

ポストたんぽぽ計画における宇宙曝露実験

三田肇* (福岡工大)、矢野創 (JAXA/ISAS)、左近樹 (東京大)、小林憲正 (横浜国大)、
癸生川陽子、横谷香織 (筑波大)、中川和道 (大阪大)、山岸明彦 (東京薬科大)、杉本学
(岡山大)、Tetyana Milojevic (ウィーン大)、別所義隆 (中央研究院・Spring 8)、中山美
紀 (福岡工大)、白水まどか (福岡工大)、横尾卓哉 (横浜国大)、佐藤智仁 (横浜国大)、
たんぽぽ研究チーム

Space exposure experiments in post-Tanpopo missions

MITA Hajime*, YANO Hajime, SAKON, Itsuki, KOBAYASHI Kensei, KEBUKAWA
Yoko, TOMITA-YOKOTANI Kaori, NAKAGAWA Kazumichi, YAMAGISHI Akihiko,
SUGIMOTO Manabu, TETYANA Milojevic, BESSHO Yoshitaka, NAKAYAMA Miki,
SHIROMIZU Madoka, YOKOO Takuya, SATO Tomohiro, Tanpopo Team

E. mail: mita@fit.ac.jp

Abstract: Post-Tanpopo missions were proceeded as successor experiments of Tanpopo mission which was the first Japanese astrobiological space experiments using ExHAM on KIBO/ISS. Although stabilities of organic compounds and microbes were focused in the 1st Tanpopo mission, synthesis of organic compounds, functions and mechanism of organic compounds and microbes to survive in the space environments were studied in the following experiments. In addition, a new experiment with some modification to the Tanpopo exposure unit is also planned for the future space exposure experiments. Space exposure experiments of organic compounds in the post-Tanpopo missions are introduced mainly in this report.

1. はじめに

たんぽぽ実験は、2015年より2018年までの3年間に行われた日本で最初のアストロバイオロジー分野の宇宙実験である。この「たんぽぽ」実験では、微生物や有機物を宇宙空間に曝露し微生物の生存可能性と有機物の変性を明らかにする研究、宇宙空間に漂う物質を捕獲し地球上から舞い上げられた微生物の存在と宇宙より飛来した宇宙塵を捕獲しその中に含まれる有機物を解析する研究、軌道上に存在するデブリの分布を明らかにする研究、捕獲に必要なエアロゲルの開発を目的にした。この中で本報告では、有機物の宇宙曝露実験について、たんぽぽ実験での成果を受けて実施されたポストたんぽぽ実験について紹介する。

2. たんぽぽ実験での曝露実験¹

たんぽぽ実験では、1枚のたんぽぽ型曝露装置(図1)に、20個の曝露ユニット(図

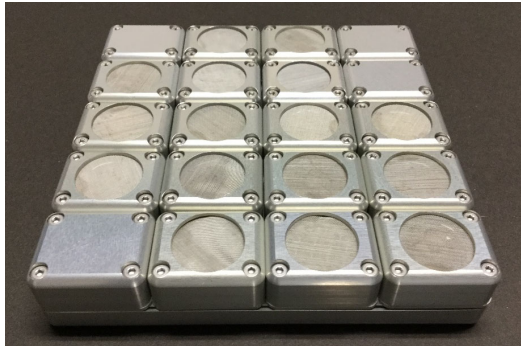


図1 たんぼぼ型曝露装置



図2 曝露ユニット

2) を搭載できる。ユーザーは、この曝露ユニット内のサンプル基板上に小孔をあけて中に曝露試料を充填したり、薄膜を蒸着するなど、それぞれの実験目的に応じて使用することができた。たんぼぼ実験では、3枚のたんぼぼ型曝露装置を ExHAM に搭載し、1年ごとに1枚ずつ取り外し、地球に帰還後、ユーザーに曝露ユニットを分配し分析を行った。

最近では、分子雲で生成し、原始太陽系星雲に運ばれ、それが小天体上での水質変性などを受けて地球上にもたらされたものが、地球上の生命の源になったと考えられている。ここで、紫外線や宇宙線などに曝されている有機物が地球まで無事に届くのか疑問になる。特に、炭素質隕石中にアミノ酸が検出されているが、その大部分は酸加水分解によって検出されることから、隕石中には何らかの前駆物質として含まれていると考えられている。そこで、たんぼぼ実験では、アミノ酸としてグリシンとイソバリン、低分子量前駆体としてヒダントインと5-エチル-5-メチルヒダントイン、高分子量前駆体として陽子線照射により生成した複雑有機物(CAW)を曝露試料に選択し、アミノ酸、低分子量前駆体、高分子量前駆体で安定性の相違を明らかにすることを目的に実施した。さらに、アミノ酸でもあるアラニン薄膜も宇宙曝露することで、真空紫外線の線量計として使用するとともに、ジペプチドが生成するかのかにもついて調べることにした。

アミノ酸とアミノ酸前駆体の地上実験では、ISS環境で想定される宇宙線ではほとんど分解が起らず、紫外線の効果が大きいことを明らかにし、アミノ酸自体よりも低分子量であっても高分子量であってもアミノ酸前駆体の方が安定であることが示された。しかし、宇宙曝露の結果では、低分子量アミノ酸前駆体がアミノ酸よりも早く分解されることが明らかになった。高分子量前駆体は、アミノ酸よりも安定であることも明らかとなった。これは、低分子量前駆体とアミノ酸との真空紫外線領域における吸光スペクトルの相違に依存しているのではないかと考えた。地上実験では、ほぼ単色光である172 nmのXeエキシマ光源を用いて行ったが、宇宙環境では白色であり比較的長波長の強い紫外線も強く浴びることに起因しているものと考えた²⁾。

アラニン線量計によって、直径18 mmのサンプル基板上で縁辺部を除いて、ほぼ均質に紫外線照射を受けていること、470-570 kJ m⁻² y⁻¹の真空紫外線を受けていたこと

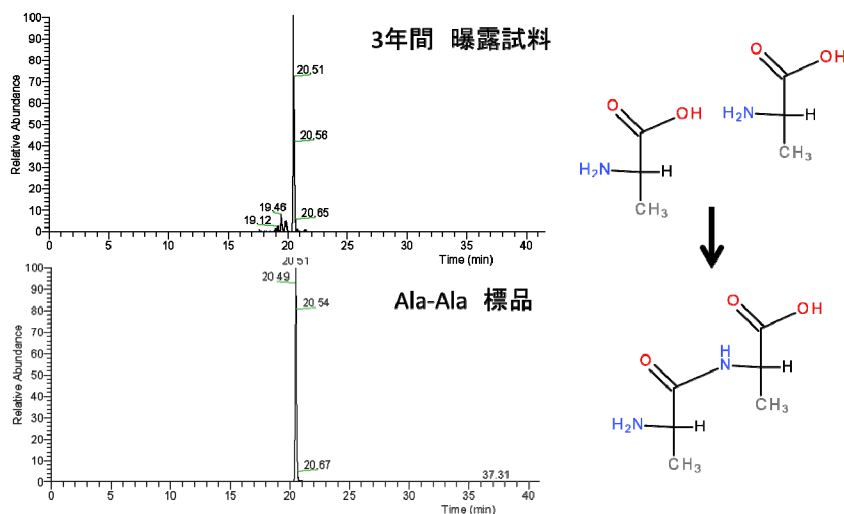


図3 3年間曝露したアラニン薄膜中のジアラニン生成を示すマスキロマトグラム

を明らかにすることができた³。さらに、アラニン薄膜に真空紫外線を照射することでジアラニンを生成することが報告されているので、アラニン薄膜を水に溶解し、HPLCとLC-MS分析を行ったところ、ジアラニンを検出することができた(図3)。様々な有機物曝露実験は行われているが、合成反応を行った初めての成果である⁴。隕石中からジグリシンの検出が報告されているが⁵、真空紫外線によりジペプチドが生成することが明らかになった。

微生物の曝露については、Kawaguchiらにより、放射線耐性菌が宇宙で3年後にも生存し、地球惑星間を移動することが可能であることを示されている。

3. たんぼぼ2実験での曝露実験

たんぼぼ実験の成果を受け、2019年より2020年までの1年間、たんぼぼ曝露装置1枚を用いた宇宙曝露実験を実施した。さらに、これまで別に実施されてきたQCC型曝露装置を用いた実験もたんぼぼ実験の枠組みの中で実施されることになった。QCC型曝露装置は、石英あるいはMgF2の窓材が必要であったたんぼぼ型曝露装置を発展させた、窓材無しの宇宙曝露も可能な曝露装置である(図4)⁶。このQCC型曝露装置1枚も暴露するこになり、曝露実験の幅を一層広げることができるようになった。



図4 QCC型曝露装置

たんぼぼ2での有機物曝露実験では、たんぼぼ型曝露装置を使ったでは、アミノ酸からペプチドができる反応をより詳細に検証することにした。まず、真空紫外線の線量測定を目的にしたアラニン薄膜の曝露では、極微量にしか生成しないジアラニンが実験環境中の汚染物の混入でないことを確かめるために、安定同位体標識したアラニンを使

用することで精度の向上を目指した。アラニンからジアラニンが生成するのであれば、原料にジアラニンをを用いることで、さらに長い4量体の生成するのではないかと考えた。2量体から4量体の生成が確認できれば、原料の存在確率の問題はあるが、可能性としてはさらに長いペプチドが宇宙環境で生成する可能性があることを示すことになる。また、タンパク質のように機能を持つためには、単一の

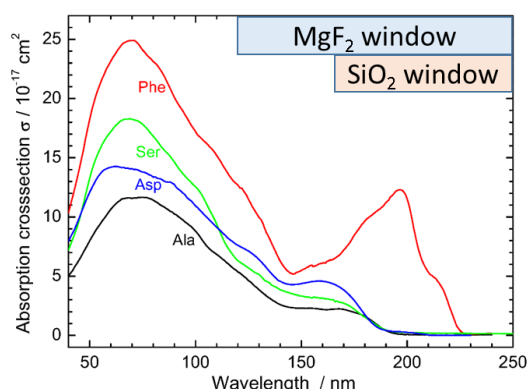


図5 アミノ酸のVUV吸収スペクトル

アミノ酸組成でなく、複数のアミノ酸から共重合体の生成の必要である。そこで、これまでのアラニン単独の薄膜でなく、アラニンにセリン、フェニルアラニン、アスパラギン酸を加えて薄膜を作成し、曝露を実施した。さらに、フェニルアラニンの吸収スペクトルは、他のアミノ酸と大きく異なること(図5)から、たんぼぼ実験でのアミノ酸前駆体の安定性検討で示唆された安定性に及ぼす吸収スペクトルの影響を検証する実験も兼ねることになる。これらの実験から、ペプチド鎖の伸長と共重合体生成が確認できれば、宇宙環境でも多様なペプチドの生成、さらにはタンパク質ような機能性分子発現の可能性を示すことになり、生命の起源に関する研究にとって大きな一歩となる。

さらに、QCC型曝露パネルも使用できるようになったので、グリシン薄膜とCAW薄膜の窓材無しの曝露も実施することにし、より実際の宇宙環境に即した安定性評価も計画した。

微生物については、たんぼぼ実験でも実施した陸棲ラン藻の宇宙曝露も実施した。陸棲ラン藻についても、たんぼぼ実験で、曝露される紫外線の波長の寄与が強い可能性が示された。そこで、窓材に波長透過性の異なる薄膜を付加することで、照射される波長が異なるように設計した。さらに、藻体の厚さも変えることで、生存性を高める条件を探ることにした。

4. たんぼぼ3実験での曝露実験

たんぼぼ3実験は、たんぼぼ型曝露装置1枚を、2020年10月に曝露を開始し、1年間の予定で、曝露を進行中である。

有機物については、たんぼぼ2実験の成果を受けて条件を設定する必要があることから実施を見送った。

微生物については、放射線耐性菌の耐性能を引き出すためにはMnが重要な役割を果たす可能性が見出されたので、Mn欠乏条件で培養したものを曝露することにした。また、陸棲ラン藻をレゴリスと共存させる実験や、人類の宇宙進出を考え、木質の宇宙環境耐性や、イネの種子がもつ色素が紫外線に対する耐性を高めるのではないかとという検

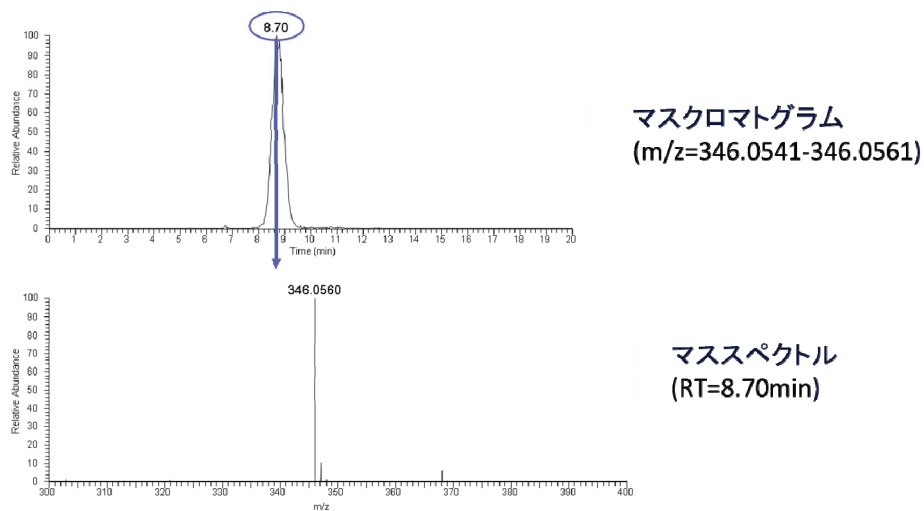


図6 アデニンとリン酸糖との混合水溶液中へのVUV照射後のマスクロマトグラムとピーク位置（保持時間 8.70）でのマススペクトル

証実験も併せて実施している。

5. たんぽぽ4実験以降の曝露実験の計画

これまで宇宙曝露に使用してきた ExHAM に代わり新しいプラットフォームとして ExBAS が使用される見込みになったので、これに併せた曝露装置の改良検討を進めている。たんぽぽ型曝露ユニットを搭載することは変えずに、曝露ユニットを固定する台座のみを変更するだけで宇宙曝露を実施する目途がついた。たんぽぽ4として、2021年暮れからの曝露開始を目指して準備を進めることになった。

ここでは、新たな曝露試料として、ヌクレオチド合成を目指して準備を進めている。ヌクレオチドは、アミノ酸・タンパク質と並び、生命の誕生に重要な物質であるが、その生成には不明な点が多い。我々は核酸塩基とリン酸糖の混合水溶液に真空紫外線を照射することでヌクレオチドが生成することを明らかにした(図6)。現在の地球海洋には、真空紫外線や短波長紫外線(UV-C)は、ほとんど到達しないが、大気中に酸素分子が存在する以前の原始海洋には現在より強い紫外線が到達していたと考えられている。そこで、ISSでの宇宙曝露環境を原始海洋のシュミレーションの場として使用とするものである。そこで、たんぽぽ型曝露ユニットを改造して、水溶液の宇宙曝露ができないかを検討している。たんぽぽ型曝露ユニットでは、サンプルを固定していたサンプル基板の

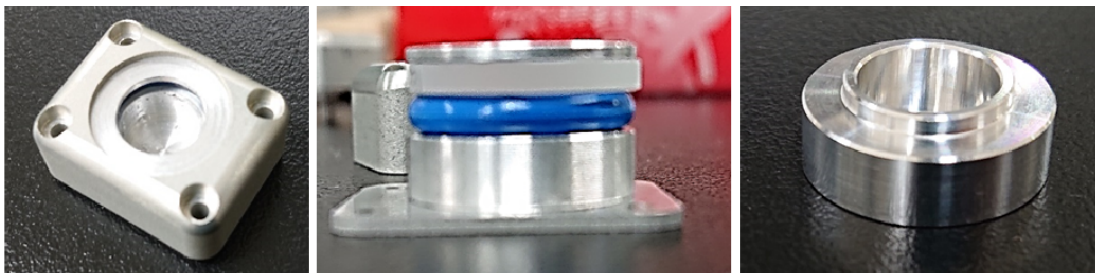


図7 計画中の液体曝露用セル

部分を液体を封入できるセルに置換することを計画した (図 7)。たんぼぼ実験で、たんぼぼ型曝露装置の温度環境は、 $29 \pm 5^\circ\text{C}$ から $-42 \pm 5^\circ\text{C}$ と報告している⁷。曝露環境で 60°C であっても、内圧は 133 kPa であり 152 kPa を超えない、内部の試料に毒性はないことから、シールドに該当すると判断している。窓材は、 120°C でも破壊されることがないことを、強度計算に加えて、 120°C のオープンに 90 分放置した実験で確認している。また、超高真空下 (約 $2 \times 10^{-6} \text{ Torr}$) での -60°C から $+60^\circ\text{C}$ の温度サイクル試験を進行中である。

さらに、曝露環境が変わるので、改めて紫外線線量測定を行うためのアラニン薄膜の曝露や、たんぼぼ2で実施できなかった異なるアミノ酸での共重合実験や、さらなる伸長実験も候補となっている。

微生物に関しては、孢子をつくる場合や、金属鞘を作ることに微生物、細胞外多糖を生産する微生物で、宇宙環境耐性が向上するのではないかという点の検証も計画されている。

6. 結語

これまで継続的に、生命起源や微生物の宇宙環境耐性を明らかにするための宇宙曝露実験を実施してきた。当初は、安定性という点に重きが置かれてきたが、合成や機能機序の検討という点に重きを置いた研究に、進化発展してきている。今後、さらに ISS に加えて、Gateway や ARTEMIS のような場を活用しながら、このような宇宙曝露実験を継続することで、アストロバイオロジー分野の発展に寄与していきたい。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金(16H04823, 17H02991, and 20H02014)および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のプロジェクト (AB282002, AB292002, AB302005, AB312006 and AB022002) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 三田肇、癸生川陽子 日本生物工学会誌、2019, **96**, 688-692.
- 2) Kobayashi, K. *et al. Astrobiology* to be submitted.
- 3) Kawaguchi Y., *et al. Front Microbiol* 2020, **11**, 2050-2061.
- 4) Nakagaw K., *et al., Astrobiology* Submitted.
- 5) Izumi Y., *et al., Orig Life Evol Biosph* 2011, **41**, 385–395.
- 6) Sakon T., *et al., COSPAR Scientific Assembly* 2018, 3-18.
- 7) Hashimoto H. *et al., Viva Origino* 2019, **47**, 4, 1-8