

6.7GHz メタノールメーザー源 G006.18–00.35 の東 アジア VLBI 観測網を用いた内部固有運動の計測

理学部理学科物理学コース

16S2020F 高木奏人

2020 年 3 月 30 日

概要

EAVN(東アジア VLBI 観測網)にて観測された周期強度変動が確認されているメタノールメーザー源である G006.18–00.35 について、この天体がどのような周期変動モデルに適するのか切り分けるためにデータ解析を行った。データは合計 4 エポック分あるが、本卒業研究では 1 エポック目の空間分布を取得した。しかし、この 1 エポック目の空間分布は先行研究と大きく異なるものとなってしまった。今後は較正方法などを見直して 1 エポック目のデータの再解析を行い、その後、残りのエポックについても同様に空間分布の取得を行っていきたい。また、最終的には全ての情報から対象天体の固有運動を導出し、周期強度変動機構の解明を目指す。

目次

1	研究背景	4
1.1	大質量星形成	4
1.2	メーザー	4
2	対象天体 G006.18–00.35	6
2.1	天体選出条件	6
2.2	先行研究	6
3	研究目的	9
4	観測	10
5	解析手法	11
6	結果	14
7	考察	18
8	まとめ	19

1 研究背景

1.1 大質量星形成

恒星は大きく、質量が太陽の 8 倍以上の大質量星とそれ以下の中・小質量星に分けることができる。中・小質量星については、進化のタイムスケールが長いこと、比較的近傍に存在すること、などの要因からその形成過程の理解は進んでいる。現在理解されている形成過程のシナリオは以下の通りである。[1]

1. 星間ガス雲である分子雲の中でガスが分裂・収縮し、重力的に束縛される状態になると、分子雲全体の平均よりも密度が高く、重力的に束縛された分子雲コアという領域ができる。
2. 分子雲コア自身の自己重力と、乱流・熱による運動エネルギーや磁場のエネルギーなど重力に対抗する力とのバランスが崩れ、自己重力が優勢になる (密度が 10^6 個 cm^{-3} を越えるあたり) と、重力収縮が進んで第 1 のコア (ほぼ力学的に平衡状態のガス球) が出来る。その後、second collapse (平衡状態が破れる現象) を経て、原始星ができる。
3. さらに原始星に星間ガスが降着し原始星の質量が増加する。この段階を主質量降着期という。
4. 主質量降着期を終えた星は、ゆっくりと収縮し重力エネルギーを解放する。この収縮を前主系列収縮という。この結果、中心温度が上昇し、水素燃焼反応が始まる。これ以降は核反応エネルギーによって圧力が保持されるので収縮が止まり、半径が一定となる。こうして主系列星が誕生する。

一方、大質量星に対しては、上記と同様の形成過程で考えると寿命の間に大質量まで成長できないという矛盾が生じてしまうため、適用することができない。また、大質量星は絶対数が少なく相対的に遠方に存在するので、形成過程についての理解は現在も不十分である。

1.2 メーザー

1.2.1 メーザー現象

熱平衡状態の粒子の励起状態の分布は衝突による励起と脱励起だけで決まる、いわゆるボルツマン分布に従い、以下の式が成り立つ。[2]

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

ここで n_1, n_2 はそれぞれの準位における粒子の数密度であり、 g_1, g_2 は縮退度である。この時、 $n_2/g_2 < n_1/g_1$ の安定した状態となる。しかし、宇宙空間は粒子数密度が低いので、励起、脱励起は衝突によるものよりも自発放射や吸収によるものの影響の方が大きくなることもあり、粒子の励起状態の分布がボルツマン分布に従わなくなる場合がある。この時、エネルギーの高い準位の方が粒子数が多くなる、あるいは言い換えると、 $n_2/g_2 > n_1/g_1$ が成り立つ場合も生じうる。この状態のことを反転分布といい、非常に不安定な状態である。この状態から何らかのきっかけで粒子がエネルギーの高い準位から低い準位に脱励起して光子を放出すると、それを皮切りに連続的に粒子が低い準位に脱励起する誘導放射が起こり、放射の強度が指数関数的に増加していく。この現象のことをメーザー (MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ぶ。

1.2.2 6.7GHz メタノールメーザー

現在までに OH, H₂O などの分子によるメーザーが確認されているが、その中でもメタノール (CH₃OH) メーザーは衝突による励起が優勢な ClassI と、放射励起が優勢な ClassII に分けられ、6.7GHz メタノールメーザーは ClassII の代表的なメーザーである。その中には周期強度変動するものも確認されている。ClassII メタノールメーザーは大質量星形成領域でのみ検出される放射であるので、大質量星形成過程の解明に役立つと期待されている。

また、メーザー源は輝度が非常に高く、数 au の小さな領域からの放射なので、高い空間分解能を持っているが感度があまり良くない VLBI (Very Long Baseline Interferometry) での観測が可能である。この VLBI による複数エポック観測により、視線速度、固有運動の両方が解明できる。ここでエポックは天球上の位置を示す時刻を意味する。

2 対象天体 G006.18–00.35

2.1 天体選出条件

本研究で解析をする天体の選出条件は以下の通りである。

- 杉山他 (投稿準備中) で周期強度変動が検出されているメタノールメーザー天体
- EAVN(東アジア VLBI 観測網) による複数エポックの VLBI マップが存在
- フラックス密度の周期変動の極大期または極小期に近い時期に観測が行われた天体

これらの条件から合計 4 天体が選出されたが、本研究で解析を行ったのはその中で周期が最も長い G006.18–00.35 である。尚、他 3 天体については茨城大学電波天文観測研究室内で現在解析中、または解析済みとなっている。

2.2 先行研究

対象天体の座標は $\text{R.A. (J2000)} = 18^{\text{h}}01^{\text{m}}02^{\text{s}}.160$, $\text{Dec. (J2000)} = -23^{\circ}47'10''.8$ であり、距離は 5.1kpc であることが年周視差法により確認されている [3]。加えて、EAVN のデータ解析の結果 (1 エポック目) から、全時間積分スペクトル (図 1)、メーザースポットの空間分布 (図 2) も明らかになっている [4]。

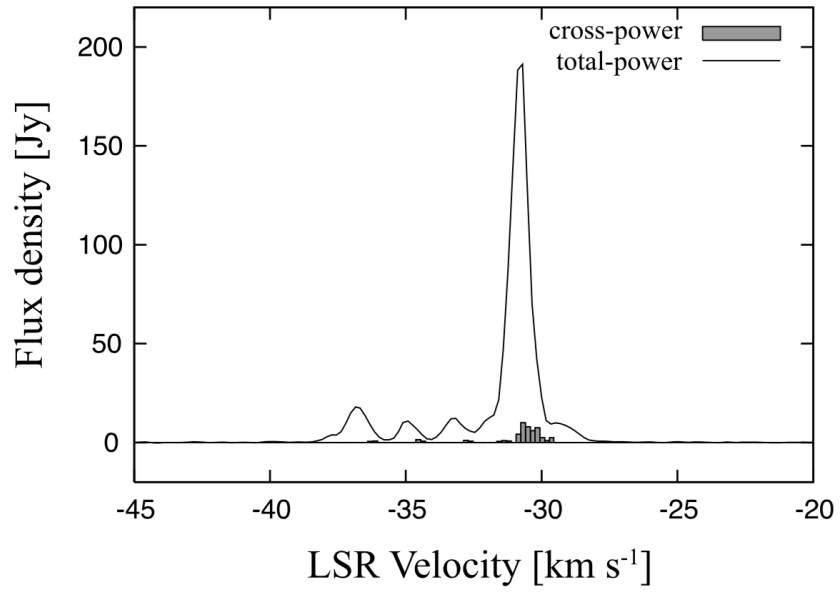


図 1: 全時間積分スペクトル

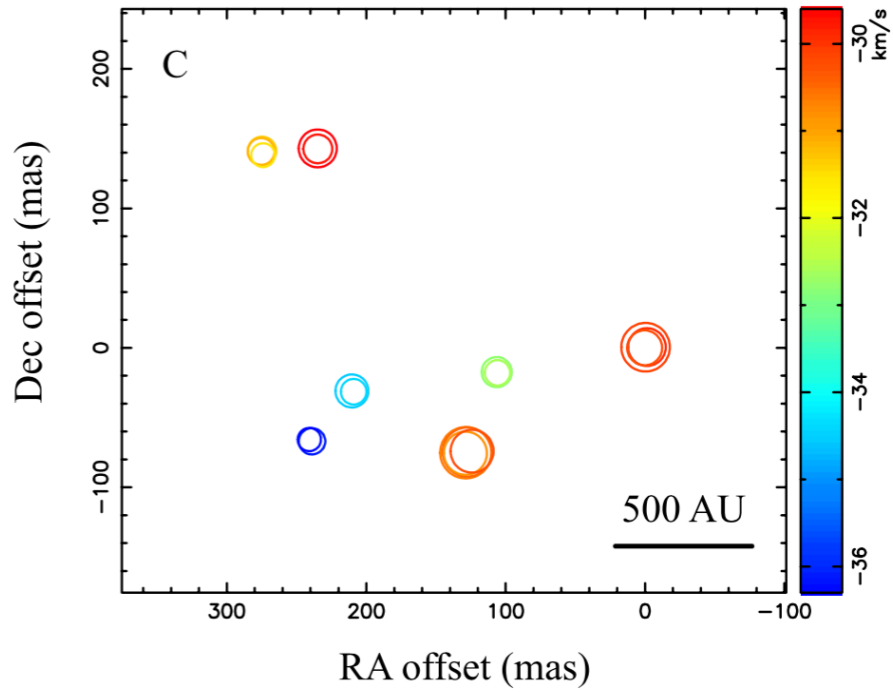


図 2: 空間分布 (1 エポック目)

また、天体選出条件にも記述しているが、この天体に付随するメタノールメーザーは周期強度変動することが分かっていて、その周期は 179 日である。図 3、図 4 は日立 32m 望遠鏡によるモニター観測で得られた対象天体 G006.18-00.35 の各速度成分の強度の時間変化である [5]。これを見ると確かに強度が周期的に変化していることがわかる。

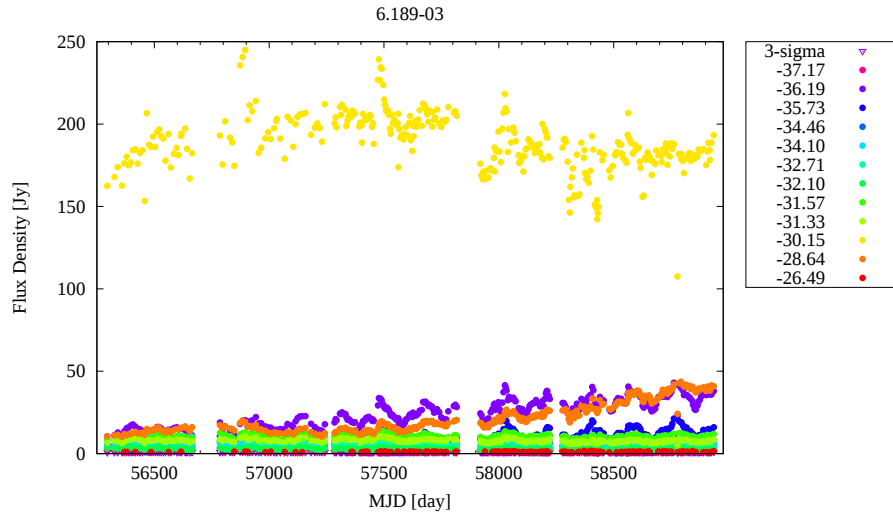


図 3: 強度変動プロット

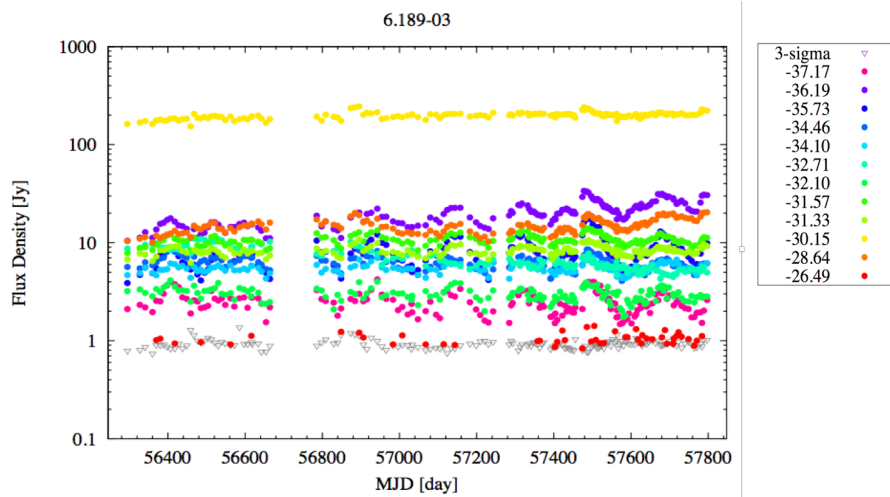


図 4: 強度変動プロット（対数スケール）

3 研究目的

以上を背景に、本研究では EAVN により観測された対象天体 G006.18-00.35 のマルチエポックデータの解析を行い、各エポックごとに空間分布を取得し、そこから天体の固有運動を導出することを目的とした。

4 観測

EAVN では対象天体 G006.18-00.35 を計 4 回観測していた (そのうち 1 エポック目は [4] で解析済み)。それぞれのエポックについての観測日、参加局、観測周波数帯を表 1 に示す。ここで VERA4 局とは水沢・入来・小笠原・石垣局のことである。また、データは観測周波数帯域幅 4MHz を 1024 チャンネルに分光したものを使用した。総観測時間は各エポックともに 9 時間 30 分ほどであり、対象天体に関してはその中で 15 分の観測を 4 回行っている。

観測日 1	2010/8/29	2011/10/5	2012/9/23	2013/10/29
エポック	1	2	3	4
参加局	上海	山口	山口 上海	山口 KVN 蔚山
	VERA4 局 日立			
観測周波数帯	6666~6670 MHz			

表 1 観測概要

続いて、解析に用いた天体とその理由を表 2 に示す。それぞれの較正をするのに適した特徴を持った天体として、非常に明るい ($\sim 5000\text{Jy}$) メタノールメーザー G9.62、明るい連続波源 NRAO530, 3C454.3 を選んだ。

観測天体	観測理由
G006.18-00.35	解析対象
G9.62	装置、相関処理の際の異常がないかを 確認
NRAO530	相関処理時の遅延時間残差較正 バンドパスの位相・振幅特性較正
3C454.3	

表 2 解析に用いた天体

5 解析手法

解析ソフトには AIPS, Difmap を用いた。今回行った解析の手順は以下の通りである。

1. FITS データ読み込み
2. データチェック
3. 使用不可なデータのフラグ
4. 振幅ゲイン較正
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 (テンプレート法)
10. メーザーピークによるフリンジフィッティング
11. Dirty image 作成
12. Self calibration
13. Clean image 作成
14. メーザースポットのパラメーター取得

それぞれの解析パートについて簡単に説明する。AIPS での較正では相関ビジビリティデータは改変せず、較正結果はファイルに添付するテーブルに書き込まれる。

1. FITS データ読み込み

VLBI 観測により得られた FITS データを AIPS 内に読み込む。1 つの観測日のデータが複数の FITS データに分割されている場合は、それらを 1 つのデータに結合する。

2. データチェック

観測スケジュール、観測に参加したアンテナの情報を確認する。

3. 使用不可なデータのフラグ

アンテナごとに何んらかの理由で正しく観測されなかった時間帯をフラグする。しかし、今回解析した 1 エポック目のデータにそのような異常は見られなかった。

め、ここではデータのフラグは行っていない。

4. 振幅ゲイン校正

頂いた観測データはなぜか振幅方向に 3 ~ 4 倍引き伸ばされたものとなっているので、これを規格化する。また、バンドパスの振幅校正のテーブルを作成する。

5. Delay&Rate 校正

相関処理時の遅延時間補正の残差を明るい連続波源（NRAO530、3C454.3）を用いて校正する。この残差は、主に各局の水素メーザーの時刻同期精度に起因しているので、校正天体は必ずしもターゲット天体に近い必要はない。

また、上記のもの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校正を行う。これを用いて 6. バンドパス位相特性校正にてテーブルを作成する。

6. バンドパス位相特性校正

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のテーブルを作成する。

7. バンドパス振幅校正アプライ

バンドパス振幅校正テーブルをアプライしたファイルを新たに作成し、そこにバンドパス位相校正テーブルをコピーする。

8. ドップラー校正

対象天体について、どのチャンネルをどの視線速度値と定めて校正を行うか決め、周波数方向へシフトされたファイルを作成する。その際、周波数方向へのシフト量が $\pm 1\text{ch}$ よりも小さくなるように視線速度値を定める。

9. 振幅ゲイン校正 (テンプレート法)

メーザー自身の自己相関スペクトルを用いた、各局の振幅ゲインの時間変動校正を行う。また、併せてフラックスの絶対値校正も行う。この際、「メーザー自身が VLBI 観測中に時間変動していない、という過程の元で、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している」という前提で、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校正を行う。この手

法のことをテンプレート法という。そのために必要なテンプレートとなるスペクトルは、ある時刻におけるアンテナ雑音温度 T_{sys} 、アンテナ開口能率 η が既知でなければならない。

10. メーザーピークによるフリンジフィッティング

メーザーピーク成分を用いてフリンジフィッティングを行い、位相解と遅延時間変化率解を得る。

11. Dirty image 作成

対象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。そのファイルを元に Dirty image と合成ビームマップを作成する。

12. Self calibration

13. Clean image 作成

較正天体では十分でなかった部分を、メーザースポット分布自身を用いて較正する。

まず、上記の Dirty image を元にビジビリティの位相較正を行い、そのデータを元にもう一度分布を描く。

次にその分布イメージを元に、ビジビリティの位相・振幅を同時に解く。

最後にこれらの作業で得られた位相・振幅解を、メーザー放射が見られる全チャンネルにアプライし、8 秒角四方の広範囲イメージキューブと、2 秒角四方の高空間分解能イメージキューブの 2 つを作成する。ここでイメージキューブは各周波数チャンネルごとの Clean image を 1 つのファイルにまとめたものを意味する。

14. メーザースポットのパラメーター取得

上記のイメージキューブから、メーザースポットのパラメーターを取得する。このパラメーターから、対象天体のメーザースポットの空間分布を描くことができる。

6 結果

この卒業研究で解析したデータはエポック 1 のみである。得られた UV カバレッジ (図 4)、合成ビームマップ (図 5)、Dirty image (図 6) は以下のようにになった。図 5、図 6 の座標はピークメーザースポットを中心 (R.A. = $18^{\text{h}}01^{\text{m}}02^{\text{s}}.16$, Dec. = $-23^{\circ}47'10''.8$) とした相対座標であり、どちらも $\text{cellsize} = 0.001''$, $\text{imsize} = 1024$ である。

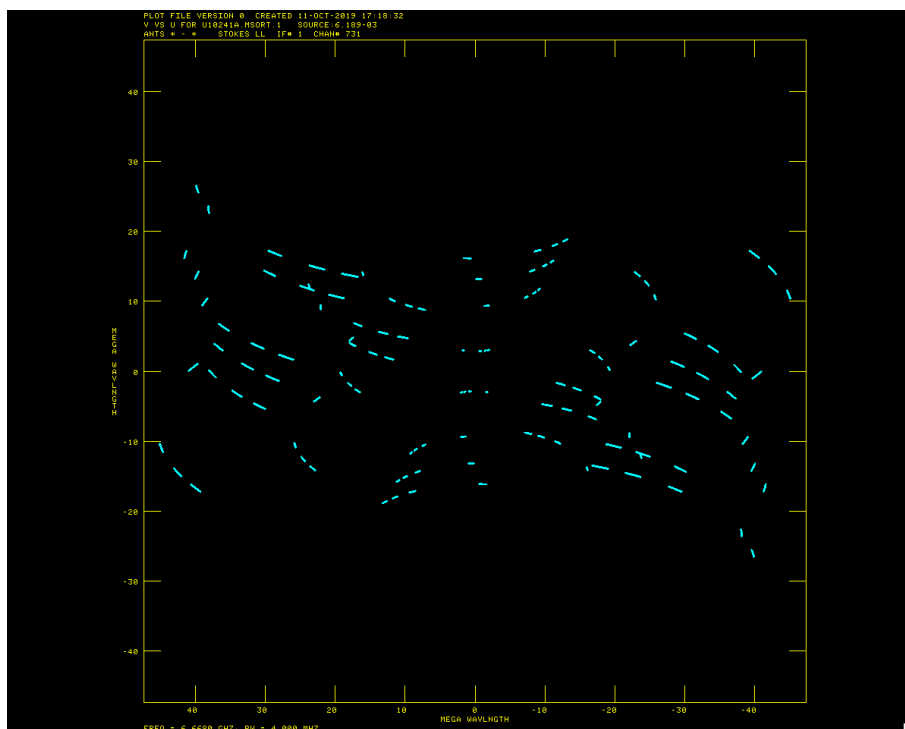


図 5: UV カバレッジ

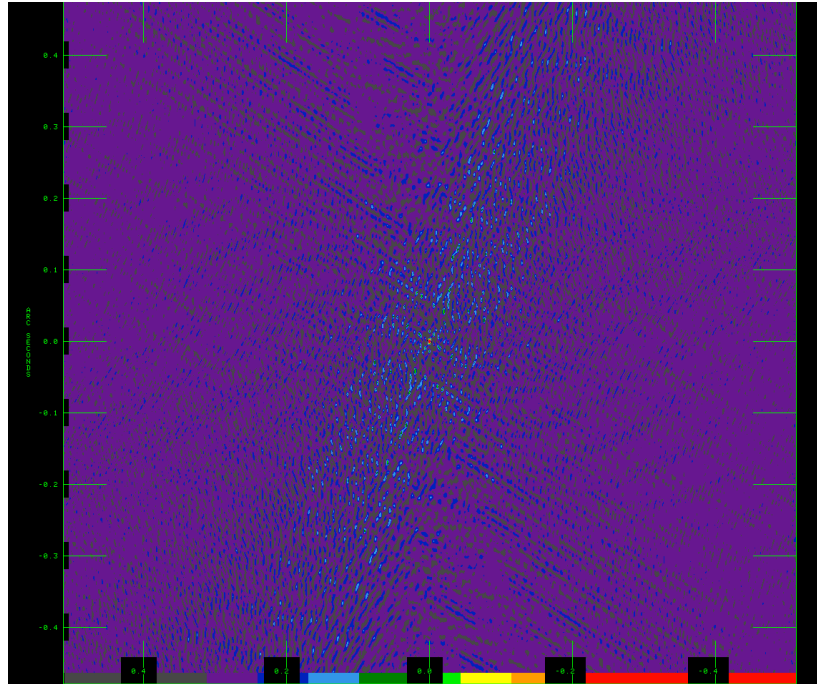


図 6: 合成ビームマップ

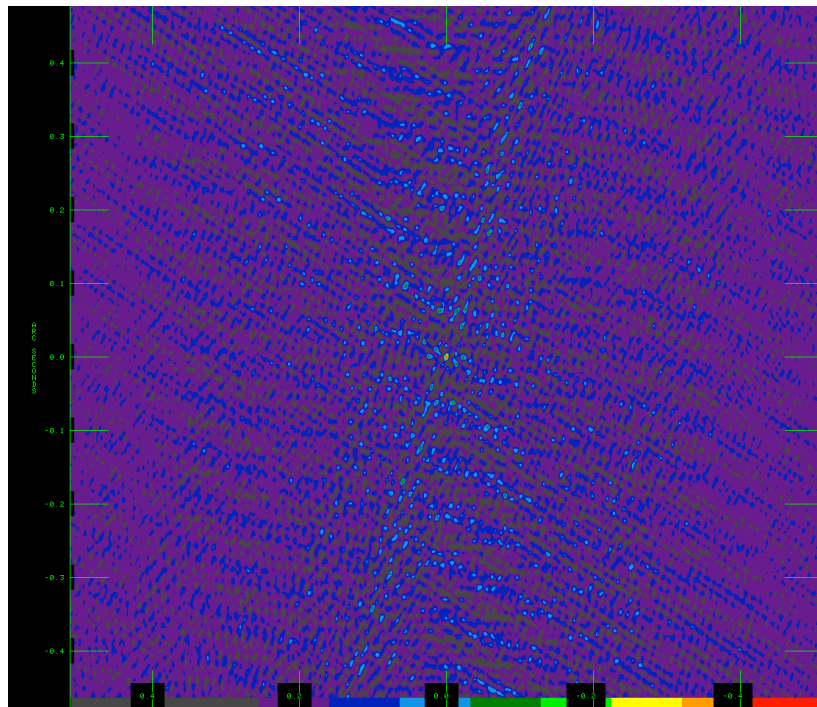


図 7: Dirty image (731ch)

次に Clean image を示す (図 7)。先行研究のスペクトル図を見ると、主成分より小さい速度に弱いピークがいくつかあることが確認できるが、その成分についてはマップで確認することができなかった。合成ビームサイズは $6.93 \times 2.84 \text{ mas}^2$ であり、ノイズレベルは $1\sigma = 1.446693 \text{ Jy/beam}$ であった。

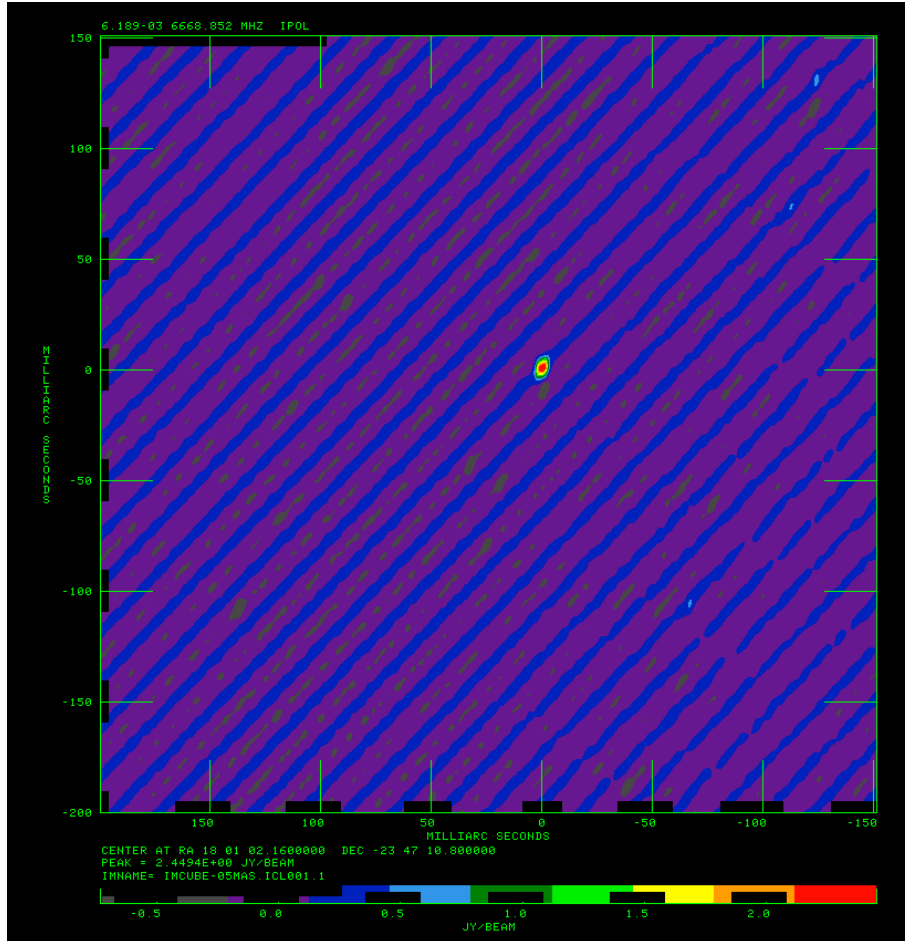


図 8: Clean image (731ch)

また、得られたメーザースポットのパラメーターから空間分布を作成した (図 8)。カラーバーは視線速度を示し、円の大きさは電波強度の対数を取ったものに比例させ、縦横軸は中心成分からの相対座標である。

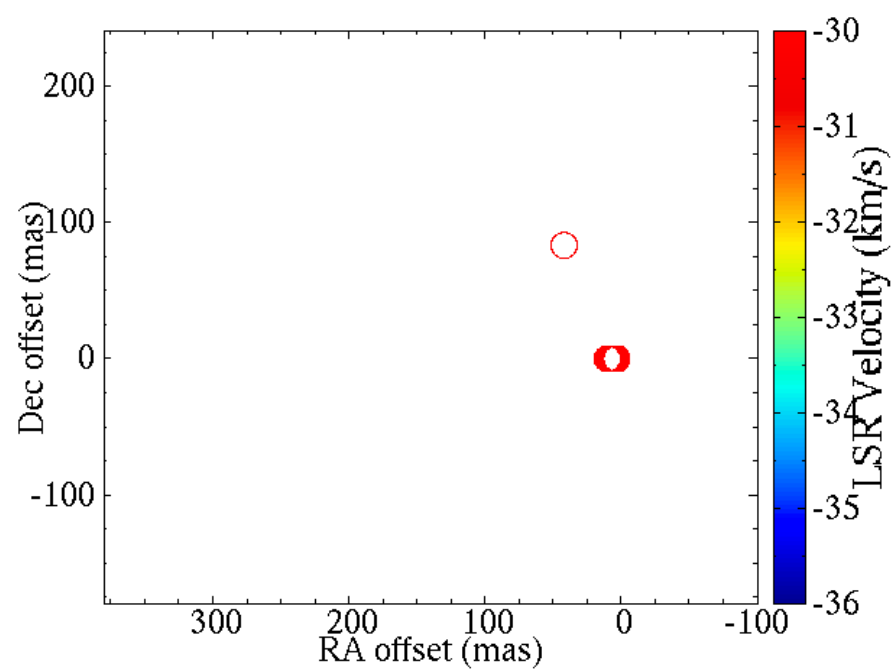


図 9: 空間分布

7 考察

今回の解析の結果得られた空間分布では、スペクトル図で見られる主成分以外の弱いピークの部分が確認できなかった。これには、以下の2つの原因が考えられる。

1. 解析手順の 9. 振幅ゲイン校正 (テンプレート法) において仮定したパラメータが適切でなかった

テンプレート法という校正では、ある時刻、ある局における T_{sys} と η が必要となるが、今回解析した 1 エポック目のデータはかなり古かったためにその2つの値が記録として残っていなかった。そのため、観測の開始と終了時の T_{sys} は分かっている η が安定している水沢局で値の仮定を行ったが、その過程が適切でなかったと考えられる。今後、より適切と思われる値での再解析を行う予定である。

2. 解析手順の 10. メーザーピークによるフリンジフィッティングにおいて遅延残差変化率についての解が正しく求められなかった

メーザーピークによるフリンジフィッティングでは、位相解と遅延時間変化率解の2つが求められるはずだが、今回の解析では遅延時間変化率解が求まらず、適用することができなかった。これも結果に大きく影響していると考えられる。解が1つしか求まらなかった原因はまだわかっていないので、今後考察していく。

これらの考えられる原因を考慮して再度 1 エポック目について解析を行い、空間分布を作成する予定である。

8 まとめ

EAVN(東アジア VLBI 観測網) で得られた 6.7GHz メタノールメーザー源である G006.18–00.35 のデータの解析を行い、対象天体の固有運動の導出、周期変動機構の解明を目指した。現段階での成果は 1 エポック目のメーザースポットのパラメーターを取得し空間分布を作成したのみである。しかし、その空間分布は先行研究と異なるものになってしまった。

今後は 1 エポック目のデータを再解析し、より精度のいい空間分布を作成する。また、他のエポックについても同様に解析を行い、本天体の固有運動の導出を目指す。

謝辞

本研究を行うにあたり、天文学の知識を基礎から教えてくださった百瀬宗武教授、解析の手法などについてご指導・ご指摘をしていただいた米倉覚則教授、国立天文台（現:NARIT）の杉山孝一郎氏には大変感謝しています。お忙し中、本当にありがとうございました。

また、佐藤公紀先輩をはじめとした研究室の先輩・同期の方々にも大変お世話になりました。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。

参考文献

- [1] シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 日本評論社 福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、中井直正、舞原俊憲、水野亮
- [2] The Formation of Stars. Steven W. Stahler and Francesco Palla
- [3] Xu et al. (2016) Publ. Astron. Soc. Japan, 68(5), 74
- [4] Fujisawa et al. (2014) Publ. Astron. Soc. Japan, 66(2), 31
- [5] Yonekura et al. (2016) Publ. Astron. Soc. Japan, 68(5), 74