

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05997

研究課題名(和文) 星間ダストの物性理解への実験的及び観測的挑戦

研究課題名(英文) Understanding of the properties of interstellar dust based on laboratory experiment and infrared observations

研究代表者

左近 樹 (SAKON, ITSUKI)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：70451820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ダスト合成・変性実験と赤外線天文観測に基づき、新星や終焉を迎える大質量星で作られる有機物の物質理解を目指す。特に、国際宇宙ステーションを用いた宇宙曝露実験を通じて星間有機物の一生の理解を目指す研究を行なった。まず、2.45GHzマイクロ波電源を用いたプラズマ急冷凝縮の手法により、新星周囲で合成される有機物と酷似する窒素含有炭素質物質の合成に成功した。また、宇宙曝露実験からは、回収後の実験試料に炭素質隕石物質中の不溶性有機物と類似する特徴を見いだした。また、得られた知見を反映させながら、次世代の赤外線衛星/大型望遠鏡ミッションのサイエンス検討活動や装置仕様策定を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、宇宙ダストおよび宇宙に存在する有機物の物性理解および起源と進化の一生の理解に焦点を当てた研究である。特に昨今の系外惑星研究の進展に伴い、有機物がいかに太陽系にもたらされ、生命活動と関係するかなどは、次世代の天文学における重要な研究テーマである。本研究結果は、それらに対して、ダストや有機物の合成実験と分析に基づき明確な物質情報を与え、将来の赤外線天文学や系外惑星研究の解釈の根拠となる基礎データとなる。同時に、本研究を通じて、日本が国際的な責務として担当すべき次世代の国際天文学ミッションへの寄与を担った。

研究成果の概要(英文)：This study aims to understand the properties of organics formed around novae and massive evolved star based on dust synthesis/alternation experiment and infrared astronomical observations. We have carried out the space exposure experiment of dust particles synthesized in the laboratory to examine the lifecycle of interstellar organics. We have succeeded in synthesizing laboratory organics that mimic the organics formed around classical novae via plasma chemical vapor deposition (CVD) using 2.45 GHz microwave discharge. We also have identified the infrared spectral characteristics in the samples collected back from the space exposure experiment that linked to those of insoluble organic molecules (IOM) in carbonaceous condorite. I have carried out the science planning and the study of instrument conceptual design for the next generation infrared space/ground-based missions.

研究分野：赤外線天文学、実験天文学、星間物理学、星間化学

キーワード：星間有機物 赤外線天文学 実験天文学 国際宇宙ステーション 星間ダスト Origins Space Telescope Thirty Meter Telescope

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

### 1. 研究開始当初の背景

次世代の赤外線天文学は、地上の 30m 望遠鏡(TMT)プロジェクトや、我が国の宇宙冷却望遠鏡 SPICA ミッション(Nakagawa et al. 2014)、米国の 2020 Decadal Mission の一つである Origins Space Telescope などによって、近い将来に新たな時代を迎えると期待される。現在の赤外線天文学において、「宇宙に存在する原子ガス、分子ガス、そして固体微粒子(ダスト)からなる物質の進化上の循環を理解する事」は最も重要な研究テーマの一つである。特に、天の川銀河系内や近傍銀河において、観測的に得られる星間物質の赤外線放射スペクトルとその進化に影響を与える星間物理環境要因を正しく紐づけた上で、遠方宇宙、初期宇宙の銀河に対して、観測的に得られる赤外線スペクトルの情報を利用して、その星間物理環境を測量することは、赤外線天文学における重要な戦略的手法であり、これに沿って、TMT や SPICA などの次世代赤外線ミッションでは大きな科学的進捗が期待される。しかしながら、現在の星間物質研究における最大の問題点は、我々がまだ宇宙ダストの正体を、化学組成や物質状態の観点から正確に知らない点である。炭素質の宇宙ダストの場合、2010 年に発見された C<sub>60</sub>(Cami et al. 2010)を除いて、真に物性同定が行われて宇宙での存在が確認されている炭素質ダスト(星間有機物)はほとんどない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究計画では、実験室で 2.45GHz マイクロ波電源装置を用いて炭素、水素、窒素等から構成されるプラズマガスを急冷凝縮させて炭素質ダストを合成する実験と、国際宇宙ステーション「きぼう」実験棟船外簡易曝露装置 ExHAM を用いたダストの宇宙環境曝露実験「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と有機物進化過程の解明(QCC プロジェクト)」を基軸とする実験的手法と、あかり衛星やすばる望遠鏡に搭載した中間赤外線観測装置を用いてダスト形成を伴う天体の赤外放射を調べる観測的手法によって、年老いた星の星周環境で凝縮するダストが星間空間に至るまでに被る変性過程を探り、星間ダストの真の姿を同定する事を目的とする。本研究は、観測される星間物質の赤外放射スペクトルと銀河の星間物理環境の紐付けの精度を格段に上げ、次世代の赤外線天文学に於いて、赤外線天文衛星ミッションである SPICA や Origins Space Telescope および、地上大型望遠鏡ミッションである TMT が星間物質の赤外スペクトルの情報を利用して遠方宇宙、初期宇宙の物理環境を測量する手法の基礎を構築することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、新星や終焉を迎える大質量星など、活発な質量放出とダスト特に有機物の形成の現場の赤外線観測と室内ダスト合成実験の比較を通じて、星間有機物の物質理解を目指すとともに、宇宙曝露実験を通じて「ダストが星周空間を離れて星間空間に到達するまでに被る物理変性過程」の理解を目指す。宇宙曝露実験では、非曝露試料、曝露後回収試料、地上対照実験試料の全てに対して、本研究費で既存の分光光度計に導入する顕微赤外 ATR 分光ユニットを用いた赤外線分光特性の分析や、X 線光電子分光(XPS)など各種分析・測定を実施し、宇宙曝露を通じて試料が被った赤外分光特性上の変化を捉え、その変性要因を特定するとともに必要に応じて新規の宇宙曝露実験の検討および実験提案を行う。また、観測では、ダスト形成を伴う天体の観測データを用いて星周ダストの凝縮過程と物性の理解を狙う。また、星間物質に対して得られた知見を、次世代の赤外線衛星ミッションや地上大型望遠鏡ミッションのサイエンス検討活動や装置仕様策定に反映させるための活動も行なう。

### 4. 研究成果

本研究計画では、国際宇宙ステーション「きぼう」実験棟船外簡易曝露装置 ExHAM を用いたダストの宇宙環境曝露実験「炭素質ナノ粒子の宇宙風化と有機物進化過程の解明(QCC プロジェクト)」を基軸とする実験的手法と、あかり衛星やすばる望遠鏡に搭載した中間赤外線観測装置を用いてダスト形成を伴う天体の赤外放射を調べる観測的手法によって、年老いた星の星周環境で凝縮するダストが星間空間に至るまでに被る変性過程を探り、星間ダストの真の姿を同定する事を目的とする研究を行った。本研究は、観測される星間物質の赤外放射スペクトルと銀河の星間物理環境の紐付けの精度を格段に上げ、次世代の赤外線天文学に於いて、SPICA, JWST, Origins Space Telescope など次世代の赤外線衛星ミッションや地上大型望遠鏡計画である TMT に搭載される赤外線観測装置が星間物質の赤外スペクトルの情報を利用して遠方宇宙、初期宇宙の物理環境を測量する手法の基礎を構築することに資するものである。

本研究の結果、連星系をなす恒星の終焉期の爆発的質量放出現象である新星周囲で合成される有機物と極めて類似する赤外線特性を有する窒素含有炭素質物質の合成に成功した(【5. 主な発表論文 雑誌論文 [8], 学会発表[2],[6],[8],[10]】Endo et al. 2018; Endo et al. in preparation)。さらに、本研究費を用いて真空対応の赤外線顕微分光器を導入し、波長 20 $\mu$ m までの測定が可能な検出器の追加導入、および曝露表面の分析が可能となるように ATR ユニットの導入をはかり、赤外線分光特性の測定系の構築を完了させた。2015 年度および 2016 年度の宇宙曝露実験サンプルを 2017 年 11 月までに全ての実験試料の地上回収を完了させた

([http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/160920\\_exham.html](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/160920_exham.html))。急冷炭素質物質の宇宙暴露実験の結果から、宇宙暴露実験により炭素質隕石物質中に含まれる不溶性有機物とより類似した性質を獲得することを見出し、終焉期の恒星を起源とする有機物が、原始太陽系物質中の始原的な有機物に寄与し得るといふ仮説を提示するに至った(【5. 主な発表論文 雑誌論文 [1]】左近 樹、他 2018、図 1 参照)。この検証のために新規に、窒素含有炭素質物質の宇宙暴露実験を提案し、2019年度の打ち上げを目指しタンポポ2 ミッションの枠組みのもとで暴露実験試料の準備を完了させた。

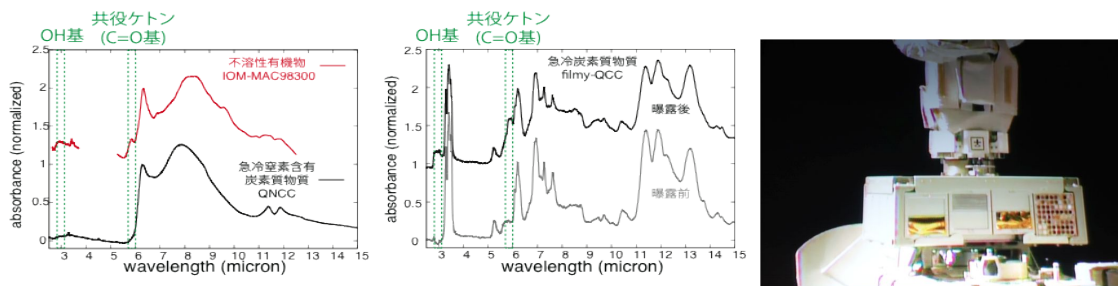


図 1: (左) 新星周囲のダストの赤外特性を模擬する急冷窒素含有炭素質物質 (QNCC) の赤外吸光度スペクトルと炭素質コンドライト中の不溶性有機物(IOM-MAC98300)の赤外吸光度スペクトル(見やすさのためY方向に+1.0のオフセットを付記)の比較。(中) 2015-2017年度に国際宇宙ステーションきぼう実験棟ExHAMを利用して実施した急冷炭素質物質(filmy-QCC)の宇宙暴露実験前後での赤外スペクトルの比較(曝露後のデータにY方向+1.0のオフセットを付記)。宇宙曝露の前後で、増加が見られた5.9-6.0 $\mu\text{m}$ 付近の共役ケトン(C=O)基および2.8-3.0 $\mu\text{m}$ 付近のOH基の対応位置を緑色点線枠で示す。(右) 2015-2017年に実施したきぼう実験棟ExHAMを利用して実施した宇宙暴露実験「炭素質固体微粒子の宇宙風化と有機物進化の実証研究」のサンプルが宇宙暴露環境に設置される様子(NASA/JAXA提供)。

また、2016年5月より、米国2020年 Decadal Survey に向けて検討される Origins Space Telescope (OST)について、JAXA よりオブザーバーを任命され、科学技術定義チーム (STDT) 活動に参加した。主要観測装置の一つである中間赤外線観測装置 MISC の Principal Investigator (PI)を担当し、海外共同研究者 Thomas L. Roellig (NASA Ames)らとともに MISC の概念設計検討を担当し、サイエンス検討活動に参加した(【5. 主な発表論文 雑誌論文 [2],[3],[4],[6],[9]】、図 2 参照)。その結果、2018年5月に完成した中間報告書 (<https://arxiv.org/abs/1809.09702>)、さらに、2019年4月26日に NASA HQ 内の評価チーム LCIT に提出した最終報告書に MISC の該当部分の執筆を担当した。また、海外共同研究者の Chris Packahm が PI を務める中間赤外線観測装置 MICH I について 星間物質サイエンスの検討や面分光機能の開発を担当した【5. 主な発表論文 雑誌論文 [5]】。

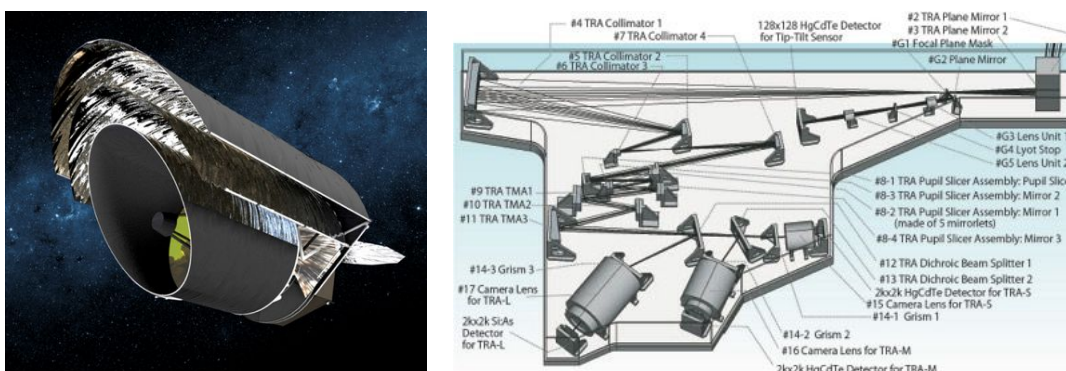


図 2. (上) 2035 年の打ち上げを狙う Origins Space Telescope (OST) の想像図と、OST/MISC (Sakon et al. 2018, Proc. of SPIE, 10698, 1069817) の最終基本仕様で採用した瞳分割分光的手法による系外惑星トランジット分光装置の構造設計図。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- [1] 左近 樹, 遠藤 いずみ, 池内 綾人, 尾中 敬, 木村 勇気, 木村 誠二, 和田 節子, 中村 正人, 市村 淳, 小川 奈々子, 大河内 直彦, 稲富 裕光, “炭素質ダストの宇宙曝露実験”, 日本航空宇宙学会誌, 66, 381-387 (2018) (DOI: 10.14822/kjsass.66.12\_381)
- [2] Sakon, I., Roellig, T. L., Ennico-Smith, K., Matsuo, T., Ikeda, Y., Yamamuro, T., Fujishiro, N., Enya, K., Takahashi, A., Wada, T., Guyon, O., Kotani, T., Nishikawa, J., Murakami, N., Sarugaku, Y., Burgarella, D., “The mid-infrared imager, spectrometer, coronagraph (MISC) for the Origins Space Telescope (OST)”, *Proc. of the SPIE*, 10698, 1069817 9pp. (2018) [DOI: 10.1117/12.231417].
- [3] Matsuo, T., Greene, T., Roellig, T. L., McMurray, R. E., Johnson, R. R., Kashani, A., Goda, S., Ido, M., Ito, S., Tsuboi, T., Yamamuro, T., Ikeda, Y., Shibai, H., Sumi, T., Sakon, I., Ennico-Smith, K. “A highly stable spectrophotometric capability for the Origins Space Telescope (OST) mid- infrared imager, spectrometer, coronagraph (MISC)”, *Proc. of the SPIE*, 10698, 1069844 12pp. (2018) [DOI: 10.1117/12.2311896].
- [4] Fujishiro, N., Sakon, I., Enya, K., Guyon, O., Nishikawa, J., Murakami, N., Kotani, T., Tamura, M., Takahashi, A., Roellig, T. L., Ennico-Smith, K. “PIAA coronagraph for Origins Space telescope (OST) mid-infrared imager, spectrometer, coronagraph (MISC) instrument”, *Proc. of the SPIE*, 10706, 107065N 10 pp. (2018). [DOI: 10.1117/12.2311896].
- [5] Packham, C., Honda, M., Chun, M., Sakon, I., Richter, M., Okamoto, Y., Kataza, H., Marois, C., Meyer, M., Puravankara, M., Birkby, J., Crossfield, I., Curry, T., Greathouse, T., Herczeg, G., Ichikawa, K., Inami, H., Imanishi, M., Lopez-Rodriguez, E., “The key science drivers for MICH: a thermal-infrared instrument for the TMT”, *Proc. of the SPIE*, 10702, 10702A0 12 pp. (2018). [DOI: 10.1117/12.2313967].
- [6] Battersby, C., et al. “The Origins Space Telescope”, *Nature Astronomy*, 2, 596-599 (2018). [DOI: 10.1038/s41550-018-0540-y].
- [7] Sakon, I., Shimamoto, S., Onaka, T., Osawa, R., Ishihara, D., Usui, F., Ootsubo, T., Doi, Y., “Properties of Infrared Emission of Novae Detected in AKARI All Sky Survey”, *JAXA Special Publication: The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI archive: from galaxies and stars to planets and life*, JAXA-SP-17-009E, 281-284 (2018)
- [8] Endo, I., Sakon, I., Onaka, T., Kimura, S., Wada, S., Ogawa, N., Ohkouchi, N., Yabuta, H., “Infrared property of nitrogen-included carbonaceous dust produced via microwave discharge and its comparison with the observed unidentified infrared (UIR) bands”, *JAXA Special Publication: The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI archive: from galaxies and stars to planets and life*, JAXA-SP-17-009E, 305-308 (2018)
- [9] Sakon, I., Roellig, T. L., Ennico-Smith, K., Matsuo, T., Ikeda, Y., Yamamuro, T., Fujishiro, N., Enya, K., Takahashi, A., Wada, T., Guyon, O., Kotani, T., Nishikawa, J., Murakami, N., Sarugaku, Y., Burgarella, D., “Mid-Infrared Imager, Spectrometer, Coronagraph (MISC) for the Origins Space Telescope (OST)”, *JAXA Special Publication: The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI archive: from galaxies and stars to planets and life*, JAXA-SP-17-009E, 67-70 (2018)
- [10] Sakon, I., Onaka, T., Usui, F., Shimamoto, S., Ohsawa, R., Wada, T., Matsuhara, H., Arai, A., “Spectral Evolution of Novae in the Near-Infrared Based on Akari Observations”, *PKAS*, 32, 101-103 (DOI: 10.5303/PKAS.2017.32.1.101)

〔学会発表〕(計 10 件)

- [1] Sakon, I., “MISC Instrument”, 国際研究会 ‘From First Stars to Life: Science with the Origins Space Telescope’, UK, Oxford (2018) [招待講演]
- [2] Sakon, I., “Space Exposure Experiment of Laboratory-Synthesized Carbonaceous Solids using ISS/KIBO/ExHAM; Project Overview”, 国際学会 42nd COSPAR Scientific Assembly, Pasadena, USA (2018) [口頭講演]
- [3] Sakon, I., “The mid-infrared imager, spectrometer, coronagraph (MISC) for the Origins Space Telescope (OST)”, 国際研究会 SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, Texas, USA (2018) [口頭講演]
- [4] 左近 樹, “Mission Concept Studies for the 2020 Decadal Survey ; Origins Space Telescope (OST) Final Mission Concept”, 日本天文学会 2019 年春季年会 (2019)
- [5] 左近 樹, “The study of Mid-Infrared Imager and Spectrometer (MISC) for Origins Space Telescope (OST) Mission Concept 2”, 日本天文学会 2018 年秋季年会 (2018)
- [6] 左近 樹, “宇宙環境曝露実験によって探る炭素質星間塵の性質”, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018)
- [7] 左近 樹, “A Mission Concept Studies for the 2020 Decadal Survey ; The study of Mid-Infrared Imager, Spectrometer, Coronagraph (MISC) for Origins Space Telescope (OST)”, 日本天文学会 2017 年秋季年会 (2017)

[8] 左近 樹, “国際宇宙ステーション「きぼう」利用 簡易曝露実験装置 ExHAM を利用した炭素質ダストの宇宙曝露実験(3)”, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017)

[9] 左近 樹, “Mission Concept Studies for the 2020 Decadal Survey ; Origins Space Telescope”, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017)

[10] 左近 樹, “国際宇宙ステーション「きぼう」利用 簡易曝露実験装置 ExHAM を利用した炭素質ダストの宇宙環境曝露実験(2)”, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016)

〔図書〕(計 0 件)

〔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

【1】 The MISC for Origins Space Telescope

[http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/OST/MISC/index\\_misc.html](http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/OST/MISC/index_misc.html)

【2】「きぼう」利用科学研究テーマ「炭素質固体微粒子の宇宙風化と有機物進化の実証研究」

<http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/QCC/index.html>

【3】 2019 年度 Tanpopo2 曝露実験サンプル(QCC 型)

[http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/QCC/index\\_tanpopo2\\_qcc-type.html](http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/QCC/index_tanpopo2_qcc-type.html)

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 遠藤 いずみ

ローマ字氏名: ENDO, IZUMI

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。