

AGB Superwind

田 辺 俊 彦 , 西 田 伸 二

〈東京大学 理学部 天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

ttanabe@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

snishida@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

マゼラン雲に存在する球状星団は、生まれたばかりの新しいものから我々の銀河系に存在するような古いものまで年齢が多岐にわたっており、様々な質量の星の進化を研究するのに理想的な天体である。我々は、新たに開発した近赤外線カメラを用いて、これら球状星団を系統的に観測しているが、その過程で中間年齢の球状星団に、可視光では見えない赤外線星を3つ発見した。これら赤外線星は、恒星進化終末期の AGB 段階のさらに末期に、激しい質量放出を行う Superwind フェーズにあると考えられる。年齢、質量、絶対光度などの判った星で、Superwind が発見されたことにより、星の進化理論を直接検証することが可能となった。さらにこれら赤外線星の発見は、早期 M 型から晩期 M 型、炭素星へ、さらにそれらが Superwind のフェイズへと進化するという直接の証拠を初めて与えるものと考えられる。また我々は、これら赤外線星の発見率から Superwind 期の存続時間を 10 万年と推定した。

AGB における質量放出と赤外線観測

我々の銀河系（恐らく他の銀河でも同様であろうが）に存在する星の圧倒的多数は、質量が太陽の 8～9 倍以下の中小質量星である。これら中小質量星は、最終的に漸近巨星分枝（Asymptotic Giant Branch, 以下 AGB）を経て（あるものは、惑星状星雲となりその後）、白色矮星へと進化し、だんだんと温度が冷えて我々の視界から姿を消すと考えられている。ところで、観測される白色矮星の質量分布は、0.6 太陽質量程度の所に集中しており^{1), 2)}、従って中小質量星は、進化の途中でその質量のかなりを失うことになる。この質量放出の大部分が起こるのが AGB 段階であると考えられている。AGB 星とその質量放出については、橋本氏の記事³⁾を参照されたい。これら AGB 星は、進化の進んだ星であり、その中心部で核反応を起こし、だんだんと重い元素を合成している。先に述べたように中小質量星は、銀河の圧倒的多数を占めるので、AGB

星により放出される重元素を多量に含むガスは、星間空間に充満し、それらからやがてまた誕生する新たな星や惑星系の化学組成を決定することになる。AGB 星による質量放出は、大質量星末期に起こる超新星爆発による質量放出に比べ地味ではあるが、恒星の進化のみならず宇宙における物質進化を規定する最も重要な因子である。

この質量放出は、後述するように比較的短期間に行われるため、単位時間当たりに放出される量は多く、多いものでは 1 年間に地球百個分の質量にも相当する。質量放出がどのようにして起こるのかは、未だ良く判っていないが、多量のガスは、星の表面から離れるにつれ温度が下がり、ある割合で固体の微粒子 = ダストとなり星をとりまくようになる。星周塵の誕生である。なお、宇宙空間のような密度の低い所では、物質は通常、液体という状態では存在できず、直接、気体-固体の変化となる。形成されるダストの量は、質量放出量が大きい程多いと考えられる。星をとりまいたダスト

粒子は、星の光を吸収、散乱するため星の光を遮るようになるが、その固体の微粒子の大きさは、可視光の波長程度であると考えられており、この程度の大きさの微粒子は、波長が長くなるにつれて吸収、散乱の度合が小さくなることが知られている。従って、短い波長で見るほど光が減光されて星が暗く見えることになる。同時に星の光を吸収したダスト粒子が自分自身で出す輻射は、赤外線域にピークを持つ。そもそも AGB 星は、星の外層大気が膨れあがった巨星で表面温度が低いうえ、これらの星周塵の影響で、可視光では暗く赤外線域で明るい天体となっている。従って、これら AGB 星を研究するには、赤外線による観測が非常に重要、というより不可欠となる。実際、我々の銀河系の中には、ダストに覆われた AGB 星と考えられる星が、例えば、赤外線天文衛星 IRAS によって数多く見つかった⁴⁾。

恒星進化モデルのテストフィールドとしての球状星団

このように銀河系内には数多くの AGB 星が見つかったが、それらの星は、孤立した単独星であるため、一般に星までの距離を決めることは難しく、従ってその星の絶対光度を知ることも難しい。さらにそれらの星の年齢、質量を知ることは、今の我々の知識ではほとんど不可能に近い。現在、提唱されている恒星進化モデルが正しいか正しくないかは、観測される恒星の物理量をどれだけ正確に予測できるかによって判断される訳であるが、観測で決められる量に不定性のあるこれらの星は、理論の検証という観点からすると問題があることになる。しかし幸いなことに宇宙には、1 万から 10 万個の星の集団

である球状星団と呼ばれるものが存在している。星団に属する星は、ほぼ同時に生まれたと考えられ、従ってそれらの星の年齢は等しく、また、生まれた時の化学組成も等しいと考えることができる。ただし、それらの星の質量は、大きいものから小さいものまで様々である。

恒星進化を論ずるのに非常に便利でありよく使われるものに Hertzsprung-Russell 図 (HR 図) がある。銀河系に属する球状星団である M3 の HR 図 (色-等級図) を図 1 に示す。⁵⁾ HR 図とは、有効温度 (表面温度にほぼ等しい) の高い星ほど左の方に、絶対光度の大きい星ほど上の方にプロットした図である。大質量の主系列星は、高温で明るいので左上に、小質量の主系列星は、低温で暗いので右下にくる。球状星団の HR 図では、主系列のどこかに折れ曲がりがあり、それより左上の方に星

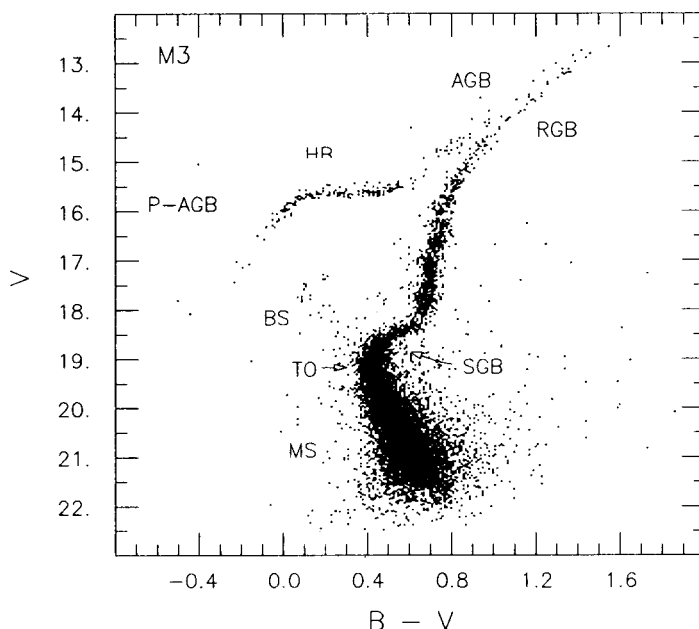


図 1 我々の銀河系に属する球状星団 M3 の色-等級図 (HR 図と同等). AGB : 漸近巨星分枝, HB : 水平分枝, RGB : 赤色巨星分枝, SGB : 準巨星分枝, MS : 主系列.

がない。つまり、質量の大きい星がすでに主系列を離れて進化してしまったことを意味する。星は一般に、質量が大きい程その進化が速いということがこの図から明らかである。恒星進化の理論の助けを借りれば、このことから逆に球状星団ではどのくらいの質量の星がすでに主系列を離れたか、つまり主系列の折れ曲がりがあるか、その星団の年齢を推定することができる。また主系列の上方に存在する主系列を既に離れた星は、主系列に比べその密度が低くなっている。これは（そう自明ではないが）、主系列を離れてからの星の進化が速いことを意味している。これも逆に言えば、主系列以後の様々な段階における寿命をこの密度から推定することができるのである。ちなみに AGB 期の存続時間は、その星の寿命と比べてはるかに短い 100 万年程度と考えられている。

ところで、主系列以後における星の進化は非常に速いので、HR 図上にあるそれらの星の年齢を主系列の折れ曲がりにおける星団の年齢と考えてもそれ程間違いではない（実際には、この年齢より少し古い）。また、それらの星の質量も主系列の折れ曲がりにおける質量の星が進化し（て現在の質量になつ）たと考えでも良い（実際には、この質量より少し大きな質量の星が進化した）。さらにここでは述べないが、幾つかの方法によって球状星団までの距離を比較的正確に見積もることができるので、星の絶対光度を知ることができるのである。このように球状星団は、恒星の進化、特に主系列を離れた後の進化を研究するのに非常に都合が良い。即ちその理由は、

1. 星団に族する星は、ほぼ同時に生まれており、誕生時の化学組成が等しい、
2. 星団の年齢、つまり恒星の年齢が判る、
3. 主系列を離れた星のもともとの質量が判る、
4. 星の絶対光度が判る、

ということである。このような訳で、球状星団は、古くから盛んに観測が行われてきたのである。

マゼラン雲の球状星団

しかしながら、良く知られているように我々の銀河系に属する球状星団は、宇宙の年齢を決定するのに使われるように、皆非常に古いものばかりである。このことは、質量の大きい星は既に進化してしまって我々の視界から消え去っており、現在我々が見る球状星団の星々は、質量の小さいもの（太陽より少し小さい星）ばかりということの意味している。従ってこれらの球状星団の観測から直接に得られる知識は、小質量星の進化ということになる。

他方、我々のすぐ隣りの不規則銀河である大小マゼラン雲には、我々の銀河系の球状星団と同様に古いものから非常に新しいものまで、様々な年齢の球状星団が存在することが判ってきた⁶⁾。即ち、マゼラン雲の球状星団は、様々な質量の星の進化を我々に示してくれていることになる。さらに我々の銀河系の球状星団の数は 200 を超えないと考えられているのに対し、マゼラン雲ではその数は、1000 を超えると見積られている。このことは、AGB 星のように寿命の短い天体を観測するのに大変有利である。1 万から 10 万の星を含んでいると考えられる球状星団でも、一つの球状星団の中には短寿命な天体を見つけられないかも知れないが、系統的に多くの星団を観測することによりそれらの天体を捉えられる可能性があるからである。

マゼラン雲球状星団の近赤外線観測

我々は、恒星進化終末期、特に AGB 段階における星の進化を研究する目的で大小マゼラン雲球状星団を赤外線です系統的に観測する計画を立てた。この計画は、一方では地上から観測不可能な中間赤外域をヨーロッパ宇宙機関が打ち上げた赤外線スペース天文台 (ISO)⁷⁾ によって観測するものであり、他方は近赤外線カメラにより地上から観測するものである。ISO による観測の紹介は、別の機会に譲るとして本稿では地上観測の結果を紹介する。

我々は、国立天文台、南アフリカ天文台 (SAAO) と共同で、地上観測のために PtSi (プラチナシリサイド) という半導体を使った赤外線 2 次元検出器を用いて赤外線カメラ、PANIC (PtSi Astronomical Near-Infrared Camera) を開発した^{8), 9), 10)}。PANIC については、中田氏の¹¹⁾記事に詳しい。我々は、PANIC を用いて 1993 年から SAAO において、マゼラン雲球状星団の系統的近赤外線観測を開始し、マゼラン雲観測に都合の良い 8 月から 12 月の時期に年 4 週間程度の観測を今までに行なってきた。この間、年齢の古いものから新しいものまで比較的明るい (つまり大きい) 約 20 の球状星団を *J* (1.25 μm), *H* (1.65 μm), *K* (2.2 μm) の 3 バンドで毎年繰り返し測光観測してきた。観測に用いている望遠鏡は、SAAO サザerlandステーションの 0.75m 望遠鏡で、この望遠鏡では PANIC は、視野 5' \times 5' という今までの近赤外線カメラでは得られなかった広視野を提供し、典型的に 2' から 3' の大きさのマゼラン雲球状星団を観測するのに最適である。

中間年齢の球状星団における赤外線星の発見

我々は、このような観測を続けている内に、*I* (0.9 μm) バンドで撮られた像¹²⁾に写っていない非常に赤い赤外線星を大マゼラン雲の球状星団 NGC 1783, NGC 1978 と小マゼラン雲の球状星団 NGC 419 に見つけた¹³⁾。これら球状星団の *J*, *K* バンドイメージを図 2 に示す。周りの星と比較して、*J* より波長の長い *K* でのほうが明るいことが判る。このことは、先に述べたように、これらの星が多量の質量放出を行っており、その結果、星が厚いダストに覆われていることを意味する。ちなみに、図 2 に写っている星々は、通常の星に比べ低温で赤く、ほとんどが AGB 星であると考えられる。なお、NGC 1978 の赤外線星については、Frogel ら¹⁴⁾が、AGB 星を単素子の測光器によって観測している途

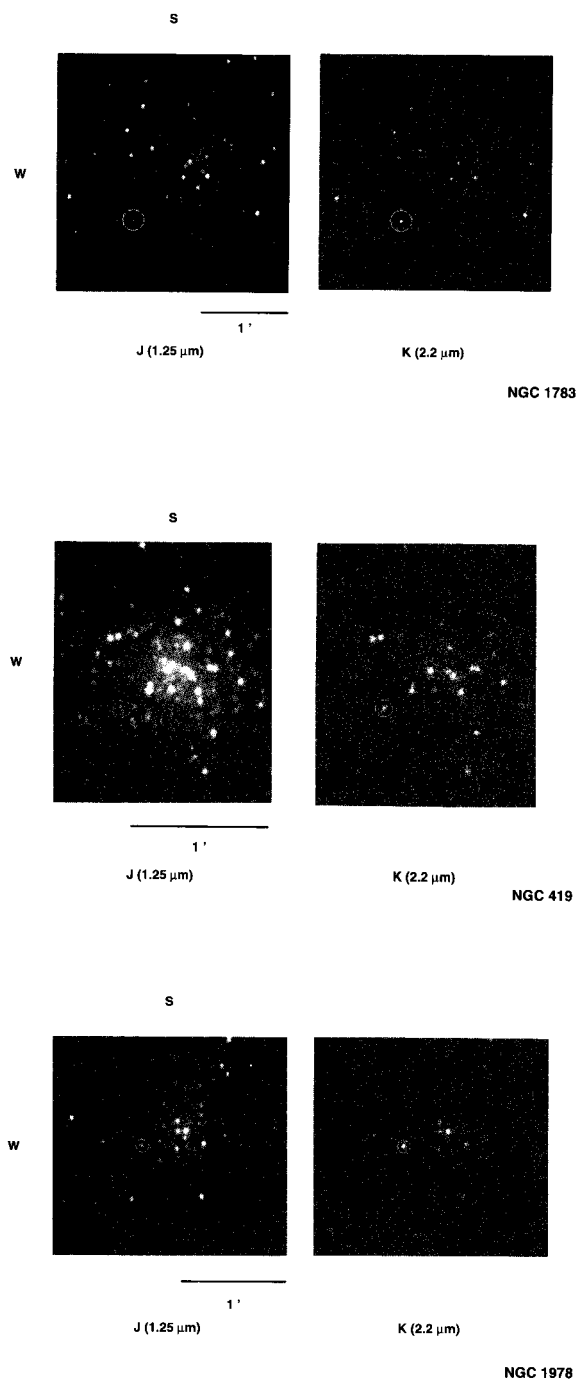


図 2 赤外線星が発見されたマゼラン雲球状星団の *J* (1.25 μm), *K* (2.2 μm) バンドイメージ。a) NGC 1783, b) NGC 419, c) NGC 1978. 赤外線星は、丸で囲ってある。

中に偶然発見しており、我々が最初に見つけたということにはならない。またこの星は、Ferraro らの観測¹⁵⁾でも捉えられている (NGC 1978 の 101 番)。

これらの球状星団は、年齢が約 10–20 億年程度^{16), 17), 18)}の中間年齢の星団である。またこれらの球状星団の AGB 星の質量は、だいたい 1.5–2.5 太陽質量程度と見積もれる。中間年齢の球状星団では、AGB 星がよく発達していることが知られており^{14), 19)}、また炭素星も多数見つかっている。宇宙全体で考えると炭素より酸素の方が多いので、通常の星は、炭素より酸素が多い組成で誕生するが、炭素星は、星の表面で酸素より炭素が多い星であり、現在の進化理論では、AGB 段階における星の内部での核融合の結果生成された炭素が、星の表面にくみ上げられて炭素超過になったと考えられている星である。つまり、AGB 段階の後半になってできる星である。AGB 星は、その名の通り HR 図上で枝ようになって左下から右上に伸びているが、その進化も光度の小さい方から大きい方へと進むと考えられており、従って炭素星は、酸素の多いいわゆる M 型の星より明るいと考えられている。実際、マゼラン雲球状星団の AGB 星は、ある光度を境にしてその下に M 型、その上に炭素星が存在しているように見える¹⁴⁾。

我々は、得られた観測データを DoPHOT²⁰⁾というソフトウェアによって解析し、J, H, K における等級を求めた。Glass²¹⁾や Feast²²⁾らは、J-H vs. H-K のいわゆる 2 色図上にミラ型変光星をプロットすると、炭素

星は、M 型の星が占める位置よりも明らかに赤いところに位置することを示したが、我々の見つけた赤外線星も、このような炭素星の領域に含まれることが判った。さらに、本稿では詳しく立ち入らないが、今までの観測からこれらの赤外線星は、近赤外領域でミラ型変光星のように変光していることが判っており、これらのことから赤外線星は、恐らく炭素星であると思われる。図 3 には、これら赤外線星のエネルギー分布を示した。J, H, K における値は、我々の測光結果、12 μm と 25 μm は、IRAS 衛星による観測の上限値である。なお、図 3 の測光値は、ある一回の観測に基づいたものであり、変光は考慮していない。この図から、これらの赤外線星がそのエネルギーの大部分を中間赤外域に放出していることが判る。赤外線星が、得られた測光データに合うような黒体放射のスペクトルを持っていると仮定すると、距離が判っているので、絶対光度を求めることができる。その値は、AGB の上の方の値に近く、上述した M 型の

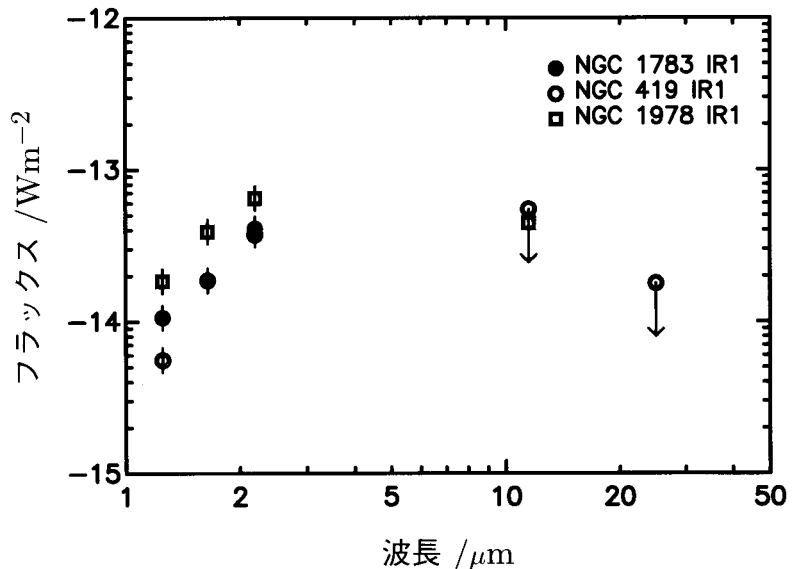


図 3 3つの赤外線星のエネルギー分布図。J, H, K は我々の観測によるもの、12 μm 、25 μm は、IRAS 衛星による観測の上限値。

AGB 星と炭素星の境の上方である。このことからこれら赤外線星が、炭素超過の星であることが示唆され、また、AGB 上でも進化の進んだ星であると考えられる。

AGB Superwind

1980 年に行なわれた研究会において、イタリアの Renzini²³⁾は、中小質量星が全て惑星状星雲を経るとして、観測される惑星状星雲の星雲部分の質量、膨張速度、中心星からの距離を考えると、その星雲を作るもとになった中心星の質量放出の量は、少なくとも 1 年間に $5 - 6 \times 10^5$ 太陽質量分 (地球十数個分) なくてはならないと結論し、このような大規模な質量放出を Superwind と呼んだ。このことは、大質量放出を行なう期間は、1 万年から 10 万年の程度であることを意味する。この期間は、星の一生からすればもちろん、AGB 期の存続期間に比べても短いものである。Renzini は、AGB 期には通常は質量放出を行なう時期とそれに続く大規模な質量放出を行なう時期があると考え、短期間に大質量放出を行なう星は、厚いダストに覆われるので赤外線星であると予測した。

前節で述べた赤外線星の特性を考えると、我々の発見した赤外線星は、まさに Renzini の予想した Superwind 期にある赤外線ではないかと考えられる。もちろん銀河系内には、多くの赤外線星が存在し、例えば、OH / IR 星などは、Superwind 期にあると考えられているが、年齢、質量、絶対光度などの判った星で、Superwind が見つかったのは初めてであり、星の進化理論を直接検証することができるという意味で重要であろう。さらに、先に述べたようにこれらの赤外線星の見つかった中間年齢の球状星団には、AGB 星が数多く存在する。これら赤外線星の発見は、早期 M 型から晩期 M 型、炭素星へ、さらにそれらが Superwind のフェイズへと進化するという直接の証拠を初めて与えるものと考えられる。

また、このような星が複数見つかったことで、あ

る程度統計的な議論が可能となったという観点も見逃さないだろう。事実我々は、統計的な方法で Superwind の存続期間を計算した。またまた Renzini によるが、彼らは理論的な考察から、発見される星の数、探された球状星団の全光度、それらの星の属する進化段階の寿命の 3 者の間の簡単な関係式を導出した²⁴⁾。この関係式を我々の観測に当てはめると、Superwind フェイズは、約 10 万年程度続くという結果になる。逆に言えば、質量放出量は、だいたい 1×10^5 太陽質量 / 年となる。我々は、初期質量がだいたい 2 太陽質量程度の星を観測しているので、これらの値は、この程度の質量の星の観測値ということになる。これらの値は、先に Renzini が予想した値と比べ、寿命はその上限に近く、質量放出量は下限に近い。ただし我々の出した値は、質量が 2 太陽質量、金属量として大マゼラン雲の値を用い、現実的な質量放出を取り入れて計算した Wood²⁵⁾らのグループによる最近の恒星進化モデルを支持しているように思われる。

今後の課題

今回我々が赤外線星を発見できたのは、近赤外線 2 次元検出器の進歩におうところが大きい。このような天体は、単素子の検出器では、発見することが極めて難しい。また我々は、三菱電気の開発した 1040×1040 素子という大フォーマットの PtSi 検出器を用いているが、その大きさという利点の有効に活かされた結果であろうとも考えている。観測装置が進歩すると新しいものが見えてくるという良い例であろう。

しかしながら、現時点では、これら赤外線星の発見によって何か特別新しいことが判ったという訳でもない。橋本氏も指摘しておられるように³⁾、AGB 星の進化に伴う質量放出は、これまで考えられてきたように単調に連続的に増加するというような単純なものではないらしい。これら赤外線星の意味するところをよくよく考えてみる必要がある。そのためには、分光観測によってこれらが本当に炭

素星であるかどうか、定常的な観測により変光曲線を正確に求め、これと中間赤外線域の測光観測によってエネルギー分布を正確に決め、黒体輻射を仮定しない絶対等級を求めるなどこれら赤外線星をさらに詳しく観測しなければならない。AGB星の観測的研究はむしろ、始まったばかりと考えた方が良いでしょう。

幸いにも我々には、ISOによる観測がある。ISOによる測光、分光観測によってこれら赤外線星の特性が明らかになることを期待したい。また、ISOという新しい観測装置で近赤外線域でも見えない非常に厚いダストに覆われた赤外線星が発見されるかもしれない。

ここで述べた結果は、もちろん筆者らだけで得られたものではない。いわゆる「うちわ」の話なので人名は省略するが、中田氏の解説記事¹¹⁾に登場する全ての人の成果でもある。さらに本観測は、近赤外カメラの開発を抜きにしては語れない。カメラの開発、特にPtSi素子の扱いについて丁寧に御教示下さった東大教養の上野宗孝氏と三菱電気(株)の木股雅章氏には、この場を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Weidemann V., 1990, ARA&A 28, 103
- 2) Weidemann V., Koester, D., 1983, A&A 121, 77
- 3) 橋本 修 1996, 天文月報, 89, 382
- 4) Chester T., 1986, in Light on Dark Matter, ed. Israel, F. P. (Reidel, Dordrecht) p. 3
- 5) Renzini A., Fusi Pecci F., 1988, ARA&A 26, 199
- 6) Searle L., Wilkinson A., Bagnuolo W. G., 1980, ApJ 239, 803
- 7) 田辺 俊彦 1993, 天文月報, 86, 54

- 8) Glass I. S., Carter D. B., Sekiguchi K., Nakada Y., 1994, in Infrared Astronomy with Arrays: The Next Generation, ed. Mclean I. S. (Kluwer, Dordrecht) p. 285
- 9) Glass I. S., Sekiguchi K., Nakada Y., 1995, in New Developments in Array Technology and Applications, eds. Davies Phillip A. G., Janes K. A., Uppgren A. R. (Kluwer, Dordrecht) p. 109
- 10) Tanabé T., et al., 1995, Proc. SPIE 2744, 110
- 11) 中田 好一 1996, 天文月報, 89, 111
- 12) Lloyd Evans T., 1980, MNRAS 193, 87
- 13) Tanabé T., et al., 1997, Nature 385, 509
- 14) Frogel J. A., Mould J., Blanco, V. M., 1990, ApJ 352, 96
- 15) Ferraro F. R., et al., 1995, MNRAS, 272, 391
- 16) Mould J., et al., 1989, ApJ, 339, 84
- 17) Bomans D. J., Vallenari A., de Boer K. S., 1995, A&A 298, 427
- 18) Duran D., Hardy E., Melnick J., 1984, ApJ 283, 552
- 19) Westerlund B. F., Azzopardi M., Breysacher J., Rebeiro E., 1991, A&AS 91, 425
- 20) Schechter P. L., Mateo M., Saha A., 1993, PASP 105, 1342
- 21) Glass I. S., Feast M. W., 1982, MNRAS 199, 245
- 22) Feast M. W., et al., 1982, MNRAS 201, 439
- 23) Renzini A., in Physical Processes in Red Giants, 1981, eds. Iben Jr. I., Renzini A. (Reidel, Dordrecht) p. 431
- 24) Renzini A., Buzzoni A., in Spectral Evolution of Galaxies, 1986, eds. Chiosi C., Renzini, A., p. 195
- 25) Vassililadis E., Wood P. R., 1993, ApJ 413, 641

AGB Superwind

Toshihiko Tanabé and Shinji Nishida

Institute of Astronomy, The University of Tokyo, Mitaka, Tokyo, 181, Japan

Abstract: Globular clusters associated with the Magellanic Clouds Provide an excellent opportunity for studying late stages of the stellar evolution. We discovered infrared stars in the intermediate-age globular clusters, NGC 1783, NGC 1978 and NGC 419. These stars undergo a period of intense mass-loss and are thought to be in a superwind phase.

Our observations confirm that asymptotic giant branch stars go through a superwind phase, and constrain the duration of this phase to be about 10^5 years.