

炭素星の分光観測

平井 正 則*

1. はじめに

最近の大口徑望遠鏡の活躍や赤外観測技術の進歩はブラックホールや銀河核の研究ばかりでなく、炭素星研究にも非常に本質的な変化をもたらしつつある。ここで、最近の炭素星研究の一端を紹介するとともに、今後の研究課題を考えたい。なお、本誌にはこれまでも炭素星に関する立派な解説があるので、この際、是非参照されたい。

2. リッチャーによる炭素星起源

1978, 1980年, ブランコ, ブランコ, マッカーシーはセロトロロの4メートル望遠鏡を用いて, 大, 小マゼラン雲中のM, C型巨星の掃天観測を行なった。結果はM型巨星に対するC型星の相対数はわれわれの銀河系に比べて極端に多かった。炭素星の光度に関心をもつリッチャーは1981年大マゼラン雲中の炭素星71星についてのVIJ赤外測光観測と25星のイメージチューブによる分光観測を行ない, 炭素星の誕生と死に関する次の提案を行なった。

図1はリッチャーの示したHR図である。たて軸は彼の測光等級Iから推算した全輻射等級 (M_{bol}), 横軸は同じく (J-K)₀ の色指数から得られた色温度の対数值 ($\log T$) である。プロット中で●印はすべてのN型炭素星, ×印はM型巨星, △印は¹³Cの豊富な山下分類でのJ型炭素星, □印はSC型炭素星を意味する。カッコは炭素星が連星系の一員であるため, 測光観測値が不確定性を含んでいるものである。リッチャーは比較のために, これまでに得られた数値計算による理論的な結果を実線で示した。図中央から下端の実線は種族Iの1.4と1.5 M_{\odot} の質量をもつ星の巨星枝, SFは7 M_{\odot} の二殻

源星のヘリウム殻フラッシュに対する軌跡, 上辺のものは超巨星を示す。リッチャーの論旨に従うと, 図中のすべての炭素星はヘリウム燃焼段階の巨星領域 (図上辺) にあり, M型巨星に比べて, いずれも, ヘリウム殻フラッシュを経験した領域 (実線の右辺) にある。この事実と大マゼラン雲中での観測事実を結び付けて, 何故, われわれの銀河系より, 大マゼラン雲で多くの炭素星が発見されるかを説明した。

大マゼラン雲中で30~50億年前に爆発的な星の形成が起った。一度に多数の主系列星が誕生したのであろう。そのうち, 1.2~2 M_{\odot} 程度の質量をもつ主系列星は水素燃料を使い果たして, 巨星へと膨脹した。中心核質量0.56~0.75 M_{\odot} のこれらの星はヘリウム燃焼を起し, 二重殻構造をもつ巨星となった。杉本グループの計算結果にみられるように, 熱的に不安定な構造をもつこれらの星はヘリウム殻フラッシュを起して, 中心近くの核反応物質を恒星外層に運んだ。このヘリウム殻フラッシュが何回も継続するうちに, 3 α 反応で生まれた炭素は大気に混入し, C/O 元素組成比が1を越えて炭素星が誕生した。藤本(1980)の議論にあるようにヘリウム殻フラッシュの際, 充分な水素燃焼が起る星では¹²C/¹³C比は平衡値4に近く, J型炭素星の誕生となった。こうして, 一度に出現した主系列星はM型巨星の段階を通過して, 現在, 炭素星段階にあり, 多数の炭素星をみることになる。さらに, 炭素星段階の寿命は最大200万年, これらの炭素星の中心核を除く, 外皮質量は $2.3 \times 10^{-7} M_{\odot}$ /年の割合で炭素の多量に含まれた大気を星間空間へ質量放出し, 炭素星の死へと進む。このリッチャーの結論には, 彼の推算した色温度は有効温度と考えると良いのか, 理論線と観測の重ね合せは正確か等のいろいろな問題はあるが, 今まで観測してきたわれわれの銀河内の炭素星では独立に決定できなかった光度や炭素星密度の情報を含む点で重要である。

逆に, われわれが今までに得てきた炭素星研究の総合的な評価をしているともいえよう。

3. 炭素星の物理

恒星の基本的な物理量には光度, 有効温度, 表面重力加速度, 元素組成等がある。これらの物理量を互いに独立な観測から決定することが望ましい。ここで, 炭素星についての主な困難を考えてみよう。晩期型星で低温側に位置する炭素星では主な放射エネルギーは赤外波長域に集中していて, 炭素星の赤外観測に対して歴史的に, 修得され, 磨かれてきた従来の光学的手段はそれほど有

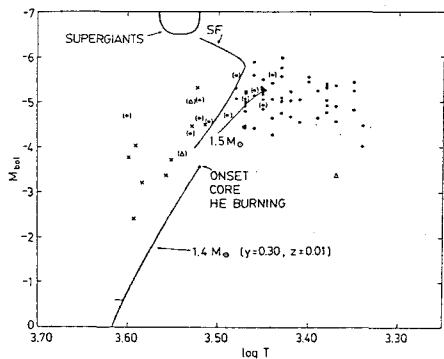


図1 リッチャーによる大マゼラン雲のN型炭素星のHR図 (ApJ, 243, 744, 1981)

* 福岡教大 Masanori Hirai: From the Spectroscopic Study of Carbon Stars

効ではなかった。また、低温大気では辻の解離平衡モデルで示されるように、大気的主要元素の水素やヘリウムは影をひそめ、次の C, N, O のような元素や多種の金属元素の組合せによる多種類の分子が 10^8 を越える無数の吸収線を作り出す。また、稀かな元素組成比の変化が、恒星大気の構造を大幅に変化させ、観測されるスペクトルの様子を複雑にしてしまう。これらの困難を克服するには、新しい赤外線を取扱う技術と、多数の吸収線を分解可能な高分散スペクトルの観測手段が必要であった。藤田の晩期型星の可視、写真赤外スペクトル観測から得られた、C, N, O 元素組成比のちがいが M, S, C 型の分光型を作るという以前からの提案は辻の解離平衡モデルによって示された。辻モデルの低温側では、多原子分子、 C_2H_2 や HCN のような複雑な分子の存在も指摘された。筆者は当時可能な写真赤外域 ($1 \mu m$) スペクトルにより、その吸収スペクトルを同定したが、1977 年上松観測所で野口等は炭素星に特有な吸収が $3 \mu m$ に存在することを発見、1978 年リッジウェイ等はこれが C_2H_2 , HCN の分子線の重合であることを示した。1972 年から山下は 250 星に及ぶ多数の炭素星の可視光スペクトルの観測を行ない、炭素星のキーン・モルガン分類を一步進めた。山下は可視光で分子帯の影響の少ない原子線強度比をもとに様な炭素星の温度系列を見出した。辻は 1980 年炭素星モデルを基に、吸収帯の最も少ないと考えられる赤外 L 等級とモデルの組合せから、ミラ型を除く N 型炭素星についての有効温度を決定した。これはリッジウェイ等 (1977) の炭素星のエンペイ観測の結果と矛盾しないという。しかし、この辻による赤外域で決めた温度は山下による可視域での温度系列と逆相関しており、赤外と可視光でのこの不一致は物理的にどのように説明されるのかという点で興味ある問題を提起している (図 2)。これらの問題の解決には赤外高分散スペクトルの物理的に首尾一貫した分光解析が重要と考えられる。

このように、炭素星の温度系列と例えば C, N, O 元素組成比の変化系列とは完全に分離しているとはいえない。そこで、前にあげた物理量決定には総合的に各波長域のスペクトルを説明し得る炭素星大気モデルが重要であろう。現在、辻の解離平衡モデルを基礎とするケル

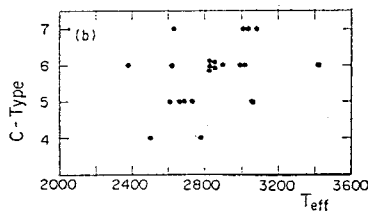


図 2 辻による C 分類と有効温度 (J. Astrophys. Astr., 2, 95, 1981)

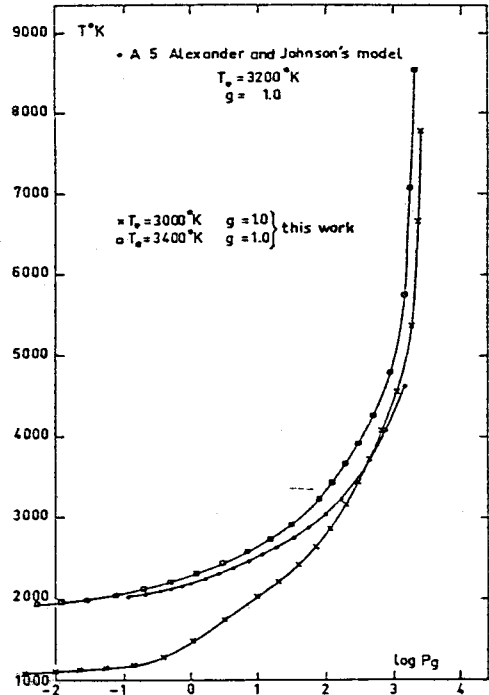


図 3 ケルシー・ケルシー・辻による炭素星大気モデル (Astron & Astrophys., 31, 265, 1974)

ー、ケルシー、辻 (1974)、ケルシー、ケルシー (1975) の炭素星モデルとジョンソン (1982) のモデルが存在する (図 3)。いずれも多数の分子線を統計処理することで大気の不透明度を算出するもので、計算途上で用いるスペクトル線幅をどう選ぶかによって、最終的な大気の不透明度、すなわち、大気構造は大きく変わるため、十分な精度を得ることは難かしいようである。これは M 型星に比べて炭素星スペクトルを被う CN, C_2 分子の吸収線の波長分布が比較的一様であるという特質に起因する。

4. 元素組成比

山下分類の温度系列ともうひとつの特色は元素組成比によるグループ分けにある。例えば種族 II の CH 炭素星や ^{13}C の豊富な J 型星、リチウム星はその典型である。これ等の分類に対して、杉本グループ (1975 年 12 月号杉本の記事参照) は N 型炭素星の起源として、中低質量巨星のヘリウム殻フラッシュとそれに伴う恒星外層への核生成物の混入を計算した。R 型炭素星は置いても N 型炭素星の起源はほぼ説明可能であり、1980 年藤本は J 型炭素星について、ヘリウム殻フラッシュに伴う水素燃焼は CN 反応の結果として $^{12}C/^{13}C$ 値を平衡値にする可能性について論じた。 $^{12}C/^{13}C$ 値を観測的に決定する試みは藤田、辻 (1977) の成長曲線の方法によって行なわれた。この方法は、大気の励起温度をどう選ぶかによって結果が影響される。一方、クライメンハーガ等

(1982)は理論的スペクトルの方法により $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の値を決めた。この方法は線輪郭を適当なパラメーターを選んで計算し、観測と計算された線輪郭の一致具合で総合的に $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 値を決定する。この方法には物理的に余り意味のないパラメーターを選択したり、重合が単純にたし算される等の点で難点がある。両者の解析結果は余り一致が良くなくて、山下分類によるJ型炭素星としてのグループ分けの域を出ないようである。筆者は低温炭素星のいくつかで両方の方法を用いて $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 値を決定してみたところ、両方法とも同じ結果を与えた。従って、高分散スペクトルにより、可能な限り重合を避け、充分吸収線の分離を行なう事が重要と考えている。さらに、両観測者はいずれも写真赤外でのスペクトルを問題にしているが、今後、赤外域スペクトルでの解析も必要であろう。

前述の藤本によれば、杉本グループの計算は現在観測される炭素星の元素組成比と比較できる程度に進んでおり、今後、観測事実に対応する条件に基づき数値計算を行なうことで、観測される元素組成比との比較を行なうことは恒星内部構造論の実証としての意義をもっているといつて良い。

5. 重元素異常

杉本グループの議論によるヘリウム殻フラッシュでは中性子の放出が起り、重い核を作る s-過程が進行する可能性がある。内海は1967年来、57星に及ぶ炭素星の可視スペクトルを観測しており、その結果、C6~C7の星では稀土類の元素組成比が10~100倍程度の超過を示すことを明らかにした。これは山下分類において指摘される重元素量の変化を実証するものでもある。筆者はこの稀土類の超過については大気構造と元素組成比との間には密接な関係があり、この特異性は個々の星についての物理的に首尾一貫した解析による検証が必要ではないかと考えている。特に低温炭素星ではグラファイトのような固体微粒子の存在が指摘されており、重力加速度は巨星大気表面ではきわめて小さく不安定な状態が考えられる。内海の指摘する稀土類は電離ポテンシャルが低く、ふつうの電子供給源であるアルカリ金属と殆んど変わらない。大気の電離度や励起度は内海という稀土類超過に影響されないであろうか。いささか空想に近いが、固体微粒子の放出は大気元素の選択的な吸着を起さないであろうか。筆者はミラ型変光星で低温炭素星のひとつに前原(1971)、辻(1971)がM、S型星にみられると同じ性質の二重分子線を同定した(図4)。しかも、この二重線から得られた $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は互いに異なっていた。

分光分類により指摘される温度系列、元素組成比のちがいを、各星毎に、暗い紫外、可視、明るい赤外での慎重なしかも物理的に一貫した解析を通して、実証していく仕事が現在の炭素星研究にとって大切ではないであろうか。

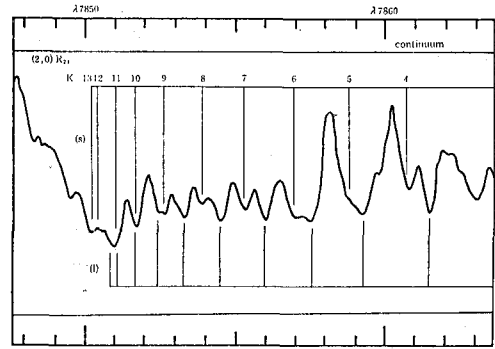


図4 白鳥座U星(C8, 2e)の極大後期にあらわれたCN分子の二重線。

- (s) は膨脹すると見られる熱い成分。
- (l) は前回の脈動によって膨脹した外部殻の落下を示す冷い成分。

うか。

6. あとがき

ここで議論された事柄も含めて、恒星の内部構造進化の結果多様化した内部構造の反映は恒星の種類を多様化し、低温状態はこの多様性を倍増しているようにみる。

特異な元素組成をもつ炭素星は、弱い表面重力のもとで、特異な元素組成をもつ大気を星間空間へと放出する。開放系としての炭素星は、非可逆的な元素組成比の変化を通して、星間気体、星間塵の中にその歴史を書き込んでいくように思える。このような動きは銀河系外星雲での炭素星研究により得られる飛躍ともう一步精度の高い炭素星研究の両面によって、新たな描象を得てゆくのではないかと考えている。

お知らせ

東レ科学技術賞および研究助成候補者募集

上記について東レ科学振興会より本会あて推薦依頼が来ています。希望者は10月25日までに、学会庶務理事まで御連絡下さい。募集の要項はつぎのとおりです。

科学技術賞……(1) 学術上の業績が顕著なもの (2) 学術上重要な発見をしたもの (3) 重要な発明をして、その効果が大きいもの (4) 技術上重要な問題を解決して技術界への貢献が大きいもの、に対し金メダルと副賞300万円。

研究助成金……科学技術の基礎的な研究に従事し、その研究の成果が科学技術の進歩・発展に貢献するところが大きいと考えられる研究を行なっている研究者、またはそのグループに対し総額1億円前後、1件1,000万円程度。但し、とくに重要と認められる研究については、3,000万円程度まで助成が考慮されます。

贈呈期日は両方とも昭和59年3月予定。