

## 特集「比較惑星系形成論」

# 電波天文で探る星・惑星系形成

百瀬宗武<sup>1</sup>

## 1. 電波観測と惑星系円盤

### 1.1 惑星系円盤観測のスタート

太陽とその周囲を公転する惑星は、約46億年前に一連の流れの中でほぼ同時期に形成されたと考えられている。一方、太陽のような星の形成は現在でも盛んにおこっている現象である。したがって、現在形成途上の段階にある星の周囲を詳しく調べれば、宇宙の中で惑星系形成がどのように起きているのか？、また、太陽系のような惑星系は普遍的な存在なのか、それとも特殊な存在なのか？、といった疑問に対し、大きな手がかりを与えると考えられる。

このような発想のもと、惑星系形成の現場を天文学的手法により解明することが現実味を帯びる契機になったのは、80年代に打ち上げられた赤外線天文衛星（IRAS）による遠赤外全天サーベイの成功である。IRASで得られた知見は多岐にわたるが、星・惑星系形成に関して特に重要な発見は以下の2点であろう。(i) 太陽程度の質量をもつ前主系列星（Tタウリ型星）が円盤起源と見られる赤外放射超過を普遍的に示すことを明らかにした点[1]。(ii) 星形成が起こっている分子雲中に、Tタウリ型星前の進化段階にある天体と見られる赤外線点源（原始星候補天体）を数多く発見した点[2]。

第一の発見を受けたその後の観測的研究により、この星周円盤は半径が約100AU（AU:天文単位=1億5千万km）、質量が（0.1-0.001）太陽質量であり、

またTタウリ期のかかなりの期間にわたって存在し続けることが明らかになった。これらの特徴は、太陽系形成論で考えられていた「原始太陽系星雲」と非常によく似ている。このことから現在では、これらの円盤は惑星系の母体であると信じられており、「原始惑星系円盤」と呼ばれている。惑星系形成過程を天文学的手法で解明するための対象をはっきり確立する契機を作ったという意味で、非常に重要な発見であった。

また第二の発見は、星や原始惑星系円盤が星間物質から形作られる道筋を明らかにする上で非常に重要であった。星形成過程を一言でいうと「低温星間物質の塊が自己重力の働きによって動的収縮（フリーフォール）すること」となるが、このような描像が得られたのは60年代になされた理論的研究にまで遡ることができる。しかしIRAS以前には、星間物質の収縮により星や原始惑星系円盤が成長していく段階（原始星期）にあたる天体はほとんど見つかっていなかった。これは、原始星期では中心の高温部分が周囲の塵粒子を含んだ低温の星間物質によって隠されているため、これらを可視光で見つけるのが非常に困難だったためである。IRASにより原始星候補天体の体系的サンプルが初めて得られたのを皮切りに、これらを対象にした赤外線・電波観測を通じて少しずつその星周環境が解明された結果、星間物質から主系列星に至るまでの一連のシナリオが観測事実と対応する形で構築されたのである。

<sup>1</sup> 学振特別研究員・国立天文台野辺山宇宙電波観測所

このような経緯をへて最近では、星形成過程の各段階における代表的天体について、より詳しく、また多様な視点で観測した成果が目立ってきている。本稿では、特にミリ波・サブミリ波帯での原始惑星系円盤に関する観測結果にしぼり、最近の進展をレポートしたい。実は可視光や赤外線など他波長の観測でも重要な結果は多く得られており、それらを紹介できないのは残念だが、これらは別の機会に譲りたい。

余談になるが、私が大学院に進学しこの分野の研究を始めた6年ほど前は、原始惑星系円盤の存在や大雑把な進化の流れがほぼ確立され、より詳しい観測を次々と行っていく必要が出てきた時期にあっていた。したがって本稿の内容は、私がこれまで研究者として体験してきたことと丁度重なる。私が研究を始める少し前は、惑星系円盤の観測などできそうもないといった雰囲気だったらしいことを考えると、非常にラッキーだったと思う。

## 1.2 ミリ波・サブミリ波の重要性

最近の成果を紹介する前に、ミリ波・サブミリ波でどのような情報が得られるかをごく簡単にまとめておきたい。星の材料となる星間物質や惑星系円盤は、分子ガスとダスト粒子から構成されているが、ミリ波・サブミリ波ではそのどちらも観測できる点が重要である。

まず分子輝線の観測では、その強度から視線方向に含まれているガスの質量を導出できるだけでなく、ドップラー偏移量から運動の視線方向成分についての情報が得られる点も大きな特徴である。さらに、様々な分子種の輝線を観測することで、ガスの化学的性質を議論することも可能である。一方ダスト粒子については、その熱放射をミリ波・サブミリ波帯の連続波として観測することができる。ダスト連続波は赤外線でも観測できるが、ミリ波・サブミリ波では放射が光学的に薄くなる

ため、ダスト質量をより正確に求められるという特徴がある。もっとも、ダスト粒子の質量を推定するためにはその放射係数が分かっている必要があるが、この値はダストの化学組成や形状等によって大きく変化することが知られている。特に原始惑星系円盤の場合、普通の星間空間に比べ著しく高密度な領域であり、この問題は決して軽視できない。しかし今後、理論や実験の進展に加え、観測的にも複数の波長でダスト放射を検出し放射係数の周波数依存性についての情報が得られれば、円盤中のダスト粒子そのものの性質にもかなり迫ることができるはずである。

## 2. 最近の観測から

### 2.1 原始星L1551 IRS5の観測

まずはじめに、原始星段階にあたる天体を対象にした研究例として、野辺山ミリ波干渉計を用いたL1551 IRS5（以下、IRS5と略）の観測結果を紹介したい。IRS5は、太陽程度の質量をもつ星の形成領域としては最も近傍にある牡牛座分子雲中に存在する。過去のNMA観測により、この天体周囲のガスが動的収縮していることがすでに確認されており[3],[4]、いわば、数少ない「真正正銘の」原始星の一つと言えるだろう。歴史的に見ても、双極分子流が発見された最初の天体であること、また赤道面には半径一万AUスケールの円盤状高密度ガスが付随することが早い時期に明らかにされるなど、その星周環境が非常に詳しく調べられてきた天体である。

しかしこれらの観測では空間分解能が不足していたため、星・原始惑星系円盤に対する直接の質量供給源となっているはずの半径1000AUスケールのガスについては、その内部構造がこれまで十分には明らかにされていなかった。そこで今回は野辺山ミリ波干渉計を用いて、これまでにない高い

解像度 (ビームサイズ2.5秒角, 牡牛座分子雲の距離で350AUに相当), 高い速度分解能 (0.21 km/s) で観測を行った. 観測に用いた分子輝線は, その強度がガスの質量を忠実に反映するC<sup>18</sup>O (1-0) 輝線である[5].

まずこの観測で得られたガスの全強度分布を図1に示す. 強度のピークは, 同時に得られたミリ波連続波のピークから求められた中心星の位置と一致し<sup>注1)</sup>, 全体としては星から両極方向に放出されている分子流と直交する向きにのびた構造を示す. このことから図1は, 中心集中し, かつ赤道面にそって円盤状に広がる外層部ガス (円盤状エンベロープ) をとらえたものであることが分かる. この円盤状エンベロープの半径と質量は, それぞれ1200AU, 0.062太陽質量であった. ここで注意して欲しいのは, この円盤状エンベロープ自体が原始惑星系円盤に相当するわけではないという点である. 原始惑星系円盤に相当する部分の広がり半径100AU程度であり, 図1でみられる円盤状エンベロープはその外側を囲む部分であると考えられ

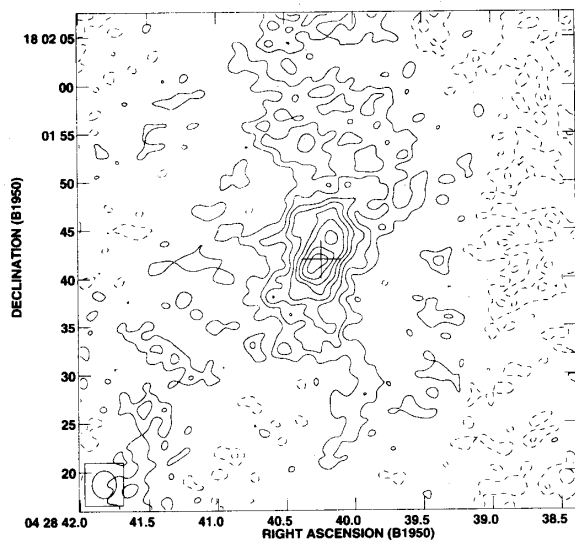


図1 L1551 IRS5のC<sup>18</sup>O (1-0) 全強度分布図. 等高線は1.5 $\sigma$ 間隔 (1 $\sigma$ 間隔=29.7 mJy/beam), 破線はネガティブを表す. 十字はミリ波連続波から決めた星の位置. 左下の楕円はビームサイズ (2.8 $\times$ 2.5秒角) を表す. 縦軸の一目盛り (5秒角) が700AUに相当する.

る. この点は, これから解説する円盤状エンベロープ内部のガスの運動を理解することではっきりするはずである.

それでは次にそのガスの運動に関して詳しく見ていこう. 図2a-cは「位置速度図 (PV図)」と呼ばれ, ある線上での輝線強度が視線方向速度の関数として示されたものであり, 天体中の運動を解析するのに良く使われる. まず最初に, 円盤状エンベロープの長軸に沿ったカットでのPV図 (図2a) に着目する. 今回のようにガスが円盤中を運動していると見なせる場合, このカットで観測される速度構造は回転運動成分を反映する. 図2を見ると, 北西側 ( $\Delta > 0$ ) では星を基準に我々から遠ざかる向きの速度成分が, 南東側 ( $\Delta < 0$ ) では星を基準に我々に近づく向きの速度成分が, それぞれ卓越していること, また, 中心に近づくほど速度の絶対値がより大きくなっていることがわかる. このような特徴は, 円盤状エンベロープ中に回転運動があり, かつそれが中心に行くほど大きくなっていくことを示している.

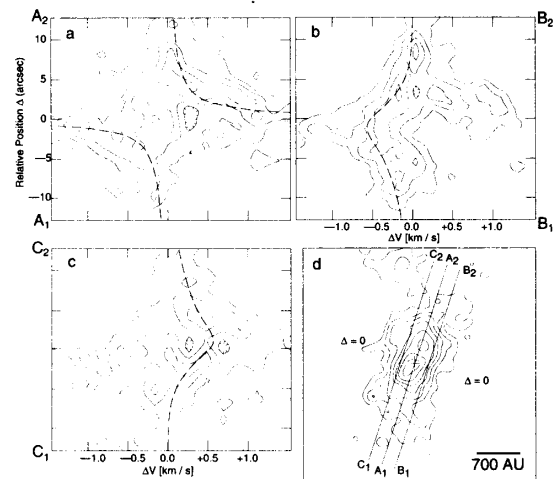


図2 C<sup>18</sup>O (1-0)のPV図 (a-c) と, 全強度分布図上に示したPV図に対するカット位置 (d). PV図の等高線は1.5 $\sigma$ 間隔 (1 $\sigma$ =115 mJy/beam), 全強度分布図の等高線は3 $\sigma$ から1.5 $\sigma$ おき. PV図の速度は星を基準とし, プラスが我々から遠ざかる向き, マイナスが我々に近づく向きをそれぞれ表す. 図中破線は本文中に記した速度場から予想される分布を示す.

注1) 最近なされた極めて高解像度のダスト連続波観測[6]などから, L1551 IRS5は実は天球面上での投影距離にして約50AU (0.35秒角) の原始連星系であることが確実にってきた. しかし今回紹介した数百AUスケール以上のガス運動の議論には, この事実はほとんど影響を与えない.

次に長軸から平行にずらした2本のカットに沿ったPV図(図2b, c)を見てみよう。南西側のカット(図2b)では星を基準に我々に近づく向き(速度成分)が卓越しているのに対し、北東側のカット(図2c)では逆に星を基準に我々から遠ざかる向き(速度成分)が卓越していることがわかるだろう。このような特徴は回転運動だけでは説明ができず<sup>注2)</sup>、動径方向の運動があることを示している。一口に動径方向の運動といっても、収縮運動と膨張運動の二通りが考えられるが、実は今回の場合は中心へと収縮する運動であることがわかる。これは、過去の双極分子流やジェットを観測から極軸の3次元的な配置が分かっており、それと円盤状エンベロープとの位置関係を考えると、南西(図2b)側が星より遠い側、北東(図2c)側が星より近い側に相当することが簡単に分かるためである。

今回の観測は円盤状エンベロープの外径に比べて解像度が十分高いため、これらPV図の詳しい解析により速度場の半径依存性まで議論することができる。ここでは簡単のため、エンベロープが幾何学的に無限に薄い平板だと仮定して解析しよう。まず図2aをよく説明する回転速度則は、その半径依存性が $r$ の $-1$ 乗、半径700AUでの大きさが0.24km/sであることが分かった(図中破線)。一方、図2b, 2cは収縮成分と回転成分の重ね合わせで説明しなくてはならない。しかし回転成分は先に求めたものを使うと、収縮速度は半径依存性が $r$ の $-0.5$ 乗、半径700AUで0.5km/sとして大部分の特徴が説明される(図中破線)。

このような速度場はどのような運動で説明できるだろうか。まず円盤状エンベロープの外域では、収縮速度の方が大きい点や回転速度が $r$ の $-1$ 乗に比例する点から、ガスが角運動量を保存しつつ中心へと自由落下していると考えられる。しかしその一方で、収縮速度と回転速度の半径依存性の違いに注意すると、ガスが内側にいくほど、回転速

度が相対的に顕著になることがわかる。得られた速度則から推定すると、ガスは半径約150AUのところまで落ち込むと回転速度が収縮速度と等しくなる。このような状況では中心星の重力と遠心力とがほぼ釣り合うため、物質がそれより内側に落ち込むことはない<sup>注3)</sup>。つまり、ガスはこの地点でほぼ純粋な回転運動に移行すると予想される。この内側の回転運動している領域こそが、将来、原始惑星系円盤になる部分に相当しているわけである。つまりこの結果は、原始星期における惑星系円盤の成長をとらえたものといえる。

このように原始星期の星周環境を詳しく調べると、星・惑星系円盤の形成期を考える際にキーとなる量について、多くの定量的情報が得られる。ここではエンベロープ中の速度場に関して詳しく見たが、得られる情報はそれだけにとどまらない。例えば星・円盤系への質量供給率は、今回得られた収縮速度と円盤状エンベロープの平均的な柱密度から一年あたり $6 \times 10^{-6}$ 太陽質量と求められる。質量供給率は星・惑星系円盤の成長過程を考える上で非常に基本的な量だが、この種の観測を通じて初めて正確に見積もることができる。また今回は円盤状エンベロープの厚みを完全に無視したが、観測結果とモデル計算との比較により、厚み方向の密度構造に関する程度議論することができる。これらについて興味がある方は、是非原論文を参照していただきたい[5]。

## 2.2 Tタウ型星に付随する円盤の観測

次に、より進化が進んだTタウ型星を対象にした円盤の観測について、二つの観測例を紹介しよう。まず第一は、連星系をなすTタウ型星GG Tauに付随する「周連星リング」の高解像度イメージングについてである。GG Tauは天球面上の投影距離にして約40AUの間隔をもつ連星系であり、その周囲に回転するガス円盤が存在していること

注2) 回転運動だけの場合は、どちらのカットに沿ったPV図でも、 $\Delta > 0$ ではより遠ざかる方向の速度成分が、 $\Delta < 0$ ではより近づく方向の速度成分が見られるはずである(図2aと同様)。

注3) ガス粘性等による角運動量輸送があると降着運動が生じる。初期の原始惑星系円盤ではこのような過程がおけると予想されるが、これは自由落下とは全く異なる現象である。

が野辺山の電波望遠鏡を用いて初めて明らかにされた天体である。その後の詳しい観測により、この「ガス円盤」が実は連星系を取り囲むリング状構造をしていることが明らかになった。最近の研究によると、太陽程度の質量をもつ星の多くが連星系として誕生することが明らかになってきており、そこに付随する円盤がどのような構造をもつかは非常に興味深い問題である。また、円盤と連星系との力学的関係は、原始惑星系円盤と其中で誕生する原始惑星との関係を考える上でもよい「実験場」と見なすことができる。

この天体については以前の遊・星・人でも紹介されていたが[7]、最近、ヨーロッパのIRAM干渉計を用いた観測により、さらに素晴らしいイメージが得られた。図3がそのイメージである[8]。まずグレースケールで表されているのは、波長1.4mmのダスト連続波マップである。これを見るとすぐわかるように、連続波強度は中心部分では弱く、内径180AU、外径260AUのリング状構造を示す。さ

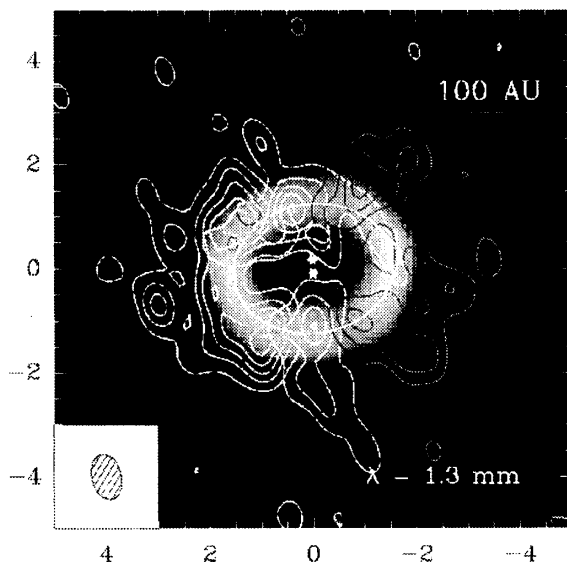


図3 ヨーロッパIRAM干渉計が得たGG Tauの1.4mm連続波(グレースケール)、及び $^{13}\text{CO}$  (2-1) 輝線分布(等高線)。 $^{13}\text{CO}$ については、異なる速度成分のものを重ねて示してある。図中の星マークは連星の位置を、左下の楕円はビームサイズ(0.85×0.6秒角)を、それぞれ示す。両軸の数字は中心からの角距離(単位:秒角)。

らにそれに加え、(印刷の関係で見づらいかもされないが)内側の連星系のごく近くに非常に薄い成分が検出されている。これは、連星系をなす二つの星それぞれに付随する半径4-20AU程度の星周円盤を起源とする成分と考えられている。すなわち、ダストは連星系の間隔に比べ十分外側か、十分内側の領域に集中して存在しているわけである。

一方図3中の等高線は、同時に得られた $^{13}\text{CO}$  (2-1) 輝線の分布を、視線方向速度ごとに描いたものである。リング内の速度構造はケプラー回転でよく説明される。興味深いのは、輝線強度から求められる $^{13}\text{CO}$ 分子の質量と、同じ領域に存在するダストの質量とを比較した結果、 $^{13}\text{CO}$ 分子の存在量が一般の分子雲中に比べ1/20程度に減っていることが示唆された点である。彼らは同様の観測を $\text{HCO}^+$ というイオンについても行っているが、その存在量の減少はさらに顕著で、一般の分子雲中の1/200程度になっているらしい。これらは原始惑星系円盤に含まれるガスの化学反応過程を考慮する上で、非常に興味深い結果と言えるであろう。

ちなみに図3のイメージのビームサイズは0.6×0.85秒角、これはGG Tauの距離で85×120AUに相当する。現在の短ミリ波帯での装置で得られる最高解像度のイメージで、コンパクトな天体の観測に強みを発揮するIRAM干渉計ならではの見事な結果である。このような結果に刺激をうけ、我々も野辺山ミリ波干渉計を用い、単一星に付随するダスト円盤のイメージング・サーベイを昨年から3年計画でスタートした。この結果については近いうちに紹介できればと考えている。

第二の話題は、原始惑星系円盤ダスト放射の偏波(偏光)観測についてである。結果を見る前に、まずダスト連続波の偏波観測がどのような意味をもつのか、簡単に解説したい。星間空間中のダスト粒子は完全な球形をしているわけではなく、扁平もしくは扁長の形をもっていると考えられる。

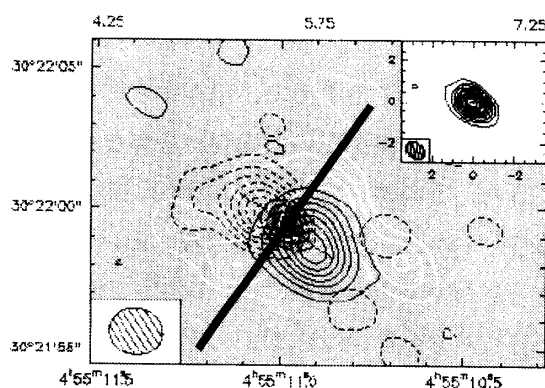
その場合、ダスト粒子はその長軸を磁場の向きと直交する面内に含む形で整列すると予想されている。一方、ダスト粒子の放射係数（吸収係数）は、ダスト粒子の長軸と平行な偏光成分に対するものの方が、それと直交する偏光成分に対するものに比べ大きくなる。つまり、ダスト放射そのもの、もしくはダストで吸収をうけた放射の偏光成分を調べることにより、ダストの整列方向がわかり、これから天球面に投影された磁場の向きが導かれるわけである。

つい最近までは、ミリ波・サブミリ波帯でのダスト放射の偏波観測を実行することは非常に困難であった。これは、ダスト放射の偏波率が数パーセントと非常に低く、それを検出できるほどの高感度・高安定度な検出器がなかったためである。特に、原始惑星系円盤のような微弱な信号の偏波観測はほとんど不可能だったといっただろう。しかし、マウナケア山頂にあるサブミリ波望遠鏡・JCMTに搭載された高感度サブミリ波カメラ（SCUBA）の出現、及び、そのカメラ専用の偏波計が開発されたことにより状況は大きく変わり、以前の10倍近い感度でサブミリ波連続波偏波観測を行うことが可能になった。なおこの偏波計は、国立天文台の田村元秀氏を中心とする日本チームと英国チームとの共同開発で実現したもので、昨年夏より本格的な観測に使用されている。

この偏波観測システムを真っ先に使い、二つの原始惑星系円盤を観測した結果が図4である[9]。どちらの図も、干渉計で得られた円盤の高解像度イメージに、観測された偏波ベクトルの向きを重ねている。なお、偏波観測のビームは円盤サイズに比べてはるかに大きいので、得られた偏波の向きも円盤全体で平均したものに相当している。図4を見ると、偏波ベクトルの向きはどちらの場合も円盤の長軸とほぼ垂直であることがわかる。もしこの偏波の起源が先に述べた磁場によるダストの整

列だとすると、磁場の向きは円盤面と平行（トロイダル磁場）ということになる。過去の理論的考察[9]によると、少なくとも円盤の外域（ $r > 15\text{AU}$ ）ではガスと磁場はよくカップルしていると予想されており、円盤内の差動回転によってトロイダル磁場が強められたことにより今回の結果が得られたとする解釈は非常に魅力的であるといえる。

## GM Aur



## DG Tau

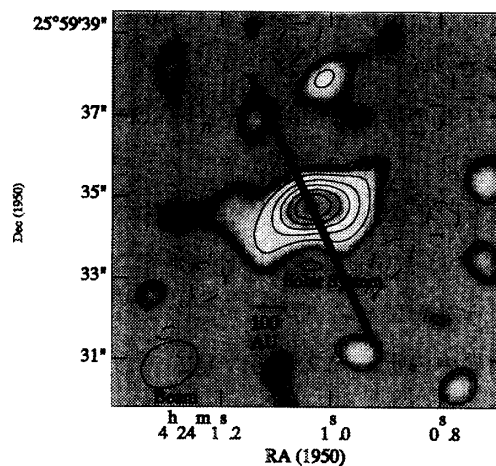


図4 JCMTで得られたダスト連続波偏波の方向（太線）を干渉計マップに重ねたもの。GM Aurの干渉計イメージ（等高線）はIRAM干渉計で得られたもので、異なる速度成分のものを重ねて示してある。また右上の図は1.3mmの連続波イメージ。この連続波イメージは左上から右下方向にのびており、偏波の方向と直交していることがわかる。一方DG Tauの干渉計イメージは野辺山ミリ波干渉計を用いて北村らが得た2mm連続波イメージ。この連続波イメージは左右方向にのびており、やはり偏波の向きとほぼ直交していることがわかる。

しかしその一方で、原始惑星系円盤のような非常に特殊な環境下で磁場による整列機構が効果的に働くのか?, その他のダスト整列機構は考えられないのか?, といった疑問も当然出てくるだろう。このあたりは、観測結果をさらに蓄積するとともに、理論・実験も含めた今後の研究の発展が楽しみなどころである。

### 3. 将来の展望

これまで見てきたように、現存するミリ波・サブミリ波帯の装置を用いた観測は着実な成果を収めてきた。この勢いは今後もしばらく衰えないであろう。しかし、「惑星系形成過程」という大問題に真っ正面から取り組むには、いささか物足りないと感じる方も多いのではないだろうか。これは、やはり現存の電波望遠鏡で得られる解像度が、惑星系形成過程を本格的に調べるにはかなり物足りないことが最も大きな原因であろう。

このような現状を抜本的にうち破る装置として電波天文分野で考えられているのが、大型ミリ波サブミリ波干渉計 (LMSA) と呼ばれる装置である。これは、口径10-12mのアンテナを50-100台組み合わせた干渉計を非常に観測条件のいいサイト (具体的にはチリ北部高地の砂漠地帯) に建設しようという計画である。実際、このような装置の実現は世界中の電波天文学者が望んでおり、国際協力の下に共同でこのような装置を建設しようという方向で事態は推移している。

LMSAクラスの干渉計が実現すれば、近傍の惑星系円盤を1-5AUの解像度でイメージングすることが可能になる。これにより、原始星期における質量供給の様子からTタウリ期での原始惑星系円盤の温度・密度分布の情報までが詳細に得られ、観測を通じて惑星系形成過程を本格的に議論することが可能になるだろう。原始惑星系円盤の中には、

GG Tauで見られたのと同様の過程によって原始惑星系が円盤物質をクリアリングしている様子も発見できるかもしれない。また高感度・高解像度を生かし、より遠方の星形成領域中に存在する原始惑星系円盤を対象にした系統的な観測も可能になるだろう。これにより、星形成領域そのものの性質・環境の違いが惑星系形成過程に対しどのように影響するのかといった疑問についても、解明が進むと期待される。

ここ10年で星形成過程の研究は大きく進んだ。その一つの象徴は、誕生している星の質量分布頻度関数と星の材料となる分子ガス塊の性質との関係が、星形成過程の筋書きを介すかたちで得られたことである[11]。惑星系形成過程でも同様の枠組みは作れるはずだ。惑星系の普遍性・多様性や太陽系そのものの位置づけを、原始惑星系円盤の性質や惑星系形成過程と関連づけて議論できるようにすることは、一つの究極目標といってもいいだろう。この遠い目標に向かって、電波天文観測のさらなる向上を目指すとともに、手法の垣根を越えた協力関係を長い目で構築していきたいものである。

### 謝辞

1999年地球惑星合同学会の「比較惑星系」セッションを企画し、本稿執筆の機会を下さった渡邊誠一郎氏に感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] Rucinski, S.M. 1985, *Astron. J.*, 90, 2321.
- [2] Beichman, C. A. et al., 1986, *Astrophys. J.* 307, 337.
- [3] Ohashi, N. et al. 1996, *Astrophys. J.*, 466, 957.
- [4] Saito, M. et al. 1996, *Astrophys. J.*, 473, 464.

- [5] Momose, M. et al. 1998, *Astrophys. J.*, 504, 314.
- [6] Rodriguez, L. et al. 1998, *Nature*, 395, 355.
- [7] 大橋永芳 遊・星・人, 1995, 4, 230.
- [8] Guilloteau, S. et al, 1999, *Astron. & Astrophys.* in press.
- [9] Tamura, M. et al, 1999, *Astrophys. J.* in press.
- [10] Umebayashi, T. & Nakano, T., 1988, *Prog. of Theor. Phys. Suppl.*, 96, 151.
- [11] 立松健一・梅本智文 遊・星・人, 1995, 4, 222.