

修士学位論文

大質量星形成領域 G9.62+0.20 における 6.7 GHz
メタノールメーザー強度の周期変動に関する観測研究

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

15NM159R

佐藤宏樹

論文要旨

本研究は大質量形成領域 G9.62+0.20 を対象とした観測研究である。

対象天体は大質量星が存在する指標となる H_{II} 領域が複数存在する領域で、電波の波長帯での観測により水メーザーや水酸基メーザー、6.7 GHz、12.2 GHz メタノールメーザー放射が多数検出されている。

本天体に付随する 6.7 GHz、12.2 GHz メタノールメーザーは強度の周期変動が確認されており、10 年以上の単一鏡観測によって変動周期は 243.3 日であるとされていた。また、変動の位相差は最大で 8 日とされた。さらに、先行研究での VLBI 観測結果で、周期変動成分は 500 au 程度に広がって分布していると考えられていた。周期強度変動を説明するモデルとして有力視されている Colliding Wind Binary (CWB) モデルを仮定したとき、メーザー放射源の分布が 500 au の広がりをもつ点は問題なく説明可能であるが、視線方向への広がりを矛盾なく説明できるかが疑問であった。

本研究では、G9.62+0.20 からのクラス II メタノールメーザーの周期変動要因として CWB モデルを適用することの妥当性を検証する。まず日立 32 m 電波望遠鏡（日立局）を用いて強度変動のモニターを実施した。単一鏡観測でのモニター観測は、メーザー放射領域の物理的な変化を反映した強度変動を捉えられるため有益である。この観測で 16 のスペクトル成分を検出し、そのうち 11 成分で周期強度変動が確認できた。変動周期 243 ± 9 日の成分が多く、短いものは 156 ± 3 日であった。強度上昇期間中に静穏期強度標準偏差の 2 倍以上となった日付を変動の開始日と定義すると、 5.0 km s^{-1} 成分の変動開始日に対して、最も早く 2 日前、最も遅く 24 日後に変動を開始する成分があった。時間遅延が光路差に起因すると仮定した場合、H_{II} 領域の広がり最大で 4560 au 程度となる。6.7 GHz メタノールメーザーは赤外線励起なので、メーザー放射が可能になる領域は熱輻射をするダスト温度に依存する。メタノール分子を励起するのに最適な温度は 125~300 K である。中心星の質量を $18 M_{\odot}$ と仮定したときの光度から見積もられるダスト領域の半径は最大で 3500 au 程度である。

一方、視線と垂直な方向での分布の広がり、観測者から放射源までの距離と VLBI 観測で得た空間分布から幾何学的に求められる。本研究では、空間分布を決定するだけでなく、VLBI イメージ上で強度変動を捉えるために、静穏期に 1 回、強度ピーク日に 1 回の計 2 回の VLBI 観測を実施した。視線速度を元にした周期変動成分の空間分布だけでなく、放射源を空間的に分解した状態で周期強度変動の有無を議論できる。これにより、周期変動が起こる空間スケールを精度良く決定できる点に、VLBI イメージ上で強度変動を捉える意義がある。この観測によって、周期強度変動成分が最大で 1812 au 離れて分布していると判明した。

本研究において、単一鏡観測結果から導出した H_{II} 領域の視線方向の広がり、VLBI 観測により決定した周期強度変動メーザー成分の視線に垂直な分布の広がり、従来よりも大きな値となった。それでも、本天体のメタノールメーザー周期強度変動要因として CWB モデルが不適当である決定的な証拠は見つからなかった。

目次

1	序論	4
1.1	大質量星形成過程	4
1.2	メタノールメーザー	5
2	研究背景・目的	8
2.1	対象天体：G9.62+0.20	8
2.2	Colliding Wind Binary モデル (van der Walt et al. 2009, van der Walt 2011)	10
2.3	本研究の目的	11
3	単一鏡観測	13
3.1	観測	13
3.2	解析と結果	14
4	VLBI 観測	21
4.1	観測	21
4.2	解析と結果	25
5	考察	37
5.1	H _{II} 領域の空間スケール	37
5.2	メーザー放射源の空間スケール	38
付録 A	メーザーの原理	45
付録 B	解析に用いた関数の詳細	45
B.1	変動指数	45
B.2	Lomb-Scargle periodogram	46
付録 C	Astronomical Image Processing System (AIPS)	47
C.1	注意点	48
C.2	実行 task と adverb 設定	48

1 序論

可視光望遠鏡による天体観測は 17 世紀の初めから行われてきた一方で、X 線、赤外線、電波天文学が大きく発展したのは 20 世紀に入ってからのことである。可視光以外の波長の観測技術が発展したことで、これまで見えなかった高密度な星間物質が存在する、星形成領域の研究が盛んに行われるようになった。

1.1 大質量星形成過程

本節は「シリーズ現代の天文学 6 (星間物質と星形成)」を参考に記述する。

研究の進歩によってその大枠がほぼ確立している $8M_{\odot}$ ^{*1}未満の小中質量星の形成過程は次のように考えられている。まず、分子雲内で密度が他よりも高い部分（分子雲コア）の中心で重力収縮が始まり、first core と呼ばれる星の芯が形成される。その後も first core への質量降着が進み、中心の温度が 1.5×10^7 K になると水素核融合が始まって主系列星となる。小中質量星の星形成過程は分子雲から主系列星が形成されるまでの期間を指すことが多い。しかし、 $8M_{\odot}$ を越える大質量星の場合は、主系列星になった後に質量を獲得して大質量星となる可能性も考えられるので、“大質量星形成過程”として小中質量星の形成過程と明確に区別する。

$8M_{\odot}$ 以上の大質量星の形成に小中質量星形成と同様の理論は適用できない。第 1 に、恒星の寿命の問題がある。小質量星を形成における質量降着率 $10^{-5}M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ で絶えず質量降着が続く場合を考える。寿命が 4.3×10^6 年である $40M_{\odot}$ の星は形成可能であるが、 $60M_{\odot}$ の場合は寿命が 3.4×10^6 年と短くなるので、倍の質量降着率がなければ形成不可能である。より質量が大きい場合はさらに高い質量降着率が要求される。第 2 に、中心星の輻射による質量降着率低下の問題である。中心星は約 $8M_{\odot}$ で主系列星となって放射を始めるため、周囲の物質は輻射圧により降着が妨げられてしまう。質量降着率が低下すると、上記の寿命問題とも関わってくるので大質量星が形成できない。

ここまでは球対称の質量降着を仮定していたが、実際は降着物質が角運動量を持っているので中心星周りに円盤を形成する。この場合、円盤面は極めて光学的に厚くなるため、輻射で妨げられることなく質量降着が可能である。現在は大質量星の形成も質量降着によるものと考えられており、質量降着率は小中質量星の場合より 2 桁も大きい $10^{-3}M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 程度と予想されている。

大質量星形成過程は「星なし大質量分子雲コア」、「成長途上の原始星を含む大質量分子雲コア」、「大質量原始星」に分類できる。まず、分子雲の比較的高密度な領域に星のない大質量分子雲コアが形成される。次に、大質量ではない原始星が存在する大質量分子雲コアへと成長し、中心星が大質量原始星となる。観測的には、ミリ波やサブミリ波で星なし大質量分子雲コアの高密度で低温の星間微粒子（ダスト）の放射を検出できる。中間赤外線ではホットコアや赤外線点源と呼ばれる高温のダストからの放射、天体からのアウトフローで熱せられたダストからの放射、電離水素領域（以

*1 太陽質量 ; $1M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

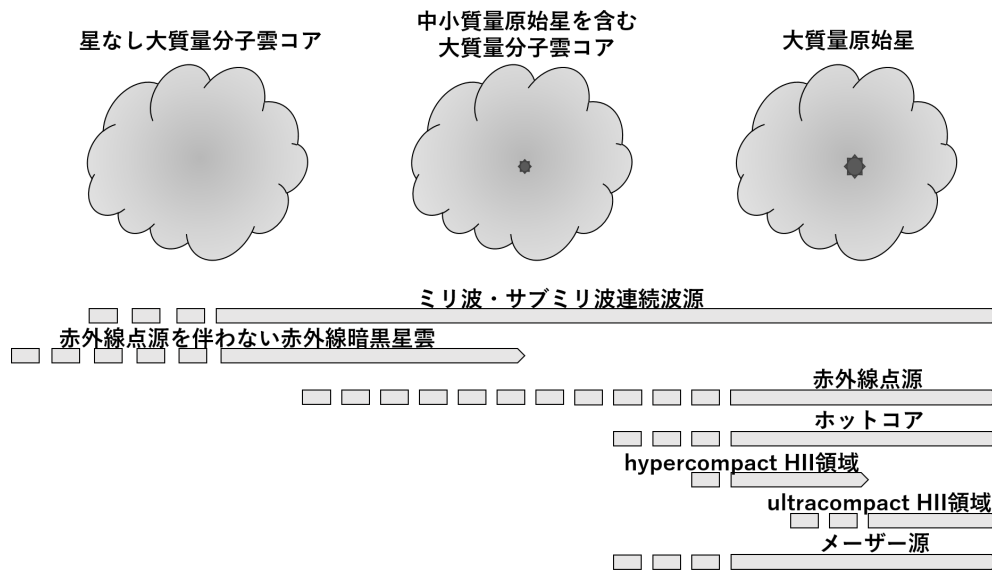


図 1 大質量分子雲から大質量原始星が誕生するまでの過程と、観測できる天体や波長の対応関係。

降 H_{II} 領域と呼ぶ) からの制動放射を検出できる。それぞれ、分子雲コア内にある原始星の存在、大質量の物質降着、紫外線放射が豊富な大質量原始星または主系列星の存在が示唆される。 H_{II} 領域は時間と共に拡大していくことが知られており、大質量原始星の成長段階の指標とされる。電波では水メーザーや水酸基メーザー、メタノールメーザーなどが検出される。特に、メタノールメーザーは H_{II} 領域が形成される段階の初期に見つかるため、形成段階を細分化した大質量星形成過程の研究に最適である。

1.2 メタノールメーザー

メーザーは誘導放射で電波強度が大幅に増強する現象のことである(詳細は付録 A 参照)。物質の遷移エネルギーに対応する波長の輻射のみが増幅されるので、観測される線幅^{*2}は 1 km s^{-1} 程度の狭い輝線となる。放射領域の大きさは数 au 程度である一方、電波強度が強いため、高分解能だが感度の低い VLBI (Very Long Baseline Interferometry) でも観測が可能である。

大質量星形成の初期段階の領域から検出するメタノールメーザーは、観測的にクラス I とクラス II に分けられている。 H_{II} 領域から僅かに離れたアウトフロー領域に見つかるメーザーをクラス I, H_{II} 領域の連続波に重なった位置に見つかるメーザーをクラス II としている (Menten et al. 1988a,b; Norris et al. 1988)。クラス I は物質の衝突による励起 (Plambeck & Menten 1990) で、クラス II は赤外線放射で励起する。

理論的にはメタノールの遷移が A-type と E-type の 2 つに分けられる。分子の対称軸まわりに回転する水素原子がポテンシャル障壁を越えることで遷移が起こるのだが、ポテンシャルは炭素

^{*2} 放射物質の熱運動によるドップラー効果から求められる視線速度幅

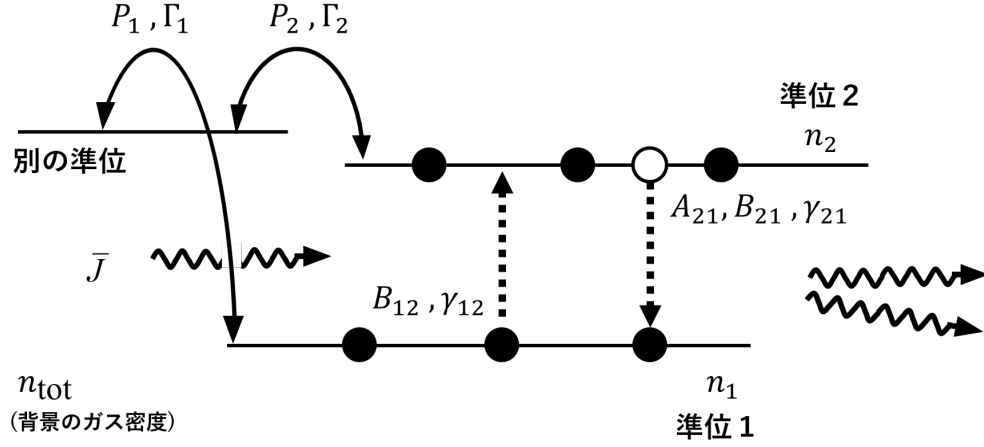


図2 3準位モデル

原子に結合する水素原子のスピンの向きによって異なる。スピンの全てが平行（Ortho）の場合を A-type, 反平行（Para）な場合を E-type の遷移と呼ぶ。本論文で対象としている 6.668519 GHz（以降 6.7 GHz と記述する）のメーザー放射は、メタノール分子の $5_1 \rightarrow 6_0 A^+$ の遷移によるものである。クラス II メーザーと分類され、周囲の星間微粒子（ダスト）の赤外線放射によって励起していると考えられている。6.7 GHz メーザー放射が存在する場所では、同じクラス II の 12.2 GHz メーザー（ $2_0 \rightarrow 3_{-1} E$ の遷移）も観測されている。これらのメーザーは強度の周期強度変動が確認されており（Goedhart et al. 2004, 2014）、変動を説明する理論研究が複数存在する。特に、6.7 GHz メーザーは大質量星形成初期段階の領域からしか観測されていない（Minier et al. 2003）ため、若い進化段階の大質量原始星周辺の状態を知る上でより重要な指標となる。

発生機構

本小節は Stahler & Palla "The Formation of Stars" (2004) を参考に記述する。

付録 A では 2 準位のモデルでメーザー現象を説明しているが、メタノールメーザーの場合は 2 準位とその他の準位が関わる励起機構と考えられている（本論文では 3 準位モデルと呼ぶ）。準位 2 と準位 1 の n_1, n_2 を準位 1, 2 の状態数、 n_{tot} を周囲のガスの数密度とする。さらに、2 準位間の自発放射確率、吸収による励起確率、誘導放射率、粒子衝突による励起確率、脱励起確率をそれぞれ $A_{21}, B_{12}, B_{21}, \gamma_{12}, \gamma_{21}$ とし、別の準位との粒子のやりとりを P と Γ で表す。 P_1, P_2 がそれぞれの準位に単位時間、単位体積あたりに加わる状態数、 $n_1 \Gamma_1, n_2 \Gamma_2$ がそれぞれの準位から単位時間、単位体積あたりに減少する状態数である。各準位間で平衡状態にあるときは正味の状態数の変化がないので、上の準位と下の準位の状態数は、

$$P_2 + n_1 B_{12} \bar{J} + n_1 \gamma_{12} n_{\text{tot}} = n_2 \Gamma_2 + n_2 B_{21} \bar{J} + n_2 \gamma_{21} n_{\text{tot}} + n_2 A_{21} \quad (1.1)$$

$$P_1 + n_2 B_{21} \bar{J} + n_2 \gamma_{21} n_{\text{tot}} = n_1 \Gamma_1 + n_1 B_{12} \bar{J} + n_1 \gamma_{12} n_{\text{tot}} + n_1 A_{12} \quad (1.2)$$

を満たす。周囲のガス温度が 2 準位のエネルギー幅に相当する温度よりも十分大きいとき、衝突に

よる励起と脱励起の割合は等しくなると考えられる ($\gamma_{21}g_2 \approx \gamma_{12}g_1$)。また, Einstein の関係式より $g_2B_{21} = g_1B_{12}$ である。さらに, 自発放射 A_{21} が Γ に対して十分小さいため無視でき, 別の準位に状態数を放出する割合は 2 準位とも等しい ($\Gamma_2 = \Gamma_1 = \Gamma$) と仮定して式 (1.1) と (1.2) を簡略化すると,

$$P_2 - n_2\Gamma - \left(n_2 - n_1 \frac{g_2}{g_1}\right) (B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}}) = 0 \quad (1.3)$$

$$P_1 - n_1\Gamma + \left(n_2 - n_1 \frac{g_2}{g_1}\right) (B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}}) = 0 \quad (1.4)$$

となる。ここから, 各順位の状態数は

$$n_2 = \frac{(P_2 + P_1)[1 + (2g_2/g_1)(B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}})/\Gamma] + (P_2 - P_1)}{2\Gamma + 2(1 + g_2/g_1)(B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}})} \quad (1.5)$$

$$n_1 = \frac{(P_2 + P_1)[1 + (2g_2/g_1)(B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}})/\Gamma] - (P_2 - P_1)}{2\Gamma + 2(1 + g_2/g_1)(B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}})} \quad (1.6)$$

と書ける。粒子数の差 Δn は次のようになり, 状態数が別準位から 1,2 の準位に入り込む確率の比 $P_2g_1/P_1g_2 > 1$ になる場合に反転分布が実現するのが分かる。

$$\Delta n \equiv \frac{n_2}{g_2} - \frac{n_1}{g_1} \quad (1.7)$$

$$= \frac{P_2/g_2 - P_1/g_1}{(B_{21}\bar{J} + \gamma_{21}n_{\text{tot}})} \quad (1.8)$$

仮に種光子が全くない ($\bar{J} = 0$) 場合を

$$\Delta n^\circ = \frac{P_2/g_2 - P_1/g_1}{\Gamma + (1 + g_2/g_1)\gamma_{21}n_{\text{tot}}} \quad (1.9)$$

とすると,

$$\Delta n = \frac{\Delta n^\circ}{1 + \bar{J}/J_s} \quad (1.10)$$

$$\bar{J}_s \equiv \frac{\Gamma + (1 + g_2/g_1)\gamma_{21}n_{\text{tot}}}{(1 + g_2/g_1)B_{21}} \quad (1.11)$$

$\bar{J}_s$ は, 2 準位から誘導放射以外で放出されるエネルギーを表す^{*3}。 $\bar{J}$ が大きくなるにつれて反転分布に与える影響が大きくなり, $\bar{J}_s$ を越えると誘導放射が制限され始める。

^{*3} 正確には, $\bar{J}/\bar{J}_s$ で誘導放射以外のエネルギー放出に対する誘導放射でのエネルギー放出の割合となる。

2 研究背景・目的

大質量星形成初期の段階の物理現象を調査するために、様々な遷移線でのメタノールメーザーの観測が行われている。6.7 GHz, 12.2 GHz の放射では周期強度変動が見つかり、その周期性を説明する理論モデルが複数提唱されている。研究の対象とした G9.62+0.20 は様々な成長段階にある大質量天体が密に分布している領域であるため、いくつかの波長で観測が行われ、多面的に研究されている領域である。以下で詳しく説明するように、この中に含まれる H_{II} 領域 E と呼ばれる領域からは周期強度変動を示すメーザーが検出されている。

2.1 対象天体 : G9.62+0.20

本天体は太陽から 5.2 ± 0.6 kpc^{*4}の距離 (Sanna et al. 2009) に存在する、様々な成長段階の大質量星が密に分布した領域である。大質量星の存在を示唆する 5 つの H_{II} 領域は視直径の大きい順に A~E と名付けられた (Garay et al. 1993)。領域 A,B は extended H_{II} 領域, C は compact H_{II} 領域, D は ultracompact H_{II} 領域, E は hypercompact H_{II} 領域である (Kurtz & Franco 2002)。H_{II} 領域の大きさが原始星の進化段階を表す指標となることを踏まえると、5 つの領域の中で E が最も若い天体と考えられる。その後、領域 D と E の間に電波連続波源が見つかり、領域 F とされた (Testi et al. 2000)。この領域はホットコアの段階と考えられ、実際に高速のアウトフローが観測されている (Hofner, Wiesemeyer & Henning 2001)。中間赤外線 (11 μ m) での観測により、領域 B,C,E に高密度コアが発見された (De Buizer et al. 2003) が、近赤外線では何も検出されないことが分かっている (Persi et al. 2003)。

H_{II} 領域 E は銀河系内で最も明るい 6.7 GHz メタノールメーザー (Phillips et al. 1998) が観測されている天体であり、メーザー強度の周期変動が初めて確認された天体 (Goedhart et al. 2004) の一つでもある。1 回の変動は、2 週間緩やかな増光が続いた後、さらに 2 週間で急激に増光して 1 週間程度ピーク強度を維持し、2 ヶ月かけて元の強度まで減衰する。単一鏡による 10 年間のモニター観測が実施されており、その結果から変動周期は 243.3 日 (Goedhart et al. 2014) と求められた。VLBI 観測も行われており、この領域の水、水酸基、6.7 GHz, 12.2 GHz メタノールメーザー放射源の高分解能マップが得られている。メタノールメーザー放射源は数 100 au^{*5}に渡る直線状のクラスターを成して分布している (Phillips et al. 1998)。クラスター同士は東西に 500 au 程度離れて分布している (Minier, Booth & Conway 2002)。最近行われた VLBI 観測 (Sanna et al. 2015) では、東側のクラスター内の南北約 500 au の範囲に周期強度変動する放射源が存在するとされた。さらに、領域 E のスペクトル指数の計算により、B1 型星の ZAMS^{*6}天体であると考えられている (Hofner et al. 1996)。

*4 1pc= 3.1×10^{16} m (年周視差が 1 秒角になる距離)。

*5 astronomical unit ; 天文単位 (太陽と地球の平均距離)。1 au= 1.5×10^{11} m

*6 Zero Age Main Sequense ; 核融合が始まったばかりの主系列星

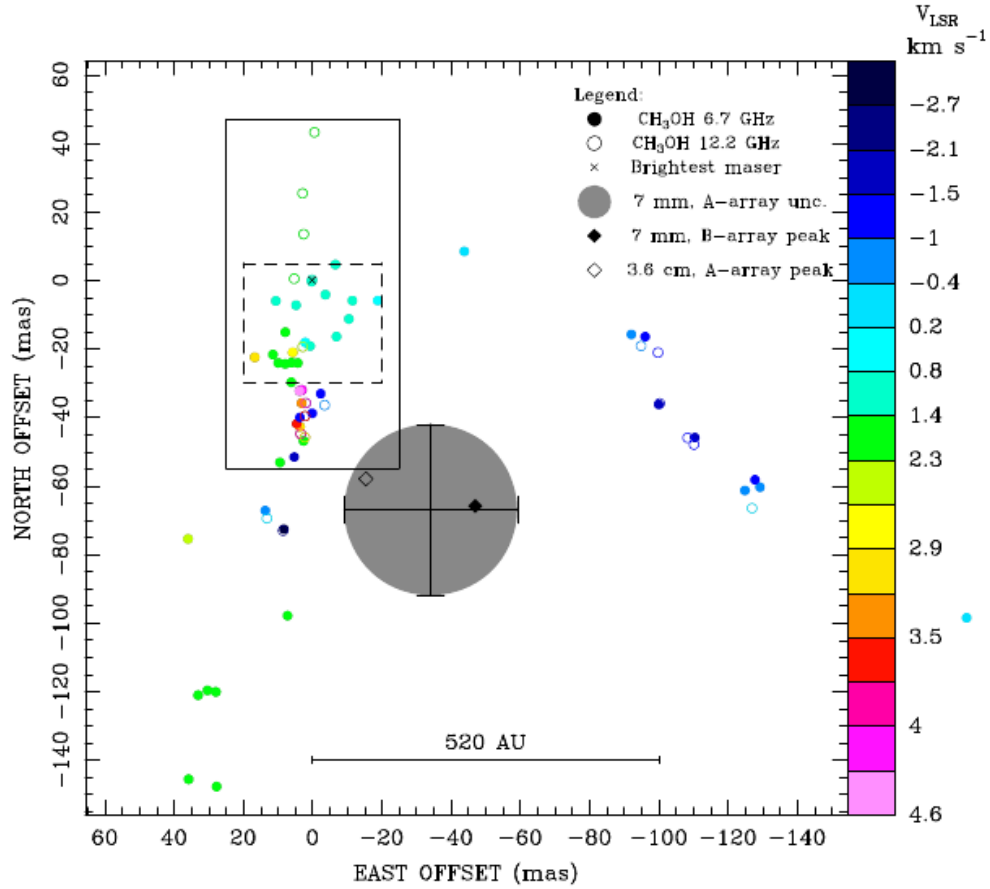


図3 水、メタノール、水酸基メーザー放射の分布。実線で囲まれた領域のメタノールメーザーが周期変動するとされる。破線は論文内で円盤構造を議論した領域 (Sanna et al. 2015)。

上述したような様々な観測結果をもっても、現段階ではこの周期変動機構の断定はできない。しかし以下の議論から、本天体には適用できない機構がいくつか除外できる。まず、星の脈動変光に伴う場合を考える。6.7 GHz メタノールメーザー強度の周期変動が質量降着に起因する中心星の脈動変光に起因するというモデルが提唱されている (Inayoshi et al. 2013)。質量降着率を $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と仮定した場合の、OB 型の若い原始星段階における脈動変光モデルである。しかし、このモデルでは光度が正弦波的（連続的）に変動するため、メーザー強度がほとんど変動しない期間（静穏期と呼ぶ）をもつ本天体の説明には適さない。

12.2 GHz メタノールメーザーの強度変動期間中に行われた VLBI のマルチエポック観測により、放射源の空間的な位置の変化がないと示された (Goedhart et al. 2005)。このことから、メーザー放射領域内を衝撃波や物質が通過することによるメーザー放射可能な領域の拡大、それに伴う強度変動の可能性は否定できる。

残る変動の要因として、中心星が連星系を成している場合が考えられる。可視光で見える O9 型から M 型星のうち、50% 以上が伴星を持っている (Abt 1976, 1983)。Herbig - Haro 天体 (Herbig 1951; Haro 1952) の研究では、連星の検出率は 79~86% であり、そのうちの約半数が三連星以上

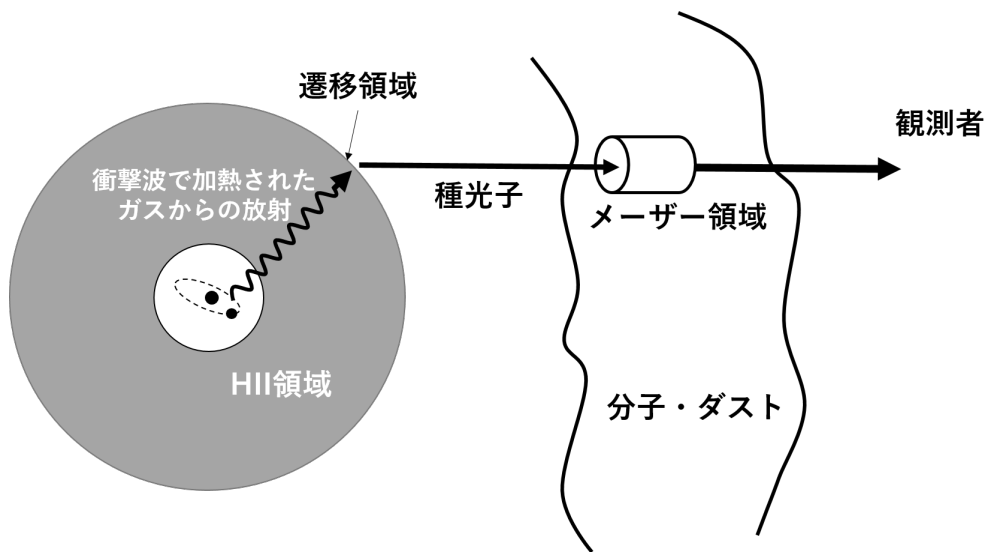


図4 CWB モデル (van der Walt 2011 を参考に作成)

の集合を成している (Reipurth 2000)。二連星は三連星以上の多連星を経由して形成される可能性があるとシミュレーションにより求められた (Bonnell & Bate 2002)。さらに、大質量星は複数が同時に密集して（クラスター的に）形成される傾向にある (Clarke, Bonnell & Hillenbrand 2000) ことも知られている。このことから、変動の原因となる中心星は連星系を成している可能性が極めて高い。そこで、伴星を持つ $11M_{\odot}$ の B1 型星を仮定してケプラーの第 3 法則を用いると、243 日周期を再現する軌道半径は 1.7 au となる。観測的に知られている主系列の連星間距離が 0.05 au から 1000 au であることを踏まえると、1.7 au の軌道半径は十分あり得る値である。現在は連星による衝撃波を変動起源とする Colliding Wind Binary モデル (van der Walt 2011) が有力視されている。§2.2 でモデルを用いた周期強度変動の説明を行う。

2.2 Colliding Wind Binary モデル (van der Walt et al. 2009, van der Walt 2011)

周期強度変動が連星の公転に起因するとしたモデルである。上昇したメーザー強度が元の強度に戻ることから、メーザー放射領域の物理状態は変動の周期ごとに元の状態に戻ると考えられる。すなわち、メーザーの強度変動は種光子の変動に起因していると考えられる。

このモデルでは電波連続波となる H_{II} 領域の制動放射がメーザーの種光子であるとする。主星に伴星が近接した際に生じる衝撃波で加熱された物質の X 線放射が卓越する (Stevens et al. 1992)。それによって、遷移領域の電離度が増加する。電離度の増加に伴って微増する H_{II} 領域からの制動放射が、メーザーにより指数関数的に増幅される。その結果、メーザー放射の大きな変動が観測される。

2.3 本研究の目的

本研究では、G9.62+0.20 からの 6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動要因に CWB モデルを適用する妥当性を検証する。CWB モデル過程のもと、観測結果と理論値の空間スケールに矛盾が生じなければ、妥当性が保たれる。そこで、視線に沿った方向の広がりを変動の時間差から導出するために単一鏡を用いた高頻度（毎日～数日 1 回程度）モニター観測を実施し、視線と垂直な面内での広がり（横の広がり）を求めるために VLBI 観測を行った。

2.3.1 視線に沿った広がり

各速度成分の増光開始の時刻差（位相差と呼ぶ）から、H_{II} 領域の広がりを導出する。

前提として、G9.62+0.20 のメーザー変動の要因は CWB モデル（すなわち、H_{II} 領域からの種光子の増減が変動要因）で、中心星は B1 型星（10～18 $M_{\odot}$ ）であると仮定する。メーザー強度変動の位相差を生む要因は 2 つに大別できる。（1）中心星からメーザー放射源を経由して観測者に至る経路差による光の伝搬時間の差と、（2）各放射源に変動をもたらす種光子の増加時刻が異なる場合である。後者の要因による位相差を見積もるためには、ultracompact H_{II} 領域を空間分解した状態で放射強度変動が捉えられるほどの高分解能かつ高感度な観測が必要である。現在そのような観測を実現する観測装置はないので、本研究では（1）で種光子の増加時刻が等しい場合を考える。しかし、位相解析の方法によっては、メーザー領域のガス密度や H_{II} 領域の電離度や再結合率の違いによるメーザー強度の時間変化率の違いが、求まる位相差に影響を及ぼす可能性もある。そこで、経路差のみに起因する位相差を導出するために、できる限り変動の始まりに近い時刻を用いて成分間の比較を行う必要がある。詳細な議論は §5 で行うことにするので、ここでは単純に位相差は経路差によるものであると仮定する。

本研究では位相差を正確に導出するために、高頻度（毎日～数日に 1 回程度）なモニター観測を実施した。

2.3.2 横方向への広がり

Sanna et al. (2015) では、6.7 GHz, 12.2 GHz メタノールメーザーの両方とも、周期強度変動成分は 100 mas^{*7} 範囲に分布するとしている。5.2 kpc 先ではおよそ 500 au となる。ただし、単一鏡（Hartbeesthoek Radio Astronomy Observatory; HartRAO）によるモニター観測結果で周期変動が示された (Goedhart et al. 2014) 成分の速度と、VLBI 観測による成分速度の比較により、周期変動成分の空間分布を同定している。最も明るい成分の速度が単一鏡の成分速度に対して -0.18 km s^{-1} シフトしていることに加え、LBA (Long Baseline Array) の速度分解能は 0.04 km s^{-1} であることを考慮すると、図 3 における左下 (EAST OFFSET=20～40 mas, NORTH OFFSET=-120～150 mas) の成分が周期変動しないとは断定できない。周期変動成分をより正

*7 milli arc seconds ; mas (ミリ秒角)

確に同定するために、本研究では 6.7 GHz 帯における VLBI でのマルチエポック観測を実施した。

図表と用語の対応

ここで一度、頻出する用語についての意味を整理する。

- 成分速度：各スペクトルピークの視線速度。
- 速度成分：視線速度に対応するスペクトルピーク。個々の放射に対応。
- 放射源：個々の輻射（観測値）を放つメタノールを含むガス雲。
- フレア：強度を時系列プロットした際に、強度の急激な変動により“山”として見える部分。
- 静穏期：強度を時系列プロットした際の“山”以外の部分。

3 単一鏡観測

3.1 観測

茨城県日立市にある 32 m 電波望遠鏡（電波望遠鏡は観測局なので，以降“局”と呼ぶ）を用いて 6.7 GHz（C バンド）のモニター観測を行った。日立局の 6.7 GHz 帯でのビームサイズ（半値全幅）は 4.6 arcmin である。受信周波数帯域幅は 8 MHz であり，8192 点分光を行っているので，速度分解能は 0.044 km s^{-1} となる。各観測において積分時間は 300 sec である。これらの観測パラメータは表 1 にまとめた。観測期間と頻度は表 2 に記載した。

2012/12/30 から 2014/01/10 は Azimuth（AZ；方位角）を統一していない観測のため，AZ や Elevation（EL；仰角）の違いによるポインティング誤差が受信強度に影響を与えている。この期間に関しては， $177^\circ \leq \text{AZ} \leq 179^\circ$ *⁸を満たすデータを抜粋して解析に使用する。2014/01/10 から 2014/05/06 はアンテナのメンテナンスにより観測を行っていない。2014/05/07 以降は AZ を統一して観測しているので全てのデータを使用した。ただし，台風などにより観測不備があった日付のデータは除外している。サンプル数（観測日数）は 543 である。観測頻度は表 2 に記載する。

表 1 日立局観測パラメータ

受信周波数	6664 - 6672	MHz
システム雑音温度	~ 30	K
半値幅（ビームサイズ）	4.6	arcmin
分光チャンネル数	8192	ch
速度分解能	0.044	km s^{-1}
ノイズレベル（ 1σ ）	~ 0.3	Jy
積分時間	300	sec

表 2 観測頻度

観測期間	観測頻度	備考
2012/12/30 - 2014/01/10	毎日	$177^\circ \leq \text{AZ} \leq 179^\circ$ のデータのみ使用
2014/05/07 - 2015/09/16	毎日	
2015/09/18 - 2016/06/21	4~5 日に 1 回	
2016/06/24 -	4 日間のうち 3 日観測	

*⁸ AZ と方位について：日立局では真北を 0° として，アンテナが時計回りに回転する方向で AZ が増加するように定義している。

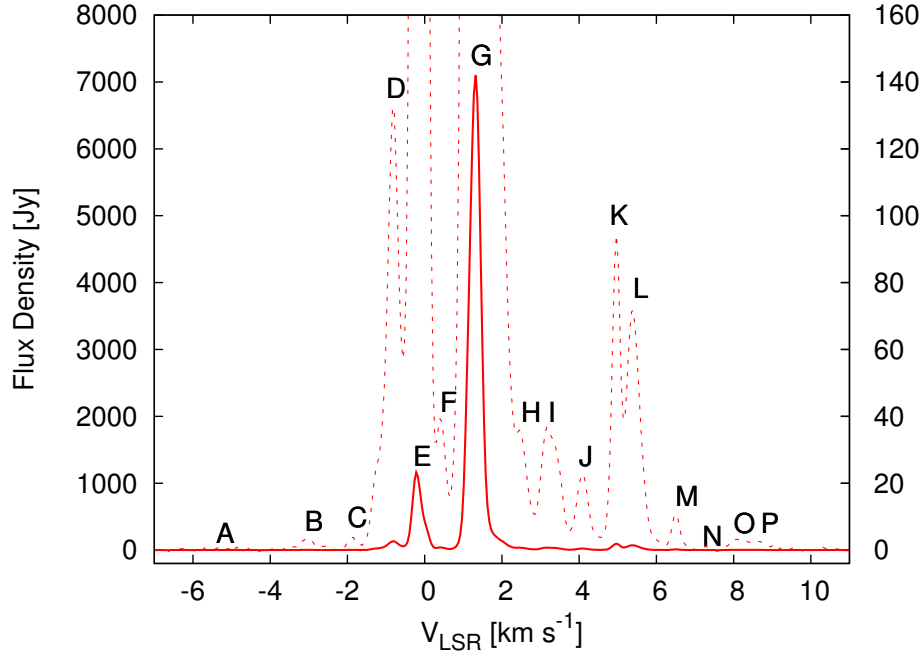


図5 実線：2013/10/22（フレア時）日立局観測スペクトル。破線：実線を50倍したもので、右縦軸が対応する目盛である。

3.2 解析と結果

G9.62+0.20 の 6.7 GHz における放射スペクトルの例を図5に示す。いずれかの観測日において、信号雑音比（Signal Noise Ratio なので以降 S/N と表記する）が3以上となる放射を“検出”とした。日立局の観測で16のメーザー成分を検出した。それらの成分を視線速度の小さい順に A～P とする（識別記号と速度成分の対応は表3に記載）。放射が検出した速度域は $-5.47 \sim 8.76 \text{ km s}^{-1}$ で、最も電波強度の強い成分 G の視線速度は 1.33 km s^{-1} であった（参考：Goedhart et al. (2014) では 1.227 km s^{-1} ）。2成分（M, N）は、対象天体から南東に約10秒角離れた天体 G9.61+0.19（電波連続波源 F）の放射として同定した。^{*9}

全ての速度成分に対して、変動指数を用いた強度変動成分の決定と Lomb-Scargle ピリオドグラムを用いた周期解析を行った。変動と周期がともに確認できた成分を周期強度変動成分として、成分間の変動位相差を導出した。各成分速度と平均強度、平均 S/N、変動指数の値、Lomb-Scargle ピリオドグラムによる周期、および静穏期の標準偏差を表3にまとめた。

^{*9} Fujisawa et al. (2014) における G9.61+0.19 のスペクトル成分速度の半値全幅に、日立局で検出した成分 M, N の速度が包括されるので、G9.61+0.19 からの放射とした。

3.2.1 強度変動成分の定義

レーザー強度の変動を定量的に評価するために、変動指数 VI_1 と VI_2 を導入する。Goedhart et al. (2004); van der Walt et al. (2009) の変動指数を参考にした。 VI_1 の詳細は付録 B.1 を参照。観測日 t_i 、観測日数 N 、速度成分の強度 $m(t_i)$ 、ノイズ標準偏差 $\sigma_{\text{rms}}(t_i)$ (各観測日における rms ノイズレベル)、速度成分の最大値、最小値、平均強度をそれぞれ m_{max} 、 m_{min} 、 $\bar{m}$ とする。変動指数はそれぞれ、次のように定義する。

$$VI_1 = \frac{1}{(N-1)\bar{m}} \left\{ \sum_{i=1}^N (m(t_i) - \bar{m})^2 - (N-1) \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{\text{rms}}}{N} \right)^2 \right\} \quad (3.1)$$

$$VI_2 = \frac{m_{\text{max}} - m_{\text{min}}}{\bar{m}} \quad (3.2)$$

VI_1 はノイズの影響を除いたレーザー強度の不偏分散を平均強度で規格化したもので、 VI_2 は強度の最大振幅を平均強度で規格化したものである。平均 S/N が 3 以上、 $VI_1 \geq 0.1$ (分散が平均値の 1 割以上)、 $VI_2 \geq 0.5$ (振幅が平均値の 5 割以上) を満たす速度成分を強度変動成分と定義する。この条件を満たす 11 成分を変動成分とした。表 3 に変動指数の値を記載する。

3.2.2 周期解析

速度成分の変動周期を導出するために Lomb-Scargle ピリオドグラムを用いて周期解析を行った。これは、不等間隔の離散的な時系列データに対してフーリエ変換を行い、周期を導出するものである (Lomb 1975; Scargle 1982)。解析用のプログラムソースは安井靖堯修士論文 (2015 年度、茨城大学) でまとめられている。解析プログラムを用いて導出した Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルが図 8~9 である。横軸が周期の逆数 (周波数)、縦軸左がピリオドグラムの規格化強度、縦軸右は統計学的な有意水準である。この解析では有意水準に 0.001 を採択して、Lomb-Scargle ピリオドグラムの規格化強度がそれを超えているとき、その周波数に対応する周期の変動を検出したものとする。ただし、ピリオドグラムの特性上、周波数の整数倍の位置に同様なピークが出現する^{*10}。このため、規格化強度が最大になる周波数を変動の周波数として採用する。全ての成分に対して Lomb-Scargle ピリオドグラムの計算を行った。§3.2.1 で変動が確認できた成分で、周期が検出できたものを周期強度変動成分とする。

16 成分のうち、11 成分 (C, D, F, G, H, I, J, K, L, O, P) が有意な周期変動成分であった。変動周期は長いものから順に、 243 ± 7 , 237 ± 7 , 230 ± 6 , 162 ± 3 , 156 ± 3 日である。そのうち 3 成分 (K, O, P) は、今回のモニター観測および周期解析によって初めて周期変動が確認できた成分である。変動周期が 240 日程度の成分は、現在までのモニター観測で 6 回のフレアが観測できている。最も顕著な例は K 成分である。

^{*10} フーリエ変換の特性によるものである。付録 B.2 参照

表 3 各速度成分の平均強度, 平均 S/N, 変動指数, 有意水準を越えた Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値に対応する周期, および静穏期の標準偏差。平均 S/N と変動指数は, 本論文での変動条件を満たすものを太字かつ下線で示した。静穏期標準偏差は周期が 230, 237, 243 日の成分でのみ導出した。

成分の 識別記号	V_{LSR} [km s ⁻¹]	平均強度 [Jy]	平均 S/N	VI_1	VI_2	周期 [日]	静穏期標準偏差 [Jy]
A	-5.47	0.57	1.84	-0.06	<u>3.15</u>	-	-
B	-3.05	4.06	<u>13.27</u>	0.08	<u>0.89</u>	673	-
C	-1.86	2.01	<u>6.59</u>	<u>0.34</u>	<u>2.15</u>	237	-
D	-0.81	141.13	<u>461.32</u>	<u>1.19</u>	<u>0.57</u>	156	-
E	-0.22	1083.96	<u>3546.99</u>	<u>6.04</u>	0.49	219	-
F	0.41	38.05	<u>124.37</u>	<u>0.32</u>	<u>0.69</u>	237	2.10
G	1.33	5771.90	<u>18891.47</u>	<u>45.84</u>	<u>0.55</u>	237	347.28
H	2.42	28.49	<u>93.24</u>	<u>0.31</u>	<u>0.65</u>	243	1.99
I	3.26	28.92	<u>94.79</u>	<u>0.32</u>	<u>0.59</u>	230	2.20
J	4.11	22.98	<u>75.17</u>	<u>0.12</u>	<u>0.60</u>	162	-
K	5.00	36.41	<u>119.52</u>	<u>14.42</u>	<u>3.19</u>	243	2.60
L	5.39	72.70	<u>237.66</u>	<u>0.36</u>	<u>0.56</u>	156	-
M	6.52	9.52	<u>31.12</u>	0.07	<u>0.57</u>	365	-
N	7.28	0.60	1.94	-0.06	<u>2.60</u>	-	-
O	8.09	1.30	<u>4.28</u>	<u>0.78</u>	<u>5.01</u>	243	0.27
P	8.76	1.49	<u>4.90</u>	<u>0.26</u>	<u>2.97</u>	243	0.49

3.2.3 位相解析

§2.3.1 で触れたように, 速度成分の増光開始時刻の差を位相差と呼ぶ。周期強度変動成分にのみ, 次の方法を適用して位相差の導出を行った。

まず, フレアの極大値を観測した日付 (MJD^{*11}) を単純にピーク日と定義する。最も変動が顕著な成分 K は 6 回の強度ピークが確認できた。その他の周期強度変動成分に関しても, 6 回のフレア全ての強度ピーク日を決定する。

次に各成分の静穏期強度の標準偏差を導出した。本天体のメーザー強度変動の傾向は, 緩やかな上昇に 2 週間, 急激な上昇に 2 週間, ピーク維持が 1 週間, もとの強度までの減衰に 2 ヶ月である (Goedhart et al. 2005)。変動が連続的な成分 C と, 周期が大きく異なる成分 D, J, L 以外の成分はこの傾向の変動であると仮定する。各成分, 各フレアの観測ピーク日から 40 日前, 70 日後まで

^{*11} Modified Julian Date ; 修正ユリウス日。1858/11/17 0 時 UT を 0 日とする。(紀元前 4713/1/1 を 0 日とするユリウス日から 2,400,000.5 日を差し引いたもの)

をフレアとし、それ以外を静穏期とした。各周期変動成分ごとに静穏期を求め、静穏期強度の標準偏差を導出した（表 3 参照）。7 日以内に 2 日間以上、静穏期強度標準偏差の 2 倍の強度が観測された場合、初めに強度が標準偏差の 2 倍を越えた日付をフレア開始日と定義する。変動が顕著な成分 K を基準として、各周期変動成分と成分 K の変動開始日の差を位相差とする。位相差は負の場合が基準より前、正の場合は基準より後に変動が始まっていることを表している。各回のフレアでの位相差は変動の傾向（強度上昇率）が影響するため、各成分ごとに導出できた位相差の平均を、それぞれの成分の位相差とする。最初に変動が始まるのは成分 O で、基準より 2.2 日前に変動を開始する。最も遅れて変動が始まるのは成分 F で、基準より 24.2 日遅れて変動が始まる。最大の位相差は成分 F と O で、26.4 日である。

表 4 6 回のフレアを持つ成分 K に対する各周期強度変動成分の遅延。正；遅れ、負；先進を表す。ピークが確認できなかったフレアに関しては変動開始日が定義できていないので、位相差を定義できない。表には“-”と表記している。

成分	視線速度	基準成分 K のフレア開始日 [MJD]						平均位相差
	[km s ⁻¹]	成分 K からの位相差 [日]						[日]
K	5.0	56334.0	56583.3	56813.7	57062.0	57307.3	57546.6	-
C	-1.86	-	-	-	-	-	-	-
D	-0.81	-	-	-	-	-	-	-
F	0.41	41.8	0.0	28.9	35.9	23.9	14.9	24.2
G	1.33	-	0.0	17.9	8.0	0.0	8.9	7.0
H	2.43	13.9	0.0	-2.0	8.0	5.0	14.9	6.2
I	3.26	41.8	0.0	-2.0	8.0	5.0	18.96	7.3
J	4.11	-	-	-	-	-	-	-
L	5.40	-	-	-	-	-	-	-
O	8.09	0.0	-13.0	1.0	-1.0	0.0	0.0	-2.2
P	8.76	0.0	0.0	4.9	5.0	0.0	8.9	3.1

周期が 243 日から大きく異なる周期強度変動成分 D, J, L にはこの手法を適用していない。

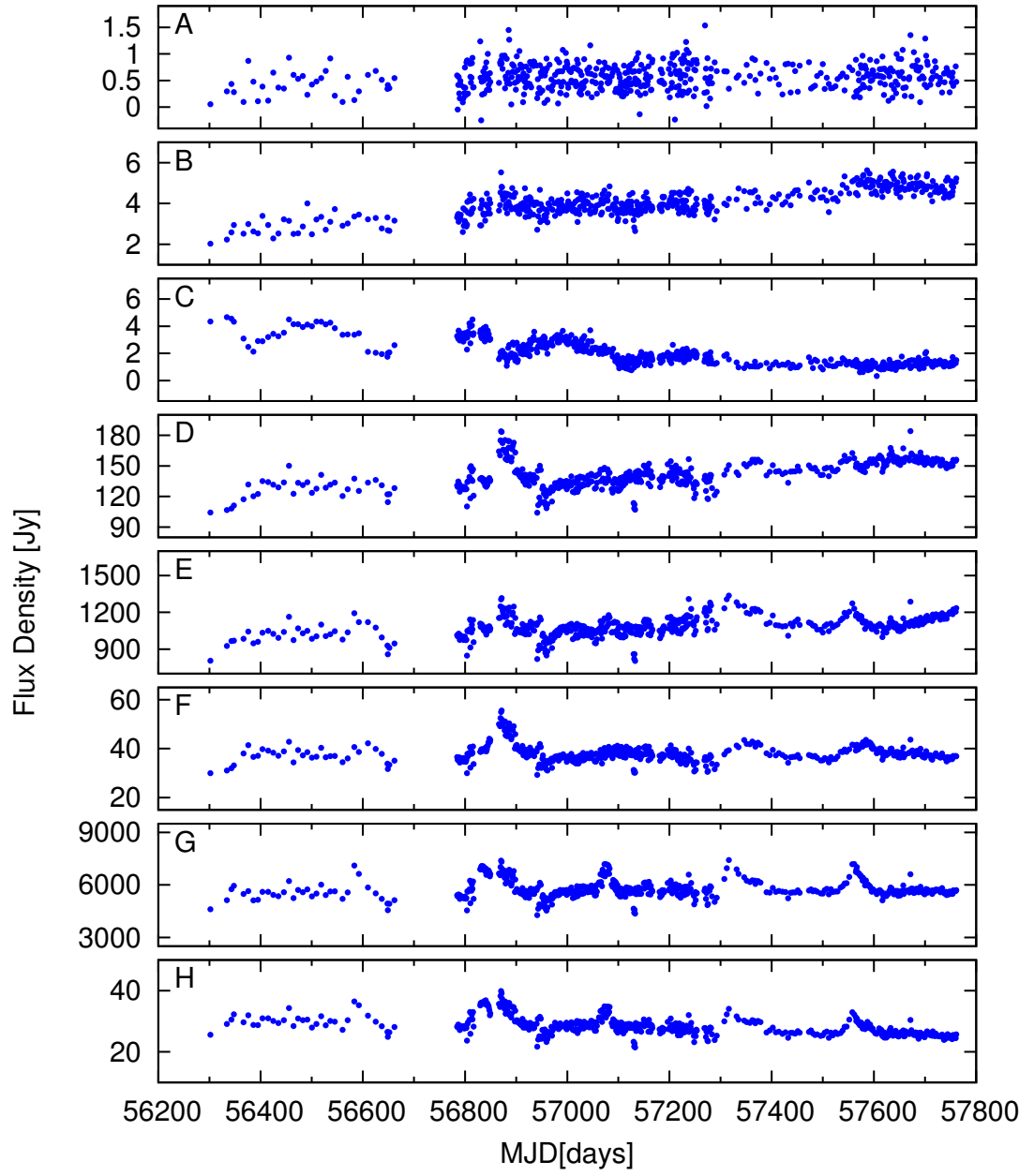


図6 日立局モニター結果（成分 A～H）

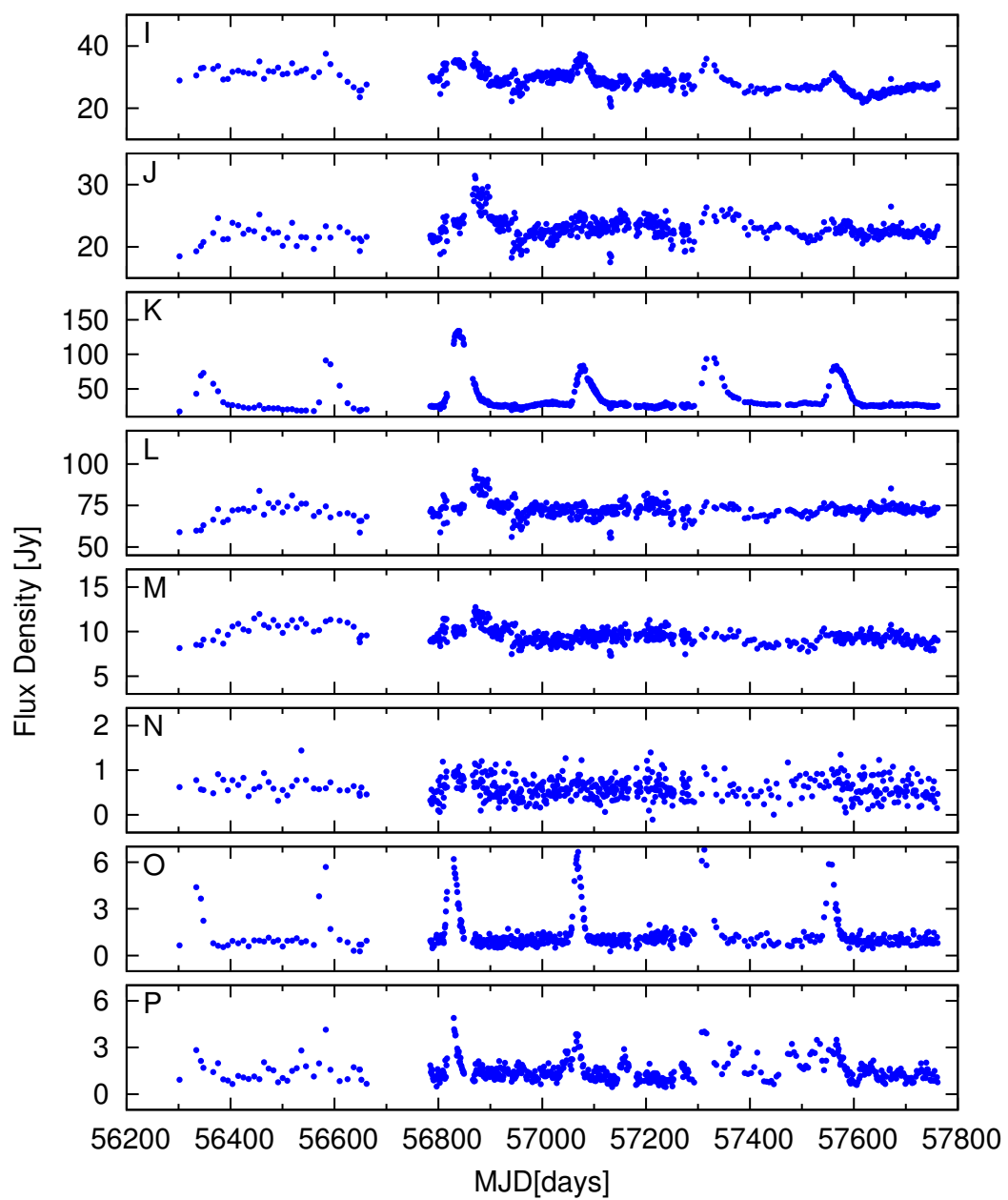


図7 日立局モニター結果（成分 I～P）

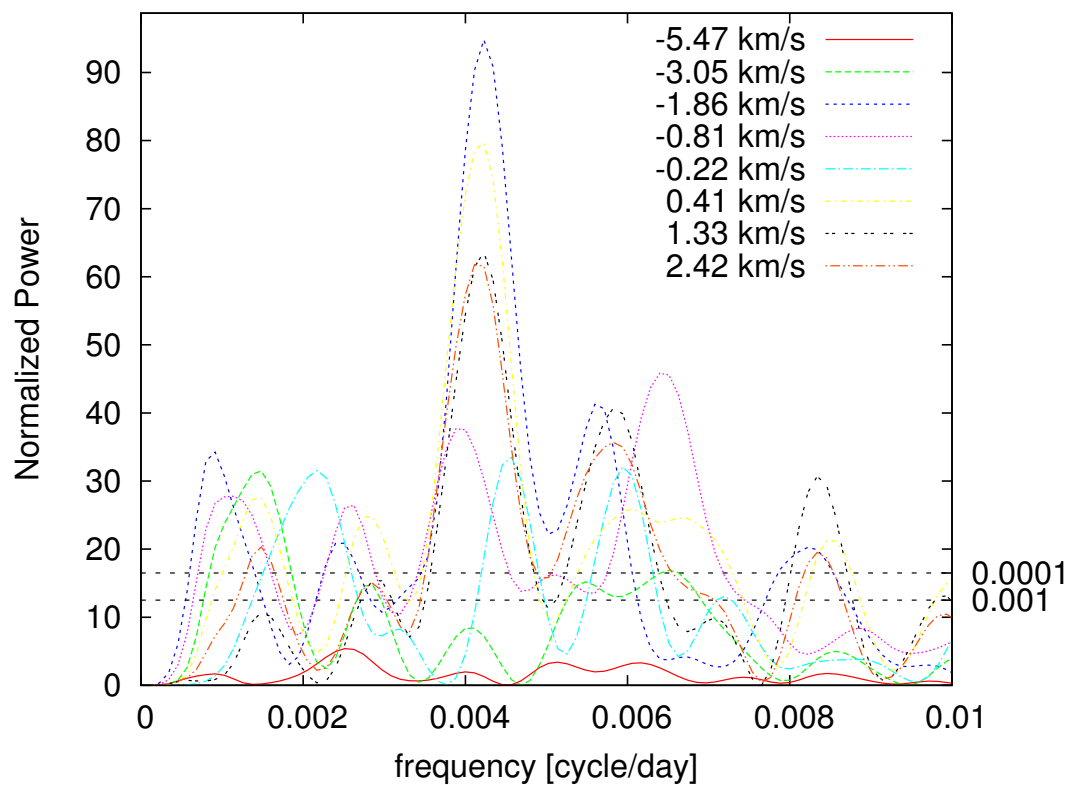


図 8 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル, 16 成分中の 8 成分

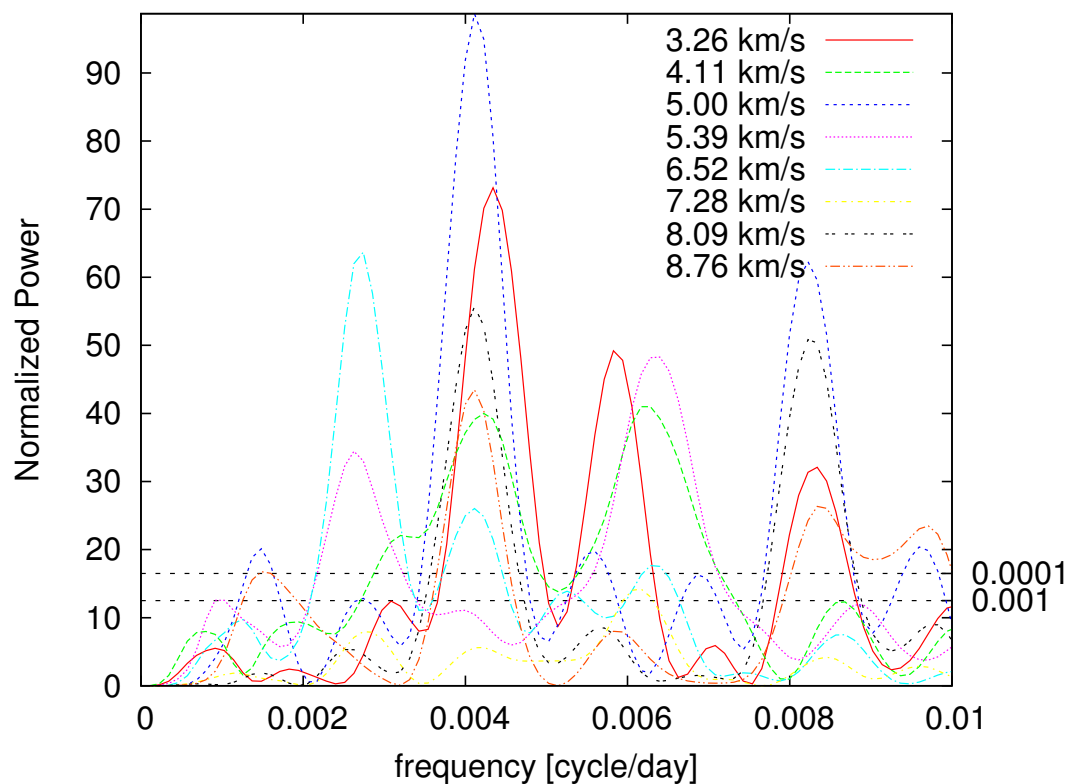


図 9 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル, 16 成分中の 8 成分

4 VLBI 観測

4.1 観測

本天体の 6.7 GHz メタノールメーザー放射において、強度変動中に VLBI マルチエポック観測が行われた例がなく、Sanna et al. (2015) では視線速度を元にして周期変動成分の空間分布を決定していた。そこで、放射源を空間的に分解した状態で周期強度変動する放射源を特定し、より精度良く周期変動成分の空間スケールを決定することを目的として VLBI マルチエポック観測を実施した。

本研究では大学連携 VLBI 観測網を使用した観測を実施した。放射強度の時間変動を捉えるには、変動期間のモニター観測が必要だが、観測スケジュールが自由に組みにくい VLBI 観測では観測日の多数確保が難しい。2 回の観測で周期強度変動成分を特定できるようにするため、増光が始まる直前の静穏期に 1 回、フレアピーク日に 1 回の観測を目標とした。日立局のモニター結果の周期解析を行って導出した周期 241 日^{*12}を用いて、2015/2/25 の成分 K のフレアピークから 2 周期後（2016 年の 6 月）に起こると予想されるフレアに合わせた観測を提案した。2 周期後とした理由は、観測提案の採択期間を考慮したためである。実際の観測日は 2016/05/14（静穏期）、2016/06/10（フレアピーク日）である。1 回目の観測を第 1 エポック（観測コード：U16135B）、2 回目の観測を第 2 エポック（観測コード：U16162B）と呼ぶ。日立局モニター観測で捉えた周期変動成分の変動と各エポックの日付の対応を図 10 に示す。参加局は第 1 エポックが水沢、小笠原、入来（全局とも口径 20 m）と山口局、日立局（両局とも口径 32 m）の計 5 局で最大基線長は 1300 km、第 2 エポックが水沢、小笠原、入来、石垣（20 m）と山口局、日立局の計 6 局で最大基線長が 2300 km である。観測帯域は 6.6020 - 7.1140 GHz（C バンド、帯域幅 512 MHz）である。観測日と観測参加局は表 5 にまとめた。

^{*12} 観測提案の提出前に、2015/10/21 までのデータから導出した周期

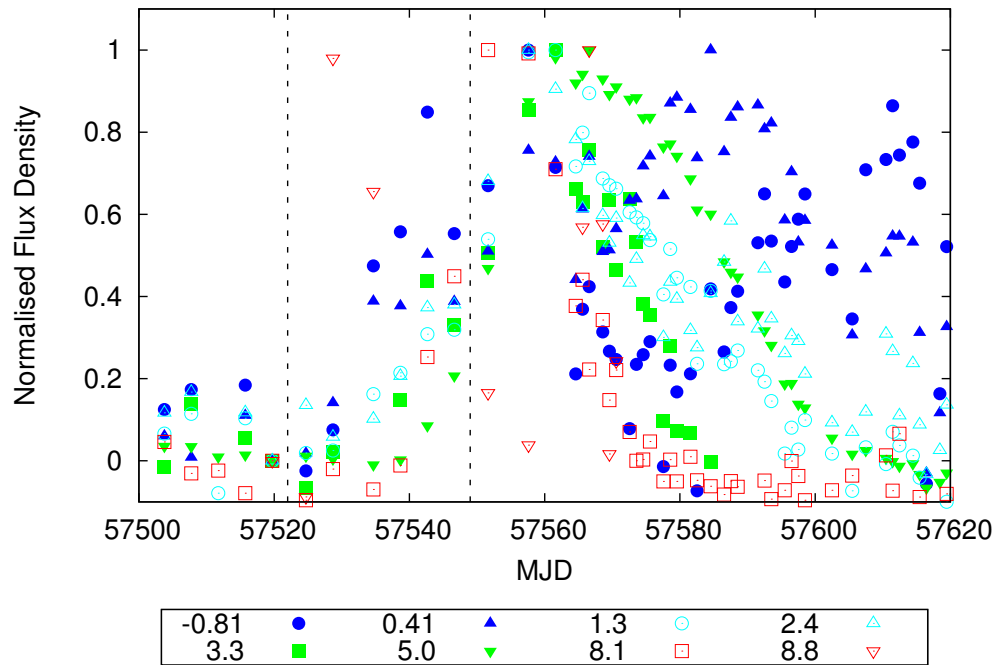


図 10 日立局モニター結果と VLBI 観測日。244 日程度の周期変動が確認できた成分を規格化してプロットしている。左の破線が第 1 エポック (MJD=57522), 右の破線が第 2 エポック (MJD=57549)

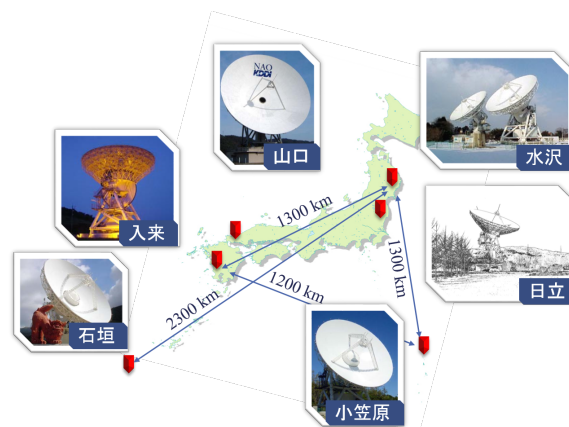


図 11 観測局の位置関係 (各局の写真は VERA ホームページ, 各大学ホームページより引用)

表 5 VLBI 観測諸元。第 2 エポックは石垣局を除いた合成ビームを記載している。

エポック	観測コード	観測日 (MJD)	観測時刻	参加局	合成ビーム [mas]	P.A.*13	イメージ感度 [Jy]
第 1	U16135B	2016/05/14 (57522)	13:30:00 - 20:23:00 (JST*14)	水沢, 入来, 小笠原, 山口, 日立	6.82×4.61	-21.19	0.035
第 2	U16162B	2016/06/10 (57549)	11:30:00 - 18:23:30 (JST)	水沢, 入来, (石垣) *15 小笠原, 山口, 日立	7.34×4.67	-9.07	0.040

*15 Position Angle の略。

*15 Japan Standard Time ; 日本標準時

*15 石垣局の観測データは解析過程で除外した。

観測では、ターゲットの G9.62+0.20 の他に較正天体も適宜観測している。各較正天体の観測目的と選出条件は次の通りである。天体選出には National Radio Astronomy Observatory の The VLBI Calibrator List (<http://www.vlba.nrao.edu/astro/calib/>)*¹⁶を参照した。

バンドパスキャリブレーション（帯域通過特性を持つ振幅・位相の較正天体）： J1733-1304 (NRAO530)

受信帯域を制限するバンドパスフィルターを通過する際に、電磁波は振幅と位相の変化を伴う。その変化を較正するため、明るい電波連続波源を観測する。ただし、合成ビームよりも大きく広がった天体ではない必要がある。広がった天体では、長基線において resolved-out（天体構造が分解できるために起こるビジビリティの低下）が起これ、その基線での較正が難しくなるからである。

本天体はターゲットからの離角が 10.88° の位置にあり、最長基線の約 20 M λ でおよそ 2.4 Jy である。観測時間は、1 スキャン 300 秒で 45 分に 1 回とした。

本天体は十分な明るさがあるため、局位置による経路差起因の遅延残差の較正にも用いた。

ディレイキャリブレーション（大気条件で生じる位相差較正天体）： J1755-22

本天体を利用して各局上空の大気条件による光路差起因の遅延の較正をするために観測する。通常はターゲット天体に近く（数度以内）、天体の広がりが合成ビームと同等かそれ未満のをもつ電波連続波源を採用する。

本天体はターゲットからの離角が 3.22° の位置にあり、20 M λ でおよそ 0.3 Jy である。観測時間は、1 スキャン 180 秒でおよそ 30 分に 1 回（EL $\leq 23^\circ$ では 15 分に 1 回）とした。

ゲインキャリブレーション（アンテナゲイン振幅の較正天体）： G9.62+0.20

各局のゲインによる振幅を較正するために観測する。通常は、数秒でも検出できるほど明るく、観測時間以内で強度変動が無視できる程度の輝線放射源を採用する。ターゲット天体がこの条件を満たす場合、ゲインキャリブレーションの観測は行わない。今回のターゲットである G9.62+0.20 は最も明るい放射が 5000 Jy を越えるため、1 秒の観測でも十分に検出できる明るさである。

ここでの明るい天体とは、各アンテナにおいて 1 スキャンの時間で S/N が 10 以上になると予測される天体のことである。単一鏡のノイズレベル σ_{rms} は次のように求められる。

$$\sigma_{\text{rms}} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{\eta A_{\text{phy}} \sqrt{B t_{\text{obs}}}} \quad (4.1)$$

k はボルツマン定数、 T_{sys} はシステム雑音温度、 η は開口能率、 A_{phy} は物理開口面積、 B は有効帯域幅（帯域幅/分光点数） t_{obs} は観測時間である。本観測の参加局で最も感度が低いアンテナ*¹⁷は単位時間（1 秒）の観測で $\sigma_{\text{rms}} = 73.1$ Jy なので、最も明るい成分 G では十分な S/N を実現できる。

本天体からのメーザー強度変動傾向 (Goedhart et al. 2005) より、強度変動開始 1 週間後から約 14 日の間、最も変動率が高い。この 14 日間で 1000 Jy の強度増加があった場合でも、7 時間の

*¹⁶ 検索の際には 2000 年分点の赤経、赤緯を入力する。

*¹⁷ 水沢、入来、小笠原、石垣の 4 局。4 局とも $A_{\text{phy}} = 20$ m, $T_{\text{sys}} = 130$ K である。

観測では観測開始時と終了時で 20 Jy 程度 (5000 Jy の 0.4%) の変化である。そのため、観測時間において強度変動が無視できるメーザー源と考え、ゲインキャリブレーションとして観測した。

4.2 解析と結果

4.2.1 遅延残差補正から CLEAN イメージの作成

観測データは水沢の相関器で相関処理が行われた。6.6020 - 7.1140 GHz (512 MHz) 512 点分光データと、本天体の 6.7 GHz メタノールメーザー放射が含まれる 6.6682 - 6.6702 GHz (2 MHz) を抜粋して 1024 点分光した (速度分解能 0.088 km s^{-1}) データがある。付録 C では前者を広帯域データ、後者を狭帯域データと呼んで区別する。データ解析 (較正処理とイメージング) には Astronomical Image Processing System (AIPS) を用いた。^{*18}

強度変動を有意に捉える目的を達成するためには、UV-coverage の差異に起因する受信強度変化は除く必要がある。ここで、UV-coverage とは、観測時間におけるビジビリティ標本を空間周波数 u, v の領域に表現したものである。UV-coverage の広がりが多いほど分解能が高く、密に埋まっているほど感度が高いと解釈できる。 (u, v) の変化がビジビリティに与える影響は次のようになる (干渉計サマースクール 2005)。簡単のため、 (u, v) 平面の u の成分のみで考える。点源放射の電場強度 $\hat{E}(\nu)$ としたとき、クロスパワースペクトル $\hat{C}$ は

$$\hat{C}(\nu) = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* E_0^2(\nu) \exp[-2\pi\nu(\tau_i - \tau_g)] \quad (4.2)$$

となる ($\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2^*, \tau_i, \tau_g$ はそれぞれアンテナ 1, 2 の複素利得 (ゲイン), 遅延補正項, 幾何学的遅延である)。実際の天体は空間的な広がりを持っているが、連続的に点源が存在するものとする。この時、基準点 (原点) に対する遅延時間 $\tau_{g,N} (N = 1, 2, 3, \dots)$ が各点源からの電場 E_N に含まれるため、クロスパワースペクトルの位相差として現れる。位相差は $\Delta\phi_N = 2\pi\nu\tau_{g,N} = 2\pi ul_N$ として表せる。クロスパワースペクトルはアンテナでの受信電圧に対して線形応答かつ異なる方向からの電場間の相関はない。そのため、各点源からの放射のクロスパワースペクトルへの寄与は重ね合わせが可能である。すなわち、広がりをもった放射源のクロスパワースペクトルは (u, v) 空間において、

$$\hat{C}(\nu) = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* \int_{\text{source}} E^2(\nu, l) \exp(2\pi i u l) dl \quad (4.3)$$

となる。これが (u, v) 空間におけるビジビリティとなる。空間周波数 u が変化するとビジビリティも変化することが分かる。

第 1 エポック、第 2 エポックの全基線 UV-coverage は図 12, 13 である。石垣局が観測に加わると基線長が 1000 km も伸びるため、第 1 エポックの (u, v) が $\pm 20 \text{ M}\lambda$ 程度に広がっているのに対して、第 2 エポックは $\pm 40 \text{ M}\lambda$ まで広がっている。

メーザー放射源を空間分解した状態で強度変動を捉える本観測の目的を達成するためには、UV-coverage の変化に起因するビジビリティの変化を避ける必要がある。今回は第 1 エポックに

^{*18} 実行 task や advarb の設定など、詳細は付録付録 C を参照。

合わせ、第2エポックにおける石垣局のデータは全て解析に用いないこととした。

最も電波強度の強い 1.3 km s^{-1} （日立局観測による速度成分 G）でフリンジフィットを行なった。相関処理（水沢相関器）における位相中心に対する位置誤差に起因する遅延の変化率をから位置を較正し、成分 G をイメージ中心とした。実際の解析過程は付録 C に詳しく記載した。

4.2.2 放射点リストの作成

図 15, 16 のように、CLEAN イメージ上に合成ビームの影響が現れる場合がある。合成ビームは点源応答関数とも呼ばれる、中心に点源を置いた時に得られる強度分布のことで、実際に得られた UV-coverage を 2 次元フーリエ変換したものである（合成ビームパターンは図 14 のようになっている）。合成ビームパターンの影響で CLEAN イメージ上に出現した成分は天体からの真の放射ではない。この成分を真の放射として誤認するのを避けるため、ある放射源を中心として対称的に現れた放射は、CLEAN イメージから放射源の相対位置や強度を取得する際^{*19}に選択しないこととした。

各チャンネルにおける放射の位相中心からの相対座標、電波強度をまとめた放射点リスト（この後、位置平均などを行ったものを放射源と呼ぶので、“放射点”として区別する）を作成し、放射源分布図の作成に用いた。

リストの放射点の数は第1エポックで 280、第2エポックで 277 である。放射点リストの分布は図 17（第1エポック）、図 18（第2エポック）のように、成分速度が近い複数の放射点が数 mas 四方に密集して分布している。

4.2.3 放射源の決定

実際のメーザー放射はある一点からではなく、有限の体積をもつ領域から放射されていると考えられる。すなわち、その領域の速度分散による線幅を持った輝線として観測される。そのため、放射点リストには一つの放射の線幅をチャンネル幅で分割した数の放射位置が記録されていることになる。観測的には $0.3 \sim 0.5 \text{ km s}^{-1}$ の狭い線幅の放射が発見されている (Menten 1991)。今回の VLBI 観測での 1 チャンネルあたりの速度幅は 0.088 km s^{-1} である。線幅の典型値を 0.5 km s^{-1} とすると、強度ピークのチャンネルから前後 2 チャンネルは同一の領域からのメーザー放射と考えられる。ただし、前後 2 チャンネルまで確認できない場合^{*20}は、前後 1 チャンネルまでを同一の放射とする。前提として、放射強度とイメージ感度の比（VLBI 観測における S/N ）が 5 未満のデータは検出感度未満として除外する。

上記を踏まえて、それぞれの放射の検出と放射源の位置を次のように定義した。前後 2 チャンネル以上に放射点が確認できているピーク強度が $S/N \geq 5$ を満たすものを放射とする。放射の強度ピーク前後 2 チャンネルが確認できるとき、強度ピークチャンネルを含めた 5 チャンネルの位置平均とする。前後 1 チャンネルしか確認できない場合は計 3 チャンネルの平均位置とする。これにより、第1エ

^{*19} AIPS における task JMFIT。付録 C 参照

^{*20} JMFIT の際に取りこぼした可能性がある。

ボックスで 32, 第 2 エポックで 25 の放射を検出し, それぞれの放射源の位置を決定した。放射が検出できた速度域は第 1 エポックで $-3.12 \sim 8.11 \text{ km s}^{-1}$, 第 2 エポックで $-3.65 \sim 8.73 \text{ km s}^{-1}$ である。強度の最も弱い放射は第 2 エポックの 0.24 Jy (-3.65 km s^{-1} 成分, $S/N=7.18$) で, 最も強い放射は第 2 エポックの 709.60 Jy (1.35 km s^{-1} , $S/N=10768$) であった。

大まかな分布は, 位相中心を含む南北に渡る直線状のものと, その西側にある同様の分布から成っている。加えて, 位相中心から 174.5 mas , 297.8 mas 離れた位置にそれぞれ -1.99 km s^{-1} , 8.11 km s^{-1} の放射源が点在している。放射源の分布の広がり, 第 1 エポックでは東西に 434 mas , 南北に 351 mas 程度, 第 2 エポックでは東西に 435 mas , 南北に 287 mas 程度であった。各放射源の視線速度, フラックス密度, 位相中心からのオフセットは表の通りである。各放射源の分布は図 19, 20 に示す。

4.2.4 周期変動成分の同定

両エポックの放射を同定した後, 強度比較を行った。まず, 両エポックにおいてピーク速度が速度分解能以内で一致していること, 位置の差がビームサイズ内 (7 mas 以内) に収まることを条件として同定した。強度はピークチャネルの値を比較した。本観測における振幅較正誤差 (各エポックにおいて約 10%) により, 第 1 エポックと第 2 エポックの強度比は 20% 程度の誤差が含まれる。そこで, 本論文では第 1 エポックに対する第 2 エポックの強度比が 1.2 以上の放射を周期強度変動と定義した。

各エポック間で同一の放射源と同定できたのは 21 成分で, 成分速度の小さい順に成分 a~u とした。そのうち, 変動が確認できた成分は, b, f, j, k, l, n, t, u の 8 成分であった。これらを周期変動成分を捉えたものと仮定した。視線速度から日立モニター結果の成分と対応づけると, j と G, n と H, t と K, u と O が同一の放射であると考えられる。位相中心である最も明るい成分 (単一鏡速度成分 G) から約 360 mas 北東に離れた場所に位置する成分 u の周期変動が確認できた例は過去になく, 本研究での発見となる。さらに, Sanna et al. (2015) で周期変動成分とされなかった East offset = $20 \sim 40 \text{ mas}$, North offset = $-150 \sim -120 \text{ mas}$ の領域に存在する成分 k が変動していると判明した。周期変動成分で最も離れた成分 k と u の離角は 362.3 mas である。視線に垂直な方向での距離に換算すると 1812 au で, これまで周期変動成分の空間分布のスケールとされていた 500 au の 3 倍以上の広がりがあると判明した。

4.2.5 残されている課題

上記手順では, リスト上で強度ピークとなる速度を放射源の速度としていた。日立局観測結果との対応付けのためにも, 放射の強度ピーク速度と位置, 放射強度をより正確に決定する必要がある。今後の課題は個々の放射領域ごとのスペクトルをガウス関数で近似することによって強度ピークの速度を導出する。これにより, 今回は平均化で導出した放射源の強度ピークの値と対応する速度, 放射の位置も精度良く決定できる可能性がある。

*21 強度の誤差はピーク強度をガウスフィットする際の誤差。実際にはこれに加えて振幅較正誤差が 10% 上乗せされる。

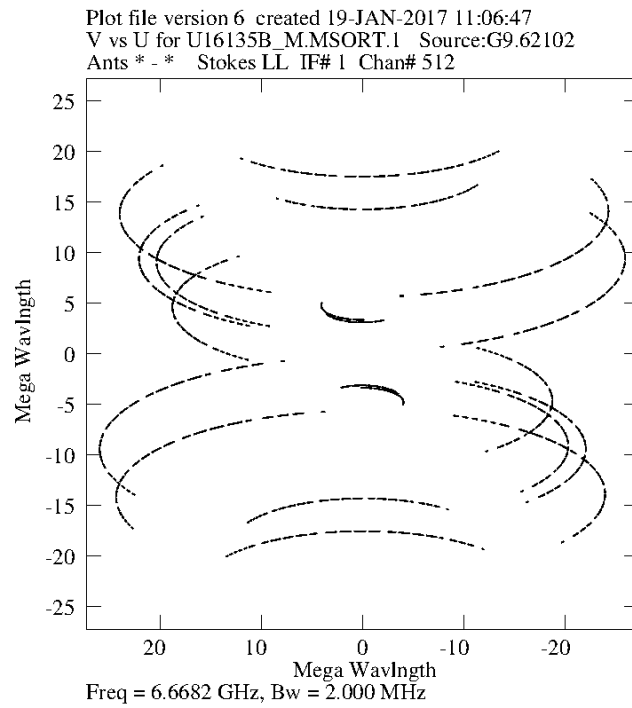


図 12 U16135B の観測における UV-coverage

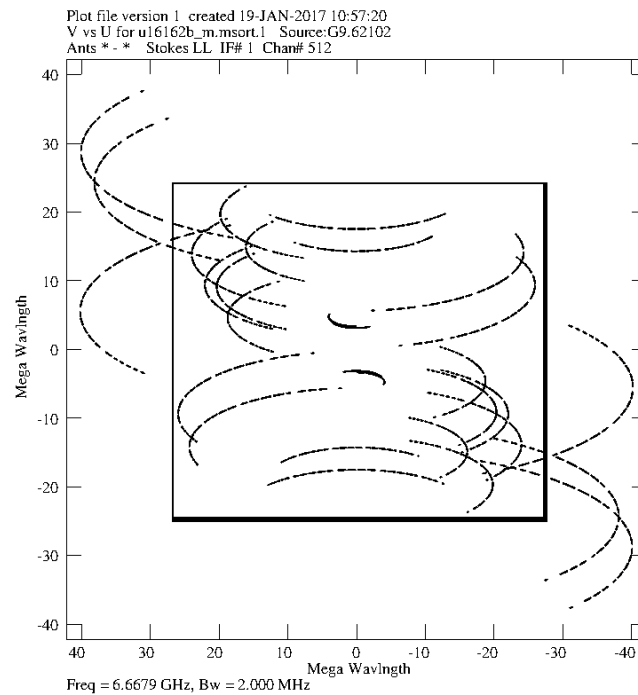


図 13 U16162B の観測における UV-coverage。図内の実線で囲った部分が U16135B と同じスケールの UV-coverage である。実線の外にビジビリティ標本が広がっている（UV-coverage が異なる）ことが分かる。

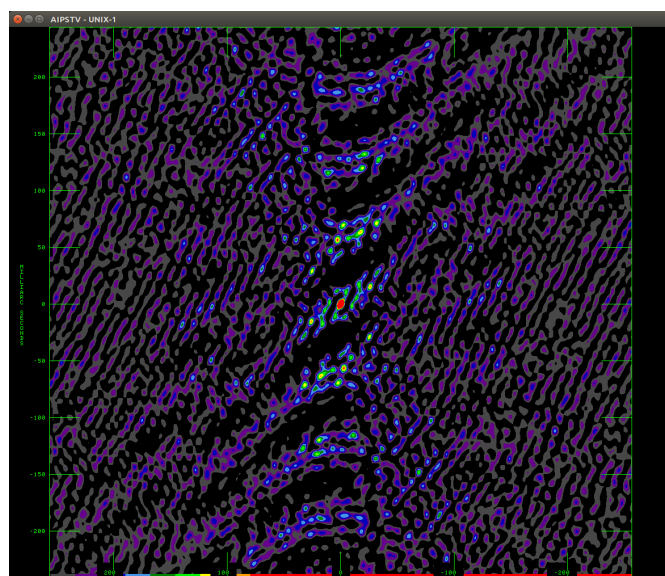


図 14 第 2 エポックにおいて石垣局を除いた UV-coverage を，2 次元フーリエ変換した結果（合成ビームパターン）

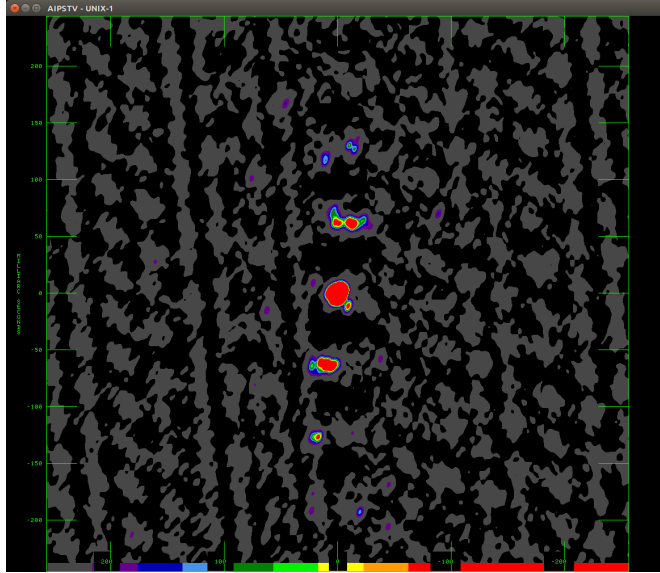


図 15 1.3 km s^{-1} 放射が含まれるチャンネルの CLEAN イメージ (第 2 エポック)。中心付近の放射のみが真の放射であり，対称的に現れた放射ピークは合成ビームパターンが誤って CLEAN された結果であると考えられる。

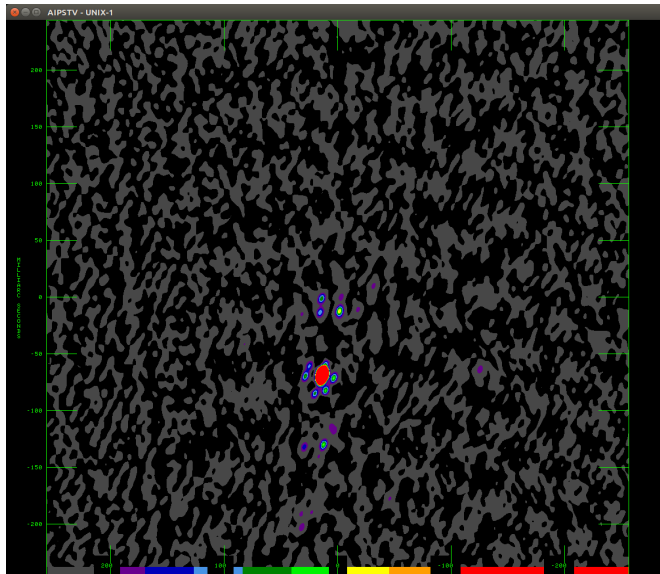


図 16 -0.2 km s^{-1} 放射が含まれるチャンネルの CLEAN イメージ (第 2 エポック)。大きな放射ピークを囲むように対称的に存在する放射ピークは，合成ビームが誤って CLEAN された結果であると考えられる。

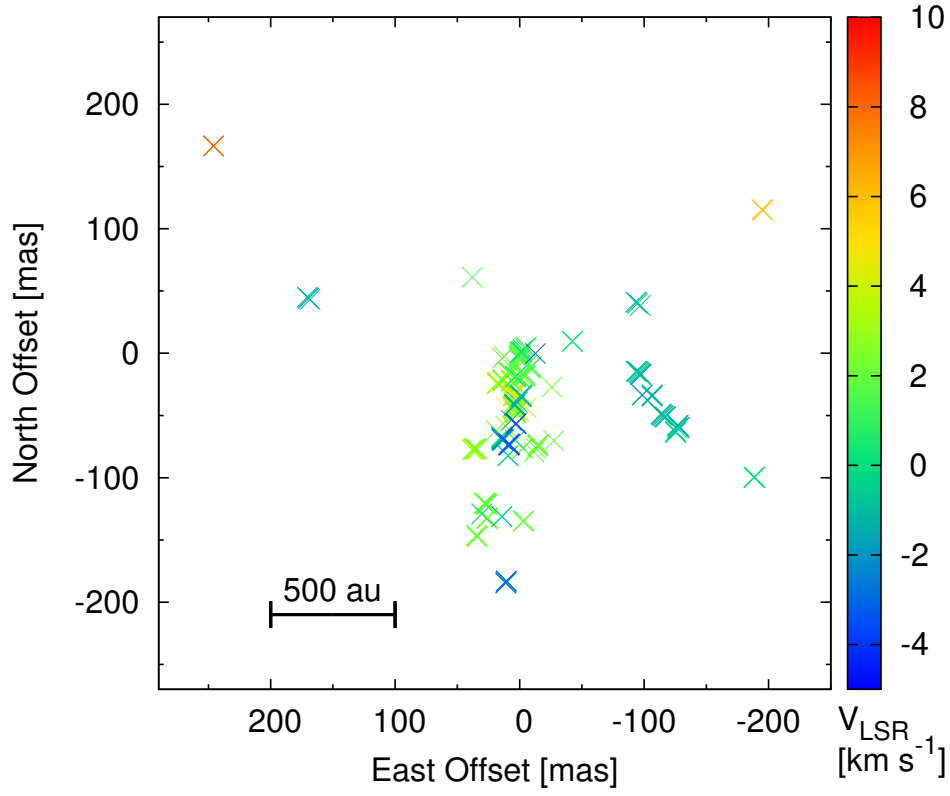


図 17 U16135B のメーザー放射点リストを用いた分布図

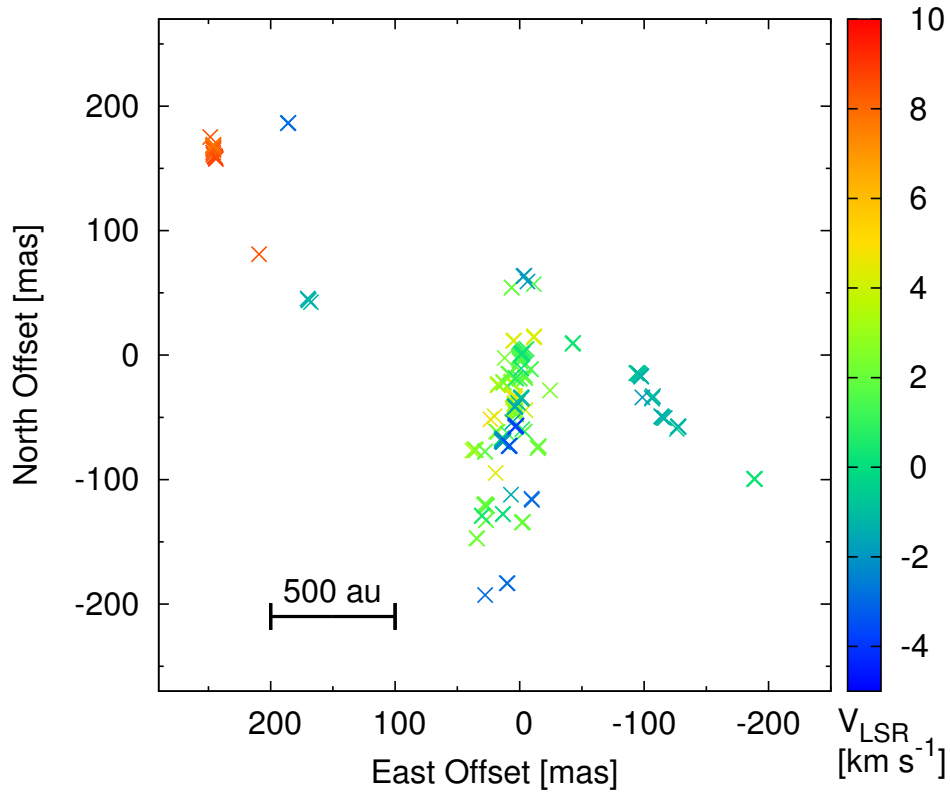


図 18 U16162B のメーザー放射点リストを用いた分布図

表 6 U16135B で検出した放射一覧。

	視線速度 [km s ⁻¹]	East offset [mas]	North offset [mas]	強度* ²¹ [Jy]	対応記号
1	-3.12	8.49±0.074	-73.06±0.11	1.26±0.03	a
2	-2.68	10.94±0.23	-184.05±0.36	0.26±0.03	
3	-1.28	3.82±0.027	-41.43±0.036	2.79±0.03	b
4	-1.19	169.31±0.26	43.87±0.25	0.38±0.03	c
5	-1.10	-115.48±0.085	-50.28±0.097	1.11±0.03	d
6	-1.10	-106.50±0.12	-33.87±0.16	0.57±0.03	
7	-1.01	-127.05±0.11	-58.07±0.13	1.08±0.03	e
8	-0.93	-95.24±0.15	39.67±0.15	0.63±0.03	
9	-0.84	-1.38±0.011	-34.44±0.015	11.34±0.03	f
10	-0.75	-94.97±0.0060	-14.88±0.0076	18.82±0.03	
11	-0.22	13.74±0.0002	-69.32±0.0004	332.94±0.04	g
12	-0.14	-125.40±0.032	-63.47±0.045	2.81±0.04	
13	0.39	-42.40±0.10	9.59±0.13	0.77±0.03	h
14	0.47	-188.58±0.023	-99.61±0.026	6.31±0.03	i
15	1.35	-0.52±0.0002	-0.07±0.0002	575.46±0.04	j
16	1.44	-8.76±0.0050	-11.43±0.0073	26.47±0.04	
17	1.70	0.44±0.0067	-19.05±0.0093	20.10±0.03	
18	1.79	-3.50±0.012	-17.37±0.012	11.11±0.03	
19	1.88	26.89±0.0096	-121.13±0.011	10.98±0.03	k
20	2.05	-14.76±0.10	-73.63±0.17	0.82±0.03	l
21	2.05	8.52±0.030	-15.61±0.038	2.98±0.03	m
22	2.05	26.32±0.11	-132.64±0.15	0.66±0.03	
23	2.14	34.36±0.11	-147.12±0.16	0.61±0.03	
24	2.67	13.26±0.15	-21.89±0.20	0.67±0.03	n
25	2.76	35.72±0.13	-76.80±0.18	0.68±0.03	o
26	2.93	-0.29±0.26	0.53±0.39	0.27±0.03	
27	3.19	6.61±0.043	-22.27±0.063	2.42±0.03	p
28	3.28	4.21±0.012	-43.35±0.021	5.76±0.03	q
29	3.46	17.45±0.063	-23.85±0.096	1.21±0.03	r
30	4.16	5.24±0.015	-43.06±0.022	6.35±0.03	s
31	4.95	4.70±0.013	-33.56±0.018	7.72±0.03	t
32	8.11	245.85±0.29	166.61±0.45	0.25±0.03	u

表 7 U16162B で検出した放射一覧。強度比は 1.2 を以上を太字かつ下線で示した。

	視線速度 [km s ⁻¹]	East offset [mas]	North offset [mas]	強度 [Jy]	対応記号	強度比
1	-3.65	2.88±0.32	-56.75±0.43	0.24±0.03		
2	-3.12	8.47±0.080	-73.04±0.12	1.42±0.03	a	1.1
3	-2.16	13.37±0.39	-67.71±0.66	0.22±0.03		
4	-1.28	3.66±0.029	-41.27±0.038	3.26±0.03	b	<u>1.2</u>
5	-1.19	168.96±0.27	43.68±0.28	0.40±0.03	c	1.0
6	-1.10	-115.67±0.092	-50.29±0.11	1.01±0.03	d	0.9
7	-1.01	-127.51±0.097	-57.65±0.12	1.09±0.03	e	1.0
8	-0.84	-95.67±0.0060	-15.12±0.0074	21.08±0.03		
9	-0.84	-1.43±0.011	-34.40±0.015	13.19±0.03	f	<u>1.2</u>
10	-0.22	13.57±0.0002	-69.10±0.0004	372.44±0.04	g	1.1
11	0.39	-42.74±0.11	9.48±0.14	7.12±0.03	h	1.1
12	0.39	-188.72±0.026	-99.48±0.029	0.88±0.03	i	1.1
13	1.35	-0.56±0.0002	-0.17±0.0002	709.60±0.07	j	<u>1.2</u>
14	1.88	27.02±0.0092	-120.90±0.010	14.46±0.04	k	<u>1.3</u>
15	2.05	-15.05±0.098	-73.51±0.13	1.11±0.04	l	<u>1.4</u>
16	2.05	8.47±0.057	-15.24±0.063	3.38±0.04	m	1.1
17	2.67	12.91±0.12	-22.12±0.15	0.77±0.03	n	<u>1.2</u>
18	2.76	35.72±0.14	-76.26±0.20	0.77±0.03	o	1.1
19	3.19	6.56±0.052	-22.01±0.074	2.73±0.03	p	1.1
20	3.28	4.04±0.014	-43.08±0.024	6.35±0.03	q	1.1
21	3.46	17.42±0.085	-23.77±0.12	1.23±0.03	r	1.0
22	4.07	5.01±0.015	-42.70±0.022	7.02±0.03	s	1.1
23	4.95	4.57±0.0098	-33.38±0.014	13.12±0.03	t	<u>1.7</u>
24	8.02	246.13±0.072	167.64±0.11	1.29±0.03	u	<u>5.2</u>
25	8.73	244.90±0.22	159.45±0.38	0.43±0.03		

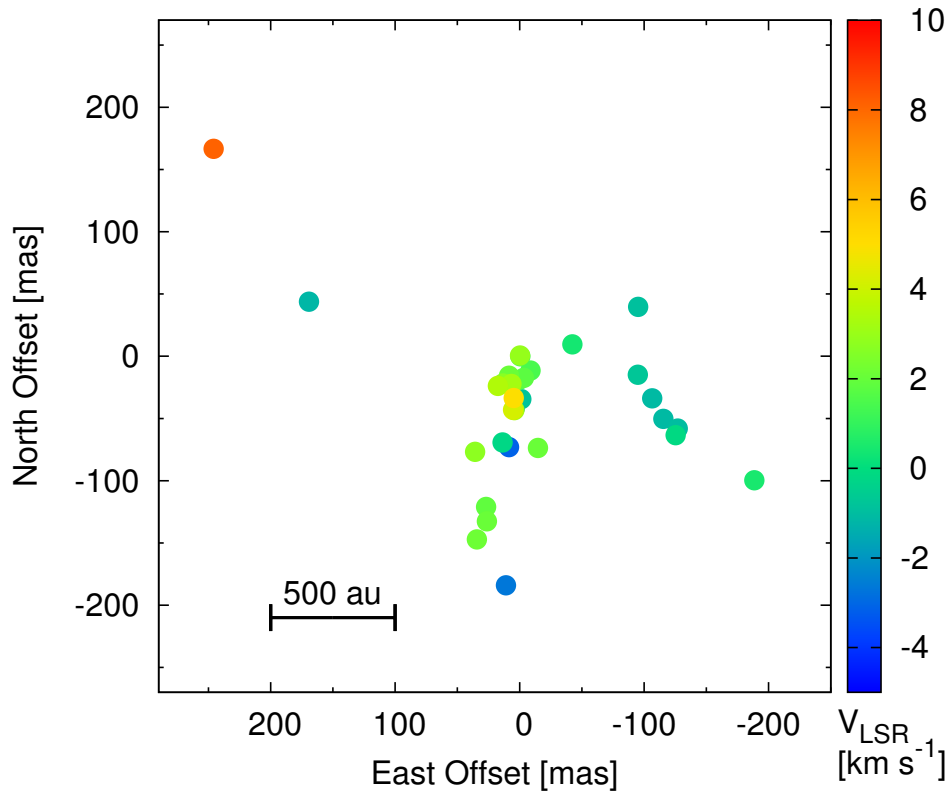


図 19 U16135B のメーザー放射源の分布。

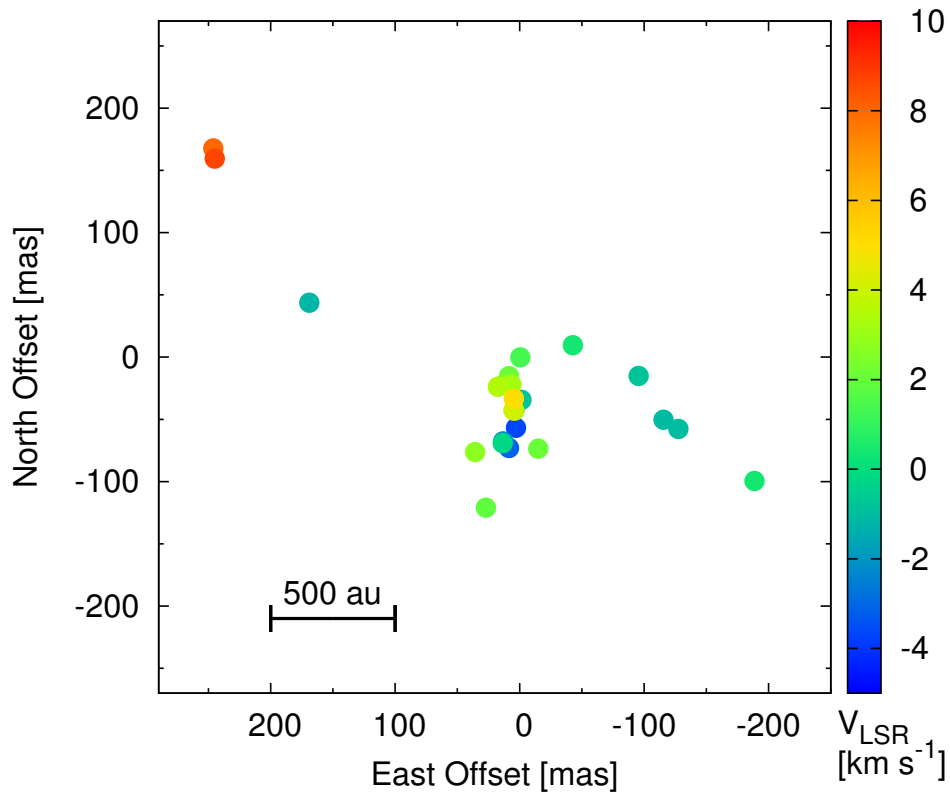


図 20 U16162B のメーザー放射源の分布。

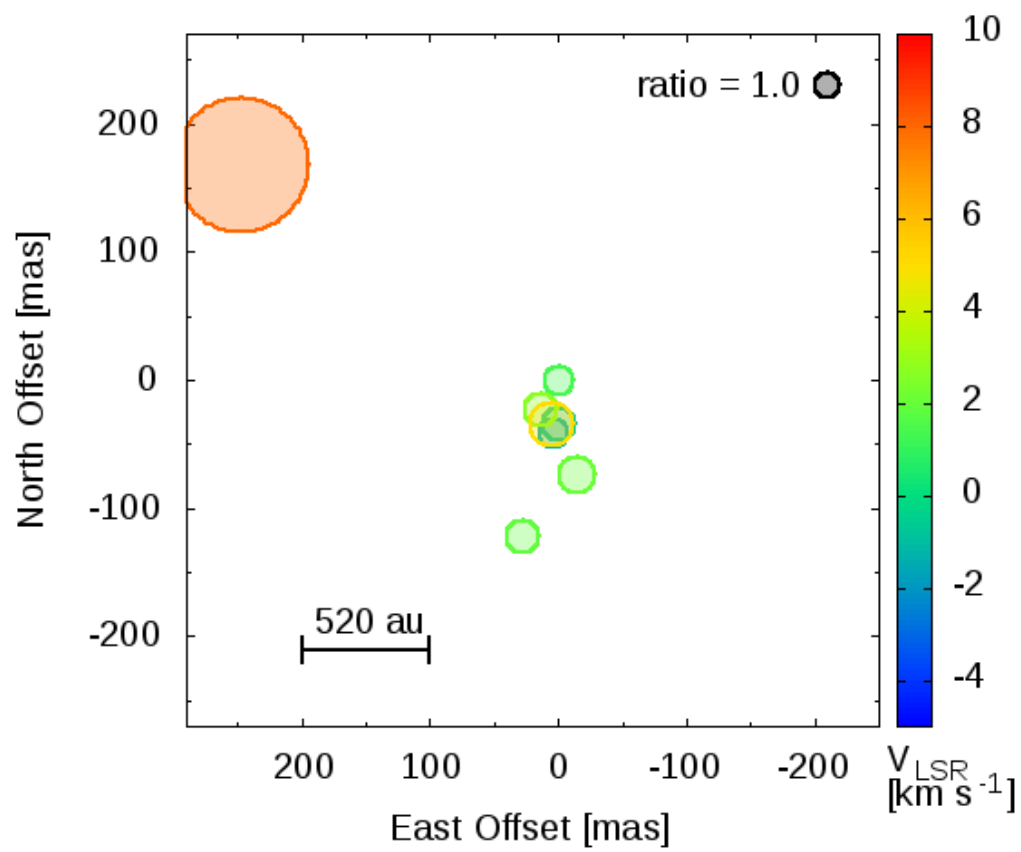


図 21 変動が確認できた成分の位置と強度比（第 2 エポック強度/第 1 エポック強度）。強度比で円の直径をプロットしている。図の右上に比が 1 の場合の円を描いた。

0/

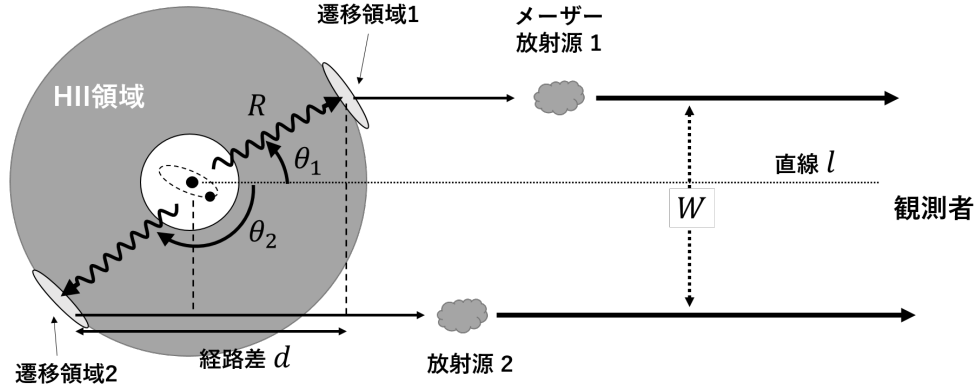


図 22 HII 領域境界における遷移領域の空間的広がりと経路差。

5 考察

5.1 HII 領域の空間スケール

Garay et al. (1993) の観測における約 1 秒角のビームでも構造を分解できないことから、本天体の HII 領域 E の直径は 5200 au 以下であると考えられる。メタノールメーザーの周期強度変動の要因が CWB モデルであると仮定し、メーザーの強度変動は種光子である制動放射強度の増減に起因しているものとする（図 22 参照）。恒星風の衝突で生じた衝撃波で加熱されたダストからの放射（本論文では“追加放射”と呼ぶ）が到達すると、遷移領域における電離度が上昇する。これにより制動放射強度が僅かに上昇し、6.7 GHz などの放射がメーザーにより指数関数的に増光する。ここではメーザーの強度変動の位相差や VLBI 観測結果を用いて HII 領域の空間スケールを見積もり、過去に報告された空間的な広がりとは矛盾しないことを検証する。

まず、遷移領域は HII 領域の境界面なので連続的に広がっているが、簡単のためにメーザーの周期強度変動要因となる種光子を放射する遷移領域を独立した領域として考える。そのようにして局所的に遷移領域を見たとき、各遷移領域は等方的に連続波を放射しているとする。また、メーザーの指向性を考慮すると、メーザー放射領域と遷移領域は同一視線上に存在していると考えられる。

各遷移領域に同時に追加放射が到達した場合、制動放射の強度がそれぞれの領域で同時に増加する。増加した種光子がメーザー領域に達すると、それぞれの遷移領域と同じ視線上のメーザー領域からの放射が強度変動を起こす。このとき、遷移領域が視線方向に間隔をもって分布していると、経路差を起因とした位相差が生じる。観測者と中心星を結ぶ線分 l の長さ L （天体までの距離）、中心星と遷移領域 1, 2 を結ぶ線分が l と成す角をそれぞれ θ_1, θ_2 （球対称なので、 $0 \leq \theta_1 \leq \pi, -\pi \leq \theta_2 \leq 0$ ）、中心星と各遷移領域の距離 R とする。中心星から遷移領域 1、メーザー領域 1 を経由する観測者までの経路長 d_1 、遷移領域 2 とメーザー領域 2 を経由する経路長 d_2

はそれぞれ,

$$d_1 = L - R \cos \theta_1 \quad (5.1)$$

$$d_2 = L - R \cos \theta_2 \quad (5.2)$$

となる。経路差 d は

$$d = |d_1 - d_2| \quad (5.3)$$

$$= R |\cos \theta_1 - \cos \theta_2| \quad (5.4)$$

と表せる。ただし、メーザー放射源と H_{II} 領域が視線上で重なっている必要があるので、VLBI 観測で得た放射源の分布スケール ($W = 1812 \text{ au}$) を用いて、 $R(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \geq W$ を満たすものとする。 H_{II} 領域の空間スケールは先行研究と併せて、 $1812 \text{ au} \leq 2R \leq 5200 \text{ au}$ となる。

遷移領域の視線方向の分布が $\theta_1 = 0, \theta_2 = -\pi$, または $\theta_1 = \pi, \theta_2 = 0$ のときに経路差が最大の $2R$ となる^{*22}。つまり、強度変動の位相差が H_{II} 領域の直径の最大値を制限する。単一鏡の観測結果から得られた位相差は最大 26.4 日であった。1 光日 172.8 au なので、位相差から経路差を見積もると 4562 au である。上述の $1812 \text{ au} \leq 2R \leq 5200 \text{ au}$ の範囲内に収まっているので、空間スケールに矛盾は生じていない。

しかし、実際には経路差以外で変動に時刻差が生じる可能性が大きい。(1) H_{II} 領域が球状ではなく、遷移領域が同心球殻上に存在しない場合や、(2) 衝撃波加熱での追加放射の発生時刻が異なり、遷移領域の変動に時刻差が生じる場合、(3) 各経路上の物質の密度差により光路差が生じる場合などの要因が考えられる。(1) を解決するためには H_{II} 領域を空間分解できる観測が必要となり、(2) を解決するためには H_{II} 領域を空間分解した状態で、各遷移領域からの制動放射(サブミリ波帯)の強度変動を捉える高感度観測が必要となる。(3) は存在する物質と密度を正確に把握できる観測必要がある。いずれの場合も現在の装置での観測は難しく、定量的に時刻差を見積もるのは困難である。

5.2 メーザー放射源の空間スケール

6.7 GHz メーザーは放射による励起のため、ある領域の状態数の分布は励起源となる周囲のダスト温度に依存する。準位 5₁ と準位 6₀ の状態数が反転分布となるのに最適なダスト温度は 125~300 K とされる (Cragg et al. 2005)。この温度領域をもとに、中心星から適温ダストまでの距離を見積もる。

輝度 $B_\nu(T_*)$ の半径 R_* の中心星から距離 R に位置する、半径 a で温度 T_d の黒体と見なせるダスト粒子を考える。ダストから中心星を見込む立体角は $\pi \left(\frac{R_*}{R}\right)^2$ なので、ダストが受け取るエネルギー E_{abs} は、

$$E_{\text{abs}} = \pi a^2 \int B_\nu(T_*) \pi \left(\frac{R_*}{R}\right)^2 d\nu \quad (5.5)$$

^{*22} この条件では放射源が 1 つになってしまうだけでなく、種光子が中心星を通過することになってしまうので、厳密には両方の遷移領域が視線上に重なってはいけない

中心星の光度 L_* は $\int \pi B_\nu(T_*) 4\pi R_*^2 d\nu$ で表わせるので, $E_{\text{abs}} = L_* (\frac{aR_*}{4R})^2$ となる。一方で, 温度 T_d のダストが放射するエネルギー E_{emi} は,

$$E_{\text{emi}} = 4\pi a^2 \int \pi B_\nu(T_d) d\nu \quad (5.6)$$

である。フラックスは Stefan-Boltzmann 定数 σ_{SB} を用いて,

$$\begin{aligned} F &= \int F_\nu d\nu \\ &= \pi \int B_\nu(T) d\nu \\ &= \pi B(T) \\ &= \sigma_{\text{SB}} T^4 \end{aligned} \quad (5.7)$$

と表せるので, $E_{\text{emi}} = 4\pi a^2 \sigma_{\text{SB}} T_d^4$ となる。

ダストが熱平衡にあるとき, $E_{\text{abs}} = E_{\text{emi}}$ が成り立つ。

$$\frac{L_* R_*^2}{4R^2} = 4\pi r^2 \sigma_{\text{SB}} T_d^4 \quad (5.8)$$

$$\Rightarrow R = \sqrt{\frac{L}{16\pi \sigma_{\text{SB}} T_d^4}} \quad (5.9)$$

B1 型星の典型的な質量の上限と下限を用いて, メーザー放射に適したダスト温度となる中心星からの距離 R を見積もると, $10M_\odot$ ($1.9 \times 10^3 L_\odot$ ^{*23}) の場合 $38 \sim 220$ au, $18M_\odot$ ($5.2 \times 10^4 L_\odot$) の場合 $200 \sim 1200$ au がメーザー放射に適した領域であると言える (質量光度関係については Salaris & Cassisi "Evolution of Stars and Stellar Populations" (2005) を参考にした)。B0 型ともいえる $18M_\odot$ でさえ, 単一鏡観測結果の位相差から見積もる空間スケール (4562 au) を説明できない。さらに, ダストの適温領域が H_{II} 領域空間スケール (5200 au) の内側となっている。 H_{II} 領域の温度は $\sim 10^4$ K であるので, その中に 100 K 程度のダストが存在しているとは考えにくい。

そこで, 吸収効率 $Q_{\text{abs}} (\leq 1)$ を考慮したダストで, メタノールの励起に適切な温度領域の概算を行う。ダストが受け取るエネルギー (式 5.5) は次のように書き換えられる。

$$E_{\text{abs}} = \pi a^2 Q_{\text{abs}} \int B_\nu(T_*) \pi \left(\frac{R_*}{R} \right)^2 d\nu \quad (5.10)$$

吸収率と等価である放射率 (ここでは赤外線放射を仮定) Q_{IR} を用いて, ダストが放射するエネルギー (式 5.6) を書き換えると,

$$E_{\text{emi}} = 4\pi a^2 Q_{\text{IR}} \int \pi B_\nu(T_d) d\nu \quad (5.11)$$

*23 太陽光度 ; $1L_\odot = 4 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$

となる。熱平衡が成り立つとき,

$$Q_{\text{abs}} \frac{L_*}{4R^2} a^2 = 4\pi a^2 Q_{\text{IR}} \sigma_{\text{SB}} T_d^4$$

$$\Rightarrow R = \sqrt{\frac{Q_{\text{abs}}}{Q_{\text{IR}}}} \sqrt{\frac{L_*}{16\pi\sigma_{\text{SB}} T_d^4}} \quad (5.12)$$

である。

吸収率（および放射率）は波長依存性があり、大まかには

$$Q_{\text{abs}} = \begin{cases} 1 & (2\pi a \geq \lambda) \\ (2\pi a/\lambda)^\beta & (2\pi a \leq \lambda) \end{cases} \quad (5.13)$$

で表される（「惑星形成の物理」 井田茂，中本泰史）。Wien の変位則より放射ピーク波長は $\lambda = 2900/T \text{ } \mu\text{m K}^{-1}$ と表される。 $10M_\odot$, $T_* = 22000 \text{ K}$ のとき，放射ピークは $\lambda_*(10M_\odot) = 132 \text{ nm}$ となる。 $18M_\odot$, $T_* = 31000 \text{ K}$ のとき， $\lambda_*(18M_\odot) = 94 \text{ nm}$ となる。つまり，大質量星の輻射に曝されるダストのサイズを $a = 1 \text{ } \mu\text{m}$ と仮定したとき， $2\pi a \geq \lambda$ が常に成立するので $Q_{\text{abs}} = 1$ となる。一方， 125 K のダストからの放射を考えると，Wien の変位則より $\lambda_d = 23.2 \text{ } \mu\text{m}$ である。 $2\pi a \leq \lambda$ なので $Q_{\text{IR}} = (2\pi a/\lambda_{\text{IR}})^\beta$ となる。 β はダストなどが存在する星間空間では 1.7 とする。

中心星が $10M_\odot$, $18M_\odot$ のときのメタノール励起適温ダストの領域はそれぞれ，

$$R(10M_\odot) = \sqrt{\frac{1}{(2\pi/2.32)^{1.7}}} \sqrt{\frac{1.9 \times 10^3 \times 4 \times 10^{26}}{5.67 \times 10^{-8} \times 125^4}}$$

$$= 669 \text{ [au]}$$

$$R(18M_\odot) = \sqrt{\frac{1}{(2\pi/2.32)^{1.7}}} \sqrt{\frac{5.2 \times 10^4 \times 4 \times 10^{26}}{5.67 \times 10^{-8} \times 125^4}}$$

$$= 3498 \text{ [au]}$$

となる。

メタノールを励起する適温ダスト領域の最大値は，約 3500 au である。 H_{II} 領域の最大半径は 2600 au なので，ダストは H_{II} 領域の周りに薄く分布していることになるが，高温領域 ($T \sim 10^4 \text{ K}$) に低温 ($T \sim 100 \text{ K}$) のダストが存在している矛盾は解決した。

5.2.1 結論

6.7 GHz メタノールメーザーの周期強度変動成分がもつ視線に垂直な分布の広がり，本研究の VLBI 観測によって従来の 500 au から 1800 au に拡大した。しかし，メーザー強度の周期変動を引き起こす種光子を放射する H_{II} 領域の広がりを越えることはなかった。さらに，位相差も従来の 8 日から 26 日に拡大した。位相差は経路差のみに起因すると仮定したときに見積もられる H_{II} 領域の視線方向への広がり（ $\sim 4600 \text{ au}$ ），視直径から求まる広がり（ $\sim 5200 \text{ au}$ ）以内であった。一方で，黒体でないダストがメタノールの励起に適切な温度となる領域を見積もると，中心星から

半径 3500 au であり, H_{II} 領域の周囲にメタノールメーザー放射源が分布することが分かる。以上のことから, 本研究での観測によって, G9.62+0.20 の周期変動要因としては CWB モデルが適切である可能性が見出された。

謝辞

本論文の執筆にあたっては多くの方々にご協力を頂きました。この場を借りて感謝の言葉を述べさせて頂きたいと思います。百瀬宗武様，米倉覚則様，塚越崇様には普段の研究生生活はもとより，研究発表の度に天文学の基礎から研究テーマに踏み込んだ議論まで，幅広くご教授していただきました。VLBI の複雑な解析に四苦八苦している時，杉山孝一郎様，澤田-佐藤聡子様から手厚いご指導をしていただきました。心より御礼申し上げます。また，素朴な質問，些細な疑問などに親身になって答えてくださった齋藤悠様，Soon Kang Lou 様，田辺義浩様，研究テーマの議論や考察に積極的に関わってくださった同期，後輩の皆さまにはこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- Abt H.A., 1979, AJ, 84,1591
- Abt H.A., 1983, ARA&A,21,343
- Bonnell I.A., Bate M.R., 2002, MNRAS, 336, 656
- Clarke C.J., Bonnell I.A., Hillenbrand L.A., 2000, in Mannings V., Boss A., Russell S.S., eds, Protostars and Planets IV. The Formation of Stellar Clusters. University of Arizona Press, Tuscon, p.151
- Cragg D.M., Sobolev A.M. and Godfrey P.D., 2005, MNRAS, 360, 533
- De Buizer J.M., Radomski J. T., Telesco C.M. and Piña R.K., 2003, ApJ, 598, 1127
- Fujisawa K., Sugiyama K., Motogi K., Hachisuka K., Ynekura Y., Sawada-Satho S. et al., 2014, Garay G., Roderiguez L.F., Moran J.M. and Churchwell E., 1993, ApJ, 418, 368
- Goedhart S., Gaylard M.J. and van der Walt D.J., 2004, MNRAS 355,553
- Goedhart S., Minier V., Gaylard M.J. and van der Walt D.J., 2005, MNRAS, 356, 839
- Goedhart S., Maswanganye J.P., Gaylard M.J. and van der Wald D.J., 2014, MNRAS 437,1808
- Herbig G.H., 1951, ApJ, 113, 697
- Haro G., 1952, ApJ, 115, 572
- Hofner P., Kurtz S., Churchwell E., Walmsley C.M. and Cesaroni R., 1996, ApJ, 460, 359
- Hofner P., Wiesemeyer H. and Henning T., 2001, ApJ, 549,425
- Inayoshi K., Sugiyama K., Hosokawa T., Motogi K. and Tanaka K.E.I, 2013, ApJL, 769, 20
- Kurtz S. and Franco J., 2002, RMAA, 12, 16
- Lomb N.R., 1975,A&SS, 39, 447
- Menten K.M., 1991, ApJ, 380, 75
- Minier V., Booth R.S. and Conway J.E., 2002, A&A, 383,614
- Persi P.2, Tapia M., Roth M., Marenzi A.R., Testi L. and Vanzi L., 2003 A&A, 397, 227
- Phillips C.J., Norris R.P., Ellingsen S.P. and McCulloch P.M., 1998, MNRAS, 300, 1131
- Reipurth B., 2000, AJ, 120, 3177
- Sanna A., Reid M.J., Moscadelli L., Dame T.M., Menten K.M., Brunthaler A., Zheng X.W., Xu Y. et al., 2009, ApJ, 706, 464
- Sanna A., Menten K.M., Carrasco-González C., Reid M.J., Ellingsen S.P., Brunthaler A., Moscadelli L., Cesaroni R., Krishnan V. et al, 2015, ApJL, 804, 2
- Scargle J.D. 1982,ApJ, 263, 835
- Stevens I.R., Blondin J.M. and Pollock A.M.T., 1992, ApJ, 386, 265
- Testi L., Hofner P., Kurtz S. and Rupen M., 2000, A&A, 359, 5
- van der Walt D.J., Goedhart S. and Gaylard M.J., 2009, MNRAS, 398, 961
- van der Walt D.J., 2011, AJ, 141, 152

Rybicki G.B. and Lightman A.P., 1979, WILEY-VCH, Radiative Processes in Astrophysics

Salaris M. and Cassisi S., 2005, WILEY-VCH, Evolution of Stars and Stellar Populations

Stahler S.W. and Palla F., 2004, WILEY-VCH, The Formation of Stars

干渉計サマースクール 2005

井田茂, 中本泰史, 星形成の物理

福井康夫, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井正, 舞原俊憲, 水野亮, 日本評論社, シリーズ現代の天文学第

6 巻 星間物質と星形成

安井靖堯, 2016, 茨城大学理工学研究科修士論文

付録 A メーザーの原理

誘導放射による電波の増幅現象をメーザー (maser ; microwave amplification by stimulated emission of radiation) と呼ぶ。

メーザーを理解するために、まずは物質の遷移による放射・吸収の特徴を見ていく。強度 I_ν の電磁波が物質の中を距離 ds だけ伝搬するときの強度変化 dI_ν は、物質がもつ吸収係数 α_ν 、放射係数 j_ν を用いて、

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu \quad (\text{A.1})$$

と書ける。これが輻射輸送の方程式である。

低い準位 1 と高い準位 2 をもつ物質を考える。周囲からの影響を全く受けずに準位 2 から 1 へ輻射によってエネルギーを放出して遷移する現象を自発放射、入射した電磁波のエネルギーを得て準位 1 から 2 へ遷移する現象を吸収と呼ぶ。さらに、物質付近を通過する電磁波を吸収せずに、その光子と同じ波長と位相の電磁波を放出する現象を誘導放射と呼ぶ。このうち吸収と誘導放射はどちらも入射する電磁波の強度に依存するため、両者を合わせて一つの吸収係数 α_ν で表すことにする。準位 1, 2 の粒子数をそれぞれ n_1, n_2 とし、その統計的重率を g_1, g_2 とすると、吸収係数は

$$\alpha_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \varphi(\nu) n_1 B_{12} \left(1 - \frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} \right) \quad (\text{A.2})$$

となる。ここで B_{12} は吸収における Einstein 係数である。

準位 1 と 2 の粒子数 n_1, n_2 の比はボルツマン分布に従う。

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp \left(-\frac{h\nu}{kT} \right) \quad (\text{A.3})$$

大気のように密度の高いガスの熱平衡状態では、エネルギーの低い準位の粒子数が多く、この比が必ず 1 より小さくなる。吸収係数は正、すなわち吸収が起こる。これに対して、星間空間のようにガスの密度が低い領域ではエネルギーの高い状態の粒子がより多い反転分布となりやすい。そこでは比が 1 より大きくなるため、吸収係数が負となる。このとき、輻射輸送方程式の誘導放射が加わり、結果として通過する電波が連鎖的に増幅される。このしくみがメーザーである。

付録 B 解析に用いた関数の詳細

B.1 変動指数

Goedhart et al. (2004) で変動を定義する際に用いている変動指数は、観測日 t_i 、観測日数 N 、放射チャネルの強度 $m(t_i)$ 、ノイズチャネルの強度 $n(t_i)$ 、放射とノイズの平均強度をそれぞれ $\bar{m}$ 、 $\bar{n}$ として、

$$VI = \frac{1}{\bar{m}} \left\{ \sum_{i=1}^N (m(t_i) - \bar{m})^2 - \sum_{i=1}^N (n(t_i) - \bar{n})^2 \right\} \quad (\text{B.1})$$

と記述される。ここで、放射のない一つのチャンネルを時間平均したとき、そのノイズの標準偏差 σ_{noise} は $\sqrt{\sum_{i=1}^N (n(t_i) - \bar{n})^2 / (N - 1)}$ となる。

本論文の解析では、変動指数計算とは別にノイズレベル σ_{rms} を算出している。ノイズレベルの算出方法は、各観測日において放射のない複数チャンネル（チャンネル数 C とする）強度の標準偏差を導出している。そのため、 σ_{rms} は $\sqrt{\sum_{j=1}^C (n(j) - \bar{n}_c) / (C - 1)}$ となる。

σ_{noise} と σ_{rms} どちらも、ノイズの強度分布は正規分布に従うと仮定すると、 $\sigma_{\text{noise}} = \sigma_{\text{rms}}$ と考えられる。すなわち、式 B.1 は σ_{rms} を用いて、

$$VI = \frac{1}{\bar{m}} \left\{ \sum_{i=1}^N (m(t_i) - \bar{m})^2 - (N - 1) \times \sigma_{\text{rms}}^2 \right\} \quad (\text{B.2})$$

となる。

この変動指数は規格化された平方和であると解釈できる。観測日数 N が大きくなるにしたがって VI も大きくなってしまう。観測日数によらない指数とするために、 $(N - 1)$ で割って不偏分散とする。本論文での変動定義にはその不偏分散を用いている。

B.2 Lomb-Scargle periodogram

ここでは大まかな原理と、解析時に必要になる値の意味について記載する。詳細は Scargle (1982), Lomb (1975) を参照。日立局観測データ解析用のプログラムに関しては安井靖亮, 茨城大学理工学研究科修士論文 (2016) 参照。

任意の時刻 t_i に得られた N_0 個の離散時系列データ $X(t_i)$, ($i = 1, 2, \dots, N_0$) を用いて、離散フーリエ変換のパワースペクトルに相当するピリオドグラムを記述する。等間隔データが正規分布に従うノイズのみの場合、ピリオドグラム x の確率分布関数 $f(x)$ は

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x}{\sigma_0^2}\right) \quad (\text{B.3})$$

の指数分布となる。不等間隔データのピリオドグラムの確率分布も指数分布となるように補正を加えたピリオドグラムは

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^{N_0} X(t_i) \cos \omega(t_i - \tau) \right]^2}{\sum_{i=1}^{N_0} \cos^2 \omega(t_i - \tau)} + \frac{\left[\sum_{i=1}^{N_0} X(t_i) \sin \omega(t_i - \tau) \right]^2}{\sum_{i=1}^{N_0} \sin^2 \omega(t_i - \tau)} \right\} \quad (\text{B.4})$$

で表される。これを Lomb-Scargle ピリオドグラムと呼ぶ。ただし、 τ は次の条件を満たすものとする。

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} \sin 2\omega t_i}{\sum_{i=1}^{N_0} \cos 2\omega t_i} \quad (\text{B.5})$$

$X(t_i)$ に含まれるノイズ以外の成分が周波数 ω_0 であるとき、ピリオドグラム $P_X(\omega_0)$ が大きな値を取り得る。等間隔データのピリオドグラムによって導出される独立周波数の数 N は $N_0/2$ で与

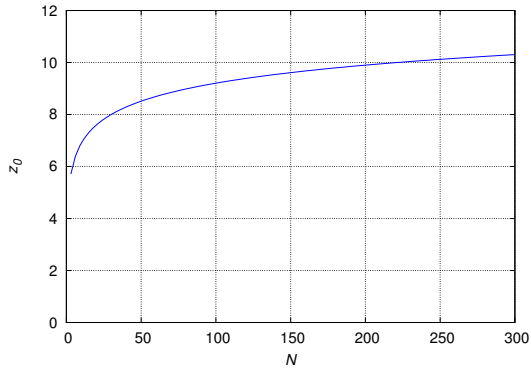


図 23 誤警報確率を 0.01 で固定して式 B.7 をプロットしたもの。

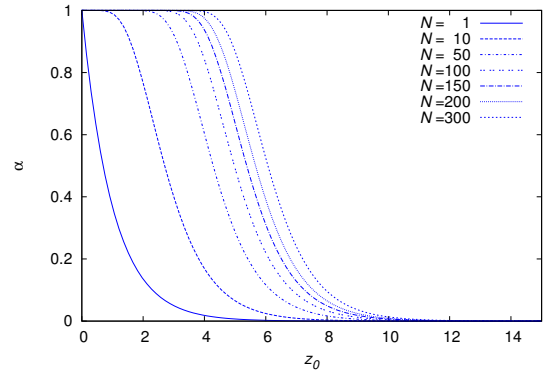


図 24 $N = 1, 10, 50, 100, 150, 200, 300$ それぞれの場合での式 B.6 をプロットしたもの。

えられる。不等間隔データの場合，厳密には N が等間隔データの場合と同じにはならないが， N_0 が十分大きい ($N_0 \geq 20$) 時は $N = N_0/2$ とする。

次に，Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値の優位性について簡単に記述する。ピリオドグラムが z となるときの，ノイズを放射として判断してしまう確率（誤警報確率と呼ばれる） α は

$$\alpha = 1 - [1 - \exp(-z)]^N \quad (\text{B.6})$$

と表される。誤警報確率をある値（例：統計的有意水準）で固定し，そのときの z の値を z_0 とする。ピリオドグラムの値が z_0 を超えていれば周期が有意に検出したとする。つまり， z_0 が周期の検出・非検出の閾値となる。 z_0 について解くと，

$$z_0 = -\ln \left[1 - (1 - \alpha)^{1/N} \right] \quad (\text{B.7})$$

となる。

図 23 は誤警報確率を 0.01 としたときの式 B.7 をプロットしたものである。サンプル数 N の増加に伴って z_0 も増加するが， N が大きいところでは z_0 が変化しづらくなることが分かる。図 24 は特定のサンプル数 N における式 B.6 をプロットしたものである。サンプル数が増えるにつれて，閾値を高く設定しないと誤警報確率が下がらないことが分かる。

付録 C Astronomical Image Processing System (AIPS)

観測の生データである FITS ファイルには変更を加えないというのが AIPS の思想である。そのため，解析の途中で新たなデータの作成やデータのフラグ（除外）を行っているが，それらは全て元データから導いた解や，使わない部分を記述したテーブル（表）を作成しているだけなのである。そのため，誤った操作で目的と異なる解を導出してしまっても，追加されたテーブルを削除すれば立ち戻って解析を継続できるのである。以下に，注意点と実際の解析過程をマニュアルとして記載する。

C.1 注意点

通常、task は全て大文字で入力する。AIPS の入力において、クオテーション「'」で囲むと、全て大文字として認識される。左側のみクオテーションを付けると、入力文字のまま認識される。

task によってはファイルの読み込みや書き出しを行うものがある。受付可能な文字数が決まっているため、深い階層に保存してあるファイルは読み込めない（絶対パスが長くなるから）。

task は go を入力するまで実行されないが、verb (tvall や zap, extdest など) は入力だけで実行される。特に、zap は cat ファイルを削除する verb なので、誤って別の cat ファイルで実行しないよう、Enter キーを押す前に getn (読み込み cat 番号) を再度確認する。

解析過程で作成されるテーブルは番号付きで保存されている。何を目的として作成したテーブルなのか、逐一メモを取ることを忘れてはいけない。

C.2 実行 task と adverb 設定

以下、マニュアルとして実際に使用した task や adverb 設定などを添付する。位相補償を行わない場合はマニュアル通りに task を実行すれば、イメージングが可能となっている。マニュアル上では、adverb の getn が cat 番号だけでは混乱しやすいので、[データ内容. クラス] を記載した。

```
*****
FITS ファイルの取り込み
AIPS user no. ごとに取り込まないといけない。
u16135b の解析は user2
u16162b の解析は user3 とした。
取り込む順番は広帯域，狭帯域の順としている。
→ cat ファイル番号の若い方が広帯域
*****

task 'fitld'
  default
  datain '/[読み込み先ディレクトリ]/FITS/U16162B.A1.C.FITS.1
  outname 'u16162b_C
  outclass 'fitld
  outdisk 1
  dotable 1
  douvcomp -1
  doconcat -1
  clint 1/60
  digicor -1
go

tget fitld
  datain '/[読み込み先ディレクトリ]/FITS/U16162B.A1.C.FITS.1
  outname 'u16162b_M
go

*****
```

```

task DBCONで結合（u16162bなどでは未実施）
したFITSファイルが時系列になっていない時に，
時系列で並べ直す。
*****

task 'msort'
  default
  getn 1 [広帯域.FITS]
  outname 'u16162b_c'
  outclass 'msort'
  sort 'tb'
go

tget msort
  getn 2 [狭帯域.FITS]
  outname 'u16162b_m'
go

*****
NXテーブルを作成する。
MSORTでは元のcatファイルにあるNXテーブルが
結合されないのので，ここでNXテーブルを作る。
*****

task 'indxr'
  default
  getn 3 [広帯域.msort]
  cparm (3) 1/60
go

tget indxr
  getn 4 [狭帯域.msort]
go

*****
NXテーブルの中身を確認する。
テキストファイルで出力する。
*****

task 'listr'
  default
  getn 3 [広帯域.msort]
  optype 'scan'
  inext 'nx'
  docrt -1
  outprint '/[保存先ディレクトリ]/16162c_nx.txt'
go

tget listr
  getn 4 [狭帯域.msort]
  outprint '/[保存先ディレクトリ]/16162m_nx.txt'
go

```

```

*****
ATテーブルの中身を確認する。
テキストファイルで出力する。
*****

task 'prtan'
  default
  getn 3 [広帯域.msort]
  docrt -1
  outprint '/[保存先ディレクトリ]/16162c_ant.txt
go

tget prtan
  getn 4 [狭帯域.msort]
  outprint '/[保存先ディレクトリ]/16162m_ant.txt
go

*****
スペクトルのプロット。
広帯域データでバンドパス特性（振幅）を確認。
狭帯域データで対象天体のスペクトルが存在するか確認する。
*****

task 'possm'
  default
  getn 3 [広帯域.msort]
  sources 'g9.62102''
  aparm (8) 1
  solint 3
  nplots 6
  factor -0.1
  dotv 1
go

tget possm
  getn 4 [狭帯域.msort]
go

*****
ビジビリティ振幅のプロット。
狭帯域データの全てのスキャンで、
ビジビリティの異常値（極端に小さい・大きい）
がないかを確認する。
*****

task 'vplot'
  default
  getn 4 [狭帯域.msort]
  sources 'nrao530z''
  nplots 6
  dotv 1
go

```

```

tget vplot
sources 'g9.62102''
go

tget vplot
sources 'j1755-22''
go

*****
UV coverageのプロット。
ターゲット天体でUV台が描けているか確認する。
*****

task 'uvplt'
default
getn 4 [狭帯域.msort]
sources 'g9.62102''
bcha 512
echa 512
bparm 6 7 2
xinc 11
dotv 1
go

*****
不要になったcatファイルの削除。
スペクトルやビジビリティ、UV台に問題がないと
確認できたら、classがmsortのファイル以外
(classがfitldのファイル)は不要となる。
容量確保のために削除しておく。
*****

getn 1 [広帯域.FITS]
zap

getn 2 [狭帯域.FITS]
zap

recat

*****
解析に使用しないデータテーブル (FGテーブル)
を作成する。フラグ対象は下記。
・広帯域データ
  バンドパスフィルターで受信電圧が落としてあるch。
・狭帯域データ
  異常ビジビリティの時刻 (スキャン)。

本観測の目的が、周期変動する放射源の特定
にある。1エポック目とUV台を揃えないと、真の
強度変動を捉えられない。そのため、今回は
石垣局の観測データを全てフラグする。
*****

```

***** 広帯域，石垣局のフラグ*****

```
task 'uvflg'
  default
  getn 1 [広帯域.msort]
  antennas 4 0
  opcode 'flag'
  bcha 0
  echa 0
  outfgver 1
go
```

***** 狭帯域，石垣局のフラグ*****

```
tget uvflg
  getn 2 [狭帯域.msort]
  antennas 4 0
  bcha 0
  echa 0
go
```

***** 広帯域，バンドパスフラグ*****

(adverb *は目的にあった数値を入力)

```
tget uvflg
  getn 1 [広帯域.msort]
  antennas * 0
  bcha *
  echa *
go
```

フラグ結果 (FGテーブルの中身) の確認。

5列目 6列目 8列目 9列目

アンテナ番号 時刻 チャネル 1111

9列目が1111ならフラグ済みを表す。

```
task 'prtab'
  default
  getn 1 [広帯域.msort]
  inext 'fg'
  invers 1
go
```

アンテナ位置の精度を上げたUV再計算テーブル
を読み込み，位相較正を行う。

UV再計算のデータファイル名の意味

観測名.A1.帯域-再計算日付-対象帯域-SN.TXT

U16162B.A1.C-2016-08-17-APPLY2C-SN.TXT

長いと読み込めないなので短くしたファイル名

u16162_c_c.txt

```

task 'tbin'
  default
  geton 1 [広帯域.msrt]
  intext '/[読み込み先ディレクトリ]/u16162_c_c.txt
go

tget tbin
  geton 2 [狭帯域.msrt]
  intext '/[読み込み先ディレクトリ]/u16162_m_m.txt
go

*****
取り込んだUV再計算テーブル（SNテーブル1）
のプロット。nsecのオーダーであれば○

delayについては観測データをダウンロードした
時に付属しているpsファイルと見比べる。

狭帯域データに関しても同様に確認を行う。
*****

task 'snplt'
  default
  getn 1 [広帯域.msrt]
  inext 'sn'
  invers 1
  nplots 6
  optype 'dela'
  dotv 1
go

tget snplt
  optype 'rate'
go

tget snplt
  optype 'phas'
go

*****
SN1（UV再計算テーブル）をCLテーブルへ格納。
*****

task 'clcal'
  default
  getn 1 [広帯域.msrt]
  opcode 'cali'
  interpol 'self'
  smotype 'vlbi'
  snver 1
  invers 1
  gainver 1
  refant -1

```

```

go

tget 'clcal'
getn 2 [狭帯域.msort]
go

*****
ベースラインの規格化（振幅の較正）。
SN2テーブルが作成される。
狭帯域についても同様に行う。
*****

task 'accor'
default
getn 1 [広帯域.msort]
solint 1/60
go

***** SN2の中身の確認 *****
tget snplt
getn 1 [広帯域.msort]
invers 2
optype 'amp'
go

***** SN2をCL2へ格納 *****
tget clcal
getn 1 [広帯域.msort]
opcpde 'cali'
interpol 'self'
smotype 'ampl'
snver 2
invers 2
gainuse 2
refant -1
go

*****
バンドパス特性起因の振幅較正。
BPテーブルをアプライした後、
広帯域データ：連続波なので平坦になる。
狭帯域データ：埋もれていたスペクトルが現れる。
*****

task 'bpass'
default
getn 1 [広帯域.msort]
calsour 'nrao530z''
docalib 1
gainuse 3
solint 0
soltype 'l1r'
bpassprm(1) 1

```



```

    bpassprm(10) 1
go

***** BP1の中身を確認*****
tget possm
getn 1 [広帯域.msort]
sources ''
aparm(8) 2
solint 0
nplot 6
factor -0.1
dotv 1
go

*****対象天体スペクトル確認*****
( BPテーブルアプライ前)
tget possm
getn 1 [広帯域.msort]
sources 'g9.62102''
docalib 1
gainuse 3
doband -1
timerang 0 14 54 00 0 15 09 00
solint 5
aparm(8) 1
nplots 6
go

*****対象天体スペクトル確認*****
( BPテーブルアプライ後)
task possm
doband 2
bpver 1
go

*****
位相較正に入る前に、クロスパワースペクトルと
位相の変化率（傾き）を確認する。
広帯域データに関して、これまでの較正テーブル
をアプライした状態でプロット。
aparm (2) 1で縦軸固定した方が、位相が
回っているのかそうでないかが分かりやすい。
*****

tget possm
getn 1 [広帯域.msort]
timerange 0
gainuse 3
flagver 1
bpver 1
aparm (2) 1
aparm (5) =-180
aparm (6) 180
aparm (8) 0

```

```

solint 5
nplots 6
dotv 1
go

*****
水沢-山口基線の12:35:30-12:40:30の位相が安定していない
*****
tget possm
getn 1 [広帯域.msort]
timerang 0 12 35 30 0 12 40 30
antennas 1 0
baseline 5 0
aparm (2) 0
dotv -1      ***** PLテーブル作成
go

*****PLテーブル(dotv -1で作成)のPSファイル出力*****
task 'lwpl'
default
getn 1 [広帯域.msort]
plver 1
invers 1
dparm (6) 4      ***** A4出力
dparm (7) 71     ***** フォントの種類
dparm (8) 13     ***** 文字サイズ
outfile '[保存先ディレクトリ]/[出力ファイル名]'
go

*****
広帯域データで6.7 GHzに相当するch(16~17ch)
の位相変化率(傾き)を基準として、大きく異なる
傾きを持つchを基線毎にフラグする。
以下、例として。
今回、水沢局を含む基線の20ch付近の傾きが
一定ではなかったので、追加でフラグする。
*****
tget uvflg
getn 1 [広帯域.msort]
bcha 20
echa 30
antennas 1 0
outfgver 1      ***** FG1に追加書き込み
go

tget uvflg
getn 1 [広帯域.msort]
timerang 0 15 35 00 0 15 40 00
bcha 70
echa 71
antennas 1 0
baseline 5 0
go

```

位相較正を行う前に，受信強度不足の場合は
ch方向へ積分する（連続波に対してのみ可）
較正天体の明るさが十分なため
U16162Bに関しては行っていない。

```
task 'avspc'
  default
  getn 1 [広帯域.msort]
  doband 2
  bpver 1
  doacor 1
  outname 'avg64ch'
  outclass 'avspc'
  avoption 'subs'
  channel 16
```

go

これによりFG，BPがアプライされた新しいcatファイルが作成される。
今回はこのタスクを実行していないので，以降のFRINGなどでは
アプライするためにFLAGVERとBPVERを指定しなければならない。

NRA0530をソースとして位相較正を行う。
バックエンド（原始時計の誤差など）での遅延
から生じる位相差の補正。
10 nsec程度の補正が見込まれる。
第一参照アンテナは小笠原局(3)。
第二参照アンテナは山口局(5)。

***** 広帯域データに関して*****

```
task 'fring'
  default
  getn 1 [広帯域.msort]
  calsour 'nrao530z''
  bcha 2
  echa 511
  docalib 1
  gainuse 3
  flagver 1 *** FGテーブルのアプライ
  bpver 1 *** BPテーブルのアプライ
  refant 3
  search 5 0
  solint 10
  aparm (6) 3
  aparm (7) 10
  aparm (9) 1
  dparm 0 200 200 0
  dparm (8) 1
```

```

go

***** SN3の中身を確認 *****
delay:10 nsec 程度の範囲で線形に変化しているなら○
phase:波形になっている？ 特に判断材料にならない
rate :今回は reteを導出していないので、全て0なら○

tget snplt
getn 1 [広帯域.msort]
invers 3
optype 'dela'
go

***** SN3をCL3へ格納し、CL4を作成する *****
tget clcal
getn 1 [広帯域.msort]
opcode 'cali'
interpol 'ambg'
smotype 'vlbi'
snver 3
invers 3
gainver 3
refant 3
go

***** CL4でclosspowerをプロット *****
位相の回転が少なくなっていれば○
CL3では3回転していたものが0回転になる、など。

tget possm
getn 1 [広帯域.msort]
sources 'nrao530z''
flagver 1
bpver 1
aparm (2) 0
aparm (8) 0
solint 5
nplots 6
go

*****
大気による遅延補正。
ターゲット近傍の較正天体(J1755-22)を用いる。
SN5テーブル(較正解)のdelayがpico secの
程度まで小さければ補正できていると言える。
*****

tget fring
getn 1 [広帯域.msort]
calsour 'j1755-22''
bcha 2
echa 511
docalib 1

```

```

gainuse 4
refant 3
search 5 0
solint 3
aparm (6) 3
aparm (7) 5
aparm (9) 1
dparm 0 100 100 0
dparm (8) 1
go

***** CL4テーブルへ格納（クロスパワーを見るため）*****
tget clcal
getn 1 [広帯域.msort]
opcode 'cali'
interpol 'ambg'
smotype 'vlbi'
snvver 4
invers 4
gainver 4
refant 3
go

*****
空間的広がりによる遅延の補正。（rate解の導出）
*****
tget fring
getn 1 [広帯域.msort]
calsour 'nrao530z''
bcha 2
echa 511
docalib 1
gainuse 3
refant 3
search 5 0
solint 1
aparm (6) 3
aparm (7) 10
aparm (9) 0
dparm 0 200 200 0
go

*****
広帯域FRINGによるSNテーブルを狭帯域へ変換&コピー。
連続波と近傍天体のrateなし、連続波のrateありの3つのSNテーブルを移す。

途中、SNテーブルの周波数変換を行う。（freqconv2.plを使用）
AIPSのバージョンによってSNテーブルのテンプレが異なるので、
emacsを用いてfreqconv2.plに対応したテーブル形式に手作業で
書き換える（応急措置）。その後、狭帯域に取り込む前にAIPSバージョンに
合わせた形式に書き直す。

TBOUT > u16162c_sn4.txt

```

```

コピー > u16162c_sn4edi.txt (編集用)
変換後 > u16162m_sn4edi.txt
TBIN用 > u16162m_sn4.txt
(u16162c_sn4.txtのREAL,IMAGの列に
u16162m_sn4edi.txtのものをコピー)

```

[edi]を付けたファイルを現在のバージョンのAIPSでは読み込めないファイルと位置づける。
[edi]のないファイルはAIPSで読める形であるものとする。

freqconv2.plの使い方 (readme.txt)

```
*****
```

```

* -freqconv2.pl
* -parameter01.txt
* presented by K.Yamashita
* 2010/02/24
*****

```

- 1.元となるSNテーブルをAIPSで作成。
- 2.SNテーブルをTBOUT@DOCRT=80で吐き出す。
- 3.parameter01.txtに、LISTRで表示されるIFの周波数情報をそのままコピー。

※コピーの後、FQID部分の1を削除しないと正しく変換されない。

【NXテーブルの中身】

FQID	IF#	Freq(GHz)	BW(kHz)	Ch.Sep(kHz)	Sideband	Bandcode
1	1	6.66790820	2000.0001	1.9531	1	←この行をコピー

【parameterファイルの中身】

Output_Freq_Start

1	6.66790820	2000.0001	1.9531	1	←この列数に合わせる
---	------------	-----------	--------	---	------------

- 4.自分で決めた変換後の周波数情報も、ならってparamter01.txtに書き込む。
- 5.手順2で吐き出したファイルの名前を入力ファイル名としてparameter01.txtに書き込む。
- 6.出力ファイル名もparameter01.txtに書き込む。
- 7.\$perl freqconv2.pl [パラメータファイル]
- 8.出力する先頭周波数に合わせた解に変換されたSNテーブルができる。

```
*****
```

***** SNテーブルのテキスト出力 (今回は3,4,5) *****

```

task 'tbout'
default
getn 1 [広帯域.msort]
inext 'sn'
snver 3
invers 3
outtext '/[保存先ディレクトリ]/u16162c_sn3.txt
docrt 80
go

```

snvet, invers, 保存ファイル名を変えてSN4とSN5でも実行する。

***** emacsを用いてテーブルの書き換え (AIPS外で作業) *****

10,11列が不要であるため一旦削除

```
>emacs /[保存元ディレクトリ]/u16162c_sn4edi.txt
```

emacsでの矩形選択と編集

[ctrl + @] 始点の決定

[ctrl + x,r,k] 選択範囲の削除（キルリングに蓄積）

[ctrl + x,r,y] キルリングの最新内容を貼り付け（矩形）

freqcomv2.plで変換

```
>perl freqcomv2.pl parameter01_u16162c_sn4.txt
```

*****emacsで10,11列を再度挿入（元のテーブル形式に戻す）*****

```
>emacs /[保存元ディレクトリ]/u16162m_sn4.txt
```

```
>emacs /[保存元ディレクトリ]/u16162m_sn4edi.txt
```

別のウィンドウでそれぞれ起動して，ediファイルのDARAYとRATEを含む一帯を選択。

コマンドではなく，エディタ上部のコピーボタンでコピー。

（※ コマンドでのコピーはウィンドウ間のコピーには使えないため。）

別ウィンドウでファイルの最後尾にカーソルを持って行き，ペーストボタンでペースト。

あとはemacsコマンドでDERAYとRATEを書き換えて終了。

***** SNテーブルの取り込み（今回は3,4,5）*****

```
task 'tbin'
```

```
default
```

```
getn 2 [狭帯域.msort]
```

```
intext '/[保存元ディレクトリ]/u16162m_sn4.txt
```

```
go
```

SNテーブルをCLテーブルへ格納（狭帯域）

```
tget clcal
```

```
getn 2
```

```
snver 3
```

```
invers 3
```

```
gainver 3
```

```
refant 3
```

```
go
```

```
snver 4
```

```
invers 4
```

```
gainver 4
```

```
go
```

*****バンドパス位相較正のためだけに用いるSN5はCL3へ格納*****

```
snver 5
```

```
invers 5
```

```
gainver 3
```

```
go
```

バンドパス位相特性の較正

```
tget bpass
getn 2 [狭帯域.msort]
calsour 'NRA0530Z''
docalib 1
gainuse 6
doband 2
bpver 1
solint -1
soltype 'l1r'
refant 3
smooth 3 16 8
bpassprm 0
bpassprm (4) 1
go
```

***** BP2のプロット（位相が $\pm 5^\circ$ 程度に収まっているらば○） *****

```
tget possm
getn 2 [狭帯域.msort]
sources ''
doband 1
bpver 2
timerang 0
solint 0
aparm (2) 0
aparm (8) 2
go
```

BP1（振幅較正解）のアプライ
後の過程で観測アレイをVLBAに変更しなければ
ならず，そこでBPテーブルがアプライされなくなって
しまう。元データをいじらないAIPSの理念に反するが
BP1テーブルをアプライした新たなcatファイル
[狭帯域BP.splat]を作成する。

```
task 'splat'
default
getn 2 [狭帯域.msort]
doband 2
bpver 1 [バンドパス振幅較正]
outname 'u16162m'
outclass 'splat'
aparm (5) 1
go
```

SPLATによってアプライされたBP以外のBPテーブルは
引き継がれないので，[狭帯域.msort]からコピー
してくる必要がある。
（docalibでCLテーブルをアプライした場合は，
その他のCLテーブルが消える。）

```

task 'tacop'
  default
  getn 2 [狭帯域.msort]
  geton 3 [狭帯域BP.splat]
  inext 'bp'
  invers 2 [バンドパス位相較正]
  ncount 1
go

*****
ドップラー較正。
使用アレイ名をVLBAに変更しないと、地球回転
パラメータが正常に働かず、1 km/sほどの絶対値
誤差を生んでしまう。
それを避けるために、アレイ名変更→基準チャネル
と速度の対応付け→ドップラー較正の手順を踏む。
アレイ名を元に戻すのはピークを用いたフリンジ
フィッティング前で大丈夫。
*****

*****アレイ名の確認（ARRNAMの行）*****
tget prtab
  getn 3 [狭帯域BP.splat]
  inext 'an'
  invers 1
go

*****アレイ名の変更*****
task 'tabed'
  default
  getn 3 [狭帯域BP.splat]
  inext 'an'
  invers 1
  aparm (4) 3
  optype 'key'
  keyword 'arrnam'
  keystrng 'vlba'
go

*****アレイ名の確認*****
tget prtab
go

*****チャネルと速度の対応*****
POSSMで単一鏡スペクトルのピークchを見つける。

tget possm
  getn 3 [狭帯域BP.splat]
  sources 'g9.62102''
  docalib -1
  doband -1
  timerang 0 14 54 00 0 15 09 00
  solint 15

```

```

bcha 500
echa 530
aparm(8) 1
nplot 5
factor 1
dotv 1
go

```

***** ドップラー較正に必要なパラメータの入力*****
 sysvelは文献値もしくは単一鏡モニター結果などを用いる。
 restfreqはAIPSで一度に読み込む桁が限られているため、
 MHz以上と未満を分けて書く。

```

task 'setjy'
default
getn 3 [狭帯域BP.splat]
sources 'g9.62102''
sysvel 1.28
aparm (1) 512
restfreq 6668000000 519000
veltype 'lsr'
veldef 'radio'
go

```

***** 第0近似でのドップラー較正*****

```

task 'cvel'
default
getn 3 [狭帯域BP.splat]
sources 'g9.62102''
outname 'G9.62+02'
outclass 'cvel'
freqid 1
aparm (9) 2
go

```

メッセージサーバへの出力で、
 Ant: 1 IF#: 1 Average shift = -0.85174
 Ant: 2 IF#
 Ant: 3
 .
 .

となっている。この数値がchのシフト量である。
 最大値と最小値を用いて平均を求め、1chあたりの速度幅0.088をかける。
 今回、平均値が-0.879595であったため、速度に換算して-0.0774km/s。
 $1.28 - (-0.0774) = 1.3573 \text{ km/s}$

***** 前のCVELで作成されたcatファイルは不要なので削除する *****
 getn 4 [狭帯域1回目ドップラー.cvel]

***** ドップラー較正に必要なパラメータの修正後、CVEL実行*****
 tget setjy

```

getn 3 [狭帯域BP.splat]
sysvel 1.357
go

tget cvel
go

*****
  実行結果，最小シフト-0.78488，最大シフト0.77957
  平均シフト量は-0.00531 km/sであるので完了とする。
*****

*****
振幅ゲイン較正（テンプレートメソッド）の準備。
*****
*****テンプレート局を決める*****
  中間のスキャン（ターゲットの南中付近）の時刻のTsysを調べる。
  運用終了報告時に送信されるメールの添付ファイル
  [観測コード].tsys内で，上記時刻のTsysをメモ。
  U16162B スキャン26/53 時刻 14:54:00-15:09:00 Tsys 35.55 K
  U16162B.DRGファイルより，同時刻のELは32°

*****放射chの把握*****
tget possm
getn 4 [天体名.cvel]
sources 'g9.62102''
timerang 0 14 54 00 0 15 09 00
bcha 420
echa 600
aparm (2) 1
aparm (3) 0.5
aparm (4) 1.8
aparm (8) 1
solint 5
nplot 5
dotv 1
go

*****ベースラインフィット用のch決定*****
  bcha 270
  echa 850
go

***** 放射ch:420-600
***** ベースラインフィット用ch:270-420,600-850

*****全時間スペクトルデータ作成*****
task 'split'
default
getn 4 [天体名.cvel]
sources 'g9.62102''
docalib 1
gainuse 3 [ACCORの解を格納したCLテーブル]

```

```

    outclass 'all
    aparm (5) 1
go

*****テンプレート用の時刻スペクトルデータ*****
tget split
    timerang 0 15 01 00 0 15 02 00
    outclass 'temp
    aparm (5) 2
go

*****
振幅ゲイン較正 (テンプレートメソッド)
テンプレート局: 日立
時刻: 15:01:00-15:02:00 (1分間)
Tsys: 35.55 K
 $\eta_{\text{eff}}: 71.4\% @ EL=32^\circ$ 
 $S(\text{仮定天体強度}) = \rho * [2k * T_{\text{sys}}] / [\pi * r^2 * \eta_{\text{eff}}]$ 
 $S/[T_{\text{sys}} * \rho] = 4.8064$ 
ピークch: 512
ピーク周辺ch: 510-514
放射ch: 420-600
ベースラインフィット用ch: 270-420, 600-850
*****
task 'acfit'
    default
    getn 5 [天体名.all]
    get2n 6 [天体名.temp]
    calsour 'g9.62102''
    refant 6 [日立局]
    antennas 1 2 3 5 6 [石垣局は用いない]
    solint 1 [tempの時間と同じ長さ]
    aparm 3 3 4.8064
    bcha 510
    echa 514
    bparm 270 420 600 850 [テンプレ以外の局]
    cparm 270 420 600 850 [テンプレ局]
    xparm (1) 35.55
go

***** 解の確認 *****
tget snplt
    getn 5 [天体名.all]
    inext 'sn'
    invers 1
go

***** SNのコピー *****
tget tacop
    getn 5 [天体名.all]
    get0n 4 [天体名.cvel]
    inext 'sn'

```

```

    invers 1
go

***** SNをCLへ格納 *****
tget clcal
getn 4 [天体名.cvel]
opcode 'cali'
interpol '2pt'
smotype 'ampl'
snver 6
invers 6
gainver 5 [rateありのCLへ書き込まないように注意]
refant -1
go

*****
メーザーピークを用いたフリンジフィット
*****
***** 観測アレイ名をVERAに戻す *****
tget tabed
getn 4 [天体名.cvel]
keystng 'vera'
go

***** 観測アレイ名の確認 *****
tget prtab
getn 4 [天体名.cvel]
inext 'an'
go

***** フリンジフィット *****
tget fring
getn 4 [天体名.cvel]
calsour 'g9.62102''
bcha 512
echa 512
docalib 1
gainuse 7
doband 1
bpver 1
refant 6
search 5 2
solint 0.5
aparm (6) 3
aparm (7) 5
aparm (9) 1
dparm (2) =-1
dparm (3) 100
go

***** SNテーブルの確認 *****
tget snplt
getn 4 [天体名.cvel]

```

```

inext 'sn'
invers 7
pixrange -180 180
nplot 5
optype 'phas'
go

***** SNをCLへ格納 *****
tget clcal
getn 4 [天体名.cvel]
sources 'g9.62102''
calsour 'g9.62102''
opcode 'cali'
interpol 'ambg'
smotype 'vlbi'
snver 7
invers 7
refant 6
go

*****
セルフキャリブレーション用のピーク放射の
CLEANイメージ作成（手動）
*****
***** ピークchのみ取り出す *****
tget split
getn 4 [天体名.cvel]
sources 'g9.62102''
bcha 512
echa 512
docalib 1
gainuse 8
doband 1
bpver 1
outclass 'pk512'
aparm 0
aparm (1) 1
go

***** Dirty Imageの作成 *****
task 'imagr'
default
getn 7 [天体名.pk512]
sources 'g9.62102''
bcha 1
echa 1
outname 'Dirty512'
cellsize 0.001
imsize 1024
uvwtn 'uo'
niter 0
gain 0.05
bmaj -1

```

```

go

*****Dirty Imageの放射なし領域のRMS取得*****
task 'imean'
  default
  getn 9

tvall
tvwin [ノイズ部分の選択]

go

***** APIS_MSGSRVの出力RMSを記録する。
***** 今回は RMS=1.5582E+01

*****ピークchのCLEAN(手作業)*****
tget imagr
  getn 7 [天体名.pk512]
  outname 'Clean512-0'
  cellsize 0.0005
  imsize 1024
  niter 50000
  gain 0.05
  flux =1.5582E+01*3 (46.746)
  bmaj -1
go

tget imean
  getn 11 [Clean512-0.ICL001]

tvwin [ノイズ部分の選択]

go

*** RMS=4.424E+00

tvall [放射領域を選択しやすいように拡大]

tget imagr
tvbox [放射領域を囲む]
  flux =4.424*3
go

tget imean
  getn 13 [Clean512-0.ICL001]

tvall
tvwin

go

*** RMS=2.051E+00

```

```

tvall [拡大]

tget imagr
rebox [さっきのCLEANで残った放射を囲む]
    flux =2.051*3
go

tget imean
.
.
.
(RMSが下がらなくなるまで繰り返す)

***** CLEANイメージの作成 *****
ここまで掘り進めたadverbのまま, bmajを0にする

tget imagr
    outname 'CLEAN512-0'
    bmaj 0
go

*****
セルフキャリブレーション
*****

***** まずは位相のみを解く*****
task 'calib'
    default
    getn 7 [天体名.pk512]
    get2n 27 [CLEAN512-0.ICL001]
    cmethod 'def'
    cmodel 'comp'
    invers 1
    outname 'scal512'
    refant 6
    solint 3
    aparm (1) 3
    aparm (6) 3
    aparm (7) 10
    soltype 'l1r'
    solmode 'p'
go
*** [天体名.pk512]にSNテーブル(位相解)が作られる
*** [selfcal(位相).CALIB]が新規作成される

***** SNテーブルの確認 *****
tget snplt
    getn 7 [天体名.pk512]
    inext 'sn'
    invers 1
    optype 'phas'

```



```

go

*****位相解を用いたCLEANイメージの作成*****
tget imagr
getn 28 [selfcal (位相) .CALIB]
outname 'scal512'
go

*****次に位相と振幅を同時に解く*****
tget calib
getn 28 [selfcal (位相) .CALIB]
get2n 31 [scal512.ICL001]
solint 1
aparm (1) 4
solmode 'a&p'
go
*** [selfcal (位相) .CALIB]にSNテーブル (位相&振幅解) が作られる
*** [selfcal (位相&振幅) .CALIB]が新規作成される

*****A&P解のSNを.cvelへコピー*****
tget tacop
getn 28 [selfcal (位相) .CALIB]
geton 4 [天体名.cvel]
inext 'sn'
invers 1
go

*****SNのCLへの格納*****
tget clcal
getn 4 [天体名.cvel]
interpol 'simp'
snver 8
invers 8
gainver 8
refant 6
go

*****
イメージングのための全メーザー放射chのcatファイル作成
*****
tget split
getn 4 [天体名.cvel]
sources 'g9.62102''
bcha 1
echa 0
docalib 1
gainuse 9
doband 1
bpver 1
outclass 'final'
aparm 0
aparm (1) 1
go

```

```

*****
データバックアップのためのFITS書き出し
.cvel
.final
の2つのクラスファイルをaipsフォルダ外に保存
*****
task 'fittp'
  default
  getn 4 [天体名.cvel]
  dataout '/[保存先ディレクトリ]/162.m.cvel.FITS
go

  getn 32 [天体名.final]
  dataout '/[保存先ディレクトリ]/162.m.final.FITS
go

*****
処理に時間のかかるtaskを実行中に止めなくなった場合、
taskの中断：abort(verb)

中断すると、読み込み中/書き込み中 catファイルが生じる。
catの読み書き停止：clrstat(verb)
*****

*****
CLEANイメージの作成（自動）
*****
全校正終了後の全局・全基線・全時間積分を
行ったクロスパワースペクトルの表示

tget possm
  getn 4 [天体名.cvel]
  bcha 1
  echa 0
  docalib 1
  gainuse 9
  doband 1
  bpver 1
  aparm (8) 0
  solint 0
  nplot 0
go

***** 日立局トータルパワースペクトルのみプロット
(放射chの再確認)

tget possm
  getn 4 [天体名.cvel]
  bcha 420
  echa 600
  antenna 6 0
  aparm (8) 1

```

```

go

***** 閾値のためのRMSの取得*****
**** line-free ch 350

tget imagr
getn 32 [天体名.final]
sources 'g9.62102''
docalib -1
bcha 350
echa 350
outname 'free_350ch
cellsize 0.0005
imsize 2048
uvwtfm 'uo'
niter 0
gain 0.05
bmaj 0
go

tget imean
default
getn 35 [line-free.IIM001]
tvall
go

*** RMS=3.980E-02

***** イメージキューブの作成*****
tget imagr
getn 32 [天体名.final]
sources 'g9.62102''
bcha 420
echa 601
outname 'IMCUBE-05mas
cellsize 0.0005
imsize 2048
uvwtfm 'uo'
niter 50000
nboxes 0
clbox 0
gain 0.05
flux =3.98E-02*3
bmaj 0
go

*****
放射領域のパラメータ取得
イメージキューブ全chを連続プロット
chの絞り込み
JMFITでパラメータ取得
pixrangeを指定し、強度の小さい放射を見つける
JMFITでパラメータ取得

```

```

    pixrangeから繰り返し
*****
*****プロット領域指定*****
tblc 512 512; ttrc 1024+512 1024+512

*****連続プロット*****
getn 37 [イメージキューブ.ICL001]
pixtange 0 2    *** 狭く取って、強度が大きくなってきたら広げると良い。
tvall          *** カラースケールを動かして、感度程度に紫が来るようにすると良い。
for i=1 to 182; tblc (3) i; ttrc (3) i; tvlod; end

*****絞り込み*****
for i=90 to 100; tblc (3) i; ttrc (3) i; tvlod; end
for i=95 to 95; tblc (3) i; ttrc (3) i; tvlod; end

*****パラメータ取得（標準出力）*****
task 'jmfit'
default
getn 37 [イメージキューブ.ICL001]
ngauss 1
doprint 0

tvall *** 必要に応じて拡大
tvwin *** 放射領域を囲む

go

*****パラメータ取得（テキスト出力）*****
出力するファイル名が同じなら追加書き込みされる。
doprint -1: フィッティングの詳細記録
doprint -4: ピーク強度やch, 座標のみ

tget jmfit
getn 37 [イメージキューブ.ICL001]
doprint -1
fitout '[保存先ディレクトリ]/jmfit162_1.txt
go

doprint -4
fitout '[保存先ディレクトリ]/jmfit162_4.txt
go

*****ch変更してJMFIT*****
i=96; tblc (3) i; ttrc (3) i; blc (3) i; trc (3) i
tvall
tvbox

fitout '[保存先ディレクトリ]/jmfit162_96_01_4
go

fitout '[保存先ディレクトリ]/jmfit162_96_01_1
doprint -1
go

```

```

*****
指定した領域のみのスペクトルを表示する。
エポック間の強度比を求めるにはこのスペクトルを
ガウスフィットしたピーク強度を用いる。
*****

task 'ispec'
  default
  getn 37 [イメージキューブ.ICL001]

*****プロット領域とch指定*****
tblc 512 512; ttrc 1024+512 1024+512
i=96; tblc (3) i; ttrc (3) i
tvall
tvwin

*****スペクトルをTV画面に表示*****
  dotv 1
  doprint 0
go

*****スペクトルをテキスト出力*****
  doprint -3 ***** -2だと中間ヘッダーが存在
  outprint '/[保存先ディレクトリ]/162_[座標].txt
go

*****
Dirty ImageやCLEAN Imageのlabel付き出力
*****

task 'kntr'
  default
  getn 36 [イメージキューブ(ビーム).IBM001]
  dovect 0
  ofmfile 'RAINBOW'
  docolor 1
  clev 0.018
  levs -3,3,6,12,24,48,96
  dotv 1
  ltype 4
go

*****

```