

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740151

研究課題名(和文) 原始惑星系円盤の時間変動の詳細観測

研究課題名(英文) Detailed observational study on temporal variation of protoplanetary disks

## 研究代表者

深川 美里 (Fukagawa, Misato)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40509840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：惑星の形成過程を理解するには、誕生の現場となる原始惑星系円盤の観測が重要となる。中でも時間変化という性質は円盤内で起きている現象を知る手がかりとなる。この研究では、原始惑星系円盤に対し、可視光と近赤外域において、撮像、分光や測光観測をほぼ同時に行った。撮像と測光の組み合わせにおいては、円盤内縁の塵からの放射量と、円盤外側での塵による散乱光が反相関を示すことが分かった。これは内縁の構造変化が外側領域の照らされ方に影響を与えていること、及び塵の成長と赤道面への沈殿を示唆する。また、1.3メートル望遠鏡を用いたより高頻度の測光モニタからは、AA Tauriの大きな減光といった新しい現象が見つかった。

研究成果の概要(英文)：Observations of birthplaces of planets, 'protoplanetary disks' around young stars, are central to understand how planets form. Temporal variation of the disk structure is one of the key properties to know what is happening there. In this study, quasi-simultaneous observations of protoplanetary disks were conducted in direct imaging, spectroscopy, and photometry at optical and near-infrared wavelengths. In direct imaging combined with photometry, the anti-correlation was found between thermal emission from the innermost region of the disk and the light scattered by the solid grains in the outer disk. This suggests variable illumination, and hence temporal change of the inner disk structure as well as grain sedimentation toward the disk mid-plane. The more frequent monitoring has been performed for the optical and near-infrared photometry over 3 years using the 1.3m telescope, yielding the discovery of a large extinction event for AA Tauri.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：惑星形成 原始惑星系円盤 変光 赤外線観測

### 1. 研究開始当初の背景

惑星がどのように誕生するのかを理解することは、天文学における重要課題の一つである。生まれたての若い星は、固体微粒子（塵）とガスから成る円盤状構造（原始惑星系円盤）にとり囲まれている。この円盤の中で塵や微惑星の合体成長等を経て惑星が誕生すると考えられている。すなわち原始惑星系円盤は、惑星の材料物質を提供し、また生まれたばかりの惑星の成長や進化に影響を与える。このように重要な構造でありながら、サイズが小さく、かつ暗い等の理由により、詳細な観測は非常に難しい。惑星形成のおおまかな描像が理論研究の進展によって盛んに議論されているのに対し、実在する円盤に関する観測的な理解はまったく不十分であった。

原始惑星系円盤を理解する鍵の一つが、円盤構造の時間変動である。実際に、当初進み始めた観測により、塵からの放射が時間変化する様子がとらえられていた。時間変動は円盤の理解を複雑にするものではなく、むしろ円盤の物理を知るための手がかりになるはずである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、惑星誕生の現場である原始惑星系円盤の構造とその進化を、観測的に明らかにすることである。特に、少数の円盤に的を絞り、円盤構造の「時間変動」を詳細に調べる。複数の望遠鏡を用いた「ほぼ同時」観測により、円盤内で何が起きているのかを理解することを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 観測対象

若い星の光が時間的に変化（変光）することは、古くからよく知られている。ただしそこで主に議論されていたのは、若い星自身の性質であった。本研究では、惑星の形成により焦点を当てるため、塵の成長や形成直後の惑星の存在が示唆される円盤を持つ、年齢100万年程度の天体を観測対象とした。

#### (2) 方法

従来の変光観測はもっぱら目に見える可視光で行われていた。円盤そのものの時間変動を探るには、円盤の塵からの放射を検出できる赤外線での観測が有用である。そこでこの研究においては、可視光だけでなく、赤外線での観測を重視した。また、原始惑星系円盤の時間変化は注目され始めてはいたが、単一の観測手法から得られる限られた情報を使用することが多かった。しかしながら、例えば円盤の外側（星から遠い領域）の塵が星からの光を反射（散乱）して光る様子をとらえる手法もあれば、星のごく近傍に存在する熱い塵の空間分布を詳しく調べる方法もある。すなわち、円盤の時間変動の原因や、それが及ぼす密度・温度分布への影響を調べるには、さまざまな波長や手法の観測を組み合

わせることが有用となる。そこで本研究では、円盤の内縁と外側領域、そして星自身を、複数の波長と観測装置を用いて、ほぼ同時に観測する手法を採用した。具体的には、(1)すばる望遠鏡等の大口径望遠鏡を用いた高解像度の近赤外線散乱光撮像、(2)VLT や Keck 望遠鏡を用いた近赤外線干渉計観測、(3)IRTF 望遠鏡を用いた近赤外線測光・分光観測、(4)小口径望遠鏡を用いた可視・近赤外線測光モニタ観測を行った。大口径望遠鏡を使う高い解像度の観測は、円盤の構造をより詳しく調べるのに適しているが、観測時間の確保の点で、頻繁に観測することは難しい。それに対して、解像度の点で不利ではあるが、小口径望遠鏡であれば観測時間の確保がある程度容易になり、観測頻度を上げられるという利点がある。そのため、(1)、(2)は基本的に年の時間スケール、(4)は日の時間スケール（(3)はその中間）の変化が追えるようなデータを取得するようにした。なお、これらの観測は、海外の研究協力者（M. Sitko, C. Grady, J. Wisniewski ら）と連携して行った。

以下の研究成果では、観測天体数の点から、(1)、(2)、(4)の組み合わせで得られた結果と、国内の ISAS 1.3m 望遠鏡を用いた(4)の結果（より具体的な方法も含む）を示す。

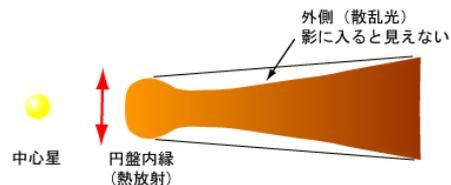


図 1: 円盤を真横から見たときの模式図。星に近い内縁は星から照らされて温度が高い。内縁の塵は主に近赤外線を放射する。星から遠い領域は、円盤表面の塵が星からの光を散乱して光っている様子をとらえることで、観測できる。何らかの物理過程で内縁に構造変動があると、円盤外側の照らされ方が変化するため、これら内縁の熱放射と外側の散乱光、両方の明るさが変化するのははずである。

### 4. 研究成果

#### (1) 高解像度撮像と低解像度分光・測光

すばる望遠鏡による散乱光撮像は、すばる戦略枠プロジェクト SEEDS や共同利用時間で進めていたが、その一部の天体について、IRTF や ISAS 1.3m 望遠鏡による低解像度観測をほぼ同時期に行った。例えば MWC 480 と呼ばれる星については、以前のハッブル宇宙望遠鏡による観測では散乱光の検出が難しかったが、すばるの撮像では、感度の向上が大きくなかったにも関わらず、検出に成功した（図 2, Kusakabe et al. 2012）。一方、近赤外線測光観測からは、すばるで観測された時期に、ちょうど円盤内縁からの熱放射が弱くなっていた可能性がある。つまり、ハッブルでの観測の際は円盤内縁が星からの光をブロックするため円盤外側が暗くなっており、

すばるの観測時には内縁の構造が変わって外側に星の光が当たりやすくなっていたのではないかという仮説が成り立つ(図1)。また、別の円盤について、1年間でおよそ1桁の変光を検出し(論文準備中)、これに関しても近赤外測光との逆相関が見られることから、円盤内縁の構造が時間変化している可能性が高い。一方、この天体は物質放出の現象を明確に示しており、放出の周期が、近赤外測光から示唆される変光の周期と同程度である。つまり、内縁の構造変化は物質放出イベントに関連すると考えられる。

また、モデル計算の結果も考え合わせると、円盤内縁の構造変化を原因として散乱光の変化が起こるためには、円盤内で塵が成長し、円盤の上空から赤道面へ沈殿している必要がある。すなわち、惑星形成の第一歩である塵の成長は、これまで(物質放出を示すような天体について)考えられていたよりも、非常に速い段階で進行していると考えられる。

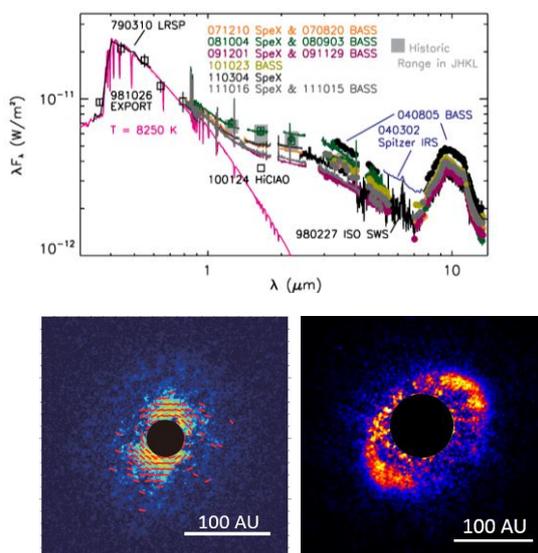


図2: (上、左下): MWC 480 の観測結果 (Kusakabe et al. 2012)。上図には、各波長における天体(円盤を含む)の明るさを、観測時期ごとに示してある。左下の図がすばるで取得した1.6ミクロンでの散乱光画像である。この時、上図で分かるように、天体全体からの1.6ミクロン放射は弱かった(データ点「100124 HiCIAO」)。(右下): 同様に円盤外側の照らされ方に時間変化が確認された天体の1.6ミクロン散乱光画像。

## (2) 若い星の可視・近赤外同時観測

原始惑星系円盤を持つ17天体に対して、可視(V, R, Iバンド)、近赤外(主にH, Ksバンド)で測光モニタ観測を行った。1天体を除き、おうし座とオリオン座に位置する天体である。うち1天体は原始惑星の候補を持ち、7天体については惑星の存在の間接的な証拠が知られている。3天体は、別の望遠鏡による分光の結果と組み合わせ議論を行

うために観測対象とした。観測には、ISAS 1.3m望遠鏡と、独自に開発した可視・近赤外線同時撮像カメラを用いた(近赤外線観測機能は平成24年度に使用を開始した)。平成23年11月18日~平成26年1月30日の秋冬期において、197夜のうち、悪天候を除く151夜でデータを取得した。変光の量は、同一視野内にある別の星と明るさを比較すること(相対測光)で求めた。測光精度は可視光で0.05等級、近赤外線で0.1等級未満であった。

観測の結果、全ての天体に対して変光を検出した。原始惑星の候補を持つ天体は日の時間スケールで規則正しい周期的な変光を検出し、より円盤進化の早期にあたる天体には、質量降着が原因と考えられる非周期的な変光を検出した(大阪大学にて学位論文準備中)。

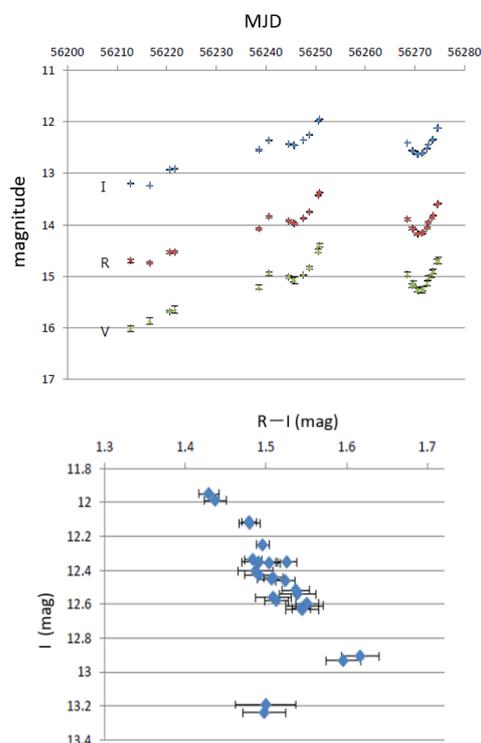


図3: AA Tauri の光度曲線(上)と色-等級図(下)。観測波長帯はV(0.5ミクロン), R(0.6ミクロン), I(0.7ミクロン)バンド。上図の横軸の単位は日。下図で、全体の傾向としては暗くなるほど赤くなるが、最も暗い(図の下方)時期に青くなっている(図の左方)、すなわち短い波長の方が相対的に明るくなっている。

中でも、AA Tauri は注目すべき変光を示した(図3)。AA Tauri は変光のプロトタイプとして扱われる星の一つである(AA Tau型変光)。しかし、観測の結果、先行研究で報告されている8.2日周期の変光に加えて、過去約17年間のデータに出現していない、深い減光が検出された。また、最も暗い時期に天体の色(短い波長で明るければ青く、長い波長で明るければ赤い)が青化に転じるという特徴も見られた。観測者から見て円盤物質が

星を隠し、星の光が減光される場合には、一般に色は赤くなるが、遮蔽が強い場合には逆に円盤物質で散乱された光が卓越するため青くなるのであろうと考えられている (UX Ori 型変光)。また、10 年以上の時間スケールの変動は、円盤内縁における熱不安定性、もしくは星から 6 AU 以遠の円盤構造の不均一性を示唆する。この成果は、吉田 浩晃 (大阪大学) が卒業研究論文にまとめた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① Wagner, K. R., Sitko, M. L., Grady, C. A., Swearingen, J. R., Champney, E. H., Johnson, A. N., Werren, C., Whitney, B. A., Russell, R. W., Schneider, G. H., Momose, M., Muto, T., Inoue, A. K., Lauroesch, J. T., Hornbeck, J., Brown, A., Fukagawa, M., Currie, T. M., Wisniewski, J. P., Woodgate, B. E., Variability of Disk Emission in Pre-main Sequence and Related Stars. III. Exploring Structural Changes in the Pre-transitional Disk in HD 169142, *Astrophysical Journal*, 査読有, 798, 2015, 94  
DOI: 10.1088/0004-637X/798/2/94
- ② Grady, C., Fukagawa, M., Maruta, Y., and 57 coauthors, The outer disks of Herbig stars from the UV to NIR, *Astrophysics and Space Science*, 査読有, 355, 2015, 253-266  
DOI: 0.1007/s10509-014-2214-2
- ③ Onozato, H., Ita, Y., Ono, K., Fukagawa, M., Yanagisawa, K., Izumiura, H., Nakada, Y., Matsunaga, N., A study on the mid-infrared sources that dramatically brightened, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 2015, Advance Access. 26 pp.  
DOI: 10.1093/pasj/psv008
- ④ Grady, C. A., Muto, T., Hashimoto, J., Fukagawa, M., Currie, T. and 69 coauthors, Spiral Arms in the Asymmetrically Illuminated Disk of MWC 758 and Constraints on Giant Planets, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 762, 2013, 48-60  
DOI: 10.1088/0004-637X/762/1/48
- ⑤ Kusakabe, N., Grady, C. A., Sitko, M. L., Hashimoto, J., Kudo, T., Fukagawa, M., and 49 coauthors, High-contrast Near-infrared Polarization Imaging of MWC480, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 753, 2012, 153-159  
DOI: 10.1088/0004-637X/753/2/153
- ⑥ Muto, T., Grady, C. A., Hashimoto, J., Fukagawa, M., Hornbeck, J. B., and 57 colleagues, Discovery of Small-scale Spiral Structures in the Disk of SAO

206462 (HD 135344B): Implications for the Physical State of the Disk from Spiral Density Wave Theory, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 748, 2012, L22

DOI: 10.1088/2041-8205/748/2/L22

[学会発表] (計 10 件)

- ① Aimi Y., Fukagawa M., Yasuda T., Yamashita T., Kawabata K., Uemura M., Arai A., Sasada M., Ohsugi T., Yoshida M., Shibai H., Simultaneous Visible and Near-Infrared photometric monitoring of T Tauri Stars, *The International Symposium on Research Frontiers of Physics, Earth and Space Science*, 2013年12月17日~2013年12月18日, 大阪府豊中市 (大阪大学)
- ② Fukagawa M., Hashimoto J., Grady C. A., Momose M., Wisniewski J. P., Okamoto Y., Muto T., Kusakabe N., Bonnefoy M., Kotani T., Maruta Y., Tamura M., Seeds/Hiciao/Ao188 Collaboration, Near-Infrared Polarimetric Imaging of Disks around Young Intermediate-mass Stars in SEEDS, *Protostars and Planets VI*, 2013年07月15日~2013年07月20日, ドイツ・ハイデルベルク
- ③ Aimi Y., Fukagawa M., Yasuda T., Yamashita T., Kawabata K., Uemura M., Arai A., Sasada M., Ohsugi T., Yoshida M., Shibai H., Simultaneous Visible and Near-Infrared Variability of Classical T Tauri Stars, *IAU Symposium 299: Exploring the Formation and Evolution of Planetary Systems*, 2013年06月02日~2013年06月09日, カナダ・ブリティッシュコロンビア州・ビクトリア
- ④ 会見 有香子、可視・近赤外線同時観測によるTタウリ型星の変光原因の解明、日本天文学会2011年秋季年会、2011年9月19~22日、鹿児島大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

深川 美里 (FUKAGAWA, Misato)  
大阪大学大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 40509840