

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03925

研究課題名（和文）超高光度超新星母銀河における隠された星形成活動および分子ガスの詳細研究

研究課題名（英文）Detailed Study of Obscured Star Formation Activity and Molecular Gas in Superluminous Supernova Host Galaxies

研究代表者

廿日出 文洋（Hatsukade, Bunyo）

国立天文台・アルマプロジェクト・准教授

研究者番号：70719484

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）：近年の大規模探査により、通常の超新星の10～100倍も明るい超高光度超新星が発見されているが、それらがどのような環境で発生するのかは未解明である。本研究では、塵に隠された星形成を系統的に探査するため、VLAを用いて母銀河の観測を行い、星形成活動、超高光度超新星の電波放射の年スケールでの時間変動、および理論モデルに制限を与えた。また、ALMAを用いてI型超高輝度超新星母銀河の観測を行い、世界で初めて分子ガスの検出に成功した。さらに、突発天体発生環境の統合的な理解のため、ガンマ線バーストや高速電波バーストの母銀河の分子ガス観測も行い、世界最大のサンプルを構築し、他の星形成環境との比較を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超高光度超新星の起源に迫るため、塵による吸収の影響を受けない電波での観測を行った。これにより、塵に隠された星形成活動の有無を含めて正確な星形成活動を理解することができるようになった。大規模サンプルにおいて電波観測を行ったのは本研究が初めてであり、超高光度超新星研究の分野に重要な知見を与えた。また、星形成の材料である分子ガスに着目した点も独創的であり、I型の超高光度超新星母銀河において世界で初めて分子ガスを検出するなど、新たな展開をもたらした。

研究成果の概要（英文）：Recent large-scale surveys have discovered superluminous supernovae that are 10 to 100 times brighter than normal supernovae, but the environment in which these supernovae originate is still unknown. In order to systematically probe star formation hidden in dust, we conducted VLA radio observations of host galaxies. We successfully constrain their star formation activity, time variability of radio emission from superluminous supernovae, and theoretical models. We also observed the host galaxy of Type-I superluminous using ALMA and succeeded in detecting molecular gas for the first time in the world. In addition, for an integrated understanding of the environment of astronomical transients, molecular gas observations of the host galaxies of gamma-ray bursts and fast radio bursts were also carried out to construct the largest sample in the world, allowing comparison with other star-forming environments.

研究分野：電波天文学

キーワード：超高光度超新星 分子ガス 星形成 電波観測 ALMA VLA

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙に存在する星が、どのように誕生し、どのように終焉を迎えるのか。星の「進化」の過程を明らかにすることは、天文学における最も大きな課題の一つである。太陽のおよそ 10 倍以上の質量を持つ大質量星は、寿命を迎える際に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こす。2000 年代後半から、超新星の大規模な探査が行われるようになった結果、それまで観測されていた超新星と比較して 10 倍から 100 倍もの明るさを持つ超新星が発見された。このような超新星は「超高光度超新星」と呼ばれ、これまで知られていなかった新種の天体として大きな注目を集めている。超高光度超新星は非常に明るく、初期宇宙（およそ 120 億年前）においても観測例が報告されており、遠方宇宙の環境を調べるための新たな指標としても着目されている。このような特徴から、超高光度超新星を理解することは大質量星の終焉を理解するに留まらず、宇宙初期から現在に至るまでの星形成活動の理解にも密接に関連する。しかしながら、比較的近年発見された種族であるため、超高光度超新星の研究はまだ進んでおらず、どのような環境で発生するのか、未だ解明されていない。この状況を打破するためには、超高光度超新星が発生した銀河 (= 母銀河) を詳細に研究する必要がある。

これまでの研究から、超高光度超新星母銀河の多くは星質量が比較的小さく、活発な星形成活動を行っていることが報告されている。しかしながら、これまでの研究で用いられてきた観測波長である可視光は、宇宙空間に漂う塵（ダスト）によって吸収を大きく受けるといった問題がある。そのため、可視光観測では塵に「隠された」星形成活動を捉えることが出来ない。特に活発に星形成を行っている銀河では、塵が多量に存在している。塵による減光の影響は大きく、真の星形成活動を 1 桁以上低く見積もっている可能性もある。超高光度超新星母銀河における活動を正確に測定するためには、塵による吸収を受けない新たな手法が必要となる。さらに、超高光度超新星がどのような環境で発生するかを明らかにするには、星の材料である分子ガスの性質を理解することが不可欠である。超高光度超新星をとるような大質量星は、星形成が活発な領域に存在していて、その周囲には星の材料である分子ガスが豊富に存在していると予想される。しかし、これまで超高光度超新星の母銀河において分子ガスの観測が行われた例はなく、早急に取り組むべき課題である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、超高光度超新星が発生する環境を正確に理解することである。既存の可視光観測では、塵によって大きく吸収を受けるため、隠された星形成活動を捉えることが困難であった。「隠された」星形成活動が存在する場合、超高光度超新星の発生環境を大きく見誤っている可能性がある。電波観測では塵の影響を受けずに母銀河における星形成活動を求めることができるため、星形成活動を正確に測定することが可能となる。また本研究では、星の材料である分子ガスにも着目した。分子ガス観測は、星形成活動を理解するために不可欠であるが、超高光度超新星の母銀河においては未だ例がない。そのため、電波による観測は、超高光度超新星母銀河の研究分野に新たな展開をもたらす。

## 3. 研究の方法

超高光度超新星の発生環境を理解するために、以下の 3 つの観測研究を遂行した。

- 大規模サンプルを用いた、塵に隠された星形成活動の系統的探査  
VLA 電波干渉を用いて、超高光度超新星母銀河の電波観測を行った。観測サンプルの選定では、母銀河の星質量および星形成率のパラメータスペースを包括的にカバーするようにした。観測で得られたデータから星形成活動を求め、塵に隠された星形成活動の有無を検証した。電波観測によって得られた星形成活動と、過去の可視光観測で得られた値とを比較することで、超高光度超新星の母銀河がどの程度塵によって減光を受けているかを見積もった。母銀河の星質量と星形成率との関係を求め、他の銀河種族と比較することで、超高光度超新星の発生環境の性質を探った。
- 超高光度超新星発生環境における分子ガスの高空間分解能電波観測  
超高光度超新星の発生場所における星形成活動を理解するため、ALMA 望遠鏡を用いて、母銀河を空間的に分解する観測を実施した。本研究では、分子ガストレーサーとして知られる一酸化炭素分子輝線を観測した。母銀河をより詳細に研究するため、最も近い超高光度超新星の母銀河の一つである NGC 3191 を観測した。

- ガンマ線バーストおよび高速電波バーストの母銀河における分子ガス観測  
突発天体の発生環境の統合的な理解として、超高光度超新星と同様に大質量星の終末に起因すると考えられているガンマ線バーストや、電波帯での突発現象として知られる高速電波バーストの母銀河における分子ガス観測を行った。

#### 4. 研究成果

本研究により得られた成果は以下のとおりである。

- 既存の観測では検出できなかった塵に隠された星形成の有無を系統的に探査するため、VLA 電波干渉計を用いて母銀河の観測を行った。本研究では新たに 20 の母銀河を観測し、過去に取得されたデータと合わせることで、世界最大のサンプルを構築した。母銀河における星形成活動、超高光度超新星の電波放射の年スケールでの時間変動、および理論モデルに制限を与えた。  
観測された天体のうち 1 天体から時間変動を検出した。超高光度超新星のシステムにおいて、発生から数年後の電波放射の時間変動が検出されたのは世界で初めてである。時間変動の要因としては、母銀河における活動銀河核の変動、あるいは超新星発生時に誕生した若いマグネター（強磁場を持つ中性子星）からのエネルギー供給が考えられることが分かった。
- 超高光度超新星が発生した場所において、星の材料である分子ガスの性質を探るため、ALMA 望遠鏡を用いて超高光度超新星 2017egm 母銀河 (NGC 3191) の観測を行った。その結果、I 型超高光度超新星の母銀河において世界で初めて分子ガスの検出に成功した。母銀河全体の分子ガス質量は、他の一般的な星形成銀河と同様のスケールに則ることが分かった。空間的に分解した観測からは、超新星が発生した環境は、通常の星形成環境と分子ガスの性質が共通することが分かった。分子ガス検出の成功により、星形成の材料から超高光度超新星に迫る研究手法を示した。
- 超高光度超新星と同様に大質量星の終末に起因すると考えられているガンマ線バーストの発生環境を探るため、ALMA 望遠鏡を用いて 14 の母銀河における分子ガスの観測を行った。その結果、新たに 8 つの母銀河から分子ガスの検出に成功し、分子ガスが検出されたガンマ線バースト母銀河のサンプルを 2 倍以上に拡張した。さらに過去の CO 観測がある母銀河を文献から集めることにより、世界最大のサンプルを構築した。他の星形成銀河との比較から、ガンマ線バーストを作り出す環境は他の星形成銀河における星形成環境と共通することを示唆する結果が得られた。  
また、突発天体の発生環境の統合的な理解として、電波帯での突発現象として知られる高速電波バーストの母銀河における分子ガス観測を、ALMA 望遠鏡を用いて行った。過去に取得されたデータと合わせて 6 天体のサンプルを構築し、分子ガスの特性の研究を行った。その結果、高速電波バースト母銀河は多様な分子ガスの性質を示すこと、超高光度超新星母銀河や近傍の星形成銀河とは異なる性質を示すことを明らかにした。

これらの研究結果は、5 編の査読付き主著論文として、当該分野の主要欧文論文誌に発表した。また、国内外の学会や会議において、報告を行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hatsukade Bunyo, Hashimoto Tetsuya, Niino Yuu, Hsu Tzu-Yin	4. 巻 940
2. 論文標題 Diverse Properties of Molecular Gas in the Host Galaxies of Fast Radio Bursts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L34 ~ L34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ac9f39	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 Hsu Tzu-Yin, Hashimoto Tetsuya, Hatsukade Bunyo, Goto Tomotsugu, Wang Po-Ya, Ling Chih-Teng, Ho Simon C-C, Uno Yuri	4. 巻 519
2. 論文標題 The molecular gas kinematics in the host galaxy of non-repeating FRB 180924B	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2030 ~ 2034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stac3655	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 Hatsukade B., Tominaga N., Morokuma T., Morokuma-Matsui K., Tamura Y., Niinuma K., Hayashi M., Matsuda Y., Motogi K.	4. 巻 911
2. 論文標題 Variability of Late-time Radio Emission in the Superluminous Supernova PTF10hgi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/abef03	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 Hatsukade Bunyo, Tominaga Nozomu, Morokuma Tomoki, Morokuma-Matsui Kana, Matsuda Yuichi, Tamura Yoichi, Niinuma Kotaro, Motogi Kazuhiro	4. 巻 922
2. 論文標題 A VLA Survey of Late-time Radio Emission from Superluminous Supernovae and the Host Galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 17 ~ 17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac20d5	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 Hatsukade Bunyo, Morokuma-Matsui Kana, Hayashi Masao, Tominaga Nozomu, Tamura Yoichi, Niinuma Kotaro, Motogi Kazuhiro, Morokuma Tomoki, Matsuda Yuichi	4. 巻 72
2. 論文標題 Spatially resolved molecular gas properties of host galaxy of Type I superluminous supernova SN2017egm	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 L6-1, L6-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa052	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 Hatsukade Bunyo, Ohta Kouji, Hashimoto Tetsuya, Kohno Kotaro, Nakanishi Kouichiro, Niino Yuu, Tamura Yoichi	4. 巻 892
2. 論文標題 ALMA CO Observations of the Host Galaxies of Long-duration Gamma-Ray Bursts. I. Molecular Gas Scaling Relations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 42 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7992	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Bunyo Hatsukade
2. 発表標題 Molecular gas properties in the host galaxies of long-duration gamma-ray bursts, superluminous supernovae, and fast radio bursts.
3. 学会等名 A half century of millimeter and submillimeter astronomy: Impact on astronomy/astrophysics and the future (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hatsukade Bunyo, Hashimoto Tetsuya, Niino Yuu, Hsu Tzu-Yin
2. 発表標題 Diverse Properties of Molecular Gas in the Host Galaxies of Fast Radio Bursts
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hatsukade Bunyo、Hashimoto Tetsuya、Niino Yuu、Hsu Tzu-Yin
2. 発表標題 Diverse Properties of Molecular Gas in the Host Galaxies of Fast Radio Bursts
3. 学会等名 East-Asian ALMA Science Workshop 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hatsukade Bunyo、Hashimoto Tetsuya、Niino Yuu、Hsu Tzu-Yin
2. 発表標題 分子ガス観測で明らかになった高速電波パースト母銀河の多様性
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 廿日出文洋、富永望、林将央、松田有一、諸隈智貴、諸隈佳菜、田村陽一、新沼浩太郎、元木業人
2. 発表標題 超高輝度超新星PTF10hgiにおける後期電波放射の時間変動
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廿日出文洋、富永望、松田有一、諸隈智貴、諸隈佳菜、田村陽一、新沼浩太郎、元木業人
2. 発表標題 VLAで探る超高光度超新星からの後期電波放射および母銀河の星形成活動
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廿日出文洋
2. 発表標題 Star Formation in Distant Star forming Galaxies
3. 学会等名 銀河星形成研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廿日出文洋, 富永望, 松田有一, 諸隈智貴, 諸隈佳菜, 田村陽一, 新沼浩太郎, 元木業人
2. 発表標題 VLAで探る超高光度超新星からの後期電波放射および母銀河の星形成活動
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2021年度
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Bunyo Hatsukade
2. 発表標題 Gamma-ray Bursts, Progenitors and Host Galaxies
3. 学会等名 Probing the extragalactic universe with High and Very High Energy sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hatsukade B.
2. 発表標題 Constraining the nature of superluminous supernovae and their host galaxies
3. 学会等名 next generation VLA Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hatsukade B.
2. 発表標題 ALMA Observations of Molecular Gas in the Host Galaxies of Long-duration GRBs
3. 学会等名 Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hatsukade B.
2. 発表標題 ALMA Observations of Molecular Gas in the Host Galaxies of Long-duration GRBs
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 廿日出文洋, 河野孝太郎, 新納悠, 橋本哲也, 中西康一郎, 太田耕司, 田村陽一
2. 発表標題 ALMA CO Observations of the Host Galaxies of Long-duration Gamma-ray Bursts. I: Molecular Gas Scaling Relations
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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