

修士学位論文

VLBI観測による大質量星形成に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの 強度変動機構の解明

2025 年度
(令和 7 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

24nm152l

松島 瑞樹

要旨

太陽の 8 倍以上の星を大質量星と呼ぶ。大質量星は星間空間に多大な影響を与えるが、その一方で形成過程は観測の困難さと中小質量星形成モデルが適用できないことにより未解明である。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した現象であり、大質量星形成領域と位置の相関が良い。加えて VLBI(Very Long Baseline Interferometry) による高空間分解能観測が可能であるため大質量星形成領域の環境を理解するために有用な指標である。また、6.7 GHz メタノールメーザーは時間に対して周期的な強度変動が発生することが確認されている。複数のモニター観測により存在が確認されており、理論モデルの提唱も行われているが、その変動メカニズムは未解明である。現在提唱されているモデルは、種光子の量の変動に起因するものと、赤外線放射量の変動に起因するものに大別される。そのため、理論モデル検証のためにはメーザー spot の空間分布および各 spot の強度変動や位置変化の情報を取得する必要がある。VLBI 等高空間分解能な干渉計を用いた複数回の観測が必要である。

本研究では、周期変動モデルの検証のためにどのメーザー spot で強度変動が起こっているかを測定することと、新規の VLBI イメージの取得を目的として、2025 年 5 月 6 日から 31 日までの期間で計 6 回の VLBI 観測を行った。これらの観測は複数回の観測の第 1 回目に相当する。使用した観測局は VERA、日立 32 m アンテナ、山口 32 m アンテナの合計 6 局である。また、観測天体は茨城大学でモニター観測が行われている天体の中から、「周期強度変動が確認されているもの」かつ「6.7 GHz メタノールメーザーの VLBI 観測データが存在しないもの」を条件に 8 天体を観測した。

スペクトルとメーザー spot の空間分布取得のため、取得データの解析は AIPS(Astronomical Image Processing System) と Difmap 及び Python を用いて行った。8 天体全てでメーザー放射が検出された。spot map は 8 天体中 6 天体で取得に成功した。また、メーザー spot の位置、サイズ及びフラックスを求めた。Spot map は、先行研究の結果と比較して spot が検出されていない天体が確認された。これは電波干渉計の原理である、最小基線長によって決定される大きさよりも広がった構造が分解されてしまうことに起因している可能性が高い。また、イメージ取得に失敗した天体のうち、解析の失敗が原因である可能性がある。また、本研究にて得られたメーザー spot のサイズ及びフラックスは、本観測の空間分解能の高さに起因して先行研究のものよりも正確な値を示している可能性が高い。

今後の展望として、解析に失敗した可能性のあるデータの再解析と 2 回目以降の観測が挙げられる。また、今後の観測のデータにはスプリアスは混入しないことが期待されるため、スプリアスが本データに与えた影響を測定できる可能性がある。

Abstract

Stars more than eight times the mass of the Sun are called massive stars. While massive stars exert a significant influence on interstellar space, their formation process remains poorly understood due to observational difficulties and the inapplicability of low-to-medium mass star formation models. The 6.7 GHz methanol maser is a phenomenon exclusively associated with massive star-forming regions, showing good correlation with their locations. Furthermore, it is a useful indicator for understanding the environment of massive star-forming regions because high spatial resolution observations are possible using VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Additionally, it has been confirmed that the 6.7 GHz methanol maser exhibits periodic intensity variations over time. Their existence has been confirmed through multiple monitoring observations, and theoretical models have been proposed; however, the mechanism behind these variations remains unexplained. Currently proposed models broadly fall into two categories: those attributed to variations in the number of seed photons and those attributed to variations in infrared radiation. Therefore, to verify the theoretical model, it is necessary to obtain information on the spatial distribution of maser spots and the intensity fluctuations and positional changes of each spot. This requires multiple observations using high-spatial-resolution interferometers such as VLBI.

This study conducted a total of 6 VLBI observations between May 6 and May 31, 2025, aiming to measure which maser spots exhibit intensity fluctuations for verifying periodic fluctuation models and to acquire new VLBI images. The observation stations used were VERA, the Hitachi 32 m antenna, and the Yamaguchi 32 m antenna, totaling 6 stations. These observations correspond to the first of multiple observations. Additionally, eight celestial objects were observed. These were selected from objects monitored by Ibaraki University, based on the criteria of “having confirmed periodic intensity variations” and “lacking existing VLBI observation data for the 6.7 GHz methanol maser.”

To obtain the spatial distribution of the spectrum and maser spot, Data analysis was performed using AIPS (Astronomical Image Processing System), Difmap, and Python. Maser emission was detected for all 8 sources. Spot maps were successfully acquired for 6 out of the 8 objects. We also determined the position, size, and flux of the maser spots. Comparison with previous studies revealed objects where no spot was detected. This is likely due to the fact that structures smaller than the minimum baseline length, which is determined by the principle of radio interferometry, cannot be resolved. Furthermore, among the objects where image acquisition failed, some failures may have been caused by analysis errors. Furthermore, the maser spot sizes and fluxes obtained in this study are likely to be more accurate than those in previous studies due to the high spatial resolution of this observation.

Future prospects include reanalyzing data where analysis may have failed and conducting subsequent observations. Furthermore, since spurious signals are not expected to contaminate future observation data, it may be possible to measure the impact spurious signals had on this data.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	大質量星形成について	1
1.2	6.7 GHz メタノールメーザーについて	1
1.2.1	メーザー放射	2
1.2.2	Class II メタノールメーザー	2
1.3	VLBI 観測について	3
1.3.1	電波干渉計と VLBI	4
1.3.2	干渉計の原理	4
第 2 章	研究背景	10
2.1	6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動	10
2.1.1	Colliding Wind Binary	10
2.1.2	原始星脈動	10
2.1.3	周期的質量降着	12
2.1.4	Spiral shock	14
2.1.5	食連星系モデル	15
2.2	高い空間分解能観測の必要性について	15
第 3 章	研究目的	16
3.1	観測天体の選定	16
3.2	先行研究	17
3.2.1	Hu et al. (2016)	17
3.2.2	Motogi et al. (2017)	17
3.2.3	結合型干渉計と VLBI で得られる物理量に関する注釈	17
第 4 章	観測概要	19
第 5 章	データ解析	20
5.1	VERA 局の自己相関スペクトルに発生したスプリアス	20
5.2	メーザー spot の空間分布取得	22
第 6 章	結果	24
6.1	スペクトル	24
6.2	maser spot map	25
第 7 章	考察	31
7.1	先行研究との比較	31
7.1.1	スペクトルの比較	31
	観測結果比較	32

スプリアスの影響について	35
放射強度の比較まとめ	35
各天体の周期変動成分について	36
7.1.2 Spot map の比較	37
観測結果の比較	37
7.1.3 Spot の物理量について	41
第 8 章 まとめ	45
謝辞	46
付録 A データ解析詳細	49
A.1 解析準備	49
A.1.1 データの読み込み	49
A.1.2 データの確認	49
A.2 データの calibration	51
A.2.1 自己相関スペクトルを用いた振幅較正	51
A.2.2 近傍連続波源を用いたフリンジフィッティング	51
A.2.3 バンドパス較正	51
A.2.4 ドップラー補正	52
A.2.5 テンプレート法を用いた振幅較正	53
A.2.6 観測ターゲット自身でのフリンジフィッティング	53
A.2.7 本研究に用いた較正天体一覧	53
A.3 データの imaging	54
A.3.1 DIFMAP を用いたピークチャンネルの self-calibration	54
A.3.2 メーザースポット map の作成	54

第1章 序論

1.1 大質量星形成について

太陽の 8 倍を超える星を大質量星と呼ぶ。これらの星は星間空間、銀河及びその進化に化学的、物理的に多大な影響を及ぼす。具体的な例は以下の通りである。

- 表面温度の高さゆえに周辺ガスを電離・加熱させる。
- 星風を起こし周辺物質を圧縮する。
- 超新星爆発により重元素が生成される。
- 超新星爆発で発生した中性子星やブラックホールが宇宙線加速の現場となる。

しかし、その形成過程については中小質量星とは異なり未解明である。その原因の一つとして距離が遠く、可視光や近赤外線で光学的に厚いため観測が困難であることが挙げられる。また、形成に高い降着率が要求される大質量星において、形成理論が決定していないことが挙げられる。以前は、大質量星形成に必要な降着率が高く、中小質量星における形成モデルを適用すると、原始星への質量降着が輻射圧を上回らず質量降着が妨げられてしまい、 $20 M_{\odot}$ を超える大質量星が形成できず、観測結果と矛盾が生じるという問題が挙げられていた。しかし、現在は非球対称降着モデルを使用することで輻射圧による最大質量の制限は回避することが可能であるとされている。輻射圧の問題が解決した中で、分子雲内部で高い降着率を達成し、大質量星を形成するためのモデルとして以下の二つが挙げられている。

- Monolithic Collaps model (McKee & Tan 2003)
- Competitive model (Bonnell et al. 2004)

前者は乱流により支えられたジーンズ質量の 100 倍以上の質量を持つ分子雲コアを考えたモデルであり、中・小質量星のモデルをそのまま大質量星にスケールアップしたものである。その一方で後者のモデルはジーンズ質量程度の分子雲コアを初期状態と考え、分子雲全体が不安定になった後、重力ポテンシャルの中心に向かって降着が発生することにより最終的に大質量星を形成するモデルである。これら二つのモデルでは分子雲コアの形成過程と分子雲コアの形成タイムスケールが異なる。これらのモデルを検証し、大質量星形成メカニズムを理解するためには、大質量星形成の初期状態を観測することが必要である。

1.2 6.7 GHz メタノールレーザーについて

ここでは、本研究の対象となる 6.7 GHz メタノールレーザーについて説明をする。

1.2.1 メーザー放射

ガス密度が高い環境下（地球大気）では、局所熱力学的平衡状態であるために2つのエネルギー準位間の粒子の分配はボルツマン分布になる。つまり、高い準位にある粒子数が低い準位にある粒子数を超えることは無い。しかし、粒子の数密度の低い宇宙空間では粒子間の衝突による励起・脱励起よりも自発放射や誘導放射及び吸収により粒子の励起・脱励起が発生する場合がある。この際にエネルギー準位間の粒子分布がボルツマン分布から外れ、粒子が上のエネルギー準位の方に多く分布することが起こることがある。これを反転分布という。この状態の準位間の粒子数の関係は以下の式 (1.1) で表せる。

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (1.1)$$

ここで、 n_1 、 n_2 はそれぞれ下と上の準位の粒子数であり、 g_1 、 g_2 はその準位での統計的重み、 ΔE は遷移に必要なエネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T は励起温度である。この状況で、 $n_1/g_1 < n_2/g_2$ という関係が成立する。

反転分布が起こっている領域は不安定であり、ここに外部から2準位間のエネルギー差に相当する周波数 ν_{21} の放射が入射すると、誘導放射が連鎖的に発生し強度が増幅される。このようにして増幅された電波の放射をメーザー (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ぶ。メーザーには以下の様な特徴がある。

- ・ 強度が高い
- ・ 線幅が狭い
- ・ メーザーが放射される領域は観測的に広がりを持たない点源とみなすことが可能であり、maser spot と呼ばれる
- ・ 直線 or 円偏波している
- ・ 電波の位相が揃う

メーザー放射を発生させる分子は代表的なもので OH、H₂O、SiO、メタノールがある。これらの分子を起因とするメーザーにはそれぞれ検出される星周領域内の位置や、星の形成期か晩期かどうかなどの違いがあるため、星周領域の物理状態の指標として用いられる。また、強度の高さと放射領域のサイズから VLBI 観測が可能であり、高い空間分解能観測による詳細な spot の位置情報を取得できる。メーザースポットの位置の変化はガスの運動の指標として研究に用いられており、星形成領域や晩期星周囲においてガスの運動を知るために用いられている。

1.2.2 Class II メタノールメーザー

本研究で取り扱う物理現象は、メタノール分子によって発生するメーザー放射の一種である。メタノールメーザーは励起機構と放射位置の違いにより class I と class II に分類されている。class I が分子同士の衝突による励起であることに対して、class II は中心星からの赤外線による励起である。本研究ではその中でも 6.7 GHz で放射される class II メタノールメーザーを対象とする。

Class II 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現象である。class I メタノールメーザーは質量を問わず星形成領域に付随するが、励起源である天体からは離れ

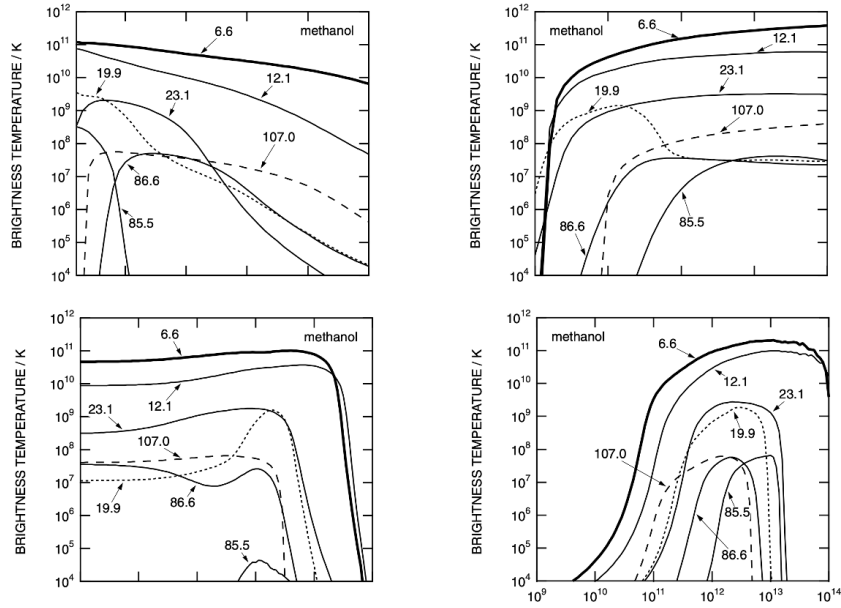


図 1.1: 物理状態のシミュレーション結果。ガス温度 (左上)、ダスト温度 (右上)、ガス密度 (左下)、柱密度 (右下) と輝度温度の関係。(Ellingsen et al. 2004 から引用)

たアウトフローと分子雲の衝突する領域で観測される。その一方で class II メタノールメーザーが観測される場所は降着円盤上やアウトフローなど、大質量原始星近傍である。また、Class II メタノールメーザーは生まれつつある大質量星（大質量原始星）との位置相関が良いことから (e.g. Minier et al. 2003)、大質量星が形成される場所の指標となる。Ellingsen et al. (2004) により算出された class II メタノールメーザー放射領域の物理量と輝度温度の関係について図 1.1 に記載する。この結果より、Class II メタノールメーザー放射領域の物理量と輝度温度の関係は遷移によって大きく異なることが分かる。

Class II メタノールメーザーは 6.7 GHz、12.2 GHz、19.9 GHz など複数の周波数で観測されているが、中でも 6.7 GHz メタノールメーザーは最も輝度が高く、現在 1000 天体以上で検出されている。また、6.7 GHz メタノールメーザーはその輝度の高さから VLBI 観測が容易であり、得られた空間分布には elliptical (楕円)、arched (円弧)、linear (直線)、paired (ペア)、complex (前のどの分布にも属さないもの) のように分類されている (e.g. Bartkiewicz et al. 2009, Fujisawa et al. 2014)。図 1.2 に、Fujisawa et al. (2014) による、各分類ごとの例を記載する。メーザー spot の空間分布は分類ごとに構造が考察されている。elliptical 構造は傾いた大質量原始星周辺の円盤をトレースしており、linear、arched 型はアウトフローに関連しているか、または円盤構造の一部であるとされている (Bartkiewicz et al. 2009)。paired、complex 型の分布は特徴的な構造に分類できないとされているが、これは暗い天体構造が VLBI 観測で検出されなかったことが起因して、elliptical 構造やその他の構造の一部をトレースしている可能性がある。

1.3 VLBI 観測について

ここでは、本観測に使用した手法である VLBI の概要と、電波干渉計の原理について説明する。

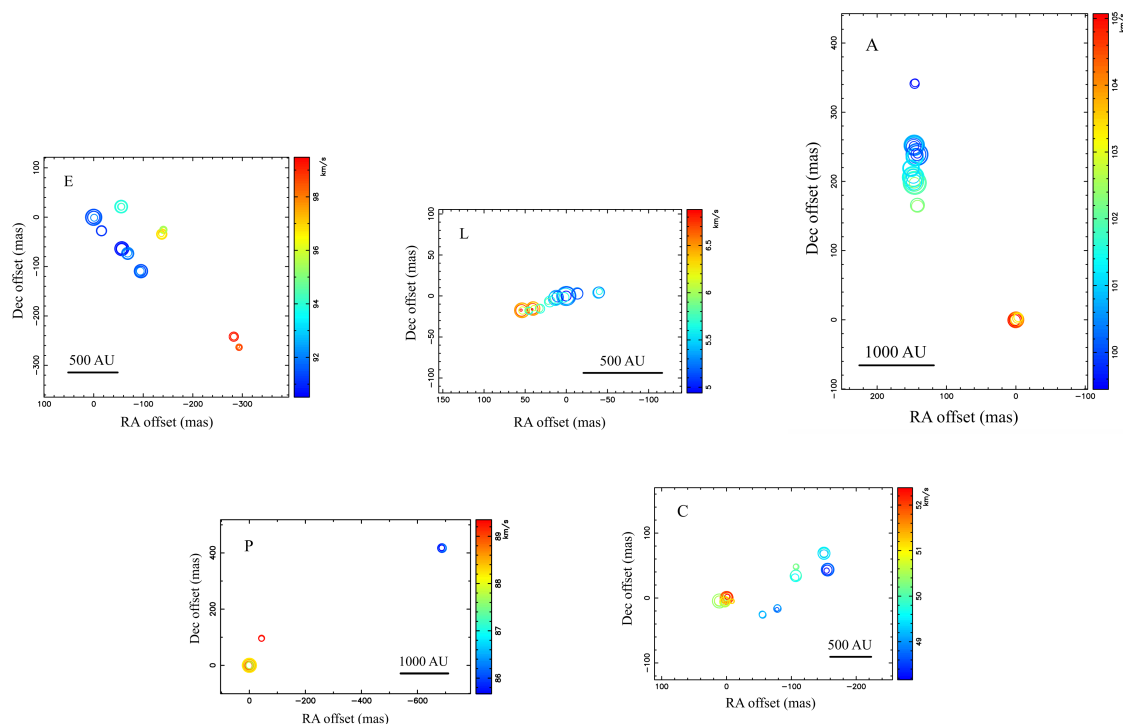


図 1.2: メーザーの空間分布例。左上: elliptical、中央上: linear、右上: arched、左下: paired、右下: complex。(Fujisawa et al. 2014 より引用)

1.3.1 電波干渉計と VLBI

電波望遠鏡の空間分解能は、観測波長 λ /望遠鏡の口径 D で定められる。そのため、単一鏡で高い空間分解能を得るためには、口径の巨大化が要求される。しかし、これには技術的に限界が存在する。そのため、電波観測では高い空間分解能観測が必要な場合に、電波干渉法と呼ばれる手法が用いられることがある。これは複数の望遠鏡を素子アンテナとして観測を行い、データを相関処理することによって素子アンテナ間の距離（基線長）を口径とする巨大な単一鏡と同等の分解能を得る手法である。電波干渉計は電波観測の中で、主に高い分解能を活かした天体の位置や構造を測定するイメージング観測位置に用いられる。電波干渉計には、以下の二つのタイプが存在する。

- 素子結合型干渉計
- VLBI (Very Long Baseline Interferometer)

これらの望遠鏡の具体例を、図 1.3 に記載する。

本観測では、VLBI を用いて観測を行った。VLBI は、名称の通り結合型電波干渉計と比較して基線長が長いことが特徴である。そのため、単一鏡や結合型干渉計よりも高い空間分解能を得ることが可能である。

1.3.2 干渉計の原理

ここでは、VLBI を含む電波干渉計の原理と、それによって取得されるデータと、その処理方法について述べる。干渉計の観測量は、アンテナの組み合わせごとに測定されるビジビ



図 1.3: (左) ALMA 望遠鏡 (国立天文台サイトより引用: URL <https://www.nao.ac.jp/research/project/alma.html>)
 (右) VERA 観測網の概略図 (国立天文台 VERA 水沢サイトより引用: URL <https://www.miz.nao.ac.jp/veraserver/introduction/vera/index.html>)

リティである。干渉計の原理を理解するために、このビジビリティについて理解する必要がある。

最初に、観測に必要な天球面上の座標系と地球固定の座標系の関係を示す。アンテナ位置から見た天球面上で観測対象となる電波源中心方向を指す単位ベクトルを $\mathbf{s}$ とする。この位置を原点として天球面に接する平面座標 (l, m) を仮定する。 $\mathbf{s}$ の方向に n 軸をとると、 (l, m, n) が直角座標系になり天球面上の任意の点において

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (1.2)$$

を満たす。一方でアンテナは地上に固定されているため、地球上に固定された座標系を考える。Z 軸を北極方向に、X 軸を赤道上で経度 0° 、Y 軸を経度 90° の方向に取る。 (l, m, n) に平行で地球中心を原点とする地球上の座標を (x, y, z) とすると、 (X, Y, Z) 座標系と (x, y, z) 座標系は Z 軸回りの回転行列 $\theta = GST + \lambda - \alpha$ と Y 軸回りの $-\delta$ の回転で変換される。ここで、 θ は時角、GST はグリニッジ恒星時、 λ は東を正とするアンテナの経度である。この時、アンテナの位置ベクトル $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ を (x, y, z) 座標に変換すると、

$$\begin{pmatrix} P_z \\ P_x \\ P_y \end{pmatrix} = R_Y(-\delta) R_Z(\theta) \begin{pmatrix} P_X \\ P_Y \\ P_Z \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

となる。ここで、 $R_Y(-\delta)$ と $R_Z(\theta)$ はそれぞれ δ と θ 方向の回転行列である。2つのアンテナの位置ベクトルを $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$ とし、それらを結ぶ基線ベクトルを $\mathbf{D}$ とすると、 (X, Y, Z) 座標系で表した基線ベクトルと (x, y, z) 座標系で表した基線ベクトルの関係は

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \delta & \sin \theta \sin \delta & \cos \delta \\ \cos \theta \cos \delta & -\sin \theta \cos \delta & \sin \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_X \\ D_Y \\ D_Z \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

である。ここまでの座標系概要を図 1.4 に示す。

次に、干渉計の出力であるフリンジとスペクトルについて説明する。ここでは単一周波数 ν_0 で広がりを持たない点源を A_1 、 A_2 の 2 アンテナで観測していると仮定する (図 1.5)。この時アンテナ間の基線ベクトルを $\mathbf{D}$ 、天体の方向ベクトルを $\mathbf{s}$ とする。そうすると、光路長には $c\tau_g$ の差が生じる。ここで、 c は光速、 τ_g は幾何学的遅延であり、

$$\tau_g = \frac{1}{c} \mathbf{D} \cdot \mathbf{s} \quad (1.5)$$

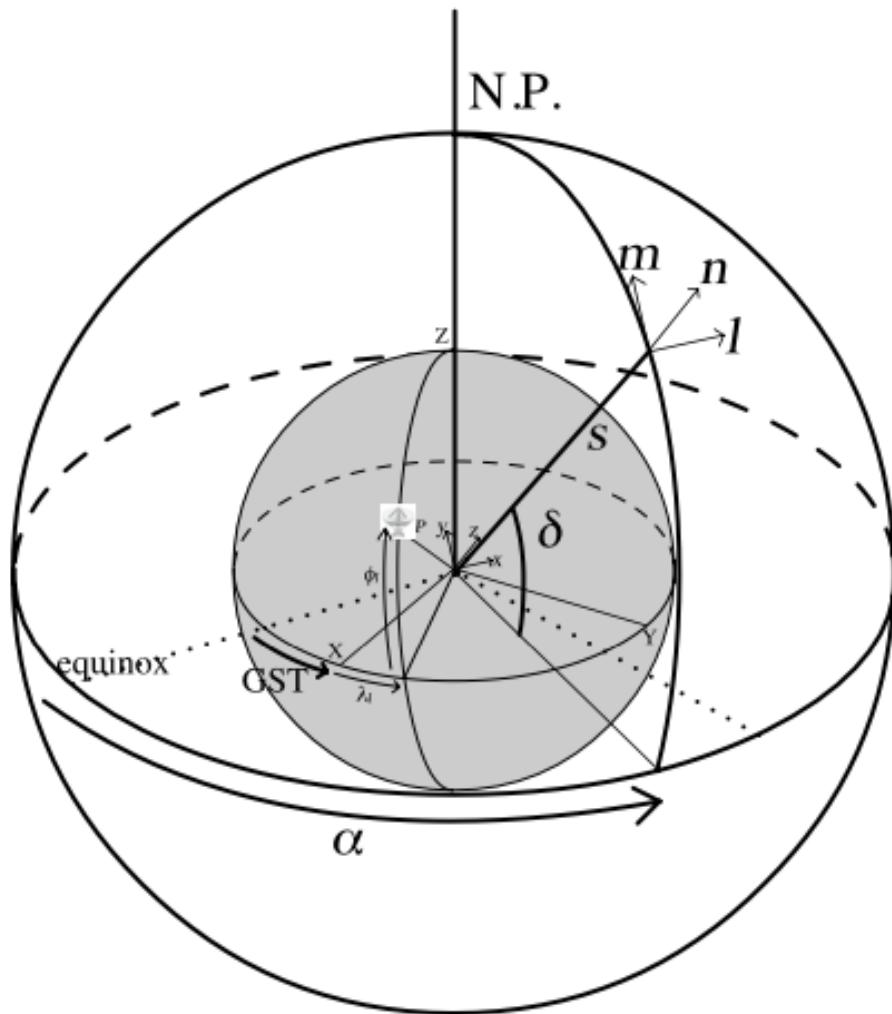


図 1.4: 地球上座標系と天球面上座標系の概要図。グレーの球部分が地球中心座標系であり、白い球が天球中心座標系を表している。図中のアンテナの絵はアンテナの位置を示している。 (x, y, z) 座標系は地球中心を原点とし、 (l, m, n) に平行に軸を取った座標系であり、 (X, Y, Z) は地球中心を原点とし X 軸を経度 0 方向、 Y 軸を東経 90° 、 Z 軸を天の北極方向に取った座標系である。(干渉計サマースクール 2005 年 教科書 より引用)

と表される。天体からの放射が $E(t) = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t)$ である時、アンテナで受信される信号はそれぞれ

$$V_1(t) = \mathbf{a}_1 E_0 \cos[2\pi\nu_0(t - \tau_i)], V_2(t) = \mathbf{a}_2 E_0 \cos[2\pi\nu_0(t - \tau_g)] \quad (1.6)$$

である。 E_0 は放射電場、 V_1 、 V_2 は受信電圧、 $\mathbf{a}$ は振幅と位相を持つアンテナごとの比例係数、 τ_i は相関器で入れられる遅延補正の値である。これらの受信信号を加算し 2 乗検波してから時間平均したものが干渉計の出力である。これを相互相関関数 $C(\tau)$ と呼び、

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t=-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_1(t) V_2^*(t - \tau) dt \quad (1.7)$$

で定義される。そのため、

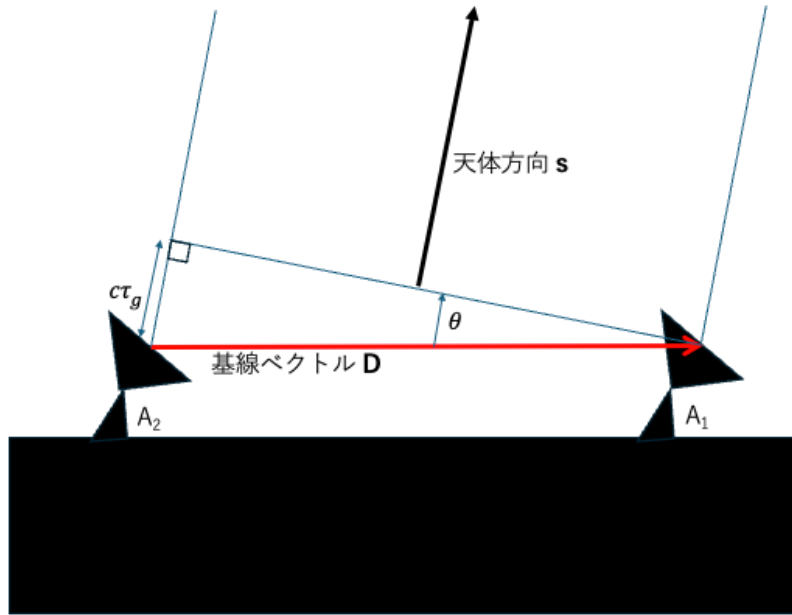


図 1.5: 干渉計概略図

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t=-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* \cos[2\pi\nu_0 E_0(t - \tau_i)] E_0^* \cos[2\pi\nu_0(t - \tau_g - \tau)] dt \quad (1.8)$$

と変形できる。ここで、

$$\cos(a) * \cos(b) = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)] \quad (1.9)$$

を用いると、

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t=-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* E_0 E_0^* \cos[2\pi\nu_0(2t - \tau_i - \tau_g - \tau)] + \cos[2\pi\nu_0\{\tau - (\tau_i - \tau_g)\}] dt \quad (1.10)$$

となる。時間平均の結果、1 項目は受信電波の周波数程度で振動するために 0 となる。そのため、相互相関関数 $C(\tau)$ は

$$C(\tau) = \frac{1}{2} \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* |E_0|^2 \cos[2\pi\nu_0\{\tau - (\tau_i - \tau_g)\}] \quad (1.11)$$

と導出される。相互相関関数は τ に対して振動し、天体放射強度に比例する。このパターンをフリンジと呼ぶ (図 1.6)。フリンジの周期をフリンジ間隔、式 (1.11) の $\cos$ の引数をフリンジ位相と呼ぶ。相互相関関数を τ に対してフーリエ変換すると、クロスパワースペクトル $\hat{C}$ を得られ、

$$\hat{C} = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) \exp(-2\pi i \nu \tau) d\tau \quad (1.12)$$

$$= \frac{1}{4} \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* |E_0|^2 \delta(\nu - \nu_0) \exp[-2\pi i \nu_0 (\tau_i - \tau_g)] \quad (1.13)$$

である。位相 $\phi = -2\pi i \nu_0 (\tau_i - \tau_g)$ は遅延補正が τ_i 、 τ_g と等しい場合 0 になる。

次に、天体の位置に位相中心からのズレがあった場合の干渉計の位相について考える。天体の方向ベクトル $\mathbf{s}$ に位相中心からのズレ (offset) l を加えると、位相の変化量は

$$\Delta\phi = \frac{\partial\phi}{\partial l} = 2\pi \frac{D \cos\theta}{\lambda} \Delta l = 2\pi u \Delta l \quad (1.14)$$

である。ここで、 λ は観測周波数である。ここで、 $D \cos\theta / \lambda = u$ とした。 u を空間周波数という。式 (1.14) を用いることで、位相の差から位置の差を求めることが可能である。

ここまでは天体が点源である仮定であったが、ここからは構造を持つ天体であると仮定する。電波源が n 個の点源である場合、クロスパワースペクトルは n 個分のクロスパワースペクトルの和となり、

$$\hat{C} = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* \sum_{k=1}^n I_k^2(\nu, l) \exp 2\pi i u l_k \quad (1.15)$$

と表せる。ここで、 I_k は天体の輝度分布である。また、天体が連続的に分布している場合、

$$\hat{C} = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* \int_{\text{source}} I(\nu, l) \exp 2\pi i u l_k \quad (1.16)$$

である。天体の広がり以外で $I(\nu, l) = 0$ と仮定すると、 l の積分区間を $(-\infty, \infty)$ と表せるため、 $I(\nu, l)$ と $\hat{C}(\nu)$ はフーリエ変換の関係になっていると言える。 $\hat{C}$ は空間周波数 u に依存した値である。そのため新たに u に依存した値ビジビリティ $\mathcal{V}(\nu, u)$ として設定し、

$$\mathcal{V}(\nu, u) = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* \int_{\text{source}} I(\nu, l) \exp 2\pi i u l_k \quad (1.17)$$

と表示する。すると、天体の輝度分布 $I(\nu, l)$ とビジビリティ $\mathcal{V}(\nu, u)$ は u と l にはフーリエ変換の関係があることがわかる。つまり、ビジビリティを様々な空間周波数で測定し、逆フーリエ変換することで天体の輝度分布を取得することが可能である。

これを、2次元天体輝度分布に拡張したものが van Citter-Zernike の定理である。図 1.4 にある座標系をそのまま使用する。 (l, m, n) 座標系で位相中心 $\mathbf{s}$ から少し離れた $\mathbf{s} + \Delta\mathbf{s}$ があると仮定すると、 $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ かつ $n > 0$ である。ここで、空間周波数の (x, y, z) 軸に対応した成分を

$$(u, v, w) = \frac{1}{\lambda} (D_x, D_y, D_z) \quad (1.18)$$

とする。この時の幾何学的遅延

$$\frac{1}{c} (\mathbf{s} + \Delta\mathbf{s}) \cdot \mathbf{D} = \frac{1}{c} (D_x l + D_y m + D_z n) \quad (1.19)$$

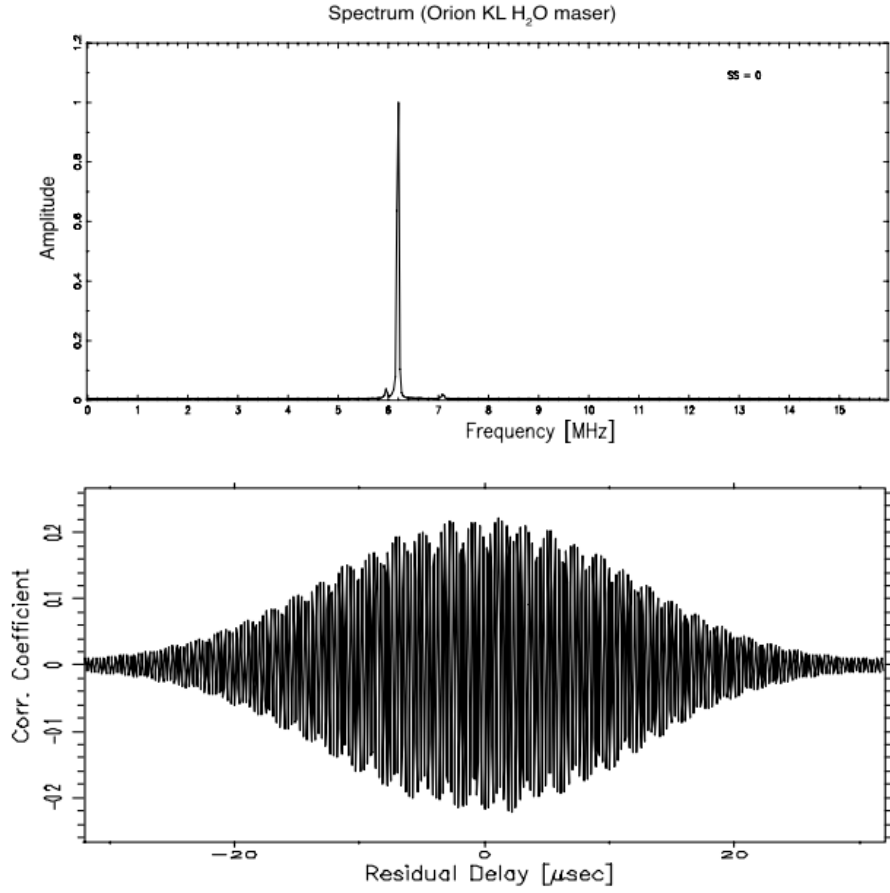


図 1.6: Orion KL IRC2 における 22 GHz 水蒸気メーザーのスペクトル (上) とフリンジ (下)。(干渉計サマースクール 2005 教科書より引用)

を反映すると、クロスパワースペクトルの位相は

$$\phi = 2\pi \left[ul + vm + w \left(\sqrt{1 - l^2 - m^2} - 1 \right) \right] \quad (1.20)$$

である。ここで、視野が狭い場合を仮定すると、

$$\phi = 2\pi(ul + mn) \quad (1.21)$$

と近似できる。以降、この仮定を使用する。クロスパワースペクトル $\hat{C}$ は

$$\hat{C} = \int_l \int_m \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* I_\nu(l, m) \exp[2\pi i(ul + um)] dldm \quad (1.22)$$

である。点源の時と同様にビジビリティに書き換えると、

$$\mathcal{V}_\nu(u, v) = \int_l \int_m \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* I_\nu(l, m) \exp[2\pi i(ul + um)] dldm \quad (1.23)$$

と表せる。ビジビリティは天体の輝度分布 $I_\nu(l, m)$ とフーリエ変換の関係である。つまり、天体が広がっていてもビジビリティを逆フーリエ変換することで輝度分布を求められる。これを van Citter-Zernike の定理と呼ぶ。

第2章 研究背景

2.1 6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動

6.7 GHz を含む class II メタノールメーザー天体の中で、周期的に強度変動が確認されているものがある (e.g. Goedhart et al. 2004, Goedhart et al. 2007、図 2.1)。2025 年現在 6.7 GHz メタノールメーザー天体約 1000 天体のうち、茨城大学のモニター観測などにより 57 天体で周期的な強度変動が確認されている。これらの周期は数 10 から数 1000 日である (e.g. Tanabe and Yonekura 2024)。

6.7 GHz メタノールメーザーの周期的強度変動のメカニズムとして、複数の理論モデルが提唱されている。これらのモデルについて観測での検証が必要とされている。しかし、メーザー放射が発生する領域を空間的に分解して観測するためには高い分解能が要求される。そのため、サンプル数の少なさが原因で実際に周期変動メカニズムを解明するには至っていない。以下に、現在提唱されている Class II メタノールメーザーの周期変動メカニズムのモデルを示す。

2.1.1 Colliding Wind Binary

Colliding Wind Binary モデルは、van der Walt (2011) によって提唱された class II メタノールメーザーの周期強度変動を説明するモデルである。このモデルを適用する前提条件は、HII 領域が存在していることと、恒星風の衝突が発生している大質量連星系であることである。この論文では、G9.62+0.20E と G188.95+0.89 の二つのメタノールメーザー源に対して議論が行われている。この 2 天体が CWB (恒星風衝突連星) 系であること、class II メタノールメーザーが背景のコンパクト HII 領域からの放射を増幅していることの 2 点を仮定する。この仮定をした場合、連星の軌道運動による恒星風衝突で加熱されたガスが起因となり、周期的に変化する電離放射が発生する。

この電離放射のパルスが減衰することなく HII 領域内部を通過し、HII 領域終端の励起領域にある非電離、または部分電離ガスに吸収される。このことによってガスの電子密度が上昇し、free-free 放射が増加する。これを種光子としてメーザー放射が発生することで、周期的な変動をするメーザーが観測されるというものである。このモデルの概略図を van der Walt (2011) から引用し、図 2.2 に示す。

van der Walt (2011) では、このモデルを G9.62+0.20E と G188.95+0.89 の 2 天体に適用したところ、図 2.3 のように、class II メタノールメーザーの変動を説明可能であると述べられている。

2.1.2 原始星脈動

原始星脈動モデルは、Inayoshi et al. (2013) によって提唱された class II メタノールメーザーの周期強度変動を説明するためのモデルである。本モデルでは、Hosokawa and Omukai

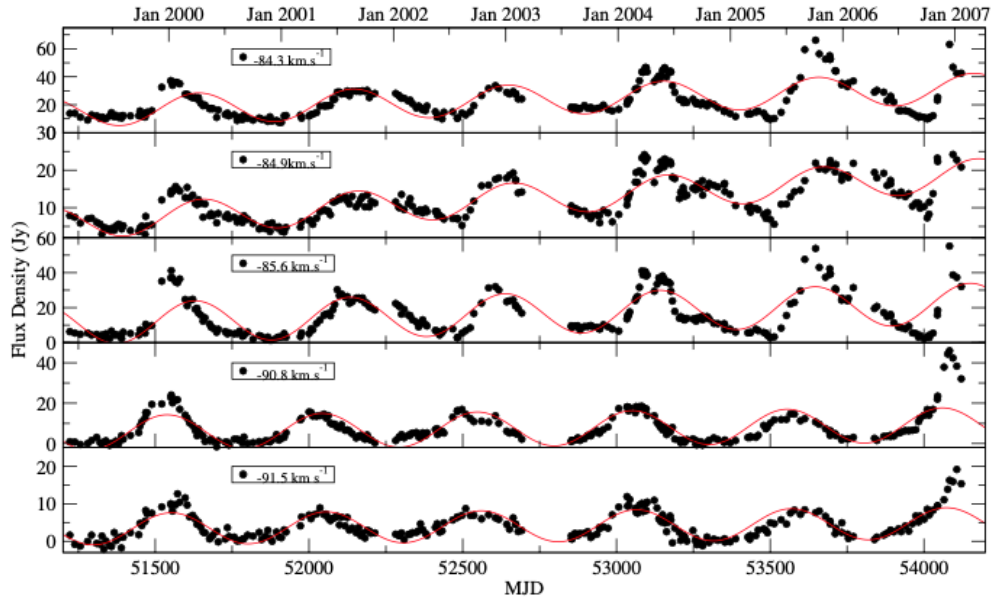


図 2.1: G331.13-0.24 の光度曲線。赤線は強度の変動を sin 関数近似した結果 (Goedhart et al. 2007 より引用)

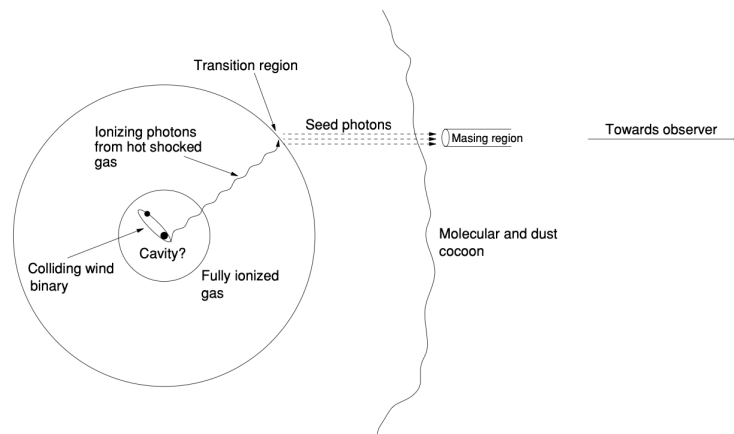


図 2.2: Colliding wind binary モデル概略図 (van der Walt 2011 より引用)

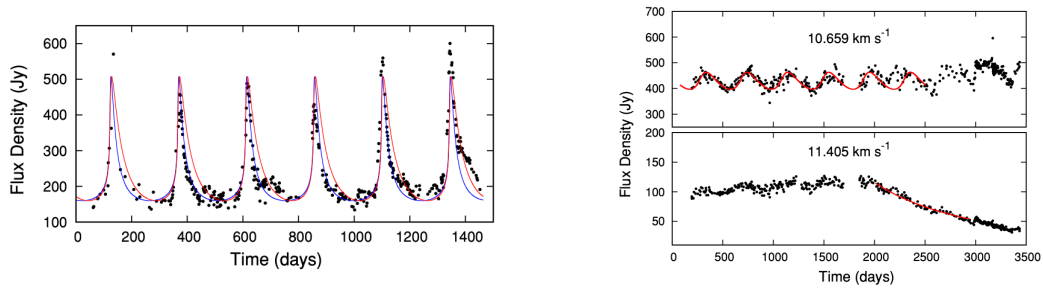


図 2.3:

CWB モデルを 2 天体に適用した結果。(左) G9.62+0.20E における class II メタノールメーザーの観測結果 (黒点) と CWB モデルによるフィット結果。電離率の比例係数 β と平衡電子数 n_{e*} の値によって赤線 ($\beta = 2.07, n_{e*} = 3 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$) と青線 ($\beta = 0.85, n_{e*} = 7.5 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$) が記述されている。(右) G188.95+0.89 における class II メタノールメーザーの観測結果 (黒点) と CWB モデルによるフィット結果 (赤線)。なお、右下 $V_{\text{lsr}} = 11.405 \text{km/s}$ の図は周期変動成分へのフィットではなく水素原子の再結合によって電子密度が減少している H II 領域があるとされるメーザー spot へのモデルフィットの図である。(van der Walt 2011 より引用)

(2009) で使用された、球対称降着モデルを前提として使用する。Inayoshi et al.(2013) 内で、Hosokawa and Omukai (2009) から引用した、降着率ごとの原始星進化をプロットした図を記載する (図 2.4)。

Inayoshi et al. (2013) では、質量降着率 $\dot{M} \geq 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 程度で、ZAMS 星になる前段階、恒星半径が最大となる際に原始星で脈動不安定が発生すると述べられている。この原始星の脈動が、原始星の光度を変化させることにより、原始星周りの円盤上のダスト温度を上昇させる。これにより、6.7 GHz メタノールメーザーの放射強度が周期的に変化する。

また、Inayoshi et al. (2013) の中では 脈動周期 P と恒星光度 L の関係の導出を行っている (図 2.5、式 2.1)。

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 4.62 + 0.98 \log \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right) \quad (2.1)$$

この関係は、脈動変光星として知られるセファイド変光星の脈動周期と光度の関係を示す関係と類似している。また、この関係を用いて、質量 M_* 、半径 R_* 、質量降着率 $\dot{M}_*$ との関係も導出している (図 2.6、式 2.2 から式 2.4)。

$$M_* = 17.5 M_{\odot} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.30} \quad (2.2)$$

$$R_* = 350 R_{\odot} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.62} \quad (2.3)$$

$$\dot{M}_* = 3.1 \times 10^{-3} M_{\odot} \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right)^{0.73} \quad (2.4)$$

2.1.3 周期的質量降着

周期的質量降着モデルは、Araya et al. (2010) によって提唱された 6.7 GHz メタノールメーザーの周期変動メカニズムのモデルである。大質量連星系において、円盤中の物質が周期的に中心星に降着することにより、ダストが加熱され赤外線放射が発生する。これによりメーザーが励起され、強度が上昇すると述べられている。このモデルを適用することで、

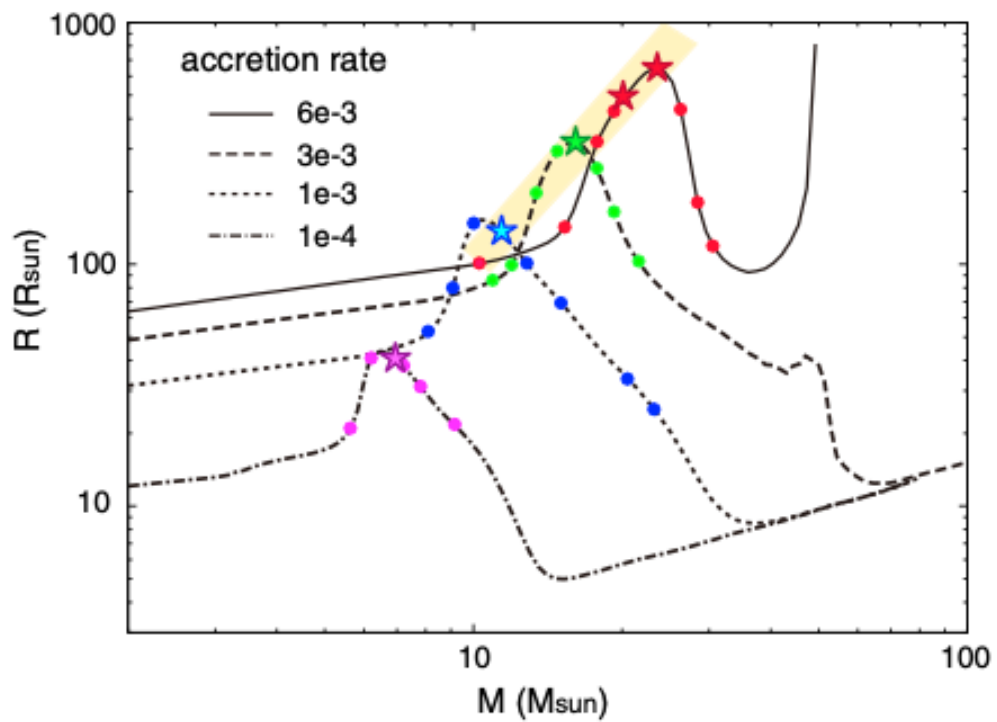


図 2.4: 質量降着率ごとの原始星進化。黄色の帯は脈動不安定帯である。(Inayoshi et al. 2013 より引用)

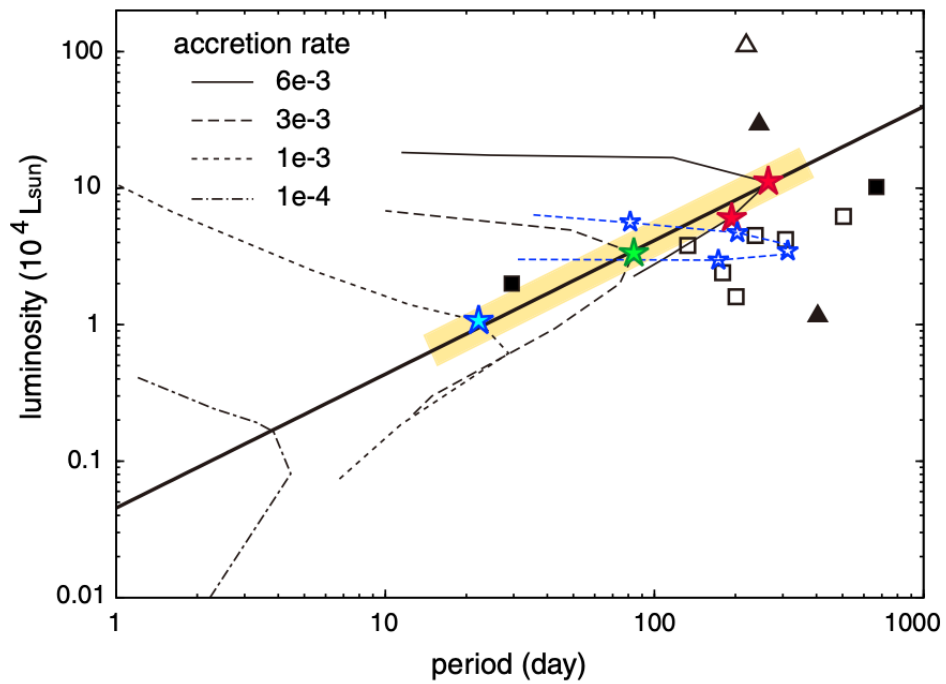


図 2.5: 脈動周期と光度の関係。黄色の帯は脈動不安定帯。(Inayoshi et al. 2013 より引用)

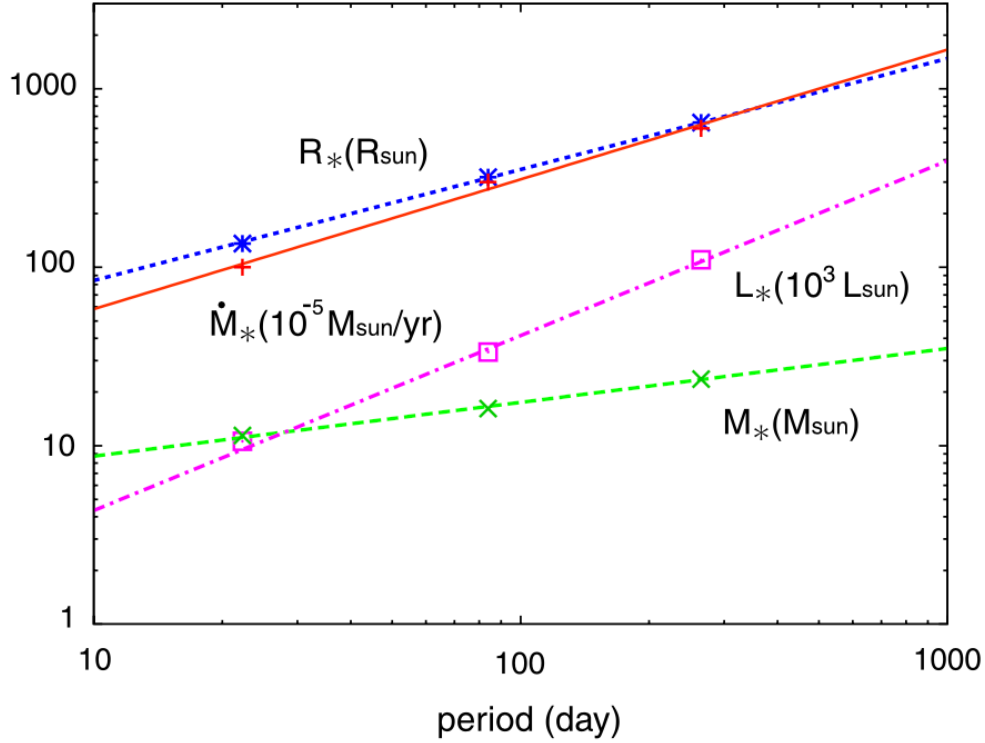


図 2.6: 脈動周期と質量、半径、質量降着率の関係 (Inayoshi et al. 2013 より引用)

大質量原始星領域 IRAS 18566+0408 (G37.55+0.20) に見られる 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動の周期を説明できると述べられている。このモデルでは、連星の離心率によってメーザー放射の形状や持続タイムスケールも説明できるとされる。

2.1.4 Spiral shock

これは、Parfenov and Sobolev (2014) で説明されている class II メタノールメーザーの周期変動機構モデルである。本モデルでは、円盤中心部で回転する bow shock が存在する大質量連星系周囲の円盤を仮定している。また、円盤上のガスは熱的平衡かつ電離平衡であると仮定されている。さらに、モデルを考慮する上で以下の仮定を置いている。

- 円盤は edge-on (真横から見ている) 状態である。
- 物理的条件は視線方向で不変である。

円盤内部のダストと bow shock が視線方向で重なる際にその領域内でガスの柱密度が最大となり、メーザー放射強度の急激な上昇が発生する。この際に回転する bow shock に伴い柱密度は急激に上昇し、緩やかに減少するというパターンを示す。このモデルを適用すると、van der Walt (2011) の G9.62+0.20E などに見られる Class II メタノールメーザーの周期的な強度変動 (図 2.3 左) を説明できると述べられている。なお、この際のメーザーの周期は、連星の軌道周期と一致する。また、Spiral shock モデルでは HII 領域の有無を問わないため、より若い進化段階の天体で見られる周期変動を説明可能である。

2.1.5 食連星系モデル

食連星系モデルは、Maswanganye et al. (2015) によって提唱されたモデルである。このモデルでは、HII 領域を持つ連星系において、伴星が主星からの電離放射を遮断することで、HII 領域のサイズが小さくなる、あるいは電離度が下がることで、free-free 放射の強度が減少するというものである。このモデルを適用するためには、伴星は低質量星である必要がある。

2.2 高い空間分解能観測の必要性について

前節で紹介したモデルは、メーザーの周期変動パターンの違い及びメーザー spot の空間分布の情報から分類が可能である。食連星系モデルと周期降着モデルは周期変動のパターンのみで説明可能である。食連星系モデルは、sin 関数で近似できる変動パターンであり（連続的）、周期降着モデルは間欠的な変動パターンを示す。しかし、残りの 3 モデルはメーザー spot の空間分布（HII 領域の有無、すべてのメーザー spot が強度変動を示すかどうか）の情報も含めて分類をする必要がある（e.g. 森泉 2023）。表 2.1 に Colliding wind binary (CWB)、原始星脈動、spiral shock の 3 モデルの分類を示す。

表 2.1: 周期変動モデルの分類。*1：複数の大質量星が同一の視野に存在する場合、*2：メーザー spot が同一箇所に固まっている配置の場合、*3：強度変動しない spot と十分に離れている場合など、特殊な状況を仮定する必要がある。

		HII 領域	全 spot で強度変動	一部 spot で強度変動
周期変動	連続的	有	原始星脈動	CWB
		無	原始星脈動	原始星脈動 (* 1)
	間欠的	有	CWB (* 2)	CWB (* 3)
		無	spiral shock (* 2)	spiral shock

表 2.1 より、周期変動モデルの検証を行うためには、メーザーの空間分布及びその変動の情報が不可欠であり、高空間分解能観測である干渉計観測が必要である。ただし、6.7 GHz メタノールメーザーが見られる大質量星形成領域は地球から数 kpc 程度と遠く離れているため、より空間分解能の高い VLBI 観測による検証が有用である。例えば、Fujisawa et al. (2014) によって elliptical に分類された 025.82–00.1(図 1.2) において、6.7 GHz メタノールメーザー spot の中心星からの半径(離角)は、75 - 300 [mas] である。したがって、このメーザー spot の位置を空間的に分解して求めるためには、この数倍から数十倍程度以上高い空間分解能 (10 mas - 30 mas) による観測が必要である。代表的な結合型干渉計である VLA の最大基線長は 21 km であり、その空間分解能は 6.7 GHz において ~ 440 mas である。したがって、結合型干渉計ではメタノールメーザー spot を空間的に分解して観測することはできず、VLBI 観測が必須である。

第3章 研究目的

本研究の目的は、以下の2点である。

- 単一鏡観測によって、6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動が確認されている天体に対して複数回 (最低でも周期変動の増光期と静穏期の2回) の VLBI 観測を行い、その空間分布及びメーザー spot の強度の変化を調査する。これにより、周期変動メカニズムを解明する。
- 過去に 6.7 GHz メタノールメーザーで VLBI 観測が行われていない天体に対して観測を行うことにより、空間分布のデータを取得する。これにより、突発的な強度変動が起きた際に本観測のデータを突発変動前の空間分布として用い、前後の強度分布を比較することが可能となる。

3.1 観測天体の選定

本研究を行うにあたって、周期強度変動が確認されており、かつ 2024 年 12 月の時点で 6.7 GHz メタノールメーザーを対象とした VLBI 観測がされていない天体を選出した。観測天体は、茨城大学でモニター観測を行っている 474 天体の中から、茨城大学の観測で 3 Jy 以上の強度で検出されていること、周期強度変動が確認されていること、過去に 6.7 GHz メタノールメーザーで VLBI 観測が実施されていないことを条件に選定した。選定にはモニター観測の結果以外に、Maser Data Base (URL: <https://maserdb.net>) と Tanabe et al. (in prep) を用いた。その結果を表 3.1 に記載する。なお、以降天体名を記載する際は簡略化のために天体 code を用いる。赤経、赤緯は茨城大学のモニター観測カタログを参照した。周期変動速度成分は G78.12+3 は Szymczak et al. (2024) を、G45.80-0 は Olech et al. (2022) を、G108.7-0 は Olech et al. (2019) を、残りの天体は Tanabe et al. (in prep) の情報を参照した。

表 3.1: 観測天体一覧

天体名	天体 code	赤経, 赤緯	周期 [d]	周期変動速度成分 [km/s]
G11.936-0.616	G11.93-0	18:14:0.89, -18:53:26.60	782	39.09
G78.122+3.633	G78.12+3	20:14:20.04, 41:13:33.39	2520	-8.34, -7.68, -7.02, -6.63, -6.10, -5.57, -4.96
G353.273+0.641	G353.2+0	17:26:1.59, -34:15:14.9	310	-6.27, -5.46, -4.48
G45.804-0.356	G45.80-0	19:16:31.08, 11:16:12.01	417	59.94, 69.29
G19.701-0.267	G19.70-0	18:27:55.52, -11:52:40.30	995	42.52, 42.83, 43.75
G121.298+0.659	G121.2+0	00:36:47.36, 63:29:02.18	614	-27.60, -27.10, -22.54
G108.759-0.952	G108.7-0	22:58:40.30, 58:46:05.00	163	-56.00, -45.71
G94.603-1.796	G94.58-1	21:39:58.26, 50:14:20.96	186	-43.66, -42.95, -40.96

3.2 先行研究

本研究のデータを比較するための先行研究について記載する。新規 VLBI データの取得が目的である関係上、過去に VLBI 観測が行われていない。そこで、先行研究は過去の干渉計観測によるメーザー spot の分布を比較対象として用いた。天体ごとの振り分けは表 3.2 に示す。また、これらの論文以外に、スペクトルの比較を行うために茨城大学のモニター観測結果も用いた。

表 3.2: 先行研究と記載されている天体

Reference	天体
Hu et al. 2016	11.93-0, G78.12+3, G45.80-0, G19.70-0, G121.2+0, G108.7-0, G94.58-1
Motogi et al. 2017	G353.2+0

3.2.1 Hu et al. (2016)

Hu et al. (2016) は、VLA (Very large array) を用いて 6.7 GHz メタノールメーザーと UC (Ultra Compact) HII 領域の関係を調査するために 372 天体で 6.7 GHz メタノールメーザーと連続波の観測を行っている。本研究で観測を行った天体のうち表 3.2 にある通り、7/8 天体は Hu et al. (2016) を先行研究として参照する。また、Hu et al. (2016) においても本研究同様にメーザーのデータに関しては AIPS を用いて calibration を実行している。観測の結果、VLA の 6.7 GHz メタノールメーザーのスペクトル、メーザー spot の位置、連続波イメージとメーザー spot の関連が結果として得られている。その一例として本観測対象天体の一つである 11.93-0 の観測結果を記載する (図 3.1)。この論文のデータは全天体分がオンライン上で公開されている。本研究のために、Maser DB 上に公開されていた Hu et al. (2016) のデータを引用した。

3.2.2 Motogi et al. (2017)

Motogi et al. (2017) では、大質量星形成領域 G353.273+0.641 に対して、45 GHz の連続波イメージと、6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布を取得している。前者は Jansky Very Large Array を、後者は ATCA (Australia Telescope Compact Array) を用いて観測が行われている。Motogi et al. (2017) による観測では、6.7 GHz メタノールメーザーの分布は非軸対称な渦巻き状の分布をしていることが報告されている (図 3.2 右図)。この分布は、中心への降着流を示している可能性があることが述べられている。

3.2.3 結合型干渉計と VLBI で得られる物理量に関する注釈

本観測に用いた国内 VLBI 観測網の空間分解能は ~ 4.0 mas 程度である。その一方、Hu et al. (2016) で使用された VLA の空間分解能は ~ 440 mas であり、Motogi et al. (2017) で使用された ATCA の空間分解能は ~ 1500 mas である。このように、結合型干渉計の空間分解能は、VLBI よりも悪いが、一般的に VLBI よりも感度が高いため、メーザー spot の位置を非常に正確に求めることが可能である。メーザー spot の位置精度は [ビームサイズの

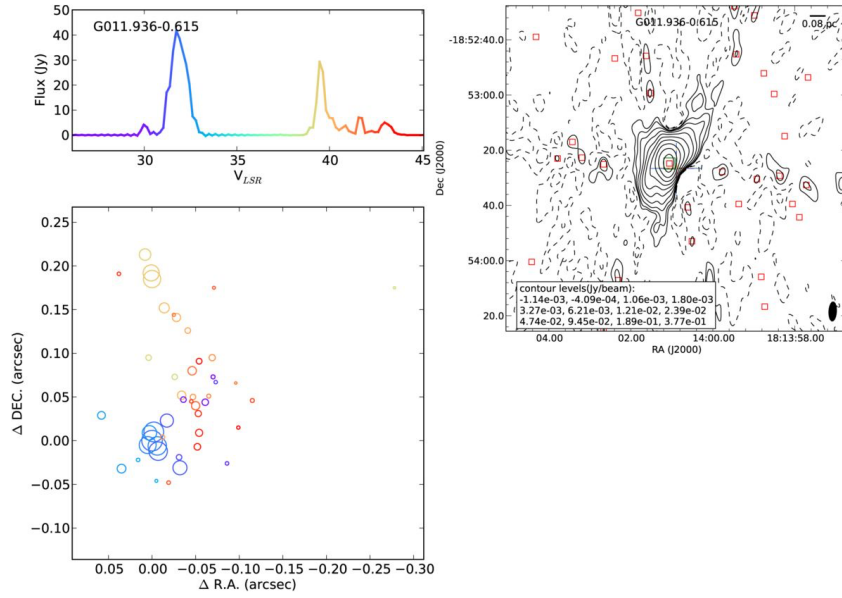


図 3.1: G11.93-0 のスペクトル、spot map、連続波とメーザー spot の関連（等高線が連続波、色付きの十字がメーザー spot である。）。(Hu et al. 2016 より引用)

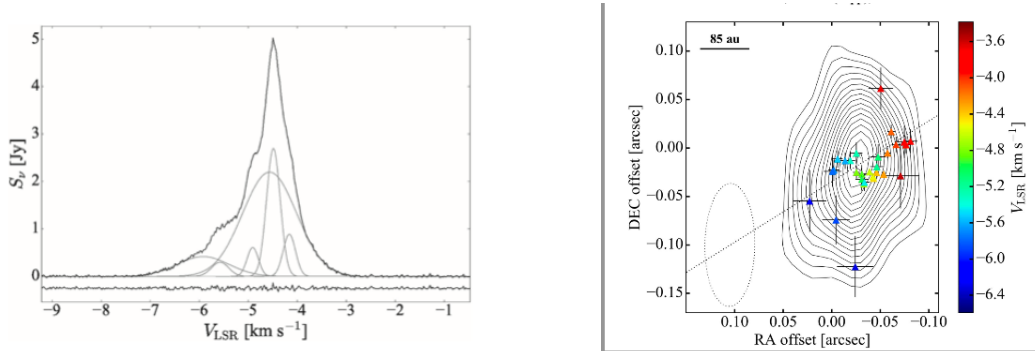


図 3.2: ATCA による G353.273+0.641 スペクトル（左）とメーザー spot map（右）。左図のスペクトルは太線であり、細線は 6 成分のガウスフィットの結果が記載されている。右図の等高線は J-VLA による連続波の強度分布を等高線を表している。(Motogi et al. 2017 から引用)

半値幅/[S/N 比] で表せる。先行研究においてメーザー spot の誤差は ~ 1 mas から ~ 300 mas である。

しかし、ビームサイズ内に多数のメーザー spot が含まれ、それらの位置・サイズ・フラックスを空間分解能よりも半値幅の小さい 2 次元楕円形状のガウス関数の重ね合わせで fit することで求めているため、不定性が高い。従って、VLBI 観測を行うことで、結合型干渉計と比較して、メーザー spot の peak フラックス、サイズ、全フラックスを正確に求めることが可能である。本研究の最終目的である、スポットごとの全フラックスの時間変化を求めるためには、VLBI 観測が必要不可欠である。

第4章 観測概要

本観測の概要を、表 4.1 に記す。本観測は、2025 年 5 月 6 日から 5 月 31 日の期間に、合計 8 天体（表 3.1）を観測した。観測期間中の観測割り振りを表 4.2 に記す。

研究目的では、2 回以上の観測が必要ではあるが、観測対象として選定したメーザーの変動周期は 163 日から 2525 日であり、増光期と静穏期の 2 回 の観測を 1 シーズンで行うことは現実的ではない。そのため、2026 年 2 月 現在、各天体において 2 回目以降は未実施である。2026 年 3 月 以降、今後の観測を予定している。

表 4.1: 観測概要

観測局	VERA, 日立, 山口
観測周波数	6.664 – 6.672 [GHz]
観測期間	2025/05/06 - 05/31
観測偏波	LHCP
チャンネル数	8192 [ch]

表 4.2: 観測コードと天体に対する日付の割り振り

観測 code	Day (UT)	Source code	備考
u25126a	2025/05/06	G353.2+0	入来局 使用不可
u25141a	2025/05/21	G11.93–0	-
u25143a	2025/05/23	G19.70–0	-
u25144a	2025/05/24	G94.58–1, G108.7–0, G121.2+0	-
u25145a	2025/05/25	G45.80–0	-
u25151a	2025/05/31	G78.12+3	-

第5章 データ解析

観測データからスペクトルとメーザー spot の空間分布を取得するために、AIPS と Difmap を用いてデータの解析を行った。大まかな手順として、(1) データの確認及び不備データのフラグ、(2) calibration、(3) 空間分布取得の流れである。詳細は付録 A に記載した。

5.1 VERA 局の自己相関スペクトルに発生したスプリアス

図 5.1 は、u25126a における、ターゲット天体の自己相関スペクトルを、1 scan 分だけ切り出したものである。日立局、山口局と VERA 局（この観測では入来局は使用不可）では、放射の出ているチャンネルが異なることが確認できる。図 5.1 下部は、VERA 局で強い放射が確認された範囲（赤枠）と、日立局と山口局で強い放射が確認された範囲（紫枠）を拡大して局ごとに並べたものである。この図中の、日立局と山口局で確認されている 5000 チャンネル付近の放射は日立局のモニター観測結果よりメーザーの信号である可能性が高く、赤枠内に確認される放射は機器依存のスプリアスである可能性が高い。スプリアスはメーザーの放射に比べて数チャンネルから 10 チャンネル程度と線幅が細いという特徴がある。本研究では、茨城大学のモニター観測の結果から、明らかにスペクトル上でメーザー放射の形状と異なる信号をスプリアスと判断した。他のデータも同様に確認したところ、VERA 局において全ての観測で多数のスプリアスの混入が確認された。VERA 局で混入したスプリアスの特徴は以下の通りである。

- ・ (1) 2000 - 3000 チャンネルで発生している強度の高いスプリアス（例：図 5.1 下部左図）。
- ・ (2) 全帯域に渡って確認された強度の弱いスプリアス（例：図 5.1 下部右図の 5320-5340 チャンネルに見られるメーザー放射以外のもの）。

なお、図 5.1 下部の紫枠ではメーザーの信号周辺のみが拡大されているが、スプリアス自体は全チャンネルに渡って確認された。また、これらのスプリアスは、時間で発生チャンネルが数チャンネルずつ移動していた。その変化率は 10^{-4} ch/s 程度で正の方向にシフトしていることが導出されたが、発生しているスプリアスごとに変化率の値は異なった。数の多さと時間変化率のばらつきから、これらスプリアスを全てフラグすることは困難であると判断したため、本解析では (1) のスプリアスを可能な限りフラグし、残りはそのまま解析を進めたため、振幅の値は正確でない可能性がある。

茨城大学で過去に発生した事例と VERA 局による調査の結果、以下のことが検討された

- ・ スプリアスの時間変化はドップラー追尾に関連して発生している可能性
- ・ スプリアスが発生する要因は本観測では使用しなかったが、VERA 局の受信機室で電源が入っていた OCTAD と呼ばれるサンプラーである可能性

これらの調査を受けて、2025 年秋以降の観測では VERA 局で 6 GHz 帯の観測を実行する際には OCTAD の電源を切って運用することが決定した。

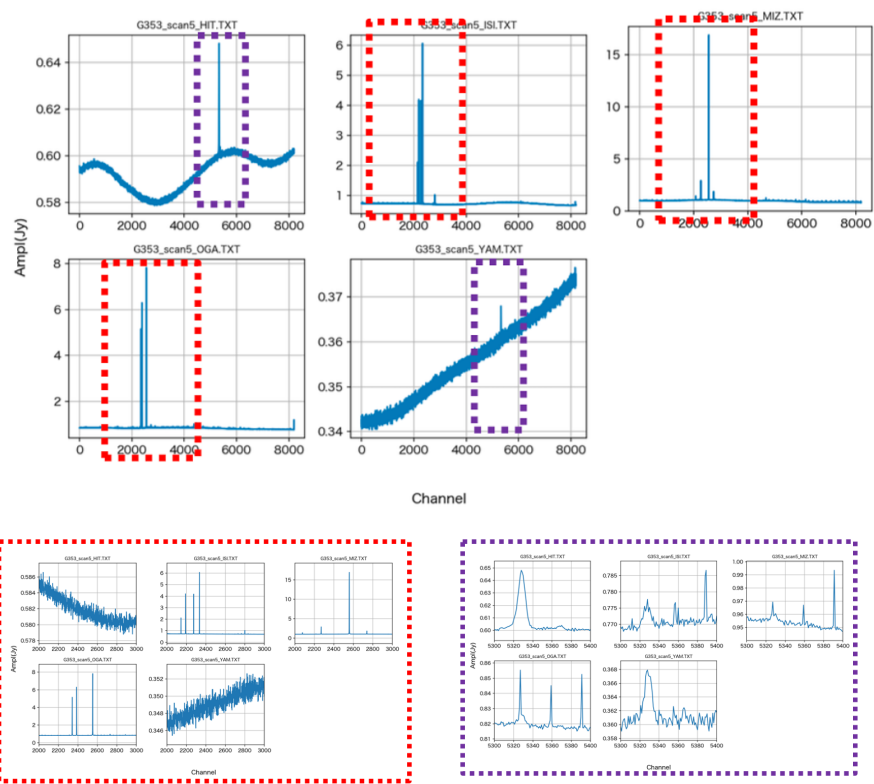


図 5.1: u25126a のターゲット天体 G353.2+0 の scan5 における自己相関スペクトル (上)。赤枠と紫枠の領域を拡大したもの (下)。

5.2 メーザー spot の空間分布取得

実際の観測データには、放射の空間分布に対して合成ビームのビームパターンが畳み込まれている。そのため、デコンボリューションと呼ばれる作業を行い、合成ビームの畳み込みを解除する必要がある。本研究では CLEAN と呼ばれるアルゴリズムを用いてデコンボリューションを行った (付録 A.3 参照)。

AIPS での calibration が終了した後、Difmap を用いて放射のピークチャンネルに CLEAN 及び self-calibration を実行し、その結果を AIPS を用いて calibration 後のデータに適用した。その後に 1 チャンネルずつ改めて CLEAN を行った。

本研究では、放射が無いチャンネルでの放射の RMS を 1σ とし、その値の 5 倍を閾値とした。本研究では、メーザー spot を以下のように定義した。イメージ中の各グリッドにおいて閾値以上の値を持つものを放射とした。さらに、ビームサイズよりも広い範囲に渡って放射が隣接して分布し、かつ速度方向に 3 チャンネルに渡って同じ位置に放射が見られるものをメーザー spot と定義した。

さらに、spot がビームサイズの 2 倍以上の大きさを持ち、複数のピークが見られる場合、複数 spot が重なっているものを、誤って大きな一つの maser spot であると認識してしまっている可能性があるため、以下の手順を用いて分離を行った。

- 集合の中のピークに合わせた重みをかけてガウスフィット
- フィット結果を元のデータから一旦引き、残差データを作成
- spot 内における残差データの中で、引いた spot の近傍で元のデータの中で明るさが閾値を超える集合を検出
- 検出した集合に対してガウスフィット

この動作の例を、図 5.2 に記載する。ただし、2 個のピークが隣接している場合や、2 個目の spot が 1 個目よりも非常に暗い場合には分離に失敗している。

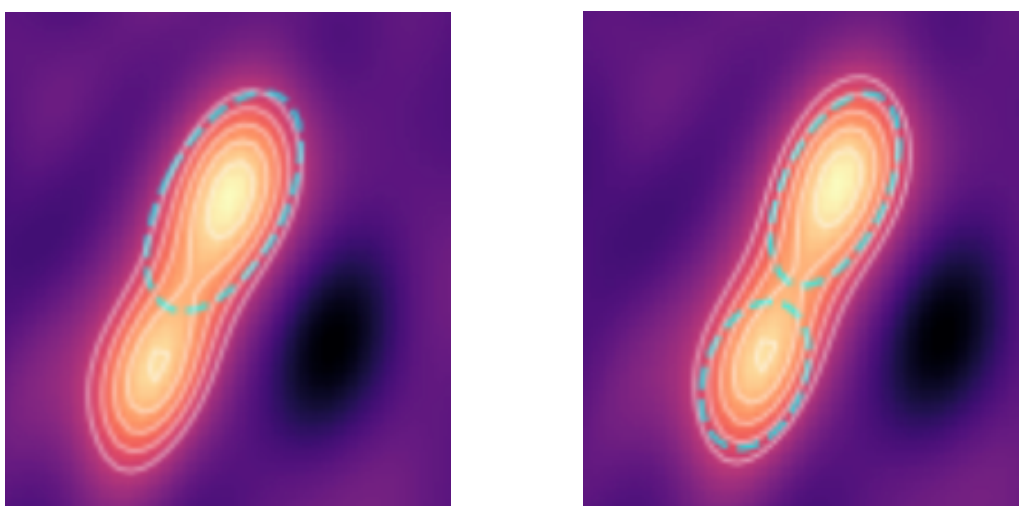


図 5.2: G11.93-0 におけるガウスフィットの比較。横軸と縦軸はそれぞれ赤経・赤緯の位相中心からの offset (ミリ秒角, mas) である。図の 0.44 Jy 以上の明るさを持つ領域に対して等高線を引き (白線)、その上の青い点線はフィットしたガウス関数の半値幅である。半値幅の値を maser spot の大きさとしている。(左) 1 回だけのガウスフィットの結果。右上の spot を見ると、上下の spot が融合してしまっており、ガウスフィットがうまく行っていない。(右) 2 回のガウスフィットの結果。上下の spot がそれぞれ別のものとして分離されている。

第6章 結果

6.1 スペクトル

ここでは、本観測によって初めて VLBI 観測で得られた calibration 後のスペクトルを記載する。本データは、AIPS で出力された相互相関スペクトルを python に読み込み、横軸を視線速度、縦軸を電波強度に設定したものである。また、これらのスペクトルは、全基線と全時間のデータが平均されたものである。なお、横軸の表示範囲は比較のため茨城大学のモニター観測で記録されている範囲と合わせている。

図 6.1 から図 6.8 に calibration 後の相互相関スペクトルを表示する。スペクトルはベースラインを差し引いたものであり、赤線は 3σ ノイズレベルである。ノイズレベルの値を閾値として検出・非検出の判定を行う。また、表示の順番は、観測が行われた日時順である(表 4.2 より)。これらの図を見ると、表 3.1 にある速度成分のうち、検出されていないものがあるが、これは次の章で考察する。

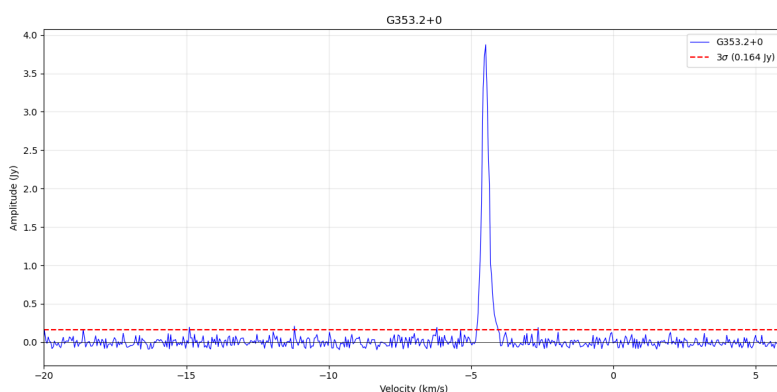


図 6.1: G353.2+0 における calibration 後の相互相関スペクトル

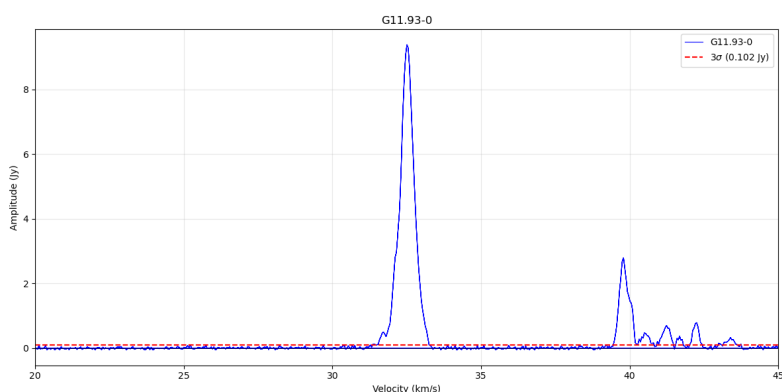


図 6.2: G11.93-0 における calibration 後の相互相関スペクトル

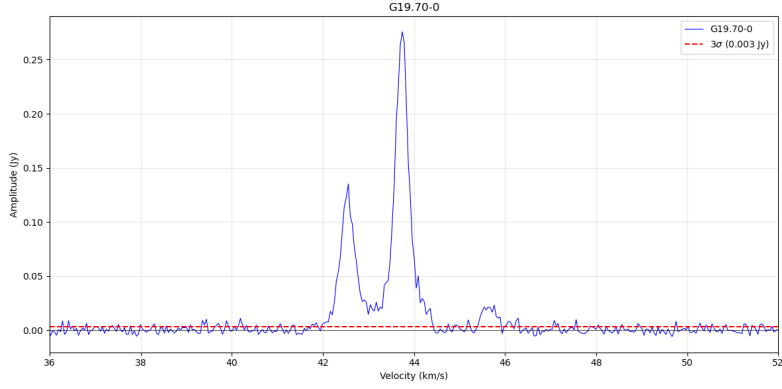


図 6.3: G19.70-0 における calibration 後の相互相関スペクトル

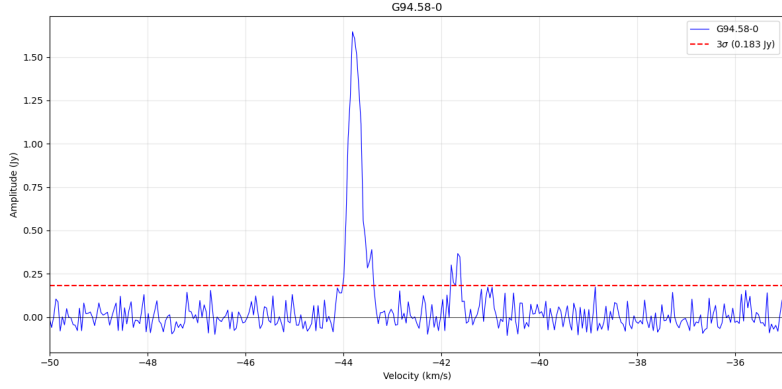


図 6.4: G94.58-1 における calibration 後の相互相関スペクトル

6.2 maser spot map

次に、G19.70-0 と G108.7-0 を除く 6 天体について、self-calibration を適用し、CLEAN を行った結果である maser spot map を記載する（図 6.9 から図 6.14）。前章の通りの解析を行い、速度成分ごとにメーザー spot の空間分布を色分けしてプロットした。また、図中のリングの大きさは、その点の光度ごとに対数を取りスケーリングを行っており、リングが大きいものほど明るい spot である。

G353.2+0、G11.93-0、G121.2+0 の 3 天体では、複数のメーザー spot による広がった分布を取得することに成功した。G94.58-1、G45.80-0、G78.12+3 の 3 天体では、原点付近のみ spot が検出された。また、G19.70-0 に関して、self-calibration を施した結果、サイドローブの影響を殆ど除去できなかったため、解析失敗とした。また、G108.7-0 は閾値を超える spot が検出できなかった。

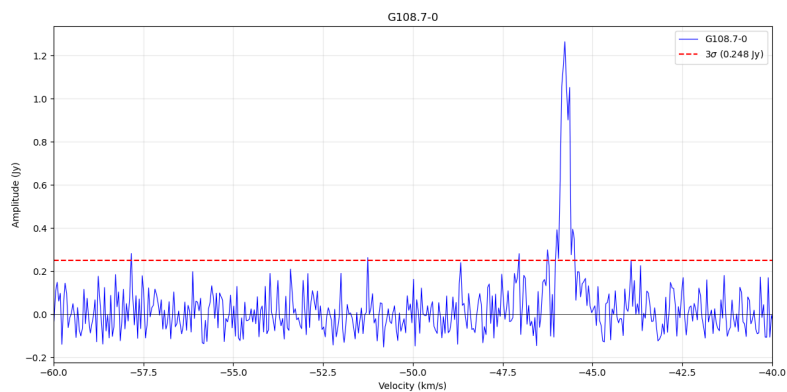


図 6.5: G108.7-0 における calibration 後の相互相関スペクトル

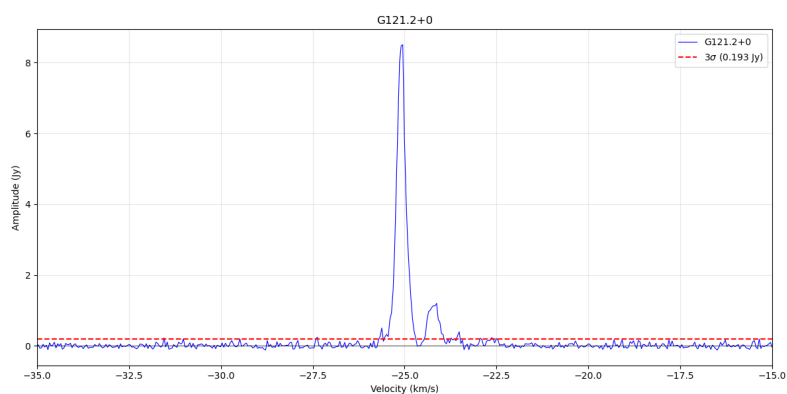


図 6.6: G121.2+0 における calibration 後の相互相関スペクトル

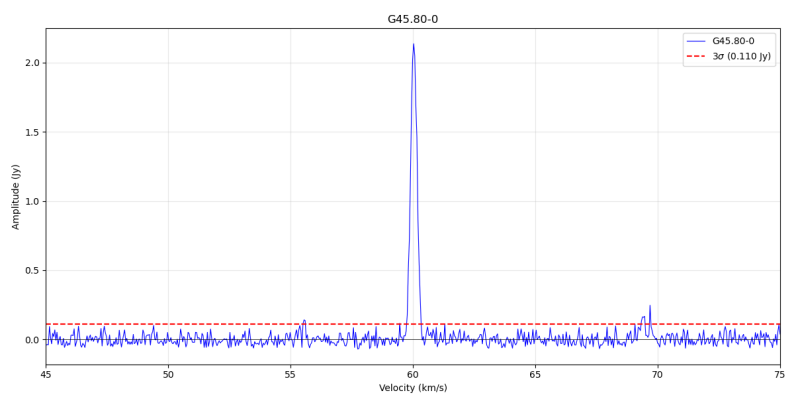


図 6.7: G45.80-0 における calibration 後の相互相関スペクトル

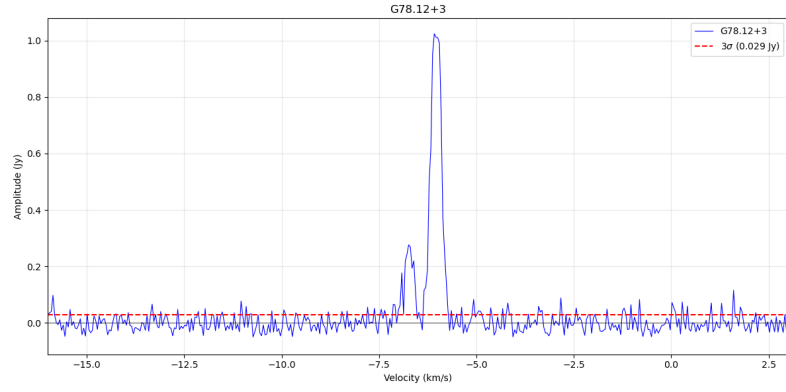


図 6.8: G78.12+3 における calibration 後の相互相関スペクトル

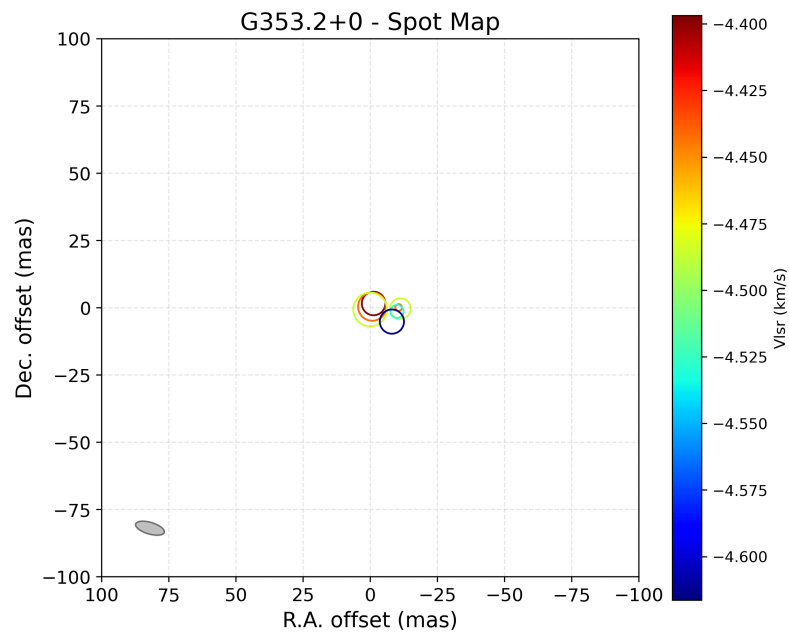


図 6.9: G353.2+0 のメーザー spot map

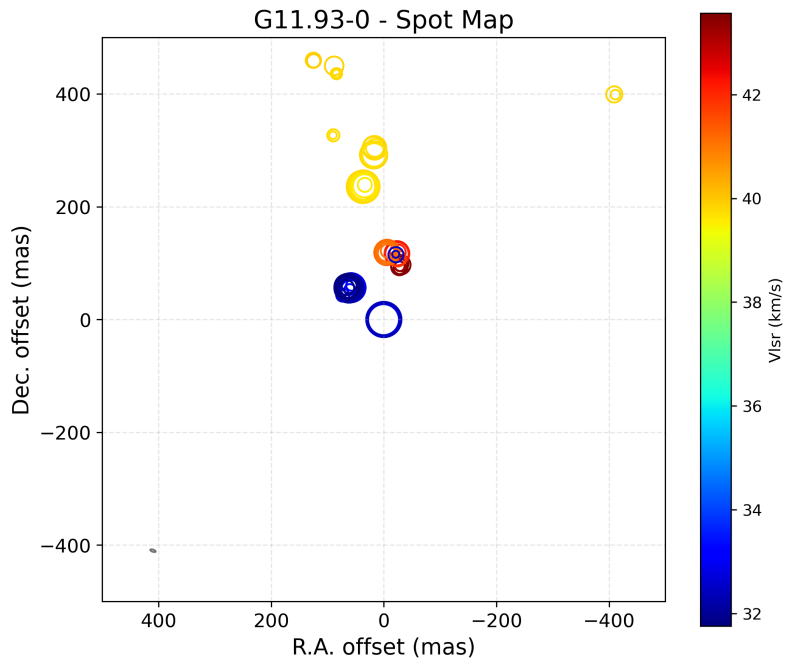


図 6.10: G11.93-0 のメーザー spot map

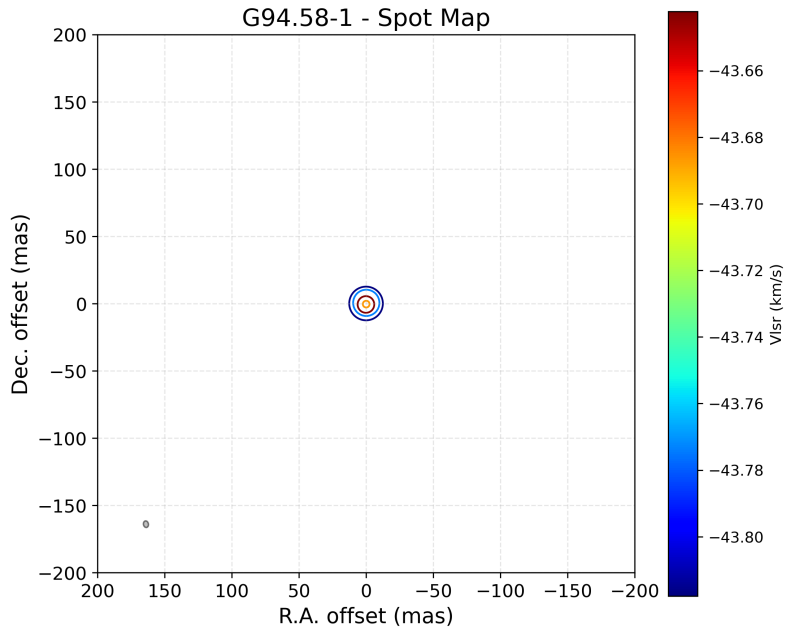


図 6.11: G94.58-1 のメーザー spot map

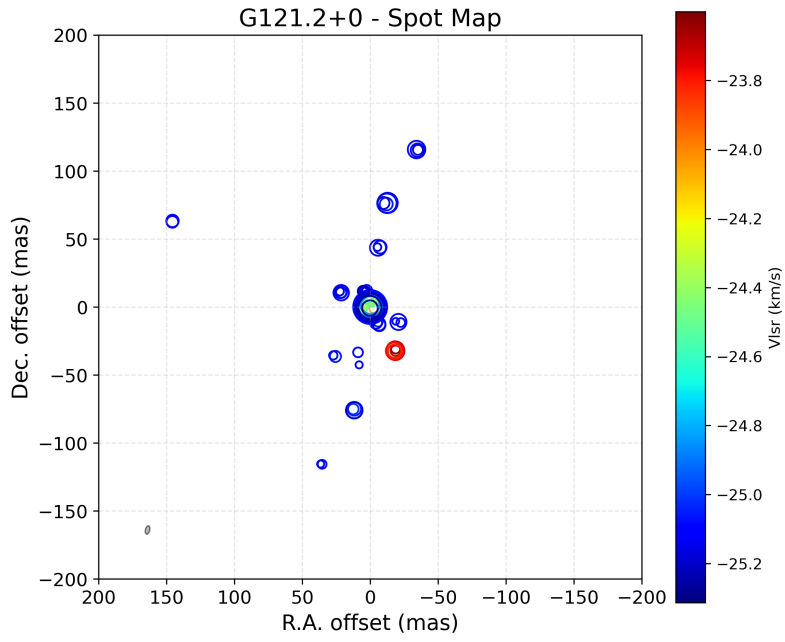


図 6.12: G121.2+0 のメーザー spot map

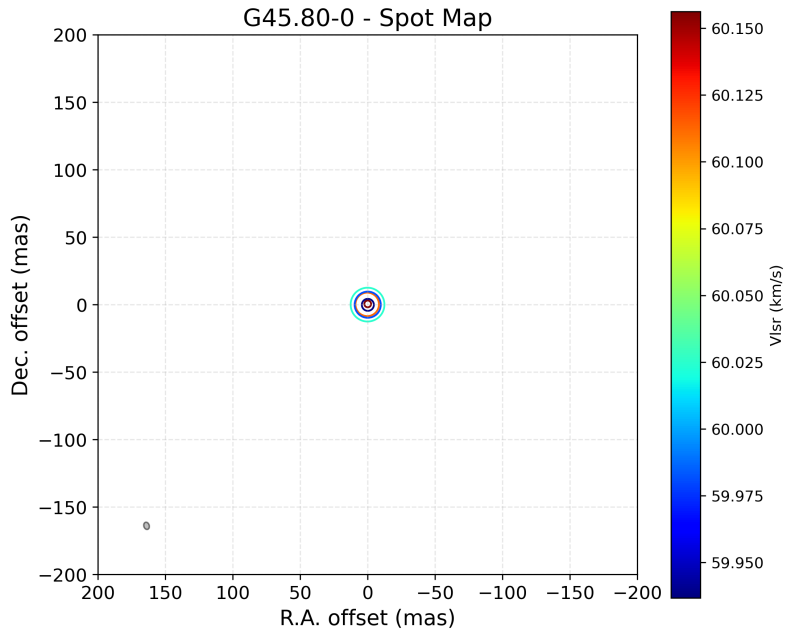


図 6.13: G45.80-0 のメーザー spot map

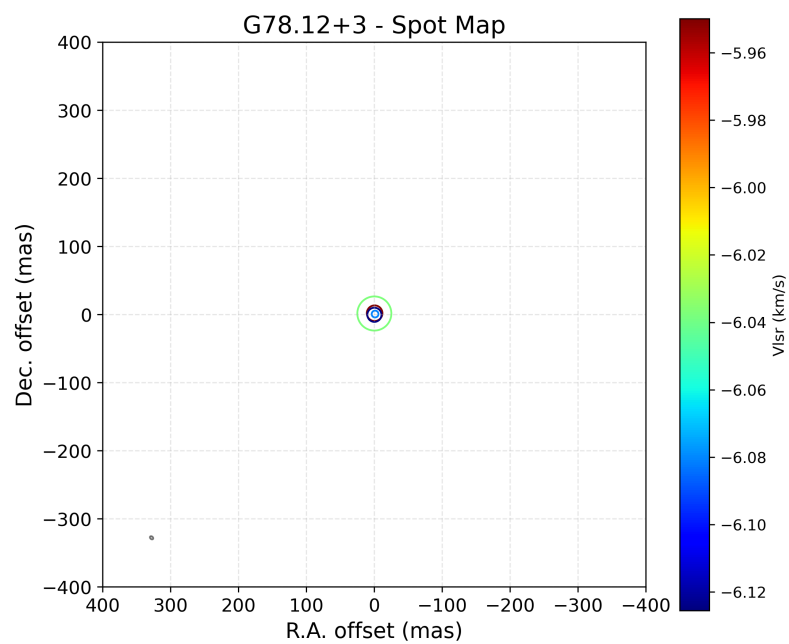


図 6.14: G78.12+3 のメーザー spot map

第7章 考察

7.1 先行研究との比較

ここでは、取得した結果を Hu et al. (2016)、Motogi et al. (2017) 及び日立 32 m 望遠鏡を用いた単一鏡観測である茨城大学のモニター観測と比較を行う。

7.1.1 スペクトルの比較

ここでは、本観測で得られたスペクトルについて評価を行う。図 7.1 から図 7.6 は、茨城大学のモニター観測結果と先行研究で得られた 3 つのスペクトルを比較したものである。先行研究で得られたスペクトルは、Hu et al. (2016) と Motogi et al. (2017) から引用した。また、茨城大学のモニター観測結果は、本観測日近傍の観測 2 回分のものがプロットされている。

最初に、茨城大学の観測、先行研究、本観測の観測機器の違いについて述べる。茨城大学の観測データは本観測でも使用された日立 32 m 電波望遠鏡を用いた単一鏡観測である。その一方で先行研究 2 つは結合型電波干渉計を用いている。単一鏡と干渉計の観測感度 (ノイズレベル) の比は、

$$\frac{S_\nu(\text{単一鏡})}{S_\nu(\text{干渉計})} = \alpha \sqrt{1 - \frac{1}{n}} \quad (7.1)$$

で表される。ここで S_ν はそれぞれの観測感度であり、 α は観測感度の低下ファクター、 n は素子数である。この式は干渉計の観測感度は通常単一鏡よりも低いことを示している。観測感度は素子数にのみ依存しているため、素子数の少ない VLBI 観測感度が結合型干渉計よりも低いことが考えらるが、素子数が同じ場合は感度は結合型干渉計と変わりがないことが予想できる。VLBI 観測も干渉計である以上原理的には単一鏡観測よりも感度が低いことが予想される。つまり、観測感度は茨城大学の単一鏡モニター観測及び先行研究と本観測の検出、非検出の差と関連がある。一方で式 (7.1) の周波数依存性は今回の観測対象とする数 MHz 程度では殆ど無いため、スペクトル形状の差を生じさせる原因にはなり得ない。

次に、VLBI の原理上、広がった領域では天体信号が分解 (resolve out) されてしまうため、総フラックスが低く観測されるという特徴について考慮する。干渉計、特に VLBI 観測において、天体が resolve out されるかどうかは

$$\theta_{\text{LAS}}[\text{mas}] \sim 2063 \frac{\lambda[\text{cm}]}{B_{\text{min}}[\text{km}]} \quad (7.2)$$

で判別可能である。 θ_{LAS} は最大の天体の角度スケール、 B_{min} は最小基線長である。本観測で 6.7 GHz メタノールメーザーの観測に使用した 6 局の最小基線長は水沢-日立基線の ~ 270 km である。観測波長 $\lambda \sim 4.48$ cm を代入すると、 $\theta_{\text{LAS}} \sim 34$ mas である。これ以上広がったメーザー spot は本観測の条件では分解されてしまい、検出できないか、強度が非常に弱く観測される。結合型干渉計は短基線を張るアンテナを含めることによってこの問題

を解決している。その一方で単一鏡観測ではこのような観測される強度の低減は発生しない。そのため観測結果の比較において VLBI 観測の強度が弱い場合には、広がったメーザー spot が分解されてしまったため総フラックスが低減して観測されていることが原因である可能性が考えられる。

観測結果比較

(1) **G353.2+0** 本観測の結果は、図 7.1 において茨城大学の結果とは大きな矛盾は見られない。その一方で、Motogi et al. (2017) に見られるメーザースペクトルの red-wing に当たる部分が見られない。この違いについて、以下の二つの可能性が挙げられる。(a) これらの成分は茨城大学の結果にも見られないため、Motogi et al. (2017) の観測期間から現在までの間に強度の変動が発生した可能性が考えられる。(b) 観測機器の違いと構造の広がりについても考える必要がある。つまり、日立 32 m アンテナではビームサイズよりも十分に小さい (つまり、beam filling factor が非常に小さくなる) ために spot が検出されず、VLBI では resolve out が発生して検出されず、かつ ATCA では beam filling factor が 1 に近く、かつ resolve out されない広がりを持つという条件を満たす spot が存在している可能性があると考えられる。

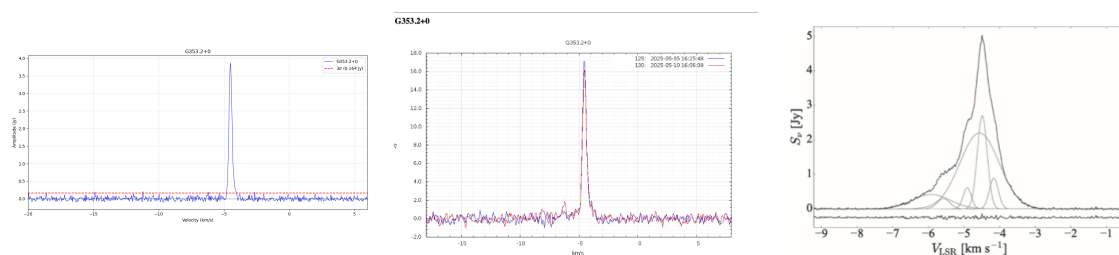


図 7.1: G353.2+0 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Motogi et al. (2017) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 5 日 (青線) と 5 月 10 日 (赤線) の結果がプロットされている。

(2) **G45.80-0** 今回の結果における G45.80-0 では、Hu et al. (2016)、茨城大学モニター観測結果に見られる ~ 62 km/s の成分が検出されていない ($\sim 1.2 \sigma$)。他の成分は総フラックスの低減は見られるが、検出自体はされており、Hu et al. (2016) 及び茨城大学モニター観測結果との矛盾は無いものと考えられる (図 7.2)。

次に、 ~ 62 km/s 成分の非検出について以下の可能性を検討する。(a) 観測終了時に配布される ANTAB データを確認したところ、水沢局において T_{sys} の値が ~ 12000 K となる時間が確認された。本観測データの解析において全時間のデータを平均して使用しているため、 T_{sys} の値が異常を示しているデータも平均されたことにより、電波強度に異常が生じてしまった可能性も考えられる。ただし、calibration を行う際にデータの $1/\text{rms}^2$ で重み付け平均を取っているため、この可能性は低いと考える。(b) 5 月 9 日から 16 日の間に、該当成分の放射が弱まった可能性は、茨城大学の 10 年以上のモニター観測において突発的に強度が減衰するような変動パターンが観測されていないことから、非常に低いと考えられる。(c) ~ 62 km/s 成分においても他成分の強度減衰と同様に、VLBI 観測 resolve out が発生したことで検出されなかったものであると考える。

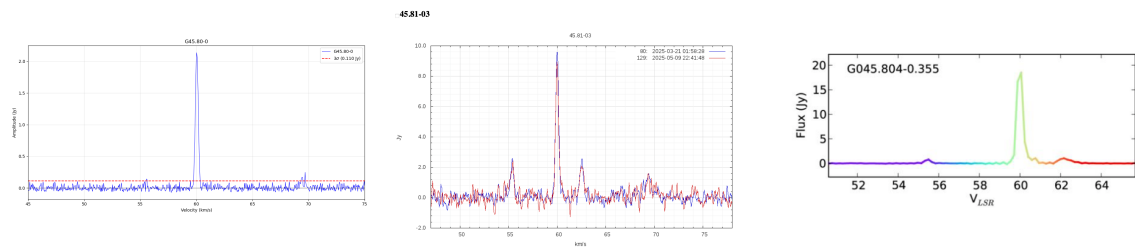


図 7.2: G45.80-0 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 16 日 (青線) と 5 月 9 日 (赤線) の結果がプロットされている。

(3) **G94.58-1** G94.58-1 では、茨城大学のモニター観測結果には検出されているが、本観測で検出されていない成分が存在する ($V_{\text{LSR}} = -42.95$ km/s など)。一方で flux の低さは存在するものの、Hu et al. (2016) の結果と検出されている成分に関しては大きく矛盾が無い (図 7.3)。そのため、結合型干渉計、VLBI とともに resolve out が起こる広がった放射領域が存在すると考えられる。Hu et al. (2016) において、観測中のアンテナ配置は C-配列であり、VLA の website (<https://science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/resolution>) によると、C-配列の最小基線長は 35.5 m であるため、resolve out 限界サイズは 6.7 GHz で ~ 260054 mas である。

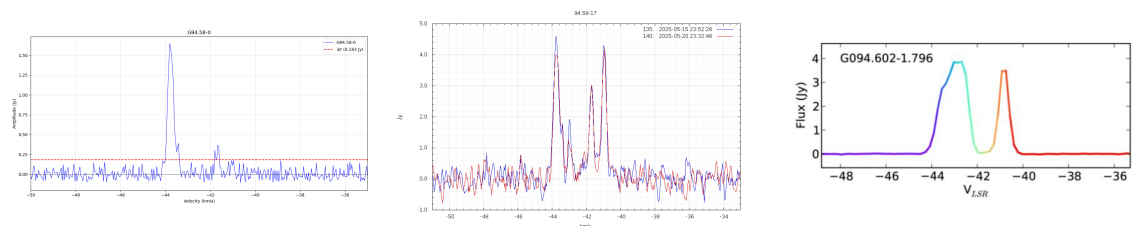


図 7.3: G94.58-1 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 15 日 (青線) と 5 月 20 日 (赤線) の結果がプロットされている。

(4) **G108.7-0** G108.7-0 の結果を比較する。茨城大学の結果と本観測の結果では Hu et al. (2016) で確認されている $V_{\text{LSR}} \sim -47.00$ には放射が確認できていない (図 7.4)。この天体も、G353.2 同様に、単一鏡では beam filling factor が小さすぎるために検出できず、VLBI では resolve out が発生したことにより結果の通りのスペクトルが検出されていると考えられる。

また、この天体は他天体と比較してベースラインノイズの強度が高い。原因として考えられる要因は、較正天体のクエーサーの位相が他天体に使用した較正天体と比較して揃っておらず、観測に失敗している可能性が考えられる。そのため、連続波を用いたフリンジフィッティングが失敗していることが起因して、位相が補正し切れていない可能性が考えられる。

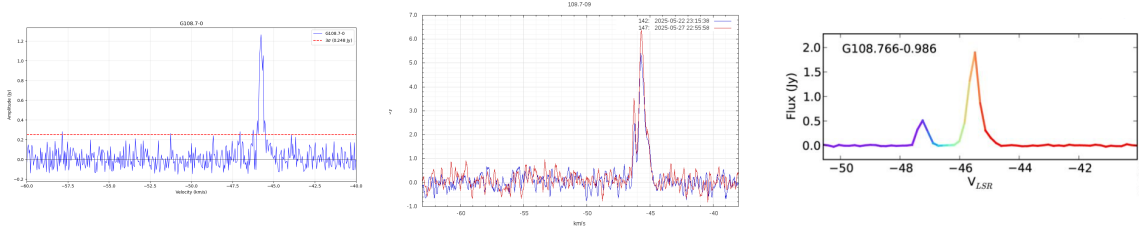


図 7.4: G108.7-0 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 22 日 (青線) と 5 月 27 日 (赤線) の結果がプロットされている。

(5) **G121.2+0** G121.2+0 においても同様に、検出できていない速度成分が確認された (図 7.5)。これも VLBI によって広がった放射が分解されたことに起因していると考えられる。しかし、Hu et al. (2016) と比較すると、ピーク強度 ($V_{\text{LSR}} = -25.00$ km/s) の低減はほぼ無いことが確認できる。そのため、この成分のみ結合型干渉計と VLBI の間で成分の resolve out が発生していないことが考えられる。

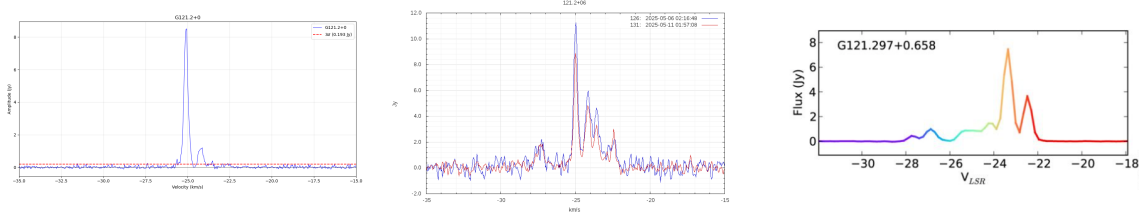


図 7.5: G121.2+0 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 6 日 (青線) と 5 月 11 日 (赤線) の結果がプロットされている。

(6) **G78.12+0** G78.12+0 では、茨城大学の結果で検出されている成分の殆どが検出されなかった (図 7.6)。Hu et al. (2016) の結果と比較すると、Hu et al. (2016) では $V_{\text{LSR}} \sim -6.1$ km/s をピークに持つ線幅の広い放射を示す一方で、本観測では、2 つの速度成分の放射に分解されていることが確認できる。他の天体同様のフラックスの低減も発生しているため、単一鏡観測、結合型干渉計とのスペクトルの異なりをどちらも干渉計観測による広がった天体の分解が起因していると説明ができると考えられる。

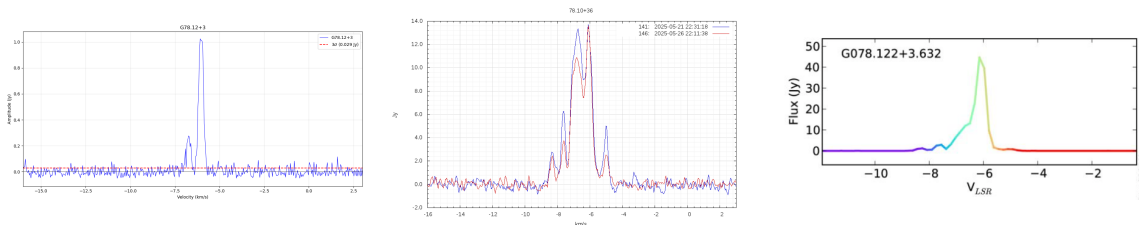


図 7.6: G78.12+3 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 21 日 (青線) と 5 月 26 日 (赤線) の結果がプロットされている。

(7) その他の天体 他の天体に関しては先行研究データとも茨城大学観測データとも速度成分の検出・非検出には矛盾は見られなかった（図 7.7、図 7.8）。しかし、全ての天体において検出された強度には差異が見られた。これらの差異は観測機器の違いにより広がった放射が分解されたことで総フラックスが低く観測されたことに起因すると考えられる。

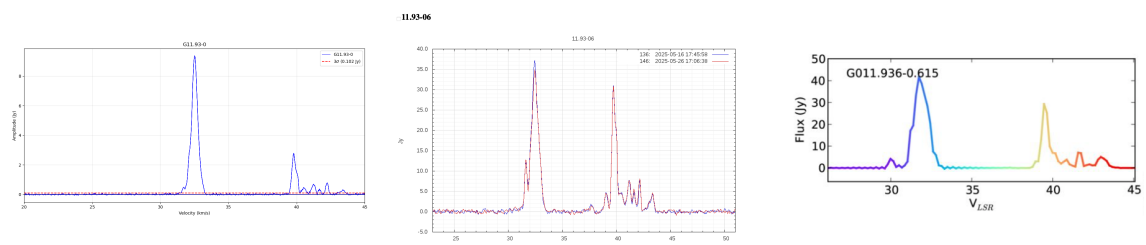


図 7.7: G11.93-0 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 5 月 16 日 (青線) と 5 月 26 日 (赤線) の結果がプロットされている。

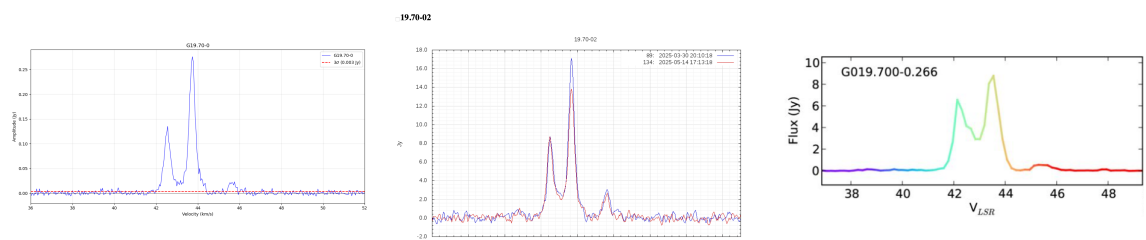


図 7.8: G19.70-0 における観測結果の比較。左は本観測結果、中央は茨城大学のモニター観測結果、右は Hu et al. (2016) の結果を示す。茨城大学の結果は 2025 年 3 月 21 日 (青線) と 5 月 14 日 (赤線) の結果がプロットされている。

スプリアスの影響について

ここまで述べてきた可能性を考慮した上で、スペクトル強度の違いには観測データに混入していたスプリアスが影響している可能性を考慮する必要がある。スプリアスは、天体起因では無い信号のことであり、本観測においては数チャンネル程度の幅を持ち、 $+ \sim 10^{-4}$ ch/s で発生チャンネルが移動していることが確認された。強度の高いスプリアスはフラグしたが、データ全体に広がっている強度の低いスプリアスに関してはフラグができなかった。その中にはメーザー信号と同じチャンネルに発生しているものもあったため、このスプリアスがスペクトル上での強度に異常を発生させている可能性がある。

放射強度の比較まとめ

本観測の観測結果と、先行研究及び茨城大学モニター観測の結果との放射強度の違いは、

- 観測装置の違いにより、本観測 (VLBI) では広がった放射領域が分解 (resolve out) されたことにより強度が低減した。
- スプリアスの影響で放射強度に異常が発生した
- 放射強度の 10 日スケールの急激な時間変化の影響を受けた

表 7.1: 周期変動を示す成分の放射の検出の有無

天体名	速度成分 [km/s]	増光/静穏	検出の有無
G353.2+0	-4.48	静穏	O
G11.93+0	39.09	増光	X
G19.70-0	42.52	静穏	O
G19.70-0	42.83	増光	O
G19.70-0	43.75	増光	O
G94.58-1	-43.66	増光	O
G94.58-1	-42.95	増光	X
G94.58-1	-40.96	増光	O
G108.7-0	-56.00	静穏	X
G108.7-0	-45.71	静穏	O
G121.1-0	-27.60	静穏	X
G121.1-0	-27.10	静穏	X
G121.1-0	-22.54	静穏	X
G45.80-0	59.94	静穏	O
G45.80-0	69.29	静穏	O
G78.12+3	-8.34	静穏	X
G78.12+3	-7.67	静穏	X
G78.12+3	-7.02	静穏	X
G78.12+3	-6.63	静穏	O
G78.12+3	-6.10	静穏	O
G78.12+3	-5.57	静穏	X
G78.12+3	-4.96	静穏	X

ことが考えられる。しかし、本観測の観測天体は、茨城大学のモニター観測で 10 日スケールの時間での急激な強度変化は報告されていないことから、本観測と茨城大学モニター観測の間には時間変化の影響が起因した可能性は非常に低いと考えられる。スプリアスの影響に関しては、2025 年秋以降の観測で VERA 局でスプリアスの対策を行うことから、今後の観測データと比較して検証する必要がある。また、本観測のすべてのデータで Hu et al. (2016) 及び Motogi et al. (2017) の結合型干渉計観測結果、茨城大学の単一鏡観測のデータと比較して強度の低減が発生しているため、VLBI 観測の原理上、広がった構造のメーザー放射を分解したことによる強度の低減が最も有力な原因であると考えられる。

各天体の周期変動成分について

次に、表 3.1 にある周期変動成分について比較を行う。表 7.1 に、天体ごとに周期変動速度成分と周期変動の増光期 or 静穏期 のどちらか、また本観測での検出の有無を記載する。表 7.1 の中で、周期変動が確認されている成分で増光期であるにも関わらず VLBI 観測で検出できていない成分については、今後の観測で周期変動成分の空間分布を VLBI 観測で取得し、分類を行うことはできない可能性が高いと考えられる。

7.1.2 Spot map の比較

次に、レーザー spot map について考察を行う。図 7.9 から 図 7.14 に、本観測の結果と先行研究の結果を重ねて表示する。図中の○が本観測の結果であり、×が先行結果をプロットしている。また、6 章同様にプロットの大きさは強度の対数に比例した大きさになっており、色は速度のカラーバーに対応したものになっている。また、本観測における空間分布は放射が最も明るい速度を位相中心とした相対位置である。そのため先行研究と比較を行う際に、以下の手順を行い位置を合わせた。

- 1) 本観測データの中から最も強度が強い spot とその速度成分を記録。
- 2) 先行研究データから、記録した速度成分と最も近い速度成分を選ぶ。
- 3) 選ばれた二つの速度成分データの中で、最も明るい spot 同士は同じ spot であると仮定し 2 つの spot が重なるように先行研究データの座標を移動。

観測結果の比較

(1) **G353.2+0** G353.2+0 では、Motogi et al. (2017) に見られる渦巻き状構造は見られなかった(図 7.9)。ただし、 $(\Delta RA, \Delta DEC) \sim (0, 0)$ に見られる spot は Motogi et al. (2017) に見られるものとほぼ一致している。そのため、前節で考察した resolve out の影響を受けて渦巻き状構造の一部のみが検出されたと考察する。

また、プロットされたレーザー spot は全て $V_{lsr} = -4.48$ km/s をピークに持つ周期変動が確認されている成分に含まれるものである。そのため、これらの spot が強度変動するかどうかを今後の観測で確認する必要がある。

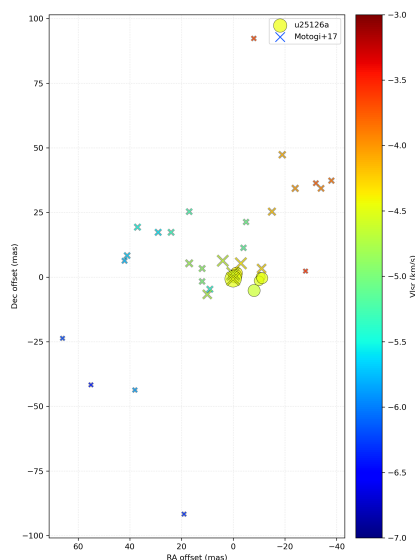


図 7.9: G353.2+0 の spot map 比較。本観測結果 (○) と Motogi et al. 2017 (×) の spot map を重ねたもの

(2) **G11.93-0** G11.93-0 の強度分布を先行研究の結果と比較する(図 7.10)。レーザー spot の分布に関しては先行研究と本観測の結果に矛盾は無いと考えられる。ただし全体的に spot が北側にズレていることが確認できる。 $V_{lsr} \sim 40.0$ km/s に見られる成分が特に顕著であ

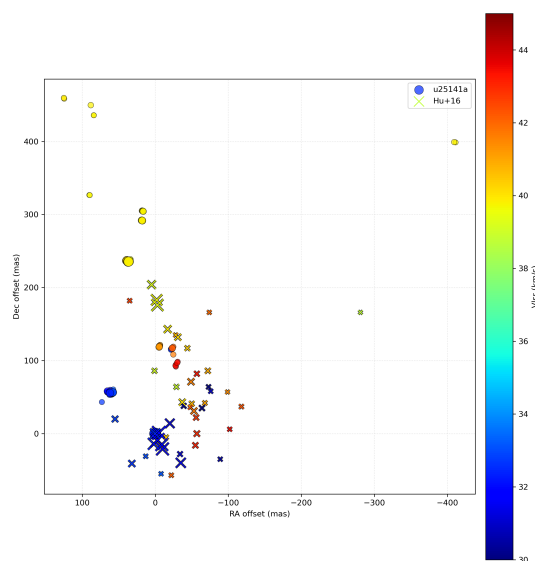


図 7.10: G11.93-0 の spot map 比較。本観測結果 (○) と Hu et al. 2016 (×) の spot map を重ねたもの

る。ただし、本観測において絶対位置の取得ができていないため、このズレがメーザー spot の移動であるかどうかを判断することはできない。また、本観測では周期変動が確認される成分の放射は増光期であるが検出されていないため (表 7.1)、周期変動による spot の強度変動を今後の観測で測定することは不可能であると考えられる。

(3) **G121.2+0** G121.2+0 の spot と Hu et al. (2016) の結果を比較する (図 7.11)。spot こそ確認できたものの、ピークとなる速度成分、大まかな配置等先行研究の結果とは異なる結果となった。原因は現在調査中であるが、機器の違いにより Hu et al. (2016) に見られた成分が分解されたこと及び、サイドローブの影響を完全に取り除けていない可能性が考えられる。そのため、今後このデータに対して再度 self-calibration を適用し、CLEAN を実行する。

(4) **G94.58-1, G78.12+3, G45.80-0 : 1 spot のみが検出された天体** G94.58-1、G78.12+3、G45.80-0 について、 $(\Delta RA, \Delta DEC) \sim (0, 0)$ に数個の spot が確認できたが、Hu et al. (2016) に見られる spot の分布を確認することができなかった (図 7.12、図 7.13、図 7.14)。他の天体同様に、resolve out の影響を受けたためであると考えられる。検出されている spot は周期変動成分が含まれており、該当成分は観測日において静穏期であったため、増光期の観測で強度の上昇が発生した場合に全 spot が同期して強度が変動する場合に、新規 spot が検出される可能性がある。

(5) **G108.7-0 : spot が検出できなかった天体** G108.7-0 は、本解析手法では閾値を超える maser spot を検出することができなかった。原因は他天体同様に resolve out が考えられる。

(6) **G19.70-0 : サイドローブの影響を殆ど取り除けなかった天体** 本解析において、G19.70-0 は他の天体同様に self-calibration を適用し、その後に CLEAN を実行したが、サイドローブの影響を除去できず、spot の検出ができなかった。本項では、その原因を考察する。まず考えられる要因として、Difmap での self-calibration の失敗が考えられる。中心に点源がある

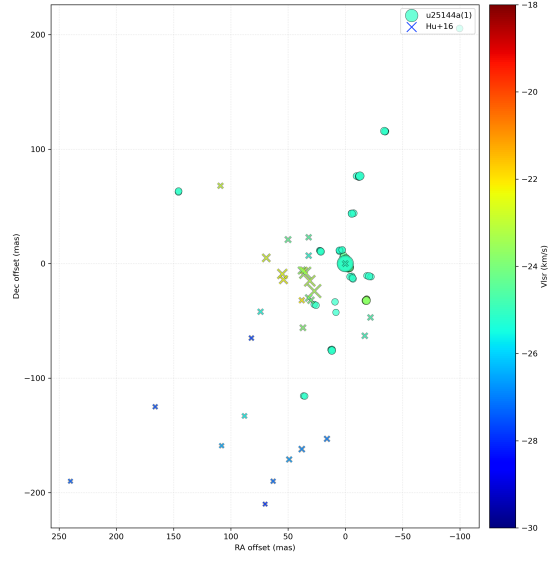


図 7.11: G121.2+0 の spot map 比較。本観測結果 (○) と Hu et al. 2016 (×) の spot map を重ねたもの

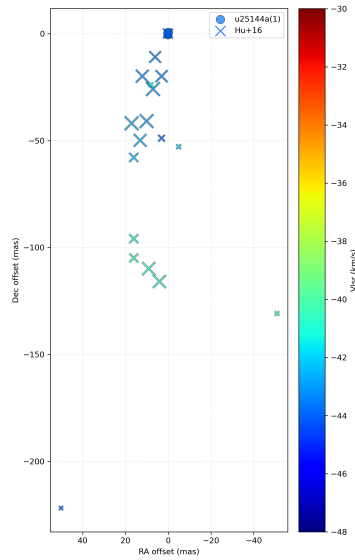


図 7.12: G94.58-1 の spot map 比較。本観測結果 (○) と Hu et al. 2016 (×) の spot map を重ねたもの

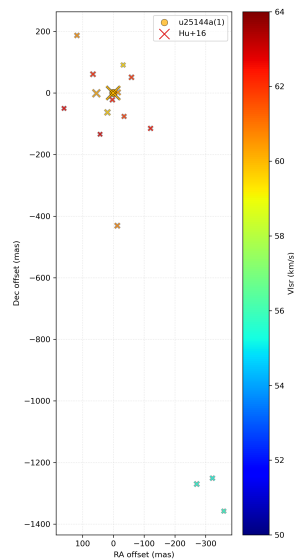


図 7.13: G45.80-0 の spot map 比較。本観測結果 (○) と Hu et al. 2016 (×) の spot map を重ねたもの

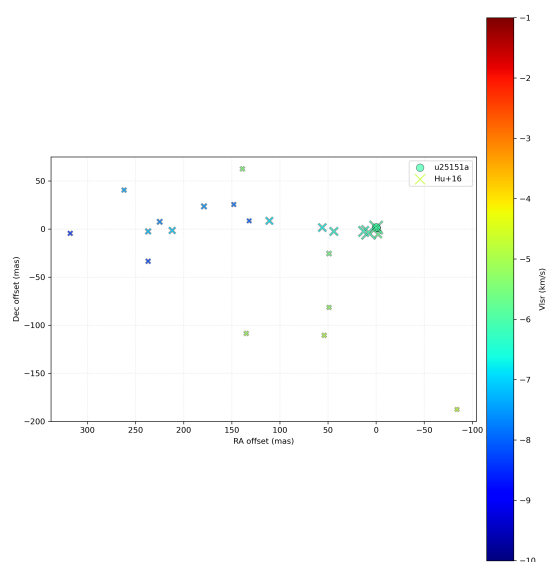


図 7.14: G78.12+3 の spot map 比較。本観測結果 (○) と Hu et al. 2016 (×) の spot map を重ねたもの

仮定でモデルを作成し、中心部に box を設置して CLEAN 及び位相、振幅の self-calibration を実行したが、結果として self-calibration 後のイメージにサイドローブと思われるものが混入している。振幅の補正をする際に、水沢局において他の局よりも高い補正值を出力していることから、水沢局のデータに何かしらの異常が発生している可能性があるが、詳細な原因は調査中である。

しかし、Difmap 上で水沢局のデータをフラグして self-calibration を実行した結果、self-calibration の結果には改善が見られたが、最終イメージにはほぼ変化が見られなかった。そのため、AIPS に保存されている calibration 済みのデータが原因である可能性も考えられる。結果の項で G19.70-0 のスペクトルのみ他の天体のスペクトルよりも振幅の値が小さいことが確認できる (図 6.3)。つまり、この天体のみ振幅低減の要因は resolve out のみが原因ではなく、データそのものに重大な問題がある状態で calibration をしてしまったことも起因して発生しており、そのデータを元に imaging を実行したためにサイドローブの影響が解除できなかった可能性があると考えられる。そのため、原因の調査を行い再解析を行う必要がある。

spot map 比較まとめ 本観測の対象天体 8 天体のうち、6 天体で spot を検出、1 天体で spot 非検出、1 天体でサイドローブの影響を除去できなかった。いずれの天体に関しても先行研究の結果と完全に spot の分布が一致したわけではなく、検出できていない spot が存在した。最低でも 1 つ以上の spot が検出されている天体に関しては、スペクトル同様に resolve out が原因であると考えられる。

また、全体的に self-calibration の解を適用する際に解が failed になるものが確認されている。AIPS の中で解決を試みたが、G108.7-0 では失敗した解が成功した解の数を上回ることがなかった。そのため、self-calibration 適用の失敗が原因である可能性も考えられる。そのため、今後解析を進める中で原因の調査と解決を行う。

また、G19.70-0 では、self-calibration 解を適用したところでイメージの改善が殆ど行われず、最終 CLEAN image からサイドローブの影響を除去できず、spot がどこなのかを判定することができなかった。これについては calibration 中に発生した問題が起因である可能性が考えられるため、今後再度解析を行う。

7.1.3 Spot の物理量について

次に、レーザー放射の分布を取得した天体の中から、先行研究結果との大きな矛盾が見られない、G353.2+0 と G11.93-0 について、レーザー spot の物理量を算出し、表 7.2 と表 7.3 にまとめる。求めた物理量は spot ごとの速度成分 V_{lsr} (km/s)、原点からのオフセット ΔRA (mas) ΔDec (mas)、最大フラックス I_{peak} (Jy/beam)、spot のサイズ θ_{maj} (mas) θ_{min} (mas)、spot の総フラックス S_{int} (Jy) である。

2 章で述べたとおり、結合型干渉計は分解能の低さが起因して、ピークフラックス、spot のサイズ、総フラックスの値に不定性が大きいという特徴が挙げられる。そのため、高い空間分解能を持つ VLBI で分解して観測されたことにより、結合型干渉計を用いた先行研究よりも正確な値を取得できた可能性が高いと考えられる。

表 7.2: G353.2+0 のメーザー spot の物理量

V_{lsr} (km/s)	ΔRA (mas)	ΔDec (mas)	I_{peak} (Jy/beam)	θ_{maj} (mas)	θ_{min} (mas)	S_{int} (Jy)
-4.40	-1.251	1.544	5.076	4.59	11.98	13.810
-4.44	-0.734	0.374	6.988	4.46	11.72	18.599
-4.44	-10.587	0.044	2.760	4.598	11.94	7.48
-4.49	0.035	-0.678	10.173	4.49	12.09	27.936
-4.49	-11.222	-0.383	4.487	4.407	12.279	12.51
-4.53	-9.982	-1.430	3.264	4.54	16.05	11.893
-4.62	-8.073	-5.189	5.517	4.43	11.77	14.743

表 7.3: G11.93-0 のメーザー spot の物理量

V_{lsr} (km/s)	ΔRA (mas)	ΔDec (mas)	I_{peak} (Jy/beam)	θ_{maj} (mas)	θ_{min} (mas)	S_{int} (Jy)
43.57	-28.316	91.685	1.165	4.509	10.659	2.76
43.53	-30.750	98.318	1.416	4.457	13.682	4.30
43.48	-27.750	93.038	1.669	4.492	11.189	4.15
43.44	-30.095	96.989	2.112	4.619	15.050	7.06
43.26	-28.083	94.305	1.001	4.871	11.316	2.52
42.21	-23.358	117.021	3.819	4.657	15.090	12.801
42.17	-23.340	116.549	3.208	4.511	15.742	11.217
42.08	-24.766	118.901	1.449	4.673	11.546	3.716
41.68	-24.791	108.228	1.479	13.250	4.542	1.857
41.38	-4.750	118.275	1.777	15.238	4.47	2.54
41.29	-5.832	119.747	3.502	15.351	4.63	5.20
41.24	-5.436	118.521	3.960	4.629	14.64	12.88
41.20	-5.791	119.632	3.842	4.525	15.30	13.05
41.16	-5.250	118.210	3.064	16.528	4.48	4.76
41.11	-5.674	118.725	3.031	4.685	15.60	10.50
41.07	-5.644	118.855	2.066	15.348	4.55	3.01
41.02	-6.750	121.484	1.336	4.529	15.59	4.63
40.15	39.877	236.535	5.762	14.626	4.71	8.28
40.10	39.000	237.288	7.453	4.863	15.42	25.53
40.06	38.885	236.688	7.745	15.190	4.88	11.98
40.02	38.193	236.287	7.480	4.995	15.27	25.37
39.97	37.925	235.283	7.799	5.018	14.83	25.69
39.93	37.412	235.428	9.252	4.834	14.53	29.86
39.93	124.613	458.527	1.234	5.004	13.203	3.619
39.88	37.258	235.235	10.979	4.773	14.671	35.78
39.88	18.695	291.915	4.332	5.384	9.11	8.77
39.88	18.027	305.082	2.520	4.860	7.40	4.14
39.88	125.085	459.584	1.408	4.899	12.932	4.044

Continued on next page

V_{lsr} (km/s)	ΔRA (mas)	ΔDec (mas)	I_{peak} (Jy/beam)	θ_{maj} (mas)	θ_{min} (mas)	S_{int} (Jy)
39.84	36.923	235.223	11.731	14.581	4.786	17.083
39.84	18.366	291.917	4.886	5.404	9.19	9.97
39.84	17.389	304.711	2.700	5.307	7.36	4.42
39.84	88.195	449.671	2.015	6.384	12.43	5.56
39.80	36.423	235.494	12.243	5.035	15.154	41.21
39.80	17.757	291.649	4.921	5.490	9.13	9.98
39.80	16.924	304.607	3.120	5.018	7.24	5.02
39.80	−409.318	399.074	1.400	5.826	14.873	4.626
39.80	84.113	435.811	1.083	11.093	5.62	1.41
39.75	36.127	235.340	10.599	5.054	15.005	35.33
39.75	17.457	291.420	4.103	9.041	5.83	5.32
39.75	16.434	304.264	3.227	5.213	7.37	5.28
39.75	89.642	326.482	1.171	5.418	11.98	3.12
39.75	−411.314	398.707	0.992	13.742	5.360	1.525
39.71	35.600	235.527	9.481	15.031	5.08	15.10
39.71	90.250	326.602	0.919	13.513	5.50	1.42
39.71	84.119	435.862	0.909	13.773	5.54	1.45
39.66	35.251	235.295	6.529	5.194	15.20	22.04
39.66	17.305	291.735	3.152	9.284	5.10	3.57
39.66	16.005	304.193	1.700	6.400	6.98	2.64
39.62	35.151	235.331	4.543	15.517	4.98	7.33
39.58	34.486	236.961	3.077	15.061	4.71	4.55
39.53	33.750	238.733	1.396	4.502	14.09	4.37
33.21	60.404	53.123	1.045	4.62	11.52	2.674
33.21	57.399	60.451	1.038	4.70	12.93	2.981
33.17	59.343	53.608	1.804	14.14	4.91	2.612
33.12	59.000	55.202	2.541	4.69	15.47	8.729
33.08	59.250	54.772	3.301	4.77	15.11	11.080
33.03	59.113	55.502	4.050	4.71	15.40	13.851
32.99	58.483	56.156	4.836	4.60	15.34	16.472
32.95	58.643	55.669	5.766	14.95	4.67	8.406
32.90	58.237	56.457	7.081	4.53	15.20	23.910
32.86	58.304	55.889	6.571	4.72	15.10	22.042
32.82	57.869	56.492	6.655	4.63	14.98	22.146
32.73	0.474	−0.361	8.709	4.65	12.16	23.514
32.68	0.398	−0.050	10.545	11.61	4.58	11.700
32.68	73.025	43.174	1.205	4.57	10.80	2.892
32.64	0.489	−0.350	12.508	4.78	11.73	32.590
32.60	0.200	−0.093	14.904	11.10	4.64	16.030
32.55	0.076	0.040	15.967	10.98	4.74	17.366
32.55	−21.551	114.832	1.414	5.097	12.542	3.939

Continued on next page

V_{lsr} (km/s)	ΔRA (mas)	ΔDec (mas)	I_{peak} (Jy/beam)	θ_{maj} (mas)	θ_{min} (mas)	S_{int} (Jy)
32.51	0.004	−0.064	17.902	10.77	4.70	18.906
32.51	−21.250	115.635	1.012	4.802	10.403	2.338
32.46	−0.169	−0.034	16.340	4.76	10.81	39.241
32.46	62.274	53.518	2.821	4.52	13.95	8.737
32.42	−0.329	0.105	13.971	4.86	10.96	34.015
32.38	−0.476	0.241	12.165	10.78	4.68	12.810
32.38	61.881	55.517	4.462	15.31	4.52	6.448
32.33	61.725	55.908	4.535	15.84	4.50	6.754
32.29	61.974	55.410	5.423	4.54	14.59	17.576
32.24	61.960	55.601	6.727	4.66	14.80	22.109
32.20	62.017	55.646	6.304	4.63	14.89	20.842
32.16	61.953	56.405	6.018	4.69	14.83	19.819
32.11	62.081	56.130	5.406	14.60	4.83	7.952
32.07	62.169	56.591	3.417	4.75	15.86	12.038
32.02	62.750	55.959	2.200	16.48	4.67	3.531
31.98	61.604	59.903	1.349	4.92	16.59	4.969
31.85	65.766	56.364	1.338	5.20	12.98	3.857
31.81	65.696	57.205	2.581	14.68	4.65	3.677
31.76	65.585	58.276	3.882	4.67	14.97	12.902

第8章 まとめ

本研究では、周期変動メカニズムの解明と新規 VLBI イメージ取得を目的とした 6.7 GHz メタノールメーザーの VLBI 観測を 2025 年 5 月に VERA 4 局、日立 32 m、山口 32 m の計 6 局のアンテナを用いて行った。取得したデータの解析は calibration に AIPS を、イメージングに AIPS と Difmap を使用した。メーザー spot の検出に関しては AIPS の結果を python に読み込み処理を行った。

メタノールメーザーの放射は全天体で検出ができたが、先行研究の結果及び茨城大学の単一鏡観測の結果では検出できている成分が一部検出できていないことが確認された。これは 3 つの観測機器の違いに起因するものであり、干渉計の原理上妥当なものであると考えられる。

また、スペクトルから、周期強度変動成分に対して先行研究及び茨城大学の観測結果と比較したところ、非検出の成分について、変動の増光期のものが確認できた。この成分では今後の観測において検出される可能性は低いと考えられる。

8 天体の観測のうち、6 天体で新規 VLBI イメージを取得することに成功した。これら 6 天体の spot map において、先行研究で確認されているメーザー spot のうち、検出されていないものが確認された。また、G108.7-0 では設定した閾値を超えるフラックス密度を持つ spot が確認できなかった。一方で、G19.70-0 では self-calibration を適用してもサイドロープの影響が除去できなかったため、再度解析をやり直す必要がある。さらに、G353.2+0 と G11.93-0 において、メーザー spot の位置、サイズ、フラックスを求めた。これらの値は、分解能の高さから過去に結合型干渉計を用いて取得されたデータよりも正確な値を示している可能性が高い。

本研究の成果は、過去に 6.7 GHz メタノールメーザーで VLBI 観測が行われたことの無い 8 天体に対して観測を行い 6 天体でイメージデータを取得したこと、複数回の観測を行い周期強度変動機構を解明する研究において 1 回目の観測を行い 2 天体でメーザー spot の分布確認に成功したこと、またその 2 天体において結合型干渉計の結果よりも正確な物理量を取得したことの 3 点である。

今後の展望として、解析に失敗した天体の再解析を行うことと、2 回目以降の観測を実行してメーザー周期強度変動モデルを分類することが挙げられる。また、得られたデータにはスプリアスが多数混入していたため、強度の値が正確でない可能性がある。2025 年秋以降のシーズンの観測ではスプリアス混入対策が行われるため、その結果と今回の結果を比較し、今回のデータにスプリアスがどれほどの影響を与えているのかの評価を行う必要があると考えられる。

謝辞

茨城大学の米倉覚則教授には指導教員として研究活動のご指導をいただいたことを感謝いたします。米倉様のご指導と詳細なご指摘がなければ、本論文を完成させることはできませんでした。研究の指導だけではなく、研究会への参加や観測所の当番などの経験を積ませていただいたことも並べて感謝いたします。

本観測では国立天文台 VERA 局を使用してデータの取得を行いました。職員の皆様には、観測データの観測並びに相関処理、スプリアスの調査等、多大なるご尽力に感謝いたします。

山口大学研究員の田辺義浩様には、6.7 GHz メタノールメーザー周期変動情報の提供ならびに日頃のアンテナ運用当番のご指導及び茨城大学のモニター観測データの取り扱いに関するご指導をいただきましたことお礼申し上げます。

福井工業大学の澤田佐藤聡子教授には、AIPS の基礎的な使用方法から、質問の対応まで解析研究の根幹にあたる部分でのサポートをいただきました。理解が及ばない私に対して詳細な手法を教えていただき、またメールで分かりにくい文章での質問にも真摯に対応をいただいたことに感謝を申し上げます。

武蔵野大学の樋口あや様には、東京電機大学に在学した学部時代にゼミや観測所への出張を通して観測天文学の研究を行うきっかけを与えていただきました。現在茨城大学で修士論文執筆に至って、改めて感謝を申し上げます。

2024 年から現在にかけて研究室に在籍していた皆様には、短い間ではありましたが充実した研究生活を送れたことは皆様との交流が不可欠であったと考えています。先輩方並びに同期、後輩の皆様には時に研究関連のアドバイスや意見をいただき、また日頃の雑談等様々な場面で支えてくださったことを大変ありがたく思っています。特に博士後期課程在学の森泉怜様には、AIPS や Difmap のデータ処理だけでなく、研究に必要な知識や資料の提供、及び学校での生活において、外部から茨城大学に入学した私に対して丁寧なサポートをいただいたことをこの場を借りてお礼をいたします。

私の生活を多方面から支えてくださった家族にも感謝しています。

改めて私の研究生活に関わっていただいた皆様、ありがとうございました。

参考文献

- [1] Furuya, R. S., Cesaroni, R., Codella, C., et al. 2002, *A&A*, 390, L1. doi:10.1051/0004-6361:20020850
- [2] McKee, C. F. & Tan, J. C. 2008, *ApJ*, 681, 2, 771. doi:10.1086/587434
- [3] Bonnell, I. A., Vine, S. G., & Bate, M. R. 2004, *MNRAS*, 349, 2, 735. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.07543.x
- [4] Hosokawa, T. & Omukai, K. 2009, *ApJ*, 691, 1, 823. doi:10.1088/0004-637X/691/1/823
- [5] Ellingsen, S. P., Cragg, D. M., Lovell, J. E. J., et al. 2004, *MNRAS*, 354, 2, 401. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08200.x
- [6] Minier, V., Ellingsen, S. P., Norris, R. P., et al. 2003, *A&A*, 403, 1095. doi:10.1051/0004-6361:20030465
- [7] Bartkiewicz, A., Szymczak, M., van Langevelde, H. J., et al. 2009, *A&A*, 502, 1, 155. doi:10.1051/0004-6361/200912250
- [8] Fujisawa, K., Sugiyama, K., Motogi, K., et al. 2014, *PASJ*, 66, 2, 31. doi:10.1093/pasj/psu015
- [9] Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2004, *MNRAS*, 355, 2, 553. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08340.x]
- [10] Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2007, *Astrophysical Masers and their Environments*, 242, 97. doi:10.1017/S174392130701263X
- [11] Tanabe, Y. & Yonekura, Y. 2024, *PASJ*, 76, 3, 426. doi:10.1093/pasj/psae021
- [12] van der Walt, D. J. 2011, *AJ*, 141, 5, 152. doi:10.1088/0004-6256/141/5/152
- [13] Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., et al. 2013, *ApJ*, 769, 2, L20. doi:10.1088/2041-8205/769/2/L20
- [14] Araya, E. D., Hofner, P., Goss, W. M., et al. 2010, *ApJ*, 717, 2, L133. doi:10.1088/2041-8205/717/2/L133
- [15] Parfenov, S. Y. & Sobolev, A. M. 2014, *MNRAS*, 444, 1, 620. doi:10.1093/mnras/stu1481
- [16] Maswanganye, J. P., Gaylard, M. J., Goedhart, S., et al. 2015, *MNRAS*, 446, 3, 2730. doi:10.1093/mnras/stu2306

- [17] Szymczak, M., Durjasz, M., Goedhart, S., et al. 2024, A&A, 682, A17. doi:10.1051/0004-6361/202348189
- [18] Olech, M., Durjasz, M., Szymczak, M., et al. 2022, A&A, 661, A114. doi:10.1051/0004-6361/202243108
- [19] Olech, M., Szymczak, M., Wolak, P., et al. 2019, MNRAS, 486, 1, 1236. doi:10.1093/mnras/stz926
- [20] Hu, B., Menten, K. M., Wu, Y., et al. 2016, ApJ, 833, 1, 18. doi:10.3847/0004-637X/833/1/18
- [21] Motogi, K., Hirota, T., Sorai, K., et al. 2017, ApJ, 849, 1, 23. doi:10.3847/1538-4357/aa8d75
- [22] 福井康雄・犬塚修一郎・大西利和・中井直正・舞原俊憲・水野亮,2014, シリーズ現代の天文学 6 巻 星間物質と星形成, 日本評論社
- [23] 中井直正・坪井昌人・福井康雄,2020, シリーズ現代の天文学 16 巻 宇宙の観測 II-電波天文学 [第 2 版], 日本評論社
- [24] Tanabe et al. (in prep)
- [25] 森泉 怜 2023 茨城大学院理工学研究科修士論文
- [26] 斎藤 偉 2018 茨城大学院理工学研究科修士論文
- [27] 亀野誠二 他, 干渉計サマースクール 2005 教科書,2005, 国立天文台

付録 A データ解析詳細

ここでは、データ解析の流れについて詳細を説明する。

A.1 解析準備

ここでは、データの解析の準備段階について説明する。主な作業はAIPSで実行し、imagingの一部工程でDifmapを使用した。AIPSでは、主に以下の実行コマンドとパラメータを用いて作業を行った。

- task : calibration や imaging 等に使用される主要な実行コマンド。adverb を設定後コンソール上で「go」と入力することで実行される。
- verb : task よりも簡易的な実行コマンド。verb 名を入力するだけで実行される。主に入力した abverb の確認や不要なデータの削除等に使用される。
- adverb : 上記 2 つの実行コマンドに設定するパラメータ。

A.1.1 データの読み込み

まず最初に、task ‘FITLD’を用いてデータを読み込む。正しくデータの読み込みができてくる場合には、aips のコンソール上で verb ‘pcat’を実行すると、読み込まれたデータが表示される（図 A.1）。次に、task ‘INDXR’を用いて calibration に必要な‘NX’テーブルと‘CL’テーブルを作成する。

A.1.2 データの確認

データの読み込みが完了したら、読み込んだデータの内容を確認する。task ‘LISTR’では、観測の scan リストを確認することができる（図 A.2）。verb ‘imh’を実行すると、データのヘッダーを確認することができる（図 A.3）。このヘッダーにはデータの概要他、データに付随するテーブルとそのバージョンを閲覧することができる。先ほど作成した「NX」テーブルと「CL」テーブルがあることが確認できる（それぞれバージョンは1である）。AIPSの解析は、このテーブルを編集し、バージョンを更新することで進行する。各テーブルはtask ‘PRTAB’で、adverb ‘inext’にテーブル名を入力することで確認できる。

```
>pcat
AIPS 1: Catalog on disk 1
AIPS 1:  Cat  Usid Mapname      Class  Seq  Pt    Last access    Stat
AIPS 1:  1    8 U25143A      .CONT  .    1 UV 02-JAN-26 18:41:26
AIPS 1:  2    8 U25143A      .MASER .    1 UV 04-JAN-26 18:08:58 READ
```

図 A.1: verb ‘pcat’ の実行結果

```

localhos LISTR(31DEC24) 8 02-OCT-2025 18:00:35 Page 1
File = U25143A .MASER . 1 Vol = 1 Userid = 8
Freq = 6.664000000 GHz Ncor = 1 No. vis = 172620
Scan summary listing

```

Scan	Source	Qual	Calcode	Sub	Timerange	FreqID	START	VIS	END	VIS
1	G9.62+01	: 0000		1	0/17:35:01 - 0/17:37:59	1	1	1	3780	
2	PKS1741	: 0000		1	0/17:40:31 - 0/17:45:29	1	3781		10080	
3	1911-200	: 0000		1	0/17:49:01 - 0/17:51:59	1	10081		13860	
4	G23.01-0	: 0000		1	0/17:54:00 - 0/17:56:59	1	13861		17640	
5	G19.70-0	: 0000		1	0/17:59:00 - 0/18:09:00	1	17641		30240	
6	1911-200	: 0000		1	0/18:11:00 - 0/18:14:00	1	30241		34020	
7	G19.70-0	: 0000		1	0/18:16:01 - 0/18:26:00	1	34021		46620	
8	1911-200	: 0000		1	0/18:28:01 - 0/18:30:59	1	46621		50400	
9	PKS1741	: 0000		1	0/18:34:30 - 0/18:39:29	1	50401		56700	
10	1911-200	: 0000		1	0/18:42:50 - 0/18:45:50	1	56701		60480	
11	G23.01-0	: 0000		1	0/18:47:51 - 0/18:50:50	1	60481		64260	
12	G19.70-0	: 0000		1	0/18:52:51 - 0/19:05:19	1	64261		80010	
13	1911-200	: 0000		1	0/19:07:20 - 0/19:10:20	1	80011		83790	
14	G19.70-0	: 0000		1	0/19:12:21 - 0/19:24:49	1	83791		99540	
15	1911-200	: 0000		1	0/19:26:50 - 0/19:29:50	1	99541		103320	
16	PKS1741	: 0000		1	0/19:33:21 - 0/19:38:20	1	103321		109620	
17	1911-200	: 0000		1	0/19:41:21 - 0/19:44:20	1	109621		113400	
18	G23.01-0	: 0000		1	0/19:46:21 - 0/19:49:20	1	113401		117180	
19	G19.70-0	: 0000		1	0/19:51:20 - 0/20:06:19	1	117181		136080	
20	1911-200	: 0000		1	0/20:08:21 - 0/20:11:19	1	136081		139860	
21	G19.70-0	: 0000		1	0/20:13:21 - 0/20:28:20	1	139861		158760	
22	G23.01-0	: 0000		1	0/20:30:20 - 0/20:33:19	1	158761		162540	
23	1911-200	: 0000		1	0/20:35:20 - 0/20:38:20	1	162541		166320	
24	PKS1741	: 0000		1	0/20:41:30 - 0/20:46:29	1	166321		172620	

```

localhos LISTR(31DEC24) 8 02-OCT-2025 18:00:35 Page 2
File = U25143A .MASER . 1 Vol = 1 Userid = 8

```

Source summary

Velocity type = 'LSR' Definition = 'RADIO'

ID	Source	Qual	Calcode	RA(2000.0)	Dec(2000.0)	IFlux	QFlux	UFlux	VFlux	No. vis
1	1911-200	: 0000		19:11:09.6530	-20:06:55.109	0.000	0.000	0.000	0.000	34020
2	G19.70-0	: 0000		18:27:55.5200	-11:52:40.300	0.000	0.000	0.000	0.000	94500
3	G23.01-0	: 0000		18:34:40.2770	-09:00:38.400	0.000	0.000	0.000	0.000	15120
4	G9.62+01	: 0000		18:06:14.6700	-20:31:32.400	0.000	0.000	0.000	0.000	3780
5	PKS1741	: 0000		17:43:58.8560	-03:50:04.616	0.000	0.000	0.000	0.000	25200

ID	Source	Freq(GHz)	Velocity(Km/s)	Rest freq (GHz)
1	All Sources	6.6640	0.0000	0.0000

Frequency Table summary uses reference channel 1.00

FOID	IF#	Freq(GHz)	BW(kHz)	Ch.Sep(kHz)	Sideband	Bandcode
1	1	6.66400000	8000.0005	0.9766	1	

図 A.2: task 'LISTR' で出力された u25143a の scan list

```

[>imh
AIPS 1: Image=MULTI (UV) Filename=U25143A .MASER . 1
AIPS 1: Telescope=VERA Receiver=VLBA
AIPS 1: Observer=u25143a. User#= 8
AIPS 1: Observ. date=23-MAY-2025 Map date=02-JAN-2026
AIPS 1: # visibilities 172620 Sort order TB
AIPS 1: Rand axes: UU-L-SIN VV-L-SIN WW-L-SIN TIME1 SUBARRAY
AIPS 1: SOURCE FREQSEL INTTIM ANTENNA1 ANTENNA2 CORR-ID
AIPS 1: -----
AIPS 1: Type Pixels Coord value at Pixel Coord incr Rotat
AIPS 1: COMPLEX 3 1.0000000E+00 1.00 1.0000000E+00 0.00
AIPS 1: STOKES 1 -2.0000000E+00 1.00 -1.0000000E+00 0.00
AIPS 1: FREQ 8192 6.6640000E+09 1.00 9.765625E+02 0.00
AIPS 1: IF 1 1.0000000E+00 1.00 1.0000000E+00 0.00
AIPS 1: RA 1 00 00 00.000000 1.00 0.000000 0.00
AIPS 1: DEC 1 00 00 00.000000 1.00 0.000000 0.00
AIPS 1: -----
AIPS 1: Coordinate equinox 2000.00
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type HI is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type CL is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type NX is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type AT is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type IM is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type FG is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type PL is 2
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type CT is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type FQ is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type AN is 1
AIPS 1: Maximum version number of extension files of type SU is 1
AIPS 1: Keyword = 'OLDRFQ' value = 6.66400000D+09

```

図 A.3: verb 'imh' の実行結果

次に、task ‘POSSM’を用いて観測データが取得できているかの確認を行う。結果を図1.1に示す。ここでは観測天体と calibration 用天体に対して、自己相関スペクトル（観測局ごとのスペクトル）と相互相関スペクトル（基線ごとのスペクトル）の2種類のスペクトルを確認する。ここで、メーザーのスペクトルとは大きく形状や強度が異なる不自然なスペクトルが確認された場合、それは天体からの信号ではなく、人工的な電波であるスプリアスの混入が考えられる。スプリアスの混入によって、データの正確性（主に電波強度の情報）が損なわれる可能性があるため、task ‘UVFLG’を用いてスプリアスが発生している観測局、チャンネルをフラグする。データのフラグを行うと、新しく「FG」テーブルが作成される。これ以降の解析でフラグ情報を参照する場合、task ごとに「FG」テーブルのバージョンを参照する adverb において、バージョンを指定するか、最新バージョンを適用する設定をする必要がある。

A.2 データの calibration

A.2.1 自己相関スペクトルを用いた振幅較正

最初に、task ‘ACCOR’を用いることによってターゲット天体の自己相関スペクトルを使用し、振幅の値を補正する。この task の実行後、「SN」というテーブルが生成される。ただし、このままでは振幅補正の結果はデータに適用されないため、task ‘CLCAL’を用いてSN.1の結果を適用する必要がある。実行後ヘッダーを見ると、CL テーブルのバージョンが2に更新されていることが確認できる。以降、calibration は該当する task で「SN」テーブルのバージョンを更新し、それを‘CLCAL’を用いて適用し、「CL」テーブルのバージョンを更新するという動作を繰り返す。また、calibration の結果を適用してデータを解析する際には、docalib 1 と adverb を設定する。

A.2.2 近傍連続波源を用いたフリンジフィッティング

VLBI 観測実行後、データは相関局で相関処理が行われる。相関処理後のデータには、観測局ごとの時計のズレや、遅延時間やその変化率の残差が残っている。これを近傍の天体の観測データを用いて補正する作業をフリンジフィッティングと呼ぶ。AIPS 上では、task ‘FRING’を用いてこの作業を実行する。まず、観測ターゲット近傍の連続波源（今回はクエーサーを用いた）の特定の scan におけるデータを用いて、時計のタイミングの遅延を補正する。完了すると、「SN」テーブルのバージョン2が生成されているため、前回同様に‘CLCAL’を用いて適用する。その後、同様に近傍連続波源の全時間のデータを用いて遅延時間とその遅延時間変化率を補正する。この際に使用する連続波源については scan list を参照する。こちらも同様に、「SN」テーブルのバージョンが更新されているため、‘CLCAL’を用いてデータに解を適用する必要がある。

A.2.3 バンドパス較正

次に、task ‘BPASS’を用いて、バンドパス特性を補正する。ここでも明るい連続波の自己相関スペクトルを用いる。この作業の結果、「SN」テーブルの更新は発生せず、代わりに「BP」テーブルが生成される。バンドパス較正の結果は、task ‘POSSM’で aparm(8)

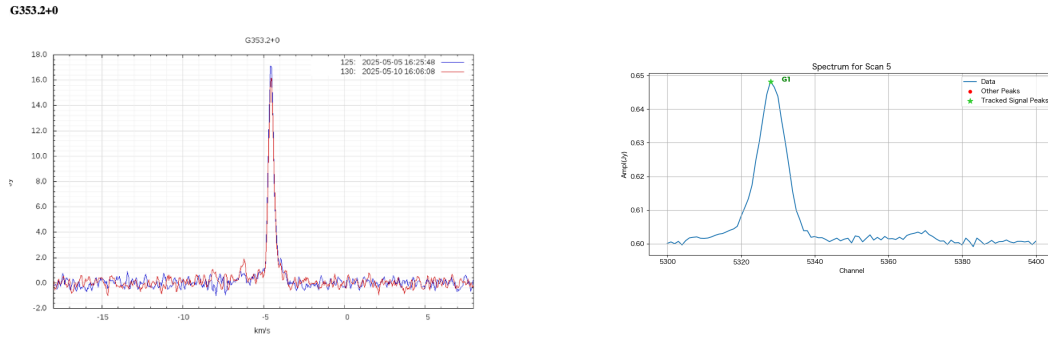


図 A.4: (左) 茨城大学モニター観測より、観測日前後の G353.2 のスペクトル。
(右) 今回の観測結果のうち、日立局・scan5 での G353.2 の自己相関スペクトル。図は task ‘POSSM’ の結果をテキストファイルに出力し、python で表示したものである。

= 2 と設定することで確認できる。以降の解析で、バンドパス較正解を使用する場合は、各 task で `doband = 1` と `adverb` を設定する必要がある。

A.2.4 ドップラー補正

観測データは、地球の自転と公転により、ドップラー効果が発生するため観測周波数は実際のものとは異なっている。そのため、ここではそれを補正する。この補正を行うためには、観測局の位置と観測時間、補正する天体とその分子輝線の情報が必要である。ただし、前二つはデータを読み込んだ時点で AIPS そのものに登録されているため、ここでは後者二つを設定する。task ‘SETJY’ を用いて、天体情報が格納されている ‘SU’ テーブルを編集する。書き加える情報は「AIPS 上でのメーザーのピークチャンネル」、「分子輝線が検出される速度」、「6.7 GHz メタノールメーザーの静止周波数」の三つである。今回は、AIPS の task ‘POSSM’ の出力結果と、茨城大学の観測結果及び maser DB を用いてこれらの情報を取得した。以下に、作業の例を記載する。6.7 GHz メタノールメーザーの静止周波数は既知であるため省略する。図 A.4 は、VLBI 観測日前後の、茨城大学のモニター観測による G353.2+0 のスペクトル（左）と、本観測における G353.2+0 の日立局における自己相関スペクトル（右）である。この図から

- POSSM の結果より、ピークチャンネルは 5328 ch である。
- 茨城大学の結果より、メーザーのピーク ch は $\sim -4.46 \text{ km s}^{-1}$ である。

ことが読み取れるため、この値を task ‘SETJY’ の対応する `adverb` に設定した。

次に、ドップラー補正の速度の基準を VLBA のものと同じにする必要があるため、task ‘TABED’ を用いて ‘AN’ テーブルを書き換える。

ここまでの作業が終了したら、task ‘CVEL’ を用いて、ドップラー補正をデータに適用する。その結果、新しく .CVEL という拡張子のファイルが生成される。本研究では、.CVEL には、観測ターゲット天体のみの、ドップラー補正が適用されたデータが保存されるように `adverb` を設定した。このファイルに対して verb ‘imh’ を行くと、一部のテーブルが元データから引き継がれておらず、消滅している。しかし、消滅したテーブルの内容はデータそのものに取り込まれているため気にする必要は無い。今後の解析は、この .CVEL のファイルを用いて行う。

表 A.1: 本解析において使用した較正天体一覧

ターゲット天体	フリンジフィッティング	バンドパス較正	テンプレート振幅較正
G353.273-0.641	J1626-2951	NRAO530	G354.615+0.472
G11.936-0.616	NRAO530	NRAO530	G12.908-0.260
G19.701-0.267	J1911-2006	PKS1741	G23.010-0.410
G94.603-1.796	J2202+4216	3C454.3	G81.871+0781
G108.759-0.952	J2353+5518	3C454.3	G109.8+21
G121.298+0.659	J0102+5824	3C454.3	G109.8+21
G45.804-0.356	J1925+210	3C454.3	G49.4897-0.3876
G78.122+3.633	J2002+4725	3C454.3	G81.871+0.781

A.2.5 テンプレート法を用いた振幅較正

次に、明るいメーザーの自己相関スペクトルを用いて振幅較正を行う。そのために、時間とアンテナを指定した明るいメーザー源の自己相関スペクトル「テンプレートファイル」と、全時間、全アンテナでの明るいメーザー源の自己相関スペクトル「ALL ファイル」の二つを用意する必要がある。テンプレートファイル作成の際に指定は、「較正用メーザー源が南中している時刻」で「最もスペクトルの S/N 比が良いアンテナ」を選ぶと良い。これら二つのファイルを、task ‘SPLIT’ を使用して作成する。これらを作成したら、「ALL ファイル」の中に task ‘ACFIT’ を用いて「SN」テーブルを作成する。この task 実行にあたって、テンプレートファイルで使ったアンテナの DPFU と T_{sys} (システム雑音温度) の値が必要になるため、観測終了後に作成される ANTAB ファイルを参照する。

ALL ファイルに「SN」テーブルをしたら、task ‘TACOP’ を用いて作成した SN テーブルを.CVEL の「SN」テーブルの最新版としてコピーする。その後は他の作業同様に task ‘CLCAL’ で「CL」テーブルに「SN」テーブルを適用すれば、終了である。

A.2.6 観測ターゲット自身でのフリンジフィッティング

最後に、ターゲット天体自身を較正天体として、フリンジフィッティングを行う。ドップラー補正が終わったデータ.CVEL に対して、ターゲット天体のメーザー放射のピーク付近を指定し、task ‘FRNG’ を実行する。その結果、SN テーブルが更新されていることを確認したら、今まで通り task ‘CLCAL’ を用いて「CL」テーブルに解を適用する。

本解析で実行した calibration は、これで全てである。AIPS ではここまでの操作で使った adverb 設定をスクリプトとして AIPS の中の RUN というディレクトリに保存しておくと、AIPS 上で「RUN (スクリプトのファイル名)」と入力すると自動で adverb を設定し実行する。

A.2.7 本研究に用いた較正天体一覧

ここでは本研究の解析に用いた較正天体を以下の表 A.1 に記載する。これらの天体はターゲット天体と同じ観測内で観測をする必要がある。本観測では、フリンジフィッティング天体とバンドパス較正天体を NRAO の VLBA Calibrator Search Tool (URL: <https://obs.vlba.nrao.edu/cst>) を、テンプレート振幅較正天体を茨城大学のモニター観測リストを用いて決定した。

A.3 データの imaging

ここからは、較正したデータを用いて、データのイメージング（空間分布の取得）を行う。最初に、calibration 実行後のデータに対して、ターゲット天体のみを指定して task ‘SPLIT’ を実行する。この結果作成されたファイルで今後の作業を行う。

A.3.1 DIFMAP を用いたピークチャンネルの self-calibration

ここで、さらにターゲット天体のメーザーピークチャンネルのみをさらに task ‘SPLIT’ で切り出し、task ‘FITTP’ を用いて fits ファイルとして自身の PC 内に保存する。保存したデータを difmap で読み込む。読み込まれたデータは dirty map と呼ばれる、visivility をフーリエ変換しただけで合成ビームパターンを除去していない状態である。この状態に対して、CLEAN という動作を行うことにより、ビームパターンの畳み込みを解除する。これは Högbom によって提唱された、電波干渉計のデータにおいて合成ビームパターンの畳み込みを解除する際によく使用される手法である。dirty map の中から輝度のピークを探し、適当なスケールリングを行い dirty map から差し引くことで、合成ビームが作り出すサイドローブと呼ばれる不要なデータを一括で除去するというものである。ただし、これは天体は点源の集合であるという仮定のもとであるため、広がった構造に対しては CLEAN ビームと呼ばれる理想的なビームを畳み込み、残差の画像を加えて CLEAN map を作成する。difmap で clean を行う際には、CLEAN box を画像上の明るく確実に天体がいると判断された場所に設置する。

以降、図の手順に従い、CLEAN 残差の放射がほぼ一樣になるまで CLEAN と self-calibration を繰り返す。self-calibration は、ターゲット天体自身の visivility を使ってさらに細かく位相と振幅の補正を行う手法である。ただし、self-calibration を行うことで天体の絶対位置は失われてしまうため、以降の解析での天体の位置は絶対位置ではなく、この放射のピークチャンネルの視線速度を原点とした相対座標である。

A.3.2 メーザースポット map の作成

次に、difmap で取得した self-calibration の結果を、AIPS に戻って元のデータに適用する。事前に difmap の解析結果を fits ファイルに出力し、task ‘CALIB’ でそのファイルを参照元に指定する。この際にも今までの手順同様に SN テーブルが出力されているため、これを task ‘CLCAL’ で「CL」テーブルに適用する形で全チャンネルに self-calibration の解を適用する。ただし、task ‘CLCAL’ は、単一 source ファイルでは使用できないため、事前に確認の必要がある。単一 source ファイルで適用したい場合は、task ‘MULCH’ を用いて複数 source ファイルに変換をしてから task ‘CLCAL’ を行う必要がある。ただし、複数 source ファイルに変換したファイルはドップラー補正が行われていないため、もう一度 task ‘SETJY’ を用いてドップラー効果の補正を行った。

その後、相互相関スペクトル上でメーザーが検出されている全てのチャンネルにおいて AIPS 上で task ‘IMAGR’ を用いることで CLEAN を実行した。この際には、self-calibration 実行時とは異なり、dirty map 全体に対して CLEAN を実行し、box の設定は行わなかった。

VLBI 含む干渉計で得られる Image データは、Van Cittert-Zernike の定理より、visivility とフーリエ変換の関係がある。また、単一のメーザー spot からの信号は visivility 上で、ガウス関数で近似可能である。そのため、CLEAN が終了した Image における単一のメー

ザー spot の空間分布もまた、ガウス関数で近似可能である。本研究では、各チャンネルで CLEAN 後のデータを fits ファイルに変換し、python に読み込ませ、以下の動作を行った。なお、fits ファイルにはドップラー補正の結果が反映されていなかったため、同じファイルで task ‘POSSM’ を行い、その結果を予め txt ファイルに書き起こし、その速度の値を反映している。

- 読み込んだ fits ファイルの中から、特定の閾値以上の強度を持つ点の集合を自動で一括検出
- 検出した点の集合をガウス関数で近似
- 近似したガウス関数のピークの座標と、ファイルに該当するチャンネル（視線速度）を記録し縦軸、横軸が中心座標からのズレ [mas] のグラフにプロット