

宇宙における植物の生活環

唐原一郎 (富山大・院・理工), 村本雅樹 (富山大・院・理工), 篠原弘徳 (富山大・院・理工), 玉置大介 (基生研), 久米 篤 (九大・院・農学), 蒲池浩之 (富山大・院・理工), 西内 巧 (金沢大・学際科学実験センター), 矢野幸子 (JAXA), 谷垣文章 (JAXA), 嶋津 徹 (日本宇宙フォーラム), 笠原春夫 (有人宇宙システム), 曾我康一 (大阪市立大・院・理), 吉田久美 (名大・院・情報科学), 神阪盛一郎 (富山大・院・理工)

Life cycle of plants in space

Ichirou Karahara¹, Masaki Muramoto¹, Hironori Shinohara¹, Daisuke Tamaoki², Atsushi Kume³, Hiroyuki Kamachi¹, Takumi Nishiuchi⁴, Sachiko Yano⁵, Fumiaki Tanigaki⁵, Toru Shimazu⁶, Haruo Kasahara⁷, Kouichi Soga⁸, Kumi Yoshida⁹, Seiichiro Kamisaka¹

¹ Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, Gofuku, Toyama, 930-8555 Japan

²National Institute for Basic Biology, ³Kyushu University, ⁴Kanazawa University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency, ⁶Japan Space Forum, ⁷Japan Manned Space Systems Corporation, ⁸Osaka City University, ⁹Nagoya University

E-Mail: karahara@sci.u-toyama.ac.jp

Abstract: Developing a successive plant-cultivation system as a component of life support system is crucial to secure a stable food supply in a long-term space station as well as in a planetary base. It is necessary to clarify effects of altered gravity on the reproductive processes of plants to develop such a successive cultivation system in space. Effects of space environment, including microgravity, on various processes of life cycle of plants are still largely unknown. To clarify which and how physiological process in plant's life cycle is affected in space environment, we have organized a research team consisting of 7 members.

Key words; Space experiment, International space station, Life cycle, Arabidopsis, Plant, Vegetative and reproductive growth, Microgravity, Hypergravity

1. はじめに

4.7 億年前に植物は水中から陸上というニッチに進出した。その後、浮力がなくなり見かけ上増加した重力に適応するため、植物はリグニン合成能力を獲得し、体に機械的強度を与える支持組織を発達させ、樹木へと進化した。重力は植物の生活環を通じて常に影響を及ぼす。しかし全生活環の観点から見ると、植物の生理基盤に重力が与える影響について明らかになっていることは、重力屈性や抗重力反応を含めまだ一部に過ぎない。

植物の生理基盤に地球の重力がどのように関わっているかをあぶり出すことは、陸上植物の進化を語る観点から重要である。他方、人類の宇宙進出に備えるための、長期の有人宇宙活動を支える生命維持システムの一部として、食物・大気再生・建築資材などの様々な局面で植物栽培が必須である。月面・火星・宇宙船などにおける、地球とは異なる重力環境で地球の植物・作物を問題なく継代栽培していけるのかを明らかにし、宇宙環境に適した宇宙植物を開発していくことも必須の課題である。

そのために、地球と異なる重力環境が植物の生活環に与える影響を丹念に検証し、地球と異なる重力環境に植物が適応する能力を明らかにしていくこと、同時にそれに基づく宇宙基地での植物栽培システムの確立が必須である。そこで筆者らは7名のメンバーからなる宇宙環境

利用科学委員会研究班リサーチチーム(RT)「宇宙における植物の生活環」(唐原, 西内, 曾我, 久米, 吉田, 蒲池, 矢野)を立ち上げ、これらの課題解決を目指して活動している。

これまで、木部などの支持組織の発達に、重力が植物を進化させる強力な淘汰圧として働いたことは明らかだが、支持組織の発達が重力により制御されることは永らく実験的に証明されていなかった。筆者らはまず24時間程度の短期過重力実験から始め、過重力下では花茎においてリグニンおよび二次壁含量が増加し、一次木部の二次壁が強化されること¹⁾、二次壁形成関連遺伝子、オーキシシンやエチレンのシグナリングや生合成関連の遺伝子が発現変化すること²⁾、また花茎で植物ホルモンのオーキシシン動態が大きく変化することを明らかにした³⁾。過重力環境下における生殖生長時のトランスクリプトーム解析により、実際オーキシシンやジベレリンなどの植物ホルモン動態関連の遺伝子発現が影響を受けることが示された⁴⁾。これらの経緯をふまえ、本年度は、以下の項目について研究を行った。

2. 長期間の過重力環境がシロイヌナズナ花茎の組織形態に与える影響

長期間のシロイヌナズナの過重力栽培を試み、花茎に

おける組織形態に与える影響を調べた。

20-23日齢の植物体を、光を照射しながら10Gの過重力環境下で10日間生育させ、花茎の横断切片を観察した。各組織の面積・細胞数を調べた結果、過重力処理による横断面積増加は多くの組織においてみられる一方で、細胞数増加は木部および維管束形成層に限られた。以上より、過重力環境下においては、多くの組織で細胞が拡大生長することで花茎が太くなるとともに、木部においては細胞数を増やすことで花茎の機械的強度を増すことに寄与している可能性が示唆された。

3. 宇宙環境下で生育したシロイヌナズナの花茎先端部の形態学的解析

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」においてシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.) Col-0株を用いて「微小重力下における高等植物の生活環」(通称 Space Seed)が行われ、微小重力実験区(μ G区)、宇宙1G対照区、地上対照区における比較がなされた。本研究では、Space Seed 実験で得られた試料を用い、微小重力環境がシロイヌナズナの花茎先端部における内部組織形態に与える影響を調べた。

33日間栽培された花茎の先端部に近い節間を切り出した後、固定および樹脂包埋を行い、横断切片を作成した。横断切片をトルイジンブルーOで染色して観察し、花茎の横断面全体と各組織の面積・細胞数を調べた。試料数は、保存状態の良いものを除くと地上1G区では2となったため、主に μ G区と宇宙1G区の間で比較した。その結果、花茎の先端部において、花茎の横断面積および全細胞数は μ G区では宇宙1G区と比べ有意に減少した。組織別に比べると、表皮、篩部、形成層、髓の横断面積および細胞数は、 μ G区で宇宙1G区と比べ有意に減少していた。維管束間繊維は宇宙1G区において確認されなかった。木部の面積・細胞数は有意差が見られなかったが、 μ G区においては宇宙1G区よりも減少する傾向が見られた。予備的であるが花茎基部においても概ね同じ傾向が確認されており、基部において有意な変化が確認されなかった髓組織において先端部では細胞数の有意な差が見られた。これらの結果から、微小重力下においては花茎先端部は細くなり、その際に多くの組織で面積・細胞数の減少が伴うことが分かった。試料数が少ないため、今後再検証の必要はあるが、花茎先端部においては基部に比べ、重力による影響の差が大きく表れる可能性が示された。

4. 長期間の過重力環境がシロイヌナズナのシュートおよび根の発達に与える影響

地上実験として、光を当てながら長期間の過重力処理を行うための栽培装置を開発するとともに、環境条件の検討を行っており、現時点までで明らかになった結果を報告する。シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) Col-0株の種子を滅菌後、栄養塩類を含む寒天培地に播種し、

低温処理後25℃の1Gまたは10G条件下において30-40日間生育させた。その結果、10G条件下においては1G条件下のものに比べて、一次花茎の長さは減少した一方で、その乾燥重量は増加し、個体あたりのロゼット葉の総乾燥重量は有意に増加した。また10G条件下においては、根系の乾燥重量が有意に増加したため、元素吸収も増加する可能性が考えられた。そこでシュートをロゼット葉・花茎に分けて湿式灰化処理した後に、ICP発光分析装置を用いて多元素同時分析を行った結果、ロゼット葉、花茎ともに、分析したいずれの元素の吸収量においても重力条件による有意な差はみられなかった。

5. 今後の展望

本RTから2014年度国際公募のライフサイエンスおよび宇宙医学分野の国際宇宙ステーション利用実験テーマに応募した。結果は不採択であったが、問題点を検討し今後も応募する予定である。

6. 謝辞

本研究は、科研費(21570064, 21657011, 24620003)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Nakabayashi, I., Karahara, I., Tamaoki, D., Masuda, K., Wakasugi, T., Yamada, K., Soga, K., Hoson, T., Kamisaka, S. Hypergravity stimulus enhances primary xylem development and decreases mechanical properties of secondary cell walls in inflorescence stems of *Arabidopsis thaliana*. *Annals of Botany*, **97**, 1083-1090 (2006).
- 2) Tamaoki, D., Karahara, I., Nishiuchi, T., De Oliveira, S., Schreiber, L., Wakasugi, T., Yamada, K., Yamaguchi, K., Kamisaka, S. Transcriptome profiling in *Arabidopsis* inflorescence stems grown under hypergravity in terms of cell walls and plant hormones. *Adv Space Res*, **44**, 245-253 (2009).
- 3) Tamaoki, D., Karahara, I., Nishiuchi, T., Wakasugi, T., Yamada, K., Kamisaka, S. Involvement of auxin dynamics in hypergravity-induced promotion of lignin-related gene expression in *Arabidopsis* inflorescence stems. *J Exp Bot*, **62**, 5463-5469 (2011).
- 4) Tamaoki, D., Karahara, I., Nishiuchi, T., Wakasugi, T., Yamada, K., Kamisaka, S. Effects of hypergravity stimulus on the global gene expression during reproductive growth in *Arabidopsis*. *Plant Biology*, **16**, 179-186 (2014).