

令和 2 年 9 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14245

研究課題名(和文) 星間雲から原始惑星系円盤に至る分子組成進化の理論的研究

研究課題名(英文) Formation and evolution of molecules from interstellar clouds to protoplanetary disks

研究代表者

古家 健次 (Furuya, Kenji)

筑波大学・計算科学研究センター・助教

研究者番号：80783711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：星間分子雲と呼ばれるガス塊の中で、我々の住む太陽系のような恒星や惑星系が生まれる。分子雲には水や有機分子を含む多様な分子が存在することが知られており、その詳細な理解は我々の住む地球や生命の起源などの根源的な問いに迫る第一歩として意義がある。本研究では分子雲から原始惑星系円盤(惑星系の直接の形成現場)に至るまでの分子組成進化を主に数値シミュレーションを用いて調べた。主要な成果としては(i)分子雲における窒素同位体分別メカニズムの解明と(ii)原始惑星系円盤の分子組成を理論的に探る新たな手法として、固体微粒子の衝突合体成長と氷化学を統合的に解く数値計算コードを開発したことがあげられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

隕石や彗星などの太陽系始原物質と、星と惑星形成の場である分子雲に含まれる分子には、窒素同位体の存在比異常が存在することが知られていた。しかし、窒素同位体の存在比異常がどのようなメカニズムで生じたかはよくわかっていなかった。本研究でそのメカニズムが明らかになったことで、窒素同位体の存在比を利用して、太陽系を含め、星と惑星系が生まれる際の物質進化の研究がさらに進展することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Stars and planetary systems like our solar system are formed in molecular clouds. It is known that various different types of molecules, including water and organic molecules, are present in molecular clouds. These molecules would ultimately become raw materials of planetary systems. In this project, I investigated the molecular evolution from molecular clouds to protoplanetary disks (the site where planetary systems are formed) mainly by numerical simulation. As the major achievements of this project, (i) I revealed nitrogen isotope fractionation mechanism in molecular clouds for the first time, and (ii) I developed a new numerical code, in which dust evolution and gas-ice chemistry are considered in a self-consistent manner.

研究分野：天文学

キーワード：星惑星形成 星間化学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

希薄な星間原子雲から分子雲を経て、星・惑星系が形成される過程において、ガスや氷(固体)の分子組成は系の物理的進化を反映しつつ非平衡に進化する。その詳細な理解は我々の住む地球や生命の起源などの根源的な問いに迫る上で重要である。宇宙における分子組成進化の観測研究は、大型電波干渉計 ALMA の本格稼働により飛躍的に進みつつある。それに伴い、観測と相補的な精密な分子組成進化の理論モデルが求められている。

研究代表者はこれまで星・惑星系形成領域における分子組成の理論的研究を推進してきた。特に、水素同位体比を指標とした分子雲から原始惑星系円盤に至るまでの一連の水の進化の研究や、乱流状態にある原始惑星系円盤における組成進化などの研究は世界的に評価されている(e.g., Furuya & Aikawa 2014; Furuya et al. 2016, 2017)。加えて、ALMA をはじめとする電波望遠鏡による観測と理論モデルの比較など、積極的に国内外の観測研究者と共同研究を行い、実証的に研究を進めてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、分子雲から原始惑星系円盤に至るまでの分子組成・同位体組成進化を理論的に明らかにすることである。特に「分子雲形成時における同位体分別とその後の進化段階への伝搬」、「原始惑星系円盤内での組成進化」の2点を中心に研究を行う。

3. 研究の方法

一般に星・惑星系形成領域は熱化学平衡に至っておらず、そこでの分子組成進化は気相及び固体表面上での化学素反応を列挙した反応速度式(反応ネットワークモデル)を解くことで調べられる。本研究では、これまで研究代表者が構築してきたガス・氷化学反応ネットワークモデルを、分子雲形成や原始惑星系円盤の物理進化モデルとカップルして解くことで、星・惑星系形成領域の分子組成進化及び同位体組成進化を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 分子雲における窒素同位体分別機構

窒素には質量数の異なる2つの安定同位体が存在する(窒素14と窒素15)。近年の観測によって、分子雲中のガス分子は窒素15に乏しいことが分かってきた。その原因として低温での同位体交換反応と窒素分子の同位体選択的光解離が考えられてきたが、いずれも観測を説明することは困難であった。前者はガス分子に窒素15に濃集させる方向に働き、後者は分子雲表面のごく狭い領域でのみしか効率的でないためである。

銀河内の星間ガスが超新星爆発などで掃き寄せられて分子雲は形成すると考えられている。研究代表者らはこの分子雲形成段階に着目し、分子雲形成時における窒素同位体分別の数値計算を行った。分子雲形成段階において全てのガスは選択的光解離領域を通るため、分子雲全体でガス分子は窒素15に乏しくなることを示した。さらにアンモニアを含む氷分子は窒素15に富むことも分かった。この傾向は太陽系の彗星氷の観測と調和的である。以上の結果は星形成の最初期に窒素同位体分別が起こり、それが後の進化段階まで伝搬することを示唆する重要な成果である。本研究は国内外で評価され、国際会議及び国内会議において招待講演を行った。

また、この理論モデルを観測的に検証するため、スペインの IRAM30m 電波望遠鏡を用いた観測を行い、モデルの予測と整合的な結果を得た。

本研究によって窒素同位体分別の機構が明らかになったことで、今後は、窒素同位体の存在比を指標として、太陽系を含め、星・惑星系形成過程に伴う物質進化の理解の進展が期待される。

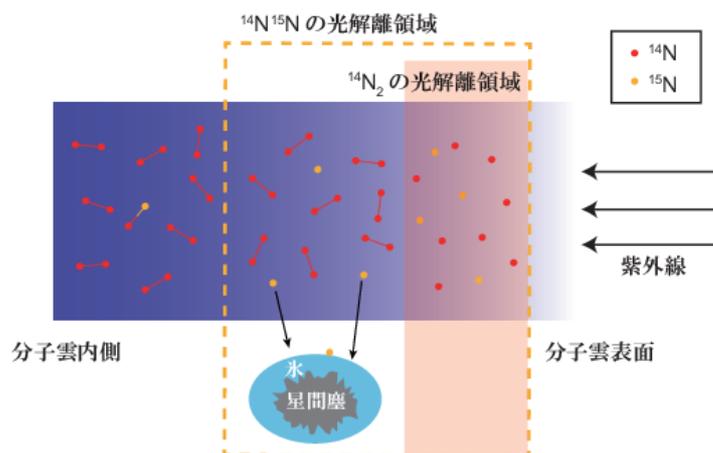


図1 分子雲形成時において窒素同位体分別を引き起こす機構

(https://www.ccs.tsukuba.ac.jp/press_20180427/)

(2) ダスト合体成長を考慮した原始惑星系円盤における分子進化の理論モデル

原始惑星系円盤は惑星系形成の現場である。円盤内の固体粒子(ダスト+氷)やガスは惑星の材料物質であり、それら材料物質の分子組成が、やがて形成される惑星の組成を決める。近年の ALMA による観測から、ダスト成長が円盤内の揮発性物質分布に大きな影響を与えること

が示唆されているが、その詳細は観測的にも理論的にもよく分かっていない。研究代表者はダスト成長モデルと氷化学反応モデルをカップルした数値計算コードを世界に先駆けて開発した。そのコードを用い、原始惑星系円盤内の分子組成分布とその時間発展を調べた。

その結果、円盤内の分子分布は、大きく成長した氷ダストの中心星方向への移動、氷の昇華、一酸化炭素(CO)を他分子へと変換する氷化学反応の3つのプロセスの競合でおおよそ決まることを明らかにした。この結果を基に、観測から導出されたCO雪線内側のCO分子存在量とモデルの予測を比較することで、TW Hya 円盤の重要な物理パラメータ(氷ダストの衝突破壊速度と宇宙線電離率)に制限を加えることに成功した。今後、本研究で構築したモデルをさらに発展させることで(例: 円盤風の影響、ダスト成長モデルの精密化)、円盤からそこで形成される(微)惑星への進化を物質科学的な観点から明らかにしていきたい。

(3) 星形成領域における窒素原子存在量の推定法の開発

星形成領域における窒素の研究は他の揮発性元素に比べて遅れており、窒素の主要存在形態(原子 or 分子 or 氷)すらよく分かっていない。その理由の一つは、窒素原子が星形成領域のような低温ガス中では直接観測が困難なためである。

そこで本研究では、観測可能なアンモニア(NH₃)の重水素濃縮度から窒素原子存在量を推定する新たな理論的手法を開発した。またALMAやVLAなどの大型電波干渉計を用いた観測によって、現実的な観測時間で近傍の小質量星形成領域における窒素原子存在量を推定可能なことを示した。実際にVLAに観測プロポーザルを提出し、観測時間を確保することに成功した。重水素化したアンモニアの検出には至っていないが、今後の窒素の主要存在形態の解明へつながる重要な成果である。

(4) 水氷表面における水素分子のオルソ・パラ転換

分子の水素同位体比(D/H比)は星形成領域や原始惑星系円盤の温度環境や化学進化を探る指標として広く用いられている。水素同位体分別の理論はよく整備されてきているが、水素分子のオルソ・パラ比が大ききな不定性として残っている。オルソ体はパラ体に比べ170 Kほど高い内部エネルギーを持つため、水素同位体分別の温度依存性とオルソ・パラ比依存性が縮退するためである。近年の実験から、水氷表面においてオルソ・パラ(OP)転換が起きることが分かってきたが、その星形成領域における効率は未解明であった。

研究代表者らは水素分子の吸着エネルギー分布、表面拡散などを包括的に取り込んだ数値モデルを構築し、星形成領域における水氷表面でのOP転換効率を世界に先駆けて明らかにした。さらにその結果を用いて、水氷表面でのOP転換は気相中の化学反応によるOP転換よりも効率的であり、従来考えられてきたよりも短いタイムスケールでオルソ・パラ比が熱化されることを示した。以上の結果は、分子の水素同位体比をより精度良く解釈するための基盤となる重要な成果である。

(5) 原始星天体における水の水素同位体比のALMA観測

水の水素同位体比(HDO/H₂O)は、星惑星形成に伴う水の進化や太陽系の水の起源を探る強力なツールである。これまでの観測から、活発な星形成領域に含まれる原始星天体のHDO/H₂O比は太陽系の彗星のそれと同程度なことが知られている。研究代表者のこれまでの理論研究により、HDO/H₂O比は星形成領域の物理環境に依存することが示唆されている。HDO/H₂O比の環境依存性を観測から探るため、分子雲複合体に付随しない孤立した原始星天体についてHDOとH₂¹⁸Oの観測をALMAを用いて行った。

その結果、活発な星形成領域中の原始星天体に比べ、孤立した原始星天体ではHDO/H₂O比が2倍程度高いことが分かった。孤立した天体は近傍の星形成の影響を受けないため、星形成のタイムスケールが長いこと、分子雲コア時代の温度がより低いことの2点が可能性として考えられる。活発な星形成領域中の原始星天体のHDO/H₂O比が彗星のHDO/H₂O比と同程度な一方、孤立した天体はより高いHDO/H₂O比を持つことは、太陽系が活発な星形成領域で形成されたとする説と整合的であり、大変興味深い。

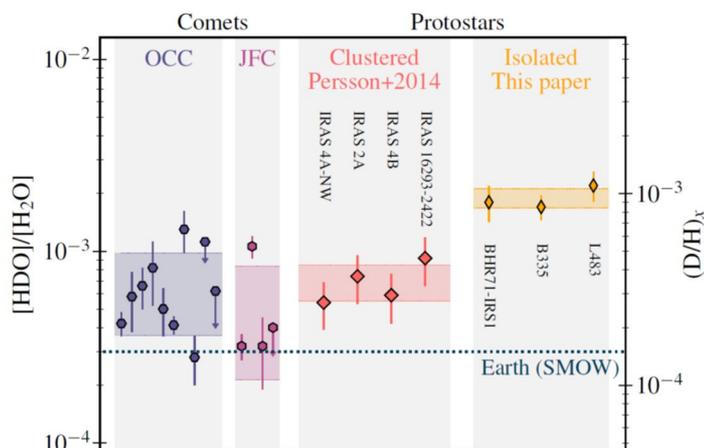


図2 原始星天体エンベロープと彗星氷に含まれる水のD/H比 (Jensen et al. 2019)

(6) 原始星天体の分子組成多様性

低質量原始星天体を取り巻くエンベロープガスの分子組成は天体毎にバリエーションがあることが知られている。これまでの観測で飽和有機分子に富むホットコリノ天体、飽和有機分子が少なく不飽和炭素鎖分子に富む WCCC 天体、両者の中間的な天体が見つかっている。このような多様性の起源についてはよくわかっていないが、星形成領域の物理環境を原因とする説が提案されている。

そこで星形成領域の物理環境(温度、紫外線輻射場、星なしコア時代の寿命)がエンベロープガスの組成に与える影響を反応ネットワークモデルを用いて調べた。その結果、上記の物理パラメータを変えることで、観測されたエンベロープガスの分子組成多様性を(少なくとも部分的には)説明できることが分かった。例えば低温で、紫外線輻射場があればエンベロープガスは不飽和炭素鎖分子に富む傾向になる。本研究の結果は星形成領域の物理環境の多様性が原始星天体の分子組成多様性につながることを支持している。(5)で述べた水の水素同位体比含め、今後は周辺物理環境が原始星天体の分子組成に与える影響の理論的・観測的解明が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Furuya Kenji, Aikawa Yuri, Hama Tetsuya, Watanabe Naoki	4. 巻 882
2. 論文標題 H2 Ortho-Para Spin Conversion on Inhomogeneous Grain Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab3790	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kama Mihkel, Shorttle Oliver, Jermyn Adam S., Folsom Colin P., Furuya Kenji, Bergin Edwin A., Walsh Catherine, Keller Lindsay	4. 巻 885
2. 論文標題 Abundant Refractory Sulfur in Protoplanetary Disks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab45f8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Jensen S. S., Jorgensen J. K., Kristensen L. E., Furuya K., Coutens A., van Dishoeck E. F., Harsono D., Persson M. V.	4. 巻 631
2. 論文標題 ALMA observations of water deuteration: a physical diagnostic of the formation of protostars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/201936012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Furuya K., Watanabe Y., Sakai T., Aikawa Y., Yamamoto S.	4. 巻 615
2. 論文標題 Depletion of ^{15}N in the center of L1544: Early transition from atomic to molecular nitrogen?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/201833607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furuya Kenji, Persson Magnus V	4. 巻 476
2. 論文標題 Tracing the atomic nitrogen abundance in star-forming regions with ammonia deuteration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4994-5005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Furuya Kenji, Aikawa Yuri	4. 巻 857
2. 論文標題 Depletion of Heavy Nitrogen in the Cold Gas of Star-forming Regions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab768	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aikawa Yuri, Furuya Kenji, Hincelin Ugo, Herbst Eric	4. 巻 855
2. 論文標題 Multiple Paths of Deuterium Fractionation in Protoplanetary Disks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaad6c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 Astrochemical models of water
3. 学会等名 Astrochemistry: Past, Present, and Future (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 Hydrogen and nitrogen isotopes follow different fractionation pathways in interstellar clouds
3. 学会等名 Our astrochemical history; Past, Present, and Future (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 Hydrogen and nitrogen isotopes follow different fractionation pathways in star-forming clouds
3. 学会等名 42nd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 Isotopic fractionation in interstellar clouds: Hydrogen, carbon, nitrogen, and oxygen
3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 星・惑星系形成領域における水素・窒素同位体分別
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 分子雲コアL1544中心領域における重窒素の希釈
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Furuya Kenji
2. 発表標題 Evolution of ices and deuteration in forming disks
3. 学会等名 Disk formation workshop 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Furuya Kenji
2. 発表標題 Exploring the main nitrogen reservoir in star-forming clouds with ammonia deuteration
3. 学会等名 Symposium "Evolution of Molecules in Space" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 原始惑星系円盤内の揮発性物質：観測とモデル
3. 学会等名 基研研究会「原始惑星系円盤」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古家健次
2. 発表標題 星形成領域における窒素同位体分別過程
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考