

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14757

研究課題名（和文）大マゼラン雲の近赤外輝線サーベイで探るスーパーシェルによる誘発的星形成

研究課題名（英文）A study of star formation triggered by supergiant shells in the Large Magellanic Cloud

研究代表者

國生 拓摩 (Takuma, Kokusho)

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：60803442

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）：大マゼラン雲の前主系列星4825天体について星とダストの光度を求め、スーパーシェルとの関係を調べた。その結果、シェルに付随するガスに沿って若い前主系列星が分布しており、スーパーシェルによる誘発的星形成の兆候を捉えた。一方、スーパーシェルに付随する前主系列星の星質量は他の領域に比べて系統的に小さく、スーパーシェルによる誘発的星形成は、大質量星の形成には有効でないという示唆を得た。上記の解析と並行して、スーパーシェルに付随する星形成ガスの物理量をより詳しく調べるため、南アフリカ望遠鏡IRSFに搭載する近赤外線分光器の開発を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大マゼラン雲は近傍の星形成銀河で、金属量が低く初期宇宙の銀河と似ているため、初期宇宙の活発な星形成活動を理解するうえで重要なターゲットである。本研究では、超新星爆発や星風の複合体であるスーパーシェルと生まれたばかりの前主系列星の関係を調べ、スーパーシェルによる誘発的星形成は、大質量星の形成には有効でないという示唆を得た。また、スーパーシェルに付随する星形成ガスの特性を詳しく調べるため、南アフリカ望遠鏡IRSFに搭載する近赤外線分光器の開発を進めた。この観測装置は、本研究に限らず他の様々な観測研究でも有用である。

研究成果の概要（英文）：We conducted a systematic study of the evolutionary stages and stellar masses of 4825 young stellar objects (YSOs) in the Large Magellanic Cloud (LMC). We find that young YSOs tend to associate with supergiant shells in the LMC, suggesting that supergiant shells may have triggered recent star formation. We also find that YSOs associated with supergiant shells systematically possess lower stellar masses, suggesting that supergiant shells may be ineffective for massive star formation. In addition, we have developed a new near-infrared spectrometer for the IRSF telescope to study physical properties of star-forming gases associated with supergiant shells in the LMC.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：大マゼラン雲 誘発的星形成 スーパーシェル 近赤外線分光器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近傍銀河の大マゼラン雲には直径 1 kpc にも及ぶスーパーシェルが点在し、星間物質と銀河スケールで相互作用している。スーパーシェルは複数の超新星爆発や星風により作られ、周りの星間物質を圧縮することで、新たな星の形成を銀河スケールで誘発していることが近年の研究で示唆されている。しかし、スーパーシェルは大規模な構造であるため、周りの星間物質や星形成との関係を系統的に調べることは容易ではない。また、超新星爆発の衝撃波は星間物質を加熱・破壊する可能性もあるため、シェルの物理状態を精査することが重要である。本研究では、生まれたばかりの前主系列星の進化段階や星質量を網羅的に調べ、HI ガスの観測で見つかったスーパーシェルとの関係性を調べる。この結果から星形成を伴うスーパーシェルを同定し、衝撃波トレーサ [FeII]・H<sub>2</sub>輝線のフォローアップ観測を行う。この観測から星形成ガスの物理状態を調べ、スーパーシェルによる誘発的星形成のメカニズムを探る。

### 2. 研究の目的

(1) Spitzer と Herschel 衛星による大マゼラン雲の観測で得られた前主系列星カタログと、地上望遠鏡の観測で得られた可視光・近赤外線点源カタログを合わせて、各天体の spectral energy distribution (SED) を作成する。この SED のモデルフィッティングにより、ダストに覆われた、生まれたばかりの前主系列星の空間分布や進化段階、星質量を網羅的に求めて、スーパーシェルと最近の星形成活動の関係性を明らかにする。

(2) 南アフリカ望遠鏡 IRSF に搭載する近赤外線分光器を開発して、上記で同定された星形成を伴うスーパーシェルの広域分光マッピング観測を行う。星形成シェルにおける星間物質の電子密度・温度の空間分布を求め、スーパーシェルにより星形成が誘発されるメカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 前主系列星の SED に星とダストの放射から成るモデル関数をフィッティングして、星とダストの光度や質量を求める。異なる基準で大マゼラン雲の前主系列星を同定したカタログが 3 つあるため、これらを統合して、全天体の SED フィッティングを系統的に行う。また、前主系列星とスーパーシェルの空間的な対応を調べて、スーパーシェルに付随する前主系列星を同定する。これらの前主系列星について、シェル中心からの距離と進化段階の対応から、スーパーシェルによる誘発的星形成の時間発展を探る。

(2) スーパーシェルの分光フォローアップ観測のため、IRSF 近赤外線分光器を開発する。同装置を IRSF 望遠鏡へ搭載する前に、国内望遠鏡にてテスト観測を行い、期待される性能を満たすことを確認する。その後、IRSF 望遠鏡にて衝撃波トレーサ [FeII]・H<sub>2</sub>輝線や水素再結合線を観測し、複数輝線の強度比から電子温度や密度を得て、誘発的星形成が起きる物理条件を調べる。

### 4. 研究成果

(1) 先行研究で得られた大マゼラン雲の前主系列星カタログ 3 つを統合して、4825 天体を含むカタログを構築した。これらのサンプル天体について、可視光の点源カタログとのマッチングや、赤外線マップを測光した結果をもとに、全サンプル天体の可視光から遠赤外線にわたる SED を得た。この SED を星およびダスト 3 温度成分を組み合わせた放射モデルでフィッティングして、星光度とダスト光度を求め、星/ダスト光度比を進化段階の指標とした。ここで、進化が進むにつれ星の母体ガス・ダストが晴れ上がっていくため、星/ダスト光度比が大きい天体ほど進化が進んでいるとみなせる。

解析の結果、図 1 に示すように前主系列星の空間分布や進化段階が得られた。スーパーシェルを含む HI シェル上に分布する天体ほど若く、冷たい星間物質に付随した星形成の様子が見られた。また、30 Dor など活発な星形成領域で星光度が大きく、同領域の高い星形成率と矛盾ないことが分かった。

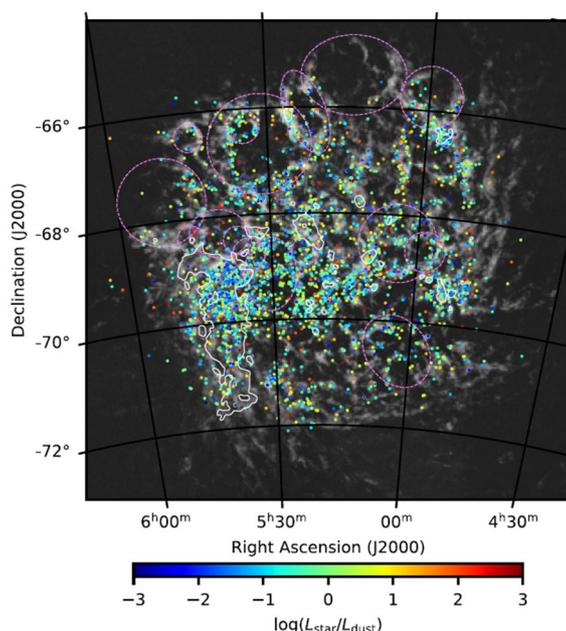


図 1. 大マゼラン雲の HI マップと前主系列星の空間分布。点の色は星/ダスト光度比、紫の円はスーパーシェルの位置を示す。

(2)スーパーシェル上に位置する前主系列星について、その進化段階を詳しく調べた。スーパーシェルが星形成を誘発した場合、衝撃波の伝播に伴い、シェル中心から外側にかけて順に星形成が起きるため、前主系列星の進化段階はシェルの外側ほど若いことが期待される。大マゼラン雲のスーパーシェル 16 天体についてこの傾向を調べたところ、一部のスーパーシェルで上記の傾向は見たものの、半数以上のスーパーシェルは有意にこの傾向を示さないことが分かった。この解釈として、以下の可能性を考えた。図 2 は、スーパーシェル SGS5 における前主系列星の進化段階を、8 分角の領域ごとに平均化したマップである。この図から、シェルの内側に大質量星が存在していることが分かる。このようなシェル内側の大質量星が最近の星形成を誘発して、このとき形成された若い前主系列星が上記の解析に混入し、期待される傾向を隠している可能性がある。

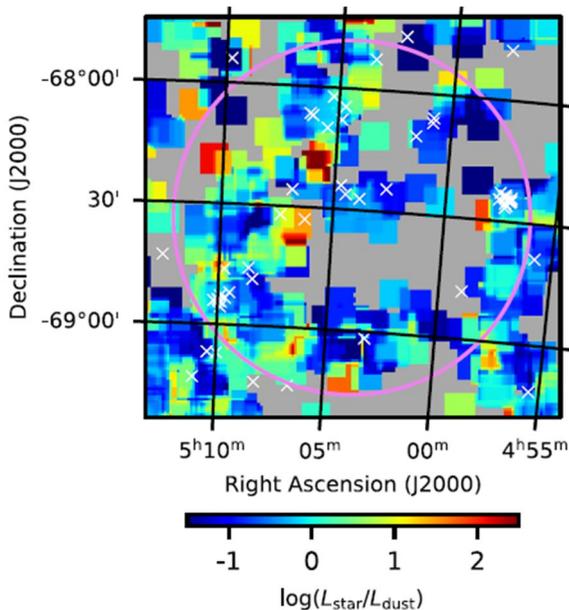


図 2 . スーパーシェル SGS5 における前主系列星の進化段階の分布。円はシェルの外縁、クロスマークは大質量星の位置を表す。

(3)スーパーシェル内に位置する前主系列星の星質量関数を調べたところ、スーパーシェル以外の領域に比べて、大質量星が有意に少ないことが分かった。大質量星を形成するには多くの星間ガスを圧縮する必要があるが、スーパーシェルによるガス圧縮は非効率であることが示唆される。2 つ以上のスーパーシェルの境界で、より効率的なガス圧縮が起きる可能性もあるが、当該領域に分布する前主系列星も星質量は系統的に低く、スーパーシェル単体の場合と同じように、大質量星の形成には有効でないと考えられる。上記(1)から(3)の成果は査読付き論文として発表した。

(4)スーパーシェルに付随する星形成ガスの特徴を調べるため、IRSF 近赤外線分光器の開発を進めた。研究開始当初、同装置は鹿児島大学 1m 望遠鏡にてテスト観測を行っており、この観測を進めて期待される性能を評価した。具体的には、2MASS カタログ星の観測や Ar ランプの測定から、期待される検出限界や波長分解能を満たしていることを確認した(図 3)。

テスト観測の後、同装置を名古屋大学へ持ち帰り、検出器をより高感度なものに置き換える準備を進めた。当初予定していた検出器を用いるには温度 30 K 以下の冷却が必要だが、本装置の冷凍機でこの要求温度を達成することが難しいことが分かった。このため、感度波長帯は制限されるが、運用温度が 130 K と高い別の検出器を用いる形で、装置の光学設計を変更した。観測波長は 1.0-1.6  $\mu\text{m}$  に制限されるものの、検出器フォーマットは大きくなるため、分散素子をプリズムから回折格子に置き換えて、波長分解能( / )を 200 から 700 程度まで向上させた。コロナ禍の影響もあり、IRSF 望遠鏡での観測には至っていないが、2024 年度以降の観測に向けて本装置の開発や観測所の整備を進めた。

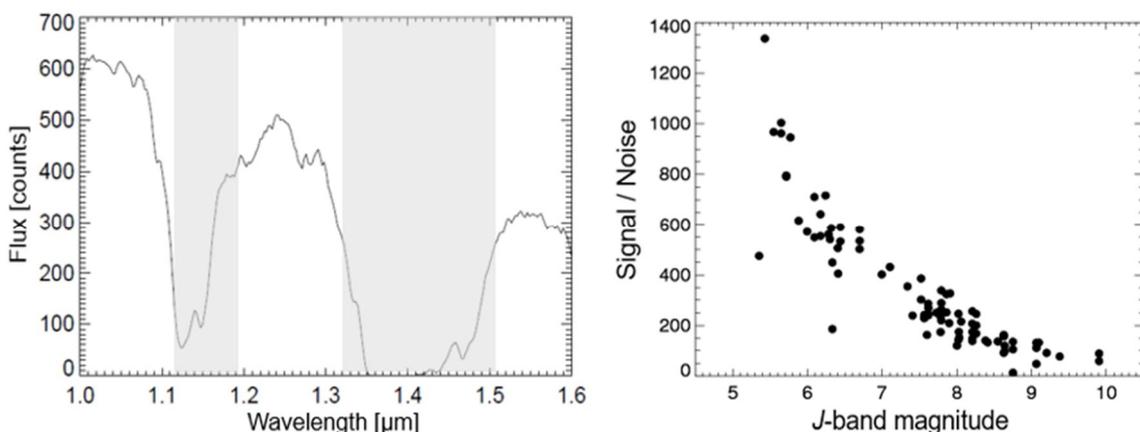


図 3 . (左) IRSF 近赤外線分光器のテスト観測で得られた星のスペクトル。灰色の領域は地球大気の吸収を受けている波長帯を表す。(右)同装置で複数の 2MASS カタログ星を観測して、J バンド帯の S/N 比を求めた結果。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Furuta Takuya, Kaneda Hidehiro, Kokusho Takuma, Nakajima Yasushi, Fukui Yasuo, Tsuge Kisetsu	4. 巻 74
2. 論文標題 Three-dimensional geometry and dust/gas ratios in massive star-forming regions over the entire LMC as revealed by the IRSF/SIRIUS survey	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 639 ~ 655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac025	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 Furuta Takuya, Kaneda Hidehiro, Kokusho Takuma, Nakajima Yasushi, Fukui Yasuo, Tsuge Kisetsu	4. 巻 73
2. 論文標題 Three-dimensional dust geometry of the LMC HI ridge region as revealed by the IRSF/SIRIUS survey	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 864 ~ 879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab052	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 Furuta Takuya, Kaneda Hidehiro, Kokusho Takuma, Ishihara Daisuke, Nakajima Yasushi, Fukui Yasuo, Tsuge Kisetsu	4. 巻 71
2. 論文標題 Extinction and dust/gas ratio in the HI ridge region of the LMC based on the IRSF/SIRIUS near-infrared survey	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 95-1, 95-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz078	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 Kokusho Takuma, Torii Hiroki, Kaneda Hidehiro, Fukui Yasuo, Tachihara Kengo	4. 巻 953
2. 論文標題 Properties of Star Formation of the Large Magellanic Cloud As Probed by Young Stellar Objects	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 104 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace10e	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 國生拓摩、鳥居洋希、金田英宏、福井康雄、立原研悟
2. 発表標題 YSOの系統的観測で探る大マゼラン雲の星形成活動
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Kokusho, Takuya Furuta, Genki Tomei, Yuki Katsurada, Yuki Fujii, Hidehiro Kaneda, Takahiro Nagayama
2. 発表標題 Current status of the near-infrared spectrometer for the IRSF telescope
3. 学会等名 The workshop on infrared astronomy with the IRSF (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田拓也
2. 発表標題 IRSF/SIRIUS近赤外線サーベイ観測によるLMC大質量星形成領域のダストとガスの3次元構造の研究
3. 学会等名 2021年度IRSF勉強会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤崎駿介
2. 発表標題 近赤外線分光観測によるミラ型変光星の変光フェイズと酸化バナジウムの吸収線の関係
3. 学会等名 2021年度IRSF勉強会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤崎駿介
2. 発表標題 近赤外線分光観測によるミラ型変光星の変光フェイズと酸化バナジウムの吸収線の関係
3. 学会等名 2021年度連星系・変光星研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國生拓摩
2. 発表標題 IRSF望遠鏡に搭載する近赤外線分光器の開発
3. 学会等名 せいめいユーズーズミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國生拓摩
2. 発表標題 IRSF望遠鏡に搭載する近赤外線分光器の開発
3. 学会等名 2020年度 IRSF勉強会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國生拓摩、古田拓也、石鉢卓也、森鼻久美子、金田英宏、永山貴宏、石原大助
2. 発表標題 IRSF望遠鏡に搭載する近赤外線分光器の開発
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 國生拓摩
2. 発表標題 IRSF望遠鏡に搭載する近赤外線分光器の開発
3. 学会等名 光赤外天文学大学間連携WS
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國生拓摩
2. 発表標題 赤外線全天/広域サーベイで探る大質量星形成と星間・惑星間物質
3. 学会等名 プラネタリウムで俯瞰する多波長全天/広域サーベイ（招待講演）
4. 発表年 2023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			
南アフリカ	南アフリカ天文台			