

地球周回軌道上の宇宙塵捕集とアストロバイオロジー

矢野 創

有機物含有宇宙塵の地球到達

生命の地球起源仮説 アストロバイオロジー研究の目標の一つは、「宇宙における地球生命の普遍性と特殊性」を科学的に理解することである。しかし現在、科学的に調査可能な生命は「地球生命」のみであるため、地球外生命探査を推進するとともに、地球生命の起源、進化、生存可能な環境を理解することが不可欠である。従来の研究成果によれば、現在の地球生命の共通祖先が誕生して繁栄するには、遅くとも約38億年前までに、エネルギーが持続的に供給され、かつ有機物が安定的に濃集できる領域（仮説としては、深海底熱水領域や陸域の温泉領域など）へ、化学的に合成された非生物由来の有機物が一定期間、継続的に供給される必要があったと考えられる。20世紀にはMillerの実験を皮切りに¹⁾、放電などさまざまなエネルギーを用いて還元的気体中で有機物を合成・濃集する研究が行われてきたが、その後の研究によって新たにわかってきた二酸化炭素を主成分とする原始地球大気では、そうした化学進化は期待できない。仮に有機物が生成されたとしても、地表で分解される効果との収支の推定も必要となる。

前駆物質の宇宙起源仮説 一方、電波・赤外などの天文学では、星間物質や恒星の生成領域で有機物や炭素化合物が分光的に発見されている²⁾。これらの有機物は、低温環境の宇宙塵表面で、揮発成分の吸着と紫外線照射などを経て生成したと考えられる。また、地球表面に到達した炭素質コンドライト隕石や宇宙塵の一部には、生命の前駆物質であるアミノ酸など多彩な有機物や、海水の源としての含水鉱物や岩塩が含まれることが判明しており、スターダスト探査機が捕集したヴィルド第二彗星の塵からもアミノ酸が検出されている^{3,4)}。特に、現在も年間2～6万トンほど地球に降り注ぐ直径1 mm未満の宇宙塵を主な運搬機構として、原始地球へ継続的に有機物が到達したという仮説も提唱されている^{5,6)}。さらに、放射線耐性や乾燥耐性を持つ微生物自体が光圧で加速されて恒星間を伝搬するという「パンスペルミア仮説」⁷⁾も一世紀以上前から提唱されているが、現在も実証されていない。

地球周回軌道における宇宙塵の直接計測・捕集

地上採取時の選別効果 地球環境内での宇宙塵採集は、深海底、極地氷雪、成層圏などで一世紀以上も行われてきた⁸⁾。しかし、それぞれの採取場所での地球由来有機物や汚染物質の混合や試料の変性、検出バイアスなどが障壁となり、地球環境で採取された宇宙塵中に検出された有機物がはたして地球外由来であるのか、また元の性質を留めているのかは結論づけることが困難である。

地球低軌道衛星の地上回収 この課題を解決するには、地球環境に突入する前に宇宙塵を採取する必要がある。秒速8 kmもの超高速で地球低軌道をめぐる人工衛星には、小惑星や彗星を主な起源とする宇宙塵と、人工のゴミ・スペースデブリの両方が衝突する。そこで1960年代から世界各国の宇宙機関によって、一定期間宇宙空間へ曝露された地球周回衛星の地上回収が行われるたびに、固体微粒子が衛星表面上に超高速衝突した痕跡を統計的に観察・解析する「飛行後検査」[LDEF (1984–90年), EuReCa (1992–93年), HST (1989–93年), SFU (1995–96年) など] が行われ、現在の地球近傍の宇宙塵およびスペースデブリに関する固体微粒子環境モデルが構築されるようになった^{9,10)}。

衝突微粒子の非破壊捕集 しかし、宇宙機の外壁は主に金属構体、熱制御材、太陽電池などで構成されており、超高速衝突する微粒子の残留物を保存することに最適化されていなかった。そこで、1990年代からはシリカエアロゲルを筆頭に、衝突物の破壊や変性を可能な限り軽減する低密度捕集材を曝露して超高速衝突微粒子の「非破壊捕集」実験が、地球低軌道ではEuReCa (1992–93年), Euro-Mir (1996–98年), ODC (1998–98年), MPAC-SEED (2002–05年)、深宇宙では前述のスターダスト探査機 (1999–2006年) によって実施されるようになった^{11–13)}。特にシリカエアロゲルは、EuReCa衛星 (密度0.06 g/cm³) を皮切りに、前述のスターダスト探査機 (同0.03 g/cm³)、そして2015年から現在まで継続中のたんぼぼ計画 (後述, 同0.01 g/cm³) へと、より低密度に進化してきている。シリカエアロゲルとは、二酸化ケイ素の超低密度の湿潤ゲルを作製した後に、エタノール溶媒を液化炭酸と置き換え超臨界乾燥させること

によって作製される多孔質のゲル素材である。シリカエアロゲルは可視光に対して透明であり、捕集後の微粒子の同定が容易である¹⁴⁾。

たんぼぼ計画における宇宙塵捕集実験

たんぼぼ計画の科学目標 こうした研究環境にあって日本初のアストロバイオロジー宇宙実験を標榜したたんぼぼ計画が2007年に国際宇宙ステーション（ISS）曝露部の第二期利用公募で採択され、2015年に軌道上運用を開始した^{15,16)}。「たんぼぼ」の科学目標を要約すれば、「生命の原材料となる有機物の宇宙塵による地球への輸送」と「地球生命が惑星間を移動する可能性」の両方を検証することである。そのために超高速微粒子捕集用のエアロゲルを収納した「捕集パネル」と、微生物や有機物を曝露するための「曝露パネル」の2種類の実験装置を搭載し（図1）、全国26か所の大学・研究機関の研究者が共同研究チームを組みながら、以下の六つのサブテーマに挑んでいる。

1. 地球低軌道上での地球起源微生物の採集
2. 極限環境微生物の宇宙での生存実験
3. 分子雲の観測、隕石・宇宙塵分析、彗星探査から確認された有機物の宇宙での変成実験
4. 有機物を含んだ宇宙塵の非破壊捕集
5. 将来の深宇宙探査への応用も視野に入れた国産エアロゲルの宇宙実証
6. 地球近傍の宇宙塵とデブリのフラックス直接計測

地球起源エアロゾルの軌道上捕集 このうち特に検証過程で注意が必要な課題は、「地球低軌道上での地球起源微生物の採集」であろう。前述のパンスペルミア仮説は欧州研究者による宇宙実験で一部検証された。その結果、微生物は岩石によって紫外線から遮蔽されれば地球-火星間の往来が可能であるとする「リソパンスペル

ミア仮説」が提唱されている¹⁷⁾。さらに地球起源の微生物のコロニーが大気エアロゾル内部に存在する場合、対流圏での微生物採集実験の外挿として、大気中微粒子（エアロゾル微粒子）が宇宙空間まで到達し、付着した微生物が地球低軌道高度で生存できるかを考えることも意義深い^{18,19)}。仮にエアロゾル微粒子が地球重力圏を脱出せずに、ISS軌道と交差する弾道軌道や一時的な地球周回軌道に乗った場合、微小スペースデブリに類似した軌道力学に従ってステーション外壁に超高速衝突することになるため、宇宙塵やデブリに加えて「たんぼぼ第三の捕集粒子候補」として、地球起源エアロゾルの捕集も調査している。

捕集パネル構成とExHAM運用概要

たんぼぼ捕集パネル たんぼぼ計画の捕集パネルには、独自開発した二層構造式エアロゲルが使われている。二層構造式エアロゲルは、密度0.01 g/cm³の「非破壊捕集素材」を密度0.03 g/cm³の「構体」で保護して配置している。またエアロゲルは、軌道上で宇宙飛行士がハンドリングする際に傷つけないためにアルミ製のメッシュ状蓋で保護されている（図1）。さらに宇宙塵中有機物や微生物試料への汚染管理の一環として、捕集パネル表面に低速で衝突・付着する汚染物質のモニターを行うため、カーボンナノチューブのカーペット状テープ（ウィットネスプレート）も曝露されている。なお、宇宙塵中の有機物を検出するため、エアロゲルに混入しうるアミノ酸の総量を低減する工夫や汚染管理を、ゲル製作の全過程で実施した。特にαアミノイソ酪酸とイソバリンについては、検出限界（1-10 fmol）以下までアミノ酸量を低下させることに成功した¹⁴⁾。

ExHAM運用 ISSは地球重力指向の三軸姿勢制御衛星（進行方向面、宇宙面、地球面が固定されている）で、高度約400-500 kmの低軌道を周回している。「きぼう」曝露部はISSの進行方向左側に位置している（図1）。「きぼう」曝露部への「たんぼぼ」搭載を機に開発された「簡易宇宙曝露装置（ExHAM）」は、実験用パネル（100×100×20 mm）を、最大20枚まで同時に曝露できる。ExHAMは、地上から操作されるロボットアームによって「きぼう」与圧部のエアロック経由で曝露部の手すりに固定され、一定期間後に回収される。「捕集パネル」は、「宇宙面」に4枚、進行方向面（東面）と与圧部と反対側の面（北面）に捕集パネル4枚ずつ設置される。宇宙面は常に地球と反対側を向いており、スペースデブリがほぼ衝突しない、進行方向面（東面）と与圧部と反対側の面（北面）には宇宙塵とスペースデブリの両方が衝突する。

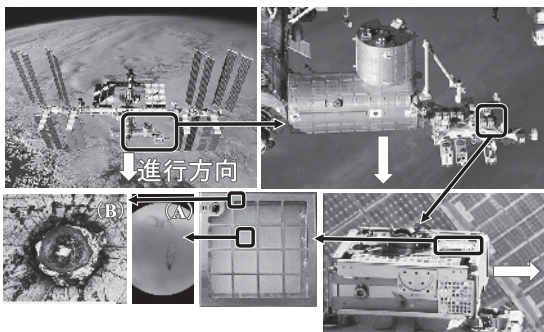


図1. ISS（上左）きぼう曝露部（上右）上のExHAM（下右）、たんぼぼ捕集パネル（下中）の位置関係と微粒子衝突痕（A：エアロゲル上、B：アルミ蓋上）。(クレジット：下左3枚・たんぼぼチーム、その他・JAXA/NASA)。

表1. たんぼぼ捕集パネル全試料の打上げから詳細分析までのスケジュール

捕集年度	2016A	2016B	2017A	2018A	2019A
パネル数	8	3	12	12	1
打上げ	2015.4.15	2015.4.15	2015.4.15	2015.4.15	2015.4.15
曝露開始	2015.5.26	2015.11.11	2016.6.29	2017.7.28	2018.7.25
曝露終了	2016.6.14	2017.3.1	2017.7.19	2018.7.2	2019.夏予定
地球帰還	2016.8.27	2017.3.19	2017.9.17	2018.12.予定	2019.秋予定
初期分析開始	2016.9.26	2017.4.7	2017.10.24	2019.01.予定	2019.秋予定
初期分析終了	2017.3.2	2017.7.26	2018.12	2019.夏予定	2020.春予定
詳細分析開始	2017.1.3	2017.7.27	2018.1.28	2019.春予定	2020.春予定

軌道上運用

たんぼぼ運用サイクル 表1は、たんぼぼ計画の運用サイクルの概略である。2015年4月に捕集パネル36枚と曝露パネル3枚をスペースX社のファルコン9ロケットで打ち上げた。ISSに到着した装置は、いったんJAXAきぼう与圧部内に運び込まれ、同補給部に収納された。その後、捕集パネルは何回かに分けて曝露が行われた。一例として、初年度試料第一弾（2016A）は2015年5月26日から2016年6月14日まで宇宙空間に曝されたのち、同年8月27日にドラゴン帰還カプセルに搭載され、太平洋カリフォルニア沖で回収された。日本へ空輸された後、9月20日にはJAXA宇宙科学研究所（ISAS）の専用クリーンルーム内の試料保管庫に運び込まれた。9月26日より後述の「初期分析」作業を開始し、2016年末には優先順位の高い試料から順次エアロゲルから掘削・摘出し、各詳細分析チームへ配分された。二年度試料もすでに地表に帰還し、同様のサイクルで分析が進められている。また、三年度試料も曝露を完了して予圧部に保管され、本稿執筆時点で地球帰還のタイミングを待っている。最終年度である四年度試料は2018年7月25日から一年間の予定で宇宙空間に曝露中であり、地球帰還後の詳細分析は2020年に実施される予定である。

CLOXSシステム・汚染管理

無人無塵室とCLOXSによる初期分析 たんぼぼチームに返還された捕集パネルは、すべての出発点となる初期分析と試料配分を迅速かつ高精度に行ったうえ

で、宇宙塵、スペースデブリ、地球起源エアロゾルそれぞれの詳細分析を着実に実施する必要がある。そこで、ISASの専用クリーンルーム内で全パネルに共通した非破壊初期分析と全試料の汚染管理が行われる。クリーンルームで微粒子を分析する際の最大の汚染源は、人間による長時間作業である。そのためたんぼぼ初期分析では、衝突痕の探索から位置同定、三次元計測、衝突痕判定、掘削までの工程を、ISO = 3-4レベルのクリーンルームを無人にしたまま、学生レベルの作業員でも「クリーンルーム外から」操作できる分析装置「CLOXS（捕集微粒子用位置同定・観察・掘削システム）」を独自開発した²⁰⁾。これを設置したクリーンルームを通称「無人無塵室」と呼ぶ。さらに、同クリーンルーム内に卓上スーパークリーン生成装置を設置して、全作業をISO = 1レベルで実施できる清浄環境を実現した²¹⁾。そうした環境下で記載・掘削された微粒子サンプルを全国の共同研究者へ詳細分析用に配分したり、残りの試料を湿度1%の乾燥空気内で汚染管理した状態で保管したり、分析結果のデータベースを管理するキュレーション機能も、このISAS初期分析設備が担っている。

初期分析成果

エアロゲルとアルミ蓋分析 たんぼぼ捕集パネルの初年度試料（2016A, 2016B）はExHAM1, 2号機に曝露された、合わせて11枚である。これらをX線CTとCLOXS付属の光学顕微鏡で立体観察した結果、固体微粒子による0.1 mm以上の大きな超高速衝突痕が、120個程度確認された（図2）。そのうちの数十個はすでにエアロゲルから掘削・摘出され、詳細分析用に全国の研究者に配分された。また、エアロゲルに残された衝突トラックの立体角を分析することから、ISSの複雑な構体による二次衝突放出物と遮蔽の効果を評価することができた。二次衝突放出物と遮蔽の効果を除外することで、物質分析を待たずに、軌道力学上の制約から宇宙面には宇

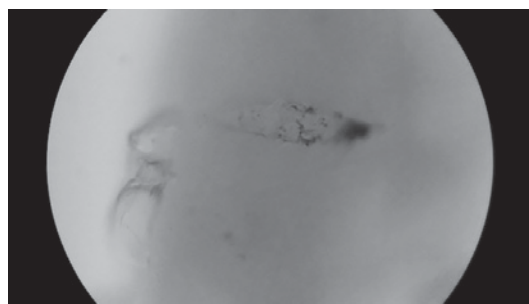


図2. たんぼぼ初年度捕集パネル上の宇宙面エアロゲルに形成された超高速衝突痕（0.1 mm オーダー長トラック）。

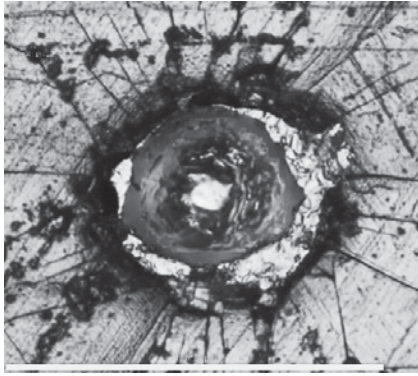


図3. たんぽぽ初年度捕集パネル上の進行面アルミニウム蓋に形成された超高速衝突痕 (0.01 mm オーダー直径クレーター).

宙塵による衝突と推定できるケースもあった。また捕集パネルのアルミニウム蓋上の微小クレーターの元素組成に基づく予備判定では、宇宙塵：デブリ：起源不明の比率はおおよそ5:2:1であり、既存の微粒子分布モデルとも整合的であった(図3)²²⁾。

ミッション成功基準達成 捕集試料の元素分析から小惑星起源の宇宙塵も同定されている。これにより、たんぽぽ計画のサブテーマ「有機物を含んだ宇宙塵の非破壊捕集」に関するミッション成功基準は、初期分析の段階でミニマムサクセスを達成している。なお、こうした地球低軌道の微粒子環境の直接計測は、日本では1996年に地球帰還したSFU衛星以来のことである。

「たんぽぽ」後継時代の宇宙実験・探査

たんぽぽ後継への助走 「たんぽぽ」は日本のアストロバイオロジー研究コミュニティが策定した「宇宙科学・探査ロードマップ」における「はじめの一步」であり、独自の宇宙実験の提案から選抜・機器開発・検証試験・打上げ・軌道上運用・地球帰還・初期分析・科学成果の創出までの全工程を初めて経験する機会であった。その結果、学際領域の研究者や次世代を担う若手が、宇宙科学分野に新規参入することができた。

海洋天体探査 同時にたんぽぽが解きつつある課題以上に、その知見から新たな疑問も多数生まれている。そこで、たんぽぽ後継時代の宇宙実験・探査の構想が、すでに検討されている。一例は、「たんぽぽ」エアロゲルの発展型による、土星衛星エンケラドスなど海洋天体の内部海から放出されるプリューム粒子の捕集・軌道上分析である²³⁾。すでに一部の微生物やペプチドは、「たんぽぽ」エアロゲルへ超高速衝突した後にも検出できることが地上実験で実証されている。曝露実験についても、

たんぽぽ計画の発展と新規試料の宇宙曝露によるアストロバイオロジー研究の深化が検討されている。

謝 辞

たんぽぽ計画（代表：山岸明彦氏）は2007年にJAXA宇宙環境利用センター（当時）の曝露部第二期利用公募に応じて選抜された。同センターにおける歴代のきぼう曝露部担当各位に、心より感謝したい。また、2015年からの軌道上運用には筆者に加えて、橋本博文氏が貢献した。捕集パネルの初期分析は現在もISAS大学共同利用システム共同研究として実施中であり、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター・サテライト研究費（代表：小林憲正氏）の支援も受けている。CLOXS開発に際しては、同センター・プロジェクト研究費（代表：筆者）の支援を受けた。なお初期分析作業におけるスーパーバイザーとして、筆者の他に以下が貢献している。今井栄一氏、今仁順也氏、奥平恭子氏、河口優子氏、癸生川陽子氏、佐々木聰氏、田端誠氏、堀川大樹氏、三田肇氏、山岸明彦氏。また同作業に従事した会津大学、慶應義塾大学、東京工科大学、東京薬科大学、法政大学、横浜国立大学からの歴代の学生諸君にも深く感謝する。

文 献

- 1) Miller, S. L.: *Science*, **118**, 528 (1953).
- 2) Cronin, J. R. and Pizzarello, S.: *Science*, **285**, 951 (1998).
- 3) Nakamura-Messenger, K. et al.: *Science*, **314**, 1439 (2006).
- 4) Elsila, J. E. et al.: *Meteor. Planet. Sci.*, **44**, 1323 (2008).
- 5) Chyba, J. and Sagan, C.: *Nature*, **355**, 125 (1992).
- 6) Love, S. and Brownlee, D.: *Science*, **262**, 550 (1993).
- 7) Arrhenius, S.: *Worlds In The Making: The Evolution Of The Universe*, Harper and Brothers Publishers (1908).
- 8) 矢野 創：星のかげらを採りにいく—宇宙塵と小惑星探査, 岩波書店 (2012).
- 9) Yano, H.: *Earth Planets Space*, **51**, 1233 (1999).
- 10) Yano, H., et al.: *Adv. Space Res.*, **25**, 293 (2000).
- 11) Burchell, M. et al.: *Planet. Space Sci.*, **47**, 189 (1999).
- 12) Horz, F. et al.: *Icarus*, **147**, 559 (2000).
- 13) Brownlee, D. et al.: *Science*, **314**, 1711 (2006).
- 14) Tabata, M. et al.: *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **77**, 325 (2016).
- 15) 山岸明彦ら: *Biol. Sci. Space*, **21**, 67 (2007).
- 16) Yamagishi, A. et al.: *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. Aerospace Tech. Jpn.*, **12**, Tk_49 (2014).
- 17) Horneck, G. et al.: *Orig. Life Evol. Biosph.*, **31**, 527 (2001).
- 18) Yang, Y. et al.: *Biol. Sci. Space*, **23**, 151 (2009).
- 19) Kawaguchi, Y., et al.: *Astrobiology*, **16**, 363 (2016).
- 20) Sasaki, S. et al.: *Biol. Sci. Space*, in press (2018).
- 21) 矢野 創：CHSニュース（興研株式会社 発行）, **699**, 4 (2017).
- 22) 矢野 創：ISASニュース（宇宙科学研究所 発行）, **441**, 1 (2017).
- 23) 高井 研 編：生命の起源はどこまでわかったか—深海と宇宙から迫る, 岩波書店 (2018).