

## Be 型輝線星の変光現象 (I)

平 田 龍 幸\*

B 型輝線星には 0.2-0.5 等程度の変光を示すものが多い。変光のタイム・スケールは数年～数十年に及び、この為、その変化のようすはよくわかっていない。そこで、国際的な測光観測キャンペーンが、アマチュア観測家も含めて、現在実施されつつある。本稿では、現在迄に知られた変光のようすと、その解釈についての若干の考察を述べてみたい。

### 1. B 型輝線星とは？

B 型輝線星 (以下 Be 星, 輝線=emission line) は, B 型主系列星, 巨星の中で水素・バルマー線等に幅広い輝線成分をもつ星をいう。Be 星の高温側, 低温側への延長として, Oe 星, Ae 星というものもある。1866 年, イタリアの天文家セッキによって輝線の発見されたカシオペア座  $\gamma$  星 (W の真中, 現在 2.3 等) が, Be 星の第一号である。現在では, 6 等より明るい Be 星は全天で約 180 個であり, B 型星全体の 10 ないし 20 パーセントを占めると推定される。北天で最も明るい Be 星は, しし座  $\alpha$  星 (レグルス, 1.3 等), 南天ではエリダヌス座  $\alpha$  星 (アケルナー, 0.6 等) である。

Be 星本体の最大の特徴は, その自転速度の大きいことである。恒星の自転速度は恒星の表面層 (光球) で作られる吸収線が, 自転によるドップラー効果によりひろがることを利用して評価することができる。この方法で求まる自転速度は, 恒星の赤道における回転速度  $V$  と, 自転軸と視線方向のなす角  $i$  として, 積  $V \sin i$  であって, ‘見かけの自転速度’ と呼ばれる。例えば, たまたま極方向 ( $i=0^\circ$ ) からみておれば, いかにも早く回転していても, 吸収線はひろがらず, みかけの自転速度はゼロである。しかしながら, 1 つのグループに属する多数の恒星のみかけの自転速度がわかっておれば, 自転軸の向きがランダムになっていると仮定して, 傾き  $i$  の影響を消去し,  $V$  自身の分布を推定することができる。このようにして得られた Be 星の真の自転速度  $V$  は 150-400 km/s の範囲にあり, 輝線をもたない普通の B 型星 (平均回転速度 150 km/s 程度) より高速回転している。前述の如く, みかけの自転速度が小さくても, 真の自転速度は大きい場合もある。また, Be 星は時に輝線を失なって普通の B 型星のスペクトルとかわらなくなったり, 再び輝線が出現したりすることがある。このようなこと

を考えあわせると, 現在, 普通の B 型星と考えられている星もいつ Be 星になるかもしれない。事実, 前述のエリダヌス座  $\alpha$  星は 1966 年, しし座  $\alpha$  星に至っては昨年, 輝線が発見されたばかりである。この意味で, Be 星というより ‘Be 現象’ と呼ぶべきかもしれない。

さて, Be 星の輝線を発する気体は, 種々の分光学的観測事実から, 星の赤道面を回転している円盤状の温度 1 万度程度の気体であることがわかっている (天文月報第 69 巻 11 月号, 1976 年, 参照)。そして, 輝線は, B 型星 (表面温度 3 万度~1 万度) の紫外放射により電離された気体が, 再結合の際に生ずるものである。みかけの自転速度の小さい Be 星では輝線成分は比較的幅の狭い, 単一のピークの輪郭を示すことがよくある。Be 星は一般に高速回転しているので, このような Be 星を, 誇張して, 極 (ポール) 方向から見た星, ‘ポールオン・スター’ と呼ぶ。又, みかけの自転速度が大きい Be 星で, 輝線成分以外に, 水素, 一回電離金属線に, 鋭い吸収線がみられることがある。このような Be 星は分光学的に ‘ガス殻星’ (シェル・スター) と呼ばれる。解釈は, Be 星を赤道方向からみて, 赤道回転円盤が, 星の光を吸収して, これらの吸収線を作ったと考えればよい。

この赤道回転円盤の質量供給源は B 型星そのものと考えられてきた。しかし, 最近では, 連星の相手の星 (赤色巨星と考えられる) からの質量流入の証拠のある Be 星もみつき, その成因は 1 つだけではないらしい。チェコのハルマネック達は, Be 星は全て, 上述のような連星であるという仮説を提出している程である。Be 星の高速回転は, 質量流入の際, 角運動量をもらった結果と考えるのである。この考えとは逆に最近, X 線パルサーの主星として, いくつかの Be 星が同定され, 中性子星への質量供給源の 1 つとして脚光をあげている (天文月報第 74 巻 12 月号, 1981 年, 参照)。

### 2. Be 星の変光

恒星測光 (明るさ, 色の測定) の最も普及したシステムは, UBV 三色測光である。各々のバンドの中心波長は, おおよそ 0.36, 0.44, 0.55  $\mu\text{m}$  であって, 帯域幅は 0.05~0.1  $\mu\text{m}$  程度である。過去において, 最も組織的に Be 星の三色測光を実施したのはアルゼンチンのファインスタインである。彼は南天の 65 個の Be 星に対して 1963 年-1976 年の 13 年間にわたって, 観測を実施した。この結果から, 彼は実視等級 V で, 8 割の Be 星

\* 京大理 Ryuko Hirata: Light Variation of Be Stars (I)

が有意な変化をしたと報告している。また、チェコのハルマネックのグループはユーゴ・アドリア海フヴァール島に設置した 60cm 鏡を用いて、1972 年より、三色測光を開始している。勿論、その他にも、特定の Be 星の観測や、他の目的で観測された Be 星のデータが、UBV 測光の始まった 1950 年頃から存在する。そこで、過去の測光データを集めて、Be 星の変光の統計的性質を調べてみた。変光のタイム・スケールは 10 年のオーダーのものが最も卓越しており、これを調べることに、Be 星の活動現象、活動周期に迫る一つの手がかりを与えるかもしれないと思ったからである。図 1 に、色・等級図 (B-V, V) 上での、いくつかの Be 星の長期変化 (>10 年) を示す。上段には右上がりの傾向、即ち、明るくなれば、赤くなる (または暗くなれば青くなる) ものを、下段には逆に右下がりになるものを集めた。上段二つ目の X Per は X 線パルサーでもある。又、上段右端の  $\theta$  Pup は、明るさはあまりかわらず、色指数が変化する例である。下段右端の 48 Lib は複雑なふるまいをする例として挙げた。実は、下段の星は全て、ガス殻星、即ち、赤道方向から見ていると思われる星ばかりであって、上段の星は、ガス殻星でない Be 星、即ち、自転軸の方向、またはななめにみていると思われる星である。右上がり、右下がりの変化を示す星でも、その平均的な勾配は色々である。この平均的な勾配、 $\alpha = \Delta V / \Delta(B-V)$  は、観測者から見た自転軸の傾き  $i$  や分光型と密接に関係しているかもしれない。そこで、10 年以上の長期にわたるデータがあり、比較的多く観測され、変化も大きいもの ( $\Delta V > 0.15$  等、または  $\Delta(B-V) \geq 0.05$  等) で長期変動を反映していると思われる Be 星 75 個を選んだ。そして、図 1 の色・等級図上での変化、及び二色図 (B-V, U-B) 上での変化をプロットし、えいやっと、両図上で

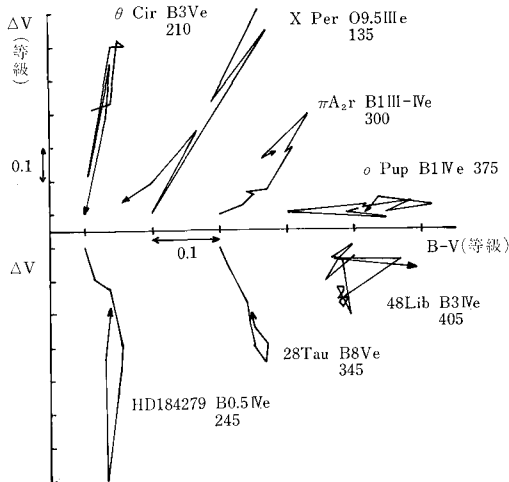


図 1 色・等級図上での長期変動の例

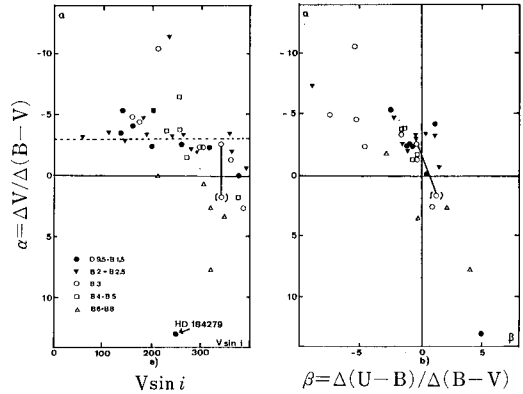


図 2 a)  $\alpha = \Delta V / \Delta(B-V)$  と自転速度  $V \sin i$  の相関  
b)  $\alpha$  と  $\beta = \Delta(U-B) / \Delta(B-V)$  の相関

表 1  $\alpha$  と分光型で分類した Be 星の各グループのみ  
かけの自転速度の平均値 (かっこの中は星数)

	O9.5-B1.5	B2-B2.5	B3	B4-B5	B6-B8
$\alpha \leq -3$	187(3)	184(8)	184(4)	243(4)	—
$-3 < \alpha \leq 0$	284(4)	332(5)	310(4)	? (3)	210(1)
$\alpha > 0$	245(1)*	—	385(1)	353(2)	328(3)

\* HD 184279

の勾配、 $\alpha$  及び  $\beta = \Delta(U-B) / \Delta(B-V)$  を求めてみた、何とか  $\alpha$  の値が求まるのが、75 個の内 46 個 (61%)、 $\alpha$ 、 $\beta$  とも求まるのは 33 個 (44%) であった。この結果を図 2 及び表 1 に示す。これらの図・表から次の傾向が読みとれる。

- 1) 分光型サブ・グループ毎にみると、 $\alpha$  が大きい程 (負→正)、みかけの自転速度が大きい (図 2a 及び表 1)。これは傾斜角  $i$  の効果と思われる。
- 2) 表面温度の低い Be 星 (早期→晩期 Be 星) 程、 $\alpha$  の値が大きくなる (図 2a 及び表 1)。
- 3)  $\alpha$  と  $\beta$  の符号は基本的に同じである (図 2b)。

傾向 1), 2) の例外は図 1 で示した HD 184279 であった。傾向 1), 2) を図 1 のような色・等級図上で模式的に画くと、図 3 のようになる。また、傾向 3) を  $\alpha > 0$ 、 $\alpha < 0$  に分けて、U, B, V の等級変化、即ち、エネルギー分布の変化で模式的に示したのが図 4 である。

UBV 測光データの統計から以上の結果を得たが、三色測光は、三つの波長しかわからず、かつ帯域幅が広いので、連続光のエネルギー分布を調べるには如何にも物足りない。もっと多波長で、きめこまかく調べることができると、解釈もしやすい。こう思っているとき、昨年 12 月のことだったが、メキシコのアルヴァレッツ氏から、データが送られてきた。氏はジョンソン達が始めた、 $0.33 \mu\text{m} \sim 1.1 \mu\text{m}$  を 13 の波長で、帯域幅もせまく設定した、いわゆる 13 色測光システム用の測光装置をその

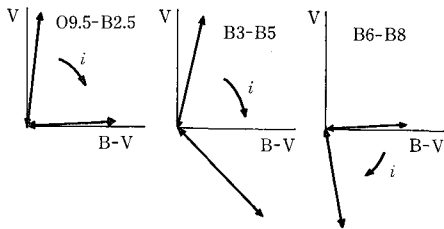


図 3 色・等級図上での、長期変動の模式図

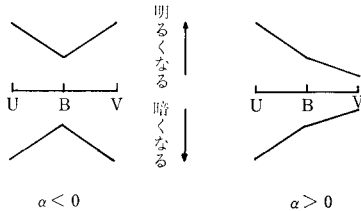


図 4 U, B, V バンドでの明るさの変動の模式図

まま引継ぎ、1977 年以來、北天の Be 星の組織的観測を実施している。この中から、ジョンソン達が 1965-1968 年に得たデータも含めて、変化の大きい 16 星のデータが送られてきたのであった。図 5 は、その中から図 1 に示した 3 星 (X Per, 28 Tau, HD 184279) を選んで、各波長での相対的变化を示したものである。たて軸は、適当な時期の各波長での値を基準にしての相対的变化である。横軸は、波長の対数を取り、UBV の各波長域も参考の為に示した。X Per は図 5 の  $\alpha < 0$  のタイプに属し、長波長側にいくにつれて更に変化が大きいことがわかる。28 Tau は、図 5 の  $\alpha > 0$  のタイプに属し、0.36  $\mu\text{m}$  より短波長側、即ち、バルマー連続光での変化が著しい。HD 184279 は早期 B 型星にもかかわらず、図 5

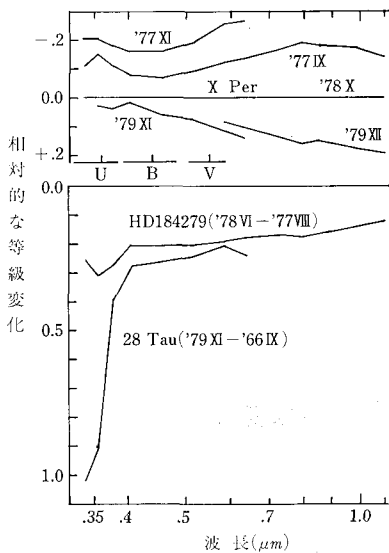


図 5 13 色システムによる、0.34-1.1  $\mu\text{m}$  における変化例

の  $\alpha > 0$  のグループに属し、UVB での統計では例外的な星であった。成る程、B, V 領域の色変化は小さく、図 1 のようになることがわかる。

実に紫外域、赤外域になると、エネルギー分布はどのように変化するのであろうか？ 紫外域 ( $< 0.3 \mu\text{m}$ ) では地球大気圏外での観測となり、赤外域 ( $> 1 \mu\text{m}$ ) では文字通り、赤外線観測となり、ともに学問的歴史は浅く、Be 星の長期変化のデータは極端に少なくなる。ここではもっとも良くデータが蓄積されている Be 星の 1 つの、28 Tau について、0.2  $\mu\text{m}$  から 4  $\mu\text{m}$  のエネルギー分布の変化を示す (図 6)。今度は、種々の測光システムの観測値を採用するので、同じプレアデス星団中の、通常の B 型星 18 Tau (B8 V) を基準にとって、システム間の系統誤差を取り除くことにする。横軸は図 5 と同じである。この星は 1973 年に活動期に入り、いわゆるガス殻星(ガス殻期?)となり、その外大気による吸収線は徐々に強くなっている (天文月報第 69 巻 11 月号参照)。図 1 に示したこの星の色・等級図上の変化は、実は活動期前から現在に至る変化を示したものである。図の紫外域のデータは OAO-2 衛星、スイスのゴレーによるバルーン観測、及び IUE 衛星による。可視域のデータは前記 13 色のデータ、アメリカのシルド氏から頂いたスキャナー観測のデータを用いた。又、赤外域データはジョンソン(1966)及び上松における宇宙研奥田氏の観測データによる。図 1 に示したように、可視域では、この星は活動期に減光し、その後 (1975 年) から、ゆるやかな増光に転じて現在に至っている。図 6 から明らかなように紫外域では、減光が単調に進行し、1979 年には活動前期に較べて、1 等級も下がっている。赤外域では 2  $\mu\text{m}$  以上で 1977 年には増光しているようだ。4  $\mu\text{m}$  以上の変光を知りたいところであるが、残念ながらわからな

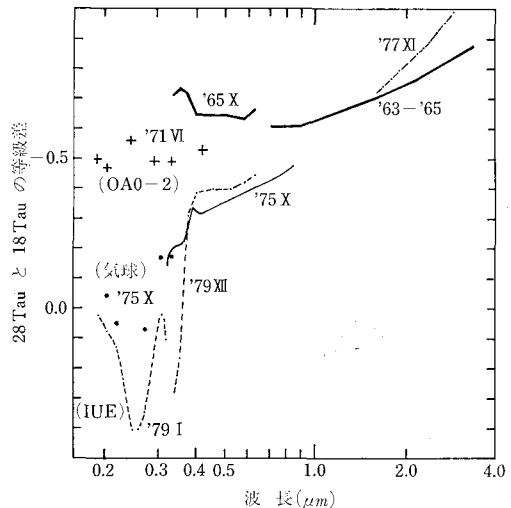


図 6 牡牛座 28 番星にみられる、0.2-4  $\mu\text{m}$  における変動

い。大きくみれば、28 Tau の広波長域の変化は図4の  $\alpha > 0$  タイプの延長であることが結論できる。

3. Be 星の偏光現象

さて、以上述べてきた Be 星の変光現象、即ち連続光のエネルギー分布の変化を解釈するに際して、実はもう一つの重要な手がかりがある。それは偏光観測である。恒星の偏光観測の歴史は、1946年、チャンドラセカールが恒星大気中の電子による光の散乱（以下、電子散乱）による直線偏光の理論的見積りに刺激されて始まった。その後、普通の恒星大気での偏光は観測にひっかかる程ではなく、むしろ、星間物質による偏光現象の発見・研究へとつながっていった。ところが、Be 星は異常に大きな偏光を示し、かつ時間的に変化することが次第に明らかになってきた。このことは、Be 星のまわりの気体——赤道円盤——によることを示唆している。

まず、円盤中の電子散乱により、直線偏光現象がどのように起るかを簡単に説明しよう。図7は、円盤をななめ上方から見た図であり、視線方向は紙面に直角と考えよう。中心の星Sを發した光は偏光していないとする。この星から光が円盤中の点Pにある電子により散乱され、観測者の方向にむかったとする。散乱角を  $\theta$  とすると、その確率は  $(1 + \cos \theta)$  に比例する。ところで、このような光路をたどる光は部分的に偏光し、直線 SP と視線方向を含む面に直角な方向の電気ベクトルをもち、その偏光の割合は、このような光路をたどった散乱光の内の  $(1 - \cos \theta) / (1 + \cos \theta)$  であることがわかっている。図に示した同一円周上の両矢印のマークは各点でのベクトルの方向と偏光量の大きさをあらわしている。例えば図のA点では、散乱角  $\theta$  は  $90^\circ$  で、観測者の方にむかう全ての散乱光が偏光している。円周上の他の点では  $\theta \neq 90^\circ$  の為に、偏光量は小さくなる。かくして、円盤全体からの寄与をよせ集めると、全体としての偏光度がわかる。円盤を赤道方向からみる場合を考えると、赤道面で散乱されて、観測者の方に向かう散乱光の電気ベクトルの方向はどの点でも自転軸方向であり、ベクトルがそろっている為、偏光度はもっとも高くなる。一方、自転軸方向からみた場合は、散乱角  $\theta$  は  $90^\circ$  で、同一円周上ではどの点でも偏光量（両矢印の長さ）は同じで偏光面は全ての方向がある。従って、全体としては偏光度はゼ

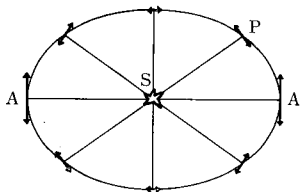


図7 電子散乱による偏光現象

ロとなる。同様に考えると、例えば球状の外大気の偏光度はゼロである。即ち、観測者からみて、散乱物質の形が視線に対して軸対称からずれるときに、直線偏光現象が起るのである。観測される偏光度は、星から直接、観測者の方にやってくる光等も含めた全体の光量に対しての割合である。上の説明では、一回散乱のみを考えたが、散乱に対する光学的厚さが大きくなると、多重散乱を考えねばならない。また、円盤中で光がうまれたら、その散乱も考えねばならない。

次に Be 星に対する偏光観測データをみてみよう。多数の Be 星の偏光度を、みかけの自転速度に対してプロットしてみると、確かに、みかけの自転速度の小さい星では偏光度がゼロに近く、みかけの自転速度の大きい星ではちらばりは大きい、大むね偏光度は大きくなっている（図8）。従って、基本的には、今迄考えてきた赤道円盤によると考えてよい。偏光度は高々2%程度である。電子散乱は波長依存性がないので、もし円盤内で電子散乱のみが起っているならば、偏光度は波長によらない。ところが、観測してみると、波長に強く依存していることが明らかになった。図9にその典型例を示す。図に示したように、その偏光度は、水素原子の第二準位からの電離エネルギーに対応する波長 ( $0.3647 \mu\text{m}$ , 図の  $n=2$ ) で不連続にかわっている。このことは化学組成として圧倒的に多い水素原子による光の生成・吸収過程が関係していることを意味する。かくして、本稿の主題である変光現象と偏光現象は密接に関連していることがわかる。次回には偏光も考慮に入れて Be 星の変光現象を考えてみることにする。

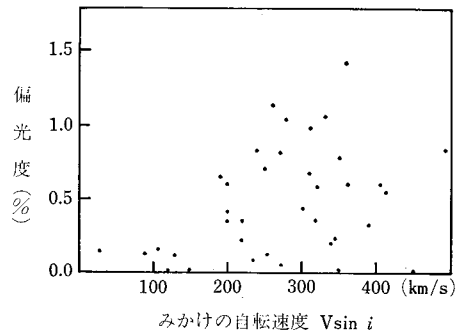


図8 偏光度と自転速度の相関 (波長  $0.65 \mu\text{m}$ )

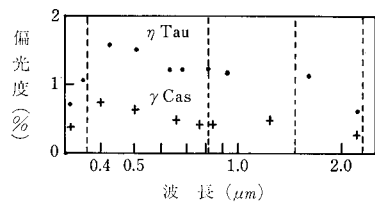


図9 偏光度の波長特性 ( $\zeta$  Tau-B1 IVe, 320 km/s,  $\gamma$  Cas-B0.5 IVe, 230 km/s)