

## 論文の内容の要旨

### Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation

(最初期形成過程における低質量原始星天体の物理・化学構造)

氏名 大小田 結貴

惑星系形成の「始まり」はその後の進化を決定付け、また惑星系の多様性の要因となり得る。近年、多くの系外惑星が発見され、それらは連星系で形成されたものや中心星の自転と逆向きに公転するものなど、様々であることが明らかになりつつある。その起源の要因が潜む、誕生して間もない星（原始星）は、太陽系の起源を理解するための重要な研究課題となり、活発に研究が行われている。星形成研究は、宇宙における最も基本的な構造形成過程として重要であり、その理解を深めることは、宇宙物理学・天文学において基本的課題である。

本論文の目的は、最先端の電波観測技術を用いて、太陽質量 ( $1 M_{\odot}$ ) 以下の低質量原始星の最初期形成過程の描像を明らかにすることである。原始星は、星間ガスの重力収縮によって作られ、低温 (数10-100 K) でかつ母体となる厚いガスに埋もれているため、可視光や赤外線観測でその詳細を調べることが困難である。そのため、理論的研究に比べその観測的研究は立ち遅れてきた。2011年にAtacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) の初期観測が始まって以来、電波領域での高分解能観測が可能になった。惑星系のもととなる円盤構造やそこでの化学組成の研究は急速に発展し、原始星周りの物理・化学構造の理解は明らかになりつつある。さらに、ここ数年の間で、ALMA の観測性能は格段に向上し、進化段階が若い原始星における小さな円盤構造も数 auスケールで分解できるようになった。この最高分解能を用いた観測により、原始星の誕生直後からわずか数千年

程度の形成過程において、未だ新たな発見が続いている。

本論文では、多様な分子の回転スペクトル輝線が特定の物理構造をトレースすることを活用し、原始星周りの物理構造の分布と運動を理解する。また、化学組成分布を単に「分子マーカー」として捉えるだけでなく、原始星周りの化学過程の理解に役立つ。このように、本論文は若い原始星の物理・化学構造に焦点を当て、最初期形成過程の理解を進展する観測的成果を見出した。主な点を以下にまとめる。

### (1) 原始星と円盤の共進化 (Chapter 3)

原始星が誕生してから1000年程度である低質量原始星天体IRAS 15398-3359を観測し、非常に若い原始星にもかかわらず、すでに回転する円盤構造（原始星円盤）が形成されていることを明らかにした。原始星近傍では、原始星の輻射によって温められた分子がダストから脱離する。そのようにして気相に現れたSO分子の回転スペクトル輝線を観測し円盤構造を抽出した。ケプラー回転運動からその原始星質量は $0.007 M_{\odot}$ と極めて小さい。これまでは、主に1万年程度の原始星における円盤構造が観測され、それらの原始星質量は概ね $0.1 M_{\odot}$ 程度以上である。それらと比較すると、IRAS 15398-3359は10分の1程度の非常に小さい原始星質量を示す。また、この天体は原始星質量に比べ十分に周りのガスが残っている ( $0.5-1.2 M_{\odot}$ ) ことから、小さな原始星質量は、原始星が誕生して間もない進化段階にあることを意味する。このような初期の天体における円盤検出によって、惑星系の形成が原始星の誕生とともに始まっていることを示した (図1)。

### (2) 原始星進化に伴うアウトフローの方向変化 (Chapter 4)

上記の若い天体について大きなスケールでの物理構造 (~2000 au) を調べ、原始星から

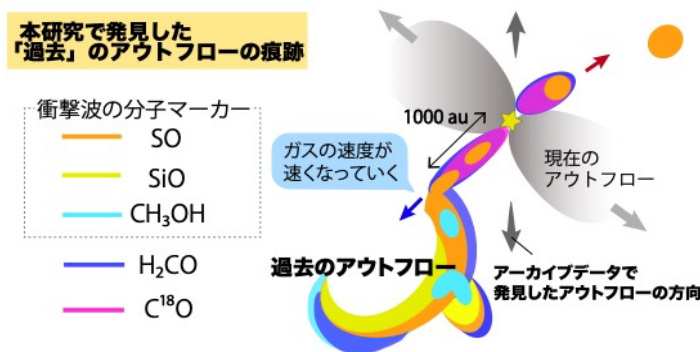


図 2. 最初期形成過程にある原始星天体 IRAS15398-3359 のアウトフローの模式図。3つのアウトフローが存在することがわかった。

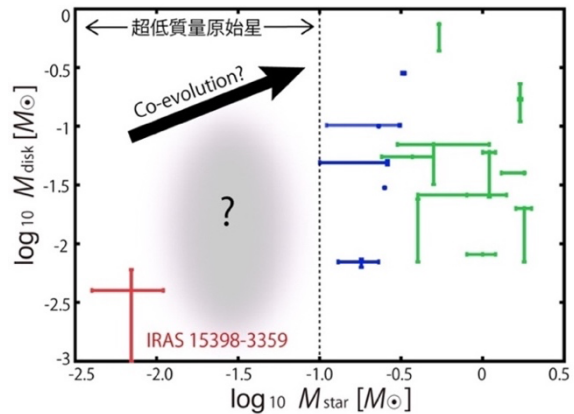


図 1. 左下に位置する天体の初期円盤の検出によって見えてきた共進化描像の兆候。横軸と縦軸はそれぞれ原始星質量と円盤質量を表す。緑と青は進化が進んだ他天体のサンプル。

噴出するアウトフローガスの大きな方向変化を捉えた。SO、SiO、CH<sub>3</sub>OHは既存のアウトフロー方向と90°程度異なる方向にアーク状の構造を示す (図2)。これらの分子は衝撃波領域を選択的にトレースする分子マーカーである。特にSiOは通常、星間塵コアに

存在し、アウトフローが周りの静的なガスに衝突した時に気相に放出される。分子輝線の狭い線幅は衝突してからの時間経過を示し、アーク状の構造が過去に形成されたものであることがわかった。さらにアーク状構造に向かって伸びる細い構造は、アウトフローに特徴的な、原始星からの距離に比例する加速度運動を示した。このように、複数の分子輝線を活用し過去のアウトフローを捉えた。アウトフローの方向変化は原始星に落ち込むガスの角運動量の変化に起因すると考える。さらにALMAのアーカイブデータでさらに広域（ $\sim 10000$  au）を調べたところ、南北に渡って広がるアウトフローを検出した。この発見は本論文のアウトフローの方向変化のシナリオを強める結果である。このように、星形成の最初期形成過程は激しい活動性を伴って進行することがわかった。

### (3) 温度分布が示す Accretion shock の兆候 (Chapter 5)

孤立した若い低質量原始星天体 B335 において高分解能観測を行い、原始星周り数 10 au スケールの温度分布を調べたところ、半径 6 au で降着衝撃波の兆候を見出した (図 3)。これは分子分布の相違性と複数の輝線を活用した温度測定に基づく。HCOOH と NH<sub>2</sub>CHO は CH<sub>2</sub>DOH と CH<sub>3</sub>OH に比べ原始星周りにコンパクトな分布を示す。これらの分子輝線から見積もった温度は、原始星から離れるにつれて一度下がり、再び上昇する様子を示した。原始星からの放射のみではこの描像を説明することができない。外側の温度上昇を引き起こす最も有力なメカニズムとして、降着するガスと原始星周りのガスとの衝突によって引き起される衝撃波による加熱を提案した。一方、エンベロープの外側において、100 K 以上であるにもかかわらず HCOOH と NH<sub>2</sub>CHO は検出されないことは、これらの分子の生成過程の手がかりを示している。

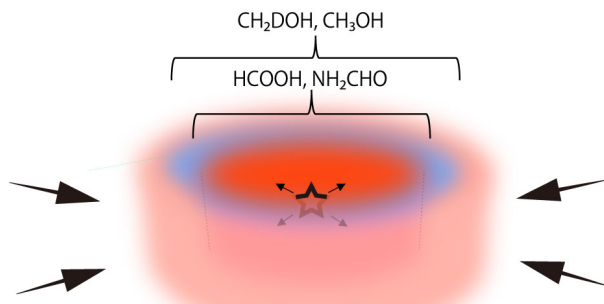


図 3. 低質量原始星天体 B335 の円盤・エンベロープ構造における温度分布の模式図。原始星の放射による原始星近傍の温度上昇と、降着衝撃波によるエンベロープの外側での温度上昇を示す。

### (4) 主成分分析を活用した化学組成分布の分類 (Chapter 6, 7, 8)

電波観測の高度化により、一度の観測で豊富な分子輝線を検出できるようになった。本論文では、膨大なデータの解析手法として、主成分分析 (PCA) を原始星周りの分子輝線データに適用した。その有効性を確かめるため、まず初めに原始星天体 IRAS 15398-3359 において検出した 15 種の分子輝線データと連続波の 2 次元分布に PCA を行なった。アウトフローを含む大きなスケールと円盤・エンベロープ構造の小さいスケールに適用した結果、系統的に分子分布を分類し、化学組成分布の特徴を先入観なく抽出することがわかった。また、PCA を適用する選択範囲の重要性が示された。

さらに本論文では、周波数方向 (速度方向) を含む 3 次元データに対する PCA の有効性を

示す。円盤・エンベロープ構造に有機分子を豊富に含む低質量原始星天体L483（23種類の分子輝線）とB335（32種類の分子輝線）の観測データを用い、分布だけでなく速度構造も同時に抽出することで有機分子分布を分類できることを示した。円盤・エンベロープは複雑な速度構造を持つため、3次元分布に対するPCAが非常に有効であることがわかった。

#### (5) 原始星近傍における有機分子の傾向 (Chapter 8, 9)

有機分子を豊富に含む原始星天体L483とB335の3次元データに対するPCAの結果は、主に「酸素を含む分子と窒素を含む分子の系統的な違い」、「NH<sub>2</sub>CHOとHNCOの相関」、「HCOOHの特異性」を示す。酸素を含む分子は窒素を含む分子に比べると原始星周りに広がった分布を示す傾向が見られた。しかしながら、HCOOHは酸素を含む分子にもかかわらず窒素を含む分子と同様にコンパクトな分布を持つ。これらの傾向は他の天体でも指摘されていたが、本研究では、温度分布とともにその異状性が明確に示された。この結果は、単に星間塵マントルからの蒸発温度の違いとして理解することはできず、有機分子の生成過程の再考を促すものと言える。また、NH<sub>2</sub>CHOやHNCOは、ロゼッタミッションでチュリモフグラシメンコ彗星の探査においても検出され、注目されている分子である。それらが原始星近傍に分布していることは、太陽系小天体での存在との関連性が示唆される(図4)。

本論文は、低質量原始星の最初期形成過程が物理的にも化学的にも単純なものではなく、激しい変化を伴う複雑な過程であることを観測的に示した。この成果は、星・惑星系形成の理解に一石を投じるものであるとともに、この複雑性が、形成される惑星系の多様性とどう繋がるかという課題を提示した。

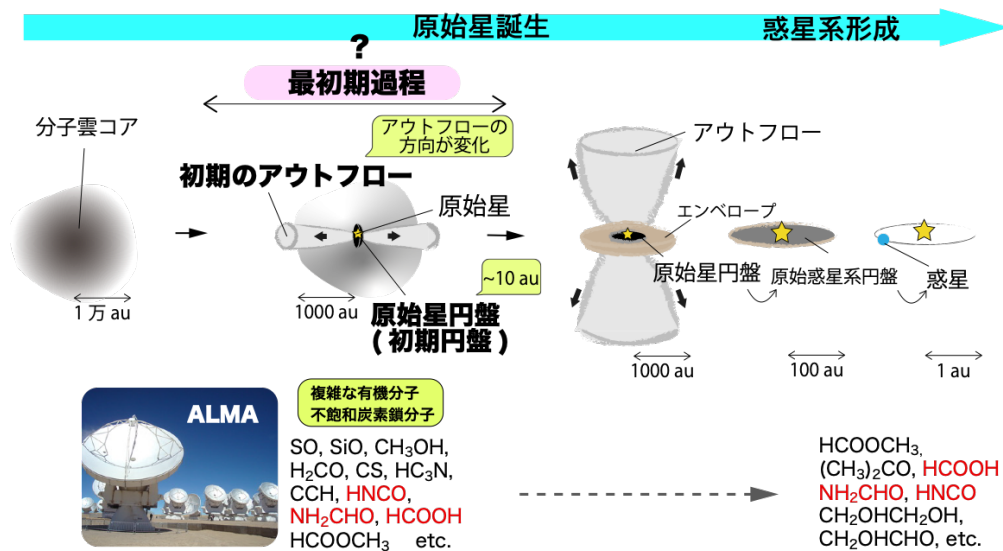


図4. 原始星から恒星への形成過程。最初期過程では初期円盤の検出やアウトフローの方向変化といった物理構造に加え、太陽系とも関連性がある多様な有機分子を検出した。