

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17664

研究課題名(和文)大マゼラン雲の超新星残骸に付随する分子雲と原子雲

研究課題名(英文)Molecular and atomic clouds associated with the supernova remnants in the Large Magellanic Cloud

研究代表者

佐野 栄俊 (Sano, Hidetoshi)

名古屋大学・高等研究院(理)・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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線加速機構の解明は現代天体物理学の最大の課題のひとつである。超新星残骸(SNR)は、宇宙線加速の場として注目されてきた。我々名古屋大学の研究チームは、星間物質と超新星残骸との衝撃波相互作用に注目し、宇宙線加速や高エネルギー放射の性質に、星間物質が本質的な影響を与えていることを、銀河系のSNRについて明らかにしてきた。本研究は、これを大マゼラン雲のSNR25個に拡張した。結果として、少なくとも半数で付随する分子雲を特定した。また、ALMA電波干渉計を用いた星間分子雲の高空間分解能を遂行し、大マゼラン雲のSNRにおける宇宙線加速と衝撃波・星間雲相互作用の密接な関係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

宇宙線の起源は天文学100年来の謎であり研究意義が極めて大きい。なぜなら宇宙線は星の材料である星間雲の電離/加熱を促すため、その起源解明は「銀河や宇宙の進化」の理解に欠かせないからだ。本研究では、大マゼラン雲の超新星残骸(SNR)に着目し、宇宙線の起源やその高エネルギー放射と周辺環境との関係を世界で初めて明らかにした。大マゼラン雲のSNRに着目した研究は前例がなく学術的意義は大きい。本研究によって得られた知見は、SNRに付随する星間雲が、銀河系以外でも宇宙線やX線・ガンマ線の発生に重要な役割を果たしていること示したものであり、人類の宇宙に対する理解を促進したという点で社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Acceleration mechanism of cosmic rays is one of the biggest issues in modern astrophysics. Supernova remnants (SNRs) have revealed much attention as cosmic-ray accelerators. Our research team of Nagoya University revealed that the interstellar medium has a significant affect on the origin of cosmic rays and their high-energy radiation in the Galactic SNRs by focusing on the shock-cloud interaction. This research project aims to extend them to 25 SNRs in the Large Magellanic Clouds, in order to reveal the shock-cloud interaction. As a result, at least ten of them were shown to have molecular clouds that have good spatial correspondence with X-rays. Follow-up observations using ALMA revealed a strong connection between the cosmic-ray acceleration and shock-cloud interactions in the Magellanic SNRs for the first time.

研究分野：電波天文学

キーワード：超新星残骸 大マゼラン雲 星間物質 宇宙線 X・ガンマ線 電波天文学 アルマ電波干渉計

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

最高  $10^{20}$  eV を超える宇宙線の加速機構の解明は、天体物理学のもっとも大きな課題のひとつである。銀河系内の宇宙線の最高エネルギーは  $10^{15.5}$  eV とされ、超新星残骸 (SNR) が有望な加速源である (e.g., Hayakawa 1956; 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、現実的な非一様な星間物質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 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 (高密度水素分子・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ることを示した (e.g., Fukui et al. 2012; Sano et al. 2010; 2013; 2015)

衝撃波で加速された宇宙線電子は、非熱的電波・X 線を放射する (シンクロトロン放射)。研究代表者はガンマ線 SNR に付随する星間雲分布を精査することで、非熱的 X 線が星間雲周辺で増光していることを発見した。特に星間分子雲の豊富な RX J1713 では、この傾向が顕著である。RX J0852 では、星間原子雲と X 線のシェル構造が見事に一致している。この解釈として、名古屋大学理学部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 (Sano et al. 2013)。衝撃波が星間雲と衝突して乱流を励起し、星間雲周りの磁場を強めるためにシンクロトロン放射が増光する、という描像である。さらに同領域では電子の最大エネルギーが上昇しており、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た (Sano et al. 2015)。一方、衝撃波相互作用によって加熱された星間雲は、熱的 X 線を放射する。RCW 86 では、原子雲と熱的 X 線の間にも正の相関が見られた。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、SNR に付随するガスの特定は、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当時 4 個の SNR に限られ、いかにもサンプル数が少ない。現在の急務は、SNR の個数を増やすことにある。ところが、銀河系内の SNR は、(1) 銀河円盤の奥行きがあるため距離決定が難しく、(2) 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点があり、研究対象を増やすことが容易ではない。これを克服する有力な方法として、大マゼラン雲の SNR における星間雲の精査があげられる。大マゼラン雲は、地球から最も近い系外銀河であり (距離  $\sim 50$  kpc, Feast 1999)、我々から見てほとんど奥行きがないため、星間物質の重なりが少なく距離決定も容易である。従って質量や密度などの物理量を決定しやすく、また均一なサンプルを統計的に研究するのに非常に適している。ところが研究開始当初、大マゼラン雲 SNR の星間雲に着目した研究は数件しかなく (e.g., Banas 1997; Desai et al. 2010)、しかも衝撃波との相互作用を十分に検証できた天体はなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、大マゼラン雲にある X 線で明るい 25 個の SNR について付随する分子雲と原子雲を特定し、衝撃波—星間雲の相互作用や非熱的・熱的放射の起源、宇宙線加速の仕組みを探ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究は、以下の 3 ステップ 1) - 3) で遂行する。

### 1) 分子雲と原子雲の観測および定量

Mopra および ASTE 電波望遠鏡による CO  $J=1-0, 3-2$  輝線のサーベイ観測を行う。これにより SNR 方向の分子雲分布を空間分解能  $\sim 5-11$  pc で明らかにする。併せて、ATCA 電波干渉計による公開 HI データを用いて、原子雲の空間分布も調べる。星間雲の付随が特定できたものについては、ALMA 電波干渉計による高空間分解能 CO 輝線追加観測 ( $\sim 0.7$  pc 以下)、および ATCA 電波干渉計による HI 追加観測 (空間分解能  $\sim 4$  pc) を行う。SNR に付随する星間雲の具体的な同定・定量方法は下記の通りである。

- A) CO  $J=1-0$  輝線と X 線の比較から、SNR に付随する分子雲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周辺での非熱放射増光の兆候がないか精査する。
- B) CO  $J=3-2/1-0$  もしくは  $3-2/2-1$  強度比を用いて、A) で特定した速度範囲を検証する。衝撃波と分子雲が 1,000 yr ほど相互作用していれば、衝撃波加熱によって強度比が 0.8 を超える。既に N132D において実践しており、速度範囲の精密決定に有効であることを確認している。
- C) CO で特定した速度範囲について HI を解析し、付随する原子雲成分を特定する。このとき、熱的 X 線との付随関係がみられるかどうか、また、位置速度図において、膨張構造がみられないか慎重に確認する。後者は 30 Dor C における予備研究で、複数の SNR 衝撃波により形成された膨張 HI シェル構造がみられたためである。
- D) B)-C) で特定した分子雲および原子雲から、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) で求められた、CO 強度とガス量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については注意が必要である。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、本来のガス量を 1/2 程度に過小評価してしまうことが示されている。この点を考慮したうえで、全星間雲を精確に見積もる。

## 2) 非熱的・熱的 X 線との詳細比較

付随する星間雲が特定できたら、非熱的・熱的 X 線との定量的な比較を行う。具体的には、全星間雲、分子雲、原子雲それぞれについて X 線強度との相関をとり、定量的な傾向が見えるかどうか調べる。RXJ1713 の場合、非熱的 X 線のフラックスと、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)。この傾向がマゼラン雲の SNR でも見られれば、衝撃波-星間雲相互作用の傍証になる。

## 3) X 線吸収柱密度と光子指数の定量

RXJ1713 の際は、X 線スペクトル解析から求めた吸収柱密度と光子指数の空間分布と、全星間雲の比較を行った。結果として、X 線吸収に効いている星間雲を特定し、SNR に付随する星間雲との区別を明確にできた。また、分子雲方向で非熱的 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。このような比較研究は、宇宙線電子の加速機構の詳細に迫るうえで、極めて有効なアプローチであると考えられる。1) で付随する星間雲が特定できた SNR から、順次 2) 3) の研究を進めていく。

以上 3 ステップ 1) -3) を通して、大マゼラン雲にある 25 個の X 線 SNR の衝撃波-星間雲相互作用を明らかにし、宇宙線加速機構や X 線放射の起源を探る構想である。

## 4. 研究成果

主な研究成果は、以下の 5 つに大別される。

### I) 大マゼラン雲 SNR における分子雲サーベイの実施 (主な発表論文[8])

大マゼラン雲にある 25 個の X 線 SNR についてについて、Mopra/ASTE 電波望遠鏡による世界初の CO 輝線サーベイを行った。その結果、90% の SNR で  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線を  $3\sigma$  以上の有意度で検出した。うち少なくとも 10 個の SNR では、付随する分子雲を確認することができた。衝撃波-星間雲相互作用を研究するうえで、貴重なサンプルを得ることができた。結果はカンファレンス集録論文として出版した [8]。

### II) N49 に付随する分子雲 (主な発表論文[6], 図 1ab)

N49 は、過去の研究で巨大分子雲の付随が示唆されている SNR である (Banas et al. 1997)。我々は ALMA 電波干渉計による高空間分解能  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線観測 ( $\sim 0.7$  pc) を行い、SNR に付随する 21 個の分子雲を解像した (図 1a)。全ビリアル質量は  $\sim 5.3 \times 10^3$  太陽質量であり、これは CO 積分強度から求めた質量  $\sim 1.9 \times 10^3$  太陽質量の約 3 倍である。これは衝撃波によって分子雲が影響を受けていることを示す。また、これらの分子雲は  $^{12}\text{CO } J=3-2/1-0$  強度比が高いことから、衝撃波相互作用により加熱されていることもわかった。さらに我々は、分子雲周辺での非熱的電波連続波と硬 X 線の増光を発見した (図 1b)。前者は衝撃波-星間雲相互作用による磁場増幅が、宇宙線電子起源のシンクロトロン放射の増光を引き起こしたと解釈した。後者は、衝撃波プラズマと分子雲の熱伝導による過電離プラズマの生成を示していると結論した。大マゼラン雲における衝撃波-星間雲相互作用を研究した初の結果であり意義がある。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された [6]。エディターからも高い評価を受け、天文学にブレイクスルーをもたらした研究として AAS Nova Highlight に選ばれ、解説記事が作成された (<https://aasnova.org/?p=4347>)。

### III) N63A に付随する分子雲の発見 (主な発表論文[2], 図 1cd)

N63A は衝撃波電離起源の可視光星雲が付随するユニークな SNR である。我々は ALMA 電波干渉計による CO 輝線観測を実施し、星雲に埋め込まれた分子雲塊を世界で初めて見つけた (図 1c)。X 線のスペクトル解析からは、当該星雲方向の吸収柱密度は  $\sim 1.5-6.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  と求めることができた。これは、星間雲の柱密度よりも  $\sim 1.5-15$  倍程度小さい。このことは、N63A からの X 線放射は、分子雲の視線方向前面のみでなく背面からも放射されていることを意味し、衝撃波に飲み込まれながらも高密度なため生き残った分子雲塊であることがわかった。また当該領域の X 線放射は、吸収を受けた power-law もしくは高温プラズマ成分に、熱的プラズマ成分を足したモデルでよく表現できる。これは衝撃波相互作用による磁場増幅もしくは電離が効率よく起きていることを意味する。さらにガンマ線との比較から、宇宙線陽子の加速効率にも制限を付することができた。具体的には、宇宙線陽子のターゲットとして初めて星間電離ガスも考慮することで、宇宙線陽子の全エネルギーを  $\sim (0.3-1.4) \times 10^{49} \text{ erg}$  (加速効率 0.3-1.4%) と求めた。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された [2]。

### IV) スーパーバブル 30 Doradus C に付随する分子雲の発見 (主な発表論文[5,7,9], 図 1ef)

30 Doradus C は、シンクロトロン X 線と TeV ガンマ線で明るいスーパーバブル (超新星残骸複合体) であり、宇宙線加速の面から注目を集めている。我々は、Mopra/ASTE 電波望遠鏡および ALMA/ATCA 電波干渉計による分子雲・原子雲の高空間分解能観測を実施した。結果として、シンクロトロン X 線シェルに付随する分子雲を特定し、これらが衝撃波-星間雲相互作用

用による磁場増幅起源であると結論した (図 1e)。さらに全星間陽子柱密度を求めることで、宇宙線陽子の全エネルギーを  $\sim 1.2 \times 10^{50}$  erg と推定した。また、X線スペクトル解析から、宇宙線電子起源のシンクロトン放射の冪指数が、シェル西側で特に小さくなっていることを示した [5, 9]。この冪指数の小さい領域は、被加速電子の最大エネルギーが高いことに対応する。興味深いことに、全星間陽子柱密度が高い領域で、電子の最大エネルギーの増加が見られた (図 1f)。この解釈として、ガス雲の多い領域では、過去の超新星爆発や恒星風により磁場乱流が高められており、より効率よく高いエネルギーまで宇宙線が加速できていると解釈した。宇宙線の振る舞いを理解する上で極めて重要な知見である。これらの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された [5, 7]。

#### V) N103B に付随する分子雲の発見 (主な発表論文[3], 図 1gh)

N103B は年齢 860 年の若い Ia 型超新星残骸である。今回我々は、ALMA 電波干渉計による 1.8 秒角 (空間分解能  $\sim 0.4$  pc) の CO 輝線観測を実施した。結果として、SNR シェル南側に付随する高密度分子雲を発見した (図 1g)。これらは位置-速度図上において、約 5 km/s の膨張構造を呈していた (図 1h)。さらに、いくつかの分子雲クランプは、 $H\alpha$  で見える可視光の blob に対応しており、SNR 中心から吹き流されたような構造をもつ。この解釈として、N103B は、質量降着風による wind-blown bubble 内で爆発し、まさにいま分子雲との相互作用を開始したと解釈した。質量降着風が見られるのは、Ia 型超新星爆発でも、白色矮星と赤色巨星または主系列星等との連星系に限られる (SD 説)。Ia 型爆発には白色矮星同士の合体も考えられてきたが (DD 説)、今回の結果は SD 説をサポートする。Ia 型爆発は、その爆発時の明るさが一定と考えられていることから宇宙の標準光源とされ、宇宙の距離決定や、加速膨張を決定づけた重要な現象である。もし今回のような高密度分子雲が付随する SD シナリオがマジョリティーだとすると、Ia 型爆発時の明るさが分子雲内部の星間塵によって減光される可能性もあり、これまでの距離決定を一部は見直す必要があるかもしれない。衝撃波-星間雲相互作用の理解のみならず、Ia 型爆発の仕組みや、宇宙の距離決定にも波及効果を及ぼす意義深い研究である。本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された [3]。

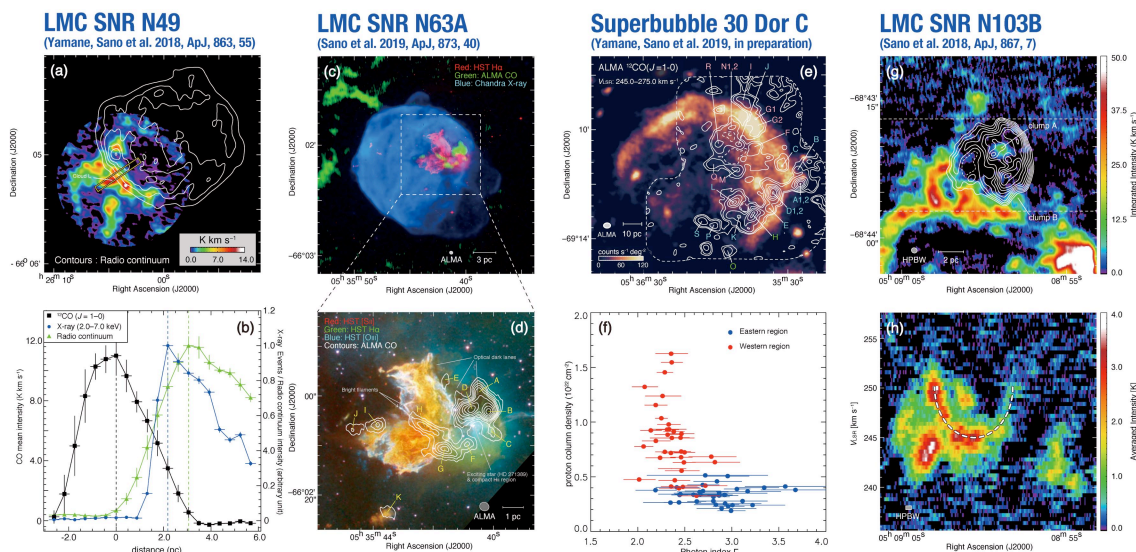


図 1: 本科研費で得られた大マゼラン雲 SNR N49, N63A, N103, そしてスーパーバブル 30 Doradus C の研究成果の一部。(a) N49 の ALMA による CO 輝線強度に、等高線でシンクロトン電波強度を重ねた。(b) (a) における短冊領域の CO, X線, 電波連続波の動径分布。(c) N63A の三色合成図 (赤:  $H\alpha$ , 緑: CO, 青: X線)。(d) 可視光星雲の拡大図 (赤: [SII], 緑:  $H\alpha$ , 青: [OIII])。等高線で分子雲の分布を重ねた。(e) 30 Doradus C のシンクロトン X線画像に、ALMA による CO 分布を重ねた。(f) シンクロトン放射の冪指数と全星間雲柱密度の相関図。(g) N103B の CO 分布に、等高線で X線強度を重ねた。(h) CO の位置-速度図。点線は膨張構造を示す。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- [1] Alsaberi, Rami Z. E., Maitra, C., Filipović, M. D., Bozzetto, L. M., Haberl, F., Maggi, P., Sasaki, M., Manjolić, P., Velović, V., Kavanagh, P., Maxted, N. I., Urošević, 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., Onić, D., Dai, S., Pannuti, T. G., Tothill, N. F. H., Crawford, E. J., Yew, M., Bojičić, I., Dénes, H., McClure-Griffiths, N., Gurovich, S., Fukui, Y. "Discovery of a Pulsar-powered Bow Shock Nebula in the Small Magellanic Cloud Supernova Remnant DEMS5", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol.486, pp.2507-2524,

(2019) 【査読あり】

DOI: 10.1093/mnras/stz971

- [2] Sano, H., Matsumura, H., Nagaya, T., Yamane, Y., Alsaberi, R. Z. E., Filipović, M. D., Tachihara, K., Fujii, K., Tokuda, K., Tsuge, K., Yoshiike, S., Onishi, T., Kawamura, A., Minamidani, T., Mizuno, N., Yamamoto, H., Inutsuka, S., Inoue, T., Maxted, N., Rowell, G., Sasaki, M., Fukui, Y., “ALMA CO Observations of Supernova Remnant N63A in the Large Magellanic Cloud: Discovery of Dense Molecular Clouds Embedded within Shock-ionized and Photoionized Nebulae”, *The Astrophysical Journal*, Vol.873, pp.40-53, (2019) 【査読あり】  
DOI: 10.3847/1538-4357/ab02fd
- [3] Sano, H., Yamane, Y., Tokuda, K., Fujii, K., Tsuge, K., Nagaya, T., Yoshiike, S., Filipovic, M. D., Alisaberi, R. Z. E., Barnes, L., Onishi, T., Kawamura, A., Minamidani, T., Mizuno, N., Yamamoto, H., Tachihara, K., Maxted, N., Voisin, F., Rowell, G., Yamaguchi, H., Fukui, Y. “Molecular Clouds associated with the Type Ia SNR N103B in the Large Magellanic Cloud”, *The Astrophysical Journal*, Vol.867, pp.7-16, (2018) 【査読あり】  
DOI: 10.3847/1538-4357/aae07c
- [4] Roper, Q., Filipovic, M., Allen, G. E., Sano, H., Park, L., Pannuti, T. G., Sasaki, M., Haberl, F., Kavanagh, P. J., Yamane, Y., Yoshiike, S., Fujii, K., Fukui, Y., Seitzzahl, I. R. “An X-ray expansion and proper motion study of the Magellanic Cloud Supernova Remnant J0509-6731 with the *Chandra* X-ray observatory”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol.479, pp.1800-1806, (2018) 【査読あり】  
DOI: 10.1093/mnras/sty1196
- [5] Babazaki, Y., Mitsuishi, I., Matsumoto, H., Sano, H., Yamane, Y., Yoshiike, S., Fukui, Y. “A Spatially Resolved Study of X-ray Properties in Superbubble 30 Dor C with *XMM-Newton*”, *The Astrophysical Journal*, Vol.864, pp.12-19, (2018) 【査読あり】  
DOI: 10.3847/1538-4357/aad6a1
- [6] Yamane, Y., Sano, H., van Loon, J. Th., Filipović, M. D., Fujii, K., Tokuda, K., Tsuge, K., Nagaya, T., Yoshiike, S., Grieve, K., Voisin, F., Rowell, G., Indebetouw, R., Lakićević, M., Temim, T., Staveley-Smith, L., Rho, J., Long, K. S., Park, S., Seok, J., Mizuno, N., Kawamura, A., Onishi, T., Inoue, T., Inutsuka, S., Tachihara, K., Fukui, Y. “ALMA observations of supernova remnant N 49 in the LMC: I. Discovery of CO clumps associated with X-ray and radio continuum shells”, *The Astrophysical Journal*, Vol.863, pp.55-69, (2018) 【査読あり】  
DOI: 10.3847/1538-4357/aacfff
- [7] Sano, H., Yamane, Y., Voisin, F., Fujii, K., Yoshiike, S., Inaba, T., Tsuge, K., Babazaki, Y., Mitsuishi, I., Yang, R., Aharonian, F., Rowell, G., Filipović, M. D., Mizuno, N., Tachihara, K., Kawamura, A., Onishi, T., Fukui, Y. “Discovery of Molecular and Atomic Clouds Associated with the Magellanic Superbubble 30 Doradus C”, *The Astrophysical Journal*, Vol.843, pp.61-67, (2017) 【査読あり】  
DOI: 10.3847/1538-4357/aa73e0
- [8] Sano, H., Fujii, K., Yamane, Y., Inaba, T., Yoshiike, S., Fukuda, T., Voisin, F., Rowell, G., Fukui, Y. “Interstellar Gas toward the Magellanic Supernova Remnants”, *AIP Conference Proceedings*, Vol.1792, pp.1-6, (2017) 【査読なし】  
DOI: 10.1063/1.4968942
- [9] Babazaki, Y., Mitsuishi, I., Sano, H., Yoshiike, S., Fukuda, T., Maruyama, S., Fujii, K., Fukui, Y., Tawara, Y., Matsumoto, H., “A Spatial Study of X-ray Properties in Superbubble 30 Dor C with *XMM-Newton*”, *Proceedings of the IAU*, Vol.29B, pp.737-737, (2016) 【査読なし】  
DOI: 10.1017/s1743921316006608

〔学会発表〕（計 25 件）

- [1] 佐野栄俊, 長屋拓郎, 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 N63A プロジェクトチーム, “大マゼラン雲の超新星残骸 N63A に付随する分子雲と電離ガス”, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年
- [2] Sano, H., “ALMA CO studies in the Magellanic supernova remnants”, Star formation with ALMA: Evolution from molecular clouds to protostars, 2019 年
- [3] 佐野栄俊, “ALMA で解き明かす超新星残骸の素顔”, 天文学講演会 南天にひろがれ宇宙ロマン 25 「星の爆発が宇宙をつくった」, 2019 年 【招待講演】
- [4] 佐野栄俊, “星間物質の精査と多波長観測を軸とした超新星残骸の探究”, 宇宙電波懇談会 シンポジウム 2018 「電波天文学の将来サイエンス」, 2018 年
- [5] Sano, H., “CO studies of Galactic / Magellanic Gamma-ray SNRs using ALMA”, Cherenkov Telescope Array Australia: Consortium Workshop 7, 2018 年
- [6] Sano, H., “ALMA CO Observations toward the Gamma-ray Supernova Remnants”, SNR Workshop 2018, 2018 年
- [7] 佐野栄俊, 山根悠望子, 長屋拓郎, 吉池智史, 柘植紀節, 立原研悟, 福井康雄, 藤井浩介, 水野範和, 河村晶子, 徳田一起, 大西利和, “大マゼラン雲の Ia 型超新星残骸 N103B に付

- 随する分子雲の発見”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年
- [8] Sano, H., “Interstellar gas associated with SNRs: Evidence for cosmic-ray acceleration”, SNR mini workshop, 2018 年
  - [9] Sano, H., “Interstellar gas associated with the Galactic and Magellanic supernova remnants”, Cherenkov Telescope Array Australia: Consortium Workshop 6, 2018 年【招待講演】
  - [10] 佐野栄俊, 吉池智史, 山根悠望子, 長屋拓郎, 立原研悟, 福井康雄, 藤井浩介, 水野範和, 河村晶子, 徳田一起, 大西利和, Kevin Grieve, Miroslav Filipovic, Fabien Voisin, Gavin Rowell, “大マゼラン雲の超新星残骸に付随する分子雲の探査”, 日本天文学会 2018 春季年会, 2018 年
  - [11] Sano, H., “Shock-cloud interaction in the Galactic/Magellanic supernova remnants: Evidence for cosmic-ray acceleration”, Interstellar Medium in the Nearby Universe 2018, 2018 年
  - [12] 佐野栄俊, “超新星残骸と相互作用する星間ガスと粒子加速”, 「自然科学における階層と全体」シンポジウム, 2018 年【招待講演】
  - [13] Sano, H., Yamane, Y., Nagaya, T., Fujii, K., Yoshiike, S., Tachihara, K., and Fukui, Y., “CO Survey toward the Magellanic Supernova Remnants”, 2017 ALMA/45m/ASTE Users Meeting, 2017 年
  - [14] Sano, H., “Interstellar Gas toward Young Gamma-Ray SNRs”, CTA Japan workshop 2017, The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma-rays 2017, 2017 年
  - [15] Sano, H., “Studies of TeV gamma-ray SNRs associated with the interstellar gas”, Cherenkov Telescope Array Australia: Consortium Workshop 5, 2017 年【招待講演】
  - [16] Sano, H., “Young supernova remnants associated with the interstellar gas; pursuit of the origin of cosmic-rays”, Theories of Astrophysical Big Bangs, 2017
  - [17] Sano, H., “Shock-Cloud Interaction in the Galactic and Magellanic Supernova Remnants”, SNR Workshop 2017, 2017 年
  - [18] Sano, H. and NANTEN team, “Shock-cloud interaction in the Galactic/Magellanic Supernova remnants”, Cherenkov Telescope Array Australia: Consortium Workshop 4, 2017 年【招待講演】
  - [19] 佐野栄俊, “超新星残骸における宇宙線研究の到達点と展望: 電波天文学の立場から”, 日本天文学会春季年会 企画セッション「超新星残骸の多波長 観測と理論研究の展開」, 2017 年【招待講演】
  - [20] 佐野栄俊, “星間物質の精査を軸にした超新星残骸の探査”, 宇宙電波懇談会シンポジウム 2016, 2017 年【招待講演】
  - [21] 佐野栄俊, “海外研究機関での在外研究を通して得られたもの”, 連携型博士研究人材総合育成システムシンポジウム 2016, 2016 年
  - [22] 佐野栄俊, 山根悠望子, 藤井浩介, 吉池智史, 稲葉哲大, 柘植紀節, 馬場崎康敬, 三石郁之, R. Yang, F. Aharonian, F. Voisin, G. Rowell, 水野範和, 立原研悟, 河村晶子, 大西利和, 福井康雄, “スーパーバブル 30 Doradus C に付随する星間ガスの観測的研究”, SNR Workshop 2016, 2016 年
  - [23] 佐野栄俊, “巨大星の最期”, 第 25 回公開セミナー「天文学の最前線」目ではみえない宇宙の姿, 2016 年【招待講演】
  - [24] Sano, H., Fujii, K., Yamane, Y., Yoshiike, S., Fukuda, T., Voisin, F., Rowell, G., Fukui, Y., “Interstellar Gas in the Magellanic SNRs”, The 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma2016), 2016 年
  - [25] Sano, H. and NANTEN team, “Shock-cloud interaction toward the Magellanic SNRs”, Cherenkov Telescope Array Australia: Consortium Workshop 3, 2016 年【招待講演】

〔図書〕(計 1 件)

- [1] Sano, H. and NANTEN team, “Shock-Cloud Interaction in RX J1713.7-3946: Evidence for Cosmic-Ray Acceleration in the Young VHE  $\gamma$ -ray Supernova Remnant”, Springer Japan, 2016 年

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~sano/>

## 6. 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

※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、研究者個人に帰属されます。