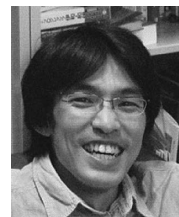


原始惑星系円盤からの散乱光の詳細構造と その解釈



武藤 恭之

〈工学院大学 基礎・教養教育部門 〒192-0015 東京都八王子市中野町2665-1〉

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

SEEDS計画では、さまざまな原始惑星系円盤からの近赤外線における散乱光分布が高い空間分解能で得られ、リング状やスパイラル状の構造など、詳細な構造が見えてきている。本稿では、これらの観測の解釈に焦点をあてながら解説する。散乱光の解釈についてはさまざまな可能性があり、また天体によっても大きく異なるが、本稿では、はじめに円盤からの散乱光に関する基本的な内容を解説した後、SEEDS計画の中で得られた結果から3天体（SAO 206462, HD 169142, TW Hya）を紹介し、散乱光観測と惑星形成へのつながりなどを議論する。

1. 原始惑星系円盤の基本的な構造

原始惑星系円盤は、惑星形成の現場として多くの研究が行われている。まずはじめに、原始惑星系円盤の構造に関して、基本的な事項¹⁾をまとめておこう。

星は分子雲コアの重力崩壊で生まれるが、星に直接落ち込むことのできなかつたガスやダスト（塵）粒子が星の周囲に円盤を作る。この円盤を原始惑星系円盤と呼ぶ。原始惑星系円盤は、半径がおおよそ数百天文単位までに広がる回転円盤であり、主に中心星の重力と遠心力が釣り合っている。したがって、その回転速度はおおむね、半径の1/2乗で減少するケプラー回転である。（実際にはガス圧力による小さな補正がある。）原始惑星系円盤の質量には、理論的・観測的に大きな不定性が伴っているが、ガス質量で中心星の質量のおおよそ1/100程度だと考えられており、自己重力があまり効かないと考えることが多い。星間空間のガス・ダスト比がおおよそ100程度だから、ダストの質量は中心星の1/10,000程度であると推定できる。

原始惑星系円盤の半径が100天文単位で、ガス質量が中心星の1/100程度であったとき、原始惑星系円盤の典型的なガス面密度は数 g/cm^2 であると見積もれる。なお、この値は中心星から100天文単位程度離れた場所での典型的な面密度に対応することに注意しておこう。実際には、内側ほど円盤の面密度が大きくなっていると考えられており、よく用いられる林モデル²⁾では、中心星から1天文単位程度離れた場所におけるガス面密度はおおよそ $1,000 \text{ g}/\text{cm}^2$ だと推定されている。原始惑星系円盤のガス・ダスト比を100程度とすれば、近赤外線における典型的なダスト粒子の吸収係数が数 cm^2/g であることから、原始惑星系円盤は近赤外線で光学的に厚いことがわかる。

原始惑星系円盤の円盤面に垂直な方向の構造は、中心星の重力とガスの圧力勾配力の釣り合いによって決まっている。このことから、原始惑星系円盤の幾何学的な厚み H は、円盤の音速 c をケプラー角速度 Ω で割った量 c/Ω 程度になるということがわかる。したがって、円盤の幾何学的厚みを円盤の半径 r で割った量 H/r は、おおよそ音速とケプラー速度の比に等しい。円盤の温度はおおよそ

中心星からの輻射と円盤表面からの（ダストの）熱放射が釣り合っている。ダストとガスの温度が同じであるとすれば、およそ中心星から1天文単位程度離れた場所で300 K程度（地球の温度と同じくらいだろう）であり、半径の1/2乗にしたがって、外側ほど温度が下がるであろう。このことから、中心星から100天文単位程度離れた場所での円盤の音速は0.数km/s程度だとわかる。一方で、太陽質量程度の星の周囲の、半径100天文単位程度の円軌道の速度は数km/s程度であるから、円盤の幾何学的な厚みは半径の1/10程度であると見積もられる。したがって、原始惑星系円盤は幾何学的に薄い（冷たい）円盤であるということができる。

2. 原始惑星系円盤の近赤外線直接撮像観測と散乱光の分布

原始惑星系円盤の近赤外線観測を考える際、重要な特徴は以下の3点である：

- ・幾何学的に薄い（温度が低い）
- ・近赤外線に対して光学的に厚い
- ・中心に明るい星（光源）がある

これらのことから、原始惑星系円盤の近赤外線撮像観測において何が見えるかを考えてみよう。

まず、原始惑星系円盤の温度が低いため、近赤外線の熱放射を空間的に分解してみることは不可能である。近赤外線の熱放射は、中心星のごく近傍の温度の高い部分でしか顕著に現れないはずだが、そのような領域を空間的に分解して観測することはできない。しかし、近赤外線では原始惑星系円盤は光学的に厚いので、中心星からの（近赤外線）輻射は円盤の中心面に達することができず、円盤の表層で反射される。原始惑星系円盤の近赤外線撮像観測において観測できるのは、この、中心の星から出た放射が円盤の表面において反射された散乱光である。

散乱光の明るさがどの程度になるかを見積もってみよう。中心星の輻射は、中心星から放射状に

広がる。中心星輻射のうち、円盤表面に達した分だけが散乱されることになるが、原始惑星系円盤は幾何学的に薄いため、ほとんどの光は円盤に散乱されない。中心星輻射のうち、原始惑星系円盤に散乱されるのは、原始惑星系円盤のある方向に放たれた光のみである。原始惑星系円盤が占める、星に対する立体角は H/r 程度のオーダーであるから、星が放出した輻射のうち、 H/r 程度の割合の光が円盤によって散乱される。したがって、原始惑星系円盤の散乱光のトータルの量は、およそ星の明るさの H/r 倍程度であると見積もることができる。距離140 pcにベガ程度の明るさの星があったとすると、その星のみかけの明るさは1 Jyのオーダーである。原始惑星系円盤の典型的な拡がり100天文単位程度と仮定すると、距離140 pcにある原始惑星系円盤の見かけの大きさは1秒角程度であるから、散乱光の面輝度の典型的な値としては数十mJy/asec²程度になるだろう。

直接撮像観測では、原始惑星系円盤の散乱光分布を画像として取得することができる。すなわち、直接の観測量として得られるものは、散乱光の明るさの動径方向分布や方位角方向の分布である。この画像から、原始惑星系円盤に関してどのような情報が得られるだろうか。

簡単のため、観測される光は円盤表面で1回だけ散乱されたとしよう。円盤の散乱表面は、星から出た放射の方向に沿った円盤の光学的厚みが1程度になる場所として定義できる。円盤の幾何学的な厚みが H 程度であり、また円盤の半径 r に比較して H が十分に小さいということを考えると、円盤の散乱表面の位置も、円盤中心面から H 程度の高さにあるといえる。このことは、円盤の構造を考慮に入れたより正確な議論によっても裏づけることができ、近赤外線での円盤の散乱表面の高さ H_s は、目安として H の3倍程度であるということがわかっている^{3),4)}。

円盤のある場所における散乱光の明るさは、もしも円盤に存在するダスト粒子の散乱効率が場所

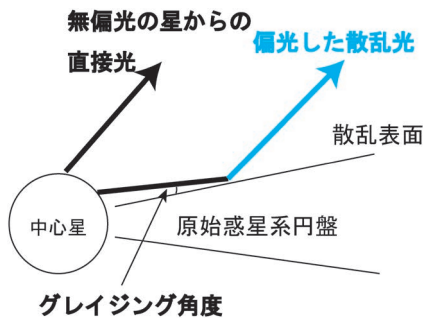


図1 円盤からの散乱光観測の概念図とグレイジング角度。

によらずに一様だったとすると、中心星からの入射光フラックスに、原始惑星系円盤の散乱表面と星からの入射光線の間のなす角度 β を掛けたものに比例する⁵⁾。ここで、 β は90度から入射角を引いた値に等しく、グレイジング角度 (grazing angle) と呼ばれる (図1)。中心星から、円盤中心面に沿って半径 r の位置の上空における円盤表面の位置を $H_s(r)$ としたとき、グレイジング角度 β は $\beta \sim dH_s/dr - H_s/r$ と与えられるが、 H_s が円盤の幾何学的厚みの数倍程度であるから、 β の値もおおむね H/r のオーダーであると見積もって良い。ただし、 β はあくまでも円盤の散乱表面の高さの微分に依存する量であるから、散乱表面の形状によってはかなり大きくなることもありうることに注意しておこう。中心星からの入射光フラックスは、中心星からの距離の2乗に反比例して減少する。これにグレイジング角度 β の動径依存性と、ダスト粒子の散乱効率の動径依存性を掛けたものが、観測される散乱光の動径分布になる。

さて、グレイジング角度の動径方向依存性はどのようなになるだろうか。グレイジング角度を求めるためには、円盤の散乱表面がどこにあるかを考えれば良い。円盤の散乱表面は、円盤の上空にどの程度のダスト粒子が存在するかによって決まる。ここでは簡単のため、円盤の中心面に垂直な方向の構造が、単純な成層構造をしているとして議論を進めよう。円盤の面密度が大きければ、中心星から見た円盤の光学的厚みも大きくなるの

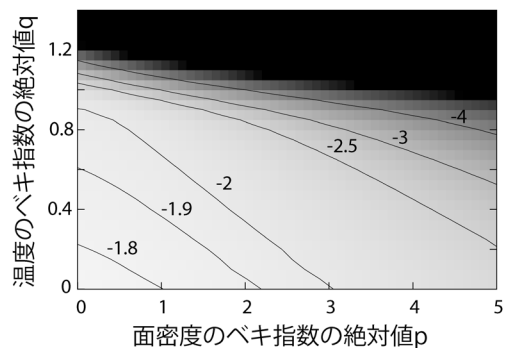


図2 円盤からの散乱光の動径方向分布の、半径に対するべき指数。横軸は円盤の面密度の動径方向分布のべき指数を表し、縦軸は円盤の温度の動径方向分布のべき指数を表す。色の濃淡と等高線は散乱光の動径分布のべき指数を表しており、左下ほど浅いべき、右上ほど深いべきとなる傾向がある。

で、円盤の表面はより上空に存在する。円盤の内縁のように、切り立った崖のような構造が存在すれば、その場所ではグレイジング角度も大きくなるため、散乱光は明るくなる。(直観的には、壁にはたくさんの光があたるということである。) また、円盤の幾何学的厚み (より正確には、円盤の幾何学的厚みを円盤の半径で割った量) が大きければ、より多くの物質が上空に存在するということになるので、円盤の光学的厚みも大きくなり、円盤の散乱表面も高くなる。円盤の幾何学的厚みは円盤の音速に関係しているから、円盤の散乱表面は円盤の温度分布に依存するということがいえる。詳しい計算によって円盤表面の位置を見積もると、円盤表面の位置は円盤の面密度の対数の平方根と、円盤の幾何学的厚みに比例するということがわかる⁴⁾。したがって、グレイジング角度の動径方向依存性も、円盤の温度分布や面密度分布に関係しているということが言えるだろう。

図2は、1回散乱の仮定のもと、散乱光の動径方向分布がどのようなになるかを調べたものである。おおまかな傾向を見るため、円盤の面密度は中心星からの距離の $-p$ 乗に比例して減少し、また、円盤の温度は半径の $-q$ 乗に比例して減少す

るものとした。また、ある半径における円盤の温度は、円盤中心面に垂直な方向では一定だとした。図の濃淡は、散乱光の明るさの動径分布を中心星からの距離のべき関数でフィットしたときのべき指数を表している。この図から、円盤の温度や面密度分布が滑らかな分布であった場合、散乱光の強さの動径分布はおおむね中心星からの距離の -2 乗程度で減少するか、それより深いべきとなるということが予想される。もし、観測された散乱光の動径分布が中心星からの距離の -2 乗よりも深いべきになっていたとすれば、あまり円盤の表面が外側に向かって高くなっておらず、中心星により近い場所にある円盤の影が外側に向かって広がっているということを示唆する。また、もしも散乱光の分布が半径の -2 乗よりも浅いような観測があったとすると、円盤内縁付近といった急激に散乱面が変化するような場所を除いて、円盤の形状の効果だけでは説明をすることが難しいだろうということも示唆される。

図2に示した結果は、温度や密度の分布を単純に手で与えたモデルについてであるということに注意しておこう。特に、円盤の温度については注意が必要である。円盤を暖める主な熱源は中心星からの輻射である。したがって、円盤の温度は円盤の表面で受けた輻射の量、すなわちグレイジング角度の大小に依存する。そして、円盤の温度によって、圧力の大小が変化するので、この影響は円盤の密度構造にも影響を与える。精確なモデルを構築するためには、温度構造・密度構造を自己無撞着に解く必要がある。しかし、散乱光観測から円盤の基本的な物理構造を考察する足がかりとして、図2の結果は参考になるだろう。

3. SEEDSで観測された原始惑星系円盤の散乱光分布とその解釈

さて、以上のことを踏まえて、実際に観測される円盤散乱光の構造をどう解釈するかという問題を考えてみよう。円盤の散乱表面の高さは、円盤

の温度・面密度の両方に依存する。円盤の面密度に対する依存性は、温度（円盤の幾何学的厚み）に対する依存性よりも圧倒的に弱い。一方で、円盤で生じるさまざまな力学過程によって密度は大きく変化する可能性があるが、温度は密度ほどは変化しにくいという側面もあり、現実の円盤において、散乱光の明るさを決めている主要な要因が密度の変化なのか温度の変化なのか、そこまで自明な問題ではないだろうと考えている。

SEEDS観測においては、軸対称に近い散乱光分布をもつ円盤から、強い非軸対称性をもつ円盤まで、さまざまな原始惑星系円盤が見つまっている。ここでは、数例の観測例を挙げながら、散乱光観測の解釈の一例を挙げていきたい。

図3に示すのは、HD 169142周囲の原始惑星系円盤の観測画像と、全方向で平均した動径方向の明るさ分布である⁶⁾。この天体では、軸対称に近い散乱光の分布が見えているが、中心星から70天文単位程度離れた場所において、リング状の構造が見えている。しかし、このリングはそこだけ散乱光が暗くなっているという分布ではない。方位角方向を平均した明るさ分布を見ると、半径の -3 乗に比例した分布が二つ見えており、それらが半径70天文単位の付近でつながっているような分布になっていることがわかる。

図4には、SAO 206462周囲の原始惑星系円盤の観測画像と、中心星から西向きに見た方向の明るさの動径プロファイルを示す⁷⁾。この天体では、スパイラル状の構造が見えており、その外側に半径の -4 乗の分布が見えている。SAO 206462は、散乱光の非軸対称性が強く、すべての方向で -4 乗のべきとなっているわけではないが、おおむね -2 乗よりは明らかに深い。

HD 169142の場合も、SAO 206462の場合も、明るさの動径プロファイルを見ると半径の -2 乗よりも深い。このことは、先にも述べたように、グレイジング角度が中心星から離れるに従って減少していることを示唆しており、すなわち内側の

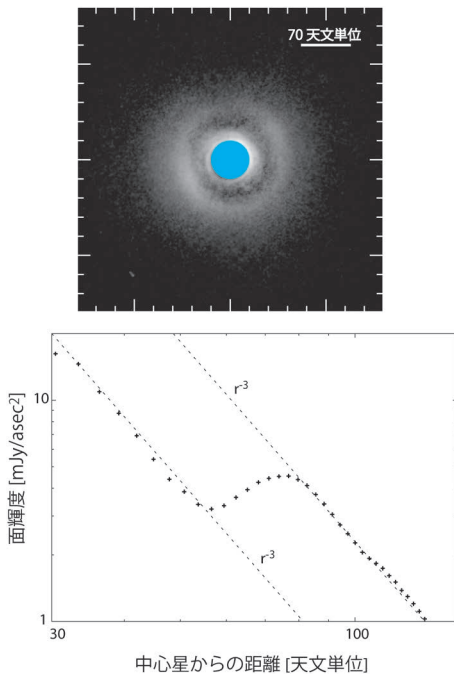


図3 HD 169142周囲の原始惑星系円盤の散乱光分布（上）と、全方位角方向を平均した明るさの動径プロファイル（下）。上図で、中心の青い領域はマスクで隠された領域である。動径プロファイルには、半径の -3 乗のプロファイルが点線で示されている。

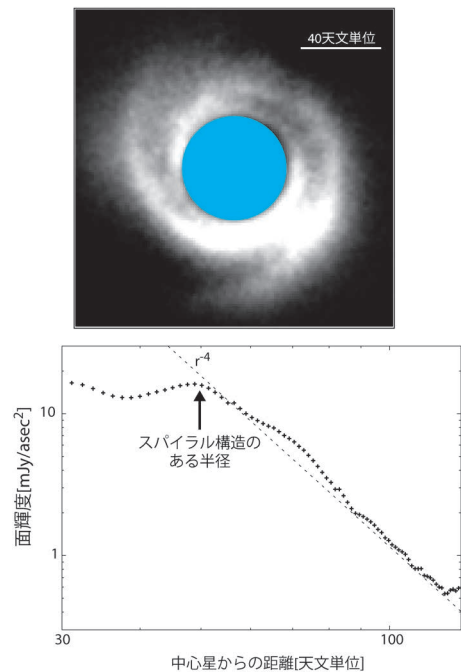


図4 SAO 206462周囲の原始惑星系円盤の散乱光分布（上）と、西側の明るさの動径プロファイル（下）。上図で、中心の青い領域よりも外側がリアルな検出をできている場所だと考えている。動径プロファイルには、半径の -4 乗のプロファイルが点線で示されている。

何らかの構造が外側に影を落としていることを示唆する。いくつかのモデルを試すと、HD 169142の場合、中心星から半径70天文単位程度離れた場所で密度が少し大きくなっている、あるいは温度が少し高くなっているようなことがあるかもしれない、ということが示唆される。HD 169142において、さらにさまざまな方位角方向での散乱光強度の動径分布を調べると、内側の明るさが明るいような方位角の方向に沿った散乱光の分布では、外側の明るさが暗くなっている傾向があることもわかった。このことは、内側の散乱面の高さが高い（正確にはグレイジング角度が大きい）場所では、外側により影を落としやすいということによるのかもしれない。

また、SAO 206462の場合では、スパイラル状の構造の付近で散乱面が少し盛り上がっているよ

うなことがある、外側に影を落としている可能性がある。ただし、半径の -2 乗よりも深いべきで散乱光の明るさが落ちている場合、散乱光の分布の変化が、必ずしもその場の温度や密度の構造の変化を反映していないという可能性も否定できるものではない⁸⁾、ということには注意をしておこう。散乱面の構造自体が影の影響を受けやすいようになっているのだから、影の原因となる構造がより中心星の近くにあって良いかもしれない。

散乱光の解釈にはさまざまな不定性が残るものの、HD 169142などで見られるようなリング状構造や、SAO 206462で見つかったようなスパイラル状の構造は、極めて興味深い。円盤にリング状構造を作る一つの可能性として、永年重力不安定性⁹⁾や、磁気回転不安定性の長期進化¹⁰⁾など、円盤における何らかの力学的過程が関係して

いる可能性がある。また、円盤のスパイラル構造も、円盤に立つ密度波（音波）と関係があるかもしれない。もし、この構造が密度波であれば、その形状から円盤の音速、ひいては円盤の幾何学的厚みを密度波理論に基づいて推定できる^{7), 11)}。これは、他とは全く独立な温度推定の方法となり、その後の形状の時間発展などにより、観測的検証可能である。円盤における力学的過程は、円盤内におけるダストの運動と成長や、惑星と円盤の相互作用など、惑星形成過程と密接にかかわっており、円盤には大きさスケールが円盤の幾何学的厚みと同程度であるようなさまざまな構造を作り出す。原始惑星系円盤の高解像度観測が可能になったことで、円盤における力学過程を直接的に観測で検証することが可能になり、惑星形成過程への理解がより進んでいくものと期待される。

散乱光の動径分布が、半径の -2 乗よりも明らかに浅い場合は、問題は深刻である。この場合、散乱表面の形状のみで説明しようとする、散乱表面は中心星から離れるに従って急激に高くななければならない。つまり、中心星から離れるに従って急激に面密度が上昇したり、温度が高くなったりといったことを考える必要がある。局所的に散乱光が大きくなっているようなことがある場合は、何らかの「壁」のようなものを置いておけば説明ができるかもしれないが、このような分布がある程度の半径にわたって続いているような場合は、問題が深刻になる。

ところが、このような観測例も実際にある。図5は、TW Hyaの周囲の原始惑星系円盤の散乱光の動径方向分布である¹²⁾。中心星から20天文単位程度離れた場所よりも内側では、散乱光分布が半径の -1.4 乗程度でしか落ちていない。さらに、その外側には、半径40天文単位程度までほぼ一定の散乱光分布になっており、さらに外側で初めて半径の -2.7 乗程度で落ちるようになる。特に、半径20天文単位程度より内側の -1.4 乗のべきというのは明らかに浅く、温度や密度の変化

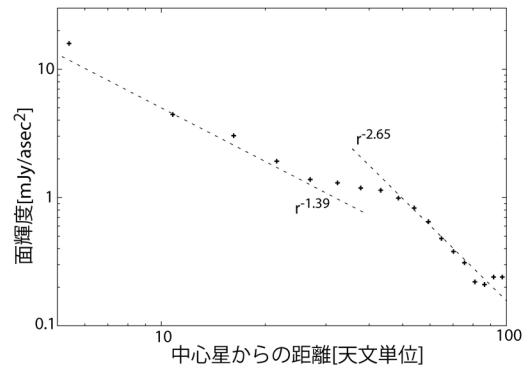


図5 TW Hya周囲の原始惑星系円盤の散乱光強度の、円盤長軸方向の動径プロファイル。

による散乱表面の変化で説明すると、かなり不自然な円盤構造になってしまう¹³⁾。この場合は、散乱光強度を決める別の要因、すなわちダスト粒子の性質まで考えなければならぬかもしれない。例えば、もしも円盤の内側ほどダスト粒子の大きさが大きくなっていくとすると、その粒子はより円盤の中心面への沈殿が起りやすいので、実質的に散乱表面を、内側ほど下げるという効果がありうる。ダスト粒子が大きくなったとき、散乱の光学的性質がどう変わるかという問題もあり、しっかりとした検証が必要であるが、この観測は場所によってダスト粒子の性質が異なるということまで示唆している可能性がある。ダスト成長を考えると、ガス円盤に構造がなくても散乱光にはリング状の構造が現れるという研究¹⁴⁾もあり、惑星形成の材料としてのダストを考えるうえでは興味深い天体であろう。

4. おわりに

本稿では、原始惑星系円盤の近赤外線散乱光の直接撮像観測について、基本的な事柄を解説した後、SEEDSプロジェクトで得られたいくつかの結果について、特にその解釈の部分に重点を当てて解説した。紙面の都合で、すべての観測を紹介することは不可能であるが、原始惑星系円盤の散乱光分布には天体によってさまざまな特徴があ

り、その解釈もさまざまである。

高解像度の観測によって、リング構造やスパイラル構造などの詳細な構造が見えてくると、その解釈も難しくなってくる。このような詳細な構造は、円盤の密度や温度の局所的な変化、特に散乱表面付近（円盤上空）における構造の変化に起因している可能性がある。円盤における、このような局所的な物理量の変化は、円盤における力学的過程によって引き起こされる可能性があり、例えばSAO 206462の観測で触れた密度波理論による温度推定などは、円盤の力学の理論を実際の観測の解釈として適用した一つの例である。しかし、円盤における力学的過程と原始惑星系円盤の構造との間の関係は、完全に理解されているとは言えない状況でもある。例えば、ここでは、基本的には円盤は中心面に垂直な方向に成層構造をしていると考えて議論を進めてきたが、磁気回転不安定性などの乱流によって円盤上空に円盤風が吹き、ダストを中心面から持ち上げる¹⁵⁾ というようなプロセスが起こる可能性も指摘されていて、円盤における重要な物理過程を一つひとつ明らかにしていくことが今後必要となる。さらに、TW Hyaのように、解釈が一筋縄ではいかないような例もあり、最終的には、ダストの大きさや光学特性の変化まで考慮に入れながら、散乱光分布を理解することが必要となってくるだろう。

惑星形成は、さまざまな過程が複雑に組み合わさって進んでいくものであるから、さまざまな解釈があって当然である。しかし、原始惑星系円盤の力学過程にしるダスト粒子の成長にしる、そのような惑星形成と深くかかわっているような過程が起こっている現場が、直接に画像として観測されるようになりつつある、ということは特筆すべきである。SEEDSの観測により、近赤外線のパラメータの分布がさまざまな天体で明らかにされてきた。今後、より高解像度の観測・可視から電波まで含めた多波長での観測・円盤の時間進化の観測などにより、現状の解釈を大きく修正することもあるだろう。

う。観測的な情報をより蓄積していくことで、個々の円盤の解釈にとどまらず、円盤の中で全体として何が起きているのかを明らかにしていくことが、今後の大きな目標となってくるだろう。

謝辞

本稿は、天文月報のSEEDS特集の一環として執筆されました。編集委員の町田正博氏、およびSEEDS計画の代表の田村元秀氏には、このような機会を提供していただき、感謝しております。

参考文献

- 1) 井田茂, 2007, 『系外惑星』(東京大学出版会)
- 2) Hayashi C., et al., 1985, in "Protostars and planets II," Tucson, University of Arizona Press, 1100
- 3) Chiang E. I., Goldreich P., 1997, ApJ 490, 368
- 4) Muto T., 2011, ApJ 739, 10
- 5) Inoue A., et al., 2008, PASJ 60, 577
- 6) Momose M., et al., 2015, PASJ 67, 83
- 7) Muto T., et al., 2012, ApJ 748, L22
- 8) Takami M., et al., 2014, ApJ 795, 71
- 9) Takahashi S. Z., Inutsuka S., 2014, ApJ 794, 55
- 10) Johansen A., et al., 2009, ApJ 697, 1269
- 11) 武藤恭之, 橋本淳, 田村元秀, 深川美里, 2013, 天文月報 106, 196
- 12) Akiyama E., et al., 2015, ApJ 802, L17
- 13) Dong R., 2015, ApJ 810, 6
- 14) Birnstiel T., et al., 2015, ApJ 813, L14
- 15) Suzuki T. K., et al., 2010, ApJ 718, 1289

Scattered Light from Protoplanetary Disks and Its Interpretations

Takayuki MUTO

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

Abstract: A number of high resolution images of protoplanetary disks have been obtained by the SEEDS Project, and the disks are found to be rich in small scale structures. In this article, we discuss how such structures observed in near infrared scattered light observations may be interpreted. We first review fundamentals of scattered light from protoplanetary disks. We then review the observations of three systems, SAO 206462, HD 169142, and TW Hya.