# 円盤多波長直接撮像観測と円盤モデル

#### 武藤 恭之<sup>1</sup> 2010年10月11日受領, 2010年10月29日受理,

(要旨) 原始惑星系円盤の直接撮像観測は,現在ハワイのすばる望遠鏡を用いた集中的な観測が進められている.また,チリに建設中で間もなく初期運用が開始されるALMA 望遠鏡を用いると,サブミリ波からミリ波の領域で,赤外線の観測と同程度かそれ以上の分解能で原始惑星系円盤の直接撮像観測が実現できるようになると期待できる.このような状況を踏まえ,本稿では原始惑星系円盤の直接撮像観測から円盤に対してどのような情報を引き出すことができうるのかということを例を挙げて示したい.まず,原始惑星系円盤 中に惑星が存在したらどのような構造が観測されるのかということを議論する.また,別の例として,電波と赤外の観測の情報を利用して円盤の質量について制限を与えるようなモデルを提案する.

## 1. はじめに

原始惑星系円盤は、若い星の周囲のガスと塵粒子か らなる円盤であり、惑星の生まれる現場だと考えられ ている.近年の観測技術の発展により、原始惑星系円 盤の写真を撮ることが可能になってきている.現在、 星周円盤の観測は、近赤外線の領域ではハワイのすば る望遠鏡を用いた戦略枠プロジェクトSEEDS などに よって精力的に進められている.また、電波の領域で は電波干渉計SMA を用いた観測も進められているが、 近赤外線ほどの分解能は達成できていない.しかし、 近いうちに初期観測が開始される予定であるチリの電 波干渉計ALMA を用いると、サブミリ波の領域でも 非常に高い分解能が実現されると期待されるため、電 波観測も今後急激に進展すると考えられる.

近年の近赤外線の観測によって,原始惑星系円盤は 非常に豊かな構造を秘めていることがわかってきた. たとえば,Fukagawa et al. [1] による AB Aur 周囲の 円盤の構造の観測では,100 天文単位程度の広がりを もったスパイラル状の構造が観測された.この天体は, より中心星に近い領域(約20 天文単位)までの観測が 最近なされ, さらに豊かな構造が多く存在していることが分かっている[2].

このように、新しい観測が多く出てくることが期待 される状況において、理論の立場からは何が必要にな るだろうか.それは、円盤の詳しいモデルを作り、観 測される構造は円盤のどのような状態に対応している かを明らかにしていくことであろう、本稿では、円盤 の物理状態とそこから観測されるであろう構造に関し て、いくつかテーマを絞って述べていきたい.

#### 2. 直接撮像観測でみる円盤

まず,このセクションではどの波長で円盤のどのような情報が得られるのかということを簡単にまとめておこう.

原始惑星系円盤の観測によって見える光には,主に 二つの種類がある.一つは中心星の放射が円盤によっ て散乱される散乱光であり,いま一つは円盤そのもの からの熱放射である.まず,近赤外線およびサブミリ 波の領域において,これらのうちどちらが見えるのか ということを調べよう.

原始惑星系円盤のモデルとしてよく用いられるのは, 最小質量円盤モデル(惑星形成論まで含めたレビュー

<sup>1.</sup> 東京工業大学大学院 理工学研究科 muto@geo.titech.ac.jp

としてHayashi et al. [3]) である. このモデルでは, 原始惑星系円盤の面密度として

$$\Sigma(r) = 1.7 \times 10^3 \left(\frac{r}{1 \text{AU}}\right)^{-3/2} \text{g/cm}^2$$
 (1)

また温度として

$$T(r) = 2.8 \times 10^2 \left(\frac{r}{1 \text{AU}}\right)^{-1/2} \text{K}$$
 (2)

という値が用いられている. ここに, r は中心星から の距離である.

まず,近赤外線の領域を考えよう.この波長帯での 質量吸収係数はおおむね10-100cm<sup>2</sup>/g程度であるか ら,円盤の高さ方向の光学的厚みは円盤のほとんどの 領域で1を超えていることが分かる.したがって,円 盤中心面から出た光は観測者には届くことがない.ま た,円盤の温度が低いために,円盤からの熱放射はそ もそも非常に小さい.したがって,近赤外線では中心 星からの光が円盤の上層部で散乱された光を主に観測 することになる.つまり,すばる望遠鏡などで見える 近赤外線の波長域では,原始惑星系円盤の上層の構造 が反映されているということになる.

一方,電波の領域では質量吸収係数は10<sup>-2</sup>cm<sup>2</sup>/g 程度まで下がってくる.すると,たとえば直接撮像で 受かってくることが期待される,半径100AU程度の 領域では、円盤は光学的に薄い.また,このあたりの 領域では円盤の温度も10K 程度であるので,円盤の 熱放射が最も主要な放射になるということがわかる. つまり,電波観測においては円盤を見通すことができ, たとえば視線方向に積分した円盤の面密度といった量 を観測できることになる.

このように,一言で円盤の直接撮像観測といっても, 見ている情報は波長によってかなり異なることが分か る.したがって,それぞれの波長に合わせた円盤モデ ルを作っていくことが重要になる.また,円盤の違う 場所を見ているということは,多波長の観測の情報を 用いることによって,円盤に関してより多くの情報が 導き出せるということを意味する.この点からも,赤 外線の観測と同程度の分解能を電波領域で達成できる ALMA 望遠鏡は,原始惑星系円盤の観測において重 要な役割を果たすと期待できる.

原始惑星系円盤の直接撮像観測を議論するうえでも う一つ重要なことは、どの程度の大きさの構造が見え るかという点である.望遠鏡の解像度をおおむね0.1 秒角と考えると、もし原始惑星系円盤が地球から100 パーセクの距離にあるとすれば、だいたい10 天文単 位程度の大きさの構造が分解して観測できるというこ とになる.この10 天文単位という数字は、中心星か ら100 天文単位程度の距離における円盤のスケール高 さの程度の量である.ここに、スケール高さとは円盤 の厚みの目安となる量で、円盤の音速cをケプラー角 速度で割った程度の大きさである.この量は力学的に は重要な長さのスケールで、円盤の厚み方向の高さを 決めるだけでなく、円盤面内の構造に関してもこの程 度の大きさの変化が出てくると考えられる(詳細は後 述する).したがって、中心星から離れた領域に関し ては、円盤の上の力学的な相互作用の現場を直接撮像 観測によってそのまま捉えることができると期待でき る.

# 円盤・惑星相互作用と円盤中の 惑星の証拠

ここまでで、円盤の直接撮像観測によって原始惑星 系円盤上の詳細な構造をみることができるようになる と期待できることを述べた。それでは、その構造とは 具体的にはどのようなものであると期待されるであろ うか.まずこのセクションでは、円盤・惑星相互作用 を例にとって考えてみよう。

円盤・惑星相互作用とは、原始惑星系円盤とその中 に存在する惑星との間の重力相互作用のことである。 原始惑星系円盤中に存在する惑星は、周囲のガスと重 力的に相互作用する結果、原始惑星系円盤に特徴的な 面密度の構造を作る。その構造は、軽い惑星の場合は、 密度波と呼ばれるスパイラル状の構造になる。一方で 重い惑星の場合は、惑星軌道の周囲のガスを軌道反発 で弾き飛ばしてしまう結果、惑星の軌道の周囲に面密 度の小さい領域(ギャップと呼ばれる)を作る。

円盤・惑星相互作用の基礎過程についての詳細は, 筆者による『天文月報』の記事[4]にあるので割愛する が,簡単にその概要をここでまとめておこう.

軽い惑星の場合,原始惑星系中の惑星は円盤中に密 度波を励起するが,その定性的な性質は線形解析によ って調べることができる.密度波とは,円盤中に励起 された非軸対称な音波のことである.簡単のため,円 盤は中心星の重力と回転の遠心力の釣り合ったケプラ ー回転している状態にあるとし,惑星はその円盤中の



図1: 線形解析によって求めた惑星周囲の密度の揺らぎ.

ある半径の部分を円軌道していると仮定する.このと き,惑星の角速度と同じ速度で剛体的に回転している 座標系に移ると,その系で惑星は止まって見える.一 方で原始惑星系円盤のガスは,惑星の軌道の場所では 止まっているように見えるが,惑星の軌道半径から離 れた場所では方位角方向に相対速度を持っている.つ まり,円盤ガスと惑星の間には相対速度が存在し,そ の大きさは惑星から離れるほど大きくなる.

さて、この円盤上には惑星重力によってどのような 揺らぎが励起されるかを考えよう.まず、回転系では 惑星が止まっているのだから、この系では揺らぎは定 常的に見えると考えられる.流体力学の二次元超音速 定常流に関する結果を用いると、惑星と円盤との相対 速度が音速を超えるような領域で励起された摂動は、

その相対速度の方向に向かって伸びたような構造にな るということが知られている[5].いま,惑星軌道の 内側のガスは惑星よりも速く回転しているから,惑星 軌道の内側にできた構造は惑星の回転速度の方向に引 き伸ばされているということがわかる.一方,惑星軌 道の外側のガスはゆっくりと回転しているために,惑 星の回転速度と逆の方向に引き伸ばされる.したがっ て,惑星との相対速度が超音速になるような領域では, 惑星による摂動の結果,惑星を中心に方位角方向に引 き伸ばされたような構造ができるということがわかる.

惑星と円盤ガスの相対速度が音速程度になるような 点(この点は音速点と呼ばれる)は、惑星からスケー ル高さH 程度離れた場所にある.この場所において 励起される密度の揺らぎの大きさから、密度波の振幅 を見積もってみよう.惑星からスケール高さ程度離れ た場所での惑星の重力エネルギーの大きさは $GM_p/H$ 程度である.ここにGは重力定数、 $M_p$ は惑星の質量 である.このエネルギーが、円盤ガスのエネルギーの 揺らぎ(より厳密にはエンタルピー)と同程度の大きさ になると考えられる.面密度 $\Sigma$ の円盤ガスに対し、  $\delta\Sigma$ の揺らぎがあった時、円盤ガスのエネルギーの揺 らぎの大きさは、音速をcとすると $c^2 \delta \Sigma / \Sigma$  と見積 もられる.したがって、惑星がたてる密度波の典型的 な振幅は

$$\frac{\delta \Sigma}{\Sigma} \sim \frac{G M_{\rm p}}{H c^2} \tag{3}$$

程度になる.したがって,揺らぎの大きさは惑星質量 に比例している.たとえば、中心星から100天文単位 の距離に存在する0.1木星質量程度の惑星の場合,だ いたい10%程度の揺らぎになることがわかる.

図1に,線形解析によって求められた惑星近傍の円 盤密度の揺らぎを示す.この図では,原点に中心星の 周囲を円軌道で回転する惑星が存在し,横軸が円盤の 動径方向,縦軸が円盤の方位角方向を表す.惑星近傍 に限った計算を行ない,等高線は密度のゆらぎを表す.

図1には、式(3) でのパラメタ GM<sub>p</sub>/Hc<sup>2</sup> を1と置い た計算を表すが、惑星質量に比例して揺らぎの大きさ は変化する.また、この図の横軸・縦軸は、それぞれ スケール高さで規格化された長さを表している.図1 において、惑星を中心に斜めに伸びた構造ができてい る.この構造が密度波であり、だいたいその幅がスケ ール高さ程度で、方位角方向には拡がった構造になっ ているということが分かる.

軽い惑星と原始惑星系円盤の間の重力相互作用は, Goldreich と Tremaine による線形解析[6] を端緒とし て,現在も精力的に研究がされている。特に,惑星と ガスの相対速度が亜音速となるような惑星近傍の構造



図2: すばる望遠鏡で、地球から140パーセクの位置に存在し、 中心星から100天文単位離れた場所に質量比2.5×10<sup>-4</sup>の 惑星が存在するような原始惑星系円盤を1.6μmの波長帯 で観測した場合に得られると予想される画像。図の横軸・ 縦軸は秒角単位で表してあり、色は円盤の明るさをmJy/ asec<sup>2</sup>の単位で表している.図の左側の黒くなっている場 所に惑星が存在し、そこから上側に密度波の構造が見えて いる.

については円盤の状態に依存する部分が大きく,まだ 明らかになっていない部分も多い.しかし,相対速度 が超音速となるような惑星から離れたところに励起さ れている密度波の構造についてはある程度の理解が得 られている.

惑星の質量が大きく,パラメタ*GM*<sub>p</sub>/*Hc*<sup>2</sup>の大きさ がだいたい1 程度の大きさになると,惑星はその軌道 半径の付近にギャップを作るようになる.つまり,中 心星から100 天文単位程度の距離にある惑星を考えた 場合,だいたい惑星の質量が木星質量程度を超えると ギャップを作るようになる.ギャップの幅や深さに関 する研究は,たとえばCrida et al. [7]によるものがあ るが,惑星の質量が大きければそれだけ深くて幅の広 いギャップが生成され,スケール高さの数倍程度まで 拡がったギャップが生成されると考えられている.

なお、ギャップ生成の詳しいメカニズムや、ギャッ プをあけるための惑星質量の評価の詳細は、円盤の状 態にも依存するということも分かってきた。特に乱流 粘性の小さい静かな円盤に関しては、軽い質量の惑星 についても長時間待てばギャップがひらく可能性があ るということも指摘されている[8,9].

円盤構造の観測という観点からみると、ギャップを 作るような大質量の惑星のほうが、円盤全体により拡 がった構造を作るために観測しやすいと考えられる しかし、惑星の作る密度波も方位角方向には拡がった 構造をしており、また中心星から十分離れた場所に惑 星が存在すれば、スケール高さ程度の構造も分解可能 である。図2には、地球から140パーセク離れた場所 に存在する原始惑星系円盤をすばる望遠鏡を用いて観 測した場合にどのような構造が見えるかということを 流体力学の数値シミュレーションの結果をもとに計算 した図を載せる、この円盤には、中心星から100天文 単位離れた場所に中心星との質量比が2.5×10<sup>-4</sup>の惑 星が存在しているとしている.中心星の温度は10<sup>4</sup>K, 中心星の半径は2.3 太陽半径を仮定し、中心星の質量 を2太陽質量としたときに円盤の惑星の位置での面密 度は2.7g/cm<sup>2</sup>. スケール高さと半径の比は0.06となる ように円盤のパラメタを仮定した.また、円盤面密度 は半径の-2.3乗、スケール高さと半径の比は半径の 0.27 乗に比例するようなモデルを採用した<sup>1</sup>. 惑星の 付近から上方に向かって密度波の構造が見えているこ とが分かる.

ここまで,惑星は,円盤・惑星相互作用の結果,原 始惑星系円盤中に拡がった構造を作るということを述 べてきた.このことは,原始惑星系円盤中に存在する であろう惑星を探すうえで非常に重要な点である.基 本的に惑星は点源だから,直接撮像の画像から惑星そ のものからの光を観測することは決して容易なことで はない.また,惑星がガスに埋もれてしまっていれば, 惑星からの光が届かないということも考えられる.し かし,円盤・惑星相互作用によって励起された円盤上 の構造は拡がっているために,比較的簡単に画像とし て得ることができる.そのような構造のパターンを解 析することによって,どのような質量の惑星が惑星が どの場所にあるのかといった情報が得られると期待で きる.

しかし,原始惑星系円盤に構造を作る原因は,惑星 のみに限られているわけではない.たとえば,原始惑 星系円盤内に起こっている乱流が原因となって円盤内 に構造ができる可能性もある.そこで,原始惑星系円 盤において観測された構造が本当に惑星のものである

<sup>\*1</sup> これらの値は、AB Aur の観測から示唆されている値を採用 している.

のかどうかを検証する必要がある.その方法として有 力だと考えられるのが、構造の時間変化の観測である. 惑星が原始惑星系円盤の中に励起する構造は、基本的 には惑星が中心星の周囲を回転する速度で一緒に回転 している.その角速度はケプラー角速度であるから、 もしも惑星が50天文単位の場所にあれば、一年間で 約1度程度動く.この程度の変化であれば、数年間の 観測によって検出することが可能であると考えられる. ここで注意すべきことは、円盤のあらゆる場所におけ る構造は同じ角速度で動くということである.つまり、 惑星から動径方向に離れた場所にある構造も、その場 のケプラー角速度で動くのではない.これに対し、た とえば磁気乱流が原因となって生まれた構造は、その 構造がある場所での円盤の回転角速度と同程度の速度

で動くと予想される.したがって,長期間の構造の時 間変化の観測によって,原始惑星系円盤に惑星が存在 することの強い証拠が得られるのではないかと期待で きる.

# 円盤構造から円盤の物理状態を探る可能性

ここまで,原始惑星系円盤における構造の観測から, 円盤中に存在するであろう惑星の証拠をいかに捉える かということを議論してきた.しかし,原始惑星系円 盤の構造は,惑星以外にも色々な情報を含んでいると 考えられる.そこでこのセクションでは,円盤構造の 観測から円盤の物理状態を推定する可能性について, 一例を挙げて議論したい.とくに,これら多波長のデ ータを組み合わせることで何か円盤の状態に対して制 限を付けることができないだろうかということを考え てみたい.

問題を絞るために、今回は面密度分布にギャップが 存在するような円盤を観測するということを考える. そして、ギャップ周囲の構造を詳細に観測することで、 円盤の質量に対して制限を与えられる可能性があると いうことを提案したい[10].

今回考えるモデルとして, 面密度分布が

$$\Sigma(r) = 2.7\alpha g(r) \left(\frac{r}{100 \text{AU}}\right)^{-3/2} \text{g/cm}^2 \qquad (4)$$

で与えられるような円盤を考える.ここにαは適当 な数で円盤全体の面密度がどの程度であるかをパラメ トライズしている.また,g(r)はギャップの形と深さ を決める関数で、今回は100天文単位の位置で95%の ガスが無くなっているような幅30天文単位のガウシ アンの形をしたギャップを考える.ギャップができる 原因としては、たとえば重い惑星による摂動などを考 えているが、今回は特にその原因を特定することなく、 もしもこのような面密度の構造があったらどのように なるかということを議論したい.

今回は、αの値を色々と変化させ、円盤の自己重 力を含めて円盤の垂直方向の構造を求め、その円盤が どのように観測され、どのような特徴が現れるのかと いうことについて議論したい、円盤の垂直方向の構造 を求める際には、この方向に円盤が静水圧平衡にある ことを仮定する、円盤の自己重力も考慮に入れ、ポア ッソン方程式を満たすように密度分布を定める、垂直 方向の構造を求める際には、円盤の温度に関する情報 が必要になる、これについては、動径方向に

$$T(r) = 30 \left(\frac{r}{100 \text{AU}}\right)^{-1/2} \text{K}$$
(5)

と与えられるものとし、円盤の高さ方向には等温と仮 定する.この仮定は、現実にはあまり成立していない 可能性もあるが、今回は円盤自己重力の効果に特に注 目するために等温とした.鉛直方向の温度構造につい ては、今後より自己無撞着な方法で考慮に入れていく べきことである.また、密度構造から観測される円盤 構造を求める際には、赤外線および電波の領域での観 測を想定し、散乱光と熱放射を計算した.散乱光の計 算では一回散乱を仮定し、多重散乱は無視している. 円盤中の塵粒子の光学特性には大きな不定性があるた め、それぞれの波長域で全吸収係数を5倍程度変化さ せて計算を行なった.また、円盤を真上から見ている と仮定して計算した.

ここで、今後の議論に重要になる量として、 ToomreのQパラメタを導入しておこう.これは

$$Q = \frac{\kappa c}{\pi G \Sigma} \tag{6}$$

として定義される量で, κは円盤のエピサイクリッ ク振動数を表す.ケプラー角速度で回転する円盤につ いては,エピサイクリック振動数とケプラー角速度は 等しい. Toomre のQパラメタは,円盤の自己重力 がどの程度効いているかを表すパラメタで,Qが1よ り十分に大きければ自己重力の効果は無視できる.一 方で,Qが1に近いときは自己重力の効果が無視で



図3: ギャップの存在する原始惑星系円盤を観測した際のギャップ付近の明るさの分布.中心星から50天文単位離れた場所での明るさで規格化している.横軸は中心星からの距離,縦軸は相対的な明るさを示している.左は近赤外線で 観測した場合,右は電波で観測した場合を表し,実線は軽い円盤(Q = 15程度),点線は重い円盤(Q = 2程度)を表す.

きなくなり, *Q* < 1 となると軸対称の摂動に対し自己 重力不安定が起こる.

図3には、求められた散乱光と熱放射の分布の一例 を示す、今、軸対称の円盤を上から見た場合を考えて いるから、観測される光も軸対称である、そこで、図 3には、明るさの動径方向の分布のみを示してある、 また、観測される構造がどうなるかということに注目 するため、中心星から50天文単位のところの明るさ で規格化した分布を示している、この図を見てわかる ことは、電波観測では基本的に重い円盤でも軽い円盤 でも同じような明るさの分布が観測されるのに対し、 近赤外線の散乱光では異なる構造になるということで ある、特に散乱光の観測では、重い円盤の場合、100 天文単位付近のギャップの領域の手前に、構造として 少し明るい領域(ここではバンプと呼ぶことにする) ができる.

これらの構造がなぜできるのか,簡単な説明は次の ように与えられる.まず,電波で同じ形になるのは, セクション2で述べたように,基本的には明るさの分 布は面密度を反映しているためである.今回のモデル では,面密度の絶対値は異なるものの面密度の分布は 同じ形のモデルを考えているため,規格化された明る さで見ると同じような構造になる.

一方で,赤外線の散乱光で重い円盤の場合にバンプ ができることは,次のようにして理解できる.赤外線 の散乱光で見ているのは円盤表面の構造であるから, 円盤表面の高さがどのように分布しているかを理解で きれば良い.ここで,円盤の表面とは,中心星からの

光に対して光学的厚みが1程度の大きさになる点であ る。もしも自己重力の効果を全く考えなければ、円盤 表面の高さは面密度が増大するほど高くなる。なぜな らば、円盤の面密度が大きければそれだけ多くの物質 が存在するということなので、中心星から出た光はよ り高い位置で散乱されるからである。ところが、円盤 面密度が増えてToomre のQパラメタが小さくなり、 円盤自己重力の効果が効いてくると、その影響で円盤 の表面も円盤中心面に向かって引き下げられる。この 二つの効果を合わせて考えると、Qパラメタが中途半 端な大きさのときにもっとも円盤の表面が高くなると いうことが結論できる.今,円盤のQパラメタは,円 盤にギャップが存在するために動径方向に大きく変化 しているようなモデルを考えている. したがって. ギ ャップの端の部分で円盤の表面が最も高くなるという ことになる、この、ギャップ端での円盤表面の「盛り 上がり」を反映して赤外線の散乱光にもバンプができ ている.

このようにして考えると、ギャップ端のバンプの強 さが円盤のQパラメタと相関しているということが 予想される.これを示したのが図4で、横軸にはこの バンプの強さ、縦軸には中心星から35-50天文単位 の範囲で平均した円盤のQパラメタが描かれている. ここで、「バンプの強さ」は次のようにして求めた. まず、赤外線の明るさの動径分布のうち、あまりギャ ップの影響を受けていない35天文単位から50天文単 位の範囲のデータをベキ関数によってフィットする. 次に、求まったフィット関数で実際のデータを割り算



図4: 近赤外線で、ギャップの前に現れる盛り上がりの大きさと 円盤のQ値の関係.同じQパラメタ上の異なる点は、円盤 中の塵粒子の全吸収係数が異なるモデルに対応する.

することで,規格化された明るさの分布を求める.こ のとき,ギャップの影響を受けていない部分のデータ について,規格化された明るさの分布はほぼ1となっ ている.最後に,この規格化された明るさの分布のう ち,60天文単位(どのパラメタでもバンプ構造よりも 内側にある)から100天文単位(ギャップの最も深いと ころに近い場所)の範囲内での最大値を求め,その値 を「バンプの強さ」と定義した.これをみると,もし もバンプの強さがある程度強ければ,円盤のQパラメ タが精度よく定まる可能性があるということが示唆さ れる.

円盤の面密度は、電波の連続光の明るさから求める ことが一般的である.しかし、これで求まるのは質量 吸収係数 $\kappa$ と円盤面密度 $\Sigma$ の積であり、質量吸収係 数の不定性のために円盤面密度には少なくとも2倍程 度の不定性が存在する.しかし、今回の計算の結果は、 電波の観測である程度質量が分かっている天体に対し、 赤外線の散乱光の情報を組み合わせることで、重い円 盤に関してはより良く円盤の質量が求まる可能性があ るということを示唆している.なお、図4における「バ ンプの強さ」は、その導出の方法からもわかるように、 原理的には直接撮像観測によってわかる明るさの空間 的分布の観測量のみから定量化できる量であることに 注意したい.

もちろん,今回のモデルには多くの不定性があるこ とは注意しておかなければならない.特に,円盤の垂 直方向の温度分布の取り扱いに関しては,等温という 非常に簡略化したモデルを用いていることに注意して おこう.しかし、今回述べたバンプの構造は自己重力 の効いている円盤に特徴的な構造であると考えられる. 今後、温度構造まで考慮したモデルを作り、どのよう に自己重力の効果を引き出して円盤の質量に対する制 限を与えていけるかということをより詳しく検討して いき、将来の観測に対するモデルにつなげていきたい と考えている.そして、もしこのようなモデルを通じ て実際に重い円盤が見つかってくれば、重力不安定に よる惑星形成の現場を直接観測するということもでき るかもしれない.

### 5. まとめ

すばる望遠鏡やALMA 望遠鏡によって、赤外線か ら電波の領域で同じ分解能での原始惑星系円盤直接撮 像観測を行なうことが現実のものになりつつある.そ こで、理論の立場からは、円盤の構造から円盤の物理 状態を引き出すモデルを構築していくことが必要であ る.本稿では、このようなモデルの例として、円盤・ 惑星相互作用の理論を用いて円盤の構造から円盤に惑 星が存在するという証拠を掴むにはどのようにすれば 良いかということと、赤外線と電波の観測から円盤の 質量により強い制約を付けるためのモデルという二つ の話題を取り上げた.原始惑星系円盤の直接撮像観測 を行ない、円盤構造の時間変化や、構造の詳細な観測 を行なうことで、原始惑星系円盤の状態について多く のことが言える可能性が高い.そして、そこから惑星 形成に対する理解も深まっていくことを期待したい.

本稿を執筆する機会を与えてくださった編集長の田 中秀和氏およびコメントを頂いた査読者の百瀬宗武氏 に感謝いたします.筆者は,科学研究費補助金(特別 研究員奨励費22・2942)の補助を受けています.

# 参考文献

- [1] Fukagawa, M. et al., 2004, ApJ, 605, L53.
- [2] Hashimoto, J. et al., 2010, Submitted.
- [3] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, 1100.
- [4] 武藤恭之, 2010, 天文月報, 103, 688
- [5] ランダウL.D., リフシッツE.M. (竹内均訳), 1971, 流体力学,(東京図書)

- [6] Goldreich, P. and Tremaine, S., 1979, ApJ, 233, 857
- [7] Crida, A. et al., 2006, Icarus 181, 587
- [8] Yu, C. et al., 2010, ApJ, 712, 198
- [9] Muto, T. et al., ApJ, 724, 448
- [10] Muto, T., 2010, in preparation