

# 極低温表面反応装置で探る星間分子の生成過程

長岡明宏, 渡部直樹, 日高宏, 香内晃  
低温基礎科学部門 雪氷物性・惑星科学研究室

## 1. 分子雲における分子進化

星と星の間の宇宙空間は星間空間と呼ばれる。星間空間はその存在度が最も大きい水素原子でも、平均の数密度が 1 個/cc という非常に希薄な領域である。しかし、星間空間はどこも一様に希薄というわけではなく、密度にむらがある。水素原子が水素分子となり、その密度が  $10^3$  個/cc 程度の高密度領域は“分子雲”と呼ばれる。分子雲内に漂っているサブミクロンサイズのケイ酸塩鉱物微粒子(星間塵)が背景の星からの光を遮り可視光では真っ暗に見えるため、分子雲は“暗黒星雲”とも呼ばれる。分子雲の中心にはさらに高密度の“分子雲コア”という領域がいくつも存在している。分子雲コアは一般的に 0.3 光年 (=3 兆キロメートル=太陽・地球間距離の 2 万倍) 程度の大きさで、水素分子密度がおおよそ  $10^4$  個/cc である。この分子雲コアが自身の重力で収縮することによって、星や惑星が誕生する。

星が誕生する前の分子雲コアは 10 K という極低温であるにもかかわらず、そこでは活発な化学反応が起こっており、一酸化炭素 (CO), ホルムアルデヒド ( $H_2CO$ ), メタノール ( $CH_3OH$ ) アンモニア ( $NH_3$ ), 水 ( $H_2O$ ) などの様々な分子(星間分子)が生成される。これらの分子は複雑な有機物の前駆体であり、それらの生成過程に関する情報は分子雲の化学的進化(分子進化)を考える上で必要不可欠なものである。上記の星間分子のうち、CO は気相反応で生成されるが、それ以外の分子は気相反応では生成されにくく、極低温の星間塵表面で起こる原子結合反応(星間塵表面反応)が主要な生成機構であると考えられてきた。例えば、 $H_2CO$  と  $CH_3OH$  は 10K の塵表面に吸着した CO 分子と H 原子の結合反応 ( $CO \rightarrow HCO \rightarrow H_2CO \rightarrow CH_3O \rightarrow CH_3OH$ ) によって生成されると考えられた。ところが、この反応は極低温かつ CO 等の不純物を含むアモルファス氷表面における反応であるため、その素過程に関する情報(反応速度、反応経路等)を理論的に得ることは難しく、実験も技術的に困難であった。そのため、これらの分子が塵表面反応で効率良く生成されるかどうかは不明であった。そこでわれわれは、独自の実験システムを構築し、上記のプロセスで  $H_2CO$  および  $CH_3OH$  が効率的に生成されるかどうかを実験的に調べた[1-5]。本稿では実験システム[6]と実験結果の一部[4]を紹介する。

## 2. 実験システムおよび実験手順

われわれは LASSIE (LAboratory Setup for Surface reactions in Interstellar Environment, ラッシー) および ASURA (Apparatus for SURface Reaction in Astrophysics, アシュラ) と名付けた 2 つのほぼ同型の実験システムを立ち上げた。以下では ASURA の概要および実験手順を紹介する。

ASURA はメインチャンバー、原子線源、フーリエ変換型赤外線分光計 (FT-IR) (Spectrum One, Perkin Elmer), 四重極型質量分析計 (QMS) (M-400QA-M, Anelva) で構成されている (図 1, 2)。メインチャンバーおよび原子線源をターボ分子ポンプを用いて、それぞれ  $10^{-10}$ ,  $10^{-8}$  Torr まで排気する。メインチャンバーの中心に 4K 冷凍機 (RDK415, 住友重工) を設置し、その先端には銅製

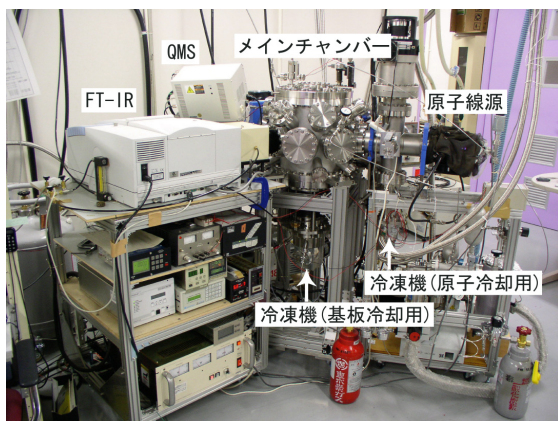


図 1. ASURA システムの外観.

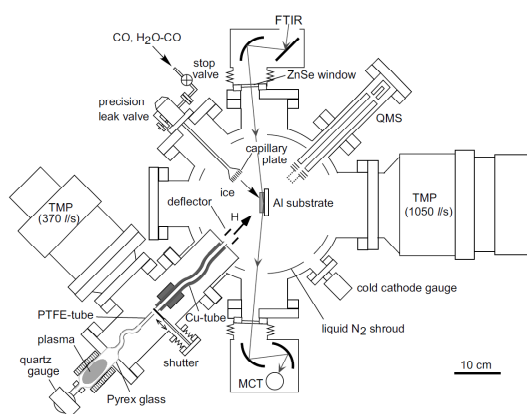


図 2. ASURA システムの上から見た断面図.

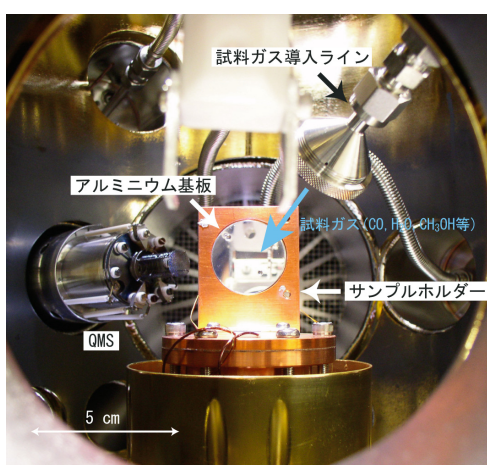


図 3. メインチャンバー内部.

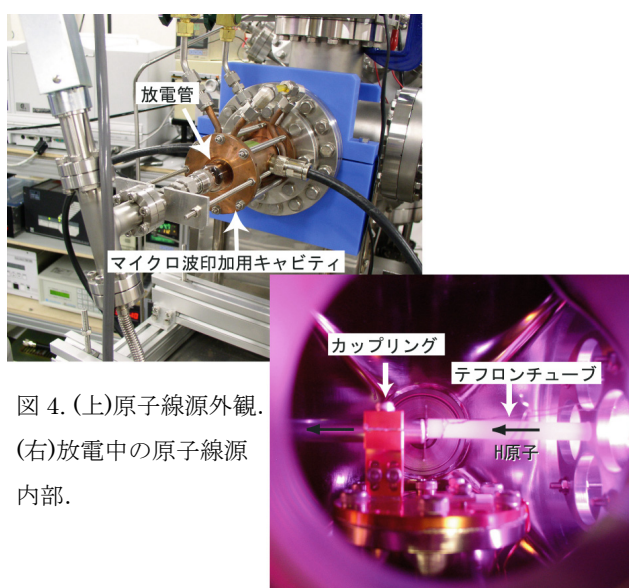


図 4. (上)原子線源外観.  
(右)放電中の原子線源内部.

のサンプルホルダー（技術部 中坪氏製作）が取り付けられている（図 2， 3）．基板の中心にはアルミニウム基板を取り付け、基板を所定の温度（8-20K）に冷却した後、試料ガスを吹きつけて試料固体を作成する．試料ガス導入ライン（中坪氏製作）の先端にはキャピラリープレート（内径  $X\mu\text{m}$  長さ 1mm のガラス毛細管を束ねたもので全体の直径は 20mm）が取り付けられており、均一な厚さの試料作成が可能である．試料作成後、FT-IR を用いて試料の赤外線吸収スペクトルを測定する．スペクトル測定後、試料に水素（H）原子を照射する．H 原子は原子線源のピレックス放電管内で  $\text{H}_2$  分子をマイクロ波（2.45GHz）放電によって解離させて生成する（マイクロ波印加用水冷キャビティ：新堀氏，中坪氏製作；図 4）．生成された H 原子は試料へ照射する前に原子冷却管を通し、分子雲内の H 原子の温度（ $<100\text{K}$ ）まで冷却する（図 4）．原子冷却管は銅製のカップリング（中坪氏製作）を介して 10K 冷凍機（V204SC5L，ダイキン）に接続し、冷却管内壁（ $\sim 50\text{K}$ ）に H 原子が複数回衝突することにより、その並進温度を 100K 以下にまで下げることができる．H 原子のフラックスは  $10^{14}\text{-}10^{15} \text{ H cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であり、一方  $10^6$  年間に分子雲内の塵に降り注ぐ H 原子の総量は  $\sim 10^{19} \text{ H cm}^{-2}$  であるので、数時間の照射実験により分子雲内で  $10^6$  年間に起こる塵表面反応を再現することができる．原子照射による試料の組成変化を赤外線吸収スペクトルのその場測定により観

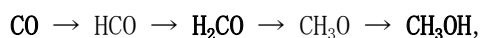
察する．図2に示すような光学系と MCT 検出器を用いることによって，0.01 分子層相当量の CO 分子などを検出することができる．

### 3. 実験結果および議論

CO 分子への H 原子付加による H<sub>2</sub>CO および CH<sub>3</sub>OH 分子生成 [4]

CO と H<sub>2</sub>O の混合氷 (8-20K) に H 原子を照射する実験を行い，H<sub>2</sub>CO さらに CH<sub>3</sub>OH が生成されるかどうかを調べた．また，H<sub>2</sub>O を含まない CO 固体に原子を照射する実験も行い，H<sub>2</sub>O が反応性に与える影響を調べた．

図5に CO と H<sub>2</sub>O の混合氷の赤外線吸収スペクトルおよび H 原子照射による組成の変化を示す．H 原子の照射により CO が減少し，H<sub>2</sub>CO さらに CH<sub>3</sub>OH の吸収バンドがスペクトルに現れた．H<sub>2</sub> を照射した場合にはこのような変化は現れなかったことから，H<sub>2</sub>CO および CH<sub>3</sub>OH は CO 分子への H 原子逐次付加反応；



によって生成されることがわかった．図6にスペクトルから得られた各分子の柱密度の変化を示す．原子照射時間の増加とともに CO が減少し，H<sub>2</sub>CO が生成され，H<sub>2</sub>CO はさらに CH<sub>3</sub>OH へと変化したことがわかる．CO の減少曲線から CO→HCO 反応の反応速度を求めると，試料温度 12K 以上では温度が上がるにつれて反応速度が小さくなることがわかった．一般に化学反応は温度が上がるにつれて反応速度が大きくなることが知られているが，この結果はその逆の傾向を示している．本実験で得られた反応速度は，①H 原子の試料表面への吸着，②原子の表面拡散，③H と CO の反応，の3つのプロセスを含む言わば“実効的な反応速度”である．CO→HCO 反応の活性化エネルギー

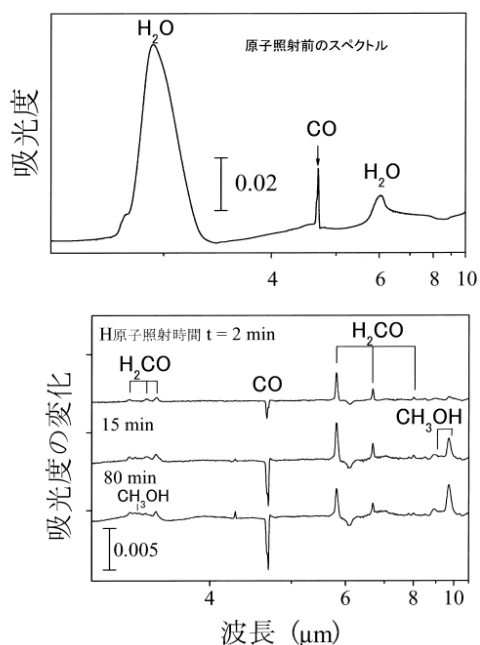


図5. (上)原子照射前の CO と H<sub>2</sub>O(1:4)の混合氷の赤外線吸収スペクトル(10K). (下) 原子照射後の初期スペクトルからの変化.

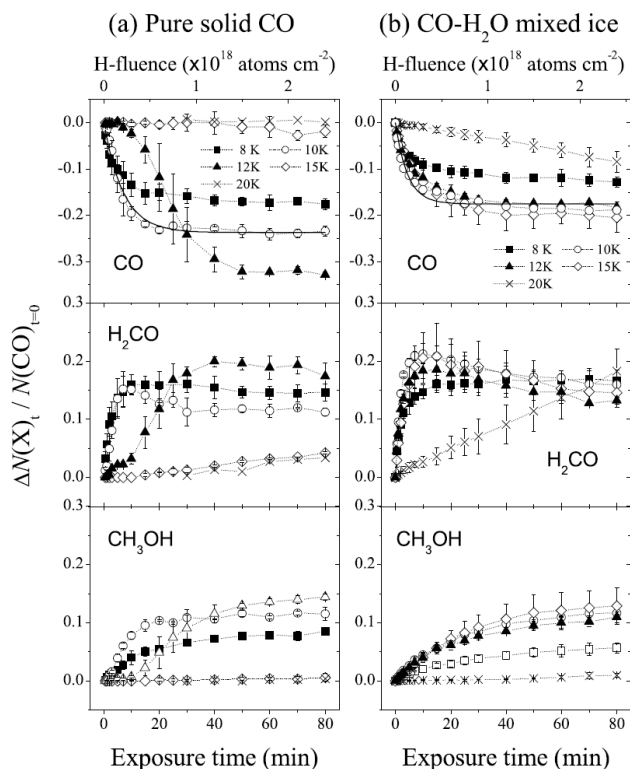


図6. 初期 CO 量で規格化した各分子の柱密度の変化(a)CO 固体. (b)CO と H<sub>2</sub>O の混合氷.

ギーはおよそ 2000K と見積もられているため、10K という極低温下では活性化エネルギーを乗り越える熱的な反応は起こりにくい。ところが、極低温下では水素原子の波動性が顕著になるため、活性化障壁をすり抜ける“トンネル反応”で CO+H の反応が進行し得る。トンネル反応自身の反応速度は 8-20K の温度範囲ではほぼ一定であると考えられるため、本実験で得られた反応速度の温度依存性は主に①の H の表面への吸着確率の温度依存性を反映しているものと考えられる。本実験の条件下では、H<sub>2</sub>分子は 20K 以上では試料表面に吸着できない。したがって、試料温度が上がるにつれて H 原子の表面への吸着確率が小さくなるため、CO と反応しにくくなり、実効的な反応速度が小さくなったと考えられる。

H<sub>2</sub>O 分子を含まない CO 固体を用いて同様な実験を行ったところ、H<sub>2</sub>O と CO の混合氷の場合よりも反応速度の温度依存性が顕著になり、12K 以上では反応速度が非常に小さくなった。混合氷では 20K でも H<sub>2</sub>CO の生成がある程度見られたが、CO のみの試料では、15K 以上で生成量が激減した。これは、混合氷の場合と同様、H 原子の吸着確率が CO 固体の温度上昇にともない低下したためである。以上の結果から、H<sub>2</sub>O 分子が H 原子の吸着確率を上げ、CO と H の反応を促進させるという“触媒”的な効果を示すことが初めてわかった。本実験から、星間塵表面に H<sub>2</sub>O 分子が多く凝縮している場合、H<sub>2</sub>CO および CH<sub>3</sub>OH の生成は表面温度 20K まで効率的に起こり得るが、H<sub>2</sub>O が少ない場合、12K 以下でのみ効率的に生成されると示唆される。

#### 4. まとめ

われわれはこれまでブラックボックスとなっていた極低温の星間塵表面反応による H<sub>2</sub>CO および CH<sub>3</sub>OH の生成過程を実験的に初めて解明した。本稿ではこれまでに得られた結果の一部を紹介したが、他にもこの実験システムにより星間分子の水素同位体分別機構などに関する多くの知見が得られている [5, 7, 8]。今後は表面反応による他の星間分子の生成過程（たとえば、2H + O → H<sub>2</sub>O, 3H + N → NH<sub>3</sub>）も調べていく予定である。

#### 謝辞

実験システムを構築するにあたり、低温研技術部の新堀邦夫、中坪俊一、藤田和之、石井弘道の各氏に大変お世話になりました。感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Watanabe, N. & Kouchi, A. 2002, *Astrophys. J.*, 571, L173.
- [2] Watanabe, N., Shiraki, T., & Kouchi, A. 2003, *Astrophys. J.*, 588, L121.
- [3] Hidaka, H., Watanabe, N., Shiraki, T., Nagaoka, A., & Kouchi, A. 2004, *Astrophys. J.*, 614, 1124.
- [4] Watanabe, N., Nagaoka, A., Shiraki, T., & Kouchi, A. 2004, *Astrophys. J.*, 616, 638.
- [5] Nagaoka, A., Watanabe, N., & Kouchi, A. 2005, *Astrophys. J.*, 624, L29.
- [6] Watanabe, N., Nagaoka, A., Hidaka, H., Shiraki, T., Chigai, T., & Kouchi, A. 2006, *Planet. Space. Sci.*, in press.
- [7] 渡部ほか, 2005, 日本惑星科学会誌「遊星人」, vol. 14, 175.
- [8] 長岡ほか, 2006, 日本惑星科学会誌「遊星人」, 印刷中.