

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2013

課題番号：24684011

研究課題名(和文)ALMAとVERAによるサブミリ波水メーザー源の高空間分解能観測

研究課題名(英文)Observations of submillimeter water masers with ALMA and VERA

研究代表者

廣田 朋也(HIROTA, Tomoya)

国立天文台・水沢VLBI観測所・助教

研究者番号：10325764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円、(間接経費) 3,060,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、国立天文台が運用する国内の超長基線電波干渉計VERAと、運用開始間もない日米欧のミリ波サブミリ波干渉計ALMAを組み合わせ、太陽系から最も近い大質量星形成領域オリオンKLについて観測的研究を推進した。本研究ではセンチ波からサブミリ波にある水分子輝線に着目し、オリオンKLのサブミリ波帯水分子輝線の初検出に成功した。また、コンパクトリッジと呼ばれる衝撃波領域や大質量原始星である電波源Iの物理的・力学的・化学的狀態をこれまで以上の高解像度で明らかにするという成果も上げている。

研究成果の概要(英文)：The present research carried out observational studies of the nearest massive star-forming region Orion KL by using VERA, a very long baseline interferometer operated by National Astronomical Observatory of Japan, and ALMA, an international millimeter/submillimeter interferometer just started regular operation. The research mainly focused on the centimeter, millimeter, and submillimeter water emission lines. As the result of the present research, some of the water lines were detected for the first time in Orion KL. Furthermore, the highest spatial resolution observations with VERA and ALMA revealed detailed physical, dynamical and chemical properties of a shocked molecular gas called Compact Ridge and a massive protostar Source I.

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 位置天文学 電波干渉計 星形成 星間分子 メーザー VERA ALMA

1. 研究開始当初の背景

星や惑星がどのようにして誕生するかを解明する星形成研究は、天文学、宇宙物理学の中でも最も重要な分野の1つとして認識されている。他の分野同様、観測では高空間分解能の装置、特に電波干渉計や超長基線電波干渉計(VLBI)の発展が顕著である。

本研究代表者は、国立天文台が日本国内4ヶ所に直径20mの電波望遠鏡を配置した基線長2300kmのVLBIネットワークVERAによる観測的研究を進めている。中でも、大質量星形成領域としては太陽系からもっとも近い天体であるオリオンKLについて、22GHz(波長1.3cm)帯水メーザー源の高精度位置天文観測を初めて行い、年周視差計測(仮定を含まない三角測量の原理)で 437 ± 19 pc(1pc/パーセク=3.26光年)という距離を得るなどの成果を上げている(Hirota et al. 2007, PASJ, 59, 897)。その後も観測的研究を進めている間、2011年2月にオリオンKL領域で22GHz帯水メーザー源の光度が1000倍以上に増光する「バースト現象」を観測し、バースト中のメーザー源の同定に成功した(Hirota et al. 2011, ApJL, 739, L59)。バースト現象はオリオンKL中のアウトフローや衝撃波領域など、星形成活動と密接な関係があり、この理解を深めることで大質量星形成機構の解明に貢献することが可能と期待されている。

本研究代表者は、オリオンKL領域で2011年に13年ぶり(前回は1998年)に起こった3回目の数少ない巨大バースト現象の詳細な観測を行うために、研究開始当初の2011年10月に観測運用を開始したばかりの日米欧の国際プロジェクトであるアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMAを用いた研究に着目した。ALMAを加えることで、今まさにバースト現象が起こっているオリオンKL領域の水メーザー源の励起星の同定や、既存の望遠鏡ではほとんど不可能であったサブミリ波での水メーザー源撮像によるメーザー励起機構の解明も初めて可能になると期待されていたためである。以上のような動機で、本研究ではVERAとALMAを組み合わせた初めての星形成領域の高空間分解能観測に基づいた研究を着想した。

2. 研究の目的

本研究では、VERAによる位置天文観測と、ALMAによる高空間分解能撮像観測を組み合わせ合わせた初めての観測的研究を行う。具体的には、大質量星形成領域オリオンKLのセンチ波帯からサブミリ波帯の水メーザー源同時期モニター観測、VERAによる固有運動計測によって、メーザー源励起星の同定や、メーザー放射領域を伴う大質量星形成領域の物理的・力学的・化学的性質の解明を目指す。

ALMAでは、321-650GHz(波長0.9-0.5mm)帯の複数のサブミリ波水メーザーの空間分布や速度構造、時間変動を明らかにする。また、

これらの性質が、VERAで観測される22GHz帯水メーザーと相関を持つかどうかについても調べる。さらに、これらのデータを基にモデル計算を行い、メーザー放射領域の温度や密度、水分子の存在量、メーザー励起機構についての知見を得る。同時に、ALMAを用いたサブミリ波連続波観測によるメーザー源の励起星の同定、VERAを用いた位置天文観測による22GHz帯水メーザー源の高精度固有運動計測も行う。ALMAとVERAで得られる物理的・力学的・化学的な情報を総動員して、オリオンKL領域の星形成過程を明らかにすることを旨とする(図1)

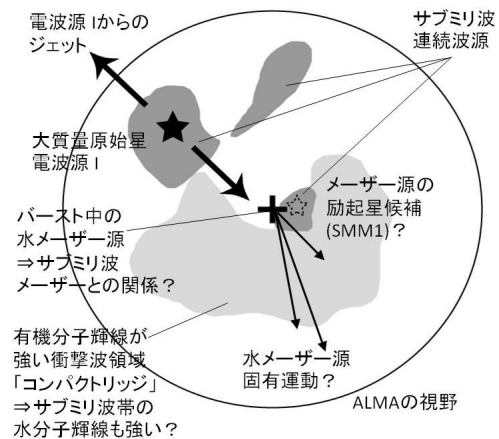


図1:オリオンKL領域の模式図。電波源Iはジェットの駆動源であり、VERAによる固有運動計測からもバーストした水メーザー源の励起星である可能性が示唆される。これまでのVERAによる固有運動計測は測定期間が2ヶ月(3回)と短く不定性が大きかった(Hirota et al. 2011)が、本研究により1年間以上の長期間のデータを得ることに成功したため、より高精度な固有運動計測に成功した。これにより、衝撃波領域「コンパクトリッジ」の運動の片鱗を捉えることに成功している(Hirota et al. 2014, PASJ 投稿中)。また、電波源Iよりもメーザー源の近くに存在するサブミリ波源SMM1も励起星の可能性はあるが、過去の観測では分解能が悪かったため、ALMAによる高分解能撮像との比較が必須である。本研究で得られたデータでは、SMM1のより高精度な位置決定や物理量の決定にも成功している(Hirota et al. 2014, PASJ 投稿中)。

3. 研究の方法

すでに述べたように、本研究はVERAとALMAを組み合わせた観測が本質的である。

ALMAでは2011年6月に最初の共同利用観測が募集されている。日米欧を中心とした世界中から900件以上の提案があり、そのうち上位約100件が採択されている。競争率9倍を超える激戦りであるが、本研究代表者が提案した「オリオンKL領域のサブミリ波水メーザーのモニター観測、それに付随する熱的分子輝線・連続波撮像観測」は上位10%にランクされ、採択されている。本研究ではこのALMAによるサブミリ波水メーザーのモニタ

一観測とあわせて、VERA による 22 GHz 帯水メーザー源位置天文観測を行い、これらの時間変化や空間構造、速度構造の相関について調べる。VERA による位置天文観測は、長期間・高頻度な観測で高精度化を図り、衝撃波領域の運動の検出を目指す。また、ALMA と VERA の観測結果については、撮像や固有運動計測だけでなく、複数の水メーザーの輝線強度比などを基にした輻射輸送モデルや分子の励起モデル計算との比較により、放射領域の温度や密度、水分子の存在量などの物理パラメータを検証する。

本研究代表者が提案した ALMA による観測は、2011 年 12 月以降から 2012 年 6 月まで継続予定であったが、ALMA の観測の遅れにより、データは 2012 年後半に取得され、2012 年末に一次処理済みのデータが届けられている。このデータを本研究期間内に再解析を行い、成果を取りまとめている。

VERA による位置天文モニター観測は本研究開始当初から研究期間中継続的に行われている。1 ヶ月に 1 ~ 2 回の観測割り当てが予定通り実行され、位置天文観測のための解析と合わせてスペクトル線強度モニターが行われている。この中では本研究で導入された新しいデータ記録装置が活用されている。ALMA との同時観測を保障するため、本研究では通常の VERA によるモニター観測 (1-2 ヶ月に 1 回) よりも高頻度の観測を行い、22GHz 帯水メーザーのバーストによる強度変化や構造変化を詳細にすることも可能となっている。水メーザー源バーストの起源やオリオン KL 領域の力学的状態を探る上で固有運動計測は重要な情報を与えるが、その測定精度は観測期間に比例して向上するため、長期間のモニター観測が不可欠である。

4. 研究成果

本研究開始当初から、1 カ月に 1 ~ 2 回の頻度で VERA による 22GHz 帯水メーザー観測が行われ、バーストした水メーザー源がオリオン KL のコンパクトリッジと呼ばれる衝撃波領域で励起されていることが高精度位置天文観測によって突き止められた。また、2012 年 6 月には水メーザーの強度が 15 万 Jy と今回のバーストで最大光度になったことが確認された(図 2)。この水メーザーは、2013 年に一時静穏期になったもののその後再び増光し始めたことも確認され、複雑な時間変動を起こしていることが明らかになっている。これはメーザーの増光が温度や密度などの物理的環境の変化ではなく、ピーミングとよばれる天体構造の変化などに起因する見た目上の増幅効果である可能性を示唆している。このことは、後述する ALMA で観測されたサブミリ波帯水メーザーのデータからも示唆される。以上のような VERA を用いた観測を進めるにあたり、本研究では大容量データ記録、広帯域・高分解能観測のための新たな記録装置を導入し、観測運用に実用化している。

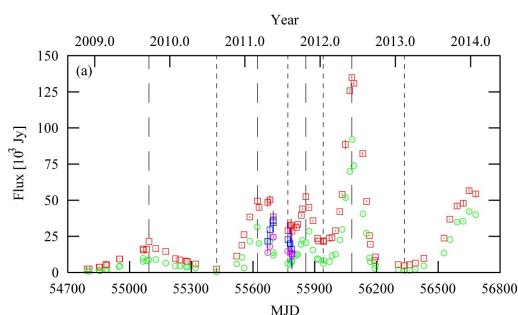


図 2 : VERA で観測されたバーストした水メーザーのスペクトル強度の時間変化 (Hirota et al. 2014, PASJ 投稿中)。2012 年 6 月に最大の強度となっている。

一方、ALMA による研究では、オリオン KL のコンパクトリッジ領域でサブミリ波帯の水分子輝線の検出をめざしたものの、予想に反して検出することができなかった。後述するように、電波源 I と呼ばれる別の天体では強い水分子輝線が検出されており、物理的・化学的環境がこれら 2 天体で異なっていることは明らかである。VERA と ALMA の観測結果、モデル計算の結果を総合的に解釈すると、22GHz 帯の水メーザーバーストは衝撃波領域の物理的性質の変化ではなく、メーザー放射のピーミングによる効果で異常な増光が起こっていることが示唆され、メーザー励起機構を理解する上で重要な情報となっている。これらの成果は、現在査読論文に投稿中で、まもなく受理される見込みである (Hirota et al. 2014, PASJ 投稿中)。

また、ALMA のデータでは、オリオン KL 領域中の大質量原始星候補天体である電波源 I から 321GHz、336GHz サブミリ波帯の 2 つの水分子輝線が初めて検出され、電波源 I 近傍の高温高密度ガスを高解像度で分解することに成功した(図 3)。電波源 I はアウトフローの励起源で、バーストを起こすメーザーが存在しているコンパクトリッジで衝撃波領域を形成する起源となっている(図 1)が、詳しい解析の結果、電波源 I にはそのアウトフローの軸の周りを回転するガス円盤が付随している確固たる証拠を得ることに初めて成功している。このことは、電波源 I が中小質量星同様に質量降着によって形成されていることを示す決定的な証拠として重要な成果となっている (Hirota et al. 2014, ApJL, 782, L28)。

さらに、本研究ですでに公開されている ALMA 科学評価データを用いて、オリオン KL では初の 232GHz 帯 (波長 1.3mm) 振動励起 (3500K) 高エネルギー水分子輝線の検出という、当初計画以上の成果も上げている(図 4)。これは本研究でターゲットとしていた ALMA による 300GHz 帯水分子輝線観測の準備的研究として行われたものであり、本研究期間内では最初の科学的成果となっている (Hirota et al. 2012, ApJL, 757, L1)。振動励起水分子輝線は、VERA で観測された 43GHz (波長 7mm)

の SiO メーザーや 22GHz 水メーザーと同じ速度構造を示し、これらがほぼ同じ領域から放射されていることを示唆している。科学評価データでは解像度が足りず振動励起水分子輝線でトレースされる電波源 I の力学的構造を解明することはできなかった。その後の cycle 0 の観測で電波源 I のアウトフローとその周囲を回る回転円盤の構造が検出されたのはすでに述べたとおりであるが、300GHz 帯と 232GHz 帯の水分子輝線が同じ場所から放射されているのかどうか、もし同じ場所であるならばその物理状態はどのようなものかは、今後のより高い空間分解能の ALMA による観測で明らかになると期待される。

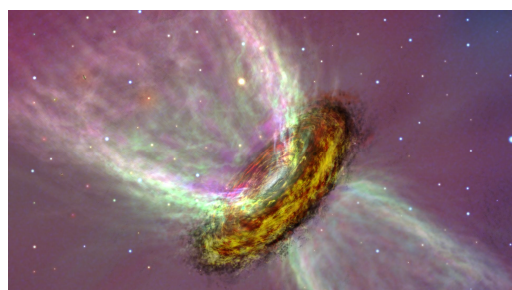
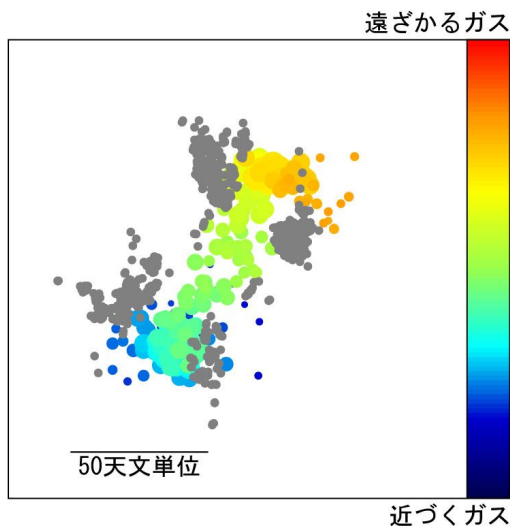


図3 : ALMA cycle 0 で観測された電波源 I の水分子輝線の分布(カラー)。回転の兆候を示す速度構造と、VERA で観測された SiO メーザー(グレー)と反相関の分布から、大質量原始星の周囲を回転する円盤を真横から観測しているという描像が明らかになった。下図はその想像図。どちらも国立天文台ウェブリリースより。

以上のように、本研究ではセンチ波からサブミリ波の水分子輝線に着目し、VERA と ALMA を組み合わせた初めての星形成研究を推進することで、太陽系からもっとも近い大質量星形成領域オリオン KL のメーザー励起機構、コンパクトリッジと呼ばれる衝撃波領域や大質量原始星電波源 I の物理的・力学的・化学的状态を高解像度で解明するという新たな研究手法を切り開いている。これらの成果を元にした本研究代表者の研究は、その後の ALMA の共同利用観測 cycle 1, cycle 2 において合計 3 本の観測提案採択という形でも評

価されている。ALMA cycle 1, cycle 2 の観測提案は、ともに 5 倍程度の高い競争率となっているが、その中でも本研究の発展は上位 10% という極めて高い評価となっている。これらの ALMA を用いた高解像度の観測、いまだに未開拓のサブミリ波帯の観測と VERA による位置天文観測を組み合わせた独創的な視点により、今後も大質量星形成の総合的な理解に向けた観測的研究が推進されると期待される。

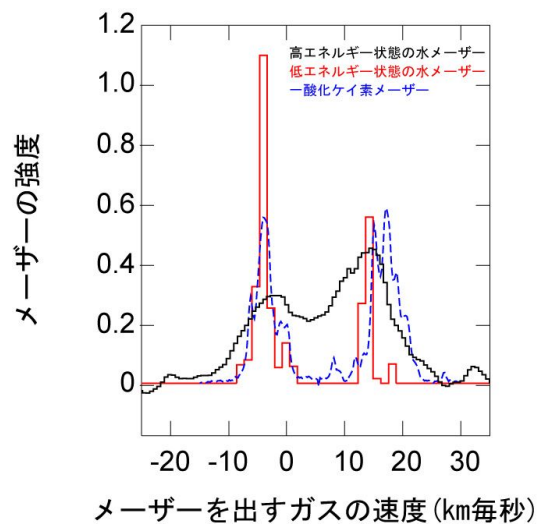


図4 : ALMA 科学評価観測データで初めて検出された Orion KL の振動励起水分子輝線のスペクトル。VERA で観測された SiO メーザースペクトルとの類似性から、放射領域が SiO メーザーと似ていることを突き止めたが空間構造は分解できなかった。cycle 0 の 300GHz 帯水分子輝線観測では円盤状の構造が検出されたが、232GHz 帯の輝線については今後の cycle 1 の観測で正体が解明されると期待される。国立天文台ウェブリリースより。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Hirota, T., Kim, M. K., Kurono, Y., Honma, M., A Hot Molecular Circumstellar Disk around Massive Protostar Orion Source I, The Astrophysical Journal Letters, 査読あり, 782, 2014, L28, pp5, DOI: 10.1088/2041-8205/782/2/L28

廣田朋也, VERA と ALMA によるオリオン KL の詳細観測、天文月報、査読なし、Vol107, No7, 2013, 491-496

Hirota, T. et al (12 authors), High-Resolution Observations of Centimeter/ (Sub)Millimeter H₂O Masers in Orion KL with VERA and ALMA, ASP Conference Series, 査読なし, 476, 2013, 327-328

Hirota, T., Kim, M. K., Honma, M., The First Detection of the 232 GHz Vibrationally Excited H₂O Maser in Orion KL with ALMA, The Astrophysical Journal Letters, 査読あり, 757,

2012, L1, pp5, DOI: 10.1088/2041-8205/757/1/L1

〔学会発表〕(計 17 件)

Hirota, T., Recent results of millimeter/submillimeter observations of H₂O and CH₃OH masers, Workshop on Interstellar Medium and Masers, 2014年3月28日、鹿児島大学(鹿児島県)

廣田朋也、金美京、黒野泰隆、本間希樹、ALMAによるオリオン KL 電波源 I における星周ガス円盤の観測、日本天文学会春季年会、2014年3月21日、国際基督教大学(東京都)

廣田朋也、ALMAによるオリオン KL 天体の分子輝線観測(招待講演)、日本分光学会中部支部北陸ブロック富山大学講演会、2014年2月21日、富山大学(富山県)

Hirota, T., ALMA Cycle 0 Observation of Orion Radio Source I, Orion Nebula Cluster as a Paradigm of Star Formation workshop, 2013年10月15日、STScI(ボルネモア、アメリカ)

Hirota, T., ALMA Observations of the Millimeter/Submillimeter H₂O Masers in Orion KL, Asia-Pacific regional URSI conference (AP-RASC), 2013年9月5日、Howard International House(台北、台湾)

Hirota, T., Observational Studies of H₂O Maser Burst in Orion-KL with VERA and ALMA (招待講演), A Neapolitan of Masers: Variability, Magnetism and VLBI, Sydney, Australia, 2013年5月20日、CSIRO (シドニー、オーストラリア)

廣田朋也、ALMA cycle 0 での Orion KL 領域スペクトル線観測の紹介、2012年度 ALMA Workshop「宇宙と生命」、2013年3月14日、国立天文台(東京都)

Hirota, T., ALMA early science of H₂O masers in Orion KL, VERA-KVN science workshop, 2013年1月30日、ソウル大学(ソウル、韓国)

Hirota, T., Observations of the centimeter/(sub)millimeter H₂O masers in Orion KL with ALMA and VERA, The First Year of ALMA Science, 2012年12月13日、Hotel Cumbres Patagonicas(プエルト・バラス、チリ)

Hirota, T., VLBI studies of nearby star-forming regions, NRO workshop Star Formation 2012(招待講演)、2012年12月10日、国立天文台(東京都)

Hirota, T., High-resolution Observations of Centimeter/(Sub)millimeter H₂O masers in Orion KL with VERA and ALMA, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era -The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory -, 2012年12月3日、プリンス箱根(神奈川県)

Hirota, T., Observations of the millimeter/submillimeter H₂O masers in Orion KL, ALMA-J User's Meeting 2012(招待講演)、2012年11月21日、国立天文台(東京都)

Hirota, T., VERA+ALMA Observations of the H₂O Maser Burst in Orion KL, The 11th

European VLBI Network Symposium, 2012年10月9日、Chambre de Commerce et d'Industrie de Bordeaux(ボルドー、フランス)

廣田朋也、本間希樹、金美京、黒野泰隆、坪井昌人、藤沢健太、今井裕、下井倉ともみ、米倉覚則、ALMA cycle 0 におけるオリオン KL 領域の観測、日本天文学会秋季年会、2012年9月19日、大分大学(大分県)

廣田朋也、Orion KL領域SVデータ解析の例、2012年度 ALMA Workshop「宇宙と生命」、2012年6月21日、国立天文台(東京都)

廣田朋也、ALMA cycle 1におけるサブミリ波水メーザー観測案、2012年度 ALMA Workshop「ミリ秒角の高空間分解能観測による新たなサイエンスの開拓」、2012年6月7日、国立天文台(東京都)

Hirota, T., VERA+ALMA observations of the H₂O maser burst in Orion KL, East Asia VLBI Workshop 2012, 2012年6月1日、台湾中央研究院天文及天文物理研究所(台北、台湾)

〔その他〕

ホームページ等

<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201210236888.html>

<http://www.miz.nao.ac.jp/vera/content/pr/pr20140304/c01>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣田 朋也 (HIROTA, Tomoya)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教

研究者番号：10325764