

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17612

研究課題名(和文) 多波長天文観測に基づく低重元素量環境下での星間分子化学の研究

研究課題名(英文) A multiwavelength study on interstellar chemistry in low-metallicity environments

研究代表者

下西 隆 (Shimonishi, Takashi)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：80725599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、宇宙空間における星や惑星、そして生命の材料となり得る物質の化学的多様性を明らかにすることを目的としている。本計画では、最先端の望遠鏡による天文観測を主軸として、過去の銀河に類似した環境を持つ低重元素量銀河内に存在する星間分子の調査を行った。結果として、有機分子を含む氷の雲に埋もれた原始星(生まれたばかりの星)やホットコアと呼ばれる化学的に豊かな分子ガスに包まれた原始星が世界で初めて我々の住む天の川銀河外に発見され、太陽系近傍とは大きく異なる環境を持つ銀河では、星の材料となる物質の化学組成が異なることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study aims to reveal the chemical diversity of interstellar medium in the universe. In this project, based on astronomical observations with state-of-the-art telescopes, we investigated properties of interstellar molecules in nearby low-metallicity galaxies, which potentially have common environmental characteristics with past galaxies. Particularly, we focused on understanding of interstellar chemistry in various phases of interstellar medium (molecular gas, ices, and dust), with the aid of multiwavelength observations from infrared to radio. As a result, a number of astrochemically important objects, such as protostars deeply embedded in icy dust with organic molecules and protostars surrounded by a cocoon of warm molecular gas (hot molecular core), were detected outside our Galaxy. Detailed analyses have shown that chemical compositions of interstellar molecules in low-metallicity galaxies have different characteristics compared to those in our Galaxy.

研究分野：天文学

キーワード：赤外線天文学 電波天文学 星間化学(アストロケミストリー) 星間分子 氷 マゼラン雲 系外銀河
ホットコア

1. 研究開始当初の背景

我々の住む地球や生命の材料となる物質は宇宙空間のどのような環境で生成され、どのような化学的進化を遂げ、そしてどのような多様性を持つのだろうか。これらの謎に対し、本研究計画で推進するアストロケミストリーと呼ばれる研究分野は、従来の天文学に化学的視点を取り入れ、宇宙空間に存在する分子(星間分子)の天文観測、及び関連する理論計算・実験的研究により迫っていく分野である。

本研究では、過去の宇宙に類似した環境下における星や惑星の材料物質の化学的性質に焦点を当て、過去から現在に至るまでの宇宙の時間的な進化史と星間物質の化学的多様性の進化史の関連性解明に向けた研究を行った。「銀河の重元素量」は、本研究の学術的背景を述べる上で重要なキーワードである。我々の体を作る重元素(天文学では一般的にヘリウムより重い全ての元素を指す)は、恒星内部の核融合反応によって生成され、超新星爆発などの星の終末期に起こる現象により星間空間へと供給される。つまり、星の誕生と死のサイクルが繰り返されるほど銀河の重元素量は増加していく。このため、宇宙の化学的進化とは、第一次近似的には重元素量の増加であると捉えることができる。よって、重元素が低い環境下に存在する星間分子の詳細な研究は、過去の宇宙において、現在の天の川銀河で見られているような星間物質の分子化学的多様性が存在していたのかどうかを知る手掛かりとなる。

しかし、長らく、分子雲(星が生まれる母体となるガスの塊)又は原始星(生まれたばかりの星)の化学組成に関する研究は、我々の住む天の川銀河内の天体又は同様の重元素量環境にある天体に限られていた。このため、重元素量の低い環境下にある星間分子の化学的性質はほとんど明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究は、重元素量の低い環境下にある星形成領域の観測を行い、太陽近傍の標準的な重元素量とは異なる環境にある星間分子の性質を探ることを目的としている。また、得られた観測データに基づき、過去の銀河に類似した低重元素量環境における星間分子化学の特徴を明らかにし、宇宙における星・惑星材料物質の化学的多様性を理解することを目的としている。

3. 研究の方法

星間分子の観測には様々な手法が知られているが、その中でも星・惑星形成領域に存在する分子の観測において特に重要なものとして、ミリ波・サブミリ波領域における気相分子の回転遷移の観測、及び近・中間赤外線領域における固相分子の振動遷移の観測が挙げられる。星形成の現場において普遍的に見られる低温・高密度環境では、気相反応及びダスト(固体微粒子)表面での固相反応が密接な

関わりを持ち、双方が物質の化学的進化に重要な役割を果たすことが知られている。このため、天文観測により星間物質の化学的性質を正しく理解するためには、赤外線から電波の幅広い波長域における多波長分光観測を行い、固体・気体の両面から物質の化学組成や温度などを探っていくことが必要となる。そして、宇宙における物質の化学的多様性を銀河の環境と関連づけて探るといふ本研究の科学的観点からは、天の川銀河だけでなく、様々な銀河環境(特に多様な重元素量環境)にある星・惑星形成領域の観測的研究が必要となる(図1)。

本研究では、最先端の観測装置により得られるユニークな波長横断型分光観測データを駆使して研究計画を推進してきた。その結果として、下記に挙げる成果が得られた。

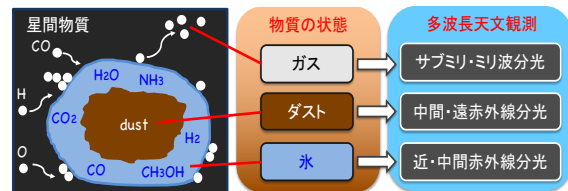


図1. 星・惑星形成領域には、ガス・ダスト(固体微粒子)・氷などの様々な星間物質(分子)が存在している。本研究では、赤外線から電波にわたる多波長分光観測により、多様な重元素量環境下に存在する星間物質の化学的性質を明らかにしていく。これにより、過去の銀河に類似した低重元素量環境における星間分子化学の特徴を探っていく。

4. 研究成果

(1) 星が形成される現場である分子雲の大部分は、一般的に極めて低温(10-20ケルビン程度)であるため、ダストの表面には様々な原子ガス・分子ガスが吸着する。このような吸着物質は星間氷と呼ばれ、その生成メカニズムであるダスト表面を触媒とした化学反応は、星・惑星形成領域における物質の化学的進化において極めて重要な役割を果たすと考えられている。

Shimonishi et al. (2016a) (発表論文⑦)では、南米チリにあるヨーロッパ南天天文台の大型光学望遠鏡Very Large Telescopeを用いて、天の川銀河近傍に位置する系外銀河「大マゼラン雲」内に存在する11天体の大質量原始星を赤外線の波長域で観測した。大マゼラン雲は、銀河の重元素量が低い(太陽近傍の約1/3)という環境的特徴を持っており、過去の宇宙に類似した環境における星間物質の化学的性質を探る上で重要な銀河である。

観測により得られた赤外線スペクトル(2.9-4.1ミクロン)の詳細な解析の結果、氷の状態で存在する水及びメタノールによる吸収バンドを複数の天体に対して検出した(図2)。

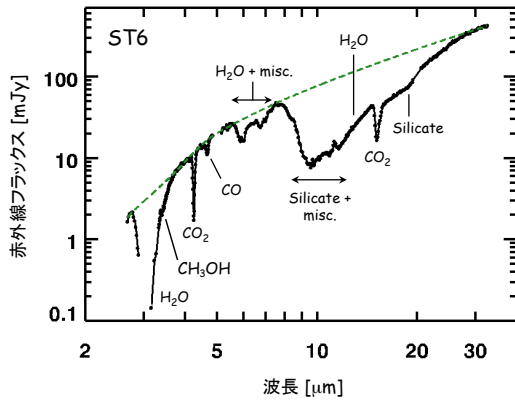


図2. 大マゼラン雲の大質量原始星の赤外線スペクトルの例。水や二酸化炭素などの様々な星間氷吸収バンドの位置が示されている。Shimonishi et al. (2016a)では、地上大型望遠鏡VLTを用いて近赤外線2.9-4.1ミクロンの重点的な高感度観測を行い、メタノール(CH₃OH)氷の吸収バンド(3.53ミクロン)の系統的な調査を行った。

得られたデータと、天の川銀河内にある同種の天体のデータを比較した結果、大マゼラン雲では天の川銀河と比べてメタノール氷の存在比が系統的に低いことが明らかになった。星間化学の理論モデルや実験室における星間氷模擬試料の物性測定実験などの結果を取り入れた議論により、このような低重元素量銀河における有機分子の氷の化学組成の違いは、大マゼラン雲内での高いダスト温度に起因するダスト表面反応の違いが原因であるという説を本論文において提唱した。

メタノールは通常の重元素量環境では比較的存在比の高い星間有機分子であり、星・惑星形成領域においてより大型の有機分子を生成する化学反応の起点になると考えられている重要な分子種である。本研究で明らかになった低重元素量銀河におけるメタノールの存在比の低さは、過去の宇宙に類似した銀河環境下では、有機分子の生成効率が著しい影響を受けることをしめした興味深い結果である。

(2) Shimonishi et al. (2016b) (発表論文⑤)では、東アジア・ヨーロッパ・北米及びチリの国際共同プロジェクトにより建設された大型電波望遠鏡アルマを用いて、低重元素量銀河に存在する分子ガスに関する観測的研究を行った。結果として、ホットコアと呼ばれる天体を世界で初めて天の川銀河外に発見した。ホットコアは、形成途上の星の周囲に出現する化学的に豊かな分子ガスを多量に含む天体であり、星間分子化学の研究において極めて重要な役割を果たしてきた。

発見された銀河系外ホットコアの詳細な化学分析を行い、天の川銀河内の同種の天体の化学組成と比較した結果、星・惑星形成領域での大型有機分子生成の始点となるメタノー

ルやホルムアルデヒドといった小型の有機分子が、マゼラン雲のホットコアでは極端に欠乏しているという結果が得られた(図3)。これら小型有機分子の欠乏は、(1)で述べた赤外線観測に基づく氷の化学分析の結果とも整合性がある。また、Nishimura et al. (2016a, 2016b) (発表論文⑧・⑥)において、分子雲スケールでの化学組成の観測を低重元素量銀河の天体に対して行った結果、上述の結果と整合性のあるメタノール分子の存在比の低さが示唆された。

以上の研究により、銀河系外ホットコアの化学分析という新たな手法・視点がアストロケミストリー分野に提供された。また、重元素量の低い過去の宇宙において、生命の起源となり得る有機分子の生成が難しかった可能性を示唆する興味深い結果が得られた。

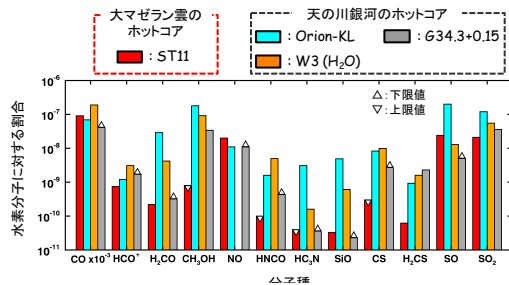


図3. ALMAにより得られたサブミリ波スペクトルから導出されたホットコア(原始星の形成途上で出現する化学的に豊かな分子ガスの塊)の化学組成を、大マゼラン雲の天体と天の川銀河の天体で比較したヒストグラム。重元素量の低い銀河のホットコアでは、メタノール(CH₃OH)・ホルムアルデヒド(H₂CO)・イソシアン酸(HNCO)などの有機分子の存在比が特に低いことが分かる。この著しい低さは、材料となる重元素量の違いだけでは説明できず、低重元素量星間化学の理解には固相又は気相の化学反応の影響を考慮する必要性を示唆している。

(3) 宇宙における氷の生成は、星や惑星が誕生する現場における水や有機分子などの生成において非常に重要な役割を果たす。星間氷の生成メカニズムは、いわば宇宙における極低温の触媒反応といえる。このため、星間氷の生成過程を正しく理解するためには、星間空間に多量に存在する触媒、すなわちダストの表面において、分子の材料となる様々な表面種がどのような挙動を示すのかを明らかにすることが重要となる。

Shimonishi and Nakatani et al. (2018) (発表論文①)では、理論化学や実験物理学を専門とする異なる分野の研究者らと協力し、極低温の氷表面における炭素原子、窒素原子、酸素原子の振る舞いを示す指標となる吸着エネルギーと呼ばれる量を理論的に導出するモデルを開発した。その結果、これまで実験的

に挙動を観察することが難しかった原子種について、それらの吸着エネルギーを計算化学的に求めることに成功した。

さらに、ここで得られた物性データを天文学的シミュレーションに応用し、分子雲内における星間氷の化学組成の時間進化に関する数値シミュレーションを行った。その結果、新たに得られた物性値が実際の星間空間における分子生成に著しい影響を与えることが明らかになった。本研究により、星間空間(特に星や惑星が形成される高密度領域)における固相分子化学を記述する上で極めて重要な基礎データが提供された。今後は、本研究で得られた基礎データを活かし、低重元素量環境における星間分子化学の特徴を理論的に明らかにする研究へと発展させていく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

- ① 下西 隆、中谷 直輝 (共同筆頭・共同責任著者)、古家 健次、羽馬 哲也
"Adsorption Energies of Carbon, Nitrogen, and Oxygen Atoms on the Low-temperature Amorphous Water Ice: A Systematic Estimation from Quantum Chemistry Calculations"
The Astrophysical Journal, Vol. 855, 27 (11pp), 2018, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/aaaa6a
- ② 西村 優里、渡邊 祥正、原田 ななせ、下西 隆、坂井 南美、相川 裕理、河村 晶子、山本 智
"Molecular-Cloud-Scale Chemical Composition II: Mapping Spectral Line Survey toward W3(OH) in the 3 mm Band"
The Astrophysical Journal, Vol. 848, 1, 17 (18pp), 2017, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/aa89e5
- ③ 渡邊 祥正、西村 優里、原田 ななせ、坂井 南美、下西 隆、相川 裕理、河村 晶子、山本 智
"Molecular-cloud-scale Chemical Composition. I. A Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band"
The Astrophysical Journal, Vol. 845, 2, 116 (30 pp), 2017, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/aa7ece
- ④ 下西 隆、加藤 大輔、板 良房、AKARI/IRC チーム
"AKARI Infrared Camera Survey of the Large Magellanic Cloud"
Publications of The Korean Astronomical Society, Vol. 32, 1, pp83-85, 2017, 査読有
DOI: 10.5303/PKAS.2017.32.1.083

- ⑤ 下西 隆、尾中 敬、河村 晶子、相川 裕理
"The detection of a hot molecular core in the Large Magellanic Cloud with ALMA"
The Astrophysical Journal, 827, 72 (20 pp), 2016, 査読有
DOI: 10.3847/0004-637X/827/1/72
 - ⑥ 西村 優里、下西 隆、渡邊 祥正、坂井 南美、河村 晶子、相川 裕理、山本 智
"Spectral Line Survey toward a Molecular Cloud in IC10"
The Astrophysical Journal, 829, 94 (8 pp), 2016, 査読有
DOI: 10.3847/0004-637X/829/2/94
 - ⑦ 下西 隆、E. Dartois、尾中 敬、F. Boulanger
"VLT/ISAAC infrared spectroscopy of embedded high-mass YSOs in the Large Magellanic Cloud: Methanol and the 3.47 μm band"
Astronomy and Astrophysics, 585, A107, 20pp, 2016, 査読有
DOI: 10.1051/0004-6361/201526559
 - ⑧ 西村 優里、下西 隆、渡邊 祥正、坂井 南美、河村 晶子、相川 裕理、山本 智
"Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud"
The Astrophysical Journal, 818, 161 (17 pp), 2016, 査読有
DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/161
- [学会発表] (計22件)
- ① 下西 隆
"Astrochemical observations of low-metallicity star-forming regions"
High Mass Star Formation Workshop 2018, 2018, 招待講演
 - ② 下西 隆
「マゼラン雲の観測で探る低金属量銀河の星間化学」
日本天文学会春季年会, 2018, 基調講演
 - ③ 下西 隆、中谷 直輝、古家 健次、羽馬 哲也
「第一原理計算による星間氷表面への原子の吸着エネルギーの推定 2: 分子雲化学組成への影響」
日本天文学会春季年会, 2018, 口頭発表
 - ④ 下西 隆
"Chemical properties of low metallicity star-forming regions"
The 4th AKARI International

Conference, 2017, 招待講演

- ⑤ 下西 隆
"Ices in star-forming regions: the role of metallicity"
The 10th meeting on Cosmic Dust, 2017, 招待講演
- ⑥ 下西 隆
「赤外線アストロケミストリーの展望」
光赤天連シンポジウム 2017,
2017, 招待講演
- ⑦ 下西 隆、尾中 敬、河村 晶子、相川 裕理
"Observations of a hot molecular core in a low metallicity dwarf galaxy"
IAU Symposium 332 "Astrochemistry VII - Through the Cosmos from Galaxies to Planets",
2017, 口頭発表
- ⑧ 下西 隆
"Observations of ices at low metallicity"
Lorentz Center Workshop "Ice Age -The Era of the James Web Space Telescope"
2016, 招待講演
- ⑨ 下西 隆、尾中 敬、河村 晶子、相川 裕理
"Observations of a hot molecular core in a nearby low metallicity galaxy"
The 9th meeting on Cosmic Dust, 2016 ,
口頭発表
- ⑩ 下西 隆、E. Dartois、尾中 敬、F. Boulanger、相川裕理
"Observations of Water and Methanol Ices in the Large Magellanic Cloud",
Water in the Universe: From Clouds to Oceans, 2016, 口頭発表
- ⑪ 下西 隆、尾中 敬、河村 晶子、相川 裕理
"ALMA Observations of a Hot Molecular Core in the Large Magellanic Cloud"
Molecular Gas in Galactic Environments, 2016, 口頭発表
- ⑫ 下西 隆、E. Dartois、尾中 敬、F. Boulanger
"Infrared spectroscopy of embedded high-mass YSOs in the Large Magellanic Cloud: Methanol and the 3.47 μm band"
From Interstellar Ices to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 2015, 口頭発表

- ⑬ 下西 隆、E. Dartois、尾中 敬、F. Boulanger
"Infrared spectroscopy in the C-H stretching region towards embedded high-mass young stellar objects in the Large Magellanic Cloud"
The 8th meeting on Cosmic Dust, 2015,
口頭発表

[その他]

- ① 国際・国内プレスリリース (2016年、上記⑤の発表論文について)
参考 URL
(英文)
http://www.tohoku.ac.jp/en/press/discovery_of_extragalactic_hot_molecular_core.html
(和文)
<http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2016/09/press20160905-01.html>
- ② 一般向け研究成果解説 (2016年、東北大学ウェブページにて、上記⑦の発表論文について)
参考 URL
<http://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20160301-7724.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下西 隆 (SHIMONISHI, Takashi)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教
研究者番号：80725599