

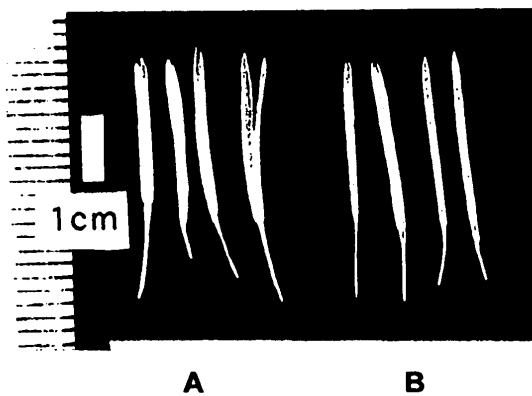


Fig. 6. Shatterproof mutant of *Arabidopsis thaliana* (L.). A, Wild type plant (Columbia); B, shatterproof mutant.

を行うために、2番目、3番目に形成された莢はまだ十分熟していない。JEMでの植物実験で形成された種子を回収するときに問題になるのは、莢の開裂による種子の飛散である。2000年に Yanofsky らによって発見されたシロイヌナズナの莢のはじけない突然変異体⁹⁾ *shp1-1*, *shp2-1* (Fig. 6) は宇宙で形成された種子の稔性を調べる目的には適した株であると考えられる。本稿で紹介した植物実験には、シロイヌナズナの Lansberg というエコタイプ(生態型)を使用していたが、現在Columbiaというエコタイプが植物実験ユニットでも、栽培可能かどうかを調べるはじめている。その理由は、エンド型キシログルカン転移/分解酵素の遺伝子ファミリーに関する研究や莢のはじけない突然変異体がいずれも Columbia 由来であるからである。

地上と国際宇宙ステーション内では磁場、放射線などの環境が大いに異なるが、JEMに搭載されている人工重力発生装置は、植物の生活環に対する重力の影響を解明する有力な手段となることが期待できる。また、JEMで得られた実験データは、宇宙での植物を活用した食糧生産と環境維持のための基礎情報と技術を与えると期待できる。

最後に、JEMでの植物実験の準備のためにご協力を頂いている、富山大学・唐原一郎、増田恭次郎、山田恭司、宮城教育大学・後藤伸治、大阪市立大学・保尊隆享、若林和幸、曾我康一、東北大学・西谷和彦、放送大学・山田晃弘、北海道東海大学・笠原宏一、宇宙開発事業団・矢野(相澤)幸子、上垣内茂樹、日本宇宙フォーラム・嶋津徹、福井啓二、千代田アドバンスト・ソリューションズ株式会社・田山一郎、永瀬睦の各氏にお礼を申し上げる。

文 献

- 1) Hoson, T. *et al.*: *J. Plant Res.*, **112**, 477 (1999).
- 2) Parfenov, G. P. and Abramova, V. N.: *Dokl. Acad. Nauk SSR*, **256**, 254 (1981).
- 3) Kordyum, E. L. *et al.*: *Adv. Space Res.*, **3**, 247 (1983).
- 4) 上垣内茂樹: 宇宙植物科学の最前線, **28**, 83 (2000).
- 5) Halstead, T. W. and Dutcher, F. R.: *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **38**, 317 (1984).
- 6) 神阪盛一郎ら: 宇宙植物科学の最前線, **28**, 143 (2000).
- 7) 矢野(相澤)幸子ら: *Space Utilization Res.*, **18**, 120 (2002).
- 8) Yokoyama, R. and Nishitani, K.: *Plant Cell Physiol.*, **42**, 1025 (2001).
- 9) Liljgren, S. H. *et al.*: *Nature*, **404**, 766 (2000).

閉鎖生態系生命維持システムにおける植物の役割

後藤 英司

本特集で紹介されているように、国際宇宙ステーション(ISS)では日本を含む参加各国が無重力下でさまざまな植物実験を実施する予定である。ISSでは乗員は定期的に交代し、ステーション内でリサイクルできない物資は地上から定期的に補給され、廃棄物は地上に持ち帰ることになる。しかし今後計画される実験ステーションでは乗員の滞在期間が長くなり、将来は1年を越えることもありうる。そのような長期にわたる宇宙活動を支援するために、医学、心理学、精神衛生学などの分野の研究者によりさまざまな研究開発が行われている。NASDAでも将来の有人飛行を想定して再生型の生命維持システムの基礎研究を行っている。

植物の利用は食糧自給の最も有効な手段として米国航空宇宙局(NASA)では重要テーマに位置づけている。¹⁾宇宙における植物利用は、新たな宇宙時代を迎えた今日、より現実的な課題になりつつある。その背景には米国が計画している火星への有人飛行がある。また日本を含む数カ国では宇宙開発シナリオとして、月面に長期滞在型の実験基地を造る計画を挙げている。これらの長期有人飛行活動において植物の役割は3つある。第1は食糧を自給すること。第2は宇宙空間内の限られた資源の有効利用、つまり物質循環を効率的に行うために植物を利用すること。そして第3は人間が植物に接することによる心理的効果と景観効果である。本稿では将来宇宙において

どのように植物を利用するのかを紹介したい。

1. 閉鎖生態系生命維持システム的重要性

1.1 閉鎖生態系生命維持システムとは何か 宇宙船、宇宙基地では、地上から物資の供給を得る頻度は少ない。廃棄物は宇宙空間に廃棄することはできないため地球に持ち帰る。したがって宇宙における人間を中心とする人工的な生態系は、エネルギーは開放系であるが、物質的にはほぼ閉鎖系に近いシステムを構築することが必要になる。このような生態系を“人工的な閉鎖生態系”，いわゆる CELSS と呼ぶ (Fig. 1)。CELSS は closed ecological life support system または controlled ecological life support system の略語であり、閉鎖生態系生命維持システムと呼ばれる。長期の有人飛行活動を可能にするためには CELSS を構築し、閉鎖度、循環度の高い物質循環システムを確立することが重要になる。

1.2 系内の物質循環 人間の生命活動に必要な要素は酸素、水、食糧である。代謝研究によれば成人 1 人 1 日あたりの物質収支は、 O_2 ガスを約 840 g、水（飲料水、食品中水分を含む）を約 3080 g、食糧を約 620 g（乾物ベース）を獲得し、 CO_2 ガスを約 1000 g、水は呼吸と発汗で約 1830 g、尿で約 1510 g、また固形排泄物を約 200 g を排出する。²⁾

まず、人間が呼吸で放出する CO_2 ガスから O_2 ガスを作り出す方法を考える。従来から検討され ISS で実用化される物理化学的な方法は、空気中の CO_2 ガスを分離、吸着し、サバチエ法を利用して酸素と炭素に分ける方法である。一方、植物は光合成活動により CO_2 を吸収して O_2 を放出する、いわゆるガス交換機能を有している。物理化学的反応は数 $100^\circ C$ を必要とするが、光合成の適温は $20 \sim 30^\circ C$ で、人間の適温と一致する。酸素発生量は光合成速度に比例するため、発生量の予測と制御が容易で

ある。しかし問題もある。植物は発芽から収穫までの間光合成量が変化し、また多くの植物には暗期が必要である。安定したガス交換のためには複数の植物を組み合わせさせて栽培し、生育ステージを細分化して混植する、栽培区画ごとに明期時間帯をずらすなどの工夫が必要になる。

水は宇宙では貴重な資源である。CELSS において人間 1 人あたり 1 日に必要な水量は約 30 kg になると見積もられている。そのために生活水を効率的に再生する技術と、人間から排泄される糞尿中の水分を化学的に浄化する技術が開発されている。呼吸や発汗によって空気中に放出された水分は純度が高いため除湿器で回収すればそのまま上水になるが、生活水や糞尿には有機物が混ざっているため、ろ過、蒸留のシステムが必要になる。ロシアの宇宙船ミールでは物理化学的な方法による水再生システムが使用され、ISS にも搭載される予定である。一方、植物の蒸散作用も水を再生する手段の一つとして注目されている。植物根で吸水される水は、養分の吸収、分配、体温維持に使用され、99% 以上が葉面の気孔を通して空気中に蒸発する。この水蒸気も上水または培養液水として再利用できる。しかし浄化のために積極的に植物を利用することには無理がある。なぜなら除去したい物質が植物体に蓄積して生育不良になるからである。CELSS における植物による水質浄化は、食糧生産とガス交換の 2 大機能に付随する機能と考えるべきであろう。

系内で植物を利用する食糧生産を行う場合、植物の不可食部および人間からの廃棄物は肥料に再合成することが望ましい。現在、有機廃棄物を酸化して無機物に変える方法として湿式酸化法などが検討されている。湿式酸化法は、高温高压下で有機物を酸化分解し、炭素は CO_2 ガスとして空気中に、窒素はアンモニアとして残液中に抽出させる。この方法では、肥料成分として必要なリン酸、カリウムおよび他の金属元素もかなりの割合で分離抽出が可能である。最近は、このようにして再生した肥料成分を主成分とする養液栽培法の研究が行われている。

2. 宇宙における植物生産

2.1 宇宙特有の環境要因 宇宙空間は地球と異なり、太陽からの放射線（宇宙放射線）を吸収する大気圏がない。そのため人間は宇宙服を着ても長時間は活動できない。長期間生活する建築物は放射線を防御する構造が必要である。しかし天井や壁だけで放射線を防ぐのは難しい。たとえば月面では地下 2 m 以下に建設するか、地上

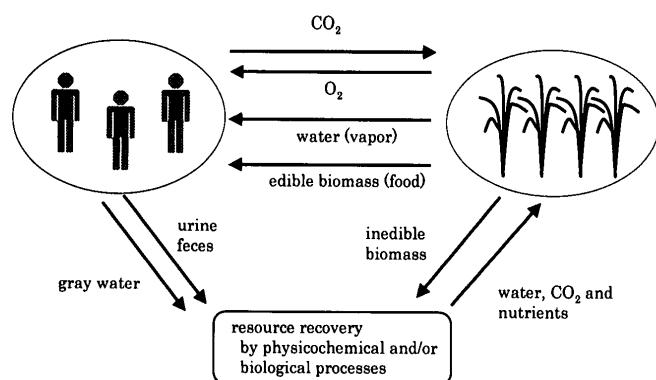


Fig. 1. Material circulations in a closed ecological life support system in space.

に建設するならば周囲を2 m以上の岩石で覆うことになる。³⁾ 植物生産にも宇宙船の居住空間の建築構造を適用することになる。

宇宙空間はほぼ真空（火星は6～9 kPa）であるため、内部圧を地球の平地並みの101 kPa（1気圧）に維持するためには、漏気のない気密性の優れた構造が要求される。もちろん全圧を1気圧にできれば問題ないが、実は植物は大気の主成分である窒素ガスを直接利用してはいない。必要なのはCO₂ガスとO₂ガスであり、この合計分圧は約21 kPaである。この2成分に水蒸気を加えた約23 kPaの全圧の空気で栽培してもよいし、不活性ガス（HeやAr）で全圧を維持してもかまわない。ガス制御の面ではむしろ低圧の方が有利な点もある。そこで筆者らは低圧下で植物を栽培する試みを行っている。⁴⁾ それによれば、0.5～0.2気圧でも、CO₂ガス、O₂ガス、水蒸気を適値に維持すれば、植物生産は可能である（Fig. 2）。

宇宙でどうやって光合成に必要な光を得るのだろうか。太陽光の明暗周期が火星では約24時間であるが、月面では約29日、地球軌道上では約90分である。いずれにしても放射線が強い、気温が生育適温でないという理由から、光合成の光エネルギーを太陽光から直接得ることは困難である。したがって太陽エネルギーを電気エネルギーに変換し、人工光源で照射する。従来から植物実験には波長組成が自然光に近いメタルハライドランプ、もしくは電気変換効率の高い高圧ナトリウムランプが使用されてきた。しかし宇宙では、限られた空間に効率よく照明するために、照明効率、均一性、安全性といった観点が重視されるため、高輝度発光ダイオード（LED）や小型高効率蛍光ランプが使われる。LEDの特長は波長域が狭いことで、赤、青、緑などの複色色のLEDチップを組み合わせると、植物に最適な波長組成の作出に加えて

波長制御により微小重力下における光形態形成反応の調節が可能になるかもしれない。そこで筆者らはLEDを用いて穀類や野菜を栽培する研究に取り組んでいる。⁵⁾

重力は宇宙において植物を育成するための最大の環境要因である。火星（0.37 g）や月面（1/6 g）では低重力が存在するので、地上で開発された養液の供給・循環の基本技術は実現可能である。しかし1 gの地上とは重力の大きさが異なるため、さまざまな問題が生じると予想されるため、ISSで実施される重力植物学研究成果を最大限に取り入れることが不可欠である。またISSなどにおいて、重力を0から1 gの間で可変できる人工重力装置を利用して火星や月面のシミュレーション実験も必要になろう。

2.2 宇宙に植物工場を 人工光型植物工場という工場をご存じだろうか。空調により温湿度、CO₂ガス濃度を制御した室内で、太陽光の代わりに人工光を用い、土壌の代わりに養液法を用いて栽培するハイクラス農業である。日本はこの分野の研究では世界のトップクラスである。この生産法は自然条件の影響を受けないため計画生産しやすい、好適環境下で生育するため成長が早く栽培期間を短縮できる、土壌の汚染や肥沃度の低下を心配する必要がないというメリットがある。また、播種・移植・収穫の機械やロボットを導入しやすいと考えられている。農業としてみると、投入エネルギーコストが高く売値が低い作物ではなかなか採算は取れない。しかし栽培技術は多くの作物、具体的には葉菜類、果菜類、穀類、イモ類、豆類などで確立されている。宇宙における作物生産施設はまさに人工光型植物工場の宇宙版になるであろう。

2.3 作物種と必要栽培面積 食糧自給に関しては、小さな人工生態系で家畜や魚を飼育するのは効率が悪いいため、食糧は基本的には食用作物から摂取することになる。ガス交換だけが目的ならば、藻を栽培するほうが効率的である。たとえば、人間1人が排出するCO₂ガスをO₂ガスに変換するには60 lの水槽で藻を栽培すれば十分と言われている。もちろん藻は食糧にもなる。しかし、多くの人は、藻ばかりを食べる食生活を好まない。それでは食糧を食用作物でまかなうとして、必要な栽培面積はどのくらいになるのだろうか。以前筆者らが行った計算⁴⁾では、イネ、ムギ、ジャガイモ、ダイズ、ラッカセイ、レタス、ホウレンソウの7作物を選ぶと、エネルギー、タンパク、脂質、主要なビタミンをバランスよく含む組み合わせが得られる（Table 1）。作物の選定と料理法はベジタリアン食が参考になる。これらの作物を人工光型

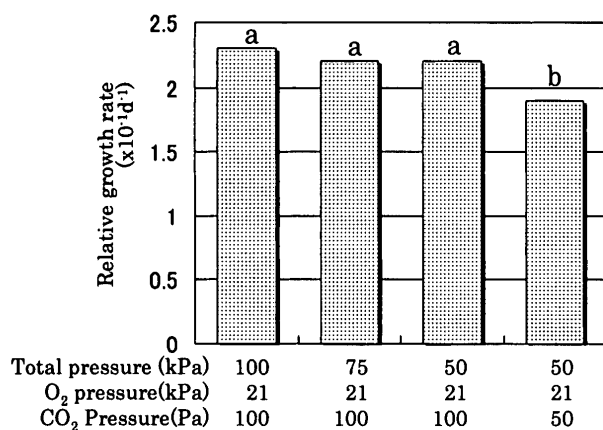


Fig. 2. Spinach growth under various total pressures. (cultivation period: 10 d)

植物工場において最も好適な栽培環境で栽培するならば、人間1人あたり、年間を通して35～55 m²の栽培面積が必要になる (Table 2)。この量の植物はCO₂とO₂のガス交換には十分である。養液栽培は多段式が可能なので、12畳の部屋で高さ4 mの空間があれば人間1人が生きていけることになる。

3. 実証実験

人間を含む CELSS の実証実験としては、1990 年代前半に行われたロシアの BIOS-3、米国アリゾナ州のバイオスフェア 2 が有名である。両者は、一定期間人間が系

内に滞在し、植物を栽培し自給自足の生活を試みる点は一致しているが、他の点では大きな違いがある。前者は宇宙応用を想定した人工的な実験系であり、食糧として必要最小限の植物種と人間から構成される系であった。後者は地球の生態系に近づけるために、土壌を利用して気象条件の異なる区を設け、多数の植物種、家畜、微生物を生息させていた。

宇宙に作る人工生態系は人間活動の支援が目的であるため、初期段階は、必要最低限の生物種だけを入れて系の維持を図ることになるであろう。現在、日本でも (財) 環境科学技術研究所 (青森県六ヶ所村) が閉鎖系実験を

Table 1. Proposed crop selection and nutrient content of the crops.

	Weight ^b (g)	Energy (kcal)	Protein (g)	Fat (g)	Calcium (mg)	Vitamin C (mg)
Target ^a		2700	85	85	600	50.0
Rice	200	702	15	6	20	0.0
Wheat	200	666	21	6	48	0.0
Potato	150	483	3	0	8	34.5
Soybean	100	417	35	19	240	0.0
Peanut	80	449	20	38	40	0.0
Lettuce	40	5	1	0	20	5.2
Spinach	40	10	1	0	22	26.0
Total	810	2732	96	69	398	65.7

^a Nutritional requirements for the daily diet of an adult crew member based on Standard Tables of Food Composition in Japan, 4th edition, 1990.

^b The value represents the stored weight for rice, wheat, potato, soybean, and peanut and the fresh weight for lettuce and spinach.

Table 2. Crop productivity and growing area used in the simulation.

Crop	Growing period ^a (d)	Yield ^b (g m ⁻²)	Productivity ^b (g m ⁻² d ⁻¹)	Requirement for a crew member	
				Weight ^b (g d ⁻¹)	Area (m ²)
Rice	100	1500	15.0	200	13.3
Wheat	80	1500	18.8	200	10.7
Potato	110	1800	16.4	150	9.2
Soybean	100	1000	10.0	100	10.0
Peanut	100	800	8.0	80	10.0
Lettuce	20	4000	200.0	40	0.2
Spinach	20	4000	200.0	40	0.2
Total					53.6

^a Days from transplant to final harvest.

^b The value represents the stored weight for rice, wheat, potato, soybean, and peanut and the fresh weight for lettuce and spinach.

計画中である。ここでは、居住施設、植物栽培施設、家畜施設と物理化学的な物質循環システムが結ばれており、各施設の物質収支を測定しながら長期間の閉鎖実験を行うことができる。2005年には人間1人、ヤギ数頭および植物を入れた実験が開始される予定である。

米国のNASAでは火星などへの長期有人飛行を想定したadvanced life support projectを展開している。ジョンソンスペースセンターが核になり、エイムズリサーチセンターとケネディスペースセンターと共同で、さらには大学などと連携して研究開発を行っている。ジョンソンスペースセンターではBIO-PlexというCELSS実証実験施設を建設中である。⁶⁾ 植物栽培、物理化学的な物質循環システム、食品加工などの技術を開発している。今後5年間で、物質循環システムの性能試験、および植物と人間を含めた長期間の実証実験を行う予定である。

お わ り に

宇宙において人間と植物を中心とする人工的な閉鎖生態系を作るためには、ここで紹介した植物研究だけでなく、物質循環とリサイクル、系内で発生・蓄積する微量有害ガスの除去、微生物の問題、閉鎖系システムの制御、

収穫物の貯蔵、食品加工、農業用ロボットの導入など多岐にわたる基礎研究が必要である。そこは農学的、生物学的な研究と工学的な研究が結びつく研究領域である。また、これらの研究を通じて生まれる技術の一部は、地上の生態系研究や環境問題の解決にも応用できるであろう。宇宙で植物を育てる研究は、植物と環境の関係を環境工学的にとらえて、一見過酷と思われる宇宙環境を積極的に制御し、最適な生育環境を創造するという研究であり、今後の発展が期待されている。

文 献

- 1) Wheeler, R.M. *et al.*: In *Handbook of Plant and Crop Physiology*, (Pessarakli, M.), p.925, Marcel Dekker, Inc. (2002).
- 2) 新田慶治, 木部勢至朗: 宇宙で生きる, p.146, オーム社 (1994).
- 3) 清水建設宇宙開発室: 月へ, ふたたび一月に職場をつくる, p.150, オーム社 (1999).
- 4) Goto, E.: In *Plant Production in Closed Ecosystems* (Goto, E. *et al.*), p.279, Kluwer Academic Publishers (1997).
- 5) Goto, E. *et al.*: *Proc. XIV CIGR World Congress 2000*, p.1779 (2000).
- 6) Villarreal, J. D. and Tri, T. O.: *SAE Paper*, 2001-01-2317 (2001).