

12.2 GHz 及び 6.7 GHz メタノールレーザー放射の 強度比による大質量星形成領域の物理状態の推定

22S6018G 菅村海斗

2026 年 2 月 26 日

概要

本研究は大質量星形成領域の物理状態を推定することを目標に行った。茨城大学が運用している日立 32 m アンテナを用いて行ってきた、6.7 GHz 及び 12.2 GHz メタノールメーザーの観測データを用いて解析を行った結果 6.7 GHz では 404 天体、12.2 GHz では 158 天体でメーザー放射が検出された。6.7 GHz と 12.2 GHz の両方でメーザー放射が検出された天体に対し $6.7 \text{ GHz} / 12.2 \text{ GHz}$ の強度比を算出した結果、約 58 % の天体が強度比 3 倍から 15 倍の範囲に集中していることが分かった。

目次

1	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	先行研究	5
2	観測	5
2.1	観測概要	5
2.2	観測諸元	5
2.3	解析方法	6
3	結果	7
3.1	検出の有無	7
3.2	強度比の算出	8
3.3	検出バイアスの確認	9
4	考察	11
4.1	検出結果について	11
4.2	強度比の算出と検出バイアスについて	11
4.3	物理状態の推定	11
5	今後の展望	13
6	参考文献	13

1 序論

1.1 研究背景

大質量星形成領域は、中小質量星形成領域と比較して高密度のガスに覆われており、さらに形成時間も短いと考えられている。そのため内部の物理状態を直接的に推定することは容易ではない。このような環境においては、強い放射強度を持ち、高密度ガスによる吸収の影響をほとんど受けないメタノールレーザーが有効な観測手段となる。特に、大質量星形成領域に特有とされるメタノールレーザーは、その物理状態の推定において重要な役割を果たす。6.7 GHz メタノールレーザーは比較的広い物理条件下で強く検出されることが知られている。一方、12.2 GHz メタノールレーザーは 6.7 GHz に比べて強く検出される物理状態の範囲がより限定的である。したがって、6.7 GHz および 12.2 GHz メタノールレーザーの検出状況や強度比を比較することにより、大質量星形成領域の物理状態を推定できると考えられる。

図 1 に 6.7 GHz 及び 12.2 GHz メタノールレーザー放射の強度比と各物理状態の関係を示す。表 1 に図 1 の各グラフの固定したパラメータの一覧を示す。本研究では解析したデータから算出した強度比を図 1 と比較することでガス温度、ダスト温度、ガス密度などの大質量星形成領域の物理状態の推定を行う。

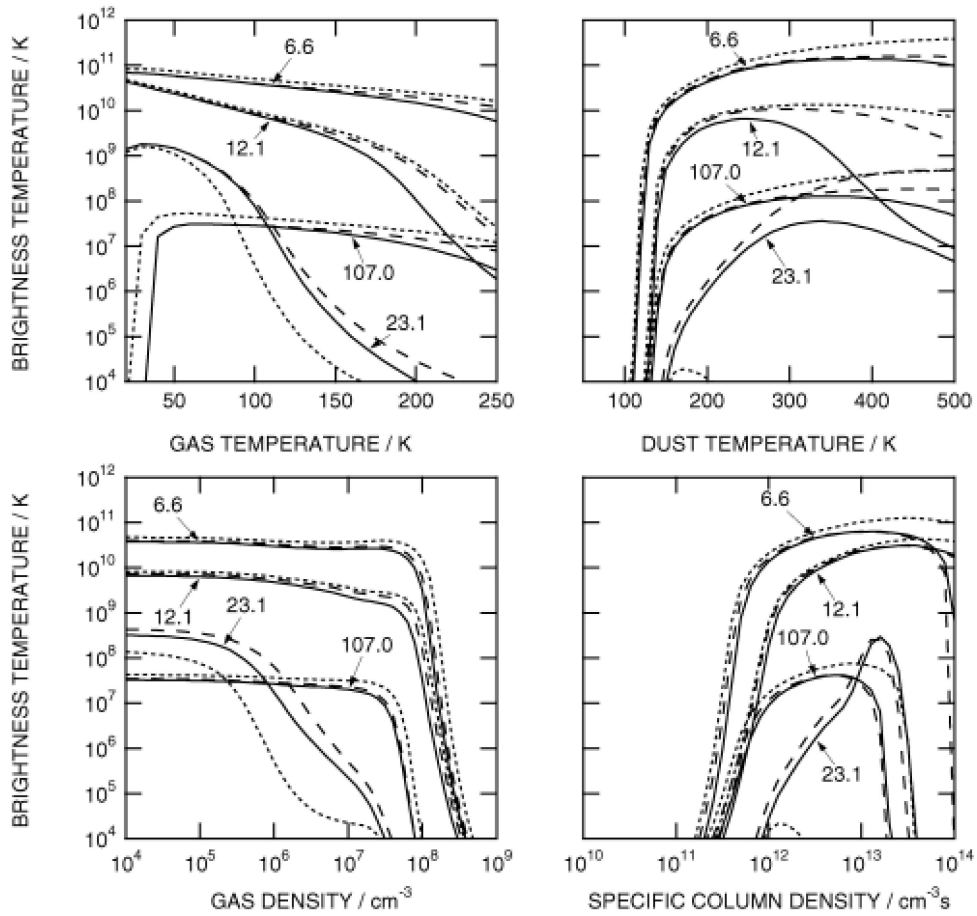


図 1 : 各物理状態と輝度温度の関係 [1]

	ガス温度の仮定	ダスト温度の仮定	ガス密度の仮定	カラム密度
ガス温度の図	可変	175 K	10^7 cm^{-3}	$10^{12.2} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$
ダスト温度の図	150 K	可変	10^7 cm^{-3}	$10^{12.2} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$
ガス密度の図	150 K	175 K	可変	$10^{12.2} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$

表 1 : 図 1 のパラメータ [1]

1.2 先行研究

佐藤氏 [2] は、茨城大学が観測をしている 433 天体に対し 6.7 GHz では 2012 年 12 月 30 日から 2024 年 1 月 22 日まで、12.2 GHz では 2023 年 2 月 26 日から 2023 年 11 月 21 日までのデータに対し解析を行っている。6.7 GHz では 400 天体、12.2 GHz では 119 天体でメーザー放射が検出されており、12.2 GHz で放射が検出された天体は全て 6.7 GHz でも検出されていた。さらに、6.7 GHz の強度は常に 12.2 GHz の強度より大きくなっていた。

2 観測

2.1 観測概要

現在、茨城大学が運用している日立 32 m アンテナでは 432 天体を 6.7 GHz と 12.2 GHz メタノールメーザーの同時モニター観測を行っている。ただし、NGC2071 と 358.9-00 の 2 天体は 2 種の天体コードで観測を行っているため観測データ数は 434 である。

2.2 観測諸元

観測諸元を表 2 に示す。

	6.7 GHz	12.2 GHz
観測期間	2012年12月30日~2026年1月1日	2023年2月26日~2025年9月16日
天体数	432天体	
解析データ数	434	
観測時間	1日あたり15時間程度	
観測周波数	6.669 GHz	12.178 GHz
周波数範囲	6.664 ~ 6.672 GHz	12.170 ~ 12.186 GHz
分光点数	8192点	
速度幅	360 km s ⁻¹	394 km s ⁻¹
速度分解能	0.13 km s ⁻¹	0.14 km s ⁻¹
典型的な T _{sys}	25 K	26 K
典型的な τ (tau)	0.010	0.012

表 2 : 観測諸元

2.3 解析方法

Chopper-Wheel 法によるアンテナ温度の導出、ドップラー補正による周波数から V_{lsr} 速度への変換、Flux 密度の校正、baseline の除去は、観測終了後自動で行われる。

米倉覚則氏作成のプログラム winteg を用いて、天体ごとにノイズレベルの -2 乗で重み付け平均し、python matplotlib を用いて天体ごと、周波数ごとに、全観測データの平均化スペクトルを作成した。v2 - v3 間がメーザー放射が見られる速度範囲。v1 - v2 間及び v3 - v4 間の 2 つが baseline の速度範囲。baseline の速度範囲によりノイズレベルを求めた。v2 - v3 の速度範囲で 5σ 以上の放射が確認できた放射を検出とみなした。観測されたスペクトルの各チャンネルの強度がノイズである時、標準正規分布に従う。標準正規分布で、 5σ より大きい値を持つ確率は、約 $3.0 \times 10^{-5} \%$ である。したがって 5σ より大きい値が検出された場合、それがノイズである確率は非常に低くなる。[3]

上記の解析を全天体のデータに対し行い、検出の有無を比較した。6.7 GHz と 12.2 GHz の両方でメーザー放射が確認できた天体で強度比を算出した。両方とも同じ速度成分でピークをとる場合、そのままピークの強度で比を算出する。違う速度成分でピークをとる場合は、同じ成分同士で比較するために 12 GHz のピーク強度と、その成分の近く (± 1 km s⁻¹) で極大値をとる 6.7 GHz の強度を用いて比を算出する。

3 結果

3.1 検出の有無

6.7 GHz と 12.2 GHz のスペクトルについて、ピークの速度成分が同じ例を図 2、違う例を図 3、非検出の例を図 4、全てのデータの検出結果の分類を表 3 に示す。

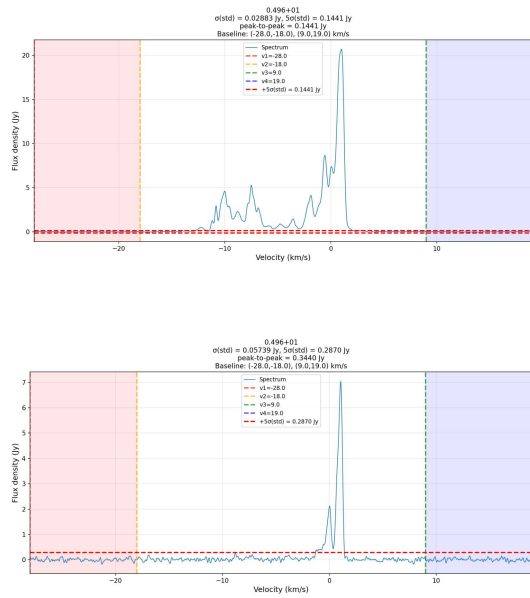


図 2：ピークの速度が同じである天体のスペクトルの例。(上) 6.7 GHz、(下) 12.2 GHz

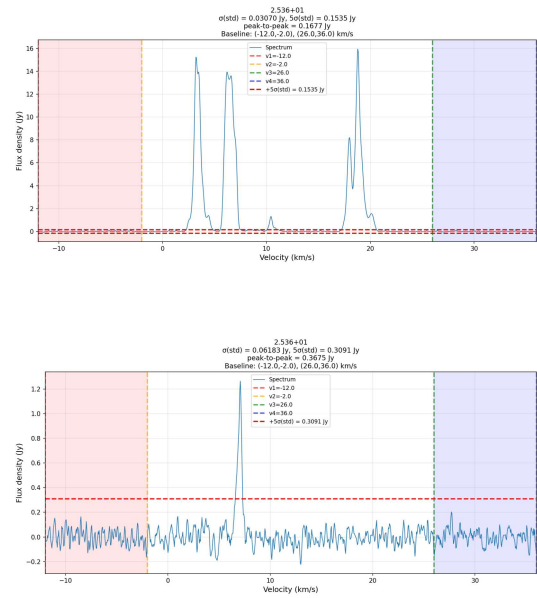


図 3：ピークの速度が異なる天体のスペクトルの例。(上) 6.7 GHz、(下) 12.2 GHz

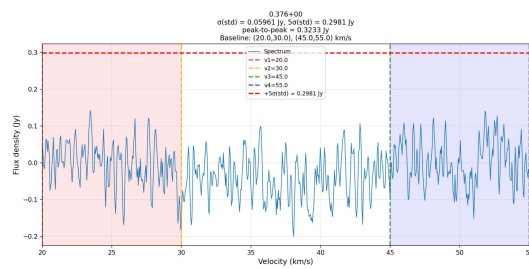


図 4：12.2 GHz メタノールメーザー放射が非検出な天体のスペクトルの例

	6.7 GHz メーザー放射が検出された天体	6.7 GHz メーザー放射が検出されなかった天体	計
12.2 GHz メーザー放射が検出された天体	158	0	158
12.2 GHz メーザー放射が検出されなかった天体	246	30	278
計	404	30	434

表 3 : 6.7 GHz および 12.2 GHz メタノールメーザーの検出・非検出による分類結果

3.2 強度比の算出

また、6.7 GHz と 12.2 GHz の強度比と天体数の関係を図 5 に示す。図 5 のヒストグラムで 39 倍以上の比をとる 19 天体の各強度比は以下ようになる。

19 天体の比：39.01 , 39.32 , 39.45 , 44.70 , 48.97 , 49.13 , 50.23 , 51.23 , 53.51 , 57.33 , 61.76 , 62.94 , 63.22 , 69.29 , 72.91 , 84.00 , 130.5 , 164.1 , 309.6 , 317.5 , 404.1

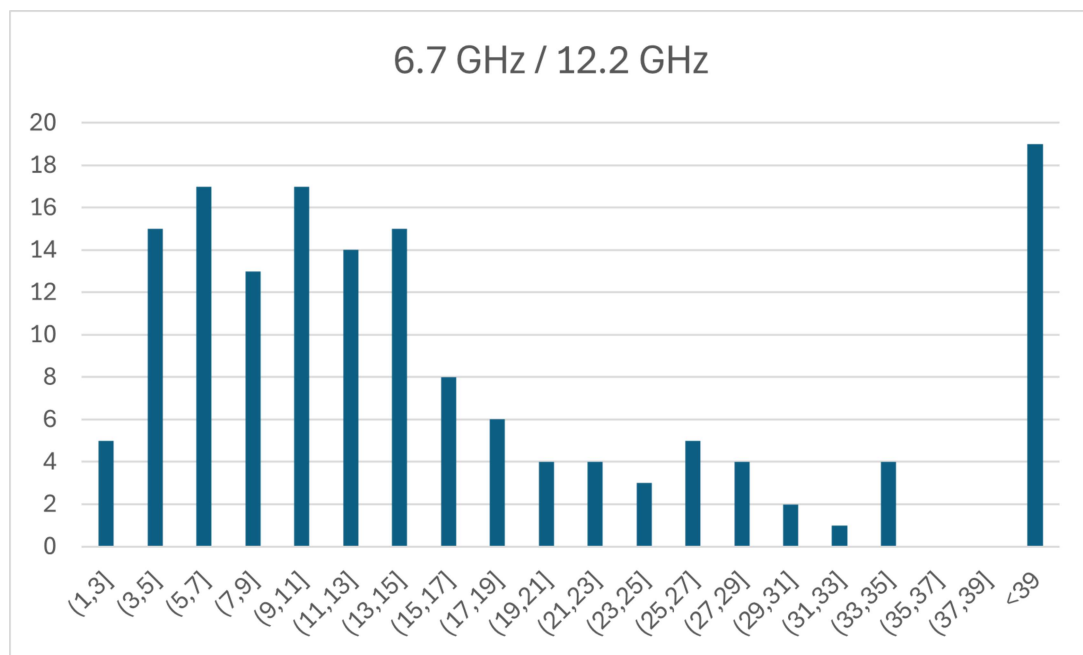


図 5 : 強度比に対する天体数

3.3 検出バイアスの確認

図 5 より、強度比が 3 - 15 倍となる範囲に天体数が集中している結果となった。考えられる原因として、12.2 GHz が 6.7 GHz に比べ観測期間が短いことによる S/N 値不足が挙げられる。12.2 GHz でメーザー放射の検出を判断する際、強度が低い天体ではノイズに埋もれてしまい検出にならず、結果的に強度比の値が大きい天体の数が少なくなっている可能性がある。それを確かめるために、強度比と 12.2 GHz 平均化データのノイズの RMS (以下 RMS と記載する) の値を比較した。12.2 GHz と 6.7 GHz の強度比と RMS の値をプロットしたグラフを図 6 に示す。また、検出水準を 3σ に下げて解析を行った。6.7 GHz の検出数は 410 天体、12.2 GHz の検出数は 243 天体であった。12.2 GHz の 243 天体のうち 78.62+09、NGC2071A、NGC2071B の 3 天体は 6.7 GHz では検出されなかったためそれらを除外した 240 天体で強度比を算出した。強度比と天体数の関係を図 7 に示す。検出水準 3σ で検出できた天体について 12.2 GHz と 6.7 GHz の強度比と RMS の値をプロットしたグラフを図 8 に示す。

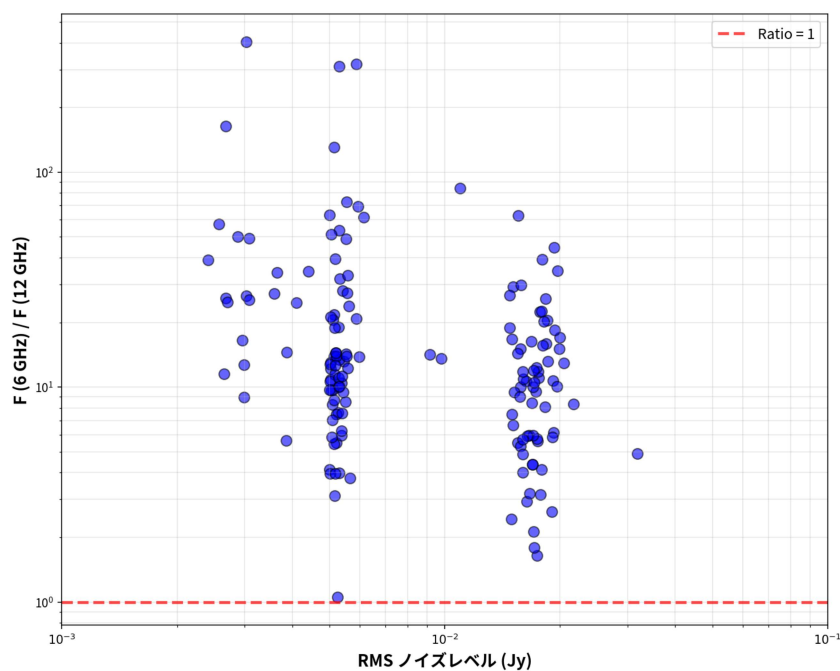


図 6 : 強度比と RMS の関係

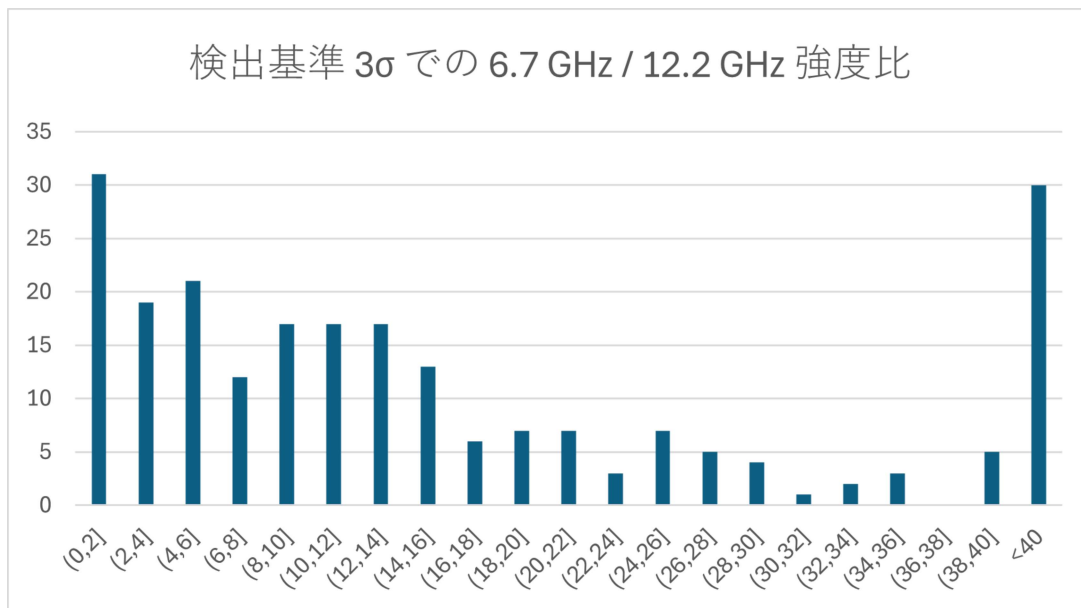


図 7 : 検出水準 3σ での強度比に対する天体数

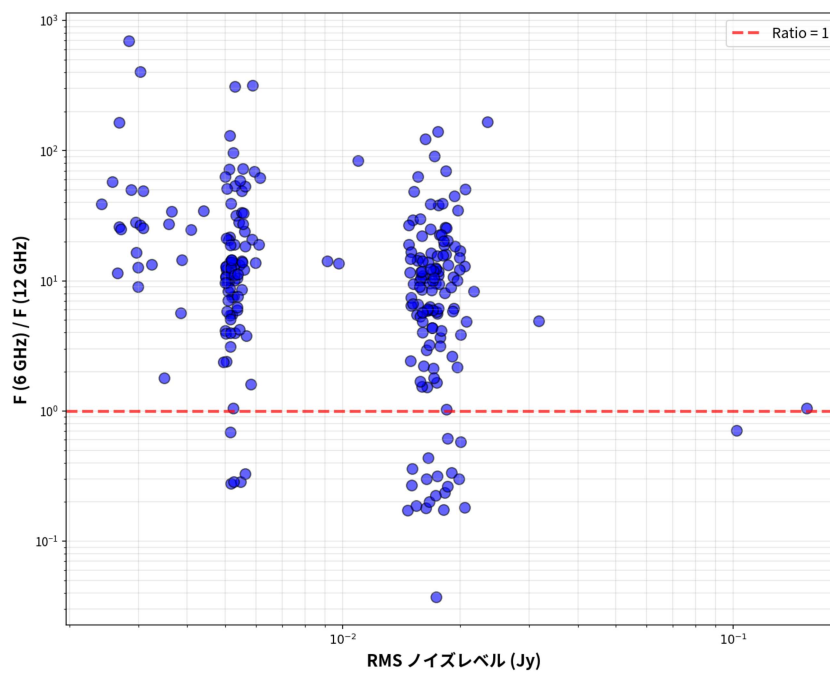


図 8 : 検出水準 3σ での強度比と RMS の関係

4 考察

4.1 検出結果について

表 2 より、12.2 GHz でメーザー放射が検出された天体は全て 6.7 GHz でも検出された。さらに、6.7 GHz では検出され、12.2 GHz では検出されなかった天体があることから、6.7 GHz の方が広い物理状態の範囲で強いメーザー放射が検出されると言える。図 5 より、強度比は最低でも 1 倍以上（算出した最低値は 1.05 倍）であることから 6.7 GHz の強度の方が 12.2 GHz の強度より常に大きくなることが分かる。これらの結果は先行研究と矛盾しない。

4.2 強度比の算出と検出バイアスについて

3.3 でも述べたように、図 5 のヒストグラムの分布から強度比が約 3 - 15 倍となる範囲に全体の 58 % の天体数が集中していることが分かる。もし、S / N 値不足により、強度が低い 12.2 GHz の検出率が低くなっていると仮定するならば、RMS が大きい（ノイズレベルが大きい）ほど強度比が大きい天体数は少なくなると考えられる。しかし、図 6 , 8 を見ると強度比と RMS に相関関係は見られない。また、図 5 , 7 を見比べても 15 倍以上の範囲の天体数の割合に変化は見られない。したがって S / N 値不足により、3 - 15 倍の範囲に天体が集中したわけではないと考えられる。

4.3 物理状態の推定

図 1 の 6.6 と 12.1 の破線の数値を比較して強度比を目測しグラフを作成した。強度比とガス温度のグラフを図 9 、強度比とダスト温度のグラフを図 10 、強度比とガス密度のグラフを図 11 に示す。各グラフの赤い範囲は強度比の値が 3 - 15 倍となる範囲である。解析結果と合わせると物理状態はガス温度が約 50 - 175 K 、ダスト温度は約 150 - 350 K 、ガス密度は約 $10^4 - 4 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ であると推定される。

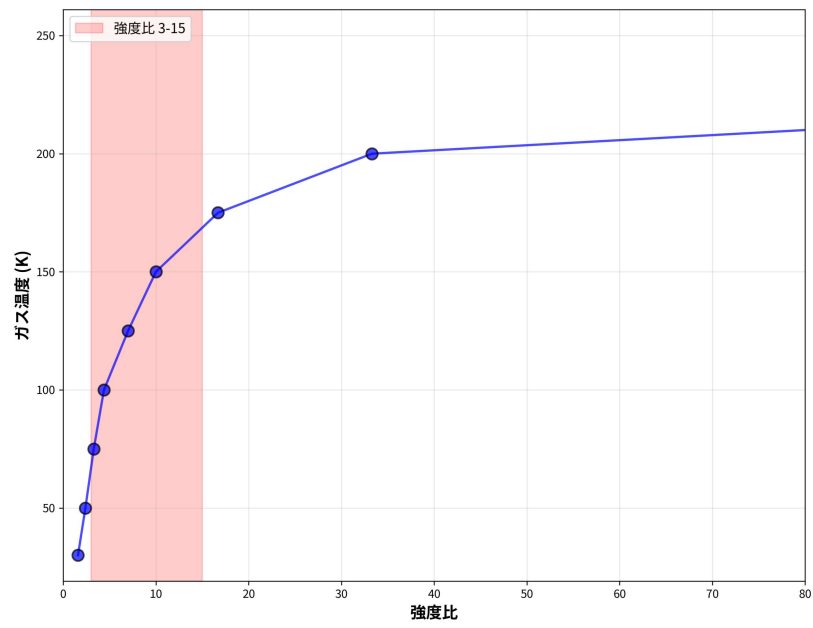


図 9 : ガス温度 (K)

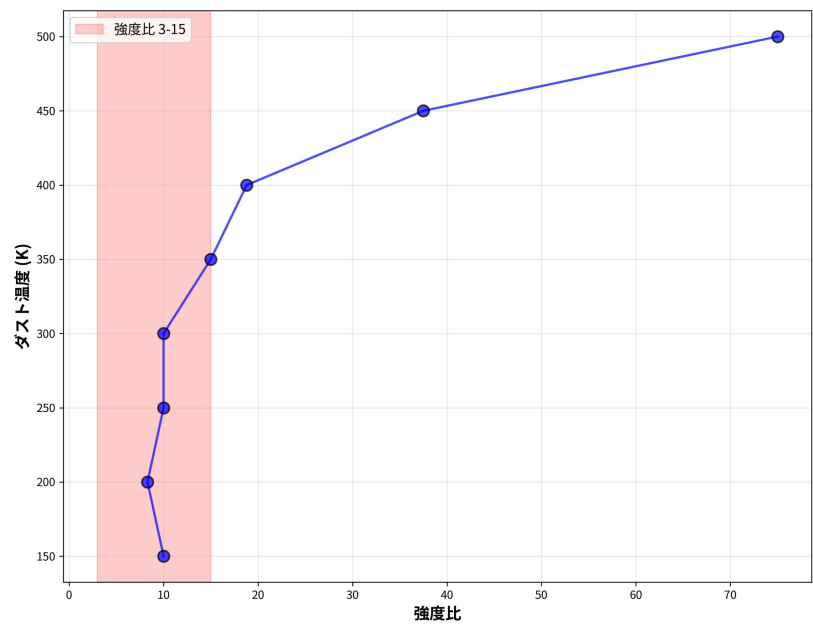


図 10 : ダスト温度 (K)

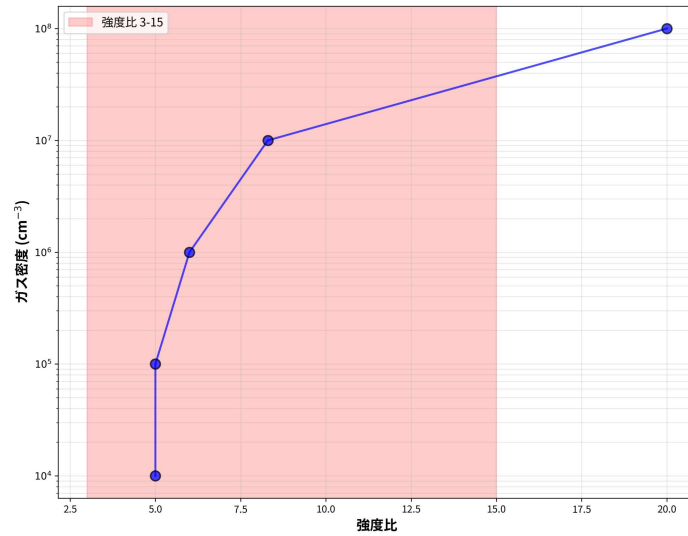


図 11 : ガス密度 (cm^{-3})

5 今後の展望

検出水準 3σ にした際に 12.2 GHz の強度が 6.7 GHz の強度よりも大きくなった天体が 23 天体あり、12.2 GHz では検出され 6.7 GHz では検出されなかった天体が 3 天体あった。これらについてノイズを検出としてしまっているのか、メーザー放射を検出できているのか解明したい。そのために、観測日ごとに強度をプロットし比較する他、引き続き観測を続けることで S / N 値をよくしていく必要がある。

6 参考文献

- [1] Cragg et al. MNRAS 360, 2, 533-545 (2005) Models of class II methanol masers based on improved molecular data
- [2] 佐藤 優希 2023 茨城大学理学部卒業論文
- [3] 村田 千和 2023 茨城大学理学部卒業論文