

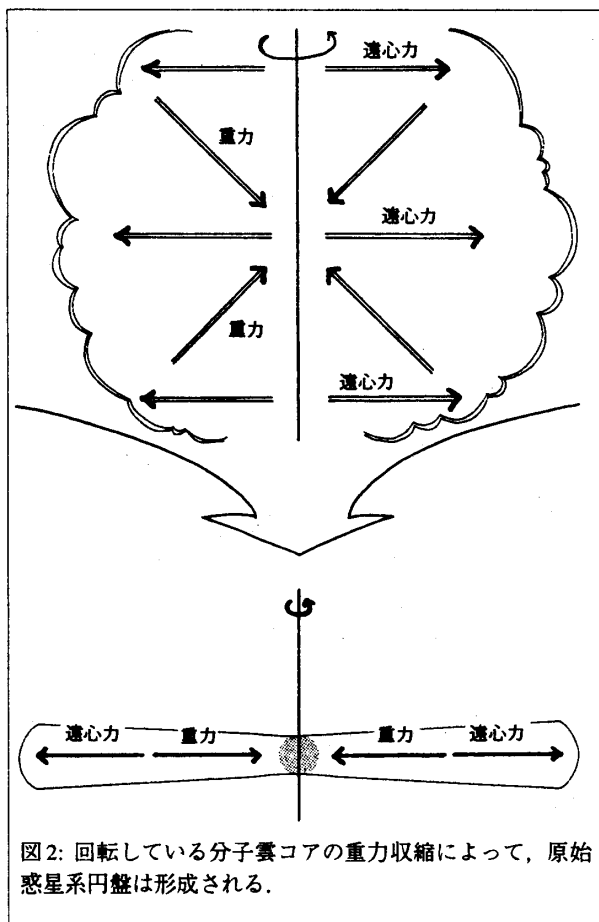


は、80年代以降の観測の進歩に刺激されて進展してきているものである。

## 2. Active Disk の形成——土砂降り

星間雲が重力によりダイナミックに収縮して恒星が誕生する。収縮に要する時間は10万年ほどと見られている[2]。これだけの時間内に太陽ほどの質量( $2 \times 10^{33}$ g)の物質が降るとするのは、中で見ている者にとっては土砂降りと映るだろう。(太陽半径のところまで「雨」として降ったとすると、1時間の「雨量」は $37\text{g/cm}^2\text{hour}$  [水の雨なら1時間に370mm!])となる。)

星間雲の中で1個の星にまで収縮しようとする部分(分子雲コア)の初めの大きさはおよそ1万AU(天文単位;  $1\text{AU}=1.5 \times 10^{13}\text{cm}$ )であり、最終的な星の大きさは百分の一AU程度であるから、両者の隔たりは6桁におよぶ。6桁の空間スケールの動的



的収縮というのはやはり穏やかな過程ではない。角運動量が保存されるときには遠心力の強さは中心からの距離の3乗に反比例するから、サイズが6桁小さくなると遠心力は18桁も強くなる。場合によっては遠心力が重力よりも強くなって、中心星へ向かっての収縮は止まってしまう。止まるところの半径( $R_{\text{disk}}$ )は遠心力と重力の釣り合いにより、 $R_{\text{disk}} = 25 (J / 10^{53} \text{g cm}^2/\text{s})^2 (M_{\text{cloud}} / M_{\odot})^{-3} \text{AU}$  というように決まる。ここで、 $J$ は分子雲コアの全角運動量、 $M_{\text{cloud}}$ は分子雲コアの質量、 $M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{g}$ は現在の太陽質量である。

ところが遠心力というのは非等方的な力であって回転軸に垂直な方向にしか働かないから、回転軸に平行な方向には雲はまだ収縮できる(図2)。こうして、円盤状の天体が形成されるだろうことがわかる。この円盤を、原始惑星系円盤と呼ぶ。

ここで見てきたのは、分子雲コアという「雲」から「雨」(物質)がどこに降るのか、という問題である。おおまかに言って、円盤領域に降る。しかし、円盤領域のどこにどれだけ降るのか、という細かな点について正確に答えるのは現時点では難しい。重力収縮の初期条件や、収縮の仕方の詳細に強く依存する問題だからである。観測的には、HL Tau という T Tauri 型星の周囲に動的に収縮している円盤状構造が見つまっている[3]。今後、動的収縮の観測例は増えていくだろう。一方、理論の方は多少停滞している。円盤の形成問題を、ガスの運動と輻射エネルギー輸送(光によるエネルギー輸送。ガスの温度を決める大きな要因)を合わせて正確に解くには大規模な数値計算が必要になるからである。これまでの計算機能力の制約から、現時点ではまだ満足のいく答えは得られていない。しかし、昨今の計算機能力の向上および計算法の進歩により、この問題もある程度きちんと解けるようになりつつあると思われる[4]。今後の進展が楽しみである。

### 3. Active Disk 内の流れ——激流

#### 3.1 流れる？ 流れない？

分子雲コアから降ってきた物質は遠心力によって収縮を止められて原始惑星系円盤を形成する。それでは、円盤内ではモノの流れは止まってしまっているのだろうか？

まず、中心星を中心とした回転運動は依然として存在する。そもそもこれがなければ重力に抗う遠心力は生じない。回転角速度が中心星に近いところほど速く遠いところほど遅い差動回転となっている(図3)。この差動回転が実はミソであることは後に見るだろう。

次に、動径方向の運動はどうだろうか。円盤内のすべての流体粒子が重力と遠心力の釣り合いにより円軌道を描いているとき、その円盤は非常におとなしい円盤である。もしこのようなおとなしい円盤があったら、観測的にはどのように見えるだろうか。円盤内に特にエネルギー源はないから、それは中心星の光を反射している天体として観測されるだろう。そういう天体は、実際観測されている。それが passive disk である(詳細は中川氏の稿参照)。

一方、中心星のそばにあって円盤形状をしていながら、自ら光り輝いている天体が観測されている[5]。そのエネルギー源は何だろうか。その温度はせいぜい数千度だから、核融合反応が起こっているとは思えない。実は、中心星の重力ポテンシャルが答えである。円盤内に或る仕掛けがあれば、重力ポテンシャルから十分なエネルギーが供給できる。というのは、もしその仕掛けがあれば、中心星の重力ポテンシャル中を円盤内の物質が少しずつ落ちて行くことができ、その際解放される重力エネルギー(の半分)がガスの熱エネルギーになるからである(図4)。こうして熱せられたガスが光って見える。このようにして自ら光る円盤を active

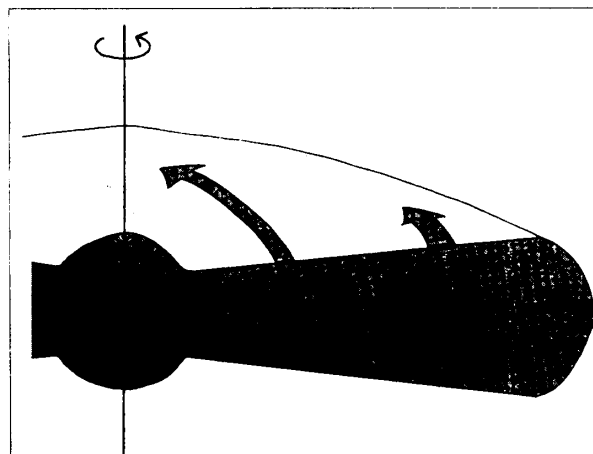


図3: 原始惑星系円盤は、差動回転している。中心星に近いところほど回転速度は速く、遠いところほど遅い。

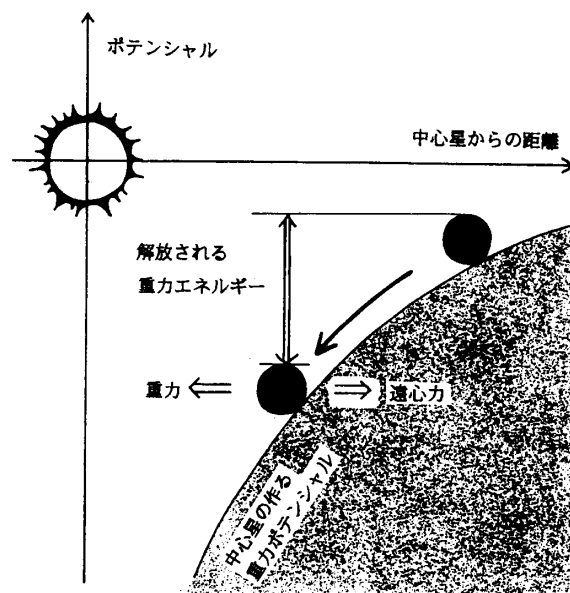
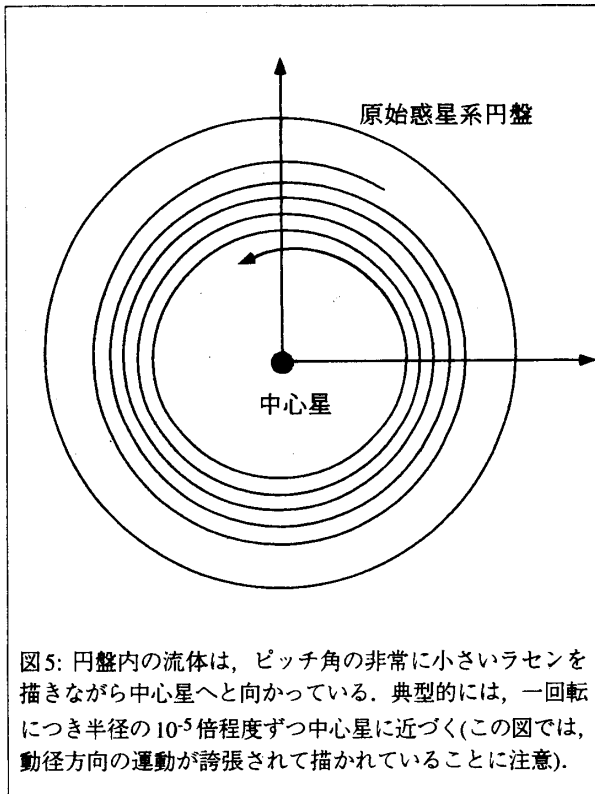


図4: 物体が中心星の重力ポテンシャルの中を落ちていくと、重力エネルギーが解放される。そのエネルギーはいったんガスの熱エネルギーとなり、さらには輻射となって系外に出ていく。

disk と呼ぶ。中には、中心星より明るく光っている円盤もある。放出されているエネルギー量から見積られる円盤内の流量は、中心星に向かって約  $10^{-6} M_{\odot}/\text{yr} = 6 \times 10^{19} \text{g/s}$  もあるものもある[1]。激流である。ただし、回転運動の方が動径方向の運動よりも圧倒的に(典型的には  $10^5$  倍ほど)卓越している。つまり、円盤内の流体は非常にピッチ角の小さいらせんを描きながら中心星へと落ちて行っているのである(図5)。



さて、円盤内の物質が重力ポテンシャルの中を落ちて行くことができるというのは本当だろうか？遠心力によって中心星へ向かう動径方向の運動は妨げられていたはずだ。しかし逆に見ると、遠心力さえ弱まれば動径方向に落ちることになる。すなわち、円盤内の物質にトルクが働いて角運動量が減少するようになっていけば、その円盤は active disk になるということである。Active disk が実際に観測されているということは、トルクが働いている円盤が存在しているということである。先に述べた円盤内の仕掛けとは、トルクのことであった。

### 3.2 ホントに流れる？

トルクの源はなんだろうか？

実は、これが大問題である。70年代以来の大問題である。いくつもの解答案が提出されてはいる。乱流粘性、磁気力、重力などである。しかし、決定的な答えはまだない。

一つの可能性は、乱流粘性である。円盤内の流

れのレイノルズ数は非常に大きいから、流れは乱流になりやすい。乱流があると乱流粘性が生じる。したがって、円盤は粘性流体として振る舞うと考えられる。

原始惑星系円盤は差動回転している。中心星に近いほど回転は速く遠いほど遅い。乱流粘性による粘性力はこの速度差を小さくしようとする。円盤内の流体は、自分のすぐ内側(中心星側)の流体からは加速され、すぐ外側の流体からは減速される。この差し引きの結果、負のトルクが働き自分は角運動量を失う。すると遠心力が小さくなり、その分だけ中心星に向かって落下することとなる。すなわち、乱流粘性が働いていると円盤内には動径方向の流れが生じ、円盤は active disk になるのである。(注：中心星+円盤の全系での全角運動量は保存している。円盤の外縁部では、内側の流体からは角運動量を受け取るが外には角運動量の受け手がいないために自分の角運動量が増加している。従って円盤半径は増大する。)

乱流を生み出す原因はなんだろうか？これまでのところ、円盤の中心面と表面との温度差による対流不安定[6]、差動回転円盤に特有のシア不安定[7]、磁場と差動回転流体の相互作用による磁気流体不安定[8]、などの流体運動の不安定に起因すると考えられている。しかし、現時点ではどれも決定的とは言えない。これらの不安定の起こり方が円盤のおかれているわずかな状況の違いによって変わってくる(たとえば対流不安定の場合の、円盤表面への中心星からの輻射[9])ので、実際の円盤を取り巻く状況がよくわかっていない現時点では、現実的な状況でこれらが本当に効くのかどうか判定できないからである。今後、これらの不安定の詳細を調べることはもちろん重要であるが、何らかの方法によって現実的な円盤のおかれている状況を詳細に知ることも望まれる。

ところで、円盤が active disk となるためには円

盤内でトルクが作用していさえすればよいから、トルクの源は粘性力に限らない。他のトルク源として、円盤を貫いて星間空間までつながっている磁力線が円盤におよぼすトルク(磁気ブレーキ)[10]、円盤物質が作り出す非軸対称重力による重力トルク[11]、などが考えられている。これらのトルクは、状況によっては粘性トルクよりも強くなる[12, 13]。しかし、これらのトルクもやはり円盤の状況のわずかな変化によって作用の仕方が変わってくるので、現実的な状況を想定した詳細な研究が必要とされている。

### 3.3 流れている!

Active disk を active disk たらしめている鍵を握っているのは、トルクである。しかし、トルクの正体はまだよくわかっていない。従って、トルクの正体を探ることが active disk の研究のひとつの方向になっている。ところが研究の方向はそれだけとは限らない。トルクの正体には触れないでも、種々の状況証拠からトルクの性質を知ることでもできる。それは、正体明かしにも役に立つ。ここではそのような試みの一例として、筆者自身によるもの[14]を簡単に紹介する。

中心星が形成されるのとほとんど同時に、その周囲に active disk としての原始惑星系円盤が形成されると考えられている。この円盤内のトルクの性質を見るために、分子雲コアからのガスの落下が続いている最中の円盤の振る舞いを調べる。分子雲コアの重力収縮過程は、分子雲コアの全角運動量( $J$ )で大まかに特徴づけられる。一方 active disk の振る舞いは、粘性係数の強さを与える粘性パラメータ( $\alpha$ )によって特徴づけられる(粘性パラメータ  $\alpha$  は、直感的には、乱流運動のマッハ数と理解できる、無次元量である)。観測と比較する物理量としては、円盤の全質量、中心星の質量などの大局的な量に注目することにする。現時点での観測

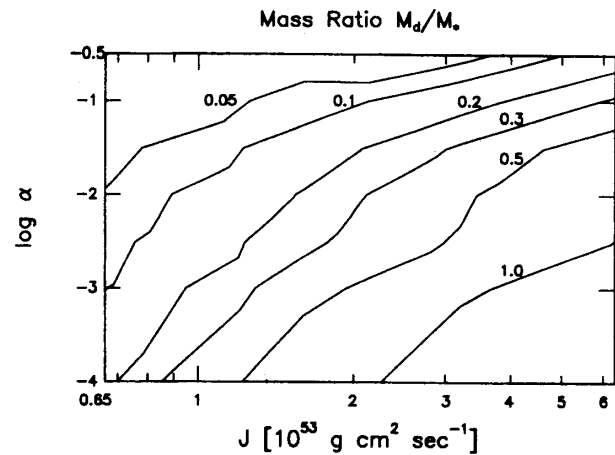


図6: 円盤質量と中心星質量の比  $M_{disk}/M_*$  を、分子雲コアの全角運動量  $J$  と円盤内の粘性パラメータ  $\alpha$  に対して等高線図で示した。左上の領域で、質量比  $M_{disk}/M_*$  が小さくなっている。

精度の制約から、それ以上の細かい構造については比較できないからである。同様の理由により、粘性パラメータ  $\alpha$  は時間的空間的に一定値であると仮定する。

円盤形成期終了後の円盤質量と中心星質量の比 ( $M_{disk}/M_*$ ) を、分子雲コアの初期全角運動量  $J$  と円盤内の粘性パラメータ  $\alpha$  に対して示したのが図6である。この結果は次のように定性的に理解できる。分子雲コアの全角運動量が大きい場合には、円盤の質量は大きくなる。中心星から遠いところに物質が落下するのだから、中心星までの道のりが遠く質量が円盤に残りやすいのである。一方、円盤内の粘性が大きい場合には円盤の質量は小さくなる。粘性が大きいほど動径方向の流れが促進されるからである。質量比 ( $M_{disk}/M_*$ ) はこれら2つの競合の結果として決まる。図6の左上の領域では  $J$  が小さく  $\alpha$  が大きいので  $M_{disk}/M_*$  は小さくなり、逆に右下の領域では大きくなる。

観測と比較してみよう。円盤形成期後の天体である T Tauri 型星の観測結果によると、質量比は大きくても 0.1 を超えることはほとんどない[5, 15]。また別の観測によれば、分子雲コアの全角運動量

はおよそ  $10^{53} \text{g/cm}^2 \text{s}$  以上である[16]. 従って図6より, 粘性パラメータは  $\alpha > 10^{-2}$  でなければならないことがわかる. このときには実際, 動径方向に  $10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$  程度で物質が流れている.

次に, 得られた  $\alpha$  の条件を満たす場合に, 円盤質量が時間とともにどう成長するかを調べてみよう. 結果を図7に示す. 計算においては  $t < 6.5 \times 10^5 \text{yr}$  を成長期とし, 成長期には分子雲コアから星+円盤に向かって一定の割合の質量降着があり, 成長期後はこれがなくなるとしている(これを分子雲コアの inside-out collapse model [17] とする). 成長期において円盤質量は, 時間の約2乗に比例して増加している. すなわち, 円盤質量は成長末期になって急速に増大しているのである. 果たして観測はどうだろうか. Ohashi et al.[18] によれば, 重力収縮中の分子雲コア(原始星と呼ばれている)内部にある, 従って成長中の円盤の質量は観測した13個中11個では  $0.03 M_{\odot}$  以下であり, 残り2個で約  $0.07 M_{\odot}$  であったという. このことだけからは確かな結論は出せないが, これは円盤質量が時間に対して非線型に増加していることを示唆しているとも取れる. その推論は次の通り. 各原始星の年齢を見積もることは現在のところ出来ないので, それらが様な年齢分布を持っていると仮定してみる. すると, 質量の小さい円盤の数が多いという観測結果は小質量状態の時間が相対的に長いことを意味する. つまり, 円盤質量は成長期末期になって急速に増大しているように見えるのである. これが本当ならば, 計算結果と観測結果は矛盾しないことになる. 詳細については, 今後の研究を待ちたい.

## 4. Active Disk の終焉

### 4.1 Outflow

Active disk に関連する現象として, 双極分子流, 光学ジェットなどの outflow 現象がある. これらは

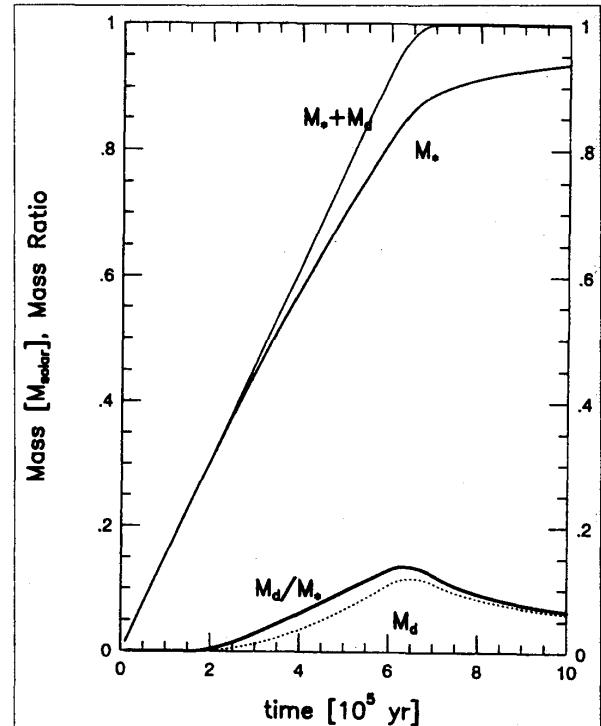


図7: 円盤質量( $M_{disk}$ ), 中心星質量( $M_*$ ), それらの和( $M_{disk}+M_*$ ), および比( $M_{disk}/M_*$ )を時間の関数として示した( $J=1.6 \times 10^{53} \text{g cm}^2/\text{s}$ ,  $\alpha=10^{-1}$  の場合). 成長期( $t < 6.5 \times 10^5 \text{yr}$ )において, 円盤質量  $M_{disk}$  は時間の約2乗に比例して増加している.

いずれも, 中心星付近から円盤と垂直方向に吹き出しているガスの流れである. しかし, こうしたガスの流れを作り出す機構はまだ明らかになっていない. 中心星の作っている磁場と円盤との相互作用によるものであるとする説が現在有力であるが, この説もいくつかのモデルに分かれる. 円盤を貫く中心星の双極子磁場の磁力線と星間空間につながる磁力線のつなぎ換えがocこり, その際の磁力線の跳ね返りに伴って物質が円盤と垂直方向に跳ね上げられるとするモデル[19], 中心星近傍から星間空間につながる磁力線が高速で振り回され, その上に乗っている物質が遠心力により放り出されるとするモデル[20], などが提唱されているが, いずれも今後の詳細な検討が望まれている.

さて, outflow は中心星と active disk を親としつつもこれらに影響を及ぼすらしい. すなわち, outflow は未落下の分子雲コア中の物質を吹き払

い、円盤への質量落下を止めてしまう働きがあるのである。星+円盤系は、あるところで自律的に自分の質量を決めてしまうというのである[21]。見事なダイエットが出来るらしい。なお、星の質量がどうやって決まるかという問いは非常に重要なしかし難しい問いであったが、この説はそれに対する一つの解答になっている。Outflow を作り出す機構の解明が進めば、星の質量決定機構もさらに詳しく明らかになるだろう。

#### 4.2 流れは止まる？

さて、active disk 内の流れはいずれ止まると考えられている。流れのない passive disk が多数観測されており[5,22]、それらの中心星の年齢が active disk を伴う中心星の年齢よりも古いと見られるからである[1,22]。重要なのは、流れが止まったときの円盤内の質量分布である。これが、微惑星の初期空間分布を決め、ひいては最終的な惑星の空間配置を決めることになるからである。しかし、そもそもどうやってトルクが働いているかがよくわからないので、どうやってトルクが働かなくなり、どうやって流れが止まるかということは全くわかっていない。しかし、ことは惑星系形成に関して非常に重要な問題であるから、今後真剣に検討する必要がある。

### 5. 今後の研究の流れは？

昨今は観測事実の土砂降りの時代である。それに伴って星・惑星系形成についての研究の流れも激流をなしている。国際的な研究会も至る所で頻繁に開催されている。この激流はいったいどこに向かうのだろうか？ここでは、active disk としての原始惑星系円盤に関連させつつも若干広い視野に立ち、私見を少し記させていただきたい。

一つ注目すべき問題は、連星系の形成である。銀河系に存在する過半数の恒星は、連星系をなし

ているらしい[23]。最近、誕生間もない若い星でも同様であるということがわかってきた[24]。すなわち、星形成過程の結果としては、太陽のような単独星よりも連星系の方が一般的のようなのだ。連星系形成の特殊な場合が単独星の形成になるのだろうか。従って、連星系形成をきちんと調べることが重要である。しかし、連星系形成問題は理論的には取り扱いが難しい。単独星形成ならば、円盤を含めて考えても軸対称2次元の問題であるが、連星系形成となると一般に非対称3次元の問題となるからである。大規模な数値計算が必要となる。初期状態としての分子雲コアの状態を精度良く特定すること、動的収縮過程を力学的・熱力学的に(輻射エネルギー輸送も含めて)精度よく解くこと、など難問ではあるが、重要かつやりがいのある問題である。世界的に見ても、連星系形成問題に対する関心は急上昇しているようである。

もう一つ注目すべき問題は、(単独星周囲の)惑星系形成に対する原始惑星系円盤の影響である。いくつかの影響がある。一つは、動径方向の流れが止まったときの円盤内の質量分布であり、これにより微惑星の空間分布が決められる。次には、微惑星の運動に対するガス抵抗である。これの大小により惑星成長の仕方が変わる。さらには、原始惑星系円盤の大局的な構造からの影響である。円盤ガスの総質量は微惑星総質量の100倍もあるから、原始惑星系円盤内に銀河円盤の渦状腕のような大局的な構造があったとすると、これが惑星成長に及ぼす重力などの影響は無視できないだろう。これらの影響を丁寧に調べ、比較的進展している惑星集積過程の研究とつぎ合わせることにより、太陽系形成過程の特に初期に関する詳しく新しい理解が得られるだろう。こちらの研究の流れは現在非常に細く弱々しいものであるが、おそらく今後関心が高まると予想する。

ここで挙げた問題の他にも、本文中に触れたも

の、触れられなかったもの等々多くの問題が山積しているし、新たな問題も次々に登場している。この研究の激流は、観測装置の進歩にも促されて、当分弱まることはなさそうだ。研究の進展により、active disk の流れが止まる様子を目の当たりにすることは出来るかもしれないが、研究の流れが止まる場所を見ることは難しいようである。

本稿の原稿に対して関谷九州大学助教授から有益な御意見をいただきました。また、本文の図の作成に際し市村恭子さんと草野富美江さんに御協力いただきました。これらの方々に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Kenyon, S. J., & Hartmann, L., 1995: Pre-Main Sequence Evolution in the Taurus-Auriga Molecular Cloud. *Astrophys. J. Suppl.*, in press.
- [2] Beichman, C. A., Myers, P. C., Emerson, J. P., Harris, S., Mathieu, R., Benson, P.J., & Jennings, R. E., 1986: Candidate Solar-Type Protostars in Nearby Molecular Cloud Cores. *Astrophys. J.*, **307**, 337-349.
- [3] Hayashi, M., Ohashi, N., & Miyama, S.M., 1993: A Dynamically Accreting Gas Disk around HL Tauri. *Astrophys. J.*, **418**, L71-L74.
- [4] 中本泰史, 観山正見, 梅村雅之, 小笠原隆亮, 横野安則, 近田義廣, 1994: Radiation Hydrodynamics の一つの試み. 21世紀への宇宙物理学シンポジウム — 天体物理学における輻射輸送過程(筑波大学計算物理学研究センター研究報告), 311-321.
- [5] Beckwith, S.V.W., Sargent, A.I., Chini, R.S., & Güsten, R., 1990: A Survey for Circumstellar Disks around Young Stellar Objects. *Astron. J.*, **99**, 924-945.
- [6] Lin, D. N. C., & Papaloizou, J., 1980: On the Structure and Evolution of the Primordial Solar Nebula. *Monthly Notices Royal Astron. Soc.*, **191**, 37-48.
- [7] Dubrulle, B., 1993: Differential Rotation as a Source of Angular Momentum Transfer in the Solar Nebula. *ICARUS*, **106**, 59-76.
- [8] Balbus, S. A., & Hawley, J. F., 1991: A Powerful Local Shear Instability in Weakly Magnetized Disks. I. Linear Analysis. *Astrophys. J.*, **376**, 214-222.
- [9] Watanabe, S., Nakagawa, Y., & Nakazawa, K., 1990: Cooling and Quasi-Static Contraction of the Primitive Solar Nebula after Gas Accretion. *Astrophys. J.*, **358**, 282-292.
- [10] Pudritz, R. E., & Silk, J., 1987: Ionization-Regulated Star Formation in Magnetized Molecular Clouds. *Astrophys. J.*, **316**, 213-226.
- [11] Larson, B. L., 1984: Gravitational Torques and Star Formation. *Monthly Notices Royal Astron. Soc.*, **206**, 197-207.
- [12] Hawley, H.F., Gammie, C. F., & Balbus, S. A., 1995: Local Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks. *Astrophys. J.*, **440**, 742-763.
- [13] Laughlin, G., & Bodenheimer, P., 1994: Nonaxisymmetric Evolution in Protostellar Disks. *Astrophys. J.*, **436**, 335-354.
- [14] Nakamoto, T. & Nakagawa, Y., 1995: Growth of Protoplanetary Disks around Young Stellar Objects. *Astrophys. J.*, **445**, 330-336.
- [15] Ohashi, N., Kawabe, R., Hayashi, M., & Ishiguro, M., 1991: Observations of 11 Protostellar Sources in Taurus with Nobeyama Millimeter Array: Growth of Circumstellar Disks. *Astron. J.*, **102**, 2054-2065.
- [16] Goodman, A.A., Benson, P.J., Fuller, G.A., &



- Myers, P.C., 1993: Dense Cores in Dark Clouds. VIII. Velocity Gradients. *Astrophys. J.*, **406**, 528-547.
- [17] Shu, F., 1977: Self-Similar Collapse of Isothermal Spheres and Star Formation. *Astrophys. J.*, **214**, 488-497.
- [18] Ohashi, N., Kawabe, R., Hayashi, M., & Ishiguro, M., 1994: The Nobeyama Millimeter Array Survey for Protoplanetary Disks around Protostar Candidates and T Tauri Stars in Taurus. *Astrophys. and Space Sci.*, **212**, 239-250.
- [19] Hirose, S., Uchida, Y., Shibata, K., & Matsumoto, R., 1995: in preparation.
- [20] Shu, F., Najita, J., Ostriker, E., Wilkin, F., Ruden, S., & Lizano, S., 1994: Magnetocentrifugally Driven Flows from Young Stars and Disks. I. A Generalized Model. *Astrophys. J.*, **429**, 781-796.
- [21] Nakano, T., Hasegawa, T., & Norman, C., 1995: The Mass of a Star Formed in a Cloud Core: Theory and its Application to the Orion A Cloud. *Astrophys. J.*, **450**, 183-195.
- [22] Strom, K. M., Strom, S. E., Edwards, S., Cabrit, S., & Skrutskie, M. F., 1989: Circumstellar Material Associated with Solar-Type Pre-Main-Sequence Stars: A Possible Constraint on the Timescale for Planet Building. *Astron. J.*, **97**, 1451-1470.
- [23] Abt, H. A., 1983: Normal and Abnormal Binary Frequencies. *Annual Review of Astron. & Astrophys.*, **21**, 343-372.
- [24] Ghez, A. M., Neugebauer, G., & Matthews, K., 1993: The Multiplicity of T Tauri Stars in the Star Forming Regions Taurus-Auriga and Ophiuchus-Scorpius: A 2.2 Micron Speckle Imaging Survey. *Astron. J.*, **106**, 2005-2023.