

## 地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験研究チーム報告： 地球外有機物・微生物の検出のための宇宙実験の検討

小林憲正(横浜国大院工), 石川洋二(大林組), 今井栄一(長岡技科大), 内海裕一(兵庫県立大), 大石雅寿(国立天文台), 大林由美子(横浜国大院工), 小川麻里(安田女子大), 奥平恭子(会津大), 金子竹男(横浜国大院工), 河合秀幸(千葉大院理), 河崎行繁(IAS), 神田一浩(兵庫県立大), 齊藤香織(名大院農), 才木常正(兵庫県工技セ), 高橋淳一(NTT), 高橋裕一(山形大), 中川和道(神戸大発達), 中嶋悟(大阪大院理), 長沼毅(広島大院生物圏), 奈良岡浩(九大院理), 橋本博文(JAXA/ISAS), 春山純一(JAXA/ISAS), 福島和彦(名大院農), 本多元(長岡技科大), 丸茂克美(産総研), 三田肇(福岡工大), 宮川厚夫(静岡大工), 藪田ひかる(阪大院理), 山岸明彦(東薬大生命), 山下雅道(JAXA/ISAS), 吉村義隆(玉川大農), 横堀伸一(東薬大生命)

### Activity Report of JAXA “Astrobiology Experiments in Earth Orbit” Study Team: Studies on Detection Methods for Extraterrestrial Organics and Organism

*Kensei Kobayashi,<sup>1\*</sup> Yoji Ishikawa,<sup>2</sup> Eiichi Imai,<sup>3</sup> Yuichi Utsumi,<sup>4</sup> Masatoshi Oishi,<sup>5</sup> Yumiko Obayashi,<sup>1</sup> Mari Ogawa,<sup>6</sup> Kyoko Okudaira,<sup>7</sup> Takeo Kaneko,<sup>1</sup> Hideyuki Kawai,<sup>8</sup> Yukishige Kawasaki,<sup>9</sup> Kazuhiro Kanda,<sup>4</sup> Kaori Saito,<sup>10</sup> Tunemasa Saiki,<sup>11</sup> Jun-ichi Takahashi,<sup>12</sup> Yuichi Takahashi,<sup>13</sup> Kazumichi Nakagawa,<sup>14</sup> Satoru Nakashima,<sup>15</sup> Takeshi Naganuma,<sup>16</sup> Hiroshi Naraoka,<sup>17</sup> Hirofumi Hashimoto,<sup>18</sup> Jun'ichi Haruyama,<sup>18</sup> Kazuhiko Fukushima,<sup>10</sup> Hajime Honda,<sup>3</sup> Katsumi Marumo,<sup>19</sup> Hajime Mita,<sup>20</sup> Atsuo Miyakawa,<sup>21</sup> Hikaru Yabuta,<sup>15</sup> Akihiko Yamagishi,<sup>22</sup> Masamichi Yamashita,<sup>18</sup> Yoshitaka Yoshimura,<sup>23</sup> and Shin-ichi Yokobori<sup>22</sup>*

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501; E-Mail: [kkensei@ynu.ac.jp](mailto:kkensei@ynu.ac.jp)

<sup>2</sup>Obayashi Corporation, <sup>3</sup>Nagaoka University of Technology, <sup>4</sup>University of Hyogo, <sup>5</sup>National Astronomical Observatory, Japan, <sup>6</sup>Yasuda Woman's University, <sup>7</sup>The University of Aizu, <sup>8</sup>Chiba University, <sup>9</sup>Institute of Advanced Science, <sup>10</sup>Nagoya University, <sup>11</sup>Hyogo Prefectural Institute of Technology, <sup>12</sup>NTT, <sup>13</sup>Yamagata University, <sup>14</sup>Kobe University, <sup>15</sup>Osaka University, <sup>16</sup>Hiroshima University, <sup>17</sup>Kyushu University, <sup>18</sup>Institute of Space and Astronautical Science, <sup>19</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>20</sup>Fukuoka Institute of Technology, <sup>21</sup>Shizuoka University, <sup>22</sup>Tokyo University of Pharmacy and Life Science, <sup>23</sup>Tamagawa University

\*Yokohama National University, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

E-Mail: [kkensei@ynu.ac.jp](mailto:kkensei@ynu.ac.jp)

Abstract: Activities of the JAXA Research Team “Astrobiology Experiments in Earth Orbit” were reported. This research team was originally organized as a working group in 2004, and has been discussing possible experiments on astrobiology by utilizing the ISS and other facilities since then. In this year, we discussed novel analytical techniques for life detection in extraterrestrial environments such as Mars. We discussed the possibility to detect microorganisms near the methane eruption areas, where the main targets were methane-oxidizing bacteria. The novel detection system for methane was discussed to select the landing points. Fluorescence microscopy will be applied to direct detection of microorganisms, followed by amino acid analysis of the hydrolyzed extract of soils. We are developing a portable fluorescence microscope, and selecting the mass spectrometric techniques for trace amino acids. Other targets include terrestrial microorganisms in the caves of Moon for the verification of interplanetary migration of life, and complex organic compounds in Titan surface and Enceladus plume. In addition to development of instruments for space experiments, development of on-ground facilities for the analysis of returned samples such as the STXM-XANES line. Radiation facilities for irradiation of high-energy particles and photons for ground simulation are also necessary to design novel space experiments.

*Key words*; Astrobiology, origins of life, extraterrestrial life, amino acids, microorganisms, fluorescence microscopy, life detection

## 1. はじめに

1990年代末にNASAにより提案された「アストロバイオロジー」は生命の起源・進化・分布・未来を探る学際分野と定義され[1], 米国では NASA Astrobiology Institute (NAI), 欧州では European Astrobiology Network Association(EANA)を中心に発達してきたが、日本でも2009年にアストロバイオロジーネットワークが創設され、その研究の発展が期待されている。

われわれは、平成16年度以来、宇宙環境利用科学委員会地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験研究班WGを組織し、国際宇宙ステーションなどを用いたアストロバイオロジー実験テーマについて議論を行ってきた[2-8]。その議論の中から、宇宙ステーション上での微粒子の採取と微生物・有機物・鉱物探査や宇宙空間での微生物の生存可能性を調べる実験を「たんぼぼ計画」[9]として国際宇宙ステーション曝露部利用の候補課題として提案し、現在、宇宙実験の準備が進められている。さらに、月・火星などをターゲットとした提案に向け議論を重ねてきた。

本年度の「地球周回軌道におけるアストロバイオロジー研究チーム」では、今後の宇宙環境を利用するアストロバイオロジーミッションのテーマの発掘と、そのために必要な技術要素の開発を中心に議論を行った。

## 2. 本年度の研究チーム活動

本年度の主要な研究チーム会合としては、2011年11月26-27日に神戸大学において、また2012年1月21日にJAXA宇宙科学研究所において全体会議を持った。また、テーマ毎の会合を、JAXA宇宙科学研究所(相模原)などで、数回開催した。また、研究チームメンバーは、2011年7月にモンペリエ(フランス)で開催されたOrigins 2011およびケルン(ドイツ)で開催されたEuropean Astrobiology Network Association 会合などに出席し、欧米の研究者と今後の地球周回軌道でのアストロバイオロジー実験や将来の協力関係などについて意見を交換した。

## 3. 生命の起源を探る宇宙実験

地球上の生命は、一般に約40億年前に地球で誕生したとされる。しかし、生命の誕生した当時の地球環境や有機物は、現在の地球上に遺されていないため、実証的な研究は困難であった。しかし、今日、人類の宇宙進出により、地球上で得られない生命の起源に関するあらたな物証の取得の可能性が生じた。それらは、(1) 生命の原材料となったと考えられる地球外の始原的有機物、(2) 惑星・衛星環境での有機物、(3) 地球外生命、(4) 地球生命の宇宙への脱出の証拠、などである。

(1)は、生命の発生に必要な有機物が地球外から供給された可能性を検証するためのものであり、従来は地球上で回収された隕石(炭素質コンドライト)や宇宙塵が用いられてきた。しかし、これらが宇宙で実際にどのような環境に存在したかは不明であり、また、地球生物圏からの影響の可能性が存在した。そこで、宇宙環境で捕集された地球外物質の分析が必要となる。小惑星や彗星からのサンプルリターンがすでに行われており、また、現在計画されているたんぼぼ計画では、エアロゲルを用いた地球周回軌道上での宇宙塵の採集が予定されている[10]。

(2)は、惑星(または衛星)というマクロの場における化学進化の過程を辿るのに必要な情報が期待できる。対象となる天体としては、まず、土星の衛星のタイタンがあげられる。タイタンは、窒素を主とする1.5気圧の大気を有し、副成分としてメタンを含むことから、原始地球のアナログとして期待されている。これまで、ボイジャー探査およびカッシーニ・ホイヘンス探査により、大気中の有機物およびエアロゾルの分析が行われた。今後の探査としては、カッシーニにより発見されたタイタン上の液体メタン・エタンの湖や、タイタン表面に集積されているエアロゾル集積物が分析の対象となるだろう[11]。

タイタン以外では、火星地下の凍土や、土星の衛星、エンケラドゥスから噴出したプルームも候補と考えられる。

(3)では、火星を筆頭に、木星の衛星エウロパ、そして、(2)でも述べた土星の衛星のタイタン・エンケラドゥスが対象となりうる。地球とは異なる生命形態を知ることは、生命の概念のより一般化にもつながる。最大の課題は、形態が未知の生命をどのようにして検出するかである。この点に関しては、次章で扱う。

(4)は生命の惑星間移動の可能性の直接的証拠となりうる。たんぼぼ計画では、地上350-400kmの国際宇宙ステーション軌道近傍の微生物探査を行うが、地球起源の微生物が捕集されることが期待される。地球から宇宙に脱出した微生物を捕集する場所としては、月が候補に挙げられる[12]。

## 4. 地球外生命検出の戦略- 火星を中心に-

1976年のNASAによるViking計画においては、生命の検出法として、カメラによる撮影、熱分解-GCMSによる有機物分析、3種の代謝検出法(熱解放出実験、ラベル放出実験、ガス交換実験)が用いられた。しかし、これらは地球型生命の一部しか検出できず、また、感度も十分高くなかった。

現在、進行中のNASAのMars Science Laboratory計画では、SAMと呼ばれる有機物分析システムが用いられている。さらに、NASA/ESAのExoMarsでは、

抗原抗体反応に基づく微小有機物の測定装置の搭載が計画されている。

日本でも日本独自の火星探査計画(MELOS)の検討が始まり、その一環として生命探査の可能性の検討(JAMP)が始まった[13]。

MELOSにおける生命探査戦略は、欧米とは一線を画するものである。探査地点としては、メタンの発生地点であり、探査対象としては火星表面において、メタンを鉄により酸化するタイプの微生物を考える。そして、探査手法としては、顕微蛍光法と加水分解ーアミノ酸分析法を中心に検討を進めている。

**メタン検出法：** 地上および探査機からの観測により、火星の特定の地域からのメタンの湧出が報告されている。メタン酸化細菌をターゲットとする場合、探査地点の特定のためのメタンの微量分析が不可欠である。メタンの高感度検出法としては、赤外レーザーを用いた方法が考えられる。1.65  $\mu\text{m}$  のテレコムレーザーを用いた遠隔検出器が商品化されているが、この原理を用いた分析法の検討を行なっている。

**顕微蛍光法：** 顕微蛍光法においてはまず、対象とする土壌を適当な蛍光色素を用いて可搬型蛍光顕微鏡で観察し、生命の特徴(細胞膜, 核酸, 酵素など)を有するものを画像としてスクリーニングする。その部分を取り出し、有機物を抽出、加水分解後、質量分析法等でアミノ酸を分析する。

探査機搭載用の小型蛍光顕微鏡の試作を現在行っている。光源にはレーザーダイオードを使用し、レーザービームコンバイナーで各々の波長を合成して1本の光ファイバーに入射して顕微鏡本体へ導入する。レーザーの集光には非球面レンズを用いるが、光学設計ソフトを利用してシミュレーションを行い、高効率で光ファイバーへ入射することができるようになっている。

このような探査用装置は、十分な性能を有することに加えて、打ち上げ、着陸などに伴う振動に耐える必要があるため、そのテストを計画中である。

**アミノ酸分析法：** アミノ酸の現地分析では、まず、土壌試料に水を加えた後、抽出有機物を含む上清を吸引し、密閉容器に移す。これに塩酸を添加、加熱して加水分解を行う。塩酸を除去、濃縮した後にアミノ酸分析を行う。

アミノ酸検出法としては、HPLC、電気泳動法、GC/MS法、質量分析法などが考えられるが、宇宙での使用を考える場合、質量分析計を用いる方法が有利と考えられる。高性能の質量分析計を用いてカラムなしで分析する場合、日本独自のTOF-MSを高性能化したMULTUM(Multi-turn TOFMS)が、候補に挙げられる。MALDI法でイオン化する場合には、マトリックス由来のピークによる妨害を最小化する工夫が必要である。

## 5. おわりに

本年度は、地球外環境下での生命の検出法と中心に検討を行った。新しいミッションを提案する場合は、新たな特色ある分析手法の開発が不可欠であるので、次年度以降も積極的に取り組んでいく予定である。

また、宇宙環境での有機物の生成および変成と、生物(微生物, 植物, 小動物)の生存可能性についても、新たな実験の提案を目指して検討を重ねていく予定である。そのためには、予備実験として、地上での宇宙環境模擬実験(放射線・紫外線照射実験など)が不可欠である。そのための実験機会の開拓も重要なテーマである。特に、有機物の顕微分析のためのSTXM-XANESラインの国内での開発が望まれる。

**謝辞** 本研究は、JAXA宇宙環境利用科学委員会・研究チーム経費により行われたので感謝する。また、第1回全体会議(アストロバイロロジーワークショップ)で依頼講演をして下さった、山口耕生博士(東邦大)、土山明博士(阪大)、佐々木貴教博士(東工大)、相川祐理博士(神戸大)、斉藤博英博士(京大)、寺崎英紀博士(阪大)、第2回全体会議で話題提供をして下さった新聞秀一博士(阪大)、戸野倉賢一博士(東大)に感謝する。

## 参考文献

- 1) Soffen, G. A.; *Astrobiology, Adv. Space. Res.*, **23**, 283 (1999).
- 2) 小林憲正ほか;地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験, *Space Util. Res.*, **21**, 280-283 (2005).
- 3) 小林憲正ほか;地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験:極端紫外光利用実験を中心に, *Space Util. Res.*, **22**, 329-332 (2006).
- 4) 小林憲正ほか;地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験:宇宙環境下での有機物・微生物・生態系を探る, *Space Util. Res.*, **23**, 410-413 (2007).
- 5) 小林憲正ほか;地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験研究班活動報告, *Space Util. Res.*, **24**, 318-321 (2008).
- 6) 小林憲正ほか;宇宙で生命の起源と分布を探るー地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験研究班WG報告ー, *Space Util. Res.*, **25**, 195-198 (2009).
- 7) 小林憲正ほか;「地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験研究チーム」活動報告, *Space Util. Res.*, **26**, 147-150 (2010).
- 8) 小林憲正ほか;「地球周回軌道におけるアストロバイロロジー実験研究チーム」活動報告, *Space Util. Res.*, **27**, 189-192 (2011).
- 9) 山岸明彦ほか;Tanpopo:有機物と微生物の宇宙空間曝露と微隕石及び微生物の捕集実験, *Biol. Sci.*

*Space*, **21** 67-75 (2007).

10) A. Yamagishi, H. Yano, K. Okudaira, K. Kobayashi, S. Yokobori, M. Tabata, H. Kawai, M. Yamashita, H. Hashimoto, H. Naraoka and H. Mita; TANPOPO: Astrobiology Exposure and Micrometeoroid Capture Experiments, by *Trans. JSASS Space Tech.*, **7**, Tk49-55 (2009).

11) 小林憲正; タイタンのアストロバイオロジー探査, 遊星人 (日本惑星科学会誌), **20**, 94-99 (2011).

12) 横堀伸一, 春山純一, 矢野創, 鳴海一成, 三田肇, 高橋淳一, 月における生命探査の可能性の検討, *Space Util. Res.*, **27**, 183-184 (2011).

13) A. Yamagishi, S. Yokobori, Y. Yoshimura, M. Yamashita, H. Hashimoto, T. Kubota, H. Yano, J. Haruyama, M. Tabata, K. Kobayashi, H. Honda, Y. Utsumi, T. Saiki, T. Itoh, A. Miyakawa, K. Hamase, T. Naganuma, H. Mita, K. Tonokura, S. Sasaki, H. Miyamoto; Japan Astrobiology Mars Project (JAMP): Search for microbes on the Mars surface with special interest in methane-oxidizing bacteria, *Biol. Sci. Space.*, **24**, 67-82 (2010).