

長期有人宇宙ミッションでの生命維持に必須の食料生産、物質循環、健康維持機能を担う植物栽培システムの構築

北宅 善昭（大阪府大），平井 宏昭（大阪府大），矢野 幸子（JAXA）

Construction of a plant culture system for producing food, recycling materials, and maintaining mental health in long-term manned space mission

Yoshiaki, Kitaya*, Hiroaki Hirai, Sachiko Yano

*Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University, Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
E-Mail: kitaya@envi.osakafu-u.ac.jp

Abstract: Plant growth and reproduction in space have recently been of greater concern as the possibility of realizing manned space flight over a long term increases. The long term human life support in space is greatly dependent on the amounts of food, atmospheric O₂ and clean water produced by plants. Therefore, the space farming with scheduling of crop production, obtaining high yields with a rapid turnover rate, converting atmospheric CO₂ to O₂ and purifying water should be established with employing suitable plant species and varieties and precisely controlling environmental variables around plants grown at a high density in a limited space. Sweet potato is a candidate food crop for crew in long term manned space missions. We are developing a sweet potato culture system for producing tuberous roots as a high-calorie food and fresh edible leaves and stems as a nutritive functional vegetable food in space farming. The biomass of edible parts in the whole plant was almost 95%. It was confirmed that sweet potato can be utilized for the vegetable crop as well as the root crop allowing a little waste and is a promising functional crop for supporting long-duration human activity in space.

Key words; CELSS, Space agriculture, Sweet potato

1. はじめに

宇宙開発において、人間が長期にわたって宇宙船、宇宙ステーション、あるいは月や火星の基地などに滞在する場合、人間の生存に不可欠な食料生産、空気や水の浄化、物質リサイクルなどを閉鎖環境下で行う閉鎖生態系生命維持システム（Controlled Ecological Life Support System、以下 CELSS（セルス））を構築する必要がある。CELSS では基本的に、人間を含む動物の呼吸により排出される CO₂ は植物の光合成で吸収・固定され、その時に発生する O₂ が動物の呼吸に利用される。また、動物の排泄物や植物の食用にならない部分は、酸化されて水と CO₂ およびその他の無機物に変換されるので、その酸化に必要な O₂ の供給および発生する CO₂ の吸収も植物の光合成に依存することになる。さらに CO やエチレンなど微量有害ガスの吸収、除去も植物が担う。また飲用水には、植物からの蒸散水を凝縮して用いる。したがって CELSS では、食料生産機能に加えて、ガス処理機能や水処理機能をもつ植物栽培システムの構築が重要課題となる。

過去のロシアやアメリカの宇宙実験では、コムギなどは開花したものの発芽能力を持つ稔性種子の形成率が著しく低下し、またカラシナでは、ほぼ地上と等しい種子数が得られたが、種子の形質や成熟過程に変異の生じたことが報告されている^{1), 2), 3)}。このように、植物種によっては、一世代の生殖過程は進行できることが示されて

いるが、種子を食料とする場合や、種子繁殖の必要性がある場合、生殖過程の異常は重要問題である。生殖成長期には、微小重力に起因する熱対流の欠如による植物葉面でのガス交換（光合成や蒸散）の抑制^{4), 5)}や生殖器官での温度上昇⁶⁾が生殖過程の異常を引き起こすこと、閉鎖環境内でのエチレン蓄積が生殖器官の生理に影響すること、また重力に依存して受粉が行われる植物種では微小重力が正常な受粉を妨げることが考えられる。一般に宇宙農場では人間の食料となる穀類や豆類の生産が重要とされており、これらを生産するためには、宇宙で開花、受精、稔実などの生殖成長を正常に行なわせなければならない。

本研究では、宇宙の閉鎖空間で、食料となる植物を生産し、さらに空気や水の浄化、物質リサイクルを可能とする栽培実験装置を開発する。この装置は精密な環境制御の下で植物を育成でき、制御環境要素の逐次モニタリング、発芽から栄養・生殖成長を含む植物生育全段階における形態形成、ガス交換、水収支などの情報を個体あるいは組織レベルで自動モニタリングできる装置の開発を目標とする。

2. 方法

供試植物種としては、食用部の生産および繁殖・再生産に生殖成長過程を必要とせず、環境ストレス耐性、栄養価、可食部比率、成長速度の高さなどの観点から、まずサツマイモを対象として、宇宙植物工場の小型モデル

となる栽培装置を開発する。宇宙植物工場では、限られた空間容積、エネルギー使用量で最大の光合成効率を得るため、葉面積密度を高め、同時に照明効率、CO₂吸収効率を高める。

以下の手順で栽培装置の研究を進めていく。

- 1) 栽培装置、環境モニタリングシステムの各要素技術を構築する。
- 2) 植物成長、生理応答の重要指標である植物体温、植物体ガス交換のモニタリング技術を確立する。
- 3) 地上において、精密な環境制御により、健全植物が高速で栽培できる装置を構築する。
- 4) イモと同時に茎葉部も野菜として食用となるサツマイモの複数品種について、成長速度、栄養価、イモ／茎葉部比率などの点から評価し、最適品種を複数選定する。
- 5) 国際宇宙ステーション(ISS)「きぼう」に装置を搭載し、食料生産を実証するとともに、宇宙環境の植物影響を細胞、個体、および個体群レベルで評価する。
- 6) 微小重力や宇宙放射線といった宇宙特有の環境の植物影響を評価するため、地上において、同型の栽培装置を用いて宇宙特有環境以外の条件を全く同一にして育てた植物と宇宙で育てた植物の比較研究を行う。
- 7) 宇宙環境において、放射線遮蔽のための水フィルターの有無により育てた植物の比較研究を行い、宇宙の微小重力下での放射線 dose-response を評価する。
- 8) ISSにおいて、クルーの精神的ストレスが植物の栽培、鑑賞、生鮮野菜の摂取などにより緩和されることを実証する。

3. これまでの検討結果

サツマイモは食用となる根部および茎葉部に栄養素がバランス良く含まれ、その可食部比率は 95%以上である。さらにビタミン A、C および E、食物繊維、タンパク質などが豊富であり、特に茎葉部には抗酸化物質を豊富に含む。また、種子繁殖ではなく、栄養繁殖で容易に増殖できる。空間容積、エネルギー使用量が限られる宇宙農場では、蔓性の茎葉部を適宜収穫して葉面積密度を適正に制御し、群落としての受光効率を高め、成長速度を高めることができる。これまでの研究結果に基づく試算では、1 人あたりの必要栽培面積は 54m² であり、例えば 3×3×3 m³ の栽培空間に 6 段の栽培棚を設置すると、1 人分の食料生産と同時に、蒸発散により 1 日約 200L の清浄水を回収できる。なお地上の一般農地での作物生産では、この 6 倍以上の耕地面積が必要である。

4. おわりに

以上のような宇宙での植物栽培技術の開発は、地上では重力の影響で覆い隠されていた植物と環境との相互影響についての本質、例えば流体である大気と植物の相互影響や重力の潜在的な生物影響を解明することに繋がり、地上での植物生産(農業生産)において、農業物理学的側面から、ガス交換(光合成や蒸

散)促進、高温障害回避、水収支改善などに結びつく新たな技術の発展に繋がるのが期待できる。

また閉鎖系植物生産の応用例として、最近注目されている植物工場栽培への展開が考えられる。例えば、明期には光合成により CO₂ を吸収し、O₂ を放出する植物と、常時 O₂ を吸収し、CO₂ を放出するキノコの栽培室を連結し、両者の成長を促進することができる⁷⁾。またキノコ菌糸の培地に植物生産システムから排出される植物残渣を用いることも可能である。さらに植物成長計測・情報解析に基づく栽培環境の自動制御化技術は、自動化植物工場への応用が期待される。さらに人工的に生態系を創成する CELSS の基本概念は、農業を取り入れた都市圏生態系へと展開でき⁸⁾、系外からの入力物質、および入力エネルギー量を最少にして、系外への環境負荷を最少とする物質循環型の社会構築に貢献できると考えられる。

参考文献

- 1) Mashinsky, A.L., Ivanova I., Derendyaeva T., Nechitailo G.S. & Salisbury F.B. From seed-to-seed experiment with wheat plants under space-flight conditions. *Adv. Space Res.* 14, 13-19 (1994).
- 2) Salisbury, F.B., Bingham G.E., Campbell W.F., Carman J.G., Bubenheim D.L., Yendler B. and Jahns G., Growing super-dwarf wheat in Svet on Mir. *Life Support and Biosphere Science*, 2, 31-39, (1995)
- 3) Musgrave, M.E., Kuang, A. Plant reproductive development during spaceflight. *Advances in Space Biology and Medicine*, 9, pp.1-23, (2003)
- 4) Kitaya, Y., Kawai M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. and M. Kiyota. The effect of gravity on surface temperature and net photosynthetic rate of plant leaves. *Adv. Space Res.* 28, 659-664, (2001)
- 5) Hirai H. and Kitaya Y.: Effects of gravity on transpiration of plant leaves, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1161, 166-172, (2009)
- 6) Kitaya, Y., Hirai, H., Thermal Situation of Plant Reproductive Organs Affected by Gravity and Light Intensity. *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 24 (4), 16-21, (2008)
- 7) Kitaya, Y., Sakami, K. and Kozai T., Development of photoautotrophic plant tissue culture system using CO₂ from shiitake mushroom. *Acta Hort.*, 393, 195-202, (1995)
- 8) 北宅善昭、生態工学ハンドブック(大政ら監修)、丸善、84-90、(2015)