表面重力 g と乱流速度 V_t

| 星 (スペクトル型) | T_{eff} (K) | $\log g$ | V_t (km/s) |
|------------------------|----------------------|----------------|--------------|
| α Sco (M1 Ib) | 3600, ± 100 | 0.0 ± 1.0 | 3 |
| α Her (M5 II) | 3400 ± 100 | -0.5 ± 1.0 | 3 |
| ϵ Peg (K2 Ib) | 4200 ± 300 | 2.0 ± 2.0 | 3 |
| δ Oph (M1 III) | 3700 ± 300 | 0.5 ± 1.0 | 3 |
| γ Aql (K3 II) | 4200 ± 300 | 2.0 ± 2.0 | 3 |
| α Cet (M2 III) | 3700 ± 200 | 0.5 ± 1.0 | 3 |
| λ Aqr (M2 III) | 3400 ± 300 | 0.0 ± 1.5 | 6 |
| τ^4 Eri (g M3) | 3400 ± 300 | 0.0 ± 1.5 | 6 |
| γ Eri (M0 III) | 3800 ± 200 | 0.0 ± 1.0 | 3 |
| α Ori (M2 I ab) | 3800 ± 200 | 0.0 ± 1.0 | 3 |
| α Tau (K5 III) | 4100 ± 100 | 2.0 ± 1.0 | 3 |

特に、昨年と今年標準星に用いた α Boo と α CMa を直接比較すること、又、第一次的な標準星である α Lyr の測光も行いたい。従って次回は将来の BAT-2 の赤外フーリエ分光観測の計画も考慮に入れて、経緯台方式の架台にして飛揚させたいと考えている。又、暗い星に対する S/N 比を向上させるために、検出器は冷却素子で冷やすことにし、測光器のダイヤフラムは前回の 3' 程度にもどす方が良いようである。

最後に、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、並びに機械技術研究所の矢島信之氏に心から感謝の意を表する。

1978年5月27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 (1976) 623
- [2] 田中濟, 小平桂一, 辻隆, 尾中敬, 長井嗣信, 渡邊鉄哉, 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
- [3] W. Tanaka: thesis (1977), submitted to Publ. Astron. Soc. Japan
- [4] T. Tsuji: Publ. Astron. Soc. Japan 28 (1976) 543
- [5] T. Tsuji: Publ. Astron. Soc. Japan 28 (1976) 567
- [6] T. Tsuji: Astron. Astrophys. 62 (1978) 29
- [7] R. L. Kurucz, E. Peytremann, E. H. Avrett: Blanketed Model Atmospheres for Early-Type Stars, Smithsonian Institution Press, Washington D. C. (1974)
- [8] D. Latham: Smithsonian Ap. Spec. Report No. 321 (1970)
- [9] J. W. Fowler: Astrophys. J. 188 (1974) 295
- [10] 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)
- [11] H. L. Johnson: Bols. Obs. Tonantzintla Tacubaya 3 (1964) 305

- [12] H. L. Johnson, R. I. Mitchel, B. Iriarte and W. Z. Wisnewski: Comm. Lunar Plan. Lab. 4 (1966) 99
- [13] T. A. Lee: Astrophys. J. **162** (1970) 217