

「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
横浜国大院工	大林由美子	ISAS/JAXA	春山純一
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
兵庫県立大	神田一浩	阪大院理	藪田ひかる
名大院農	斉藤香織	東薬大生命	山岸明彦
兵庫県工技セ	才木常正	ISAS/JAXA	山下雅道
N T T	高橋淳一	玉川大農	吉村義隆
山形大	高橋裕一	東薬大生命	横堀伸一
神戸大発達	中川和道		

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

Kensei Kobayashi,¹ Yoji Ishikawa,² Eiichi Imai,³ Yuichi Utsumi,⁴ Yumiko Obayashi,¹ Mari Ogawa,⁵ Kyoko Okudaira,⁶ Takeo Kaneko¹, Hideyuki Kawai,⁷ Yukishige Kawasaki,⁸ Kazuhiro Kanda,⁴ 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 Jun'ichi Haruyama,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 Yoshitaka Yoshimura,²² and Shin-ichi Yokobori²²

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 discussing 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 2010, we discussed future missions to study the distribution of microorganisms in space, and analytical techniques to detect microorganisms and organic compounds there. Possible targets of life detection in the solar system include lava tubes of the Moon, Mars, Europa and Titan. Basic

strategy for *in situ* detection of life on Mars includes survey with fluorescence microscopes followed by amino acid analysis after acid-hydrolysis. We are developing these techniques. Complex organic compounds in the samples returned from extraterrestrial bodies would be analyzed with STXM-XANES technique and precise analysis of amino acid enantiomers with column-switching HPLC systems. In advance of space utilizing experiments, preliminary simulation experiments on ground are required. Radiation facilities for them include the New Subaru synchrotron radiation facility for EUV irradiation, and the KEK digital accelerator for particles irradiation.

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

1. はじめに

生命の起源・進化・分布・未来を探究する学際分野「アストロバイオロジー」は、1990年代末にNASAにより提案され[1]、米欧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[2-7]。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」[8]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提案に向け、その対象や、生命探査・有機物検出の方法論について議論を行った。また、宇宙実験の予備実験としての地上模擬実験は不可欠であるが、そのための新たな施設の探索も行った。

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、2010年10月30-31日に多摩永山情報教育センター（多摩）において、また2011年1月8日に東京薬科大学（八王子）において全体会議を持った。また、テーマ毎の会合を、2010年6月25日にJAXA宇宙科学研究所（相模原）で、2010年11月1日に兵庫県立大学（兵庫県赤穂郡）で、2011年11月30日に広島大学（広島市）で開催した。年度内にさらに2回の会合を予定している。また、研究チームメンバーは、2010年4月にテキサス州（米国）で開催されたAstrobiology Science Conference、2010年7月にブレーメン（ドイツ）で開催されたCOSPAR Scientific Assembly、2010年9月にロシアで開催され

たEuropean Astrobiology Network Association 会合、ホノルル（米国）で開催されたPacifichem 2010などに参加し、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. 生命探査のターゲット

「アストロバイオロジーWG（現・研究チーム）」での議論の中から提案された「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り、2012年からの実施をめざして準備が進められているが、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。

この高度を超えた「地球生命探査」の場として、月の縦穴及び溶岩チューブの可能性について議論を行った。月の表面は、紫外線・宇宙線・微隕石等への曝露により、微生物の生存にとっては厳しい環境であるが、SELENE（かぐや）計画により発見された縦穴内、およびそれにつながって存在すると考えられる溶岩チューブでの（地球）微生物の検出の可能性を議論した。

太陽系における地球外生命の存在の可能性が高いと考えられているのは、火星・エウロパ・タイタン・エンケラドスなどの惑星・衛星である。特に、火星へは、日本独自の探査(MELOS)の検討が始まっている。MELOSにおける生命探査を想定した検討を行った。特に注目する地域は、メタンの発生源であり、メタンを鉄により酸化するタイプの微生物の可能性について議論を行った[9]。

3. 生命探査法の検討

2010年12月、リンの代わりにヒ素を用いて生育すると考えられる微生物が見つかったという報告がなされ、話題を集めた[10]。これは、地球外生命探査を行うにあたり、地球の通常の生化学システム

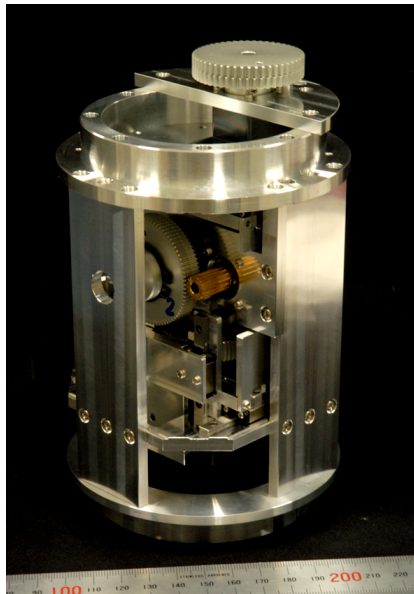


Fig. 1 携帯型小型蛍光顕微鏡

とは異なるシステムを用いる生命の存在を強く示唆するものである[12]。Viking 計画での生物学実験や、ExoMars で用いられる予定の抗体反応に基づいた生命検出法では検出されないような異種生命系をどのようにして検出するかが大きな課題である。

われわれは、顕微蛍光法とアミノ酸分析法を組み合わせた方法での火星等での生命検出法の構築を議論した。この方法においてはまず、対象とする土壌を適当な蛍光色素（核酸、酵素、膜等を識別できるもの）を用いて可搬型蛍光顕微鏡で観察し、生命の特徴を有するものをサーヴェイする。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。顕微蛍光法をメインに用いる点、および有機物を加水分解してからアミノ酸分析する点が欧米の生命探査との相違点である。アミノ酸分析法の詳細については次章で述べる。

探査機搭載用の小型蛍光顕微鏡(Fig. 1)の試作を試みている。試作しているフィールド用携帯顕微鏡の光源部の設計を行った。光源には波長375nm

(405nm)、488nm、638nmの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た。

また、蛍光顕微鏡法による圏外生命検出法を開発するために、各種蛍光色素のスクリーニングと模擬火星土を使った染色試験を行った。核酸検出蛍光色素、酵素活性検出色素、細胞膜検出色素等、数十種

類の蛍光色素の中から、極限環境中の微生物検出に適した蛍光色素を選抜した。これらの蛍光色素を用いて模擬火星土（JSC MARS-1A SIMULANT）を染色したところ微生物を明瞭に検出することができた。

5. 微量有機物分析法の検討

地球外始原有機物の解析には様々な手法が用いられているが、中でもアミノ酸分析と、X線吸収端構造（XANES）スペクトルに注目し、検討した。例えば、藪田らは、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や、炭素質コンドライト中の有機物分析を顕微（STXM）/XANESで行い、種々の試料間、あるいは試料内の有機物の比較を行い、本法が極めて有力な解析手法であることを明らかにしている。しかしながら、現在、日本で炭素や窒素などの軽元素のSTXM/XANESが可能な設備がなく、米国等に出向いて分析する必要がある。日本における独自の設備の整備が望まれる。なお、バルクのXANES測定は、兵庫県立大学の放射光施設ニュースバルなどでも可能と考えられるので、検討していく予定である。

アミノ酸分析は、前章で述べたように、日本の生命探計画の中核であるとともに、始原有機物（宇宙塵中の有機物など）の分析においても必要である。われわれが加水分解にこだわるのは、生物起源・非生物起源を含め、宇宙環境に遊離型のアミノ酸よりは結合型のアミノ酸の方がはるかに多いと考えられるためである。

アミノ酸の現地分析では、以下のような方法が考えられる。土壌よりの抽出液に塩酸を加えて、加水分解後を行う。よく用いられる110℃、20hという加水分解条件を保つことは難しいと考えられるので、マイクロ波加熱を導入し、短時間でかつ低温での効率的な加水分解を検討している。一方、アミノ酸の分析には、HPLCあるいはCEによる分離を行う方法と、MSで求める方法がある。HPLC、CEでは、アミノ酸の種類ごとの分離能の高い測定が可能になるが、高感度分析を行うためには、地上でも細かいメンテナンスが必要であり、火星上でリモートに制御するには困難を伴う。そこで、湿式分析の面が少ないMS法の方が、リモートでの分析には適していると考ええる。イオン化法として、固体試料を加熱し脱離したところに熱電子を当ててイオン化させる直接導入EI法（DI法）や、白金フィラメント上に試料液を塗布し通電により加熱脱離したところにイオン化させる脱離イオン化法（DEI法）、これらと化学イオン化法の組み合わせなどを検討

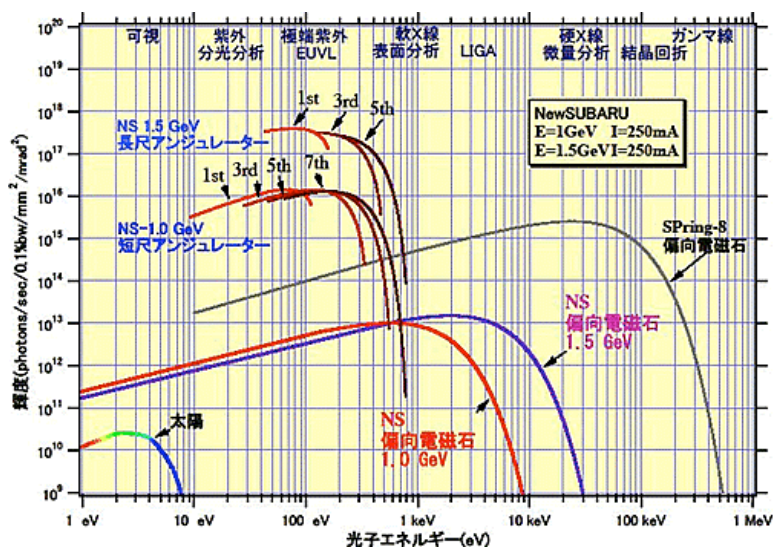


Fig. 2 ニュースバル放射光施設で利用可能な放射光のスペクトルと輝度

するのが適切であると考える。

6. 加速器等を用いた地上予備実験

宇宙環境利用実験では、宇宙線、太陽光等の宇宙環境要素の影響が重要であるが、実験計画において、地上模擬実験が不可欠である。これまで、宇宙生物学実験では、主として重粒子線照射と X 線照射がメインであった。しかし、曝露部での実験を考えると、紫外線の効果、特に化学的作用の高い真空紫外線・極端紫外線の影響を考慮する必要がある。しかし、これまで、極端紫外光の影響を調べられる施設が極めて少なく、そのような実験はほとんど行われていなかった。われわれは、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が有するニュースバルに着目した。

ニュースバルは 1.5GeV の電子ビーム蓄積リングを持つ中型放射光施設で、物質との相互作用の大きい軟 X 線～真空紫外域の波長の光を利用することができる。分子進化・生命進化の実験用いることのできる照射用のビームラインとして BL06, BL02, BL07A が設置されており、それぞれ 1000eV 以下の白色光、4000eV 以下の白色光、800eV 以下の準単色光の照射が可能であり、実験目的に応じて使い分けることが可能である(Fig. 2)。本施設を用いたアミノ酸の惑星間環境下での安定性を調べる実験を計画中である。

重粒子線照射実験は、主として放射線医学研究所の HIMAC を用いて行われているが、イオン種や、

そのエネルギーを自由に選ぶことはできなかった。現在、高エネルギー加速器研究機構で開発されているデジタル加速器は、あらゆる核種のエネルギーを連続的に変化して照射することが可能な設備であり、その利用も検討中である。

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ので感謝する。

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ー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オロジー実験研究チーム」活動報告, *Space Util. Res.*, **26**, 147-150 (2010).
- 8) 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).
- 9) 山岸明彦ほか；Japan Astrobiology Mars Project (JAMP): Search for microbes on the Mars surface with special interest in methane-oxidizing bacteria,” *Biol. Sci. Space*, in press.
- 10) Wolfe-Simon, F. *et al.*; A bacterium that can glow by using arsenic instead of phosphorus, *Science*, DOI: 10.1126/science.1197258 (2010).
- 12) 小林憲正；「ヒ素で生きる細菌」の発見が生命の定義を覆した、*化学*, **66**, 32-34 (2011).