

卒業論文

2015年度（平成27年度）

日立32m電波望遠鏡によるモニター観測データを用いた突発変動天体のサーベイ

電波天文観測研究室

学際理学コース 12S6001H 青木健悟

指導教員：百瀬宗武 米倉覚則

概要

大質量星とは質量が $8M_{\odot}$ 程度以上の恒星である。大質量星の寿命は約 10^7 年以下と恒星の中では短く、進化のタイムスケールも短い。また多くが比較的遠方(>1kpc)に位置していること、形成領域が星形成の材料となる濃いガスやダストに覆われていることから可視光での観測が困難であり、その形成過程の解明は現在でも十分ではない。

6.7GHzメタノールレーザーは大質量星形成過程を解明するための有力なツールとされている。これまでの観測により、その様々な強度変動が確認されてきた。中でも周期的な変動を示す天体がいくつか確認されている。

近年、非常に短い期間（～数日間）における急激な強度変動が観測された。Fujisawa et al. (2014), Fujisawa et al. (2012)によると天体G033.64-00.21から放射されるメタノールレーザーのうち視線速度59.64km/sのフラックス密度のみが1-3日程度以内に静穏時の約7倍以上に上昇したとの観測結果が得られている。このような、非常に短い期間(数日間程度)における急激な強度変動を突発現象と呼んでいる。電波領域で突発現象を観測することは、太陽フレアのような突発的な強度上昇が大質量星形成領域においても生じるのかどうかの解明およびそれに起因した爆発的なエネルギー生成メカニズムの研究に寄与すると期待できる。しかし、突発現象を観測するうえで次のような問題点がある。現在メタノールレーザーの放射が確認されている天体の母数(約1000天体)のうち何天体が突発現象を起こしているか統計がとれておらず出現時期が不明である。突発現象を生じる天体とそうでない天体の物理的特徴(光度、質量、密度など)の比較ができていない。

本研究では、突発現象を極大時のフラックス密度が直前の観測時（静穏時）と比べて2倍以上になるものと定義し、日立32m電波望遠鏡（日立局）でモニター観測している天体の中で突発現象を示す天体がどの程度存在するか調査をした。解析の結果、6天体に突発現象を確認した。

目次

1	序論	1
1.1	大質量星	1
1.2	メーザー	1
1.2.1	メーザー現象	1
1.2.2	6.7GHz メタノールメーザー	2
1.3	研究目的	3
2	観測・解析	4
2.1	観測	4
2.2	解析方法	4
3	結果・考察	5
3.1	解析結果	5
3.1.1	G 005.61-00.08	6
3.1.2	G 014.33-00.63	7
3.1.3	G 033.64-00.21	9
3.1.4	G 035.79-00.17	12
3.1.5	G 078.10+03.64	14
3.1.6	G 189.78+00.34	15
3.2	考察	17
4	まとめ	18
	参考文献	19

1 序論

1.1 大質量星

質量が $8M_{\odot}$ 程度以上の恒星は大質量星と呼ばれる。 $1M_{\odot}$ 程度の星の寿命は約 10^{10} 年であるのに対し大質量星の寿命は約 10^7 年以下と短く、進化のタイムスケールも非常に短い。このため、大質量星の途中の進化段階に対応するサンプル数が少なく、統計的に進化段階を追うことが難しい。大質量星の多くは地球から $1\text{kpc}(1\text{pc}=3.26 \text{ 光年})$ 以遠に位置しているため、観測には高い空間分解能が必要とされる。また、大質量星形成領域は濃いガスやダストに覆われているため可視光での観測が困難である。これらの理由から大質量星の形成過程は現在においても十分に解明されていない。

大質量星は分子雲内において低温の高密度領域である分子雲コアで集団的に形成されると考えられている。現在考えられている大質量星形成のシナリオは次の通りである。

- I. 高密度分子雲コアのガスやダストが自己重力収縮して内部に非常に小さな原始星が形成される。
- II. 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。
- III. 原始星の質量が大きくなり中心で水素の核融合反応が始まると主系列星として輝き始める。

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 は励起温度である。このような状況では式(1)は必ず1より小さくなり、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。

ところが粒子数密度が希薄な宇宙空間では粒子同士の衝突よりも輻射場によるやりとり（自発放射・吸収・誘導放射）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、上のエネルギー準位の方により多く分布する場合がある。このような状態は反転分布と呼ばれる。

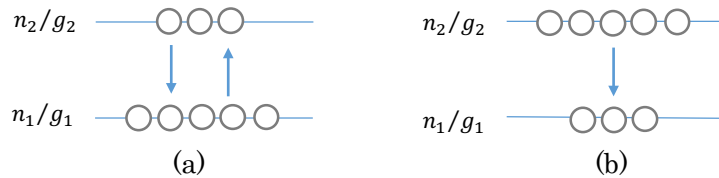


図 1. (a) 熱平衡状態の場合の分布, (b)メーザーの場合の分布

反転分布は非常に不安定であり、外部からこの2準位間のエネルギー差に相当する周波数の電磁波が入射してくると、上の準位にある粒子がすぐに下の準位に落ちて同じ周波数の電磁波を誘導放射する。それがとなりの粒子に入射して同様の放射をおこす。これが連続的に起き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 電波源の広がりが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。

宇宙空間でメーザー現象を起こす代表的な分子としてOH、H₂O、SiO、CH₃OHなどがある。

1.2.2 6.7GHz メタノールメーザー

メタノールメーザー源の分布は輝線によって大きく異なるため、クラス I（25GHzなど）とクラス II（6.7GHz, 12GHzなど）の二種類に分類されている。特に6.7GHzメタノールメーザーは典型的な輝度温度が非常に高く（ $\sim 10^{10}$ K）、多くの周波数帯で検出されるメタノールメーザーの中では一番明るく、メーザー全種の中ではH₂Oメーザーに次いで二番目に明るい。6.7GHzメタノールメーザーは、過去の観測において大質量星形成領域以外での検出例がないため、大質量星形成過程を解明するための有力なツールになると考えられている。

1.3 研究目的

これまでの観測により6.7GHzメタノールメーザーは特徴的な強度変動を示すことが確認されている。中でも周期的な強度変動を示す天体が現在までにいくつか発見されている。

近年、非常に短い期間（～数日間）における急激な強度変動が検出された。Fujisawa et al. (2014), Fujisawa et al. (2012)によれば、天体G033.64-00.21から放射されるメタノールメーザーのうち視線速度59.64km/sのフラックス密度のみが1-3日程度以内に静穏時の7倍以上に上昇したとの観測結果が得られている。G033.64-00.21の59.64km/s成分の強度変動に見られるような、非常に短い期間（数日間程度）における急激な強度変動のことを突発現象と呼んでいる。電波領域で突発現象を観測することは、太陽フレアのような突発的な強度上昇が大質量星形成領域においても生じるのかどうかの解明および、それに起因した爆発的なエネルギー生成メカニズムの研究に寄与すると期待できる。しかしながら、突発現象を観測するうえで以下のような問題点がある。

- 現在メタノールメーザーの放射が確認されている天体の母数は約1000天体であるが、そのうち何天体が突発現象を起こしているか統計がとれておらず出現時期が不明である。
- 突発現象を生じる天体とそうでない天体の物理的特徴（光度・質量・密度など）の比較ができていない。

本研究では日立32m電波望遠鏡でモニター観測している天体の中で突発現象を示しているのではないかとと思われる天体がどの程度存在するか調査をした。

2 観測・解析

2.1 観測

2012年末から現在にかけて、杉山孝一郎氏を中心に日立32m電波望遠鏡（日立局）を使用して6.7GHzメタノールメーザーのモニター観測を行っている。観測対象の天体は、メタノールメーザー母カタログに載っている赤緯-30度以上に位置する合計461天体である。観測期間は2012年12月30日から2014年1月10日（第1期）、2014年5月7日から2015年8月24日（第2期）、2015年9月18日から2015年12月24日（第3期）であり、観測頻度は9-10日に1回である（一部例外あり）。観測パラメータを表1に示す。



図 2. 日立 32m 電波望遠鏡（日立局）

表1. 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
静止周波数	6668MHz
観測周波数	6664 - 6672MHz
分光点数	8192点
速度分解能	0.044km/s
積分時間	5分間/source
検出感度 (3σ)	$\sim 0.9\text{Jy}$

2.2 解析方法

解析には、日立モニター観測で取得した各天体から放射されるメタノールメーザーの各観測日における強度変動プロット、スペクトルを用いた。

本研究では、突発現象を極大時のフラックス密度が直前の観測時（静穏時）と比べて2倍以上となるものと定義し、この条件を満たす天体を突発変動天体として選出した。ただし、本研究では、突発的かつ非周期的な強度変動を示す天体の選出を目的とする。

永瀬桂 (2015), Fujisawa et al. (2012)によると天体G014.23-00.50から放射されるメタノールメーザーのうち視線速度25.30km/s成分の強度変動、天体IRAS22198+6336から放射されるメタノールメーザーのうち視線速度-9.19km/s,-8.48km/s,-7.30km/s成分の強度変動は上記の突発現象としての選出条件は満たすが、強度変動が周期的であることが確認されているため今回の解析対象からは除外した。

3 結果・考察

3.1 解析結果

モニター観測によって得たデータを解析したところ、上記の選出条件を満たすものは461天体のうち6天体であり、突発変動天体の検出率は1.3%であった。

今回選出した各天体について、本モニター観測で取得した各観測日における強度変動プロット、極大時と静穏時のスペクトルを以下に示す。なお前者の図に関して突発現象の疑いがある視線速度成分の強度変動は実線で繋いで示している。また、後者の図に関して静穏時のスペクトルは緑色の点線、極大時のスペクトルは赤色の実線で示している。

3.1.1 G 005.61-00.08

観測期間において、視線速度 -26.45km/s (成分B)で突発的な増光現象を1回検出した。極大時は2014年8月4日(MJD=56873)であり、この時のフラックス密度は $4.757[\text{Jy}]$ であった。極大時のひとつ前の観測点 (静穏時) は2014年7月10日(MJD=56848)であり、この時のフラックス密度は $2.031[\text{Jy}]$ であった。静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約2.3倍であった。増光に要した期間の上限値は25.0日間であった。

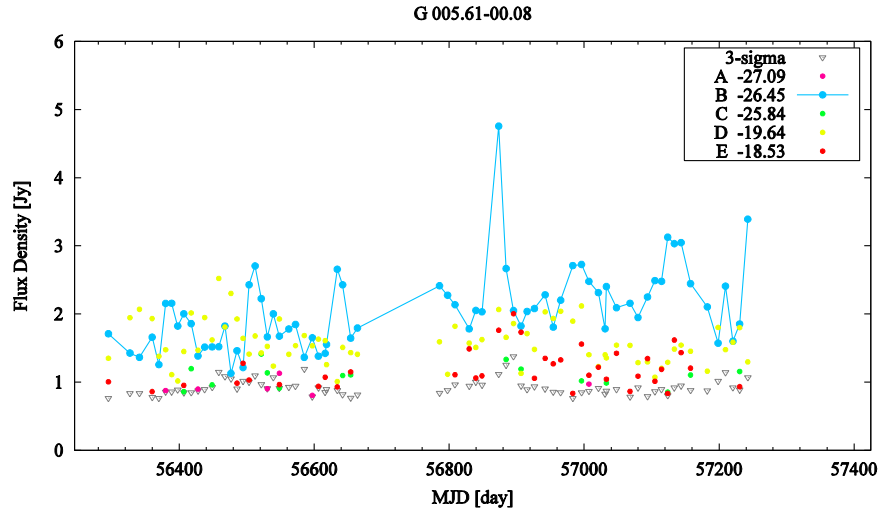


図3. G005.61-00.08から放射されるメタノールメーザーの強度変動プロット。
縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸はMJD(修正ユリウス暦)[day]。

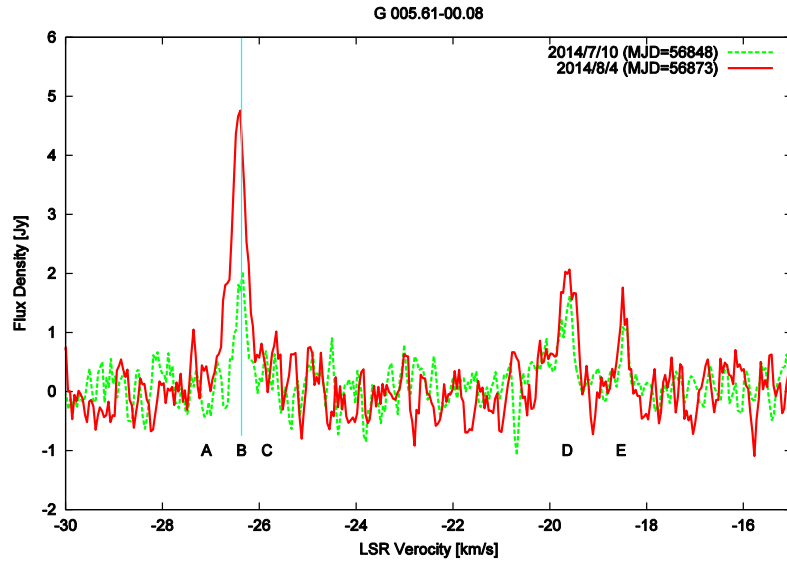


図4. G005.61-00.18の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
静穏時は2014/7/10(MJD=56848)、極大時は2014/8/4(MJD=56873)。
縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は視線速度 [km/s]。

3.1.2 G 014.33-00.63

観測期間において、視線速度21.55km/s (成分A)で突発的な増光現象を2回検出した。1回目の極大時は2014年7月28日(MJD=56866)であり、この時のフラックス密度は 5.054[Jy] であった。1回目の極大時のひとつ前の観測点 (静穏時) は2014年7月3日(MJD=56841)であり、この時のフラックス密度は1.157[Jy]であった。静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約4.4倍であった。増光に要した期間の上限値は25.0日間であった。

2回目の極大時は2014年9月28日(MJD=56928)であり、この時のフラックス密度は 2.868[Jy] であった。2回目の極大時のひとつ前の観測点 (静穏時) は2014年9月18日(MJD=56918)であり、この時のフラックス密度は 0.892[Jy] であった。静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約3.2倍であった。増光に要した期間の上限値は10.0日間であった。

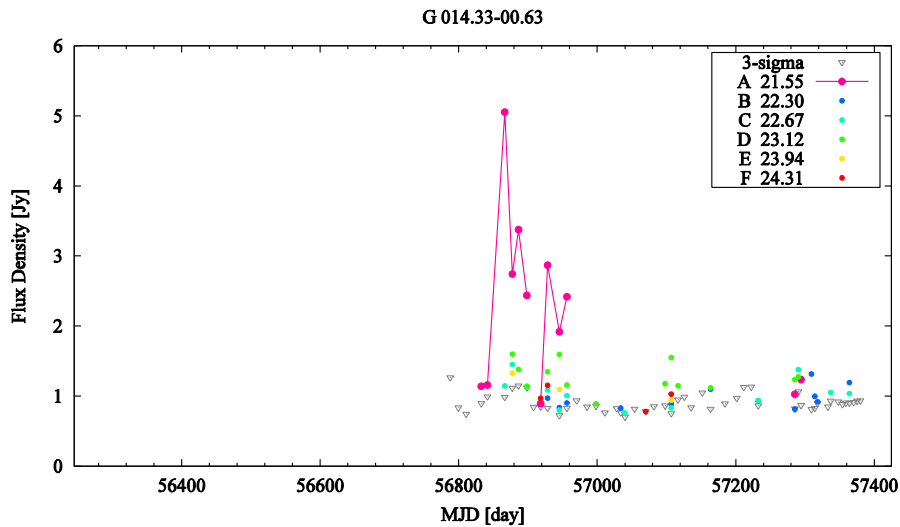


図5. G014.33-00.63から放射されるメタノールメーザーの強度変動プロット。

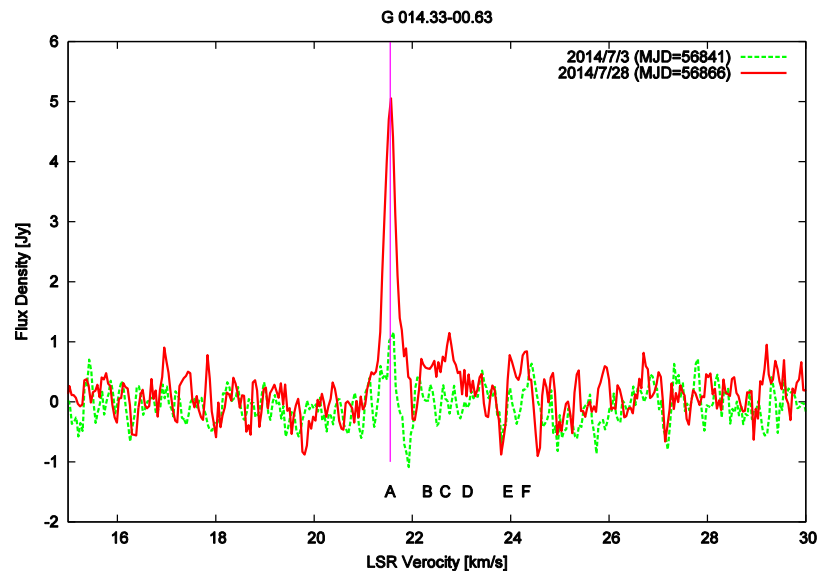


図6. G014.33-00.63の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。静穏時は2014/7/3 (MJD=56841)、極大時は2014/7/28 (MJD=56866)。(1回目の増光時)

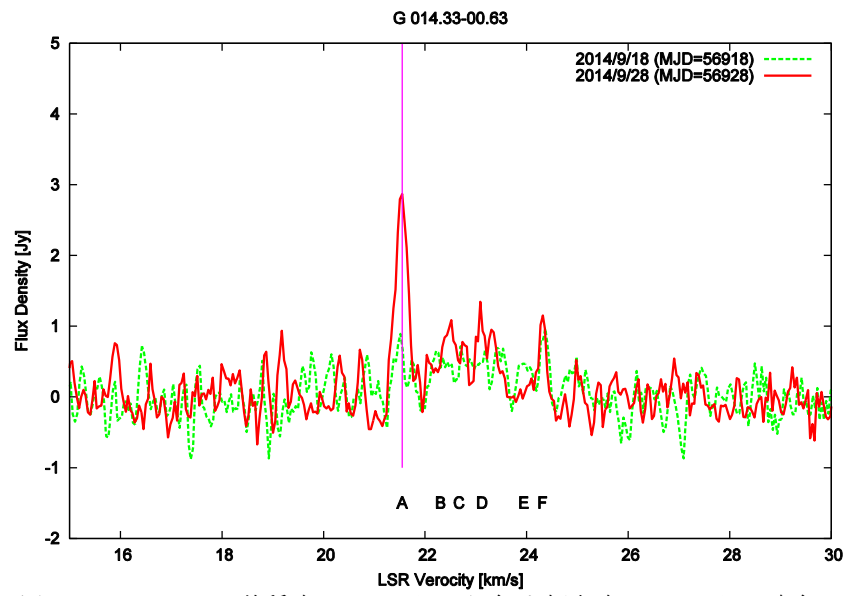


図7. G014.33-00.63の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
静穏時は2014/9/18 (MJD=56918)、極大時は2014/9/28 (MJD=56928)。(2回目の増光時)

3.1.3 G 033.64-00.21

観測期間において、視線速度59.63km/s (成分D)で突発的な増光現象を20回検出した。

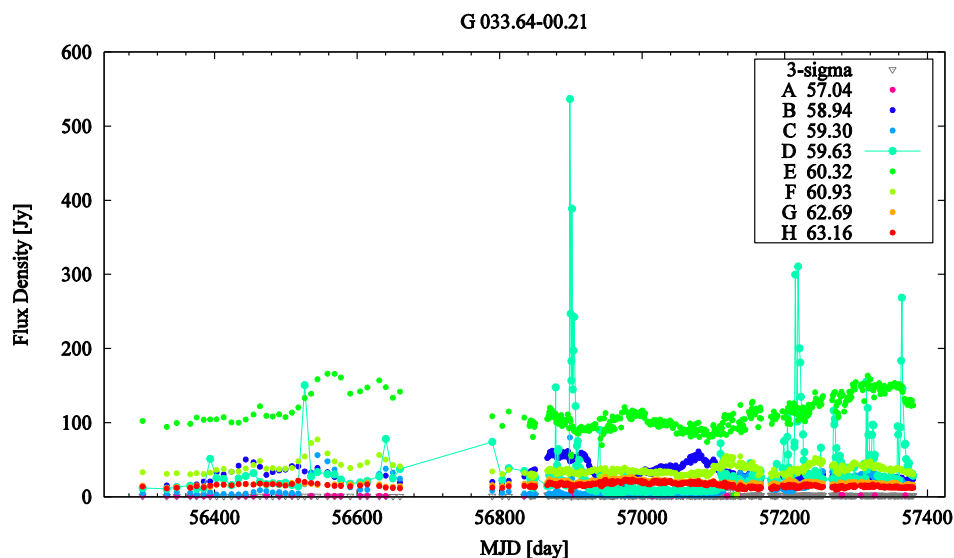


図8. G033.64-00.21から放射されるメタノールメーザーの強度変動プロット。

変動の様子をより見やすくするために、視線速度59.63km/s (成分D)の強度変動のみをプロットし横軸に対して拡大したものを以下の図9、図10、図11に示す。モニター期間中に検出した突発的な増光現象の静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約2.8倍 ~ 約36.2倍であった。増光に要した期間の上限値は1.0日~9.0日であった。ただし、山口貴大 (2015)によると、第3期 (MJD57283~57380) における成分Dのデータを解析したところ強度変動は周期的であり 47.5 ± 2.2 日で周期変動しているという結果が得られている。今後も変動の様子を詳しく調べるために継続して観測を実施していきたい。

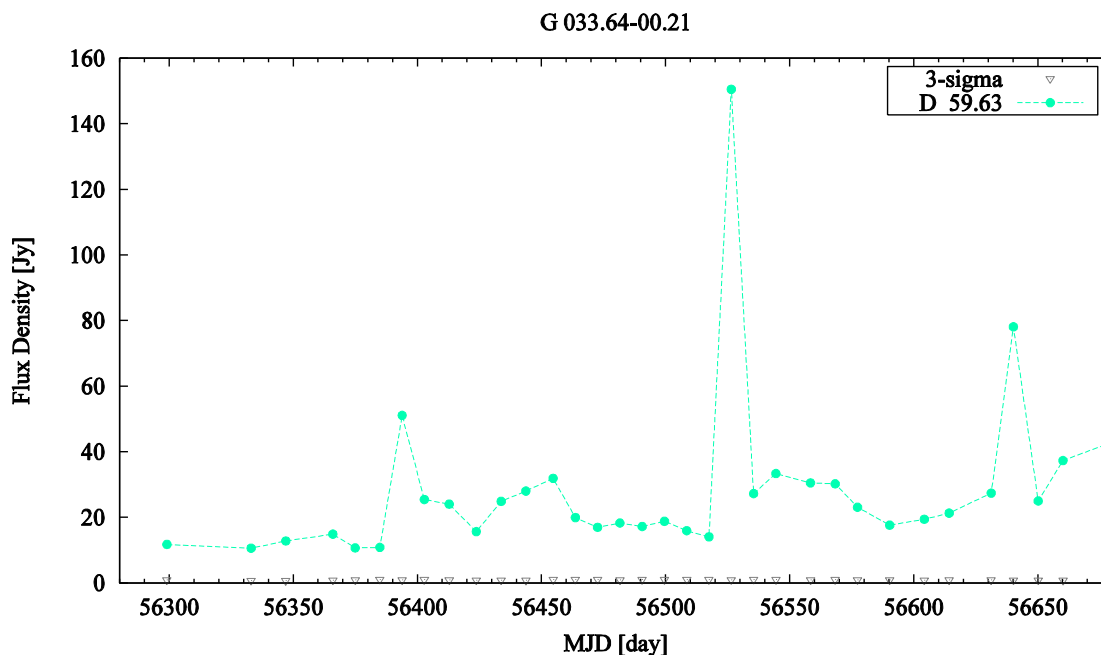


図9. MJD=56280からMJD=56680にかけて拡大。

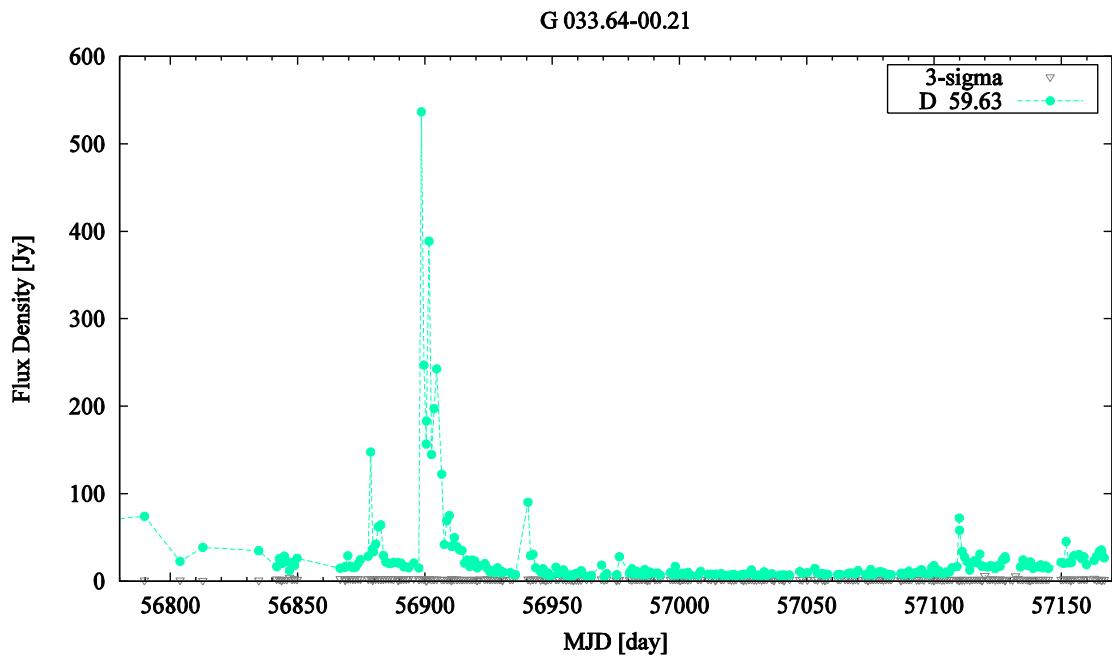


図10. MJD=56780からMJD=57170にかけて拡大。

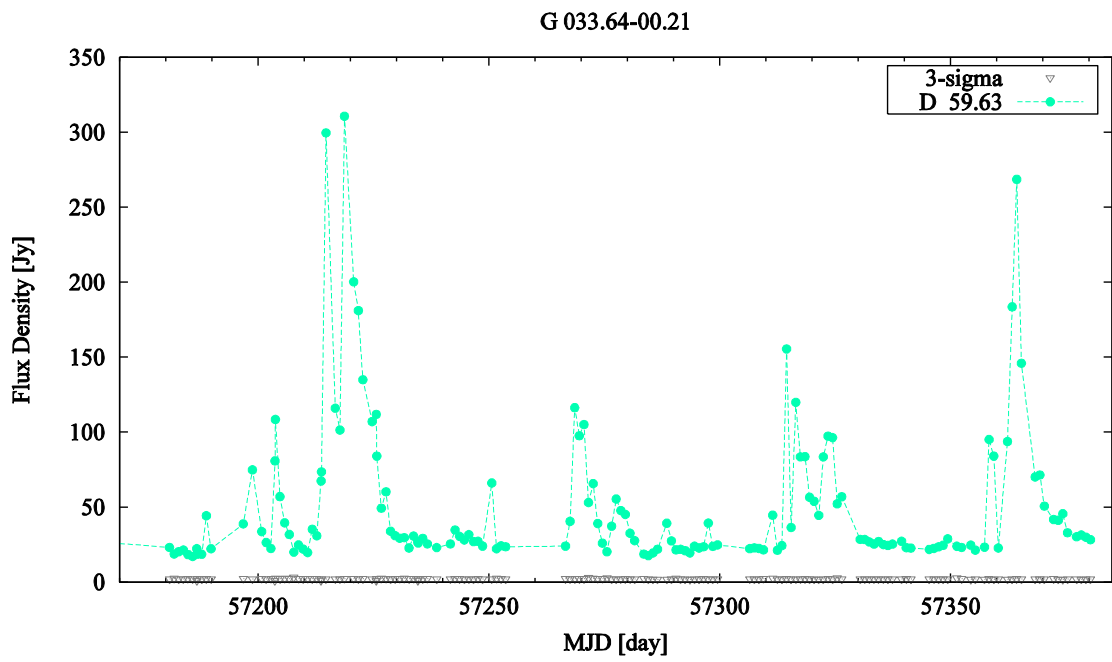


図11. MJD=57170からMJD=57385にかけて拡大。

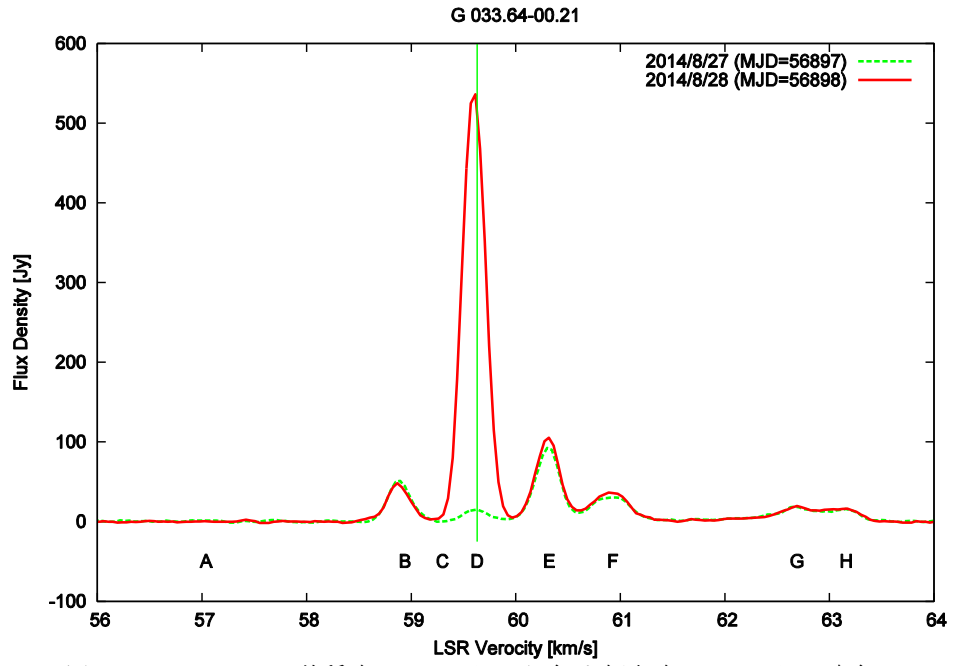


図12. G033.64-00.21の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
 静穏時は2014/8/27 (MJD=56897)、極大時は2014/8/28 (MJD=56898)。

3.1.4 G 035.79-00.17

観測期間において、視線速度58.84km/s (成分E)で突発的な増光現象を2回検出した。1回目の極大時は2015年6月23日(MJD=57196)であり、この時のフラックス密度は 5.028[Jy]であった。1回目の極大時のひとつ前の観測点(静穏時)は2015年6月8日 (MJD=57181)であり、この時のフラックス密度は 1.238[Jy]であった。静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約4.1倍であった。増光に要した期間の上限値は15.0日間であった。

2回目の極大時は2015年12月1日(MJD=57357)であり、この時のフラックス密度は 6.511[Jy]であった。2回目の極大時のひとつ前の観測点(静穏時)は2015年11月25日(MJD=57351)であり、この時のフラックス密度は 2.199[Jy]であった。静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約3.0倍であった。増光に要した期間の上限値は6.0日間であった。

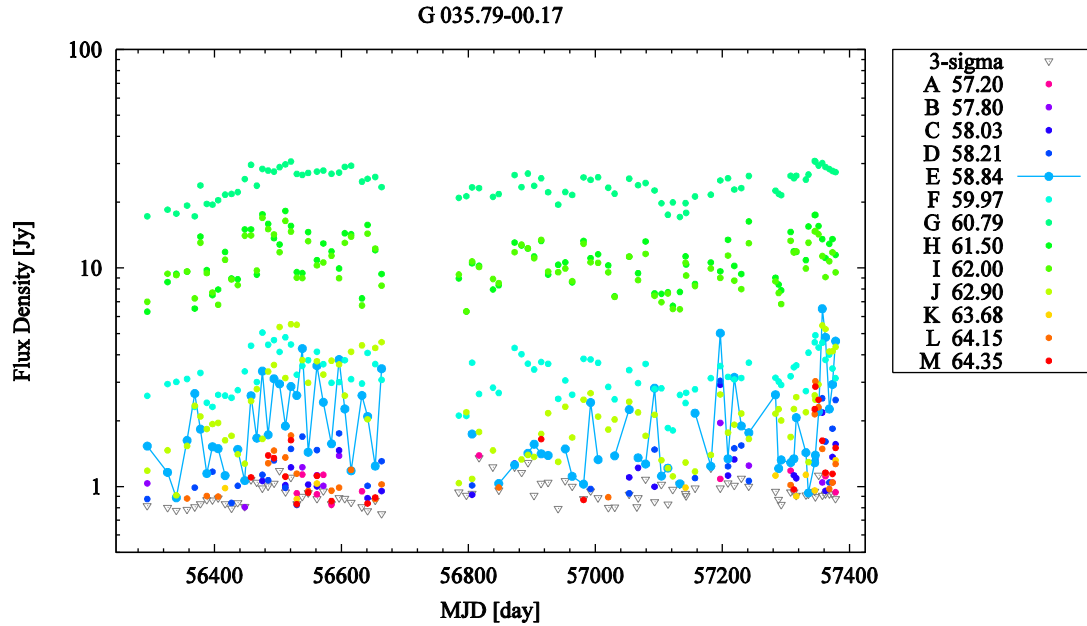


図13. G035.79-00.17から放射されるメタノールメーザーの強度変動プロット。
なお、縦軸はlogスケールである。

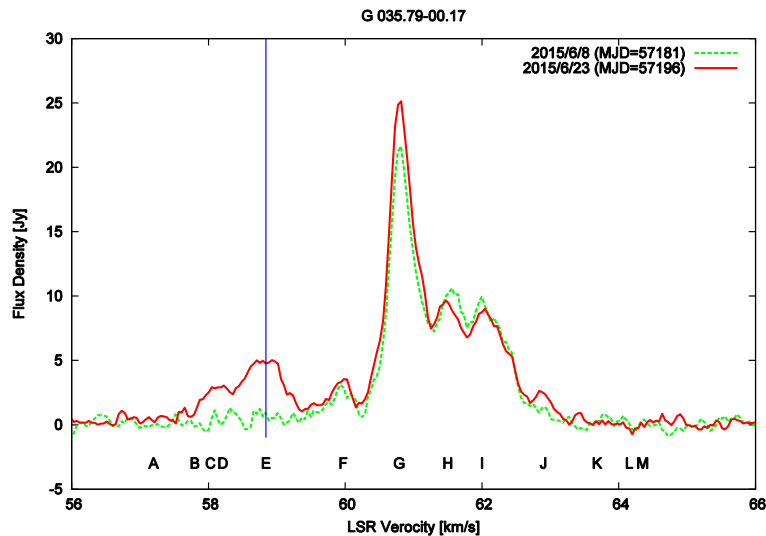


図14. G035.79-00.17の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
静穏時は2015/6/8 (MJD=57181)、極大時は2015/6/23 (MJD=57196)。(1回目の増光時)

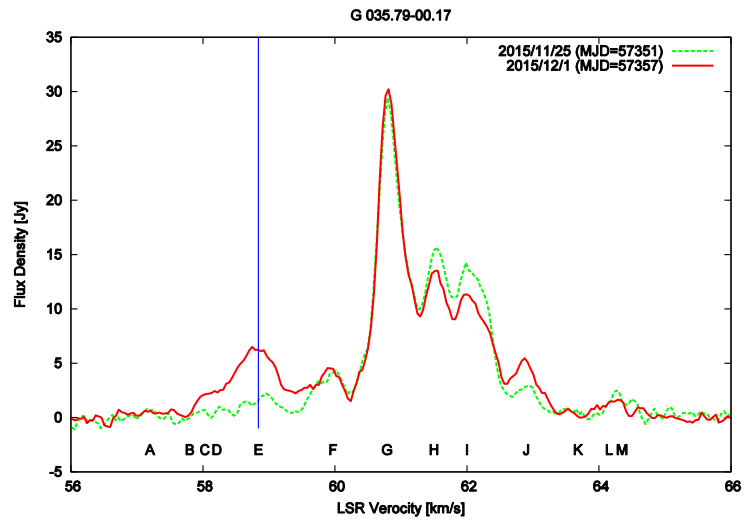


図15. G035.79-00.17の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
静穏時は2015/11/25 (MJD=57351)、極大時は2015/12/1 (MJD=57357)。(2回目の増光時)

3.1.5 G 078.10+03.64

観測期間において、視線速度 -6.64km/s (成分C)で突発的な増光現象を1回検出した。極大時は2014年7月6日(MJD=56844)であり、この時のフラックス密度は $108.879[\text{Jy}]$ であった。極大時のひとつ前の観測点 (静穏時) は2014年6月27日 (MJD=56835)であり、この時のフラックス密度は $38.938[\text{Jy}]$ であり、静穏時に対する極大時の強度の上昇率は約2.8倍であった。増光に要した期間の上限値は9.0日間であった。

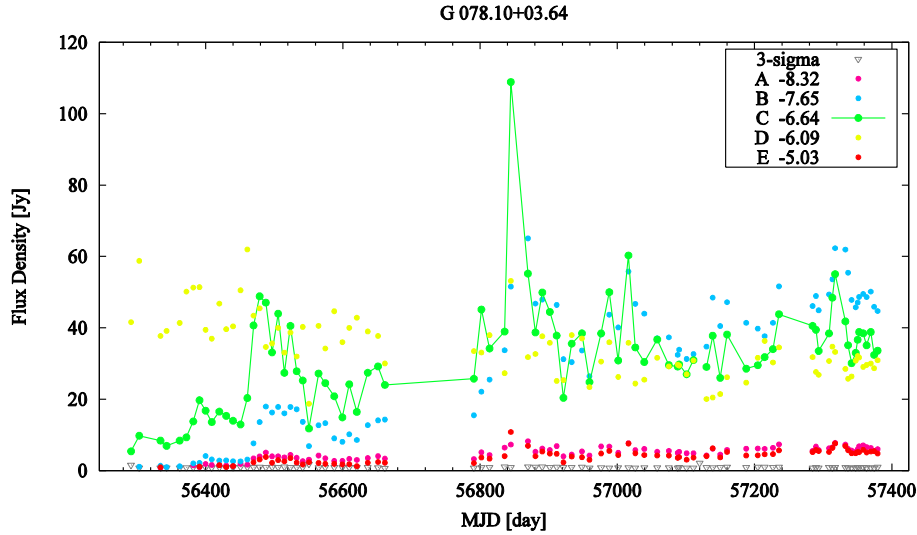


図16. G078.10+03.64から放射されるメタノールメーザーの強度変動プロット。

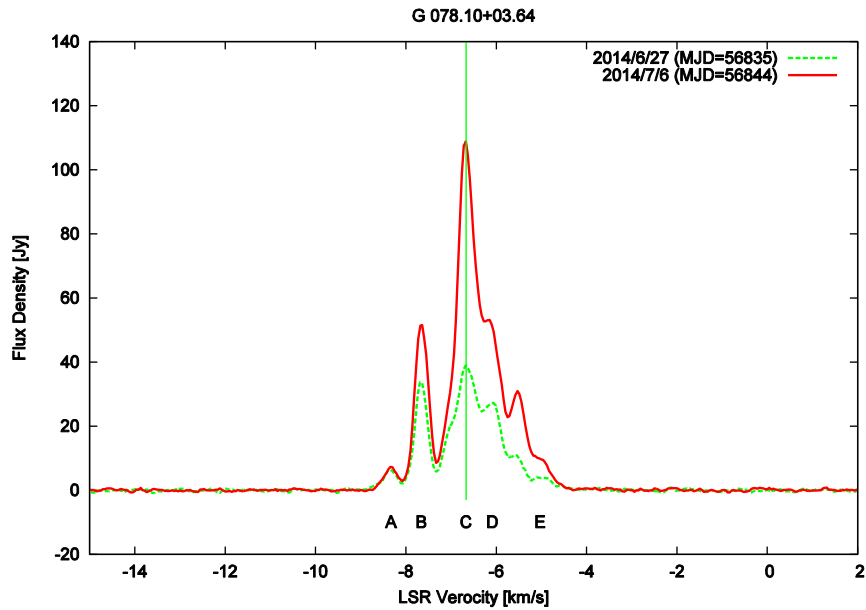


図17. G078.10+03.64の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
静穏時は2014/6/27 (MJD=56835)、極大時は2014/7/6 (MJD=56844)。

3.1.6 G 189.78+00.34

観測期間において、視線速度3.86km/s (成分A), 4.25km/s (成分B), 5.49km/s (成分C), 5.63km/s (成分D)で突発的な増光現象を1回検出した。すべての成分において極大時は2013年4月13日(MJD=56395)であった。極大時のひとつ前の観測点(静穏時)は2013年4月4日(MJD=56386)である。増光に要した期間の上限値は9.0日間であった。表2に各視線速度の静穏時に対する極大時の強度の上昇率を示す。

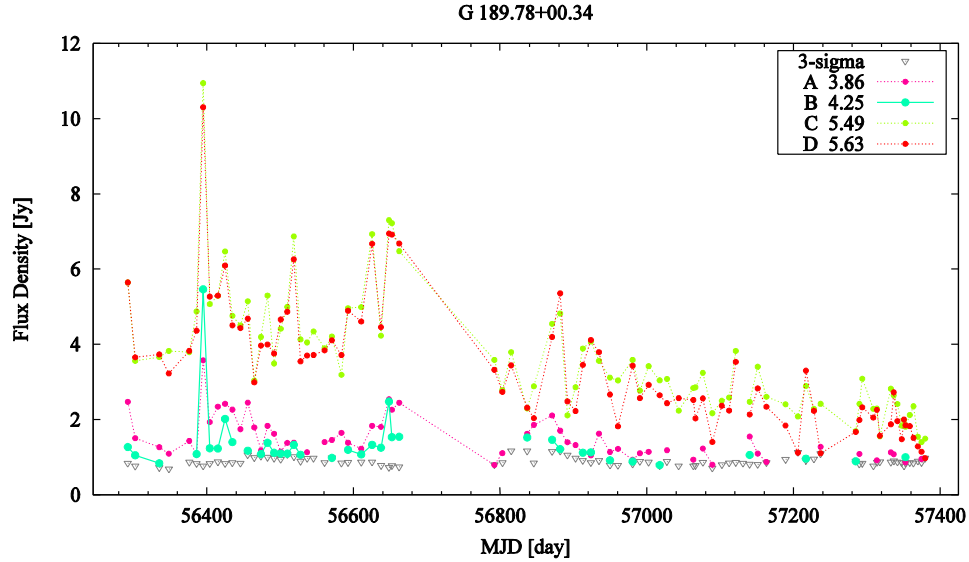


図18. G189.78+00.34から放射されるメタノールメーザーの強度変動プロット。

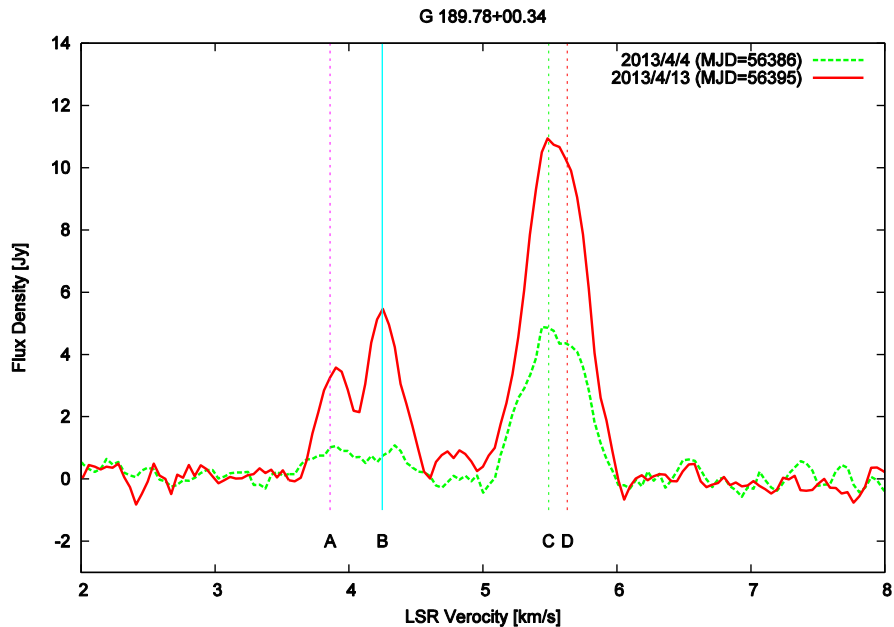


図19. G189.78+00.34の静穏時のスペクトル(緑色)と極大時のスペクトル(赤色)。
静穏時は2013/4/4 (MJD=56386)、極大時は2013/4/13 (MJD=56395)。

表2. 各視線速度の静穏時に対する極大時の強度の上昇率

視線速度 [km/s]	強度の上昇率
3.86	3.4
4.25	5.1
5.49	2.2
5.63	2.4

今回の解析により突発変動天体として選出した6天体に関して、突発的な増光現象を示した視線速度とその強度変動の特徴を以下の表3に示す。

表 3. 突発現象を示す視線速度とその強度変動の特徴。

天体名	増光の回数	視線速度[km/s]	強度の上昇率*	増光に要した期間[日]
G 005.61-00.08	1 回	-26.45	2.3	25.0
G 014.33-00.63	2 回	21.55	3.2 - 4.4	10.0 - 25.0
G 033.64-00.21	20 回	59.63	2.8 - 36.2	1.0 - 9.0
G 035.79-00.17	2 回	58.84	3.0 - 4.1	6.0 - 15.0
G 078.10+03.64	1 回	-6.64	2.8	9.0
G 189.78+00.34	1 回	3.86, 4.25, 5.49, 5.63	2.2 - 5.1	9.0

* 強度の上昇率 = (極大時のフラックス密度[Jy]) / (静穏時のフラックス密度[Jy])

3.2 考察

van der Walt (2005)によると、大質量星の6.7GHzメタノールメーザー出現期間は $2.5 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$ 年と推定されている。この値と今回の解析結果を用いて、大質量星が突発現象を示す期間を推定する。ただし、推定の際には以下の3つの仮定を置いた。

- ① どの天体もメタノールメーザーの出現期間は $2.5 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$ 年である。
- ② どの天体もメタノールメーザーの出現期間で必ず突発現象を示し、その出現段階と出現期間が同じである。
- ③ メタノールメーザーの出現期間において、各天体のメーザー放射段階の分布はランダムである。

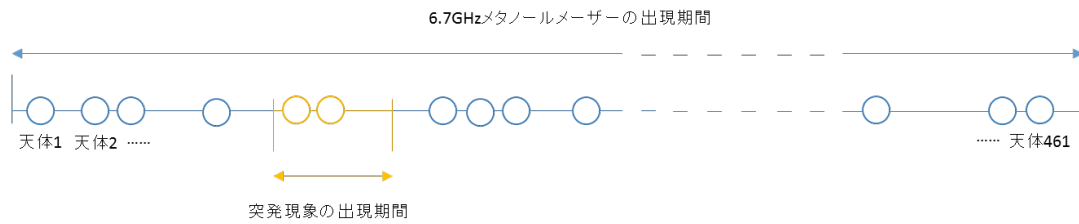


図20. 6.7GHzメタノールメーザーの出現期間における各天体のメーザー放射段階の分布。
メーザー出現期間において突発現象がどこに出現するかは現在でも詳しくわかっておらず
これは一つの想像図である。

大質量星の6.7GHzメタノールメーザー出現期間を Δt_{maser} 、突発変動天体の数を N_{burst} 、モニター観測を行っている天体の総数を N とすると、大質量星が突発現象を示す期間 Δt_{burst} は以下の式(2)より概算できる。

$$\Delta t_{\text{burst}} = \Delta t_{\text{maser}} \times \frac{N_{\text{burst}}}{N} \quad (2)$$

式(2)に $\Delta t_{\text{maser}} = 2.5 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$ [年]、 $N_{\text{burst}} = 6$ 、 $N = 461$ をそれぞれ代入すると $\Delta t_{\text{burst}} = 325 \sim 586$ [年]を得る。したがって、大質量星が突発現象を示す期間は $325 \sim 586$ [年]であると推定できる。

4 まとめ

今回の日立32m電波望遠鏡を用いた6.7GHzメタノールメーザーのモニター観測データの解析により6天体を突発変動天体として選出した。この結果をもとに、大質量星が突発現象を示す期間を推定したところ約325~586[年]であった。

今回解析に使用したデータは、一部例外はあるが大部分について観測頻度は9-10日に1回程度であった。今回選出した突発変動天体については、より短いタイムスケールでの強度変動を捉えるために現在よりも頻度を高くして観測を実施していく予定である。また、突発現象を示す天体とそうでない天体の物理的特徴（質量・光度・密度）の比較をしていく必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、百瀬宗武先生、米倉覚則先生、杉山孝一郎様、研究室の皆さまには様々な助言をいただきました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1]Fujisawa et al. (2014) PASJ 66, 109, “Observations of the bursting activity of the 6.7 GHz methanol maser in G33.641-0.228”
- [2]Fujisawa et al. (2012) PASJ 64, 16, “Bursting Activity in a High-Mass Star-Forming Region G33.64-0.21 Observed with the 6.7GHz Methanol Maser”
- [3]Fujisawa et al. (2014) PASJ 66, 78, “Periodic flare of the 6.7-GHz methanol maser in IRAS 22198+6336”
- [4]van der Walt (2005) MNRAS 360, 153, “On the number and lifetime of 6.7-GHz methanol masers”
- [5]山口貴大 (2015) 茨城大学理学部理学科学際理学コース 卒業論文
- [6]永瀬桂 (2015) 茨城大学大学院理工学研究科 修士論文
- [7]石井翔太 (2014) 茨城大学大学院理工学研究科 修士論文
- [8]福井康雄 他 “シリーズ現代の天文学 第6巻 星間物質と星形成” 日本評論社
- [9]中井直正 他 “シリーズ現代の天文学 第16巻 宇宙の観測 II-電波天文学-” 日本評論社