

すばるによる中間赤外線観測で 見えてきた惑星形成の現場

藤原 英明

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: fujiwara@astron.s.u-tokyo.ac.jp



藤原

岡本

本田

岡本 美子

〈茨城大学理学部理学科 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1〉

e-mail: yokamoto@mx.ibaraki.ac.jp

本田 充彦

〈神奈川大学理学部情報科学科 〒259-1293 神奈川県平塚市土屋 2946〉

e-mail: hondamt@kanagawa-u.ac.jp

前主系列星に付随する原始惑星系円盤や主系列星に付随するデブリ円盤は、惑星形成の現場だと考えられている。特に円盤中のダストは惑星の材料であり、その諸性質を探ることはたいへん重要である。そこでわれわれは、すばる望遠鏡に搭載された中間赤外線撮像分光装置 COMICS を用いて、原始惑星系円盤・デブリ円盤を観測し、円盤中のダストの物理的・化学的性質や、空間分布を調べてきた。本稿では、われわれの研究成果をいくつか紹介し、その展望を示す。

1. 中間赤外線で見える星周ダスト円盤

年齢が 100 万年程度の前主系列星の周囲には、ガスとダストからなる円盤状の構造があることが知られている。そしてこれが惑星誕生の現場になると考えられるため、円盤は原始惑星系円盤と呼ばれる。ダストは大きさがミクロン程度の固体微粒子であるが、惑星系形成過程においては、このダストが原始惑星系円盤の中で重要な役割を果たす。現在考えられている惑星系形成のシナリオでは、原始惑星系円盤の中でダストが合体成長して微惑星になり、それらは最終的には木星型惑星のコアや地球型惑星になるとされている。すなわち、原始惑星系円盤におけるダストは惑星系形成過程の“出発点”に位置する物質なのである。

また、より進化が進んだ主系列星にも、デブリ円盤（残骸円盤）と呼ばれる星周ダスト円盤をもつものがあることが知られている。主系列星周囲のダストは、原始惑星系円盤からの生き残りではなく、すでに形成された小天体（微惑星や彗星）から、蒸発や衝突によって現在進行形で放出されていると考えられている。よって、デブリ円盤をもつ星では惑星がすでに形成されている可能性が高く、たいへん興味深い研究対象である。

これら、原始惑星系円盤やデブリ円盤中におけるダストの進化過程を探ることは、惑星形成過程を考えるうえでたいへん重要である。近年、原始惑星系円盤の観測が進みつつあり、円盤内におけるダストの分布や性質が探られてきた。特に中間赤外線は、温度が数百 K 程度のダストの熱放射、

すなわち中心星から距離で数～数十天文単位のいわゆる惑星形成領域を探るのに適する。しかも中間赤外線域には、さまざまなダストの放射・吸収バンドフィーチャーがあり、これらはダストの組成やサイズ、形状などに応じて、強度や形、ピーク位置を変える。したがって、若い星周囲に付随するダストを中間赤外線で観測することは、惑星形成領域における惑星の原材料の性質を探るための有効な手段である。

中間赤外線領域の地球大気透過率は一部を除けば不透明で、感度や観測波長範囲の広さの点では、宇宙からの衛星観測は有用である。実際、1995年に打ち上げられた赤外線宇宙天文台 ISO は、宇宙にはさまざまな種類のダストが存在することを明らかにし¹⁾、「宇宙鉱物学」と呼ばれる新分野を切り開いた。そして、原始惑星系円盤・デブリ円盤ダストの諸性質の詳しい研究が展開された。衛星観測ではその後、日本の赤外線天文衛星「あかり」や NASA のスピッツァー宇宙望遠鏡がさらなる研究の可能性を広げている²⁾⁴⁾。

しかしながら、個々の円盤を細かく観測するには、衛星観測ではビームサイズが大きすぎて分解できない。例えば ISO は数十秒角の、スピッツァー宇宙望遠鏡は 3 秒角程度の空間分解能しかもたず、典型的な近傍の円盤天体の距離 100 パーセク (330 光年) では後者をもってしても 300 天文単位程度の構造しか議論できず、惑星形成領域に迫ることは到底できない。一方で、すばる望遠鏡をはじめとする地上の 8 メートル級望遠鏡では、1 桁小さい空間分解能、すなわち 10 ミクロンでは 0.3 秒角が達成可能である。これは、100 パーセクの天体について 30 天文単位程度の構造を空間的に分解できることを意味する。つまり、地上からでも観測可能な N バンド (8–13 ミクロン) と Q バンド (16–26 ミクロン) の大気の窓を使えば、円盤を分解して詳しく調べることができる。しかも、原始惑星系円盤・デブリ円盤に豊富に存在するシリケート (ケイ素の酸化物と鉄・マグネ

シウムなどの金属の酸化物から構成されるケイ酸塩鉱物) ダストは、N, Q バンドで強いフィーチャーをもつため、このフィーチャーの観測を通じて、性質の違うダストが円盤内にどのように分布しているのかを直接的に調べることが可能になる。

そこでわれわれは、すばる望遠鏡に搭載された中間赤外線撮像分光装置 COMICS^{5),6)} を用いて、原始惑星系円盤やデブリ円盤のダストの観測を精力的に行っている。COMICS は、提案から開発に至るまでわれわれのグループが行った装置であり、N, Q 両バンドで、高い空間分解能で、撮像・分光観測が可能である。本稿では、われわれの COMICS による研究成果の例を紹介し、その展望を示す。

2. 中間赤外スペクトルが語る 円盤ダストの履歴

まずは中間赤外線スペクトルから読み解かれた円盤シリケートダストの進化について紹介しよう。これまでの天体観測の結果、われわれの銀河系の星間空間のシリケートダストは非晶質な大きさ約 0.1 ミクロン以下のダストであることがわかっている⁷⁾。したがって、星間物質を取り込んだ原始惑星系円盤のダストを観測すると、非晶質シリケートが主要であることは自然な帰結である。一方で 1990 年代後半の ISO の観測を皮切りに Herbig Ae/Be 型星 (2–8 太陽質量の中質量前主系列星) の円盤ダストから結晶質なシリケート成分が検出された。また、2000 年代に入ってから COMICS をはじめとする地上中間赤外観測によりおうし座 T 型星 (太陽質量程度の小質量前主系列星) の円盤ダストからも結晶質シリケートが検出された⁸⁾。非晶質シリケートを結晶化するには、一般に約 800 K 以上の高温が必要であり、このような高温加熱プロセスが原始惑星系円盤で起こっていることが明らかになったのである。実はわれわれの太陽系形成初期にもシリケートダストの熔融現象が起こっていたことが、コンドリュールと

呼ばれるコンドライト隕石中の組織から知られており、太陽系外の円盤においても類似の現象が起きているのかもしれない。また、彗星塵にも結晶質シリケートが普遍的に存在していることも観測⁹⁾からわかっており、原始太陽系星雲の広い場所で結晶質シリケートが存在していたことを示している。このことは、天体観測による太陽系外原始惑星系円盤における結晶質シリケートの検出と符合する。ただし、この高温加熱プロセスの実態が何かははまだ明らかにはなっていない。中心星のごく近くで輻射によって加熱・結晶化したダストが円盤の外側にもたらされたという説¹⁰⁾もあれば、円盤内で衝撃波が生じ、ダストが加熱されることによって形成されたという説¹¹⁾もあり、現在もお論争中である。

そこで、中心星年齢や円盤の性質がさまざまな若い星を多数観測し、円盤内でシリケートの結晶化や粒子成長をつかさどる具体的メカニズムに迫る研究が近年多数行われた。原始惑星系円盤では、天体によって観測的に見られるシリケートダストに有意に違いが見られる。例えば図1は、おうし座T型星が示す10ミクロン帯シリケートフィーチャーの例である。三角形のフィーチャーを示すLkH α 264には大きさが0.1ミクロン程度の非結晶質シリケートが、台形型のフィーチャーを示すIQ Tauには大きさが2ミクロン程度以上の非結晶質シリケートが、スペクトル中に微細構造が見られるHen 3-600Aには、結晶質シリケートが豊富に存在していると考えられる。星間空間のダストは大きさが0.1ミクロン程度の非結晶質シリケートであったので、それによく似たLkH α 264のダストは始原的である。一方でIQ Tauは粒子成長が、Hen 3-600Aでは結晶化が起きたと考えられ、より進化したダストであると考えられるため、これらの違いは円盤シリケートダストの進化段階を示していると考えられる。そこでわれわれは30天体のおうし座T型星と57天体のHerbig Ae/Be型星を観測し、年齢との相関を調

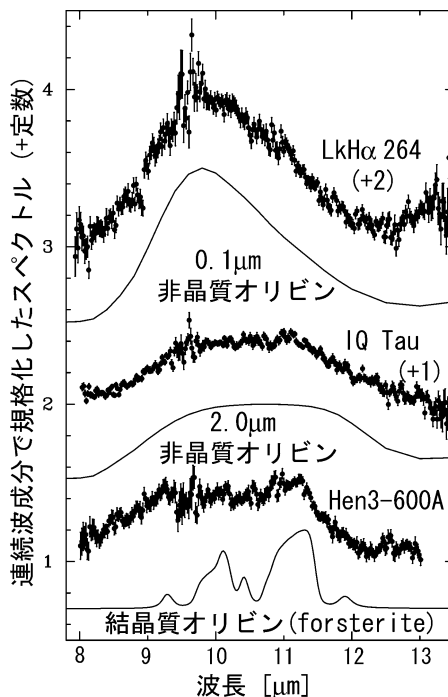


図1 おうし座T型星の10ミクロン帯ダストフィーチャーの例と各種ダストスペクトル比較。LkH α 264のスペクトルは星間空間シリケートダストと言われる、サイズが0.1ミクロン程度の非結晶質シリケートのスペクトルとよく似ており、始原的ダストが多いと考えられる。一方で、IQ Tauのように台形なスペクトルを示すものも多く、これらの円盤には~2ミクロン以上に成長した非結晶質シリケートが多いと考えられている。また、Hen 3-600のスペクトルのように、フィーチャーに比較的に細かい構造が見られるものもあり、これらの円盤には結晶質シリケートの成分が存在していると考えられている。このような原始惑星系円盤ダストの多様性の成因が何かについては、現在も議論中である。

べる研究を行った^{12), 13)}。単に円盤内で結晶質シリケート形成が進んでいるのであれば、時間が経てば経つほど、結晶質シリケートを示す天体が増えると予想したからである。しかし、この予想は見事に裏切られ、年齢100万年程度の非常に若い段階の円盤からも結晶質シリケートや粒子成長の証拠が見つかり、年齢との相関は見いだせなかつ

た。このことから、われわれは結晶質シリケートを形成するプロセスは、原始星段階程度のかかなり初期に起こり、原始惑星系円盤においては活発ではないと考えている。また、その他の円盤の性質を表す指標、例えば円盤のダスト質量、円盤赤道面での粒子サイズと関係しているといわれるミリ波・サブミリ波でのダスト不透明度の波長依存性のべき指数 β 、円盤の降着活動性を示す $H\alpha$ 光度との相関も調べたが、明瞭な相関は見いだせず、結晶化をもたらすメカニズムの特定には至らなかった。その後、スピッツァー宇宙望遠鏡による、高感度かつ大規模な観測研究が行われたが、いまだに結晶化や粒子成長をつかさどるメカニズムが何かについて、明瞭な結論が出ているとは言い難い。

この状況を打破する手段として、空間分解した分光観測が鍵になるかもしれない。というのは、実はこれまでの研究のほとんどは、円盤を空間分解していない、つまり原始惑星系円盤からやってくる中間赤外線放射をすべて足し合わせたスペクトルを用いた研究であるからである。結晶質シリケートの空間分布の観測は、結晶化プロセスの実態に迫る強力な手段となることは容易に想像できる。しかし、中間赤外線帯においては、スピッツァーはもちろん、8メートル級望遠鏡をもってしても原始惑星系円盤を空間分解するのは近傍の限られた天体でないと難しい。そこで、中間赤外線干渉計や次世代の30メートル望遠鏡を用いた高空間分解能観測に期待が高まっている。実際、まだ観測例は少ないが、円盤において結晶質シリケートが中心集中している傾向が見えており¹⁴⁾、高空間分解能観測により円盤ダストの結晶化プロセスの理解が進むと期待されている。

3. 直接撮像で探る原始惑星系円盤の構造

円盤の形態、すなわち星周ダストの空間分布は、星・惑星形成の歴史を大きく反映しているは

ずである。したがって、円盤におけるダストの分布空間を調べることはたいへん重要である。円盤の詳細な構造を調べるうえで最も強力かつシンプルな方法が、撮像観測である。あるがままの姿を詳細にとらえる観測によって、円盤の立体的な構造や温度などの物理的な環境を知ることができる。この種の観測では、特に可視光から近赤外線でのコロナグラフ観測がよく使われている。一方、中間赤外線では、中心星から放射がたいへん弱くなるため、コロナグラフを必要としない。したがって、可視光線や近赤外線では見ることができなかった、まさに惑星形成の現場となるような円盤の中心付近の様子までも見渡すことができる。

そこでわれわれは、このメリットを活かし、COMICSを用いて原始惑星系円盤とデブリ円盤の中間赤外線撮像サーベイ観測を行った。その結果、HD142527という Herbig Ae/Be 型星の周囲に、中間赤外線で顕著に広がったアーク状の円盤構造を検出することに成功した¹⁵⁾。図2に24.5ミクロンで検出された円盤の画像を示す。中心星から0.85秒角、実距離にしておよそ170天文単位のところに、アーク状の構造が見られる。HD142527には、すでに、すばる望遠鏡に搭載された近赤外線コロナグラフ観測装置 CIAO の観測によって、ほぼ真正面から見たようなアーク状の円盤が存在することが知られていたが¹⁶⁾、形態としては類似した構造が COMICS でも見られた。

さらに、近赤外線観測では見えにくかった中心星近傍の構造も明らかになった。アーク状に広がった円盤に加えて、星の近傍に比較的小さい円盤があり、この二つの円盤の間にはダストが存在しないギャップ領域があることが明らかになった。内側と外側の円盤を隔てるこのギャップは、円盤の中ですでに惑星が誕生しており、その惑星が軌道に沿って円盤物質を掃き去ったために作られた可能性がある。円盤進化の後期段階になると、惑星が形成されることによって円盤中心部

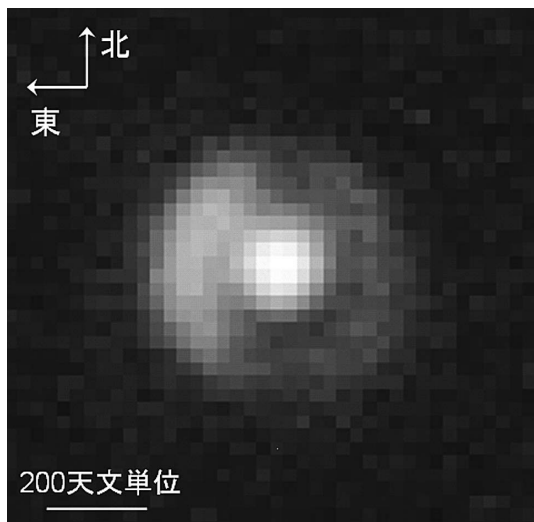


図2 24.5 ミクロンでの HD142527 のイメージ。中心集中した放射に加え、東と西にアーク状の広がった放射成分が見られる。HD142527 までの距離は 200 パーセク程度なので、円盤は 150 天文単位以上も広がっていることになる。

に穴やギャップが形成されるという「遷移円盤」モデルが、スピッツァー宇宙望遠鏡によるスペクトルエネルギー分布観測によって最近提唱されているが¹⁷⁾、今回のわれわれの結果は、まさに「遷移円盤」を直接的に見ているものかもしれない。

近赤外線と中間赤外線とでは、形態としては類似した構造が見られた HD142527 の円盤であったが、一つ大きな違いがあった。それは、東西方向に非対称な輝度分布が、近赤外線と中間赤外線とで逆転していることだ。近赤外線では西側のほうが明るいのに、中間赤外線では東側のほうが明るかったのである。このような非対称輝度分布は、図3のように、高い内壁をもつ外側の円盤を真正面から少し傾いた状態で見ていると考えれば説明できる。すなわち、円盤が少し傾いていることで、温度が高く中間赤外線ですっきりと光っている内壁が東側だけ露出していると考えられる。この場合、中心星からの光は円盤の西側では前方散乱的に、東側は後方散乱的に散乱されるために、円

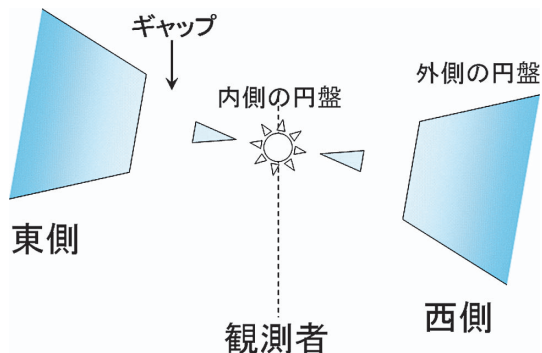


図3 近赤外線と中間赤外線観測から推定される HD142527 の円盤構造。ギャップがある円盤が少し傾いていることで、温度の高い円盤内壁が露出している東側が中間赤外線では明るく見えると考えられる。

盤表面のダストによる散乱光をトレースする近赤外線では、西側のほうが明るく観測される。このように、他波長での観測と高空間分解能の中間赤外線観測を併せて考えることで、円盤の立体構造をも推定することが可能になった。

さらに中間赤外線では、観測された熱放射の 2 波長での放射強度比から、ダストの大きさや温度も導き出せる。今回の観測で、18.8 ミクロン、24.5 ミクロンの 2 波長で共に円盤構造が分解され、ダストの中心星からの距離がわかったことにより、ダストモデルとの比較から、円盤外縁部にあるダストの典型的なサイズが数ミクロン程度であることもわかった。もともと星間空間に存在するダストのサイズは 0.1 ミクロン程度だと考えられているので、HD142527 の円盤外縁部にあるダストはすでに少しずつ成長を始めていると言える。中心星から近く、物質の密度が高い領域でダストサイズが成長しているということは、これまでの 10 ミクロン帯シリケートフィーチャーの観測から多くの天体についてすでに知られていたが、今回の観測結果は、ダスト成長についての議論の範囲を、円盤のより外側の領域にまで広げた。

4. 高空間分解能と詳細分光を組み合わせた究極の観測：がが座 β 星に見る初期惑星系の姿

以上のように、星周円盤を空間分解してスペクトルを議論すれば、より詳しく惑星形成の道筋を追うのに役立つことは明らかである。例えば、円盤の中のダストのサイズ成長がどこでどの程度進んでいるかがわかれば、微惑星成長の基礎を解く鍵になる。また、結晶質シリケートのような高温生成物の分布範囲は、ダスト結晶化のメカニズムや円盤内での物質混合の様子を解明する手がかりになる。あるいはデブリ円盤では、ダストの空間分布はすでにできた惑星から力学的な影響を受けることがしばしばあり、間接的に惑星の分布や質量のヒントを与える。

ここでは、われわれが行った、デブリ円盤のダスト分布を空間的に詳しく分解して調べた研究を紹介しよう。がが座 β 星は、距離約 20 パーセク（およそ 60 光年）のところにある A5 型の主系列星で中心星質量は太陽の約 1.75 倍である。年齢は 1,200 万年とかなり若い。赤外線天文衛星 IRAS によって、この星に赤外線域の超過放射が発見され、1984 年には、この星の周りにほぼ真横から見たダスト円盤があることが発見された¹⁸⁾。以来、この星について、惑星系形成の観点からさまざまな観測が行われてきた。特に、このデブリ円盤のダストは、10 ミクロン帯にシリケート放射を示し、しかもこれが太陽系の一部の彗星とよく似て、結晶質シリケートに特徴的な 11.3 ミクロンのピークをもつことから注目されていた¹⁹⁾。

われわれは COMICS を用いてがが座 β 星の円盤ダストを詳しく観測した。COMICS は、ロングスリット分光器で、スリットを円盤の長軸方向にあてて、円盤の場所ごとに 10 ミクロン帯のシリケートスペクトルがどのように変化しているのかを調べることができる。回折限界での空間分解能は約 0.3 秒角で、これはがが座 β 星では約 6 天文

単位に相当するが、実際には、この天体は南天にあって、すばるから観測すると高度が最大で 20 度までしか上がらないので空間分解能は劣化してしまったが、それでも場所ごとのスペクトルの違いを見いだすことができた。円盤中心では、結晶質シリケートによる複数のピークが見られるが、円盤の外側ほど非晶質シリケートによる三角形の幅広なフィーチャーが強く見られるようになる。そこでわれわれは、これらのスペクトルの成分分布を解析するため、各位置でのスペクトルを、小さい非晶質シリケート（半径 0.1 ミクロン）、大きい非晶質シリケート（半径 2 ミクロン）、結晶質シリケートの一種であるフォルステライト、および連続成分でフィットした。その結果得られた各成分の放射強度分布が図 4 である。図 4 から、結晶質フォルステライトと、大きい非晶質シリケートはいずれも中心集中していること、これらの分布はちょうど点源の強度分布に対応していることで、COMICS で空間分解できない程度の広がりしかもっていない。一方で、小さい非晶質シリケートは、中心ではむしろ少なく、中心星から 6, 16, 30 天文単位付近に主に分布していることがわかった。がが座 β 星の場合、中心星からの放射の圧力によって、小さいダストは数年から数十年のタイムスケールで円盤外へと吹き飛ばされてしまう。にもかかわらず 6, 16, 30 天文単位という三つの場所にこれらの小さいダストが多く分布しているのは、これらの場所で今まさにダストが放出されているのだと考えることができる。そこでわれわれは、これらの場所に、微惑星がベルト状に分布し、その中で微惑星同士が頻繁に衝突を起こしてダストをまき散らしているものと考え、これを「微惑星帯」と名づけた²⁰⁾。太陽系の小惑星帯のようなものを想像するのがわかりやすいだろう（想像図は図 4）。こうしてまき散らされたダストは、小さいものは放射圧で円盤外へと飛ばされていくが、大きいものは逆に、放射圧がダストの軌道運動へのブレーキとして効く（ポインティングロ

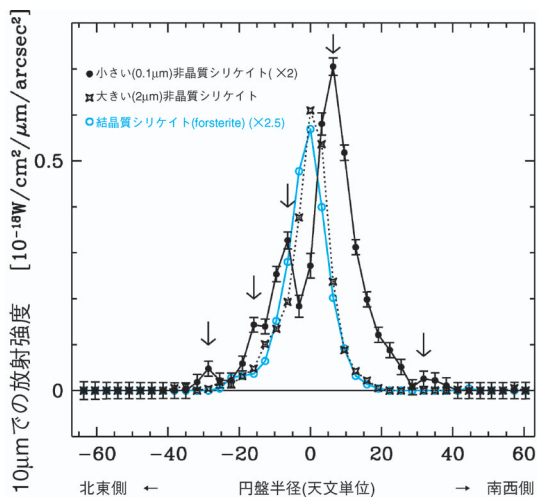


図4 がか座β星の各種シリケートダストの10ミクロンでの放射強度の空間分布(左)および、そこから推測される微惑星・惑星分布の想像図(右)。(JAXA 提供)



バートソン効果) ことでだんだんと中心星方向へと落ちていく。こうすることで、大きいダストからのスペクトル放射は、より温度が高い中心星近傍で強くなる。さらに、こうして落ちていったダストは中心星に十分近づくと、高温になり結晶質へと変性するので、やはり結晶質シリケートスペクトルは中心星近傍で強くなる。こうして、がか座β星のデブリ円盤ダストの空間分布は非常にうまく解釈できることがわかった。

さらに興味深いのは、これらの微惑星帯の位置が、お互いに力学的に共鳴の関係にあることである。力学的共鳴関係とは、太陽系の惑星同士や惑星と小天体の間でも見られる関係で、お互いの軌道周期が簡単な整数倍で表されるとき、軌道が安定になったり不安定になったりするということである。ただ、微惑星のような小天体同士で力学的共鳴になるというのは考えにくい。そこでわれわれは、がか座β星には、まだ検出できていない惑星が複数あって、それらがお互いに力学的共鳴の関係にあり、また惑星と微惑星がやはり力学的共鳴の関係にあるのだと考えた。その結果として微惑星帯同士が共鳴関係をなしているように見えるという考えである。太陽系の場合、平均運動共鳴

(公転角速度の共鳴関係) で見たときに、例えば木星と小惑星帯の内側の端は2:1の共鳴に、木星と小惑星帯の外側の端は4:1の共鳴関係にある。そのように考えた場合、がか座β星の円盤で、例えば惑星が12.5天文単位の軌道にあると、6天文単位のところの微惑星帯と同様の共鳴関係を満たしうる。このとき、この惑星はこの外側の微惑星帯とは3:2の共鳴関係を満たすことができるが、これはちょうど太陽系の海王星と、エッジワースカイパーベルトにある冥王星をはじめとする一群の天体との共鳴関係と同じである。がか座β星では、円盤での微惑星の形成のあと、すでに大きな惑星ができていて、惑星に対して安定な軌道にある微惑星だけが残って微惑星帯が作られた可能性がある。また、惑星による微惑星への力学的攪乱が、微惑星同士の衝突を促し観測されたようなダスト分布を生み出しているのだろう。ざっと各微惑星帯で放出されるダスト質量を見積もると年間に 10^{15-16} kgにもなる。これは、太陽系の黄道光ダストの生成率に比べておよそ10~100万倍も大きく、放出の激しさが伺える。がか座β星は年齢が1,200万年と、太陽系(45億年)に比べて著しく若く、惑星系の初期の姿を示していると考えられ

る。今回の観測で微惑星帯があることがわかった領域は、太陽系でいえばちょうど惑星が存在するほど星に近い内側部分にあたり、これまで観測がとて難しかった場所である。もしかすると太陽系の初期にも同じような「微惑星帯」が存在し、激しい衝突を起こしていたのかもしれない。

われわれの研究成果は、世界で初めて、生まれつつある惑星系で塵がまき散らされている場所を特定することに成功したもので、惑星系形成論に大きなインパクトを与えるものになった。さらに上に述べたように、微惑星帯は、惑星の存在をも示唆する可能性がある」と指摘したが、その後、2007年になって、われわれが提案したような構造が実際に作られうるのかを理論シミュレーションによって検討したグループがある。それによれば、微惑星をばらまいた円盤から12天文単位のところには2-5木星質量の惑星を、また25天文単位のところには0.5木星質量の惑星をおくことで観測されたような微惑星帯の構造を再現できる²¹⁾。さらに2008年11月には、がが座β星の中心星から8天文単位のところには点源天体が直接撮像で検出され、これが8木星質量程度の惑星である可能性が考えられている²²⁾。このように、星周円盤のダストの空間分布を詳しく理解することは、今後惑星系のいろいろな姿を解明するのに有力な手法になるだろう。

5. 今後の展開：30メートル望遠鏡時代の円盤観測に向けて

これまでに述べたような、星周円盤ダストの空間分布の研究は、惑星系の形成や進化を探るうえで非常に興味深いのが、残念ながら、現状の8メートル望遠鏡では、同種の観測を行える天体は、感度的にも空間分解能の点からも極めて限られている。がが座β星はその中でも例外的な天体であった。しかし、現在計画が検討されている次世代の30メートル級望遠鏡では、感度は8メートルよりも2桁程度、空間分解能は0.08秒角まで向上す

る。そのため、いろいろなデブリ円盤や原始惑星系円盤について、その中のダスト分布の解明に取り組めるようになる。例えば、がが座β星であれば、1.6天文単位の空間分解能に相当するから、微惑星帯の幅や、より内側での惑星や小天体の分布についても調べられるだろう。一方で、30メートル級望遠鏡時代には、観測時間はより貴重なものになり、より効率的な観測が求められる。

そこでわれわれは、次世代望遠鏡での円盤観測のために、新しい観測技術の開発にも取り組んでいる。その中の一つが、イメージスライサーと呼ばれる面分光技術の開発である。ロングスリット分光器は、よく知られた、スリットを通した光を回折格子などで分光するものである。イメージスライサー型分光器(図5)では、このスリットの代わりに、反射型スリット、すなわち細長いミラーを複数並べておく。ただし、これらの反射型スリットは、それぞれ向きを少しずつ変えておく。こうすることで、スリットミラー(スライスマイラー)を通った光はそれぞれ少しずつ異なる方向に進む。これらを別々のミラーで再度結像させるときに、スライスマイラー上の視野を再配置して、1列に並べ直す。こうすることで、この後ろにおかれる分光器に、あたかも1本のスリットから光がやってきたかのように光を入射させ広い視野範囲を一気に分光しつつも空間情報は維持するのである。このような手法は、円盤ダストの空間分布を調べるような、特定の範囲に対象が集中している天体の分光観測に非常に向いている。

イメージスライサーを用いた中間赤外線分光器は、2010年代半ばの打ち上げを目指すNASAのジェームスウェーブ宇宙望遠鏡(JWST)用に開発が進められているが、まだ稼働しているものはない。そのため、イメージスライサー部分の光学系開発などを中心に基礎技術開発が必要とされている。さらに、地上観測への応用では、高背景放射下での観測・解析手法も必要となる。そこで、茨城大、JAXA宇宙科学研究本部、国立天文台、東

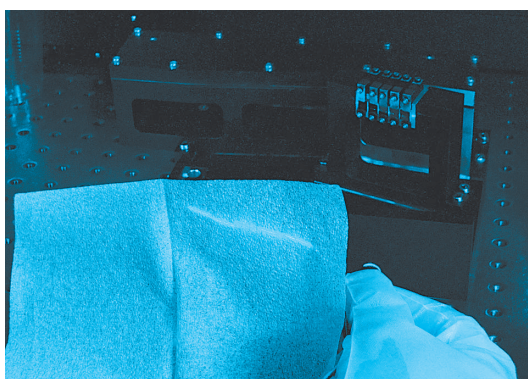
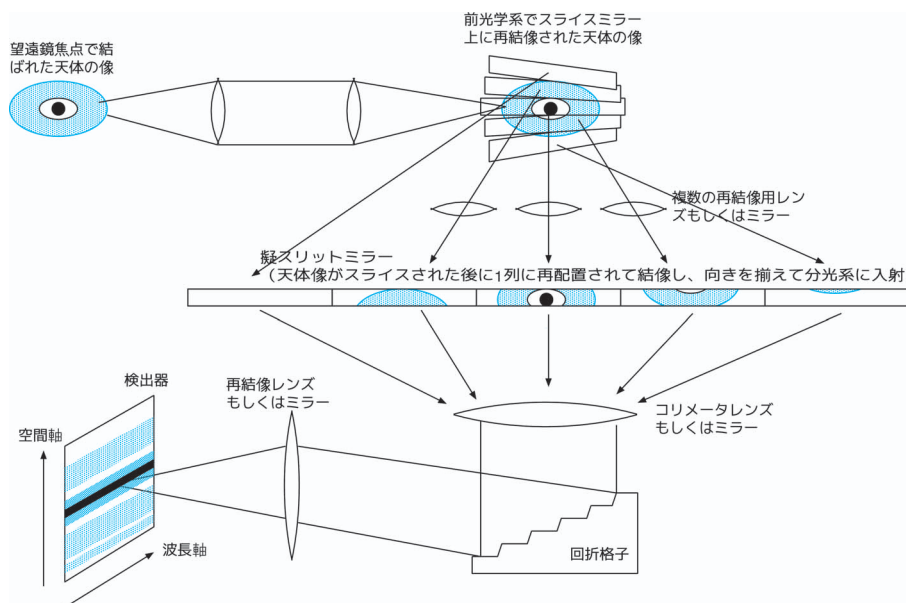


図5 イメージスライサー型分光器の概念図(上)と、中間赤外線用イメージスライサー型分光器プロトタイプ MIRSIS のスライサー系の試験の様子。右奥に見えているのが擬スリットミラーで、その後ろにスライスミラーが隠れている。スライスミラーに入射させたレーザー光(丸いビームをもつ)が、スライサー系を通過して1列に長い線上に再配置された様子が手前においた薄紙に映っている。ここではレーザー光が本来赤いところを月報の2色印刷に合わせて青に変換して写真を載せている。

大のグループでは、イメージスライサーを用いた中間赤外線分光器のプロトタイプ MIRSIS の開発を進めている^{23)~25)}。図5は MIRSIS で用いるイメージスライサー光学系の試験の様子である。これまでに国立天文台先端技術センターでの試作などを通して、スライスミラーなどの光学部品を十分な精度で製作する技術を確認することができおり、今後、装置を室内実験や試験観測等を通し

て評価していこうとしている。このような新しい技術を搭載した、次世代装置を30メートル級の次世代望遠鏡で稼働させることで、円盤のダスト分布の観測は飛躍的に進展するだろう。それによって、ダストの進化の観点から見た惑星系形成の理解は飛躍的に進むだろう。

謝 辞

本研究は、片坐宏一准教授 (ISAS/JAXA)、尾中敬教授 (東京大学)、宮田隆志准教授 (東京大学)、酒向重行助教 (東京大学)、山下卓也教授 (国立天文台)、藤吉拓哉さん (ハワイ観測所)、左近樹助教 (東京大学) をはじめとする COMICS グループメンバー、三井健司さん、岡田則夫さんをはじめとする国立天文台先端技術センターの方々、渡部潤一准教授 (国立天文台)、深川美里助教 (大阪大学)、茨城大学宇宙観測研究室の学生たちとの共同研究です。本研究を進めるうえでお世話になった多くの方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Waelkens C., et al., 1996, A&A 315, 245
- 2) 尾中 敬, 石原大助, 2009, 天文月報, 本号
- 3) Takita, S., et al., 2009, PASJ, in press
- 4) Werner M., Fazio G., Rieke G., Roellig T. L., Watson D. M., 2006, ARA&A 44, 269
- 5) 片坐宏一, 2004, 天文月報 97, 210
- 6) Kataza, H., et al., 2000, Proc. of SPIE, 4008, 1144
- 7) Kemper F., et al., 2004, ApJ 609, 826
- 8) Honda M., et al., 2003, ApJ 585, L59
- 9) Sugita S., et al., 2005, Science, 310, 274
- 10) Ciesla F., et al., 2007, Science, 318, 613
- 11) Harker D. E., Desch S. J., 2002, ApJ 565, L109
- 12) Honda M., et al., 2006, ApJ 646, 1024
- 13) 藤原英明, 2007, 遊星人 16, 112
- 14) van Boekel R., et al., 2005, Nature 432, 479
- 15) Fujiwara H., et al., 2006, ApJ 644, L133
- 16) Fukagawa M., et al., 2006, ApJ 636, L153
- 17) D'Alessio P., et al., 2005, ApJ 621, 461
- 18) Smith B. A., Terriile R. J., 1984, Science 226, 1421
- 19) Knacke R. F., et al., 1993, ApJ 418, 440
- 20) Okamoto Y. K., et al., 2004, Nature 431, 660
- 21) Freistetter F., Krivov A. V., Loehne T., 2007, A&A 466, 389
- 22) Lagrange A. M., et al., 2008, A&A, in press
- 23) Okamoto Y. K., Kataza H., Mitsui K., Onaka T., 2006, Proc. SPIE 6269, 62695F
- 24) Okamoto Y. K., et al., 2008, Proc. SPIE 7014, 70142B
- 25) Mitsui K., et al., 2008, Proc. SPIE 7014, 701427

Planet Formation Site Revealed with Subaru Mid-infrared Observations

Hideaki FUJIWARA

The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Yoshiko K. OKAMOTO

Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito-shi, Ibaraki 310-8512, Japan

Mitsuhiko HONDA

Kanagawa University, 2946 Tsuchiya, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1293, Japan

Abstract: Protoplanetary disks and debris disks are thought to be planet formation sites. Especially it is important to study circumstellar dust, which is starting material of planets. We have observed protoplanetary disks and debris disk with COMICS. Here we introduce our recent studies and describe future prospects.