

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—

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
国立天文台	大石雅寿	名古屋大院農	福島和彦
ISAS/JAXA	奥平恭子	長岡技科大	本多 元
千葉大院理	河合秀幸	産総研	丸茂克美
I A S	河崎行繁	福岡工業大	三田 肇
大阪大院理	癸生川陽子	静岡大工	宮川厚夫
東工大生命	小池惇平	阪大院理	藪田ひかる
名大院理	斉藤香織	東薬大生命	山岸明彦
大阪大院理	鈴木彰子	ISAS/JAXA	山下雅道
N T T	高橋淳一	玉川大農	吉村義隆
神戸大発達	中川和道		

Search for Origins and Distribution of Life in Space

- Working Group Report of Astrobiology Experiments in Earth Orbit -

Kensei Kobayashi,¹ Yoji Ishikawa,² Eiichi Imai,³ Yuichi Utsumi,⁴ Masatoshi Ohishi,⁵ Kyoko Okudaira,⁶ Hideyuki Kawai,⁷ Yukishige Kawasaki,⁸ Yoko Kebukawa,⁹ Junpei Koike,¹⁰ Kaori Saito,¹¹ Akiko Suzuki,⁹ Jun-ichi Takahashi,¹² Kazumichi Nakagawa,¹³ Satoru Nakashima,⁹ Takeshi Naganuma,¹⁴ Hiroshi Naraoka,¹⁵ Hirofumi Hashimoto,¹⁶ Kazuhiko Fukushima,¹¹ Hajime Honda,¹⁷ Katsumi Marumo,¹⁸ Hajime Mita,¹⁹ Atsuo Miyakawa,²⁰ Hikaru Yabuta,⁹ Akihiko Yamagishi,²¹ Masamichi Yamashita,¹⁶ 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,

⁵National Astronomical Observatory of Japan, ⁶The University of Aizu, ¹⁷Chiba University,

⁸Institute of Advanced Science, ⁹Osaka University, ¹⁰Tokyo Institute of Technology,

¹¹Nagoya University, ¹²NTT, ¹³Kobe University, ¹⁴Hiroshima University, ¹⁵Kyushu University,

¹⁶Institute of Space and Astronautical Science, ¹⁷Nagaoka University of Technology,

¹⁸National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ¹⁹Fukuoka Institute of

Technology, ²⁰Shizuoka University, ²¹Tokyo University of Pharmacy and Life Science,

²²Tamagawa University

Abstract: “Astrobiology” is a novel interdisciplinary field defined as origins, evolution, distribution and destiny of life in the Earth and elsewhere in space. We organized the working group “Astrobiology Experiments in Earth Orbit” and have been discussed possible subjects of astrobiological experiments in Earth orbit since 2004. In 2006, we picked up one of the subjects, and it was proposed to JAXA as the “Tanpopo mission”. In order to study origins and distribution of life in space, both in earth orbit and in planetary bodies, it is necessary to develop novel sensitive techniques to detect and characterize organic compounds and microorganisms. In this year, we discussed such instrumental analytical techniques as mass spectrometry and soft X-ray spectroscopy. One of the promising techniques to detect extant life is fluorometric

microscopy. These techniques can be used not only in the Tanpopo mission but also future missions to detect life on Mars and beyond. Post-Tanpopo missions are discussed including a “Space Photon Lab” mission to synthesize organic compounds in space. Another important subject is planetary protection, which should be applied to not only astrobiology missions but also non-astrobiology missions. We also discussed domestic and international astrobiology networks.

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

1. はじめに

「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で、「地球および宇宙における生命の起源、進化、分布と未来」を扱うと定義される [1]。NASA や ESA などの惑星探査において、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、また、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も欧米で行われている。日本でも「宇宙での生命科学研究ロードマップ」において、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[2-5]。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」[6]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、本WGでは、「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。捕集・曝露された試料や、地球外環境での微生物や微量有機物の検出は、今後の宇宙実験に不可欠である。蛍光顕微鏡による微生物検出法の確立や、先端分析法を用いた有機物のキャラクタリゼーション、あらたな宇宙実験テーマなどについて報告する。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ふれる。

2. 有機微量分析法

「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、今後の火星やエウロパ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。

先行例として、NASA の Stardust 計画における有機物分析が参考となる。2005年、Stardust 探査機に

よりヴィルト第2彗星からの彗星塵が持ち帰られ、その分析が行われたが、数十 ng の極微量の試料を対象とすることになるので、従来、広く使われている溶媒抽出を行い、クロマトグラフィー-質量分析計で同定・定量するというような分析は困難になる。そこで、局所領域の分析を行うための技術を取り入れる必要がある。そこで、Stardust 計画では、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機物分析法によりその評価が試みられた。

特に有用と考えられるのが、X線吸収端近傍構造 (XANES) 分析法である。炭素、窒素、酸素などの軽元素は、軟X線を吸収した時、各原子の内殻軌道から光電子が放出されるが、それに必要な最小エネルギーが吸収端である。同じ炭素原子でも、その結合状態等によりその吸収端エネルギーが異なるため、XANES スペクトルから炭素の状態分析が可能となる。これを走査型透過X線顕微鏡(STXM)と組み合わせた顕微分析システムにより、ヴィルト第2彗星の塵中の有機物の分析が行われた。その結果、この彗星塵中の有機物は、隕石(炭素質コンドライト)中の有機物よりも芳香族炭素の割合が非クック、窒素や酸素に富んだ多様な官能基を含み、その官能基組成が多様であることがわかった[7]。

本法の問題点として、この分析には放射光施設に専用の特殊なラインが必要であることがあげられる。日本には多くの放射光施設があるが、上記のような有機物XANES分析が可能なラインはまだなく、米国カリフォルニアのバークレー国立研究所の施設等を用いるしかない。今後、日本でのこのようなラインの整備が望まれる。

また、試料量が多く得られる場合は、固体NMRなどの手法も炭素の種類の識別等に有用である。

さらに、生命探査のための有機物分析法としては、アミノ酸の超微量分析が考えられる。非生物試料でも、例えば炭素質コンドライト中にもアミノ酸が存在するが、これと生物起源のアミノ酸との比較のためには、アミノ酸のエナンチオマーの分離が不可欠である[5]。ESAは将来の火星探査(ExoMars)や、彗星探査(Rosetta)においてアミノ酸のエナンチオ分

析を計画している。ただし、宇宙試料中のアミノ酸の多くは結晶型・複雑分子型と考えられるため、宇宙環境でいかに加水分解するかが問題である。

3. 微生物検出法

さまざまな地球極限環境下にも微生物活動が検出され、また、火星・エウロパ・タイタン・エンケラドスなどの太陽系諸天体上の生命の可能性が議論されている。このような極限環境下での微生物の検出法としては、培養法、代謝法、有機物分析法などが存在するが、特にその性質が未知の微生物にあつてはその検出は困難である。例えば、培養法で検出可能な地球土壌中の微生物はたかだか1%程度といわれている。また、Viking計画で用いられた代謝法でも同様である。より広範囲の微生物の検出法として、われわれは顕微蛍光法を提案している[8]。

本法では、生物の特性、例えば膜、核酸、酵素などを有することに対応して蛍光を発する色素を用いる。例えば、土壌中の微生物の識別は困難だが、エステラーゼ活性によって加水分解されて蛍光を発する色素、CFDA-AMを加えた場合、微生物が蛍光を発するため、周りの環境との識別が可能となる。さらに他の染色法と組み合わせることにより、いろいろな種類の微生物の検出がより確かに行えると考えられる。例えば、3種類の蛍光色素による多重染色法として、エステラーゼ用CFDA-AMと、核酸染色用、膜染色用を組み合わせる。試料に余裕があれば、CFDA-AMの代わりに、環境試料の染色に現在最も広く使われている核酸染色用色素SYBR GOLDを使うことも可能となる。ただし、CFDA-AMとSYBR GOLDは同じ蛍光波長を有するため、同時に使用することができない。

今後、宇宙でも利用可能な軽量可搬型の蛍光顕微鏡の製作、および本法（および他の手法との組み合わせ）による極限環境生物圏の検出法の確立が課題である。

4. 新たな宇宙実験・惑星探査と惑星検疫

隕石や彗星・宇宙塵中に様々な有機物が存在することが確認されており、これらが地球にもたらされ、始原的な生命の源になったとする仮説は広く支持されている。隕石や彗星中の有機物は、星間塵上に凝縮した揮発性分子を原材料とし宇宙線や紫外線が作用して生成する。このような宇宙空間での有機物生成やその消長には、ダスト表面といった特殊な環境が重要な役割を果たしていると考えられる。これまでに模擬宇宙環境下での有機物の合成・分解実験により、星間塵環境下で単純な化合物から宇宙線や紫外線によりアミノ酸前駆体などの有機物が生

成することがわかった。しかし、この地上での実験条件は紫外線、高エネルギー粒子、高真空、微小重力などの多様な要素が同時にはたらく実際の宇宙空間とは異なる。そこで、本実験では宇宙環境下において星間塵上の凝縮相を模擬的に生成し、それに太陽紫外線や宇宙放射線を照射することにより、その生成物を分析して評価、定量することを目的とする宇宙実験を提案してきた[9]。このような実験は、「たんぽぽ」での有機物の捕集、曝露実験と相補うものである。

一方、宇宙塵の捕集や有機物・微生物の曝露に関しては、宇宙ステーション高度以外の環境も候補となりうる。例えば、ESAとロシアは、ロシアの火星探査機Phobos-Gruntに曝露用試料を載せ、長期間の飛行後に回収する実験を計画している。日本でも火星探査の議論が始まり、また、はやぶさで始まった日本独自の小惑星探査計画も、次なるターゲットとして、よりアストロバイオロジー的に興味深いC型・D型小惑星や枯渇彗星等が候補に挙げられている。これらの探査に、宇宙塵の捕集や有機物の曝露などを組み合わせる可能性も検討すべきである。

以上述べたような、有機物や微生物を用いる宇宙実験においては惑星検疫の問題はさけて通れない。また、アストロバイオロジーとは一見関係ないような、火星の内部探査なども、その実施に当たっては惑星検疫を考慮しないことには実施は不可能である。探査機の滅菌法、有機物除去法の検討が課題となる。

6. アストロバイオロジー・ネットワーク

今後のアストロバイオロジー関連の宇宙実験や探査の計画や遂行にあたっては、日本国内や国際的なネットワークの整備が必要である。米国ではNASA Astrobiology Instituteがアストロバイオロジー研究の中核をにない、Astrobiology Science Conferenceを隔年で開催している。一方、従来、ヨーロッパでは2001年にEuropean Astrobiology Network Association (EANA)が設立された。そして、NAIやEANAなどの世界のAstrobiology組織の連合体である、Federation of Astrobiology Organizations (FAO)が設立された。FAOは地域のAstrobiology組織やISSOL(国際生命の起源学会)、Bioastronomyなどの国際学会などによる連合体であり、現在、地域代表としては、米国、欧州、オーストラリア、イスラエル、メキシコから参加している。

日本の場合はこれまで、公式のAstrobiology機関は存在せず、NAIなどとの連携が困難であった。そこで、アストロバイオロジーのネットワーク創設を

目的のひとつとして、2008年12月20-21日に湘南国際村で「アストロバイオロジーワークショップ2008」が開催された。この会には約60名が参加し、28の講演が行われた。そして、「日本アストロバイオロジーネットワーク」を2009年1月に発足することで合意が得られた。

このネットワークをFAOに加盟させ、NAIやEANAとの有機的な連携をはかっていくことにより、地球周回軌道などでのアストロバイオロジー実験においても国際的な協力関係を築いていくことが期待される。

謝辞 本研究は、JAXA宇宙環境利用科学委員会・研究班WG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) 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).
- 7) Standford, S. A. *et al.* Organics Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft. *Science*, **314**, 1720-1724 (2006).
- 8) Saito, T., Kawasaki, Y. *et al.*, Fluorescence Microscopic System for Detection of Microorganisms and Organic Compounds on Mars, *Proc. SPIE*, **3755**, 24-32 (1999).
- 9) H. Hashimoto *et al.*, "Conceptual Design of Apparatus for Cosmo-biology Experiment on International Space Station," *Biol. Sci. Space*, **12**, 106-111 (1998).