

大質量星の近傍にある分子雲と星形成 ～ HII 領域が星形成に与える影響を定量的に調べる～

山口 玲子

〈名古屋大学理学部天体物理学研究室 〒464-8602 名古屋市千種町不老町〉

e-mail: reiko@a.phys.nagoya-u.ac.jp

南天の HII 領域 23 個に対して分子ガスの観測をし、HII 領域が星形成に与える影響について統計的に調べました。分子雲の HII 領域に面する部分では、HII 領域から離れた部分にくらべて、効率良く星が形成されていることがわかってきました。「HII 領域の影響で分子雲が圧縮され、星（大質量星）が効率良く形成される」という理論に対し、HII 領域の影響によって「どのくらいの量」の星が、「どうい質量分布」で形成されるのかという観点にたち、観測から明らかになったことを紹介します。

1. はじめに

大質量星は、紫外線を放射することによって、周りの中性水素ガスを電離し、電離水素領域（HII 領域）を形成します。HII 領域は、大質量星形成後、時間とともに膨張するため、大質量星の周りにある分子雲は、超音速で膨張する HII 領域によって圧縮されて密度が高くなり、効率よく星や星団が形成されると考えられてきました^{1), 2)}。さらに、HII 領域の圧縮により、分子雲の HII 領域に接する側で大質量星が形成されるという理論的シナリオが提案されています¹⁾ (図 1 = 表紙参照)。近年、HII 領域の影響で星形成が起きていることを示す観測的事実が増加してきました。10² M_☉ 程度の小質量分子雲に対する観測がなされ、HII 領域によって照らされて縁が光っている分子雲 (bright-rimmed cloud, 以下 BRC, 図 1 の写真参照) と暗黒星雲 (dark globule) の比較から、BRC では星形成率が高く、効率的に星が形成されていることが明らかになってきました³⁾。また、名古屋大学で私達のグループがおこなってきた分子雲の広範囲な観測によって、比較的小質量の分子雲 (10² - 10³ M_☉) で、同様の結果が得られています^{4), 5), 6)}。しかし、理論

的に考えられているような、HII 領域に「隣接する部分」と「離れた部分」で星形成に違いが見られるかは明らかではありません。これまでの研究は、HII 領域に付随する分子雲と付随しない分子雲で星形成の活発さを比較してきました。しかし、HII 領域に付随する分子雲と付随しない分子雲では、両者が全く異なる環境に存在するため、HII 領域の影響以外の要因で星形成に違いがみられるのかもしれませんが。例えば、HII 領域があるところは、大質量星が生まれている領域ですから、もともと活発に星を形成している領域で、孤立した分子雲よりも活発な星形成活動がみられると考えることもできます。そこで、HII 領域の影響をより詳しく調べるために、HII 領域に付随する分子雲を「HII 領域に隣接する部分」と「HII 領域から離れた部分」に分けて比較することにしました。また、どの HII 領域でも同じような傾向がみられるかどうかを調べるために、多くの HII 領域を観測して、たくさんの分子雲のサンプルを集めました。本研究では、南天の 23 個の HII 領域を広い範囲にわたってサーベイし、95 個の分子雲を同定しました。この結果に基づき、HII 領域と星形成の関係について調べたので、その結果を紹介します。

2. HII 領域の分子雲探査

観測は、1998年1月に、名古屋大学4 m電波望遠鏡「なんてん」を用いて行ないました。なんてん望遠鏡は、1996年に名古屋大学とワシントンのカーネギー財団の協力により、チリ・ラスカンパナス天文台に移設されました。口径4 mで、110 GHzにおけるビームサイズは2.7分です。観測対象は、南天のBRCが付随するHII領域です。BRCを選んだ理由は主に2つあります。1つは、BRCが付随するHII領域は、光で見えるので、光学写真と比較することによって、分子雲のどの部分がHII領域に接しているかが判別できます(図1の写真参照)。もし、HII領域が見えなければ、分子雲のどの部分がHII領域と相互作用しているかわからず、HII領域の影響を調べることができません。もう1つの理由は、BRCは中性ガスがHII領域によって電離されて光っている部分ですから、BRCがあるということは、十分な量の中性ガス、つまり、分子雲が確実に存在することを示しています。これらのことから、BRCが付随するHII領域を観測すると、最も効率よくHII領域と相互作用する分子雲を検出できると予想できます。観測領域を決めるにあたって、私達はラスカンパナス天文台から観測できるBRC 43個をカタログ⁷⁾から選びました。これらの43個のBRCは、23個のHII領域に付随しています。観測領域は、これらのHII領域とその周りの減光が見える部分を含むように決めました。非常に大きく広がったHII領域については、BRCが存在する部分のみ観測をしました。1つのHII領域に対する観測領域は、1-6平方度程度です。

観測には¹³CO分子の回転遷移(J=1-0)によって放出される110 GHzの輝線を用いました。¹³CO分子で観測できる分子雲は、典型的に密度が 1cm^{-3} あたり 10^3 個程度の分子雲です。観測は、ビームサイズ2.7分に対して、4分グリッドで行いました。総観測点数は、7760点で、これは約38平方度あたります。1点当たり4-12秒積分して、典型

的なrms雑音温度は、 $\Delta T_{\text{rms}} \sim 0.35\text{ K}$ (速度分解能0.1 km/s)でした。このノイズレベルで検出できるのは、水素分子柱密度が典型的に $1 \times 10^{21}\text{ cm}^{-2}$ 以上の領域です。

3. HII 領域近傍の分子雲

観測で得られたCOの分布から、HII領域に付随する95個の分子雲を同定しました。同定した分子雲の距離は、ガム星雲に付随する0.45 kpcから、S306に付随する4 kpcです。大部分の分子雲は、1 kpcから2.5 kpcの間にあります。分子雲の半径は、0.3-13 pcで、典型的には1-3 pcです。線幅は、0.9-6 km/sで、典型的には、2.5-3.0 km/sです。分子雲の質量は、6-40000 M_{\odot} で、典型的には、数1000 M_{\odot} です。HII領域に接している分子雲は、HII領域の影響を受けていると考えられます。大質量星からの紫外線によって、CO分子が解離されたり、分子ガスが電離されたりして、COの輝線強度勾配がHII領域に向かって大きくなっている分子雲がたくさん見つかりました。さらに、同じHII領域に付随する分子雲の視線速度が互いに数km/s程度異なっているものが存在しました。特に、ブルーシフトした成分は、減光が強い部分(HII領域の手前)に存在し、レッドシフトした成分はHII領域内(HII領域の向こう側)にありました。ブルーシフトした成分は私達に近づき、レッドシフトした成分は私達から遠ざかっているため、これは、分子雲が膨張していることを示しています。また、ブルーシフトした成分とレッドシフトした成分の速度差は、典型的に5-10 km/sで、HII領域の膨張速度とほぼ一致しています。したがって、これらの分子雲は膨張するHII領域によって加速されたと考えられ、分子雲とHII領域の相互作用を示す証拠になります。観測した23個のHII領域のうち、8つのHII領域でこのようなはっきりとした相互作用がみられました。

4. 分子雲で生まれている原始星

星は、分子雲の中で生まれます。生まれて間もない星は、周りにダストや分子ガスがあるため光で見ることができません。しかし、星の周りのダストが星からの光を吸収し、再放射するため、遠赤外線で見ることが出来ます。また、原始星の周りのダストは低温なので、長波長ほど強い、波長に対して右上がりの強度分布（冷たいスペクトル）を持つものが原始星の有力な候補といえます。

赤外線天文衛星 IRAS は、4つの波長帯で全天の90%をカバーし、数多くの遠赤外線点源（IRAS点源）を検出しました。そこで、同定した分子雲での星形成活動を調べるために、以下の条件1) - 4)を満たすIRAS点源を、分子雲に付随する原始星候補天体とみなしました。

- 1) 各バンドにおける強度の比が $\log[F(12 \mu\text{m}) / F(25 \mu\text{m})] < 0$, かつ, $\log[F(25 \mu\text{m}) / F(60 \mu\text{m})] < 0.3^{\text{B}}$. → 冷たいスペクトルを持つ。
- 2) $25 \mu\text{m}$ のデータの quality が2以上. → 有意に検出されている。
- 3) 系外銀河、惑星状星雲として同定されていない。
- 4) 分子雲から4分以内に存在する. → 分子雲に付随する。

これらの条件を満たすIRAS点源は、204個ありました。これらのIRAS点源は、同定した95個の分子雲のうち、57個に付随しています。1個の分子雲に付随するIRAS点源は、1 - 23個で、平均2個です。IRAS点源は、分子雲がHII領域に接している部分や、COの輝線強度が特に強くなっている部分に多く存在する傾向がみられました。これらのIRAS点源と分子雲、HII領域の関係について次の章でさらに詳しく議論しましょう。

5. HII領域と分子雲の位置関係

HII領域と星形成の関係を調べるために、HII領域に対する分子雲の位置によって、分子雲を以下の3つに分類しました。

- a) HII領域の光学的境界の内側にある分子雲 (16個)。
- b) HII領域の光学的境界上にある分子雲 (61個)。
- c) HII領域と視線速度が一致し、同じ距離にあると考えられるが、みかけ上HII領域から離れている分子雲 (18個)。これらの分子雲は、HII領域に付随している可能性があるが、 $H\alpha$ とCOの分布を比較する限りでは、はっきりした相互作用はみられません。

みかけ上ははっきりとHII領域に付随する分子雲(a, b)には、HII領域から離れたところにある分子雲(c)に比べて、多くのIRAS点源が付随する傾向がみられました。IRAS点源の個数面密度を調べると、a)は $1.7 \times 10^2 \text{ pc}^{-2}$, b)は $1.7 \times 10^3 \text{ pc}^{-2}$, c)は $9.6 \times 10^4 \text{ pc}^{-2}$ であり、HII領域に付随する分子雲の方が2 - 10倍以上多くの星が生まれていると考えられます。

6. HII領域の影響を調べる

理論的には、「HII領域に隣接する部分」では、分子雲が圧縮されて密度が高くなり、より質量の大きな星が形成されると考えられています。そこで、HII領域の光学的境界上にある分子雲(bに分類、5章参照)のうち、2点以上で検出された50個の分子雲を輝線強度のピークを通る線に2つに分け、星形成の違いについて調べました(図2 = 表紙参照)。以降、HII領域に隣接する部分を「HII領域側」、HII領域から離れた部分を「HII領域外」とよぶことにします。図2では、大きい丸ほど明るいIRAS点源を示しています。これを見ると、明らかにHII領域側で明るい(すなわち、質量の大きな)星が生まれていることがみてとれ

ます。また、HII 領域側に IRAS 点源が多いこともわかります。さらに、これらの星形成活動の違いを定量的に評価するために、それぞれの側での分子雲、IRAS 点源の性質、また、分子雲の質量と IRAS 点源の明るさ（光度）の関係について見ていきます。

HII 領域側と HII 領域外の分子雲の性質を表 1 に示しました。分子雲のサイズ(R)、線幅(ΔV)、質量(M)に大きな違いはみられません。しかし、水素分子個数密度(n)は、HII 領域側で 1.5 - 2 倍程度になっており、HII 領域側の分子雲の密度がやや高くなっていることを示しています。HII 領域側では、水素分子柱密度 ($N(H_2)$) を見積もる時に用いた仮定によって $N(H_2)$ が数 10 % 低く見積もられている可能性が高いので、HII 領域側の分子雲の密度は表 1 の見積もりよりも高くなっていると考えられます。

次に、星形成活動の活発さをそれぞれの側で比較するために、分子雲に付随する IRAS 点源を、「HII 領域側」と「HII 領域外」2 つに分類しました。HII 領域側が 110 個、HII 領域外が 66 個、個数面密度は、それぞれ 0.07 pc^{-2} 、 0.03 pc^{-2} です。このことは、HII 領域に隣接する部分では、HII 領域の影響が相対的に弱いと考えられる HII 領域から離れた部分にくらべて、2 倍程度多くの星が形成されていることを示しています。

形成される星の質量を調べるために、IRAS 点源の光度を見積もりました。ここで、光度の誤差が

1 桁以上あるものは不定性が大きいので除きました。その結果、十分な誤差の範囲内で光度を見積もることのできる IRAS 点源は、HII 領域側で 80 個、HII 領域外で 43 個となりました。条件を厳しくしても、個数比はほとんど変わらず (2:1)、HII 領域側で活発な星形成がみられます。図 3 は、IRAS 点源の光度関数です。光度関数は、どの程度の光度の星がどれくらいの割合で形成されているかをあらわします (光度関数は、光度 L から $L + dL$ の間にある IRAS 点源の数を dN としたとき、 $dN/dL \propto L^{-s}$ で表される)。HII 領域側の光度関数は、 $10^5 L_{\odot}$ 以上までのびているのに対し、HII 領域外のは $10^4 L_{\odot}$ 以下であり、より質量の大きい星が HII 領域側で形成されていることがみてとれます。

私達が観測した HII 領域では、IRAS 点源の検出限界が約 $300 L_{\odot}$ (質量に換算すると約 $5 M_{\odot}$) であるため、 $300 L_{\odot}$ 以上の IRAS 点源に対して光度関数を直線で近似しました。直線の傾きは、HII 領域側、HII 領域外ともほぼ等しく、それぞれ -1.4 ± 0.2 、 -1.5 ± 0.5 です。このことは、形成される星の質量分布はよく似ており、星の数が多い HII 領域側でより大きい質量の星が形成されたと考えられます。しかし、一方で、HII 領域外の光度関数には、 $10^4 L_{\odot}$ に上限が存在し、 $10^4 L_{\odot}$ 以上の大質量星が形成されていないようにも見えます。この上限が有意であるかどうかは、この結果からは結論できません。もし、この上限が存在するな

表 1. HII 領域側、HII 領域外の分子雲の性質 (50 個の平均値)

	R	ΔV	M	$N(H_2)$	n
	(pc)	(km/s)	(M_{\odot})	($\times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$)	($\times 10^3 \text{ cm}^{-3}$)
HII 領域側	2.6	2.8	2000	11	2.5
HII 領域外	3.0	3.0	2400	8.6	1.5

*) n: 水素分子個数密度。分子雲が半径 R の球であると仮定して求めた。
 $n \sim M / 2m_H / (4\pi R^3 / 3)$ 。 m_H は水素原子の質量。

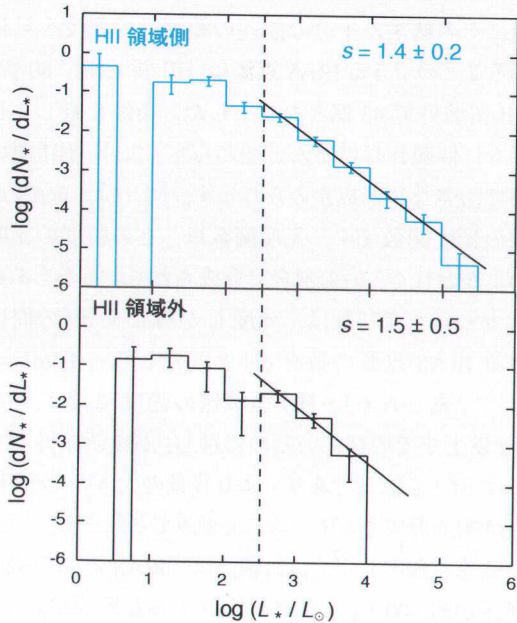


図3 IRAS 点源の光度関数. 光度関数は, 光度 L から $L+dL$ の光度をもつ IRAS 点源の数を dN とした時, dN/dL を L のべき乗の関数として表したものです ($dN/dL \propto L^s$). IRAS 点源の光度分布を表していて, 傾き(s)が小さいと明るい IRAS 点源の占める割合が大きいことを示しています. (a) HII 領域側, (b) HII 領域外の光度関数.

らば, 大質量星は HII 領域の影響を受けたところで形成されやすいことになります. この問題の結論を出すには, 今後サンプルを増やして調べることが必要です.

さらに, 星形成の効率を比較するために, 分子雲の質量と付随する IRAS 点源の光度の関係を調べました (図4). IRAS 点源の光度は, 分子雲の質量が増加するにしたがって高くなっています. さらに, 同程度の質量の分子雲に付随する IRAS 点源の光度を比較すると, HII 領域側は HII 領域外にくらべて1桁程度高くなっていることがわかります. このことは, 同じ質量の分子雲から形成される星の質量が大きい, つまり, HII 領域側では星が効率良く形成されていることを示しています. 光度-質量比 (光度/質量) を調べると, HII 領域側の平均値が1.2であるのに対し, HII 領域外では

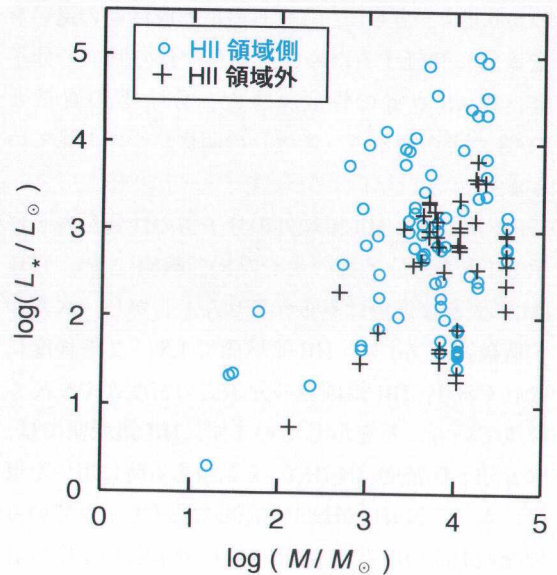


図4 分子雲の質量と付随する IRAS 点源の光度の関係. 青い丸は HII 領域側, 黒い十字は HII 領域外の IRAS 点源を示しています.

0.12 で, 平均的に10倍程度明るい星が HII 領域側で生まれています.

さらに, 星形成率 (形成された星の質量/分子雲の質量 $\times 100\%$) を求め, 比較しました. IRAS 点源の光度から求めた星の質量を用いると, 星形成率は, HII 領域側で0.7%, HII 領域外で0.2%となります. IRAS 点源の検出限界 ($5 M_{\odot}$) 以下の星の量を, 星の質量分布を仮定して求め, 形成された星の質量に加えると, 星形成率はそれぞれ $\sim 2.5\%$, $\sim 0.7\%$ になると予想されます. このように, HII 領域側では, 星形成率が3倍程度高く, 効率良く星が形成されていることが明らかになりました.

得られた結果を表2にまとめました. 表2を見ると, HII 領域側の IRAS 点源が1桁程度明るく, 質量に換算すると約2倍重い星が形成されていることがわかります. HII 領域側では, HII 領域外にくらべて, より質量の大きい星が効率良く形成されています. つまり, HII 領域の影響を強く受けている部分で, 星形成が活発になっており, これは,

HII 領域によって分子雲が圧縮されたため、星がでやすくなっていることを反映していると考えられます。

7. 銀河系全体に対する HII 領域の影響

HII 領域の影響で星が形成されるという過程は、銀河系全体でどの程度重要なのでしょうか？ Sugitani ら⁹⁾は、銀河系の星の最低 5% が BRC で形成されると見積もっています。私達は、HII 領域の影響でどの程度の星が形成されるのかを得られた結果に基づいて概算しました。

まず、1つの HII 領域あたり何太陽質量程度の星が HII 領域の影響によって形成されたかを調べました。付随する IRAS 点源の質量は、HII 領域側で $30 M_{\odot}$ 、HII 領域外で $10 M_{\odot}$ と求められました。したがって、何も影響のない時に、分子雲で様に星が生まれるとすると、 $30 - 10 = 20 M_{\odot}$ が HII 領域の影響によって余分に形成された星であると考えられます。

次に、1つの HII 領域が 1 年間にどれくらいの星を形成するかを以下のように求めました。HII 領域の年齢は、大きさを膨張速度で割ることによって約 10^6 年と見積もられます。IRAS 点源である原始星の年齢は、約 10^5 年¹⁰⁾ですから、HII 領域が生まれてから現在までに形成した星は、現在分子雲に付随している IRAS 点源の約 10 倍になります。

したがって、HII 領域の影響で 10^6 年の間に形成されたと考えられる星は、 $200 M_{\odot}$ となり、1 年当たり換算すると $2 \times 10^4 M_{\odot}/\text{yr}$ になります。

私達からの距離が 1kpc 以内にある BRC が付随する HII 領域は、32 個あります^{7), 9)}。したがって、HII 領域の個数面密度は、 2.6 kpc^{-2} となります。もし、HII 領域が銀河系の中心から 10 kpc 以内に様に分布していると仮定すると、1 年間に銀河系全体で HII 領域の影響によって形成される星は、 $0.2 M_{\odot}/\text{yr}$ になります。また、電波の連続波から見積もった HII 領域の数をを用いて概算しても約 $0.4 M_{\odot}/\text{yr}$ となり、前に求めた $0.2 M_{\odot}/\text{yr}$ と矛盾しない結果になります。銀河系全体で 1 年間に形成される星の質量は、約 $4 M_{\odot}/\text{yr}$ ¹¹⁾ ですから、銀河系の星の約 5 - 10% が HII 領域の影響によって形成されていることとなります。

ただし、ここで用いた IRAS 点源は、ほとんどが $5 M_{\odot}$ 以上の星ですから、星の質量分布を仮定して、さらに小さい星の質量を含めると、 $0.5 - 1.3 M_{\odot}/\text{yr}$ が 1 年間に HII 領域の影響によって形成されると考えられます。これは、銀河系全体の星の質量の約 10 - 30% に相当します。

この見積もりは大変あっぱい見積もりですが、少なくとも数 10% の星が HII 領域の影響で形成されている可能性があるでしょう。このように、HII 領域による分子雲の圧縮は、星形成、特に質量の

表 2. HII 領域側と HII 領域外の比較

	HII 領域側		HII 領域外	
	範囲	平均値	範囲	平均値
分子雲の総質量 $M (M_{\odot})$	1.0×10^5		1.2×10^5	
IRAS 点源の数	80		43	
IRAS 点源の光度 $L (L_{\odot})$	$2 - (1 \times 10^5)$	7×10^3	$6 - (6 \times 10^4)$	1×10^3
RAS 点源の質量 $M_* (M_{\odot})$	1 - 29	8.4	2 - 13	6.3
光度 - 質量比 (L_{\odot}/M_{\odot})	0.003 - 17	1.2	0.001 - 0.43	0.12

大きな星を形成するプロセスにおいて重要な役割を果たしていると考えられます。

8. まとめと今後の課題

HII領域の影響を調べるために、南天のHII領域に対して分子雲サーベイをおこないました。その結果、HII領域に接している部分では、HII領域から離れた部分にくらべて、質量の大きい星が形成されていることが統計的に明らかになりました。HII領域によって分子雲が圧縮され、星形成が活発になる、という理論的示唆に対し、この研究は「どのくらい」活発になっているかを観測から示しました。さらに、このようなプロセスは、銀河系全体の星形成の数10%を占めており、HII領域は大質量星を形成するのに重要な役割を果たしていると考えられます。

今後は、さらにサンプルを増やすことにより、IRAS点源の光度関数を調べ、HII領域側は、「大質量星が形成される割合が大きい」のか、「星が形成しやすい」のかを明らかにしたいと思います。また、今回の観測では、分子雲の性質にはっきりした違いがみられませんでした。さらに高密度な領域を調べることによって、星を形成する直前のガスの物理状態を知ることが重要だと思えます。

9. 謝辞

この研究は、私の修士論文¹²⁾をもとにまとめました。この研究を進めるにあたり、指導教官である福井康雄先生からたくさんのご指導とご助言をいただきました。ありがとうございました。また、議論におつきあいただいた水野亮先生、大西利和先生、米倉覚則先生をはじめとする研究室のみなさまに深く感謝いたします。なんてんプロジェクトは、名古屋大学とワシントンのカーネギー財団の協定によってすすめられています。ラスカンパナス天文台に滞在した2ヶ月間には、Miguel Roth台長をはじめとする天文台のみなさまに大変お世話になりました。

参考文献

- 1) Elmegreen B., Lada C.J., 1977, ApJ 214, 725
- 2) Klein R.I., et al., 1985, in Protostar & Planets II, ed D.C. Black (University of Arizona Press, Tucson), p340
- 3) Sugitani K., et al., 1989, ApJ, 342, L87
- 4) Dobashi K., et al. 1996, ApJ 466, 282
- 5) Yonekura Y., et al., 1997, ApJS 110, 21
- 6) Kawamura A., et al., 1998, ApJS 117, 387
- 7) Sugitani K., Ogura K., 1994, ApJS 92, 163
- 8) Beichman C.A., 1986, in Light on Dark Matter, ed F.P. Israel, (D. Reidel Publishing Company, Dordrecht), p279
- 9) Sugitani K., et al., 1991, ApJS, 77, 59
- 10) Beichman C.A., et al., 1986, ApJ 307, 337
- 11) McKee C.F., Williams, J.P., 1996, ApJ 476, 144
- 12) Yamaguchi R., et al., 1999, PASJ 51, 791

Molecular Clouds and Star Formation Near-by Massive Stars

~ Quantitatively Studying the Effects of HII Regions on Star Formation ~

Reiko YAMAGUCHI

Department of Astrophysics, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602

Abstract: In order to quantitatively investigate dynamical effects of HII regions on star formation, observations in ^{13}CO ($J = 1 - 0$) have been made toward the 23 southern HII regions. Ninety-five molecular clouds were identified, and 57 of them were found to be associated with 204 protostellar IRAS sources. More numerous and massive stars are found to be formed on the side facing to the HII regions than that away from the HII regions. This suggests the dynamical effects of the HII regions, such as compression of the molecular gas by the expanding ionized/shock fronts.