

## 論文の内容の要旨

### A Few Tens au Scale Physical and Chemical Structures around Young Low-Mass Protostars

(数 10 au スケールで見た若い低質量原始星天体の  
物理的・化学的構造)

氏名 大屋 瑤子

太陽程度の質量をもつ恒星（低質量星）の形成過程は、星間分子雲の収縮に始まり、原始星の誕生、その周囲での原始惑星系円盤の形成、そして惑星系の形成に至るまでの幾つかの段階に分けられる。このうち、前半の星間分子雲の収縮から星形成までの過程、および後半の原始惑星系円盤については、電波や赤外線などの観測で近年急速に理解が進みつつある。しかし、原始星の周りに「いつ」「どのようにして」原始惑星系円盤が作られるのか、またそこでどのような物質進化が起こるのかについては、観測的にも理論的にも未開拓の領域として残されている。そこで本論文では、原始星進化の前半と後半を繋げるべく、大型電波干渉計 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) による高分解能観測とモデル計算を併用した研究を行った。本論文では、5つの低質量原始星天体 L1527, IRAS 15398–3359, IRAS 16293–2422 Source A および Source B, L483 を対象とし、分子の回転スペクトル線を捉えることで、天体におけるガスの速度構造と化学組成を明らかにした。

おうし座にある Class 0 低質量原始星 L1527 は、原始星円盤およびエンベロープガスの回転面が天球面とほぼ直交しており、ガスの回転運動を捉えることが容易な天体である (図 1a)。坂井らは、ALMA を用いて  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  分子の回転スペクトル線でこの天体を観測し、その速度構造の解析から、エンベロープガスの遠心力バリアを発見した (Sakai et al., 2014, Nature, 507, 78)。この半径は、回転しながら落下するガスが、角運動量の保存のためそれ以上原始星に近づけない半径（「近日点」）である。本論文では、エンベロープガスの速度場の定量的な解析のため、回転しながら落下するガスの 3次元モデルを作成した (図 2)。観測されたエンベロープガスの速度構造は、このモデルによってよく再現された (図 1b)。また、このモデルとアウトフローの放物面モデルを用いて、CS 輝線の速度構造を詳細に解析し、エンベロープ/アウトフロー構造の傾き角とその向きを決定した。さらに、遠心力バリア (半径 100 au) 付近で、ガスの化学組成が劇的に変化することを確認した (図 3)。

おおかみ座にある Class 0 原始星 IRAS 15398–3359 については、ALMA による CCH と  $\text{H}_2\text{CO}$  輝線の高分解能観測 (ビームサイズ 80 au) の結果、原始星の位置から北東-南西方向に噴き出すア

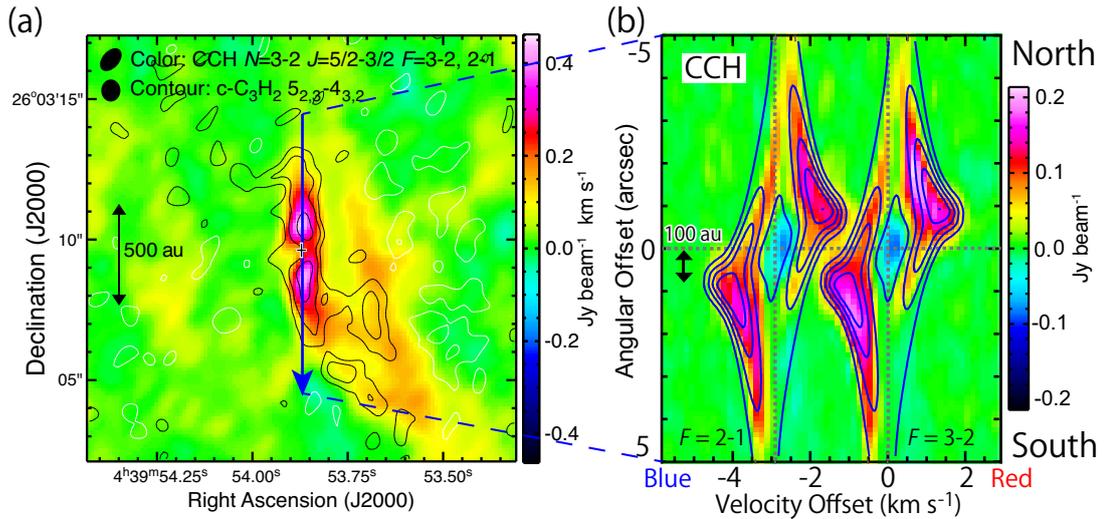


Figure 1: (a) L1527 の  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  (カラー) と CCH (等高線) の輝度分布。(b) エンベロープガスの回転面に沿った位置-速度図。カラーは CCH、青い等高線は図 2 のモデルによる計算結果を表す。

ウトフローが鮮明に捉えられた。放物面モデルを用いたアウトフローの速度構造の解析から、アウトフローの軸から視線までの傾きを 70 度と決定した。一方、原始星付近のエンベロープガスの速度場については空間的に十分分解できなかったが、L1527 と同様のモデルを用いて、遠心力バリアの半径が 80 au 以下、原始星質量が 0.09 太陽質量以下であることを示した。また原始星の位置に集中した弱い高速度成分が見られ、非常に若い原始星にもかかわらず、すでに遠心力バリアの内側に円盤構造が存在している可能性を示唆した。

上記の 2 天体は、原始星付近 ( $\sim 1000$  au スケール) の暖かい領域に CCH や  $\text{C}_4\text{H}$  などの不飽和炭素鎖分子が豊富に含まれる warm carbon-chain chemistry (WCCC) 天体であることが知られている。一方、へびつかい座にある IRAS 16293–2422 は、原始星の付近にメタノール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) やギ酸メチル ( $\text{HCOOCH}_3$ ) 分子などの複雑な飽和有機分子を豊富に含む hot corino 天体である。この天体は、図 4(a) に見られるように、2 つの原始星 (Source A, Source B) からなる連星系であるが、本論文ではまず Source A について、上記の 2 天体と同様のモデルを利用して速度構造を解析した。その結果、遠心力バリアの半径が 40 – 60 au、原始星質量が 0.5 – 1.0 太陽質量であることを明らかにした (図 4b)。この天体では、OCS 分子の輝線によって遠心力バリア外側のエンベロープガスが捉えられた (図 4c)。一方、ギ酸メチル分子は遠心力バリア付近に集中し (図 4d)、さらに、チオホルムアルデヒド ( $\text{H}_2\text{CS}$ ) 分子は、遠心力バリア内側のケプラー回転する円盤成分にも存在していることがわかった (図 4e)。この天体では、前述の L1527 で見られた化学組成の劇的な変化が、L1527 とは異なる分子種で起こっている (図 3)。さらに、連星系の他方である IRAS 16293–2422 Source B についても、同様の化学組成の変化を確認した。Source B は、エンベロープガスの回転面が天球面と平行に近い場合、その回転構造を捉えるのは難しい。本論文では、上記の化学組成の変化を利用することで、遠心力バリアの半径 (30 – 50 au) と原始星質量 (0.2 – 0.8 太陽質量程度) を見積もった。また、視線とほとんど平行に噴き出すアウトフローと、その根元付近で原始星に向かって落下するガスの存在を明らかにした。

わし座にある L483 は、単一口径望遠鏡による観測から WCCC 天体であると言われてきた。この天体では、CCH と CS の分子輝線によってエンベロープガスの速度構造が捉えられた。図 2 のモデルとの比較から、その遠心力バリアの半径 (100 au) と原始星質量 (0.2 太陽質量) を評価した。L483 は WCCC 天体であり、複雑な有機分子は少ないと考えられていた。しかし、ALMA による高分解能観測 (ビームサイズ 100 au) の結果、ギ酸メチル分子などの複雑な有機分子が、原始星付近の高速度成分に集中して存在することが明らかになった。WCCC と hot corino 化学の両方の性質を併せ持つ原始星天体が、空間的に分解して確認されたのは初めてである。また、CS 輝線のア

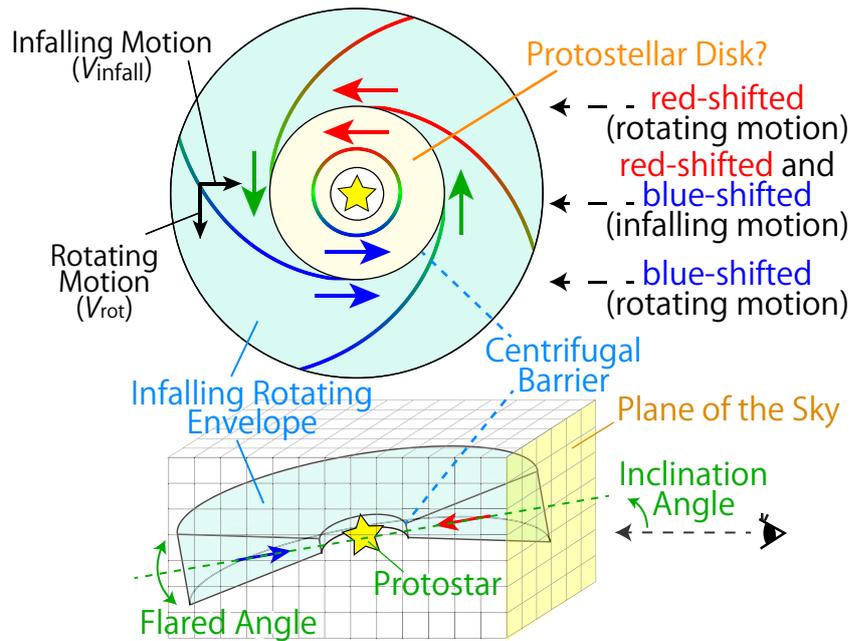


Figure 2: 回転しながら落下するエンベロープガスと、その内側でケプラー回転する原始星円盤モデルの模式図。

アウトフロー成分の解析から、アウトフローの回転運動の可能性が示唆された。このことは、落下するエンベロープガスによって持ち込まれた角運動量が、アウトフローによって取り出されることを意味し、円盤形成に至る物理的メカニズムを理解する上で重要な鍵になると考えられる。

以上のように、本論文では、エンベロープガスから原始星円盤にかけての数 10 au スケールの構造を、物理的・化学的両側面から調べた。その中で、5 つの若い低質量原始星天体における原始星付近 (~ 数 100 au) のガスの速度構造が、図 2 のような簡単な力学モデルで説明されることを示した。この結果は、このスケールにおいて磁場やガス圧の影響は小さいことを示唆しており、エンベロープガスの物理的構造の一般的理解を進めることができた。さらに、遠心力バリアの前後でガスの速度構造が急激に変化していることを明らかにし、その内側で原始星円盤が形成されている可能性を示した。このことから、遠心力バリアはエンベロープから円盤構造が形成される境界にあたりとみられる。本論文では、エンベロープ/円盤構造に加え、アウトフローの構造も解析した。これらの構造は、ガスの角運動量を通して相互に関連していると考えられており、その包括的な理解は、円盤形成領域の全体像を探る上で不可欠である。

また本論文では、炭素鎖分子や複雑な有機分子などの様々な分子輝線の観測から、数 1000 au スケールの観測で知られていた化学組成の多様性 (WCCC/hot corino 化学) が、原始星近傍の円盤形成領域まで確かに持ち込まれていることを明らかにした。さらに、遠心力バリアの位置で、ガスの化学組成が急激に変化することを示した (図 3)。これは、遠心力バリア上でガスが滞留している間にその化学組成が変化すること、またガスの降着衝撃波によって星間塵上の分子が蒸発することによるものと考えられる。このことは、原始惑星系円盤、ひいては将来そこで形成される惑星系における、化学的な初期条件に重要な知見を与える。また、このように検出される化学種が円盤形成領域の物理的な構造の変化 (エンベロープガス、遠心力バリア、円盤成分) に応じて異なる現象は、このスケールでの物理構造の解明にも有用である。

これらの成果は、原始惑星系円盤の形成初期における物理的メカニズムの一般的理解と、化学的多様性の起源を探る新たな切り口を与えるものとして、高い学術的意義があると考えられる。

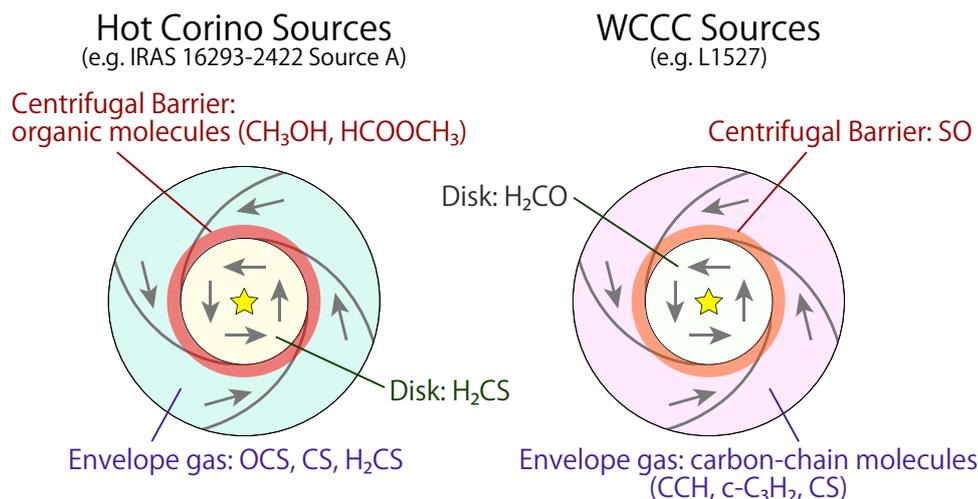


Figure 3: 複雑な有機分子が豊富な hot corino 天体 (左; IRAS 16293-2422) と炭素鎖分子が豊富な WCCC 天体 (右; L1527) における、分子種による分布の違い。エンベロープガス、遠心力バリア、その内側の円盤成分によって、化学組成が異なる。一方ガスの速度場は、どちらの天体でも同一のモデル (図 2) に従う。

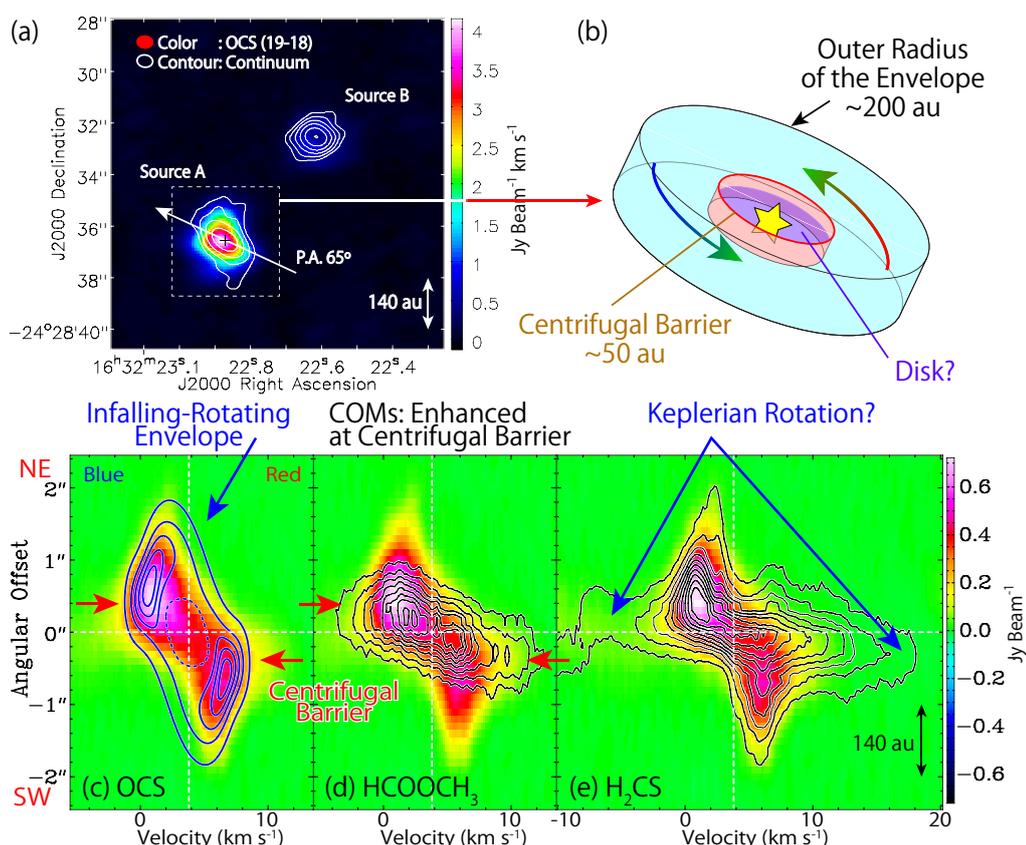


Figure 4: (a) IRAS 16293-2422 における、OCS 分子の積分強度図 (カラー) と連続波 (波長 1.2 mm) の強度分布 (等高線)。 (b) Source A のエンベロープガスの模式図。 (c-e) (a) 図中の白い矢印 (position angle  $65^\circ$ ) に沿った位置-速度図。白い横の破線は原始星の位置 ( $0''$ ) を、縦の破線は天体の速度 ( $3.8 \text{ km s}^{-1}$ ) を表す。カラーは OCS 分子、等高線はギ酸メチル分子 (d) とチオホルムアルデヒド分子 (e) の速度分布を表す。図 (c) 中の等高線は図 2 のモデル計算の結果を表す (0.75 太陽質量の原始星質量と、半径 50 au の遠心力バリアを仮定)。OCS 分子 (c) は回転・落下するエンベロープガス (等高線) に分布するのに対して、ギ酸メチル分子 (d) は遠心力バリアの位置に分布し、原始星の周囲を環状に囲んでいる。一方、チオホルムアルデヒド分子 (e) は原始星の位置 ( $0''$ ) に集中した高速度成分を捉え、遠心力バリア内側の円盤構造に由来するとみられる。