

令和 2 年 5 月 14 日現在

機関番号：35302

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05439

研究課題名（和文）高解像度中間赤外線観測により探る原始惑星系円盤構造

研究課題名（英文）Study on the protoplanetary disk structure based on high-resolution mid-infrared observations

研究代表者

本田 充彦（Honda, Mitsuhiro）

岡山理科大学・生物地球学部・准教授

研究者番号：40449369

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,500,000円

研究成果の概要（和文）：主にすばる望遠鏡と中間赤外線観測装置COMICSを用いた原始惑星系円盤の中間赤外線高解像度観測を実施した。その結果、中質量前主系列星Herbig Ae/Be型星周りのgroup Iと分類される円盤は遷移円盤であるという仮説をほぼ検証できた。また、内側・外側円盤の misalignmentが円盤の観測される形態に大きく影響を与えることが分かってきた。一方で次世代中間赤外線観測装置のための装置内冷却チョッパーの開発も進めた。試作1号機を設計・製作し、問題点を洗い出した。また、試作1号機でも最低限のチョッパーの機能を確認かつある。今後on-skyテストや改良型2号機の製作の予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の原始惑星系円盤の中間赤外線観測により、group Iに属するHerbig Ae/Be型星原始惑星系円盤はフレア円盤であるという解釈を、遷移円盤に相当するという正しい解釈を示すことが出来た。これは現在のALMAの高解像度観測によってもほぼ確認されている。また、冷却チョッパーの開発は、日本が次世代地上中間赤外線装置開発において国際貢献をしていくための重要な技術の一つとなりうる。また、日本の赤外線観測コミュニティにとっても有用なデバイスとなると期待している。

研究成果の概要（英文）：We made high-resolution mid-infrared imaging observations of the protoplanetary disks around Herbig Ae/Be stars mainly using mid-IR instruments COMICS on Subaru Telescope. Based on our continuous observational studies, we established a new interpretation that the disks around the group I Herbig Ae/Be stars are actually transitional disks. In addition, we found that the misalignment of the inner and outer disks affects the mid-infrared disk morphology significantly.

Furthermore, we have been developing an internal cold chopper system for the future next-generation ground-based mid-IR facility/instrument. A first test model was designed and fabricated for detailed analysis and trouble shooting. We found some problems on the first test model, but also noticed that even this model can be used for the chopping observations. We are now making a second test model and also planning an on-sky test observing with these new cold chopper.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：光赤外線天文学 原始惑星系円盤

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、すばる望遠鏡をはじめとした 8m クラス望遠鏡やアタカマミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) の原始惑星系円盤の観測が進み、その物理構造が明らかになりつつある。一般に近赤外線観測では円盤ダストからの散乱光、ミリ波・サブミリ波観測では低温ダスト熱放射が観測される。一方で、これらの中間的な波長である中間赤外線波長では、中～低温ダストからの熱放射が観測される。特に波長  $20\mu\text{m}$  帯の観測では、数  $100\sim 50\text{K}$  程度のダスト熱放射をトレースでき、円盤の温度構造やダストサイズなどを求めることができ、円盤における惑星形成過程を理解するための情報を与えてきた(e.g. Fujiwara, Honda, et al. 2006, Honda et al. 2010, Honda et al. 2012)。

このように、波長  $20\mu\text{m}$  帯での高解像度中間赤外線観測は原始惑星系円盤構造を探るうえで強力なツールとなっているが、今後は他波長で達成されている解像度である約  $0.1''$  を達成するには、口径 30m 程度の望遠鏡が必要となる。標高 4200m のハワイ・マウナケア山頂に建設される口径 30m 望遠鏡 TMT(Thirty Meter Telescope)はこのような  $20\mu\text{m}$  帯高解像度観測が実現可能なプロジェクトである。我々は TMT を用いて  $20\mu\text{m}$  帯観測を実現するため、中間赤外線観測装置 MICH I の開発検討を進めてきた。(Okamoto+2010 SPIE, Packham+2013 SPIE)。基礎検討の結果、MICH I を実現するうえで最も重要かつ難度が高い開発要素は、高背景放射を除去するための振動鏡システムであることが明らかとなった。 $20\mu\text{m}$  帯をはじめとした中間赤外線は大気が非常に明るくかつ高速で変化するため、これを精度よく差し引くことが精密観測には欠かせない。すばる望遠鏡を含むこれまでの望遠鏡は副鏡を高速で振動させることで視野をスイッチし、大気光の精密除去を実現してきた(チョッピング観測)。スイッチの時間間隔は大気変動のタイムスケールで決まっており、典型的には 0.1 秒程度である。しかし、TMT は副鏡も巨大化するため(TMT の副鏡直径は約 3.1m)、このような短い時間間隔で振動させることは現実的ではない。これを解決する方法として、観測装置内部に光学的に副鏡と同じ位置となる瞳をつくり、そこに置いた鏡を振動させることで背景光除去を実現する方法がある。鏡からの放射を避けるため、すべてのシステムは極低温 ( $<30\text{K}$ ) に冷却する。このようなシステムは世界的にも開発途上であり、そのまま TMT/MICH I で使用可能なものは存在しない。我々のグループでは世界に先駆け 2006 年ごろ冷却チョッパーを開発し、実際の天体観測に用いることに成功している(Nakamura et al. 2008 SPIE)。しかしながら、この観測は口径 1m の望遠鏡を用いたものであり、TMT/MICH I に使用するには駆動ストロークが 30 倍ほど不足している。低発熱 (1W 以下) で大きなストローク(数 mm 程度)を持ち、極低温真空下で安定して駆動し、高解像度を実現できるような冷却チョッパーを開発することが MICH I 実現のためには必須である。

### 2. 研究の目的

本研究は、原始惑星系円盤の高解像度中間赤外線観測を行うことで、近赤外線観測や ALMA 観測ではとらえられない中～低温ダスト熱放射を捉え、円盤の温度構造を観測的に明らかにするものである。特に、すばる望遠鏡を用いた観測を進め、ある程度のサンプル数をベースに統計的な進化描像を提示する。

また、TMT 時代の中間赤外線観測の実現に必要な装置内部冷却チョッパーの開発を行う。TMT 時代はまだ 10 年ぐらい先であるが、事前に技術的リスクを減らしておくことで、装置の実現可能性を高めていく。

### 3. 研究の方法

すばる 8m 望遠鏡の中間赤外線装置 COMICS を用いて、これまでも進めてきた中間赤外線高解像観測を継続し、円盤の物理構造や温度構造を観測的に導出する。特に、これまでの個別天体のケーススタディも継続するが、それらのサンプルを統合して、特に中質量星まわりの円盤の構造の違いを統計的に探る。中質量星周りの原始惑星系円盤は、スペクトルエネルギー分布 (SED) から、group I と group II に分けられている(e.g. Meeus et al. 2001)。これは円盤のフレアリングの程度の違いといわれているが、我々はこれは円盤の中心星近傍の“穴”の有無の違いを意味しているという新しい仮説を提示している。この仮説の正当性を、多くの観測サンプルを用いて示す。

また、来るべき 30m 望遠鏡 TMT 時代での中間赤外線観測に必須である装置内冷却チョッパーの開発を行う。具体的には想定する仕様から試作機を作成し、まずは室内駆動試験により技術立証を行う。冷却チョッパーはいくつかの要素から成り立っているが、アクチュエーターや、弾性ヒンジ、ギャップセンサーなど必ずしも極低温で動くかどうか明瞭でないものが多い。そこで低温で動くものを組み合わせたり、改めて特注品を製作し、低温で動作するかどうかも含めて検証していきたい。また、低温で駆動系が動いたとしても、それらの駆動制御等の課題も多い。これらについても、様々な専門家を交えて解決していく。最終的に冷却チョッパーの試作機が出来たのちには、東京大学が開発中の中間赤外線装置 TAO/MIMIZUKU へ搭載し、性能試験観測を on-sky で行うことで、さらなる性能実証・問題点の洗い出しを行う。これらを達成することで、30m 望遠鏡時代に確実につなげ、さらには日本からの 30m 望遠鏡観測装置の貢献・プレゼンを増していきたいと考えている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 原始惑星系円盤の高解像度観測

まず、Subaru/COMICS を利用し、Herbig Ae/Be 型星の波長 25 マイクロメートルでの 22 天体もの撮像サーベイを行った。そのデータを解析し、観測された熱放射を縦軸に、横軸に波長  $30\ \mu\text{m}$  と  $13.5\ \mu\text{m}$  の比 ( $F_{30}/F_{13.5}$ ) をプロットしたものが図 1 である。横軸は SED のグループ分けに使用される指数の一つであり、大きいものが group I と分類されるものに多い。Group I の天体の方が空間的に広がっていることを示している。また、標準的な Herbig Ae/Be 型星の原始惑星系円盤のモデルを作成し、その円盤中心部に 10, 20, 30, 40, 50AU と穴をあけたモデルを疑似観測し、波長  $25\ \mu\text{m}$  での拡がりを同時にプロットした。観測の傾向に近く、 $F_{30}/F_{13.5}$  が大きいものほど広がっている傾向を示すことが出来、これまで我々が仮説として提唱してきた group I ソース円盤が遷移円盤であるという仮説のさらなる証拠を得た (Honda et al. 2015, ApJ)。

また、近年注目されている遷移円盤天体 Oph IRS48 の Subaru/COMICS を用いたフォローアップ観測を行い、長軸方向が明るい理由を検討した。その結果、内側円盤の影が外側円盤にかかっていることで、相対的に短軸方向輝度が低下し、長軸方向が明るく見える可能性があることが分かった (Honda, Okada, et al. 2018)。近年、内側円盤と外側円盤の傾きの不一致が多くの円盤で報告されているが、円盤の形態 (見え方) にも影響を及ぼすことが分かった (図 2)。

##### (2) 冷却チョッパー開発

次世代地上中間赤外線装置のための冷却チョッパーの実現に向けて、まずアクチュエータ部等の試作を行った。極低温下 ( $20\sim 30\text{K}$ ) での低発熱 ( $< 0.1\text{W}$ ) を実現するため、MgB2 超電導線材を用いた超電導 VCM アクチュエータの試作を行った。その結果、超電導線材を小型コイルに応用するには設計上の制約が大きい事、超電導のシー材の磁性に起因した磁力が強く VCM の性能に影響することが分かってきた。これらは当初想定しておらず、様々に検討した結果、超電導線材ではなく低温下で抵抗値が非常に小さくなる (高純度) 金属線材を用いたコイルを利用する方針に変更した。その後、通常銅線コイルを用いた冷却チョッパーシステム設計を進め、1 次試作機を製作した (図 3)。また、計測のための MATLAB を用いたリアルタイム制御機器を導入し、常温駆動特性の評価を進めた。その結果、この 1 次試作機では、当初要求の高速駆動には問題があることが 2017 年度に判明した。そこで、金沢大学の軸屋研究室の協力により、より詳細な常温駆動試験をすすめる、制御方式やパラメータの最適化、2 次試作の検討を進めた。その結果、1 次試作品でも駆動性能は目標を下回るが、chopper としての基本的な駆動は可能であることを確認できた。その後、1 次試作機を低温環境下で試験するために東京大学への移設を行い、現在、低温駆動試験を始めるところである。一方で、2 次試作に向けた試作機の整備も進めており、一部の部品や機械加工を進めた。今後はこの 2 次試作機を用いた試験も、岡山理科大学や金沢大学において並行して進める予定である。また、2 次試作機では TAO/MIMIZUKU に搭載しての on-sky テストも予定している。当初計画より遅延しているが、国産冷却チョッパー開発は進んでおり、将来的な 30 m 望遠鏡観測装置へ貢献できると考えている。

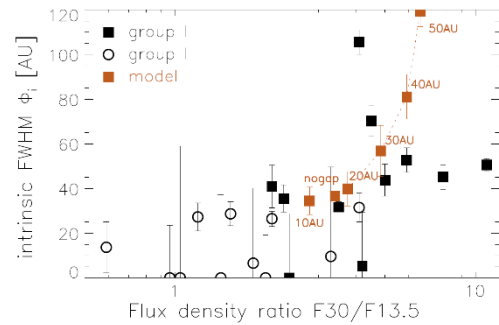


図 1: group I (図中の■) の波長  $25\ \mu\text{m}$  での拡がり、数 10AU の穴を持つモデルと比較的整合的であることを示す。

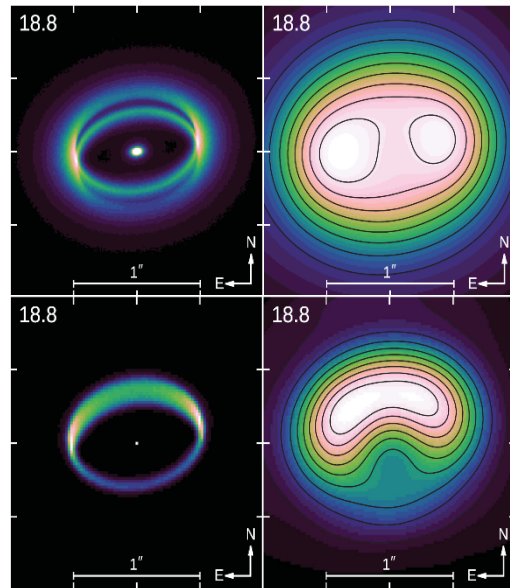


図 2 波長  $18.8\ \mu\text{m}$  でのモデル画像と疑似観測画像. 内側円盤の影が形態に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

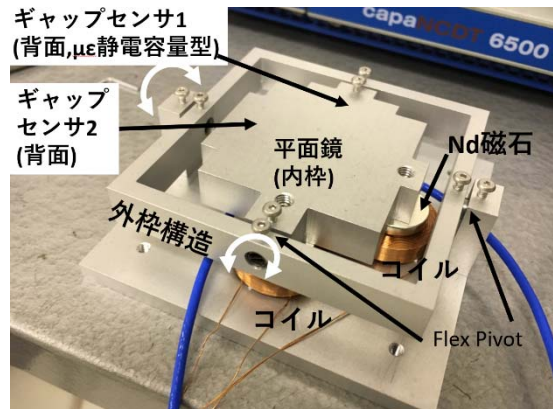


図 3: 製作した通常銅線コイルと Nd 磁石を用いた冷却チョッパー 1 次試作機。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Honda Mitsuhiro, Okada Kazushi, Miyata Takashi, Mulders Gijs D, Swearingen Jeremy R, Kamizuka Takashi, Ohsawa Ryou, Fujiyoshi Takuya, Fujiwara Hideaki, Uchiyama Mizuho, Yamashita Takuya, Onaka Takashi	4. 巻 70
2. 論文標題 Mid-infrared multi-wavelength imaging of Ophiuchus IRS 48 transitional disk †	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy033	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto, Y. K., Kataza, H., Honda, M., Yamashita, T., Fujiyoshi, T., Miyata, T., Sako, S., Fujiwara, H., Sakon, I., Fukagawa, M., Momose, M., Onaka, T.	4. 巻 154
2. 論文標題 A Circumstellar Disk around HD 169142 in the Mid-Infrared (N-Band)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 16, 12 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa7578	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mori, K., Miyata, T., Honda, M., Kamizuka, T., Takahashi, H., Sako, S., Ohsawa, R., Okada, K., Uchiyama, M., Kataza, H., Ohsaki, H., Hiroe, T., Packham, C.	4. 巻 9912
2. 論文標題 Development of superconducting voice coil motor of a cold chopper for MICH	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE (the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)	6. 最初と最後の頁 id. 991218 8 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2231889	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Honda, M., Kudo, T., Takatsuki, S., Inoue, A. K., Nakamoto, T., Fukagawa, M., Tamura, M., Terada, H., Takato, N.	4. 巻 821
2. 論文標題 Water Ice at the Surface of the HD 100546 Disk	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id. 2, 6 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/821/1/2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Honda, M., Maaskant, K., Okamoto, Y. K., H. Kataza, T. Yamashita, T. Miyata, S. Sako, T. Fujiyoshi, I. Sakon, H. Fujiwara, T. Kamizuka, G. D. Mulders, E. Lopez-Rodriguez, C. Packham, T. Onaka	4. 巻 804
2. 論文標題 High-resolution 25 $\mu$ m Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143, 1--8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0004-637X/804/2/143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Honda, M.
2. 発表標題 Evolution of solids & planet formation revealed by Subaru
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 TMT 用熱赤外観測装置MICHl および地上中間赤外での系外惑星・地球型惑星検出可能性について
3. 学会等名 地球型惑星の直接撮像装置ワークショップ2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 Lesson Learned from COMICS
3. 学会等名 Mid Infrared Astronomy Past 20 years and Future 20 years
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Honda, M.
2. 発表標題 Introduction of Subaru/COMICS
3. 学会等名 The Next Generation of Thermal-IR Astronomy: How can we Reach the Photon Noise Limit? (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Honda, M.
2. 発表標題 MICHl: a Thermal-Infrared Instrument for the TMTFour Key Science Drivers
3. 学会等名 XXX IAU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Honda, M.
2. 発表標題 Protoplanetary disk science with Subaru/COMICS and TMT/MICHl
3. 学会等名 Thirty Meter Telescope-MICHl and China: A workshop on thermal-IR astronomy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 TMT 中間赤外線観測装置MICHl 提案の現状報告
3. 学会等名 2018 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 "MICHl Science cases : protoplanetary disks"
3. 学会等名 The 2017 Thirty Meter Telescope Science Forum
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 Subaru thermal-infrared studies on ice and silicate in the protoplanetary disks
3. 学会等名 Future Exploration of Star and Planet Formation with Subaru (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 Toward solid observations of snow line
3. 学会等名 10th RESCEU/Planet2 Symposium Planet Formation around Snowline (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 Subaru/IRCS 熱赤外偏光観測機能の立ち上げ1 撮像偏光試験観測結果
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 TMT 中間赤外線観測装置MICHl 提案の現状報告
3. 学会等名 光学赤外線天文連絡会シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 TMT/MICHl current concept
3. 学会等名 The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI archive: from galaxies and stars to planets and life (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 毛利清、宮田隆志、上塚貴史、高橋英則、酒向重行、大澤亮、岡田一志、内山允史、大崎博之、広江貴、本田充彦
2. 発表標題 TMT/MICHl 冷却チョッピングに用いる超伝導ボイスコイルモーターの性能評価
3. 学会等名 日本天文学会2016 年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 毛利清、宮田隆志、上塚貴史、高橋英則、酒向重行、大澤亮、岡田一志、内山允史、大崎博之、広江貴、本田充彦
2. 発表標題 次世代中間赤外線装置における低温チョッピング実現に向けた超伝導リニアモーターの開発
3. 学会等名 日本天文学会2017 年春季年会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 毛利清、宮田隆志、上塚貴史、高橋英則、酒向重行、大澤亮、岡田一志、内山允史、大崎博之、広江貴、本田充彦
2. 発表標題 TMT/MICHI チョッパー用超伝導コイルの開発
3. 学会等名 第6回可視赤外線観測装置技術ワークショップ
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Honda, M
2. 発表標題 Observations of water ice dust in the protoplanetary disk & introduction of mid-IR instrument MICHI for TMT
3. 学会等名 Grain Formation Workshop 2015
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 岡田一志、本田充彦、宮田隆志、酒向重行、上塚貴史、大澤亮、内山允史、毛利清
2. 発表標題 中間赤外線撮像観測でさぐる0ph IRS 48の遷移円盤の構造
3. 学会等名 日本天文学会2015年度秋季年会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 毛利清、宮田隆志、上塚貴史、高橋英則、本田充彦、酒向重行、大澤亮、岡田一志、内山允史
2. 発表標題 TMT搭載中間赤外線観測装置における冷却チョッピングの検討
3. 学会等名 日本天文学会2015年度秋季年会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 野津翔太, 石本大貴, 野村英子, 本田充彦
2. 発表標題 原始惑星系円盤の化学反応計算と、赤外線分光観測によるスノーライン・C/O比分布の検出可能性
3. 学会等名 日本天文学会2016年度春季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 本田充彦
2. 発表標題 Mid-IR studies of disks around Herbig Ae/Be stars
3. 学会等名 International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III"
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考