

学位論文題名

Study of evolutionary stages of molecular cloud
cores in low- and high-mass star forming
regions from CCS and NH_3 line observations

(CCS, NH_3 輝線観測による大・小質量星形成領域の
分子雲コアの進化段階に関する研究)

学位論文内容の要旨

恒星は星間空間に存在する分子ガスの雲、分子雲で形成される。具体的には分子雲内部の特に密度の高い、分子雲コアと呼ばれる領域が自己重力で収縮して形成されることが分かっている。星形成はコアの重力収縮から開始されるので、分子雲コアに関する理解は星形成の初期段階を知るために重要である。これまでに行われた多数の観測的・理論的研究から、太陽程度の質量の星が形成される小質量星形成と太陽の数倍の質量を持つ星が形成される大質量星形成は、分子雲コアのスケールで見て異なることが明らかになっている。また、分子雲スケールでは一つの分子雲コアから単独もしくは連星として星が形成されるような孤立した星形成と、コア内で星が群れをなして形成される星団形成という二つの異なる種類の星形成があることがわかってきている。

本研究は、小質量星形成のうちまだ解明されていない力学的な進化過程と化学的な進化過程の関係を探ること、また、分子雲ごとに異なる星形成の多様性が何に起因しているのかを探ることを目的としたもので、北海道大学苫小牧 11 m 電波望遠鏡及び国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡を用いた観測に基づいている。

北海道大学苫小牧 11 m 電波望遠鏡を用いた観測では、おうし座分子雲複合体、オリオン座 B 分子雲、オリオン東分子雲の 3 つの星形成領域の分子雲コアに対して NH_3 (J, K) = (1, 1), (2, 2), CCS $J_N = 2_1-1_0$ 輝線の同時観測を行った。また、一部のコアでは NH_3 (J, K) = (3, 3) 輝線あるいは $\text{HC}_5\text{N } J = 9-8$ 輝線を同時に観測した。観測対象のコアの選定は過去の研究から形成途中の星である原始星の有無やダストの減光量に依存しない、無バイアスな高密度ガストレーサー輝線のマッピング観測の結果を参照して行っており、本観測領域についても無バイアスのデータセットが得られるようにした。また、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡を用いた観測ではおうし座分子雲複合体の一つの分子雲コアに対して NH_3 (J, K) = (1, 1) 輝線と CCS $J_N = 2_1-1_0$ 輝線の高解像度マッピング観測を行い、2 種の分子のコア内部における空間分布を明らかにできるようにした。

苫小牧 11 m 電波望遠鏡での観測の結果、 NH_3 (J, K) = (1, 1) 輝線はおうし座分子雲複合体、オリオン B 分子雲、オリオン東分子雲のそれぞれの領域で 26 個、25 個、1 個のコアから検出された。これに対して、 NH_3 (J, K) = (2, 2) 輝線はおうし座分子雲複合体では検出されず、一方、オリオン座 B 分子雲とオ

オリオン座東分子雲ではそれぞれ 9 個、1 個のコアで検出された。さらに、CCS 輝線はおうし座領域の 12 個、オリオン座東分子雲の 1 個のコアで検出されたが、オリオン座 B 分子雲では検出されなかった。また、一部のコアでは同時に観測した NH_3 (J, K) = (3, 3) 輝線や HC_5N $J = 9-8$ 輝線も検出された。特にオリオン座東分子雲ではこれらの高密度ガストレーサーや炭素鎖分子の輝線が検出されるのは初であり、この領域で現在も星形成が継続的に起きていることを初めて明らかにした。

オリオン B 分子雲とオリオン座東分子雲のコアでは、検出された NH_3 (J, K) = (1, 1) 輝線と (2, 2) 輝線の強度から NH_3 分子の励起温度である回転温度と奥行き方向を積分した密度である柱密度を、おうし座分子雲複合体では各輝線の強度と線幅から各分子の柱密度を導出した。

回転温度からは大質量星形成が行われているオリオン B 分子雲の分子雲コアでは南側の領域で温度が 24-30 K と他の分子雲コアの 12-16 K より有意に高いコアが存在すること、一方で小質量星形成を行っているオリオン座東分子雲の分子雲コアの温度や柱密度が近傍小質量星形成領域であるおうし座分子雲複合体に近いことが示された。

一般的に分子雲コアの化学組成はガス分子の化学反応によって時間と共に変化して行くので、これをコアの化学的進化と呼ぶ。CCS ラジカルは分子雲コアの進化の初期段階で豊富であるのに対して、 NH_3 分子は進化の後期段階で豊富な分子であることがこれまでの研究から明らかになっており、その柱密度の比は分子雲コアの化学的進化の指標として見ることもできると指摘されていた。今回の観測結果から CCS/ NH_3 柱密度比を導出し、分子ガスの密度やダスト温度といった分子雲コアの力学的進化に関係する物理量と比較したところ、それらの温度や密度が高い場合に柱密度比は減少し、化学進化と力学進化には矛盾がないことを示した。一方で、野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡で行った高空間分解能観測からは、一つの分子雲コアの内部においてもそれを細分化する空間スケールでみると NH_3 と CCS の空間分布には僅かな差があり、CCS/ NH_3 柱密度比が一定ではなくコアの内部で変化していることが明らかになった。

この CCS/ NH_3 柱密度比を分子雲コアの年齢の指標として用いることで、オリオン座東分子雲の分子雲コアの年齢を大まかに推測し、このコアは分子雲がオリオン OB 1b 星団の影響に曝された後に形成された可能性があることを示した。これが正しければ、同じようにオリオン OB 1b 星団の影響下にあって分子雲が恒星風の影響を受けていると考えられているオリオン B 分子雲とオリオン座東分子雲で星形成のモードが違うことになり、分子雲のサイズや質量により近傍に存在する大質量星団の星形成に与える影響が異なることを示唆するものとなった。

さらに、おうし座分子雲複合体の観測結果と他の小質量星形成領域であるペルセウス座分子雲複合体、パイプ星雲の先行研究の観測結果との比較から、小質量星形成領域では集団的な星形成をしている分子雲でも化学組成は変わらず、星形成の効率以外に差がないことが示唆された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	羽部朝男
副査	特任教授	藤本正行
副査	教授	河本昇
副査	教授	倉本圭
副査	助教	徂徠和夫

学位論文題名

Study of evolutionary stages of molecular cloud cores in low- and high-mass star forming regions from CCS and NH₃ line observations

(CCS, NH₃ 輝線観測による大・小質量星形成領域の
分子雲コアの進化段階に関する研究)

恒星は星間空間の分子雲内部のコアと呼ばれる密度の高い領域から形成される。質量が太陽程度以下の小質量の単独の恒星については、分子雲コアの重力収縮から原始星と呼ばれる内部で核融合反応を起こす前の天体に至る過程について、観測結果と理論的予想との整合性が比較的良好に取られている。ただし、恒星には集団で形成されるものも多く、集団で形成されるか単独星もしくは連星で形成されるのか、その決定因子についてはまだよくわかっていない。さらに、太陽の数倍以上の質量を持つ大質量星の形成、形成される恒星の質量の違いを決定する条件等についても未解明であるが、これらは恒星形成を理解する上で本質的な問題である。

本論文は、分子スペクトル線の観測から、異なる星形成領域について、分子雲コアの進化段階、星形成モードの特徴について研究したものである。観測は、本学が所有する苫小牧 11m 電波望遠鏡並びに、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡を用いて、銀河系内の 3 つの星形成領域を対象としている。この 3 つの領域は、おうし座分子雲、オリオン座 B 分子雲、オリオン座東分子雲で、それぞれ小質量形成領域、大質量星形成を伴う巨大分子雲、大質量星形成領域に隣接する暗黒星雲の複合体であり、星形成の性質が異なることが知られている。観測したアンモニア分子と一硫化二炭素ラジカルのスペクトル線の強度比は、分子雲コアの化学的進化段階の指標になることが知られているが、これまでは小質量星形成領域を中心に限られた天体に対してのみ観測がなされてきたにすぎな

い。本研究では、対象を広げて系統的な観測を実施した点に意義があり、実際、オリオン座東分子雲では初めて一硫化二炭素のスペクトル線を検出するに至っている。

アンモニア分子と一硫化二炭素ラジカルのスペクトル線の強度比は、分子雲コアの化学進化の指標であるが、本論文ではおうし座分子雲で観測された強度比を、同じ領域について観測された H^{13}CO^+ イオンのスペクトル線強度から導出した水素分子密度と比較することで、分子雲コアの収縮過程、つまり分子雲コアの物理的な進化との対応付けを行っている点も特筆に値する。この化学進化と物理進化の対応を踏まえた上で、以降の議論を行っている。

苫小牧 11m 電波望遠鏡を使った探査観測では、個々の分子雲コアどうしの性質の比較に重点を置いているため、空間分解能は分子雲コアの典型的な大きさにほぼ匹敵しており、その内部の詳細を知ることができない。そこで、本研究では代表的な観測点について、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡を使ったアンモニア分子と一硫化二炭素ラジカルの観測も実施している。その結果、内部での両スペクトルの局在は見られるものの、分子雲コア全体としては、苫小牧 11m 電波望遠鏡の解像度で過不足なく観測できることを確認している。

この研究では、アンモニア分子の複数の遷移によるスペクトル線を観測しており、それらの強度比から回転温度と呼ばれる励起温度も導出している。オリオン座 B 分子雲中の大質量星形成が起こっているコアでは回転温度が約 30 K 程度であるのに対して、大質量星形成を伴わないコアでは 15 K 程度以下であり、おうし座分子雲と同様に温度が低いことを明らかにしている。オリオン座 B 分子雲では、小質量星しか形成されていない領域でも一硫化二炭素のスペクトル線が検出されておらず、化学進化は明らかに異なっている。これらの領域の大きな違いは、母体となる分子雲の大きさ（質量）だけであり、本研究では、分子雲の質量が化学進化に対して影響を与えている可能性を示唆している。

以上のように、著者はアンモニア分子と一硫化二炭素ラジカルのスペクトル線の観測から分子雲コアの進化についてコアが内包されている環境が関係している可能性があるという新しい知見を得ており、巨大分子雲と質量の小さい暗黒星雲で形成される星の質量や密集度が異なるという観測事実の原因究明に対して重要な貢献をしている。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。