

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際活動支援班）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21735

研究課題名（和文）宇宙における分子進化研究の国際連携・分野間融合への展開

研究課題名（英文）Development of project on molecular evolution in space to international cooperation and interdisciplinary research

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 26,500,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙分子進化の研究成果を、大型国際共同研究（ALMA、「はやぶさ2」などの始原的小惑星からのサンプルリターンプロジェクト）との連携に生かし、積極的に海外に発信し、さらに、これらの活動を通じて若手研究者を育成することが主たる目的である。このために、指導的研究者から若手研究者までの派遣および招聘を実施した。その結果、拠点研究機関同士の研究交流が活発におこなわれ、国際連携研究が当初の想定以上に展開され、優れた研究結果が多数生み出された。これらの研究活動を通じて、次世代の指導者たる人材を育成することができた。

研究成果の概要（英文）： The purpose of the present project is to maximize scientific achievements of molecular evolution in space by international cooperation. We made various exchange programs between domestic and foreign institutions. Especially, we focused on following international large projects such as ALMA and sample return projects from primitive asteroids such as Hayabusa2. As a result, international cooperative studies advanced remarkably, and excellent results have been yielded. From these activities, we have trained young scientist as a next generation leader.

研究分野：地球惑星科学，天文学

キーワード：分子進化 星間分子雲 原始惑星系 氷 有機物

### 1. 研究開始当初の背景

本領域は、国内での各分野での最先端研究を融合し、世界に類のない学際融合研究として発展させ、宇宙での H, C, O, N 系物質の進化を統一的に理解し、惑星系形成論に化学的視点を初めて導入することをめざし、発足したものである。

本領域で構築する「分子進化シナリオ」は、宇宙科学・太陽系科学分野全体の大きな流れのひとつであり、複数の大型計画が国際協力で実施されている。例えば、ALMA 望遠鏡は星・惑星系形成領域の化学的特徴を H, C, O, N 系分子から追究することをめざしている。また、探査対象天体をめざし運用中の JAXA 小惑星サンプルリターン探査機「はやぶさ 2」、2016 年秋打ち上げ予定の NASA 小惑星サンプルリターン探査機 OSIRIS-REx は有機物を含む小惑星からのサンプルリターンをおこない、2020 年代初頭に採取試料中の有機物分析がおこなわれる。

本領域の成果は、これらの大型計画に直接的かつ本質的な貢献をするものであり、計画が順調に進行している現段階から、積極的に国際大型計画との連携を進めていく必要がある。また、実験、理論、観測、分析を統合した世界に類のない本領域が順調に進行していることを受け、この取り組みを世界に積極的に発信し、広めることも必要であり、時宜を得ていると考える。

### 2. 研究の目的

本領域で構築する「分子進化シナリオ」は ALMA 望遠鏡や始源小天体（彗星、小惑星）探査の成果に直接の貢献が可能なものである。これらの国際協力大型計画が本格化を迎える前の段階から、国内の研究者が積極的に関与し、本領域の成果を最大限に活かす体制を構築する。本領域では実験、理論、観測、分析が有機的に連携した世界に類のない研究組織を構築し、研究を進めている。この新たな学融合研究創出が宇宙での分子進化研究のブレークスルーとなることを世界に積極的に発信する。また、日本発の学融合研究をさらに確固たるものにするための国際連携を強化する。関連分野で国際的に活躍する次世代研究者の育成が必要である。

### 3. 研究の方法

指導的研究者から若手研究者までの派遣および招聘を主として、下記の計画を推進する。

#### (1) 国際大型計画との連携・協力

ALMA および始原的小惑星からのサンプルリターンミッション「はやぶさ 2」、OSIRIS-REx と密接に連携して、これらの研究を推進する。

#### (2) 国際研究ネットワークの強化

拠点研究機関同士の研究交流を重点的におこない、共同実験・観測、シンポジウム等の共催で、研究を推進する。

#### (3) 次世代研究者の育成

若手研究者・技術者の招聘・派遣や上記(1)、(2)への参画により、次世代を担う若手研究者の育成に資する。

### 4. 研究成果

#### (1) 国際大型計画との連携・協力

ALMA 関連では、ヨーロッパの関連グループと共同観測を定常的に実施し、大きな成果に繋がった。さらに、国際シンポジウムの際に、関連する研究者を招聘し、今後の研究展望を議論し、今後の観測提案として結実した。「はやぶさ 2」や OSIRIS-REx では、関連する研究機関や国際シンポジウムに研究者を派遣するとともに、外国の研究者を国内の関連研究機関へ招聘した。このような努力により、両プロジェクトで採取した小惑星サンプルの分析にあたっては、密接に協力して高度な分析をおこなっていくことが合意された。

#### (2) 国際研究ネットワークの強化

スペインの Institute of Structure of materials-CSIC と北海道大学低温科学研究所間で研究者の相互交流によって氷の物質科学に関する共同研究を推進するとともに、国際シンポジウムを 2 回開催した。その結果、両機関での部局間交流協定の締結に繋がった。

#### (3) 次世代研究者の育成

上記(1)、(2)関連のみならず、個々の研究者がおこなっている共同研究においても、若手研究者を比較的長期にわたって招聘・派遣し、共同研究を推進した。優れた研究成果が生み出されただけでなく、今後の継続的な共同研究の実施にも道筋をつけた。国立天文台 ASTE 望遠鏡の観測装置開発を、若手技術者を中心に行わせ、観測装置の望遠鏡への搭載にあたっては、技術者をチリに派遣して経験をつませた。

### 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 18 件)

すべて査読有

1. T. Soma, N. Sakai, Y. Watanabe, S. Yamamoto, (2018) Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1, **Astrophys. J.**, 854, 11pp, DOI: 10.3847/1538-4357/aaa70c
2. Fei, H., Koizumi, S., Sakamoto, N., Hashiguchi, M., Yurimoto, H., Marquardt, K., Miyajima, N., Katsura, T. (2018) Mg lattice diffusion in iron-free olivine and implications to conductivity anomaly in the oceanic asthenosphere, **Earth Planet. Sci. Lett.** 484,

- 204-212, DOI: 10.1016/j.epsl.2017.12.020
3. O. Takahashi, Y. Tamenori, T. Suenaga, T. Ikeda-Fukazawa, J. Matsuno, A. Tsuchiyama(2018) XANES spectra of forsterite in crystal, surface, and amorphous states, **AIP Advances**, 8, 025107 (10-pages), DOI:10.1063/1.5017245
  4. Y. Oba, T. Tomaru, T. Lamberts, A. Kouchi, N. Watanabe (2017) An infrared measurement of chemical desorption from interstellar ice analogues, **Nature Astronomy**, 2, 228-232, DOI: 10.1038/s41550-018-0380-9
  5. S. Tachibana, A. Kouchi, T. Hama, Y. Oba, L. Piani, I. Sugawara, Y. Endo, H. Hidaka, Y. Kimura, K. Murata, H. Yurimoto, and N. Watanabe(2017) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures, **Science Advances**, 3, eaao2538(6pp), DOI: 10.1126/sciadv.aao2538
  6. R. Okazaki, H. Sawada, S. Yamanouchi, S. Tachibana, Y. N. Miura, K. Sakamoto, Y. Takano, M. Abe, S. Itoh, K. Yamada, H. Yabuta, C. Okamoto, H. Yano, T. Noguchi, T. Nakamura, K. Nagao, The Hayabusa2 SMP Team (2017) Hayabusa2 sample catcher and container: Metal-seal system for vacuum encapsulation of returned samples with volatiles and organic compounds recovered from C-type asteroid Ryugu, **Space Science Reviews**, 208, 107-124, DOI: 10.1007/s11214-016-0289-5
  7. Kebukawa Y., Chan Q. H. S., Tachibana S., Kobayashi K. and Zolensky M. E. (2017) One-pot synthesis of amino acid precursors with insoluble organic matter in planetesimals with aqueous activity, **Science Advances**, 3, e1602093 (8pp) DOI: 10.1126/sciadv.1602093
  8. Sawada H., Okazaki R., Tachibana S., Sakamoto K., Takano Y., Okamoto C., Yano H., Miura Y. N., Abe M., Hasegawa, S., Noguchi T. and the Hayabusa2 SMP Team(2017) Hayabusa2 sampler: Collection of asteroidal surface material, **Space Science Reviews**, 1-26, DOI: 10.1007/s11214-017-0338-8
  9. R. Escibano, E. Artacho, A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, and N. Watanabe (2017) Simulations and Spectra of Water in CO Matrices, **Physical Chemistry Chemical Physics**, 19, 7280-7287 DOI: 10.1039/C6CP08248C
  10. Okazaki R., Sawada H., Yamanouchi S., Tachibana S., Miura Y. N., Sakamoto K., Takano Y., Abe M., Itoh S., Yamada K., Yabuta H., Okamoto C., Yano H., Noguchi T., Nakamura T., Nagao K. and The Hayabusa2 SMP Team (2017) Hayabusa2 sample catcher and container: Metal-seal system for vacuum encapsulation of returned samples with volatiles and organic compounds recovered from C-type asteroid Ryugu, **Space Science Reviews**, 1-18, DOI:10.1007/s11214-016-0289-5
  11. R. Naohara, K. Narita, T. Ikeda-Fukazawa (2017) Change in hydrogen bonding structures of a hydrogel with dehydration, **Chemical Physics Letters**, 670, 84-88, DOI:10.1016/j.cplett.2017.01.006
  12. Zolensky, M. E., Bodnar, R. J., Yurimoto, H., Itoh, S., Fries, M., Steele, A., Chan, Q. H. S., Tsuchiyama, A., Kebukawa, Y. and Ito, M. (2017) The search for and analysis of direct samples of early Solar System aqueous fluids, **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 375, 20150386, DOI: 10.1098/rsta.2015.0386
  13. H. Yabuta, T. Noguchi, S. Itoh, T. Nakamura, A. Miyake, S. Tsujimoto, N. Ohashi, N. Sakamoto, M. Hashiguchi, K. Abe, A. Okubo, A. L. D. Kilcoyne, S. Tachibana, R. Okazaki, K. Terada, M. Ebihara, H. Nagahara (2017) Formation of an ultracarbonaceous Antarctic micrometeorite through minimal aqueous alteration in a small porous icy body, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 214, 172-190, DOI:10.1016/j.gca.2017.06.047
  14. Kawabata, Y., Nagahara, H. (2017) Crystallization and cooling conditions for diogenite formation in the turbulent magma ocean of asteroid 4 Vesta, **Icarus**, 281, 379-387, DOI:10.1016/j.icarus.2016.08.005
  15. Naraoka, H., Yamashita, Y., Yamaguchi, M. and Orthous-Daunay F. R. (2017) Molecular evolution of N-containing cyclic compounds in the parent body of the Murchison meteorite, **ACS Earth Space Chem.**, 1, 540-550, DOI: 10.1021/acsearthspacechem.7b00058
  16. T. Hama, A. Kouchi, 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
  17. A. Lopez-Sepulcre, Y. Watanabe, N. Sakai, R. Furuya, O. Saruwatari, and S. Yamamoto (2016) The Role of SiO As a Tracer of Past Star-Formation Events: The Case of the High-mass Protoprotocluster NGC2264-C, **Astrophys. J.**, 822, 85, 14pp, DOI:10.3847/0004-637X/822/2/85

18. Yasuda, S., Akagi, T., Naraoka, H., Kitajima, F., Takahashi K. (2016) Carbon isotope ratios of organic matter in Bering Sea settling particles: Extremely high remineralization of organic carbon derived from diatoms, **Geochem. J.**, 50, 241-248, DOI:10.2343/geochemj.2.0411

[学会発表] (計 23 件)

1. A. Kouchi (2018) In Situ Observation of Amorphous Ices by Ultrahigh Vacuum TEM, **2018 MRS Spring Meeting & Exhibit**
2. S.Tachibana(2018)Sampling techniques for Hayabusa-2, **ROADS TOWARDS SAMPLE RETURN FROM COMETS AND ASTEROIDS**
3. S. Tachibana (2018) Asteroid sample return missions - Hayabusa-2 and OSIRIS-ReX, **Workshop “Role of Sample Return in Addressing Major Outstanding Questions in Planetary Sciences”**
4. H. C. Connolly Jr, S. Tachibana, D. S. Lauretta, S. Messenger, and the sample analysis team for HAYBUS2 and OSIRIS-REX (2018) Analysis of the returned samples from asteroids Ryugu and Bennu, **Solar-System Symposium in Sapporo 2018**
5. S. Tachibana (2018) Chemistry of Molecular-Cloud Macromolecular Organic Matter; Photochemical Experiments with PICACHU, **Solar-System Symposium in Sapporo 2018**
6. S. Tachibana (2017) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperature, **Symposium ‘Molecular Evolution in Space’**
7. A. Kouchi and S. Tachibana (2017) Evolution of molecules in space: From interstellar clouds to proto-planetary nebulae, **Symposium ‘Molecular Evolution in Space’**
8. Orthous-Daunay F-R, Flandinet L, Thissen R, Vuitton V, Moynier F, Piani L & Tachibana S (2017) Effect of UV Irradiation on the Soluble Organic Matter Extract from the Murchison Chondrite, **Goldschmidt Conference 2017**
9. A. Kouchi (2017) Observation of liquid-like behavior of UV-irradiated amorphous ices, **Meeting on DIPSS (Dust and Ice Particles Spectroscopy and Scattering)**
10. Tachibana S., Watanabe S., and the Hayabusa2 Project Team (2017) Hayabusa2 samples returned from C-type near-Earth asteroid Ryugu, **48th Lunar and Planetary Science Conference**
11. Orthous-Daunay, L. Flandinet, R. Thissen, V. Vuitton, F. Moynier, L. Piani, S. Tachibana (2017) Effect of UV Irradiation on the Soluble Organic Matter extract from the Murchison Chondrite, **Solar – System symposium in Sapporo 2017**
12. T. Hama, A.Kouchi, N. Watanabe (2016) Laboratory studies of hydride ices: physical and chemical processes, **The Hydride toolbox**
13. A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, R. Escibano, Watanabe (2016) Formation of high-density amorphous ice by matrix sublimation method, **Workshop on Interstellar Matter 2016**
14. Tachibana S. (2016) A supernova with mixing fallback as a last spike of short-lived radionuclides 107Pd, 129L and 182Hf in the early solar system, **79th Annual Meeting of the Meteoritical Society**
15. Watanabe S., Tachibana S., Sugita S., Kitazato K. and Tanaka S. (2016) Hayabusa2: A mission to reveal the material evolution on a C-Type asteroid Ryugu, **Goldschmidt Conference 2016**
16. Walsh K., Connolly H., Lauretta D., Tachibana S. and Bottke W. (2016) Geology on small airless bodies, **Goldschmidt Conference 2016**
17. Connolly Jr. H.C., Lauretta D.S., Walsh K. J., Tachibana S. (2016) The dynamical evolution of asteroids constrained from sample analysis, **Goldschmidt Conference 2016**
18. Mori M., Tachibana S., Piani L., Marrocchi Y., Schrader D.L. and Connolly, Jr. H.C. (2016) Cooling experiments of Fe-FeS melts: A cooling speedometer of chondrules, **Goldschmidt Conference 2016**
19. H. Hidaka, Y. Sugimoto, S. Nakatubo, N. Watanabe, A. Kouchi (2016) Observation of amorphous solid water by non-contact atomic force microscopy, **Astrophysical Ices in the Lab**
20. A. Kouchi, N. Watanabe, H. Hidaka, T. Hama, Y. Kimura, S. Nakatubo, K. Fujita, K. Sinbori, M. Ikeda (2016) Development of an UHV transmission electron microscope for in-situ observation of ice, **Astrophysical Ices in the Lab**
21. A. Kouchi, S. Tachibana (2016) Evolution of Molecules in Space: From Interstellar Clouds to Protoplanetary Systems, **Solar-System symposium in Sapporo 2016**

22. L. Piani, S. Tachibana, T. Hama, I. Sugawara, Y. Oba, H. Tanaka, Y. Kimura, A. Miyake, J. Matsuno, A. Tsuchiyama, H. Yurimoto, A. Kouchi (2016) Photochemistry in Molecular Cloud: Evolution of Ice and Organic Residues through Warming and UV-Irradiation, **Solar-System symposium in Sapporo 2016**
23. A. Kouchi, S. Tachibana (2015) Evolution of molecules in space: from interstellar clouds to proto-planetary, **HAYABUSA2015:3rd Symposium of Solar System Materials**

[その他]

新学術領域研究

宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ

<https://www.astromolecules.org/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

橘 省吾 (TACHIBANA Shogo)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：50361564

### (3) 連携研究者

永原 裕子 (NAGAHARA Hiroko)  
東京工業大学・地球生命研究所・フェロー  
研究者番号：80172550

深澤 倫子 (FUKAZAWA Tomoko)  
明治大学・理工学部・教授  
研究者番号：40409496

山本 智 (YAMAMOTO Satoshi)  
東京大学・理学研究科・教授  
研究者番号：80182624

坂本 尚義 (YURIMOTO Hisayoshi)  
北海道大学・理学研究院・教授  
研究者番号：80191485

奈良岡 浩 (NARAOKA Hiroshi)  
九州大学・理学研究院・教授  
研究者番号：20198386