

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82624

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14534

研究課題名(和文)極低温星間分子雲におけるH<sub>2</sub>Oガスの起源：CO-H<sub>2</sub>O氷からH<sub>2</sub>Oは脱離するか？研究課題名(英文)Origin of H<sub>2</sub>O gases in interstellar molecular clouds at low temperatures: Does H<sub>2</sub>O desorb from CO-H<sub>2</sub>O ice?

研究代表者

北島 謙生 (Kitajima, Kensei)

文部科学省科学技術・学術政策研究所・第2研究グループ・研究員

研究者番号：70845445

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：星間分子雲に存在するH<sub>2</sub>Oガスの起源を解明するうえで、分子雲内の氷微粒子(氷星間塵)表面におけるH<sub>2</sub>O脱離過程の理解は重要である。本研究では、極低温H<sub>2</sub>O氷の上層がCOの固体で覆われた系で下層のH<sub>2</sub>O分子が光脱離を誘起しうるかを調べた。COとH<sub>2</sub>Oからなる二層構造の氷(CO-H<sub>2</sub>O氷)を実験的に作成し、光刺激脱離法と共鳴多光子イオン化法(PSD-REMPI法)で脱離したH<sub>2</sub>Oを検出した。被覆するCO固体の厚さを変えながらH<sub>2</sub>Oのシグナルをモニターしたところ、H<sub>2</sub>Oのシグナルは徐々に減少するが、数10分子層のCOを被せてもなおH<sub>2</sub>Oが検出されることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星間塵を覆う極低温のCO固体はポーラスな構造を持ちうるため、その下層にH<sub>2</sub>Oが存在する場合、空隙を通じてこれら分子が脱離する可能性がある。本研究では、上層が数10分子層のCOで覆われたCO-H<sub>2</sub>Oの二層氷においてH<sub>2</sub>Oが光脱離しうる結果が示され、分子雲中におけるH<sub>2</sub>Oガス起源の解明に資する知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：To understand the origin of H<sub>2</sub>O gas in interstellar molecular clouds, it is important to understand the H<sub>2</sub>O desorption process on the surface of ice particles (icy dust grains) in molecular clouds. In this study, we investigated whether H<sub>2</sub>O molecules from low-temperature H<sub>2</sub>O ice the top of which is covered with CO solid can be desorbed by photodesorption. We experimentally prepared a bilayer of CO and H<sub>2</sub>O ice (CO-H<sub>2</sub>O ice) and detected the desorbed H<sub>2</sub>O using photo-stimulated desorption and resonant multiphoton ionization (PSD-REMPI) techniques. The H<sub>2</sub>O signal was monitored by changing the thickness of the CO solid coverage, and it was found that the H<sub>2</sub>O signal decreased gradually, but H<sub>2</sub>O was still detected even when the ice was covered with several tens of monolayers of CO.

研究分野：宇宙惑星科学

キーワード：氷 光脱離 水分子 星間分子雲 星間塵表面

1. 研究開始当初の背景

水分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) の生成起源として、星間分子雲を浮遊する星間塵の表面における水素と酸素の反応が有力視されている。星間塵は10 K程度の極低温であるため、生成した $\text{H}_2\text{O}$ は氷として星間塵表面に留まるはずであるが[1], 天文観測により気相中でも十分量の $\text{H}_2\text{O}$ 分子が存在することが分かっている[2]。報告者らのグループでは、気相中の $\text{H}_2\text{O}$ の起源として、それまで理論的に提案されていた紫外光による $\text{H}_2\text{O}$ の光脱離を実験的に実証し[3], その結果、熱脱離が起こり得ない極低温環境における $\text{H}_2\text{O}$ ガスの供給メカニズムとして光脱離が一般的に受け入れられつつある。しかし、分子雲の中でも特にガス密度が高い領域では、 $\text{H}_2\text{O}$ 氷の表面がCOにより覆われた二層構造の氷 ( $\text{CO-H}_2\text{O}$ 氷) の存在が確認されている [4]。したがって、 $\text{H}_2\text{O}$ ガスの起源を明らかにする上で、図1に示すように、 $\text{H}_2\text{O}$ 氷が露出せずCO氷に覆われた環境でも下層の $\text{H}_2\text{O}$ が光脱離を生じ得るかを示す必要がある。

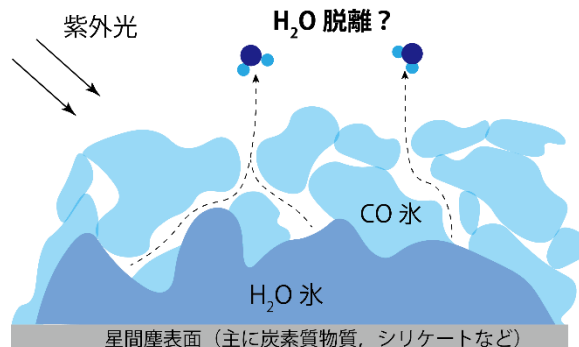


図1 本研究の概念図. 星間塵表面には多層のCOで覆われた $\text{H}_2\text{O}$ 氷が存在する. CO氷で覆われていても、下層の $\text{H}_2\text{O}$ が光脱離を生じうるかを検証する。

2. 研究の目的

本研究では氷星間塵を模擬した  $\text{CO-H}_2\text{O}$  の二層氷を用い、下層の  $\text{H}_2\text{O}$  氷から光脱離が起こり得るかを明らかにすることを目的とする。先行研究によれば[5], 表面の氷が数分子層以上に厚くなると、下層からの分子の脱離量はゼロに近づくと思われ。しかし、CO固体のように多数の空隙を多く含む氷の場合には、CO固体の空隙を通じて、下地に存在する  $\text{H}_2\text{O}$  氷から  $\text{H}_2\text{O}$  が脱離する可能性があり、下層  $\text{H}_2\text{O}$  分子の脱離の有無を調べる必要がある。そこで  $\text{H}_2\text{O}$  氷上層にCO固体を被覆したときの  $\text{H}_2\text{O}$  の脱離量を実験的に検証する。

3. 研究の方法

図2 (a)に示すように、10ケルビンの金属基板上に試料ガスを暴露して、COと $\text{H}_2\text{O}$ からなる二層構造の氷( $\text{CO-H}_2\text{O}$ 氷)を実験的に作成し、光刺激脱離法と共鳴多光子イオン化法を組み合わせた高感度分子検出法(PSD-REMPI法)を用いて、下層 $\text{H}_2\text{O}$ の光脱離が起こりうるかを調べる。このとき、 $\text{H}_2\text{O}$ の脱離には532nmのYAGレーザーを用い、 $\text{CO-H}_2\text{O}$ 氷に照射する。532nmレーザーの場合、主に金属基板で吸収され、生じたフォノンの伝搬により分子が氷表面から脱離する。そこで上層を被覆するCO固体の厚さを変化させ、下層の $\text{H}_2\text{O}$ の脱離量をモニターする。さらに、脱離した $\text{H}_2\text{O}$ 分子は上層のCOと衝突を繰り返しながら脱離するため、エネルギー損失が増大することが予想される。そこで図2(b)に示すように、REMPI用レーザーと基板の位置の制御を行い、 $\text{H}_2\text{O}$ の並進運動エネルギーを測定する。

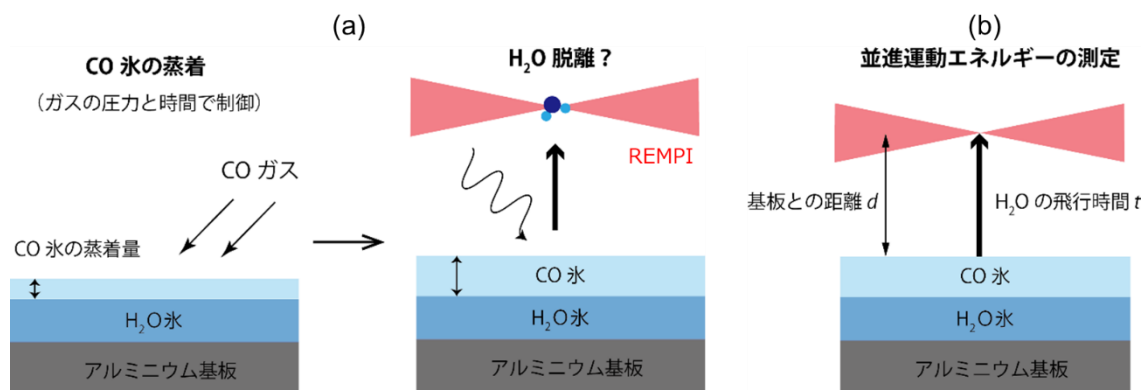


図2 (a)  $\text{CO-H}_2\text{O}$ 氷から光脱離した $\text{H}_2\text{O}$ の検出手法. COの蒸着量を変化させたときにパルスレーザーにより下層の $\text{H}_2\text{O}$ が脱離し得るかを調べる. (b) 光脱離した $\text{H}_2\text{O}$ の並進運動エネルギーの測定方法. REMPI用レーザーと基板との距離 $d$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ の飛行時間を $t$ とする. これらのパラメーターはREMPI用レーザーの入射位置や、その入射タイミングによって制御できる. 以上のパラメーターの関数として、 $\text{H}_2\text{O}$ の並進運動エネルギーを算出する。

#### 4. 研究成果

本研究ではまず、PSD-REMPI 法による単体の H<sub>2</sub>O 氷での H<sub>2</sub>O 検出を行い、その上に CO を徐々に蒸着しながら H<sub>2</sub>O 脱離の有無を調べた。10 K の基板に H<sub>2</sub>O ガスを暴露して氷薄膜を作成し、532nm レーザーの照射により H<sub>2</sub>O を脱離させた。得られた REMPI スペクトルから、氷表面から脱離した H<sub>2</sub>O を検出できていることを確認した。その後、生成した H<sub>2</sub>O 氷の上に CO ガスを暴露し、CO-H<sub>2</sub>O の二層氷を作成した。このとき FT-IR を用いて被覆した CO 固体の厚さを推定したところ、少なくとも数分子層の CO を蒸着した限りでは、H<sub>2</sub>O の脱離量にほとんど変化が見られなかった。

そこで、H<sub>2</sub>O 氷上に蒸着する CO 固体の厚さを数分子層以上に変化させながら、下層 H<sub>2</sub>O 分子の収量をモニターしたところ、脱離する H<sub>2</sub>O 収量が CO 固体の厚さとともに指数関数的に減少する様子が観測された。その結果、被覆する CO 固体の厚さが数 10 分子層であってもなお H<sub>2</sub>O が検出されることが分かった。この結果は、基板上に H<sub>2</sub>O 氷を作成し数 10 分子層の CO 固体を蒸着した後、PSD-REMPI を行った場合でも同様であった。つまり、PSD レーザーの CO-H<sub>2</sub>O 氷に及ぼす物理的影響は小さく、被覆する CO 固体の厚さにより H<sub>2</sub>O の脱離量が決まると考えられる。一方、脱離した H<sub>2</sub>O の並進運動エネルギーを測定したところ、CO を被覆した場合と被覆しなかった場合のいずれも 300 K 程度と求められ、両者に顕著な差異は見られなかった。つまり、H<sub>2</sub>O が下層から脱離する際には CO 固体と衝突しながら脱離するのでなく、CO の被覆が少ない隙間を通じて真空中へと脱離することが示唆された。

近年の CO 固体の構造に関する研究が示すように、CO 固体はポーラスな構造を形成しうることから[6]、これらの空隙から H<sub>2</sub>O が脱離したと解釈される。つまり、CO 固体と H<sub>2</sub>O 氷は均一な二層構造ではなく、真空環境から H<sub>2</sub>O 氷が直接的に見える構造を成すものと考えられる。なお、上記で用いた 532nm レーザーの代わりに、193nm の紫外レーザーを CO-H<sub>2</sub>S 固体に照射し、下層から脱離する H 原子を観察した場合でも CO-H<sub>2</sub>O 氷と同様に指数関数的な減少傾向が観測されている。これらの測定結果から、上層が数 10 分子層の CO で覆われた二層の氷であっても下層を構成する H<sub>2</sub>O 分子が光脱離しうることが解り、分子雲中に存在する H<sub>2</sub>O ガス起源の解明に資する結果が示された。

#### <引用文献>

- [1] Miyauchi *et al.*, Chem. Phys. Lett. 456, 27 (2008).
- [2] Dominik *et al.*, Astrophys. J., 635, L85 (2005).
- [3] Hama *et al.*, J. Chem. Phys., 132, 164508 (2010).
- [4] Pontoppidan *et al.*, Astrophys. J., 678, 1005 (2008).
- [5] Andersson *et al.*, Astron. Astrophys., 491, 907 (2008).
- [6] Kouchi *et al.*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 505, 1530 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kouchi Akira, Kimura Yuki, Kitajima Kensei, Katsuno Hiroyasu, Hidaka Hiroshi, Oba Yasuhiro, Tsuge Masashi, Yamazaki Tomoya, Fujita Kazuyuki, Hama Tetsuya, Takahashi Yukihiro, Nakatsubo Shunichi, Watanabe Naoki	4. 巻 9
2. 論文標題 UV-Induced Formation of Ice XI Observed Using an Ultra-High Vacuum Cryogenic Transmission Electron Microscope and its Implications for Planetary Science	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fchem.2021.799851	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kitajima Kensei, Nakai Yoichi, Sameera W. M. C., Tsuge Masashi, Miyazaki Ayane, Hidaka Hiroshi, Kouchi Akira, Watanabe Naoki	4. 巻 12
2. 論文標題 Delivery of Electrons by Proton-Hole Transfer in Ice at 10 K: Role of Surface OH Radicals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 704 ~ 710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c03345	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoki Watanabe, Kensei Kitajima, W.M.C. Sameera, Masashi Tsuge, Hiroshi Hidaka, Yoichi Nakai
2. 発表標題 Negative Charge Delivery in Ice at 10 K: the Role of Surface OH Radicals
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensei Kitajima, Yoichi Nakai, W.M.C. Sameera, Ayane Miyazaki, Masashi Tsuge, Hiroshi Hidaka, Akira Kouchi, Naoki Watanabe
2. 発表標題 A new electrochemical property of ice: negative charge transport triggered by reactions of surface OH radicals with electrons
3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北島謙生, 中井陽一, 柘植雅士, 日高宏, 香内晃, 渡部直樹
2. 発表標題 極低温の水とNH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S固体の界面における負電荷移動機構
3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北島謙生
2. 発表標題 イオンビームによる液体の放射線物理化学に関する研究
3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kensei Kitajima, Yoichi Nakai, Masashi Tsuge, Ayane Miyazaki, Hiroshi Hidaka, Akira Kouchi, Naoki Watanabe
2. 発表標題 Verification of proton-hole transfer in ice at 10 K via detection of surface OH radicals
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北島謙生, 中井陽一, W.M.C. Sameera, 宮崎彩音, 柘植雅士, 日高宏, 香内晃, 渡部直樹
2. 発表標題 極低温アモルファス氷への紫外光・電子線同時照射による負の水透過電流生成
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------