

宇宙における植物の生活環

唐原一郎 (富山大・院・理工), 玉置大介 (富山大・院・理工), 高橋郁佳 (富山大・院・理工), 西内 巧 (金沢大・学際科学実験センター), 久米 篤 (九大・院・農学), 蒲池浩之 (富山大・院・理工), 矢野幸子 (JAXA), 谷垣文章 (JAXA), 嶋津 徹 (JAXA), 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, Daisuke Tamaoki¹, Fumika Takahashi¹, Takumi Nishiuchi², Sachiko Yano³, Fumiaki Tanigaki³, Toru Shimazu⁴, Haruo Kasahara⁵, Hiroyuki Kamachi¹, Atsushi Kume⁶, Kouichi Soga⁷, Kumi Yoshida⁸, Seiichiro Kamisaka¹

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

²Kanazawa University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Japan Space Forum, ⁵Japan Manned Space Systems Corporation, ⁶Kyushu University, ⁷Osaka City University, ⁸Nagoya 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. Our research team called "Life cycle of plants in space" aims to clarify which and how physiological process in plant's life cycle is affected in space environment including altered gravity conditions. Here we report our activities of the present fiscal year. Transcriptome profiles in floral buds of arabidopsis *lefty/tau6* mutant were compared between space 1 G and μ G conditions. Effects of 10-G hypergravity on the morphology and chlorophyll content of rosette leaves of wildtype arabidopsis plants.

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、植物の生理機能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と推測される。

生活環を通じ、植物の生理機能が地球の重力にどのように適応しているかをあぶり出すことは、陸上植物の進化を探る観点から重要であるだけでなく、植物から未知の機能を引き出し有用植物の機能強化に結びつけることができる可能性も秘める。他方、人類の宇宙進出において、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選抜・開発していくことも必須の課題である。そしてこのことは、地球上における環境変動にも強いロバストな作物品種の作出にもつながる。

宇宙における植物栽培環境を最適化するためには、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、長期にわたる地球上での過重力環境を用いた実験、宇宙ステーションにおける宇宙環境、これらを通じた宇宙基地での植物栽培システムの確立が必須である。筆者らは宇宙環境利用専門委員会コミュニティーにおいても、「宇宙における植物の生活環」の活動を継続し、これらの課題解決を目指している。

これまで、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¹⁾。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. 微小重力環境がシロイヌナズナの花芽における

トランスクリプトームに与える影響 -*lefty* 変異体を用いた解析-

先行する Seed to Seed 宇宙実験により、軌道上実験における栽培条件管理については問題が提起されていた。我々はそれを踏まえ、国際宇宙ステーション(ISS)内において植物の生活環を全うさせる Space Seed 実験を 2009 年に行った。その結果、軌道 1 G 区および μ G 区で 63 日間生育させたシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.) Col-0 株の野生型植物体において、宇宙環境で形成された果実の長さが地球上対照区と比べて短くなる傾向が見られ、宇宙環境において果実形成が影響を受けることが示唆された²⁾。宇宙環境において果実形成が影響を受けた原因についての手掛かりを得るためには、トランスクリプトーム解析が有効である。Space Seed 実験において、軌道上で RNAlater 処理された野生型の花芽試料を解析することはできなかったが、Columbia をバックグラウンドに持つ *lefty/ tua6* 変異体の花芽は得られた。この変異体は、宇宙環境下で正常に成長し、野生型と同様に μ G 下で花茎の生長促進が反応見られることも示されている³⁾。そこでこれを用いてトランスクリプトーム解析を行い、花芽における遺伝子発現に微小重力および宇宙環境が与える影響を調べた。

宇宙 1 G 区、 μ G 区、および地上 1 G 区(富山)で 33 日間栽培し軌道上で RNAlater 処理された *lefty/ tua6* 変異体の植物体より、花芽を切り出し RNA 抽出を行った。1 回の RNA 抽出に 3-5 個の花芽を用いた。マイクロアレイ解析は Agilent Arabidopsis 2 Oligo Microarray (44K; Agilent Technologies)を用いて行った。マイクロアレイ解析はそれぞれ 2 回の独立した実験を行った。

まず μ G 下および 宇宙 1 G 下で形成された花芽におけるトランスクリプトームを比較したところ、 μ G 下で発現が 2 倍以上増加または、1/2 倍以下に減少した遺伝子の数はそれぞれ 100 程度であった。増加したのものには、光応答の遺伝子群が、減少したのものには防御応答に関連する遺伝子群が比較的多く含まれていた。

宇宙 1 G 下および地上 1 G 下で形成された花芽におけるトランスクリプトームを比較したところ、発現が 2 倍以上増加または、1/2 倍以下に減少した遺伝子の数はそれぞれ 1000 前後であった。増加したのものには栄養状態や飢餓応答に関する遺伝子群が、減少したのものには高温・光および酸化ストレス応答に関する遺伝子群に加え、花粉形成に関わる遺伝子群やオーキシン応答関連の遺伝子群が含まれていた。宇宙環境において花粉形成に関する遺伝子の発現が影響を受けたことが、果実形成が影響を受けたことの一因になっている可能性が推測された。

3. 10 G の過重力環境がシロイヌナズナにおけるロゼット葉の形態及びクロロフィル蓄積に与える影響

重力は地球上で常に植物体に作用しており、植物の形

態形成における様々な面に関与していると推測されるが、具体的に示されることはまだ少ない。本研究では、10 G の過重力環境下で白色光を照射しながらシロイヌナズナ Col-0 株を 30 日間生育させ、ロゼット葉の外部形態、色彩及びクロロフィル含有量に与える影響を調べた。10 G 環境下で生育した場合、ロゼット葉の個々の面積と縦幅、個体あたりの乾燥重量は有意に増加した。デジタル画像を用いて個々のロゼット葉の色を平均化し、その色相、彩度、明度の値を調べたところ、10 G 環境下において色相については緑色が薄くなる方向に有意に低下し、彩度は有意に減少し、明度は有意に増加した。N,N-ジメチルホルムアミド中でロゼット葉からクロロフィルを抽出し、葉の単位生重量あたりのクロロフィル含有量を調べた。その結果、1 G 環境下に対して 10 G 環境下ではクロロフィル a とクロロフィル b の双方において有意な減少が見られた。以上より、過重力環境下では植物体における物質生産が促進される一方、葉の老化が早められる可能性が示唆された。

4. 今後の展望

今後も引き続き、テーマを発展させながら「きぼう」利用フィジビリティスタディ等に応募していく予定である。

5. 謝辞

本研究は、科研費(24620003, 15K11914)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 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).
- 2) Karahara I, Suto T, Yashiro U, Yamaguchi T, Tamaoki D, Yano S, Tanigaki F, Shimazu T, Kasahara H, Kasahara H, Soga K, Hoson T, Kamisaka S Life cycle of *Arabidopsis thaliana* under microgravity condition in the International Space Station Kibo module. In *Proceedings of the 39th COSPAR Scientific Assembly* pp. 9165, Mysore, India (2012).
- 3) Hoson, T., Soga, K., Kazuyuki, W., Takahashi, H., Karahara, I., Yano, S., Tanigaki, F., Shimazu, T., Kasahara, H., Masuda, D., Kamisaka, S. Growth stimulation in inflorescences of an *Arabidopsis tubulin* mutant under microgravity conditions in space. *Plant Biology*, **16**, 91-96 (2014).