

令和 7 年 6 月 2 0 日現在

機関番号：3 2 2 0 1

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2024

課題番号：2 0 K 0 4 0 1 7

研究課題名（和文）新しい電波干渉計画像合成法を応用した地球形成領域の観測研究

研究課題名（英文）Observational study on the formation process of Earth-like planets using a new imaging technique for radio interferometers

研究代表者

塚越 崇（Tsukagoshi, Takashi）

足利大学・工学部・准教授

研究者番号：2 0 5 3 3 5 6 6

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スパースモデリングを用いた電波干渉計の画像再構成手法を開発・検証し、アルマ望遠鏡で観測されたさまざまな原始惑星系円盤のデータに適用した。これにより従来法では解像が困難であった地球形成領域の解像を行うとともに、地球-木星形成領域の円盤構造サンプルを大幅に増加させることに成功した。円盤微細構造と、円盤や中心星の物理パラメータとの関係を統計的に調査し、惑星系形成過程における円盤構造への影響やタイムスケールなど、観測的制約を与えることができた。本研究の成果は、今後の系統的サーベイや惑星系形成研究の基盤を形成するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スパースモデリングを用いた電波干渉計画像再構成手法により、ソフトウェア側での工夫を通じてハードウェアの解像度制約を克服し、従来手法では解像が困難だった、原始惑星系円盤の微細構造を高精度に描画することを実現した。これにより、地球から木星形成領域における円盤構造の高解像度サンプルを多数取得し、惑星系形成過程との関連性について大規模な統計的調査を可能とする研究基盤を築いた。画像再構成の自動化と解析の客観性を兼ね備える本手法は、次世代電波干渉計計画においても、標準的解析技術の一つとして活用されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed and validated a sparse modeling-based image reconstruction technique for radio interferometry and applied it to ALMA observation data of various protoplanetary disks. The method enabled high-resolution imaging of the terrestrial planet-forming regions, which were previously difficult to resolve with the conventional technique, and significantly increased the number of disk samples with resolved structures spanning orbital radii from terrestrial to Jovian scales. By statistically analyzing relationships between disk substructures and the physical parameters of the disks and central stars, we derived observational constraints on the influence of disk evolution and the timescales of planetary system formation. These results provide key insights into how circumstellar disk structures evolve and how planets form within them, offering a foundation for future systematic surveys and the advancement of researches on the planet formation process.

研究分野：電波天文学

キーワード：惑星系形成 原始惑星系円盤 電波天文学 電波干渉計 スパースモデリング

1. 研究開始当初の背景

地球のような惑星系の形成過程を解明する上で重要となるのは、母体となる原始惑星系円盤の構造と進化を明らかにすることである。詳細な円盤構造を調べる観測において、近年主軸となっているのは、円盤の構成要素である冷たい塵やガス(~ 10 K) を直接見ることのできる、大型電波干渉計アルマ望遠鏡を用いた電波観測である。これまでに最大解像度での円盤観測が盛んに行われており、地球近傍(およそ 100–200 pc) に存在する円盤において、木星軌道(~ 5 au) 以遠の円盤構造の解像に成功している。それにより、惑星形成に起因すると思われる、さまざまな微細構造が見出されている。

一方、太陽系の形成過程を包括的に探るには、 ~ 5 au より内側の地球形成領域における円盤構造の解明が求められている。しかしながら、一部の極近傍天体(TWHya)を除き、そのような円盤内側の領域まで解像した観測を行うには、アルマ望遠鏡の最高解像度の観測でも限界があった。そのため、地球形成領域における円盤構造の系統性は調べられていない。

2. 研究の目的

望遠鏡の解像度はその口径の大きさに比例するため、従来の観測手法で地球形成領域における円盤構造を調べるには、ハードウェアの大規模なアップグレードが必須となってしまう。本研究では、電波干渉計の画像合成法というソフトウェア側の工夫によりハードウェアの解像度制約を打ち破り、これまで未到達だった地球形成領域における複数の円盤構造を描き出すことを目的とする。そこから円盤構造の系統的調査を行い、地球形成領域における惑星系形成過程において観測的な制約を与えていく。

3. 研究の方法

本研究課題では、スパースモデリングによる電波干渉計の画像再構成法をアルマ望遠鏡で取得された原始惑星系円盤データに適用させ、従来手法よりも高い解像度の画像作成を行う。この手法はすでに一定の成果を上げているが、まだ開発途中であり原始惑星系円盤への応用ではまだ様々な検討事項が残されている。具体的には以下のような課題を設定し、順次取り組んでいく。

- (1) スパースモデリングによる画像合成法の検証と開発および高速化：
アルマ望遠鏡データに対するスパースモデリングの応用は、priism と呼ばれるソフトウェアの開発が進められており、一定の成果を出している。しかしながら、科学的な観点から画像を評価するためには、まだ検証が進められており、様々な角度から検証に取り組む必要がある。放射モデルと擬似観測を用いた検証を行い、ソフトウェアにより生成される画像の妥当性や誤差についての評価を行う。また、解析のボトルネックとなる処理速度を改善させるための工夫も取り入れる。
- (2) 実観測データを用いた科学的観点からの検証：
(1)の検証を行いながら、原始惑星系円盤の実観測データへの手法の適用も行い、実観測データが持つ系統的ノイズに対する振る舞いなども評価検証を行う。得られた画像に対しては、科学的な視点から円盤構造の議論を行うとともに、実データに対する手法の妥当性を評価していく。
- (3) 地球形成領域の原始惑星系円盤構造を探る：
アルマ望遠鏡で取得された距離 100-200pc に存在する複数の原始惑星系円盤のデータに対し、画一的にスパースモデリングによる高解像度化を行う。必要に応じて新たに観測提案も行い追加データを取得する。実際に到達できる解像度はデータの質にも依存するが、多くの円盤サンプルに対して地球-木星形成領域における構造導出が期待できる。解析により得られた構造は、穴構造の有無やその大きさ、密度構造の変化量など、惑星形成で期待される円盤構造の変化で分類し、理論的に予想される構造と比較を行う。それらを中心星の明るさや質量、年齢、円盤全体の質量などと比較することで、地球形成領域における惑星系形成の土壌の系統性と多様性を調査する。円盤構造から惑星質量の推定が可能な場合、これまでに見つかっている系外惑星系との比較を行い惑星形成過程のタイムスケールに知見を与える。

4. 研究成果

- (1) スパースモデリングによる画像合成法の検証と開発
アルマ望遠鏡データに対する画像化ソフトウェア priism の開発と検証を継続して行ってきた。開発においてはとりわけ、データの取り扱い方法や高速化に対し重点的に取り組んできた。具体的には、(1)生成画像評価に際してのデータ weight の取り扱い、(2)画像化における gridding の影響を取り除くため、Non-Uniform FFT を取り入れた実装、(3)並列化による高速化などがある。priism 開発者と定期的なミーティングを行い、塚越は特に動作検証での貢献を行ってきた。また、近年では、電波干渉計データのノイズリダクション手法の

一つである、セルフキャリブレーションに対し、従来の反復的手法ではなく、観測方程式全体を一括して最適化するアプローチを提案した。この手法により、複数成分の位相誤差とスパース性に基づく高解像度画像復元を同時に実現することが可能となり、複雑なサブストラクチャを含む系でも安定して高忠実度の画像を得られることが示された(Ikeda et al. 2025)。

擬似観測データを用いた手法の検証では、原始惑星系円盤で期待されるような、動径方向にベキ状分布を持つ輝度分布モデルにおいて、従来法よりも高い精度で放射を再現できることが確認できた(図 1 参照)。この結果は研究会等で報告を行なっている。実アルマ望遠鏡データを用いた検証も行なっており、高解像度領域での画像再現性が高く、従来法に比べておよそ 3 倍程度の高解像度化が可能であることを示している(Yamaguchi et al. 2020)。

これらの技術開発は、アルマ望遠鏡をはじめとする今後の大規模干渉計アレイにおける高分解能画像再構成の標準的枠組みとなる可能性を持ち、サブ AU スケールでの惑星形成過程解明に向けた基盤技術として位置付けられる成果であると言える。

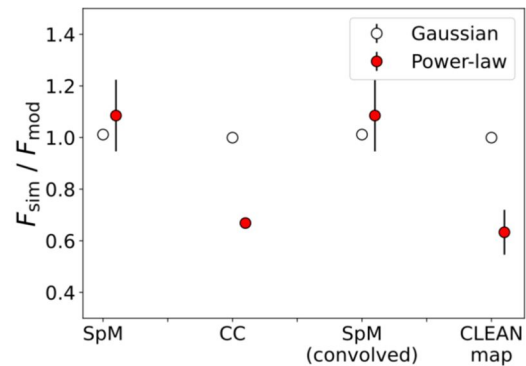


図 1 擬似観測データによる画像再現度の比較。ベキ乗分布(赤丸)の放射分布の場合、スパースモデリング(SpM)の方が従来法(CC/CLEAN map)より再現度が高い結果を示す。ガウス関数型放射分布のようなコンパクトな放射については、同程度の画像再現性を持つ。

(2) 単一天体の詳細観測とスパースモデリングの適用

スパースモデリングによる高解像度画像再構成を、選定した原始惑星系円盤の実データに適用し、個々の円盤の詳細構造を明らかにしてきた。得られた結果から、スパースモデリングによる高解像度化の検証・評価を行うとともに、高解像度化の恩恵により更新された、新たな観点のもと科学研究として推進してきた。スパースモデリングの実データへの応用は、さまざまな研究会にて報告をしてきており、またいくつかについては論文化を進めてきた。

Yamaguchi et al. (2021) では、典型的な原始星である T Tau に対して取得されたアルマ望遠鏡データを対象に、スパースモデリングを用いた超解像画像化を適用した。従来の画像化手法では解像度が制限され検出が困難であった円盤内部の詳細構造が、新手法により明瞭に描き出された。特に、T Tau のような複雑な多重星系においてもスパースモデリングが有効に機能することが実証された点は重要である。

本研究では、スパースモデリングの応用に活用可能な、高解像度かつ高感度データの取得も進められてきた。Tsukagoshi et al. (2022) では、最も地球近傍にある原始惑星系円盤 TW Hya に対し、アルマ望遠鏡を用いた多周波・高分解能観測を実施してきた。論文では従来法の画像化を行ったが、円盤内の微細構造をこれまでにない精度、かつ多周波での画像化に成功した。円盤に見られた複数のギャップ構造の解析から、それらが形成中の惑星起源である可能性を示唆する結果が得られた。このデータは今後、スパースモデリングによる高解像度化を適用する予定であり、また、このデータをベースに多周波観測対応に向けた開発を進めていく。

(3) スパースモデリングを用いた円盤構造検出と系統性の調査

priism を用いたスパースモデリングによる電波干渉計の画像化手法を、既存のアーカイブデータに対し画一的に適用させることで、大規模な高解像度電波画像のサーベイ画像データを作成し、統計的性質を調査する試みを行ってきた。

Yamaguchi et al. (2024) では、Taurus-Auriga 星形成領域に属する多数の原始惑星系円盤のアルマ望遠鏡データに対して、スパースモデリングを用いた高解像度電波画像の作成を行っており、新規検出を多く含む、微細なリング構造やギャップ構造の解像に成功した。円盤のギャップ構造を系統的に調査したところ、外縁部の広いギャップと内側の複数リング構造が顕著であり、惑星形成に伴うダスト集積過程の普遍性を反映している可能性を示唆する結果が得られている。形成中の惑星は、海王星から木星質量程度だと思われる。

同様の大規模データサーベイの研究を、Ophiuchus 星形成領域においても行なっている(Syoshi et al. 2025)。こちらの領域においても、スパースモデリングによる画像化により、新規検出を含む複数の天体で円盤微細構造の解像に成功している。検出された円盤微細構造を分類し、中心星年齢との比較からその進化傾向について調べたところ、年齢が進むにつれて円盤微細構造が出現する様子が見て取れ、特に、円盤進化の比較的若い時期、ある半径より外側に多くの微細構造が現れる様子がわかった。これは、円盤内のちりやガスが豊富な環境下において、星と惑星が共に成長していく可能性を示唆する結果であり、惑星形成過程を知る上での重要な手掛かりとなる。

(4) アルマ望遠鏡による個別天体ごとの原始惑星系円盤のデータ解析と解釈

観測データそのものの科学的解釈を支援するため、アルマ望遠鏡の高感度・高解像度観測を活用して、スパースモデリングの画像化に限らずに、多様な個別原始惑星系円盤の構造・物理状態を詳細に解析し、惑星形成環境の多様性を明らかにしてきた。各天体における円盤微細構造の検出のほか、円盤ガスの運動検出や、化学組成の検出も行なっており、惑星形成プロセスの多様性を浮き彫りにしてきている。

最も有名な原始惑星系円盤天体の一つである TW Hya については、Tsukagoshi et al. (2022)、Yoshida et al. (2022, 2024, 2025)、Nomura et al. (2021)、Furuya et al. (2022) 等により多面的な解析が進められた。Tsukagoshi et al. (2022) では高分解能かつ多周波の連続波観測データから塵の分布を詳しく調べ、塵の成長と惑星形成への関連についての知見を得ている(図 2 参照)。分子線観測からは CO や HCN など様々な分子の存在量分布や同位体比が定量され、酸素・炭素同位体の分別挙動と物質供給過程の理解が深まった。特に Yoshida et al. (2024) による円盤内惑星に起因するアウトフロー構造の発見は、惑星形成活動を直接示す新たな証拠となった。それ以外の他の天体においても、その原始惑星系円盤の構造や進化について、多くの重要な知見が得られてきている。これらの結果は、惑星形成過程の多様性を実証的に把握すると同時に、化学進化・塵成長・ガス力学の複合的理解を大きく前進させた成果群となっている。

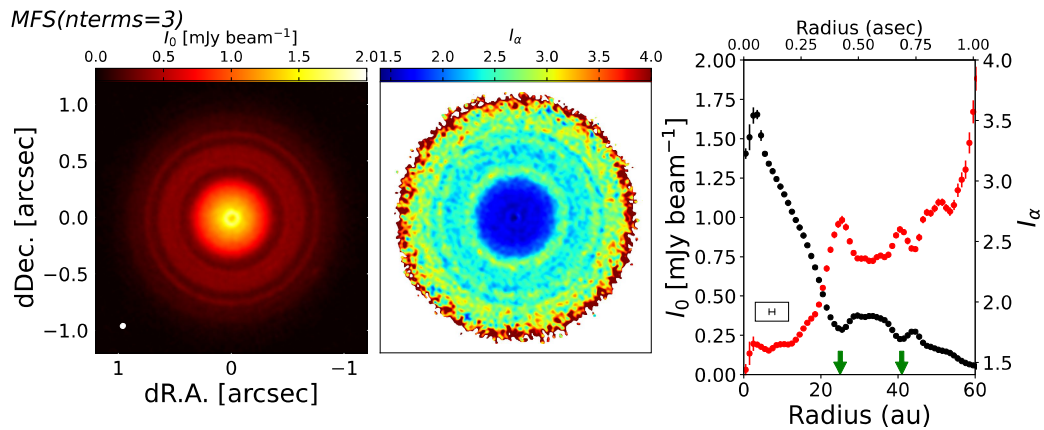


図 2 最も地球近傍にある原始惑星系円盤を持つ天体 TW Hya の多周波数画像(左)と電波強度の周波数依存性の分布(中央)、およびそれらの動径方向分布(右) (Tsukagoshi et al. 2022)。電波強度の周波数依存性は、円盤内の塵の大きさ分布を反映しており、円盤内の溝構造において小さい塵が支配的であることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件／うち国際共著 18件／うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Shoshi Ayumu, Yamaguchi Masayuki, Muto Takayuki, Hirano Naomi, Kawabe Ryohei, Tsukagoshi Takashi, Machida Masahiro N	4. 巻 77
2. 論文標題 ALMA 2D super-resolution imaging survey of Ophiuchus Class I/flat spectrum/II disks. I. Discovery of new disk substructures	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 572 ~ 606
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psaf026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda Shiro, Nakazato Takeshi, Tsukagoshi Takashi, Takeuchi Tsutomu T, Yamaguchi Masayuki	4. 巻 77
2. 論文標題 Solving self-calibration of ALMA data with an optimization method	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 260 ~ 276
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psae114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ohashi Satoshi, Muto Takayuki, Tsukamoto Yusuke, Kataoka Akimasa, Tsukagoshi Takashi, Momose Munetake, Fukagawa Misato, Sakai Nami	4. 巻 9
2. 論文標題 Observationally derived magnetic field strength and 3D components in the HD 142527 disk	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 526 ~ 534
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41550-024-02454-x	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 -

1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Doi Kiyooki, Furuya Kenji, Kataoka Akimasa	4. 巻 980
2. 論文標題 Dust Scattering Albedo at Millimeter Wavelengths in the TW Hya Disk	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 50 ~ 50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ad9f31	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Law Charles J., Teague Richard, Shibaike Yuhito, Furuya Kenji, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 971
2. 論文標題 Outflow Driven by a Protoplanet Embedded in the TW Hya Disk	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L15 ~ L15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ad654c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Furuya Kenji, Teague Richard, Law Charles J., Tsukagoshi Takashi, Lee Seokho, Rab Christian, Berg Karin I., Loomis Ryan A.	4. 巻 966
2. 論文標題 The First Spatially Resolved Detection of ^{13}CN in a Protoplanetary Disk and Evidence for Complex Carbon Isotope Fractionation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad2fb4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamaguchi Masayuki, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi, Nomura Hideko, Hirano Naomi, Nakazato Takeshi, Ikeda Shiro, Tamura Motohide, Kawabe Ryohei	4. 巻 -
2. 論文標題 ALMA 2D Super-resolution Imaging of Taurus-Auriga Protoplanetary Disks: Probing Statistical Properties of Disk Substructures	5. 発行年 2024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) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohashi Satoshi, Momose Munetake, Kataoka Akimasa, Higuchi Aya E, Tsukagoshi Takashi, Ueda Takahiro, Codella Claudio, Podio Linda, Hanawa Tomoyuki, Sakai Nami, Kobayashi Hiroshi, Okuzumi Satoshi, Tanaka Hidekazu	4. 巻 954
2. 論文標題 Dust Enrichment and Grain Growth in a Smooth Disk around the DG Tau Protostar Revealed by ALMA Triple Bands Frequency Observations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace9b9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Yi, Liu Hanyu Baobab, Muto Takayuki, Hashimoto Jun, Dong Ruobing, Kanagawa Kazuhiro, Momose Munetake, Akiyama Eiji, Hasegawa Yasuhiro, Tsukagoshi Takashi, Konishi Mihoko, Tamura Motohide	4. 巻 948
2. 論文標題 Multiple Rings and Asymmetric Structures in the Disk of SR 21	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Law C. J., Teague R., Oberg K. I., Rich E. A., Andrews S. M., Bae J., Benisty M., Facchini S., Flaherty K., Isella A., Jin S., Hashimoto J., Huang J., Loomis R. A., Long F., Munoz-Romero C. E., Paneque-Carreno T., Perez L. M., Qi C., Schwarz K. R., Stadler J., Tsukagoshi T., Wilner D. J., van der Plas G.	4. 巻 948
2. 論文標題 Mapping Protoplanetary Disk Vertical Structure with CO Isotopologue Line Emission	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 60 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb3c4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Orihara Ryuta, Momose Munetake, Muto Takayuki, Hashimoto Jun, Liu Hanyu Baobab, Tsukagoshi Takashi, Kudo Tomoyuki, Takahashi Sanemichi, Yang Yi, Hasegawa Yasuhiro, Dong Ruobing, Konishi Mihoko, Akiyama Eiji	4. 巻 75
2. 論文標題 ALMA?Band?6 high-resolution observations of the transitional disk around SY?Chamaeleontis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 424 ~ 445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ueda Takahiro, Kataoka Akimasa, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 930
2. 論文標題 Massive Compact Dust Disk with a Gap around CW Tau Revealed by ALMA Multiband Observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 56 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac634d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Law C. J., Crystian S., Teague R., Oberg K. I., Rich E. A., Andrews S. M., Bae J., Flaherty K., Guzman V. V., Huang J., Ilee J. D., Kastner J. H., Loomis R. A., Long F., Perez L. M., Perez S., Qi C., Rosotti G. P., Ru?z-Rodriguez D., Tsukagoshi T., Wilner D. J.	4. 巻 932
2. 論文標題 CO Line Emission Surfaces and Vertical Structure in Midinclination Protoplanetary Disks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6c02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Furuya Kenji, Tsukagoshi Takashi, Lee Seokho	4. 巻 932
2. 論文標題 A New Method for Direct Measurement of Isotopologue Ratios in Protoplanetary Disks: A Case Study of the $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ Ratio in the TW Hya Disk	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 126 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6efb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Furuya Kenji, Ueda Takahiro	4. 巻 937
2. 論文標題 Discovery of Line Pressure Broadening and Direct Constraint on Gas Surface Density in a Protoplanetary Disk	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L14 ~ L14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac903a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ilee John D, Walsh Catherine, Jennings Jeff, Booth Richard A, Rosotti Giovanni P, Teague Richard, Tsukagoshi Takashi, Nomura Hideko	4. 巻 515
2. 論文標題 Unveiling the outer dust disc of TW Hya with deep ALMA observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L23 ~ L28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slac048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hashimoto Jun, Muto Takayuki, Dong Ruobing, Liu Hanyu Baobab, van der Marel Nienke, Francis Logan, Hasegawa Yasuhiro, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 911
2. 論文標題 ALMA Observations of the Asymmetric Dust Disk around DM Tau	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5～5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe59f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Kawabe Ryohei, Muto Takayuki, Kanagawa Kazuhiro D., Aikawa Yuri, Akiyama Eiji, Okuzumi Satoshi, Ida Shigeru, Lee Seokho, Walsh Catherine, Millar T. J.	4. 巻 914
2. 論文標題 High Spatial Resolution Observations of Molecular Lines toward the Protoplanetary Disk around TW Hya with ALMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 113～113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abfb6a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iino Takahiro, Taniguchi Kotomi, Sagawa Hideo, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 ¹³ C Isotopic Ratios of HC ₃ N on Titan Measured with ALMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Planetary Science Journal	6. 最初と最後の頁 166～166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/PSJ/ac134c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Masayuki, Tsukagoshi Takashi, Muto Takayuki, Nomura Hideko, Nakazato Takeshi, Ikeda Shiro, Tamura Motohide, Kawabe Ryohei	4. 巻 923
2. 論文標題 ALMA Super-resolution Imaging of T Tau: r = 12 au Gap in the Compact Dust Disk around T Tau N	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 121～121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2bfd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Furuya Kenji, Tsukagoshi Takashi, Qi Chunhua, Nomura Hideko, Cleaves L. Illedore, Lee Seokho, Yoshida Tomohiro C.	4. 巻 926
2. 論文標題 Detection of HC180+ in a Protoplanetary Disk: Exploring Oxygen Isotope Fractionation of CO	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 148 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac45ff	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsukagoshi Takashi, Nomura Hideko, Muto Takayuki, Kawabe Ryohei, Kanagawa Kazuhiro D., Okuzumi Satoshi, Ida Shigeru, Walsh Catherine, Millar Tom J., Takahashi Sanemichi Z., Hashimoto Jun, Uyama Taichi, Tamura Motohide	4. 巻 928
2. 論文標題 ALMA High-resolution Multiband Analysis for the Protoplanetary Disk around TW Hya	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 49 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamaguchi Masayuki, Akiyama Kazunori, Tsukagoshi Takashi, Muto Takayuki, Kataoka Akimasa, Tazaki Fumie, Ikeda Shiro, Fukagawa Misato, Honma Mareki, Kawabe Ryohei	4. 巻 895
2. 論文標題 Super-resolution Imaging of the Protoplanetary Disk HD 142527 Using Sparse Modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 84 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab899f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nayakshin Sergei, Tsukagoshi Takashi, Hall Cassandra, Vazan Allona, Helled Ravit, Humphries Jack, Meru Farzana, Neunteufel Patrick, Panic Olja	4. 巻 495
2. 論文標題 TW Hya: an old protoplanetary disc revived by its planet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 285-304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kanagawa Kazuhiro D., Hashimoto Jun, Muto Takayuki, Tsukagoshi Takashi, Takahashi Sanemichi Z., Hasegawa Yasuhiro, Konishi Mihoko, Nomura Hideko, Liu Hanyu Baobab, Dong Ruobing, Kataoka Akimasa, Momose Munetake, Ono Tomohiro, Sitko Michael, Takami Michihiro, Tomida Kengo	4. 巻 909
2. 論文標題 ALMA Observation of the Protoplanetary Disk around WW Cha: Faint Double-peaked Ring and Asymmetric Structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 212 ~ 212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abdfc5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 塚越 崇
2. 発表標題 ALMA 1au分解能で見る TWHya円盤の微細構造
3. 学会等名 日本天文学会2025春期年会
4. 発表年 2025年

1. 発表者名 塚越 崇
2. 発表標題 原始惑星系円盤モデルを用いた スパースモデリングによる画像再構成手法の検証と 3次元データへの展開
3. 学会等名 星間データサイエンス研究会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takashi Tsukagoshi
2. 発表標題 New ALMA Observation at 1au Resolution for TW Hya; Resolved Structure and Time Variation of a Localized Substructure in the Disk
3. 学会等名 Protostars and Planets VII (国際学会)
4. 発表年 2023年

1．発表者名 塚越 崇
2．発表標題 New ALMA Observation at 1au Resolution for TW Hya; Resolved Structure and Time Variation of a Localized Substructure in the Disk
3．学会等名 新学術領域「星・惑星形成」2023年度大研究会
4．発表年 2023年

1．発表者名 塚越 崇
2．発表標題 New ALMA Observation at 1au Resolution for TW Hya; Resolved Structure and Time Variation of a Localized Substructure in the Disk
3．学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2024
4．発表年 2024年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMA [CI](1-0) survey for protoplanetary disks
3．学会等名 地球惑星科学連合大会2022
4．発表年 2022年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMAによる原始惑星系円盤の[CI](3P1-3P0)サーベイ観測
3．学会等名 新学術領域「星惑星形成」大研究会2023
4．発表年 2023年

1．発表者名 蛸谷かおる，奥村幸子，塚越崇
2．発表標題 スパースモデリングによる電波干渉計画像再構成手法の輝度分布モデルを用いた定量的評価
3．学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4．発表年 2023年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 スパースモデリングを応用した電波干渉計画像合成法の高解像度ALMAデータへの応用
3．学会等名 ngVLA Development Days
4．発表年 2021年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMA多波長画像解析で探るTW Hyaの原始惑星系円盤のスペクトル指数分布
3．学会等名 日本天文学会2021秋季年会
4．発表年 2021年

1．発表者名 Tsukagoshi Takashi
2．発表標題 ALMA [CI](1-0) survey for protoplanetary disks
3．学会等名 East Asian ALMA Science Workshop 2022 (国際学会)
4．発表年 2022年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMA による原始惑星系円盤の [CⅠ](3P1-3P0) 観測 II
3．学会等名 日本天文学会2022春季年会
4．発表年 2022年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 惑星系形成研究における近年のALMA観測の成果
3．学会等名 茨城大学重点研究サマリー研究会
4．発表年 2021年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMA cycle7観測で検出したTWHya円盤の1auスケールの微細構造
3．学会等名 新学術領域大研究会
4．発表年 2022年

1．発表者名 中村友音, 奥村幸子(日本女子大学), 塚越崇, 川邊良平(国立天文台)
2．発表標題 スパースモデリングによる画像合成と天体構造の関係
3．学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4．発表年 2021年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMA多波長画像解析で探るTW Hyaの原始惑星系円盤のスペクトル指数分布
3．学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4．発表年 2021年

1．発表者名 山口正行（東京大学，国立天文台），川邊良平，塚越崇，野村英子(国立天文台)，武藤恭之(工学院大学)
2．発表標題 ALMA 超解像画像で探る T Tau 周囲の原始惑星系円盤の詳細構造
3．学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4．発表年 2021年

1．発表者名 塚越崇
2．発表標題 ALMA多波長画像解析で探るTW Hyaの原始惑星系円盤のスペクトル指数分布
3．学会等名 惑星系形成若手研究会2021
4．発表年 2021年

1．発表者名 Tsukagoshi, Takashi
2．発表標題 High-resolution multiband imaging for investigating the radial variation of the spectral index in the protoplanetary disk around TW Hya
3．学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

惑星形成の最初の一步が捉えられる
https://alma-telescope.jp/news/dgtau-202310?doing_wp_cron=1715065641.8516080379486083984375
年を経た惑星工場にも十分な材料
<https://www.nao.ac.jp/news/science/2023/20230111-dos.html>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------