

修 士 学 位 論 文

東アジア VLBI 観測網を用いた 6.7 GHz メタノールメー
ザー源 G012.88+00.48 の観測的研究

2019 年度
(令和元年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻
18NM155N
佐藤公紀

論文要旨

大質量星 ($M \geq 8 M_{\odot}$) は中小質量星と比べて観測が困難であり、その形成過程は未だ十分な理解が得られていない。大質量星形成領域からはさまざまな分子からのメーザー放射が確認されており、その放射領域サイズは au スケールと非常にコンパクトである。そのため、超長基線電波干渉法 (VLBI) を用いたミリ秒角スケールの高空間分解能観測によって、メーザーの空間分布や内部固有運動を導出することができる。内部固有運動の計測から、大質量星形成領域周辺で起こっている力学的な運動の情報が得られると期待されている。6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星形成領域にのみ付随することから、大質量星形成の指標として精力的な研究が行われている。6.7 GHz メタノールメーザーには周期的な強度変動を示すものが発見されており、その周期変動は、大質量原始星ごく近傍の何らかの変動現象に起因していると考えられている。そのため、空間分布および内部固有運動の計測によって得られた情報と、視線速度の情報を組み合わせることで、大質量原始星周辺ガスの 3 次元運動を推定し、どのような天体変動現象に起因する変動モデルが適するかを決定することができる。

本研究の解析対象天体 G012.88+00.48 は、メーザー天体の中から、杉山らによって行われている日立局メタノールメーザーモニター観測により周期変動が検出されており、東アジア VLBI 観測網 (EAVN) によるマルチエポック観測の VLBI イメージが存在し (Fujisawa et al. 2014)、かつ周期変動の極大期もしくは極小期に近い時期に観測が行われているという 3 つの条件から選出された 4 天体の中で、変動周期が 29.5 日 (Goedhart et al. 2009) と最短の天体である。また、G012.88+00.48 は大質量原始星 IRAS18089 – 1732 に付随する領域であり、原始星の周りには回転円盤を示唆する構造の存在が確認されている (Beuther et al. 2005)。

本研究の目的は、大質量星形成領域 G012.88+00.48 に付随する周期強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布の取得と、内部固有運動の計測の 2 点とした。本研究で解析に用いた観測のデータは、EAVN を用いて 2011 年 10 月 28 日 (エポック 1)、2012 年 9 月 26 日 (エポック 2)、2013 年 9 月 19 日 (エポック 3) の 3 回観測によって取得されたデータである。既知の周期から推定されたピーク日と観測日との比較から、この観測はメーザーの増光期に完全に合わせて観測がなされたわけではない。エポック 1, 2, 3 でそれぞれ 60, 22, 16 個のメタノールメーザースポットが検出され、メーザーフィーチャーという 10 au スケールの小さなクラスタにまとめた。その結果、同定されたメーザーフィーチャーはエポック 1, 2, 3 でそれぞれ 11, 3, 3 個であった。そのうち 3 エポックにわたって同定されたフィーチャーが 2 個であり、2 エポック間のみで同定されたフィーチャーが 2 個であった。リファレンススポットに対する相対的な固有運動の計測は複数エポックにわたって同定されたフィーチャーに対して行った。本研究では複数エポック間でのフィーチャーの RA, Dec 方向それぞれの、時間に対する相対位置の変化に対して直線フィットを行い、その変化率から RA, Dec それぞれの運動速度を導出するという手法を採用した。今回導出された固有運動は真の運動を捉えていない可能性がある。

リファレンススポットを含むフィーチャーの速度は、実際の固有運動の速度を表しているわけではなく、位置変化の不定性を表している。原点付近のフィーチャーの運動速度の値は、この不定性と誤差の影響を含めて考えると信頼性が低い。一方で、その他の 2 つのフィーチャーの速度の値は、不定性の値と誤差の影響を含めて考えても信頼性が高い。この値は過去の 6.7 GHz メタノールメーザーに対する観測結果では検出されていない値である。今回求めたフィーチャーの固有運動は真の運動を捉えていない可能性があるため、その場合は特定の運動を否定することは難しい。仮に今回得られた速度が真であるとした場合を考えると、速度の値が大きいことから、運動は中心星の重力に束縛されていないと考えられる。一方で、メーザーが付随する領域が回転円盤を示唆する構造に付随している可能性があるため、ケプラー回転の速度と比較した結果、得られたどのメーザーフィーチャーの速度の値も、この速度よりも数倍大きい値であった。このことは、大質量原始星周辺の回転円盤を示唆する構造に付随すると思われる領域に存在するメーザー放射ガスの運動は、ケプラー回転ではないことを示唆する。今後、検出スポット数を増やすために増光期に合わせ、誤差の影響を減らすために高頻度かつ長期間の観測を行い、正確な内部固有運動を議論していく必要がある。

ABSTRACT

This thesis presents the results of multi-epoch imaging of the 6.7 GHz methanol masers in the high mass star formation region G012.88+00.48 by East Asian VLBI Network. The obtained images revealed that there were 60, 22 and 16 maser spots at epochs 1, 2 and 3, respectively. The maser spots were divided into clusters, called maser features, with their sizes of less than a few milli-arcsec. The proper motion of each maser feature was analyzed, but no significant motion was detected. Based on these analyses, possible motions of the masing clouds are discussed.

目次

第 1 章	イントロダクション	1
1.1	大質量星	1
1.2	メーザー	3
1.3	VLBI (Very Long Baseline Interferometry)	6
1.4	内部固有運動	7
1.5	研究目的	8
第 2 章	対象天体 G012.88 + 00.48 (IRAS18089 – 1732)	9
2.1	天体選出条件	9
2.2	G12.8 (IRAS18089 – 1732) の先行研究	10
第 3 章	観測概要	15
第 4 章	解析とデータリダクション	17
第 5 章	結果	20
5.1	空間分布	20
5.2	メーザーフィーチャー	26
5.3	固有運動	31
第 6 章	考察	34
6.1	接線速度 V_{tan} の比較	34
第 7 章	まとめ	36
	謝辞	37
	参考文献	38
	Appendix	39
A.1	3 エポックで同定されたメーザーフィーチャー	39

第 1 章

イントロダクション

1.1 大質量星

大質量星 ($M \geq 8 M_{\odot}$) は星間物質、さらには銀河とその進化に非常に大きな影響を与える。大質量星は表面温度が高いため、大量の紫外線を放射する。その結果、周囲のガスを電離し加熱する。また、星風と呼ばれるガス流を発生させ、周囲の物質を圧縮する。さらには進化の最終段階で超新星爆発を起こし、星間空間に膨大なエネルギーを放出すると同時に、大質量星内部で生成される重元素を爆発時に星間空間に供給する。

以上のような影響によって、大質量星の形成頻度が低いにも関わらず、星間空間に与える影響は非常に大きい。そのため大質量星形成過程の解明は、銀河規模でのものを含む広範な現象の理解に不可欠である。次節でその形成過程に関する現状の理解の概要を述べる。

1.1.1 大質量星形成過程

本節は「シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成」(福井康雄、他 2008) を参考に記述する。

中小質量星 ($M < 8 M_{\odot}$) の形成過程は、その形成領域が相対的に太陽系近傍にあることもあり、豊富な観測的証拠を踏まえた深い理解が得られている。また、理論的にはシミュレーションによって自己重力下にある星間物質の振る舞いが数値計算されており、観測との比較を通じて、標準的な形成過程のシナリオが確立されている。具体的には以下の通りである。

1. 分子雲内の高密度領域である分子雲コアの中心で重力崩壊が始まり、中心密度が $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ に達すると、力学的に平衡な first core と呼ばれる原始星コアが形成される。
2. 外層の物質が first core に降着することで質量が増加すると、ケルビン - ヘルムホルツ収縮に伴う自己重力エネルギーの解放によってコアの温度が上昇し、およそ 2000 K になると水素分子が解離を始める。この過程は吸熱過程である。
3. 吸熱によってガスのが不安定になり、平衡状態が破れることで再び重力崩壊が始まる (second collapse)。
4. 水素分子の解離によって生じた水素原子が完全電離し、再び平衡状態の原始星コア (second core) が形成される。
5. second core にさらにガスが降着することで、原始星の質量が増加する。何らかの仕組みで質量降着が停止すると、星の最終的な質量が決定される。
6. ケルビン - ヘルムホルツ収縮によって中心コアの温度が $1.5 \times 10^7 \text{ K}$ に達すると、水素核融合が始まり、主系列星となる。

一方で、大質量星は

1. 絶対数が少ない。
2. 進化のタイムスケールが短く途中の進化段階に対応するサンプルが少ないため、統計的に進化過程を追うことが難しい。
3. 太陽系から最も近い観測対象（オリオン座の巨大分子雲）でも約 400 pc 離れており、高空間分解能観測が要求される。
4. 形成領域が高密度な星間物質に埋もれているため、可視光での観測が困難である。

などの観測的難点から、その形成過程の理解があまり進んでいない。

このような観測的困難の問題だけでなく、より本質的な問題も存在する。

中小質量星と同様の形成シナリオを適用して質量降着が長時間続いた結果、数十 $M_{\odot}$ 以上の大質量星が形成されると考えると以下の2つの困難が生じる。

1. 小質量星の際の典型的な質量降着率 $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ と同程度で、大質量星の典型的な寿命 2–3 百万年程度の間質量降着が続いたとしても、30–40 $M_{\odot}$ 程度までしか質量を増やすことができないため、それ以上の質量を持つ大質量星が観測されていることを説明できない。
2. 典型的な降着率の時、質量が 8 $M_{\odot}$ に達すると中心星は主系列星になり、以後、中心星からの膨大な輻射圧によって降着が妨げられる。そのため、典型的な降着率のもとでは、10–20 $M_{\odot}$ 以上の大質量星を球対称的な質量降着により形成することは困難である。

よって中小質量星の形成過程を単純に拡張しただけでは、大質量星の形成は説明できない。

現在では、主として2つの形成シナリオが提案されている。まず第1のシナリオが降着説である。この説では、大質量星も小質量星同様に質量降着によって質量を獲得するが、その降着率が極めて大きいとする。この場合は輻射圧による降着の制限がゆるくなり、数十 $M_{\odot}$ 以上の大質量星の形成も可能となる。実際の降着物質は角運動量を持っているために原始星の周りに降着円盤を形成する。そのため、原始星から見て円盤方向は光学的に厚く、それと垂直な極方向は比較的光学的に薄くなる。よって中心星からの輻射は、円盤方向には弱くなるため、降着が妨げられない。

第2のシナリオが競争的降着説である。この説では、必ずしも巨大でない分子雲コアが複数形成された後、コア同士で競争的に降着がおき、最終的には一番重力ポテンシャルが大きい分子雲コアにほとんどの物質が降着する。その結果、最初に形成された巨大でない分子雲コアが、巨大分子雲コアに成長するという説である。

大質量星は、巨大分子雲内の高密度領域である分子雲コアで生まれる。小質量星から大質量星が全て含まれるような星団が形成される場合、大質量星は以下の進化段階を経て形成されると考えられている。

1. 星なし大質量分子雲コア
2. 形成途上の中小質量星を含むが、大質量原始星のない大質量分子雲コア
3. 大質量原始星を含む若い星団
4. 大質量主系列星を含む星団

1. の星なし分子雲コアは、低温、大質量の分子雲コアである。内部に熱源を持たないため、中間赤外線では検出されな
いか非常に放射が弱い。一方で周囲を取り囲む巨大分子雲よりも高密度であるため、ミリ波、サブミリ波帯において低温の星間微粒子からの熱放射が顕著である。2. は中心星への質量降着が進み、中心星が成長していく途中の段階である。この時点での中心星の質量は数 $M_{\odot}$ であると考えられる。3. はさらに中心星への降着が進み、中心星質量が大質量に到達した段階である。この進化段階は、高温の分子雲コアである、ホットコアや超コンパクト H_{II} 領域などとして観測される。 H_{II} 領域は時間と共に拡大していくことが知られているため、大質量原始星の進化段階の指標とされる。

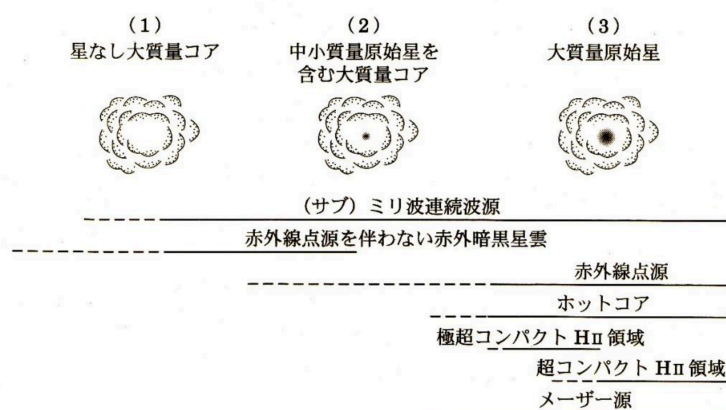


図 1.1 大質量星の進化段階および指標となる天体（シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 P.277）

また、大質量星形成領域からは、しばしば OH、水、メタノールなどのメーザー放射が確認されている。メーザーは高輝度なため、超長基線電波干渉法（Very Long Baseline Interferometry; VLBI）を用いたミリ秒角（milli-arcsecond; mas）スケールでの高空間分解能観測によって、詳細な空間分布などを得ることができる。メタノールメーザーが示す周波数のドップラーシフトによって得られる視線速度の情報と、天球面上での固有運動の情報を組み合わせることができれば、天体の 3 次元運動を理解する上で非常に有効である。特にメタノールメーザーは H_{II} 領域が形成される段階の初期に見られるため、大質量星形成過程の研究に適する。中でも、6.7 GHz メタノールメーザーは、大質量星形成領域にのみ付随するため、大質量星形成領域を選択的に研究するプローブとして有用である。次節ではメーザーおよび 6.7 GHz メタノールメーザーについて詳細を記述する。

1.2 メーザー

本節は「シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成」（福井康雄、他 2008）および「シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測 II—電波天文学」（中井直正、他 2009）を参考に記述する。

1.2.1 メーザーの原理

メーザー^{*1}とは、上準位のエネルギーが E_u で下準位のエネルギーが E_l である 2 つのエネルギー準位間で、上準位の方により多くの粒子が存在する反転分布と呼ばれる状態にある系に電磁波が入射することで発生する。誘導放射により上準位から下準位への粒子の遷移が連続的に起こり、入射電磁波が増幅され強い放射となる現象である。

地球大気のようにガス密度が高く、粒子同士の衝突が卓越するような熱平衡下にある 2 つの準位間の粒子数の比は

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right)$$

のようなボルツマン分布で与えられる。ここで T_{ex} は励起温度であり、 n_u, n_l および g_u, g_l はそれぞれ上準位と下準位

^{*1} 誘導放射によるマイクロ波増幅（Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation）

の粒子数および統計的重みである。上式を変形すると

$$\frac{n_u/g_u}{n_l/g_l} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) < 1$$

となり、必ず1より小さい値となる。すなわち、統計的重みあたりの粒子数 n_i/g_i ($i = u, l$) は下準位のほうが多くなる。しかし、ガス密度の低い宇宙空間では粒子同士の衝突はあまり頻繁に起こらず、自発放射や誘導放射や吸収が支配的な場合がある。このような状況下では必ずしも $n_u/g_u < n_l/g_l$ とはならず、上準位の方に粒子が多く分布する場合がある。このような粒子分布を反転分布と呼ぶ。

反転分布の状態は非常に不安定であるため、2準位系の外から2準位間のエネルギー差に相当する周波数 $\nu_{ul} = (E_u - E_l)/h$ の電磁波が入射すると上準位の粒子が下準位に遷移して、誘導放射により入射電磁波と同一の周波数および位相をもつ電磁波を放射する。そしてこの放射電磁波がさらに他の2準位系に入射することで、再度誘導放射を起こす。このように、誘導放射がカスケード式に起こることで電磁波の強度が増幅され、レーザーとして観測される。この現象が可干渉に起こるには分子間の相対速度が小さくなければならない、すなわち周波数幅が小さくなければならないので、一般的にレーザーのスペクトルプロファイルの周波数幅は、熱運動によって生じる周波数幅よりも非常に小さい。レーザーには他にも以下のような特徴があることがわかっている。

- 放射源の広がり（レーザースポットの放射領域サイズ）が極めて小さく点状である。
- 直線偏光もしくは円偏光した放射である。
- 電磁波の位相が揃っている。
- 輝度温度が非常に高い。

1.2.2 メタノールレーザー

大質量星形成領域では、周辺の電離領域に付随した分子雲内に存在する OH、メタノール、水分子などから強いレーザー放射が確認されている。その中でもメタノールレーザーは、1971年に大質量星形成領域である Orion-KL 領域から 25 GHz 帯で初めて観測された (Barrett et al. 1971)。メタノールレーザーは様々な周波数帯で検出されている。また、付随領域の違いから、Class I, Class II の2つに分類されている (Menten 1991a)。

Class I メタノールレーザーは、大質量星形成の指標となる天体（大質量原始星候補天体）との位置的な相関が必ずしも良くない（1 pc 程度離れているものもある）。一方で、Class II メタノールレーザーは、大質量原始星候補天体との位置的な相関が良いと言われている。近年では、超コンパクト H II 領域や赤外線点源などよりも、それらのごく近傍に位置するより若い天体（超コンパクト H II 領域を伴わない大質量原始星やミリ波、サブミリ波連続波源など）との相関が良いものが多数存在することが明らかになってきた。メタノールレーザーの特徴について表 1.1, 1.2 にまとめた。

表 1.1 メタノールレーザーの様々な遷移周波数

Class	周波数 (GHz)
I	9.9, 25.0, 36.2, 44.1, 84.5, 95.2, 146.6
II	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 37.7, 38.3, 38.5

表 1.2 メタノールメーザーの特徴

	Class	
	I	II
付随領域	アウトフローと周辺ガスとの境界面	円盤やアウトフロー
励起機構	衝突励起	赤外線励起
放射領域（スポット）サイズ	100 au スケール	au スケール
輝度温度	$10^6 - 10^8$ K	$> 10^{10}$ K

1.2.3 6.7 GHz メタノールメーザー

メタノールメーザーの一つである 6.7 GHz メタノールメーザーは 1991 年に初めて発見された（Menten 1991b）。様々なメタノール分子の遷移の中でも最も強い放射であり、観測される輝度温度は水メーザーに次いで全てのメーザー放射の中で 2 番目に高い。放射領域（スポット）サイズは au スケールと非常にコンパクトである（Menten et al. 1992）。また、6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星形成領域にのみ付随するため（Minier et al. 2003）、大質量星形成領域の指標として精力的な観測が行われている。さらに、比較的長寿命であることもわかっている。

周期強度変動

6.7 GHz メタノールメーザーに対する長期的なモニター観測によって、このメーザーは様々な強度変動を示すことがわかってきている。現在までに周期的、突発的な強度変動などが確認されている。その中でも、周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーは Goedhart et al. (2003) で初めて発見され、以降観測が盛んに行われている。

茨城大学では、6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動について統計的に研究するために、日立 32m 電波望遠鏡を用いたモニター観測（日立モニター観測）を行っている。観測は 2012 年 12 月 30 日から現在まで大きく 4 つの期間に分けて実施されており、現在も継続中である。各期間における観測諸元を表 1.3 に示す。また、日立モニター観測によって得られた、G032.03+00.06 という天体のライトカーブを図 1.2 に示す（山口, 2017 茨城大学大学院理工学研究科修士論文）。図 1.2 中の色はメタノールメーザーの視線速度に対応しており、いくつかの速度成分で周期的な強度変動が確認された。

表 1.3 日立モニター観測概要

	第 1 期・第 2 期	第 3 期	第 4 期
期間	2012 年 12 月 30 日–2014 年 1 月 10 日 2014 年 5 月 7 日–2015 年 8 月 24 日	2015 年 9 月 18 日–2017 年 3 月 7 日	2017 年 6 月 14 日–現在
天体数	442	143	442
頻度	各天体 9 日に 1 回程度	各天体 4 日に 1 回程度	各天体 5 日に 1 回程度 または 45 日に 1 回程度
目的	50 日–200 日周期の 周期変動天体の検出	短周期（50 日未満）の 周期変動天体の検出	第 1 期・2 期で達成できていない 長周期の周期変動天体の検出 短周期（50 日未満）の 周期変動天体の検出

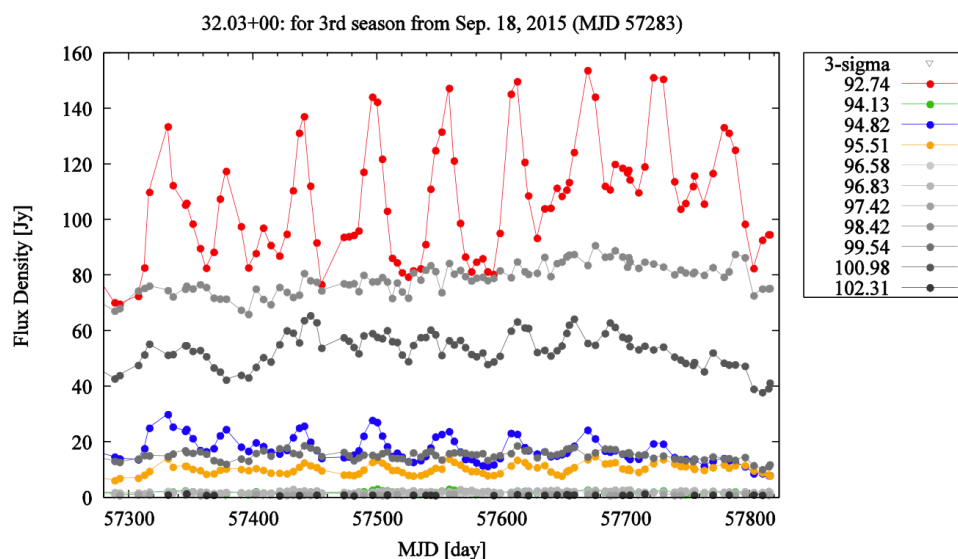


図 1.2 日立モニター観測によって得られた G032.03 + 00.06 のライトカーブ（山口, 2017 茨城大学大学院理工学研究科修士論文）。凡例はメーザーの視線速度 (km s^{-1}) に対応している。

6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動メカニズムについては解明されていないが、大質量原始星近傍の何らかの変動現象に起因していると考えられており、いくつかの理論モデルが提唱されている。Inayoshi et al. (2013) では、急激な質量降着率の下で成長する大質量原始星の脈動によるモデルを提唱している。これは、質量降着によって増加する原始星の半径が最大に広がったとき、原始星が脈動を始めることによって周囲のダストの温度が変化し、暖められたダストからの赤外線放射によって励起される 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動を引き起こすというモデルである。また、van der Walt (2011) では、Colliding Wind Binary (CWB) モデルを提唱している。これは、連星系の公転運動によって生じる衝撃波の影響によって、背景の超コンパクト H_{II} 領域からの制動放射の強度が変動し、それをメーザーで増幅することでメーザー放射の強度変動が観測されるというモデルである。

1.3 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

§1.2.1 で述べたように、メーザーは高い輝度温度をもち、スポットサイズが au スケールと非常にコンパクトである。典型的な大質量星形成領域までの距離（数 kpc）では、1 au は 0.1 ~ 1 ミリ秒角（milli-arcsecond; mas）に相当するため、mas スケールの高空間分解能を得られる VLBI（超長基線電波干渉法）技術を用いることによって、詳細な空間分布などの解明が可能である。

VLBI とは、受信電波を送信するためのケーブルが直接結合できないほどアンテナ同士が離れている場合に用いられる干渉計観測技術のことである。遠く離れた複数の電波望遠鏡を同時に使い観測することで、アンテナ間の距離（基線長）に相当する開口を持つアンテナで観測したことに相当する空間分解能を得る。

望遠鏡の空間分解能は

$$\theta \sim \frac{\lambda}{D}$$

で決まるため、同一の波長であればアンテナ開口 D が大きい方がより良い空間分解能を得られることになる。そのため VLBI では 0.1 mas を切る分解能が実現されており、遠方の非常にコンパクトな天体の内部構造などの詳細な観測に長ける。

図 1.3 に、European VLBI Network (EVN) を用いた高分解能観測によって得られた G33.980 – 00.019 という天体に付随する 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布を示す。スポットがリング状の空間分布をしていることが明らかになった (Bartkiewicz et al. 2009)。

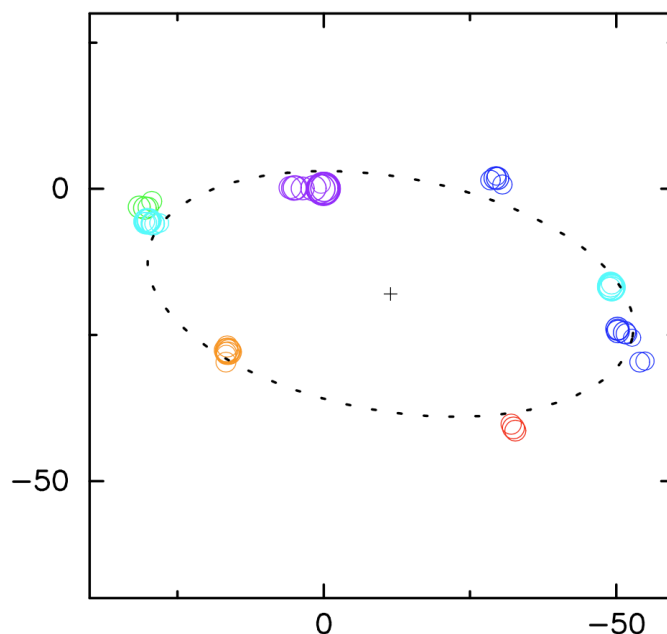


図 1.3 VLBI 観測によって得られた大質量星形成領域 G33.980 – 00.019 内の 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布 (Bartkiewicz et al. 2009)。横軸と縦軸はそれぞれ、最も強度の強いメーザースポットに対する相対位置 (ΔRA , ΔDec) (mas) である。円の大きさは log スケールで表した強度に比例しており、色は視線速度に対応している。赤色ほど速度が速く、青色ほど速度が遅い。点線および十字はそれぞれ、空間分布についてフィットした楕円およびその中心を表す。

1.4 内部固有運動

§1.2.3 で述べたように、6.7 GHz メタノールメーザーは比較的長寿命であるので、複数年にわたって VLBI 観測を行うマルチエポック VLBI 観測により、メーザースポットの内部固有運動を mas yr^{-1} スケールで計測することが可能である。メーザーは大質量原始星周辺領域のガスから放射されと考えられているため、内部固有運動の計測によって得られた情報と、視線速度の情報とを組み合わせることで 3 次元速度構造を明らかにすることができ、大質量原始星周囲の円盤の回転やインフォールもしくは膨張などの力学的運動の情報を直接得ることができると期待される。これまでに、回転運動 (Sanna et al. 2010)、膨張を伴う回転運動 (Sugiyama et al. 2016)、インフォールを伴う回転運動 (Sugiyama et al. 2014)、エンベロープからの降着運動 (Goddi et al. 2011)、膨張運動 (Sugiyama et al. 2011) など様々な内部固有運動が推定されている。内部固有運動の研究例として、図 1.4 に G006.79 – 00.25 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動計測の結果を示す。この論文では、楕円状に分布したメーザースポットが膨張を伴う回転運動をしていると推定された。

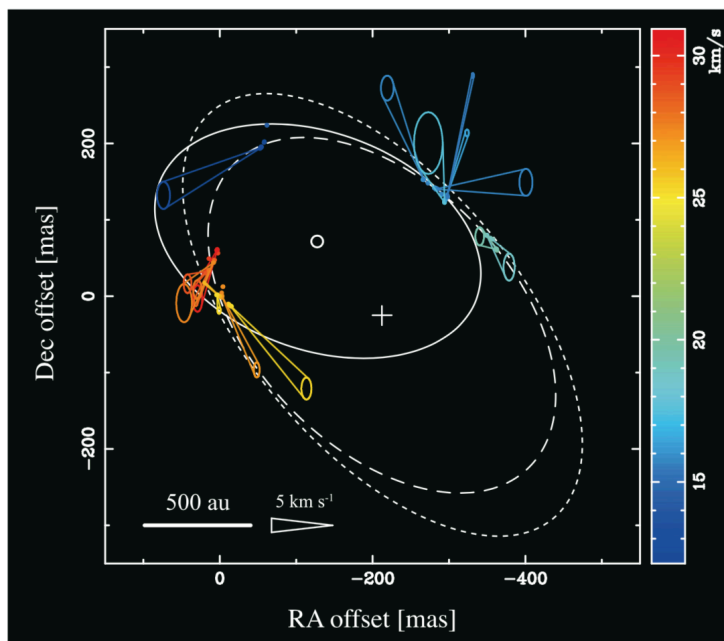


図 1.4 大質量星形成領域 G006.79 – 00.25 で検出された 6.7 GHz メタノールメーザーの重心に対する内部固有運動 (Sugiyama et al. 2016)。重心とは全スポットの平均の相対座標の位置である。コーンが各スポットの固有運動を表し、その開口は向きの不定性を表す。丸がリファレンスとしたスポットに対する各スポットの相対位置座標であり、その色は視線速度に対応している。視線速度のスケールは図右側のカラーバーであり、空間スケールおよび運動の速度スケールは図左下に示してある。白抜きの丸が重心を表し、破線楕円および十字は固有運動を考慮せずにスポットの空間分布についてフィットした楕円およびその中心を表す。点線楕円は固有運動を考慮し、上述の楕円中心を円盤の中心としてフィットした円盤モデルであり、実線楕円は固有運動を考慮し、重心を円盤の中心としてフィットした円盤モデルである。

1.5 研究目的

§1.2.3 と §1.4 で述べたように、メーザースポットの空間分布および内部固有運動の情報と視線速度の情報を組み合わせることができれば、大質量原始星周辺の 3 次元速度構造を明らかにすることができる。6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動は大質量原始星近傍の天体変動現象に起因すると考えられているため、推定された天体の 3 次元運動の情報から、どのような天体変動現象に起因する周期強度変動モデルが適するかを決定することができる。そのため、周期強度変動メカニズムの解明にはメーザーの空間分布の取得および内部固有運動の計測が必要である。

そこで本研究の目的は、周期強度変動する 6.7 GHz メタノールメーザー源に対する VLBI 観測によって取得されたデータの解析を行い、メタノールメーザー放射の空間分布の取得および内部固有運動を計測することとした。

第 2 章

対象天体 G012.88 + 00.48 (IRAS18089 – 1732)

本研究で対象とした天体は、周期的強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザー源 G012.88 + 00.48（以下 G12.8 と呼称）である。以下に天体選出条件および対象天体の詳細について記す。

2.1 天体選出条件

本研究で解析した天体 G12.8 は以下の 3 つの条件から選出した。

1. 杉山他（投稿準備中）で周期的強度変動が検出されているメタノールメーザー天体（既知も含む）
2. EAVN^{*1}によるマルチエポックの VLBI 観測が実施されている天体（Fujisawa et al. 2014）
3. 周期変動の極大期もしくは極少期に近い時期に観測を行っている天体

この 3 条件から 4 天体が選出されたが、G12.8 はその中でも最短の強度変動周期を持つ天体である（表 2.1 参照）。また、EAVN のエポック 1 の観測情報を表 2.2 に示す。

表 2.1 選出された 4 天体。Ref. の項は周期に関する参考文献

天体名	周期（日）	Ref.
G006.18 – 00.35 ^{*1}	179	杉山他（投稿準備中）
G012.88 + 00.48	29.5	Goedhart et al. (2009)
G025.82 – 00.17 ^{*2}	71	山口, (2018) 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
G032.04 + 00.05 ^{*3}	57	山口, (2018) 茨城大学大学院理工学研究科修士論文

^{*1} 茨城大学 B4 高木氏が解析中

^{*2} 茨城大学 B4 伊藤氏が解析中

^{*3} 會川氏（2018 年度茨城大学大学院理工学研究科修了）が解析済み

^{*1} East Asian VLBI Network

表 2.2 EAVN 観測エポック 1 のパラメータ (Fujisawa et al. 2014)

セッション	観測日 (yyyy/mm/dd)	観測時間 (UT)	参加局 [*]
1	2010/08/28	07:00 – 16:00	M,R,O,I,H,S
2	2010/08/29	07:00 – 28:00	M,R,O,I,H,S
3	2010/08/30	08:00 – 17:00	M,R,O,I,H
4	2011/10/27	03:00 – 10:00	M,R,O,I,Y,H
5	2011/10/28	03:00 – 10:00	M,R,O,I,Y,H,S
6	2011/11/26	01:30 – 9:00	M,R,O,I,Y,U,H,S

^{*} M:水沢、R:入来、O:小笠原、I:石垣、Y:山口、U:白田、H:日立、S:上海

2.2 G12.8 (IRAS18089 – 1732) の先行研究

G12.8 は大質量原始星である IRAS18089 – 1732 に付随しており、強い OH、水、メタノールメーザー放射が観測されている。天体に関する基本的なパラメータを表 2.3 にまとめる。天体の座標は Australian Telescope Compact Array (ATCA) を用いた 6.7 GHz メタノールメーザー観測により $0''.4$ の精度で決定された (Green et al. 2010)。天体までの距離は 12 GHz メタノールメーザーの年周視差計測により決定された (Xu et al. 2011)。また、光度は Sridharan et al. (2002) の赤外線観測の結果をもとに、Dall’Olio et al. (2017) によって 2.34 kpc の距離で再計算された。

表 2.3 G12.8 (IRAS18089 – 1732) の諸情報

IRAS 名	座標 (J2000.0)		天体までの距離	系の視線速度	光度
	RA	Dec			
18089 – 1732	18 ^h 11 ^m 51 ^s .40	–17°31′29″.6	2.34 kpc	33.8 km s ^{–1}	$1.3 \times 10^4 L_{\odot}$
Ref.	Green et al. (2010)		Xu et al. (2011)	Sridharan et al. (2002)	

2.2.1 6.7 GHz メタノールメーザーによる研究

G12.8 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーは、EAVN を用いた mas スケールの空間分解能を得られる観測により空間分布が取得されている (Fujisawa et al. 2014)。Fujisawa et al. (2014) で得られた空間分布を図 2.1 に示す。空間分布の広がり は 1100 mas × 1600 mas 程度であり、天体までの距離が 2.34 kpc であることから実スケールで 2600 au × 3800 au 程度の広がり に相当する。メーザースポットの空間分布は、原点付近のメインクラスと、そこから北東方向へ $1''.5$, $1''.9$ 程度離れた 2 つのクラスで構成されている。

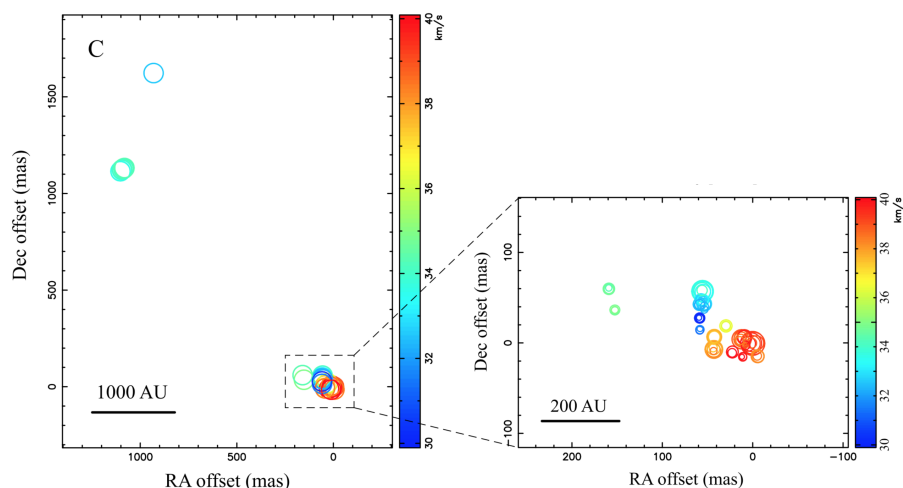


図 2.1 EAVN によって同定された空間分布 (Fujisawa et al. 2014)。原点はフリンジレートマッピングで $0''.2$ の精度で決定された絶対座標 ($\text{RA}(\text{J2000.0})=18^{\text{h}}11^{\text{m}}51^{\text{s}}.39$, $\text{Dec}(\text{J2000.0})=-17^{\circ}31'30''.1$) であり、横軸と縦軸はそれぞれ、原点に対する相対座標軸である。円の大きさは log スケールで表した強度に比例しており、色は視線速度に対応している。

また、Hartebeesthoek 電波天文台の 26 m 電波望遠鏡を用いた長期間のモニター観測によって、G12.8 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動周期が 29.5 日であることが同定された (Goedhart et al. 2009)。周期変動が検出された速度成分を表 2.4 に示す。

表 2.4 G12.8 で検出された周期強度変動するメタノールメーザーの視線速度成分 (Goedhart et al. 2009)

周期変動成分の視線速度 $V_{\text{lsr}}(\text{km s}^{-1})$	周期 (日)
31.74	29.5
31.85	29.5
32.75	29.5
33.43	29.5
33.65	29.5
34.66	29.5
36.57	29.5
37.81	29.5
38.71	29.5
39.16	29.5

前述の日立モニター観測においても G12.8 に対する観測がなされており、先行研究と同様の周期が検出されている。日立モニター観測で得られたライトカーブを図 2.2, 2.3 に示す。

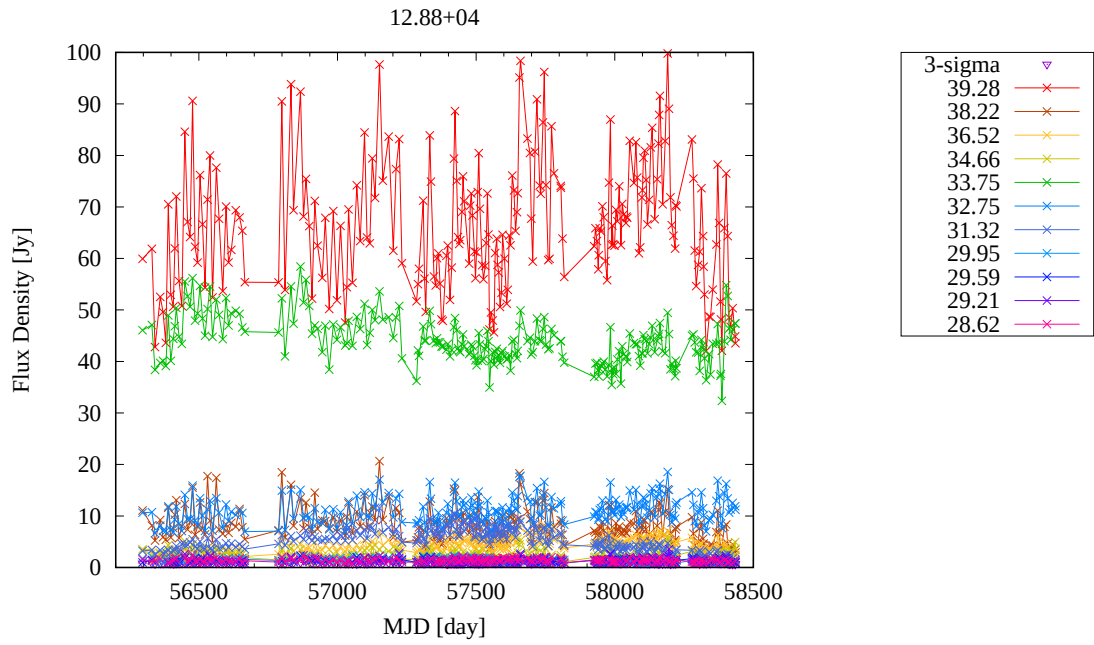


図 2.2 G12.8 のライトカーブ

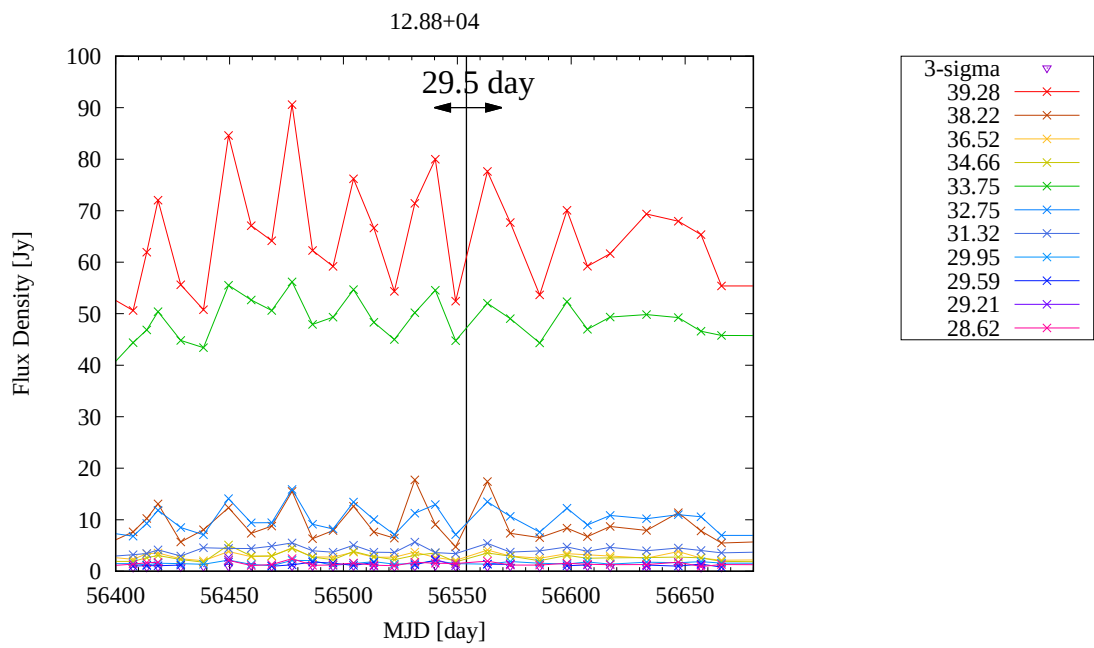


図 2.3 図 2.2 の MJD=56500 付近の拡大図。縦線が 2013 年 9 月 19 日（後述の表 3.1 のエポック 3 観測日）を表す。

2.2.2 電波連続波および分子輝線放射による研究

G12.8 が付随する大質量原始星 IRAS18089 – 1732 は典型的なホットコア天体であり、Submillimeter Array (SMA) を用いた観測によって、ミリ波・サブミリ波のダスト連続波 (Beuther et al. 2004b; Beuther et al. 2005, 図 2.4) やホットコアトレサである分子からの輝線放射 (e.g., HCOOCH_3 , CH_3OH ; Beuther et al. 2004a) が観測されている。サブミリ波のダスト連続波の観測結果から、中心コアの質量が $45 M_\odot$ と見積もられている (Beuther et al. 2005)。さらに、ほぼ南北の方向に $\text{SiO}(5-4)$ 輝線でアウトフローが観測されており (Beuther et al. 2004b)、その速度はシステム速度に対して数 km s^{-1} – 10 km s^{-1} である。また、 HCOOCH_3 分子輝線観測によってアウトフロー軸と垂直で、中心を横切る方向に速度シフトが見られた (Beuther et al. 2005, 図 2.5)。この結果は回転する円盤構造の存在を示唆しており、その方向と垂直な向きにアウトフローが検出されていることと合わせると、大質量星形成の2つのシナリオのうち小質量星の形成とよく似たシナリオである降着説を支持している。

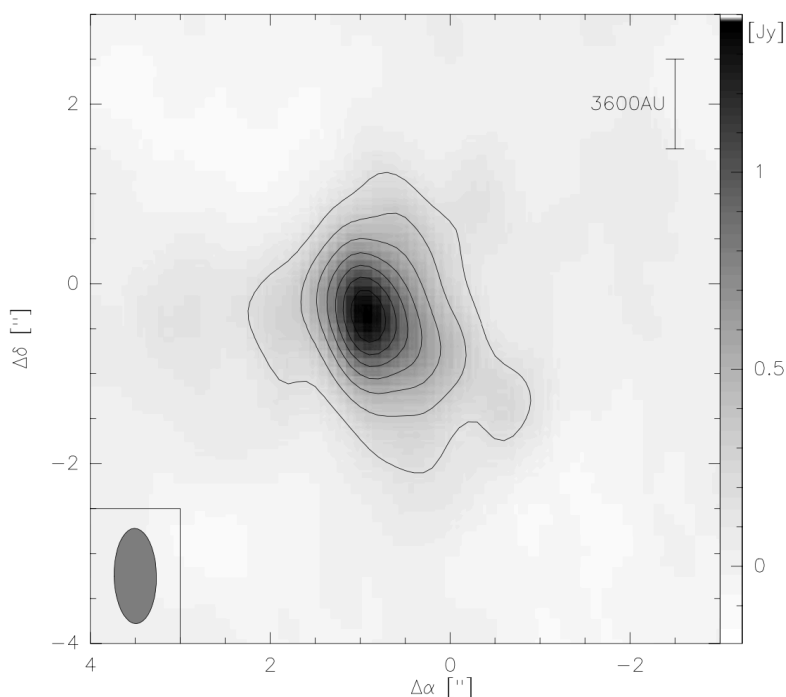


図 2.4 SMA によって取得された IRAS18089 – 1732 の $860\mu\text{m}$ のダスト連続波のコンタマップ (Beuther et al. 2005)。横軸と縦軸はそれぞれ、位相中心 ($\text{RA}(\text{J2000.0})=18^{\text{h}}11^{\text{m}}51''.4$, $\text{Dec}(\text{J2000.0})=-17^{\circ}31'28''.5$) に対する相対座標軸を表す。図右上のスケールバーは距離 3.6 kpc で換算した値であり、2.34 kpc で換算すると 2340 au に相当する。

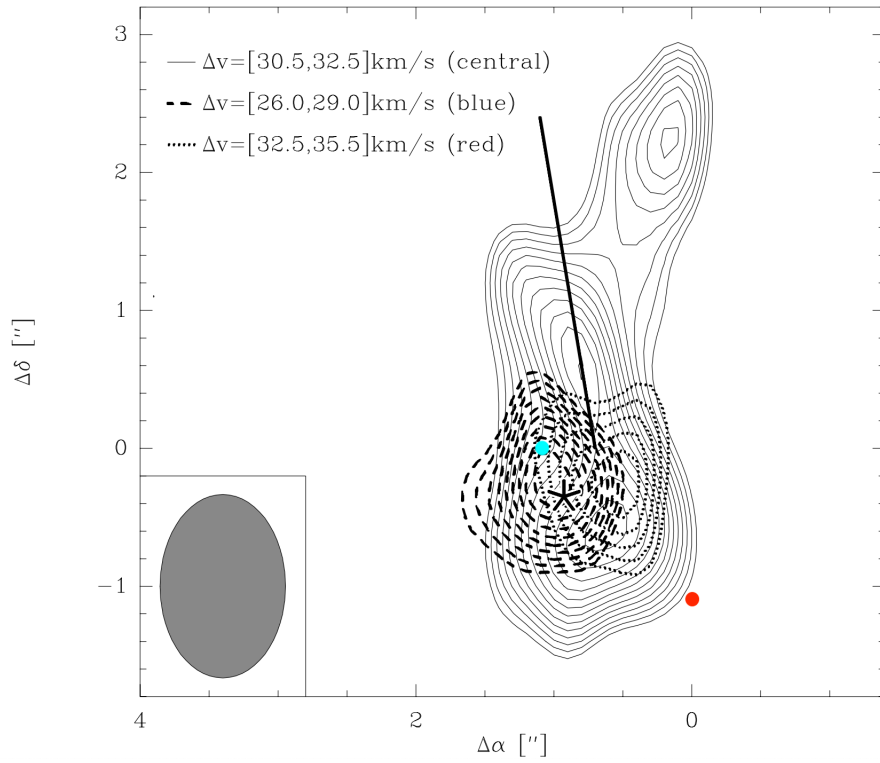


図 2.5 SMA を用いて取得された HCOOCH_3 分子輝線のコントアマップ (Beuther et al. 2005) を一部改変した図。実線は中間速度成分の放射を表し、破線および点線はそれぞれ blue shift 成分と red shift 成分の放射を表す。星印はサブミリ波連続波源のピーク位置を表す。横軸と縦軸はそれぞれ、位相中心 ($\text{RA}(\text{J2000.0})=18^{\text{h}}11^{\text{m}}51^{\text{s}}.4$, $\text{Dec}(\text{J2000.0})=-17^{\circ}31'28''.5$) に対する相対座標軸である。赤と水色の丸が、G12.8 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザースポットの位置を表す (図 2.1 参照)。太線は $\text{SiO}(5-4)$ 輝線で検出された分子アウトフロー軸を表す (Beuther et al. 2004b)。中心コアを挟んで対称に red shift 成分と blue shift 成分の放射が見られる。

第 3 章

観測概要

本研究で解析に用いたデータは、EAVN を用いて 3 エポック（2011 年 10 月 28 日, 2012 年 9 月 26 日, 2013 年 9 月 19 日）に分けて観測されたデータである。観測参加局は、水沢、入来、小笠原、石垣、山口、日立、上海の計 7 局である（2 エポック目のみ、水沢、入来、石垣、山口、日立の 5 局）。各アンテナの配置と各基線を図 3.1 に示す。観測参加局やビームサイズなどの情報を表 3.1 に示す。各エポックとも、7 時間もしくは 7 時間半にわたる観測中に積分時間 15 分のスキャンを 4 回、計 1 時間かけて対象天体 G12.8 を観測した。さらに遅延残差補正とバンドパス補正のために校正天体 NRAO530, 3C454.3 を適宜観測し、大気遅延の補正のために J1743-03 も適宜観測している。その他、本研究では対象としていない別のメタノールメーザー天体も同じ日に観測している。

G12.8 に付随するメタノールメーザーは 29.5 日周期で強度変動することがわかっているため、日立モニター観測のデータを用いて、エポック 3 観測日である 2013 年 9 月 19 日（MJD=56554）以前の最初のピーク日である 2013 年 9 月 5 日（MJD=56540）を基準として各観測日と推定されるピーク日との比較を行い、観測日が増光期付近なのか静穏期付近なのかを推定した。結果を表 3.2 に示す。これよりエポック 1 は増光期付近であるのに対してエポック 2 と 3 は静穏期付近であろうと推定された。すなわちこの観測はメーザーの増光期に合わせて実行されていたわけではない。

表 3.1 観測パラメータ

エポック	1	2	3
観測日	2011 年 10 月 28 日	2012 年 9 月 26 日	2013 年 9 月 19 日
観測時間 (UT)	03:00-10:00	05:00-12:30	05:30-13:00
観測局 [†]	M,R,O,I,Y,H,S	M,R,I,Y,H	M,R,O,I,Y,H,S
観測周波数帯	6665 – 6669 MHz		
分光点数	1024		
速度分解能	0.18 km/s		

[†] M:水沢、R:入来、O:小笠原、I:石垣、Y:山口、H:日立、S:上海

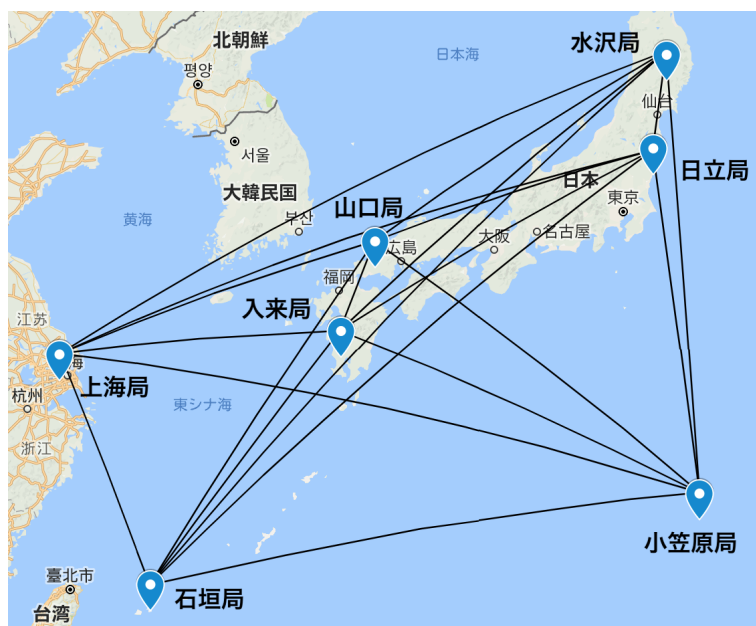


図 3.1 アンテナ配置と各基線（Google Map より一部改変）

表 3.2 観測日と推定されるピーク日との比較

エポック	観測日 (MJD)	推定ピーク日 (前)	観測日との差	推定ピーク日 (後)	観測日との差
1	2011 年 10 月 28 日 (55862)	55861.5	0.5	55891	29
2	2012 年 9 月 26 日 (56196)	56186	10	56215.5	19.5
3	2013 年 9 月 19 日 (56554)	56540	14	56569.5	15.5

第 4 章

解析とデータリダクション

解析は Astronomical Image Processing System (AIPS) および Difmap を用いて解析を行った。解析手順は以下の通りである。なおこの解析手順はタイ国立天文研究所の杉山孝一郎氏が作成した、JVN/EAVN データ解析フローチャート ver.1.8.1 in 2017/01/23 を参考にした。

1. FITS データ読み込みおよびデータチェック

観測データを AIPS で読み込み、AIPS 形式のファイルを作成した。その後、データに異常がないかどうかや、観測スケジュール情報、観測局情報などを確認した。また、異常が見られたデータ点は適宜フラグ（使用しないデータとして印をつけること）した。

2. UV 再計算

相関器内で計算されている UV 再計算解を用いて天球面上の絶対位置決定精度を良くすることを目的とした較正である。これを行わない場合、数秒角の絶対位置誤差が生じる。本研究では位相中心にリファレンスとなるメーザースポットを持ってきて（フリンジフィッティング）、そのスポットに対する相対的な運動を検出することが目的であるので行わなくてもいい較正であるが、本研究では実施した。

3. 振幅ゲイン較正（ベースライン規格化およびバンドパス振幅補正）

AIPS 内の task ACCOR によって自己相関のデータを用いてベースラインを規格化した。また task BPASS によって各アンテナのバンドパス振幅に見られる周波数特性を較正した。

4. 遅延時間残差およびその変化率の較正

task FRING によって最初に相関処理時の遅延時間補正の残差を、明るい連続波天体 NRAO530 および 3C454.3 を用いて較正した。次に大気揺らぎによる遅延時間残差を、対象天体に比較的近い連続波天体 J1743 – 03 を用いて較正した。最後にバンドパス位相較正解を作成するためだけに、NRAO530 および 3C454.3 を用いて位相較正解を作成した。

5. バンドパス位相特性較正

task BPASS によって各アンテナのバンドパス位相に見られる周波数特性を較正した。

6. ドップラー較正

task CVEL によってスペクトル線データを周波数方向にシフトさせ、地球の自転および公転運動と局所静止基

準系（LSR）に対する運動の影響で生じるドップラー効果の較正を行った。

7. 振幅ゲイン較正（テンプレート法）

task ACFIT によってテンプレート法を用いた振幅ゲイン較正を行った。テンプレート法は「メーザー自身が観測中に時間変動が起こらないと仮定して、自己相関スペクトルの時間変動は全てシステム起因である」という前提で、メーザーの自己相関スペクトルを用いてシステムゲインの時間較正を行う手法である。テンプレート法実施に必要な情報は、大気吸収を受けた後のシステム雑音温度 T_{sys}^* およびアンテナ有効開口面積 $A_{\text{eff}} = \pi r^2 \times \eta$ （ r はアンテナ開口半径、 η は開口能率）である。テンプレートとした局および各局のシステム雑音温度を表 4.1 に示す。また、各観測局の開口能率の値は仰角に依存して変化する。観測中の T_{sys}^* の値が分かっている水沢、入来、小笠原、石垣の4局の開口能率は 50 – 55% 程度であることがわかっているが、観測中の仰角の値が不明だったため、3 エポック通じて平均値である 52.5% を用いた。

表 4.1 テンプレート局とその T_{sys}^*

エポック	テンプレート局	T_{sys}^* [K]
1	石垣	111.3
2	入来	125.7
3	入来	126.1

8. メーザーピークによるフリンジフィッティング

task FRING によってフリンジフィッティングを行った。フリンジフィッティングには3 エポック通じて $V_{\text{lsr}} = 39.30 \text{ km s}^{-1}$ 成分の中で最も明るいメーザースポットをリファレンスとして、位相解と遅延時間変化率の解を求めた。フィットの結果得られた解をメーザー放射が見られるすべてのチャンネルのビジビリティに適用した。

9. ダーティマップの作成

task IMAGR によって強度ピークチャンネルにおけるダーティマップおよび合成ビームマップを作成した。

10. セルフキャリブレーション (Difmap)

AIPS で作成した FITS ファイルを Difmap に読み込ませ、Difmap 内でメーザースポット分布自身を用いて振幅および位相較正を行った。簡単な流れとしては以下の通りである。

- (a) 一番明るいメーザースポットの空間分布を求め、単純な構造であるかどうかを確認する
- (b) 得られた分布イメージをモデルとして、ビジビリティの位相較正解を求める
- (c) 位相較正解をビジビリティデータに適用し、もう一度空間分布を描く
- (d) 得られた分布イメージをモデルとして、ビジビリティの位相および振幅較正解を同時に求める

11. クリーンマップの作成

セルフキャリブレーションの作業で得られた振幅および位相較正解をメーザー放射が見られる全チャンネルに適用した後に、task IMAGR を用いて 1 ピクセル 2 mas の $8''.0 \times 8''.0$ の広範囲なクリーンマップおよび 1 ピクセル 0.5 mas の高分解能な $2''.0 \times 2''.0$ のクリーンマップの2つを作成した。

12. メーザースポットのパラメータ取得

作成したクリーンマップ内からメーザースポットのピーク位置とその強度などのパラメータを task JMFIT によって求めた。本研究ではメーザースポットの検出条件として、信号対雑音比 (S/N) ≥ 5 であることと2チャンネル以上連続して同じ位置（合成ビームサイズ以内）にスポットが存在することの2つを課し、条件を満たしたものを1チャンネルごとにスポットとして同定した。

第 5 章

結果

5.1 空間分布

解析の結果、エポック 1, 2, 3 でそれぞれ 60, 22, 16 個のメタノールメーザースポットを検出した。得られた空間分布を図 5.1, 5.2 に示し、各エポックで検出されたスポットのパラメータを表 5.2–5.5 に示す。横軸と縦軸はそれぞれ、原点からの相対座標軸である。円のサイズは log スケールで表した強度を表しており、色は視線速度に対応している。リファレンスメーザースポットは $V_{\text{lsr}} = 39.30 \text{ km s}^{-1}$ 成分の中で最も強度の高いスポットとした。リファレンスメーザーの位置を原点とするために、各スポットの座標からリファレンスメーザーの座標を差し引いた。その際のエラーは、RA, Dec についてそれぞれ

$$\mu_{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\text{major axis (mas)}}{S/N} \times \cos(\text{PA}) \right)^2 + \left(\text{各スポットの RA のエラー (mas)} \right)^2 + \left(\text{リファレンスメーザーの RA のエラー (mas)} \right)^2}$$

$$\mu_{\delta} = \sqrt{\left(\frac{\text{major axis (mas)}}{S/N} \times \sin(\text{PA}) \right)^2 + \left(\text{各スポットの Dec のエラー (mas)} \right)^2 + \left(\text{リファレンスメーザーの Dec のエラー (mas)} \right)^2}$$

とした。ここで $\text{major axis (mas)} / (S/N)$ はスポットの位置決定精度を表す。line-free チャンネル上でのイメージ rms ノイズレベル (1σ) はエポック 1, 2, 3 でそれぞれ、24.75, 42.15, 60.97 mJy beam $^{-1}$ である。まとめた表を表 5.1 に示す。

本研究で解析したデータのうち、エポック 1 のデータ (2011 年 10 月 28 日、観測コード U11301A) は Fujisawa et al. (2014) によって解析されたデータと同一のものである。エポック 1 の空間分布は Fujisawa et al. (2014) の空間分布と一致する結果が見られ、解析手法に間違いがないことを確認した。一方、エポック 2 およびエポック 3 の空間分布ではメインのクラスタから北東方向 $\sim 1''.9$ の位置にエポック 1 で検出された $V_{\text{lsr}} = 32.62 - 32.80 \text{ km s}^{-1}$ 成分のメーザースポットが非検出となった。その他にもメインのクラスタ内で、 $V_{\text{lsr}} = 34.55 - 34.91 \text{ km s}^{-1}$ 成分や $V_{\text{lsr}} = 36.31 - 36.66 \text{ km s}^{-1}$ 成分など、いくつかのスポットが非検出となった。また、エポック 1・2 共に検出されていた $(\Delta\text{RA}, \Delta\text{Dec}) = (50, 60) \text{ mas}$ 付近の $V_{\text{lsr}} = 33.59 \text{ km s}^{-1}$ 成分のスポットが、エポック 3 では非検出となっており、新たに $(\Delta\text{RA}, \Delta\text{Dec}) = (0, 170) \text{ mas}$ 付近の $V_{\text{lsr}} = 39.30, 39.12 \text{ km s}^{-1}$ 成分のスポットが検出された。

表 5.1 解析の結果得られたパラメータ

noise RMS (mJy beam^{-1})	24.75	42.15	60.97
合成ビームサイズ $\theta_{\text{maj}} \times \theta_{\text{min}}$ (mas $\times$ mas)	7.31×2.75	20.00×2.50	7.14×2.72
PA ($^{\circ}$)	-20.00	-34.26	-20.32
検出スポット数	60	22	16

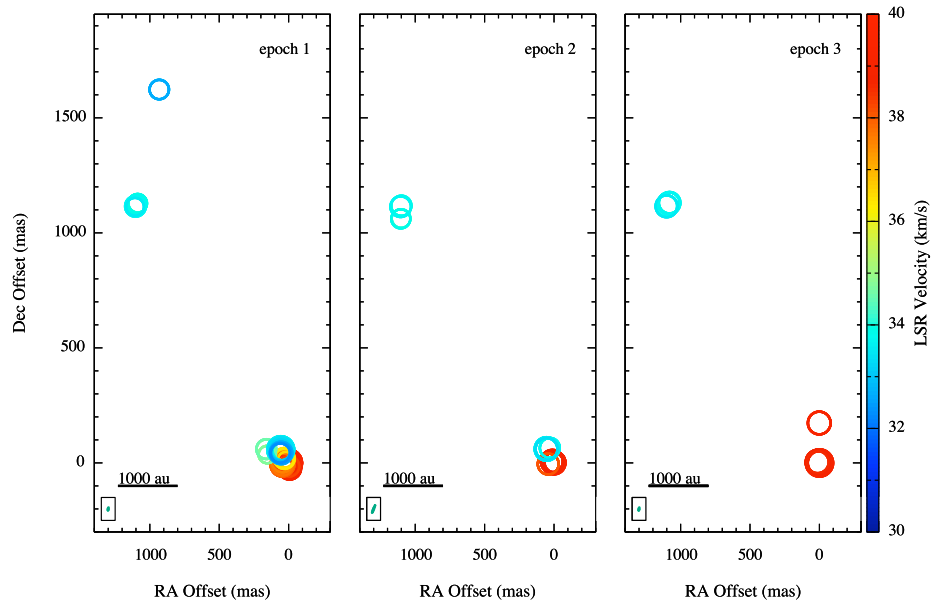


図 5.1 検出された 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布。左からエポック 1,2,3 の分布を表す。色は視線速度に対応しており、円のサイズは log スケールで表した強度を表している。横軸と縦軸はそれぞれ原点に対する相対座標軸である。各エポックのビームサイズは図左下の枠内に描かれている。

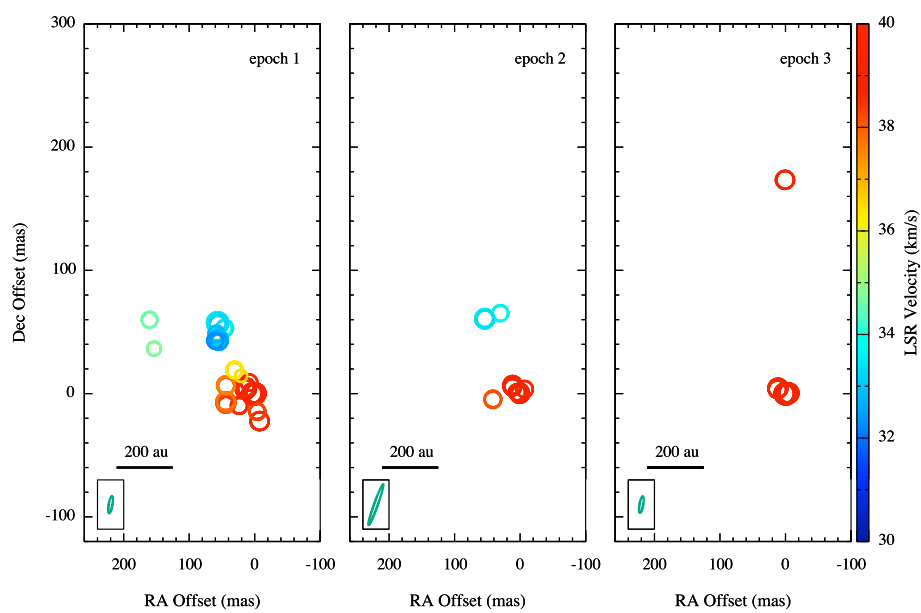


図 5.2 図 5.1 の原点周辺の拡大図

表 5.2 エポック 1 で検出されたメタノールメーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (Jy beam ⁻¹)
	RA	σ_α	Dec	σ_δ		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	23.62	0.09	-9.84	0.22	40.00	0.240
2	23.58	0.06	-9.58	0.15	39.83	0.342
3	3.86	0.04	0.03	0.07	39.65	0.749
4	2.25	0.02	-0.15	0.03	39.48	2.045
5 [†]	0.00	0.01	0.00	0.01	39.30	1.696
6	2.94	0.02	-0.58	0.05	39.30	1.264
7	12.91	0.08	4.48	0.17	39.30	0.305
8	8.54	0.07	8.95	0.16	39.30	0.323
9	13.50	0.03	4.17	0.05	39.12	1.142
10	2.13	0.03	-0.54	0.06	39.12	1.019
11	-1.89	0.04	0.20	0.06	39.12	0.851
12	-7.42	0.04	-22.29	0.09	39.12	0.597
13	13.61	0.03	4.16	0.05	38.95	1.252
14	-7.71	0.05	-22.29	0.11	38.95	0.515
15	13.63	0.04	4.40	0.08	38.77	0.719
16	13.83	0.08	4.50	0.18	38.60	0.283
17	43.85	0.10	-8.82	0.23	38.42	0.218
18	-3.85	0.10	-14.46	0.25	38.42	0.203
19	44.02	0.05	-8.17	0.11	38.25	0.538
20	-4.15	0.08	-14.75	0.19	38.25	0.283
21	43.95	0.03	-7.31	0.07	38.07	0.783
22	43.98	0.04	-6.67	0.08	37.89	0.746
23	43.64	0.07	6.33	0.18	37.89	0.289
24	43.73	0.04	6.74	0.10	37.72	0.548
25	44.38	0.05	-6.26	0.12	37.72	0.439
26	43.66	0.06	6.90	0.13	37.54	0.412
27	30.72	0.11	18.83	0.26	36.66	0.202
28	30.70	0.07	19.15	0.17	36.49	0.330
29	20.79	0.28	14.40	0.76	36.49	0.070
30	30.78	0.08	19.13	0.19	36.31	0.265
31	153.74	0.17	36.58	0.42	34.91	0.121
32	160.54	0.10	59.66	0.24	34.73	0.213
33	153.59	0.16	36.39	0.41	34.73	0.122
34	160.43	0.09	60.07	0.21	34.55	0.238
35	56.99	0.06	57.62	0.14	34.03	0.412
36	1087.47	0.32	1128.82	0.51	34.03	0.157
37	56.78	0.03	57.53	0.05	33.85	1.112
38	1103.43	0.17	1115.76	0.37	33.85	0.221

表 5.3 表 5.2 の続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (Jy beam ⁻¹)
	RA	σ_α	Dec	σ_δ		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
39	46.06	0.11	53.24	0.26	33.85	0.192
40	1093.45	0.24	1124.84	0.45	33.85	0.185
41	1087.92	0.21	1128.14	0.45	33.85	0.179
42	56.58	0.02	57.51	0.04	33.68	1.758
43	1103.46	0.13	1115.52	0.27	33.68	0.318
44	46.07	0.07	53.14	0.16	33.68	0.314
45	56.49	0.02	57.31	0.04	33.50	1.633
46	1107.05	0.28	1113.26	0.57	33.50	0.140
47	45.72	0.07	53.11	0.16	33.50	0.321
48	56.27	0.03	57.11	0.07	33.32	0.927
49	56.17	0.08	56.57	0.20	33.15	0.289
50	55.30	0.11	46.64	0.26	33.15	0.214
51	54.83	0.07	45.14	0.17	32.97	0.292
52	58.15	0.11	49.07	0.27	32.97	0.187
53	931.88	0.12	1623.11	0.31	32.80	0.221
54	54.69	0.05	43.97	0.11	32.80	0.503
55	58.72	0.09	48.33	0.23	32.80	0.236
56	54.69	0.05	43.09	0.12	32.62	0.512
57	932.33	0.15	1622.86	0.38	32.62	0.204
58	54.67	0.09	41.99	0.21	32.44	0.270
59	60.15	0.09	43.28	0.22	32.44	0.265
60	60.16	0.10	42.66	0.25	32.27	0.210

(1) スポット ID 番号。(2)–(5) 原点に対するスポットの RA, Dec 相対位置オフセットおよびその位置誤差。

(6) スポットの視線速度。(7) スポットの強度

† リファレンスのメーザースポット

表 5.4 エポック 2 で検出されたメタノールメーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (Jy beam ⁻¹)
	RA	σ_α	Dec	σ_δ		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	4.90	0.69	1.12	0.99	39.65	0.286
2	0.37	0.43	0.90	0.64	39.48	0.506
3 [†]	0.00	0.12	0.00	0.17	39.30	0.578
4	0.26	0.43	0.35	0.63	39.30	0.501
5	11.65	0.60	5.18	0.87	39.30	0.324
6	11.75	0.37	6.13	0.55	39.12	0.562
7	1.16	0.54	-0.78	0.80	39.12	0.343
8	-7.00	0.60	3.67	0.87	39.12	0.308
9	11.49	0.37	6.95	0.54	38.95	0.599
10	11.86	0.53	6.49	0.78	38.77	0.342
11	41.49	0.55	-4.91	0.80	38.25	0.307
12	41.41	0.56	-4.33	0.82	38.07	0.331
13	1102.01	1.01	1062.63	1.42	34.03	0.173
14	1104.26	0.88	1060.73	1.20	33.85	0.193
15	1099.91	0.66	1117.99	0.94	33.85	0.263
16	54.20	0.47	60.98	0.69	33.85	0.409
17	30.32	0.73	65.21	1.06	33.85	0.235
18	1105.04	0.63	1113.58	0.88	33.68	0.292
19	53.94	0.32	61.02	0.47	33.68	0.695
20	30.10	0.66	65.39	0.97	33.68	0.258
21	53.98	0.33	60.46	0.48	33.50	0.685
22	53.51	0.45	60.52	0.66	33.32	0.424

[†] リファレンスのメーザースポット

表 5.5 エポック 3 で検出されたメタノールメーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (Jy beam ⁻¹)
	RA	σ_α	Dec	σ_δ		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	1.93	0.09	0.05	0.17	39.48	0.849
2 [†]	0.00	0.03	0.00	0.03	39.30	1.714
3	0.88	0.12	173.43	0.25	39.30	0.555
4	-0.76	0.05	-0.13	0.08	39.12	1.937
5	0.48	0.12	173.49	0.24	39.12	0.510
6	-0.49	0.09	-0.20	0.20	38.95	0.678
7	-5.11	0.08	0.43	0.16	38.95	0.878
8	11.33	0.09	4.49	0.17	38.95	0.776
9	11.87	0.11	4.10	0.20	38.77	0.657
10	12.47	0.15	3.53	0.29	38.60	0.438
11	1083.63	0.18	1129.10	0.34	33.85	0.398
12	1080.88	0.26	1130.56	0.42	33.85	0.322
13	1084.50	0.15	1127.67	0.31	33.68	0.452
14	1079.69	0.16	1130.63	0.34	33.68	0.405
15	1101.62	0.20	1116.90	0.41	33.68	0.338
16	1101.09	0.16	1115.93	0.29	33.50	0.450

[†] リファレンスのメーザースポット

5.2 メーザーフィーチャー

本研究では複数のメーザースポットをクラスタリングした「メーザーフィーチャー」を用いて内部固有運動を導出する。メーザーフィーチャーとはメーザースポットを 10 au スケールの小さなクラスタにまとめたものである。メーザーフィーチャーはメーザー放射が付随するガス雲を表している可能性がある。固有運動をフィーチャーを用いて導出することで、離角の小さいスポット同士の相対的な輝度の変化による偽の固有運動を導出してしまうこと（クリスマスツリー効果）を避けられると期待される（e.g., Sanna et al. 2010a; Moscadelli et al. 2011）。

本研究におけるメーザーフィーチャーは、各エポックごとの合成ビームサイズ（PA も考慮したもの）内に少なくとも 3 つ以上のメーザースポットが含まれることを基準とした。また、合成ビームサイズ内に含まれるスポットの視線速度の範囲が自己相関スペクトルの強度ピークにおける FWHM 以上離れている場合は、視線速度の違いによってフィーチャーを区別することとした。具体例として Sugiyama et al. (2016) において同定されたメーザーフィーチャーの例を挙げる（図 5.3 参照）。

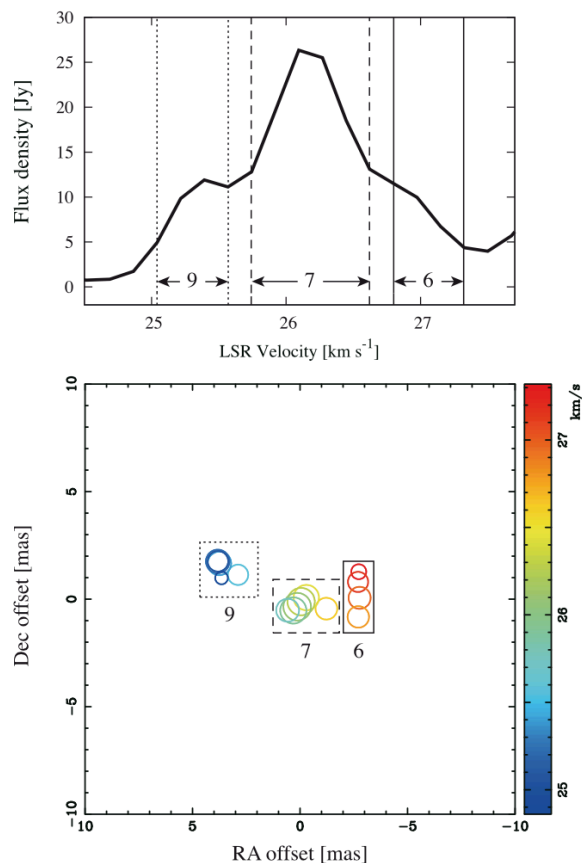


図 5.3 メーザースポットの区別の一例 (Sugiyama et al. 2016)。上図が自己相関スペクトルで下図が空間分布である。上図の横軸と縦軸はそれぞれ、視線速度とフラックス密度を表す。下図の横軸と縦軸はそれぞれ、原点 (RA(J2000.0)=18^h01^m57^s.76, Dec(J2000.0)=−23°12′34″.2) に対する相対座標であり、色は視線速度に対応している。円の大きさは log スケールで表した強度に比例している。異なる速度成分が見られるが、スペクトルの各速度成分ごとにスポットのをフィーチャーに区別している。

解析の結果、エポック 1, 2, 3 でそれぞれ 11, 3, 3 個のメーザーフィーチャーを同定した。同定したメーザーフィーチャーを図 5.4, 5.5 に示し、そのパラメータを表 5.6–5.8 に示す。座標と視線速度の値は、フィーチャーに含まれる全スポットの値を単純に平均した値である。座標のエラーは各フィーチャー内のスポットのエラーの 2 乗和平方根である。積分強度はフィーチャーに含まれる全スポットの強度の値を速度分解能 0.18 km s^{−1} で積分した値である。また、メーザーフィーチャーの拡大図の一部を図 5.6, 5.7 に示し、その他の図は本論文の末頁に示す。図内の十字が検出されたメーザースポットに対応しており、円がフィーチャーに対応している。

3 エポックにわたってフィーチャーが同定された成分は 2 成分 (ID No.1, 2) であり、2 エポック分でフィーチャーが同定された成分は 2 成分 (ID No.11 for epoch1, epoch3) (ID No.6 for epoch1, epoch2) であった。

表 5.6 エポック 1 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (Jy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1 [†]	6	1.55	0.07	-0.17	0.13	39.33	1.340
2	5	13.49	0.12	4.34	0.27	38.95	0.650
3	3	30.73	0.15	19.04	0.37	36.49	0.140
4	3	43.67	0.10	6.66	0.24	37.72	0.220
5	5	44.04	0.13	-7.45	0.30	38.07	0.479
6	6	56.55	0.11	57.28	0.26	33.59	1.077
7	3	45.95	0.14	53.17	0.34	33.68	0.145
8	4	59.29	0.20	45.83	0.48	32.62	0.158
9	5	54.83	0.17	44.17	0.41	32.80	0.315
10	3	1104.65	0.35	1114.85	0.73	33.68	0.119
11	3	1089.61	0.45	1127.27	0.82	33.91	0.092

[†] リファレンススポットを含むフィーチャー

表 5.7 エポック 2 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (Jy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1 [†]	4	0.45	0.83	0.12	1.21	39.30	0.339
2	4	11.69	0.96	6.19	1.40	39.04	0.321
6	4	53.91	0.80	60.74	1.17	33.59	0.389

[†] リファレンススポットを含むフィーチャー

表 5.8 エポック 3 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (Jy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1 [†]	4	0.17	0.15	-0.07	0.28	39.21	0.910
2	3	11.89	0.20	4.04	0.40	38.77	0.329
11	4	1082.17	0.38	1129.49	0.71	33.76	0.277

[†] リファレンススポットを含むフィーチャー

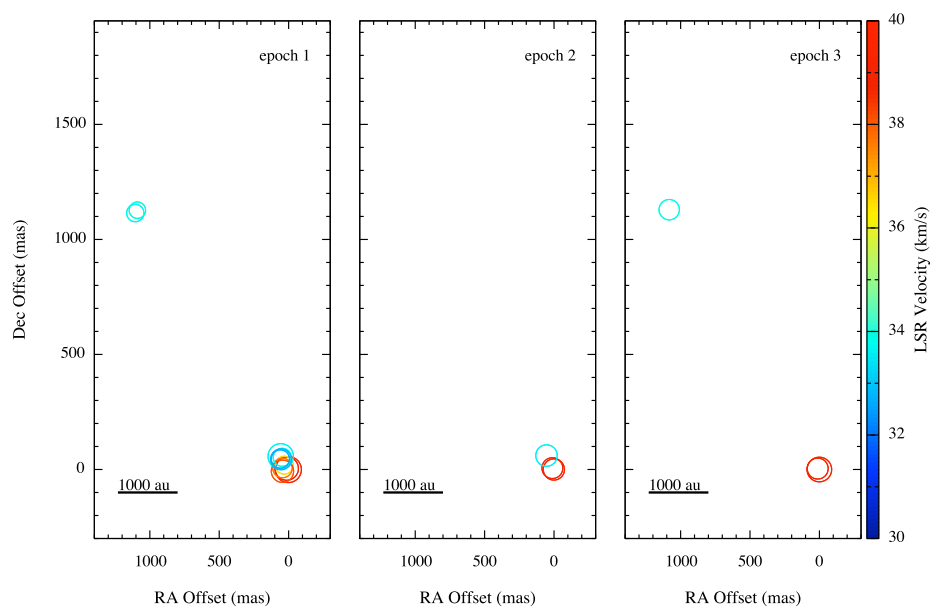


図 5.4 同定されたメーザーフィーチャー。横軸と縦軸はそれぞれ、原点に対する相対座標であり、色は視線速度に対応している。円の大きさは log スケールで表したフィーチャーの積分強度に対応している。

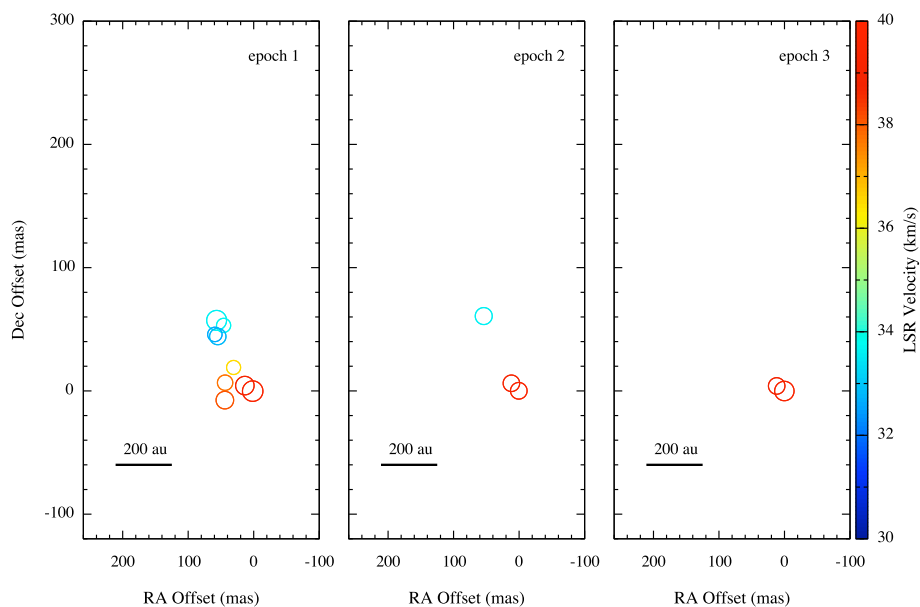


図 5.5 図 5.4 の原点周辺の拡大図

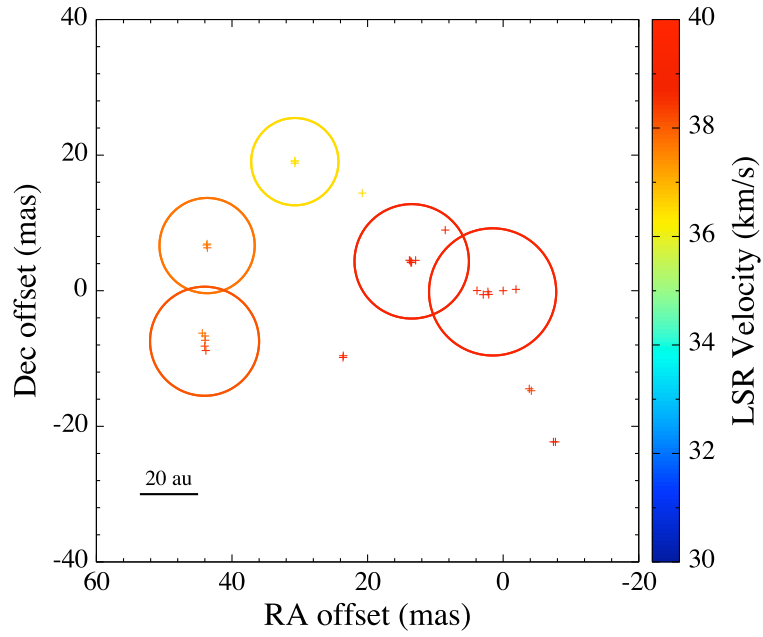


図 5.6 エポック 1 で同定されたメーザーフィーチャーの原点周辺の拡大図。十字が検出されたスポット、円がフィーチャーに対応する。円の大きさは log スケールで表したフィーチャーの積分強度に対応している。

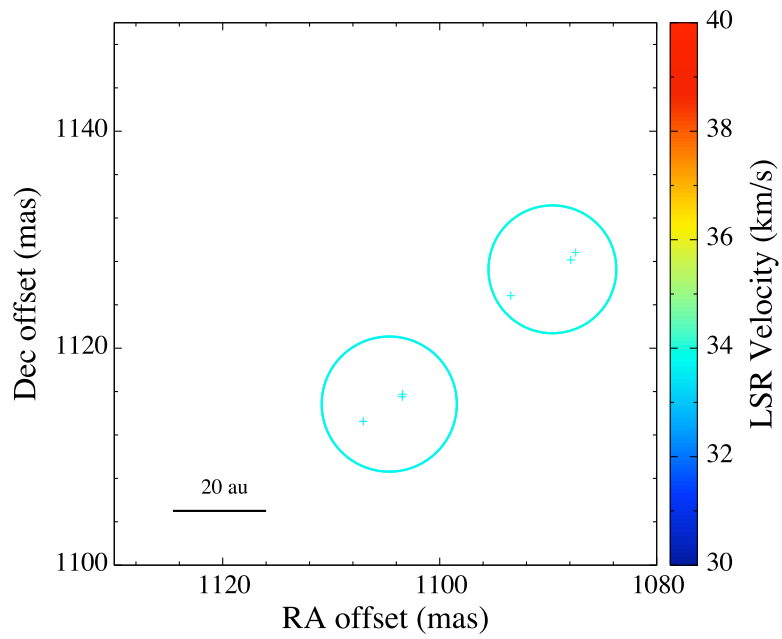


図 5.7 エポック 1 で同定されたメーザーフィーチャーの相対位置 $(\Delta\text{RA}, \Delta\text{Dec}) = (1100, 1120)$ 周辺の拡大図

5.3 固有運動

本研究では、3 エポックにわたって同定されたメーザーフィーチャーおよび2 エポック間のみで同定された4 つのフィーチャーについて、リファレンスメーザースポットに対する相対的な固有運動の導出を行った。導出方法は、各フィーチャーの位置変化率 (mas yr^{-1}) を速度 (km s^{-1}) に変換する方法を採用した。固有運動の導出は、全エポックにわたって同定されているフィーチャーを対象とし、かつ導出された速度の値がそのエラーよりも大きい場合に有意な検出であるとするのが理想であるが、本研究の解析結果では3 エポック全てで同定されたフィーチャーが2 つと少なく、かつ導出された Dec 方向の速度の値がエラーより小さかったため、理想的な条件を課すと固有運動の議論の材料がなくなってしまう。そのため、真の運動を捉えていない可能性があるが、2 エポック間のみで同定されたフィーチャーの固有運動および導出された速度の値がエラーより大きい場合の固有運動についても議論の対象とする。各フィーチャーの、リファレンスメーザースポットに対する RA, Dec それぞれの相対位置オフセットの変化を図 5.8, 5.9 に示す。

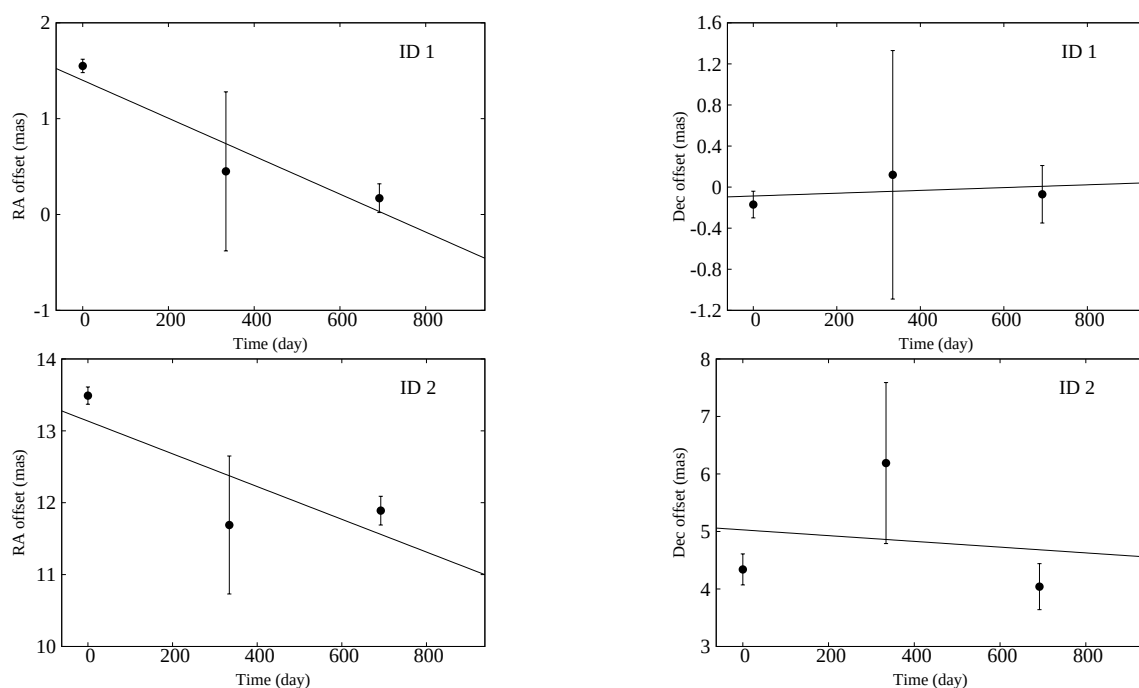


図 5.8 各フィーチャーの時間（日数）に対するリファレンスメーザースポットからの RA, Dec 相対位置オフセットの変化と、それに対する直線フィットの結果。左図が RA の結果で右図が Dec の結果である。ID 番号は各フィーチャーの ID 番号（表 5.6–表 5.8 参照）である。黒の実線が直線フィットの結果を表す。

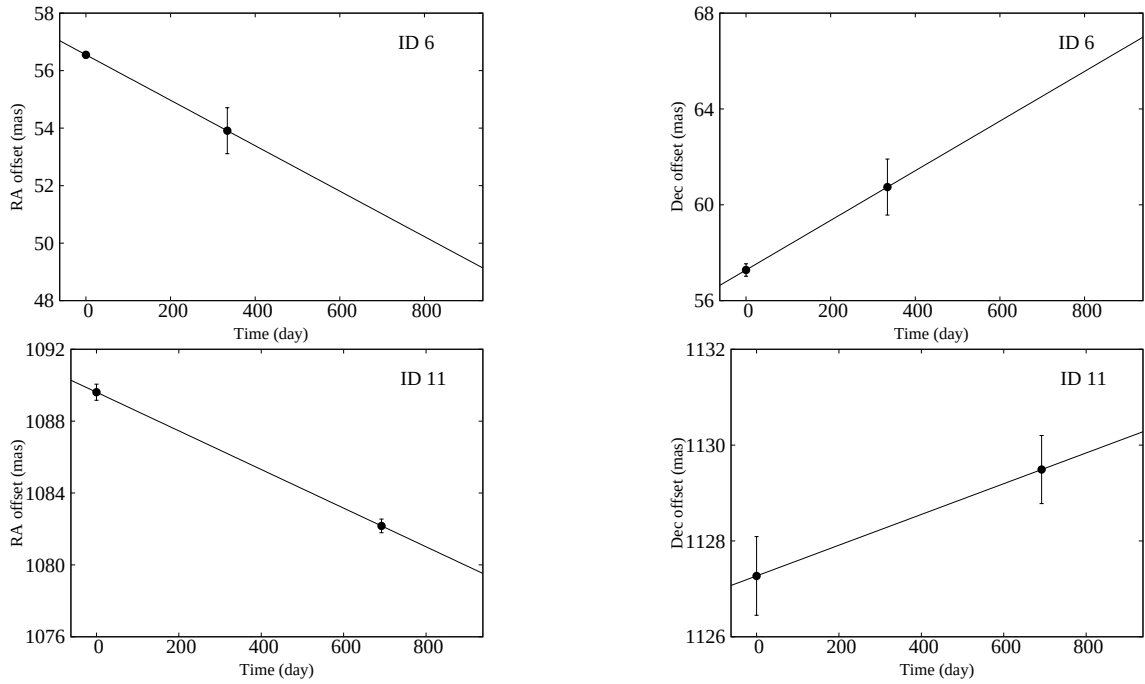


図 5.9 図 5.8 と同様

導出された、リファレンススポットに対する相対的な固有運動を図 5.10, 5.11 に示す。また、速度の情報などのパラメータを表 5.9 に示す。視線速度の値はエポック 1 のフィーチャーの値を使用した。表中の備考欄に記載がない場合は 3 エポック分のデータを用いて固有運動を導出していることを表す。

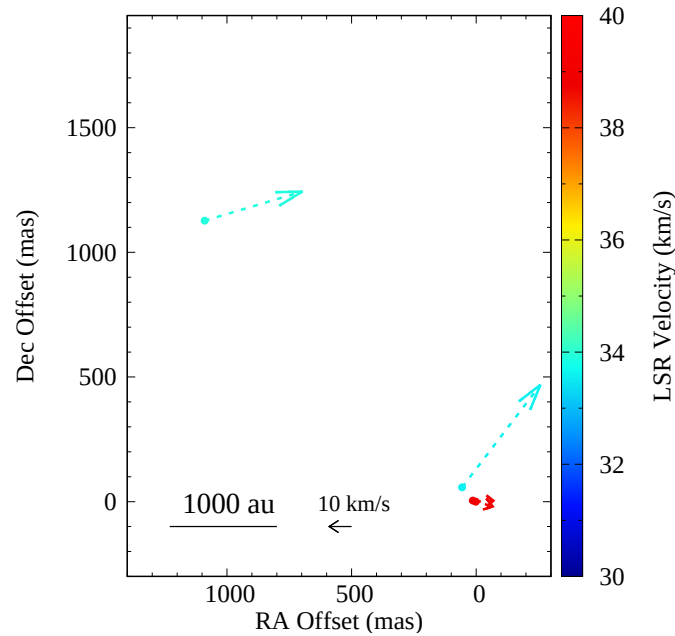


図 5.10 導出された原点に対する各フィーチャーの固有運動。矢印は固有運動の向きを表し、長さは接線速度の大きさである。丸の位置が各フィーチャーの位置を表している。色は視線速度に対応している。空間スケールおよび接線速度スケールは図中左下に示してある。

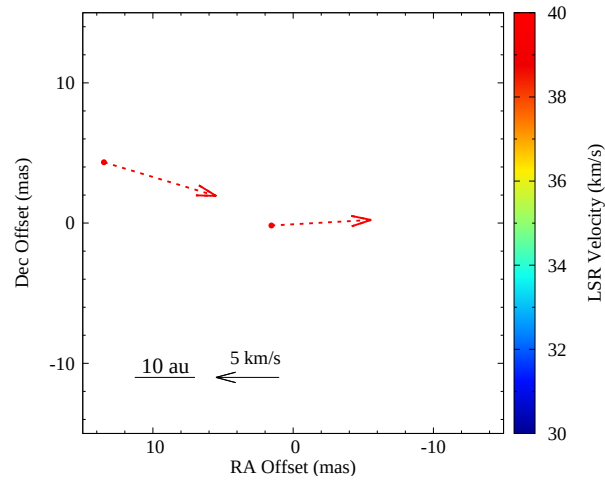


図 5.11 図 5.10 の原点周辺拡大図

表 5.9 導出された固有運動のパラメータ

ID	視線速度 (km s^{-1})	固有運動								備考
		μ_α	σ_{μ_α}	μ_δ	σ_{μ_δ}	V_x	σ_{V_x}	V_y	σ_{V_y}	
		(mas yr $^{-1}$)				(km s $^{-1}$)				
1	39.33	-0.72	0.26	0.05	0.15	-8.01	2.93	0.55	1.63	
2	38.95	-0.83	0.63	-0.18	1.21	-9.21	6.93	-2.02	13.45	
6	33.59	-2.89	0.00	3.78	0.00	-31.97	0.00	41.89	0.00	エポック 1, 2 のみで導出
11	33.91	-3.92	0.00	1.17	0.00	-43.48	0.00	12.97	0.00	エポック 1, 3 のみで導出

また、ID6, 11 について、フィーチャーの位置誤差によって生じる直線の傾き（固有運動の RA, Dec 方向それぞれの速度）の最大値と最小値を表 5.10 にまとめた。

表 5.10 V_x, V_y の最大・最小値

ID	V_x 最大値 (km s $^{-1}$)	V_y 最大値 (km s $^{-1}$)	V_x 最小値 (km s $^{-1}$)	V_y 最小値 (km s $^{-1}$)
6	-42.98	59.21	-20.95	24.58
11	-48.33	21.92	-38.63	4.03

第 6 章

考察

6.1 接線速度 V_{tan} の比較

導出された固有運動の接線速度 $V_{\text{tan}} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ をまとめた表を表 6.1 に示す。フィーチャー ID1 内にはリファレンスとなるメーザースポットも含まれている。そのため、フィーチャー ID1 の速度は実際の固有運動速度を表しているわけではなく、速度換算された位置変化率の不定性を表していることに注意する。フィーチャー ID2 の速度の値は、不定性も含めた誤差の値より小さいため、信頼性は低い。一方でフィーチャー ID6, 11 の速度の値は、不定性の値も含めた誤差の値より大きいので信頼性は高い。この速度の値は、過去の 6.7 GHz メタノールメーザーに対する観測結果では検出されていない。今後の議論はこのフィーチャー ID6, 11 について行う。

表 6.1 導出された各フィーチャーの固有運動の接線速度

ID	接線速度 V_{tan} (km s^{-1})	誤差 * (km s^{-1})
1 [†]	8.0	± 3.4
2	9.4	± 15
6	52.7	± 20
11	45.4	± 7

[†] 固有運動の速度ではなく位置変化率の不定性を表す

* ID1, 2 はフィッティング誤差から、ID6, 11 は表 5.10 から導出した

今回求めたフィーチャーの内部固有運動は真の運動を捉えていない可能性があり、得られた速度よりも小さい速度で運動している可能性もあるので、その場合は特定の運動を否定することは難しい。仮に今回得られた速度が真だとする場合を考えると、得られた速度の値が大きいので、運動は中心星の重力によって束縛されていないと考えられる。また、固有運動の向きに関しては、リファレンススポットを含む ID1 のフィーチャーの位置変化の不定性があるため、今回得られた固有運動の向きからどのような運動かを議論することは難しい。速度の値から、可能性のある運動としてはアウトフローやジェットが考えられる。

一方、§2.2.2 で述べたように、G12.8 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーを放射するガスは原始星周囲の回転円盤を示唆する構造に付随している可能性があるため、得られた速度をケプラー回転の速度と比較した。IRAS18089–1732 の光度が $1.3 \times 10^4 L_{\odot}$ であり、質量 – 光度関係 $M \propto L^{1/3}$ を仮定すると、IRAS18089–1732 の中心原始星の質量は

$$M \sim 2 \times 10^1 M_{\odot}$$

と推定できる。また、Green et al. (2010) で求められている 39.3 km/s 成分のメーザーの絶対座標と G12.8 の空間分

布から推定して打点した、原点付近のメーザー付随位置および北東方向のメーザー付随位置と、サブミリ波連続波ピーク位置との距離はそれぞれ、 $\sim 3000, \sim 900$ au であり、この長さを用いて回転速度の導出を行った。値として、重力定数 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$)、 $M \sim 2 \times 10^1 M_{\odot}$ 、 $r \sim 3000, \sim 900$ au を用いると

$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \sim 2 \text{ km s}^{-1} \quad (3000 \text{ au の場合})$$

$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \sim 4 \text{ km s}^{-1} \quad (900 \text{ au の場合})$$

となった。一方で、Beuther et al. (2005) でのサブミリ波連続波の観測結果によって、IRAS18089 – 1732 の中心コア質量が $45 M_{\odot}$ と見積もられているため、この質量を用いて同様の計算を行ったところ、 ~ 3000 au, ~ 900 au で回転速度がそれぞれ、 $\sim 4 \text{ km s}^{-1}$, $\sim 7 \text{ km s}^{-1}$ となった。今回はこれらのコア質量が全てメーザー付随位置よりも中心星に近い領域内に含まれていると仮定した。今回得られたメーザーフィーチャーの速度の値はこれらの値よりも1桁大きい値である。このことは、大質量原始星 IRAS18089 – 1732 周辺の回転円盤を示唆する構造に付随すると思われる領域 G12.8 に存在する、6.7 GHz メタノールメーザーが放射されるガスの運動が、ケプラー回転ではないことを示唆する。

本研究では検出されたスポット数がエポック 2 と 3 で少なかったため、今後は検出スポット数を増やすために増光期に合わせた観測を行い、かつ誤差の影響をなるべく減らすために高頻度かつ長期間の観測を行うことで、より正確な固有運動について議論していく必要がある。正確な固有運動が求まれば、視線速度の情報と合わせることでガスの3次元運動を推定し、その運動の様子からどの周期強度変動モデルが適するかを決定できる。

第 7 章

まとめ

本研究では、EAVN を用いて 2011 年 10 月 28 日、2012 年 9 月 26 日、2013 年 9 月 19 日に実施された VLBI 観測のデータを解析することで、6.7 GHz メタノールメーザー源 G012.88+00.48 に付随する周期的強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布および内部固有運動を導出した。G012.88+00.48 は大質量原始星 IRAS18089 – 1732 に付随する領域であり、原始星の周りには回転を示唆する構造の存在が確認されている (Beuther et al. 2005)。

観測日は既知の周期から推定したところ、エポック 1 が増光期でエポック 2, 3 が静穏期であると推定された。メーザースポットの検出条件は、信号対雑音比 (S/N) ≥ 5 かつ 2 チャンネル以上連続して同じ位置 (合成ビームサイズ以内) にスポットが確認されることの 2 点とした。

解析の結果、検出されたメーザースポット数はエポック 1, 2, 3 でそれぞれ 60, 22, 16 個であった。エポック 1 の分布は先行研究 Fujisawa et al. (2014) で解析されたデータと同様のものであり、本研究でも同様の空間分布が得られたため、解析手法が正しいことが確認できた。一方でエポック 2 および 3 で得られた空間分布はエポック 1 と比べて検出スポット数が少なかった。検出されたメーザースポットをメーザーフィーチャーにまとめた。メーザーフィーチャーの条件は、合成ビームサイズ内に少なくとも 3 つのスポットが含まれることを条件に課した。その結果、エポック 1 で 11 個、エポック 2 で 3 個、エポック 3 で 3 個のメーザーフィーチャーが同定された。そのうち 3 エポックにわたって同定されたフィーチャーが 2 つ、2 エポックのみで同定されたフィーチャーが 2 つであった。

フィーチャーのリファレンススポットに対する相対的な固有運動の計測には、時間に対するフィーチャーの座標変化を直線でフィットさせ、その傾きから運動の速度を導出する手法を採用した。その際、真の運動を捉えていない可能性があるが、2 エポックのみで同定されたフィーチャーおよび速度よりもエラーの方が大きい値だった場合に関しても議論の対象とした。

リファレンススポットを含むフィーチャーの速度は、実際の固有運動速度を表しているわけではなく、速度換算された位置変化率の不定性を表している。そのため、原点付近のフィーチャーの速度の値は信頼性が低い。一方で、それ以外の 2 つのフィーチャーの速度の値は、信頼性が高い。このような大きい速度の値は、他の 6.7 GHz メタノールメーザーの観測結果では検出されていない値である。今回求めたフィーチャーの固有運動は真の運動を捉えていない可能性があり、その場合は特定の運動を否定することは難しい。仮に得られた速度が真である場合を考えると、考えられる運動は中心星の重力によって束縛されていないと考えられる。一方で、メーザー放射ガスが回転円盤を示唆する構造に付随している可能性があるため、ケプラー回転の速度と比較した結果、フィーチャーの速度の値は、全てこの回転速度よりも数倍大きい値であった。このことは、原始星周辺の回転円盤を示唆する構造に付随すると思われるメーザー放射ガスの運動は、ケプラー回転ではないことを示唆する。本研究では検出されたスポット数がエポック 2 と 3 で少なかったため、今後は検出スポット数を増やすために増光期に合わせ、誤差の影響を減らすために高頻度かつ長期間の観測を行い、より正確な固有運動について議論していく必要がある。

謝辞

本研究に取り組むにあたって、たくさんの方々のご指導とご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

百瀬宗武教授にはゼミや授業を通じて電波天文学や星形成の基礎を教えていただいただけでなく、データ解析手法についてや研究発表方法についてのアドバイス、論文執筆に関わる添削など数多くのご指導を賜りました。また、米倉覚則教授には VLBI 観測についての詳細な情報をご提供いただいたり、日立 32m 電波望遠鏡の観測システムについてのゼミなどを開いていただきました。大変お世話になりました。

タイ国立天文研究所の杉山孝一郎様には解析ソフトの使い方から、各種データの較正方法についてのアドバイス、解析の結果に対するアドバイスなどについて数多くの具体的なお指導を賜りました。また、打ち合わせなどで出た私の疑問に対して非常に丁寧に回答していただきました。心より感謝申し上げます。

研究員の齋藤悠様、田辺義浩様、泉奈都子様にも大変多くのご指導ご鞭撻を賜りました。ありがとうございました。齋藤悠様には、日立モニター観測の観測運用に関わることを数多く教えていただきました。運用作業中に起こったトラブルについても丁寧に対応していただきました。ありがとうございました。田辺義浩様、泉奈都子様には研究に関わることや論文の執筆の仕方、発表練習など数多くのアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

研究室の後輩の皆様には、たった一人の M2 である私に対しても気軽に話しかけていただきました。同期がいない環境の中でも日々の生活が楽しく送れたのは皆様のおかげです。大変お世話になりました。

改めて、関わっていただいた全ての皆様に感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Barrett, A.H., Schwartz, P.R., & Waters, J.W. 1971, ApJ, 168, L101
- [2] Bartkiewicz, A., Szymczak, M., van Langevelde, H.J., et al. 2009, A&A, 502, 155
- [3] Beuther, H., Zhang, Q., Hunter, T.R., et al. 2004a, ApJ, 616, L19
- [4] Beuther, H., Hunter, T.R., Zhang, Q., et al. 2004b, ApJ, 616, L23
- [5] Beuther, H., Zhang, Q., Sridharan, T.K., et al. 2005, ApJ, 628, 800
- [6] Dall’Olio, D., Vlemmings, W.H.T., Surcis, G., et al. 2017, A&A, 607, A111
- [7] Fujisawa, K., Sugiyama, K., Motogi, K., et al. 2014, PASJ, 66, 31
- [8] Goddi, C., Moscadell, L., & Sanna, A. 2011, A&A, 535, L8
- [9] Goedhart, S., Gaylard, M.J., & van der Walt, D.J. 2003, MNRAS, 339, L33
- [10] Goedhart, S., Langa, M.C., Gaylard, M.J., et al. 2009, MNRAS, 398, 995
- [11] Green, J.A., Caswell, J.L., Fuller, G.A., et al. 2010, MNRAS, 409, 913
- [12] Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., et al. 2013, APJL, 769, L20
- [13] Menten, K.M. 1991a, ASPC, 16, 119M
- [14] Menten, K.M. 1991b, ApJ, 380, L75
- [15] Menten, K.M., Reid, M.J., Prato, P., et al. 1992, ApJL, 401, L39
- [16] Moscadelli, L., Sanna, A., & Goddi, C. 2011b, A&A, 536, A38
- [17] Sanna, A., Moscadelli, L., Cesaroni, R., et al. 2010, A&A, 517, A71
- [18] Sridharan, T.K.; Beuther, H., Schilke, P., et al. 2002, ApJ, 566, 931
- [19] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., et al. 2011, PASJ, 63, 53
- [20] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., et al. 2014, A&A, 562, A82
- [21] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Hachisuka, K., et al. 2016, PASJ, 68, 72
- [22] van der Walt, D.J., 2011, AJ, 141, 152
- [23] Xu, Y., Moscadelli, L., Reid, M.J., et al. 2011, ApJ, 733, 25
- [24] 會川航平 2019, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [25] 山口貴大 2018, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [26] 干渉計サマースクール 2005 教科書 国立天文台
- [27] 福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、他 シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 日本評論社
- [28] 中井直正、坪井昌人、福井康雄 シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測 II – 電波天文学 日本評論社

Appendix

A.1 3 エポックで同定されたメーザーフィーチャー

本章では第5章で紹介した、3 エポックで同定されたメーザーフィーチャーについて、本文では紹介しきれなかったマップについて紹介する。横軸と縦軸がそれぞれ、原点に対する相対座標 (ΔRA , ΔDec) であり、色は視線速度に対応している。円の大きさは log スケールで表したフィーチャーの積分強度に対応している。十字が各メーザースポットを表す。

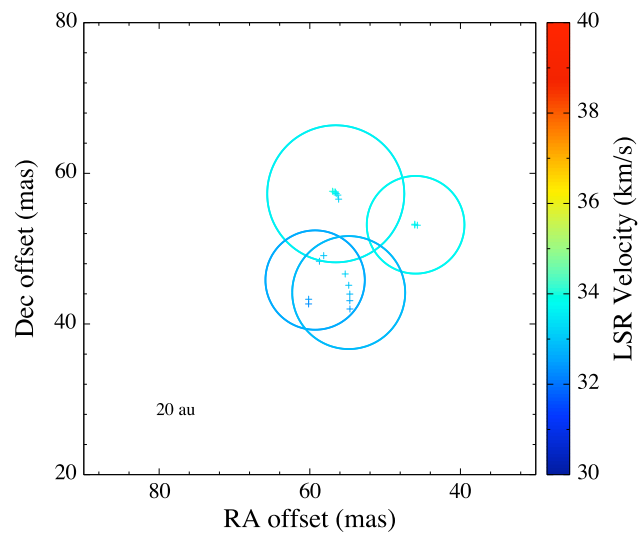


図 A.1 エポック 1 で同定された相対位置 (RA, Dec)=(60, 60) 周辺のメーザーフィーチャー

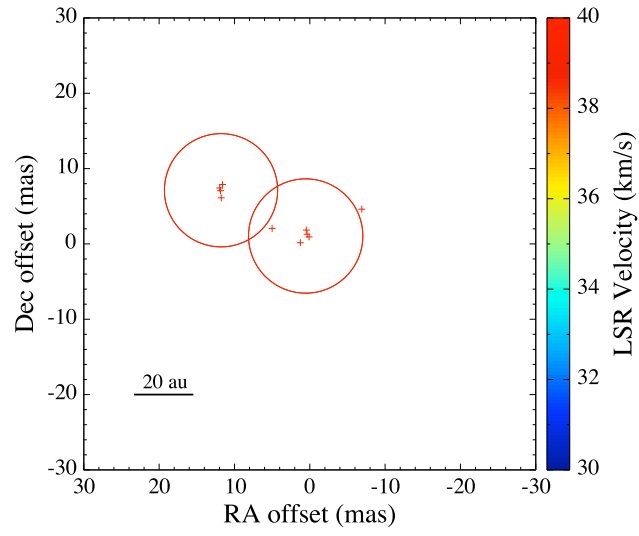


図 A.2 エポック 2 で同定された原点周辺のメーザーフィーチャー

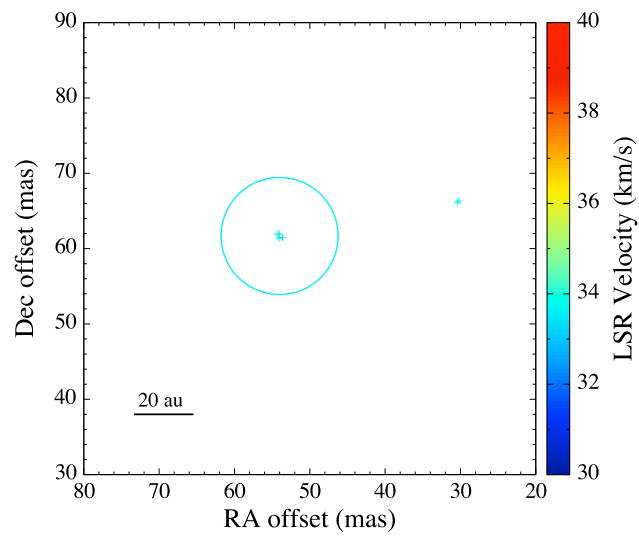


図 A.3 エポック 2 で同定された相対位置 (RA, Dec)=(60, 60) 周辺のメーザーフィーチャー

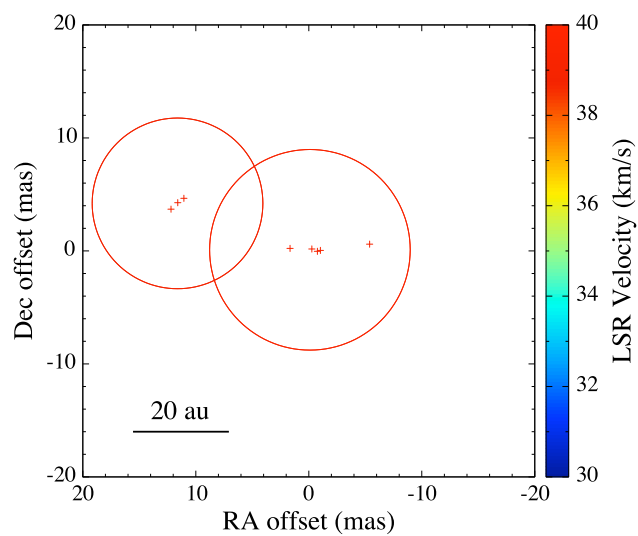


図 A.4 エポック 3 で同定された原点周辺のメーザーフィーチャー

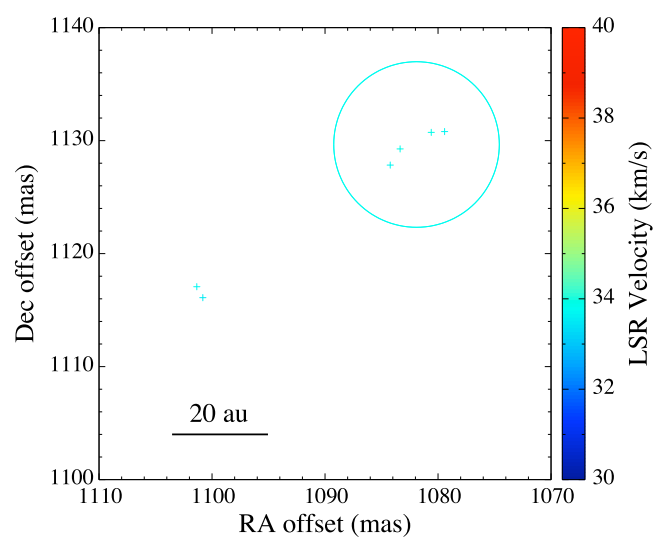


図 A.5 エポック 3 で同定された相対位置 (RA, Dec)=(1100, 1120) 周辺のメーザーフィーチャー