

低地球周回軌道を利用した生体有機物生成検証実験

癸生川陽子（横浜国大），小林憲正（横浜国大），三田肇（福岡工大），別所義隆（理研），
中川和道（神戸大），柴田裕実（大阪大），今井栄一（長岡技大），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），橋本博文（JAXA），
横堀伸一（東薬大），山岸明彦（東薬大），

地球周回軌道におけるアストロバイオロジー実験 WG

Verification of Abiotic Formation of Bioorganic Compounds by Utilizing Low Earth Orbit

Yoko Kebukawa, Kensei Kobayashi, Hajime Mita, Yoshitaka Bessho, Kazumichi Nakagawa,
Hiromi Shibata, Ei-ichi Imai, Jun-ichi Takahashi, Yukihiro Ishibashi, Kyoko Okudaira, Hajime Yano,
Hirofumi Hashimoto, Shin-ichi Yokobori,*

Akihiko Yamagishi, Astrobiology Experiments in Earth Orbit WG

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

E-Mail: kkensei@ynu.ac.jp

Abstract: In prior to the generation of life on planets, bioorganic compounds such as amino acids should have been synthesized abiotically. A large number of laboratory experiments have been performed simulating possible planetary or interstellar environments. In these experiments, however, large flux of energies was usually given to the starting materials from artificial sources such as accelerators or lamps. In order to examine possible prebiotic formation of bioorganic compounds, it would be of interest to verify whether chemical evolution occurs by natural energies. We here propose some space experiments to synthesize bioorganic compounds on the Exposed Facility of Japanese Experimental Module (JEM-EF) of the International Space Station. They include (1) organic formation in aqueous solution in solar system small bodies. Experimental apparatus were designed to use the Ex-HAM facility now on equipped on the JEM-EF.

Key words; Astrobiology experiments, Prebiotic Synthesis, International space station, Amino Acids, Titan, Solar system small bodies, Cosmic Rays, Solar UV

1. はじめに

生命の誕生に必要なアミノ酸などの有機物の起源に関しては、地球起源説と地球外起源説がある。前者に関しては、かつてはメタン・アンモニアなどを主とする強還元型原始地球大気を用いた室内模擬実験が多数行われ、放電[1]などによりアミノ酸が容易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で推定されている。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。しかし、このような弱還元型大気からでも、陽子線照射[2]や隕石衝突後の高温ブルームを想定したプラズマ放電[3]などにより、アミノ酸が高効率で生成しうることが報告されている。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%含む大気を有しており、原始地球のアナログとして注目されているが、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[4]。タイタン大気を模擬した窒素・メタンの混合気体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、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[5]。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示唆される。

一方、炭素質コンドライトや彗星などの地球外物質にアミノ酸(前駆体)を含む多様な有機物が含まれていることが知られており[6, 7]、これが地球に有機物を持ち込んだ可能性が考えられている。とりわけ、地球には現在も毎年1万トンレベルの宇宙塵が降下しており[8]、原始地球にはこれをはるかに超える宇宙塵が有機物を運び込んだ可能性が考えら得る。現在、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟(JEM)の曝露部で実施中のたんぼぼ計画では、低密度シリカエアージェルを用いて地球生物圏に達する前の宇宙塵を捕集し、それにふくまれる有機物を評価することを目的のひとつとしている[9]。

隕石などに含まれる有機物の起源には様々な説がある。ひとつは、太陽系が生成する前の分子雲中で、星間塵の周囲に氷結した「アイスマントル」に宇宙線や紫外線が作用してできたとするものである。これを模擬し、一酸化

炭素・アンモニア・水などを含む氷に粒子線[10,11]や紫外線[12,13]を照射することにより、アミノ酸前駆体を含む複雑有機物が生成することが報告されている。また、初期太陽系において、隕石母天体(小惑星)などの太陽系小天体の内部で水、アンモニア、ホルムアルデヒドなどからなる液体が存在した可能性があり、この溶液中での生成の可能性もあり、これを模擬した実験も行われている(後述)。

惑星上、星間、小惑星中などのさまざまな環境での化学進化を調べるための地上模擬実験が多数行われてきたが、それらにおいては、時間や設備の都合上、通常のエネルギーフラックスよりもはるかに高いエネルギー(紫外線、 γ 線、粒子線など)を賦与するのが通例である。また、紫外線と粒子線とを同時に照射した場合は、それらのシナジー効果が生じる可能性があるが、そのような実験は地上での実施が困難であるため、ほとんど行われていない。しかし、宇宙環境を利用すれば、実際の宇宙でのエネルギーフラックスで、しかも複数のエネルギーを組み合わせた形で利用することが可能である。

これまでもアストロバイオロジー宇宙実験は行われてきたが、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。日本初のアストロバイオロジー宇宙実験である「たんぼぼ」[9]においては、地球低周回軌道での宇宙塵の捕集を世界で初めて行うが、これは宇宙塵の形で地球に供給される有機物の評価を行うものであり、有機物の生成を調べるものではない。そこで、「たんぼぼ」の次のアストロバイオロジー宇宙実験としては、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ことは極めて意義が高いものである。

2. 宇宙線および紫外線による有機物生成検証実験

1953年のMillerの実験では、メタン・アンモニア・水素・水という強還元型原始地球大気が想定され、その中で火花放電によりアミノ酸の生成が報告された。しかし、新たな太陽系生成論からは、そのような強還元型原始地球大気の存在は否定され、二酸化炭素、窒素などを主とする大気であったと考えられている。しかし、若干の一酸化炭素やメタンが存在した可能性が示唆されている。この場合、窒素を主とし、副成分としてメタンを含むタイタン大気は原始地球大気のアナログと考えることができる。タイタンは窒素・メタン等を含む濃厚な大気をもち、この大気中で紫外線、土星磁気圏電子、宇宙線などの働きにより多様な有機物が生成していることが予想されている。

われわれは、(1) 二酸化炭素+メタン(350 Torr)・窒素(350 Torr)・水蒸気混合気体への陽子線照射および火花放電、(2) メタン(5%)・窒素(95%)の混合気体

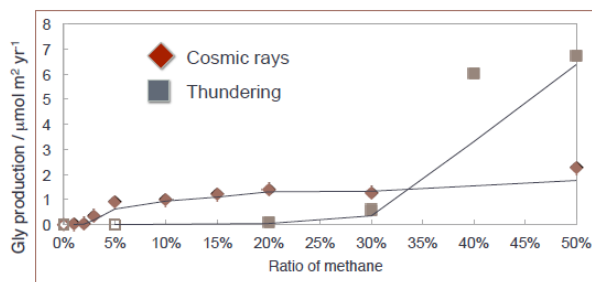


Fig. 1. Estimation of global formation of glycine from $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ type primitive atmosphere by cosmic rays and thundering. $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 = 50\%$, $\text{N}_2 = 50\%$. Energy flux was estimated to $2.9 \times 10^{21} \text{ eV m}^{-2} \text{ yr}^{-2}$ (cosmic rays) and $1.0 \times 10^{24} \text{ eV m}^{-2} \text{ yr}^{-2}$ (thundering), respectively [20].

(模擬タイタン大気)への陽子線照射・ γ 線照射を行い、生成物中のアミノ酸分析などを行った。

陽子線照射は、タンデム加速器(東工大)からの2.5 MeV陽子線を混合気体に2 mC照射し、 γ 線照射は、混合気体 ^{60}Co 線源(東工大)を用いた。火花放電はテスラコイルを用い、混合気体に挿入した1対のタングステン電極間で行った。放電または照射後、容器から生成物(水溶液)を回収し、その一部を酸加水分解(6 M HCl, 110 °C, 24 時間)した後、陽イオン交換HPLC法(*o*-フタルアルデヒドとN-アセチル-L-システインによるポストカラム誘導体化-蛍光検出)によりアミノ酸分析を行った。

原始大気実験では火花放電・陽子線照射のいずれにおいても CH_4 の比率が高くなると、アミノ酸の種類や生成量が増加したが、火花放電では、 CH_4 混合比が30%以下になると急激にアミノ酸生成量が減少し、ほとんどアミノ酸が生成しなくなった。一方、陽子線照射では、グリシン収率はほぼ CH_4 混合比に比例し、 CH_4 混合比が1%でもアミノ酸の生成が確認された。このことから、もし原始大気の組成が弱還元型(N_2 、 CO_2 が主成分でごく少量の CH_4 が含まれる)であった場合、雷によるアミノ酸等の生成は期待できないが、宇宙線によるアミノ酸等の生成が可能であることが示唆された(Fig. 1)。

模擬タイタン大気への陽子線照射では気相中でもやが生じ、その加水分解でアミノ酸が生成した。タイタンでは高層大気では主として土星磁気圏電子(プラズマ放電)や紫外線、下層大気で宇宙線や隕石衝突が主なエネルギー源と考えられ、従来は高層大気中での有機物生成が主に考察されてきた。本研究では、アミノ酸前駆体の生成を考える場合、むしろ濃厚な下層大気中で宇宙線的作用による生成が重要であることが示唆された。

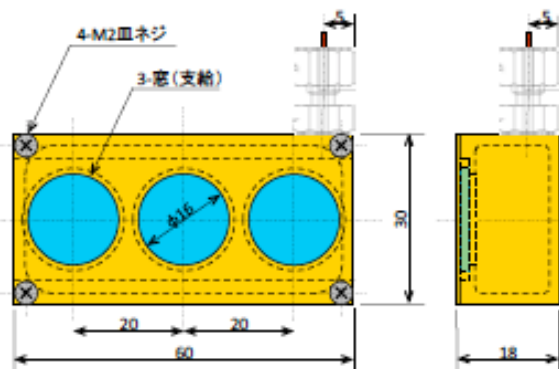


Fig. 2. Gas cell for in situ synthesis of organic compounds with cosmic rays and solar UV

以上の結果をもとに、宇宙実験としては、模擬タイタン大気を用いることを提案する。理由は、原始地球大気の組成はわかっていないのに対し、タイタンの大気組成は知られていること、将来のタイタン探査により、宇宙実験の結果の検証が可能であることが挙げられる。

「たんぼぼ」では、宇宙塵捕集および有機物・微生物曝露のユニット(10 cm × 10 cm × 2 cm)を、JEM-EFに設置されたEx-HAMを(船外簡易取付機構)に取り付けて実験を行っている。「たんぼぼ」は2018年に終了する予定であり、その空きスペースを用いた実験をデザインすることとした。つまり、実験ユニットは10 cm × 10 cm × 2 cmを基本とする。このユニットにいくつかの曝露容器をいれる。

紫外線透過窓のない曝露容器は、SUS316製の直方体(28 mm × 58 mm × 18 mm)にガス導入部として、Swagelok SS-100-R4を取り付けたもので、ここに1/16インチのSUS管を挿入し、ここから混合気体を導入した後、管をかしめてガスを封入する。これに紫外線透過のためのMgF₂窓を取り付けた曝露容器の設計図をFig. 2に示す。これらのBBMを作製した。

タイタン大気の組成を参考に、窒素(95%)とメタン(5%)の混合気体を1気圧封入し、これを1年間曝露する場合を考える。模擬実験(タンデム加速器から2.5 MeV陽子線を照射)では、グリシン(前駆体)のG値は0.03であった[5]。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0.09 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 × 10⁸ J m⁻² y⁻¹(LEDF実測値)であり、宇宙線より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。しかし、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[14]。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。

タンデム加速器を用いた実験では、比較的エネルギーの低い陽子線を高いフラックスで用いたが、より宇宙条件に近い実験として、より高いエネルギーの粒子を、より低いフラックスで照射する実験をHIMAC(放医研)を利用して行っているところである。また、陽子線と紫外線の同時照射により、両者のシナジー効果があるかを調べる実験も計画中である。

3. 太陽系小天体中での有機物生成実験

隕石に含まれる岩塩の結晶中から液体の水を含む流体包有物が報告されている[15]。これらの岩塩は宇宙線の照射により青色を呈しており、長期間宇宙線にさらされる環境にあった後に、隕石の母天体である小惑星に取り込まれたと考えられている。このような流体包有物を含む岩塩は、小惑星帯の準惑星Ceresにかつてあったとされる内部海を起源としている可能性が指摘されている[16]。土星の衛星Enceladusにおいては、地表の割れ目から、塩分、二酸化炭素、アンモニア、有機物などを含む海水が噴出していることが探査機カッシーニにより観測されている[17]。液体の水は化学反応の優れた媒体である。ホルムアルデヒドやアンモニアなど、太陽系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、複雑な高分子有機物の形成が確認された[18,19]。また、熱を与えなくても、重粒子線などの照射により、アミノ酸の前駆体を含む有機物が形成されることが分かってきている。そこで、小天体表層付近の液体の水のある環境において、宇宙線などのエネルギーによる有機物生成の可能性を調べるために、ISS地球周回軌道曝露部において小天体液体水環境の模擬実験を行う。出発物質として、H₂O : H₂CO :

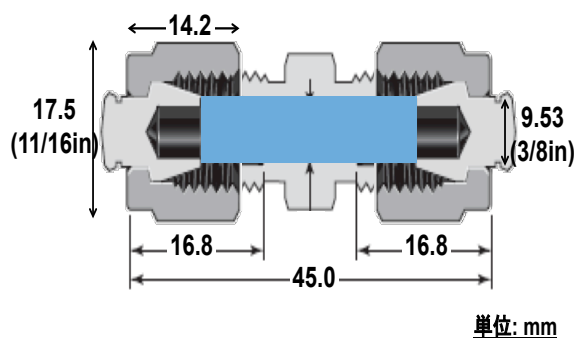


Fig. 3. Device for space experiments to examine abiotic synthesis of organic compounds from aqueous medium simulating solar system small bodies.

NH₃ = 100 : 10 : 10をスウェジロック®で構成した容量1mL程度のステンレス製セルに封入したものを用いる (Fig. 3)。1年間の曝露でアミノ酸前駆体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、重粒子線やガンマ線照射実験を行い、ホルムアルデヒドやアンモニアから生成する有機物を調べている。

4. おわりに

たんぼぼ計画を進展させた次のアストロバイロジ—宇宙実験の検討状況を報告した。上記のほかにも、オゾン層生成前の原始地球表層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可能性を検証する実験の可能性も議論している。

地球上での生命誕生にいたる化学進化過程は、原始地球物質が今日の地球上の遺されていないため、実証的な研究が困難と考えられてきた。しかし、宇宙実験や太陽系生命・有機物探査により、宇宙、特に太陽系環境下での化学進化の証拠が得られることにより、地球上での化学進化の解明も進んでいくことが期待される。

謝辞 本稿において紹介した地上準備実験を行うにあたり、金子竹男・阿部仁美・伊勢絢一・三澤柊介（横浜国大）、依田功・福田一志・近藤康太郎・小栗慶之（東工大）、吉田聡（放医研）の各氏の御世話になったので感謝する。本研究の一部は、平成26年度 JAXA 宇宙環境利用科学 WG/研究チーム経費、および27年度大学共同利用機関法人自然科学研究機構アストロバイオロジーセンタープロジェクト (AB271014) の助成を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) S. L. Miller, A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth, *Science*, **117**, 528-529 (1953).
- 2) K. Kobayashi, et al., Amino Acid Formation in Gas Mixtures by Particle irradiation, *Origins Life Evol. Biosphere*, **28**, 155-165 (1998).
- 3) S. Miyakawa, et al., Amino Acid Synthesis from an Amorphous Substance Composed of Carbon, Nitrogen and Oxygen, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 990-992 (1998).
- 4) 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).
- 5) T. Taniuchi, et al., 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).
- 6) K. Kvenvolden, et al., Evidence for Extraterrestrial Amino Acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite, *Nature*, **228**, 923-926 (1970). 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft, *Science*, **314**, 1720-17264 (2006).
- 7) 矢田透, 他, 遊星人, **10**, 184-191 (2001).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) K. Kobayashi, et al., Formation of Amino Acid Precursors in Cometary Ice Environments by Cosmic Radiation, *Adv. Space Res.*, **16**, 21-26 (1995).
- 11) T. Kasamatsu, et al., Formation of Organic Compounds in Simulated Interstellar Media with High Energy Particles, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **70**, 1021-1026 (1997).
- 12) G. M. Munos Caro, et al., Amino Acids from Ultraviolet Irradiation of Interstellar Ice Analogues, *Nature*, **416**, 403-406 (2002).
- 13) M. Bernstein, et al., Racemic Amino Acids from the Ultraviolet Photolysis of Interstellar Ice Analogues, *Nature*, **416**, 401-403 (2002).
- 14) M. S. Gudipati, et al., Photochemical Activity of Titan's Low-Altitude Condensed Haze, *Nat. Commun.*, **4**, 1648.
- 15) M. E. Zolensky, Asteroidal Water Within Fluid Inclusion-Bearing Halite in an H5 Chondrite, Monahans (1998), *Science*, **285**, 1377-1379 (1999).
- 16) M. E. Zolensky, et al., The mineralogy of Ceres* (*Or something an awful lot like it), *78th MetSoc*, Abstract #5270 (2015).
- 17) F. Postberg, et al., A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus, *Nature*, **474**, 620-622 (2011).
- 18) G. D. Cody, et al., Establishing a molecular relationship between chondritic and cometary organic solids, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **108**, 19171-19176 (2011).
- 19) Y. Kebukawa, et al., Exploring the Potential Formation of Organic Solids in Chondrites and Comets through Polymerization of Interstellar Formaldehyde, *Astrophys. J.*, **771**, 19 (2013).
- 20) K. Kobayashi and T. Saito, Energetics for Chemical Evolution on the Primitive Earth, in "The Role of Radiation in the Origin and Evolution of Life," Ed. by M. Akaboshi, Univ. Kyoto Press, Kyoto (2000) pp. 25-37.