

日立 32-m を用いた大質量星形成領域における周期変動天体サーベイ

杉山 孝一郎¹、米倉 覚則¹、齋藤 悠¹、永瀬 桂¹、安井 靖堯¹、佐藤 宏樹¹、宮本 祐輔¹、
百瀬宗武¹、元木 業人²、本間 希樹²、内山 瑞穂²、田崎 文得²、藤沢 健太³、
蜂須賀 一也³、稻吉 恒平⁴、田中 圭⁵、細川 隆史⁶

所属機関：1. 茨城大学、2. 国立天文台、3. 山口大学、4. コロンビア大学、5. フロリダ大学、6. 東京大学

概要

我々は、2012 年 12 月 30 日から日立 32-m 電波望遠鏡を用いた北半球から観測可能な 461 天体 (Dec > -30°) を対象とした、大規模な 6.7 GHz メタノールメーザーの長期高頻度モニタープロジェクトを開始している。本プロジェクトは、特に大質量(原始)星周囲で希有な“周期的”強度変動現象を示すメタノールメーザー天体の、完全なリストの構築及び統計的な研究を目指している。数ヶ月程度と中期なものから、数年程度と長期なものまで、幅広い周期変動をカバーするため、各天体毎に 9–10 日に 1 度の頻度で 3 年間継続してきた。今回は、上記頻度で継続してきた 2015 年 8 月 24 日までの観測データを元にした周期変動天体の検出状況を報告する。今回は、強度変動が顕著だと判定された 149 天体(全 318 スペクトル成分)に対して、Lomb-Scargle 法を用いた周期解析を行った。その結果、計 25 天体から周期変動を検出することに成功した(既知: 11 天体、新検出: 14 天体)。本紙では、メタノールメーザーの周期変動を解釈するモデルの一つである、大質量原始星の脈動不安定モデルから予言されている周期-光度関係(P-L relation)の暫定的な観測的検証の結果も併せて紹介する。

1 研究背景

近年の分子輝線、赤外線干渉計観測、及びメーザー源に対する VLBI モニターにより、大質量星($\geq 8 M_{\odot}$)も小質量星と同様に、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し、円盤を通じた質量降着により形成が進むことが明らかになってきた^{1)–5)}など。形成過程が明らかになってきた現在では、次なる研究課題として大質量原始星の進化過程の解明が挙げられる。Hosokawa & Omukai (2009)⁶⁾ の理論計算によると、進化の経路は原始星表面に降り積もるガスの質量降着率 \dot{M}_* によって決定付けられると提唱されている。従って、大質量星の進化を理解するには、 \dot{M}_* を何らかの方法で観測的に計測する必要がある。しかし、原始星表面のサイズは高々 0.1 au であり、大質量星の典型的な距離 1 kpc 以遠においては、0.1 mas 未満に相当してしまう。それ故、ALMA を含む現存の観測装置では 2 弔以上空間分解能が不足し、将来の extended-ALMA をもってしても 1 弔以上分解能が足りず、直接撮像により物理量の導出は不可能である。

そこで、我々は理論研究により提唱された“大質量星が原始星時代に生じる脈動不安定モデル”⁷⁾に着目した。この研究により、大質量原始星が主系列星に到達する直前 1000 年程度の間に不安定な脈動変動を生じ、 \dot{M}_* に依存して成長することで、10–

100 日オーダーの周期的な光度変動を生じる可能性が示された。同時に、その脈動周期 P と天体光度 L との間に一定の相関関係“P-L relation”が予言されている。これは、 P と L が共に原始星の半径および質量に従って決定されるため、成立すると予想される。これは、脈動周期と天体光度が、原始星表面における質量降着率と密接な関係にある、天体半径および質量によって決定されるからである。即ち、この理論予言されている P-L relation を観測面から検証・確立することが出来れば、脈動周期の観測を通じて、原始星光度を導出することが可能となり、結果として天体光度の決定に寄与している原始星表面の(\dot{M}_* を含む)物理パラメータを間接的に導出可能となることが期待される。

現在のところ、大質量(原始)星周囲で観測的に周期的な強度変動を検出しているプローブはメーザー源のみであり、特に 6.7/12.2 GHz メタノールメーザーに対する探査が積極的に実施されている。これまでに 18 天体から検出されており、その周期は 29.5–668 日と非常に幅広く、またその変動傾向も“連続的”，“間欠的”的 2 タイプに大別される^{8)–10)}など。しかし、母数 1000 天体以上に対し、幅広い周期をカバー出来るほどの頻度・期間に亘って、無バイアスにモニターされた天体は 10% 程度であり、周期天体の正確な存在数や統計は明らかになっていない。また、P-L relation の観測的確立という観点からも、

周期天体のサンプル不足が懸念される。

そこで、我々は北半球から観測可能な Dec $> -30^\circ$ に位置する 461 天体を、フラックス密度などに制限は設けず無バイアスに、高頻度で、かつ長期に亘る単一鏡モニターサーベイプロジェクトを 2012 年 12 月 30 日から開始した。本紙では、日立 32-m 電波望遠鏡を用いた 3 年のモニターの結果、新検出された 14 天体の周期変動を報告すると共に、P-L relation の暫定的な観測面からの検証結果も紹介する。

2 観測

日立 32-m 電波望遠鏡を用いたメタノールメザーモニターは、2012/12/30–2014/01/10 (MJD 56291–56667), 2014/05/07–2015/08/24 (MJD 56784–57258) の 2 期に分けて実施され、第 1 期のモニター結果から、変動の比較的小さいものを較正天体として選出し、第 2 期では毎日のモニターに組み込んでいる。観測頻度としては、両期に共通して各天体辺り 9–10 日に 1 度の頻度でデータを取得している。バックエンドとしては、観測帯域 6664–6672 MHz を 8192 点分光することにより、速度分解能 0.044 km s^{-1} を達成している。また、各天体辺り 5 分積分により、検出感度 $3\sigma \sim 0.9 \text{ Jy}$ を達成している。データ解析は茨城大学の独自開発ソフトウェアを使用して行った。

3 結果: 変動成分と周期解析

まずは、モニターしている 461 天体の全 3282 スペクトル成分から、変動の顕著な成分を選出するために、以下の条件を設けた:

- モジュレーションインデックス σ_{mod} (フラックス密度の (標準偏差) \div (平均値)) ≥ 0.30
- 期間中のフラックス密度の最大値 $S_{\text{max}} \geq 7\sigma$

これにより、149 天体、全 318 成分が強度変動天体成分として判定された。これら全 318 成分に対して、Lomb-Scargle 法^{11),12)} を適用することにより、周期性の有無の判定を実施した。この手法は、不等間隔な離散データに対する周期解析法として代表的な手法であり、日立データに対しては、茨城大学 M2 の安井氏がチューニングした C 言語プログラムを使用した (プログラムの詳細は安井氏のポスター講演参照)。今回は、本モニターでの周期変動天体の同定を行うため、周期解析の結果に、以下の条件を設けた:

- 周期解析によるパワースペクトル信号の信頼性を表す閾値 (雑音による見かけの周期でナイ確率) が 0.001 以下である
- 導出された周期が、モニター期間 ~ 970 日において、3 周期以上捉えられる

その結果、計 25 天体から周期変動を同定することに成功した。内訳としては、11 天体が既知で、残り 14 天体は全て新検出として同定され、新検出天体の周期は 23.7–220 日となった。また、既知 11 天体の内、G 196.45–01.67 からは、既知周期 668 日⁸⁾ よりも短い 133 日周期を新たに検出することが出来た。変動傾向としては、新検出の 14 天体の内、最短の周期 23.7 日を示した G 014.23–00.50 (詳細は茨城大学 M2 の永瀬氏のポスター講演参照) “以外” の 13 天体で“連続的”な傾向が観測された。新検出された 14 天体の内、G 034.39+00.24 (周期: 29.5 日), G 036.70+00.09 (周期: 53.4 日) のダイナミックスペクトルを図 1 に掲載する。本モニターによる新検出により、周期変動天体サンプルを、既知の 18 天体から計 32 天体へ約 2 倍増加させることができた。

4 P-L relation (暫定版)

周期方向に幅広いサンプルがそろってきたため、本紙にて観測データを用いた P-L relation の暫定版を作成する。大質量原始星の脈動不安定現象は、晩期型の AGB 星と同様、 κ 機構により脈動が成長していくと考えられているため、変動傾向としては“連続的”なものが期待されるはずである。そこで、今回の観測的検証にあたっては、既知 + 新検出の計 32 天体から、“連続的”な変動傾向を示す天体のみを使用した。また、縦軸の天体光度に関しては、付随する IRAS 点源の総フラックスをベースに、parallax/kinematic 距離を用いて導出した。IRAS 源が付随していない天体を除外した、計 19 天体を本紙での観測的検証に活用した。

それらを、P-L relation の理論予言線と重ね合わせた結果を図 2 に示す。これに対し、以下の式で最小二乗フィットした結果、

$$\log(L/L_\odot) = a + b \cdot \log(P/100 \text{ days})$$

$a = 4.40 \pm 0.14$, $b = 0.47 \pm 0.41$ が得られた。上記結果を代入した、観測データを用いて得られた暫定版 P-L relation を、図 2 に実線として表すと共に、エラーを考慮した最大・最小の P-L relation も破線で示す。理論予言線との比較を行ったところ、観測データフィットの傾き b に対する大きなエラーの範囲内ではあるが、理論側で予言される誤差込みの不

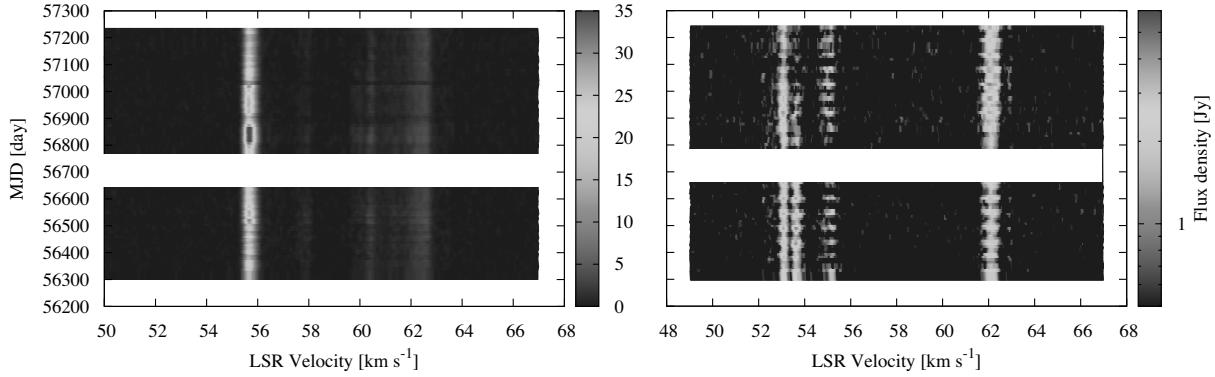


図 1: 日立モニターにより新検出された周期変動天体: (左) G 034.39+00.24 (周期: 29.5 日), (右) G 036.70+00.09 (周期: 53.4 日) のダイナミックスペクトル。横軸: 視線速度, 縦軸: 観測日時 [MJD] で、グレースケールはフラックス密度に相当 (右パネルは対数)。

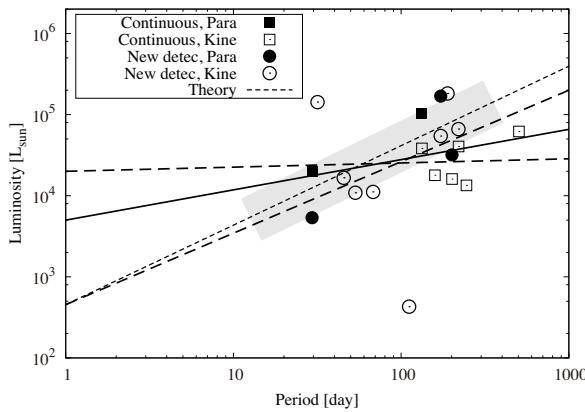


図 2: 暫定版 P-L relation。各点は既知/新検出の周期天体の観測データに相当 (四角/丸印) し、塗りつぶし/抜きは天体距離の計測法の違いで色分け (parallax/kinematic)。観測面から確率した P-L 線、及び理論線を実線/破線、及び点線で表記。灰色のボックスは、理論側で予言される誤差込みの不安定帯に相当。

安定帯 (灰色のボックス) と重なっているように見える、という結果が得られた。これは、観測面から P-L relation を検証出来た初めての結果となる。

5 今後の展望

- 10 日程度の超短周期 & 1 年以上の長周期変動天体の周期リストをコンプリートに
 - 第 3 期モニターとして、2015/09/18 から厳選した天体を 5 日に 1 度の頻度でデータ取得中
 - 長周期変動天体のサーベイを目指し、2018 年までモニター継続予定
- kinematic 計測により、距離の不定性の大きい天体が多い (図 2 中でも 14/19) 故、parallax 法で高精度に計測

- 南半球の既知周期天体の一部を、LBA を用いて計測中
- 北半球では、VERA/JVN へ提案予定
- メタノールメーザーと、その励起起源である赤外線源との直接的な強度変動比較が未実施であるため、そもそも脈動不安定現象などの局所的な変動に起因しているかどうかの、直接的な観測結果の取得を目指す
- 共同研究者の内山氏主導で、既知の周期天体に対し、近赤外線が点源に近い天体を選出し、鹿児島 1-m 光赤外望遠鏡を用いて高頻度モニターを実施¹³⁾
- 近赤外線波長における、同程度の頻度・期間でのモニター観測を実施し、同様な周期変動の検出を目指すことで、直接的な観測結果の比較だけではなく、変光時の平均等級を P-L relation の縦軸に活用する

<参考文献>

- 1) Patel, N. A., et al. 2005, Nature, 437, 109
- 2) Kraus, S., et al. 2010, Nature, 466, 339
- 3) Sanna, A., et al. 2010a, A&A, 517, 71
- 4) Goddi, C., et al. 2011, A&A, L535, 8
- 5) Sugiyama, K., et al. 2014, A&A, 562, 82
- 6) Hosokawa, T., & Omukai, K. 2009, ApJ, 691, 823
- 7) Inayoshi, K., et al. 2013, ApJL, 769, L20
- 8) Goedhart, S., et al. 2004, MNRAS, 355, 553
- 9) Goedhart, S., et al. 2009, MNRAS, 398, 995
- 10) Fujisawa, K., et al. 2014, PASJ, 66, 78
- 11) Lomb, N. R. 1976, Ap&SS, 39, 447
- 12) Scargle, J. D. 1982, ApJ, 263, 835
- 13) 内山 瑞穂, 他, 2014, 秋季年会, P136a