

# 系外惑星「遠い世界の物語」その6

## ～SEEDSプロジェクトがとらえた原始惑星系円盤の複雑な模様～

橋本 淳<sup>1</sup>

(要旨) SEEDSプロジェクトでは惑星形成を観測的に理解するために、すばる望遠鏡戦略枠観測において原始惑星系円盤の近赤外線高解像度観測を推進してきた。今回、惑星形成と特に密接に関連がある天体として、最近注目を集めている遷移円盤天体についてSEEDSでの観測結果を紹介したい。SEEDSが始まる以前から遷移円盤には惑星との重力相互作用によって形成されたと考えられるギャップ構造が報告されていたが、SEEDSの高解像度かつ高コントラスト観測によって、ギャップ構造のみならずスパイラル構造やディップ構造など多様かつ複雑な微細構造が遷移円盤に付随していることが明らかになった。本稿ではSEEDSの遷移円盤探査について概観し、SEEDS後の遷移円盤探査についての展望を述べたい。

### 1. 遷移円盤観測の小史

原始惑星系円盤は惑星の形成母体であると考えられている。その円盤において形成中の惑星存在の可能性を早期に示唆したのは赤外線天文衛星IRASであった[1]。およそ25年前の話である。惑星が円盤内に埋もれていると円盤との相互作用によりスパイラルアームおよびギャップ構造が円盤に励起されることが理論的に予測されている[2]。ギャップ構造では円盤の面密度が減少するため、赤外線における輝度が減少し、近赤外線から中間赤外線における天体のスペクトルエネルギー分布(SED)にへこみが生じる(図1)。IRASを用いた観測により、若い天体のSEDにへこみが実際に確認され、ギャップ構造を持たないのっぺりした円盤とガスが消失した残骸円盤との中間の進化段階にあると考えられる円盤が観測的に報告されたのだ。現在ではこのようなギャップ構造を持つ(と考えられている)円盤は、遷移段階にある円盤という概念に基づき、遷移円盤と呼ばれている[3]。

円盤そのものの直接撮像が困難であった1990年代としては、ギャップ構造を特徴付ける中間赤外線にお

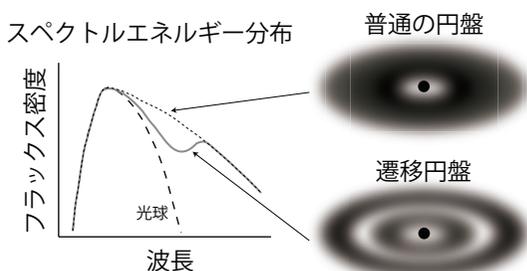


図1: ギャップのない普通の円盤と遷移円盤のSED。遷移円盤にはギャップ構造が付随するため、中心星近傍のホットなダストの面密度が下がり、近赤外線から中間赤外線におけるSEDにへこみが生じる。このため巨大なギャップが付随しているか否かはSEDを調べることで判別することが可能である。一方で、HL Tauに付随するような比較的細いギャップの有無をSEDのみから判断することはおそらく困難だろう。

けるSEDの構築は、遷移円盤の構造を理解する上で有効であったと考えられる。しかし、中間赤外線での地上観測は水蒸気による影響が甚大で、特に比較的暗いTタウリ型星の詳細なSEDの構築には宇宙からの分光観測を待たねばならなかったようだ。その後、21世紀になるとスピッツァー宇宙望遠鏡が打ち上げられ、中間赤外線における高精度の分光観測が可能となり、ギャップ構造の特徴付けのみならず、遷移円盤の新規検出数も飛躍的に増加した。広域赤外線探査衛星WISEの活躍もあり、現在までに450天体程度の遷移

1. 自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター・自然科学研究機構国立天文台  
jun.hashimoto@nao.ac.jp

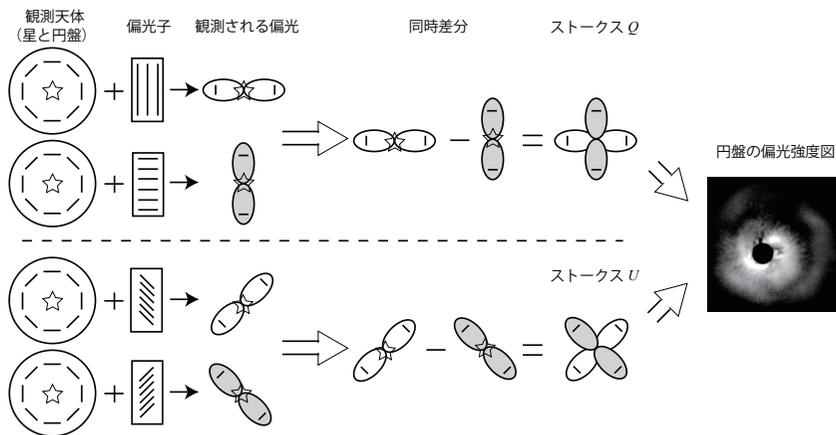


図2：同時偏光差分撮像の概念図。天体に付随する線分は偏光ベクトルを示す。HiCIAOでは直交する2つの偏光成分を同時に検出することができる。このとき、星の光は無偏光なので、偏光子通過後も2つの偏光成分は同じフラックス密度になる。さらに同時撮像であるため星像が一致し、差分をとることで星の成分を精度よく差し引くことができる。このようにして、高コントラストの円盤の偏光強度図を得ることができる。

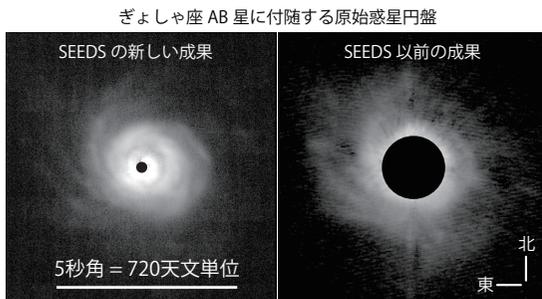


図3：ぎょしゃ座AB星に付随する原始惑星円盤。HiCIAOの偏光差分法では、半径22天文単位までの偏光強度を検出できている(左図)。一方で、従来の参照星差し引きによる方法では、引き算の誤差が大きいため半径120天文単位以内の構造を検出することは難しかった(右図)。

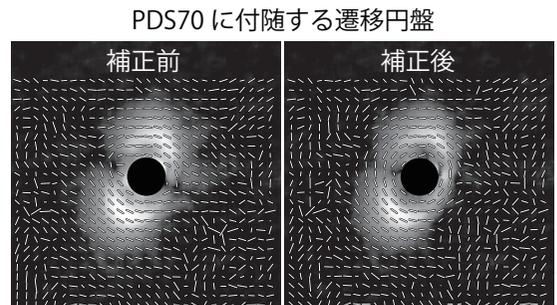


図4：PDS70に付随する遷移円盤の偏光ベクトルマップ。左図では、本来なら中心星に対して垂直になるべき偏光ベクトルが装置偏光などの影響により円盤短軸の方向に比較的揃ったようなパターンになっている。右図は揃った偏光ベクトルを補正したもの。

円盤が報告されている[4]。

画像として遷移円盤のギャップ構造(内縁円盤は一般にスケールが10天文単位未満で輝度が弱く、実際の観測ではギャップ構造ではなく穴構造に見えていた)を観測し始めたのは2005年頃からで、電波干渉計による貢献が大きい。可視光や近赤外線では明るい中心星のために、当時は半径100天文単位以内の円盤構造を検出することは困難であったが、電波の観測波長域ならば星のフラックス密度は弱く、円盤からの熱放射をとらえることが可能であるため、ギャップ構造を検出しやすかったのだろう。また、電波干渉計による遷移円盤の観測例が増加し始める頃の、赤外線観測による日本人の活躍も忘れてはならず、すばる望遠鏡を

用いた観測により中質量星HD142527に付随するバナナ構造のような円盤の検出に成功している[5]。今日では、サブミリ波干渉計(SMA)やALMA望遠鏡、さらに後述するすばる望遠鏡による偏光差分撮像の成功により、20天体ほどの遷移円盤が空間分解されており、ギャップ構造だけではなくスパイラルアーム構造や非対称構造、オフセット構造などが報告されている[6]。

## 2. SEEDSプロジェクトにおける円盤探査

2009年からスタートしたSEEDSプロジェクト[7]では、すばる望遠鏡に設置した高コントラストカメラ

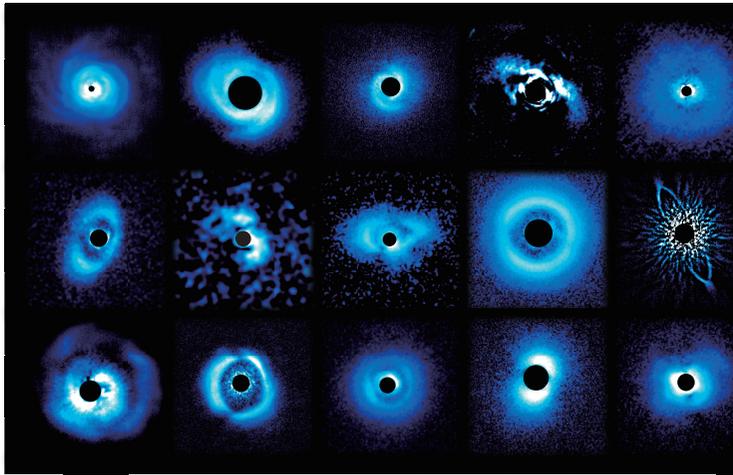


図5：SEEDS円盤ギャラリー。ギャップ構造だけではなく、スパイラル構造や非対称構造、オフセット構造などの複雑な微細構造が見つかった。これらは全て、形成中の惑星との重力相互作用で生じたかもしれない。

HiCIAOを用いて系外惑星および原始惑星系/残骸円盤の探査を行ってきた。プロジェクトの説明については葛原昌幸氏の執筆記事[8]を参照して頂きたい。SEEDSの円盤探査においては偏光差分法を用いることで円盤のより内側の構造(惑星形成に密接に関連すると思われる半径100天文単位以内)を検出することに成功している。偏光差分法とは、円盤の散乱光が偏光しているのに対し、星の光が無偏光であるという性質を利用して、入射光を直交する2つの偏光成分に分けて「同時」に撮像し、それらの差分を行うことで円盤の散乱光のみを効率的に検出しようとする観測方法である(図2)。同時撮像というのがキーポイントである。

SEEDS以前の円盤探査では、円盤天体の観測(オブジェクトと呼ぶ)を行った直後に、主星の成分を引き算するための参照星の観測(参照星)を行い、オブジェクトから参照星の引き算をすることで円盤の散乱光を取り出そうとしていた。しかし、オブジェクトと参照星の時間差のある観測では、一般的に大気の状態が異なるため、主星の成分をうまく引き算して円盤の散乱光を得ることは大変難しい。なぜなら天体から放出された光の波面は整っているが、観測中に望遠鏡と天体の間を大小さまざまなスケールの水蒸気の塊が通過しているため、望遠鏡に届くころには波面が乱れてしまっているからだ。補償光学により乱れた波面を補正してはいるものの、完全に補正することは難しく、時間

差のある観測では波面が異なっているためどうしても天体の像が揺らいでしまう。このため、従来の差分方法では円盤の半径100天文単位以内を精度良く観測することは困難であった。それに対し、偏光差分法では、直交する2つの偏光の同時観測を行っているため、波面が(ほぼ)同じと考えられ、主星の成分を精度良く引き算できるのである(図2; 図3; [9])。

だが、偏光差分撮像はSEEDSが初めて行ったわけではなく、他の8 m級望遠鏡(ジェミニ望遠鏡やVLTなど)でも観測例は少ないものの偏光観測は行われていた[10]。一般に、8 m級望遠鏡だと観測装置も巨大化し複雑化するため、装置起源の偏光(装置偏光)が無視できず、偏光観測は困難だと考えられていた。実際に円盤天体を観測してみると、本来なら中心星に対して垂直になるべき偏光ベクトルが、ある方向に揃ったようなパターンになってしまう天体がある(図4左; [11])。このような偏光パターンになってしまった天体を運悪く観測してしまった研究者は、装置偏光によって観測データそのものが信用できないと思ったのかもしれない。そのために他の8 m級望遠鏡における円盤の高解像度偏光観測は積極的に行われてなかったのではないかと筆者は予想している。幸い、SEEDSプロジェクトでは装置偏光を補正して偏光ベクトルを復元できており(図4右; [11])、上記のような事情もあってか競合相手が少なかったために、他に先駆けてたまたま運よく成果を出すことができたと考えている。我々

### PDS70に付随する遷移円盤

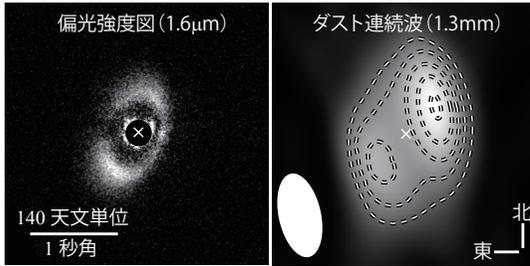


図6： PDS70に付随する遷移円盤の近赤外線偏光強度図(1.6ミクロンメートル；左)とダスト連続波画像(1.3ミリメートル；右)。近赤外線で見ると円盤のギャップの半径が65天文単位だが、ダスト連続波で見るとギャップの半径が80天文単位に広がって見える。

はラッキーだったのだ。

## 3. SEEDS円盤探査における成果

### 3.1 2つの新発見

SEEDSプロジェクトの円盤探査での新発見は主に2つあるだろう。1つ目はスパイラル構造(図5; [12])の発見で、もう1つは波長ごとにギャップの大きさが異なる天体(図6; [11])の発見である。スパイラル構造については未発表天体を含めるとこれまで5天体ほど見つかっており、武藤恭之氏の執筆記事[13]に詳しいので参考にさせていただきたい。2つ目の波長ごとにギャップの大きさが異なる天体については、(手前味噌で恐縮だが)著者らが発表したPDS70(図6)という天体を例に紹介したい。PDS70は0.8太陽質量で、年齢が100万年のオーダーだと考えられており、我々の太陽の若かりし頃だという言い方もできるかもしれない。この天体には近赤外線(波長1.6ミクロンメートル)で観測すると半径65天文単位のギャップがあるように見える(図6左)が、電波干渉計(波長1.3ミリメートル)による観測では半径80天文単位に広がって見える(図6右)。一般に、近赤外線観測ではレイリー散乱によって円盤表面のサブミクロンサイズの「小さなダスト」の分布をトレースし、電波の波長域では円盤中央平面にある質量吸収係数が大きなミリメートルサイズの「大きいダスト」をトレースすると考えられている。したがって、図6の結果を言い換えるなら、「小さなダスト」の円盤は半径65天文単位のギャップを持ち、

「大きなダスト」の円盤は半径80天文単位のギャップを持っていることになる。SEEDSではこのように見ている波長で円盤のギャップのサイズが異なることを発見したのである。では、なぜ波長によって、もしくはダストのサイズによってギャップの大きさが異なるのだろうか？単純に、ギャップのサイズは両ダストにおいて同じであるが、近赤外線は円盤表面をトレースするためギャップの壁が光っており、一方で電波では、輝度は円盤面密度の構造を反映するため、ギャップの壁の少し外側の面密度のピークがより明るくなることで、近赤外線と電波でギャップのサイズが異なると考えられるかもしれない。しかし、後述するように惑星と円盤との重力相互作用でこれら異なるギャップが生じたと考ええると観測結果をうまく説明できそうなことがわかってきたので、本稿では惑星起源説の立場で話を進めたい。

### 3.2 サイズの異なるギャップ

惑星が円盤内に埋もれていると円盤にギャップを形成することが理論的に予測されていることはすでに述べた。このときダストとガスのカップリングを考慮した「ダスト濾過作用[14]」と呼ばれるプロセスを導入することで、異なるサイズのギャップについて説明できる可能性がある。もともとダスト濾過作用は、遷移円盤の一見矛盾するように思える以下の性質を説明するために検討された。(a) SEDから予想されるように、遷移円盤の内縁円盤の面密度はギャップのない普通の円盤に比べて小さくなっている；(b) 中心星への質量降着率は、ギャップのない普通の円盤と同程度である。これらがなぜ矛盾しているかという点、円盤のガスやダストはその外縁部から質量降着によって内縁円盤に向かって運ばれてくると考えられるため、質量降着率が普通の円盤と同じならば、内縁円盤のガスやダストは外縁円盤から再供給されて面密度も復元されると考えられるからである。したがって、上記の遷移円盤の性質を説明するには何らかのメカニズムを導入して、ガスだけを中心星へ降着させ、ダストは外縁円盤に押し戻す必要がある。これがダスト濾過作用と呼ばれる由来であろう。

一般に、小さいダストはガスとよくカップリングしているが、大きなダストはガスとあまりカップリングしない。このことは、砂埃(小さなダストの例)に息を

ダストろ過作用の数値計算結果

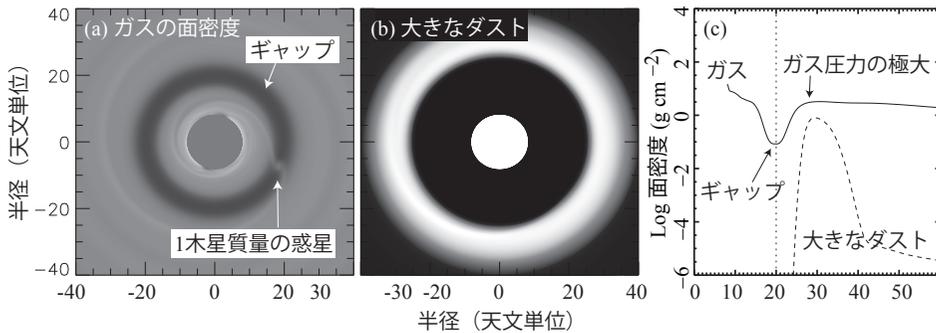


図7：ダスト濾過作用が機能した場合のガス(a)と大きなダスト(b)の面密度の数値計算結果およびそれらの動径プロファイル(c)。1木星質量の惑星が半径20天文単位の軌道にあることを想定している。大きなダストは、惑星軌道の少し外側に形成されたガスの圧力極大半径に集積するが、一方で、小さいダストはガスと良くカップルして中心星へ降着するため、ダストの大小でギャップの半径が異なると考えられている。図はZhu, Z. 氏提供。

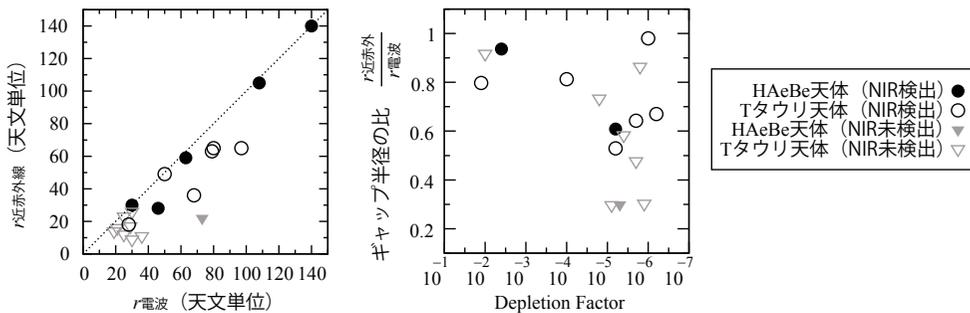


図8：SEEDSで観測した約40天体の遷移円盤のうち、ダスト連続波でギャップが空間分解されている20天体の近赤外線での半径と電波干渉計での半径をプロットしている(左)。近赤外線でギャップが分解できていない天体については、空間分解能を上限値としている。系統的に近赤外線でのギャップの半径の方が小さくなっている。さらに2つの半径の比をdepletion factorの関数としてプロットすると(右)、分散が大きいものの、右下がりの可能性があることが分かった。このことは、ギャップの面密度が小さいほど半径の比が小さくなることを示しており、惑星がギャップを形成した場合の描像と矛盾しない。

吹きかけると宙を舞うが、砂粒(大きなダストの例)に同じことをしてもあまり動かないことを想像してもらえばよいだろう。今、惑星によって円盤内にギャップが形成されたとする(図7; [15])。このとき、惑星の軌道より少し外側にガスの圧力が極大となる場所ができる。ガスの圧力が極大となる半径より少し内側もしくは外側では、圧力勾配のためガスはケプラー回転よりそれぞれ早くもしくは遅く回転していると考えられている。一方で、大きなダストはケプラー回転しているため、ガスの圧力が極大となる半径より内側ではガスの追い風を受けて角運動量を獲得し、反対に外側では向かい風を受けて角運動量を失う。これにより、大きなダストはガスの圧力が極大となる半径に分布すると

考えられる。では、小さいダストはどのような分布が予想されるかというところ、ガスとよくカップリングしていると考えられるため、ガスと同様の分布が期待される。図7を見ると、ガス(小さいダスト)と大きなダストにおけるギャップの半径が異なっていることがわかる。大きなダストはガスの圧力の極大付近に鋭く集まっているのに対して、ガス(小さいダスト)は惑星軌道から極大半径に向かって緩やかに増加している。これが、異なる波長で観測したときにギャップの半径が異なっていた理由の一つだと考えられる。

3.3 ギャップは惑星が形成したものか？

ダスト濾過作用における数値計算[16]の予測による

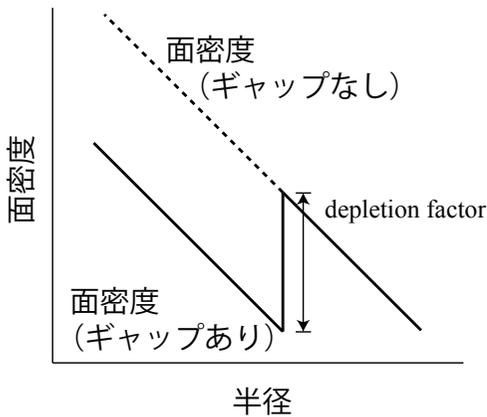


図9：Depletion factorの定義。ギャップの壁においてどのくらい面密度が下がっているのかを示す。

と、ヒル半径が広がる重い惑星ほどガスの圧力が極大になる半径が大きくなり、電波干渉計で観測した時の大きなダストにおける円盤のギャップの半径( $r_{\text{電波}}$ )が大きくなること示唆されている。一方で、ガスとよくカップリングした小さいダストにおける円盤のギャップ半径( $r_{\text{近赤外}}$ )は惑星の質量にほとんど依存しないため、これら2つの半径の比(Ratio =  $r_{\text{近赤外}}/r_{\text{電波}}$ )は重い惑星ほど小さくなることが予測されている。SEEDSプロジェクトでは遷移円盤を約40天体観測しているため、このような傾向がみられるかを検証した。用いたサンプルは、上記の2つ半径の比を導出したかったので、電波干渉計によってギャップが分解されている20天体を使用している。まず、電波干渉計と近赤外線の観測における円盤のギャップの半径の関係を図8(左)にプロットした。その結果、近赤外線の観測におけるギャップ半径 $r_{\text{近赤外}}$ は電波干渉計観測におけるギャップ半径 $r_{\text{電波}}$ より系統的に小さいことが分かった。このことは惑星によってギャップが形成された場合の結果と矛盾はしないだろう。

次に、惑星の質量と半径の比Ratioの関係を調べてみる。ただし、残念ながらギャップの中の惑星の確実な検出例は非常に限られているため、惑星の質量の代わりにdepletion factorと呼ばれる物理量を用いる。Depletion factorは図9のようにギャップの壁において円盤のダスト面密度がどのくらい減少しているかを示すパラメータである。惑星が重くなると円盤との重力相互作用が強くなるため、円盤面密度が下がること

が予想されている[17]。よって、depletion factorが小さいほど重い惑星が存在し、一方で、depletion factorが大きいほどギャップの中の惑星が軽い可能性があることが推測される。図8(右)はdepletion factorと半径の比の関係を示したもので、はっきりとした傾向ではないが、depletion factorが小さいほど半径の比が小さくなる傾向が見られる。この観測結果についても、ギャップが惑星によって形成された場合の傾向と矛盾はしないだろう。しかし、depletion factorが小さくなると、半径の比の分散が大きくなっており、惑星起源以外の物理的要因も含めて考慮すべきなのかもしれない。また、近赤外線の観測において、ギャップの半径が非常に小さい天体は、ギャップが分解できていないため、具体的な半径の比を導出するためにもフォローアップ観測が必要なのは言うまでもないだろう。

#### 4. まとめと今後の展望

SEEDSでは惑星形成の観測的研究という観点から惑星探査のみならず円盤探査も行ってきた。ここでは、最近注目を集めている遷移円盤について紹介してきたが、SEEDSではギャップのない普通の円盤や多重星の周りの円盤の観測も行ってきた。遷移円盤の探査の結果、スパイラル構造やギャップ構造の発見を初めとし、統計的な解析の結果からも、惑星が存在する仮定して大きく矛盾はしないことがわかってきた。今後は、惑星起源説の確認のために、すばる望遠鏡で本格運用される極限補償光学SCEXAOを用いて、ギャップ内に存在するであろう形成中の惑星の直接撮像が期待される。

スパイラル構造に関しては、惑星起源説だけではなく、磁気回転不安定説や重力不安定説などによるスパイラル構造の励起も提唱されており、さらなる検証が必要だろう。具体的には、惑星起源であればスパイラル構造は惑星と共回転するためスパイラルの形は崩れないが、不安定説起源だと、円盤のケプラー回転に伴いスパイラルの形が時々刻々と変化していくと予想される。このような時間変化を定期的な観測によって検出することで、スパイラル構造の起源に迫ることができると考えている。

ギャップ構造に関しては、ダスト濾過作用を仮定すると観測結果を説明できる可能性があることがわかっ

てきたが、ダスト濾過作用説の観測的証拠はまだ見つかっていない。直接的な観測証拠としては、ALMAを用いて図7のような観測結果を得ることだと考えている。つまり、ガスのギャップがあって、大きなダストの面密度がそのギャップより内側では急激に減少しているという観測結果である。ALMAによる追観測によってSEEDSで検出されたギャップ構造の起源にさらに制限を加えることができるだろう。

## 謝 辞

本原稿は著者の博士論文の一部を引用しており、博士論文の指導をしてくださった田村元秀氏に大変感謝いたします。田村氏にはまた、SEEDSプロジェクトのP.I.として、著者に「YSOにおける惑星探査および円盤探査カテゴリーのとりまとめ役」という貴重な機会を与えて頂き、非常に有意義な経験を積むことができたことを合わせてお礼申し上げます。高コントラスト装置HiCIAOの偏光差分撮像における装置偏光の補正に際し、周藤浩士氏にはとてもお世話になりました。揃った円盤の偏光ベクトルの補正に際し、高見道弘氏には的確なアドバイスを頂きました。120夜におよぶSEEDS観測中、真夜中にも関わらず、早野裕氏、美野和陽典氏、Jeschke, Eric氏、稲垣豪志氏には何度も技術的なトラブルの対応をして頂きました。また、ハワイに常駐し、SEEDS観測が滞りなく遂行されるようにHiCIAOの日々のメンテナンスや実際のSEEDS観測を主導された工藤智幸氏には頭が上がりません。ここには全て書ききれませんが、SEEDSプロジェクトの遂行に関わってこられたすべての方に感謝いたします。最後に、成田憲保氏には惑星科学誌に寄稿する機会を与えて頂きました。どうもありがとうございました。

図2, 3, 4, 5, 6で使用している観測画像は、ApJおよびPASJより転載許可を得ています。

## 参考文献

- [1] Strom, K. M. et al., 1989, AJ 97, 1451.
- [2] Kley, W. and Nelson, R. P., 2012, ARA&A 50, 211.
- [3] Espaillat, C. et al., 2014, in Protostars and Planets VI 914, 497.
- [4] Koepferl, C. M. et al., 2013, MNRAS 428, 3327.
- [5] Fukagawa, M. et al., 2006, ApJ 636, 153.
- [6] Pérez, L. M. et al., 2014, ApJ 783, 13.
- [7] Tamura, M., 2009, in Proc. Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, 11.
- [8] 葛原昌幸 他, 2013, 遊星人 4, 255.
- [9] Hashimoto, J. et al., 2011, ApJ 729, 17.
- [10] Potter, D. E., 2005, in Proc. Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions ASP Conference Series 343, 143.
- [11] Hashimoto, J. et al., 2012, ApJ 758, 19.
- [12] Muto, T. et al., 2012, ApJ 748, 22.
- [13] 武藤恭之 他, 2013, 天文月報 106, 195.
- [14] Rice, W. K. M. et al., 2006, MNRAS 373, 1619.
- [15] Zhu, Z. et al., 2012, ApJ 755, 6.
- [16] de Juan Ovelar, M. et al., 2013, A&A 560, 111.
- [17] Kanagawa, K. et al., 2015, ApJ 806, 15.