

令和 4 年 6 月 26 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03921

研究課題名(和文)大質量原始星の進化経路の特定及び解明を目指した、周期-光度関係の観測的検証

研究課題名(英文)Observational Establishment of the Period-Luminosity Relation in the Evolution of High-mass Protostars

研究代表者

杉山 孝一郎 (SUGIYAMA, Koichiro)

国立天文台・水沢VLBI観測所・特別客員研究員

研究者番号：50624954

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)：大質量星進化の経路特定・解明を目指し、星表面におけるガス降着率の有力な観測的導出法として期待される周期-光度関係の検証へ向け、1)茨城32m電波望遠鏡を用いたメタノール分子メーザー周期変動の系統的探査を通じた30天体以上の新検出、2)超長基線干渉計VERAを用いた周期天体G35.79とG37.47に対する水分子メーザーの年周視差計測による20%以内の高精度な距離決定、を達成した。また1)の副産物として、大質量原始星G358における突発増光現象の新検出と、世界20カ国以上の研究者で構成されるM20との連携観測による降着バースト起因の観測的裏付け、及び円盤からのガス降着構造を観測的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大質量星の進化に最も大きな影響を及ぼす物理現象でありながら、1天文単位未満と微小な星表面において生じるガス降着率の、ほぼ唯一と言っても良いほど希少な導出法と期待される周期-光度関係の観測的確立へ向け、周期変動サンプルの大幅な増加と、光度を高精度に決定する上で不可欠な距離計測を複数天体で達成出来たことは、本確立へ向けた大きな前進と言える。また、G358における降着バーストの新検出と、そのガス降着構造を詳細に明らかに出来たことは、大質量星の進化に不可欠なガス降着現象の直接的な観測研究の達成、および進化トラックにおける降着バースト現象の普遍性を高めた、という点で高い学術的意義を持つ結果と言える。

研究成果の概要(英文)：To understand the evolutionary track of high-mass protostars, we aimed to observationally establish Period-Luminosity relation that could be an exclusively way for measurement of accretion rates onto the stellar surface, via completing 1) new detections of periodic methanol masers in beyond 30 sources via high-cadence & long-term intense flux monitoring with Ibaraki 32-m radio telescope since the end of 2012, & 2) parallax measurements to determine accurate distances (within 20% uncertainties) for two periodic targets: G35.79 & G37.47 with very-long-baseline-interferometry VERA. In addition, as by-product of the intense monitoring with Ibaraki 32-m, we achieved a new detection of drastic flux bursting activities of methanol masers at the high-mass protostar G358.93-00.03MM1, and via follow-up observations with M20 that is the world-wide maser monitoring organization this phenomenon was verified to be caused by an accretion burst and its accreting structure on a disk was unveiled.

研究分野：大質量星形成

キーワード：電波天文学 大質量星形成 強度変動 メーザー 周期変動 周期光度関係 突発増光 降着バースト

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

太陽程度の星より 1 桁以上重たい“大質量星”は、軽い星に比べてその数は圧倒的に少ないが、2 桁以上明るく、鉄などの重元素の生成や次世代の星形成に大きく寄与するという点において、銀河および宇宙における星形成率や、元素構成を包括的に理解する上で重要な観測対象天体と言える。周囲の大量なガス・塵により、可視光による直接観測が困難な中、近年の電波・赤外線による干渉計の発展により、大質量原始星の周囲にガスの回転円盤を想起させる空間・速度構造が検出され始めた[1][2]。また、回転に起因して放出されるアウトフロー[3]、砂時計型の形状を示す磁場構造[4]、および降着バースト現象[5][6]、など、軽い星の形成時と同様な周辺構造と天体現象が観測的に次々検出されてきた昨今、大質量星は軽い星と同様、周囲の回転・降着円盤からのガス降着により質量を獲得し成長していくことは、もはや疑いの余地は無い。そこで、次なる研究課題として大質量原始星の進化経路の解明が筆頭として挙げられる。

Hosokawa & Omukai (2009) [7] の理論計算によると、進化の経路は原始星表面に降り積もるガスの質量降着率 \dot{M}_{dot} によって異なると提唱されている。その傾向は、特に原始星の中心で核融合反応による自己発光が開始される主系列段階の直前に、原始星半径が膨張することにより顕著に現れると予言されている。従って、大質量星の進化を理解するには、原始星表面における \dot{M}_{dot} を何らかの方法で観測的に計測する必要がある。しかし、原始星表面のサイズは 1 天文単位 (au) より小さく、大質量星までの典型的な距離 3000 光年以遠においては、見かけの角度にして 1 ミリ秒角よりも小さい超微小な空間スケールに相当する。そのため、原始星そのもの、もしくはその直近を観測可能な波長(赤外線・電波サブミリ波)では、研究開始当時もしくは現状でも世界最高の解像度を誇る VLTI や将来の ALMA2 をもってしても 1-2 桁以上解像度が不足し、直接的に空間分解・撮像し物理量を導出することは不可能である。従って、『上記以外の波長帯で、間接的な観測手法による原始星表面の物理量導出を通じ、進化経路の正確な理解は可能か?』という学術的問いに迫る必要があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、理論研究により提唱された大質量星が原始星時代に生じ得る脈動不安定モデルに着目した。Inayoshi et al. (2013) [8] は、大質量原始星が主系列直前の半径膨張段階に、原始星近傍のヘリウム電離外層の透明度が脈動し、 \dot{M}_{dot} に依存してその脈動が成長することで、10-100 日オーダーの周期的な光度変動を示す可能性を提唱した。理論計算に依ると、この脈動成長は、質量降着と内部構造進化のタイムスケール t_{acc} , t_{KH} が釣り合うタイミングで生じると推定される。 t_{acc} は原始星の質量及び \dot{M}_{dot} で決まる一方、 t_{KH} は原始星の質量、半径、及び光度で決まる[9]。従って、脈動の周期性と、天体の光度との間には、一定の相関関係が推定される(周期-光度関係[8])。本研究では、これを観測的に検証し、その確かさを証明することを通じて、超微小な原始星表面におけるガスの質量降着率 \dot{M}_{dot} を、間接的に導出する手法の確立を目指した。

3. 研究の方法

そのための観測プローブとして、6.7 GHz 周波数帯で観測されるメタノール分子のメーザーと 22.2 GHz 周波数帯で観測される水分子のメーザーに着目した。前者メタノールメーザーは、原始星により暖められた塵からの赤外線放射により励起される[10]ため、原始星の光度変動に敏感に反応して強度変動することが期待される[11]。本研究では、特に周期的な強度変動の観測的検出に着目したい([12][13][14]など)。メタノールメーザーは、電波で非常に明るく、かつ周期的な強度変動を検出可能な点において、吸収が激しく可視光や赤外線波長帯での観測が非常に困難な大質量原始星周囲において、脈動周期を探るための最適なプローブと言える。

一方、後者の水メーザーは、天体光度の高精度な決定に必要不可欠な、年周視差法による高精度な距離計測の観測プローブとして着目した。これまで、日本の VERA やアメリカの VLBA を用いた水メーザーの年周視差計測結果が多数報告されている([15][16]に多数文献掲載)。また、6.7 GHz メタノールメーザーに比べて出現周波数が高いため、周波数が低いほど影響の大きい電離層による位置誤差の影響を最小限に抑えることができ、非常に高い優位性を有している。

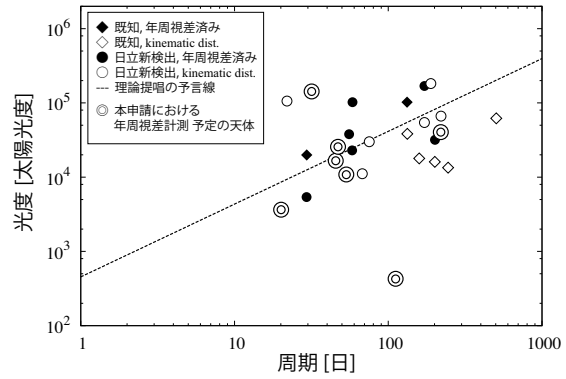
本研究では、それぞれのメーザーを用いて、以下 2 点の観測達成を目指した：

- メタノールメーザーの母体カタログ([17][18]など)に対する周期変動の系統的探査を完結する
- 水メーザーを用いた年周視差計測により、周期変動を示すメタノールメーザー天体の距離を誤差 10% 以内で決定する

4. 研究成果

(1) 【6.7 GHz メタノールメーザー放射の周期的な強度変動の系統的探査観測の完了】

初年度(令和元年度)の目標のひとつに掲げていたもので、本探査は、平成 24 年度末から、茨城(日立) 32m 電波望遠鏡を用いて北半球から観測可能な全 442 天体を対象に開始した長期的かつ高頻度なメタノールメーザー強度モニター観測を、本研究の初年度末までの計 8 年間の長期に亘り、高頻度に継続してきた。その結果、本観測年度においては、特に 2 年以上と長い周期を示す可能性のある天体も含め、短長あらゆる周期を示す天体を網羅するに至った。これにより、従来の周期変動天体が 20 天体程度であったものを、約 3 倍近くまで周期変動天体サンプルを増加させる 30 天体以上の新検出を達成した。これらは、申請者と研究協力者の米倉覚則教授・百瀬宗武教授(茨城大学)らにより、査読論文[19][20][21] & 国際研究会集録[22] としてまとめ公表している。また、これら 60 天体近い周期変動サンプルのうち、大質量原始星の脈動不安定現象によりその周期性を駆動できると期待される連続的な変動パターンを示す天体を選出した、現段階での周期-光度関係を上図にプロットする。なお、本申請時に付随する水メーザーを用いた年周視差計測により、その天体距離を高精度に決定する予定だった天体は、本プロット上に二重丸(◎)を用いて記した。



(2) 【22.2 GHz 水メーザーを用いた周期変動天体の年周視差計測を用いた高精度な距離決定】

本研究期間内に、想定していた距離の曖昧な周期変動 7 天体のうち、数ヶ月以下と短い周期を示す G 035.79-00.17, G 036.70+00.09, および G 037.47-00.10 の 3 天体に対して、世界で唯一の位置天文学専用観測網である VERA をプロジェクト観測を実施することに至った。そのうち、研究協力者の酒井大裕博士(タイ国立天文学研究所), 廣田朋也助教(国立天文台) らとの協力により、G 035.79 および G 037.47 の 2 天体で暫定的な年周視差計測結果、およびそれぞれ 20% 以内の高精度な距離の決定に成功した(D. Sakai, K. Sugiyama, T. Hirota, et al. in prep.). G 035.79, G 037.47 それぞれの観測は、2017 年 2 月~2018 年 2 月、2017 年 11 月~2019 年 1 月まで 9 回にわたり実施され、それぞれ 0.169 ± 0.034 ミリ秒角 (mas)、 0.123 ± 0.021 ミリ秒角 (mas) の年周視差値を得るに至った(図 1, 2)。これらはそれぞれ、 $5.92 (+1.49, -0.99)$ kpc, $8.13 (+1.67, -1.19)$ kpc に相当する。過去の運動学的距離として計測されていた 3.5 ± 0.4 , 3.5 ± 0.4 kpc [23] と比較すると、絶対値・精度ともに大きな改善が得られ、光度の算出へは距離は 2 乗で効いてくるため、それぞれ 2.8, 5.4 倍の改善と光度自体の高精度な導出へも大きく寄与する距離決定を達成できたと言える。

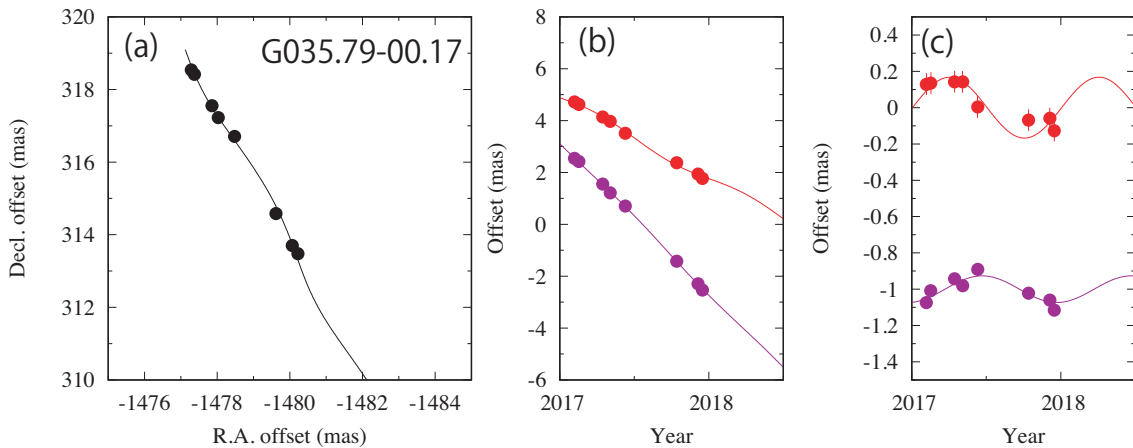


図 1. G 035.79-00.17 水メーザーの天空面上における絶対位置の変化(左)。(真ん中) 赤経(赤)・赤緯(紫)方向それぞれの動き。(右) 絶対固有運動を除去した純粋な年周視差成分のプロット。

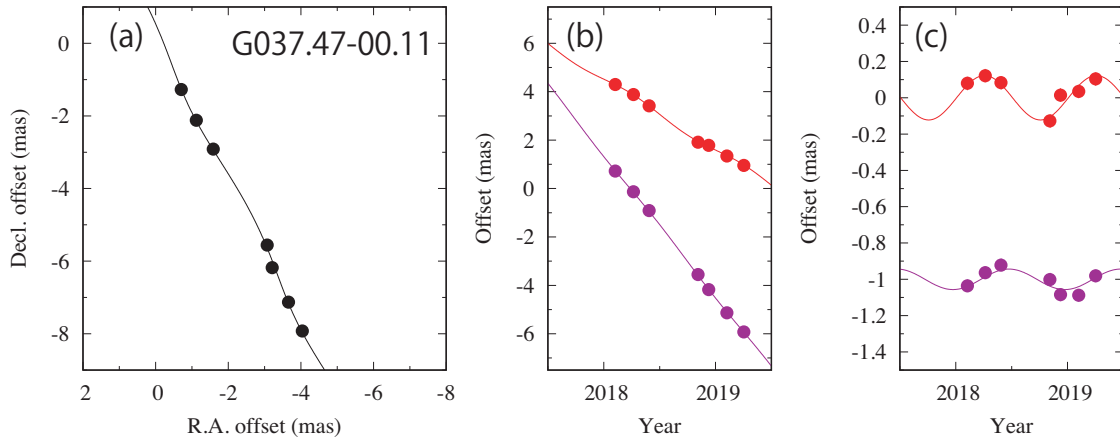


図2. 図1と同様だが、G 037.47-00.11 水メーザーに対する結果のプロット。

(3) 【G 036.70+00.09 におけるメタノールメーザーと赤外線同期した周期強度変動の発見】

本研究期間内に並行して、本研究において新検出済みのメタノールメーザー周期変動天体 G 036.70+00.09 (周期: 53.4 日, 連続的な変動パターン) に対して、研究協力者の内山瑞穂博士(JAXA 宇宙科学研究所)との協力による赤外線衛星アーカイブデータ ALLWISE および NEOWISE の徹底的な調査により、メタノールメーザーと中赤外線の同期した周期強度変動が発見された (M. Uchiyama et al. re-submitted to ApJ). なお、本研究においては、ALLWISE および NEOWISE でカバーされる 2010-2019 年の 10 年にわたり約半年ごとに実施されているモニターデータを調査の対象とした。その結果、波長 $3.4 \mu\text{m}$, $4.6 \mu\text{m}$ をカバーする W1, W2 バンドにて、次ページの図 3 (左)のような年スケールにわたる長期的な強度変動傾向を検出するに至った。赤外線アーカイブデータの観測頻度が半年ごとであることから、茨城(日立) 32-m で実施された 6.7 GHz メタノールメーザーのモニター頻度 4-10 日により検出された 53.4 日周期との比較は不可能である一方、図 3 (右)に示すように 50 日ごとにデータを平均化したプロット上においては、メタノールメーザーデータにも年スケールの長期的な周期変動を検出することができている。お互いの長期的な年スケールの変動傾向を比較した結果、対 W1, W2 それぞれで定量的に相関係数を -0.59 , -0.66 と有意な反相関関係を示す値を得ることができた。この発見は、周期変動天体 G 036.70 の周期変動が、周囲のダスト温度の周期変動を伴って生じている重要な観測的証拠であり、大質量原始星周囲のダスト温度を周期変動させることが容易な脈動不安定モデル起因であることの直接的な観測的証拠とも言える。同時に、本結果は、連続的な周期強度変動パターンを示す天体が脈動不安定モデルで説明可能だといえる一つのモデルケースにもなり得、周期-光度関係の観測的検証を完成させる上で重要な要素のひとつである『検証に用いる周期変動天体の母数サンプルからの選定』を行う上でも重要な情報を与える結果と言える。

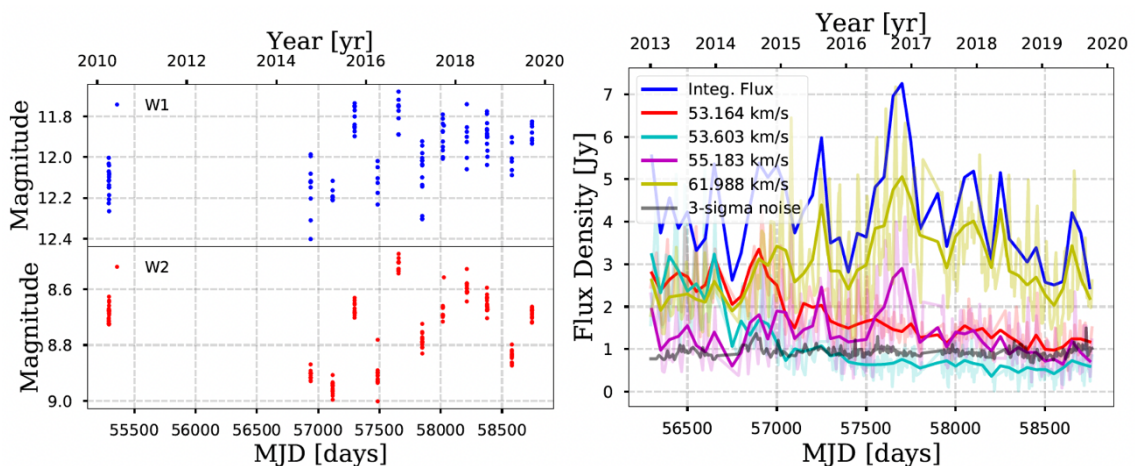
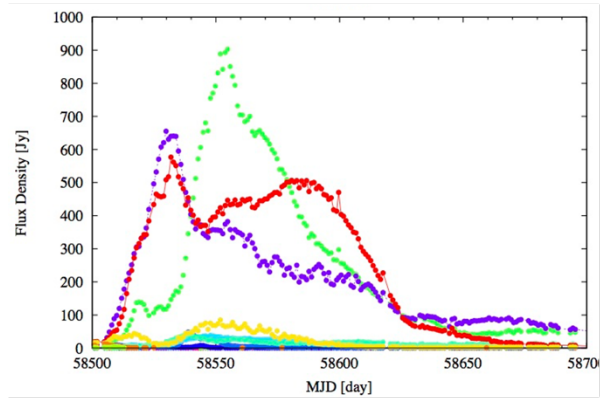


図3. (Credit: M. Uchiyama et al. re-submitted to ApJ からの抜粋) (左) G 036.70 における WISE アーカイブデータの W1 (青), W2 (赤) バンドそれぞれにおける中赤外線変光プロット。(右) 同天体における茨城(日立) 32-m モニターにより得られた 6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動。実線はスペクトル成分それぞれにおいて、50 日ごとにデータを平均化した変動曲線に相当。

(4) 【3 例目となる降着バースト起因の大質量原始星 G 358.93-00.03 MM1 における突発的増光現象の新検出と詳細な追観測】

本研究における柱である“茨城(日立)32m電波望遠鏡を用いて北半球から観測可能な全 442 天体を対象とした長期的かつ高頻度なメタノールレーザー強度モニター”の副産物として、大質量原始星 G 358.93-00.03 MM1 における 6.7 GHz メタノールレーザーの突発的な増光現象の新検出を達成した [24] (右図: Credit - Sugiyama, Yonekura, et al. 2019b ©茨城大学)。本増光現象の特徴として、複数の全スペクトル成分で、1 ヶ月程度の遅延はあれど、同期して最大 3 桁もの増光が挙げられる。また、本増光検出を、The Astronomer’s Telegram への報告に先駆けて、世界 20 カ国以上の研究者で構成している Maser Monitoring Organization (M2O) へ情報共有し、電波帯における単一の望遠鏡、干渉計のみならず、赤外線帯にもわたる数々のフォローアップが実現された。その結果、様々なメタノールレーザー遷移の新検出 [25][26]、6.7 GHz メタノールレーザーの増光初期・ピーク期 2 回における超長基線干渉計 VLBI 観測を通じた空間分布の劇的な変化とそれを通じた大質量原始星付近における突発的な増光と周囲のダスト温度の急激な上昇 [27]、原始星周囲の円盤上での渦状腕構造を示唆する降着速度構造の発見 [28][29]、同期した赤外線帯の突発的増光現象の検出 [30]、など大質量原始星の進化、特に周囲の円盤からの活発な質量降着を通じた成長過程を理解する上で非常に重要な観測結果の数々の生産に貢献した。ここでは特に、共同研究者 Dr. B. Stecklum (カール・シュヴァルツシルト天文台) を中心として実施された Herschel 赤外線衛星データを中心としたアーカイブデータ、および M2O への突発的増光現象検出の情報共有後に中赤外線観測装置 SOFIA を用いたフォローアップ観測との組み合わせ・比較により検出された、赤外線帯における同期した突発増光現象の検出について紹介する。本フォローアップ観測をベースとした Spectral Energy Distribution (SED) のモデル化と、増光前、増光時、減衰時 3 期それぞれの比較を行った結果、レーザーの突発的増光現象に同期した赤外線帯における明確な光度 1 桁にも及ぶ増光現象の検出が確認された。熱的な光度 1 桁の増光を実現する現象は、もはや降着バースト現象以外での説明は不可能であり、この観測結果をもって、G 358.93 において検出された突発的増光現象は、大質量原始星における 3 例目となる貴重な降着バースト現象の検出である観測的な裏付けに成功したといえ、大質量星の進化における Episodic で劇的な質量降着現象が、それまでに検出されていた 2 天体のみに特別な現象ではなく、原始星の進化に不可欠かつ重要な寄与を及ぼしていると言えるに至った。



<引用文献>

- [1] Patel et al. 2005, Nature, 437, 109
[2] Hirota et al. 2014, ApJ, 782, L28
[3] Hirota et al. 2017, Nature Astro., 1, 0146
[4] Girart et al. 2009, Science, 324, 1408
[5] Caratti o Garatti et al. 2017, Nature Phys., 13, 276
[6] Hunter et al. 2017, ApJ, 837, L29
[7] Hosokawa and Omukai 2009, ApJ, 691, 823
[8] Inayoshi et al. 2013, ApJ, 769, L20
[9] Stahler et al. 1986, ApJ, 302, 590
[10] Cragg et al. 2005, MNRAS, 360, 533
[11] Sugiyama et al. 2008, PASJ, 60, 1001
[12] Goedhart et al. 2004, MNRAS, 355, 553
[13] Fujisawa et al. 2014, PASJ, 66, 78
[14] Sugiyama et al. 2017, PASJ, 69, 59
[15] VERA Collaboration, Hirota, et al. 2020, PASJ, 72, 50
[16] Reid et al. 2019, ApJ, 885, 131
[17] Breen et al. 2015, MNRAS, 450, 4109
[18] Quiroga-Nunez et al. 2017, A&A, 604, A72
[19] Yonekura et al. 2016, PASJ, 68, 74
[20] Sugiyama et al. 2017, PASJ, 69, 59
[21] Sugiyama et al. 2019a, JPCS, 1380, 012057
[22] Sugiyama et al. 2018, IAU Symp., 336, 45
[23] Green & McClure-Griffiths 2011, MNRAS, 417, 2500
[24] Sugiyama et al. 2019b, The ATel, 12446
[25] Breen et al. 2019, MNRAS, ApJL, 876, L25
[26] Brogan et al. 2019, ApJL, 881, L39
[27] Burns, Sugiyama, et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 506
[28] Chen et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 1170
[29] Bayandina et al. 2022, AJ, 163, 83
[30] Stecklum et al. 2021, A&A, 646, A161

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Hirota Tomoya, Cesaroni Riccardo, Moscadelli Luca, Sugiyama Koichiro (4番目), Burns Ross A., Kim Jungha, Sunada Kazuyoshi, Yonekura Yoshinori	4. 巻 647
2. 論文標題 Water maser variability in a high-mass YSO outburst. VERA and ALMA observations of S255 NIRS 3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A23, 18 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202039798	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 Stecklum B., Wolf V., Linz H., Caratti o Garatti A., Schmidl S., ..., Surcis G., Sugiyama K. (24番目), van der Walt J., Volvach A., Yonekura Y.	4. 巻 646
2. 論文標題 Infrared observations of the flaring maser source G358.93-0.03. SOFIA confirms an accretion burst from a massive young stellar object	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A161, 21 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202039645	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 Tanaka Kei E. I., Zhang Yichen, Hirota Tomoya, Sakai Nami, Motogi Kazuhito, Tomida Kengo, Tan Jonathan C., Rosero Viviana, Higuchi Aya E., Ohashi Satoshi, Liu Mengyao, Sugiyama Koichiro (12番目)	4. 巻 900
2. 論文標題 Salt, Hot Water, and Silicon Compounds Tracing Massive Twin Disks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L2-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abafdc	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 Hirota Tomoya, VERA collaboration, Nagayama Takumi, Honma Mareki, ..., Sugiyama Koichiro (48番目), Sunada Kazuyoshi, ..., Yamauchi Aya, Yuda Akito	4. 巻 72
2. 論文標題 The First VERA Astrometry Catalog	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.50-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa018	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 Kim Jung-ha, Kim Mi Kyoung, Hirota Tomoya, Kim Kee-Tae, Sugiyama Koichiro (5番目), Honma Mareki, Byun Do-young, Oh Chungsik, Motogi Kazuhito, Kang Jihyun, Kim Jeongsook, Liu Tie, Hu Bo, Burns Ross A., Chibueze James O., Matsumoto Naoko, Sunada Kazuyoshi	4. 巻 896
2. 論文標題 Multiple Outflows in the High-mass Cluster-forming Region G25.82-0.17	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.127, 10 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9100	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 Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G., MacLeod G. C., van den Heever S. P., Sugiyama K. (6番目)	4. 巻 494
2. 論文標題 Monitoring a methanol maser flare associated with the massive star-forming region G358.93-0.03	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L59 ~ L63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slaa036	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 Chen, Xi; Sobolev, Andrej M.; Breen, Shari L.; ...; Sugiyama, Koichiro (16番目); ... 他20名	4. 巻 Volume 890
2. 論文標題 13CH3OH Masers Associated With a Transient Phenomenon in a High-mass Young Stellar Object	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L22-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab72a5	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 Burns, Ross A.; Sugiyama, Koichiro (2番目); Hirota, Tomoya; ... 他20名	4. 巻 Volume 4
2. 論文標題 A heatwave of accretion energy traced by masers in the G358-MM1 high-mass protostar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 506-510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-019-0989-3	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 MacLeod, Gordon C.; Sugiyama, Koichiro (2番目); Hunter, Todd R.; ... 他18名	4. 巻 Volume 489
2. 論文標題 Detection of new methanol maser transitions associated with G358.93-0.03	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3981-3989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2417	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 Brogan, C. L.; Hunter, T. R.; Towner, A. P. M.; ...; Sugiyama, Koichiro (24番目); ...他24名	4. 巻 Volume 881
2. 論文標題 Sub-arcsecond (Sub)millimeter Imaging of the Massive Protocluster G358.93-0.03: Discovery of 14 New Methanol Maser Lines Associated with a Hot Core	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L39-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab2f8a	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 Sugiyama, Koichiro (1番目); Yonekura, Yoshinori; Motogi, Kazuhito; ... 他10名	4. 巻 Volume 1380
2. 論文標題 Long-term with short-intervals monitor of 6.7 GHz CH ₃ OH masers using Hitachi 32-m radio telescope to statistically research the periodic flux variability around high-mass protostars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 012057-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1380/1/012057	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 Bayandina O. S., Brogan C. L., Burns R. A., Chen X., Hunter T. R., Kurtz S. E., MacLeod G. C., Sobolev A. M., Sugiyama Koichiro (9番目), Val' t's I. E., Yonekura Y.	4. 巻 163
2. 論文標題 A Multitransition Methanol Maser Study of the Accretion Burst Source G358.93-0.03-MM1	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac42d2	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 Huda Ibnu Nurul, Hidayat Taufiq, Dermawan Budi, Lambert Sebastien, Liu Niu, Leon Stephane, Fujisawa Kenta, Yonekura Yoshinori, Sugiyama Koichiro (9番目)、...他12名	4. 巻 52
2. 論文標題 Measuring the impact of Indonesian antennas on global geodetic VLBI network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Astronomy	6. 最初と最後の頁 141 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10686-021-09773-1	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 Akahori, Takuya; Imai, Hiroshi; Eie, Sujin; Oyama, Tomoaki; Kimura, Kimihiro; Kurayama, Tomoharu; Kono, Yusuke; Kobayashi, Hideyuki; Sakai, Daisuke; Sakai, Nobuyuki; Teraya, Takaaki; Jike, Takaaki; Motogi, Kazuhito; Sugiyama, Koichiro (14番目); ...他12名	4. 巻 -
2. 論文標題 VLBI Future Planning Working Group Review Report	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 VLBI Future Planning Working Group Review Report, June 2021, 4th Edition	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 無
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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Koichiro Sugiyama (主著, 発表者)、Phrudth Jaroenjittichai、Boonrucksar Soonthornthum、...他21名
2. 発表標題 Key Science Topics with 40-m Thai National Radio Telescope (TNRT)
3. 学会等名 13th East Asian VLBI Workshop 2021 (EAVW21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kitiyanee Asanok (発表者)、Malcolm D. Gray、Tomoya Hirota、...、Koichiro Sugiyama (8番目)、Bannawit Pimpanuwat
2. 発表標題 Bipolar outflow tracing by 22 GHz H ₂ O masers toward W49 N star-forming region measured with KaVA
3. 学会等名 13th East Asian VLBI Workshop 2021 (EAVW21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taufiq Hidayat (発表者)、Koichiro Sugiyama (2番目)、Phrudth Jaroenjittichai、Zamri Zainal Abidin
2. 発表標題 Developing the future VLBI Network in South-East Asia
3. 学会等名 13th East Asian VLBI Workshop 2021 (EAVW21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉山孝一郎 (主著, 発表者)、米倉覚則、齋藤悠、他11名
2. 発表標題 大質量星形成領域G358.93-00.03における降着バーストの増光現象の検出
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sugiyama, Koichiro (主著, 発表者); Yonekura, Yoshinori; Saito, Yu; ...他6名
2. 発表標題 The accretion bursting flare in the high-mass SFR G 358.93-00.03 I: Single-dish monitoring
3. 学会等名 12th East Asian VLBI Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sugiyama, Koichiro
2. 発表標題 Research for Flux Variability with 40m TNRT
3. 学会等名 NARIT-NAOJ Collaboration Meeting 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sugiyama, Koichiro
2. 発表標題 Flux Variability of Masers in High-mass Star-forming Regions
3. 学会等名 NARIT-Maser Key Science Focus Group Meeting (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Sugiyama (主著, 発表者)、Phrudth Jaroenjittichai、Boonrucksar Soonthornthum、...他21名
2. 発表標題 Unique View through the Window of Radio Astronomy with Very Long Baseline Interferometry
3. 学会等名 Siam Physics Congress 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichiro Sugiyama (主著, 発表者)、Tomoya Hirota、Kee-Tae Kim、...他7名
2. 発表標題 EAVN collaboration with KaVA-LP via surveying the 6.7 GHz CH3OH masers
3. 学会等名 EAVN Star-formation workshop and VLBI tutorial (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichiro Sugiyama (主著, 発表者)、Phrudth Jaroenjittichai、Boonrucksar Soonthornthum、Saran Poshychinda、Busaba H. Kramer、Apichat Leckngam、他
2. 発表標題 タイ王国電波天文・測地プロジェクトRANGDと東(南)アジアVLBI
3. 学会等名 2021年度VLBI懇談会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichiro Sugiyama (主著, 発表者)、Phrudth Jaroenjittichai、他
2. 発表標題 Research & Development for Radio Astronomy / Geodesy in Thailand, and Cooperation to UEC International Internship Program
3. 学会等名 The 8th UEC Seminar in ASEAN, fiscal 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>日韓VLBIネットワークKaVAによる星形成大規模観測プログラム初成果: 高速ガス流を噴き出す巨大な赤ちゃん星たちの姿に迫る https://www.miz.nao.ac.jp/veraserver/highlight/20200729_kavasfr/index.html The First Results from the KaVA Large Program for Star-formation Studies: Unveiling massive baby stars ejecting complex high velocity outflows https://www.narit.or.th/index.php/en-astronomy-news/1211-unveiling-massive-baby-stars</p> <p>Earth Faster, Closer to Black Hole in New Map of Galaxy https://www.miz.nao.ac.jp/veraserver/highlight/20201125_catalog/index-e.html</p>

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
研究協力者	米倉 寛則 (YONEKURA Yoshinori)		
研究協力者	廣田 朋也 (HIROTA Tomoya)		
研究協力者	酒井 大裕 (SAKAI Daisuke)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	内山 瑞穂 (UCHIYAMA Mizuho)		
研究協力者	元木 業人 (MOTOGLI Kazuhito)		
研究協力者	百瀬 宗武 (MOMOSE Munetake)		

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			
タイ	タイ国立天文学研究所 (NARIT)	チェンマイ大学 (Chiang Mai University)	チュラロンコーン大学 (Chulalongkorn University)	
インドネシア	パンドン工科大学 (ITB)	ボスカ天文台 (Bosscha Observatory)		
ドイツ	マックスプランク電波天文学研究所 (MPIfR)	Thuringer Landessternwarte Tautenburg		
南アフリカ	Hartebeesthoek電波天文台 (HartRAO)			
米国	アメリカ国立電波天文台 (NRAO)			
オランダ	Joint Institute for VLBI ERIC (JIVE)			
スペイン	Yebes天文台, IGN			