

## 論文の内容の要旨

論文題目      Observational Study of Post-AGB Stars  
(漸近巨星分枝段階以降における恒星の観測的研究)

氏名              藤井高宏

惑星状星雲は、中小質量星が華麗な最後を迎える姿としてよく知られている。この輝線星雲を形成するガスは、中心星が漸近巨星分枝 (AGB) 星として巨大で低温の恒星外層を有していた時代に、自らが放出した恒星外層部そのものである。質量放出を終了した AGB 星は収縮を開始し、高温の惑星状星雲中心星へと急激な進化をたどる。AGB 星から惑星状星雲へのこの短い移行期の星は Post-AGB 星と呼ばれる。Post-AGB 星は、数百から数千年の間にスペクトル型を急速に早期型へと変化させていく中心星と、内側からの放出ガスの補給を欠いたまま膨張していく星周雲との 2 つの組合せからなるため、非常に多様なスペクトルを含む星のグループである。そのスペクトルエネルギー分布は天体構造を反映して、一般に可視紫外域と遠赤外域の双方にピークを持つという特異な形を示す。この特徴を利用して近年多くの Post-AGB 星が発見されているが、観測結果から進化シナリオを導くにはまだ至っていない。筆者は Post-AGB 星の多様な側面を研究するには複数の観測手法を組み合わせる統計的に十分な量のサンプル星を詳しく調べることが必要と考えた。そこで、本論文では、多波長測光観測、変光モニター、近赤外分光観測、電波メーザー観測を行い、Post-AGB 星の誕生と進化を観測データに基づいて解明することを試みた。

Post-AGB 星の誕生は AGB 星からの質量放出停止が原因である。過去の多くの研究にもかかわらず、質量放出現象は未だにその原因、放出の全体像、恒星進化への影響が不明の難問であるが、質量放出機構は長周期かつ大振幅の脈動と強く結びついている点では多くの研究者の意見が一致している。したがって、変光観測により脈動の有無を調べ、それを質量放出の指標として用いることで AGB 段階の終了と Post-AGB 星の誕生がいつおこるのか探ることにした。IRAS 天文衛星による赤外線源カタログから Post-AGB 星、AGB 星候補 113 天体を選択し 4 年間に渡る近赤外線変

光モニター観測を実施した。観測には東京大学天文学教育研究センター木曾観測所シュミット望遠鏡に搭載された赤外カメラ KONIC が使用された。波長  $1.6\mu\text{m}$  ( $H$  バンド) で対象星の画像を撮り、周辺星の  $H$  等級と比較して変光を測定した。

観測の結果、長周期大振幅の変光 AGB 星は IRAS 遠赤外強度比を用いた 2 色図上で一定の枠内に限られることが判った。一方、その領域の外側では、変光 AGB 星とは別の弱い変光を示す天体が、非変光天体とともにみつかつた。また、重要な点として、それら非変光天体は、設定された変光 AGB 星領域にも一部存在していた。質量放出星は強い脈動による変光を必ず伴うという立場に立てば、こうした弱変光、非変光天体は質量放出停止と判定されるが、IRAS 遠赤外カラーでは近い位置に存在するため、実際に質量放出を停止しているかどうかは慎重に決定されなければならない。そこで、変光停止ライン周辺の星に対して一酸化珪素 ( $\text{SiO}$ ) 43GHz メーザーの探査観測を野辺山 45m 電波望遠鏡を使用して行った。一酸化珪素メーザーは多くの質量放出星から検出される。水メーザーや OH メーザーが星周雲の内部から放射されるのに対して、一酸化珪素メーザーは恒星表面に近い極小な領域から放射され、恒星表面の活動度すなわち質量放出を反映しているとみなされている。野辺山での観測結果によると変光 AGB 星からのメーザー検出率は 82% であった。一方、弱変光、非変光天体の検出率は 0% であった。以上のことから弱変光、非変光天体の表面活動は低下しており、質量放出が停止していると裏付けることができた。したがって、これらの天体は質量放出を停止した Post-AGB 星である可能性が高い。

次の問題としてそれらの Post-AGB 候補星が、どのような進化段階にあるのか検証する必要がある。そのためには、分光観測によりスペクトル型を決定し天体の温度を調べることが有効である。最初に述べたように、質量放出を終えた星はスペクトル型を急速に早期型へと変えていく。したがって天体の温度を調べるという事は、Post-AGB 星の進化段階を決定することに等しい。一方、AGB 期に Post-AGB 星周辺に形成された星周雲の方は広がるにつれダスト温度を下げ光学厚みが減少するが、この過程の初期段階はまだ濃い星周雲の奥深くで進行するため赤外分光観測が不可欠となる。国立天文台岡山天体物理観測所の OASIS 近赤外分光撮像装置はこのような天体のスペクトル型を知るには最適である。そこで、岡山 188cm 望遠鏡により木曾で変光を調べた星の  $H(1.6\mu\text{m})$  及び  $K(2.2\mu\text{m})$  バンドスペクトルを取得した。 $H$ 、 $K$  バンドには、水素原子による Brackett 系列吸収線と一酸化炭素 CO の吸収線が共に存在する。水素ラインは G 型より早期の星に見られ、一酸化炭素ラインは G 型より晩期の星で検出されるため、両者のライン強度から中心星スペクトル型を決定できる。その結果、当然ながら変光 AGB 星はすべて M 型星に見られるような強い CO の吸収を示すことがわかつた。K から M 型スペクトルのテンプレートが少ないため、今回詳しいサブクラスの解析は難しいが、質量放出の段階と中心星スペクトル型の関連は今後研究すべき分野である。

一方、弱変光星、非変光星のスペクトル型は M 型から B 型まで広い範囲に渡っていた。この観測結果は、Post-AGB 星の進化によるスペクトル型変化をとらえたものと考えられる。特に興味深いのは 5 つの M 型星である。このうち 2 天体は、明瞭なダブルピーク型のスペクトルエネルギー分布を持ちかつ、AGB 天体の変光とは異なる非常に小さな振幅の変光を示しており、変光観測により設定された変光 AGB 星領域のすぐ外側に存在していた。中心星スペクトル型が M 型というこの星は、極めて近い過去の質量放出を停止を示唆している。あえて推測すれば、これらはミラ型脈動が止まりつつある極めて貴重な例である可能性がある。残りの 3 天体については、非変光であるにもかかわらず、変光 AGB 星領域の内側の奥深い所に存在していた。一時的に脈動を停止している AGB 星である可能性も否定できないが、Post-AGB 星であるとすると、これまでに Post-AGB 星の存在が考えられていなかった領域で、既に Post-AGB 星が誕生していることになる。IRAS 12,

25 $\mu\text{m}$  赤外線強度比が小さいことから推測すれば、低質量の Post-AGB 星の誕生の現場をみている可能性がある。いずれにしてもこれら 5 天体の長期観測は恒星進化を直接観察する希な機会となるであろう。

また、中心星のスペクトル型以外にも Post-AGB 星の進化段階を推定する方法が存在する。Post-AGB 星は中心星と星周雲の複合系であるため、その進化は中心星のスペクトル型と星周雲の大きさの 2 つで規定される。この内、中心星の方は上に述べた OASIS 観測でデータを取得した。星周雲の広がりを知るため木曾観測所において可視近赤外測光観測を行い *BVRIJHK* の 7 バンドでの等級を定めた。これらとは別に、いくつかの典型的な Post-AGB 星で測光観測を行った結果に IRAS データを加え、ダストシェルモデルでスペクトルエネルギー分布を合わせた。その結果 B 型星までのスペクトル変化は質量放出停止後 500 年以内に起こることが判った。この結果は理論モデルからはある程度予測されていたが、観測データから承認されたことは重要である。さらに、シェルモデルの検討から発見した興味深い天体がある。それは質量放出停止後の年齢が 1,000 - 2,000 年であるのに拘わらず F, A 型のスペクトル型を持つ 2 つの Post-AGB 星である。このようにスペクトル変化が遅いと、中心星表面温度が上がり周辺ガスを電離できるようになる頃には星周雲は星間空間に散逸してしまうだろう。すなわち、Post-AGB 星のすべてが、言い換えれば中小質量星のすべてが、惑星状星雲になるわけではないのである。これらの星は直接白色矮星へと進化すると考えられるが、こうした惑星状星雲にならない Post-AGB 星の例はこれまで観測的に知られていなかった。

このように AGB のミラ型変光を停止した後の Post-AGB 星の進化を、中心星スペクトルとシェルモデル適用の 2 つから追ってきた。Post-AGB の段階では既に AGB の脈動は停止しているが、スペクトル型が早期になってくると星は HR 図上のセファイド不安定帯を横切ることになる。そして、実際そのためと思われる Post-AGB 星を 6 つ発見した。これまでも Post-AGB 星の変光の報告は数例あった。しかしそれらは単独の報告で特異な Post-AGB 星という位置付けであった。これに対し筆者の発見はグループとしての新しい種類の変光星の発見である。スペクトル型はすべて F-G 型でセファイド型不安定脈動である可能性を強く示唆している。さらに興味深い点はこれらの変光星が IRAS2 色図上で限られたボックス内に存在していることである。中心星のスペクトルを反映する HR 図と星周雲スペクトルを示す IRAS 二色図との双方で変光 Post-AGB 星が固まって存在するというこの意味は何であろうか？それはこれらの Post-AGB 星が共通の進化タイムスケールにしたがっているということで、中心核質量がほぼ同じ値をとるということの意味していると考えられる。この点はさらにデータ点を増やした観測が求められる。

以上の観測結果を列挙すると以下ようになる。

1. 変光観測を通して、AGB 変光星領域を決定した。
2. 一酸化珪素メーザーが、変光 AGB 星に特有の現象であり、非変光星からは出ていない事を発見した。
3. M 型のスペクトル型を持つ誕生直後の Post-AGB 候補天体を発見した。
4. 新しい種類の Post-AGB 変光星グループを発見した。
5. ダストシェルモデルをとおして Post-AGB 星の年齢を決定し、その結果惑星状星雲を経由することなく白色矮星に進化すると考えられる Post-AGB 星を発見した。

これらの結果に基づき、これまで理論的推測にとどまっていた質量放出停止による誕生から温度を上昇させ、再び小振幅の変光帯を通過する地点までの Post-AGB 星進化を観測的に明らかに

した。