

古い散開星団を求めて

長谷川 隆

〈県立ぐんま天文台 〒377-0702 群馬県吾妻郡高山村中山 6860-86〉

e-mail: hasegawa@astron.pref.gunma.jp

河北 秀世

〈京都産業大学 603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: kawakthd@cc.nao.ac.jp

ぐんま天文台で進めている古い散開星団の探査について紹介します。これはぐんま天文台の小口径 65 cm 望遠鏡を利用して行われ、2000 年度に行われた一般向けの観測研究講座の延長として結実したものです。現在 33 の星団について年齢を測定し、一つを除いてヒヤデスより若い星団はなく、30 が 10 億年より古い星団と考えられます。これは散開星団で典型的な年齢の 1,000 万年よりはるかに古いもので、天の川の歴史の中で暗黒の中間期について探る重要な天体となります。

ほとんど平野ともいえる標高 885 m にあるぐんま天文台の 65 cm 望遠鏡。今の大型望遠鏡の御時世ではこの口径ではとうてい太刀打できないので観望会で大事に使っています、それだけで終わってしまっても仕方ないのかもしれませんが。しかし逆にこうにもなります。65 cm 望遠鏡があれば何か観測できるでしょう。道具があるのに本当に天文学をしなくてもいいのですか。この小文は、そんな草場の陰であまり陽の当たらない古い散開星団を探す日々の一コマです。

最初の一步

この観測を始めたきっかけは、ぐんま天文台で行った観測研究講座でした（現在でも天文学校と改名しているいろいろなパターンとテーマで続けられています）。当時から東京大学木曾観測所で行われていた銀河学校が参考になりました。現在では自然科学研究機構の三鷹、野辺山のキャンパスや、美星天文台をはじめとした公共天文台でも同様のものが行われるようになりましたが、ぐんま

天文台の特色として何を打ち出すか、ということで議論して、対象を高校生や大学生などに限定するのではなく、社会人も含めて一般を対象にし、何でもよいからまだわかっていないことをやって、研究と同じ状況の現場を見てもらうことにしました。

準備を始めたのが 2000 年のことです。測光観測で何か天文学が入ったテーマという施設の要望がありました。使う望遠鏡は 65 cm 望遠鏡で、空冷の可視 CCD カメラ。512 ピクセル四方では視野は 5 分角にしかありませんし、当時ぐんま天文台の空の明るさもよくわかっていませんでしたが、北の空で勝負するしかないように思われました。大気揺らぎの大きさもよくわかっていませんでしたが 2-3 秒角くらいと思われました。今になってみれば seeing も 1 秒台ができることは頻繁にありますし、限界等級も 20 等近くまでできますので、球状星団でも中心でなければ測光はできたのですが、散開星団のほうが圧倒的に近くにあるものが多いこともあって当時の状況としては

ほぼ後者しか選択肢はありませんでした。

とはいっても、可視光で散開星団の観測といえ、色等級図を書いてその年齢、距離、そして大雑把な金属量を求める程度かもしれません。散開星団といえば銀河面にあり、数百程度の星の小集団、年齢は千万年程度と思われていましたから、予想された結果が出てくるのでは面白くありません。そこで出会った論文が Friel¹⁾ でした。当時最大の Lynga の散開星団のカタログ²⁾には 1,150 個強が載っており、半数以上の星団は年齢が知られていませんでしたが、散開星団というには古い、10 億年より古い星団が 40 個程度あることはわかっていました。球状星団は 100 億年以上昔の天の川初期の星団ですが、古い散開星団を探すことで球状星団と最近できた散開星団の間をつなぐことができるかもしれないと思いました。

古い散開星団を実際に DSS (Digitized Sky Survey) で見てみると実にどちらともつかない顔をしていました。例えば約 100 億年といわれる NGC 6791 はたいへん立派な星団で、某先生も見るなり「球状星団くずれだな」と言われました。この星団はこの古さでありながら、金属量（水素とヘリウム以外の元素の重量の組成比率）は太陽の 2 倍もある星団です。天の川では金属量は初期に一気に増え、それからほぼ一定であるという年齢金属量関係が信じられています。この星団の顔写真を見ながら、何か単純ではない歴史が潜んでいるような気がしました。

星団の年齢の分布はある程度は天の川の星の形成史を反映していると思われますし、金属量からは天の川の化学進化や銀河円盤中の金属量勾配が調べられます。例えば、銀河円盤中では中心から外側になるにつれ、金属量が単調に少なくなるという説と、10 kpc を境にその内側では金属量が高く外側では少ないという説が対立していました。Friel のサンプルはまだ銀河円盤の外縁部までは十分サンプルできていないこともあり、まだ重要な天体が残っているという感じがしたのでした。

また、星団の速度からは星団の起源などが、また、星の数の多い星団ならば青いさまよい星などのめずらしい進化段階にある星の研究が可能になります。また、本当に散開星団と球状星団の間の星団がたくさん見つかるようであれば、散開星団と球状星団を分けた要因は何か、その境界は本当にあるのかということになります。マゼラン星雲には星団の質量（星の数）や中心集中度で見ると散開星団と球状星団と中間の性質の星団が今も生まれていることがわかっていましたから、天の川でも本当はあるのかどうか、なければ、なぜマゼラン星雲では存在する星団が天の川では見られないのか。大マゼラン星雲は天の川とよく似た星団形成史ですが、小マゼランは継続的に星団が生まれていたらしいですから、銀河ごとに形成史が異なるのはなぜか。また Palomar 5 という星団は年齢からすると球状星団というべきでしょうが、かなりばらけていて、Messier 13 のような立派な球状星団とは比べるべくもありません。こういった星団はもともと天の川で生まれてその中を運動しているうちにばらけてきたのか、よそで生まれて天の川に落ち込んで来たものなのか、そういう星団はどのくらい見つかるのか、幾分かの展開はできそうな気がしました。

700 近くもあるターゲット

当時は 700 近くの星団がまだ年齢がわかっていませんでした。全部を観測するのは無謀でしたし（今では韓国でやっているようですが）、測光夜がどの程度あるかもわかりませんでしたから、星団の選び方が重要です。星団のカタログには形態パラメーターがあり、メンバーの数、密集度、星の明るさの幅が半定量的に記述されていました。古い星団は数が多く、密集度が高く、同じような明るさの星が多いことが見てとれたので、その条件で 60 個程度に絞りました。もっとも、Lynga の星団のカタログ (1987) は、実にいろいろなカタログが混ざっており（ついでに言えば中心座標の精

度も実にさまざまです), それぞれのカタログの選択基準も明確ではないので, その中には古い星団を目指してリストしたものもあるかもしれません. 例えば一番古い散開星団の Collinder 261 は上の形態パラメーターの条件から漏れてしまうことから, こういった古い星団が含まれているカタログの星団は一通り目を通すことにしました. こうやって 100 個強の星団が残りました.

もう講座の一月くらい前になってやっと晴れる季節になり, 観測してみると, そこそこ明るい星でもピークは何と二, 三百カウントしかありませんでした. どこかに分光器でもついていたかなと思いつつも, これではどの程度の色等級図が書けるか, 試すことにしました.

見えるか, 赤い星の塊

そうこうしているうちに観測研究講座が始まりました (図 1). そもそも測光というのが光子の数を数えることであることを知らしてもらうために最初は光電管を使って光子数を数えることから始めました. 当時は天文台が開いたばかりで観測条件もよくわかっていませんでしたから, これで空の明るさを測ってみることにしました. この日は 10 時までの観望会中は濃霧でしたが, 講座の観測時間が始まると見事に晴れ切り, 月もなくほぼ理想的な条件になりました. その結果が図 2 です. ついでに, このシーズンの測光係数も図 3 に示します. 最近は気象事情が不安定になってきた感じを強くもちますが, このシーズンはまだかなり安定した測光条件だったことがわかります. 日本では測光観測は難しいと思われているせいか, 色変換係数が発表されている天文台はそう多くはないので, 天文台スタッフとしての義務を幾分果たして肩の荷が多少軽くなった感じがしました.

さて, こちらの準備としては, あとは等時曲線を準備してそれを当てはめて年齢や金属量を測定できればいいはずですが, もっとも当てはめるのがどのくらいあやふやなものか, かなり不安を感じ



図 1 観測研究講座の光景.

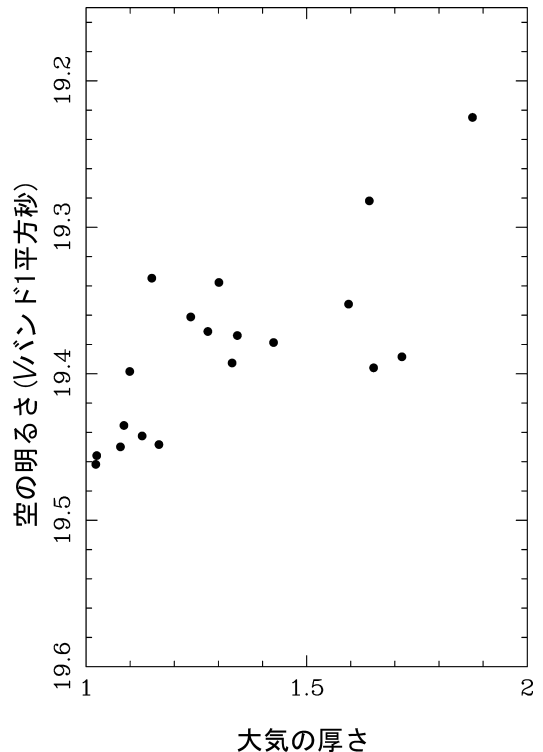


図 2 ぐんま天文台の空の明るさ. 横軸に大気の厚さ (天頂からの距離が大きくなると厚くなり, ちょうど天頂で厚さ 1, 天頂から 60° で 2 になる), 縦軸に空の明るさを示す. 方向によって異なるが, 天頂で一番暗く $V = 19.45$ 程度である.

ていました. 教科書は全く役に立ちませんでした, 論文を読んでいるうちに, red clump と呼ば

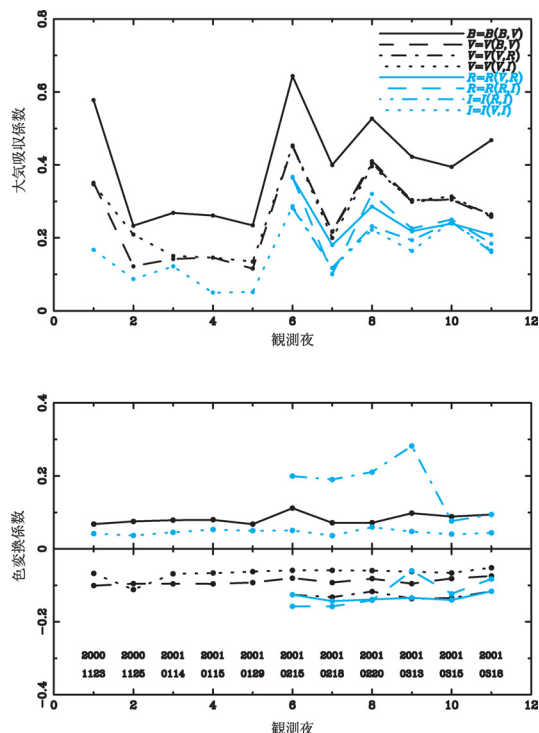


図3 2000-2001シーズンの測光条件. 横軸が観測日のシリアルナンバー, 縦軸が色変換係数. さまざまなカラーの組み合わせが書いてあるが, どの組み合わせでも係数が日ごとにほとんど変化しなかったことがわかる.

れる色等級図上の赤い星の塊が強力な目印になることが読み取れました. これは星の中心でヘリウムが燃える進化段階です. 球状星団では水平分枝にあたるものですが, 散開星団では金属量が高いため赤い位置にきます. その明るさは年齢にあまりありません. ですから, これが見えれば星団の絶対等級に焼き直すことができたも同然ですから, ちょうど主系列から離れる星(転向点と呼びます)の明るさから年齢がわかります. ただ, この研究で見つかった大多数の星団の20-30億年の星団では, 転向点にいる星の明るさが対流射出層の影響をどのくらいモデルに入れるかによってかなり変わること, 金属量によっても変化するので, 赤い塊と転向点のみならず全部の星まで含めて当てはめました. とくに主系列の明るい部分

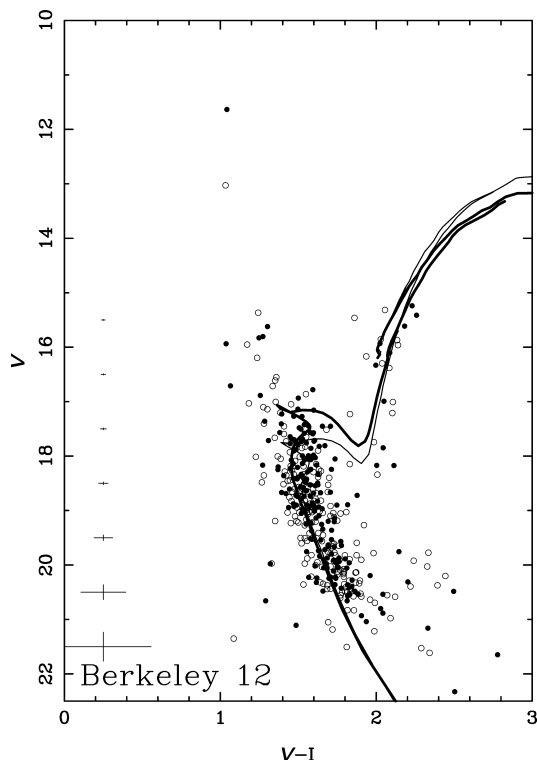


図4 Berkeley 12の色等級図で, ベストフィットの年齢と金属量のモデル進化曲線が重ねてある.

(転向点のすぐ暗い部分)は金属量で形態がかなり変わるので役に立ちました³⁾.

もっともこの赤い塊は20-30億年の星団に多く, もっと年をとった星団になるとまた少なくなることを知ったのはあとになってからの話でした. 観測研究講座をやっていた頃はとにかく赤い塊だけが頼りでした. そのようなわけで, もし赤い塊があれば, 色等級図が出てきた瞬間に年齢の見当がついてしまいます. 一体自分の目利きがどの程度であったのかがわかってしまう瞬間です. 天体観測講座では四つしか観測しませんでした, 最初の二つはあまりはっきりしませんでした. 測光のソフトには SExtractor や DAOPHOT などがありますが, 前者はもともと混み合っていない領域の遠い銀河用に開発されたものなので, 後者に変えてみました. これで主系列は幾分はっ

きりしてきて精度は向上したのはわかりましたが (パラメーターだらけの画像解析ソフト IRAF に Linux でしたから参加者の人もたいへんだったでしょう), それでも顕著な赤い塊はなかなか現れませんでした。

しかし、最後の一つで、はっきりとした塊が現れたのでした (図 4 $V-I=2.1$, $V=16$ の近く). 講座の参加者と夕飯を買い出しにいった、その店で静かに感慨にふけりました. どこかの大学のホームページに、研究とは一年 364 日はトンネルであるが、年に一日くらいトンネルの向こうに光がさしているように見えることがあるものだ、と書いてありましたが、そんな一日だったように思います. 一泊二日 4 回のきつい日程でしたが、参加者にもよく我慢してもらえました. 何も新しいものがないことを流暢に解説するより、自分もわからないことを暗中模索でやる、その道を参加者にも一度一緒に通ってもらったことは、たぶん、よかったのだろうと今でも思っています。

いつのまにか自分のテーマとなり

こうして観測研究講座は観測を追加して 14 個の星団の測光でまとめて論文にしました⁴⁾. 年齢分布は図 5 のようになりました. たくさんの色等級図を見ているうちに、(背景の星がある中でも) 赤い塊の見え方というようなものがわかるようになりました. そうして見直してみると、結局 14 個のうち一つを除いて 10 億年より古い星団ばかりでした. さらに考えてみると、サンプルはほとんど銀河中心の反対方向で銀河円盤の外縁部に近い領域にあることが見えてきました. 円盤内部では分子雲との衝突で星団が 2 億年程度で散逸してしまうので、外にいくほど古い星団が生き延びやすいのはもっともです. また、測光による金属量はそれほど精度はできませんが、いくつか、金属量が高そうな星団が出てきました. 一般に銀河には太陽程度の金属量勾配があって外縁部にいくほど金属量は下がるとは思われていますが、例外的な星団

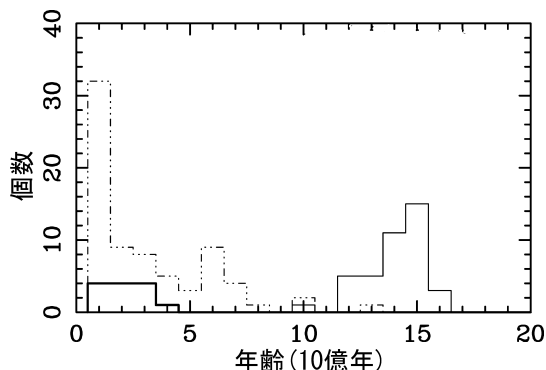


図 5 Hasegawa et al. (2004) でサンプルした 14 の星団の年齢分布. 太線がこの論文で年齢を測定した星団, 点線は Friel (1995) らのサンプル, 細線が球状星団のもの.

なのかもしれません.

現在も次の 19 個の星団の測光結果を投稿しています (図 (=表紙) はサンプルの一部の星団のチャートです. 視野約 5 分角). 今度は銀河中心の方向に近い星団も多く、平均年齢で見ると幾分若めです. それでもすべてヒヤデスと同じかそれより古く、現在ぐんま天文台で年齢が 10 億年より古いと測定された星団は 30 個になり、とくに中心からの距離 12 kpc 以遠の銀河円盤外縁部で観測された星団では過半数となりました. これらは星団の起源や運動を調べるうえで貴重なサンプルになっているはずで、また、星の数が多い星団が含まれており、その中にはヘリウム燃焼の進化段階にある赤い塊の星約 10 個が、塊というよりは一直線に並んでいるものが見つかりました. Cararro (2002) も同じような「赤い並び」を NGC 2158 (空の上では、有名な M35 の近くにある星団です) に見つけ⁵⁾, それが星間吸収が場所によって異なる (differential reddening) せいであると結論づけました. しかし、ぐんま天文台で観測した星団では、differential reddening の量は赤外の 2MASS で見積もった量とあまり一致してなくて、別な原因を探る必要があると思っています. 当然来るべき分光観測へのいい道筋がつかえました.

種は芽生え

こうして、地味ながら、星の色等級図を道具に銀河の進化を探る研究が、今、いくつか次のテーマを生んでいます。金属量が高いと思われる星団の起源は何か。一番若い球状星団はどれか。散開星団のみならず、近傍銀河の個々の星の測光でも仕事できました。Vansevičius et al.⁶⁾では、すばる望遠鏡の主焦点広視野カメラ Suprime-Cam のデータを解析して矮小銀河 Leo A の赤色巨星の分布から広がったハローを見いだしましたし、各系列の星の銀河の中での分布から星形成がいつどこで起こったか調べているところです。十分な研究態勢に恵まれる施設は少ないと思いますが、そういう施設のみなさまにも草場の蔭から応援して小文を終わります。

最後になりますが、ぐんま天文台でその建設に携わり、また、この仕事の名助言役であるハキム・ルトゥフィー・マラサン氏に感謝します。観測研究講座で最後まで我慢強く参加していただいた中井辰治、百海正明さんの両名に感謝します。また開催するに当たって、職員の大林 均、倉林勉の支援をいただきました。土農工商大学院生でまだまだ犬のフェーズを越えられない長谷川を国立天文台の有本信雄教授には拾っていただきました。

参考文献

- 1) Friel E. D., 1995, ARAA 33, 381
- 2) Lynga G., 1987, Catalog of Open Cluster Data, 5th ed. (Strasbourg: publisher)
- 3) Bertelli G., Bressan A., Chiosi C., Fagotto F., Nasi, E., 1994, A&AS 106, 275
- 4) Hasegawa T., et al., 2004, PASJ 56, 295
- 5) Carraro G., Girardi L., Marigo P., 2002, MNRAS 332, 705
- 6) Vansevičius V., et al., 2004 ApJ 611, L93

Searching for Old Open Clusters

Takashi HASEGAWA

*Gunma Astronomical Observatory, 6860-86
Nakayama, Takayama, Agatsuma, Gunma 377-
0702, Japan*

Hideyo KAWAKITA

*Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto
Sangyo University, Motoyama, Kamigamo,
Kita-ku, Kyoto 603-8555, Japan*

Abstract: In this article authors describe a search activity of old open clusters at Gunma Astronomical Observatory, using a very small telescope of 65 cm diameter. This is an extended effort of the public course of the astronomy given at this observatory in 2000-2001. At this writing, 33 clusters are dated to be older than 1 Gyr, except only three. Our sample constitutes the majority in the sample of open clusters older than 1 Gyr in the outer disk. Several clusters are, tentatively, richer in metal than the canonical metallicity gradient found in the Galactic disk. A cluster is found to have red clump stars aligned at the nominal red clump position, providing an exciting sample to identify their physical origin in the future.