

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14758

研究課題名(和文) 近傍系外銀河の超新星残骸に付随する星間雲

研究課題名(英文) Interstellar gas associated with supernova remnants in the nearby galaxies

研究代表者

佐野 栄俊 (Sano, Hidetoshi)

国立天文台・科学研究部・特任助教

研究者番号：50739472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線加速機構の理解は、現代天文学の最重要課題のひとつである。超新星残骸(SNR)が、宇宙線加速の場として注目されている。これまで申請者は、星間物質とSNR衝撃波との衝突が、宇宙線の加速に本質的な影響を与えていることを、銀河系内のSNRについて明らかにしてきた。本研究は、これをマゼラン雲やM33を含む近傍系外銀河のX線SNR30個余りに拡張することで検証例を増やし、宇宙線電子加速機構の一般的描像の獲得を目的とする。ALMA/ASTE電波望遠鏡により、これら近傍系外銀河でも、衝撃波-星間雲相互作用が宇宙線加速に本質的な役割を担うことを世界で初めて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線の起源やその加速機構の解明は、天文学100年来の大きな謎であり、学術的意義が高い。なぜなら宇宙線はその高いエネルギー密度から星間雲内部に深く浸透し、星間物質の加熱や化学進化を促すため、銀河進化を考える上で本質的であるからだ。本研究は、宇宙線加速源として有望視される系外近傍銀河の超新星残骸(SNR)に着目し、宇宙線からの高エネルギー放射と周辺環境との関係を明らかにした。特に、小マゼラン雲やM33銀河における当該研究は前例がなく学術的意義は高い。また本研究は、宇宙線の普遍的な発生機構を示したものであり、人類の宇宙に対する理解を促進した点で社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Understanding the acceleration mechanism of cosmic rays is one of the important issues in modern astrophysics. Supernova remnants (SNRs) are thought to be promising sites as sites of cosmic-ray acceleration. We revealed that the SNR shock-cloud interaction plays an important role in understanding the efficient acceleration of cosmic rays in the galactic SNRs. This research project aims to extend the ISM studies to 30 SNRs in the Magellanic Clouds and M33 galaxy, in order to reveal the diversity and universality of the shock-cloud interactions. Our ALMA and ASTE observations revealed the tight relation between the efficient cosmic-ray acceleration and shock-cloud interactions in both the Magellanic and M33 SNRs for the first time.

研究分野：電波天文学

キーワード：超新星残骸 宇宙線 ALMA ASTE エックス線・ガンマ線 星間雲 マゼラン雲 電波天文学

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

最高  $10^{20}$  eV を超える宇宙線の起源や加速機構を理解することは、銀河内の物質循環や宇宙の進化を考えるうえで重要である。銀河系内宇宙線の最高エネルギーは  $10^{15.5}$  eV とされ、SNR が有望な加速源である (e.g., Ginzburg & Syrovatskii 1964)。通常、宇宙線加速理論 DSA では、薄い星間物質が想定され、現実的な非一様分布は考慮されていない (e.g., Ellison et al. 2010)。しかし我々は、銀河系内のガンマ線 SNR や、大マゼラン雲の X 線 SNR について星間物質の系統的研究を行い、衝撃波と星間分子・原子雲 (水素分子・原子ガス) との相互作用が、ガンマ線と X 線の発生に本質的な影響を与えていることを示した (e.g., Fukui et al. 2012, 2017; Sano et al. 2010, 2013, 2015a,b, 2017a,b,c, 2018a,b,c)。

衝撃波で加速された電子は、非熱的 X 線・電波を放射する。申請者は SNR に付随する星間雲を精査し、非熱的放射が星間雲周辺で増光していることを発見した。特に分子雲の豊富な RXJ1713 や N49 ではこの傾向が顕著である (図 1A,B)。RXJ0852 では、原子雲と非熱的 X 線のシェル状構造が見事に一致している (図 1C)。解釈として、井上剛志氏らが流体力学計算で明らかにした「衝撃波—星間雲相互作用モデル」が適用できることを示した (e.g., Sano et al. 2013)。衝撃波が星間雲と衝突、乱流を励起し星間雲周りで磁場を強めることで非熱的放射が増光するという描像である。同領域では、電子の最大エネルギー上昇も確認され、DSA の枠組みを超えた宇宙線加速機構の存在に期待が高まっている (Sano et al. 2015a)。一方、衝撃波加熱された星間雲は熱的 X 線や H $\alpha$  輝線を放射する。RCW 86 では、原子雲と X 線・H $\alpha$  の空間対応がみられた (Sano et al. 2017a)。衝撃波のエネルギーは、星間雲の加熱と宇宙線加速に分配されるため、付随ガスの特定は宇宙線加速機構を探る手がかりになる。

以上の点から、衝撃波—星間雲相互作用の研究は、宇宙線加速機構の解明に欠かせない。しかし銀河系内で得られた描像は 6 個の SNR に限られており、いかにもサンプル数が少ない。現在の急務は、衝撃波相互作用する SNR の個数を増やすことにある。ところが銀河系内の SNR は、銀河円盤の奥行きがあるため距離決定が難しく、星間物質が幾重にも重なりコンタミネーションが多いという問題があり、研究対象を増やすことが容易でない。これを克服する方法として、申請者はこれまで大マゼラン雲の SNR に着目した研究を推進してきた (若手研究 B, 平成 28–30 年)。大マゼラン雲は、最近傍の系外銀河のひとつである (距離 50 kpc)。我々から見て奥行きがほとんどなく、付随ガスの特定が容易である。距離が既知のため、大きさや質量等の物理量も決定しやすい。結果として 12 個の X 線 SNR に付随する分子雲を特定し、うち 4 天体については ALMA による高空間分解能 CO 観測を実施、X 線と分子雲の密接な関係を明らかにした。

### 2. 研究の目的

本研究では、これを大小マゼラン雲や M33 などの近傍系外銀河の SNR に拡張する。目的は、(A) 衝撃波—星間雲相互作用の検証例を増やし、宇宙線電子の加速機構を探究すること、(B) 異なる銀河間での現象の普遍性もしくは相違性を探ることにある。(B) については、金属量の違い (銀河系を 1 とすると、大マゼラン雲・M33 は  $\sim 0.5$ 、小マゼラン雲は  $\sim 0.1$ ) や銀河の種族が異なる (銀河系・M33: 渦巻銀河、大小マゼラン雲: 矮小銀河) 点に注目する。これら様々な環境下で、SNR に付随する分子雲・原子雲を特定し、その物理量 (質量・大きさ・密度) と熱的・非熱的放射とを比較した研究は前例がなく独創的である。特に M33 における SNR 研究は、これまで可視光・赤外線・電波連続波・X 線に限定されていた (e.g., Long et al. 2010)。M33 SNR における初の付随分子雲特定を試みる点で創造性が高い。

### 3. 研究の方法

本研究は、次の 4 ステップ 1)–4) で遂行する。

#### 1) 分子雲と原子雲の観測

14 天体について ALMA を用いた CO 観測を提案する。各天体 1–15 視野 (1 視野は約 1 分角) の観測で、延べ 50 時間ほどで完了する。小マゼラン雲の SNR のうち 10 天体は、別観測プロジェクトの提案領域に含まれており、公開データが使用可能である (#2017.A.00054.S; 2018.1.01115.S)。すでに受理された M33 の 8 天体を含め、計 18 天体について研究を継続できる。ALMA の観測データが得られたものから順次リダクションを行う。

#### 2) 付随する星間ガスの特定および定量

SNR に付随する星間雲の具体的な特定・定量方法は下記の通りである。

- ① 非熱的放射 (シンクロトロン X 線・電波) と、CO 強度の空間分布比較から、付随分子ガスの

速度範囲を絞り込む。具体的には、全速度域について、分子雲方向での非熱的放射の増光が見られないか精査する。衝撃波と相互作用する分子雲周辺では磁場が増幅し、非熱的放射強度の上昇が期待できるからだ (e.g., Inoue et al. 2012)。

- ② 同様に熱的放射 (熱的 X 線・H $\alpha$ ) と HI 強度分布を比較する。熱的放射は、原子雲のような希薄なガスを衝撃波が電離した際に生じる。従って両者の空間一致は、衝撃波相互作用の証拠となる。注目する速度は CO で特定した範囲を参考にする。
- ③ [1,2] で特定した速度範囲について位置速度図を描き、ガスの膨張運動を確認する。この膨張運動は、超新星爆発前の母天体からの恒星風や、衝撃波圧縮で形成される (e.g., Sano et al. 2017c)。従って SNR へのガス雲の付随を別側面から検証できる。
- ④ 特定した分子雲・原子雲から、SNR に付随する全星間雲の水素柱密度を定量する。CO については、Fukui et al. (2008, LMC)、Mizuno et al. (2001, SMC)、Blitz et al. (2007, M33) で求められた、CO 電波強度とガス柱密度の変換係数を用いる。一方 HI 強度からのガス量の見積もりは注意を要する。Fukui et al. (2015) によると、低温高密度の HI が 5 割以上存在し、従来の光学的に薄い仮定では、原子ガス量を 1/2 程度に過小評価してしまう。この点を考慮して全星間雲量を正確に見積もる。

### 3) 非熱的放射との詳細比較

付随する星間雲が特定できたら、非熱的放射との定量的な比較を行う。具体的には、全星間雲、分子雲、原子雲それぞれの水素柱密度について、非熱的 X 線・電波放射強度との相関をとる。RXJ1713 の場合、非熱的 X 線強度と、全星間雲の柱密度との間に正の相関がみられた (Sano et al. 2013)。この傾向が近傍銀河の SNR でも見られれば、衝撃波-星間雲相互作用の傍証になる。このとき各付随ガス雲の物理量 (サイズ・質量・個数密度) との比較も行う。同時にこれらの傾向が、異なる銀河の SNR 間で同じかそうでないかを調べる。

### 4) X 線吸収柱密度と光子指数の定量

2) で星間雲が特定できた SNR のうち、X 線光子統計が十分な天体について X 線スペクトル解析を行い、吸収柱密度と光子指数のマップを描く。これを全星間雲の分布や物理量と比較する。RXJ1713 では、X 線吸収に寄与する星間雲を特定し、SNR に付随する星間雲との区別を明確にできた。また、分子雲方向で X 線の光子指数が小さくなっていたことから、衝撃波相互作用により、電子の最大エネルギーが周囲に比べて高くなっていると解釈した (Sano et al. 2015a)。同様の研究は、大マゼランのスーパーバブル 30 Dor C でも進めており、空間領域毎の吸収柱密度と光子指数の変化が見えている (Babazaki, Sano et al. 2018)。このようなアプローチは、宇宙線電子の加速機構の詳細に迫るうえで極めて有効であると考えられる。

以上の 4 ステップ 1) - 4) を通して、近傍系外銀河にある 26 個の X 線 SNR について、衝撃波-星間雲相互作用を明らかにし、宇宙線加速機構を探る

## 4. 研究成果

主な研究成果は、以下の 3 つに大別される。

### ① 大マゼラン雲 SNR N132D に付随する分子雲と高エネルギー放射 (査読付き論文 [1])

N132D は大マゼラン雲中央部に位置する年齢 2500 年のシェル型 SNR である。TeV/GeV ガンマ線で明るく、非熱的 X 線で非常に暗いため、宇宙線陽子加速の観点から注目される。今回我々は、ALMA 電波干渉計による  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線観測を、かつてない角度分解能  $\Delta\theta \sim 5$  秒角 ( $\sim 1.2$  pc) で行った。結果として、SNR シェル南部に接する巨大分子雲に加えて、シェル中心部に位置する 8 つの分子雲塊を新たに特定した。典型的なサイズは  $\sim 2$  pc、質量は  $\sim 100$  太陽質量である。高い輝線強度比  $\text{CO } J=3-2/1-0 > 1.5$  から、これら分子雲は衝撃波によって加熱されていることを示した。また X 線スペクトル解析の結果、分子雲方向の熱的 X 線放射は、0.8 keV の電離平衡プラズマと、3.4 keV の電離非平衡プラズマでよく記述できる。得られた星間吸収柱密度や電離パラメータから、当該分子雲は衝撃波を受けてから 2000 年以上経過しており、衝撃波に飲み込まれていると考えて矛盾しない。これは、分子雲が宇宙線陽子のターゲットとして機能することを意味し、被加速宇宙線陽子のエネルギーの下限値として  $\sim 0.5-3.8 \times 10^{49}$  erg と求めた。近傍銀河における初の宇宙線エネルギーの定量結果として極めて重要な知見である。成果は査読付き論文としてアストロフィジカルジャーナル誌から出版済みである [1]。

### ② 小マゼラン雲 RX J0046.5-7308 付随する分子雲の発見 (査読付き論文 [2])

小マゼラン雲は銀河系から最も近くかつ宇宙初期に近い低重元素環境下 ( $Z_{\odot} \sim 0.05-0.2$ ) にある系外銀河であるため、さまざまな物理現象の普遍性を宇宙史レベルで理解するための最適な実験場である。

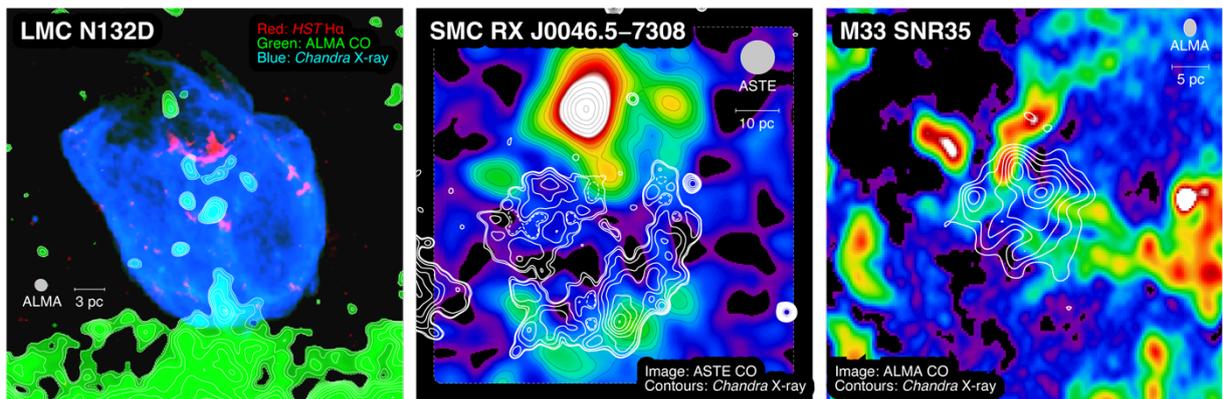


Figure 1. 大マゼラン雲の SNR N132D (左図), 小マゼラン雲の SNR RX J0046.5-7308 (中図), および M33 SNR35 (右図) に付随する星間雲の観測結果 [1-3]。衝撃波-星間雲相互作用による、分子雲周辺での X 線・H $\alpha$  放射の増光を捉えている。

今回我々は、小マゼラン雲にある X 線と電波連続波で明るいシェル型 SNR RX J0046.5-7308 について、ASTE および Mopra 電波望遠鏡を用いた  $^{12}\text{CO}(J=3-2, 1-0)$  輝線観測を実施した。その結果 X 線シェルに沿って分布する 8 個の分子雲を特定した。X 線で明るい方向には分子雲が位置し、衝撃波-星間雲相互作用による増光を示唆する。分子雲のうち 4 個は高い輝線強度比  $^{12}\text{CO } J=3-2 / 1-0 > 1.2$  を示しており、衝撃波相互作用による加熱と理解できた。ASKAP HI データも解析した結果、SNR の広がりに対応する  $\Delta V \sim 3 \text{ km s}^{-1}$  の膨張シェルを見つけた。X 線スペクトル解析から SNR の年齢を 25,000-28,000 年、および母天体質量を 30 太陽質量以上と決定した。これらを総合して、当該超新星残骸が恒星風バブル内部での重力崩壊型超新星残骸を起こしたと結論し、系内で見られた現象と同じことが、低重元素環境下でも起きうることを示した点で大きな意義がある。成果は査読付き論文としてアストロフィジカルジャーナル誌から出版済みである [2]。

### ③ M33 SNR に付随する星間雲の特定と、分子雲衝突による星団形成現場の発見 (査読付き論文 [3])

X 線で明るい M33 SNR 8 個を、ALMA による CO 輝線を用いてかつてない角度分解能  $\Delta\theta \sim 0.5$  秒角 ( $\sim 2 \text{ pc}$ ) で観測し、全ての天体で付随する分子雲を発見した。銀河系内と同様に、恒星風バブルと見られる膨張運動や、分子雲に沿った X 線増光などを世界で初めて捉えることに成功した。また、そのうち 1 天体の同一視野内にある巨大分子雲方向にて、思いがけず分子雲衝突による星団形成現場も捉えることができた。成果は査読付き論文として日本天文学会欧文誌から出版済みである [3]。

なお当該研究課題は、同じ研究代表者の基盤研究 B 「ALMA 電波干渉計で探る超新星残骸の宇宙線加速機構」が、終了前年度申請により 2021 年度から採択となったため、本研究計画の一部は基盤研究 B の内容に含まれ、引き続き推進していく予定である。

### 本文で引用した主な研究成果 (査読付き論文)

- [1] Sano H., Plucinsky P. P., Bamba A., Sharda P., Filipovic M. D., Law C. J., Alsaberi R. Z. E., Yamane Y., Tokuda K., Acero F., Sasaki M., Vink J., Inoue T., Inutsuka S., Shimoda J., Tsuge K., Fujii K., Voisin F., Maxted N., Rowell G., Onishi T., Kawamura A., Mizuno N., Yamamoto H., Tachihara K., Fukui Y. “ALMA CO Observations of Gamma-Ray Supernova Remnant N132D in the Large Magellanic Cloud: Possible Evidence for Shocked Molecular Clouds Illuminated by Cosmic-Ray Protons”, *The Astrophysical Journal*, Vol.902, pp.53-66, (2020) 【査読あり】
- [2] Sano H., Matsumura H., Yamane Y., Maggi P., Fujii K., Tsuge K., Tokuda K., Alsaberi R. Z. E., Filipovic M. D., Maxted N., Rowell G., Uchida H., Tanaka T., Muraoka K., Takekoshi T., Onishi T., Kawamura A., Minamidani T., Mizuno N., Yamamoto H., Tachihara K., Inoue T., Inutsuka S., Voisin F., et al., “Discovery of Shocked Molecular Clouds Associated with the Shell-type Supernova Remnant RX J0046.5-7308 in the Small Magellanic Cloud”, *The Astrophysical Journal*, Vol.881, pp.85-96, (2019) 【査読あり】
- [3] Sano H., Tsuge K., Tokuda K., Muraoka K., Tachihara K., Yamane Y., Kohno M., Fujita S., Enokiya R., Rowell G., Maxted N., Filipovic M. D., Knies J., Sasaki M., Onishi T., Plucinsky P. P., Fukui Y., “ALMA CO observations of a giant molecular cloud in M33: Evidence for high-mass star formation triggered by cloud-cloud collisions”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol.73, pp.62-74, (2020) 【査読あり】

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22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 Sano H., Plucinsky P. P., Bamba A., Sharda P., Filipovic M. D., Law C. J., Alsaberi R. Z. E., Yamane Y., Tokuda K., Acero F., Sasaki M., Vink J., Inoue T., Inutsuka S., Shimoda J., Tsuge K., Fujii K., Voisin F., Maxted N., Rowell G., Onishi T., Kawamura A., Mizuno N., Yamamoto H., Tachihara K., Fukui Y.	4. 巻 902
2. 論文標題 ALMA CO Observations of Gamma-Ray Supernova Remnant N132D in the Large Magellanic Cloud: Possible Evidence for Shocked Molecular Clouds Illuminated by Cosmic-Ray Protons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 53 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb469	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 Sano Hidetoshi, Tsuge Kisetu, Tokuda Kazuki, Muraoka Kazuyuki, Tachihara Kengo, Yamane Yumiko, Kohno Mikito, Fujita Shinji, Enokiya Rei, Rowell Gavin, Maxted Nigel, Filipovic Miroslav D, Knies Jonathan, Sasaki Manami, Onishi Toshikazu, Plucinsky Paul P, Fukui Yasuo	4. 巻 73
2. 論文標題 ALMA CO observations of a giant molecular cloud in M33: Evidence for high-mass star formation triggered by cloud-cloud collisions	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 S62 ~ S74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa045	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 Sano H., Inoue T., Tokuda K., Tanaka T., Yamazaki R., Inutsuka S., Aharonian F., Rowell G., Filipovic M. D., Yamane Y., Yoshiike S., Maxted N., Uchida H., Hayakawa T., Tachihara K., Uchiyama Y., Fukui Y.	4. 巻 904
2. 論文標題 ALMA CO Observations of the Gamma-Ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Discovery of Shocked Molecular Cloudlets and Filaments at 0.01 pc Scales	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abc884	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 Law Charles J., Milisavljevic Dan, Patnaude Daniel J., Plucinsky Paul P., Gladders Michael D., Schmidt Judy, Sravan Niharika, Banovetz John, Sano Hidetoshi, McGraw Jordan M., Takahashi George, Orlando Salvatore	4. 巻 894
2. 論文標題 Three-dimensional Kinematic Reconstruction of the Optically Emitting, High-velocity, Oxygen-rich Ejecta of Supernova Remnant N132D	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 73 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab873a	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 Tokuda Kazuki, Muraoka Kazuyuki, Kondo Hiroshi, Nishimura Atsushi, Tosaki Tomoka, Zahorecz Sarolta, Onodera Sachiko, Miura Rie E., Torii Kazufumi, Kuno Nario, Fujita Shinji, Sano Hidetoshi, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko, Tachihara Kengo	4. 巻 896
2. 論文標題 ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. I. Resolving Star Formation Activities in the Giant Molecular Filaments Possibly Formed by a Spiral Shock	5. 発行年 2020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/ab8ad3	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 Fukushima Kotaro, Yamaguchi Hiroya, Slane Patrick O., Park Sangwook, Katsuda Satoru, Sano Hidetoshi, Lopez Laura A., Plucinsky Paul P., Kobayashi Shogo B., Matsushita Kyoko	4. 巻 897
2. 論文標題 Element Stratification in the Middle-aged SN Ia Remnant G344.7-0.1	5. 発行年 2020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/ab94a6	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 Kokusho Takuma, Torii Hiroki, Nagayama Takahiro, Kaneda Hidehiro, Sano Hidetoshi, Ishihara Daisuke, Onaka Takashi	4. 巻 899
2. 論文標題 Near-infrared [Fe II] and H2 Line Mapping of the Supernova Remnant IC 443 with the IRSF/SIRIUS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 49 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9cb3	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 Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Sano Hidetoshi, Tsuru Takeshi Go	4. 巻 900
2. 論文標題 Shock-Cloud Interaction in the Southwestern Rim of RX J1713.7-3946 Evidenced by Chandra X-Ray Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abaef0	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 Muraoka Kazuyuki, Kondo Hiroshi, Tokuda Kazuki, Nishimura Atsushi, Miura Rie E., Onodera Sachiko, Kuno Nario, Zahorecz Sarolta, Tsuge Kisetsu, Sano Hidetoshi, Fujita Shinji, Onishi Toshikazu, Saigo Kazuya, Tachihara Kengo, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko	4. 巻 903
2. 論文標題 ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. II. Triggered High-mass Star Formation by Multiple Gas Colliding Events at the NGC 604 Complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 94 ~ 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb822	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 Bamba Aya, Watanabe Eri, Mori Koji, Shibata Shinpei, Terada Yukikatsu, Sano Hidetoshi, Filipovic Miroslav D.	4. 巻 365
2. 論文標題 Low X-ray Efficiency of a Young High-B Pulsar PSR J1208-6238 Observed with Chandra	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophysics and Space Science	6. 最初と最後の頁 178 ~ 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10509-020-03891-6	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 Yew M, Filipovic M D, Stupar M, Points S D, Sasaki M, Maggi P, Haberl F, Kavanagh P J, Parker Q A, Crawford E J, Vukotic B, Urosevic D, Sano H, Seitzenthal I R, Rowell G, Leahy D, Bozzetto L M, Maitra C, Leverenz H, Payne J L, Park L A F, Alsaber R Z E, Pannuti T G	4. 巻 500
2. 論文標題 New optically identified supernova remnants in the Large Magellanic Cloud	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2336 ~ 2358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3382	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 Tsuge Kisetu, Fukui Yasuo, Tachihara Kengo, Sano Hidetoshi, Tokuda Kazuki, Ueda Junko, Iono Daisuke, Finn Molly K	4. 巻 73
2. 論文標題 The formation of young massive clusters triggered by cloud-cloud collisions in the Antennae galaxies NGC4038/NGC4039	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 S35 ~ S61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa033	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 Fujita Yutaka, Nobukawa Kumiko K., Sano Hidetoshi	4. 巻 908
2. 論文標題 Intrusion of MeV-TeV Cosmic Rays into Molecular Clouds Studied by Ionization, the Neutral Iron Line, and Gamma Rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abce62	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 NeelamKodan Naslim, Tokuda Kazuki, Barman Susmita, Kondo Hiroshi, Sano Hidetoshi, Onishi Toshikazu	4. 巻 908
2. 論文標題 ALMA Reveals a Cloud-Cloud Collision that Triggers Star Formation in the Small Magellanic Cloud	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L43 ~ L43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abdebb	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 Ergin T, Saha L, Bhattacharjee P, Sano H, Tanaka S J, Majumdar P, Yamazaki R, Fukui Y	4. 巻 501
2. 論文標題 Probing the star formation origin of gamma-rays from 3FHL J1907.0+0713	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4226 ~ 4237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3817	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 Sano H., Matsumura H., Yamane Y., Maggi P., Fujii K., Tsuge K., Tokuda K., Alsaberi R. Z. E., Filipovic M. D., Maxted N., Rowell G., Uchida H., Tanaka T., Muraoka K., Takekoshi T., Onishi T., Kawamura A., Minamidani T., Mizuno N., Yamamoto H., Tachihara K., Inoue T., Inutsuka S., Voisin F., Tothill N. F. H., et al.	4. 巻 881
2. 論文標題 Discovery of Shocked Molecular Clouds Associated with the Shell-type Supernova Remnant RX J0046.5-7308 in the Small Magellanic Cloud	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2ade	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 Sano H., Rowell G., Reynoso E. M., Jung-Richardt I., Yamane Y., Nagaya T., Yoshiike S., Hayashi K., Torii K., Maxted N., Mitsuishi I., Inoue T., Inutsuka S., Yamamoto H., Tachihara K., Fukui Y.	4. 巻 876
2. 論文標題 Possible Evidence for Cosmic-Ray Acceleration in the Type Ia SNR RCW 86: Spatial Correlation between TeV Gamma-Rays and Interstellar Atomic Protons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 37 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab108f	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 Alsaberi Rami Z E, Maitra C, Filipovic M D, Bozzetto L M, Haberl F, Maggi P, Sasaki M, Manjolic P, Velovic V, Kavanagh P, Maxted N I, Urosevic D, Rowell G P, Wong G F, For B-Q, O'Brien A N, Galvin T J, Staveley-Smith L, Norris R P, Jarrett T, Kothes R, Luken K J, Hurley-Walker N, Sano H et al.	4. 巻 486
2. 論文標題 Discovery of a pulsar-powered bow shock nebula in the Small Magellanic Cloud supernova remnant DEM S5	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 2507 ~ 2524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz971	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 Alsaberi, R. Z. E., Barnes, L. A., Filipovic, M. D., Maxted, N. I., Sano, H., Rowell, G.; Bozzetto, L. M., Gurovich, S., Urosevic, D., Onic, D., For, B. -Q., Manojlovic, P., Wong, G.; Galvin, T. J., Kavanagh, P., Ralph, N. O., Crawford, E. J., Sasaki, M., Haberl, F., Maggi, P., Tothill, N. F. H., Fukui, Y.	4. 巻 364
2. 論文標題 Radio emission from interstellar shocks: Young type Ia supernova remnants and the case of N 103B in the Large Magellanic Cloud	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysics and Space Science	6. 最初と最後の頁 204 ~ 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10509-019-3696-8	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 Maxted Nigel I., Filipovic M. D., Hurley-Walker N., Bojicic I., Rowell G. P., Haberl F., Ruiter A. J., Seitzzahl I. R., Panther F., Wong G. F., Braiding C., Burton M., Puhhofer G., Sano H., Fukui Y., Sasaki M., Tian W., Su H., Cui X., Leahy D., Hancock P. J.	4. 巻 885
2. 論文標題 A Supernova Remnant Counterpart for HESS J1832-085	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 129 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3e3f	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 Sezer A, Ergin T, Yamazaki R, Sano H, Fukui Y	4. 巻 489
2. 論文標題 Discovery of recombining plasma inside the extended gamma-ray supernova remnant HB9	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 4300 ~ 4310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2461	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 Joseph T D, Filipovic M D, Crawford E J, Bojicic I, Alexander E L, Wong G F, Andernach H, Leverenz H, Norris R P, Alsaberi R Z E, Anderson C, Barnes L A, Bozzetto L M, Bufano F, Bunton J D, Cavallaro F, Collier J D, Denes H, Fukui Y, Galvin T, Haberl F, Ingallinera A, Kapinska A D, Koribalski B S, Sano H et al.	4. 巻 490
2. 論文標題 The ASKAP EMU Early Science Project: radio continuum survey of the Small Magellanic Cloud	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 1202 ~ 1219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2650	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24件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Sano, H., Inoue, T., Tokuda, K., Tanaka, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., Aharonian, F., Rowell, G., Filipovic, M., Yamane, Y., Yoshiike, S., Maxted, N., Uchida, H., Hayakawa, T., Tachihara, K., Uchiyama, Y., Fukui, Y.
2. 発表標題 ALMA CO Observations of the Gamma-Ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Discovery of Shocked Molecular Cloudlets and Filaments at 0.01 pc scales
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2020 (online)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sano, H., Fukui, Y.
2. 発表標題 Studies of Gamma-ray Emission from Molecular and Atomic Clouds with CTA
3. 学会等名 COSPAR 2021: 43rd COSPAR Scientific Assembly (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 FUGIN の成果を軸とした超新星残骸研究の新展開
3. 学会等名 FUGIN & COMING リモート研究会 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊, 山根悠望子, 柘植紀節, 立原研悟, 福井康雄, 徳田一起, 馬場彩, Plucinsky, P. P., Filipovic, M. D., Rowell, G., Voisin, F., 他 N132D プロジェクトチーム
2. 発表標題 ALMA による TeV ガンマ線超新星残骸 N132D の観測
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 M33 における分子雲衝突と大質量星形成
3. 学会等名 分子雲衝突小研究会 2020 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 ALMA 電波干渉計による銀河系内超新星残骸観測の新展開
3. 学会等名 超新星残骸リモート研究会2020 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 恒星風圧縮によるフィラメント状分子雲の形成
3. 学会等名 オンライン研究会「分子雲から原始星誕生までを追う~新時代の星形成モデル構築に向けて~」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊, 井上剛志, 徳田一起, 田中孝明, 山崎了, 犬塚修一郎, Aharonian, F., Rowell, G., Filipovic, M. D., 山根悠望子, 吉池智史, Maxted, N., 内田裕之, 早川貴敬, 立原研悟, 内山泰伸, 福井康雄
2. 発表標題 ALMA 電波干渉計によるガンマ線超新星残骸 RX J1713.7-3946 北西部の観測
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 超新星残骸に付随する分子雲の[Cl]観測
3. 学会等名 オンライン研究会「ALMA高周波バンドを用いた星形成研究を考える」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野栄俊, 井上剛志, 犬塚修一郎, 山根悠望子, 吉池智史, 早川貴敬, 立原研悟, 福井康雄, 徳田一起, 田中孝明, 内田裕之, 山崎了, 内山泰伸, Aharonian, F., Rowell, G., Filipovic, M. D., Maxted, N.
2. 発表標題 ALMAによるガンマ線超新星残骸RX J1713.7-3946の観測
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野栄俊, 徳田一起, 山根悠望子, 井上剛志, 犬塚修一郎, 立原研悟, 福井康雄
2. 発表標題 電波干渉計で探るフィラメント状分子雲の形成機構
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 中性炭素輝線で探る低エネルギー宇宙線
3. 学会等名 低エネルギー宇宙線Workshop 2021 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sano, H.
2. 発表標題 ALMA CO observations toward gamma-ray supernova remnants
3. 学会等名 Cherenkov Telescope Array Australia: Consortium Workshop 8 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sano, H. and Fukui, Y.
2. 発表標題 Shock-cloud interactions in young gamma-ray supernova remnants: Evidence for cosmic-ray acceleration
3. 学会等名 Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sano, H., Yamane, Y., Matsumura, H., Tokuda, K., Miroslav, F. F., Rowell, G., Sasaki, M., Tachihara, K., Fukui, Y.
2. 発表標題 ALMA view of the molecular clouds associated with the Magellanic SNRs
3. 学会等名 Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sano, H.
2. 発表標題 ASTE CO survey of the Galactic/Magellanic supernova remnants
3. 学会等名 ASTE研究会: Sub-mm Spectroscopy and Large Scale Science with ASTE (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野栄俊, 山根悠望子, 柘植紀節, 井上剛志, 犬塚修一郎, 立原研悟, 福井康雄, 松村英晃, 藤井浩介, 徳田一起, 他 RX J0046.5-7308 プロジェクトチーム
2. 発表標題 小マゼラン雲の超新星残骸 RX J0046.5-7308 に付随する分子雲の発見
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 Sano, H.
2 . 発表標題 Interstellar gas associated with supernova remnants
3 . 学会等名 next generation VLA workshop ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sano, H., Yamane, Y., Matsumura, H., Tokuda, K., Miroslav, F., Rowell, G., Sasaki, M., Tachihara, K., Fukui, Y.
2 . 発表標題 ALMA CO Observations toward the Magellanic SNRs and Superbubble
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 Sano, H.
2 . 発表標題 Interstellar gas associated with the Galactic and Magellanic SNRs
3 . 学会等名 Collaborative Meeting on Supernova Remnants between Japan and USA ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sano, H., Matsumura, H., Yamane, Y., Tokuda, K., Filipovic, M. D., Rowell, G., Sasaki, M., Plucinsky, P. P., Tachihara, K., and Fukui, Y.
2 . 発表標題 ALMA and Chandra Studies of the Supernova Remnant N63A in the Large Magellanic Cloud
3 . 学会等名 20 Years of Chandra Science Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Sano, H., Matsumura, H., Yamane, Y., Tokuda, K., Filipovic, M. D., Rowell, G., Sasaki, M., Tachihara, K., and Fukui, Y.
2. 発表標題 ALMA CO Observations of Supernova Remnant N63A in the Large Magellanic Cloud: Discovery of Dense Molecular Clouds Embedded within Shock-ionized and Photoionized Nebulae
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sano, H.
2. 発表標題 ALMA CO Observations of Supernova Remnants in the Local Group Galaxies
3. 学会等名 Molecular gas observations toward the Local Group and the outer Milky Way (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐野栄俊
2. 発表標題 ALMA CO Observations of a Giant Molecular Cloud in M33: Evidence for High-Mass Star Formation Triggered by Cloud-Cloud Collisions
3. 学会等名 大質量星形成ワークショップ2020
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
---------	---------