

平成 27 年度（2015 年度）

卒業論文

日立 32m 電波望遠鏡を用いた、周期的な強度変動を

示すメタノールメーザー源のサーベイ

～30 日未満の短周期検出を目指した高頻度モニター～

茨城大学理学部理学科学際理学コース

電波天文観測研究室

12s6025n

山口貴大

2016/02/29

概要

6.7GHz メタノールメーザー源は、太陽の 8 倍以上の質量をもつ大質量星の形成領域にのみ付随しており、その多くが進化初期の原始星段階で検出されている。そのため、6.7GHz メタノールメーザーは、いまだ謎の多い大質量星の形成過程を解明するための有力なツールとされている。

今までに観測された 6.7GHz メタノールメーザーのうちいくつかは周期的な強度変動を示すものが見つかった。しかし、周期性を検出し得るほどの十分な期間と頻度で観測が行われた天体は、これまでに 6.7GHz メタノールメーザー放射が検出されている天体数約 1000 天体に対して 20%にも満たない程度と非常に少なく、統計的な調査にはサンプル数が足りていない。そこで、周期変動天体のサンプル数を増やすことを目的として、茨城県日立市にある 32m 電波望遠鏡では、大規模なモニター観測を 2012/12/30 から現在にかけて行っている。

本研究では、2015/09/18・現在（第 3 期）に行われている高頻度なモニター観測によって得られた観測データのうち、2015/12/24 までの観測データについて周期解析を行い、短周期での周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指した。周期解析については、Lomb-Scargle 法という不等間隔な離散的データに対して適用可能な周期解析方法が用いられたプログラム（安井, 2016, 茨城大学大学院 修士論文 [1]）を使用した。そして、以下の二つの条件を満たすものを周期変動天体として同定した。

- 1) 誤警報確率(false-alarm probability ; fap) < 0.001
- 2) 導出された周期が観測期間の 1/3 より短い

その結果、条件を満たし、周期変動天体であると判断された天体は 143 天体中 6 天体あった。そのうち、1 天体(G 000.16-00.44)は初めて周期変動天体であると判断され、その周期は 47.5 日であった。他の 5 天体については、G 033.64-00.21 以外の天体は、既知の周期とほぼ同等の周期が求められた。また、今回の解析結果から、2015/09/18 - 2015/12/24 の 98 日間、各天体 5 日に 1 回の頻度での観測では、観測データが足りず、30 日程度未満の周期性は見落とされてしまうことがわかった。

今後は、より長い観測期間のデータを用いることで観測データを増やし、30 日未満の短周期で周期変動する 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指したい。

目次

第1章 序論.....	1
1.1 大質量星.....	1
1.1.1 大質量星形成.....	1
1.1.2 大質量星形成領域におけるメーザー源.....	2
1.2 6.7GHz メタノールメーザー.....	2
1.2.1 メーザー現象.....	2
1.2.2 6.7GHz メタノールメーザー.....	3
1.2.3 周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー.....	3
1.3 研究目的.....	5
第2章 観測.....	7
2.1 観測天体の選出方法.....	7
2.2 観測概要.....	8
第3章 解析と結果.....	9
3.1 解析.....	9
3.1.1 Lomb-Scargle 法.....	9
3.1.2 誤警報確率.....	9
3.1.3 周期変動天体の選出条件.....	9
3.1.4 周期解析の流れ.....	10
3.2 結果.....	12
3.2.1 G 000.16-00.44.....	12
3.2.2 G 014.23-00.50.....	15
3.2.3 G 033.40+00.01.....	17
3.2.4 G 033.64-00.21.....	20
3.2.5 G 034.39+00.24.....	22
3.2.6 IRAS 22198+6336.....	25
第4章 考察と今後の展望.....	28
4.1 周期性が初検出の G 000.16-00.44 について.....	28
4.2 既知の周期と異なる周期が導出された G 033.64-00.21 について.....	28
4.3 今回の解析における周期性の検出限界.....	29
第5章 まとめ.....	31
付録A 第3期観測天体リスト.....	32
謝辞.....	33
参考文献.....	34

第 1 章 序論

※序論の大部分は、「星間物質と星形成」[2]、「宇宙の観測Ⅱ - 電波天文学」[3] を参考にしながらまとめた。

1.1 大質量星

1.1.1 大質量星形成

星の形成領域は、質量によって、大質量星形成領域と中小質量星形成領域に大きく分けられる。ここで大質量星とは、太陽の 8 倍以上の質量をもつ恒星のことである。この大質量星は、以下のような点で、星間空間、さらには銀河とその進化に物理的、化学的にも大きな影響を与える。そのため、大質量星形成過程を解明することは、銀河規模での現象の理解に不可欠である。

- 表面温度が高いために紫外線量が大きく、周囲のガスを電離・加熱する。
- 星風と呼ばれるガス流を発生して周囲の物質を圧縮する。
- 進化の終末で超新星爆発を起こし、星間空間に膨大なエネルギーを与え、同時に爆発時に重元素を生成・供給する。

これまでの理論研究より、現時点では、大質量星は以下の進化過程を経て形成されると考えられている。

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

1) の星なし大質量分子雲コアは、巨大分子雲内において周囲より高密度で低温な領域であり、このような領域で大質量星が生まれる。分子雲コアの中心部分では、自己重力及び周囲の外圧の働きにより収縮して中心星が形成される。2) は、中心星への質量降着が進み、中心星が成長していく途中の段階である。この時点では中心星の質量は太陽の数倍程度であると考えられる。3) は、さらに中心星への質量降着が進み、中心星が大質量に到達した段階である。4) は、中心星の質量が十分大きくなり、星の中心で水素の核融合反応が始まって主系列星として輝き始める段階である。この段階では、主系列星から放出される紫外線により周囲に存在する水素が電離を起こし、HII 領域（電離水素領域）が形成される。

このような大質量星形成過程を証明するためにも、観測的な検証が重要である。しかし、大質量星形成領域は、以下の理由から観測が困難である。

- 絶対数が少ない。
- 進化のタイムスケールが短いため、進化過程を追うことが難しい。
- 太陽系近傍の巨大分子雲が少ないため、空間分解能が悪い。
- 大質量原始星の周囲が高密度な星間物質に覆われているため、可視光での直接的観測が難しい。

1.1.2 大質量星形成領域におけるメーザー源

大質量形成領域は、しばしば、水酸基メーザー(OH)、水メーザー(H₂O)、メタノールメーザー(CH₃OH)などのメーザー源を伴うことが知られている。メーザーは放射強度が非常に強いため、超長基線干渉計法(VLBI)などの、感度はそれほどよくないが超高空間分解能な観測によって、詳細な空間分布が得ることが可能である。また、メーザーは、周波数のドップラーシフトから得られる視線方向の速度と、固有運動による接線方向の速度の情報が観測可能であり、天体の 3 次元運動を理解する上で非常に有益な存在である。中でも、6.7GHz メタノールメーザーは、現在までに大質量星形成領域でのみ検出されているため、可視光での直接的観測が困難な大質量星形成領域を理解する上で非常に有力なツールとされている。そこで、次項では、この 6.7GHz メタノールメーザーについて詳しく見ていく。

1.2 6.7GHz メタノールメーザー

1.2.1 メーザー現象

メーザー(microwave amplification by stimulated emission of radiation ; maser)とは、二つの準位間で上の準位の方により多くの粒子が存在する（反転分布）状態のとき、連続的に粒子が下の準位へ遷移して誘導放射し、強い放射を出す電波領域の特徴的な現象のことである。原理的には、光領域のレーザー(laser)と同じ現象である。

地球の大気のようにガスの密度が高いところでは通常、粒子同士の衝突が支配的であり（熱平衡状態）、二つの準位間の粒子数の比は次式のような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、 (n_1, n_2) はそれぞれ準位 1 と準位 2 の粒子数、 (g_1, g_2) はそれぞれ準位 1 と準位 2 の統計的重み、 ν は周波数、 T は励起温度、 $h = 6.63 \times 10^{-27} [\text{erg} \cdot \text{s}]$ はプランク定数、 $k = 1.38 \times 10^{-16} [\text{erg} \cdot \text{K}^{-1}]$ はボルツマン定数である。この式を変形すると、

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) < 1 \quad (2)$$

となり、必ず 1 より小さくなる。よって、統計的重みあたりの粒子数 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、ガスの密度が低い希薄な宇宙空間では、粒子同士の衝突よりも自発放射や誘導放射の方が支配的になる場合がある。このとき、必ずしも

$n_2/g_2 < n_1/g_1$ とはならず、上のエネルギー準位の方に粒子がより多く分布する場合がある。このような状態は反転分布と呼ばれる。この状態は非常に不安定であり、外から二つの準位間のエネルギー差に相当するエネルギー $h\nu_{21}$ を持った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へ落ちて周波数 ν_{21} の電波を誘導放射する。そしてさらにこの放射がとなりの分子に入射して同様な放射を起こす。これが連続的に起こることで非常に強い放射を出す。このようにして増幅された放射が、レーザー放射である。

レーザー放射は以下のような特徴がある。

- 強度が非常に強い。
- 電波源の広がり極めて小さく点状である。
- 直線または円偏光している。
- スペクトル線の周波数幅が一般に非常に細い。
- 電波の位相がそろっている。

1.2.2 6.7GHz メタノールレーザー

レーザーは、分子の種類によって増幅できる電波の周波数が異なる。先ほども述べたが、大質量形成領域では、水酸基(OH)や水(H₂O)、メタノール(CH₃OH)などの分子が強いレーザーを出すことが知られている。また、メタノールレーザーは、レーザー源の分布が輝線によって大きく異なるため、クラス I (25GHz など) とクラス II (6.7GHz、12GHz など) の 2 種類に分類されている。中でも 6.7GHz メタノールレーザーは、現在までに大質量星形成領域以外での検出例がないため、可視光での直接的な観測が困難な大質量星形成領域を間接的に観測可能にする良いプローブとなる。

1.2.3 周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールレーザー

6.7GHz メタノールレーザーは様々な強度変動を示すことがよく知られている。さらにその中でも周期的な強度変動を示すものが見つかっており、Goedhart et al. (2003)による観測で初めてその周期性が検出された [4]。6.7GHz メタノールレーザーの周期的な強度変動の要因はまだ明確にはわかっていないが、可能性の一つとして、中心星の光度の周期変動によるものが考えられている。そのため、6.7GHz メタノールレーザーの周期的な強度変動の詳細を調べることで、中心星の特徴を知ることができるとともに、大質量星形成過程で明らかになっていない、それぞれの進化段階でのタイムスケールを知る手がかりにもなる。現在、約 1000 天体で 6.7GHz メタノールレーザー源が見つかっており、そのうち、周期的な強度変動を示すものは 17 天体見つっている。それを以下の表 1 にまとめた。また、周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールレーザー源 17 天体の周期に関するヒストグラムを以下の図 1 に示す。

表 1：既知の周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源

天体名	周期 [day]	参考文献
G 009.62+00.19	243	Goedhart et al. 2014
G 012.68-00.18	307	Goedhart et al. 2004
G 012.88+00.48	29.5	Goedhart et al. 2009
G 022.36+00.06	179.3	Szymczak et al. 2015,2011
G 025.41+00.10	244.7	Szymczak et al. 2015
G 037.55+00.20	237	Araya et al. 2010
G 045.47+00.13	195.6	Szymczak et al. 2015
G 073.06+01.80	159	Szymczak et al. 2015
G 075.76+00.34	119.9	Szymczak et al. 2015
G 188.94+00.88	416	Goedhart et al. 2004
G 196.45-01.67	668	Goedhart et al. 2004
G 328.23-00.54	220.5	Goedhart et al. 2014
G 331.13-00.24	509	Goedhart et al. 2014
G 338.93-00.06	132.8	Goedhart et al. 2014
G 339.62-00.12	200.3	Goedhart et al. 2014
G 358.46-00.39	220	Maswanganye et al. 2015
IRAS 22198+6336	34.6	Fujisawa et al. 2014

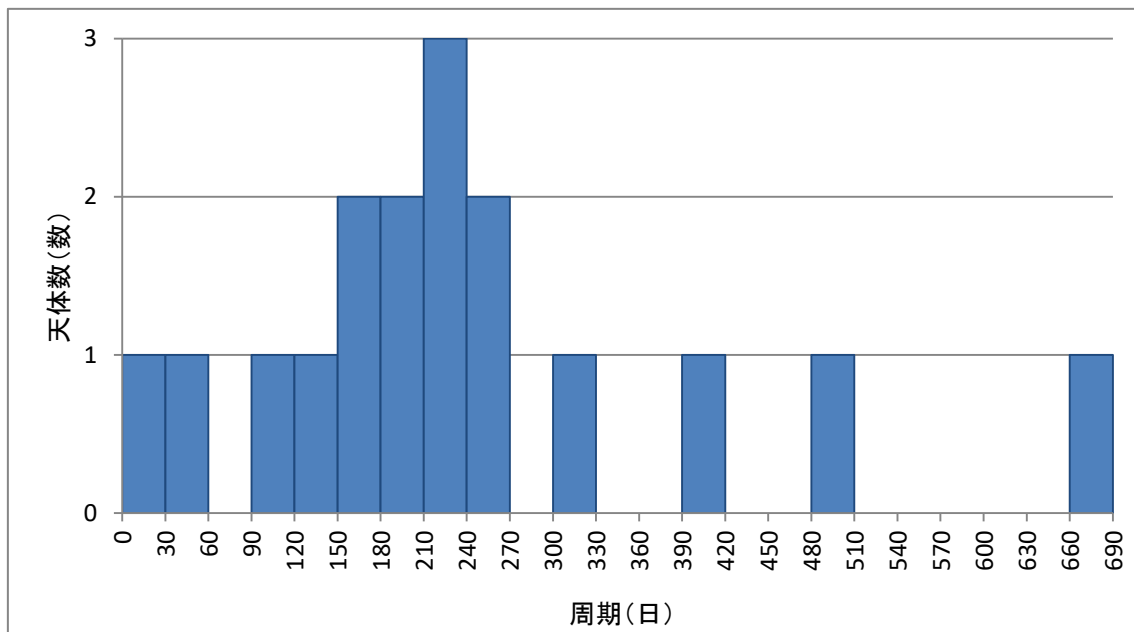


図 1：既知の周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源のヒストグラム

1.3 研究目的

先ほども述べたとおり、これまでに、周期的な強度変動を示すものは 17 天体見つかった。しかし、周期性を検出し得るほどの十分な期間と頻度で観測が行われた天体は、これまでに 6.7GHz メタノールメーザー放射が検出されている天体数約 1000 天体に対して 20%にも満たない程度と非常に少なく、統計的な調査にはサンプル数が足りていない。そこで、周期変動天体のサンプル数を増やすことを目的として、茨城県日立市にある 32m 電波望遠鏡では、2012/12/30 - 2014/01/10（第 1 期）、2014/05/07 - 2015/08/24（第 2 期）にかけて、461 天体に対し、各天体 9 - 10 日に 1 回の頻度で大規模なモニター観測を行った。この観測では、約 30 日以上の中周期で周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指した。さらに、約 30 日未満の短周期で周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指し、日立 32m 電波望遠鏡では、観測する天体数を 143 天体に絞り、より高頻度（5 日に 1 回程度）なモニター観測を 2015/09/18 - 現在（第 3 期）に行っている。

第 1 期と第 2 期の観測データに関しては、茨城大学の杉山孝一郎氏によって周期解析が行われており [13]、周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源が新たに 14 天体見つかった（表 2）。また、G 196.45-01.67 という天体については、既知の周期（668 日）とは異なる周期（132.5 日）が導出されている。

表 2: 日立アンテナで新検出された周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源

天体名	周期 [day]
G 006.18-00.35	180.5
G 014.23-00.50	23.7
G 024.14+00.00	188.9
G 026.52-00.26	172.2
G 028.02-00.44	111.5
G 030.40-00.29	220.1
G 033.40+00.01	31.7
G 033.64-00.21	200.8
G 034.39+00.24	29.5
G 036.70+00.09	53.4
G 037.47-00.11	67.9
G 108.75-00.96	164.2
G 111.53+00.76	171.9
G 174.19-00.09	45.5

本研究では、第 3 期の観測データのうち、2015/12/24 までの観測データについて周期解析を行い、短周期での周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指した。(以降、6.7GHz メタノールメーザーを、メタノールメーザーと略して呼ぶこととする。)

第 2 章 観測

2.1 観測天体の選出方法

茨城県日立市にある 32m 電波望遠鏡では、2012/12/30 - 2014/01/10 (第 1 期)、2014/05/07 - 2015/08/24 (第 2 期)、2015/09/18 - 現在 (第 3 期) の 3 期間にわたってモニター観測を行っている。モニター観測とは、同じ天体に対して、ある期間で何度も観測を行うことである。第 1 期と第 2 期の観測対象天体は、現在までに見つかっているメタノールメーザー源約 1000 天体から、北半球の日立 32m 電波望遠鏡で観測可能な 461 天体 (赤緯 ≥ -30 [deg]) を選出した。さらに第 3 期の観測対象天体は、第 1 期と第 2 期の観測対象天体 461 天体から、十分な強度を持ち、かつ強度変動していると思われる 143 天体を選出した (付録 A)。この選出の際、用いた指標が変動指数(modulation index)と信号雑音比(signal-to-noise ratio)である。

まず、強度変動の有無を判断する指標として、各速度成分に対して、全観測値の標準偏差 σ を平均 μ で割った、

$$I_{\text{mod}} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

を変動指数 I_{mod} と定義する。変動天体の選出条件は $I_{\text{mod}} \geq 0.30$ とした。この場合、天体の速度成分は強度変動していると判断する。

次に、十分な強度も持つかを判断する指標として、観測期間中の強度の最大値 S_{max} と観測装置由来の雑音の rms 値 σ との比、

$$SNR = \frac{S_{\text{max}}}{1\sigma} \quad (4)$$

を信号雑音比 SNR と定義する。選出条件では $SNR \geq 7$ とし、この場合、その天体が十分な強度をもつと判断した。

つまり、第 3 期の観測対象天体は、第 1 期と第 2 期の観測対象天体 461 天体から、次の二つの条件を満たす 143 天体を選出した。

- 1) $I_{\text{mod}} \geq 0.30$
- 2) $SNR \geq 7$

2.2 観測概要

本研究で用いた観測データは、日立 32m 電波望遠鏡で 2015/09/18 - 現在（第 3 期）に、各天体 5 日に 1 回の頻度で行われているモニター観測によって得られたものである。このモニター観測の概要を以下の表 3 にまとめた。

表 3：モニター観測の概要

望遠鏡	日立 32m 望遠鏡
観測期間	2015/09/18 - 現在（第 3 期）
観測頻度	5 日に 1 回
空間分解能	~ 4.6 [arcmin]
周波数	6664 - 6672 [MHz]
分光点数	8192
速度分解能	0.044 [km/s]
積分時間	300 [s]
検出感度(3σ)	~ 0.9 [Jy]

ただし、観測期間と観測頻度について、表 3 の内容とは異なる天体がいくつかあり、それを以下の表 4 にまとめた。なお、表 4 では、表 3 と異なる部分のみ表記しており、空欄は表 3 と同様の内容である。

表 4：観測期間あるいは観測頻度が表 3 とは異なる天体

天体名	観測期間	観測頻度
G 000.16-00.44	2015/08/09 - 現在	1 日に 1 回
G 014.23-00.50	2015/08/09 - 現在	1 日に 1 回
G 033.40+00.01	-	2 日に 1 回
G 033.64-00.21	2015/08/09 - 現在	1 日に 1 回
G 034.39+00.21	-	2 日に 1 回
G 192.6-00.0	-	(2015/11/13 から)1 日に 1 回
IRAS 22198+6336	2015/08/09 - 現在	1 日に 1 回

第3章 解析と結果

3.1 解析

本研究では、日立 32m 電波望遠鏡で得られた第3期の観測データのうち、2015/12/24までの観測データについて、周期解析プログラム(安井, 2016, 茨城大学大学院 修士論文 [1])を用いて解析を行った。このプログラムでは、Lomb-Scargle 法という、不等間隔な離散的データに対して適用可能な解析方法が用いられている。

3.1.1 Lomb-Scargle 法

通常、周波数解析では、連続信号から一定の間隔でサンプリングした離散的信号を取扱い、データ点とデータ点の間は等間隔であることが多い。しかし、天文観測では、観測装置の不調や天候の影響などにより、等間隔の時間で観測を行うことは難しく、データ点とデータ点の間は不等間隔になってしまうことの方が多い。そのため、本研究で用いた観測データも不等間隔の離散的データである。Lomb-Scargle 法は、このような不等間隔な離散的データに対しても適用可能であり、等間隔で得られたデータと等価のペリオドグラムを求めることができる。そのため、Lomb-Scargle 法は近年、観測データの周波数解析法として広く用いられている。

3.1.2 誤警報確率

今回用いた解析プログラムでは、Lomb-Scargle 法によって導出された周期がどれだけ有意かを表す指標として、誤警報確率(false-alarm probability ; fap)を採用している。誤警報確率とは、「雑音を信号である」と判断してしまう確率であり、この確率を α とすると、次のような式で与えられる。

$$\alpha = 1 - [1 - \exp(-z)]^N \quad (5)$$

ここで、 z はペリオドグラムの値、 N は計算に用いる (=出力される) 周波数の数である。この α の値が低いほど、Lomb-Scargle 法によって導出された周期は信頼性が高いと言える。例えば、 $\alpha = 0.01$ のとき、得られた周期は 99% 信頼できると言える。

3.1.3 周期変動天体の選出条件

本研究では、一つの天体に対し、いずれかの成分が以下の二つの条件を満たす場合、その天体は周期的な強度変動を示す天体である(周期性がある)と判断した。

- 1) 周期解析によって導出された周期に対する正規化 Lomb-Scargle ペリオドグラムの値(ペリオドグラムの最大値)が誤警報確率 $\alpha < 0.001$ を満たすこと。
- 2) 条件 1) で選出された周期が、誤差も考慮した上で、観測期間の 1/3 より短い(観測期間に 3 周期以上捉えられる周期である) こと。

条件 1) では、周期解析によって導出された周期が 99.9% 信頼できるものかどうかを評価している。また、条件 2) を課すのは、観測期間中に 3 周期以下しか捉えられない場合、観測期間の前後もその周期性を保っているとは言い難く、観測的に周期変動を示すとは断言できないためである。ここで、条件 2) における誤差とは、正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムが最大値をとる周波数の両隣の周波数の逆数との差のことであり、次項(3.2 結果)で詳しく記述する。条件 2) を具体的に記述すると、観測期間が 2015/09/18 - 2015/12/24 (98 日間) の場合は周期が約 32.7 日以下、観測期間が 2015/08/09 - 2015/12/24 (138 日間) の場合は周期が約 46.0 日以下であることが要求される。

3.1.4 周期解析の流れ

周期解析の流れは次の通りである。

- 1) 周期解析プログラムを用いて、第 3 期観測対象天体 143 天体それぞれの正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを作成する。
- 2) それぞれの速度成分についてピリオドグラムの最大値を読み取る。
- 3) ピリオドグラムの最大値が誤警報確率 $\alpha = 0.001$ のラインを超えているかどうか (選出条件 1) を満たすかどうか) を確認する。
- 4) ピリオドグラムの最大値に対する横軸 (周波数) の値を読み取り、その逆数を周期とする。
- 5) 導出された周期が観測期間の 1/3 より短いかどうか (選出条件 2) を満たすかどうか) を確認する。短い場合、その天体は、導出された周期で周期的な強度変動を示す天体であると言える。

具体例として、今回の解析で実際に周期的な強度変動を示す天体であると判断された G 000.16-00.44 について、周期解析の流れを以下に示す。

- 1) 周期解析プログラムを用いて、G 000.16-00.44 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを作成した結果、以下の図 2 のようになった。なお、図 2 において、スペクトルの横軸は周期の逆数 [cycle/day]、縦軸は左の目盛がピリオドグラムの値、右の目盛が誤警報確率の値を示している。

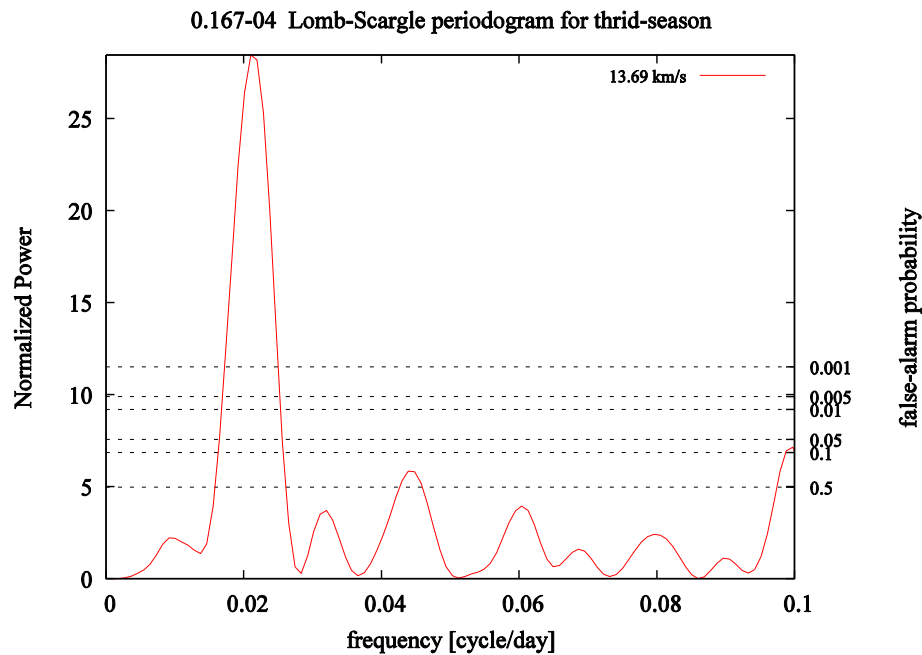


図 2 : G 000.16-00.44 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

- 2) 作成されたスペクトルより、速度成分 13.69 [km/s] のピリオドグラムの最大値は 28.4 と読み取れる。
- 3) 作成されたスペクトルより、ピリオドグラムの最大値は誤警報確率 $\alpha = 0.001$ のラインを超えていることがわかる。
- 4) 作成されたスペクトルより、ピリオドグラムの最大値 28.4 に対する横軸（周波数）の値は、0.021043 [cycle/day] である。よって周期はその逆数で、 $1 / 0.021043 \sim 47.5$ [day] である。
- 5) この天体の観測期間は 2015/08/09 - 2015/12/24（138 日間）であるから、導出された周期は、誤差を考慮すると観測期間の 1/3 より短い。よって、G 000.16-00.44 は周期 47.5 日で周期的な強度変動を示す天体であると言える。

3.2 結果

今回の周期解析の結果、第 3 期観測対象天体 143 天体のうち、選出条件を満たし周期変動天体であると判断された天体は 6 天体あった。そのうち、初めて周期変動天体であると判断された天体は、1 天体(G 000.16-00.44)であった。周期変動天体であると判断された天体の一覧を以下の表 5 に示した。表 5 には、各天体について、先行研究によって導出されている既知の周期と、今回の解析によって導出された周期を示してある。なお、周期変動天体の選出条件を満たす成分のみ、導出された周期を示した。

表 5：周期変動天体であると判断された天体

天体名	視線速度 V_{lsr} [km/s]	既知の周期 [day]	導出された周期 [day]
G 000.16-00.44	13.69	-	47.5
G 014.23-00.50	25.30	23.7	23.8
G 033.40+00.01	98.64	31.7	-
	99.43	-	31.6
	104.20	-	33.0
	104.89	-	31.6
G 033.64-00.21	59.02	200.8	-
	59.65	209	47.5
G 034.39+00.24	55.67	29.5	28.1
IRAS 22198+6336	-15.52	-	34.2
	-10.92	34.6	35.3
	-9.21	34.6	-
	-8.50	34.6	35.3
	-7.29	34.6	34.2

3.2.1 G 000.16-00.44

G 000.16-00.44 は、1 個の速度成分(13.69 [km/s])が同定されている。この成分は選出条件を満たしており、今回の解析により初めて周期性があると判断された。導出された周期は 47.5 日であり、隣り合う周期との差は+2.2 日、-2.0 日であった。ここで、隣り合う周期とは、正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムが最大値をとる周波数の両隣の周波数の逆数のことであり、導出周期の誤差と解釈できる。なお、周期 47.5 日は選出条件 2) を満たさないが、誤差を考慮すると満たすため、今回周期変動天体であると判断した。

以下に、G 000.16-00.44 の解析結果をまとめた。表 6 には、G 000.16-00.44 の速度成分 13.69 [km/s] のピリオドグラムの最大値 P_{max} 、誤警報確率 α 、周期を示した。また、図 3 には、G 000.16-00.44 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示した。図 4

には、速度成分 13.69 [km/s] の強度変動において、強度が高くなる観測日（フレア期）のスペクトルと、その直近で強度が低くなる観測日（静穏期）のスペクトルを重ねて示した。なお、この図には、速度成分 13.69 [km/s] 上に縦線を挿入してある。この図より、確かに強度が変動していることがわかる。さらに、図 5 には、速度成分 13.69 [km/s] のフラックス密度の時間変動を示した。

表 6 : G 000.16-00.44 の解析結果

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 P_{max}	誤警報確率 α	周期 [day]
13.69	28.45	0.000001	47.5

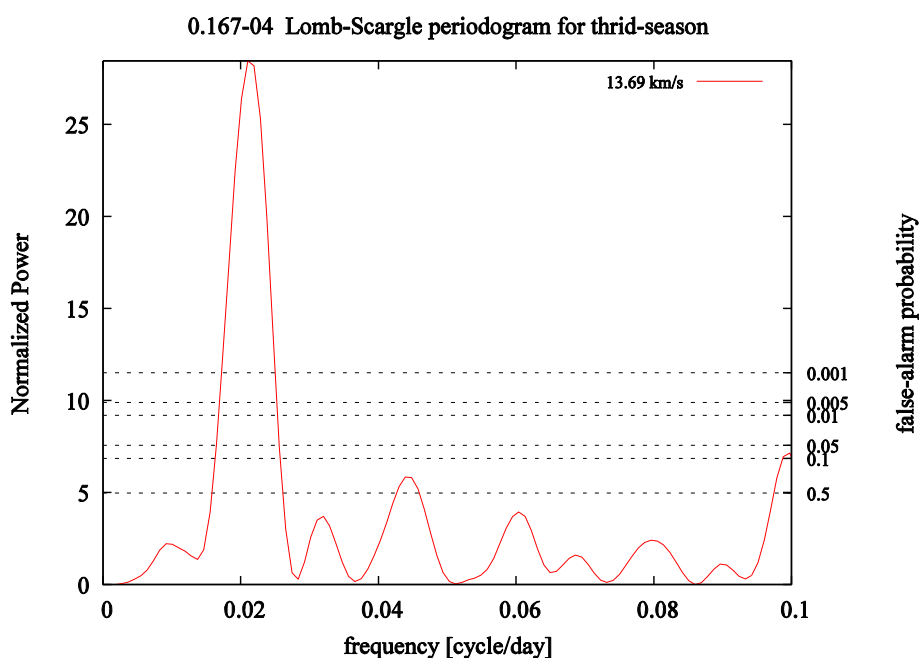


図 3 : G 000.16-00.44 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

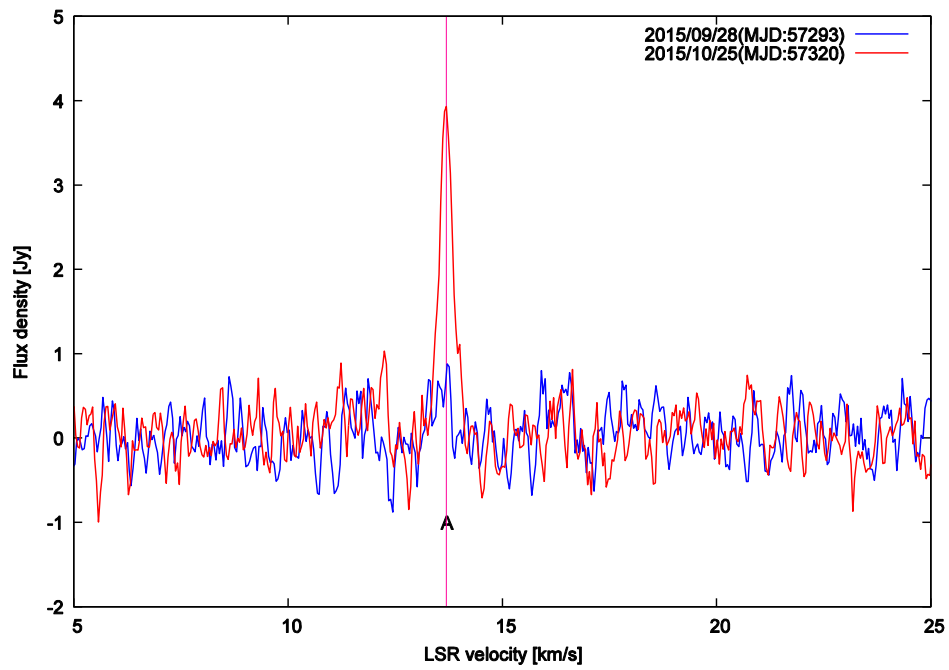


図 4 : G 000.16-00.44 のスペクトル (赤線はフレア期、青線は静穏期)

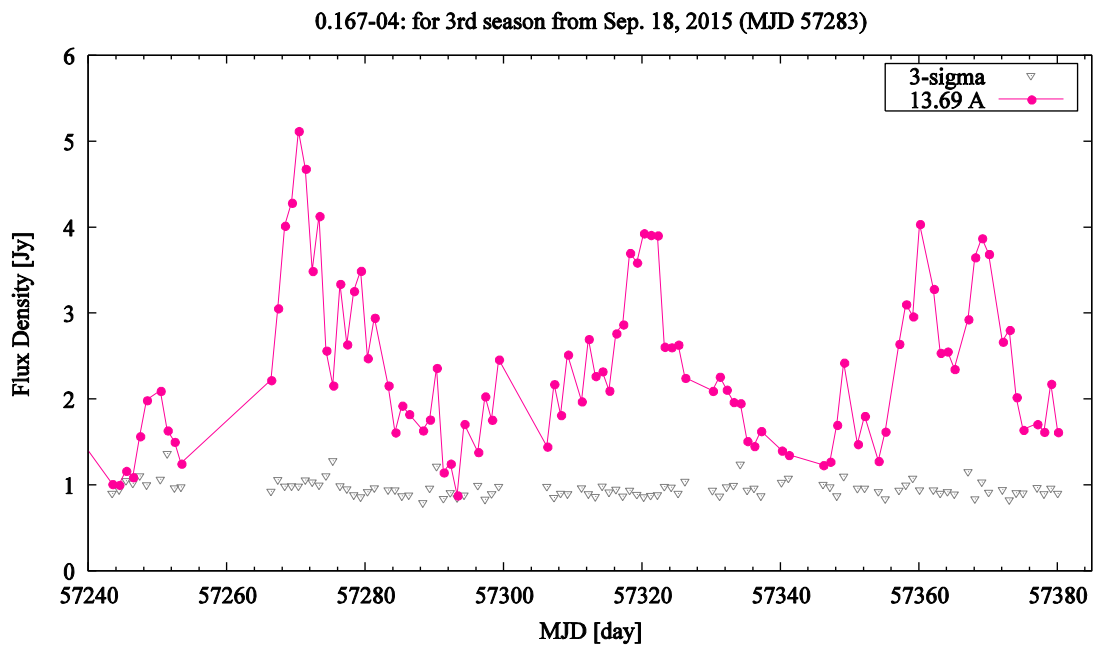


図 5 : G 000.16-00.44 の強度変動時系列

3.2.2 G 014.23-00.50

G 014.23-00.50 は、9 個の速度成分(20.54、21.01、21.30、21.75、22.29、23.45、23.92、24.70、25.30 [km/s])が同定されている。このうち、選出条件を満たしたのは 1 個(25.30 [km/s])であった。導出された周期は 23.8 日であり、隣り合う周期との差は+0.5 日、-0.5 日であった。

以下に、G 014.23-00.50 の解析結果をまとめた。表 7 には、G 014.23-00.50 の各速度成分のピリオドグラムの最大値 $P_{\max}$ 、誤警報確率 α 、周期を示した。なお、選出条件を満たす成分のみ、導出周期を示した。また、図 6 には、G 014.23-00.50 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示した。図 7 には、選出条件を満たす速度成分 25.30 [km/s] の強度変動において、強度が高くなる観測日（フレア期）のスペクトルと、その直近で強度が低くなる観測日（静穏期）のスペクトルを重ねて示した。なお、この図には、速度成分 25.30 [km/s] 上に縦線を挿入してある。この図より、確かに強度が変動していることがわかる。さらに、図 8 には、各速度成分のフラックス密度の時間変動を示した。なお、フラックス密度が 3σ 以下の場合はプロットしておらず、選出条件を満たす成分のみ、プロットを実線で結んである。

表 7 : G 014.23-00.50 の解析結果

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_{\max}$	誤警報確率 α	周期 [day]
20.54	5.23	0.411783	-
21.01	6.61	0.124885	-
21.30	4.58	0.637858	-
21.75	3.01	0.993153	-
22.29	6.19	0.183306	-
23.45	4.25	0.758006	-
23.92	4.20	0.776808	-
24.70	4.68	0.604443	-
25.30	21.57	0.000001	23.8

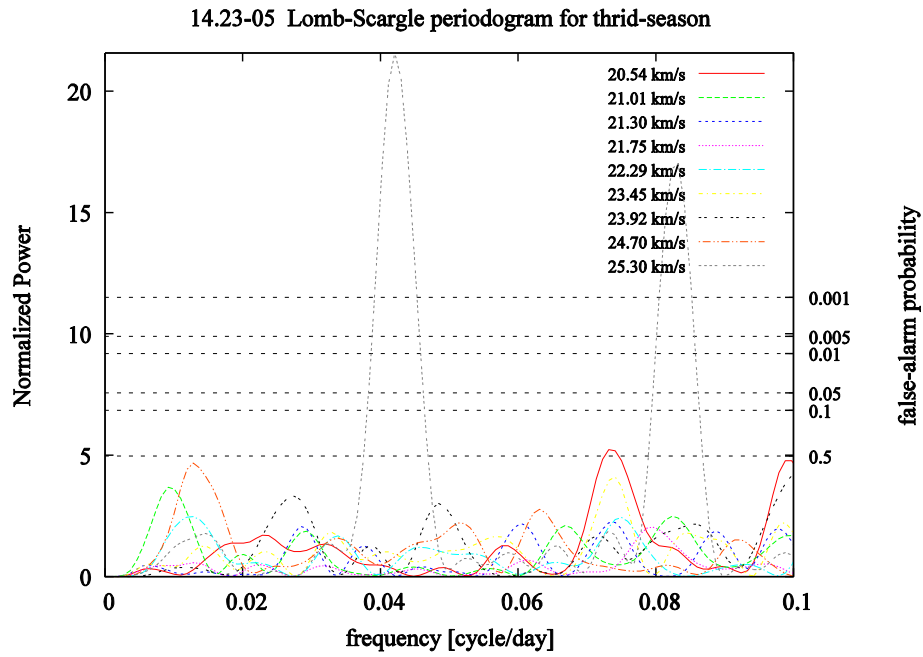


図 6 : G 014.23-00.50 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

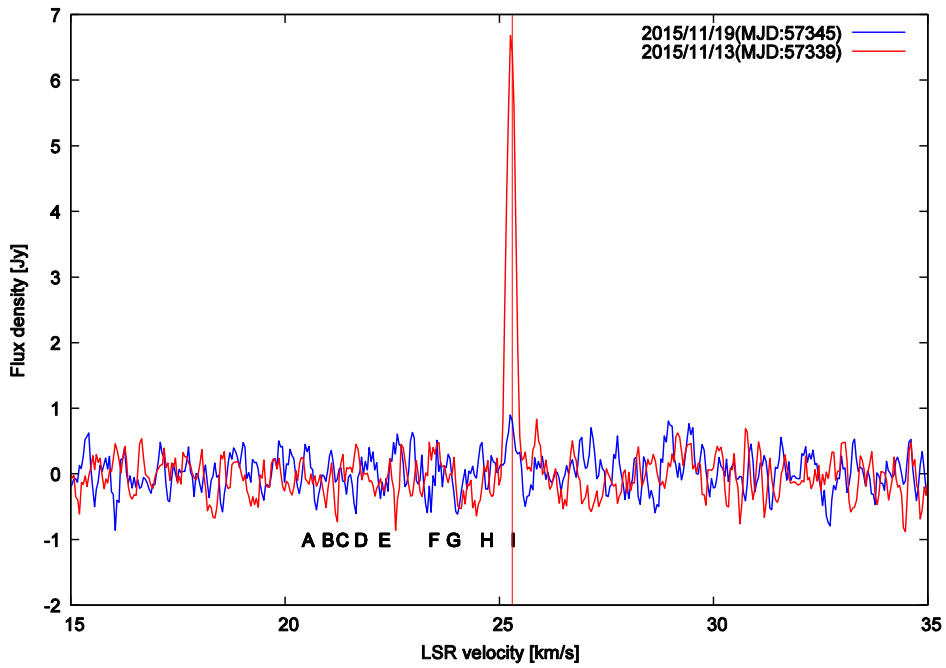


図 7 : G 014.23-00.50 のスペクトル (赤線はフレア期、青線は静穏期)

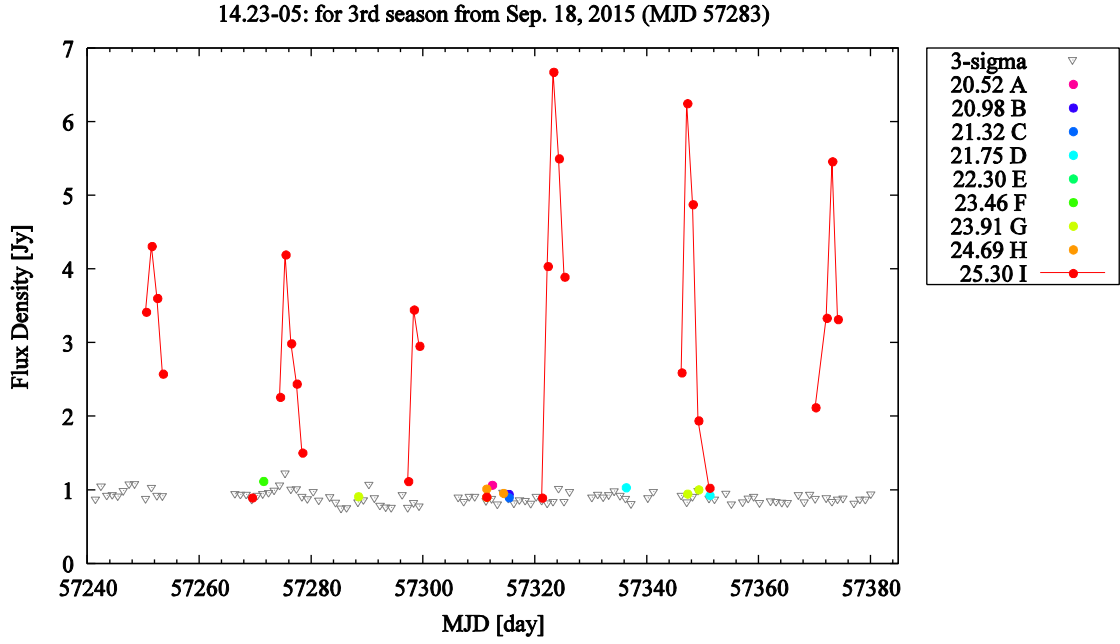


図 8 : G 014.23-00.50 の強度変動時系列

3.2.3 G 033.40+00.01

G 033.40+00.01 は、17 個の速度成分(97.55、97.85、98.64、99.03、99.43、100.84、101.20、102.24、103.02、103.16、104.20、104.89、105.25、105.68、106.86、107.11、107.59 [km/s]) が同定されている。このうち、選出条件を満たしたのは 3 個(99.43、104.20、104.89 [km/s]) であった。導出された周期は、99.43 [km/s] と 104.89 [km/s] で 31.6 日であった。もう一つの 104.20 [km/s] の導出周期は 33.0 日であり、他の二つの成分の導出周期 31.6 日とは隣り合う周期であった。また、周期 31.6 日の隣り合う周期との差は+1.4 日、-1.3 日であり、周期 33.0 日の隣り合う周期との差は+1.5 日、-1.4 日であった。

以下に、G 033.40+00.01 の解析結果をまとめた。表 8 には、G 033.40+00.01 の各速度成分のピリオドグラムの最大値 $P_{\max}$ 、誤警報確率 α 、周期を示した。なお、選出条件を満たす成分のみ、導出周期を示した。また、図 9 には、G 033.40+00.01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示した。図 10 には、選出条件を満たす速度成分のうち誤警報確率 α が最も低い速度成分 99.43 [km/s] の強度変動において、強度が高くなる観測日（フレア期）のスペクトルと、その直近で強度が低くなる観測日（静穏期）のスペクトルを重ねて示した。なお、この図には、選出条件を満たす速度成分上に縦線を挿入してある。この図より、確かに強度が変動していることがわかる。さらに、図 11 には、各速度成分のフラックス密度の時間変動を示した。なお、フラックス密度が 3σ 以下の場合はプロットしておらず、選出条件を満たす成分のみ、プロットを実線で結んである。

表 8 : G 033.40+00.01 の解析結果

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 P_{max}	誤警報確率 α	周期 [day]
97.55	5.90	0.081809	-
97.85	7.94	0.011018	-
98.64	10.23	0.001122	-
99.03	6.85	0.041988	-
99.43	11.62	0.000280	31.6
100.84	3.59	0.578510	-
101.20	3.10	0.759279	-
102.24	2.17	0.977018	-
103.02	3.70	0.539590	-
103.16	4.44	0.307431	-
104.20	11.06	0.000486	33.0
104.89	10.73	0.000679	31.6
105.25	8.45	0.006632	-
105.68	6.08	0.068618	-
106.86	4.25	0.360081	-
107.11	5.18	0.161242	-
107.59	7.53	0.016552	-

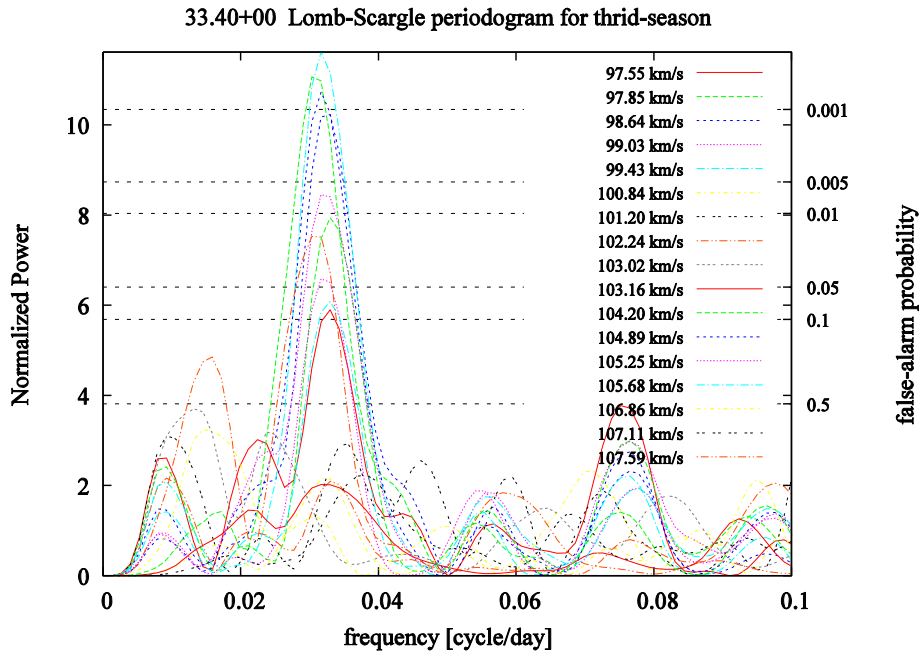


図 9 : G 033.40+00.01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

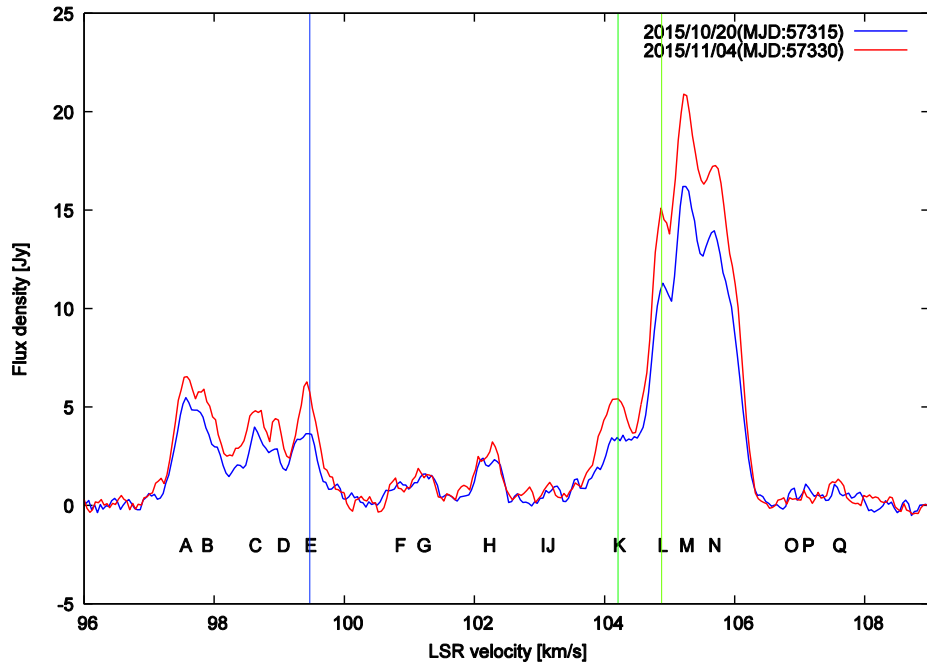


図 10 : G 033.40+00.01 のスペクトル (赤線はフレア期、青線は静穏期)

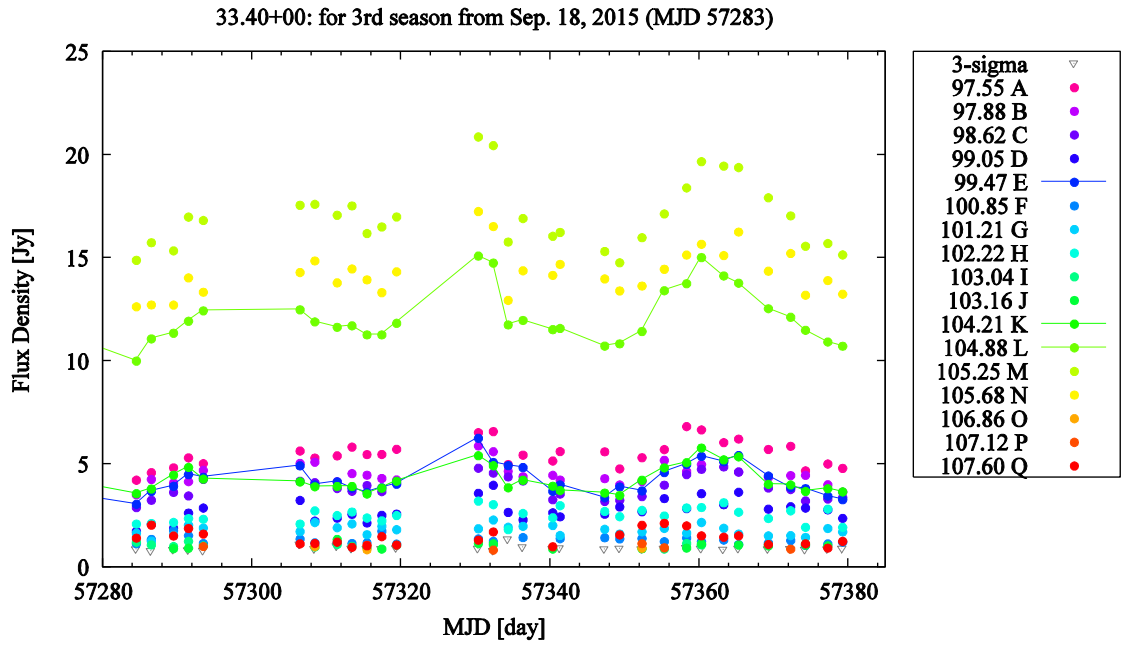


図 11 : G 033.40+00.01 の強度変動時系列

3.2.4 G 033.64-00.21

G 033.64-00.21 は、8 個の速度成分(57.08、59.02、59.31、59.65、60.32、60.97、62.69、63.19 [km/s])が同定されている。このうち、選出条件を満たしたのは 1 個(59.65 [km/s])であった。導出された周期は 47.5 日であり、隣り合う周期との差は+2.2 日、-2.0 日であった。なお、周期 47.5 日は選出条件 2) を満たさないが、誤差を考慮すると満たすため、今回周期変動天体であると判断した。

以下に、G 033.64-00.21 の解析結果をまとめた。表 9 には、G 033.64-00.21 の各速度成分のピリオドグラム of the maximum $P_{\max}$ 、誤警報確率 α 、周期を示した。なお、選出条件を満たす成分のみ、導出周期を示した。また、図 12 には、G 033.64-00.21 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示した。図 13 には、選出条件を満たす速度成分 59.65 [km/s] の強度変動において、強度が高くなる観測日（フレア期）のスペクトルと、その直近で強度が低くなる観測日（静穏期）のスペクトルを重ねて示した。なお、この図には、速度成分 59.65 [km/s] 上に縦線を挿入してある。この図より、確かに強度が変動していることがわかる。さらに、図 14 には、各速度成分のフラックス密度の時間変動を示した。なお、フラックス密度が 3σ 以下の場合はプロットしておらず、選出条件を満たす成分のみ、プロットを実線で結んである。

表 9 : G 033.64-00.21 の解析結果

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_{\max}$	誤警報確率 α	周期 [day]
57.08	4.82	0.559175	-
59.02	23.11	0.000001	-
59.31	26.70	0.000001	-
59.65	13.83	0.000100	47.5
60.32	21.72	0.000001	-
60.97	22.47	0.000001	-
62.69	8.28	0.025354	-
63.19	17.88	0.000002	-

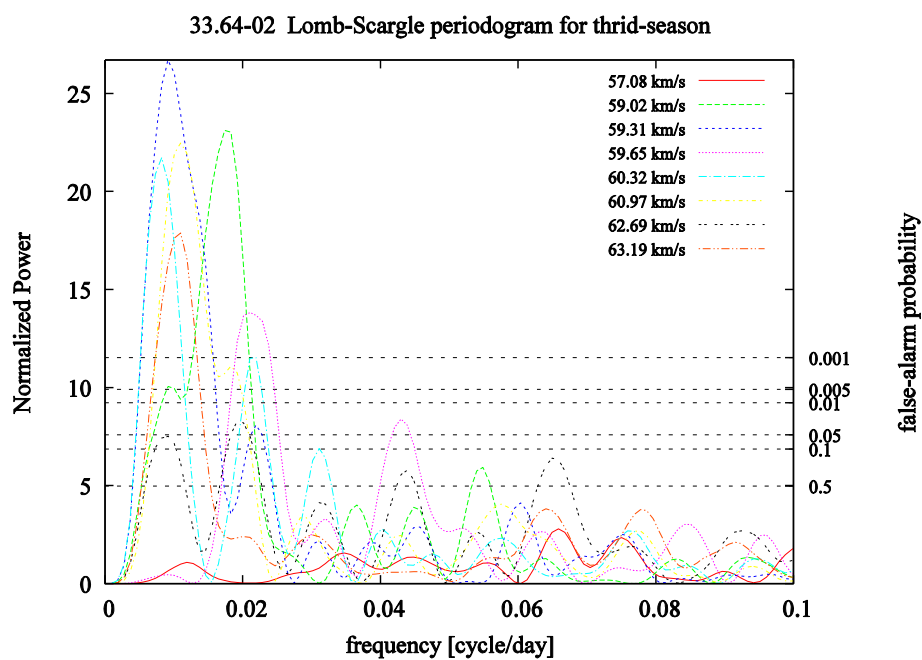


図 12 : G 033.64-00.21 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

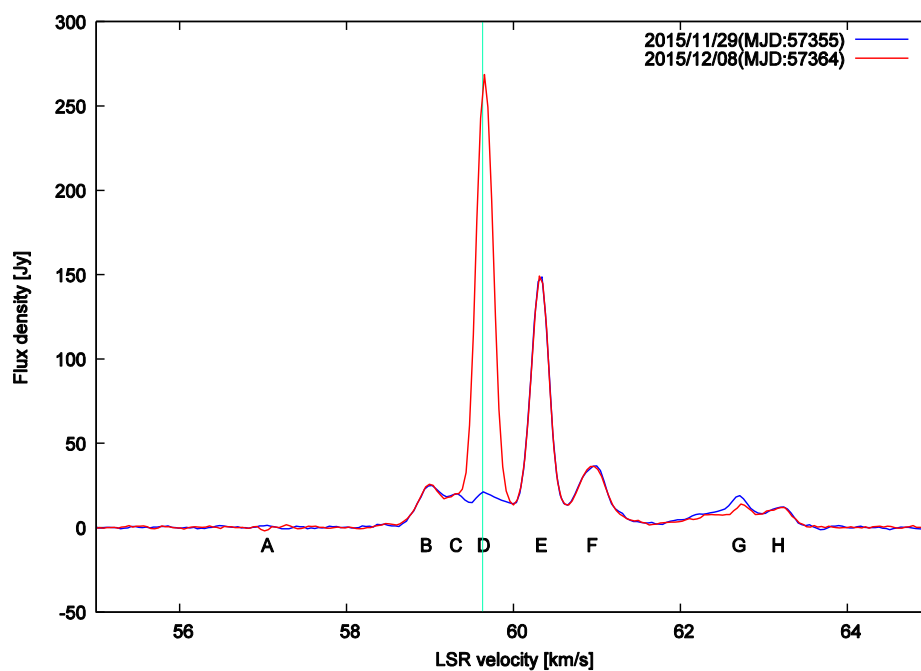


図 13 : G 033.64-00.21 のスペクトル (赤線はフレア期、青線は静穏期)

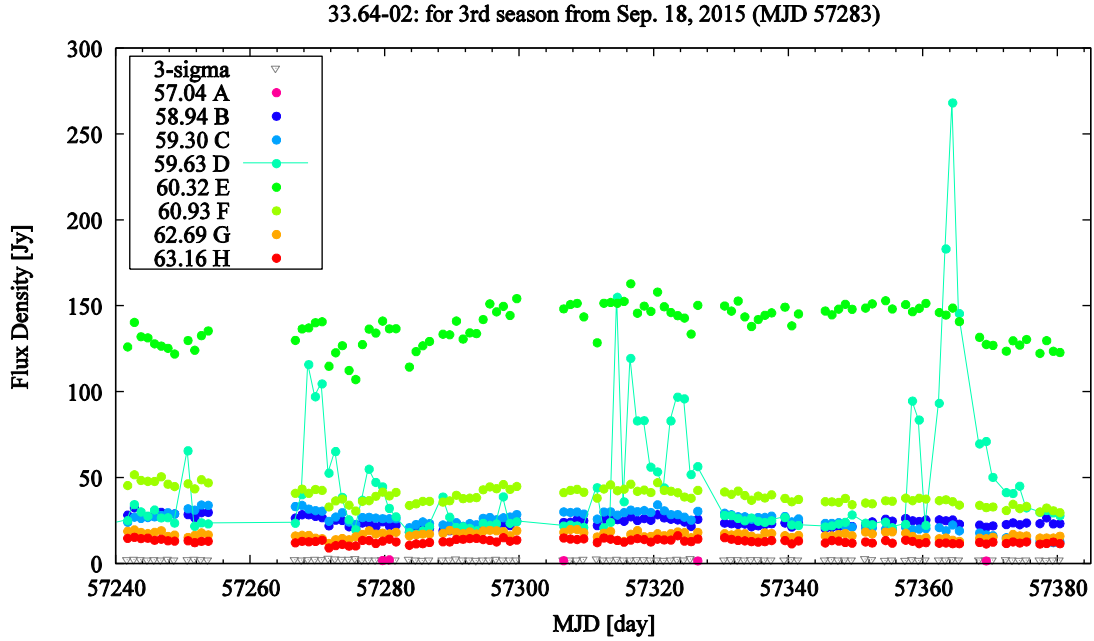


図 14 : G 033.64-00.21 の強度変動時系列

3.2.5 G 034.39+00.24

G 034.39+00.24 は、8 個の速度成分(55.67、57.90、59.96、60.49、60.83、61.39、62.54、63.42 [km/s])が同定されている。このうち、選出条件を満たしたのは 1 個(55.67 [km/s])であった。導出された周期は 28.1 日であり、隣り合う周期との差は+1.1 日、-1.0 日であった。

以下に、G 034.39+00.24 の解析結果をまとめた。表 10 には、G 034.39+00.24 の各速度成分のピリオドグラムの最大値 $P_{\max}$ 、誤警報確率 α 、周期を示した。なお、選出条件を満たす成分のみ、導出周期を示した。また、図 15 には、G 034.39+00.24 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示した。図 16 には、選出条件を満たす速度成分 55.67 [km/s] の強度変動において、強度が高くなる観測日（フレア期）のスペクトルと、その直近で強度が低くなる観測日（静穏期）のスペクトルを重ねて示した。なお、この図には、速度成分 55.67 [km/s] 上に縦線を挿入してある。この図より、確かに強度が変動していることがわかる。さらに、図 17 には、各速度成分のフラックス密度の時間変動を示した。なお、フラックス密度が 3σ 以下の場合はプロットしておらず、選出条件を満たす成分のみ、プロットを実線で結んである。

表 10 : G 034.39+00.24 の解析結果

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 P_{max}	誤警報確率 α	周期 [day]
55.67	11.76	0.000250	28.1
57.90	2.55	0.924902	-
59.96	4.71	0.252172	-
60.49	6.87	0.032649	-
60.83	4.12	0.411769	-
61.39	4.95	0.204233	-
62.54	5.95	0.080400	-
63.42	4.90	0.213129	-

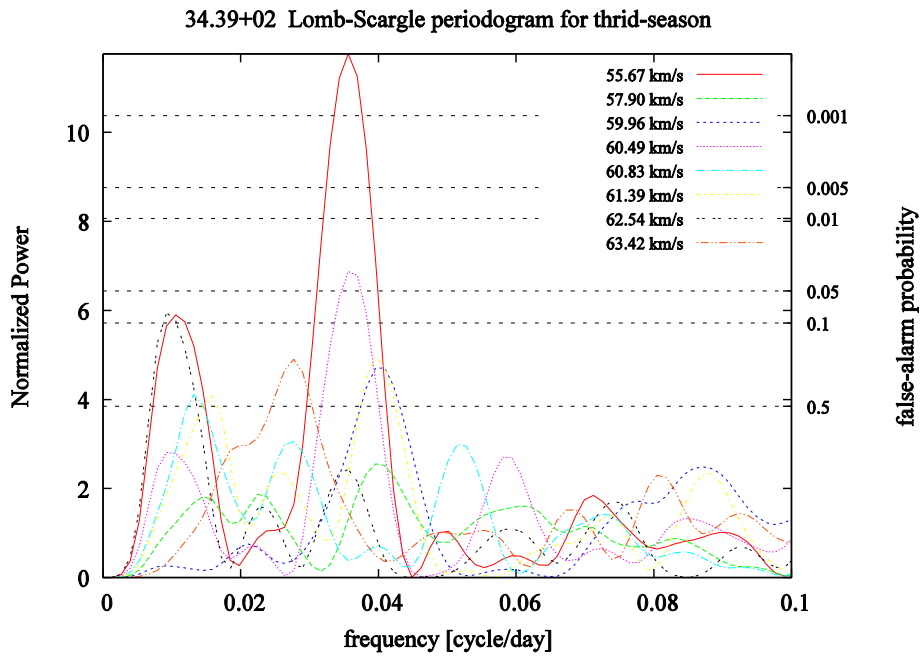


図 15 : G 034.39+00.24 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

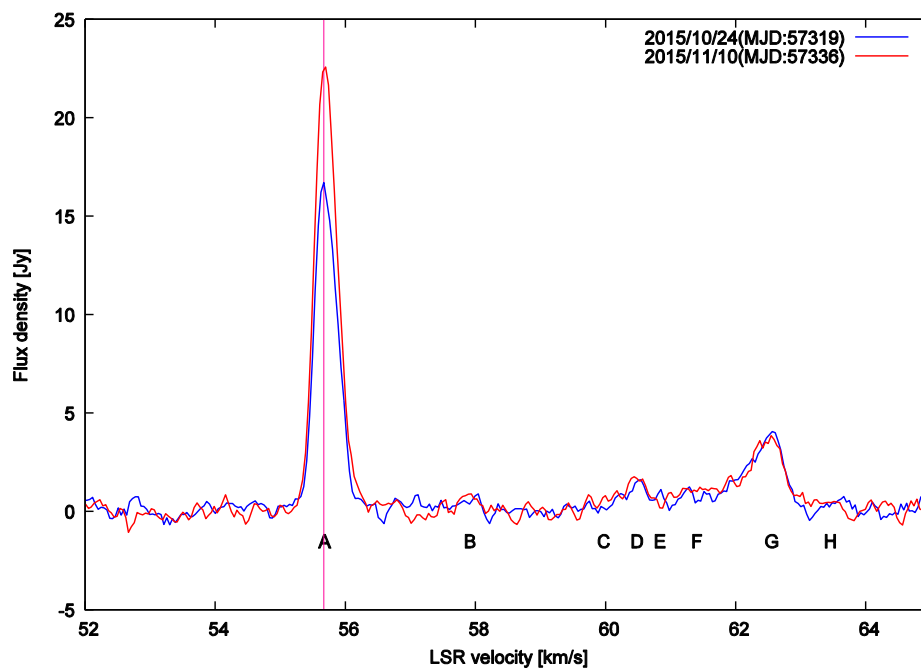


図 16 : G 034.39+00.24 のスペクトル (赤線はフレア期、青線は静穏期)

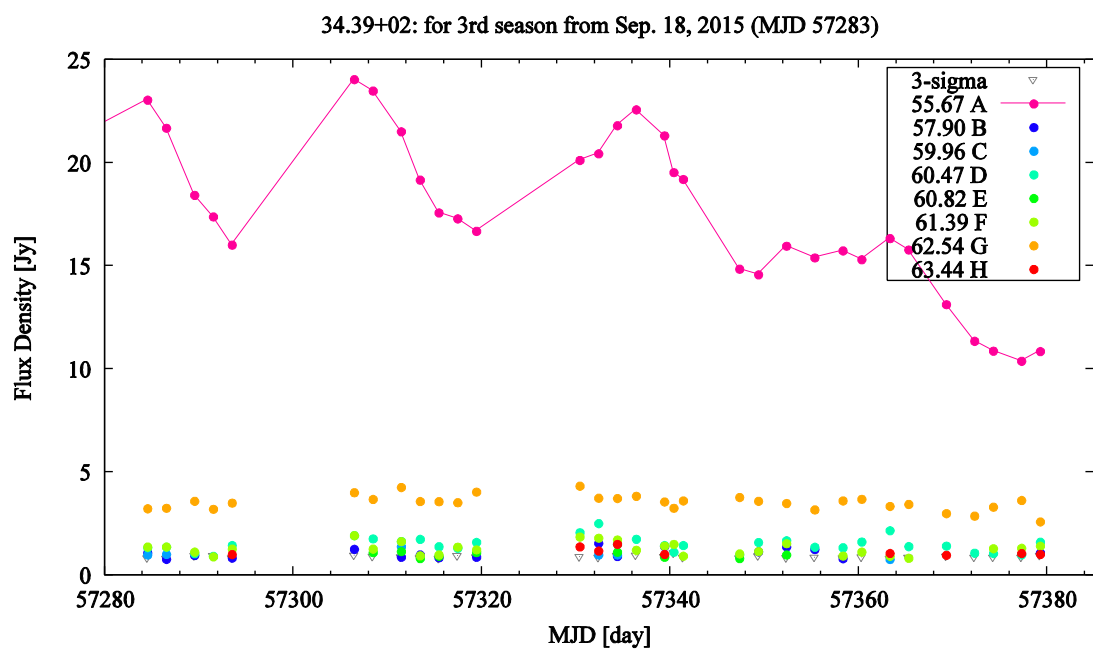


図 17 : G 034.39+00.24 の強度変動時系列

3.2.6 IRAS 22198+6336

IRAS 22198+6336 は、7 個の速度成分(-16.88、-16.07、-15.52、-10.92、-9.21、-8.50、-7.29 [km/s])が同定されている。このうち、選出条件を満たしたのは 4 個(-15.52、-10.92、-8.50、-7.29 [km/s])であった。導出された周期は、-15.52 [km/s] と-7.29 [km/s] で 34.2 日であり、-10.92 [km/s] と-8.50 [km/s] で 35.3 日であった。なお、この二つの周期は隣り合う周期であった。また、周期 34.2 日の隣り合う周期との差は+1.1 日、-1.0 日であり、周期 35.3 日の隣り合う周期との差は+1.2 日、-1.1 日であった。

以下に、IRAS 22198+6336 の解析結果をまとめた。表 11 には、IRAS 22198+6336 の各速度成分のピリオドグラムの最大値 $P_{\max}$ 、誤警報確率 α 、周期を示した。なお、選出条件を満たす成分のみ、導出周期を示した。また、図 18 には、IRAS 22198+6336 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示した。図 19 には、選出条件を満たす速度成分のうち最も強度変動の激しい速度成分-7.29 [km/s] の強度変動において、強度が高くなる観測日（フレア期）のスペクトルと、その直近で強度が低くなる観測日（静穏期）のスペクトルを重ねて示した。なお、この図には、選出条件を満たす速度成分上に縦線を挿入してある。この図より、確かに強度が変動していることがわかる。さらに、図 20 には、各速度成分のフラックス密度の時間変動を示した。なお、フラックス密度が 3σ 以下の場合はプロットしておらず、選出条件を満たす成分のみ、プロットを実線で結んである。

表 11 : IRAS 22198+6336 の解析結果

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_{\max}$	誤警報確率 α	周期 [day]
-16.88	9.73	0.006182	-
-16.07	8.56	0.019746	-
-15.52	15.23	0.000025	34.2
-10.92	21.29	0.000001	35.3
-9.21	9.66	0.006619	-
-8.50	15.03	0.000031	35.3
-7.29	12.27	0.000490	34.2

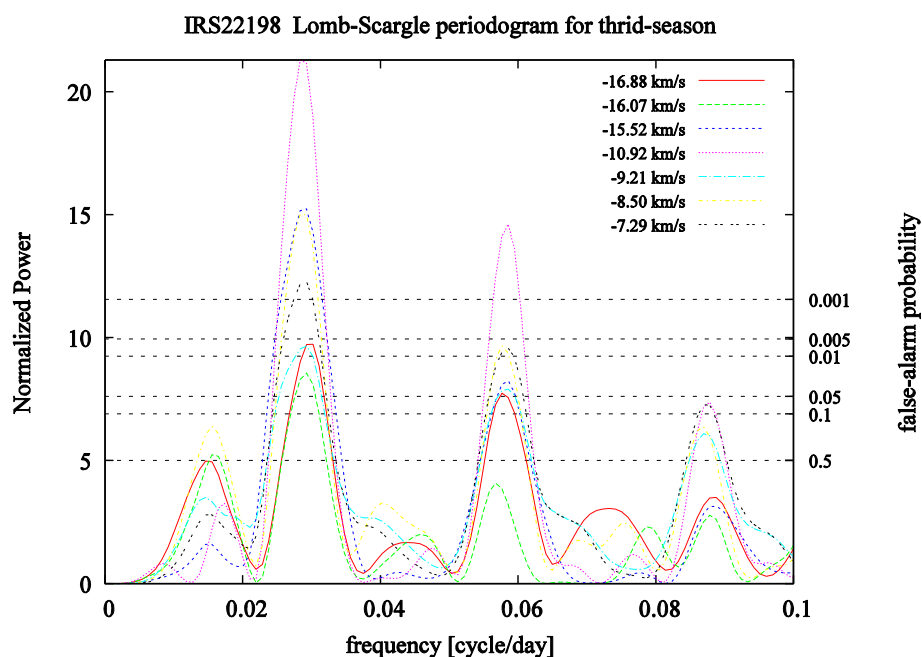


図 18 : IRAS 22198+6336 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

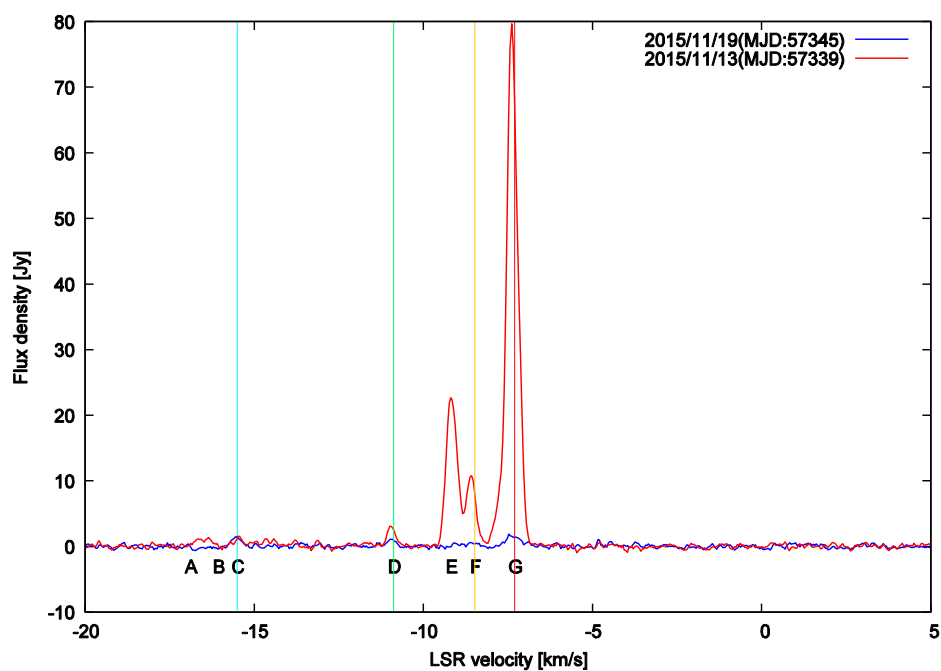


図 19 : IRAS 22198+6336 のスペクトル (赤線はフレア期、青線は静穏期)

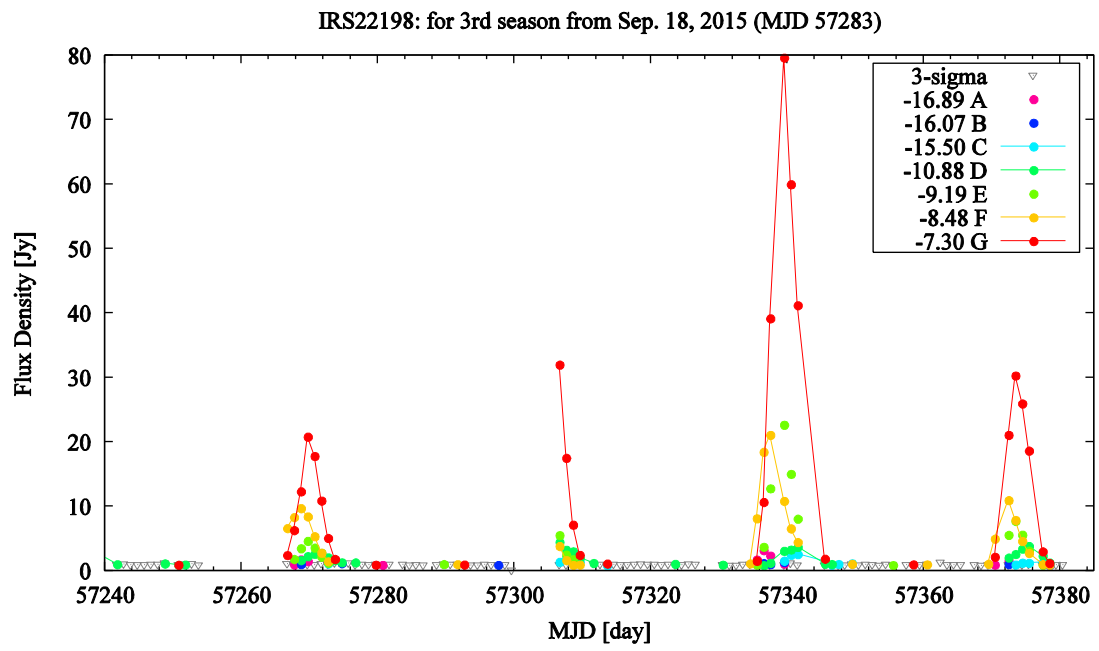


図 20 : IRAS 22198+6336 の強度変動時系列

第4章 考察と今後の展望

今回の解析により、周期変動天体であると判断された天体は6天体あった。そのうち、G 000.16-00.44 は初めて周期変動天体であると判断され、その周期は47.5日であった。他の5天体については、G 033.64-00.21 以外の天体は、既知の周期とほぼ同等の周期が求められた。以下に、周期性が初検出の G 000.16-00.44、既知の周期と異なる周期が導出された G 033.64-00.21 についての考察をまとめる。また、解析結果より、2015/09/18 - 2015/12/24 の98日間、各天体5日に1回の頻度での観測では観測データが足りず、今回の解析では30日程度以下の周期性は見落とされてしまうことがわかった。このことについての考察も以下にまとめる。

4.1 周期性が初検出の G 000.16-00.44 について

先ほども述べたとおり、G 000.16-00.44 は今回の解析、つまり第3期の観測データの解析により初めて周期変動天体であると判断され、その周期は47.5日であった。しかし、47.5日という周期は、第3期よりも観測頻度の低い第1期と第2期の観測（9・10日に1回の観測頻度）でも本来なら検出し得る周期である。それにもかかわらず、第1期と第2期では検出されていない。その理由は、9・10日に1回の観測頻度では強度変動の詳細な様子を捉えることができなかったためだと考えられる。実際に、第3期の G 000.16-00.44 の強度変動時系列（図5）を見ると、短いタイムスケール（5日程度）での細かい上昇と下降を繰り返しながら47.5日の周期で変動していることがわかる。9・10日に1回の観測頻度ではこのような短いタイムスケールの変動を捉えることができない。そのため、第1期と第2期では強度変動の詳細な様子を捉えることができず、周期性が検出されなかったと考えられる。

今後は、モニター観測を続け、より長い観測期間のデータを用いて周期解析を行うことで、47.5日という周期の妥当性を検証していきたい。

4.2 既知の周期と異なる周期が導出された G 033.64-00.21 について

G 033.64-00.21 は、今回検出された周期（47.5日）より約4倍長い周期（209日）で周期変動していることが指摘されている [14]。両者の周期はほぼ整数倍の関係にあるため、より短い47.5日で周期変動している可能性が高い。しかし、47.5日で周期変動しているとすると、先行研究の観測は今回の観測とほぼ同じ頻度（1日に1回程度）で行われていたため、先行研究の観測でも47.5日という周期が得られたはずである。そこで、得られなかった理由の1つとして、1日より短い期間での突発的な強度変動を見逃している可能性が挙げられる。よって今後は、このような突発的な強度変動を見逃さないために、今回の解析より求められた周期（47.5日）から突発的な強度変動が現れる時期を予測し、その前後5日程度は1日に複数回の高頻度な観測を行うことで、より詳細な変動の様子を捉えたい。

4.3 今回の解析における周期性の検出限界

今回の解析の結果、G 033.40+00.01 は周期 31.6 日、G 034.39+00.24 は周期 28.1 日と、約 30 日の周期性を検出することができた。しかし、これらの天体とほぼ同じ周期の 29.5 日で周期変動していると既に知られている G 012.88+00.48 という天体は [6]、今回の解析では、ほとんどの速度成分（11 成分中 10 成分）で誤警報確率の値が 0.1 以上と高くなってしまい、周期変動天体の選出条件 1) を満たさず周期性が検出されなかった。その理由は、今回の観測において、G 012.88+00.48 は他の 2 天体と比べて観測頻度が低く（G 012.88+00.48 は 5 日に 1 回、G 033.40+00.01 と G 034.39+00.24 は 2 日に 1 回の頻度）、観測データが足りなかったためだと考えられる。そこで、2 日に 1 回の頻度で観測を行った G 033.40+00.01 と G 034.39+00.24 について、意図的に 5 日に 1 回の観測データのみを取り出して周期解析を行い、その場合に周期性が検出されるかどうかを確かめた。その結果、どちらの天体も周期変動天体の選出条件 1) を満たさず、G 012.88+00.48 と同様に周期性が検出されなかった。以下に、意図的に 5 日に 1 回の観測データのみを取り出して周期解析を行った場合の G 033.40+00.01 と G 034.39+00.24 それぞれの正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示す（図 21、図 22）。これらの図から、どの速度成分もピリオドグラムの最大値が誤警報確率 $\alpha = 0.001$ のラインを超えていない、つまり周期変動天体の選出条件 1) を満たしていないことがわかる。

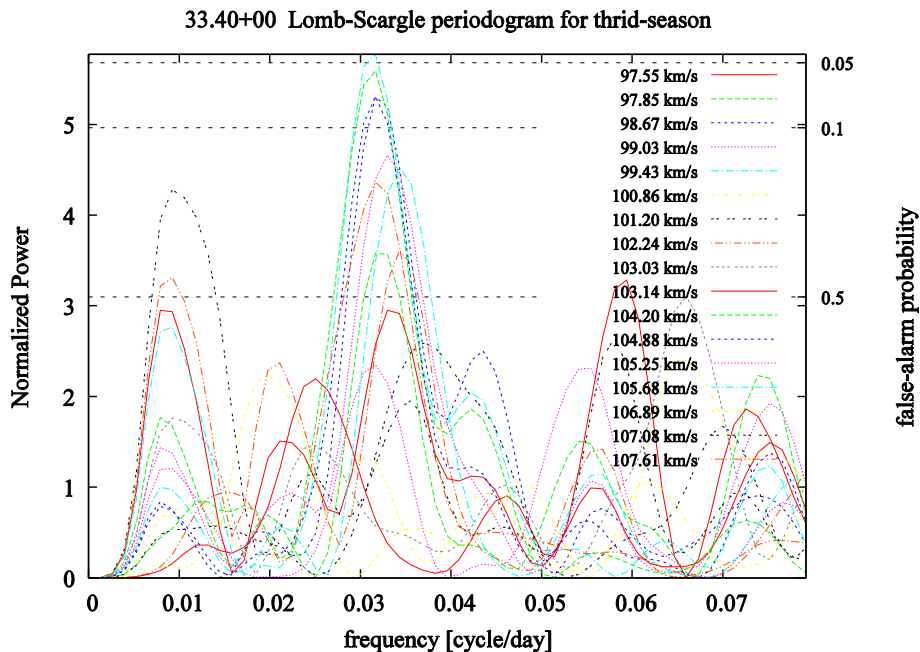


図 21 : G 033.40+00.01 の Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

（意図的に 5 日に 1 回の観測データのみを取り出して周期解析を行ったもの。全観測データを用いて周期解析を行ったものは図 9 を参照。）

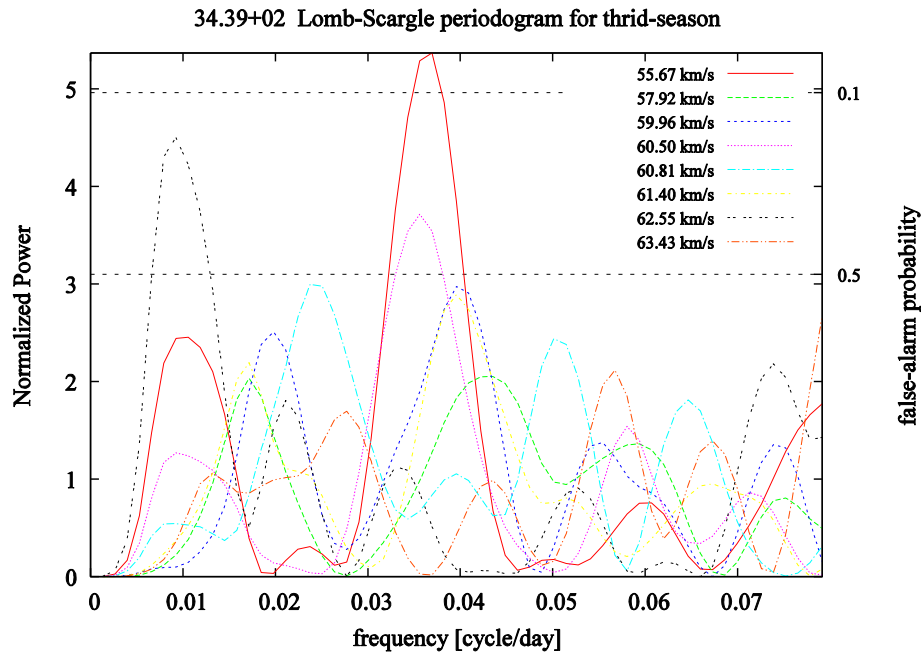


図 22 : G 034.39+00.24 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル
(意図的に 5 日に 1 回の観測データのみを取り出して周期解析を行ったもの。全観測データを用いて周期解析を行ったものは図 15 を参照。)

よって、2015/09/18 - 2015/12/24 の 98 日間、各天体 5 日に 1 回の頻度での観測では観測データが足りず、30 日程度以下の周期性は見落とされてしまうことがわかった。したがって、30 日程度以下の短周期を検出するには、①データ期間を延ばす、あるいは、②観測頻度を上げる必要がある。しかし、観測対象天体が多いため、②の方法をとることは難しい。そこで今後は①の方法をとり、モニター観測を続け、より長い観測期間のデータを用いることで、30 日以下の短周期で周期変動するメタノールメーザー源の検出を目指したい。

第5章 まとめ

本研究では、短周期での周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指し、日立 32m 電波望遠鏡で得られた 2015/09/18 - 2015/12/24 までの観測データに対して周期解析を行った。周期解析には、Lomb-Scargle 法が用いられた周期解析プログラム(安井, 2016, 茨城大学大学院 修士論文 [1])を使用した。そして、以下の二つの条件を満たす天体を周期変動天体として同定した。

- 1) 誤警報確率(false-alarm probability ; fap) < 0.001
- 2) 導出された周期が観測期間の 1/3 より短い

その結果、条件を満たし、周期変動天体であると判断された天体は 143 天体中 6 天体あった。そのうち、G 000.16-00.44 は初めて周期変動天体であると判断され、その周期は 47.5 日であった。他の 5 天体については、G 033.64-00.21 以外の天体は、既知の周期とほぼ同等の周期が求められた。また、今回の解析結果から、2015/09/18 - 2015/12/24 の 98 日間、各天体 5 日に 1 回の頻度での観測では、観測データが足りず、30 日程度未満の周期性は見落とされてしまうことがわかった。

今後は、より長い観測期間のデータを用いることで観測データを増やし、30 日未満の短周期で周期変動する 6.7GHz メタノールメーザー源の検出を目指したい。

付録 A 第 3 期観測天体リスト

今回解析を行った第 3 期の観測天体のリストを以下の表 12 に示す。ただし天体名は略称であり、例えば、3 つ目の天体 0.167-04 は G 0.167-0.446 である。

表 12：第 3 期観測天体リスト

天体名 (略称)		
	11.93-06	24.33+01
351.7-05	12.18-01	24.50-00
359.4-04	12.20-01	24.54+03
0.167-04	12.62-00	24.64-03
0.315-02	12.68-01	24.93+00
0.409-05	12.88+04	25.27-04
0.546-08	12.90-02	25.38-01
4.434+01	13.17+00	25.82-01
5.885-03	13.65-05	26.52-02
5.900-04	13.71-00	27.22+01
6.189-03	14.23-05	27.78+00
6.539-01	14.33-06	27.78-02
6.610-00	14.63-05	27.86-02
6.795-02	15.60-02	28.02-04
7.632-01	15.66-04	28.39+00
8.139+02	18.34+17	28.53+01
8.872-04	18.73-02	28.69+04
9.621+01	18.88-04	28.86+00
10.09+07	19.26+03	30.20-01
10.20-03	19.36-00	30.30-01
10.28-01	19.47+01	30.30+00
10.32-02	19.75-01	30.40-02
10.32-01	19.88-05	30.70-00
10.47+00	20.24+00	30.76-00
10.629-0	22.36+00	31.06+00
10.72-03	22.43-01	32.03+00
10.88+01	23.19-03	32.11+00
11.10-01	23.48+00	33.09-00
11.49-14	23.80+04	33.40+00
11.904-0	24.14+00	33.64-02

33.74-01	41.12-02	81.76+05
33.86+00	41.16-02	81.87+07
34.24+01	42.43-02	94.58-17
34.39+02	43.87-07	108.7-09
35.02+03	45.44+00	109.8+21
35.20-07	45.47+01	111.2-07
35.20-17	45.49+01	111.5+07
35.79-01	49.03-10	121.2+06
36.10+05	49.41+03	123.0-63
36.70+00	49.49-03	173.4+24
36.84-00	49.60-02	174.1-00
37.47-01	52.66-10	183.3-05
37.52-01	53.62+00	188.9+08
37.54+02	59.78+00	189.7+03
38.26-02	73.04+18	192.6-00
38.26-00	75.76+03	196.4-16
40.28-02	78.10+36	IRS22198
40.62-01	79.75+09	
41.12-01	80.85+04	

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の百瀬宗武様及び米倉覚則様、研究員の杉山孝一郎様、そして先輩方には多くの助言をいただきました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 安井靖堯, 2016, 茨城大学理工学研究科 修士論文
- [2] 福井康雄, 他 (2009) 「星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 第 6 巻」日本評論社
- [3] 中井直正, 他 (2009) 「宇宙の観測Ⅱ - 電波天文学 シリーズ現代の天文学 第 16 巻」日本評論社
- [4] Goedhart, S., et al. 2003, MNRAS, 339, L33G
- [5] Goedhart, S., et al. 2004, MNRAS, 355, 553G
- [6] Goedhart, S., et al. 2009, MNRAS, 398, 995G
- [7] Goedhart, S., et al. 2014, MNRAS, 437, 1808G
- [8] Szymczak, M., et al. 2011, A&A, 531, L3S
- [9] Szymczak, M., et al. 2015, MNRAS, 448, 2284S
- [10] Araya, E. D., et al. 2010, ApJL, 717, L133A
- [11] Maswanganye, J. P., et al. 2015, MNRAS, 446, 2730M
- [12] Fujisawa, K., et al., 2014, PASJ, 66, 78F
- [13] 杉山孝一郎, 他 (2015) 「天文学会 2015 年秋季年会」, P135a
- [14] 杉浦結, 2015, 山口大学理学部物理情報科学科 卒業論文