

# 修士学位論文

## 大質量星形成領域 G33.641−0.228 に付随 する 6.7 GHz メタノールメーザー源の 強度変動周期の安定性

2020 年度

(令和 2 年度)

茨城大学 大学院理工学研究科  
理学専攻

19NM158Y

渡辺 雅人



## 概要

星形成過程の解明は、宇宙や銀河の成り立ちを理解することにつながる、天文学における重要なテーマの一つである。恒星は、質量によって中小質量星 ( $< 8M_{\odot}$ ) と大質量星 ( $\geq 8M_{\odot}$ ) の二つに分けられる。小質量星の形成過程については大きく理解が進んでいるが、大質量星の形成についてはまだ十分な理解が得られていない。6.7 GHz メタノールメーザーはほとんどが大質量星形成領域で検出されているため、大質量星形成過程を探るための有力な手段となっている。この 6.7 GHz メタノールメーザーは単調な強度変動、周期的な強度変動 (以下、周期変動と呼ぶ)、突発的な強度変動など、さまざまな強度変動を示すことが知られている。中でも、周期変動は Goedhart et al. (2003) で初めて報告され、中心星近傍の状態変化に伴うメーザー種光子量の変動、もしくはメーザー雲の温度変化を反映していると考えられている。

茨城大学電波天文観測研究室では、6.7 GHz メタノールメーザーに着目し、日立 32m 電波望遠鏡 (以下、日立局と呼ぶ) を用いてモニター観測を実施している。目的の一つは、高頻度観測により強度変動の周期を正確に算出し、周期変動メカニズムを解明することである。このモニター観測は、2012 年 12 月 30 日から現在に至るまで、大きく四つの期間に分けて実施されている。各期間における観測頻度は、原則として次の通りである: 第 1,2 期は 442 天体を約 9 日間隔、第 3 期は第 1,2 期で強度変動を示した 143 天体を約 5 日間隔、第 4 期は第 1,2 期と第 3 期でそれぞれ採用していたパターンのハイブリッドである。短周期の周期変動天体の数を増やすことを目指し、第 3 期の観測データに対して周期解析を行った山口 (2017) では、50 日未満の短い周期を持つ周期変動天体の検出に成功している。その山口 (2017) において第 1,2 期では周期が導出された成分が第 3 期においては検出できなかったり、逆に第 3 期において新検出となった成分が複数発見されたりした。

そこで私は観測頻度が観測期によって異なっていたことも考慮に入れた上で、強度の周期変動の出現や消失、または周期の変化に着目し、周期変動の安定性を調査することを目的とした研究を行った。対象天体は大質量星形成領域 G33.641−0.228 に付随している 6.7 GHz メタノールメーザー源とした。この天体は視線速度 59.60 km/s 成分のみが急激な強度上昇 (バースト現象) を示しており、複雑なバーストメカニズムが示唆されている。本研究では日立局を用いたモニター観測データ (2012 年 12 月 30 日のモニター観測開始から 2020 年 10 月 3 日までの全データ) とトルン 32m 電波望遠鏡を用いたモニター観測データ (Olech et al. 2019) を用いて、周期解析を行った。周期解析には Lomb-Scargle 法という不等間隔の離散的データに対しても適用できる解析法を用いた。Lomb-Scargle 法による周期解析に先立つ前処理として、得られたデータのトレンド成分を除去し、全期間の平均値で正規化をした。周期解析で得た周期で位相を定義して光度曲線を折り返して重ね合わせた図を作成し、周期性の確からしさを確認した。加えて、全期間の観測データに対して Lomb-Scargle 法により得られた周期が、実際に全期間にわたって安定していたのかを検証するために、観測データを複数の時間窓に区切って周期解析を行った。

周期解析の結果、日立局の観測データから G33.641−0.228 の 7 つの速度成分の周期 361.8–784.0 日が導出された。今回導出した周期を、Olech et al. (2019) と山口 (2017) で得られた周期と比較した。その結果、速度成分 63.13 km/s 成分に関しては、ある限られた期間においては周期変動をしていた可能性があることがわかった。また、今回導出した周期から作成した折り返し光度曲線と、時間窓ごとに周期解析したペリオドグラムから、全期間を通して明確に再現性のある変動パターンはみられなかった。よって本研究で解析したデータからは、すべての速度成分において、似たようなタイムスケールで強度の増減が繰り返されているものの、長期間にわたる安定な周期は存在しないと結論された。今後は、モニター観測をさらに継続し、周期の安定性に関するデータを増やすとともに、他の天体についても同様の解析をしていく必要があると考える。

## Abstract

The methanol maser at 6.7 GHz is an indicator of massive star formation. This thesis focuses on the periodic variation of the 6.7 GHz methanol masers associated with the high-mass star forming regions G33.641–0.228 and aims at investigating the stability of their variation periods. The Lomb-Scargle method is used for the analysis. It is concluded that there is no stable period over the whole monitoring period of about 7 years though the all the maser components at different velocities show quasi-periodic variation with similar timescale.

## 目次

|     |                               |    |
|-----|-------------------------------|----|
| 1   | 序論                            | 2  |
| 1.1 | 大質量星形成とメタノールメーザー              | 2  |
| 1.2 | 周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザー | 3  |
| 1.3 | Lomb-Scargle ピリオドグラム          | 4  |
| 1.4 | 研究目的                          | 6  |
| 2   | 観測                            | 7  |
| 2.1 | 観測概要                          | 7  |
| 2.2 | 対象天体 G33.641−0.228            | 9  |
| 3   | 解析                            | 10 |
| 3.1 | 周期導出方法                        | 10 |
| 3.2 | 解析手順                          | 10 |
| 3.3 | 日立局とトルン局とで取得されたデータ間の強度比較      | 12 |
| 4   | 結果                            | 14 |
| 4.1 | 日立局観測データのみを用いた解析結果            | 14 |
| 4.2 | 日立局とトルン局の観測データを統合した解析結果       | 32 |
| 5   | 考察                            | 38 |
| 5.1 | 日立局で導出した全期間の周期について            | 38 |
| 5.2 | 周期変動の安定性について                  | 41 |
| 6   | まとめ                           | 42 |

# 1 序論

## 1.1 大質量星形成とメタノールメーザー

星形成過程の解明は、宇宙や銀河の成り立ちを理解することにつながるため、天文学において重要なテーマの一つとされている。恒星は、宇宙において最も基本的で重要な構成要素である。恒星は、質量によって中小質量星 ( $< 8M_{\odot}$ ) と大質量星 ( $\geq 8M_{\odot}$ ) の二つに分類される。過去の研究により、小質量星の形成過程については大きく理解が進んだが、大質量星の形成についてはそれに比べてまだ十分な理解が得られていない。観測的には

- 絶対数が少ない
- 進化のタイムスケールが短く ( $< 10^7$  yr)、統計的に進化過程を追うことが難しい
- 対象が遠方にしか見つからず、観測的研究においては高い空間分解能が要求される
- 形成初期の原始星段階 ( $\sim 10^4$ – $10^5$  年) は高密度な分子雲に埋もれているため、原始星が可視光を放射してもその周囲を取り巻く星周物質によって吸収される

などの点から理解が遅れている。

大質量星形成領域はしばしば、水酸基メーザー (OH)、水メーザー ( $\text{H}_2\text{O}$ )、メタノールメーザー ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) などのメーザー源を伴うことが知られている。メタノールメーザーに関しては、衝突励起と放射励起のどちらが優勢かによってクラス I、II メーザーに分類されている。水メーザーやクラス I メタノールメーザーは、超コンパクト HII 領域や赤外線点源などの大質量星形成の指標となる天体との位置的な相関が必ずしも良くない。これに対して、クラス II メタノールメーザーや水酸基メーザーは、大質量星形成の指標となる天体との位置的な相関が良いと言われていた。しかしながら、干渉計を用いた高空間分解能観測により、クラス II メタノールメーザーの中には、超コンパクト HII 領域や赤外線点源よりもさらに前の進化段階にあるとみられる若い天体（超コンパクト HII 領域を伴わない大質量原始星など）との相関が良いものが多数存在することが明らかになってきた。

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から推定可能であり、星周物質の 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、6.7 GHz メタノールメーザーは、現在までにほとんどが大質量星形成領域で検出されているため、近年では大質量星形成の指標として精力的な観測が行われている。

## 1.2 周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザー

本研究の対象となる 6.7 GHz メタノールメーザーは、1991 年に初めて観測された (Menten 1991)。個々のクラス II メタノールメーザースポットの寿命は数年以上に達し、このメーザーが付随する領域は比較的力学的に安定している。しかし、単調な強度変動、周期的な強度変動 (以下、周期変動と呼ぶ)、突発的な強度変動など、さまざまな強度変動を示すことが知られている (e.g., Goedhart et al. 2004)。その中でも、周期変動は Goedhart et al. (2003) で報告され、それ以降は盛んに観測が行われている。

現在、およそ 1000 個以上の 6.7 GHz メタノールメーザー源が発見されており、その中で周期変動を示す天体は 2016 年時点で 20 天体発見されている (表 1.1: Goedhart et al. 2003, 2004, 2007, 2009, 2014; Szymczak et al. 2011, 2014, 2015; Maswanganye et al. 2015, 2016; Araya et al. 2010; Fujisawa et al. 2014)。周期変動の要因はまだ明確にはわかっていないが、中心星近傍の状態変化に伴うメーザー種光子量の変動、もしくはメーザー雲の温度変化を反映していると考えられている。今後、大質量原始星やその周囲で起こっている現象の解明が期待されている。

表 1.1 既知の周期変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザー。

| 天体名            | 周期 [day] | 参考文献                       |
|----------------|----------|----------------------------|
| G 009.62+00.19 | 244      | Goedhart et al. 2003       |
| G 012.68−00.18 | 307      | Goedhart et al. 2004       |
| G 012.88+00.48 | 29.5     | Goedhart et al. 2009       |
| G 022.35+00.06 | 179      | Szymczak et al. 2011       |
| G 025.41+00.10 | 245      | Szymczak et al. 2015       |
| G 037.55+00.20 | 237      | Araya et al. 2010          |
| G 045.47+00.13 | 196      | Szymczak et al. 2015       |
| G 073.06+01.80 | 159      | Szymczak et al. 2015       |
| G 075.76+00.34 | 120      | Szymczak et al. 2015       |
| G 188.94+00.88 | 395      | Goedhart et al. 2014       |
| G 196.45−01.67 | 668      | Goedhart et al. 2004       |
| G 316.64−00.09 | 321      | Goedhart et al. 2004       |
| G 328.23−00.54 | 220      | Goedhart et al. 2007       |
| G 331.13−00.24 | 504      | Goedhart et al. 2014, 2007 |
| G 338.93−00.06 | 133      | Goedhart et al. 2007       |
| G 339.62−00.12 | 201      | Goedhart et al. 2007       |
| G 339.98−00.42 | 246      | Maswanganye et al. 2016    |
| G 358.46−00.39 | 220      | Maswanganye et al. 2015    |
| Cepheus A      | 84–87    | Szymczak et al. 2014       |
| IRS22198+6336  | 34.6     | Fujisawa et al. 2014       |

### 1.3 Lomb-Scargle ピリオドグラム

Lomb-Scargle ピリオドグラム (Lomb 1976: Scargle 1982) は不等間隔にサンプリングされた時系列から周期を検出して特徴づけるためのよく知られたアルゴリズムであり、天文観測で得られたデータの解析では特に広く使われている。通常、時系列解析では、連続信号から一定の間隔でサンプリングした離散信号を扱い、データ点は等間隔に取られていることが多い。しかし天文観測では、観測装置の運用上の都合や、天候の影響などにより必ずしも等時間間隔で観測を行えないことが多い。本研究で取り扱うデータも観測間隔が不等間隔の離散データである。そのため、解析方法には、等間隔で得られたデータを前提にした理論や手法を適用することはできない。しかし、Lomb-Scargle ピリオドグラムはこのような不等間隔な離散データに対しても適応可能な解析法であり、等間隔で得られたデータと等価のピリオドグラムを求めることができる。

一定の観測間隔で得られた  $N_0$  個の時系列データ  $(x_1, X(x_1)), (x_2, X(x_2)), \dots, (x_{N_0}, X(x_{N_0}))$  に対し、離散フーリエ変換 (DFT) は、

$$\begin{aligned} DFT(\omega_n) &= \sum_{j=1}^{N_0} X(x_j) \exp(-i\omega_n x_j) \\ &= \sum_{j=1}^{N_0} X(x_j) \exp\left(-i \frac{2\pi n}{\Delta t N_0} x_j\right) \end{aligned}$$

で与えられる。ここで、 $n = 0, 1, \dots, N_0 - 1$  である。これを用いて、パワースペクトルの推定に当たる古典的なピリオドグラム (最初に提案した Schuster (1898) にちなんで Schuster ピリオドグラムと呼ばれることもある) を計算することができ、

$$P(\omega_n) = \frac{1}{N_0} |DFT(\omega_n)|^2 \quad (1.1)$$

で表すことができる。 $N_0$  個の離散時系列データに含まれる周期関数  $X_S(x_i)$  の周波数が  $\omega_{n_0}$  である場合、ピリオドグラムは  $P(\omega_{n_0})$  で大きな値を取り、時系列データに含まれる周期をピリオドグラムから得ることができる。

等間隔に観測されたデータ  $X(x_j)$  に含まれる雑音が正規分布に従う雑音成分  $R(x_j)$  のみの場合、ピリオドグラム (1.1) の確率分布は指数分布になり、その確率分布関数  $f(x)$  は、

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x}{\sigma_0^2}\right)$$

で表される。ここでは  $\sigma_0^2$  は観測データ  $X(x_j) = R(x_j)$  の分散を表している。

一方、不等間隔に観測されたデータのピリオドグラムの確率分布は、指数分布になるとは限らない。しかし、ピリオドグラム (1.1) を、一般化された形を考慮して修正を加えると、等間隔の観測データと同様に確率分布を指数分布にすることができる。この修正を加えたピリオドグラムは、

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[ \sum_{j=1}^{N_0} X(x_j) \cos \omega(x_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2 \omega(x_j - \tau)} + \frac{\left[ \sum_{j=1}^{N_0} X(x_j) \sin \omega(x_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \sin^2 \omega(x_j - \tau)} \right\} \quad (1.2)$$

で表され、これを Lomb-Scargle ピリオドグラムと呼ぶ。 $\omega$  は周波数を表し、 $\tau$  は、

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \sin 2\omega x_j}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos 2\omega x_j}, \quad (1.3)$$



を満たすものとする。このとき、分散  $\sigma_0^2$  が 1 でない観測データの場合、観測データの分散、

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{j=1}^{N_0} (X(x_j) - \bar{X})^2, \quad (1.4)$$

を用いて、

$$P_N(\omega) = \frac{P_X(\omega)}{\sigma_0^2} \quad (1.5)$$

のように正規化することにより、確率分布を指数分布にすることができる。これを正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムと呼ぶ。また、式 (1.2)、式 (1.5) を用いた計算を Lomb-Scargle 法と呼ぶことにする。

### 1.3.1 誤警報確率

Lomb-Scargle 法により、信号に含まれる周期を推定することができる。しかし、Lomb-Scargle ピリオドグラムを計算するだけでは、その最大値を表すピークの値がどれだけ有意なのかが分からない。そこでピークの有意性を定量化するための典型的なアプローチである誤警報確率 (false alarm probability) を用いた。これは信号ではない正規分布する雑音が発生した場合のピークを作る確率を表している。

データが正規分布する雑音のみで構成される場合、Lomb-Scargle ピリオドグラムの確率分布は指数分布となるから、ある周波数  $\omega$  におけるピリオドグラムの値  $P_x(\omega)$  が  $z$  より小さくなる確率は、

$$f(z) = \int_0^z \exp(-z') dz' = 1 - \exp(-z)$$

で与えられる。独立周波数の数が  $N$  である場合、それぞれの周波数におけるピリオドグラムの値がすべて  $z$  より小さくなる確率は、

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

と書ける。つまり、いずれかのピリオドグラムの値が  $z$  より大きくなる確率は

$$\alpha = 1 - F(z) = 1 - [1 - \exp(-z)]^N \quad (1.6)$$

となる。この  $\alpha$  が誤警報確率である。 $\alpha$  の値が小さいほど、Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値の信頼性は高いと言える。

誤警報確率  $\alpha$  を例えば 0.01 や 0.05 などの小さな値で固定し、そのときの  $z$  の値をピリオドグラム上に示した方が、Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値の信頼性の評価がしやすくなる。そのため、式 (1.6) の  $z$  を  $z_0$  に置き換えた後、 $z_0$  について解き、

$$z_0 = -\ln [1 - (1 - \alpha)^{1/N}] \quad (1.7)$$

となる  $z_0$  を、誤警報確率  $\alpha$  のときの閾値として扱うことにする。すなわち、Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値が  $z_0$  を下回った場合、信号は検出されなかったと明確に判断する基準を設けることに相当する。

上述の通り、誤警報確率は観測値が「正規分布する雑音以外」と判断することであり、必ずしも天体からの信号であると 100% は言い切れない。正規分布に従わない雑音や非周期的な強度変動は考慮されていないことに注意すべきである。

## 1.4 研究目的

茨城大学電波天文観測研究室では、6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動を統計的に調査するために、茨城県日立市にある 32 m 電波望遠鏡を用いてモニター観測を実施している。モニター観測とは、同じ天体に対して継続した観測を何度も行うことである。モニター観測は 2012 年 12 月 30 日から大きく四つの期間にわけて実施している。それぞれの具体的な観測期間や、周期変動天体の検出という観点から主な目的について以下の表 1.2 にまとめた。

表 1.2 モニター観測の期間と主な目的。

|     | 第 1 期・第 2 期                                                                            | 第 3 期                                        | 第 4 期                                  |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 期間  | 2012/12/30–2014/01/10 (MJD = 56291–56667)<br>2014/05/07–2015/08/24 (MJD = 56784–57258) | 2015/09/18–2017/03/07<br>(MJD = 57283–57819) | 2017/06/14–現在<br>(MJD = 57918–現在)      |
| 天体数 | 442                                                                                    | 143                                          | 442                                    |
| 頻度  | 各天体 9 日に 1 回                                                                           | 各天体 4–5 日に 1 回                               | 各天体 4–5 日に 1 回程度<br>または<br>45 日に 1 回程度 |
| 目的  | 50 日–200 日周期の<br>周期変動天体の検出                                                             | 短周期 (50 日未満) の<br>周期変動天体の検出                  | 短周期、長周期の<br>周期変動天体の検出                  |

なお、現在も含む第 4 期の観測頻度は天体の強度変動の大小により決定しており、強度変動の小さいものは 45 日に 1 回程度、大きいものは 4–5 日に 1 回程度となっている。本研究で解析対象とする大質量星形成領域 G33.641–0.228 のように、短いタイムスケールでの急激な強度上昇 (以下、バースト現象と呼ぶ) が着目されている天体は、例外として毎日観測している。

短周期の周期変動天体の数を増やすことを目指し、第 3 期の観測データに対して周期解析を行った山口 (2017) では、50 日未満の短い周期を持つ周期変動天体の検出に成功している。さらに、第 1–3 期のデータを使用して、周期変動の研究を報告した Sugiyama et al. (2018) では、22–409 日の周期を持つ 31 天体の周期変動を新たに検出することにも成功している。その山口 (2017) において、第 1,2 期では周期が導出された成分が第 3 期において非検出となったり、逆に第 3 期において新検出された成分が複数発見されたりした。そこで本研究では、G33.641–0.228 を解析対象とする。観測頻度が時期によって異なっていたことも考慮に入れた上で、強度の周期変動の出現や消失、または推定される周期の変化に着目し、強度変動の安定性を調査することを目的とした。

## 2 観測

### 2.1 観測概要

本研究では、日立 32 m 電波望遠鏡とトルン 32 m 電波望遠鏡 (Olech et al. 2019) のモニター観測により得られた大質量星形成領域 G33.641−0.228 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの観測データに対して周期解析を行った。茨城大学電波天文観測研究室では、国立天文台水沢 VLBI 観測所茨城観測局 (茨城県日立市・高萩市にある日立 32 m 電波望遠鏡と高萩 32 m 電波望遠鏡) (図 2.1) の運用およびこれらの望遠鏡を用いた研究を行っている。日立 32m 電波望遠鏡 (以下、日立局と呼ぶ) では 2012 年 12 月 30 日から開始した 6.7 GHz メタノールメーザー源のモニター観測をほぼ毎日行っている。

高頻度観測により強度変動の周期を正確に算出し、周期変動メカニズムを解明すること、そして突発的な強度変動をいち早く検出し、他波長や VLBI 観測を提案し、星形成期の様々な突発現象メカニズムの解明を目的としている。日立局メタノールメーザーモニター観測のパラメータを表 2.1 にまとめた。このモニター観測のターゲットとして大質量星形成領域 G33.641−0.228 が含まれている。



図 2.1 茨城県日立市・高萩市に位置する 2 台の 32 m 電波望遠鏡。写真中央が高萩局、右後方にみえるのが日立局。

表 2.1 日立局メタノールメーザーモニター観測諸元。

|                    |                  |
|--------------------|------------------|
| 観測帯域               | 6.664–6.672 GHz  |
| 観測偏波               | 左円偏波、右円偏波        |
| 空間分解能              | 4.6 arcmin       |
| 速度分解能              | 0.044 km/s       |
| 検出感度 ( $3\sigma$ ) | 0.9 Jy (300 秒積分) |
| システム雑音温度           | 30K              |
| 強度校正               | R-Sky 法          |
| 各天体の観測時刻           | ほぼ同じ恒星時          |

本研究においては、トルン 32 m 電波望遠鏡 (図 2.2) で行われた G33.641–0.228 のモニター観測データ (Olech et al. 2019) も利用している。よってトルン 32 m 電波望遠鏡 (以下、トルン局と呼ぶ) の観測諸元も表 2.2 に示す。



図 2.2 ポーランドにあるトルン局。

表 2.2 トルン局メタノールメーザーモニター観測諸元。

|          |           |
|----------|-----------|
| 速度分解能    | 0.09 km/s |
| 強度較正     | R-Sky 法   |
| 各天体の観測時刻 | ほぼ同じ恒星時   |
| システム雑音温度 | 30 K      |

対象天体 G33.641–0.228 の観測頻度と観測期間をまとめたものを表 2.3 に示す。

表 2.3 モニター観測の期間と観測頻度。

|      | 観測期間            | 観測頻度       |
|------|-----------------|------------|
| 日立局  | MJD 56299–59121 | ほぼ毎日       |
| トルン局 | MJD 55014–58044 | ～10 日に 1 回 |

## 2.2 対象天体 G33.641−0.228

本研究では大質量星形成領域 G33.641−0.228 に付随している 6.7 GHz メタノールメーザー源に対して解析を行った。対象天体の 6.7 GHz メタノールメーザーはトルン局によって初めて報告された (Szymczak et al. 2000)。

G33.641−0.228 は 4 kpc の距離にある大質量星形成領域であり、赤外線源の強度は IRAS カタログから  $1.2 \times 10^4 L_{\odot}$  ( $L_{\odot}$  は太陽光度) である。Fujisawa et al. (2012, 2014) では、視線速度 59.60 km/s のフラックス密度は、1 日以内で 7 倍に増光し、それがバーストイベントであったことを確認している。また、59.60 km/s 成分のみがバーストを示しているため、複雑なバーストメカニズムが示唆されている。以下に、日立局のモニター観測から得た観測期間：MJD 56299–59121 の光度曲線を示す (図 2.3)。

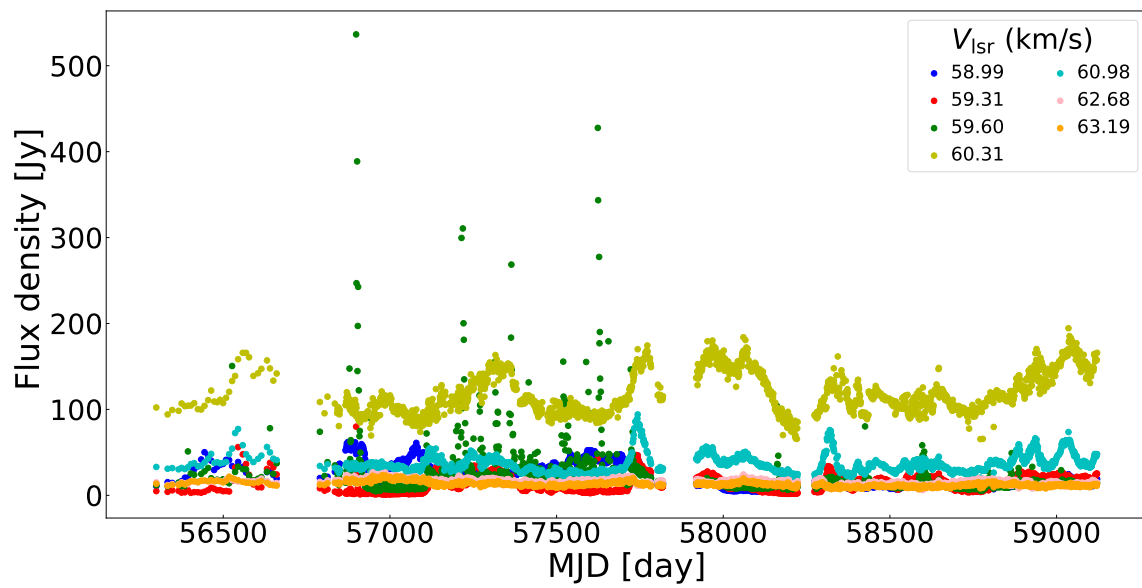


図 2.3 日立局でモニター観測した MJD 56299–59121 における G33.641−0.228 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変化。

## 3 解析

### 3.1 周期導出方法

本研究では、日立局とトルン局 (Olech et al. 2019) のモニター観測により得られた大質量星形成領域 G33.641−0.228 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの観測データに対して周期解析を行った。周期解析は安井 (2016) によって日立局のデータ解析用に作成された C 言語のプログラム、そして Python におけるオープンソフトウェア Astropy を使用した。これら二つのプログラムには序論で説明した Lomb-Scargle 法が実装されている。今回、得られたピリオドグラムから周期を導出する際には、以下の二つの条件を設け、両方を満たすものを選択した。

1. Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値が、誤警報確率  $\alpha < 0.0001$  を満たすこと。
2. 条件 1. を満たした周期が、天体の観測期間に 3 周期以上含まれること。

条件 1. の誤警報確率の設定については、山口 (2017) と同じ基準を採用した。また、条件 2. についても山口 (2017) と同様の条件を採用した。条件 2. を課すのは、強度変動の再現性を確認することにより導出周期の信頼性を高めるためである。再現性を確認しないと、実際は周期的な変動を起こしていないメーザーに対してピリオドグラムが偶然示した長い周期を誤って拾ってしまう可能性がある。このようなことを防止するため、本研究でも導出周期が観測期間に 3 周期以上含まれることを条件とした。また、二つの選出条件を満たす Lomb-Scargle ピリオドグラムのピークの値が複数ある場合は、その中で最も信頼性の高いと考えられる、ピークの値が最大の周期を採用した。さらに、導出周期の誤差として、隣接した独立周期との差を採用した。

### 3.2 解析手順

#### 3.2.1 トレンド成分の除去

今回行った周期解析の手順を記す。本研究では、6.7 GHz メタノールメーザーの強度時系列データを扱った。任意の観測間隔で得られた時系列データの数を  $N_0$  個、測定日 (修正ユリウス日) を  $x_i (i = 1, 2, \dots, N_0)$  で、強度を  $X(x_i)$  で表す。時系列解析で扱うデータには、長期間にわたる増加や減少の傾向が含まれることがある。この傾向のことをトレンドといい、時系列データにおけるトレンド成分という。この周波数成分は、周期解析によって求めたい周波数よりも非常に低いため、まずこのトレンド成分を取り除いた。また今回、時系列データに含まれているトレンド成分が 1 次関数で近似できると仮定した。まず初めにトレンド成分の 1 次関数を求めるために、時系列データを最小二乗法を用いて

$$y(x_i) = ax_i + b \quad (3.1)$$

に近似させる。ここで、 $a$  は傾き、 $b$  は切片を表す。その後に、傾き成分  $ax_i$  を元の時系列データから差し引く ( $X(x_i) - ax_i$ ) ことによりトレンド除去を行った。

具体的には、最小二乗法を用いて  $N_0$  個の時系列データ  $(x_1, X(x_1)), (x_2, X(x_2)), \dots, (x_{N_0}, X(x_{N_0}))$  を式 (3.1) に近似させるためには

$$\varepsilon(a, b) = \sum_{i=1}^{N_0} (y_i - ax_i - b)^2 \quad (3.2)$$

で与えられる  $a, b$  の最小値を求める。したがって、

$$\frac{\partial \varepsilon(a, b)}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon(a, b)}{\partial b} = 0 \quad (3.3)$$

となる、 $a$ 、 $b$  を求めればよい。今後の説明のため、トレンド成分を除去したデータを改めて、

$$h(x_i) = X(x_i) - ax_i \quad (3.4)$$

と表す (図 3.1)。

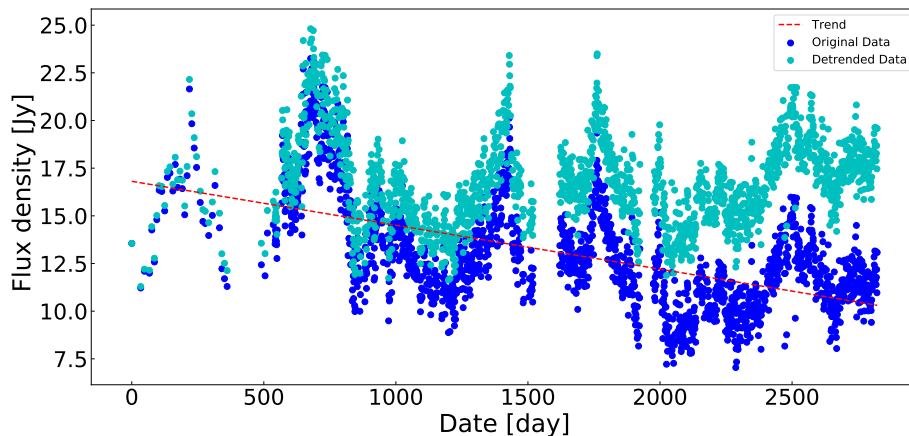


図 3.1 トrend成分の除去の例。青点がトレンド除去する前の元のデータ、赤の破線が一次関数で近似したトレンド成分、水色の点がトレンド除去した後のデータを表している。

次に、強度変動の割合を速度成分間で比較するため、各成分のデータをそれぞれの全期間の平均強度で規格化した。具体的には、トレンド除去を行ったデータ  $h(x_i)$  を、その強度の平均

$$\bar{h} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} h(x_i) \quad (3.5)$$

で割った。以上の処理を行った観測データに対して、Lomb-Scargle ピリオドグラムを作成した。

### 3.2.2 折り返し光度曲線

次に、本研究では上記の手順に加えて、Lomb-Scargle ピリオドグラムから得られた周期を確認するために、光度曲線を得られた周期によって位相を定義して重ね合わせた図を作成した。この折り返し光度曲線 (Phase-folded light curve) を周期性の確からしさを議論する上で一つの指標とした (図 3.2)。

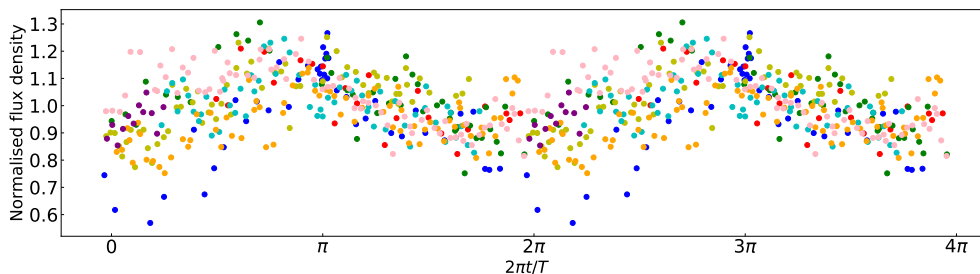


図 3.2 折り返し光度曲線の例。周期変動天体 G188.9+08 の視線速度 8.48 km/s 成分の折り返し光度曲線を示す。既知の周期  $T=395$  日によって位相を定義して重ね合わせた。わかりやすいように周期ごとに色を変えている。データ取得の開始日に依存しないように、得られた波形を 2 回分繰り返してプロットしている。



### 3.2.3 時間窓ごとの周期解析

次に、全期間の観測データに対して Lomb-Scargle 法により得られた周期が、本当に全期間にわたって安定して存在していたのかを検証するために、観測データを複数の区間に区切って周期解析を行った。具体的には、全期間のデータに対して導出した周期の 2 倍程度の時間幅を一つの時間窓とし、ピリオドグラムから得た周期の時間変化がないかを検証するために時間窓をずらしながら周期解析を行った。またそれぞれの速度成分に対してピリオドグラムが 6 つずつ得られるように、時間窓は各速度成分ごとに調節した。最後に、6 つのピリオドグラムの条件を満たす周期を導出し、作成した 6 つのピリオドグラムを一つの図にまとめ、条件を満たす周期の変化を確認した。

## 3.3 日立局とトルン局とで取得されたデータ間の強度比較

本研究では、日立局とトルン局から得た観測データ (速度成分 : 58.87 km/s、60.27 km/s、60.89 km/s、62.60 km/s、63.13 km/s) を同じプロットに表示して強度変動を確認し、解析を行った。しかし、観測局による強度較正法や観測装置の違いなどから強度に一定の傾向をもった系統誤差が生じている可能性があった。そのため周期解析を行う前に、日立局とトルン局の観測データの強度を比較した。手順としてはまず初めに、日立局とトルン局の観測期間の重複したデータを取り出し、日立局の観測データを線形補間した。次にトルン局の観測データの取得した時刻における日立局の強度を線形補間したデータから取得し、偏差を導出した (図 3.3)。最後に、導出した偏差を日立の強度で正規化し、各速度成分ごとにヒストグラムを作成した (図 3.4)。5 成分とも平均を中心とした正負対称の形をしており、一般的に R-Sky 法で実現される強度較正精度 ( $\pm 10\%$ ) を超える偏差はない (最大  $\pm 6.35\%$ ) ことから、今回は系統誤差はないと判断した。

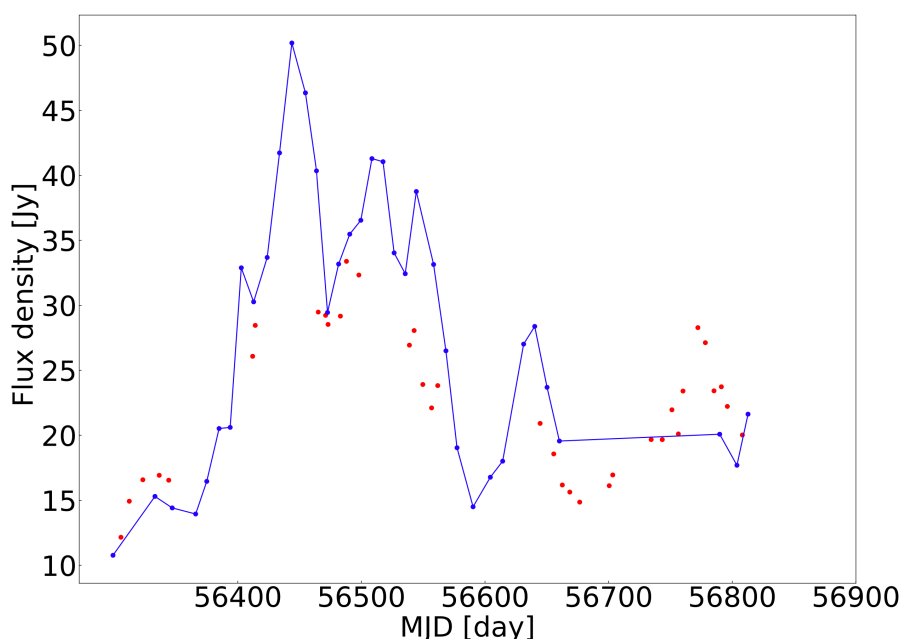


図 3.3 日立局観測データとトルン局観測データの比較。青点で線形補間しているデータが日立局の観測データ、赤点がトルン局の観測データを表している。赤点と同じ MJD にある日立の線形補間したデータから偏差を導出した。



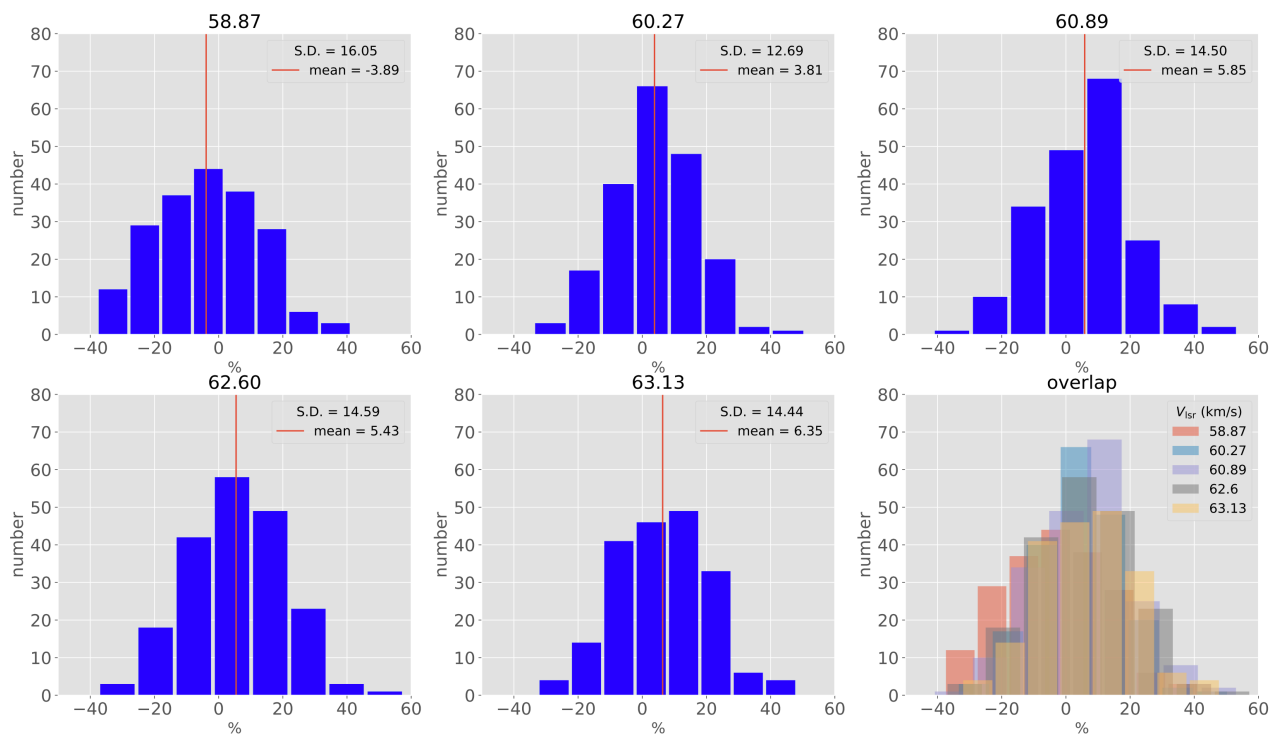


図 3.4 各速度成分ごとの偏差のヒストグラム。縦軸は個数を、横軸は偏差 [%] を表す。各ヒストグラムの右上に標準偏差 (S.D.) と平均 (mean) を示している。右下図は、5 つの速度成分のヒストグラムを重ねて表示したものを示している。

## 4 結果

### 4.1 日立局観測データのみを用いた解析結果

G33.641–0.228 は、7 個の速度成分が同定されている (表 4.1)。以下に、2020 年 10 月 3 日までの観測データの解析結果を速度成分ごとに (1) 光度曲線、(2) 全期間のデータに対するピリオドグラム、(3) (2) で得られた周期に対する折り返し光度曲線、(4) 時間窓を設定したデータに対するピリオドグラム の 4 つの図にまとめた。59.60 km/s 成分については特別な解析を行なったため、最後に示している。光度曲線を図 4.1、4.5、4.9、4.13、4.17、4.21 に、周期解析の Lomb-Scargle ピリオドグラムの結果を図 4.2、4.6、4.10、4.14、4.18、4.22 に示す。

ピリオドグラムの図は、縦軸がパワー、横軸が周期 [day] となっている。Lomb-Scargle ピリオドグラムでは等周波数間隔で結果が得られるように解析が行われるため、今回のように横軸を周期としたときに周期が大きいところほどグリッドの間隔が広がっていることに注意が必要である。また横軸の表示範囲はピリオドグラムが得られる最大周期である、観測データの取得期間の日数分とした。しかし、今回は周期の導出条件 2. にあるように導出周期が天体の観測期間に 3 周期以上含まれること、としている。そのため、閾値となる観測期間の  $1/3$  の周期に  $x$  軸と垂直な破線を引いてある。今回の日立局の G33.641–0.228 に関しては、観測期間は 2822 日であるため、閾値は 940 日である。また、 $x$  軸と平行な破線は、今回の周期の導出条件 1. にあるとおり、誤警報確率  $\alpha=0.0001$  に対応する縦軸 (Power) に引いてある。つまり、本研究においては垂線より左側かつ平行線  $f_{\text{ap}}$  より上にあるピークの値を導出周期としている。ピリオドグラムから導出した周期を表 4.2、4.4、4.6、4.8、4.10、4.12 に示す。また光度曲線とそのピリオドグラムのデータ点はわかりやすいように、各速度成分ごとに色を変えている。

図 4.3、4.7、4.11、4.15、4.19、4.23 に示した折り返し光度曲線は、ピリオドグラムから得られた周期によって位相を定義して重ね合わせている。3.1.2 節で説明しているように、重ね合わせる周期毎の重なり具合が見やすいように折り返す周期ごとに色を変えている。MJD の小さい方から順に、青、赤、緑、黄色、水色、オレンジ、ピンク、紫の順で光度曲線を重ね合わせている。

図 4.4、4.8、4.12、4.16、4.20、4.24 に各速度成分の時間窓ごとに解析した Lomb-Scargle ピリオドグラムを示す。縦軸はパワー、横軸は対数スケールの周期 [day] となっているが、確認しやすいように表示する図を拡大している。またピリオドグラムは全期間に対して周期解析した結果に示すように、離散的なデータとして導出されるが、時間窓ごとに周期解析したピリオドグラムでは、見やすくするため、離散データを線形で補間した結果を示している。時間窓ごとに、異なる色でプロットしており、色は凡例に示してある数字と対応している。数字は時間窓の順番を示しており、数字が大きくなるにつれて解析する期間が最近のものになっている。速度成分ごとに、隣り合う時間窓同士のずらした日数は図のキャプションに示している。具体的には最初の時間窓からキャプションに示す日数でずらしていき、最後の時間窓についてはその長さを維持したまま最後のデータがちょうど含まれるように、その先頭を調整した。時系列ごとに周期解析したピリオドグラムから、導出した周期と時系列の詳細な期間を表 4.3、4.5、4.7、4.9、4.11、4.13 に示す。

表 4.1 : G33.64–0.228 の速度成分。

|                              |                                                 |
|------------------------------|-------------------------------------------------|
| 視線速度 $V_{\text{lsr}}$ [km/s] | 58.99, 59.31, 59.60, 60.31, 60.98, 62.68, 63.19 |
|------------------------------|-------------------------------------------------|

#### 4.1.1 視線速度 58.99 [km/s] 成分

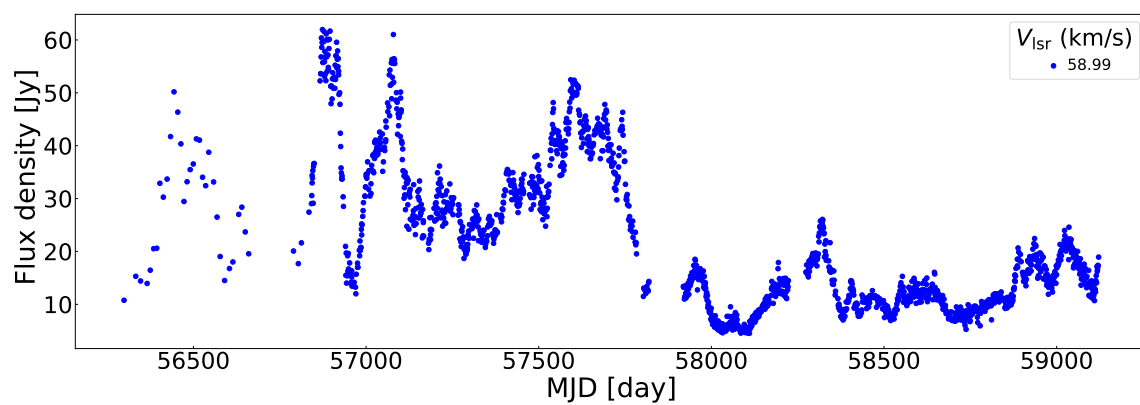


図 4.1 光度曲線。

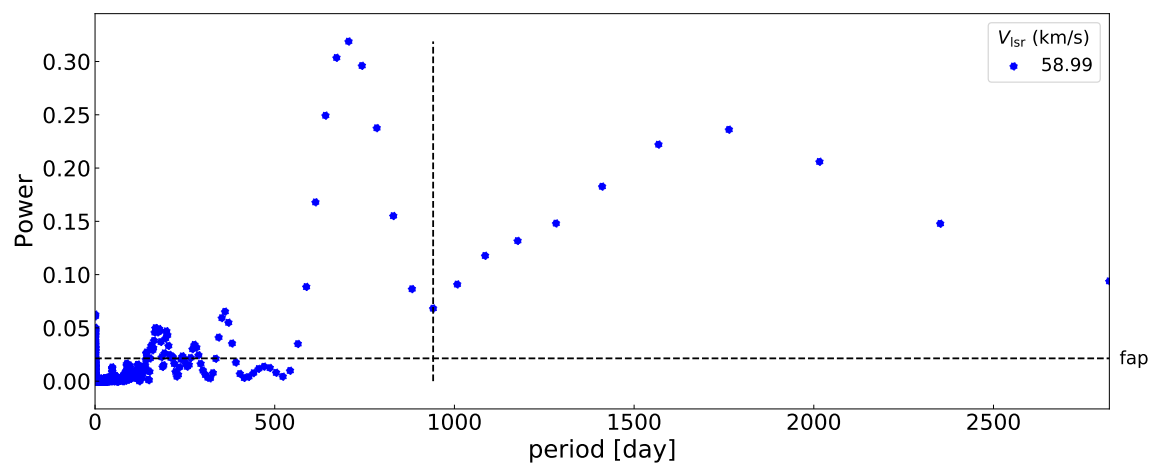


図 4.2 全データ取得期間に対して得られたピリオドグラム。

表 4.2 : 周期変動成分。

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day] | 705.6 (+37.1, -33.6) |
|--------------------|----------------------|

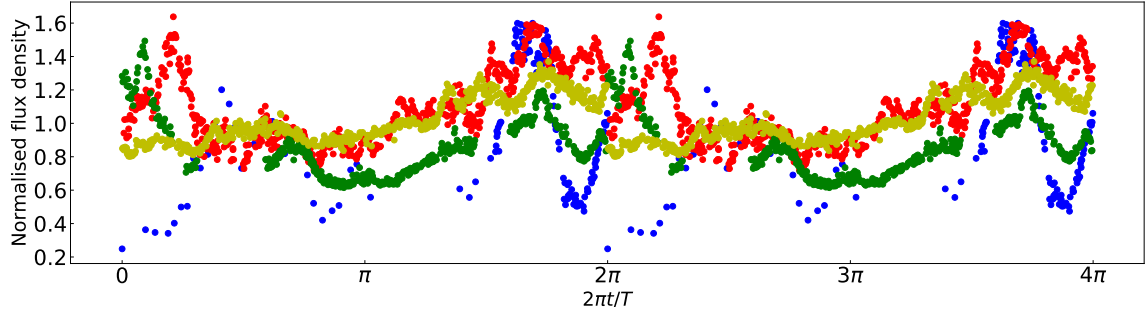


図 4.3  $T=705.6$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。

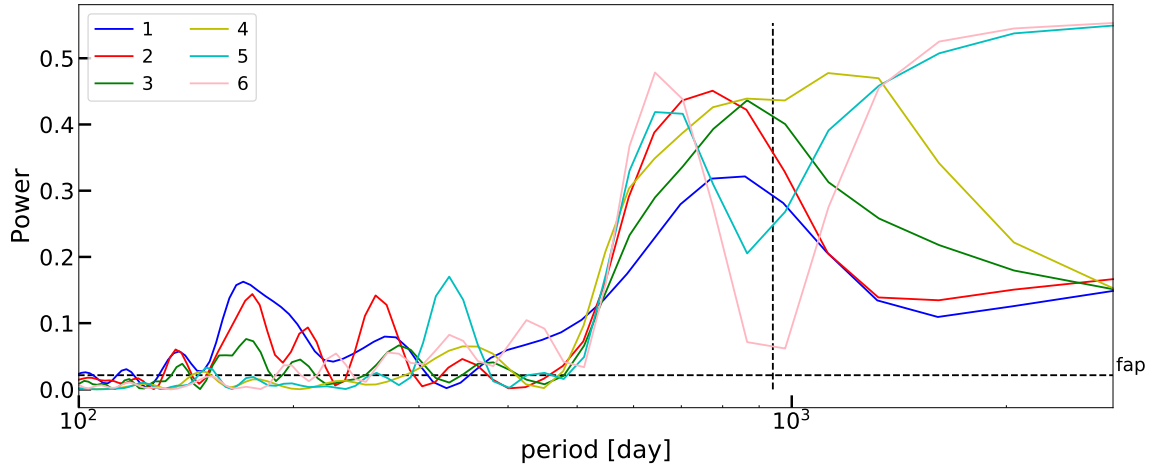


図 4.4 時間窓ごとに得られたペリオドグラム。時間窓の長さを 1500 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 300 日とした。

表 4.3 ペリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57799.1097] の周期 [day] | 859.9 |
| 時系列 2 [MJD 56599.1097–58099.1097] の周期 [day] | 774.4 |
| 時系列 3 [MJD 56899.1097–58399.1097] の周期 [day] | 865.9 |
| 時系列 4 [MJD 57199.1097–58699.1097] の周期 [day] | 864.7 |
| 時系列 5 [MJD 57499.1097–58999.1097] の周期 [day] | 643.0 |
| 時系列 6 [MJD 57621.5119–59121.5119] の周期 [day] | 643.0 |

#### 4.1.2 視線速度 59.31 [km/s] 成分

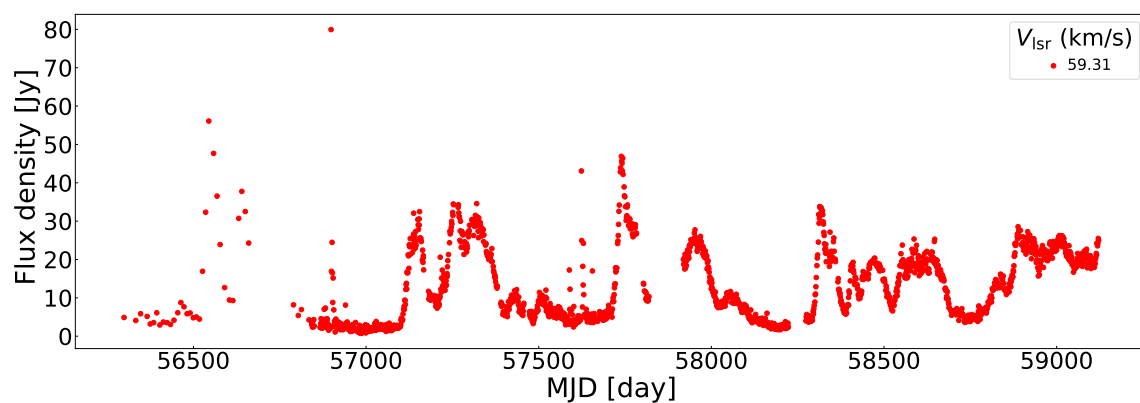


図 4.5 光度曲線。

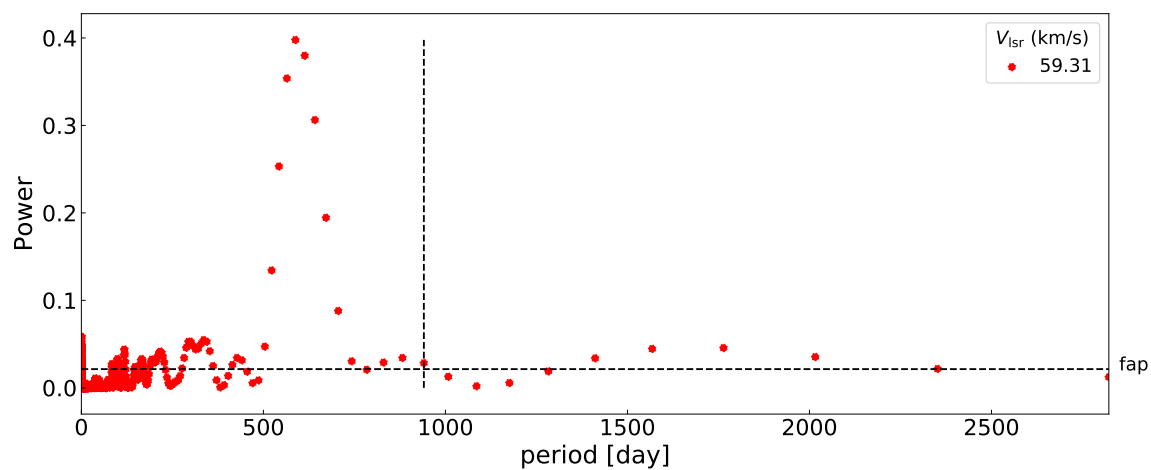


図 4.6 全データ取得期間に対して得られたピリオドグラム。

表 4.4 : 周期変動成分。

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day] | 588.0 (+25.6, -23.5) |
|--------------------|----------------------|

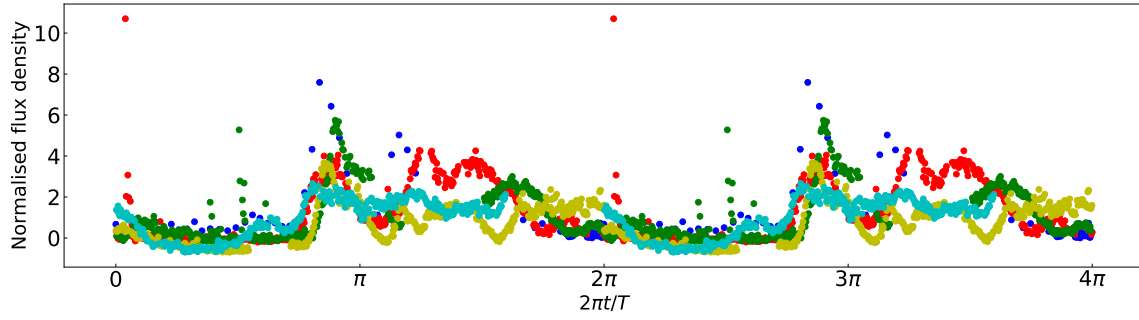


図 4.7  $T=588.0$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。

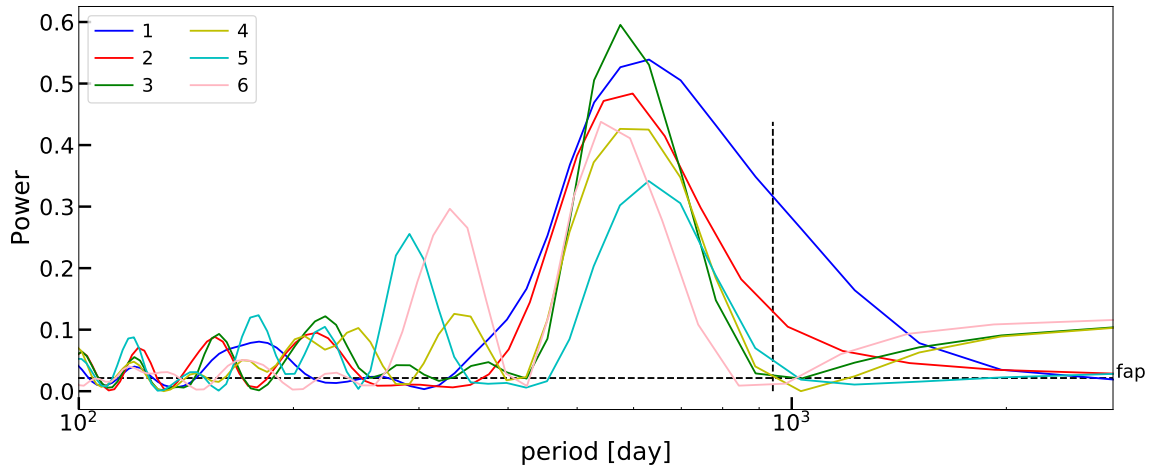


図 4.8 時間窓ごとに得られたペリオドグラム。時間窓の長さを 1300 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 300 日とした。

表 4.5 ペリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57599.1097] の周期 [day] | 630.7 |
| 時系列 2 [MJD 56599.1097–57899.1097] の周期 [day] | 598.3 |
| 時系列 3 [MJD 56899.1097–58199.1097] の周期 [day] | 574.9 |
| 時系列 4 [MJD 57199.1097–58499.1097] の周期 [day] | 574.2 |
| 時系列 5 [MJD 57499.1097–58799.1097] の周期 [day] | 629.9 |
| 時系列 6 [MJD 57821.5119–59121.5119] の周期 [day] | 539.9 |

#### 4.1.3 視線速度 60.31 [km/s] 成分

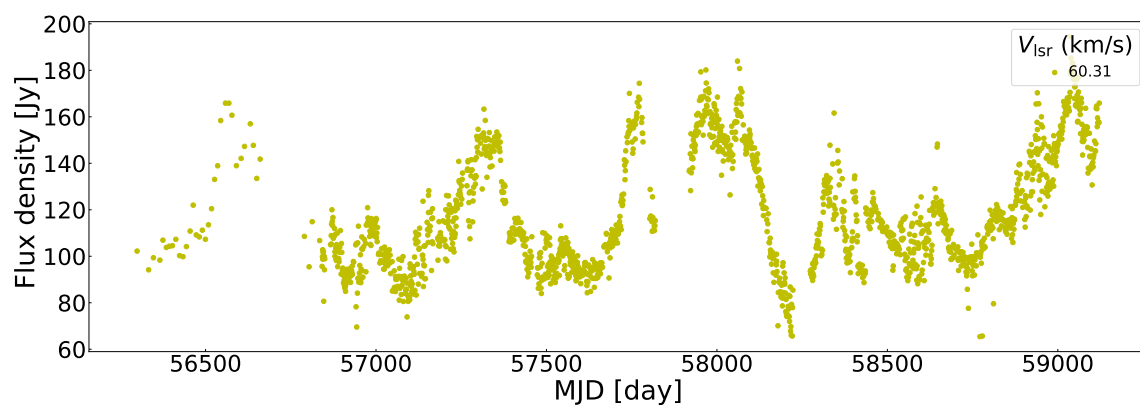


図 4.9 光度曲線。

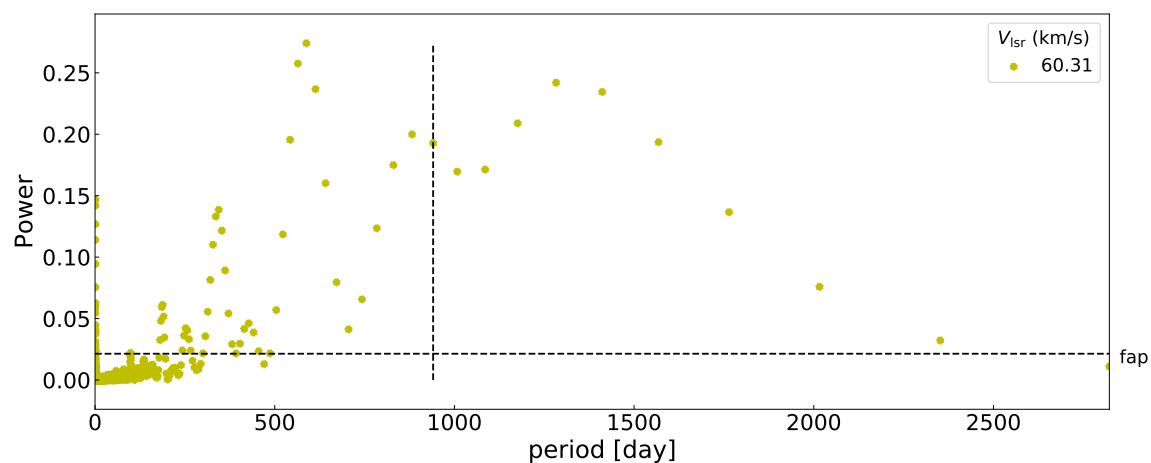


図 4.10 全データ取得期間に対して得られたピリオドグラム。

表 4.6 周期変動成分。

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day] | 588.0 (+25.6, -23.5) |
|--------------------|----------------------|

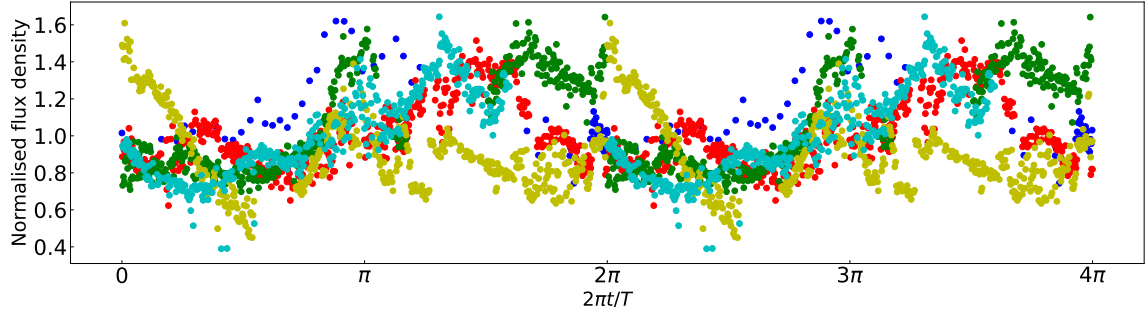


図 4.11  $T=588.0$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。

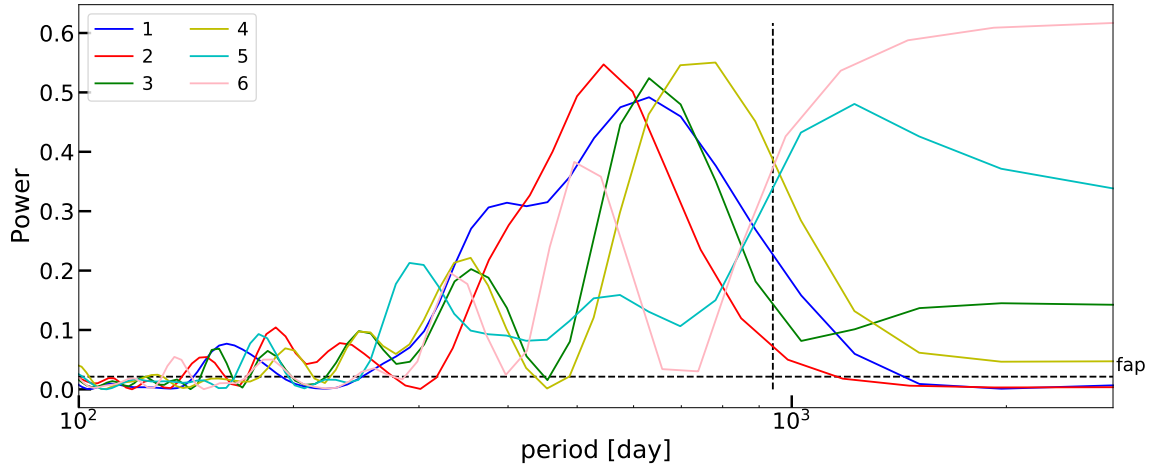


図 4.12 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 1300 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 300 日とした。

表 4.7 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57599.1097] の周期 [day] | 630.7 |
| 時系列 2 [MJD 56599.1097–57899.1097] の周期 [day] | 544.6 |
| 時系列 3 [MJD 56899.1097–58199.1097] の周期 [day] | 630.7 |
| 時系列 4 [MJD 57199.1097–58499.1097] の周期 [day] | 781.7 |
| 時系列 5 [MJD 57499.1097–58799.1097] の周期 [day] | 290.9 |
| 時系列 6 [MJD 57821.5119–59121.5119] の周期 [day] | 495.4 |



#### 4.1.4 視線速度 60.98 [km/s] 成分

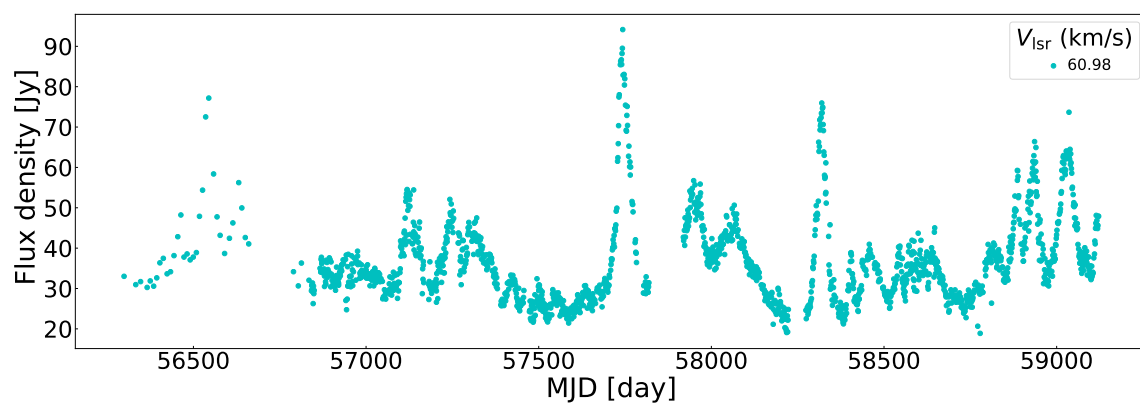


図 4.13 光度曲線。

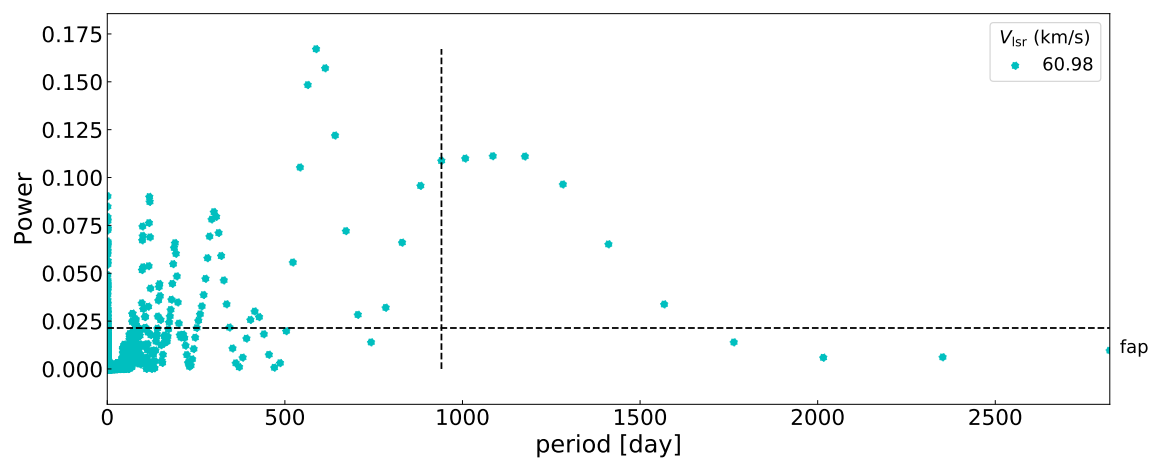


図 4.14 全データ取得期間に対して得られたピリオドグラム。

表 4.8 周期変動成分。

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day] | 588.0 (+25.6, -23.5) |
|--------------------|----------------------|

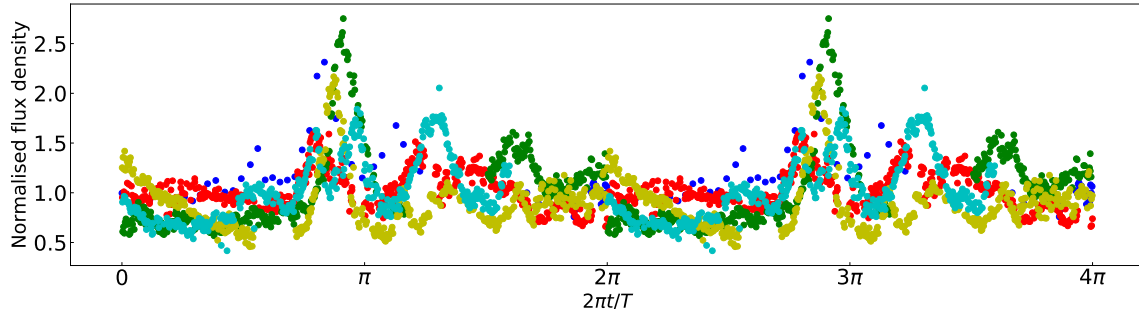


図 4.15  $T=588.0$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。

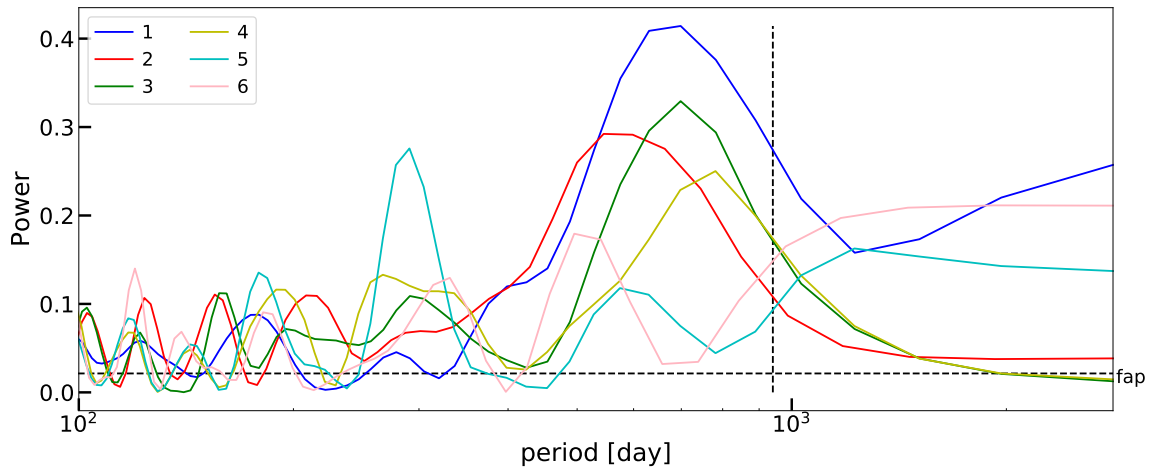


図 4.16 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 1300 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 300 日とした。

表 4.9 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57599.1097] の周期 [day] | 698.5 |
| 時系列 2 [MJD 56599.1097–57899.1097] の周期 [day] | 544.6 |
| 時系列 3 [MJD 56899.1097–58199.1097] の周期 [day] | 698.5 |
| 時系列 4 [MJD 57199.1097–58499.1097] の周期 [day] | 781.7 |
| 時系列 5 [MJD 57499.1097–58799.1097] の周期 [day] | 290.9 |
| 時系列 6 [MJD 57821.5119–59121.5119] の周期 [day] | 495.4 |

#### 4.1.5 視線速度 62.68 [km/s] 成分

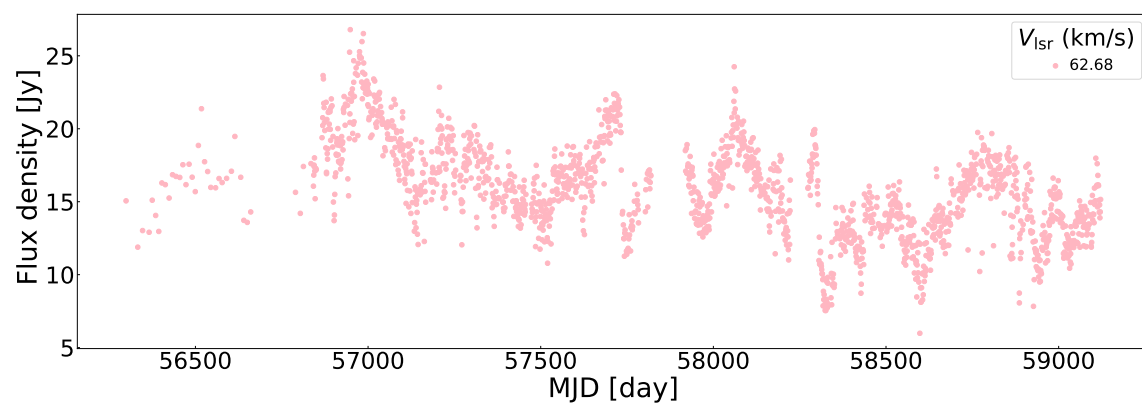


図 4.17 光度曲線。

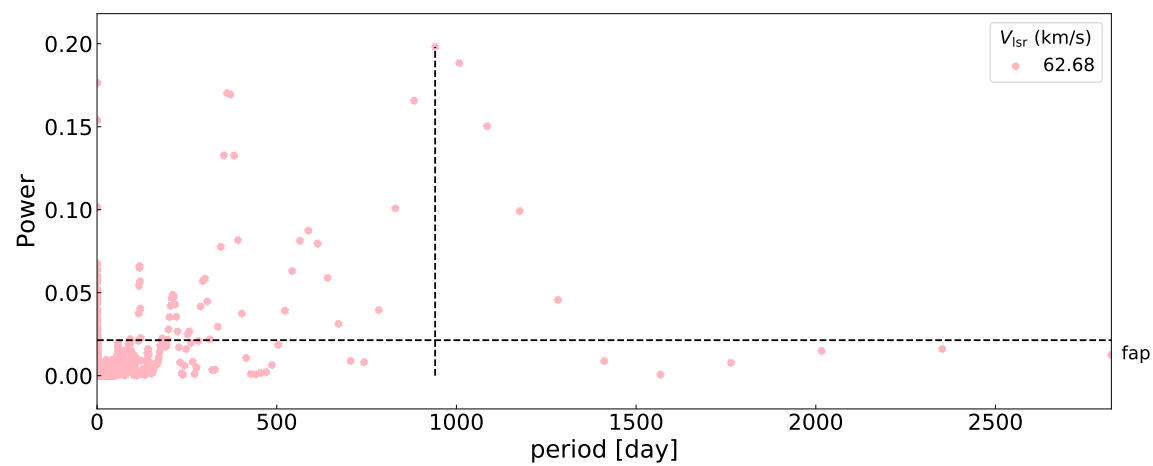


図 4.18 全データ取得期間に対して得られたピリオドグラム。

表 4.10 周期変動成分。

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day] | 361.8 (+9.5, -9.0) |
|--------------------|--------------------|

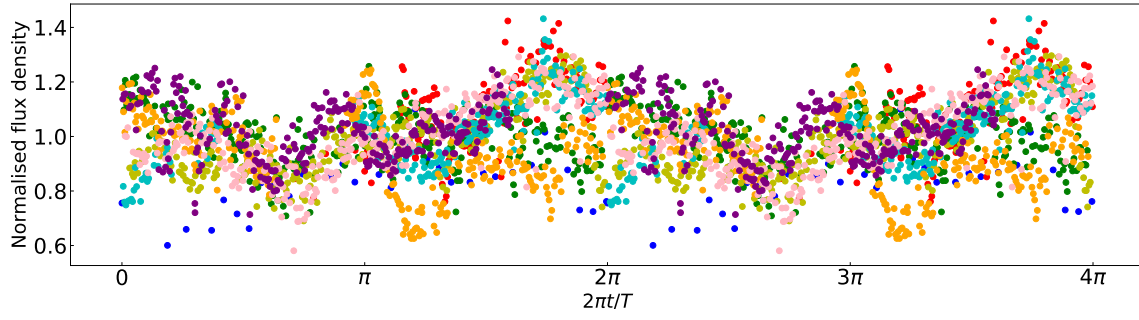


図 4.19  $T=361.8$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。

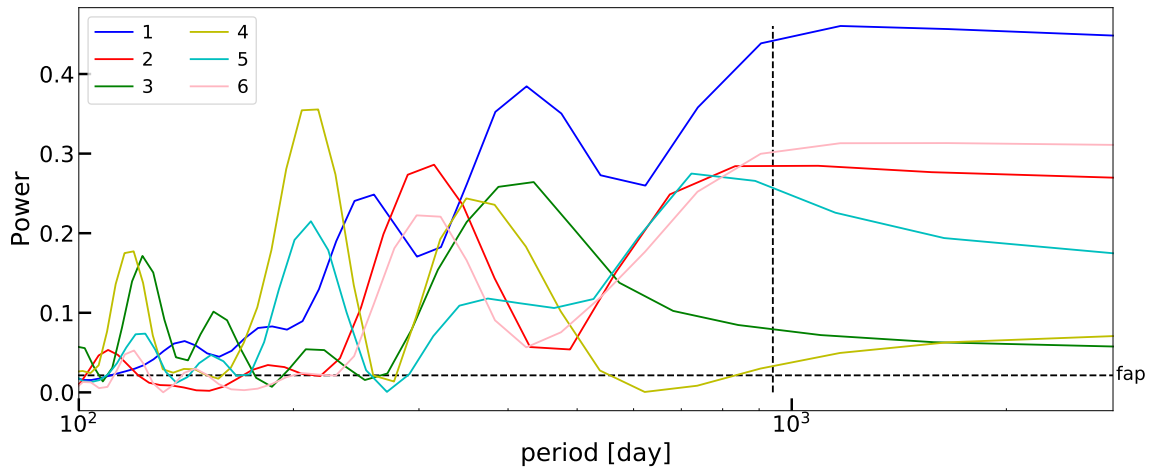


図 4.20 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 800 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 400 日とした。

表 4.11 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57099.1097] の周期 [day] | 424.7 |
| 時系列 2 [MJD 56699.1097–57499.1097] の周期 [day] | 315.0 |
| 時系列 3 [MJD 57099.1097–57899.1097] の周期 [day] | 434.6 |
| 時系列 4 [MJD 57499.1097–58299.1097] の周期 [day] | 216.6 |
| 時系列 5 [MJD 57899.1097–58699.1097] の周期 [day] | 723.2 |
| 時系列 6 [MJD 58321.5119–59121.5119] の周期 [day] | 297.7 |

#### 4.1.6 視線速度 63.19 [km/s] 成分

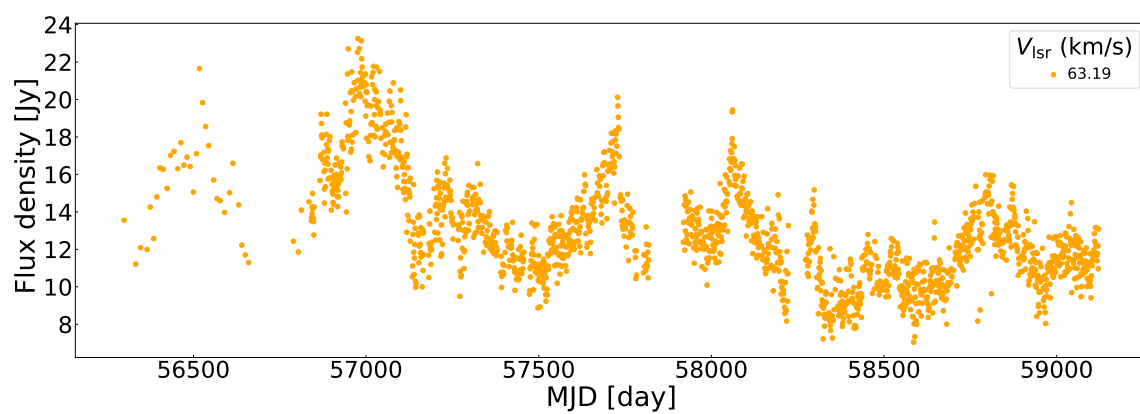


図 4.21 光度曲線。

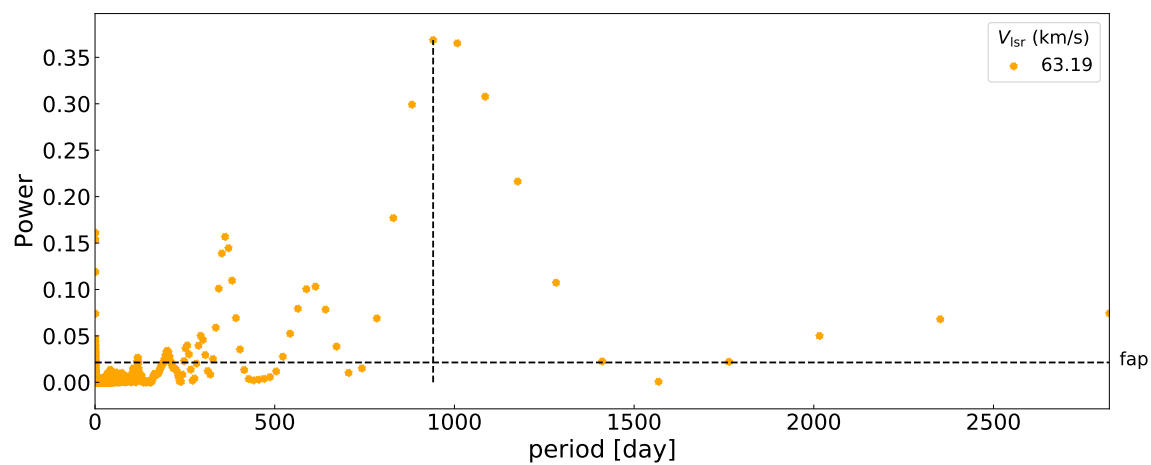


図 4.22 全データ取得期間に対して得られたピリオドグラム。

表 4.12 周期変動成分。

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day] | 361.8 (+9.5, -9.0) |
|--------------------|--------------------|

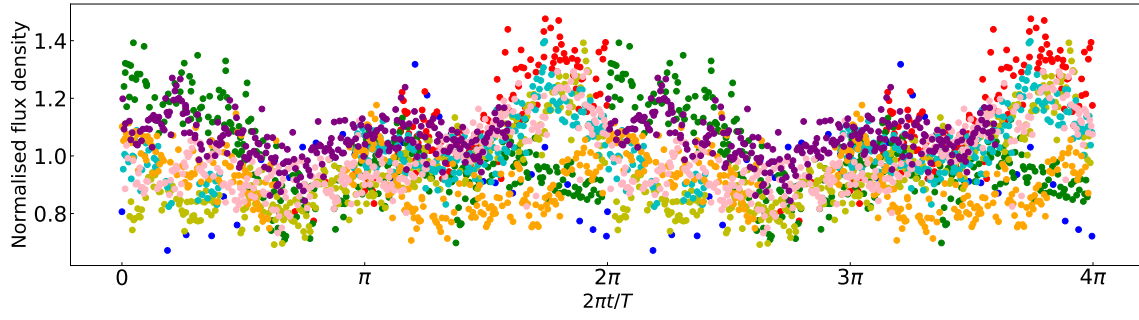


図 4.23  $T=361.8$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。

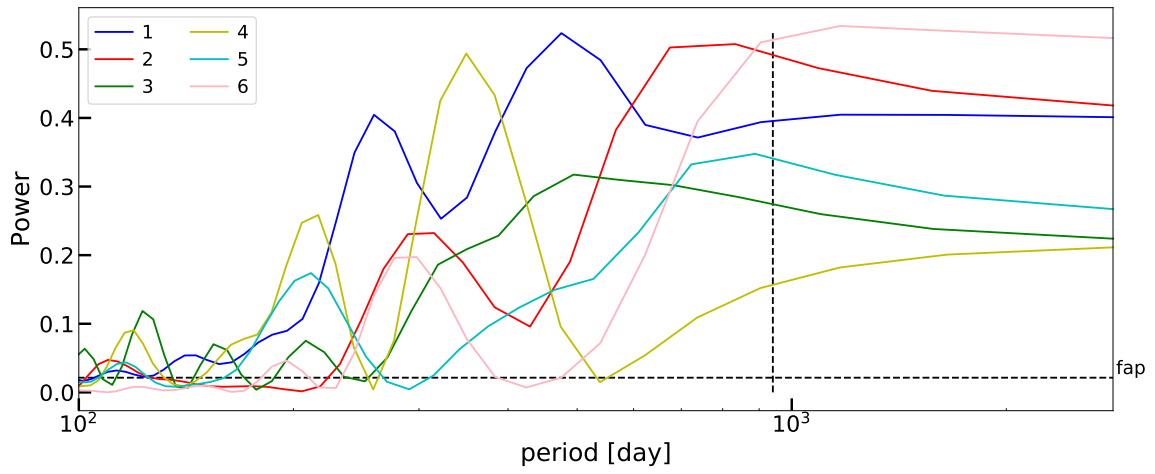


図 4.24 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 800 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 400 日とした。

表 4.13 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57099.1097] の周期 [day] | 475.2 |
| 時系列 2 [MJD 56699.1097–57499.1097] の周期 [day] | 833.1 |
| 時系列 3 [MJD 57099.1097–57899.1097] の周期 [day] | 494.3 |
| 時系列 4 [MJD 57499.1097–58299.1097] の周期 [day] | 349.5 |
| 時系列 5 [MJD 57899.1097–58699.1097] の周期 [day] | 888.4 |
| 時系列 6 [MJD 58321.5119–59121.5119] の周期 [day] | 297.7 |

#### 4.1.7 視線速度 59.60 [km/s] 成分

59.60 km/s に関しては、バースト的な振る舞いを示しているため、特別な解析を行った。内容としては、バースト的な変動を示さない期間（いわゆる静穏期）の周期を求めるために、バーストしている際に示す大強度のデータを取り除いたものに対しても周期解析を行った。具体的には、強度の 50 [Jy] 以上をバーストしている強度であると判断して、時系列データから取り除いた（以下、これを静穏期のデータと呼ぶ）。光度曲線を図 4.25 に、静穏期がよく見えるように強度の低い観測データを拡大した光度曲線を図 4.26 に示す。図 4.27 については全期間のピリオドグラムを青線で、静穏期のピリオドグラムを赤線で示している。ピリオドグラムから導出した周期を表 4.14 に示し、静穏期に対して導出した周期で位相を定義して重ね合わせた折り返し光度曲線を図 4.28 に示している。全データ、静穏期の観測データに対して時間窓ごとに解析した Lomb-Scargle ピリオドグラムを図 4.29、4.30 に示し、導出した周期と時系列の詳細な期間を表 4.15、4.16 に示している。

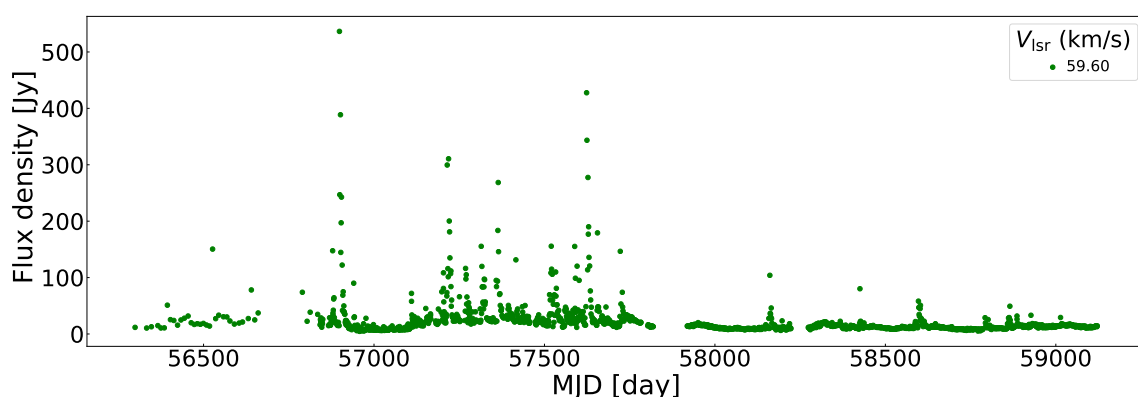


図 4.25 光度曲線。

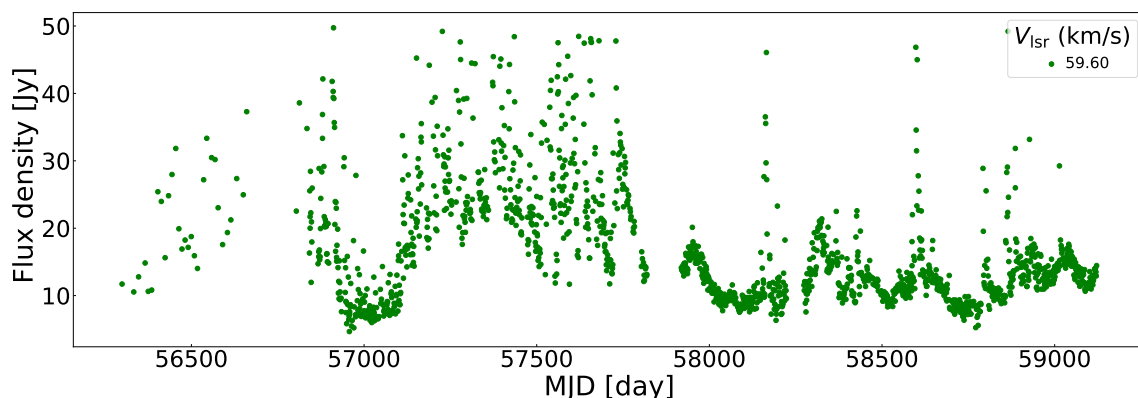


図 4.26 50Jy 以下のデータのみを用いた光度曲線。フレアを起こしていない静穏期のデータに対応している。

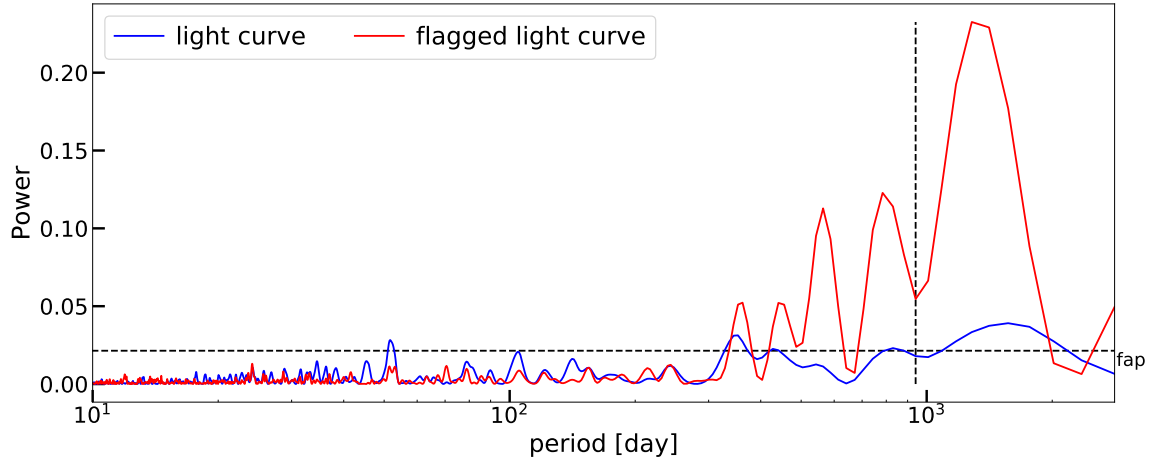


図 4.27 青線が全てのデータを使って得たピリオドグラム、赤線が 50Jy 以上を除いたデータから得たピリオドグラム。

表 4.14 周期変動成分。

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 周期 (誤差 +, -) [day]     | 352.8 (+9.0, -8.6)   |
| 静穏期の周期 (誤差 +, -) [day] | 784.0 (+46.1, -41.3) |

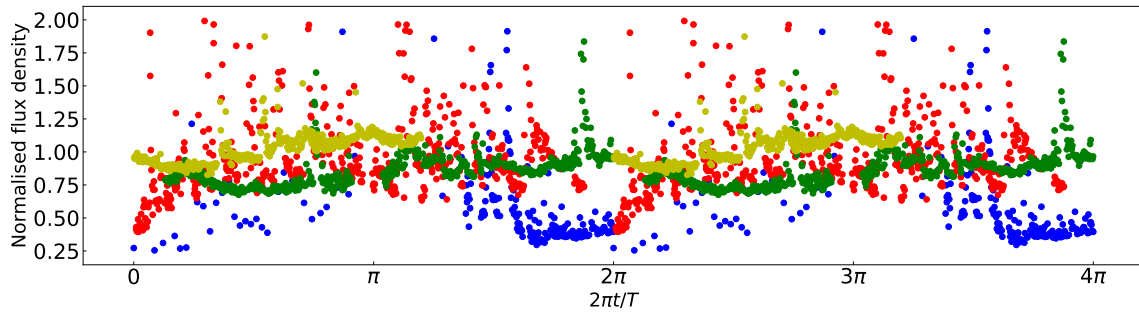


図 4.28  $T=784.0$  [day] とした場合の、静穏期のデータの折り返し光度曲線。



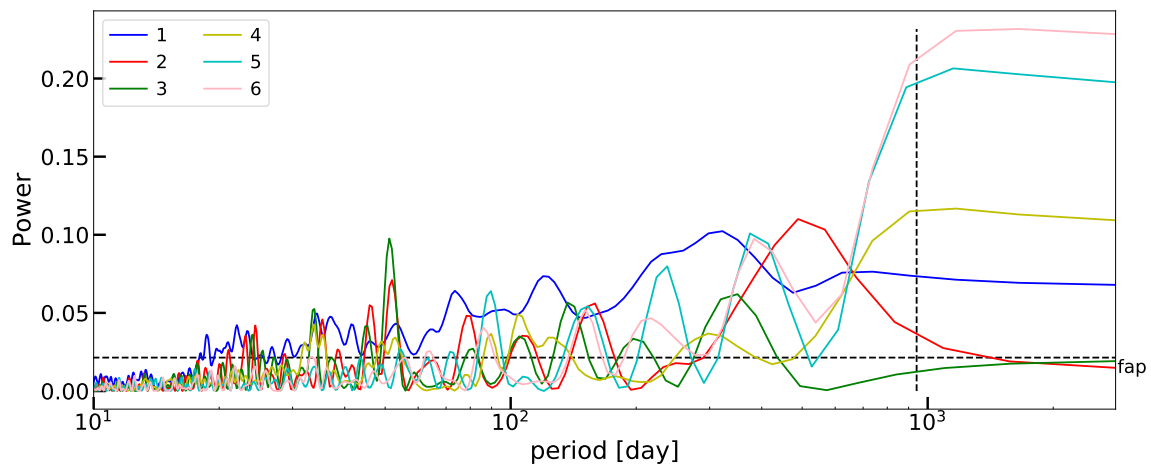


図 4.29 全データの時間窓ごとに得られたペリオドグラム。時間窓の長さを 800 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 400 日とした。

表 4.15 ペリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57099.1097] の周期 [day] | 322.1 |
| 時系列 2 [MJD 56699.1097–57499.1097] の周期 [day] | 488.6 |
| 時系列 3 [MJD 57099.1097–57899.1097] の周期 [day] | 51.2  |
| 時系列 4 [MJD 57499.1097–58299.1097] の周期 [day] | 103.8 |
| 時系列 5 [MJD 57899.1097–58699.1097] の周期 [day] | 374.8 |
| 時系列 6 [MJD 58321.5119–59121.5119] の周期 [day] | 383.5 |

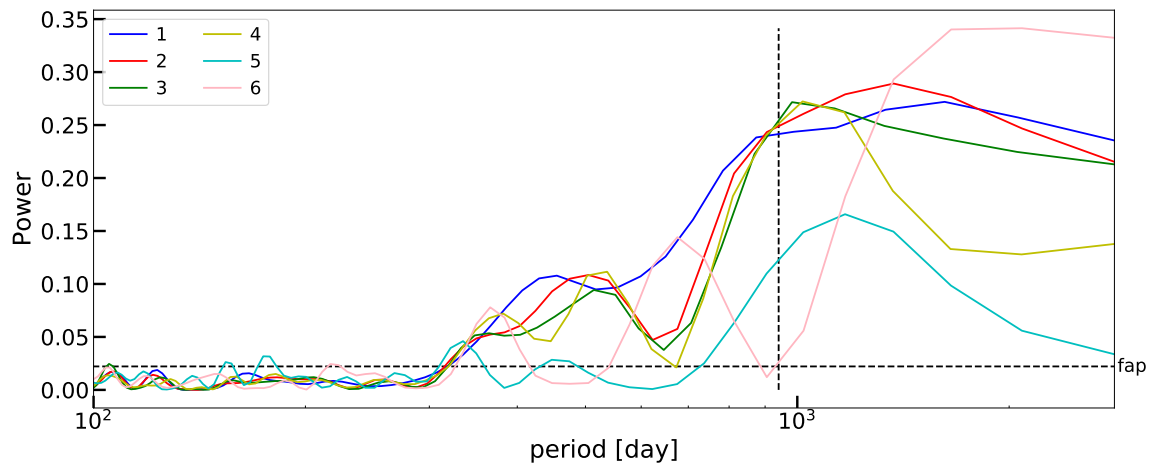


図 4.30 静穏期の時間窓ごとに得られたペリオドグラム。時間窓の長さを 1600 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 200 日とした。

表 4.16 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 56299.1097–57899.1097] の周期 [day] | 455.3 |
| 時系列 2 [MJD 56499.1097–58099.1097] の周期 [day] | 504.9 |
| 時系列 3 [MJD 56699.1097–58299.1097] の周期 [day] | 513.9 |
| 時系列 4 [MJD 56899.1097–58499.1097] の周期 [day] | 536.7 |
| 時系列 5 [MJD 57099.1097–58699.1097] の周期 [day] | 335.0 |
| 時系列 6 [MJD 57521.5119–59121.5119] の周期 [day] | 675.5 |

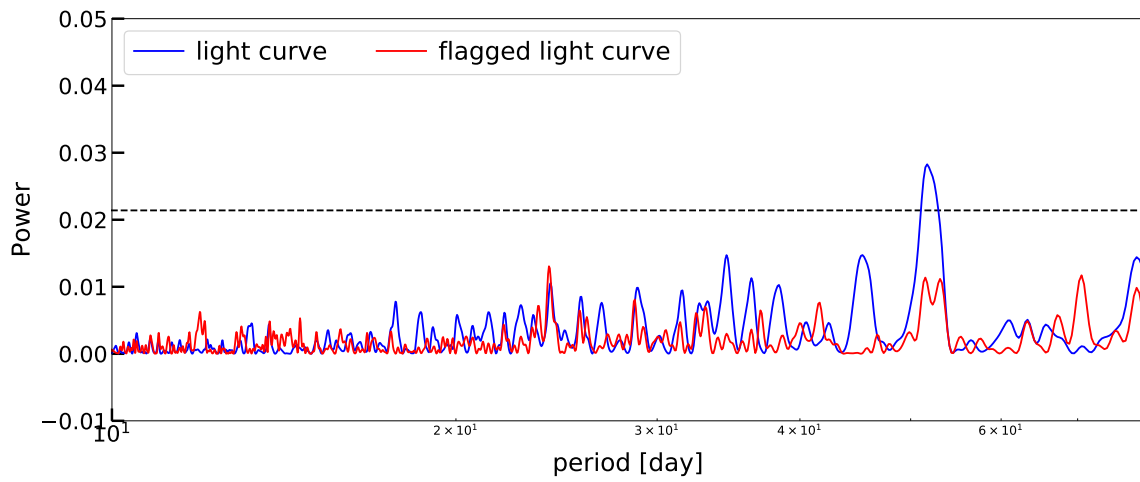


図 4.31 図 4.27 の拡大図。

図 4.27 の周期 10–80 日付近のペリオドグラムを拡大したものを図 4.31 に示す。すべてのデータを用いて解析したペリオドグラム (図 4.31 青線) では顕著なピークが見られているのに対し、バースト成分を除いたデータから作成したペリオドグラムでは (図 4.31 赤線) ではそのようなピークは見られない。全データを使って求めたペリオドグラムで  $\text{fap} < 0.0001$  を満たすピークが見られ、かつ、静穏期データのみを使って求めたペリオドグラムでは  $\text{fap} < 0.0001$  を満たすピークが見られない周期は、バースト成分の周期に対応している可能性がある。したがって、青線で示したペリオドグラムで現れているピークが、バースト成分の周期に対応している可能性がある。このピークは 51.7 日であり、この周期は第 3 期の観測データを周期解析した山口 (2017) で得られた周期 52.2 日に近い。そこで第 3 期 (MJD 57283–57819) と第 4 期 (MJD 57918–59121) の観測期間において周期 51.7 日で折り返し光度曲線を作成した (図 4.32、4.33)。これをみると、第 3 期においてはバーストが厳密には重なっていないものの、およそ 50 日前後で重なっていることがわかる。第 4 期においては、第 3 期のような重なり合いは見られない。さらに第 4 期は第 3 期よりも観測期間が 667 日多いにも関わらず、バーストの点が少なく、バーストの強度が小さくなっている。つまりこの値は第 3 期におけるバースト周期を示していると考えられる。

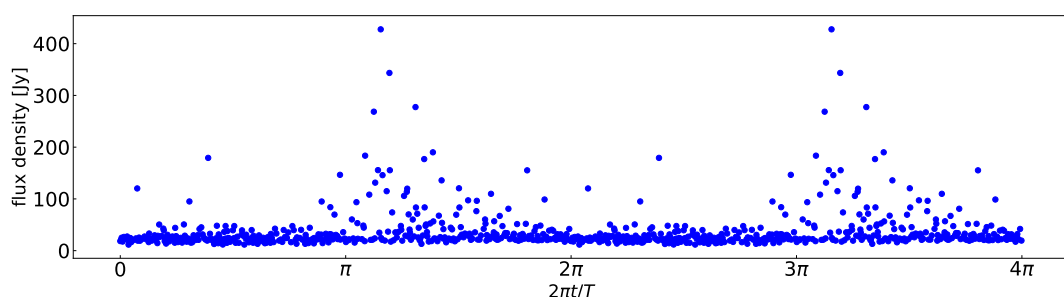


図 4.32 59.60 km/s 成分：第 3 期 (MJD 57283–57819) における  $T=51.7$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。今回の場合は、折り返す周期が多数あるため色は青色で統一している。

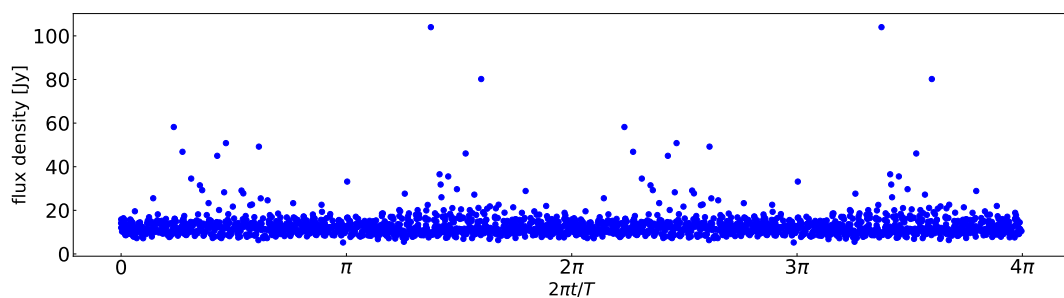


図 4.33 59.60 km/s 成分：第 4 期 (MJD 57918–59121) における  $T=51.7$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。今回の場合は、折り返す周期が多数あるため色は青色で統一している。

## 4.2 日立局とトルン局の観測データを統合した解析結果

次に、日立局とトルン局の観測データを統合して、3.2 節の最後に説明した時間窓ごとの周期解析と同様の解析を行った結果を示す。解析した速度成分は Olech et al. (2019) にある 5 つの速度成分である。表 4.17 はトルン局の観測結果から定義した速度成分で、4.1 節の表 4.1 は日立局の観測結果から定義した速度成分である。日立局の速度成分 58.99 km/s はトルン局の 58.87 km/s と、60.31 km/s は 60.27 km/s と、60.98 km/s は 60.89 km/s と、62.68 km/s は 62.60 km/s と、63.19 km/s は 63.13 km/s と同じ成分と考えた。なお、以下の結果はトルン局の観測結果から定義した速度成分の表記を用いるものとする。各速度成分について、今回の解析に用いた解析データの光度曲線を図 4.34、4.36、4.38、4.40、4.42 に、時系列ごとに周期解析した Lomb-Scargle ピリオドグラムの結果を図 4.35、4.37、4.39、4.41、4.43 に示す。光度曲線の黄色の点は日立局の、青色の点はトルン局の観測データを表している。

ピリオドグラムについては、縦軸、横軸、誤警報確率の閾値 ( $\alpha=0.0001$ ) は 4.1 節と同様であるが、観測期間が日立局とトルン局の観測データを合わせて 4106 日であるため、周期の導出条件 2. の閾値となる周期は 1368 日となる。時間窓ごとに周期解析したピリオドグラムから、導出した周期と時間窓の詳細な期間を表 4.18、4.19、4.20、4.21、4.22 に示す。

表 4.17 : 今回解析した G33.64–0.228 の速度成分。

|                              |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 視線速度 $V_{\text{lsr}}$ [km/s] | 58.87, 60.27, 60.89, 62.60, 63.13 |
|------------------------------|-----------------------------------|

#### 4.2.1 視線速度 58.87 [km/s] 成分

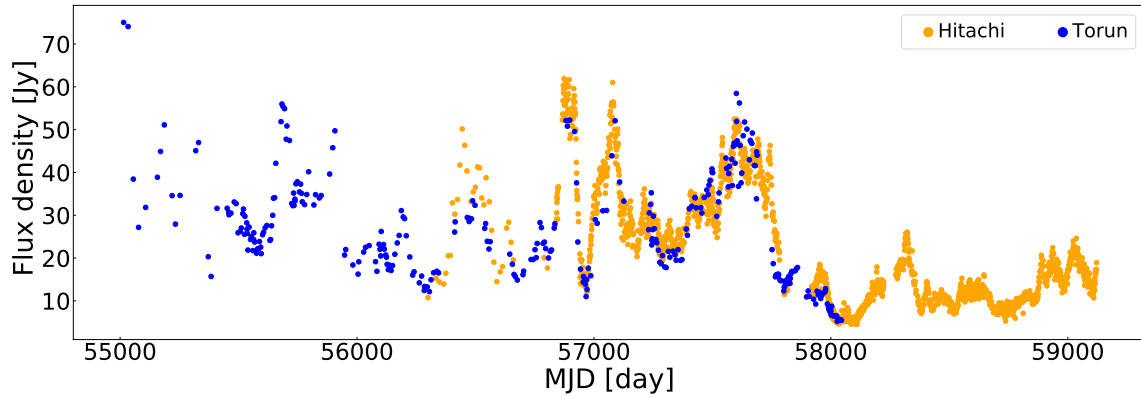


図 4.34 光度曲線。

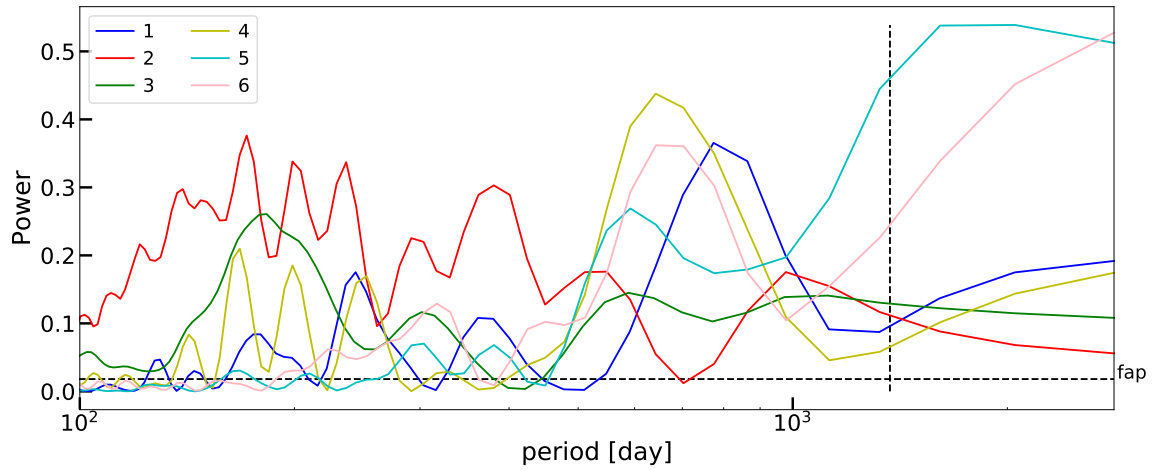


図 4.35 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 1500 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 500 日とした。

表 4.18 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 55014.8999–56514.8999] の周期 [day] | 774.2 |
| 時系列 2 [MJD 55514.8999–57014.8999] の周期 [day] | 171.4 |
| 時系列 3 [MJD 56014.8999–57514.8999] の周期 [day] | 182.8 |
| 時系列 4 [MJD 56514.8999–58014.8999] の周期 [day] | 642.4 |
| 時系列 5 [MJD 57014.8999–58514.8999] の周期 [day] | 591.8 |
| 時系列 6 [MJD 57621.5119–59121.5119] の周期 [day] | 643.0 |

#### 4.2.2 視線速度 60.27 [km/s] 成分

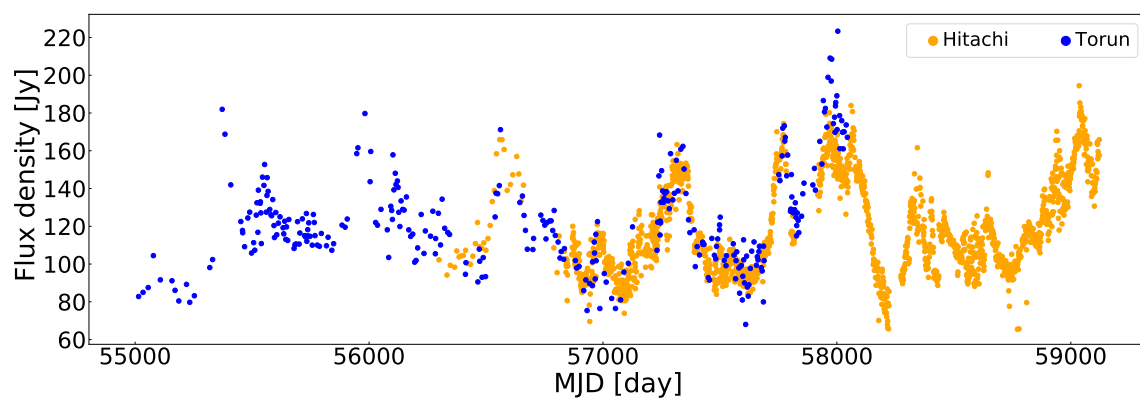


図 4.36 光度曲線。

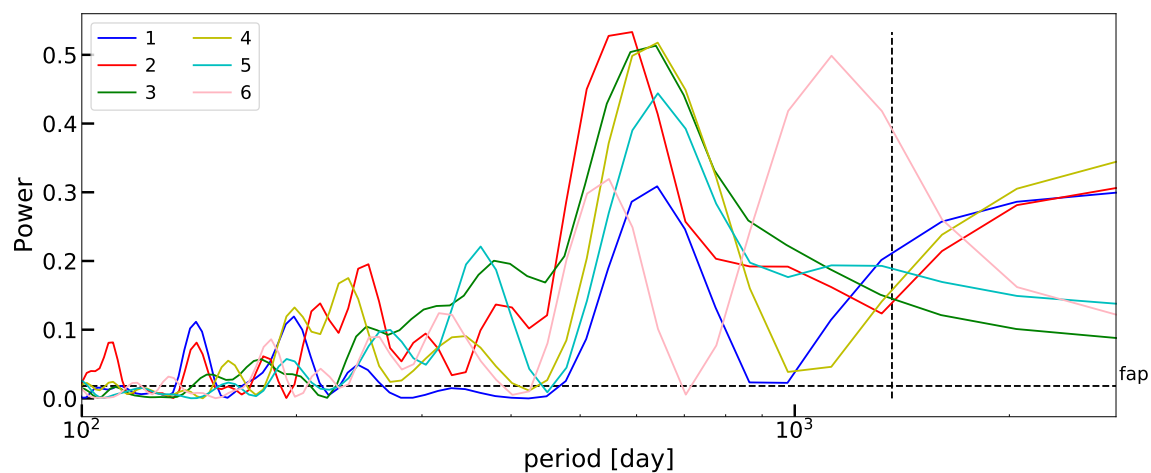


図 4.37 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 1500 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 500 日とした。

表 4.19 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |        |
|---------------------------------------------|--------|
| 時系列 1 [MJD 55014.8999–56514.8999] の周期 [day] | 641.3  |
| 時系列 2 [MJD 55514.8999–57014.8999] の周期 [day] | 591.5  |
| 時系列 3 [MJD 56014.8999–57514.8999] の周期 [day] | 638.7  |
| 時系列 4 [MJD 56514.8999–58014.8999] の周期 [day] | 642.4  |
| 時系列 5 [MJD 57014.8999–58514.8999] の周期 [day] | 642.7  |
| 時系列 6 [MJD 57621.5119–59121.5119] の周期 [day] | 1126.1 |

#### 4.2.3 視線速度 60.89 [km/s] 成分

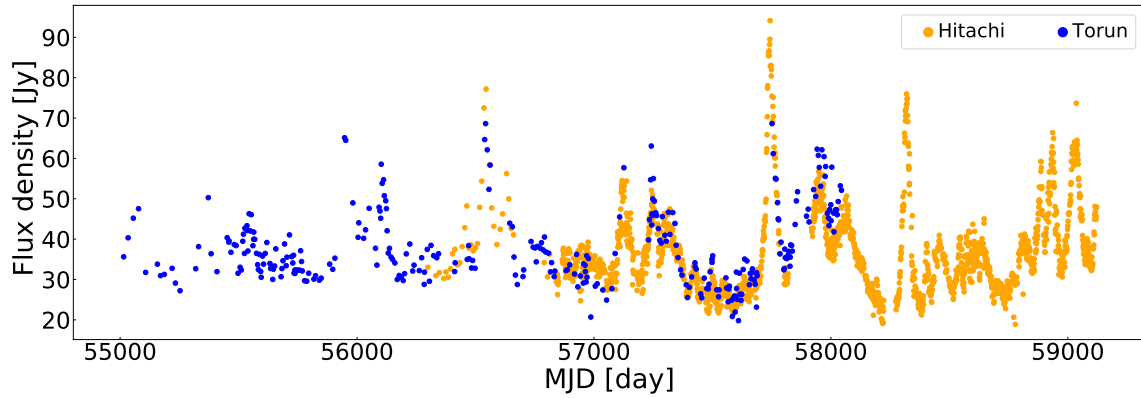


図 4.38 光度曲線。

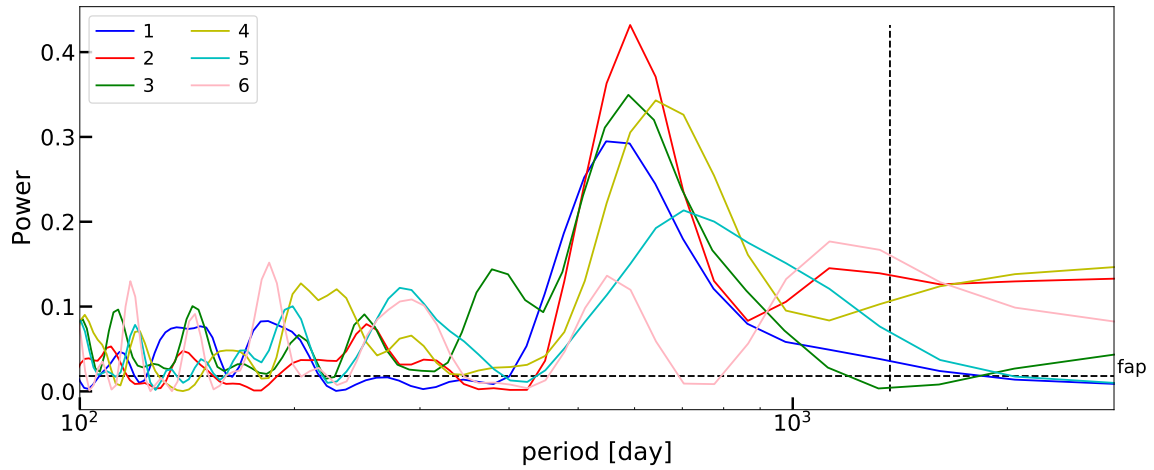


図 4.39 時間窓ごとに得られたペリオドグラム。時間窓の長さを 1500 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 500 日とした。

表 4.20 ペリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |        |
|---------------------------------------------|--------|
| 時系列 1 [MJD 55014.8999–56514.8999] の周期 [day] | 547.3  |
| 時系列 2 [MJD 55514.8999–57014.8999] の周期 [day] | 591.5  |
| 時系列 3 [MJD 56014.8999–57514.8999] の周期 [day] | 588.1  |
| 時系列 4 [MJD 56514.8999–58014.8999] の周期 [day] | 642.4  |
| 時系列 5 [MJD 57014.8999–58514.8999] の周期 [day] | 703.0  |
| 時系列 6 [MJD 57621.5119–59121.5119] の周期 [day] | 1126.1 |

#### 4.2.4 視線速度 62.60 [km/s] 成分

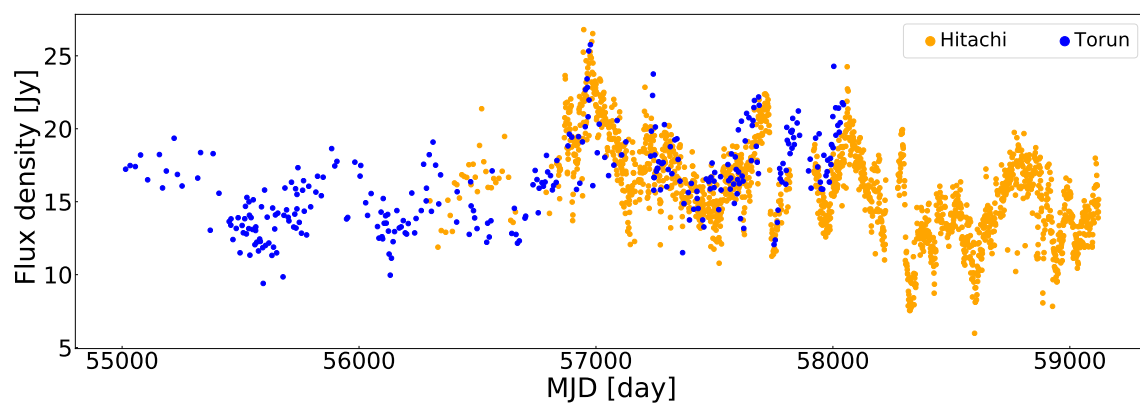


図 4.40 光度曲線。

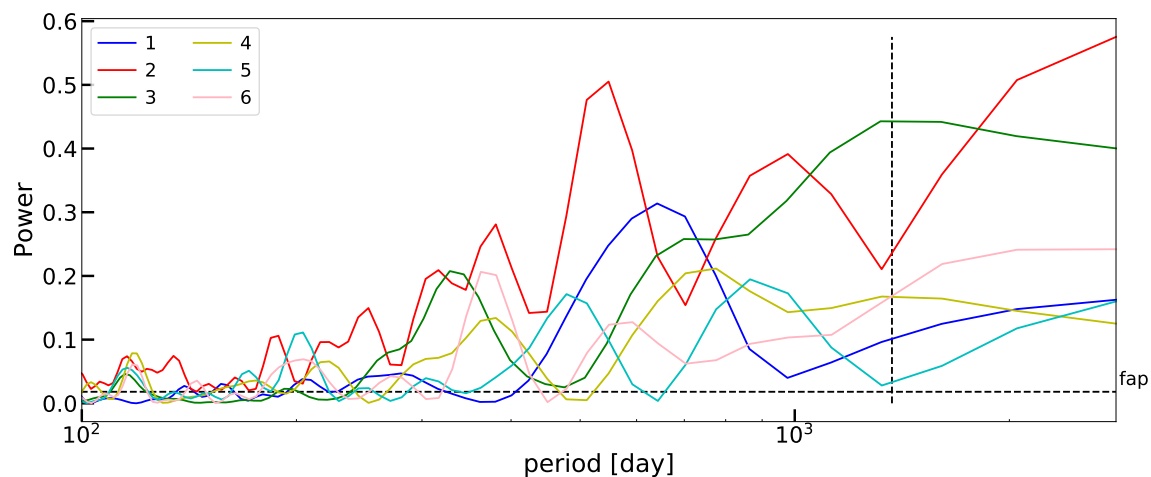


図 4.41 時間窓ごとに得られたペリオドグラム。時間窓の長さを 1500 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 500 日とした。

表 4.21 ペリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |        |
|---------------------------------------------|--------|
| 時系列 1 [MJD 55014.8999–56514.8999] の周期 [day] | 641.3  |
| 時系列 2 [MJD 55514.8999–57014.8999] の周期 [day] | 548.1  |
| 時系列 3 [MJD 56014.8999–57514.8999] の周期 [day] | 1319.1 |
| 時系列 4 [MJD 56514.8999–58014.8999] の周期 [day] | 775.5  |
| 時系列 5 [MJD 57014.8999–58514.8999] の周期 [day] | 865.5  |
| 時系列 6 [MJD 57621.5119–59121.5119] の周期 [day] | 362.8  |



#### 4.2.5 視線速度 63.13 [km/s] 成分

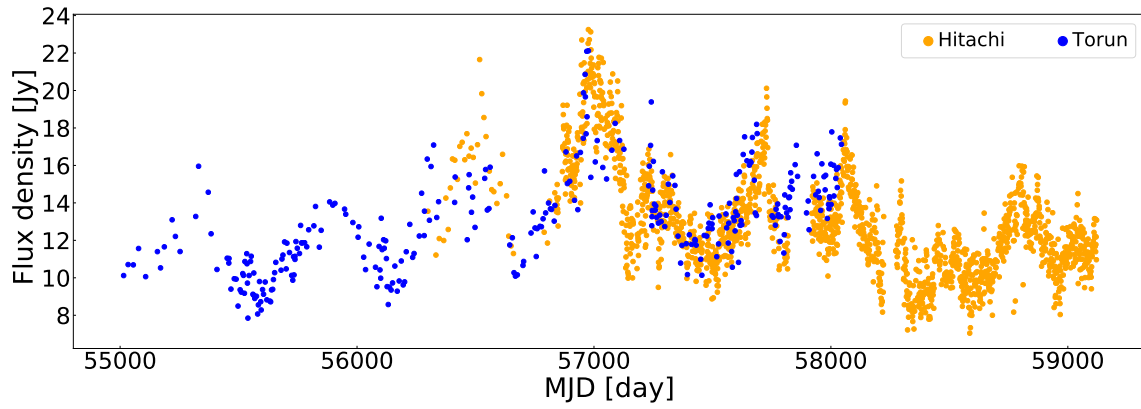


図 4.42 光度曲線。

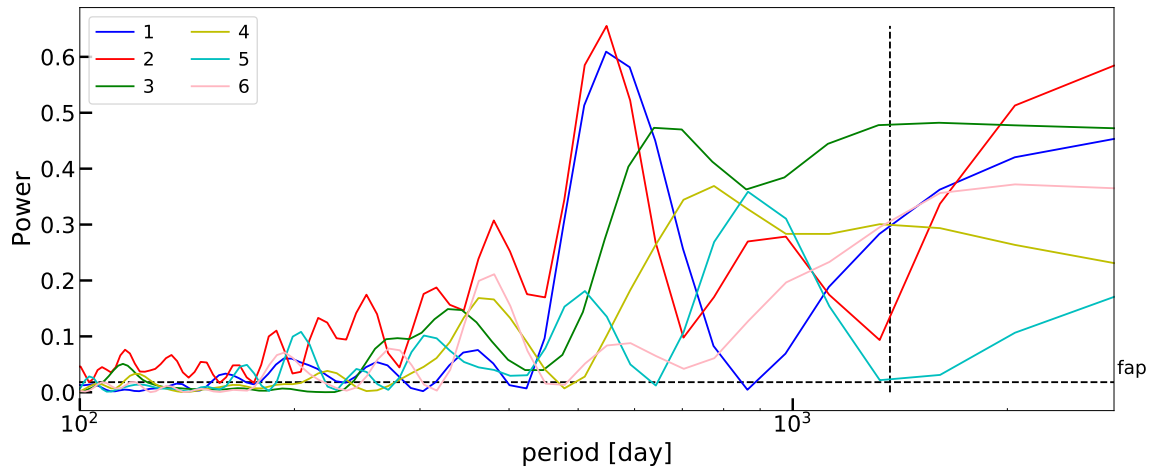


図 4.43 時間窓ごとに得られたピリオドグラム。時間窓の長さを 1500 日、隣あう時間窓同士のずらした日数を 500 日とした。

表 4.22 ピリオドグラムの時系列変化：導出周期。

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 時系列 1 [MJD 55014.8999–56514.8999] の周期 [day] | 547.3 |
| 時系列 2 [MJD 55514.8999–57014.8999] の周期 [day] | 548.1 |
| 時系列 3 [MJD 56014.8999–57514.8999] の周期 [day] | 638.7 |
| 時系列 4 [MJD 56514.8999–58014.8999] の周期 [day] | 775.5 |
| 時系列 5 [MJD 57014.8999–58514.8999] の周期 [day] | 865.5 |
| 時系列 6 [MJD 57621.5119–59121.5119] の周期 [day] | 381.3 |

## 5 考察

### 5.1 日立局で導出した全期間の周期について

今回の全期間 (MJD 56299.1097–59121.5119) における日立局の観測データから得られた周期 (表 4.2、4.4、4.6、4.8、4.10、4.12、4.14) をまとめたものと山口 (2017) の第 3 期の観測データ (MJD 57283–57819) から得られた周期を以下に示す (表 5.1)。

表 5.1 日立局: G33.641–0.228: 周期変動成分。

| 速度成分 [km/s]  | 全期間：周期 (誤差 +, –) [day] | 第 3 期：周期 [day] |
|--------------|------------------------|----------------|
| 58.99        | 705.6 ( + 37.1, –33.6) | 153.0          |
| 59.31        | 588.0 ( + 25.6, –23.5) | 142.8          |
| 59.60 (全データ) | 352.8 ( + 9.0, –8.6)   | 52.2           |
| 59.60 (静穏期)  | 784.0 ( + 46.1, –41.3) | –              |
| 60.31        | 588.0 ( + 25.6, –23.5) | 142.8          |
| 60.98        | 588.0 ( + 25.6, –23.5) | 142.8          |
| 62.68        | 361.8 ( + 9.5, –9.0)   | 126.0          |
| 63.19        | 361.8 ( + 9.5, –9.0)   | 133.9          |

山口 (2017) で得られた周期との違いを考察する。表 5.1 をみると、すべての速度成分で第 3 期データから得られた周期よりも長い周期が導出された。この原因を考える。まず、観測頻度と観測期間より、周期解析においてどの程度の周期が導出可能か見積もる。サンプリング定理より、観測データの間隔 (観測頻度に相当)  $\Delta t$  が等間隔である場合、導出可能な最小周期は  $2\Delta t$  であり、最大周期は観測期間と等しくなる。しかし、周期の導出条件 2. で観測期間に 3 周期以上含まれることという条件を課しているため、導出可能な最大周期は観測期間の  $1/3$  になる。以上を踏まえて、G33.641–0.228 に対して導出可能な周期を、本研究と山口 (2017) で比較したものが表 5.2 である。

表 5.2 日立局: G33.641–0.228: 導出可能周期。

|        | 全期間 (MJD 56299–59121) | 第 3 期 (MJD 57283–57819) |
|--------|-----------------------|-------------------------|
| 観測期間   | 2822 日                | 537 日                   |
| 観測頻度   | ほぼ毎日                  | ほぼ毎日                    |
| 導出可能周期 | 約 2 日–940 日           | 約 2 日–179 日             |

観測頻度は厳密には等間隔ではないため、約 2 日とした。この表をみると、第 3 期における先行研究においては最大の導出可能周期が 179 日となっており、本研究で全期間において導出したような長い周期は導出が不可能であることがわかる。観測期間が長くなったことで導出可能な最大周期が長くなり、長い周期を導出した可能性が考えられる。

次に、Olech et al. (2019) で導出された周期と本研究で得た周期との違いを考察する。Olech et al. (2019) で導出された周期を以下に示す (表 5.3)。ここで、Olech et al. (2019) では誤差をペリオドグラムにおけるピークをガウス関数で近似した結果の半値幅で見積もっている。

表 5.3 Olech et al. (2019) の導出周期 (左) と本研究導出周期 (右) の比較。

| 速度成分 [km/s]  | トルン局：周期 (誤差) [day]   | 日立局：周期 (誤差) [day]       |
|--------------|----------------------|-------------------------|
| 58.87 [km/s] | 674.5 ( $\pm 84.9$ ) | 705.6 (+37.1, $-33.6$ ) |
| 60.27 [km/s] | 608.5 ( $\pm 67.3$ ) | 588.0 (+25.6, $-23.5$ ) |
| 60.89 [km/s] | 586.0 ( $\pm 58.0$ ) | 588.0 (+25.6, $-23.5$ ) |
| 62.60 [km/s] | 497.8 ( $\pm 83.9$ ) | 361.8 (+9.5, $-9.0$ )   |
| 63.13 [km/s] | 534.0 ( $\pm 69.6$ ) | 361.8 (+9.5, $-9.0$ )   |

Olech et al. (2019) においては以下のような議論がされていた。まず、視線速度 58.87 km/s 成分、60.27 km/s 成分、60.89 km/s 成分の 3 成分については、折り返し光度曲線から明確な波形が見えないことから、準周期的なふるまいを示していると結論していた。また、62.60 km/s 成分と 63.13 km/s 成分については、観測期間の中の限られた期間 (MJD 55014 – 57400) において周期的な変動を示している、と結論づけられていた (図 5.1)。

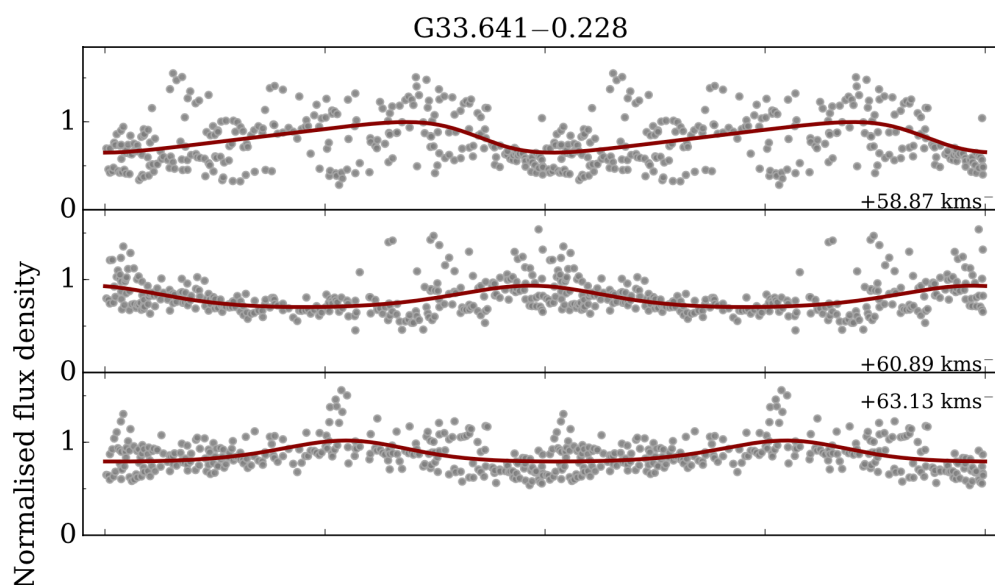


図 5.1 Olech et al. (2019) より 58.87 km/s, 60.89 km/s, 63.13 km/s の折り返し光度曲線。

58.87 km/s 成分、60.27 km/s 成分、60.89 km/s 成分の 3 成分については、本研究で導出した結果が Olech et al. (2019) の導出した周期と誤差の範囲内で一致した。しかし、62.60 km/s 成分と 63.13 km/s 成分については、本研究で導出した周期が Olech et al. (2019) と誤差を考慮しても一致しておらず、100 日以上周期が異なる結果となった。この不一致が生じた可能性としては、Olech et al. (2019) で述べられているように周期性が安定していないため、観測時期に依存して異なる周期が得られたことが考えられる。そこで、周期性があると結論づけられた MJD 55014–57400 の期間のうち、日立局でも観測をしていた MJD 56299–57400 の観測データに対して、Olech et al. (2019) で報告されていた周期で 2 周期分の折り返し光度曲線を作成した (図

5.2、図 5.3)。

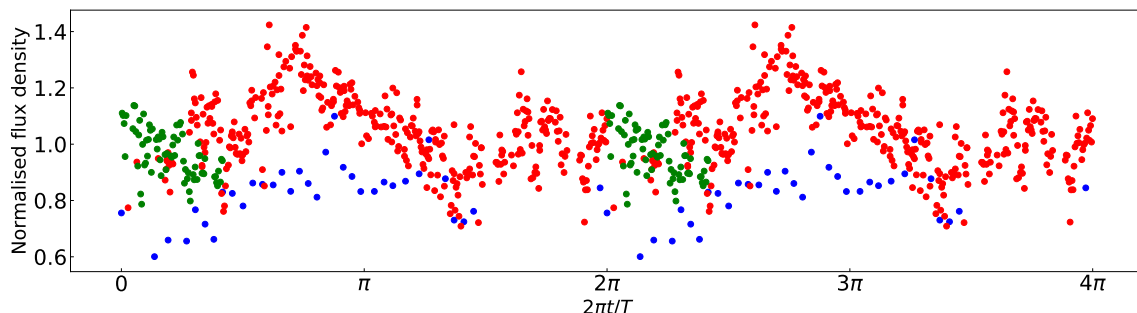


図 5.2 62.60 km/s 成分 :  $T=497.8$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。MJD の小さい方から順に、青、赤、緑の順で光度曲線を重ね合わせている。

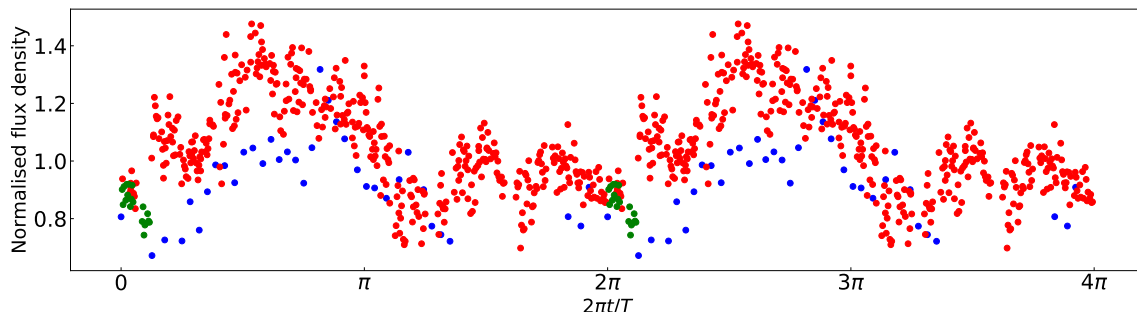


図 5.3 63.19 km/s 成分 :  $T=534.0$  [day] とした場合の、折り返し光度曲線。MJD の小さい方から順に、青、赤、緑の順で光度曲線を重ね合わせている。

図 5.2、図 5.3 をみると、62.60 km/s 成分では光度曲線の重なりはみられないが、63.13 km/s 成分に関しては、2 周期分しかデータがないものの、共通性のある変動パターンが確認できるようにも見える。また日立局で得られた観測データに対するピリオドグラムの時間変化 (表 4.11、4.13) をみると、期間 1(MJD 56299–57099) で解析した場合、確かに 62.60 km/s 成分は 424.7 日、63.13 km/s 成分は 475.2 日と、Olech et al. (2019) で取得された周期と誤差の範囲で一致した。63.13 km/s 成分においては表 4.22 の日立局とトルン局の観測データを統合して、時系列ごとに解析した結果においても、時系列 1(MJD 55014.8999–56514.8999) と時系列 2(MJD 55514.8999–57014.8999) から得られた周期 (それぞれ 547.3, 548.1 日) が Olech et al. (2019) で取得された周期と誤差の範囲で一致している。

以上のことから、特に 63.13 km/s 成分に関して、MJD 55014–57400 の期間において周期的な変動をしていた可能性が確認された。ただしその周期性は安定しておらず、MJD 57400 以降からはその周期性は失われた可能性があると考えられる。

## 5.2 周期変動の安定性について

次に、折り返し光度曲線と時間窓ごとにペリオドグラムを求めた結果から周期の安定性について考察する。今回は日立局の観測データから求めた結果を対象とする。速度成分別に時間窓ごとに導出した周期の算術平均と標準偏差をまとめたものを表 5.4 に示す。

表 5.4 日立: G33.641−0.228: 時間窓ごとに導出した周期の算術平均と標準偏差。

|               |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 速度成分 [km/s]   | 58.99 | 59.31 | 59.60 | 60.31 | 60.98 | 62.68 | 63.19 |
| 算術平均 [day]    | 775.2 | 591.3 | 503.6 | 562.3 | 584.9 | 402.0 | 556.4 |
| 標準偏差 [day]    | 98.6  | 32.4  | 101.3 | 150.6 | 163.6 | 162.1 | 226.2 |
| 標準偏差/算術平均 [%] | 12.7  | 5.47  | 20.1  | 26.8  | 28.1  | 40.3  | 40.7  |

まず初めに、作成した折り返し光度曲線 (図 4.3、4.7、4.11、4.15、4.19、4.23、4.28) からは、59.31 km/s 成分と 60.98 km/s 成分には異なる観測日のデータ間で共通する変動パターンらしき特徴はみられるものの、全体を通して明確に再現性のある変動パターンはみられなかった。加えて表 5.4 をみると、58.99 km/s 成分と 59.31 km/s 成分以外のすべての速度成分の標準偏差/平均の値が 20% 程度かそれ以上になっており、全期間における周期解析から得られた周期が、長期間にわたって安定しているわけではないことが示唆される。この周期の変化が時間軸に沿って一定の傾向を示すのかを検証するためペリオドグラムをみると、そのような傾向は見られなかった。よって今回の結果からは、すべての速度成分において、似たようなタイムスケールで強度の増減が繰り返されているものの、長期間にわたる安定な周期は存在しないと結論された。今後は、モニター観測をさらに継続し、周期の安定性に関するデータを増やすとともに、他の天体についても同様の解析をしていく必要があると考える。

## 6 まとめ

本研究では、大質量星形成領域 G33.641−0.228 の 2012 年 12 月 30 日から 2020 年 10 月 3 日までの日立局モニター観測によって得られた観測データすべてと Olech et al. (2019) による G33.641−0.228 のモニター観測データを用いて、周期解析を行った。周期解析には、Lomb-Scargle 法という不等間隔の離散的データに対しても適用できる解析法を用いた。Lomb-Scargle 法による周期解析に先立つ前処理として、得られたデータのトレンド成分を除去し、全期間の平均値で正規化を行った。視線速度 59.60 km/s (バースト成分) に対しては、バースト成分を取り除き、静穏期のデータに対しても解析を行った。周期解析で得た周期で位相を定義して光度曲線を折り返して重ね合わせた図を作成し、周期性の確からしさを確認した。加えて、全期間の観測データに対して Lomb-Scargle 法により得られた周期が、実際に全期間にわたって安定していたのかを検証するため、観測データを複数の時間窓に区切って周期解析を行った。さらに Olech et al. (2019) における G33.641−0.228 のモニター観測データに対しても、日立局の観測データと系統誤差はないことを確認した上で、日立局と統合したデータに対して観測データを複数の区間に区切って周期解析を行った。

周期解析の結果、日立局の観測データから G33.641−0.228 の 7 つの速度成分の周期 361.8–784.0 日が導出された。速度成分 63.13 km/s 成分に関しては、ある限られた期間においては周期的な変動をしていた可能性があることがわかった。また、今回得られた周期から作成した折り返し光度曲線からは、全体を通して明確に再現性のある変動パターンはみられなかった。さらに時間窓ごとに周期解析したピリオドグラムからは周期のばらつきが大きかったことから、すべての速度成分において、似たようなタイムスケールで強度の増減が繰り返されているものの、長期間にわたる安定な周期は存在しないと結論された。今後は、モニター観測をさらに継続し、周期の安定性に関するデータを増やすとともに、他の天体についても同様の解析をしていく必要があると考える。

## 謝辞

修士論文を執筆するにあたり、たくさんの方々のご指導、ご協力を承りました。この場を借りて心より感謝申し上げます。主指導教員である百瀬先生は、大変親しみやすい先生で、M1のころ参加していたゼミでは分からないことがあると、いつも丁寧に教えてくださいました。また日々の研究の進捗報告においていつもの確かな指示をしてくださり、勉強になることがたくさんありました。最後の修士論文に関しても発表練習や添削など大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。米倉先生にも、私の研究の内容に関してたくさん指導していただきました。添削では細かい部分にも目を通していただき、おかげでよりよい論文をつくることができました。今年はあまりできませんでしたが、定期的な打ち上げも楽しかったです。私は大学院からこの研究室に転入してきましたが、お二人のおかげで素晴らしい二年間を送ることができました。改めて感謝申し上げます。研究員の田辺さんには初期のプログラム作成時に大変お世話になりました。土台を教えていただいたおかげでそのあとの研究にも大変役立ちました。日々の研究についても気にかけてくれたこと、感謝しています。研究員の逢澤さんには短い間だったにも関わらず、研究に関して有益なアドバイスをたくさんいただきました。積極的に他の学生の研究に興味をもっていただき、私の話をたくさん聞いていただいたこと、感謝しています。後輩にもお世話になりました。特に折原くんには大変お世話になりました。学年は一つ下ですがなんでも知っており、ゼミやプログラムなどたくさん教えてもらい、時には相談にものってくれました。折原くんの、問題が解決するまで諦めない姿勢を尊敬しています。今後も活躍する龍さんを期待しています。研究室の同期にも大変恵まれました。平原くんには本当にたくさんのことを教えていただきました。研究などの真面目な質問には真摯に対応してくれたこと、感謝しています。上地くん川上くんは、研究や私生活において大変お世話になりました。研究報告や発表が近くなると、一緒に夜遅くまで頑張ったことはいい思い出です。また私は自分のことで手一杯でしたが二人は定期的に私のことを気にかけて、研究の話を聞いてくれました。大変感謝しています。また吉田くんにもゼミのわからないところなどたくさん教えていただきました。発表の際にもさまざまなアドバイスをいただきました。たくさんご飯にいったこともいい思い出です。この4人と同じ学年を過ごすことができて良かったです。最後にここまで大学に通わせてくれた両親と祖母に感謝したいです。おかげで大変有意義な二年間を送ることができました。この場を借りて感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Araya, E.D. et al. 2010, ApJ, 717, L133
- [2] Fujisawa, K. et al. 2012, PASJ, 64, 17
- [3] Fujisawa, K. et al. 2014, PASJ, 66, 78
- [4] Goedhart, S., Gaylard, M.J. and van der Walt, D.J. 2003, MNRAS, 339, L33
- [5] Goedhart, S., Gaylard, M.J. and van der Walt, D.J. 2004, MNRAS, 355, 553
- [6] Goedhart, S., Gaylard, M.J. and van der Walt, D.J. 2007, in IAU Symp. 242, A  
strophysical Masers and their Environments, 97
- [7] Goedhart, S. et al. 2009, MNRAS, 398, 995
- [8] Goedhart, S. et al. 2014, MNRAS, 437, 1808
- [9] Maswanganye, J.P. et al. 2015, MNRAS, 446, 2730
- [10] Maswanganye, J.P. et al. 2016, MNRAS, 456, 4335
- [11] Menten, K.M. 1991, ApJ, 380, L75
- [12] Olech, M. et al. 2019, MNRAS, 486, 1236
- [13] Schuster, A. 1898, Terrestrial Magnetism. 3, 13
- [14] Sugiyama, K. et al. 2018, in IAU Symp. 336, Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the  
Universe, 45
- [15] Szymczak, M., Hrynek, G. and Kus, A.J. 2000, A&AS, 143, 269
- [16] Szymczak, M. et al. 2011, A&A, 531, L3
- [17] Szymczak, M., Wolak, P. and Bartkiewicz, A. 2014, MNRAS, 439, 407
- [18] Szymczak, M., Wolak, P. and Bartkiewicz, A. 2015, MNRAS, 448, 2284
- [19] The European VLBI Network. <https://www.evlbi.org/telescopes> (2021/2/22 閲覧)
- [20] 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
- [21] 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 13 巻」 日本評論社
- [22] 山口貴大 2017, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [23] 安井靖堯 2015, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文