

# EAVNを用いた6.7 GHzメタノールレーザー固有運動サーベイ

杉山 孝一郎<sup>1</sup>、藤沢 健太<sup>2</sup>、蜂須賀 一也<sup>2</sup>、米倉 覚則<sup>1</sup>、元木 業人<sup>3</sup>、澤田-佐藤 聡子<sup>3</sup>、松本 尚子<sup>3</sup>、  
林 京之介<sup>2</sup>、Shen, Zhi-Qiang<sup>4</sup>、本間 希樹<sup>3</sup>、廣田 朋也<sup>3</sup>、村田 泰宏<sup>5</sup>、土居 明広<sup>5</sup>、  
新沼 浩太郎<sup>2</sup>、齋藤 悠<sup>1</sup>、百瀬宗武<sup>1</sup>、小川 英夫<sup>6</sup>、and 大学間連携/東アジア VLBI グループ

所属機関：1. 茨城大学、2. 山口大学、3. 国立天文台、4. 上海天文台、5. ISAS/JAXA、6. 大阪府立大学

## 概要

我々は、2010年8月から JVN および EAVN を用いた 6.7 GHz メタノールレーザーの VLBI モニタープロジェクトを 36 天体に対して開始し、2013 年まで継続してきた。今回は、これまでに 3 エポック分の解析が完了している 14 天体に対する相対固有運動の計測結果を、統計的な比較として報告する。それぞれの空間形状は、楕円 6 天体、直線 2 天体、ペア 3 天体、および複雑 3 天体に分類されている (Fujisawa et al. 2014)。検出された固有運動を元に距離換算された接線速度の頻度分布を各形状間で比較した結果、楕円天体群と複雑天体群との間に有意な差が検出された。その差は平均速度で  $3.3 \text{ km s}^{-1}$ 、標準偏差で  $1.6 \text{ km s}^{-1}$  であり、K-S 検定により楕円天体群の方が有意に大きいと判定された。近-遠赤外線アーカイブデータを用いた SED から導出された (原始) 星周囲の物理パラメータと比較した結果、楕円・複雑形状の天体群に対して、接線速度と質量降着率との間に正の、星年齢との間に負の相関関係を示唆することが出来た。これより、楕円形状に分類される天体は、年齢が若く、(少なくともエンベロープからの) 質量降着が激しい進化の初期段階において観測され、大質量星形成における質量降着期を観測する上で重要な候補天体となり得る。

## 1 研究背景

最近の分子輝線、および赤外線干渉計観測により、大質量星 ( $\geq 8 M_{\odot}$ ) は小質量星と同様に、形成中に周囲 10–1000 au スケールにガス・ダストの回転円盤を有することが分かってきた<sup>1),2)</sup>など。また、理論の面からも非球対称かつ大降着率であれば、質量降着による原始星成長が可能であると唱えられている<sup>3),4)</sup>など。そのため現在では、大質量星も回転円盤からのガス降着により形成されると認知されてきている。しかし、回転円盤自体の進化、特に大質量星の形成に重要なパラメータである質量降着率の時間変化は未だ明確ではない。質量降着率は、原始星の進化を決める上でも重要なパラメータである<sup>5)</sup>。

そこで、我々は大質量星周囲の回転円盤上におけるガスの 3 次元運動 (視線速度 & 固有運動)、およびガスの質量降着率の直接計測を目指して、2010 年 8 月から JVN/EAVN を用いた VLBI モニタープロジェクトを開始した<sup>6)</sup>。本プロジェクトでは、空間分布・視線速度勾配、およびいくつかの天体で回転 (+ 膨張/降着) を示す固有運動が検出されており、大質量星周囲の回転円盤上で放射している可能性の高い 6.7 GHz メタノールレーザー源<sup>7)–10)</sup>などを観測対象としている。また、様々な進化段階にある大質量星を研究する必要があるため、36 天体という多数の天体をモニターしている。本プロジェクトによ

り得られるメタノールレーザーの空間分布と固有運動の系統的調査を通じて、以下の事項の解明を目的としている; 1) 6.7 GHz メタノールレーザーの発生場所を系統的に理解、2) 大質量原始星周囲の回転円盤からの降着現象の系統的な直接検出、3) ALMA, ATCA, JVLA とのコラボレーションを通じた、大質量原始星の進化と回転円盤自身の進化の理解。今回は、3 エポックの VLBI データを用いた相対固有運動計測の成果として、様々な空間形状に分類される 14 天体に対する計測結果を、統計的な比較として報告する。

## 2 観測

2010/08/28-30 (日立, VERA4 局), 2011/10/04-06, 10/27, 11/26 (山口, 日立, VERA4 局), 2012/09/13, 21, 23, 24 (山口, 日立, 上海, VERA4 局), 2013/09/18, 20 (山口, 日立, VERA4 局) の 4 年に亘り、各天体で 3 エポック分の JVN/EAVN モニターデータを取得した。観測した 16 MHz 帯域 (6664–6680 MHz) の内、各天体のメタノールレーザー輝線が含まれる 4 MHz ( $\sim 180 \text{ km s}^{-1}$ ) を切り出し 1024 点分光しており、チャンネル分解能は  $0.18 \text{ km s}^{-1}$  に相当する。1 ch 当たりのイメージ感度 ( $1 \sigma$ ) は 1 時間積分でそれぞれ典型的に 40–100 mJy beam<sup>-1</sup> であった。また、生成された合成

ビームサイズは典型的に  $10 \times 3 \text{ mas}^2$  であった (位置角は天体 Dec 依存大)。データ解析は NRAO の作成した AIPS<sup>1</sup> を用いて行った。

### 3 結果: 相対固有運動

今回は、2010-2013 年の各 3 エポック全てで検出できたメーザースポットのみを相対固有運動計測の対象とし、以下の条件を適用した; 1) 視線速度がチャンネル分解能  $0.18 \text{ km s}^{-1}$  以内で一致、2) 空間位置が合成ビーム  $\sim 10 \text{ mas}$  以内で一致。相対固有運動の計測は、3 個以上のスポット同士で形成する“メーザークラスタ (フィーチャー)”ベースで行った。なお、フィーチャーの同定には、スペクトル上におけるガウシアン単位での個別成分の視線速度も参考している。今回は、同定されたフィーチャーの相対位置の平均値 “barycenter” を不動点と定め、barycenter に対する相対固有運動を計測した。これまでに、楕円、直線、ペア、及び複雑空間形状に分類される 6, 2, 3, 及び 3 天体<sup>6)</sup> で固有運動の検出に成功している。一部の天体に対する相対固有運動の検出結果を図 1(a)-(d) に矢印で示す。

### 4 考察: 空間形状 vs 接線速度分布

今回は、相対固有運動が検出された 14 天体に対して、各空間形状ごとに距離換算された接線速度の頻度分布 (図 1e) を基にした統計的な比較を行う (個別の天体に対する運動解釈などは過去の VLBI 懇談会集録や Sugiyama et al. 2016<sup>11)</sup>などを参照)。統計的な比較には Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定を用いたが、今回の比較では、K-S 統計量 D を有意に検定可能な固有運動フィーチャー数が十分検出されている、楕円および複雑形状天体間での比較のみ実施した。その結果、楕円・複雑天体間に有意な差が検出 (K-S 統計量  $D \sim 0.42$  により、有意水準 1% で同一分布である可能性を棄却) され、楕円天体群の方が平均速度で  $3.3 \text{ km s}^{-1}$ 、標準偏差で  $1.6 \text{ km s}^{-1}$  大きいことが分かった。この有意な差を生む物理的要因を、Spectral Energy Distribution (SED) から導出される物理パラメータを基に考察する。

各天体に対する SED は、IRSA<sup>2</sup> にアーカイブされている以下の近-遠赤外線データを用いて作成した: 2MASS, Spitzer (IRAC band), WISE, MSX, AKARI, MIPS, IRAS, Planck。但し、IRAS, Planck データは、空間分解能を考慮し上限値とし

<sup>1</sup>Software package used for astronomical data reductions developed at the National Radio Astronomy Observatory.

<sup>2</sup>NASA/IPAC Infrared Science Archive: <http://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>

で使用している。これらのデータを基に、On-line fitting ツール<sup>3</sup>を用いた SED フィットを実施した。その結果得られた物理パラメータの内、接線速度との間に顕著な相関関係が見られた“周囲のエンベロープからの質量降着率”, および“(原始) 星年齢”との相関プロットを図 1(f) に示す。この図において、楕円天体 (黒塗り丸) と複雑天体 (白抜き丸) に着目してやると、それぞれの接線速度に対して、質量降着率との間には正の、星年齢との間には負の相関関係が示唆されていることが分かる。このことから、楕円形状に分類される天体は、付随している星の年齢が若く、(少なくとも周囲のエンベロープからの) 質量降着が激しい進化の初期段階において観測され、それが故に接線速度の平均値、標準偏差共に複雑天体に比べて有意に大きい、と解釈され得る。このことは、楕円天体が大質量星形成における質量降着期を観測する上で、重要な候補天体となり得ることを示唆している。

### 5 今後の展望

- ホットコア/回転円盤トレーサーである  $\text{CH}_3\text{CN}$  輝線の高空間分解能なデータを ALMA, JVLA から得ることで、メタノール発生場所におけるダスト温度を RD 法から精度良く見積もる
- $\text{CH}_3\text{CN}$  輝線のマルチライン観測により、ガス密度を高精度に見積もり、円盤上におけるガスの膨張/降着率の高精度な導出を試みる
- 上記結果を元に、励起星の質量、および進化段階を定量的に見積もり、メタノールメーザーが示す固有運動の傾向の違いの要因を明確に

#### < 参考文献 >

- 1) Patel, N. A., et al. 2005, Nature, 437, 109
- 2) Kraus, S., et al. 2010, Nature, 466, 339
- 3) Krumholz, M. R., et al. 2009, Science, 323, 754
- 4) Hosokawa, T., & Omukai, K. 2009, ApJ, 691, 823
- 5) Hosokawa, T., et al. 2010, ApJ, 721, 478
- 6) Fujisawa, K., et al. 2014, PASJ, 66, 31
- 7) Bartkiewicz, A., et al. 2009, A&A, 502, 155
- 8) Sanna, A., et al. 2010a, A&A, 517, 71
- 9) Goddi, C., et al. 2011, A&A, L535, 8
- 10) Sugiyama, K., et al. 2014, A&A, 562, 82
- 11) Sugiyama, K., et al. 2016, PASJ,

in press (advanced access: temp. 250, 18 pp.)

<sup>3</sup><http://caravan.astro.wisc.edu/protostars/>

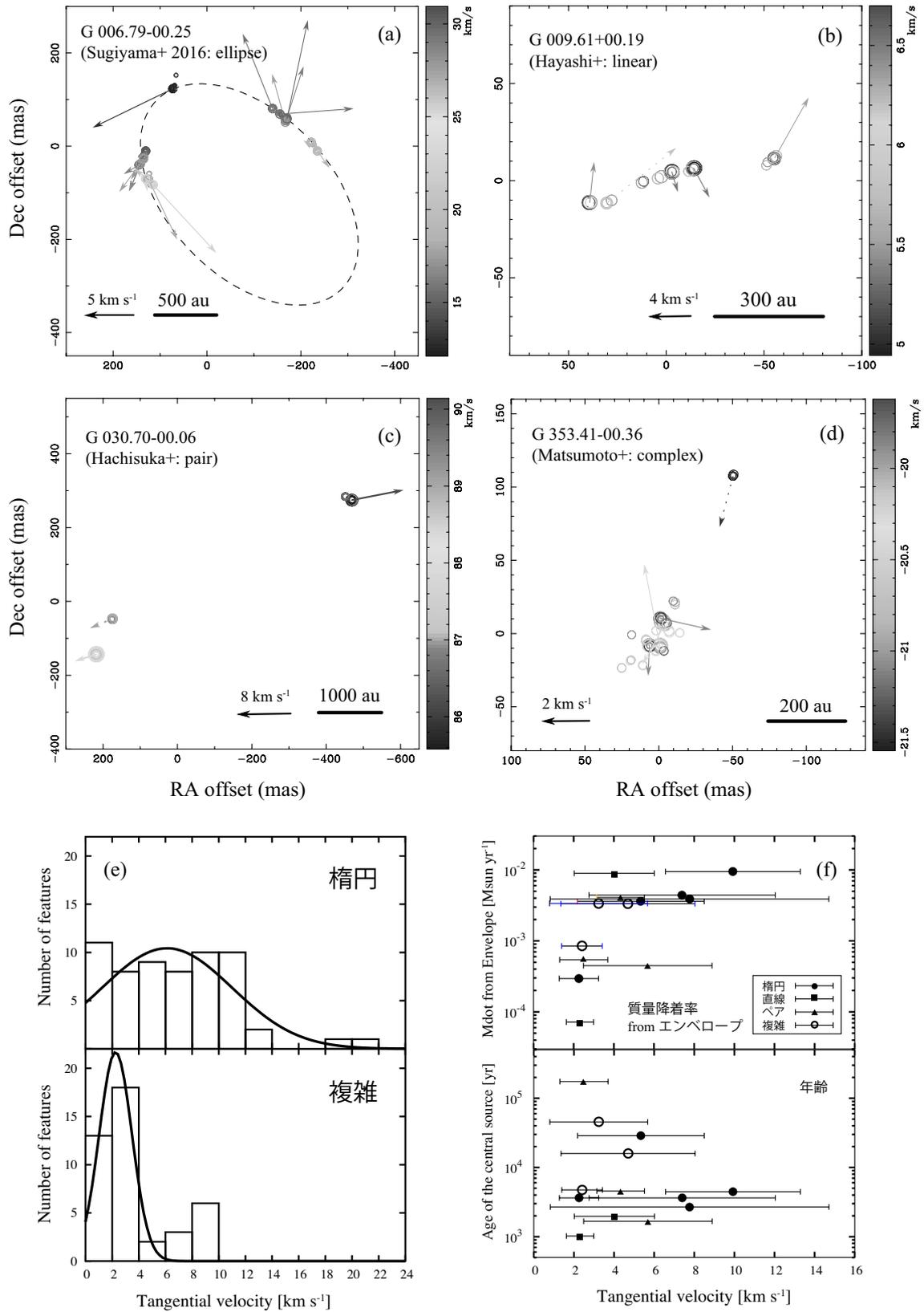


図 1: (a)–(d) 2010–2013 年の JVN/EAVN モニター観測により、3 エポックデータを用いて検出された 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布 (丸印: 強度に対数で比例) および相対固有運動 (矢印: スケールは各図の下部を参照) の一例 (a) 楕円天体 G 006.79–00.25; b) 直線天体 G 009.61+00.19; c) ペア天体 G 030.70–00.06; d) 複雑天体 G 353.41–00.36.)。グレースケールはスポット毎の視線速度の違いを表現。e) 楕円 6 天体および複雑 3 天体の各フィーチャーに対する接線速度頻度分布。曲線はガウスフィットの最小二乗解に相当。f) 各天体における接線速度の平均値 (誤差棒は標準偏差) と各物理パラメータ (エンベロップからの質量降着率, (原始) 星年齢) との相関プロット。各記号は各天体形状に相当 (対応は上パネルの凡例を参照)。