

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04080

研究課題名(和文)地球とコンドライトの化学組成：初期太陽系円盤での主要元素分別

研究課題名(英文) Fractionation of major rock-forming elements in the early Solar System and its implication to the chemistry of chondrites and the Earth

研究代表者

橘 省吾 (Tachibana, Shogo)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：50361564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：隕石や岩石惑星の元素組成は初期太陽系での元素分別で決定されたと考えられる。主要元素Mg, Si分別の鍵はフォルステライト( $Mg_2SiO_4$ )やエンスタタイト( $MgSiO_3$ )に関わる化学反応である。初期太陽系模擬条件でこれらの鉱物に関する反応実験をおこない、以下の成果を得た。1. 水蒸気存在下でのフォルステライトの蒸発速度・凝縮(気相成長)速度を決定した。2. フォルステライト・エンスタタイト組成の非晶質ケイ酸塩の結晶化および水蒸気との酸素同位体交換速度を決定した。3. 初期太陽系円盤で太陽からの距離に応じ、Mg, Siを主成分とする物質の化学・同位体組成、構造に分布が生じることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系の惑星には化学的多様性がある。小惑星イトカワと小惑星リュウグウも化学組成が異なると考えられている。これらの化学的多様性は太陽系初期に固体、気体間の化学反応でつくられた可能性が高い。岩石天体の主成分マグネシウム、ケイ素の分別をつくる反応について実験をおこない、初期太陽系で固体の元素・同位体組成や構造の分布に違いができることがわかった。本成果は太陽系初期の惑星材料の姿の理解に貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：We determined, through laboratory experiments, evaporation and vapor-growth rates of forsterite ( $Mg_2SiO_4$ ) in the low-pressure  $H_2$ - $H_2O$  system, crystallization rates of amorphous silicates with forsterite and enstatite stoichiometry, oxygen isotopic exchange rates between the amorphous silicates and low-pressure water vapor. The results indicate that chemistry and mineralogy of Mg-silicates should depend on the radial distance from the proto Sun in the early Solar System.

研究分野：宇宙化学

キーワード：初期太陽系 反応速度 フォルステライト エンスタタイト 元素分別

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

始源的隕石であるコンドライトの各化学グループの主要元素組成は、太陽系元素存在度と必ずしも一致しない。これは初期太陽系において元素分別が起きたことを示唆する。初期太陽系条件での主要な固体凝縮・化学反応過程の反応速度が必要となるが、いまだデータは揃っていない。初期太陽系で Mg/Si 分別が起こる条件はなにか、初期太陽系で実際に起こりえたかを検証した研究はこれまでに充分におこなわれていない。

### 2. 研究の目的

始源的隕石コンドライトや地球型惑星の元素組成は、初期太陽系での元素分別過程で決定されたと考えられる。主要元素 Mg, Si の分別過程の鍵となるのは、フォルステライト ( $Mg_2SiO_4$ ) 凝縮・蒸発反応やエンスタタイト ( $MgSiO_3$ ) 形成反応による固体 Mg/Si 比の変化過程である。本研究では初期太陽系を模擬した低圧条件でフォルステライト、エンスタタイトに関連した化学反応形成実験をおこない、その反応速度を決定することを目的とした。結果を基に初期太陽系でのエンスタタイト形成効率を推定し、Mg/Si 分別が起きる条件およびコンドライトと地球の元素組成の関係を議論し、地球材料をつくった結晶分化の残渣がエンスタタイトコンドライトであるという新たな仮説を提案し、妥当性を検討する。

### 3. 研究の方法

原始惑星系円盤に近い低圧ガス環境 ( $H_2$ - $H_2O$  または  $H_2O$ ) をつくり出すことができる赤外線集光加熱真空炉、赤外線加熱真空炉 (図 1) を用いて、フォルステライトの蒸発実験、フォルステライトの気相成長実験、フォルステライト・エンスタタイト組成の非晶質ケイ酸塩の結晶化実験 / 水蒸気との酸素同位体交換実験をおこなう。得られた結果を用いて、原始惑星系円盤でのマグネシウムケイ酸塩の化学組成、同位体組成、構造の太陽からの距離に応じた空間分布を明らかにする。

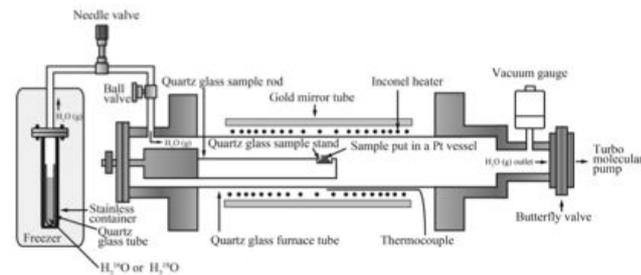
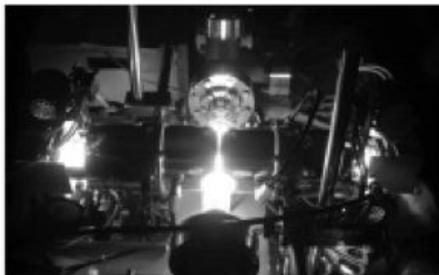


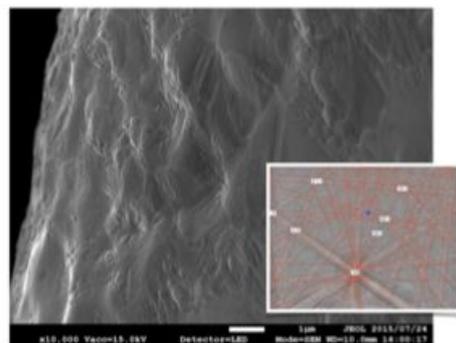
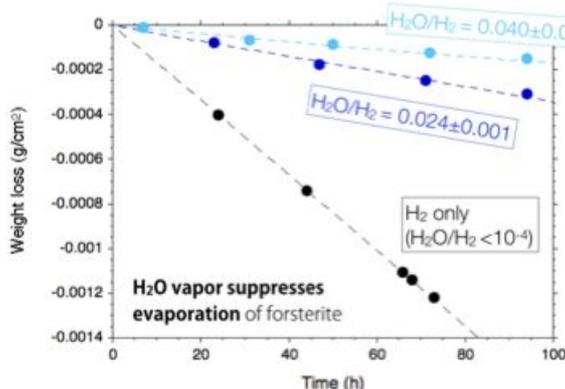
図 1 実験装置写真および模式図

### 4. 研究成果

始源的隕石コンドライトや地球型惑星の元素組成は、初期太陽系での元素分別過程で決定されたと考えられる。主要元素 Mg, Si の分別過程の鍵となるのは、フォルステライト ( $Mg_2SiO_4$ ) 凝縮・蒸発反応やエンスタタイト ( $MgSiO_3$ ) 形成反応による固体 Mg/Si 比の変化過程である。本研究では初期太陽系を模擬した低圧条件でこれらの主要鉱物に関わる化学反応実験をおこない、その反応速度や反応機構の解明を目指した。主要な成果は以下のとおりである。

(1) フォルステライトの  $H_2$ - $H_2O$  雰囲気下での蒸発速度を決定した。 $H_2O$  の存在で蒸発が抑制されることが明らかとなった (図 2)。抑制の程度には温度依存性があり、高温では水素による蒸発促進の効果が優勢となることがわかった (図 2)。

(2) フォルステライトの  $H_2$ - $H_2O$  雰囲気下での凝縮速度を決定した (図 2)。凝縮の速度論的障壁はこれまで求められてきた蒸発の障壁と同程度であることがわかった。



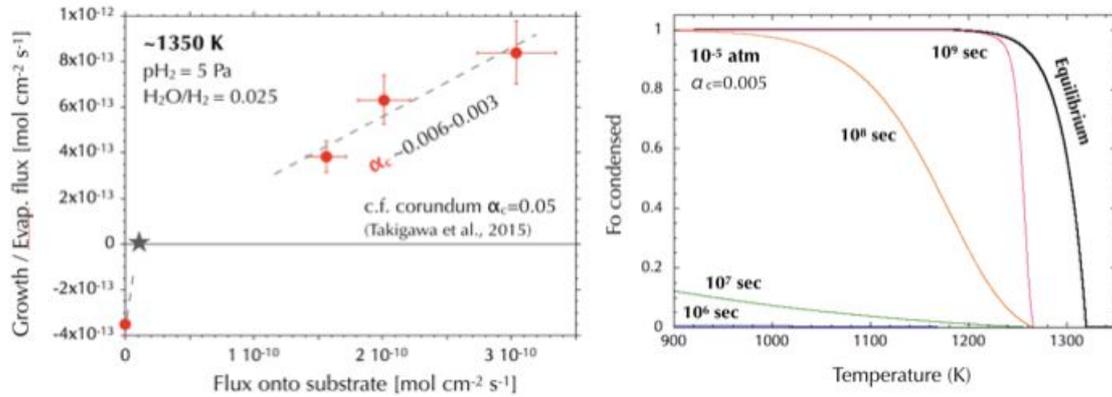


図2 (左上) フォルステライト蒸発速度の  $H_2O/H_2$  比依存性。(右上) 気相成長したフォルステライト。(左下) フォルステライト気相成長速度。(右下) 異なる時間スケールで冷却する系におけるフォルステライトの凝縮度

(3) フォルステライトおよびエンスタタイト組成の非晶質ケイ酸塩の結晶化速度を決定した(図3)。水蒸気が反応障壁を下げ、結晶化を促進することもわかった。非晶質フォルステライトの結晶化の方が効果的に起こることもわかった。

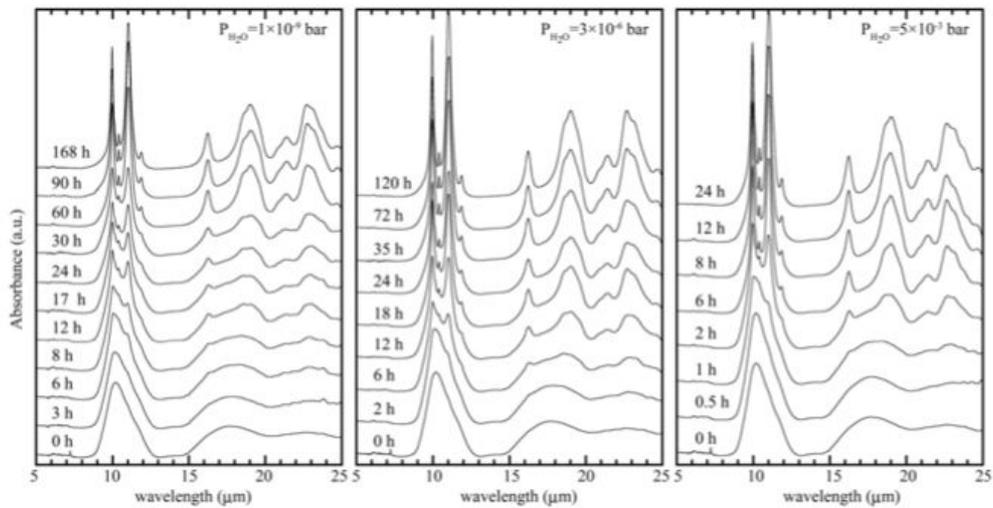


図3 異なる水蒸気分圧での加熱による非晶質フォルステライトの結晶化

(4) フォルステライトおよびエンスタタイト組成の非晶質ケイ酸塩の水蒸気との酸素同位体交換反応速度を決定した。活性化エネルギーは両者で等しいが、頻度因子が異なり、非晶質フォルステライトの同位体交換が効果的に起こることがわかった(図4)。

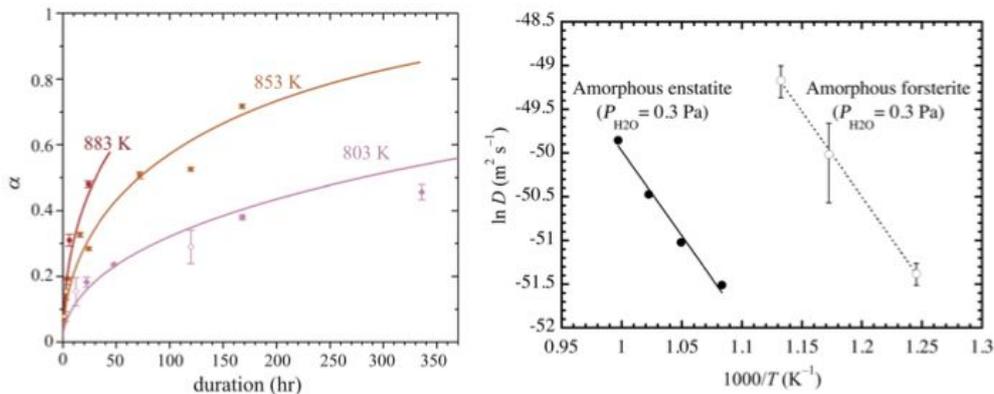


図4 (左) 水蒸気との酸素同位体交換による非晶質フォルステライト酸素同位体組成時間変化。(右) 拡散律速の非晶質フォルステライト、非晶質エンスタタイトの酸素同位体交換速度定数の温度依存性

(5) 以上の結果を総合し、原始太陽系円盤において、太陽からの距離に応じ、Mg, Si を主成分とする物質の化学組成、同位体組成、結晶性に分布が生じることを明らかにし、惑星材料の化学的多様性がつくられることがわかった(e.g., 図5)。地球材料とエンスタタイトコンドライトが初期太陽系での結晶分化で説明しうることを示した。

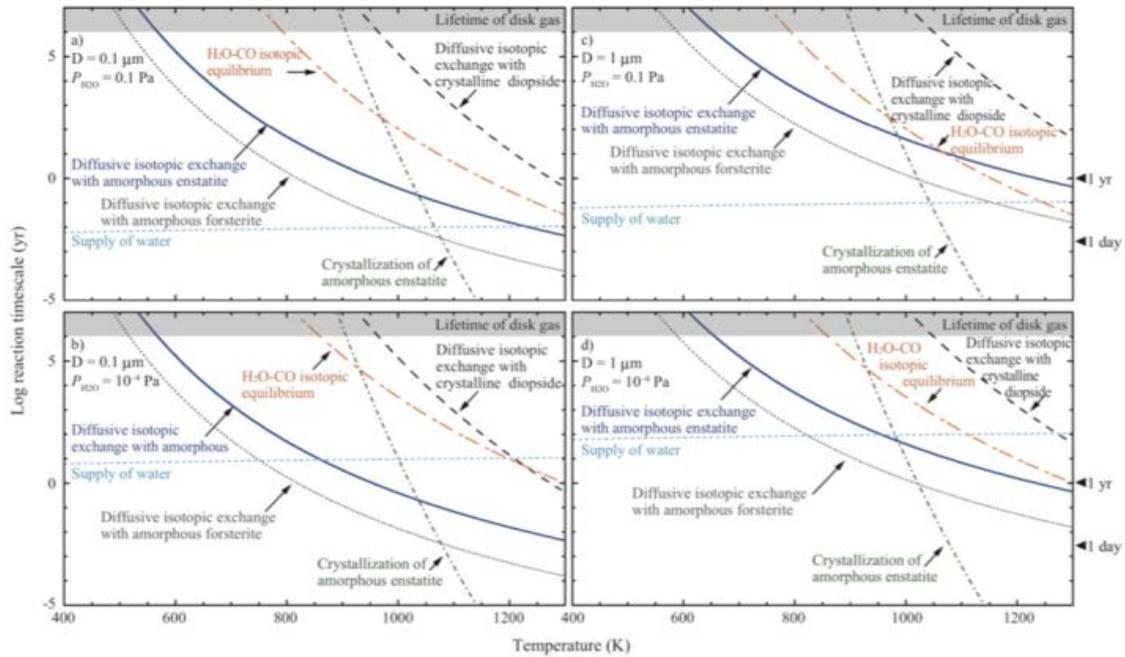


図5 原始惑星系円盤における非晶質ケイ酸塩ガストの酸素同位体交換，結晶化時間スケール

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 23 件)(すべて査読有り)

1. Sugita S., Tachibana S. et al. [121人中 70 番目] (2019) The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes. *Science* **364**, doi: 10.1126/science.aaw0422
2. Watanabe S., Tachibana S. et al. [81人中 13 番目] (2019) Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu – A spinning top-shaped rubble pile. *Science* **364**, 268-272. doi: 10.1126/science.aav8032
3. Kuroda M., Tachibana S., Sakamoto N. and Yurimoto H. (2019) Fast diffusion path for water in silica glass. *Am. Mineral.* **104**, 385-390. doi.org/10.2138/am-2019-6802
4. Sugahara H., Takano Y., Tachibana S., Sugawara I., Chikaraishi Y., Ogawa N. O., Ohkouchi N., Kouchi A. and Yurimoto H. (2019) Molecular and isotopic compositions of nitrogen-containing organic molecules formed during UV-irradiation of simulated interstellar ice. *Geochem. J.* **53**, 5-20. doi:10.2343/geochemj.2.0553
5. Isono Y., Tachibana S., Naraoka H., Orthous-Daunay F.-R., Piani L. and Kebukawa Y. (2019) Bulk chemical characteristics of soluble polar organic molecules formed through condensation of formaldehyde: Comparison with soluble organic molecules in Murchison meteorite. *Geochem. J.* **53**, 41-51. doi:10.2343/geochemj.2.0551
6. Orthous-Daunay F.-R., Piani L., Flandinet L., Thissen R., Wolters C., Vuitton V., Poch O., Moynier F., Sugawara I., Naraoka H. and Tachibana S. (2019) Ultraviolet-photon fingerprints on chondritic large organic molecules. *Geochem. J.* **53**, 21-32. doi:10.2343/geochemj.2.0544
7. Noguchi M., Tachibana S. and Nagahara H. (2019) Diffusivity and solubility of methane in ice Ih. *Geochem. J.* **53**, 83-89. doi:10.2343/geochemj.2.0537
8. Takigawa A., Stroud R. M., Nittler L. R., Alexander C. M. O'D. and Miyake A. (2018) High-temperature dust condensation around an AGB Star: Evidence from a highly pristine presolar corundum. *Astrophys. J. Lett.* **862**, L13 (6 pp), doi: 10.3847/2041-8213/aad1f5.
9. Yamamoto D., Kuroda M., Tachibana S., Sakamoto N. and Yurimoto H. (2018) Oxygen isotopic exchange between amorphous silicate and water vapor and its implications to oxygen isotopic evolution in the early Solar System. *Astrophys. J.* **865**, 98 (14pp). doi.org/10.3847/1538-4357/aadcee
10. Fujimoto Y., Kurmholz M. R. and Tachibana S. (2018) Short-lived radioisotopes in meteorites from Galactic-scale correlated star formation. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **480**, 4025-4039. doi:10.1093/mnras/sty2132
11. Yamamoto D. and Tachibana S. (2018) Water vapor pressure dependence of crystallization kinetics of amorphous forsterite. *ACS Earth Space Chem.* **2**, 778-786. doi:10.1021/acsearthspacechem.8b00047
12. Kuroda M., Tachibana S., Sakamoto N., Nakamura M., Okumura S. and Yurimoto H. (2018) Water diffusion in silica glass through pathways formed by hydroxyls. *Am. Mineral.* **103**, 412-417. doi:10.2138/am-2018-6208
13. Telus M., Huss G. R., Nagashima K., Ogliore R. C. and Tachibana S. (2018) In situ  $^{60}\text{Fe}$ - $^{60}\text{Ni}$

- systematics of chondrules from unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **221**, 342-357. doi:10.1016/j.gca.2017.06.013
14. Vlemmings W., Khouri T., O’Gorman E., De Beck E., Humphreys E., Lankhaar B., Maercker M., Olofsson H., Ramstedt S., Tafoya D. and Takigawa A. (2017) The shock-heated atmosphere of an asymptotic giant branch star resolved by ALMA. *Nature Astronomy* **1**, 848–853, doi:10.1038/s41550-017-0288-9.
  15. Terada K., Sato A., Ninomiya K., Kawashima Y., Shimomura K., Yoshida G., Kawai Y., Osawa T. and Tachibana S. (2017) Non-destructive elemental analysis of a carbonaceous chondrite with direct current Muon beam at MuSIC. *Scientific Reports* **7**, 15478. doi:10.1038/s41598-017-15719-5
  16. Takigawa A., Kamizuka T., Tachibana S. and Yamamura I. (2017) Dust formation and wind acceleration around the aluminum oxide-rich AGB star W Hydrae. *Science Advances* **3**, ea02149. doi:10.1126/sciadv.a02149
  17. Tachibana S., Kouchi A., Hama T., Oba Y., Piani L., Sugawara I., Endo Y., Hidaka H., Kimura Y., Murata K., Yurimoto H. and Watanabe N. (2017) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures. *Science Advances* **3**, ea02538. doi:10.1126/sciadv.a02538
  18. Yabuta H., Noguchi T., Itoh S., Nakamura T., Miyake A., Tsujimoto S., Ohashi N., Sakamoto N., Hashiguchi M., Abe K., Okubo A., Kilcoyne A. L. D., Tachibana S., Okazaki R., Terada K., Ebihara M. and Nagahara H. (2017) Formation of an ultracarbonaceous Antarctic micrometeorite through minimal aqueous alteration in a small porous icy body. *Geochim. Cosmochim. Acta* **214**, 172-190. doi:10.1016/j.gca.2017.06.047
  19. Noguchi T., Yabuta H., Itoh S., Sakamoto N., Mitsunari T., Okubo A., Okazaki R., Nakamura T., Tachibana S., Terada K., Ebihara M., Imae N., Kimura M. and Nagahara H. (2017) Variation of mineralogy and organic material during the early stages of aqueous activity recorded in Antarctic micrometeorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **208**, 119-144. doi:10.1016/j.gca.2017.03.034
  20. 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. doi:10.1126/sciadv.1602093
  21. 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 Sci. Rev.* **208**, 81-106. doi:10.1007/s11214-017-0338-8
  22. Piani L., Tachibana S., Hama T., Tanaka H., Endo Y., Sugawara I., Dessimoulie L., Kimura Y., Miyake A., Matsuno J., Tsuchiyama A., Fujita K., Nakatsubo S., Fukushi H., Mori S., Chigai T., Yurimoto H. and Kouchi A. (2017) Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation. *Astrophys. J.* **837**, 35 (11 pp). doi:10.3847/1538-4357/aa5ca6
  23. 小島知子, 中村圭子, 橋 省吾 (2016) 初期太陽系の惑星物質科学：隕石・彗星・小惑星の微粒子. *エアロゾル研究* **31**, 161-168.

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 橋 省吾 小惑星の物質科学と太陽系の進化．平山族発見から 100 年 – 太陽系における天体衝突・進化過程の理解の現状, 2018.11. (招待講演)
2. Tachibana S., Yurimoto H., Nakamura T., Noguchi T., Okazaki R., Yabuta H. and Naraoka H. Initial analysis plan of JAXA Hayabusa2 returned Ryugu regolith. The Geological Society of America 130th Annual Meeting, 2018.11. (招待講演)
3. Tachibana S. Hayabusa2 at Ryugu. ISSI Workshop: Reading Terrestrial Planet Evolution in Isotopes and Element Measurements, 2018.10. (招待講演)
4. 橋 省吾 「はやぶさ 2」 – 小惑星リュウグウからのサンプルリターン．2018 日本放射化学会年会・第 62 回放射化学討論会, 2018.9. (招待講演)
5. 橋 省吾 太陽系科学の将来と光赤外天文学．2018 年度光赤天連シンポジウム, 2018.9. (招待講演)
6. Tachibana S. Hayabusa2: Sampling and Sample Analysis. JpGU 2018 (International session), 2018.5. (招待講演)
7. Tachibana S. Role of sample return missions from small bodies in Solar System science. Winter school at the Ecole de Physique des Houches 'Volatile elements in the Solar System', 2018.3. (招待講演)
8. Tachibana S. Hayabusa2: Sample return from C-type near-Earth asteroid (162173) Ryugu. Royal Astronomical Society Specialist Discussion meeting 'Science of Primitive Asteroid Sample Return Missions', 2017.10. (招待講演)
9. Tachibana S., Watanabe S., Yoshikawa M., Tsuda Y. and Hayabusa2 Project Team Hayabusa2: Sample return from C-type near-Earth asteroid (162173) Ryugu. Asia Oceania Geosciences Society 13th Annual Meeting, 2016.8. (招待講演)
10. Tachibana S. Chemical Evolution of the Solar System: Laboratory Experiments and Small-Body

- Explorations. Gast Lecture at The 26th Goldschmidt Conference, 2016.6. (招待講演)
11. Tachibana S., Connolly, H. C. Jr., Lauretta D. S., Yoshikawa M. Asteroid sample return missions: The collaboration between OSIRIS-REx and Hayabysa2. JpGU 2016 (International session), 2016.5. (招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

1. 橘 省吾 (2016) 星くずたちの記憶-銀河から太陽系への物語 (岩波科学ライブラリー), 岩波書店, pp.128.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
<https://shogo-tachibana.webnode.com/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：瀧川 晶  
ローマ字氏名：Aki Takigawa  
所属研究機関名：京都大学  
部局名：白眉センター  
職名：特定助教  
研究者番号(8桁)：10750367

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。