

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740144

研究課題名(和文) 赤外暗黒雲の化学組成から探る大質量星形成

研究課題名(英文) Investigating high-mass star formation through chemical compositions of infrared dark clouds

研究代表者

酒井 剛 (SAKAI TAKESHI)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教

研究者番号：20469604

研究成果の概要(和文)：

本研究の目的は、大質量星形成初期段階にある天体(赤外暗黒雲)の化学組成を明らかにし、それをもとに大質量星の形成過程を理解することである。我々は、野辺山 45m 望遠鏡、ASTE 望遠鏡に搭載されたミリ波サブミリ波帯受信機を用いたサーベイ観測によって、大質量星形成初期天体の化学進化の様子を初めて明らかにした。このサーベイ観測の結果、大質量星形成のごく初期にある天体では、SiO や CH<sub>3</sub>OH の存在量が増加しており、原始星からの outflow と周囲の高密度ガスとの相互作用が激しく起きていることなどがわかった。本研究によって得られたデータは今後の高分解能観測のためにも非常に重要なデータとなる。

研究成果の概要(英文)：

We have investigated the high-mass star formation on the basis of the chemical compositions of infrared dark clouds (IRDCs), which are thought to be in early evolutionary stages of high-mass star formation. For this purpose, we have carried out a survey of molecular lines toward massive clumps associated with infrared dark clouds (IRDCs) by using the Nobeyama Radio Observatory 45 m telescope and the ASTE 10 m telescope. We have found that the SiO and CH<sub>3</sub>OH abundances relative to H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> are enhanced in several IRDC clumps. Since SiO and CH<sub>3</sub>OH are known as "shock tracers", this results means that an interaction between outflows and dense gas frequently occurs in early evolutionary stages of high-mass star formation. The data obtained are useful for future high-resolution observations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：電波天文学・星間物質・星間分子・赤外暗黒雲・大質量星形成

## 1. 研究開始当初の背景

大質量星 ( $> 8 M_{\text{sun}}$ ) は、強力な紫外線輻射や星風などによって星間空間に莫大なエネルギーを放出し、周囲の星形成に大きな影響を

与える。また、超新星爆発によって多くの重元素を星間空間にまき散らし、銀河内の物質循環に重要な役割を果たしている。しかし、このように銀河の進化に重要な役割を果た

している大質量星がどうやって形成されるのかということ、はまだよくわかっていない。

大質量星形成を考える上で問題とされているのが、輻射圧の問題である。小質量星と同じモデル (e. g. Shu 1977, ApJ, 214, 488) で考えた場合、星からの強い輻射圧によって、ガスやダストが星へ降着できないと考えられるからである。その問題を克服するために、ディスクを介しての降着モデル (e. g. Yorke & Sonnhalter, 2002, ApJ, 569, 846) や、小さな原始星が合体してできるモデル (Bonnell et al. 1998, MNRAS, 298, 93) などが提唱されている。しかし、それらのモデルは、降着と合体という物理的に極めて異なる現象であるにもかかわらず、現在までに明確な観測的実証がなされていない。

大質量星の形成過程があまり明らかにされていない理由の一つに、大質量星形成初期の天体の性質がよくわかっていないということがあげられる。これは、大質量星形成初期の天体が、1990年代後半までほとんど見つかっていなかったことに起因する。しかし、近年、ISO や MSX など比較的高分解能な赤外線観測衛星によって中間赤外で dark な天体が多数発見され、大質量星形成初期の候補天体として注目が集まっている。このような天体を赤外暗黒雲 (Infrared dark cloud: IRDC) と呼ぶ。最近、赤外暗黒雲に対して、ミリ波サブミリ波の連続波観測が行われ、赤外暗黒雲に付随する低温かつ高密度な大質量クランプが多数発見されている。それら大質量クランプは、現在活発な大質量星形成を伴うクランプと同程度の質量を持つことから、大質量星形成初期の天体と考えられている。研究開始当初、それらクランプの詳細な物理的・化学的性質について、あまり明らかにされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、赤外暗黒雲に付随する大質量クランプの化学組成から大質量星形成過程を探る。分子雲内部の化学組成は、中性-中性反応やイオン-中性反応などの原子/分子同士の衝突によって、比較的ゆっくり ( $\sim 10^6$  yr) と変化していく。そのため、分子雲コアの形成初期と後期では化学組成が異なることが、観測的 (e. g. Suzuki et al. 1992, ApJ, 392, 551) にも理論的 (e. g. Bergin & Langer 1997, ApJ, 486, 316) にも示されている。さらに、分子雲内部で星形成が起こることによっても、分子雲の化学組成は大きく変化する。原始星からのエネルギーによって周囲のダストが加熱され、ダスト上に吸着していた分子がガス中へと解放されるためである。さらに、ダストから蒸発した分子がガス中で反応することで、星形成以前には存在していなかった分子が形成される。こ

のようなことから、化学組成を明らかにすることで分子雲の進化段階を把握することが可能になる。特に星形成以前の天体や、星形成初期天体の進化段階を明らかにする上で非常に有効な手段となる。このような化学組成を基に進化段階を判定するという手法は、主に小質量星形成領域に対して行われ、その有効性が示されてきた (e. g. Suzuki et al. 1992, ApJ, 392, 551)。一方、大質量星形成初期天体の化学組成に関する研究は、最近まであまり行われていなかった。本研究では、中間赤外暗黒雲に付随する大質量クランプの化学組成を明らかにし、進化とともに大質量クランプ内部の物理状態がどのように変化していくか理解する。

## 3. 研究の方法

これまでに、連続波でのマッピング観測によって数百もの数の大質量クランプが見つかっている。しかし、それらクランプがどのような進化段階にあるのかは、赤外線と連続波の観測のみでは明らかではない。これら天体の進化段階を明確にするために、野辺山 45m 望遠鏡、ASTE 望遠鏡を用いて分子輝線のサーベイ観測を行い、化学組成のデータベースを構築する。野辺山 45m 望遠鏡用受信機を広帯域化することで、本観測をより効率よく行う。分子種によって存在量がピークを迎える時期やトレースする領域が異なるため、より多くの分子の存在量や運動状態を明らかにすることで、内部での星形成活動についてのより詳細な情報が得られる。より具体的に以下に示す。

(1) 野辺山 45m 望遠鏡用 100 GHz 帯 2SB 受信機の高帯域化: サーベイ観測をより効率よく行うため、45m 望遠鏡用 100 GHz 帯受信機の高帯域化を行う。改良を行う受信機は、平成 19 年度に我々が新たに 45m 望遠鏡に搭載した 2SB 受信機である (Nakajima, Sakai et al. 2008)。2SB 受信機とは 2 つのサイドバンド (Upper Side Band (USB) と Lower Side Band (LSB)) を分離し同時に観測が行える受信機である。現在の受信システムでは、中間周波数帯が 5-7 GHz のみしか観測できないが、これを 4-12 GHz へと拡大する。この受信機では 2 つの偏波と 2 つのサイドバンドの計 4 つの周波数帯を同時に観測可能であるため、32 GHz の同時受信が可能になる。従来の受信システムでは、分光計などの制限もあり 4 GHz までしか観測できなかった。野辺山 45m 望遠鏡では、新たに 2 ビーム 2SB 受信機 (本研究で用いる受信機とは別の受信機) が搭載されることに合わせて、バンド幅 2 GHz の分光計を 16 台導入予定である。この分光計と組み合わせることで、全 32 GHz 帯域をカバーでき、従来の 8 倍の観測効率が得られる。改良は、IF ハイブリッド、冷却アイソレータ、冷却ア

ンプを 4-12 GHz 対応のものに交換することで実現できる。

#### (2) 赤外暗黒雲に対する分子輝線サーベイ

Simon ら (2006, ApJ, 639, 277) によって 1 万個以上の赤外暗黒雲がカタログされているが、それら全てに大質量クランプが付随しているわけではない。減光量が視線方向で積分されていることや、背景光にむらがあることなどから、中間赤外での減光量が直接高密度領域の割合に反映されないためである。したがって、連続波によって観測が行われ大質量クランプの存在が明らかになっている領域に対して観測を行う。具体的には、Beuther ら (2002, ApJ, 566, 945)、Sridharan ら (2005, ApJ, 534, L54)、Rathborne ら (2006, ApJ, 641, 389) によって発見された天体 (268 天体) の中から選ぶ。

観測は野辺山 45m 望遠鏡、ASTE10m 望遠鏡を用いて行う。観測する輝線は、ショックトレーサーである  $\text{CH}_3\text{OH}$  や  $\text{SiO}$ 、高温ガストレーサーである  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  などである。存在量だけでなく輝線の速度幅を見ることで内部の原始星の活動状況を把握することもできる。さらに、重水素化物輝線の観測も行い、重水素濃縮度も明らかにする。これら分子の存在量をモデル計算の結果と比較することで、大質量星形成の初期の物理状態についての情報を得る。

#### 4. 研究成果

(1) 野辺山45m望遠鏡用100 GHz帯2SB受信機の広帯域化：観測の効率化のために、野辺山45m望遠鏡用100 GHz帯受信機のIF帯域を従来の4-8 GHzから4-12 GHzへと広帯域化した。ただし、分光計の帯域の関係から、観測可能なIF帯域は4-11 GHzである。実際に4-11 GHzにおいて観測を行い正常に動作することを確認している。また、この改良によって、従来の4-8 GHz帯における雑音温度の低下と安定性の向上も実現している。本受信機は、共同利用観測装置として本研究のみならず、多くの研究者に用いられ、様々な成果をあげることにも貢献している。

(2) 赤外暗黒雲に対する分子輝線サーベイ：大質量星形成初期段階にあると思われる大質量クランプ 20 天体に対して、野辺山 45m 望遠鏡を用い  $\text{CH}_3\text{OH}$ 、 $\text{C}^{34}\text{S}$ 、 $\text{SiO}$ 、 $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  などの分子輝線のサーベイ観測を行った。その結果、赤外暗黒雲では、中間赤外線源が付随する天体に比べ、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 、 $\text{C}^{34}\text{S}$ 、 $\text{SiO}$  輝線の線幅が比較的広く、また、 $\text{SiO}/\text{H}^{13}\text{CO}^+$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}^{13}\text{CO}^+$  存在量比も大きいことがわかった (図 1)。 $\text{SiO}$  はショック領域を主にトレースすることから、大質量星形成初期段階にあるクランプの化学組成にはアウトフローと分子ガスの衝突が重要な役割を果たしていると考えられ

る。これらの輝線が進化段階を理解する上で重要な役割を果たすことを初めて示した。

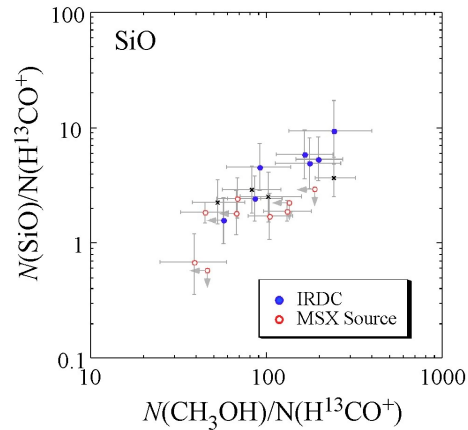


図 1. 大質量星形成領域に対する  $N(\text{SiO})/N(\text{H}^{13}\text{CO}^+)$  と  $N(\text{CH}_3\text{OH})/N(\text{H}^{13}\text{CO}^+)$  の相関図

(3) 中間赤外暗黒雲の DNC/HNC 比：野辺山 45m 望遠鏡を用いた DNC/HNC 輝線の観測の結果、大質量星形成領域では小質量星形成領域に比べ DNC/HNC 比が有意に低いことがわかった。観測結果と化学モデル計算の詳細な比較も行った結果、得られた観測結果を説明するには、大質量星形成の初期状態が小質量星のそれにくらべ高温であったか、大質量星の星なしコアのタイムスケールが小質量星に比べ短い必要があることが新たにわかった。

(4) 中性炭素原子輝線の観測：ASTE 望遠鏡を用いたサブミリ波帯受信機を搭載し輝線の観測を行った。天候不良のため有効なデータを得ることができなかつたが、複数の赤外暗黒雲において中性炭素原子輝線を検出することができ、今後の詳細観測の計画を立てる上で有効なデータを得ることができた。

本研究によって得られたデータは、ALMA などを用いた観測計画を立てる上で非常に重要な役割を果たすことができ、今後の研究を発展させていく上でも貴重な情報となる。

#### 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 3 件)

① Sakai, T., Sakai, N., Hirota, T., Yamamoto, S., “A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Stages of High-Mass Star Formation”, the *Astrophysical Journal*, 714, 1658-1671 (2010) 査読有

② 酒井剛、岩下浩幸、中島拓、伊王野大介、

高野秀路、久野成夫、川辺良平、河野孝太郎、山本智、”野辺山 45m 望遠鏡 100 GHz 帯受信機の IF 広帯域化”、2011 年日本天文学会春期年会予稿集、1 (2011)、査読無

③酒井剛、塚越崇、井上裕文、河野孝太郎、山本智、岩下浩幸、田村陽一、廿日出文洋、島尻芳人、大島泰、川辺良平、佐藤直久、飯塚吉三、関本裕太郎、田村友範、野口卓、小笠原隆亮、他 ASTE チーム、”Band 8 QM 受信機の ASTE 望遠鏡への搭載”、2011 年日本天文学会春期年会予稿集、1 (2011)、査読無

[学会発表] (計 4 件)

①Sakai, T., Sakai, N., Hirota, T., Shiba, S., Yamamoto, S., “DNC/HNC Ratio in High-Mass Star Forming Regions”, Millimeter and Submillimeter Astronomy at High Angular Resolution, Taipei, Taiwan, 2009/06/08-12

②Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Yamamoto, S., ” DNC/HNC Ratio in High-Mass Star Forming Regions: Probing the Initial Condition of High-mass Star Formation”, Submillimeter and THz Astrochemistry, Tokyo, Japan, 2010/03/17-18

③酒井剛、藤井由美、野口卓、井上裕文、河野孝太郎、”ASTE 350 GHz 帯受信機の性能向上”、2010 年日本天文学会秋季年会、金沢、2011 年 9 月

④酒井剛、”Infrared dark clouds について”、第 6 回星形成ワークショップ、東京、2010 年 11 月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井 剛 (SAKAI TAKESHI)

東京大学・理学系研究科・特任助教

研究者番号：20469604

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし