

原始惑星系円盤形成領域の化学組成とその進化

Chemical Composition of Disk Forming Regions of Solar-type Protostars and its Evolution to Planetary Systems

課題番号：18H05222

山本 智 (YAMAMOTO SATOSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授



研究の概要（4行以内）

太陽のような低質量星の形成現場で、原始星エンベロープから惑星系のもとになる円盤構造に至る過程での物理進化、化学進化をALMAによる観測で探究した。円盤構造形成の遷移領域は複雑な構造をもち、そこで化学組成が大きく変化していることがわかった。また、エンベロープガスで見られていた化学的多様性は、円盤形成領域まで伝播されていることを確認した。

研究分野：電波天文学

キーワード：星・惑星系形成、星間化学、分子分光

1. 研究開始当初の背景

「恒星とその周りの惑星系が形成する過程で、どのような物質進化が起こるのか？」これは、太陽系の物質的起源の理解に直結する重要な問題である。これまでに、太陽型原始星天体では数1000天文単位のスケールの化学組成に多様性があることが知られており、それがどのように惑星系形成領域にもたらされるかは、惑星系形成の物理的理解とともに重要な研究課題として注目されてきた。

2. 研究の目的

本研究では、太陽型原始星天体の化学組成の多様性と惑星系への進化を、ALMAを駆使して探求する。具体的には、(1)20個程度の原始星を化学的多様性の原始惑星系円盤への進化を捉えること、(2)数個の代表的原始星天体について高解像度での観測を行い、円盤形成領域の物理・化学進化を明らかにすること、(3)1つの分子雲に含まれる原始星天体の無バイアス観測によって化学的多様性の起源を探求することである。5年間の集中した研究で、惑星系形成に伴う化学進化の法則性を明らかにし、太陽系の物質的起源の理解を大きく前進させる。

3. 研究の方法

上記の(1)-(3)について、それぞれ以下のようにALMAによる観測で探求する。

(1)すでに観測されている原始星天体について、原始星近傍の化学組成分布を解明する。さらに、ALMAへの観測提案を行い、5年間で20個程度の原始星天体を調べ、原始惑星系円

盤への化学進化の法則性を明らかにする。また、化学反応ネットワーク計算との対応を通して、その化学過程を探求する。

(2)原始惑星系円盤の外縁部と回転落下エンベロープの境界（遠心力バリア）では起こっている複雑な物理・化学過程ALMAの最高解像度の観測で解明する。

(3)ペルセウス座分子雲、オリオン座分子雲の観測がALMAで採択され、実行されている。分子組成と天体の周辺環境を比較し、化学的多様性を生む要因を統計的に解明する。

観測研究と併行して、実験室における分子分光実験を行う。分子の回転スペクトル線周波数データベースの精度は同位体種や高励起遷移などについては不十分である。解析に必要な回転スペクトル線の周波数の精密測定を、理化学研究所の分光測定装置を用いて、観測の進展に即応して進める。

4. これまでの成果

(1)ALMA大型観測プログラムの採択：本研究グループが中心（山本がPI、坂井がCoPI）となり、仏、伊、独、米などの研究者と共同して、FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars) という大型プログラムを提案していたが、本基盤S研究の採択の直後に、この提案が採択された。FAUSTは13個の太陽型原始星に対して、同一の感度、同一の実空間分解能(50 au)、および同一の分子輝線で観測することにより、それらの物理構造と化学組成の特徴の全貌を明らかにしようとするものである。系統的に観測を遂行できるよう

になったことは、大きな一歩を踏み出せた。

(2) 化学的多様性の全貌と原始惑星系円盤への進化の探求：本研究では、5つの低質量原始星天体について、数 10 au スケールの物理・化学構造を明らかにした。Elias 29 はこれまでに知られている Hot Corino 化学（飽和有機分子が豊富）でも WCCC（不飽和有機分子が豊富）でもその「中間」でもなく、硫黄分子が異常に多い新しい化学的特徴を示した。L1551 と VLA1623A はいずれも Hot Corino 天体の特徴を、CB244 は WCCC 天体の特徴を、そして CB68 は「中間」的性質を示した。CB68 は孤立した分子雲であるが、同様の B335 も「中間」的性質を示すことは、化学的多様性の原因を理解する上で鍵となると言える。

(3) 原始惑星系円盤形成とそこでの物理・化学過程の解明：10 au 程度の解像度の観測を行い、B335 で初めて回転構造を検出した他、IRAS16293-2422 Source A の円盤が複雑な副構造を持つことを示した。さらに、L1527 の観測では、円盤構造の Warp を発見する成果を挙げた。このような構造が、まだ形成段階にある原始星円盤で見出されたのは初めてである。より進化が進んだ FU Ori 型星 V883 Ori では、メタノールなどの有機分子をスノーライン付近で検出した。分子の相対存在比は彗星での組成に似ていることを示した。

(4) 化学的多様性の起源の探求：これまでに、ペルセウス座分子雲に含まれる 50 個の若い原始星天体の解析が進行中である。その中で、同一領域の中でも、Hot Corino 化学を示す天体と WCCC を示す天体が見出されることが確認された。また、硫黄を含む分子の存在量も天体ごとに大きく異なることも示された。一方、化学的多様性が生まれる原因について、化学反応ネットワーク計算による研究も進めた。WCCC の出現は初期条件によって差が出るが、Hot Corino ほどのような場合でも出現するという結果が得られた。

(5) 分子スペクトル線静止周波数の精密測定：理化学研究所に設置した放射型ミリ波・サブミリ波分光計を用いて、星・惑星系形成領域の観測で重要な有機分子の測定を進めている。まず初めに、 CH_3OH 、 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 、 CH_2DOH の測定を 200 GHz 帯で行った。そのスペクトルアトラスをまとめて公表、出版する準備を進めている。並行して、超伝導 HEB (Hot Electron Bolometer) ミクサを用いた受信機で、900 GHz 帯のテスト測定にも成功した。

5. 今後の計画

引き続き、ALMA による観測とデータ解析を推進する。特に、FAUST のデータ解析を加速し、13 個の太陽型原始星について化学組成の多様性の全貌を明らかにする。また、すでに取得している高解像度観測データを解析して、回転落下エンベロープから原始星円盤への遷移領域の物理・化学過程を探る。遷移領

域については、大質量原始星天体との関連も重要になっているので、代表的天体で研究を進める。さらに、ペルセウス座分子雲、オリオン座分子雲の中の原始星天体の無バイアス観測のデータ解析を進め、化学組成の特徴と天体の置かれている環境との関連を調べ、化学的多様性の起源に迫る。

観測研究と併行して理論研究との対比を重点的に進める。たとえば、原始星円盤の非対称構造や微細構造の原因を流体力学シミュレーションで読み解く。一方、化学反応ネットワーク計算については、Cassen & Moosman (1981) に基づくコアモデルの輻射輸送計算で温度分布や分子存在度の影響を調べるとともに、観測結果との比較を行う。

ALMA のデータの解析のために必要な実験室での分子スペクトル線の静止周波数測定については、測定周波数領域を ALMA の Band 7+8 (275-500 GHz) および Band 10 (800 GHz-1000 GHz) に拡張する。 CH_3OH および様々な有機分子 (HCOOCH_3 、 CH_3OCH_3 など)、およびそれらの同位体種について測定を行い、観測データの解析を支援する。

以上の研究をまとめ、星・惑星系形成に伴う物質進化の全体像と、それを支配する物理的要因の解明という当初目標を達成する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(1) Oya, Y., Lopez-Sepulcre, A., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., Aikawa, Y., Sakai, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel C., Kahane, C., and Yamamoto, S., “Sulfur-bearing Species Tracing the Disk/Envelope System in the Class I Protostellar Source Elias 29, *Astrophys. J.* 881, 112(16 pages) (2019).

(2) Imai, M., Oya, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., “Unveiling a Few Astronomical Unit Scale Rotation Structure around the Protostar in B335”, *Astrophys. J.*, 873, L21 (7 pages) (2019).

(3) Sakai, N., Hanawa, T., Zhang, Y., Higuchi, A.E., Ohashi, S., Oya, Y., and Yamamoto, S., “A warped disk around an infant protostar”, *Nature*, 565, 206-208 (2019).

(4) Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Jorgensen, J.K., van Dishoeck, E.F., and Yamamoto, S., “The Co-evolution of Disks and Stars in Embedded Stages: The Case of the Very-low-mass Protostar IRAS 15398-3359”, *Astrophys. J.*, 864, L25 (7 pages) (2018).

7. ホームページ等

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~submm/>