



## -220~-120°Cで液体のようにふるまう氷を発見

~宇宙で生命材料分子や惑星が誕生するプロセスを解明するヒントに~

### 研究成果のポイント

- ・星が生まれるガス雲中の氷（星間氷）を模した氷が、-220~-120°Cで液体のようにふるまうことを発見。
- ・紫外線を照射した純水の非晶質氷も液体化し、この液体化が水を含む氷の特性であることを発見。
- ・星間氷は惑星をつくる材料。宇宙での生命材料分子の形成や、惑星誕生過程の解明への貢献を期待。

### 研究成果の概要

太陽などの恒星や地球のような惑星は、分子雲とよばれる星々の間を漂うガスの雲から誕生します。この分子雲に存在する氷（星間氷）を模した紫外線照射非晶質氷（水・メタノール・アンモニアの混合氷）が、-210~-120°Cの低温で、これまで考えられてきた固体状態ではなく、液体的にふるまうことを発見しました。また、純粋な水からなる氷も紫外線照射により-220~-130°Cで液体状になることを発見し、紫外線照射で現れる液体的なふるまいが、氷氷に特徴的な現象であることがわかりました。液体は化学反応を促進するため、星間氷の液体的なふるまいは、生命材料有機物にも関連する複雑有機物の形成を手助けしている可能性があります。また、液体状の氷の存在は塵の効率的な付着を助ける可能性もあり、惑星形成の第一歩である塵の集積過程の理解にもつながると期待されます。

### 論文発表の概要

研究論文名：Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures  
(星間氷を模擬した紫外線照射氷の低温での液体のようなふるまい)

著者：橋 省吾<sup>1</sup>，香内 晃<sup>2</sup>，羽馬哲也<sup>2</sup>，大場康弘<sup>2</sup>，ローレットピアニ<sup>1</sup>，菅原いよ<sup>1</sup>，遠藤由希子<sup>1</sup>，日高 宏<sup>2</sup>，木村勇氣<sup>2</sup>，村田憲一郎<sup>2</sup>，坂本尚義<sup>1,3</sup>，渡部直樹<sup>2</sup>（<sup>1</sup>北海道大学大学院理学研究院，<sup>2</sup>北海道大学低温科学研究所，<sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構(JAXA)）

公表雑誌：Science Advances

公表日：米国東部時間 2017 年 9 月 29 日（金）（オンライン公開）

## 研究成果の概要

### (背景)

恒星<sup>\*1</sup>やそれを取り巻く惑星系<sup>\*1</sup>は、星々の間を漂うガスの濃い領域(分子雲<sup>\*2</sup>)から誕生します。分子雲の中では、約-263°Cの低温で揮発性元素(水素, 炭素, 窒素, 酸素)が多様な分子をつくり、また氷(星間氷)としても存在しています。近年、アルマ望遠鏡<sup>\*3</sup>によって分子雲に多数の分子が新たに発見され、また分子雲やその後の星形成に伴ってつくられる原始惑星系円盤<sup>\*4</sup>の化学構造の多様性なども報告されています。

星間氷については、その表面で多様な分子が生成されていることや、紫外線の照射によって氷内の分子の結合が切れ、それらの分子を材料に複雑な有機物がつくられることが知られており、これらの複雑な有機物が、彗星や地球外物質中に発見される高分子有機物の起源と考えられています。太陽系における有機物の起源と進化の理解は、現在順調に飛行中の小惑星探査機「はやぶさ 2」<sup>\*5</sup>や OSIRIS-REx<sup>\*6</sup>の掲げる目標のひとつともなっています。星間氷は、天文観測や太陽系探査で注目されている宇宙有機分子形成の「ゆりかご」であると言えますが、これまで、有機物形成の場となる星間氷そのものの性質についてはよくわかっていませんでした。

### (研究手法)

(1) 分子雲と同じくらい低温(-263~-258°C)まで冷やした基板(金や酸化アルミニウム)の上に水、メタノール、アンモニアの混合ガスを吹きつけ、同時に紫外線を照射することで模擬星間氷を作成しました。模擬星間氷を作成した後に冷凍機を停止、温度を上げながら氷の状態を顕微鏡観察し、氷から昇華してくるガスを四重極型質量分析計で分析しました。

(2) 液体ヘリウムを用いて低温で観察できる透過型電子顕微鏡に紫外線照射機構などを設置し、電子顕微鏡内で純粋な水からなる氷の非晶質<sup>\*7</sup>膜を生成しました(-267~-265°C)。その後、この非晶質膜の温度を-128°Cまで上げ、氷を結晶化させました。結晶化させると、基板上に島状の結晶氷が現れます。この基板を-263°Cまで冷却し、紫外線照射をおこない、非晶質化させ、非晶質氷の島を作成しました(非晶質化したことは電子線回折で確認)。その後、温度を上昇させながら、もしくは-213°Cに固定して、島状氷の形状変化を電子顕微鏡で観察しました。

### (研究成果)

(1) 温度上昇時、-210~-120°Cで、沸騰する水のように氷が発泡する現象が見られました(図1)。発泡時に放出されるガスは、ガス分析により水素分子であることがわかりました。これは氷への紫外線照射によって、メタノールやアンモニアの分子が壊れ、氷中に蓄えられた水素からつくられた分子であると考えられます。紫外線照射した氷中でメタノールやアンモニアが壊れていることは、非晶質氷の赤外反射分光分析でも確認できています。発泡現象は、氷が液体状になっていることを示すものです。泡の成長速度から見積もられた氷の粘性は、固いハチミツ(約1,000パスカル秒)程度でした。

(2) 低温透過型電子顕微鏡でのその場観察<sup>\*8</sup>によって、島状の非晶質氷が変形し、基板上を広がっていく様子が観察されました(図2)。この事実も氷が液体のようにふるまうことを示しています。氷の広がりから見積もった氷の粘性は、ケイ酸成分を多く含むマグマ程度(約 $4 \times 10^7$ パスカル秒)でした。

### (今後への期待)

これまでも、分子雲を模した低温条件で紫外線を照射した氷での有機物形成実験により、高分子有機物や糖、アミノ酸といった生命関連有機物の形成などが調べられてきましたが、有機物形成の場となる星間氷そのものの性質についてはよくわかっていませんでした。本研究は、紫外線を照射した非晶質氷に液体的なふるまいが現れる可能性を示したものです。

宇宙においても紫外線の「照射総量」が液体状氷の発現条件であった場合、分子雲では、10万年から100万年の紫外線照射で液体状の氷が現れることとなります。これは分子雲の寿命を考えると起こりうることです。逆に、紫外線の「時間あたりの照射量」が発現条件であった場合には、分子雲の氷では液体状氷は現れないこととなりますが、分子雲からつくられる原始惑星系円盤が周囲の恒星から照らされるような場合に、円盤中の氷が短時間に十分な紫外線照射を受け、液体状の氷が現れる可能性があります。液体状氷の中では有機分子形成反応の促進が期待されるため、星間氷の液体的なふるまいは、宇宙での有機物の効果的な生成を手助けしている可能性があります。

また、惑星形成の第一歩は星間氷などの塵の付着成長ですが、液体状の氷は塵が衝突して合体する効率（付着効率）を上げる可能性があります。低温での紫外線照射非晶質氷の液体的なふるまいは、惑星材料の中での有機分子の合成と、惑星形成の第一歩である塵の集積過程の理解につながると期待されます。

なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究）「宇宙における分子進化：分子雲から原始惑星系へ」の支援を受けて実施されました。

### お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 准教授 橘 省吾（たちばな しょうご）

TEL : 011-706-3586 FAX : 011-706-3586 E-mail : tachi@ep.sci.hokudai.ac.jp

ホームページ : <http://www.astromolecules.org/>

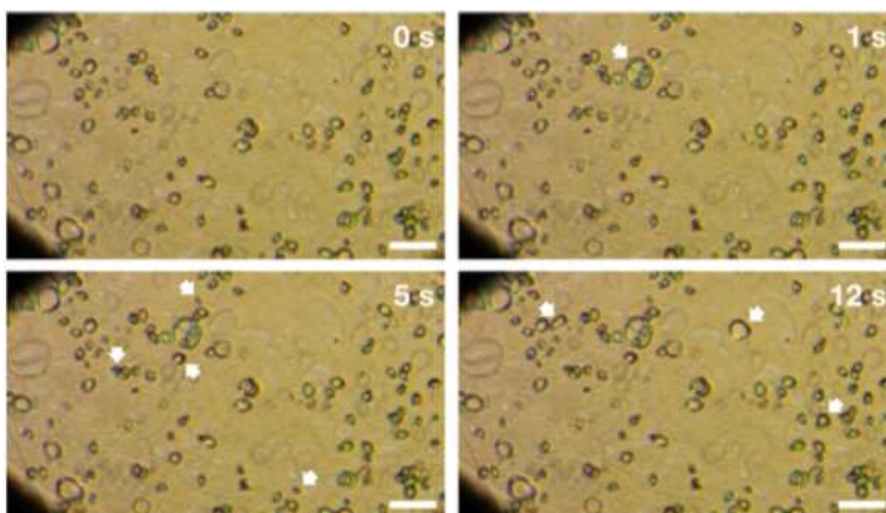


図1: 紫外線を照射した水-メタノール-アンモニア混合非晶質氷に発生する水素の泡(液体状態からの発泡)。温度は-145°C。写真右上の数字は、左上の写真からの時間経過（1, 5, 12秒後）。矢印で示されているのは新しく発生した泡。すべての写真のスケールバーは、0.2ミリメートル。

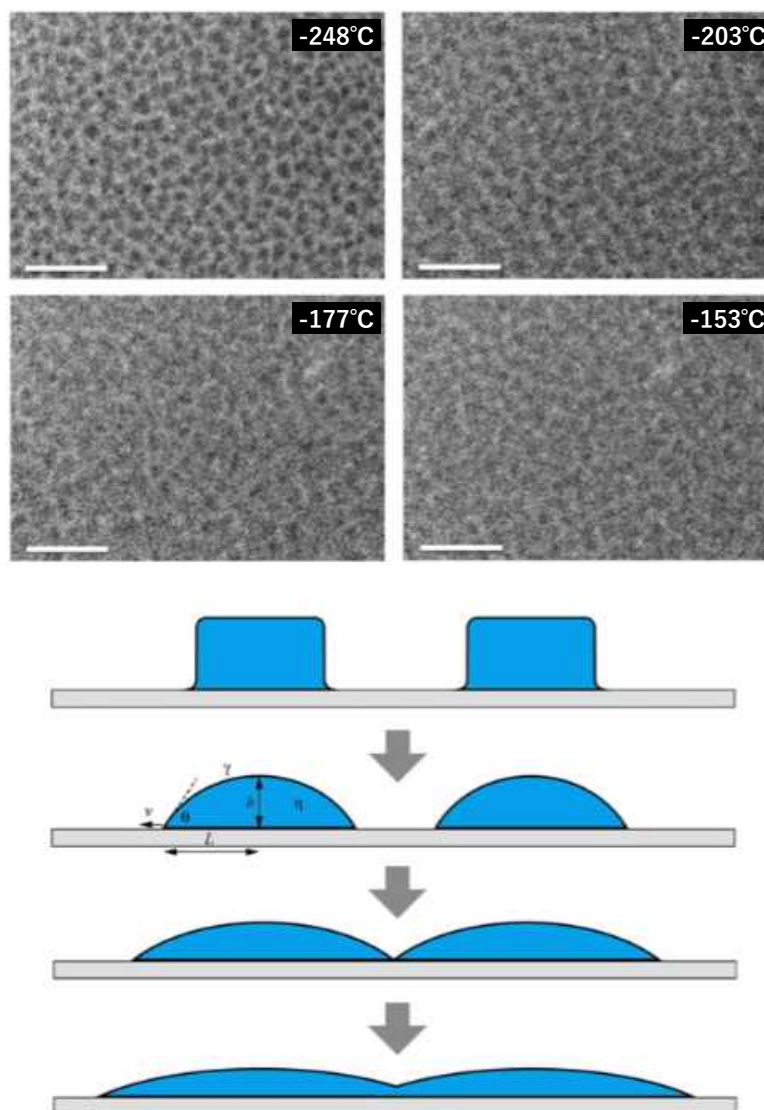


図 2: (上) 低温透過型電子顕微鏡で観察された紫外線照射非晶質水氷の変形 (温度上昇中,  $-248^{\circ}\text{C}$ ,  $-203^{\circ}\text{C}$ ,  $-177^{\circ}\text{C}$ ,  $-153^{\circ}\text{C}$  で撮影)。島状に分布する非晶質氷 (写真中で暗く見える部分) が変形し, 液体が濡れるように基板上に広がっている (像がぼやけていく)。すべての写真のスケールバーは, 0.5 マイクロメートル。(下) 非晶質氷の変形 (濡れ) の模式図。

#### 【用語解説】

- \*1 恒星, 惑星系 … 恒星とは, 太陽のように自ら光を発する星のこと。惑星系とは, 太陽系のように恒星の周囲を惑星が公転している構造全体のこと。太陽系以外の惑星系が現在, 多数発見されている。
- \*2 分子雲 … 星間ガスの密度が高い領域のこと。水素が分子として存在するため, 分子雲とよばれる。分子雲のなかでも特に密度が高い部分 (分子雲コア) が収縮を始めると, 恒星が誕生する。
- \*3 アルマ望遠鏡 … 南米チリの標高 5,000m の高地に建設され, 2011 年に観測を開始した大型電波干渉計。

- \*4 原始惑星系円盤 … 分子雲コアが収縮するにつれ、その中心には恒星が誕生するが、その際、恒星のまわりにガスや塵による円盤構造が作られる。このように、誕生直後の星のまわりにつくられる円盤を原始惑星系円盤とよび、この中で惑星が誕生する。
  
- \*5 はやぶさ 2 … 小惑星のサンプルを地球に持ち帰るための JAXA の探査機。近地球 C 型小惑星リュウグウからのサンプル回収をめざしている。2018 年にリュウグウに到着し、サンプルの地球帰還は 2020 年末と予定されている。
  
- \*6 OSIRIS-REx … 小惑星のサンプルを地球に持ち帰るための NASA の探査機。近地球 B 型小惑星ベヌーからのサンプル回収をめざしている。2018 年にベヌーに到着し、サンプルの地球帰還は 2023 年と予定されている。
  
- \*7 非晶質 … 結晶のように原子の並び方に広範囲にわたった秩序のない物質の状態のこと。アモルファスともいう。
  
- \*8 その場観察 … 観察したい対象をありのままの状態リアルタイムに観察すること。