

# 原始惑星系円盤の力学と構造観測

武藤 恭之

〈工学院大学 教育推進機構 〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1〉

e-mail: muto@cc.kogakuin.ac.jp



惑星は原始惑星系円盤の中で形成される。これは、1ミクロン程度かそれ以下の大きさのダスト粒子が数1000キロメートルになっていくきわめてダイナミックレンジの大きな過程であり、物質科学・力学・流体力学・化学などの様々な過程を考える必要がある。また、原始惑星系円盤の観測の進展により、これまでに知られていなかった様々な情報が得られるようになり、惑星形成の研究は新たな展開を迎えている時期にある。本稿では、筆者がこれまでに関わってきた円盤における力学過程や原始惑星系円盤の観測に関連する研究を紹介し、今後の展開について議論する。また、研究奨励賞をいただいたこの機会に、筆者の所属する私立大学の状況についても簡単に紹介したい。常勤の研究者を目指す方にとってのキャリアパスの参考となれば幸いである。

## 1. 惑星形成の問題点

「生まれたての若い星の周囲の原始惑星系円盤の中でダストやガスが集積し、惑星が形成される。」

惑星形成を一言で説明せよと言われれば、このようになるだろう。この説明は数十年にわたって変わっておらず、これで分かったことにしてしまうのは簡単であろう。しかし、「いつ」・「どのようにして」惑星が形成されたのか、この説明に対して少しでも疑問を抱くと、惑星の形成過程は途端に難しい問題になり、まだ多くの謎が残されている。まずこのセクションでは、惑星形成における問題点について（筆者の独断に基づき）まとめておこう。

惑星は星形成の副産物である。分子雲コアが収縮して星ができる時、全てのガスが星に落ち込むわけではなく、一部は星の周囲の回転円盤として取り残される。この円盤は原始惑星系円盤と呼ばれ、惑星形成の現場となる。太陽系の場合、最も重いガス惑星である木星は太陽の1/1,000程度の

質量であるから、円盤ガスが中心星の質量の1/100程度もあれば、太陽系のような惑星を作るのに必要な材料は揃っているだろうといえる。

ただこれだけの数字を並べるだけでも、惑星形成が厄介な問題であろうということが想像できる。惑星形成の現場である原始惑星系円盤は、星に比較して圧倒的に質量が小さい。星の1%に満たない（かもしれない）ごく少量のガスの姿を星形成の過程から推定するということは、星形成を1%、あるいはそれよりも良い精度で理解することである。星形成の研究も大きく進展しているとはいえ、まだここまでのレベルには達していないだろうというのが筆者の感覚である。星形成全体の物理過程として見れば、原始惑星系円盤程度の質量は無視しても構わないと言われても仕方がない。さらに、地球のような岩石惑星の形成を考えようとすると、その少ないガスの量のさらに1/100程度の質量しかないダスト成分を相手にすることになる。これをもって、「惑星形成は筋が悪い問題である」と考えられる向きがあるかもしれない。しかしそれでも、惑星の起源は我々が

どこから来たのかという根源的な問いに直結する問題である。これまでも長く興味を持たれてきており、これからも考える価値のある問題だろうと筆者は考えている。

原始惑星系円盤の状態を星形成過程から導き出すことが困難だとすれば、何らかの仮定を置いて前に進む他はない。歴史的には、現在の太陽系の固体成分（主にガス惑星の中心部や地球などの岩石惑星）の量や分布から原始惑星系円盤の質量や拡がりやを推定した最小質量円盤モデル（京都モデル<sup>1)</sup>と呼ばれることもある）を一つの典型例として、惑星形成が議論されてきた。また、原始惑星系円盤が星の周囲に存在する時間スケールは観測的に $10^6$ から $10^7$ 年程度であると見積もられており<sup>2)</sup>、これが惑星形成（特に、ガス惑星形成）に使える時間ということになる。

しかし、このように円盤の姿を仮定して考察を進めていくと、惑星形成はいくつもの困難に突き当たる。一つの大きな問題は、ダストが惑星のサイズにまで成長できないという問題である。ダストが成長していくと、ダストにかかるガス抵抗力の強さが変わり、ダストとガスが一体として運動しなくなる。この時、ガス抵抗の影響でダストが中心星に落下するという「ダスト落下問題」や、ダスト同士の衝突速度が大きくなって破壊されるという「衝突破壊問題」が起る。これらについては天文月報に掲載された片岡章雅氏の記事<sup>3)</sup>に詳しいので、そちらを参照されたい。

第二の問題は、様々な困難をなんとか乗り越えられたと仮定して、円盤中に惑星が形成された段階で起る。形成された惑星は周囲の円盤と重力を介して相互作用をする。この相互作用は「円盤・惑星相互作用」と呼ばれる。惑星は円盤に対する非軸対称な摂動源とみなすことができるから、円盤と惑星との間で角運動量の交換が起る。もし惑星の軌道が円軌道に保たれるならば<sup>\*1</sup>、角運動

量の変化は惑星の軌道長半径の変化を意味する。最小質量円盤モデルを考えると、軌道長半径の変化の時間スケールは上記の原始惑星系円盤の存在する時間スケールよりも一桁程度短い。つまり、惑星が形成された後、惑星は円盤のある場所に留まることなく、円盤内を動径方向に「移動」することになる。この現象を「惑星移動」という。典型的な原始惑星系円盤を考えると、惑星移動は円盤の内側に向かって起り、せつかくできたはずの惑星が円盤から失われてしまう<sup>4)</sup>。これが「惑星落下問題」である。

以上のように、惑星形成には「原始惑星系円盤の姿が分からない」・「ダストが惑星まで成長しない」・「惑星ができたとしても円盤内を移動して落下する可能性がある」という、少なくとも3つの問題がある。他にも様々な解明すべき問題が多くあり、現実的な惑星形成シナリオの構築は道半ばというべきだろう。本稿では、これまでの筆者の取り組みとして「円盤・惑星相互作用の基礎過程」および「原始惑星系円盤の姿を見る」という二つのテーマについて触れる。

## 2. 円盤・惑星相互作用の理論的研究

まず、円盤・惑星相互作用の基礎過程に関する理論的な研究についてまとめておこう。これは筆者が大学院生の頃からポストドクの頃にかけて中心に取り組んできたものであり、本稿の内容も自身による天文月報の過去記事<sup>5)</sup>と重なる部分があることをご容赦いただきたい。

円盤・惑星相互作用は「円盤の中に惑星を置いたら何が起るか」という問題で、設定としては明快である。この問題に対するアプローチとしては線形解析（惑星が軽い場合）と数値計算があるが、線形解析は基本的に密度波理論の応用であり、数値計算についても比較的単純な設定で行うことができる。筆者が修士1年の終わりの頃、研

\*1 惑星の離心率がある程度低ければ、離心率が減衰する時間スケールが軌道長半径の変化する時間スケールより十分に短いことが知られている。

究テーマ探しも兼ねてある研究会に参加したところ「いかにも解けそう」と感じ、このテーマを選んだ。学部4年の時に触れたブラックホール摂動論と出てくる方程式の形がよく似ていて、式も理解できそうだと感じたということもある。当然ながら、思ったよりも難しかった。

## 2.1 円盤・惑星相互作用の基礎

円盤・惑星相互作用を調べるにあたり、惑星側・円盤側の立場から見て、大きく二つの問いを立てることができる。一つは惑星側から見た問いで、先述した惑星移動がどのようになるか、という問いである。もう一つは円盤の方に注目した問いで、惑星の重力の影響を受けた円盤のガスやダストの分布がどのようになるか、というものである。前者は最終的に形成される惑星系の様子がどのようになるかという観点から重要である。一方、後者については、原始惑星系円盤の直接撮像観測が可能になってきたことで観測的な観点からの重要性が増している。いずれの問いを考えるにしても、円盤・惑星相互作用の基礎的な過程を知っておく必要があるので、まず、簡単にこれをレビューしておこう。

最も単純な設定として、動径方向・方位角方向の二次元問題として扱う。軸対称で滑らかな面密度分布を持つ円盤内に、一つの惑星が円軌道で運動しているものとする。円盤を構成する流体は、重力と遠心力がほぼ釣り合ったケプラー回転をしている。実際には圧力勾配力もかかるから、円盤の回転はケプラー運動からは少しずれる<sup>\*2</sup>が、円盤・惑星相互作用の基本的な過程を理解するためには、このずれを無視しても構わない。惑星が円軌道にあるので、惑星とともに回転する座標系に移ると、惑星は中心星と円盤の系に対する定常的な摂動源とみなすことができる。したがって、この座標系で定常状態が実現すると考えるのが自然であろう。

達成されるべき定常状態を求めるためには、惑星と流体の間の相対速度に注目すると良い。まず、ガスの運動について考えよう。ガスの圧力と中心星の重力を比較したとき、円盤が「重力と遠心力の釣り合った状態にある」ということは、太陽の重力の方が非常に大きいことを意味している。ガスの持つ単位質量あたりのエネルギーで見れば、太陽の重力ポテンシャルとケプラー回転の運動エネルギーがほぼ同程度で、熱エネルギーはこれらに比較して十分に小さい。このことは円盤のガスが超音速で運動していることを意味している。また、ケプラー回転の角速度は太陽からの半径によって変化するので、円盤ガスは超音速の差動回転をしているということになる。

次に、この円盤の中に惑星を置くとうどうなるだろうか。惑星も円盤と同様にケプラー回転をしているから、惑星の位置では円盤ガスと惑星との間の相対速度はゼロである。しかし、惑星の位置から動径方向に離れた位置では、円盤が差動回転していることから、惑星と円盤の間の相対速度が生じている。先述のように、ケプラー回転は超音速であるから、動径方向に少しでも離れると相対速度は超音速<sup>\*3</sup>となる。したがって、円盤・惑星相互作用の定常状態を求める問題は、二次元超音速の流れにおける定常状態を求める問題に帰着する。この結果はよく知られており、超音速の流れの方向を時間方向とみなした時の特性曲線が、流れの形状を決めることになる<sup>6)</sup>。円盤回転の中心を原点に取った二次元極座標系  $(r, \theta)$  を取り、円盤の角速度  $\Omega$  の半径  $r$  に対する分布を  $\Omega \propto r^{-\alpha}$ 、音速  $c$  の分布を  $c \propto r^{-\beta}$  とする。惑星の軌道半径を  $r_c$  とし、方位角方向の位置を  $\theta_0$  とする。その半径での音速  $c(r_c)$  とケプラー速度  $r_c \Omega(r_c)$  との比を  $h_c = c(r_c)/r_c \Omega(r_c)$  とすれば、特性曲線は

<sup>\*2</sup> このずれは、円盤中のダストの運動を解析する上では無視できない、重要な効果である。

<sup>\*3</sup> 具体的には、円盤の厚みと同程度の距離よりも離れると相対速度が超音速になる。

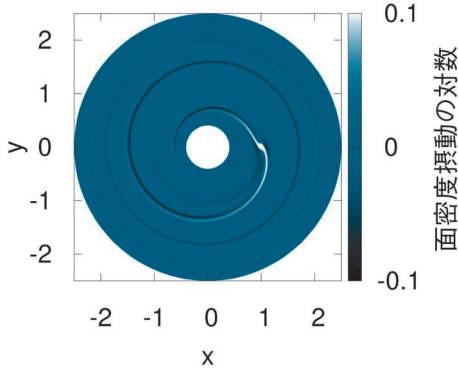


図1 原始惑星系円盤に海王星質量程度の惑星を置いた場合に周囲にできる密度構造の数値シミュレーション。位置 (1, 0) に惑星がある。

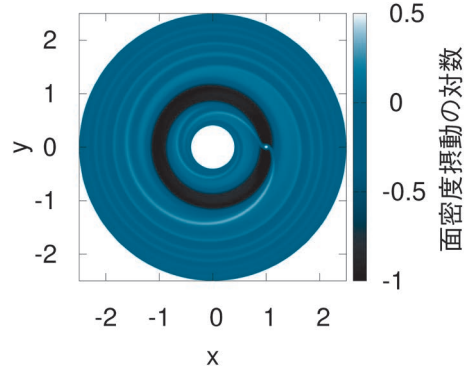


図2 原始惑星系円盤に木星質量程度の惑星を置いた場合に、周囲にできる密度構造の数値シミュレーション。

$$\theta(r) = \theta_0 - \frac{\text{sgn}(r - r_c) h_c}{h_c} \times \left[ \frac{(r/r_c)^{1+\beta} - 1}{1+\beta} - \frac{(r/r_c)^{1-\alpha+\beta} - 1}{1-\alpha+\beta} \right] \quad (1)$$

によって与えられる。これは惑星から円盤の内側と外側にそれぞれに伸びる渦巻き状の構造をしている。図1は海王星質量程度の惑星と円盤の間の重力相互作用の数値シミュレーション結果である。惑星のある位置付近から二本の渦巻き状の構造が出ているが、この形状が式(1)で近似できる。

さて、この渦巻き状の構造の実態は何であろうか。これは惑星の重力ポテンシャルによって励起される音波\*4である。すなわち、惑星の外側に励起されている構造は外向きに進む音波、内側に励起されている構造は内向きに進む音波であると解釈でき、これらの波が正・負の角運動量をそれぞれ外向き・内向きに運んでいる。波の運ぶ角運動量の源泉は惑星の公転の軌道角運動量であるので、円盤・惑星相互作用によって惑星の軌道角運動量に変化する。すなわち、惑星移動が起こることになる。ここで、惑星の内側に立つ波と外側に立つ波の持つ角運動量の符号が逆であるの

で、惑星の軌道角運動量の変化は内側・外側の波の持つ角運動量の大きさの差で決まることに注意しよう。惑星に対し、円盤の内側と外側は非対称であるので、二つの波の角運動量の大きさは異なり、惑星の軌道角運動量も変化する。

良く知られているように、音波は伝搬に従ってだんだんと切り立ちが起こり、衝撃波になる。すると、波の散逸が起こり、波の運ぶ角運動量が背景の円盤に受け渡される。したがって、円盤を構成する流体粒子の角運動量に変化することになり、背景の円盤自体の構造も変化する。惑星の外側にある流体は波から正の角運動量を受け渡されてより外側の軌道に移る。一方、惑星の内側にある流体は波から負の角運動量を受け渡されてより内側の軌道に移る。すなわち、惑星から離れるように円盤ガスの軌道が変化し、惑星軌道の付近には円盤の面密度が薄い領域が形成される。この領域は「ギャップ」と呼ばれる。惑星の質量が大きいほど励起される音波の強さも強くなり、より深いギャップが形成される。図2は円盤に木星質量程度の惑星を置いた場合の数値シミュレーション結果である。惑星の周囲に、面密度の薄い領域ができていることが見て取れるだろう。

\*4 密度波理論では short wave と呼ばれているものに対応する。



動は惑星より内側の円盤と外側の円盤に励起される波の持つ角運動量の差分が効いてくるプロセスであるので、どのような円盤を初期に仮定するかによって結果は変わってくる。したがって、さらに小さな質量の惑星でもギャップを形成できる可能性もあるということになる。この意味で、一概に「軽い質量の惑星はギャップを作らない」と言えない、という知見を得ることができた。その後の他グループの研究で、粘性の低い円盤では散逸が無いことに起因して様々なことが起こることが分かってきた。例えば、一つの惑星が複数のギャップ構造を作り出すということが数値計算によって示され<sup>12)</sup>、近年見えてきている複数のギャップ構造を持つ原始惑星系円盤に応用されている。

実際の円盤には何らかの散逸が存在する。特に重要なのは、円盤乱流による実効的な粘性の効果であろう。粘性は惑星によって励起された音波を円盤に散逸させるとともに、できたギャップの構造を埋める効果がある。したがって、粘性がある円盤では、惑星がギャップをあけようとする効果と粘性がギャップを埋めようとする効果が釣り合い、定常状態が実現されると考えられる。この状態は金川和弘氏（東京大学）を中心として最近詳しく調べられており、どのような惑星であればどのような深さや幅のギャップが作られるかというモデルができて<sup>13-15)</sup>。

### 2.3 村主崇行さんのこと

さて、少し話題が逸れるが、この機会に筆者の大学院生当時の思い出を少しだけ記しておきたい。筆者が博士課程三年の当時、研究室をシェアしていた学生の一人が、一学年下の村主崇行さんだった。村主さんはきわめて優秀なプログラマーであるとともに物理の直観にも優れ、そして何よりも、発想が非常に豊かで常に新しいアイデア（それも、周囲の人間が付いていけないような斬新さがある）を持っていた。一般的な常識では測れないような何かを持っている、そのような人

だった。

実は、先述した非粘性円盤におけるギャップ構造の形成に関する計算は、村主さんが作った計算機クラスタを主に用いて行われたものであった。彼自身は原始惑星系円盤における雷放電に関する研究を行っており、同室で様々な議論を行っていた。（もう一人の同室だった樫山和己氏（東京大学）にとっては、非常に迷惑だったかもしれない。）筆者が博士号を取得した時、村主さんは博士課程二年で京都大学の白眉プロジェクトに採用された。彼が常日頃から話していた「微分方程式の解くコードの自動生成」について、筆者は「できたら面白いかもしれない」くらいにしか思っていなかったのだが、このような形でその発想を高く評価され、自身の不覚を反省したものである。

村主さんのような天才的な人間と同室で一年間を過ごせたことは筆者自身の宝となっている。それだけに、2017年に彼の訃報に接した時は大変に残念だった。第一報は職場から帰宅途中に受けたが、余りのショックで、近くの公園のベンチにしばらく座り込んでしまった。ご家族に改めてお悔やみを申し上げることも出来ず、時ばかりが過ぎてしまった。この場を借りて、村主さんのご冥福をお祈りいたします。

現職の工学院大学には「先生の本棚」という、教員が推薦する本を紹介するコーナーがある。そこで、ある教員が村主さんの翻訳した『すごい Haskell 楽しく学ぼう』を紹介していた。当然、村主さんとは直接の面識のない方である。改めて、村主さんの影響力の大きさを実感したものである。

## 3. 原始惑星系円盤構造の観測

### 3.1 力学構造の観測に必要な空間分解能

ここまで、円盤・惑星相互作用の観点から、円盤に励起される渦巻き構造やギャップ構造について述べてきた。それでは、このような力学構造を

実際に観測して確かめることはできるだろうか。まずは、そのために必要な望遠鏡の性能への要求についてまとめておこう。

原始惑星系円盤の力学を支配する重要な物理パラメータは、円盤の音速 $c$ である。例えば、円盤・惑星相互作用の基礎過程の部分でも述べたように、原始惑星系円盤中に置かれた惑星は渦巻き状の音波を励起するが、その伝搬速度は $c$ である。また、力学過程の典型的な時間スケールはケプラー時間、すなわちケプラー回転の角速度 $\Omega$ の逆数程度の時間である。そこで、音速とケプラー時間から長さの次元を持つ量を作ると、 $c/\Omega$ 程度になる。これは円盤の厚みと同程度の大きさになるが、典型的には半径の1/10から1/100程度の量である。したがって、原始惑星系円盤の広がりや100天文単位程度とすると、空間分解すべき長さスケールはおおよそ10天文単位程度以下ということになる。

地球に最も近い原始惑星系円盤はTW Hyaという星の周囲にあり、距離はおおよそ60パーセクである。また、多くの原始惑星系円盤は星形成領域にあるが、例えば近傍のおうし座分子雲であれば、距離は140パーセク程度である。そこで、このくらいの距離で10天文単位を十分に空間分解しようとするれば、望遠鏡には0.1秒角程度かそれ以下の空間分解能が求められる。これを可視光・赤外線領域で行おうとすると、8メートルクラスの望遠鏡が必要になる。また、波長が1,000倍あるミリ波・サブミリ波の波長帯では、必要な望遠鏡の大きさは10 km程度ということになる。つまり、すばる望遠鏡やALMAなどを用いることで、初めて原始惑星系円盤の構造を捉えることができ、原始惑星系円盤における力学過程に迫ることができることになる。

### 3.2 すばる望遠鏡による原始惑星系円盤の構造の観測

すばる望遠鏡の最初の戦略的観測として2009年に観測が開始されたSEEDSプロジェクトは、

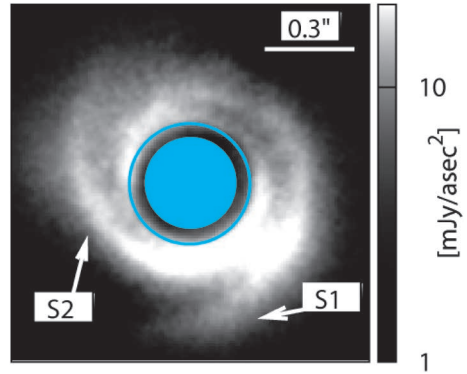


図3 SAO 206462の周囲の原始惑星系円盤の詳細構造。S1およびS2がこの観測で発見された渦巻き状構造。中心の塗りつぶしはコロナグラフで隠された領域を示し、その外側の円よりも外側の構造がリアルな構造であると考えている。筆者による天文月報記事<sup>17)</sup>の図2を再掲。

田村元秀氏（東京大学）をPIとする、系外惑星の直接撮像および原始惑星系円盤の直接撮像を目的としたプロジェクトである。筆者はこのプロジェクトに2010年頃から参加し、初期の段階から観測データに触れる機会を得られた。

その中で、SAO 206462という星の周囲の円盤に渦巻き状の構造が存在することが発見された（図3）。筆者はこのデータについて、渦巻き構造の形状を抜き出したうえで式(1)を用いてフィットし、円盤の温度（音速）や渦巻き構造の励起源の位置などを議論した<sup>16)</sup>。赤外線の観測にこの式をフィットして良いのか、という議論があることは承知の上でのことであるが（より詳しい解説は、筆者による天文月報記事<sup>17)</sup>を参照）、この観測はSEEDSプロジェクトのごく初期の段階で得られたものであり、そもそもここまでの空間分解能で円盤構造が見えた例がそれまではほとんどなかった。このような状況では、円盤構造の観測からサイエンスとして何が導き出せるのか、というアイデアを出すことが重要であった。そこで、一つの解析の可能性を提案をするという観点から、一歩踏み込んだ解析を行った。筆者自身にとって、原始惑星系円盤の渦巻き構造に関する理解が深まっ

てきたところでこの観測データが出てきたのは非常に幸運なことであった。

### 3.3 ALMAによる原始惑星系円盤の構造の観測

SEEDSプロジェクトによるデータが溜まり始めたタイミングでALMA望遠鏡の科学観測が開始され、今度はミリ波・サブミリ波の領域で原始惑星系円盤の高解像度観測が可能になった。近赤外線観測では主に円盤の表面構造を観測することになるが、ミリ波・サブミリ波ではまさに惑星形成の現場とも言える、円盤中心面の観測が可能になる。

ALMAの初期観測ではまだ0.4秒角程度の空間分解能しか達成されていなかったが、既存の電波干渉計をはるかに凌ぐ感度を持っていた。筆者が関わったALMA初期観測の成果の一つとして、深川美里氏（国立天文台）によるHD 142527周囲の原始惑星系円盤の観測を挙げる<sup>18)</sup>。これは、それまでの観測から中心にダスト面密度の小さな穴状の構造が大きく広がっていると考えられていた、明るい原始惑星系円盤である。観測の結果、この円盤にはダストからの連続波放射の分布に強い偏りがあったが、ガスにはそこまで強い偏りが無かった（図4）。惑星が形成されるためにはダストが集積することが必要だが、ガス分布とダスト分布の違いがはっきりと見え、ダストが集積していると考えられる領域が見つかったことはALMAの特筆すべき初期成果であるといえる。その後、筆者は花輪知幸氏（千葉大学）や百瀬宗武氏（茨城大学）らとこの観測結果をより詳細に調べ、ダスト連続波放射の強い部分ではガスの面密度がダストの面密度の3倍程度しかない可能性を指摘した<sup>19)</sup>。これは星間空間でのガス・ダスト比（およそ100:1）に比較して明らかにダスト量が多い。原始惑星系円盤の状態は星間空間とは大きく異なっていることが改めて示された。

ALMAの長基線観測が可能になると、さらに円盤に様々な構造が見出された。長基線観測として初めてのデータとして公開された若い星HL

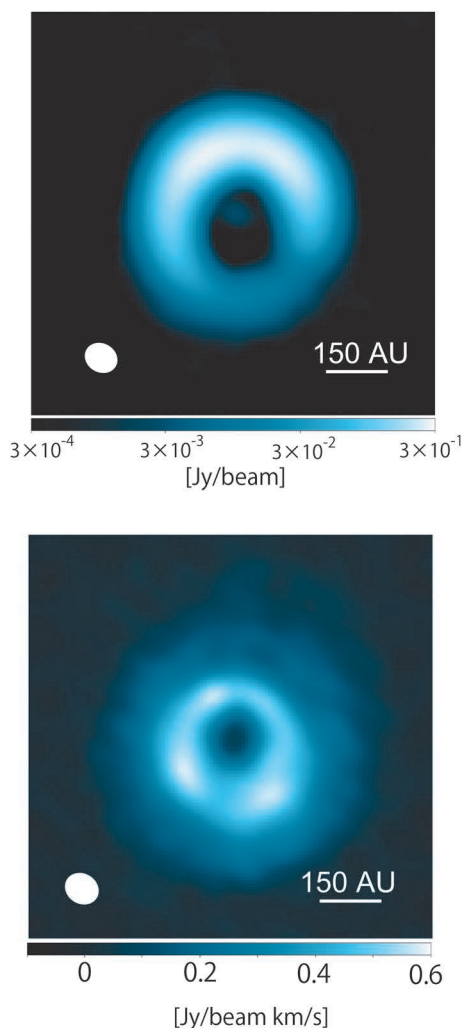


図4 ALMAによるHD 142527周囲の原始惑星系円盤の観測。上：ダスト連続波放射。下： $^{13}\text{CO}(3-2)$ 輝線放射の積分強度。

Tauの周囲の円盤には、いくつかのリング状のギャップ構造が見出された<sup>20)</sup>。この観測に対し、もし惑星がギャップを作っているとしたらどの程度の質量になるだろうか、という問題はすぐに立てることができる。これに対し、金川和弘氏が中心となり、筆者も参加してギャップを作りうる惑星の質量を見積もり、0.3木星質量程度という値を得た<sup>13, 14)</sup>。HL Tauの観測以前からギャップに関する研究をしていたところでこのデータが出て







## 謝 辞

本稿は2018年度日本天文学会研究奨励賞の受賞にあたり執筆をいたしました。これまで数多くの共同研究者に恵まれ、理論・観測の両面から原始惑星系円盤の研究を進めていくことができました。本文中に名前を挙げた方以外にも、多くの共同研究を行ってきました。改めて、皆様に感謝をいたします。特に京都大学大学院在籍時の指導教員であった犬塚修一郎准教授（現、名古屋大学教授）、東京工業大学での学振受け入れ教員であった井田茂教授に感謝の意を表します。最後に、これまで支えてくれた家族に深く感謝をいたします。

## 参考文献

- 1) Hayashi, C., et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, eds. Black, D. C. & Matthews, M. S., (University of Arizona Press, Tucson)
- 2) Alexander, R., et al., 2014, in *Protostars and Planets VI*, eds. Beuther, H., Klessen, R. S., Dullemond, C. P., & Henning, T., (University of Arizona Press, Tucson)
- 3) 片岡章雅, 2014, 天文月報, 107, 208
- 4) Tanaka et al., 2012, *ApJ*, 565, 1257
- 5) 武藤恭之, 2010, 天文月報, 103, 688
- 6) ランダウ L. D., リフシツ E. M., (竹内均訳), 1971, 流体力学2 (東京書籍), 第12章
- 7) Muto, T., et al., 2008, *ApJ*, 679, 813
- 8) Muto, T., & S.-I., Inutsuka, 2009, *ApJ*, 701, 18
- 9) Muto, T., et al., 2011, *ApJ*, 737, 37
- 10) Muto, T., et al., 2010, *ApJ*, 724, 448
- 11) Muto, T., & S.-I., Inutsuka, 2009, *ApJ*, 695, 1132
- 12) Dong, R., et al., 2017, *ApJ*, 843, 127
- 13) Kanagawa, K. D., et al., 2015, *ApJL*, 806, L15
- 14) Kanagawa, K. D., et al., 2016, *PASJ*, 68, 43
- 15) Kanagawa, K. D., et al., 2017, *PASJ*, 69, 97
- 16) Muto, T., et al., 2012, *ApJL*, 748, L22
- 17) 武藤恭之, 2013, 天文月報, 106, 195
- 18) Fukagawa, M., et al., *PASJ*, 65, L14
- 19) Muto, T., et al., 2015, *PASJ*, 67, 122
- 20) ALMA Partnership, 2015, *ApJL*, 808, L3
- 21) Kudo, T., et al., *ApJL*, 2018, 868, L5
- 22) Tsukagoshi, T., et al., 2019, *ApJL*, 878, L8
- 23) Sheehan, P., & Eisner, J., 2017, *ApJL*, 840, L12
- 24) Okuzumi, S., et al., 2016, *ApJ*, 82, 24
- 25) Takahashi, S., Z., 2018, *ApJ*, 865, 102
- 26) Andrews, S. M., 2018, *ApJL*, 869, L41

## Dynamics and Observations of Protoplanetary Disks

Takayuki MUTO

*Division of Liberal Arts, Kogakuin University,  
2665-1 Nakano-cho, Hachioji-shi, Tokyo 192-0015, Japan*

Abstract: Planets are formed in protoplanetary disks from sub-micron size dust particles. Various physical and chemical processes are involved in the course of planet formation. A consistent, realistic scenario of planet formation is yet to be developed. Moreover, recent observations of protoplanetary disks, especially with eight-meter class optical/infrared telescopes and ALMA, have discovered a number of new features. In this article, I present theoretical and observational studies of protoplanetary disks which I have been involved in so far and discuss the outlook of planet formation studies. I present theoretical studies of disk-planet interaction and observations of detailed morphological structures of protoplanetary disks. I also mention the work environment at a private university, which I am affiliated with.