

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740097
 研究課題名（和文） 惑星系母体としての星周円盤：高空間分解能赤外分光で明らかにする円盤ダスト空間分布
 研究課題名（英文） Dust distribution in circumstellar disks as birthplaces of planetary systems by infrared spectroscopy with high spatial resolution
 研究代表者
 岡本 美子（OKAMOTO YOSHIKO）
 茨城大学・理学部・准教授
 研究者番号：10343469

研究成果の概要：

惑星系形成の場としての星周円盤の性質を、円盤ダストの空間分布の観点から明らかにするため、8m すばる望遠鏡の中間赤外線観測装置 COMICS 等を用いた星周円盤ダストの観測を進めた。この結果、いくつかの著しく広がった円盤を発見し、特に大きな広がりを持つ天体の性質を詳しく調べた。10 太陽質量星周の円盤 1 個については、その 10–1000AU スケールの構造・フレア構造・温度分布・ダストの性質などを解明した。この円盤は、太陽質量程度の星の周囲の円盤でも期待されるような熱的構造を示す一方で、存在するシリケートダストの種類は、低質量星周とはかなり異なり、プラズマ等による変性の可能性が示唆される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	1,200,000	0	1,200,000
平成 20 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	330,000	2,630,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：赤外線天文学・惑星系形成・星周円盤・分光・ダスト

1. 研究開始当初の背景

星周円盤は、惑星系形成の場として重要である。特に、星周円盤中では、星間空間では 1 ミクロン以下の大きさだったダストが合体成長し、惑星の種となる微惑星を作ったと考えられており、円盤中でのダスト進化を知ることが、惑星形成のプロセスを理解する上で重要である。また、円盤中のダストとその分布には円盤の様々な状態（構造・温度・化学状態・物質輸送など）が反映される。このよ

うなダストの諸性質を詳細に調べる方法として、1990 年代後半に画期的に発展した天体鉱物学（アストロミネラロジー）の手法がある。この手法では、赤外線ダストスペクトルを天体と実験室鉱物粒子で比較することで、天体側のダストの鉱物種、組成、大きさ、形状、温度、結晶性などのさまざまな物性を明らかにする。ダスト観測の側面から惑星系形成の場としての円盤の諸性質を理解するには、天体鉱物学の手法により円盤ダストの性質の時間的・空間的变化を追う必要がある。

それには、ダストバンドフィーチャが多数存在する中間赤外線（波長 10–20 ミクロン）帯での、高い空間分解能での分光観測が鍵となる。しかし、中間赤外線における星周円盤のダストの空間分布を詳しく調べる研究は 2000 年代半ばまであまりなく、広がった円盤探査と、その中の物質分布の解明は重要な研究課題であった。そこで、我々は、平成 17 年度～18 年度に、中間赤外線帯での原始惑星系円盤ダスト放射広がり探査や高空間分解能観測を開始した。原始惑星系円盤天体は近いものでも 100pc 程度にあり、円盤の空間分解は 8m 級望遠鏡でも容易でない。そのため我々は、高解像度を誇る 8.2m 望遠鏡とその中間赤外線観測装置 COMICS による、明るい近傍 Herbig Ae/Be 型星（中質量前主系列星）の中間赤外線観測を進めた。ここでは、高速露出を繰り返す撮像観測データのシフトアンドアド解析により、円盤の広がりについて 0.1" の広がりまで検出する手法を開発し、さらに小さな円盤（0.05" 程度まで）についても、円盤がある特定のダストバンド放射や連続波でのみ広がるかどうかを空間分解する方法として、中間赤外線帯分光アストロメトリの観測手法を開発した。

2. 研究の目的

そこで、平成 19～20 年度における本研究では、上記の萌芽的研究をベースに、さらに円盤広がり探査を進め、より詳細に円盤内ダスト分布を明らかにすることに取り組んだ。具体的には以下の課題に取り組んだ。

(1) 近傍の中質量星周円盤の広がり探査をさらに進め、分解された円盤のサンプルを増やすこと。

(2) 大きく分解された円盤では、その熱放射や円盤内ダスト分布について、空間分解分光の手法で、明らかにすること。

3. 研究の方法

本研究では、8m すばる望遠鏡の中間赤外線観測装置 COMICS 等を用いた Herbig Ae/Be 型星周円盤ダストの撮像・分光観測を進めた。

上記(1)については、以前に開発した高速撮像観測および過去の観測データの再解析を中心とした広がり探査を行って、分解の有無、広がりサイズの測定、それらと星周円盤・星の性質との比較を行った。また、(2)については、これによって分解された天体の、空間分解分光や、広がりが大きくない場合には分光アストロメトリの手法も用いて、中間赤外線ダストスペクトルが空間的にどのように変化しているかを調べ、それらと、ダストの性質とを比較し、円盤の状態を調べた。

4. 研究成果

(1) 平成 17～18 年度の円盤広がり探査の研究を継続し、複数の円盤天体の分解に至った。その中で、10 太陽質量中心星である HD200775 の周りに 1000AU 程度に著しく広がった円盤を発見した。この放射強度は、10、20 ミクロン帯の両方で、星光放射成分の推定値よりもずっと明るい。この放射は、10、20 ミクロン帯の両方で、ほぼ南北に伸びた放射として検出された。これは、電波 CO 輝線観測で見出されている、過去のアウトフロー活動に伴うキャビティ構造（東西に伸びている）に直交する方向に伸びており、また、近赤外線干渉計観測により見出された近接連星軌道の投影長軸方向と合致する方向に伸びている。またそのサイズが、小中質量星でこれまでに見出されている円盤のサイズや、大質量星周に見つかっている円盤候補天体のサイズと近い。以上のことから、本研究で見出された中間赤外線帯放射は星周円盤起源と判断される。また、この円盤の発見は、単に原始惑星系円盤の分解という意義にとどまらず、未だに形成過程がよくわかっていない大質量星においても、明瞭な星周円盤構造を持つことを示した点でも意義深い。

この円盤放射の形状は、ほぼ楕円形ではあるものの、等輝度線楕円の中心が、星の位置からずれ、そのずれ方がより低輝度の等輝度線ほど大きいという特徴を示す。これは、円盤がフレア形状（半径 r と、その半径での円盤高さ $z(r)$ の比 $z(r)/r$ が r に対して単調増加となる形状）をしている場合に特徴的な性質である。我々は、フレア円盤モデルを作成し、観測された画像にフィッティングを行うことで、フレア円盤形状のパラメータを詳しく調べた。この結果、観測像がフレア円盤でよく説明できること、外径が 670AU 程度より内側では輝度分布が半径の -1.5 乗に比例していること、円盤高さは半径の $2.1+0.9$ 乗に比例していること、を明らかにした。最後の円盤高さの半径依存性は、静水圧平衡の円盤では 1.5 乗以下の依存性が期待されるのに対し、HD200775 ではやや大きめの値が求めたが、不定性も大きく、原因の特定には至らなかった。

10、20 ミクロン放射の輝度比をとることで、円盤放射の温度を求めたところ、およそ 180–350K 程度になった。また、円盤放射の光学的厚さを、この温度帯の黒体放射との比較から求めたところ、中間赤外線帯で 10^{-5} – 10^{-3} となり、これは可視光 (0.55 μ m) での光学的厚さにすると 10^{-2} – 10^{-4} に相当する。これは、円盤全体が光っているのではなく、表層のみが光っている、「円盤大気」モデルと合致す

ると考えられる。一方で従来考えられていた単純なフレア形状円盤モデルにおいては、この可視光での光学的厚みはおよそ $z(r)/r$ の程度になると見積もられ、これは HD200775 の場合にはざっと 0.1 のオーダーである。つまり、観測された円盤放射は、単純なフレア円盤の表面放射では説明ができない。この解釈として、渡邊および Lin(2008)によって提唱された、円盤表面の熱不安定によるパルス励起と、それに伴う、見かけの光学的厚みの低下が考えられる。

HD200775 については、過去に 3.4mm 電波連続波観測 (文献) から、広がった制動放射が見出されていた。この観測ビームは 5 秒角程度で、今回の我々の中間赤外線観測よりもかなり粗い空間分解能しかないが、それでも 3.4mm 制動放射の形状とサイズが、本研究で見出した、HD200775 の中間赤外線帯円盤放射に非常に良く似ていることがわかった。おそらく、HD200775 の場合には、中心星が 10 太陽質量程度あるために電離放射が起こっており、中心星からの電離光子が、円盤の光蒸発 (=ガスの電離と引き続く電離ガスの流出) を起こしているものと考えられる。

我々はこの天体について、さらにサブミリ波干渉計 SMA による観測を行って、円盤の中央面にある低温だが大部分の質量を担うダスト成分の観測も試みた。この結果、円盤の中心部に、0.8" 分解能で分解できないコンパクトな 850 ミクロン放射を検出した。これは、質量にして 0.022-0.010 太陽質量程度と、太陽系 (の太陽以外の) 形成に必要とされる最小質量程度である。

(2)我々は HD200775 を始め、広がりが検出された円盤を中心に、そのダスト分布を詳しく調べるために、さらに 10 ミクロン帯スリット分光を行った。HD200775 については、広がった円盤放射成分と、中心の点源放射成分 (これも星にごく近いところのダスト放射起源) とでスペクトルが全く違うことを見出した。

このうち、広がった円盤放射成分については、非晶質シリケート放射によると考えられる 10 ミクロン帯フィーチャが検出された。このフィーチャは 9.2 ミクロン付近にピークを持つ。これは、若い小中質量星周円盤・星間物質・大質量原始星周エンベロープで見られる非晶質シリケートのピークよりかなり短波長である。成分としては、パイロキシン ($MgSiO_3$) もしくは、それよりもさらに SiO_2 成分率の高いシリケートであることが示唆された。これは、従来よりも高い空間分解能で、円盤ダスト放射のスペクトルのみを取り出すことで、大質量星周円盤に特徴的なダスト成分を検出できた可能性がある。そのような大質量星周特有のダストが形成する原因ははっきりしないが、大質量星からの強い星風

に含まれるプラズマ、もしくは光蒸発円盤のプラズマが、星間物質にも含まれるような非晶質シリケートを変性している可能性がある。あるいは、大質量星形成過程において、何らかの変性のメカニズムが存在するのかもしれない。これについては今後の要検討事項である。

本研究での HD200775 星周円盤の観測には大きく二つの意義がある。

(A) はじめて、10 太陽質量程度の中心星の周りの星周円盤を鮮明に描き出すことに成功した。従来、数太陽質量以上の星周円盤の鮮明な画像はほとんどなく、また 8 太陽質量を超える大質量星の形成が星周円盤によるのか、他のメカニズムによるのか、はっきりしていなかったが、今回の結果により、周 10 太陽質量程度の星が、円盤を通じた物質降着で形成される可能性が高いことを示した。

(B) 星周円盤は、中心星質量によって性質に共通の点と相違の点と両方持つことを示した。今後このような円盤の性質の質量依存性を詳しく調べ、惑星形成の星による違い等を調べる端緒となるだろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① Honda, M., Inoue, A. K., Fukagawa, M., Oka, A., Nakamoto, T., Ishii, M., Terada, H., Takato, N., Kawakita, H., Okamoto, Y. K., Shibai, H., Tamura, M., Kudo, T., Itoh, Y.

"Detection of Water ICE Grains on the Surface of the Circumstellar Disk Around HD 142527", *The Astrophysical Journal Letters*, 690, L110-L113 (2009) 査読有

② de Wit, W. J., Hoare, M. G., Fujiyoshi, T., Oudmaijer, R. D., Honda, M., Kataza, H., Miyata, T., Okamoto, Y. K., Onaka, T., Sako, S., Yamashita, T., "Resolved 24.5 micron emission from massive young stellar objects", *Astronomy & Astrophysics*, 494, 157-178 (2009) 査読有

③ 藤原 英明、岡本 美子、本田 充彦、
「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」、*天文月報*, 102, 108-117 (2009) 査読無

④ de Wit, W. J., Oudmaijer, R. D.,

Fujiyoshi, T., Hoare, M. G., Honda, M., Kataza, H., Miyata, T., Okamoto, Y. K., Onaka, T., Sako, S., Yamashita, T., "A Red Supergiant Nebula at 25 μ m: Arcsecond-Scale Mass-Loss Asymmetries of μ Cephei", The Astrophysical Journal, 685, L75-L78 (2008) 査読有

⑤ Okada, Y., Onaka, T., Miyata, T., Okamoto, Y. K., Sakon, I., Shibai, H., Takahashi, H., "Si and Fe depletion in Galactic star-forming regions observed by the Spitzer Space Telescope", The Astrophysical Journal, 682, 416-433 (2008) 査読有

⑥ Matsumoto, H., Sakon, I., Onaka, T., Sako, S., Miyata, T., Kataza, H., Okada, Y., Okamoto, Y. K., Honda, M., Yamashita, T., Takahashi, H., Fujiyoshi, T., "Mid-Infrared Observations of Planetary Nebula BD +30 3639: Evolution and Distribution of Unidentified IR Band Carriers", The Astrophysical Journal, 677, 1120-1131 (2008) 査読有

[学会発表] (計 5件)

① Okamoto, Y. K., Kataza, H., Honda, M., Fujiwara, H., Miyata, T., Sako, S., Sakon, I., Onaka, T., Yamashita, T., "Spatially resolved observations of 10micron emission around Herbig Ae/Be stars", Cosmic Dust Near & Far, 8-12 Sep. 2008, in Heidelberg, Germany

② Okamoto, Y. K., "Protoplanetary Disks and Debris Disks Revealed by Mid-infrared Observations with High Spectral Resolution", Science in the Era of TMT, at Beckman Center, Irvine, CA, U.S., 23-25, Jul. 2007

③ 岡本美子、片坐宏一、本田充彦、藤原英明、宮田隆志、酒向重行、左近樹、尾中敬、山下卓也, 「Herbig Be型星HD200775 の星周円盤の 10 μ m帯中間赤外線分光」、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月、東京

④ Okamoto, Y. K., Murakami, N., Kataza, H., Ishihara, D., Figueredo, E., Doi, Y., "Map Analysis of Massive Star Forming Regions" AKARI, a light to illuminate the misty Universe, Feb 16-19, 2009, Fukutake Hall, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

⑤ 田村元秀、臼田知史、高見英樹、山田亨、高見道弘、神鳥亮、松尾太郎、鈴木竜二、森野潤一、石井未来、工藤智幸、橋本淳、岡本美子、佐藤文衛、片坐宏一、大橋永芳、E. Turner、A. Moro-Martin、SEEDS team Subaru Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with HiCIAO/A0188 (SEEDS): Proposal, 日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月、東京

[図書] (計 1件)

① 福井康雄、大西利和、中井直正、犬塚修一郎、水野亮、舞原俊憲 編、「シリーズ現代の天文学第 6 巻 星間物質と星形成」、日本評論社, ISBN 978-4535607262, 2008 年 9 月 (第 4 章共同担当)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 美子 (OKAMOTO YOSHIKO)
茨城大学・理学部・准教授
研究者番号: 10343469

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし