

超巨星の表面組成異常と進化段階

竹田 洋一

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ltakeda@c1.mtk.nao.ac.jp

大質量星が主系列を離れた後の進化段階にあたる超巨星の表面で見られる軽元素の化学組成特異性に関する我々の観測的研究の現状について報告する。組成異常は恒星内部に蓄積された水素燃焼生成物が効果的な混合によって外層に汲み上げられたことに原因があるようだがなくなる特異組成を示す超巨星（特に早期型）がいかなる進化を経たかについて考察する。混合の物理過程に関しては古典的な対流のみならず高速自転に起因する機構も重要な役割を果たすと見られる。

1. 大質量星の進化

恒星の中で本質的に最も明るいクラスは超巨星と呼ばれるグループであるが、一般的にこれらは $M \geq 10M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量) の大質量星が中心部の水素が燃え尽きるに及んで安定な主系列期を終えた結果、HR 図上を動きながら超新星爆発という最後の破滅的終局へと向かいつつある過渡的段階にあるものと考えられている。しかしこれら大質量星の進化の詳細についてはまだ良く理解されていない。従来は主系列（この質量に対しては晩期 O 型あたり）を離れると半径が膨らみ始めるとともに表面温度が下がり全体の光度をあまり変えずに HR 図上を右に動き、青→白→黄→赤と温度の低下に応じて色を変えながらより晩期の超巨星へと移行し、この赤色超巨星の段階で進化の終焉を迎えていわゆる II 型超新星として大爆発を起こすものと考えられていた。すなわち大ざっぱに言えば右向き一方向の進化である。しかるにこの単純な描像に波紋を引き起こしたのは今から遡ること八年前の二月末に 16 万光年離れたお隣の銀河大マゼラン星雲中のタランチュラ（毒ぐも）雲近くに出現した超新星 SN 1987 A であった。南天のため残念ながら日本からは観測出来なかったとはいえ数百年ぶりの肉眼で見える超新星として当

時の天文学界にかなりの騒動をまき起こしたこの SN 1987 A は出現前の写真と詳しく比較することで実は早期 B 型の青色超巨星が爆発したものであることが明らかになったのである。現在ではこの爆発前の大質量星は一度 HR 図上を右に動いて赤色超巨星となった後に再び左に動いて青色超巨星に至り、そこで爆発したと信じられている。この青→赤→青の進化に一つの理論的な解釈を試みたのは日本の齊尾氏達のグループであった¹⁾。彼らは大マゼラン雲の金属量が我々の銀河系の数分の一と少なめであることを前提にすると、もし星の内部で効果的な混合が起きてヘリウム（水素燃焼の生成物）が十分汲み上げられて外層が He 過剰になったと仮定した場合、外層の不透明度の被る効果によってこの進化経路が説明されうことを示した。SN 1987 A の初期スペクトルの解析から確かに外層のヘリウムが過剰になっていたことが示唆されるので²⁾、この解釈は観測事実とも矛盾しない好ましいものである。ただこのような大質量星の外層混合の具体的な機構については諸説紛々であって未だ納得のいく理論が存在しないのでヘリウムの汲み上がるプロセスが明らかになっていない点は物足りない。この混合のメカニズムを解明することは恒星進化を理解するための重要なキーポイントである。それには観測面からの

アプローチ、すなわちスペクトルを解析して求められる表面層の元素の組成量に関する情報が重要な役割を果たす。なぜなら核反応生成物が混合によって外層に汲み上げられたなら何らかの組成異常が検出されると期待されるからである。我々はこの数年この分光学的手法に基づく超巨星の表面組成異常の観測的研究に携わっている。まだ進行中のプロジェクトではあるが、これまでに明らかになった事実並びに問題点の所在について以下に解説したい。

2. 化学組成とCNOサイクル

最初に予備知識としていくつかの基本事項について触れておく。まず恒星表面層における元素の化学組成を表現するときは単位体積あたりの水素原子数に対する当該元素の原子数の比の常用対数に12を加えた値で表わす習慣になっている。たとえば太陽では或る体積中に水素が 10^{12} 個あるとき窒素(N)は一万分の一の 10^8 個なので窒素の組成は $A_N^\odot = \log(10^8/10^{12}) + 12 = 8.0$ となる。(右肩の「 \odot 」は太陽における値であることの意。)以後言及する他の重要な元素の太陽組成は $A_{He}^\odot = 11.0$ (ヘリウム), $A_C^\odot = 8.6$ (炭素), $A_O^\odot = 8.9$ (酸素), $A_{Na}^\odot = 6.3$ (ナトリウム)となるがこれは恒星の化学組成を論ずる際の基準値とされることが多く、ここでも過剰とか欠乏とかの言葉を用いるときはこれらの値に対する大小を言うものと理解されたい。以下では星 \star における元素Xの太陽に対する相対過剰度を $[X]^\star (= A_X^\star - A_X^\odot)$ で表わすことにする。次に内部核融合反応について述べたい。恒星は主系列にある安定期では中心部で水素を燃やしてヘリウムにしており、その燃料たる中心の水素が燃え尽きたら主系列を離れてHR図上を動き始めるのであるが、大質量星の場合この水素燃焼反応とは主としていわゆるCNOサイクルと呼ばれる過程である。このプロセスではC, N, Oは4つのHを1つのHeに変換するための触媒として働くが、平衡状態に達していない場合はHが

減りHeが増えることと合わせてこれら3つの元素の組成も多かれ少なかれ変化する。(簡単に言えば「Cが燃えてNになる」ということになる。)結果としてこの内部の燃焼生成物が汲み上げられて外層の元からある物質(太陽組成と仮定する)と混合した場合、一般的に言って「HeとNの過剰並びにCの欠乏」(Oはあまり変わらない)という特徴を示すものと期待してよい。

3. デネブとリゲル

大質量超巨星は恒星全体の中の割合としては極めて微々たる稀有な存在であるがその圧倒的に大きい光度ゆえ少々の遠距離は物ともしないため、肉眼に明るい星の中にも決して少なくない。夏の夜半に頭上高く広がる白鳥座のデネブや凍てつく冬の夜空に南天雄大にかかるオリオン座のリゲルはいずれも白色に美しく輝いて親しまれている一等星であるが、これらは質量が $\sim 20 M_\odot$ 程度で表面温度が一万度クラスの早期型超巨星である。実は我々が超巨星の進化と組成異常の問題に関心を持ったきっかけはこの二つの星のスペクトルから窒素の過剰を見出したことであつた³⁾。少し意外ではあるがこのようなとびきり明るい良く調べられている星でさえもこの事実はこれ迄明らかにされていなかったのである。その理由はこの種の星の組成決定の難しさと関連することであるが以下のようにまとめられよう。(i)CNOのような鍵となる軽元素では重要なスペクトル線は近赤外域に存在することが多いが従来の写真乾板ではこの波長域で良質のデータを得ることが出来なかったこと。(ii)普通良く用いられる局所的熱力学平衡(LTE)、すなわちある点における原子のエネルギー状態はその点での温度と圧力のみで決まる、という近似は低密度で衝突の少ない超巨星大気においては甚しく不適当なものになること。(iii)一般に遠距離で銀河面沿いに位置する超巨星では顕著な星間吸収による赤化を受けるので、普通良くなされる「色」からの大気パラメーター(有効温度、

重力加速度) 決定が困難になること。

しかしながら近年の観測, 理論の両面における進歩はこれらの問題点をかなりの所までカバーするに至った。まず CCD (電荷結合素子) を用いた検出器の導入で近赤外域でも難なく高 S/N 比のスペクトルが得られるようになった。又, 輻射輸送の数値計算においても「加速ラムダイテレーション法」と呼ばれる新しい方法の発展のおかげで現在では LTE を仮定しないいわゆる non-LTE 計算によるエネルギー占拠数の見積りが大変効率良く遂行出来るのである。更に飛翔体による紫外域や赤外域の観測データと合わせて星間赤化の程度の見積りが出来るようになったことは大きい。従って今や機は熟したと言える。近赤外の一群のスペクトル線の解析に基づく我々の最新の結果では $[N]^{デネブ} \approx +0.6$, $[N]^{リゲル} \approx +0.4$ となり⁴⁾これによればこの二つの星では外層の窒素量は太陽の数倍にもものぼることになる。興味あることにこれは CNO サイクル生成物が外層に混合した場合の予想過剰値と良く一致するのである。

しかしこれだけではまだ水素燃焼物質混合の証拠とするには不十分であるので次に鍵となる元素ヘリウムの組成を求めてみると少し意外なことになった。すなわち $[He]^{デネブ} \approx -0.8$, $[He]^{リゲル} \approx +0.4$ となってリゲルについては適度のヘリウム過剰であり CNO サイクル生成物組成とつじつまが合うのであるがデネブにおいては顕著なヘリウム欠乏という思わぬ結果が得られたのである⁵⁾。因みに C と O については使えるデータがまだ少なくそれぞれ一本のスペクトル線のみ頼らざるを得ないので多くを語れないのであるが, O は両星ともほぼ太陽並であり C は $[C]^{デネブ} \approx -1.6$, $[C]^{リゲル} \approx -0.3$ と欠乏の傾向を示すよう⁵⁾。この値を額面通り受け取るとすればリゲルにおける [C] の値は混合の場合の予想と矛盾しない適度の欠乏であるがデネブの場合は異和感を覚えるばかりにあまりにも C の欠乏度が大きすぎる。従って次のようにまとめることが出来よう。リゲルに関して

はその表面組成の特異性は内部の CNO サイクル生成物の外層への混合で問題無く片付けることが出来る。一方デネブの組成は一筋縄では行かない。この異常パターンは単純に水素燃焼物質の混合のみでは説明出来ず何か他の未知の要素がからんでいると思われるので今後の解明が待たれるところである。

4. 窒素とナトリウムの相関

リゲルの典型的な例で見たように超巨星外層への内部物質混合による組成異常の発生は確かに存在すると言ってよいがその状況はどのタイプの超巨星でも同じなのであろうか? 我々は晩期 B 型から晩期 F 型迄の 20 個余りの見かけ上明るい超巨星について同様の N の組成解析を試みた⁴⁾。得られた $[N]^*$ の値を有効温度 T_{eff} に対してプロットした結果を図 1 に示す。これからわかるように $[N]^*$ は -0.2 から $+0.7$ までかなりのちらばりを見せており星によってまちまちである。この窒素過剰度の値が確かに水素燃焼生成物混合の度合いを定量的に反映しているものであるかどうかは気

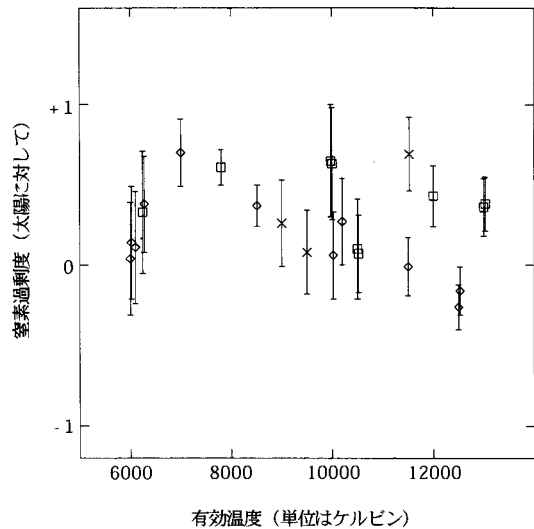


図 1 晩期 B~晩期 F 型超巨星における (太陽に対する) 窒素過剰度 $[N]^*$ と有効温度 T_{eff} の関係。シンボルは四角 $\rightarrow I_a$, クロス $\rightarrow I_{a_b}$, 菱形 $\rightarrow I_b$ のように光度階級を表わす。

にかかる所であるが、これを肯定すると見てよい一つの観測事実についても触れておきたい。

実は水素燃焼プロセスにはCNOサイクルと対応するNeNa（ネオン・ナトリウム）サイクルというものも存在する。これはエネルギー発生率に関しては無視出来る程小さいのであるがNeが燃えてNaになるという過程を含む関係上結果としてNaの組成が増大する。従って混合があれば窒素と同じくナトリウムも過剰を示すはずゆえ両者の組成間には相関が存在すると期待される。幸いにも上述の星の中でA~F型のものについてはナトリウムの化学組成も併せて決定することが出来た⁶⁾。結果として得られた $[N]^*$ と $[Na]^*$ の関係を図2に示す。この図からわかるように両者の間には明らかに正の相関が見られる。従ってこれらの元素の特異組成は水素燃焼物質の外層混合に帰せられるに違いないこと、又その混合の程度については個々の星々によってかなり異なること、が結論される。

5. 対流による汲み上げ

外層における物質混合を引き起こす物理過程として最も良く知られたメカニズムはいわゆる「対流」であるが、外層の対流層は比較的低温の星の場合にのみ水素燃焼層に到達するまでに十分深くなりうるので大質量星が進化して晩期型超巨星の領域に入ったときに始めて重要になってくる。この対流過程は理論的な不確実性がかなり大きいとはいえ恒星進化の計算には必ず考慮されており、それによってもたらされる燃焼生成物汲み上げによる外層組成異常についてもある程度予測が可能なのであるが、これでうまく説明される観測事実もある。図3に示したのは図2の星のデータに基づいて作成したもので $[Na]^*$ の値と質量に対してプロットした図であるが、F型の黄色超巨星に関しては観測値は晩期型星外層における対流による汲み上げに基づく理論の予測範囲に大体良くおさまっていることが見てとれる。(過剰度が質量に

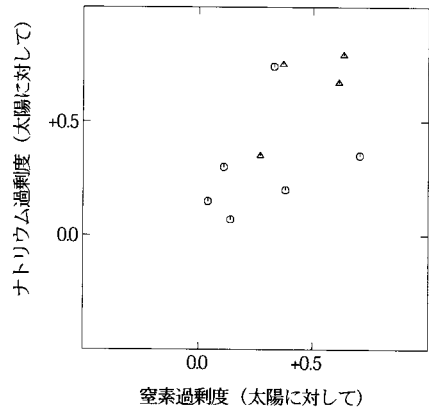


図2 A~F型超巨星における窒素過剰度 $[N]^*$ とナトリウム過剰度 $[Na]^*$ の相関。三角はA型超巨星、丸はF型超巨星を表わす。

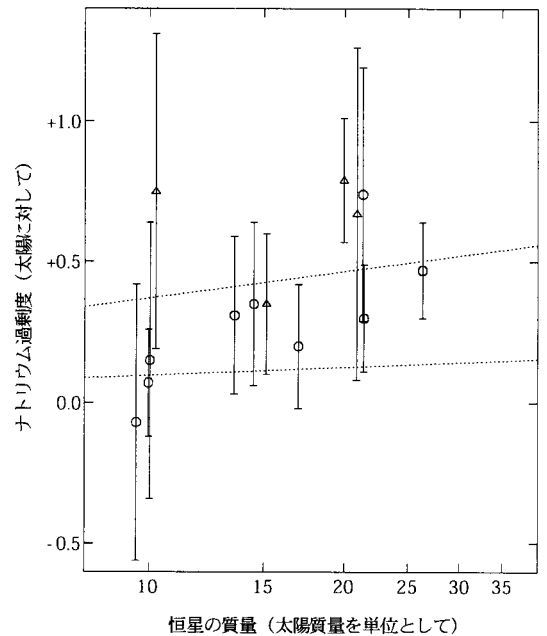


図3 A~F型超巨星におけるナトリウム過剰度と質量の関係。点線は理論の予測する上限と下限を表わす。シンボルの意味は図2の場合と同じ。

つれて増加するのは、より大きな質量の星ほど内部がより高温になるために燃焼領域が拡大することによってより多くの生成物が汲み上げられるためと見られる。)このように比較的晩期の超巨星の組成特異性については対流による外層混合に立脚

する標準理論で間に合う場合が少なくない。

6. 早期型超巨星の組成異常

ただ問題なのはより高温の青白色の超巨星の場合である。図1～図3から明らかのように有効温度が一万度あたりの晩期B～早期A型の超巨星でも水素燃焼生成物の外層混合を示唆する異常組成が厳然として存在する。しかしこれらの星ではもはや対流による汲み上げは期待することが出来ない。しからば一体どう理解すべきなのだろうか？まず思いつくのは最初に述べたSN 1987 Aとなった星の進化からの連想である。すなわちこれらの青白超巨星は大質量星が一たん赤色超巨星となった後に再び青い領域に戻って来たものだとする考えである。これによれば赤色超巨星時代に深い対流層が引き起こした汲み上げによる組成異常が外層に残っているのだと見る事が出来る。この解釈は確かに一応のつじつまは合っているが難点も合わせ持つ。まずこういった青→赤→青の進化を経た星は青色超巨星の中でも少数派と考えるのが自然であるが異常組成を示す星の割合が多すぎるように見えることである。(たとえば図3においては4個のA型超巨星のうち3個で特に顕著なナトリウム過剰が認められる。)次に理論的な面での困難が依然として存在することである。先に述べた斉尾氏達の計算では青→赤→青の進化を再現するためにはマゼラン雲程度に金属量が少ないことが前提であった。我々の銀河系並の豊富な金属量であったら(たとえヘリウムが増えたとしても)赤→青とは戻って来ないようである。従って我々の観測した星にはそのままの適用は出来ない。又、彼らの計算では赤色超巨星になっても標準的な計算法に基づく対流過程のみでは十分なヘリウムの汲み上げを達成することは出来ない。(対流理論の改良の可能性も含めて)何か他の混合メカニズムの存在を仮定しなくてはならない。ここに於いて古典的対流混合のみに基づく標準理論一本ではこの種の星の組成異常に関する観

測事実を説明することはとても不可能であることが明らかになったと言えよう。

7. 恒星自転と外層混合

最近ではこれらの(我々の銀河系内の)青白超巨星は従来考えられていたようにHR図上を主系列から直接右向きに(青→赤)向かっている途中の普通のものであって、進化の早い段階(すなわちまだ主系列にある間か或いは主系列を離れて間もない時期)に効果的な外層混合が起こって組成異常が生じたのではないかと考える説が出てきた。当然ながらここではO～B型の早期型星が問題になってくるので対流による汲み上げは期待出来ないため外層をかきまぜるに有効な何か他の物理過程を探し出す必要がある。有望なメカニズムとしては今のところ次の二つが挙げられている。一つは自転における微分回転に起因する不安定性によって生じる乱流拡散であり、他の一つは高速自転が引き起こす子午環流によるかき混ぜである。いずれの場合も自転が鍵を握っていると見て良いであろう。従ってこれらの超巨星について自転速度を観測的に決定することは進展のための糸口をつかむ上で大変有意義と思われる。しかしこれは決して容易なことではない。一般にスペクトル線の幅は自転のドップラー効果を反映するのでそれを測定することでいわゆる射影自転速度 $v_e \sin i$ (v_e は赤道速度で i は自転軸が視線と成す角度)の大きさを見積ることが出来るのであるが、表面重力加速度が小さく大気が不安定である超巨星の場合には恒星表層中の乱流運動(いわゆるマクロ乱流)のドップラー効果が顕著な寄与を示すようになるのでまずこれを分離しなければならない。それにはスペクトル線の幅だけではなく輪郭の詳細な解析をする必要がある。我々はリゲルにおけるヘリウムのスペクトル線輪郭を解析することで $v_e \sin i$ の値として40 km/sという値を得た(マクロ乱流は43 km/s)⁷⁾。現在のリゲルの質量は約18 M_{\odot} で半径は約70 R_{\odot} であるが⁸⁾この質量か

ら判断して主系列時代は晩期 O 型の半径 $7R_{\odot}$ 位の星だったはずである。角運動量保存則から $v_e \times R$ の積は進化を通じてあまり変わらないと見て良いから射影効果 ($\sin i \leq 1$) を考え合わせると過去の主系列期の v_e の値は少なくとも 400 km/s 近くはあったと思われる。この値は星が自転による遠心力によってちぎれないための上限値に近い。従って猛烈な速度で自転していたことは疑いない。これから推察して高速自転の引き起こす効果的な外層混合が先に述べたリゲルの組成異常に深く関係していた、すなわちすでに主系列近くの進化の早い段階で燃焼生成物の汲み上げが起こっていた、という可能性は高いと見てよかろう。更に他の超巨星についても自転速度と異常組成との間のかかわりを調べてみると面白いのではないかと思われる。

8. ま と め

以上我々のこれまでの研究成果を中心に述べて来たが簡潔にまとめると次のようになるだろう。

- (1) 少なからぬ超巨星において汲み上げられた水素燃焼生成物の外層混合の結果と見られる表面組成異常が確かに観測される。
- (2) しかし混合のメカニズムと進化段階の位置付けについては今だに不明瞭な点が多く、確定した結論を引き出す迄には至っていない。特に異常を示す早期型 (B~A) 超巨星については SN 1987 A となった星のように青→赤→青の進化ループを経たものも混在しているかもしれないが、むしろ主系列からそう離れていない早い時期に汲み上げが起こった普通の (赤に向かいつつある) 青白超巨星である可能性の方が高いのではないか。
- (3) こういった高温度星の早期の外層混合プロセスには自転に起因する物理過程が有力視されているので自転速度に関する観測的情報を得ることは問題解決のための足がかりを提供するはずである。

残念ながら我々が超巨星の進化段階と組成異常の関連について十分な理解を得たと言うにはまだ

程遠い。言うまでもなく観測と理論の両面における更なる進展が必要とされるが、一般に理論は少なからぬパラメーターを含むのでこれに観測の方から制約をつけてやる必要がある。この意味で観測からの経験的なデータがまだ甚しく不足していると言わざるを得ない。本稿で取り上げた He, C, N, Na のような水素燃焼生成物として直接の異常を被る元素の組成に着目することに加えて、たとえばホウ素 (B) のような内部高温領域に入りこむと壊される軽元素が観測されるかどうかを調べることも過去にどれ位の外層混合があったかの重要な情報を提供してくれるはずである。なるべく数多くの超巨星に対してこういった元素の化学組成を統一的な方法で極力正確に決定して星自体のパラメーター (有効温度, 質量, 自転速度など) との相関を統計的に調べることによって新たな解明への道が開けてくることであろう。

参 考 文 献

- 1) Saio H., Kato M., Nomoto K., 1988, ApJ 331, 388
- 2) Takeda Y., 1991, A & A 245, 182
- 3) Sadakane K., Takeda Y., Okyudo M., 1993, PASJ 45, 471
- 4) Takeda Y., Takada-Hidai M., 1995, PASJ 47, No. 2, in press
- 5) Takeda Y., 1994, PASJ 46, 181
- 6) Takeda Y., Takada-Hidai M., 1994, PASJ 46, 395
- 7) Takeda Y., Sadakane K., Takada-Hidai M., 1994, PASJ, submitted

Surface Abundance Anomalies and Evolutionary Status of Supergiants

Yoichi TAKEDA

Institute of Astronomy, The University of Tokyo

Abstract: Observed anomalies of light-element abundances in supergiants atmospheres, which are regarded as being due to mixing of hydrogen-burning products dredged-up from the interior, are discussed in connection with the evolutionary status of such massive stars. Attention is paid to the past evolutionary history of peculiar white-blue supergiants such as Rigel, in which rapid rotation may have played a significant role as the cause of efficient mixing in the early stage of their evolution.