

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17607

研究課題名(和文) 分子雲衝突による大質量星形成の観測的理解

研究課題名(英文) Observational studies of the massive star formation triggered by cloud-cloud collision

研究代表者

鳥居 和史 (TORII, Kazufumi)

国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・特任助教

研究者番号：20444383

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)：本研究は、銀河面の様々な大質量星形成領域の母体分子雲を観測・探査し、大質量星の起源に迫ることを目的とした。特に近年理論的に整備が進みつつある分子雲衝突に着目した。まず、数値シミュレーションと観測を相互比較することで、2つの異なる速度を持つ2個の分子雲に見られる「相補的な空間分布」および「中間速度成分」の2つが分子雲衝突を観測的に診断する上で非常に強力であることを突き止めた。次に、様々な大質量星形成領域にこの手法を適用し、最終的に40領域を超える天体で分子雲衝突による大質量星形成の証拠を掴んだ。本研究により、分子雲衝突が銀河の大質量星形成の主要なモードのひとつを担うことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed at understanding the mechanism of high-mass stars by observing natal molecular clouds in the various high-mass star forming regions. We especially focused on the high-mass star formation triggered by cloud-cloud collision (CCC). First, we established observationally diagnostics of cloud-cloud collision by comparing between numerical calculations and observations of CCC, resulted in finding the importance of "complementary distribution" and "intermediate velocity feature" between two molecular clouds with different radial velocities. Second, we applied these diagnostics to the high-mass star forming regions in the galactic plane and Large Magellanic cloud. As a result, we discovered evidence of CCCs in more than 40 high-mass star forming regions. These results strongly indicate that CCC is one of the major modes of the high-mass star formation in the Galaxy.

研究分野：星間物理学

キーワード：星形成 電波天文 分子雲 分子雲衝突 大質量星

### 1. 研究開始当初の背景

大質量星は、圧倒的に強い星風と紫外線、さらに進化終末の超新星爆発によって巨大なエネルギーを解放し、銀河進化に決定的な影響を与える。したがって、大質量星の起源の解明は天文学の最重要課題のひとつである。しかし、過去 20 年にわたる研究にもかかわらず、大質量星の形成機構は未だに解明されていない。

2009 年以降、研究代表者を含む研究グループによって、分子雲同士の超音速衝突が大質量星の形成を誘起している観測例が 10 個弱発見された。これにより、従来ほとんど検討されていなかった「分子雲衝突による大質量星形成」の可能性が大きくクローズアップされた。この機構では、分子雲が超音速で衝突することによって効率よく圧縮され、大質量星形成が可能になる。理論面の整備も急速に進んでいる状況にあるが、銀河全体において、分子雲衝突による大質量星形成がどの程度普遍的なのかは未だ明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、これまでの成果を基礎として、大質量星形成領域の母体分子雲の徹底した研究を行い、距離が近い銀河系とマゼラン雲について、分子雲衝突と大質量星形成の関係を観測的に確立することを目指した。本研究によって分子雲衝突と O 型星形成の普遍的関係が定量的に確立され、O 型星の起源が初めて強い説得力をもって実証されることが期待される。

### 3. 研究の方法

具体的には、銀河系およびマゼラン雲に対し、観測データの解析による分子雲衝突例の探査を実施した。観測には、主に名古屋大学 NANTEN2 4m 望遠鏡、国立天文台 ASTE 10m 望遠鏡、同野辺山 45m 望遠鏡、オーストラリア Mopra 10m 望遠鏡を用いた。また、これらに加えて、アーカイブデータも用いた。

一方の観測対象天体は以下のようにまとめられる。(1) 銀河面広域に分布する比較的独立した HII (電離ガス) 領域。ここには、Spitzer バブルと呼ばれる赤外線リング構造も含まれる。これらの多くは 1~数個の大質量星からなる天体である。(2) 銀河面の若い巨大星団。体積で  $1\text{pc}^{-3}$  以下の非常に狭い範囲に、1 万個以上の星が集中する、銀河系で 10 例ほどしか知られない特異な星団である。(3) マゼラン雲の HII 領域および原始星付随天体。以上の天体の観測データの解析結果を相互比較し、また理論研究との比較を行うことで、分子雲衝突に特有の観測的特徴を確立すること、および形成される大質量星の形態・質量を決定する条件を解明することを目指した。

### 4. 研究成果

本研究の主な結果として、まず、(1) 分子雲衝突の観測的特徴の確立に成功し、これを適用することで、(2) 銀河面の 22 個の HII 領域において新たに分子雲衝突の証拠を発見したことが挙げられる。以下、この 2 点を詳しくまとめる。

(1) 本研究は、英国 University college London の Dr. Haworth, Thomas J. との共同研究として推進した。我々は、北海道大学のチームによって行われた 2 個の大小の分子雲の衝突を追跡した数値計算データ (Takahira et al. 2014, ApJ, 792, 63) に対し、輻射輸送方程式を解くことで、この衝突が実際に天球上で観測された場合の、分子輝線の空間・速度分布を調べた。

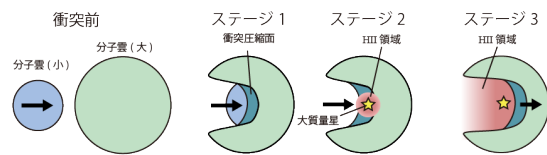


図 1: 分子雲衝突と大質量星形成の時間発展を模式的に描いたもの。ここでは、大小 2 つの分子雲の正面衝突を考える。

解析の結果、小さな分子雲が大きな分子雲に突入すると、大きな分子雲に空洞が作られることが分かった (図 1)。この空洞のサイズは小さな分子雲のサイズと一致する。したがって、衝突中のこれら分子雲を観測すると、「穴を持つ大きな分子雲」と「穴の形状と一致する分布を持つ小さな分子雲」の両者が検出されると期待される。一方、この 2 つの分子雲の衝突面では、乱流が励起される。この乱流は、衝突速度くらいの速度幅を持ち、これを超えることはない。観測的には、2 つの異なる速度の分子雲を結ぶ中間速度成分、として検出されると考えられる。以上の 2 つ、(A) 2 つの分子雲の相補的空間分布、および (B) 2 つの分子雲を速率的に結ぶ中間速度成分、が観測的に分子雲衝突を診断するための重要な手がかりを与える [19, 21]。

数値計算データから以上の知見を得た上で、観測データを用いた検証を進めた。天体は三裂星雲を選び、データは Mopra および ASTE から得られた CO J=1-0、3-2 輝線を用いた。図 2(a) に三裂星雲全景の可視光の写真、図 2(b) に中心部を観測したハッブル望遠鏡の写真を示す。三裂星雲は中心にある 1 個の O 型星からなる HII 領域である。

観測データの解析では、まず CO J=1-0 と J=3-2 輝線から分子雲の温度を推計した。結果、視線速度 2km/s および 9km/s に分布する 2 つの分子雲で有意な温度上昇が確認された。これは、2 つの分子雲が両方とも M20 に付随していることを示す。

この 2 つの分子雲の空間分布を比較すると図 2(c) の 2km/s 雲は左右に別れ、その間に

図 2(d)の 9km/s 雲が分布し、「相補的な分布」を示している。また、この 2 つの分子雲を速度的に結び中間速度成分も検出された。以上の結果は、前述の数値モデルから提案された分子雲衝突の観測的特徴と非常によく一致している [15]。

以上の結果から、分子雲衝突の観測的診断法を確立することに成功した。本研究の特筆すべき成果である。この診断法は、比較的若い分子雲衝突天体のみで有効であるが、次に述べる 20 天体を超える分子雲衝突例の発見において、重要な基盤を与えた。

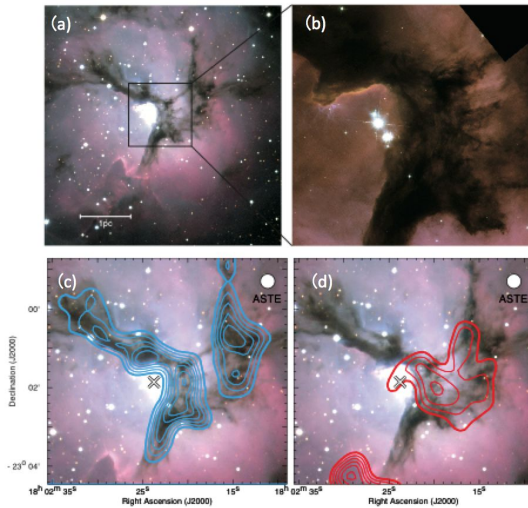


図 2 : (a) 三裂星雲 M20 の全景写真。(b) M20 中心部の O 型星周辺を拡大したハッブル望遠鏡の写真。(c, d)M20 の 2 つの衝突分子雲を等高線で示した。背景は(a)と同じ。(c)が速度 2km/s 雲, (d)が速度 9km/s 雲を示す。

(2) (1)の結果から得た分子雲衝突診断法を元に、様々な観測データを活用し、分子雲衝突天体の探査を進めた。結果、未出版のものも含めると 40 天体に上る例を発見するに至った。うち 22 天体については論文を出版、ないし論文が投稿受理されており、分子雲衝突による大質量星形成が銀河面で普遍的な現象であることを大きく裏付ける結果となった。以下、その中から HII 領域 RCW120 における結果 [22] を概説する。

図 3 に示した RCW120 は、波長 8 ミクロン (緑) の赤外線線で非常に綺麗なリング形状を示しており、内部には HII 領域と、それにより加熱されたダスト微粒子 (赤) が存在している。従来、このような構造は、高い内圧を持つ HII 領域の膨張によってできた球殻構造であると考えられていた。しかし、本研究による Mopra を用いた CO J=1-0 輝線観測の結果、そのような膨張構造は一切検出されなかった。そのため、RCW120 の綺麗なリング構造を説明する新たなモデルが必要であった。

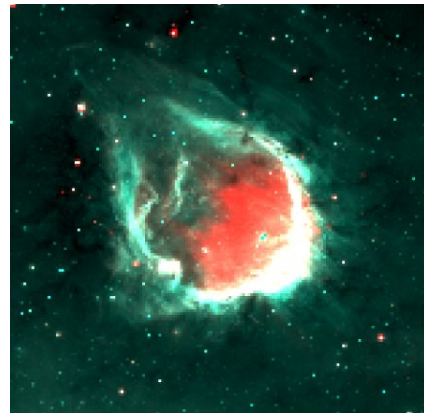


図 3: Spitzer 衛星による RCW120 の赤外線写真。緑の波長 8 ミクロンの PAH 高分子構造を、赤の 24 ミクロンが過熱されたダスト微粒子を示す。

そこで、図 1 の分子雲衝突モデルに基づくリング形成シナリオを提案した。小さな分子雲が球状であれば、衝突に際して形成される穴は円柱状になる。穴の底面にある衝突領域内で大質量星が形成されると、大質量星の強烈な紫外線により穴の内壁が照らされると共に、HII 領域が穴の内部へと広がる。この状態を観測すると、RCW120 のようなリング構造と内部の HII 領域という様子を解釈できる。実際、RCW120 にはおよそ 20km/s 離れた 2 つの分子雲が付随していることが本研究から明らかとなり、分子雲衝突による形成シナリオが非常に有力となった。

以上 2 つに加え、100pc スケールに広がった巨大 HII 領域 NGC6334+NGC6357 [13]、巨大星団 RCW38 [18]、RCW120 同様の赤外線リング構造 [1, 3]、大マゼラン雲の活発な大質量星形成領域 N159 [16, 20] 含め、40 天体で分子雲衝突の証拠を発見し、22 編の論文を出版するに至った。

本研究により、銀河面における分子雲衝突による大質量星形成の普遍性が明らかとなり、分子雲衝突が大質量星形成の主要なモードの少なくともひとつを担うことが分かった。今後は、銀河における分子雲衝突が担う星形成率の定量的な導出と、その銀河進化軸での変動を明らかにすることが重要な課題である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[ 雑誌論文 ] (計 22 件)

- [1] Torii, K., et al. “CO observations of the molecular gas in the galactic HII region Sh2-48; Evidence for cloud-cloud collision as a trigger of high-mass star formation” PASJ, 査読有, 印刷中(2018)

- [2] Fukui, Y., Torii, K., et al. "A New Look at the Molecular Gas in M42 and M43: Possible Evidence for Cloud-Cloud Collision that Triggered Formation of the OB Stars in the Orion Nebula Cluster" *ApJ*, 査読有, 859, 166 (2018) DOI: 10.3847/1538-4357/aac217
- [3] Torii, K. et al. "Large-scale CO J=1-0 observations of the giant molecular cloud associated with the infrared ring N35 with the Nobeyama 45 m telescope" *PASJ*, 査読有, 70S, 51 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psy019
- [4] Kohno, M., Torii, K., et al. "FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN): Molecular clouds toward W 33; possible evidence for a cloud-cloud collision triggering O star formation" *PASJ*, 査読有, 70S, 50 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx137
- [5] Enokiya, R., Sano, H., Hayashi, K., Tachihara, K., Torii, K., et al. "Detailed CO(J = 1-0, 2-1, and 3-2) observations toward an H II region RCW 32 in the Vela Molecular Ridge" *PASJ*, 査読有, 70S, 49 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx015
- [6] Hayashi, K., Sano, H., Enokiya, R., Torii, K., et al. "High-mass star formation possibly triggered by cloud-cloud collision in the H II region RCW 34" *PASJ*, 査読有, 70S, 48 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx141
- [7] Ohama, A., Kohno, M., Fujita, S., Tsutsumi, D., Hattori, Y., Torii, K., et al. "Molecular gas in the H II-region complex RCW 166: Possible evidence for an early phase of cloud-cloud collision prior to the bubble formation" *PASJ*, 査読有, 70S, 47 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx012
- [8] Fukui, Y., Ohama, A., Kohno, M., Torii, K., et al. "Molecular clouds toward three Spitzer bubbles S116, S117, and S118: Evidence for a cloud-cloud collision which formed the three H II regions and a 10 pc scale molecular cavity" *PASJ*, 査読有, 70S, 46 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx005
- [9] Ohama, A., Kohno, M., Hasegawa, K., Torii, K., et al. "The formation of a Spitzer bubble RCW 79 triggered by a cloud-cloud collision" *PASJ*, 査読有, 70S, 46 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx025
- [10] Fukui, Y., Kohono, M., Yokoyama, K., Nishimura, A., Torii, K., et al. "Formation of the young compact cluster GM 24 triggered by a cloud-cloud collision" *PASJ*, 査読有, 70S, 44 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx144
- [11] Sano, H., et al. (Torii, K. 24 名中 16 番目) "RCW 36 in the Vela Molecular Ridge: Evidence for high-mass star-cluster formation triggered by cloud-cloud collision" *PASJ*, 査読有, 70S, 43 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx006
- [12] Nihimura, A., et al. (Torii, K. 18 名中 12 番目) "FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). III. Possible evidence for formation of NGC 6618 cluster in M 17 by cloud-cloud collision" *PASJ*, 査読有, 70S, 42 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psx149
- [13] Fukui, Y., Kohno, M., Yokoyama, K., Torii, K., et al. "Molecular clouds in the NGC 6334 and NGC 6357 region: Evidence for a 100 pc-scale cloud-cloud collision triggering the Galactic mini-starbursts" *PASJ*, 査読有, 70S, 41 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psy051
- [14] Torii, K., et al. "A Massive Molecular Outflow in the Dense Dust Core AGAL G337.916-00.477" *ApJ*, 査読有, 840, 111 (2017) DOI: <http://10.3847/1538-4357/aa6fa8>
- [15] Torii, K., et al. "Triggered O Star Formation in M20 via Cloud-Cloud Collision: Comparisons between High-resolution CO Observations and Simulations" *ApJ*, 査読有, 835, 142 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/142
- [16] Saigo, K., et al. (Torii, K., 23 名中 10 番目) "Kinematic Structure of Molecular Gas around High-mass YSO, Papillon Nebula, in N159 East in the Large Magellanic Cloud: A New Perspective with ALMA" *ApJ*, 査読有, 835, 108 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/108
- [17] Hattori, Y., et al. (Torii, K., 12 名中 5 番目) "Mid- and far-infrared properties of Spitzer Galactic bubbles revealed by the AKARI all-sky surveys" *PASJ*, 査読有, 68, 37 (2016) DOI: 10.1093/pasj/psw028
- [18] Fukui, Y., Torii, K., et al. "The Two Molecular Clouds in RCW 38: Evidence for the Formation of the Youngest Super Star Cluster in the Milky Way Triggered by Cloud-Cloud Collision" *ApJ*, 査読有, 820, 26 (2016) DOI: 10.3847/0004-637X/820/1/26



- [19] Haworth, T.J., Shima, K., Tasker, E.J., Fukui, Y., Torii, K., et al. "Isolating signatures of major cloud-cloud collisions - II. The lifetimes of broad bridge features" MNRAS, 査読有, 454, 1634 (2015) DOI: 10.1093/mnras/stv2068
- [20] Fukui, Y., et al. (Torii, K., 23 名中 6 番目) "High-mass Star Formation Triggered by Collision between CO Filaments in N159 West in the Large Magellanic Cloud" ApJ, 査読有, 807L, 4 (2015) DOI: 10.1088/2041-8205/807/1/L4
- [21] Haworth, T.J., Tasker, E.J., Fukui, Y., Torii, K., et al. "Isolating signatures of major cloud-cloud collisions using position-velocity diagrams" MNRAS, 査読有, 450, 10 (2015) DOI: 10.1093/mnras/stv639
- [22] Torii, K., et al. "Cloud-Cloud Collision as a Trigger of the High-mass Star Formation: a Molecular Line Study in RCW120" ApJ, 査読有, 806, 7 (2015) DOI: 10.1088/0004-637X/806/1/7

〔学会発表〕(計 11 件)

- [26] 鳥居和史他「FUGIN が見た分子雲衝突」国立天文台研究集会「星形成と銀河構造における磁場の役割」鹿児島大学, 鹿児島 (2017 年 12 月 20-22 日) (招待講演)
- [27] 鳥居和史他「ALMA を用いた巨大星団 RCW38 に対する分子ガスと電離ガスの高分解能観測」日本天文学会 2017 年秋季年会北海道大学, 北海道 (2017 年 9 月 11 日~9 月 13 日) (口頭発表)
- [28] Torii, K., et al., "Nobeyama CO galactic plane survey" 2017 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM), Taipei, Taiwan (3-7 Jul. 2017) (招待講演)
- [29] 鳥居和史「分子雲衝突が解き明かす大質量星形成の謎」星間現象ワークショップ ホテルメルパルク名古屋, 愛知 (2017 年 3 月 24 日) (招待講演)
- [30] Torii, K., et al. "FUGIN: FOREST Ultra-wide Galactic Plane Survey In Nobeyama" JCMT Users Meeting 2017, Nanjing, China (Feb. 2017) (口頭発表)
- [31] 鳥居和史他「サーベイデータで探る大質量星形成:分子雲衝突による誘発的星形成の観点から」「あかり」サイエンスワークショップ 国立天文台, 東京 (2016 年 11 月 7 日) (招待講演)
- [32] 鳥居和史他「NRO 銀河面サーベイプロジェクト(FUGIN) : Spitzer バブル N18 における分子雲衝突と大質量星形成」日

本天文学会 2016 年秋季年会, 愛媛大学, 愛媛(2016 年 9 月 14 日~9 月 16 日) (口頭発表)

- [33] 鳥居和史他「巨大星団 RCW38 における O 型星のフィードバックと分子雲との相互作用」日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京, 東京(2016 年 3 月 14 日~3 月 17 日) (口頭発表)
- [34] Torii, K., et al. "High-mass star formation via cloud-cloud collision" ALMA/45m/ASTE/Mopra Users Meeting, NAOJ, Tokyo, Japan (Oct. 2015) (口頭発表)
- [35] 鳥居和史他「Spitzer バブル S36 に対する分子雲観測:分子雲衝突による大質量星形成」日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学, 兵庫 (2015 年 9 月 9 日~11 日) (口頭発表)
- [36] 鳥居和史他「分子雲衝突による大質量星形成」国立天文台談話会, 国立天文台, 東京 (2015 年 4 月 24 日) (口頭発表)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鳥居 和史 (TORII, Kazufumi)  
自然科学研究機構・国立天文台・特任助教  
研究者番号 : 20444383