

## 特集 「原始惑星系円盤」

## Solar Nebula から Protoplanetary Disks へ

中川 義次<sup>1</sup>

「自然は、巧まざる芸術家である」。地球上には、人間の力では到底及びもつかない素晴らしい自然の造形がある。どの地方を旅行しても必ず一つや二つ景勝の地に出会うことが出来る。また四季の巡りに応じて自然は様々な装いを変え、我々の目を楽しませてくれる。この真に偉大な芸術家に触発されて、人間もまた古来より様々な芸術的衝動に駆られてきた。また自然現象の奥にひそむ自然法則に対する知的好奇心は、科学を生み発展させてきた。偉大な芸術家の仕事は、もちろん地上にとどまるものではない。地球をとびたち、宇宙空間から我が太陽系を眺めること、そこに見出すものは、光り輝く巨大な太陽を中心にして、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星の9個の惑星が、皆ほぼ同一平面上を同一方向にきれいな円を描いて整然と公転する見事な姿である。芸術家は、如何にしてこのような美しい体系を作り得たのであろうか。種も仕掛けもない、太陽系の出現もまた単なる一つの自然現象にすぎないのである。しかし、人間にとっては長年の謎であった。

太陽系の大きさは、差し渡し約100AU、広大な銀河系の中ではきわめて小さなスケールである。このようなサイズは現在の観測技術をもってしても、残念ながら分解できていない。しかも惑星は、中心星の光を反射するだけで恒星のように自ら輝くことはなく、大きさも恒星よりはるかに小さい。したがって、我々の太陽系のような惑星系が銀河系

の中に多数存在するとしても、それを直接観測することは今のところ不可能である。もし形成途上の惑星系の姿が直接観測することができたなら、我々の太陽系の起源について様々な重要な情報が得られる筈であるが、これまでそのようなことは期待できなかった。このような事情から、惑星系の研究は理論研究先行で行われてきた。

1960年代初頭に恒星進化の理論が一応の完成を見ると、次の大きな関心は恒星誕生の過程となり、さらにそれに付随する惑星系形成過程へと広がっていった。そして1970年代から80年代にかけて、惑星系形成の研究は大きな発展を見た。ソ連（当時）、米国そして我が国日本で精力的に研究が行われた。中でも我が国においてなされた林忠四郎京都大学教授（当時、現在名誉教授）のグループによる研究は、惑星形成のほとんど全過程に及ぶ最も広範なもので、「京都モデル」と呼ばれている。この「京都モデル」は、そのまま今日惑星系形成の「標準モデル」と呼ばれているものの根幹となった。1985年に出版された *Protostars and Planets II* (Univ. of Arizona Press)[1]の中に、「京都モデル」が集大成された形で掲載されている。

林先生は、先日第11回京都賞を受賞された。惑星系形成の研究は先生の幅広い研究業績の中の一つである。今回の受賞理由は宇宙初期の元素合成から星の形成と進化、そして惑星系の形成に及ぶ様々な現象にたいして、それぞれに今日スタンダードとなっている基礎理論を築き上げられて現代

<sup>1</sup>神戸大学理学部地球惑星科学科

宇宙物理学の発展に深く貢献されたことである。林先生に直々に指導を受けた弟子の一人として、私にとっても嬉しく喜ばしいことである。今からもう半年ほど前になるが、新聞紙上にはじめて受賞が発表された時、先生に電話をしてお祝いを申し上げたところ、「僕は、辞退したんだがね。」といつものながらの控え目な言葉が返ってきたのを思い出す。受賞もさることながら、弟子の私として嬉しいことは、大学を退官されてから10年以上経過した今日も、先生が旺盛な研究意欲を維持され、研究論文を発表されているということである。先生は現在、惑星系形成それ自体よりも、その前段階にあたる降着円盤の進化や星から吹き出す風-星風現象-に関心をもって研究を続けておられる。先生には、研究者として生涯現役を貫いて頂きたいと願うものである。林先生と並んで惑星系形成の研究をリードしてきたロシア・シュミット研究所のSafronov博士、そして米・カーネギー研究所のWetherill博士も、林先生とほぼ同年輩の70歳代であるが、林先生と同じように活発に研究を続けている。惑星系形成の研究を推進してきた3人のリーダーが、みな今も研究に情熱を燃やしている。あとに続く我々にとって、これは大きな励みであり、また見習うべき範としたいものである。

「標準モデル」は、太陽系の形成過程をすべて明らかにした訳ではない。地球型惑星や木星までの惑星についてはその生い立ちをほぼ明らかにしているが、土星やさらに外側を巡る惑星については集積時間が長過ぎるという問題を残している。また惑星系を生む母体となった太陽系星雲が惑星の形成後あるいは形成の途上において如何にして消失したかについては、それほど明確にはされていない。しかし、それでもなお「標準モデル」が示す、太陽系星雲中でのダストの沈澱分離、微惑星の形成、微惑星の集積による地球型惑星の形成、同様に木星型惑星の中心核の形成、さらに星雲ガ

スの捕獲による木星型惑星の外層の形成という太陽系形成の大きな道筋は、現在でも研究者の間で基本的な共通の認識となっている。1980年代半ば、それまでの研究がまとめられた“Protostars and Planets II”の出版は、まさに時代を画するものとなった。長らく惑星系形成の直接的手がかりを天文観測から得ることなどあきらめられていたが、80年代後半、IRAS（赤外線天文観測衛星）のデータの中から、若い星T Tauri型星の周囲に太陽系星雲とおぼしき円盤状のダスト・ガス雲の存在を示すデータが多数見つかり、惑星系形成の研究に新しい時代が始まることになったからである。

「まさか天文学的手法によって惑星系形成を観測できる時期がこんなに早く来ようとは、私自身思いもよらなかった」。3年前、「遊・星・人」創刊号に東大理学部天文学教室（当時）の林正彦氏が投稿された「日本で進む原始惑星系円盤の研究」という記事[2]の始めの部分に出てくる実感のこもった言葉である。オリオン座のすぐ近くにあるおうし座には、おうし座暗黒星雲と呼ばれる分子雲がひろがっていて、その分子雲では活発な星形成の行なわれていることが知られている。生まれたばかりの若い星を指すT Tauri「型」星という呼び名の元となったT Tauri星（おうし座T星）は、まさにこの星座の星である。この分子雲には、T Tauri型星のほかに、これから重力収縮によって星を作ろうとしている密度の高いガスの塊り—分子雲コア—が非常にたくさん分布している。我が太陽系から500光年足らずと近いせいもあり、以前からよく観測の行なわれてきた領域である。IRASは、この分子雲中に多数分布するT Tauri型星の輻射スペクトルに、星を囲む円盤状のダスト雲から熱輻射によって放出されている赤外線の超過をとらえていたのであった。T Tauri型星の輻射スペクトルに赤外線の超過をもたらすこのダスト雲こそ、今後惑星系を生むべき母体の星雲である。かつての

原始太陽系における太陽系星雲 (Solar nebula) にあたる星雲の存在が, IRAS の観測データから明らかになったのであった。惑星系形成の最初の出発点の姿が観測データを通して初めて我々の前に現れたのであった。IRAS の赤外線領域の観測データのほかに, さらに地上の電波望遠鏡による観測データが加わり, 星雲の大きさは100AUの程度, 質量は太陽質量の10分の1から100分の1の程度と見積もられている。これらの値は, まさに「標準モデル」が想定していた値である。惑星系形成論の理論の中に存在していた太陽系星雲が, 今や多くのT Tauri型星の周りにはかなり普遍的に存在する現実の星雲となったのである。これらの星雲は, 原始惑星系円盤 (Protoplanetary disks) と呼ばれている。

原始惑星系円盤は, 放出する輻射エネルギーが中心にあるT Tauri型星のそれより大きい場合にはActive disk, また小さい場合にはPassive diskと呼ばれて分類されている。Passive diskは, 円盤の表面を照らす中心星の輻射を吸収し, それを再び熱輻射として再放出することによって輝いている円盤である。一方, Active diskはそれ自体に独自のエネルギー源をもつ円盤で, おそらく円盤の内部には発達した乱流が存在していて大きな乱流粘性のために角運動量の輸送が生じ, ガスは公転をしながら徐々に中心星に向かって落ちつつある, そのとき解放される中心星重力場のエネルギーが乱流粘性を通じてさかんに熱に変換され, 大量の熱エネルギーを表面から放出して輝いているものと考えられている。Active diskは, やがて内部の乱流がおさまると中心星へのガスの流れもとまり, 自身のエネルギー生成は終了してPassive diskへと進化していくものと考えられる。

またT Tauri型星自体も二つのグループに分類されている。輻射スペクトルの中の $H_{\alpha}$ 輝線の等価幅が $10\text{\AA}$ より大きなものを古典的T Tauri型星

(Classical T Tauri Stars, 略してCTTSs),  $10\text{\AA}$ より小さなものを弱輝線T Tauri型星 (Weak-lined T Tauri Stars, 略してWTTSs)と呼ばれて分類されている。 $H_{\alpha}$ 輝線は, 円盤が中心星と接する境界層のあたりで円盤のガスが星本体に落下する際に放出されるものと推測されているが, 輝線発生の具体的メカニズムがよく分かっているわけではない。とはいえ $H_{\alpha}$ 輝線幅は境界層のactivityを表す一つの指標と見なされていて,  $10\text{\AA}$ を境にT Tauri型星が二つのグループに分類されている。線幅の広いCTTSsは, 境界層を通して円盤のガスがまだ盛んに星の表面に落下している段階のT Tauri型星, 線幅のせまいWTTSsは, 円盤ガスの降り積もりがほとんど終了している段階のTauri型星という見方は自然であろう。CTTSsは, 光度が大きく以前からよく知られていたT Tauri型星が多いのに対し, WTTSsは光度が小さく, 可視光の観測よりも近年のX線観測衛星Einsteinによって認知されたものが多い。そして, CTTSsは大半がActive diskをともっており, 他方, WTTSsに見られる円盤は, ほとんどがPassive diskである。乱流の発達したActive diskをもつT Tauri型星にはCTTSsが多く, 乱流のおさまったPassive diskをもつT Tauri型星にはWTTSsが多いのは大変自然である。しかしこの自然な傾向に反する例があるのも事実である, CTTSsにはPassive diskを持つものも結構あるし, 一部のWTTSsは明らかにActive diskをもっている。単純には括れない部分があることを指摘しておく。さて, 上に述べたような原始惑星系円盤やT Tauri型星の観測の進展は, 従来の「標準モデル」に対しどのような影響を与えることになるのか。原始惑星系円盤やT Tauri型星に関して, ここ数年余りの間に得られつつある観測的描像は, 「標準モデル」といかに整合するのか, あるいは矛盾を来たし変更を迫るのか。先にも述べたが, 少なくとも円盤の大きさや質量については, 観測と「標準モ

デル」とはよく一致しているようである。惑星形成にとって最初の重要な過程は、ガスとダストの分離である。「標準モデル」による惑星形成は、星雲中のダストの沈澱分離から始まる。「標準モデル」が作られた頃にはまだ Active disk とか Passive disk といった概念はなかったので、ただ星雲形成時の乱流がやむと、原始太陽の重力の鉛直成分にひかれてダストは沈澱を始めると述べている。これを今風にいえば、原始惑星系円盤が Active disk の時代を終え、Passive disk の時代を迎えると、中心星の重力の鉛直成分にひかれてダストは沈澱を始めるといことになる。ダストの沈澱は、本格的惑星集積の始まるひとつ前の段階の過程であるが、観測との比較はこの段階が今のところ最も有望である。ダストが微惑星になってしまうと、熱放射の能率が極端に低下してしまい、到底観測にかからなくなってしまふからである。観測されている多くの Passive disk の内部で、果して「標準モデル」が言うようなダストの沈澱が起こっているのだろうか。この比較を試みた論文[3]があるので以下にかいつまんで紹介しよう（論文の第一著者は、現在NHKの報道部に勤務する三宅浩太郎君で本学会の会員である。三宅君の博士論文である）。

前にも述べたが、Passive disk は表面を照らす中心星の放射を吸収し、それを熱源とする。中心星の放射を吸収しているものの実体は、円盤のガス成分ではなくダストの方である。ガス成分は、中心星の放射をほとんど吸収することができない。したがって、ガスとダストがまだ分離せずに一様に混ざりあっている間は、ガス円盤の表面付近のガスにもダストが含まれているので中心星の放射はたしかに円盤の表面で吸収される。しかし、ダストが沈澱を始めると、それに応じて中心星の放射を吸収する面は、ガス円盤の表面より低くなっていく（図1）。すると中心星の放射はより浅い角度で吸収面を照らすことになり、中心星の放射が円

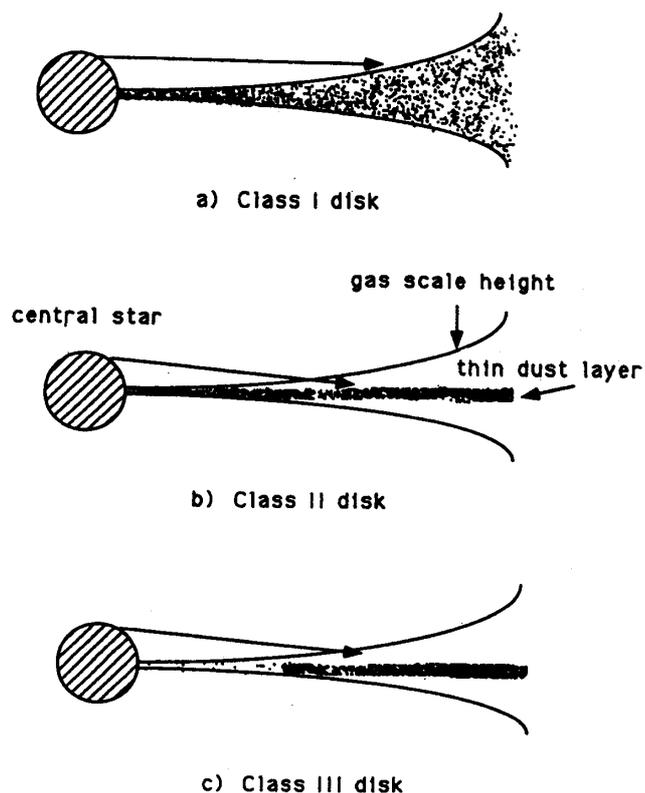


図1. 円盤内のダストの沈澱にしたがって、中心星放射の吸収面の高さが低くなっていく。論文[3]ではダストの沈澱状態に応じて円盤を分類し、(a)ダストが円盤内にまだ一様に分布しているような円盤を Class I disk, (b)ダストが中心面に沈澱してしまった円盤を Class II disk, (c)そしてさらに内側領域のダストが消失してしまったような円盤を Class III disk と呼んでいる。また、ダストがまだ沈澱途中にあると見られる円盤を Class IV disk と呼んでいる。

盤を加熱する効率が下がり始める。これは、円盤の温度に影響を与え、熱放射に影響を与える。すなわち、ダストの沈澱は円盤の熱放射スペクトルに変化を及ぼすことになる。この論文でまず明らかにされたことは、中心星の放射加熱の効率低下は円盤の外縁部ほど著しく、ダストの沈澱にともなう外縁部の温度が下がり始めるということである。もともと温度の低い円盤の外縁部は、放射スペクトルにおいては長波長の放射を担っている。

したがって、ダストの沈澱が始まると長波長側のスペクトルから下がり始める。そして、すべてのダストが中心面に沈澱してしまうと、中心面の日当たりに応じた温度が実現され、それに対応した熱輻射スペクトルが見られることになる。論文では次に、Passive diskをもつ現実のT Tauri型星について、円盤の熱輻射スペクトルを理論的に求め、IRASの観測データとの比較を行なっている。円盤内部の温度分布を決定する際、中心星の光度や半径、質量の値が必要になるが、これらは個々のT Tauri型星について観測から見積もられているものを使う。しかし、沈澱の進行程度は、予めわからないのでパラメータとしておく。この論文では、ガス円盤の厚み ( $H_{\text{gas}}$ ) に対するダストの分布層の厚み ( $H_{\text{dust}}$ ) の比を  $f$  ( $H_{\text{dust}}/H_{\text{gas}}$ ) として、これを沈澱進行の程度を表すパラメータとしている。すなわち、 $f=1$  は、ダスト層の厚みとガス円盤の厚みは同じで沈澱は始まっていない状態を表し、 $f=0$  は、ダストが中心面に沈澱してしまった状態を表している (図1)。 $f$  の値をうまく選んで観測データを再現することが出来れば、その  $f$  の値から円盤内のダスト沈澱の進行の程度を推測することが出来る。

Beckwithら[4]の与えた64個のT Tauri型星の表の中から明らかにPassive diskをもつT Tauri型星26個をサンプルとして選びだし、それらのT Tauri型星について理論的に求めた熱輻射スペクトルとIRASの観測データとの比較を試みる。結果の一部が図2に示されているが、ほとんどの例についてスペクトルの理論線はIRASデータに見事にフィットしている。図2(a)は、 $f=1$ として理論スペクトルが観測とよく一致する例で、このようなものは26個のサンプル中4個あった。これらの円盤では、まだほとんどダストの沈澱はおこっていないと考えられる。著者らは、これらの円盤をClass I diskと呼んでいる。図2(b)は、 $f=0$ として理論スペクトル

が観測とよく一致する例で、このようなものは8例あった。これらの円盤では、ダストはすでに中心面に沈澱してしまっていると考えられる。著者らは、これらの円盤をClass II diskと呼んでいる。図2(c)は、短波長の観測データが  $f=0$ とした理論

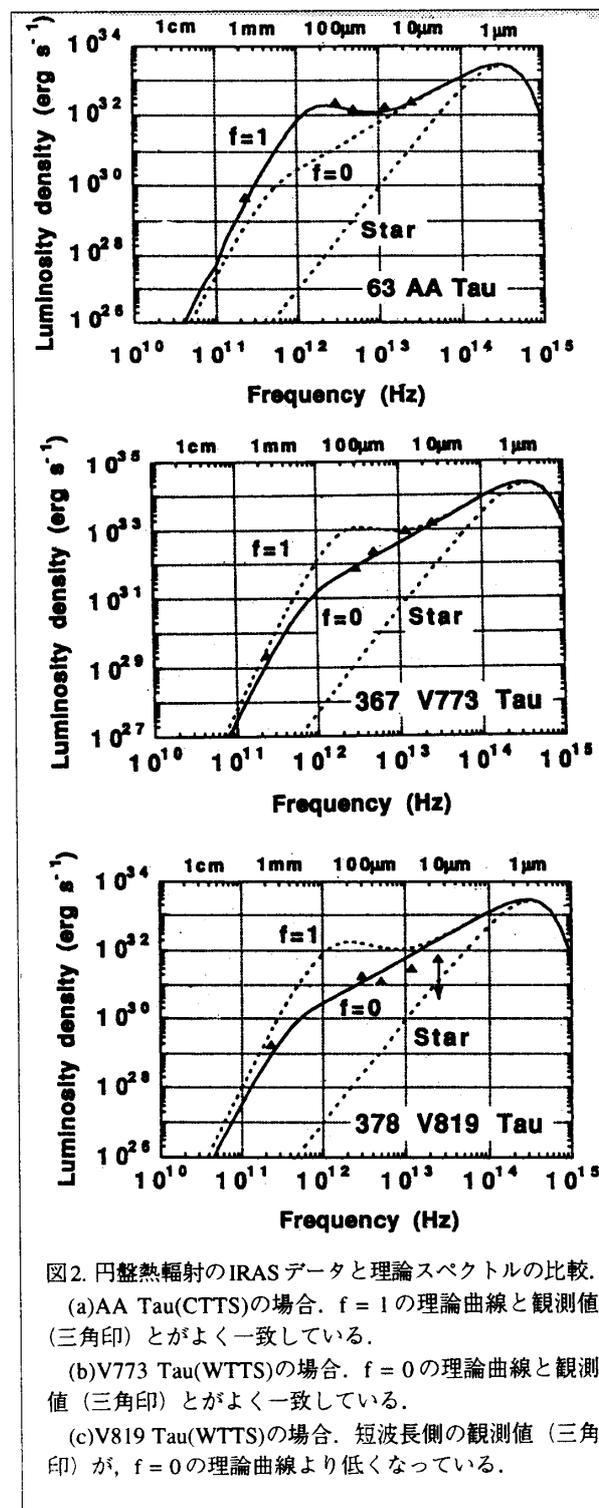


図2. 円盤熱輻射のIRASデータと理論スペクトルの比較。

(a) AA Tau (CTTS) の場合。  $f=1$  の理論曲線と観測値 (三角印) とがよく一致している。

(b) V773 Tau (WTTS) の場合。  $f=0$  の理論曲線と観測値 (三角印) とがよく一致している。

(c) V819 Tau (WTTS) の場合。 短波長側の観測値 (三角印) が、  $f=0$  の理論曲線より低くなっている。

線よりもさらに低くなっている例である。短波長の輻射は円盤の比較的内側の温度の高い領域のダストが放出している筈であるが、観測データはそのような内側領域での輻射が極端に少なくなっていることを示している。これは、円盤の内側領域でダストがすでに微惑星のような巨視的天体になってしまって輻射能率が落ちてしまった上に、内側領域の残存ダストはその領域のガス円盤とともに消失してしまったと考えるのが自然であろう。このような例は、26個のサンプル中6個あった。著者らは、これらの円盤をClass III diskと呼んでいる。このほかに、 $f$ が0と1の中間値でうまく観測データをフィットできる沈澱途上のものが5例あり、Class IV diskと名付けている。そしてこれら4つのClassに分類できないものが3例だけあった。Class IからClass IVまでの円盤はほぼ同数見られるが、WTTSsの円盤にはダスト沈澱のおこっていないClass Iの例は無く、CTTSsの円盤には惑星形成が始まっているClass IIIの例は無かった。

今見てきたようにPassive diskのIRASデータは、ダストの沈澱や内側領域での微惑星形成を考えるだけできれいに解釈がついてしまうことが分かった。これが、紹介した論文の主要な結論である。観測されているPassive diskは、「標準モデル」とよく整合しているようである。

よい事があれば別のところではそうでない事もある。惑星系は、ガス円盤の中で生まれたのであるから、地球も初期にはガスを取りこんで大量の大気をかかえていた筈である。この大気は円盤のガスを捉えたものであるから水素を主成分とする大気であり、現在の地球大気とは無縁のもので、地球からは必ず去らねばならない原始大気である。「標準モデル」ではこれの除去に、T Tauri型星の段階にある原始太陽のactivityを最大限に期待し利用していたのであるが、今考えるとこれは古典的T Tauri型星のactivityを利用していたことになる。

しかし、地球ができていた頃に、原始太陽が古典的T Tauri型星の段階にとどまっていたとはほとんど考えられない。原始太陽が古典的T Tauri型星の段階にとどまっている間はまだ本格的な惑星形成は始まっていない筈である。上述の論文を見ても、古典的T Tauri型星で、惑星形成が始まっていると思われるClass III diskを持つ例は全く無い。地球ができる頃には、原始太陽はすでに弱輝線T Tauri型星の段階に移行していた筈で、「標準モデル」が期待するほどのactivityはもはや持ち合わせていなかったと思われる。地球の原始大気除去については、「標準モデル」は、変更を求められているようである。

長年理論先行であった惑星系形成の研究は、このところ観測主導の感がある。やはり新しい時代が始まったのである。このまま、ますます観測が進展し理論研究に新たな刺激を与え続けてほしいものである。一方、「標準モデル」は、惑星系形成の研究において今もなお非常に大きな存在である。しかし、T Tauri型星の観測が進み、それまでのT Tauri型星が、古典的T Tauri型星と呼ばれるようになったのと同じように、「標準モデル」もいずれ古典的「標準モデル」と呼ばれる日が来るであろう。研究者一同一層努力して、そのような日はやく招来すべきである。

## 参考文献

- [1] Hayashi, C., Nakazawa, K, and Nakagawa, Y., 1985: Origin of the Solar System. *Protostars and Planets II*, ed. D.C. Black and M.S. Matthews (Tucson: Univ. of Arizona Press), pp.1100-1153.
- [2] 林 正彦, 1992: 日本で進む原始惑星系円盤の研究. 遊・星・人, 1, 10-17.
- [3] Miyake, K. and Nakagawa, Y., 1995: Dust Particle Settling in Passive Disks around T Tauri

Stars: Models and IRAS Observations.

*Astrophys. J.* 441, 361-384.

- [4] Beckwith, S.V.W., Sargent, A.I., Chini, R.S.,  
and Gusten, R., 1990: A Survey for  
Circumstellar Disks around Young Stellar  
Objects. *Astron. J.* 99, 924-945.