

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01273

研究課題名(和文) 星間塵表面におけるイオンの表面反応の解明：分子進化への未知の役割を探る

研究課題名(英文) Elucidation of ion-surface reactions on an interstellar dust surface: exploring their unknown roles in molecular evolution

研究代表者

中井 陽一 (Nakai, Yoichi)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員

研究者番号：30260194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：これまで実験的情報がほとんど無かった星間塵氷表面と低エネルギー分子イオンとの反応に関する実験研究を行なった。そのために、表面に存在する化学種に対して従来使われてきた検出法より高感度な検出法である、反応性散乱イオン質量分析法を利用した実験装置を開発した。極低温氷表面上の化学種に対してもその利点を活かせるように手法を改良した。その結果、極低温氷表面上に微量に存在する化学種の検出が可能となった。低エネルギーのCH<sub>3</sub><sup>+</sup>イオンを冷却した金属基板上に生成した氷薄膜表面へ照射して、その結果による反応生成物を観測した。それにより、CH<sub>3</sub><sup>+</sup>イオンの照射に起因するメタノール分子生成を示す実験結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究での実験結果は、低エネルギーのイオンと極低温氷表面との分子生成反応実験として、我々の知る限り、世界で初めて得られた結果である。これは以前の理論的予測を支持するものとなった。実験的情報の不足もあり、低エネルギーのイオンと氷表面との反応による分子生成は、これまでの星間雲での分子生成のモデルでは取り入れられてこなかった。しかし、今後その重要性を適切に評価する必要があるだろう。また、極低温氷表面上の化学種の高感度検出法として、反応性散乱イオン質量分析法が有用であることが示された。

研究成果の概要(英文)：We have performed experimental studies of the reactions between low-energy molecular ions and the surface of interstellar dust ice, for which there was little experimental information. For this purpose, we have developed an experimental apparatus using a reactive scattered ion mass spectrometry (RIS), which is more sensitive than the conventional detection methods for chemical species existing on the surface. The method was improved so that the advantage of RIS could be utilized for chemical species on the low-temperature ice surface. As a result, we have achieved high detection sensitivity for chemical species on low-temperature ice surface. The reaction products were observed after irradiating the surface of the ice thin film formed on the cooled metal substrate with low-energy CH<sub>3</sub><sup>+</sup> ions. We obtained experimental results indicating the formation of methanol molecules due to the irradiation of the CH<sub>3</sub><sup>+</sup> ions to the ice surface.

研究分野：原子分子科学，宇宙化学

キーワード：イオン表面反応 星間化学過程

## 1. 研究開始当初の背景

分子雲から星形成へ至る中での物質の進化(分子進化)は、星が誕生する以前の分子雲(温度は約 10K)から始まると考えられている。これまでの観測によって分子雲の段階で多種多様な分子が存在することが知られており、それらは原子や簡単な分子から化学反応を経て生成するとされている。分子雲内のイオンの多くは並進運動が分子雲温度程度である低エネルギーの正分子イオン(以下では“イオン”と表記する)であり、分子進化にはイオンが気相で引き起こす反応が大きな役割を果たしていると考えられている。その考えに沿って、これまでに気相でのイオンと分子の反応(イオン分子反応)に関して、理論、実験の両面から多くの研究が行われてきた。しかし、イオン分子反応だけでは、水分子やメタノール分子などの比較的簡単な分子ですら、その存在量を説明することができず、星間塵表面での反応が分子進化に決定的な役割を果たさずと考えられるようになった。近年の実験研究によって、星間塵表面に吸着した中性水素原子が引き起こす比較的簡単な分子の生成に関わる中性反応については、その詳細が明らかになってきた [Hama & Watanabe 2013, Watanabe & Kouchi 2008]。一方で、低エネルギーのイオンが星間塵表面で引き起こす反応に関する情報はほとんど得られておらず、分子進化モデルでは、星間塵に付着する電子とイオンの間で気相と同じ電子再結合反応が起きるとだけ単純に仮定されていた。研究開始当初、下に記載するように、ごく一部の量子化学計算は存在するものの、星間塵表面でのイオンの表面反応(以下、“イオン 星間塵表面反応”と表記)は、上記の仮定を除くと分子進化モデルで考慮されていなかった。

一方で、イオンと星間塵との衝突は、気相でのイオンと分子の衝突を凌駕するほどの衝突断面積を持ち、イオン 星間塵表面反応は分子進化に重要な反応過程の一つとなる可能性が考えられてきた。実際、イオン 星間塵表面反応を念頭に置いた量子化学計算によって、 $\text{HCO}^+$ や $\text{CH}_3^+$ が星間塵を覆うアモルフォス氷表面上の複数の $\text{H}_2\text{O}$ 分子と相互作用し $\text{HCOOH}$ や $\text{CH}_3\text{OH}$ を反応障壁無しで生成するという、気相とは全く異なる反応が示唆されていた [Woon 2011]。しかしながら、イオン 星間塵表面反応の実験研究は、下にも述べるように、技術的な困難さから全く行われていなかった。

分子雲内での分子進化に影響を及ぼす可能性がある新しい表面反応の探索という観点から、以前より我々はイオン 星間塵表面反応に注目していた。誘起電荷によるイオンの加速効果などのイオンと固体表面との相互作用の特徴を考慮して、イオン 星間塵表面反応に関する情報は量子化学計算などの理論的研究だけではやはり不十分で、分子進化に対するイオン 星間塵表面反応の果たす役割を理解するために実験研究が不可欠である、との認識に至ることとなった。

イオン 星間塵表面反応では反応生成物の事前予測が簡単ではないことや、原子線より強度の劣るイオンビームを用いることによって現実的な実験時間での反応生成物の生成量が極めて少なくなることなど、実験的な難しさがある。そのため、従来この種の実験で使われてきた赤外吸収分光法などの検出法では、イオン 星間塵表面反応による反応生成物の検出は非常に難しく、従来方法とは全く異なる新しい検出法の導入が必要であった。そこで、これまでの方法にこだわらず導入すべき実験技術を改めて検討した。その結果、反応性散乱イオン・低エネルギースパッタリングイオン質量分析法(RIS・LES法) [Kang 2011]を用いることを考えた。RIS・LES法は、10から数十電子ボルトのセシウムイオンを用いた微量の表面吸着化学種の検出法である。特にRIS法は中性の反応生成物をセシウムイオンが表面での散乱中に捕獲するという過程を利用したもので、表面上の中性化学種を検出できる。RIS・LES法では、反応性散乱イオンやスパッタリングイオンの質量を計測することで質量から反応生成物の同定ができ、広範な反応生成物に対応可能であること、また赤外吸収分光法に比べると非常に検出感度が高いこと、という利点がある。このことから、我々は、RIS・LES法はイオン 星間塵表面反応の実験研究で導入すべき検出技術である、との見解に達した。極低温氷表面上の化学種の検出法としては、RIS・LES法は完全に確立されているわけではなかったが、この検出法を実験方法の根幹と考えた実験装置の開発を行い、イオン 星間塵表面反応の実験研究を遂行することが必要であると考えた。

[参考文献]

Hama & Watanabe 2013: T. Hama and N. Watanabe, *Chem. Rev.*, **113**, 8783 (2013).

Kang 2011: H. Kang, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **32**, 389 (2011).

Watanabe & Kouchi 2008: N. Watanabe and A. Kouchi, *Prog. Surf. Sci.*, **83**, 439 (2008).

Woon 2011: D. E. Woon, *Astrophys. J.*, **728**, 44 (2011).

## 2. 研究の目的

上記の研究背景のもと、分子雲内のイオン 星間塵表面反応を実験的に明らかにすること、それにより分子進化でのイオンと星間塵の未知の役割を見出すことを目標にして、低エネルギー分子イオンと分子雲温度に相当する極低温アモルフォス氷表面との反応生成物を同定し、反応の特徴を調べる。そのために、従来この種の実験で使われてきた検出法より高感度な反応生成物の

検出法である、セシウムイオンによる反応性散乱イオン・低エネルギースパッタリングイオン質量分析法 (RIS・LES法) を利用して、イオン 氷表面反応を行う実験装置を開発する。これらを研究の目的とした。特に、有機分子生成に関わると考えられる分子イオンのうち、比較的構造が簡単で分子雲内および周辺での存在が重要視されており、量子化学計算の予測がある  $\text{CH}_3^+$  イオンや  $\text{HCO}^+$  イオン (実験では  $\text{DCO}^+$  イオンを用いる) を研究の対象と考えた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験装置および手法の概略

本研究で使用した実験装置は、主チェンバー内に設置された極低温の氷薄膜を生成する冷却可能な金属基板、低エネルギー分子イオンを生成するための分子イオン源、目的の分子イオンを選別して氷薄膜へ照射するためのイオン選別・減速系、反応性散乱イオン・低エネルギースパッタリングイオン質量分析法 (RIS・LES法) に用いるセシウムイオン源と四重極質量分析計、氷薄膜の厚さモニターとして使用するフーリエ変換赤外吸収分光計などからなる。

反応を起こす温度に制御された金属基板へ希薄水蒸気を暴露して氷薄膜を生成する。氷薄膜表面上に存在する化学種を RIS・LES法を用いて観測する。その後、一定時間、分子イオンを氷薄膜へ照射する。照射の後、氷薄膜表面上に存在する化学種を RIS・LES法を用いて観測する。分子イオンの照射前後の氷薄膜表面上に存在する化学種の観測により、反応生成物を同定する。

#### (2) 実験装置

##### 冷却金属基板および氷薄膜生成

アルミニウム製の冷却基板が、ヘリウム冷凍機の先端にサファイア円板を介して取り付けられた無酸素銅フレームに取り付けられている。その無酸素銅フレームには、白金コバルト抵抗測温体とセラミック抵抗ヒーターが取り付けられており、冷凍機を稼働しながらヒーターで加熱することで基板を目的の温度に制御する。主チェンバー内に希薄な水蒸気を導入して冷却した基板に暴露することで氷薄膜を生成した。

##### 分子イオン源およびイオン選別・減速系

分子イオン源は、カゴ形状のイオン生成部とその周辺にフィラメントを配置した、単純な構造の自作の電子衝撃型イオン源を用いた。イオン源内部で生成された分子イオンは加速電場によって引き出され、静電型レンズを用いてアパーチャに収束される。このアパーチャはイオン源を設置した真空容器とイオン選別系が設置された真空容器の間を差動排気するためのオリフィスを兼ねている。イオン選別系には、永久磁石を利用したウィーンフィルターを用いた。このウィーンフィルターを用いて目的の分子イオンを選別する。ウィーンフィルターの前後には静電型レンズが配置されている。ウィーンフィルターによって選別された目的の分子イオンは、その静電型レンズによってアパーチャに収束される。このアパーチャはイオン選別系が設置された真空容器と主チェンバーの間を差動排気するためにも用いられる。アパーチャを通して主チェンバーに導入された分子イオンは、静電型レンズを組み合わせたイオン減速系によって減速され、冷却金属基板に生成した氷薄膜へ照射される。イオン選別・減速系も研究者自らの設計と組上げによるものである。分子イオン源およびイオン選別系は同一の電位上に設置されており、氷薄膜へ照射するイオンのエネルギーを変更することがあっても、それらの電極電圧設定を変更する必要はない。

##### セシウムイオン源および四重極質量分析計

セシウムイオン源および四重極質量分析計は、RIS・LES法による反応生成物の同定に使用する。本研究では、分子イオンと氷表面上の複数の水分子との反応によって生成する中性の反応生成物を主な検出対象としているため、主に反応性散乱イオン質量分析法 (RIS法) を利用した。反応性散乱イオンとは、表面へ入射して来る低エネルギーの原子イオンが表面上の化学種を捕獲して表面から散乱してくるものを指す。単独の安定天然同位体を持つセシウムイオンを本研究でも利用した。セシウムイオン源については、10 eV 程度の低エネルギーまでのセシウムイオンビームを発生できることが確認されている市販のイオン源を導入した。本研究では、装置開発実験の結果、40 eV のセシウムイオンビームを発生させて用いている。氷薄膜表面から化学種を捕獲した反応性散乱イオンの質量を四重極質量分析計によって分析して捕獲した化学種を同定する。四重極質量分析計としては、量子化学計算で示唆された生成物の  $\text{CH}_3\text{OH}$  や  $\text{HCOOH}$  を捕獲した反応性散乱イオンを質量範囲としてカバーできる比較的口径の大きなものを所有しており、それを用いることとした。

##### フーリエ変換赤外吸収分光計

氷薄膜の厚さモニターとして、外部検出器が使用できる市販のフーリエ変換赤外吸収分光計を導入した。外部検出器としては MCT 検出器を用い、ミラーを用いた外部光学系によって冷却基板上的氷薄膜での赤外光吸収を計測できるようにした。

### 4. 研究成果

#### (1) 装置開発

##### 分子イオン源およびイオン選別・減速系

「研究の方法」の項にも記載したように、本研究で用いた分子イオン源およびイオン選別・減速系は研究者自らの設計と組上げによるものである。特に、イオン選別・減速系については、分

子イオンの軌道に関する数値シミュレーションを行なってレンズ等の電極配置を決定し、その結果に基づいてイオン選別・減速系を設計・製作した。これらの試験運転と改良を繰り返して電極電位などの設定パラメータなどを決定した。また、イオン減速系の出口と冷却金属基板の間にメッシュ対を挿入して、イオンの追いつき電場を発生してイオンの運動エネルギーの見積もりができるようになった。本研究で対象とする分子イオンビームを、おおよそ、0.1~0.5 nA の電流量、10 eV 程度以下の運動エネルギーで生成できた。

#### 反応性散乱イオン質量分析 (RIS) 法

上述のように、本研究ではイオン 氷表面反応の反応生成物の検出法として、主に反応性散乱イオン質量分析法 (RIS 法) を利用した。極低温氷表面上の化学種の検出法としては、RIS 法は完全に確立されているわけではなかったため、その開発実験を行なった。極低温氷薄膜表面からの散乱イオンの強度は、同じ温度の金属表面からの散乱イオンより大きく減少することが判明したため改良を加える必要があった。その改良として二つの方向性があったが、散乱イオン軌道のシミュレーション計算や装置試験と改良を繰り返し、本研究では、冷却金属基板を冷凍機と共に回転可能にして、氷表面へのセシウムイオンの入射角を浅くし、反応性散乱イオンの出射角は大きくなるようにして、反応性散乱イオンの検出量の向上を図った。分子イオン照射時と反応生成物の検出時で冷却金属基板を異なる角度に設置している。また、同時に反応性散乱イオンの検出量向上に役立てるため、四重極質量分析計の入り口に静電型レンズ系を設置した。

#### (2) イオン 氷表面反応実験

10 K 程度の極低温で金属基板上に生成したアモルフォス氷と 10 eV 程度以下まで減速した  $\text{CH}_3^+$  イオンとの反応実験を行なった。「研究の方法」に記載したように、分子イオンの照射前後の氷薄膜表面上に存在する化学種の質量を RIS 法で観測することで反応生成物を同定した。 $\text{CH}_3^+$  イオンの照射後に、質量 165 amu のピークが現れた。これは、セシウムイオン (質量 133 amu) が  $\text{CH}_3\text{OH}$  分子 (質量 32 amu) を捕獲したものと考えられる。これを確かめるため、 $\text{CH}_3^+$  がイオン選別系を通過しないようにして、それ以外はイオン照射実験と全く同じ条件で質量 165 amu のピークが現れるかを調べた。 $\text{CH}_3^+$  がイオン選別系を通過しない場合には、質量 165 amu のピークは現れず、質量 165 amu のピークは残留ガスやイオン源からの漏れガスの影響で出現したものでなく、 $\text{CH}_3^+$  イオンの照射に起因することが確かめられた。また、アモルフォス氷を  $\text{D}_2\text{O}$  で生成し、 $\text{CH}_3^+$  イオン照射実験を行なった。その結果、やはり  $\text{CH}_3^+$  イオンの照射後のみに質量 166 amu のピークが出現し、これは、セシウムイオンが  $\text{CH}_3\text{OD}$  分子 (質量 33 amu) を捕獲したものと考えるのが自然である。このことから、 $\text{CH}_3^+$  イオンの照射に起因してメタノール分子が生成されたと考えられる。さらに、基板温度が 60 K 以下では、メタノール分子生成には温度依存性がほぼ見られなかった。10 K 程度で氷に吸着する主な分子と思われる水素分子 (残留ガス) やメタン分子 (イオン源からの漏れガス) は 60 K では表面からほとんど脱離しているため、これらの分子はメタノール分子生成に影響を及ぼしていないと考えられる。

RIS 法の改良に時間を要したため、 $\text{DCO}^+$  と氷表面との反応実験は今後の課題として残った。

#### (3) 得られた成果の国内外における位置付けとインパクト、今後の展望

本研究での  $\text{CH}_3^+$  を用いた実験結果は、低エネルギーのイオン 氷表面反応における分子生成実験として、我々の知る限り、世界で初めて得られた結果であり、量子化学計算による研究結果を支持するものとなった。「背景」にも記載したように、実験的情報の不足によって、イオン 氷表面反応による分子生成は、これまでの分子雲での分子進化モデルでは取り入れられてこなかったが、その重要性を適切に評価する必要があるだろう。分子進化モデルに組み込むことで、イオン 氷表面反応の重要性をある程度評価できるものと考えている。また、極低温氷表面上の化学種の高感度検出法として、反応性散乱イオン質量分析法 (RIS 法) が有用であることが示された。上述したように、RIS 法の改良として二つの方向性があり、もう一つの方向性は研究分担者と研究協力者らの研究によって実現された。実験条件によって、これらは使い分けられることが良いと考えている。

今後は、分子雲内での存在度が  $\text{CH}_3^+$  よりも大きいと考えられる  $\text{HCO}^+$  (実験では  $\text{DCO}^+$  を使用) と氷表面との反応実験へ研究を進める予定である。さらに、星間塵氷表面上に多く存在するメタノール分子が関与する、イオンと極低温氷表面との反応についての実験研究を行うことも考えている。また、実験可能な化学種を広げるために、実験装置の改良を行いたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishibashi A., Hidaka H., Oba Y., Kouchi A., Watanabe N.	4. 巻 921
2. 論文標題 Efficient Formation Pathway of Methyl Formate: The Role of OH Radicals on Ice Dust	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L13-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac3005	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 -
1. 著者名 Miyazaki A., Watanabe N., Sameera W. M. C., Nakai Y., Tsuge M., Hama T., Hidaka H., Kouchi A.	4. 巻 102
2. 論文標題 Photostimulated desorption of OH radicals from amorphous solid water: Evidence for the interaction of visible light with an OH-ice complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 052822-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.052822	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 -
1. 著者名 Sameera W. M. C., Senevirathne Bethmini, Andersson Stefan, Al-Ibadi Muhsen, Hidaka Hiroshi, Kouchi Akira, Nyman Gunnar, Watanabe Naoki	4. 巻 125
2. 論文標題 CH3O Radical Binding on Hexagonal Water Ice and Amorphous Solid Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 387 ~ 393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.0c09111	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 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Y. Nakai, H. Hidaka, N. Watanabe
2. 発表標題 Methanol production via interactions of low-energy CH <sub>3</sub> <sup>+</sup> ions with ASW surface: experimental investigation of ion-surface reactions
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 K. Kitajima, Y. Nakai, W. M. C. Sameera, M. Tsuge, A. Miyazaki, H. Hidaka, A. Kouchi, N. 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 A. Ishibashi, H. Hidaka, Y. Oba, A. Kouchi, N. Watanabe
2. 発表標題 Development of a high-sensitivity and non-destructive detection system for trace amounts of adsorbates on ice
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 A. Ishibashi, H. Hidaka, Y. Oba, A. Kouchi, N. Watanabe
2. 発表標題 Water-promoted formation of methyl formate from methanol via methoxymethanol on ice
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 石橋 篤季、日高 宏、大場 康弘、香内 晃、渡部 直樹
2. 発表標題 超高感度表面分析法による低温氷表面に吸着したメタノールからの効率的なギ酸メチル生成過程の解明
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 石橋 篤季、日高 宏、大場 康弘、香内 晃、渡部 直樹
2. 発表標題 氷表面におけるメタノールの光化学反応生成物の高感度分析
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi HIDAKA, Atsuki ISHIBASHI, Yasuhiro OBA, Akira KOUCHI, Naoki WATANABE
2. 発表標題 Development of an analysis equipment for detecting trace adsorbate molecules on amorphous solid water by reactive ion scattering method
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井 陽一、日高 宏、渡部 直樹
2. 発表標題 低エネルギーイオンと低温氷表面との反応実験装置開発の現状2
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中井 陽一、日高 宏、渡部 直樹
2. 発表標題 低エネルギーイオンと低温氷表面との反応実験装置開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中井 陽一、日高 宏、渡部 直樹
2. 発表標題 星間塵表面を模擬した低温氷表面と低エネルギーイオンとの反応実験装置の開発
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Nakai, Naoki Watanabe, Yasuhiro Oba
2. 発表標題 Laboratory experiment for hydrogenation of C60 fullerenes deposited on a solid surface under low temperature conditions
3. 学会等名 The Olympian Symposium 2018 on "Gas and stars from milli- to mega- parsecs" (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 中井 陽一, 渡部 直樹
2. 発表標題 低温薄膜状C60固体にトラップされた水素分子の振動回転励起の赤外吸収スペクトル
3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会
4. 発表年 2018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
研究分担者	日高 宏  (Hidaka Hiroshi)  (00400010)	北海道大学・低温科学研究所・助教   (10101)	

	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
研究協力者	渡部 直樹  (Watanabe Naoki)		
研究協力者	石橋 篤季  (Ishibashi Atsuki)		

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
---------	---------