

宇宙における有機物の無生物的合成実験 Astrobiology Japan 2: 地球周回軌道上でのアストロバイオロジー実験 WG 報告

小林憲正（横国大・NINS），癸生川陽子（横国大），金子竹男（横国大），三田肇（福岡工大），別所義隆（理研 Spring8），中川和道（神戸大），柴田裕実（大阪大），今井栄一（長岡技科大），高橋淳一（大阪大），石橋之宏（九州大），奥平恭子（会津大），矢野創（JAXA/ISAS），橋本博文（JAXA/ISAS），横堀伸一（東葉大），山岸明彦（東葉大・NINS・JAXA/ISAS），JAXA 地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験 WG

Abiotic Synthesis of Organic Compounds in Space: Report of Astrobiology Experiment in Earth Orbit WG

Kensei Kobayashi,^{1,2*} Yoko Kebukawa,¹ Takeo Kaneko,¹ Hajime Mita,³ Yoshitaka Bessho,⁴ Kazumichi Nakagawa,⁵ Hiromi Shibata,⁶ Eiichi Imai,⁷ Jun-ichi Takahashi,⁶ Yukihiro Ishibashi,⁸ Kyoko Okudaira,⁹ Hajime Yano,¹⁰ Hirofumi Hashimoto,¹⁰ Shin-ichi Yokobori,¹¹ Akihiko Yamagishi,^{2,10,11} Astrobiology Experiments in Earth Orbit WG

*Tokiwada, Hodogaya-ku, Yokohama Kanagawa 240-8501

E-Mail: kkensei@ynu.ac.jp

Abstract: Activities of “Astrobiology Experiments in Earth Orbit Working Group” were reported. This working group was founded in 2004, and has been discussing possible experiments on astrobiology by utilizing the ISS and other facilities since then. The idea of the Tanpopo mission was created in this WG. This year we discussed succession missions of the Tanpopo mission. There could have been two organic sources for the first living organisms on planets: Endogenous organics and exogenous organics. Since it is suggested that primitive Earth atmosphere was only mildly reducing, conventional energies such as thundering was not effective for the synthesis. Laboratory simulations showed that cosmic ray was a possible energy source to form nitrogen-containing organics including amino acids. We proposed to expose mildly reducing gas mixture to the environment of low Earth orbit to see chemical evolution toward origins of life could take place without adding artificial energies. Gas mixtures, such as a mixture of methane (5%) and nitrogen (95%) will be sealed in mall gas cells with or without MgF₂ windows, and attached to the Ex-HAM facility equipped on the Exposed Facility of JEM, and exposed to cosmic rays and/or solar UV for more than a year. It is expected the formation of amino acid precursors by the action of cosmic rays and the enhancement of the yield by solar UV. The other possible experiments by using Ex-HAM were also discussed.

Key words; Astrobiology experiments, International space station, amino acids, abiotic synthesis, cosmic rays, solar ultraviolet light, Titan, primitive atmospheres

1. はじめに

「アストロバイオロジー」は生命の起源・進化・分布・未来を探究する学際分野と定義され[1]，欧米では NASA Astrobiology Institute (NAI)，European Astrobiology Network Association (EANA)など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，また，2013 年には自然科学研究機構（NINS）の新分野創成センターに「宇宙における生命研究分野」が創設されるなど，研究体制が整備されつつある。

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[2-9]。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「たんぽぽ計画」[10, 11]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，さらに，火星生命探査法として顕微蛍光法について検討し，JAXA 火星探査計画(MELOS)への提案を行った[12]。本年度は，たんぽぽ計画の後継ミッション（仮称 Astrobiology Japan 2）の提案のための議論を行い，実験装置のブレッドボードモデル(BBM)作製をめざした。

2. Astrobiology Japan 2 の目的

生命の誕生に必要な含窒素有機物の供給には，隕石などによる圏外有機物の供給と，惑星・衛星上での生成が考えられる。前者を実証するのが「たんぽぽ計画」「はやぶさ2計画」などである。一方，後者に関しては，かつては「ミラーの実験」[13]などに

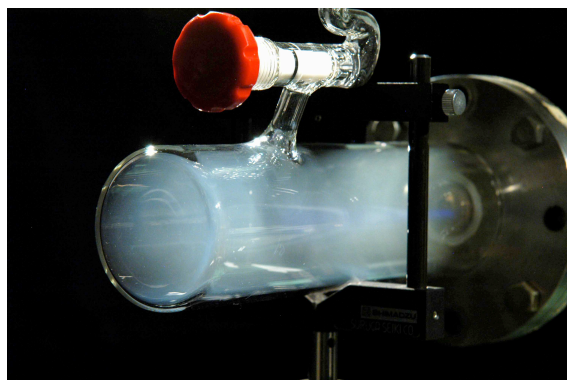


Fig. 1 模擬タイタン大気への陽子線照射. 高分子有機物 tholins からなる霧が生成

より、メタン・アンモニアなどを主とする強還元型原始地球大気を想定した場合、放電などによりアミノ酸が用意に生成すると考えられていた。しかし、近年では原始地球大気は二酸化炭素や窒素を主成分とし、メタンもしくは一酸化炭素などを微量含む弱還元型のものと推定されている。この場合、放電や紫外線などではアミノ酸の生成は限定的となる。

Kobayashiらは、弱還元型大気からでも、宇宙線のような高エネルギー粒子線を用いれば、アミノ酸が高効率で生成しうることを見いだした[14]。また、土星の衛星のタイタンでは、窒素を主成分とし、メタンを数%含む大気を有するが、このような大気中でも複雑な有機物からなる霧が生成していることが、2005年のCassini-Huygens計画により明らかとなった[15]。模擬タイタン大気に陽子線を照射することにより、複雑な有機物からなる霧が生成し (Fig.1), これを加水分解するとアミノ酸が生じることがわかっている[16]。

以上の知見から、原始地球のような弱還元型大気を有する惑星では、宇宙線などの惑星外からのエネルギーにより、アミノ酸前駆体を含む複雑な有機物が生成しうることが強く示唆されている。これを国際宇宙ステーション曝露部を用い、そこでの天然の宇宙線フラックスおよび太陽紫外線フラックスにより有機物、とりわけアミノ酸のような含窒素有機物の生成を検証するのが、Astrobiology Japan 2の目的である。

これまで、地球周回軌道環境を利用したアストロバイオロジー実験は、欧州が最も積極的に行っており、これまでにBIOPAN, LDEF, EXPOSE-E, EXPOSE-Rなどで人工衛星や国際宇宙ステーションの欧州およびロシア実験モジュールの曝露部を用いた実験が行われ、さらに現在、EXPOSE-R2が実施中であるが、微生物や有機物を宇宙環境に曝露するものが大半である。唯一、国際宇宙ステーション上で行われた

EXPOSE-E計画の中で、PROCESSという実験が行わ

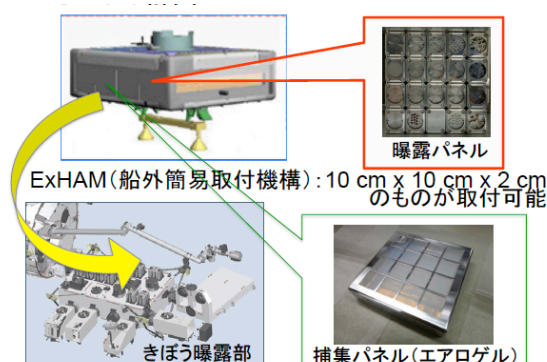


Fig. 2. たんぽぽ計画における ExHAM 利用

れ、そこでメタン(50%)・窒素、またはメタン(50%)・アルゴンという強還元型混合気体を曝露した。ここでは太陽紫外線によりメタンからエタンなどの炭化水素の生成を検証したが、生体有機物の生成を実証しようとしたものはない。Astrobiology Japan 2は、人為的なエネルギーを用いず、自然エネルギー（宇宙線・太陽紫外線）のみを用いてアミノ酸のような含窒素有機物の生成を確認しようとする世界で初めての試みとなる。

3. Astrobiology Japan 2 の概念設計

実験方法としては、「たんぽぽ計画」で使用する、Ex-HAMを利用する (Fig. 2)。Ex-HAMは、きぼう曝露部に取り付けられた船外簡易取付機構であり、10 cm x 10 cm x 2 cmのパッケージを取り付けることができる。たんぽぽ計画では、超低密度エアロゲルを入れた捕集パネルと、有機物や微生物の曝露のための曝露パネルがこのサイズで製作されている (Fig. 2)。

Astrobiology Japan 2の曝露容器も、Ex-HAMに取り付け可能な仕様での作製を検討した。Fig. 3(a), 3(b)に混合気体の曝露のためのガスセルの窓なし、窓付きタイプの組み立て図を示す。窓なしセルは、SUS316製の直方体のもので、これにガス導入部として、Swagelok SS-100-R4を取り付ける。ここに1/16インチのステンレス管挿入、固定し、ここから混合気体を導入する。サイズの制約により、バルブは使えないため、この管をかしめ加工することによりガスを封入する。

用いる混合気体としては、さまざまなものが候補に上がるが、ここでは、タイタン大気をモデルとしたものについて説明する。Fig. 3(b)の容器に窒素(95%)とメタン(5%)の混合気体を1気圧封入する。内容量20 mLに入る混合気体は約23 mgとなる。これに

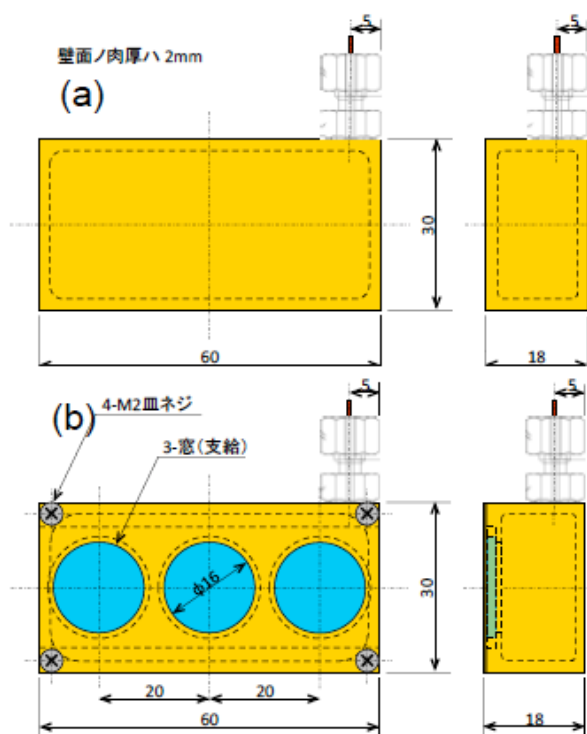


Fig. 3. Astrobiology Japan 2 用のガスセル組立
図(a) 窓なし, (b) MgF_2 窓つき

陽子線を照射した時のグリシン（前駆体）のG値は、室内実験から0.03であることがわかっている[16]。LDEF実験時の測定より、地球周回軌道上での宇宙線フラックスは 0.83 Gy y^{-1} と報告されており、この値を用いると、1年間の曝露で生成するグリシン（前駆体）は 0.06 pmol と推定できる。これは極めて微量であるが、検出可能な量である。一方、紫外線のフラックスは $2 \times 10^8 \text{ J m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (LDEF実測値)であり、宇宙線よりもかなり高いエネルギー値である。しかし、紫外線のみでは窒素の解離が困難であるため、この混合気体からはアミノ酸のような含窒素有機物は生成できない。ただし、窒素分子が宇宙線により活性化された後に紫外線が照射されれば、アミノ酸前駆体のような含窒素有機物の生成が期待できる。つまり、宇宙線と紫外線のシナジー効果により、宇宙線単独よりも多くのグリシンが検出される可能性が考えられる。

4. その他の実験候補

ExHAMに取り付けられる $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ の曝露ユニットを用いて実施可能な化学進化実験として、混合気体を用いるもの以外の検討も行った。

(1) 小天体内部での化学進化

小惑星や彗星などの太陽系小天体では、水を含む様々な化学反応が起こっていると考えられる。炭素質隕石には、アミノ酸を始め糖や核酸塩基など生命

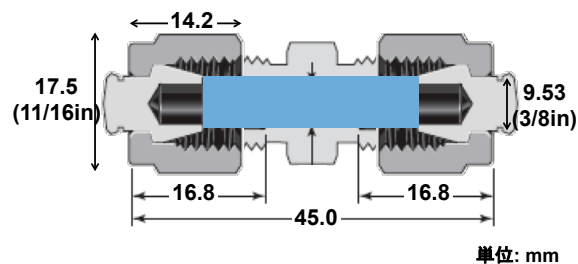


Fig. 4. 太陽系小天体内部での化学進化検証用実験装置（水色部分が試料スペース）

関連物質が数多く見つかったが、これらの一部は小天体の環境で形成された可能性がある。ホルムアルデヒドやアンモニアなど、小天体のもととなった塵に含まれていたと考えられる単純な有機物を出発物質とした水熱変成実験により、隕石に含まれる複雑高分子有機物(insoluble organic matter; IOM)に分子構造のよく似た有機物の形成が確認された[17,18]。また、これら複雑有機物と同時にアミノ酸や糖が形成されることも分かっている[19]。そこで、小惑星中での水質変成による有機物生成における宇宙線の効果を調べるために、ISS 地球周回軌道曝露部において太陽系小天体環境の模擬実験を行う。出発物質として、 $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{CO} : \text{NH}_3 = 100 : 10 : 10$ をSwagelok®で構成した容量 1 mL 程度のステンレス製セルに封入したものを用いる (Fig. 4)。1年間の曝露でアミノ酸などの生体関連分子や複雑高分子有機物の形成が期待できる。予備実験として、上記の出発物質に γ 線照射などを行い、宇宙線の効果を調べることを計画している。

(2) 原始海洋中でのリボヌクレオチド生成

原始地球上での生命起源にいたる化学進化段階で、情報伝達を司る生体物質ポリマーが化学的に発生したと考えられる。RNAワールド仮説では、このポリマーはRNAだと考えられているが、これが無生物的に生成したことを実験的に検証する試みは成功していない。活性リボヌクレオチドが重合することでRNAが形成できることが実証されている。しかし、RNAポリマーの機能素子であるリボヌクレオチドは、前生物学的な合成が難しく、構成部品のリボースと核酸塩基からどのように生成されたか合理的な説明はない。

初期生命が育まれた原始地球では、紫外線や宇宙線を遮るバリアーに乏しく、照射される強力な宇宙線が有機物の合成と分解を促進し、生命システム構築に必要な低分子化合物を供給したと考えられる。国際宇宙ステーションの「きぼう」船外曝露部では、複合放射線である宇宙線を大量に照射することが可能である。そのため、我々は、原始地球環境の出来事を再現することを目指し、原始海洋を模した液体

に溶かしたヌクレオチド前駆体をきぼう曝露部で ExHAM に取り付けて曝露する。

宇宙線照射により、化学反応性の高いフリーラジカル分子が発生し、通常の化学反応では得られない様々な化合物が合成されることが期待できる。曝露試料を地上に回収後、合成・分解化合物を、NMR や質量分析などを利用して解析する。高精度の質量分析を使用すれば、紫外線と宇宙線で合成される網羅的な原始地球環境の中間前駆体がリスト化され、ヌクレオチド化学合成の潜在的なパスウェイ構築に新たな知見が得られと期待できる。地上実験で得られる合成有機物質も同定し、原始生命におけるシステム成立の順序と選択律を科学する。

5. まとめ

本 WG は、たんぼぼ計画につづく地球周回軌道上でのアストロバイオロジー実験候補として、宇宙および原始地球環境下での化学進化の過程で生体関連有機物が無生物的に合成されることを実証するための宇宙実験を提案する。曝露試料としては、タイタン大気を模擬した弱還元型混合気体などを考えている。実験装置はきぼう曝露部に設置されている ExHAM に取付可能なサイズのものを設計し、そのうちのいくつかは、現在 BBM を作製中である。

本提案実験が実施されれば、人為的なエネルギーを全く加えることなく、生体有機物が宇宙環境下で無生物的に生成しうることを検証する、世界初の実験となる。

謝辞

本研究は、JAXA 宇宙環境利用科学委員会 WG 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) 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.*, **27**, 189-192 (2011).
- 9) 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: 地球外有機物・微生物の検出のための宇宙実験の検討, *Space Util. Res.*, **28**, 224-227 (2012).
- 10) 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).
- 11) A. Yamagishi *et al.*, Tanpopo: Astrobiology Exposure and Micrometeoroid Capture Experiments — Proposed Experiments at the Exposure Facility of ISS-JEM *ISTS Web Paper Archive*, 2013-k-49, 1-7 (2013).
- 12) A. Yamagishi *et al.*, 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).
- 13) S. L. Miller, A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth, *Science*, **117**, 528-529 (1953).
- 14) K. Kobayashi, T. Kaneko, T. Saito and T. Oshima, Amino Acid Formation in Gas Mixtures by Particle irradiation, *Origins Life Evol. Biosphere*, **28**, 155-165 (1998).
- 15) H. B. Niemann, *et al.*, The Abundance of Constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe, *Nature*, **438**, 779-784 (2005).
- 16) T. Taniuchi, Y. Takano, K. Kobayashi, Amino Acid Precursors From a Simulated Lower Atmosphere of Titan: Experiments of Cosmic Ray Energy Source with ¹³C- and ¹⁸O-Stable Isotope Probing Mass Spectrometry, *Anal. Sci.*, **29**, 777-785 (2013).
- 17) C. D. Cody, E. Heying, C. M. O. Alexander, L. R. Nittler, A. L. D. Kilcoyne, S. A. Sandford, and R. M. Stroud, Establishing a molecular relationship between chondritic and cometary organic solids. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 19171-19176 (2011).
- 18) Y. Kebukawa, A. L. D. Kilcoyne, G. D. Cody, Exploring the potential formation of organic solids in chondrites and comets through polymerization of interstellar formaldehyde. *Astrophys. J.* **771**, 19 (2013).
- 19) Y. Kebukawa, S. Oka, A. Tokumitsu, S. Tachibana, Y. Ishikawa, T. Kaneko, K. Kobayashi, and G. D. Cody, Possible prebiotic organic molecule syntheses on asteroids from formaldehyde and ammonia during aqueous activities (abstract). *46th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, March 16-20* (2015).