

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24224012

研究課題名(和文) 星間塵表面での分子進化と新しい同位体分別機構

研究課題名(英文) Mechanisms of formation and isotope fractionation of interstellar molecules on cosmic dust

研究代表者

渡部 直樹 (WATANABE, NAOKI)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：50271531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 99,800,000円

研究成果の概要(和文)：星間分子雲における分子生成・進化・同位体分別(化学進化)を明らかにすることは、太陽系の物質起源を研究するうえで重要である。本研究では、化学進化の鍵を握る、極低温下における氷星間塵表面でのトンネル反応による分子生成・重水素濃集プロセスを定量的な実験で調べた。氷表面での水素原子拡散係数と拡散メカニズム、水分子などの基本分子や始原的有機分子の生成・重水素濃集の反応経路やと化学進化に果たす役割を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Formation and isotope fractionation of molecules in molecular clouds are very important as the initial stage of chemical evolution toward planetary system. The aim of this project was to clarify the role of physicochemical processes on cosmic ice dust at very low temperatures which are keys in chemical evolution. We have experimentally demonstrated mechanisms of elementary processes for molecular formation and deuteration on ice at around 10 K. We determined diffusion-rates of hydrogen (deuterium) atoms on amorphous ice and formation (and deuteration) pathways and those reaction rates for water and some primordial organic molecules.

研究分野：星間化学物理，原子分子物理

キーワード：地球外物質化学 星間塵表面反応 重水素濃集

### 1. 研究開始当初の背景

10 K 程度の極低温の星間分子雲では、原子は化学反応を経て時間とともに複雑な分子へと変化していく (化学進化)。星間分子雲における分子生成・進化・同位体分別を明らかにすることは、太陽系に存在する物質の起源を理解するために重要である。従来、化学進化の研究は気相反応を中心におこなわれてきたが、近年になって、宇宙に豊富に存在する分子 ( $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) や有機分子は気相反応では生成が困難で、宇宙に浮かぶ固体微粒子 (星間塵) 表面での反応が分子生成の鍵を握ると考えられるようになった。

我々は、分子雲中の星間塵表面で生じる、光やイオンを必要としない極低温特有の原子トンネル反応が、 $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  や有機分子の生成にきわめて重要な役割を果たしていることを、世界に先駆けて実験的に明らかにした。また、最近では星間塵表面トンネル反応が同位体分別にも非常に有効であることを見いだした。これらの研究に触発され、星間塵表面反応に関する研究の気運は世界的に高まっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、基本的な星間分子種 ( $H_2$  や  $H_2O$  等) および有機分子の生成・同位体分別に関わる、極低温星間塵物質 (アモルファス氷) 表面におけるトンネル反応の素過程を明らかにし、これまでの成果とあわせて、分子雲での氷星間塵表面反応による化学進化を解明すること。

### 3. 研究の方法

本研究で行った実験およびその方法は大きく分けて以下の3種類である。

(1) 反応実験 (分子生成および重水素濃集) 超高真空槽中に設置した金属基板を 10K 程度の極低温に冷却し、そこにアモルファス氷や反応物を蒸着し、試料固体を作製する。水素 (H) 原子もしくは重水素 (D) 原子をマイクロ波放電によって生成し、100K 程度に冷却後、試料固体に照射する。H,D 原子トンネル反応によって変化する試料表面の分子組成を赤外吸収分光法で観測する。組成の時間変化率から反応速度定数に関する情報を得る。

#### (2) 原子拡散測定

10K 程度に冷却された金属基板上にアモルファス氷を作製し、そこへ H(D) 原子を一定量蒸着する。蒸着した原子数密度は表面拡散・再結合 ( $H_2$  分子生成) によって時間とともに減少する。表面原子数密度を、レーザー刺激脱離 (PSD) 法と共鳴多光子イオン化 (REMPI) 法を組み合わせた新規の手法によりモニターすることにより拡散速度を得る。また、拡散

速度の同位体依存性により、拡散メカニズム (熱的拡散、トンネル拡散) が明らかになる。

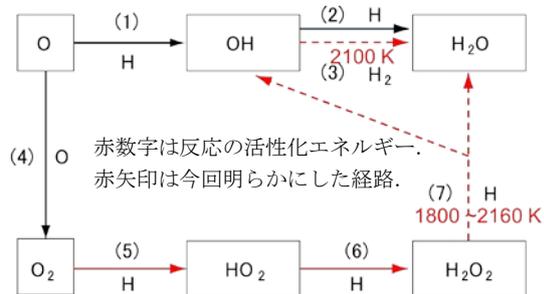
#### (3) 分子の核スピン転換測定

実験手法は「原子拡散測定」とほぼ同様である。核スピン状態オルソ/パラ比が 3/1 の  $H_2$  ガスを低温アモルファス氷上に蒸着し、一定時間経過後に PSD+REMPI 法で  $H_2$  を脱離させ回転状態を分析しオルソ/パラ比を測定する。オルソ/パラ比の時間変化から核スピン転換速度を導出し、核スピン転換速度の水温度依存性から転換速度を律速するメカニズムに迫る。

### 4. 研究成果

#### (1) 反応実験

##### ①水分子生成



星間塵表面において考えられる水分子生成過程を上図に示す。もっとも単純な反応 (1)+(2) はラジカル反応なので、活性化エネルギーは無く、H 原子が星間塵表面で拡散し、O 原子と出会うことができれば問題なく進む反応である。上記拡散の研究により、H 原子拡散が 10K においても可能であることが分かり、反応 (1)+(2) の有効性が確認された。本研究は、高い活性化エネルギーを持つ水分子生成反応：反応 (3) および (7) を実験的に調べ、活性化エネルギーの高いこれら反応が、10K 表面でもトンネル反応により効率よく進むことを初めて明らかにした。本研究により、星間塵表面反応で水分子を生成する経路はひとつではなく、トンネル反応を含む図中すべての反応経路が有効であることが初めて実証された。また、本研究では、これまで容易でなかった高純度 (90% 以上) の  $H_2O_2$  固体を作製する手法を新たに開発しており、実験結果とともに化学・工学分野への貢献も大きい。

##### ②重水素濃集プロセス

水分子の表面反応による重水素化プロセスを実験ですべて検証した。水分子に関しては H-D 置換反応は起こらず、重水素化反応はすべて水分子生成時の付加反応に由来することが明らかになった。

左の表は分子雲で原子状 D/H 比がモデルで実現可能な  $10^{-2}$  としたときに、本研究で明らかになった星間塵表面重水素化プロセスの

みで得られる重水素体の割合である。分子雲における重水素濃集度は上限値しか分かっていないが、これらの値は彗星や地球の水分子の重水素濃集度よりかなり大きく、気相における濃集プロセス無しでも大きな濃集度が得られることを示す初めての結果である(論文業績 3, 一般講演 3)。

本研究では水分子の他に  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ , Glycine の重水素化反応を調べた。これらの結果と、以前に得られている  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  の結果をまとめると、分子は以下の3つのケースに分類できることが分かった。

(A) H-D 置換反応(分子内 H 原子が D に置換)は起こるが D-H 置換(前者の逆過程)は起こらない。

(B) H-D 置換反応も D-H 置換反応も同程度の反応速度で起こる。

(C) 置換反応は一切起こらず、重水素体は D 原子の付加反応のみで生じる。

(A) に該当する分子は濃集度 10% 超の高度な濃集が星間塵表面反応で可能と思われる。以下 (B)  $\rightarrow$  (C) と、期待される濃集度は下がることが示唆された。(A) にはメタノール、ホルムアルデヒド、グリシン、(B) にはエタノール、メチルアミン ( $\text{CH}_3\text{NH}_2$ )、残る分子は (C) に該当した。本研究では反応速度的なデータが得られただけでなく、官能基により置換反応速度が大きく異なることも分かった。メチルアミンの実験では、メチル基の H-D 置換反応がアミノ基に比べ 10 倍速く、より重水素濃集が起こりやすいことが明らかになった。こうした知見は、今後の天文観測の指針になるだけでなく、基礎化学的にも全く新しい発見である。

## (2) H 原子拡散

極低温 (~10K) アモルファス氷表面における H, D 原子それぞれの拡散定数を求めることに初めて成功した。これらの原子は 10K においても速やかに星間塵表面を拡散し、他の分子との水素化反応や  $\text{H}_2$  分子生成に関与することが明らかになった。星間塵表面での  $\text{H}_2$  分子生成速度は表面拡散が律速する。本研究で得られた拡散定数は、分子雲における  $\text{H}_2$  分子存在度(生成速度)を定量的に説明することができ、天文学的な価値が極めて高い。また、拡散定数の水素同位体依存性は非常に小さく、実験で観測された拡散がトンネル拡散ではなく、熱的拡散であることが示された。アモルファス氷表面の H, D 原子拡散の活性化エネルギーは広い分布を持つことがわかったが、代表的な値はそれぞれ 22 (H 原子)、23 (D 原子) meV であった。

同様の研究を多結晶氷表面について行ったところ、アモルファス氷表面とは全く異なる振る舞いが見られた。H 原子の拡散はアモルファス氷に比べて格段に速いことが分か

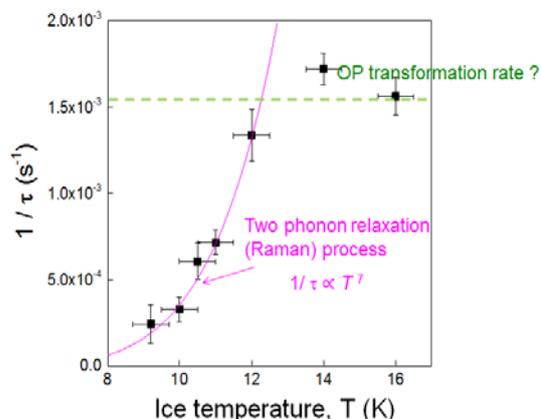
った。D 原子について調べたところ、拡散に大きな同位体効果が見られた。実験結果を定量的に分析することにより、多結晶氷表面では、短距離拡散はトンネル拡散が支配し、長距離になると熱的な拡散に移ることが明らかになった。多結晶氷が小さな単結晶の集まりからなることから、浅い準周期的なポテンシャルサイトからなる単結晶表面内ではトンネル拡散が顕著になり、境界面やステップなど不規則で高いバリアを超える長距離拡散になると熱的拡散が律速することを示唆している。

上記の研究は、地球惑星科学、天文学的に重要であるだけでなく、水素の化学物理素過程として化学、物理の分野でも注目されており、各分野の学会に解説の執筆や講演を依頼された。

## (3) アモルファス氷における $\text{H}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ の核スピンの振る舞い

### ① $\text{H}_2$ 分子

星間塵表面で生成した  $\text{H}_2$  分子が、どのような核スピン状態で脱離するかを調べることは、 $\text{H}_2$  分子の天文観測結果を解釈する上で重要なだけでなく、分子雲の気相における重水素濃集の初期過程を理解するためにも不可欠である。従来、気相における核スピン状態の決定機構はよく研究されており、核スピン状態は容易には変化しないことが知られているが、一方で、 $\text{H}_2$  分子生成の母胎である星間塵上で核スピン状態がどのように振る舞うかは全く分かっていなかった。2010年に発表した我々の研究で、 $\text{H}_2$  の核スピン状態は氷星間塵上で容易に変化することが分かったが、本研究ではさらに実験を進め、核スピン状態変化の時間スケールやアモルファス氷表面温度依存性を詳細に調べた。その結果、核スピン状態の変化は 10 分程度で速やかに進み、温度が 15K 程度でもっとも変化速度が大きくなることが明らかになった(下図)。



氷表面からの水素分子の脱離温度は 20K 程度である。したがって  $\text{H}_2$  分子が星間塵表面で経験できる温度領域は、わずかに 10~20K の範囲である。この狭い温度領域で核スピン状態の変化速度が急激に変化することは大

きな驚きである。実際の星間塵では、表面温度と表面滞在時間により気相脱離時の核スピン状態は大きく異なることが示唆される。観測された核スピン状態時間変化率の温度依存性は、スピン状態の変化がオルソ→パラへ転換する際に生じるエネルギーの散逸過程で支配されていることを意味し、とりわけ2つのフォノンが関与する過程が重要であることを示している。

## ②H<sub>2</sub>O 分子

最近の天文観測で星間 H<sub>2</sub>O 分子の核スピン状態 (オルソ, パラ) が分かるようになってきた。これまで、「星間 H<sub>2</sub>O 分子の核スピン状態は分子生成時から変化せず、核スピンのオルソ/パラ比を観測することで分子生成時の環境を探ることができる」と考えられてきた。我々は、星間塵を想定した温度 10K のアモルファス氷を様々な方法 (H<sub>2</sub>O ガス蒸着法、水素-酸素表面反応生成法) により作製し、PSD+REMPI 法により、そこから H<sub>2</sub>O 分子を脱離させ、核スピン状態を観測した。実験の結果、氷作製法、放置時間によらずオルソ/パラ比は統計重率比 3 になることがわかった。すなわち、上記従来の考え方は間違っており、天文観測から H<sub>2</sub>O の化学進化を読み解く際には、新しい解釈が必要であることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

すべて査読あり

1. H. Kobayashi, H. Hidaka, T. Lamberts, T. Hama, H. Kawakita, J. Kæstner, N. Watanabe (2017) Hydrogenation and Deuteration of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> on Cold Grains: A Clue to the Formation Mechanism of C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> with Astronomical Interest", *Astrophys. J. Lett.*, 837, 155, doi:10.3847/1538-4357/837/2/155

2. R. Escribano, E. Artacho, A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, and N. Watanabe (2017) Simulations and Spectra of Water in CO Matrices, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 19, 7280-7287, doi:10.1039/C6CP08248C

3. Y. Oba, Y. Takano, N. Watanabe, A. Kouchi (2016) Deuterium Fractionation during Amino Acid Formation by Photolysis of Interstellar Ice Analogs Containing Deuterated Methanol, *Astrophys. J. Lett.*, 827, L18(7 pp), doi:10.3847/2041-8205/827/1/L18

4. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi (2016)

Negative catalytic effect of water on the reactivity of hydrogen abstraction from the C-H bond of dimethyl ether by deuterium atoms through tunneling at low temperatures, *Chem. Phys. Lett.*, 662, 14-18, doi:10.3847/2041-8205/827/1/L18

5. Y. Oba, K. Osaka, T. Chigai, A. Kouchi, N. Watanabe (2016) Hydrogen deuterium substitution in solid ethanol by surface reactions at low temperatures, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 462, 689-695, doi:10.1093/mnras/stw1714

6. H. Ueta, N. Watanabe, T. Hama, A. Kouchi (2016) Surface Temperature Dependence of Hydrogen Ortho-Para Conversion on Amorphous Solid Water, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 253201, doi:

7. T. Hama, A. Kouchi, and N. Watanabe (2016) Statistical ortho-to-para ratio of water desorbed from ice at 10 kelvin, *Science*, 351, 65-67, doi:10.1126/science.aad4026

8. K. Kuwahata, T. Hama, A. Kouchi, and N. Watanabe (2015) Signature of Quantum-Tunneling Diffusion of Hydrogen Atoms on Water Ice at 10 K, *Phys. Rev. Lett.*, 115, 133201(5pp), doi:10.1103/PhysRevLett.115.133201

9. Y. Oba, N. Watanabe, Y. Osamura, and A. Kouchi (2015) Chiral glycine formation on cold interstellar grains by quantum tunneling hydrogen-deuterium substitution reactions, *Chem. Phys. Lett.*, 634, 53-59, doi:10.1016/j.cplett.2015.05.070

10. T. Hama, H. Ueta, A. Kouchi, and N. Watanabe (2015) Quantum Tunneling Observed without its Characteristic Large Kinetic Isotope Effects, *PNAS*, 112, 7438-7443, doi:10.1016/j.cplett.2015.05.070

11. T. Hama, H. Ueta, A. Kouchi, N. Watanabe, and H. Tachikawa (2014) Quantum Tunneling Hydrogenation of Solid Benzene and Its Control via Surface Structure, *J. Phys. Chem. Lett.*, 5, 21,3843-3848, doi: 10.1021/jz5019948

12. Y. Oba, K. Osaka, N. Watanabe, T. Chigai, A. Kouchi (2014) Reaction kinetics and isotope effect of water formation by the surface reaction of solid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with H atoms

at low temperatures, *Faraday Discussion*, 168, 185-204, doi: 10.1039/C3FD00112A

13. Y. Oba, T. Chigai, Y. Osamura, N. Watanabe, A. Kouchi (2014) Hydrogen isotopic substitution of solid methylamine through atomic surface reactions at low temperatures: A potential contribution to the D/H ratio of methylamine in molecular clouds, *Meteoritics & Planetary Science*, 49,1,117-132, doi: 10.1111/maps.12096

14. T. Hama, N. Watanabe (2013) Surface Processes on Interstellar Amorphous Solid Water: Adsorption, Diffusion, Tunneling, Reaction, and Nuclear-Spin Conversion, *Chem. Rev.*, 113, 12, 8783-8839, doi: 10.1021/cr4000978

15. N. Watanabe, T. Hama, A. Kouchi (2013) Nuclear spin temperatures of hydrogen and water molecules on amorphous solid water, *AIP Conference Proceedings*, 1543, 308-316, doi: 10.1063/1.4812625

16. T. Hama, K. Kuwahata, N. Watanabe, A. Kouchi, Y. Kimura, T. Chigai, V. Pirronello (2012) The mechanism of surface diffusion of H and D atoms on amorphous solid water: Existence of various potential sites, *Astrophys. J.*, 757, 185 (12pp), doi:10.1088/0004-637X/757/2/185

17. 渡部 直樹, 香内 晃, 羽馬 哲也, 日高 宏, 大場 康弘, 千貝 健 (2012) 星間分子雲での微粒子表面における水素の化学物理過程, *表面科学*, 33(12), 662-668, doi: 10.1380/jsssj.33.662

[学会発表] (計 24 件)

1. N. Watanabe (2017) Hydrogen Physicochemical Processes on Ice Surface at around 10 K: Diffusion, Recombination and Nuclear Spin Conversion, 34th Symposium on Plasma Processing(SPP34) The 29th Symposium on Plasma Science for Materials(SPSM29), 1月16日, 北海道大学 (北海道, 札幌市) プレナリー講演

2. T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe (2016) Laboratory studies of hydride ices: physical and chemical processes, The Hydride toolbox, 15 Dec. (Paris, France)

3. N. Watanabe (2016) Strong temperature dependence of ortho-to-para conversion of H<sub>2</sub> on amorphous solid water at around 10 K, European Conference on Laboratory Astrophysics (ECLA2016) Gas on the rocks,

24 Nov. (Madrid, Spain)

4. T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe (2016) Infrared spectroscopy as a tool for studying interstellar dust chemistry, SciX 2016 Conference, 19 Sep. (Minneapolis, USA) invited

5. N. Watanabe (2016) Experimental approach to ortho-to-para ratio of hydrogen and water molecules desorbed from ice at around 10 K, Workshop on Astrochemistry in Star and Planet Formation, 16 Feb., Riken (Saitama, Wako)

6. N. Watanabe (2015) Experimental approach to hydrogen chemistry on grain surfaces: molecular formation, deuterium enrichment, diffusion, and nuclear spin conversion, Center for Astrochemical Studies Seminar, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, 12 Oct. (Munich, Germany)

7. N. Watanabe (2015) Deuterium chemistry and nuclear spin conversion on grain surfaces: implication to deuterium enrichment, From clouds to protoplanetary disk: the astrochemical link, 6 Oct. (Berlin, Germany) invited

8. N. Watanabe (2015) Grain Surface Chemistry: What Happens Without Photons and Ions, A symposium to honor Lou Allamandola's Contributions to the Molecular Universe, 15 Sep. (Annapolis, USA) invited

9. N. Watanabe, Y. Oba, T. Hama, H. Hidaka, A. Kouchi (2015) Role of tunneling in the formation and deuterium enrichment of molecules on dust grains, Astrobiology Science Conference 2015, 19 Jun. (Illinois, USA) invited

10. N. Watanabe (2015) Experimental Approach to Chemistry of Cosmic Dust, COST Action Our Astrochemical History CM1401, 25 May (Prague, The Czech Republic) invited

11. N. Watanabe (2015) Experimental Approach to the Formation of H<sub>2</sub> Molecules on Dust, Workshop on the Interstellar Hydrogen 2015, 27 Mar., Conference room in Nadya Park (Aichi, Nagoya) invited

12. N. Watanabe (2015) Experimental approach to nonenergetic physicochemical processes on icy grains, Icy Grain

Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites, 6 March, Tokyo Institute of Technology (Tokyo, Meguro) invited

13. N. Watanabe, T. Hama, K. Kuwahata, A. Kouchi (2015) What Controls the Diffusion Mechanism of Hydrogen Atom on Ice?, Second Workshop on Experimental Laboratory Astrophysics, 24 Feb. (Hawaii, USA) invited

14. 渡部 直樹 (2014) ダスト表面における水素分子形成過程: 実験からのアプローチ, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 9 月 11 日, 山形大学, (山形県, 山形市) 招待

15. N. Watanabe (2014) Nuclear spin temperatures of hydrogen and water molecules formed and trapped on ice, Nuclear Spin Effects in Astrochemistry 2014, 9 Jun. (Gothenburg, Sweden) invited

16. 日高 宏, 杉本 宜昭, 中坪 俊一, 渡部直樹, 香内 晃 (2014) 極低温原子間力顕微鏡によるアモルファス氷の表面構造観察 Observation of surface structure of amorphous solid water by atomic force microscope at low temperatures, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 5 月 1 日, パシフィコ横浜 (神奈川県, 横浜市) 招待

17. N. Watanabe, K. Kuwahata, T. Hama, A. Kouchi (2014) Diffusion of hydrogen atom on amorphous solid water: Thermal or tunneling? 47th ACS National Meeting & Exposition, 16 Mar. (Dallas, USA) invited

18. 渡部直樹 (2014) 低温氷星間塵表面における水素の化学, 自然科学研究機構「自然科学における階層と全体」シンポジウム, 2 月 20 日, 桑山ビル 8 階会議場 (愛知県, 名古屋市) 招待

19. T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe (2013) The Ortho-Para Ratio of H<sub>2</sub>O Desorbed from Ice: Implications for Cometary Coma, Goldschmidt 2013, 27 Aug., (Florence, Italy) invited

20. Y. Oba (2013) Formation of H<sub>2</sub>O Ice on Cold Interstellar Grains: Reaction Kinetics and the Structure of Ice, Workshop on Ice and Water Films, 7 May, (Seoul, South Korea) Invited

21. N. Watanabe, T. Hama, H. Hidaka, Y. Kimura, A. Kouchi, Y. Oba, V. Pirronello

(2013) Physics and chemistry of hydrogen on cosmic dust: diffusion, spin temperatures, and water formation, First Workshop on Experimental Laboratory Astrophysics, 27 Feb., (Hawaii, USA) invited

22. N. Watanabe (2013) Physicochemical Processes of Hydrogen on Ice: A Key for Chemical Evolution in Space, 2nd International Symposium on Hierarchy and Holism, 20 Feb., National Center of Sciences (Tokyo, Chiyoda) invited

23. H. Hidaka (2013) Tunneling chemical reactions on low-temperature interstellar grain surfaces, One-day symposium on E-ring based molecular science, 7 Feb., Meeting Room, International House, Tokyo Metropolitan University (Tokyo, Hachioji) invited

24. N. Watanabe (2012) Surface diffusion mechanism of atomic hydrogen and the ortho/para ratio of nascent H<sub>2</sub> molecule on amorphous solid water at around 10 K, Dynamical Phenomena at Surfaces: The Role of Complexity, 30 Nov., (Leiden, Netherlands) invited

[その他]

ホームページ等

<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡部 直樹 (WATANABE, Naoki)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号: 50271531

### (2) 研究分担者

日高 宏 (HIDAKA, Hiroshi)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号: 00400010

大場 康弘 (OBA, Yasuhiro)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号: 00507535

羽馬 哲也 (HAMA, Tetsuya)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号: 20579172

### (3) 連携研究者

香内 晃 (KOUCHI, Akira)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号: 60161866