

## 星間氷微粒子の構造・形態を解明！

～氷微粒子が関与する多くの現象の見直しを迫る成果～

### ポイント

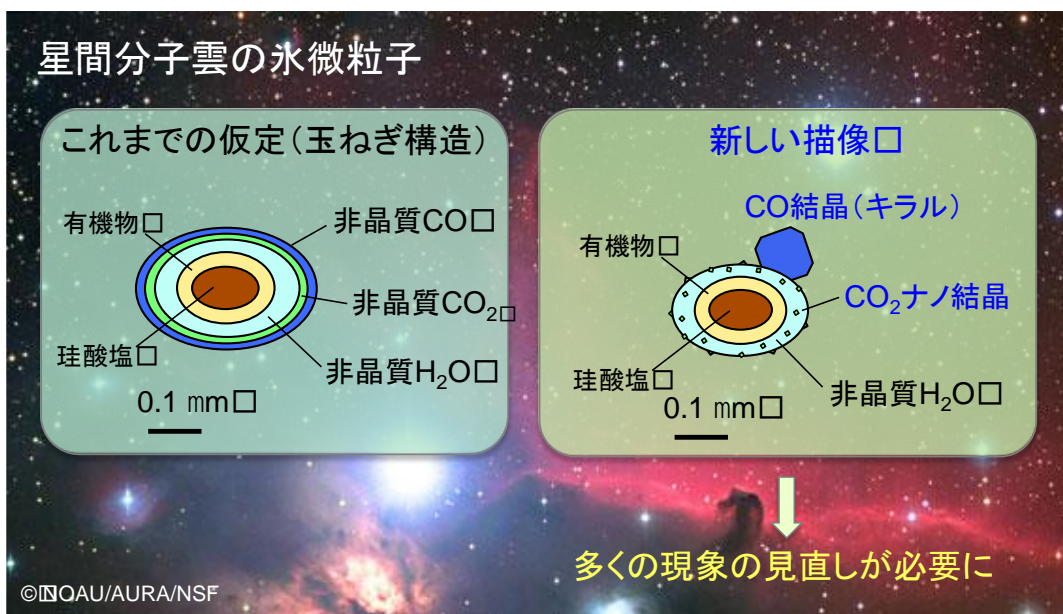
- ・星間分子雲の氷微粒子を超高真空極低温透過型電子顕微鏡内で再現し、観察することに成功。
- ・氷微粒子はCO<sub>2</sub>ナノ結晶を含む非晶質H<sub>2</sub>OにキラルなCO結晶が付着した形態であることを解明。
- ・玉ねぎ構造を仮定して構築されてきた、氷微粒子の関わる各種現象モデルの見直しを迫る成果。

### 概要

北海道大学低温科学研究所の香内 晃教授らの研究グループは、新たに開発した超高真空極低温透過型電子顕微鏡を用いた実験を行い、星間分子雲で生成されるH<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, COを含む氷微粒子が、これまで仮定されてきたような同心円状の玉ねぎ構造ではなく、CO<sub>2</sub>ナノ結晶を含む非晶質<sup>\*1</sup>H<sub>2</sub>Oにキラル<sup>\*2</sup>なCO結晶が局所的に付着した形態であることを明らかにしました。さらに、氷微粒子が原始惑星系円盤で加熱される際もこれまでの仮定と大きく異なる形態変化を示すことを見出しました。

本研究の成果は、氷微粒子上での分子生成プロセスや惑星形成論など、これまで玉ねぎ構造を仮定して議論されてきた多くの現象の見直しを迫るものです。また、氷微粒子上のキラルCO結晶の形成は、生命の起源に関わる宇宙における片方の光学異性体過剰の発現のメカニズムに繋がる発見です。

なお、本研究成果は、2021年9月6日（月）公開の *The Astrophysical Journal* 誌にオンライン掲載されました。



星間分子雲の氷微粒子の模式図。

左：これまで仮定されてきた玉ねぎ構造モデル。右：本研究で明らかにした描像。

## 【背景】

極低温(-263°C)の星間分子雲には、水(H<sub>2</sub>O)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)を含む氷微粒子があります。これらの氷はすべて非晶質で、核となる有機物に覆われた珪酸塩の周りを玉ねぎ状に(=同心円状に)取り囲んでいると考えられてきました(p.1 図)。また、原始惑星系円盤ができた際には、CO から順番に結晶化・昇華が起り、玉ねぎ構造は変化しないと考えられてきました。このような仮定のもとに、多くの天文・惑星科学的現象が議論されてきました。

研究グループは、このような仮定が正しいのかどうかを調べました。

## 【研究手法】

星間分子雲の環境(極低温, 超高真空)で種々の組成の氷を作り、それを観察することができる超高真空極低温透過型電子顕微鏡を開発しました(図1)。まず、星間分子雲でH<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, COが固体(以下、氷)になったとき、できた氷が結晶か非晶質かを定めるダイアグラムを作成しました。次に、非晶質の氷が結晶化するために必要な時間を測定しました。さらに、できた氷の構造(結晶・非晶質)と形態(薄い膜状・島状)を透過型電子顕微鏡で直接観察しました。

## 【研究成果】

氷が結晶か非晶質かを定めるダイアグラムから、星間分子雲の条件で氷ができる時、H<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>は非晶質になり、COは結晶になることがわかりました。CO<sub>2</sub>は短時間(10万年程度)で結晶化し、非晶質のH<sub>2</sub>O中にナノメートルサイズの結晶として含まれることがわかりました。非晶質のH<sub>2</sub>Oは-180°Cくらいになると結晶になります。これらの結晶の形態、特に、薄い膜状になるのか(玉ねぎモデルに該当)島状になるのかを透過型電子顕微鏡で観察しました(図2)。その結果、CO結晶とH<sub>2</sub>O結晶(氷Ic<sup>\*3</sup>)のいずれも島状になることが明らかになりました。これらの結果から、星間分子雲の氷微粒子は、CO<sub>2</sub>ナノ結晶を含む非晶質H<sub>2</sub>OにキラルなCO結晶が付着した形態であることがわかります(図3左下)。また、CO結晶は、水晶のように右手系と左手系の両方の構造をとりうるキラルな結晶であり、宇宙で最初にできたキラルな結晶であるといえます。星間分子雲の氷微粒子が原始惑星系円盤で加熱されると、図3下のように形態が変化します。

## 【今後への期待】

これまで玉ねぎ状の構造を仮定して議論されてきた多くの現象の見直しが必要になります。星間分子雲では、CO結晶の表面と非晶質H<sub>2</sub>Oの表面が同時に顔を出していますので、異なる種類の表面化学反応が同時に起こることになります。また、氷に紫外線を照射すると、極低温にもかかわらず分子が蒸発することが知られていますが、COとH<sub>2</sub>Oが同時に蒸発することになります。キラルCO結晶の表面では、片手構造が過剰なキラル分子ができるかもしれません。原始惑星系円盤では、球状の氷微粒子同士が衝突した際に、「ころがり」によって衝突エネルギーを逃して付着し、やがて惑星の卵である微惑星にまで成長すると考えられてきました。しかし、事はそのように単純ではないようです。今後の研究の進展が期待されます。

## 【研究費】

本研究は文部科学省及び日本学術振興会の科学研究費補助金、北海道大学低温科学研究所の共同研究経費の補助を受けて実施されました。関係各位にお礼申し上げます。

## 論文情報

論文名 Transmission Electron Microscopy Study of the Morphology of Ices Composed of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CO on Refractory Grains (星間微粒子上の H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO からなる氷の形態の透過型電子顕微鏡観察)

著者名 香内 晃<sup>1</sup>, 柘植雅士<sup>1</sup>, 羽馬哲也<sup>2</sup>, 大場康弘<sup>1</sup>, 奥住 聡<sup>3</sup>, 城野信一<sup>4</sup>, 百瀬宗武<sup>5</sup>, 中谷直輝<sup>6</sup>, 古家健二<sup>7</sup>, 下西 隆<sup>8</sup>, 山崎智也<sup>1</sup>, 日高 宏<sup>1</sup>, 木村勇氣<sup>1</sup>, 村田憲一郎<sup>1</sup>, 藤田和之<sup>1</sup>, 中坪俊一<sup>9</sup>, 橘 省吾<sup>10</sup>, 渡部直樹<sup>1</sup> (<sup>1</sup>北海道大学低温科学研究所, <sup>2</sup>東京大学大学院総合文化研究科附属先進科学研究機構, <sup>3</sup>東京工業大学大学院理学院, <sup>4</sup>名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>5</sup>茨城大学理学部, <sup>6</sup>東京都立大学大学院理学研究科, <sup>7</sup>国立天文台科学研究部, <sup>8</sup>新潟大学研究推進機構超域学術院, <sup>9</sup>宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所, <sup>10</sup>東京大学大学院理学系研究科)

雑誌名 The Astrophysical Journal (天文学の専門誌)

D O I 10.3847/1538-4357/ac0ae6

公表日 2021年9月6日(月)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 教授 香内 晃 (こううちあきら)

T E L 011-706-5500 F A X 011-706-7142 メール kouchi@lowtem.hokudai.ac.jp

U R L <http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/>

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

## 【参考図】



図 1. 新たに開発した氷作製・観察のための超高真空極低温透過型電子顕微鏡

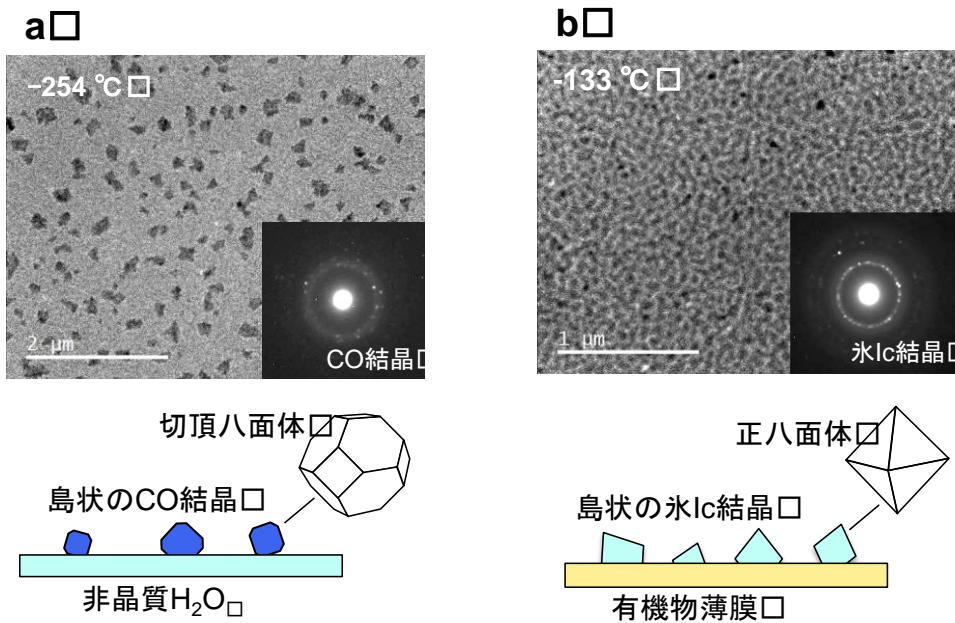


図 2. CO 結晶 (a) と H<sub>2</sub>O 結晶 (氷 Ic) (b) の透過型電子顕微鏡写真・電子回折像とその模式図。CO 結晶は-254°Cで非晶質 H<sub>2</sub>O 上に CO ガスを蒸着して作った。(a)でコントラストの強い (= 黒色部分) が CO 結晶に相当し, グレー部分は非晶質 H<sub>2</sub>O を示す。氷 Ic 結晶は, 有機物薄膜上に蒸着した非晶質の H<sub>2</sub>O を-133°Cに加熱して結晶化させた。できた結晶は薄膜状ではなく, 島状になっている (パネル (b) 中のコントラストの強い部分)。

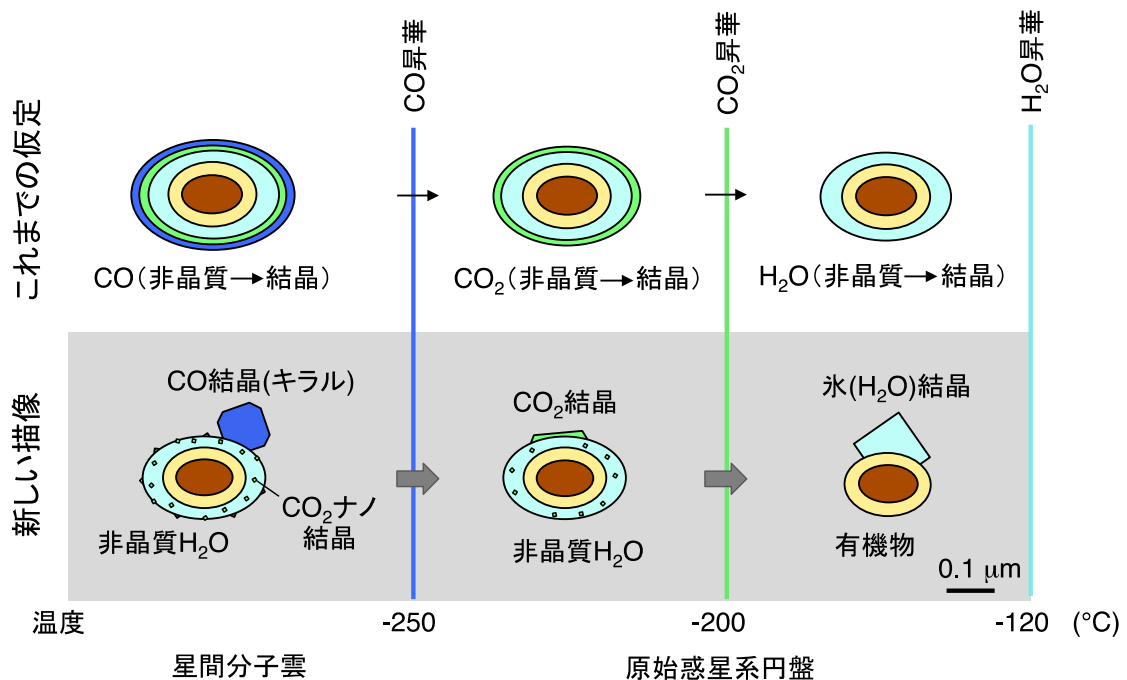


図 3. 星間分子雲でできた氷微粒子が原始惑星系円盤で加熱された時の形態の変化。微粒子の最表面にある物質の名前が書いてある。これまでは, 玉ねぎ構造が仮定され, 非晶質氷の結晶化・昇華を順番に繰り返すと考えられてきた。しかし, 本研究によってその描像は大きく異なることがわかった。

**【用語解説】**

- \*1 非晶質 … 分子配列が乱れた固体のこと。ガラスとほぼ同義。
- \*2 キラル … ある物体の鏡像が重なり合わない性質のこと。右手・左手，右水晶・左水晶がその例。
- \*3 氷 Ic … 酸素原子の配列がダイヤモンドと同じ構造の氷。-100°C以下の低温でのみ存在する。