

# 論文の内容の要旨

## Physical and Chemical Structures of Young Low-Mass Protostellar Sources in Isolated Condition

### (孤立領域における低質量原始星天体の物理・化学構造)

氏名 今井 宗明

恒星とその周りの惑星系の形成過程の探求は、太陽系の起源を理解する上で最も基本的な研究テーマである。大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) に代表される最近の観測技術の向上により、その全貌が明らかになりつつある。従来、恒星がもつ質量や形態 (単独星か多重星かなど) における物理的多様性について、それを支配する要因の理解が星形成研究の1つの重要なターゲットとして研究されてきた。一方、このような物理的多様性ととも、近年星形成の現場では原始星周りのエンベロープで化学的な多様性が認識されるようになってきた。その一つの例は飽和有機分子 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$  など) に恵まれる Hot Corino 天体と、不飽和な有機分子 ( $\text{CCH}$ ,  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ ,  $\text{HC}_5\text{N}$  などの炭素鎖分子およびその関連分子) に恵まれる WCCC (Warm-Carbon-Chain Chemistry) 天体である。このような化学的多様性は、星間ガスが収縮し原始星が誕生するまでの履歴に強く依存していると考えられることから、それが物理的多様性とどのようにリンクしているかが一つの焦点として浮かび上がってきている。物理的多様性を生む原因の一つはその星形成領域の周辺の環境の違いであることから、星形成の基本的物理過程を調べる上で孤立した星形成領域は絶好の研究対象となってきた。同様に、化学的多様性を生み出す環境要因を探るために、本研究では3つの孤立した星形成領域 B335, CB68, CB244 に着目し、そこでの化学構造と物理構造の間の関係を探る研究を行った。

わし座にある Class 0 低質量原始星天体 B335 は太陽系の近くに位置し、比較的対称で小さな分子雲の中に原始星をただ一つだけもつ。このような単純な構造により、代表的な孤立天体として星形成の物理過程の観測研究によく利用されてきた。しかし、その化学組成の特徴についてはほとんど調べられてこなかった。我々は、ALMA を用いた観測により、この天体が Hot Corino 化学と WCCC を併せもつハイブリッド型の化学組成をもつことを明らかにした。Hot Corino 化学は原始星近傍の数 10 au 程度に集中して見られ、検出された飽和有機分子の存在量は、これまで知られている典型的な Hot Corino 天体と同程度であることがわかった。それに対し、WCCC は原始星に付随しながら 1000 au 程度の領域まで広がって見られることがわかった。このようなハイブリッド型の化学組成は、Aikawa らによって報告されていた化学モデル計算の結果と一致する。また、この天体ではこれまで回転構造は検出されていなかったが、ALMA による高感度・高解像度の観測により、回転構造を初めて分解することに成功した。この回転構造は、他の低質量原始星天体のエンベロープで見られるような回転落下運動モデルによって説明することができた (図 1)。この回転落下運動では、遠心力によりガスがこれ以上原始星に落下できない場所 (近日点) に、遠心力バリアと呼ばれる構造をもつ。B335 の遠心力バリアは、これまで知られていた原始星天体のものに比べて一桁以上小さい。さらに、遠心力バリア付近に飽和有機分子が存在し Hot Corino 化学を示していることを確認した。

へびつかい座にある Class 0 低質量原始星天体 CB68 も比較的対称で小さな分子雲であり、原始星をただ一つだけもつ。代表的な孤立天体 B335 と異なり、CB68 は干渉計を用いた高感度・高空間分解能観測による詳細な研究はほとんどなされてこなかった。この天体を ALMA によって観測した結果、B335 と同様に Hot Corino 化学と WCCC を併せもつハイブリッド型の化学組成をもつことを明らかにした。また、Hot Corino 化学が原始星近傍の内側に集中して見られ、WCCC が外側 1000 au 程度まで広がって見られる点は B335 と共通している。ところが、Hot Corino 化学の特徴である飽和有機分子は B335 と比べて組成が異なり、その存在量も全般的に一桁程度少ない。物理構造に関しては、この天体のエンベロープでも小さな回転構造が検出された。この回転構造も回転落下運動モデルで説明され、遠心力バリアの上限值はこれまで知られていた原始星のものよりも小さいことが示された。

ケフェウス座にある Class 0 低質量原始星天体 CB244 は、分子雲は他の星形成領域から孤立しているものの、扁平な構造をもつ分子雲である。さらに、B335 や CB68 とは異なり原始星とともに星なしコアを有

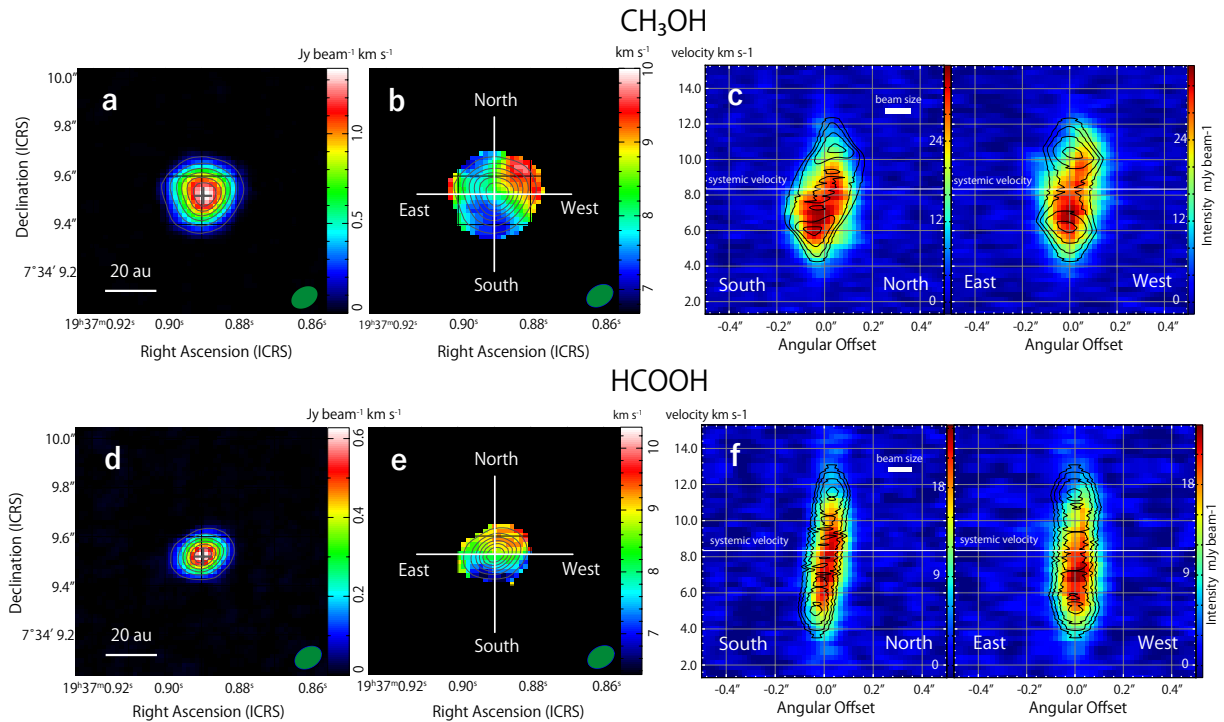


図 1: B335 での  $\text{CH}_3\text{OH}$  と  $\text{HCOOH}$  の観測結果。(a, d)  $\text{CH}_3\text{OH}$  と  $\text{HCOOH}$  の積分強度図。 $\text{CH}_3\text{OH}$  と  $\text{HCOOH}$  が原始星位置 (+印) の近傍数 10 au に集中して存在していることがわかる。(b, e)  $\text{CH}_3\text{OH}$  と  $\text{HCOOH}$  の速度勾配図。図中赤色の部分はガスが手前から奥向きに遠ざかっていることを示し、青色の部分はガスが奥から前向きに近づいてきていることを示す。両方の分子で回転の特徴である速度勾配を示す。(c, f) e, f のパネル上で示した南北 (エンベロープ方向)/東西 (アウトフロー方向) の方向での位置速度図 (PV 図) と、回転落下モデル (等高線) の比較。回転落下モデルの中で、分子の存在領域を変えることで、両方の分子の速度構造が説明される。

する。CB68 と同様に、CB244 についても干渉計を用いた詳細な観測はなされてこなかった。この天体をミリ波干渉計 NOEMA によって観測したところ、この天体では WCCC の特徴のみが検出された。観測ノイズによる検出限界から推定した飽和有機分子の存在量の上限は B335 のものより 2 桁程度低く、Hot Corino 化学は B335 や CB68 のように明確には見られなかった。また、この天体の物理構造は上記 2 つの孤立天体とは異なる。エンベロープの回転構造は、回転落下運動で説明できるが、その遠心力バリアの半径の上限値は B335 や CB68 に比べて 1 桁以上大きいことがわかった。さらに、エンベロープでは、ガスの分布に偏りがある様子が捉えられた。

これらの解析において、観測とモデルとを定量的に比較する新しい方法を考察して適用した。これによって原始星質量や遠心力バリア半径を合理的に決定・制限することができた。

以上のように、本論文では孤立分子雲における若い原始星天体に焦点を当て、その物理構造や化学構造を炭素鎖分子や飽和有機分子などの様々な分子輝線の観測によって初めて明らかにした。図 2 に示すように、孤立天体の間でもこれらの構造や化学組成には多様性がある姿が見えてきた。太陽型原始星のエンベロープで見られる化学的多様性を生み出す要因の特定までには至らなかったものの、その起源を探る上で以下の 4 つの重要な結果を得た。

1. 孤立領域における原始星でも回転落下エンベロープとそれに伴う遠心力バリアは共通して検出された。さらに、遠心力バリア付近での化学組成の急激な変化は、観測した 3 つ全ての天体で確認された。これは、太陽型原始星で回転落下エンベロープと遠心力バリアが普遍的な現象であることを示唆し、化学構造と物理構造のつながりを示す重要な証拠である。
2. Hot Corino 化学と WCCC を併せもつハイブリッド型の化学組成が B335 と CB68 で検出された。この種の化学組成はモデル計算によって報告されていたが、実際の天体での観測例は最近まで報告されてこなかった。以上の二例の検出はハイブリッド型の化学組成が確実に存在することを示す重要な証拠である。

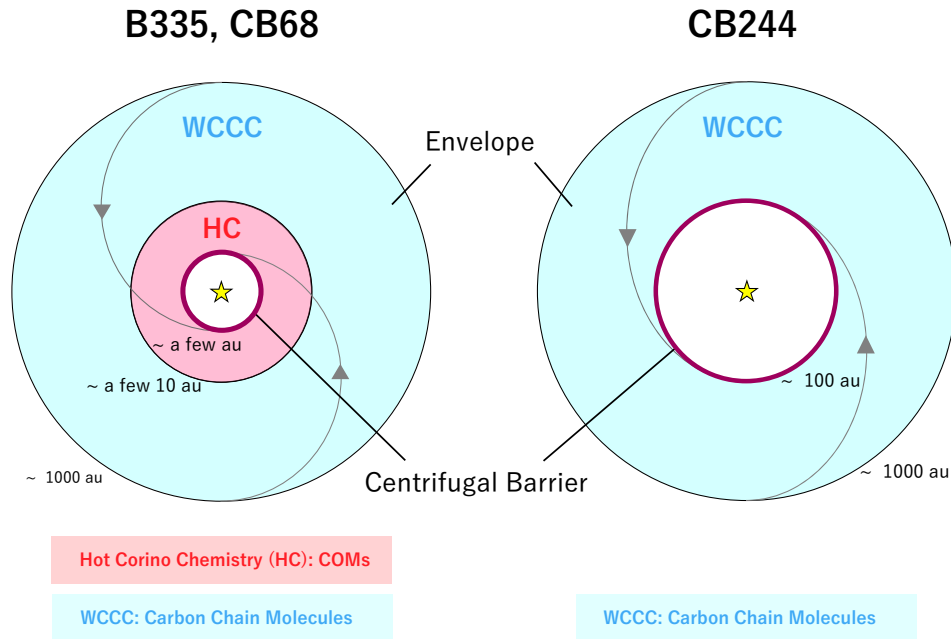


図 2: 孤立天体 B335, CB68, CB244 の原始星エンベロープの物理構造と化学構造をまとめた図。B335 と CB68 は、小さな遠心力バリアをもち、バリア付近の数 10 au 程度の領域に飽和有機分子が豊富な Hot Corino 化学がみられ、1000 au 程度まで広がった領域に不飽和な炭素鎖分子が豊富な WCCC がみられる。それに対し、CB244 は比較的大きな遠心力バリアをもち (~ 100 au)、1000 au 程度まで広がった領域に WCCC のみが見られる。いずれの天体の場合も、回転落下運動モデルでエンベロープの速度構造は説明できる。

3. 孤立領域における原始星天体に限って見ても、物理構造と化学構造には多様性があることを示した。孤立領域では、他の天体からの星形成活動による影響が排除できるため、この結果は、外部の星形成の影響がなくても化学的多様性が生じることを示す。
4. 母体となる分子雲の形状に類似性が見られる B335 と CB68 で比較的似た物理・化学構造が検出され、異なる形状を持つ CB244 では物理・化学構造が異なるように見える。このことは、分子雲の形状 (星なしコアの存在の有無や球状/扁平な分子雲の形) が原始星周りの物理・化学構造の違いを生み出している可能性を提起しており、化学的多様性の起源の理解に重要な示唆を与える。

以上のように、本研究では外部からの環境効果に影響されない孤立天体に焦点を当て、太陽型原始星の化学的多様性の起源を解明する上で重要な知見を得た。現段階での 3 つのサンプルから決定的な要因を抽出することは難しい。そのため、今後の孤立天体での統計研究が重要である。