

SEEDSにおける原始惑星系円盤の探査

橋本 淳

〈自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: jun.hashimto@nao.ac.jp



日下部

日下部 展彦

〈自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: nb.kusakabe@nao.ac.jp

SEEDSにおける近傍星形成領域のYSO (Young Stellar Objects) 探査カテゴリーでは若い惑星と原始惑星系円盤の探査を行ってきた。特に惑星形成と密接にリンクしていると期待されている‘遷移円盤’を集中的に観測してきた。補償光学と偏光差分撮像の合わせ技により、明るい中心星の影響でこれまで近赤外線での観測が難しかった半径100 AU以内の円盤構造を10 AUを切る高空間分解能で鮮明に捉えることに成功した。その結果、スパイラル構造やギャップ（もしくは穴）構造、ディップなどの非対称構造を世界に先駆けて検出できただけではなく、円盤サイズが比較的小さな太陽型星（太陽質量程度）に付随する円盤の微細構造の存在も観測的に示すことができた。本稿では、これまでのSEEDSにおける円盤探査を概観し、三つの成果を紹介した後、最後に今後の展望を述べたい。

1. SEEDS YSO カテゴリー

通称、YSO カテゴリーと呼ばれる近傍星形成領域の探査カテゴリーは、中心星の物理的特性や星形成領域ごとに七つのサブカテゴリーに分かれており、大雑把には多重星、円盤が重い星（主にハービッグAeBe星）、Tタウリ型星を探索してきた。フォローアップ等の重複観測も含めると118天体を観測した。SEEDSは惑星探査がメインのプロジェクトであるため、YSO カテゴリーでも年齢100万年から1,000万年の若い星の周りの惑星探査を行った（YSOの惑星探査については論文執筆をリードしている東京大学の鶴山太一氏が別の機会に記述するだろう）。それに加え、原始惑星系円盤の探査も同時に行っており、円盤の進化および円盤の微細構造とそれらを励起した惑星

との関係を明らかにすべく遷移円盤を集中的に観測した。

遷移円盤とはその名のとおり、ガスと固体微粒子が豊富に存在する原始惑星系円盤から、ガスが散逸した残骸円盤への遷移段階にある円盤だと考えられており、SEEDSの円盤探査の目的と極めて調和的な天体である。一般に、円盤は内縁部から外縁部に向かって散逸すると考えられており¹⁾、円盤内縁部が散逸すると天体のスペクトルエネルギー分布の近赤外線付近にへこみが生じる。その性質を利用して、およそ25年前に初めて遷移円盤の存在が観測的に示唆され²⁾、現在では約450天体が遷移円盤として知られており³⁾、さらにそのうち20天体ほどが空間的に分解されている⁴⁾。大まかには遷移円盤には2種類あり、内縁円盤と外縁円盤が光学的に薄いリング状

ギャップによって隔てられたギャップ構造と、内縁円盤が光学的に薄いもしくは空洞になっている穴構造に分類される。

さて、HiCIAOは惑星探査が主目的の高コントラスト赤外線カメラであるが、偏光差分光学系を搭載しているため、円盤観測においてもたいへん競争力のある装置となる。偏光差分撮像のメリットは何と言っても、明るい中心星の光を除去し、円盤からの散乱光を効率良く取り出すことができる点である（詳細については、手前味噌で恐縮だが筆者の寄稿⁵⁾を参考にいただきたい）。この偏光差分光学系を搭載したHiCIAOと補償光学装置AO188の組み合わせのおかげで、SEEDS YSO カテゴリーではこれまで30天体以上の円盤を分解することができた。しかし、偏光差分撮像と補償光学の組み合わせはSEEDSが初めて行ったわけではなく、Gemini望遠鏡などではすでに60天体ほどのYSOを2005年以前から観測していた⁶⁾。ではなぜ、SEEDS YSO カテゴリーでは成果を出すことができたのだろうか？

極限補償光学ではない補償光学装置の場合、波面の補正が不十分であるため、図1に示したようにシーイング（マウナケアの典型的なサイズは可視光で0.5秒角）と呼ばれる大気の影響でのっぺりと広がったPSF（point spread function）が

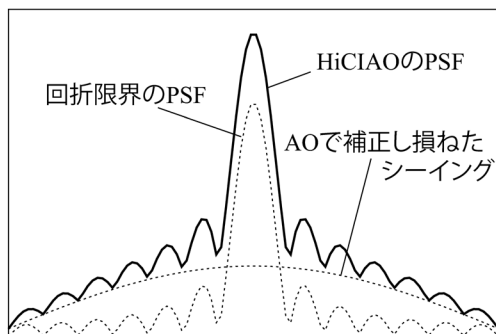


図1 HiCIAO+AO188で予想されるPSF。HiCIAOの観測ではAO188で補正された回折限界に近いPSFと補正し損ねたシーイングを重ねたようなPSFになっていると予想される。

残ってしまう。PSFとは、本来点源である天体（円盤のない星など）が、地球の大気や望遠鏡によって広がった星像になるときの星像の強度分布を表す関数を意味する。極限補償光学なら回折限界の星像が得られるが、HiCIAOの場合は回折限界に近い星像と補正し損ねたシーイングの足し合わせのようなPSF（典型的なサイズは $1.6\ \mu\text{m}$ で0.05-0.07秒角）になる。この補正し損ねたシーイングはおおむね円盤の短軸にそろった偏光をもつと予想される。今、視線方向に対して傾斜角をもつ円盤を仮定すると、円盤の長軸方向では中心星からの光が円盤表面においてほぼ90度散乱となりわれわれに届くが、短軸方向では90度からずれるため偏光度が下がる（図2）⁷⁾。一般に、偏光ベクトルは中心星に対して垂直に分布するため、短軸方向の偏光度が小さくなれば、長軸方向の偏光強度が相対的に卓越する。その結果、円盤全体を覆うような大きなシーイングで円盤全体を測光すれば、円盤短軸にそろった偏光になるだろう。よって、補正し損ねたシーイングの偏光が卓越している場合、図3左のようなそろったベクトル分布になると考えられる。SEEDSでは上記のような仮定で、補正し損ねた偏光したシーイングを引き算してみたところ、図3右のように偏光ベ

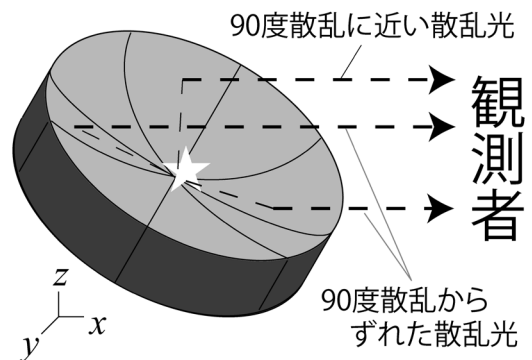


図2 円盤表面での散乱角に関する模式図。観測者から見てx軸方向に傾いた円盤を想定しているため、y軸方向が円盤の長軸になる。星の光は円盤長軸方向では90度散乱に近いが、短軸方向では90度散乱からずれて観測者に届く。

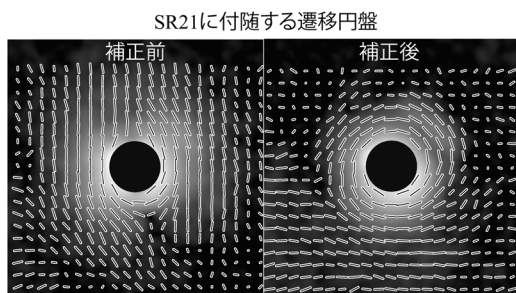


図3 SEEDSで観測した遷移円盤天体SR 21⁸⁾. 中心星に対して垂直となるべき偏光ベクトルが南北にそろっている (左). 補正されたパターン (右).

クトルを復元できた. 前述のGeminiの偏光観測でも, そろったベクトルが観測されている⁶⁾. これを見た観測者は, ひょっとしたら観測データが信用できないと思ったのかもしれない. その結果, SEEDSが始まるころには8 m級望遠鏡での高解像度の偏光観測が下火になってしまったのではないかと筆者は予想している. 競争相手が少なくなった中でプロジェクトを進めることができ, われわれは本当にラッキーだったのだと思う.

2. YSO カテゴリーの成果

SEEDSは2015年初頭に終了したが, 観測データの世界的な競争力は高く, YSOカテゴリーでは現在も, 有望な15天体以上が論文投稿中もしくは準備段階にある. 円盤探査における主な発見は二つあると筆者は考えており, 一つはスパイラル構造の発見⁹⁾ (武藤恭之氏の寄稿¹⁰⁾ に詳しい記述がある), もう一つは観測波長によって外径の大きさの異なる穴 (ギャップ) 構造の発見¹¹⁾ である. 本稿では, SEEDS初期の成果として中質量星のぎょしゃ座AB星 (AB Aur)¹²⁾ とMWC 480¹³⁾, 最近の成果として観測波長によって異なる外径の穴 (ギャップ) 構造をもつTタウリ型星のPDS 70星 (PDS 70)^{14), 15)} を紹介する.

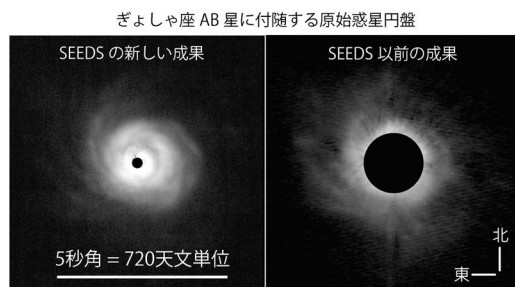


図4 AB Aurに付随する遷移円盤の近赤外線偏光強度図 (左)¹²⁾ とSEEDS以前に観測された近赤外線強度図 (右)¹⁶⁾. 明るい中心星のため, 従来は半径122 AU以内はマスクされていたが (右), HiCIAOを用いた観測によって, 半径22 AUまでの円盤構造を詳細に捉えた (左).

2.1 AB Aur

太陽の約2.4倍の質量をもつと考えられている中質量星で, その円盤にはスパイラル構造が付随することが知られており¹⁶⁾, これまで可視光や近赤外線および電波干渉計によって集中的に観測されてきた天体の一つである. ただし, SEEDS以前は明るい中心星のために半径100 AU以内の円盤構造を観測的に明らかにすることは難しかったが, HiCIAOを用いた偏光差分撮像によって, 空間分解能10 AU以下という高解像度で半径22 AUまでの円盤構造を撮像することに成功している (図4). その結果, この円盤には外径約105 AUで幅約60 AUのリング状ギャップが付随していることがわかった. リング構造の成因として, (a) 光蒸発, (b) 固体微粒子の成長, (c) 円盤と惑星の重力相互作用の観点から議論する.

(a) 光蒸発—遷移円盤の形成機構として, 中心星からの高エネルギー放射 (X線や紫外線) により円盤ガスが加熱され, ガスの運動エネルギーが中心星の重力を振り切って円盤が散逸する光蒸発機構¹⁷⁾ が提案されている. Tタウリ型星の典型的なX線光度¹⁸⁾ ($\log L_X \sim 30$ [erg/s]) に対する典型的な円盤質量消失率¹⁷⁾ は $\log M_{\text{photo}} \sim -8$ [M_{\odot}/yr] と予測されており, 典型的なTタウリ型星の質量降着率¹⁹⁾ ($\log M \sim -8$ [M_{\odot}/yr]) と調和的

なことから、光蒸発機構は円盤の進化および散逸において重要な役割を担っていると考えられている。さて、AB AurのX線光度は $\log L_X = 29.71$ [erg/s]と報告があり²⁰⁾、光蒸発機構による円盤質量消失率はせいぜい $\log M_{\text{photo}} \sim -8$ [M_{\odot}/yr]であろう。他方、AB Aurの質量降着率は大きく($\log M = -6.9$ [M_{\odot}/yr]²¹⁾、光蒸発機構でガスを散逸させても、円盤外縁部からガスが再供給されると考えられる。よって、光蒸発機構がギャップの主な成因ではない可能性がある。

(b) 固体微粒子の成長—固体微粒子はガス円盤の中で衝突および合体により、サブミクロンサイズの小さな固体微粒子からミリメートルサイズ以上の大きな固体微粒子へ成長すると予想されており²²⁾、可視光および赤外線における不透明度が減少する。内縁円盤ほど力学的なタイムスケールが短いため、円盤内縁から外縁部に向かって固体微粒子は成長すると考えられ、穴のサイズも大きくなっていくと予測される。このとき、成長した固体微粒子はガスとカップルしなくなるため円盤の中央平面に沈殿し²³⁾、円盤はフレア円盤からフラット円盤へ進化していくと考えられている。このため、天体のスペクトルエネルギー分布図は近赤外線域においてへこむこと、遠赤外線付近のフラックスが減少することが数値計算によって示唆されている^{22), 23)}。しかし、AB Aurのスペ

クトルエネルギー分布図は固体微粒子の成長によって予測されるそれとは異なる。このことから、固体微粒子の成長によって形成されたギャップという描像とは調和的ではないかもしれない。

(c) 円盤と惑星の重力相互作用—円盤内に埋もれた惑星は、円盤との重力相互作用により円盤にスパイラル構造もしくはギャップ構造を形成することが予測されている²⁴⁾。前述の光蒸発機構と固体微粒子の成長機構は、内縁円盤から外縁円盤にかけて有効に働くため、穴構造の説明と調和的であるのに対して、惑星起源説はギャップ構造の説明と調和的である。また、AB Aurの円盤には、非対称構造であるスパイラル構造が付随しており、光蒸発機構と固体微粒子の成長機構では、非対称構造を形成するのは難しいと考えられる一方、円盤と惑星の重力相互作用ならば自然にスパイラル構造を説明できるだろう²⁴⁾。よって、円盤と惑星の重力相互作用によってギャップ構造が形成された可能性が高い。しかし、AB Aurには惑星候補天体がいまだ見つかっておらず、今後の課題である。

2.2 MWC 480

太陽の約1.6倍の質量をもつと考えられている中質量星で、SEEDSによって初めてはっきりした円盤の姿を捉えた天体である(図5)¹³⁾。スペクトルエネルギー分布の赤外線領域において、円

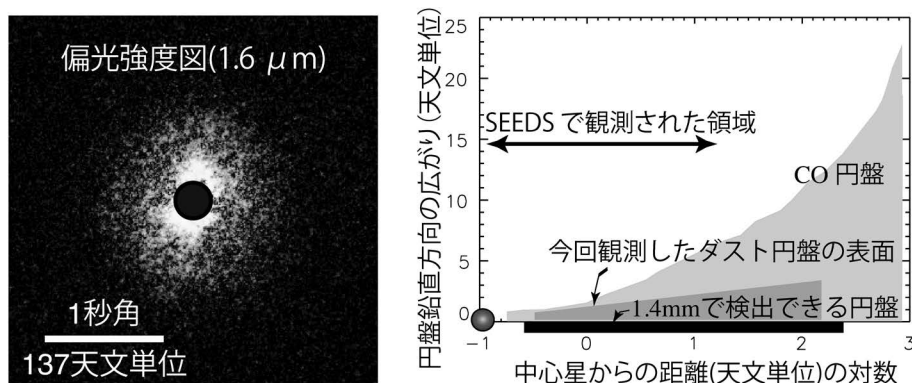


図5 MWC480に付随する原始惑星系円盤(左)と円盤鉛直方向の構造のスケッチ(右)。

盤の存在は示唆されており、SEEDSの観測以前にもいくつかの直接撮像の観測が試みられたが、その多くが未検出であった²⁵⁾。また、そのSED自体も時期により変動していることが知られており、内縁円盤の構造の変化に伴う内縁円盤からの熱放射の変化だと考えられる²⁶⁾。一般に、円盤中の固体微粒子が成長し、鉛直方向に沈み層状化していき、平らな円盤になっていくことが数値計算によって示唆されている²³⁾。この平らな円盤では、中心付近の固体微粒子が蒸発する部分が膨らむため、その影が円盤の内側に影を落とすことになる。このような自己遮蔽がすでに始まっている場合、固体微粒子蒸発領域で膨らんでいる部分が普段より小さくなったときに限り、円盤の外側部分は散乱光で照らされ、直接観測が可能となると考えられる。そのため、高コントラスト観測と赤外分光の結果を合わせることで、原始惑星系円盤の外側がどの程度平らになっているかを見積もることができる。

SEEDSで観測したMWC480の1.6 μm における見かけの明さは、これまで最も暗い赤外超過を示し、散乱光による円盤を約27 AUから137 AUの範囲で検出することに成功した。1998年2月のハッブル宇宙望遠鏡による観測結果²⁵⁾も考慮すると、円盤の鉛直方向の広がりの角度は $1.3^\circ \leq \theta \leq 2.2^\circ$ となった。これは、巨大惑星が形成されるような遷移円盤でのCOで観測されたガス円盤より5~7倍薄い円盤であることを示しており、固体微粒子の成長に伴い、固体微粒子が円盤中央平面に沈殿していく描像と調和的である。

2.3 PDS 70

太陽の約0.8倍の質量をもつと考えられているTタウリ型星で、SEEDSによって初めて微細構造が分解された天体である^{14), 15)}。天体のスペクトルエネルギー分布図の解析から、光学的に厚い内縁円盤が付随していることが明らかになっており¹⁴⁾、HiCIAOの観測によって外径約65 AUで幅35 AU以上という巨大なギャップ構造が円盤

PDS70に付随する遷移円盤

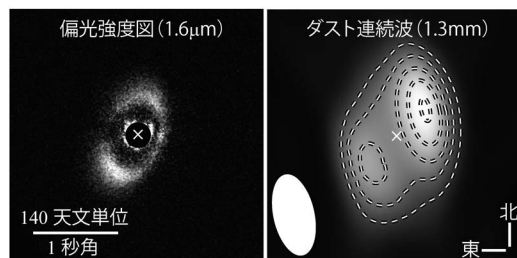


図6 PDS 70に付随する遷移円盤の近赤外線偏光強度図(左)とダスト連続波の画像(右)^{14), 15)}。ギャップの外径はそれぞれ65 AUと80 AUで異なる。

に形成されていることがわかった¹⁴⁾(図6)。細かいリング状ギャップであれば、単一の惑星によって形成された可能性があるが、巨大なギャップ構造を説明するには複数の惑星が必要であることが数値計算から示唆されている²⁷⁾。惑星自体はまだ観測されておらず、'観測されなかった'という結果から木星の約2倍以上の質量をもった惑星の存在は否定される¹⁴⁾。よって、木星かそれよりも軽い複数の惑星がPDS 70に付随している可能性がある。

その後のサブミリ波干渉計(The Submillimeter Array)を用いた追観測では、ダスト連続波におけるギャップは外径80 AUであるとわかった¹⁵⁾(図6)。つまり、PDS 70の遷移円盤のギャップの外径は近赤外線と電波で異なる。波長によってギャップの外径が異なることは、惑星の存在を仮定すれば自然に説明することが可能で、ダストろ過機構と呼ばれる物理過程の数値計算によって予測されている²⁸⁾(図7)。ダストろ過機構とは、内縁円盤の散逸が進行しているにもかかわらず、質量降着率は穴(もしくはギャップ)のない通常の原始惑星系円盤と同程度であるという典型的な遷移円盤の物理的特性を説明するために考案された機構で、固体微粒子を円盤外縁部に押し戻してガスのみを降着させる機構である。円盤内に埋もれた惑星は、円盤にスパイラルもしくは

ダストろ過作用の数値計算結果

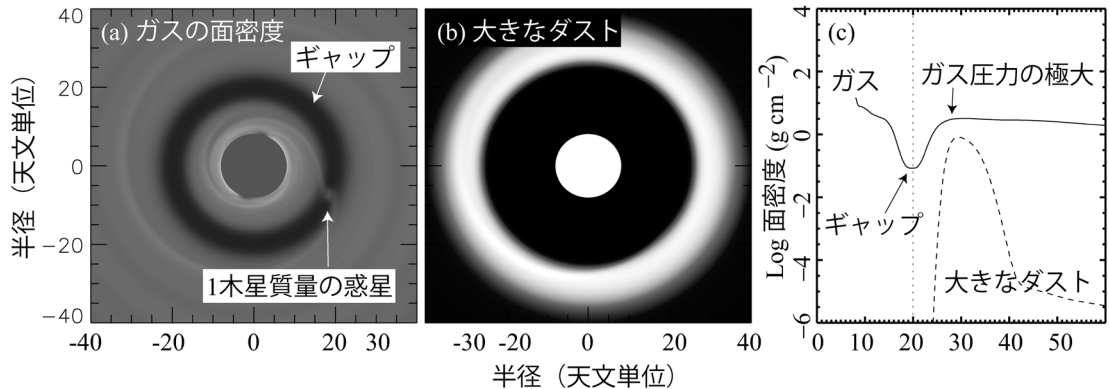


図7 ダストろ過作用が機能した場合のガス (a) と大きなダスト (b) の面密度の数値計算結果 (図は白から黒にかけて面密度の減少を意味する) およびそれらの動径プロファイル (c). 1木星質量の惑星が半径20天文単位の軌道にあることを想定している. 大きなダストは, 惑星軌道の少し外側に形成されたガスの圧力極大半径に集積するが, 一方で, 小さいダストはガスとよくカップルして中心星へ降着するため, ダストの大小でギャップの外径が異なると考えられている. 図はZhu氏提供²⁹⁾.

ギャップ構造を形成することは述べた²⁴⁾. このとき, ガス円盤におけるギャップ構造の位置は, 惑星の軌道半径に一致するのに対し, 外縁円盤のガス面密度の極大値は惑星軌道より外側に位置する. 一般に, 固体微粒子はガスと角運動量を交換することでガス面密度の極大値に集まる (ガスは自身の熱的圧力により圧力の極大値より内側ではケプラー回転より速く, 外側では遅く回転する) ため, ガスとよくカップルするサブミクロンサイズの小さな固体微粒子とミリメートルサイズの大きな固体微粒子とでは空間分布が異なると考えられている²⁸⁾. よって, 近赤外線 (小さな固体微粒子をトレース) で観測したギャップの外径は, 電波干渉計 (大きな固体微粒子をトレース) で観測したそれより小さくなることが予想される (図7). この予測は, 観測結果 (近赤外線と電波でギャップの外径の半径はそれぞれ65 AUと80 AU) と調和的であり, 複数の惑星の存在を仮定することと矛盾しない.

3. まとめと今後の展望

SEEDS YSO カテゴリーでは若い多重星, 中質

量星, Tタウリ型星に付随する惑星および円盤の探査を (追観測等の重複を含めると) 118天体に対して行ってきた. これまでは円盤が比較的大きな中質量星に付随する円盤の探査はあったものの, Tタウリ型星の観測報告は多くはなかった. 補償光学装置AO188と偏光差分光学系を搭載したHiCIAOのおかげで, 30天体以上に付随する円盤を検出し, そのうち10天体以上に惑星起源の可能性が高いスパイラルやギャップ構造を発見した. 今後は, 個別天体の議論に加え, 統計的な議論も行い, 円盤の微細構造起源の統一的理解に挑戦する.

謝辞

SEEDS YSO カテゴリーは40名以上の研究者が参加しており, ここにすべてのメンバーの名前を挙げることは難しいですが, 特に各サブカテゴリーをまとめていただいた, 伊藤洋一氏, 岡本美子氏, 葛原昌幸氏, 塚越崇氏, 深川美里氏, 眞山聡氏, 百瀬宗武氏をはじめとするYSOのメンバーの尽力なくしては成り立たないプロジェクトでした. 厚く御礼申し上げます. 本稿は筆者

(橋本淳)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たいへん感謝いたします。田村氏にはまた、SEEDSプロジェクトのPI.として、筆者にYSOカテゴリーのとりまとめ役という貴重な機会を与えていただき、非常に有意義な経験を積むことができたことを併せて御礼申し上げます。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。そろ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いただきました。120夜に及ぶSEEDS観測中、真夜中にもかかわらず、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いただきました。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。ここにはすべて書ききれませんが、SEEDSプロジェクトの遂行にかかわってこられたすべての方に感謝いたします。

参考文献

- 1) Williams J. P., et al., 2011, ARAA 49, 67
- 2) Strom K. M., et al., 1989, AJ 97, 1451
- 3) Koepferl C. M., et al., 2013, MNRAS 428, 3327
- 4) Andrews S. M., et al., 2011, ApJ 732, 42
- 5) 橋本淳, 2015, 遊星人 3, 282
- 6) Potter D. E., 2005, in Proc. Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions ASP Conference Series 343, 143
- 7) Perrin M. D., et al., 2009, ApJ 707, 132
- 8) Follette K. B., et al., 2013, ApJ 767, 10
- 9) Muto T., et al., 2012, ApJ 748, 22
- 10) 武藤恭之, 他, 2013, 天文月報 106, 195
- 11) Dong R., et al., 2012, ApJ 750, 161
- 12) Hashimoto J., et al., 2011, ApJ 729, 17
- 13) Kusakabe N., et al., 2012, ApJ 753, 153
- 14) Hashimoto J., et al., 2012, ApJ 758, 19
- 15) Hashimoto J., et al., 2015, ApJ 799, 43
- 16) Fukagawa M., et al., 2004, ApJ 605, 53
- 17) Owen J. E., et al., 2011, MNRAS 412, 13
- 18) Feigelson E., et al., 2007, PPV 313
- 19) Najita J. R., et al., 2007, MNRAS 378, 369
- 20) Telleschi A., et al., 2007, A&A 468, 541
- 21) Salyk C., et al., 2013, ApJ 769, 21
- 22) Dullemond C. P., et al., 2005, A&A 434, 971
- 23) Dullemond C. P., et al., 2004, A&A 421, 1075
- 24) Kley W., et al., 2012, ARAA 50, 211
- 25) Grady C. A., et al., 2010, ApJ 719, 1565
- 26) Sitko M. L., et al., 2008, ApJ 678, 1070
- 27) Zhu Z., et al., 2011, ApJ 729, 47
- 28) de Juan Ovelar M., et al., 2013, A&A 560, 111
- 29) Zhu Z., et al., 2012, ApJ 755, 6

Direct Imaging of Protoplanetary Disks in the SEEDS Project

Jun HASHIMOTO and Nobuhiko KUSAKABE
Astrobiology Center, NINS, 2-21-1 Osawa,
Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The SEEDS project has conducted the survey of both young planets and protoplanetary disks in young systems. Particularly, transitional disks would be paramount targets to understand planet formation, because they are thought to be intermediate phase between gas-rich primordial disks and gas-poor debris disks. Combined with AO188, HiCIAO has revealed fine structures such as spiral and gap structures within $r=100$ AU in the disk. I review the disk survey in the SEEDS YSO category, and describe future prospects.