

特集「水素・酸素同位体分別の起源」

星間塵表面反応による星間分子の重水素濃集メカニズム

渡部 直樹¹，長岡 明宏¹，日高 宏¹，香内 晃¹

1. 星間分子の重水素濃集

本稿では星間塵表面における星間分子の重水素濃集機構に関して議論する。昨年12月の「遊星人」[1]で本研究をごく簡単に紹介しているが、その後大きな進展があったのでここで報告したい。

重水素の濃集は程度の差こそあれ、古くから隕石や彗星で確認されている[2]。一般的には海水（中の H_2O ）における濃集が知られており、その濃集度は星間空間のD原子存在度（ $\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$ ）の10倍程度である。この濃集度は後に述べる分子雲におけるそれに比べればかなり小さいが、それでも惑星科学者の気を引くには十分な濃集といえる。ハレー彗星の H_2O でもほぼ同程度の重水素濃集が観測されていることから、これら太陽系天体における重水素濃集の起源は分子雲にあるという考え方が一般的に受け入れられている[3, 4]。それでは分子雲中における様々な分子の濃集度はどうであろう。分子雲の領域や分子種によってばら

きはあるものの、おおよそ宇宙存在度の $10^2 \sim 10^4$ 倍の範囲の濃集を示している。惑星間塵（IDP）や隕石中でも高度な濃集は見つかっているが、それでも数 $10 \sim 1000$ 倍程度であろうか。つまり、分子の重水素濃集は分子雲の段階でかなり進み、その後の原始太陽系星雲中でも平衡に達することなく、分子雲の高い濃集度の名残をとどめたまま現在に至っていると考えのが自然だ。参考までに図1に彗星、IDP、隕石および分子雲中のいくつかの分子における、おおよその重水素濃集度を示した。

話を重水素濃集の起源と考えられる分子雲に絞ってみよう。分子雲ではこれまで、分子イオンを含め20分子種に計27種の重水素原子を含んだ分子（重水素体）が見つかっている（表1）。現在までに同定された星間分子が141種で、すべての分子が水素原子を含んでいるわけではないことを考えると、これは結構な数である。これらの重水素体分子の中で特に高い濃集が確認されている分子が水[5]、アンモニア[6,7]、ホルムアルデヒド[8]、メタノール[9]である。これらはいずれも重水素体の存在度が水素原子のみを含む分子（標準体）の零点数%～数十%ほどもあり、異常ともいえる高濃集度を示している。とりわけ目を引くのがアン

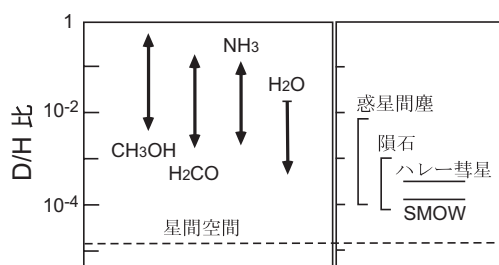


図1：分子雲および太陽系における重水素濃集度。左のパネルは分子雲中の H_2CO 、 CH_3OH 、 NH_3 、 H_2O における重水素濃集度。右のパネルは太陽系における重水素濃集（文献[3]より）。星間空間のD/H存在比もあわせて示した。SMOWは標準平均海水の同位体比。

表1：これまで分子雲で見つかった重水素体星間分子。星間塵表面反応が生成に関わっていると思われる分子を四角で囲った。

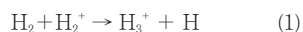
HD	
HDO	H_2D^+ HDS D_2S HDSCS CH_3D
DCN	DNC NH_2D NHD_2 ND_3 DC_3N DC_2N N_2D^+
DCO ⁺	HDCO D_2CO
CH_2DOH	CHD_2OH CH_3OD CD_3OH
CH_2DCN	C_4D C_2D CH_2DCCH CH_3CCD

モニア (NH_3), ホルムアルデヒド (H_2CO), メタノール (CH_3OH) である. これらの分子では, 重水素原子を2つ以上含む重水素体すら観測されているうえ, 濃集度も水, メタンに比べおよそ一桁大きい. それではこれらの分子の重水素濃集はどのようにして起こるのだろうか.

2. 分子雲における重水素濃集プロセス

低温の分子雲では, 多くの分子は反応の活性化エネルギーを必要としない気相のイオン-分子反応によって生成される (遊星人同号掲載, 相川氏の論文参照). 当然, 重水素体分子の主要な生成経路も, 途中に光化学反応や再結合反応が介在することもあるが, イオン-分子反応と考えられている. 重水素原子は水素原子よりも重いので, 重水素を含む分子の振動の零点エネルギーは下がり, 解離エネルギーが高くなるため, 重水素体分子は水素原子のみを含む標準体よりも一般にエネルギー的に安定である. しかし, だからといって無条件に重水素体が選択的にできるかというところではない. 分子に重水素を濃集させるためには, ①効率よく重水素体を生成するプロセスがあること, ②一度生成した重水素体分子が交換反応などで再び標準体に戻らないこと, の2つが最低限必要になる. 現在考えられているもっとも標準的な重水素濃集プロセスを定性的に説明すると以下ようになる. 初期条件として分子雲形成以前のdiffuseな雲を考える. そこではほとんどの軽元素は原子状になっている. もちろん水素 (H), 重水素 (D) も例外ではない. このときの D/H 比はおおよそ 10^{-5} であることが星間空間の観測から分かっている. 水素, 重水素原子はやがて星間塵の上で分子化し H_2 , HD , D_2 が生成される. D_2 の生成は確率的にかなり低いので無視するとして, HD/H_2 比はやはり 10^{-5} 程度である. 分子雲中心部の非常に濃い部分では H_2 の自己遮蔽効果 (同号掲載の倉本 & 本氏の記事を参照のこと) のため, この比はさらに低くなる. また, 細かい話になるが, 星間塵上での HD 生成は D の質量

が重い (表面で動きにくい) ため, H_2 生成よりも遅く, D 原子のまま残る傾向になる. イオン-分子反応が活発化し分子が大量生産されるのは次の反応で H_3^+ という分子イオンが生成された後である.



ここで H_2^+ は H_2 が宇宙線などでイオン化して生成したものである. H_3^+ は効率よく生成され, 様々な分子生成反応に寄与する. 従って, H_3^+ が重水素濃集すれば, 他の重水素体分子生成に都合がよい. H_3^+ は HD との発熱反応,

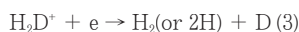


により H_2D^+ を生成する. 反応 (2) の逆反応は吸熱反応になり $10 \sim 30\text{K}$ 程度では極めて遅く無視して良い. つまり反応 (2) は上述の条件①, ②を満たす. 十分に時間がたつと H_3^+ に重水素が濃集し $\text{H}_2\text{D}^+/\text{H}_3^+ \gg 10^{-5}$ の関係になる. そして H_2D^+ は次の重水素体分子を生成し, その分子の重水素濃集度を高める. この他にも分子雲の温度によっては CH_2D^+ が介在する濃集プロセスなどがあるが, ここでは触れない.

上記のような気相での重水素濃集プロセスは1970年代頃から調べられており, その研究は一定の成果を収めてきた[10]. ところがその後, 気相だけの濃集プロセスだけでは説明できない分子種が次々と発見されてきた[5-9]. それが前章で紹介した NH_3 , H_2CO , CH_3OH の重水素体である. これらの重水素濃集度は図1にも示したように, 場合によっては標準体の数十%にも及ぶ. 複数の重水素原子を含む重水素体 (NHD_2 , ND_3 , D_2CO , CHD_2OH , CD_3OH) が大量に見つかっていることも特徴である. これらの分子を見たときに, すこしでも星間分子に興味がある研究者は, これらの標準体はすべてその生成に星間塵表面反応が関与していると考えられている分子[11-13]であることに気づく (表1参照. 塵上に見つかった分子に関しては文献[14]を参照). NH_3 , H_2CO , CH_3OH 分子を H , N , CO などの始原的な原子・分子から気相反応で生成する場合, いくつかの素反応を繰り返さなければならないが, 一連の素反応の中に一つでも (活性化エネルギーが高い,

吸熱である等の理由で) 遅い反応があると気相での生成が困難になる。上記の分子の生成にはそういった反応が含まれている[15,16]。いっぽう、塵表面反応では、気相ではほとんど起こらない $X+Y \rightarrow XY$ や $XY+Z \rightarrow XYZ$ タイプの付加反応¹⁾が起こりやすい、一度の衝突(single collision)ではなかなか反応しない系でも、塵表面(反応場)に滞在する時間が充分長い場合、反応するチャンスが格段に増す、などの特徴を持ち、気相では期待されない分子を生成することができる[1, 17]。また、水素などの軽い原子はトンネル効果により、極低温表面でも反応が進む。 NH_3 , H_2CO , CH_3OH 等の分子は表面における水素原子付加反応で生成されたと考えられている。

Tielensを始め何人かの研究者は星間塵表面反応を取り入れた重水素濃集モデルを提唱している[18]。これらのモデルのポイントは、まず反応(2)で H_2D^+ を生成し、その後



の反応でD原子を生成する。 $H_2D^+ + e$ の反応では他にHDを生成するチャンネルもあるが、生成したHDは反応(2)によって再び H_2D^+ になり、結果的にD原子が選択的に残ることになる。反応(3)により、 10^4 年後くらいには原子状のD/H原子比は0.1程度まであげることができる(もちろん、 H_2 , HDなどの分子を含めれば依然としてD/H比は 10^{-5} である)。その後、高いD/H比の原子が星間塵表面に吸着し、表面反応によって重水素体が高確率で生成されることになる。このモデルは純気相モデルと比較すると、より観測結果をうまく説明することができる。それでも、メタノールなどの異常濃集を再現するには表面に降り注ぐD/H原子比をさらに上げるなどの思い切った仮定が必要になる。また、このモデルでは複数のD原子を含

1. 2つの原子と分子(原子)が衝突して1つの分子になる時($X+YZ \rightarrow XYZ$ タイプの反応)、余剰エネルギーが生成される。気相ではそれを逃がすために光を放出するしかないが、その断面積は一般に非常に小さい(もしくは禁制になる)。そのため、 $X+YZ \rightarrow XY+Z$ などの解離を伴ってしまうのが普通である。いっぽう表面反応は余剰エネルギーを効率よく表面に逃がすことが出来るため、解離を伴わない付加反応が起こりやすい。

む CHD_2OH や CD_3OH などの存在を説明することができない。このモデルの一番の弱点は星間塵表面反応の素過程を適当に仮定するしかないところである。例えば起こりうる反応のチャンネルなどは実験を試みなければ分からないし、HとDの表面での反応性の違いもまたしかりである。その意味ではモデルの弱点と言うより、むしろ実験が行われてこなかったことが問題だったといえるかもしれない。

このように、星間塵表面反応は星間分子生成だけでなく、重水素濃集にも重要な役割を果たしていると考えられる。重水素濃集を包括的に理解するためには、星間塵表面反応の素過程を実験的に解明することが不可欠であるが、残念ながらその試みはこれまで全くされてこなかった。モデルの中には塵表面反応(塵への凝縮は考慮しているが)を考慮せずに気相反応ネットワークのみで重水素濃集説明しようとするものがあるが[6,19,20]、すくなくとも NH_3 , H_2CO , CH_3OH など、上述のようにその生成に星間塵表面反応が強く関与している分子に関しては、重水素濃集にも何らかの影響があると考えた方が自然であろう。

3. 星間塵表面反応による重水素濃集

著書らのこれまでの研究で、 H_2CO , CH_3OH は星間塵上のCO分子にH原子が逐次付加して生成されることが明らかになった[1, 21-24]。そこで、それら分子の表面反応による重水素濃集過程も調べることにした。ここからはCO, H_2CO , CH_3OH とその重水素体 H_2CO-d_n , CH_3OH-d_n ($M-d_n$ は分子Mの中のn個のH原子がD原子に置き換わったものを意味する)が絡む反応系に話を絞りたい。 H_2CO や CH_3OH に重水素が濃集するにはどうすればよいか。第2章で述べた条件①、②と同様に次の2つの条件がすぐに思い浮かぶ: ①COへのH原子付加反応に比べD原子付加反応がより速く進む、②標準体にD原子が反応し、H原子と置換するが、逆にH原子が分子内のD原子と取って代わる反応は遅い。これら①、②を実験で調べる必要がある。このうち、

①は星間塵表面反応の場合、厳密な意味で十分条件ではない。なぜなら、分子雲中で塵に水素原子が衝突してくる頻度はおよそ1日に1回くらいで、塵上でH原子とD原子が他の分子との反応で競合する機会はあまりない。つまり、仮にH原子の反応速度定数がD原子よりも小さくても、D原子が飛んできるとも前にそこにいる分子と反応してしまえば、反応速度定数の違いは意味をなさなくなる。それでも星間塵表面反応の情報が極端に不足している現状では、あらゆる可能性を吟味することは極めて重要である。

本研究の目的は、星間塵表面反応による $\text{H}_2\text{CO}-d_n$ および $\text{CH}_3\text{OH}-d_n$ の生成経路を洗い出し、観測されたような重水素異常濃集が星間塵上で実現できるかどうかを実験的に調べることにある。さまざまな反応経路を調べるために反応の親分子として、始原的なCOだけでなく、 H_2CO 、 CH_3OH 、およびその重水素体も使用した。その結果、 $\text{H}_2\text{CO}-d_n$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}-d_n$ を生成する主要な経路を初めて明らかにし、実験はもちろん、理論的研究でも考えられて来なかった新しい重水素濃集過程を特定することに成功した。この一連の実験を本稿と次号の長岡らの記事で紹介する²⁾。本稿では H_2CO の重水素化を中心に述べ、それほど定量的な議論をせず、起こりうる反応経路の特定に重きを置いた。次号、長岡らがより定量的な議論を行い、全体としてまとめる予定である。

3.1 実験

H_2CO 、 CH_3OH における重水素濃集に関連して、これまでに調べた反応系は以下の通りである。i) $\text{CO} + \text{D}$, ii) $\text{H}_2\text{CO} + \text{D}$, iii) $\text{D}_2\text{CO} + \text{H}$, iv) $\text{CH}_3\text{OH} + \text{D}$, v) $\text{CH}_3\text{OH}-d_n + \text{H}$, vi) $\text{CH}_3\text{OH}-d_n + \text{D}$, vii) $\text{CO} + \text{D} + \text{H}$ (H, D同時照射)。本稿で報告する実験で用いた表面物質はいずれも30分子層 (ML) の H_2O 氷の上に反応分子を1ML程度蒸着したもので、表面温度は

15Kである。反応分子の下に H_2O 氷を敷くのは、氷マントルを持つ星間塵表面をシミュレートするためであるが、反応場を各実験でそろえ基板のアルミニウム表面の影響を消すためでもある。実験装置の詳細は文献[24]を参照して欲しい。iv) ~ vii)に関しては次号の遊星人で長岡らが詳しく報告するので、ここでは触れない。実験手順を簡単に述べる。真空度 10^{-10} Torrの超高真空槽にアルミニウムの冷凍基板を設置し、そこに真空蒸着法でサンプル固体を作成する。先に H_2O 氷を作成した後、反応分子のガスを蒸着する。サンプル固体の赤外線吸収スペクトルをフーリエ変換型赤外分光計 (FTIR) を用いた反射測定法で測定する。その後原子線を入射しサンプルの組成変化を再びFTIRで測定する。反応の親分子、生成分子量の時間変化を原子照射量 (fluence) の関数としてプロットすることにより実効的な反応速度定数³⁾が求まる。原子はマイクロ波放電で H_2 もしくは D_2 から生成する。原子のフラックスはおよそ $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ で、原子の並進温度は100K以下である。各測定の原子の総照射量はいずれも分子雲環境で 10^6 年程度の照射量に相当する。

3.2 結果

実験結果の詳細を述べる前に、一連の実験i) ~ vii)で調べた反応系のネットワークを図2に示す。図中の黒実線・破線の矢印は考え得る反応経路で、必ずしもその反応経路が実際に有効である（その経路を通る反応が速い）ということではない。以下の結果を読まれる際にこの図を参照して頂くと分かりやすいかもしれない。

i) $\text{CO} + \text{D}$

$\text{H}_2\text{CO}-d_n$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}-d_n$ を生成する過程として最初に思いつくのは塵の上でもっとも始原的な分子であるCOにD原子が逐次付加する過程である。COは分子雲初

2. 本特集の企画が決まった後、当グループの長岡が惑星科学会の最優秀発表賞を頂き、次号に記事を執筆することになった。内容に若干重なる部分があるがご容赦願いたい。

3. この実験では原子の表面への吸着係数や拡散係数、原子の表面密度などは知ることはできない。そういう意味では厳密な反応速度定数は決定できないため、“実効的な反応速度定数”という言葉を使った。

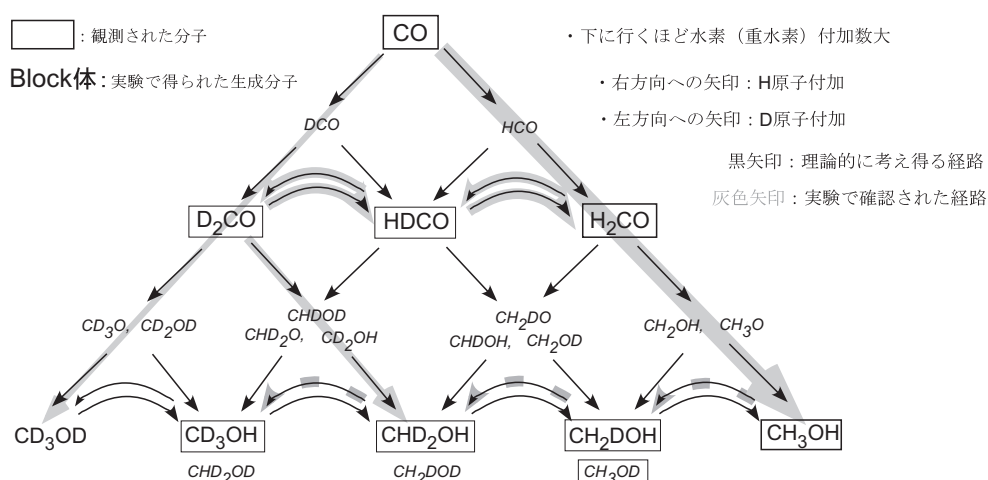


図2: 本研究で調べたCO, H₂CO(H₂CO-*d*_n), CH₃OH(CH₃OH-*d*_n)からなる表面反応ネットワーク。ブロック体、斜体で書かれた分子はそれぞれ本実験で検出された分子、されなかった分子を意味する。これまでに分子雲で観測された分子は四角で囲んだ。黒矢印は理論的に考え得る反応経路で、右（左）方向に流れる矢印はH（D）原子との反応で進む経路。灰色矢印は実験で明らかになった主な反応経路。線の太さはおおよそその実効的な反応速度定数を相対的に示した（太い方が速い）。反応速度定数は表面組成に大きく依存する。ここで示したものは本文にもあるようにH₂O氷の上に反応分子が存在する場合の結果である。灰色破線の経路については次号（長岡ら）の記事を参照のこと。

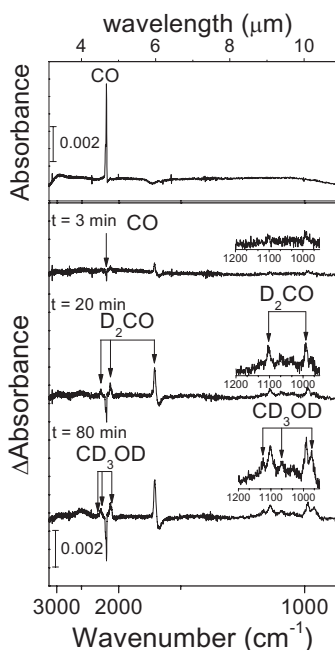


図3: 上: 原子照射前の初期CO固体の赤外線吸収スペクトル。温度15K。下: D原子照射にともなうスペクトルの変化。照射後のスペクトルから初期スペクトルを引いたもの。ベースラインより上方のピークは初期値から増加、下方は減少を意味する。COの減少とともにD₂COが増加し、その後CD₃ODへと移り変わっている様子が見て取れる。

期に気相で生成されたものが塵に凝縮したものである。

図3にCO分子にD原子を照射したときの赤外線吸収スペクトルの変化を示す。D原子付加反応



が起こり、COの減少とともにD₂COとそれに続くCD₃ODの生成が見て取れる。検出できた生成分子はこの2つのみである。表面反応の実験では、照射時間（照射量）に応じて卓越する生成分子が移り変わるのが特徴である。例えば、ある時間ではD₂COが主成分であるが、照射量が増えるとそのほとんどはCD₃ODに変化してしまう。図2で見ると、この測定で観測したのは3角形の反応ネットワークの左端を通る反応になる。中間体DCO, CD₃O(CD₂OD)が観測されなかったことから、CO + Hの実験[23]の時と同様、逐次付加反応(4)のうち中間体を作る第1, 第3段階の反応が律速プロセスであると考えられる。D原子照射に伴うCO分子の減少を一次の指数関数でフィッティングしてCO + D → DCOの実効反応速度 $k_D(\text{CO})$ を求め、以前に行ったCO + H → HCOの $k_H(\text{CO})$ と比較したところ、 $k_D(\text{CO})/k_H(\text{CO}) \sim 0.1$ となった。つまり、D

原子の付加反応はH原子付加に比べ1/10と遅く、D原子付加反応は $\text{H}_2\text{CO}-d_1$, $\text{CH}_3\text{OH}-d_1$ の濃集プロセスの最初のステップにはなり得ない。もっとも、この結果は実験をする以前からある程度予想は付いていた。COへの水素原子付加反応はトンネル反応なので、付加する原子がDになった場合、質量が倍になることにより反応のポテンシャル障壁（障壁の高さが活性化エネルギー）をトンネルする確率は格段に下がるからだ。

ii) $\text{H}_2\text{CO} + \text{D}$

i) の結果から、COからスタートした場合にはDCOは出来にくく、塵に降り注ぐ原子の量としてHがより多い環境では、H原子付加反応により、むしろ H_2CO が卓越することが分かった。次に H_2CO を親分子にしてD原子を照射する実験を行った。照射後すぐに H_2CO の減少と共にHDCOが生成され、続いて D_2CO が生成された。これらの生成物は H_2CO への単純なD原子付加ではなく、 H_2CO のHと入射したDが置換し、最終的には2度置換が起こって D_2CO に達したことを意味する。ここで“置換”の意味は必ずしもHとD原子が“直接交換（たとえば反応（5））”する反応だけを指す訳ではなく、反応（6）のような“H原子引き抜き+D原子付加”の場合も含む。本実験では残念ながらどちらが主要な経路が判別することは出来ない。



H_2CO , HDCOにDが逐次付加して、それぞれ CH_2DOD , CHD_2OD を生成する過程や、 D_2CO から CD_3OD が生成する反応はあまり見られず、分子雲で 10^6 年間に相当するD照射量を与えた後の主要生成物は D_2CO であった。これで仮に D_2CO やHDCOがH原子照射により H_2CO に戻る反応が遅ければ、この H_2CO における置換反応は重水素濃集プロセスとなりうる。

iii) $\text{D}_2\text{CO} + \text{H}$

D_2CO にH原子を照射すると、生成物として

CHD_2OH , HDCO , H_2CO , CH_3OH が確認された。 CHD_2OH は D_2CO にHが逐次付加して生成したものである。 HDCO , H_2CO , CH_3OH の生成経路は、 D_2CO のDがすべてHに置換⁴⁾され H_2CO に変化した後にHがさらに逐次付加して CH_3OH へ至ったと考えられる($\text{D}_2\text{CO} \rightarrow \text{HDCO} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$)。主要な生成物はすべての照射時間で CHD_2OH であったが、最終的（分子雲 10^6 年相当）に CH_3OH 量が CHD_2OH に匹敵した。この反応系ではi)の場合と違って付加反応が十分に起こるのが特徴だ。

上記i)～iii)の実験で分かったことをまとめる。

- ・安定分子（CO, H_2CO , HDCO , D_2CO ）にD原子が付加する速度は非常に遅い。
- ・ H_2CO にD原子を入射した場合は置換反応し、最終的に D_2CO に落ち着く傾向にあり、付加は進みにくい。
- ・ D_2CO にH原子を入射した場合、置換反応で H_2CO を生成するものの、 D_2CO にそのまま付加し、 CHD_2OH を生成する反応も同程度みられる。生成した H_2CO はそれに続く付加反応により速やかに CH_3OH に進む。

以上のことから、始原分子COが星間塵表面でとりうる主要な進化（重水素化）の経路は、図2のグレーの矢印のようになることが分かった。反応速度の相対的な違いは矢印の太さで示した（グレー破線の経路に関しては次号に議論する）。分子雲で高度の濃集が観測されている D_2CO を生成するにはCOへのD原子逐次付加よりも、むしろ H_2CO 生成後のH-Dの置換反応が有効である。 CHD_2OH の生成には、 H_2CO へのD原子逐次付加よりも D_2CO へのH原子付加の経路が効率的である。また、実験的な制約からHDCOを反応の親分子とした実験は行っていないが、 D_2CO , $\text{H}_2\text{CO} + \text{H}$ の実験結果から、HDCOにH原子が逐次付加して CH_2DOH

4. この系では、分子内のD原子がH原子と直接交換する反応は吸熱過程なので、ここでの“置換”は”H原子による分子内Dの引き抜き+H原子付加”を意味する。

を生成する過程も起こりえるが，むしろ置換反応によって H_2CO 生成に向かう過程が主要だといえる。

4. ラジカル+H, D原子について

ラジカルは反応性が高いため，十分な量を試料固体として用意することは実験的に極めて難しい．それゆえ，本研究では安定分子に至る途中のラジカル（ HCO ， DCO ， CH_3O 等）を親として原子を照射する実験を行うことが出来なかった．ラジカルと水素などの活性原子の反応は一般的に活性化エネルギーが低く，安定分子との反応よりも格段に速く進み，H, D原子による反応速度や反応経路の違いも現れにくいと考えられる．したがって，実際の星間塵表面では $\text{H}_2\text{CO}-d_n$ の生成経路として， $\text{CO} + \text{H} \rightarrow \text{HCO}$; $\text{HCO} + \text{D} \rightarrow \text{HDCO}$ という反応も起こり得るであろう． H_2CO ， $\text{H}_2\text{CO}-d_n$ から $\text{CH}_3\text{OH}-d_n$ に至る経路を考えると，話はややこしくなるが，これに関しては次号（長岡ら）で議論する予定だ．

5. H_2O , NH_3 , CH_4

本研究では H_2O ， NH_3 ，および CH_4 固体にD原子を照射する実験も行っている．この系に関しては，調べた実験のパラメーターがまだ少ないので最終的な結論には至っていないが，少なくとも表面温度10Kにおいてはいずれの系でも反応は見られなかった．つまり，一度標準体が生成してしまったら，置換反応による重水素化は起こらないということだ．他の重水素化経路としてD原子付加反応（ $\text{OH} + \text{D}$ ， $\text{NH} + \text{D}$ ）も考えられるが，上述の H_2CO にくらべて重水素化のチャンネルが少ないことは確かなようだ．これは H_2O ， NH_3 ， CH_4 における重水素濃集度が H_2CO ， CH_3OH に比べて低いという観測結果とも調和的である．

6. まとめ

星間塵表面反応による星間分子，特に H_2CO ，

CH_3OH の重水素化過程を初めて実験的に調べ，これまで全く情報のなかった重水素体生成経路を明らかにした．星間塵表面における重水素濃集にはD原子の付加反応だけでなく，H-D置換反応が重要な役割を果たしている． H_2O ， NH_3 ， CH_4 では置換反応は確認されず，これらの分子における濃集度が H_2CO ， CH_3OH に比べて低いという観測結果と整合する．

本稿では $\text{H}_2\text{CO}-d_n$ の生成経路に関して得られた定性的な情報を中心に報告した．実際の分子雲ではH, D原子がある割合で常に塵に降り注いでいる．分子雲のプロセスを正しくシミュレートするためには， $\text{CO} \rightarrow \text{H}$ ，D原子を同時に照射する実験（上記vii）が不可欠である．次号（長岡ら）の記事ではこの結果を報告すると共に， $\text{CH}_3\text{OH}-d_n$ 生成経路と濃集過程に関してより定量的な議論と，実験結果と観測との比較を行う予定である．

謝辞

この研究を遂行する上で，北海道大学低温科学研究所技術部の新堀邦夫氏，中坪俊一氏，藤田和之氏に装置開発の面で大変お世話になった．ここで御礼を申し上げたい．また，名古屋大の奥地拓生氏には本稿に対して的確なコメントを頂き感謝します．

参考文献

- [1] 渡部ほか，2004 「遊星人」 vol.13, 226.
- [2] たとえばRobert, F., Gautier, D., & Dubrulle, B., 2000, Space Sci. Rev. 92, 201.
- [3] たとえばTielens, A. G. G. M. 1997, in Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials, eds. T. J. Bernatowicz & E. K. Zinner, p.523.
- [4] Geiss, J. & Reeves, H., 1981, Astron. Astrophys. 93, 189
- [5] Parise, B. et al. 2005, Astron. Astrophys. 431,

- 547.
- [6] Hatchell, J. 2003, *Astron. Astrophys.*, 403, L25
- [7] Roueff, E., Lis, D. C. et al. 2005, *Astron. Astrophys.* 438, 585.
- [8] Loinard, L. et al., 2000, *Astron. Astrophys.* 359, 1169.
- [9] Paris, B. et al., 2004, *Astron. Astrophys.* 416, 159.
- [10] たとえば Millar, T. J., Bennett, A., & Herbst, E., 1989, *Astrophys. J.* 340, 906.
- [11] Shalabiea, O. M., & Greenberg, J. M. 1994, *Astron. Astrophys.* 290, 266.
- [12] Brown, P. D. & Charnley, S. B., 1990, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 244, 432.
- [13] Tielens, A. G. G. M., & Whittet, D. C. B., 1997, in *Molecules in Astrophysics: Probe and Processes*, ed. E. F. van Dishoeck (Dordrecht: Kluwer), 45.
- [14] Gibb, E. L., Whittet, D. C. B., Boogert, A. C. A., & Tielens, A. G. G. M., 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 151, 35.
- [15] Galloway, E. T. & Herbst, E., 1989, *Astron. Astrophys.* 211, 413.
- [16] Tielens, A. G. G. M. & Allamandola, L. J., 1987, in *Physical Processes in Interstellar Clouds*, eds. G. E. Morfill & M. Scholer (Dordrecht, Reidel) p.333.
- [17] 教科書として, たとえば” *Dust and Chemistry in Astronomy*” (1993) eds. T. J. Millar & D. A. Williams, (IOP, Bristol).
- [18] たとえば Charnley, S. B., Tielens, A. G. G. M. & Rodgers, S. D., 1997, *Astrophys. J.* 482, L203.
- [19] Roberts, H. & Millar T. J., 2000, *Astron. Astrophys.* 361, 388.
- [20] Osamura, Y., Roberts, H., & Herbst, E., 2005, *Astrophys. J.* 621, 348.
- [21] Watanabe, N., & Kouchi, A. 2002, *Astrophys. J.* 571, L173.
- [22] Watanabe, N., Shiraki, T., & Kouchi, A., 2003, *Astrophys. J.* 588, L121.
- [23] Watanabe, N., Nagaoka, A., Shiraki, T., & Kouchi, A., 2004, *Astrophys. J.* 616, 638.
- [24] Hidaka, H., Watanabe, N., Shiraki, T., Nagaoka, A., & Kouchi, A., 2004, *Astrophys. J.* 614, 1124.