

修 士 学 位 論 文

6.7GHz メタノールレーザーのモニター観測データ
を用いた突発的強度変動現象の探査

2017 年度
(平成 29 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻
16NM151A
青 木 健 悟

Abstract

I studied 6.7GHz methanol masers in high mass star forming regions. The flux variability of these masers has been observed with long-term monitoring observations, and several types of variation have been identified. Fujisawa et al. (2012) reported the rapid flux raise of maser emission in the high mass star forming region G 033.64-00.21. The maser got brighten by 7times in its flux density in a single day. The rapid raise of flux is called a flare or a burst.

We are observing 6.7GHz methanol maser in high mass star forming regions with the Hitachi 32m radio telescope. The number of observed maser sources is 442. I searched for the rapid raise of flux, similar to the case of G 033.64-00.21 by analyzing the data that are obtained by Hitachi-32m monitoring observations.

論文要旨

大質量星とは太陽の8倍以上の質量を持つ恒星である。大質量星は中・小質量星に比べて存在数が少なくその多くは遠方(>1kpc)に存在する。また、小質量星の寿命(10^{10} 年程度)に対して、典型的な大質量星の寿命は 10^7 年程度と非常に短く、途中の進化段階に対応するサンプル数が少ない。さらに、原始星の周囲を高密度な星間物質が覆っているため可視光での直接観測が困難である。このため、統計的に大質量星を研究することは難しく、その形成過程の理解は現在も不十分である。

大質量星形成領域周辺からは、水、水酸基、メタノール等の分子のメーザー現象が観測されている。特に6.7GHzメタノールメーザーは大質量星形成領域周辺のみから観測されており、大質量星を選択的に研究するための良き探針であると考えられている。この6.7GHzメタノールメーザーは過去の長期間にわたるモニター観測の結果、様々な特徴を持つ強度変動を示すことが分かってきた。Fujisawa et al. (2012)は、2009年に実施された高頻度モニター観測の結果、天体G 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールメーザーの強度が1日で約7倍に増加し指数関数的に減少したことを報告した。本研究はこのような6.7GHzメタノールメーザーの突発的強度変動現象に着目した。

私が所属する電波天文観測研究室では、2012年末から現在にかけて、日立32m電波望遠鏡(日立局)を用いて6.7GHzメタノールメーザーが付随する天体のモニター観測を実施している。観測天体数は442天体である。本研究では、1日で強度が2.0倍以上に増加する強度変動現象を狙い、2012年12月30日から2017年9月6日までに本モニター観測で取得されたデータに対して突発的強度変動現象を探索した。

観測で取得された時系列データを用いて1日あたりの強度変化率を3種類の方法で計算し、得られた値が2.0以上であった天体・速度成分を選出した。解析の結果、37天体を選出した。しかし、本解析には2つの問題点があることが判明した。第1の問題は、本解析で突発現象検出のため設定した閾値2.0に強い根拠はなく、任意性があるという点である。つまり、選出された天体・速度成分が必ずしも普段の強度変動に対して有意に異なる大きな強度変動現象を示したとは限らない。この問題点の改善策として、1日あたりの強度変化率の対数値が平均0、分散 σ^2 の正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うと仮定し、度数分布をガウシアンでフィッティングした結果得られる標準偏差 σ を基準に 10σ 以上に分布を示す天体を探索した。解析の結果、9天体を選出した。第2の問題は、観測頻度が低いことに起因して1日あたりの強度変化率を正しく導出できていない可能性があるという点である。この問題点の改善策として、選出された37天体のうち低頻度観測天体に対して1日間隔での強度変動を捉えるために高萩32m電波望遠鏡(高萩局)を用いた高頻度モニター観測を実施した。高萩局を用いた観測で取得された時系列データに対して1日で強度が2.0倍以上に増加した天体を探索した。解析の結果、1天体を選出した。今後の展望としては、この天体に対し高頻度モニター観測を実施して強度変動の特徴を注意深く監視していく必要がある。

目次

1	序論	2
1.1	大質量星の形成	2
1.2	メーザー	3
1.2.1	メーザー現象	3
1.2.2	6.7GHz メタノールメーザー	4
1.3	G 033.64-00.21 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーの強度変動	5
1.4	突発現象の発生機構	7
1.5	研究目的	8
2	観測	9
2.1	観測概要	9
3	突発現象の解析方法と結果 I	11
3.1	解析方法	11
3.2	結果	12
3.3	考察	16
4	突発現象の解析方法と結果 II	17
4.1	解析方法	17
4.2	結果	21
4.2.1	G 009.62+00.19	22
4.2.2	G 014.23-00.50	24
4.2.3	G 014.33-00.63	26
4.2.4	G 027.86-00.24	28
4.2.5	G 033.64-00.21	30
4.2.6	G 075.76+00.34	34
4.2.7	G 174.19-00.09	36
4.2.8	G 192.60-00.05	38
4.2.9	IRAS22198+6336	50
4.3	考察	62
5	高萩 32m 電波望遠鏡による高頻度モニター観測	63
5.1	観測	63
5.2	解析方法と結果	64
5.2.1	解析方法	64
5.2.2	結果	64
5.3	考察	66
6	まとめ	67
	付録 A 解析対象天体の一覧	69
	参考文献	78

1 序論

1.1 大質量星の形成

本節は「シリーズ現代の天文学6 星間物質と星形成」(福井康雄 他 2008)を参考に記述する。

恒星は大質量星と中・小質量星の2つに大別される。小質量星とは質量が太陽程度以下の恒星である。小質量星の形成過程に関しては観測的な検証が十分に行われており、以下のような標準的シナリオが存在する。

1. 高密度分子雲コアの重力崩壊の結果、内部に非常に小さな原始星が形成される。
2. 原始星は外層の物質の降着により質量を増してさらに成長する。
3. 原始星への質量降着が終わると中心星はケルビン-ヘルムホルツ収縮により内部温度が上昇する。
4. 中心星の水素核燃焼による発熱によって重力収縮が止まり主系列星となる。

小質量星ほど十分な観測的検証は行われてはいないが、太陽の数倍程度の質量を持つ中質量星もこのシナリオで形成されると考えられている。

大質量星とは太陽の8倍以上の質量を持つ恒星である。大質量星は以下に示すような特徴を持つ。

- 表面温度が高いため放出される紫外線量が多く、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させて周囲の物質を圧縮する。
- 進化の終末に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。

このように、大質量星は星間空間や銀河、さらにその進化に物理的・化学的に多大な影響を与える。大質量星形成過程を解明することは銀河規模の現象を理解するために必要不可欠な重要課題である。

しかし、大質量星形成の研究に対してはいくつかの困難が存在する。まず、大質量星は中・小質量星に比べて存在数が少なくその多くは遠方($>1\text{kpc}^1$)に存在する。そして、小質量星の寿命は 10^{10} 年程度であるのに対して、典型的な大質量星の寿命は 10^7 年程度と非常に短く、途中の進化段階に対応するサンプル数が少ない。このため、統計的に進化の過程を調査することが困難である。また、大質量原始星の周囲を高密度な星間物質が覆っているため可視光での直接観測が困難である。さらに、太陽の数十倍以上の質量を持つ大質量星が小質量星と同様な降着進化を長時間続けた結果として形成されないと考えると、次のような問題が発生する。原始星が質量降着によって進化する際、中心星がいつ主系列星になるかは、降着によって質量が増加する期間と中心星が収縮する期間との比較によって求まる。中心星は約 $8M_{\odot}$ で主系列星となる。その後、中心星の寿命 t_* の間、降着率 $\dot{M}$ で質量降着が継続した場合、質量は $\dot{M}t_*$ だけ増加する。大質量星の典型的な寿命は約 10^6 年であり、この間小質量星と同じ質量降着率 $10^{-5}M_{\odot}\text{ yr}^{-1}$ で降着が続いたとしても、数十太陽質量程度までしか成長しない。すなわち、小質量星と同じ質量降着率で長時間にわたって降

¹ 年周視差が1秒角となる距離。 $1\text{pc}=3.09 \times 10^{16}\text{m}$ 。

着進化を続けたとしても、 $100M_{\odot}$ を超えるような非常に大きな質量を持つ大質量星は形成されない。

現在、大質量星形成のシナリオとして次の2つが提唱されている。第1のシナリオは、小質量星よりも質量降着率が大いという仮定で、小質量星と同様に降着進化によって大質量星が形成されるという降着説である。もし、大質量星も小質量星と同様に原始星周りに降着円盤を伴って形成されるとすれば、原始星からみて赤道面方向は非常に光学的に厚く、極方向は比較的光学的に薄くなる。このため円盤方向に対する中心星からの放射は弱くなる。この場合、数十太陽質量以上の大質量星も形成され得る。第2のシナリオは合体説である。これまでの観測により、大質量星の多くは星団の星密度が高い中央部に存在することが確認されている。星団中央部の星密度が高い領域で恒星同士が衝突・合体した結果、大質量星が形成されるというのがこのシナリオである。しかし、いずれの説も十分な観測的証拠が得られておらず、大質量星形成過程に関しては未だに多くの謎が存在する。

1.2 メーザー

1.2.1 メーザー現象

地球大気のように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)であり、二つの準位間の粒子数を n_1, n_2 統計的重率を g_1, g_2 とすると二つの準位間の粒子数の比は運動温度で特徴づけられるボルツマン分布で与えられる。

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

ここで、 T はガス温度である。このような状況では式(1)は必ず1より小さく $n_2/g_2 < n_1/g_1$ となり、したが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。

ところが、宇宙空間は粒子数密度が低く粒子同士の衝突よりも輻射によるエネルギーのやりとりが卓越する場合がある。従って、必ずしも $n_2/g_2 < n_1/g_1$ とはならず、下のエネルギー準位よりも上のエネルギー準位に粒子が多く分布する場合がある。このような状態を反転分布という(図 1)。

反転分布は非常に不安定であり、外部から2準位(level1, level2)間のエネルギー差に相当する周波数の電磁波が入射すると、上の準位にある粒子が下の準位に遷移すると同時に全く同じ位相・周波数をもつ電磁波を誘導放射する。放射された電磁波は別の粒子に入射して誘導放射を起こす。以上の現象が連続的に起きることで電磁波の強度は指数関数的に増幅し、結果として非常に強い放射を出す。これがメーザー(MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)と呼ばれる現象である。メーザー放射は以下の特徴をもつ。

1. 強度が局所熱平衡状態に比べて大きい。
2. 電波源の広がり極めて小さく点状である。
3. 直線または円偏光している。
4. 線幅は熱運動による幅よりも小さい場合が多い。
5. 電波の位相がそろっている。

現在、宇宙空間ではOH、 H_2O 、SiO、 CH_3OH 等の分子がメーザー現象を示すことが確認されている。

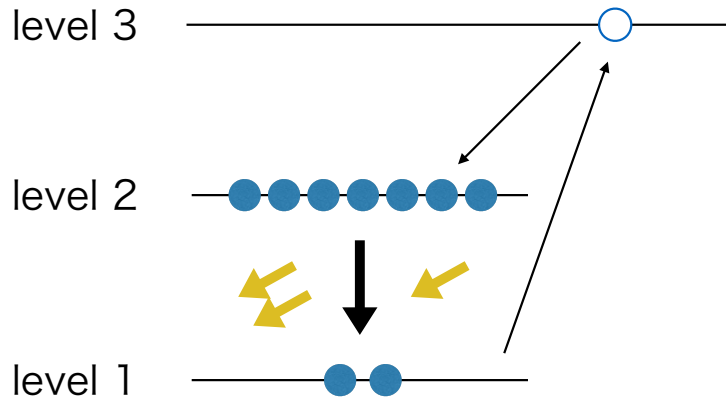


図 1 : 3 準位メーザーの模式図

1. 2. 2 6.7GHz メタノールメーザー

過去の観測の結果、宇宙空間に存在するメタノール分子は様々な周波数帯でメーザーを放射することが確認されている。メタノール分子から 6.7GHz 帯のメーザーが初めて発見されたのは 1991 年である(Menten 1991)。励起状態 $(J,K)=(5,1)$ から低励起状態 $(J,K)=(6,0)$ への A+軸対称による遷移で、その静止周波数は $6668.5192 \pm 0.0008 \text{ MHz}$ である(Breckenridge & Kukolich 1995)。本メーザーは輝度温度が非常に高く ($\sim 10^{10} \text{ K}$)、放射領域のサイズが数 au 程度と非常にコンパクトである(Minier et al. 2002)。また、大質量星形成領域周辺のみが付随することが確認されている(Minier et al. 2003)ため、大質量星形成領域周辺の物理的現象を解明するための良き探針になると考えられている。

1. 2. 3 6.7GHz メタノールメーザーの強度変動

6.7GHz メタノールメーザーの長期間にわたるモニター観測の結果、様々な特徴をもった強度変動を示すことが明らかになってきた。特に周期的な強度変動を示す天体が複数見つかっている(Goedhart et al. 2003, 2004, 2009)。本メーザーは周囲のガスやダストから放射される赤外線により励起されるため、周期的強度変動は現在のところ中心の励起星の変光に起因すると考えられている(Sugiyama et al. 2008; Araya et al. 2010; Szymczak et al. 2011)。

一方で、第1.3節で詳しく述べるが、過去の観測により大質量星形成領域 G 033.64-00.21 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーのフラックス密度が1日で約7倍に増加していることが明らかになった(Fujisawa et al. 2012)。このように、非常に短期間で急激にフラックス密度が変動する現象はフレア現象またはバースト現象とよばれている。G 033.64-00.21からは視線方向に沿って -18 mG の磁場が検出されており(Vlemmings 2008)、突発的強度変動現象(以下、突発現象と称す)は磁気リコネクションという現象に起因すると考えられている。これについては第1.4節で詳しく述べる。

1.3 G 033.64-00.21 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーの強度変動

Fujisawa et al. (2012)では、2009年に実施したモニター観測の結果に基づき、大質量星形成領域G 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールメーザーの突発現象の検出が報告された。本節はFujisawa et al. (2012)に沿ってG 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールメーザーの強度変動の特徴を説明する。

G 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールメーザーは、1999年に実施されたTorun 32m電波望遠鏡を用いた探査によってはじめて観測された(Szymczak et al. 2000)。2009年7月2日(day-of-year;DOY=183)から10月17日(DOY=290)にかけて山口県に位置する32m電波望遠鏡を用いてG 033.64-00.21の単一鏡モニター観測を実施している。観測頻度は1日または2日に1回である。観測日数は62である。山口32m電波望遠鏡によるモニター観測の観測パラメータを表 1に示す。

表 1：観測パラメータ

望遠鏡	山口32m電波望遠鏡
分光点数	4096
速度分解能	0.044 km/s
積分時間	14 min
rmsノイズレベル ² (1 σ)	1.2 Jy

図 2はG 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールメーザーのスペクトルである。縦軸、横軸はそれぞれフラックス密度[Jy]、視線速度[km/s]である。G 033.64-00.21には6つの速度成分が同定されている。

図 3は縦軸にフラックス密度、横軸に2009年1月1日を起点とする日を取り、各速度成分のフラックス密度を時系列でみたときの変動を示した図である。実線で繋がれた黒色の丸点は図 2の成分IIと対応している。DOY 186からDOY 211にかけて成分IIで2回の大きな増光現象を検出している。まず、1回目の変動に関して説明する。7月2日(DOY 183)のフラックス密度は約25Jyである。7月5日(DOY 186)のフラックス密度は約190Jyであり、3日以内のうちに約7倍の増光を示している。減光は指数関数的であり、e-folding time³は5日である。増光時である7月5日(DOY 186)とその直前の観測時7月2日(DOY 183)との間に3日間のデータ欠損があるため、増光期間と増光時のフラックス密度の値には不確実性がある。次に、2回目の変動に関して説明する。7月29日(DOY 210)のフラックス密度は26Jyである。7月30日(DOY 211)のフラックス密度は191Jyであり、1日以内のうちに約7倍の増光を示している。2回目も減光は指数関数的であり、e-folding timeは5日である。

² 観測時の天候や装置起因で発生する雑音。

³ フラックス密度が最大値の 1/e 倍となるまでに要した時間。

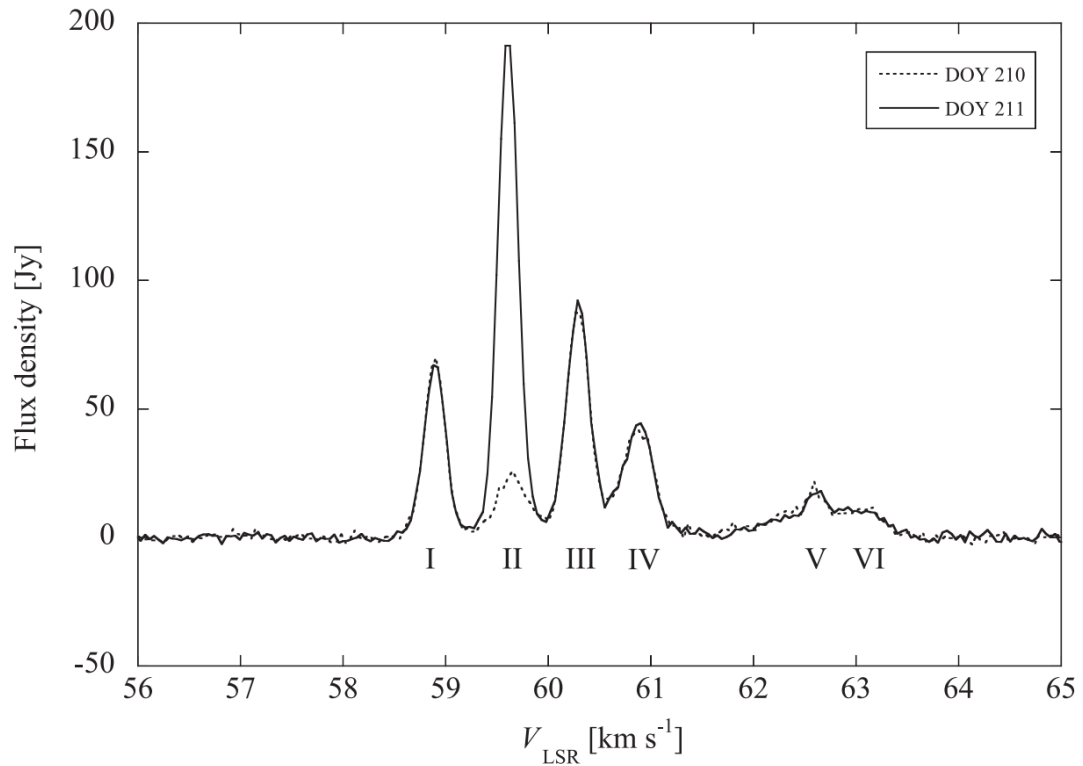


図 2 : G 033.64-00.21 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーのスペクトル。点線は 7 月 29 日(DOY 210)、実線は 7 月 30 日(DOY 211)に取得したスペクトル。成分 II($V_{\text{LSR}}=59.6\text{km/s}$)のフラックス密度のみが 1 日間で 26Jy から 191Jy に増加している。(Fujisawa et al. 2012 より抜粋)

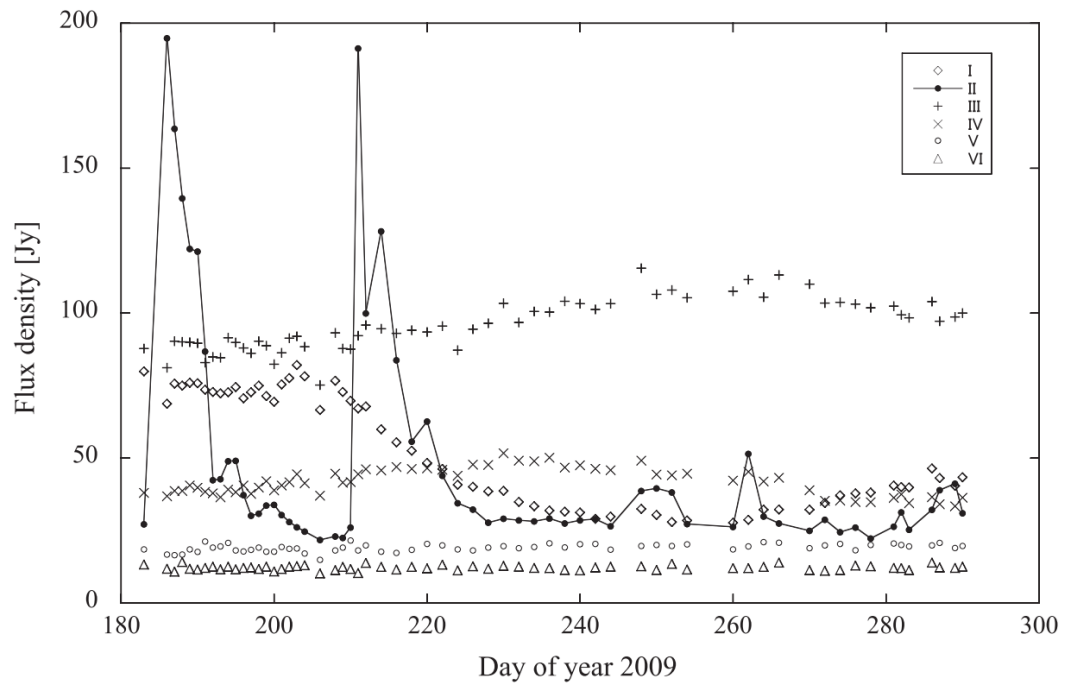


図 3 : G 033.64-00.21 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーの各速度成分(I~VI)のフラックス密度の時間変化の様子。実線で繋がれた黒色の丸点が成分 II($V_{\text{LSR}}=59.6\text{km/s}$)である。(Fujisawa et al. 2012 より抜粋)

1.4 突発現象の発生機構

本節はFujisawa et al. (2012)と「シリーズ現代の天文学10 太陽」を参考に、G 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールメーザーの突発現象について、現在考えられている発生機構を記述する。Fujisawa et al. (2012)では、G 033.64-00.21に見られる突発現象の特徴を自然に説明し得る発生機構として磁気リコネクションを提唱している。

まず、磁気リコネクションについて説明する。磁気リコネクションとは、図 4のように磁力線がつながり変わる現象である。プラズマ内で逆向きの磁力線が押しつけられると、その間で非常に強い電流が流れる。これを電流シートという。電流が流れている限りは逆向きの磁力線はつながり変わらないが、なんらかの理由により電流が散逸すると磁力線はつながりかわる。その結果として生成された新しい磁力線には強い磁気張力が発生してプラズマが激しく加速される。また同時に、ジュール加熱、衝撃波加熱などが起きてプラズマが超高温に加熱される。このように、磁気エネルギーが短時間のうちにプラズマの運動エネルギーや熱エネルギーに変換される。

身近な例として、太陽フレアはこの磁気リコネクションに起因するエネルギー解放現象である。太陽フレアとは、太陽表面に蓄えられた磁場のエネルギーが磁気リコネクションによって短時間のうちに解放される現象である。解放されたエネルギーは熱エネルギー、運動エネルギー、粒子加速エネルギーなどの別の形態のエネルギーに変換され、結果として周囲のガスやダストを加熱する。太陽フレアが発生すると、数分から数時間程度の間にさまざまな波長域の電磁波において増光現象が観測されることが明らかになっている。

以下に、Fujisawa et al. (2012)で議論されているG 033.64-00.21の突発現象の発生機構を示す。

1. 大質量原始星周辺で磁気リコネクションが発生する。
2. 磁気リコネクションにより解放されたエネルギーが周囲のガスやダストを加熱する。
3. 加熱されたダストから放射される赤外線によって周囲に存在するメタノール分子が励起され、反転分布が強められる。
4. メタノール分子ガスから瞬間的に非常に強いメーザー放射が発生する。

前述の通り、G 033.64-00.21からは視線方向に沿って -18mG の磁場が観測されている。Fujisawa et al. (2012)では、メーザーのフラックス密度を7倍増加させるのに必要とされるエネルギーと、この磁場により生成可能なエネルギーとを比較することで、本発生機構の妥当性を検証している。以下に、その計算を示す。

理論的には、周囲のダスト温度が 100K 上昇すればメーザーのフラックス密度が7倍に増加すると計算されている(Cragg et al. 2005)。メーザー放射領域を数密度 $n_{\text{H}_2} = 10^6\text{cm}^{-3}$ の水素分子で構成された半径 $r = 5\text{au}^4$ の球であると仮定し、この領域のガスの温度が $\Delta T = 100\text{K}$ 上昇する場合を考える。水素分子1個あたりの質量は $m_{\text{H}_2} = 3.3 \times 10^{-24}\text{g}$ である。水素の比熱は $c_{\text{H}_2} = 10^4\text{J K}^{-1}\text{kg}^{-1}$ なので、必要となるエネルギー E_1 は以下の通りである。

$$E_1 = \frac{4\pi r^3}{3} \times n_{\text{H}_2} \times m_{\text{H}_2} \times c_{\text{H}_2} \times \Delta T = 5.8 \times 10^{27}\text{J} \quad (2)$$

次に、 -18mG の磁場によって生成可能なエネルギー量を計算する。 $|B| = 18\text{mG}$ の磁場の単位体積あたりのエネルギー u は以下の通りである。

⁴ 天文単位。地球と太陽との平均距離。 $1\text{au} = 1.5 \times 10^{11}\text{m}$ 。

$$u = \frac{|B|^2}{2\mu_0} = 1.3 \times 10^{-6} \text{ J m}^3 \quad (3)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率($\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ m kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$)である。したがって、レーザー放射領域の磁場によって生成可能エネルギー E_2 は以下になる。

$$E_2 = \frac{4\pi r^3}{3} \times u = 2.3 \times 10^{30} \text{ J} \quad (4)$$

磁場によって生成可能なエネルギー E_2 がレーザーのフラックス密度を7倍に増加するのに必要なエネルギー E_1 を上回るので、磁場によるエネルギー解放現象により突発現象は理論上発生し得る。

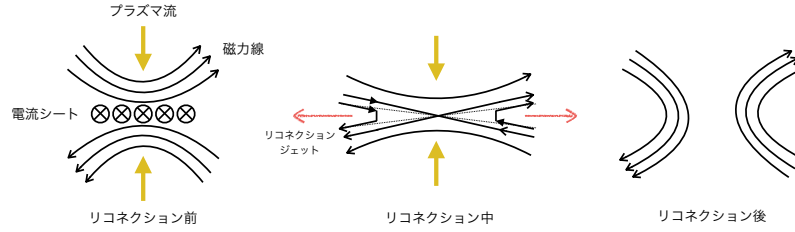


図 4：磁気リコネクションの概略図(「シリーズ現代の天文学 10 巻 太陽」を参照)

1.5 研究目的

前述の通り、2009年に実施された山口32m電波望遠鏡を用いたモニター観測の結果、G 033.64-00.21に付随する6.7GHzメタノールレーザーの突発現象が検出された。G 033.64-00.21からは磁場が検出されており、本天体の突発現象は大質量星形成領域周辺で発生する磁気リコネクションに起因すると考えられている。ただし、同様の突発現象がすべて磁気リコネクションによるエネルギー解放現象に起因するのか、あるいは別の機構に起因する可能性があるのかを検証するためには、突発現象を示す天体を統計的に調査する必要がある。しかし、G 033.64-00.21に見られるような突発現象を示す天体は本天体以外に過去の報告例がなく、統計的な調査を実施するには対象天体数が不足しているという問題がある。

私が所属する電波天文観測研究室では、2012年12月30日から現在にかけて、日立市に位置する32m電波望遠鏡(以下、日立局と称す)を使用して6.7GHzメタノールレーザーが付随する天体のモニター観測を実施している。天体数は442天体である。本モニター観測の概要については第2.1節で述べる。そこで本研究では、これらの天体の中にG 033.64-00.21に見られるような突発現象を示す天体があるか探査した。本研究では1日でフラックス密度が2.0倍以上に増加する強度変動現象を狙い、いくつかの解析方法を試してその検出を試みた。突発現象を示す天体を統計的に調査することで、突発現象がどのような発生機構に起因する自然現象なのかを明らかにできると予想した。

2 観測

2.1 観測概要

前述の通り、2012年12月30日から現在にかけて、日立市に位置する32m電波望遠鏡を使用して6.7GHzメタノールメーザーが付随する天体のモニター観測を実施している。表 2に本観測で使用した電波望遠鏡の観測パラメータを示す。観測の対象天体は、赤緯-30度以北に位置する442天体である。本モニター観測は大きく4回に分けて実施しており、それぞれ名称を第1期、第2期、第3期、第4期としている。観測頻度はほとんどの天体が第1期と第2期で約9日に1回、第3期と第4期で約4日に1回である。表 3に本モニター観測の実施概要を示す。なお、強度較正等の目的で表 3に示した観測頻度とは異なる頻度で観測を行っている天体もあり、これらの天体に関しては表 4にまとめた。

表 2：観測パラメータ

望遠鏡	日立32m電波望遠鏡
ビームサイズ	4.6 分角
観測周波数	6664 - 6672 MHz
分光点数	8192 点
速度分解能	0.044 km/s
積分時間	300 秒
検出感度(3σ)	0.9 Jy 程度

表 3：モニター観測の実施概要

名称	期間	頻度
第1期	2012/12/30 - 2014/01/10	約9日に1回
第2期	2014/05/07 - 2015/08/08	約9日に1回
第3期	2015/09/18 - 2017/03/07	約4日に1回
第4期	2017/06/14 - 現在	約4日に1回

表 4 : 観測頻度が表 3 に示した頻度とは異なる天体。

天体名	備考
G 000.16-00.44	第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
G 007.63-00.10	第 3 期の途中 2016/11/06 (MJD:57698)以降、ほぼ毎日観測。
G 009.62+00.19	すべての期間でほぼ毎日観測。
G 010.20-00.34	第 3 期の途中 2016/10/14/ (MJD:57675)頃以降、約 2 日に 1 回観測。
G 012.02-00.03	第 1 期は約 9 日に 1 回、第 2 期,第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
G 013.17+00.06	第 3 期の途中 2016/09/25 (MJD:57656)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 014.23-00.50	第 1 期は約 9 日に 1 回、第 2 期,第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
G 014.33-00.63	第 3 期の途中 2016/07/14 (MJD:57583)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 019.75-00.12	第 3 期の途中 2016/06/25 (MJD:57564)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 023.80+00.40	第 3 期の途中 2016/09/25 (MJD: 57656)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 024.93+00.08	第 3 期の途中 2016/09/25 (MJD: 57656)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 033.40+00.01	第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期は約 2 日に 1 回観測。
G 033.64-00.21	第 2 期の途中 2014/07/03 (MJD:56841)頃以降、ほぼ毎日観測。
G 034.39+00.24	第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期は約 2 日に 1 回観測。
G 035.79-00.17	第 3 期の途中 2016/06/25 (MJD:57564)頃以降、約 2 日に 1 回観測。
G 052.66-01.09	第 3 期の途中 2016/09/26 (MJD: 57657)頃以降、ほぼ毎日観測。
G 069.52-00.97	すべての期間でほぼ毎日観測。
G 174.19-00.09	第 1 期は約 9 日に 1 回、第 2 期,第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
G 183.34-00.59	第 3 期の途中 2016/10/19 (MJD:57680)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 192.60-00.05	第 3 期の途中 2015/11/13 (MJD:57339)頃以降、ほぼ毎日観測。
G 196.45-01.68	第 2 期の途中 2014/09/23 (MJD:56923)頃以降、ほぼ毎日観測。
G 213.70-12.60	第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
IRAS22198+6336	すべての期間でほぼ毎日観測。

3 突発現象の解析方法と結果 I

3.1 解析方法

まず、突発現象を定量的に定義する必要がある。本研究では、1 日でフラックス密度が 2.0 倍以上に増加する強度変動現象の検出を狙った。したがって、1 日あたりの強度変化率が $2.0[\text{day}^{-1}]$ 以上となる強度変動現象を突発現象と定義した。以下に突発現象の解析の流れを示す。

- i. 日立局のモニター観測によって取得された時系列データから 1 日あたりの強度変化率を計算によって求める。
- ii. 計算によって求めた 1 日あたりの強度変化率が $2.0[\text{day}^{-1}]$ 以上であった場合その強度変動現象を突発現象として選出する。

解析には日立局のモニター観測によって得られた時系列データのうち、観測日・rms ノイズレベル・フラックス密度の情報を扱った。以下では、ある天体・速度成分に関して 1 日あたりの強度変化率を計算する方法について述べる。

観測によって得られた時系列データのうち最も古いデータ($i = 1$)から数えて i 番目のデータの観測日, rms ノイズレベル, フラックス密度をそれぞれ $t_i[\text{day}]$, $\sigma_i[\text{Jy}]$, $S_i[\text{Jy}]$ と表記する($i = 1, 2, \dots, N_0$)。ただし、 N_0 は日立局のモニター観測で取得された時系列データのサンプル数であり天体によって異なる。本研究では 1 日あたりの強度変化率を 3 種類の方法で計算した。以下の式(5), 式(6), 式(7)は、すべての時系列データのうち任意の 2 つのデータ t_i , σ_i , S_i と t_{i+1} , σ_{i+1} , S_{i+1} を用いて 1 日あたりの強度変化率を計算する方法である。

まず 1 つ目の方法は、 t_{i+1} の 1 日前までフラックス密度が S_i のまま一定で 1 日でフラックス密度が S_i から S_{i+1} に増加すると仮定し、1 日あたりの強度変化率 $R1[\text{day}^{-1}]$ を式(5)により計算した。なお、天体の放射強度 S に対して観測時の雑音に起因して $\pm 1\sigma$ 程度の誤差が発生する可能性があり、1 日あたりの強度変化率を計算する際に雑音に起因する変動を考慮し、 S に対して 1σ をそれぞれ加減算した。

$$R1_{i+1} \equiv \frac{S_{i+1} - \sigma_{i+1}}{S_i + \sigma_i} \quad (5)$$

次に 2 つ目の方法は、 t_i から t_{i+1} にかけて毎日一定の割合でフラックス密度が S_i から S_{i+1} に増加すると仮定し、1 日あたりの強度変化率 $R2[\text{day}^{-1}]$ を式(6)により計算した。

$$R2_{i+1} \equiv \left(\frac{S_{i+1} - \sigma_{i+1}}{S_i + \sigma_i} \right)^{\frac{1}{\Delta t}} \quad (6)$$

ここで、 Δt は 2 つのデータの観測間隔 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ である。

最後に 3 つ目の方法は、 t_i から t_{i+1} にかけてフラックス密度が S_i から S_{i+1} に増加すると仮定し、1 日あたりの強度変化率 $R3[\text{day}^{-1}]$ を式(7)により計算した。式(7)の右辺を見て分かる通り、 $R3$ はフラックス密度の比 S_{i+1}/S_i を観測間隔 Δt で割った値である。

$$R3_{i+1} \equiv \frac{(S_{i+1} - \sigma_{i+1}) / (S_i + \sigma_i)}{\Delta t} \quad (7)$$

式(5), 式(6), 式(7)に示した計算式で、最も古いデータ($i = 1$)を起点として最も新しいデータ($i = N_0$)まで順に、隣り合う 2 つのデータを用いて 1 日あたりの強度変化率 $R1_i$, $R2_i$, $R3_i$ をそれぞれ計算した。これにより 1 日あたりの強度変化率 $R1_i$, $R2_i$, $R3_i$ の時系列データが求まる。ただし、天体から放射されるフラックス密度 S が rms ノイズレベルに対して検出限界 3σ 以下であった場合は 3σ の値を S の値として用いた。また、本研究では 1 日未満の強度変動は無視した。

以上の計算を、日立局でモニター観測しているすべての天体に対して実施した。天体・速度成分ごとに得られた 1 日あたりの強度変化率 $R1_i$, $R2_i$, $R3_i$ の時系列データを調査して、2.0 以上の数値があった場合にその天体・速度成分を選出した。付録 A に本解析を実施した天体をまとめた。解析で扱ったデータは 2012 年 12 月 30 日から 2017 年 9 月 6 日までに日立局のモニター観測で取得したデータである。

3.2 結果

まず、式(5)で定義した計算方法によって求めた 1 日あたりの強度変化率 $R1$ の時系列データを調査した結果を示す。解析の結果、37 天体を選出した。表 5 に選出した天体・速度成分の一覧を示す。ただし、同じ天体・同じ速度成分で突発現象を複数回検出した場合、表中の $R1$ の値は検出したすべての値のうち最大値のみを表示している。

表 5：解析の結果、選出した天体・速度成分の一覧。

天体名	視線速度[km/s]	検出回数	突発現象を検出した観測シーズン	$R1[\text{day}^{-1}]$
G 005.89-00.39	0.64	1	第 1 期	2.1
G 009.21-00.20	45.53	1	第 2 期	2.4
	4.99	3	第 2 期, 第 3 期	3.4
G 009.62+00.19	8.09	2	第 3 期	3.5
	8.75	1	第 3 期	3.5
G 010.20-00.34	1.04	4	第 3 期	2.9
	7.38	1	第 1 期	2.5
G 011.49-01.48	7.70	1	第 1 期	2.8
	14.65	1	第 1 期	2.1
	32.76	1	第 3 期	2.3
G 012.88+00.48	34.68	2	第 1 期, 第 3 期	2.3
	36.52	2	第 2 期, 第 3 期	2.1
	38.20	8	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期	3.4
G 014.23-00.50	25.29	19	第 2 期, 第 3 期, 第 4 期	7.5
G 014.33-00.63	21.54	2	第 2 期	3.2

天体名	視線速度[km/s]	検出回数	突発現象を検出した観測シーズン	$R1[\text{day}^{-1}]$
G 019.36-00.03	25.29	1	第 2 期	2.2
	27.25	1	第 2 期	2.2
G 022.36+00.06	80.86	1	第 3 期	2.1
G 025.38-00.18	61.88	1	第 1 期	2.4
G 027.86-00.24	20.18	1	第 1 期	2.2
G 028.39+00.08	72.58	1	第 1 期	2.3
	70.37	1	第 2 期	2.4
G 030.70-00.07	91.40	1	第 3 期	2.3
	91.79	1	第 3 期	2.5
G 031.04+00.36	81.82	1	第 2 期	2.2
G 033.64-00.21	59.30	9	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期	28.0
	59.61	44	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期	34.5
G 033.74-00.15	59.67	7	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期	9.2
G 034.39+00.24	55.67	2	第 2 期, 第 3 期	2.0
G 035.20-00.74	29.98	1	第 2 期	2.2
	36.68	4	第 2 期, 第 3 期	2.6
G 035.79-00.17	58.84	3	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期	2.9
	61.54	2	第 1 期	2.1
	62.02	1	第 1 期	2.0
G 036.70+00.09	53.65	2	第 1 期	2.7
	55.07	2	第 1 期, 第 2 期	2.6
	62.06	1	第 2 期	2.5
G 037.47-00.11	54.51	2	第 1 期, 第 3 期	2.5
G 039.10+00.48	17.67	1	第 4 期	2.9
G 040.62-00.14	31.18	1	第 4 期	2.0
G 045.47+00.13	59.67	1	第 1 期	2.4
G 045.49+00.13	59.67	1	第 1 期	2.6
G 049.03-01.06	37.39	1	第 1 期	2.1
G 049.60-00.25	62.09	1	第 3 期	2.1
G 075.76+00.34	-9.38	1	第 1 期	2.2

天体名	視線速度[km/s]	検出回数	突発現象を検出した観測シーズン	$R1[\text{day}^{-1}]$
G 078.10+03.64	-6.66	2	第 1 期, 第 2 期	2.8
	-6.09	1	第 1 期	2.1
	-5.01	1	第 2 期	2.4
G 123.05-06.31	-28.15	1	第 2 期	2.2
G 183.34-00.59	-15.18	1	第 2 期	2.2
G 189.78+00.34	3.84	1	第 1 期	2.5
	4.25	1	第 1 期	3.8
	5.49	1	第 1 期	2.1
	5.62	1	第 1 期	2.2
G 192.60-00.05	1.22	2	第 2 期	2.9
	3.07	2	第 3 期	3.3
	3.30	2	第 3 期	3.3
	5.87	1	第 3 期	3.3
G 232.62+00.99	22.32	1	第 2 期	2.2
	22.87	1	第 2 期	2.2
G 351.25+00.65	-10.35	3	第 3 期	3.1
IRAS22198+6336	-16.89	7	第 2 期, 第 3 期	4.1
	-15.51	2	第 3 期, 第 4 期	2.5
	-10.89	1	第 3 期	3.5
	-9.19	32	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期, 第 4 期	8.8
	-8.49	50	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期, 第 4 期	13.6
	-7.31	63	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期, 第 4 期	33.6

次に、式(6)で定義した計算方法によって求めた1日あたりの強度変化率 $R2$ の時系列データを調査した結果を示す。解析の結果、3天体を選出した。表6に選出した天体・速度成分の一覧を示す。ただし、同じ天体・同じ速度成分で突発現象を複数回検出した場合、表中の $R2$ の値は検出したすべての値のうち最大値のみを表示している。

表6：解析の結果、選出した天体・速度成分の一覧。

天体名	視線速度[km/s]	検出回数	突発現象を検出した観測シーズン	$R2[\text{day}^{-1}]$
G 014.23-00.50	25.29	14	第2期, 第3期, 第4期	5.3
G 033.64-00.21	59.30	6	第2期, 第3期	28.0
	59.61	34	第2期, 第3期	34.5
IRAS22198+6336	-16.89	5	第3期	4.1
	-15.51	2	第3期, 第4期	2.5
	-9.19	25	第2期, 第3期, 第4期	3.4
	-8.49	38	第1期, 第2期, 第3期, 第4期	9.6
	-7.31	54	第1期, 第2期, 第3期, 第4期	5.7

最後に、式(7)で定義した計算方法により求めた1日あたりの強度変化率 $R3$ の時系列データを調査した結果を示す。解析の結果、3天体を選出した。表7に選出した天体・速度成分の一覧を示す。ただし、同じ天体・同じ速度成分で突発現象を複数回検出した場合、表中の $R3$ の値は検出したすべての値のうち最大値のみを表示している。

表7：解析の結果、選出した天体・速度成分の一覧。

天体名	視線速度[km/s]	検出回数	突発現象を検出した観測シーズン	$R3[\text{day}^{-1}]$
G 014.23-00.50	25.29	15	第2期, 第3期, 第4期	5.3
G 033.64-00.21	59.30	6	第2期, 第3期	28.0
	59.61	34	第2期, 第3期	34.6
IRAS22198+6336	-16.89	1	第3期	4.1
	-15.51	2	第3期, 第4期	2.5
	-9.19	26	第2期, 第3期, 第4期	3.4
	-8.49	30	第1期, 第2期, 第3期	9.7
	-7.31	55	第1期, 第2期, 第3期, 第4期	11.2

3.3 考察

解析の結果、1日あたりの強度変化率が $2.0[\text{day}^{-1}]$ 以上となる強度変動現象を示した天体は37天体であった。しかし、本解析には2つの問題点があることが判明した。

第1の問題は、突発現象検出のため設定した閾値2.0に強い根拠はなく、任意性があるという点である。つまり、本解析で検出された天体・速度成分は必ずしも普段の強度変動に対して有意に異なる大きな強度変動を示したとは限らない。この問題点に対する改善策として、天体・速度成分固有の普段の強度変動に対して、静穏時とは有意に異なる強度変動現象を検出する方法を考えた。この解析に関しては第4章で詳しく述べる。

第2の問題は、観測頻度が約4日または約9日に1回と低頻度であることに起因して1日あたりの強度変化率を正しく導出できていない可能性があるという点である。式(5)で定義した1日あたりの強度変化率を計算する際、 t_{i+1} の前日までフラックス密度が S_i のまま一定で1日でフラックス密度が S_i から S_{i+1} に増加すると仮定したが、必ずしも増光が t_{i+1} の前日から始まっているとは限らず増光度を大きく導出している可能性がある。また、式(6)、式(7)で定義した1日あたりの強度変化率を計算する際、 t_i から t_{i+1} にかけてフラックス密度が S_i から S_{i+1} に増加すると仮定したが、必ずしも増光が t_i から始まっているとは限らず増光度を小さく導出している可能性がある。この問題点に対する改善策として、本解析で選出した天体のうち低頻度観測天体に対し、より詳細なタイムスケールでの変動を捉えることを目的とした高頻度モニター観測を実施した。観測に使用した望遠鏡は高萩市に位置する32m電波望遠鏡で、観測頻度は約1日1回である。観測で取得したデータに対して1日でフラックス密度が2.0倍以上に増加する強度変動を示す天体を探索した。これに関しては第5章で詳しく述べる。

4 突発現象の解析方法と結果 II

4.1 解析方法

統計学において、ある確率変数 x の対数値が正規分布に従うような統計分布を対数正規分布という。本解析では、1 日あたりの強度変化率の対数値を確率変数とした度数分布が平均 0、分散 σ^2 の正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うと仮定した。本解析は、天体・速度成分の普段の強度変動に対して、確率的に極めて稀に発生する強度変動現象を検出する方法である。以下では、1 日あたりの強度変化率を x_{i+1} ($i = 1, 2, \dots, N_0 - 1$)、その対数値 $\log_{10} x_{i+1}$ を y_{i+1} と表記して本解析方法について述べる。

まず、1 日あたりの強度変化率の対数値 $y_{i+1} = \log_{10} x_{i+1}$ を計算によって求める方法を述べる。第 3.1 節のときと同様に、ある天体・速度成分に関して観測によって取得された時系列データのうち、任意の 2 つのデータの観測日、rms ノイズレベル、フラックス密度 t_i , σ_i , S_i と t_{i+1} , σ_{i+1} , S_{i+1} を考える。ここで、各変数の添字の i は時系列データを最も古いデータ ($i = 1$) から順に数えて i 番目のデータであることを表す。 t_{i+1} の 1 日前までフラックス密度が S_i のまま一定で 1 日でフラックス密度が S_i から S_{i+1} に増加すると仮定し、1 日あたりの強度変化率 x_{i+1} を式(8)に示す計算式により計算した。

$$x_{i+1} = \frac{S_{i+1}}{S_i} \quad (8)$$

ただし、天体から放射されるフラックス密度 S が rms ノイズレベルに対して検出限界 3σ 以下である場合は S の値には 3σ の値を用いた。式(8)に示す計算式により、最も古いデータ ($i = 1$) を起点として最も新しいデータ ($i = N_0$) まで順に、隣り合う 2 つのデータを用いて x_{i+1} を計算した。そして、得られた 1 日あたりの強度変化率 x_{i+1} の対数値 $\log_{10} x_{i+1}$ を計算した。これにより、1 日あたりの強度変化率 x_{i+1} の対数値 $y_{i+1} = \log_{10} x_{i+1}$ の時系列データが求まる。以上の計算を、日立局でモニター観測しているすべての天体に対して実施した。

確率変数 y が平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うとすれば、 y の確率密度関数 $f(y)$ は次のように表される。

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

ここで、統計学の標準正規分布について説明する。ある確率変数 y が平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従う場合、以下の式(10)で y を新たな確率変数 z に変数変換することを考える。

$$z = \frac{y - \mu}{\sigma} \quad (10)$$

このとき、確率変数 z は平均 0、分散 1 の正規分布 $N(0, 1)$ に従う。この平均 0、分散 1 の正規分布 $N(0, 1)$ のことを標準正規分布という。標準正規分布に従う確率変数 z の確率密度関数 $f(z)$ は以下のようになる。

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (11)$$

この標準正規分布の確率密度関数から確率変数 z のとりうる値に対する確率 P を計算することが可能である。一般的に、 $P(-1 \leq z \leq 1) = 0.6827$, $P(-2 \leq z \leq 2) = 0.9545$, $P(-3 \leq z \leq 3) = 0.9973$ がよく知られている値である。なお、 $P(-1 \leq z \leq 1) = 0.6827$ とは無作為に抽出した確率変数 z の値が -1 以上かつ 1 以下に含まれる確率が 0.6827 であることを意味する。このうち、 $P(-3 \leq z \leq 3) = 0.9973$ を例にとると、これはもとの確率変数 y で考えると $P(\mu - 3\sigma \leq y \leq \mu + 3\sigma) = 0.9973$ であり、つまり無作為に抽出した y の値が平均 μ を中心値として -3σ 以上かつ $+3\sigma$ 以下に含まれる確率が 0.9973 であることを意味する。

もし、突発現象が普段の強度変動に対して確率的に減多に起こらない稀有な強度変動現象であるとすれば、これに起因する分布は確率密度関数から算出される確率が非常に小さい値となる位置に現れるはずである。そこで、突発現象の検出方法を以下のように考えた。まず、1 日あたりの強度変化率の対数値 y_{i+1} ($i = 1, 2, \dots, N_0 - 1$) を確率変数とした度数分布を作成する。そして、度数分布をガウシアンによってフィッティングする。なお、フィッティングの際は関数を以下の式(12)で定義して gnuplot の fit 関数を用いた。

$$f(y) = a \exp\left(-\frac{(y - b)^2}{2c^2}\right) \quad (12)$$

a , b , c はフィッティングの際のパラメータであり $b = \mu$, $c = \sigma$ に相当する。度数分布を目視で確認し、 a には度数の最大値、 b には y の平均値、 c には y の分布の広がりに対応する値をフィッティングの初期値としてそれぞれ与えた。フィッティングの結果、 y の散布度を表す標準偏差 σ が得られる。求めた標準偏差 σ を基準として 10σ 以上に分布を示す天体・速度成分を突発現象を示す天体・速度成分として選出した。つまり、第 3 章にて閾値を任意に 2.0 と与えていた事に対して、今回は統計的に意味のある閾値を設定する事になる。

以下に、天体 G 006.61-00.08 の視線速度 0.82 km/s 成分を例に本解析の流れを示す。図 5 は G 006.61-00.08 の視線速度 0.82 km/s 成分の時系列強度変動プロットである。図 6 は G 006.61-00.08 のスペクトルである。図 7 は、1 日あたりの強度変化率の対数値 y_{i+1} ($i = 1, 2, \dots, N_0 - 1$) を確率変数とした度数分布である。サンプル数は 182 であった。なお、本解析では、階級の個数はサンプル数の平方根の値とした。図 8 の赤線は、度数分布をガウシアンでフィッティングした結果である。フィッティングの際のそれぞれのパラメータの初期値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} a &= 40, \\ b &= 0.001, \\ c &= 0.1. \end{aligned}$$

フィッティングの結果、得られた値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} a &= 37, \\ b &= -0.001, \\ c &= 0.03. \end{aligned}$$

図 8 の右上に表示されている $\sigma = 0.03$ はガウシアンでフィッティングした結果得られた y の標準偏差 σ である。本解析で設定した閾値である 10σ は $|y| = 0.3$ に相当するが、 $|y| \geq 0.3$ に分布を示さなかったためこの天体・速度成分は突発現象を示していないと判断した。このような手法により日立局でモニター観測をおこなっているすべての天体に対して

解析を実施した。本解析で扱ったデータは2012年12月30日から2017年9月6日までに取得したデータである。

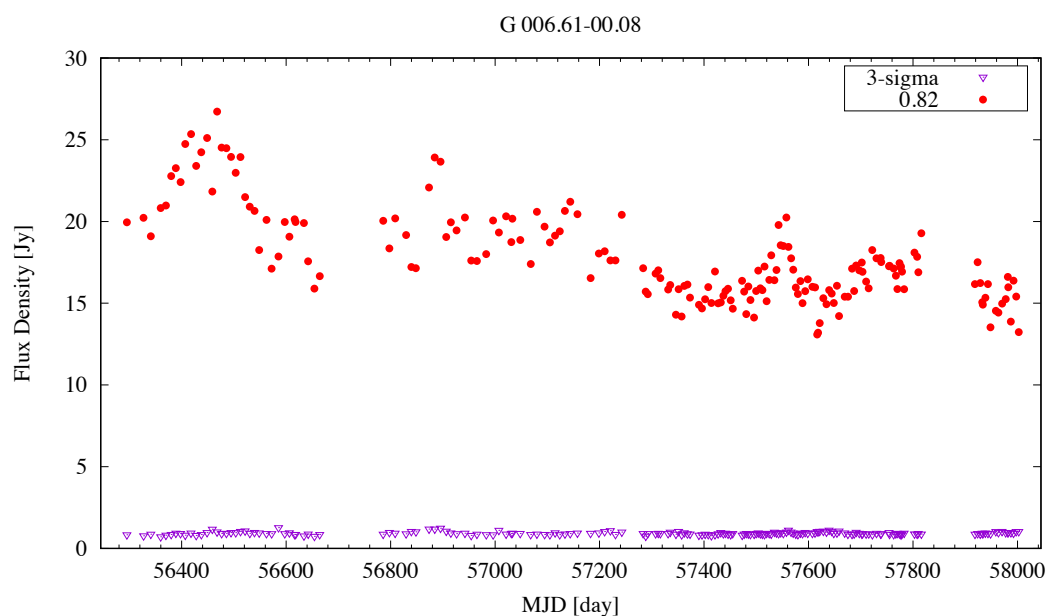


図 5 : G 00.61-00.08 の 0.82 km/s 成分の時系列強度変動プロット。

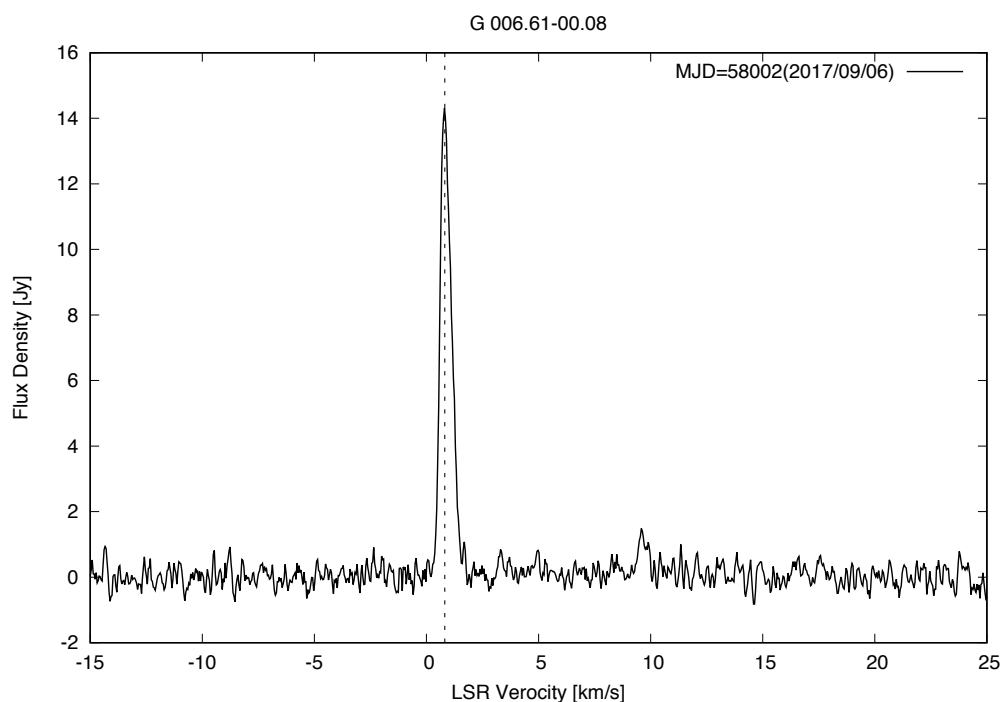


図 6 : G 00.61-00.08 の MJD=58002(2017/09/06)に取得されたスペクトル。点線で示す視線速度に対応する放射成分が 0.82 km/s 成分である。

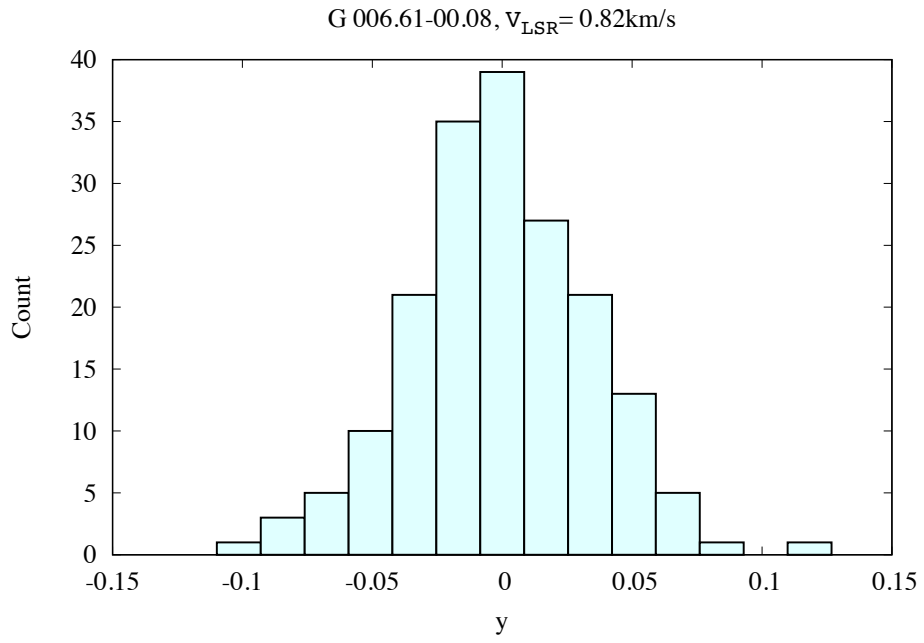


図 7 : 度数分布図。

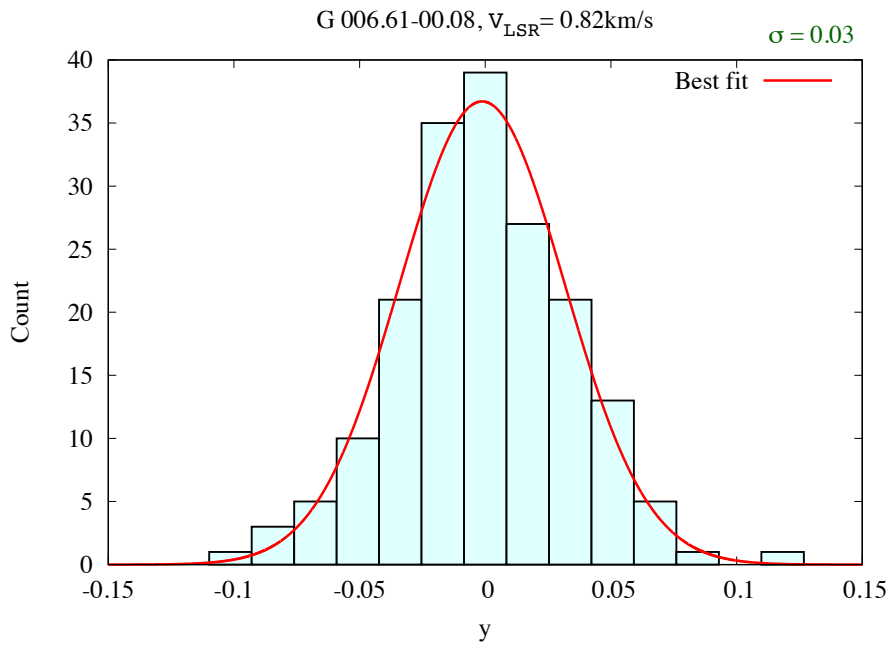


図 8 : ガウシアンでフィッティングをした後。赤色の線が度数分布をフィッティングした結果である。

4.2 結果

表 8 に本解析の結果を示す。解析の結果、9 天体を選出した。標準偏差は度数分布をガウシアンでフィッティングして得られた数値である。検出回数とは突発現象を検出した回数である。

表 8：解析結果。

天体名	視線速度 [km/s]	標準偏差 (σ)	検出回数	$ y $ の最大値	検出した観測シーズン
G 009.62+00.19	4.99	0.03	3	0.53	第 2 期, 第 3 期
G 014.23-00.50	25.29	0.05	31	0.98	第 2 期, 第 3 期, 第 4 期
G 014.33-00.63	21.54	0.05	1	0.64	第 2 期
G 027.86-00.24	20.18	0.05	2	0.51	第 1 期
G 033.64-00.21	59.30	0.09	2	1.58	第 2 期, 第 3 期
	59.61	0.10	3	1.56	第 1 期, 第 2 期
G 075.76+00.34	-9.38	0.05	1	0.52	第 1 期
G 174.19-00.09	3.77	0.03	1	0.31	第 1 期
G 192.60-00.05	3.07	0.05	2	0.54	第 3 期
	4.94	0.02	1	0.23	第 3 期
	5.34	0.02	2	0.31	第 3 期
	5.87	0.02	1	0.32	第 3 期
	6.42	0.02	10	0.43	第 2 期, 第 3 期
	7.93	0.03	2	0.34	第 2 期
	-16.89	0.05	11	0.71	第 2 期, 第 3 期
IRAS22198+6336	-15.51	0.04	4	0.54	第 3 期, 第 4 期
	-10.89	0.05	2	0.70	第 3 期
	-9.19	0.05	27	1.08	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期, 第 4 期
	-8.49	0.06	38	1.27	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期, 第 4 期
	-7.31	0.07	25	1.65	第 1 期, 第 2 期, 第 3 期, 第 4 期

以下に、本解析で選出した天体・速度成分に関して、1 日あたりの強度変化率の対数値を確率変数とした度数分布をガウシアンでフィッティングした結果・1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差 σ で割って規格化した値を確率変数とした度数分布・ y/σ の時系列変動プロット・フラックス密度の時系列変動プロットを順に示す。

4.2.1 G 009.62+00.19

天体 G 009.62+00.19 は 1 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=4.99[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 9 は 1 日あたりの強度変化率の対数値を確率変数とした度数分布をガウシアンでフィッティングした結果である。確率変数 y の標準偏差 σ は 0.03 であった。図 10 は 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差 σ で割って規格化した値を確率変数とした度数分布である。つまり $y/\sigma \geq 10$ に分布するデータが突発現象である。図 11 は y/σ の時系列変動プロットである。図 12 はフラックス密度の時系列変動プロットである。

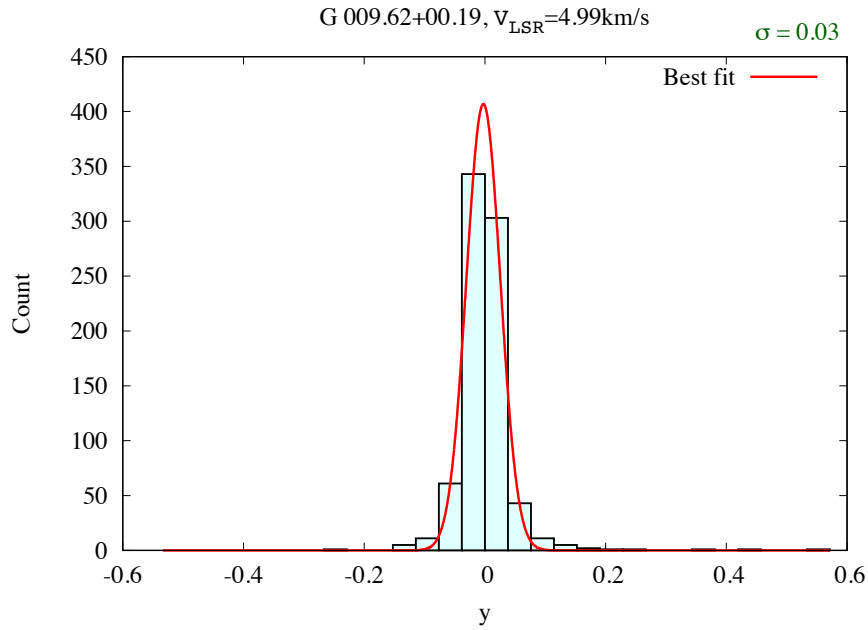


図 9 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

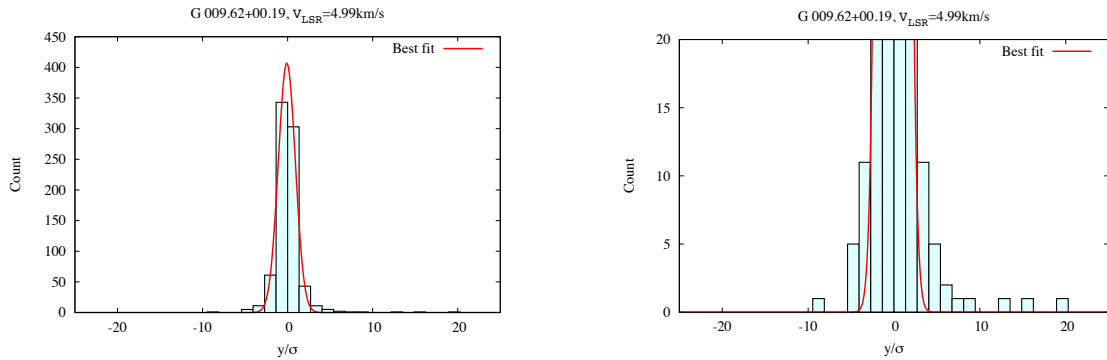


図 10 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

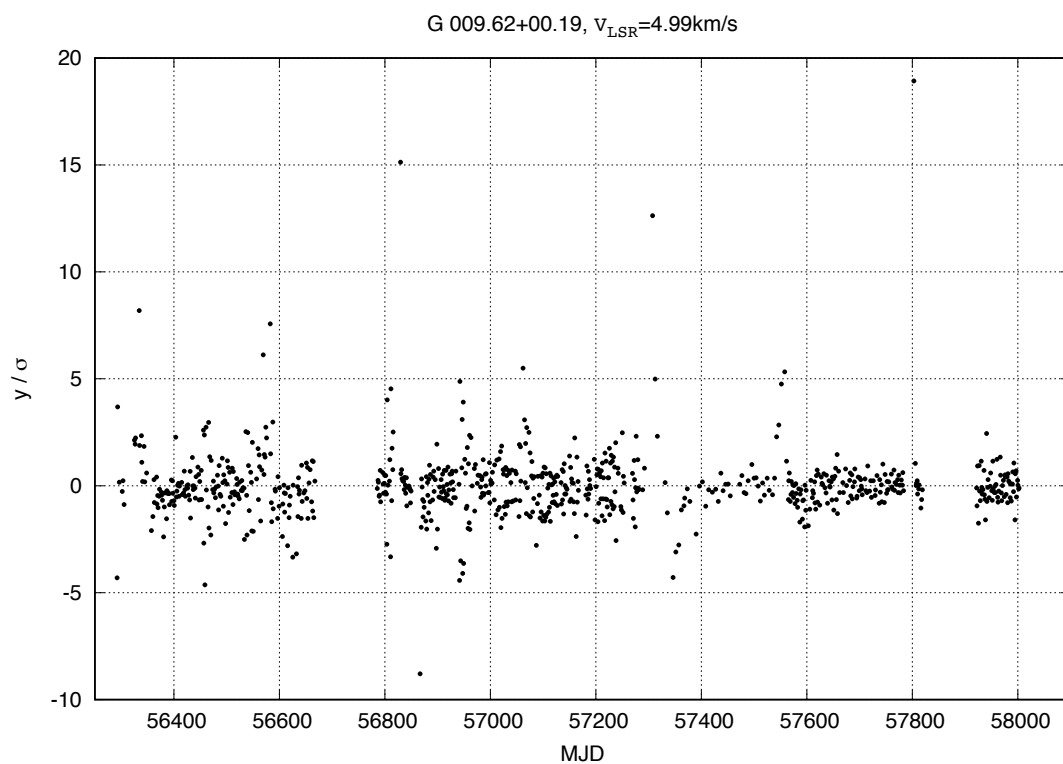


図 11 : y/σ の時系列変動プロット。

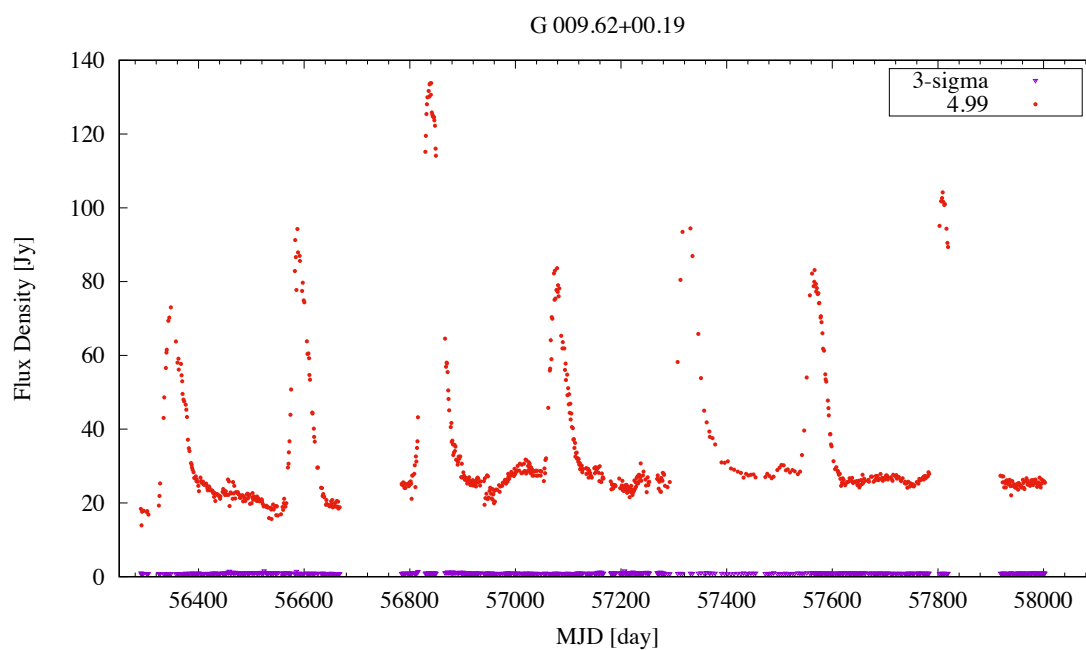


図 12 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.2 G 014.23-00.50

天体 G 014.23-00.50 は 1 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=25.29[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 13~図 16 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

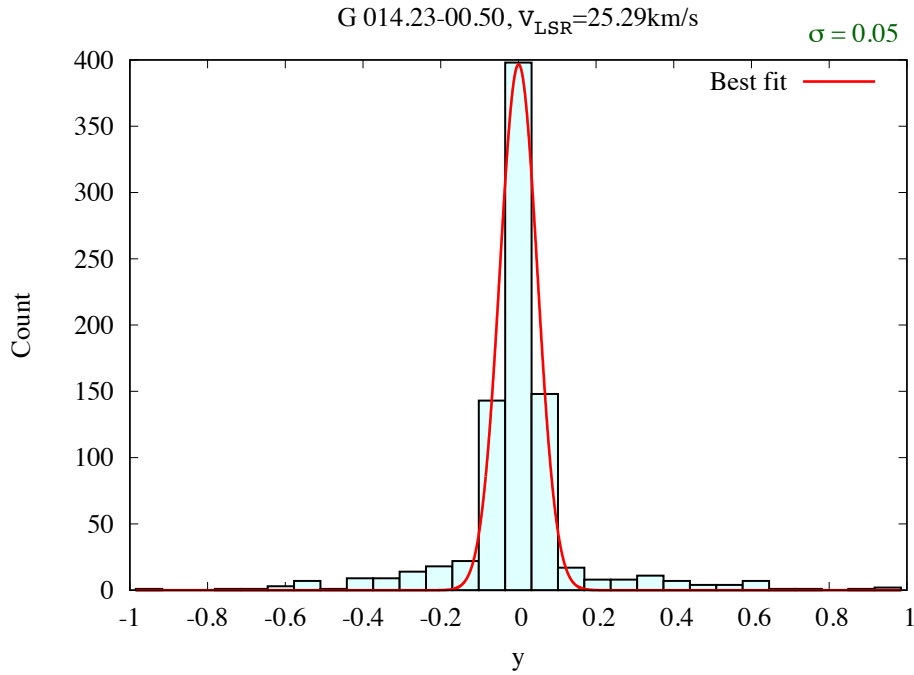


図 13 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

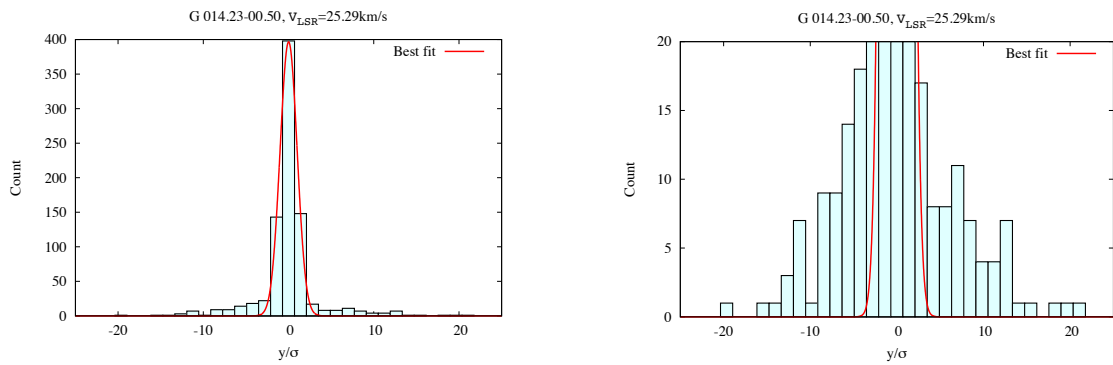


図 14 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

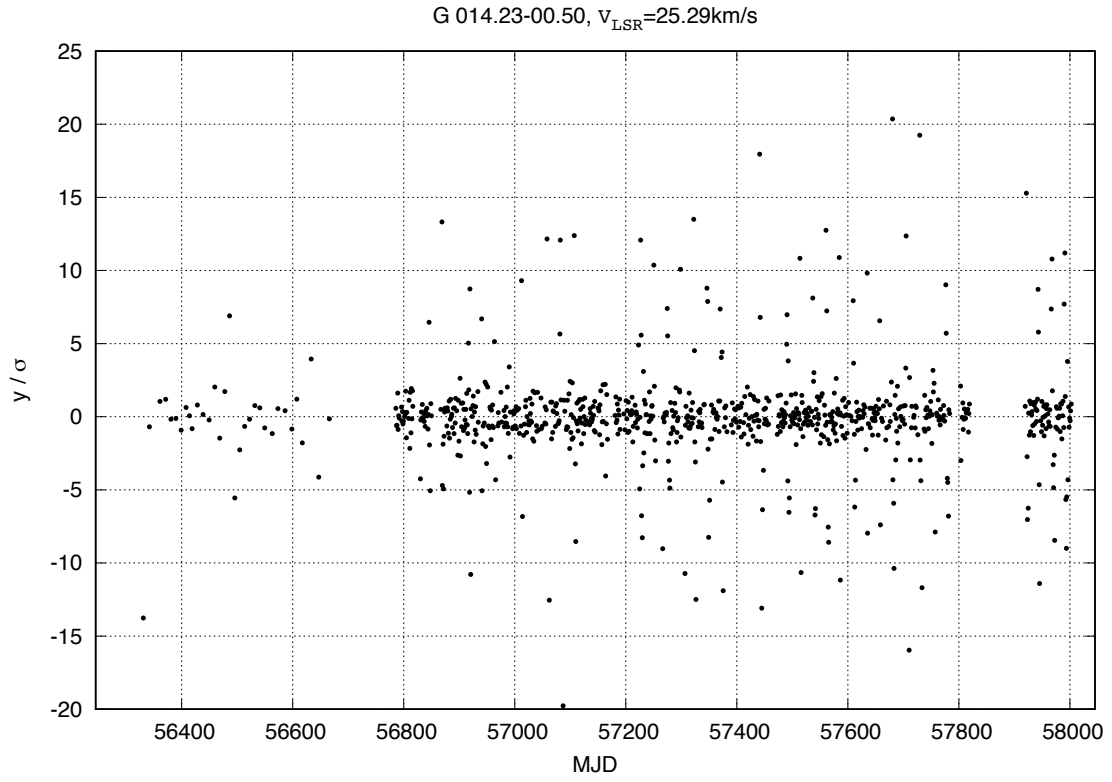


図 15 : y/σ の時系列変動プロット。

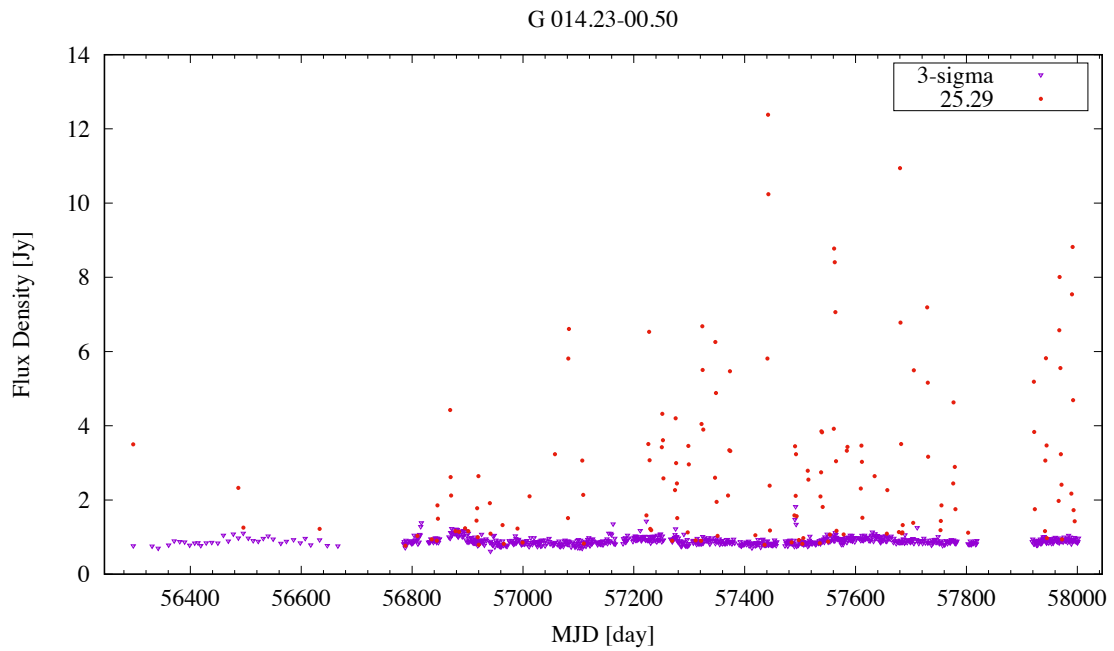


図 16 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.3 G 014.33-00.63

天体 G 014.33-00.63 は 1 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=21.54[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 17~図 20 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

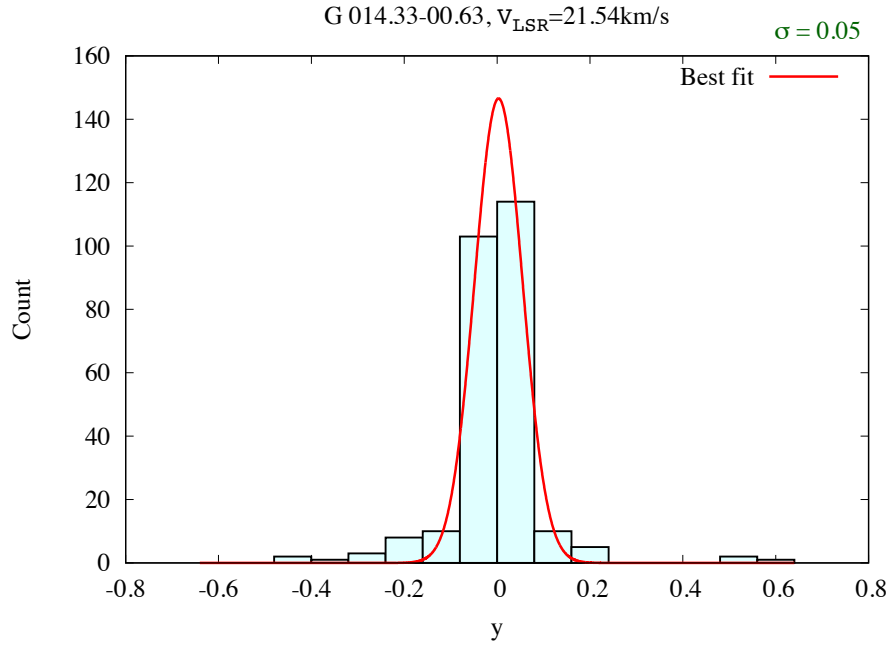


図 17 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

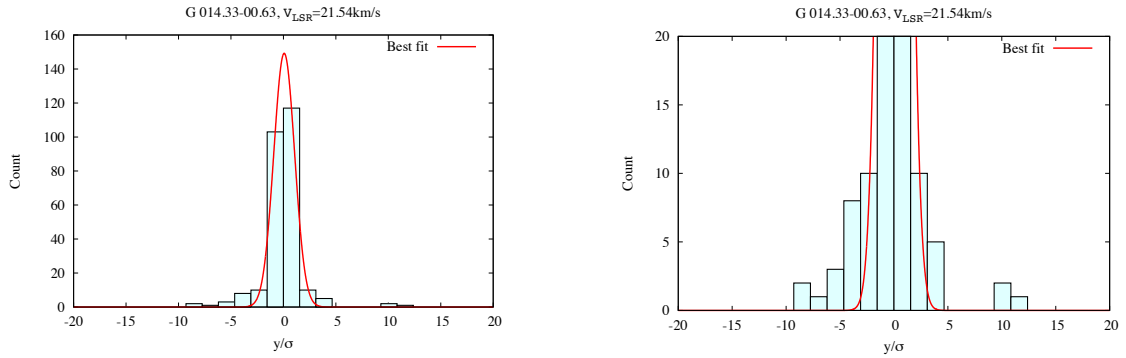


図 18 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

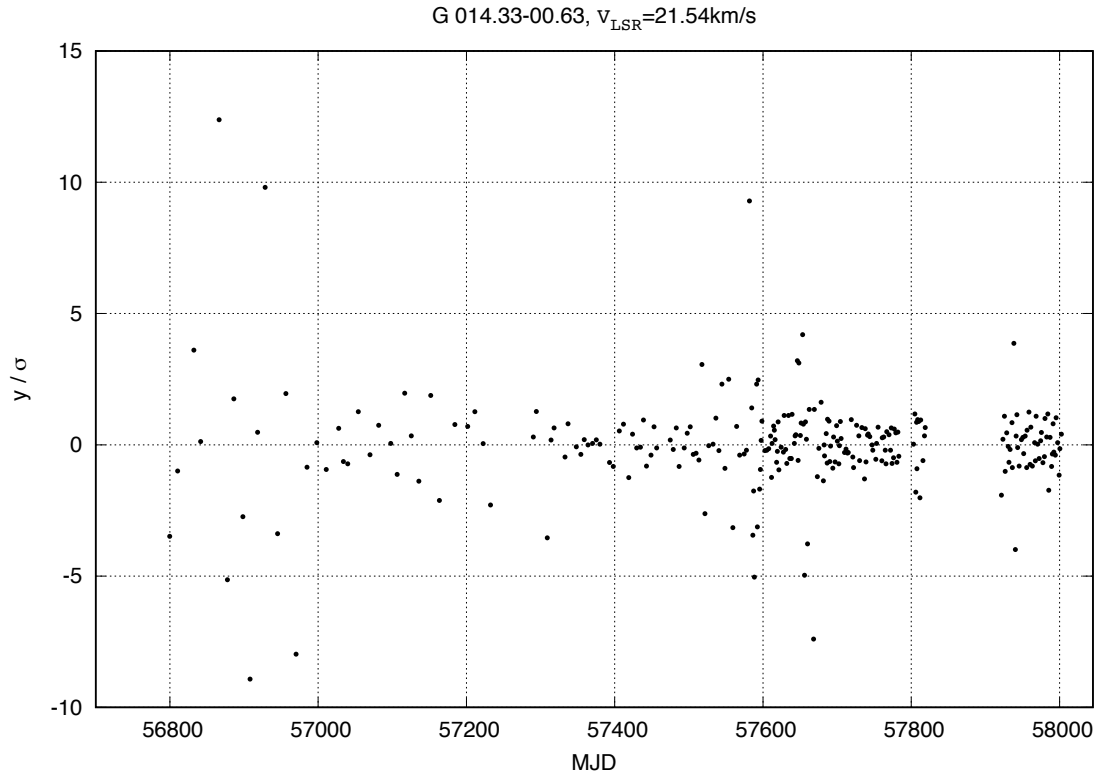


図 19 : y/σ の時系列変動プロット。

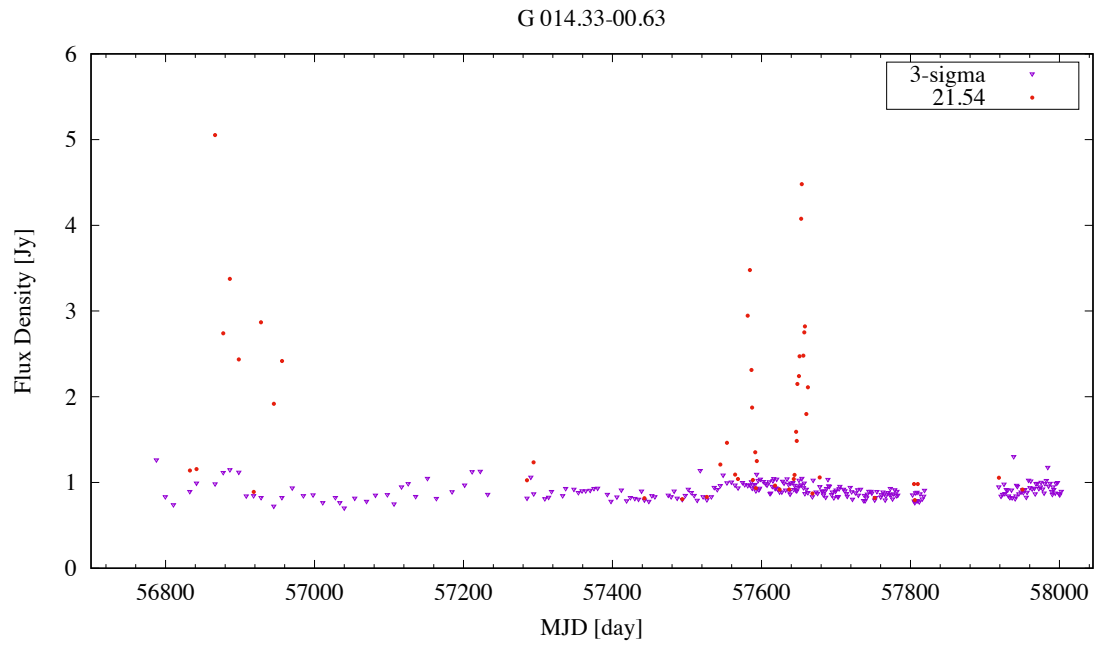


図 20 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.4 G 027.86-00.24

天体 G 027.86-00.24 は 1 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=20.18[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 21~図 24 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

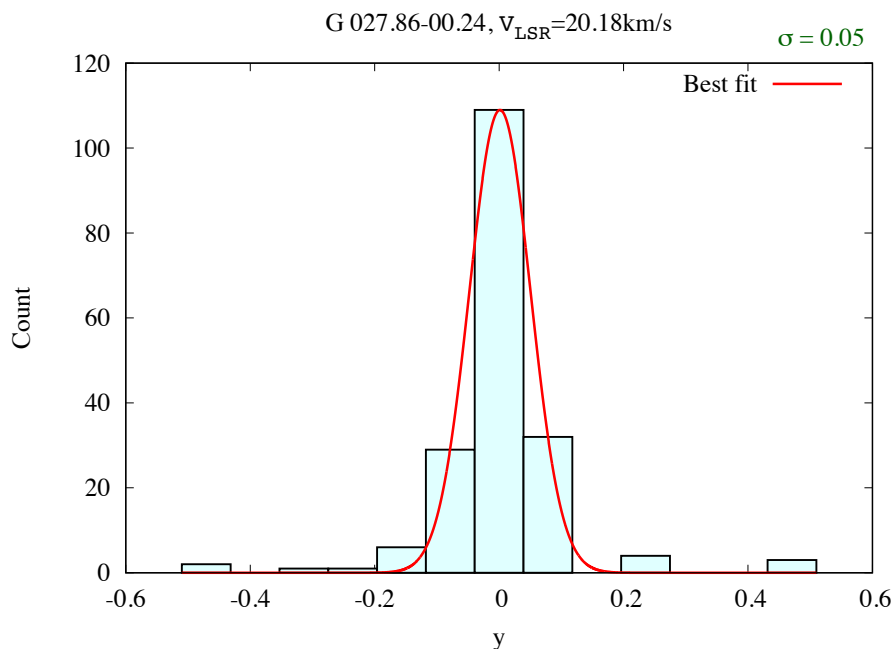


図 21 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

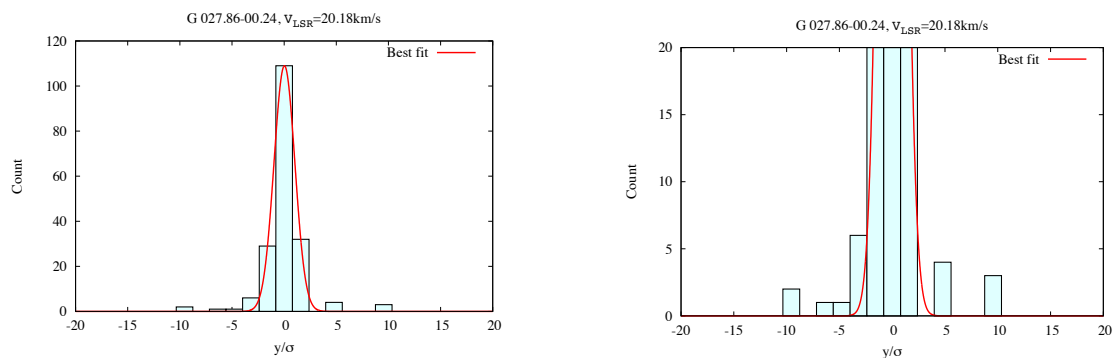


図 22 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

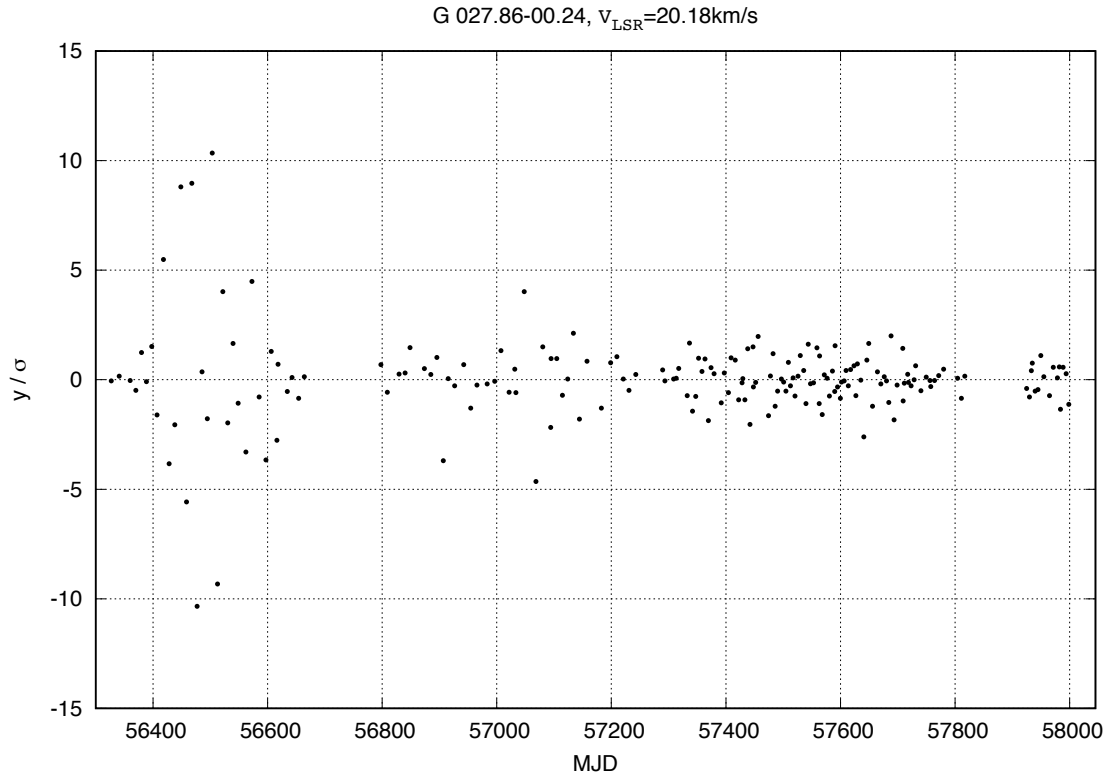


図 23 : y/σ の時系列変動プロット。

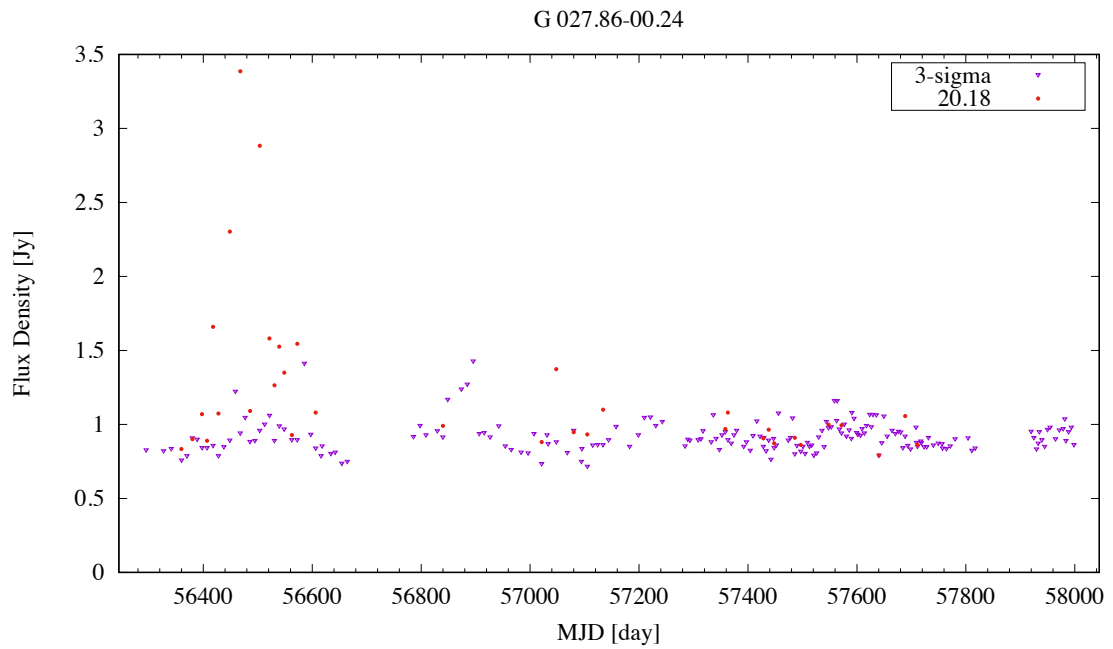


図 24 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.5 G 033.64-00.21

天体 G 033.64-00.21 は 2 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=59.30[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 25~図 28 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.09$)。

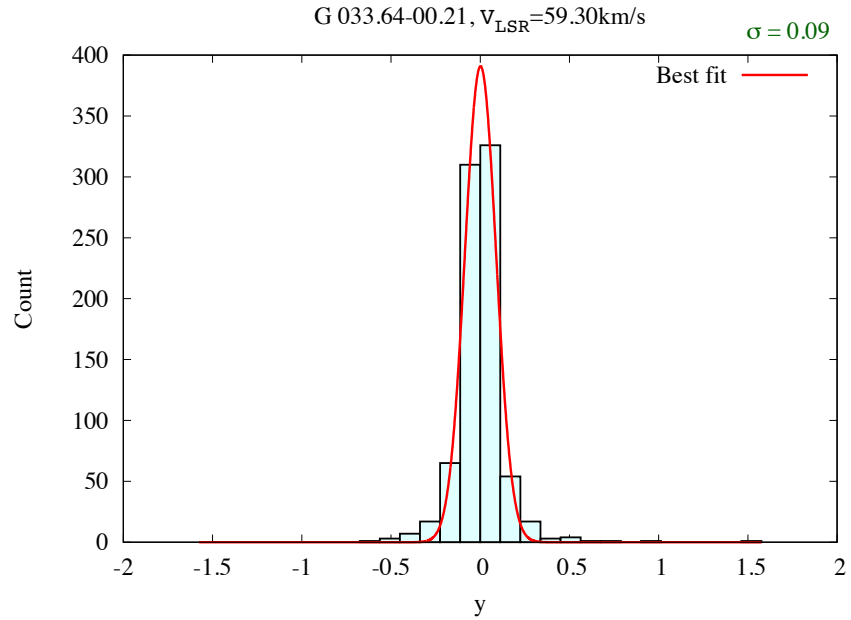


図 25 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

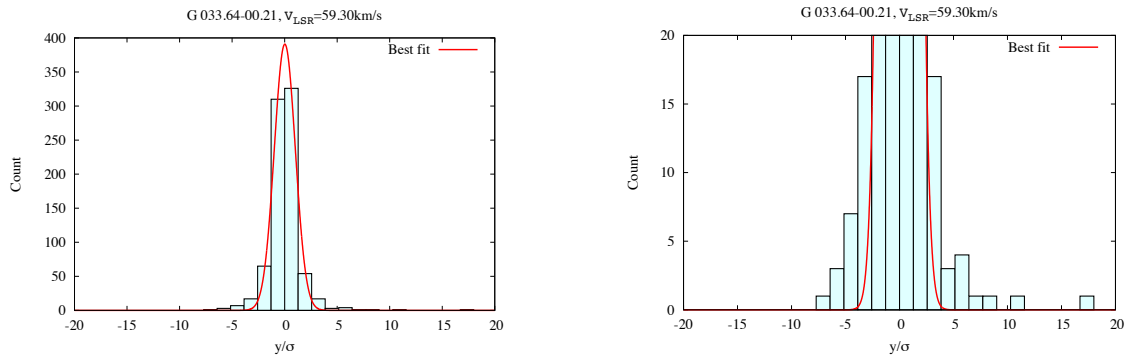


図 26 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

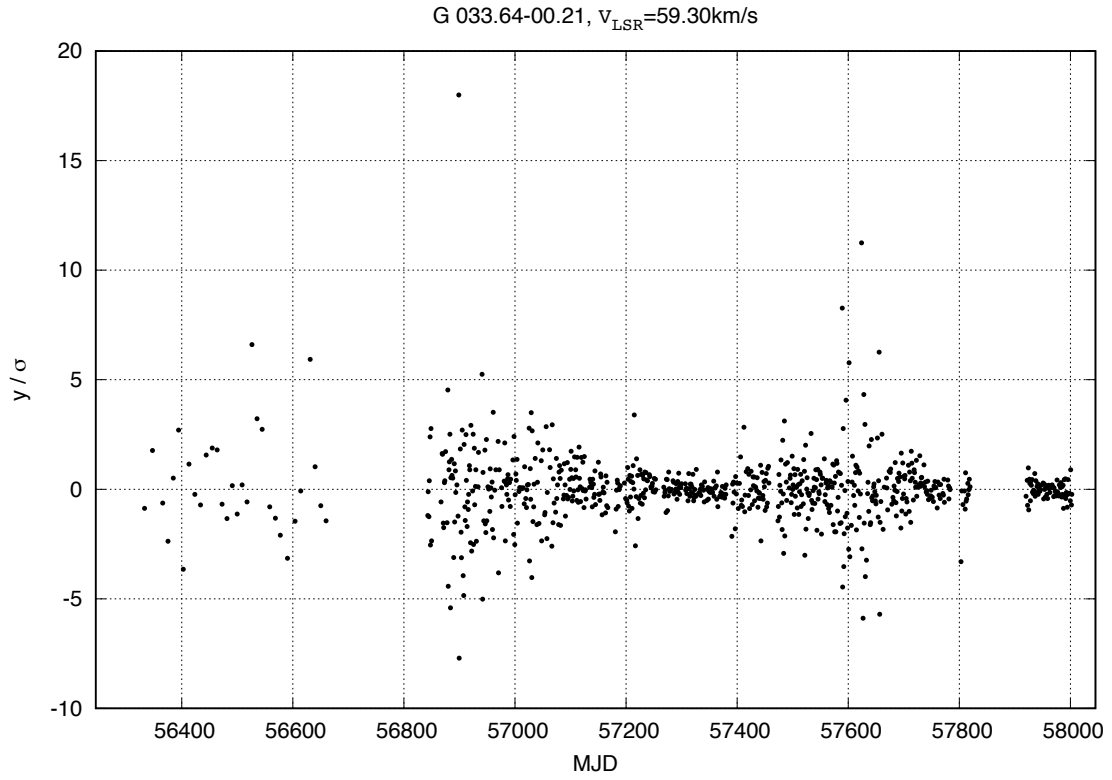


図 27 : y/σ の時系列変動プロット。

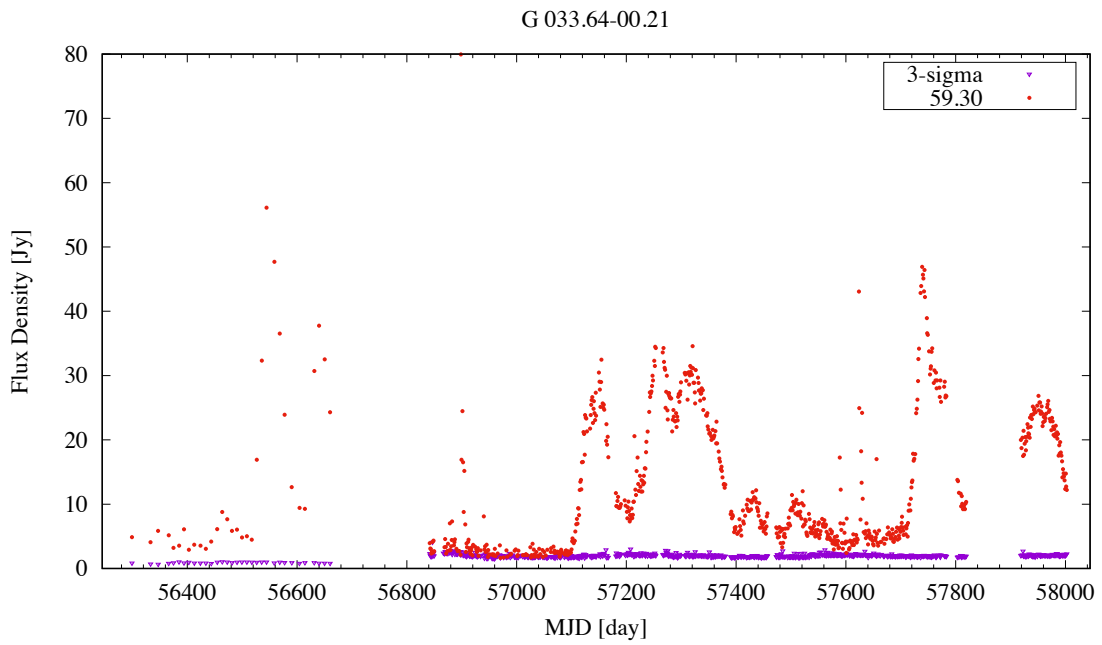


図 28 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}}=59.61[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 29～図 32 は図 9～図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.10$)。

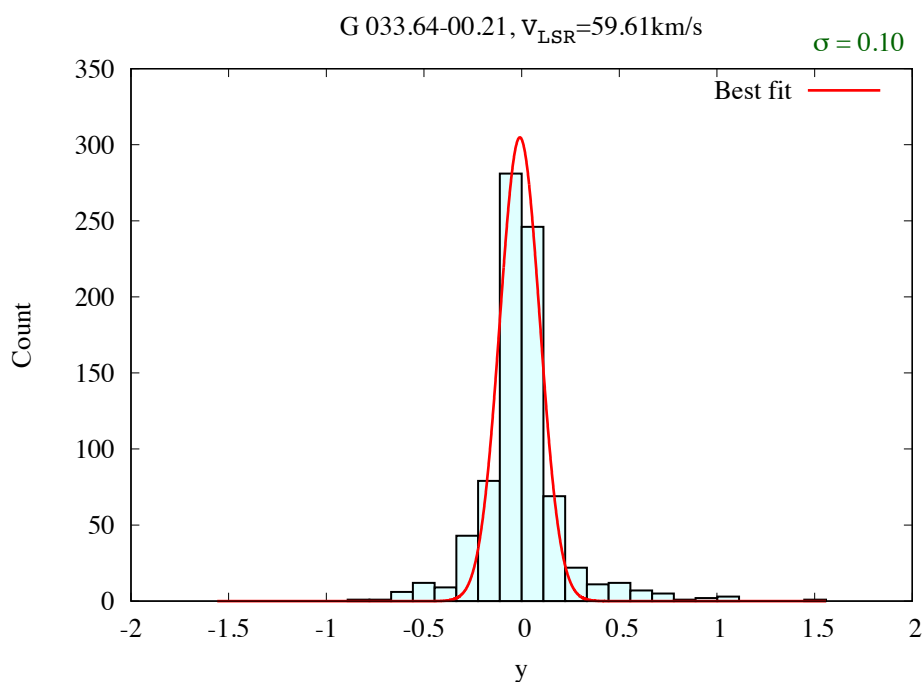


図 29 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

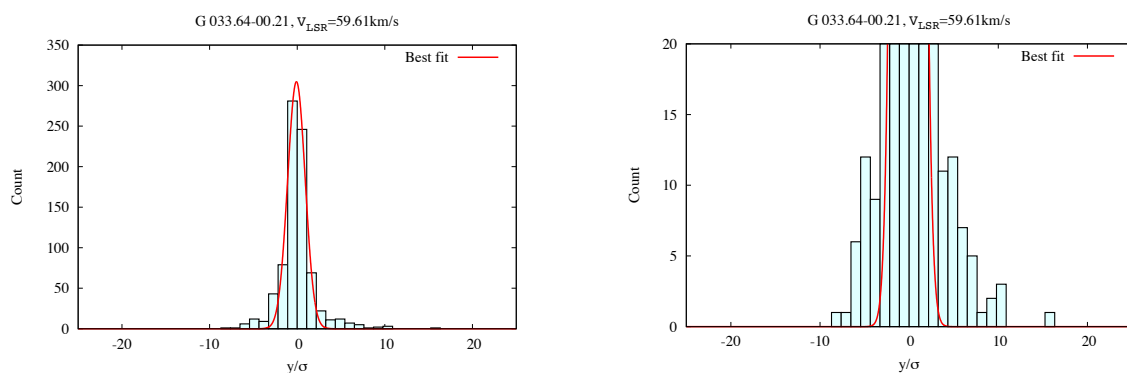


図 30 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

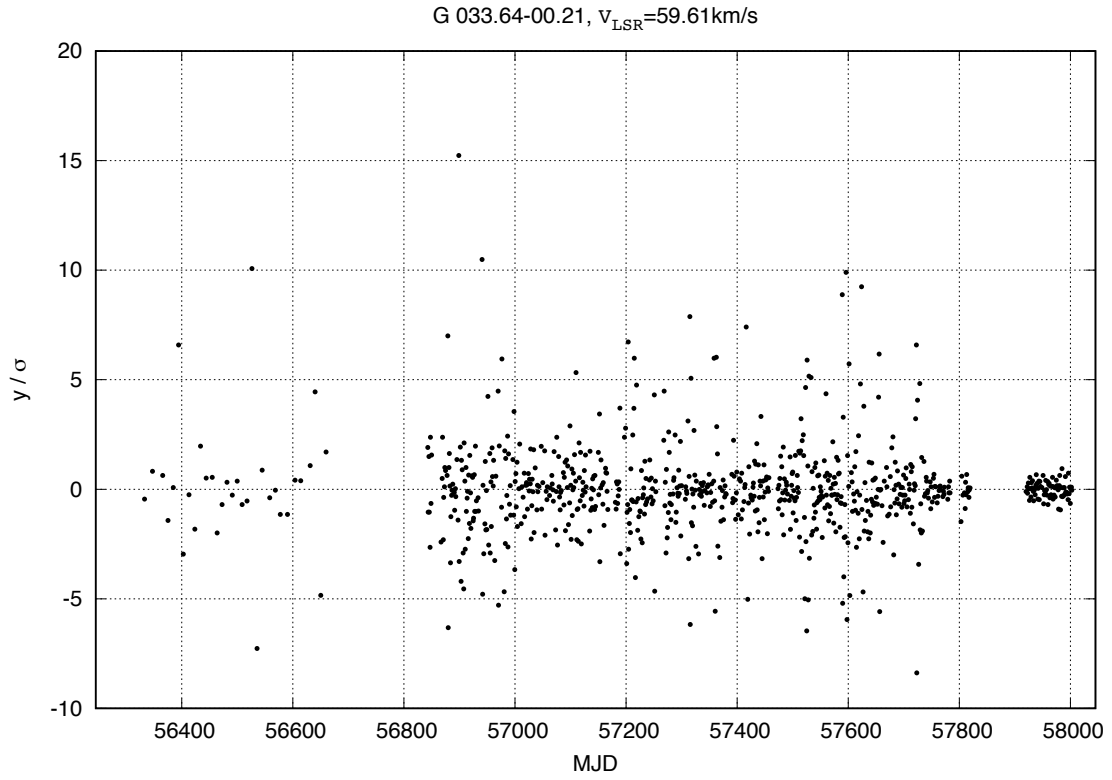


図 31 : y/σ の時系列変動プロット。

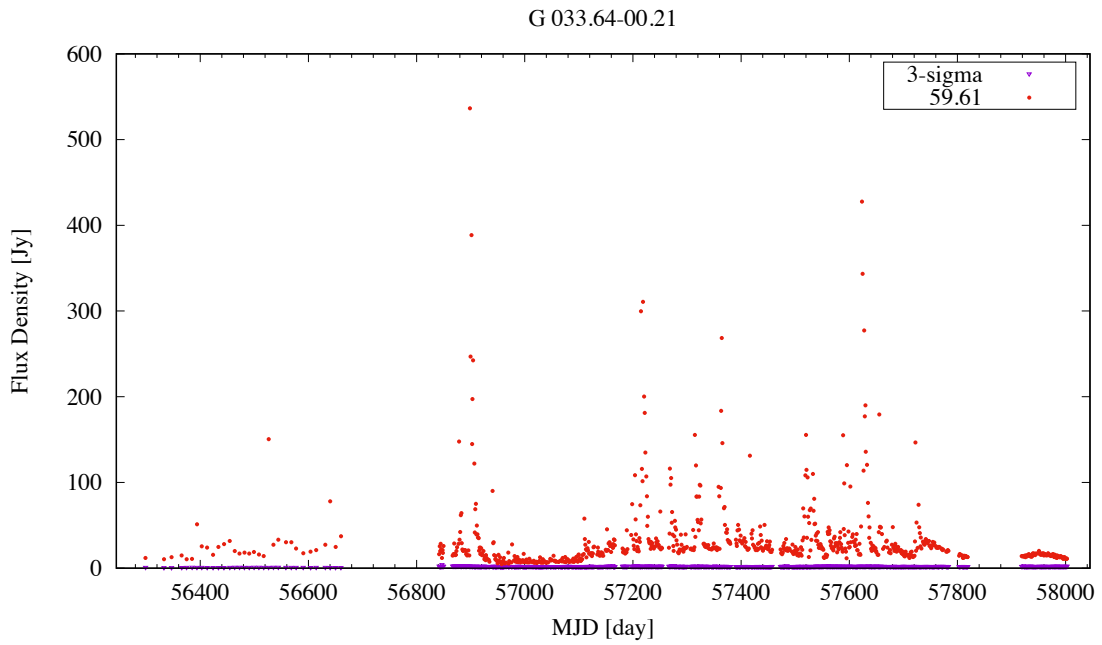


図 32 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.6 G 075.76+00.34

天体 G 075.76+00.34 は 1 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}} = -9.38 [\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 33~図 36 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

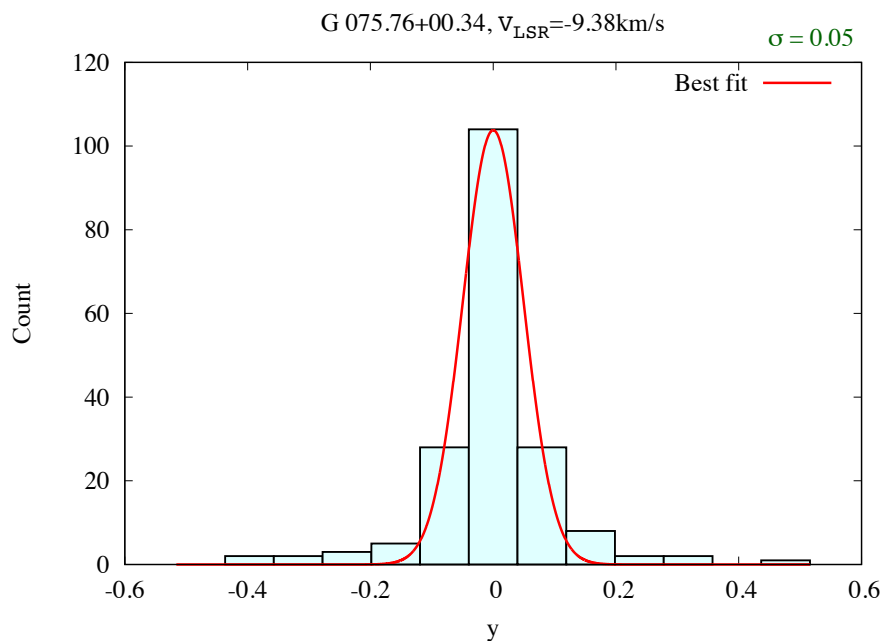


図 33 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

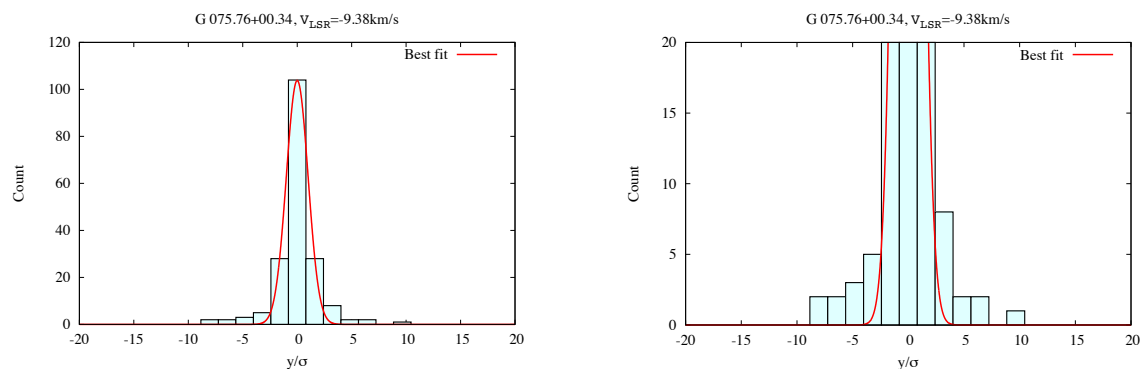


図 34 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

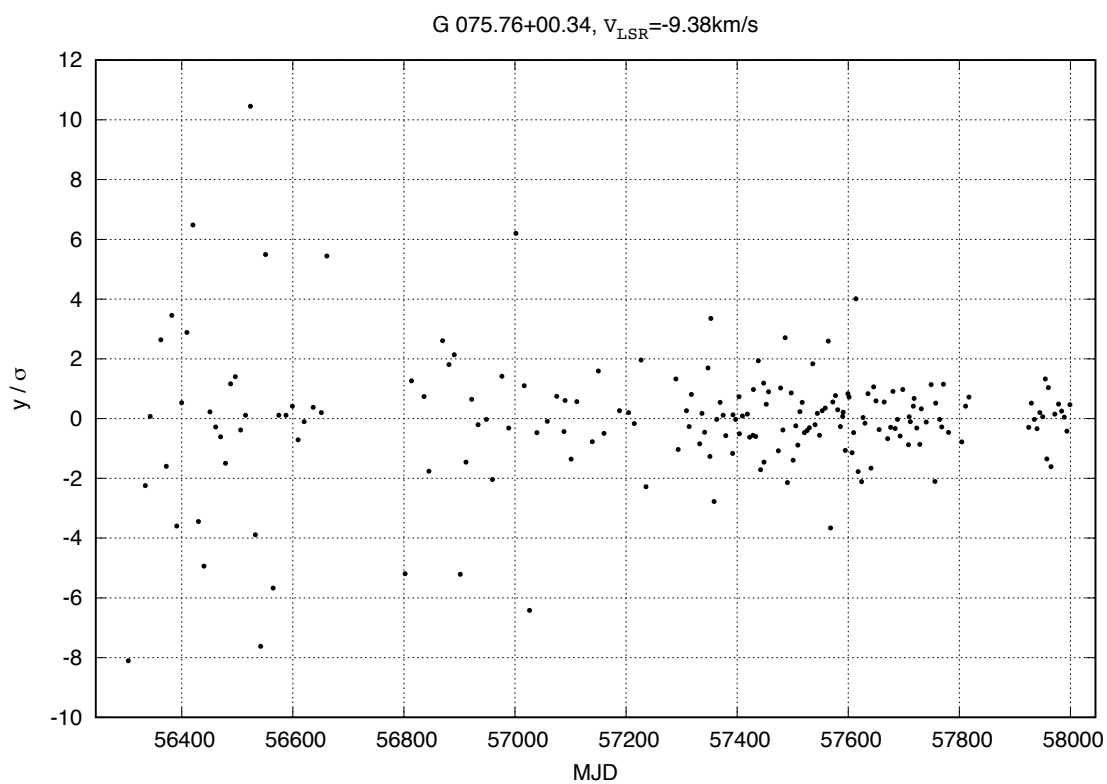


図 35 : y/σ の時系列変動プロット。

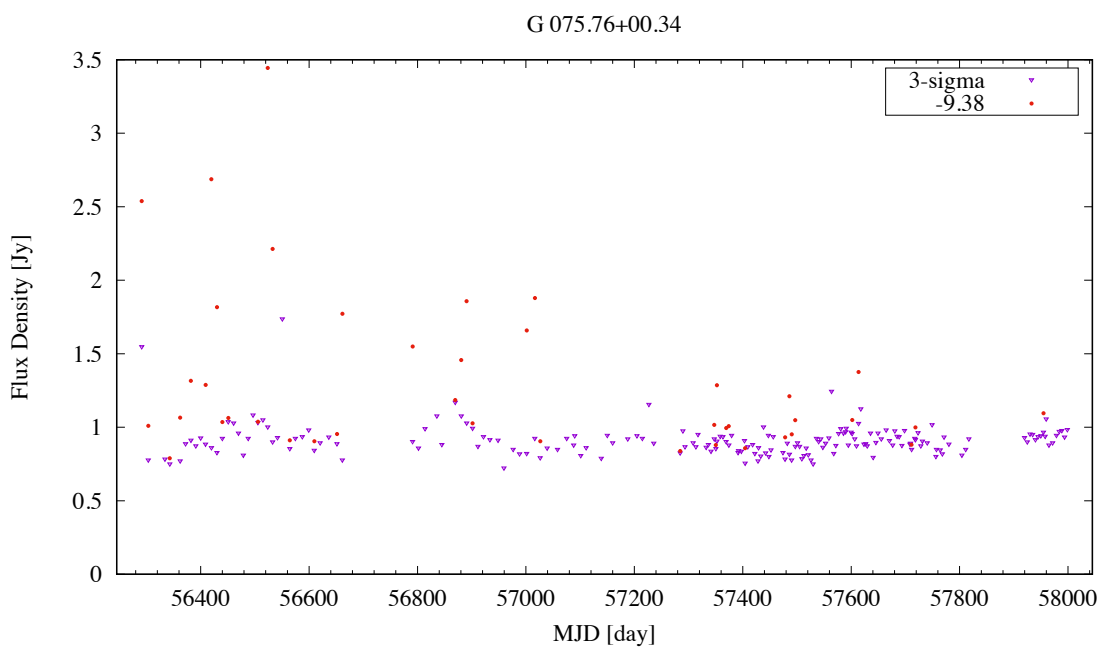


図 36 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.7 G 174.19-00.09

天体 G 174.19-00.09 は 1 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=3.77[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 37~図 40 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.03$)。

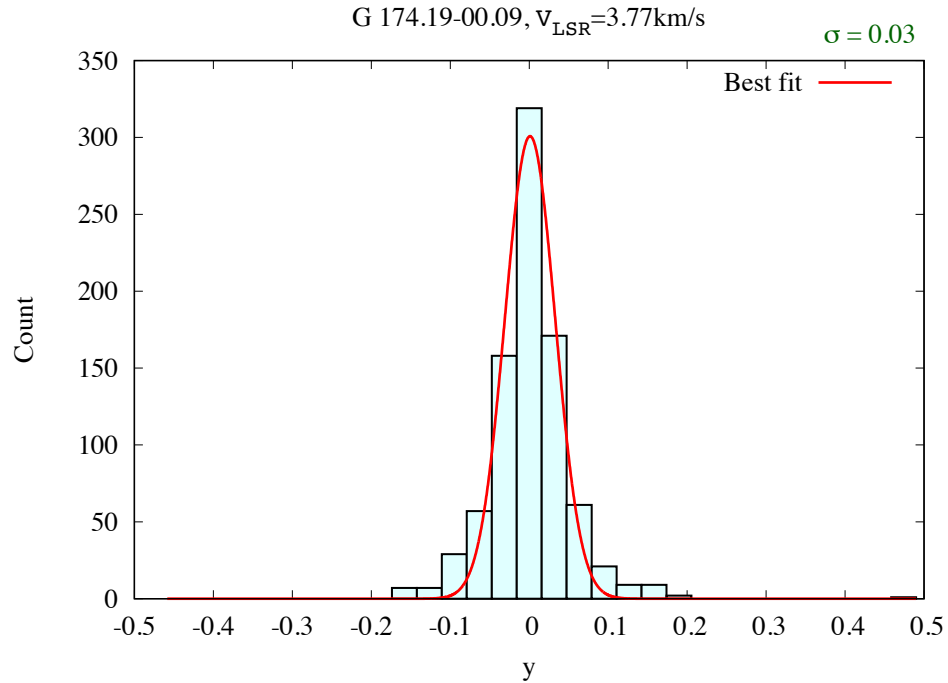


図 37 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

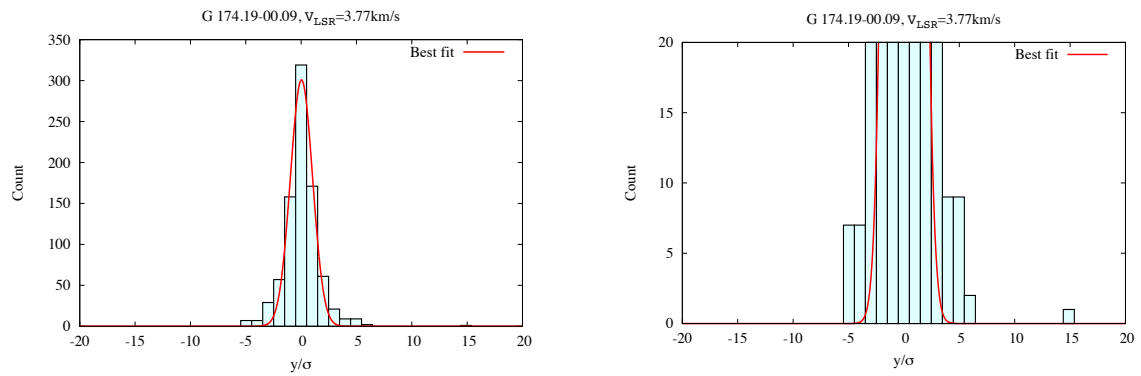


図 38 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

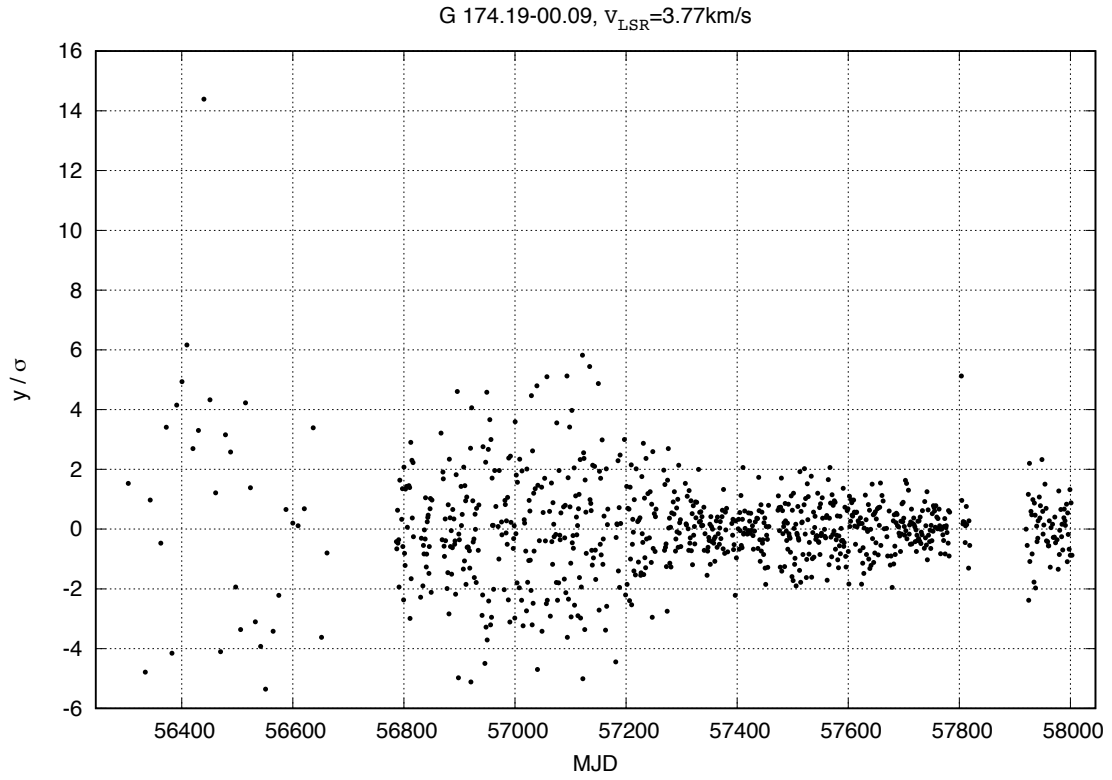


図 39 : y/σ の時系列変動プロット。

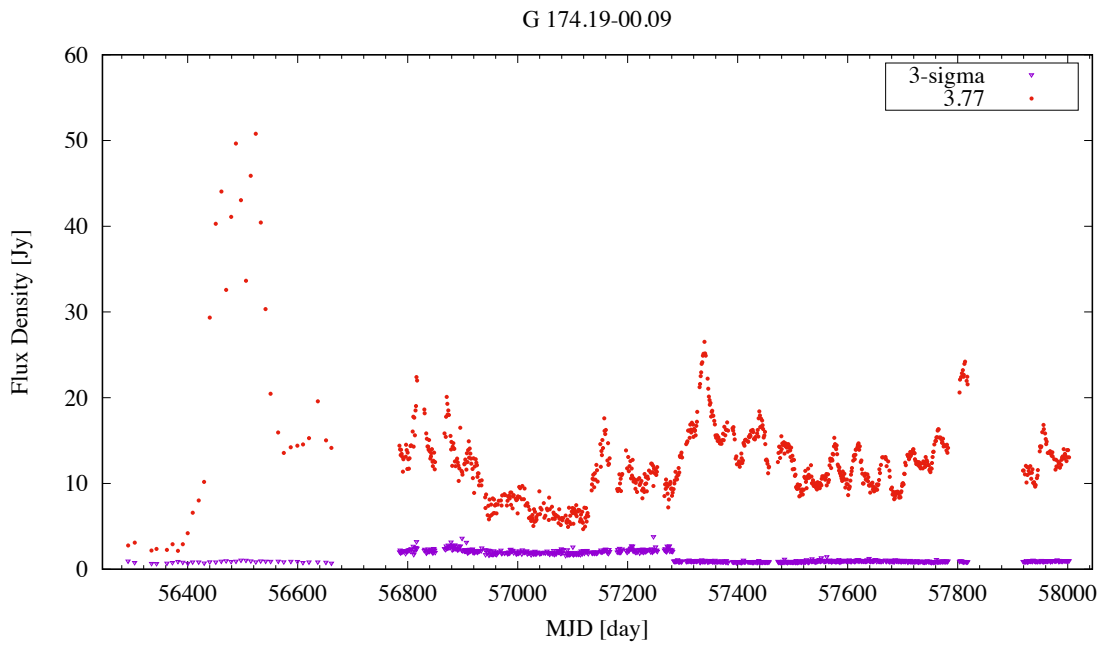


図 40 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.2.8 G 192.60-00.05

天体 G 192.60-00.05 は 6 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}}=3.07$ [km/s]成分に関する解析結果である。図 41~図 44 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

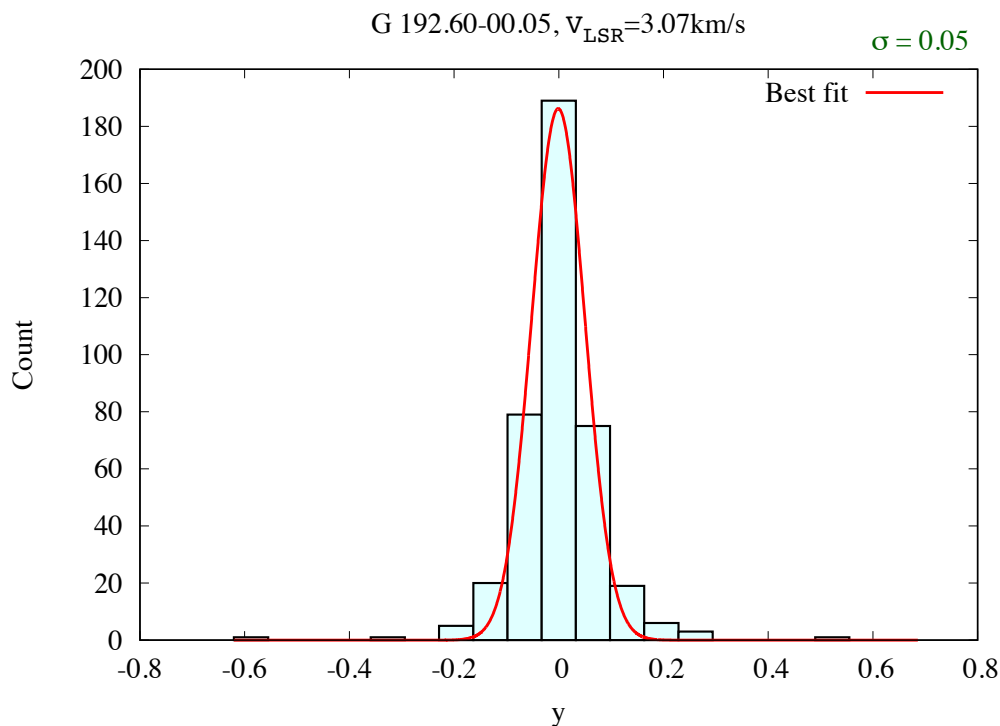


図 41 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

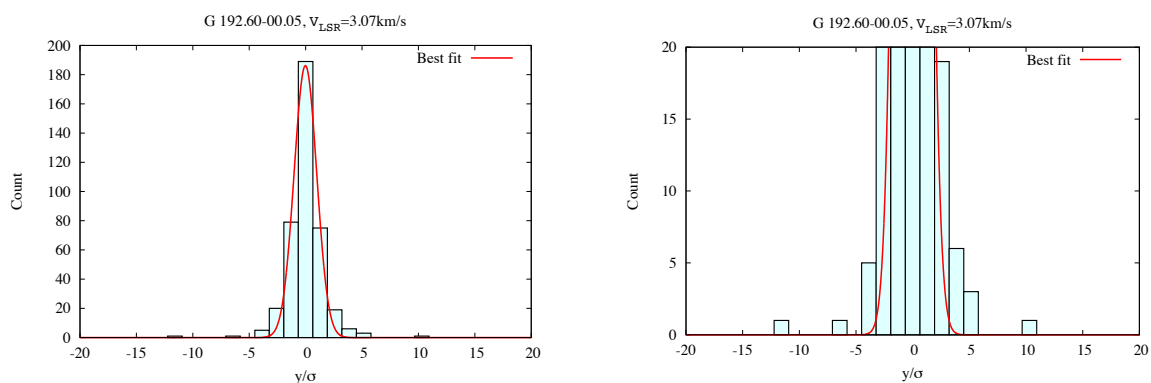


図 42 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

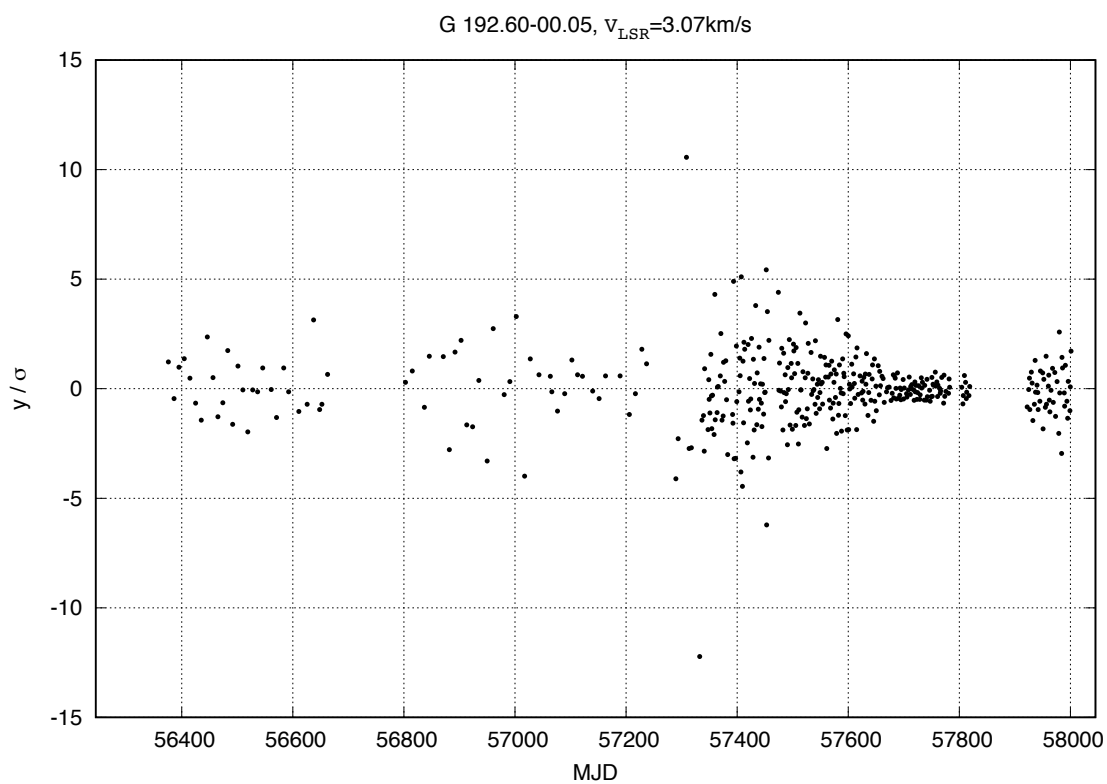


図 43 : y/σ の時系列変動プロット。

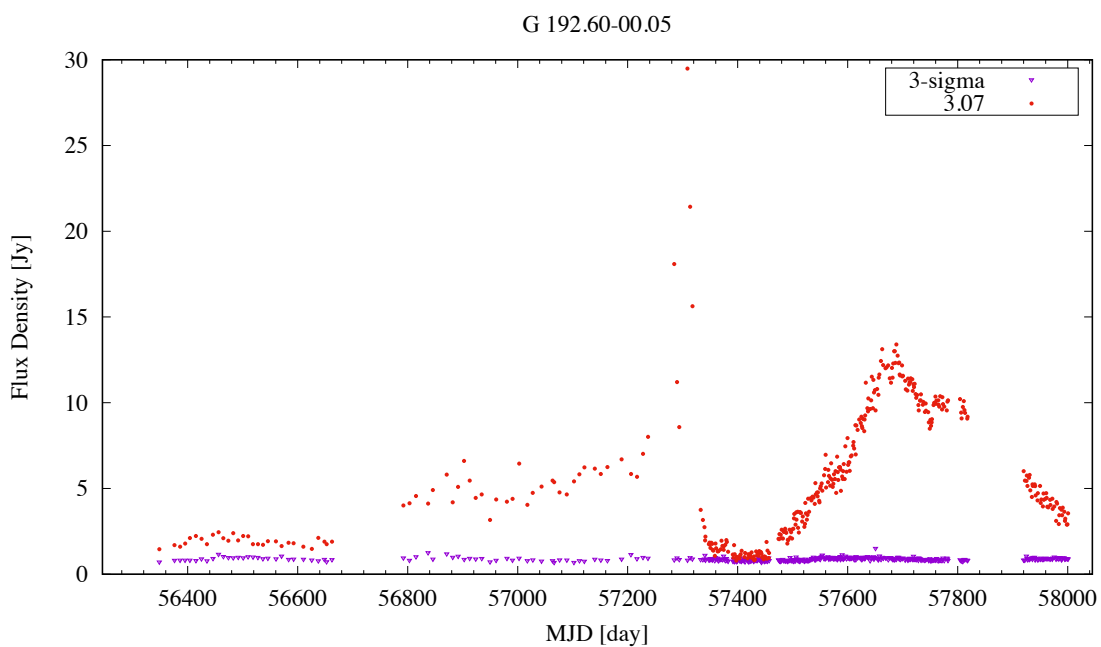


図 44 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}}=4.94$ [km/s]成分に関する解析結果である。図 45～図 48 は図 9～図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.02$)。

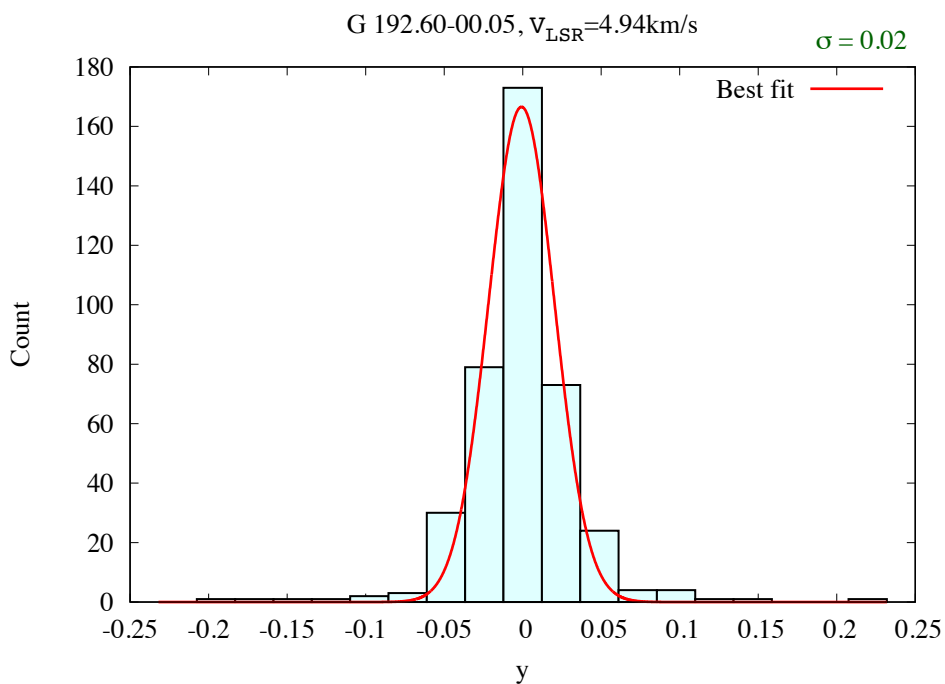


図 45 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

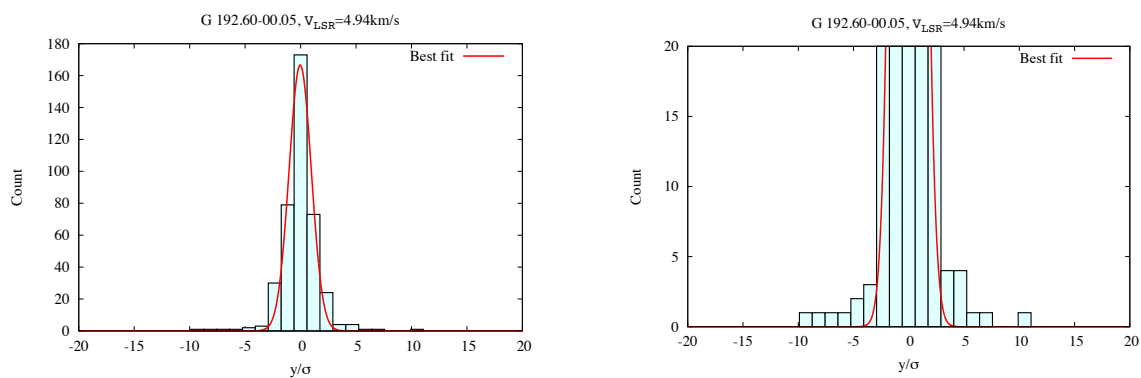


図 46 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

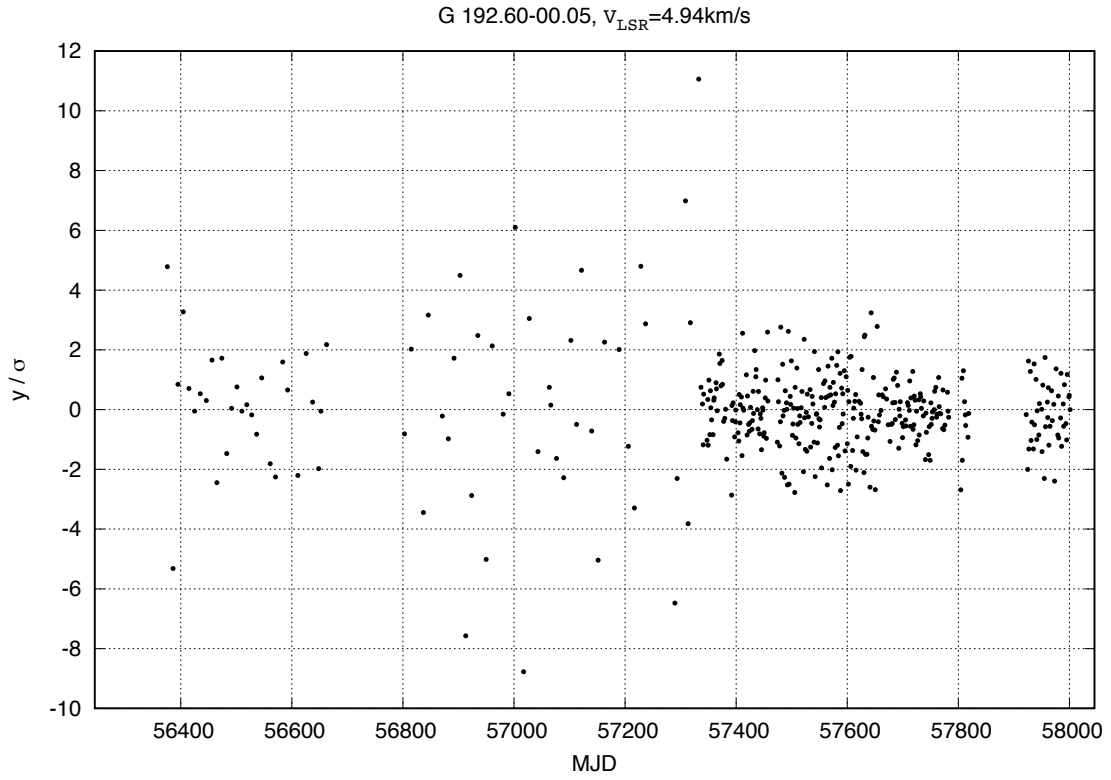


図 47 : y/σ の時系列変動プロット。

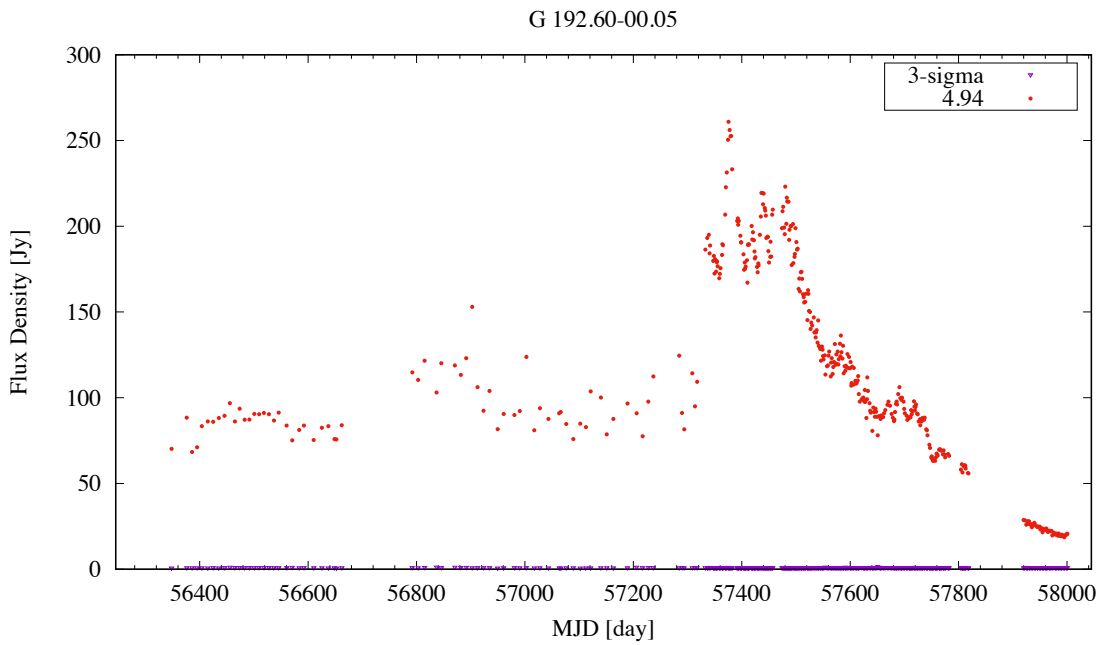


図 48 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}}=5.34$ [km/s]成分に関する解析結果である。図 49～図 52 は図 9～図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.02$)。

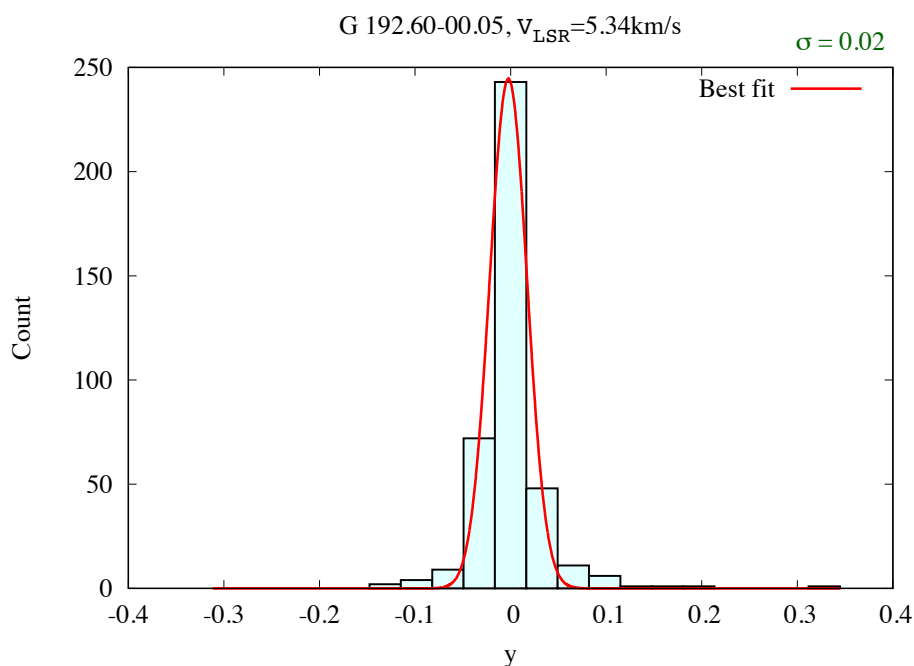


図 49：度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

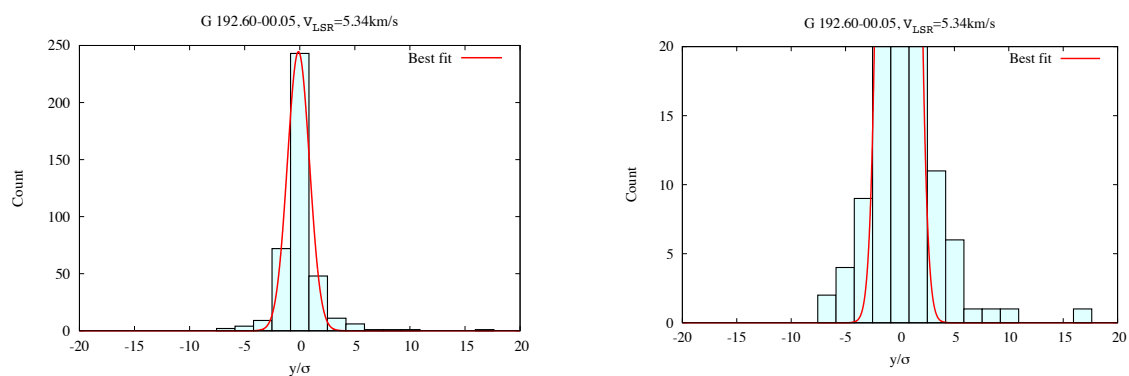


図 50：1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

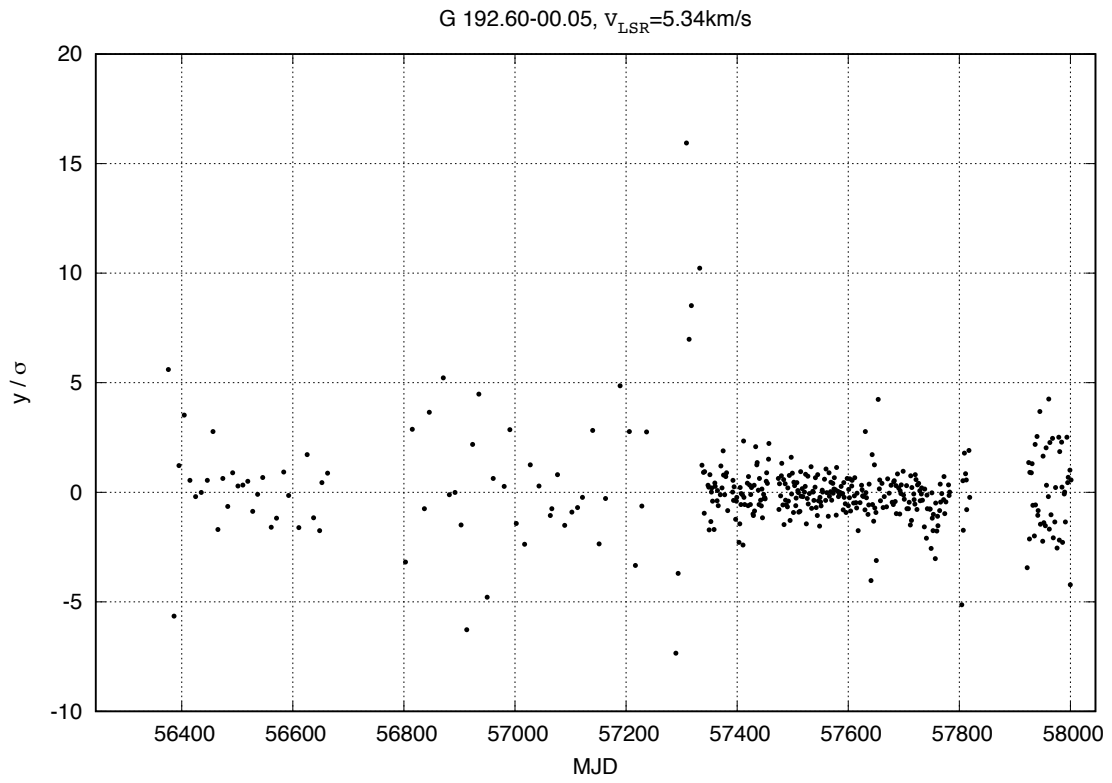


図 51 : y/σ の時系列変動プロット。

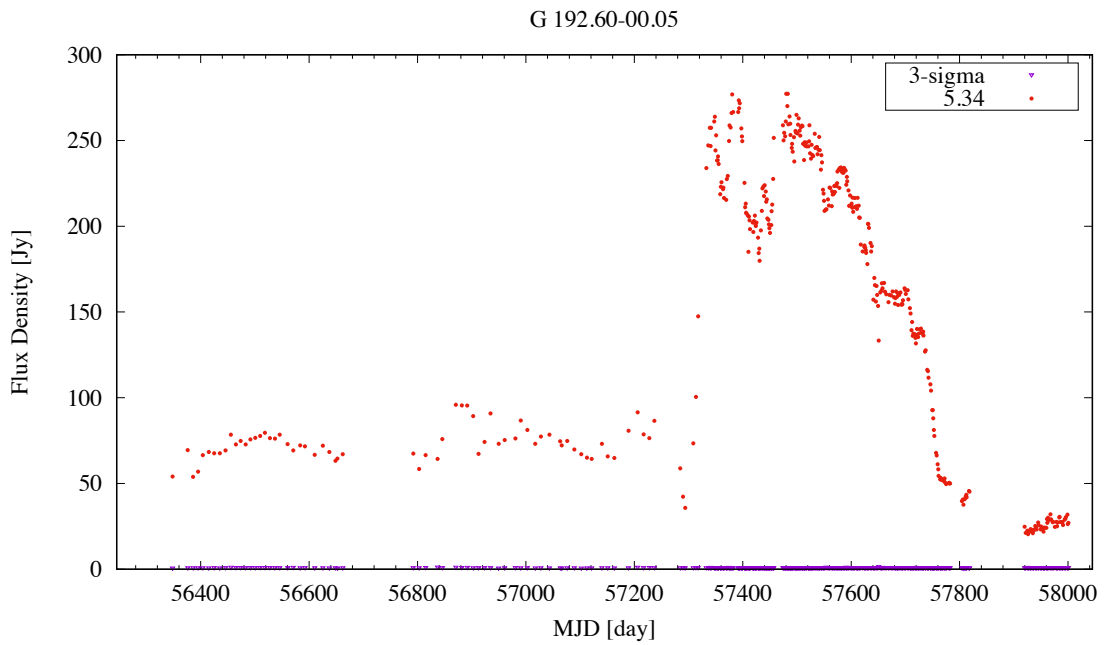


図 52 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は $V_{\text{LSR}}=5.87$ [km/s]成分に関する解析結果である。図 53~図 56 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.02$)。

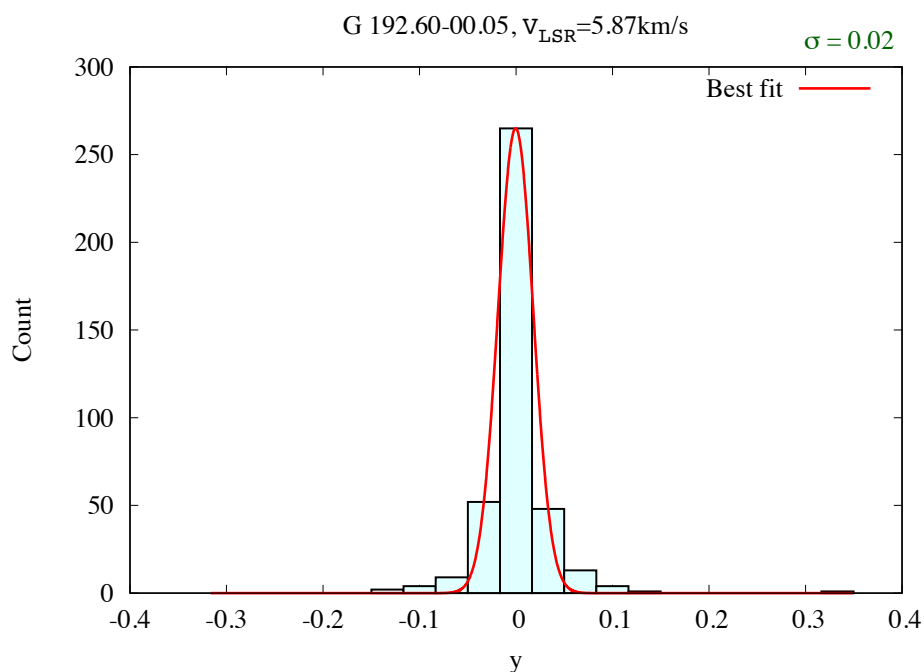


図 53 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

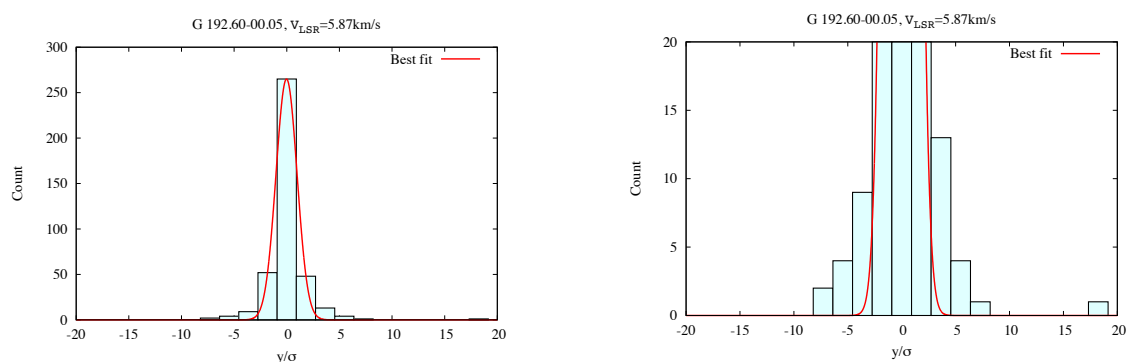


図 54 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

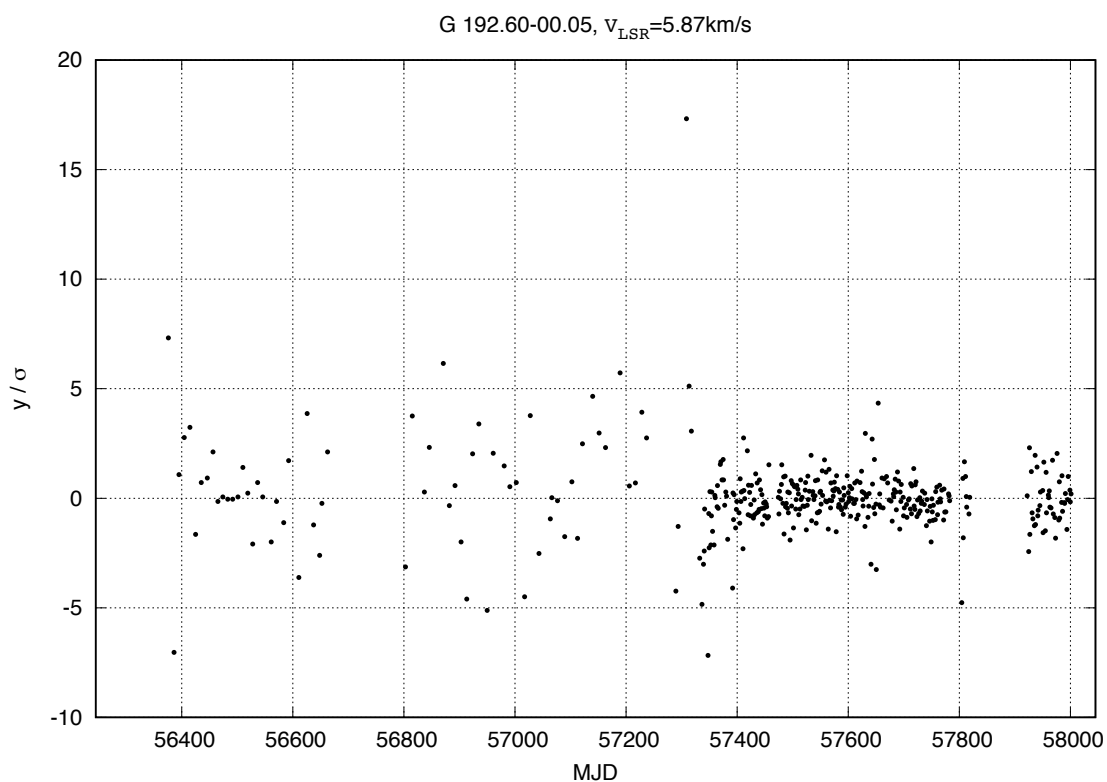


図 55 : y/σ の時系列変動プロット。

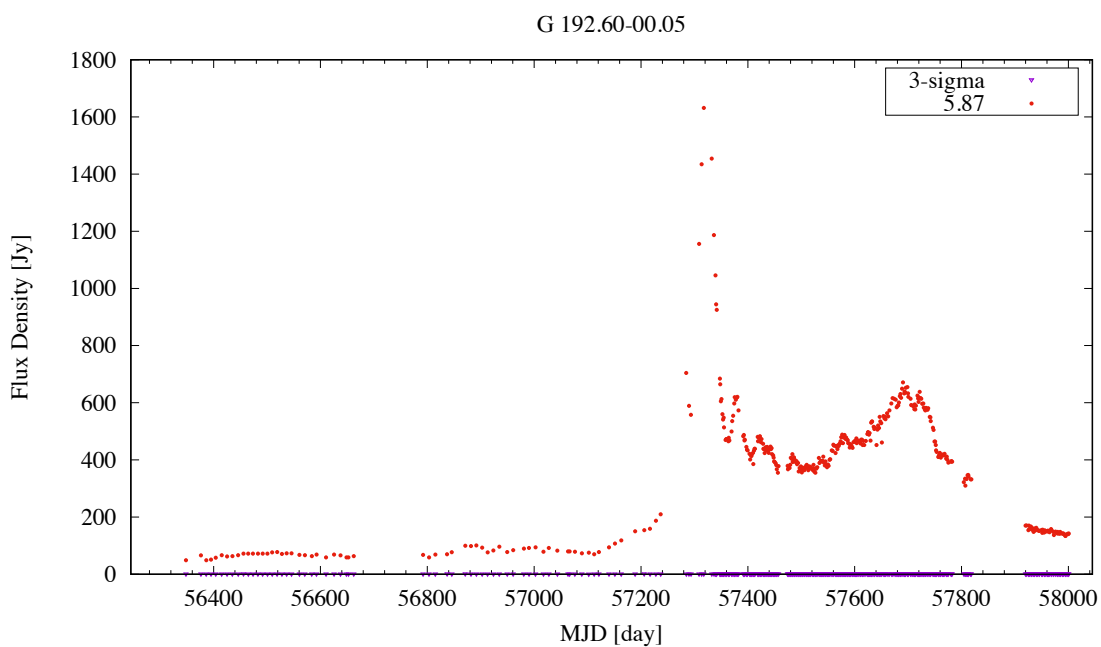


図 56 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は $V_{\text{LSR}}=6.42$ [km/s]成分に関する解析結果である。図 57~図 60 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.02$)。

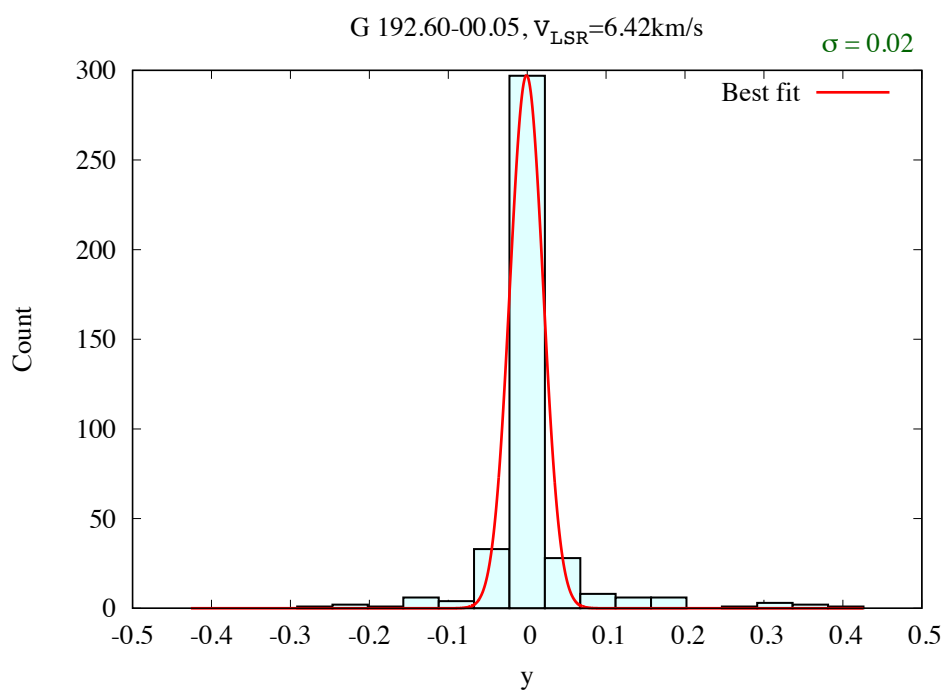


図 57 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

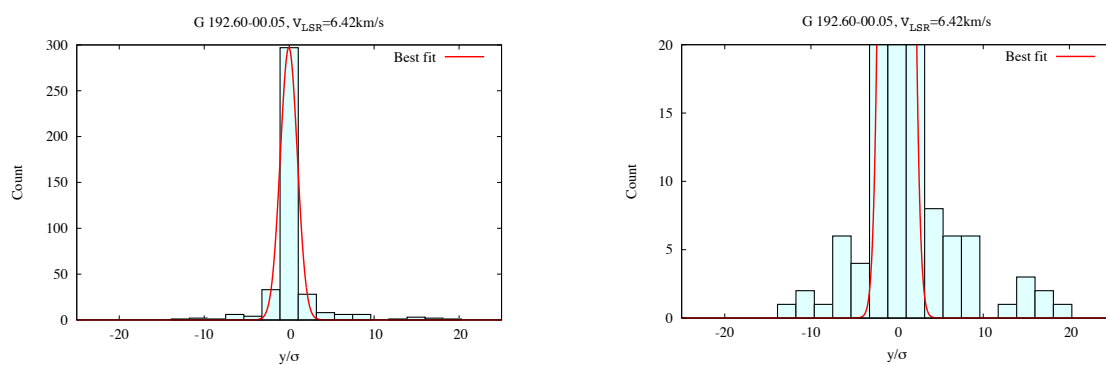


図 58 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

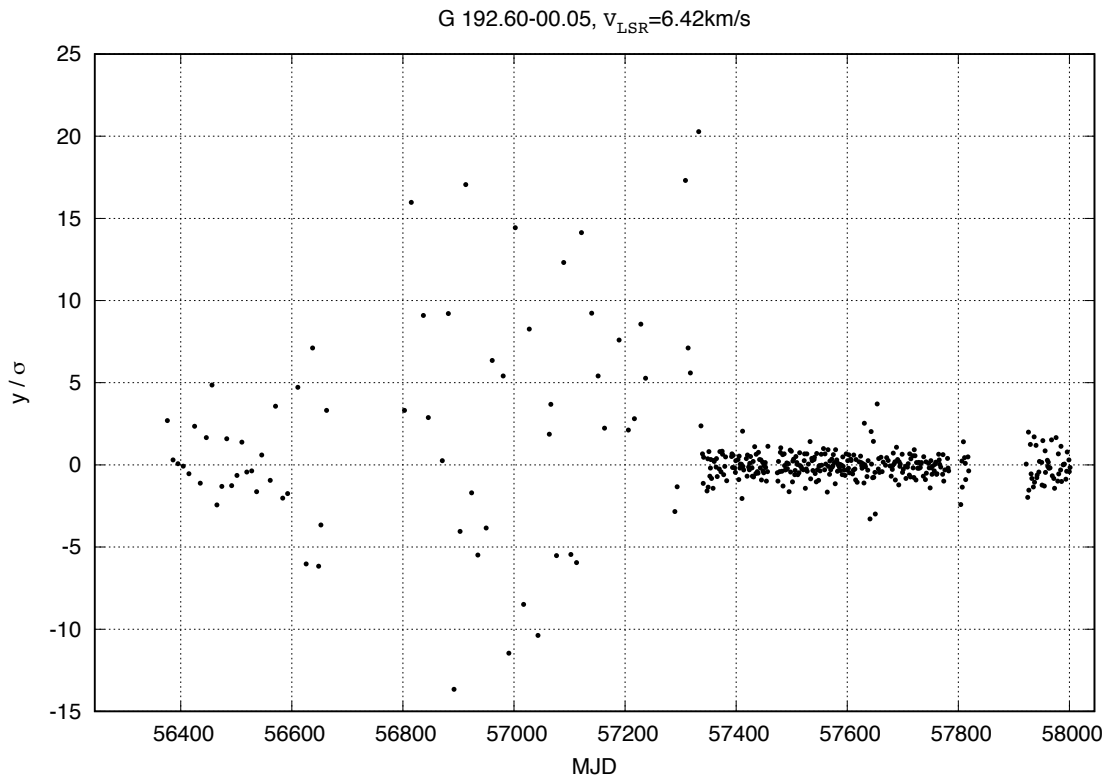


図 59 : y/σ の時系列変動プロット。

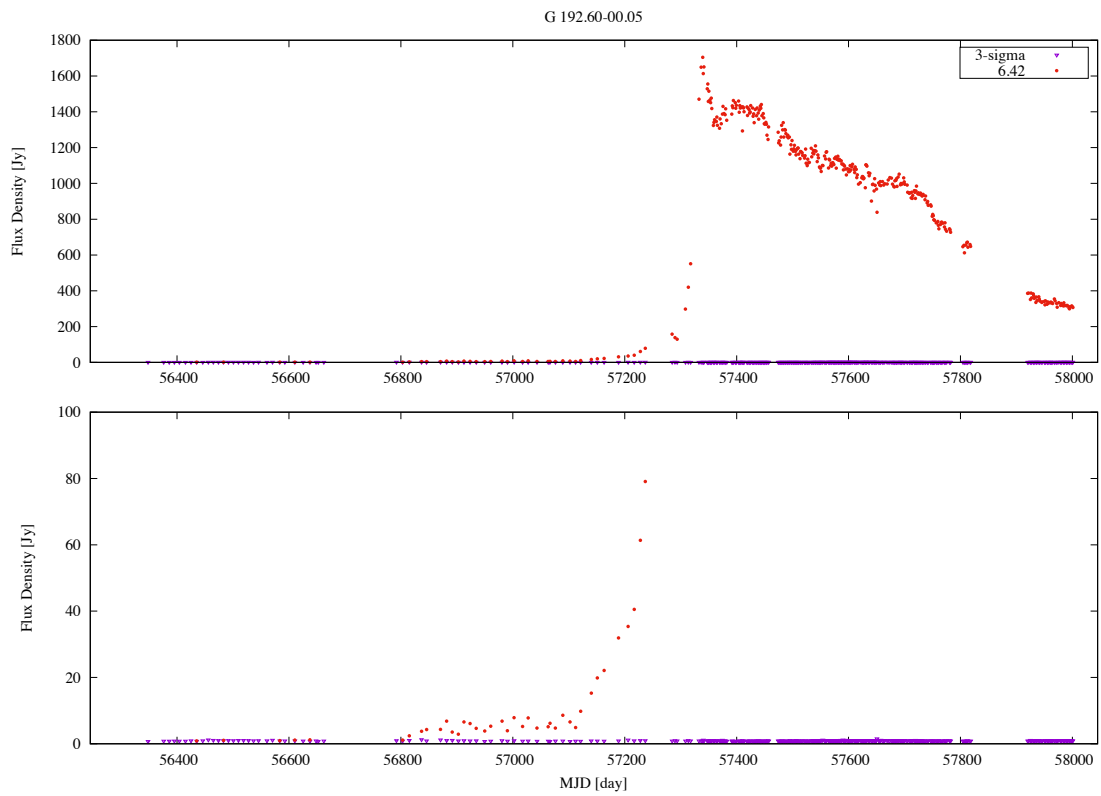


図 60 : フラックス密度の時系列変動プロット。下の図は縦軸を拡大したもの。

以下は $V_{\text{LSR}}=7.93[\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 61~図 64 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.03$)。

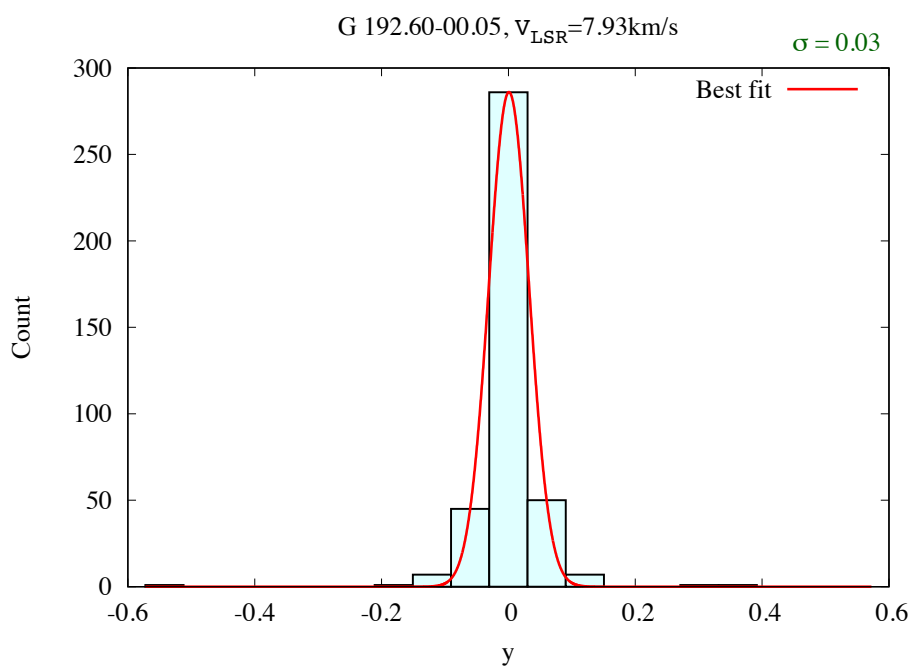


図 61 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

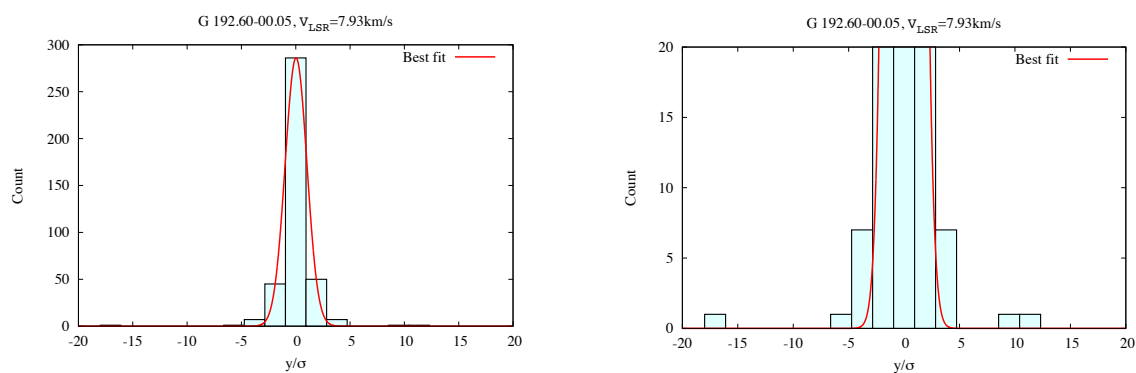


図 62 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

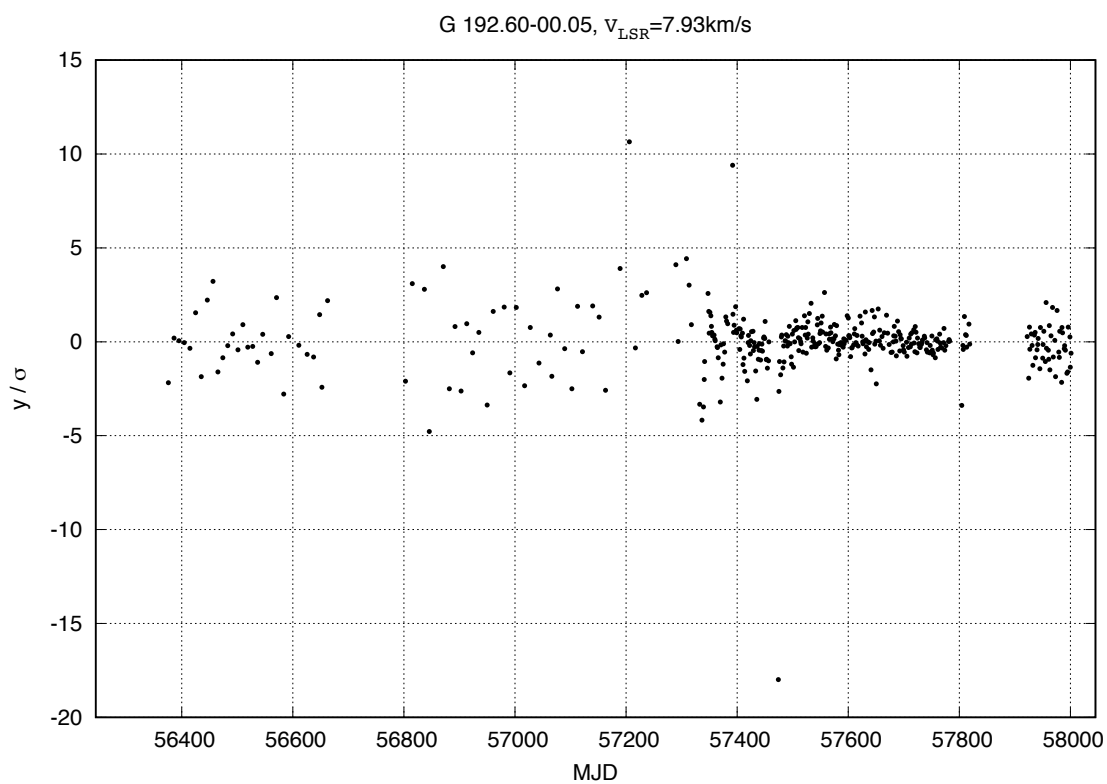


図 63 : y/σ の時系列変動プロット。

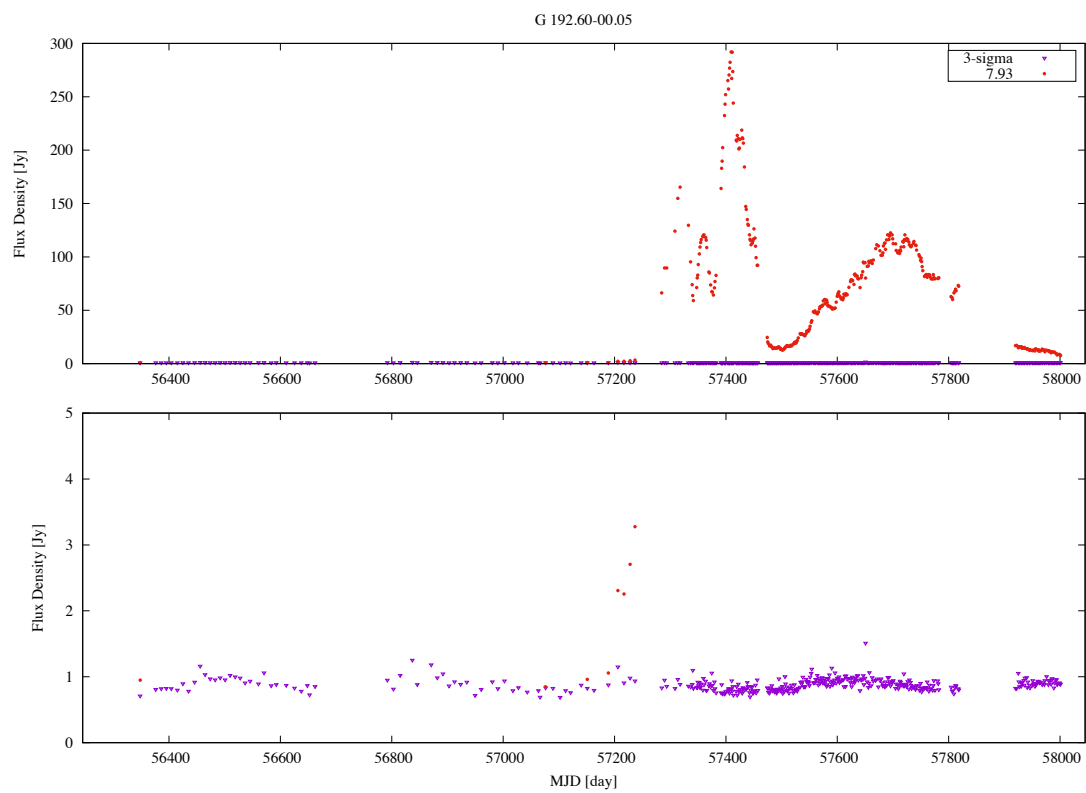


図 64 : フラックス密度の時系列変動プロット。下の図は縦軸を拡大したもの。

4.2.9 IRAS22198+6336

天体 IRAS22198+6336 は 6 つの速度成分が選出された。以下は、 $V_{\text{LSR}} = -16.89 [\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 65~図 68 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

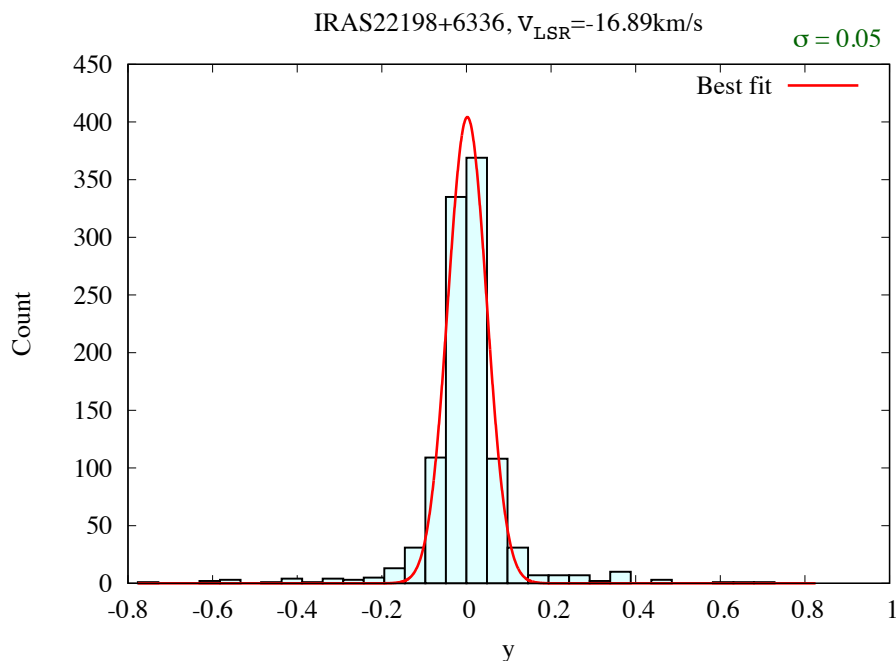


図 65 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

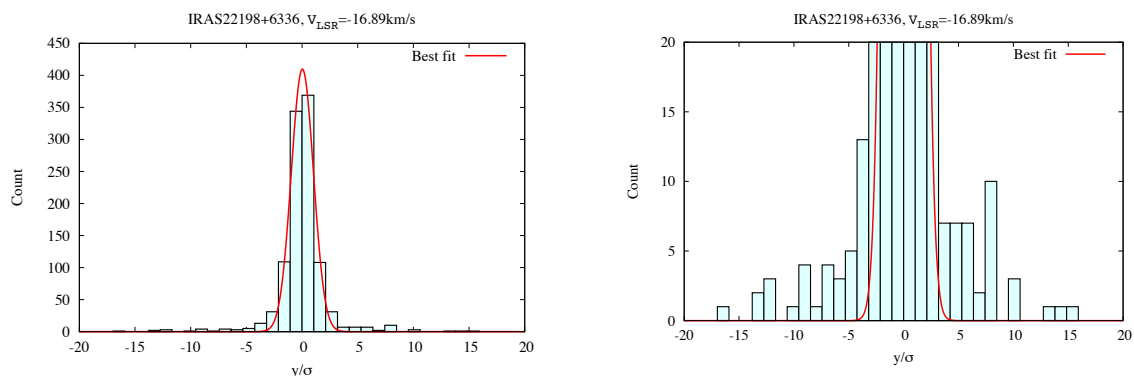


図 66 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

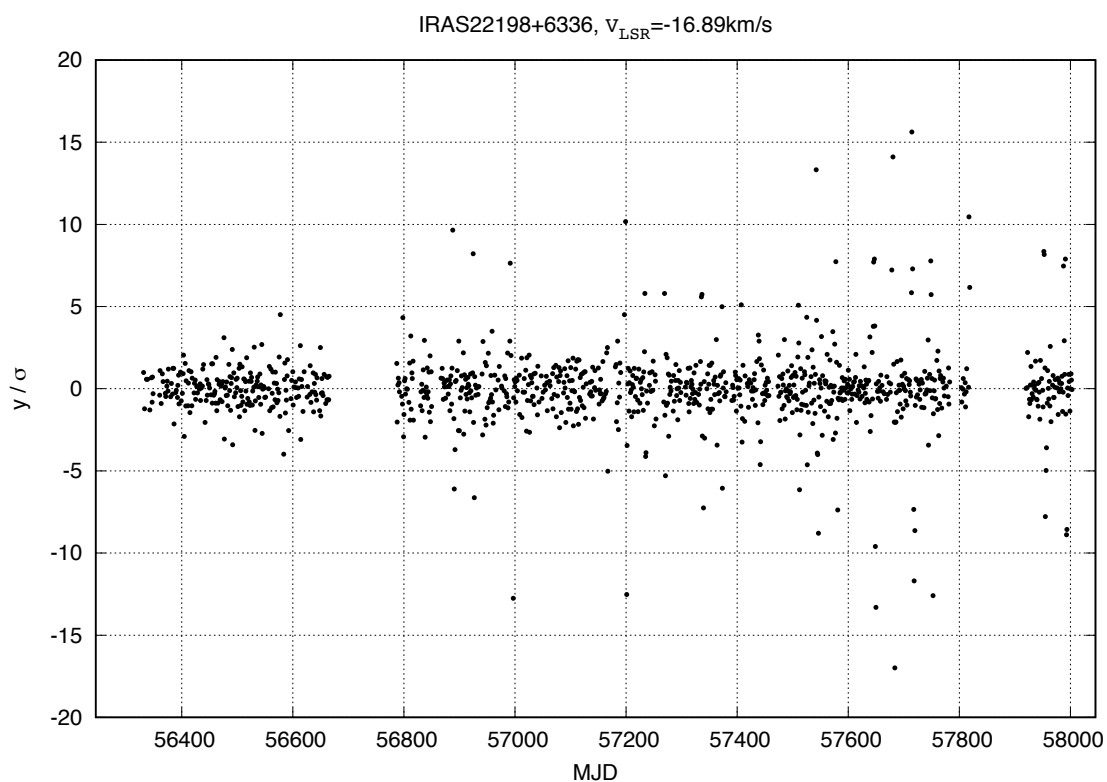


図 67 : y/σ の時系列変動プロット。

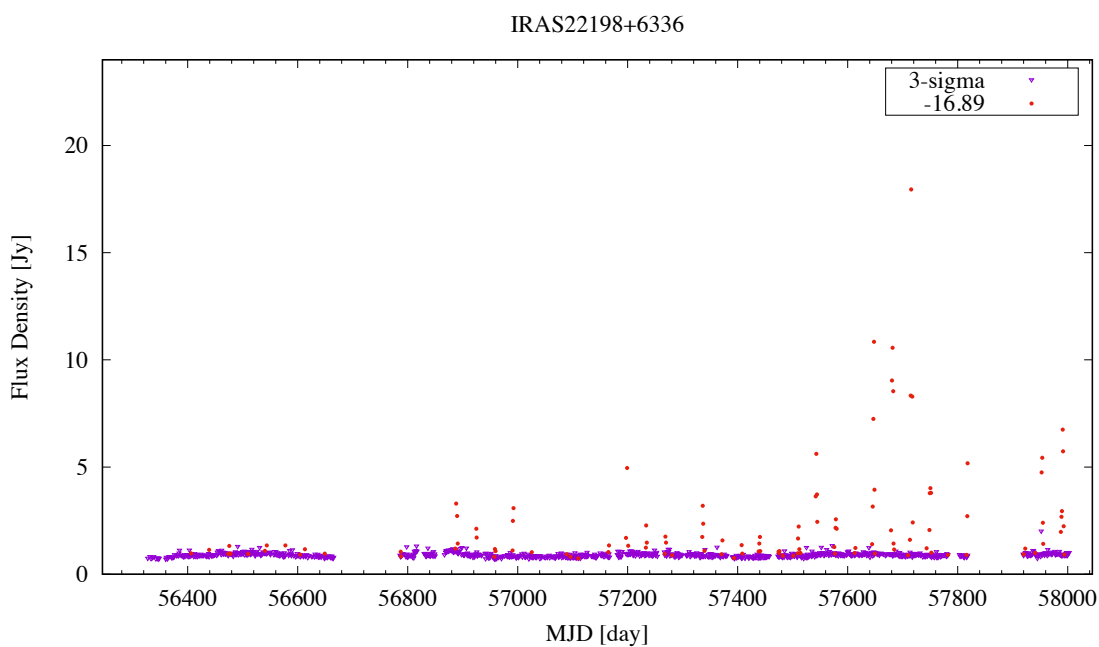


図 68 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}} = -15.51 [\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 69～図 72 は図 9～図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.04$)。

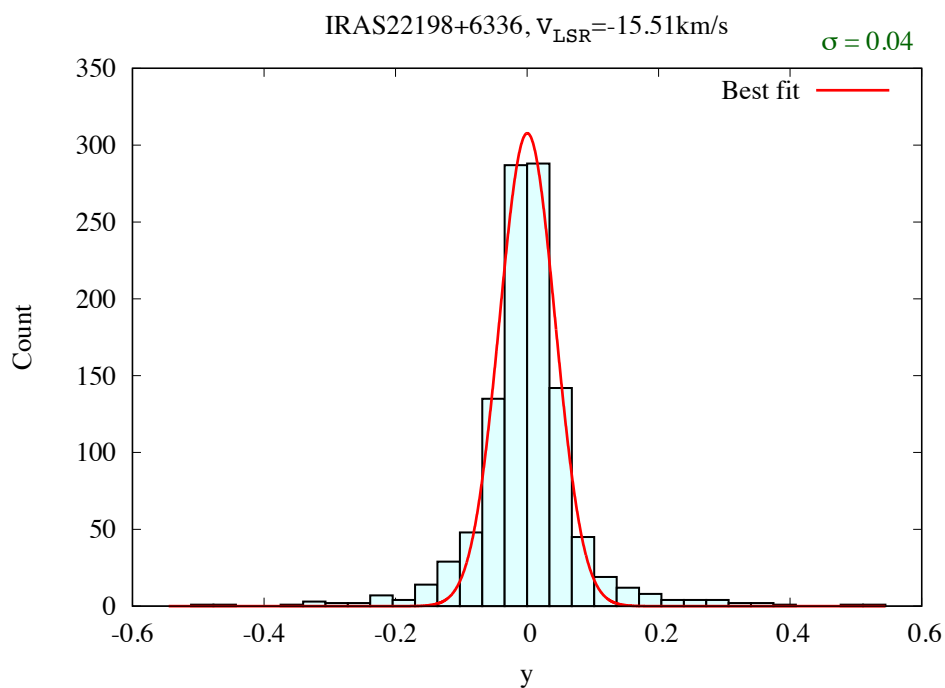


図 69 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

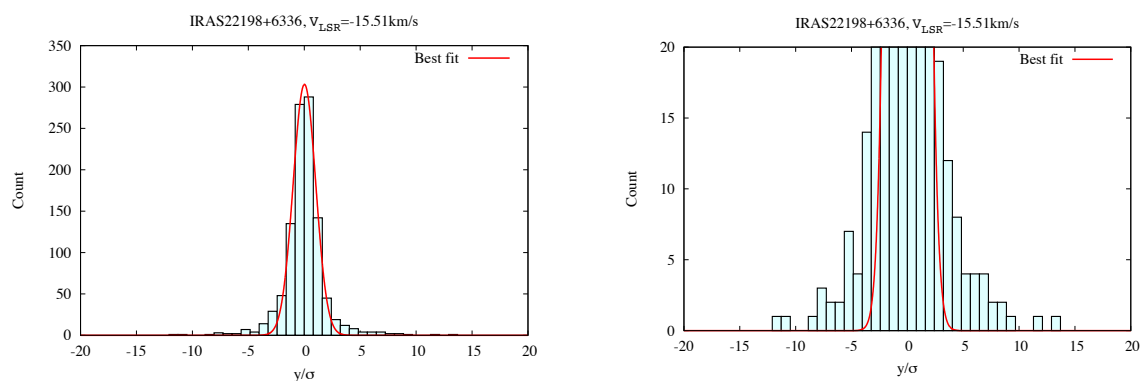


図 70 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

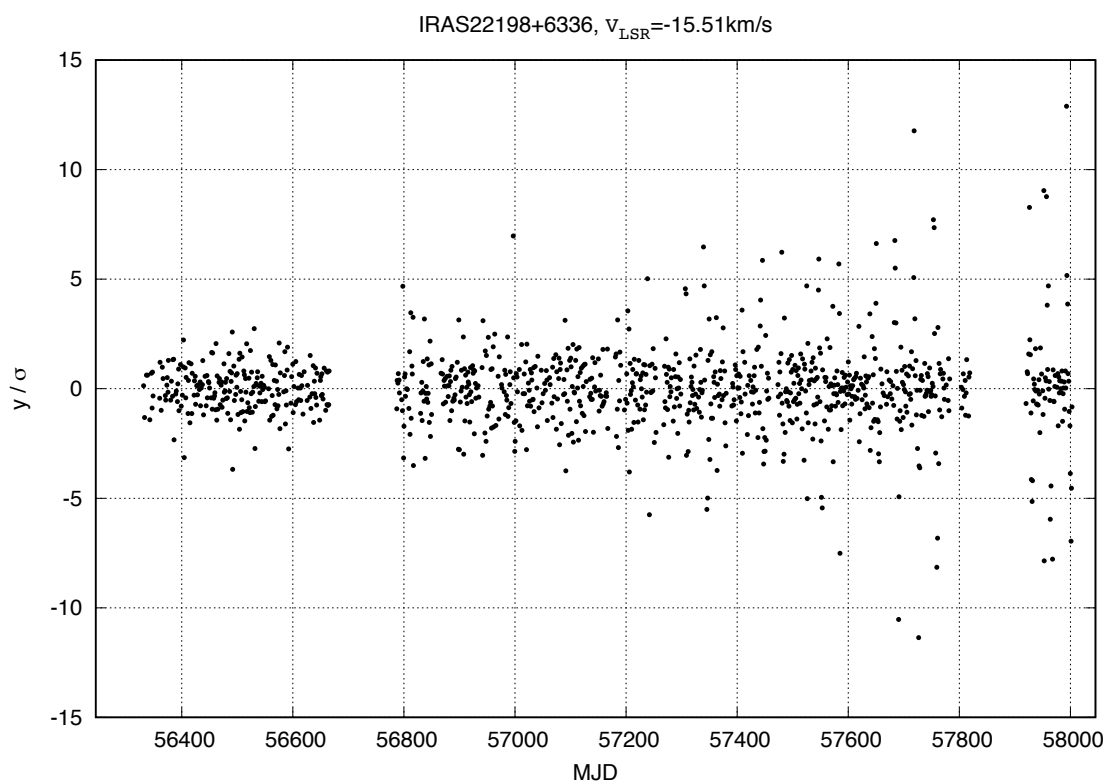


図 71 : y/σ の時系列変動プロット。

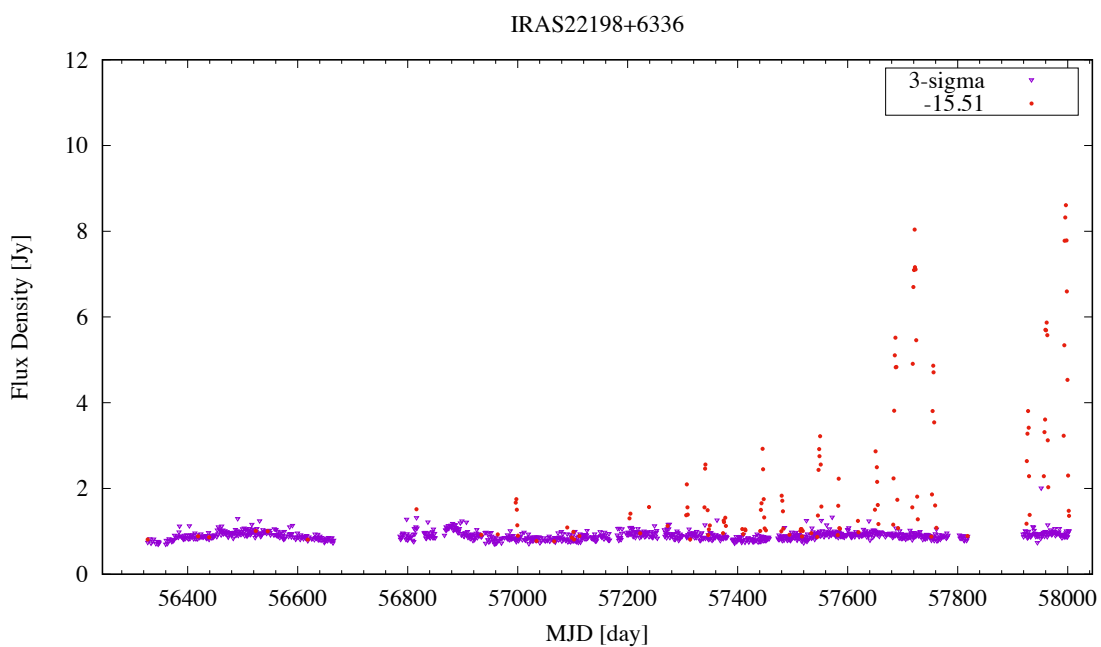


図 72 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}} = -10.89 [\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 73～図 76 は図 9～図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

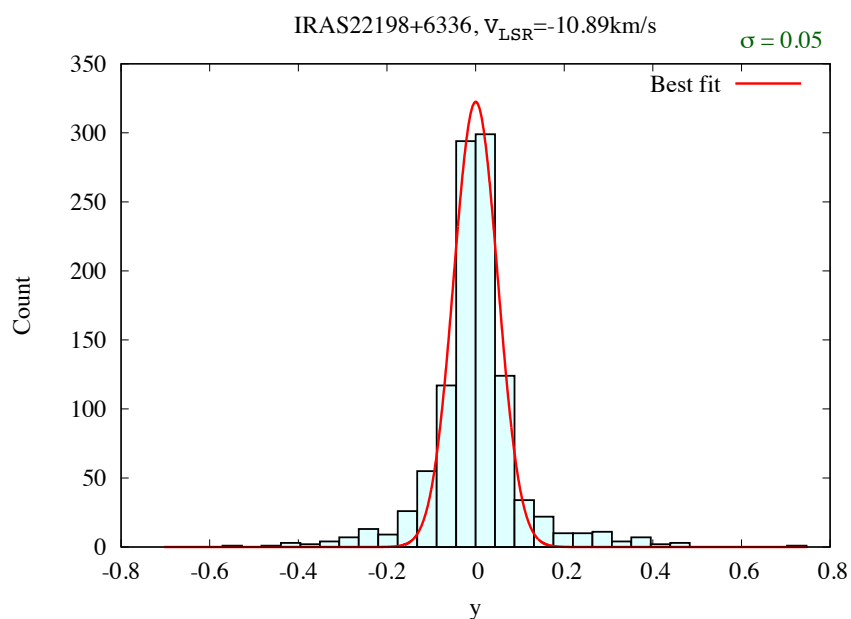


図 73 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

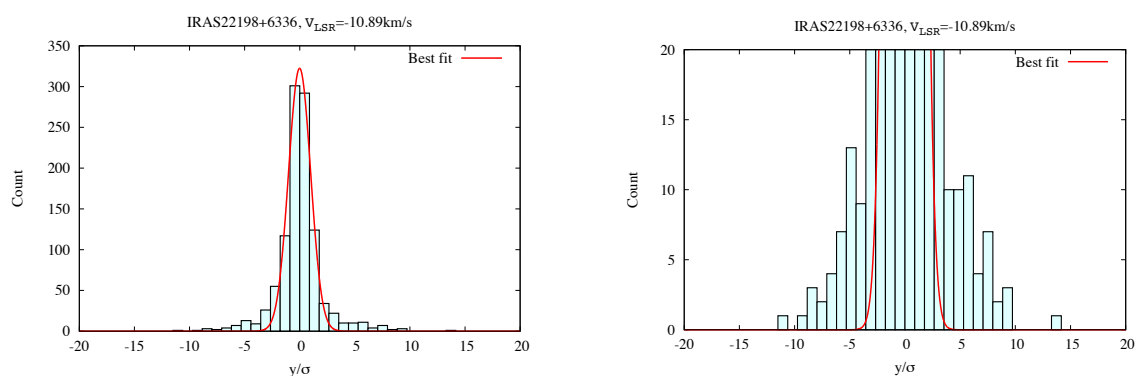


図 74 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

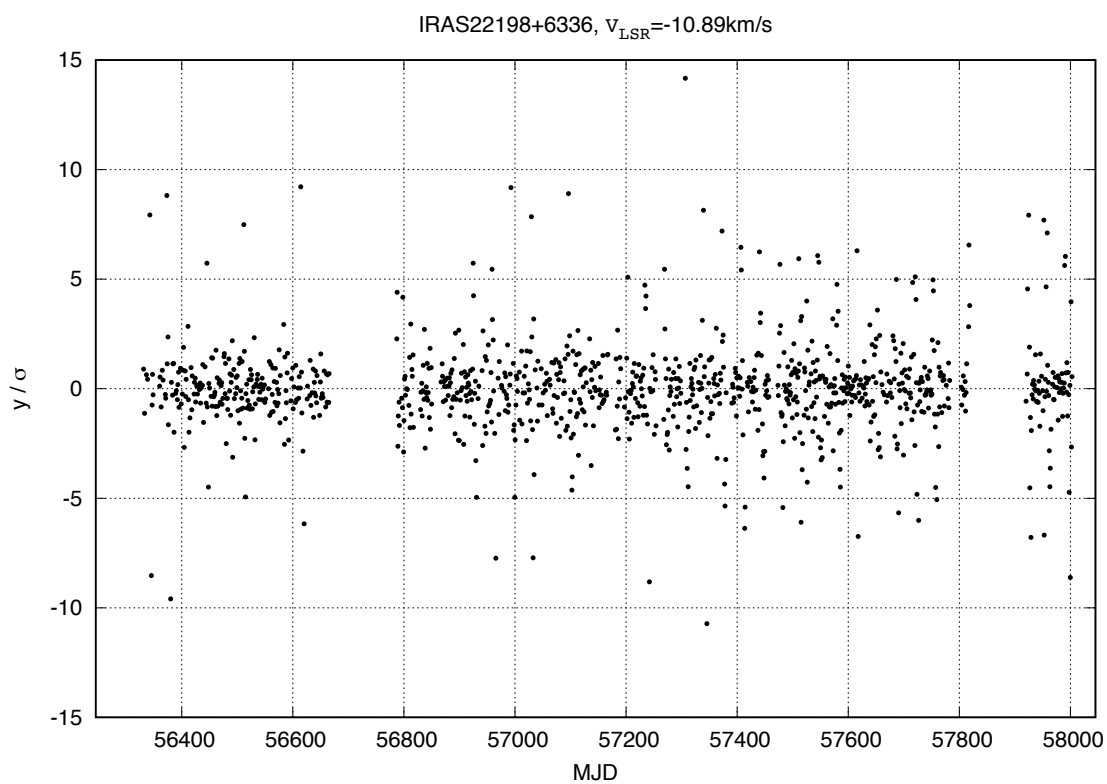


図 75 : y/σ の時系列変動プロット。

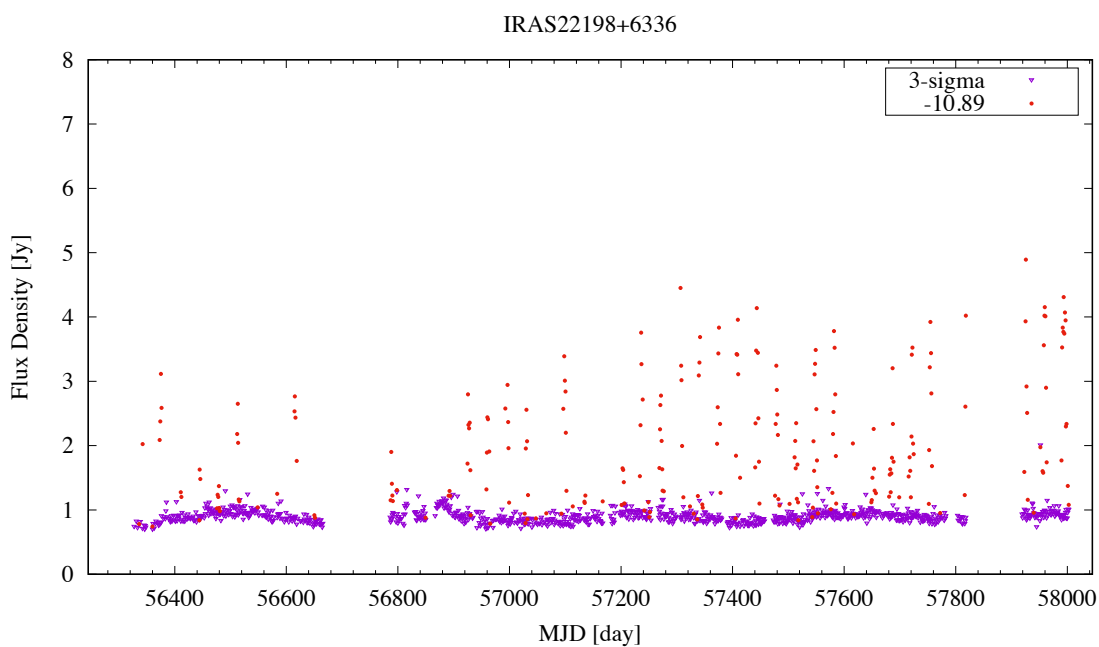


図 76 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}} = -9.19 [\text{km/s}]$ 成分に関する解析結果である。図 77~図 80 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.05$)。

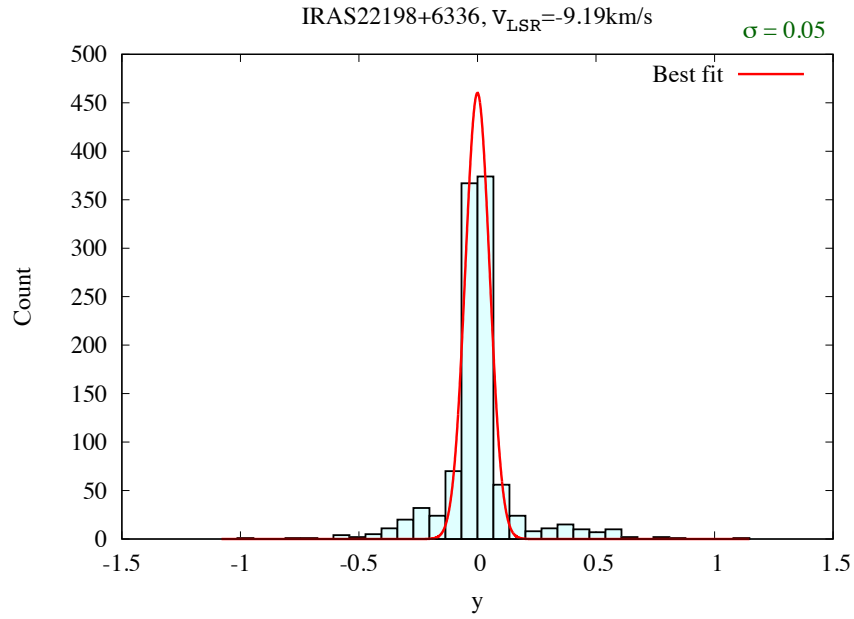


図 77 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

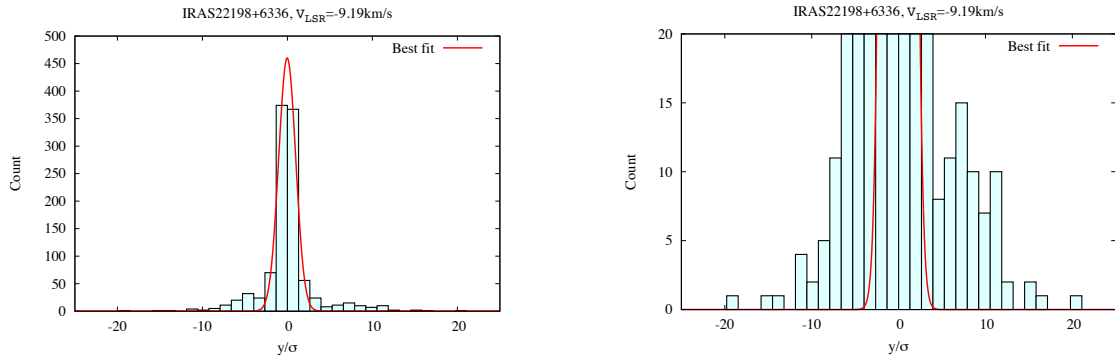


図 78 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

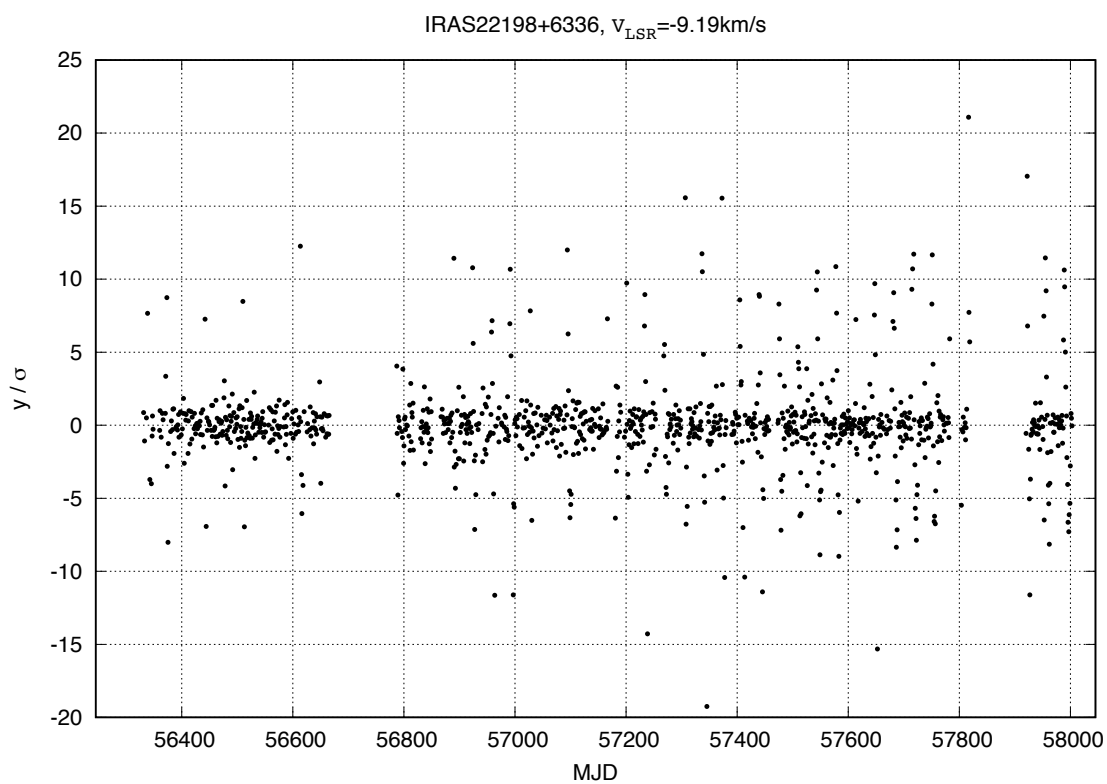


図 79 : y/σ の時系列変動プロット。

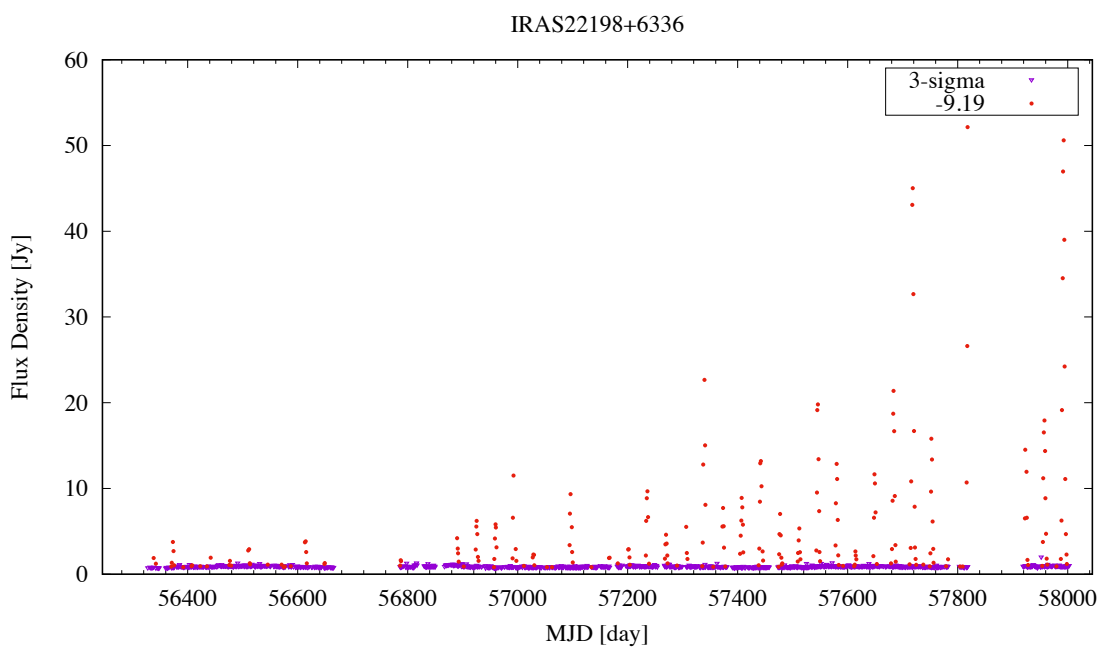


図 80 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}} = -8.49 \text{ [km/s]}$ 成分に関する解析結果である。図 81~図 84 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.06$)。

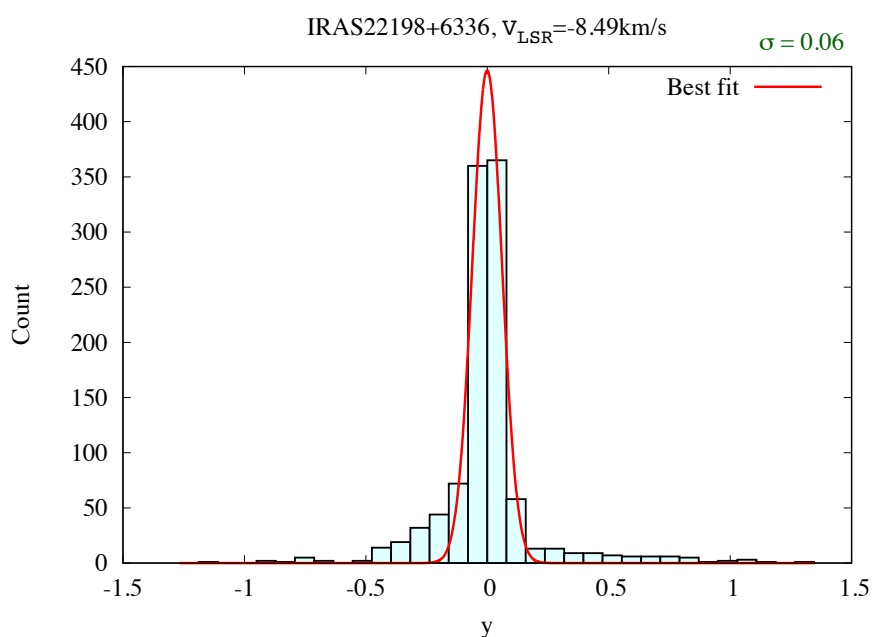


図 81 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

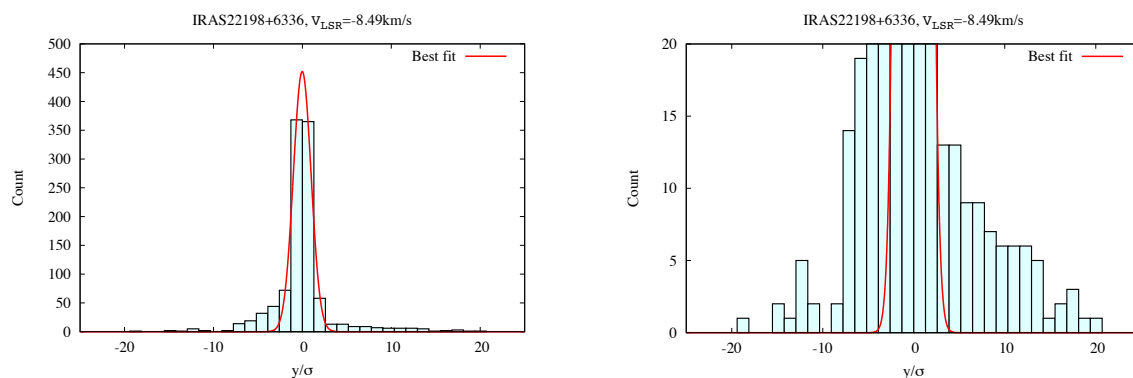


図 82 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

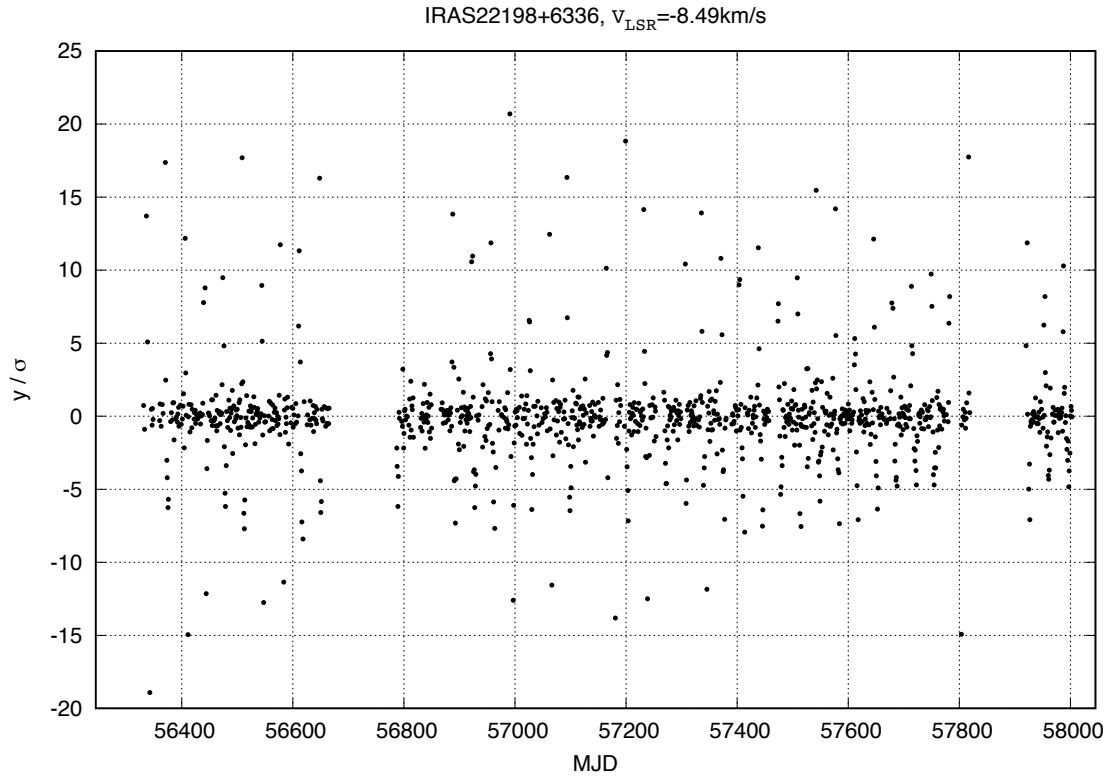


図 83 : y/σ の時系列変動プロット。

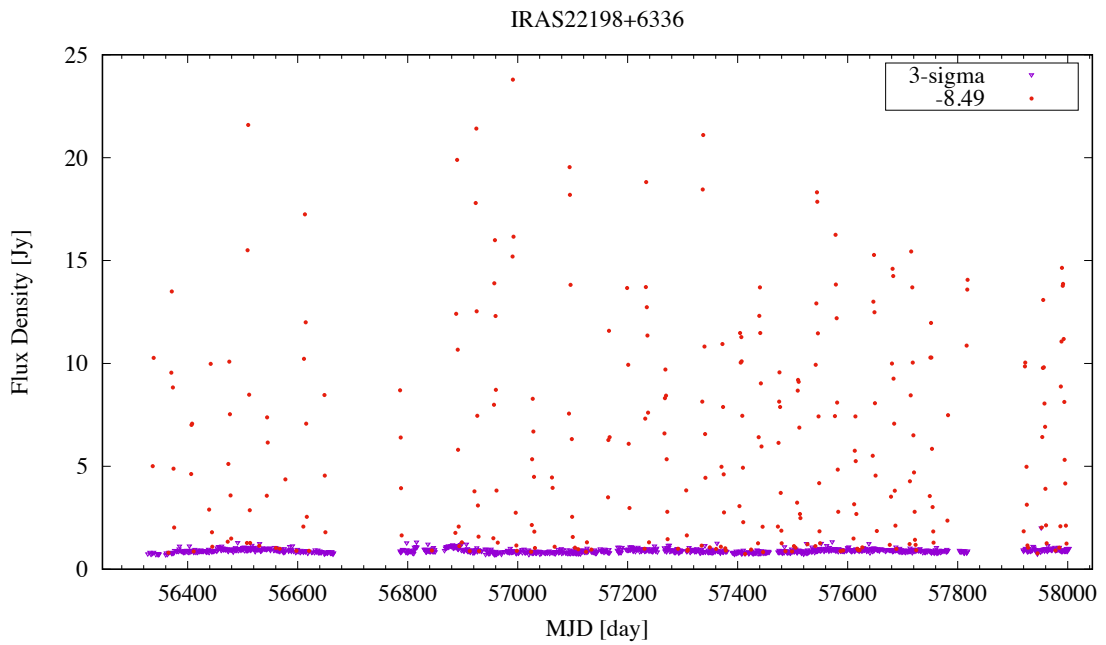


図 84 : フラックス密度の時系列変動プロット。

以下は、 $V_{\text{LSR}} = -7.31 \text{ km/s}$ 成分に関する解析結果である。図 85~図 88 は図 9~図 12 と同様である(ただし、 $\sigma = 0.07$)。

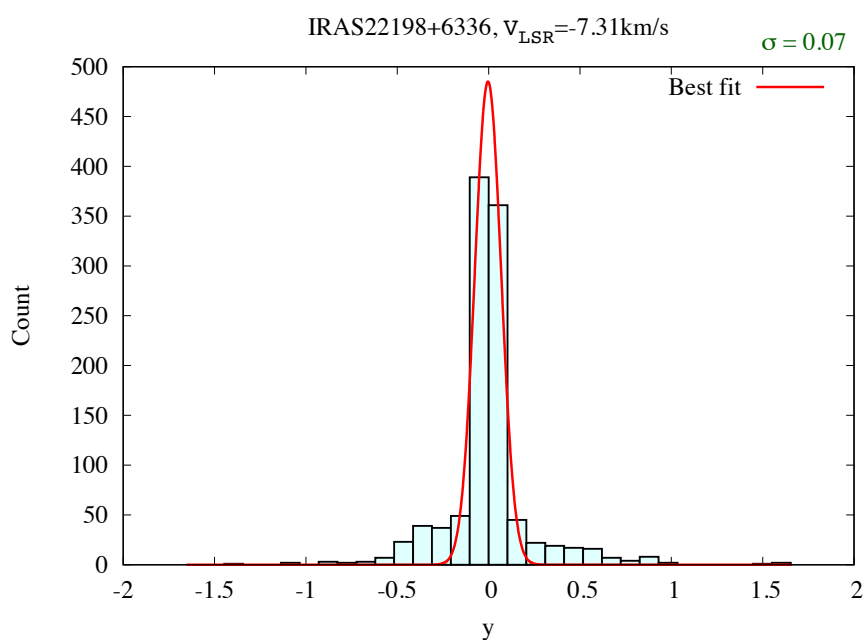


図 85 : 度数分布をガウシアンでフィッティングした結果。

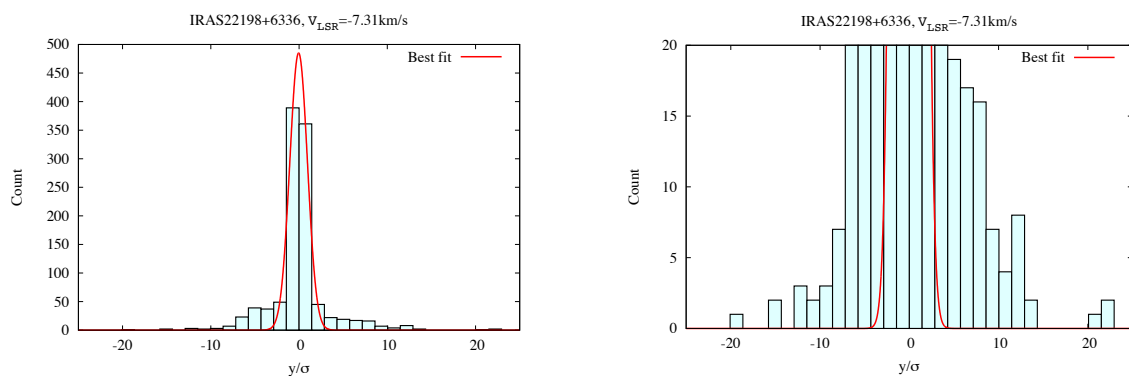


図 86 : 1 日あたりの強度変化率の対数値を得られた標準偏差で割って規格化した値を確率変数とした度数分布 (左図)。右の図は縦軸の値を拡大したもの。

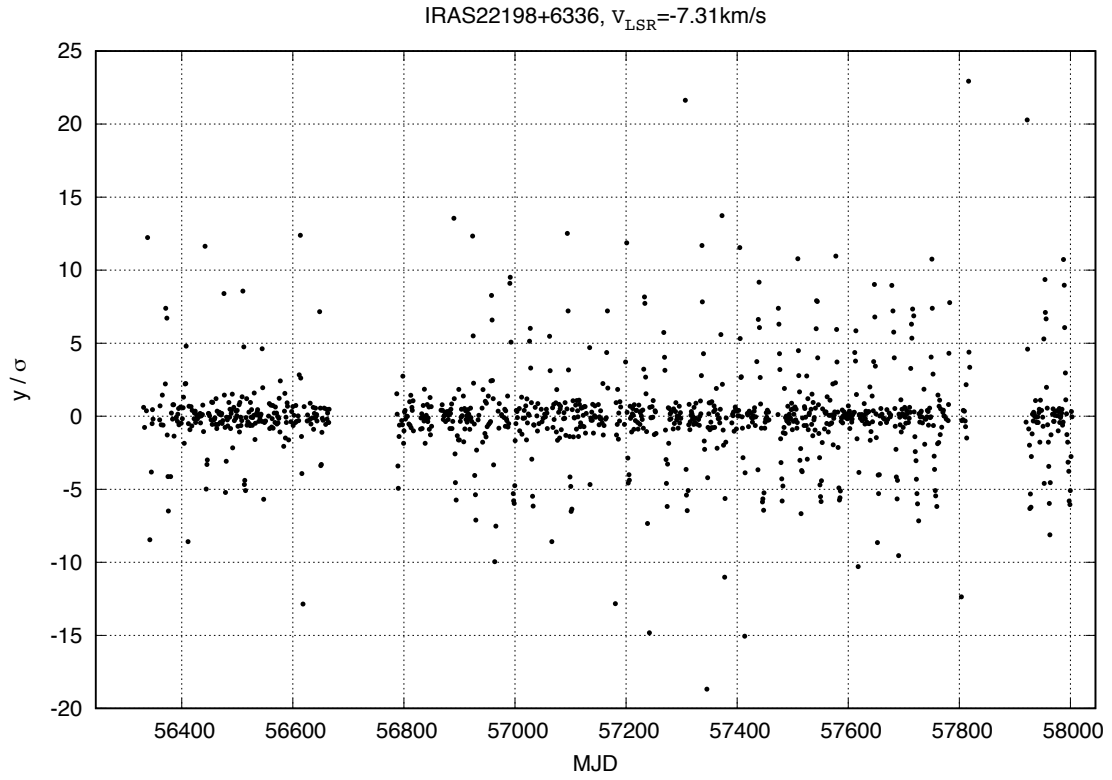


図 87 : y/σ の時系列変動プロット。

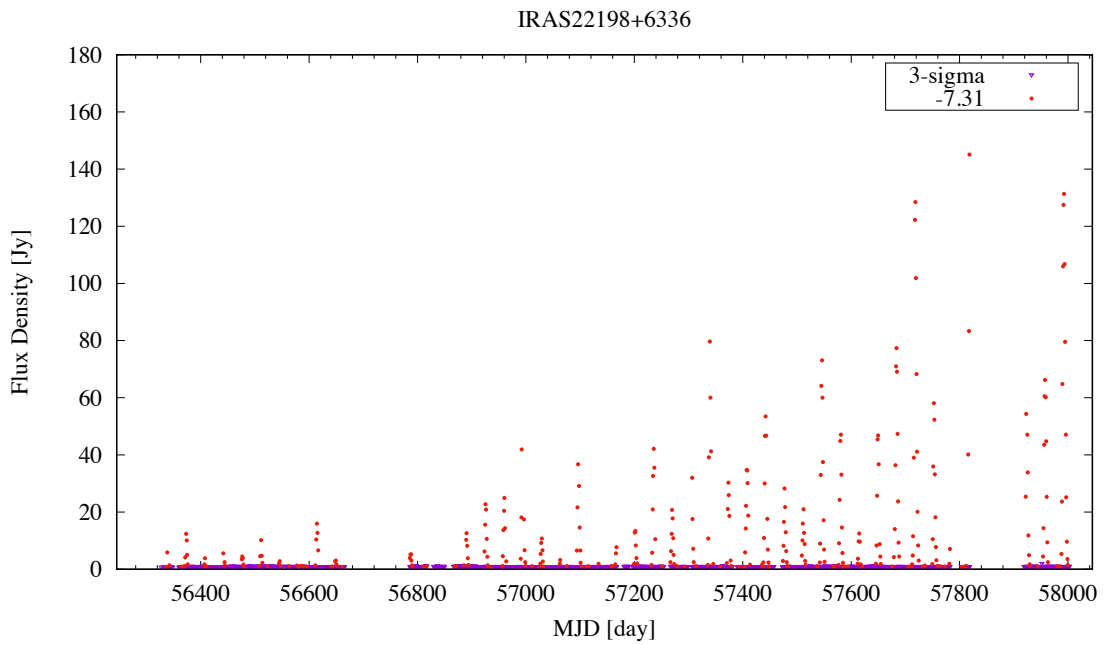


図 88 : フラックス密度の時系列変動プロット。

4.3 考察

本解析の特徴は、普段のフラックス密度の変動に対して確率的に極めて稀に発生する強度変動を検出できる点にある。したがって、本解析によって選出された天体・速度成分に関しては、普段の強度変動の振る舞いから大きく逸脱した強度変動現象を示したと言える。表 9 に本解析で選出した天体の観測頻度を示す。これらの天体の強度変動の特徴を調査したところ、1 日でフラックス密度が 2.0 倍以上に増加する強度変動を示していた天体は G 014.23-00.50, G 033.64-00.21, IRAS22198+6336 のみであった。G 014.23-00.50 と IRAS22198+6336 に関しては周期的強度変動天体であり G 014.23-00.50 は約 24 日、IRAS22198+6336 は約 34 日で周期変動することが判明している(Fujisawa et al. 2014; Sugiyama et al. 2017; 永瀬桂 修士論文. 2015)。G 027.86-00.24 と G 075.76+00.34 はどちらも第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期は約 4 日に 1 回と低頻度で観測している。今後、これらの天体については正確な増光度を導出するために高頻度なモニター観測を実施してより詳細な強度変動を捉える必要があると思われる。その他の天体に関しては、静穏時から極大時にかけて増光するのに要するタイムスケールが約 10 日以上であり本研究で検出を狙っている強度変動のタイムスケールとしては不適であった。

表 9 : 選出した天体の観測頻度。

天体名	観測頻度
G 009.62+00.19	すべての期間でほぼ毎日観測。
G 014.23-00.50	第 1 期は約 9 日に 1 回、第 2 期,第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
G 014.33-00.63	第 3 期の途中 2016/07/14 (MJD:57583)頃以降、約 4 日に 3 回観測。
G 027.86-00.24	第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期は約 4 日に 1 回観測。
G 033.64-00.21	第 2 期の途中 2014/07/03 (MJD:56841)頃以降、ほぼ毎日観測。
G 075.76+00.34	第 1 期,第 2 期は約 9 日に 1 回、第 3 期,第 4 期は約 4 日に 1 回観測。
G 174.19-00.09	第 1 期は約 9 日に 1 回、第 2 期,第 3 期,第 4 期はほぼ毎日観測。
G 192.60-00.05	第 3 期の途中 2015/11/13 (MJD:57339)頃以降、ほぼ毎日観測。
IRAS22198+6336	すべての期間でほぼ毎日観測。

5 高萩 32m 電波望遠鏡による高頻度モニター観測

5.1 観測

高萩市に位置する 32m 電波望遠鏡(以下、高萩局と称す)を用いて 6.7GHz メタノールメーザーの毎日モニター観測を実施した。本観測の目的は、第 3.1 節の解析によって選出された低頻度観測天体(表 5 参照)に対して、1 日間隔の強度変動を捉えて実際に 1 日でフラックス密度が 2.0 倍以上となる強度変動現象を示すのかどうかを検証することである。本モニター観測の実施期間は 2017 年 11 月 21 日から 2018 年 1 月 17 日である。表 10 に本観測を実施した天体の一覧を示す。観測天体数は 35 天体である。表 5 との違いは以下の通りである。G 012.02-00.03、G 032.74-00.08、G 049.57-00.38、G 069.52-00.97 は強度変動が小さい天体であり強度較正を目的として観測をおこなった。また表 5 のうち G 014.23-00.50、G 033.64-00.21、G 192.60-00.05、G 232.62+00.99、IRAS22198+6336 は日立局でほぼ毎日観測を行っている天体であるため、今回の観測天体からは除外した。

表 10 : 観測天体の一覧。*印は較正天体。

天体名	天体名
G 005.89-00.39	G 035.20-00.74
G 009.21-00.20	G 035.79-00.17
G 009.62+00.19	G 036.70+00.09
G 010.20-00.34	G 037.47-00.11
G 011.49-01.48	G 039.10+00.48
G 012.02-00.03 *	G 045.47+00.13
G 012.88+00.48	G 045.49+00.13
G 014.33-00.63	G 049.03-01.06
G 019.36-00.03	G 049.57-00.38 *
G 022.36+00.06	G 049.60-00.25
G 025.38-00.18	G 069.52-00.97 *
G 027.86-00.24	G 075.76+00.34
G 028.39+00.08	G 078.10+03.64
G 030.70-00.07	G 123.05-06.31
G 031.04+00.36	G 183.34-00.59
G 032.74-00.08 *	G 189.78+00.34
G 033.74-00.15	G 351.25+00.65
G 034.39+00.24	

5.2 解析方法と結果

5.2.1 解析方法

第 3.1 節と同様に式(5)を用いた解析を行い、突発現象を選出した。

5.2.2 結果

解析結果を表 11 に示す。

表 11 : 解析結果。

天体名	視線速度[km/s]	検出回数	$R1[\text{day}^{-1}]$
G 351.25+00.65	-11.11	1	2.4
	-10.35	1	3.1

解析の結果、天体 G 351.25+00.65 の $V_{\text{LSR}}=-11.11[\text{km/s}]$ 成分と $V_{\text{LSR}}=-10.35[\text{km/s}]$ 成分で突発現象を 1 回検出した。2 つの成分はどちらも 2017 年 12 月 31 日(MJD:58118)から 2018 年 1 月 1 日(MJD:58119)にかけて増光している。 $V_{\text{LSR}}=-11.11[\text{km/s}]$ 成分に関して、増光時である 2018 年 1 月 1 日のフラックス密度は 5.5Jy、その前日である 2017 年 12 月 31 日のフラックス密度は 1.8Jy であった。 $V_{\text{LSR}}=-10.35[\text{km/s}]$ 成分に関して、増光時である 2018 年 1 月 1 日のフラックス密度は 11.8Jy、その前日である 2017 年 12 月 31 日のフラックス密度は 3.3Jy であった。図 89 は本モニター観測によって取得された G 351.25+00.65 の速度成分ごとの時系列強度変動プロットである。図 90 に静穏時と増光時のスペクトルを示す。

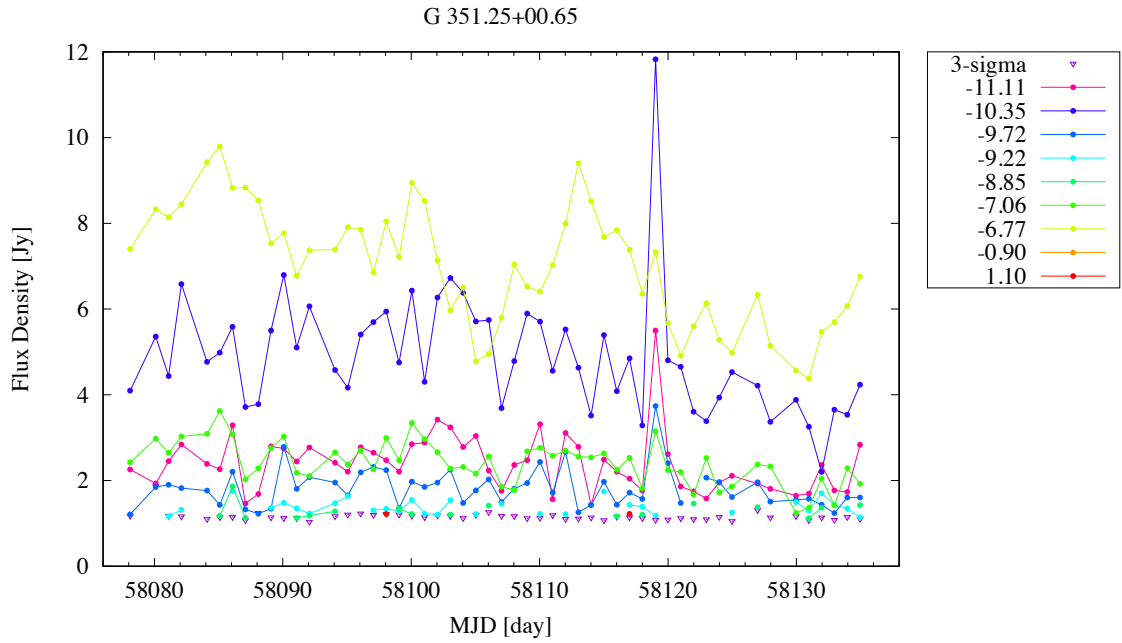


図 89：各速度成分の時系列強度変動プロット。

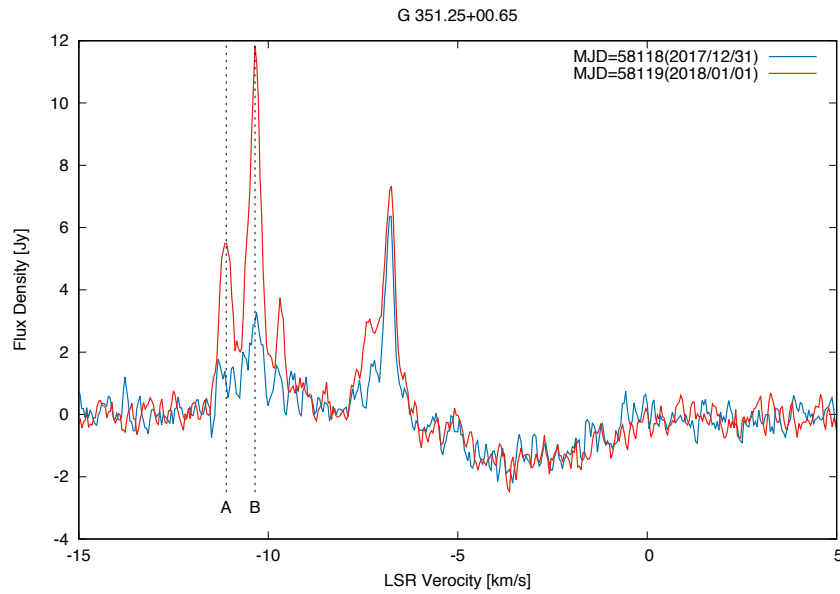


図 90：静穏時と増光時のスペクトル。青色が静穏時、赤色が増光時である。A,B はそれぞれ $V_{\text{LSR}}=-11.11[\text{km/s}]$ 成分と $V_{\text{LSR}}=-10.35[\text{km/s}]$ 成分に対応している。

5.3 考察

天体 G 351.25+00.65 は日立局を用いたモニター観測での観測頻度が第 1 期, 第 2 期で約 9 日に 1 回、第 3 期, 第 4 期で約 4 日に 1 回であった。式(5)で定義した計算方法によって計算した 1 日あたりの強度変化率 $R1$ の時系列データを調査した結果、

$V_{LSR}=-10.35[\text{km/s}]$ 成分で突発現象を 3 回検出したが、観測頻度が低いことに起因して正確な増光度を導出できていない可能性があった。そこで、高萩局を用いて約 1 日 1 回の頻度でモニター観測を実施した結果、 $V_{LSR}=-11.11[\text{km/s}]$ 成分と $V_{LSR}=-10.35[\text{km/s}]$ 成分は 1 日でフラックス密度が 2.0 倍以上に増加する強度変動を示したことが判明した。その他の天体は、高萩局を用いたモニター観測期間において 1 日でフラックス密度が 2.0 倍以上に増加する強度変動は観測されなかった。今回の高頻度モニター観測の結果、G 351.25+00.65 は 1 日でフラックス密度が 2.0 倍以上に増加する強度変動天体であることが判明した。今後の展望としては、天体 G 351.25+00.65 に対して高頻度モニター観測を実施し、強度変動の特徴を注意深く監視していく必要がある。

6 まとめ

本研究では、1日でフラックス密度が2.0倍以上に増加する増光現象の検出を狙った。そこで、まず突発現象を1日でフラックス密度が2.0倍以上に増加する増光現象と定量的に定義した。2012年12月30日から2017年9月6日にかけて日立局を用いたモニター観測で取得した時系列データを用いて、以下の3種類の方法で1日あたりの強度変化率を計算し、突発現象を探索した。

1. 時系列データで隣り合うデータの強度比を計算して得られる数値が2.0以上。
2. 時系列データで隣り合うデータの強度比の観測間隔日数の累乗根を計算して得られる数値が2.0以上。
3. 時系列データで隣り合うデータの強度比を観測間隔日数で割って得られる数値が2.0以上。

1の計算方法で解析を行った結果37天体、2の計算方法で解析を行った結果3天体、3の計算方法で解析を行った結果3天体を選出した。

しかし、この解析方法には2つの問題点があることが判明した。

- ① 突発現象検出の閾値を2.0に設定したが、これには任意性があり検出された強度変動が普段の強度変動に対して必ずしも突発的といえるほどの変動現象であったとは限らない。
- ② 観測頻度が低いことに起因して正確な増光度を導出できていない可能性がある。

①に対する改善策として次の解析を行った。

1日あたりの強度変化率の対数値を確率変数とした度数分布が平均0、分散 σ^2 の正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うと仮定して、度数分布をガウシアンでフィッティングして求めた標準偏差 σ を基準に 10σ 以上に分布を示す天体を探索した。解析の結果、9天体を選出した。これらの天体・速度成分は普段の強度変動の振る舞いから大きく逸脱した強度変動現象を示したと言える。

②に対する改善策として次の観測を行った。

1の計算方法で解析を行った結果選出した37天体のうち低頻度観測天体31天体に対し、高萩局を用いた毎日モニター観測を実施した。本観測で取得したデータを用いて1日でフラックス密度が2.0倍以上に増加する強度変動を示す天体を探索した結果、1天体を選出した。今後の展望としては、本天体に対して高頻度モニター観測を実施し、強度変動の特徴を注意深く監視していく必要がある。

謝辞

本研究を進め、本論文を執筆するにあたり、大変多くの方々に御協力を頂きましたことを心より感謝申し上げます。

百瀬宗武教授には、ゼミや授業等を通じて物理学の基礎から電波天文学に至るまで様々なことを教えて頂きました。また、自身の研究発表の際には発表の仕方や自身の研究に関するアドバイスを数多く頂きました。心より感謝申し上げます。

米倉覚則教授には、日々の自身の研究報告に対して様々なアドバイスを頂きました。私の研究に関する些細な質問に対しても真摯にそして分かりやすく教えて頂きました。心より感謝申し上げます。

塚越崇助教には、ゼミで電波天文学に関する事柄を活発に議論して頂きました。心より感謝申し上げます。

杉山孝一郎様、研究員の齋藤悠様には、日立局の運用に関する様々なことを教えて頂きました。杉山孝一郎様は、私が自身の研究の進捗報告等で部屋にお邪魔した際にいつも励ましてくれました。齋藤悠様は、私が運用担当でトラブルが発生した際に、早朝・深夜にもかかわらず御対応頂きました。本当にありがとうございました。

研究員のSoon Kang Lou様は、積極的にゼミにご参加頂き、私たちと活発な議論を交わして頂きました。私の研究に関する些細な質問や相談にも真摯に対応して頂きました。本当にありがとうございました。

研究室の先輩である田辺義浩様には、私が研究で行き詰まっていた時に一緒に研究内容について考えそして励まして頂きました。本当にありがとうございました。

同期の石川果奈様、佐藤愛樹様、山口貴大様は、ゼミで活発な議論を交わして頂きました。本当にありがとうございました。

研究室の後輩の皆様には、日々の日立局運用に携わって頂きました。本当にありがとうございます。

3年間の研究生活を通じて本当に多くの方々の支えがあることを実感致しました。最後に、私をここまで育て支えてくれた両親に感謝申し上げます。

付録 A 解析対象天体の一覧

本研究で解析した天体の一覧を表 12 に示す。ただし、全観測データ数が 1 個または 2 個の天体は除いてある。天体名は略称であり、例えば、G 0.092+06 は G 0.092+0.663 である。成分数とは日立局を用いたモニター観測によって同定された視線速度成分の数である。

表 12：解析対象天体の一覧。

天体名	成分数	天体名	成分数
G 0.092+06	9	G 4.434+01	16
G 0.167-04	1	G 4.569-00	1
G 0.212-00	6	G 4.586+00	2
G 0.315-02	15	G 4.676+02	6
G 0.376+00	1	G 4.866-01	1
G 0.409-05	3	G 5.618-00	5
G 0.475-00	6	G 5.630-02	10
G 0.496+01	14	G 5.657+04	8
G 0.546-08	14	G 5.677-00	1
G 0.645-00	8	G 5.885-03	4
G 0.673-00	13	G 5.900-04	4
G 0.836+01	2	G 6.189-03	12
G 1.008-02	5	G 6.368-00	6
G 1.147-01	8	G 6.539-01	3
G 1.329+01	1	G 6.588-01	6
G 1.719-00	6	G 6.610-00	6
G 2.143+00	17	G 6.795-02	22
G 2.521-02	4	G 6.881+00	3
G 2.536+01	7	G 7.166+01	9
G 2.591-00	7	G 7.601-01	15
G 2.615+01	12	G 7.632-01	14
G 2.703+00	5	G 8.139+02	3
G 3.253+00	7	G 8.317-00	3
G 3.312-03	1	G 8.683-03	8
G 3.442-03	1	G 8.832-00	11
G 3.502-02	2	G 8.872-04	7
G 3.910+00	5	G 9.215-02	12
G 4.393+00	9	G 9.621+01	16

天体名	成分数	天体名	成分数
G 9.986-00	13	G 12.26-00	8
G 10.09+07	1	G 12.52+00	5
G 10.20-03	6	G 12.62-00	8
G 10.28-01	12	G 12.68-01	10
G 10.32-01	21	G 12.77+01	1
G 10.32-02	17	G 12.88+04	11
G 10.35-01	1	G 12.90-00	5
G 10.44-00	23	G 12.90-02	8
G 10.47+00	27	G 13.17+00	2
G 10.627-0	16	G 13.65-05	8
G 10.629-0	22	G 13.69-01	5
G 10.72-03	2	G 13.71-00	8
G 10.82-01	6	G 14.10+00	14
G 10.88+01	14	G 14.23-05	9
G 10.95+00	3	G 14.33-06	6
G 11.03+00	5	G 14.39-00	4
G 11.10-01	8	G 14.45-01	5
G 11.49-14	18	G 14.49+00	3
G 11.903-0	6	G 14.52+01	2
G 11.904-0	12	G 14.60+00	3
G 11.93-01	6	G 14.63-05	2
G 11.93-06	14	G 14.99-01	4
G 11.99-02	5	G 15.03-06	3
G 12.02-00	10	G 15.09+01	2
G 12.11-01	14	G 15.60-02	1
G 12.18-01	18	G 15.66-04	4
G 12.19-00	16	G 16.11-03	1
G 12.20-01	21	G 16.30-01	5

天体名	成分数	天体名	成分数
G 16.40-01	1	G 19.49+01	1
G 16.58-00	12	G 19.60-02	2
G 16.66-03	1	G 19.61-01	14
G 16.83+00	7	G 19.61+00	7
G 16.85+06	2	G 19.66+01	5
G 16.86-21	5	G 19.70-02	4
G 16.97-00	4	G 19.75-01	2
G 17.02-00	6	G 19.88-05	2
G 17.02-24	7	G 20.08-01	2
G 17.63+01	1	G 20.24+00	15
G 17.86+00	10	G 21.41-02	12
G 18.07+00	8	G 21.57-00	9
G 18.15+00	3	G 21.87+00	3
G 18.26-02	7	G 22.05+02	12
G 18.34+17	6	G 22.34-01	13
G 18.44+00	1	G 22.36+00	9
G 18.46-00	6	G 22.43-01	20
G 18.66+00	8	G 23.01-04	11
G 18.73-02	6	G 23.19-03	14
G 18.83-03	4	G 23.24-02	13
G 18.87+00	1	G 23.32-02	7
G 18.88-04	7	G 23.39+01	5
G 18.99-02	1	G 23.43-01	13
G 19.00-00	8	G 23.48+00	10
G 19.24+02	6	G 23.66-01	18
G 19.26+03	3	G 23.70-01	14
G 19.36-00	4	G 23.80+04	2
G 19.47+01	16	G 23.91+00	6

天体名	成分数	天体名	成分数
G 23.98-00	9	G 27.86-02	1
G 24.00-01	9	G 28.02-04	6
G 24.14+00	3	G 28.14+00	10
G 24.33+01	12	G 28.20-00	11
G 24.50-00	9	G 28.28-03	3
G 24.54+03	8	G 28.39+00	11
G 24.64-03	5	G 28.53+01	4
G 24.67-01	5	G 28.69+04	4
G 24.78+00	16	G 28.81+03	9
G 24.93+00	8	G 28.82+04	5
G 25.27-04	6	G 28.83-02	20
G 25.38-01	5	G 28.86+00	1
G 25.38+00	2	G 29.31-01	7
G 25.41+01	5	G 29.86-00	15
G 25.53+03	1	G 29.95-00	18
G 25.65+10	6	G 30.20-01	15
G 25.70+00	11	G 30.30-01	8
G 25.82-01	11	G 30.30+00	16
G 26.52-02	9	G 30.40-02	9
G 26.59-00	6	G 30.53+00	5
G 26.60-02	9	G 30.59-00	12
G 26.65+00	3	G 30.59-01	1
G 27.21+02	4	G 30.70-00	8
G 27.22+01	8	G 30.76-00	22
G 27.28+01	7	G 30.78+02	3
G 27.36-01	16	G 30.82-00	23
G 27.78-02	4	G 30.82+02	4
G 27.78+00	9	G 30.86+01	16

天体名	成分数	天体名	成分数
G 30.96-01	6	G 35.20-17	10
G 30.98-00	4	G 35.25-02	1
G 31.04+03	7	G 35.39+00	1
G 31.06+00	5	G 35.40+00	1
G 31.16+00	3	G 35.59+00	2
G 31.28+00	14	G 35.79-01	13
G 31.41+03	12	G 36.02-02	1
G 31.58+00	7	G 36.10+05	18
G 32.03+00	11	G 36.64-02	1
G 32.11+00	16	G 36.70+00	7
G 32.74-00	15	G 36.84-00	12
G 32.80+01	2	G 36.90-04	1
G 32.97+00	8	G 36.92+04	1
G 33.09-00	22	G 37.04-00	10
G 33.13-00	6	G 37.38-00	1
G 33.40+00	17	G 37.40+15	5
G 33.64-02	8	G 37.47-01	13
G 33.74-01	10	G 37.52-01	13
G 33.86+00	6	G 37.54+02	9
G 33.97-00	10	G 37.60+04	8
G 34.10+00	5	G 37.74-01	1
G 34.24+01	10	G 37.76-01	6
G 34.39+02	8	G 37.77-02	5
G 34.74-00	4	G 38.03-03	12
G 34.78-13	7	G 38.08-02	5
G 34.82+03	1	G 38.12-02	8
G 35.02+03	10	G 38.20-00	7
G 35.20-07	13	G 38.26-00	7

天体名	成分数	天体名	成分数
G 38.26-02	6	G 43.17-00	15
G 38.56+01	1	G 43.80-01	4
G 38.60-02	1	G 43.87-07	15
G 38.66+00	1	G 44.31+00	1
G 38.92-03	4	G 44.64-05	1
G 39.10+04	15	G 45.07+01	2
G 39.39-01	2	G 45.44+00	9
G 39.54-03	1	G 45.47+00	6
G 40.28-02	21	G 45.47+01	8
G 40.41+07	13	G 45.49+01	9
G 40.62-01	5	G 45.57-01	1
G 40.94-00	4	G 45.81-03	12
G 41.08-01	3	G 46.07+02	2
G 41.12-01	3	G 46.12+03	3
G 41.12-02	7	G 48.89-01	1
G 41.16-02	11	G 48.90-02	1
G 41.23-02	5	G 48.99-03	1
G 41.27+03	1	G 49.03-10	8
G 41.34-01	8	G 49.27+03	9
G 41.58+00	1	G 49.35+04	5
G 41.87-01	1	G 49.41+03	15
G 42.03+01	9	G 49.47-03	17
G 42.30-03	5	G 49.48-04	24
G 42.43-02	4	G 49.49-03	27
G 42.70-01	5	G 49.60-02	13
G 43.04-04	7	G 49.62-03	4
G 43.08-00	5	G 50.00+05	6
G 43.15+00	20	G 50.29+06	6

天体名	成分数	天体名	成分数
G 50.78+01	2	G 98.02+14	2
G 52.20+07	3	G 106.8+53	1
G 52.66-10	6	G 108.1+55	4
G 52.92+04	5	G 108.7-09	4
G 53.04+01	1	G 109.8+21	5
G 53.14+00	2	G 110.2+26	1
G 53.62+00	2	G 111.2-07	4
G 58.75+06	9	G 111.5+07	13
G 59.78+00	12	G 121.2+06	6
G 59.84+06	5	G 123.0-63	5
G 60.56-01	2	G 133.9+10	11
G 69.52-09	7	G 136.8+11	1
G 70.12+17	4	G 168.0+08	1
G 71.51-03	2	G 173.4+24	7
G 73.04+18	4	G 173.6+28	1
G 75.76+03	8	G 173.7+23	1
G 78.10+36	5	G 174.1-00	6
G 78.62+09	1	G 183.3-05	4
G 78.89+07	1	G 188.7+10	2
G 79.75+09	4	G 188.9+08	9
G 80.85+04	3	G 189.0+07	4
G 81.76+05	14	G 189.4-01	1
G 81.87+07	9	G 189.7+03	4
G 84.95-06	5	G 192.6-00	13
G 85.40-00	6	G 196.4-16	4
G 90.90+15	3	G 203.3+20	1
G 94.58-17	4	G 206.5-16	1
G 97.52+31	4	G 209.0-19	2

天体名	成分数
G 212.0-07	3
G 213.7-12	4
G 232.6+09	4
G 351.7-05	7
G 352.6-10	12
G 353.4-03	3
G 354.6+04	13
G 358.8-00	8
G 358.9-00	7
G 358.9+00	1
G 358.9+01	4
G 359.1+00	7
G 359.4-04	7
G 359.6-02	8
G 359.9-04	1
G 359.9+01	2
C 19.0-02	1
G 12.4-10	1
G 13.8+00	4
G 15.1-00	1
G 20.7-00	8
G 23.2+00	3
G 351.2+0	9
G 353.2+0	5
G 357.9-0	10
IRS22198	7

参考文献

- [1] Araya, E. D., et al, 2010, *Apj*, 717, L133
- [2] Breckenridge, S. M., & Kukolich, S. G., 1995, *ApJ*, 438, 504
- [3] Cragg, D. M., et al, 2005, *MNRAS*, 360, 533
- [4] Fujisawa, K., et al, 2012, *PASJ*, 64, 16
- [5] Fujisawa, K., et al, 2014, *PASJ*, 66, 78
- [6] Goedhart, S., et al, 2003, *MNRAS*, 339, L33
- [7] Goedhart, S., et al, 2004, *MNRAS*, 355, 553
- [8] Goedhart, S., et al, 2009, *MNRAS*, 398, 995
- [9] Menten, K. M., 1991, *ApJ*, 380, L75
- [10] Minier, V., et al, 2002, *A&A*, 383, 614
- [11] Minier, V., et al, 2003, *A&A*, 403, 1095
- [12] Sugiyama, K., et al, 2008, *PASJ*, 60, 1001
- [13] Sugiyama, K., et al, 2017, *PASJ*, 69, 59
- [14] Szymczak, M., et al, 2000, *A&AS*, 143, 269
- [15] Szymczak, M., et al, 2011, *A&A*, 531, L3
- [16] Vlemmings, W. H. T., 2008, *A&A*, 484, 773
- [17] 福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, 水野亮 (編) 2008, シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成, 日本評論社
- [18] 桜井隆, 小島正宜, 小杉健郎, 柴田一成 (編) 2008, シリーズ現代の天文学 10 太陽, 日本評論社
- [19] 永瀬桂, 2015, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文