

6.7GHz メタノールメーザー源 G014.23-00.50 の VLBI 観測による周期的な増光メカニズムの研究

茨城大学理学部理学科物理学コース 13S2001T 會川航平

2017/3/3

概要

宇宙の成り立ち、銀河の成り立ちについて知る際には星の誕生過程の理解が重要である。恒星は大質量星と中小質量星の大きく二つに分けられ、中小質量星の形成過程はよく理解されている。大質量星は形成領域がより遠方にあることや、大質量原始星の周囲を高密度の星間物質が覆っていることから可視光での観測が困難となっており、形成過程の理解も不十分なものとなっている。

大質量星形成領域からは原始星近傍から様々な種類のメーザー現象が確認されている。メーザーは放射サイズが数 AU とコンパクトであり、明るいため VLBI 観測が可能である。また、メーザーは減光の影響を受けない電波帯の放射である。中でも 6.7GHz 帯メタノールメーザーは大質量星形成領域にのみ付随し強度変動をすることが知られていることから、このメーザーの強度変動をモニター観測することで大質量星形成過程の解明に重要な役割を果たすことが期待される。

本研究では周期的なバースト現象を示す G014.23-00.05 に着目した。G14.23-05 に付随するメタノールメーザーは Green et al.(2010) により 2007 年 8 月から 2009 年 3 月までに計 5 回観測され、2007 年 8 月と 2009 年 1 月に視線速度 $V_{\text{lsr}} 25.3 \text{ km/s}$ でメーザーが検出されている。また、日立 32m 電波望遠鏡にて 2012 年末から 2014 年初頭にかけて 9-10 日に 1 度のモニター観測を行っており、この観測で周期的なバースト現象が検出され、また 165 日の周期で変動していると推定された。さらに茨城大学大学院理工学研究科・永瀬桂氏の 2015 年修論にて、2014 年 5 月から日立 32m 電波望遠鏡にて 1 日に 1 回というより高頻度なモニター観測の結果が報告されている。これにより、より短い 24 日という周期でもバースト現象が起きていると推定され、 $20 \sim 25 \text{ km/s}$ の間で過去に観測例のない成分を確認した。また同研究でバーストの立ち上がりからピーク到達をとらえるため、バースト発生予想日の前後数日の期間に一日に複数回の観測を 4 回行い、バースト時の変動パターンと強度変動の立ち上がりをとらえることに成功している。しかし、これまででこのバースト現象を説明する強度変動のメカニズムは決定できていない。また、先行研究の展望として、(1) 他波長による観測を行い、周期的バーストを引き起こすメカニズムを究明、(2) VLBI 観測によるバースト時の空間分布の取得、(3) バースト以外の成分について、真に G014.23 の放射であるかを決定 (近傍天体との切り分け) の 3 点があげられている。

本研究では、(2) VLBI 観測によるバースト時の空間分布の取得、を主な目的として大学連携 VLBI 観測を使用した 2016 年 4 月 12 日から 14 日までの 3 日間連続でのモニター観測のデータの解析を行った。観測日は先行研究での 24 日周期のバースト期に合わせて決定し、1 エポック目と 3 エポック目の観測局が VERA4 局と茨城 32m(日立局)の 5 局、2 エポック目の観測局が石垣局を除いた VERA3 局と茨城(日立局)の 4 局で行った。結果は Green et al.(2010) での位置から (RA,Dec) $=(-0.25 \text{ arcsec}, 0.68 \text{ arcsec})$ ほどずれた位置に天体の放射とみられる成分が確認され、G14.23-05 の位置は (RA,Dec) $=(18^{\text{h}}18^{\text{m}}12.573^{\text{s}} \pm 2.30 \times 10^{-5}, -16^{\circ}49'22.129'' \pm 4.98 \times 10^{-4})$ ではないかと考えられる。またバースト成分以外の成分についてイメージングができるか試みたが、今回バースト成分以外は検出されず近傍天体との切り分けはできなかった。この天体の強度変動のメカニズムとして、spiral shock モデルが適用できると期待されたが、放射の形状からこのモデルが適用できるかの判別はできなかった。

目次

1	研究背景	4
1.1	大質量星形成	4
1.2	メタノールメーザー	4
2	対象天体 G014.23-00.50	6
2.1	Parkes64m 電波望遠鏡および ATCA による観測	7
2.2	日立 32m 電波望遠鏡によるモニター観測 (2012 - 2014)	8
2.3	日立 32m 電波望遠鏡による高頻度モニター観測 (2014 - 2015)	8
2.4	spiral shock モデル	11
3	観測	12
3.1	目的	12
3.2	観測概要	12
3.3	データ解析	14
4	結果	16
4.1	エポック 1	16
4.2	エポック 2	19
5	考察	22
5.1	エポック 1 (再解析)	22
5.2	エポック 2 (再解析)	25
5.3	エポック 3	26
5.4	バースト以外の成分	31
5.5	spiral shock モデル	31
6	まとめ	31
付録 A	フラグした周波数	33

1 研究背景

1.1 大質量星形成

1.1.1 大質量星形成のシナリオ

宇宙の成り立ちや、銀河の生成について知る際には星の誕生過程の理解が重要である。恒星は大質量星と、中・小質量星の大きく二つに分けられることができる。

中・小質量星の形成は大質量星と比べ太陽の近傍に複数存在することから、その過程も理解されている。標準的なシナリオは以下のとおりである。[1]

分子雲の中でもガスの密度が高く、星が形成される可能性の高い分子雲コアと呼ばれる領域が、重力収縮により圧縮され中心部のガスの温度が上昇する。収縮時に残った周囲のガスがコアに降着し、コアの質量が増加し、その後「the second collapse」と呼ばれる崩壊を起こして原始星が形成される。質量降着によりさらに原始星の質量が増加し、何らかの要因により降着が止まると前主系列収縮と呼ばれる収縮をはじめ、中心温度が上昇する。やがて水素燃焼反応が始まり、核反応により圧力が保持され重力収縮が止まり主系列星となる。

太陽の8倍程度までの星は上記のシナリオが適用できると考えられている。

しかし太陽の8倍以上の質量で構成される大質量星の場合は、形成領域がより遠方にあること、大質量原始星の周囲を高密度の星間物質が覆っていることから可視光での観測が困難であり、形成過程の理解も不十分なものとなっている。

1.1.2 大質量星形成領域のメーザー

大質量形成領域からは、原始星近傍から様々な種類のメーザー現象が確認されている。メーザー源は放射サイズが数 AU^{*1}とコンパクトであり、明るいため、超長基線電波干渉計（VLBI: Very Long Baseline Interferometer）観測が可能である。VLBI 観測は数ミリ秒角（milliarcsecond(mas)）の空間分解能を達成することができるため、VLBI 観測を用いたメーザー源の観測により、大質量星形成領域の詳細なデータが得られると期待される。メタノールメーザーは減光の影響を受けない電波帯の放射であり、かつ明るい（典型的な輝度温度: $10^7 \sim 10^{10}$ K）ため、大質量原始星を探る重要な手段である。中でも 6.7 GHz 帯のメタノールメーザーは大質量星形成領域にのみ付随することから、大質量星形成過程の解明に重要な役割を果たすと考えられている。メタノールメーザーの中には特徴的な周期的強度変動を示す天体がある。これまでに検出された変動周期は 30 – 670 日 (Goedhart et al. 2004, 2009) であり、かつ複数成分に同期した変動が見られる天体も存在する。これらのタイムスケールや特徴から、大質量星形成近傍の変動現象を観測可能な有力なプローブとして期待出来る。

1.2 メタノールメーザー

1.2.1 メーザー現象

通常の輝線スペクトルは分子との衝突で励起されたイオン・原子・分子が自発的に下の準位に落ちるときに電波を発するもので、非常に微弱なものである。しかし、赤外線など外部からの放射や、分子同士の衝突によって励起されることによって、通常のボルツマン分布から粒子の数密度分布が反転し、高いエネルギー準位のほうにより多く分布することがある。このような反転分布の状態、何らかのきっかけにより高

^{*1} 地球と太陽の平均距離。1AU = 1.50×10^{11} m

い準位にある粒子が低い準位へと移ると、それが引き金となり連続的に低い準位へと遷移する誘導放射が起きて強い放射を出す。これがメーザー（MASER：Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation）と呼ばれる現象である。1965 年に天体からの放射として OH メーザーが発見されて以来、 H_2O 、 SiO 、 CH_3OH 、 H_2CO など様々な種類のメーザーが発見されてきた。このようなメーザーは、星形成領域から晩期型星まで様々な進化段階の星や領域に付随していることが多い。

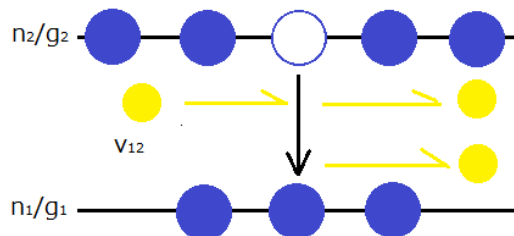


図 1.1 メーザー現象モデル

メーザー現象のモデルについて図 1.1 のような 2 つのエネルギー準位を考える。熱平衡状態のときは二つの準位間の粒子数の比は

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{KT}\right) \quad (1.1)$$

のボルツマン分布で与えられる。ここで n_1, n_2 は粒子数、 g_1, g_2 は統計的重みである。通常は必ず 1 より小さくなり $n_2/g_2 < n_1/g_1$ となる。しかし、宇宙空間のように粒子数密度が低い空間ではエネルギー準位間の遷移は粒子同士の衝突より自発放射や誘導放射、吸収のほうが大きな影響を与える場合があり、必ずしも $n_2/g_2 < n_1/g_1$ とならないことがある。このように統計的重み当たりの粒子数が上の準位により多く分布するとき、反転分布と呼ばれ非常に不安定な状態である。そのため、2 準位間のエネルギー差に相当する周波数 ν_{12} の電波が外部から入射すると、上の準位にある粒子が下の準位に落ち、周波数 ν_{12} の電波を誘導放射する。これが連続的に起こることで同じ周波数の強い放射を出す。

1.2.2 6.7GHz メタノールメーザー

メタノールメーザーは 834MHz 以上の周波数で輝線が見られ、衝突励起、放射励起のどちらが優勢かによって、class I,II メーザーに分類される。これらは生まれて間もない大質量星に付随するものである。それぞれのクラスに属するメタノール遷移を以下の表 2.1 に示す。

表 1.1 メタノール遷移表 (Muller et al. 2004 参照)

クラス	周波数 (GHz)									
I	0.834	5.0	9.9	25.0	25.3	25.8	26.8	27.4	28.1	28.9
	29.6	30.3	36.1	44.1	84.5	95.2	104.3	132.9	146.6	229.8
II	6.7	12.2	20.0	23.1	29.0	37.7	38.4	38.5	86.6	86.9
	107.0	108.8	156.5	156.8	157.0	157.2	157.3			

6.7GHz 帯と 12.2MHz 帯のメタノールメーザーは class の代表的なメーザーであり、特に 6.7GHz のメタ

ノールメーザーは多くのメーザー源におけるスポット群分布の様子から、その半数程度が大質量原始星が形成する降着ガス円盤に付随するものだと示唆されている。このことから、大質量原始星へのガス降着の仕組みを解明する手がかりが得られると期待されてきた。

6.7GHz メタノールメーザーが初めて観測されたのは 1991 年であり (Menten 1991b)、励起状態 $(J, K) = (5, 1)$ から低励起状態 $(J, K) = (6, 0)$ への A^+ 軸対称による遷移である。また、その静止周波数は $6668.5192 \pm 0.0008 \text{ MHz}$ である (Breckenridge & Kukolich 1995)。6.7GHz メタノールメーザーは多くの周波数帯で検出されるメタノールメーザーの中で最も明るく、メーザー全種の中で水メーザーに次ぎ 2 番目に明るいことが知られている。また、このメーザーを起こしている分子ガス領域のサイズは数 AU ($\approx 1.5 \times 10^{11} m$) ほどで非常にコンパクト (Menten 1992) であるため、観測される輝度温度も非常に高い。そのため高分解能な VLBI 観測に適しており、秒角スケールの空間分布を数ミリ秒角の高い分解能で知ることが可能である。ただし、Minier et al. (2002) の研究により、6.7 GHz 帯のメーザーと類似している 12.2 GHz 帯のメーザーのサイズが必ずしもコンパクトではなく、数 10 - 数 100 AU にも及ぶ広がった放射も存在していることが示唆されてきている。

また、6.7GHz メタノールメーザーは強度変動することが知られている。強度変動の観測の 1 例として Goedhart et al. (2004) がある。この研究では Hartebeesthpel26m 望遠鏡を使い、6.7GHz 帯で 54 天体を 1999 年 1 月から 2003 年 3 月まで 1~2 週間間隔でモニター観測を行っている。結果は大多数の天体に数日~年単位でスペクトルに変動が見られ、種類は単調に増加、減少するもの、周期的に変動するものなど、様々な傾向を持つ強度変動を検出した。図 1.2 は Goedhart et al. (2004) で観測された 6.7GHz メタノールメーザーが周期的強度変動をする天体 G331.13-0.24 のスペクトルと成分ごとの変動の様子である。

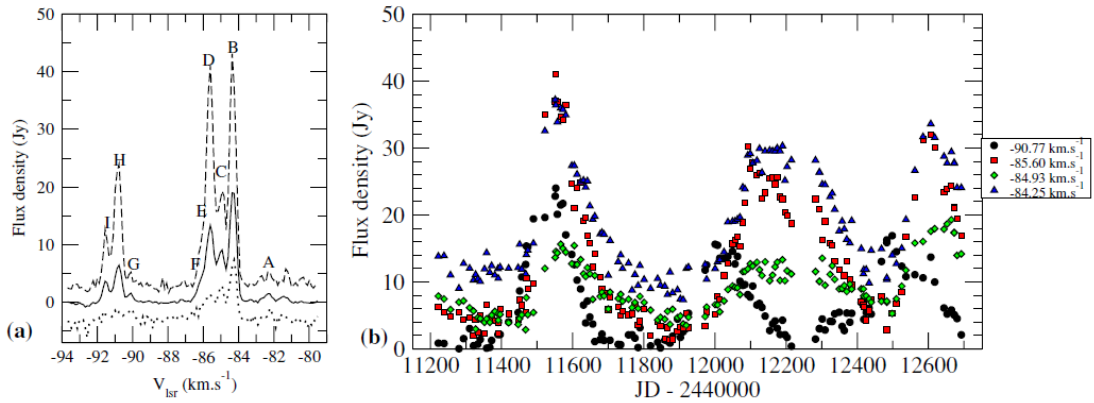


図 1.2 周期的強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー天体の例 G331.13-0.24 Goedhart et al. (2004)

2 対象天体 G014.23-00.50

本研究では周期的なバースト現象を示す G014.23-00.50 (以下 G14.23-05 と称する) に付随する 6.7GHz メタノールメーザーの VLBI 観測の結果を解析した。G14.23-05 は図 2.1 に示す暗黒星雲 G14.225-0.506 近傍に存在している。この天体の 6.7GHz メタノールメーザーが初めて検出されたのは 2007 年のオーストラリアにある Parkes64m 電波望遠鏡によるサーベイである。座標は表 2.1 のとおりである。

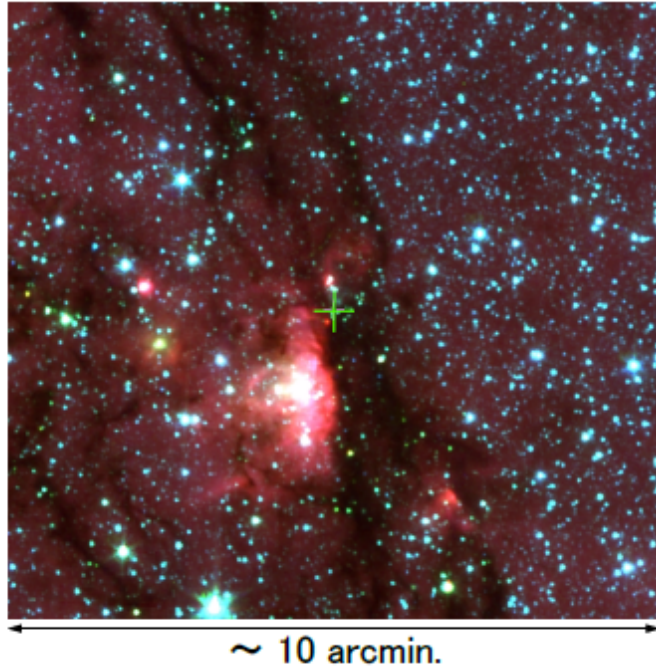


図 2.1 暗黒星雲 G14.225-0.506 の三色合成画像。IRAC 3.6/4.5/8.0 μm (blue/green/red)

表 2.1 G014.23-00.50 の座標

	R.A.(J2000)	Dec.(J2000)	Ref.
G014.23-00.50	18 ^h 18 ^m 12.59 ^s	−16°49′22.8″	Green et al.(2010)

2.1 Parkes64m 電波望遠鏡および ATCA による観測

この天体に付随する 6.7GHz メタノールメーザーが初めて報告されたのが Green et al.(2010) である。Green et al.(2010) はオーストラリア Parkes 電波望遠鏡および ATCA (Australia Telescope Compact Array) を使用して観測を行っており、G14.23-05 については 2007 年 8 月から 2009 年 3 月までに 5 回観測を行っている。この天体は 2007 年 8 月の Parkes 望遠鏡によるサーベイ観測にて $V_{\text{lsr}}=25.3\text{km/s}$ で 3.6Jy の単一な特徴が検出され (図 2.2)、ATCA 観測 2009 年 1 月で再び検出された。他 3 回の観測ではスペクトル成分は検出されなかったことから、G14.23-05 の 6.7GHz メタノールメーザーが強度変動していることが確認された。表 2.2 に Green et al.(2010) の観測結果を示した。

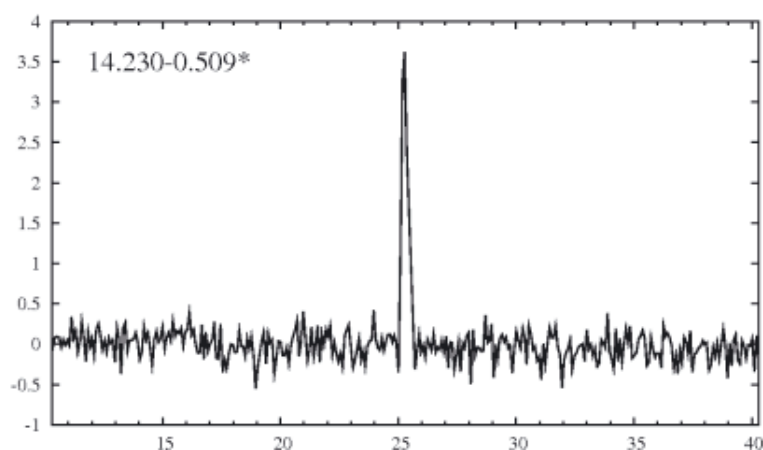


図 2.2 2007 年 8 月に Parkes 64 m 電波望遠鏡で取得されたスペクトル (縦軸:Flux density[Jy], 横軸:LSR velocity[km/s])

表 2.2 Green et al. (2010) の各観測日での観測結果

観測日	2007/8	2008/3	2008/8	2009/1	2009/3
検出の有無	○	×	×	○	×
望遠鏡	Parkes	Parkes	ATCA	ATCA	Parkes

2.2 日立 32m 電波望遠鏡によるモニター観測 (2012 - 2014)

G14.23-0.5 について日立局 32m 電波望遠鏡を使用し、2012 年末から 2014 年初頭にかけてモニター観測を行っている。その結果を記す。この期間のモニター観測は 9-10 日に 1 回である。図 2.3 は、日立局での観測結果を横軸日付、縦軸フラックス密度でプロットした図である。赤点は各観測日における G14.23-0.5 の視線速度 $V_{\text{lsr}} = 25.3\text{km/s}$ の強度、逆三角が検出限界 (3σ) を表す。この結果より、バースト的な強度変動が確認され発生間隔がおおむね等間隔であることから、この変動が周期的なものである可能性が出てきた。この結果から周期を概算すると推定周期は 165 日となり、Green et al.(2010) の結果ともおおむね一致していることが確認された。(図 2.4)

2.3 日立 32m 電波望遠鏡による高頻度モニター観測 (2014 - 2015)

茨城大学理工学研究科 2015 年度永瀬桂氏による修士論文「G014.23-00.50 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーの高頻度モニター観測」でこの天体について研究している。こちらの研究では (2012-2014) に行われた観測より、より高頻度なモニター観測を行い次の 3 点に焦点を当て観測を行っている。

1. より短いタイムスケールでの変動の可能性
2. 周期性の有無、及び変動周期の正確な導出
3. バーストの立ち上がりからピーク到達までを捉える

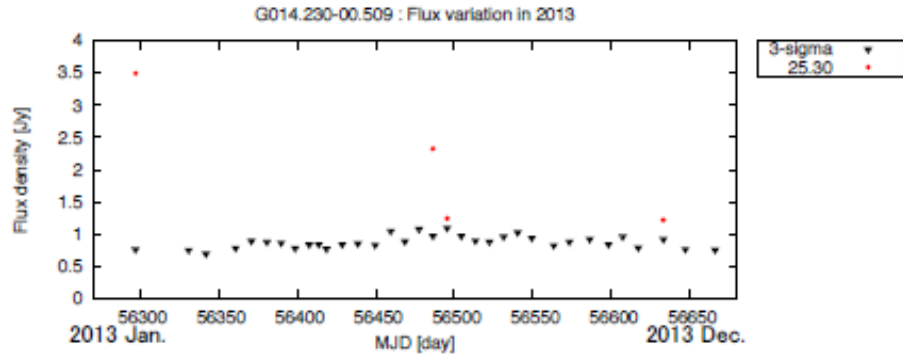


図 2.3 日立局における 2012-2014 年のモニター観測での強度変動プロット

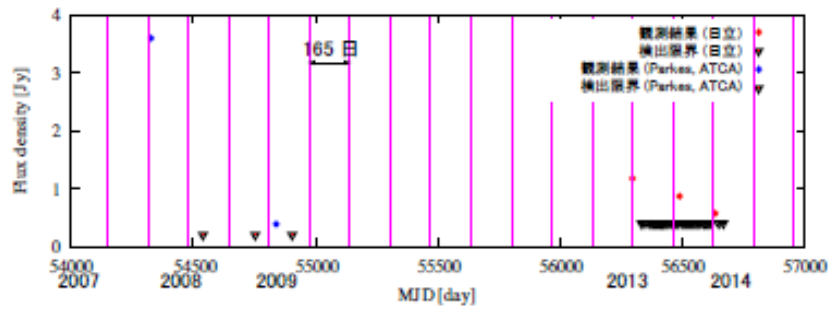


図 2.4 日立局と Green et al.(2010) の観測結果、推定周期 165 日の間隔で赤線を引いている

これらを目的として、2014 年 5 月 7 日から 1 日に 1 回の高頻度モニター観測を行った。

2015 年 12 月 31 日までのデータを用いた結果、予想されていた 165 日という周期より短い期間に複数回バースト現象が検出され、最大で 7Jy 程度まで上昇した。(図 2.5) また、25.3km/s 成分の他に 20~25km/s

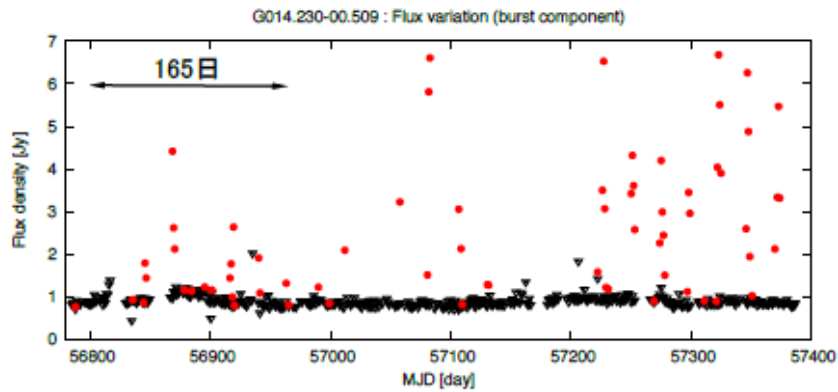


図 2.5 バースト成分の強度変動プロット

の間で過去に未検出である 8 つの成分を検出した。(図 2.6、表 2.3) これらの結果から、バースト成分

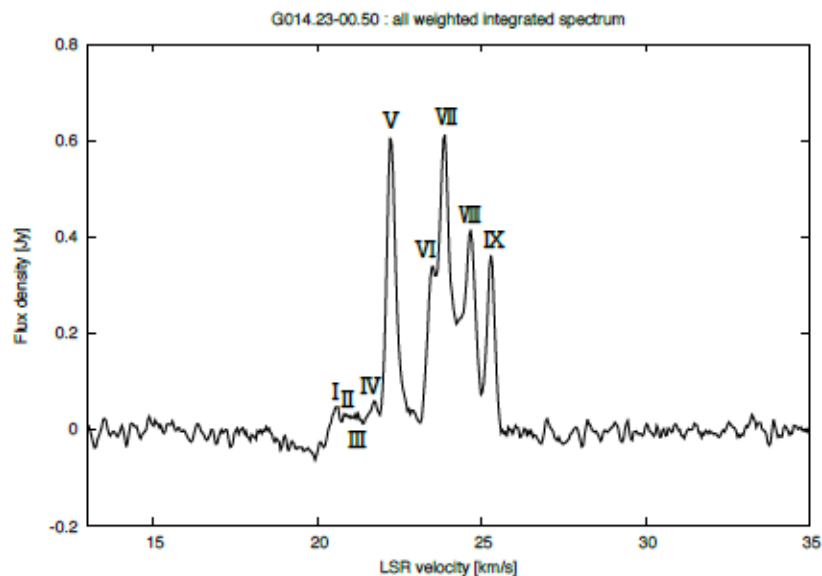


図 2.6 日立局における 2014-2015 年のモニター観測での全積分スペクトル

表 2.3 図 2.6 における速度成分

成分	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
視線速度 (km/s)	20.53	20.96	21.33	21.76	22.25	23.50	23.88	24.67	25.30

($V_{\text{lsr}} = 25.3\text{km/s}$) が 24 日周期でバースト現象を起こしていると導出され、バースト成分とその他の成分の強度変動に相関がないことが確認された。

また、バーストの立ち上がりからピーク到達までをとらえるため、バースト発生予想日の前後数日間において、1 日のうちに複数回の観測を 4 回行っている。その結果、バースト時の変動パターンをとらえること、強度変動の立ち上がりをとらえることに成功した。変動パターンについてピークを境に対称/非対称が議論されているが、対称的なパターンは 1 例のみであり、強度変動のタイムスケールについて 1 日未満であることが判明した。(図 2.7)

これら 2 つの結果から、バースト成分について強度上昇のタイムスケールからバースト時のエネルギー必要量を計算し、強度変動のメカニズムについて、磁気リコネクション、脈動モデル、CWB モデルの 3 つについて考察した。しかし、磁気リコネクションは周期性を持つかが不明であること、脈動モデルでは間欠的な変動パターンが説明不可能なこと、CWB モデルではバースト現象の起源が説明困難であることと、どのモデルも G14.23-05 の強度変動を説明するメカニズムとしては問題点が残った。

その他の成分については近傍の天体 G014.33-00.63 との関連が疑われており、新検出と断定はできなかった。

この先行研究における今後の展望としては、以下の 3 つがあげられている。

1. 他波長による観測を行い、周期的バーストを引き起こすメカニズムを究明
2. VLBI 観測によるバースト時の空間分布の取得
3. バースト以外の成分について真に G14.23-0.5 の放射であるかを決定し、近傍天体との切り分けを行う

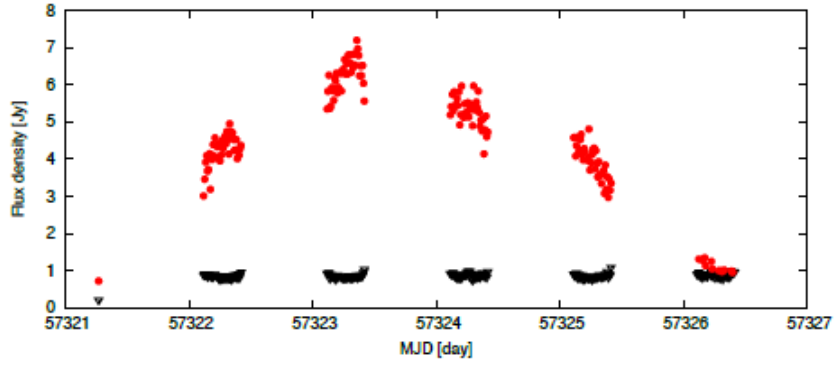


図 2.7 日立局における 1 日に複数回観測を行った際の強度変動プロット (MJD57320-57326)

2.4 spiral shock モデル

これらの先行研究から、Parfenov&Sobolev(2014) で考案されている spiral shock モデルが適当な可能性が高いと考えられる。spiral shock モデルは、中心星が連星系を形成しその周囲に回転円盤が存在することを仮定したとき、ガスの降着によって shock ができることによって周期変動を説明するモデルである。

仮定として、中心星が連星系を形成しており、連星系の周囲に回転円盤が存在することがあり、またその回転円盤は視線方向に対し edge-on であるとする。円盤からガスの巻き込みが起こることで spiral shock が形成され、これは連星や円盤の回転に従い周期性を持ち回転する。図 2.8 の (a) は、face-on から見たときの spiral shock が視線方向に対しメーザーと主星の間になく、主星のみがメタノールメーザー励起の熱源となる時、横から円盤を観測している様子である。

メタノールメーザーは回転円盤上に分布し、メーザーは連星の主星からの放射で周囲のダストが暖められ、ダストからの再放射により励起されていると仮定する。(Cragg et al. (2005) によるとメタノールメーザーの励起に適当なダスト温度は 100~300K 程度である。) spiral shock が視線方向に対してメタノールメーザーと主星の間にある時、主星だけでなく shock も熱源となりメーザーの励起に適当なダスト温度範囲のガス柱密度が増加する。同一視線速度のメタノールガスの柱密度が増加するためメタノールメーザーのフラックス密度が上昇する。図 2.8 の (b) は face-on から見たときの spiral shock が視線方向に対しメーザーと主星の間にあり、主星と spiral shock がともにメタノールメーザー励起の熱源となりうる時、横から円盤を観測している様子である。G14.23-0.5 のバースト成分にみられる、単一の成分のみで検出された周期的かつ突発的な強度変動はこのモデルで説明できると考えられる。このモデルが適用できる場合、edge-on な回転円盤上にメタノールメーザーが分布すると仮定するため、天球面の平面上では円盤を横から見た形、すなわち直線的な空間分析が観測されると期待される。

本研究では永瀬氏の研究での今後の展望として挙げられていた 2 点目、VLBI 観測によるバースト時の空間分布の取得を主な目的として研究を行う。

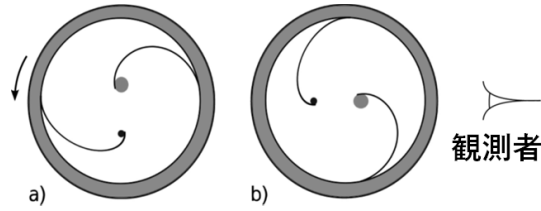


図 2.8 spiral shock モデル Parfenov&Sobolev(2014)

(a) : spiral shock が視線方向に対しメーザーと主星の間になく、主星のみがメタノールメーザー励起の熱源となる時、横から円盤を観測している様子

(b) : spiral shock が視線方向に対しメーザーと主星の間にあり、主星と spiral shock がともにメタノールメーザー励起の熱源となりうる時、横から円盤を観測している様子

3 観測

3.1 目的

上で触れたように、この観測での目的は G14.23-0.5 のバースト時における 6.7GHz メタノールメーザーの空間分布、絶対位置の取得である。具体的には、 $V_{\text{lsr}}=25.3\text{km/s}$ 成分が、他成分 ($V_{\text{lsr}}=21.0\text{--}24.6\text{ km/s}$ の 6 成分) と同様な励起源に付随しているか、また Parfenov&Sobolev(2014) の spiral shock モデルで仮定されている edge-on を想起させる空間分布を示しているか、を確認することが目的である。空間分布の取得に成功した場合、バースト現象の発生場所を数ミリ秒角の精度で特定することが可能となり、大質量星周囲で検出されている X 線での観測より良い精度での絶対位置が得られることとなる。

3.2 観測概要

先行研究より G14.23-0.5 のバーストの周期は 24 日と推定されていたため、周期の不確定性も考え推定されるバースト期に当たる 2016 年 4 月 12 日から 14 日までの 3 日間連続で、大学連携 VLBI 観測 (JVN) によりモニター観測を行った。観測は 6.7GHz 帯で行い、連続波源の解析用に 512MHz を 128 点分光した広域帯データと、メーザー源の解析用に 2MHz を 1024 点分光した狭域帯データを取得した。観測に使用した局は茨城大学日立 32m 望遠鏡、VERA-水沢 20m、VERA 小笠原-20m、VERA-入来 20m、VERA-石垣 20m の 5 局 (2 エポック目、2016 年 4 月 13 日の観測では石垣局を除いた 4 局) である。観測パラメータは表 3.1 の、観測前後の τ_0 、 T_{sys} は表 3.2 のとおりである。また、ターゲット天体以外に 6 天体をシステムチェックや較正天体、位相補償天体として観測した。各天体で 1 日に何スキャン行ったかなどは表 3.3 に示した。この観測ではターゲット天体自身での湿潤大気による伝播遅延による位相のズレの較正が難しいこと、また位置基準となる既知の他の電波源を使うことで絶対位置の把握ができることから位相補償観測を行っている。今回の観測ではターゲット天体 G14.23-0.5 と離角 1.84° の連続波源 J1825-1718 を用いてターゲット天体とほぼ交互にスキャンを行った。

位相補償とは、遅延時間残差の大きな要因である湿潤大気による伝播遅延を補正し位相をそろえる手段のことである。[2] 幾何学的遅延については相関器モデルの予想計算で補正可能であり、観測装置が起因の位相変動などは時間的に穏やかなため観測中数回の較正天体の観測で補正することができる。しかし大気による伝播

表 3.1 観測パラメータ

観測帯域・分光数	6602.0MHz～7114.0MHz（連続波用 512MHz 128 点分光） 6668.4MHz～6670.4MHz（メーザー用 2MHz 1024 点分光）
1 エポック目合成ビームサイズ	長軸:6.53mas 短軸:2.76mas 位置角: -30°
2 エポック目合成ビームサイズ	長軸:6.17mas 短軸:4.95mas 位置角: -6.59°
3 エポック目合成ビームサイズ	長軸 7.46mas 短軸:2.65mas 位置角: -32.44°
1 エポック目イメージ感度	1.64E-03 Jy/Beam（連続波天体解析時）
2 エポック目イメージ感度	2.23E-03 Jy/Beam（連続波天体解析時）
3 エポック目イメージ感度	3.57E-03 Jy/Beam（連続波天体解析時）
1 エポック目観測局	水沢局・入来局・小笠原局・石垣局・日立局
2 エポック目観測局	水沢局・入来局・小笠原局・日立局
3 エポック目観測局	水沢局・入来局・小笠原局・石垣局・日立局

表 3.2 観測時の $\tau_0 \cdot T_{\text{sys}}$

測定時	水沢 τ_0 T_{sys} [K]	入来 τ_0 T_{sys} [K]	小笠原 τ_0 T_{sys} [K]	石垣 τ_0 T_{sys} [K]	日立 τ_0 T_{sys} [K]
1 エポック目開始前	0.02 99	0.03 118	0.04 244	0.01 159	0.011 29.01
1 エポック目終了後	0.03 101	0.03 121	0.04 105	0.03 105	0.013 30.05
2 エポック目開始前	0.02 197	-0.01 247	0.03 149	0.02 107	0.019 30.1
2 エポック目終了後	0.03 104	0.03 122	0.04 104	0.04 106	不明 不明
3 エポック目開始前	0.02 155	0.03 117	-0.03 511	0.03 130	0.011 29.3
3 エポック目終了後	0.03 100	0.03 120	0.04 104	0.04 106	0.01 28.5

*1 エポック目開始前：小笠原局 雨

*3 エポック目開始前：水沢局・小笠原局・入来局：雨

表 3.3 観測天体

観測天体名	G014.23-00.50	G9.62+02	NRAO530/3C454.3
観測理由	ターゲット天体	システムチェック	幾何学的遅延の残差校正 バンドパスフィルター起因の特性校正
1 スキャン時間	2 分	3 分	5 分（1 回目のみ 10 分）/15 分
スキャン回数	57 回	1 回	6 回/1 回
合計観測時間	114 分	3 分	35 分/15 分
観測天体名	J1832-20	J1825-17	12.90-02
観測理由	大気変動による遅延の校正	位相補償のための 参照電波連続波源	振幅ゲイン校正
1 スキャン時間	3 分	2 分	2 分
スキャン回数	16 回	76 回	21 回
合計観測時間	48 分	152 分	42 分

遅延は時間変動が激しく、またその変化は不規則なものとなるためリアルタイムでの補正が必要となる。

また、位相補償を行う 2 つの利点がある。1 つ目は微弱な天体の観測が可能になることである。一般に干渉計観測ではコヒーレンス時間より短い積分時間にFRINGEを検出しなければ位相較正ができずイメージングができない。そのためコヒーレンス時間が非常に短い VLBI 観測では強度の強い天体しか観測できないのだが、位相補償を行うことで参照電波源でFRINGEフィッティングなどを行い、その解をターゲット天体へ適用することでコヒーレンス時間より長時間の積分が可能となり、微弱な天体の観測が可能となる。

2 つ目は天体の位置の計測が可能になるということである。一般に VLBI 観測で位相残差を較正する場合、その天体自身でFRINGEフィッティング、セルフキャリブレーションを行う。この場合は天体自身の位相追尾中心に対してビジビリティ位相が測定されるので、イメージの座標が位相追尾中心からの相対位置となり、絶対位置の情報に不定性が生じる。位相補償を行うことで参照電波源として位置基準となる電波源を選択することで、位相追尾中心からの相対的な位相を測定しても高精度な絶対位置でのイメージングが可能となる。

3.3 データ解析

観測データは「AIPS」を用いて解析した。手順は以下のとおりである。また、解析は「JVN/EAVN データ解析 フローチャート ver.1.5.1 in 2013/05/07」をもとに行った。

1. データインポート・チェック
2. 使用不可なデータのフラグ
3. UV 再計算テーブル読み込み
4. 振幅ゲイン較正 (1 回目)
5. Delay&Rate 較正
6. バンドパス位相特性較正
7. バンドパス振幅較正アプライ
8. ドップラー較正
9. 振幅ゲイン較正 (2 回目)
10. メーザーピークによるFRINGEフィッティング
11. ダーティイメージ作成
12. セルフキャリブレーション
13. クリーンイメージ作成

AIPS の較正パートでは相関ビジビリティデータは基本的に改変せず、較正情報はファイルに添付するテーブルに書き込まれる。

データインポート・チェック

VLBI 観測のデータを AIPS 内へ読み込ませファイルを作成する。同エポックの連続波源のデータとメーザー源のデータ、それぞれを同じ ID に読み込ませ、観測スケジュール、アンテナ情報などをチェックする。

使用不可なデータのフラグ

アンテナごとに何らかの理由で正しく観測できなかった時間帯や、バンドパスフィルターやノッチフィルターの影響が強く出ている周波数帯を使用しないデータとしてフラグする。またクロスパワースペクトル見て位相の傾きが大体そろうように、異常な傾きとなっている部分もフラグする。傾きは $\tau = \frac{\phi}{2\pi\nu} + a$ で求められ

る (a は任意の数)。フラグした周波数帯は 6 にて紹介する。

UV 再計算テーブル読み込み

UV 再計算テーブルという局位置を最新のものに修正し、かつ地球回転パラメータを精度よく解きなおしている解を持つテーブルを一番初めの解として用いる。この解は相関局に計算していただいたものであり、絶対位置の精度を上げることを目的としている。連続波のデータ、メーザーのデータをそれぞれ読み込む。

振幅ゲイン較正 (1 回目)

頂いている観測データは振幅方向に 3 倍から 4 倍引き延ばされたものとなっている。これを規格化し、またバンドパスの振幅較正のテーブルを作成する。

Delay&Rate 較正

まず、相関処理の際の遅延時間補正の残差を明るい連続波源 (NRAO530、3C454.3) を用いて較正する。なおこの残差は各局の水素メーザーの時刻の精度によるもので、較正天体は必ずしもターゲット天体に近い必要はない。

次に、大気の変動による遅延残差の補正を行う。こちらはターゲット天体に近い明るい連続波源で構成する必要があり、今回は J1832-20 を用いる。

また、上の 2 つの較正とは別に明るい連続波源 (NRAO530、3C454.3) を用いて振幅、位相についてのバンドパスフィルター起因の特性の較正を行う。これを用いて次のバンドパス位相特性較正のテーブルを作成する。これら 3 つの較正はすべて連続波のデータで行い、得られた解をメーザーのデータへコピーする。

バンドパス位相特性較正

バンドパスの位相方向にみられる特性の較正であり、バンドパスフィルターの周波数方向への特性に起因する効果を除去するためにテーブルを作成する。ただ、たいていの場合目視での確認ができないほど小さい位相傾斜が較正される。

バンドパス振幅較正アプライ

バンドパス振幅較正テーブルをアプライしたファイルを新たに作成し、バンドパス位相較正テーブルを作成したファイルにコピーしてくる。

観測アレイを VLBA に変更したのち、G14.23-05 と 12.90-02 について、どのチャンネルをどの視線速度値に定めて較正を行うかを決め、周波数方向へシフトされたファイルを作成する。周波数方向へのシフト量が $\pm 1\text{CH}$ よりも小さい値になるように視線速度値を設定する。これはメーザーのデータで行う。

振幅ゲイン較正 (2 回目)

メーザー自身の自己相関スペクトルを用いて各局の振幅ゲインの時間変動較正を行う。「メーザー自身が、VLBI 観測中に時間変動していないという仮定で、自己相関スペクトルの時間変動は全てシステムゲインの時間変動に起因する」としてメーザーの自己相関スペクトルを用いてシステムゲインの時間変動較正を行う。この手法をテンプレート法という。テンプレートとなるスペクトルとして、ある時間における T_{sys} 、開口能率が既知でなくてはならない。今回の解析では日立局とテンプレート局として使用した。

ここで知りたい値は $S = \frac{2kT_{\text{sys}}^* \cdot \rho_s}{A_{\text{eff}}}$ であり、AIPS 上では $\frac{2k}{A_{\text{eff}}}$ の値と T_{sys}^* の値を入力する。($A_{\text{eff}} = \pi r^2 \times \eta$ であり、 η は開口能率、 ρ_s は観測によってわかる値である。)

これはターゲット天体ではなく 12.90-02 を用いて較正を行い、得られた解をターゲット天体である G14.23-05 と参照電波連続波源 J1825-17 に適用する。

なお較正を行う準備として、12.90-02 についての全時間スペクトルデータと、テンプレート用の時刻を指定したデータを抜き出し、ファイルを作成する必要がある。

メーザーピークによるフリンジフィッティング

ターゲット天体 G14.23-05 ではメーザーピークでのフリンジフィッティングができないため、参照電波連続波源 J1825-17 を用いてフィッティングを行い位相解の導出を行う。これにより得た解を G14.23-05 へ周波数変換を行ったうえでコピーしてアプライする。

ダーティイメージ作成

イメージングしたい天体のピークチャンネルを抜き出したファイルを作成する。メーザー源ならば 1~数 CH を、連続波源であれば端を落としたほぼ全 CH を 1CH にまとめて抜き出す。

そのファイルをもとに IMAGR というタスクを走らせダーティイメージと合成ビームマップのイメージを作成する。パラメータを変えることで、視野の範囲を変えることが可能である。

セルフキャリブレーション

セルフキャリブレーションを行う前に、キャリブレーションをしないで clean image を作成する必要がある。

もととなるダーティイメージの放射が見られない部分の RMS(標準偏差) を導出する。IMAGR にてデルタ関数を置く明るい成分の位置を指定し、しきい値を 3σ としてクリーンをしていく。初めはクリーンイメージとの残差イメージを作成し、RMS が変化しない値までクリーンを繰り返し、その値を用いてクリーンイメージを作成する。

クリーンイメージ作成後、CALIB というタスクを用いて位相の解、または振幅と位相の解を導出する。大きく飛んでいる値があれば、フラグしその解を天体のピークチャンネルを抜き出す前のファイルにコピーし再びダーティイメージを作成する。今回の対象天体 14.23-05 は暗い天体のため、14.23-05 自身でのセルフキャリブレーションができないため、J1825-17 についてセルフキャリブレーションして解いた解を 14.23-05 へアプライしている。

クリーンイメージ作成

上のセルフキャリブレーションで作成したクリーンイメージと同様に RMS を導出ししきい値を定めて繰り返し掘っていく。RMS の変化がなくなったらその値を用いてクリーンイメージを作成する。

4 結果

エポック 1、エポック 2 の 2 エポック分のデータを解析し、G14.23-05 についての成分のイメージングを目指し解析を行った。

4.1 エポック 1

エポック 1 での UV カバレッジを取得したところ、図 4.1 のようになった。まずエポック 1 で位相補償前まで正しく解析を行えているかどうかを判断するために、参照電波連続波源 J1825-17 のイメージングを行った。

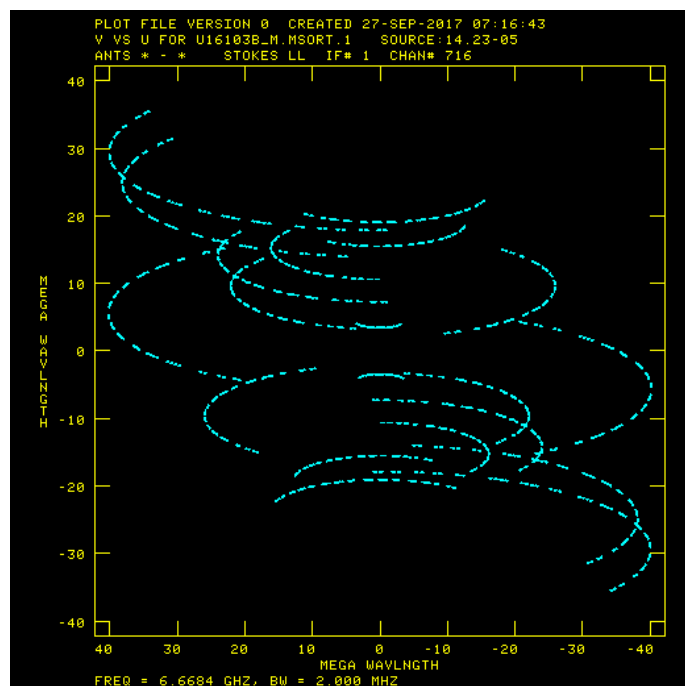


図 4.1 エポック 1 UV カバレッジ

(図 4.2)

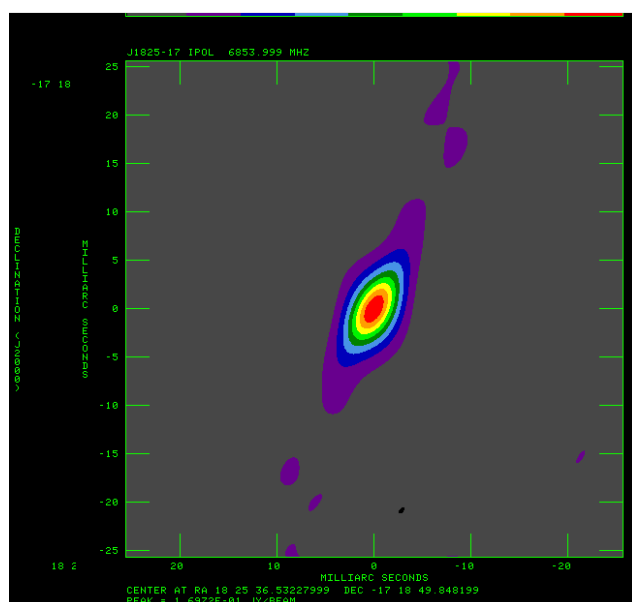


図 4.2 参照電波連続波源 J1825-17 クリーンイメージ (エポック 1)

G14.23-05 について、257CH を抜き出しダーティイメージを作成した。(図 4.3、図 4.4、図 4.5)

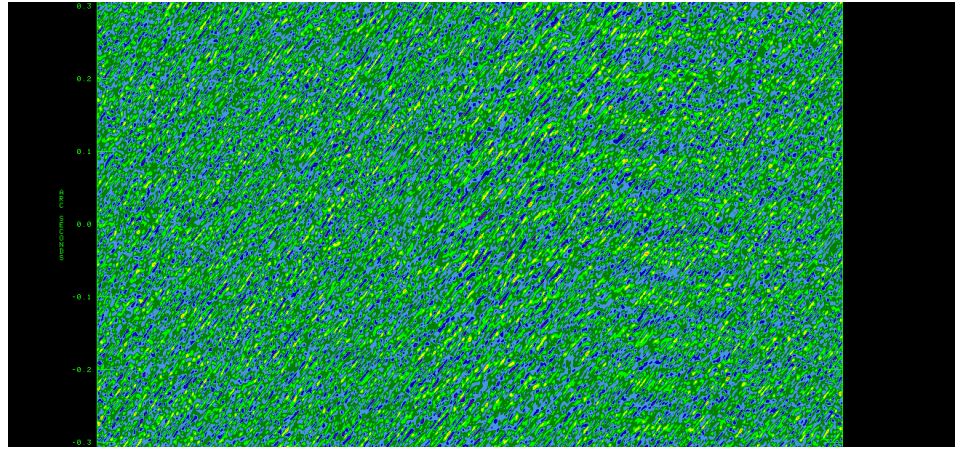


図 4.3 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.001 imsize 1024

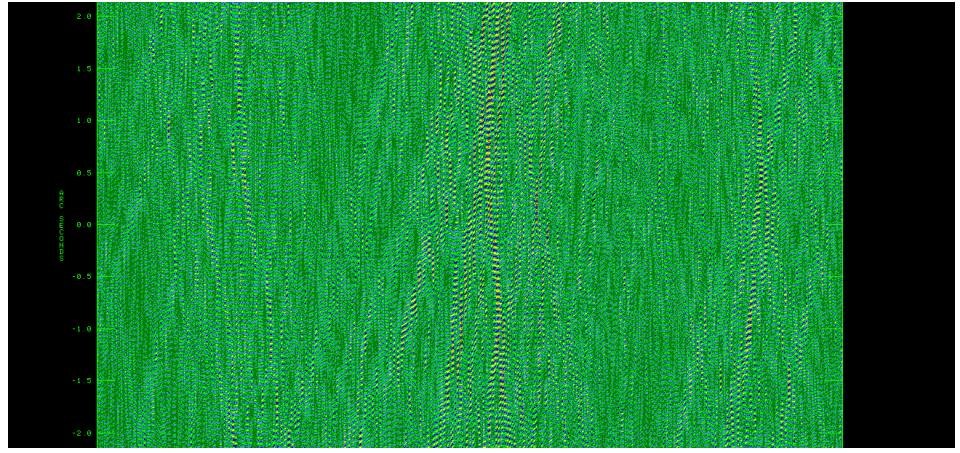


図 4.4 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.007 imsize 1024

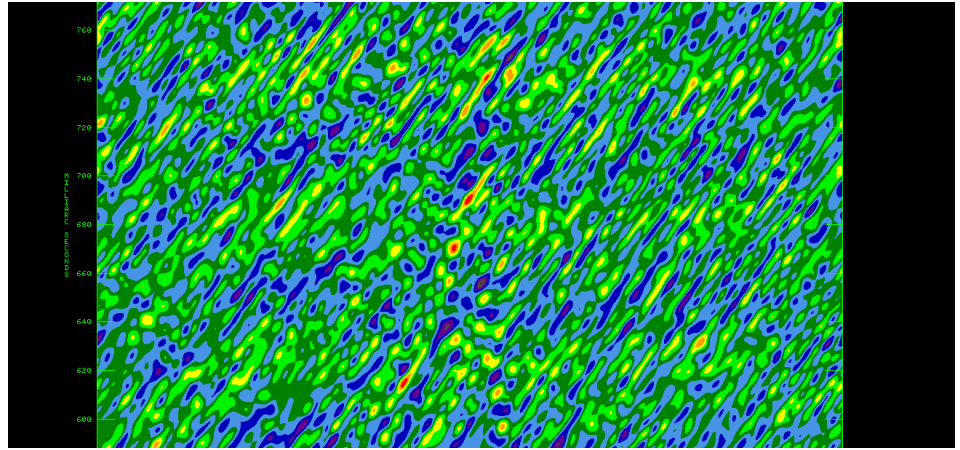


図 4.5 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.0003 imsize 1024 RAshift -0.25 Decshift 0.68

4.2 エポック 2

エポック 2 の UV カバレッジは図 4.6 のようになった。

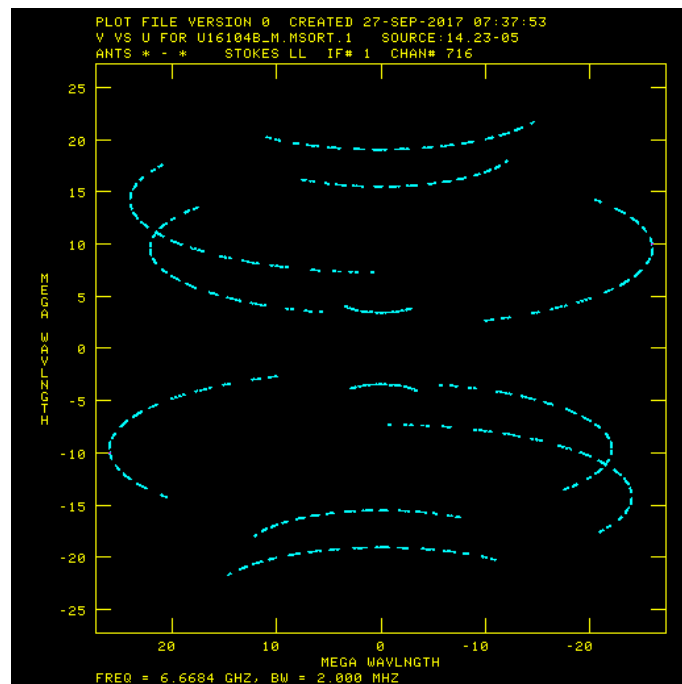


図 4.6 エポック 2 UV カバレッジ

エポック 1 と同様、位相補償まで正しく解析を行えているかどうかを判断するために、参照電波連続波源 J1825-17 のイメージングを行った。(図 4.7) G14.23-05 について、255CH を抜き出しダーティイメージを作成した。(図 4.8、図 4.9、図 4.10)

感度上昇のために 253 – 257CH まで、5CH 分を積分して再度ダーティイメージを作成した。(図 4.11、図 4.12、図 4.13)

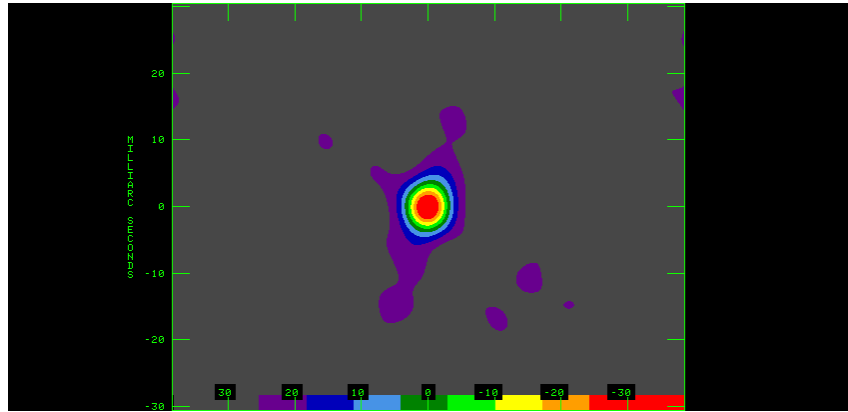


図 4.7 参照電波連続波源 J1825-17 クリーンイメージ (エポック 2)

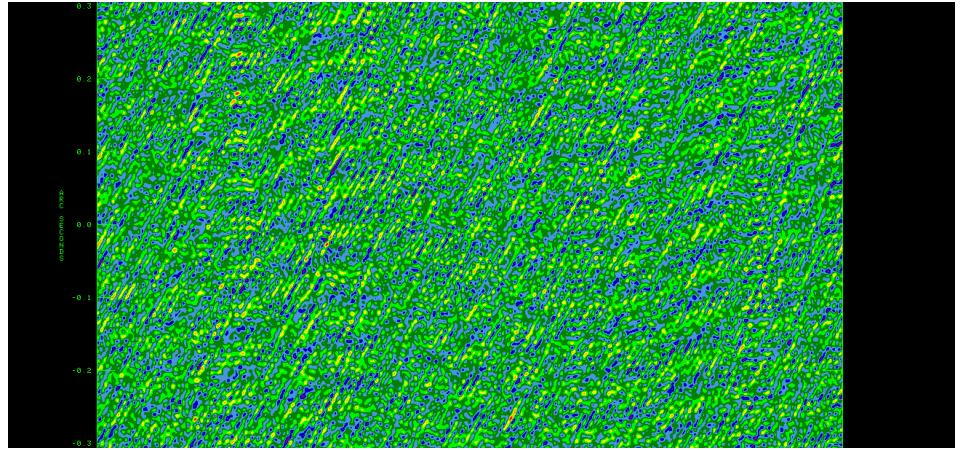


図 4.8 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.001 imsize 1024

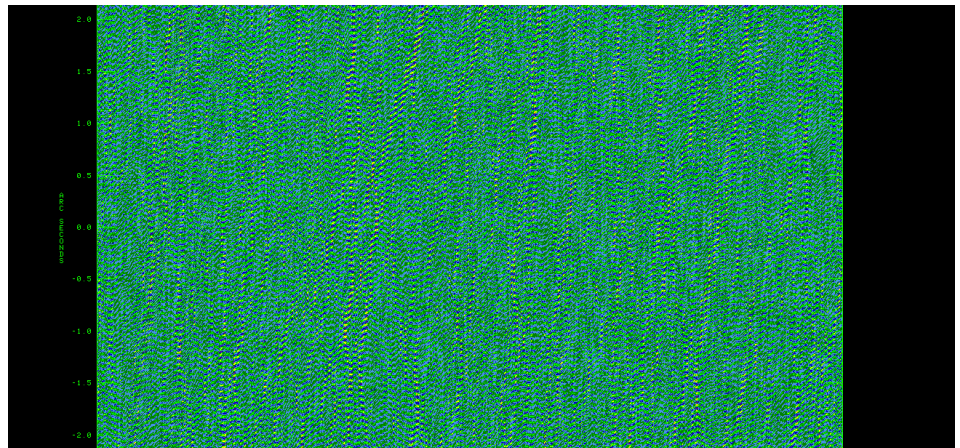


図 4.9 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.007 imsize 1024

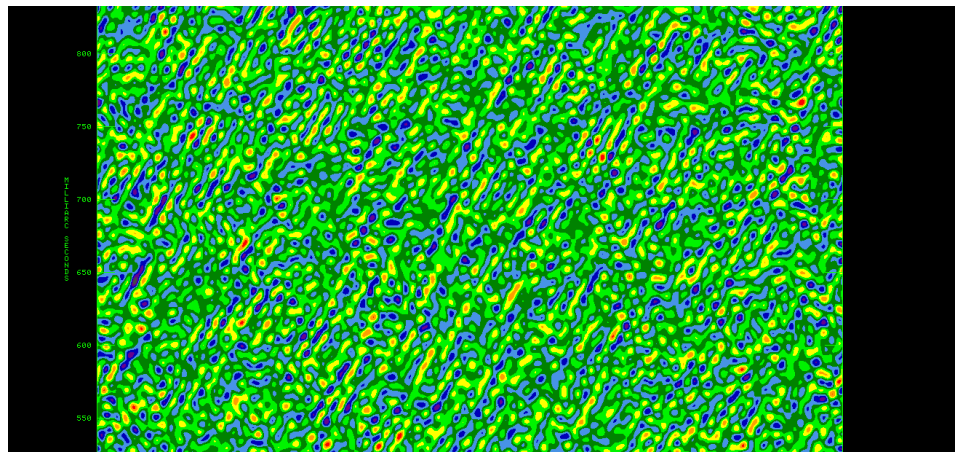


図 4.10 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.0005 imsize 1024 RAshift -0.25 Decshift 0.68

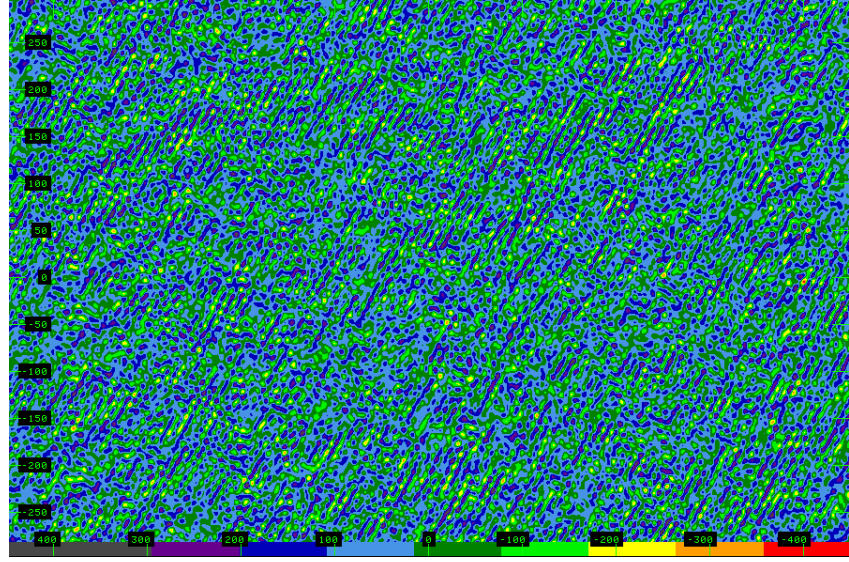


図 4.11 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.001 imsize 1024

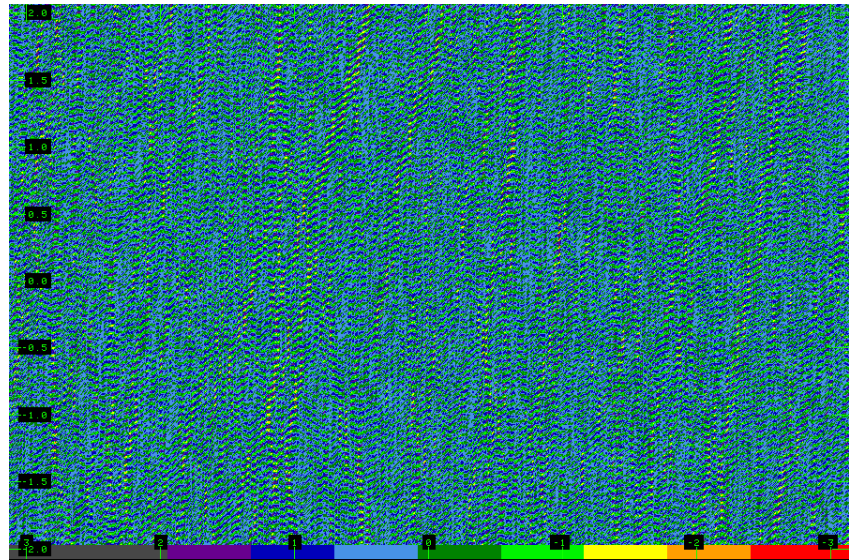


図 4.12 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.007 imsize 1024

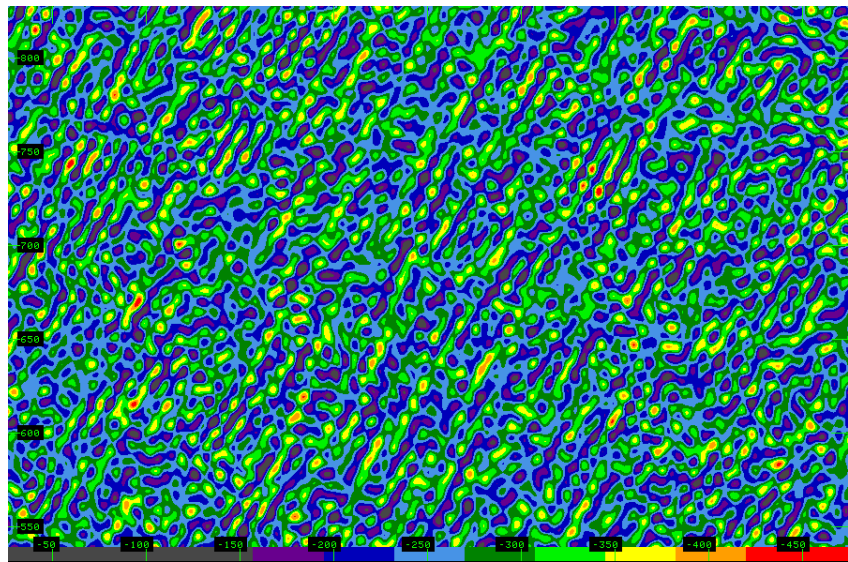


図 4.13 G14.23-05 ダーティイメージ cellsize:0.0005 imsize 1024 RAsht -0.25 Decshift 0.68

5 考察

エポック 1 において、図 4.3 上では天体からの放射の成分はみられなかった。図 4.4 の中央上付近、また図 4.5 の中心付近には天体からの放射とみられる成分が受かっている。

エポック 2 において、255CH のみの積分では図 4.5 の中央右上付近に少し明るい成分が見られるのみで、ほかの成分は見つからないように見える。253 – 257CH の 5CH 積分でも、図??(RA,Dec)=(-0.35,0.75) 付近に図 4.5 で見られた放射と同じと考えられる成分が寄り濃く見えるのみである。

この 2 つのエポックを見ると (RA,Dec)=(-0.25,0.68) の近くに明るい放射が見られることから、G14.23-05 は RA=18^h18^m12.57^s Dec=-16°49′22.1″ 付近に存在するのではないかと考えられる。

そこで、UV 再計算テーブルを RA=18^h18^m12.57^s Dec=-16°49′22.1″ を中心として再処理を依頼し、再度解析を行った。

5.1 エポック 1 (再解析)

UV 再計算をアプライし、ほぼ最初からのやり直しであるため、1 回目の解析と同様にまず位相補償前まで正しく解析を行えているかどうかを判断するため、参照電波連続波源 J1825-17 のイメージングを行った。(図 5.1) また、エポック 1 の合成ビームマップは図 5.2 となった。

観測自体が変わったわけではないため UV カバレッジは図 4.1 と同様である。G14.23-05 については、257CH で積分しダーティイメージを作成したところ (図 5.3)、中心付近に天体からの放射とみられる成分が見えていたため、クリーンイメージを作成した。(図 5.4)

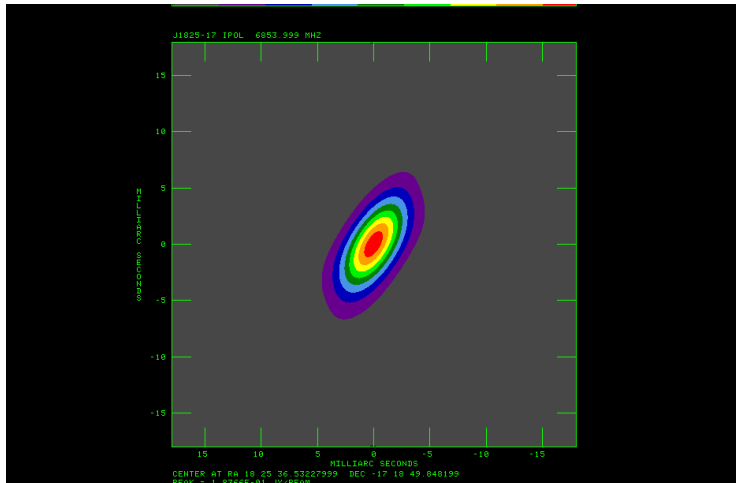


図 5.1 参照電波連続波源 J1825-17
クリーンイメージ (エポック 1)

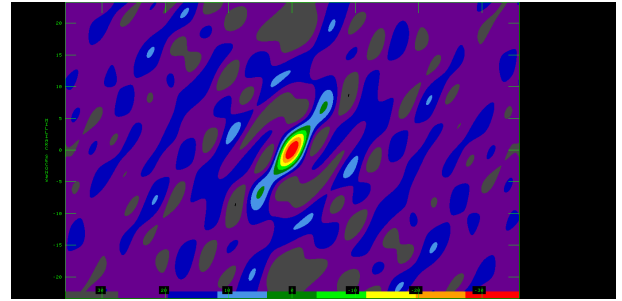


図 5.2 合成ビームマップ (エポック 1)

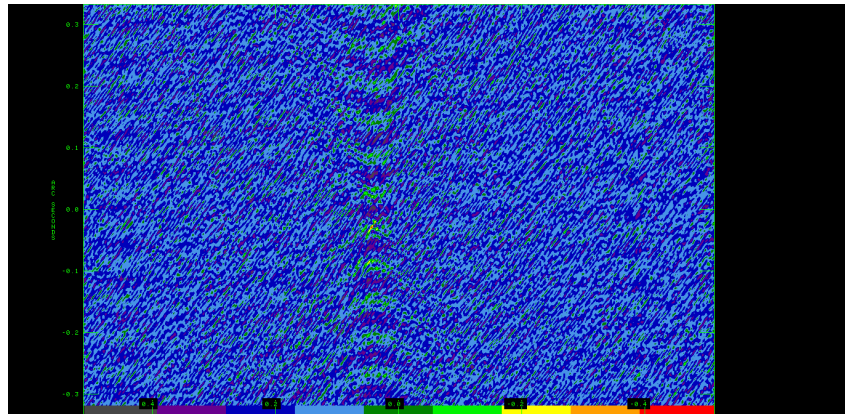


図 5.3 G14.23-05 ダーティイメージ cellsixe:0.001 imsize 1024

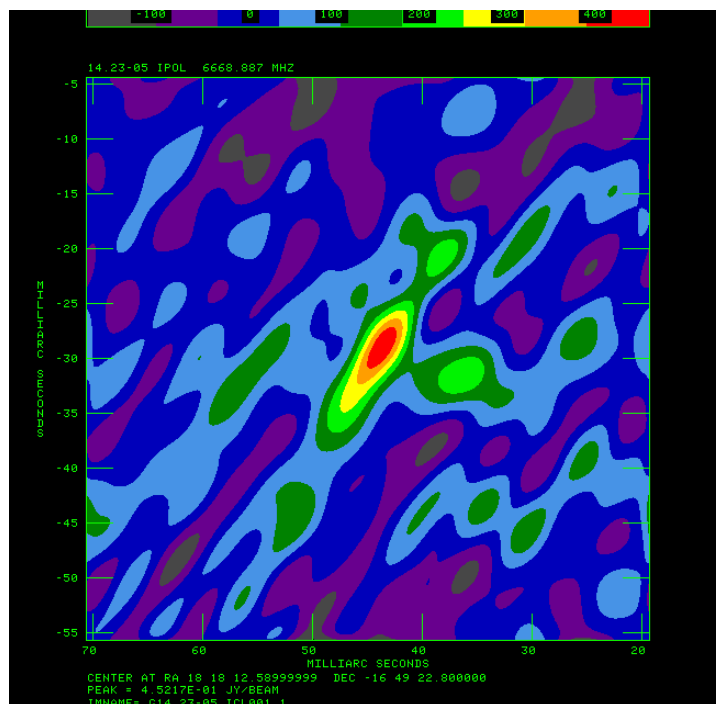


図 5.4 G14.23-05 クリーンイメージ cellsixe:0.0001 imsize 512(RA,Dec)=(0..045,-0.03)

5.2 エポック 2（再解析）

同様に、位相補償前まで正しく解析を行えているかどうかを判断するため、参照電波連続波源 J1825-17 のイメージングを行った。（図 5.5）エポック 2 での合成ビームマップは図 5.6 である。

1 エポック目と観測に参加している局数が異なるため、合成ビームの形が異なっている。G14.23-05 について

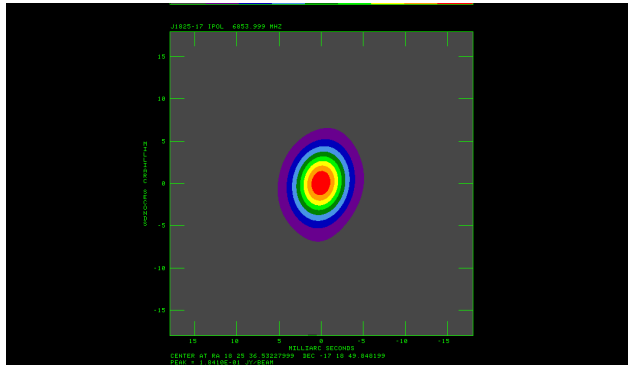


図 5.5 参照電波連続波源 J1825-17
クリーンイメージ (エポック 2)

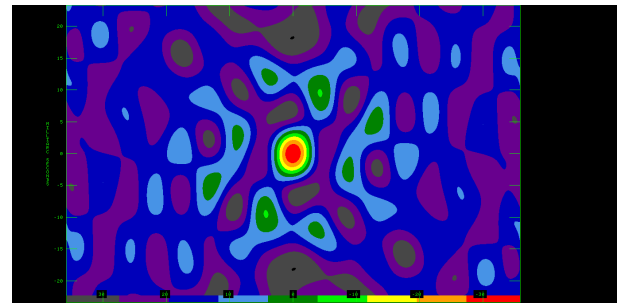


図 5.6 合成ビームマップ (エポック 2)

は、255CH で積分しダーティイメージを作成したところ（図 5.7）、エポック 2 も中心付近にと天体からの放射とみられる成分が見えていたため、クリーンイメージを作成した。（図 5.8）

ただし、こちらではエポック 1 よりアンテナの数が少なかったためか、Task CALIB で J1825-17 について導出した解が不適切なものであったため、セルフキャリブレーションは実施できなかった。

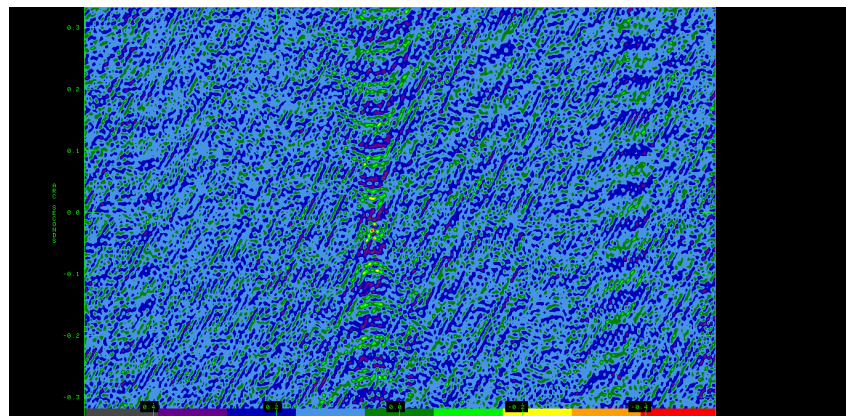


図 5.7 G14.23-05 ダーティイメージ cellsixe:0.0001 imsize 1024

これらの解析より、G14.23-05 の絶対位置は Green et al.(2010) で得られていた、 $(RA, Dec) = (18^h 18^m 12.59^s, -16^\circ 49' 22.8'')$ ではなく、以下の表 5.1 の値であると考えられる。

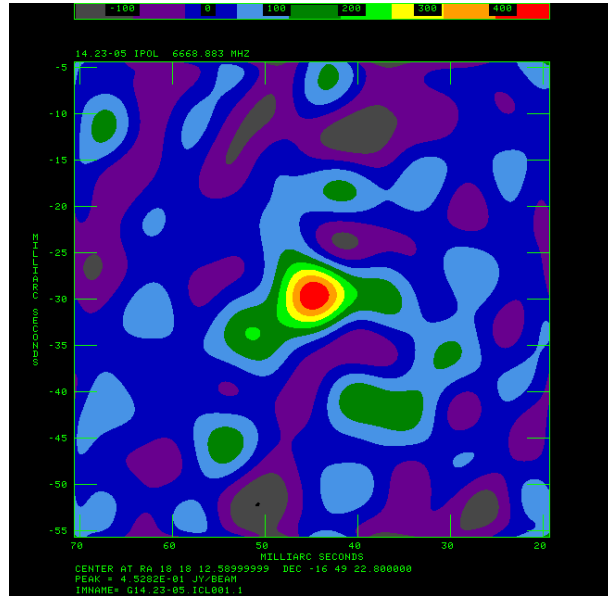


図 5.8 G14.23-05 クリーンイメージ cellsixe:0.0001 imsize 512(RA,Dec)=(0..045,-0.03)

表 5.1 G014.23-00.50 の座標

	R.A(J2000)	Dec.(J2000).
G014.23-00.50	$18^{\text{h}}18^{\text{m}}12.573^{\text{s}} \pm 2.30 \times 10^{-5}$	$-16^{\circ}49'22.129'' \pm 4.98 \times 10^{-4}$

5.3 エポック 3

一回目の解析ではエポック 3 については触れずに再処理を依頼したが、こちらもエポック 1,2 と同様に解析を行った。

エポック 3 の UV カバレッジは図 5.9 のとおりである。参照電波連続波源 J1825-17 のイメージングは図 5.10 のようになり、合成ビームマップは図 5.11 のようになった。G14.23-05 については、252CH を積分しダーティイメージを作成したところ、図 5.12 のようになり、1 エポック目、2 エポック目のように画像が収束しなかった。画像が収束しなかった原因として、キャリブレーションがうまくいっていない、天体からの放射が弱くなった、観測条件が悪くなった、などが考えられる。

天体からの放射の変化があるかどうかの確認として、Task POSSM にて位相補償までの解をアプライしたテーブルを用いて、メインピーク付近の 240CH-280CH について全時間全基線で積分しプロットした図の比較を行った（図 5.13 図 5.14 図 5.15）。これらを比較しても 1 エポック目、2 エポック目と 3 エポック目で 14.23-05 の放射強度はそれほど違いはないように見える。よって、天体からの放射にはそれほど変化はないと考えられる。

次にキャリブレーションの成否、観測条件についてであるが、J1825-17 のピークの値と、RMS の値の比較を行った。Task JMFIT で取得した値を以下の表 5.2 に記す。3 エポック目はピークの値が他のエポックよ

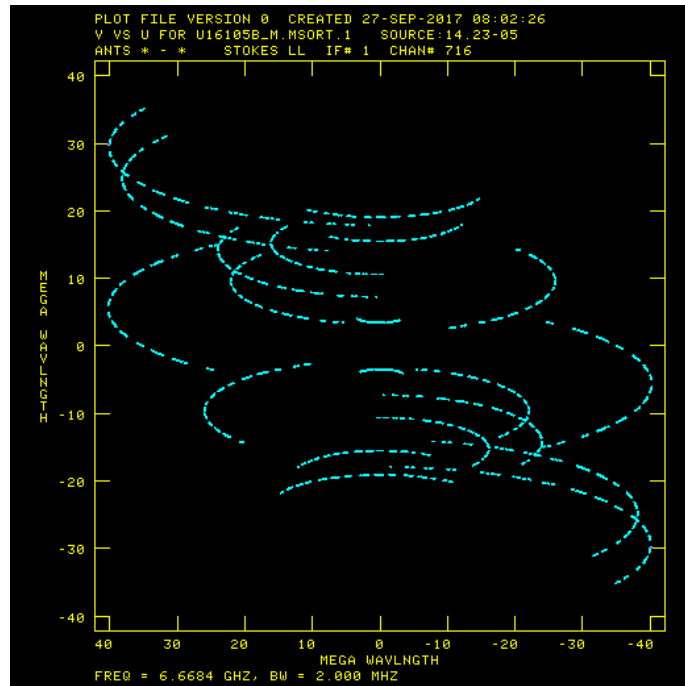


図 5.9 エポック 3UV カバレッジ

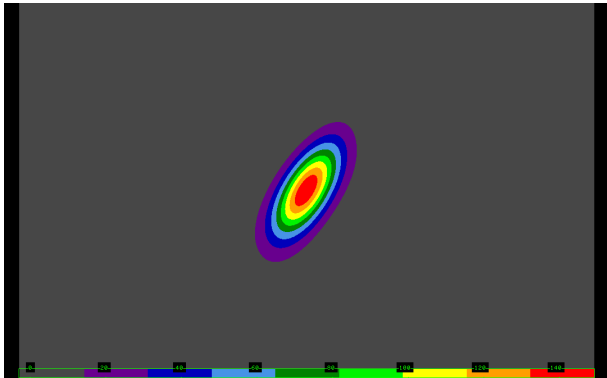


図 5.10 参照電波連続波源 J1825-17
クリーンイメージ (エポック 3)

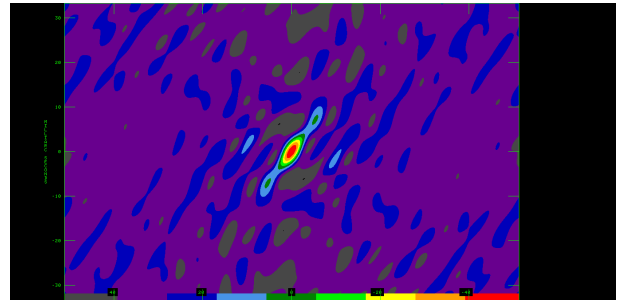


図 5.11 合成ビームマップ (エポック 3)

表 5.2 J1825-17 ピーク値・RMS・S/N 値

エポック数	ピーク値 (mJY/BEAM)	RMS(mJY/BEAM)	S/N 値
1 エポック目	182.285 +/- 1.613	1.64	111.15
2 エポック目	184.692 +/- 2.201	2.23	82.82
3 エポック目	154.147 +/- 3.506	3.57	43.19

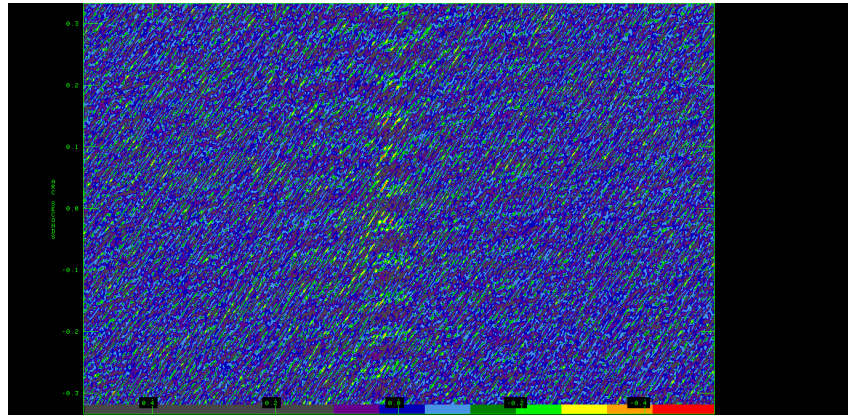


図 5.12 G14.23-05 ダーティイメージ cellsixe:0.0001 imsize 1024

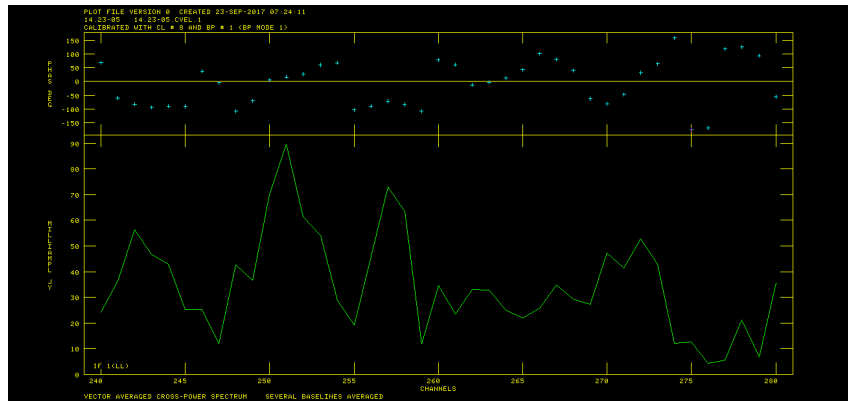


図 5.13 エポック 1 での 14.23-05 のメーザースペクトル（縦軸：電波強度 Jy、横軸：周波数チャンネル）

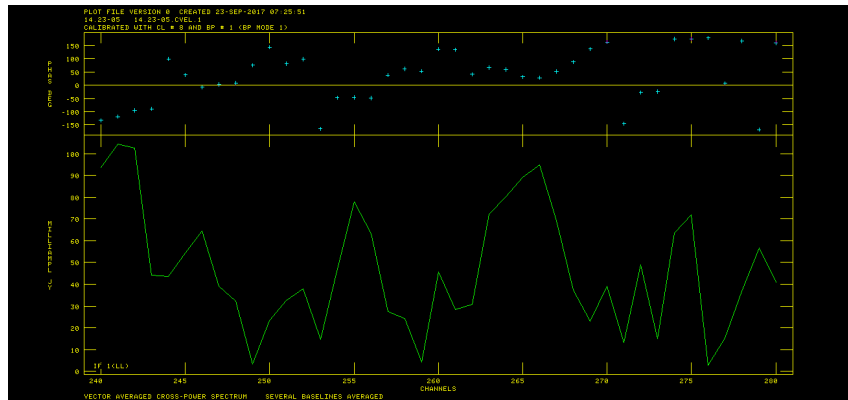


図 5.14 エポック 2 での 14.23-05 のメーザースペクトル（縦軸：電波強度 Jy、横軸：周波数チャンネル）

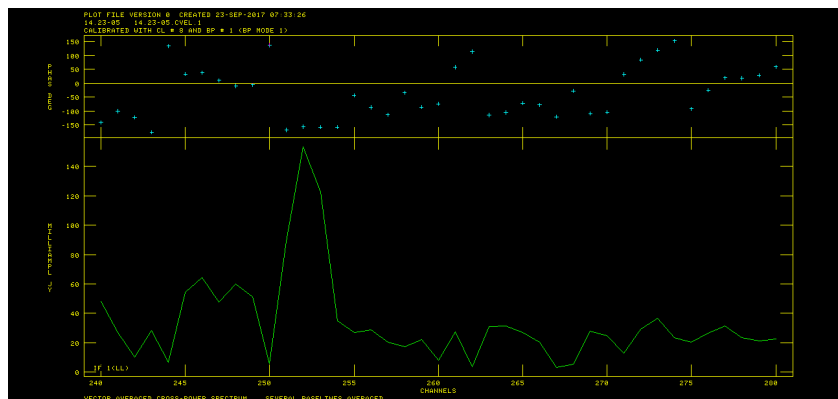


図 5.15 エポック 3 での 14.23-05 のメーザースペクトル（縦軸：電波強度 Jy、横軸：周波数チャンネル）

り 30mJy 程度低くなっており、RMS の値が 1.5 倍～2 倍以上高くなっている。ピークの値が落ちていることからキャリブレーションがうまくいっていなかった可能性、RMS が上がっていることから観測条件が 1、2 エポック目より悪くなっていた可能性がある。3 エポック目の観測については表 3.2 のとおり、水沢局、小笠原局、石垣局の 3 局が雨となっており、特に小笠原局については T_{sys} の値が他のエポックと比べ倍以上高くなっていた。この値の変化から 3 エポック目は S/N 値が他 2 エポックより半分以下に下がってしまっている。このことが画像が収束しなかったことに影響している可能性がある。

また、キャリブレーションが成功しているかどうかについて、キャリブレーションの前と後でビジビリティが上がっているかどうか確認を行った。比較のため 1 エポック目と 3 エポック目について日立一水沢基線を用いて Task VPLOT でプロットした。（図 5.16、図 5.17、図 5.18、図 5.19） これらを見ると、エポック 3

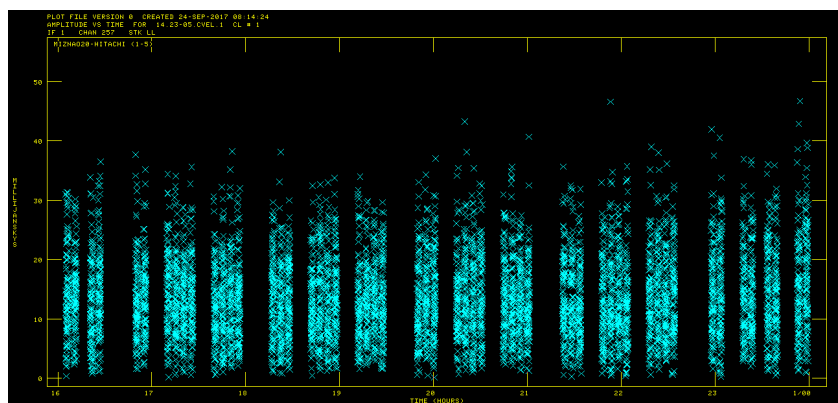


図 5.16 エポック 1 でのキャリブレーション前のビジビリティ（日立一水沢基線）

もエポック 1 と同様にキャリブレーションを行うことで振幅の値は上がっているため、キャリブレーションでの大きなミスはなかったと考えられ、観測条件の悪化によりデータの質が悪くなっていたと考えられる。しかし解析がうまくいっていない可能性は捨てきれないため、今後も解析が間違っていないかの確認は必要であろう。場合によっては 3 エポック目の解析をもう一度やり直しを行う必要があると思われる。

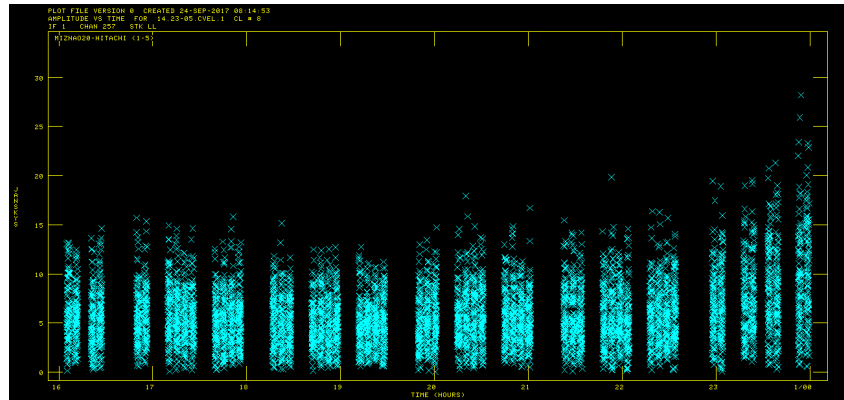


図 5.17 エポック 1 でのキャリブレーション後のビジビリティ（日立一水沢基線）

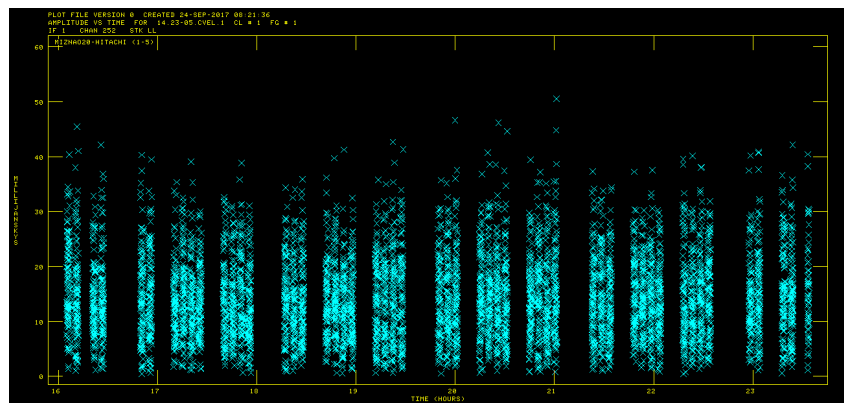


図 5.18 エポック 3 でのキャリブレーション前のビジビリティ（日立一水沢基線）

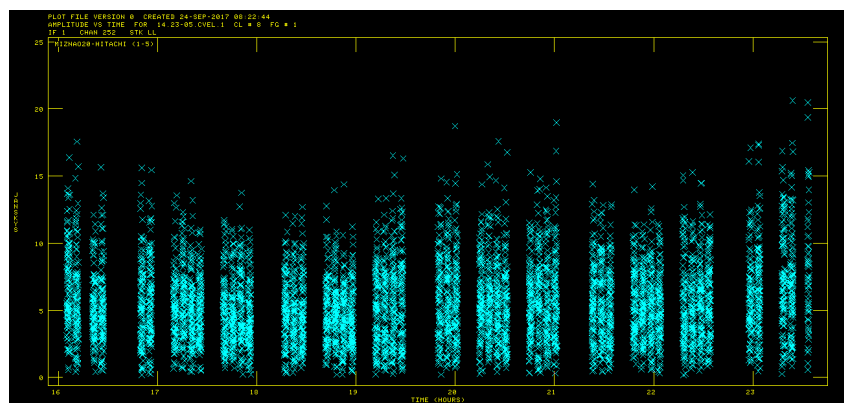


図 5.19 エポック 3 でのキャリブレーション後のビジビリティ（日立一水沢基線）

5.4 バースト以外の成分

先行研究で観測されていた 25.3km/s 以外の 8 成分についてだが、エポック 1、エポック 2 ではその付近の周波数の CH をイメージングしてもそれらしき放射は見られなかった。3 エポック目については、G14.23-05 のメインの成分が収束しなかったため、他の成分についても収束せず判別ができなかった。これは 8 成分がバースト期ではなかったために強度が弱く成分を検出できなかった、また観測の際にアンテナを向けていた方向と、実際の G14.23-05 の位置が少しずれていたためうまく検出できなかった、VLBI 観測のため感度が落ち検出できなかった、などが考えられる。したがってバースト成分が他成分と同様の励起源に付随しているかはわからなかった。

5.5 spiral shock モデル

観測目的の一つとして、G14.23-05 の強度変動のメカニズムに spiral shock モデルが適用できるような edge-on を想起させるような空間分布を示しているかの確認があったが、1 エポック目と 2 エポック目のクリーンイメージを見ると成分の形はそれぞれの合成ビームの形に大きくよっていると考えられ edge-on を想起させるような形といえるか断定はできないと考えられる。

6 まとめ

本研究では G014.23-00.05 に付随する 6.7GHz メタノールメーザーに対し、2016 年 4 月 12 日から 14 日にかけて行った VLBI 観測のデータ解析を行った。この解析結果を以下にまとめる。

G14.23-05 絶対位置

Green et al.(2010) では $(RA, Dec) = (18^h 18^m 12.59^s, -16^\circ 49' 22.8'')$ とされていたが、今回の解析結果よりそこから $(RA, Dec) = (-0.25, 0.68)$ 離れた、 $(RA, Dec) = (18^h 18^m 12.573^s \pm 2.30 \times 10^{-5}, -16^\circ 49' 22.129'' \pm 4.98 \times 10^{-4})$ がこの天体の絶対座標であると判明

バースト以外の成分

先行研究であげられたバースト以外の 8 成分については、イメージングを試みたが検出できなかった。よってバーストの成分が他成分と同様の励起源に付随しているか判断できてない。

spiral shock モデル

G14.23-05 のマップ画像は得られたが形が合成ビームの形に大きく寄っていると考えられ、spiral shock モデルが適用できるか判断はできなかった。

バーストの成分が他成分と同様の励起源に付随しているかの判断、また spiral shock モデルが適用できるかの判断については解析の際のパラメータを変えることや、解析のアプローチを変えることで判断が可能になる可能性があるため、解析を続ける必要があると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの方々にご指導、ご協力をいただき誠に感謝申し上げます。

指導教官である百瀬宗武教授には、天文学の基礎から解析の際の改善点など様々なことについてご指導いただきました。また、同研究室の米倉覚則准教授には G14.23-05 の検出のためのご提案など具体的にご指導いただきました。お二方には大変感謝しております。

宇宙科学教育センターの杉山孝一郎研究員には、解析の手法から結果についての考察など全面的にご指導いただき誠に感謝申し上げます。また、鹿児島大学の澤田-佐藤 聡子研究員には、短い間ではありましたが AIPS の基礎についてご指導いただき誠にありがとうございました。

研究室の佐藤宏樹さんをはじめとする先輩方にも大変お世話になりました。また、同期の皆様にも感謝しております。皆様に心よりお礼申し上げます。ありがとうございました。

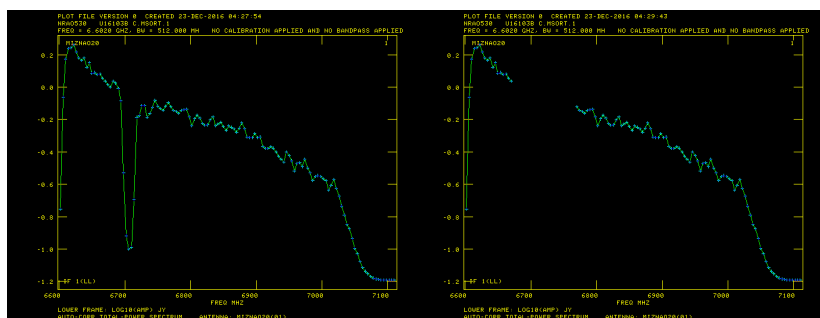
付録 A フラグした周波数

解析の際、広域帯データ（512MHz 帯域）においてバンドパスフィルターやノッチフィルターなどの影響と思われる強度の低下があった。それぞれのアンテナにおいてフラグした周波数について記載する。なお、これらのフラグした周波数帯は数 MHz の違いはあるものの基本的にエポック間で共通である。下の表付録 A.1 には 1 エポック目でフラグした周波数を記載する。また、水沢局をフラグした例が以下の図付録 A.1 と図付録

表付録 A.1 フラグした周波数

水沢局	6678-6770MHz
入来局	6882-7114MHz
小笠原局	7082-7114MHz
石垣局	6602-6622MHz 7042-7114MHz
日立局	6602-6630MHz 6690-6802MHz 6882-7114MHz

A.2 である。また、局によってアンテナの向く方向に障害があるなどで観測できない時間があった。そちらは



図付録 A.1 水沢局フラグ前

図付録 A.2 水沢局フラグ後

以下の表付録 A に記す。アンテナの基線についてはクロスパワースペクトルを見た際の位相の傾きによって

1 エポック目		2 エポック目	
小笠原局	23:46:00-00:40:00	水沢局	23:57:00-00:39:59
石垣局	18:08:00-18:10:00	小笠原局	23:15:00-00:39:59
日立局	00:02:00-00:18:00	日立局	23:38:00-00:39:59

表付録 A.2 フラグした時刻

フラグするか否かを決定した。位相の傾きがほぼ同じ位になるようにフラグをしている。フラグした各基線の周波数は以下の表付録 A のとおりである。また、1 エポック目の水沢局-日立局でフラグ前とフラグ後のクロスパワースペクトルを例として以下に挙げる。（図付録 A.3、図付録 A.4、図付録 A.5）

参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 (福井康雄他 2008)

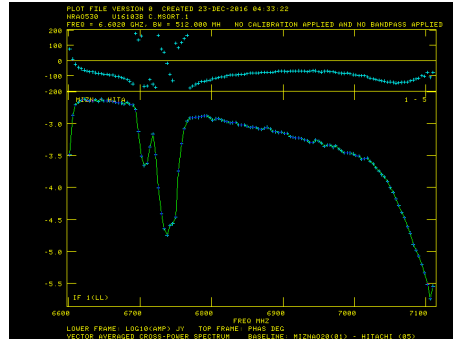
1 エピソード目

水沢局-小笠原局	7002-7114MHz
水沢局-日立局	6802-6882MHz

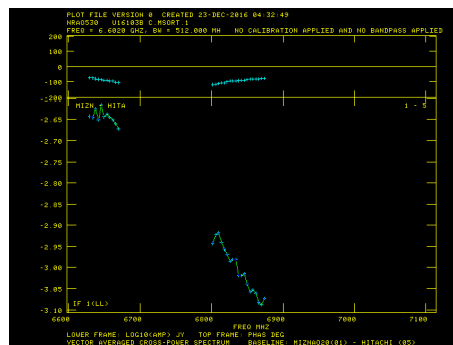
2 エピソード目

水沢局-日立局	6786-6882MHz
入来局-小笠原局	6962-7002MHz
入来局-日立局	6618-6642MHz

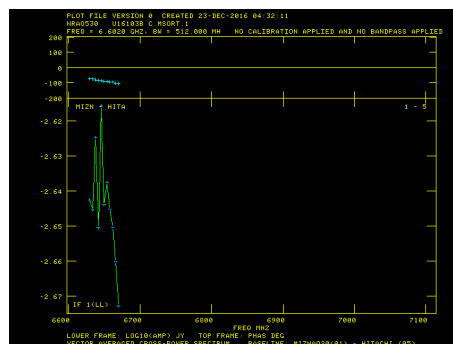
表付録 A.3 フラグした基線、周波数



図付録 A.3 水沢局-日立局フラグ前



図付録 A.4 水沢局-日立局各アンテナフラグ後



図付録 A.5 水沢局-日立局基線フラグ後

[2] 干渉計サマースクール 2005 (国立天文台編)