

オリオン領域における星の誕生のトリガー

磯 部 琇 三*

1. ガス雲の収縮の条件

私達の銀河系には太陽質量の1千億倍(以後 $10^{11} M_{\odot}$ という風に記す)もの質量が含まれている。その内約1/3が数千億個の星として輝いており、他の1/3が星間ガスとして存在している。残りの1/3がどのような状態で存在しているが現在の所よく判ってはいない。

太陽は生まれてから50億年経っていて、その寿命は約100億年と言われている。もっと質量の大きい星、例えば $10 M_{\odot}$ の星は太陽光度の1万倍(以後 $10^4 L_{\odot}$ という風に記す)にも輝いており、 10^4 倍もエネルギーを激しく消費している。そのため質量が $10 M_{\odot}$ もあっても寿命は短く、約1千万年しかない。

宇宙が始まってから約180億年経っている。私達の銀河系ができあがったのも100億年より古いことである。銀河系の初期にいろいろな質量の星ぼしが誕生したであろう。それらのうち寿命の短い質量の大きい星ぼしは、すでにその一生を終えたであろう。質量の小さい寿命が百数十億年以上ある星ぼしが、現在でも観測されている。それらは、球状星団の星ぼしであり、高速度星とよばれる星ぼしである。

銀河系が誕生してから百数十億年経った現在でも、寿命が100億年しかない私達の太陽も輝いており、もっと寿命の短いおとめ座のスピカやオリオン座のリゲルのような星ぼしが輝いている。この事を裏がえして言えば、星ぼしは銀河系の百数十億年の流れの中で次つぎと作り出されてきたのである。

星ぼしはどのようにして作られてきたのであろうか。銀河系の中には多量のガスが残っており、そのガスの平均密度は 1 cm^3 あたり原子1個 (1 cc と記す)程度である。ガスは銀河系内に一様に分布しているのではなく、少し密度の高い (10 cc 位) 星間雲とよばれるガスの固まりになっている。星ぼしはこのような星間雲の収縮によってできてきた事はだれにでも想像できるであろう。

星間雲があれば必ず星が作られるという訳ではない。もしそうであるとすると、銀河系にあったすべてのガスは星を形成するのに使われて、現在ほとんどガスが残っていないことになる。楕円銀河には星間ガスがほとんど残っていないのは、おそらく星間雲からの星の形成が非

常に有効に起ったのであろう。

とにかく私達の銀河系では、星間ガスと星がほぼ同じ位の質量の割合になっている。星間雲から星を形成する過程がコントロールされているために、両者の量がほぼ等しくなっているのである。そのような星間雲から星を形成する過程をコントロールしている条件は何であろうか。

星間雲は一定の質量を持っており、その重力によって縮まろうとする。一方、星間雲は自身の温度を持っており、その温度に対応するガス圧によって縮むのをさまたげようとする。このようなガス圧に抗して星間雲が収縮を続けるには、星間雲の質量・密度が大きくなければならない。この条件を式の形で示すと次のようになる。

$$M_{\text{crit}} \geq (3\pi^5/32)^{1/2} c_s^3 G^{-3/2} \rho_0^{-1/2}$$

ここで、 $c_s = (kT_e/\mu m_H)^{1/2}$ は星間雲の音速で、 ρ_0 は星間雲の初期密度である。

典型的な星間雲の場合、 T_e (星間雲の温度) $\sim 170 \text{ K}$ 、 $\rho_0 \sim 10 \text{ cc}$ とすると、 $M_{\text{crit}} \sim 5 \times 10^4 M_{\odot}$ になり、通常の星間雲の質量より大分大きい値になっている。一方、銀河系の中にあるもっとも質量の大きい星 ($30 M_{\odot}$) の場合には、 $T_e \sim 20 \text{ K}$ 、 $\rho_0 \sim 5000 \text{ cc}$ が必要である。

2. 星の誕生のトリガー

星間ガスの平均密度は 1 cc である。それらのガスが銀河系を回転する中で各種のゆらぎが生じて、場所によっては 10 cc 程度の密度となった星間雲となる。しかし、そのようにしてできた星間雲の自己重力は十分大きくないので、再び拡散してしまうであろう。星の誕生へと進むには、星間雲の密度が前節で示されたような値を越える程度に大きくななければならない。そのような密度の高い質量の大きい星間雲を、単なる星間ガスのゆらぎから作ることはできない。星間雲の密度をもう十数倍大きくする作用が必要である。

このような作用が何であるかは後に述べることにして、一度星間雲が前節のガス雲の収縮の条件を満たすと、その星間雲は収縮を始める。収縮すると星間雲の密度が増大し、収縮に必要な雲の質量は小さくなる。すると、一つの大きな星間雲の各部分が独立して収縮できるようになる。つまり、より小さな質量の星間雲でも収縮できるようになる。このようにして、次つぎと収縮していくと、星間雲より小さい質量の部分の収縮が可能になり、 $0.1 M_{\odot}$ から $30 M_{\odot}$ の質量を持つガス雲も収縮で

* 東京天文台 Syuzo Isobe: On the triggers for star formation in the Orion region.

きようになる。そして、現在見られるような星ぼしが誕生してきたのである。ガス雲が収縮するとそのガス雲の温度が上昇して、ガス雲の収縮をさまたげる作用に役立つが、初期の段階では、電磁波のエネルギーとして星間雲から持ち去られるので収縮を実際上さまたげることにはならない。ある程度以上密度が高くなると星間雲の温度を下げるのに役立っていた電磁波が逃げ出せなくなるようになる。このような事はガス雲の質量が $0.01 M_{\odot}$ より大きい時に起こる。

前節で示されたガス雲の収縮の条件を満足させる方法にどのようなものがあるであろうか。星間雲の通常のゆらぎの現象ではそのような条件を満足することはできない。星間雲の密度を 10 倍あまり急激に増大させる作用が必要である。このような作用があるとガス雲が収縮を始め、星が形成されるので、星の誕生のトリガー（引き金）とよんでいる。

星の誕生のトリガーとして現在考えられている方法として三つのものがある。それらは、1). 超新星の爆発によって飛び散ったガスがまわりの星間雲を押しつける場合、2). 高質量の星が輝き始めると高温の O・B 型星となり、まわりのガスを電離する。電離したガスは 1 万度もの高温となりガス圧が大きく星間雲のまだ電離していない部分を押しつける。3). 銀河系の中を約 2 億年で一回転している渦状をした密度の高い部分がある。これを密度波とよんでいて、この密度波の波頭がさしかかると、星間雲の密度は 10 倍以上増大して、ガス雲の収縮の条件が満たされるようになる。

3. 漸進的な星の誕生

前節のような星の誕生のトリガーが存在している証拠はそれぞれの場合に対して存在している。ここでは、2). の場合について記してみる。

大きなガス雲の一端において高質量星が誕生すると、その星の紫外線によってまわりのガスは電離する。そのような電離した領域は三裂星雲やオメガ星雲のようなきれいな散光星雲として輝いているのが見られている。電離したガスは 1 万度の高温になり、後方の低温のガスを押しつける。すると、その部分の密度が増大して、次の星ぼしの誕生へと進む、その新しく誕生した星ぼしの中に高質量の星が含まれていると、今度はその新しい高質量の星が放射する紫外線でまわりのガスが電離されてより後方の低温のガスを押しつける。このような作用が次々に続いてゆくと、いく世代もの年齢の異なる星ぼしが次々と並んでいることになる。

星が年齢順に並んでいるという事実は、すでに 1960 年代にオランダの天文学者ブラウによって指摘されていた。さそり・ケンタウルス・アソシエーションを見る

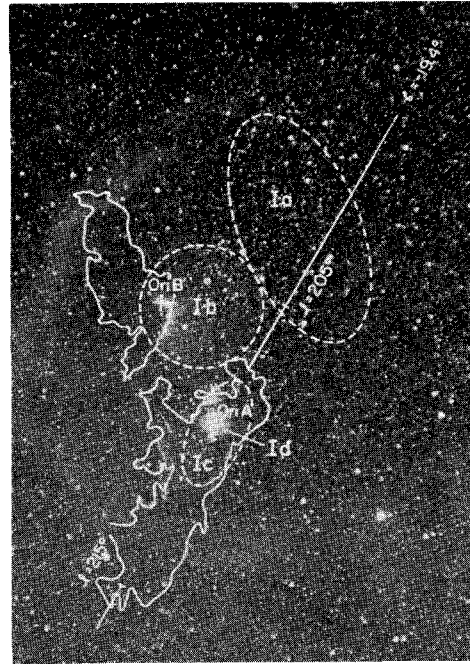


図 1 オリオン座にはバーナード・ループが輝いている。ループに囲まれた部分にアソシエーション Ia, Ib, Ic, Id が年齢順に並んでいる。

と、ケンタウルス側からさそり側に向かって次つぎと若わかしい星が並んでいる。オリオン・アソシエーションにおいても、Ia, Ib, Ic, Id の四つの小グループが見られ、それらの小グループの中にあるもっとも若わかしい星ぼしの年齢はそれぞれ 1200 万年、800 万年、600 万年、200 万年となっている。つまり、北西部分からオリオン星雲の輝く部分まで小グループが年代順に並んでいるのである。

1970 年頃までは、このような星ぼしの年齢順の並びがどのようにしてできてきたかは明らかでなかった。しかし、それ以後の電波観測、特に mm 波の輝線観測によってより明らかなものになってきた。1973 年に磯部は小グループ Ia, Ib, Ic, Id、と続く延長上に星がほとんどない事を明らかにした。そして、1977 年になってクットナー達が、ちょうどその部分に大きな分子雲が広がっている事を 2.6 mm の CO 分子の観測によって示している。

今から約 2000 万年以前にオリオン領域では、大きく広がる星間雲があったのであろう。そして、北西部分の現在のオリオン・アソシエーション Ia の部分にこの大きな星間雲の中の最初の星が誕生し、それ以後千数百万年の間次つぎと星ぼしが作られ続けてきて、やっと現在では最初の大きな星間雲の半分位の所、オリオン星雲の所まで進んできたのである。アソシエーション Id とよ

ばれてるオリオン星雲内の星ぼしの年齢は200万年と言われているが、この星雲を輝かせているトラペジウムとよばれる四つの高温星の年齢は、数万年程度という若さである。

オリオン星雲はこの星の紫外線によって電離されたガスが輝いている。そのガス圧によって後方にある低温のガス・分子雲が押しつけられて、次の世代の星が作られている。それが1967年に発見されたBN星（ベックリンとノイゲバウアーが発見）とKL天体（クライマンとローが発見）である。BN星は約800年ほど前にやっと星として輝き始めたものであり、KL天体の中ではいくつものガスの固まりが、まさに星として輝き始めようとしているのである。

4. オリオン星雲内の星

オリオン・アソシエーションにおいて漸進的に星が誕生した事は確かであろう。しかし、その領域にあるすべての星が同じような方法で誕生したのであるか。前節で、200万年の年齢を持つと言われているアソシエーション Id の中に、数万年しか年齢の経っていないトラペジウム星があると記した。この事は何か矛盾しているような感じである。

この疑問に答えるためには、オリオン・アソシエーション内のそれぞれの部分にある星ぼしの年齢がどの程度広がっているかを調べれば良い。磯部・佐々木はオリオン星雲内の16等級までの写真測光を行ない、図2に示すような結果を得ている。この図を見て注目すべきことは、年齢数万年の星から年齢数千万年までの星ぼしが連続的に存在していることである。図の右側に存在する星

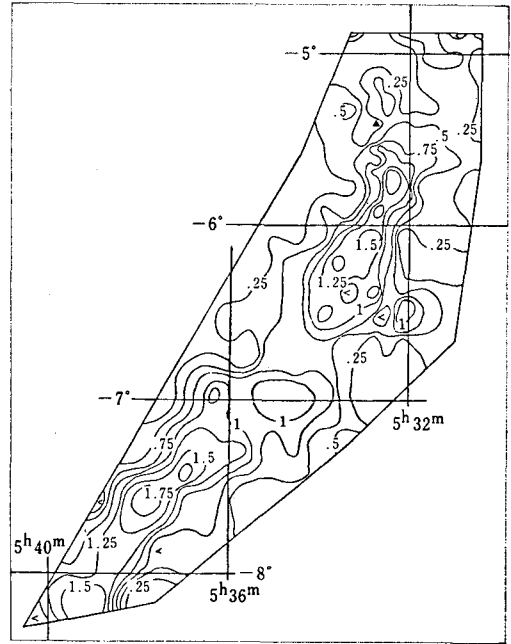


図3 オリオン星雲から南東方向に連なる分子雲のH₂CO観測。各部分に密度の高い固まりがいくつも見られる。▲印がオリオン星雲の位置。

ぼしの質量は小さいので、質量の小さい星ぼしはこれらの領域において連続的に誕生してきたと言える。

オリオン領域における漸進的な星の誕生は質量の大きい星に対して成り立っているけれども、質量の小さい星は漸進的に形成されたのではないようである。このような事情を確かめる観測がいくつか行なわれている。ジョ

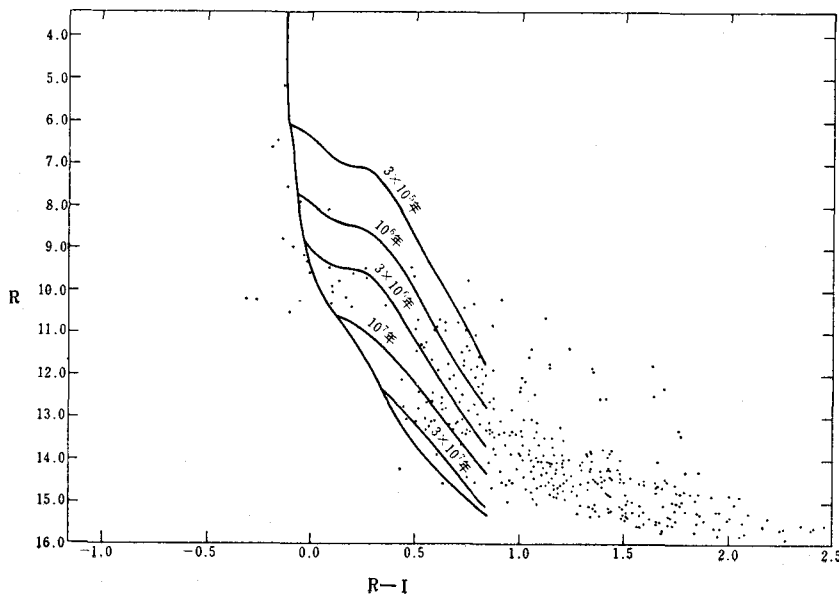


図2 オリオン星雲内の星ぼしのR(赤)とR-I(赤外)図。星ぼしは広い年齢層に広がっている。

ドレル・バンクのヒュー達はオリオン星雲から南東に広がる分子雲の H_2CO 分子の観測を行なった。この部分では磯部が示したように可視光で見える星の数はいちじるしく少ない。しかし、 H_2CO の密度分布は様ではなく、図 3 のようにオリオン星雲のすぐ近くばかりでなく各所に密度が 10^6 コ/cc より高い所が見られる。また、そのような部分を赤外線で見ると、星が誕生しかけていることを明らかに示す赤外線源がいくつも見つげられている。このような部分は、オリオン星雲のガス圧による影響はまったくないと考えられるので、そのような赤外線源は、漸進的な星の誕生とは異なる作用によって、数千万年前から連続的に新しい星ぼしが形成されてきたと考えられる。

5. バーナード・ループの星

オリオン領域には、 $17^\circ \times 13^\circ$ にも広がるバーナード・ループとよばれるループ状の星雲が見られる。このループは写真のように北東から東・南東を通して南までの半弧を描いている。反対側にはループが見られなく、 20° から 30° も離れたエリダヌス座に $H\alpha$ 光で輝くフィラメントがたくさん観測されている。

バーナード・ループは毎秒 10 km あまりの速度で膨張を続けている。このような膨張はループの中心で起ったなにかの爆発によっている事は確かである。現在ループのある方向は銀河面に近くまだ分子雲も残っている方向なので、爆発で飛んできた粒子は衝突して速度が落ち、そのエネルギーを使って明るく輝いている。反対側では、分子雲はすでに収縮して星が形成された後で、また銀河面から離れる方向であるので、星間ガスの密度が低くて膨張する粒子の速度はあまり減少しない。そして、遠くの高銀緯の所まで飛んで、かすかな $H\alpha$ フィラメントを作っている。

エリダヌス座に広がるフィラメントの内側にある B 型星 HD 28497 という星の紫外スペクトル中に OVI の星間吸収線が見られた。この事はこの方向に百万度にもおよぶ高温の領域がある事を示している。一方、その B 型星の近傍に MPO 450 というパルサーが発見されている。オリオン領域の周辺にはおうし座 AE 星を始め 3 つの逃避星がある。これらの逃避星はバーナード・ループの中心部分から約 200 万年ほど前に放出され現在毎秒 100 km あまりの速度で遠ざかっているように見えている。

バーナード・ループの中心にあった高質量の近接連星の質量の大きい方の星が進化し、その一生の最終段階として超新星の大爆発を起こしたと考えられる。爆発しなかった星は逃避星として飛び散り、爆発した星はパルサーとなっているのであろう。バーナード・ループの膨張運動のエネルギーは、超新星の爆発の数十分に対応し

ている。約 200 万年ほど前から次つぎと続いている超新星の爆発によってループが作られ、ループ内の温度が 100 万度もの高温に保たれているのである。

1973 年に磯部がオリオン領域にある星ぼしの分布を求めた。そして、 $H\alpha$ 光の強いループの所でも、星の数が多くなっていることを明らかにした。まわりの領域より星の数の密度が高くなっているこれらの所では、ループを作った爆発によって形成されたのではないかと言われていた。これは 2 節のガス雲の収縮の条件の 1) の効果によっていると考えて良いであろう。

磯部・西野は、このループ内にある星ぼしの色の特性を求めた。ループを外側から内側にかけて短冊状に切った部分にある (B-V) の値の大きい星の数と小さい星の数が図 4 に示されている。ループの外縁部から中心部、内縁部に移るにつれて、その単位領域あたりの星の数は変化している。(B-V) の値の大きい比較的赤い星・たぶん比較的質量の小さい星の数は、全体的に一樣になっている。ところが、(B-V) の値が小さい星ぼしはループの所に集中している。つまり、比較的年齢の古い星ぼしは一樣に分布しているが、比較的若い星ぼしはループを作ったのと同じ原因によって形成された事を明確に示している。

6. オリオン領域における星の形成

オリオン領域では、約 2000 万年前から星ぼしの形成が始まった。それらの初期の星ぼしの形成のスタートは、オリオン領域の部分部分で起ったのではなく、全体でほぼ同時にスタートしたと考えられる。しかし、このような星ぼしは大部分質量の小さいものである。

オリオン領域における約 2000 万年前に始まった星の誕生はどのようなトリガーによっているのであろうか。

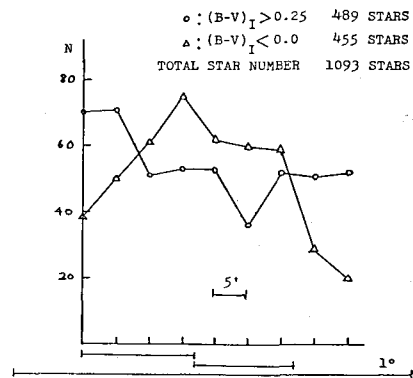


図 4 ループの外縁部(左側)から内縁部(右側)にかけての短冊状の部分にある (B-V)>0.25 (O 印) と (B-V)<0.0 (Δ 印) の星の分布。(B-V) の値は絶対的なものでなく相対的なものである。

2節に示した3). 密度波がそのトリガーとなったと考えるのが良いであろう。

銀河系は渦状構造をしている。寿命の短いO型星や散光星雲の分布を求めると、渦の内側部分にこれらの天体がきれいに並んでいることが判る。太陽周辺にはオリオン腕とよばれる構造がありその内側にはさそり・ケンタウルス・アソシエーションが見られ、少し外側に行った所(太陽の反対側)にオリオン・アソシエーションがある。

オリオン領域ではオリオン腕を作り出している密度波の波頭が、約2000万年前に通過した時に、星間雲の密度が10倍あまり高くされて、ガス雲の収縮の条件が満足されたのであろう。ガス雲が収縮する中でいろいろな質量の星が形成されていった。その時形成された質量の小さい星は、ガス雲の密度が濃いために可視光では見えなかったであろう。現在も、オリオン星雲から南東に伸びる分子雲中にある星は、可視光では観測できず、赤外線源としてようやくその姿を明らかにしてきたのである。

密度波の通過によって最初に星が形成され始めたのは約2000万年前のことである。超新星が次つぎに爆発してバーナード・ループや逃避星・パルサーを作ったのは約200万年前の事である。オリオン・アソシエーションIaの年齢は1200万年、Ibは800万年、Icは600万年、Idは200万年である。Iaの星が形成された時、超新星の爆発を起こすほど質量の大きい星がなぜなかったのか、現在の所明らかではない。

キット・ピーク国立天文台のストローム達はNGC 2264星雲内の星の観測をして、この星雲内においては、質量の小さい星の形成割合は初期の頃に大きくて、徐々に減少するが、質量の大きい星は後半になって生まれ始めることを示している。この事実はオリオン・アソシエーションIa, Ib, Icで超新星の爆発を起こすような高質量星が生まれてこないのと同じ現象と言えるであろう。

Ia, Ib, Ic, Idと漸進的な星の形成は続いて、現在ではちょうどオリオン星雲の所に達している。そして、このような過程で後1000万年の間同様な星の形成が続くであろう。そして、約数百万年前から誕生し始めた超新星になれるほど質量の大きい星は、約200万年前から次つぎと爆発を起している。トラペジウム星も、あと100万年あまり経つと超新星として爆発するであろう。爆発によって飛び散ったガスは前の超新星が吹き払った後を高速で飛び散り、ループの部分で濃いガスと衝突して、ガス雲の収縮の条件を満すであろう。そして、ループ上に星が形成されるのである。

以上見てきたように、オリオン領域においては、星の

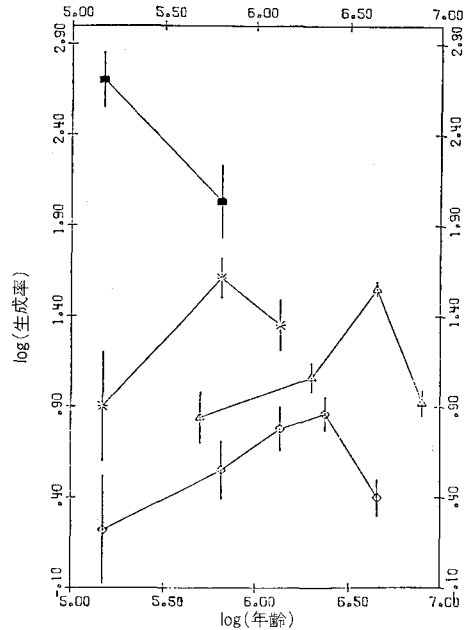


図5 NGC 2264におけるそれぞれの質量の星の生成率
 ■印は $5 M_{\odot} < M < 9 M_{\odot}$ の星, *印は $3 M_{\odot} < M < 5 M_{\odot}$,
 ○印は $1.5 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$,
 △印は $0.1 M_{\odot} < M < 0.5 M_{\odot}$.

誕生のトリガーとして考えられている三つの作用がすべて働いているようである。そして、それらの作用が各部分で複雑にからまりあっているの、問題を明確に解き明かす事は現在の所むづかしい。しかし、この領域の距離が他の星の形成領域より近い事など多くの有利な条件があるので、これからのオリオン領域の各種の観測を積み重ねる事によって、オリオン領域の問題ばかりでなく、星の誕生のメカニズムも明らかにすることができるようになるであろう。

本稿を書くにあたって東京天文台の西野洋平君・佐々木五郎君の観測、整約上の協力を得た。また、東京天文台木曾観測所の前原英夫氏のKIDSプログラムを利用させてもらった。これの方々を始め、オリオン研究を進めておられる多くの方々の助言に感謝します。

☆ ☆ ☆

☆ ☆