

球状星団の H-R 図

下 田 真 弘*

ももとの H-R 図は縦軸が絶対等級、横軸がスペクトル型であったが、スペクトル型は第一義的には表面温度の関数なので、表面温度に対応する他の観測量である色指数を横軸にした図も、現在では H-R 図と呼ばれている。球状星団の星に対して作られているものは、事実上すべてこの意味での H-R 図、厳密に云えば色指数-絶対等級図である。さらに、一つの球状星団の星は我々から殆んど等距離にあるから、絶対等級の代りに見かけの等級（視等級）をとっても図の上での星の分布は事実上変わらない。球状星団までの距離は非常に誤差が大きいので、直接我々が精密に作れるのは、縦軸を視等級にした色指数-視等級図（略して色-等級図）である。

なお、視等級と色指数は種々のものが用いられているが、大部分の観測はジョンソンの *UBV* システムで行なわれており、それに基づく色-等級図は等級に *V*、色指数に *B-V* が使われているので、話を (*V, B-V*) 図に限定する。

球状星団は他の多くの銀河 (galaxies) にも存在するが、ここでは銀河系の星団についてのみ述べる。

銀河系には現在約 120 個の球状星団が見出されている。その内、色-等級図が作られているものは 74 個で、残りは遠距離にある等、観測条件が悪いものが主なので、サーベイ的な観測はもう山を越したと行ってよいであろう。ただし、このうち大部分の星団については水平分枝附近までの観測で、それより暗い主系列まで達しているのはまだ 11 個にすぎない。水平分枝辺までの観測も精度のよいものは少ない。今後の観測の主な課題は、もっと多数の星団に対し主系列まで観測をのぼすこと、および精度を上げることである。

色-等級図の作り方

1970 年に、サンデーは M3, M13, M15, M92 に対し精密な色-等級図を発表した。この仕事は、上にのべた二つの課題を、ある部分では現在の技術の限界に近い所まで追究した唯一のものである。ここでは、そのうち M15 の色-等級図を取り上げ、これがどのようにして作られたかを述べよう。

まず基本になるのは光電測光である。これは、光電管では受光量と光電流が光量の広い範囲にわたってよい精度で比例しており、また光電流を高倍率に増幅してやる

のは容易なので、明るい星と暗い星の光量比、従って等級差を容易に、かつ正確に求める事ができるからである。ただし、球状星団の非常に暗い星の等級をジョンソン等の測光標準星から直接求めることは技術的に困難なので、まず星団内の明るい星数個（これは見かけ上星団内にあればよく、星団に属していない星の場合もある）の等級を測光標準星からきめ、次にこの明るい星を中間標準星として暗い星の等級を求めるという二段構えの手続きをとる。M15 の場合は第一段の観測は明るい星（約 17 等まで）の観測に組込まれて、ウィルソン山の 2.5 m 鏡で行なわれ、第二段の暗い星の測光には、パロマーの 5 m 鏡が用いられた。

本号アルバムに、実際に光電測光を行った星を示しておいた。上下の写真中の P11 と P13 が主な中間標準星である。暗い星の方が明るいものより星が混んでいない、中心から遠い所でしか精密な測光はできない。しかし、中心から離れすぎると、星団に属さない星の割合が増える。この二つの兼ね合いで、適当な距離の範囲は限定される。こうして選ばれた星が下の写真に示してある。上の写真は明るい星に対するものであるが、光電測光を行ったのはこのうちの 4 割余りで、残りは後述する写真測光を行った星である。

所で、光電測光では星を一つ一つ測って行かなければならないので、光電測光だけで精度のよい色-等級図を作ろうとすると、選ばれた星をすべて相当回数、観測しなければならず、非常に時間がかかる。その点、写真は一枚で多数の星が写るので、基本的な精度は悪いが観測に要する時間は非常に短かくてすむ。今、すべての光電測光星をなるべくむらがないように写し、それも相当枚数を撮れば、系統的誤差も写真固有のばらつきによる誤差も小さくでき、割合短時間の観測で精度を上げられることになる。そこで、光電測光は個々の星の観測回数を少なくして (M15 の場合、約 110 個のうち 2 回以上観測した星は 36 個)、代りに写真を適当な枚数とり、これを測定器にかけて写真乾板上の星像全体の黒みに対応する量 (*D* と名付けておく) を各星につき求め、これと光電測光による等級を両軸にとって図 1 のようにプロットし、ばらついた点の中央を通るような曲線を引き、この曲線と *D* の値から等級をきめ直す（最後の操作は図 1 に矢印つき直線で示してある）。これを全乾板につき行い、求めた等級の平均値を出す。以上の手続きで光電測光から求めた等級の改良を大部分の星に対して行った。

* 東京学芸大学 M. Simoda: H-R Diagram of Globular Clusters.

それから 18~19 等より暗い星の場合は、写真を併用することが不可欠である事情がある。光電測光では、星の光を光電管へ入れる前に、上層大気に起因する夜光をさへぎるために円いダイアフラムを望遠鏡の焦点の所に置く。この大きさは、地球大気のゆらぎのために星像が動くので、精度のよい観測をするためにはパロマーのような条件のよい所でも直径 7 秒位より小さく出来ない。そうすると、そのダイアフラム内に写真で検出できない暗い星（約 23 等以上）がいて、その光が加わっている可能性がある。またこのダイアフラムを通過してきた光には夜光が加わっているため、星からの光量を出すには星のない場所にダイアフラムを動かして夜光だけの光量を測り、星を入れたときの光量から差引かなければならない。所が、星がないと思った場所にも、検出不能の星がある可能性がある。星+夜光のダイアフラムの方だけに検出不能星が入っている場合は、星を真の値より明るいと測定してしまう。逆に、夜光だけだと思った場所の方だけに検出不能星があると、測定値が真の値より小さくなる。両者の確率は等しいので、図 1 に示した手続きで写真を使った等級を出せば、この誤差は消去できる。

以上のような手続きで決められた V , $B-V$ の値を、一部の星について本号アルバムの写真の右に与えておいた。補正に使った乾板も、殆んどすべて、明るい星は 2.5 m 鏡、暗い星は 5 m 鏡によるものである。

さらに、写真だけから等級を求めることもできる。即ち D を求め、図 1 から等級を出し、各乾板から得られた値を平均すればよい。これが写真測光の方法である。

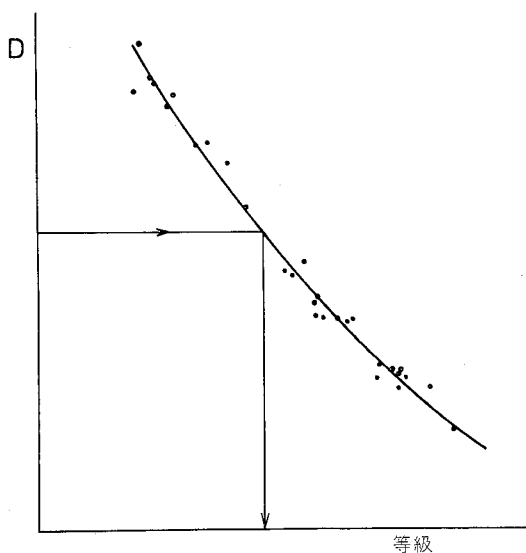


図 1 写真から等級を求める図

M15 の色-等級図

図 2 で、大きい黒丸は光電測光星およびそれに写真による補正を行った星、小さい黒丸は写真測光星、白丸は光電+写真だが、実線で示した系列中心線から誤差以上に離れていると思われる星である。この附近の写真測光星も、系列線に乗る星と左側に白丸の星と同程度離れている星に大体分れているようなので、M15 には主系列から準巨星への主な系列からはずれた、異なった種類の星があるというサンデーの主張はもっともらしいが、系列線からの離れが $(B-V)$ で 0.1 等以下なので、確実であるとは云えない。もっと精密な観測が必要であろう。

サンデー等は 2.5 m 鏡による B , V 各 10 枚の乾板を用いて、明るい星について、中心から $1'1''$ と $6'20''$ の間の円環内の測定ができる星全部（除変光星）の写真測光を行った。図 3 は、その内で測定値のばらつきが小さい星の色-等級図である。巨星枝、水平分枝、漸近枝

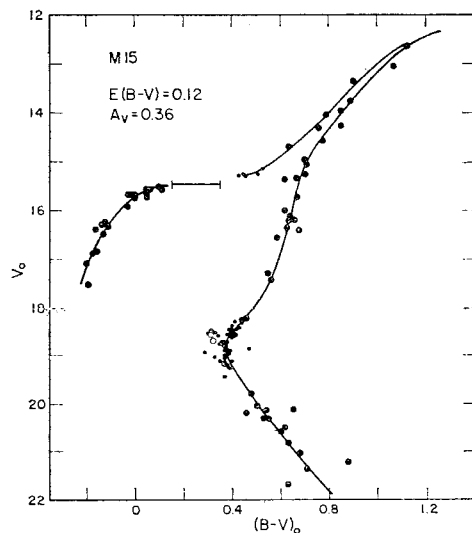


図 2 M15 の色-等級図。星間赤化と吸収に対する補正後のもの

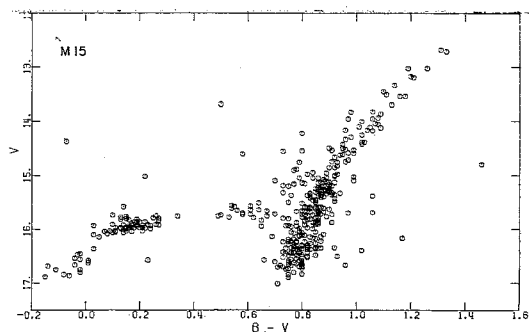


図 3 M15 の明るい部分の色-等級図

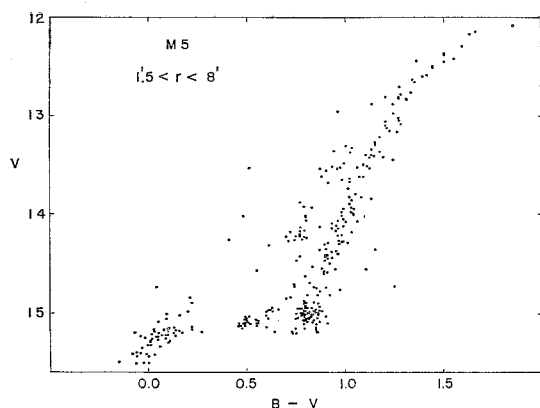


図4 M5の明るい部分の色-等級図

以外に散らばっている星があるが、大部分は星団の手前にある星か、中心附近で星が混んでいる影響が出ている星と見なせる。巨星枝について、図の上で測定された系列の幅から乾板ごとのばらつきによる幅を差引くと、真の幅は $B-V$ で ± 0.007 等（以下すべて幅の値は標準偏差）となり、この星団の巨星間の金属量差が非常に小さいことを示唆する。また巨星枝上の星の分布を見ると、一様ではなく、むらがあるように見える。もとの測定した星全部による巨星枝にも同様なむらが出ている。もしこのむらが統計的なゆらぎによるものでなければ、巨星は現在の進化論から期待されるように一様な速度で明るくなって行くのではなく、遅・速があることになり、進化論に疑問を投げかけることになる。漸近枝の方も、巨星枝との分離が悪いのではっきりしたことは云えないが、14.7 等辺を中心にしたかなり広いすきまがあるように見え、これも本当なら現在の進化論と矛盾する。

M5の色-等級図

筆者等（下田，谷川）はM5について、キット・ピーク 2.1m 鏡による B, V 各4枚の乾板を用いて、色-等級図を作った。図4で見られる通り、巨星枝の分布むらはM15よりはっきり出ている。この図には出ていないが、巨星枝は15.5等まで測定があり、この部分では落込んでいるので、M5の巨星枝の星数分布は、15.0等の所の高い山とその両側に谷がある形をしている。このゆらぎは統計的に有意であるが、統計はとり方によって有意性が変わってくるので、真実であるかどうかは問題がある所である。漸近枝はほぼ完全に巨星枝から分離し、やはり連続的でなく三つに分れているように見える。各系列の真の幅は、中心に近いとんだ星と星団の手前の星を除くため、内側と外側の星を除いて作った図（図5）から出すと、巨星枝、漸近枝、黄色水平分枝は ± 0.02 等、青色水平分枝は ± 0.07 等となるが、実は使った乾板に

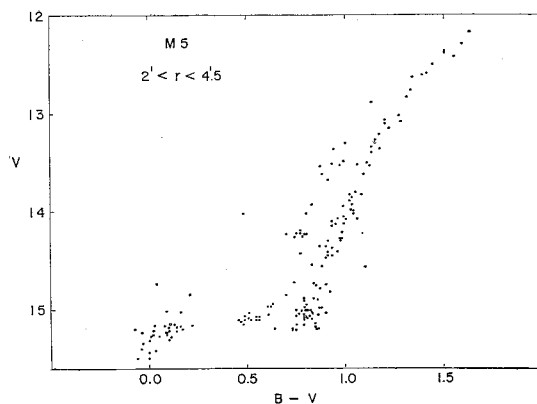


図5 図4から内側と外側の星を除いたもの

場所によるむらがあり、真の幅は前三者についてはもっと小さくなるはずで、これらを構成している星の均一性が高いことを示唆している。

青色水平分枝だけは真の幅が相当あるが、実は他の精密に観測された星団では、水平分枝の真の幅はM15（図3）でみられるようにならかなりある方が一般的であり、M5の黄色水平分枝の方が例外であるように思われる。

他の星団について、および理論的解釈

巨星枝については、発表された精密な観測は他にもいくつかあり、ただ一つの例外 (ω Cen) を除いて幅が小さいが、漸近枝の幅は小さいのも大きいものもある。 ω Cenでは巨星枝と漸近枝は全く区別できず、全体として非常に広い幅を持っている。理論的には、漸近枝に相当する進化の段階では、ヘリウムが間歇的に爆発的燃焼を起し、それにより物質の混合が起り得るので、化学組成の内部での分布が変化し、時にはそれが表面まで出てくることありうる。従って、漸近枝は幅が小さいのも、大きいのもあって差支えないと思われる。幅の広い極端が ω Cen で、実際にこの星団の巨星+漸近枝にはヘリウム反応の生成物である炭素が表面に異常に多い星が多数発見されており、理論的予想を裏付けている。

色-等級図から H-R 図へ

以上のべた色-等級図を H-R 図にするには、距離が必要である。所が、球状星団の距離を色-等級図の精度にみあう位のよい精度で決定できる方法は今の所ない。星団の年齢は進化論から出した理論的 H-R 図と観測を比較して決めるので、その精度は主に距離の精度で限定され、 $\pm 30\%$ 位の誤差があると思われる。折角よい色-等級図が作られているのに、最も重要な年齢は悪い精度でしか決められないのは残念だが、これが現状である。