

宇宙における植物の成長及び栽培への課題

保尊隆享（大阪市大・院・理）
曾我康一（大阪市大・院・理）
若林和幸（大阪市大・院・理）
神阪盛一郎（大阪市大・院・理、富山大・院・理工）

Plant Growth and Future Issues for Cultivation in Space

Takayuki Hoson, Kouichi Soga, Kazuyuki Wakabayashi, Seiichiro Kamisaka*

*, Graduate School of Science, Osaka City University, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585
E-mail: hoson@sci.osaka-cu.ac.jp

Abstract: Plant growth is entirely dependent on the gravitational acceleration on earth, and is expected to be greatly modified under microgravity conditions in space. To clarify this point, we conducted RICE, Resist Wall, Space Seed, Ferulate, Resist Tubule, and Aniso Tubule space experiments in the Space Shuttle or on the Columbus and the Kibo Modules of the International Space Station. These experiments have shown that under microgravity conditions, elongation growth of plant organs is stimulated and lateral expansion suppressed, and that the organs show automorphogenesis, consisting of altered growth direction and spontaneous curvature. The modifications of cell wall metabolism and orientation of cortical microtubules are responsible for such changes in growth and morphogenesis. The experiments also suggest that both reproductive growth and senescence are suppressed under microgravity conditions. To apply such knowledge to efficient plant cultivation in space, we need to clarify the relationship between gravity dose and the modifications of each process, and consider gravity conditions in cultivation grounds.

Key words; Automorphogenesis, Cell wall, Gravity, Growth, Microtubule, Plant, Space.

1. はじめに

植物の生活環は、周囲の環境によって強く影響される。植物体を取りまく環境要因の中で、最も安定しているのは重力である。特に陸上では、常に同じ方向から同じ大きさの重力ベクトルを受けている。植物は、そのような性質を持つ重力を最も信頼のける情報として利用して、生活環を調節している。したがって、宇宙の微小重力環境では、植物の生活環が大きく変化することが予想される。私たちは、各過程に対する微小重力の影響を明らかにするため、以下の6テーマの宇宙実験を実施してきた。

OpNom	PI	Cultivation platform
Rice	Hoson, T.	BRIC, STS-95
Resist Wall	Hoson, T.	EMCS, Columbus
Space Seed	Kamisaka, S.	CBEF, Kibo
Ferulate	Wakabayashi, K.	CBEF, Kibo
Resist Tubule	Hoson, T.	CBEF, Kibo
Aniso Tubule	Soga, K.	CBEF, Kibo

本稿では、これらの実験の結果について、栄養成長に対する影響を中心にまとめるとともに、得られた成果を、現在構想されている宇宙での効率的な植物栽培へ適用するための課題について考察する。

2. 微小重力環境における植物の栄養成長

植物は、地球上では、重力屈性によって、重力ベクトルと平行な主軸を中心とした形態を構築する。宇宙の微小重力環境では、植物本来の形作りである自発的な形態形成が見られた（Hoson 2014, 保尊ら 2020）。一般に、シュートは種子の軸から傾いた向きに成長するとともに、成長部域で背腹性に基づく自発的な屈曲を示した。一方、根は、ランダムな向きに成長した。このような特徴的な形態は、3-D クリノスタットでも観察され、暗所で生育した若い芽ばえで顕著であった。

微小重力環境では、植物器官の伸長成長が促進され、肥大成長が抑制された。伸長成長の促進は、暗所生育の芽ばえばかりでなく、明所で長期間生育したシロイヌナズナ花茎でも認められた（Hoson &

Soga 2003, Hoson 2014, 保尊ら 2020)。この結果は、遠心過重力環境下で見られた変化と正反対であった。

植物の成長を最も直接的に規定しているのは、力学的強度に優れた細胞壁である。細胞壁は、また、地球上で重力に抗して植物体を支える働きを担っているため、重力環境の違いによる成長変化には細胞壁が関わる可能性が高いと考えられる。実際、微小重力環境で生育した植物器官の細胞壁は、柔らかく伸びやすい性質を示した (Hoson 2014, Hoson & Wakabayashi 2015, 保尊ら 2020)。

植物細胞壁は、骨格に相当するセルロース繊維と、セルロース間を埋めているマトリックス、そして多糖間に架橋するフェノールや構造的タンパク質から構成される。微小重力環境で生育した植物では、細胞壁構成成分の代謝に広範な変化がおこっていた (Hoson & Wakabayashi 2015, Wakabayashi et al. 2015)。一般に、微小重力環境では、単位長さ当たりの細胞壁多糖レベル、すなわち厚みの減少が起きていた。また、マトリックス多糖類の代謝回転の促進やフェノールを介した架橋形成の抑制が認められた。さらに、マイクロアレイ及びRNAseq解析により、微小重力環境では、細胞壁代謝変化の原因となる遺伝子発現レベルの変化が起きていることがわかった。これらの様々な変化が統合され、細胞壁が柔らかく伸びやすく保たれるものと考えられる。

植物細胞の成長方向は、細胞壁中のセルロース繊維の配向によって決定されるが、その配向はさらに表層微小管によって制御されている。微小重力環境では、伸長成長の促進と肥大成長の抑制がもたらされることから、表層微小管の配向変化に関わるものと考えられる。解析の結果、微小重力環境では、細胞長軸と直角な微小管の割合が増加し、細胞長軸に平行な微小管が減少することが明らかになった (Soga et al. 2018)。また、微小管関連遺伝子群の発現低下が認められた (Hoson et al. 2014)。これらの結果から、微小重力環境では、微小管構築に関わる遺伝子の発現が低下し、細胞長軸に対して横向きから縦向きへの表層微小管の配向変化が抑制されるため、茎器官の伸長成長が長期間維持されることが示された。

一般に、細胞壁の特性や表層微小管の配向の制御には、植物ホルモンが深く関わっている。そこで、イネ芽ばえを試料として、理研の高分解能質量分析装置を用いた植物ホルモンレベルの網羅的解析を行った。その結果、宇宙の微小重力環境下でも、主要な植物ホルモンのレベルやプロファイルには大

きな変化は起こらないことが初めて明らかになった (Wakabayashi et al. 2017)。この結果は、微小重力環境下でも植物の成長を維持するメカニズムが正常に働くことを示している。

植物の生活環は、発芽、栄養成長、生殖、老化の4過程から構成される。栄養成長以外の過程に対する微小重力の影響を見ると、発芽には変化は見られなかった。一方、微小重力環境では生殖や老化過程の抑制が認められた。

3. 宇宙における植物栽培への課題

以上の微小重力実験の成果を、宇宙での効率的な植物栽培へ適用するためには、それぞれの生理過程の変化と重力の大きさの関係 (dose-response) を明らかにするとともに、栽培場所の重力環境について考慮する必要がある。Dose-response に関しては、閾値 (threshold) が存在する場合と、広範な重力範囲で重力の大きさに依存する場合とがある。形態形成に関しては、約 0.1 G に閾値があると推定されており、月面 (0.17 G) や火星表面 (0.38 G) では正常な重力屈性が起こることが予想される。一方、それらに至る飛行中は、微小重力環境となるので、自発的形態形成が見られることになる。これに対して、成長は、広範な重力範囲で重力の大きさの対数に比例して変化した (Hoson & Soga 2003)。したがって、宇宙飛行中のみならず、月面あるいは火星への定着後も、何らかの対策が求められる。なお、植物の生産性に直結する生殖や老化に対する重力の影響に関しては、dose-response が明らかになっておらず、今後の研究が必要である。

植物栽培に対する重力環境の悪影響を防ぐための対策として考えられるのは、光や水分などの重力代替因子の活用 (Hoson 1999)、重力応答に関わる変異体や遺伝子改変植物の利用、及び植物栽培システムの修正・改善などであろう。

4. まとめと展望

宇宙実験の結果、微小重力環境では植物の生活環、特に栄養成長過程が大きく変化することが明らかになった。植物は食料供給や環境維持の担い手として、人類の宇宙での長期居住に不可欠な存在である。宇宙実験で得られた成果を最大限活用し、効率的な宇宙植物栽培をめざすことが必要である。その際には、重力と他の環境要因、例えば光や放射線、との相互作用についても十分考慮することが求められる。

宇宙での植物栽培をめざすに当たって、大きな希望となり得るのは、微小重力環境で細胞壁の蓄積が抑制されること、及び植物ホルモンレベルが維持されるという結果である。地球上で、植物は、様々な力学的ストレスなどから身を守るため、過剰なレベルの細胞壁を蓄積しており、細胞壁量は芽ばえでも全乾重量の 50%、樹木に至っては 99%以上に及んでいる。植物体全体の生産量を維持したまま、細胞壁の割合を減らすことができれば、食料などに使用できる有用部分の増加が期待できる。細胞壁はまた、木材などのマテリアルとしても、宇宙での利用価値が高い。その場合は、前述の方法により、細胞壁の生産量や特性を維持すればよい。宇宙での植物細胞壁の積極的な活用が期待される。

5. 文献

- 1) Hoson, T., *Life*, **4**, 205 (2014).
- 2) 保尊隆亨他, *BSJ Review*, **11** (in press)
- 3) Hoson, T. and Soga, K., *Int. Rev. Cytol.*, **229**, 209 (2003).
- 4) Hoson, T. and Wakabayashi, K., *Phytochemistry*, **112**, 84 (2015).
- 5) Wakabayashi, K. et al., *PLoS ONE* **10**, e0137992 (2015).
- 6) Soga, K. et al., *Physiol. Plant.* **162**, 135 (2018).
- 7) Hoson, T. et al., *Plant Biol.*, **16(S1)**, 91 (2014)
- 8) Wakabayashi, K. et al., *Physiol. Plant.* **161**, 285 (2017).
- 9) Hoson, T., *Adv. Space Res.* **23**, 1971 (1999).