

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：新学術領域研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21200048

研究課題名（和文） 氷表面反応の科学：原子トンネル反応と同位体分別機構

研究課題名（英文） Ice surface processes: tunneling reactions and isotope fractionation

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）：光などの外からのエネルギーを必要としない氷表面反応，特に原子トンネル反応素過程とその同位体効果を実験的に調べ，以下の知見を得た．①極低温アモルファス氷上での水素原子表面拡散の活性化エネルギー，②氷表面で H-H 再結合により生成した水素分子の核スピン温度，③ホルムアルデヒドの原子トンネル反応による重水素濃集過程，④OH ラジカルと CO 表面反応による CO₂ 生成過程．

研究成果の概要（英文）：Ice surface reactions relevant to chemical evolution and deuterium fractionation were experimentally investigated. Activation energies for ice-surface diffusion of H and D atoms were determined. It was found that effective mass of reaction system is a control-factor of tunneling reactions. The reactivities of tunneling reactions related to deuterium fraction of formaldehyde can be well explained by the effective masses. A novel route of CO₂ formation on the ice surface was found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総計	23,800,000	7,140,000	30,940,000

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，

物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：氷表面反応，トンネル反応，同位体分別，星間分子

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間で観測されている多くの星間分子はイオン分子反応といった気相反応により生成可能であるが，最も存在度の高い水素分子や，水，有機分子などの生成には氷星間塵表面反応が不可欠であると考えられている．しかし，その重要性にもかかわらず，極低温の氷表面で本当に反応が起こるかどうか

かを含め，その詳細はほとんど知られていなかった．最近になり，研究代表者らの研究により，水分子や始原的有機分子：ホルムアルデヒド，メタノールが極低温特有の氷表面トンネル反応により生成することが明らかになってきた．その後，海外の2，3のグループが同様の実験を始め，氷表面トンネル反応の有効性が追認されるようになってきた．そ

れでも、調べられた反応系の数はまだ少なく、反応性を決める要因（実効質量、活性化エネルギー、表面組成 etc.）の洗い出しには至っていない。また、氷表面トンネル反応に至る素過程：原子の吸着、拡散に関してはまだ調べられていない。

一般に、宇宙における分子の同位体濃集度は星間分子雲でもっとも高く、天体の進化とともに濃集度は下がってくる。宇宙における分子の同位体濃集の歴史を知るためには、初期環境である分子雲における濃集プロセスを知ることは非常に重要である。研究代表者らは、最近、氷星間塵表面トンネル反応が重水素濃集にきわめて有効であることを発見した。この表面プロセスはこれまで全く考えられてこなかったもので、さらなる研究が急務である。特に濃集度の高いホルムアルデヒドやメタノールに関しては、プロセスの全容が明らかになる一歩手前まで来ている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地球惑星科学的に重要な分子種（水、二酸化炭素、ホルムアルデヒド、メタノール等）の生成・同位体分別に関わる、氷表面原子トンネル反応の反応経路、反応速度定数およびその表面温度・組成依存性を実験的に調べ、原子トンネル反応素過程に迫ること。特に、原子トンネル反応にいたる基本的表面プロセスである、水素原子の氷表面上の拡散・再結合に重点を置く。

3. 研究の方法

水素原子の表面拡散および再結合（水素分子生成）の実験：原子線をフラックス測定の後氷表面に照射し、吸着水素原子をレーザーによる光刺激脱離と共鳴多光子イオン化法を用いて検出し、水素原子の表面数密度とその時間変化を測定する。また、生成した水素分子の回転状態（核スピン温度）も同時に測定した。

トンネル反応による分子生成実験：反応親分子を氷表面上に蒸着し、水素原子、重水素原子、OH ラジカルなどを照射する。親分子および生成分子量の時間変化をフーリエ変換型赤外分光計で測定し、反応速度を求める。

4. 研究成果

・水素原子表面拡散について：アモルファス氷上での水素原子表面拡散の活性化エネルギーを測定し、さらに実効的な吸着係数を表面温度 8~20K の範囲で見積もった。拡散の活性化エネルギーは少なくとも 2 成分からなり、低い方で 20 meV、高い方で 50 meV 程度となった。20 meV の活性化エネルギーは分子雲 10 K の環境下でも十分に拡散可能な

値である。つまり、氷星間塵に吸着した水素原子は速やかに拡散し、水素分子生成や他分子とのトンネル反応に効率的に寄与するはずである。また、実効的な吸着係数は 20K 近辺で急激に下がるため、この温度以上では分子生成は進まないと考えられる。表面拡散については重水素原子を用いた実験も行った。その結果、大きな同位体効果は見られず、拡散は主に熱的な hopping に依るものと断定された。ただし、本実験では数秒より短い時間での拡散現象は実験的に観測することできないため、より速い（活性化エネルギーがより低い）拡散の同位体効果の有無に関しては今後の課題として残された。一方、多結晶氷表面では、水素原子、重水素原子共に拡散はきわめて速く、トンネル拡散の有無など定量的な見積もりには至らなかった。

・生成水素分子の核スピン温度について：再結合により生成した水素分子のスピン温度を測定したところ、およそ 200 K 以上を示す高温平衡値 3 に近いことがわかった。また、生成した水素分子はアモルファス氷表面で再トラップされた後に、スピン温度が時間とともに下がる（オルソ→パラ転換する）事がわかった。この結果は、星間水素分子のスピン温度が温度領域により異なるという天文観値と整合する。

・ホルムアルデヒドの重水素濃集について：H-D 置換、H,D 付加トンネル反応によるホルムアルデヒド重水素体生成プロセスをこれまでよりも精密に調べた。その結果、反応速度は反応系の実効質量に依存し、トンネル反応が重水素濃集プロセスに強く関与していることが明らかになった。

・CO₂ 生成について：低温 OH ラジカルと CO の氷表面反応により、CO₂ が生成した。これまで、この反応系の CO₂ 生成には OH が振動励起しているか、大きな並進エネルギーを持つことが必要と思われていたが、低温で振動基底状態の OH との反応でも CO₂ が生成することが明らかになった。放射場の弱い分子雲コアにおける CO₂ 生成の重要なプロセスと考えられる。また、同じ反応実験から H₂CO₃ の生成が同時に確認された。

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 14 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 + H₂ 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 N₂ 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 H₂O and CO₂ 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 CO₂ and H₂O mixture ices”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **13**, 35, 15785-15791,DOI: 10.1039/C1CP20595A
 5. Hama,T., Watanabe,N., Kouchi,A., Yokoyama, M. (2011) “Spin Temperature of Water Molecules Desorbed from the Surfaces of Amorphous Solid Water, Vapor-deposited and Produced from Photolysis of a CH₄/O₂ 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 (H₂CO₃) 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 H₂ 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 NH₃ with H₃O⁺”, *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 CO₂ 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. 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
 14. 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 59 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回水素量子アトムクス研究会, 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 H₂O ice", IAU Symposium280: 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 N₂ matrix at 10K", IAU Symposium280: 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 Symposium280: 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 N₂ 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 拡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, N. Watanabe “Ammonia formation by the successive hydrogenation of N atom trapped solid N₂ 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 H₂ 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 H₂O 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, Martiniplaza (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(東京都)
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 CO₂ 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)
- [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