

10⁴)において、または $R_c(\approx 5 \times 10^4)$ において、速度場が乱れて来る。これは水 ($P=7$) の場合。

- (8) R が大きくなると、対流細胞の形は不規則多角形になり、大きさもいろいろある。そうして有限の寿命 (\approx 流れが1循環する時間) になる。
- (9) 光学的な方法で、温度場を観測していると、 $R \approx 4.5 \times 10^4$ で、時間的な変動がはじまる(水の場合)。空気 ($P=0.77$) に対しては、 $R=5000$ である。 R/P を計算してみると一定(6400)である。以上は一つの実験に関するもので、確かめられてはいない。

以上の三種の乱流性の出現する R が互いに一致するかどうか、またその値も確かめられていない。またこの R が P によるのかどうかもはっきりしてない。 R/P には熱伝導係数が入って来ず粘性係数のみが残るので、乱流の出現を決める量は R/P であるという説もある。しかし P が小さいと $R=R_c$ でも R_c/P はいくらでも大きくなるのでこの説は一般には成り立たない。

- (10) $R \approx 10^6$ で、 $N \propto R^{\frac{1}{2}}$ から $\propto R^{\frac{1}{3}}$ に変わり、対流の性質も変わることが観測されている。

つぎに以上の事実を理論的な面から考察する。(次号に続く。)

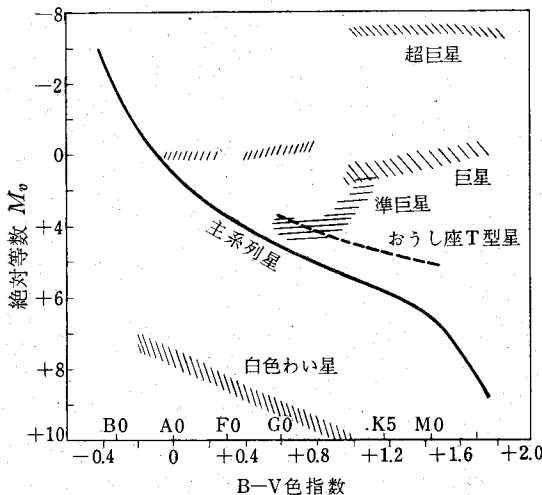
お う し 座 T 型 星

橋 本 敬 造*

1. はじめに

HR 図をみると主系列星とはほぼ平行でこれより 2~3 等級明るい一連の星がある。これがおうし座T型星である。これらの星はさまざまな興味ある現象を示す。これらの星の代表的なものは、この名の示すようにおうし座Tという星である、この星は 1852 年イギリスのヒンドが、これをとりまく星雲を観測しているときに変光星であることを発見した。その後、同じような性質をもつ多

くの星が発見されたが、これら一群の星の代表的なものというわけでおうし座T型星という名称が生じた。おうし座Tそのものは非常に不規則かつ迅速な変光を示す。これについて一角獣座のRとか南冠座のSが、同じく星雲の観測中に不規則な変光を示す星であることが発見されたが、この種の星の研究が本格的になされ始めたのは、1940 年代の A. H. ジョイの統一的な研究の後のことである。一連のおうし座T型星の研究はジョイ以降三つの段階を経たと考えることができる。まず、ジョイはこれらの星のスペクトルの様子と測光の結果から、つぎのような特長を示した。それは明るいにしろ暗いにしろ星雲を伴うものである。そのスペクトルに輝線をもつ変光星であるという点であった。40 年代後半になっておうし座Tの現象は、通常の星が星雲の中を通過するとき、周囲から物質を受けとって大気が物理的に変化をしこれに対応して起るのだと考えられるようになった。こ



第1図 HR 図におけるおうし座T型星の位置

表1 代表的なおうし座T型星

	実視等級	変光範囲	スペクトル型
駝駝座 RW	9.0-12.0	3.0等	G 5
" SU	9.7-11.3	1.6	G 2
南冠座 S	10.8-12.5	1.7	G
狼 座 RU	9.3-13.2	3.9	G
一角獣座 R	10 -14	4	G
牡牛座 T	9.5-13.0	3.5	G 5
" RY	9.3-12.3	3.0	G 0
" UX	10.6-13.3	2.7	G 5

* 京大理

K. Hashimoto; T Tauri-type stars.

の考えはスペクトル観測が進み輝線の分析が進むにつれ大きな困難に出くわした。つまり、星自体が物質を放出している事実が認められたのである。そしてまわりの物質が星におちこんでいる証拠は観測されないのである。

こうしておうし座T型星は、はじめてアンバルツミアンが指摘したように、比較的小質量の、まだ重力収縮しながら主系列に向けて進化しているきわめて若い星であるという考え方が支配的になった。その後の星の進化論はこれを支持し、HR図上での位置は逆に進化論を実証している。

2. おうし座T型星

はじめに、これらの星の銀河中での分布はかなり制限されていることに注目しよう。銀河平面から大きくはなれることはなく、銀緯は最大なものでは 14° である。また、オリオン、おうし、一角獣、ぎょしゃなどの星座に限られていて、これらの星雲(オリオン星雲など)領域にあることが多い。一般に、非常に暗い天体(もっとも明るいものでも実視等級は9等)で変光範囲は、ほぼ3等級前後である。

1945年、ジョイは11個の輝線をもつ一群の星をおうし座T型変光星と名付けた。この中に、もちろん、おうし座Tが含まれていたが、これらはいずれも、光度変化はよくわかっており、有名な不規則な変光星であった。その後、この種の星はそのスペクトルに H_α の輝線をもつか否かによって発見が進められ、光度の変化は第二義的なものになった。これらがひじょうに暗い天体であり写真測光が困難だったからである。とはいえ変光を行なうことがこれらの一般的な性質である。しかもこの変光は、まったく不規則でしかも突発的である。例外的には周期のわかっているものがあり、たとえば、ぎょしゃ座RW 5日、南冠座Sは6.1日、おおかみ座RUは約3.6~3.8日である。

これらの星は、光度曲線を作り、その形によって分類がなされている。パレナゴはオリオン星雲の中の変光星をつぎのように分類した。光度曲線上で暗いときよりも明るいときにはげしい変光を示す天体をクラスI、平均の光度のところで変光のはげしいものをクラスII、変光が暗い部分でひんばんなものをクラスIII、変光にとくに特長のないものをクラスIVとした。クラスIとクラスIIIはさらに3つに細分される。たとえば、おうし座T型星について考えると、おうし座RYは数百日の間、光度はもっとも低いところにあり活動をほとんど示さない。つぎの数日は、もっとも大きな光度に近い状態にあって、しばしば極小点が現われたり、ゆっくりした周期の振動が現われたりする。したがってこれはクラスIであり、ぎょしゃ座RWはクラスIIである。この型以外の星の例ではフラッシュ的な変光を示すおうし座EYはク

ラスIIIといたった具合である。

もっとも興味あるのはおうし座T型星のスペクトルに現われるさまざまな特長である。まず一見して太陽の彩層の日食のときに得られるフラッシュ・スペクトルによく似ていることに気付く。水素のバルマー線と一回電離したカルシウム(CaII)のHおよびK線が強い輝線として現われている。なおバルマー線のガンマ(H_γ)とCaII Kとはほぼ同じ強度であることが多い。この種の天体スペクトルだけに存在するのは電離していない鉄(FeI)の4063Å, 4132Åの波長をもつ輝線である。ふつう一回電離をしたイオウの禁制線[SII]4086Å, 4076Åが輝線として現われており、しばしば現われるものとして禁制線[SII]6717Å, 6731Åとか中性酸素の禁制線[OI]6300Å, 6363Åとか輝線がある。注目すべきことは、中性リチウム(LiI)の6707Åがかなり強い吸収線として現われることである。

さてスペクトルの吸収線からこの星々のスペクトル型をきめるとF型の終り(F8)からG型、K型、さらにM型の始め(M2)の範囲になる。おうし座TはG5、ぎょしゃ座RWもG5、南冠座SはGである。F型より早期のスペクトルを示すものはなくここで切れていると考えられるが、M型の始めて切れるのは、天体が暗く観測的に困難だからである。一般に輝線が強い天体では、吸収線がおおわれるし、また、明るい連続スペクトルによって吸収線がおおわれることもあって、スペクトル型の分類は困難なようである。また、この種の天体には紫外部での連続スペクトルが、非常に強いものがあって吸収線がすっかりおおわれてしまっておりこの場合水素のバルマー線はかなり強い輝線を示す。なお注意しておいていいことは、スペクトル型が晩期になるとHeの輝線がしばしば現われることであり、ここで述べた輝線はすべて強度が変化するし、このようなスペクトル的な特長は考えている星が星雲状物質の中にあるか、その近くに存在するときに現われることである。

星が進化の途中、おうし座T型星の段階を経るとすれば、星雲状のものを伴うか否かとか、輝線の強度が変化するとかいうことは、第二義的な特長であろう。一般的に暗いこれらの天体のうちさらに暗いものになると明るい水素線とかカルシウムのH, K線以外はほとんど見えなくなる。そこでここでおうし座T型星に関連した天体についてふれておきたい。

3. おうし座T型星に関連した天体

これまで述べた、輝線を持つおうし座T型の星は、星雲を伴う不規則変光星の半分にも満たない。オリオン星雲の研究によって、ここに存在する多くの変光星の中に水素のバルマー・アルファ(H_α)の輝線を持たないものがあることがわかってきた。この領域におうし座T型

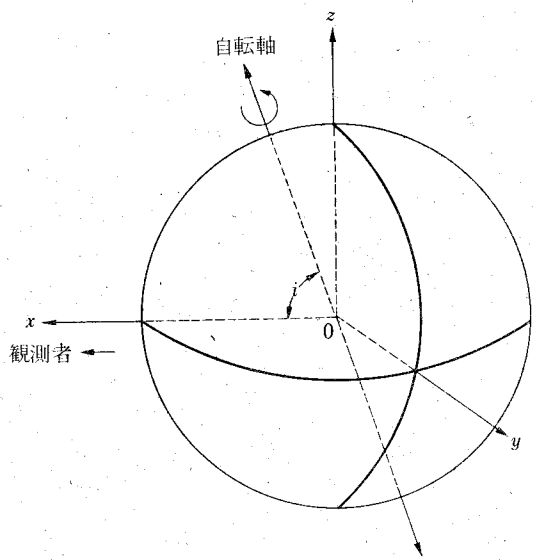
第2表 H α の輝線の出現頻度

	パレナコの光度曲線による分類			
	I	II	III	IV
H α の輝線をもつ変光星	7	18	9	3
H α の輝線をもたない変光星	12	14	8	6
H α の輝線をもつ星の割合	0.37	0.56	0.53	0.33

(写真実視等級が 12 等より暗いオリオン星雲変光星について)

星があるので、このような天体とか、一般に輝線を示さない変光星も重力収縮をおこなっている星であろう。したがってこのような不規則な変光をすることが、重力収縮中の星の一般的な現象であり、輝線スペクトルに現われる星の活動はそれほど一般的な性質といえないかもしれない。輝線があるか否かは星雲の中の変光星の光度曲線に大局的な影響を与えないからである。表2はハービヒがまとめたもので、H α の輝線があるかないかは写真測光の分類にたいした影響を与えていない。輝線をもたない変光星の観測はオリオン星雲、NGC 2264、NGC 6530 についてよくまとめられており、輝線を持たない変光星の変光星全体に対する割合は、オリオン星雲は 48%、NGC 2264 は 36%、NGC 6530 は 41% である。

つぎに、ぎょしゃ座 RW に代表される一群の星がある。変光が迅速で、変光範囲は 1~4 等級、周期は示さない。光度曲線に示される変光は連続的な場合と、変光を示す部分の間にほとんど光度変化のない区間が存在する場合とがある。もちろん、個々の星によって多様性が



第2図 星の自転軸と観測者との関係。 v km/sec の星の自転速度は観測者がみると、 $v \sin i$ km/sec となる。

ある。ところがこの種の星はすべておうし座T型星に含まれているし、ぎょしゃ座 RW そのものはおうし座T型星の代表的なものであるからこれを別の一つのクラスにまとめるのは適当でないであろう。

さらに、進化論的にはおうし座T型星より若いハービヒ・ハロ天体があるがこれについては省略する。

4. 星の進化論とおうし座T型星

おうし座T型星は、中心部分の温度が数百万度以下で、星全体がほとんど対流現象をしながら重力収縮を行なっている非常に若い天体である。この観測的な裏付けを簡単に書いておく。この種の星は、たとえば、オリオン星雲のような領域では、同じ光度の通常の星にくらべて、10倍から100倍もの大きな分布をもつ。また、明るいO型、B型のスペクトルをもつ星が存在する領域に非常に多く見つかっている。オリオン星雲中ではこのような早期のスペクトル型の星は、誕生して間もない天体なので、ここに共存するおうし座T型星は、晩期のスペクトル型(G型とかK型など)をもつ同じような現象を示す天体であるといえる。これは、おうし座T型星がまだ重力収縮をしている星であることを示す。ここで、おうし座T型星が一般の星野から、たまたま星雲領域へ入った天体だと考えられていたことがあったことを想起してほしい。

あとで述べるように、おうし座T型星はスペクトルの吸収線がかなり広がっている。またHR図をみると主系列より絶対等級で2~3等級上にある。この2つの事実は、星が収縮しながら主系列に向かって進化していると考えない限り説明できない。

なお星野から星雲領域へもぐりこむことによって、おうし座T型星のスペクトルの特異性があらわれるという考えは、たとえばおうし座の星雲の中でおうし座Tがわずかに1~2 km/sec ぐらいの速度しか持たないことによっても正しくないことが示される。

結局、おうし座T型星の年齢は、個々の星によって差はあるが、ほぼ100万年前後と考えてよいだろう。

5. おうし座T型星のスペクトルの特異性

おうし座Tのスペクトルは、サンフォードが約10 A/mmの分散度をもつ分光器系で得た結果によると、その吸収線はいくぶん浅くかつ広がっていた。その後のハービヒの観測によると、この広がりの度合を $v \sin i$ であらわすと(図2参照)、おうし座RYは45~50 km/sec、おうし座UXは20~25 km/sec、おうし座Tは20 km/sec、ぎょしゃ座SUは65 km/secであった。もし星がかなり高い分散度のスペクトルを得るのに十分なだけの明る

さを持っているとすれば、このスペクトルの吸収線はふつうのG型星のような鋭さがなく、しかもかなり広がっているのが一般的傾向である。ちなみに、G0型の通常の主系列星の広がり $v \sin i$ は15 km/sec ぐらいである。このように、吸収線が主系列星の同じスペクトル型の星のものよりも広がっているという事実をそのまま、星の自転が主系列星よりも大きいということに結びつけることの当否は別として、いま、星の自転によって吸収線が広がっていると仮定しよう。おうし座T型星の段階の星がまだ重力収縮をしており、主系列に向って進化していることはすでに述べた。もし主系列に落ちついたらとすれば、おうし座T型段階の星のスペクトル型は、現在よりも早期になる。たとえば、おうし座RYは、いまのスペクトル型はG0であるが、この星の質量が太陽のそれの1.6倍であることを考え合わせると、主系列に落ちついたときのスペクトル型は、F0型からややA型によったところ、ほぼA7ぐらいである。それまでに半径が収縮することを考えると主系列に到達したときの自転速度はほぼ100 km/sec ぐらいである。一方、観測によれば主系列星の自転速度はこの値に近い。それでおうし座T型星の吸収線の広がりには自転による効果がかかなり効いているのだろう。しかし、対象が暗いので観測に限界があるということは注意しておいてよい。

おうし座T型星のスペクトル的特長としてつぎに、中性リチウム(LiI)の吸収線が強いことである。観測によると、太陽大気の約100倍にもなる。サンフォードはLiの6707Åの吸収線がおうし座T型星にあることに気づき、ハンガーはこの星の外に、おうし座RYにもLiIの吸収線があることに気づいた。ボンサックとグリーンスタインは、おうし座T型星とこれによく似た天体を観測し、14個のうち12個までそのスペクトルにLiIの6707Åの線があることをたしかめ、5個の星については、金属元素に対するリチウムの存在比を求めた。その値は太陽の場合の50倍から400倍である。

なぜこのようにリチウムが多く存在するかということについてつぎの2つが考えられる。第一は、内部でヘリウムが核融合をしその生成物であるリチウムが対流によって表面に運ばれるという考えであり、第二は、星の表面近くで加速されたプロトンがそこに存在する炭素、窒素、酸素などをぶちこわして、リチウムが作られるという考えである。プロトンを加速する機構としては、高い磁場をもつ局所的に活動のはげしい領域を考える。このような領域は、星全体のエネルギー・スペクトルにほとんど影響を与えない程度のものである。このうちどちらが実際に起こっているかを決定するのは困難だけれども後者の現象が実際に起こっているのではないだろうか。

ところで現在の太陽のリチウム量が比較的少ないのは

なぜだろう。主系列星になるまでの重力収縮の期間に、表面からかなり深いところまで到達する対流現象があれば、内部の温度の高いところでリチウムが破壊されると考えられるだろうし、表面領域のリチウムにとんだ物質が星の大気から剝離され主系列星になったときには、表面付近はリチウムが乏しくなっているとも考えられる。けれども、おそらくは、星が主系列星となってから現在にいたるまでの長い間に(太陽で数億年)表面付近の対流現象によってリチウムが破壊されていったのだと考えるのが妥当であろう。

さて、おうし座T型の星から物質が放出されているという考え方はスペクトル上のどのような事実に対応しているかを考える。星の輝線スペクトルの輪郭をみるとつぎのような様子を示している。輝線スペクトルに吸収線の成分が重なりあっている。たとえば、もっとも強い輝線としてあらわれるH_α線とかCaIIのK線とかをみると、吸収成分があらわれており、しかもこの成分は、かなり短波長の方にずれている。これから推察されることは、おうし座T型星の大気はかなり広がったものであり、この大気ではガス状の物質がかかなりの速度で上昇しているということである。その上、数個の星を除けば、この上昇した物質が再び下降してくるという事実がない。したがってこの物質は、星をはなれてしまうと考えるのである。こうした物質が星から離れたところとか、周囲に存在するのが星雲であり、これがたいていのおうし座T型星のスペクトルに見られる禁制線の源であるとするのである。

それでは、このような輝線の輪郭にあらわれる吸収成分の輝線の中心からのずれの測定から、星の大気物質が放出される速度はどのぐらいかといえば、おうし座Tで70-170 km/sec、おうし座RYは約90 km/secである。このようにして放出される物質の成分がどのようなものかは、まず、はっきりわかっていない。しかし、星の周囲の禁制線を作る領域を支えるのに必要な物質の量は算出される。オスターブロックは、おうし座Tの星雲状領域の電子密度を一回電離した酸素の禁制線の二重線3727Å、3729Åの強度の比から決定した。それから得た、星雲領域の質量は、太陽質量の一万分の一であった(おうし座Tの星自体の質量は、太陽の1.25倍)。なお、このようにして形成される星雲で生じる、イオウや酸素の禁制線は、ぼんやりと広がった様子を示す輝線であるので、このような星雲状領域は、星からつねにかなりのスピードの物質が供給されているか、または、ここで中性原子とか電離した原子とかが、大きな速度で運動していると考えられる。けれども、このような事実から、おうし座T型星の大気そのものが、かなりの速度で膨張し(262頁へつづく)