

## 月面の植物栽培計画

### 1. 長期有人(惑星間)ミッションの基盤技術 (地球外での植物栽培)

21 世紀の有人宇宙開発計画における大きな目標の一つは、有人火星ミッションです。しかし、現在のロケット技術では人を地球－火星間、往復をさせるのに大体 2 年半から 3 年かかると言われ、このため従来のアポロミッション、スペースシャトルや国際宇宙ステーション (ISS) 等での宇宙滞在の場合とは基本的に必要とされる基盤技術が大きく異なります。

以下の表は、NASA において計算された宇宙飛行士の 1 日当りの必要物質、出される物質のそれぞれの量と割合です。

インプット			アウトプット		
	1日当りの必要量 (kg)	%		1日当りに出る量 (kg)	%
酸素	0.83	2.7	二酸化炭素	1.00	3.2
食物	0.62	2.0	代謝排泄物(固体)	0.11	0.35
水 (飲水、食品の準備)	3.56	11.4	水 (尿、洗面等による汚水)	29.95	96.5
水 (歯磨き、洗面、洗濯等)	26.0	83.9			
計	31.0			31.0	

2 年半から 3 年のミッション期間中に宇宙飛行士の排泄する尿や大便の量はどれくらいになるか見当がつかますか。

ある NASA レポートによれば、2 年間のミッションで 6 人の宇宙飛行士は 6 トンにおよぶ固体の有機ゴミを出すと試算しています。実際、そのうち大部分を占めるのは大便です。これら人間が出す物は地上では便はトイレへ、あるいは生ゴミや生活廃水などとして捨てられるものですが、思い起こしてみましょう、長期ミッション宇宙船の外はまったく真空の宇宙空間、物質そのものがない世界です。地球からはるかに離れた惑星間長期有人ミッションでは排泄物も汚水も大変貴重な物質の一つの姿です。ですから当然、捨てずにリサイクルして有効活用されることとなります。

次に、2 年半から 3 年に渡るミッションの 6 人ほどの宇宙飛行士に必要な食料の重さ、体積がどれくらいになるか計算してみてください。

実際、現代の技術では、1kg の物資を地球周回軌道へ打ち上げるだけで 200 万円ほど費用がかかります。すべてを宇宙船に積み込んで火星へ持って行くのは物理的、予算的に甚だ困難です。

すなわち、上記の理由がまずその第 1 点として、長期有人ミッションでは物質のリサイクル、再循環による自立的宇宙生活(生命維持)システムを働かせることが最も適切と考えられます。

次に、私たち人間の食物の基本は何でしょうか。そう、それはまず第一に植物です。野菜や果物、これがもっとも少ないエネルギー量から質量共に効率よく得られる食物になりますね。植物を宇宙ミッション中に育てることができれば、食料となる以外に人間が空気を吸って排出する二酸化炭素を植物が光合成反応によって再び酸素に変換してくれます、また人間の排泄物は一定の処理後、植物の肥料として使うこともできます。



将来の火星有人ミッションにおける宇宙船内の植物栽培工場(想像図) : 出典 NASA

まとめますと、食料の生産、物質のリサイクル、空気浄化の3つの理由から惑星間長期有人ミッションでは植物の栽培がセットとして欠かせない基盤技術の柱になると考えられています。

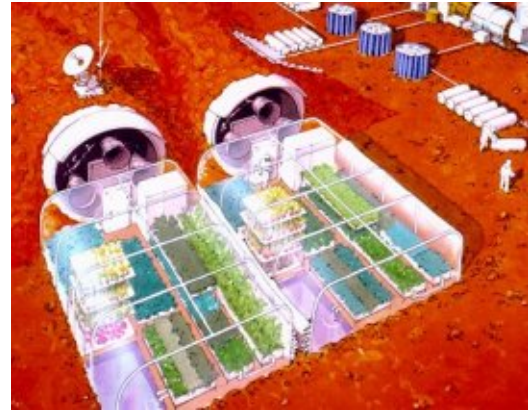
NASA や ESA(欧州宇宙機関)はこれまで、主に短期宇宙ミッションに対応した技術開発に力を注いできましたが、近年は長期ミッションの基盤技術にも目を向けてきており、その種の研究、技術開発も盛んにされつつあります。

NASA 食品科学部門の専門家グループは、火星を目指す6月から8カ月の間、飛行士らは宇宙船の中でレタスやホウレンソウ、ニンジン、トマト、ネギ、ラディッシュ、ピーマン、イチゴ、ハーブ、キャベツなどを栽培する。さらに火星に到着した後1年半に及ぶ滞在中、現地でイモ、大豆、小麦、米、ピーナッツ、豆類などを与圧室内にて栽培する——というプランを出しています。



テイラピア : 出典 NASA

また NASA は、植物に加えて魚もこの物質リサイクル、食料の生産を組み込んだ宇宙生活(生命維持)システムの一要素として加える研究も進めています。具体的には、ティラピアという種類の魚を第一候補としていますが、それはこの種類の魚が人間の便も餌にすることが可能であり、また成長が早く肉のつき方も十分でかつ味が美味しいという点をその候補理由としています。



また、ESA のあるレポートによれば、火星有人ミッションを最短 24 ヶ月と見積もった上、往路、復路共に 6 ヶ月ずつ、火星滞在を 1 年とした場合に、宇宙フライト中には食料の約 5~10%を宇宙船内の植物栽培で、また現地滞在中は食料の 40~50%を火星での植物栽培によってまかなうことを目標に掲げています。

火星における植物栽培システム(想像図) : 出典NASA

ただ、プランの構想、骨子はそれとして、これはあるシステムから出る副産物を他のシステムが利用、処理する関係性を組み合わせ、最終的にサイクルとなるようなバイオ再生型宇宙生活(生命維持)システムを現実に具現化するというものであり、これはあたかも地球規模で行われている環境の動的な維持関係を単純化、最少化しつつリサイクルの確実性、有効性も併せ持つようなシステムとして確立するものです。様々な想定外の事象にも速やかに対応可能な補償システムを用意することを含め、そのようなシステムは私たちの地球環境、生態系への根源的な深い理解なくして一朝一夕に構築できるものではなく、この点からも火星有人ミッションの実現はまだ一歩先なのかも知れません。

## 2. 月面植物栽培計画

近い将来、月面に有人基地が建設された際には、遅かれ早かれ構成要素として必ずその中に植物栽培システムが設置、稼働されると考えられています。それは一つには、火星等を目指す自立型有人ミッションの基盤技術の発展に資する、基礎実験データの取得が大きな目的となります。火星のような低気圧(1/100 気圧以下)、低重力(3/8G)の環境における植物栽培技術を確立するのに、月世界(極高真空、1/6G)はまさに大変適した実験環境を提供するといえ、ここでそのような地球外天体用の植物栽培、農業技術を習得できれば、火星でのそれより難度の低い面もあり、火星上の農業による食料生産、物質循環を十分成功させられる可能性を事前により確かなものにできる道が開けます。

地球の陸上、平地に生える植物は、もちろん 1 気圧の大気圧環境にて生活しています。では月面での植物栽培を行う際に、温室タイプの閉鎖栽培環境の一つとして植物体周囲の気圧も当然、1

気圧に設定されるでしょうか。

先ほど、物資を宇宙へ運ぶのに莫大な費用がかかることをお話しました。財政的な支援が必要な仕事は、常に費用対効果(ひょうたいこうか)を考えなければなりません。地球外の現地(たとえば、月)において、そこで容易に入手できる物質を極力利用して必要とされるものを作り出す研究、技術開発もNASA等で行われています。しかしながら、初期の開拓期の月基地ではそのかなりの物資は当然、地球から運ばれると想定されます。月面上に植物栽培用温室の構造物を作った場合、外環境は真空となりますので、内部の気圧が高ければ高いほど、その圧力差を支える構造物の強度がより求められることとなります。また気圧を1気圧まで高めるためには空気そのものもより多く地球から運ばなければなりません。よって空気を含めた温室建設用資材を最小限にするには、月面温室の内部気圧を可能な限り1気圧より下げることが望まれ、この目的にそった研究も行われています。例として、NASAにおいて1/10気圧での植物栽培実験も行い、水分を十分与えても植物の葉から水分の蒸発が止まらず、その植物体においては早魃時に発現する遺伝子が活性化するなどの影響効果が認められたことが報告されました。このような低圧環境下での植物の応答反応とその制御方法について現在も研究が進められています。



NASA 研究者による低圧環境でのレタス栽培実験 : 出典 NASA

また、月は1回地球の回りを周る(公転)間に1回の自転を行っています。ですから、運動競技場の中央に立ち、そのトラックを周回するランナーを目で追えば常にその人の同じ側面が見えることと同じで、月はいつも同じ面を地球へ向けているのでしたね。さらに地球も公転運動を続けることが加味され、月の1日は地球時間で昼が15日、夜が15日です。地球の植物は当然、そのような一日のサイクル(日周性)は持っていませんから、月面上で得られる日光に加えて、人工的な光を植物の種類によってはそれぞれ与える必要も出てくると考えられます。植物の種類ごとに人工的に与える光の波長、強度、時間間隔等の研究も行われています。

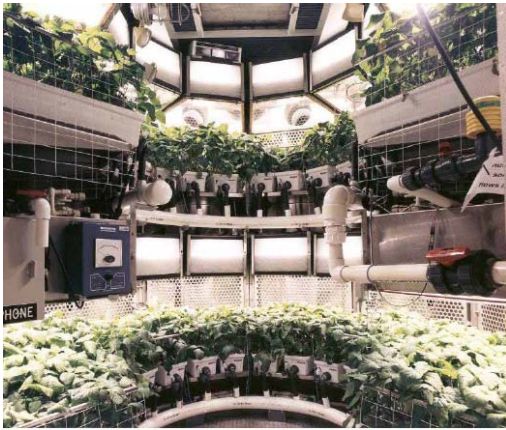


「LEDによる植物栽培実験」赤((光合成に最も有効な光))、青((赤色光の次に光合成に有効な光。屈光性(植物が光の方向に伸長すること)や、形態形成(葉を厚くする・茎を太くする)に効果的))の波長の光で栽培。 : 出典 NASA





NASA のバイオマス生産チャンバー (Biomass Production Chamber :BPC) : 出典 NASA



NASA、BPC 施設における大豆の水耕栽培実験 : 出典 NASA

さらに NASA などいくつかの宇宙機関では、閉鎖環境による植物栽培システムの研究開発や栽培実験等も行われています。

また実際、閉鎖環境下、人間の呼吸による二酸化炭素の増加と酸素の減少、それに対して植物の光合成による二酸化炭素の減少、酸素の増加の間の平衡を一定期間に渡って実地に確かめる実験等も試みられています。



NASA 閉鎖環境施設で、栽培面積 11 m<sup>2</sup> の小麦と大人の人間一人とが 15 日間生活を行った実験 : 出典 NASA

### 3. NASA“月植物栽培チャンバー(The Lunar Plant Growth: LPG) Chamber”のコンテスト

NASA ではここ数年、エンジニアリング・デザイン・チャレンジと銘打ち、米国の園児、児童、生徒さんらを対象に技術的課題に対するコンテストを実施しています。

Lunar Plant Growth Chamber のホーム

<http://www.nasa.gov/audience/foreducators/plantgrowth/home/index.html>

米国内及び米国領土内の人に対し、無償(送料は個人負担)で以下のキットの配布も行っています。

#### Engineering Design Challenge: Seeds in Space Kit

<http://corecatalog.nasa.gov/item.cfm?num=300.0-83B>



Seed packets are only available for distribution to residents of the United States, U.S. territories and outlying areas (American Samoa, Federated States of Micronesia, Guam, Midway Islands, Puerto Rico and U.S. Virgin Islands).

さらにこのコンテストにかかる、幼稚園から高校生までそれぞれの生徒用、先生用の教材が以下のサイトからダウンロードできます。大変、幅広い内容の教材となっており、米国の幼児から高校生までの現行教育カリキュラムの一端が伺い知れる、有用な材料としてご活用頂けます。

[http://www.nasa.gov/audience/foreducators/plantgrowth/joinchallenge/Teach\\_the\\_Challenge.html](http://www.nasa.gov/audience/foreducators/plantgrowth/joinchallenge/Teach_the_Challenge.html)



Educator Guide  
[+ View K-4 guide](#)



Educator Guide  
[+ View 5-8 guide](#)



Educator Guide  
[+ View 9-12 guide](#)

### 4. 企業等による月植物栽培プロジェクト「月のオアシス化計画」

米アリゾナ州の企業、パラゴン・スペース・ディベロップメント(Paragon Space Development Corp.)は2009年3月、月で植物を栽培する計画を明らかにしました。発表された「ルナ・オアシス(Lunar Oasis)プロジェクト」において、「ルナ・グリーンハウス(Lunar Greenhouse)」と名づけられた宇宙での植物栽培容器が特に注目を集めました。これは高さが45センチほど、密封容器として成型された小型の温室構造を持つものです。

同時にまた、米国のオデッセイ・ムーン(Odyssey Moon)社は、米 X プライズ財団主催、3千万ドルの月探査コンテスト「グーグル・ルナー X プライズ(Google Lunar X PRIZE)」での優勝を目指して開発中の無人月着陸機「Moon One (M-1)」のペイロードとして、このパラゴン・スペース・ディベロップメント社の植物栽培装置「ルナーグリーンハウス」を搭載すると発表しています。

同装置には、植物試料としてシロイヌナズナ(Arabidopsis)が収納されて、実際、月面で植物栽培実験を試みるとされます。この時点における本計画の実施予定は 2014 年までと目標が掲げられていました。

このように世界を見渡せば、誰がいつどのようにして、世界で初めてとなる月での植物栽培の実験実施、さらに成功の栄誉を勝ち取るのか、すでに競争下、現実の目標課題となってきたところでは。

## 5. アポロミッション当時の月レゴリスを用いた植物栽培実験

アポロミッションが実施された当時、NASAは持ち返った月レゴリスを使って何回か植物栽培実験を試みている。



アポロ 11 号により持ち返られた月ソイルを土壌の替わりに使って、ゼニゴケ(一般的に岩石の上や樹木が茂った箇所で成長する植物の一種)の無菌培養実験が行われた。 :出典NASA



アポロ 11 号により持ち返られた月ソイルを散在させた上に多数のシダ植物を生やす実験が行われた。これは栽培開始 50 日後の写真である。最も高い所で 3/8 インチほどの高さになった、キャベツのような形のその植物のより濃い色をした円状の部分は月ソイルに接触した状態で発芽したものである。一方、より明るい色のキャベツのような形の部分を囲んでいる部分は月ソイルに接触していなかった。 :出典NASA





アポロ15号で持ち返られた月ソイルを土壌の  
替わりに使って、トマトや柑橘類の小木などの  
栽培実験が行われた。 :出典NASA



アポロ15号で持ち返られた月ソイルと合成培  
地を使って、大豆の組織培養が試みられた。注  
目すべき点として 月ソイル粒子にコンタクトし  
ている部分が緑色に変化した :出典NASA