

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01937

研究課題名 (和文) 山口干渉計を用いた誕生直後の大質量原始星候補の大規模探査

研究課題名 (英文) YI survey of extremely young proto-high-mass protostars

研究代表者

元木 業人 (Motogi, Kazuhito)

山口大学・大学院創成科学研究科 ・講師

研究者番号：10722803

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 6,600,000 円

研究成果の概要 (和文) : 本研究では高感度の山口干渉計を用いて極めて若い大質量原始星ジェットの探査を行った。初年度にデータ解析手法の整備を行い、2年目から4年目にかけて、70 μm の遠赤外線で暗い赤外線暗黒星雲 (IRDC) およそ600天体から観測条件の良い175天体に対して8 GHz帯の探査観測を行った。その結果90天体で有意な信号を検出した。このうち電波強度が小さい51天体は、より低温高密度な星形成に適したIRDCに付随する傾向が見られ、何らかの星形成活動に付随している可能性が高いと予想された。5年目以降はこれらが真に原始星であるか確かめるため、スペクトル測定/時変動モニター/VLBI観測などを進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大質量星はこの世のほぼ全ての重元素の起源であり、生まれてくる大質量星の数と質量分布を理解することは、過去の宇宙から現在に至る過程、さらには未来へ続く物質進化を解き明かすための基本的なピースであり、広い意味での太陽系、地球、そして人類の起源を探る学問である。本研究では形成中のもっとも若い大質量星を発見することで、形成に必要な初期環境を明らかにすることを目的として探査観測を行った。その結果、赤外線で暗く非常に冷たいガス雲の中から51天体の原始星候補天体を発見した。本プロジェクト開始時にはこのような天体は数天体しか見つかっておらず、統計サンプルを大幅に増やすことに成功したといえる。

研究成果の概要 (英文) : In this study, we conducted a survey of extremely young high-mass protostellar jets using a highly sensitive Yamaguchi interferometer. In the first year, we established data analysis methods, and from the second to the fourth year, we conducted detection surveys at 8 GHz for approximately 175 objects with favorable observing conditions out of about 600 infrared dark clouds (IRDCs) that is completely dark at 70 μm . As a result, 90 targets were detected. Among these, the 51 faint objects showed a tendency to be associated with colder and denser IRDCs suitable for star formation. From the fifth year, we perform follow-up observations to confirm whether these faint targets trace a young protostellar jet through spectral measurements, variability monitoring, VLBI observations.

研究分野：電波天文学

キーワード：大質量星形成 電波干渉計 原始星ジェット VLBI

1. 研究開始当初の背景

太陽質量の 8 倍を超える大質量星はこの宇宙に存在するほぼ全ての重元素の起源であり、ブラックホールや中性子星といった物理学上重要な天体の前駆体である。その形成過程を明らかにし、生まれてくる大質量星の数と質量分布を理解することは、これまでの宇宙における物質進化史を紐解き、これから先の宇宙の行く末を予想する上で極めて重要である。

しかしながら大質量星はその前駆体である大質量原始星段階から膨大なエネルギーを放出し、周囲環境を改変してしまうため、その初期進化過程を観測的に理解することが非常に難しい。また強い重力ゆえに星の進化速度が速いことから、若い大質量原始星は統計的に数が少なく、現在よく研究されている天体のほとんどは形成後期の進化が進んだ天体がほとんどである。

これに対して 2016 年に極めて冷たく若い赤外線暗黒星雲(IRDCs)中に、 $70\mu\text{m}$ の遠赤外線でも見えない非常に若い原始星が初めて発見された(Feng et al. 2016)。このような天体はジェット/アウトフローといった超音速の質量放出現象を介して電波でのみ観測が可能であり、もっとも若い大質量原始星の前駆体(Proto-High-mass-Protostar: PHP)の候補であると言える。そのような天体を探索し、統計的に研究することで大質量星の典型的な形成初期環境や、その多様性を理解することが可能であると期待される。

2. 研究の目的

本研究では世界でも希少な大学運用の電波干渉計である山口干渉計(Yamaguchi Interferometer: YI)を用いてこのような PHP 候補天体の大規模探索を行い、大質量星形成の初期環境を明らかにする上で有力な研究対象となる PHP 天体カタログの作成を目指して研究を行った。

3. 研究の方法

PHP が放出する高速のジェットは、強い衝撃波によって熱的プラズマを形成することが予想される。こうしたプラズマは電波連続波を放射し、一般に 50 GHz 以下の周波数帯では高周波ほど明るいという特徴がある。そこで本研究では PHP 候補天体が埋もれていると予想される $70\mu\text{m}$ で暗い IRDCs ($70\mu\text{m}$ -dark IRDCs) に対して、YI の観測可能周波数のうちより高周波である 8 GHz 帯で電波連続波の探索を行った。

ターゲットは「The initial conditions of stellar protocluster formation II. A catalogue」(Traficante et al. 2015)の IRDC クランプリストから選出した。同カタログには 649 天体の $70\mu\text{m}$ -dark IRDCs が収録されており、このうち天体近傍に混入する電波天体がいないと予想された 175 天体に対して探索を行った。1 天体あたりの積分時間は 30 分であり、検出感度は 1-2 mJy (7σ) である。

4. 研究成果

4.1: 電波源探索結果

初年度である 2019 年は少数の IRDCs に対する試験観測を行い、データ輸送用 RAID ストレージの整備や解析スクリプトの整備など観測から解析に至るデータフローの確立を行った。2020 年から 2023 年にかけて本探索を行い、90 天体で 7σ を超えるフリンジを検出した。これらの天体のフラックス密度分布を図 1 に示す。

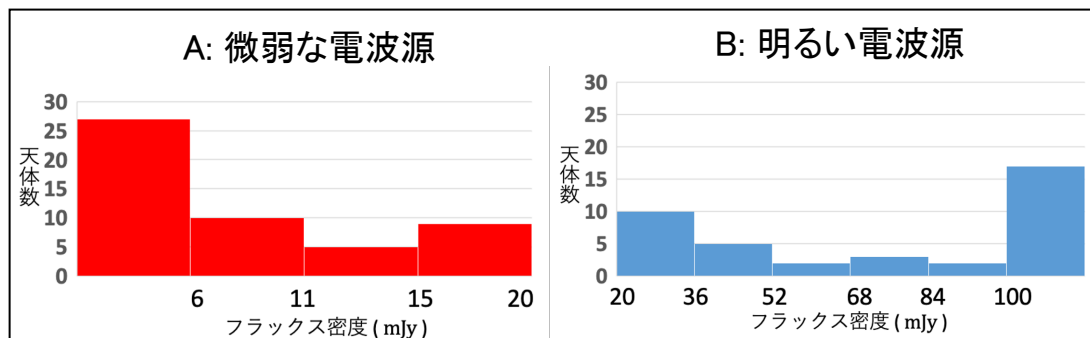


図 1: 検出天体のフラックス密度分布。20 mJy を基準としてそれ以下を原始星候補と定義した。

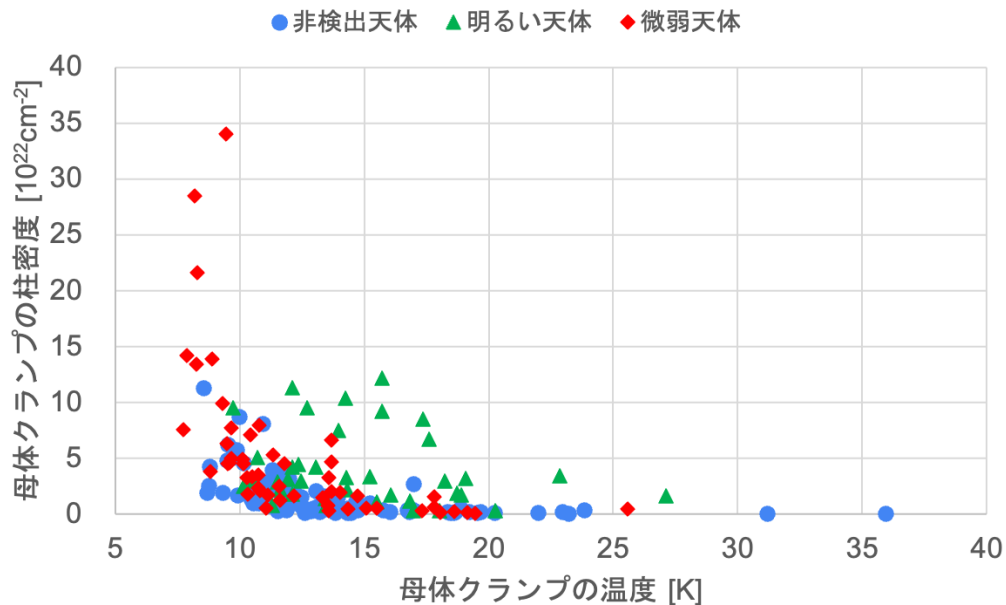


図 2: 非検出天体(青)、20 mJy 以上を基準にそれより明るい天体(緑)、それ以下の微弱天体(赤)に対する母体 IRDC クランプの温度と柱密度(面密度)の分布。ある柱密度で比べた場合、微弱天体はより低温側に分布している傾向が見られる。

大質量原始星に付随する電波ジェットは明るいものでも 10 mJy を超えることは稀である。そこで我々は 20 mJy を保守的な仮基準とし、それ以下の微弱電波源を原始星候補天体と定義した。図 2 に検出状況に対する母体 IRDC クランプの性質の比較を示す。図 2 より原始星候補である微弱電波源は、明るい天体に対してより低温で柱密度が大きいクランプに付随する傾向が見られた。これは即ちより星形成に適したクランプに付随していることを意味しており、検出された電波源が何らかの星形成活動に付随している可能性が示唆された。

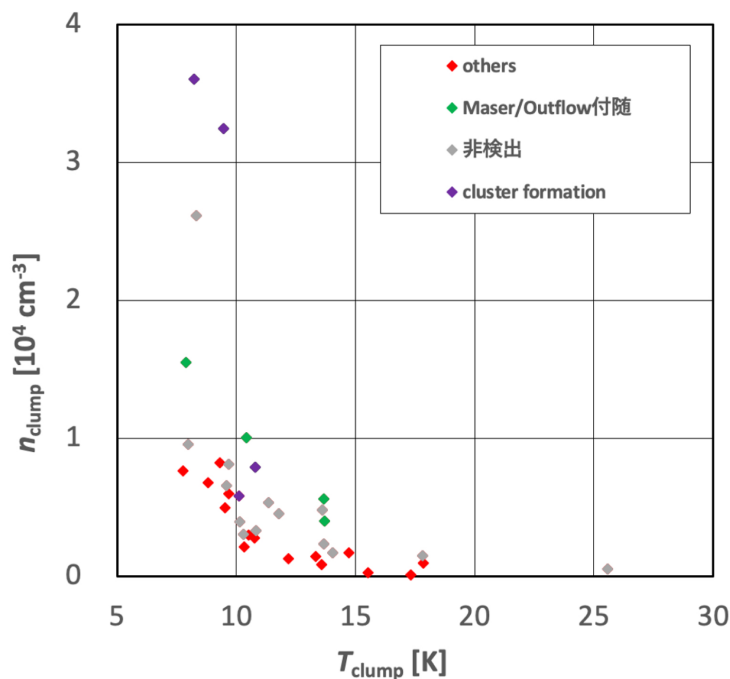


図 3: 外部データが存在した天体の母体クランプ環境。A: 星形成の兆候なし(灰)、B: 星形成の兆候あり(緑)、C: 星団形成の兆候あり(紫)、D: 外部データのない微弱電波源(赤)。

4.2 周辺星形成活動

次に我々は検出された微弱電波源に対して中間～遠赤外線データベース、および星形成活動の兆候である星間メーザーや分子輝線アウトフロー観測などの外部データを用いて星形成活動の有無を調査した。その結果 18 天体に対して外部観測データが存在することがわかった。これらの 18 天体は A: YI で検出された電波源のみが観測された天体(14 天体)、B: 同一クランプ内部に星形成の兆候が見られた天体(4 天体)、C: クランプ周辺で既に星団形成の兆候が確認された天体(4 天体)に分類された。こうした違いは同じ遠赤外線段で既に母体クランプの進化段階に違いがあることが示唆される。

図 3 にこれらの天体の母体クランプの温度と体積密度を示す。

図3よりクランプの内の星形活動および周辺での星団形成が確認できた天体はやはり低温高密度なクランプに付随している傾向が見られており、星形成しやすい環境にあることがわかる。また YI 電波源以外に星形成活動が見られていない天体でも星団形成を行っているクランプ並みに密度の高い天体が見られており、こうした天体は星団形成の最も最初期を調べる上で有望な天体であると予想される。

4.2 原始星の同定

検出された天体は必ずしも原始星ジェットとは限らず、背景のブラックホールが噴き出すジェットや、より成長した大質量星の紫外線によって形成される HII 領域などの電波放射が混入している可能性がある。そのため我々は以下の3つの方法で放射機構を調査し、原始星候補天体の絞り込みを進めている。

4-2-1. スペクトル測定

YI では探査に用いた 8 GHz に加えて 6 GHz の観測も可能である。そこで 8 GHz での検出天体に対して 6 GHz でのフォローアップ観測を行い、スペクトルの周波数依存性を調査した。星形成活動に伴う熱的放射であれば高周波ほど明るく、ブラックホールなどによる非熱的放射であれば低周波ほど明るくなるため、これにより背景ブラックホールの混入を選別することができる。これまでに 20 天体程度に対してスペクトル測定を実施しているが、6 GHz 帯での人工電波の干渉の影響が見られており、より正確な測定を目指して観測手法の改善に取り組んでいる。

4-2-2. VLBI による輝度温度測定

基線長が 110 m の YI は高感度な反面、空間分解能が低い。これに対して山口局と茨城局を組み合わせた 1 基線超長基線干渉計 (Very Long Baseline Interferometer: VLBI) は YI のおよそ 1000 倍の空間分解能を実現できるが、検出可能な天体はブラックホールのような極端に明るい非熱的電波源に限られる。このことを利用し、YI で検出された PHP 候補天体に対して VLBI 観測を行うことで、混入しているブラックホールの確実な選り分けが可能である。これを 2-1 のスペクトル測定と合わせることでより確実にブラックホールの混入を同定することができる。現在微弱天体の半数に対する VLBI 観測が完了しており、全て非検出となったことから、懸念されていた背景ブラックホールの混入が少ないことが示唆されている。

4-2-3. 時間変動モニター

原始星ジェットと HII 領域は同様に熱的なプラズマであるため、6-8 GHz でのスペクトルは似た傾向を示す、一方でジェットは活動性が高く、一般に年スケールで時間変動が確認されるのに対して、HII 領域は変動タイムスケールが短くても数十年から数百年と長い。従って時系列モニター観測を行うことでジェットと HI 領域の切り分けを行うことができる。現在およそ 10 天体に対する強度モニターを行っており、既に一部の天体では 15-30% 程度の強度変動が見られている。

4.3 母体 IRDC の環境調査

外部データベースによる環境調査で示唆された進化段階の違いを検証するため、茨城大学が運用する高萩 32 m 望遠鏡を用いてアンモニア輝線を観測し、ビリアル解析とアンモニア相対存在比の測定を行った。11 天体に対する観測の結果、環境調査において星形成活動性が見られたクランプは重力的に不安定であり、かつアンモニアの存在量が少なく、化学的に若いことが示唆された。この結果は外部データベースで星形成活動の見られたクランプは、そうでないクランプに比べて短時間で星形成を行ったことを意味しており、IRDC の進化経路に二峰性があることが示唆された。

4.4 今後の展望

今後は上記フォローアップを完了するとともに天体カタログを発表する予定である。また YI のさらなる性能向上を行い、より暗い原始星ジェットの探査を進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 北口慶太, 元木業人, 藤澤健太, 新沼浩太郎, 藤原陵太郎
2. 発表標題 Yamaguchi interferometer survey of protostellar outflows embedded in 70- μm dark infrared dark cloud
3. 学会等名 IAU symposium 380, Cosmic Masers: Proper Motion toward the Next-Generation Large Projects (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 元木業人
2. 発表標題 大質量星形成の今後-メタノールメーザーでやれること/やれないこと-
3. 学会等名 大質量星形成過程における強度変動研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿部泰成, 元木業人, 米倉覚則, 藤澤健太
2. 発表標題 赤外線暗黒星雲内に埋もれた原始星候補天体に対するアンモニア反転遷移線と水メーザーを用いた星周環境の推定
3. 学会等名 2022年度VLBI懇談会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北口慶太, 元木業人, 藤原陵太郎, 藤澤健太
2. 発表標題 山口干渉計によって検出された赤外線暗黒星雲に埋もれた原始星アウトフロー候補天体の周囲環境の調査
3. 学会等名 2022年度VLBI懇談会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原陵太郎, 元木業人, 北口慶太, 藤澤健太
2. 発表標題 山口干渉計による赤外線暗黒星雲に埋もれた原始星アウトフロー天体の探査観測
3. 学会等名 2022年度VLBI懇談会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北口慶太, 元木業人, 藤沢健太, 新沼浩太郎, 藤原陵太郎
2. 発表標題 山口干渉計による赤外線暗黒星雲に埋もれた原始星アウトフロー天体の探査観測
3. 学会等名 シン九州星形成ゼミ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北口慶太, 元木業人, 新沼浩太郎, 藤澤健太
2. 発表標題 山口干渉計による赤外線暗黒星雲に埋もれた原始星アウトフロー天体の探査観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北口慶太, 元木業人, 新沼浩太郎, 藤澤健太
2. 発表標題 山口干渉計による赤外線暗黒星雲に埋もれた原始星アウトフロー天体の探査観測
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 元木業人
2. 発表標題 大質量星形成~次の20年で知りたいこと~
3. 学会等名 VLBI懇談会シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhito Motogi, Tatsuya Ogura, Takahiro Aoki, Kotaro Niinuma, Kenta Fujisawa (Yamaguchi Univ.), Yoshinori Yonekura (Ibaraki Univ.), Kazuhiro Takefuji, Mamoru Sekido (NICT)
2. 発表標題 The survey on compact radio sources by highly sensitive JVN subarray
3. 学会等名 East Asia VLBI Workshop 2019（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
研究協力者	藤澤 健太 (Fujisawa Kenta)	山口大学・時間学研究所・教授	
研究協力者	新沼 浩太郎 (Niinuma Kotaro)	山口大学・創成科学研究科・教授	
研究協力者	米倉 覚則 (Yonekura Yosinori)	茨城大学・理工学研究科・教授	

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	青木 貴弘 (Aoki Takahiro)	山口大学・時間学研究所・助教(特命)	2019年度をもって退職

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