

# 原始星ガス円盤：最近の研究から

中村 昭子

〈京都大学理学部 〒606-01 京都市左京区北白川追川町〉

川辺 良平

〈国立天文台野辺山観測所 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉

この太陽系がおそらくそうであったように、一般に、星が生まれる時には円盤構造をとまう可能性があると考えられる。実際、電波域の分子輝線によって、若い天体を円盤状にとりまく濃いガスが観測されている。最近、このような円盤ガスに、中心へのガスの流れ込みと逆回転という、観測的には珍しい速度構造が見つかった。

## 1. 若い星をとりまく分子ガス

分子雲が収縮して新たな星が形成される時、収縮するガス雲の磁場や回転に起因して、原始星のまわりにガス円盤ができると考えられている。他方、星形成の途中には、分子流現象の時期があることが観測的に明らかにされてきた<sup>1)2)3)</sup>が、分子流の絞り込みと加速の機構の問題は、まだ決着がつけられてない。分子流は、恒星風によって押された物質が円盤の軸方向に絞り出されたものという説と、回転円盤が軸方向に（磁場を介して）

角運動量を逃す結果生じるのだという説とがある。前者の場合は、星への質量降着が進んだ段階で分子流現象が始まるのに対し、後者では、回転円盤が形成されれば分子流現象にスイッチが入ることになる。いずれにせよ、中心星のまわりの円盤（ドーナツ）構造と分子流現象とが互いに関わりをもち、星形成に重要な役割を演じていることは、まずまちがいないであろう。

いくつかの双極分子流天体では、電波域の分子輝線によって、分子流の根もとに濃いガスの構造が観測されている。このような濃いガスの系統的

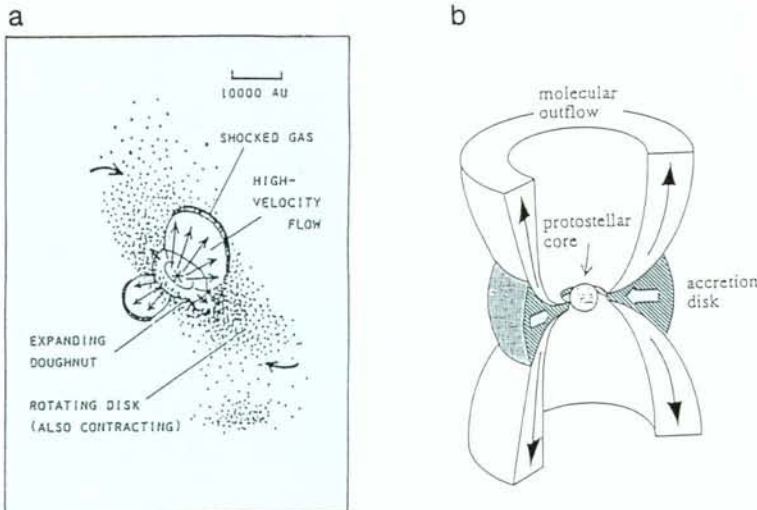


図1 双極分子流の根もとの濃いガス。  
a: オリオンKL<sup>4)</sup>, b 質量降着がある場合<sup>5)</sup>。

な運動には、図1<sup>45)</sup>にあるように、分子流に押された物質の外向きの流れと、星へ落ちていく内向きの流れ、回転などが考えられる。同じようにみえる分子流天体でも、中心星の素性（あるいは、もともとの分子雲の物理量—磁場の強さや角運動量の大きさなど）や進化の段階（年齢）で、分子流の根もとのガスの運動は異なるであろう。したがって、若い星のまわりの濃いガスの空間・速度構造を統計的にしらべることは、星の進化をたどるうえで非常に大切になってくる。低質量星の場合は、原始惑星系円盤の形成と進化という観点からも興味深い。特に、ガス円盤がいつまで存在するかは、惑星の成長を考える上で一つの鍵となっている。

これまでの観測で見つかったガスの運動の多くは、回転や膨張であると解釈されてきた。例えば、大質量星形成領域オリオンKLでは、膨張するドーナツ状の濃いガスとそのまわりのガスの回転がともにはっきり見えている<sup>46)</sup>。一方、観測結果が確定的でない場合もある。おうし座分子雲の中の双極流天体L1551—IRS5では、野辺山45m鏡で分子流と「いれこ」の構造になっている円盤状ガスが見つかり、位置—速度図からゆるやかな回転が見えると報告されている。ところが、別の観

測からは、系統的な運動はなくむしろ分子流によって乱されたガスの構造があると言われている。また、へびつかい座分子雲の分子流天体IRAS16293—2422では分子輝線のプロファイルからガスの収縮が指摘され、原始星への降着流として注目された。しかし、その後空間分解観測が行なわれた結果、ガスの降着は否定されたかわりに円盤ガスの回転運動が報告されている。

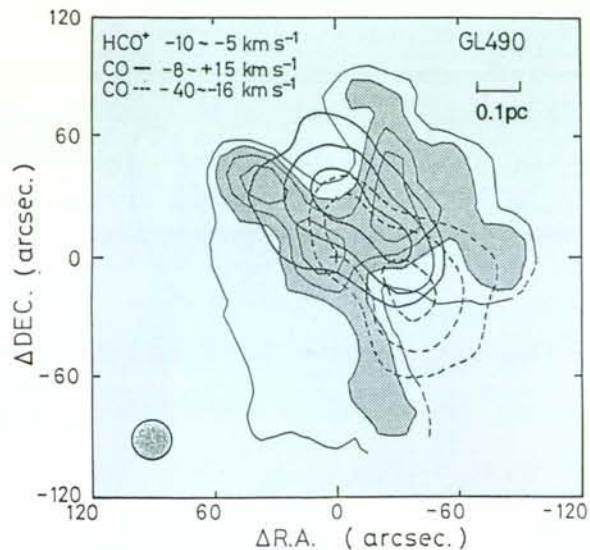
最近、ミリ波干渉計によって、円盤ガスの内むきの運動と逆回転とが示唆される2つの観測結果が新たに得られた。ジグソーパズルの断片は増えたようなのだが、それぞれの断片が星形成という絵のどこにはまってしまうのかまだまだ混沌としているように思われる。

## 2. ガス円盤の降着流

### 1) GL490

GL490はおおよそ900pcの距離にある孤立した赤外線源で、太陽の $(1\sim 3)\times 10^3$ 倍のエネルギーを放出している。中心には、厚いガスとダストに覆われた若い星があるとされ、80年代初めに続々と登場した双極分子流天体のひとつである<sup>1)2)7)</sup>。ここ10年余りにわたって、可視・赤外・電波で精力的な観測が行われ、つぎのような、空間構造モデ

図2 GL490の双極分子流<sup>7)</sup>とノズル<sup>1)</sup>。+印は、赤外線源の位置(R. A. =  $3^h23^m38^s.8$ , DEC. =  $58^{\circ}36'39''$ )を示す。





ルが築かれてきた。

図2にあるように、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ で見える双極分子流は、手前に向かってくるガスと遠ざかるガスとが視線方向に重なっている。重なり具合いからすると、分子流を真横からみているでもなし、軸に沿った方向からみているわけでもない。分子流の速度幅は最大で $60\sim 70\text{ km s}^{-1}$ に達し、空間的ひろがりはおよそ $0.3\text{ pc}$ である。川辺らは、CS(1-0)で分子流の根もとの速度構造を調べ<sup>8)</sup>(天文月報77巻第11号)、 $30\text{ M}_{\odot}$ の、分子流に垂直な半径 $0.1\text{ pc}$ のリング状のガスが、 $5\text{ km s}^{-1}$ で膨張している(図3-a, 太線) ことを見いだした。0.1 pcというのは $\text{HCO}^{+}$ <sup>(9)</sup>でトレースされた分子流のノズルのスケールとよくあっている(図2, 影の部分)。また、可視光や近赤外での観測では分子流の青い側、すなわち、中心に対して南西側にのみ反射星雲が見えている。遠ざかる分子流からの散乱光が観測されないことから、分子流の根元に高密度の構造があることが予想される。事実、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ では図3-aのようなべったりした構造が見え<sup>9)</sup>、 $1.3\text{ mm}$ や $2.7\text{ mm}$ の連続波では、これの中心部分からのダストの熱放射が検出されている。ガスとダストの円盤が分子流の軸に垂直に貫かれていると仮定すると、われわれは、

円盤を南西(下)側から絶妙の角度でのぞきこんでいることになる。

## 2) 観測結果

今回、野辺山ミリ波干渉計を用い、CS( $J=2-1$ )輝線および $3\text{ mm}$ 連続波により観測をおこなった<sup>10)</sup>。CSの速度分解能は、 $1\text{ km s}^{-1}$ である。その結果、図3-bにあるように、 $3\text{ mm}$ 連続波源を中心とし(以下では単に中心と呼ぶ)、双極分子流にほぼ垂直な方向にのびた、半径およそ $10^4\text{ AU}$ のCSガス円盤がとらえられた。干渉計の基線の最短長は $15\text{ m}$ なので、( $3\text{ mm}/15\text{ m}$ )ラジアン $\sim 40''$ よりひろがった構造は見落としてしまうのだが、CSの積分強度は、既に野辺山 $45\text{ m}$ 鏡で観測された量<sup>11)</sup>のおよそ30%に相当し、以下に述べる速度構造は、ガス円盤の主要部分について見た結果といてよいであろう。

図4に示したのが円盤ガスの速度構造である。中心からそれぞれ $2''.4$ ずつ離れた、円盤に平行な切り口での位置-速度図は、円盤の上側(A-A')で赤方偏移を、下側(B-B')で青方偏移を示している。円盤の中心部分を通り円盤に垂直な切り口(C-C')でも、中心付近で赤方偏移( $1\sim 2\text{ km s}^{-1}$ )から青方偏移( $-(1\sim 2)\text{ km s}^{-1}$ )へと速度が変化している。さらに、A-A'とB-B'両図とも、中心位置

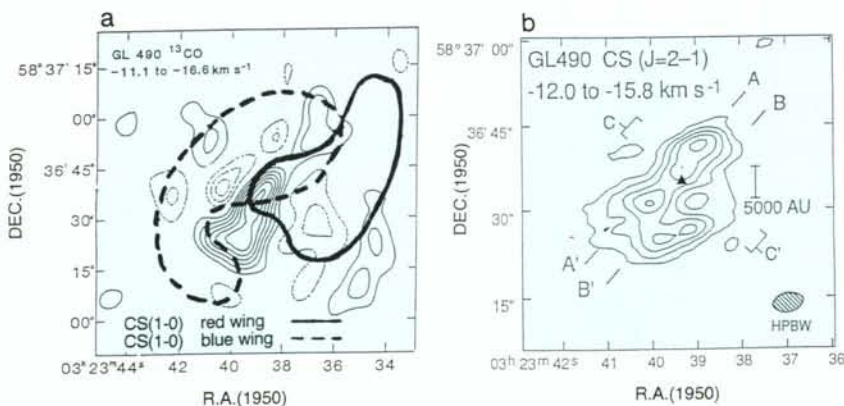


図3 GL490のガス円盤。  
 a :  $^{13}\text{CO}$ での観測<sup>9)</sup>。太線は分子流に押されて膨張するリング状のガス<sup>8)</sup>、  
 b : CS( $2-1$ )での観測<sup>10)</sup>。△は、 $3\text{ mm}$ 連続波源の位置を示す。

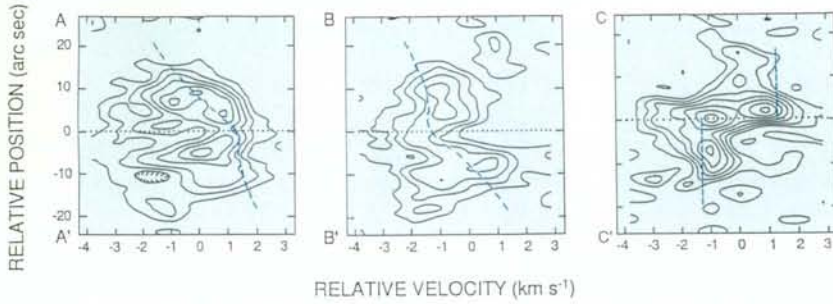


図4 円盤に沿った切り口 (図3-b, A-A', B-B') と垂直な切り口 (C-C') でのガスの位置-速度図。

では $\pm 1\sim 2 \text{ km s}^{-1}$ の速度成分が目立つのに対し、中心から $\pm 10''$ 離れた位置では $0 \text{ km s}^{-1}$ の速度成分が目立っている。これら両図を合わせると傾いた楕円の形が浮かび上がるが、これは、視線を含む面内の動径方向の運動によって説明できる。楕円が傾いているのは、回転成分がのっているからであろう。

### 3) ふたつの解釈

図4の位置-速度図を解釈するにあたって、1)で述べたように、ガス円盤があってその手前側のへりが北東側にあり向こう側の縁が南西側にあると仮定する。

まず、ガスの運動方向が円盤面内にあるとしてみる。平たい円盤を構成するガスの運動を考えるので、自然な仮定と思われる。すると、北東側-すなわち手前側で赤方偏移し、南西側-向こう側で青方偏移した速度構造は、中心へのガスの流れ込みをあらわすことになる。そこで、円盤に沿った流れ込みと、円盤を貫く軸のまわりの回転を考える。星の質量と半径数千AUより内側の円盤の質量は、あわせて $20 M_{\odot}$ かそれ以上と推定されるのだが、この質量による重力場でもって観測された内向きの速度 $1\sim 2 \text{ km s}^{-1}$ を生じさせるのは可能である。ここでは単純に、一定速度 $1.5 \text{ km s}^{-1}$ の流れ込みと、 $1.0 \text{ km s}^{-1}/9.5''\sim 24 \text{ km s}^{-1}\text{pc}^{-1}$ の剛体回転のモデル曲線を示す(図4点線)。ただし、円盤は視線に水平な面から $30^\circ$ 傾いているとした。簡単なモデルであるが、A-A', B-B'に沿う位

置-速度図はよく再現されている。

次に、円盤に垂直な運動を考えてみる。北側で赤方偏移し南側で青方偏移した速度構造は、まさに分子流の速度構造と同じである。つまり、分子流の密度の大きい場所での速度成分をとらえていると考えるのである。もしそうだとすると、速度 $1\sim 2 \text{ km s}^{-1}$ 、速度幅も同程度、しかも中心から遠ざかると(密度は小さくなるであろうのに)減速している(C-C'の図)のは奇妙である。したがって、分子流の成分は含まれているかもしれないものの、主には円盤にそって中心へ向かう運動を見ているのだと解釈される。

ミリ波干渉計の優れた視力とこれまでの観測結果でとらえたGL 490は、まさに、原始星のひな型のような単純で美しい姿をしている(例えば図1-b)。軸がかなり傾いているために、分子流天体としては、L 1551-IRSやこのあと登場するNGC 2071ほどの迫力はないが、この傾きが、円盤の速度構造を探る時になって幸いしたようだ。

### 4) 円盤ガスの降着流?

今回のガスの流れ込みは分解能 $\sim 4''$ ( $\sim 3600 \text{ AU}$ )で観測された。では、さらに分解能を上げて内側をみるとどうなっているのだろうか。大きい空間スケールでの質量降着率( $\sim 3 \times 10^{-4} M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ )のまま星の表面まで落ちていくとすると、降着によって解放される重力エネルギーでGL 490の全光度を説明することができてしまう。しかし、現実には、数千AUスケールでの降着率が4けたも



5けたも小さいスケールまでそのまま保たれているとは考えにくい。中心星が主系列（近く）まで進化していて質量が8 M<sub>☉</sub>ほどであれば、質量降着によらずとも星自身によって~10<sup>3</sup>L<sub>☉</sub>の光度を達成できる。したがって、ガスの内向きの流れがあったとして、それが星をつくっていくもの（本物の降着流）なのか、星への降着はほとんど完了してしまった時期の現象（降着流の名残）なのかは、さらに内側を見なければ正しい判断ができない。星の質量なり、星のごく近傍での質量降着率なりもっと内側の情報が必要である。原始星のひな型のように見えたGL 490も、よくよくみると主系列間近だったということは、おおいにありうる。

おうし座分子雲中の若い星々のような低質量星であれば、可視光でみえない原始星の段階からTタウリ型星の段階を経て、主系列星へといたる過程がよく調べられてきている<sup>3)5)12)</sup>。そこで、低質量星においてガスの流れ込みが観測されれば、それが星形成のどの段階のできごとなのか観測結果を時間軸上に並べるのは、比較的容易だと思われる。さらに、低質量星のよいところは、主系列にいたるまでの時間が圧倒的に長いことであって、観測できる天体が数多くあることである。問題は、中心質量が小さいために、ガスの内むきの流れがあったとしても、その速度はたいへん小さく、空間的に分解しづらい点にある。150 pc程度の近傍の星形成領域のおうし座領域・へびつかい座領域

を見るにも、現在の視力（感度も含める）では必ずしもじゅうぶんではなく、LMA(大型ミリ波干渉計)への期待が膨らむ。

### 3. ガスの逆回転

#### 1) NGC 2071—IRS

NGC 2071—IRSは図5-aに見られるように典型的な双極分子流天体である<sup>17)</sup>。分子流の根もとには3つのH II領域があり、これらを囲むようにガス円盤が観測されている。距離はおよそ390 pc、光度は450-600 L<sub>☉</sub>である。ガス円盤に沿った切り口(図5-b, A-A')での位置-速度を図6に示す。45 m鏡でのCS(1-0)観測<sup>13)</sup>(図6-a)では、AからA'に向かって、速度が青方偏移から赤方偏移へ変化している。ところが、今回の干渉計による分解能10"×0.5 kms<sup>-1</sup>の観測<sup>14)</sup>(図6-b)では、赤方偏移から青方偏移へと移行するようすがくっきりみえている。円盤ガスは、半径~15" (~6×10<sup>3</sup>AU)の内側と外側とで円盤に垂直な軸のまわりに逆向きに回転していると解釈される。内側での回転速度は~35 kms<sup>-1</sup>pc<sup>-1</sup>、外側では反対向きにせいぜい5 kms<sup>-1</sup>pc<sup>-1</sup>である。

#### 2) 磁場と角運動量

ガスの逆回転を生じた機構として考えられるのは、磁場による減速(Magnetic Breaking)である。この機構は、収縮によって高速回転をするガス円盤から角運動量を抜き取るために考えられてきた<sup>15)16)</sup>。アルペーン波によって、内側のコアの角

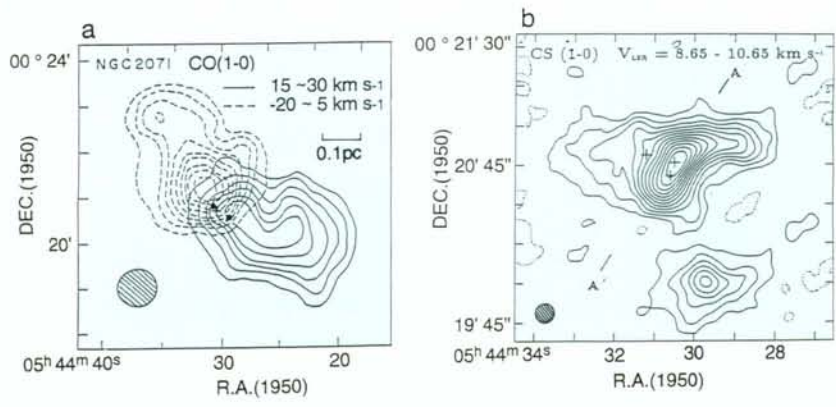


図5 NGC2071のガスの構造。  
a: 双極分子流<sup>17)</sup>、  
b: ガス円盤<sup>14)</sup>。

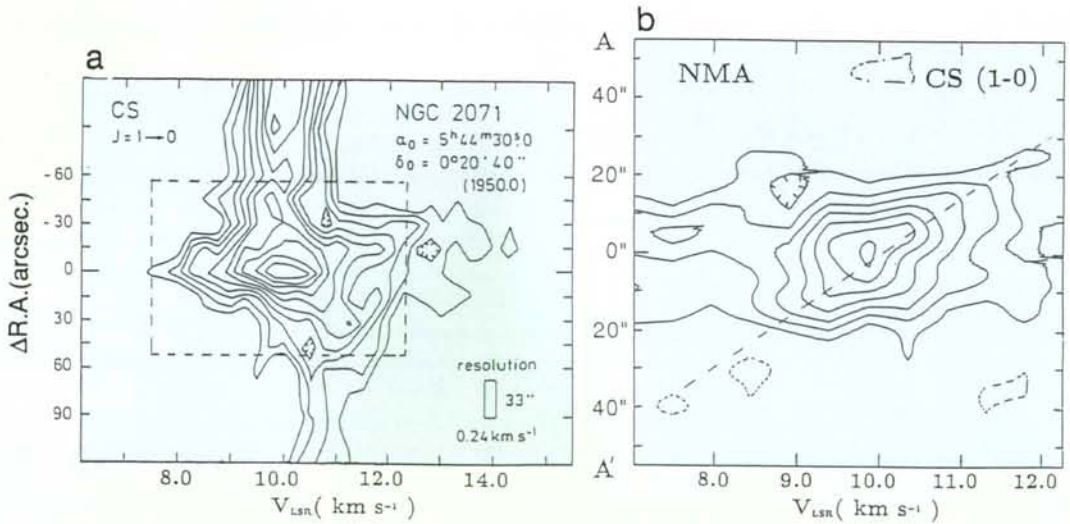
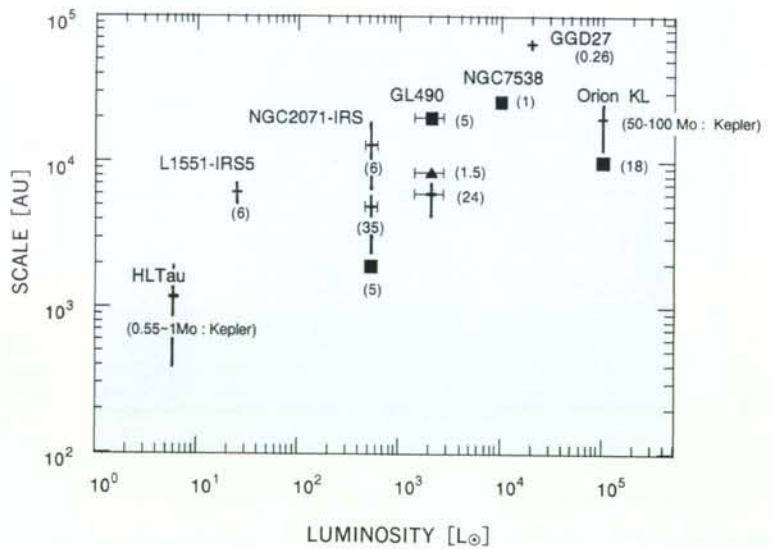


図6 円盤に平行な切り口(図5-b, A-A')でのガスの位置-速度図。  
 a: 野辺山40m鏡による観測<sup>13)</sup>,  
 b: ミリ波干渉計による観測。

図7 若い天体での円盤状分子ガスの系統的な運動。記号はそれぞれ三角:流れ込み, 四角:膨張, 十字線:回転をあらわす。括弧内の数字は流れ込み・膨張速度 [kms<sup>-1</sup>], 回転速度 [kms<sup>-1</sup>pc<sup>-1</sup>]である。参考文献は以下の通り。  
 HLTau<sup>18)</sup>  
 L1551-IRS5<sup>19)</sup>  
 NGC2071-IRS<sup>13)14)</sup>  
 GL490<sup>9)10)</sup>  
 NGC7538<sup>20)</sup>  
 GGD27<sup>21)</sup>  
 OrionKL<sup>22)</sup>



運動量が外側へ伝えられ, 適当な条件のもとでは, コアが外側と逆回転するというしくみである<sup>16)</sup>。だが, 残念なことに, NGC 7021-IRS 付近の磁場は可視光の偏光観測ではよくわかっていない。

#### 4. 絵あわせ?

上で述べてきた, GL 490 でのガスの流れ込みと NGC 2071-IRS での逆回転は, これまで観測さ

れてきた他の若い天体での円盤状分子ガスの速度構造と比較してどうであるのか。ガスの速度構造を左右しそうな物理パラメータのうち, 光度と分子流活動の大きさや<sup>12)2)</sup>円盤状ガスの質量<sup>17)</sup>の間には, 正の相関があると言われている。そこで, 乱暴は承知で, 横軸に光度縦軸に現象の中心天体からの距離(あるいは現象の空間的スケール)をとって図7に整理してみた(重要と思われる他の

パラメータ：中心星や分子流の年齢や磁場などの軸は紙面に垂直にあると考えてください)。筆者の収集が不十分なせいもあるだろうが、現象がばらばらのようかつパターンがあるようにも見えるという状況に、もどかしさをおぼえてしまう。星形成における分子ガス円盤の役割、分子流との関係、円盤の形成と消滅を理解するには、もっともっと多くの若い天体で、円盤ガスの速度構造が明かにされていくことが望まれる。

参 考 文 献

1) Bally, J., and Lada, C. J. 1983. Ap. J. 265 824-847.  
 2) Levreau, R. M. 1988. Ap. J. 330, 897-910.  
 3) Fukui, Y., Iwata, T., Takaba, H., Mizuno, A., Ogawa, H., Kawabata, K., and Sugitani, K. 1989. Nature 342, 161.  
 4) Hasegawa, T., Kaifu, N., Inatani, J., Morimoto, M., Chikada, Y., Hirabayashi, H., Iwashita, H., Morita, K., I., Tojo, A., and Akabane, K. 1984. Ap. J. 283, 117.-122.  
 5) Fukui, Y. 1989. ESO Workshop on Low mass star formation and pre-main sequence objects.  
 6) Murata, Y. 1991. Ph. D. thesis, University of Tokyo.  
 7) Snell, R. L., Scoville, N. Z., Sanders, D. B., and Erickson, N. R. 1984. Ap. J., 284, 176.  
 8) Kawabe, R., Ogawa, H., Fukui, Y., Takano, T., Takaba, H., Fujimoto, Y., Sugitani, K., and Fu-

jimoto, M. 1984. Ap. J. 282. L73.  
 9) Mundy, L. G., and Adelman, G. A. 1988. Ap. J. 329, 907.  
 10) Nakamura, A., Kawabe, R., Kitamura, Y., Ishiguro, M., Murata, Y., and Ohashi, N. 1991. Ap. J. (Letters), 383 L81 (1991).  
 11) Kawabe, R., Hasegawa, T., Hayashi, S. S., and Kaifu, N. 1987. in IAU Symposium No. 115, p. 352.  
 12) Ohashi, N., Kawabe, R., Hayashi, M., Ishiguro, M. 1991. Astron. J., 102 2054 (1991).  
 13) Takano, T., Fukui, Y., Ogawa, H., Takaba, H., Kawabe, R., Fujimoto, Y., Sugitani, K., and Fujimoto, M. 1984. Ap. J. (Letters) 282, L69-L71.  
 14) Kawabe, R., Kitamura, Y., Takano, T., Hasegawa, T., and Ishiguro, M. 1991. submitted to P. A. S. J.  
 15) Moschovias, T. 1980. in IAU Symposium No 93, p. 27.  
 16) Nakano, T. 1991. in IAU Symposium No. 147, p. 67.  
 17) Kaifu, N. 日本天文学会1988年秋季年会  
 18) Sargent, A. I., and Beckwith, S. V. W. 1991. Ap. J. (Letters) 382, L31.  
 19) Kaifu, N., et al. 1984. Astr. Ap., 134, 7.  
 20) Kawabe, R., Suzuki, M., Hirano, N., Akabane, K., Barsony, M., Najita, J., Kameya, O., and Ishiguro, M. 1991. submitted to P. A. S. J.  
 21) Yamashita, T., Suzuki, H., Kaifu, N., Tamura, M., Mountain, C. M. and Moore, T. J. T. 1989. Ap. J. 347, 894.  
 22) Plambeck, R. L., Wright, M. C. H., Welch, W. J., Bieging, J. H., Baud, B., Ho, P. T. P., and Vogel, S. N. 1982. Ap. J. (Letters) 259, 617.

☆

☆

☆

☆