

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03909

研究課題名(和文) 赤外線観測および実験に基づく恒星終焉期のダスト形成過程の理解

研究課題名(英文) Understanding the process of dust formation by evolved stars based on infrared observation and experiment

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では星間有機物の性質と一生を明らかにすることを目的とする。宇宙の塵は、恒星内部で合成された元素を原材料として、主として終焉期を迎える星の星周空間で誕生する。本研究では、新星爆発や、いずれ超新星爆発に至る直前の大質量星の姿であるWolf-Rayet星周空間における塵の形成に焦点をあて、赤外線観測と模擬星間有機物の室内合成実験の融合的手法によって調べた。その結果、新星爆発によって生まれる有機物の塵の赤外線分光特性を再現する『窒素含有炭素質物質』の合成に成功し、その詳細な分析を完了させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の有機物の塵の物質同定とその一生の理解は、地球に存在する生命が、広く長い宇宙の歴史において、いかにありがたくもありふれたものであるかを知ることと直結し、宇宙生物学、天体化学、地球惑星科学、さらには学際的に広く価値が共有される研究対象である。本研究の成果は、2021年8月26日に東京大学において明星大学及び北海道大学と共同で、『新星爆発で生まれる有機物の地理の合成に成功』として、記者発表(<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7522/>)を実施し、時事通信、朝日新聞のwebニュースのほか、東京新聞、中日新聞に掲載された。

研究成果の概要(英文)：This study aims to demonstrate the properties and the lifecycle of interstellar organics. Dust in space is expected to be formed in the circumstellar space of stars, mainly, in their final evolution stage using the nucleosynthesized elements. This study has focused on the synthesis process of dust in the circumstellar environment of novae and Wolf-Rayet stars via a combined approach between infrared spectroscopic observation and laboratory astrophysics to synthesize organic dust that mimic the observed properties of interstellar organics. Based on this project, we have successfully synthesized the organic dust that reproduce the infrared spectral properties of dust formed around novae, which we named quenched nitrogen-included carbonaceous composite (QNCC), and completed the detailed infrared and x-ray analysis of QNCC. We have made the press release on the result of this research (<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7522/>)

研究分野：赤外線天文学、実験天文学

キーワード：星間塵 赤外線 有機物 実験天文学 赤外線観測天文学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン当初、ほぼ水素とヘリウムだけで構成されていた宇宙は、宇宙に誕生した恒星内での重元素合成の結果、化学的に豊かな物質を育む現在の姿に至った。太陽質量の 8 倍を超えるような大質量星は、主系列星寿命も短く、星の誕生から数千万年程度の時間スケールで重量崩壊型の超新星爆発を経てそうした重元素を宇宙空間に供給するため、初期宇宙の銀河や遠方銀河の星間物質を特徴付ける。一方、それよりも軽い中小質量星は、より長い時間スケールで晩期型巨星の恒星風によって、また、連星系を成す一部の白色矮星は新星爆発によって、宇宙空間に重元素を供給し、天の川銀河のような比較的成熟した銀河の星間物質を特徴付けると考えられる。こうした、宇宙の化学進化の歴史の理解は、天文学における重要なテーマであるが、我々は宇宙に存在する物質の情報に対して極めて限られた知識しか持たない。星間物質のうち、電離ガスや中性の原子ガス、分子ガスとともに、重要なメンバーである星間ダストは、特に赤外線の放射から母銀河の活動度や星間物理環境を推定するために利用可能で、天文学における重要な研究対象である。しかしながら、2010 年に星間物質中における存在が観測的に確かめられたフラレーン C60 を除いて、星間ダストで明白な物質同定が出来ている物質はほとんどない。次世代の赤外線天文衛星がもたらすであろう詳細な赤外線データが供給される将来に置いて、星間ダストに対する我々の知識はあまりに乏しい。一方で、我が国の近年のはやぶさ 2 をはじめとする地球科学ミッションから太陽系内の始原的な物質に対する即物的な情報が得られるようになり、次世代の赤外線天文衛星が目指す系外惑星研究に置いて、系外惑星に存在する「生命に関係する前駆物質」や「有機物」がどのようにもたらされたかに対する興味がますます高まっている。従って、さまざまな主系列質量の恒星が終焉期の質量放出の過程で供給するダストの化学組成と物性を明らかにする事、そしてそれらがどのように銀河の星間空間を旅し分子雲中に取り込まれやがて新たな恒星の誕生現場で始原的な材料物質として寄与するかを理解する事は、最新の天文学が急務として扱う研究課題である。

2. 研究の目的

星間ダストの化学組成と物性を理解する上で、窒素を含有するダストに焦点を充てた研究が従来の星間物質に対する描像に革新をもたらすと着想を得た。本研究では、終焉期を迎える恒星の質量放出の過程で、窒素が混入したダストが形成される過程を観測的および実験的な手法で理解する事を目的とする。さらに、得られた知見を次世代の国際的な大型の赤外線天文衛星ミッションの科学策定活動に活かすことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、恒星に由来するダストのうち、特に有機物に関連するダストの形成過程とその化学組成に焦点を充て、観測と実験の両アプローチによって遂行する。

(1) 連星系を成す白色矮星が引き起こす爆発的質量放出現象である古典新星については、新たに古典新星の赤外スペクトルデータを取得する。同じく大質量星終焉期の質量放出現象である Wolf-Rayet 星におけるダスト形成は、極端に水素が欠乏した Wolf-Rayet 星の濃い恒星風と伴星の O 型星の恒星風がぶつかり合う環境下で近日点通過の度に周期的に起こる。関連する研究テーマで JWST に観測時間を獲得した ISAS/JAXA の Ryan Lau の研究協力のもと、応募者が過去にすばる望遠鏡 COMICS や赤外線天文衛星あかりを用いて取得した既存/新規データを用い、ダストの収量や赤外スペクトルの特徴を観測的に調査する。

(2) 我々が合成する窒素含有炭素質ダストは、脂肪族および芳香族の炭化水素などの炭素質ダストと窒素ガスを原材料とする。原材料の質量/流量や種類を変える事によって水素/炭素/窒素の構成比や結合状態の異なる窒素含有炭素質物質を合成することができる。これにより、特に新星の場合には、ある古典新星の異なる観測時刻での赤外スペクトル、および、異なる古典新星で取得された赤外スペクトルの特徴を再現する実験室ダストの合成実験を行うことで、赤外スペクトルの変化や多様性の要因となる物理パラメータや化学結合状態の変化を特定し、また収量を定量的に調べる事で、窒素がダストに取り込まれる過程を理解する事を狙う。合成した実験室有機物は、顕微赤外分光による分析を行い、各観測データと良く一致する赤外分光特性を示す物について、XANES 分析等を利用して、炭素や窒素の結合状態を特定し、終焉期の恒星周囲で観測される有機物の化学組成、物性を理解する。

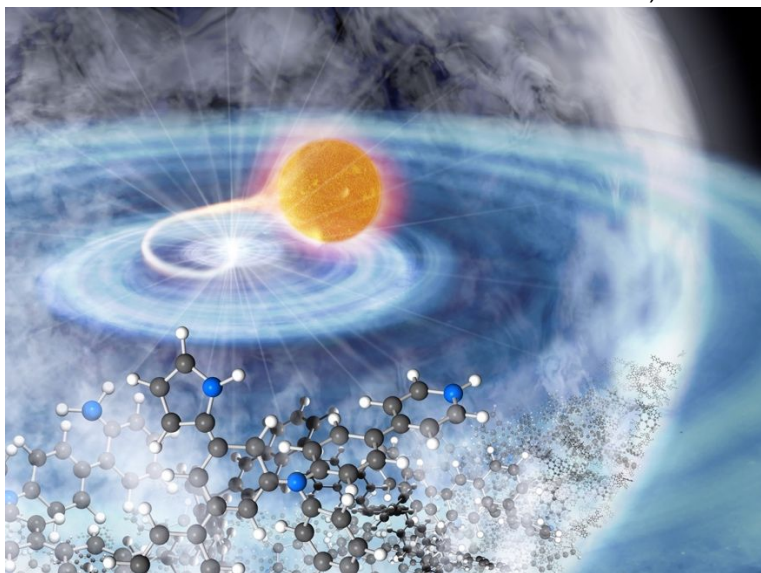
(3) さらに、米国が 2020 年 Decadal Survey において検討を進める 4 つの超大型ミッションのうちの一つである Origins Space Telescope、さらに 2021 年の Decadal 報告書の提出を受けて検討が開始した Far-infrared Probe ミッションにおける科学策定活動に、本研究で得られた知見に基づいた貢献を行う。

4. 研究成果

(1) 本研究では、終焉期を迎える恒星の質量放出の過程で、窒素が混入したダストが形成される過程を観測的および実験的な手法で理解する事を目的とする。そうした有機物の塵が合成される環境として、具体的には、連星系を成す白色矮星が引き起こす爆発的質量放出現象である古典新星の他、大質量星の終焉期の爆発的な質量放出現象である Wolf-Rayet 星などがある。すばる望遠鏡 COMICS を用いて、それらの天体に観測される未同定赤外バンドの特徴を系統的に理解するための観測的研究を実施した (Endo, Ryan, Sakon et al.2022, “Detection of a Broad 8um UIR feature in the Mid-infrared Spectrum of WR125 Observed with Subaru/COMICS”)。さらに、それらの特徴を再現する実験室有機物の合成実験を行い、星間有機物の物性理解を進めた。

(2)星間空間および星周空間に存在する宇宙ダストを研究対象とし、それらの宇宙環境での生成 / 変成 / 破壊過程を含めた一生を探ると同時に、ダストの赤外線特性を理解し遠方の銀河の星間物理環境を診断する手法を構築する事を目標に、観測及び実験の両アプローチを組み合わせることで遂行した。本研究では、宇宙ダストのうち特に有機物を含むダストの性質に焦点をあて、それらの赤外放射の性質の理解を目標とする研究を行なった。

まず、実験的手法によって、新星の周囲に観測される未同定赤外バンドの特徴を極めてよく再現する実験室有機物の合成に成功し、それらの赤外線およびX線吸収スペクトル分析を実施した。詳細な分析の結果、新星周囲で形成される有機物の正体が、窒素をアミンの形で 3-5%程度含んだ有機物であること、その放射過程が熱放射で説明できることを明らかにした。これによって、長年の未解決問題として掲げられてきた未同定赤外バンドの担い手の同定に対して、特に新星周囲に観測される未同定赤外バンドに対して、革新的な理解を得ることに至った。本結果は、Endo, Sakon*, Onaka et al. 2022, “On the nature of Organic Dust in Novae” Astrophysical Journal, 917,103(*責任著者)として Astrophysical Journal 誌に発表し、この成果に関する記者発表『新星爆発で生まれる有機物の塵の合成に成功』を 2021 年 8 月 26 日 (<https://www.s.utokyo.ac.jp/ja/press/2021/7522/>)にて行い、複数の web ニュース及び新聞記事(2021 年 10 月 17 日東京新聞朝刊、2021 年 10 月 18 日中日新聞朝刊)に掲載された。



図：新星爆発が有機物の塵を生み出す様子のイラストレーション。分子模型中の白球は水素、黒球は炭素、青球は窒素を表す。

また、急冷炭素質物質の性質と始原的な太陽系の有機物と考えられ炭素質隕石物質中に含まれる不溶性有機物等との関連を探るため、国際宇宙ステーションきぼう実験棟簡易曝露実験装置 ExHAM を用いて、実験生成有機物の宇宙曝露実験を行い、その回収試料の分析のための測定環境の整備を行うとともに、赤外およびX線による分析を実施した。

(3)さらに、本研究によって得られた星間有機物に対する知見を踏まえて、NASA が主導し検討を行なっている Origins Space Telescope の科学技術検討活動や次世代のスペース遠赤外線ミッションの検討活動につなげた。本結果は、Sakon et al.2021, “Mid-infrared spectrometer and camera for the Origins Space Telescope”, Journal of Astronomical Telescope, Instruments and Systems, 7, 011013 (27pp.)として発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 15件／うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Endo Izumi, Sakon Itsuki*, Onaka Takashi, Kimura Yuki, Kimura Seiji, Wada Setsuko, Helton L. Andrew, Lau Ryan M., Kebukawa Yoko, Muramatsu Yasuji, Ogawa Nanako O., Ohkouchi Naohiko, Nakamura Masato, Kwok Sun	4. 巻 917
2. 論文標題 On the Nature of Organic Dust in Novae	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 103 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0cf1	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 該当する

1. 著者名 Sakon Itsuki, Roellig Thomas L., Ennico-Smith Kimberly et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Mid-infrared spectrometer and camera for the Origins Space Telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 011013 (27pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.011013	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 該当する

1. 著者名 Vats Akant, Pathak Amit, Onaka Takashi, Buragohain Mridusmita, Sakon Itsuki, Endo Izumi	4. 巻 74
2. 論文標題 Theoretical study of infrared spectra of interstellar PAH molecules with N, NH, and NH ₂ incorporation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 161 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab116	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 該当する

1. 著者名 Onaka Takashi, Kimura Tomoyuki, Sakon Itsuki, Shimonishi Takashi	4. 巻 916
2. 論文標題 Discovery of Two Infrared Objects with Strong Ice Absorption in the Akari Slitless Spectroscopic Survey of the Galactic Plane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 75 (23pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0531	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 該当する

1. 著者名 Wiedner M. C., et al.	4. 巻 51
2. 論文標題 Origins space telescope: from first light to life	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Astronomy	6. 最初と最後の頁 595 ~ 624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10686-021-09782-0	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 該当する

1. 著者名 Burgarella Denis, et al.	4. 巻 51
2. 論文標題 Space Project for Astrophysical and Cosmological Exploration (SPACE), an ESA stand-alone mission and a possible contribution to the Origins Space Telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Astronomy	6. 最初と最後の頁 625 ~ 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10686-021-09703-1	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 該当する

1. 著者名 Leisawitz David, et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Origins Space Telescope: trades and decisions leading to the baseline mission concept	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 011014 (19pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.011014	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 該当する

1. 著者名 Sakon Itsuki, Roellig Thomas L., Ennico-Smith Kimberly, et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Mid-infrared spectrometer and camera for the Origins Space Telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 011013 (27pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.011013	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 該当する

1. 著者名 Leisawitz David et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Origins Space Telescope: trades and decisions leading to the baseline mission concept	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 011014 (19pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.011014	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 該当する

1. 著者名 Meixner Margaret et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Origins Space Telescope science drivers to design traceability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 011012 (19pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.011012	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 該当する

1. 著者名 Leisawitz David T. et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 Origins Space Telescope: baseline mission concept	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 011002 (23pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.1.011002	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 該当する

1. 著者名 Roellig Thomas L., McMurtry Craig, Greene Thomas, Matsuo Taro, Sakon Itsuki, Staguhn Johannes	4. 巻 6
2. 論文標題 Mid-infrared detector development for the Origins Space Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 041503 (13pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.6.4.041503	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 該当する

1. 著者名 Sakon Itsuki, Roellig Thomas L., Ennico-Smith Kimberly et al.	4. 巻 11443
2. 論文標題 The mid-infrared spectrometer/camera (MISC) for the Origins Space Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 114436K (8 pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2561949	査読の有無 無
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

1. 著者名 Buragohain Mridusmita, Pathak Amit, Sakon Itsuki, Onaka Takashi	4. 巻 892
2. 論文標題 DFT Study on Interstellar PAH Molecules with Aliphatic Side Groups	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 (11pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab733a	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 該当する

1. 著者名 Leisawitz David T. et al.	4. 巻 11115
2. 論文標題 The Origins Space Telescope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 111160Q (12pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2530514	査読の有無 無
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 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Itsuki Sakon
2. 発表標題 Study on the properties and the origin of organic dust in galaxies at high redshift
3. 学会等名 Astro2020 and IR Astrophysics: Planning for the Next Decade (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 左近 樹
2. 発表標題 たんぼぼ 2QCC 曝露
3. 学会等名 ISAS 宇宙生命探査シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sakon, I., et al.
2. 発表標題 The mid-infrared spectrometer/camera (MISC) for the Origins Space Telescope
3. 学会等名 SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Itsuki Sakon
2. 発表標題 Understanding of the properties of Interstellar Dust and Organics
3. 学会等名 International Conference on Infrared Astronomy and Astrophysical Dust, 22-25 October 2019, IUCAA, Pune, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 左近 樹
2. 発表標題 Mission Concept Studies for the 2020 Decadal Survey ; Origins Space Telescope (OST)
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤いずみ
2. 発表標題 急冷窒素含有炭素質物質の赤外分光特性
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 左近 樹
2. 発表標題 宇宙初期の銀河星間環境を特徴付けるダストの性質の理解
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤いずみ
2. 発表標題 すばる望遠鏡COMICSを用いたWR125の中間赤外低分散分光観測
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izumi Endo
2. 発表標題 Experimental approaches to understand the properties of organics in space
3. 学会等名 International Conference on Infrared Astronomy and Astrophysical Dust, 22-25 October 2019, IUCAA, Pune, India (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤いずみ
2. 発表標題 急冷窒素含有炭素質物質の宇宙環境曝露実験
3. 学会等名 第63 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izumi Endo
2. 発表標題 Laboratory experiments on the carriers of the 'Class C' UIR bands
3. 学会等名 The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, 2-6 September 2019, Palais des Papes-Avignon, France (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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 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 MISC for Origins http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/OST/MISC/index_misc_concept_base_line.html 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 Mid-Infrared Spectrometer and Camera (MISC) http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/OST/MISC/index_misc.html
--

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
研究協力者	遠藤 いずみ (ENDO IZUMI)	東京大学・理学系研究科・大学院生 (12601)	

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			
米国	NASA Ames Research Center	NASA Goddard Space Flight Center		
インド	Banaras Hindu University	Tezpur University		
米国	NASA Ames Research Center	NASA Goddard Space Flight Center	The University of Texas at San Antonio	
カナダ	The University of British Columbia			
インド	Banaras Hindu University			
米国	NASA Ames Research Center	NASA Goddard Space Flight Center	California Institute of Technology	
インド	Banaras Hindu University			
フランス	LAM	CNES		