

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400225

研究課題名(和文) 化学組成から探る星団形成初期の分子雲分裂過程とその多様性

研究課題名(英文) Studies of Chemical Compositions of Cluster Forming Clumps

研究代表者

酒井 剛 (Sakai, Takeshi)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：20469604

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)：本研究の目的は、ミリ波帯の分子原子輝線観測によって、分子雲クランプ内部での星団形成過程を明らかにすることである。星団形成の初期段階にあると考えられる天体G34.43+00.24 MM3に対し、ALMA望遠鏡を用いた高分解能観測を行った。その結果、分子雲クランプ内部に、原始星とそれに付随する極く若い(<1000年)分子流を発見した。さらに、原始星周囲の高温領域が典型的な小質量星のそれに比べ有為に大きいことがわかった。このことは、星団内での星形成は、孤立した小質量星形成とは異なる過程で起きることを示唆している。さらに、分子雲クランプ内部での重水素濃縮度の振る舞いなどについても明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have observed a cluster forming clump (MM3) associated with the infrared dark cloud G34.43+00.24 with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). We have found a young outflow (age < ~1000 yr) and a hot core toward the center of this clump. The size of the hot core is found to be much larger than that of the typical low-mass hot corinos, suggesting a high accretion rate or the presence of multiple star system harboring a few hot corinos. We have also found highly deuterated regions toward the center of the clump, although the DNC/HNC ratio of this clump is very low in the observations with the single-dish Nobeyama 45 m telescope. We think that the DNC and HNC emission observed with the single-dish telescope traces lower density envelopes, while that observed with ALMA traces higher density and highly deuterated regions.

研究分野：電波天文学

キーワード：星形成 星団 分子雲 星間分子

1. 研究開始当初の背景

我々の銀河系に存在する恒星の大部分(70-90%;Lada & Lada,2003,ARA&A,41,57)は、星団として生まれてくることが知られている。したがって、星団形成の理解は、我々の銀河系の進化にも直結する重要な課題の一つである。星団は、分子雲クラumpと呼ばれる、質量の大きな分子ガスの塊の中で形成される。しかし、分子雲クラumpがどのように分裂し、内部でどのように個々の星が誕生し、星団が形成されるのか、未だ明らかにされていない。本研究では、本格的に稼働し始めた ALMA 望遠鏡を用い、星団形成の初期段階にあると考えられる分子雲クラump内部の物理状態、化学組成を明らかにすることで、星団形成過程に迫る。

2. 研究の目的

星団形成の理解のため、本研究では、特に以下の2点に着目する。

(1) どのような順で個々の星が生まれてくるのか

分子雲クラump内部で、どのような順に個々の星が誕生してくるのか理解することは、星団形成過程に迫る重要な問題である。例えば、原始星が周囲のガスを加熱することで分裂を妨げ、大質量星を作るような大質量分子雲コアが形成されるとすれば、より質量の大きい恒星は、質量の小さな恒星より後に生まれる可能性が高い。実際、小質量星が先に形成されていることを示唆する結果も報告されている(Kumar et al.2006,A&A,449,1033)。しかし、観測例が少なく、小質量星が先に形成されるのかどうか、まだよくわかっていない。分子雲クラump内部の化学組成などからこの問題に迫る。

(2) 星団形成の多様性

これまでの、野辺山 45m 望遠鏡を用いた観測の結果、同じような進化段階にある分子雲クラumpでも、中性分子の重水素濃縮度(DNC/HNC)に違いが見られることがわかっている(Sakai et al. 2012,ApJ,747,id140)。分子雲の重水素濃縮度は、分子雲の温度に依存し、20 K 以下の低温状態では、濃縮度が大きく増加する。また、中性分子の重水素濃縮度は、星形成によって周囲のガスが加熱され温度が上昇してもすぐには解消されない。したがって、中性分子の重水素濃縮度は、星形成による加熱後も、星形成前の低温状態の情報を保持していると考えられる。そうであるとすれば、この重水素濃縮度の違いは、星形成前の重水素濃縮度の違い、つまり初期の温度の違いを反映していると考えられる。初期の温度の違いは、分裂過程に影響を与え、内部でできる恒星の質量分布などに違いを生む可能性がある。しかし、野辺山 45m 望遠鏡の観測では、分解能が低く、重水素濃縮度の違いの起源をさぐるためには、高分解能観測が必要である。本研究では、ALMA 望遠鏡を用いた高分解能観測により、分子雲ク

ラump内部の重水素濃縮度を詳細に調べることで、その振る舞いを明らかにし、星団形成の多様性に迫る。

3. 研究の方法

ALMA 望遠鏡による高分解能観測によって、星団形成初期にあると考えられる分子雲クラump内部を観測し、化学組成、力学的性質を明らかにする。観測する天体は、星団形成の初期段階にあると考えられている赤外線暗黒星雲の中から、野辺山 45m 望遠鏡による観測で、最も重水素濃縮度が低かった天体 G34. 43+00. 24 MM3 を選ぶ。観測する輝線は DNC, HN^{13}C に加え、 SiO や CH_3OH など、衝撃波で存在量が増加する分子も観測する。これによって分子流などの影響も調べる。

さらに、重水素化分子の観測を効率良く進めるため、野辺山 45m 望遠鏡の 70 GHz 帯受信機の広帯域化を進める。

4. 研究成果

(1). 赤外線暗黒星雲 G34. 43+00. 24 MM3 に付随するホットコアの発見

ALMA 望遠鏡を用い、赤外線暗黒星雲 G34. 43+00. 24 MM3 に対する分子輝線の観測を行った。その結果、この分子雲クラump内部に生まれたばかりの原始星とそれに付随する分子流を発見した。分子流の年齢から、原始星が誕生してから約 1000 年以下と非常に若い天体であることがわかった。さらに、原始星周囲のホットコアと呼ばれる高温(>100 K)領域の大きさが、典型的な低質量星のそれに比有為に大きいことがわかった。年齢が若いにも関わらず、大きなホットコアを持つことは、この原始星が典型的な小質量星とは異なるメカニズムで誕生していることを示唆している。大きなホットコアを持つ要因として、高い質量降着率や複数の原始星が誕生していることが考えられる。

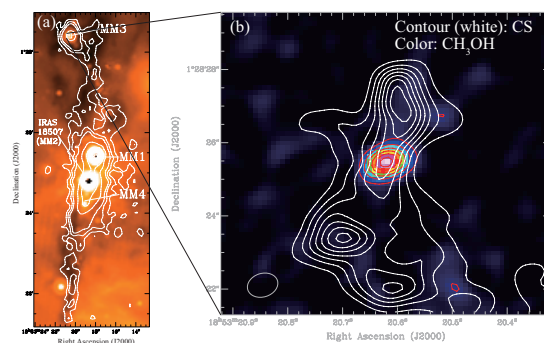


図 1. (a) 赤外線暗黒星雲 G34. 43+00. 24 MM3 の赤外線画像 (Rathborne et al. 2006, ApJ, 641, 389)。 (b) ALMA 望遠鏡による観測結果。

さらに、ホットコアでは、 HCOOCH_3 、 CH_3OCH_3 、 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ など複雑な有機分子が多数検出された。複雑な有機分子の存在量を他天体と比較した結果、小質量星形成領域よりも、大質量原始星領域の組成により近いことがわかつ

た。今後、この天体に対して高分解能観測を行うことで、星団形成領域における星形成と孤立した星形成の違いを明確にすることができると思われる。

(2). G34.43+00.24 MM3 内部での星形成

G34.43+00.24 MM3 において、前述の分子流とは異なる CH₃OH 輝線の広がった成分が見られた(図 2)。これは、過去の星形成活動の影響によるものと考えられ、若いと考えられていた G34.43+00.24 MM3 が、既に活発な小質量星の形成を経験していたことを意味している。この結果は、星団形成において小質量星が先にできる可能性を示唆している。

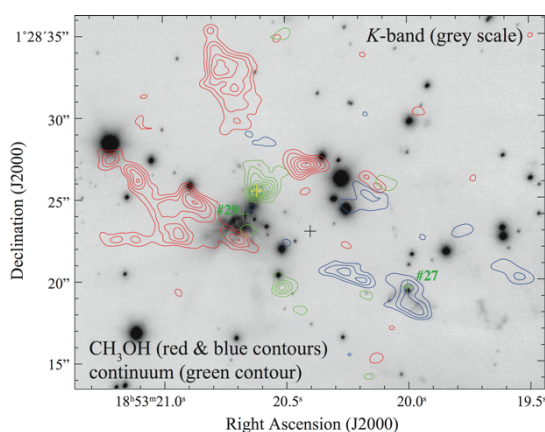


図 2. 赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 の CH₃OH 輝線の高速成分と低速成分の分布。

(3). Class I CH₃OH メーザーの起源

G34.43+00.24 MM3 に対し、ALMA 望遠鏡を用い CH₃OH メーザーの観測を行った。観測の結果、原始星から吹き出した分子流と周囲の冷たいガスが衝突した領域で CH₃OH メーザーが励起されていることがわかった(図 3)。このように CH₃OH メーザーと周囲のガスとの関係を観測的に明確に明らかにすることができたのは、この結果が初めてである。さらに、衝撃波をよくトレースする SiO 輝線が検出されないメーザー源もあることがわかった。このことは、CH₃OH メーザーが弱い衝撃波、もしくは古い衝撃波もトレースする可能性を示唆している。CH₃OH メーザーが分子雲クランプ内での星形成活動を理解する上で重要な指標になることを示した。

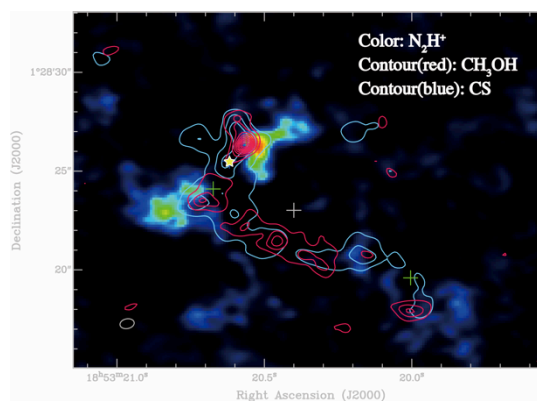


図 3. ALMA 望遠鏡による G34.43+00.24 MM3 に対する N₂H⁺, CH₃OH メーザー, CS 輝線の観測結果。CS 輝線は分子流をトレースし、N₂H⁺は低温高密度ガスをトレースする。分子流と低温ガスが衝突したところでメーザーが励起されていることがわかる。

(4). 分子雲クランプ内部の重水素濃縮度

これまでの野辺山 45m 望遠鏡による観測から、G34.43+00.24 MM3 では、DNC/HNC 比が他天体に比べ有意に低いことがわかってきた。G34.43+00.24 MM3 に対する、ALMA 望遠鏡を用いた DNC, HN¹³C 輝線の観測を行った結果、分子雲内部に DNC/HNC 比が高い領域が存在することがわかった。これは、ALMA 望遠鏡では、分子雲内部の高密度かつ重水素濃縮度の高い領域のみを観測しており、一方、野辺山 45m 望遠鏡では密度の低い広がった成分を主に観測しているためと考えられる。このことから、野辺山 45m 望遠鏡で見られた、DNC/HNC 比の違いは、高密度領域の割合の違いを反映していると考えられる。野辺山 45m 望遠鏡の観測では、同じような進化段階にあると思われる天体でも、DNC/HNC 比に違いがみられた。したがって、DNC/HNC 比の違いは、分子雲クランプ内部での高密度領域の形成過程にも多様性があることを示唆している。

さらに、原始星近傍の温度の高い領域で、DNC/HNC 比が高いこともわかった(図 4)。このことは、DNC/HNC 比が、星形成による温度上昇によってすぐに減少せず、星形成前の低温期の DNC/HNC 比を保持しているためと考えられる。DNC/HNC 比が分子雲クランプ内部でのコア形成過程を理解するために重要な指標となることを観測的に示すことができた。

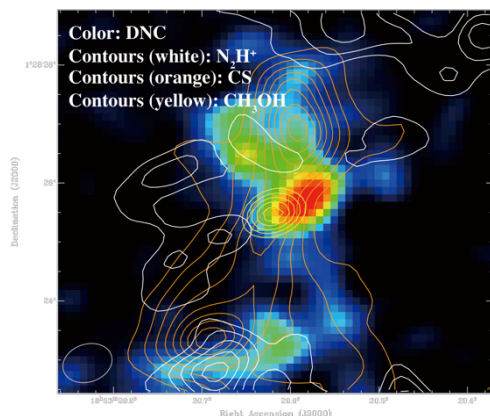


図 4. ALMA 望遠鏡による G34.43+00.24 MM3 に対する DNC, N_2H^+ , CH_3OH , CS 輝線の観測結果。DNC 輝線は原始星(黄色いコントアのピーク位置)近傍で強く。そこでは N_2H^+ 輝線の強度が弱いことがわかる。 N_2H^+ は温度が高い領域では存在量が減少するため、DNC 輝線は温度が高い領域で強いことがわかる。

(5). 70 GHz 帯受信機の広帯域化

野辺山 45m 望遠鏡の IF 広帯域化のため、SIS 素子を新たに設計製作した。これまで、SIS 接合の同調回路には、SIS 接合を 2 個並列に並べたものを使用していた。そのため、SIS 接合全体のキャパシタンスが増加し、IF 帯域が制限されるという問題があった。その問題を解決するため、SIS 接合を直列に並べ、キャパシタンスを小さくすることで、IF 広帯域化を図った。実際に製作した SIS 素子の性能を測定した結果、IF 4-11 GHz でフラットな性能が得られ、広帯域化を実現することができた。

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 4 件)

- ① Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Foster, J.B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Yamamoto, S., "ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: DNC/HNC Ratio", 2015, The Astrophysical Journal, Volume 803, id. 70, 9pp
- ② Yanagida, T., Sakai, T., Hirota, T., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Furuya, K., Aikawa, Y., Yamamoto, S., "ALMA Observations of of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: 278 GHz Class I Methanol Masers", 2014, The Astrophysical Journal Letters, Volume 794, 2014, id. L10, 6pp
- ③ Fontani, F., Sakai, T., Furuya, K., Sakai, N., Aikawa, Y., Yamamoto, S., "DNC/HNC and N_2D^+/N_2H^+ ratios in high-mass star-forming cores", Monthly Notices of the Royal

Astronomical Society, Volume 440, Issue 1, pp. 448-456

- ④ Sakai, T., Sakai, N., Foster, J. B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Kassis, M., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Yamamoto, S., "ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows", The Astrophysical Journal Letters, Volume 775, Issue 1, article id. L31

[学会発表] (計 11 件)

- ① 酒井剛, "電波観測で探る大質量星形成過程", 宇宙・電磁環境センター研究集会(電気通信大学), 2015/12/25
- ② Sakai, T., "Observational Studies of Initial Conditions for High-Mass Star Formation", East Asian ALMA Science Workshop 2015 (I-site Nanba), 2015/12/8-12/11 (招待講演)
- ③ 酒井剛, 柳田貴大, 坂井南美, 古家健次, 相川祐理, 廣田朋也, Patricio Sanhueza, Jonathan B. Foster, James M. Jackson, 山本智, "IRDC G34.43+00.24 MM3 に付随した若いホットコアの化学組成", 日本天文学会 2015 年秋季年会 (甲南大学), 2015/9/9-9/11
- ④ Sakai, T., "Review of Observations of High-Mass Star Formation", NRO-ALMA Science/Development Workshop 2015, (Nobeyama Radio Observatory), 2015/7/28-7/30 (招待講演)
- ⑤ Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Foster, J.B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Yamamoto, S., "Deuterium Fractionation in Cluster Forming Clumps", Star Formation 2015: From Clouds to Cores (National Astronomical Observatory of Japan), 2015/6/29-7/1 (招待講演)
- ⑥ Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Foster, J.B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Yamamoto, S., "DNC/HNC Ratio in Molecular Clumps", The Soul of High-Mass Star Formation 2015 (Puerto Varas, Chile), 2015/3/16-20
- ⑦ Sakai, T., Sakai, N., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T., Foster, J.B., Sanhueza, P., Jackson, J. M., Yamamoto, S., "DNC/HNC Ratio in the IRDC clump G34.43+00.24 MM3", Workshop on Interstellar Matter 2014 (Hokkaido University), 2014/10/16-18
- ⑧ 柳田貴大, 酒井剛, 廣田朋也, 坂井南美, Jonathan B. Foster, Patricio Sanhueza, James M. Jackson, 古家健次, 相川祐理, 山本智, "ALMA 望遠鏡による IRDC Clump G34.43+00.24 MM3 に対する Class I CH_3OH メーザーの観測", 日本

- 天文学会秋季年会, (山形大学),
2014/9/11-13, 一般公演
- ⑨ 酒井剛, 坂井南美, 古家健次, 相川祐理,
廣田朋也, Jonathan B. Foster, Patricio
Sanhueza, James M. Jackson, 山本智,
“ALMA による IRDC clump G34.43+00.24
MM3 に対する DNC/HNC の観測”, 日本天文
学会秋季年会, (山形大学),
2014/9/11-13, 一般公演
- ⑩ Sakai, T., Sakai, N., Foster, J. B.,
Sanhueza, P., Jackson, J. M., Kassis,
M., Furuya, K., Aikawa, Y., Hirota, T.,
Yamamoto, S., “ALMA Observations of
the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3”, The
Astronomical Society of Japan, Annual
Meeting 2014, Spring, (International
Christian University), 2014/3/19-22
- ⑪ 酒井剛、池谷瑞基、野口卓、”70 GHz 帯
SIS 素子の開発”, 第 14 回ミリ波サブミ
リ波受信機ワークショップ, (茨城大学),
2014/3/3-4

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 剛 (SAKAI TAKESHI)
電気通信大学・情報理工学研究科・助教
研究者番号: 20469604

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし