

# アストロバイオロジー研究の今後の展望

山岸 明彦

本稿では、アストロバイオロジー研究の今後の展望を紹介する。アストロバイオロジーの紹介は本誌11月号特集（前編）で山岸が行った<sup>1)</sup>。アストロバイオロジー研究は、生命の起源や生命進化、極限環境生物学、合成生物学などの地上で行う研究が大半である。研究分野は天文学から惑星科学、地学、生物学まで広範にわたる。いくつかのアストロバイオロジー研究全般にわたる解説書を紹介しておく<sup>2-4)</sup>。

本稿ではアストロバイオロジー研究の中でも、宇宙で行う実験に焦点を当てて紹介する。宇宙で実験や探査を行うためには、特殊な技術と入念な準備が必要となる。国際宇宙ステーションで行う実験については、本誌11月号特集（前編）で矢野が紹介している<sup>5)</sup>。

## たんぼぼ計画の今後

**たんぼぼ計画のタイムテーブル** たんぼぼ計画<sup>6)</sup>では2015年4月に曝露パネル3枚と捕集パネル36枚を打ち上げ、これらの装置は国際宇宙ステーション（ISS）の保管庫に保存された（図1）。2015年5月に曝露パネル3枚の宇宙曝露を開始した。曝露パネル3枚の内の1枚を1年後、次の1枚を2年後、最後の1枚を3年後に取り外して地上に持ち帰った。捕集パネルは12枚を2015年5月に宇宙空間に出して、その1年後の2016年に取り外し、地上に持ち帰った。捕集パネルの新しい12枚が2016年に宇宙曝露され、2017年に取り外して地上に持ち帰られた。2017年にまた新しい12枚が曝露開始、2018年に

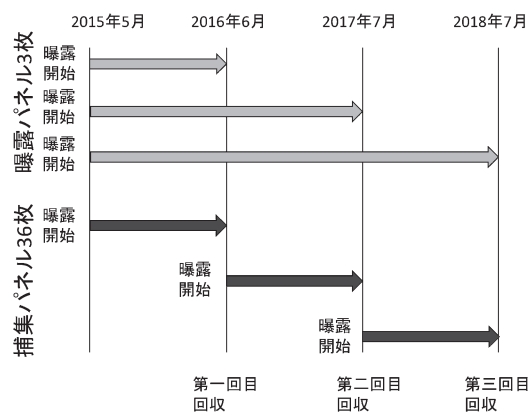


図1. たんぼぼ計画実験実施全体スケジュール

取り外され、地上に持ち帰る予定である。

**微生物・有機物曝露実験** たんぼぼ計画の特徴は、ISSの同じ場所に宇宙曝露した3組の微生物サンプルを1年後、2年後、3年後と1組ずつ3回持ち帰って分析することにある。1年間曝露した微生物サンプルは分析が終了して、本号特集（後編）の河口の稿<sup>7)</sup>と木村の稿<sup>8)</sup>に解説されている。すでに、2年間曝露したサンプルの分析はほぼ終了しており、3年間曝露したサンプルも研究室に帰還している。3年間の微生物生存率の低下の時間経過を追うことから、宇宙空間曝露した微生物の死滅曲線が得られるはずである。微生物の生存率低下が通常微生物死滅曲線のように対数で低下するのか、最初の1年の死滅に比べて2年目以降の死滅はそれほどではないのか、死滅曲線が得られるとそれを外挿することから長期間の生存率予測が可能になるはずである。長期間の生存率予測から、生命が宇宙を移動可能かどうか、パンスペルミア仮説の検証が行われる計画である<sup>6-7)</sup>。

同様に有機物がどの程度宇宙空間で分解されずに維持されるかという検討の1年目の結果に関して、三田と癸生川が本号特集（後編）で解説している<sup>9)</sup>。この実験に関しても今後、2年目3年目の結果が得られる予定である。有機物の宇宙空間での分解の時間依存性から、宇宙塵中の有機物が宇宙空間移動中にどの程度保存されるかを明らかにする計画である。

**捕集微粒子の分析** 捕集パネルから多数の衝突痕が確認され、その一部は研究者に配分されている。衝突痕の分析に関しては、本号特集（後編）で矢野が解説している<sup>10)</sup>。衝突痕が発見された部分のエアロゲル標品を担当者に配分し、本格的な分析が行われつつある。すでに、鉱物の特徴から宇宙塵と同定されている微粒子がある。今後、同様の分析を行って宇宙塵標品数を増やす。その中には有機物の含まれているものがあることが期待される。宇宙塵の分析から、生命の起源以前に有機物が宇宙塵によって十分な量、地球に運ばれたかどうかの検証が進むはずである。また、地表の微生物が何らかの機構によって、400 km上空まで達する可能性があるかどうかを調べるために、エアロゲルを染色後、蛍光顕微鏡撮像することで、微生物の有無を検討する予定である。

### ポストたんぼぼ計画

**ExHAMを用いた実験** ExHAM（簡易曝露装置）を利用することで、宇宙曝露実験が比較的短期間でできるようにになった<sup>6)</sup>。ExHAMを利用する場合にはExHAM用実験装置の規格（10 cm × 10 cm × 2 cm、あるいはその横方向2倍の大きさ）で実験装置を作製すれば、ExHAMへの固定が可能である。宇宙実験では、実験申し込み後、さまざまな審査が行われる。科学的意義と実験の実施可能性の審査がもっとも重要である。その他にも、通常は多くの審査（安全性、装置設計など）が行われる。しかし、それまでに行われた実験の装置を参考にして実験装置を作製すれば、比較的短期間でこれらの審査を受けることが可能である。審査が大幅に簡略化されるので、場合によっては実験申請後2年程度で宇宙実験を実施することも可能である。アストロバイオロジー分野の研究者は、たんぼぼ計画で明らかになりつつある微生物の宇宙での生存や有機物の宇宙での安定性の結果を発展させる実験を準備している。

**宇宙環境での反応実験** 現在の地球にはオゾン層があるため、太陽紫外線の内の短波長成分は吸収されてほとんど地表まで届かない。地球史初期は大気中の酸素濃度がまだ低く、地表では今よりも遙かに紫外線強度が高かったはずである。宇宙空間では地上に比べて、短波長紫外線が遙かに強力である。また紫外線を遮蔽するオゾン層がなかった時代の大気中での反応を模擬するには宇宙環境は適している。こうした実験を行うのに、ExHAMは適した場所である。

**宇宙検証実験** 宇宙で探査や実験を行おうとすると、さまざまな点で、地上で行う実験と異なってくる。無重力であること、紫外線や放射線強度が高いことなどである。また、宇宙での実験費用は地上と比べて桁違いに高いので、安易に試行錯誤ができない。そこで、宇宙実験や探査の前には十二分な準備を行う必要がある。こうした準備の過程で問われる課題の一つに、「その実験は失敗しないですか？」という問いがある。それまで地上実験しか経験がないと、「そんなことがわかるか、やってみるしかないから、実験するんだ」と答えたくなる。しかし、地上で試せることはすべて試すことが、宇宙実験実施の条件となる。また他の惑星に探査機を送る場合には、どうしても宇宙空間で試すことが必要になる場合がある。たとえば、用いる機器が無重力できちんと動作するかどうか、あるいは、用いる素材が宇宙環境に耐えられるかどうかなどの試験である。こうした点を試すのにExHAMは利用される。

### 他のプラットフォームを用いた実験

**宇宙曝露部共用ポート** さて、ExHAMは宇宙空間を用いて比較的短期間に実験を実現する手段としてきわめて優れているが、もちろん、さまざまな限界がある。まず、大きさが前述した規格に限られている（装置の厚さは4 cm程度まで厚くすることも可能であるが）。電源がないことや信号を外部に伝えることができないという問題もある。ISSの曝露部で宇宙曝露共用ポートを用いると、電源や信号をISSと連結して実験を実施することも可能である。ただし、装置全体はどうしても大型となり、実験機会も遙かに少ないため、それに対応した大きな科学的課題と成果が求められる。

### 今後の宇宙探査計画

**ゲートウェイ** ISSの運用は2024年までは続くことが決まっているが、その後どうなるかは決まっていない。ISSの運用に参加している諸国では、月の近傍に惑星探査を実施するための宇宙ステーションをつくる計画が検討されている<sup>11)</sup>。この宇宙ステーションはゲートウェイと名付けられている。月の近傍の宇宙空間に宇宙ステーションを作ることによって、月基地建设の足場にするのである。ゲートウェイには、惑星、特に火星を探査するうえでの基地として利用する、あるいは、火星探査のためのテストを行うというような意義もある。

**月面有人基地** ゲートウェイに次いで、月面に基地を建設して、月面の探査を行うという計画である。以前のアポロ計画とは異なり、月面基地で一定期間宇宙飛行士が滞在する計画である。最近、月にも氷あるいは水分がそれなりにあるのではないかという測定結果が得られつつある。もし、月の永久陰などの部分に水（氷あるいは水分）が十分な濃度ある場合には、水からロケット燃料となる酸素と水素を製造することができるのではないかということが検討課題となっている。また、月での科学的探査を進める方法として、有人の探査車を用いて長距離移動しながら探査を進めることなどが検討されている。

**火星有人探査** さらにこれらの探査の先に、火星での有人探査が検討対象となっている。今すぐに火星に宇宙飛行士を送るというのではないが、国際的な協働で将来火星に宇宙飛行士を送り、有人の探査を行う計画である。現在はそれを見すえて、まずスペースゲート、そして月での有人探査を行うことで火星有人探査へ向けた技術開発と実証を行うという計画である。

## その他の探査対象と探査案

**火星無人探査** 将来の火星有人探査に向けて、火星の無人探査を進める計画も進められている。これらに関しては本誌11月号特集（前編）で吉村が解説している<sup>12)</sup>。すでに予定されている火星への無人探査としては、NASA（アメリカ航空宇宙局）のMars2020という計画がある。NASAは2020年Mars2020という無人探査車を火星に送る予定である。2026年頃には火星からサンプルを持ち帰る計画が進められている。Mars2020は、有機物を含むさまざまな分析を行い、地球へ持ち帰るサンプルを保存しておくということも任務となっている。

ESA（欧州宇宙機関）は、2020年ExoMars着陸探査車を火星に送る予定である。ExoMarsも火星で有機物や過去の生命（化石）を含むさまざまな探査を実施する計画である<sup>12)</sup>。

JAXA（日本宇宙航空研究開発機構）では2020年代の前半に、火星の衛星フォボスあるいはダイモスに向けて探査機を送る計画を準備している。この計画はMMXとよばれ、火星の衛星の探査を行い、そこからサンプルを地球に持ち帰ることが計画されている。さらに、そのあと火星への着陸機を送るための検討が進行しているがこれについては吉村が解説している<sup>12)</sup>。

**氷衛星無人探査** 火星よりもさらに遠くの天体として木星や土星がある。木星や土星はガス惑星とよばれる惑星で、中心部の固体でできたコアの周りは水素とヘリウムを主成分とした大量のガスで覆われている。木星や土星は多くの衛星をもっている。それらの中のいくつかは氷で覆われており、氷衛星とよばれている。氷衛星のなかでも木星の衛星ユーロパや土星の衛星エンセラダスの氷の下には海があると推定されている。実際、これらの氷衛星からはプルームとよばれる噴出物が検出されている。エンセラダスのプルームの分析からプルームは地下から噴出した海水で、地下海には熱水噴出孔があり、地下の岩石から熱水成分が地下海に供給されていることが推定されている。

現在、木星の氷衛星を順に訪れて、その遠隔探査を行う計画JUICEの準備が進行している。さらに、ユーロパに着陸機を送る計画も進行している。長期的にはエンセラダスのプルームのサンプルを地球に持ち帰る計画も検討されているが、これらについては本誌11月号特集（前編）で高井が解説している<sup>13)</sup>。

## 太陽系外惑星観測

**太陽系外惑星** 30年ほど前までは、太陽系以外に惑

星は見つかっていなかった。現在では地球の望遠鏡を用いた観測あるいは宇宙望遠鏡からの観測によって3000個もの太陽系以外の惑星が見つまっている<sup>2-4)</sup>。これらは系外惑星とよばれている。その統計的な解析から、宇宙のほとんどの星は複数個の惑星を持っているのではないかと推定されている。その中には地球ほどの大きさでその惑星の太陽（中心星とよばれる）からの距離が適度で液体の水を持っていても良い惑星（ハビタブル惑星とよばれる）が10個以上見つまっている。太陽系からもっとも近い距離（4.2光年）にある恒星、ケンタウルス座アルファ・プロキシマ星にもハビタブル惑星が見つまっている。

**系外惑星での生命探査** こうした系外惑星で生命がいるかどうかを考えるうえでは、いくつもの課題がある。たとえば、1) どのような条件があれば生命が誕生して、現在も存在しているのか、2) 生命を探す場合に、何を探せばよいのか、3) それをどのような方法で探せばよいのか、などである。これらの課題が重要な研究課題となっている。すでに、提案されている方法としては、望遠鏡を用いて系外惑星の大気进行分析して、そのなかに酸素やオゾン、メタンガスを検出しようということが提案されている<sup>2-4)</sup>。

直接の探査を検討しているグループもある。それはスターショットとよばれる計画である。地球にもっとも近い系外惑星でも、現在のロケットで到着するためには数万年かかる。そこで、宇宙空間移動のためのまったく新しい機構の開発が提案されている。それは、こうもり傘様の帆をヨットのように張り、地上からの強力なレーザー光で推進するという機構である。この方法を用いれば理論的には光速の20%の速度を出すことができる。開発に20年、打ち上げ後20年でケンタウルス座アルファ・プロキシマ星の惑星に到達し、写真を撮影して地球に送信すると送信後約4年で画像が地球に到着する。今から44年後に系外惑星の写真を見ることもできるかもしれない<sup>14)</sup>。

## 地球外知的生命探査

**ドレイクの式** 地球外知的生命ということサイエンスフィクションと思うかもしれない。今から半世紀以上前に、地球外知的生命の存在可能性が検討され、地球外の生命がいるとしたら地球に向けて送ってくるかもしれない電波の探査が行われた<sup>2-4)</sup>。この探査はさまざまな評判とともに批判も受けた。太陽系外に知的生命体があったとしても、なぜその生命が地球にむけて電波を発信するのかという疑問である。さらに、知的生命体がそもそも宇宙にいるのかという本質的な疑問がもちろんある。こ



の疑問に答える方法として提案されたのがドレイクの式である<sup>2-4)</sup>。ドレイクの式では、まず銀河系にある星の数と寿命を考える。この式は、その恒星が衛星を持つ確率、衛星のなかでのハビタブルな惑星の確率、ハビタブルな惑星の中で生命誕生の確率、生命が知的生命となる確率、知的生命が電波通信技術を開発する確率、最後にその文明の平均寿命を掛け合わせることで、銀河の中で現在存在している電波技術をもつ知的生命の数を推定しようというわけである。この中のいくつかの確率はかなり良くわかってきているが、生命の起源や進化に関わる確率はほとんどわかっていない。それでも、こうした確率がわかれば、宇宙で知的生命を検出する確率がわかる。しかし、この式のもっとも重要な点は、宇宙で知的生命探査を行うと、それが見つからなかった場合でも、知的生命の平均寿命の上限がわかるという点である<sup>2-4)</sup>。つまり、十分な感度で知的生命探査を行っても、見つからない場合、銀河での平均的電波文明の寿命はきわめて短いということが推定されることになる。

**SKA計画** 半世紀前に行われた知的生命探査計画以来、これまで多くの探査が断続的に行われてきた。もちろん、まだ地球外知的生命は見つかっていない。しかし、半世紀前にくらべて、電波望遠鏡をはじめとする電子機器、とりわけデジタル信号処理技術の進展はきわめて大きい。さまざまな因子を総合すると半世紀前の $10^{26}$ 倍もの能力で探査を行えるようになってきている<sup>2,3)</sup>。感度が十分良くなると、相手の文明が意図的に電波を発していないとしても、日常的に用いている電波を検出することができるようになる。こうした探査を実現するために、オーストラリアおよび南アフリカで数百台の電波望遠鏡を並べることで、他の宇宙探査とともに知的生命探査を行う計画SKA計画が始まっている<sup>2-4)</sup>。

#### 宇宙実験と探査に参加するには

**ISS実験や飛行機、大気球実験** さて、こうした宇宙実験はそう簡単には行えないが、宇宙科学研究所では実験用の飛行機や大気球を用いた実験機会が提供されている。また、有人宇宙部門を通してISSでの実験を申し込むこともできる。基本的には誰でもこうした実験に応募可能であるが、宇宙実験を実施するための経験と知識がないと、応募書類を書くことも難しい。まずは、現在進行している実験に参加させてもらう、あるいは見学させてもらうとよい。一般の実験に比べて実施までに要求される準備の比重や水準がかなり高い。また、最初はそもそも何を準備する必要があるかも不明だと思う。まずは本誌の本特集の著者らに問い合わせるところから始め

ることを勧める。

**宇宙科学研究所への班員登録** 情報を得るためには、宇宙科学研究所の宇宙理学（あるいは宇宙工学）メンバーに登録して欲しい<sup>15)</sup>。すると、さまざまな情報が配信されるようになる。その中には、さまざまな宇宙実験機会の申請募集が含まれている。

**アストロバイオロジーセンター** 自然科学研究機構は、天文台、遺伝研、岡崎三研究所などを中心に構成されている研究機構である。そこに、アストロバイオロジーセンターが設置された<sup>16)</sup>。研究所は20人ほどの構成員で、三鷹の天文台に研究室が設置されている。アストロバイオロジーセンターは、太陽系外惑星での生命探査を主な任務として研究をすすめている。アストロバイオロジーセンターは、全国のアストロバイオロジーを推進することも任務としており、1年ごとのプロジェクト研究費と3年間続くサテライトを形成する研究費を募集配分している。また、アストロバイオロジーセンターでは年に何回かのワークショップを開催している。アストロバイオロジーの実際の成果を聞くことができる。

**アストロバイオロジーネットワーク** 日本におけるアストロバイオロジー研究の学会に相当するのが、生命の起原および進化学会（The Society for the Study of the Origin and Evolution of Life: Astrobiology-Japan, SSOEL: Astrobiology-Japan）である。そのメール配信グループとしてアストロバイオロジー・ネットワーク<sup>17)</sup>が運営されている。アストロバイオロジー・ネットワークへの登録は無料で、欧米のアストロバイオロジー関係のニュースを含む情報が配信される。

#### 文 献

- 1) 山岸明彦：生物工学，**96**，620 (2018)。
- 2) 山岸明彦 編集：アストロバイオロジー，化学同人 (2013)。
- 3) 海部宣男ら 編集：宇宙生命論，東京大学出版会 (2015)。
- 4) ウルムシュナイター：宇宙生物学入門，丸善出版 (2012)。
- 5) 矢野幸子：生物工学，**96**，644 (2018)。
- 6) 山岸明彦ら：日本航空宇宙学会誌，**66**，173 (2018)。
- 7) 河口優子：生物工学，**96**，693 (2018)。
- 8) 木村駿太：生物工学，**96**，695 (2018)。
- 9) 三田 肇，癸生川陽子：生物工学，**96**，688 (2018)。
- 10) 矢野 創：生物工学，**96**，684 (2018)。
- 11) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構：http://www.jaxa.jp/press/2018/01/20180126\_nasa\_j.html (2018/9/19)。
- 12) 吉村義隆：生物工学，**96**，634 (2018)。
- 13) 高井 研：生物工学，**96**，639 (2018)。
- 14) 須藤 靖：季刊ビオフィリア電子版，No. 19 (2016)。
- 15) 宇宙理学委員会：http://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/ (2018/9/19)。
- 16) 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター：http://abc-nins.jp/ (2018/9/19)。
- 17) 日本アストロバイオロジー・ネットワーク：http://logos.ls.toyaku.ac.jp/~astrobiology-japan/ (2018/9/19)。