

「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」活動報告

横浜国大院工	小林憲正	大阪大院理	中嶋 悟
大林組	石川洋二	広島大	長沼 毅
長岡技科大	今井栄一	九大院理	奈良岡浩
兵庫県立大	内海裕一	ISAS/JAXA	橋本博文
安田女子大	小川麻里	名古屋大院農	福島和彦
会津大	奥平恭子	長岡技科大	本多 元
横浜国大院工	金子竹男	産総研	丸茂克美
千葉大院理	河合秀幸	福岡工業大	三田 肇
I A S	河崎行繁	静岡大工	宮川厚夫
名大院農	斉藤香織	阪大院理	藪田ひかる
兵庫県工技セ	才木常正	東薬大生命	山岸明彦
N T T	高橋淳一	ISAS/JAXA	山下雅道
山形大	高橋裕一	玉川大農	吉村義隆
神戸大発達	中川和道		

Activity Report of JAXA “Astrobiology Experiments in Earth Orbit” Study Team

Kensei Kobayashi,¹ Yoji Ishikawa,² Eiichi Imai,³ Yuichi Utsumi,⁴ Mari Ogawa,⁵ Kyoko Okudaira,⁶ Takeo Kaneko,¹ Hideyuki Kawai,⁷ Yukishige Kawasaki,⁸ Kaori Saito,⁹ Tunemasa Saiki,¹⁰ Jun-ichi Takahashi,¹¹ Yuichi Takahashi,¹² Kazumichi Nakagawa,¹³ Satoru Nakashima,¹⁴ Takeshi Naganuma,¹⁵ Hiroshi Naraoka,¹⁶ Hirofumi Hashimoto,¹⁷ Kazuhiko Fukushima,⁹ Hajime Honda,³ Katsumi Marumo,¹⁸ Hajime Mita,¹⁹ Atsuo Miyakawa,²⁰ Hikaru Yabuta,¹⁴ Akihiko Yamagishi,²¹ Masamichi Yamashita,¹⁷ and Yoshitaka Yoshimura²²

¹Graduate School of Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501; *E-Mail: kkensei@ynu.ac.jp*

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

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 discussed possible experiments on astrobiology by utilizing the ISS and other facilities since then. In 2006, we picked up one of the subjects, and it was proposed to JAXA as the “Tanpopo mission”. In 2009, we discussed future missions to study the distribution of microorganisms in space: They include Earth orbits of lower and higher altitude, the Moon, Mars, Europa and Titan. It is important to develop new sensitive techniques to detect and characterize organic compounds and microorganisms. STXM-XANES technique is one of the promising one for ultra micro samples returned from space. Detection of D-/L-amino acids is important to discuss possible presence of life. New possible separation and pretreatment techniques were discussed. We also discussed domestic and international astrobiology networks.

Key words; Astrobiology, origins of life, extraterrestrial life, amino acids, microorganisms, fluorescence microscopy, astrobiology networks

1. はじめに

われわれはどこから来たか。われわれは何者か。われわれはどこへ行くのか。このような問いに答える学問分野「アストロバイオロジー」は、1990年代末にそれまでの圏外生物学を発展させて生み出された新学際領域としてNASAにより提案され[1]、米国ではNASA Astrobiology Instituteが中心となり、またヨーロッパではEuropean Astrobiology Network Association (EANA)などの組織が作られて活発な研究が進められており、またNASAやESAなどの惑星探査においても、火星・エウロパ・タイタンなどの生命探査や彗星や小惑星などの有機物探査といったアストロバイオロジー関連テーマは重要な位置をしめてきた。また、ヨーロッパ・ロシアでは人工衛星等を用いた地球周回軌道上でのアストロバイオロジー実験が盛んにおこなわれている。

日本でもJAXAの第二期中期計画において「宇宙での生命科学研究ロードマップ」において、「生命の起源研究」は「太陽系起源研究」の中に位置づけられ、宇宙利用科学の生命科学分野でもアストロバイオロジーは惑星生物学、生物・生態工学とならぶ3本の柱のひとつと位置づけられている。

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[2-6]。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」[7]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、その検討が進められている。

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、今後の日本のアストロバイオロジー研究・アストロバイオロジーミッションのロードマップを見据え、その中で「たんぼぼ」につづく宇宙実験計画や、それに必要な科学・技術について議論を行った。また、国内および国際的なアストロバイオロジー研究のネットワーク化についても検討し、活動を行った。

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、9月17日に広島大学（東広島）で、引き続き9月18日には安田女子大学（広島）で会合を持った。また、11月には第2回アストロバイオロジーワークショップ

が葉山の湘南国際村センターで開催されたおりに会合をもった。また研究チームメンバーは、10月にケルン（ドイツ）のDLR訪問と、ブリュッセル（ベルギー）で開催されたEANA会合に出席し、ヨーロッパのアストロバイオロジー研究者と、地球周回軌道でのアストロバイオロジー実験や将来の日欧の協力関係などについて意見を交換した。

3. 宇宙における微生物の分布

現在、2012年からの実施をめざして準備中の「たんぼぼ計画」は、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール(JEM)曝露部を利用して、宇宙塵の捕集や微生物・有機物の曝露などを行う予定であるが、その主要目的のひとつが国際宇宙ステーション高度(約350 km)における微生物の探査である。

地球上の生命の起源に関しては、生命の誕生の場を地球上とする説の他に、地球外で誕生した生命が地球に届けられた、とする地球外起源説（パンスペルミア説）がある。従来、生物が宇宙環境で長時間生存するのは困難と考えられていたことなどから、パンスペルミア説はあまり支持されてこなかった。しかし、地球上の様々な極限環境で生息する微生物が発見され、特に、宇宙環境の特徴である、高真空、高紫外線、高放射線環境でも生存できるものも見つかっている。一方、地球高層大気中の微生物に関しては、航空機や大気球を用いた微生物採集が試みられ、最大高度58 kmでもその生存が確認されている。パンスペルミア、すなわち微生物の惑星間移動の可能性を探る上で、地球微生物がどの高度まで脱出しているかを調べる必要がある。たんぼぼ計画で宇宙ステーション上で微生物の検出が達成できれば、この上限が大幅に拡大することになる。

この研究の延長としては、バルーン観測高度と宇宙ステーション高度の間、および宇宙ステーション以上の高度での微生物探査が考えられる。高度50-100 kmでは、弾道軌道ロケットの利用が考えられる。高度500 km以上の場合は、その回収方法が課題となる。

さらに遠方（高高度）となると、月面が考えられる。1969年、Apolo 12号の宇宙飛行士が無人月探査機Surveyor 3号(1967年4月に月面軟着陸)のカメラを回収した際に、カメラの内部に連鎖球菌が生存していたのが発見された。このことは、月面上でも適当な遮蔽物があれば地球微生物が長期間生存可能であることを示す。月面での自然の遮蔽環境とい

えば、クレーター内の永久影が候補に上がる。月のクレーター内の永久影に水の氷の存在は早くから予想されていたが、2009年、NASAは月の Cabeus クレーターに月探査機 LCROSS を衝突させることによりその証拠を得た[8]。このような永久影に地球を脱出した微生物が捕集され、生存している可能性が考えられる。

ロシアの火星探査機、Phobos-Grunt に微生物を含む土壌を搭載し、3年間の飛行の間、宇宙環境に曝露した後に回収する計画 (LIFE Experiment) を有する[10]。このような、他の天体へのミッションに便乗して、惑星間のダストをエアロゲルで収集する案も検討すべきである。

4. 惑星・衛星の生命探査

3. で述べた宇宙空間の微生物探査の延長には、太陽系の他の天体の生命探査がある。現時点で、地球以外に生命の可能性が広く議論されている天体としては、火星、木星の衛星のエウロパ、そして土星の衛星のタイタンなどがある。

4- 1. 火星

火星における生命の可能性は早くから議論されてきた。1976年、NASAは Viking 1号、2号を火星に着陸させ、生命探査を試みた。対象となったのは、Chryse 平原および Utopia 平原の表土であり、熱分解 GC/MS 法による有機物分析と、いわゆる Viking 生物学実験 (3種) が行われたが、生命の兆候や有意量の有機物は検出されなかった。

1996年 NASAは、火星隕石 ALH84001 中に過去の火星生命の痕跡を検出したという発表を行った。主な証拠は、炭酸塩の存在と、その近傍の微生物状の構造体、地球上の微生物がつくるものと類似した磁鉄鉱、および多環芳香族炭化水素 (PAH) 類の存在であった。この発表に関しては、今日にいたるまで議論がつづいており、結論は出ていない。しかし、この発表を契機に、米欧の火星探査は活性化され、これまでの探査により過去の火星表面に多量の水が存在した証拠が得られている。これを踏まえて、近い将来の火星探査 (NASA の Mars Science Laboratory や ESA の ExoMars など) では有機物や生命探査へのシフトが試みられる予定である。

4- 2. エウロパ

エウロパは木星の4大衛星 (Galileo 衛星) のひとつで、ガニメデ、カリストとともに表面が水の氷で覆われた氷衛星であることが知られていた。1979年、Voyager 探査機は木星系に接近し、エウロパの

近接写真も撮影した。その画像から、エウロパの表面の氷の下には液体の水の海が存在することが示唆された。この予想は、1995年の Galileo 探査機によるより詳細な観測により、ほぼ疑いのないものとされた。

エウロパは、現在も液体の水を大量に有していること、氷を溶かすエネルギー (木星の潮汐力など) の存在などから、エウロパに現存する生命の可能性は火星以上と考えられている。ただし、生命誕生の3条件とされる有機物・水・エネルギーのうち、有機物はまだ検出されていない。

エウロパの海洋中の生命探査を行うために、数十 km の厚さの氷をボーリングするのは現実的でない。氷の割れ目 (縞) には氷の下の最近の海水が顔を出していると考えられるので、そこに含まれる有機物、もしくは微生物の痕跡の検出法の検討が望まれる。

4- 3. タイタン

タイタンは土星最大 (太陽系で2番目) の衛星であり、濃厚な大気を有することが知られていた。ボイジャー探査機により、主成分が窒素で、数%のメタンを副成分とする、約1.5気圧の大気を有することが確認された。窒素を主成分とし、炭素化合物を副成分として有することから、原始地球大気との類似性が指摘され、「化学進化の天然の実験室」とも呼ばれている。

窒素とメタンの混合気体に、紫外線照射、プラズマ放電、陽子線照射などを行うことにより、炭化水素などの様々な有機物が生成することが確認された。また、プラズマ放電や陽子線照射により、気相中で高分子状有機物も生成するが、これは *tholins* とよばれ、タイタン大気中で観測されるもやの主成分と考えられる。*Tholins* を加水分解するとアミノ酸が生成する。

2004年に探査機 Cassini が土星系に到着し、切り離されたプローブ Huygens が2005年1月にタイタンに着陸した。Cassini-Huygens により、タイタンの表面のようすが始めて明らかにされ、メタン・エタンの湖が確認された。また、地下にはアンモニアと水からなる液体の海の存在の可能性も議論されている。表面に水の海が存在しなくても、メタン・エタンの湖、あるいは地下のアンモニア水の海が存在すれば、生命存在の可能性が生じる。

5. 微量有機・微生物分析法

「たんぼぼ」などの地球周回軌道上でのアストロバイオロジー実験や、今後の火星・エウロパ・タイタンなどでの生命探査において、有機物の微量分析

法やキャラクタリゼーション法が必要である。特に星間塵などの微小試料を扱う場合、高感度な顕微分析法が不可欠となる。例えば、NASA の Stardust 計画における地球に持ち帰られた彗星ダスト中の有機物分析では、L²MS, TOF-SIMS (Static SIMS), nano-SIMS (Dynamic SIMS), STXM/XANES, 顕微赤外, 顕微ラマンなどの局所有有機物分析法 が用いられた。特に, STXM/XANES 法では, 微小試料中の炭素・窒素・酸素などの軽元素のキャラクタリゼーションが可能であり, 複雑有機物の解析に威力を発揮すると考えられる。

生命との関連では, アミノ酸の検出が重要となる。Stardust 計画で持ち帰られたエアロゲルの覆いのアルミ箔から地球外由来と考えられるグリシンの存在が報告されている [10]。一般に地球に持ち帰られた試料や, 地球由来の物質 (エアロゲルなど) を含む試料には, 地球由来のグリシンなどのタンパク質アミノ酸の混入が問題となる。そのため, 地球環境にはほとんどない非タンパク質アミノ酸, 例えば α -アミノイソ絡酸やイソバリンの検出が現実的である。後者は光学活性なので, その D/L 比も重要な指標となる。複雑な組成の試料中の超微量 (サブアトモル) の D-および L-アミノ酸分析には, カラムスイッチングを用いたデュアルカラム HPLC 法の適用が有用と考えられる。

ESA の彗星探査 (Rosetta 計画) や火星探査 (ExoMars 計画) では, 生命検出法のひとつとして, アミノ酸のエナンチオ分析が計画されている。これらの計画では, 現地で採取された試料を直接誘導体化し, キラルカラムを接続した GC/MS システムで分析することになっている。しかし, 宇宙試料中のアミノ酸の多くは結合型・複雑分子型と考えられるため, 現地で加水分解などの前処理が不可欠である。惑星上での自動試料前処理には最新の Lab-on-a-chip 技術やマイクロ波を用いた加水分解法などの適用が考えられる。

微生物の検出法としては, 顕微蛍光法の検討を引き続き行っていくこととした。この場合も有機物の分析と同様, 試料 (岩石など) の前処理法が極めて重要である。

6. アストロバイオロジー研究者のネットワーク化

日本では, これまでアストロバイオロジー研究者のネットワーク化が欧米よりも遅れていたが, 2009 年 1 月に日本アストロバイオロジーネットワーク [11] が立ち上げられ, 9 月に生命の起原および進化学会と協力して八王子で夏の学校を, また, 11 月には 2008 年にひきつづき, 第 2 回アストロバイオ

ロジーワークショップを葉山で開催した。また, ネットワークメンバーは 2009 年 10 月にブリュッセルで開催された European Astrobiology Network Association (EANA) の会合に出席し, EANA との連携などを議論した。2010 年 4 月には, 米国で Astrobiology Science Conference (AbSciCon) が, 7 月にドイツで COSPAR が開催されるので, これらの機会に, NAI などのアストロバイオロジー機関との協力関係をさらに深める予定である。

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。

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オロジー実験, *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オロジー実験: 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オロジー実験: 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オ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—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 報告—, *Space Util. Res.*, **25**, 195-198 (2009).
- 7) 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).
- 8) LCROSS CRator Observation and Sensing Satellite, http://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/prelim_water_results.html
- 9) Projects Life Experiment: Phobos, <http://www.planetary.org/programs/projects/life/>
- 10) J. E. Elsila, D. P. Glavin and J. P. Dworkin, *Meteor. Planet. Sci.*, **44**, 1323-1330 (2009).
- 11) <http://www.ls.toyaku.ac.jp/astrobiology-japan/>