

太陽系星雲の形成と進化

渡邊 誠 一 郎*

赤外線および電波による星形成領域の観測が進み、それに触発されて太陽系の形成と進化の研究がおおいに発展すべき時期にきている。ここでは理論的研究の立場から太陽系形成論の現状を紹介する。

1. 従来の太陽系進化論

最近になるまで太陽系の形成期を知る手がかりは、地上に落下した隕石だけだった。太陽系が形成されたのは今から約 46 億年前と推定されているが、これはもっとも始源的な隕石の固化年代から求められた(文献 1)。一方、地球上には 40 億年より古い岩石は存在しない。これは、地球などの大きな天体に比べ、隕石は短期間で冷え、形成時の記憶を保持しているためである。したがって、隕石を調べれば形成時の様子がわかると思える。ところが、太陽系は数千万年より短い時間の間にほぼ現在と同じような姿にまで進化したと考えられる。従って隕石に残された情報から形成期の太陽系の進化の様子を復原することは、ちょうど 1 年前のある 1 日の出来事を記憶をたどって思い出すことと同じでたいへん難しい。

手がかりが少なければ理論的研究の発展も遅くなる。1970 年代に至るまで、太陽系形成に関しては、物理的な矛盾のない一貫したシナリオはなく、個々の物理プロセスに関する定量的な議論もほとんど無かった。

1970 年代になって、星の構造と進化の解明、月・惑星探査の成功、隕石研究の進展といった要因が重なって、太陽系進化の理論的研究も本格化した。いくつかの理論が提出されたが、次の基本線に関してはほぼ共通している。

- (1) 惑星系と太陽は同一の星間分子雲の収縮により形成された。
- (2) 星間分子雲の比較的大きな角運動量を持った部分が太陽の周囲を回るディスク状の星雲(太陽系星雲)をつくりそこから惑星がつけられた。
- (3) 固体物質からなる多数の小天体が衝突合体して成長し惑星となった。

日本では、京都大学の林志四郎を中心としたグループが「京都モデル」と呼ばれるシナリオを提出した。

そこでは、理論的解明の主眼は惑星の成長過程におかれた。モデルの発出点となる太陽系星雲の質量分布に関しては、現在の各惑星の固体質量をそのまわりの空間に

なめらかにばらまき、その分布から元素の宇宙存在度をもとにガスの量を復原して与えられた。[こうすると太陽系星雲の全質量は現在の太陽質量 (M_{\odot}) の 0.013 倍となる。] この星雲は太陽のまわりをほぼケプラー回転していて、質量比で 1% 程度のダストを含んでいるものとした。この初期状態を出発点として惑星の形成過程が調べられた。形成のシナリオの要点をまとめると次のようになる(文献 2)。

- (1) 平均サイズが $1\mu\text{m}$ 程度のダストが衝突合体して直径 1 cm 程度まで成長し星雲の中心面に沈殿する。沈殿に要する時間は $10^8 \sim 10^4$ 年である。
- (2) 厚みの薄くなったダスト層が重力不安定により分裂、微惑星を形成する。その質量は地球軌道付近で約 10^{18} g, 数は太陽系全体で約 10^{10} 個である。
- (3) 微惑星が重力相互作用により合体成長して月サイズの原始惑星となる。この程度の大きさになると周囲の星雲ガスを引きつけ大気として身にまとうようになる。
- (4) 外惑星領域では原始惑星の質量が地球質量の 10 倍を越えるまで成長する。すると大気が自重を支えられなくなり惑星表面へと落ち込んでしまう。こうして外惑星には大質量の $\text{H}_2\text{-He}$ 大気が形成される。内惑星領域では材料不足で、惑星は大気が不安定になるほどの大きさまで成長できない。
- (5) 太陽系星雲が惑星を残して散逸する。内惑星の表面の $\text{H}_2\text{-He}$ 大気も散逸し、衝突脱ガスによる生じた CO_2 , H_2O を主成分とする 2 次大気におきかわる。

しかし、このシナリオには次のような問題点が含まれている。

- (a) ダスト層が重力不安定を起こすほど薄くなるためには、太陽系星雲はたいへん静かでなければならない。z 方向の流れの速度が数 cm/s 程度を越すとそこまで沈殿しなくなる(文献 3)。
- (b) 惑星の成長時間は、太陽からの距離の約 3 乗に比例するため、海王星領域まで行くと太陽系の年齢を越えてしまう。
- (c) 太陽系星雲散逸の定量的な議論が行われていない。散逸のメカニズムに関しては原始太陽の紫外線や太陽風により吹き飛ばしや、星雲表面でのケルヴィン・ヘルムホルツ型不安定や木星による摂動による太陽への落ち込み等が提案されたが定性的議論に

* 山形大 理 Sei-ichiro Watanabe: Formation and Evolution of the Solar Nebula

とどまっている。

これらの疑問に関しては、モデルの枠のなかで答が見つかると可能性は少ない。星間分子雲からの収縮により、本当に最初に仮定された星雲の状態に至るのかということを確認する必要がある。仮定された星雲の質量は、現在ある惑星系をつくるための最低必要量であって、これより重くても余った質量が太陽に落ちるか系外に去ったかすればよい。質量分布に関しても、現在の惑星の質量から一意に〈京都モデル〉のものに決まるわけではない。

こうした疑問に答えるためには、太陽系星雲を単に惑星の成長環境としてだけでなく自体の進化をも含めてきちんと考え直す必要がある。

2. 見えてきた太陽系星雲

現在の太陽系に残された情報だけから46億年前の形成期の様子を知ることは難しい。ところが目を太陽系の外に向けて、近くでは、おうし座やへびつかい座にある星間分子雲の中で太陽のような恒星が生まれつつある。それらの恒星のまわりで惑星系もまた造られつつあると考えるのが自然だろう。いろいろな進化の段階にある惑星系を詳しく観測できれば、太陽系がいかに造られたかが明らかになるだろう。

近年になって赤外線や電波の観測からこうした星形成領域の様子がしだいにわかるようになってきた。主な例は、(a)赤外線天文衛星(IRAS)による生まれて間もない原始星の網羅的観測、(b)分子(^{12}CO など)の輝線スペクトルの観測による高速分子流の発見、(c)ミリ波干渉計による分子雲コア中心部の詳細観測(分解能数百天文単位)、などである。さらに、おうし座T型星とよばれる原始星から少し進化した若い星々は、スペクトルの形が黒体スペクトルに比べ異常で、赤外の波長域での放射強度が過剰である。このことは、表面温度約3500Kの中心星の周囲を自ら熱を出すダストの雲が薄い円盤状にとりまいておるとすれば説明できる。雲が自ら光るのは、ガスが中心に向かって螺旋を描きながら落ち込み重力エネルギーを解放しているためである。

こうした観測はまさに前節の太陽系星雲が実際にできつつある現場をとらえていると考えられる。それまではまったく理論上の産物でしかなかった太陽系星雲の存在が捉えられたということは、今の太陽系形成論が大筋において正しい方向に進んでいることを確認させるもの

だ。一方、高速分子流に代表されるようにそれまで理論が予想すらしなかった重要な現象も、観測により確認されている。したがって、これらの観測を基に太陽系形成の初期、太陽系星雲の進化の研究が本格化すると期待されている。

以下の節では、太陽系星雲の形成と進化に関してどこまでわかってきているかを紹介する。

3. 太陽系星雲の形成

まずここでは、原始太陽と太陽系星雲がどのようにしてできあがったか考えてみる。

星は星間分子雲で造られる。例えば太陽にもっとも近いおうし座分子雲は質量が約 $10^4 M_{\odot}$ で現在活発に若い星を生み出しつつある。電波観測から分子雲はボコボコした密度分布をしていて、特に濃い部分が点在していることがわかった。それらの部分はコアと呼ばれ質量は $1\sim 10 M_{\odot}$ 、広がりや0.5光年程度、温度は約10Kと推定されている。原始星はこのコアから生まれる: 実際コアの約半数は中心部に赤外点源を伴っている。

分子雲コアは、寿命が自由落下時間の10倍以上と推定されている。これは、収縮させようとする重力の働きを妨げる何らかの力があることを示している。この力は——コアの形が磁力線方向に平たいという観測結果から——磁場の力と考えられる。ガスの大部分を占める中性粒子(H_2 や He)は磁力を直接は感じないが、磁力線に捉えられた少数の荷電粒子とぶつかることで間接的な作用を受ける。そのため、自由落下は妨げられ準静的に収縮していく。

準静的収縮が進むと、ガスは中心部から自由落下を始める。これは、収縮により密度分布が r^{-2} 分布(中心からの距離 r の2乗に反比例する分布)に近くなり、密度の高い中心付近では重力が強くて磁場の力では支えられなくなるからである。こうして、内側が落ち始めるとそれに続いて外も落ちていくという具合で、自由落下を開始する領域は外に向かい音速(C_s)で球状に広がる。その結果単位時間に中心に落下する質量(質量フラックス: F_0)は常にほぼ一定となる。アメリカのシュール(Frank Shu)等によれば(文献4)

$$F_0 = 0.975 C_s^3 / G \quad (1)$$

と表される。中心付近に達し濃くなったガスは光を通しにくくなり、その温度は断熱的に上昇する。その結果、中心圧力の急増により圧力勾配と重力が釣りあい、落下してきたガスは止められる。この新たな平衡状態が原始太陽である。原始太陽は、今の太陽のように核エネルギーで光っているのではなく、落下してくるガスの解放する重力エネルギー($GM_s F_0 / R_s$: M_s と R_s は原始太陽の質量と半径)で光っている。

* ここでダストの雲と呼ぶ意味は、観測される赤外線はおもに μm 程度の大きさのダストが放出しており、ガスの存在を示す直接的な証拠はないためである。ただし、一般には宇宙の平均的な元素存在度にしたがって観測されるダストの100倍近い質量のガスがあるものと推定されている。

では太陽系星雲はどのように形成されたのだろうか。それは、ガスの角運動量について考えることで明かになる。角運動量 ($r^2\Omega$: Ω は回転角速度) は、磁場中を静々と収縮している間は (アルフヴェン波によって) 散逸するが、自由落下に移った後はほぼ保存される。その結果、角速度 (Ω) は増し (スピニアップ)、それに応じて遠心力 ($r\Omega^2$) も増大する。もし原始太陽表面に落ち込む前に遠心力と重力のつりあいが達成されてしまうと、ガスは太陽に直接加わることができずそのまわりを回ることになる。自由落下前の星間雲コアは—— Ω を一定にしようとする磁場の働きで——外側のガスほど大きな角運動量を持っていた。したがって外側のガスは、後から降ってきて原始太陽のまわりにディスクを造る。これが太陽系星雲である。

しかし、後から降ってきたガスが全て太陽系星雲に加わってしまうと太陽は軽く星雲は重くなってしまう。何らかのプロセスで、いったん星雲に降りつもったガスが原始太陽へと運ばれたはずである。

このメカニズムを調べるために、4節でまず太陽系星雲の安定性について議論し、次に5節で星雲の内部状態を考える。

4. 太陽系星雲の安定性

太陽系星雲のガスは質量 M_s の太陽のまわりをほぼ円ケプラー運動している。その回転角速度は $\Omega(r) = \sqrt{GM_s/r^3}$ と表わされる。

まずこの状態の星雲の自己重力に対する安定性を調べてみる。太陽から距離 r での星雲の、厚さを h 、平均密度を ρ 、回転角速度を Ω とする。太陽がなければ星雲は自己重力 ($\sim G\rho h^2/h^2$) で半径 h 程度の部分ごとに分裂する。太陽は潮汐力 ($\sim \Omega^2 h$) を及ぼしてこれを阻止する。したがって、星雲の自己重力が太陽の潮汐力に打ち勝つのは $G\rho < \Omega^2$ となるときである。この関係は局所的な条件であるが一つの目安として星雲全体の質量 ($M_a \sim \rho \pi R^2 h$) で書き直すと

$$Ma > \sqrt{2}(h/R)M_s \quad (2)$$

となる (ただし R はディスクの半径、ファクター $\sqrt{2}$ はより正確な見積り)。すなわちディスクの重みが増し、原始太陽との質量比が厚みと半径の比を越すと、星雲は自己重力不安定となる。

少し別の角度から自己重力不安定を見てみよう。太陽系星雲の中を伝わる波動に <音波> がある。この <音波> は、十分短い波長では地上でわれわれが発するのと同じふつうの音波だが、波長が長くなるにつれ自己重力の影響でふつうとはずれてくる。星雲の質量が条件式 (2) を越えるとこの <音波> は h 程度の波長で不安定化し、もはや波動ではなく振幅が (少なくとも初期

の間は) 指数関数的に増幅するようになる。すなわちガスの圧縮された部分が一方的に収縮してしまうようになる。これが自己重力不安定である。

実は星雲の質量が上述より軽くても別の種類の不安定が有り得る。その一例がシア不安定である。この不安定もまた <音波> を通して理解できる。星雲は太陽のまわりを中心に近いところほど速く回転している。今、半径に比べ十分短い波長を持つ <音波> に対しては、この回転流はシアを持つ平行流とみなせる。これを <主流> と呼ぶことにする。さて、<音波> の位相速度と <主流> の流速が一致する半径が存在する。線形解析をするとわかるが、半径方向に伝わる <音波> はその半径まで達することができずその手前で反射される。この反射の際、波の振幅が増大する。一見するとエネルギーが保存していないように思えるが、実は増幅された分だけ <主流> の方がエネルギーを失っていてつじつまがっている。この増幅され反射された波が再び星雲の縁で (通常) 反射され戻ってくるとあとは繰り返して振幅が増大する。ここで注意すべきはシア不安定は (自己重力不安定とは違って)、星雲の縁での波の反射率に大きく依存するため、実際の星雲での不安定の成長率がきちんとわからないということである。ただし仮に反射率を1としても成長率は重力不安定に比べかなり小さい。

このほか、従来は熱対流による不安定が考えられていたが原始太陽による星雲表面の加熱などを考えるとその維持は困難である (文献 5)。

したがって、ディスクの質量が条件式 (2) を越えると不安定の成長率は急増するが、(2) を越えないと安定かあるいは不安定でも成長率は小さい。

5. 太陽系星雲の内部状態

ある平衡状態が不安定であればその状態は実現されない。ではどういう状態になるかという疑問に答えるには非線形解析をしなくてはならない。しかし、太陽系星雲中の不安定に関しては今のところきちんとした答は得られていない。ここでは最終的な状態が、時間空間的に平均するともとの不安定な平衡状態からあまりずれないような状況が実現されると仮定しよう。この状況では、不安定により <主流> から渦 (ゆらぎ) へと受け渡されたエネルギーは、非線形効果で次第に小さい渦へと移され最終的に分子粘性で熱となる。つまり、定常乱流が実現されている。すると <主流> にはたらく実効的な粘性 (ν_t : 乱流粘性) は不安定の最大成長率 n_s とその波数 k_0 から

$$\nu_t = n_s k_0^{-2} \quad (3)$$

と書ける (文献 6)。

星雲が乱流状態にあり、実効的な粘性 ν_t が生み出さ

れているものとする。このとき、星雲中の質量フラックス F_{as} は定常状態で

$$F_{as} \equiv 2\pi r \Sigma v_r = 3\pi \Sigma v_e \quad (4)$$

と表される。ただし、 v_r は r 方向速度で、 Σ は星雲の面接度 (単位面積をもつ、ディスクに垂直な円柱に含まれる質量) である。乱流星雲中では、(4) 式で与えられる割合でガスが太陽へと落ち込んでいる。

こうして、いったんディスクに加わったガスは太陽へと運ばれ、太陽は成長してゆく。

6. 太陽系星雲の進化

以上の考察のもとに太陽系星雲の進化を考えてみる。

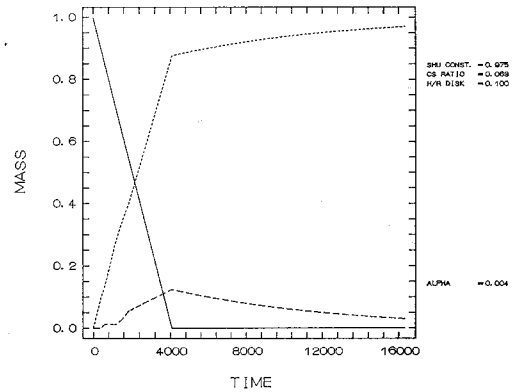
一様回転する分子雲コア、厚みの薄い ($h/r=0.1$ とする) ディスク状の太陽系星雲、および半径が一定の原始太陽という 3 つの構造だけからなる単純なモデルをつくり進化の様子を探った。分子雲コアからは (1) 式の F_0 の割合で質量が供給される。供給された全質量が $1M_\odot$ になったら F_0 を 0 とする。星間雲からの質量フラックスは一部が原始太陽に直接落ち込み、残りは太陽系星雲に降り積もる。太陽系星雲から原始太陽へは (4) 式の F_a の割合で質量が供給される。(4) 式中の v_e は (3) 式で与えられる。(3) 式中の n_s に関してはシア不安定の最大成長率を標準値として使い、(2) 式が満たされるときはさらに自己重力不安定の成長率を加えた。ただしシア不安定に関しては 4 節で述べたように成長率に関しては不確定な要素があり、またそれ以外の不安定の寄与もあり得るから、標準的な場合 (ケース a) のほかにその成長率を 5 倍した場合 (ケース b) と 1/5 倍の場合 (ケース c) とを調べた。

分子雲コア、太陽系星雲、および原始太陽の質量変化を示したのが図 1 である。それぞれ、実線、長い破線、および短い破線で示してある。横軸は時間で、ディスクの最終的な半径 R での回転角速度 Ω の逆数を単位としている。例えば $R=100$ AU なら単位時間は 160 年となる。縦軸は質量で M_\odot を単位としてある。この図から次の 3 つの段階があることがわかる。

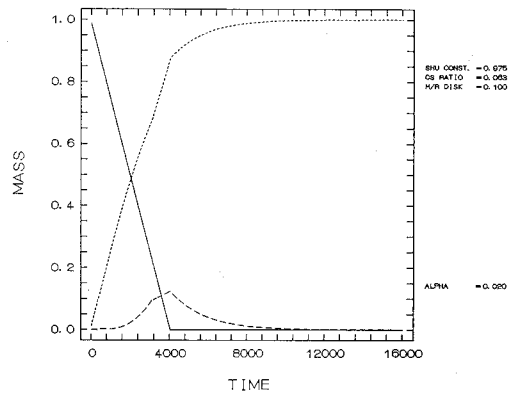
原始太陽形成期 初期は太陽への直接降り積もりが効き、またディスクの質量輸送も速やかなため $M_s \gg M_a$ となり太陽系星雲は自己重力不安定に対し安定である。

自己重力不安定期 M_a はほぼ自己重力不安定の安定不安定の境界値 [(2) 式の右辺の値] をとり M_s に比例して増加する。これは、 M_a が境界値を越えると F_{as} が急増し M_a を減らし、逆に境界値を割り込むと F_{as} が小さくなり M_a は回復するというフィードバックが効くためである。

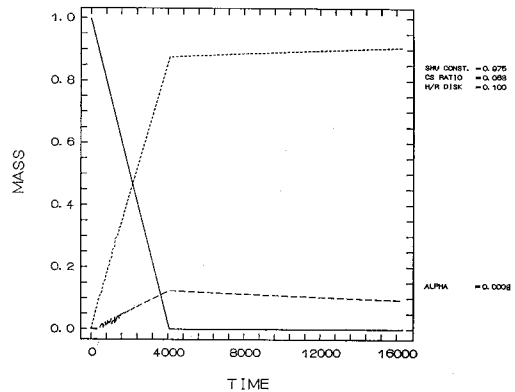
散逸期 分子雲コアからの降り積もりがなくなると、



(a)



(b)



(c)

図 1 太陽系星雲形成期の質量変化。実線、長い破線、および短い破線がそれぞれ分子雲コア、太陽系星雲、原始太陽、の質量を表わす。

- (a) 標準的なシア不安定の成長率の場合。
- (b) 標準値の 5 倍の場合。
- (c) 標準値の 1/5 倍の場合。

M_a は減少しディスクは重力不安定に対し安定化される。その後は、ディスクの質量は指数関数的に減少する。質量減少のタイムスケールはシア不安定の強さに応じ、 R^2/ν_c で決まる。

この単純化モデルからは、進化の全ステージでディスク質量が原始太陽の質量の 10% 程度以下に抑えられると結論できる。これは、原始星やおうし座 T 型星のまわりで観測されるディスクの推定質量とよく一致する。

ただし、以上の考察の大前提は星雲の不安定は（自己重力不安定も含め）全て乱流につながる（5 節参照）ということにある。これを確かめるにはいろいろな不安定が非線形効果でどのような最終状態に至るのかを明らかにする必要がある。

また、供給された質量がちょうど $1M_{\odot}$ となったとき分子雲コアからの降り積もりを止めるのも恣意的である。降り積もりのフラックスが（1）式からずれるのは

いかなる要因によるのか、恒星の質量はいかに決まるのかを明かにしなくてはならない。

これら古くて難しい問に答えることが太陽系の初期進化を理解するためには不可欠である。

参考文献

- 1) 小嶋 稔, 齊藤常正編, 岩波講座地球科学 6 地球年代学, 1978, 第 2 章.
- 2) Hayashi, C., Nakazawa, K., and Nakagawa, Y., 1985. In *Protostars & Planets II*, pp. 1100. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- 3) 鶴山正見, 天文月報, 82, 201.
- 4) Shu, F. H., Adams, F. C., and Lizano, S., 1988 *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 25, 23.
- 5) Watanabe, S., Nakagawa, Y., and Nakazawa, K., 1990. *Ap. J.* 358, 282.
- 6) Canuto, V. M., Goldman, I., and Chasnov, J., 1988. *Astron. Astrophys.* 299, 291.

☆ ☆ ☆

天体観測専門誌

天文ガイド

7月号 定価620円(税込み)

6月5日発売

アメリカのアリゾナ州

世界最大の電波干渉計

宇宙の果てからどんな情報が送られてくるか

今月より連載

ソフトを使った望遠鏡の設計

7月の主な天文現象

海外では皆既日食

国内では7月27日に土星が衝

■ 7月の星空 ■ 7月の天文現象観測資料 ■ 観測ガイド (流星ガイド・彗星ガイド・惑星ガイド・惑星の衛星ガイド・小惑星ガイド・星食ガイド・小惑星の食ガイド・接食ガイド・人工天体ガイドほか)

定価は税込みです

企画・構成 藤井旭
好評発売中
定価850円

天体観測野帖 1991 1992 1993年版

1991年から1993年にかけての天文現象のデータ集です。火星地図、木星、土星のスケッチ用紙、月面地図、流星観測用星図、黄道光、対日照、新星観測星図、星雲・星団用星図の観測資料集。

最新刊発売中
藤井旭著
定価600円

藤井旭の天文年鑑 1991年度版

天文年鑑のジュニア版です。初めて星空をながめ、星の名前や星座の形を覚えたい人のためにも役立つように構成。1991年4月から1992年3月までの星空の移り変わりを月ごとに再現。

誠文堂新光社

東京都練馬区豊玉上2-6 (営業)

電話 03-5999-5121 FAX 03-5999-5120