

球状星団における赤色巨星進化の謎

松 永 典 之

〈東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: matsunaga@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

私たちは IRSF 望遠鏡と SIRIUS 近赤外線カメラを用いて、145 個の球状星団を観測しています。2002 年の春から続けている 3 年に及ぶ観測によって、多くの赤色巨星変光星を発見しました。その中には、これまで球状星団で確認のされていなかった大質量放出星も含まれていました。本稿ではこの新しいデータを用いて、赤色巨星の進化について議論します。

1. 観測風景

IRSF 望遠鏡と SIRIUS 近赤外線カメラは、名古屋大学と国立天文台によって南アフリカ共和国のサザーランドに設置されました。私はこの装置を用いて、145 個の球状星団を観測しています。球状星団は 6 月前後が観測に最適な時期で (図 1 参照)、IRSF 望遠鏡のある南アフリカでは真冬に当たります。そして、午後 6 時に日没を迎えたあと、午前 7 時までたっぷり観測できます。星団一つ当たりに必要な観測時間は 15 分程度で、そのたびにどの星団を観測するかを決めて、ひたすら観測を繰り返します。前後の準備を入れると 14 時間労働となりますが、晴れている限りは日曜日でも祝日もない充実した観測生活です。

サザーランドはケープタウンから内陸へ 400 km ほどの村で、南アフリカ天文台の観測所があります。8 畳ほどの観測室で夜一人観測していると少し寂しいところですが、宿舎などは完備され生活の不便は感じません。食事は観測所のおばさんたちが作ってくれる夜食 (ナイトランチ) があるのですが、サンドイッチ 2 枚ではとても朝までもちません。そこで、時間を見つけて観測室にある炊飯器でご飯を炊いたり、インスタントラーメンをゆでたり、8 畳ほどの観測室の中でまさに観

測と生活が直結しています。私は 2002 年から 2004 年の 3 年間、毎年 6 月前後に 3 カ月間南アフリカに滞在し、このような生活を続けました。そうして得られたデータは、たいへん貴重なものでした。

2. 球状星団と近赤外線観測

2.1 球状星団観測の長い歴史

球状星団は数万個から数百万個の星が球状に集まったものです。その研究の歴史は古く、球状星団がいて座の方向に偏在していることから、太陽が銀河系の中心にないことをシャプレイが 1910 年代に指摘したのは有名な話です。また、各球状星団の中の星は基本的にどれも同じ年齢、同じ初期化学組成をもっていて、距離もほぼ等しいとみなせます。そのため、色等級図の分布と理論計算をそのまま比較でき、恒星進化の研究の基礎が築かれました。図 2 は可視光による球状星団 M3 の色等級図です。この図で主系列 (MS)、赤色巨星分枝 (RGB)、水平分枝 (HB)、漸近巨星分枝 (AGB) と進化していくことは現在よく知られています¹⁾。このように天文学上のさまざまな基本的知見が球状星団の観測をもとに得られましたが、その主流は可視光による観測でした。

一方で、観測する波長が変われば、見えるもの

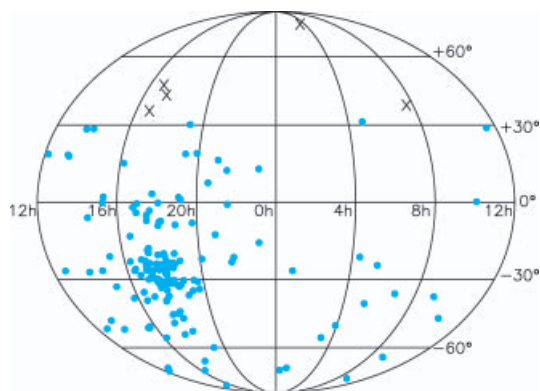


図1 球状星団の天球上での分布. 銀河中心のある赤経18時, 赤緯 -30 度あたりに星団が多い. 青い点は観測した145個の星団, \times 印は観測できない5個の星団.

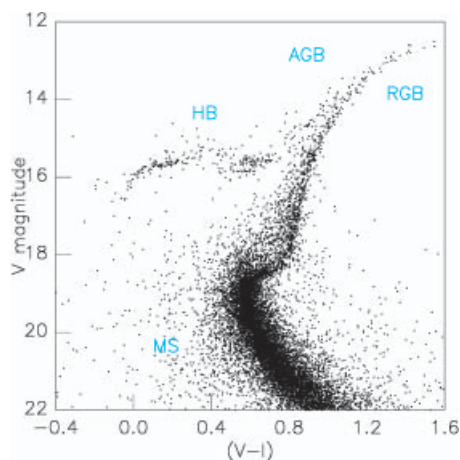


図2 球状星団M3の色等級図³⁾. 主系列(MS), 赤色巨星分枝(RGB), 水平分枝(HB), 漸近巨星分枝(AGB)は各進化段階の呼称.

も変わります. 1970年代からX線衛星による観測が始まると球状星団に次々にX線源が発見されました³⁾. その後, ミリ波パルサーも発見されて, 連星を形成する恒星系力学から, 連星の進化に及ぶ大きな研究テーマになっています⁴⁾.

2.2 球状星団と近赤外線観測

さて, 私の観測している波長は近赤外線です. 球状星団は, 70年代後半から単素子による個々の星の観測が行われるようになりましたが⁵⁾, 多く

の星が混み合っているため, 観測が困難な天体でした. 一方で, 近赤外線アレイの発達に伴い, 1990年代後半には2MASS (2-Micron All Sky Survey) や DENIS (DEep New-Infrared Survey) といった大型の広域サーベイも行われました. たとえば, 2MASSは全天のほとんどを観測し, 5億個近い星の位置と等級を求めたカタログを2003年に公開しました. しかし, そのピクセルスケールは2秒角と大きく, 球状星団の星の混んだ部分では星を分解することができていません (IRSF/SIRIUSは1ピクセル0.45秒角). 実質的に多くの球状星団をすみずみまで観測できるようになったのはここ数年のうちのことです. 私たちはこのチャンスをとらえて, 145個というほとんどすべての球状星団を観測しています.

3. 赤色巨星進化の謎と観測の目標

3.1 第1の謎—質量放出

私たちが主に研究している赤色巨星 (RGB と AGB) は, 電子縮退した等温コアの周りに核燃焼をしている薄い殻と大きく膨張した水素の外層が乗った構造をしています. そして, 核燃焼でできた物質は等温コアにどんどん足されていきます. ある質量までコアが大きくなると同時に温度も高くなるので, 新たな核燃焼がコアで始まることとなります. しかし, 等温コアが大きくなると同時に, 星の表面からどんどんガスが出ていってしまいます. これが質量放出と呼ばれる現象で, 赤色巨星の進化は質量放出に大きく左右されます. 放出の割合は, 非常に小さいものから, 毎年 10^{-4} 太陽質量という大きなものまで観測されています.

質量放出によって水素の外層がなくなってしまうと, 縮退した等温コアは燃料がなくなるためそれ以上進化できず, そのまま冷たくなって白色矮星になっていきます. 主系列では5太陽質量以上であった星も最終的に質量が1太陽質量程度の白色矮星になってしまうことが散開星団の観測などで知られています⁶⁾. 質量放出は, このように恒

星の運命を決定づけるだけでなく、星が進化する間に生成した水素・ヘリウムより重い物質が星間空間に放出されたガスの中に含まれるため、星間物質の化学進化にも影響を及ぼします。このように重要な質量放出現象なのですが、その物理的な仕組みについては、さまざまな研究が行われているにもかかわらずよくわからないところが多く残っています。

3.2 第2の謎—脈動

もう一つの大きな謎は星の脈動です。赤色巨星がどんどん膨張してくると脈動変光を行うようになります。大きな変光振幅と周期的な変光曲線をもつミラ型変光星や、振幅が小さな半規則型変光星 (Semi-Regular) や不規則型変光星 (Irregular) などがあります。基本的には進化が進んで明るくなるにつれて振幅が大きくなってきて、ミラ型変光星になっていくという傾向がありますが、これも定量的にはいつどのような変光星になるのかわかっていません。一つには赤色巨星の表面近くの対流層を計算するときにとれだけ非線形の効果が効くのかかわからず、脈動安定性の理論的な計算が難しいためようです。また、観測結果の解釈の難しさもあります。セファイド型変光星の場合はセファイド不安定帯と呼ばれる領域を質量に応じて水平に進化経路が横切るため、どの明るさでどの質量の星が変光星になっているのかわかります。しかし、赤色巨星の場合はいろいろな質量の星がほとんど同じ経路をたどって進化していきます。このため、色等級図の上に変光星を並べたとしても、どんな質量の星がどこで変光星になっているのかわからないのです。

また、この謎は質量放出の謎とも関係があります。ミラ型変光星の中には質量放出が非常に大きくなったものが多く知られています。このため、脈動によって質量放出が増大される機構があるだろうと考えられます。したがって、進化の間いつどれだけの質量を放出するかという第1の謎を解くには、いつどんな脈動をするかという第2の

謎を解く必要があります。

3.3 研究の目標

私たちは、星の脈動と質量放出の進化についてのシナリオを、球状星団の観測から作ってしまおうと考えています。2.1節で紹介したように、球状星団では同じ年齢、化学組成の星が進化する様子を調べることができます。さらに球状星団の特徴として、天体の進化にかかる時間がそのまま個数となって現れるということがいえます。滞在時間の長い進化段階ほど多くの天体が観測されるのです。そこで、球状星団の色等級図の中で脈動変光星と質量放出星の分布と個数を調べれば、いつどんな変光星になって、どれだけ質量を放出するのかわかるはずで

す。このような研究を行うには、なるべくたくさんの球状星団を観測する必要があります。特に、毎年 10^{-5} 太陽質量以上の大きな質量放出をする期間は数万年にすぎない短いものです。数十万個の星がある大きめの球状星団を考えても、その期待値は0.1個程度にすぎません。したがって、そのような天体を見つけるためには何十個もの球状星団を観測する必要があります。実際、それほど大きな質量放出をする星は今までのところ球状星団では見つかっていませんでした。これが単に観測が不足しているためなのか、それとも球状星団にあるような古い星 (= 低質量星) ではそのような大きな質量放出をしないのか、確かめる必要があります。また、球状星団の性質 (特に化学組成) によって、進化の道筋や速さが変わることが知られているので、球状星団を適当にグループ分けしてよく整理することも必要です。

3.4 観測

銀河系では約150個の星団が発見されていますが、南半球側にある銀河中心の方向に多く分布するため南アフリカから145個の星団を観測することができます (図1)。バルジや銀河面にあるものも含めて、その145個すべてを観測することにしました。なかには星の数が非常に少なく赤色巨星

は数えるほどしかないようなものもありますが、気にせず観測しました。そして、その一つひとつを1カ月に一度以上観測することを目標に観測を繰り返しました。観測は2002年の春から開始し、これまでにほとんどの星団で10回以上観測しています。このようなデータでほとんどの球状星団の色等級図と変光星の探査・観測を調べることができるようになりました。

4. 質量放出星や変光星の発見

これまでの解析でおよそ半分の球状星団について、変光星を探る解析を行いました。2003年冬の時点では反復観測の回数が十分でない星団もあって、残念ながら修士論文の時点ですべての球状星団の変光星を議論することはできませんでした。本稿ではそれまでの結果をまとめたものを紹介します。まず、23個の球状星団から、84個の新しい変光星を発見しました。これらは近赤外線での約0.2等以上の振幅をもつ変光星で、ほとんどがミラ型変光星だと考えられます。(赤色巨星変光星では可視光に比べて近赤外線での振幅は小さくなります。)これまで球状星団で見つかったミラ型変光星は30個以下でしたので^{7),8)}、それを一気に数倍まで増やしたことになります。特に研究が不足していたバルジ方向の球状星団に多く変光星を発見しました。ただし、それらの球状星団の方向には視線方向が偶然重なっているだけの星団と関係のない星も多く存在することから、そのうちの何割が本当に球状星団に含まれている変光星なのかを確かめる必要があります。現在、南アフリカのフィースト博士、メンジス博士とともに視線速度を測定して星団への帰属を確かめる観測を行っています。

図3は、私たちが新しく発見した84個と、すでに見つかったものを合わせた358個の変光星の色等級図上の分布です。赤色巨星が明るくなった最後の部分で、変光星になっていることがわかります。また、 $(J-K)_0$ が1.5を超えるような変光

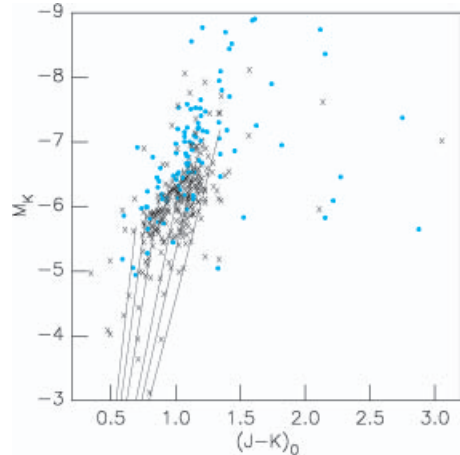


図3 赤色巨星変光星の色等級図。振幅が0.2等以上と確認できた星は青い点、それ以外は×印。実線は太陽の約100分の1から同じ金属量までの各化学組成における巨星分枝の位置。右側ほど金属量が高い。

星も見つかっています。このような星は質量放出によって大量のガスとダストが星を覆い、その吸収・赤化によって赤くなっていると考えられます。すでに述べたとおり、このような星は今まで発見されておらず、球状星団では私たちが初めて発見しました。2004年の春にこのうちのいくつかを野辺山45m電波望遠鏡で観測したところ、質量放出の証拠である一酸化珪素メーザを検出しました^{9),10)}。(このような赤い星の一つのカラー写真が、天文月報3月号の巻頭にありますのでご覧ください。)メーザの周波数から求めた変光星の視線速度は球状星団の速度とそれほど矛盾もなく、実際に球状星団の中で進化してきた星である可能性が高くなりました。五つの非常に赤い質量放出星の個数からは、約5万年の間大きな質量放出を行うという計算になります。残念ながら、近赤外線の観測だけでは質量放出の定量的な値まで得られないので、さらに研究を進めるために赤外線衛星ASTRO-Fによる観測などを計画しています。

5. 周期光度関係と変光星の進化

もう少し詳しく変光星の分布を見てみましょう。そのためには、色等級図での分布のほかに周期光度関係の分布を調べます。図4は、これまでに周期のわかっている118個の変光星の周期と絶対K等級をプロットしたものです。図中の2本の実線はマゼラン雲の観測などですでに知られている周期光度関係のうちB⁻系列とC系列と呼ばれるものです。C系列は振幅も大きく周期的できれいな変光曲線をもつミラ型変光星、一方、B⁻系列には半規則的変光星 (Semi-Regular) と呼ばれる振幅のそれほど大きくない変光星が分布します¹¹⁾。(変光星の周期光度関係の詳細は天文月報3月号の板 由房氏の項¹²⁾をご覧ください。) 図中の青い点は近赤外線での振幅が0.2等以上の星で、球状星団でも大振幅のミラ型変光星はC系列にきれいに並ぶことがわかります。

短周期側(図の左側)はそれほどはっきりとした系列にはなっていません。そのあたりの星はどれも小さい振幅なので、私たちの観測では変光が検出できていません。そのため、その周期はどれも文献から採用したのですが、変光の周期性が

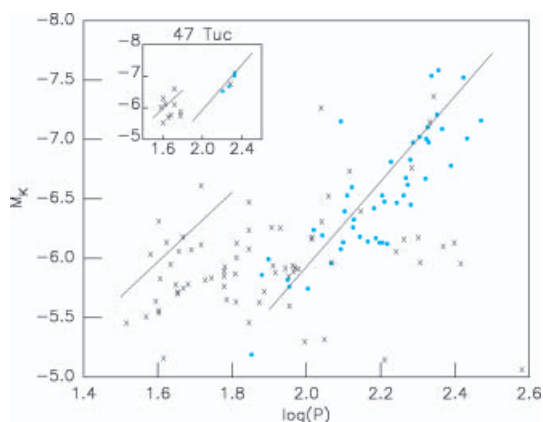


図4 周期光度関係。振幅が0.2等以上と確認できた星は青い点、それ以外は×印。実線はマゼラン雲で求められた周期光度関係のB⁻系列とC系列。

弱くなっていくことが知られていて、そのあたりの不定性も含まれて誤差が大きくなっていると考えられます。ただし、47 Tucについてプロットした図などを見ると、短周期側と長周期側で二つの系列の上に乗っていることは間違いありません。

大きな特徴の一つはB⁻系列よりも明るい部分(B⁺系列と呼びます)に変光星がないことです。すなわち、短周期側で絶対K等級で-6.5等より明るいところに変光星が分布せず、これはマゼラン雲の周期光度関係とは全く異なった分布です。そして、この境界に当たる-6.5等は、球状星団のRGB星の最高到達光度にあたります。このことは、AGB星だけでなくRGB星も変光するという、私たちの予想^{12), 13)}を支持しています。また、マゼラン雲で観測されるB⁺系列の変光星は、球状星団には含まれない若い星が進化した姿だと推測できます。一方、球状星団でこの光度を超えるようなAGB星はどれもC系列のミラ型変光星になるということがわかりました。さらに、質量放出がB⁻系列、B⁺系列、C系列で異なるのかどうかという研究も、板 由房氏を中心として進めています。

6. カタログとしての魅力

最後に、これまで述べてきた巨星進化の議論のほかに、私たちのデータがもつ可能性について、宣伝と自戒を込めて紹介しておきます。これまで近赤外線での観測が行われている球状星団は半数程度に過ぎませんでした。私たちはこれを一挙に95%まで高めました。一つの観測装置で同じ手法によってこれだけ完全に得られたデータは、可視光でも存在しません。したがって、球状星団の性質を統計的に議論するうえで、たいへん有効なデータといえます。たとえば、図5は赤色巨星分枝の色が金属量によって変化するという関係を示したものです(金属量が高いほど巨星分枝が赤くなる)。この関係は、金属量を分光で測ることが容

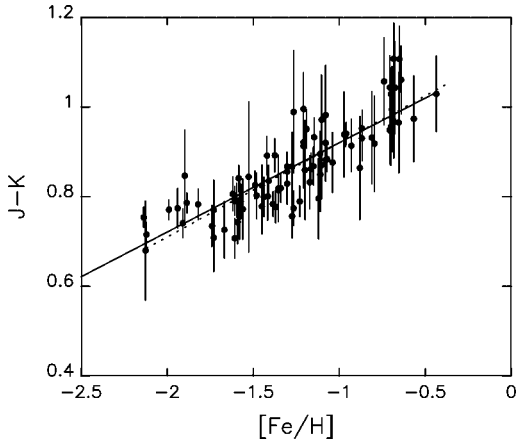


図5 各球状星団の絶対K等級 -5.5 等における赤色巨星分枝の色と金属量 $[\text{Fe}/\text{H}]$ との関係。実線は私たちのデータへの回帰で、点線はFerraroら¹⁴⁾によるもの。

易ではない比較的遠くの銀河の星に対してよく用いられる関係です。また、星団中の星々が空間的にどのように分布しているかを、すべての星団について得ることができれば、恒星系力学に大きな寄与があるでしょう。このようにさまざまな研究に使っていただけるような基本的なカタログを出版するために、現在鋭意解析中です。

謝辞

本稿は筆者の修士論文に基づいています。ご指導いただいた東京大学天文学教育研究センターの中田好一教授と田邊俊彦助手にお礼を申し上げます。また、すばらしい装置を作り、観測時間を提供くださった名古屋大学物理Z研と国立天文台の関係するすべての皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) Renzini A., Fusi Pecci F., 1988, ARA&A 26, 199
- 2) Rosenberg A., et al., 2001, A&AS 145, 451
- 3) Clark G. W., et al., 1975, ApJ 199, L93
- 4) Bailyn C. D., 1995, ARA&A 33, 133
- 5) Frogel J. A., et al., 1983, ApJS 53, 713
- 6) Romanishin W., Angel J. R. P., 1980, ApJ 235, 992
- 7) Frogel J. A., Whitelock P. A., 1988, AJ 116, 754
- 8) Clement C. M., et al., 2001, AJ 122, 2587
- 9) Matsunaga N., et al., 2005, PASJ 57, L1
- 10) 松永典之, 2004, ニュートン, 12月号, 13
- 11) Ita Y., et al., 2004, MNRAS 347, 720
- 12) 板 由房, 2005, 天文月報 98, 3月号, 163
- 13) Ita Y., et al., 2002, MNRAS 337, L31
- 14) Ferraro F. R., et al., 2000, AJ 119, 1282

The Evolution of Red Giants in Globular Clusters

Noriyuki MATSUNAGA

*Institute of Astronomy, Department of Astronomy,
University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka-shi,
Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: We have been observing 145 globular clusters in our Galaxy for the last 3 years to study red variables stars. We have discovered many new variables, which include very red stars with heavy mass loss. We discuss the evolution of the red variables from their distribution in color-magnitude diagram and period-luminosity diagram.