

宇宙種子ミッションの過去例

1.宇宙へ植物種子を打ち上げ、その後、地上に回収した事例の一端

1971年1月31日、アポロ14号が月へ3回目の着陸を目指して打ち上げられた。その司令・機械船のパイロットを務めたスチュアート・ローザ(Stuart Roosa) (前職が米国森林サービス/森林降下消防士(former U.S. Forest Service(USFS) smoke jumper)の個人用持込品の中には小さい容器に梱包された数百の木の種子が含まれていた。それは NASA/USFS の共同プロジェクトの一つとして実現したものである。地球に帰還後、「月の木(moon trees)」として世に広く知られるようになり、その苗は1976年の米国独立記念200年祭の折などしばしば合衆国各地で記念に植樹され、またその一部は世界各地にも植えられた。近年もその子孫が宇宙と地球を繋ぐ木として、米国を中心に記念植樹されている。



(図1) アポロ14号司令・機械船パイロット、スチュアート・ローザ(Stuart Roosa) (出典:NASA)

1994年7月9日、スペースシャトル“コロンビア号”で向井千秋宇宙飛行士と共に打ち上げられた、ツツジの種子は、地球帰還後、向井さんから館林市へ無事、返還された。その後、市では向井さんの偉業をたたえ「つつじのまち・館林」のイメージアップをはかるため1998年に「宇宙ツツジ」などの商標登録を出願し、1999年、正式に承認されている。

2000年、スペースシャトル“エンデバー号”に毛利衛宇宙飛行士と共に搭載された桜の種子は、毛利さんの故郷・北海道余市町で育てられ、36本の苗木が同館を含む全国の科学館に贈られた。2006年春にはその桜の花が咲いたという便りが寄せられている。

韓国初の宇宙飛行士イ・ソヨンさんが宇宙へ旅立つのに先立って、2008年2月5日、無人貨物船で2万個の植物種子(蘭、タンポポ、コスモス、ムクゲ、稲、豆など全11種類)が国際宇宙ステーションへ向けて打ち上げられた。地上回収後、突然変異個体の育種に成功したなら、それは‘ソヨン蘭’と命名すると発表された。

2008年6月、スペースシャトル“ディスカバリー号”に搭乗した東京都世田谷区出身の宇宙飛行士、星出彰彦氏はケヤキの種子(約千三百粒)を宇宙へ伴い、また無事、地球に持ち帰った。これは都が駒沢オリンピック公園で採取し、星出氏に託したものである。種子は都農林水産振興財団の農林総合研究センター(立川市)で苗木に育てた後、都内の公園や小学校などに植えられる予定とした。

2008年、有人宇宙システム株式会社(JAMSS)はJAXAの支援により「花伝説・宙へ！」プロジェクトを実施した。これはさくら、ゆり、すみれなど日本の花の種子を宇宙フライトさせ、文化的イ

イベントを創出し、「宇宙の文化利用」という新しい分野に挑戦することを目指す、JAMSS担当者はその抱負を述べている。それらの種子は2009年7月に若田光一宇宙飛行士と共にスペースシャトル“エンデバー号”で地上に回収された。日本に返還後、種子をそもそも採集した各地に戻され、専門家の協力を得てそれぞれの地元のこどもたちによって育てられている。

等々、実際、枚挙に暇がないほど、その事例は数多い。

2. 海外の宇宙機関等による宇宙種子科学教育実験

2. 1.NASA(アメリカ航空宇宙局)の宇宙種子実験

25年以上に及ぶNASAとパーク・シード社の共同宇宙種子実験

1983年、NASAが学校や実業界に向け、小規模宇宙実験への主体的な参加呼びかけを行っていた。当時すでに115年の歴史を誇った米国種子会社“パーク・シード社”のジョージ・パーク副社長はそれを知り、植物種子を実際にスペースシャトルに搭載し、宇宙フライトが種子にどのような影響を及ぼすか調べてみる提案を出すことを思いついた。この第1歩となった小さなプロジェクトから発展を続け、NASAとパーク・シード社は以来共同して、植物種子が外宇宙の環境に応じてどのような応答をするのかについて学び、その上さらに大事なこととして、宇宙環境に曝した植物種子を試料とするサイエンス実験を自ら行える機会を世界中の生徒、学生さん等に提供してきたことがあげられる。

第1回宇宙フライト：ゲッタウェイ・スペシャル

パーク・シード社の第1回宇宙種子実験はNASAが「ゲッタウェイ・スペシャル」と非公式に呼んだプログラムの一部として行われた。

正式には「小型・自己充足タイプの搭載物実験」(the Small, Self-Contained Payloads)と言う名称のこのプログラムはNASA以外の政府機関や人々にも宇宙で実験が行えることを可能にした意義を持つ。

パーク・シード社のゲッタウェイ・スペシャルは具体的にSTS-6ミッションの一部として実施された(STS-6スペースシャトル“チャレンジャー号”は、1983年4月4日に打ち上げられた)。

「パーク・シード社は総計11.3kgの一般的な果物や野菜の種を軌道に送る。」旨、公表され、実際、ジャガイモからスイートコーンまで40種類に及ぶ植物の種子がシャトルに搭載された。

パーク社は、「21世紀、宇宙コロニーや月面基地では滞在する人の食料を確保するため、特別な閉鎖環境の装置を使って植物を栽培し、食料を生産することが想像される。なぜなら、食料それ自体全部を宇宙の彼方までロケットに搭載して運ぶのは容積がかさみ過ぎ、かつ重量の負担が増えるからである。」と未来に向け、その見込み、意気込みを語っている。

実際、パーク社は、将来、この分野に市場が生まれることを確信していた。

この企業の最初の目的は、植物種子が宇宙フライト中の苛酷な環境に耐えられるようどのようにパッケージすべきか、それを明らかにすることであった。これら種子実験では、軌道上で発芽、

栽培させない一方、地上へ帰還させた後、種子は芽だし実験にまわされることとなる。

地上に残した種子は全く同一の2つのグループに分けられ、宇宙フライト群と比較すべく研究に用いられる。種子の一つのグループは簡単なポリエステル(DacronTM)製のバッグにパッケージし、もう一方のグループは気密性のあるプラスチックのポーチ(小袋)に封入する等、詳細かつ具体的な実験手技の試行錯誤がくり返された。

以下、パーク・シード社担当者の実験に臨んだ際のコメントを引用する。

「私たち種子会社の研究者らは、植物種子への宇宙環境の極端な温度変化と放射線の影響を明らかにすることを企図した。地上社会の具体的な例として、放射線は農業に有益に寄与する(実際、農林業では種子の突然変異の出現率をあげることはしばしば品種改良の見地からむしろ期待されている)のはよく知られた事実であり、変異が出た中には、その植物をより環境に対して強靱とする品種をも含むという遺伝的多様性が生じることある。反面、温度の大きく変動する繰り返し(+120℃～-150℃)がその植物に害をもたらす可能性もある。パーク社は、この実験が将来の宇宙における食物輸送について、基本的な原理原則を提供するものと信じている。」

種子が実際、地球に戻って後、パーク・シード社の研究チームへ届けられ、宇宙フライトと地球に保管した種子からそれぞれ栽培して違いが出るか専門家により調べられた。結果、(幸いにも)科学的にみて差は認められなかった。

第1回宇宙種子教育実験: LDEF

小規模のゲッタウェイ・スペシャル実験の成功に励まされ、翌年、パーク・シード社ははるかに大規模で、かつより野心的な実験を試みることとなる。1984年4月6日、NASAは、まだまだ多くの未知の部分を含んだが宇宙環境からの影響を研究するために、無人実験室として計画された、長期曝露施設衛星(Long Duration Exposure Facility: LDEF)を宇宙の中へ送り出した。

このミッションは公式にはSTS-41Cとして知られ、LDEFに含まれる多くの実験試料の中には、パーク・シード社からの植物種子、1450万粒もあった。実験は106種にも及ぶ様々な植物種子からなり、その中では特にトマト種子が単独で1250万粒も入れられていた! それは地球へ回収後、長期宇宙放射線被曝、大きな温度変化の繰り返しなどによる種子の遺伝子構造、発芽率、生存率への効果を調べるというパーク・シードの考えによるものであった。種子試料の一部はパーク社の研究施設で発育させるために確保し、それ以外の大部分の種子は、米国各地の先生方へ地上対照の種子とセットで送られ、それぞれのクラスの総計、何百万人もの“科学の若い卵”(生徒)さんたちによって育てられ、実験されるよう企画された。また別に、種子の一部は他の研究者たちへ実験用として配られている。

元々の計画では、1年後に軌道から帰還させる予定であったが、予想外の問題が次々に発生し、結果その回収は後回しにされることとなる。そして月日は流れ、LDEFは宇宙に6年近くも取り残されてしまう。その間、LDEFは徐々に地球大気縁近くまで軌道高度を下げ続け、ついには燃え尽きてしまうぎりぎりの期限が迫った。まさに燃えて灰になろうとした寸前、LDEFはシャトル“コロンビア号”によって無事回収されたのである。

地上回収後、“生徒さんたちのために開発された宇宙曝露実験”(Space-Exposed Experiment Developed for Students: SEEDS(この頭文字を続けてそのまま読むと“種”という英単語の複数形になる))の配布にかかる業務が開始され、LDEF に収められていたトマト種子等や、宇宙フライト試料と同じ種類、数に揃えられたパーク・シード社種子貯蔵庫の保管種子を入れた13万2千個以上のキットは、合衆国中の4万以上の学校の6万4千人以上の教師、さらに米国以外の30以上に及ぶ国々へ配られた。

留意すべきは、LDEFの種子が計画より5倍以上の長きに渡った期間、宇宙に置かれていたことであり、したがって、計画されていたよりはるかに多くの放射線量、温度変化の繰り返しが試料が受けたことである。しかし、予想に反して、実験結果を記す報告書が集まってゆくと、そこに結果として示されていたのは、今回の宇宙環境曝露でも地上対照と比べて具体的に発芽率でも差がなく、さらに広範囲の遺伝子変異も認められなかったことである。

ニュースメディアは、おそらく人食いトマト(人に危険な影響を及ぼすという意味)、あるいはそれほどの植物が生まれたとするレポートを可能ならセンセーショナルに報じたかったかもしれないが、実際、葉に斑入りが入る若干の例がみられたことを除き、変異はほとんど認められなかった。事実、6個の宇宙実験トマトの内の1つのグループがカンザス州フェアで一等賞を取ったものさえあった!



(図2 左) **LDEF** 1984年4月7日、スペースシャトル“チャレンジャー号”から軌道に投入される直前のLDEF。背景の地球にはバツハカリフォルニアが見えている。(出典:NASA)

(図2 中2つ) **LDEF** NASAのLDEFはスクールバスほどの大きさをもつ、円筒形の形状をした宇宙空間実験ラックであり、約5.7年間、様々な材料実験用のサンプルを宇宙環境に曝露し続けた。地球周回軌道を32,422回巡ったLDEFは、STS-32ミッション“コロンビア号”によって1990年1月12日回収された。(出典:NASA)

(図2 右) **Seeds In SpaceのPATCH** (出典:パークシード)

人の命を狙う宇宙トマト団のあまた襲来? いえいえ、そんなことは決して!

(ATTACK OF THE KILLER SPACE TOMATOES? NOT!)

宇宙トマトは世界のいたる所に突如、いっせいに出現することとなった。事実、米国すべての50州、コロンビア特別区、および米国以外の34カ国、330万人以上の生徒たちと6万4千人の教

師が、地上対照のトマトと宇宙フライトトマト種子を使って栽培、比較実験を行った。生徒さんたちが彼らの実験を終了し、NASA は寄せられた 8 千に及ぶ実験結果レポートを分析して、得られた知見をまとめた。出されたレポート中の成長過程の記録からは、宇宙種子の発芽がわずかに早いことが示唆され、さらに宇宙種子から育てた苗が、発芽後の 3~4 週間までは成長がより早い可能性があった。しかしながら最終的には、地上対照の苗も、宇宙種子からのものに次第に追いつくこととなり、全体的に見て両者の植物体、果実に統計学的な違いは見つけられなかった。

NASA はこの結果を受けて、植物種子を宇宙に長期滞在させた場合でも、植物には変化が全く起きないか、もしくはほとんど影響を及ぼさないという認識を、1992 年には持つこととなった。

なお、宇宙トマトを人に食べさせる時、しばしば見せびらかしたり、またじらしたりする傾向が見られ、そのせいもあってか人によっては宇宙トマトの方が地球対照の兄弟と比べ、むしろ「よりおいしく、より水気もあり、またさらに甘かった!」と感じたり(プラセボ効果)、また別のレポートでは、宇宙の方が皮が少々厚く、種も多かったとしたものもあった。研究者が確かに言えることは、つまり宇宙、地球トマトはそれぞれ十分同等に健康であったということである。

この実験を行った結果、最も興味深い出来事の 1 つは宇宙曝露トマトにおける放射線突然変異の可能性を不安視する一部メディアの関心ぶりであった。種子があちこちに配られ始めた直後、宇宙曝露植物から取られる実に毒性がある可能性を警告する記事がロサンゼルスタイムズに載った。それは、放射線が種子の DNA に影響をもたらし、その結果致死的な変異が生じる可能性があると言う科学的根拠に基づくものであった。そのことについて NASA は、宇宙曝露種子にそのような体細胞変異が起きたとして、それは DNA 分子上の一組の塩基に点変異をもたらすはずで、そのような変化は実際植物自体に致命的になることはむしろあっても、結果として植物の次の代に毒性を発することとの因果関係、関連性はないという認識を予め持っていた。

世界中到る所でトマトは育てられているが、その間、受けた放射線の量は累積し、変異原となる物質もまた成長期のトマトに作用したりするのが現実で、その結果地球のふつうのトマトにおいても、変異は自然に起きている。

放射線は、周囲の環境、たとえば土壌やビルの建材や岩石、地下水、食品、私たちの身体からさえ放出されている。SEEDS 実験の先生用ガイドで説明されているように、長期の宇宙放射線被曝の効果は実験の主要な変数の 1 つということである。

とは言え、その警告記事が書かれなかった場合にはおそらくさほど踏み込まれなかったかもしれない、別の観点をこの実験に加える役割も果たしたのである。ほとんどの場合、教師はその警告を、この実験に対して深く洞察し、議論を活発にするプラスの効果とを及ぼし、放射線や放射能の概念を教え、遺伝学や変異を理解させることに役立ったと感じた。それらのことを正しく理解した結果、多くの教師が宇宙種子からとれたトマトを楽しく食べたと報告し、ある教師にいたっては、クリスマス・プレゼントとしてトマトジャムを作る計画もした由である。また、あるクラスでは、食材にベーコン、レタス、それにこの宇宙トマトなどを使ったサンドイッチパーティを開き、この実験の意義を祝ったりした。

第2回宇宙種子教育実験 “宇宙と地上と海面下”

(Seeds in Space II: In Space, On Earth, and Under Water)

NASAとパーク・シード社との3回目の共同事業は前回のLDEFミッションほど大規模ではないものの、それは基本的な実験の枠組みにさらに新しい要素を足して、新規性を持たせたものである。今回は、宇宙へ送ったトマト種子の群、パーク・シード社米国本部に保管した地球の地上対照群、それに加え、このミッションでは海の下にも種子を保管した。

実験計画の中の一つの要素とされた水面下での保管は、フロリダ州キー・ラーゴ、世界で唯一の海底に設置された実験室を使用した。マリーナラブ(MarineLab: 海洋研究室)と呼ばれるこの実験室は、閉鎖系生命維持機構(Closed Ecological Life Support System: CELSS)の具体例である。CELSSはその目的として、人が長期間、宇宙の中で生きる時に必須となるような、完全に自己充足的な生命維持環境を作りだすことにある。このマリーナラブはNASAの海洋プロジェクト(NASA 海洋 CELSS 模擬実験)の一部であり、それは水深約10メートルの環礁の中にある施設から操作される。

第2回宇宙種子実験用の宇宙フライト種子はスペースシャトル“アトランティス号”(STS-86)に搭載された(1997年9月25日に打ち上げ)。

一定期間、それぞれの環境に曝露した後、宇宙、地上対照、および海面下の施設に保管された種子の3セットはパッケージされ、クラスルームで教材として活用されるために米国中の教育者に配布された。

結果に関する報告がいくつか学校からもたらされたものの、共通した傾向は認められなかったもようである。

第3回宇宙種子教育実験: 工学的挑戦

宇宙種子教育実験の最近のラウンドは、2006年7月4日に打ち上げられたスペースシャトル“ディスカバリー号”(STS-121 ミッション)において開始した。今回、パーク・シード社はそこに約1千万のシナモンバジルの種子を搭載した。今回の種子はMISSE(ミッシー)4実験の試料の1つとして搭載されたが、このMISSEは、国際宇宙ステーション物質科学実験(Materials International Space Station Experiments)の頭文字を並べたもので、国際宇宙ステーションの外部設置コンテナ内に各種試料物質を搭載し、外宇宙の環境にそれらがどのように影響を受けるかを調査する一連の実験として行われてきたものである。

宇宙フライト種子は1年余り、MISSEの置かれた過酷な条件(原子状酸素、宇宙放射線、高温と低温間の温度変化(+120°C~-150°C)のくり返し、微小宇宙デブリスの衝突、微小重力、真空等)下に曝され、2007年8月21日、地球へ回収された。今回は生徒さんたちが総計2百万人まで参加が可能となるように設定され、1980年代のLDEFに搭載されたSEEDS実験と同様に、地上対照と宇宙フライトの種子それぞれを同時に栽培して違いがあるか調べる実験に供された。

問い: なぜ、バジルを宇宙へ飛ばす種子に選んだか?

NASA の答え:

シナモンバジルは栽培時に健康状態を維持しやすい。

その種子のサイズ(重さと容積)が宇宙飛行士によって宇宙へ運ぶ際に数を十分増やすことができるくらい小さく、またそれはNASAが地上回収後により多くの人々へ配布することを可能とする。

一方、そのサイズは生徒さんたちが肉眼で見て十分取り扱いができる程度には大きい。

バジルを上手く育てられる栄養成分が十分把握されている。



(図3) MISSE (出典:NASA)

国際宇宙ステーション外部に初めて備え付けられた実験装置である、国際宇宙ステーション物質科学実験 (Materials International Space Station Experiments: MISSE)は、過酷な宇宙環境への物質の長期被曝効果を調べることを目的とする。MISSE は、NASA、産業界や国防総省等によって将来、低地球軌道上や、あるいは惑星間宇宙ミッションなどで使用される見込みの物質、素材などの性能、安定性や長期の抗変質性を評価するために用いられている。

2. 2.CSA(カナダ宇宙庁)の宇宙種子教育実験“トマトスフィア”(Tomatosphere)

(トピックス: 英単語“Atmo・sphere”はその原義の“空気(蒸気)の丸い固まり(球)”から転化して、大気を表す。また、大気は地表に近い方から順に、対流圏(0km-11km) troposphere、成層圏(11km-50km) stratosphere、中間圏(50km-80km) mesosphere)、熱圏(80km-800km) thermosphere に分けられる。一方、太陽圏(heliopause: ヘリオスフィア)とは、太陽風が太陽系を吹き渡り、冥王星の軌道も越えて銀河系の星間ガスと作用がつかう場所を境界とした内側範囲を指す。このユーモアを交えた Tomato・sphere という造語は、定めし“トマト圏”とでもいう意味になるらしい)

トマトスフィアは2000年から、カナダとアメリカ合衆国の1万1千以上の教室における通常のカリキュラムの一部として発展してきたプロジェクトである。

2009年秋の時点で、このプロジェクトから種子の受領を要望する教師は、応募すればそのまま自動的に登録される。2009年に用いられた種子の一部はまた、火星の模擬環境に保存された。

このプロジェクトを主宰するCSAは以下の点を本実験参加で得られる意義として述べている。

「これらの種子の成長を観察することは、宇宙ミッションの生命維持システムの要素、--食物、水、酸素、および乗組員によって吐き出された二酸化炭素の除去--、などに関することを教室で話題に上るように促進すると考えられる。現在の技術では、人を火星に送り、またさらに地球へ帰還させるまで3年近く要するが、そのミッションの間に食料としての植物を栽培する方法を知るの、

人間の宇宙進出を理解する上で肝要である。生徒さんたちがこの科学実験を行うことは、科学者が長期の有人宇宙フライトにかかる課題を正しく理解することを高めることとなる。」



(図4 左) ISSに搭載されたトマト種子入りバッグ (出典:NASA)

国際宇宙ステーション(ISS)ズベズダ・モジュール内のトマトスフィアIIプロジェクトのトマト種子入りバッグと宇宙飛行士エドワード・M・フィンケ (2004年7月17日撮影)

(図4 中、右) トマトスフィア・プロジェクトに参加した生徒たち (出典:トマトスフィア)

これまで複数回実施されてきたトマトスフィアの実績例: 18ヵ月間、宇宙に滞在した種子を提供、火星を模擬した環境で保存された種子を提供、38万7千人以上のカナダの生徒さんたちの参加、等。

トマトスフィアのパートナーらによって作成された新たな授業用教材: これまでに教師や生徒さんたち用に、科学を理解しかつ学校の通常カリキュラムに関連する新しい授業要素が作成された。

小学校3～4年生: 火星で生活する人が食料を得る方法--有人火星ミッション期間中のクルーへの栄養補給に焦点

小学6年生: 火星上で人の生存に必要とされるもの--呼吸可能な空気の再生

中学1～2年生: 火星環境--火星の気象観測

中学3年生～高校1年生: 生存に必要なエネルギー---長期ミッションを実現する上でクルーに必要な栄養素

スポンサー: カナダ農務・農産食品省、カナダ宇宙庁、ハインツ・カナダ、ハインツ・シード、センターズ・オブ・エクセレンス、ストークス・シード、グエルフ大学

2. 3. オーストラリア宇宙種子科学実験

2008年5月31日にシャトル“ディスカバリー号”で打ち上げられ、その後ほぼ半年間、国際宇宙ステーションで保管された、ウォレマイ・パイン(Wollemi pine: シドニー西方200kmにあるウォレマイ国立公園で1994年に発見されたナンヨウスギ科の松の一種で、その起源として1億5千万年前の恐竜が地上を闊歩していた時代にさかのぼるほど古く、最も希少な樹木の一つで“生きた化石”と呼ばれる)、ワラタ(waratah: オーストラリア、ニューサウスウェールズ州の「州花」で、アボリジニ語で「赤い花」という意味)、ゴールデン・ワトル(golden wattle: アカシア属の花の一種で、オーストラリアの国花)、フランネル・フラワー(flannel flower: 葉や花が細かい毛で覆われ、

触るとフランネルのような感触をもつオーストラリア原産、セリ科の多年草)の種子を地上回収後、発芽率、生存率などの解析が開始された。このプロジェクトは、ニューサウス・ウエールズ植物園 (NSW's (New South Wales') Botanic Gardens)の要望にそって、オーストラリアの研究者が主導的に担当、実施している。2009年6月29日現在、地上対照と比べ宇宙フライト種子から成長させた植物体に障害がよりみられるという発見はなく、将来の自立型宇宙コロニーの研究、開発に資するため、今後もさらに実験を続けてゆく方針という。

2. 4.日本における宇宙種子教育活動・実験

岡山大学資源生物科学研究所・杉本学准教授グループは、2006年に国際宇宙ステーションのロシアモジュールで5カ月間の大麦種子保管等の実験を実施した。

子供たちに宇宙や科学への興味を深めてもらい、実際宇宙を身近に感じながら地球環境との違いを学んでもらうことを目的に、2008年11月に同研究所の菜園で倉敷市内の小学生たちを招いた種播きや、翌年5月29日にはまたその子供たち参加による収穫体験授業、また大麦の生育過程や宇宙空間での食糧生産を目指す研究の講義等も行ったりして、宇宙フライト大麦種子に基づく教育活動を実施している。

教育プログラムを広く提供する株式会社リバナスはJAXAの有償利用という制度を利用して、2008年11月、ミヤコグサとシロイヌナズナの種子をスペースシャトル“エンデバー号”で国際宇宙ステーションに向けて打ち上げ、日本実験棟「きぼう」の船内保管室で約8カ月間保管した。その試料は宇宙飛行士若田光一氏が2009年7月31日、地球に持ち帰った。リバナス(株)とベネッセコーポレーションが同年秋から各地の小、中、高校などに配布して、2009年12月時点、各学校による地上対照との栽培比較実験を実施している。実験終了後の2010年3月、成果報告会が開催される予定である。