

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340034

研究課題名(和文)メタノールメーザー源の大規模モニタリングサーベイによる大質量星形成機構の解明

研究課題名(英文)Study of the mechanism of massive-star formation by large-scale monitoring survey of methanol masers

研究代表者

米倉 覚則 (YONEKURA, YOSHINORI)

茨城大学・宇宙科学教育研究センター・准教授

研究者番号：90305665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)： 形成途上の大質量星周囲の物質の固有運動を求めるため、6.7 GHzメタノールメーザー源36天体に対して、日本および東アジアの VLBI 網を用いた超高空間分解能観測を行った。1天体において回転しながら膨張する円盤の存在が明らかになった。

6.7 GHz メタノールメーザー源の速度および強度変動を捉えるため、日立および高萩の2台の32メートル電波望遠鏡を用いて384天体に対する継続的な単一鏡モニター観測を行った。強度が周期的になめらかに変動する天体を新たに1天体、周期的に急激な増光を繰り返す天体を新たに1天体、突発的に増光する天体を新たに2天体検出した。

研究成果の概要(英文)： In order to derive proper motion of materials around massive stars during their formation process, high-angular resolution VLBI observations were achieved toward thirty-six 6.7 GHz methanol maser sources using Japanese and East-Asian VLBI network. We found a rotating disk with expanding motion toward one source.

In order to derive fluctuations in velocity and intensity of 6.7 GHz methanol maser emission, we made single-dish monitoring observations toward 384 6.7 GHz methanol maser sources using Hitachi and Takahagi 32-m radio telescopes. We newly found the following four activities: one source with sinusoidal fluctuation pattern of the intensity, another source with intermittent fluctuation pattern of the intensity, and the other 2 sources with bursting activity.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 メタノールメーザー VLBI 大質量星形成 時間変動

1. 研究開始当初の背景

太陽をはじめとする恒星は、分子雲と呼ばれる、密度1立方センチメートルあたり100個程度、絶対温度10度程度の星間ガスで生まれる。これらの分子雲の中心部が重力収縮によって更に高密度となったものは、クランプ(密度1立方センチメートルあたり1万個程度)あるいはコア(密度1立方センチメートルあたり100万個程度)と呼ばれる。さらに収縮が進むと回転エネルギーが支配的になるため、球対称の収縮ができなくなる。物質は一旦、中心部をとりまく円盤に降り積もった後、質量放出現象を起こしながら回転エネルギーを減少させる事によって、再び中心に向かって質量降着を続ける事ができるようになる。太陽のような中小質量(質量が太陽の8倍以下)の星については、このような進化過程を経て形成する事が明らかになっている。一方で、大質量(質量が太陽の8倍以上)の星では、中心星からの輻射圧によって収縮が妨げられる可能性がある点、大質量星に成長するまでに要する時間がコアなどの寿命に対して長過ぎる点などの問題点があるため、中小質量星と同じメカニズムでは形成できない点が指摘された(Wolfire & Cassinelli 1987)。そこで提唱されたのが「大降着説」と「合体説」の2説である。

「大降着説」: 中小質量星と同様な過程を経るが、質量降着率が桁違いに大きく、非常に短い時間で大質量星に至るという説(McKee & Tan 2003 など、図1参照)。

「合体説」: 中小質量星を沢山作った後、一気に合体させる事によって大質量星を形成するという説(Bonnell et al. 1998 など)。

どちらの説が有力であるかは未だ解明されていない。これはひとえに観測的装置の空間分解能が不足しており、円盤などを直接捉える事ができないためである。

6.7 GHz のメタノールメーザーは、大質量星形成領域のみで検出されるという特徴がある。メタノールメーザーが何をトレースしているかについては解明されていないが、形成途上の大質量星の周囲~1000 AU 以内の円盤、アウトフロー、あるいはジェットのうちいずれかであると考えられている。また、数10AU 程度の非常にコンパクトな領域から放射されており、非常に輝度が高い、という特徴を持っている。そのため、0.001 秒角程度の空間分解能を達成可能な VLBI 観測においても、十分検出可能である。これまでの観測により、6.7 GHz メタノールメーザー源の運動速度は 10 km/s 程度と見積もる事ができる。この値は、大質量星形成領域の典型的な距離である数 kpc において、1年あたり数 AU 程度の運動に相当する。この距離において、VLBI 観測の空間分解能は数 AU 程度である。したがって、数年間継続的な VLBI 観測を行う事により、6.7 GHz メタノールメーザー源の運動、すなわち、形成途上の大質量星周囲のガスの運動を直接検出する事が可

能である。

形成途上の大質量星周囲のガスの運動を直接検出できる観測手法は、VLBI のみである。世界には、アメリカ(VLBA)、ヨーロッパ(EVN)、日本/東アジア(JVN/EAVN)、オーストラリア(LBA)の4つのVLBIが存在するが、メタノールメーザーの観測を行っているのは、ヨーロッパと日本のみである。ヨーロッパでは2003年から2007年にかけて、31天体のイメージが得られた(Bartkiewicz et al. 2009)。しかしながら、継続的なVLBI観測によって運動を直接検出したのは、4例である(Sanne et al. 2010a, 2010b; Rygl et al. 2010; Moscadelli et al. 2011)。日本においては、4例の運動検出例が報告されている(Sugiyama et al. 2011, 2012a, 2012b; Matsumoto et al. 2012)。これら8例の結果は、2例が回転のみ、3例が膨張、1例が膨張を伴う回転、1例が降着を伴う回転、1例が回転円盤+ジェットと、バラエティーに富んでおり、統一的な描像を描くには至っていない。したがって、少なくとも20~30天体以上について運動を検出する必要があると思われる。

2. 研究の目的

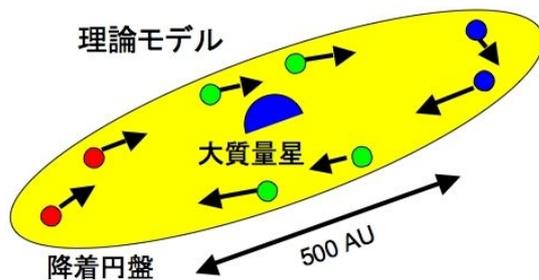
本研究では、超高空間分解能を達成できる超長基線電波干渉計(VLBI)を用いて、形成途上の大質量星の周囲のガスの運動を直接検出する事により、大質量星の形成機構を解明する。具体的には、質量が太陽の8倍以上である「大質量星」が、太陽と同じ仕組みで形成されるのか(大降着説)、あるいは太陽とは全く異なった仕組みで形成されるのか(合体説)を、観測的に初めて明らかにし、大質量星形成過程に関する議論に終止符を打つ事を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 現存する電波望遠鏡の中で最も感度が良い茨城32メートル電波望遠鏡を用いた単一鏡観測により、大質量星形成領域の非常に良いトレーサーである6.7 GHz メタノールメーザーが検出されている400天体程度の形成途上の大質量星に対して、メタノールメーザーのスペクトル取得のための単一望遠鏡観測を行い、複数の速度成分を持つ天体を選定する。ターゲットとしては、既知の6.7 GHz メタノールメーザー源(Pestalozzi et al. 2005; Green et al. 2009, 2010; Caswell et al. 2010, 2011 など)を用いる。文献にスペクトルが掲載されていないものがある事、強度および速度が時間変動している可能性がある事、さまざまな望遠鏡で観測されたデータが混在している事、などの理由から、日本から観測可能な全ての天体(赤緯マイナス30度以北の400天体程度)について新たに観測を行う。ターゲット天体に対して

中心方向1点のみの観測を行い、複数の速度成分の有無を調べるとともに、高頻度モニター観測のターゲット天体を選定する。過去の6.7 GHz メタノールレーザーの観測における感度と同程度である1 Jyを達成するために必要な観測時間は、1天体あたり5分程度であるため、2週間程度で全ての天体に対する観測を完遂できる。

- (2) 上記にて選定された天体に対して、茨城32メートル電波望遠鏡を用いた単一鏡観測を1~2週間程度に1回の頻度で行い、強度および速度の時間変動を検出する。
- (3) 上記によって視線速度の時間変化を伴う事が明らかになった天体に対して、日本のVLBI網を用いた超高空間分解能観測を行い、レーザー源の空間分布および速度分布を明らかにする。さらに、VLBI観測を1年に1回程度の頻度で継続的に行うことにより、レーザー源の運動を直接検出する。
- (4) これらの観測結果に基づいて、大質量星の形成が、「大降着説」「合体説」のどちらが正しいかを、形成途上の大質量星の周囲に円盤があるか否かを空間分解する事により明らかにする。



赤、青、緑色の小さい丸印:レーザー源

図1. 大降着説で予想される理論モデル。このような運動が捉えられた場合、回転しながら降着する運動が予測される。

4. 研究成果

- (1) 単一鏡によるサーベイ観測: モニター観測対象天体の選定: 日立32メートル電波望遠鏡を用いて、6.7 GHz メタノールレーザーの単一鏡観測を行い、次項のモニター観測対象天体を選定した。ターゲットとして、既知の6.7 GHz メタノールレーザー源を用いた。日本から観測可能な全ての天体(赤緯マイナス30度以北の433天体)について新たに観測を行った。ターゲット天体に対して中心方向1点のみ、1天体あたり5分の積分時間で、合計14日間の観測を実施した。過去に同程度の口径の電波望遠鏡を用いて行われた6.7 GHz メタノールレーザーの観測における感度と同程度である1 Jyを達成した。この観測の結果、301天体に対してメタノールレーザーを

検出するとともに、49天体については複数の天体が視野に混入しており32メートル電波望遠鏡では分離が難しい事が明らかになった。この結果、384天体をモニター観測対象天体として選定した。

- (2) 単一鏡によるモニター観測: 視線速度および強度の時間変化を伴う天体の選定
上記によって選定された384天体に対して日立および高萩の2台の32メートル電波望遠鏡を用いて6.7 GHz メタノールレーザーの速度および強度変動を捉えるための継続的な単一鏡モニター観測を行った。中心方向1点のみ、1天体あたり5分の積分時間で、過去に同程度の口径の電波望遠鏡を用いて行われた6.7 GHz メタノールレーザーの観測における感度と同程度である1 Jyを達成した。大部分の天体については9日に1回程度の頻度の観測を、変動が激しい天体については、1日ないし3日に1回程度の頻度の観測を、2012年12月から2014年1月まで、および2014年5月から2015年3月まで継続した。周期的になめらかに変動する天体として新たに1天体(周期約55日) 周期的に急激な増光を繰り返す天体として新たに1天体(周期約180日) 周期的に急激な増光を繰り返しているように見えるが周期の導出に至っていない天体として新たに1天体、予測出来ないタイミングで突発的に増光する天体として新たに2天体を検出した。

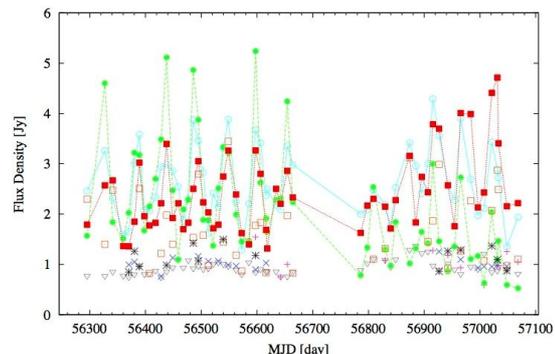


図2. 周期的になめらかに変動する天体の強度変動。横軸は日にち(修正ユリウス日)、縦軸は強度(フラックス密度)。各速度成分の強度を異なった色で表示してある。

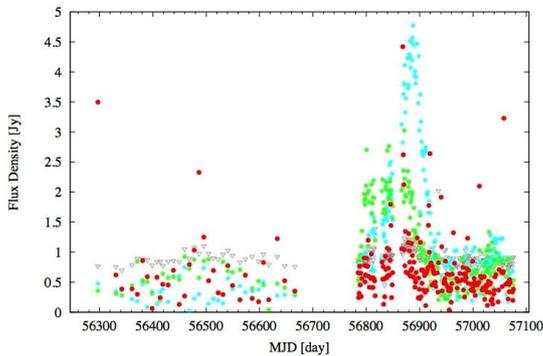


図3．周期的に急激な増光を繰り返す天体の強度変化。赤色で示した速度成分が、周期的な変動を示す。

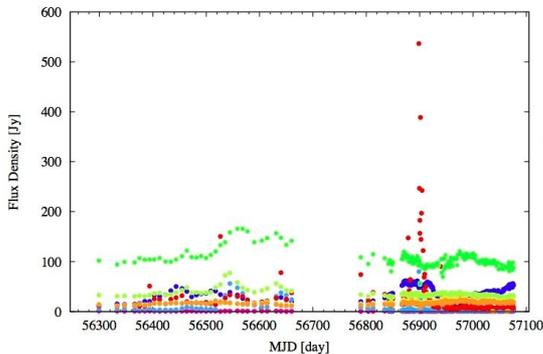


図4．予測出来ないタイミングで突発的に増光する天体の強度変化。赤色で示した速度成分が、突発的な強度変動を示す。

9日に1回程度のモニター観測によって短周期の変動が期待された51天体に対して、高萩32メートル電波望遠鏡を用いた6.7 GHz メタノールメーザーの観測を21日間毎日行った。1天体において、数日程度のスケールでの変動が検出された。

(3) VLBIによるモニター観測：内部固有運動の導出

メーザー源の空間分布および速度分布を明らかにする目的で、強度が強く比較的南天に位置する36天体に対して、2010年から2013年までの4年間に年1回ずつ、日本/東アジアのVLBI網を用いた超高空間分解能観測を行った。各天体につき、3ないし4回の観測を実施した。1回目の観測結果を用いた解析結果(メーザー源の空間分布)は、日本天文学会欧文研究報告に掲載された。

3ないし4回の観測結果全てを用いて固有運動を導出した所、回転運動が予想される楕円形状6天体のうち、1天体において回転しながら膨張する円盤の存在が明らかになった。この天体について論文にまとめ、日本天文学会欧文研究報告に投稿した。回転しながら収縮する円盤の存在が明らかになった天体は検

出されなかった。

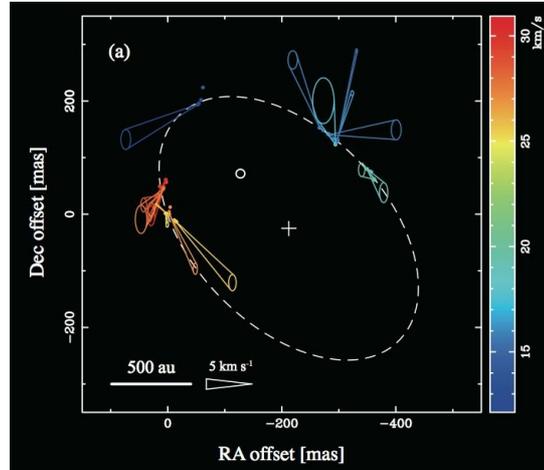


図5．回転しながら膨張する円盤の存在が明らかになった天体の観測結果。固有運動の解析により、各々の円錐の頂点に位置するメーザー源が、円錐の底面方向に向かって運動しており、全体として左回りに回転しながら膨張する運動が捉えられた。

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 1件)

藤澤健太、杉山孝一郎、元木業人、蜂須賀一也、米倉覚則、澤田佐藤聡子、松本尚子、徂徠和夫、百瀬宗武、齋藤悠(他19名、5番目)『Observations of 6.7 GHz methanol masers with East-Asian VLBI Network. I. VLBI images of the first epoch of observations』、日本天文学会欧文研究報告誌、66巻、31、2014、査読有、DOI: 10.1093/pasj/psu015

〔学会発表〕(計 18件)

杉山孝一郎、藤澤健太、蜂須賀一也、元木業人、平野大樹、林京之介、新沼浩太郎、米倉覚則、百瀬宗武(他9名、8番目)、『EAVNによる6.7 GHzメタノール・メーザーのVLBIサーベイX』、日本天文学会2015年春季年会、2015.3.18、大阪大学(大阪府豊中市)

杉山孝一郎、藤澤健太、蜂須賀一也、元木業人、平野大樹、林京之介、新沼浩太郎、米倉覚則、百瀬宗武(他9名、8番目)『EAVNによる6.7 GHzメタノール・メーザーの固有運動計測プロジェクト』、日本天文学会2014年秋季年会、2014.9.13、山形大学(山形県山形市)
米倉覚則、杉山孝一郎、齋藤悠、石井翔太、百瀬宗武、平本信善、元木業人、藤澤健太、『茨城32-m鏡による6.7 GHzメタノールメーザー源の単一鏡強度モニター』、日本天文学会2014年秋季年会、2014.9.13、山形大学(山形県山形市)

松本尚子、藤沢健太、蜂須賀一也、元木業人、平野大輝、林京之介、新沼浩太郎、杉山孝一郎、米倉覚則(他7名、9番目)

『EAVNによる6.7GHzメタノール・メーザーのVLBIサーベイVIII』、日本天文学会2014年秋季年会、2014.9.13、山形大学(山形県山形市)

蜂須賀一也、藤沢健太、元木業人、平野大樹、林京之介、杉山孝一郎、米倉覚則(他3名、7番目)『EAVNによる6.7GHzメタノール・メーザーのVLBIサーベイIX:ペア形状天体の内部固有運動』、日本天文学会2014年秋季年会、2014.9.13、山形大学(山形県山形市)

杉山孝一郎、元木業人、藤沢健太、齋藤悠、石井翔太、古川尚子、米倉覚則、百瀬宗武(他6名、7番目)『6.7GHzメタノール・メーザーの周期強度変動探査II:100日周期天体』、日本天文学会2014年春季年会、2014.3.21、国際基督教大学(東京都三鷹市)

杉山孝一郎、藤沢健太、元木業人、新沼浩太郎、平野大樹、蜂須賀一也、Shen Zhiqiang、米倉覚則、百瀬宗武(他9名、8番目)『EAVNによる6.7GHzメタノール・メーザーのVLBIサーベイVII:楕円形状天体の固有運動まとめ』、日本天文学会2014年春季年会、2014.3.21、国際基督教大学(東京都三鷹市)

杉山孝一郎、藤沢健太、元木業人、新沼浩太郎、平野大樹、蜂須賀一也、Shen Zhiqiang、米倉覚則、百瀬宗武(他9名、8番目)『EAVNによる6.7GHzメタノール・メーザーのVLBIサーベイVI:2010-2012年間における内部固有運動議論その2』、日本天文学会2013年秋季年会、2013.9.10、東北大学(宮城県仙台市)

杉山孝一郎、元木業人、藤沢健太、齋藤悠、古川尚子、米倉覚則、百瀬宗武(他4名、6番目)『6.7GHzメタノール・メーザーの周期強度変動探査I:プロジェクト概要』、日本天文学会2013年秋季年会、2013.9.10、東北大学(宮城県仙台市)

米倉覚則、齋藤悠、齋藤貴文、森智彦、Soon KangLou、百瀬宗武、横沢正芳、小川英夫、藤沢健太、杉山孝一郎(他8名、1番目)『Development of 32-m Radio Telescopes for Monitoring Observations of Methanol Masers, H₂O Masers, and Radio Continuum』、New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era、2012.12.3、箱根プリンス(神奈川県足柄下郡箱根町)

杉山孝一郎、藤沢健太、蜂須賀一也、米倉覚則(他9名、4番目)『The VLBI Imaging Survey of the 6.7 GHz Methanol Masers using the JVN/EAVN』、New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era、

2012.12.3、箱根プリンス(神奈川県足柄下郡箱根町)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.asec.ibaraki.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米倉 覚則(YONEKURA YOSHINORI)
茨城大学・宇宙科学教育研究センター・准教授
研究者番号: 90305665

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

百瀬 宗武(MOMOSE MUNETAKE)
茨城大学・理学部・教授
研究者番号: 10323205

藤澤 健太(FUJISAWA KENTA)
山口大学・時間学研究所・教授
研究者番号: 70311181

杉山 孝一郎(SUGIYAMA KOICHIRO)
茨城大学・宇宙科学教育研究センター・研究員
研究者番号: 50624954