

## 特集「太陽系におけるアストロバイオロジー」

# 極限環境下での植物利用のアストロバイオロジー

橋本 博文<sup>1</sup>

2011年4月12日受領, 2011年5月6日受理.

(要旨) アストロバイオロジーは純粋なサイエンスであり、真理の探究がその目的であるが、極限環境下での植物の利用という観点から、その応用について考える。一つは将来の火星の環境下で行われる宇宙農業であり、低圧下での植物栽培を追求した結果、与圧温室ドームではなく火星の大気圧下での農作物のハウス栽培の可能性が見えてきた。もう一つは、放射性物質に汚染された土壌の浄化に植物を用いる方法の有効性である。これらは未来社会でアストロバイオロジーの応用可能性を示している。

## 1. はじめに

NASAが定義した「アストロバイオロジー」の意味は「地球および地球外での生命の起源・進化・分布・未来」[1]となっており、純粋なサイエンスである。日本では宇宙関係の研究者でさえ、アストロバイオロジーについて知る方は多くないが、欧米の学会に出かけていくと数百人規模の研究者が活発に議論を交わしていることに驚かされる。そのテーマは多種多様であり、荒削りでまとまりを欠いているようにも見えるが、学問としての若さと勢いを感じる。まさに、アストロバイオロジーは成長を続けている生きた学問なのである。また、従来の「生物学」が地球環境の淘汰圧下で進化してきた生物、いわば制限付きの生物学であるのに対して、アストロバイオロジーは宇宙環境全体、さらに過去や未来に範囲を広げた4次元的に生物学を一般化する学問である。したがって、「生命の起源」等の複雑な環境パラメータの中での化学反応を議論するためには重要な分野である。しかし、アストロバイオロジーの研究対象は「生命の起源」だけではない。欧米では幅広く柔軟にテーマが設定され、発展性の高い学問となっている。そこで、日本で馴染みの薄いアストロバイオロジーを理解してもらうために、どのような応用があるか考えてみたい。その例として、特に極

限環境下での植物栽培という観点から、火星という地球外環境下に人類が入植して農業を行う場合に必要となる宇宙農業と土壌浄化の方法としてのファイトレメディエーションについて述べる。

## 2. 宇宙農業

将来の火星以遠の有人宇宙探査は大規模化および長期化する可能性があり、食料の自給や酸素を生産する意味でも植物の栽培、つまり宇宙農業は重要な役割を果たす。そこで例として、火星での有人探査を想定した場合の宇宙農業の課題について、アストロバイオロジーの研究対象になるテーマを考えてみたい。

### 2.1 低圧ドームの必要性

火星の大気は二酸化炭素を主成分とする。全圧は約0.7kPaであるが、季節により変化する。温度は季節や緯度にもよるが、かなり低い。砂嵐が吹く季節もある。そこで、火星表面に植物の栽培環境として温室ドームを考え、さらにその中に人間が生活する環境を居住区として考えることにする。仮にドーム内の圧力を地球上の大気圧100kPaと同じにすると、ドーム内外で、ほぼ100kPaの差圧が生じることになる。温室ドームの壁に加わる100kPaの圧力とは、いかなる力であろうか。100kPaとは1cm<sup>2</sup>あたり1kgもの力が加わる圧力であり、一辺10cmの正方形の面積には100kg、

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
hashimoto@surc.isas.jaxa.jp

一辺が1mの正方形になると、なんと10tもの力になる。これに耐える温室ドームは、とても強固に設計する必要がある。しかし、もしドーム内の圧力が小さくてすめば、それだけ設計が楽にできる。火星温室ドームの内圧はなるべく低く設計すべきである。

## 2.2 人間の低圧耐性

人間が低酸素環境下での運動に制限を受けることはよく知られている。ここで全圧と酸素分圧をカッコ付きで、全圧(酸素分圧) kPaのように表記することにする。たとえば、標高0mの地表での標準的な圧力値は100(21)kPaと書く。多くの旅客機の客室圧力は標高2400 m相当の気圧である75(16)kPaに保たれており、離陸着陸の前後で圧力変化を感じることはあるが、特に息苦しさは感じない。ところが、これ以上の高度では高山病の症状が出てくることになる。国立天文台ハワイ観測所のすばる望遠鏡は、ハワイ島マウナケア山頂の標高4200 mの高度に設置されているが、ここはかなり厳しい。以前、見学に訪れたときは、標高2800 mのオニズカ・ビジター・センターで数時間の休憩をすすめられた。山頂近くで写真を撮るために車から出て小走りしたところ、頭がクラッとしたことを覚えている。あやうく酸欠で倒れるところであった。先に見学に来ていたグループの数人が酸素マスクを付けて横になっていた。この高度での気圧は60(12) kPaである。また、アンデス山中の鉱山の宿舎を標高5500 mに建設したところ、不具合を訴える作業員が続出したので、標高5300 mまで高度を下げたという話[2]がある。これは時間をかけても慣れなかったということなので、この辺りがふつうの人間の限界かもしれない。この高度での気圧は52(11) kPaである。さらに、訓練された特殊な人間は標高8848 mのエベレストへ酸素ボンベなしで登頂しているが、一般的ではない。ちなみに、この高度での気圧は31(6.6) kPaである。まさに超人といえる。

一方、宇宙では人間はどのような空気の中で暮らしているのだろうか。アポロ宇宙船内や宇宙服内では1/3気圧程度に減圧した純酸素を用いている。また、ソユーズ宇宙船やスペースシャトルでは地球大気と同じ組成、圧力を設定している。減圧する方が真空の宇宙空間との差圧が小さくなり、低圧ドームと同じ理屈でメリットがあるが、高濃度の酸素を用いることは火



図1：低圧環境発芽実験装置。

災の危険をまねく。長期滞在する国際宇宙ステーションでは、地球大気と同じにしてある。濃い酸素が人体に及ぼす影響がよくわかっていないからである。火星に移住する際にも人間の居住区は地球大気と同じ組成圧力にすべきであろう。低圧下での人体の変化は次の段階でのアストロバイオロジーのテーマである。

## 2.3 低圧環境下での発芽実験

それでは植物はどうであろう。火星温室ドームの内圧を下げる意義はご理解いただけたと思うが、実際に植物をこの低圧環境で育てられなければ意味がない。低圧環境での発芽実験[3]を行なった。さらに、植物栽培といっても、種子の発芽から始まり、生長、開花、結実まで栽培するとなると、実験環境そのものの制御が複雑になり、パラメータも増えて分析する項目も膨大になる。そこでまず、第一段階の栽培実験として、一週間程度の栽培ではっきりと答えが出る種子の発芽実験を行った。実際の食料としても、スプラウトのように発芽段階で収穫して食べることを想定している。

低圧環境下での発芽実験を行うために、図1のようなステンレス製の密閉容器を用意した。この容器の上部にアクリル製のフランジを取り付けると内部が観察できるようになる。植物種としては、カイワレダイコンを使用した。シャーレの底に紙を置き、紙に水を15 ml含ませ、その上に100個の種子をまく。このシャーレを容器内に入れ、密閉してから真空ポンプで減圧することにより低圧環境を作る。さらに、必要に応じて窒素を追加することにより酸素分圧を調節する。

光合成を行う前の発芽段階では植物は酸素しか必要

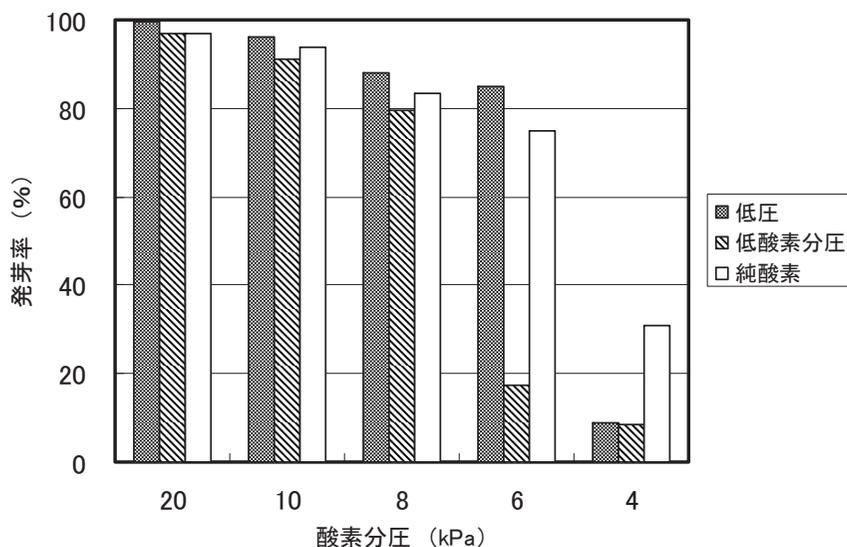


図2：同酸素分圧環境下での発芽率の比較(カワレダイコン).

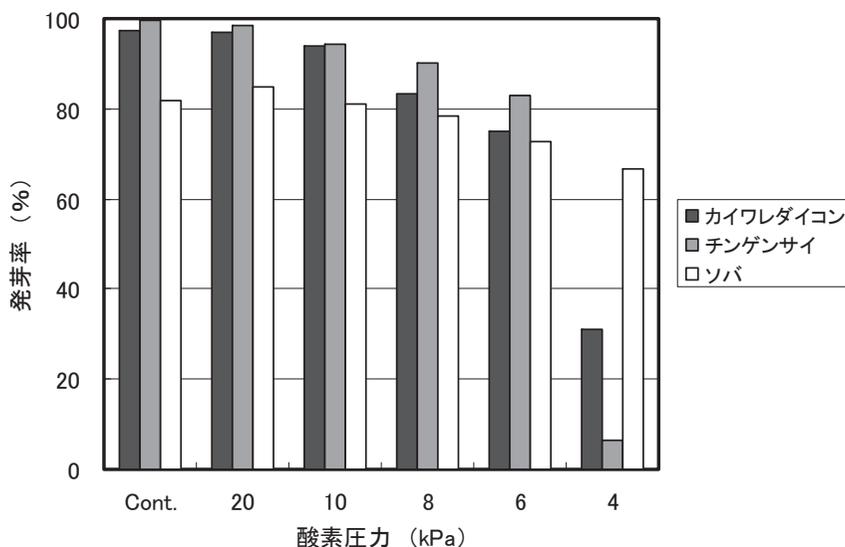


図3：異なる植物種による発芽率の比較.

としない。そこで、全圧と酸素分圧の関係がよくわかるように、次の3つの環境条件で実験を行うことにした。

- (1) 組成比は大気圧のままで空気を単純に減圧する。(低圧)
- (2) 全圧は大気圧100kPaのままで酸素分圧だけを変える。(低酸素分圧)
- (3) 純酸素を用いてその圧力を変える。(純酸素)

なお、実験結果を比較しやすいように、これらの環境下で酸素分圧がそれぞれの条件で何れも20、10、8、6、4kPaとなるように容器内雰囲気調節する。

図2に実験結果を棒グラフにして示す。縦軸は発芽率(%)で、横軸は酸素分圧(kPa)である。3つの条件とも酸素分圧20kPaでは発芽率が100%に近く非常によいが、10kPa、8kPaと酸素分圧が下がるにつれて、

発芽率も徐々に低くなって行く。6kPaになると劇的に変化しているのがわかる。低酸素分圧環境での値だけが20%以下と非常に低くなり、純酸素環境の場合は75%と高い。発芽に際して植物は酸素を必要とするが、窒素分子が周囲にたくさんあると酸素分子の拡散が悪くなり、呼吸に必要な酸素を十分に得ることができない。その結果、発芽率が低くなる。同様の現象がイネの発芽においても見られることが、後藤ら[4]により報告されている。さらに、4kPaにおいては純酸素環境が他より発芽率がよく、低圧環境下では純酸素を用いることが効果的であることがわかる。種子の発芽には酸素が少しあれば十分である。

これまでは、カイワレダイコンを用いた実験を紹介したが、他の種では低圧環境における発芽率はどうなるであろうか。純酸素環境の実験条件でチンゲンサイとソバの発芽率を調べ、カイワレダイコンと比較し図3に示した。カイワレダイコンは、6kPaまでは圧力の低下にしたがい発芽率も少しずつ低下し、4kPaの発芽率は31%で6kPaの半分以下であった。はっきりと下限値を示している。ここで下限値とは、発芽率が急激に下がる直前の圧力値を指す。チンゲンサイの場合もカイワレダイコンとほぼ同様の傾向を示し、やはり6kPaのとき下限値となっているが、4kPaの発芽率が7%とかなり低く、6kPaの83%の1/10以下である。カイワレダイコンの場合よりも圧力の下限値前後での発芽率の差が大きい。これらの傾向に対して、ソバの場合は圧力の低下にしたがい発芽率も少しずつ低下してだけで、下限値を示すような発芽率の大きな差は見られない。また、コントロールと比較したときの発芽率の差も小さい。4kPaでは67%と3種の中で最も高い発芽率を示し、コントロールとの差も15%しかなく、圧力の下限値はさらに低そうである。以上のことから、植物種によって発芽率の傾向は大きく異なることがわかる。種により低圧耐性は異なるのである。これらのデータベース化が重要となる。

## 2.4 さらになる低圧発芽への挑戦

これらの植物の低圧環境下での発芽実験により、低圧下でも適当な環境条件では種子は発芽することがわかった。このように発芽段階はクリアできたものの、火星での宇宙農業の可能性を確認するためには、さらに生長、開花、結実まで段階を進める必要がある。し

かも、農作物としての収穫量や栄養も調べる必要があり、課題は山積している。しかし、これらの問題にあえて目をつむり、冒頭の命題を試したい。

試験的に、モロヘイヤ、シュンギク、コマツナ、キュウリ、オクラ、ナスの6種類の植物の種子を用いて、酸素分圧1kPaという極限環境下での発芽実験を試みた。純酸素のみで1kPaの環境を作ると室温(約20℃)での飽和水蒸気圧(2.3kPa)を下回り、液体の水を維持することが困難なので、空気をそのまま5kPaまで減圧して酸素分圧が1kPaになるように調節した。その結果、モロヘイヤとキュウリだけが発芽し、特に前者ではその発芽率が70%にも達した。しかし、発芽速度は非常に遅く、通常大気のコントロールでは2日ではほぼ100%発芽するのに対して、酸素分圧1kPaでは10日以上かかっている。

火星の大気圧は変動するが、1kPaに非常に近い。仮に、火星大気圧と温室ドームの差圧がゼロならば、温室の気密性を気にする必要がなくなる。つまり、ビニールハウスのような簡易温室の内部を純酸素で満たし、非平衡ながらも水分をコントロールできれば、スプラウト栽培が可能になるのである。この極限環境下で発芽した種は限られているが、品種改良等の努力を加えれば、他の種でも発芽する可能性を秘めている。さらに、植物を大きく栽培するためには光合成が必要であり二酸化炭素が必要であるが、火星大気に多量に含まれているので、これを上手く利用すれば火星大気圧のまま宇宙農業を実現できる。また、そのためには光合成活動の低圧環境下での影響を調べる必要がある。火星という極限環境下での植物栽培は、まさにアストロバイオロジーの研究テーマであり、その結果、火星ではハウス栽培が可能になるかもしれない。

## 3. 放射能を集める植物

ちょうど、本原稿の執筆中に東日本大震災が起こった。被災された方々には心からお見舞い申し上げます。今回の地震は震災被害にとどまらず、津波、原発事故と次々に被災地を襲っている。特に、原発事故はなかなか収束せず、周囲に放射性物質を放出し続けている。このままでは事故が一段落しても放射線とその風評被害により、被災地の農業や水産業は大きな打撃を受けるであろう。このような状況では復興もままならない。

こんなときに「アストロバイオロジー」は何か貢献できないだろうか。ふと、チェルノブイリ原発事故のときに、放射能除去にヒマワリが使われたことを思い出した。福島原発事故では主にヨウ素131、セシウム137といった放射性物質が報道され問題となっているが、ストロンチウム90も人体に取り込まれる性質を持っており危険である。ヨウ素131は半減期が8日と短いので、長期的には気にならなくなるのに対して、セシウム137やストロンチウム90は半減期が約30年と長く、厄介である。これらが土壌に残っている限り、農作物は放射能に汚染され続ける可能性がある。そこで登場するのがヒマワリである。ヒマワリは根にセシウムを花にストロンチウムをそれぞれ蓄える性質を持っていて、上手く使えば土壌浄化に利用できる可能性がある。これは、ファイトレメディエーションと呼ばれる方法である。もちろん、放射性物質吸収後のヒマワリは放射性廃棄物となるので、その処理方法も考えておかなければならない。他にも放射性物質の吸収効率がよい植物や事後処理が楽な植物があるかもしれない。また、放射線に強い微生物も発見されており、これらを利用したり研究結果を応用したりすることも立派なアストロバイオロジーの研究課題になるのではないだろうか。

## 4. おわりに

火星での宇宙農業からファイトレメディエーションに話が飛んでしまったが、「アストロバイオロジー」が真理を探究するサイエンスとしてだけでなく、応用され社会に役立つ側面を持っていることを示したかった。震災後の原発事故の悲惨な状況を見て、工学出身の研究者として、毎日ふんだんに電気を消費してきた日本国民として、とても胸が痛む。これからもアストロバイオロジーが社会に貢献できることを考えていきたい。

## 謝辞

本稿を執筆する機会を与えてくださいました田中秀和博士(北海道大学)、山岸明彦博士(東京薬科大学)、小林憲正博士(横浜国立大学)にこの場をお借りして御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 小林憲正, 2008, アストロバイオロジー (岩波科学ライブラリー).
- [2] 森滋夫, 2010, 宇宙農業サロン資料.
- [3] 樋之口耕, 他, 2005, Space Utiliz Res 21, 315.
- [4] Goto, E. et al., 2002, SAE Proc. of 32nd ICES, 2002-01-2439.