

図1 球状星団M3の Hertzsprung-Russell(HR) 図³⁾。AGB：漸近巨星分枝，RGB：赤色巨星分枝，SGB：準巨星分枝，MS：主系列，HB：水平分枝。

構造の変化が生じると、恒星全体はその見かけの姿を大きく変え赤色巨星 (Red Giant) となる。このような天体は Hertzsprung-Russell (HR) 図の右上の赤色巨星分枝 (Red Giant Branch) と呼ばれる部分に分布し(図1文献3参照)、これを RGB と省略して表記する。

主系列星から RGB 上の赤色巨星に進化する時点で、星の中心部で生成された元素の一部は恒星の表面に運ばれ、恒星大気の化学組成を著しく変化させる。深い大気の奥底から表面に物質が運ばれる様子が水底の泥を掘上げる浚渫作業 (dredge) に似ていることから、この過程は first dredge-up と名付けられている。RGB 以後の恒星進化では、恒星内部での核生成物が表面大気に混入し、大気の化学組成を変化させる過程が数多く存在する。このため、RGB 以降の進化した恒星の研究において、分光観測による詳細な大気組成の研究は恒星進化を探るうえできわめて重要な手法のひとつとなっている⁴⁾⁵⁾。

恒星が RGB の上を進化するにつれて中心部のヘリウムは核反応を起こし、その結果、炭素と酸素でできた新たな中心核が形成される。その形成の様子は恒星の質量の違いによって若干異なっ

ているが、ここでは深く立ち入らない。いずれにしても結果的に似たような中心核ができあがる。この新たな中心核では電子が縮退しており、その周りを薄いヘリウムの層と、さらに外側にある水素を主体とした巨大な外層が取り囲む(図2)。この状態になると見かけは低温で巨大な星となり、RGB に続く生涯二度目の赤色巨星の状態となる。このような赤色巨星の分布する HR 図上の位置は、比較的暗い天体の多くが RGB とほぼ同じ位置に分布する(図1)ため漸近巨星分枝 (Asymptotic Giant Branch) と呼ばれている。ここから、質量や明るさの違いにかかわらず、この様な進化段階にある晩期型巨星をまとめて AGB 天体あるいは AGB 星と総称している。明るい AGB 天体の場合、HR 図上の位置は RGB から大きく離れており、もはや「漸近 (asymptotic)」のもつ本来の言葉の意味は無い。したがって、AGB とは HR 図上の幾何学的な分類ではなく、むしろ恒星の進化段階を示すものであると理解する方が妥当である。一般に、電子の縮退した炭素と酸素の中心核を持つようになった低温度の巨星を AGB 天体と呼んでいる。

典型的な AGB 天体は太陽の数千倍から数万倍程度の明るさで、有効温度は 2000~3500 K、直径は太陽の数百倍にも達する。

RGB から AGB への進化の様子や、AGB でのその後の進化は恒星全体の質量に大きく依存する。しかし、ある進化段階での個々の AGB 天体の見かけの姿は初期質量にはほとんど依存せず、むしろ現時点での中心核の質量のみに依存していると考えられている。例えば、AGB 天体の明るさは中心核の質量にほぼ比例することが知られている。中心核がチャンドラセカール質量と呼ばれる太陽の 1.4 倍程度の質量を超えると、電子の縮退が解け炭素や酸素が核反応を起こして超新星まで進化してしまう。このため、AGB 天体の中心核の質量はチャンドラセカール質量を超えることはない。それ故、AGB に留まるための初期質量には上

限值が存在し、AGB での明るさにも太陽の 5 万倍程度の上限がある。

ところで、質量の大きい一部の AGB 天体では AGB に進化する際にも内部の物質が表面に運ばれることがある。これを second dredge-up と呼ぶが、全ての AGB 天体が経験しているわけではない。

3. 熱パルス

AGB に進化して間もない天体は、中心核周りの薄いヘリウム層での核反応を主なエネルギー源とする。しかし、ある程度進化すると、水素に豊かな巨大な外層の底に水素の核反応を起こす薄い層状の領域が形成され(図2)、普段はここでの水素燃焼がエネルギー発生の主体となる。一方、この水素の核反応で生じたヘリウムは内側にあるヘリウム層に蓄積され、その質量は次第に増加していく。やがて、ヘリウム層の質量がある一定値を超えたところで突発的に激しいヘリウム層での核反応が起こり、この時一時的に外層底部での水素燃焼は停止する。このような現象は熱パルスあるいはヘリウムシェルフラッシュと呼ばれ、進化した AGB 天体に見られる独特の現象である。熱パルスが収まった後は、再び水素燃焼を主体とした落ち着いた状況にもどり、その後熱パルスと水素燃焼の時期を交互に繰り返す。

熱パルスのピークの直後、ヘリウムシェルフラッシュで生成された物質の一部が外層の対流によって表面大気に運ばれる。これを third dredge-up と言い、これによって表面大気の化学組成は大き

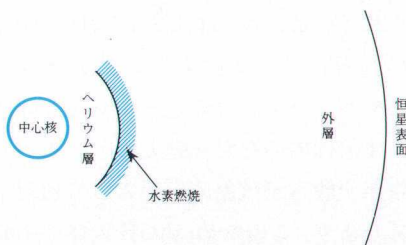


図2 AGB 天体の構造。中心核は炭素と酸素からなり、そこでは電子が縮退した状態にある。

く変化する。炭素が増大し、s-process 元素と呼ばれる中性子を多く含んだ元素が現れるようになる。特に、この過程によって表面大気の炭素が酸素の存在量を上回るようになった時に、典型的な AGB 天体のひとつである炭素星が形成されると考えられている。

4. 脈動と質量放出

AGB 天体の観測的な特徴として、その多くがミラ型変光星に代表される長周期の脈動変光星であることが挙げられる。変光周期と光度には経験的な関係が求められており^{6),7)}、天体の距離決定などにも応用されている。しかし、その物理的解釈にはまだ不十分なところが多く、脈動モードも完全には決定されていない。

質量放出現象も多くの AGB 天体に普遍的に見られる特徴である。進化した AGB 天体がその外層大気を毎秒 10 km 程度の速度で放出する現象である。質量放出のメカニズムはまだ十分に解明されていないが、大気の脈動と放出物質の中に形成された固体粒子(ダスト)への輻射圧が重要な役割を演じていると考えられている。観測的な AGB 天体の質量放出の情報は、かつては高分散の分光観測から示されていた^{8),9)}が、現在では電波や赤外線を用いて、放出物質で形成された星周エンベロープを観測することが主流になっている(図4参照)。特に、赤外線天文衛星(IRAS)の成功以後は赤外線データを利用した質量放出の研究が著しく発展した。

5. AGB 進化と質量放出

一般に、AGB 天体は質量放出の状況を変化させながら進化して行くと考えられている。最初は比較的静かな質量放出を続け、進化の最末期にきわめて激しい質量放出を短期間行う。末期の激しい質量放出を行っている間は、放出物質中の多量のダスト粒子によって可視光は遮られ、極端な赤外線天体として観測される。その後質量放出は停

止し、恒星の外層は晴れ上がり次第に中心核の高温の成分が見えるようになってくる。激しく大量に放出された物質は膨張によって遠く離れ、高温の中心星に照らされて電離し惑星状星雲となる。やがて、最終的に惑星状星雲は星間に飛び去り、中心の核のみが白色わい星として残り恒星の一生を終えていく。これが一般的な AGB 進化の描像である。どの時点で質量放出が停止し、どの時点でどのような高温度星として中心星が見えてくるのかは、残っている外層の質量に依存する。このため、外層の質量を著しく減らす質量放出は AGB 進化の運命を直接決定するきわめて重要な要因となっている。

幅広い進化段階を網羅する数多くの AGB 天体に対して、IRAS の観測データから求められた質量放出率の分布を図 3 に示す¹⁰⁾。ここでは恒星大気において炭素より酸素が多い酸素過多天体のみを扱っているが、炭素星などの一部の例外を除く非常に多くの AGB 天体はこれに相当する。横軸は質量放出率で、一年当りの放出量を太陽質量単位で示してある。縦軸は IRAS で観測された酸素過多 AGB 天体で、各放出率に相当する質量放出

を行っている天体の数である。

この分布では、酸素過多の AGB 天体が質量放出率の違いにより二つのグループに明確に分離していることが解る。ミラ型星などの質量放出が比較的穏やかな AGB 進化中期にある天体と、激しい質量放出を行っている進化最末期の天体の二種類である。二つの分布の間には連続的なつながりがないことから、両者は放出現象の特性が連続的に変化していったものではなく、それぞれが全く異なった物理状況にあるものである可能性が高い。例えば、脈動モードが突然変化した結果急激な放出率の増加が生じた可能性がある。

さらに、IRAS データの解析からは、二つのグループそれぞれにおける質量放出現象の継続時間はどちらも千年から一万年程度であることが推定されている。これを基に統計的な処理を行ったところ、比較的穏やかな AGB 中期の質量放出も決して連続的に行われるのではなく、休止期間を挟んで何度も繰り返されるものであることが示されるようになってきた¹⁰⁾。

このような不連続な質量放出をともなった進化の描像は、以前より提唱されている連続的な質量放出の変化に基づいた AGB 進化の描像^{11),12)}とは大きく異なっている。しかし、IRAS 以降の観測的な研究からは、次々と同様の不連続な質量放出の可能性が示されるようになってきている¹³⁾。炭素星についても、その形成期において急激な化学組成の変化と質量放出の停止を引き起こすような進化像が提唱されている¹⁴⁾。

6. 星周エンベロープの観測と AGB 進化

質量放出によって形成された星周エンベロープは膨張しているため、その空間構造には質量放出の履歴情報が反映されている。質量放出が停止していれば中心星から離れた構造になり、複数の放出と停止を繰り返していれば何重かのシェル構造が現れるはずである。たとえ連続的に質量放出が

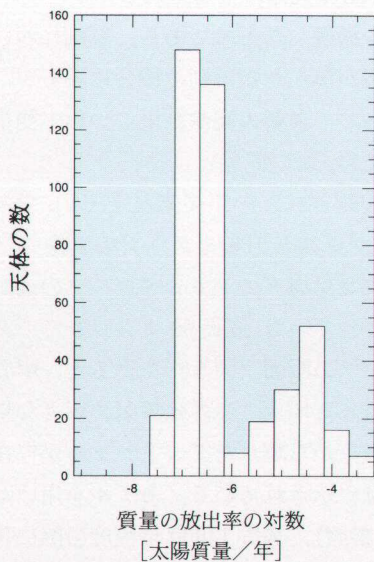


図 3 酸素過多 AGB 天体の質量放出率の分布¹⁰⁾。質量放出率の単位は一年当りの太陽質量。

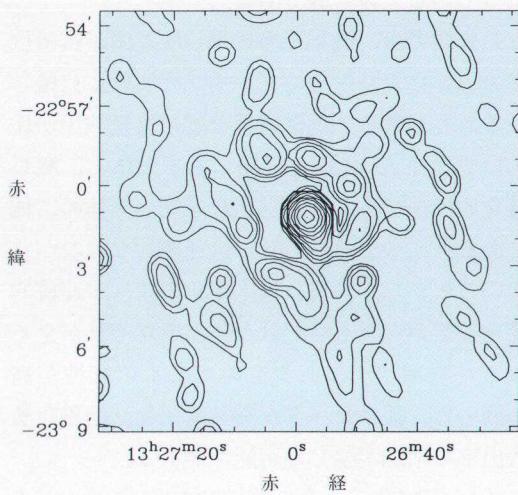


図4 波長 $60\ \mu\text{m}$ で見たミラ型変光星 R Hya の広がった星周ダストエンベロープ。質量放出は100年程度停止していたと考えられている¹⁸⁾。

変化していても、定常的な質量放出の分布からのずれが生じるはずである。したがって、星周エンベロープの空間構造を観測的に明らかにすることによって、AGB 進化における質量放出の履歴を直接的に知ることが可能になる。

実際、電波によって中心星から離れたエンベロープを持つ炭素星が観測されており^{15),16)}、長期の質量放出の停止の可能性が示されるようになってきている。また、高空間分解処理を施した IRAS 画像からは、離れた星周ダストエンベロープが炭素星¹⁷⁾に加えて、酸素過多の普通のミラ型天体にも発見されている(図4参照)¹⁸⁾。さらに、炭素星の中には二重のシェル構造を示しているものも見出されるに到っている¹⁹⁾。どうやら、AGB 進化における不連続で変化に富んだ質量放出はかなり一般的な現象である可能性が高くなってきた。最近では、繰り返し起こる不連続な質量放出と AGB 天体特有の熱パルスとの関連が示唆されており^{13),20)}、進化論的にも受け入れられるようになりつつある。事実、最近百年程度の質量放出の停止があったと見込まれる天体の一つでは、停止直前の熱パルスの形跡が認められている¹⁸⁾。

星周エンベロープの空間構造を直接観測するためには高い空間分解能が必要とされ、これまでこのような観測データの量は限られていた。しかし、現在活躍中の赤外線宇宙天文台 (ISO) や、近い将来に動き始める JNLT や IRIS などの観測装置では、より高い空間分解能と精度で星周エンベロープの空間構造を観測することが可能になると見込まれている。さらに、JNLT などの大型望遠鏡では非常に高い波長分解能での分光観測も可能になる。これを利用すれば、詳細な化学組成の変化に基づく恒星内部進化の情報に加えて、質量放出のメカニズムを直接反映した動力学的な情報も得られるものと期待されている。このような研究のためには、データ解析に利用できるきわめて高精度なモデルが必要とされ、これらの装置の完成に合わせてのモデルの開発や整備も現在の重要な課題となっている。

7. ISO による星周ダストエンベロープの観測

ここまで書いたところで、ISO による我々の最初の観測データを入手するところとなった。遠赤外線域で AGB 天体の星周ダストエンベロープの空間構造を撮像したものである。詳細については十分な解析が済んだ後の別の機会に譲るが、ここでも速報として最新の観測結果について簡単に述べておきたい。

最初に観測されたのが炭素星 Y CVn である。波長 $90\ \mu\text{m}$ と $160\ \mu\text{m}$ の画像には中心星から離れた星周ダストエンベロープの姿が見事に映し出されていた。波長 $90\ \mu\text{m}$ でのダストエンベロープの断面(図5)を見ると、中心から約 190 秒離れた地点に赤外線放射の大きな膨らみがあり、恒星から離れたダストシェルが存在することが明確に示されている。モデルを用いた解析から(図5参照)、過去 14000 年程度の間著しい質量放出率の減少があったことが明らかになった²¹⁾。ダストシェルの空間構造から、過去に不連続

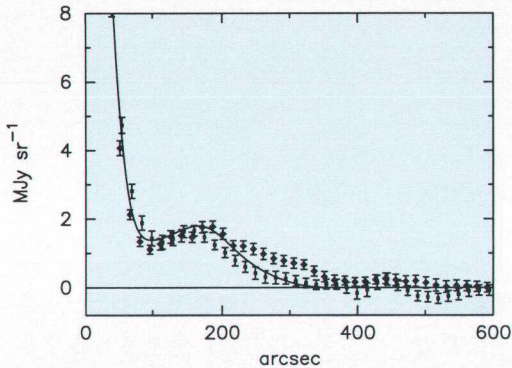


図5 ISOによって観測された炭素星 YCVn の波長 $90 \mu\text{m}$ での断面図²¹⁾。中心から 190 arcsec の距離にダストシェルによるピークが見られる。実線はフィットに用いたモデルである。

な質量放出を経験して来たことを明確に示した歴史的な観測である。

つぎに観測されたのが、進化した酸素過多の AGB 天体 IRC-10529 である。星周ダストエンベロープの空間構造を直接観測した例はこれまでに無かったものの、IRAS の観測データの解析から、この天体の現在の質量放出は非常に大きく、しかも星周ダストエンベロープの大きさ（広がり）が非常に小さいことが予測されていた¹⁰⁾。これが正しければ、進化最末期の激しい質量放出を始めたばかりの天体を見ていることになる。はたして ISO の赤外線画像には予想通りのコンパクトなダストエンベロープが映し出されていた。激しい質量放出を開始して千年程度しか経過していない。やはり、今まさに生涯の最期を迎えようとする天体であった²²⁾。さらに、予想外の成果として、小さくて濃いダストシェルの外側にも薄いダストエンベロープが写っている可能性がある。これは激しい質量放出を起こす以前の穏やかな質量放出の名残りであると考えることができる。まだ詳細な解析を必要とするが、これが事実であれば、進化最末期の激しい質量放出を開始する前には特別の前兆は無いようである。どうやら最期の時は突然やって来るらしい。

ISO による最新の観測から、目から鱗が落ちん

ばかりの研究の進展が今日得られつつある。最新の観測装置を駆使した観測によって、AGB 進化と質量放出の詳細が明白にされる日もきっと遠くないことであろう。AGB の研究はいよいよ面白くなってきたところである。広い意味での天文学の発展のためにも、少しでも AGB の知名度が上がってくれることを期待している。

参考文献

- 1) Iben I. Jr., Renzini A., 1983, ARA & A 21, 271
- 2) 齊尾英行, 1992, 星の進化, 培風館
- 3) Renzini A., Fusi Pecci F., 1988, ARA & A 26, 199
- 4) Gustafsson B., 1989, ARA & A 27, 701
- 5) Tsuji T., 1986, ARA & A 24, 89
- 6) Feast M. W., et al., 1989, MNRAS 241, 375
- 7) Whitelock P., et al., 1991, MNRAS 248, 276
- 8) Deutsch A. J., 1956, ApJ 125, 210
- 9) Sanner F., 1976, ApJS 32, 115
- 10) Hashimoto O., 1994, A & AS 107, 445
- 11) Baud B., Habing H. J., 1983, A & A 127, 73
- 12) Bedijn P. J., 1988, A & A 205, 105
- 13) Zijlstra A. A., et al., 1992, A & A 265, L5
- 14) Chan S. J., Kwok S., 1988, ApJ 334, 362
- 15) Oloffson H., et al., 1990, A & A 230, L13
- 16) Yamamura I., et al., 1993, PASJ 45, 573
- 17) Waters L. B. F. M., et al., 1994, A & A 281, L1
- 18) Hashimoto O., et al., 1996, A & A submitted
- 19) Izumiura H., et al. 1996, A & A submitted
- 20) Vassiliadis E., Wood P. R., 1992, ApJ 413, 641
- 21) Izumiura H., et al., 1996, A & A submitted
- 22) Hashimoto O., et al., 1996, in preparation

Evolution and mass loss of AGB stars

Osamu HASHIMOTO

*Department of Applied Physics, Seikei University
Kichijoji-kita, Musashino, Tokyo 180, Japan*

Abstract: Asymptotic Giant Branch, which is usually abbreviated as AGB, is the final stage of stellar evolution of low- and intermediate-mass stars. An AGB star is a cool giant with a degenerate core of carbon and oxygen, which is surrounded by a thin helium shell and a large outer hydrogen envelope. Mass loss is commonly seen in the evolved AGB stars, playing a dominant role in the AGB evolution. The AGB evolution with mass loss is briefly reviewed on the basis of recent observational results.