

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03703

研究課題名(和文)ALMA Long Baseline 観測による原始惑星の直接撮像

研究課題名(英文)Direct Imaging of Protoplanets with the ALMA Long Baseline Observations

研究代表者

高桑 繁久(Takakuwa, Shigehisa)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号：50777555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計「ALMA」を用いた観測により、生まれて間もない(年齢10-100万年)星「原始星」周囲における惑星形成の描像を明らかにすることである。本研究の主な成果は、1)すでに原始星段階において、惑星形成の現場と考えられる分子ガスと塵の円盤が普遍的に存在していることを示したこと、2)原始星円盤における磁場の効果の存在を観測的に示したこと、3)原始星円盤における惑星形成を直接観測するための大型のALMA観測計画「eDisk」の観測提案書(プロポーザル)を採択させることができたことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は「いつどのようにして惑星が形成されるのか」という天体物理学の一大問題を解決するための重要な指針を与えた。すなわち、惑星形成はこれまで考えられていたよりもずっと早い原始星段階で起こっていること、さらに今後のALMA大型観測プログラムにより、原始星における惑星形成の現場を直接観測できる機会を得たことである。これにより、我々の住む惑星がどのようにして生まれたのかという、一般社会全体の関心にも繋がる科学的知見が得られる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research project is to clarify planet formation around young (0.1 - 1 million years) protostars by observations with the Atacama Large Millimeter and submillimeter Array (ALMA). The main outcomes of the present research are; 1) finding of prevalence of disks of molecular gas and dusts around protostars, which is the site of ongoing planet formation; 2) observational identification of the effect of the magnetic fields in the protostellar disks; 3) approval of the ALMA Large Program, "eDisk", which will aim to unveil ongoing planet formation in protostellar disks.

研究分野：電波天文学、天体物理学

キーワード：惑星形成 ALMA 原始星 円盤

## 1. 研究開始当初の背景

本研究開始時点で2000を超える太陽系外の惑星が発見されている(2021年4月現在では4375個: NASA exoplanet archive)。それまで、これらの惑星は、誕生から1千万年程度経った若い星(Class II 天体)周囲で普遍的に観測される、分子ガスと固体微粒子(ダスト)からなる円盤「原始惑星系円盤」の中で形成されると考えられてきた。一方、サブミリ波干渉計「SMA」やアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計「Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA」を用いた我々の観測により、生まれてからの年齢が100万年未満の「原始星」(Class 0, I 天体)においても、太陽系の回転「ケプラー回転」する円盤が見つかり始めてきた。さらに、これらの原始星のひとつ HL Tau においては、円盤内に惑星の軌道を示す溝状の構造も捉えられた(ALMA Partnership et al. 2015, ApJL, 808, L3)。これらの結果は、惑星形成がそれまでの理解と異なり、より若い原始星段階で始まっている可能性を示唆している。

しかしながら、それまで惑星形成はClass II 段階で起こると考えられていたため、ALMAによる惑星形成を直接捉えるための高解像度、高感度観測はClass II 天体に主眼が置かれていた(e.g., Andrews et al. 2018, ApJL, 869, L41)。これらの観測では、リング状の構造や渦巻構造など惑星の存在を示唆する円盤構造は普遍的に捉えられたものの、現在進行形での惑星形成の兆候は得られなかった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、ALMAによる原始星円盤の系統的なサーベイにより、惑星形成の現場の直接検出を目指す。形成中の惑星「原始惑星」には周囲に「周惑星系円盤」が存在し、この周惑星系円盤が中心の惑星に質量を供給して惑星を成長させていると考えられる。従って、原始星円盤内に溝状の構造が存在し、さらにこの溝状構造の中にこの周惑星系円盤が存在する観測画像が得られれば、惑星の形成の現場を捉えた非常に有力な証拠となる。また原始星段階は、円盤そのものの形成、成長段階でもある。原始星周囲の分子ガス、ダストの構造「エンベロープ」が中心に落ち込んで円盤を形成、成長させている描像を明らかにすることも本研究の目的である。このようにして、惑星形成システムの統一的描像を得る。

## 3. 研究の方法

本研究は3つの段階よりなる。まず、(1) SMA や ALMA を用いて、単独星のみならず連星も含めた原始星周囲の円盤の観測を行う。さらにこれまでに観測されたALMAのアーカイブデータも解析することで、原始星周囲でのケプラー回転円盤を系統的に探査し、その物理的性質を明らかにしていく。ここでは、観測データから原始星円盤の物理を得るためのソフトウェアの開発も含まれる。(2) これらの研究を土台とし、国際共同研究体制を構築して、原始星周囲における惑星形成の研究を系統的に行うためのALMAの大型観測プログラム(eDiskと命名)を提案、採択させる。(3) eDiskにより原始星における惑星形成の兆候を探る。

## 4. 研究成果

(1) 原始星円盤形成における磁場の役割 (Takakuwa et al. 2018, ApJ, 865, 51)

原始星周囲においては、円盤のみならず原始星+円盤のシステム全体を覆う分子ガスとダストの構造、エンベロープが存在している。このエンベロープが中心の円盤にガス、ダストを供給することにより円盤を成長させ、惑星の源となっていると考えられる。一方、原始星周囲での円盤形成においては磁場が大きな役割を果たすことが、これまでの多くの理論的研究から示されている。しかし実際に磁場が円盤形成に及ぼしている影響を、観測的に明らかにした例はこれまでなかった。このためには原始星円盤、エンベロープそれぞれで分子ガスの運動を詳細に調べ、比較する必要がある。

図1にSMAによるClass I 原始星 IRAS 04169+2702 の観測結果を示す。図1 a)では、青色と赤色のコントラストでそれぞれ青方遷移(我々に近づく方向への運動)、赤方遷移(遠ざかる方向)した $^{13}\text{CO}$ (J=3-2)輝線の分布を示す。青方遷移した $^{13}\text{CO}$ 輝線は原始星の北西側、赤方遷移した $^{13}\text{CO}$ 輝線は原始星の南東側に位置し、この速度勾配の向きは、原始星から放出される双曲分子流と垂直となっている。観測の空間分解能は $^{13}\text{CO}$ 輝線の場合と比べて悪いもののS0(6<sub>5</sub>-5<sub>4</sub>)輝線も $^{13}\text{CO}$ 輝線と同様の速度成分をトレースしていることがわかる(図1 b)。

一方、 $\text{C}^{18}\text{O}$ (J=2-1)輝線では、 $^{13}\text{CO}$ , S0輝線より外側の半径300-500 au程度の分子ガスの構造をトレースしていることがわかる(図1 c)。 $\text{C}^{18}\text{O}$ 輝線は、北側に赤方遷移、南側に青方遷移の速度成分を示している。すなわち速度勾配の方向が内側の $^{13}\text{CO}$ , S0輝線のものとは正反対となっている。我々は、このような空間スケールによって真逆な速度構造の起源を、数値モデルを作成して検討した。その結果、 $^{13}\text{CO}$ , S0輝線は原始星周囲を取り巻く半径200天文単位程度のケプラー回転円盤をトレースしているのに対して、 $\text{C}^{18}\text{O}$ 輝線は円盤とは逆の方向に回転しつつ円盤に落ち込むエンベロープ成分をトレースしていることが明らかになった。すなわち、円盤とエンベロープで逆回転が起こっているのである。数値モデルを元に導出した物理パラメータは、円盤半径200

天文単位、中心星の質量 0.1 太陽質量、エンベロープの回転速度  $0.20 \text{ km s}^{-1}$ 、インフォール速度  $0.16 \text{ km s}^{-1}$  である。

円盤とエンベロープでのこのような逆回転は、非理想的磁気流体の効果の一つ「ホール効果」によって引き起こされることが、理論的研究から示唆されている (Tsukamoto et al. 2015, ApJL, 810, L26)。最近の理論的研究によると、我々の観測で得られた結果は、定量的にホール効果から予言される描像で再現可能である (Zhao et al. 2020, MNRAS, 492, 3375)。すなわち我々の観測結果は、エンベロープ、円盤の分子ガスの運動として、磁場の効果を観測的に明らかにしたものであると言える。

現在、ALMA による IRAS04169 の追観測を行なっている。ALMA による観測から、エンベロープから円盤までのガスの運動の詳細が明らかになり、円盤形成における磁場の役割について重要な知見が得られると期待される。

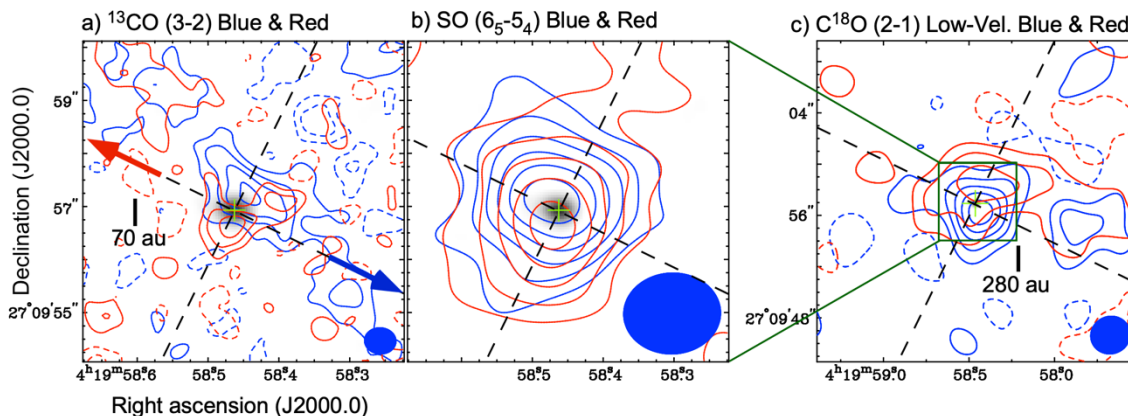


図 1: SMA による原始星 IRAS04169+2702 の観測結果。それぞれのパネルの上部に対応する分子輝線を記述しており、青、赤のコントアがそれぞれ青方遷移、赤方遷移した分子輝線の分布を示す。グレースケールは 0.9-mm ダスト連続波の画像。十印は原始星の位置、青と赤の矢印はそれぞれ青方遷移、赤方遷移した双極分子流の方向を示す。右下の楕円は観測の空間分解能 (ビーム) を表す。

## (2) 原始星連星周囲の円盤構造 (Takakuwa et al. 2020, ApJ, 898, 10)

太陽質量程度の星の過半数は、二つの星が重力的に束縛されて互いの周りを回っている双子の星「連星」であることが分かっている (Raghavan et al. 2010, ApJS, 190, 1)。ケプラー衛星などを用いた観測により、惑星系は連星の周囲においても多く存在していることが分かってきた (Orosz et al. 2019, AJ, 157, 174)。従って、生まれたばかりの連星「原始星連星」周囲の円盤「周連星系円盤 (Circumbinary Disk; 以降 CBD)」の詳細観測を行い、その構造、運動を探ることは、惑星形成の描像を探る上で不可欠である。

図 2 (a, c) に、我々の ALMA 観測で得られた、原始星連星 L1551 NE, IRS 5 の 0.9-mm ダスト連続波の画像を示す。L1551 NE, IRS 5 とともに中心に二目玉の構造がみられることがわかる。これらは、個々の星の周囲の円盤 (Circumstellar disk: CSD) である。そしてこの CSDs の外側に CBD の構造が見られることがわかる。L1551 NE においては、CBD は二つの渦巻腕 (Arm A, Arm B) からなっていることがわかる。さらにこれらの渦巻腕の分布は全体として西側 (図中の右側) に偏った、 $m=1$  のモードを示している。L1551 NE における CBD のこのような構造は、我々の数値シミュレーションで説明できる (図 2 b)。

一方、L1551 IRS 5 においても、CBD は二つの渦巻腕 (Arm N, Arm S) からなっている。しかし、L1551 IRS 5 の CBD の大きさは、L1551 NE と比べて半分以下である。さらに L1551 NE で見られた  $m=1$  モードは L1551 IRS 5 では見られない。また、L1551 NE と同様に、L1551 IRS 5 についても数値シミュレーションを行なったところ、観測の L1551 IRS 5 の CBD は、数値シミュレーションで予言されるものよりも小さいことが分かった (図 2 d)。我々の数値シミュレーションは、磁場が入っていない hydrodynamic simulation である。L1551 NE においてはこの数値シミュレーションで CBD の構造がよく説明できるのに対して、L1551 IRS 5 では説明できなかったことは、L1551 IRS 5 においては磁場の効果が効いている可能性を示唆している。

現在、我々は磁場も含めた CBD の数値シミュレーションに着手している。さらに、磁場によって分子輝線が直線偏波を起こす現象 (Goldreich-Kylafis effect) を用いて L1551 NE, IRS 5 の磁場の構造を調べる ALMA 観測のプロポーザルも提出した。また、韓国のグループとの国際共同研究の元、L1551 IRS 5 の CBD におけるダストの成長 = 惑星形成の兆候を調べる観測プロポーザルも提出している。これらの研究により、CBD における惑星形成、それに対する磁場の影響といった知見をさらに深めることができると期待される。

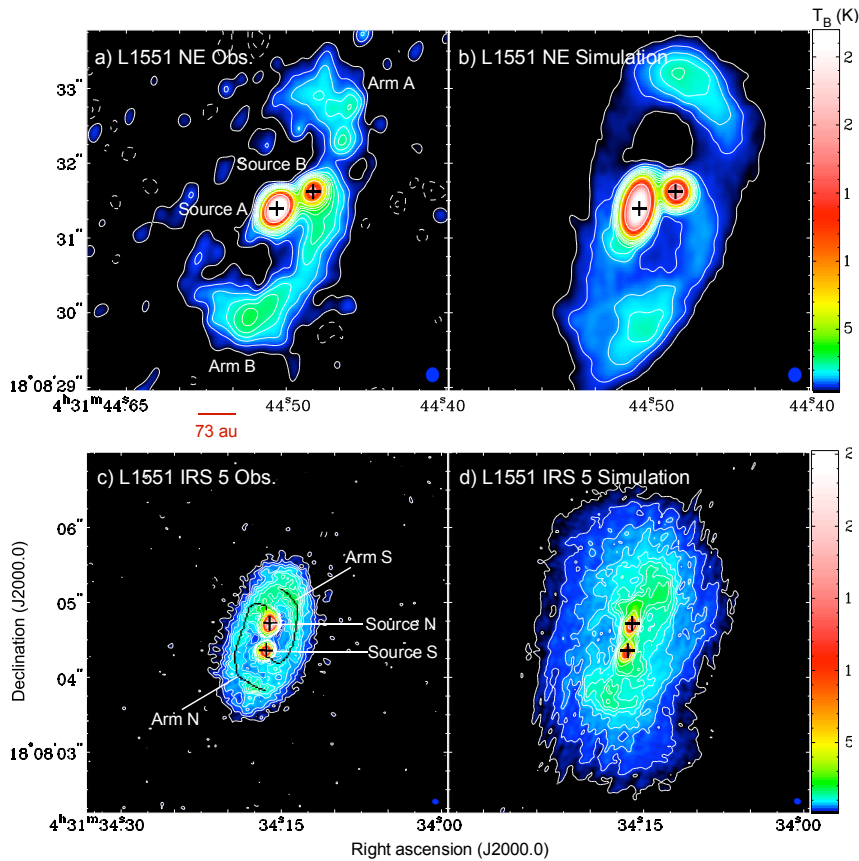


図2: ALMAによる原始星連星 L1551 NE (a), IRS 5 (c) の 0.9-mm ダスト連続波の画像と対応する理論シミュレーションの画像 (b, d)。カラースケールで、0.9-mm 連続波の輝度温度を表している。図中の十印は連星の個々の星の場所を表す。

### (3) ALMA 大型観測プログラム eDisk

これまで、ALMAによる Class II 天体周囲の円盤の超高分解能 (~5 天文単位) 観測は精力的に行われており、溝状、リング状の構造や、渦巻腕の構造など、興味深い構造が多く検出されている。これらの構造は、惑星の存在を示唆すると考えて無矛盾である一方、円盤自身の重力不安定性や、氷昇華やダスト蒸発による不透明度の変化(Okuzumi+ 2016, ApJ, 821, 82)によっても形成され得る。さらに形成中の惑星「原始惑星」が円盤内に埋まっている、現在進行形で惑星形成が起こっているという着実な証拠はまだ見つかっていない(いくつかの報告例はある e.g., PDS70; Isella et al. 2019, ApJL, 879, L25)。

我々はこのような現状を打破するためには、Class II 天体より若い原始星段階(Class 0, I 天体)の詳細観測が不可欠であると考え、まず ALMA による原始星の既存の観測、データアーカイブの検索を始めた。図3に ALMA のデータアーカイブから作成した原始星周囲の円盤のダスト連続波の画像を示す。WL17 では、太陽系の土星軌道に対応する半径まで穴が空いており、その外側にリングが見られる。これは、リングの内側に惑星が存在して、内側の物質を掃き出している可能性を示唆する。同様なリング構造は L1489 IRS においても見られる。一方、GY91 においては、リング状の構造と溝状の構造が幾重にも重なり合った構造が見られる。既存の ALMA データアーカイブが示した原始星周囲の円盤でのこのような構造は、原始星段階において既に惑星形成が始まっている可能性を示唆している。

このようなデータ解析の土台のもと、我々は日本、台湾、韓国、米国、デンマーク、チリと、全世界に及ぶ関連分野の研究者を集めて国際共同研究体制を構築し、ALMA の大型観測プログラムを提案した。「eDisk」と名付けた本プログラムは17天体に及ぶ原始星天体を5天文単位の空間分解能で観測し、原始星円盤における惑星形成を徹底的に調べるものである。観測プロポーザルは当初の2回は採択されなかったが、3回目の2019年について採択された。これを受けて同年12月に東京大学において、これまでの成果のレビュー、今後の研究計画の議論を目的とした国際ワークショップを開催した。当初、eDiskの観測は2019年から2020年にかけて行われる予定であった。しかし、チリにおけるコロナウイルスの問題のため、2020年からALMAは観測を停止した。このため、本来は本研究課題の期間中にeDiskのデータが得られる予定であったが、本研究課題の期間中にはデータを得ることができなかった。しかし2021年4月に、1天体についてeDiskの初の観測が実行され、データを得ることができた。現在、本データの解析を始めている。今後、より多くの天体、さらに高い空間分解能による観測から、原始星における惑星形成の描像を得ることができると期待される。本研究は、2021年度からの新たな科研費研究(基盤A:ALMA大型観測プログラムによる原始星円盤における惑星形成の解明)に引き継がれる。

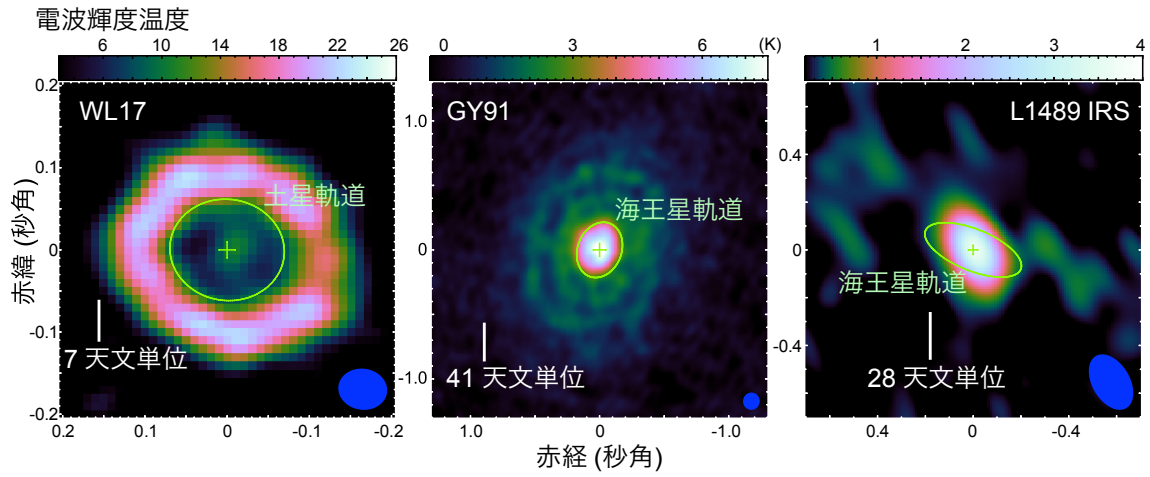


図 3. ALMA による Class I 原始星周囲の円盤の観測結果の例。WL17 においては、中心星 (十印) に付随する円盤と外側の明るいリング状の構造の間に、溝状の構造「ギャップ」が見られる (Sheehan & Eisner 2017, ApJ, 840, L12)。GY91 においては、リング状の構造とギャップが交互に折り重なっている (Sheehan & Eisner 2018, ApJ, 857, 18)。L1489 IRS においては、中心星に付随する明るい円盤と外側のリング構造が見られる (Sai+ 2020, ApJ, 893, 51)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 16件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sai Jinshi, Ohashi Nagayoshi, Saigo Kazuya, Matsumoto Tomoaki, Aso Yusuke, Takakuwa Shigehisa, Aikawa Yuri, Kurose Ippei, Yen Hsi-Wei, Tomisaka Kohji, Tomida Kengo, Machida Masahiro N.	4. 巻 893
2. 論文標題 Disk Structure around the Class I Protostar L1489 IRS Revealed by ALMA: A Warped-disk System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 51～51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab8065	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 Takakuwa Shigehisa, Saigo Kazuya, Matsumoto Tomoaki, Saito Masao, Lim Jeremy, Yen Hsi-Wei, Ohashi Nagayoshi, Ho Paul T. P., Looney Leslie W.	4. 巻 898
2. 論文標題 Circumbinary Disks of the Protostellar Binary Systems in the L1551 Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 10～10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab9b7c	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 Yen Hsi-Wei, Zhao Bo, Koch Patrick, Krasnopolsky Ruben, Li Zhi-Yun, Ohashi Nagayoshi, Shang Hsien, Takakuwa Shigehisa, Tang Ya-Wen	4. 巻 893
2. 論文標題 Transition from Ordered Pinched to Warped Magnetic Field on a 100 au Scale in the Class 0 Protostar B335	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 54～54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab7eb3	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 Aso Yusuke, Hirano Naomi, Aikawa Yuri, Machida Masahiro N., Ohashi Nagayoshi, Saito Masao, Takakuwa Shigehisa, Yen Hsi-Wei, Williams Jonathan P.	4. 巻 887
2. 論文標題 Protostellar Evolution in Serpens Main: Possible Origin of Disk-size Diversity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 209～209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab5284	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 Su Yu-Nung, Liu Sheng-Yuan, Li Zhi-Yun, Lee Chin-Fei, Hirano Naomi, Takakuwa Shigehisa, Hsieh I-Ta	4. 巻 885
2. 論文標題 The Infall Motion in the Low-mass Protostellar Binary NGC 1333 IRAS 4A1/4A2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 98 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4818	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 Yen Hsi-Wei, Gu Pin-Gao, Hirano Naomi, Koch Patrick M., Lee Chin-Fei, Liu Haiyu Baobab, Takakuwa Shigehisa	4. 巻 880
2. 論文標題 HL Tau Disk in HCO+ (3-2) and (1-0) with ALMA: Gas Density, Temperature, Gap, and One-arm Spiral	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 69 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab29f8	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 Motogi Kazuhito, Hirota Tomoya, Machida Masahiro N., Yonekura Yoshinori, Honma Mareki, Takakuwa Shigehisa, Matsushita Satoki	4. 巻 877
2. 論文標題 The First Bird's-eye View of a Gravitationally Unstable Accretion Disk in High-mass Star Formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L25 ~ L25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab212f	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 Yamagishi M., Hara C., Kawabe R., Nakamura F., Kamazaki T., Takekoshi T., Shimajiri Y., Nomura H., Takakuwa S., Francesco J. Di	4. 巻 875
2. 論文標題 ALMA Observations of Layered Structures due to CO Selective Dissociation in the Ophiuchi A Plane-parallel PDR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 62 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0d80	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 Yen Hsi-Wei, Takakuwa Shigehisa, Gu Pin-Gao, Hirano Naomi, Lee Chin-Fei, Liu Haiyu Baobab, Liu Sheng-Yuan, Wu Chun-Ju	4. 巻 623
2. 論文標題 Signs of outflow feedback from a nearby young stellar object on the protostellar envelope around HL Tauri	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A96 ~ A96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201834209	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 Sahu Dipen, Liu Sheng-Yuan, Su Yu-Nung, Li Zhi-Yun, Lee Chin-Fei, Hirano Naomi, Takakuwa Shigehisa	4. 巻 872
2. 論文標題 Implications of a Hot Atmosphere/Corino from ALMA Observations toward NGC 1333 IRAS 4A1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 196 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaffda	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 Yen Hsi-Wei, Zhao Bo, Hsieh I-Ta, Koch Patrick, Krasnopolsky Ruben, Lee Chin-Fei, Li Zhi-Yun, Liu Sheng-Yuan, Ohashi Nagayoshi, Takakuwa Shigehisa, Tang Ya-Wen	4. 巻 871
2. 論文標題 JCMT POL-2 and ALMA Polarimetric Observations of 6000?100 au Scales in the Protostar B335: Linking Magnetic Field and Gas Kinematics in Observations and MHD Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 243 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aafb6c	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 Kamazaki Takeshi, Nakamura Fumitaka, Kawabe Ryohei, Hara Chihomi, Takakuwa Shigehisa, Hirano Naomi, Francesco James Di, Friesen Rachel, Tamura Motohide	4. 巻 871
2. 論文標題 ALMA Observations of the Ophiuchus B2 Region. I. Molecular Outflows and Their Driving Sources	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 86 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf857	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 Matsumoto Tomoaki, Saigo Kazuya, Takakuwa Shigehisa	4. 巻 871
2. 論文標題 Structure of a Protobinary System: An Asymmetric Circumbinary Disk and Spiral Arms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 36 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf6ab	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 Wu Chun-Ju, Hirano Naomi, Takakuwa Shigehisa, Yen Hsi-Wei, Aso Yusuke	4. 巻 869
2. 論文標題 Physical and Chemical Conditions of the Protostellar Envelope and the Protoplanetary Disk in HL Tau	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 59 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaed42	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 Kawabe Ryohei, Hara Chihomi, Nakamura Fumitaka, Saigo Kazuya, Kamazaki Takeshi, Shimajiri Yoshito, Tomida Kengo, Takakuwa Shigehisa, Tsuboi Yohko, Machida Masahiro N., Francesco James Di, Friesen Rachel, Hirano Naomi, Oasa Yumiko, Tamura Motohide, Tamura Yoichi, Tsukagoshi Takashi, Wilner David	4. 巻 866
2. 論文標題 Extremely Dense Cores Associated with Chandra Sources in Ophiuchus A: Forming Brown Dwarfs Unveiled?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 141 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae153	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 Takakuwa Shigehisa, Tsukamoto Yusuke, Saigo Kazuya, Saito Masao	4. 巻 865
2. 論文標題 Possible Counterrotation between the Disk and Protostellar Envelope around the Class I Protostar IRAS 04169+2702	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 51 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aadb93	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 Aso Yusuke, Hirano Naomi, Aikawa Yuri, Machida Masahiro N., Takakuwa Shigehisa, Yen Hsi-Wei, Williams Jonathan P.	4. 巻 863
2. 論文標題 The Distinct Evolutionary Nature of Two Class 0 Protostars in Serpens Main SMM4	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 19 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aacf9b	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 Yen Hsi-Wei, Zhao Bo, Koch Patrick M., Krasnopolsky Ruben, Li Zhi-Yun, Ohashi Nagayoshi, Takakuwa Shigehisa	4. 巻 615
2. 論文標題 Constraint on ion?neutral drift velocity in the Class 0 protostar B335 from ALMA observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A58 ~ A58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201732195	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18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 高桑 繁久
2. 発表標題 ALMA Observations of the Protostellar Binary System L1551 IRS 5: Resolving the Gas Motion inside the Hill Radii
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高桑 繁久
2. 発表標題 ALMA Observations of the Protostellar Binary System L1551 IRS 5: Resolving the Gas Motion inside the Hill Radii
3. 学会等名 新学術領域「星惑星形成」大研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Observations of the Circumbinary Disk in the Protostellar Binary System L1551 IRS 5: Resolving the Gas Motion inside the Hill Radii
3. 学会等名 Five years after HL Tau: a new era in planet formation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 CASA Users Committee (CUC) report
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA observations of the binary systems in the L1551 region: gas motions inside the Hill radii and the orbital motion misaligned from the circumstellar disks
3. 学会等名 East Asian ALMA Science Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ngVLA Survey for Kernels and First Cores in the 7-mm Molecular Lines
3. 学会等名 ngVLA Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 Spirals, Gas Motions, and their Differences among the Protostellar Binaries in the L1551 Region
3. 学会等名 ALMA2019: science results and cross-facility synergies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高桑 繁久
2. 発表標題 ALMAによる原始星連星周囲の円盤の構造、運動の観測、解析
3. 学会等名 連星系・変光星研究会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Study of Misalignments between Protostellar Envelopes and Disks
3. 学会等名 ALMA Workshop 2019: Early Planet Formation in Embedded Disks (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 CASA Users Committee
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Study of Misalignments between Protostellar Envelopes and Disks
3. 学会等名 East-Asian ALMA Science Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 Survey for Circumbinary Disks in Protostellar Binary Systems with NOEMA
3. 学会等名 NOEMA/30m Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Observations of Circumbinary Disks in Protostellar Binary Systems L1551 IRS 5 and NE
3. 学会等名 JCMT Transient Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Study of the Circumbinary Disks in the L1551 Region
3. 学会等名 East Asian ALMA Science Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Fellow Report
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 ALMA Observations of Circumbinary Disks in Protostellar Binary Systems
3. 学会等名 Dynamics and physics of outflows in protostellar disks and Active Galactic Nuclei (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 Highest resolution ALMA Study of Protostellar Disks
3. 学会等名 Star formation with ALMA: Evolution from molecular clouds to protostars (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takakuwa, S.
2. 発表標題 7-mm tracers for the densest part of cloud cores
3. 学会等名 Power of wideband receiver: Exploring sciences at 7mm wavelength with large single dish telescopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分担者	伊王野 大介  (Iono Daisuke)  (60425402)	国立天文台・アルマプロジェクト・准教授   (62616)	
研究 分担者	塚本 裕介  (Tsukamoto Yusuke)  (70748475)	鹿児島大学・理工学域理学系・助教   (17701)	

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			
その他の国・地域	台湾中央研究院天文及天文物理 研究所	台湾清華大学		
韓国	KASI	Yonsei University		
米国	National Radio Astronomy Observatory	University of Virginia	Northwestern University	他2機関
デンマーク	University of Copenhagen			
チリ	Joint ALMA Observatory			