

# アルマ望遠鏡による赤外線暗黒星雲観測と大質量星形成



酒井 剛

〈電気通信大学大学院情報理工学研究所 基盤理工学専攻 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1〉  
e-mail: takeshi.sakai@uec.ac.jp

大質量星の形成過程を理解するためには、その初期状態を観測的に明らかにすることが非常に重要です。そのための観測対象として、赤外線暗黒星雲と呼ばれる天体が注目され、近年活発に研究が行われています。われわれは、赤外線暗黒星雲の重水素濃縮度を明らかにすることで、大質量星形成の初期状態を探ろうとしています。本稿では、ALMAを用いた赤外線暗黒星雲に対する重水素化分子輝線の高分解能観測の結果を紹介し、赤外線暗黒星雲内部での星形成と重水素濃縮の関係について説明いたします。

## 1. 大質量星形成

大質量星 (>8太陽質量) は、巨大な分子流や、星風、強力な紫外線、超新星爆発などによって、星間空間に莫大なエネルギーを放出し、銀河の進化に重要な役割を果たしています。しかし、大質量星がどのように形成されるのか、まだよくわかっていません。大質量星が形成されるためには、小質量星に比べ高い質量降着率が必要です。大質量星形成を考えるうえで重要な点は、この高い質量降着率がどのように実現されているのか明らかにすることです。

大質量星は、一般に、分子雲クランプと呼ばれる質量の大きな分子ガスの塊の中で形成されます。現在、分子雲クランプ内部において高い質量降着率を実現するモデルとして、主に、turbulent core accretion model<sup>1)</sup> と competitive accretion model<sup>2)</sup> の二つが提案されています。前者の turbulent core accretion model は、乱流によって支えられたジーンズ質量 ( $M_J$ ) の 100 倍以上の質量をもつ分子雲コアを初期状態とし、高い質量降着率を実現するモデルです (図1上)。一方、competitive accretion

model は、ジーンズ質量程度の分子雲コアを初期状態とし、大きなスケールでの質量降着によって、物質が周囲から降り積もり、高い質量降着率を実現するというモデルです (図1下)。図1を見ても明らかなように、これら二つのモデルでは、大質量星を生む分子雲コアの形成過程が大きく異なります。

さらに、これら二つのモデルでは、分子雲コア形成のタイムスケールも大きく異なることが指摘されています (約5-10倍ほど、competitive accretion model のほうが速い<sup>3)</sup>)。したがって、大質量星の形成メカニズムを理解するためには、母体となる“分子雲クランプ”内部で、個々の“分子雲コ

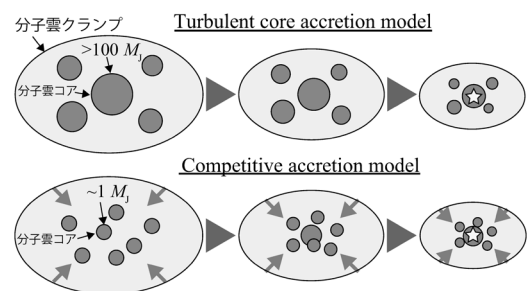


図1 二つの大質量星形成モデルの模式図。

ア”が、どのように、どのようなタイムスケールで形成されるのか明らかにすることが極めて重要です。そのためには、大質量星形成の初期状態を観測的に明らかにすることが必要となります。

## 2. 赤外線暗黒星雲

大質量星形成の初期状態を明らかにするために重要な観測対象と考えられている天体が、赤外線暗黒星雲 (Infrared Dark Clouds) と呼ばれる天体です。赤外線暗黒星雲は、人工衛星、ISO (Infrared Space Observatory) や MSX (Midcourse Space Experiment) による中間赤外線の銀河面観測によって発見された<sup>4), 5)</sup>、中間赤外線で暗く見える天体です。現在までに、Spitzer 宇宙望遠鏡などによって、数多くの赤外線暗黒星雲が同定されています<sup>6)</sup>。さらに、赤外線暗黒星雲に対し、ミリ波サブミリ波帯での連続波のマッピング観測が行われ、大質量で低温な分子雲クランプが付随していることもわかっています<sup>7)</sup>。そのような大質量な分子雲クランプが付随するにもかかわらず、明るい赤外線源を伴わないことから、赤外線暗黒星雲は、大質量星形成の初期状態にあると考えられ、近年活発に研究が行われています。

一方で、赤外線暗黒星雲に付随する分子雲クランプの多くに、暗い赤外線源や分子流など、星形成の兆候が見られることもわかっています<sup>8)</sup>。最近の観測から、波長  $70 \mu\text{m}$  で暗く赤外線で見られる兆候が見られない天体であっても、分子輝線観測を行うと、多くの天体で分子流が検出され、すでに星形成が起きていることもわかってきました。したがって、赤外線暗黒星雲といっても完全に星形成が起きている分子雲クランプは非常に少ないと言えます。

また、赤外線暗黒星雲に付随する分子雲クランプすべてにおいて、大質量星形成が起きるわけではありません。大質量星が形成される条件がわかっていませんので、経験則によるものですが、Kauffmann & Pillai<sup>9)</sup> は、分子雲クランプの質量

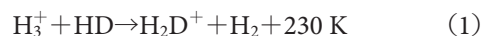
( $m$ ) と半径 ( $r$ ) が、 $m > 870 M_{\odot} (r/\text{pc})^{1.33}$  という条件を満たす場合、大質量星が形成される可能性が高いとしています。赤外線暗黒星雲に付随する分子雲クランプの中には、この条件を満たさないものも多数存在します。したがって、赤外線暗黒星雲といっても、さまざまな性質のものが含まれており、すべてが大質量星形成につながるわけではないということは、注意が必要です。

## 3. 分子雲クランプにおける重水素濃縮

さて、大質量星形成を理解するためには、星形成前の情報を得ることが重要と述べました。しかし、前述のように、赤外線暗黒星雲であっても、多くの分子雲クランプで、すでに星形成が起きている。したがって、大質量星形成前の分子雲の状態を観測的に明らかにすることは簡単ではありません。特に、統計的な研究を行うことは至極難しいことです。もし、星形成がすでに起きている天体を観測することで、その天体の星形成前の情報を得ることができれば、初期状態についての統計的な研究も容易に行うことができます。我々は、そのための手段として、分子雲内の“中性分子”の重水素濃縮度を明らかにすることが有効であると考えています。

### 3.1 星形成前の重水素濃縮度の変化

重水素濃縮とは、重水素を含む分子の割合が、宇宙元素存在度に比べ、有意に高くなっている状態です。例えば、宇宙元素存在度では D/H 比は  $10^{-5}$  程度ですが、分子雲内部では、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$  比が  $10^{-1}$  程度にまで高くなっています。この重水素濃縮が起きる原因は、以下の反応が発熱反応であるためです。



低温な分子雲では、この反応の逆反応があまり起きず、 $\text{H}_3^+$  に対する  $\text{H}_2\text{D}^+$  の割合が増加していきます。 $\text{H}_2\text{D}^+$  は、さまざまな分子の生成反応に関係

しているため、さまざまな分子において重水素を含む分子の割合が増加します。また、上記反応は温度に依存するため、より低温な分子雲のほうが、重水素濃縮度が高くなります。さらに、温度が約20 K以下になると、 $\text{H}_2\text{D}^+$ を壊す主要な分子であるCOがダストに凍りつきます。その結果、 $\text{H}_2\text{D}^+$ の寿命がさらに延び、星形成前の低温な分子雲では重水素濃縮度が非常に高くなります。

さらに、星形成前の重水素濃縮度は、分子雲の収縮の速度にも依存します<sup>10)</sup>。例として、異なる収縮速度における重水素濃縮度 ( $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比とDNC/HNC比) の変化のモデル計算結果を図2に示します。図2を見てわかるように、同じ密度で見ると、収縮の速度によって、重水素濃縮度が大きく異なることがわかります。最初に述べましたように、turbulent core accretion modelとcompetitive accretion modelでは、分子雲コア形成のタイムスケールが大きく異なります。したがって、星形成が起きる直前の分子雲の重水素濃縮度を知ることは、大質量星形成を考える上で重要な知見が得られると期待されます。

### 3.2 星形成後の重水素濃縮度の変化

星形成が起きると、周囲のダストが温められ、COがダストから蒸発します。蒸発したCOは、

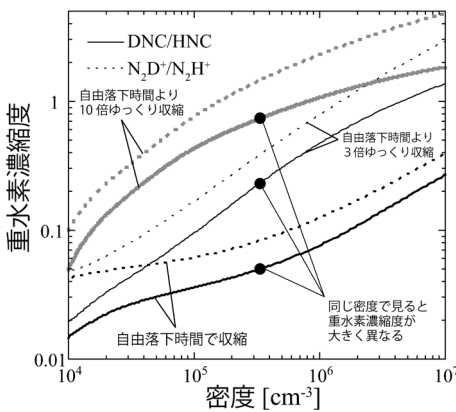


図2 異なる収縮速度をもつ分子雲コアにおける、密度と重水素濃縮度の変化のモデル計算結果 (筑波大 古家氏による計算)。

$\text{H}_2\text{D}^+$ を壊すため、 $\text{H}_2\text{D}^+/\text{H}_3^+$ 比は、星形成後、急激に低下します。同様の性質は、同じイオン分子である  $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比についても見られます。 $\text{N}_2\text{D}^+$ は、COと反応し壊されるため、星形成後は  $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比が低くなります。したがって、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比などイオン分子の重水素濃縮度から、すでに星形成が起きている天体の星形成前の情報を得ることは難しくなります。

一方、DNCなどの中性分子はCOとは反応しません。温度が上昇しCOがダストから蒸発しても、すぐには壊されず、星形成後も比較的長く存在することができます。例えば、DNCは、COではなく、 $\text{HCO}^+$ と反応して壊されます。 $\text{HCO}^+$ はCOに比べて存在量をはるかに少ないため、DNCの寿命は長くなります。したがって、中性分子は、星形成後であっても、星形成前の重水素濃縮度のある程度の間保持することができます。つまり、中性分子の重水素濃縮度を明らかにすることで、星形成が既に起きている天体の星形成前の情報が得られると期待されるのです (図3参照)。

このような観点での赤外線暗黒星雲に対する研究は、これまで行われていませんでした。さらに、重水素濃縮度が上記のような振る舞いをするのかどうかも、観測的には確かめられていませんでした。そこで、まず、上記のようにイオン分子と中性分子で異なる振る舞いが見られるのか、赤外線暗黒星雲内部の重水素濃縮度は小質量星形成領域などと違いが見られるのか、といった基本的なことから、ALMAを用いた高分解能観測によって

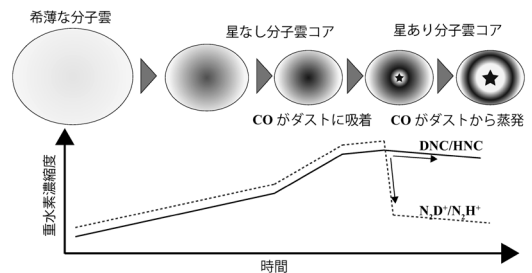


図3 星形成と重水素濃縮度の関係の模式図。

調べることにしました。

#### 4. ALMAによる赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3の観測

ALMAで観測を行った天体は赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24です(図4a)。この天体を選んだ理由は、野辺山45 m望遠鏡によるサーベイ観測<sup>11)</sup>において、DNC/HNC比が最も低い天体であったためです。まず、特徴的な天体を観測し、その特徴の原因を明らかにすることで、重水素濃縮度の振る舞いについて理解するという戦略をとりました。

赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24は、赤外線暗黒星雲の中でも比較的有名な天体です。これまでに、いくつかの観測結果<sup>12)-14)</sup>が報告され、すでに内部で星形成が起きていることもわかっていました。しかし、干渉計での高分解能観測は行われておらず、もちろん重水素化分子の高分解能観測も

行われていませんでした。そこで、ALMAを用い、分解能 $0''.8$ で、この天体を詳細に観測することにしました。観測を行った輝線はDNC  $J=3-2$ 、 $\text{HN}^{13}\text{C } J=3-2$ 、 $\text{N}_2\text{D}^+ J=3-2$ 、 $\text{N}_2\text{H}^+ J=3-2$ 輝線です。その他、CS、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 、SiOなどの複数の輝線も同時に観測しています。

観測結果を示す前に、この天体の距離について触れておきます。実は、この天体までの距離がはっきりとわかっていません。VLBIによる観測から求めた距離( $1.56 \text{ kpc}^{15)}$ )とその他の手法で求めた距離( $3.5-3.9 \text{ kpc}^{16)-18)}$ )が2倍以上違って、まだどちらの距離が正しいのかははっきりとした結論は出ていないのが現状です。ただ、重水素濃縮度については、どちらの距離であっても結論に大きな変化はありませんのでご安心ください。

#### 4.1 観測結果

図4b, cにALMAによる $\text{HN}^{13}\text{C}$ とDNCの観測

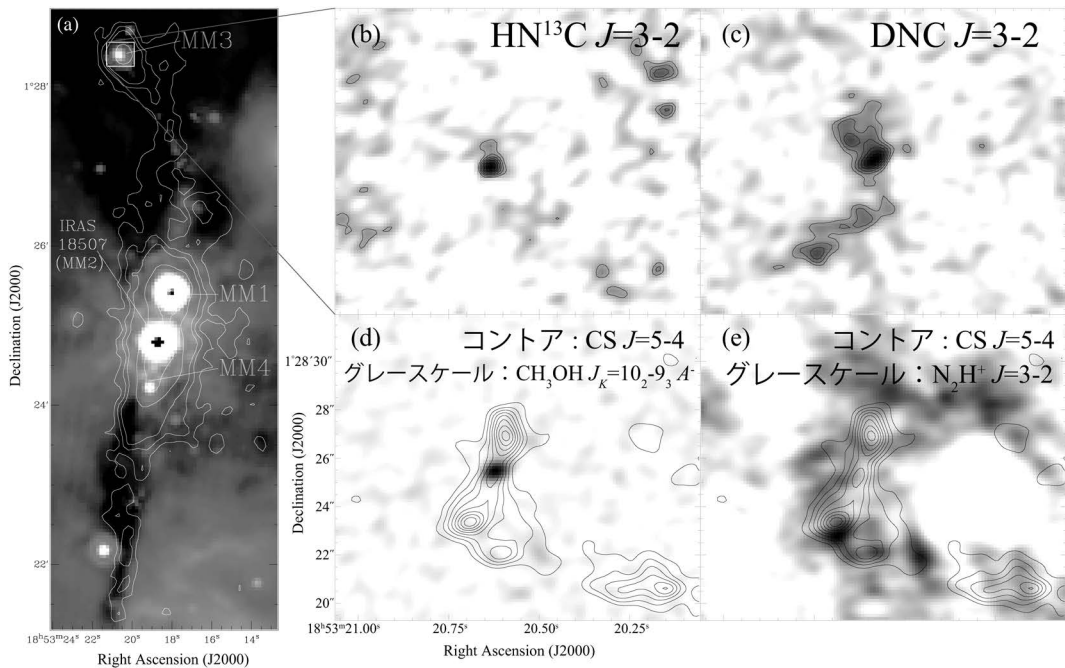


図4 (a) 赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3に対する、Spitzer望遠鏡による $24 \mu\text{m}$ イメージ(グレースケール)と、IRAM 30 m望遠鏡による1.3 mm連続波の観測結果<sup>12)</sup>。(b)-(e) ALMAによるG34.43+00.24 MM3に対する観測結果。

結果を示します。DNCが比較的広がって分布しているのに対して、 $\text{HN}^{13}\text{C}$ は非常にコンパクトに分布していることがわかります。図4dに、同じ領域に対する $\text{CH}_3\text{OH}$ の高励起輝線（グレースケール）とCS輝線（コントラ）の分布を示します。比較すると、 $\text{HN}^{13}\text{C}$ は、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 輝線と同じ位置で強くなっていることがわかります。この位置では、複数の $\text{CH}_3\text{OH}$ 輝線が検出されており、それら輝線の強度から温度を見積もると、100 Kを超える値になります。さらに、CSの分布を見ると、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 輝線のピークから上下に伸びた構造が見られます。したがって、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 輝線のピーク位置には原始星があり、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 輝線は原始星周囲のホットコア、CSは分子流をトレースしていると考えられます。つまり、 $\text{HN}^{13}\text{C}$ は原始星のごく近傍でのみ検出され、DNCは原始星近傍に広がって分布しているということがわかりました。

一方、 $\text{N}_2\text{D}^+$ は今回の観測では検出されませんでした。図4eに $\text{N}_2\text{H}^+$ 輝線（グレースケール）にCS輝線（コントラ）の分布を重ねた図を示します。図を見ると、 $\text{N}_2\text{H}^+$ は、DNC、 $\text{HN}^{13}\text{C}$ とは逆に、原始星近傍で弱くなっていることがわかります。 $\text{N}_2\text{H}^+$ はCOによって壊される分子です。したがって、原始星周囲の $\text{N}_2\text{H}^+$ が弱い領域は、比較的溫度が高く、COがダストから蒸発し $\text{N}_2\text{H}^+$ が壊されている領域だと考えられます。そのような領域でDNC輝線が検出されたということは、中性分子は溫度が上昇しても壊されにくく、中性分子の重水素濃縮度が星形成後も保持されていることを示唆しています。つまり、今回の観測によって、イオン分子と中性分子で星形成後の振る舞いにはっきりと違いが見え、中性分子の重水素濃縮度を調べることが、星形成がすでに起きている天体の星形成前の状態を得る有効な手段となることを示すことができました。

#### 4.2 ALMAと野辺山45 m望遠鏡の結果の比較

そもそもALMAでこの天体を観測した理由は、重水素濃縮度が最も低い天体ということでした。

図5にALMAの観測結果（ $15'' \times 15''$ の領域の平均）と野辺山45 m望遠鏡の観測結果を示します。図5を見ると、ALMAではDNCが強く、野辺山45 m望遠鏡では $\text{HN}^{13}\text{C}$ が強いという、一見矛盾する結果が得られています。この違いの主な要因の一つは、野辺山45 m望遠鏡とALMAで観測した輝線の遷移の違いにあると考えています。

野辺山45 m望遠鏡では、 $J=1-0$ 輝線を観測しましたが、ALMAでは $J=3-2$ 輝線を観測しました。これら二つの遷移では、臨界密度が大きく異なります（DNC  $J=1-0$ の臨界密度は $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、 $J=3-2$ は $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ）。そのため、 $J=3-2$ 輝線を観測したALMAでは高密度な領域のみをトレースすることになります。分子雲クラump内部でそのような高密度領域の割合が少ないと、ビームサイズが大きい野辺山45 m望遠鏡の観測（ $\sim 20''$ ）

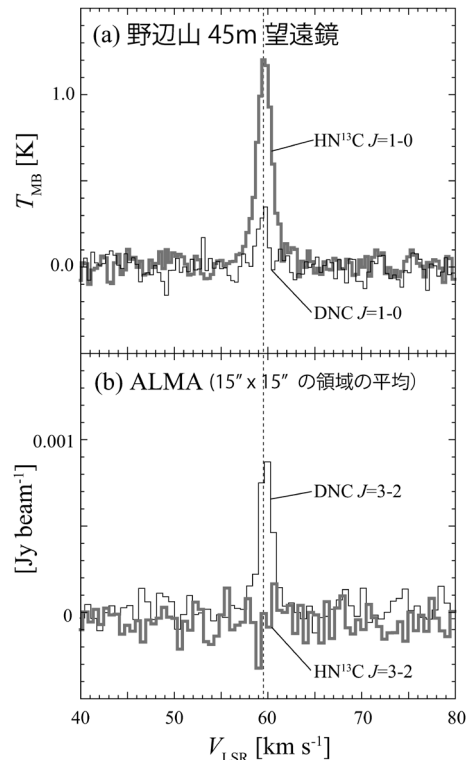


図5 野辺山45 m望遠鏡 (a) とALMA (b) で得られたDNCと $\text{HN}^{13}\text{C}$ のスペクトル線の比較。

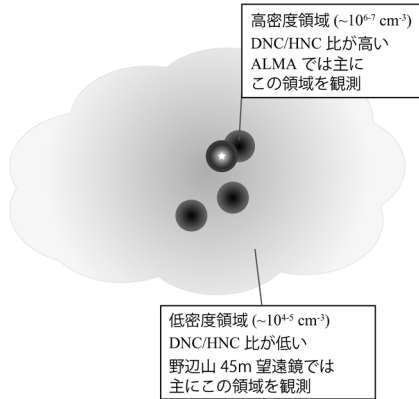


図6 G34.43+00.24 MM3における重水素濃縮度と密度の関係の模式図。

では、密度の低い部分を主にトレースすることになります。密度が低い場合、化学反応のタイムスケールが長く、重水素濃縮度は低くなります。したがって、野辺山45 m望遠鏡とALMAの結果の違いは、分解能と観測した遷移の違いによるものと考えられます(図6参照)。今回の結果から、重水素濃縮度について考える際は、観測している領域の密度が非常に重要であるということも、改めてわかりました。

#### 4.3 他天体の重水素濃縮度との比較

高密度領域でのDNC/HNC比を求めると、その値は小質量星形成領域のそれと同程度の値でした。一方、大質量星形成領域であるOrionと比較すると、有意に高い値になりました。これは、この赤外線暗黒星雲の星形成前の重水素濃縮度が、小質量星形成領域のそれと同程度であることを示唆しています。さらに、このことから、この赤外線暗黒星雲での星なし分子雲コアの形成タイムスケールが、小質量星のそれと同程度であると言えるかもしれません。また、もし、他の大質量星形成領域との違いが、初期状態の違いであるとするれば、大質量星形成の初期状態に多様性がある可能性も示唆されます。

## 5. まとめ

赤外線暗黒星雲G34.43+00.24 MM3に対し、ALMAを用いた重水素化分子の観測を行い、星形成の温度上昇によって、重水素濃縮度がどのように変化するのか、明らかにしました。特に、星形成による温度上昇後も中性分子の重水素濃縮度が大きく変化しないことを示せたことは、大きな成果であったと思います。赤外線暗黒星雲に対する中性分子の重水素濃縮度の高分解能観測は、まだほとんど例がありません。前述のように、重水素濃縮度は密度に大きく依存するため、赤外線暗黒星雲のような比較的距離の遠い天体の重水素濃縮度を明らかにするためには、高分解能観測が必須になります。今後、ALMAを用いた高分解能なサーベイ観測を行い、赤外線暗黒星雲ごとに高密度領域の重水素濃縮度に違いが見られるのかなど、明らかにしていきたいと考えています。それによって、大質量星の形成過程に多様性があるのか調べることも可能になると考えています。

## 6. 最後に

今回のALMAの観測データから4本の査読論文(現在さらに1本追加予定)を出版することができました<sup>19)-22)</sup>(決して小分けにして成果を稼ごうということではありません)。本稿で紹介した結果以外にも、今回の観測で発見したホットコアでは、非常に興味深い性質も見られています。高分解能観測を行うことで、偶然、観測バンド内に入ってきた輝線でも、予期せぬ結果が得られました。赤外線暗黒星雲という比較的詳細がわかっていない天体に対して、まだ観測されていない輝線で観測を行ったことが、新しい発見につながったと思います。観測してみないとわからないことも多々あると思いますので、ALMAのプロポーザル審査は、チャレンジングな観測提案にもう少し寛容であってもよいのではないかなと思います。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2013、2014と2015年に筆者らが発表した投稿論文<sup>19)-22)</sup>に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。本研究は日本学術振興会の科学研究費(21224002, 23740146, 25400225, 16K05292 and 25108005)の支援を受けて行われました。

## 参考文献

- 1) McKee C. F., Tan J. C., 2003, ApJ 585, 850
- 2) Bonnell I. A., et al., 2001, MNRAS 323, 785
- 3) Tan J. C., et al., 2014, PPVI 149
- 4) Pérault M., et al., 1996, A&A 315, L165
- 5) Egan M. P., et al., 1998, ApJ 494, L199
- 6) Peretto N., Fuller G. A., 2009, A&A 505, 405
- 7) Rathborne J. M., et al., 2006, ApJ 641, 389
- 8) Chambers E. T., et al., 2009, ApJS 181, 360
- 9) Kauffmann J., Pillai T., 2010, ApJ 723, L7
- 10) Kong S., et al., 2016, ApJ 821, 94
- 11) Sakai T., et al., 2012, ApJ 747, 140
- 12) Rathborne J. M., et al., 2005, ApJ 630, L181
- 13) Garay G., et al., 2004, ApJ 610, 313
- 14) Sanhueza P., et al., 2010, ApJ 715, 18
- 15) Kurayama T., et al., 2011, PASJ 63, 513
- 16) Sakai T., et al., 2008, ApJ 678, 1049
- 17) Sanhueza P., et al., 2012, ApJ 756, 60
- 18) Foster J. B., et al., 2012, ApJ 751, 157
- 19) Sakai T., et al., 2013, ApJ 775, L31
- 20) Yanagida T., et al., 2014, ApJ 794, L10
- 21) Foster J. B., et al., 2014, ApJ 791, 108
- 22) Sakai T., et al., 2015, ApJ 803, 70

## ALMA Observations of Infrared Dark Clouds

Takeshi SAKAI

*Graduate School of Informatics and Engineering,  
The University of Electro-Communications,  
Chofu, Tokyo 182-8585, Japan*

Abstract: In order to understand the formation mechanism of high-mass stars, it is very important to reveal the initial conditions. For the purpose, infrared dark clouds (IRDCs) are thought to be good targets. We have observed IRDC G34.43+00.24 MM3 in several molecular lines, including deuterated species, by using the Atacama Large Millimeter/submillimeter Telescope (ALMA). In this report, we present the observational results with ALMA and discuss how the deuterium fractionation ratios vary through star formation.