

たんぽぽ計画における宇宙塵捕集と有機物曝露

三田 肇^{1*}・癸生川陽子²

はじめに

地球上の生命体がどのように誕生したのかは、いまだ明らかになっていない大きな謎であり、重要な研究課題になっている。地球上の生命が地球上で誕生したという考えに加え、宇宙に存在した生命が地球上にたどり着き繁栄したという考えもある。前者の場合には、生命体の原料になる有機物は地球上で合成されたのか、宇宙より運ばれてきたのかという疑問が生じ、後者の場合には、果たして過酷な宇宙環境を生命体が飛来してくることが可能なのかといった課題が生じてくる。近年、アストロバイオロジーと呼ばれる学問分野が進展しており、生命体そのものは難しいかもしれないが、宇宙より地球に飛来した生命体の材料物質が地球上での生命誕生に大きく寄与したと考える研究者が増えてきている。

こうした課題を検討するために、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームを用いたアストロバイオロジー実験「たんぽぽ」が計画された¹⁾。このたんぽぽ計画は、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集し、地球上から舞い上げられた微生物の存在密度上限を調べるとともに宇宙より飛来した宇宙塵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、捕集に必要な超低密度シリカエアロゲルの開発を目的としている。本稿では、有機物の曝露と、宇宙塵中の有機物の解析の2点に関して紹介する。

宇宙空間に有機物が存在することは、すでに、炭素質コンドライト隕石、月の石、彗星塵、宇宙塵といった宇宙物質の分析や、電波天文学などの観察により知られている。特に、比較的豊富に存在する炭素質コンドライトについては多くの研究が行われており、アミノ酸、核酸塩基などの生体関連有機物を含む非常に多様な有機物が検出されている²⁾。これらの有機物は、溶媒で抽出し、ガスクロマトグラフィー質量分析計 (GC-MS) や液体クロマトグラフィー質量分析計 (LC-MS) を用いて、同定されている。しかし、隕石中には化学種が同定されていないものも多く存在する³⁾。さらに、溶媒に不溶で分子量が大きく特定の構造を有さない有機物が多く含ま

れている。これらの有機物は、フーリエ変換型赤外分光 (FTIR)、ラマン分光、核磁気共鳴などの手法により、化学構造の特徴が調べられている。さらに最近では、顕微FTIR、顕微ラマン分光、走査型透過X線顕微鏡 (STXM) を用いたX線吸収端近傍構造分析 (XANES)、高空間分解能二次イオン質量分析法 (NanoSIMS) などの局所解析の手法が発展してきており、隕石中の部位ごとに有機物の分布を明らかにすることも可能になってきている。また、これらの局所分析の手法により、微細な宇宙塵や彗星塵中の有機物の特徴も明らかになってきている。

地球にもたされる宇宙物質の量を考えると隕石によってもたらされる量に比べて、より小さな宇宙塵によってもたらされる量は遥かに多く、現在でも年間数万トンの宇宙塵が地表に到達していると見積もられている。また、隕石の中で有機物を含む始原的な炭素質コンドライトの割合は、数%以下程度と少ないが、宇宙塵は始原的なものが大部分を占めると考えられており、地球に供給された有機物の源として重要な役割を果たしていたと考えられている。そこで、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム上に、超低密度シリカエアロゲルを配置して、宇宙塵を捕集し、その有機物を分析することにした。

一方で、 γ 線や重粒子線などの宇宙線や紫外線など有機物の変性源が豊富に存在する宇宙環境で、宇宙塵中の有機物が安定に存在できるのかという疑問も生じる。そこで、宇宙環境で有機物の安定性を調べるための有機物の曝露実験も行うことになった。

たんぽぽ計画では、大きく2種類の実験装置が用意された。一つは、宇宙塵とデブリを捕集するための超低密度シリカエアロゲルを装着した捕集パネル (図1) であり、もう一つは有機物や微生物を宇宙環境に曝露するための曝露パネル (図2) である。これらの実験装置は、2015年4月15日にSpaceX社のドラゴン補給船運用6号機により打ち上げられ、国際宇宙ステーションに届けられた。船内にて捕集パネルと曝露パネルは、別のいくつかの実験装置とともに簡易曝露装置 (ExHAM) に取り付けられた。ExHAMは、「きぼう」のエアロックから船外に搬出され、「きぼう」ロボットアーム先端の子ア

著者紹介 ¹福岡工業大学工学部生命環境化学科 E-mail: mita@fit.ac.jp

²横浜国立大学大学院工学研究院 E-mail: kebukawa@ynu.ac.jp

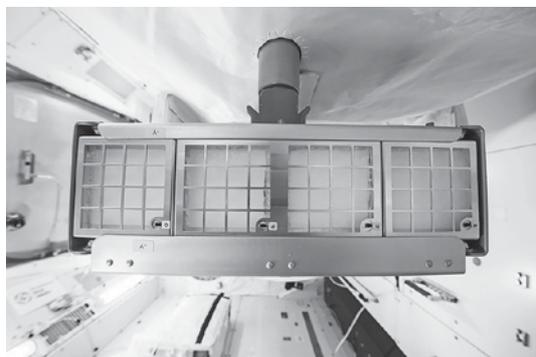


図1. ExHAMに取り付けられた捕集パネル。4つの捕集パネルの中に、10 cm × 10 cmの超低密度シリカエアロゲルが収納されている（写真提供：JAXA/NASA）。

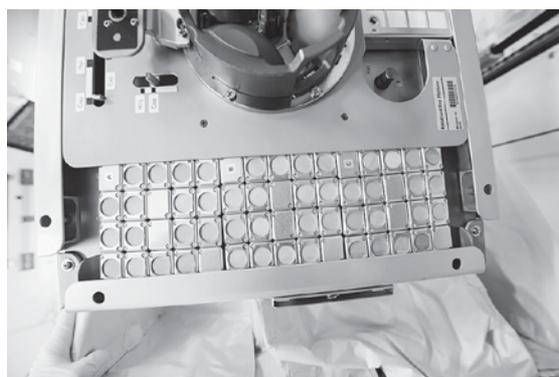


図2. ExHAM上に取り付けられた曝露パネル。三つの曝露パネルが取り付けられており、それぞれのパネルには20個の曝露ユニットが搭載されている。曝露パネルは1年ごとに一つずつ回収された（写真提供：JAXA/NASA）。

ムによって把持された後、「きぼう」船外実験プラットフォーム上のハンドレールに取り付けられ、2015年5月26日より曝露が開始された。捕集パネルは1年ごとに交換し、地球に持ち帰り分析に供した。曝露パネルの運用では、三つの曝露パネルをExHAM上に配置し、曝露開始1年後にそのうちの1枚が、2年後に次の1枚が、3年後に最後の1枚が地上に帰還した。すでに、一部の捕集パネルを除き、3年間の宇宙実験が終わったところである。

有機物の曝露実験

宇宙塵などに含まれている有機物が無事に地球まで届けられるのかどうかを明らかにするために、たんぼぼ計画では、有機物を宇宙空間に曝露することが行われた。これまでも海外の宇宙機関によって、「BIOPAN」や「EXPOSE」などのアミノ酸や核酸塩基の曝露実験は行われていたが⁴⁾、たんぼぼ計画は、アミノ酸に加えてそれらの前駆体の安定性を比較することを目的として実施

された。アミノ酸は、地球上の生命体に共通に存在し、生体中の存在量が多く重要な機能をもつタンパク質を構成する重要な物質であるため、生命の起源に密接に関わる物質として注目されている。そして、これまでに多くの炭素質コンドライト⁵⁾、月の石⁶⁾、彗星塵^{7,8)}など、さまざまな宇宙物質の中に比較的豊富に含まれていることが報告されている。しかし、実はアミノ酸分子そのものがこれらの宇宙物質中に含まれている比率は少なく、宇宙物質からの熱水抽出物を加水分解することで、アミノ酸が検出されているのである。すなわち、宇宙物質中にはアミノ酸が含まれていると言うより、加水分解によりアミノ酸となるアミノ酸前駆体が存在するのである。そこで、アミノ酸とそれらの前駆体と考えられている物質の双方を宇宙環境に曝露することで、それらの安定性を比較することにした。アミノ酸の前駆体としては、欧米の科学者を中心に低分子の前駆体化学物質と、小林ら⁹⁾のように宇宙環境を模擬した地上実験で多く生成する高分子量の化学構造を特定できない複雑有機物の二つの可能性が考えられている。そして、筆者らのチームではアミノ酸の前駆体、特に高分子量前駆体である複雑有機物の方がアミノ酸より宇宙空間で安定に存在し、地球上に前駆体として運ばれ、地球の海の中で加水分解を受けてアミノ酸として供給されたのではないかと考えた。

そこで、たんぼぼ計画では、もっとも簡単なアミノ酸であるグリシン、炭素質隕石中に比較的豊富に存在するイソバリン（2-アミノ-2-メチル酪酸）、それらの低分子前駆体の候補であるヒダントイン（2,4-イミダゾリジンジオン）とエチルメチルヒダントイン（5-エチル-5-メチル-2,4-イミダゾリジンジオン）を曝露試料として選択した（図3）。さらに、複雑有機物として、一酸化炭素、アンモニア、窒素の混合ガスに陽子線を照射することで生成した高分子量物質を選択した。これら5つの物質を宇宙環境に曝露した。

これらの物質を、直径18 mmのアルミ円盤にあけた直径2.5 mmの小孔の中に塗布して曝露ユニットに収納した（図4）。このアルミ円盤には、おおよそ160 nm以下の紫外線を通さない石英（SiO₂）と、120 nmまで透過可能な蛍石（MgF₂）の窓材でカバーすることで紫外

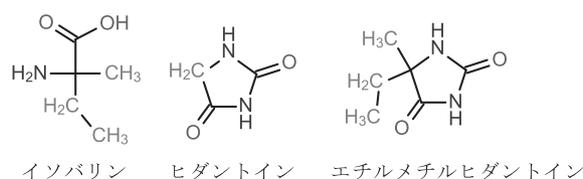


図3. 曝露有機物の化学構造

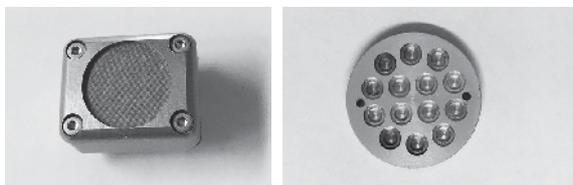


図4. 地上帰還後に曝露パネルより取り出された曝露ユニット(右)と曝露試料を塗布したアルミ板(左). アルミ板の中にあるそれぞれの小孔の中に有機物が塗布されている(写真提供: たんぼぼチーム).

線の波長に対する依存性を測定することが可能になっている(図4左). なお, 万が一の窓材の破損に備えて破片が散乱しないように金属製メッシュを被せてある. たんぼぼ計画では, 有機物の曝露に加えて, 微生物などを宇宙環境に曝露することも計画されており, 併せて20個の曝露ユニットを一つのパネルに組み上げ, 曝露実験を行った(図2).

宇宙環境で有機物の変性に影響を及ぼす因子として, 紫外線, 宇宙線として γ 線と重粒子線を想定した. さらに, 国際宇宙ステーションの場合, 太陽光により最高で80°Cまで加熱されることが想定された. そこで, 宇宙実験を開始するまでに, 紫外線としては特に有機物への影響が大きいと考えられる真空紫外線を172 nmのエキシマ放電ランプにより照射し, 宇宙曝露の地上予備実験を行った. γ 線については, 日本原子力研究機構高崎研究所の γ 線照射施設において ^{60}Co からの γ 線照射実験を行った. 重粒子線としては, 放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置(HIMAC)を用いて炭素粒子の照射を行った. これらの予備実験の結果, 国際宇宙ステーション上で受けることが想定される1年間の照射エネルギー量から, γ 線と重粒子線による変性はほとんど受けず, 真空紫外線の影響がもっとも大きいことが予想された. 真空紫外線により, アミノ酸であるグリシンとイソバリンは1年間で1000分の1以下まで減少し, ほとんど残らないことが見込まれた. 一方, アミノ酸前駆体であるヒダントイン類と複雑有機物は30–70%が残存することが予想された. 一方で, 80°Cの温度では, アミノ酸など有機物の分解は生じないが, アミノ酸には昇華性があるため, 超高真空である宇宙環境で80°Cまで加熱されると昇華により消失する可能性があることがわかった. そこで, アミノ酸などの試料をヘキサトリアコンタン膜で覆い昇華を防ぐことにした.

これまでに分析が完了し, まとめられた1年曝露の結果をみてみると, 予想と異なりグリシンが約70%程度残存していた. 一方で, ヒダントインの残存率は30%

程度, エチルメチルヒダントインでは10%以下であり, 地上予備実験での予想を下回った. なお, 複雑有機物は70%程度の残存率であり, ほぼ地上予備実験と同程度であった. 地上予備実験との差異についての詳細は現在検討中であるが, 地上予備実験ではエキシマ放電ランプを用いたため172 nmの単色光であるのに対して, 実際の宇宙環境で照射される真空紫外線は白色光であり, それぞれの物質の各波長での吸収を考慮していないことがもっとも大きな要因であると考えている. グリシンとヒダントインの真空紫外領域の吸収スペクトルを比較すると, 160 nmから長波長領域において, 吸収断面積はヒダントインの方が大きいことが示されている. 現在, 2年目の試料の解析が進められており, 3年目の試料も今秋に入手できたので, 3年間の試料を同時に再分析することで, さらに正確な見積もりができると考えている.

宇宙塵の有機物分析

先述したように, 地球にもっとも多く有機物を供給しているのは, 隕石ではなく宇宙塵(惑星間塵)であると考えられている. 宇宙塵とは要するに小さい隕石であり, およそ10–100 μm 程度の大きさの微粒子が大量に地球に降り注いでいる. 隕石として地球に到達するには, ほとんどのメテオロイドがある程度の大きさでないと大気圏で燃え尽きてしまう. 逆に宇宙塵くらい小さければ, 大気による摩擦をあまり受けずに, ふわふわと落ちてくるので, 燃え尽きずに地表に到達する. ちなみに, 隕石が大気圏突入の際に激しく加熱されるので, アミノ酸などの有機物は壊れてなくなってしまうのでは?という質問をよく受けるのだが, そんなことはなく, 表面は熱せられて溶融・気化するが, 熱が内部に伝わる前に気化するので, 内部は冷たいままである. 地球に落ちてきた隕石を見ると, 外側は薄い溶融被膜(フュージョンクラスト)で覆われており, その内側は熱の影響が見られない. しかし, 有機物や氷などの比較的揮発性の高い物質を多く含むメテオロイドは脆く, もとは十分な大きさがあっても大気圏突入の際に分解してしまうことが多い. したがって, 隕石として手に入る物質はせいぜい数%の有機物を含んでいる程度だが, 宇宙塵としてふわふわと降ってくるような物質には有機物を多く含むものが多い. たとえば, 南極の雪を溶かして回収される南極微隕石のなかにはその大部分が有機物という超炭素質微隕石も見つかっている¹⁰⁾. また, 欧州のRosetta探査機によって分析された彗星周囲の塵は, その大部分(約45 wt.%)が有機物であったことが分かっている¹¹⁾. 宇宙塵にはこういった彗星からの塵も含まれているであろう.

しかし、このような宇宙塵の地上での分析には困難が伴う。1 mm以下の微粒子なんて、ひとたび地表に落ちてしまえば埃にまぎって回収困難である。そこで先にも少々述べたが、たとえば南極の雪の中から回収するという手法がとられている。南極ではかなりきれいな雪、あるいは氷がとれるのでそれを溶かしてろ過し、固体微粒子を回収する。もう一つの方法は、地表に到達する前に宇宙塵を回収しようというもので、成層圏を航空機で飛びながらシリコンオイルを塗った板で塵を捕集する、という方法である。捕集した宇宙塵はヘキサンで洗浄してシリコンオイルを除去するのだが、あまり有機物分析には向かないだろう。最近ではシリコンオイルを使わずに発砲ポリウレタンで捕集する方法もある。いずれにせよ、微量な試料からアミノ酸のような地上にはありふれた物質を検出したい場合、このような方法で回収された宇宙塵は汚染が心配である。実際に、このような宇宙塵から地球外のアミノ酸が検出されたという報告は筆者らの知りうる限りではまだないようである。

このように、原始地球への有機物供給源として非常に重要な宇宙塵であるが、その有機物の分析はあまり進んでいないのが現状である。わかっていることとしては、隕石に含まれているような複雑な高分子有機物が含まれているということくらいである。そこで、このような宇宙塵を宇宙で捕集し、フレッシュで地球物質による汚染の少ない試料を手に入れて有機物を調べようというのが、たんぼぼ計画サブテーマの一つ、宇宙塵捕集の目的である。

宇宙塵は宇宙に漂っていると考えられているが、国際宇宙ステーションが秒速約8 km/secと、非常に高速で飛行しているために、宇宙塵を捕集する場合には高速衝突する状況になる。そこで、衝突時のダメージを抑えるためにクッション材として新規に開発した非常に密度の低いシリカエアロゲルを用いた¹²⁾。個々のエアロゲルブロックの大きさはおよそ93×93×17 mm³であり、超低密度(0.01 g/cm³)のエアロゲルを0.03 g/cm³のエアロゲルで取り囲み、補強した構造となっている。エアロゲルに衝突した試料は、エアロゲルに貫入しながら徐々に減速し、やがて止まる。その際、エアロゲル中を粒子が進んだ跡であるトラックができ、その先端に粒子がある(図5)。まずはトラックを周囲のエアロゲルごとエアロゲルブロックから切り出し、さらにそこから粒子を摘出する(図6)。貴重な試料から最大限の情報を引き出すために、次のフローに沿った分析が行われている。1) アミノ酸分析：粒子またはトラックを熱水抽出し、酸加水分解を行った後にLC-MSにより、アミノ酸分析を行



図5. エアロゲル中に捕集された粒子と突入時に生じたトラック(NN1A0183T)。焦点深度を変えて撮影した画像を重ね合わせて作成したので、多少、段差が生じている。右下矢印が粒子の突入口で、左上矢印に粒子が見える(写真提供：たんぼぼチーム)。

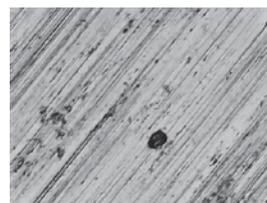


図6. 金板上に取り出した粒子(NN1A0183T)(写真提供：たんぼぼチーム)

う。2) 粒子の有機物分析：粒子を金板に圧着し、走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型X線分光法(SEM-EDS)により鉱物分析を行った後、顕微FTIRおよびラマン分光法により有機物分析、NanoSIMSにより同位体分析を行う。SEM-EDSやNanoSIMSは地球外物質かどうかの判定にも有効である。また、これらの一部の試料を集束イオンビーム法(FIB)により厚さ100 nm程度の超薄切片として切り出し、STXM-XANES分析を行う。放射光の軟X線を用いたSTXM-XANESは、炭素・窒素・酸素などの結合状態を数十nmの空間分解能で調べることができ、微小試料中にどのような有機物が含まれているかを調べるのに最適な手法である。3) トラック分析：シンクロトロン放射光X線トモグラフィー(SR-XRD)により、トラックの高空間分解能3次元構造分析を行う。これにより、衝突角度や衝突速度の見積もりが可能である。

これまでに、多数の衝突トラックを見いだしており、数個の粒子を取り出すことに成功している。SEM-EDS測定により、隕石などに特徴的な組成を持つ鉱物が検出されており宇宙塵の捕集が確認されている。しかし、現在のところはまだ宇宙物質由来と確認できる有機物の検出には至っていない。

謝 辞

本研究は、藪田ひかる博士（広島大学）、奥平恭子博士（会津大学）、土山明教授（京都大学）、野口高明教授（九州大学）、中川和道教授（神戸大学）、小林憲正教授（横浜国立大学）、矢野創（JAXA）ほか多数のたんぽぽ研究チームのメンバーの協力を得て実施されている。本稿で紹介した研究の一部は、科学研究費補助金（JP17H02991, JP16H04283, JP17H06458, JP18K03722）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（AB271012, AB281001, AB292002, AB301020）の助成を受けたものである。

文 献

1) Yamagishi, A. *et al.*: *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., Space Technol. Jpn.*, **7**, Tk_49 (2009).

2) Pizzarello, S. *et al.*: *Meteorites and the Early Solar System II*. (Edited by Lauretta, D. S. *et al.*), p. 625, University of Arizona Press (2006).
 3) Schmitt-Kopplin, P. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107**, 2763 (2010).
 4) Cottin, H. *et al.*: *Space Sci. Rev.*, **209**, 83 (2017).
 5) Elsila, J. E. *et al.*: *ACS Cent. Science*, **2**, 370 (2016).
 6) Harada, K. *et al.*: *Science*, **173**, 433 (1971).
 7) Elsila, J. E. *et al.*: *Meteorit. Planet. Sci.*, **44**, 1323 (2009).
 8) Altwegg, K. *et al.*: *Sci. Adv.*, **2**, e1600285 (2016).
 9) Kobayashi, K. *et al.*: *Astrobiology: Emergence, Search and Detection of Life* (Ed.: Basiuk, V. A.), p. 175, American Scientific Publishers (2010).
 10) Duprat, J. *et al.*: *Science*, **328**, 742 (2010).
 11) Bardyn, A. *et al.*: *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **469**, S712 (2017).
 12) Tabata, M. *et al.*: *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **77**, 325 (2016).

『生物工学会誌』96巻12号（2018年12月25日発行）、「特集（後編）：たんぽぽ計画における宇宙塵捕獲と有機物曝露（三田 肇・癸生川陽子 著）」内に誤記がございました。原稿校了後の調査によって、南極微隕石からアミノ酸が検出されたという研究（Matrajt, G. *et al.*: *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1849–1858 (2004).）があることがわかりました。謹んでお詫び申し上げるとともに、下記の通り、訂正させていただきます。

p. 691 左段上から16行目

【誤】……実際に、このような宇宙塵から地球外のアミノ酸が検出されたという報告は筆者らの知りうる限りではまだないようである。

【正】……削除
