

2024 年度

修士論文

メタノールメーザー源 G034.395+0.221
の周期強度変動メカニズムの解明

茨城大学

大学院理工学研究科 理学専攻 宇宙物理学コース

23NM156A 古川真祐子

概要

大質量星は、太陽の8倍以上の質量を持つ恒星で、太陽が $\sim 6000\text{ K}$ に対し $\sim 10000\text{ K}$ と非常に高い表面温度を持ち、大量の紫外線を放射する。この紫外線は周囲の星間物質に強い影響を与え、ガスを電離し、加熱する。さらに、大質量星は強力な星風を発生させ、新たな星形成を促進する要因となる。大質量星の進化は、最終的に超新星爆発を起こし、膨大なエネルギーを放出する。この過程で、次世代の星や惑星の形成に必要な重元素が供給され、宇宙の化学的進化に寄与する。このように、大質量星は紫外線の放射、星風の生成、超新星爆発を通じて、星間物質や銀河の進化に対して非常に重要な役割を果たしている。大質量星の形成は、従来の中小質量星の形成過程では説明できず、主に「降着説」と「合体説」の2つのシナリオが提案されている。

メーザーは、高密度で可視光観測が困難な領域に対しても観測可能であり、大質量星形成領域では、メーザー観測が重要な役割を果たしている。6.7 GHzのメタノールメーザーは、原始星近傍の3次元運動を理解する上で貴重な情報源となっている。メーザーは、通常の熱放射とは異なり、特別な物理状態で生じる電波放射現象で、非常に狭い範囲から強い電波を放出する特徴を持っているため、大質量星形成領域の詳細な観測が可能となっている。

本研究ではメタノールメーザー源 G034.395+0.221 について、5つの周期変動モデルの適用可能性について考えるために、各々の周期強度変動モデルに必要な条件について調べることで、メタノールメーザー源 G034.395+0.221 の周期強度変動メカニズムの解明を目指した。

解析方法としては、(1) H_{II} 領域の付随の有無、(2) 原始星が単独星か連星かについて先行研究を調べた。(1) H_{II} 領域の付随の有無については、Hu et al. (2016) において、連続波が検出されたが、6.7 GHz メタノールメーザーとの物理的な関係を裏付ける証拠なしという結果が報告されていた。また、(2) 原始星が単独星か連星かに関する情報は得られなかった。次に、(3) 周期強度変動パターンの調査については、平野 (2020) は茨城大学で行っている6.7 GHz メタノールメーザーモニター観測の周期強度変動の解析結果を用いて変動パターンを調べた。Lomb-Scargle 法を用いて周期解析が行われ、8つの速度成分が検出され、そのうち6つの成分の周期が29.2–29.3日だと求められている。

今回新たに再解析した結果、8つの速度成分のうち、6つの成分の周期が29.3日だと求められ、残り2つの成分である62.46 km/s と63.41 km/s はそれぞれ、62.46 km/s の成分は1146.1日の周期が検出され、63.41 km/s の成分は周期性なしという結果となった。また、本研究では新たに(4) VLBI 観測結果の解析を行った。茨城大学グループが提案し採択された、G034.395+0.221 について東アジア VLBI 観測網 (EAVN) で複数回観測が行われた観測データを、Astronomical Image Processing System (AIPS) と Difmap を用いて解析を行った。本研究で解析に用いたデータは、EAVN を用いて2エポック (2021年9月14日、2021年10月6日) に分けて観測されたデータであり、観測参加局は、水沢、入来、小笠原、石垣、蔚山、日立の計6局である。解析はEpoch 1、Epoch 2ともにCLEAN Imageの作成まで完了した。クロスパワースペクトルの結果から、Epoch 1の水沢-日立の基線では検出されたが、

日立局の自己相関スペクトルが 35Jy に対し、3.5Jy ほどしか検出されていなかった。今回の EAVN の最短距離は水沢-日立であり、約 53 au よりも天体が広がっていることが明らかになった。この値は、Minier et al. (2002) によって求められた 6.7 GHz メタノールメーザースポットの構造 (直径 2–20 au の core と、直径 12–290 au の halo から構成される) と矛盾しない。また、Epoch 1 (増光期) と Epoch 2 (静穏期) の各値を比較すると、日立局の自己相関スペクトルは Epoch 1 が 35Jy に対して Epoch 2 が 18Jy と 1/2 程度になっており、小笠原-日立基線でも、Epoch 1 が 1.8Jy、Epoch 2 が 0.8Jy と 1/2 程度になっていたが、入来-小笠原基線では、Epoch 1 が 3Jy に対して、Epoch 2 が 4Jy と強度が多少強くはなっているなど、明確な傾向を見出せなかった。

In this study, in order to clarify the periodic intensity variation mechanism of the methanol maser source G034.395+0.221, I investigated the necessary conditions for each periodic intensity variation model to consider the applicability of five periodic variation models.

I searched literatures for information (1) whether or not there is an associated H_{II} region, (2) whether the protostar is a single star or a binary, and (3) whether the periodic intensity variation pattern were investigated from previous studies. (1) Regarding the presence or absence of H_{II} regions, Hu et al. (2016) reported that radio continuum was detected, but there was no evidence to support a physical relationship with the 6.7 GHz methanol maser sources. In addition, (2) no information was obtained on whether the protostar was a single star or a binary. Next, regarding (3) the investigation of the periodic intensity variation pattern, the analysis of the periodic intensity variation of the 6.7 GHz methanol maser monitor observations conducted by Hirano (2020) detected eight velocity components, and the period of five of them was determined to be 29.3 days. As a result of this new reanalysis, it was found that the period of six of the eight velocity components is 29.3 days, while the remaining two components, 62.46 km/s and 63.41 km/s, have a period of 1146.1 days, while the 63.41 km/s component has no periodicity.

In this study, I newly analyzed (4) the results of VLBI observations. I used data observed by EAVN in two epochs (September 14, 2021, and October 6, 2021) and analyzed them using the Astronomical Image Processing System (AIPS) and Difmap. At this moment, the analysis has been completed up to the creation of CLEAN images of the both epochs. Analysis was completed up to the point of creating CLEAN images for both Epoch 1 and Epoch 2. The cross power spectrum showed that the spectrum was detected on the Mizusawa-Hitachi baseline in Epoch 1, but only about 3.5 Jy was detected, while the autocorrelation spectrum at Hitachi was 35 Jy. The shortest distance of the EAVN in this study was from Mizusawa to Hitachi, and it was revealed that the source extends beyond about 53 au. This value is consistent with the structure of the 6.7 GHz methanol maser spot calculated by Minier et al. (2002), which consists of a core with a diameter of 2–20 au and a halo with a diameter of 12–290 au. In addition, when comparing the values for Epoch 1 (brightening period) and Epoch 2 (quiet period), the autocorrelation spectrum at the Hitachi station was 35Jy in Epoch 1 and 18Jy in Epoch 2, approximately half the intensity. Similarly, for the Ogasawara-Hitachi baseline, the intensity was 1.8Jy in Epoch 1 and 0.8Jy in Epoch 2, approximately half the intensity. However, for the Iriki-Ogasawara baseline, the intensity was slightly stronger, 3Jy in Epoch 1 and 4Jy in Epoch 2, indicating no clear trend across all baselines.

目次

1 序論	5
1.1 大質量星	5
1.1.1 大質量星形成	5
1.1.2 大質量星形成のシナリオ	6
1.2 メーザー	7
1.2.1 メーザーの原理	7
1.2.2 メタノールメーザー	8
1.3 周期強度変動	9
1.3.1 脈動変動	9
1.3.2 Colliding wind binary	9
1.3.3 Spiral shock	10
1.3.4 Periodic accretion	11
1.3.5 Eclipsing binary	11
1.4 研究目的	12
2 対象天体 G034.395+0.221	13
2.1 天体選定条件	13
2.2 天体諸元	13
3 文献調査	17
3.1 H _{II} 領域の付随の有無	17
3.1.1 結果	18
3.2 原始星が単独星か連星か	18
3.3 周期強度変動パターンの調査	18
3.3.1 Lomb-Scargle 法	18
3.3.2 誤警報確率	19
3.3.3 オーバーサンプリング	19
3.3.4 周期解析の流れ	20
3.3.5 判定基準	21
3.3.6 結果	21
3.4 周期の再解析	23
4 VLBI 観測	27
4.1 観測概要	27
4.2 観測データの解析	30
4.3 結果	32
5 議論とまとめ	38
謝辞	40
参考文献	41

1 序論

1.1 大質量星

大質量星は、質量が太陽の 8 倍以上の恒星であり、これらの星は、星間物質の形成や銀河の進化に深く関与しており、その影響は多岐にわたる。

まず、大質量星は、太陽が $\sim 6000\text{ K}$ に対し $\sim 10000\text{ K}$ と非常に高い表面温度を持ち、大量の紫外線を放射する。この紫外線は周囲の星間物質に強い影響を与え、ガスを電離し、加熱する。さらに、大質量星は強力な星風を発生させ、周囲の物質を圧縮し、これが新たな星形成を促進する要因となる。大質量星の進化は、最終的に超新星爆発という劇的な現象に至る。この爆発は、星がその核融合反応に使える物質を使い果たした後に起こり、膨大なエネルギーを放出する。この過程で、鉄より原子番号が大きい重元素が生成され、星間空間に放出されることにより、次世代の星や惑星の形成に必要な重元素が供給され、宇宙の化学的進化に寄与する。

このように、大質量星は紫外線の放射、星風の生成、超新星爆発を通じて、星間物質や銀河の進化に対して非常に重要な役割を果たしている。

1.1.1 大質量星形成

本節は「シリーズ現代の天文学 星間物質と星形成」(福井康雄 他 2014)を参考に記述する。中・小質量星と大質量星の形成過程は、天文学における重要な研究テーマであり、それぞれ異なるメカニズムと特性を持っている。まず、中・小質量星の形成の具体的な流れ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が、重力的に不安定になりガスが中心へと落下しはじめる。
2. 重力収縮により圧縮が続き、分子雲コアの中心密度が $5 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ に達すると、重力収縮が止まり力学平衡の状態であるファーストコアと呼ばれる、原始星コアが形成される。
3. 取り残された周囲のガスがファーストコア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ファーストコア内部の温度が上昇し、約 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。
4. 吸熱によりガスの圧力が低下し、平衡状態が破れることで再び重力収縮が始まる (second collapse)。
5. 4. の重力収縮後、水素分子の解離によって生じた水素原子が完全電離し、再び平衡状態であるセカンドコアが形成される。
6. セカンドコア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。
7. 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、水素核融合が始まる。その後、核反応により圧力が保持され重力収縮が止まり主系列星となる。

一方で、大質量星の場合、中小質量星と同様の形成シナリオを適用し、質量降着進化が長い時間をかけて続いた結果として形成されないと考えると、以下の二つの問題が発生する。

(1) 寿命問題

中・小質量星形成の際の典型的な質量降着率 $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の場合、大質量星の寿命（約 200 万 - 300 万年）程度の間、質量降着が続いたとしても、最大で $20 - 30 M_{\odot}$ までしか成長できない。このため、それ以上の質量を持つ大質量星が存在する理由を説明することができない。

(2) フィードバック問題

典型的な降着率を考慮すると、中心星は質量が $8M_{\odot}$ に達すると主系列星となり、その後、中心星からの強い輻射圧によって降着が妨げられる。このため、典型的な降着率のもとでは、 $10M_{\odot}$ から $20M_{\odot}$ より大きな星を球対称な降着によって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。

1.1.2 大質量星形成のシナリオ

現在では、大質量星形成について、主に 2 つのシナリオ (1) 降着説、(2) 合体説が提案されている。

(1) 降着説

この説では、大質量星が質量降着により成長し、その降着率が極めて大きいとき放射圧による制限が緩くなるため、 $20M_{\odot}$ 程度以上の大質量星の形成が可能となるとされている。また、降着物質は実際には角運動量をもっており、原始星周辺に降着円盤を形成するため、原始星からみて円盤方向は光学的に厚く、垂直な極方向は比較的光学的に薄くなる。よって、放射が極方向に強く、円盤方向に弱くなり、円盤を通じての降着は妨げられない。よって、 $20M_{\odot}$ 程度以上の大質量星の形成が可能となる。

(2) 合体説

この説では、星団中央部の星密度が高い環境で、星同士の衝突・合体が起こり、大質量星が形成されるというシナリオである。この過程が実際に起こるためには、星密度が 10^8 個 pc^{-3} 必要であるが、これまでに、そのような高密度環境は発見されておらず、実際に星同士の合体が効率よく起こるかどうかは確認されていない。

現在はこの合体説の改良版として、競争的降着説が提唱されている。この説は、分子雲内の高密度領域が自己重力によって崩壊し、初期には小さな分子雲コアが多数形成される。その後、高密度領域中心部では降着率が高く、外縁部では低い状態になり、最初は等質量だった分子雲コアが中心部の分子雲コアほど多くのガスを集積する。降着は動的な時間スケールで進行し、中心部の分子雲コアで大質量星が、それ以外の分子雲コアで中・小質量星が形成される。ガスの重力ポテンシャルが支配的な初期段階後に星が重力ポテンシャルを支配する。多様な質量スペクトルを持つ星団が形成され、星団全体の重力でガスが引き込まれることによって、大質量星が形成されるというシナリオである。

1.2 メーザー

メーザーとは誘導放射によるマイクロ波増幅 (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) のことであり、二つの準位間で上の準位の方に、統計的により多くの粒子が存在する (反転分布) 状態のとき、誘導放射によって連続的に粒子が下の準位に遷移することで、強い放射を出す電波領域の特徴的な現象のことである。

大質量星形成領域ではしばしばメーザーが観測される。メーザーは可視光よりも波長の長い電磁波である電波での放射であるため、分厚い星周物質を透過し、原始星ごく近傍領域に対しても観測可能である。メーザー源は輝度が非常に高いため、超長基線干渉法 (VLBI) などの高空間分解能が得られる観測においても検出可能であり、詳細な空間分布が得られるだけでなく、時期をずらして複数回観測を行うことにより、視線に垂直な方向の運動の解明も行うことができる。中でも 6.7 GHz メタノールメーザーは、大質量星形成領域以外での検出例がほとんどないため、大質量星形成領域を選択的に観測するのに有用である。

1.2.1 メーザーの原理

ガス密度が高いところでは、熱平衡状態で粒子同士の衝突が支配的であり、二つの準位 (上の準位を 2、下の準位を 1 とする) 間の粒子数 (n_1, n_2) の比はボルツマン分布で与えられる。

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right). \quad (1)$$

ここで、

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right) \quad (2)$$

は通常は 1 より小さくなり、統計的重み当たりの粒子数 $n_i/g_i (i=1, 2)$ は下のエネルギー準位の方が多くなる。

しかし、粒子数密度の低い希薄な宇宙空間では粒子同士の衝突に起因する遷移に伴う放射よりも、A 係数を用いて表される自発放射、B 係数を用いて表されるや誘導放射、吸収の方が多くなる場合があるため、必ずしも $n_2/g_2 < n_1/g_1$ とはならず、統計的重み当たりの粒子数が上のエネルギー準位により多く分布する場合がある。このような状態を反転分布と言う。

二つの準位間で上の準位により多くの粒子が存在する状態は非常に不安定であり、外側からこの 2 準位間のエネルギー差に相当する周波数 ν_{21} の電波が入射してくると上の準位にある粒子がすぐに下の準位に落ちて ν_{21} の電波を誘導放射し、それがまた隣の分子に入射して同様な放射を起こし、これが連続的に起きて非常に強い放射を出す。これがメーザー現象である。

メーザー放射は以下のような特徴を持つ。

1. 強度が局所的熱平衡状態における熱放射に比べて大きい。

2. 電波源の広がりが極めて小さく点状である。
3. 直線または円偏光している。
4. 線幅は熱運動による幅よりも小さい場合が多い。
5. 電波の位相がそろっている。

宇宙空間で強いメーザー現象を起こす分子として、OH、H₂O、SiO、メタノール (CH₃OH) などがあるが、HCN や NH₃ など弱いメーザー現象を起こすことがある。H₂O メーザーは、大質量星形成領域中 (H_{II} 領域近傍) で多く検出されており、若い星からのジェットなどで励起されたショック領域で起きていると考えられる。OH メーザーも H_{II} 領域近傍でよく検出され、遠赤外線吸収を介して反転分布が作られていると考えられている。

星形成領域以外でも、晩期型星の星周で SiO メーザーや H₂O メーザー、OH メーザーなどが観測されている。SiO メーザーは、星のごく近傍で赤外域の振動励起状態を介して反転分布が作られると考えられており、メーザー強度の時間変動も大きい。一方で、H₂O メーザーは SiO メーザーよりも外側で、水素分子との衝突で励起されと考えられている。さらにその外側に OH メーザーが分布している。また、活動銀河中心核では非常に強い、H₂O メーザーが検出されることがある。

このように、メーザーはその有無により、晩期型星の組成の違いや星周囲の物理状態の違いを区分する指標に使用される。

1.2.2 メタノールメーザー

メーザーは、分子の種類によって増幅できる電波の周波数が異なり、大質量形成領域では、水酸基 (OH)、水 (H₂O)、メタノール (CH₃OH) などのメーザー源を伴うことが知られている。

メタノール (CH₃OH) メーザーは、付随領域の違いから 2 種類に分類することができ、その特徴を表 1 にまとめた。

	クラス I	クラス II
周波数 [GHz]	9.9, 25.0, 36.2, 44.1, 84.5, 95.2, 146.6 など	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 37.7, 38.3, 38.5 など
付随領域	アウトフローと周辺ガスの境界面	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	100 au スケール	au スケール
輝度温度	10 ⁶ –10 ⁸ K	< 10 ¹⁰ K

表 1: クラス I 及びクラス II メタノールメーザーの特徴

静止周波数 6.668519 GHz の放射を出す 6.7 GHz メタノールメーザーは典型的な輝度温度が非常に高く ($\sim 10^{10}$ K)、多くの周波数帯で検出されるメタノールメーザーの中では一番明るい。また、6.7 GHz メタノールメーザーは、過去の観測において大質量星形成領域以外での検出例がほとんどないため、大質量星形成領域を選択的に観測するのに有用であり、大質量星形成過程を理解する上で非常に有力なツールとされている。

これまでに検出された 1000 天体以上の 6.7 GHz メタノールメーザーのうち、その強度が周期的に変動する天体 (以降、周期変動天体と呼ぶ) が 36 天体確認されている (Tanabe & Yonekura. 2024 およびその参考文献, Szymczak et al. 2024)。しかし、その要因はまだ明確にはわかっていないため、周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーを調査することは、大質量原始星やその周囲で起こっている現象の解明につながると期待されている。

1.3 周期強度変動

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、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。解析の結果、本研究の対象天体 G034.395+0.221 においても、いくつかの速度成分で周期的な強度変動が確認された。詳しくは 3.3 章で記述する。

6.7 GHz メタノールメーザーは、赤外線放射によって放射励起されるため、周期的な強度変動は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いる。周期強度変動の機構については未だ解明されていないが、これまでに、5 つの周期変動モデルが挙げられている。

1.3.1 脈動変動

脈動変動モデル (Inayoshi et al. 2013) は、急速な質量降着を介して成長する原始星の中心星光度の変動に追随してメタノールメーザー強度が変動する可能性があるというモデルである。

当初、恒星の半径は恒星の質量の増加とともに増加した後、原始星は放射を介してエネルギーを失うことによって収縮し、この収縮期に恒星の中心温度が上昇し、原始星は ZAMS (Zero Age Main Sequence) に到達する。この ZAMS 期直前の原始星半径拡張期に生じる不安定期に、原始星の脈動に伴い、周囲のダストがメーザー放射に適した温度に上昇・下降することで、メーザーが増・減光する。

1.3.2 Colliding wind binary

Colliding wind binary モデル (van der Walt 2011) は、連星の周囲に球殻状に広がる H_{II} 領域表面のメーザー放射の種光子の量が、連星付近における恒星風の衝突によって変動することでメーザーの周期的強度変動が起こるとするモデルである。概略図を図 1 に示す。

衝撃加熱されたガスが断熱的に冷却されるか、放射的に冷却されるかにかかわらず、軌道運動は衝撃加熱されたガスから発生する電離放射を変調させる。この結果、電離放射の「パルス」が H_{II} 領域をほとんど減衰することなく外部に伝搬し、実質的に部分的に電離しないガスに到達して吸収される。これにより、電子密度が上昇し、free-free 放射が発生する。

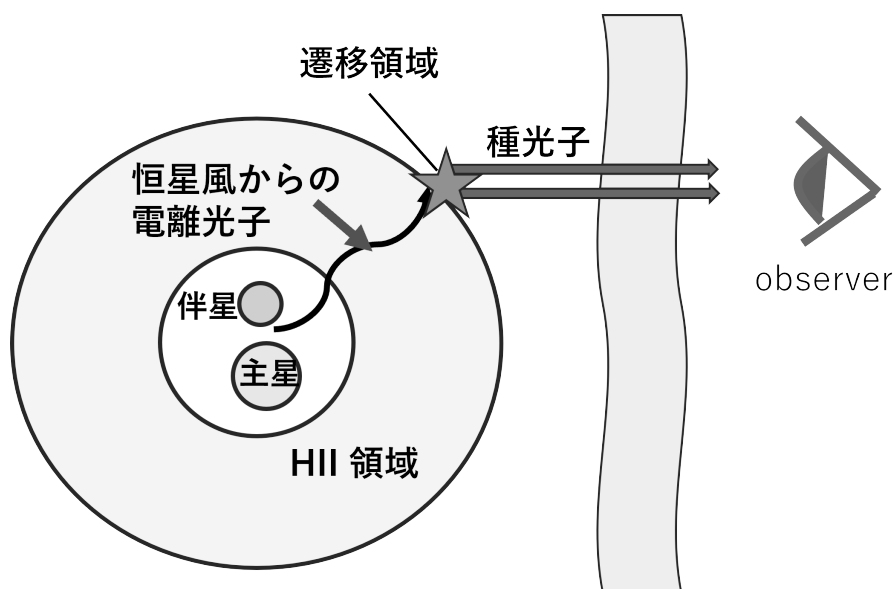


図 1: Colliding wind binary モデル概略図 (van der Walt 2011 を一部改編).

1.3.3 Spiral shock

Spiral shock モデル (Parfenov & Sobolev 2014) は、中心星が連星系を形成し、その周囲に回転円盤が存在すると仮定したとき、ガスの降着によって shock ができることでメタノールレーザーの強度が周期変動するというモデルである。概略図を図 2 に示す。

円盤からのガスの巻き込みが起こることで形成された spiral shock が、連星や円盤の回転に従い周期性を持ち回転する。周期的に形成される spiral shock が視線方向に対してメタノールレーザーと主星の間にあるとき、主星だけでなく shock も熱源となり、レーザーの励起に適した温度をもつガス柱密度を増加させる。同一視線速度のメタノールガスの柱密度が増加するため、メタノールレーザーの輝度が上昇する。

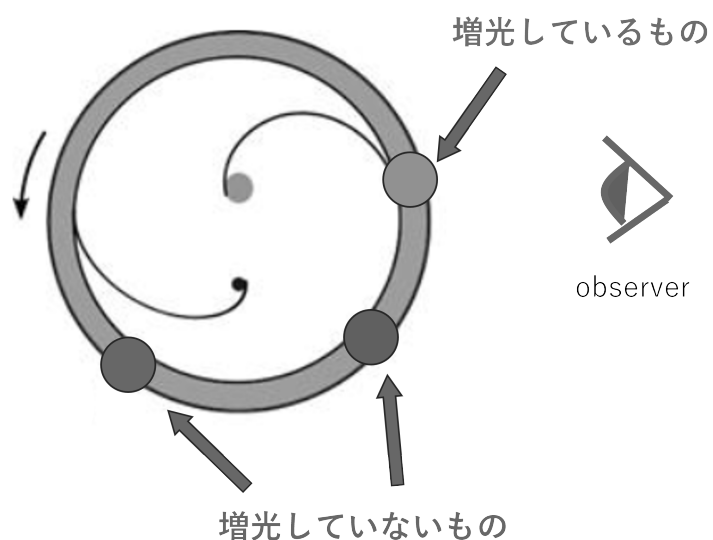


図 2: Spiral shock モデル概略図 (Parfenov & Sobolev 2014 を改変)

1.3.4 Periodic accretion

Periodic accretion モデル (Araya et al. 2010) は、降着円盤から、連星によって分裂したガスの塊が周期的に中心星へ落下することにより、原始星の光度が上がり、メーザースポットの周囲のダストが加熱されることによって、メーザーの周期的強度変動が起こるとされるモデルである。

1.3.5 Eclipsing binary

Eclipsing binary モデル (Maswanganye et al. 2015) は中心星が連星系を形成しており、その伴星が、主星周辺の HII 領域とメーザースポットの間を横切ることにより、メーザースポットに供給される種光子が一時的に減ることで、メーザーの周期的強度変動が起こるとされるモデルである。

1.4 研究目的

それぞれの周期変動モデルの必要条件を表 2 にまとめる。

周期変動モデル	変動するもの	必須なもの	変動パターン	強度変動する メーザースポット
脈動変動	柱密度		連続	全て
Collding wind binary	種光子	H _{II} 領域・連星	間欠	一部
Spiral shock	柱密度	連星	間欠	一部
Periodic accretion	柱密度	連星	間欠	全て
Eclipsing binary	種光子	H _{II} 領域・連星	連続・間欠	一部

表 2: 6.7 GHz メタノールメーザーが各々の周期強度変動するために必要な条件

本研究では、次章で示すように G034.39+0221 の周期変動メカニズムの解明を行うことを目的とする。

変動パターンが連続的か間欠的かについては単一鏡観測によってある程度調べることができ、全てのメーザースポットが強度変動するのか一部のメーザースポットが強度変動するのかについては VLBI 観測によって調べることができる。H_{II} 領域の付随については、高空間分解能のセンチ波電波連続波（周波数 $\lesssim 10$ GHz）観測によって調べることができる。

したがって、本研究は、対象天体 G034.395+0221 に対して、

1. H_{II} 領域の付随の有無の調査
2. 原始星が単独星か連星かの調査
3. 周期強度変動パターンの調査
4. VLBI 観測の解析

の 4 つについて調査及び新たに解析を行うことで、メタノールメーザー源 G034.395+0221 の周期強度変動のメカニズムを解明をする。

2 対象天体 G034.395+0.221

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 G034.395+0.221（以下 G34.39 とする）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 天体選定条件

本研究で解析を行った天体 G34.39 は、

1. 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 (2016 年時点)
2. 日本で観測できる天体
3. 過去に複数回 VLBI 観測が行われていない天体
4. 周期が 60 日未満の天体

の 4 つの条件をすべて満たす天体である。4 つ目の条件は、観測可能機会をなるべく多くする目的で、東アジア VLBI 観測網 (EAVN) の観測シーズン (約 5 か月) 内に複数回の増光期と静穏期が含まれるようにするために設けた。この 4 つの条件を満たすとして 6 天体を選出され、その中から G34.39 を選定した。

天体名	周期 (日)
G12.889+0.490	29.6
G14.230-0.509	23.9
G32.045+0.059 ※ 1	57.7
G034.395+0.221	29.3
G035.792-0.174 ※ 2	33.1
G036.705+0.096	53.0

選出された天体 (周期は平野 2020 より)

※ 1 茨城大学森泉 (2023) が解析済み ※ 2 茨城大学稲村 (2024) が解析中

2.2 天体諸元

以下に G34.39 の諸元、スペクトルおよびライトカーブを示す。

物理量	値	備考	Refernce
距離 d	1.56 kpc	VERA による 年周視差を用いて求めた	Kurayama et al. (2011)
光度 L	2100 $L_{\odot}$ (MM4)	文献中で求められた L を 距離 1.56 kpc を用いて 再計算した値	Rathborne et al. (2005)
stellar mass M	12–15 $M_{\odot}$ (MM4)	上記で求められた L から $L \propto M^3$ を用いて求めた値	Rathborne et al. (2005)

表 3: G34.39 の諸元

Rathborne et al. (2005) では、1.2mm 波の放射は光学的に薄い（透明）という特徴から、この波長ではダストからの放射を直接観測できるため、観測された放射の強さからダストの量を推定し、そこから全体の質量を計算していた。質量は $M = F_{\nu} D^2 / [\kappa_{\nu} B_{\nu}(T)]$ で推定を行い、ここで、

F_{ν} ：観測された放射の強度（フラックス）

D：距離

κ_{ν} ：ダストの不透明度（ダスト 1 g あたり）

$B_{\nu}(T)$ ：プランク関数（温度 T での放射強度）である。

ダストの温度を 30 K、ガスとダストの質量比を 100:1、ダストの不透明度（ $\kappa_{1.2\text{mm}}$ ）を $1.0 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、距離を 3.7 kpc として計算を行った結果、IRDC 全体の質量は約 $7500 M_{\odot}$ となり、ガウスフィッティングで各コアの質量を計算したところ、MM4 は $170 M_{\odot}$ という結果となっていた。しかし、この値は中心星の周辺のダストも含めた質量になっている。

また、光度は SED を graybody フィッティングに当てはめて推定を行っていた。graybody とは完全な黒体とは異なり、波長によって放射効率が変化する物体のことである。

3つのパラメータ

放射率指数（ β ）:1.8

250 μm での光学的厚み（ τ_{250} ）:0.25

ダストの温度（ T_D ）:約 33 K

を自由パラメータとして設定し、単純化のため、コアは等温（温度が一樣）、光源の大きさを 15 秒角と仮定し、計算を行った。その結果、MM4 は $12,000 L_{\odot}$ という結果となった。

しかしこの結果は、距離 3.7 kpc を使用して求めた値であったため、距離を 1.56 kpc に直して再計算を行った結果、光度を $2100 L_{\odot}$ と求め、この光度を用いて、ダストを含まない中心星の質量を $L \propto M^3$ の式から 12–15 $M_{\odot}$ と求めた。

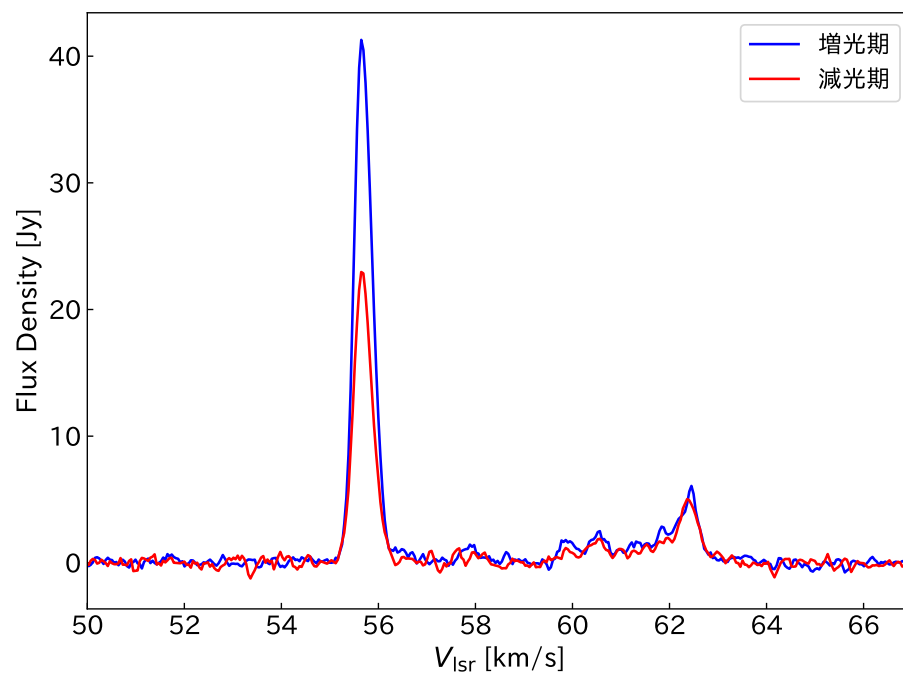


図 3: 日立単一鏡によって測定された G34.39 のスペクトル
 増光期：2021 年 8 月 19 日、静穏期：2021 年 9 月 3 日

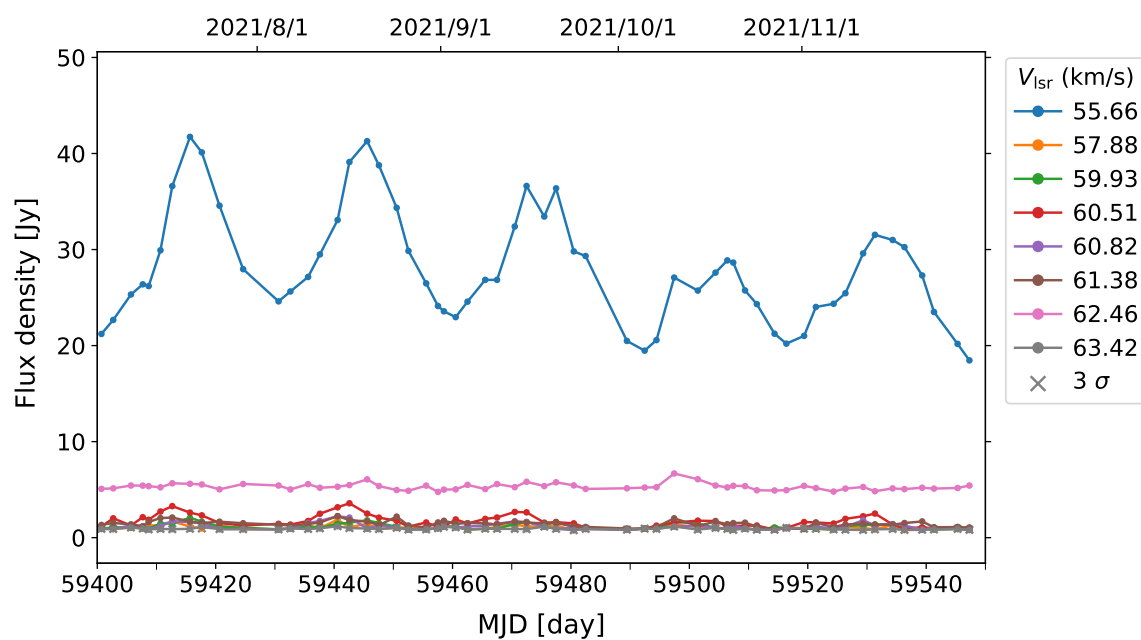


図 4: G34.39 の各速度成分のライトカーブ

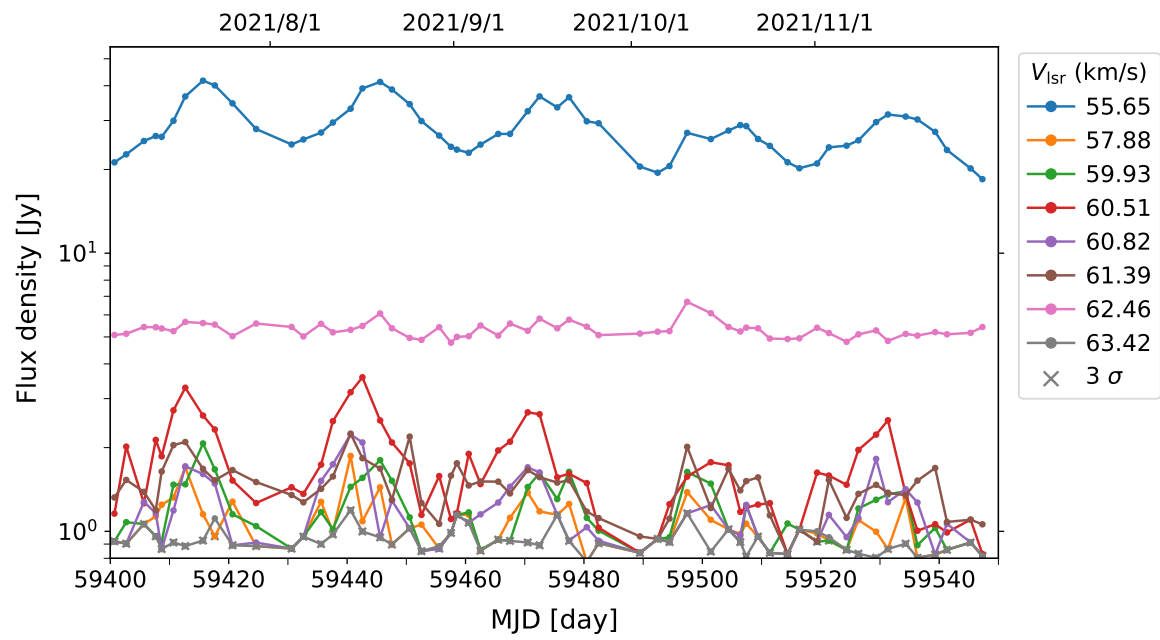


図 5: G34.39 の各速度成分のライトカーブ（縦軸をログスケールで示したもの）

3 文献調査

3.1 H_{II} 領域の付随の有無

6.7 GHz メタノールメーザーの H_{II} 領域の付随については、Hu et al. (2016) を参考に調査を行った。Hu et al. (2016) は、6.7 GHz メタノールメーザーラインと C バンド (4–8 GHz 帯) 連続波放射を VLA で同時に観測をした。H_{II} 領域は、この周波数帯での連続波放射源の一つである。

Hu et al. (2016) において観測を行われた 6.7 GHz メタノールメーザーの選出条件は、以下の通りである。

1. 「メタノールマルチビームカタログ (MMB; Caswell & Breen 2010; Green et al. 2010, 2012)」
2. 「アレシボ天文台メタノールメーザー銀河面サーベイ (AMGPS; Pandian et al. 2011)」
3. 「6.7 GHz メタノールメーザーのトルン 32m 望遠鏡によるカタログ (Szymczak et al. 2012)」
4. 既知の 6.7 GHz メタノールメーザーまたは MSFRs(大質量星形成領域) の他の個々の観測 (Caswell et al. 1995; Walsh et al. 1997, 1998; Xu et al. 2008; Caswell 2009)

のうち、VLA から見える赤緯 -30° 以北で、2 Jy 以上のピークフラックス密度を持つものであり、本研究の対象天体である G34.39 も含まれる。

表 4 に Hu et al. (2016) の観測諸元を示す。

観測したもの	6.7 GHz メタノールメーザーラインと C バンド (4-8 GHz 帯) 連続波放射を同時に観測
観測日程	2012/2/28、3/4、3/7、3/18、4/16
装置・アンテナ数・構成	VLA・25m × 27 台の干渉計を C 配列で設置 (最大基線長は 3395.7m)
観測した天体数	372 天体
6.7 GHz メタノールメーザー 観測時の周波数範囲	6664.5-6672.5 MHz
6.7 GHz メタノールメーザー の検出数	367 天体
検出基準	rms ノイズレベルの 5 倍
ノイズレベル	33 mJy/beam
連続波観測の周波数範囲	4.9840-6.0080 GHz, 6.6245-7.6485 GHz
連続波の検出数	279 field の連続波源 (1 field に複数の連続波源が存在する場合もあるので、合計連続波源は 349 個)

表 4: Hu et al. (2016) の概要

3.1.1 結果

Hu et al. (2016) において、6.7 GHz メタノールメーザーが連続波源と関連しているとみなされた条件は、

- ・ 6.7 GHz メタノールメーザーと連続波源との投影されたオフセットが 1pc よりも小さい
- ・ オフセットが連続波源を楕円とみなした場合の長半径よりも小さい

であり、検出された 367 個のメタノールメーザーは以下のように分類されている。

「A」 上記の条件をどちらも満たし、関連する連続波放出が検出されたもの

「B」 上記の条件のうちどちらかを満たし、メーザーの近傍で連続波放出が見られるが、メーザーと連続波源との間の物理的関係を裏付ける証拠がないもの

「N」 上記の条件に当てはまらず、連続波放出がないもの

「A」は 140 天体、「B」は 139 天体、「N」は 70 天体という結果になっている。

対象天体 G34.39 は、「B」に分類され、連続波が検出されたが、メーザーとの物理的な関係を裏付ける証拠なしという結果となった。

3.2 原始星が単独星か連星か

適切な先行研究を見つけることができなかったため、情報を得られなかった。

3.3 周期強度変動パターンの調査

茨城大学で行っている 6.7 GHz メタノールメーザーモニター観測の周期強度変動の解析結果（平野 2020）を以下に引用する（一部改変あり）。論文内では、安井（2015）によって作成された Lomb-Scargle 法という周期解析プログラムを用いて周期解析を行った。

3.3.1 Lomb-Scargle 法

通常、天文学におけるモニター観測では、他の観測との兼ね合いや観測装置の不調、天候の影響などにより、一定間隔で観測を行うことは難しく、データ点とデータ点の取得時間は不等間隔になってしまうことが多い。そのため、日立 32 m 電波望遠鏡によって得られた観測データも不等間隔の離散データである。ここで、Lomb-Scargle 法のおおまかな原理について解説する。詳細については、Lomb (1976)、Scargle (1982)、及び安井 (2015) の論文に記載されている。

Lomb-Scargle 法の基本的な原理は、与えられた不等間隔の時系列データから周期性を推定することにある。まず、一定の観測間隔で得られた N_0 個の離散的な時系列データ

に対して、パワースペクトルの推定に当たるピリオドグラムは次のように表される。

$$P(\omega_n) = \frac{1}{N_0} |DFT(\omega_n)|^2$$

ここで、 DFT は離散フーリエ変換を示し、 ω_n は強度変動の周波数を表す。しかし、式 (2.1) は不等間隔で取得されたデータには適用できないため、Lomb-Scargle 法では、次のように修正されたピリオドグラムを用いる。：

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cos(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \sin(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}$$

この式 (2.2) を Lomb-Scargle ピリオドグラムと呼ぶ。ここで、 τ は次の条件を満たす値である。：

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \sin 2\omega t_j}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos 2\omega t_j}$$

3.3.2 誤警報確率

Lomb-Scargle 法を用いて周期を導出することができるが、得られたピリオドグラムのパワー（以下、L-S Power と呼ぶ）が有意であるかどうかを評価するためには、単に計算するだけでは不十分である。そこで、誤警報確率 (False alarm Probability; FaP) を指標として用いる。誤警報確率とは、「雑音を信号である」と誤って判断する確率であり、この確率を α とすると、次のように表される：

$$\alpha = 1 - [1 - \exp(-z)]^N$$

ここで、 z は L-S Power、 N は計算に用いる独立周波数の数であり、この α の値が小さいほど、Lomb-Scargle 法によって導出された周期は信頼性が高いとされる。なお、 α は百分率ではなく、1 に対する割合であることに注意が必要である。

3.3.3 オーバーサンプリング

Lomb-Scargle 法は不等間隔のデータに適用可能だが、データ点の間隔が粗いと周期を正確に求めることが難しくなる。そこで、周波数分解能を高めるためにオーバーサンプリング（補間）を行う。オーバーサンプリングとは、データ数 N_0 を変えずに元の時系列に

$$X(t_j) = 0, \quad j = N_0 + 1, \dots, M$$

となる $M - N_0$ 個の 0 点を挿入することで、周波数のサンプリング間隔を細かくする手法である。例えば、2 倍にオーバーサンプリングを行うと、周波数分解能が $1/2$ になる。ただし、オーバーサンプリングを大きくすると L-S Power が小さくなることに注意が必要である。

安井（2015）の周期解析プログラムでは、解析時に何倍にオーバーサンプリングを行うかを ofac（over sampling factor）というオーバーサンプリング係数で指定でき、このプログラムで導出される独立周波数の数 N は次のように与えられる：

$$N = \text{ofac} \times \frac{N_0}{2}$$

ofac の設定については、Goedhart et al. (2014) を参考にし、ofac=4 とすることが保守的であるとされている。しかし、本解析ではより正確に周期を求めるため、以下の手法を取る：

1. ofac=4、つまり 4 倍にオーバーサンプリングを行い、周期性があるかを判断する。
2. ofac=16、つまり 16 倍にオーバーサンプリングを行い、周期を導出する。

この手法により、周期の誤差を ofac=1 の場合に比べて小さくすることができる。

3.3.4 周期解析の流れ

周期解析は以下の様に行われた。

1. モニター観測で取得された、各天体の観測データのスペクトル図を作成する。天体を複数回測定することで速度成分を定義し、それらの最大値の強度を取り出す。ここでの強度とは、正確にはフラックス密度 [Jy] である。
2. 手順 1 で取り出した、各天体のそれぞれの速度成分の強度の時間変動を示した強度変動プロットを作成する。
3. Lomb-Scargle 法を用いて、各天体のそれぞれの速度成分のピリオドグラムを作成する。
4. 手順 3 の図で、L-S Power の最大値を読み取り、誤警報確率 $\alpha = 0.0001$ の線を下回っているかどうかを確認する。
5. ピリオドグラムのパワーの最大値に対する横軸（周期）の値を読み取り、それが解析期間の 1/3 より短いかどうかを確認する。

平野（2020）では、一つの天体に対し、いずれかの速度成分が手順 4、5 の二つの条件を満たす場合、その天体は周期変動天体であると判断された。L-S Power の最大値の誤警報確率 α が非常に小さく、ピークが一つで他の値と比べて卓越しているものほど、導出された周期は信頼性が高く、天体固有の強度変動の可能性があると考えられる。しかし、選出条件として、手順 4 の L-S Power の最大値が誤警報確率 $\alpha < 0.0001$ を満たすこととしか課していないため、L-S Power のピークが複数のものや、ピークが一つであっても他の値と比べて卓越していないものも、周期変動天体として検出された。つまり、物理量での判定だけでは導出周期の信頼性は低いため、手順 4 の選出条件に加え、より厳しい物理量での判定基準、そして見た目での判定基準を設けた。

3.3.5 判定基準

周期変動天体であると判断された天体の速度成分のうち、新たに検出することができた周期変動天体の導出周期がどれくらい有意性があるのかが考察された。

信頼性の高い新検出長周期変動天体の選出には、物理量での判定に加えて、見た目での判定基準を設ける必要があり、平野（2020）では、以下の表 5 のような四つの物理量判定基準と三つの見た目判定基準が設けられた。

物理量判定基準	見た目判定基準
強度変動幅が 10 Jy よりも大きい	増光期の強度が毎回同程度の値
α が 1.00×10^{-12} よりも小さい	強度変動パターンが きれいに繰り返している
$\alpha < 0.0001$ を満たすピークが一つ、 あるいはそれが卓越している	増光期と静穏期が見分けられる
$\alpha < 0.0001$ を満たすピークが複数のとき、 それらの周波数は基本波と高調波の関係	

表 5: 導出周期判定基準

表 5 の基準をもとに、新たに検出された長周期変動天体の 596 速度成分を、物理量判定基準も見た目判定基準も、それぞれ二つ以上満たす場合は “○”、それ以外は “×” として分類が行われた。

3.3.6 結果

対象天体 G34.39 の周期解析結果（平野 2020）を図 6 に示す。

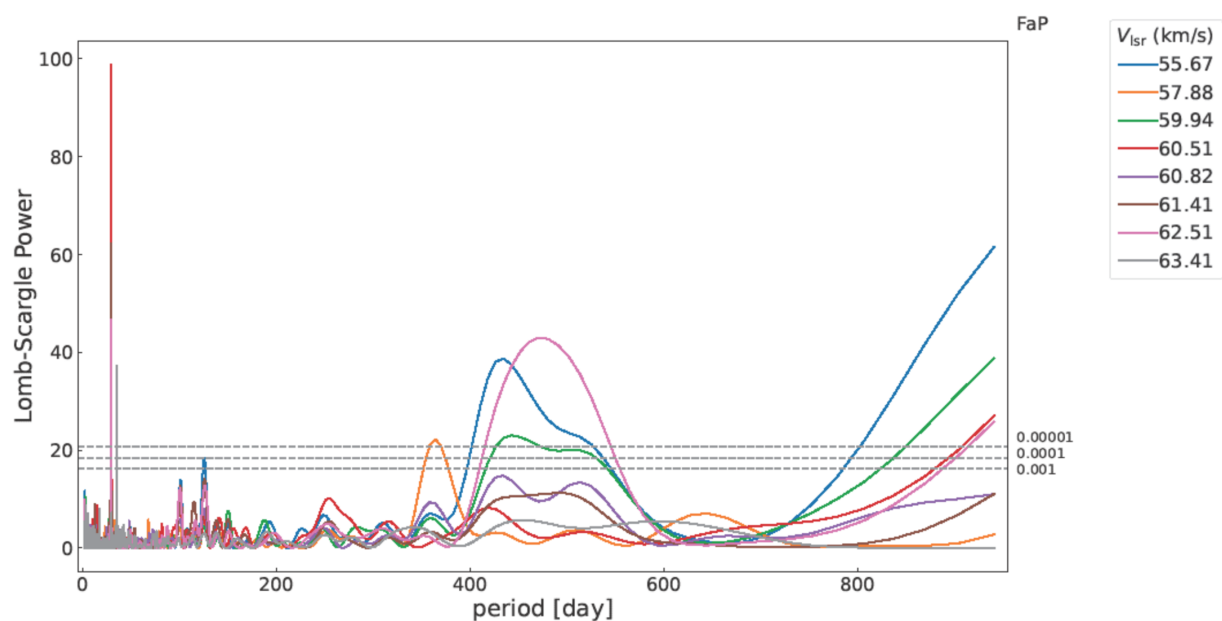


図 6: G34.39 の周期解析結果

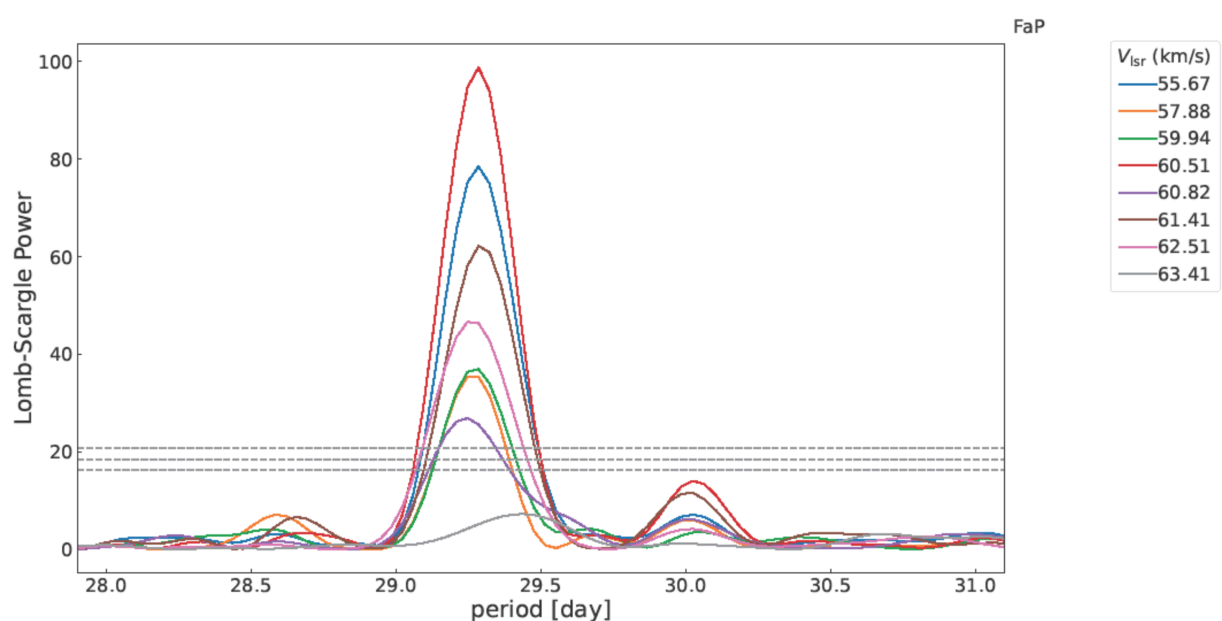


図 7: G34.39 の周期解析結果（横軸の 50 日までの範囲を拡大したもの）

検出された速度成分の判定結果（平野 2020）を表 6 に示す。

解析結果は、速度成分が 8 成分検出され、そのうち 55.67、57.88、59.94、60.51、60.82、61.41[km/s] の 6 つの成分の周期が 29.2-29.3 日という結果となった。また、8 つのうち物理量判定基準、見た目判定基準ともに○なのは 55.67、59.94、60.51、61.41、62.51、63.41[km/s] の 6 つの成分という結果となった。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	周期 T[day]	L-S Power	誤警報確率 α	物理量 判定基準	見たい 判定基準
55.65	29.3	76.26	$< 5.81 \times 10^{-13}$	○	○
57.89	29.3	35.94	1.16×10^{-12}	×	○
59.95	29.3	36.46	5.81×10^{-13}	○	○
60.52	29.3	98.90	$< 5.81 \times 10^{-13}$	○	○
60.81	29.3	26.67	1.37×10^{-8}	×	○
61.39	29.3	60.84	$< 5.81 \times 10^{-13}$	○	○
62.46	470.4	44.62	$< 5.81 \times 10^{-13}$	○	○
63.41	35.3	36.84	5.81×10^{-13}	○	○

表 6: 検出された速度成分の判定結果

3.4 周期の再解析

平野（2020）では、解析に 2012 年 12 月 30 日から 2020 年 10 月 2 日までのデータを使用し、強度が 3σ 以下のデータを「 3σ の値を持つもの」として扱っていた。今回、2012 年 12 月 30 日から 2025 年 2 月 8 日までのデータを使用し、強度が 3σ 以下のデータを使用しないとして解析の精度を上げて周期の再解析を行った。結果を図 8 に示す。

8 つの速度成分のうち 6 つの成分の周期が 29.3 日だと求められた。62.46 km/s の成分は 29.3 日には周期はなく、1146.1 日の周期が検出され、63.41 km/s の成分は周期性なしという結果となった。

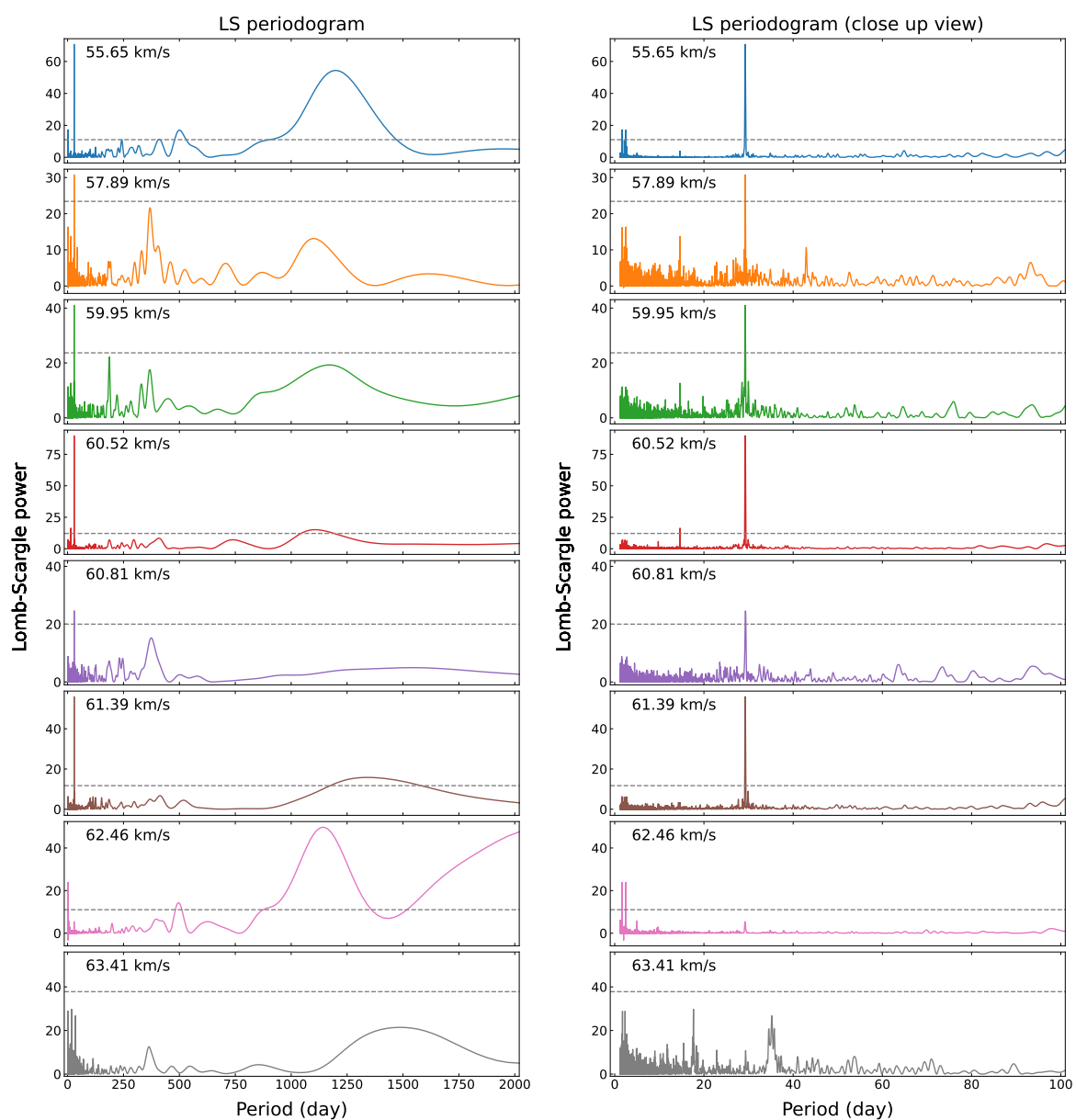


図 8: G34.39 の周期再解析結果

再解析において検出された速度成分の判定結果を表 7 に示す。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	周期 T [day]	L-S Power	誤警報確率 α
55.67	29.3	70.71	1.08×10^{-60}
57.88	29.3	30.76	1.47×10^{-8}
59.94	29.3	41.02	2.00×10^{-12}
60.51	29.3	89.76	7.98×10^{-73}
60.82	29.2	24.6	8.70×10^{-8}
61.41	29.3	55.94	7.28×10^{-43}
62.51	1146.1	49.76	5.35×10^{-40}
63.41	周期性なし	29.77	7.11×10^{-4}

表 7: 再解析において検出された速度成分の判定結果

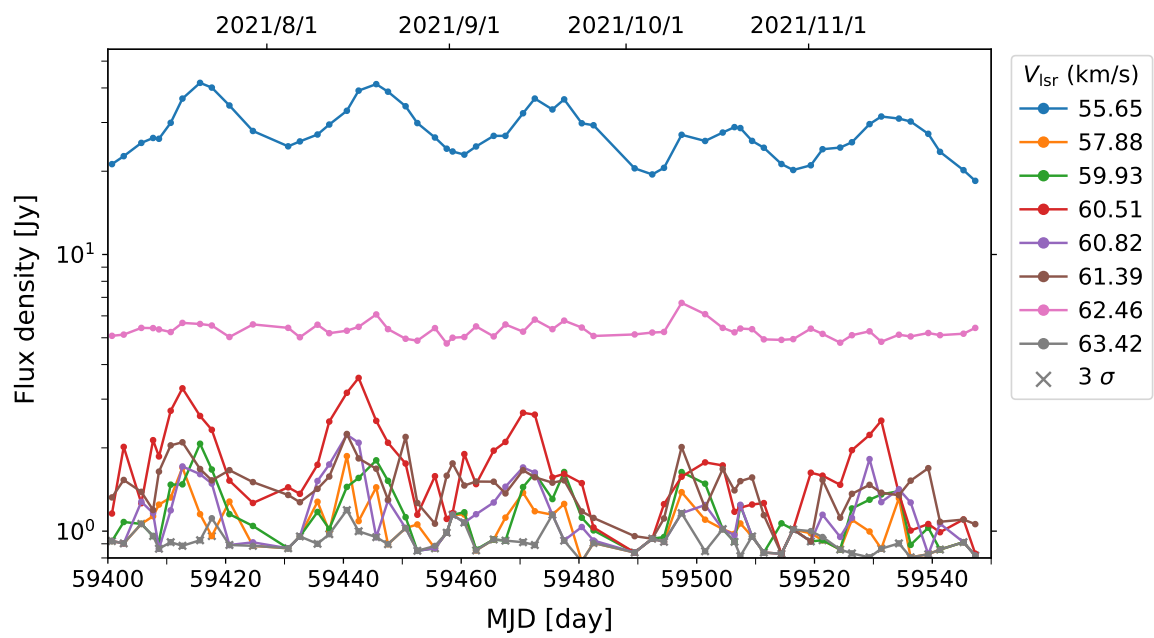


図 9: G34.39 のライトカーブ (縦軸をログスケールで示したもの)

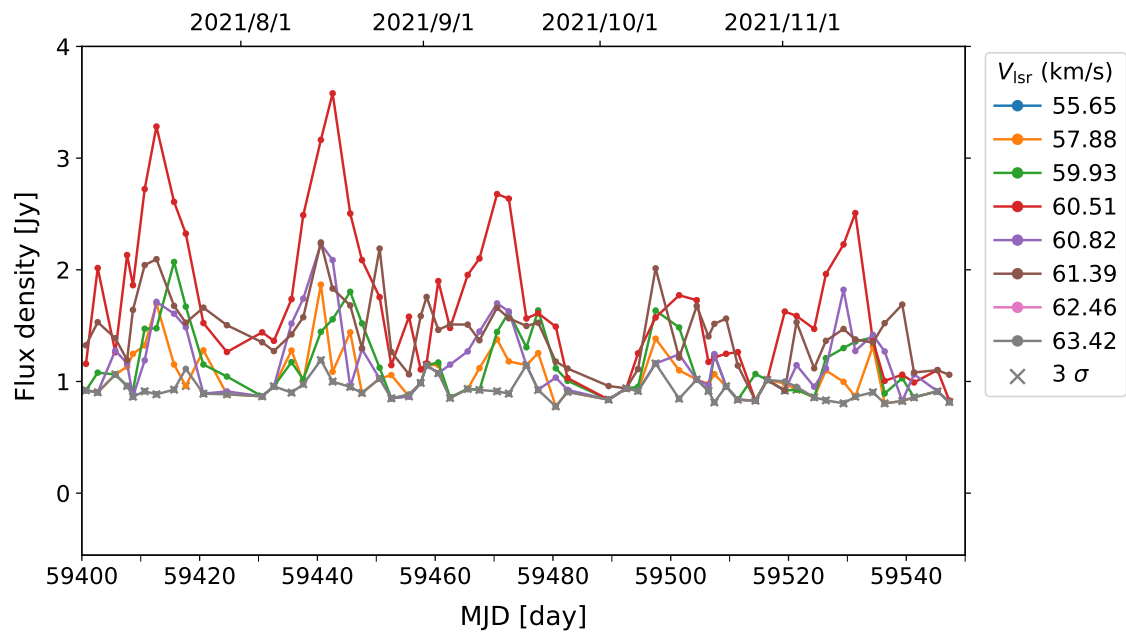


図 10: G34.39 のライトカーブ (縦軸の 0-4 までを拡大したもの)

周期強度変動については図 9-10 に示したライトカーブの見た目から 55.65、60.52、61.39 [km/s] の成分は連続的な変動、57.89、59.95、60.81、62.46 [km/s] の成分は間欠的な変動だと読み取った。

4 VLBI 観測

4.1 観測概要

本研究で解析に用いたデータは、EAVN を用いて 2 エポック (2021 年 9 月 14 日 [Epoch 1]、2021 年 10 月 6 日 [Epoch 2]) 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、蔚山、日立の計 6 局である。各アンテナの配置を図 11 に示す。観測参加局やビームサイズなどの情報を表 7 に示す。各エポックとも、対象天体 G34.39 および、遅延残差補正とバンドパス補正のために較正天体 1741-038 および 2223-052、振幅ゲイン較正のために較正天体 G35.197 - 0.743、大気遅延の補正のために 1853+027 を適宜観測している。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。メーザーの増光期 (最も明るい時期) と静穏期 (最も暗い時期) のそれぞれにタイミングを合わせて VLBI 観測を行うことにより、どこのメーザースポットが強度変動を示すのかを調べることが可能となるため、G34.39 に付随するメタノールメーザーを日立モニター観測のデータを用いて、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 G34.39 のライトカーブを用いて図 12 に示す。これより Epoch 1 の観測はメーザーの増光期ではあるが強度が極大となった日に実行されていないことがわかる。一方、Epoch 2 の観測は静穏期の中で強度が極小となった日に実行されていたことがわかる。



図 11: 各アンテナの配置 (Google Map を改変)

観測日	Epoch 1: 2021-9-14, Epoch 2: 2021-10-6
参加局	水沢、入来、小笠原、石垣、蔚山、日立 (Epoch 2 は水沢は観測に失敗したため、他 5 局を使用)
観測周波数および帯域幅	6.600 – 6.856 GHz (16 MHz x 16 IFs) メタノールメーザーの解析には 6.664 – 6.6860 GHz の IF のみを用いる。
分光点数	1IF につき 8192 チャンネル
観測偏波	LHCP
対象天体	G34.39+0.221 (G34.39)
バンドパス較正天体	1741–038、2223–052
振幅ゲイン較正天体	1853+027
振幅ゲイン較正天体	G35.197–0.743

表 8: VLBI 観測概要

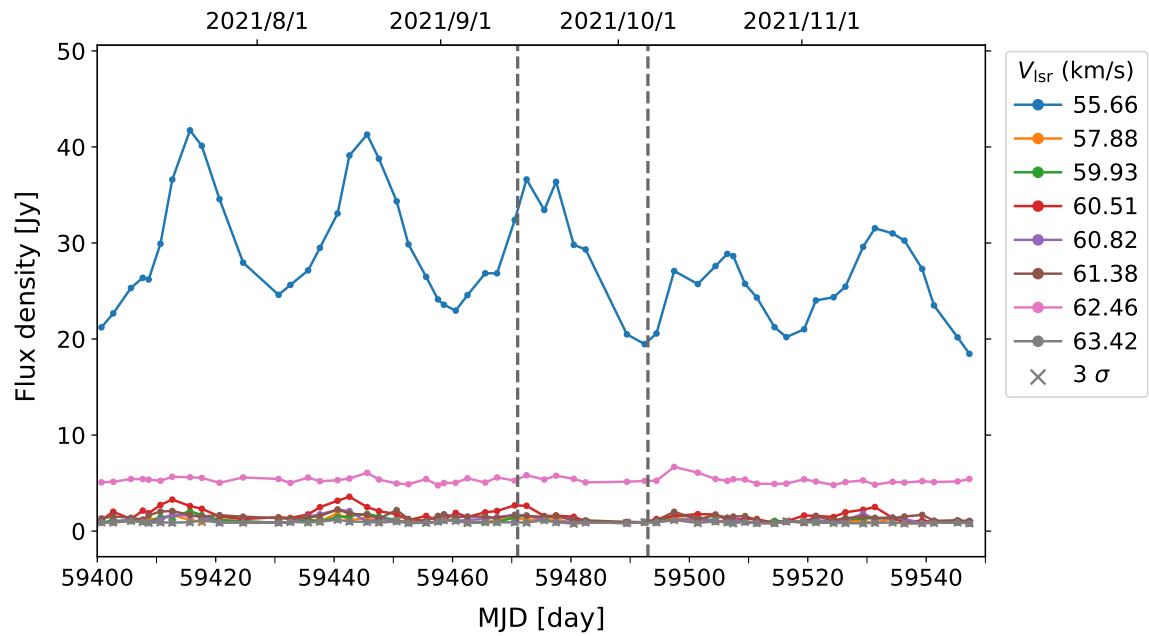


図 12: 日立単一鏡モニター観測によって求められた G34.39+0.221 の各速度成分の強度変化と VLBI 観測日との比較。Epoch 1 (左の黒破線) の観測はメーザーの増光期ではあるが強度が極大となった日に実行されていないことがわかる。一方、Epoch 2 (右の黒破線) の観測は静穏期の中で強度が極小となった日に実行されていたことがわかる。

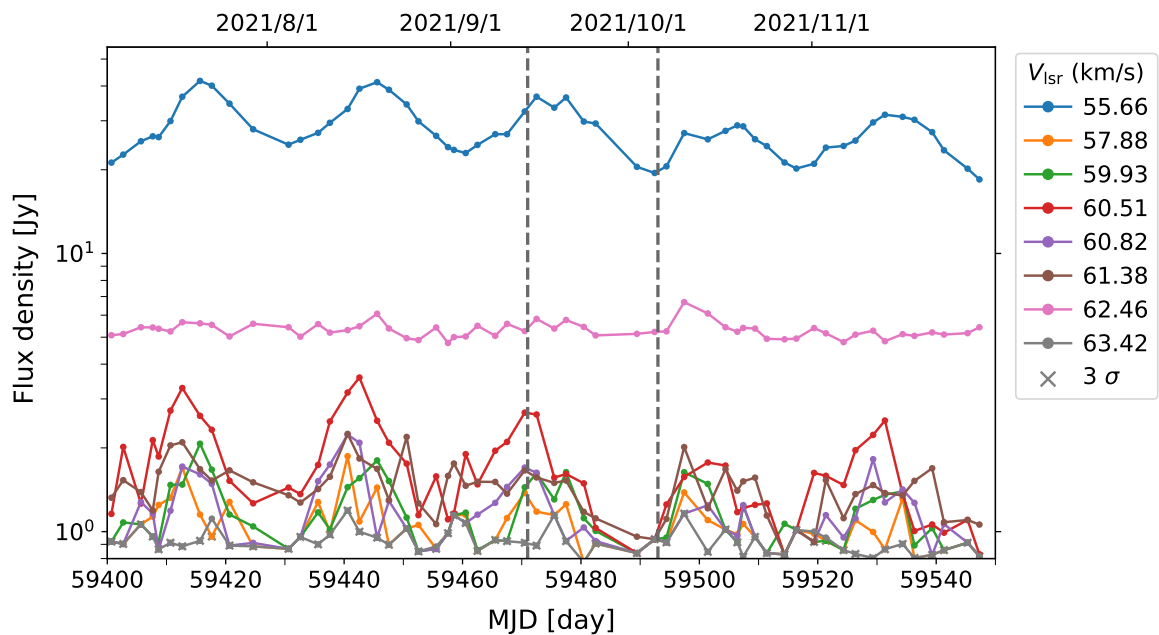


図 13: 日立単一鏡モニター観測によって求められた G34.39 の各速度成分の強度変化と VLBI 観測日との比較。(縦軸をログスケールで示したもの)

4.2 観測データの解析

データの解析には、Astronomical Image Processing System (AIPS) と Difmap を用いて行った。解析手順は以下の通りである。

1. FITS データ読み込み、データチェック
2. 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)
3. バンドパス位相特性較正
4. 遅延時間残差およびその変化率の較正
5. ドップラー較正
6. 振幅ゲイン較正 (テンプレート法)
7. メーザーピークによるフリンジフィッティング
8. Dirty Image 作成
9. CLEAN Image 作成 (ピークチャンネル)
10. self calibration
11. CLEAN Image 作成 (全チャンネル)
12. メーザースポットのパラメーター取得

以下にそれぞれの段階で行った解析手順を説明する。

1. 該当する FITS データ読み込み、データチェック
task FITLD を用い、該当する複数ある FITS データの読み込みを行い、AIPS 内に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を行った。
また、task UVFLG を用いて、異常のある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. 振幅ゲイン較正 (ベースライン規格化及びバンドパス振幅補正)
task ACCOR によって、自己相関のデータを用いベースラインの規格化を行った。また、task BPASS を用いて、各アンテナのバンドパスの振幅較正を行った。
3. バンドパス位相特性較正
1741-038 および 2223-052 を用いてバンドパス位相較正解を作成し、task BPASS により各局の振幅における帯域通過特性 (バンドパス特性) を除去を行った。
4. 遅延時間残差およびその変化率の較正
task FRING を用いて、相関処理時の遅延時間補正の残差を、明るい連続波源 1741-038 および 2223-052 を用いて較正をした。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源 1853+027 を用いて較正をした。
5. ドップラー較正
task SETJY にてドップラー較正を行うため、チャンネルと視線速度値の対応付

けを行い、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ることでドップラー効果の追尾較正を行った。

6. 振幅ゲイン較正 (テンプレート法)

task SPLIT を用いて G35.197-0.743 の南中時刻に近い自己相関スペクトルを用い、テンプレートファイルを作成し、task ACFIT により、テンプレート法を用いた振幅ゲイン較正を行った。テンプレート法とは「メーザーは 1 日以内のタイムスケールでは時間変動が起こらず、自己相関スペクトルの振幅の時間変動は全てシステム起因である」という仮定の下で、システムゲインの時間変動補正を行う方法である。

7. 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、メーザーピークのチャンネルを用いて、フリンジフィッティングによる位相解と遅延時間変化率の解の導出を行った。その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。

8. Dirty Image 作成

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

9. CLEAN Image 作成 (ピークチャンネル)

self calibration を行うため、Difmap を用いて一度強度ピークチャンネルの CLEAN Image を作成した。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し、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た。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いた。

10. self calibration

9 で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、得られた振幅・位相解をメーザー放射がみられる全チャンネルに適用した。

11. CLEAN Image 作成 (全チャンネル)

セルフキャリブレーション後のビジビリティから、task IMAGR を用いてメーザーの放射が認められる全てのチャンネルの CLEAN image を作成した。

12. メーザースポットのパラメーター取得

作成した CLEAN Image 内から task jmfitt を用いて、メーザースポットのピーク位置とその強度等のパラメータを取得した。

4.3 結果

現段階の結果として、Epoch 1 の CLEAN Image を図 14 に、Epoch 2 の CLEAN Image を図 15 に示す。

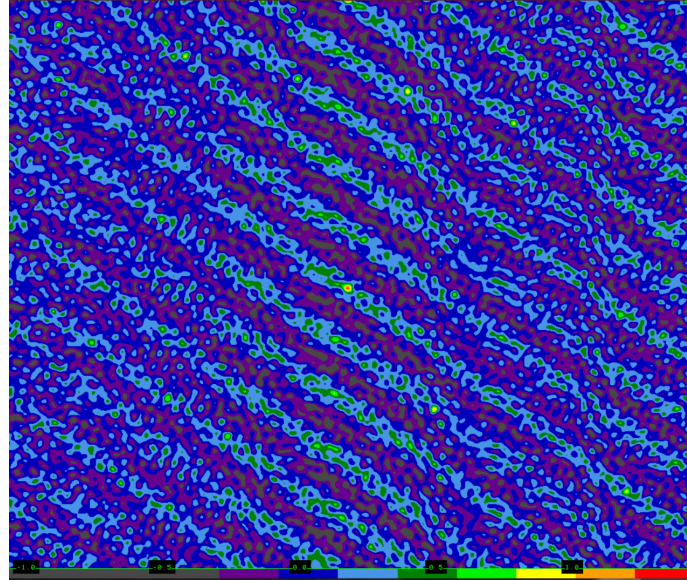


図 14: Epoch 1 の CLEAN Image (55.6 km/s [1592 チャンネル])

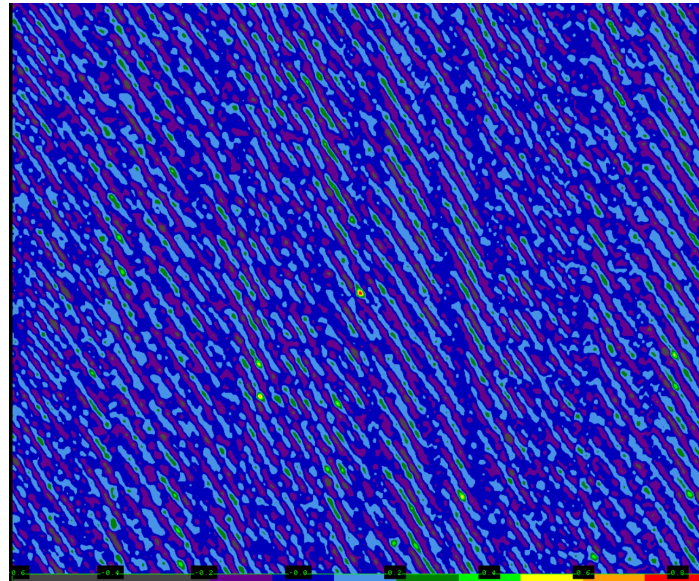
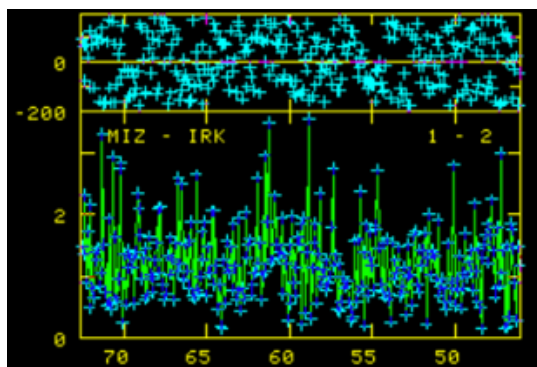
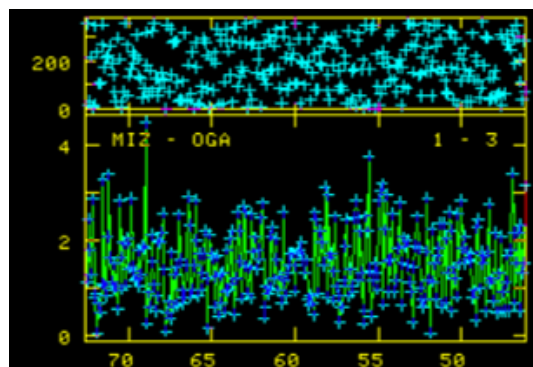


図 15: Epoch 2 の CLEAN Image (55.6 km/s [1567 チャンネル])

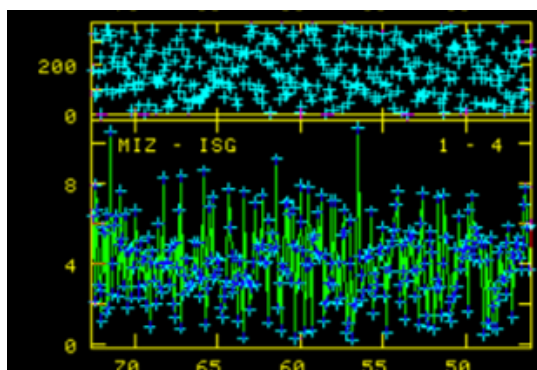
図 16 に Epoch 1 の全 15 基線のクロスパワースペクトル (43–75 km/s) を示す。



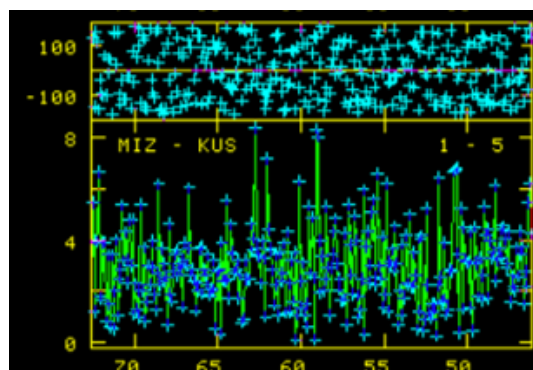
(a) Epoch 1
水沢-入来のクロスパワースペクトル



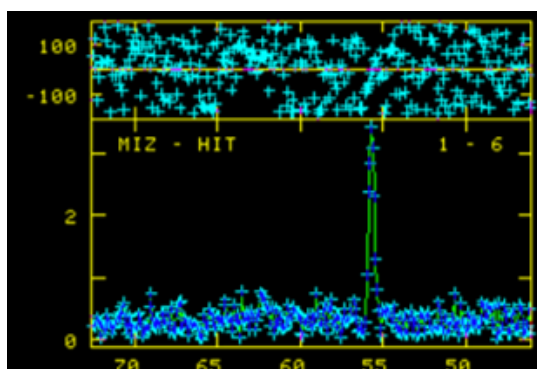
(b) Epoch 1
水沢-小笠原のクロスパワースペクトル



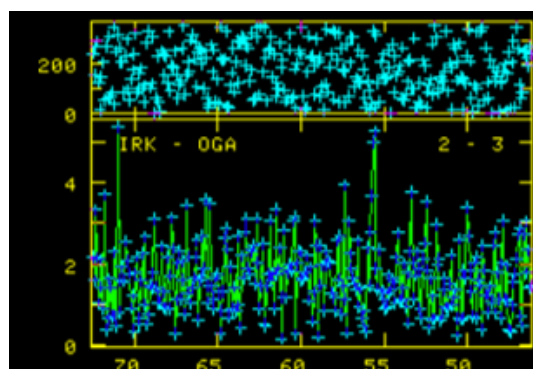
(c) Epoch 1
水沢-石垣のクロスパワースペクトル



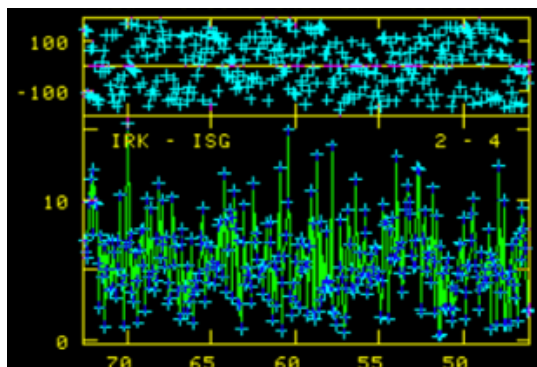
(d) Epoch 1
水沢-蔚山のクロスパワースペクトル



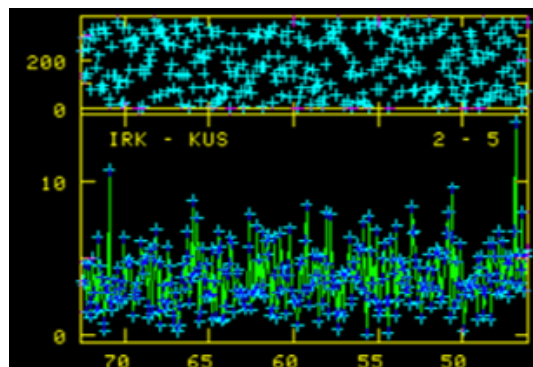
(e) Epoch 1
水沢-日立のクロスパワースペクトル



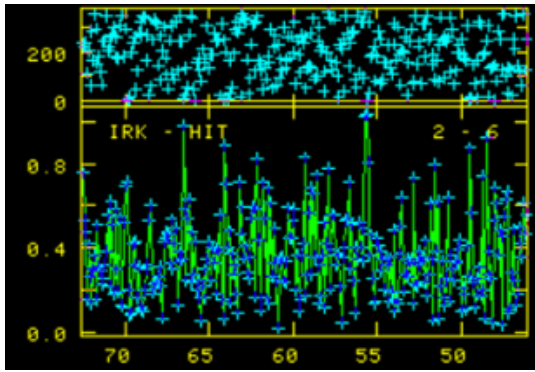
(f) Epoch 1
入来-小笠原のクロスパワースペクトル



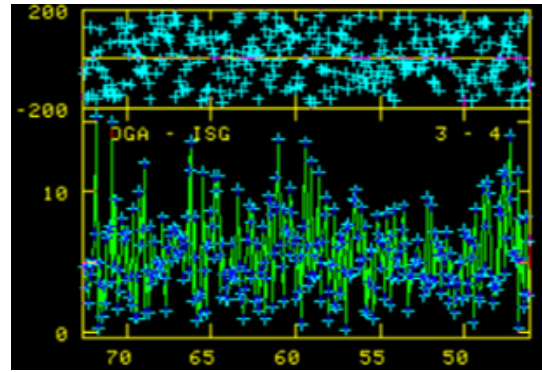
(g) Epoch 1
入来-石垣のクロスパワースペクトル



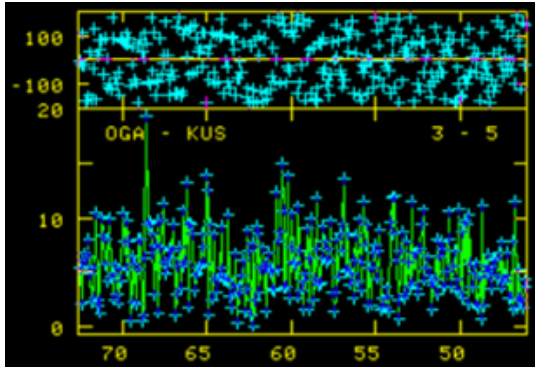
(h) Epoch 1
入来-蔚山のクロスパワースペクトル



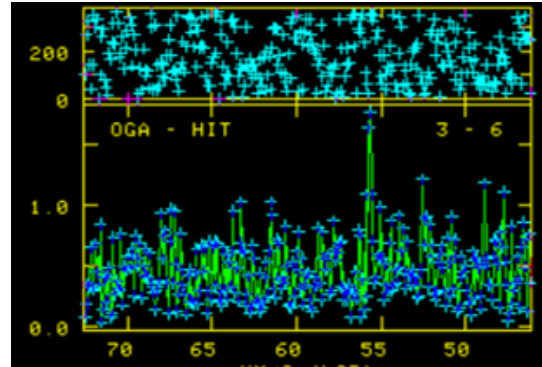
(i) Epoch 1
入来-日立のクロスパワースペクトル



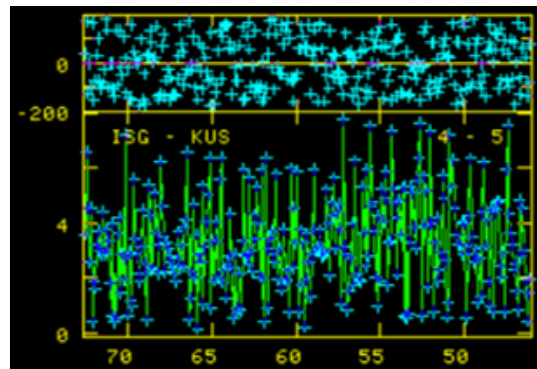
(j) Epoch 1
小笠原-石垣のクロスパワースペクトル



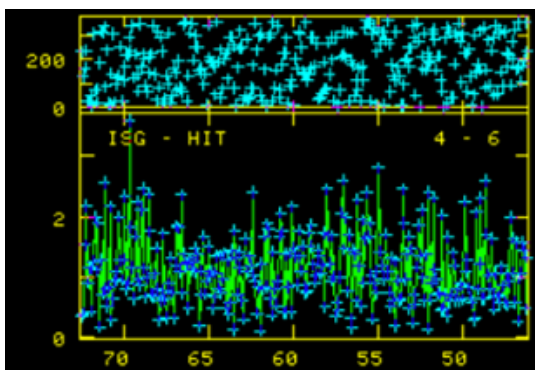
(k) Epoch 1
小笠原-蔚山のクロスパワースペクトル



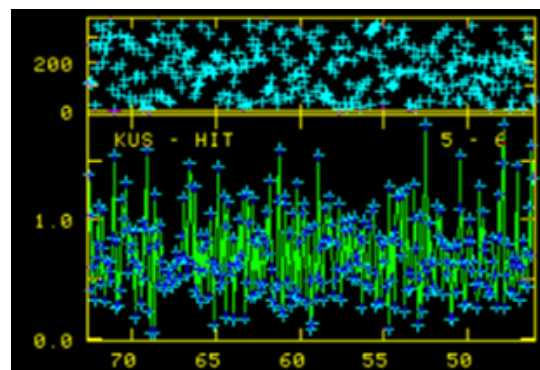
(l) Epoch 1
小笠原-日立のクロスパワースペクトル



(m) Epoch 1
石垣-蔚山のクロスパワースペクトル



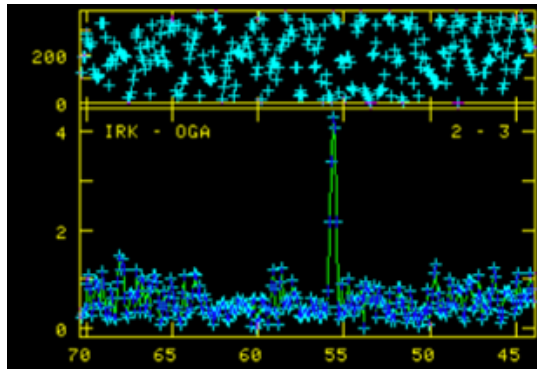
(n) Epoch 1
石垣-日立のクロスパワースペクトル



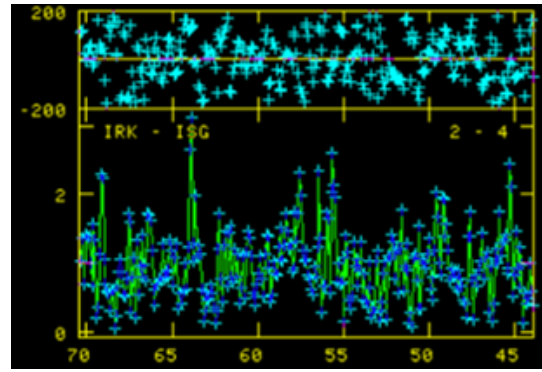
(o) Epoch 1
蔚山-日立のクロスパワースペクトル

図 16: Epoch 1 のクロスパワースペクトル

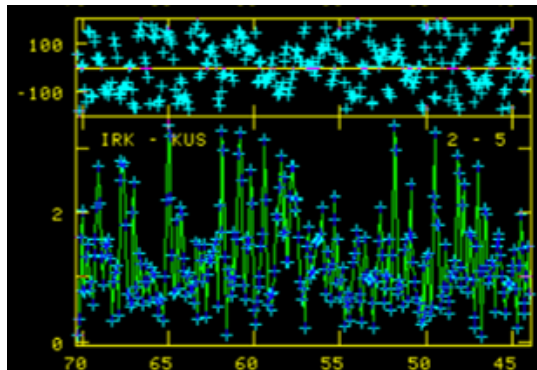
図 17 に Epoch 2 の全 10 基線のクロスパワースペクトル (46–73 km/s) を示す。Epoch 2 は水沢は観測に失敗したため、他 5 局を使用した。



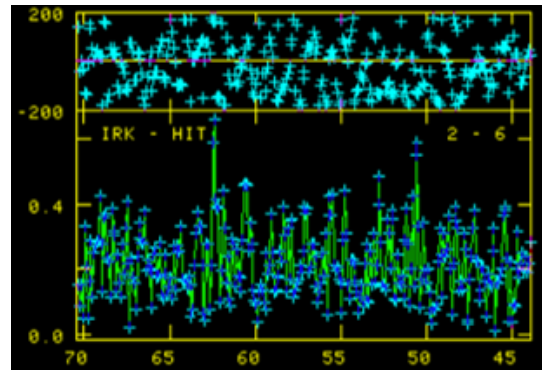
(a) Epoch 2
入来-小笠原のクロスパワースペクトル



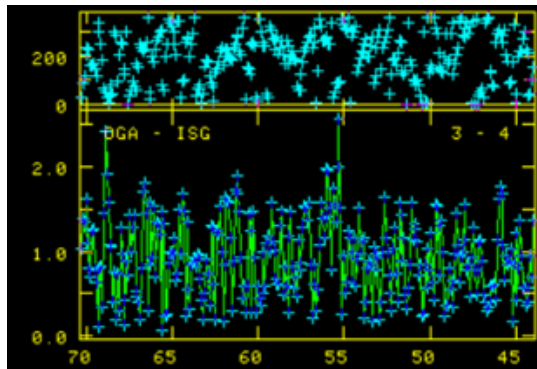
(b) Epoch 2
入来-石垣のクロスパワースペクトル



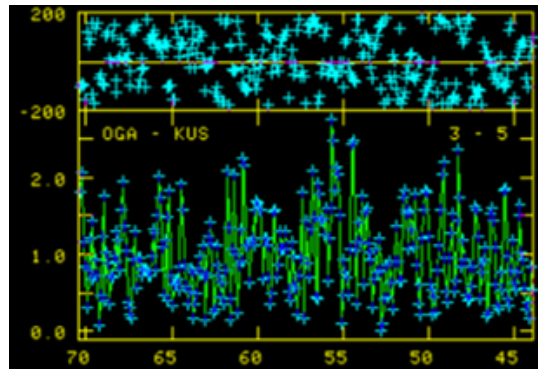
(c) Epoch 2
入来-蔚山のクロスパワースペクトル



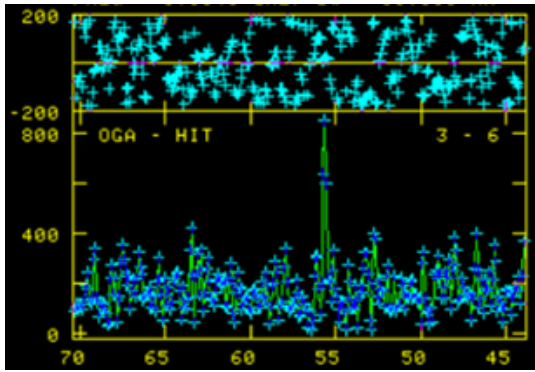
(d) Epoch 2
入来-日立のクロスパワースペクトル



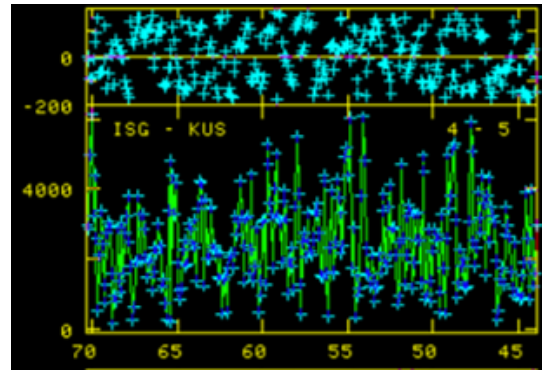
(e) Epoch 2
小笠原-石垣のクロスパワースペクトル



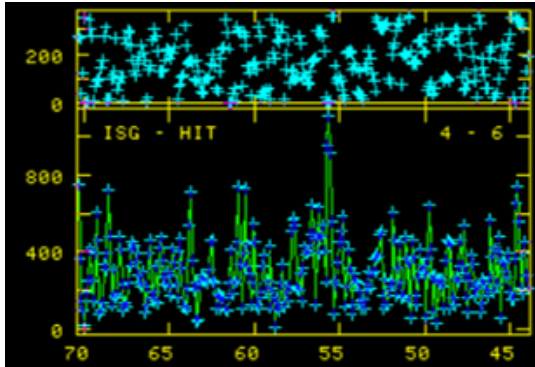
(f) Epoch 2
小笠原-蔚山のクロスパワースペクトル



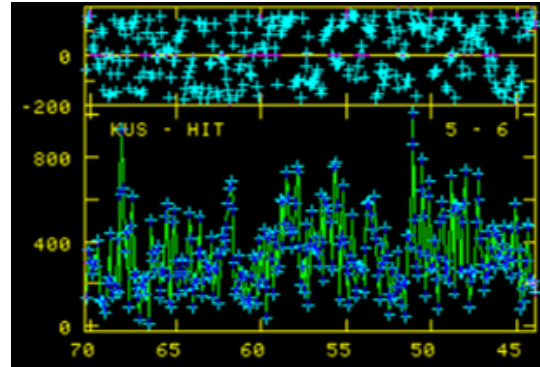
(g) Epoch 2
小笠原-日立のクロスパワースペクトル



(h) Epoch 2
石垣-蔚山のクロスパワースペクトル



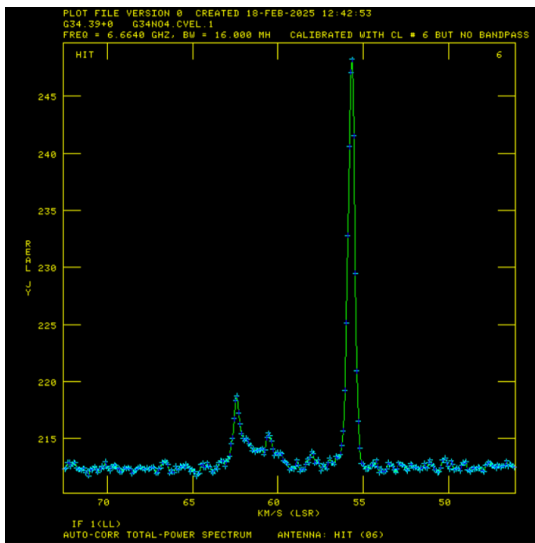
(i) Epoch 2
石垣-日立のクロスパワースペクトル



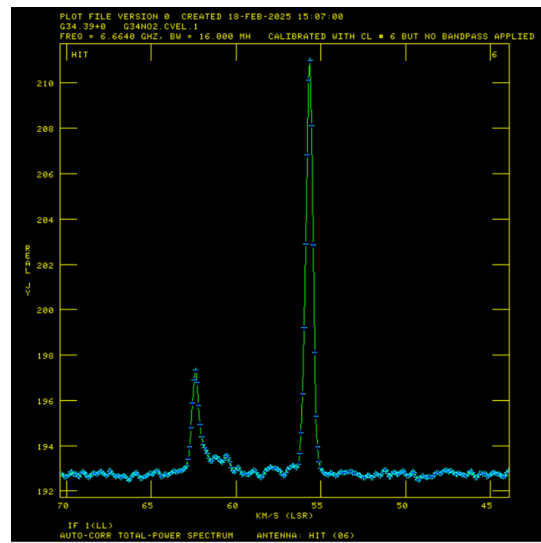
(j) Epoch 2
蔚山-日立のクロスパワースペクトル

図 17: Epoch 2 のクロスパワースペクトル

図 18 に、Epoch 1、Epoch 2 の日立局の自己相関スペクトルを示す。



(a) Epoch 1 の日立局の自己相関スペクトル



(b) Epoch 2 の日立局の自己相関スペクトル

図 18: Epoch 1、2 の日立局の自己相関スペクトル

図 16–18 で示したクロスパワースペクトルから読み取った各基線の強度が最大の速度成

分である 55.6 km/s 成分の強度とノイズレベルと、日立局の自己相関スペクトルから読み取ったそれぞれの Epoch の 55.6 km/s 成分の強度を表 8 に示す。

	各基線のクロスパワースペクトルにおける 55.6 km/s 成分の強度 [Jy](S) とノイズレベル [Jy](N)										日立局の自己相関 スペクトルにおける 55.6 km/s 成分の強度 [Jy]
	水沢-日立		小笠原-日立		入来-日立		石垣-日立		入来-小笠原		
	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	
Epoch 1	3.5	0.5	1.8	0.8	0.7	0.3	ND	2.0	3.0	1.0	35
Epoch 2	NA	NA	0.8	0.4	ND	0.4	1.1	0.5	4.0	1.0	18

表 9: 各局の SN と日立局の自己相関スペクトルの強度

クロスパワースペクトルの結果、から、Epoch 1 の水沢-日立の基線では検出されたが、日立局の自己相関スペクトルが 35Jy に対し、3.5Jy ほどしか検出されていなかった。今回の EAVN の最短距離は水沢-日立であり、その距離は 273.13 km (EAVN Status Report for 2025A Semester の Table 1 より算出) なので、感度を持つ最大のスケールは

$$\frac{4.5 \times 10^{-5}}{273.13} \times \frac{180}{\pi} \times 3600 = 0.034 = 34 \text{ ミリ秒角}$$

$$0.034 \times \frac{\pi}{180} \times \frac{1}{3600} \times 1560 \times 206,265 = 53.014 \text{ au}$$

となる。したがって約 53 au よりも天体が広がっていることが明らかになった。この値は、Minier et al. (2002) によって求められた 6.7 GHz メタノールメーザースポットの構造 (直径 2–20 au の core と、直径 12–290 au の halo から構成される) と矛盾しない。また、Epoch 1 (増光期) と Epoch 2 (静穏期) の各値を比較すると、日立局の自己相関スペクトルは Epoch 1 が 35Jy に対して Epoch 2 が 18Jy と 1/2 程度になっており、小笠原-日立基線でも、Epoch 1 が 1.8Jy、Epoch 2 が 0.8Jy と 1/2 程度になっていたが、入来-小笠原基線では、Epoch 1 が 3Jy に対して、Epoch 2 が 4Jy と強度が多少強くはなっているなど、明確な傾向を見出せなかった。

5 議論とまとめ

本研究ではメタノールメーザー源 G034.395+0.221 の周期強度変動メカニズムの解明のため、5つの周期変動モデルの適用可能性について考えるために、各々の周期強度変動モデルに必要な条件について調査を行った。

(1) H_{II} 領域の付随の有無については、Hu et al. (2016) において、連続波が検出されたが、6.7 GHz メタノールメーザーとの物理的な関係を裏付ける証拠なしという結果が報告されていた。また、(2) 原始星が単独星か連星かに関する情報は得られなかった。次に、(3) 周期強度変動パターンの調査については、平野 (2020) が茨城大学で行っている 6.7 GHz メタノールメーザーモニター観測の周期強度変動の解析結果を用いて変動パターンを調べ、Lomb-Scargle 法を用いた周期解析の結果は、8つの速度成分を検出し、そのうち6つの成分の周期が 29.2–29.3 日だと求めたという情報を得た。周期の再解析を行った結果、8つの速度成分のうち、6つの成分の周期が 29.3 日だと求められ、残り2つの成分である 62.46 km/s と 63.41 km/s はそれぞれ、62.46 km/s の成分は 1146.1 日の周期が検出され、63.41 km/s の成分は周期性なしという結果となった。そして、(4) VLBI 観測結果の解析については、EAVN を用いて2エポック (2021 年 9 月 14 日、2021 年 10 月 6 日) に分けて観測されたデータを用いて Astronomical Image Processing System (AIPS) と Difmap を用いて解析を行った。解析は CLEAN Image の作成まで完了している。ここまでの VLBI 解析結果を用いて、最もフラックス密度が大きい 55.6 km/s 成分の自己相関スペクトルのフラックス密度と、クロスパワースペクトルのフラックス密度との比較を行い、全フラックス密度の 10 % が約 50 au よりも狭い領域から、90 % がそれよりも広い領域から放射されている事が明らかになった。これは先行研究で提唱されたコア・ハロー構造と矛盾しない。

ここまでの結果から、それぞれの周期変動モデルに必要な条件についての検討結果を以下の表 9 に示す。

周期変動モデル	変動するもの	必須なもの	変動パターン	強度変動する メーザースポット
脈動変動	柱密度		連続	全て
Colliding wind binary	種光子	H_{II} 領域・連星	間欠	一部
Spiral shock	柱密度	連星	間欠	一部
Periodic accretion	柱密度	連星	間欠	全て
Eclipsing binary	種光子	H_{II} 領域・連星	連続・間欠	一部

表 10: 6.7 GHz メタノールメーザーが各々の周期強度変動するために必要な条件

周期の再解析結果とライトカーブから、62.46 km/s と 63.42 km/s の成分以外は 29.3 日の周期があると判明した。表 9 によると、これらの速度成分の周期変動モデルは脈動変動である可能性が高い。しかし、全てのメーザースポットが「同じ周期で変動する」という条件を満たさない。そのため、これらのメーザースポットの位置を特定し、これら2つの速度成分のスポットが 29.3 日の周期性を示すものとは無関係かどうかを確かめるには VLBI の解析が必要である。今回の解析では、照度不足のため VLBI 観測の解析の結果を

出すことができなかったため、VLBI の解析の結果を出すには 2Epoch 分のデータを重ね合わせる、または、新たに VLBI 観測をおこなう必要があると考えられる。なお、62.46 km/s 成分は 1000 日以上周期を持つため、「脈動する星 (29.3 日) + 伴星」の連星の 2 つのモデルの組み合わせで出ているという可能性、または 29.3 日の高調波という可能性が考えられる。これらの場合、62.46 km/s 成分と、29.3 日の周期性を示す 6 つの成分とは空間的に離れている必要はない点に注意すべきである。

謝辞

本研究を進めるにあたって多くの方々に多大な助言を賜りました。

この研究を進めるにあたってご指導していただきました、米倉覚則教授に深く感謝申し上げます。VLBI 観測についての詳細な情報をご提供いただいたり、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、AIPS を用いた VLBI 観測のデータを解析する方法を教えてください、大阪公立大学の澤田-佐藤聡子氏に深く感謝申し上げます。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くださいただだけでなく、データ解析手法についてなど多くのご指導を賜りました。

また、研究員の田辺義浩様には、たくさんの助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

研究室の先輩方には、AIPS での解析を教えてください、発表の際のアドバイス等を沢山いただきました。心より感謝申し上げます。

また、物理女子の皆様にはつらいときや苦しいとき支えていただきました。この場を借りて心より感謝申し上げます。また同期の皆様にも大変お世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。また、山口茨城研究会を通してお世話になった山口大学の先生方、学生の皆様、ありがとうございました。

参考文献

- [1] Araya, E. D., et al. 2010, Ap.J., 717, L133
- [2] EAVN User Support Team et al., 2024, "EAVN Status Report for the 2025A Semester"
- [3] Hu, B., et al. 2016, Ap.J., 833, 1, 18
- [4] Inayoshi, K., et al. 2013, Ap.J., 769, L20
- [5] Kurayama, T., et al. 2011, PASJ, 63, 513
- [6] Lomb, N. R. 1976, Ap&SS, 39, 447
- [7] maserdb (<https://maserdb.net/>) Ladeyschikov, D.A., Bayandina, O.S., & Sobolev, A.M. 2019, A.J., 158, 6, 233
- [8] Maswanganye, J. P., et al. 2015, M.N.R.A.S., 446, 3, 2730
- [9] Minier, V., et al. 2002. A&A 383, 614 [10] Parfenov, S. Y., & Sobolev, A. M. 2014, M.N.R.A.S., 444, 620
- [11] Rathborne, J. M., et al. 2005, Ap.J., 630, L181
- [12] Scargle, J. D. 1982, Ap.J., 263, 835
- [13] Szymczak, M., et al. 2024, A&A, 682, A17
- [14] Tanabe, Y. & Yonekura, Y. 2024, A.S.J., 76, 3, 426
- [15] van der Walt, D. J. 2011, A.J., 141, 152
- [16] 中井直正他, 2020, 宇宙の観測 II - 電波天文学, シリーズ現代の天文学 第 16 巻, 第 2 版, 日本評論社
- [17] 福井康雄他, 2014, 星間物質と星形成, シリーズ現代の天文学 第 6 巻, 第 2 版, 日本評論社
- [18] 平野 遥香, 2020, 茨城大学理学部卒業論文
- [19] 森泉 怜, 2023, 茨城大学大学院理工学研究科理学専攻修士論文
- [20] 安井 靖堯, 2015, 茨城大学大学院理工学研究科理学専攻修士論文
- [21] 渡辺 雅人, 2020, 茨城大学大学院理工学研究科理学専攻修士論文