

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03912

研究課題名(和文) 臼田64m鏡Lバンド帯を用いた分子雲形成の研究

研究課題名(英文) Study of Molecular Cloud Formation using L-band in USUDA-64m telescope

研究代表者

山本 宏昭 (Yamamoto, Hiroaki)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：70444396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：分子雲形成領域と考えられている高銀緯の大規模フィラメント構造の一部に対して、中性水素原子21cm線のデータから二相の安定相の分離を行い、分子雲形成に関係が深い、低温・高密度の相の空間分布や性質を明らかにした。また、低密度分子雲の分布、性質を明らかにすべく、OH輝線の観測をJAXAが臼田宇宙空間観測所で運用している口径64mの通信アンテナを用いて実施した。さらに、OH輝線の周波数帯(L帯：1-2GHz)の受信機の高感度化を行い、日本国内でのL帯観測の推進に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、分子雲形成の研究にOHラジカルがトレースする低密度の分子雲を含めたことに新規性がある。中性水素21cm線がトレースする水素原子雲と一酸化炭素分子輝線がトレースする分子雲の間には密度のギャップがある。OHラジカルがこのギャップを埋める。分子雲の形成・進化の議論を低密度水素原子ガスから高密度分子雲までシームレスに追うことができるようになる点で、学術的意義は大きい。また、この研究は臼田64m鏡といった国内の望遠鏡を観測に使っている。L帯の研究開発は日本では立ち遅れている部分があり、L帯の高感度受信機を開発する点において、日本のL帯天文学を発展させる意味で学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Stable two phases of HI clouds are divided into from spectra of atomic hydrogen 21cm line for a part of a large filamentary structure located at high galactic latitude, where molecular clouds are considered to be formed. Then, spatial distribution and physical properties of the component of low temperature and high density, which is thoroughly related to the formation of molecular clouds, are revealed. In order to reveal the spatial distribution and physical properties of low density molecular clouds, observations in the OH line were conducted using the communication antenna, whose diameter is 64 m, operated by JAXA at Usuda deep space center. In addition, we improved the sensitivity of the receiver for the frequency band of the OH emission line (L band: 1-2 GHz) and contributed to the promotion of L-band observations in Japan.

研究分野：電波天文学

キーワード：分子雲形成 L帯 水素原子 CNM OH輝線

## 1. 研究開始当初の背景

1970年に星間空間からの一酸化炭素分子(CO)輝線が検出されて以来、星間物質の高密度領域である分子雲の分布、運動、性質などの理解が進んできた(Heyer & Dame 2015 など)。また、分子雲は星形成の母体であるため、星形成に関する理解も飛躍的に進んだ(Motte et al. 2018 など)。一方、分子雲自体の形成については、星形成と比較するとその理解は遅れている。分子雲形成を議論するためには、種となる極小質量・低密度の分子雲を検出する必要があるが、CO輝線ではそのような分子雲をトレースできない。また、低銀緯の分子雲は1 kpcを越えるような場所にあるものがほとんどであり、このような場所で0.1太陽質量以下の分子雲を検出するのは非常に困難である。Yamamoto et al. (2006)では、高銀緯領域に存在する20度×20度程度の大きさの遠赤外線ループ状構造全体に対してCO輝線の観測を行い、0.1 pc以下のサイズで0.1太陽質量以下の形成初期段階の極小分子雲を多数検出した。CO輝線でトレースできる分子雲の密度は数 $100\text{ cm}^{-3}$ –数 $10000\text{ cm}^{-3}$ である。一方で水素分子の密度は連続的に変化しているはずであり、極小分子雲であってもその周囲には密度 $100\text{ cm}^{-3}$ 以下の密度の分子雲が存在しているはずである。また、このような領域には中心密度が $100\text{ cm}^{-3}$ 以下の極低密度な分子雲も存在するはずである。分子雲形成を議論するためには、そのような低密度の分子雲を観測的に捉え、物理状態を調べる必要がある。また、そのような低密度分子雲は、現在の観測ではトレースできないとされる星間雲(ダークガス)の候補としても考えられており、近年多くの研究によりその存在が議論されている(Grenier et al. 2005; Paradis et al. 2012; Liszt et al. 2018 など)。低密度分子雲のトレーサーとして近年では波長18cmのOH輝線(周波数1612, 1665, 1667, 1720 MHz)が注目されている(Allen et al. 2015 など)。しかし、低密度分子雲内のOH輝線は強度が弱く、すでに技術的限界に近い世界最高感度の受信機を用いても、1点あたり数時間から10時間以上の積分を要するため、観測提案制の望遠鏡では広域を観測することが難しいなどの困難がある。

分子雲形成の現場をとらえるためには低密度分子雲の検出と合わせて、水素分子形成の現場を中性水素原子(HI)21cm線のデータから探ることも重要である。HI雲は、高温・低密度な相(WNM: Warm Neutral Medium) (温度～数1000 K、密度～0.1から数個 $\text{cm}^{-3}$ )と低温・高密度な相(CNM: Cold Neutral Medium) (温度～数100 K、密度～数10個 $\text{cm}^{-3}$ )が安定相として存在する。水素分子形成はCNM中の星間ダストの表面で起こると考えられているため、CNMの分布や性質を明らかにすることが水素分子形成の現場を探る上で重要である。しかし、観測で得られるHI輝線はWNM、CNM、およびこれらをつなぐ中間相であるLNM(Lukewarm Neutral Medium)からの輝線が足し合わされている。CNMの性質を明らかにするためには、観測されたHI輝線からこれらの相を分離し、CNMのみを抽出しなければならない。近年、計算機の高性能化のおかげで、HI輝線からWNMとCNMの2成分の分離が試みられ始めている(Marchal et al. 2019 など)。これらにより、各相の物理状態が明らかになりつつあるが、現段階でCNMに特化して、その性質を調べた観測的研究はない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は水素分子雲の形成条件やそのメカニズムを観測的に明らかにすることである。HIについては特にCNMが重要であり、HI輝線の成分分離を実行することで、CNMを抽出し、その空間分布や性質を調べる。また、OH輝線の観測を通して、低密度分子雲の性質を明らかにし、分子雲形成・進化の素過程を観測的に明らかにする。

## 3. 研究の方法

以下のように研究を実施した。

### 3-1. 臼田64m鏡L帯(1-2GHz帯)観測システムの整備、及び高感度化

L帯の観測が可能な口径60m以上の単一鏡は世界にいくつか存在するが、これらは観測提案制を採用しており、観測提案できる時間には上限が設けられている。この時間の制約のため、従来の低密度領域におけるOH輝線の観測・研究は点での比較のみであった。しかし、分子雲の形成現場やその環境を明らかにするためには、面での観測が必要不可欠であり、これを達成するためには観測時間を柔軟に多く確保できる単一鏡が必要である。そこで、申請者は宇宙航空研究開発機構(JAXA)が臼田宇宙空間観測所にて、深宇宙探査機との通信に使用している口径64mの通信アンテナ(臼田64m鏡)に注目し、このアンテナの天文観測に向けた整備を行ってきた。世界のL帯の受信機性能はすでに技術的限界に達しており、大気込みのシステム雑音温度は15-30 K程度である。一方で、臼田宇宙空間観測所のL帯のシステム雑音温度は74-81Kで

あり、この差は観測効率にして、10倍以上悪い。OH輝線を現実的な時間で、十分な感度で検出するため、臼田64m鏡の受信機システムの高感度化を行った。具体的には、1. 初段の極低温低雑音増幅器を世界最高感度のものに交換、2. 同軸導波管回路を含む、極低温低雑音増幅器を冷却するためのシステムの開発、3. L帯のOH輝線4周波数、それぞれについて、両円偏波の計8輝線を同時に観測するシステムの構成の構築、である。

### 3-2. OH輝線の高感度観測

臼田64m鏡にてOH輝線の観測を行う。観測の効率を最大限あげるため、周波数スイッチング観測にて、観測を実施する。観測天体は高銀緯分子雲であり、特に分子雲形成が起きていると考えられる場所について、観測を行った。

### 3-3. 水素原子21cm線のデータの相分離

Regularized Optimization for Hyper-Spectral Analysis (ROHSA, Marchal et al. 2019) を用いて、HIの輝線強度から、WNM、LNM、CNMの成分分離を行い、CNMを抽出する。そして、CNMの空間分布、性質を明らかにする。

## 4. 研究成果

### 4-1. 臼田64m鏡L帯(1-2GHz帯)観測システムの整備、及び高感度化

初段の増幅器として、世界最高性能のLow Noise Factory社製の低雑音冷却増幅器を選定、購入した(図1)。左右円偏波をそれぞれ同時に受信する必要があるため、2台購入した。また、この増幅器を動作させるためのバイアス電源を自作した(図1)。図1の低雑音冷却増幅器を現在の臼田64m鏡の同軸導波管変換器の直後に取り付け、常温にてL帯システムのシステム雑音温度測定を行った。結果を図2に示す。常温の状態でも70K程度と現状のシステム雑音温度と同等、もしくはよりよい性能を得た。最終的には冷却することで、増幅器単体でさらに30K程度、同軸導波管変換器も冷却するため、合計で40K程度低減されると期待される。冷却化のため



図1. 本事業で購入した世界最高感度の低雑音冷却増幅器(手前)と自作した低雑音冷却増幅器のバイアス電源(奥)。

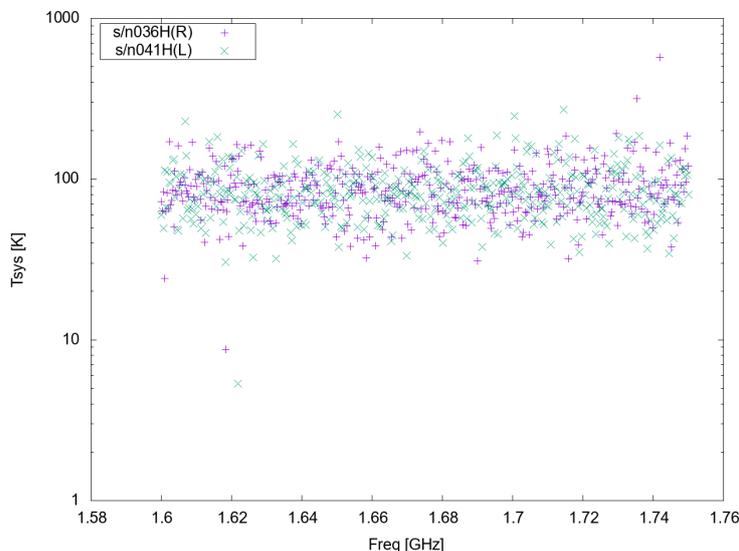


図2. 新極低温冷却増幅器を常温で接続した際のシステム雑音温度測定の結果。

ためにクライオスタット内の設計をAutodesk社のInventorを用いて行った。断熱導波管における電波信号の損失の計算を電磁界シミュレーターH.F.S.S.で行い、断熱導波管のクリアランスを1mmと決定した。各部品的设计図を図面化し、製作した。

OH輝線の4周波、両円偏波を含めた8輝線の同時取得のため、相関器に新たにADS3000+を導入した。これにより、各輝線について、従来使用していたK5/VSSP系よりも広い速度帯域を確保することが可能となり、周波数スイッチング観測においても、十分なベースラインを確保することを可能にした。図3に

ADS3000+での試験観測の結果を示す。NGC2024において、8輝線を同時に取得することに成功し、科学観測のための準備を整えた。

### 4-2. OH輝線の高感度観測

従来の受信機システムで、高銀緯分子雲の観測を行った。ペガサスループ(Yamamoto et al. 2006)、HLCG92-35(Yamamoto et al. 2003)、その他複数の高銀緯分子雲(Onishi et al. 2001)に対して、OH輝線の観測を実施した。各観測点について、on-sourceで2時間の周波数スイッチング観測を行

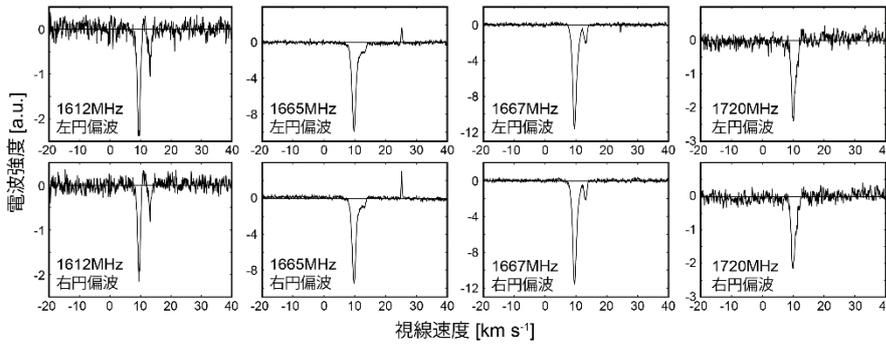


図3. NGC2024 方向の OH 輝線の 4 周波数、両円偏波の計 8 輝線の同時観測の結果。

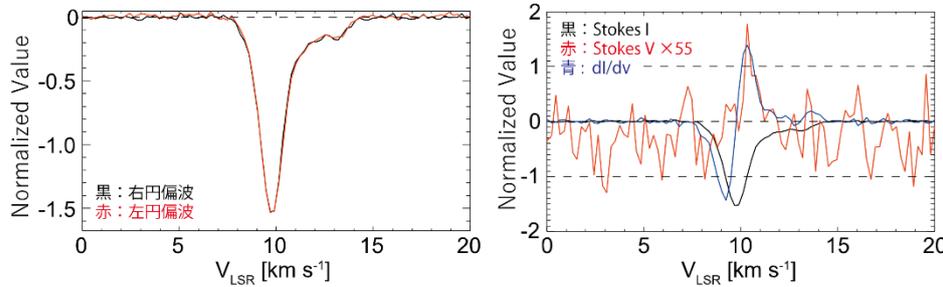


図4. 1665 MHz の両円偏波のデータから導出した Stokes I、Stokes V、 $dI/dv$ 。

ったが、感度が足りず、いずれの点においても OH 輝線を検出することができなかった。マイクロエーサー SS433 のジェットと相互作用している分子雲に対して、OH 輝線の観測を行った。こちらも OH 輝線は検出できなかった。分子雲の一部の物理量は 1720MHz の OH メーカーの放射条件をぎりぎり満たしていたが、ビームサイズの影響により検出できなかった旨の結論を得た。この結果は Yamamoto et al. (2022) としてまとめられている。

OH の 1665MHz 線は Zeeman splitting factor が大きく、Zeeman 効果を用いた星間磁場の直接測定にしばしば使われる。本試験で得られた NGC2024 の OH 吸収線において、Zeeman 効果の解析を実施し、星間磁場の測定が可能かどうかを検定した。その結果を図4に示す。Stokes V の輝線が  $2\sigma$  の感度で検出することができ、これから磁場強度を 17 マイクロガウスと見積もった。これにより、臼田 64m 鏡を用いた星間磁場強度の直接測定の可能性を示した。

### 4-3. 水素原子 21cm 線のデータの相分離

水素原子 21cm 線の相分離には ROHSA (Regularized Optimization for Hyper-Spectral Analysis) (Marchal et al. 2019) を用いた。5つのフリーパラメーターがある中で、48通りの計算を行い、観測を一番よく再現できたモデルを採用した。その結果は線幅の大きさで、3つの塊に分類できた。これらは WNM、CNM、及びこれらの中間の成分である Lukewarm Neutral Medium (LNM) であることをつきとめ、それらの空間分布を明らかにした。図5に3つの相の質量比の空間分布を示す。WNM は他の2成分と空間的な相関は見られなかったが、CNM と LNM は反相関を示した。これは ROHSA とは別のアルゴリズムで全天にわたり解析を行った、Kalberla & Haud (2018) の結果と矛盾しない。特に CNM は LNM に取り囲まれている。これは LNM 中で CNM が形成されていることを意味する。WNM から不安定相である LNM へ進化した後、その中で CNM が形成されることを観測的に明らかにした。この領域における CNM、LNM、WNM の質量比は 45:43:12 と見積もられた。Kalberla & Haud (2018) では 25:41:34 であり、本解析領域よりは CNM の割合が大きい。これは本解析領域には 350 太陽質量ほどの分子雲が存在するため、CNM の割合が全天の解析に比べて大きくなっていると考えられる。個々の CNM の中心速度の分散は、LNM の線幅程度であった。個々の CNM の運動は

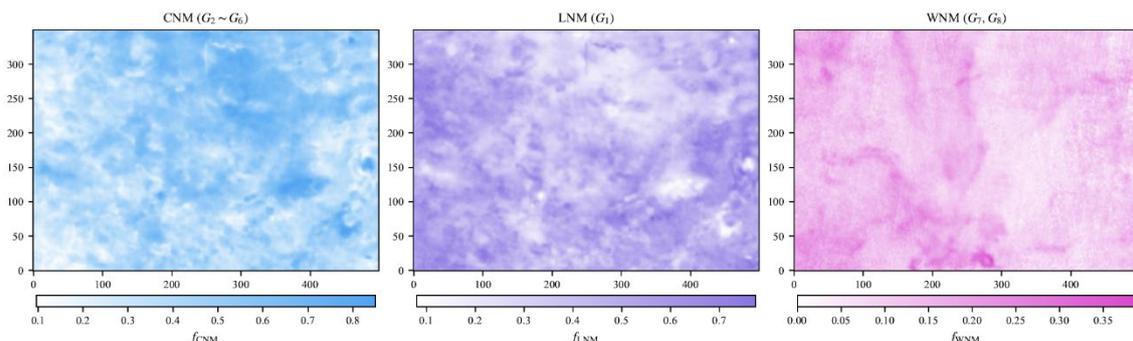


図5. ROHSA を用いて分離した三相の質量比の空間分布。(左) CNM、(中央) LNM、(右) WNM。

元々の WNM、LNM の内部運動を反映していることを意味し、分子雲の乱流に関する可能性がある重要な結果である。

<引用文献>

**Allen, R. J.**, et al. 2015, *AJ*, 149, article id. 123; **Grenier, I. A.**, et al. 2005, *Science*, 307, 1292; **Heyer, M., & Dame, T. M.**, 2015, *ARA&A*, 53, 583; **Kalberla, P. M. W., & Haud, U.**, 2018, *A&A*, 619, id.A58; **Liszt, H.**, et al. 2018, *A&A*, 617, id.A54; **Marchal, A.**, et al. 2019, *A&A*, 626, id.A101; **Motte, F.**, et al., 2018, *ARA&A*, 56, 41; **Onishi, T.**, et al. 2001, *PASJ*, 53, 1017; **Paradis, D.**, et al. 2012, *A&A*, 543, id.A103; **Yamamoto, H.**, et al. 2003, *ApJ*, 592, 217; **Yamamoto, H.**, et al. 2006, *ApJ*, 642, 307; **Yamamoto, H.**, et al. 2022, *PASJ*, 74, 493;

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroaki Yamamoto, Ryuji Okamoto, Yasuhiro Murata, Hiroyuki Nakanishi, Hiroshi Imai, Kohei Kurahara	4. 巻 74
2. 論文標題 Physical properties of the molecular cloud, N4, in SS 433: Evidence for an interaction of molecular cloud with the jet from SS 433	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publication of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 493-509
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psac012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 SS433-W50と中性星間物質の相互作用
3. 学会等名 W50/SS433研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Yamamoto
2. 発表標題 Japan SKA-ISM group activity report and science with SKA
3. 学会等名 East Asia SKA Workshop 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 1秒角分解能で探る原子雲から分子雲への進化の革新的探究：星のゆりかごの種を探せ
3. 学会等名 Japan SKA Consortium Science Strategy Workshop 2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 マイクロエーサーSS433 のジェットと分子雲N4との相互作用の詳細解析
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 マイクロエーサーのジェットと星間物質の相互作用
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 センチ波を用いた分子雲形成の研究を目指して
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 臼田64m鏡を用いたL帯OH輝線観測にむけた整備
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本宏昭
2. 発表標題 分子雲形成に関する研究
3. 学会等名 近傍宇宙の観測的研究で探る星間物質ライフサイクル
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Yamamoto
2. 発表標題 Association of molecular clouds and their details at western part of W50/SS433
3. 学会等名 Physics of relativistic jets on all scales, IAU GA 2022 Focus Meeting 1 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	村田 泰宏  (Murata Yasuhiro)		
研究協力者	坪井 昌人  (Tsuboi Masato)		
研究協力者	今井 裕  (Imai Hiroshi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中西 裕之  (Nakanishi Hiroyuki)		
研究協力者	蔵原 昂平  (Kurahara Kohei)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関