

修士学位論文

星形成領域 IRAS 22198+6336 に付随する 6.7GHz
メタノールメーザーの強度変動に関する研究

2016 年度
(平成 28 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

15NM168N

宮本 祐輔

論文要旨

大質量星とは太陽の 8 倍以上の質量を持つ天体のことを指すが、未だその形成過程は解明されていない。大質量星形成領域には、大質量星にのみ付随する 6.7 GHz メタノールメーザーが観測されており、半数以上が強度変動する。中でも特徴的なものに周期的に変動するものがあり、その変動の原因として挙げられるものは、中心星の光度の変化がダスト温度の変化に相当する脈動モデルや連星が近づいたときに発生するショックが種光子の変化を起こす CWB モデルなどがある。なお現在までに確認されている 6.7 GHz メタノールメーザーで周期変動を示す天体は 20 ある。

本研究では、その周期変動メーザー源の一つであり、中質量星ながら 6.7 GHz メタノールメーザーを放射する唯一の天体でもある IRAS 22198+6336 に着目した。先行研究により周期が 34.6 日と判明しており、変動プロファイル等の議論がされていた。しかしフレアの立ち上がり時のデータに欠けが生じていたり、感度が不十分だったために変動プロファイルの議論ができなかった成分も存在していた。そこで本研究ではより高感度かつ高頻度な観測を行った。

観測は 2014 年 7 月 12 日 - 7 月 26 日に行い、検出感度以上の放射を確認できた日は 7 月 13 日 - 7 月 23 日の 11 日間だった。6 つの速度成分を検出することに成功し、全成分が同時に変動していることも確認された。強度変動プロットを作成したところ、その変動プロファイルは前後非対称に見られた。そこで非対称な変動を示す成分に対してもフィッティング可能な関数を用い、関数フィッティングを行った。その結果成分ごとにフレアの形状が異なっており、それによりピーク時刻差を位相差とするのではなくフレア開始時刻差を位相差と用いるべきだということが明らかになった。

さらに励起源から同心円上にメーザースポットが分布しており、励起源からの変動が同時にスポットに伝わるという仮定を置き、メーザースポットの奥行き方向の広がり求めた。そして IRAS 22198+6336 のフレア機構について、(1): 脈動不安定モデル、(2): Colliding-Binary モデル、(3): スパイラルショックモデルの 3 つのモデルの検証を行った。しかし今回の結果からだけでは、どのモデルでも不十分な点や矛盾点が生じ、具体的な結論を出すには至らなかった。その代わり、今後すべき観測として VLA の A 配列を用いた Hyper-Compact HII 領域の探査や、同じく VLA の A 配列で、43 GHz 帯の SiO の熱的放射を観測しショックの立体角を調べれば良いということを示せた。

目次

1	イントロダクション	3
1.1	電波天文学の特徴	3
1.2	大質量星	3
1.2.1	小・中質量星の形成過程	3
1.2.2	大質量星形成過程	5
1.3	メーザー	5
1.3.1	メーザー励起機構	5
1.3.2	様々なメーザー	10
1.3.3	6.7 GHz メタノールメーザー	10
2	観測天体 IRAS 22198+6336 の先行研究	13
2.1	電波連続波や分子輝線での観測	13
2.2	6.7 GHz メタノールメーザーによる観測	18
2.2.1	Fujisawa et al. (2014)	18
2.2.2	Szymczak et al. (2016)	20
2.3	未解明な点	22
3	観測	23
3.1	日立局での IRAS 22198+6336 の観測	23
3.2	強度較正	23
4	観測結果	29
5	考察	38
5.1	強度変動プロファイルの定量的な関数フィッティング	38
5.1.1	非対称な変動プロファイルに適用可能な関数	38
5.1.2	IRAS 22198+6336 へのフィッティングの結果	42
5.2	光路差の導出	46
5.3	メーザースポットの 3 次元マッピング	47
5.4	IRAS 22198+6336 のフレア機構について	50
5.4.1	脈動不安定モデル	50
5.4.2	Colliding Wind Binary モデル	50
5.4.3	スパイラルショックモデル	50
6	まとめ	53

謝辞	54
付録 A IRAS 22198+6336 の較正について	55

1 イントロダクション

1.1 電波天文学の特徴

今日、天文学では可視光線の他にも様々な波長を用いて観測が行われている。その中でも電波(波長が $100\ \mu\text{m}$ より長い電磁波)を観測する電波天文学の分野は、大きく3つの特徴を有する。

一つ目は他波長では観測できないものが観測できる点である。電波は波長が長く、そのため星間微粒子による吸収・散乱を受けない。そのためガスや塵に深く埋もれた星からの放射も、直接観測できる。

二つ目は地上からの観測が可能な点である。これは一部の電波を除き、電波が大気の吸収を受けないからである。その結果として装置の大型化や載せ替え等が容易に行えるという利点がある。

最後に、電氣的に干渉が容易な点が挙げられる。そのため VLBI^{*1}観測という観測方法が存在し、極めて高い角度分解能を達成している。

1.2 大質量星

太陽質量の8倍以上の質量を持つ星は大質量星と呼ばれる。大質量星がその一生を終えるときには超新星爆発を引き起こすが、その衝撃波による周辺の星間物質の圧縮は新たな星形成を促すので、宇宙における物質の循環などを考える上で重要な天体である。しかし大質量星がどのように生まれるかは未解明である。理由としては、大質量星は絶対数が少なく、進化のタイムスケールも短いためサンプル数が不足しているからである。さらに大抵は数 kpc 以遠に存在しているため空間分解能が悪く、詳細な観測が困難になりがちであることも挙げられる。一方で、小・中質量星の場合はすでに確立されたモデルが存在している (Shu et al. 1987)。そこで比較のためそのモデルを紹介する。

1.2.1 小・中質量星の形成過程

小・中質量星の形成過程は図 1.1 のような過程で表され、天体構造の違いによって (1) - (5) の違いがある。図 1.1 の (1)-(5) と同期して説明していく。

(1): 分子雲の中でもガスの密度が高い高密度コア (水素分子個数密度が $10^4\ \text{cm}^{-3}$ 程度) が収縮し原始星が形成される。

(2): 分子雲の収縮により温度が上昇している段階。この段階ではミリ波やサブミリ波の長波長のみで検出される。この段階において、励起源から双極方向にアウトフローが検出されている。

(3): 周囲にできた円盤から物質が降着する。原始星は未だダスト深くに埋もれている。しかしその星周円盤からの遠赤外線放射が観測されるようになる。

(4): 原始星によってダストが晴れ上がり、減光が小さくなるため可視光や赤外線領域全体で観測さ

^{*1} Very Long Baseline Interferometry の略。日本語では超長基線電波干渉法という。

れるようになる。しかし円盤からの赤外線放射の寄与が見られる。この段階の星を T タウリ型星と呼ぶ。

(5): この段階の星は完全に可視光で見えるようになり、星表面からの黒体放射のみを観測できる。また (3) - (5) では、赤外線領域を含む SED^{*2}の形の違いから、(3) から順に、Class I から Class III まで以下の式で定義されている α によって分類されている (Lada et al. 1987)。

$$\alpha = \frac{d \log(\lambda F_{\lambda})}{d \log(\lambda)} \quad (1)$$

この α は、 $10 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ までの SED の傾きを表しており、Class I 天体は $\alpha > 0$ 、Class II 天体は $-2 < \alpha < 0$ 、Class III 天体は $\alpha < -2$ となっている。

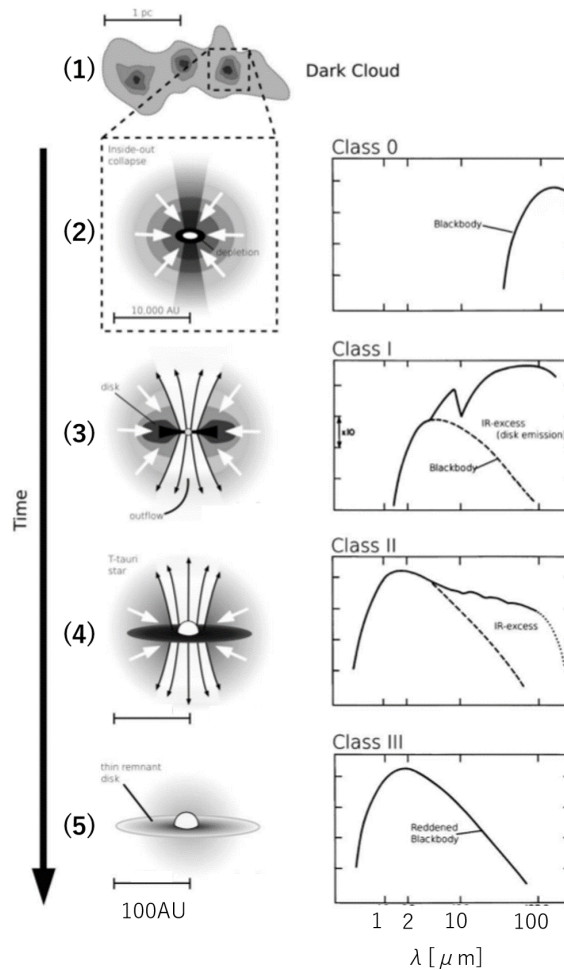


図 1.1 左図が低質量星の進化過程概略図である。右図はそれに対応した SED の例である。縦軸がエネルギー、横軸が波長になっている。図中左の括弧が本文中の進化の過程の説明と同期している。Purcell 氏 2006 年博士論文図 1.1 を改変。

*2 Spectral Energy Distribution の略。日本語では放射エネルギー分布。

1.2.2 大質量星形成過程

§1.2.1 のようなシナリオが小・中質量星では確立されているが、これを単純に大質量星に適用するといくつかの制限により破綻が生じる。その理由を説明している (シリーズ現代の天文学 6 巻を参照)。高密度なダストで生まれた原始星がいつ主系列星になるかは、周囲のダストからの物質の降着により質量の増加するタイムスケールと、中心星が重力により収縮するタイムスケール (ケルビン-ヘルムホルツ時間) の比較により決まる。

初めは物質の降着のタイムスケールのほうが大きい、ある点を超えると質量の増加によりケルビン-ヘルムホルツ時間のほうが短くなる。そうなる中心星は降着を続けながらも収縮することが可能になり、やがて核融合を始め、主系列星になる。小質量星形成時の典型的な物質の降着率 $\dot{M}$ は、 $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であるが、このとき $8 M_{\odot}$ 程度で主系列星になることが知られている。しかしながら、大質量星の場合は寿命が $2-3 \times 10^6$ 年と短いので、たとえ降着がずっと続いたとしても $20-30 M_{\odot}$ までしか成長できない。

また主系列星になった後は、実際には輻射による圧力が発生するために物質が降着し続けることは不可能になる。つまり大質量星の質量は、先ほどの $20-30 M_{\odot}$ よりもさらに小さくなってしまい、Crowther et al. (2010) で発見された $100 M_{\odot}$ を超えるような質量の星は形成されない。

そのため現在では、2つの新たな形成シナリオが提唱されている。1つ目が降着説である。これは小・中質量星と進化の過程自体は同じだが、その際の質量降着率が高い。この場合、放射圧による制限がゆるくなり数十 $M_{\odot}$ 以上の質量の天体も形成可能だと考えられている。また降着物質は球対称的ではなく、光学的に厚い降着円盤を通して降着するのでさらに放射圧がゆるくなることが期待される。2つ目が合体説である。これは星団中央部の星密度が高い環境で、星同士が衝突した結果大質量星が形成されるというシナリオである。しかし、このような合体が起きる環境は未だ発見されておらず、実際に効率よく合体が起きるかどうか確認されていない。

1.3 メーザー

ここでは大質量星形成領域の研究を行う上で重要なメーザー (MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) という現象について説明する。メーザーとは反転分布 (後に説明) によってある遷移が非常に大きく増幅されるような現象で、結果的に狭い線幅で強い放射になる。またこれは非熱的な放射であり、極めて高い輝度温度を持つので ($T_B > 10^7 K$)、VLBI 観測による高分解能観測が可能である。まずその励起機構から説明していく。

1.3.1 メーザー励起機構

ここでは図 1.2 のような状況を考えてメーザーの励起機構について考えていく。通常、地上のようにガス密度が高い環境下では、分子は熱平衡状態あるため、2つの準位間の粒子数の比はボルツマン分布の式

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T_{\text{ex}}}\right) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 n_u, n_l はそれぞれ上下のエネルギー準位に存在する粒子の数密度、 g_u, g_l は統計的重み、そして ΔE は遷移エネルギーに当たる。しかし宇宙空間などの密度が非常に低い環境では、粒子同士の衝突よりも、自然放射や誘導放射、吸収が卓越することがある。このとき上の準位に粒子が多く存在する反転分布という状態を形成することがある。反転分布では $n_u/g_u > n_l/g_l$ になっているので、放射の際には負の励起温度を持つことになる。

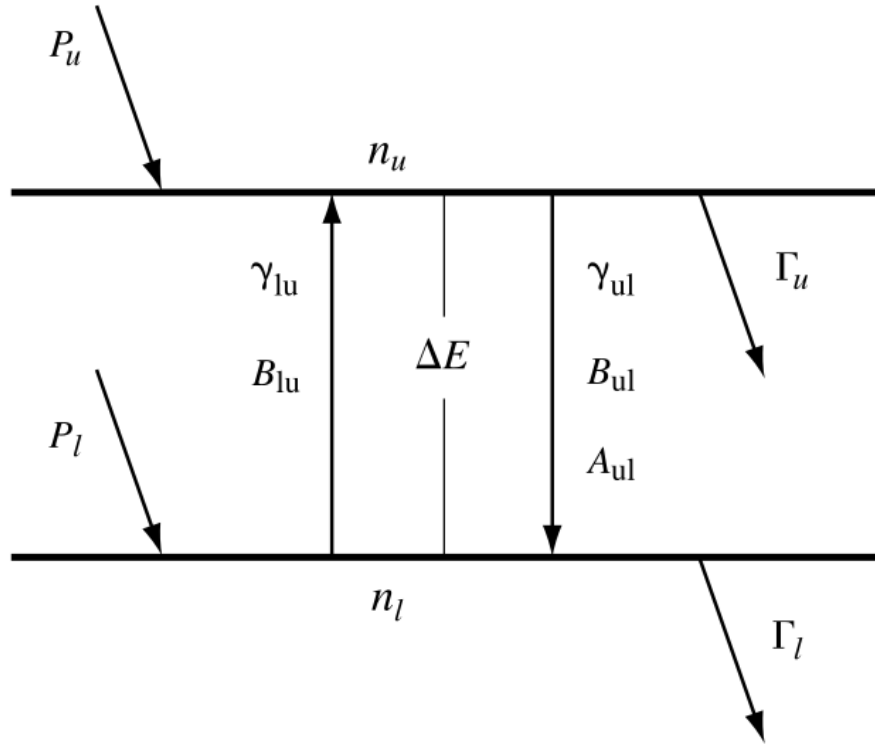


図 1.2 メーザー遷移における各準位間の分子のやり取りの概略図になっている。Stahler & Palla 図 14.7 より抜粋。

次に、この反転分布について定量的に見ていく。反転分布の維持のためには、それぞれの準位へ分子が供給されていなければならないが、それを単位体積・単位時間あたりに供給される分子の数密度を *pump rate* として、 P_u, P_l と置く。さらに二準位間の系と、それ以外の準位でのやり取りを考えると、単位時間あたりの遷移数は各準位の分子数によって決まるので、 $n_u \Gamma_u, n_l \Gamma_l$ をそれぞれの単位体積あたりの *loss rate* と置く。また周囲の分子との衝突も考慮する必要があり、background gas の数密度を n_{tot} 、衝突励起係数と衝突脱励起係数をそれぞれ γ_{lu} と γ_{ul} とおくと、立体角方向で平均した輻射強度 $\bar{J}$ を用いて、単位時間・単位体積あたりの分子のやり取りを説明できる。

各準位が平衡状態にあるとき、以下のような釣り合いの式が成り立つ。

$$0 = P_u - n_u \Gamma_u - (n_u B_{ul} - n_l B_{lu}) \bar{J} - (n_u \gamma_{ul} - n_l \gamma_{lu}) n_{tot} - n_u A_{ul} \quad (3a)$$

$$0 = P_l - n_l \Gamma_l + (n_u B_{ul} - n_l B_{lu}) \bar{J} + (n_u \gamma_{ul} - n_l \gamma_{lu}) n_{tot} + n_u A_{ul} \quad (3b)$$

アインシュタイン B 係数は $g_u B_{ul} = g_l B_{lu}$ の関係式が存在し、励起温度 T_{ex} が運動温度 T_{kin} より非常に小さい場合を考えると、式 (2) に T_{kin} を代入すると、 $\exp$ が 1 に近づくので、 $\gamma_{ul} g_u \approx \gamma_{lu} g_l$ が得られる。つまり先程の式は

$$0 = P_u - n_u \Gamma_u - (n_u - n_l g_u/g_l)(B_{ul} \bar{J} + \gamma_{ul} n_{tot}) - n_u A_{ul} \quad (4a)$$

$$0 = P_l - n_l \Gamma_l + (n_u - n_l g_u/g_l)(B_{ul} \bar{J} + \gamma_{ul} n_{tot}) + n_u A_{ul} \quad (4b)$$

となる。ここでメーザー放射の条件として、自発放射の項 (A_{ul}) は Γ_u や Γ_l に比べ小さいので無視できる。そして式 (5a),(5b) を n_u, n_l について解くと、反転分布を以下の Δn という量で定義できる。

$$\begin{aligned} \Delta n &\equiv n_u/g_u - n_l/g_l \\ &= \frac{P_u/g_u - P_l/g_l}{\Gamma + (1 + g_u/g_l)(B_{ul} \bar{J} + \gamma_{ul} n_{tot})} \end{aligned} \quad (5)$$

これにより反転分布には $P_u/g_u > P_l/g_l$, つまり下の準位よりも上の準位への pump rate が高くなくてはならないと言える。

また輻射場がないときの反転分布も考えておく。この時の数密度の差を Δn° , として n_u° と n_l° を $\bar{J} = 0$ での数密度とすると、

$$\begin{aligned} \Delta n^\circ &\equiv n_u^\circ/g_u - n_l^\circ/g_l \\ &= \frac{P_u/g_u - P_l/g_l}{\Gamma + (1 + g_u/g_l)\gamma_{ul} n_{tot}} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、ここから

$$\Delta n = \frac{\Delta n^\circ}{1 + \bar{J}/\bar{J}_s} \quad (7)$$

$$\bar{J}_s \equiv \frac{\Gamma + (1 + g_u/g_l)\gamma_{ul} n_{tot}}{(1 + g_u/g_l)B_{ul}} \quad (8)$$

が得られる。式 (8) からは、反転分布の度合いは $\bar{J} < \bar{J}_s$ の場合 $\bar{J} = 0$ の時とほとんど変わらず、逆に $\bar{J} > \bar{J}_s$ の場合反転分布の度合いは非常に小さくなることが言える。つまりその時メーザーは飽和していると言える。

次に、この飽和という現象について輻射輸送方程式を用いて考察していく。吸収係数を α 、放射係数を j とおくと、光学的に薄い場合 ($\tau < 1$)、

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu \quad (9)$$

となる。吸収・放射係数をプロファイル関数 $\phi(\nu)$ を用いて置き換えると

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{h\nu_o}{4\pi} \Delta n g_u B_{ul} \phi(\nu) I_\nu + \frac{h\nu_o}{4\pi} n_u A_{ul} \phi(\nu) \quad (10)$$

となる。 ν_0 は輝線中心の振動数であり、 $\int \phi(\nu) d\nu = 1$ を満たす。ここで $\phi(\nu)$ を周囲のガス温度のドップラー関数と仮定する。するとドップラー幅 $\Delta\nu_D$ を用いて

$$\phi(\nu_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_D} \quad (11)$$

と表せる。観測者が受け取る強度 I を $I \equiv \int I_\nu \phi(\nu) d\nu$ として振動数積分を行うと、

$$\frac{dI}{ds} = \frac{h\nu_0 \Delta n^\circ g_u B_{ul}}{4\pi \Delta\nu (1 + \bar{J}/\bar{J}_s)} I + \frac{h\nu_0 n_u A_{ul}}{4\pi \Delta\nu} \quad (12)$$

が得られる。更にここでは $\Delta\nu$ を用いてメーザーに対し有効なバンド幅を

$$\Delta\nu \equiv \frac{\int I_\nu d\nu}{I} \quad (13)$$

で定義している。

飽和の理解のためには、式 (12) から $I(s)$ を得るべきである。そのために $\bar{J}$ を書き下す。 J_ν の定義より、 $J_\nu = I_\nu \Delta\Omega/4\pi$ である。そこから $J = I \Delta\Omega/4\pi$ になるので、

$$\frac{\bar{J}}{\bar{J}_s} = \frac{I}{I_s} \quad (14)$$

とおける ($I_s \equiv 4\pi \bar{J}/\Delta\Omega$ 。 $\Delta\Omega$ は立体角)。

式 (12) 右辺第二項は自発放射の項だが、これは誘導放射よりも非常に小さい。しかし背景の輻射場が存在しないと最初の輻射も存在なくなってしまうため第二項の n_u を $I = 0$ のときの n_u° で置き換える。これらの変化を考えると、輻射輸送方程式は

$$\frac{dI}{ds} = \frac{I}{L(1 + I/I_s)} + \beta \frac{I_s}{L} \quad (15)$$

になる。ここで L は *unsaturated growth length* という量で、

$$L \equiv \frac{4\pi \Delta\nu}{h\nu_0 \Delta n^\circ g_u B_{ul}} \quad (16)$$

で定義される。また、 β は無次元量で

$$\beta \equiv \frac{n_u^\circ}{g_u \Delta n^\circ} \left(\frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) \frac{A_{ul}}{B_{ul} \bar{J}_s} \quad (17)$$

という量になっている。 β について、 $g_u \Delta n^\circ / n_u^\circ$ はメーザーを放射する前の準位の反転の度合いを示す項だが、実際の状況に近いモデルの pump rate では、この値は 1 よりずっと小さくなることはない。またメーザー源の立体角は小さく、 $A_{ul}/B_{ul} \bar{J}_s$ の項も

$$\frac{A_{ul}}{B_{ul} \bar{J}_s} = \frac{(1 + g_u/g_l) A_{ul}}{\Gamma + (1 + g_u/g_l) \gamma_{ul} n_{tot}} \quad (18)$$

と置き換えれば $A_{ul} \ll \Gamma$ より常に小さくなる。よって、 $\beta \ll 1$ となる。

式 (16) は変数分離することで積分ができ、 β が小さいという条件のもと

$$\frac{I(s)}{I_s} - \frac{I(0)}{I_s} + \ln \left[\frac{I(s)/I_s + \beta}{I(0)/I_s + \beta} \right] = \frac{s}{L} \quad (19)$$

とできる ($I(0)$ は背景の輻射源)。図 1.3 はこれのプロットになっている。レーザー増幅の初めは不飽和な領域にいて、 $I \ll I_s$ では $\log$ の項が卓越している。つまり、近似的に

$$I(s) = I(0)\exp(s/L) + \beta I_s[\exp(s/L) - 1] \quad (\text{unsaturated}) \quad (20)$$

が成り立つ。

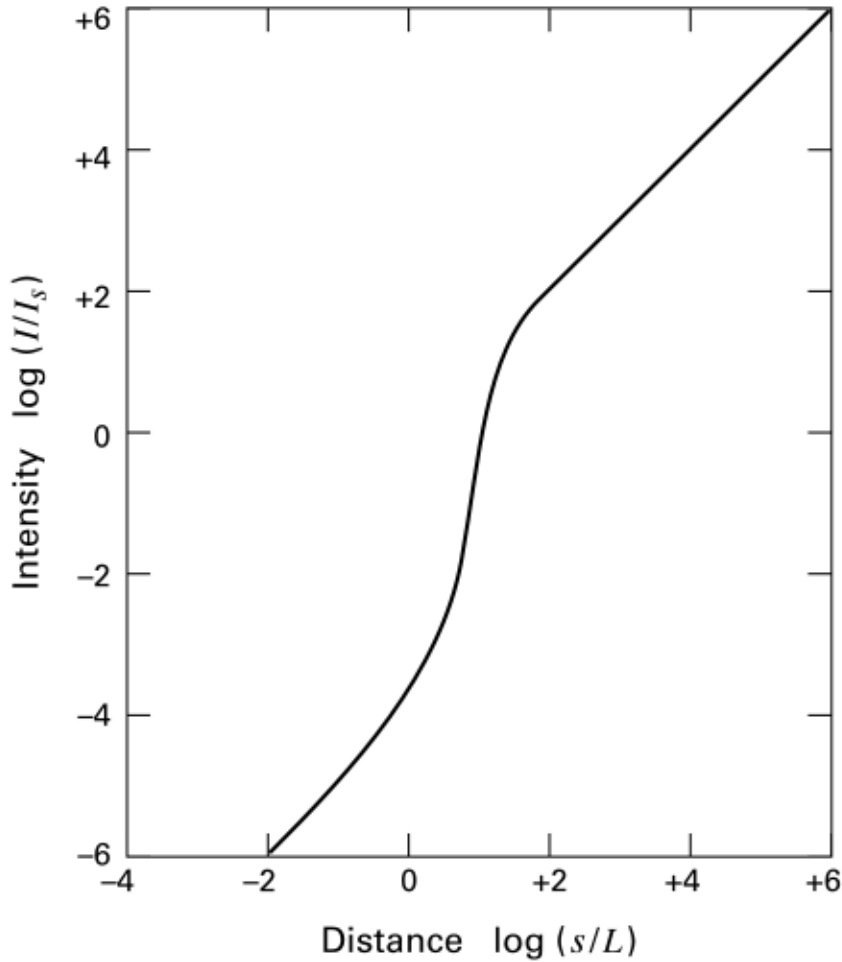


図 1.3 レーザー放射時の強度の増加具合を示している。ここでは式 (20) 中で $\beta = 10^{-4}$, $I(0) = 0$ と置いている。Stahler & Palla 図 14.8 より抜粋。

飽和前は強度は指数的に増加する。 $I(0)$ が背景からの放射だった場合、 $\ln[I(s)/I(0)]$ はレーザーのゲインと呼ばれる。

そこから飽和が起きると、それ以降は強度は一次的にしか上昇しなくなる。この飽和領域では $I \gg I_s$ になり $\log$ の項が消滅する。二準位間の遷移は $I \approx I_s$ で起きるので、近似的に

$$I(s) = I_s + I_s \left(\frac{s - s_1}{L} \right) \quad (\text{saturated}) \quad (21)$$

が得られる。ここで s_1 は飽和・不飽和の境界値であり、式 (20) で $I(s) = I_s$ と置くと得られる。飽和後は強度は linear にしか変化しないが、同様にゲインは log でしか変化しなくなる。式 (6) による Δn の定義と、式 (5a) により、上の準位がメーザー光子をつくる際の単位体積あたりの割合は $\mathcal{R} = g_u \Delta n B_{ul} \bar{J}$ である。式 (8) を用いると $\mathcal{R}$ は有限の限界値の

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &\approx g_u \Delta n^\circ B_{ul} \bar{J} \\ &= \frac{P_u - P_l g_u / g_l}{1 + g_u / g_l} \end{aligned} \quad (22)$$

を得る。つまり、飽和が進んだ後の漸近的な生成比率は準位ごとの pump rate の違いに比例する。上の準位にきた分子はメーザー放射の光子を生成するが、 $\bar{J}_s \ll \bar{J}$ では上から下の準位に大量に遷移する分、下の準位から上の準位へ励起される分子も多くなり、結果として下の準位の分子がそのメーザー光子を吸収してしまう。そうすると実質的な反転分布の割合は 0 に近づいていく。最終的に、式 (8) から分かるように、 $\bar{J}_s \ll \bar{J}$ で Δn は消える。

1.3.2 様々なメーザー

ここまででメーザーの放射機構について見てきたが、実際宇宙空間では OH, H₂O, SiO, そして CH₃OH などの分子がメーザーを放射する。メタノールメーザーは輝線によって空間分布が大きく異なるため 2 つのクラスに分かれている (Menten 1991)。以下にその一例を掲載する。

表 1 メタノールメーザーのクラスとその周波数

	輝線周波数 [GHz]
Class I	25, 36, 44, 84, 95
Class II	6.67, 12, 19, 23, 37, 38

またメーザーの種類によって発生場所が異なっている。SiO メーザーは晩期型の大質量星から観測される。OH, H₂O, CH₃OH メーザーは大質量星形成領域と関係している。しかし、H₂O 及び OH メーザーは小・中質量星や晩期型星から検出されることもある。その中でも H₂O, Class I CH₃OH は UCHII 領域や励起源と離れて観測される。これらのメーザーの励起機構はアウトフローによるショックと関係していると考えられている。OH メーザーや Class II CH₃OH メーザーは通常 UCHII 領域付近で見つかり、直接的な関係があると考えられていた。しかし多数のクラス II メタノールメーザーが UCHII 領域から外れていることがわかり (e.g. Ellingsen et al. 1996)、これによりその前の段階で形成されることが考えられている。またメーザーの出現時期やどのメーザーが先に出現するのか、などに関しては様々な議論があり、未だ統一的な見解は得られていない。

1.3.3 6.7 GHz メタノールメーザー

ここでは私の研究で用いている 6.7 GHz メタノールメーザーと大質量星の関係について触れていく。このメーザーは大質量星形成領域でしか検出されておらず、選択的に大質量星形成領域の研究を行える有用な手段である。6.7 GHz メタノールメーザーのうち、その強度が周期的に変動する

天体が確認されており、現在は 20 天体存在する (e.g. Goedhart et al. 2007; Fujisawa et al. 2014)。またその周期は 29 - 668 日まで様々確認されている (Goedhart et al. 2009; Goedhart et al. 2004)。その周期変動を説明するモデルがいくつか存在する。

- **脈動不安定モデル (Inayoshi et al. 2013)** メーザーの強度変動を中心星の周期的な光度の変化により説明するモデル。中心星が主系列星になる前の、準主系列星のときに星自身が脈動する。その時の光度の変化に伴いメーザーを放射できるダストの量が増減することによってメーザーの強度変動を説明するモデルである。励起源の光度は、星の脈動不安定性に伴い常に変化するので、メーザーの強度は正弦波的に変動する。

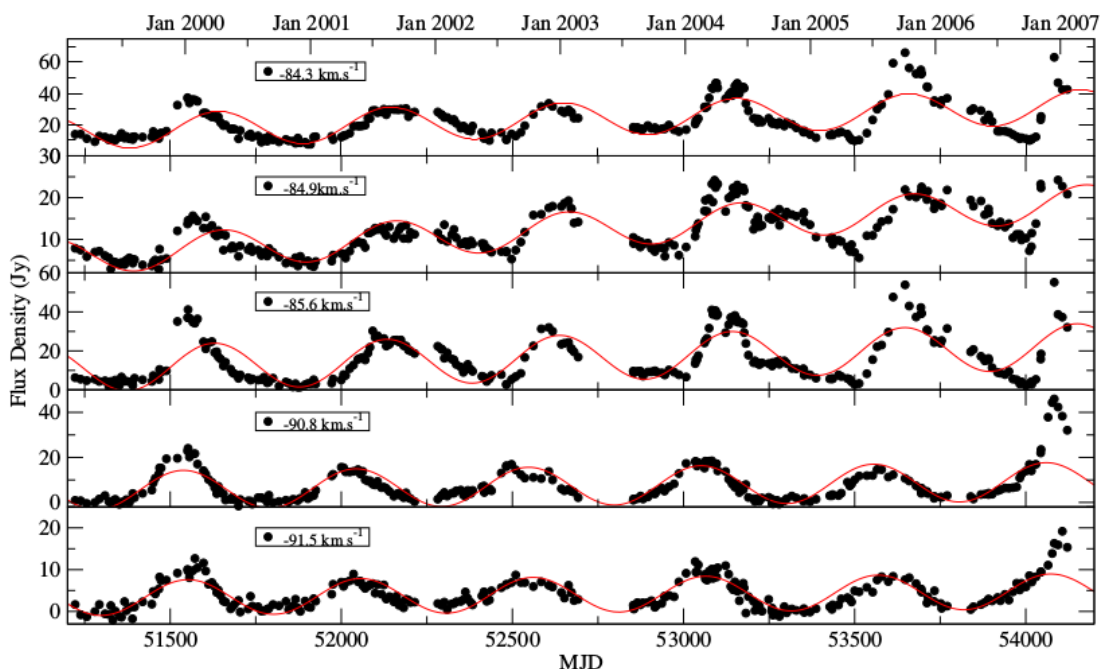


図 1.4 これは G33.13-0.24 の 5 つのスペクトル成分の強度変動を表している。横軸が日付で縦軸がフラックス密度である。点は観測結果、実線は正弦波によるフィッティング結果をそれぞれ示している。Goedhart et al. (2007) より抜粋。

- **Colliding Wind Binary モデル (van der Walt 2011)** 励起源が連星系である、およびその周囲に HII 領域が存在するという仮定のもと周期変動を説明するモデルである。以降は CWB モデルと称する。まず伴星がその近星点において、主星と伴星の恒星風が衝突することによって衝撃波が生じる。それによって HII 領域との境界にある中性ガスが電離される。その結果メーザー放射の種光子である HII 領域からの自由-自由放射も増大し、メーザーの強度が変動するというモデルである。なお、連星系からの衝撃波は間欠的なのでメーザーの強度も間欠的に変動する。

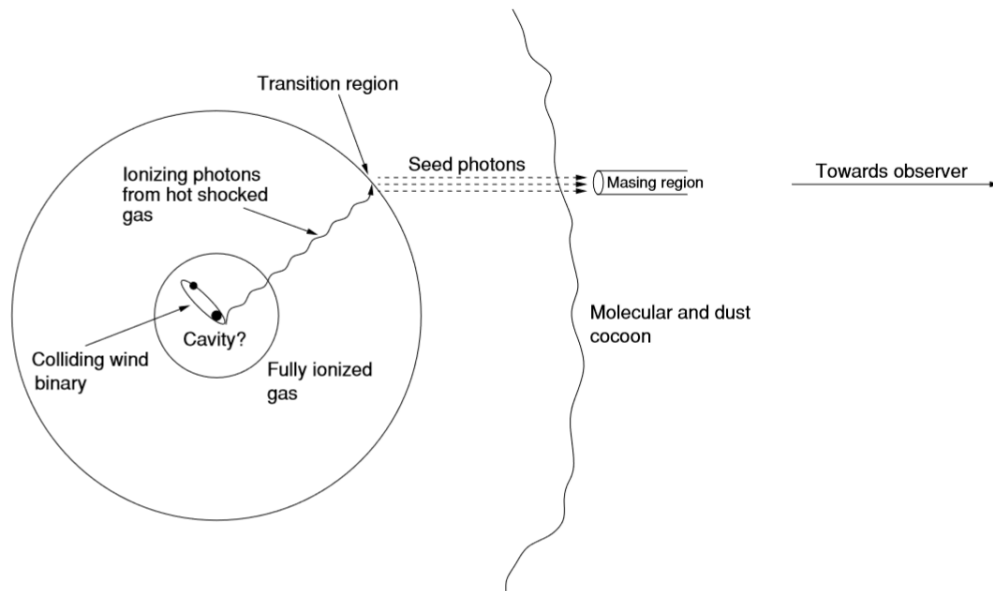


図 1.5 CWB モデルの模式図。連星からの衝撃波が HII 領域との境界にある中性ガスをわずかに電離させ、そこからの自由-自由放射もわずかに増大する。そしてその増加分によってメーザーの強度も変化する。van der Walt (2011) より抜粋。

しかしどのモデルに対しても実際の観測例は少なく、統計的な調査は行えていない。そこで茨城大学では 6.7 GHz メタノールメーザーで周期変動する天体の統計的な調査、またそのサンプル数の増加を目指して茨城県日立市に存在する日立 32m 電波望遠鏡 (以下日立局) を用いてモニター観測を行っている。今回の研究対象天体である IRAS 22198+6336 (以下 IRAS 22198) もこのモニター観測のサンプルに含まれている。

2 観測天体 IRAS 22198+6336 の先行研究

IRAS 22198 は、暗黒星雲 L1204 G 中に位置している。系の視線速度は $V_{LSR} = -11 \text{ km s}^{-1}$ である (Tafalla et al. 1993)。水メーザーの年周視差の観測により、距離が $764 \pm 27 \text{ pc}$ と求まっており、そこから光度と質量はそれぞれ $450 L_{\odot}$, $7 M_{\odot}$ と求められている (Hirota et al. 2008)。その後 Sánchez-Monge et al. (2010) で、SED によるフィッティングにより $370 L_{\odot}$, $5 M_{\odot}$ に改訂された。それにより IRAS 22198 は中質量星の Class 0 天体であることが判明した (Hirota et al. 2008; Sánchez-Monge et al. 2008; Sánchez-Monge et al. 2010)。

2.1 電波連続波や分子輝線での観測

IRAS 22198 は cm 波や mm 波の連続波、また多数の分子輝線での観測が行われている (図 2.1 - 2.5)。

- Sánchez-Monge et al. (2008)

VLA ^{*3} の D 配列を用いて 7 mm, 1.3 cm, 3.6 cm 連続波で観測した。この観測で IRAS 22198 の cm 波での放射源を捉えた。また 7 mm, 1.3 cm 連続波は南東-北西の方角に伸びており、スペクトルインデックスが +0.5 であることから、電波ジェットを捉えたとしている。さらに近・中赤外線が未付随であることから、IRAS 22198 は cold dust に深く埋もれた天体であると示唆している。

- Hirota et al. (2008)

VERA ^{*4} を用いて 22 GHz 水メーザーで観測した。水メーザー源の年周視差を計測することで IRAS 22198 までの距離を $764 \pm 27 \text{ pc}$ と導出した。そこから光度を $450 L_{\odot}$ と導き ^{*5}、そこから質量に上限を設けた。IRAS 22198 が ZAMS 上に乗っていれば $5 M_{\odot}$ が最も適当であるとしている。もしくはまだ物質が降着中ならば降着率 $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 、励起起源のサイズを $5 R_{*}$ とした上で、 $7 M_{\odot}$ が適当であると述べられている。また水メーザーの固有運動の測定によりジェットが東西方向に伸びているのが最もふさわしいと述べている。

^{*3} VLA: Very Large Array の略。アメリカのニューメキシコ州に存在。Y 型状に配置された 27 台のアンテナからなり、各アンテナの口径は 25 m。

^{*4} VERA: VLBI Exploration of Radio Astronomy の略。水沢局、入来局、小笠原局、石垣島局の計 4 局からなる。各アンテナの口径は 20 m。この 4 局を組み合わせて観測すると、直径 2300 km の望遠鏡と同じ性能を発揮できる。

^{*5} それまでは Molinari et al. (1996) により IRAS 22198 の距離は 1300 pc であった。また光度は Sánchez-Monge et al. (2008) で、観測された SED への関数フィッティングにより $L_{\text{bol}} = 1300 L_{\odot}$ と求められていた。そして Hirota et al. (2008) では求めた距離を用いて、補正値 $(764 \text{ pc} / 1300 \text{ pc})^2 = 0.35$ を導出しそれを適用することで $L_{\text{bol}} = 450 L_{\odot}$ と導いた。

- Sánchez-Monge et al.(2010)

PdBI ^{*6}を用いて CO(1-0),SiO(2-1) を観測した。また SMA ^{*7}を用いて 1.3mm 連続波, CH₃CN, HCNO, OCS そして CH₃OH も観測している。観測の結果ミリ波の放射源を検出し、分子輝線の観測からは北西-南東方向に速度勾配を持つ高密度コアが検出された。さらに CO(1-0) からは、ミリ波放射源を中心とした、四重極構造の 2 本のアウトフローを検出している。SiO(2-1) の分子輝線は片方のアウトフローのみで検出されたことから、この 2 本のアウトフローは別々のものであると示唆している。そしてそのコアの速度勾配が円盤の回転を捉えていると仮定すると、IRAS 22198 は edge-on の時ダスト円盤と励起源の質量がほぼ同じであることを導き、そこから IRAS 22198 は Sánchez-Monge et al.2008 と同様に Class 0 天体であると示している。

- Palau et al. (2011)

PdBI を用いて 1.3mm 連続波,CO(2-1),HCN(1-0),(CH₃)₂CO,(CH₃)₂CO,CH₃CHO, CH₃CH₂OH そして CH₃OH を観測した。Sánchez-Monge et al. 2010 よりも RA 方向に 5 倍、Dec 方向に 3 倍高い空間分解能で観測を行っている。アウトフローを細かく分解できたことにより 2 つの独立したアウトフローが存在する可能性が高いと示唆している。高分解能な分子輝線の観測とアウトフローの観測により、分子輝線はエンベロープやトロイドではなく円盤を見ていると示唆している。

- Palau et al. (2013)

PdBI を用いて 1.3mm 連続波,HCN(1-0),HCO⁺ を観測した。HCN と Sánchez-Monge et al. (2010) で観測した SiO の分子輝線は Class 0 天体から放射されることが多いと述べられている。さらに Palau et al. (2011) で観測した分子輝線の速度勾配から、IRAS 22198 のアウトフローは Class 0 天体によって放射されるアウトフローと、もうひとつの別なアウトフローに分けられると述べられている。

^{*6} PdBI: Plateau de Bure Interferometer の略。フランスのビュール高原に存在する。標高 2550 m。6 台のアンテナからなり、各アンテナの口径は 15 m。現在はアンテナ数を増やし NOEMA(Nothorn Extended Millimeter Array) として稼働中。NOEMA は現在も建設中。

^{*7} SMA: Submillimeter Array の略。ハワイ島マウナケア山頂に存在。8 台のアンテナからなり、各アンテナの口径は 6 m。

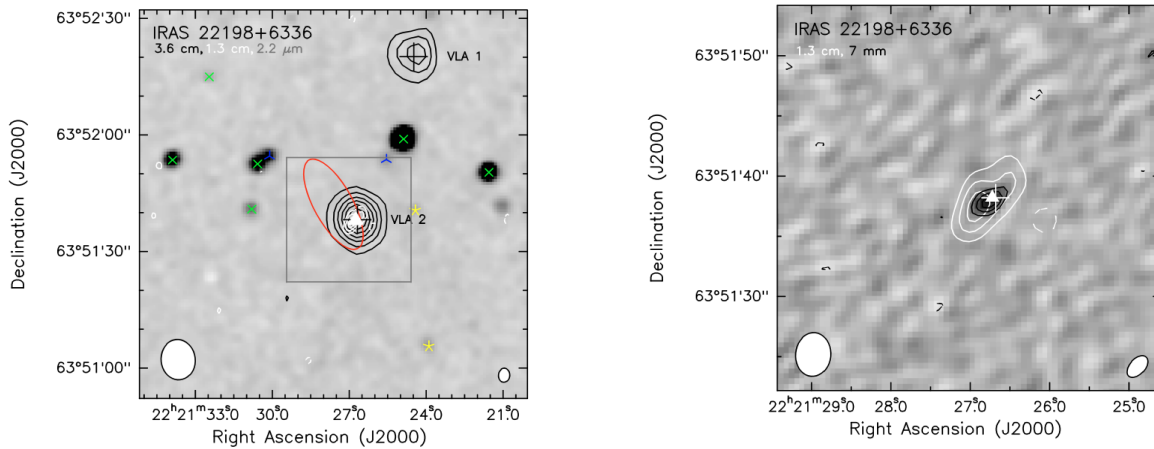


図 2.1 左図: グレースケールが K バンドの 2MASS *⁸画像、黒のコントアが 3.6 cm, 白が 1.3 cm 連続波での観測結果。色付きの星は 2MASS の放射源に相当し、赤い楕円は IRAS 点源の位置誤差を示している。四角の範囲が右図で示されている。

右図: 白のコントアが 1.3 cm, 黒が 7 mm 連続波での観測結果。白の十字が cm 波の放射源に、三角が水メーザーに相当する。ビーム幅は 3.6 cm, 1.3 cm, 7 mm 連続波の順にそれぞれ $10''.4 \times 8''.8$, $3''.6 \times 2''.9$, $2''.2 \times 1''.3$ である。

どちらも VLA を用いて観測された。Sánchez-Monge et al.(2008) 図 8 より抜粋。

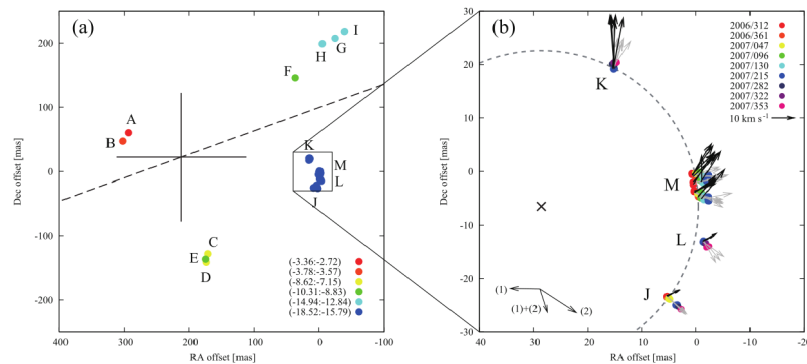


図 2.2 これは位相補償後の水メーザーの分布を示している。

左図: 水メーザー全体の分布図。9 回観測を行ったのだが、検出できた全ての成分がプロットされている。十字と破線は、それぞれ Sánchez-Monge et al. (2008) で観測された 7 mm 連続波のピーク位置とその分布の長軸方向を示している。

右図: 左図の拡大図で、主な成分である J - M の分布と固有運動を示している。各成分の色付きの点は、日付と共に移動する、太陽系と銀河の動きの補正をしていないときの固有運動を示している。灰色の矢印はその固有運動を示し、反対に黒の矢印は太陽系と銀河の動きを補正した固有運動を示している。1 mas yr⁻¹ 分の固有運動は 3.6 km s⁻¹ に相当する。左下の矢印は、(1): 太陽系の固有運動 (3.612 mas yr⁻¹, 0.064 mas yr⁻¹), (2): 銀河の回転運動 (-4.543 mas yr⁻¹, -2.947 mas yr⁻¹), (3): その合計 を示している。大きい円は広がった shell の最もフィットするモデルである。

Hirota et al. (2008) 図 4 より抜粋。

*⁸ The Two Micron All Sky Survey の略。

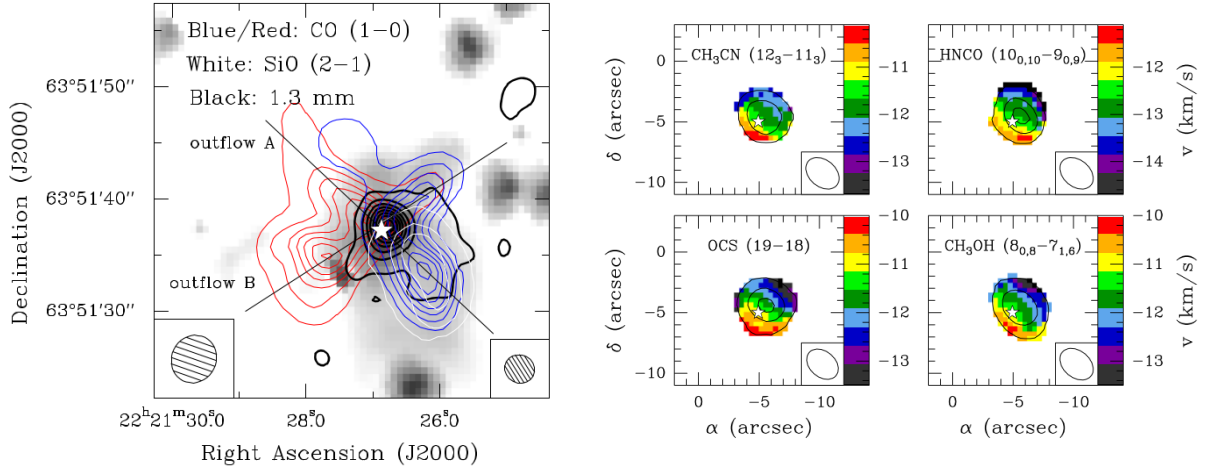


図 2.3 左図: 赤と青のコントアがそれぞれ赤方偏移 ($-6 - +14 \text{ km s}^{-1}$)・青方偏移 ($-16 - -26 \text{ km s}^{-1}$) した CO(1-0) 輝線にあたる。白のコントアは青方偏移 ($-16 - -26 \text{ km s}^{-1}$) した SiO(2-1) にあたる。PdBI を用いて観測された。黒のコントアは SMA の 1.3 mm 連続波にあたる。ビーム幅は、CO(1-0), SiO(2-1), 1.3 mm 連続波の順に $3''.0 \times 2''.5$, $4''.5 \times 4''.0$, $3''.0 \times 2''.2$ である。

右図: 0 次モーメント (強度、黒のコントア) と 1 次モーメント (速度、カラースケール) のプロット図。SMA で観測された。白い星は Sánchez-Monge et al.(2008) で観測された cm 波の放射源である。ビーム幅は $2''.1 \times 1''.3$ である。

Sánchez-Monge et al. (2010) 図 1 より抜粋。

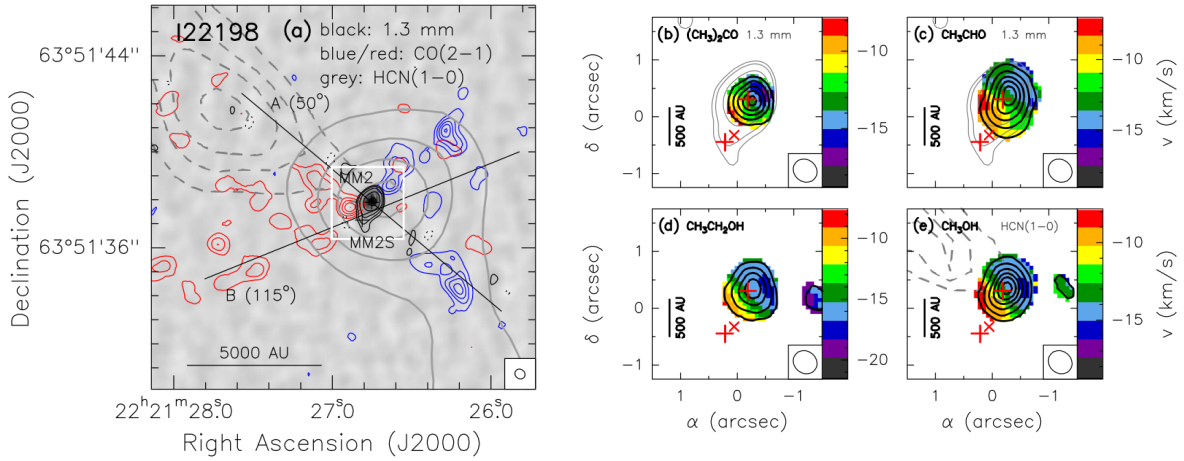


図 2.4 左図: 黒のコントアが 1.3 mm 連続波。赤と青のコントアがそれぞれ赤方偏移 ($-5.3 \sim 7.9 \text{ km s}^{-1}$)・青方偏移 ($-31.0 \sim -19.7 \text{ km s}^{-1}$) した CO(2-1) 輝線にあたる。灰色のコントアは Sánchez-Monge et al. (2011) で観測した、アウトフローをトレースしている HCN(1-0) にあたる。破線が赤方偏移、実線が青方偏移を示している。ビーム幅は順に、 $0''.43 \times 0''.39$, $0''.55 \times 0''.50$, $4''.4 \times 3''.9$ である。

右図: 黒のコントアが 0 次モーメント、カラースケールが 1 次モーメントになっている。ビーム幅は全て $0''.43 \times 0''.39$ 。(b) と (c) の灰色のコントアは 1.3 mm 連続波、(e) の灰色のコントアは HCN(1-0) である。また赤の十字がミリ波連続波のピーク、赤のクロスが *Spitzer*-IRAC ($3.6 \mu\text{m}$) の放射源にあたる (Sánchez-Monge et al. 2011)。

両者とも PdBI を用いて観測された。Palau et al. (2011) 図 1 より抜粋。

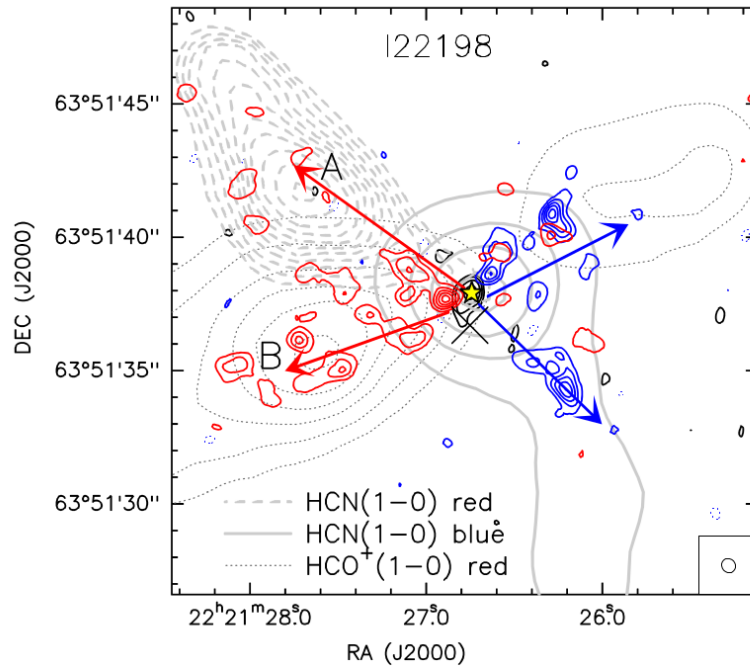


図 2.5 赤と青のコントアが CO(2-1) 輝線にあたり、矢印は outflow の方向を示す。PdBI で観測された。灰色の HCN(1-0), HCO⁺(1-0) 輝線は Sánchez-Monge et al. (2011) で観測された。Palau et al. (2013) 図 1 より抜粋。

2.2 6.7 GHz メタノールメーザーによる観測

2.2.1 Fujisawa et al. (2014)

大質量星形成領域のみに付随すると考えられていた 6.7 GHz メタノールメーザーだが、中質量星の天体では初めて IRAS 22198 から検出され、さらに周期変動 (34.6 日) も確認された (Fujisawa et al. 2014)。そして現在でもこの天体以外に中質量星からの 6.7 GHz メタノールメーザーの検出はない。Fujisawa et al. (2014) はこの研究と深く関わっているので詳しく説明する。観測には山口 32 m 電波望遠鏡が用いられたが、そのパラメータを表 2 に掲載する。

表 2 Fujisawa et al. (2014) の観測諸元

観測局	山口 32 m 電波望遠鏡
観測期間	2011/09/12 - 2011/12/03 (3 日に 2 回)
	2012/09/27 - 2012/11/11(1 日に 1 回)* ⁸
較正天体	Cepheus A
バンド幅	4 MHz * ⁹
チャンネル数	4096 ch * ⁹
速度分解能	0.044 km s ⁻¹
積分時間	840 sec
rms ノイズ (1 σ)	1.4 Jy

観測の結果、2011/09/12 - 09/23 , 10/13 - 10/21 , 11/21 - 11/24 , 2012/09/28 - 10/02 そして 10/31 - 11/07 の期間で 5 つのスペクトル成分が検出された (図 2.6)。それ以外では全ての成分が検出感度以下だった。検出された成分の全てが間欠的な強度変動を示し、うち 3 成分が約 35 日周期でフレア*¹⁰していた。さらにその 3 成分のフレアのピーク時刻が各々異なっていた。そこで強度変動プロファイルをガウシアンと仮定して各成分の強度のピーク時刻を求め、成分ごとのピーク時刻の差も求めている。Fujisawa et al. (2014) ではさらにこれを発展させ、以下のような考えより、ピーク時刻差から IRAS 22198 のメーザー放射領域を推定している。

各メーザースポット*¹¹が励起源の同心円上に分布しており、その励起源の変動が各スポットに同時に伝わる。そうした場合、時刻のずれは観測者と各スポット間の距離の差と考えることが可能になる。

これは Szymczak et al. (2011) でも用いられており、G 22.357+0.066 の三次元構造がプロット

*⁸ ただしフレア (*¹⁰) が検出されたときは 1 日 20 回観測した。

*⁹ 2012 年の観測ではバンド幅が 8 MHz, チャンネル数が 8192 ch になっている。

*¹⁰ 短期間でのフラックス密度が急上昇することを指す。

*¹¹ メーザーガス雲のこと。天球面上での 1 点 1 点に相当。

されている。IRAS 22198 に適用すると、1.8 日の時刻差を光が伝わる時間と考えるので、視線方向に 310 AU の奥行き^{*12}があると示している。また、Cragg et al. (2005) で Class II メタノールメーザーの励起温度は 120 K -300 K とされており、これに光度 $450 L_{\odot}$ (Hirota et al. 2008) を与えるとメーザー放射可能領域の直径 330 AU となり、推定したメーザー放射領域と値が近いと示している。

次にメーザーのフレア機構について議論している。まず脈動不安定モデルでは間欠的な変動プロファイルの説明は難しいこと、また P-L relation に IRAS 22198 の光度 ($450 L_{\odot}$)、周期 (34.6 日) のどちらを代入しても得られている観測値と大きくかけ離れていた。つまり脈動不安定モデルは適当でないとされた。

CWB モデルでは間欠的な変動でも説明可能であることから、IRAS 22198 が連星である場合の主星と伴星及び軌道長半径を求めている。すると質量がそれぞれ $7 M_{\odot}$ と $1 M_{\odot}$ となり、軌道長半径は 0.41 AU となった。これは連星系としてありえない値ではないと述べられている。

最終的に、Fujisawa et al. (2014) では IRAS 22198 の強度は、34.6 日という短い周期と間欠的な変動パターンから CWB モデルが最もふさわしいと述べている。

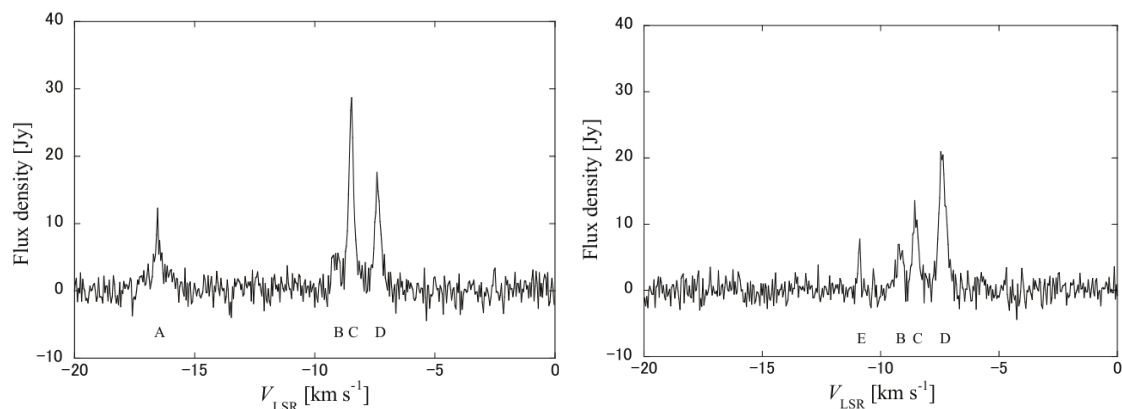


図 2.6 左図が 2011/09/15 に、右図が 2012/11/04 に検出されたスペクトル図。図中のアルファベットは速度成分と対応しており、A ($V_{\text{LSR}} = -16.5 \text{ km s}^{-1}$)、B (-9.1 km s^{-1})、C (-8.5 km s^{-1})、D (-7.3 km s^{-1})、E (-11.0 km s^{-1}) である。Fujisawa et al. (2014) 図 1 から抜粋。

^{*12} $3 \times 10^8 [\text{m s}^{-1}] \times 1.8 [\text{day}] \times 86400 [\text{s day}^{-1}] \div 1.5 \times 10^{11} [\text{m AU}^{-1}] \approx 310 \text{ AU}$

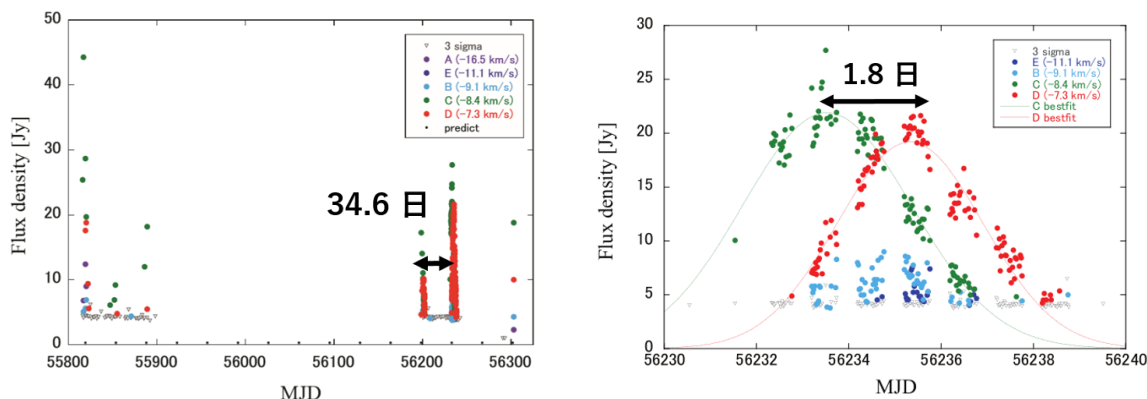


図 2.7 左図: IRAS 22198 の各成分の強度変動プロット。34.6 日周期でフレアが発生することが示されている。図中の predict は横軸の上の等間隔に並んだ点のことであり、34.6 日周期で打たれている。Fujisawa et al. (2014) 図 5 を一部改変。

右図: 左図の MJD=56230 - 56240 を拡大した図。成分 C, D のピーク時刻差が 1.8 日であると示されている。しかしフレアの開始にデータの欠けがある他、変動について議論できていない成分もある。Fujisawa et al. (2014) 図 3 を一部改変。

しかし図 2.7 右にあるようにフレア開始時のデータに欠けがあり、また成分 A, B, E の変動プロファイルについて議論できていない。

2.2.2 Szymczak et al. (2016)

単一鏡で周期変動を観測し (図 2.8, 2.9)、また干渉計でも観測を行い 6.7 GHz メタノールメーザーの 2 次元マップを作成している (図 2.10)。単一鏡観測では、メタノールと共に水メーザーも観測しており、その結果両方のメーザーから強度変動を検出できている。これは IRAS 22198 が初めての天体である。メタノールメーザーのピーク時刻差も Szymczak et al. (2016) では複数得られているが、Fujisawa et al. (2014) と同じ速度成分はほぼ同じピーク時刻差で変動しており、その平均時刻差も Fujisawa et al. (2014) と良い一致を見せている。また、一般的に Class II メタノールメーザーは赤外線放射により、水メーザーはショックとの衝突により励起される。しかし IRAS 22198 ではこの 2 つのメーザーが同期して変動しており、同じ速度成分であるところも非常に珍しい。

干渉計観測からは、メタノールメーザーの空間分布が得られ、同じ速度を持つ水メーザーと 30 - 80 AU という近距離に存在していることも分かった。メタノールメーザースポットは 400 mas 離れて南東-北西方向にクラスター状に分布していることが分かり、これらが Palau et al. (2011) で CO 輝線で観測された outflow B の軸と一致していることも分かった。さらに、南東のクラスターから 300 mas 西の方角にもうひとつスポットが存在していることも明らかにされた。なお、Fujisawa et al. (2014) で強度変動プロファイルを議論した成分は南東の同じクラスター内に存在していた。

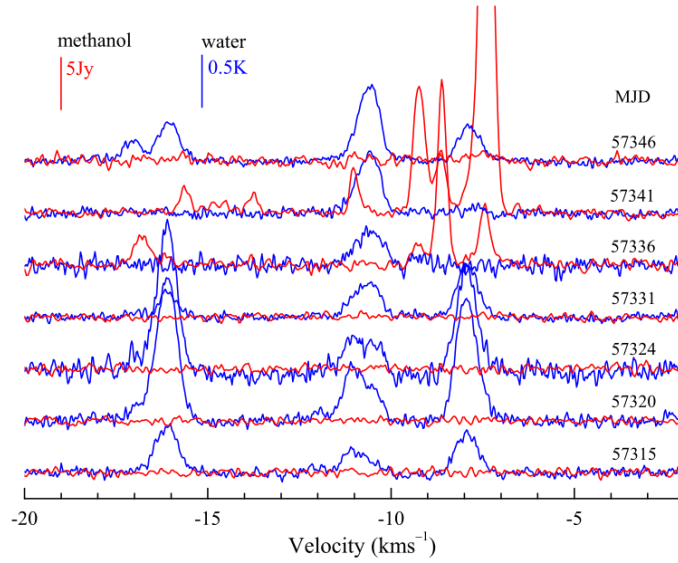


図 2.8 Torun 32m 電波望遠鏡^{*13}で観測した 6.7 GHz メタノールメーザー (赤) と 22 GHz 水メーザー (青) のスペクトルとその強度変動をプロットした。左上の縦棒がそれぞれのスケールを表している。なお MJD 57341 のメタノールの -7.43 km s^{-1} の成分のピークは 57.7 Jy である。Szymczak et al. 2016 図 2 より抜粋。

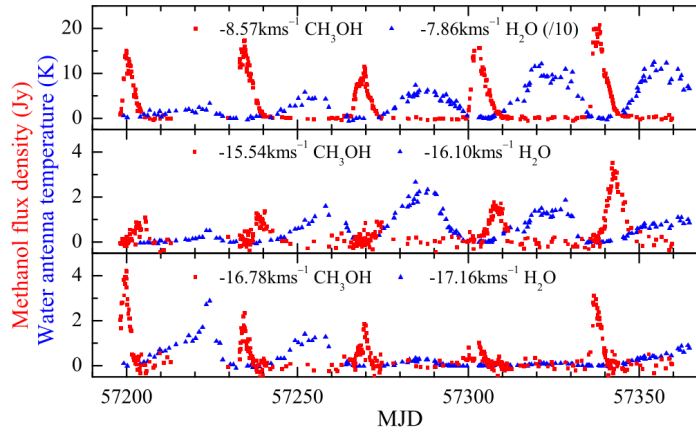


図 2.9 1.1 km s^{-1} 以内で速度成分が一致する、メタノールメーザーと水メーザーのライトカーブのプロット図。これにより水メーザーはメタノールメーザーのピークとピークの間、もしくはそこから 2-5 日遅れてピークを迎えることが明らかにされた。Szymczak et al. (2016) 図 4 より抜粋。

*13 ポーランドの Toruń に存在する。

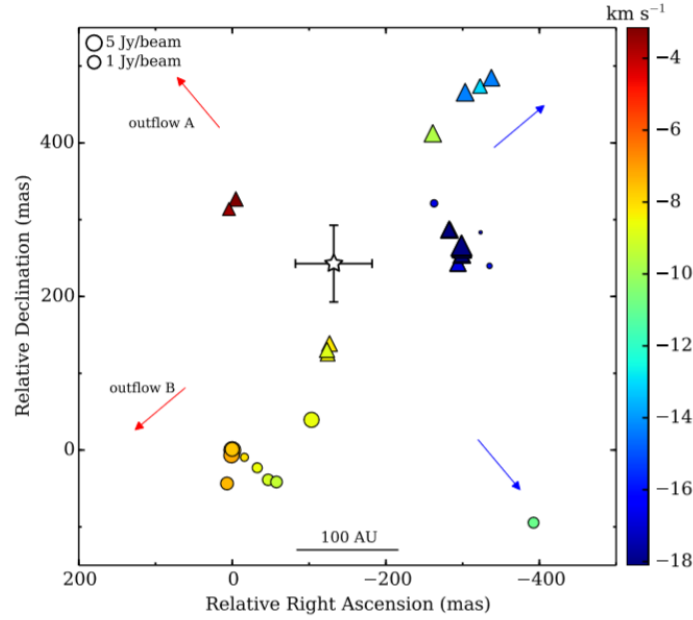


図 2.10 EVN ^{*14} で観測した。6.7 GHz メタノールメーザーは ○ で、Hirota et al. 2008 で観測した 水メーザーは △ で示している。○ の大きさが強度に、スポットの色が右端の速度スケールと対応している。また中央の星が 1.3mm 輝線で見た励起源に (Palau et al. 2013)、赤と青の矢印がアウトフローの方向に対応している (Palau et al. 2011)。Szymczak et al. 2016 図 3 より抜粋。

2.3 未解明な点

IRAS 22198 は上で見てきたように様々な波長で観測が行われ、特に中質量星でありながら 6.7 GHz メタノールメーザーを放射する唯一の天体であるという点は非常に珍しい。しかし Fujisawa et al. (2014) でその周期変動が示されているが、その変動プロファイルはフレア開始時にデータの欠けが存在していたり、全ての速度成分について変動プロファイルを議論できているわけではなく、完全というわけではない。また、その際に観測した山口 32 m 電波望遠鏡の検出感度 3σ は 4 Jy であり、IRAS 22198 の静穏期のスペクトルが得られず、真に間欠的かを結論付けるためにはより高感度な観測が必要になる。

^{*14} The European VLBI Network の略。

3 観測

3.1 日立局での IRAS 22198+6336 の観測

観測目的でも述べたが、IRAS 22198 の静穏期のスペクトルの取得や変動プロファイルの議論のために、日立局ではモニター観測を行っている。表 3 にパラメータを掲載する。

表 3 日立局観測パラメータ

観測局	日立 32 m 電波望遠鏡
受信周波数	6664 - 6672 MHz
バンド幅	8 MHz
チャンネル数	8192 ch
速度分解能	0.044 km s^{-1}
積分時間	300 sec
システム雑音温度 (典型値)	30 K
rms ノイズ (3σ)	0.9 Jy

表 3 には IRAS 22198 の観測期間を記載していないが、2012/12/30 - 2014/01/10 , 2014/05/05 - 現在 まで、IRAS 22198 の毎日のモニター観測は継続している。その上で、2014/06/09 - 06/24(1 エポック目) と 2014/07/12 - 07/26(2 エポック目) の 2 回でさらなる高頻度な観測を実施した。これは 1 日の中で、観測天体の仰角 (以降 EL) $> 15^\circ$ を満たすときに観測を行ったもので、その結果 1 日に 29 - 38 回の独立したデータ点が取得された。また 1 日の連続スキャンを全積分することで、 $3\sigma \approx 0.15 \text{ Jy}$ という高感度も達成可能になっており^{*15}高い時間分解能で変動期間を把握することが可能になる。今回の解析では、1 エポック目のデータにはフレア開始時のデータが取得されていなかったため、2 エポック目のデータについて解析を行った。

3.2 強度較正

今回の解析する観測データは、1 日の中で複数回観測したデータであるが、その場合には (1) ポインティング較正 , (2) 時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の補正の残差の較正を行う必要がある。普段の日立局のモニター観測では、同じ EL で観測しており、強度の相対変化に着目しているため必要はないが、今回のような高頻度観測では異なる EL の時にも観測しているため較正が必要になってくる。そしてその較正のために Cepheus A (以下 Cep A) を IRAS 22198 と交互に観測した。Cep A は IRAS 22198 から 5° の離角に位置し、強度が強く、かつ 1 日の中では

^{*15} rms ノイズは積分時間のルートに反比例している。つまり 1 日で 38 回観測を行った場合、積分時間が 38 倍になるので rms ノイズは $0.9 \times 1/\sqrt{38} \approx 0.15 \text{ Jy}$ となる。またノイズはルートに反比例するので、観測回数が増えるにつれて全積分しても効果が薄くなるという欠点がある。

強度変動が見られないため、較正天体として適当である (Sugiyama et al. 2008; Szymczak et al. 2014)。図 3.1, 3.2 は Cep A に 1 日以内の強度変動が見られないという結果を示す先行研究から抜粋したものである。

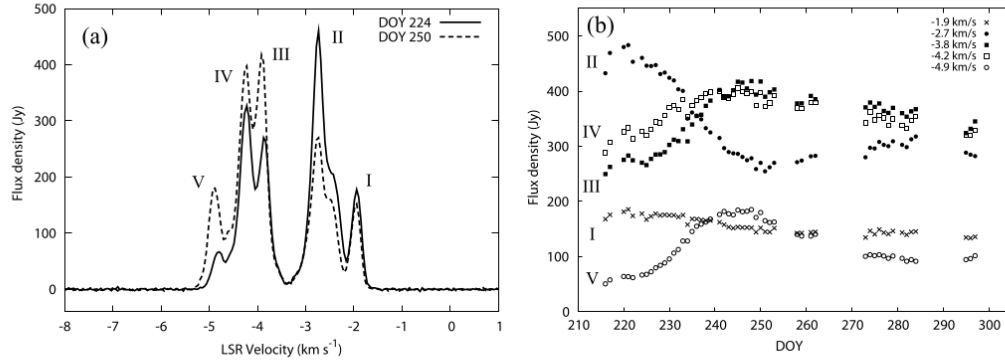


図 3.1 Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザーでの観測結果である。山口 32m 電波望遠鏡で観測された。

左図: Cep A のスペクトル図。I - V までの 5 成分が検出されている。

右図: 各成分の強度変動プロット図。この図では Cep A に 1 日以内の急激な強度変動は検出されていない。

両者とも Sugiyama et al. (2008) 図 1 より抜粋。

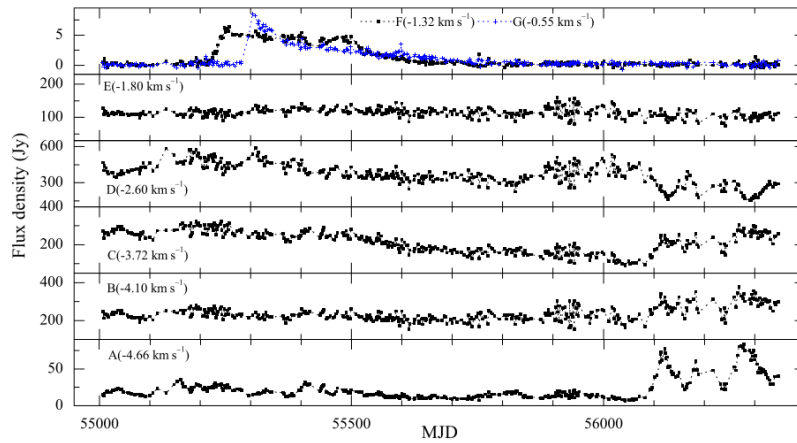


図 3.2 Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザーでの観測結果である。Torun 32 m 電波望遠鏡で観測された。各成分の強度変動をまとめて表したプロット図である。そのため横軸の時刻は全成分で共通だが、縦軸のフラックス密度の値は成分ごとに異なっている。また Sugiyama et al. (2008) で観測された 5 成分に加え、新たに成分 F, G の 2 成分が検出された。Szymczak et al. (2014) 図 5 より抜粋。

実際の観測では、IRAS 22198 の ON 点 300 秒 → IRAS 22198 の OFF 点 300 秒 → Cep A の 9 点法 865 秒 → ... というサイクルで観測を行った。今回の観測では、ON 点時はアンテナは天

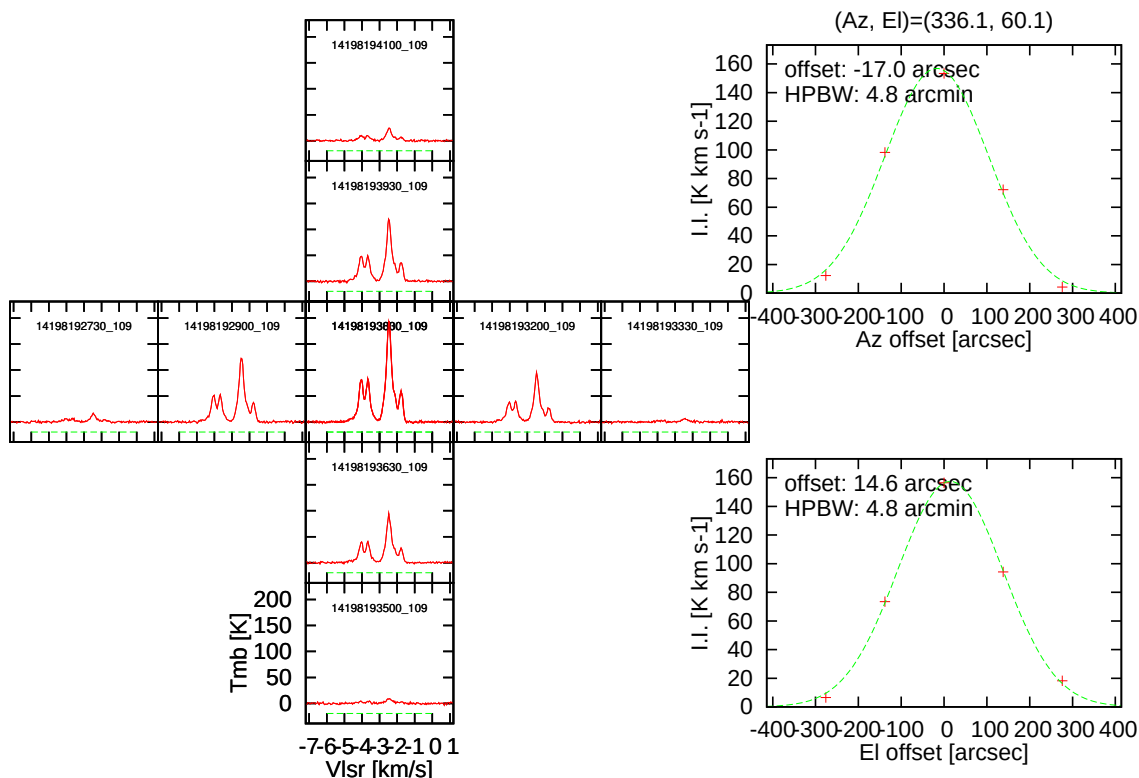


図 3.3 9 点法観測の結果とそのガウシアンフィッティングの結果。左の十字スキャンが AZ と EL 方向にずらして観測した時の Cep A のスペクトル図。縦軸がアンテナ温度、横軸が視線速度であり、軸の目盛は全てのプロットで共通である。また各プロット中の上の数字は観測時刻。

理想的な場合、ビーム幅だけずらして観測すると天体からの電波は $1/4$ になるが、このスキャンではその値がずれている。これは正しく天体中心を観測できていないために生じる。そこで図中右のように、縦軸を強度、横軸を天体中心からの離角でプロットしガウシアンでフィッティングをかけると、9 点法観測をした時にアンテナが AZ, EL 方向にどれだけずれていたのが得られる。それが図中のオフセットで示されている。HPBW は半値幅である。

体中心を向くようにプログラムされているが、実際はアンテナの指向誤差によって正しく天体中心を向いていないことがある。その場合天体からの電波を完全には受信できず、結果的に電波強度が下がってしまう。それを較正する方法が 9 点法である。

9 点法とは、強度が既知の天体に対して、AZ と EL 方向にそれぞれ + ビーム幅ずらした点、+ ビーム幅の半分ずらした点、天体中心、- ビーム幅の半分ずらした点、- ビーム幅ずらした点の 5 点の観測を行う。Class II メーザーは点源と考えられるので、上記 5 点の観測で得られた強度を、アンテナのビームパターン、つまりガウシアンで近似フィットできる。つまり天体中心を観測したスキャンが、実際に天体中心を観測していたのか否かが分かり、外れていた場合はどれだけ外れて観測していたのか求めることが可能になる。図 3.3 は 9 点法観測によるガウシアンフィッティング結果の一例である。

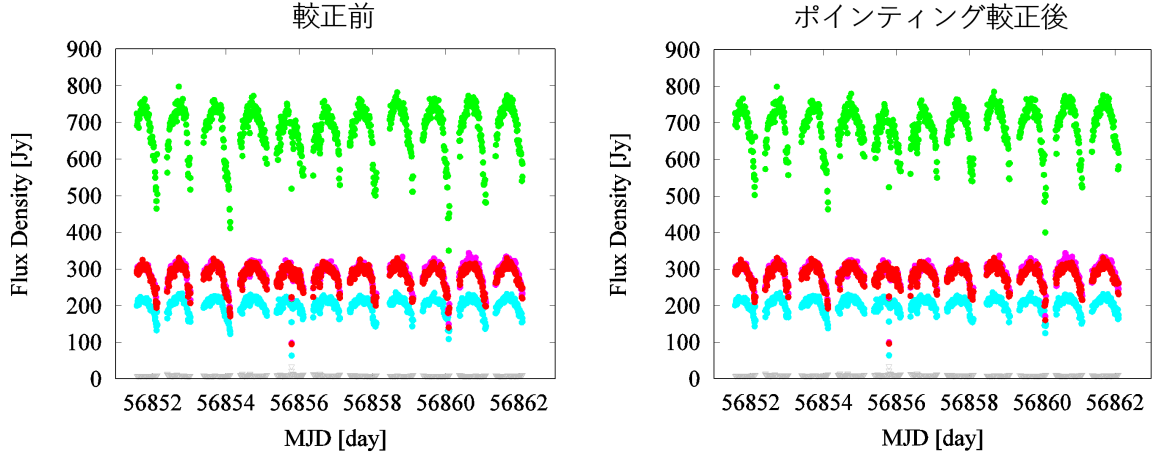


図 3.4 ポインティング較正前と較正後の Cep A の強度変動の比較図。赤、水色、ピンク、緑と 4 つの速度成分が検出されている。各観測日の観測開始と観測終了時に近い時間帯、つまり EL が低い時 (典型値は 30° 以下) では特に補正値が大きかった。逆に EL が高い時はほとんど補正の必要がなかった。また、強度が一定になっていないことは明らかであるため、時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の残差の較正を実施した。なお本文で述べた除外したスキャンは、MJD 56856 付近のフラックス密度が極端に落ちている 1 スキャンである。

ここで得られた 2 つのオフセットから IRAS 22198 に適用する補正値を導出する。オフセット値を $[\Delta AZ, \Delta EL]$ とすると、測定される電波強度はガウシアンで減少していくので、その減少率は 2 次元ガウシアン の式

$$\Delta S = \exp \left(-\frac{4 \log 2}{HPBW^2 / ((\Delta AZ)^2 + (\Delta EL)^2)} \right) \quad (23)$$

で表すことができる。ここで HPBW はビームの半値幅で、日立局では 4.6 分角である。

そして、ポインティング較正前のフラックス密度を S_{app} 、ポインティング較正後のフラックス密度を S_{point} とすると、

$$S_{point} = \frac{S_{app}}{\Delta S_{point}} \quad (24)$$

からポインティング較正後のフラックス密度 S_{point} が求まる。まず IRAS 22198 に対して補正を行う前に、一度 Cep A に補正を適用しポインティング較正の効果を確認する (図 3.4)。その際に MJD = 56856 付近の 1 回の 9 点法スキャンのみ観測された強度が非常に弱かったため、このスキャンは解析から除外している。図 3.5 にその時の 9 点法スキャンの結果を掲載する。今回の較正では、 $EL > 30^\circ$ のときは補正値は 2 - 3 % であるのに対し、 $EL < 30^\circ$ のときは 10 - 30 % まで補正値は上昇した。しかし Cep A のフラックス密度は未だ一定になっておらず、較正後でも最大で 30 % 強度の減少も見られていた。そこで次に述べる時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の残差の較正を行った。各スキャンのオフセット値 $[\Delta AZ, \Delta EL]$ 、電波強度の減少率から求めた強度の補正値 ΔS_{point}^{-1} は付録 A に掲載する。

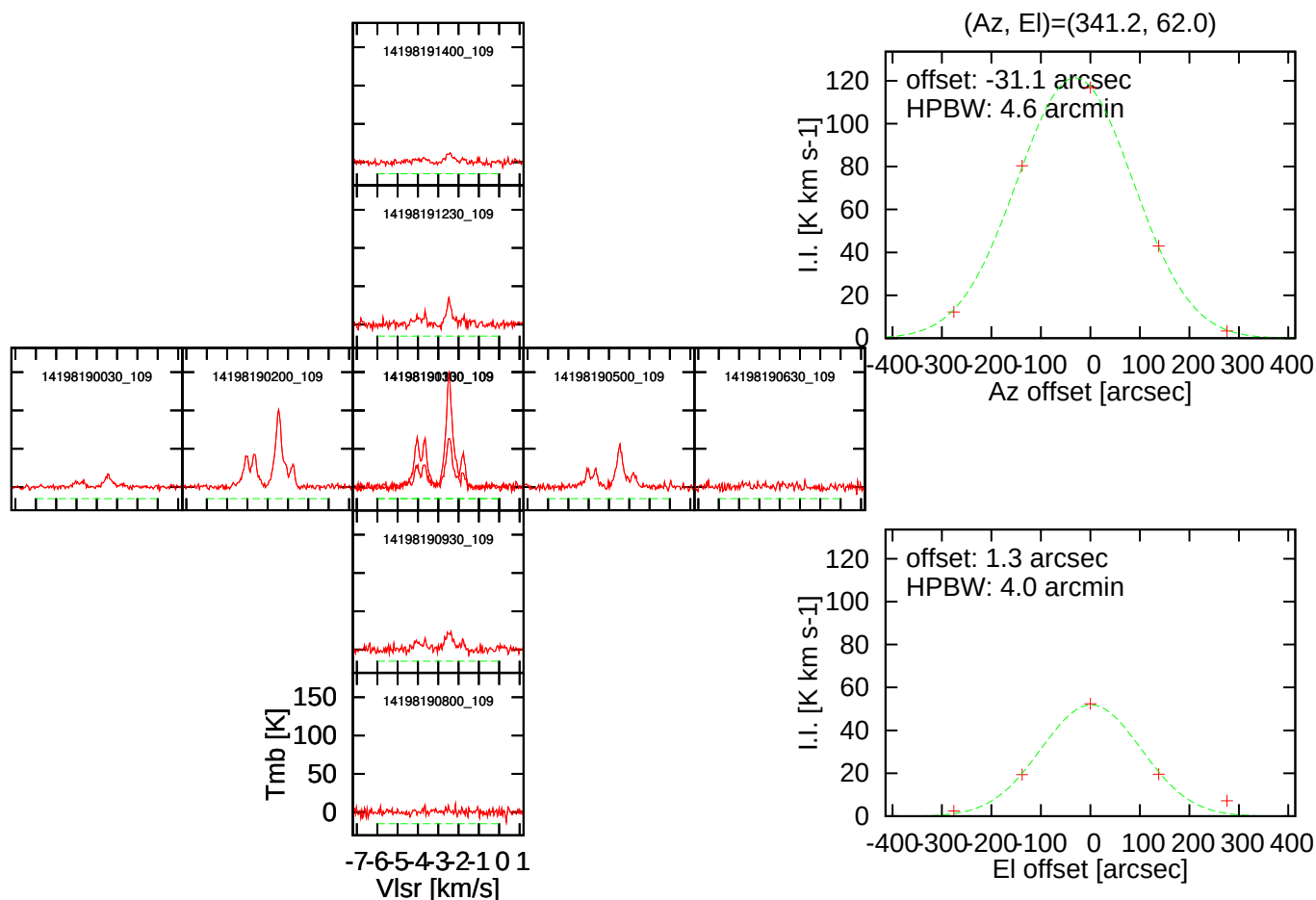


図 3.5 除外したスキンの 9 点法スキンのプロット図。図中のパラメータは図 3.3 と同じである。このスキンでは AZ 方向のポインティング較正は正常だったが、EL 方向では全ての観測されたフラックス密度の値が半分以上に落ち込んでいる。これはそもそもアンテナが Cep A の方向に向いていなかったからだと判断し除外した。

次にポインティング較正では補正できない、時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の残差の較正を行う。この較正では Cep A の強度変動は見られないという仮定において、つまり Cep A のフラックス密度は一定であるとして、各スキンにおける補正値を導出している。またこの較正は時間ごとに変動するシステム雑音も補正するため、補正値は直前の IRAS 22198 に適用する。

較正の手順として、各観測日において、各成分の一番明るいフラックス密度の値から、10% 以内の値を示すデータを平均したフラックス密度を導出する。ここでの 10% とは、観測される強度の較正精度から決定した。さらに IRAS 22198 の放射を検出した 11 日間において Cep A は強度変動がないと仮定し、先ほど求めた各日の平均フラックス密度を、さらに 11 日間平均したフラックス密度を今回の観測における Cep A の真の強度として採用し、Cep A の各成分に対する規格化を行った。こちらも、時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の残差の較正後のフラックス密度

を S_{int} とすると、

$$S_{\text{int}} = \frac{S_{\text{point}}}{\Delta S_{\text{etc}}} \quad (25)$$

となる。その結果を図 3.6 に掲載する。 ΔS_{etc} も電波強度の減少率なので、実際に適用する補正値は $\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$ である。この補正値 $\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$ も付録 A に掲載する。

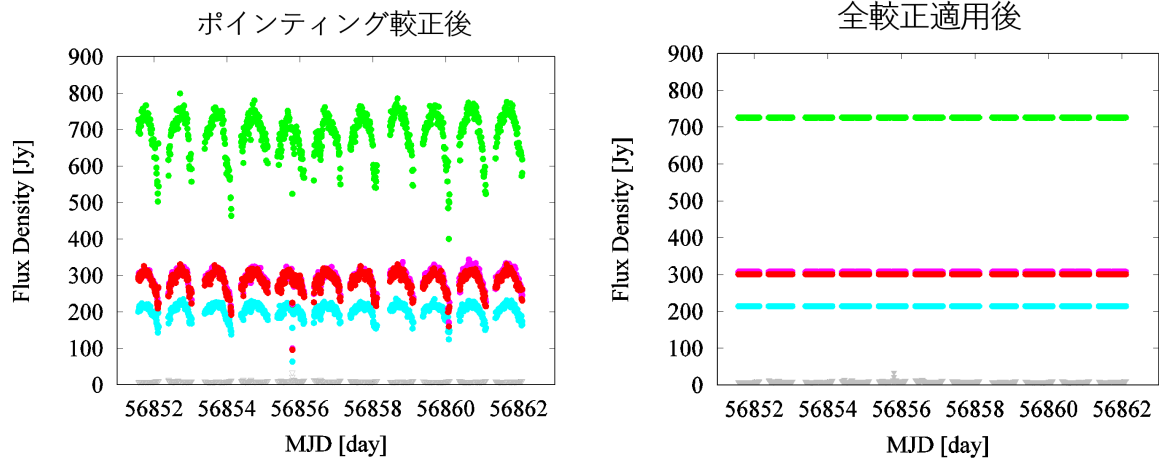


図 3.6 時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の残差の較正を行う前 (ポインティング較正のみ) と、行った後 (全較正適用) の Cep A の強度変動プロット図。最終的に、IRAS 22198 にはポインティング補正値と時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の残差の補正値をそれぞれ適用する。

4 観測結果

観測の結果 IRAS 22198 からの放射を 2014/07/13 - 07/23 (MJD 56851 - 56861) までの 11 日間で検出した。それ以外では検出感度 3σ (後述参照) 以下だった。6 つの速度成分が検出され、順に A ($V_{\text{LSR}} = -16.9 \text{ km s}^{-1}$) , B (-16.06 km s^{-1}) , C (-10.91 km s^{-1}) , D (-9.15 km s^{-1}) , E (-8.52 km s^{-1}) , F (-7.35 km s^{-1}) とした。また検出されたフラックス密度は最大で 21 Jy だった。図 4.1 はスペクトルの検出例である。なお、較正前と較正後の IRAS 22198 のフラックス密度の比較も付録 A で行う。また Fujisawa et al. (2014) との速度成分の比較を表 4 に示す。Szymczak et al. (2016) で観測された 6.7 GHz メタノールメーザーの速度成分も $-16.71 - -7.16 \text{ km s}^{-1}$ の範囲で観測されており、本観測と同じ速度成分を検出していると思われる。

表 4 Fujisawa et al. (2014) との速度成分の比較。速度成分の値は -16.5 km s^{-1} 以外は今回の観測で得られた値を使用している。また、両者の速度分解能は 0.044 km s^{-1} である。

速度成分 [km s^{-1}]	本観測	Fujisawa et al. (2014)
A (-16.90)	○	-
(-16.5)	-	○
B (-16.06)	○	-
C (-10.91)	○	○
D (-9.15)	○	○
E(-8.52)	○	○
F(-7.35)	○	○

さらに強度変動プロファイルを得るために、強度変動プロットも作成した (図 4.2)。しかし本観測でも、5 分積分を 1 スキャンとするデータでは微弱な成分の変動 (成分 A - D) の議論が難しいので、1 日のスキャンを全積分したデータを用いて、強度変動プロットを作成しなおしている。§ 3.1 でも触れたが、1 日に 29 - 38 回観測しているので、積分時間は時間は 500 秒から 8700 -11400 秒に伸び、結果として検出感度は 0.9 Jy から 0.15 Jy まで改善している。これも図 4.2 に掲載する。図 4.3 - 図 4.8 では各成分ごとに、1 データあたりの積分時間の違いによる、強度変動プロットの比較をしている。しかしこれでもなお、静穏時には全成分が検出感度以下になってしまい、IRAS 22198 の静穏期からフレアのピーク時に、フラックス密度が何倍になったのかという相対振幅が定義できない。そこで今回は 3σ (0.15 Jy) の値を静穏期のフラックス密度の上限値として採用する。

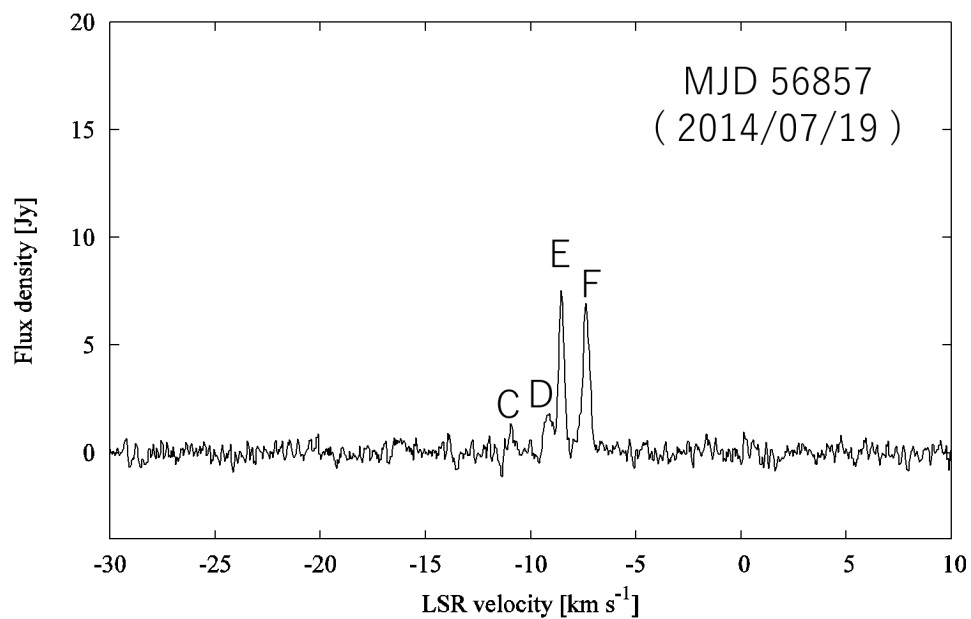
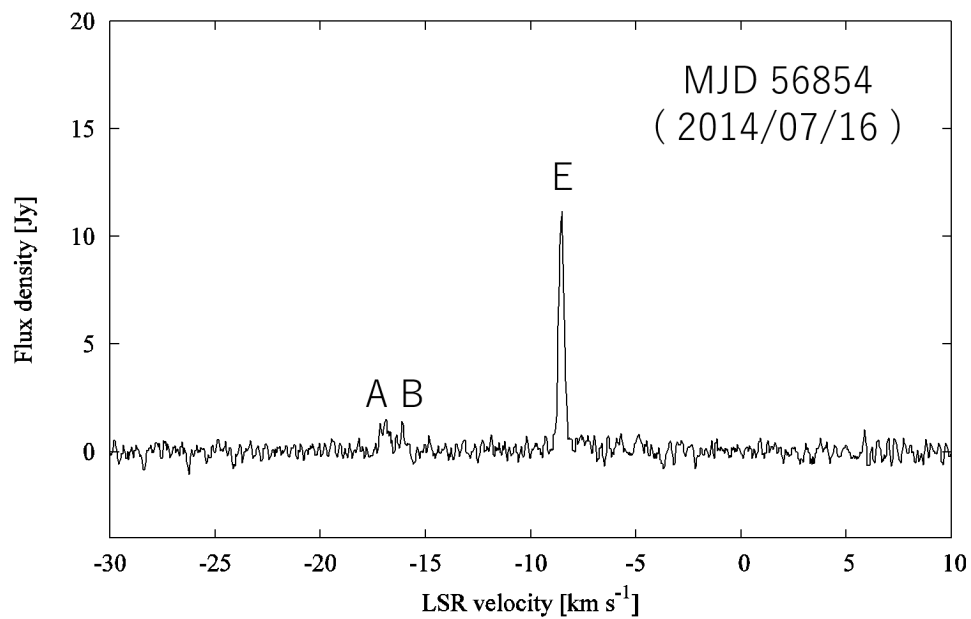


図 4.1 IRAS 22198 のスペクトル図。3 σ を検出感度と定義した。横軸が視線速度、縦軸がフラックス密度である。

上図: MJD 56854 におけるスペクトル図。成分 A, B, E を検出した。

下図: MJD 56857 におけるスペクトル図。成分 C, D, E, F を検出した。

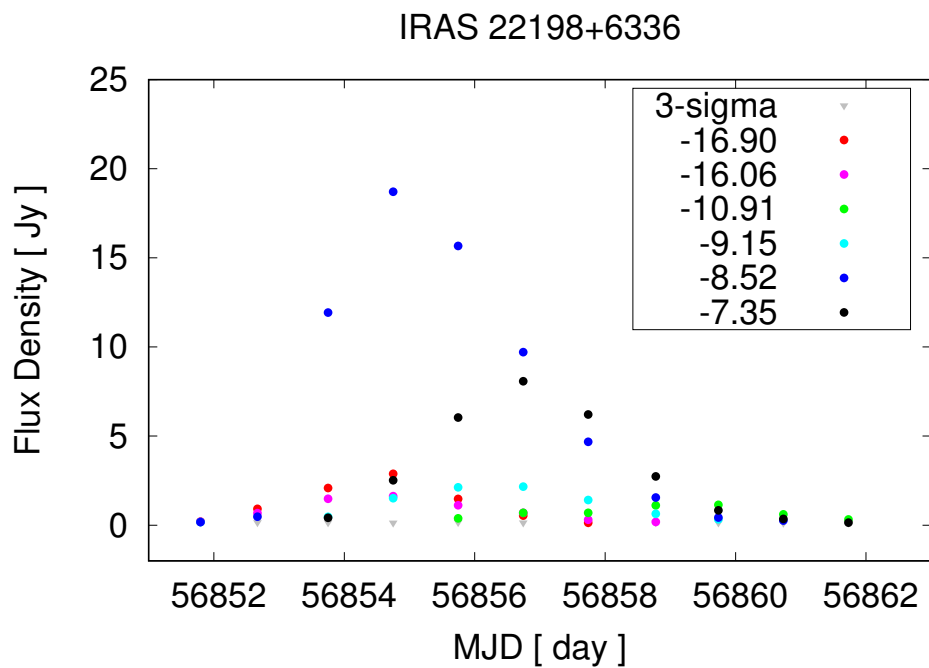
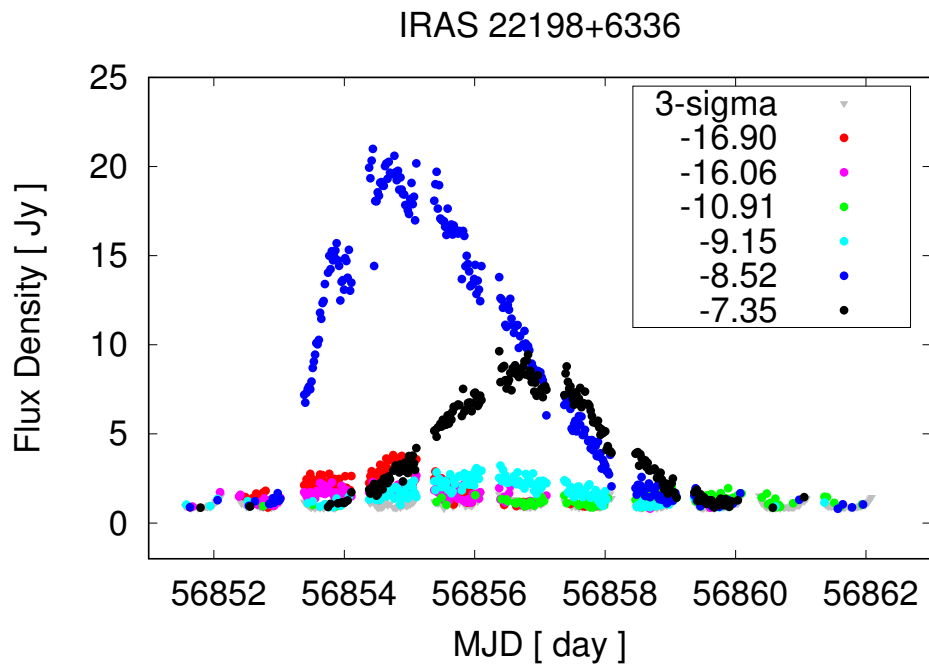


図 4.2 IRAS 22198 の強度変動プロット。横軸が時間、縦軸がフラックス密度である。また図 4.3 以降も同じように上図・下図ともに掲載している。

上図: 検出された成分の強度変動プロット。 $3\sigma \approx 0.9 \text{ Jy}$ 。

下図: 検出された成分の、1 日分のデータを積分した強度変動プロット。 $3\sigma \approx 0.15 \text{ Jy}$

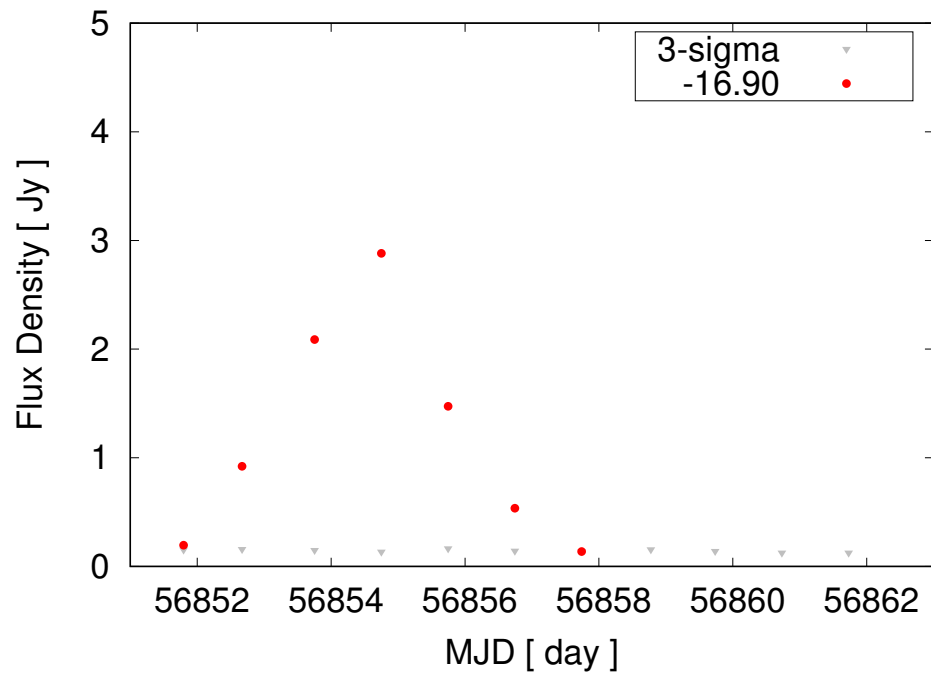
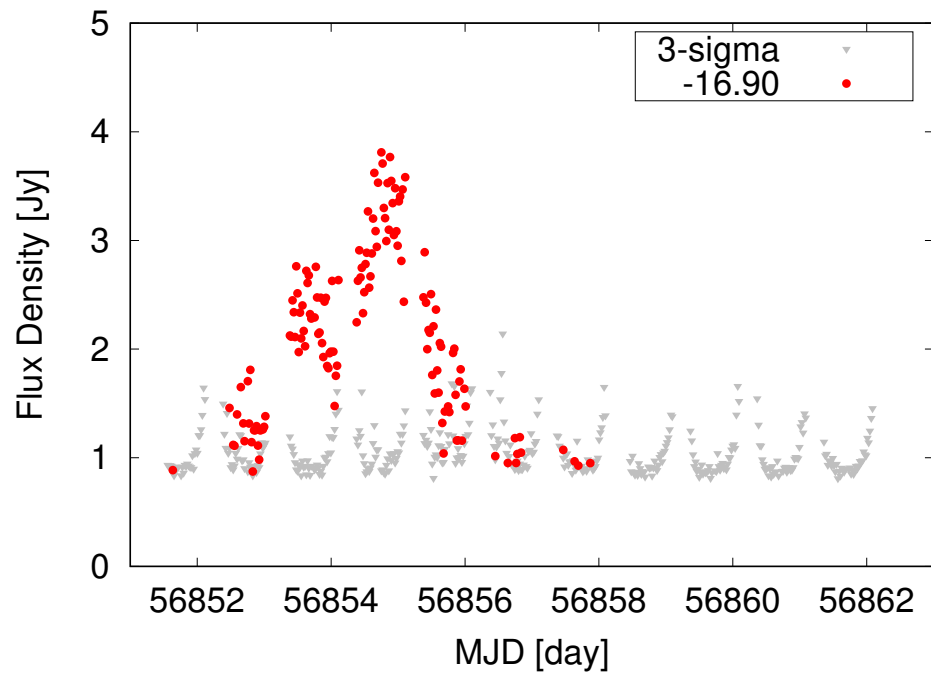


図 4.3 成分 A(-16.90 km s^{-1}) の強度変動プロットの比較。検出感度 3σ の値が 0.9 Jy から 0.15 Jy まで改善されている。また、3 日程度で強度がピークに達し、3 日程度で強度が元に戻っている。詳細は § 5.3 で述べる。

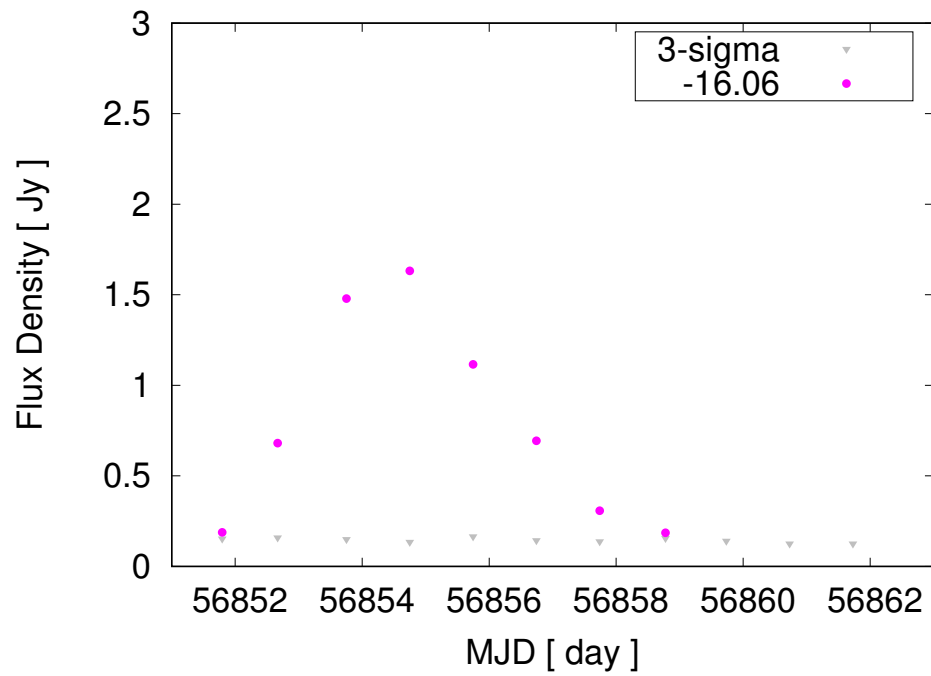
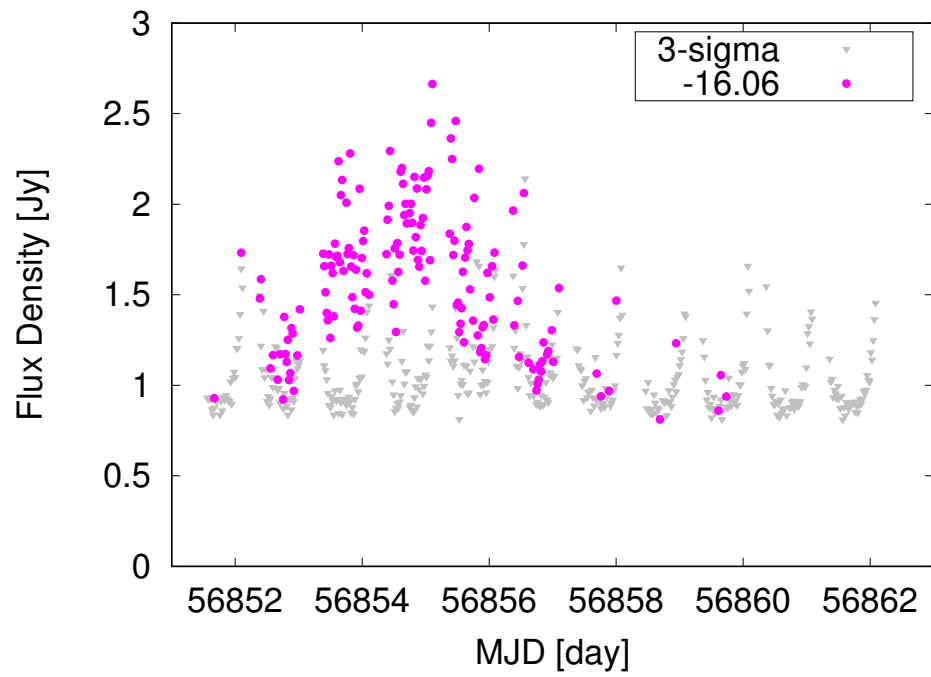


図 4.4 成分 B(-16.06 km s^{-1}) の強度変動プロットの比較。3 日程度で強度がピークに達し、3 日程度で強度が元に戻っている。

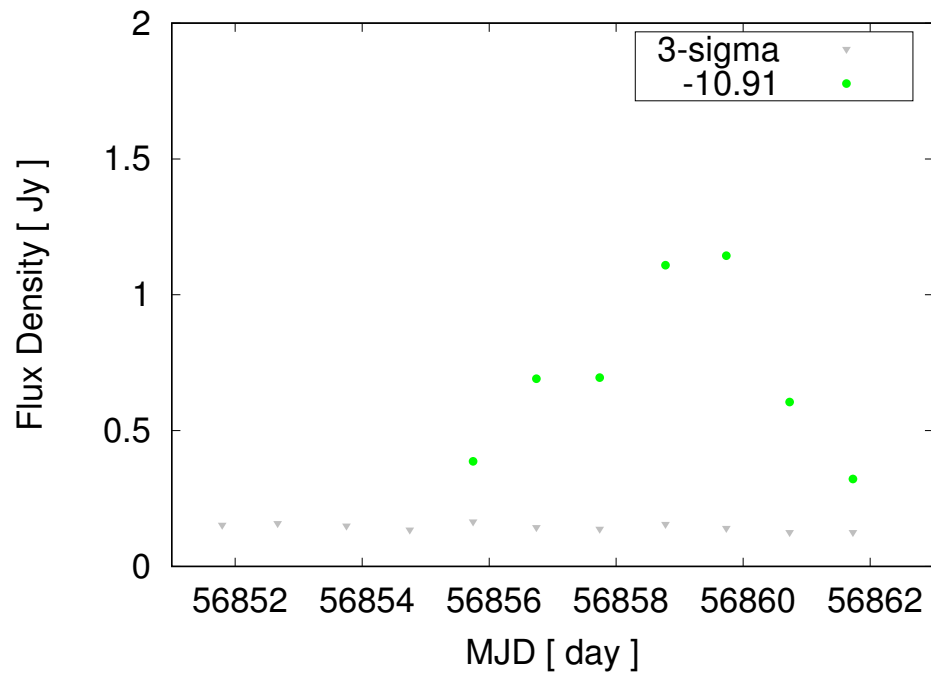
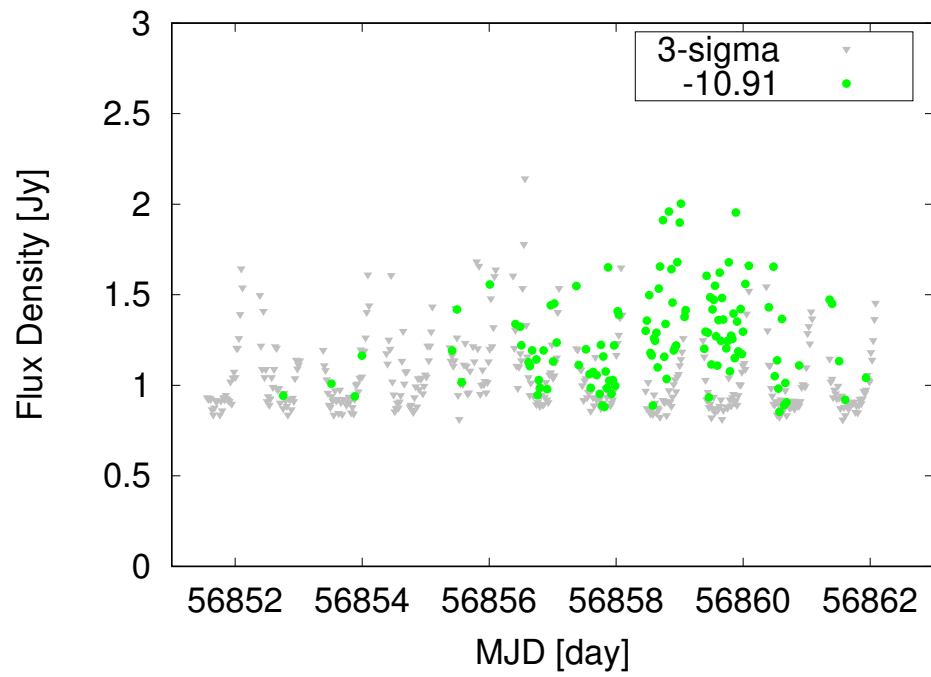


図 4.5 成分 C(-10.91 km s^{-1}) の強度変動プロットの比較。4 日程度で強度がピークに達し、3 日程度で元に戻っている。

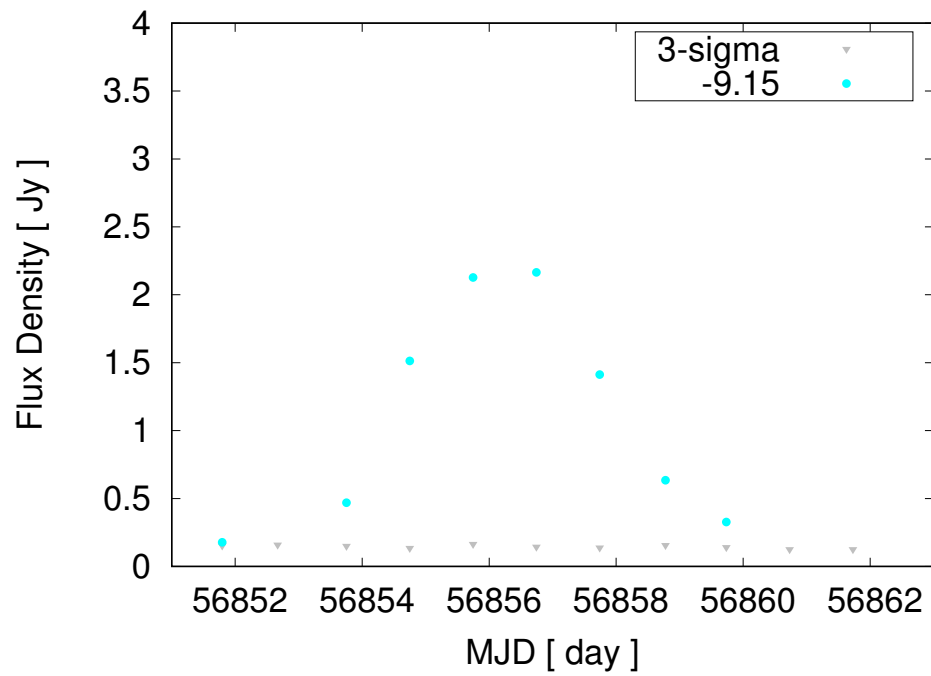
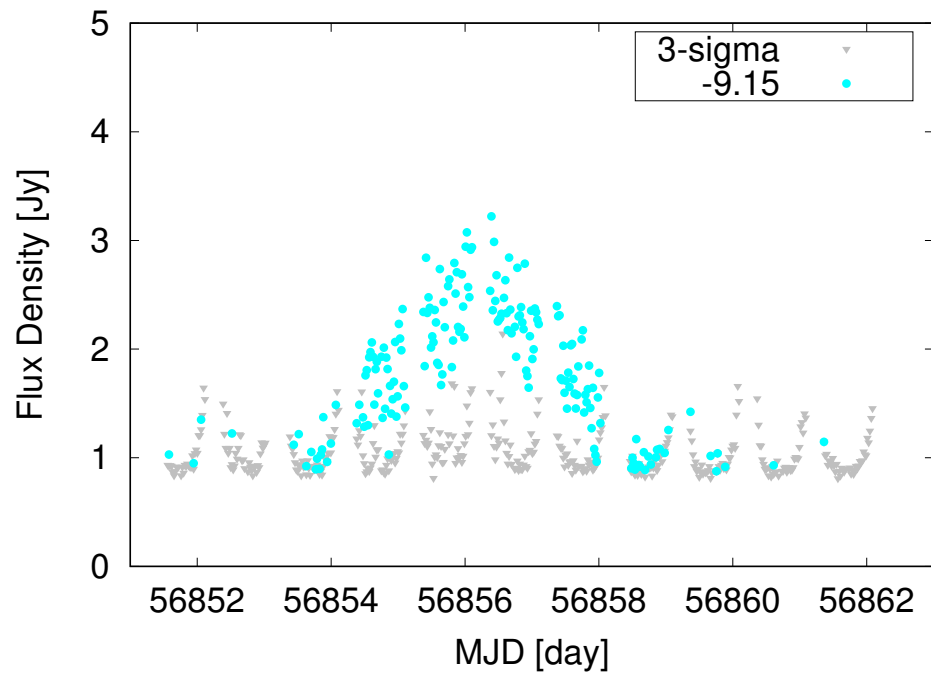


図 4.6 成分 D(-9.15 km s^{-1}) の強度変動プロットの比較。4 日程度で強度がピークに達し、4 日程度で元に戻っている。

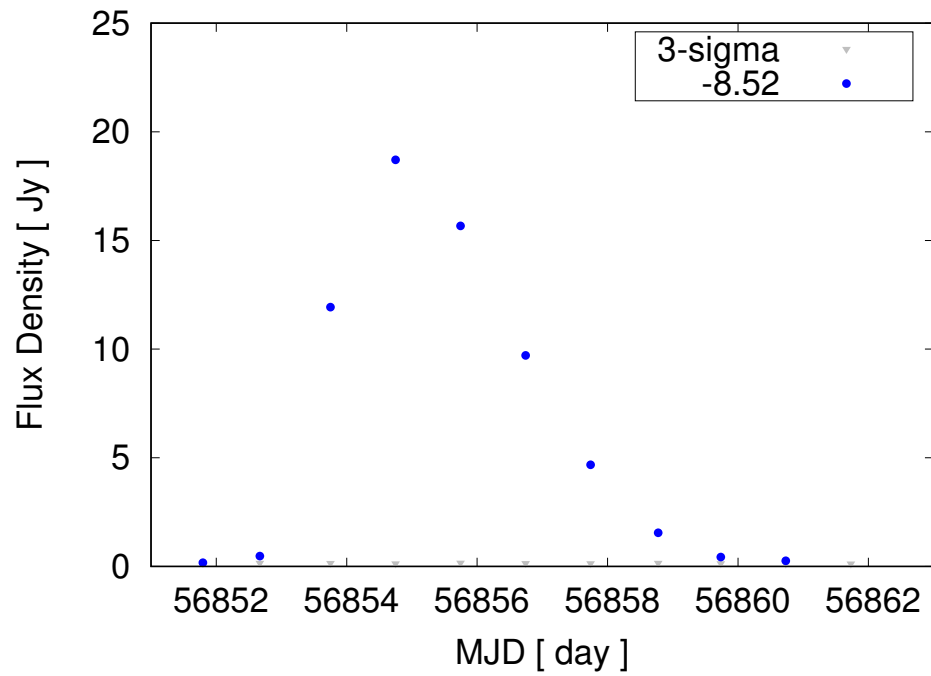
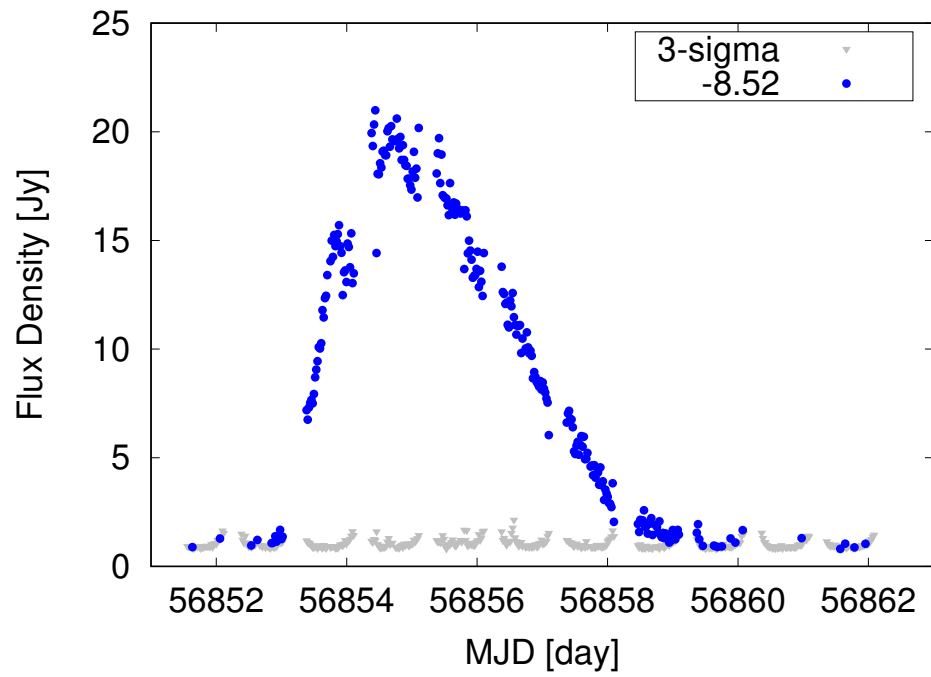


図 4.7 成分 E(-8.52 km s^{-1}) の強度変動プロットの比較。2 日程度で強度がピークに達し、5 日程度で元に戻っている。

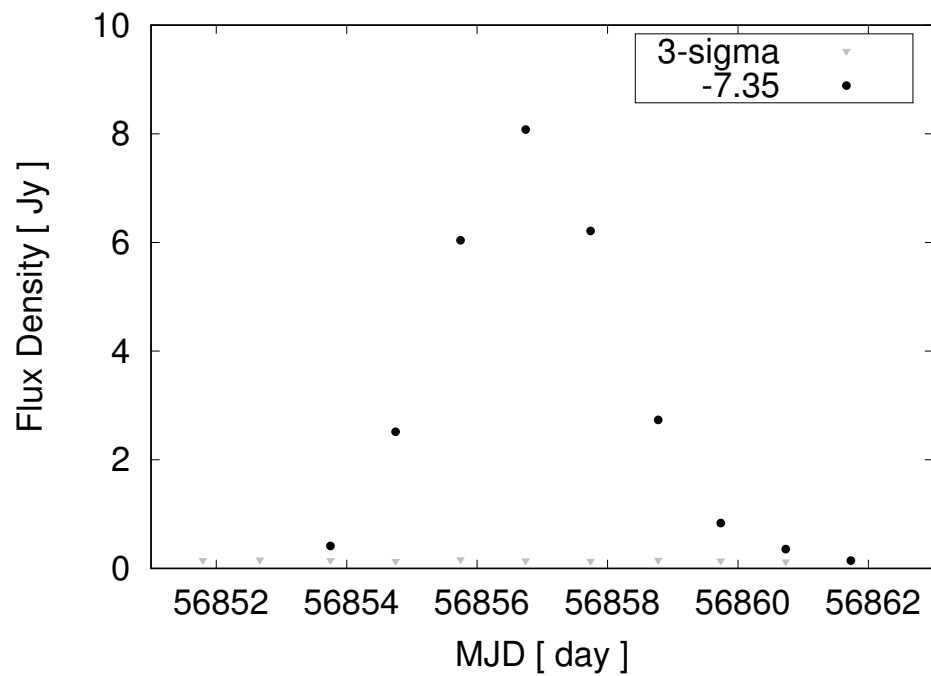
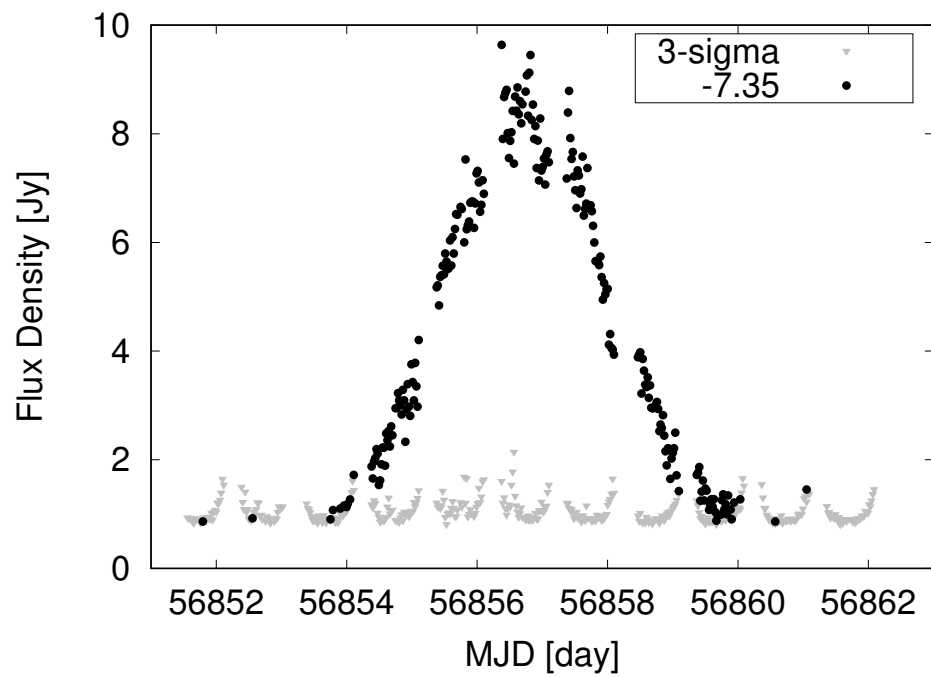


図 4.8 成分 F(-7.35 km s⁻¹) の強度変動プロットの比較。4 日程度で強度がピークに達し、4 日程度で元に戻っている。

5 考察

5.1 強度変動プロファイルの定量的な関数フィッティング

§4 で強度変動プロット図を作成したのは、先行研究でもなされているが (e.g. Fujisawa et al. 2014; Szymczak et al. 2016)、フレアの位相差や、フラックス密度の上昇・下降に費やした日数の導出など、定量的な評価を行うためである。今回の観測でも定量的な評価を行うために関数フィッティングを行う。しかし成分 E(図 4.7) の強度変動はピーク時刻に対して明らかに左右対称ではなく、ガウシアンでフィッティングを行うのは適切ではないと考えられる。そこで本研究では § 5.1.1 に示すような関数を用いた。

5.1.1 非対称な変動プロファイルに適用可能な関数

非対称な変動をする成分に対するフィッティング関数は、既に Szymczak et al. (2011) で用いられており (図 5.1)、今回もその関数を用いる。具体的には

$$S(t) = A^{s(t)} + C \quad (26)$$

で表される関数であり、 A, C は定数である。さらに $s(t)$ は

$$s(t) = \frac{b \cos(\omega t + \phi)}{1 - f \sin(\omega t + \phi)} + a \quad (27)$$

で表される。 $s(t)$ は David et al. (1996) で初めて用いられた関数であり、Szymczak et al. (2011) ではこれを改変し間欠的な変動をする成分にもフィッティングを可能にした。

この $s(t)$ の中のパラメータは a : フラックス密度の平均値、 b : 平均値 a からの増幅率、 ω : 振動数 (ただし P を周期として $\omega = \pi/P$)、 ϕ : 位相、そして f : 非対称パラメータ となっており、 f は $-1 \leq f \leq 1$ を取る^{*16}。 $S(t)$ でも同じパラメータが用いられているが、 ω のみが Szymczak et al. (2011) では $\omega = 2\pi/P$ を用いていた。今回のフィッティングでは $\omega = 2\pi/P$ を採用する。そして非対称パラメータ f が $s(t)$ の中で一番大切なパラメータであり、これによって変動のピークに対して強度変動がどれだけ非対称であるかが決まる。図 5.2 に David et al. (1996) で用いられた $s(t)$ を、図 5.3 に Szymczak et al. (2011) で用いられた $S(t)$ の一例をプロットしている。ともに 3 つの関数を同時にプロットしているが、これは f の値のみ $-0.75, 0, 0.75$ と変えてプロットしたものになっている。また f の値と関数の色は図 5.2, 5.3 で同期させている。 $f = -0.75$ の場合はピークが早い側に、 $f = 0.75$ の場合はピークを遅い側にそれぞれ偏る。ただし $S(t)$ に関しては、 $A > 1$ の時のみ $s(t)$ と同じ振る舞いをする。 $A < 1$ ではこの振る舞いが逆転し、 $f = -0.75$ の場合はピークが遅い側に、 $f = 0.75$ の場合はピークを早い側にそれぞれ偏る。

^{*16} それ以外の値では関数が連続的にならない。

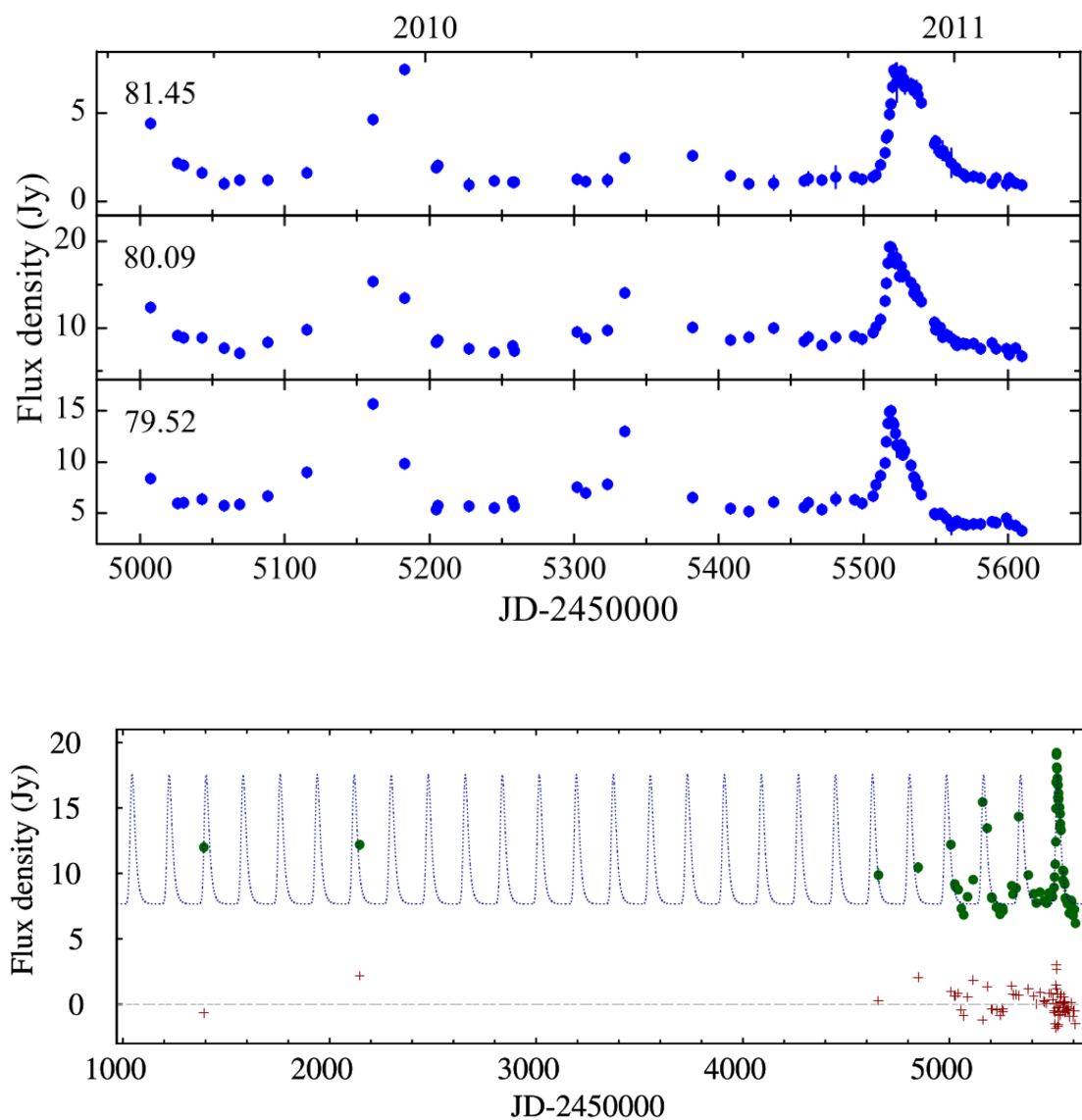


図 5.1 G22.356+0.066 の観測から得られた強度変動プロット図である。Torun 32m 電波望遠鏡で観測された。

上図: G22.356+0.066 の 6.7 GHz メタノールメーザーのうち、強度の強い 3 成分の強度変動プロット図になっており、図中左上の数字はその速度成分を表している。目視でも強度変動がピークに対して非対称であることが分かる。Szymczak et al. (2011) 図 1 より抜粋。

下図: 80.09 km s⁻¹ の速度成分に対して $S(t)$ を用いて関数フィッティングを行った結果が示されている。図中下の十字はフィッティング関数からの残差を示している。Szymczak et al. (2011) 図 2 より一部改変。

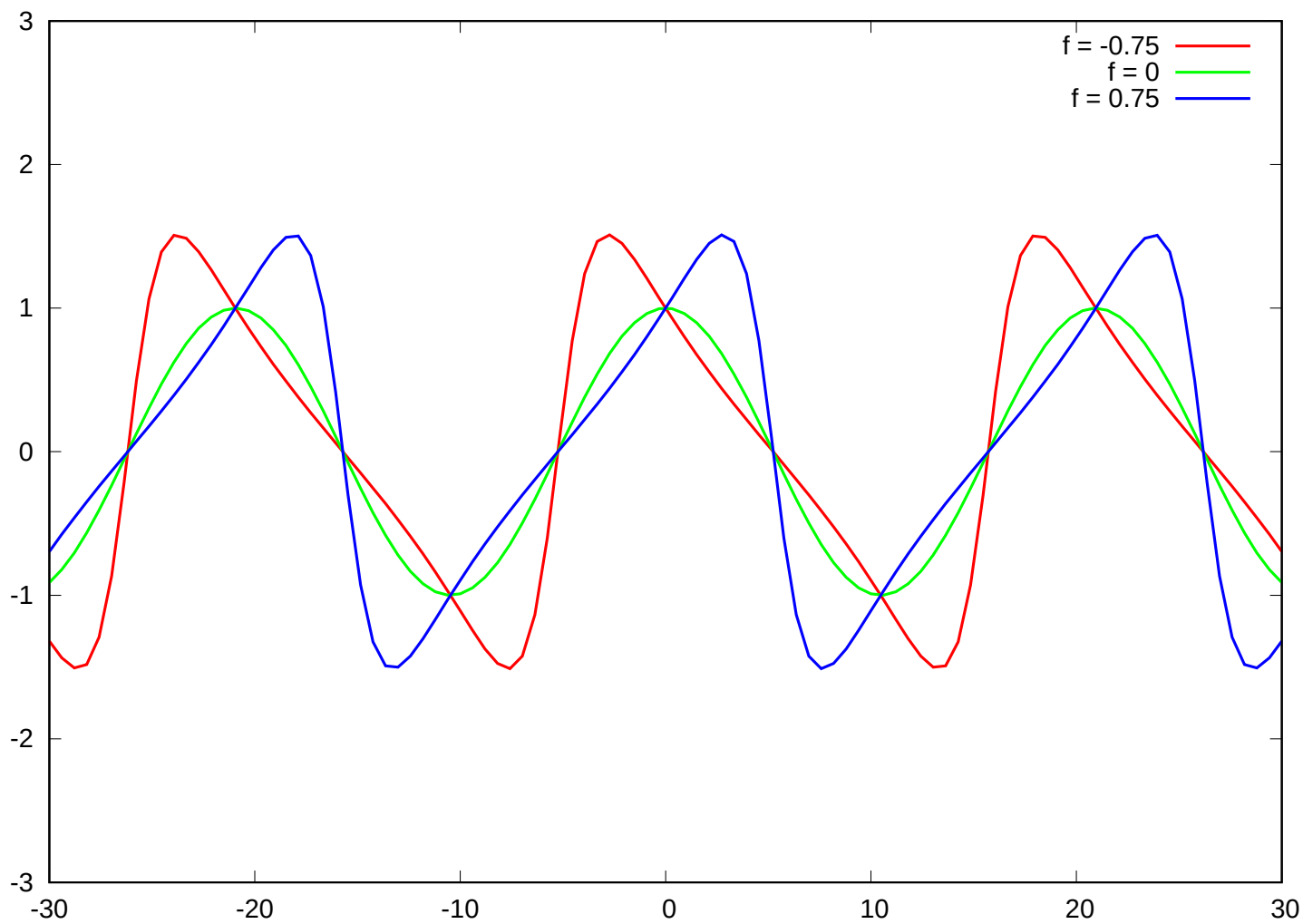


図 5.2 David et al. (1996) で用いられた関数 $s(t)$ のうち、 f の値のみ変えてプロットした。 f は $-1 \leq f \leq 1$ を取るが、 f が 0 に近いときは左右対称な変動になる。そして f が -1 に近づくときピークが早い段階で現れ、逆に f が 1 に近いときはピークは遅い段階で現れる。

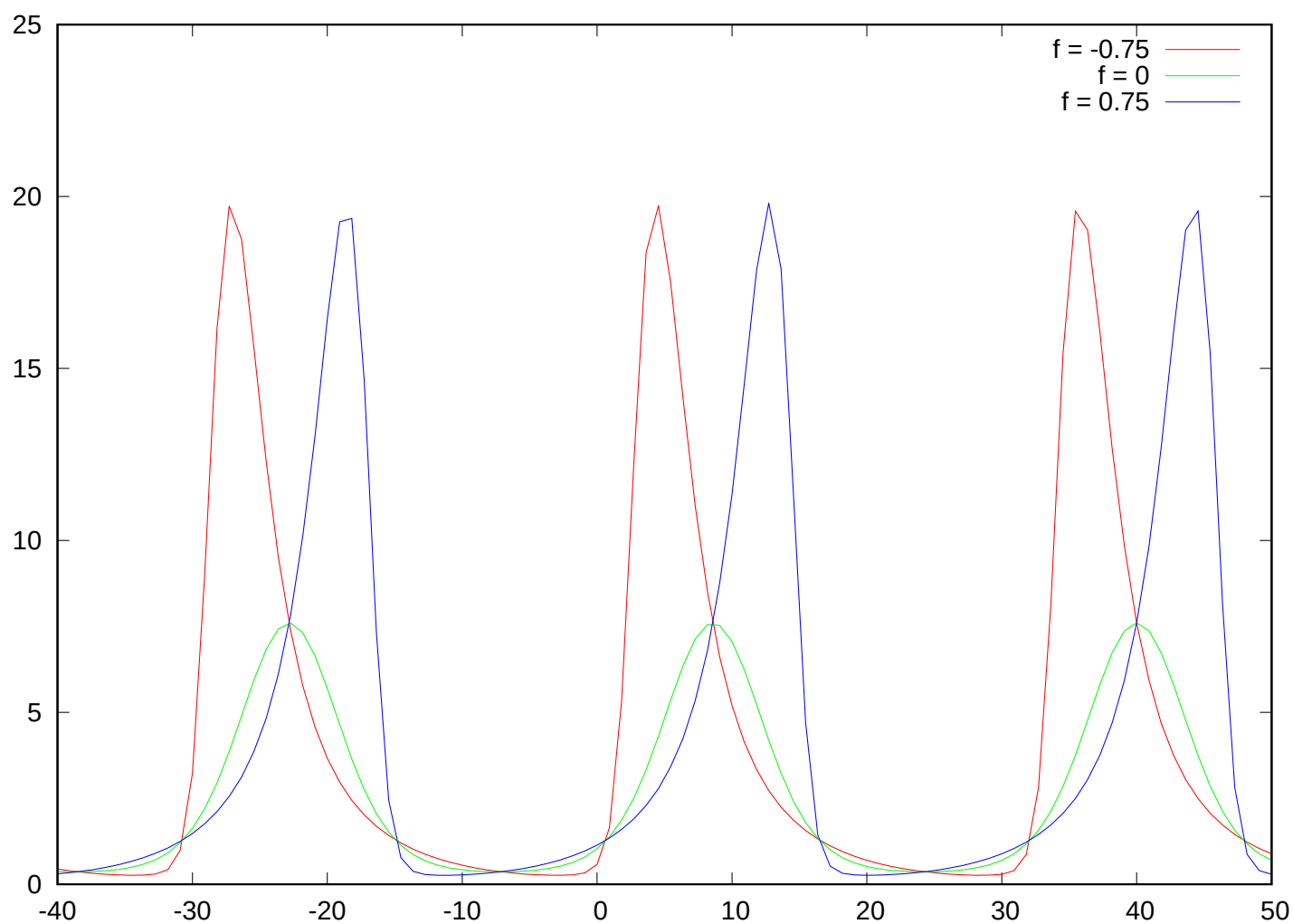


図 5.3 Szymczak et al. (2011) で用いられた関数 $S(t)$ のうち、これも f の値のみ変えてプロットした。縦軸と横軸の値は図 5.2 と同じである。 $s(t)$ をべき指数として扱うことで間欠的な変動に対しても対応できるようになっている。

5.1.2 IRAS 22198+6336 へのフィッティングの結果

間欠的な変動に対してもフィッティング可能な関数を紹介したので、ここから実際のデータを用いてフィッティングを行う。しかし今回は 1 回の高頻度モニター観測のみの解析である一方、このフィッティング関数は複数周期が存在しないとフィッティングができない。そこで 34.6 日後に同じプロファイルのフレアが発生すると仮定をおいて、2 周期分データを追加してフィッティングを行った (図 5.4)。Fujisawa et al. (2014) でフレアの周期は既に確認されているので、これは妥当な仮定である。

図 5.5 - 5.10 で全成分への $S(t)$ を用いた関数フィッティングの結果を掲載し、最後にパラメータを表 5 に記載する。表には速度成分、振幅、非対称パラメータ f 、そしてフィッティングの残差平方和を記載している。ただし、成分 E の C のパラメータは、そのままでは収束しなかったので、収束するような初期値をこちらで与えた。つまりこの場合はパラメータの誤差は評価できない。

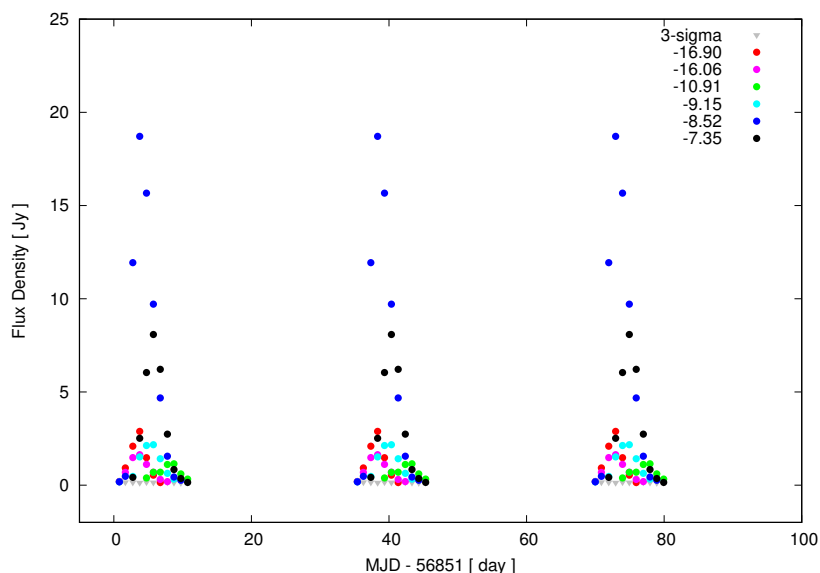


図 5.4 34.6 日後に同じプロファイルのフレアが発生するという仮定をおいた場合の IRAS 22198 の強度変動プロット図。フィッティングもこのデータに対して行った。またこの仮定は Fujisawa et al. (2014) で報告された周期を用いており、妥当だと言える。また横軸は $\text{MJD} = 56851 [\text{day}]$ を基準とした相対表示 ($\text{MJD} - 56851 [\text{day}]$) となっているが、これはフィッティングのために採用しており、これ以降も横軸の値はこうに表記される。

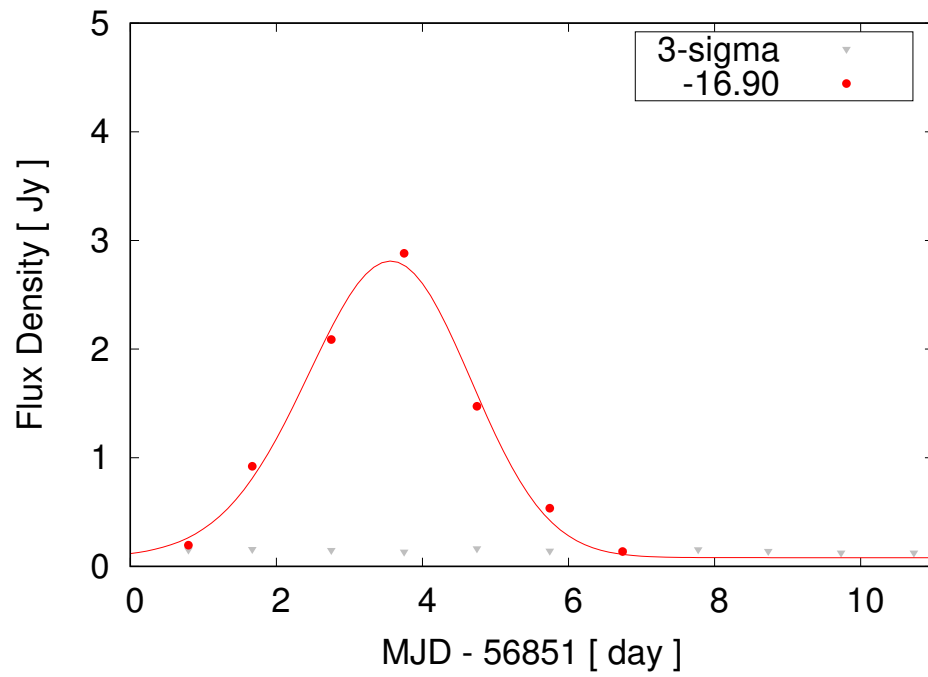


図 5.5 成分 A(-16.90 km s^{-1}) に対するフィッティング結果。点が観測値、実線がそのフィッティング関数になっている。

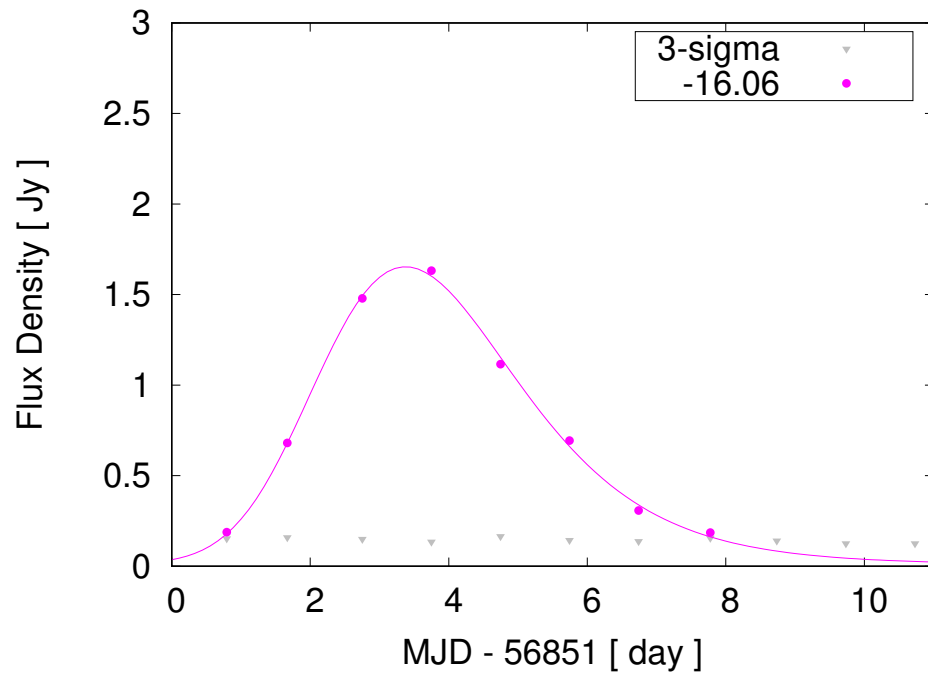


図 5.6 成分 B(-16.06 km s^{-1}) に対するフィッティング結果。

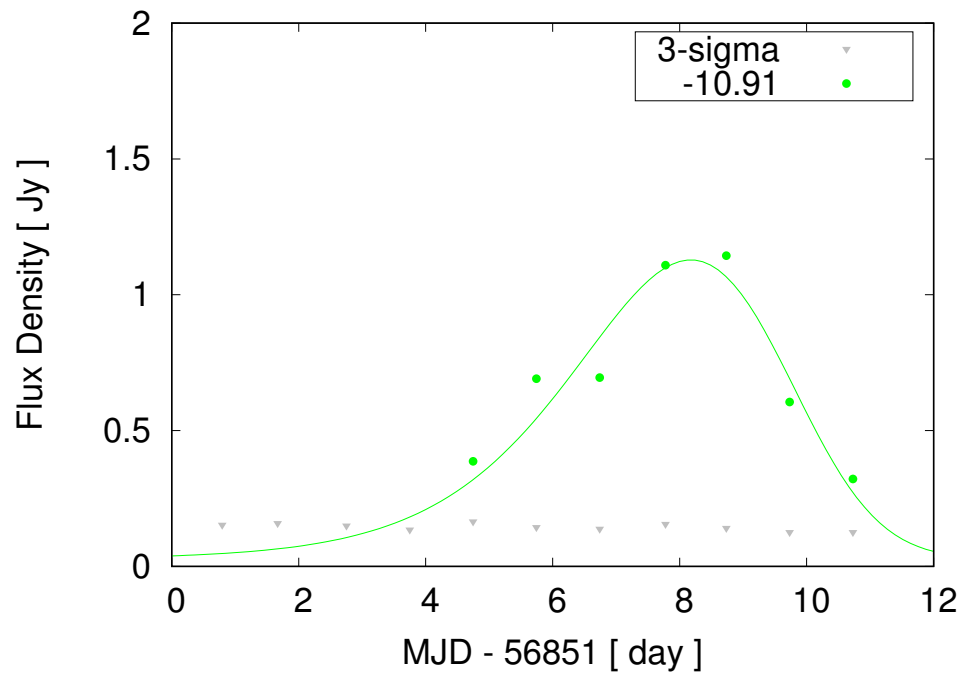


図 5.7 成分 C(-10.91 km s^{-1}) に対するフィッティング結果。

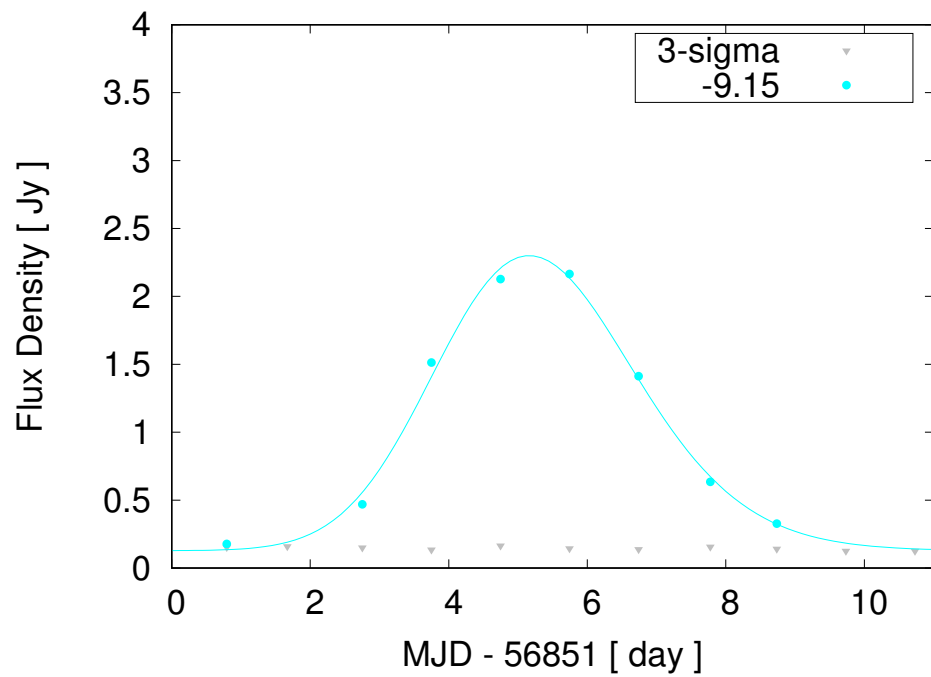


図 5.8 成分 D(-9.15 km s^{-1}) に対するフィッティング結果。

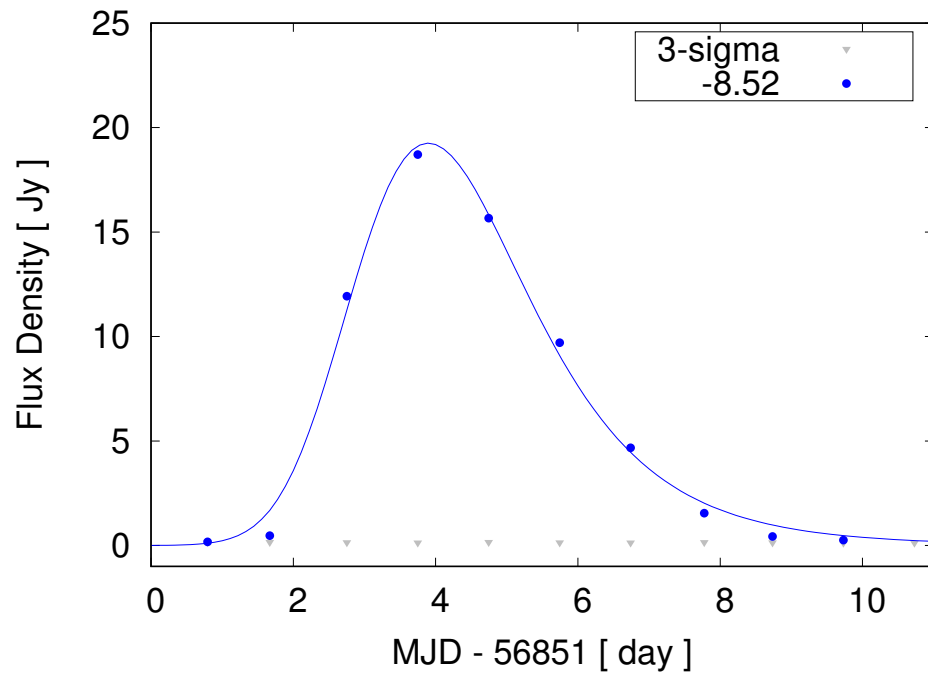


図 5.9 成分 E(-8.52 km s^{-1}) に対するフィッティング結果。

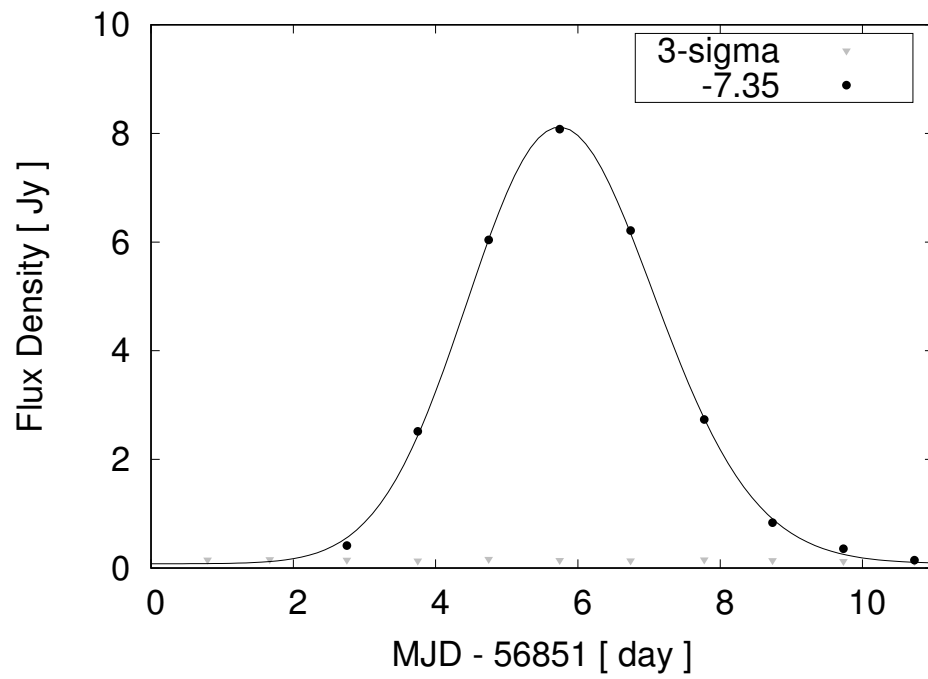


図 5.10 成分 F(-7.35 km s^{-1}) に対するフィッティング結果。

表5 関数 $S(t)$ によるフィッティング結果。

速度成分 [km s ⁻¹]	振幅	非対称パラメータ f	残差平方和
A (−16.90)	$8.38 \times 10^{-6} \pm 0.01$	-0.23 ± 0.15	0.22
B (−16.06)	1.57 ± 30.6	0.65 ± 0.03	0.02
C (−10.91)	1.5 ± 187	-0.57 ± 0.14	0.25
D (−9.15)	$2.75 \times 10^{-4} \pm 0.28$	0.34 ± 0.10	0.09
E (−8.52)	$192 \pm 9.5 \times 10^4$	-0.78 ± 0.03	9.32
F (−7.35)	12.5 ± 2230	0.14 ± 0.04	0.14

非対称パラメータは、 $-0.78 \leq f \leq 0.65$ まで幅があり、成分間で有意な違いが存在している。つまり、成分ごとに強度変動プロファイルが異なっていることを示している。

5.2 光路差の導出

§5.1.2 で成分ごとに強度変動プロファイルが異なっていることを示した。これにより、メーザースポットの奥行き方向の広がりを求める際には、ピークの時刻差を採用して光路差を求めるのは適切ではなく、フレアの開始時刻差から光路差を求めるべきであると言える。そのためには静穏時の IRAS 22198 のスペクトルを取得する必要があるが、静穏時のスペクトルは、Fujisawa et al. (2014) や Szymczak et al. (2016) でも同様だったが、検出感度以下だったために、フレアの開始時刻差を厳密には求められないことになる。そのため今回はフラックス密度が検出感度 3σ を超えた時刻をフレアの開始時刻として定義した。その結果、成分 A が一番早く変動することが分かった。また各メーザースポットが励起源から同一距離に分布しており、各スポットの強度変動は励起源と本質的に同期しているという仮定のもと、成分 A のスポットからの各スポットの奥行き方向の位置もそれぞれ求めた。表 6 に成分ごとのフレア開始時刻と成分 A とのフレア開始時刻差、スポットの奥行き方向の位置を記載する。

表6 検出感度 3σ を超えた時刻をフレア開始時刻とした場合の成分 A とのフレアの開始時刻差と、そこから求められるスポットの奥行き方向の位置

速度成分 [km s ⁻¹]	フレア開始時刻 [MJD − 56851 day]	成分 A からのフレア 開始時刻差 [day]	スポット A から見た 奥行き [AU]
A (−16.90)	0.39	-	-
B (−16.06)	0.75	0.36	60
C (−10.91)	3.57	3.18	550
D (−9.15)	1.44	1.05	180
E (−8.52)	0.90	0.51	90
F (−7.35)	1.96	1.57	270

5.3 メーザースポットの 3 次元マッピング

ここではメーザースポットの奥行き方向の位置と干渉計観測の結果 (Szymczak et al. 2016) を用いて、メーザースポットの 3 次元マッピングを行う。図 2.10 がその干渉計観測の結果であるが、ここからは観測者から見て天球面に射影したスポット同士の距離の情報しか得られない。そこで本観測から得られた奥行き方向の距離の情報を追加すると、3 次元のマップが得られる。

図 5.11 は干渉計の結果 (左図) と本観測から求めた奥行き方向の距離 (右表) を矢印で繋いだ図になっており、これを元に図 5.12 を作成した。Szymczak et al. (2016) では成分 A, B がクラスターに、また成分 D, E, F がまた別なクラスターを形成しているとある。そこで図 5.12 ではクラスター同士の奥行きの位置の平均も示した。すると 3 つのクラスターが含まれる面が決まり、同時にその 3 点を同心円上に含む円も一意に定まるので、その円の中心を励起源の位置とした。星の位置の推定に関しては、メーザーの強度変動と中心の励起源の変動が同期しているという仮定に基づいている。図 5.12 は図 5.11 左図に奥行き方向の距離を追加した図になっており、右向きの矢印方向に観測者がいる。さらに図 5.13 では、奥行き方向の距離と天球面上に射影したスポット同士の距離からスポット間の距離も導出している。

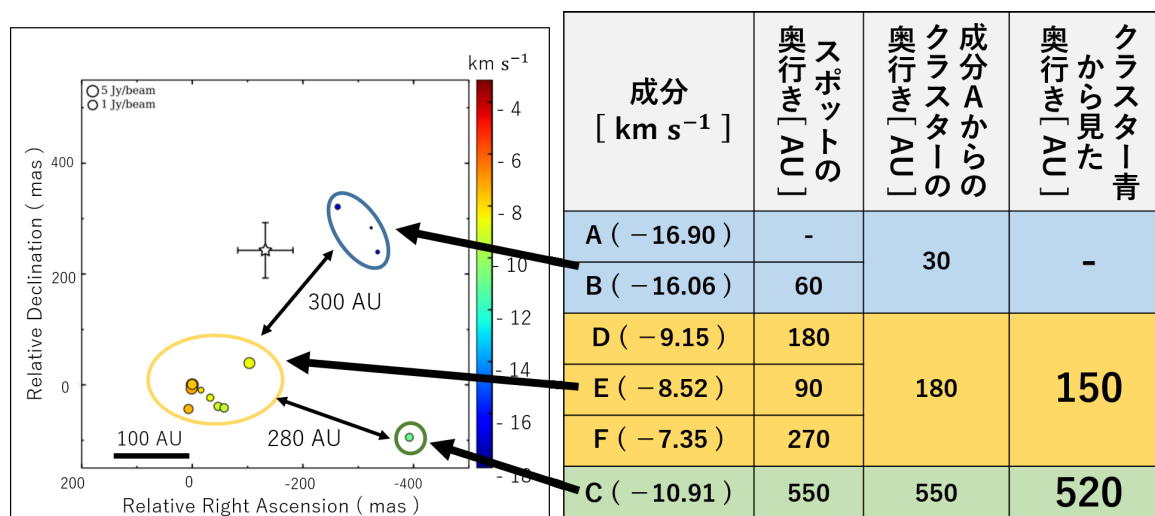


図 5.11 左図: IRAS 22198 の干渉計観測による 2 次元マップ (Szymczak et al. 2016)。カラーの点がそれぞれメーザースポットを表しており、カラーの丸で囲われた箇所がクラスターとして存在している。中心星の位置をスターで表している。各クラスターどうしの距離とスケールバーを記載してある。Szymczak et al. (2016) を一部改変。

右図: 本観測から求めた奥行き方向の距離を、クラスターごとに色付けをして矢印とともに指し示している。速度が近い成分どうしがクラスターを形成している。

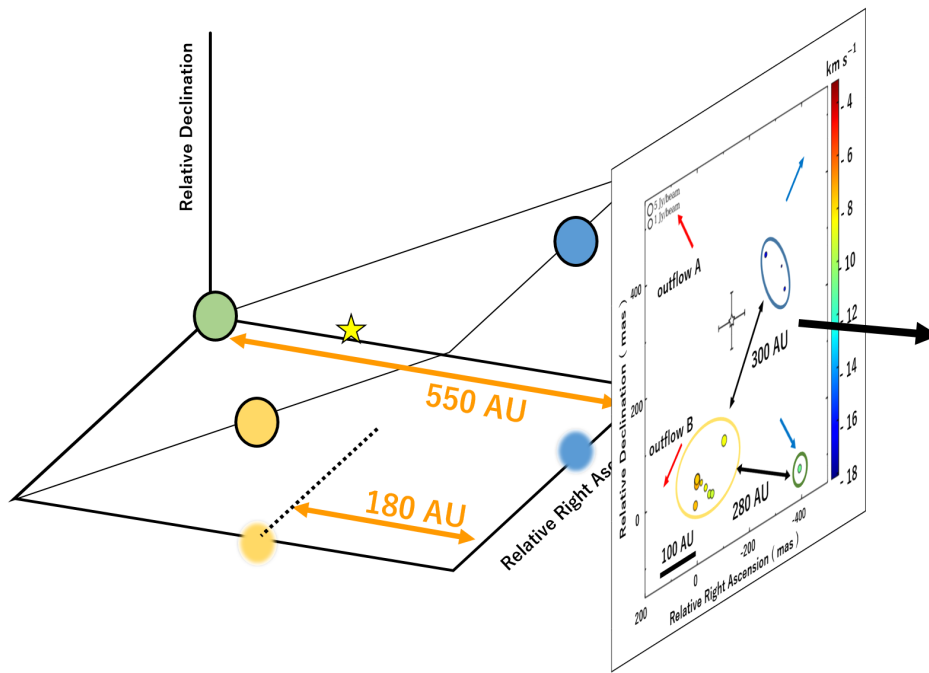


図 5.12 図 5.11 左図に奥行き方向の距離を追加した図。右の矢印方向に観測者がいる。色付きの丸は各メーザーのクラスターを表している。黄色のクラスターまでの距離は、その中に含まれているスポットまでの距離の平均として算出している。中心の励起源は星の位置に存在していると考えられる。また 3 点のクラスターと交差している平行四辺形は、各メーザークラスターが含まれる平面を表し、励起源はこれらを含む円の中心に位置すると考えられる。青と黄のクラスターの下にもうひとつ色の薄い同じ色の丸があるが、これはクラスター間の奥行きの距離をわかりやすくするために補助として導入している。

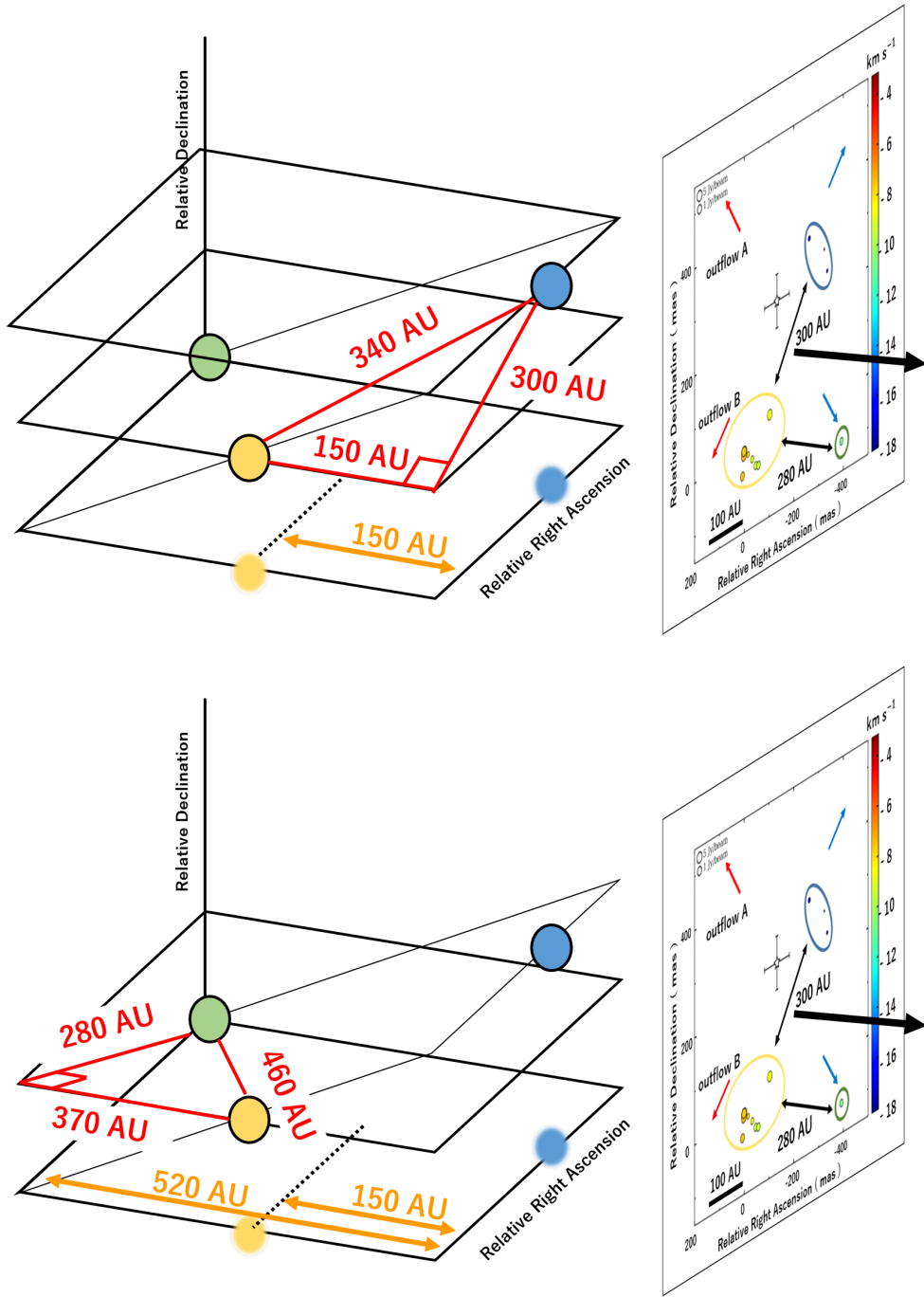


図 5.13 ピタゴラスの定理を用いて導出したスポットどうしの距離を示している。上図で用いた 300 AU と、下図で用いた 280 AU は Szymczak et al. (2016) の結果を用いている。図 5.12 にある星の位置は省略している。

5.4 IRAS 22198+6336 のフレア機構について

ここからは IRAS 22198 のフレア機構について考察する。先行研究でも取り上げられていたモデルから順次考察する。

5.4.1 脈動不安定モデル

脈動不安定モデルとは §1.3.3 でも紹介したが、メーザーの周期的な強度変動を中心星の光度の変動に起因すると考えるモデルである。この場合中心星の脈動は、 κ 機構に従い成長するため、その光度変動は連続的であると予想される (e.g The Formation of Stars 18 章)。しかし IRAS 22198 は間欠的な変動を示すのでこのモデルでの説明は困難に思われる。

5.4.2 Colliding Wind Binary モデル

次に CWB モデルについて考察する。こちらも §1.3.3 で紹介したが、メーザーの周期的な変動の説明を連星系からのショックによって説明するモデルである。このモデルの場合は定性的には間欠的な変動を説明することは容易である。

しかしこのモデルでは前提条件として HII 領域が存在していなければならないが、Sánchez-Monge et al.(2008) で HII 領域からの cm 波が非検出であった。つまり CWB モデルの前提条件が成り立っていないためこのモデルでの説明は難しいと考えられる。ただし Sánchez-Monge et al.(2008) での VLA のアンテナ配列は、最も角度分解能が低い D 配列であったことに注意すべきである。3.6 cm, 1.3 cm, 7 mm 連続波で観測を行っていたが、最も角度分解能が高い 7 mm 連続波でも $2''.2 \times 1''.3$ であり、764 pc 先では $1680 \text{ AU} \times 990 \text{ AU}$ になる。この大きさは Hyper-Compact(以降 HC) HII 領域の典型的なサイズの 620 AU (e.g Kurtz & Franco 2002) よりも大きく、仮に HCHII 領域が存在していたとしても検出できていない可能性がある。

そのため今後の課題として、より空間分解能がよく、かつ IRAS 22198 の $+60^\circ$ という高い赤緯にも対応できる VLA の A 配列を用いた HCHII 領域の探査が挙げられる。

5.4.3 スパイラルショックモデル

最後に、間欠的な周期変動を説明できるようなモデルとして、Parfenov & Sobolev (2014) で提唱されたスパイラルショックモデルがある。このモデルでも連星系を仮定しているが、まず星周円盤からの降着物質によってショックが発生している。そしてそのショックが追加の熱源となり、メーザーを放射できるダストの量が増えることで、メーザーが周期的な強度変動を起こすことが可能になる。

図 5.14 はその概念図になっており、連星系からのショックが直接星周円盤のダストを暖め、それによりメーザー放射が可能なダストの柱密度が変動する。それによりメタノールメーザーに強度変動が発生するとするモデルである。CWB モデルと違う点は、ダストを直接暖めるという点で、種光子の量を増幅させるわけではない。つまり種光子が宇宙背景放射でもよいことになり、HII 領域

の存在は必須ではなく、IRAS 22198 から HII 領域の放射が非検出であったとしても矛盾が生じない。

しかし注意すべき点も存在する。§ 5.3 の図 5.12 でメタノールメーザーの 3 次元マップと推定される励起源の位置を示しているが、これには各メーザースポットが同心円上に分布し、かつ励起源の変動が同時に伝わる必要がある。しかしスパイラルショックモデルでは、図 5.12 のスポット全てを覆う程の立体角を持つショックは想定されておらず、励起源からの変動が各スポットに伝わるまでに時間差が生じることになる。だがその場合でも、ショックの広がりに伴う、励起源からの変動が各スポットに伝わるまでの時間差が、今回の観測から得られたフレア開始時刻差の 3.57 日より十分短い時刻で伝わるとすれば矛盾は生じない。そしてその場合、3 つのショックが考えられる。一つ目が立体角が小さく、公転が早いショック、二つ目が立体角が大きく、公転が早いショック、最後に立体角が大きく、公転が遅いショックである。ここで公転が早い場合、フレアの周期が、観測されているメーザーのフレアの周期 34.6 日より十分短い周期になることが予想され、矛盾が生じる。しかし公転が遅い場合は、定性的ではあるが、観測されているメーザーのフレアの周期を説明できるかもしれない。

そのためには今後の観測として、メーザー放射領域から見込まれるショックの立体角を知るために、ショックのトレーサーを高い角度分解能で観測する必要がある。ショックトレーサーとしては、SiO の熱的放射が挙げられる (Martín-Pintado et al. 1992)。さらにスポット間の距離が 400 mas であることから、空間分解されたショックを観測するには 100 mas 以下の分解能を達成できるような干渉計が望ましい。最後に、IRAS 22198 の $+60^\circ$ という赤緯でも観測できることを考慮に入れると、ビームサイズが 0.43 mas で、43 GHz での観測が可能な VLA の A 配列での観測が当てはまる。

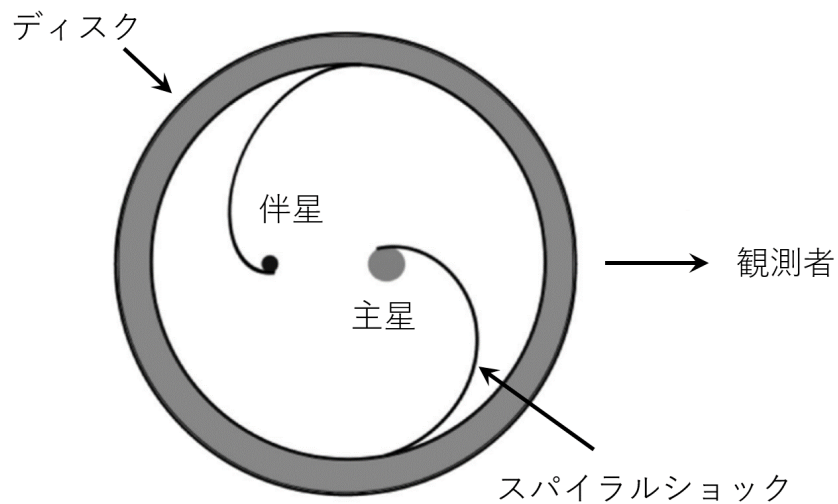
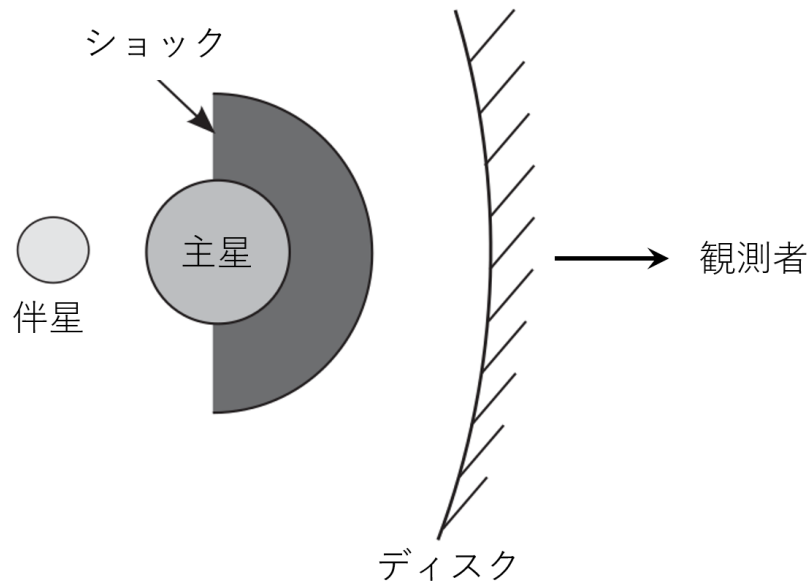


図 5.14 スパイラルショックモデルの概要図。

上図: 星周円盤からの降着物質によって発生するショックの概要図になっている。

下図: ディスク中の連星とスパイラルショックの概要図。スパイラルショックは弧を描いて円盤まで到達する。伴星の運動に引きずられてショックも回転することにより、周期的にダストを暖めることが可能になり、それによって強度変動を起こすと説明されている。

両者とも Parfenov & Sobolev (2014) を一部改変した。

6 まとめ

本研究では、大質量星形成領域解明のため、IRAS 22198+6336 の 6.7 GHz メタノールメーザーという電波を観測した。IRAS 22198 は中質量星でありながら 6.7 GHz メタノールメーザーを放射する唯一の天体であり、Fujisawa et al. (2014) で初めて周期が観測された。しかしながら、そのフレアの立ち上がり時のデータに欠けが生じていたり、感度が低かったために、フレアの変動プロファイルを議論できていない速度成分も存在していた。そこで日立局を用いて追観測を行い、より高頻度で高感度な観測を行った。

その結果 Fujisawa et al. (2014) では変動プロファイルが議論できていなかった成分も、関数フィッティングを行えるほどの期間で、検出感度を超えるフラックス密度を観測できた。そして非対称な変動プロファイルにも適用可能なフィッティング関数を用いた結果、同じ天体からの放射であっても、速度成分ごとに変動プロファイルが異なっていることが分かった。そしてそのことより、メーザースポットの奥行き方向の距離を導出するためには、位相差にフレアのピーク時刻差を用いるのではなく、フレアの開始時刻差から求めるべきであることを明かし、その 3 次元分布を初めて議論した。

また IRAS 22198 のフレア機構についても議論を行った。(1): 脈動不安定モデル、(2): Colliding-Binary モデル、(3): スパイラルショックモデルの 3 つのモデルについて考察を行った。本研究からではどのモデルならば IRAS 22198 のフレア機構を説明できるか、という結論には至らなかったが、今後の展望としてどのような追観測を行えばよいのか示すことができた。

謝辞

研究室の皆さまには大変感謝しています。皆さまのおかげで修士論文を完成させることができました。

指導教官の百瀬宗武教授には研究の内容についてのご指摘や意見、文章の書き方など、時には厳しく教えて頂きました。また研究発表の際にポスターやスライドの配置やそのタイトルを漠然と考えていた私にタイトルの持つ意味などから教えて頂き、非常に有益なアドバイスを頂けたと感じています。心から感謝申し上げます。

米倉覚則准教授には私が IRAS 22198 を研究するにあたり、その具体的な進め方や日立局の特徴について教えて下さりありがとうございました。特にデータの較正について、プログラムを始め様々な形で後押しをして頂いたこと感謝申し上げます。

杉山孝一郎研究員には IRAS 22198 に関連した論文や研究を進める上で読むべき論文やその骨子まで教えて下さり感謝しております。また私の研究のモチベーションを継続させるようなお言葉すら下さり研究以外の面でもご助力頂いたことは非常に嬉しかったです。

齋藤悠研究員にも研究を進めるにあたりアドバイス頂いたことに感謝します。プログラミングで躓いた時には、プログラムが分からなかった私にも優しく教えて下さりありがとうございました。

塚越崇助教、現在は国立天文台野辺山にいらっしゃる宮本祐介研究員、現在は鹿児島大学にいらっしゃる澤田-佐藤聡子研究員には、ゼミでのご指導、高萩・日立アンテナでの作業でのご協力、研究会等への参加のお声をかけていただことに非常に感謝しております。ありがとうございました。

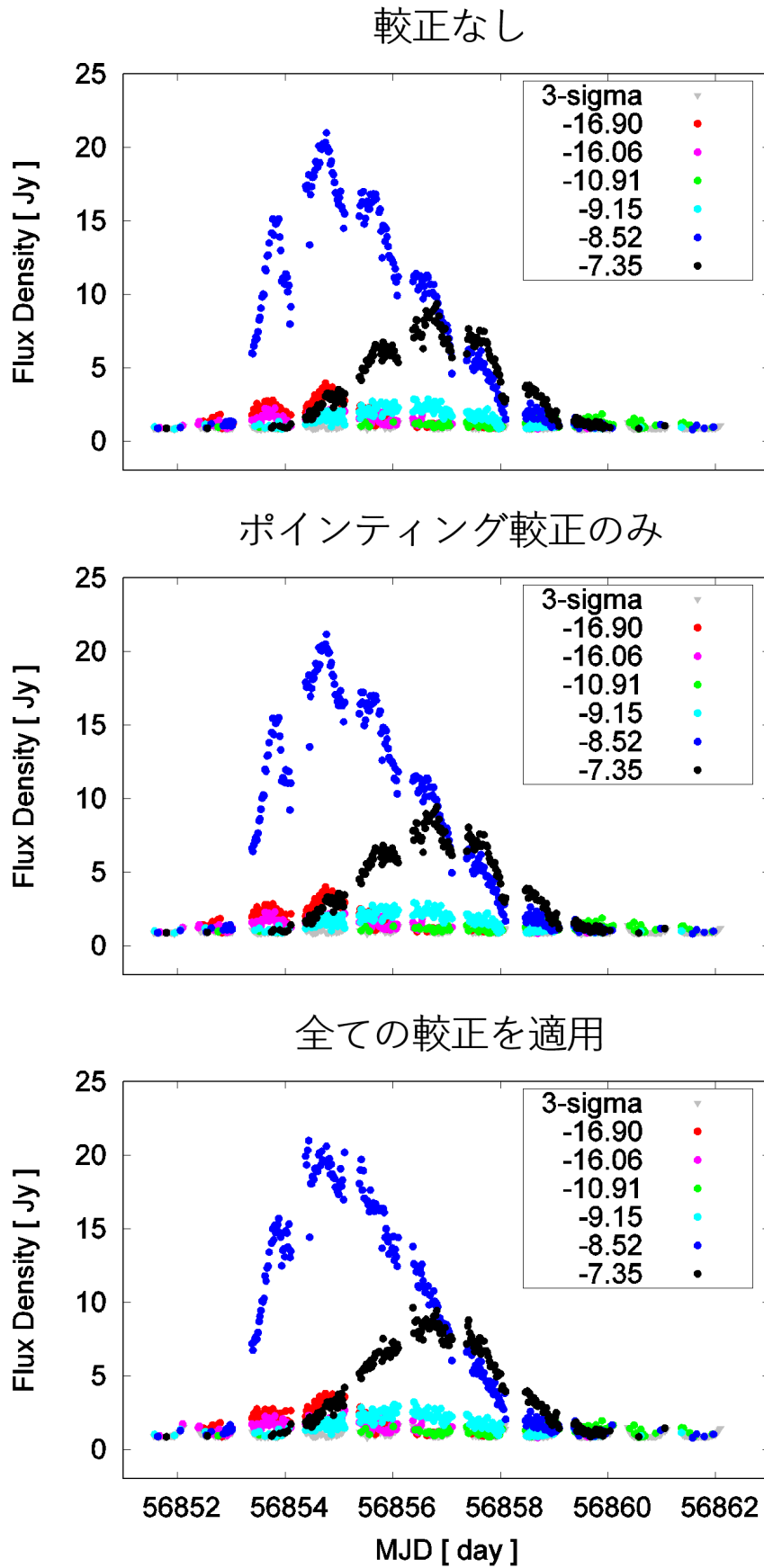
電波天文観測研究室の学生メンバーにもとても感謝しております。非常に風通しの良い研究室であつたと感じており、過ごしやすかったです。博士後期過程に在籍中の Soon Kang Lou 氏と田辺義浩氏には、ゼミや研究発表にも参加して頂き非常に感謝しております。また研究室の同期や後輩からも、研究以外の面でも良い刺激を頂き感謝しております。楽しい時間を過ごすことができました。

最後に大学院まで進学をさせてくれた両親に感謝したいと思います。

繰り返しになりますが、私が修士論文を完成させることができたのは皆さまのご助力のお陰であると感じおります。本当にありがとうございました。

付録 A IRAS 22198+6336 の較正について

ここでは § 3 で行った較正によって、IRAS 22198 の強度がどの程度補正されたかを確認する。図を見ると、ポインティング較正よりも時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の補正の残差の較正の効果が大きいことが分かる。掲載する値は、順に観測時刻、Cep A の 9 点法観測時の AZ と EL、またそこから得られたオフセット値 $[\Delta\text{AZ}, \Delta\text{EL}]$ 、電波強度の減少率 ΔS である。



図付録 A.1 上から順に較正なし、ポインティング較正のみ、全較正適用の IRAS 22198 の強度変動プロット図になっている。ポインティング較正よりも 時刻ごとに異なるシステム雑音や仰角依存性の補正の残差の較正の効果が大きい。

表 7 MJD 56851 での較正值。表の値は付録本文を参照。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
133930	35.69	42.76	-18.77	-11.34	1.00	0.98
140630	35.42	45.92	-17.19	-8.58	1.00	0.97
143330	34.62	49.03	-13.04	-9.73	1.00	0.96
150030	33.19	52.06	-22.15	-9.90	1.00	0.98
152730	31.02	54.95	-7.51	-2.20	1.00	0.94
155430	27.98	57.63	1.93	2.50	1.00	0.92
162130	23.95	60.01	-6.98	2.19	1.00	0.94
164830	18.87	62.00	-19.11	4.41	1.00	0.93
171530	12.77	63.49	-16.88	-3.66	1.00	0.92
182530	354.21	64.37	-26.61	20.19	1.01	0.93
185230	347.29	63.49	-22.14	-2.51	1.00	0.93
191930	341.19	62.01	-18.25	18.69	1.01	0.93
194630	336.10	60.03	-10.60	11.26	1.00	0.93
201330	332.06	57.65	-16.63	21.91	1.01	0.94
204030	329.02	54.97	-6.15	27.12	1.01	0.95
210730	326.84	52.09	4.14	35.26	1.01	0.95
213430	325.40	49.06	4.72	31.35	1.01	0.98
220130	324.60	45.94	4.58	47.44	1.02	1.00
222830	324.32	42.78	10.13	48.94	1.02	1.04
225530	324.51	39.62	8.34	49.55	1.02	1.05
232230	325.08	36.49	4.19	47.97	1.02	1.05
234930	326.00	33.42	9.89	45.96	1.02	1.05
001630	327.23	30.44	10.79	52.56	1.02	1.08
004330	328.73	27.56	18.65	51.83	1.03	1.09
011030	330.48	24.82	23.84	63.71	1.04	1.14
013730	332.45	22.23	7.72	79.05	1.06	1.22
020430	334.64	19.81	-0.93	89.68	1.07	1.32
023130	337.01	17.59	7.54	98.72	1.08	1.44
025830	339.56	15.59	5.73	87.25	1.08	1.25

表 8 MJD 56852 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
093230	22.99	17.57	-9.73	47.50	1.02	0.95
095930	25.37	19.79	5.27	41.88	1.02	0.96
102630	27.55	22.20	15.98	31.60	1.01	0.99
105330	29.53	24.79	4.10	21.83	1.00	1.02
112030	31.28	27.53	-4.63	13.06	1.00	1.05
114730	32.78	30.41	-15.10	6.63	1.00	1.04
121430	34.01	33.39	-22.32	6.19	1.00	1.06
124130	34.93	36.47	-13.04	6.53	1.00	1.07
130830	35.51	39.59	-17.03	12.78	1.00	1.08
133530	35.69	42.75	-17.04	1.55	1.00	1.13
140230	35.42	45.91	-12.51	1.90	1.00	1.17
142930	34.62	49.03	-10.64	-4.66	1.00	1.27
145630	33.20	52.06	-19.91	3.89	1.00	1.36
152330	31.02	54.95	-6.58	6.29	1.00	1.31
155030	27.99	57.62	6.49	7.98	1.00	1.26
161730	23.96	60.01	-6.21	3.95	1.00	1.13
164430	18.89	62.00	-18.61	11.28	1.00	1.09
171130	12.79	63.48	-15.51	4.07	1.00	1.08
182130	354.23	64.37	-24.02	24.90	1.01	1.00
184830	347.31	63.50	-20.21	1.34	1.00	0.99
191530	341.20	62.02	-18.74	24.57	1.01	0.97
194230	336.11	60.03	-9.57	15.97	1.00	0.97
200930	332.07	57.65	-14.48	25.99	1.01	0.96
203630	329.02	54.98	-6.66	29.74	1.01	0.96
210330	326.84	52.09	2.57	33.92	1.01	0.96
213030	325.40	49.06	1.63	28.98	1.01	0.95
215730	324.60	45.95	-0.87	38.76	1.01	0.95
222430	324.32	42.79	5.61	48.94	1.02	0.93
225130	324.51	39.63	10.93	71.61	1.05	0.95
231830	325.08	36.50	8.89	89.28	1.07	0.92
234530	326.00	33.43	10.39	79.72	1.06	0.91
001230	327.23	30.45	4.25	74.24	1.05	0.89
003930	328.72	27.57	7.81	94.70	1.08	0.90

表9 MJD 56853 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
092830	22.99	17.57	-9.65	23.59	1.00	0.95
095530	25.36	19.78	2.31	28.66	1.01	0.96
102230	27.55	22.20	11.55	20.07	1.00	0.99
104930	29.53	24.78	4.46	5.73	1.00	1.02
111630	31.27	27.53	-4.90	1.90	1.00	1.05
114330	32.78	30.40	-15.40	1.90	1.00	1.04
121030	34.00	33.39	-21.10	2.50	1.00	1.06
123730	34.93	36.46	-13.44	0.62	1.00	1.07
130430	35.51	39.59	-17.88	3.90	1.00	1.08
133130	35.69	42.75	-17.46	-5.34	1.00	1.13
135830	35.43	45.90	-16.39	-7.25	1.00	1.17
142530	34.63	49.02	-11.63	-9.77	1.00	1.27
145230	33.20	52.05	-21.11	-8.73	1.00	1.36
151930	31.03	54.94	-7.06	-0.61	1.00	1.31
154630	28.00	57.62	3.31	2.94	1.00	1.26
161330	23.98	60.00	-7.18	-2.59	1.00	1.13
164030	18.90	61.99	-18.89	6.27	1.00	1.09
170730	12.81	63.48	-16.12	-1.81	1.00	1.08
181730	354.25	64.37	-24.01	18.20	1.01	1.00
184430	347.33	63.50	-22.89	-0.23	1.00	0.99
191130	341.21	62.02	-19.26	17.99	1.01	0.97
193830	336.12	60.04	-10.53	8.62	1.00	0.97
200530	332.08	57.66	-16.05	22.50	1.01	0.96
203230	329.03	54.99	-0.51	27.05	1.01	0.96
205930	326.85	52.10	10.17	37.40	1.01	0.96
212630	325.41	49.07	14.54	39.98	1.01	0.95
215330	324.60	45.96	9.70	44.82	1.02	0.95
222030	324.32	42.80	17.19	62.49	1.04	0.93
224730	324.51	39.64	9.13	71.07	1.05	0.95
231430	325.08	36.51	3.00	78.57	1.06	0.92
234130	326.00	33.44	8.96	73.47	1.05	0.91
000830	327.22	30.45	0.40	71.52	1.05	0.89
003530	328.72	27.58	13.50	78.36	1.06	0.90
010230	330.47	24.83	5.86	82.75	1.06	0.92
012930	332.44	22.24	-0.90	92.84	1.08	0.92
015630	334.63	19.82	3.33	98.17	1.09	0.92
022330	337.00	17.60	9.91	112.84	1.11	0.91
025030	339.55	15.60	2.52	118.28	1.13	0.95

表 10 MJD 56854 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
092430	22.98	17.56	-5.38	50.77	1.02	0.99
095130	25.36	19.78	2.52	43.84	1.02	0.97
101830	27.54	22.19	17.50	32.49	1.01	0.97
104530	29.52	24.78	-2.98	7.57	1.00	0.96
111230	31.27	27.52	-3.67	6.79	1.00	0.96
113930	32.77	30.40	-15.85	11.61	1.00	0.96
120630	34.00	33.38	-23.80	8.49	1.00	0.95
123330	34.92	36.45	-15.61	7.58	1.00	0.95
130030	35.50	39.58	-18.74	10.55	1.00	0.93
132730	35.69	42.74	-17.20	0.88	1.00	0.95
135430	35.43	45.89	-16.94	-1.55	1.00	0.92
142130	34.63	49.01	-12.23	-4.52	1.00	0.91
144830	33.20	52.04	-22.54	-5.14	1.00	0.89
151530	31.04	54.93	-7.86	2.00	1.00	0.90
154230	28.00	57.61	8.15	11.91	1.00	0.92
160930	23.99	60.00	-4.26	2.18	1.00	0.92
163630	18.91	61.99	-19.40	6.08	1.00	0.92
170330	12.82	63.48	-16.59	-0.51	1.00	0.91
181330	354.27	64.38	-26.77	22.46	1.01	0.95
184030	347.34	63.50	-20.81	-0.38	1.00	0.94
190730	341.23	62.03	-19.35	17.68	1.01	0.93
193430	336.13	60.04	-10.48	11.42	1.00	0.95
200130	332.09	57.67	-16.12	23.44	1.01	1.00
202830	329.04	54.99	-7.48	30.48	1.01	1.05
205530	326.85	52.11	-4.37	31.65	1.01	1.19
212230	325.41	49.08	-3.07	21.90	1.00	1.22
214930	324.60	45.96	-1.02	26.98	1.01	1.17
221630	324.33	42.81	0.49	25.20	1.00	1.18
224330	324.51	39.65	-1.08	31.56	1.01	1.18
231030	325.08	36.52	-0.75	35.34	1.01	1.01
233730	326.00	33.45	2.72	31.49	1.01	1.00
000430	327.22	30.46	6.43	24.43	1.00	1.01
003130	328.72	27.58	8.40	26.94	1.01	0.98
005830	330.46	24.84	13.56	28.07	1.01	0.99
012530	332.44	22.25	2.48	40.93	1.01	0.97
015230	334.62	19.83	-0.21	50.24	1.02	0.96
021930	336.99	17.61	5.03	50.26	1.02	0.98
024630	339.54	15.60	0.17	62.35	1.03	0.97

表 11 MJD 56855 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
092030	22.97	17.56	-11.18	46.17	1.02	0.94
094730	25.35	19.77	-1.41	44.73	1.02	0.93
101430	27.54	22.18	10.67	30.63	1.01	0.95
104130	29.52	24.77	3.39	16.46	1.00	1.00
110830	31.27	27.51	-12.10	9.88	1.00	1.05
113530	32.77	30.39	-21.65	8.65	1.00	1.19
120230	34.00	33.37	-23.16	11.97	1.00	1.22
122930	34.92	36.44	-15.84	9.55	1.00	1.17
125630	35.50	39.57	-21.07	13.46	1.00	1.18
132330	35.69	42.73	-17.41	4.50	1.00	1.18
135030	35.43	45.89	-16.77	0.12	1.00	1.01
141730	34.63	49.00	-13.94	-0.89	1.00	1.00
144430	33.21	52.03	-23.86	-1.40	1.00	1.01
151130	31.04	54.92	-6.98	5.55	1.00	0.98
153830	28.01	57.60	0.74	12.83	1.00	0.99
160530	24.00	59.99	-6.22	5.87	1.00	0.97
163230	18.93	61.98	-19.69	12.51	1.00	0.96
165930	12.84	63.47	-17.48	1.84	1.00	0.98
180930	354.29	64.38	-25.94	21.09	1.01	0.97
183630	347.36	63.51	-22.39	0.58	1.00	0.96
190330	341.24	62.03	-31.06	1.33	1.01	0.92
193030	336.14	60.05	-17.04	14.59	1.00	0.94
195730	332.10	57.67	-19.35	26.78	1.01	0.94
202430	329.04	55.00	-6.03	31.29	1.01	0.91
205130	326.86	52.12	-6.69	30.80	1.01	0.89
211830	325.41	49.09	-4.13	23.65	1.00	0.90
214530	324.60	45.97	-3.24	25.22	1.00	0.91
221230	324.33	42.82	-2.53	25.07	1.00	0.91
223930	324.50	39.66	-3.25	31.64	1.01	0.91
230630	325.08	36.53	-4.32	34.34	1.01	0.94
233330	325.99	33.45	3.68	29.21	1.01	0.93
000030	327.22	30.47	3.33	31.39	1.01	0.93
002730	328.71	27.59	9.67	28.57	1.01	0.93
005430	330.46	24.84	12.77	27.23	1.01	0.94
012130	332.43	22.25	1.09	40.07	1.01	0.94
014830	334.61	19.84	-4.29	45.83	1.02	0.99
021530	336.99	17.62	1.75	54.68	1.02	1.02
024230	339.54	15.61	1.65	54.32	1.02	1.09

表 12 MJD 56856 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
091630	22.97	17.55	-5.90	34.85	1.01	0.96
094330	25.35	19.77	-2.30	32.21	1.01	0.92
101030	27.53	22.18	3.10	24.61	1.00	0.94
103730	29.51	24.76	-1.99	13.26	1.00	0.94
110430	31.26	27.51	-5.77	10.75	1.00	0.91
113130	32.77	30.38	-17.79	6.41	1.00	0.89
115830	34.00	33.36	-24.73	10.84	1.01	0.90
122530	34.92	36.43	-13.32	5.49	1.00	0.91
125230	35.50	39.56	-18.15	10.59	1.00	0.91
131930	35.69	42.72	-14.07	2.33	1.00	0.91
134630	35.43	45.88	-17.44	1.85	1.00	0.94
141330	34.63	49.00	-15.23	-2.35	1.00	0.93
144030	33.21	52.03	-24.19	1.26	1.00	0.93
150730	31.05	54.92	-9.41	5.85	1.00	0.93
153430	28.02	57.60	1.08	7.65	1.00	0.94
160130	24.01	59.98	-6.86	2.61	1.00	0.94
162830	18.94	61.98	-20.93	11.25	1.00	0.99
165530	12.86	63.47	-16.35	1.47	1.00	1.02
180530	354.30	64.38	-26.75	23.23	1.01	1.09
183230	347.38	63.51	-20.68	0.94	1.00	1.14
185930	341.26	62.03	-21.86	18.76	1.01	1.20
192630	336.15	60.06	-12.91	13.07	1.00	1.16
195330	332.11	57.68	-16.06	24.39	1.01	1.20
202030	329.05	55.01	-8.73	28.20	1.01	1.22
204730	326.86	52.12	-2.72	32.92	1.01	1.25
211430	325.42	49.10	-1.73	24.53	1.00	1.28
214130	324.60	45.98	-2.36	29.47	1.01	1.40
220830	324.33	42.82	-3.97	26.59	1.01	1.53
223530	324.50	39.66	-2.37	35.26	1.01	1.37
230230	325.07	36.53	-1.71	35.26	1.01	1.06
232930	325.99	33.46	1.12	35.05	1.01	1.07
235630	327.21	30.48	5.13	26.62	1.01	1.05
002330	328.71	27.60	9.45	30.77	1.01	1.07
005030	330.45	24.85	12.45	34.15	1.01	1.00
011730	332.43	22.26	2.06	40.74	1.01	1.01
014430	334.61	19.84	-1.76	50.86	1.02	0.98
021130	336.98	17.62	4.46	67.03	1.04	0.97
023830	339.53	15.61	5.79	65.97	1.04	0.96

表 13 MJD 56857 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
091230	22.96	17.55	-17.04	40.07	1.02	1.07
093930	25.34	19.76	0.30	37.66	1.01	1.08
100630	27.53	22.17	4.65	33.38	1.01	1.04
103330	29.51	24.76	0.15	10.16	1.00	0.99
110030	31.26	27.50	-8.51	10.45	1.00	0.99
112730	32.76	30.37	-18.30	2.70	1.00	0.99
115430	33.99	33.36	-25.08	7.43	1.01	0.98
122130	34.92	36.43	-14.17	6.71	1.00	1.01
124830	35.50	39.55	-20.48	13.86	1.00	0.96
131530	35.69	42.71	-18.21	3.13	1.00	0.97
134230	35.43	45.87	-18.83	-2.33	1.00	0.96
140930	34.64	48.99	-13.49	-0.24	1.00	0.95
143630	33.22	52.02	-23.56	-1.99	1.00	0.95
150330	31.06	54.91	-7.54	3.99	1.00	0.94
153030	28.03	57.59	0.81	9.17	1.00	0.91
155730	24.02	59.98	-6.93	5.16	1.00	0.91
162430	18.96	61.97	-20.42	7.90	1.00	0.92
165130	12.87	63.47	-16.53	1.26	1.00	0.92
180130	354.32	64.38	-26.33	24.71	1.01	0.93
182830	347.40	63.51	-22.41	2.04	1.00	0.93
185530	341.27	62.04	-23.13	21.30	1.01	0.95
192230	336.17	60.06	-12.59	13.99	1.00	0.95
194930	332.12	57.69	-17.53	26.85	1.01	0.94
201630	329.06	55.01	-8.96	28.39	1.01	0.95
204330	326.86	52.13	-3.15	30.81	1.01	0.96
211030	325.42	49.10	-3.97	23.63	1.00	0.96
213730	324.61	45.99	-2.72	28.43	1.01	0.96
220430	324.33	42.83	-1.23	28.57	1.01	0.97
223130	324.50	39.67	-2.92	34.75	1.01	0.98
225830	325.07	36.54	-1.50	39.18	1.01	1.00
232530	325.99	33.47	3.24	39.73	1.01	1.03
235230	327.21	30.48	4.37	50.04	1.02	1.06
001930	328.70	27.60	9.89	62.06	1.03	1.18
004630	330.45	24.86	10.49	80.06	1.06	1.29
011330	332.42	22.27	-4.88	87.07	1.07	1.32
014030	334.60	19.85	-10.48	79.15	1.06	1.29
020730	336.98	17.63	0.77	102.25	1.08	1.38
023430	339.52	15.62	-9.65	87.02	1.07	1.28

表 14 MJD 56858 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
112400	32.78	30.42	-19.58	5.37	1.00	0.98
115100	34.01	33.40	-24.71	11.07	1.01	0.96
121800	34.93	36.48	-19.04	3.90	1.00	0.97
124500	35.51	39.60	-21.61	10.25	1.00	0.94
131200	35.69	42.76	-21.08	1.16	1.00	0.95
133900	35.42	45.92	-15.65	-2.56	1.00	0.92
140600	34.62	49.04	-13.88	-5.96	1.00	0.93
143300	33.19	52.07	-23.00	-4.39	1.00	0.93
150000	31.02	54.95	-7.10	2.66	1.00	0.91
152700	27.97	57.63	1.01	6.11	1.00	0.90
155400	23.95	60.01	-6.47	2.70	1.00	0.90
162100	18.87	62.00	-19.34	9.06	1.00	0.90
164800	12.77	63.49	-18.17	2.93	1.00	0.90
175800	354.21	64.37	-28.05	23.77	1.01	0.93
182500	347.29	63.49	-22.46	2.41	1.00	0.92
185200	341.18	62.01	-22.05	22.86	1.01	0.93
191900	336.09	60.03	-12.17	18.46	1.00	0.92
194600	332.06	57.65	-17.27	30.32	1.01	0.93
201300	329.01	54.97	-9.33	31.29	1.01	0.94
204000	326.84	52.08	-3.93	34.53	1.01	0.94
210700	325.40	49.05	-5.09	29.71	1.01	0.95
213400	324.60	45.94	-1.69	33.38	1.01	0.97
220100	324.33	42.78	-1.80	34.58	1.01	0.98
222800	324.51	39.62	-0.59	45.44	1.02	1.01
225500	325.09	36.49	-3.23	50.55	1.02	1.05
232200	326.01	33.42	1.10	47.70	1.02	1.05
234900	327.23	30.44	4.63	44.16	1.02	1.03
001600	328.73	27.56	11.16	47.04	1.02	1.06
004300	330.48	24.82	15.30	50.90	1.02	1.09
011000	332.45	22.23	2.45	61.86	1.03	1.11
013700	334.64	19.81	-3.87	64.16	1.04	1.11
020400	337.01	17.59	1.57	92.77	1.07	1.30
023100	339.57	15.59	1.73	87.74	1.07	1.29

表 15 MJD 56859 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
090500	22.99	17.58	-4.60	41.37	1.01	1.06
093200	25.37	19.79	-3.52	38.73	1.01	1.03
095900	27.55	22.20	9.69	28.69	1.01	1.01
102600	29.53	24.79	0.25	17.83	1.00	0.98
105300	31.28	27.54	-3.81	10.36	1.00	0.97
112000	32.78	30.41	-15.25	5.28	1.00	0.97
114700	34.01	33.40	-23.51	8.57	1.00	0.97
121400	34.93	36.47	-14.52	4.11	1.00	0.96
124100	35.51	39.60	-17.25	6.84	1.00	0.96
130800	35.69	42.76	-17.49	-3.31	1.00	0.97
133500	35.42	45.91	-15.77	-3.73	1.00	0.94
140200	34.62	49.03	-12.27	-6.72	1.00	0.93
142900	33.19	52.06	-21.90	-3.82	1.00	0.94
145600	31.02	54.95	-6.30	2.15	1.00	0.92
152300	27.98	57.63	2.19	7.23	1.00	0.90
155000	23.96	60.01	-5.94	3.11	1.00	0.92
161700	18.88	62.00	-21.14	8.72	1.00	0.90
164400	12.78	63.48	-16.25	-0.09	1.00	0.90
175400	354.23	64.37	-26.90	21.54	1.01	0.93
182100	347.31	63.50	-22.93	-0.23	1.00	0.94
184800	341.20	62.02	-19.60	18.51	1.01	0.96
191500	336.10	60.03	-12.08	12.68	1.00	0.93
194200	332.07	57.65	-17.24	26.84	1.01	0.94
200900	329.02	54.98	-10.50	29.02	1.01	0.97
203600	326.84	52.09	-5.37	32.84	1.01	0.97
210300	325.40	49.06	-4.25	27.20	1.01	0.95
213000	324.60	45.95	-0.91	29.64	1.01	0.98
215700	324.33	42.79	-4.96	34.29	1.01	0.97
222400	324.51	39.63	-0.72	44.37	1.02	1.01
225100	325.08	36.50	-3.11	57.32	1.03	1.07
231800	326.00	33.43	2.55	63.71	1.04	1.11
234500	327.23	30.44	3.44	67.26	1.04	1.14
001200	328.73	27.57	8.36	83.65	1.07	1.21
003900	330.47	24.82	14.87	73.89	1.05	1.17
010600	332.45	22.23	1.45	84.61	1.07	1.24
013300	334.63	19.82	-8.57	101.89	1.10	1.39
020000	337.01	17.60	-2.86	123.20	1.15	1.75
022700	339.56	15.59	-10.49	110.43	1.11	1.48

表 16 MJD 56860 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
090100	22.99	17.57	-5.05	38.91	1.01	1.04
092800	25.36	19.79	-12.31	42.66	1.02	1.09
095500	27.55	22.20	8.80	24.03	1.01	1.00
102200	29.53	24.79	-3.15	17.17	1.00	0.97
104900	31.28	27.53	-10.48	9.31	1.00	0.97
111600	32.78	30.40	-18.79	7.28	1.00	0.97
114300	34.00	33.39	-22.32	12.74	1.01	0.98
121000	34.93	36.46	-16.12	9.45	1.00	0.96
123700	35.51	39.59	-18.30	8.38	1.00	0.94
130400	35.69	42.75	-15.72	4.64	1.00	0.94
133100	35.42	45.90	-13.08	0.72	1.00	0.95
135800	34.63	49.02	-11.34	-2.04	1.00	0.93
142500	33.20	52.05	-23.46	-2.49	1.00	0.93
145200	31.03	54.94	-6.57	6.31	1.00	0.90
151900	27.99	57.62	5.76	6.36	1.00	0.90
154600	23.97	60.00	-5.79	5.86	1.00	0.90
161300	18.90	61.99	-16.06	11.82	1.00	0.91
164000	12.80	63.48	-14.65	1.53	1.00	0.90
175000	354.24	64.37	-25.15	23.74	1.01	0.92
181700	347.32	63.50	-22.64	1.87	1.00	0.90
184400	341.21	62.02	-20.19	20.33	1.01	0.93
191100	336.12	60.04	-9.67	14.22	1.00	0.91
193800	332.08	57.66	-14.48	27.08	1.01	0.91
200500	329.03	54.98	-6.14	29.84	1.01	0.93
203200	326.85	52.10	3.09	38.13	1.01	0.94
205900	325.41	49.07	0.46	28.39	1.01	0.96
212600	324.60	45.95	0.12	35.72	1.01	0.96
215300	324.33	42.80	3.65	39.19	1.01	0.96
222000	324.51	39.64	0.56	48.09	1.02	1.00
224700	325.08	36.51	1.49	52.50	1.02	1.04
231400	326.00	33.44	5.68	50.16	1.02	1.05
234100	327.22	30.45	14.06	49.83	1.02	1.06
000800	328.72	27.57	12.78	63.28	1.04	1.10
003500	330.47	24.83	18.69	72.37	1.05	1.18
010200	332.44	22.24	2.19	93.26	1.08	1.28
012900	334.63	19.82	25.53	90.55	1.09	1.27
015600	337.00	17.60	6.12	105.35	1.10	1.34
022300	339.55	15.60	13.29	102.99	1.09	1.40

表 17 MJD 56861 での補正值。

time (UT)	AZ (deg)	EL (deg)	Δ AZ (arcsec)	Δ EL (arcsec)	$\Delta S_{\text{point}}^{-1}$	$\Delta S_{\text{etc}}^{-1}$
085700	22.98	17.56	-9.07	48.42	1.02	1.08
092400	25.36	19.78	-3.89	50.11	1.02	1.05
095100	27.54	22.19	8.99	38.77	1.01	1.05
101800	29.52	24.78	3.32	21.73	1.00	0.97
104500	31.27	27.52	-0.68	17.75	1.00	0.98
111200	32.77	30.40	-8.86	13.20	1.00	0.97
113900	34.00	33.38	-22.39	10.20	1.00	0.97
120600	34.92	36.45	-11.73	7.63	1.00	0.97
123300	35.50	39.58	-17.90	9.11	1.00	0.95
130000	35.69	42.74	-16.71	2.43	1.00	0.94
132700	35.43	45.90	-14.71	-0.24	1.00	0.94
135400	34.63	49.01	-9.99	-3.43	1.00	0.93
142100	33.20	52.04	-19.17	-4.52	1.00	0.94
144800	31.03	54.93	-4.56	3.90	1.00	0.91
151500	28.00	57.61	3.25	8.36	1.00	0.90
154200	23.98	60.00	-4.76	4.40	1.00	0.90
160900	18.91	61.99	-18.21	8.53	1.00	0.89
163600	12.82	63.48	-15.76	1.84	1.00	0.92
174600	354.26	64.37	-25.17	23.86	1.01	0.91
181300	347.34	63.50	-20.51	1.80	1.00	0.91
184000	341.23	62.02	-19.74	19.28	1.01	0.91
190700	336.13	60.04	-9.81	15.47	1.00	0.91
193400	332.09	57.67	-15.35	25.72	1.01	0.92
200100	329.03	54.99	-6.61	29.78	1.01	0.92
202800	326.85	52.11	-2.62	34.67	1.01	0.95
205500	325.41	49.08	-0.23	24.93	1.00	0.94
212200	324.60	45.96	-0.76	30.27	1.01	0.95
214900	324.33	42.81	0.10	31.15	1.01	0.96
221600	324.51	39.65	-0.91	40.92	1.01	0.99
224300	325.08	36.52	-2.53	44.61	1.02	1.04
231000	326.00	33.45	5.80	42.23	1.02	1.02
233700	327.22	30.46	6.55	43.97	1.02	1.06
000400	328.72	27.58	12.25	47.61	1.02	1.07
003100	330.46	24.84	17.82	54.90	1.03	1.10
005800	332.44	22.24	2.80	65.60	1.04	1.11
012500	334.62	19.83	0.85	66.05	1.04	1.13
015200	337.00	17.61	-2.05	81.01	1.06	1.21
021900	339.55	15.60	-1.83	81.00	1.05	1.22

参考文献

- [1] Cragg, D. M., Sobolev, A. M., & Godfrey, P. D. 2005, MNRAS, 360, 533
- [2] Crowther, P. A., Schnurr, O., Hirschi, R., et al. 2010, MNRAS, 408, 731
- [3] David, P., Etoke, S., & Le Squeren, A. M. 1996, A&AS, 115, 387
- [4] Ellingsen, S. P., Norris, R. P., & McCulloch, P. M. 1996, MNRAS, 279, 101
- [5] Fujisawa, K., Takase, G., Kimura, S., et al. 2014, PASJ, 66, 78
- [6] Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2004, MNRAS, 355, 553
- [7] Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2007, Astrophysical Masers and their Environments, 242, 97
- [8] Goedhart, S., Langa, M. C., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2009, MNRAS, 398, 995
- [9] Hirota, T., Ando, K., Bushimata, T., et al. 2008, PASJ, 60, 961
- [10] Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., Motogi, K., & Tanaka, K. E. I. 2013, ApJL, 769, L20
- [11] Kurtz, S., & Franco, J. 2002, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 12, 16
- [12] Lada, C. J., & Wilking, B. A. 1984, ApJ, 287, 610
- [13] Martín-Pintado, J., Bachiller, R., & Fuente, A. 1992, A&A, 254, 315
- [14] Menten, K. 1991, Atoms, Ions and Molecules: New Results in Spectral Line Astrophysics, 16, 119
- [15] Molinari, S., Brand, J., Cesaroni, R., & Palla, F. 1996, A&A, 308, 573
- [16] Palau, A., Fuente, A., Girart, J. M., et al. 2011, ApJL, 743, L32
- [17] Palau, A., Fuente, A., Girart, J. M., et al. 2013, ApJ, 762, 120
- [18] Parfenov, S. Y., & Sobolev, A. M. 2014, MNRAS, 444, 620
- [19] Purcell, 2006, THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES Ph.D. Thesis
- [20] Sánchez-Monge, Á., Palau, A., Estalella, R., Beltrán, M. T., & Girart, J. M. 2008, A&A, 485, 497
- [21] Sánchez-Monge, Á., Palau, A., Estalella, R., et al. 2010, ApJL, 721, L107
- [22] Sánchez-Monge, Á., 2011, UNIVERSITAT DE BARCELONA Ph.D. Thesis
- [23] Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. 1987, AR&A, 25, 23
- [24] Stahler, Steven W., Palla, Francesco, 2004, The Formation of Stars
- [25] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., et al. 2008, PASJ, 60, 1001
- [26] Szymczak, M., Wolak, P., Bartkiewicz, A., & van Langevelde, H. J. 2011, A&A, 531, L3
- [27] Szymczak, M., Wolak, P., & Bartkiewicz, A. 2014, MNRAS, 439, 407

- [28] Szymczak, M., Olech, M., Wolak, P., Bartkiewicz, A., & Gawroński, M. 2016, MNRAS, 459, L56
- [29] Tafalla, M., Bachiller, R., & Martin-Pintado, J. 1993, ApJ, 403, 175
- [30] van der Walt, D. J. 2011, AJ, 141, 152
- [31] 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 巻