

2025 年度
卒業論文

6.7 GHz メタノールレーザーと
22 GHz 水レーザーの周期性と相関関係について

茨城大学理学部理学科
学際理学コース

学籍番号：22s6003y

石川楽人

概要

大質量星形成領域においてメーザーと呼ばれる電波が増幅される現象が確認されている。代表的なものとして、赤外放射による放射励起によって主に降着円盤上で発生する 6.7 GHz メタノールメーザー (class II メタノールメーザー) と衝突励起によって分子雲とアウトフローの境目で発生する 22 GHz 水メーザーが挙げられる。両者共に周期的な強度変動が発生することが知られている [1, 2]。一方で、メタノールメーザーと水メーザーでは発生領域や励起機構が異なるため、両者の強度変動に関係性はないと考えられていた。しかし Syzmczak et al.[2] にて両メーザーの速度や位置が一致し、強度変動が反相関的な関係を示す天体 IRAS22198 (G107.298+5.639、以下 IRAS22198 と書く) が報告された。また、山口 (2017) [3] において高萩 32 m 電波望遠鏡を用いた水メーザーの観測が行われ、その結果、IRAS22198 において両メーザー間で周期が半位相ずれた反相関周期性が確認された。

本研究ではこのような両メーザー間で強度変動が周期的な関係性を示す天体の例を増やすことを目的として、日立 32 m 電波望遠鏡で毎日実施されている 6.7 GHz メタノールメーザーのモニター観測データに加え、高萩 32 m 電波望遠鏡を用いて 22 GHz 水メーザーの観測を実施した。対象とした観測天体は、2012 年 12 月 30 日から行われている 6.7 GHz メタノールメーザーのモニター観測データを周期解析することによって求められた周期が 40 日未満の 11 天体を選出した [4–6]。この中には先行研究で反相関周期性が示されていた天体 IRAS22198 も含まれている。観測期間は 2025 年 10 月 21 日から 2026 年 1 月 4 日までの 76 日とした。

また、本研究では両メーザーの周期解析や強度変動プロットに加え、両メーザー間で相関係数や相関係数の有意性を示す P 値を求め、両メーザー間の関係性を示す。

以上の観測の結果、反相関周期性が確認できた天体は先行研究で発見されていた IRAS22198 の 1 天体のみという結果となり、先行研究を再確認する形となった。また、相関係数を求めた結果より両メーザー間で相関が確認できた天体が 2 天体検出された。また、解析によって、観測期間が水メーザーでの周期の検出率に繋がるということが分かったため、今後さらに長期間の観測を行うことで、先行研究で示されているような両メーザー間での強度変動が周期的な相関性を示す天体の例を増やすことによって、大質量星形成領域の物理状態の解明に繋げたい。

目次

1	研究背景	4
1.1	メーザー現象	4
1.1.1	メーザー発生機構	4
1.1.2	メタノールメーザーと水メーザー	4
1.2	先行研究	5
1.2.1	両メーザー間での相関関係	5
1.2.2	理論的解釈	7
2	観測概要	8
2.1	日立 32 m 電波望遠鏡を用いた 6.7 GHz メタノールメーザーモニター観測	8
2.2	高萩 32 m 電波望遠鏡を用いた 22 GHz 水メーザーの観測	8
3	解析	10
3.1	周期解析	10
3.1.1	Lomb - Scargle 法	10
3.1.1.1	Lomb - Scargle 法の原因	10
3.1.1.2	誤警報確率	11
3.1.1.3	基本周期と高調波	11
3.1.1.4	トレンド	11
3.2	相関係数と P 値	11
3.3	解析手順	12
4	結果	14
4.1	検出 / 非検出	14

4.2	強度変動の有無	17
4.3	周期性の有無	22
4.4	6.7 GHz メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーの相関	32
4.4.1	強度変動および周期が検出された天体	32
4.4.2	水メーザーでの周期が非検出だが強度変動が確認された天体	33
4.4.2.1	IRAS22198	33
4.4.2.2	34.39+02	34
4.4.2.3	35.79-01	34
5	考察	35
5.1	IRAS22198 のメタノールメーザーの周期解析でみられた偽の周期について	35
5.2	水メーザーの周期変動の検出率について	36
5.2.1	観測期間の影響	36
5.2.2	観測頻度の影響	37
5.2.3	水メーザーの強度の影響	37
6	まとめ	39
7	謝辞	40

1 研究背景

1.1 メーザー現象

1.1.1 メーザー発生機構

メーザーとは入射した放射強度が増幅される現象で、原理的には光のレーザーと同様の現象である。地球大気のようなガス密度が高いところでは、粒子同士の衝突が支配的（＝熱平衡状態）であるため、二準位間の粒子数の比は以下のボルツマン分布に従う。

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

この式は必ず 1 より小さくなる、すなわち統計的重みあたりの粒子数は下のエネルギー準位の方が必ず多くなる。しかし、粒子数密度の希薄な宇宙空間では自然放射や誘導放射、吸収の方が粒子同士の衝突よりも支配的になる。これにより、上の準位の粒子数が下の準位の粒子数より多く分布することがあり、この状態を反転分布と呼ぶ。反転分布は非常に不安定であり、この時、二準位間のエネルギー差に相当する周波数 ν_{21} が入射することによって上の準位から下の準位に粒子が落ちる。その際に、 ν_{21} の電波を誘導放射する。これが連続的に続くことで電波が増幅される現象をメーザーと呼ぶ。

また、メーザーの特徴として以下が挙げられる。

- ・強度が局所熱力学平衡状態に比べて大きい
- ・電波源の広がり極めて小さく点状である
(その為、メーザー源をメーザースポットとも呼ぶ。)
- ・直線偏光または円偏光している
- ・線幅は熱運動による幅よりも小さい場合が多い
- ・電波の位相が揃っている

1.1.2 メタノールメーザーと水メーザー

メタノール分子によって引き起こされるメーザー現象をメタノールメーザーと呼び、周波数帯や発生領域、励起機構の違いによって class I と class II に分けられる。今回解析対象としている 6.7 GHz メタノールメーザーは class II に分類され、メーザースポットサイズが数 au と非常に小さく、赤外放射による放射励起によって降着円盤上で発生する。また、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ことから、大質量星形成領域の有効な指標として観測されている。

一方、22 GHz 水メーザーはメーザースポットサイズが数 100 au と広がっており、衝突励起によって分子雲とアウトフローの境界で発生する。水メーザーは中小質量星や晩期型星の周囲でも検出されているため、大質量星形成に特有の現象ではない。

ここまで、両メーザーで発生領域や発生機構が異なることは示したが、数密度やダスト温度の観点から共存可能な領域について考える。6.7 GHz メタノールメーザーは数密度 $10^4 \sim 10^8$ [cm⁻³] の範囲で赤外放射により放射励起され、ダスト温度 T_d が約 120 [K] で急激に増加し、運動学的温度 T_k が T_d に近づくか $T_d < T_k$ となると放射が減少する。一方、22 GHz 水メーザーは数密度 $10^4 \sim 10^8$ [cm⁻³] の範囲、 T_k が 200 から 2000 [K] の領域で衝突により励起するため、 T_d

$< T_k$ の運動学的温度がダスト温度よりも高い時に効率的に励起され、 T_d の上昇につれて、水メーザーの放射の強度は減少する。以上より、両メーザーは数密度 $10^4 \sim 10^8 \text{ [cm}^{-3}]$ 、ダスト温度 $200 \text{ [K]} < T_d < 250 \text{ [K]}$ の範囲で両メーザーは共存することが出来る。以上よりメタノールメーザーと水メーザーでは、ダスト温度の変化に対する反応の仕方が真逆なことが分かる。

このように、6.7 GHz メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーで発生領域や発生機構、メーザースポットサイズなど多くの点で違いが見られる一方で、一部共存可能な領域も存在する。(表 1)

	class II メタノールメーザー	水メーザー
発生領域	降着円盤上	分子雲とアウトフローの境目
励起機構	赤外放射による放射励起	衝突励起
メーザースポットサイズ	数 au	数 100 au

表 1: class II メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーの比較

1.2 先行研究

1.2.1 両メーザー間での相関関係

メタノールメーザーと水メーザー対して、これまで数多くの観測が行われているが、前の小節で示したように、両メーザー間で発生領域や発生機構が異なることから、両メーザー間の関係性はないと考えられていた。しかし、複数の大質量星に対してメタノールメーザーと水メーザーの観測を行った結果、両メーザーの速度や発生する位置が一致する天体が発見された。(図 1) [7]

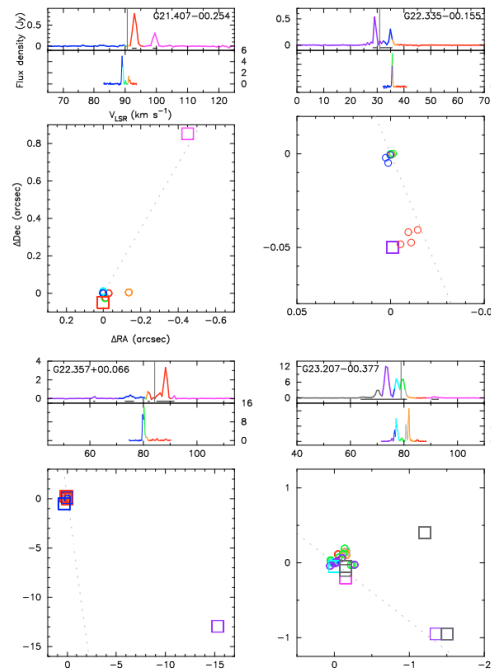


図 1: 4 天体に対するメタノールメーザーと水メーザーのスペクトルとマップ。マップ上の丸がメタノールメーザーを、四角が水メーザーを表している。

また、6.7 GHz メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーでフレア現象が交互に発生し、かつ両メーザーの位置や視線速度が一致する天体 IRAS22198 が報告された。[2]

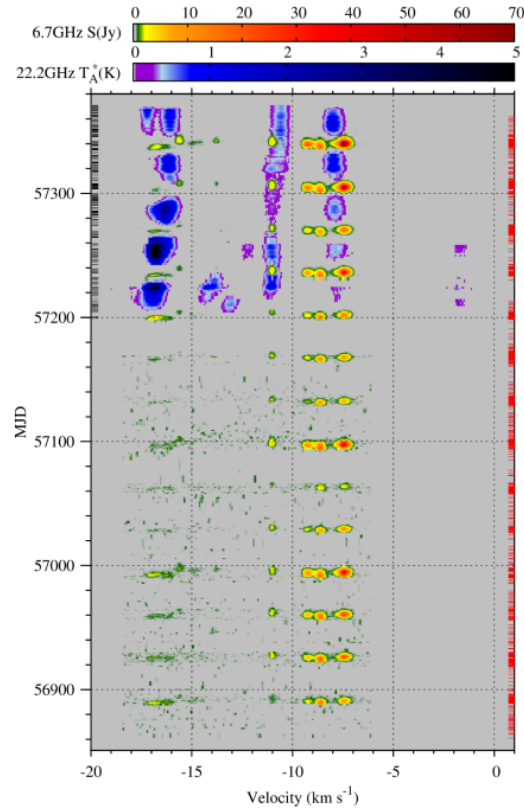


図 2: IRAS22198 の速度と時間に関して、両メーザーの強度変動を表したもの

この天体はメタノールメーザーで 34.4 ± 0.8 日の周期で強度変動する天体で、図 2 より -8.57 km/s、-15.54 km/s、-16.78 km/s など複数の速度成分で 6.7 GHz メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーのフレアが交互に起こっていることが確認できる。また図 3 より、それに対応する水メーザーの速度成分は 1.1 km/s 以内と速度の近さや、図 4 より位置も近いことが確認できる。

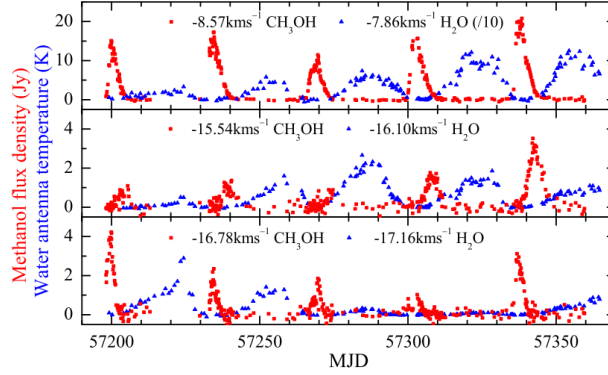


図 3: IRAS22198 で両メーザーについて 1.1 km/s 以内の速度成分について並べた強度変動プロット

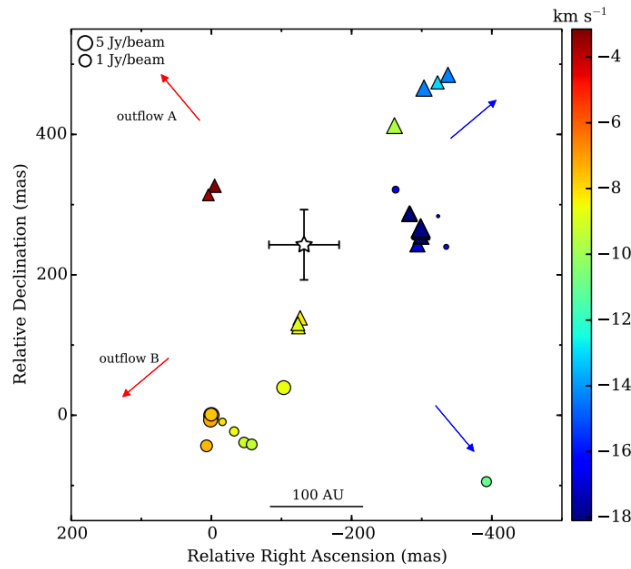


図 4: 両メーザーのマップ。丸がメタノールメーザー、四角が水メーザーを表す。

1.2.2 理論的解釈

前節で、両メーザーは数密度 $10^4 \sim 10^8 \text{ [cm}^{-3}]$ 、ダスト温度 $200 \text{ [K]} < T_d < 250 \text{ [K]}$ の範囲において共存可能であることを示した。一方、先行研究で報告された天体 IRAS22198 において両メーザーが反相関的な変動を示す理由について、M. Szymczak et al. (2016) では周期的な降着不安定性に伴う赤外放射場の変動によってダスト温度 T_d が変化することが関係していると解釈されている [2, 8]。原始星が連星系を形成している場合、公転運動に伴い連星が円盤に接近する際に、その重力作用によって周囲の降着円盤からダストやガスを剥ぎ取る。これらの剥ぎ取られたダストやガスが原始星に落下することで、原始星の光度が上昇する。その結果、周囲のダスト温度が上昇し、赤外放射が強くなる。赤外放射によって励起される class II メタノールメーザーの強度は強くなる一方で、ダスト温度の上昇は水メーザーの励起条件を悪化させるため、水メーザーの強度が減少する、というような周期的な強度変動モデルが考えられている。

2 観測概要

2.1 日立 32 m 電波望遠鏡を用いた 6.7 GHz メタノールメーザーモニター観測

茨城大学電波天文観測研究室では日立市にある日立 32 m 電波望遠鏡を用いたモニター観測を運用している。この観測では、2012 年 12 月 30 日から現在まで 474 天体を複数のグループに分け、メタノールメーザーのモニター観測を継続して行っている。

2.2 高萩 32 m 電波望遠鏡を用いた 22 GHz 水メーザーの観測

日立 32 m 電波望遠鏡を用いたモニター観測によるデータを用いた周期解析が行われている過去の卒業研究 [5, 6] と執筆中の論文 [4] により 6.7 GHz メタノールメーザーで求められた周期が 40 日未満の 11 天体を選出した。ここで 40 日未満の周期を持つ天体のみ選出した理由として、当初の観測予定期間が 2025 年 9 月から 2025 年 12 月までの 120 日間を想定しており、周期を 3 周期以上確認することによって、より確実に周期性について議論するためである。さらに、これら 11 天体に較正用の 3 天体を加えた計 14 天体を観測対象とした [9]。

表 2 に観測諸元、表 3 に観測天体を、表 4 に較正天体をまとめる。

使用望遠鏡	日立 32 m	高萩 32 m
対象メーザー	6.7 GHz メタノールメーザー	22 GHz 水メーザー
観測周波数	6664 [MHz] - 6672 [MHz]	22219 [MHz] - 22251 [MHz]
観測天体	14 天体 (対象天体 11 天体 + 校正天体 3 天体)	
観測期間	2012/12/30-	2025/10/21 - 2026/01/05
積分時間	5 [min / Source]	5 × 2 [min / Source] 5 × 13 [min / Source]
分光点数	8192	
速度分解能	0.044 [km/s]	0.053 [km/s]
3 σ ノイズレベル	0.9 [Jy]	校正天体 : 5.2 [Jy] 観測天体 (10 分積分) : 3.0 [Jy] 観測天体 (65 分積分) : 1.3 [Jy]

表 2: 観測諸元

表 2 中にある水メーザーの積分時間についてだが、観測は 5 分積分を 2 回行い、ノイズレベルの-2 乗で重み付け平均をし 10 分積分としているが、観測対象天体の空間分布の関係から、IRAS22198 のみ 5 分積分を 13 回行い、65 分積分としている。

天体名	6.7 GHz メタノールメーザーの 強度変動周期 (day)
0.167-04	9.9
12.88+04	30
12.90-02	25.4
14.23-02	24
19.75-01	21.9
24.64-03	15.2
33.40+00	31.4
34.39+02	29
35.79-01	33
52.66-10	14.9
IRS22198	33

表 3: 観測天体

天体名
IRS16293
133.9+10
ORIKLH2O

表 4: 較正天体

また、水メーザーでの観測は 4 日から 5 日間隔で行い、観測した日付、MJD を表 5 にまとめる。ここで MJD とは修正ユリウス日を指し、西暦 1858 年 11 月 17 日を 0 日として、そこから経過した日数を表す。

観測日 (yy/mm/dd)	MJD
2025/10/21	60969
2025/10/27	60975
2025/10/30	60978
2025/11/5	60984
2025/11/10	60989
2025/11/14	60993
2025/11/19	60998
2025/11/23	61002
2025/12/1	61010
2025/12/6	61015
2025/12/13	61022
2025/12/19	61028
2025/12/27	61036
2025/12/30	61039
2026/1/1	61041
2026/1/4	61044

表 5: 観測日

3 解析

3.1 周期解析

本研究では、メタノールメーザーと水メーザーの周期性の相関関係について議論するため、日立 32 m 電波望遠鏡を用いたメタノールメーザーのモニター観測データと今回高萩 32 m 電波望遠鏡を用いた水メーザーの観測データに対して周期解析を行った。周期解析には不等間隔な離散的データに対して適用可能な Lomb - Scargle 法を用いた。

3.1.1 Lomb - Scargle 法

3.1.1.1 Lomb - Scargle 法の原因

一般的に天文学におけるモニター観測では、観測装置の改修や保守作業、他の観測との関係などで、データ点同士の間隔は不等間隔になることが多い。実際、使用するメタノールメーザーのモニター観測のデータや水メーザーの観測データも不等間隔であるが、このような不等間隔の離散的データに対しても周期解析を行えるのが Lomb - Scargle 法の大きな利点である。ここでは、Lomb - Scargle 法のおおまかな原理について説明する。詳細な点については、Lomb (1976)、Scargle (1982)、安井 (2015) に記載されている [10–12]。

まず一定間隔の観測で得られた 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、以下のようにかける。

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

ここで DFT は時系列データの離散フーリエ変換、 ω_n は周波数を表し、 $n = 1, 2, \dots, N_0$ である。しかし、式 (1) は不等間隔な離散的データに対して適用することが出来ない。そこで、ピリオドグラムに修正を加えることで、不等間隔な観測データを等間隔の観測データのピリオドグラムと同様に扱うことが可能になる。この修正を加えたピリオドグラムは

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

と表される。この式を Lomb - Scargle ピリオドグラムと呼ぶ。この Lomb - Scargle ピリオドグラムは、観測データを最小二乗法を用いて $\sin$ カーブにフィットすることと等価になるという特性を持つ。ここで、 ω は強度変動の周波数を表し、 τ は

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \sin 2\omega t_j}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos 2\omega t_j} \quad (3)$$

を満たすものとする。ここで、分散 σ_0^2 を考える。分散 σ_0^2 が 1 でない観測データの場合、観測データの分散 σ_0^2 を用いて、

$$P_N(\omega) = \frac{P_X(\omega)}{\sigma_0^2} \quad (4)$$

と正規化することで、確率分布を指数分布にすることが出来る。これを、正規化 Lomb - Scargle 法と呼び、式 (2)、式 (4) を用いた周期解析法を Lomb - Scargle 法と呼ぶ。

3.1.1.2 誤警報確率

ピリオドグラムを計算することは、観測データに含まれている周波数成分を求めることである。観測データに含まれる雑音以外のある周波数成分でピリオドグラムが最も大きな値を取るとき、その周波数成分の逆数を取った値を観測データの周期とみなすことができる。しかし、そのピリオドグラムがどの程度有意な値なのか評価する必要がある。そこで、ピリオドグラムの有意性を表す指標として、誤警報確率を用いる。この誤警報確率とは、実際の雑音を信号であると判断してしまう確率である。この確率を α とすると、

$$\alpha = 1 - (1 - e^{-z})^N \quad (5)$$

と書ける。ここで、 z は L-S power、 N は計算に用いる独立な周波数の数である。 α は 1 に対する割合で、 α が小さければ小さいほど雑音を信号としてとらえてしまう確率が低い、すなわち導出された周期の信頼性が高いと言える。

3.1.1.3 基本周期と高調波

周期解析において、真の周期（基本周期）以外にその整数倍の周波数（周期の $1/n$ ）で現れる成分がある。これを高調波と呼び、2 倍高調波（周期 $1/2$ ）や 3 倍高調波（周期 $1/3$ ）、 n 倍高調波（周期 $1/n$ ）が見えた際は真の周期のみを採用する。ここで採用する真の周期であるが、平野 (2020) [6] によって報告された値を採用する。

3.1.1.4 トレンド

観測される強度変動には周期的変動に加え、長期的な増加または減少といった緩やかな変動が含まれることがある。本研究では、このような長期変動をトレンドとして扱う。また、トレンドを除去する際、時間の 1 次式で近似した成分を差し引いて除去する。

3.2 相関係数と P 値

得られたデータから求めた相関係数について、その統計的な信頼性を評価するため、相関の確かさを表す指標である P 値を導入する。P 値とは仮に相関がないとしたときにこのデータが得られる確率である。その為、P 値が低いほど、得られた相関係数の統計的有意性は高くなるが、P 値は相関係数の大きさとは独立した量であることに注意する必要がある。本研究では、一般的に用いられる基準に従い、 $P < 0.05$ (5 %) の場合に相関が統計的に有意であると判断する。

3.3 解析手順

解析手順を以下に示す。

1. 22 GHz 水メーザーの観測で同一天体に対して得られた全観測日のデータに対して、ノイズレベルの - 2 乗で重み付け平均を行い、各天体につき横軸を速度、縦軸を放射強度とするスペクトルを作成する。このスペクトルから、天体からの放射と思われる放射が確認できる速度範囲を各天体ごとに設定する。天体からの放射とする判断基準だが、放射が見られる速度範囲を $v_1 \sim v_2$ とすると、 $v_1 - 10 \sim v_1$ [km s⁻¹] および $v_2 \sim v_2 + 10$ [km s⁻¹] の速度範囲で RMS を計算し、これを 1σ として 3σ 以上の放射を天体からの放射とする。ここで 3σ と設定したのは、統計的に 3σ であれば、全体の約 99.7 % 以上のデータが含まれるため、有意な信号検出の基準として採用する。

2. この定めた速度範囲より、22 GHz 水メーザーに対して前節にて説明した Lomb - Scargle 法を用いて周期解析を行う。この際の誤警報確率を p とすると、 $p = 0.0001$ と設定する。これは、得られた周期が偶然に生じる確率を 0.01 % 以下に抑え、99.99 % 以上の信頼度で周期性を検出することを意味する。

メタノールメーザーに関するデータは毎日のモニター観測で、速度成分ごとの強度の変化を記録したファイルを作成しているため、このデータを用いて水メーザーと同様に誤警報確率を $p = 0.0001$ と設定し、周期解析を行う。

また、両メーザーでの周期解析を行う際に、時間の 1 次式で近似した成分を差し引くことで、トレンドを除去して周期解析を行う。

3. 両メーザーで横軸を時間、縦軸を放射の強度とする強度変動プロットを作成し、両メーザーの強度変動の挙動を比較する。この際に、観測期間の大半で水メーザーの放射強度が 3σ 未満の天体は、水メーザーでの検出成分が存在しないとする。

4. 次に、両メーザー間の放射強度から相関係数と相関の有意性を表す P 値を求めるのだが、得られたメタノールメーザーもしくは水メーザーの放射強度が観測期間の大半で使用したアンテナの 3σ ノイズレベル未満の天体は、誤差が非常に大きいため、両メーザー間での相関を求める解析対象から除外する。

両メーザー間の相関係数と P 値を求める際に

(a) 放射強度そのものの相関

(b) 強度変動率の相関

の二種類の解析を行う。

まず、放射強度の対数を取った値を用いて求めた相関係数は、両メーザーの放射強度が同時に増減しているかを示す指標である。一方で、強度の対数を取った後に時間微分を行うことで得られる量は放射強度の変化率を表し、この変化率同士の相関係数は、両メーザーが同じタイミングで増減しているか、すなわち変動の同期性を表す指標である。これにより長期的なトレンドによる影響を抑えた相関を評価することが出来る。

また、相関を求める際に使用する速度成分は、Lomb - Scargle 法を用いた周期解析における周期検出の有無に応じて、以下の条件で選出する。なお、前述の条件と同様に、観測に用いたアンテナの 3σ ノイズレベル未満の速度成分は誤差が大きく、相関係数の評価に適さないため、周期が検出された場合であっても十分な強度を持つもののみを使用する。

- 周期が検出された場合
周期が検出され、かつ観測期間の大半において観測に用いたアンテナの 3σ ノイズレベルを超える強度を示す速度成分を全て使用する。
- 周期が非検出の場合
観測期間の大半において観測に用いたアンテナの 3σ ノイズレベルを超える強度を示す速度成分を全て使用する。

この際に、横軸をメタノールレーザーの放射強度、縦軸を水レーザーの放射強度として、両対数グラフも作成する。

4 結果

4.1 検出 / 非検出

本研究において、水メーザーでの放射の検出定義を、観測期間の大半で 3σ 以上の放射が見られた場合とした。また、 3σ としたときの放射強度を表 6 に示す。

天体名	放射強度 [Jy]
0.167-04	0.70
12.88+04	1.13
12.90-02	0.75
14.23-02	0.59
19.75-01	0.61
24.64-03	0.62
33.40+00	0.57
34.39+02	0.70
35.79-01	0.62
52.66-10	1.11
IRAS22198	0.24

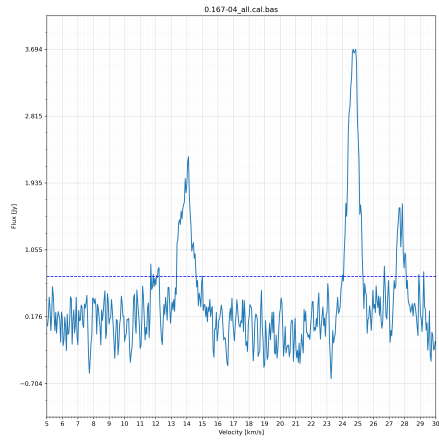
表 6: 3σ 強度

また、これら 3σ 以上の放射が検出された天体及び速度成分を表 7 に示す。

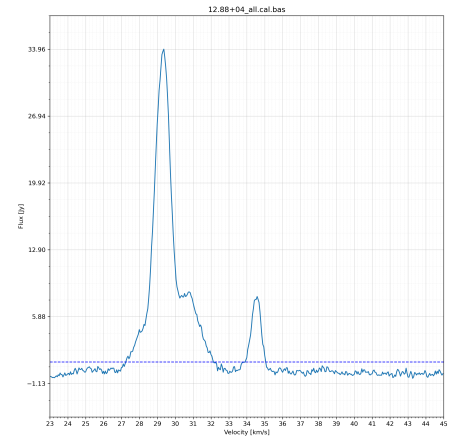
天体名	速度成分 [km/s]									
0.167-04	13.97	24.65								
12.88+04	29.35	30.43	34.53							
12.90-02	34.54	36.96	39.22	43.47	49.51					
14.23-02	14.71	17.5	19.23							
34.39+02	49.7	52.51	54.43	56.17	56.86	58.88	62.89	78.25	80.87	82.48
35.79-01	58.53	62.9								
IRS22198	-16.4	-7.87	-7.24	-5.92	-4.03					

表 7: 各天体における速度成分

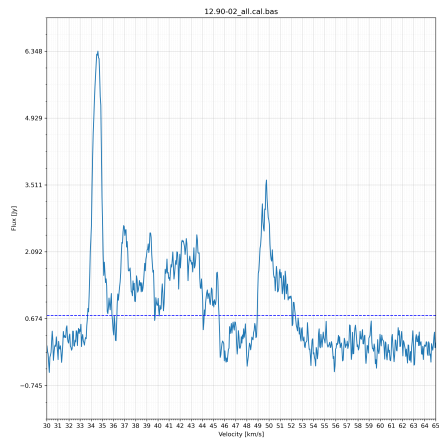
また、以下図 6 に各天体のスペクトルを示す。



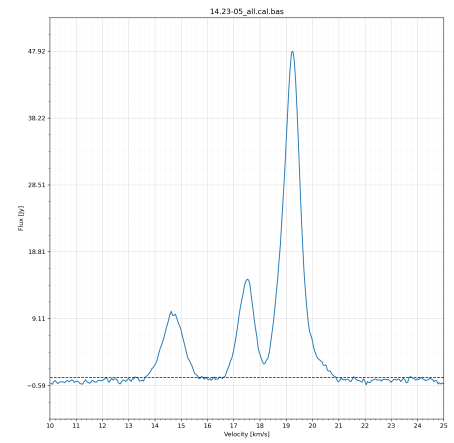
(a) 0.167-04



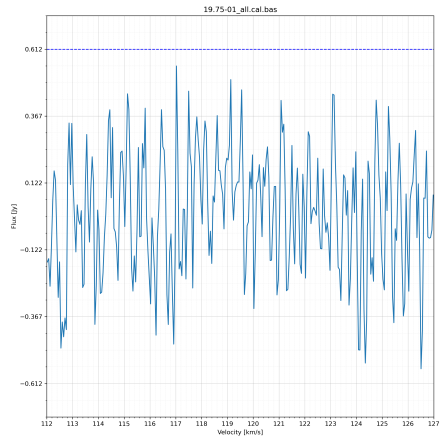
(b) 12.88+04



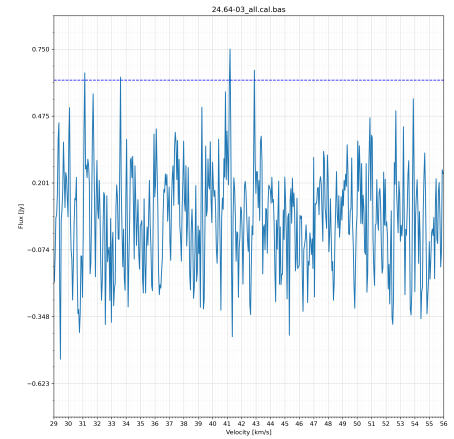
(c) 12.90-02



(d) 14.23-05

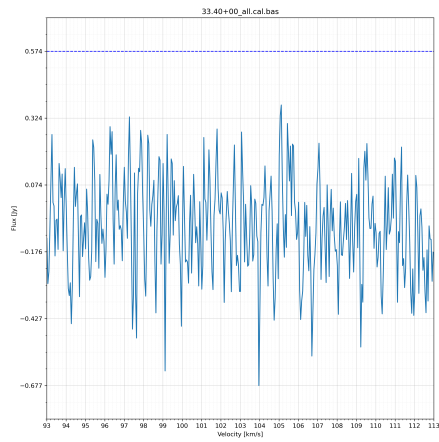


(e) 19.75-01

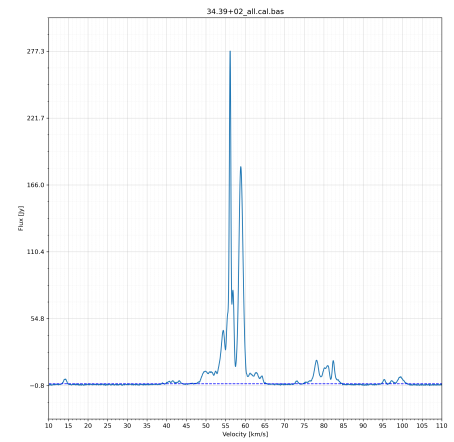


(f) 24.64-03

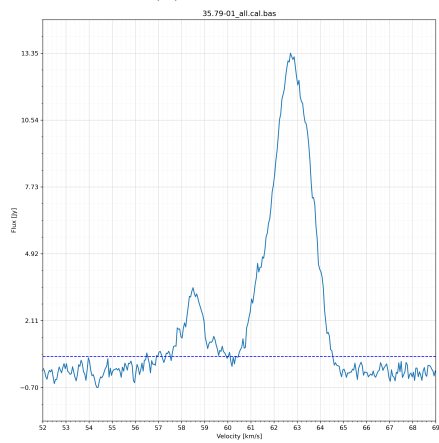
図 5: 各天体のスペクトル (1/2)



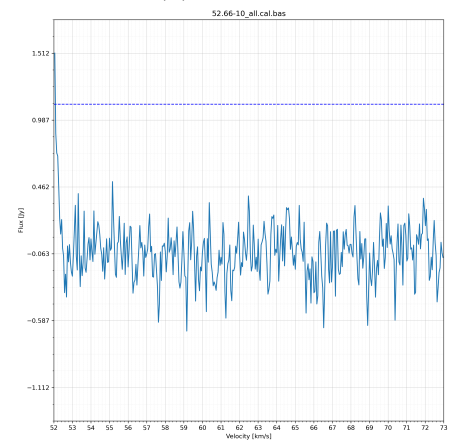
(g) 33.40+00



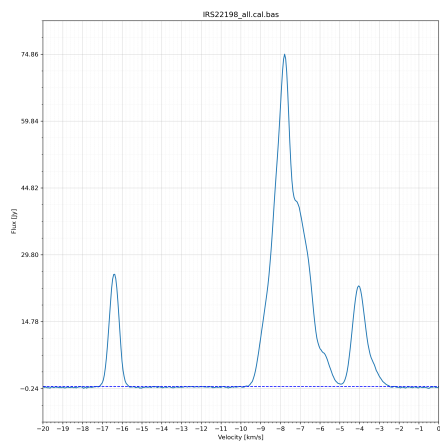
(h) 34.39+02



(i) 35.79-01



(j) 52.66-10

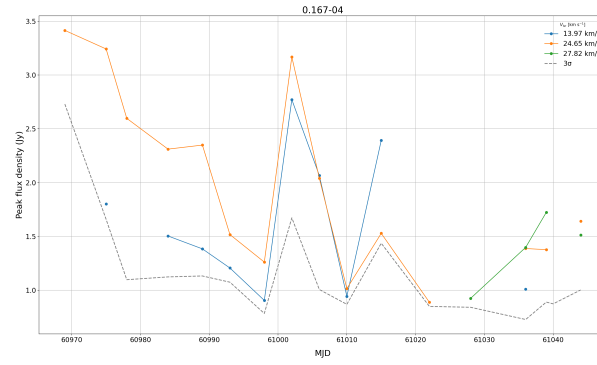


(k) IRAS22198

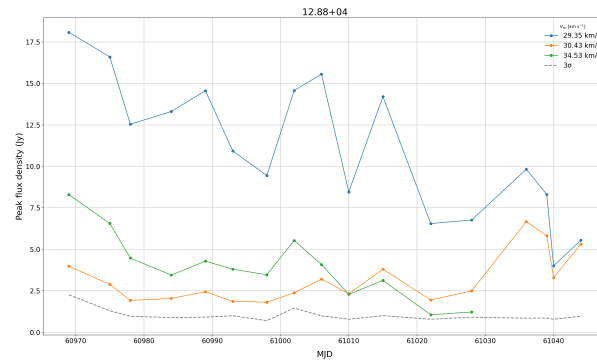
図 5: 各天体のスペクトル (続き 2/2)

4.2 強度変動の有無

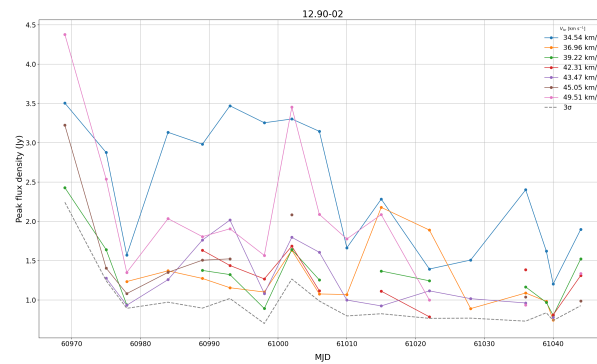
最初に、各天体の強度変動プロットを以下図 6 に示す。



(l) 0.167-04

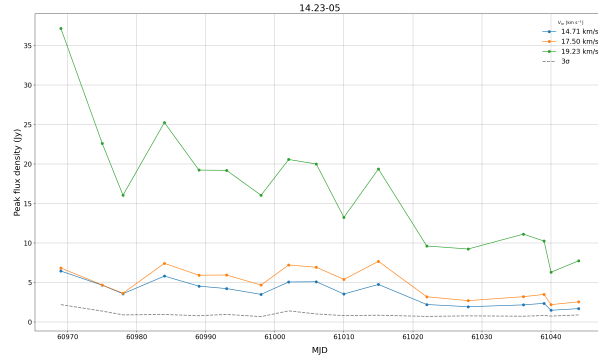


(m) 12.88+04

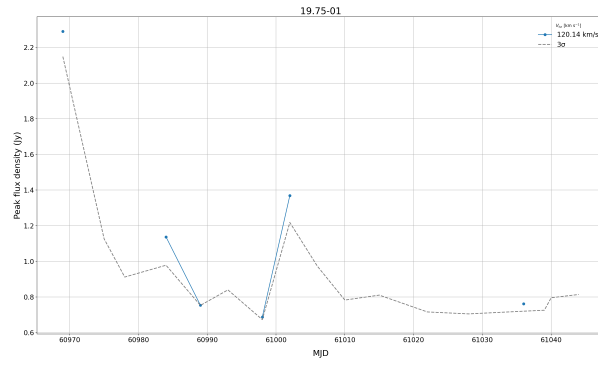


(n) 12.90-02

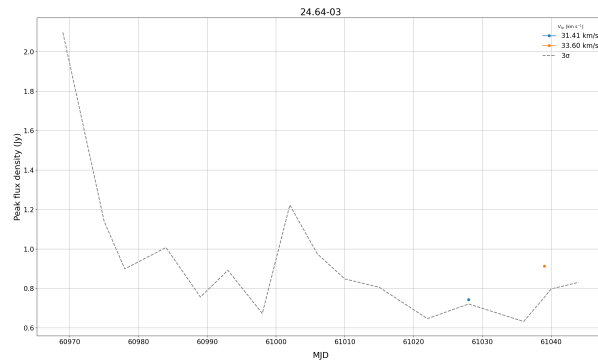
図 5: 各天体強度変動プロット (1/4)



(o) 14.23-05

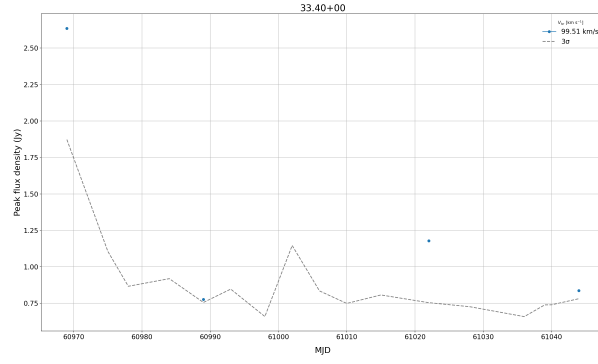


(p) 19.75-01

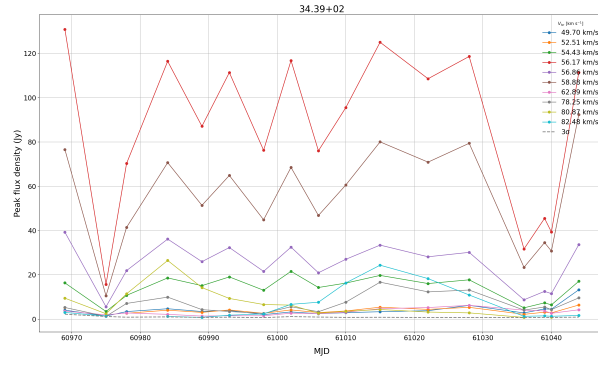


(q) 24.64-03

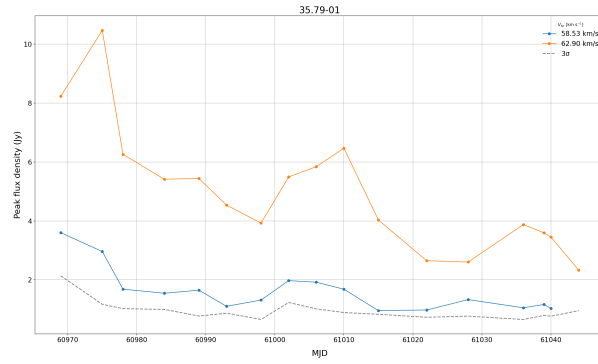
図 5: 各天体強度変動プロット (2/4)



(r) 33.40+00

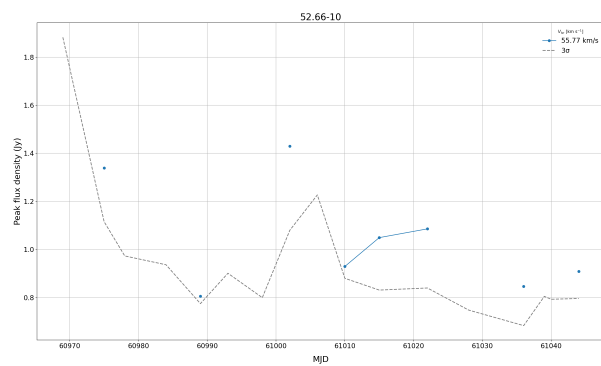


(s) 34.39+02

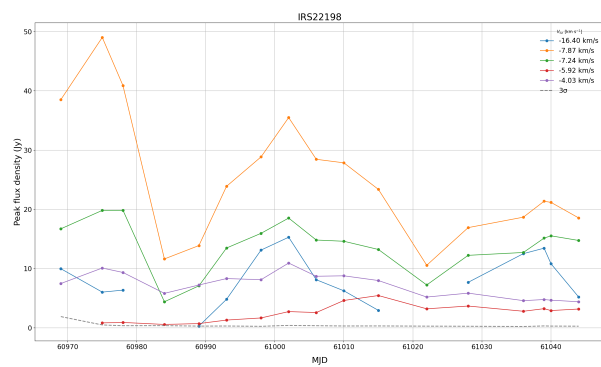


(t) 35.79-01

図 5: 各天体強度変動プロット (3/4)



(u) 52.66-10



(v) IRAS22198

図 5: 各天体強度変動プロット (4/4)

また、本研究では強度変動の大きさを評価するために、無次元量である変動係数を導入した。変動係数は、各速度成分のピーク強度の時間平均に対して、以下のように定義した。

$$VI = \frac{\sigma_F}{\bar{F}}$$

ここで、 $\bar{F}$ は平均ピーク強度、 σ_F は標準偏差である。この量は平均強度に対する相対的な変動幅を表しており、この値が大きいほど、強度変動が強いことが分かる。本研究では変動係数が 0.3 すなわち平均的な放射強度に対しての変動が 30% 以上の場合に変動が有るとする。また、観測期間の大半で 3σ 以上の放射が確認できない天体や速度成分は、この解析から除外する。解析する天体、速度成分は表 7 と同様であり、解析結果を表 8 に示す。

天体名	速度成分 (km/s)	変動係数
0.167-04	13.97	0.403
	24.65	0.418
12.88+04	29.35	0.375
	30.43	0.465
	34.53	0.505
12.90-02	34.54	0.34
	36.96	0.311
	39.22	0.312
	43.47	0.309
	49.51	0.465
14.23-02	14.71	0.412
	17.5	0.383
	19.23	0.464
34.39+02	49.7	0.623
	52.51	0.313
	54.43	0.391
	56.17	0.412
	56.86	0.408
	58.88	0.407
	62.89	0.436
	78.25	0.617
	80.87	0.962
	82.48	1.174
35.79-01	58.53	0.454
	62.9	0.425
IRAS22198	-16.4	0.518
	-7.87	0.425
	-7.24	0.31
	-5.92	0.565
	-4.03	0.289

表 8: 各天体における速度成分と変動係数

各天体における変動係数を求めた結果、水メーザーが検出された全天体でいずれかの速度成分で変動係数が 0.3 以上となった。以上より、各天体に対して水メーザーの検出/非検出と合わせて変動の有無をまとめる。

- 0.167-04：2 つの速度成分全てで有意な変動が検出された。
- 12.88+04：3 つの速度成分全てで有意な変動が検出された。
- 12.90-02：5 つの速度成分全てで有意な変動が検出された。
- 14.23-02：3 つの速度成分全てで有意な変動が検出された。
- 19.75-01：水メーザーでの検出成分が存在しない。
- 24.64-03：水メーザーでの検出成分が存在しない。
- 33.40+00：水メーザーでの検出成分が存在しない。
- 34.39+02：10 個の速度成分全てで有意な変動が検出された。特に 49.7、78.25、80.87、82.48 [km/s] の速度成分が変動が大きい。
- 35.79-01：2 つの速度成分全てで有意な変動が検出された。
- 52.66-10：水メーザーでの検出成分が存在しない。
- IRAS22198：5 つの速度成分のうち、4 成分で有意な変動が確認された。

4.3 周期性の有無

前述の解析手順にて説明した方法で、22 GHz 水メーザーに対して、周期解析を行った。この際に、時間の 1 次式で近似した成分を差し引いて、トレンドを除去した周期解析を行っている。結果、22 GHz 水メーザーで 6.7 GHz メタノールメーザーと同様の周期が確認できた天体は IRAS22198 の 1 天体のみであった。一方で、6.7 GHz メタノールメーザーと異なる周期が検出された天体が 34.39+02 の 1 天体検出された。それら周期解析を行った結果を以下の図 6 に示す。左がメタノールメーザーの周期解析結果、右が水メーザーの周期解析結果となっている。また、図中の点線は誤警報確率を $p = 0.0001$ とした際の閾値、赤線は平野 (2020) [6] によって報告された 6.7 GHz メタノールメーザーでの周期を表している。

さらに、メタノールメーザーでの周期を表 9 に示す。

天体名	周期 (day)
0.167-04	9.9
12.88+04	30
12.90-02	25.4
14.23-02	24
19.75-01	21.9
24.64-03	15.2
33.40+00	31.4
34.39+02	29
35.79-01	33
52.66-10	14.9
IRS22198	33

表 9: 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動周期

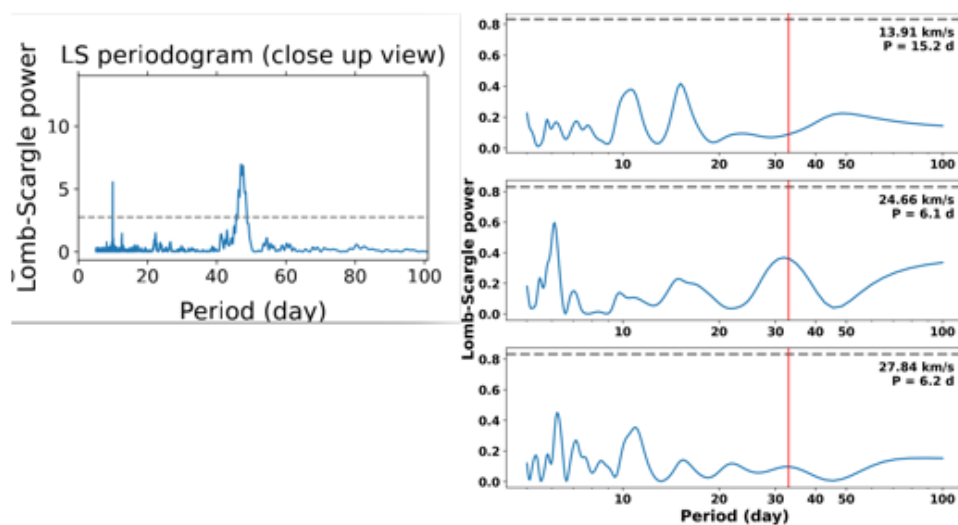


図 6: 0.167-04 周期解析結果

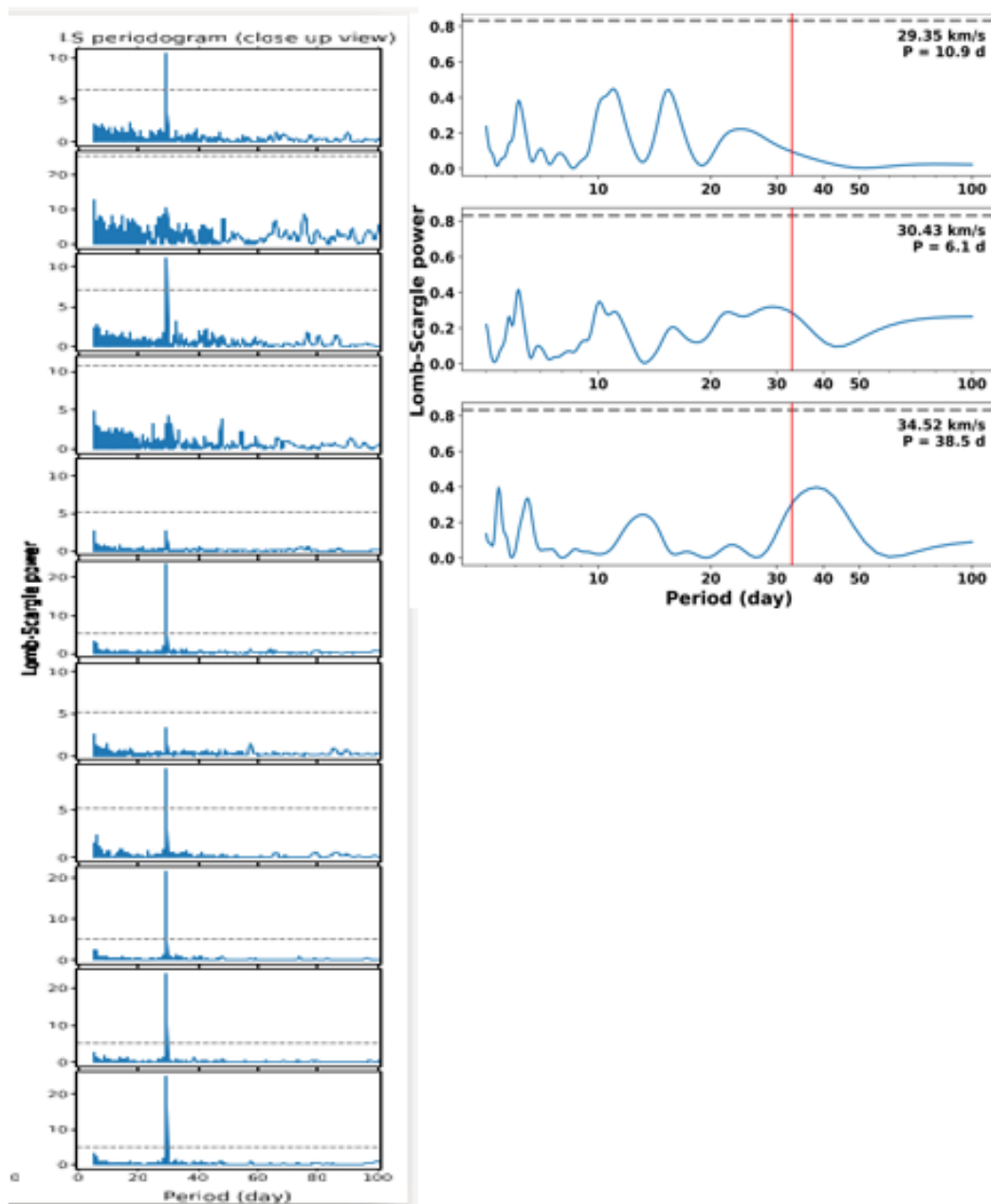


圖 6: 12.88+04 周期解析結果

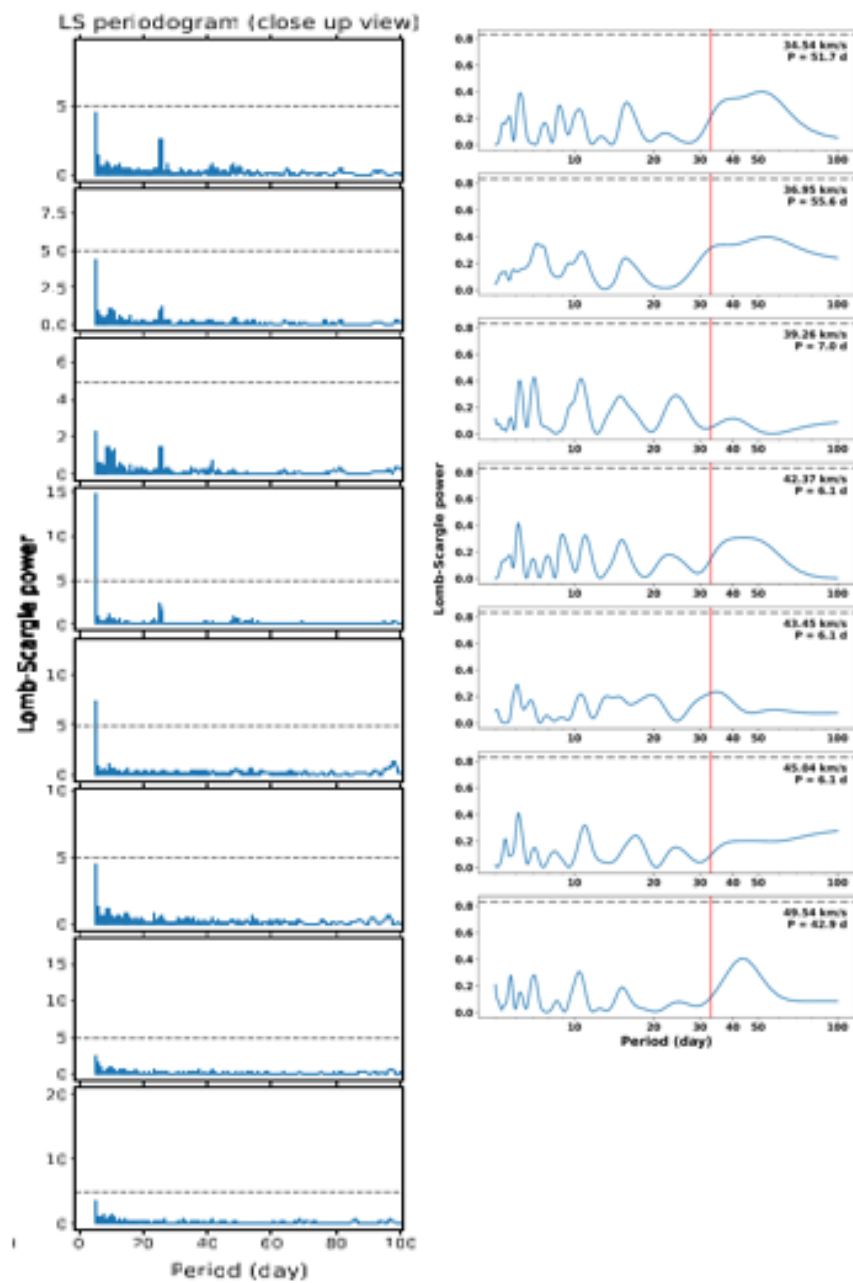


图 6: 12.90-02 周期解析结果

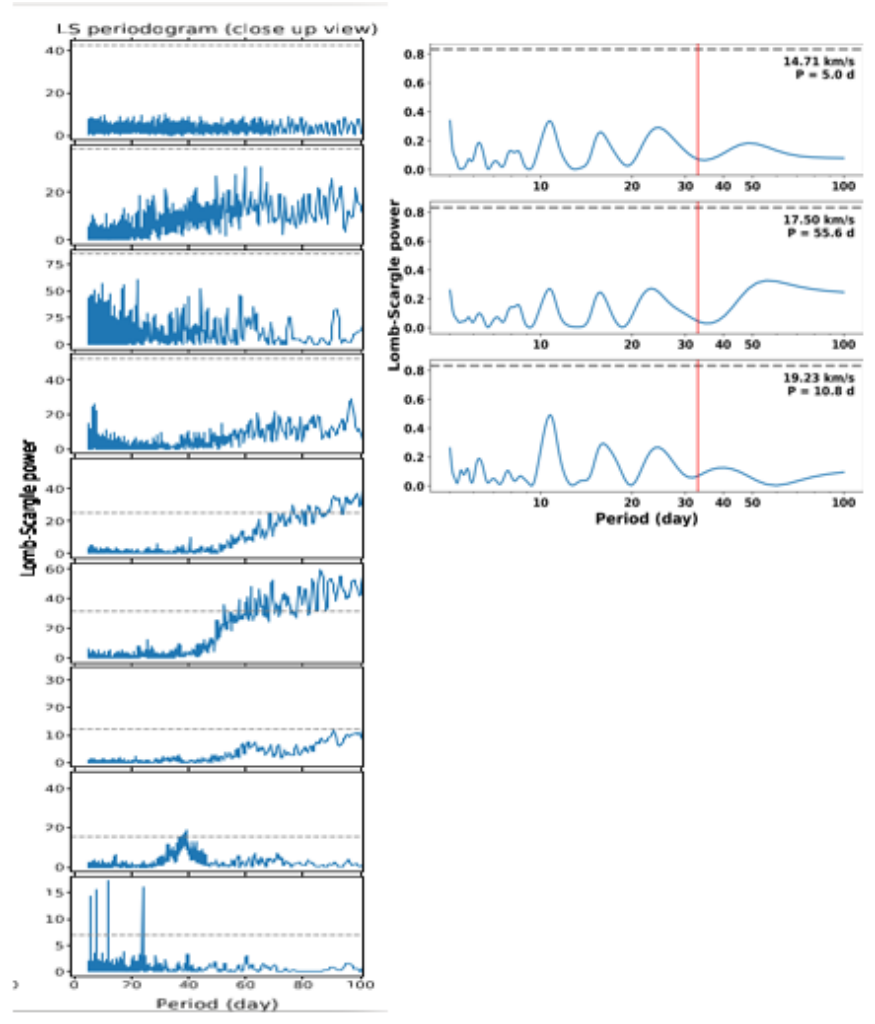


图 6: 14.23-05 周期解析结果

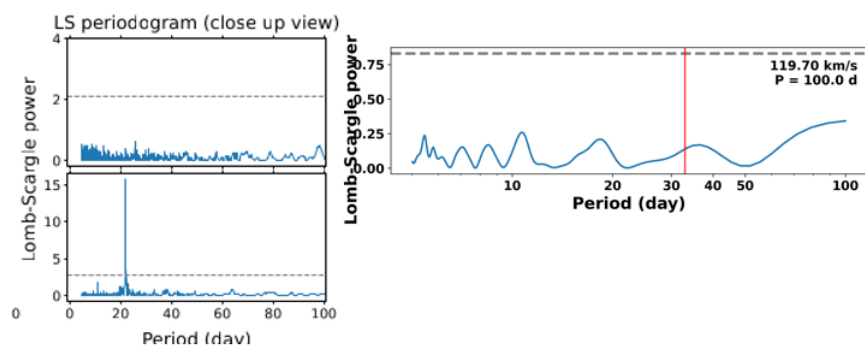


图 6: 19.75-01 周期解析结果

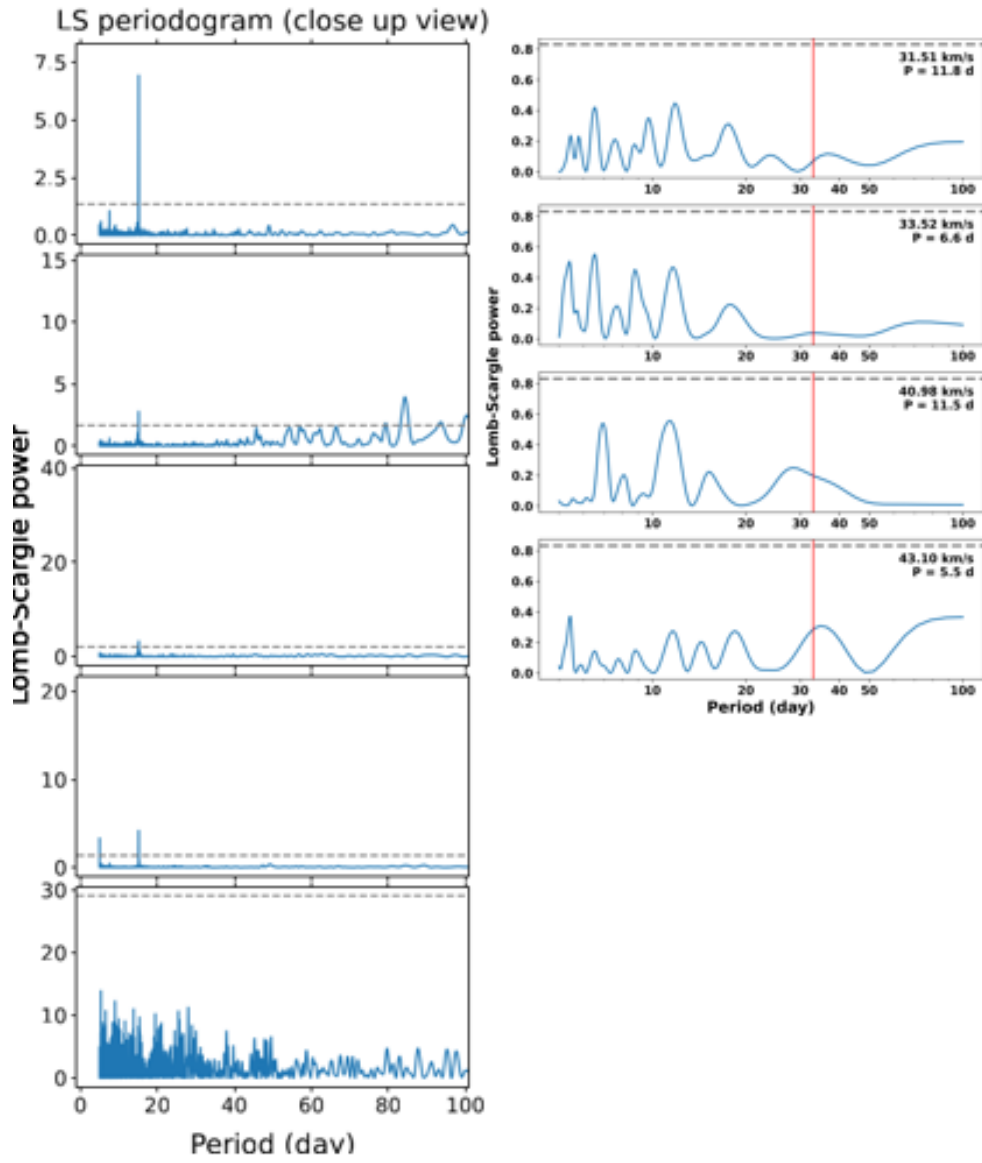


圖 6: 24.64-03 周期解析結果

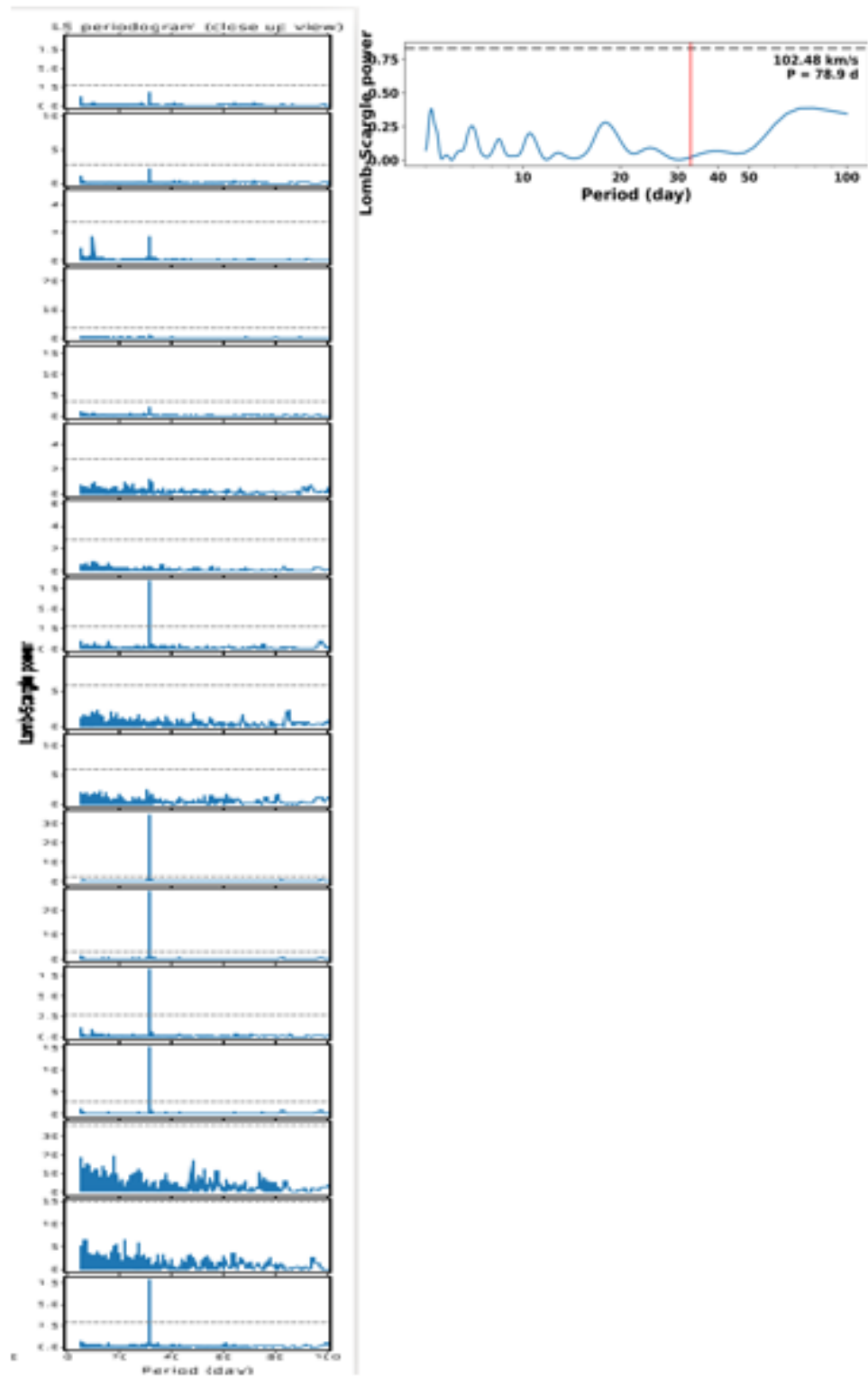


图 6: 33.40+00 周期解析結果

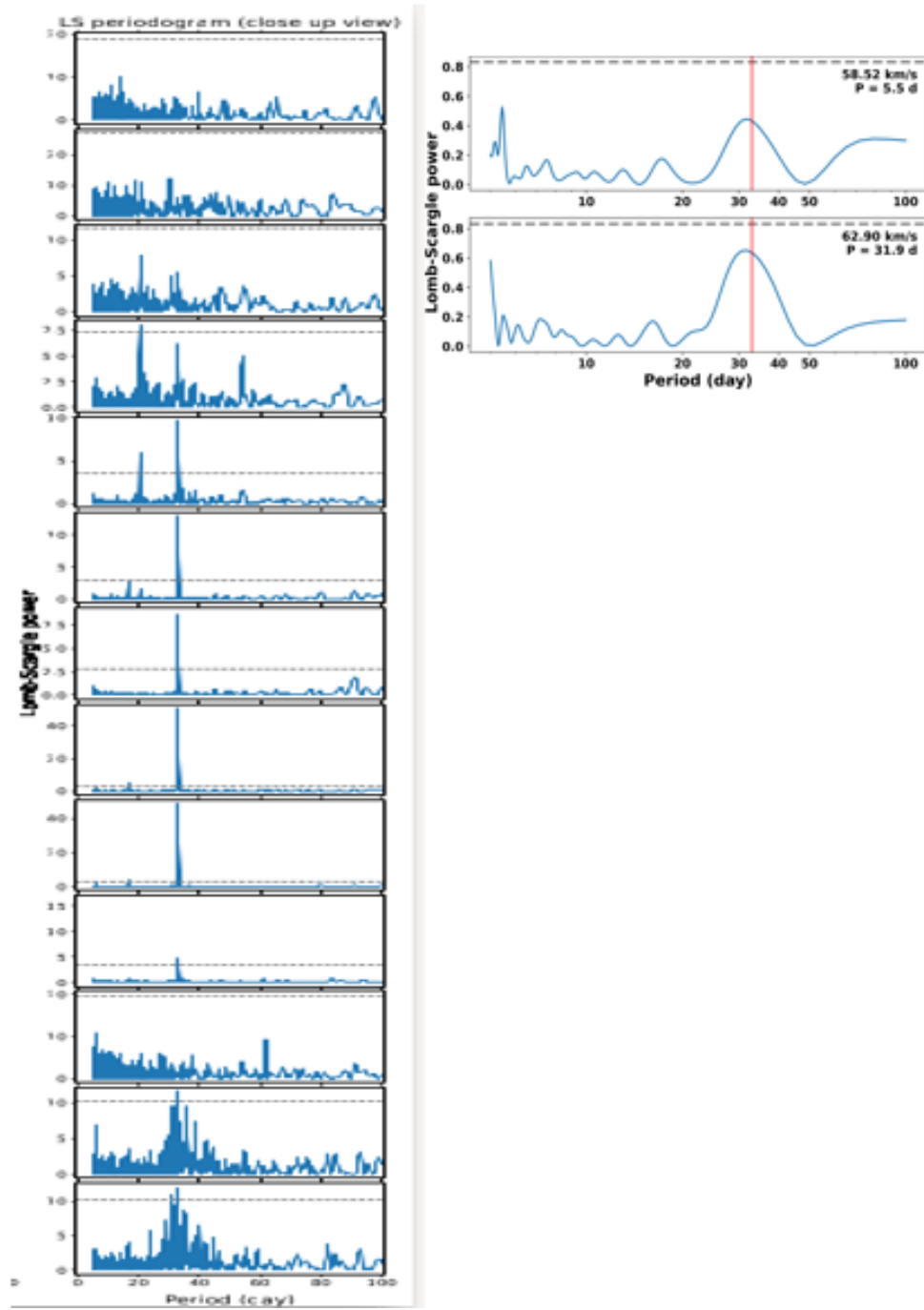


图 6: 35.79-01 周期解析结果

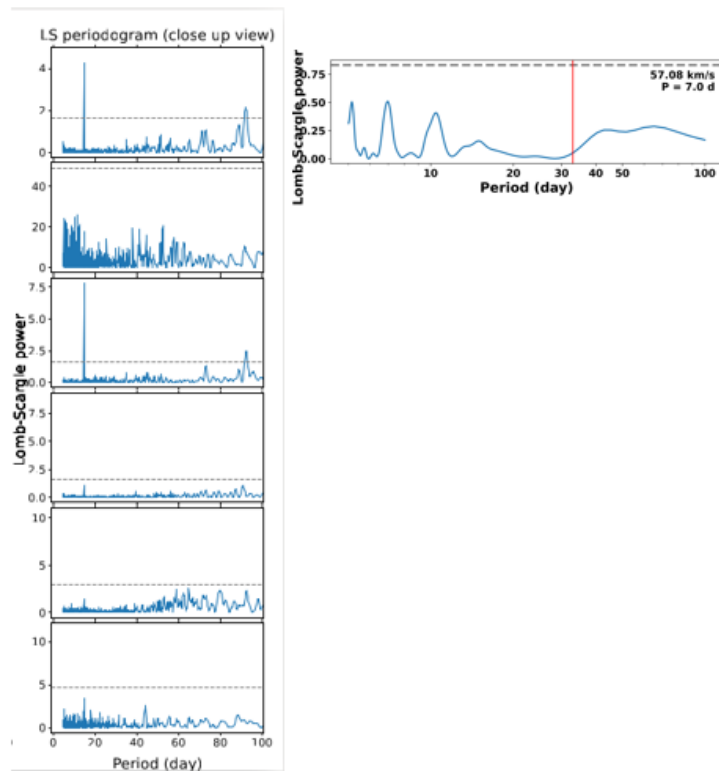


图 6: 52.66-10 周期解析結果

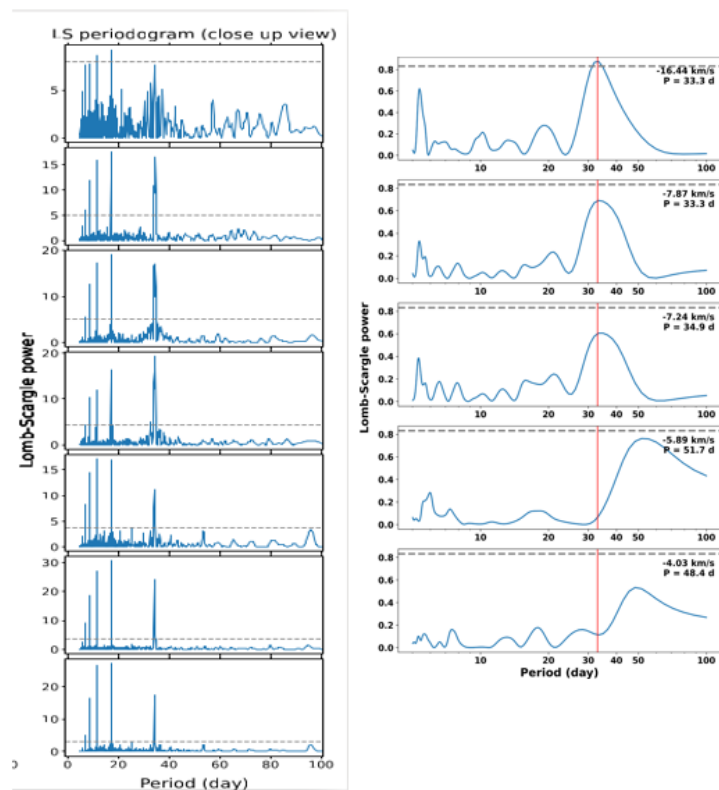


图 6: IRAS22198 周期解析結果

4.4 6.7 GHz メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーの相関

次に両メーザー間の放射強度から相関係数と P 値を求めた。この際に、前述の 2 つの相関係数を求めるのだが、観測に用いたアンテナの 3σ ノイズレベル以下の速度成分は誤差が大きいため、解析対象からは除外する。これらを除外した解析対象の天体、速度成分を表 10 に示す。

天体名	メタノールメーザー 速度成分 [km/s]	水メーザー 速度成分 [km/s]
12.88+04	32.72	29.3
	36.57	34.5
	38.23	
	39.27	
34.39+02	55.65	54.4
		56.2
		56.8
		58.8
		78.2
		80.8
35.79-01	59.92	62.9
	60.86	
	61.58	
	62.06	
IRAS22198	-16.07	-16.4
	-15.5	-7.8
	-10.89	-7.2
	-9.18	-5.9
	-8.51	-4.0
	-7.3	

表 10: 各天体におけるメタノールメーザーおよび水メーザーの速度成分

これらの天体と速度成分から、先行研究である山口（2017）[3] の条件を踏襲し、両メーザー間の速度差が $\pm 1[\text{km/s}]$ 以内の速度成分に対して 2 種類の相関係数と P 値を求める。対応する速度成分が存在しない 12.88+04 は解析対象外としている。

4.4.1 強度変動および周期が検出された天体

今回の観測で唯一、水メーザーでの強度変動が確認されかつ、水メーザーでの周期が検出されている天体 IRAS22198 の $-16.4[\text{km/s}]$ の速度成分について速度差が $\pm 1[\text{km/s}]$ で相関係数を求める。放射強度そのものの相関を表 11 に、対数微分後の強度変動率の相関を表 12 に示す。

放射強度そのものの相関係数は -0.5 と弱い負の相関、対数微分後の強度変動率の相関係数は -0.373 であったが、P 値が 0.15 （15%）と高く、統計的に有意な相関は見られなかった。これより、強度変動が確認された天体 IRAS22198 で水メーザーの周期が検出された速度成分と近い速度の相関は増減傾向に相関があると言える。

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
IRAS22198	-16.07	-16.4	-0.501	4.05×10^{-2}

表 11: 放射強度そのものの相関

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
IRAS22198	-16.07	-16.4	-0.373	1.55×10^{-1}

表 12: 対数微分後の強度変動率の相関

4.4.2 水メーザーでの周期が非検出だが強度変動が確認された天体

次に周期解析によって水メーザーでの周期は非検出となったが、強度変動が有るとした天体、速度成分について、速度差が $\pm 1[\text{km/s}]$ に対して相関を求める。

4.4.2.1 IRAS22198

放射強度そのものの相関を表 13 に、対数微分後の強度変動率の相関を表 14 に示す。

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
IRAS22198	-8.51	-7.8	-0.636	6.04×10^{-3}
	-7.3	-7.8	-0.742	6.47×10^{-4}
		-7.2	-0.903	7.10×10^{-7}

表 13: 放射強度そのものの相関

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
IRAS22198	-8.51	-7.8	-0.852	2.76×10^{-5}
	-7.3	-7.8	-0.874	9.88×10^{-6}
		-7.2	-0.824	8.64×10^{-5}

表 14: 対数微分後の強度変動率の相関

この結果から、この天体は水メーザーでの周期が非検出だが強度変動が確認された複数の速度成分で、負の相関を示すことが分かる。また、これらは P 値も低く、統計的にも有意であると言える。このことから、水メーザーでの周期は検出されていないが、以上の速度成分で両メーザーの増減傾向や変動率が反対の挙動を示していることが分かる。

4.4.2.2 34.39+02

放射強度そのものの相関を表 15 に、対数微分後の強度変動率の相関を表 16 に示す。

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
34.39+02	55.65	56.2	0.486	4.78×10^{-2}

表 15: 放射強度そのものの相関

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
34.39+02	55.65	56.2	0.465	6.96×10^{-2}

表 16: 対数微分後の強度変動率の相関

この結果から、放射強度そのものの相関は弱い正の相関を示す。一方で、対数微分後の強度変動率の相関は P 値が大きく、統計的に有意な相関と言えない。以上より、この天体は強度の増減傾向に関連性があることが示唆される。

4.4.2.3 35.79-01

放射強度そのものの相関を表 17 に、対数微分後の強度変動率の相関を表 18 に示す。

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
35.79-01	62.06	62.9	-0.622	7.68×10^{-3}

表 17: 放射強度そのものの相関

天体名	メタノールメーザー 使用速度成分 [km/s]	水メーザー 使用速度成分 [km/s]	相関係数	P 値
35.79-01	62.06	62.9	-0.226	4.00×10^{-1}

表 18: 対数微分後の強度変動率の相関

この天体も、放射強度そのものの相関に負の相関を示す一方で、対数微分後の強度変動率の相関は P 値が大きく、統計的に有意な相関と言えない。以上より、この天体は強度の増減傾向が反対の変動を行う関係があることが示唆される。

5 考察

5.1 IRAS22198 のメタノールメーザーの周期解析でみられた偽の周期について

IRAS22198 のメタノールメーザーは先行研究 [5, 6] などでは 33 日の周期が検出されている。しかし、今回のメタノールメーザーの周期解析の結果、本来の周期以外に複数の周期で閾値を超える値が確認できる。

この原因について、Lomb - Scargle 法の特徴が影響していると考えられる。解析の章でも書いているが、Lomb - Scargle 法は観測データを $\sin x$ や $\sin 2x$ 、 $\sin nx$ など複数の $\sin$ カーブの組み合わせとしてフィットさせることで周期性を評価している。このように周波数が n 倍の $\sin$ カーブを組み合わせているので、周期が $1/n$ の値が高調波として出てくる。以下図 7 にメタノールメーザーの周期解析結果を示す。

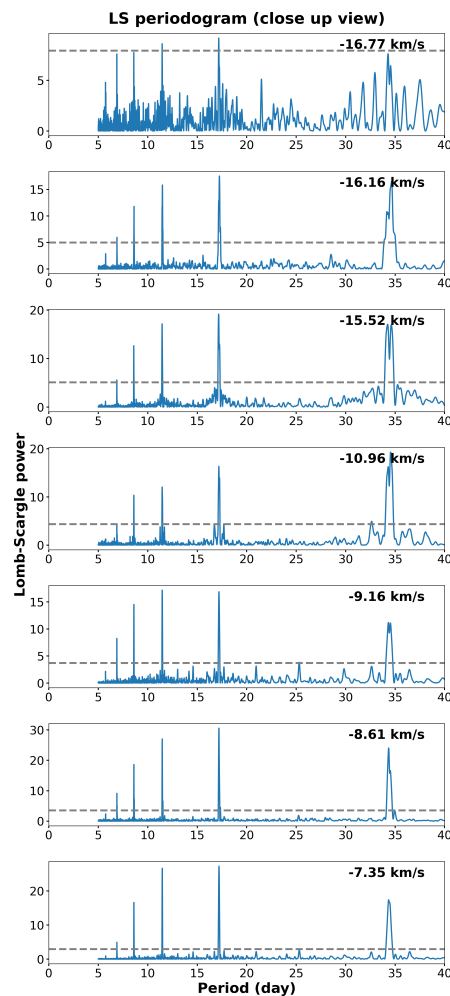


図 7: IRAS22198 メタノールメーザーの周期解析結果

この図より、本来の周期以外で閾値を超える周期が確認できる部分が、本来の周期の整数分の一に対応する周期として確認できる。具体的には、33 日の真の周期に対して、 $n = 2$ (約 17 日)、 $n = 3$ (約 11 日)、 $n = 4$ (約 8 日)、 $n = 5$ (約 6 日) の部分にピークが見られる。これらより、

本来の周期以外で確認できるピークは Lomb - Scargle 法を用いた際に出てくる高調波であると考えられる。

5.2 水メーザーの周期変動の検出率について

今回の観測・解析の結果、水メーザーで周期変動が検出されたのは 1 天体の 1 速度成分のみであった。この水メーザーの周期検出率の低さの原因について検証する。周期について議論するためには、観測期間が検出された周期の少なくとも 3 倍以上必要である。観測天体の周期の 3 倍以上を観測期間として設けることで、3 周期確認することができ、偶然の変動ではなく周期変動であることをより確実に議論することが出来る。本研究の場合、対象とした天体の最長の周期が 33 日のため、周期変動について議論するために 100 日以上観測が求められる。今回の 75 日という観測期間では 25 日までの周期をもつ天体についてのみ周期変動について議論可能ではあるが、今回はあえてそれ以上の周期をもつ天体についても議論する。

5.2.1 観測期間の影響

本研究の観測期間は 75 日程度であったため、周期が 9.9 日で 3 周期以上の周期が確認できる天体、0.167-04 について、メタノールメーザーをモニター観測全期間で周期解析した場合と今回の観測期間である 75 日で周期解析した場合を比較する。図 8 (a) がメタノールメーザーをモニター観測全期間で周期解析した場合、図 8 (b) が今回の観測期間である 75 日間で周期解析した場合である。

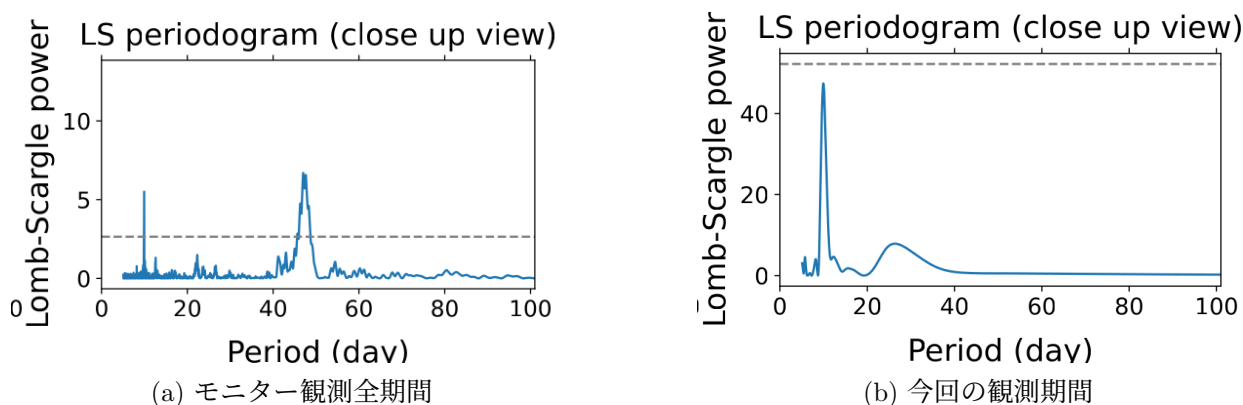


図 8: 0.167-04 に対する周期解析の比較。0.167-04 は 47 日の周期も報告されているが、今回は議論の対象外とする。

これらの図より、モニタ観測全期間で周期解析した場合に確認されていた周期が、今回の観測期間で周期解析した場合に確認されなかった。これは、観測期間が短く、データ点が少なかったことによるものだと考えられる。

5.2.2 観測頻度の影響

本研究は 4 から 5 日間隔で観測を行った。この観測頻度が検出率に影響しているのか確かめるべく、メタノールメーザーの周期が今回の観測期間の $1/3$ 以内かつ、観測頻度が低い 19.75-01 について、今回の観測期間と同期間で周期解析を行った。図 9 (a) は、19.75-01 をモニター観測全期間で周期解析した結果であり、図 9 (b) は今回の観測期間で周期解析したものである。

結果として、モニター観測全期間で周期解析した場合は周期が検出されていたが、解析期間を今回の観測期間とした際に、LS power が低下し、周期が検出されなくなった。以上より、観測頻度が低くとも周期は検出されている。

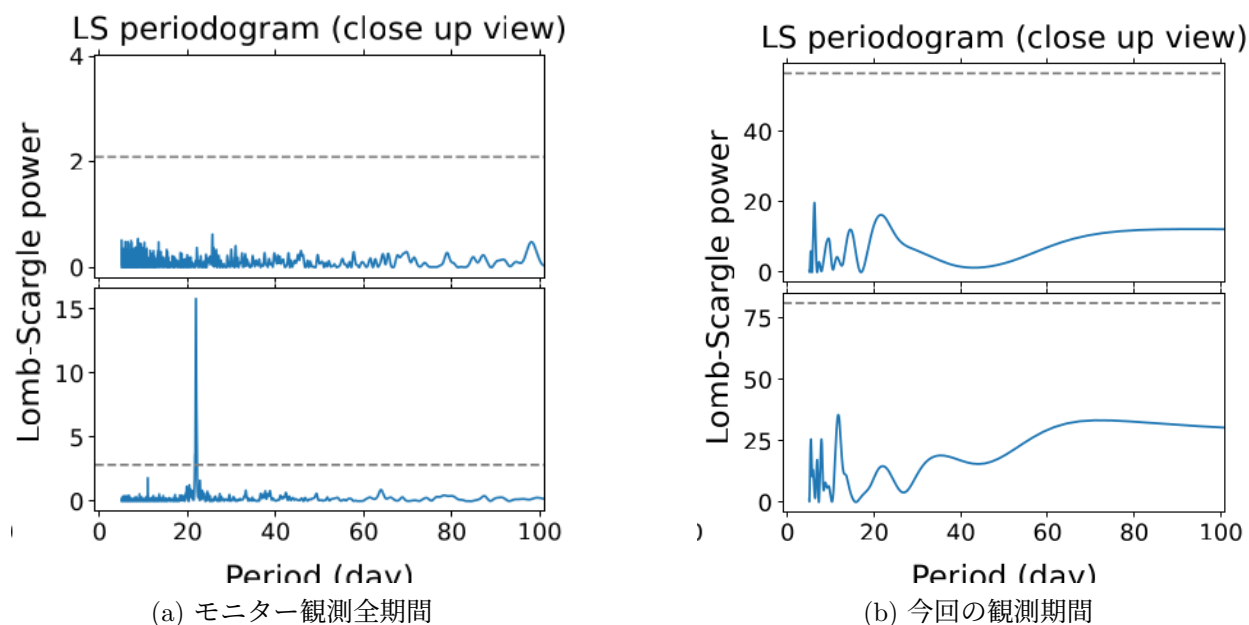


図 9: 19.75-01 に対する周期解析の比較

5.2.3 水メーザーの強度の影響

水メーザーの強度が弱いことが、周期の検出率の低さに関係しているのか確かめるため、メタノールメーザーでの放射強度が弱い天体 0.167-04、19.75-01 に対してモニター観測全期間で周期解析を行った。結果として、強度が弱い天体でも周期が検出されていた。

これらの結果から、観測頻度や水メーザーの強度よりも、観測期間が検出率に大きく関わっていることが分かる。これより、周期に対して詳細な検討を行うには、より観測期間を増加させる必要がある。

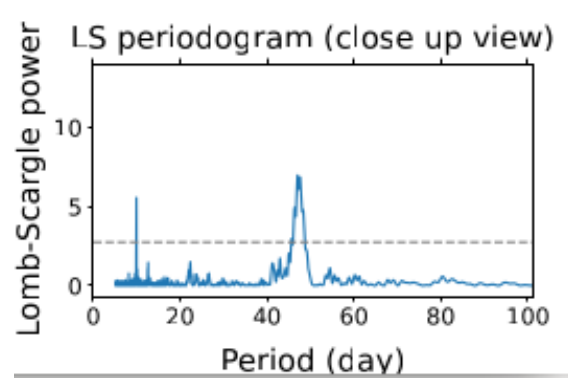


図 10: 0.167-04 でモニター観測全期間で周期解析した結果

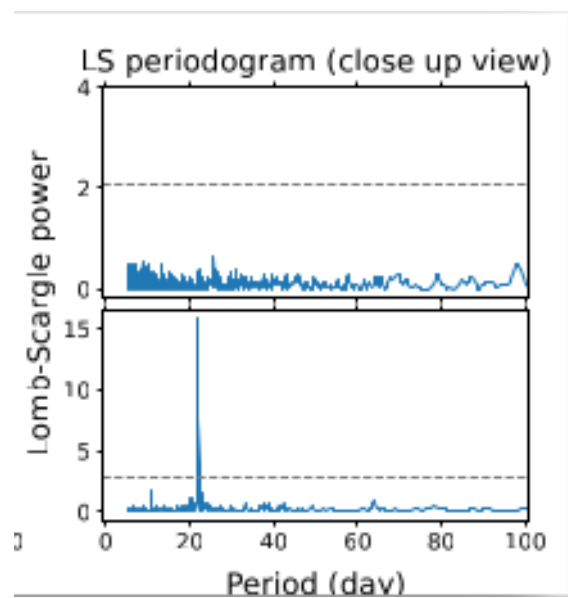


図 11: 19.75-01 でモニター観測全期間で周期解析した結果

6 まとめ

本研究では、大質量星形成領域の物理状態を解明することを目的として、6.7 GHz メタノールメーザーと 22 GHz 水メーザーを日立 32 m 電波望遠鏡と高萩 32 m 電波望遠鏡を用いて観測を実施した。観測は 2025/10/21 - 2026/01/04 までの 75 日間 11 天体について観測を実施し、両メーザーに周期性や強度変動の挙動に相関関係があるか解析を行った。解析の結果、

- 両メーザーで強度変動及び周期性が確認された天体：1
- 水メーザーにおいて周期性が非検出だが、強度変動が確認された天体：2
- 水メーザーにおいて周期性が非検出、また、強度変動が確認されたが統計的に有意でない天体：1
- 水メーザーにおいて周期性が非検出、また、強度変動が確認されたがアンテナのノイズのアンテナの影響が大きく相関を求める解析対象外：3
- 水メーザーでの放射が非検出：4

となった。これまで、両メーザー間の強度変動の挙動が反相関性を示す天体について議論されており、本研究では先行研究で検出されていた IRAS22198 で両メーザー間で速度差が近い複数の速度成分で両メーザーの増減傾向や変動率が反対の挙動を示している事が確認できた。また、新たに 1 天体において両メーザーの強度の増減傾向が反対の変動を示す天体や、増減傾向に正の相関を持つ天体も新たに 1 天体検出された。

また、これまで長年モニター観測が行われている 6.7 GHz メタノールメーザーでは多くの天体で周期が検出されている一方で、本研究で新たに観測を行った 22 GHz 水メーザーでは周期の検出率が低かった。その要因として観測期間の短さが挙げられる。本研究で対象とした天体のメタノールメーザーの周期は 9.9 日から 33 日であるのに対し、観測期間は 75 日であり、最長の周期に対しては 3 周期未満となってしまう、周期性を十分に検証するには観測期間が不十分であった可能性がある。今後、両メーザー間の周期性や相関についてより詳細な議論を行うためには、より長期間の観測を行うことが重要である。

このように、これまで発生領域や発生機構が異なるため、関係性がないと考えられていた異なるメーザー種において、両メーザー間の強度変動の挙動に周期性や相関性を持つ天体が検出されている。今後、このような観測例をさらに増やすことにより、これらの関係性を通じて大質量星形成領域の物理状態の解明に繋げることが期待される。今後、本研究よりも長期間の観測を行い、両メーザー間の強度変動の挙動に周期性や相関性がみられる天体の例を増やしていきたい。

7 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご指導とご支援を賜りました。この場をお借りして、心より感謝申し上げます。

指導教員である米倉覚則教授には、研究序盤の観測天体の選定から観測スケジュールの作成、解析手法に至るまで、本研究を行う上での大部分にわたって多大なるご指導を賜りました。また、長期間にわたり観測スケジュールを実行していただきました。百瀬宗武教授には一年間のゼミを通して、研究の基礎となる電波天文学についてご丁寧に教えていただきました。お二方に深く感謝を申し上げます。ありがとうございました。

研究員である田辺義浩様には、周期解析スクリプトの使い方を教えていただいたり普段のモニター観測で対応していただいたりと、大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

博士課程2年の森泉様にはスケジュール作成から解析、結果などで行き詰った際に、どんな些細な質問にもとてもご丁寧に教えていただきました。また、研究面だけでなく、星を見に連れていってくださったりなど、貴重な経験をさせていただきました。ありがとうございました。

研究室の先輩方には、研究に関することだけでなく日頃から話しかけていただいたりなど、温かく接していただきました。ありがとうございました。

同期の皆様からは、ゼミでの議論や進捗報告などで多くの刺激をもらいました。また、ポスター作成などで遅くまで研究室に共に残ったことも思い出深いです。ありがとうございました。

研究室の先輩方や同期が普段から話してくださるおかげで、研究室に行きたいと思えました。

最後になりますが、ここまで多くの事をご指導いただきました全ての方に改めて深く感謝を申し上げます。誠にありがとうございました。

References

- [1] S. Goedhart, M. J. Gaylard, and D. J. van der Walt. In: MNRAS, 2003, 339, pp. L33–L36.
- [2] M. Szymczak et al. In: MNRAS, 2016, 459, pp. L56–L60.
- [3] 山口 祥子. In: 茨城大学理学部卒業論文, 2017.
- [4] Tanabe et al. im prep. In.
- [5] 山口 貴大. In: 茨城大学大学院理工学研究科修士論文, 2017.
- [6] 平野 遥香. In: 茨城大学理学部卒業論文, 2020.
- [7] A. Bartkiewicz et al. In: AA, 2011, 525, A120.
- [8] E. D. Araya et al. In: The Astrophysical Journal Letters, 2010, 717, pp. L133–L137.
- [9] R. Valdettaro et al. In: AA, 2001, 368, pp. 845–865.
- [10] N. R Lomb. In: ApSS, 1976, 39, p. 447.
- [11] J. D. Scargle. In: ApJ, 1982, 263, p. 835.
- [12] 安井靖堯. In: 茨城大学大学院理工学研究科理学専攻修士論文, 2016.