

原始星形成の理論モデル

増 永 浩 彦

〈東京大学気候システム研究センター 〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1〉

星形成過程の初期段階である原始星の形成メカニズムの解明に向けて、近年の観測成果を説明する理論モデルの必要性が高まっています。本稿では、輻射流体力学理論計算による原始星形成モデルを紹介するとともに、観測天体の統計が示す傾向との関連に焦点を当てて議論します。さらに、星なし分子雲コアからクラス 0、クラス I、またフラットスペクトル T タウリ型星といった若い星形成天体が、天体の年齢と観測者に対する見かけの傾斜角度によって分類できることを示します。

1. 原始星形成過程を探る

星が星間分子ガスからどのような過程を経てつくられるのか、という問題は、1970 年前後から 80 年にかけてたくさんの理論モデルが提案されました。Larson¹⁾の仕事が皮切りに、京都大学の成田ほか²⁾をはじめ世界中で活発に星形成過程のモデル計算が試みられましたが、各々の結果が大きく喰い違ってしまい、10 年もの間論争が繰り返されました。しかし、ついに 1980 年に二つのグループ^{3), 4)}が発表した研究により論争に終止符を打たれ、現在に至っています。これらの研究から明らかになった星形成進化の描像は、私自身の計算でも裏付けられているので、後ほど詳しく述べたいと思います。

これらの理論モデルに対応する観測天体は、1980 年の時点ではまだよく知られていませんでした。誕生したばかりの星（原始星と呼ばれます）は、母体となった分子ガスと星間塵の「繭」に深く埋もれているため、星からの可視光放射は周囲の塵に吸収されてしまい、観測者にとってはこの塵が放つ赤外線放射によってしか見えません。赤外線は地球の大気に吸収されやすいため可視光に比べ観測が難しく、とくに遠赤外線（波長が数 10 から 100 ミクロン程度）になると地上からはほとんど観測できなくなってしまいます。

赤外線天文衛星（IRAS）により多数の赤外線点源

が星形成領域に発見されたのは、1980 年代のとくに後半以降のことです。理論モデルで予想されたような、可視光では見えず赤外線で非常に明るい天体すなわち原始星の存在も確認されました。以後現在に至るまで、赤外および電波観測技術の向上と共に、原始星形成現場の観測的理解は飛躍的に高まりつつあります。

90 年代に入って、「クラス 0」カテゴリーの提案⁵⁾が原始星天体の観測に新たな潮流を産み出しました。クラス 0 天体は、可視光はおろか IRAS による赤外線源としても検出されず、絶対温度で数 10 K の冷たいダストで数千天文単位程度の塊として観測されます。このような天体では、直接目に触れるのは「繭」の表面だけなのですが、双極分子流が付随すると言った間接的な証拠から、繭の中心では既に活発な原始星形成活動が行われていると考えられています。一般に星形成天体は、近赤外線から中間赤外線でのエネルギー・スペクトルの形に基づき、クラス I（原始星）からクラス II（おもに古典的 T タウリ型星）、クラス III（弱輝線 T タウリ型星）という進化の系列に分類できることが知られていますが、「クラス 0」という分類はこのクラス I 天体よりもさらに若い、まだ形成途上にある生まれたばかりの原始星を表すという意味で命名されました。

しかし、クラス 0 天体の進化上の位置付けには

まだ疑問が残されています。より進化の進んだと考えられるクラスI天体でも、観測される角度によって星周円盤に原始星本体が隠されクラス0天体として観測されることが予想されます。天体がそのような角度（ちょうどfrisbeeを水平に持って真横から眺めるような角度）にある時を円盤面に対しエッジ・オンと言いますが（図1）、実際に双極分子流の向きから想定されるクラス0天体の角度はエッジ・オンのものが多いという観測的示唆もあります。もしクラス0とクラスIの違いが天体の向きだけで決まるものだとすると、クラス0というカテゴリーは進化段階の指標にはなり得ないことになってしまいます。

原始星形成過程の研究は、上に述べた歴史的経緯から理論側と観測側がすれ違う形で進められて今日に至っています。その両者を統合するためには、1980年にいったん決着した理論モデルを、今日の原始星観測の問題意識に答える形で再構築しなければなりません。具体的には、80年以前のモデルで考慮されていなかったエネルギー・スペクトル（SED）をモデル計算に取り入れ、観測量と直接比較できる形で計算結果を提示することが重要です。そのような理論計算を行うことで、クラス0, I天体のような原始星天体の位置付けを初めて明確にすることができます。この問題意識がまさに私の研究の立脚点であります。本稿では以下に私のモデルの概要と結果を述べ、さらに最新の観測・理論の成果を統合して新たな原始星形成の進化の描像を提案したいと考えています。

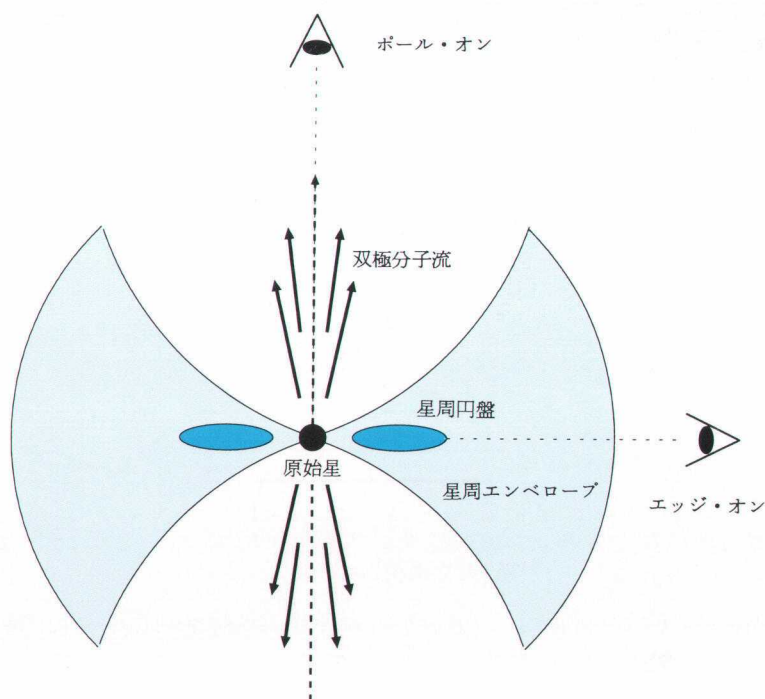


図1 ある原始星天体をエッジ・オンおよびポール・オンで観測する場合の概念図。エッジ・オンで観測すると、星周円盤に隠され中心の原始星は見えません。一方、ポール・オンの場合は原始星まで見通すことができます。

2. 球対称輻射流体力学による原始星形成モデル

2.1 モデルの特徴

まずはじめに、わたしの原始星形成理論モデルの「売り」を紹介します。より詳しくは参考文献6)を参照してください。

- 輻射場と流体が相互作用しつつ進化する系を記述する方程式系（輻射流体力学基礎方程式）をもとにした球対称の数値計算コードを開発しました。数値計算手法としてVariable Eddington Factor法と呼ばれる方法を用いています。この手法では、輻射流体

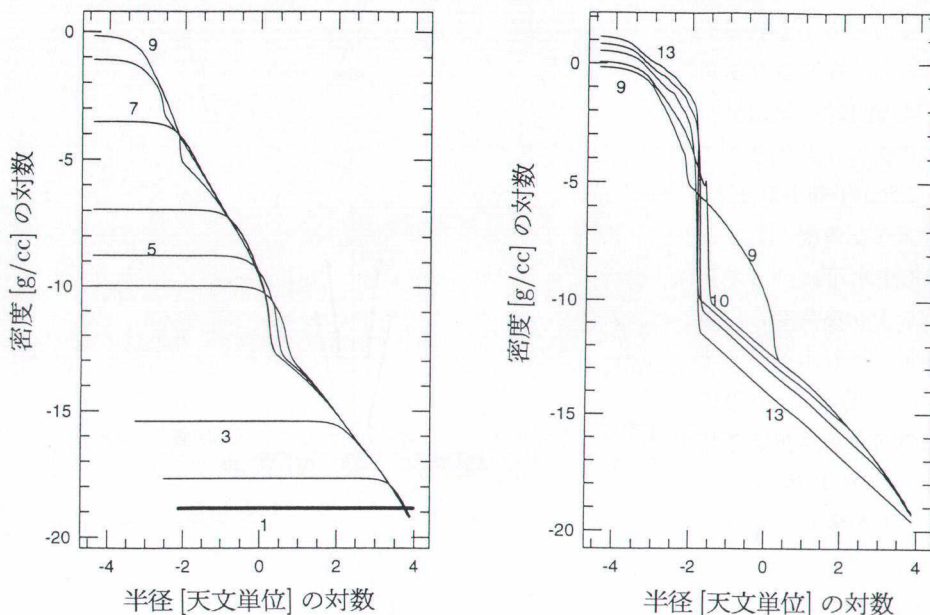


図2 密度分布の時間進化. 左図が進化の前半部 (原始星誕生以前), 右図は後半部を示します. 太線は初期条件です. 各線に振られた番号の順に時間が進みます.

力学基礎方程式群と輻射輸送方程式を別個に解き, エディントンファクター (輻射のエネルギーと輻射圧の比) を介して両者を組み合わせます. この二種類の方程式群を計算上いったん分離することにより, 輻射場を高い精度かつ現実的な計算量で扱うことができるのです.

- 輻射場の周波数依存性も厳密に考慮し, 天体の力学進化と同時にエネルギー・スペクトルの進化を計算で追うことができます. これは, 過去の原始星形成モデル^{1), 2), 3), 4)}では扱われていなかった新しい点です.

これらの特色により, 球対称という制約はあるものの理論的な信頼性と観測との比較可能性という意味で過去に比類のない原始星形成理論モデルの構築が可能になりました.

以下ではいよいよ数値計算結果をもとに理論的に解明された原始星形成のシナリオを紹介します.

2.2 原始星形成のシナリオ

星形成の母体は星間分子雲と呼ばれ, 絶対温度で 10 K ないし数 10 K の冷たい水素分子とヘリウム原子 (と微量なその他の分子や塵など) から成る雲です. 分子雲の中には所々 1 万個 / cc またはそれ以上の高密度の塊 (分子雲高密度コア) が存在し, これらが自己重力により収縮をはじめたときから星形成の進化が始まります (図 2).

計算では, ある一つの分子雲コアを取り出してきてその重力収縮およびその後の進化を追跡します. 分子雲コアの質量は 1 太陽質量で, 大きさは 1 万天文単位, 温度はほぼ 10 K を想定します. 重力収縮による圧縮のためガスは暖められようとしていますが, 収縮開始後しばらく (10 万年ほど) は放射による冷却効率が良いため温度は上がりません. しかし中心部の密度が十分高くなるとガス圧縮熱化率が放射冷却率に追い付き, 中心部の温度は急激に上昇をはじめます (ここで温度が上がり始める条件についても詳しく解析を行いました

が⁷⁾、ここでは割愛します)。温度の上昇により圧力勾配が生じ、重力収縮は減速され、中心部に数天文単位程度の大きさのコアが誕生します。これは第1次コア (first core) と呼ばれ、その大きさや質量は解析的な見積もりによっても裏付けることができます⁸⁾。第1次コア内部の温度が2千度程度まで上がると、水素分子は解離して水素原子となります。この時、重力エネルギーは分子の結合を切るために消費され、熱エネルギーへの変換が十分に行われなくなるため、第1次コアは圧力で支えきれなくなりさらに重力収縮を行います。水素分子の解離がほぼ終了した時点で今度は中心に太陽半径の4倍程度のコアが誕生します (第2次コア)。これが原始星が産声をあげる瞬間です。周囲からは原始星に向かって質量降着が続き、原始星は質量を得て成長していきます。原始星の誕生からおよそ10万年程度の時間が経過して、母体となった分子雲コアの大部分の質量が中心の原始星への降着を終えます。原始星の半径は、質量降着の間ほとんど変化しません。以上の進化の様子は、過去の原始星形成モデルの計算結果^{3), 4)}と良い一致を示しています。

ここで述べた計算は、初期の分子雲高密度コアの密度分布が一樣であると仮定して行われたものです (以下、これを初期一樣モデルと呼びます)。実際は、実在の分子雲コア内部の密度分布がどうなっているかを観測から決定することは、難しい問題です。星形成を起こす分子雲コア (以後、星形成コアと呼びます) がどのようにしてつくられるかという理論モデルは、次のようなシナリオが提案されていますが実は良く分かっていません。たとえば、磁場により支えられた分子雲コアが中性粒子のすり抜けによって準静的に収縮し、充分中心密度が高くなったとき力学進化を開始し星形成が始まる⁹⁾といったものや、乱流により支えられていた分子雲コアが乱流の散逸と共に準静的に収縮し、ある時点で重力不安定となって力学的収縮をはじめ¹⁰⁾

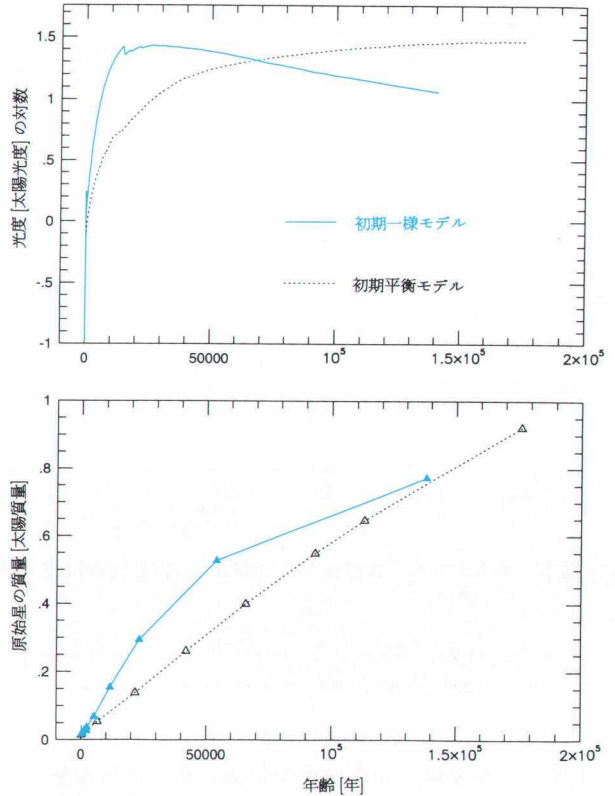


図3 初期一樣および初期平衡モデル各々の光度曲線(上図)と原始星の質量の時間進化(下図)。

といったシナリオが考えられます。このような「自発的な」星形成シナリオでは、力学的収縮が始まるまで分子雲コアがほぼ平衡形状を保ちつつ進化してくるので、密度分布は一樣よりむしろ力学平衡に近い星形成コアが実現されると予想されます。

そこで、密度分布が重力に対しほとんど平衡であるような初期条件で計算をはじめたケース (初期平衡モデル) も試してみました。その結果は、力学進化の様子は上に述べた初期一樣モデルの場合とほとんど変わらないことを確認しましたが、面白いことに天体の光度の時間進化 (光度曲線) ははっきりと異なる振る舞いを示すことを見いだしました。

図3は、初期一樣モデルおよび初期平衡モデルそれぞれの光度曲線と中心に誕生した原始星の質量の進化を並べて示したものです。初期一樣モデ

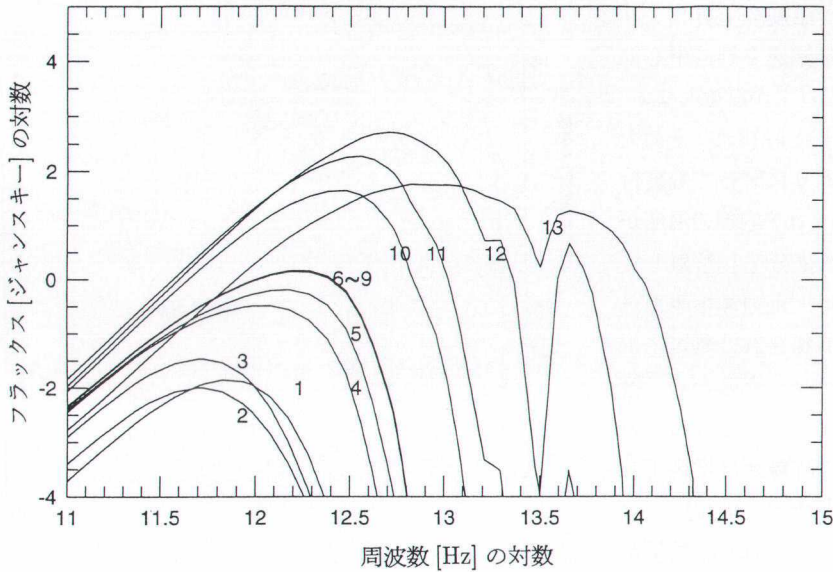


図4 エネルギー・スペクトル (SED). 各線に振られた番号は図2中の番号に対応しています。

ルでは、光度は原始星誕生直後に25太陽光度まで上昇し、以後徐々に減少していきます。一方初期平衡モデルでは、光度は終始単調に緩やかな上昇を示すのみです。この違いの原因は、以下のように説明することができます。

初期一様モデルでは、初期条件は力学的に平衡状態ではなく、内向きに勢いをつけて重力収縮を開始していることとなります。このため、原始星誕生時やや大きめの質量降着率が実現されます。このため、原始星誕生直後原始星の質量は急激に成長しますが、その分すぐに星周エンベロープ中の降着物質が枯渇してしまうため、質量降着率（言い換えると原始星の成長率）は時間と共に鈍っていきます（図3の下図参照）。原始星天体の光度は、降着物質の重力エネルギーの解放が担っているので、質量降着率が大きい原始星誕生直後では光度が一気に上昇するものの、降着物質の枯渇と共に光度は次第に減少します。一方初期平衡モデルでは、収縮はほとんど勢いを持たずにそっと始まります。そのため、初期一様モデルよりは小さめの質量降着率しか得られません。結果として原始星誕

生直後の急激な光度の増加は見られませんが、そのぶん降着物質はすぐには枯渇しないため、光度は原始星の成長と共に単調に増加を続けます。

一様と平衡という星形成コアの密度分布の違いが、原始星の光度曲線に正反対の結果をもたらすことが分かりました。では観測天体が示す光度の傾向は、このどちらのモデルを支持するでしょうか？ 原始星の年齢

と観測天体の対応をつけるために、次にエネルギー・スペクトルの計算結果を見てみましょう。

2.3 エネルギー・スペクトル (SED)

前節で述べた力学進化にともなうエネルギー・スペクトル (SED) の進化を図4に示します。収縮初期から原始星誕生の直前まで（図中の番号1から9）は、エネルギー・スペクトルは10Kから数10Kに相当する低温成分のみ（スペクトルのピークで 10^{12} Hz前後）を示しますが、原始星形成直後（10番以降）からより高周波成分が次々と現れます。とくに後期段階（12, 13）では近赤外フラックスも現れています。このように計算で得られたエネルギー・スペクトルの進化は、観測で見られる星なし分子雲コア（図中番号9以下）からクラス0（10, 11）、クラスI（12）へ連なるスペクトルの進化を良く裏付けていると言えます。エネルギー・スペクトルはボロメトリック温度¹¹⁾という定量的な指標に焼き直すことができますが、これを使うとクラス0天体の観測スペクトルに合致する天体は、私の計算の中では原始星誕生後2万年よ

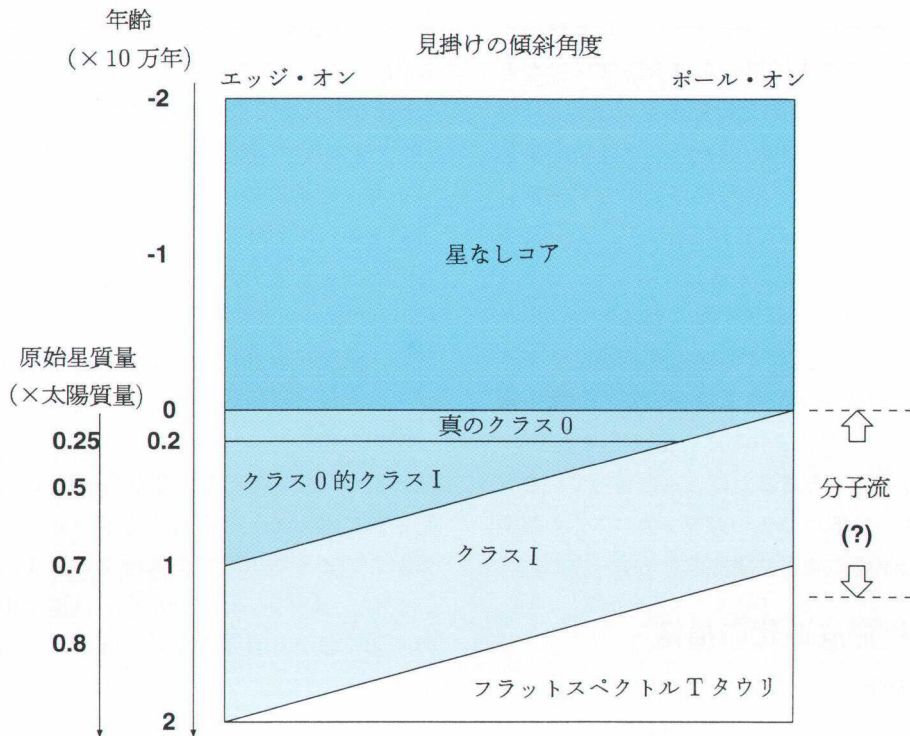


図5 若い星形成天体の分類図。縦軸は時間（と原始星の質量）、横軸は天体の観測者に対する見掛けの傾斜角度を表します。

り若い天体であることが分かりました。従来近赤外の観測で知られていた原始星（クラスI）の典型的な年齢が10万年であることと比べると、クラス0天体はこれより一桁若いこととなります。クラス0天体の年齢については、これまでは非常におおざっぱな見積もりで1万年程度と考えられてきましたが⁵⁾、ここで初めて詳細な理論計算により裏付けることができました。

クラス0天体の2万年という年齢は、図3の光度曲線に立ち返ると初期一様モデルではちょうど光度が最大値に達している時期に対応します。すなわち、原始星はクラス0段階で非常に明るい時期を迎え、その後クラスI段階に向けて徐々に暗くなっていきます。一方初期平衡モデルでは光度は単調に増加するので、この場合クラスI天体はクラス0天体より明るくなくてはいけません。一方、

観測天体はどのような傾向を示すかということ、クラス0天体の平均光度は5.7太陽光度¹²⁾、一方クラスI天体の平均光度は1太陽光度程度¹³⁾です。すなわち、観測事実は統計的にクラス0からクラスIに向けて暗くなっていることを示唆しています。私の初期一様モデルではこの観測的傾向を再現しますが、初期平衡モデルでは逆の結果になってしまいます（ここで初期密度分布が「一様」であることに強い意味はなく、むしろ収縮が始まる際に分子雲コアが力学平衡に近かったか否かが重要です）。すなわち、星形成を起こす分子雲高密度コアは、典型的に力学平衡にはないという結論に達します。

この結果は何を意味しているのでしょうか？星形成コアは、総じて「自発的」に作られたとは言えないことを示唆しています。それでは、どのよ

うなプロセスで星形成コアが生まれるのでしょうか? 「自発的星形成」シナリオに対し、分子雲が近傍の超新星爆発や星風からの衝撃波圧縮などによってフィラメントさらには分子雲コアへと分裂し、これが星形成をはじめるとする「外発的星形成」の考え方に従うと、星形成コアが力学平衡にないことはむしろ自然かも知れません。また、乱流の散逸とともに分子雲コアが進化するシナリオでは力学平衡に近い星形成コアが生まれると先に述べましたが、もし分子雲コア全体の構造を乱すような大きな乱流の渦が支配する場合には、力学平衡にない星形成コアが生まれることも考えられます。しかし、実際のところはまだほとんど判っていないのが現状です。星形成コアの形成メカニズムの解明は、まだまだ今後の発展に期待されるテーマです。

3. 原始星形成進化の描像

私の計算は球対称を仮定しているために、中心星からの放射がエッジ・オンの円盤に隠されるといった非球対称的な効果は、あらためて検討する必要があります。そこで私の球対称計算結果に加えて、予想される非球対称効果も考慮にいれ、さまざまな観測天体を統一的に説明する原始星の進化の描像を提案したいと思います。

図5は、天体の年齢と観測者に対する見掛けの傾斜角度をそれぞれ縦横の軸として、原始星およびさらに若い星形成天体の分類を試みたものです。縦軸で時間が0と記された位置は、ちょうど原始星が誕生した瞬間を表します。それ以前(時間軸の負の値)は、星形成コアが重力収縮をはじめたもののまだ中心に原始星が誕生していない段階で、「星なしコア」として観測されている天体に相当します。一方、時間が正の値に突入した時点から、同じ年齢の天体でも観測者から見た傾斜角度によって異なった外観を呈します。球対称の計算結果からは、2万年より若い天体はクラス0天体として観測されることは上に述べた通りですが(「真のクラス0」)、より進化の進んだ天体でも傾斜角度がエッ

ジ・オンに近い場合は、原始星本体は円盤の陰にかくれあたかもクラス0であるかのように観測されるはず(クラス0的クラスI)。実際に観測で知られるクラス0天体は、「真のクラス0」と「クラス0的クラスI」の混成体であると考えられます。

一方、原始星の星周エンベロープは一般に回転運動を伴っており、回転軸に沿った方向(すなわち円盤面と垂直方向)は遠心力によりガスが拭き払われてスカスカになっていると予想されます。同時に、原始星天体には回転軸に沿って放出されるガスの流れ(双極分子流)がしばしば付随することが知られており、回転軸方向はさらにきれいに拭き払われているだろうと考えられます。すると、回転軸に沿って上から天体を覗き込んだ場合(天体がこのような角度にある時をポール・オンと言います)、エッジ・オンの場合とは逆に中心の高温の原始星はより見えやすくなります(図1参照)。そのため、ポール・オンで観測される天体は球対称計算結果に比べ比較的早い段階でクラス0からクラスI的な天体に移行するだろうと思われれます。以上に述べた議論を総合すると、図5ではクラスIとクラス0の境界線は斜めに走ることになります。

「真のクラス0」に相当する若さを持ちながら極度にポール・オンであるか極方向に大きく抜けた空洞を持つ天体は、クラスIとして観測されるかもしれません。実際L1551IRS5という有名なクラスI天体は、高い光度(30太陽光度)をもつ一方で推定される原始星質量が小さい(0.1太陽質量程度)ため¹⁴⁾、進化段階としては非常に若い「真のクラス0天体」がクラスI天体として観測されている珍しい例である可能性があります。

進化が進んで星周エンベロープが消失しつつあるクラスI天体では、ポール・オン方向には中心の原始星から可視光も抜け出せるようになり、原始星ではなくTタウリ型星として観測されるはず(「フラット・スペクトルTタウリ型星」が有力候補だと考えています。フラット・スペクトルTタウリ型星とは、通常の

Tタウリ型星よりも近赤外線フラックスが強いため、近赤外域のエネルギー・スペクトルが平坦な形状を示す天体です。従来はこの近赤外線超過の原因は謎とされていたのですが、近年の観測と理論から、フラット・スペクトルTタウリ型星は原始星からTタウリ型星へと進化しつつある過渡的な天体であることが明らかになってきました。

図5の中で、各領域の面積の大小はそのままそれぞれの天体が観測にかかる数の多少を表しています。このことを利用して少し大胆に想像力を働かせてみると、原始星が進化の途上で分子流を吹き出す期間を推定することができます。観測の統計から、クラス0天体の100%とクラスI天体の75%には分子流が付随していることが知られています¹⁵⁾。分子流は原始星誕生の瞬間から吹き出すと考えると¹⁶⁾、図5でクラス0の領域すべてを覆い、かつクラスIの領域の75%をカバーするためには、分子流は原始星誕生からおおよそ13万年程度吹き続けるとすると観測を説明することができます。もちろん、ここで試みた推定は分子流が天体の個性に無関係に定常的に吹き続けることを暗に仮定しており、この仮定の真偽は分子流の駆動原理についてより詳しい理論と観測の研究を待たねばなりません。

図5の縦軸(年齢)は球対称計算による定量的な裏付けに基づいていますが、横軸(傾斜角度)は現在の知識ではあくまで推測に過ぎません。図5を横軸を含めて定量的に精密化するためには、原始星形成過程を多次元輻射流体力学理論計算で追跡することが不可欠です。そのような計算は、技術的に難しい上に膨大な計算量を要求され、とても一朝一夕に解決できる問題ではありません。しかし、非常に重要かつ興味深いテーマでありますし、10年20年後を見据えた将来課題として今後の成果を期待したいと思います。

本稿は、私の博士学位論文⁶⁾の内容に基づくものです。公務にご多忙な傍ら指導教官を務めていただいた国立天文台観山正見教授に深くお礼申し上げます。

げます。また、生意気な若僧に懲りずにお付き合いいただいた国立天文台犬塚修一郎助手には大変お世話になりました。どうもありがとうございます。また、貴重なコメントをいただいた中野武宣教授、百瀬宗武氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Larson R., 1969, MNRAS 145, 271
- 2) Narita S., Nakano T., Hayashi C., 1970, Prog.Theor.Phys. 43, 942
- 3) Winkler K.-H., Newman M.J. 1980, ApJ 238, 311
- 4) Stahler S.W., Shu F.H., Taam R.E., 1980, ApJ 241, 637
- 5) Andre P., Ward-Thompson D., Barsony M., 1993, ApJ 406, 122
- 6) 増永浩彦, 1999, 博士学位論文(東京大学)
- 7) Masunaga H., Inutsuka, S., 1999, ApJ 510, 822
- 8) Masunaga H., Miyama S.M., Inutsuka S., 1998, ApJ 495, 346
- 9) たとえば Shu, F.H., Adams, F.C., Lizano, S., 1987, ARAA 25, 23
- 10) Nakano T., 1998, ApJ 494, 587
- 11) Myers P.C., Ladd E.F., 1993, ApJ 413, L47
- 12) Gregersen E.M., et al., 1997, ApJ 484, 256
- 13) Kenyon S.J., et al., 1990, AJ 99, 869
- 14) Momose M., et al., 1998, ApJ 504, 314
- 15) Mardones D., et al., 1997, ApJ 489, 719
- 16) Tomisaka K., 1998, ApJ 502, L163

A Theoretical Model for Protostar Formation

Hirohiko MASUNAGA

Division of Theoretical Astrophysics

National Astronomical Observatory

Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

*Present address: Center for Climate System Research,
University of Tokyo*

Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo 153-8904

Abstract: A theoretical model which accounts for recent observations is required for investigating the mechanism of protostar formation. In this article we introduce a radiation hydrodynamical model for protostar formation and discuss on the relations between our computational results and statistical trends in observations. Furthermore, we show that the early young stellar objects such as star-less cores, class 0 and class I objects, and flat-spectrum T Tauri stars are categorized in terms of the age of the object and its inclination angle to an observer.