

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月8日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540502

研究課題名（和文）極低温星間塵表面反応による水分子の重水素濃集

研究課題名（英文）Deuterium fractionation of water molecule via grain surface reactions at very low temperatures

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

研究成果の概要（和文）：星間分子雲における水分子生成およびその重水素濃集過程の鍵を握る星間塵表面反応を実験的に調べ、以下のような知見を得た。①OH ラジカルと H<sub>2</sub> 分子のトンネル表面反応により、分子雲環境でも H<sub>2</sub>O が生成し得ることを初めて明らかにした。②上記反応の同位体効果を調べたところ、重水素濃集には水酸基が D 化 (OD) していることが本質的で、その後 D 化した水素分子 (HD, D<sub>2</sub>) が反応したとしても、それ以上の重水素濃集は起こりにくいことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Water molecule formation and its deuterium fractionation via surface tunneling reactions were investigated experimentally, relevant to chemical evolution in a molecular cloud. We found that H<sub>2</sub>O molecule is produced by tunneling reaction, OH + H<sub>2</sub>, at very low temperature surfaces and that, from the isotope effect on the above reaction, the formation of OD is essential for deuterium fractionation of water rather than HD or D<sub>2</sub> formation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：地球外物質化学、重水素濃集

## 1. 研究開始当初の背景

水分子は地球・太陽系から分子雲に遍在する始原的な分子で、有機分子を含む様々な分子の生成・進化に関与する極めて重要な分子種である。地球や太陽系始原天体である彗星

に存在する水分子は、宇宙存在度による水素重水素(D/H)比 $\sim 10^{-5}$ に比べ、10倍程度重水素濃集している。一方、分子雲における水分子の重水素濃集度は上限値ではあるが D/H $\sim 10^{-2}$  が観測により得られている。この濃集度の違いは、分子雲で高度に重水素濃集した水

分子が、分子雲→原始太陽系星雲→太陽系に至る進化過程で、徐々に濃集度を減少させていったと考えたと理解することができる。しかし、分子雲における高度な重水素濃集がどのように実現したかについては未解明である。研究代表者らは最近の研究で、水分子が星間塵表面における酸素分子 (O<sub>2</sub>)-水素原子 (H) 表面トンネル反応で効率よく生成しうることを明らかにした。そのことから、同様に、星間塵表面反応が水分子の重水素濃集においても一定の役割を果たすものと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は水分子の重水素濃集に対する星間塵表面反応の寄与を実験により定量的に評価することである。

## 3. 研究の方法

極低温 (~10K) に冷却した基板上に水分子生成に繋がるラジカル (OH とその同位体) および水素分子 (およびその同位体 D<sub>2</sub>, HD) を蒸着し、水分子 (H<sub>2</sub>O, HDO, D<sub>2</sub>) の生成速度を反射型赤外吸収分光計を用いて測定する。

## 4. 研究成果

OD ラジカルと H<sub>2</sub> ガス, OH ラジカルと D<sub>2</sub> ガスをそれぞれ 10 K の低温基板に蒸着したところ、前者では HDO 固体の生成が確認されたが、後者では生成されなかった。この結果は OD+H<sub>2</sub>→HDO+H が進む一方で OH+D<sub>2</sub>→HDO+D が起こらないことを示している。両反応には活性化エネルギーに大きな違いはないため、反応の有無は反応の実効質量 (effective mass) の違いがもたらすトンネル反応の同位体効果によるものと考えられる。また、OH+HD, OD+HD の実験を行ったところ、前者の反応では H<sub>2</sub>O が、後者では HDO が主生成物であった。これは、いずれの反応でも HD 分子から H が引き抜かれたことを意味し、反応系の実効質量の小さい方が起こりやすいというトンネル反応の特性から理解できる。これらの結果を総合すると、水酸基と水素分子から水分子を生成する場合、重水素濃集には水酸基が D 化 (つまり OD) していることが本質的で、その後 D 化した水素分子 (HD, D<sub>2</sub>) が反応したとしても、それ以上の重水素濃集はきわめて起こりにくいということが分かった。本研究では、過酸化水素 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) とその重水素体と水素原子と反応による生成プロセスを十分に調べることはできなかった。

## 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 21 件)

下記掲載はすべて査読有り

1. Y. Oba, N. Watanabe, T. Hama, K. Kuwahata, H. Hidaka, A. Kouchi (2012) "Water Formation Through a Quantum Tunneling Surface Reaction", OH + H<sub>2</sub>, at 10 K, *Astrophys.J.*, **749**,67(12pp),DOI:10.1088/0004-637X/749/1/67
2. H. Hidaka, M. Watanabe, A. Kouchi and N. Watanabe (2011) "FTIR study of ammonia formation via the successive hydrogenation of N atoms trapped in a solid N<sub>2</sub> matrix at low temperatures", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 35, 15798-15802, DOI: 10.1039/c1cp20645a
3. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi, T. Hama and V. Pirronello (2011) "Experimental studies of surface reactions among OH radicals that yield H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> at 40-60 K", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 35, 15792-15797, DOI: 10.1039/c1cp20596j
4. T. Kinugawa, A. Yabushita, M. Kawasaki, T. Hama and N. Watanabe (2011) "Surface abundance change in vacuum ultraviolet photodissociation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O mixture ices", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 35, 15785-15791, DOI: 10.1039/C1CP20595A
5. T. Hama, N. Watanabe, A. Kouchi, M. Yokoyama (2011) "Spin Temperature of Water Molecules Desorbed from the Surfaces of Amorphous Solid Water, Vapor-deposited and Produced from Photolysis of a CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> Solid Mixture", *Astrophys. J. Lett.*, **738**, 1, L15(5pp),DOI:10.1088/2041-8205/738/1/L15
6. T. Hama, M. Yokoyama, A. Yabushita, M. Kawasaki, N. Watanabe (2011) "Translational and rotational energy measurements of desorbed water molecules in their vibrational ground state following 157 nm irradiation of amorphous solid water", *Nucl. Instr. Methods B*, **269**,9,1011-1015,DOI:10.1016/j.nimb.2010.12.031
7. 大場康弘, 渡部直樹, 香内晃, 羽馬哲也, ピロネロ バレリオ(2011) 「星間分子雲における二酸化炭素生成に関する実験的研究」, *地球化学*, **45**, 213-226
8. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi, T. Hama, V. Pirronello (2010) "Formation of Carbonic Acid (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) by Surface Reactions of Non-energetic OH Radicals with CO Molecules at Low Temperatures",

- Astrophys.J.,**722**,1598-1606,DOI:10.1088/0004-637X/722/2/1598
9. N. Watanabe, Y. Kimura, A. Kouchi, T. Chigai, T. Hama, V. Pirronello (2010) "Direct measurements of hydrogen atom diffusion and the spin temperature of nascent H<sub>2</sub> molecule on amorphous solid water", *Astrophys.J.Lett.*,**714**,L233,DOI:10.1088/2041-8205/714/2/L233
  10. T. Hama, M. Yokoyama, A. Yabushita, M. Kawasaki, S. Andersson, C.M. Western, M.N.R. Ashfold, R.N. Dixon, N. Watanabe (2010)"A desorption mechanism of water following vacuum-ultraviolet irradiation on amorphous solid water at 90 K", *J. Chem. Phys.*, **132**, 164508,DOI:10.1063/1.3386577
  11. E.-S. Moon, H. Kang, Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi (2010) "Direct evidence for ammonium ion formation in ice through ultraviolet-induced acid-base reaction of NH<sub>3</sub> with H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>", *Astrophys. J.*, **713**, 906, DOI: 10.1088/0004-637X/713/2/906
  12. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi, T. Hama, V. Pirronello (2010) "Experimental study of CO<sub>2</sub> formation by surface reactions of non-energetic OH radicals with CO molecules", *Astrophys. J. Lett.*, **712**, L174, DOI:10.1088/2041-8205/712/2/L174
  13. N. Watanabe, A. Kouchi, H. Hidaka, Y. Oba (2009) "Nonenergetic reactions between atomic hydrogen and molecules on interstellar grain surfaces", *J.Phys.:Conf.Ser.*,**194**,012044, DOI:10.1088/1742-6596/194/1/012044
  14. H.Hidaka,M.Watanabe,A.Kouchi,N.Watanabe (2009)"Hydrogen isotope exchange and H(D) atom addition reaction of solid formaldehyde on amorphous solid water at low temperatures" *J.Phys.:Conf.Ser.*,**194**,132024, DOI:10.1088/1742-6596/194/13/132024
  15. T. Hama, A. Yabushita, M. Yokoyama, M. Kawasaki, N.Watanabe (2009) "Formation mechanisms of oxygen atoms in the O(<sup>3</sup>P<sub>1</sub>) state from the 157 nm photoirradiation of amorphous water ice at 90 K", *J. Chem. Phys.* **131**, 114511,DOI:10.1063/1.3194797
  16. T. Hama, A. Yabushita, M. Yokoyama, M. Kawasaki,N.Watanabe(2009)"Formation mechanisms of oxygen atoms in the O(<sup>1</sup>D<sub>2</sub>) state from the 157 nm photoirradiation of amorphous water ice at 90 K", *J. Chem. Phys.* **131**, 114510,DOI:10.1063/1.3194797
  17. H. Hidaka, M.Watanabe, A. Kouchi & N. Watanabe (2009) "Reaction routes in the CO-H<sub>2</sub>CO-d<sub>n</sub>-CH<sub>3</sub>OH-d<sub>m</sub> system clarified from H(D) exposure of solid formaldehyde at low temperatures", *Astrophys. J.* **702**, 291, DOI:10.1088/0004-637X/702/1/291
  18. T. Hama, A. Yabushita, M.Yokoyama, M. Kawasaki, N.Watanabe (2009) "Formation of compact amorphous H<sub>2</sub>O ice by codeposition of hydrogen atoms with oxygen molecules on grain surfaces", *Astrophys. J.* **701**, 464, DOI:10.1088/0004-637X/701/1/464
  19. A.Yabushita, T. Hama, M.Yokoyama, M. Kawasaki, S. Andersson, R. N. Dixon, M. N. R. Ashfold, N. Watanabe (2009) "Translational and Rotational Energy Measurements of Photodesorbed Water Molecules in Their Vibrational Ground State from Amorphous Solid Water", *Astrophys.J.Lett.*,**699**,L80-L83,DOI:10.1088/0004-637X/699/2/L80
  20. 大場康弘, 宮内直弥, 千貝健, 日高宏, 渡部直樹, 香内晃 (2009) 「極低温星間塵表面原子反応による水分子生成」, *地球化学*, **43**, 117-131
  21. 香内晃, 渡部直樹 (2009) 「宇宙における水分子生成過程の解明に至るまで」, *雪氷*, **71**, 395-401
- [学会発表] (計 67 件)
1. 桑畑和明, 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃 「アモルファス氷表面で生成した水素分子のオルソ・パラ比とその時間変化」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学 (西宮市)
  2. 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃 「共鳴多光子イオン化法による氷から熱脱離した水分子の原子核スピン温度測定実験」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学 (西宮市)
  3. Y. Oba, N. Watanabe, T. Hama, A. Kouchi and V. Pirronello "Low-temperature Surface Reactions of Non-energetic OH Radicals of Astrophysical Interest", 18th Symposium on Atomic, Cluster, and Surface Physics (SASP2012),2012.1.25, The Conference Center de l'Alpe d'Huez (France)
  4. N. Watanabe "Hydrogen Chemistry on cold surfaces", 18th Symposium on Atomic, Cluster, and Surface Physics (SASP2012), 2012.1.24, The Conference Center de l'Alpe d'Huez (France), invited
  5. T. Hama, N. Watanabe and A. Kouchi "Spin temperature measurement of thermally desorbed water molecules from water ice prepared at 8K", 18th Symposium on Atomic, Cluster, and Surface Physics (SASP2012),

- 2012.1.23, The Conference Center de l'Alpe d'Huez (France)
6. N. Watanabe "Nonenergetic processes on grain surfaces", Mini-Workshop on Gas-Grain Interactions in Interstellar Clouds, 2011.10.28, Univ. of Tokyo (Tokyo)
  7. 中井陽一, 日高宏, 渡部直樹, 小島隆夫 「イオン打ち込み型移動管を用いた水和クラスターイオンの生成実験の現状」, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学 (富山市)
  8. 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃, V. Pirronello 「重水素原子の低温氷表面における拡散」, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月23日, 富山大学 (富山市)
  9. 渡部直樹 「星間物質表面での水素反応」, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月22日, 富山大学 (富山市) (招待)
  10. 大場康弘, 渡部直樹, 香内晃 「低温表面反応による水分子生成とその同位体効果」, 日本地球化学会年会, 2011年9月16日, 北海道大学 (札幌市)
  11. 日高宏, 香内晃, 渡部直樹 「低温の星間塵表面における窒素原子への水素原子付加反応によるアンモニア生成」, 日本地球化学会年会, 2011年9月16日, 北海道大学 (札幌市)
  12. 大場康弘, 渡部直樹, 香内晃 「星間塵表面におけるメチルアミンの水素同位体交換反応」, 第29回有機地球化学シンポジウム, 2011年9月1日, 九州大学 (福岡市)
  13. 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃, 木村勇氣, V. Pirronello 「アモルファス氷表面における水素原子の拡散メカニズム」, 第9回水素量子アトミクス研究会, 2011年8月23日, 東北大学 (仙台市)
  14. N. Watanabe, H. Hidaka, A. Kouchi "Hydrogen tunneling reaction and its isotope effect at a low temperature ice surface: Origin of deuterium enrichments in interstellar formaldehyde and methanol", International Conference on the Research of Chemistry and Physics of Matrix Isolated Species (MATRIX2011), 2011.7.11, University of British Columbia (Canada), invited
  15. T. Hama, N. Watanabe, A. Kouchi, M. Yokoyama, "REMPI measurements of spin temperatures of desorbed water molecules from vapor-deposited and photo-produced amorphous solid water at 8 K", 第27回化学反応討論会, 2011年6月9日, 東京工業大学 (東京都目黒区)
  16. Y. Oba, N. Miyauchi, H. Hidaka, T. Chigai, N. Watanabe, A. Kouchi, "Sequential hydrogenation of molecular oxygen on cold surfaces: reaction kinetics and structure of formed H<sub>2</sub>O ice", IAU Symposium 280: The Molecular Universe, 2011.6.2, University of Castilla-La Mancha (Spain)
  17. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi, T. Hama, V. Pirronello, "Neutral radical-molecule reactions CO + OH on cold interstellar ices", IAU Symposium 280: The Molecular Universe, 2011.6.2, University of Castilla-La Mancha (Spain)
  18. H. Hidaka, M. Watanabe, A. Kouchi, N. Watanabe, "FTIR measurements of ammonia formation by the successive H-atom addition to N-atom in an N<sub>2</sub> matrix at 10K", IAU Symposium 280: The Molecular Universe, 2011.6.2, University of Castilla-La Mancha (Spain)
  19. T. Hama, N. Watanabe, Y. Kimura, A. Kouchi, T. Chigai, V. Pirronello "Diffusion mechanism of hydrogen and deuterium atoms and the spin temperature of molecules on the surface of water ice at 8 - 15 K", IAU Symposium 280: The Molecular Universe, 2011.6.2, University of Castilla-La Mancha (Spain)
  20. 羽馬哲也, 横山正明, 薮下彰啓, 川崎昌博, 渡部直樹 「アモルファス氷への真空紫外光照射による水分子脱離メカニズム」, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月26日, 幕張メッセ (千葉県)
  21. 羽馬哲也, 渡部直樹, 木村 勇氣, 香内晃, 千貝健 「水素および重水素原子の氷表面拡散と水素分子生成」, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月23日, 幕張メッセ (千葉県)
  22. 大場康弘, 渡部直樹, 香内晃, 羽馬哲也, ピロネロ バレリオ 「高密度分子雲内部におけるラジカル分子表面反応による二酸化炭素生成」, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月23日, 幕張メッセ (千葉県)
  23. 日高宏, 香内晃, 渡部直樹 「水素-窒素原子低温表面反応によるアンモニア分子生成」, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年3月28日, 新潟大学 (新潟市)
  24. 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃, 木村勇氣, V. Pirronello 「低温氷表面に吸着した水素原子の拡散メカニズム」, 日本物理学会第66回年次大会, 2011年3月28日, 新潟大学 (新潟市)
  25. 日高宏, 香内晃, 渡部直樹 「水素-窒素原子低温表面反応によるアンモニア分子生

- 成」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 28 日, 新潟大学 (新潟市)
26. 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃, 木村勇氣, V. Pirronello 「低温氷表面に吸着した水素原子の拡散メカニズム」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 28 日, 新潟大学 (新潟市)
27. 渡部直樹 「氷表面反応による星間分子の重水素濃集」 2010 年度宇宙空間原子分子過程研究会---星間分子から量子縮退気体まで, 2011 年 2 月 16 日, JAXA (神奈川県)
28. 渡部直樹 「イオン誘起微粒子核生成: 素過程からのアプローチ」, 豊田理化学研究所特定課題研究・低温科学研究所共同利用「核生成の学理と応用」低温科学研究所共同利用「その場観察と理論による氷結晶成長カイネティクスの解明」合同研究会, 2011 年 2 月 4 日, 北海道大学 (札幌市)
29. T. Hama, M. Yokoyama, A. Kouchi N. Watanabe “Spectroscopic approach to physicochemical processes on ices at low temperatures”, Pacificchem 2010, 2010.12.18, Sheraton Waikiki (U.S.A)
30. H. Hidaka, M. Watanabe, A. Kouchi, N. Watanabe “Ammonia formation by the successive hydrogenation of N atom trapped in solid N<sub>2</sub> at below 30K”, Pacificchem 2010, 2010.12.18, Sheraton Waikiki (U.S.A)
31. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi, T. Hama, V. Pirronello “Experimental studies on surface reactions of CO molecules with cold OH radicals at 10-40 K”, Pacificchem 2010, 2010.12.18, Sheraton Waikiki (U.S.A)
32. 渡部直樹 「低温氷表面での原子分子過程と化学進化」, 理研シンポジウム: 第 1 回 広がる原子分子物理研究: 宇宙空間における原子分子進化過程, 2010 年 12 月 3 日, (独)理化学研究所 (埼玉県)
33. H. Hidaka, M. Watanabe, A. Kouchi, and N. Watanabe “Ammonia formation by the successive hydrogenation of N atom trapped solid N<sub>2</sub> at low temperature”, ISM2010, 2010.9.13-15, Hokkaido Univ.(Sapporo)
34. N. Watanabe, T. Hama, A. Kouchi, T. Chigai, V. Pirronello, Y. Kimura “Laboratory measurements of atomic hydrogen diffusion and the ortho-para conversion of nascent H<sub>2</sub> molecules on amorphous solid water”, ISM2010, 2010.9.13-15, Hokkaido Univ. (Sapporo)
35. Y. Oba, N. Miyauchi, T. Chigai, H. Hidaka, N. Watanabe, A. Kouchi “Structure of H<sub>2</sub>O ice formed by surface reactions of oxygen molecules with hydrogen atoms at low temperatures”, PCI2010, 2010.9.10, Hokkaido Univ. (Sapporo)
36. V. Pirronello, T. Hama, H. Hidaka, A. Kouchi, Y. Oba, N. Watanabe “Observational evidences of interstellar icy mantles on dust grains and laboratory investigations of physico-chemical processes”, PCI2010, 2010.9.9, Hokkaido Univ. (Sapporo)
37. N. Watanabe, H. Hidaka, A. Kouchi, A. Nagaoka “Effect of amorphous solid water on surface tunneling reactions of atomic hydrogen”, PCI2010, 2010.9.9, Hokkaido Univ. (Sapporo)
38. H. Hidaka, N. Miyauchi, A. Kouchi, N. Watanabe “Morphology effects in hydrogenation of CO at low temperature ice surfaces”, PCI2010, 2010.9.9, Hokkaido Univ. (Sapporo)
39. T. Hama, A. Yabushita, M. Kawasaki, N. Watanabe “Photodesorptions of OH radical and oxygen atom following vacuum ultraviolet photodissociation of water ice”, PCI2010, 2010.9.8, Hokkaido Univ. (Sapporo)
40. T. Hama, A. Yabushita, M. Kawasaki, N. Watanabe “Desorption mechanisms of photoproducts following 157 nm irradiation of water ice”, 27th European Conference on Surface Science (ECOSS 27), 2010.8.30, Martini plaza (The Netherlands)
41. N. Watanabe, H. Hidaka, T. Hama, A. Kouchi, T. Chigai, Y. Kimura “Ice surface chemistry of hydrogen atom in space”, 27th European Conference on Surface Science (ECOSS 27), 2010.8.30, Martini plaza (The Netherlands), invited
42. 羽馬哲也, 木村勇氣, 香内晃, 渡部直樹 「水素原子のアモルファス氷表面拡散と水素分子生成」, 原子衝突研究協会第 35 回年会, 2010 年 8 月 11 日, 奈良女子大学 (奈良市)
43. N. Watanabe “Surface processes of atomic hydrogen at very low temperatures relevant to astrochemistry”, 24th International Conference on Atomic Collisions in Solids, ICACS- 24, 2010.7.22, Jagiellonian University (Poland), invited
44. N. Watanabe, H. Hidaka, A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura “Chemistry of atomic hydrogen on interstellar ice grains at very low temperatures” Western Pacific Geophysics Meeting: Laboratory Simulations for Astrophysics, 2010.6.23, Taipei

- International Convention Center (Taiwan), invited
45. A. Kouchi, Y. Oba, N. Miyauchi, H. Hidaka, T. Chigai, N. Watanabe "Formation of Compact Amorphous Water Ice by Surface Atomic Reactions at Low Temperatures", Western Pacific Geophysics Meeting, 2010.6.23, Taipei International Convention Center (Taiwan)
46. Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi, T. Hama, V. Pirronello "Surface Reactions of CO Molecules with OH Radicals at Low Temperatures", Western Pacific Geophysics Meeting, 2010.6.23, Taipei International Convention Center (Taiwan)
47. M. Yokoyama, T. Hama, A. Yabushita, M. Kawasaki, S. Andersson, C.M. Western, M. N. R. Ashfold, R. N. Dixon, N. Watanabe "A desorption mechanism of water following vacuum-ultraviolet irradiation on amorphous solid water at 90 K", 第26回化学反応討論会, 2010年6月2日, 広島大学 (東広島市)
48. N. Watanabe "Physicochemical processes of atomic hydrogen on amorphous solid water at very low temperatures" 239th American Chemical Society National Meeting & Exposition, 2010.3.24, Moscone Center (USA), invited
49. N. Watanabe "Ice surface reactions: its role in chemical evolution in space", ILTS International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", 2009.11.10, Hokkaido Univ. (Sapporo)
50. N. Watanabe, A. Kouchi, H. Hidaka, Y. Oba, N. Miyauchi, Y. Kimura "Tunneling reactions of atomic hydrogen and molecules on amorphous solid water at very low temperatures", Horiba-ISSP International Symposium on Hydrogen and Water in Condensed Matter Physics, 2009.10.16, Seimei-no-Mori resort (Chiba), invited
51. H. Hidaka, M. Watanabe, A. Kouchi, N. Watanabe, "Quantum tunneling in the H-D substitution and the H (D) atom addition reactions of formaldehyde on low temperature surfaces", Horiba-ISSP International Symposium on Hydrogen and Water in Condensed Matter Physics, 2009.10.13, Seimei-no-Mori resort, (Chiba)
52. 日高宏, 渡辺元浩, 香内晃, 渡部直樹 「低温固体表面における水素、窒素原子結合反応によるアンモニア分子生成」日本惑星科学会秋季講演会, 2009年9月29日, 東京大学 (東京)
53. 日高宏, 渡辺元浩, 香内晃, 渡部直樹 「低温ホルムアルデヒド固体表面における水素・重水素原子トンネル反応」日本物理学会秋季大会, 2009年9月27日, 熊本大学 (熊本市)
54. 渡部直樹, 香内晃, 木村勇氣 「低温アモルファス氷表面における水素原子の拡散・脱離」日本物理学会秋季大会, 2009年9月27日, 熊本大学 (熊本市)
55. 大場康弘, 渡部直樹, 日高宏, 香内晃, Varello Pirronello 「極低温表面反応 CO+OH による CO<sub>2</sub> 分子生成」日本地球化学会第56回年会, 2009年9月16日, 広島大学 (東広島市)
56. N. Watanabe "Nonenergetic Reactions Between Hydrogen And Molecules On Interstellar Grain Surfaces", XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, 2009.7.24, Michigan University (USA), invited
57. H. Hidaka, M. Watanabe, A. Kouchi, N. Watanabe "Hydrogen isotope exchange and H (D) atom addition reaction of solid formaldehyde on amorphous solid water at low temperature", XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, 2009.7.24, Michigan University (USA)
58. N. Watanabe "Reactions of Hydrogen Atoms and Molecules on Amorphous Solid Water at Very Low Temperatures", Gordon Research Conference; Matrix-Isolated Species, Physics & Chemistry of, 2009.7.1, Magdalen College (UK), invited
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/>
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
- (3) 研究連携者  
なし