

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05306

研究課題名(和文)「赤色超巨星の間欠的質量放出」仮説の追求

研究課題名(英文) Verification of eruptive mass loss scenario in red supergiants

研究代表者

朝木 義晴 (Asaki, Yoshiharu)

国立天文台・チリ観測所・准教授

研究者番号：00332148

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)：太陽質量の8倍以上ある恒星は進化末期に赤色超巨星となり、質量放出により恒星中心部で生成された核融合物質を大量に宇宙へ放出していく。その物質は銀河の中で重力によって集まり、新たな恒星を生み、もしかしたら地球型惑星や生命の誕生につながるかもしれない。赤色超巨星の質量放出は宇宙の化学進化において極めて重要なプロセスに位置付けられる。赤色超巨星の質量放出を研究するにあたり、世界で最も優れた天体観測装置の一つであるALMA望遠鏡の最高解像度性能を引き出し、地球から3600光年離れた赤色超巨星「大犬座VY星」の光球のサブミリ波による撮像と、VY星から塵とガスが非等方的に放出される様子を捉えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤色超巨星の質量放出は、中小質量星の進化末期段階である漸近巨星分岐星(AGB)の延長線上で議論されることが多く、その質量とサイズがAGB星とは桁で異なるため3次元流体力学シミュレーションすらも難しい現象であり、その理解はAGB星と比較して相対的に不足している。RSGにはAGB星とは明らかに異なる「間欠的な質量放出」の特徴が潜むことがこれまで見過ごされており、本研究成果はRSGの質量放出機構を大きく見直す機会となる。また、本研究の過程において行ったALMAのサブミリ波最高角度分解能性能実証により2021年からの一般観測でその性能が利用可能となり、サブミリ波天体物理研究への波及効果は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：A red supergiant (RSG) is in the final stage of a stellar evolution for a heavier star than eight solar mass. In this stage, stellar nucleosynthesis materials are largely ejected from its photosphere. The materials may gravitationally be bounded later in a galaxy to form new stars possibly with earth-like planets and life. RSG's mass ejection, in other words, mass loss, is considered to be a very important process for a chemical evolution in the universe. In the course of this research of RSGs' mass loss process, we have achieved the highest angular resolution of ALMA, one of the greatest telescopes in the world, to observe one of the most famous RSGs VY CMa whose distance is 3600 light years. We successfully captured the photosphere in a sub-millimeter wave region as well as the gas and dust anisotropically ejected from the RSG.

研究分野：電波天文学

キーワード：赤色超巨星 質量放出 恒星光球面撮像 サブミリ波干渉計 ALMA望遠鏡 高角度分解能観測

1. 研究開始当初の背景

進化末期段階の恒星(進化末期星)ではしばしば大規模な質量損失が観測されるが、質量損失の規模が恒星の最終段階にどのような影響を与えるかについてまだよく分かっていない。特に質量が太陽の8倍以上の恒星の場合、進化最終段階の赤色超巨星(red supergiant: RSG)ではその質量とサイズは太陽質量の数倍程度の漸近巨星分岐星(Asymptotic Giant Branch star: AGB)を圧倒的に上回るため流体力学シミュレーション研究も十分に進んでおらず、RSGの進化と質量放出に対する理解は中小質量星のそれと比較して相対的に不足している。

進化末期星の質量放出により形成された星周ガスを電波で観測すると、しばしば星半径数倍以上の領域で恒星から遠ざかっていくメーザー放射源として捉えられ、時間の経過とともに惑星状星雲へと進化していく。OH/IR星などのVLBI観測では、恒星半径の数倍程度の場所でSiOメーザー放射源(メーザースポット)が星周囲にリング状に分布している様子が観測できる。また、恒星半径で数十-数百倍離れた領域では、数-数十 km s^{-1} にまで加速された H_2O メーザースポットが星間空間へ散っていく様子が観測されている。これまでは、SiOも H_2O もメーザースポットの寿命はおよそ数ヶ月であり、個々の天体によって多少の違いはあるものの、大方において分子メーザーを放射する進化末期星共通の性質、というのが概ねの理解であった。

しかし、AGBとRSGの間には、メーザースポットの寿命に明確な違いがあり、RSGでは長いもので10年以上もの寿命を持つメーザースポットが存在する。また、RSGのライトカーブには、変光周期が2年以上と長く、活発に脈動変光を起こしている時期とほとんど変光していない不活発な時期が数十数年おき程度に繰り返しあらわれる特徴を示すものがある。脈動変光しない時期があるにも関わらず、長寿命メーザースポットは星周ガスが常に存在していることを示唆しており、RSGの質量放出には周期的な脈動変光が観測されるAGBとは異なる質量放出機構のあることが示唆されていた。

2. 研究の目的

本研究を開始するにあたり、我々は「RSGでは脈動を起こす時期とそうでない時期が数年以上おきに交互に起こり、脈動が活発な時期に多量のガスが恒星表面から離れる『間欠的質量放出』を起こしている。」という仮説を立て、この検証を目的として研究を開始した。近年、赤外干渉計やミリ波・サブミリ波干渉計により、巨星からの熱的放射源(光球面)の撮像が非常に高い角度分解能で可能となってきた。RSGからの質量放出は非等方に起こる可能性が指摘されており、突発的に質量放出の起きた痕跡を辿るために、恒星表面からメーザーを放射する星周ガスやダストの空間分布とを繋いでいる痕跡を高い空間分解能で丁寧に探ることが、我々の仮説を検証しRSGの質量放出を理解する上で重要と考えた。本研究では、星周塵の影響を受けにくいサブミリ波での太陽以外の恒星(RSG)光球面の直接撮像を行うことを目標とし、本格稼働を開始した大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMAを利用してこの挑戦的課題に取り組むこととした。

3. 研究の方法

ALMAにより、地球から1キロパーセク程度の距離にあるAGB星やRSGの光球からの熱的放射を高感度で観測し、撮像をすることが原理的に可能になってきた。例えば、2014年にはALMAのミリ波観測で角度分解能13ミリ秒角(mas)によりベテルギウスの光球の撮像が行われている(O'Gorman et al. 2015a)。このような高い角度分解能はALMAの最長基線長(16 km)を利用することで可能になり、ALMAのサブミリ波バンド(波長0.8 mmから0.3 mm)で16 kmの基線長の観測を行えば10 masを上回る角度分解能性能を得ることができる。このような高い角度分解能により、1キロパーセク以内のRSGで質量放出を起こしている恒星光球面を撮像するとともに、とその周囲の星周塵や星周ガスを連続波や分子輝線、メーザー放射の観測により分布と運動を捉え、質量放出機構に鋭く切り込むことが可能となる。

本研究では、最も挑戦的課題と位置付けたALMAサブミリ波によるRSG光球撮像を行うため、一般公募観測が行われていないALMA最長基線(16 km)によるサブミリ波高角度分解能撮像性能の実証研究に取り組んだ。2016年度に研

究代表者をチームリーダーとする ALMA 高周波数高角度分解能観測検証チームを結成し、2017 年と 2019 年にその性能検証試験を行なった。特に、ALMA では新しい方式のデータキャリブレーション法である「band-to-band」方式 (Asaki et al. 2020a) の技術検証に注力した。また、ALMA のサブミリ波観測バンドであるバンド 9 とバンド 10 では、アンテナで受信しデジタル信号処理された観測データに位相モジュレーションをかけて両側帯受信のデータを上側帯波と下側帯波に分離して観測帯域を倍にする 90° 位相スイッチも試験的に導入し、連続波観測の感度を $\sqrt{2}$ 倍に向上させることに成功した。最終的には天体のイメージング性能を評価し、ALMA サブミリ波観測で最高周波数において 7 mas の高角度分解能で天体像を得ることに成功している。これらの技術検証研究については Asaki et al. (2020a) および Asaki et al. (2020b) の 2 編の査読論文で成果を紹介している。また、本技術研究は 2020 年春季天文学会で成果発表を行なった。この他、研究代表者が共著者に入った関連する技術検証論文をさらに 2 編執筆中である。

4. 研究の成果

(1) ALMA サブミリ波高角度分解能観測による VY CMa 光球面とサブミリ波 H₂O メーザーの撮像

ALMA サブミリ波における最高角度分解能への機能拡張とその性能実証試験を行うにあたり、赤色超巨星の中では最も激しい質量放出を起こすことで知られている VY CMa をバンド 9 (波長 0.46 mm) で試験観測した。試験時の ALMA 最長基線長は 13.8 km で、原理的には 10 mas を切る角度分解能が得られる。

VY CMa は地球から 1.17 kpc の距離にあり、赤色超巨星の中では最も激しい質量放出を起こすことで有名な天体である。これまでの電波から可視光にかけての観測から、VY CMa は過去 1000 年ほどの間に時間変動のある大量の質量放出を起こしていると考えられており、その質量放出レートは実に $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ にも達すると見られている。VY CMa を取り巻く星周塵からの熱的放射 (連続波) や様々な分子輝線が VY CMa を中心として数秒角の範囲で観測されているが、可視光および近赤外領域では厚い星周塵による散乱によって恒星まで見通すことができない。センチ波干渉計により質量放出で形成された星周ガスから強い放射される H₂O メーザーおよび SiO メーザーが観測されているが、既存の電波干渉計ではこの波長域で VY CMa を検出するのに十分な感度がない。VLT 中間赤外干渉計で得られたビジビリティ・データから、VY CMa の光球面のサイズは 11.4 mas と推定されており (Wittkowski et al. 2012)、ALMA サブミリ波での長基線観測が期待通りの性能を発揮すれば、これまでどの観測装置も成し遂げることができていない VY CMa の光球の直接撮像が可能となるはずである。

VY CMa 連続波源に対し、ALMA で標準的な画像合成法である CLEAN を使って撮像した結果を図 1 の右パネルに示す。干渉計ビームは 12×11 mas を実現し、それまでのあらゆる ALMA の観測の中で最高の角度分解能を達成した。参考のため、同じ波長において 2013 年の ALMA 試験観測で得られた最長基線 2.7 km で撮像された VY CMa の連続波源の撮像結果 (Richards et al. 2014) を図 1 の右パネルに示す。2013 年の観測での干渉計ビームは 110×59 mas であり、サブミリ波を放射する星周塵である「C」成分や「N」成分と恒星からの放射を空間的に分離できていなかった。一方、本研究で達成した角度分解能により、VY CMa を星周塵放射と明瞭に分離することができた。最も明るいコンパクトな放射源のサイズは 19×12 mas であり、VLT 赤外線干渉計で推定されている恒星のサイズとよく一致している。測定された放射源の強度は 180 mJy であるが、およそ 3200 K の有効温度を持つ VY CMa からの放射は 111–124 mJy と見積もられており (O’Gorman et al. 2015b)、我々の観測結果は恒星光球の放射に加え、恐らく恒星のごく近傍の星周塵の放射が寄与しており、それが VY CMa の超過放射と形状の異方性に影響していると考えられる。この試験観測により VY CMa の光球面撮像を行うことに成功した。

VY CMa の試験観測では 658 GHz のサブミリ波 H₂O メーザー ($v_2 = 1, 1_{1,0} - 1_{0,1}$) の観測も試みられた。星周ガス中のメーザー源の実サイズは 1 天文単位程度と考えられているが、距離 1.17 kpc から 1 天文単位は 0.9 mas となるため、H₂O メーザーの撮像においてはデータを像合成する際のウェイトを調整し、角度分解能を 10×8 mas に上げて像合成を行なった。速度分解能 8 km s^{-1} で描いた H₂O メーザーのイメージを図 2 に示す。水メーザーが VY CMa の周囲に巨視的には球殻状に取り巻いている様子が観測され、ガスにおいては質量放出が等方的に起こっている様子が得られた。ただし微視的には星周塵が集中して分布する領域と恒星との間で恐らく衝突の励起を起源とするメーザー放射が観測されるなど、複雑な質量放出の歴史を示唆する結果が得られており、時間非定常な質量放出を裏付ける結果が得られた。

本結果は、ALMA 高周波数高角度分解能観測の実証試験の結果として (Asaki et al. 2020a) で報告している。この試験観測データは公開されており、現在、科学成果を報告した論文を執筆している。

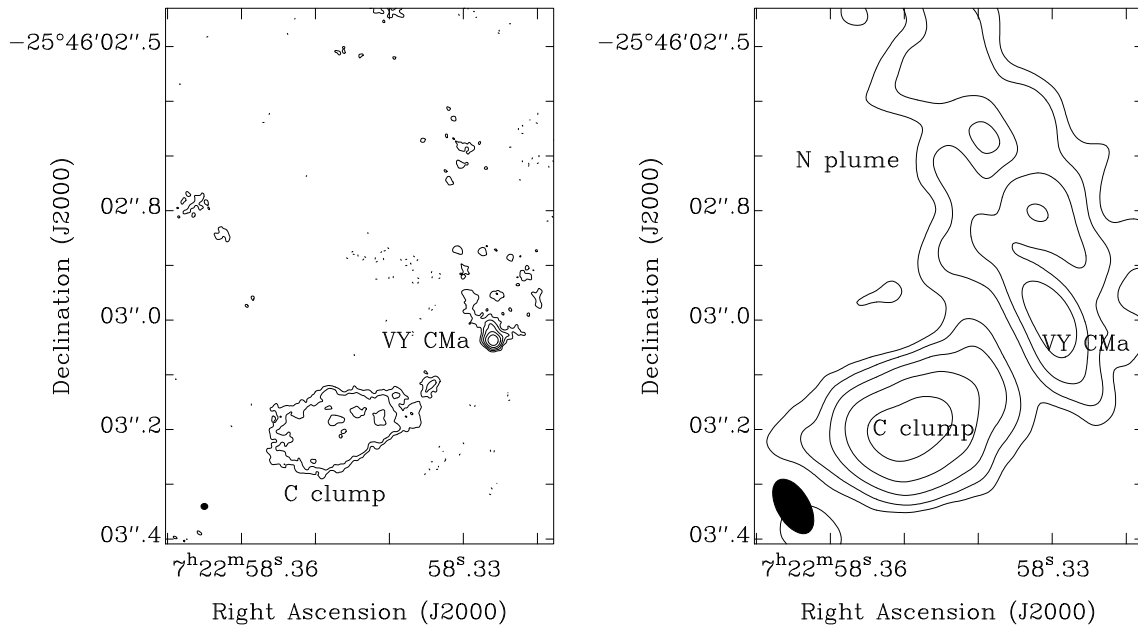


図 1. 波長 0.46 mm のサブミリ波連続波による赤色超巨星 VY CMa の ALMA 撮像観測結果。コントアはイメージ雑音 (1σ) に対し -3σ 、 3σ 、 6σ 、 12σ 、 24σ 、 48σ で描かれている。左パネル：2017 年に行われた最長基線長 13.8 km 試験観測による熱的放射源 (Asaki et al. 2020a)。イメージ雑音は $1.5 \text{ mJy beam}^{-1}$ 。干渉計ビームは左下に描かれている ($12 \times 11 \text{ mas}$)。右パネル：2013 年に行われた最長基線長 2.7 km 試験観測による熱的放射源 (Richards et al. 2014)。イメージ雑音は $4.1 \text{ mJy beam}^{-1}$ 。干渉計ビームは左下に描かれている ($110 \times 59 \text{ mas}$)。2013 年の ALMA 試験観測に対し、本研究グループが主導した 2017 年の ALMA 試験観測では角度分解能が大幅に向上していることが分かる。

(2) OH/IR 星の ALMA サブミリ波高角度分解能観測による VY CMa 光球面とサブミリ波 H_2O メーザーの撮像

漸近巨星分岐段階にある OH/IR 星の中で、赤色超巨星と同様に非常に長い変光周期を持つ巨星に対する位置天文 VLBI を行なった。OH/IR 星は太陽質量の星の進化の末期にあたり、質量放出が非常に大きな時期を迎えた星と考えられている。典型的なミラ型変光星より周期が長い OH/IR 星についても観測例がほとんどないため、系列の確認は進んでいない。2017 年末から開始した OH/IR 星 NSV25875 (周期 1748 日) の SiO メーザー VLBI 観測から、年周視差 $0.38 \pm 0.13 \text{ mas}$ (距離 $2.60 \pm 0.85 \text{ kpc}$) が得られた。この結果は 2018 年の IAU シンポジウムで発表している (Nakagawa et al. 2018)。

引用文献

- Asaki, Y., Maud, L. T., Fomalont, E. B., et al. 2020a, *ApJS*, 247, 23, doi: [10.3847/1538-4365/ab6b20](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6b20)
- Asaki, Y., Maud, L. T., Fomalont, E. B., et al. 2020b, *AJ*, in printing
- Nakagawa, A., Kurayama, T., Orosz, G., et al. 2018, in IAU Symposium, Vol. 336, *Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe*, ed. A. Tarchi, M. J. Reid, & P. Castangia, 365–368
- O’Gorman, E., Harper, G. M., Brown, A., et al. 2015a, *A&A*, 580, A101, doi: [10.1051/0004-6361/201526136](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526136)
- O’Gorman, E., Vlemmings, W., Richards, A. M. S., et al. 2015b, *A&A*, 573, L1, doi: [10.1051/0004-6361/201425101](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425101)
- Richards, A. M. S., Impellizzeri, C. M. V., Humphreys, E. M., et al. 2014, *A&A*, 572, L9, doi: [10.1051/0004-6361/201425024](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425024)
- Wittkowski, M., Hauschildt, P. H., Arroyo-Torres, B., & Marcaide, J. M. 2012, *A&A*, 540, L12, doi: [10.1051/0004-6361/201219126](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219126)

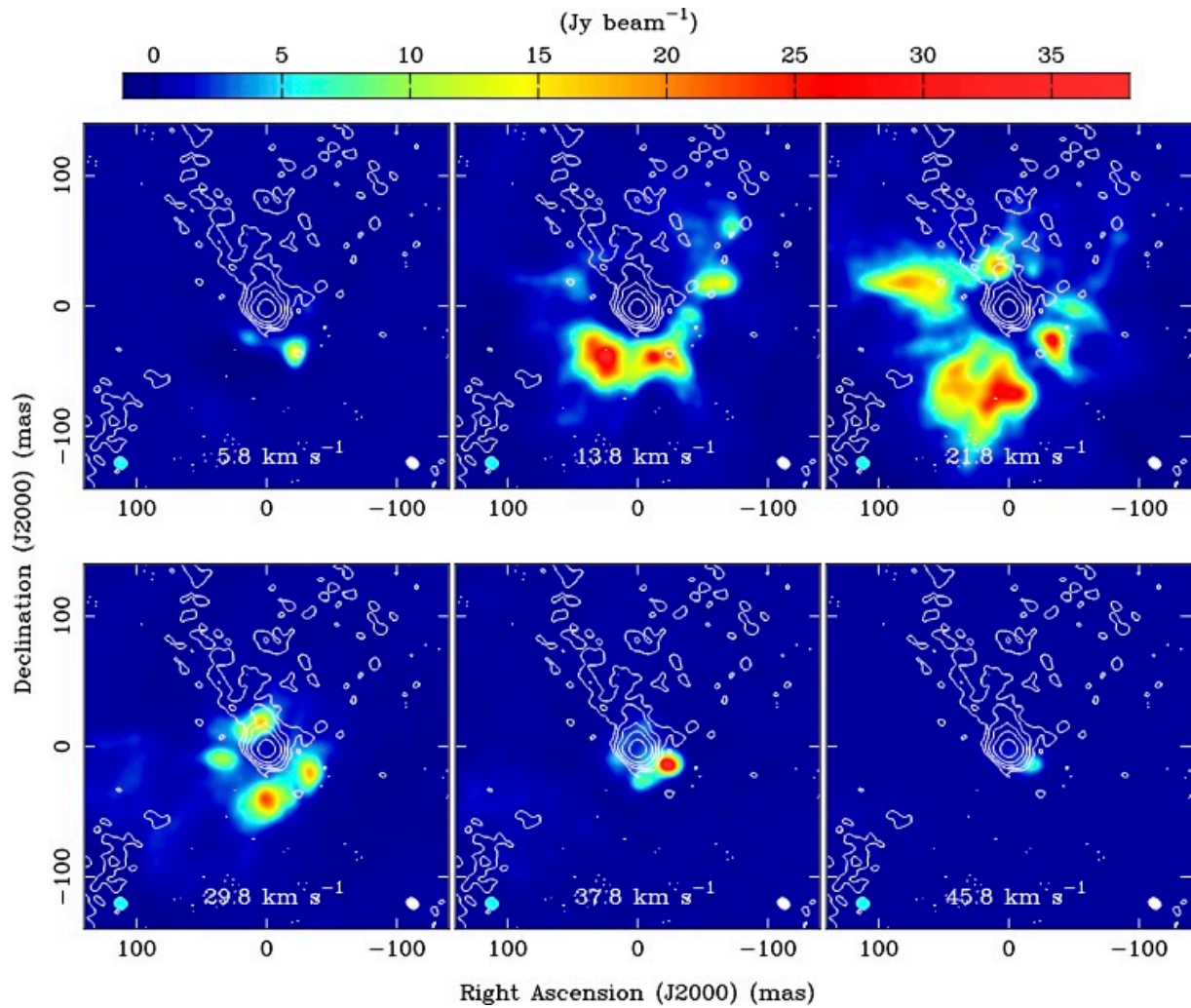


図2. VY CMa 星周ガス中のサブミリ波 H₂O メーザー (カラーグラデーション) (Asaki et al. 2020a)。干渉計ビームは 10 × 8 ミリ秒角 (各イメージの左下の水色の楕円)。各イメージの速度分解能は 8 km s⁻¹。各プロットの下側に視線速度が示されている。波長 0.46 mm の連続波イメージはコントア (2σ, 4σ, 8σ, 16σ, 32σ, 64σ, (1σ = 1.8 mJy beam⁻¹) で重ねられている。(干渉計ビームは右下の白い楕円。)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Akiharu Nakagawa, Tomoharu Kurayama, Gabor Orosz, Ross A. Burns, Tomoaki Oyama, Takumi Nagayama, Takashi Miyata, Mamoru Sekido, Junichi Baba, keiichi Wada	4. 巻 13
2. 論文標題 Astrometric VLBI Observations of the Galactic LPVs, Miras, and OH/IR stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium	6. 最初と最後の頁 365 - 368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921317009449	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Yoshiharu Asaki, Satoki Matsushita, Edward B. Fomalont, Stuartt A. Corder, Lars-Ake Nyman, William R. F. Dent, Neil M. Philips, Akihiko Hirota, Satoko Takahashi, Baltasar Vila-Vilaro, Bojan Nikolic, Todd R. Hunter, Anthony Remijan, Catherine Vlahakis	4. 巻 99065U
2. 論文標題 ALMA long baseline phase calibration using phase referencing	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2232301	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 該当する

1. 著者名 Orosz, G., Imai, H., Dodson, R., Rioja, M. J., Frey, S., Burns, R. A., Etoke, S., Nakagawa, A., Nakanishi, H., Asaki, Y., Goldman, S. R., Tafuya, D	4. 巻 153
2. 論文標題 Astrometry of OH/IR Stars Using 1612 MHz Hydroxyl Masers. I. Annual Parallaxes of WX Psc and OH138.0+7.2	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/153/3/119	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 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 中川亜紀治, 倉山智春, 守田篤史, 加世田大地, 湯田晶斗, 松野雅子, 濱田翔太, 田中理央, 国立天文台VERAプロジェクト
2. 発表標題 長い周期を持つOH/IR星のVERAを用いた位置天文観測
3. 学会等名 2019年日本天文学会春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川亜紀治, 須藤広志, 倉山智春, 国立天文台VERAプロジェクト
2. 発表標題 長周期変光星におけるVLBIとGaiaによる年周視差の比較
3. 学会等名 2018年日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiharu Asaki
2. 発表標題 Intermittent Mass Blowout of the Red Supergiant S Per
3. 学会等名 IAU Symposia 336: Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiharu Asaki
2. 発表標題 Millimeter/submillimeter interferometry phase calibration strategy
3. 学会等名 ALMA Long Baseline Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akiharu Nakagawa
2. 発表標題 Astrometric VLBI observation of the Galactic LPVs; Miras and OH/IR stars
3. 学会等名 IAU Symposia 336: Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川亜紀治
2. 発表標題 OH/IR星を対象としたVLBI位置天文に基づく銀河動力学の観測的研究
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川亜紀治
2. 発表標題 VERAによるSiOメーザーを用いた周期の長いOH/IR星の位置天文VLBI観測
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川亜紀治
2. 発表標題 VERAによるOH/IR星のSiOメーザー位置天文観測
3. 学会等名 VLBI懇談会シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Asaki, R. Burns, J. O. Chibueze, S-H. Cho, Y. K. Choi, R. Dodson, M. D. Gray, H. Imai, T-H. Jung, J. Kim, N. Matsumoto, R. Micheletto, C. Min, A. Nakagawa, K. Obara, G. Orosz, M. Oyadomari, M. J. Rioja, A. Sobolev, F. Watari, Y. Yun
2. 発表標題 Map Comparison between Quadruple Masers of the Red Supergiant S Per Using VLBI Source/Frequency Phase Transfer Technique
3. 学会等名 Cool Stars 19th (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 朝木義晴
2 . 発表標題 赤色超巨星 S Perの間欠の質量放出
3 . 学会等名 連星系・変光星・低温度星研究会
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Akiharu Nakagawa, Tomoharu Kurayama, Gabor Orosz, VERA Project
2 . 発表標題 Astrometry of the Galactic Miras and LPVs with a Japanese VLBI array "VERA"
3 . 学会等名 13th European VLBI Network Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Y. Asaki, R. Burns, J. O. Chibueze, S-H. Cho, Y. K. Choi, R. Dodson, M. D. Gray, H. Imai, T-H. Jung, J. Kim, N. Matsumoto, R. Micheletto, C. Min, A. Nakagawa, K. Obara, G. Orosz, M. Oyadomari, M. J. Rioja, A. Sobolev, F. Watari, Y. Yun
2 . 発表標題 Intermittent Mass Blowout of the Red Supergiant S Per
3 . 学会等名 Pulsation 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Yoshiharu Asaki, Stuartt Corder, Satoko Takahashi, Ed Fomalont, William Dent, Luke Maud, Loreto Barcos
2 . 発表標題 ALMA High Frequency (Long Baseline) Capability Commissioning Campaign 2017
3 . 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI (国際学会)
4 . 発表年 2017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 分 担 者	中川 亜紀治 (Akiharu Nakagawa) (60535631)	鹿児島大学・理工学域理学系・助教 (17701)	