2019年度最優秀研究者賞受賞記念論文 分子雲から原始惑星系円盤に至るまでの 化学組成進化

古家 健次

2020年12月19日受領, 査読を経て2021年2月1日受理

(要旨) 星間分子雲から星・惑星系が形成される過程において,ガスや氷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. 本稿では分子雲で水が生成されてから原始惑星系円盤に輸送されるまでの過程や 水素及び窒素同位体分別過程について,筆者自身の関わった研究を中心に紹介する.

1. はじめに

星は分子雲と呼ばれるガス塊の中で誕生する.生 まれたばかりの星(原始星)には原始惑星系円盤が 付随し,円盤内で惑星は形成される.太陽系も約46 億年前に分子雲の中で生まれたと考えられている. 分子雲には既に,水や様々な有機物が,ガス中とダス トを覆う氷として存在することが知られている.では 「我々の太陽系に存在する水や有機物は,太陽系の 母体となった分子雲を起源とするのだろうか?」「分 子雲から円盤,さらに惑星が形成される過程におい て,星間物質はどのような物質進化(ガス,氷分子組 成の進化)を経るのか?」これらの問いは物質科学 の観点から見た星・惑星形成論の主要課題であり, 地球や生命の起源などの根源的問いに迫る上でも 重要である.

筆者は星・惑星系形成領域における分子進化を主 に理論的な手法を用いて研究を行っている.本稿で は、星・惑星系形成領域における化学について基本 的事項を手短にまとめた上で、これまで筆者自身が 行ってきた研究である「分子雲で水が生成されてか ら原始惑星系円盤に輸送されるまでの水の進化」と 「窒素同位体分別過程」に関する研究を紹介する.

1.自然科学研究機構 国立天文台 科学研究部 kenji.furuya@nao.ac.jp

2. 星・惑星系形成領域における化学

2.1 星・惑星系形成領域における化学過程

星形成の現場である分子雲は、水素分子を主成 分とするガスとケイ酸塩などの難揮発性物質から成 るダスト粒子(典型的には半径0.1µm程度)で構成 される.分子雲は極低温・低密度環境(10 K, 10³~ 10⁴ cm³程度)であり、そこでの化学は地上でのそれ と大きく異なる.星間空間における化学過程は大き く分けて、気相反応(イオン-分子反応、紫外線光解 離)、気相と固相間での分配(脱離,吸着)、ダスト上 での表面反応の3つに大別できる[1].

分子雲の化学は宇宙線により駆動される.水素分 子(H₂)が宇宙線で電離され,H₂⁺が生成される.H₂⁺ は別のH₂と即座に反応しH₃⁺が生成される.H₃⁺ 重元素(ヘリウムより重い元素)を含む分子生成の起 点となる分子である.分子雲のガスは弱電離状態で あり、イオン分子は中性分子に比べて存在量が少な い.しかし、分子雲は極低温なため、反応障壁のな いイオン-分子反応で様々な分子が生成される.例 えば炭素原子から一酸化炭素(CO)は(1) C + H₃⁺ → CH⁺+H₂,(2) CH⁺ + H₂ → CH₂⁺ + H,(3) CH₂⁺ + e-→ CH + H,(4) CH + O → CO + H という一連の反 応で生成される. ダストは分子雲の化学にとって2つの点で重要で ある.一点目は紫外線の遮蔽である.分子雲は銀河 内の星からの紫外線(星間紫外線)にさらされてい る.ダストが紫外線を吸収することで,分子雲内部 では光解離による分子の破壊が抑えられる.二点目 は,表面反応である.ガス中の原子及び分子がダス トと衝突するとダスト表面に吸着する.吸着した原子 /分子は表面上を拡散し,反応相手と出会うと(より 大きな)分子を生成する.H₂やH₂Oは主にダスト表面 反応で生成される.

2.2 化学反応ネットワークモデル

星・惑星形成領域の分子組成は上で挙げたような 様々な化学過程の競合で決まる.そのため分子組成 進化の研究には、数値シミュレーションが大きな役 割を果たしてきた.気相及びダスト表面上での化学 素反応を列挙した反応速度式(反応ネットワークモ デルと呼ぶ)を数値的に解くことで、星・惑星形成領 域にどのような分子がどれほどの量で存在するかを 予測できる.

反応ネットワークモデルの予測精度は化学素反応 をいかに正確にモデルに組み込むかに左右される. そのため、化学素過程を明らかにする室内実験や理 論化学の研究者と協働することが星・惑星形成の化 学の研究を推し進めていく上で極めて重要である. 本稿では詳しく述べないが、実際に筆者も原子・分 子のダスト表面への吸着・拡散、水素分子のダスト 表面でのオルソ-パラ核スピン転換などの宇宙におけ る物質進化の理解に不可欠な物理化学素過程につ いての共同研究を行ってきた [2-4].本稿で紹介す る水の水素同位体や窒素同位体分別過程について は個々の反応素過程がよく理解されており、予測精 度の高いモデルを構築することが可能である.

化学反応の効率は温度・密度・紫外線輻射場など の物理量に依存する.また,星・惑星形成領域は,(地 球上と比べ)低温・低密度・強い紫外線輻射場という 極限環境であり,ガスや氷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していく.したがっ て,化学反応ネットワークモデルを現実的な系の物 理的進化を考慮した上で解くことも肝要である[5].

3. 重水素濃縮から探る水の進化

これまでの天文観測によって、分子雲から原始惑 星系円盤に至るまでの様々な進化段階にある天体 に、H₂O 分子は普遍的かつ豊富に存在することが 分かっている[6]. 例えば、1 太陽質量の分子雲中に は地球の海の質量の10¹² 倍以上のH₂Oが氷として含 まれると推定される.

その一方で星・惑星形成領域における水の進化、 「分子雲で生成された水がどのようにして原始惑星 系円盤まで運搬されるのか?」、あるいはよりシンプ ルに「原始惑星系円盤の水はその場でつくられたの か、あるいは分子雲で生成されたものが持ち込まれ たのか? |ということはH₂Oの観測のみからは分から ない. これらの問いは太陽系の水の起源に関連深い のに加え、より一般に物質進化が分子雲から円盤へ と連続的に起こるのか、それとも何らかの理由で一 度リセットされて円盤内でまた一から再スタートする のか、という観点から興味深い、この問いに迫るに は水の水素同位体組成(H₂O, HDO及びD₂Oの存在 量比)が有用である、星・惑星系形成の各進化ステー ジにおける水の水素同位体組成を比較することで. 観測的に水の「進化 |を追跡することができるのであ る.

この節では、水素同位体分別(重水素濃縮)過程 の基本事項と水の水素同位体組成に関する観測事 実を説明し、分子雲における水の生成からその原始 惑星系円盤への輸送に至るまでの現状の理解を筆 者らの数値シミュレーションによる研究に基づいて 紹介する.この研究については既に日本語の解説記 事[7]があるので、ここでは簡単に結果をまとめる.

3.1 水素同位体分別過程

星間空間において重水素(D)の水素(H)に対する 元素存在量比(以下[D]/[H]比と書く)はおよそ10万 分の1である[8]. 一方,低温度環境下で生成された 分子は,[D]/[H]比に比べて,極めて高いD/H比 を持つ(重水素体に富む)ことが理論や分子雲の観 測から分かっている.例えば分子雲におけるN₂D⁺/ N₂H⁺存在量比は0.1程度にも達する[9].重水素の濃 縮の程度は温度に強く依存するため,分子のD/H比 はその分子の生成環境を探る強力なプローブとして



図1: 原始星天体及び彗星におけるHDO/H₂O比の観測値. 彗星67PのHDO/H₂O比は1.1x10⁻³である. 比較のために, 地球の海及び重水素の元素存在量比([D]/[H]比)を示す. 値は[12,14]及びその中の引用文献より.

用いられる.

重水素濃縮は以下の同位体交換反応を起点に進 行する[10]:

 $H_3^+ + HD \rightleftharpoons H_2D^+ + H_2$

左向きの逆反応は吸熱反応であり(H₀D⁺分子のゼロ 点振動エネルギーがH₃⁺分子のそれより低いことに 起因する). 右向きの順反応は発熱反応である. 結果 として、分子雲程度の低温度下では、H₃⁺はH₂D⁺に 一方的に変換され, H₂D⁺/ H₃⁺存在量比は[D]/[H] 比よりもずっと高くなる. 2節で述べたように, H₃⁺は 分子雲における化学反応の起点となる分子であるた め、H₃⁺の重水素濃縮はその他の分子にも伝搬する ことになる. 温度が上がるにつれ吸熱な逆反応が進 みやすくなり重水素濃縮の効率は落ちる. そのため. 重水素の濃縮の程度は温度に依存する。またCOが ダストに吸着し気相から減少すると重水素濃縮が 進行しやすくなる. H₃⁺とH₂D⁺はCOとのプロトン移 動反応で主に壊されるので、CO存在量が減少する ことでH_a⁺とH_aD⁺の寿命が延びるためである. 重水 素濃縮過程のより詳細については[7, 11]を参照され たい.

3.2 水の重水素比の観測

これまでに, 彗星や原始星近傍の高温(>100 K) なガスで水の重水素比(HDO/H₂O存在量比)が観測 から求められてきた(図1). 彗星は原始太陽系円盤の 情報を保持する始原的な天体である.一方,原始星 天体で観測される水は,星形成前に生成された水氷 が昇華したものと解釈されている.この図から読み 取れる情報の一つは太陽系と原始星天体に存在す る水のいずれについても,顕著な重水素濃縮を示し ていることである.このことは,これらの水が低温度 環境で生成されたことを示している.加えて興味深 いことに,原始星と彗星のHDO/H₂O比は非常によ く似ている¹.この類似性は,太陽系の母体となった 分子雲で生成された水が彗星や隕石中に現在に至 るまで残っている,という可能性を提示する.

さらに近年になって、H₂OとHDOに加えて、D₂O の検出も報告され始めた.原始星天体において D₂O/HDO存在量比はHDO/H₂O存在量比よりも1 桁程度高いということが明らかになった[13].さらに ロゼッタ彗星探査機により67P/チュリモコフ・ゲラシ メンコ彗星(以下,彗星67P)についても同様な傾向 であることが明らかとなった [14].単純に考えると D₂O/HDO比はHDO/H₂O比の0.25になると期待さ れるので²,前者の方が1桁高いというのは予想外の ことである.にもかかわらず、分子雲で生成された水

¹彗星のHDO/H₂O比は、地球の海のHDO/H₂O比と同じ程度の ものもあれば、2、3倍程度高いものもある. オールト雲彗星と木星 族彗星で系統的な違いは見られない. ²水氷のダスト表面での生成を考えるとHDOは"O → OH →

HDO"と" $O \rightarrow OD \rightarrow HDO$ "の2経路あるのに対し、H₂Oと D₂O は1経路ずつしかないため、

と彗星67Pの水で同様な傾向が観測されたことは, 分子雲の水が円盤に持ち込まれ彗星67Pの材料と なった,という可能性を支持する.現状,観測から得 られているのは分子雲と彗星という断片的な進化段 階での知見のみであり,観測を適切に解釈するには 理論モデルの構築が必須である.

3.3 分子雲から円盤へ:水の生成と輸送

以上のような背景のもと, 筆者らは分子雲から円 盤に至るまでの水の水素同位体組成進化の反応ネッ トワーク計算を行った[15-17]. 計算は2つのステッ プからなる.

1. 分子雲(コア)での水氷の生成,

2. 水氷の原始惑星系円盤への輸送.

以下にそれぞれのステップで得られた主要な結果を まとめる.

最初に分子雲及び分子雲コアにおける反応ネット ワーク計算を行った、分子雲(コア)は低温なため、ダ スト表面上に原子/分子が吸着することでダストは 氷マントルに覆われる. シミュレーション結果を基に 得られた氷マントル構造の概念図を図2に示す、分子 雲において、 星間紫外線はダストによって減衰され、 原子が分子へと徐々に変換される.水素原子がまず 水素分子に変換される. その後, 炭素・酸素原子は 気相COやH₂O氷に変換される.ダスト表面では、最 初にH₂O氷に富んだ層(下層)が生成される.分子雲 よりもさらに密度が高く、星間紫外線が(ほぼ)完全 に遮蔽された分子雲コアにおいて、H₂O氷に富んだ 層の上にCOやメタノール(CH₃OH) に富んだ層(上 層)が生成される. 上層にもいくばくかのH₂O氷は含 まれるが、氷マントル全体で見ると下層にH₂Oの大 部分が含まれる.気相COがダストへ吸着すること で重水素濃縮が進行しやすくなるため、氷マントル の下層に比べ、上層は重水素に富んでいる.

筆者らのモデルから予測される分子組成,同位体 組成のどちらにおいても不均一な構造を持った氷マ ントルは,D₂O/HDO比がHDO/H₂O比よりも1桁高 いという観測結果を自然に説明できる.氷マントル 内の重水素濃縮度の勾配のため,H₂Oは下層に主に 存在するにもかかわらず,HDOとD₂Oは氷マントル の上層に主に存在する.この場合,氷マントル上層 のみを見ると確かにD₂O/HDO比はHDO/H₂O比の



図2:分子雲および分子雲コアで生成される氷マントルの層構造 の概念図.

0.25となるが, 氷マントル全体でみると下層に豊富に 存在するH₂O によりHDO/H₂O 比が薄められ,結 果としてD₂O/HDO比はHDO/H₂O比より大きくなる のである.原始星天体で観測される水は氷マントル 全体が昇華したものなので,筆者らのモデルは観測 をよく説明できる[16].

次にステップ1で得られた気相と氷の分子組成 が、原始惑星系円盤に輸送されるまでにどのような 分子組成進化を経るかを明らかにするため、分子雲 コアが重力収縮し星と原始惑星系円盤を形成する までの円盤形成の物理進化モデルと反応ネットワー クモデルを組み合わせたシミュレーションを行った (図3).

その結果, 星形成前に生成された水氷の大部分 は高温過程や紫外線による破壊を逃れて円盤まで 運搬されるが,一部は中心星からの紫外線によって 破壊され,再生成され円盤に持ち込まれることが分 かった.ここでの再生成の意味は,紫外線により水 分子が酸素原子に戻され,再び酸素原子から水分子 が作られる,ということである.つまり円盤に含まれ る水には分子雲(星形成前)起源のものと星形成後に 再生成されたものが混在することが分かった.

この両者は水素同位体組成から明瞭に見分けら れる.図4は、横軸に円盤に輸送される間に水氷に 照射される中心星からの紫外線量、縦軸に[D₂O/ HDO]/[HDO/H₂O]比を取った図である.横軸で約



図3: 円盤形成モデルの概略図.分子雲コアの重力収縮により, 原始星と星周円盤が形成される.原始星近傍からアウトフ ローが噴き出す.原始星とその周りの円盤は,元あった分子 雲コア(エンベロープと呼ぶ)のガスが降着することで成長 する.ガスが円盤に降着する流線に沿って分子組成進化を 計算する.

400以上(破線の右側)が星からの紫外線によって壊 され再生成された水氷に対応する.つまり図4から は破壊され再生成された水氷は星形成前に生成さ れた水氷とは異なり、0.1程度の低い[D₂O/HDO]/ [HDO/H₂O]比を持つことが読み取れる.したがっ て、[D₂O/HDO]/[HDO/H₂O]比から両者の区別が 可能である.一方でHDO/H₂O比を見ると、星形成 前に生成された水氷とその後破壊され再生成され た水氷は同程度の値であり、両者の区別はつかな い.

3.4 今後の展望

以上のシミュレーション結果から,高い [D₂O/ HDO]/[HDO/H₂O]比を持つ彗星67Pの水は太陽系 の母体となった分子雲起源であると考えるのが自然 である.現状,D₂Oが観測されているのは彗星67P のみであり,今後,より多くの彗星についてD₂O (及 びHDO,H₂O)を観測することが太陽系の水の起源 を明らかにするうえで重要であろう.そのような観測 には大型電波干渉計ALMAを用いた彗星の(サブ) ミリ波帯における分光観測が有効かもしれない.

また本稿で紹介したモデルでは、0.1µm程度の 星間ダストを常に仮定しており、円盤内で効率的に



図4: 円盤に輸送される間に水氷に照射される中心星からの紫外 線量とHDO/H₂O比および[D₂O/HDO]/[HDO/H₂O] 比の関係. 各点が各流体素片に対応する. 横軸は適当な値 で規格化してある. 破線より右側が水氷の再生成が重要な 領域である. 図は[17]を改変.

起きると考えられるダストの合体成長を考慮してい ない.図4から読み取れるように、円盤に輸送される 水氷の水素同位体組成にはバリエーションがある. 円盤の中でのダストの運動はダストサイズによって 異なるため、円盤内で異なる水素同位体組成を持つ 水氷が混合されると考えられる.今後、円盤内にお けるより現実的な水の同位体組成とその空間分布を 明らかにするには円盤内でのダスト進化と分子組成 進化の両者を考慮したモデルが必要である.また本 稿では水素同位体に着目したが、酸素同位体分別を 考慮した同様なモデルの構築も進めていく必要があ るだろう.

4. 窒素同位体分別機構

4.1 太陽系物質と星形成領域の分子で観測 される窒素同位体分別

窒素には質量数の異なる2つの安定同位体が存 在する(¹⁴Nと¹⁵N).太陽風の観測から,太陽系全体 の¹⁴Nと¹⁵Nの元素存在量比([¹⁴N]/[¹⁵N]比)は441で ある[18].一方で,隕石や彗星などの太陽系始原物 質では,¹⁴N/¹⁵N比は441よりも低い(=¹⁵Nに濃縮して いる)ことが知られている.例えば彗星氷中のNH₃ やHCNの¹⁴N/¹⁵N比は~150であり,3倍程度¹⁵Nが 濃縮している[19,20].太陽系始原物質に見られる 窒素同位体分別がいつ・どのようなメカニズムで起



図5:分子雲コアL1544における分子の¹⁴N/¹⁵N比. [21]の表1を 基に作成.

こるのかについてはよく分かっていない. 窒素同位 体分別の起源やメカニズムを探るには星形成領域の 観測が有効である. 例えば, もし太陽系始原物質に 含まれる分子が太陽系の母体となった分子雲を起 源とするなら, 分子雲中の分子は¹⁵Nに富んでいるは ずである.

近年の分子雲コアの観測によって明らかになって きたのは分子雲中のガス分子は¹⁵Nに富んでいない. ということである(氷分子ではないことに注意). 図5 に分子雲コアL1544中の分子の¹⁴N/¹⁵N比の観測値 を示す. 分子種によって¹⁵Nに乏しいものや同位体分 別を示さないものがあることが分かる3. 最も不思議な のは、N₂H⁺分子が¹⁵Nにひどく乏しいことである.こ れは、その親分子であるN₂分子が¹⁵Nにひどく乏し いことを意味している4. N2分子は窒素の主要な存 在形態の一つであるため、他の存在量の小さな分子 (HCNやCN)に比べて同位体分別の影響を受けにく いと期待されるため不思議なのである. L1544以外 の分子雲コアについてもN2H⁺分子は¹⁵Nに乏しいこ とが分かっており、L1544が特殊な天体であるとい うわけではない[24]. 以下ではN₂H⁺分子(N₂分子)が ¹⁵Nに乏しいことを手掛かりに窒素同位体分別のメカ

ニズムについて考える.

星形成領域において、窒素同位体分別を起こしう る原因は大きく分けて2つある. (1) 気相での同位体 交換反応と(2)N₂分子の同位体選択的光解離である [25]. 3.1節で述べたように水素同位体分別の主要因 は同位体交換反応である。一方、同位体交換反応に よる窒素同位体分別に関しても多くの理論研究が行 われてきた.同位体交換反応を組み込んだモデル計 算によると、N₂が¹⁵Nに富む傾向になり、観測とは逆 センスである(¹⁴N¹⁵Nが¹⁴N₂に比べゼロ点エネルギー が小さく、低温では¹⁴N¹⁵Nが増えるため). さらに最 近の研究では¹⁵N分別を引き起こす起点になると思 われていた交換反応に反応障壁があることが分か り、同位体交換反応による窒素同位体分別は極めて 非効率であるということが明らかになった[26]. 以上 のことから、同位体交換反応で観測を説明するのは 難しい

次に同位体選択的光解離について説明する. N₂ 分子は特定の波長の紫外線を吸収すると光解離す る. 分子雲の表面から紫外線が入ってくるとき、N₂ 分子を解離する波長の紫外線は分子雲の表面付近 に存在するN₂分子に吸収されることで弱くなる。こ れを自己遮蔽効果と呼ぶ. 分子雲のある程度内部で は、¹⁴N₂は自己遮蔽効果により光解離の効率が落ち るが、存在量の少ない¹⁴N¹⁵Nは自己遮蔽効果が効き づらく、効率的に光解離する、このような領域におい ては¹⁴N¹⁵Nが選択的に光解離で破壊されることにな るため、N2分子は¹⁵Nに乏しくなる. この傾向は観測 と整合的である. 分子雲の中心領域では星間紫外 線がダストに十分遮蔽され,分子の光解離は無視で きる、したがって、同位体選択光解離は分子雲の限 られた領域(正確にはガス中の窒素の存在形態がN 原子からN₂分子に遷移する領域)でのみ有効に働く、

では、N₂H⁺分子に見られる¹⁵Nの欠乏は同位体選 択的光解離で説明できるのであろうか?一般に分子 雲コアは密度が高く、星間紫外線が十分に遮蔽さ れていると考えられる.その一方、近年の観測から L1544で炭素鎖分子(C₃H₂)が検出されており、その ことから分子雲コアのある程度内部まで星間紫外線 が浸透している可能性もある(COが光解離されてで きたC原子を材料に炭素鎖分子が効率的に生成さ れうるため) [27].したがって、同位体選択的光解離

³現在の星間空間における[¹⁴N]/(¹⁵N]比は200~300と推定されて いる[22]. 太陽系の[¹⁴N]/(¹⁵N]=441との違いは,太陽系誕生後 の46億年間に起こった星々の元素合成の結果であると考えられ ている [23].

⁴N₂分子は等核2原子分子のため双極子モーメントを持たず直接 観測できない. その代用として, N₂分子から容易に生成される N₂H⁺分子がしばしば観測される.



図6:分子雲において窒素同位体分別を引き起こす機構. 筑波大学プレスリリースより.

が実際にN₂H⁺の¹⁴N/¹⁵N比に影響を与えているか否 かを結論付けることは難しかった.

4.2 N₂D+の¹⁵N同位体の観測

そこで筆者らは、分子雲コアL1544において N₂D⁺(N₂H⁺の重水素化物)の¹⁵N同位体の観測を行っ た、N₂D⁺は高密度ガスの良いトレーサーとして知ら れており(重水素濃縮は高密度なほど進みやすいた め)、分子雲コア中心部を選択的に観測できる、実際 にL1544においてもN₂D⁺はN₂H⁺よりもコア中心付 近のコンパクトな領域をトレースすることが知られて いる [28]. そのため、N₂H⁺に見られる¹⁵Nの欠乏が 選択的光解離を要因とするならば、N₂D⁺には¹⁵Nの 同位体分別が見られない(少なくとも分別の程度が 小さい)はずである.

以上のアイディアを検証するためにIRAM 30m 電波望遠鏡を用いて N_2D^+ の ^{15}N 同位体の観測を行っ た.結果として $^{14}N_2D^+$ は検出できたが、その ^{15}N 同位 体は検出できなかった、そのことから N_2D^+ も N_2H^+ と同様に ^{15}N に乏しいことが分かった、すなわち、分 子雲コアでの選択的光解離説を否定する結果となっ た[29].

4.3 分子雲形成時における窒素同位体分別

では分子雲コアでN₂H⁺分子が¹⁵Nに乏しい要因を どこに求めればよいだろうか?これまでの議論では 分子雲コアで観測される分子の窒素同位体分別は "その場"で起きると暗に仮定していた.分子雲は,銀 河内の星間ガスが超新星爆発などで掃き寄せられて 形成する.筆者らはこの分子雲の形成段階で¹⁵Nの 分別(¹⁵Nに富んだ氷と¹⁵Nに乏しいガス)が起き,そ れが後の進化段階においても維持される,という以 下のようなシナリオを提唱した(図6) [21].

N₂分子の同位体選択的光解離により,N₂は¹⁵Nに 乏しく,窒素原子は¹⁵Nに富む.分子雲では酸素原 子からH₂O氷が生成されるように窒素原子からNH₃ 氷がダスト表面反応で生成される.窒素原子は¹⁵N に富んでいるため,NH₃氷が生成することで,気相か ら¹⁵Nが選択的に減少することになる.その結果,ガ スと固体間で¹⁵Nの分別が起き,ガスは¹⁵Nに乏しく, 氷は¹⁵Nに富むようになる.一度ガスと氷の間で¹⁵N の分別が起きると,この状態は温度が低く,氷の昇 華が非効率である限り維持されると期待される.し たがって,分子雲形成段階で確立された分別は,そ



図7:分子雲形成時における気相(実線)および氷(破線)化学種の存在量の時間進化(左パネル). 右パネルには¹⁴N/¹⁵N比を示す. この計算で は元素存在量比[¹⁴N]/[¹⁵N] = 300を仮定した.¹⁴N¹⁵Nの選択的光解離領域(~1.5 mag)を通過したガスは¹⁵Nに欠乏することが分かる. N₂とN₂H⁺の¹⁴N/¹⁵N比はほぼ同じである. 図は[21]を改変.

の後の進化段階である分子コアにもそのまま伝わる ことになる. このシナリオは分子雲における酸素同 位体分別 [30]のアナロジーとして理解できる (N₂が CO, NH₃氷がH₂O氷に対応).

このシナリオの検証のため、筆者らは衝撃波によ る分子雲形成時の窒素同位体分別過程を気相・固相 での化学反応および同位体選択的光解離を考慮し た数値計算で調べた.この計算では現在の星間空 間を想定し、元素存在量比[¹⁴N]/[¹⁵N] = 300を仮 定した、結果を図7に示す、時間と共に衝撃波で掃き 寄せられたガスの量が増え星間紫外線は減光され るので、図7では横軸に可視減光量(Av)が取ってあ る(この計算では1 Avは約400万年に相当する). 窒 素原子からN。分子へとガス中での窒素の主要存在 形態が変わるところで (Av ~ 1.8 mag), 選択的光 解離によってN2分子は¹⁵Nに乏しく, 窒素原子は¹⁵N に富む.さらに窒素原子からNH₃氷が生成されるこ とで、N₂分子を含むガスが¹⁵Nに乏しくなることが確 認された.希薄な星間ガスから分子雲ができる際に ガスは必ず選択的光解離が効率的な領域を通過す るため、分子雲全体でガスが¹⁵Nに乏しくなる、

筆者らのモデルは、分子雲コアで N_2H^+ 分子(N_2 分子)が¹⁵Nに乏しいことを定性的ながらも説明で きた初めてのモデルである.しかし、観測を定量的 に説明するまでには至っていない(観測では N_2H^+ の ¹⁴N/¹⁵N比は約1000,モデルでは400程度).ガスの ¹⁵Nの欠乏の程度はNH₃氷の生成と選択的光解離 の起こるタイミングで決まる(両者のオーバーラップ が大きいほどよりガスは¹⁵Nが欠乏する). 化学パラ メータで最も重要なのはNH₃の光脱離率であり, す でに室内実験でよく調べられている[31]. 今後は重 要と思われる物理パラメータ(紫外線強度や密度)が 定量的な結果にどう影響するかを明らかにする必要 がある.

4.4 窒素の物質進化

筆者らの提唱した窒素同位体分別メカニズムで は、アンモニアを含む氷分子は¹⁵Nに富む(図7右). したがって、分子雲形成時にガスと氷の間に窒素同 位体分別(¹⁵Nに富んだ氷と¹⁵Nに欠乏したガス)が起 き、それが円盤に持ち込まれ彗星氷の材料となった と考えると、分子雲コアのガス分子の観測と彗星氷 の観測を同時に説明可能である.

一方,最近になって彗星67Pで N_2 分子が¹⁵Nに富 んでいることが明らかになった [32]. 筆者らのシナ リオでは N_2 分子(気相,固相によらず)は¹⁵N に乏し い必要があるので,この事実を説明することは難し い.彗星67Pでは N_2 /CO存在量比が低いことが分 かっている(~0.6 %) [33].筆者らの分子雲モデルで は N_2 /CO存在量比は5 %程度である(図7左).例 えば彗星67Pが原始太陽系円盤の N_2 スノーライン 内側で形成され,その後彗星内での化学反応により



図8:分子雲で形成される氷マントルの層構造. 左図には¹⁵Nの濃縮度((¹⁵NX/¹⁴NX)/([¹⁵N]/[¹⁴N])), 右図には重水素の濃縮度((XD/XH)/ ([D]/[H]))を示す. この計算では最終的に, 半径0.1µm のダストの表面上に約75分子層(厚みは約0.03µm) の氷マントルが生成され ている. 図は[21]を改変.

 NH_3 などから N_2 が生成されたと考えれば,¹⁵Nに富ん だ N_2 を説明できるかもしれないが,現状では推測の 域をでない.他の彗星で N_2 分子がどの程度含まれて いるのか, $^{14}N/^{15}N$ 比がどうなっているかは興味深い 点である.

星形成領域の氷に比べて彗星氷はNH。に乏しい ことがこれまでの観測から分かっている。前者では NH₃/H₂O比が5%程度であるのに対し、後者では NH₃/H₂O比はせいぜい1%程度である[19]. 彗星氷 にNH₃が少ない理由は謎であったが、彗星67Pでア ンモニウム塩が検出されたことから、NH₃がアンモ ニウム塩に変換されたことが要因であると考えられ る[34]. 以上のことから、窒素を含む分子に関しては 水のように、星形成前に生成されたものが彗星まで 生き残るというような単純な描像ではなさそうであ る. 窒素の物質進化を明らかにするには、VLA電波 望遠鏡や現在検討が進められているngVLA電波 望遠鏡を用いた原始星天体や原始惑星系円盤にお けるアンモニアの観測研究や、分子雲から原始惑星 系円盤に至るまでの窒素を含む分子進化の理論モ デルの整備が必要であろう.

最後に窒素同位体と水素同位体分別の関係について触れておく.図8に筆者らの分子雲モデルで形成される氷マントルの層構造を示した.重水素濃縮は低温度下であれば時間と共に進行するため、3節でも見たように氷マントルの表面付近ほど重水素が

濃縮している. 一方で, 氷分子の¹⁵N濃縮は紫外線が 適度に減衰された限られた環境でしか起こらないた め、重水素濃縮とはふるまいが異なる. 隕石中の有 機物において重水素のホットスポットと¹⁵Nのホット スポットは必ずしも相関しないということが知られて いる [35]. その要因は星・惑星形成領域において窒 素同位体分別と水素同位体分別を起こすメカニズム が異なるからなのかもしれない.

5. まとめ

本稿では,分子雲から原始惑星系円盤に至る化 学進化過程について,水素及び窒素同位体分別に着 目した筆者らの研究を中心に紹介した.同位体分別 は惑星科学と天文学にまたがる共通のキーワードで ある.天文観測や分析から得られる,分子雲や彗星 という断片的な進化段階における化学組成を理論 モデルを介して読み解くことで,星形成・惑星系形成 に伴う物質進化の全体像に迫ることができる.

本稿では紹介できなかったが、ALMAによる高 空間分解・高感度なガス分子輝線観測により、原始 惑星系円盤内の化学構造が見え始めてきた(関連す る遊星人の記事として[36]がある).最新の観測事実 と理論モデルに基づき、物質科学的な観点から惑星 系形成の解明に貢献していきたいと思っている.

謝辞

本稿は,2019年度最優秀研究者賞受賞記念論文 として執筆しました.推薦して頂いた相川祐理氏と 選考委員の皆様に感謝いたします.本稿で紹介した 研究を含むこれまでの研究は,多くの方々との共同 研究です.大学院時代の指導教員である相川祐理 氏,ポスドク時代の受け入れ研究者であるEwine F. van Dishoeck氏をはじめ,国内外の多数の共同研 究者の皆様に心よりお礼申し上げます.また,本稿を 丁寧に査読いただいた査読者の方にもお礼申し上げ ます.

本研究はJSPS科研費17K14245の助成を受けた ものです.

参考文献

- Tielens, A. G. G. M., 2005, The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium. (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 219.
- [2] Furuya, K. et al., 2019, ApJ 882, 172.
- [3] Kouchi, A. et al., 2020, ApJL 891, L21.
- [4] Shimonishi, T. et al., 2018, ApJ 855, 27.
- [5] Aikawa, Y., 2013, Chem. Rev. 113, 8961.
- [6] van Dishoeck, E. F. et al., 2014, Protostars & Planets VI (Tucson: Univ. Arizona Press), 835.
- [7] 古家健次, 2018, 天文月報 111, 1.
- [8] Linsky, J. L., 2003, Space Sci. Rev. 106, 49.
- [9] Crapsi, A. et al., 2005, ApJ 619, 379.
- [10] Watson, W. D., 1976, Reviews of Modern Physics 48, 513.
- [11] 相川祐理, 2005, 遊星人 14, 168.
- [12] Persson, M. V. et al., 2014, ApJ 563, 74.
- [13] Coutens, A. et al., 2014, ApJL 792, 5.
- [14] Altwegg, K. et al., 2017, Phil. Trans. R. Soc. A 375, 20160253.
- [15] Furuya, K. et al., 2015, A&A 584, 124.
- [16] Furuya, K. et al., 2016, A&A 586, 127.
- [17] Furuya, K. et al., 2017, A&A 599, A40.
- [18] Marty, B. et al., 2011, Science 332, 1533.
- [19] Mumma, M. and Charnley, S. B., 2011, ARA&A 49, 471.

- [20] Shinnaka, Y., 2016, MNRAS 462, 195.
- [21] Furuya, K. and Aikawa, Y., 2018, ApJ 857, 105.
- [22] Ritchey, A. M. et al., 2015, ApJL 804, L3.
- [23] Romano, D. et al., 2017, MNRAS 470, 401.
- [24] Redaelli, E. et al., 2018, A&A 617, A7.
- [25] Heays, A. N. et al., 2014, A&A 562, 61.
- [26] Roueff, E. et al., 2015, A&A 576, 99.
- [27] Spezzano, S. et al., 2016, A&A 592, L11.
- [28] Caselli, P. et al., 2002, ApJ 565, 331.
- [29] Furuya, K. et al., 2018, A&A 615, L16.
- [30] 倉本圭, 圦本尚義, 2005, 遊星人 14, 193.
- [31] Martin-Domenech, R. et al., 2018, MNRAS 473, 2575.
- [32] Altwegg, K. et al., 2019, ARA&A 57, 113.
- [33] Rubin, M. et al., 2015, Science 348, 232.
- [34] Altwegg, K. et al., 2019, Nat. Astro. 4, 533.
- [35] Busemann, H. et al., 2006, Science 312, 727.
- [36] 野村英子, 2019, 遊星人 28, 200.