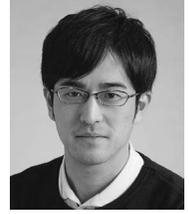


重水素比から探る，星・惑星系形成領域における水の生成と輸送



古 家 健 次

〈筑波大学計算科学研究センター 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1〉

e-mail: furuya@ccs.tsukuba.ac.jp

水 (H_2O) は地球上の生命にとって欠かすことのできない物質である。地球外にも、外惑星や、彗星など水はわれわれの太陽系内に広く存在する。太陽系の水の元々の起源としては、その高い重水素濃縮度から、原始太陽系の母体となった低温な分子雲で生成されたというのが有力な説の一つである。本稿では、星・惑星系形成領域における化学過程について簡単に解説し、分子雲における水の生成およびその星周円盤への輸送について筆者らの数値シミュレーション結果を基に紹介する。

1. はじめに

われわれの太陽系のような星・惑星系は、分子雲コアと呼ばれるガス塊の自己重力収縮により生まれる。生まれたばかりの星（原始星）には円盤状のガスが付随し、原始星から前主系列星への進化とともにその一部が原始惑星系円盤となる。惑星は原始惑星系円盤内で形成される。

太陽系内には地球上をはじめとして、外惑星や彗星の構成物質として水 (H_2O) が広く存在する。太陽系内の水に見られる著しい特徴として重水素体 (D) に富むことが挙げられる。太陽系における重水素 (D) の水素 (H) に対する元素存在量は太陽風の観測より 10^{-5} 程度と推定されている¹⁾。一方、地球の海に含まれる HDO の H_2O に対する割合は 3×10^{-4} であり、元素存在量と比べ桁で大きい。つまり地球の海には重水素が 10 倍以上濃縮している。同様に、彗星水に含まれる水や隕石中の含水鉱物にも顕著な重水素濃縮が見られる^{2), 3)}。後で詳しく説明するように、重水素濃縮を引き起こすためには極めて低温 ($\leq 50 \text{ K}$) であることが必要条件である。また太陽質量程度の星形成領域に含まれる水が、太陽系の水と同程度の重水素

濃縮を示すことが天文観測よりわかっている⁴⁾。これらのことから、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ことを示すのではないかと、という議論が長年盛んに行われている^{5), 6)}。

この仮説を検証するためには星・惑星系形成に伴う水の「進化」を追跡する必要がある。その道具となるのが、水の重水素比 (H_2O に対する HDO と D_2O の存在量比) である。星・惑星系形成の各進化ステージにおける水の重水素比を比較することで、観測的に水の「進化」を追跡することができる。近年のそのような天文観測および極低温環境下での化学反応素過程の実験研究の進展、それらに触発された精密な理論モデルの構築により、星・惑星系領域の水に対する理解は大きく進んだ。本稿では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最新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。なお星形成領域では水以外にも有機分子を含む多様な分子が検出されている。それに関連する天文月報の記事として文献 7, 8 があるので、合わせて参照されたい。

2. 星形成領域の化学

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や炭素質物質からなる塵粒子（ダストと呼ぶ、典型的には半径0.1 μm程度）で構成される。分子雲は極低温・低密度環境（典型的には10 K, 10^3 - 10^4 cm⁻³程度）であり、そこでの化学は地上のそれとは大きく異なる^{7), 8)}。以下に、やや長くなるが、分子雲における水と重水素濃縮に関する物理化学素過程をまとめる。

2.1 H₂Oの生成・破壊過程

赤外線からサブミリ波までの天文観測により、分子雲から原始惑星系円盤に至るまでのさまざま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わかっている⁹⁾⁻¹¹⁾。分子雲の観測で一般に最もよく用いられる分子は一酸化炭素(CO)であり、その水素分子に対する存在量は 10^{-4} 程度である。H₂Oの存在量はCOと同程度かそれよりも大きい。分子雲は極低温・低圧環境であり、H₂O分子は主にダスト表面を覆う固体(氷)として存在する。例えば、1太陽質量の分子雲コア中には地球の海の質量の 10^{12} 倍以上のH₂O氷が含まれると推定される。

宇宙でどのようにして酸素原子からH₂O氷が生成されるのだろうか？ 図1にH₂O分子の生成・破壊過程の概略図を示す。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、の三つに大別できる。H₂Oについてはいずれの過程についても低温下での実験、分子動力学・量子化学計算により詳しく調べられている。

H₂O氷の生成経路としては、気相反応によりH₂Oが生成されダスト表面に吸着する経路と、酸素原子がダスト表面に吸着しダスト表面上での水素付加反応によりH₂O氷を作る経路の2通りがある。前者の気相でのH₂O生成は非効率（酸素原子の1%程度しかH₂Oに変換できない）であり¹²⁾、

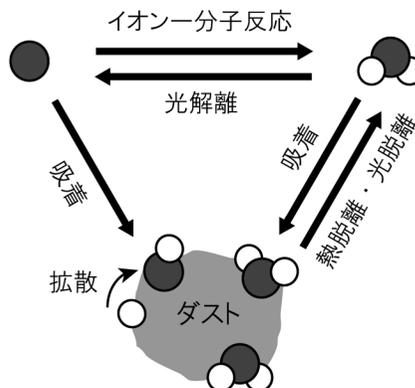


図1 H₂O分子の生成・破壊過程の概略図。黒丸が酸素原子、白丸が水素原子を表す。気相中における、 $O+H_3^+ \rightarrow OH^+ + H_2$ から始まる一連のイオン-分子反応により酸素原子はH₂Oに変換される。一方、紫外線による光解離により気相H₂Oは破壊される。ダスト上に吸着した酸素原子は $O+H \rightarrow OH$, $OH+H \rightarrow H_2O$ などの水素付加反応によりH₂O氷に変換される。気相・固相間でのH₂Oの分配は吸着と脱離のバランスで決まる。文献13のFig. 2を参考にした。

後者のダスト表面反応が主要な生成経路である。

ダスト表面反応でH₂O氷を生成するには、ダスト表面に酸素原子と水素原子が吸着し、表面上を熱拡散し、両者が出会う必要がある。分子雲の典型的な温度である10 Kでは原子の吸着が律速過程であり、吸着した酸素原子はほとんどすべてH₂O氷の生成に使われると思って良い。生成されたH₂O氷は約100 K以上で熱的に気相へと脱離する。脱離温度以下であっても、H₂O氷が紫外線を吸収すると光エネルギーの一部を使って気相に脱離する（光脱離と呼ばれる）。以上から、分子雲では酸素原子のダスト表面への吸着とH₂O氷の光脱離のバランスでH₂O氷の存在量が決まることがわかる。例えばおうし座分子雲では、視線方向の可視減光度が3等を超える領域のみH₂O氷が豊富に存在することが赤外線分光観測よりわかっている¹⁴⁾。

2.2 重水素濃縮過程

太陽系近傍の星間空間では重水素(D)の水素

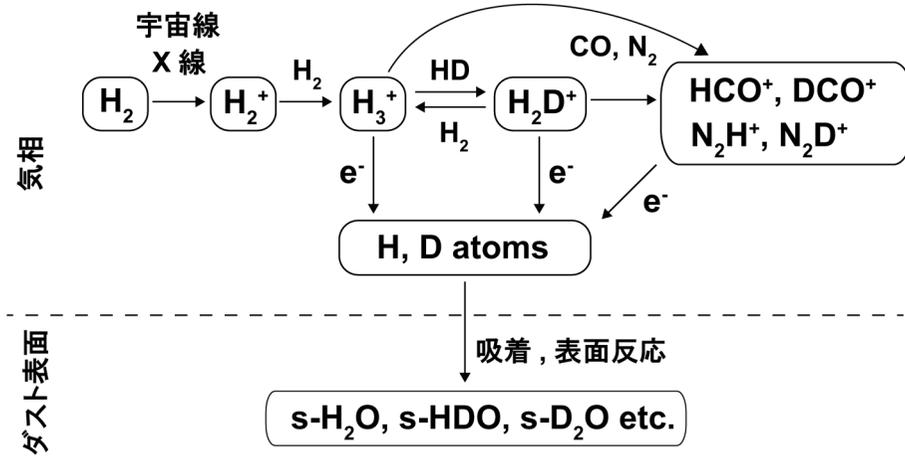


図2 星間分子の重水素濃縮機構の概略図。水素分子の宇宙線やX線による電離を起点に H_3^+ イオンが作られる。同位体交換反応(1)により H_3^+ に重水素が濃縮する。 H_3^+ の重水素濃縮は気相反応やダスト表面反応を通してさまざまな気相・氷分子に伝播する。

(H) に対する元素存在量比 (以下 $[D]/[H]$ 比と書く) は、 1.5×10^{-5} である¹⁵⁾。分子雲では、重水素は主に HD 分子として存在する。一方、 H_2 以外の分子は、 $[D]/[H]$ 比に対して桁で高い重水素をもつことが観測からわかっている。例えば、 N_2D^+/N_2H^+ 存在量比は分子雲コアにおいて 0.01 以上にも達する。

図2に重水素濃縮機構の概略図を示した。重水素濃縮過程は HD 分子からその他の分子に重水素原子が配られる過程と理解でき、その起点となる最も重要な反応が以下である¹⁶⁾：



逆反応は吸熱反応であり、発熱反応である順反応よりずっと遅い。反応(1)が進むと H_3^+ は H_2D^+ に一方的に変換され、 H_2D^+/H_3^+ 存在量比は $[D]/[H]$ よりもずっと高くなる。ここで重要なのは、 H_3^+ イオンの存在量はせいぜいガスの電離度程度であり(分子雲では 10^{-8} - 10^{-7} 程度)、ガスの主成分である H_2 分子に比べてずっと小さいことである。さもなければ、 $[D]/[H]$ 比に対して桁で大きいような極端な濃縮は起こりえない。 H_3^+ は分子雲における化学反応の起点となるイオンであ

るため、 H_3^+ の重水素濃縮はその他の気相分子(例えば HCO^+ 、 N_2H^+ など)にも伝播することになる。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。これが、はじめに述べた「重水素濃縮を引き起こすためには極めて低温であることが必要条件である」こと理由である。また、分子の重水素濃縮度が温度計として広く観測研究に用いられる理由でもある。

H_3^+ の重水素濃縮は気相分子のみならずダスト表面で生成される氷分子にも伝播する¹⁷⁾。 H_2D^+ から以下の反応によりD原子が生成される：



ダスト表面上でO原子にH原子が付加することにより H_2O 氷が生成するのであった。同様にO原子にD原子が付加することで重水素化した水(HDOおよび D_2O)が生成される。つまり、氷分子の重水素濃縮度も H_3^+ のそれを反映することになる。

2.3 水素分子のオルソ-パラ比

重水素濃縮の効率を左右する要因は温度以外にもいくつかある。高密度領域ではCOのダスト表

面への吸着が進み、気相COの存在量が小さくなり、重水素濃縮が進む。COは H_3^+ と H_2D^+ を破壊する主要な分子だからである。なかでも近年最も注目されているのは、水素分子のオルソ-パラ比（以下、 $H_2 o/p$ 比）である。水素分子にはオルソとパラの二つの核スピン状態が存在し、基底状態ではオルソ水素 ($o-H_2$) のほうがパラ水素 ($p-H_2$) に比べ170 K高い内部エネルギーをもつ（分子雲の温度は10 K程度であることを思い出そう）。この高い内部エネルギーのため、 $o-H_2$ が存在すれば反応（1）の逆反応が進みやすくなり*1、重水素濃縮を鈍化する¹⁹⁾。

$H_2 o/p$ 比がどのような過程で決まるかを説明しておく。 $H_2 o/p$ 比はダスト表面上における水素分子生成と、気相におけるスピン交換反応の競合で決まると考えられている*2。水素分子はダスト表面反応により主に生成され、生成時の $H_2 o/p$ 比は $o-H_2$ と $p-H_2$ の統計的重率と同じ3である¹⁸⁾。プロトン (H^+) や H_3^+ イオンによる気相でのスピン交換反応は $H_2 o/p$ 比を熱平衡値 ($9 \exp(-170/T)$, T はガス温度) へ近づけるように作用する。典型的な分子雲の物理条件では、理論的に予想される $H_2 o/p$ 比の定常値は 10^{-3} 程度である¹⁹⁾。これは10 Kでの熱平衡値 ($\sim 10^{-7}$) よりもはるかに高い。

図3に H_2D^+/H_3^+ 存在量比を温度の関数として示す。10 K程度の極低温下では H_2D^+/H_3^+ 比が $[D]/[H]$ 比 ($\sim 10^{-5}$) よりも桁大きいこと、温度上昇とともに H_2D^+/H_3^+ が減少することが見て取れる。一方で、僅かな $o-H_2$ の存在 ($H_2 o/p$ 比が 10^{-3} 以上) が重水素濃縮に影響を与えることがわかる。よって重水素濃縮度の定量的な議論には $H_2 o/p$ 比の定量的な理解が欠かせない。しかし残念ながら、重水素濃縮が効率的な低温領域で水素分子は輝線を出さず、 $H_2 o/p$ 比を観測的に

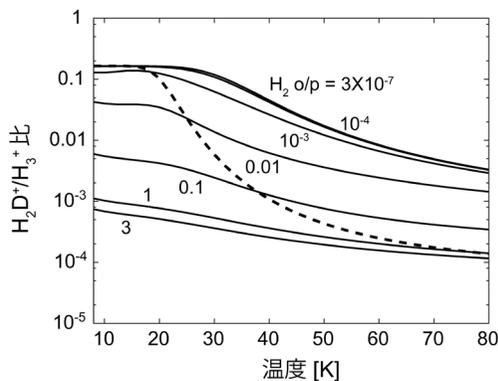


図3 定常状態における H_2D^+/H_3^+ 存在量比。横軸は温度。各実線では異なる $H_2 o/p$ 比を仮定しており、点線は $H_2 o/p$ 比が熱平衡値の場合を示している。星形成領域の化学組成は一般に非定常なため、値は各温度・ $H_2 o/p$ 比における最大の H_2D^+/H_3^+ 比と思って良い。一酸化炭素の水素分子に対する存在量は、分子雲の典型値である 10^{-4} と仮定している。

決めることは容易でない^{20), 21)}。ただし、分子雲コアなどで観測される極めて高い重水素比 (0.01以上) から、そこでの $H_2 o/p$ 比が1よりもずっと小さいことは確かである。

2.4 分子組成進化のシミュレーション

これまで見てきたように星（・惑星）形成領域の分子組成はさまざまな物理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、観測と実験に加え数値シミュレーションが大きな役割を果たしてきた。具体的には気相およ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になる。

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

*1 より正確には、 H_2D^+ と H_3^+ にもオルソ体とパラ体が存在し、これらの分子のオルソ-パラ比にも逆反応の効率は依存する。

*2 加えて、ダスト表面上でのスピン変換も重要であることが近年の実験から提案されている¹⁸⁾。

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うえで解くことが重要である。本稿の残りでは、星形成前における水氷の生成（3章）からその星周円盤への輸送（4章）までを筆者らの数値シミュレーションに沿って解説する。それを基に、太陽系の水の起源を探るうえでどのような観測が必要かを議論する。

3. 分子雲および分子雲コアにおける水氷の生成

分子雲および分子雲コアでの水氷の生成とその重水素濃縮過程については、これまで多くのシミュレーション研究がなされてきた²²⁾。しかし先行研究では、すでに水素が水素分子として存在するところから計算を始めていたため、 H_2 *o/p* 比の初期値を仮定する必要があった。重水素濃縮の効率は H_2 *o/p* 比に強く依存する。そのため、このアプローチでは初期にどのような値を仮定するかに計算結果が大きく依存するという問題がある。そこで筆者らは、原子ガスから分子ガスへの遷移が起こる分子雲形成段階から計算を始めることで、 H_2 *o/p* 比と水氷の重水素比を含む分子組成の進化を整合的に解くことにした²⁵⁾。

分子雲は希薄な原子ガスが衝撃波により掃き集められることで形成されると考えられている^{23), 24)}。非定常衝撃波化学モデルを用いて、原子ガスから分子雲形成に至るまでの物理・化学過程を調べた。簡単のため、このモデルでは一次元平行平板を仮定してある。

ここでは初期に密度 10 cm^{-3} 、温度 40 K の水素原子を主成分とするガスが速度 15 km/s で衝突した場合の結果を紹介する。衝撃波圧縮を受けたガスは輝線放射冷却によって冷やされ、密度 10^4 cm^{-3} 、温度十数Kの冷たく高密度なガス（＝分子雲）が形成される。衝撃波モデルの計算では約800万年間の進化を計算し、最終的に分子雲の柱密度は可視減光度で2等に達した。一方、星形

成の直接の現場である分子雲コアは10等を超える減光度をもつ。分子雲コア内での分子組成進化を模擬するために、衝撃波モデルに引き続き分子雲コア条件 ($>10^4\text{ cm}^{-3}$, 10 K , 10等) での計算も行った。以下では、分子雲と分子雲コア条件下での気相と氷マンツルの分子組成進化を合わせて説明する。

図4に気相分子組成（上パネル）と氷マンツルの層構造（下パネル）の時間進化を示す。時間とともに氷マンツルの厚みは増していくので、図4では横軸に氷マンツルの厚みが取ってある（上ラベルには対応する時間が示してある）。この計算では最終的に、半径 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ のダストの表面上に約80分子層（厚みは約 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ ）の氷マンツルが生成されている。参考のため、シミュレーション結果を基にした気相と氷マンツル組成の時間進化を表す概念図を図5に示した。

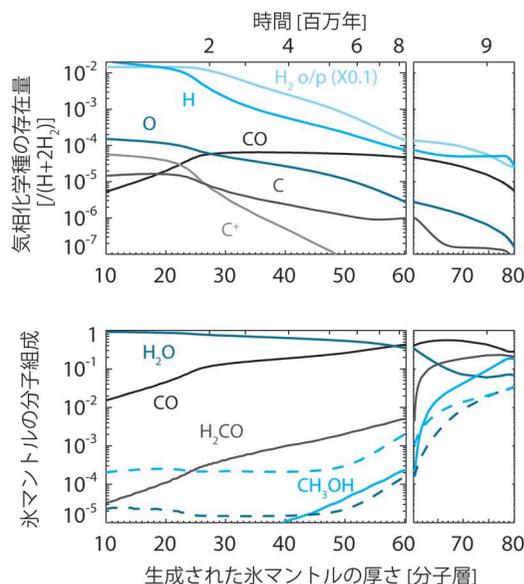


図4 星形成前における気相化学種存在量（上パネル）と氷マンツル組成（下パネル）の時間進化。下パネルでは破線で水氷とメタノール氷の重水素比 (HDO/H_2O 比と CH_3OD/CH_3OH 比) を示す。左パネル（60分子層以前）が分子雲、右パネル（60分子層以降）が分子雲コアに対応する。詳しい説明は本文を参照。

分子雲において、星間紫外線はダストによって遮蔽され、原子は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、酸素原子と炭素イオン・炭素原子は水氷や気相COに変換される。ダスト表面では、まず最初にH₂O氷に富んだ層が生成され、その後、その上にCOやメタノール(CH₃OH)に富んだ層が生成されていることがわかる。CH₃OHは、ダスト表面に吸着したCOに水素付加反応が起こることで生成される。CO氷がH₂O氷に遅れて生成されるのは、光脱離の効率がCO氷のほうが高いためである(H₂OとCO氷の光脱離効率は実験で測られている)。

さて、重水素濃縮度に話を移そう。今は温度10 K程度の状況を考えているので、重要なのは気相COの量とH₂ o/p比である。先ほど述べたように気相COはH₂O氷の生成から遅れてダスト表面に吸着する。一方、H₂ o/p比は気相でのスピン交換反応により時間とともに減少する(ただし熱平衡値よりは常に高い、図4上パネル)。以上のことから、時間とともに重水素濃縮が活発になることがわかる。

まとめると、氷マンテルはH₂Oに富んだ下層、COとCH₃OHに富んだ上層の2層構造からなり、上層は下層に比べ重水素比が高い(図5)。このシミュレーション結果は以下の観測事実と整合的である。赤外線吸収バンドによる星間氷の観測から、氷マンテルには水に富んだ層とCOに富んだ層が存在することがわかっている²⁶⁾。またメタノール氷は水氷よりも重水素比が高いことが知られている²⁷⁾、*3。星間氷は分子組成、同位体組成のどちらにおいても非常に不均一な構造を持っていると言える。

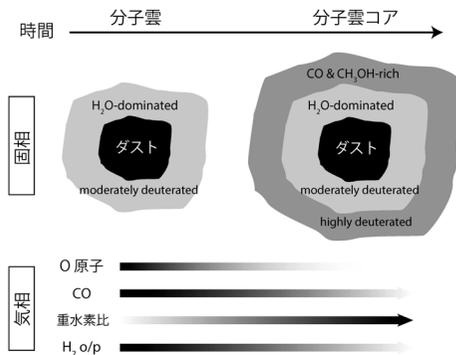


図5 分子雲と分子雲コアにおける気相と氷マンテルの分子組成進化の概念図。この図では便宜上、氷マンテルの厚みをダスト半径よりも大きく書いている。

これまで分子内の一つの水素が重水素に置き換わった分子(水の場合はHDO)を見てきたが、多重水素化した分子(D₂O)の観測からも不均一な氷マンテルが支持される。最近の観測で、星間水氷ではHDO=H₂O比が10⁻³程度であるのに対し、D₂O/HDO比は10⁻²程度と1桁ほど高い値であることが明らかになった²⁸⁾。D₂O/HDO比はHDO/H₂O比の1/4であることが期待されていたため*4、この結果は驚きをもって受け止められていた。

筆者らは、この高いD₂O/HDO比が不均一な氷マンテルを考えると自然に説明できると気づいた²⁹⁾。氷マンテル内の重水素濃縮度の勾配のため、HDOとD₂Oは氷マンテルの上層に主に存在するのに対し、H₂Oは下層に主に存在する(図4下パネル)。この場合、氷マンテル上層のみを見ると確かにD₂O/HDO比はHDO/H₂O比の1/4となるが、氷マンテル全体で見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

*3 HDO氷など重水素化した氷分子を検出するのは感度などの点から現状難しい。そのため、氷分子の重水素濃縮度は原始星周囲の暖かいガス(ホットコリノ)の観測から推定されている。ホットコリノではダストが十分暖かく、水分子が気相へと熱脱離するのである。

*4 水氷のダスト表面での生成を考えると、HDOは“O→OH→HDO”と“O→OD→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。

くなるのである。観測から D_2O/HDO 比とメタノール氷の重水素比が同程度であることがわかっており、このことは氷マントル上層部に HDO と D_2O が主に存在するという筆者らのモデルと整合的である。

最後に先行研究と筆者らのモデルの違いを述べておく。ほとんどの先行研究と比べて筆者らのモデルは原子ガスから計算を始めることで恣意的に H_2O/p 比を仮定する必要がない点、氷マントルの層構造を考慮した点、最新の表面反応の実験結果を取り入れている点で優れたものになっている。その甲斐あって、水とメタノールの重水素比の違いや、高い D_2O/HDO 比などの観測事実を一連のモデルで整合的かつ定量的に説明することに成功した。本稿では紙面の都合で定量的な議論を割愛したが、それについては原論文^{25), 29)}を参照されたい。

4. 星周円盤への水氷の輸送

これまで見てきたように、星形成前の低温な段階で分子組成・同位体組成的に不均一な氷マントルがダスト上に生成される。星形成前後で、系の紫外線・温度環境は大きく変わり、星形成前に生成された物質は星周環境を反映した組成進化を経ながら円盤へと持ち込まれると予想される。例えば、星形成に伴う昇温やエンベロープガスが円盤に降着する際の衝撃波加熱により星形成前に蓄えられた氷は昇華し、ガス組成を大きく変える。また、原始星からの紫外線にさらされた分子は破壊され、重水素濃縮度含め分子組成がリセットされる可能性もある(図6)。

原始星近傍での円盤形成およびそこでの気相の組成進化は ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) によって観測的研究が盛んに行われているが³⁰⁾、対応する氷の組成進化を観測的に研究することは現状難しい。そこで筆者らは2次元の準解析的円盤形成モデル³¹⁾と反応ネットワークモデルを組み合わせ、母体分子雲コ

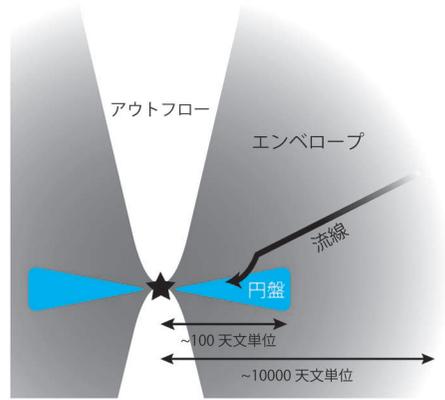


図6 円盤形成段階の概略図。分子雲コアの重力収縮により、原始星と星周円盤が形成される。原始星近傍からアウトフローが噴き出す。原始星とその周りの円盤は、元あった分子雲コア(エンベロープと呼ぶ)のガスが降着することで成長する。

アから形成中の円盤への水氷の輸送過程をシミュレーションで調べた³²⁾。具体的な計算方法としては、物理モデル内で流体素片の軌跡を追い、それに沿って反応ネットワークモデルを解いている。物理モデル内では化学反応に重要な中心星からの紫外線輻射場と温度は輻射輸送を解いて求めた。

ここでは手短かに結論のみを述べることにする。星形成前に生成された水氷は大部分がそのまま円盤に輸送されるが、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わかった。ここでの再生成の意味は、紫外線により H_2O 氷が酸素原子に戻され、再びダスト表面反応で酸素原子から H_2O 氷が作られる、ということである。

ではシミュレーションの予測、星形成前に生成された水氷は大部分がそのまま円盤に輸送される、をどのように観測的に検証できるだろうか？ 言い換えると、星形成前に生成された水氷と星形成後に壊され再生成された水氷をどのように区別できるだろうか？ ここで重水素濃縮が重要な指標となる。円盤への輸送中に水氷が破壊されるか

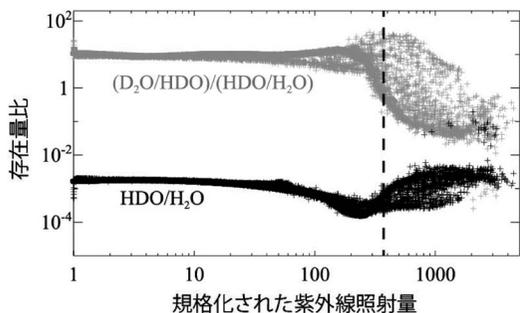


図7 HDO/H₂O比および [D₂O/HDO]/[HDO/H₂O]比を円盤に輸送される間に照射された紫外線量の関数として示す。各点が各流体素片に対応する。横軸は適当な値で規格化してある。破線より右側が水氷の再生成が重要な領域である。

否かを決めるのは、円盤に輸送されるまでの間ほどの程度星からの紫外線にさらされるか、である。図7は、横軸に流体素片に照射される紫外線量、縦軸にHDO/H₂O比を取った図である。横軸で約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7からは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が同程度のHDO/H₂O比をもつことが読み取れる。HDO/H₂O比では両者を見分けることができないのである。紫外線に照射される領域は温度も高いので、この結果を不思議に思うかもしれないが、重要なのはタイムスケールである。水氷の再生成のタイムスケールが重水素濃縮が緩和されるタイムスケールよりも短いのである。

一方、[D₂O/HDO]/[HDO/H₂O]比を見てみよう。HDO/H₂O比とは違い、再生成された水氷は元々の値よりも低い値をもつことがわかる。第3章で見たように、D₂O/HDO比がHDO/H₂O比より高いためには氷マントル中に重水素濃縮度の勾配が必要なのであった。言い換えると、水氷の再生成のタイムスケールが重水素濃縮のタイムス

ケールと同じ程度か長い必要がある。上で述べたようにこの条件は満たされないので、再生成された水氷は低い [D₂O/HDO]/[HDO/H₂O] 比をもつのである。よって、[D₂O/HDO]/[HDO/H₂O]比が星形成前に生成された水氷と星形成後に壊され再生成された水氷を区別するトレーサとして有望である、というのが結論である*⁵。

5. まとめと今後の展望

太陽系の水の起源としては原始太陽系の母体となった分子雲で生成された、というのが有力な説の一つである。分子雲起源説の観測的検証には従来用いられてきたHDO/H₂O比のみでは不十分であり、より頑健な結論を得るには [D₂O/HDO]/[HDO/H₂O] 比の測定が必要である。

最近になって、彗星探査機ロゼッタによって彗星氷中のD₂Oが初検出された³³⁾。ロゼッタによって観測された67P/Churyumov-Gerasimenko彗星では、D₂O/HDO比がHDO/H₂O比よりも10倍程度高いことが明らかになった。星形成領域においても同様にD₂O/HDO比がHDO/H₂O比よりも10倍程度高いこと、筆者らのモデルの結果を合わせて考えると、(少なくとも67P/Churyumov-Gerasimenko) 彗星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最も自然である。ただし、D₂Oの星形成領域および彗星における観測例は非常に限られているため、今後サンプル数を増やしていくことがさらなる検証には必要である。そのため、欧米の電波天文研究者と共同で星形成領域および彗星におけるD₂O（およびH₂O, HDO）の観測を計画している。

謝辞

本稿は筆者らが発表した査読付き論文^{25), 29), 32)}に基づいています。Ewine van Dishoeck教授、相川祐理教授をはじめとする共同研究者の皆様

*⁵ HDO/H₂Oで両者が区別できるとこれまで仮定されていたが、その仮定は正しくなく、[D₂O/HDO]/[HDO/H₂O]比が必要であるというのが実際のところである。

深く感謝いたします。また、研究の大部分は筆者が日本学術振興会海外特別研究員としてライデン天文台に滞在中に行ったものです。丁寧に原稿をチェックしていただきました富田賢吾助教に御礼申し上げます。最後になりましたが、本稿を執筆する機会を与えてくださった町田正博准教授に御礼申し上げますとともに、筆者の遅筆ゆえにご迷惑おかけしたことをお詫び申し上げます。

参考文献

- 1) Geiss J., Gloeckler G., 2003, Space Sci. Rev. 106, 3
- 2) Mumma M. J., Charnley S. B., 2011, ARA&A 49, 471
- 3) Altwegg, K., et al., 2014, Science 347, 1261952
- 4) Persson M. V., Jørgensen J. K., van Dishoeck E., Harsono D., 2014, A&A 563, 74
- 5) Geiss J., Reeves H., 1981, A&A 93, 189
- 6) Aikawa Y., Herbst E., 1999, ApJ 526, 314
- 7) 坂井南美, 2013, 天文月報106, 780
- 8) 山本智, 2014, 天文月報107, 620
- 9) Gibb E. L., Whittet D. C. B., Boogert A. C. A., Tielens A. G. G. M., 2004, ApJS 151, 35
- 10) Terada H., et al., 2007, ApJ 667, 303
- 11) Honda M., et al., 2009, ApJL 690, L110
- 12) Jensen M. J., et al., 2000, ApJ 543, 764
- 13) Schmalzl M., Visser R., Walsh C., Albertsson T., van Dishoeck E. F., Kristensen L. E., Mottram J. C., 2014, A&A 572, A81
- 14) Whittet D. C. B., 1993, in Dust and Chemistry in Astronomy, ed. Millar, T. J., Williams, D. A. (Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing) p. 9
- 15) Linsky J. L., 2003, Space Sci. Rev. 106, 49
- 16) Watson W. D., 1976, Reviews of Modern Physics 48, 513
- 17) Tielens A. G. G. M., 1983, A&A 119, 177
- 18) Watanabe N., et al., 2010, ApJ 714, L233
- 19) Flower D. R., Pineau Des Forêts G., Walmsley C. M., 2006, A&A 449, 621
- 20) Maret S., Bergin E. A., 2007, ApJ 664, 956

- 21) Brünken S., et al., 2014, Nature 516, 219
- 22) Taquet V., et al., 2013, A&A 550, A127
- 23) 井上剛志, 2014, 天文月報107, 36
- 24) Inutsuka S.-I., Inoue T., Iwasaki K., Hosokawa T., 2015, A&A 580, A49
- 25) Furuya K., et al., 2015, A&A 584, A124
- 26) Öberg K. I., et al., 2011, ApJ 740, 109
- 27) Parise B., et al., 2006, A&A 453, 949
- 28) Coutens A., et al., 2014, ApJL 792, 5
- 29) Furuya K., van Dishoeck E. F., Aikawa Y., 2016, A&A 586, A127
- 30) Sakai N., et al., 2014, Nature 507, 78
- 31) Visser R., Doty S. D., van Dishoeck E. F., 2011, A&A 534, A132
- 32) Furuya K., et al., 2017, A&A 599, A40
- 33) Altwegg K., et al., 2017, Phil. Trans. R. Soc. A 375, 20160253

The Water Trail from Clouds to Disks Probed by Deuterium Fractionation
Kenji FURUYA

Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

Abstract: There are long-standing arguments on the origin of water in the Solar System. One of the hypotheses is that water originated from the interstellar molecular cloud from which the Solar System was formed. This article overviews the formation of regular and deuterated forms of water in molecular clouds and their delivery to forming disks, based on our numerical simulations.