

植物における宇宙での微小重力と模擬太陽光の複合影響研究

日出間 純（東北大・院・生命科学），高橋 昭久（群馬大・重粒子線医学研究センター），稲富裕光（JAXA）

Combined effects of microgravity and simulated solar UV radiation on plant in space

Jun Hidema*, Yoshiaki Kitaya, Akihisa Takahashi, Hiromitsu Inatomi

*Graduate School of Life Sciences, Tohoku Univ., Sendai, Miyagi 980-8577

E-Mail: j-hidema@ige.tohoku.ac.jp

Abstract: In order to establish sustainable life support systems for securing the long term human life with plant functions in space, we develop the fundamental research device that can be utilized for culturing healthy plants for several generations and for elucidating physiological and ecological influences of space environment on plants. However, space environment is not only microgravity but also higher energy radiation, including UV and space radiation, condition. It is necessary to understand gravitational and space radiation including UV radiation effects on plant at molecular, cellular and individual levels through the space experiments or grand experiments using 3D clinostat etc. Such experiments clarify direct and/or indirect gravity effects on vegetative and reproductive growth and new evidences of antigravity reactions, and possibly find not only novel biological knowledge such as molecular mechanisms in gravity reactions, but also novel growth control in crop production on earth. In addition, experiments with including space specific radiation environment will elucidate combined influences of low gravity and high level visible, ultraviolet and space radiations on plant growth and regeneration in a whole growth stage. Establishment of environment control technologies to avoid the negative influences of space environment on plants is important for constructing sustainable life support systems with plants and expected for allowing long-duration human activities on Moon and Mars and human life in space colonies.

Key words: Space experiment, International space station, …

1. はじめに

これまで、植物科学分野における宇宙実験は、主として2つに大別できる。1つは、短期栽培による微小重力環境を利用した重力屈性、水分屈性機構に関する基礎研究(PI:高橋秀幸)、また微小重力環境における植物の姿勢制御に関する基礎研究(PI:保尊隆享、西谷和彦、若林和幸、辰巳仁史、曾我康一、上田純一: <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/scientific/>)である。これらの研究では、地上では重力の影響で覆い隠されていた植物の潜在的な機構である“重力と植物ホルモン、オーキシンの役割”に関して、宇宙実験をすることによって極めて重要な科学的知見が得られた。2つ目は、神阪(PI)らにより実施された長期植物栽培実験による微小重力環境下における植物の生活環境に関する研究(<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/spaceseed/>)であり、世界に先駆けて、宇宙での1Gと μ Gでの植物の生活環境を完結させることに成功した。そして、微小重力環境下では植物の重力屈性が失われ、異常な形態形成を示すこと、開花し種子はつけるものの発芽能力を持つ稔性種子の形成率が低下することが報告された。また、他グループによる同様の宇宙実

験では、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おいて変異が生じたことなどが報告された¹⁻³⁾。しかしながら、特に種子形成に関しては、この現象が宇宙環境に特有な現象であるのか否かに関しては、未だ実証されていない。今日、人類は宇宙という環境へと活動の場を広げつつある。人類の宇宙における長期活動には、全ての生命の源ともいえる植物(作物)の宇宙環境における安定かつ効率的な光合成機能を発揮できる植物育成技術の基盤研究が必要不可欠であるとともに、急務な課題である。しかし、宇宙は地球とは異なり、微小重力環境に加え、高強度の紫外線・放射線という特殊な環境である。宇宙紫外線・放射線環境は、動物のみならず全ての生物に変異誘発、オルガネラ障害、細胞死誘発といった様々な障害の誘発頻度を上昇させる可能性が地上実験の結果から想定されている。しかしながら、これまでの研究では、動物を対象に精力的に実施されている“重力ストレス”という観点からの分子、細胞、生理学的解析、さらには、宇宙環境で重力環境と同様に重視すべき環境である高強度の紫外線・放射線環境、そして高強度の紫外線・放射線と微小重力の複合環境が植物の生育に及ぼす

影響という、植物を対象とした研究は国内外を通して実施されていない。重力ストレス、微小重力環境下における高強度の紫外線・放射線による障害、そしてその修復に関する基礎データの蓄積は急務な課題と言える。

これまでに我々は、非電離放射線である太陽有害紫外線(UVB: 280-320 nm)による植物の障害、ならびにその修復・耐性機構に関する一連の解析を、分子、細胞、個体レベルで解析を行ってきた。これまでに、紫外線 UVB による植物の生育障害は、線量の高低によって異なるが、主には①紫外線による直接的なDNA損傷(ピリミジン二量体の生成)^{4,6)}、および②活性酸素誘発によるオルガネラ障害に起因することを示してきた^{7,9)}。そしてこれらの障害に対する修復機構として、DNA修復酵素(CPD光回復酵素)、また障害オルガネラ除去に関わるオートファジー機能の重要性を報告してきた^{5, 8)}。そこで本研究では、これまでの研究成果を基盤に、宇宙環境での植物育成技術基盤を確立することを最終目標に、植物における微小重力環境が高強度の紫外線・放射線障害に及ぼす影響をISSにおいて研究を実施するために必要な、デバイスであるUVB-LED装着型の植物培養器を開発することを目的に開発を実施した。本項では、開発したデバイスを紹介する。

2. UVB-LED 装着植物培養器の開発

これまでに見出した疑似微小重力が植物の紫外線障害とその修復機能に及ぼす影響を、宇宙環境で検証することが、本研究の目標である。しかし、既存のISSに搭載されている機器では、本研究成果を検証することはできない。そこで、宇宙実験を実施するための装置として、既存のPEUに搭載可能な植物培養器に装着するUVB-LED装着植物培養器を作製し、本装置の機能を検証する。本装置の設計は、千代田化工建設と共同で考案した(Fig. 1)。本装置では、単三乾電池2本を使用して、3時間、UVB-LEDを20 W/m²の強度で照射することが可能である。単三乾電池は、現在6か月分の給水バックの設置場所がPEUにあるが、その給水バックの容積を減らして、その空いた空間に設置することを想定している。また、UVB-LEDは、5 cm角容器の上方隅に設置することで、栽培されている植物への照射強度はグラデーションがかかり、異なる照射強度での照射が可能なUVB-LED光源装着植物培養器となっている。

Fig. 2には、Fig. 1のイメージ図をベースに、株式会社AESと共同で作製したUVB-LED植物培養器の外観、および内部の構造を示した。容器は基本、これまでに神坂らによりISSで実施された実験(Space Seeds)で使用されたPEUに搭載可能な植物

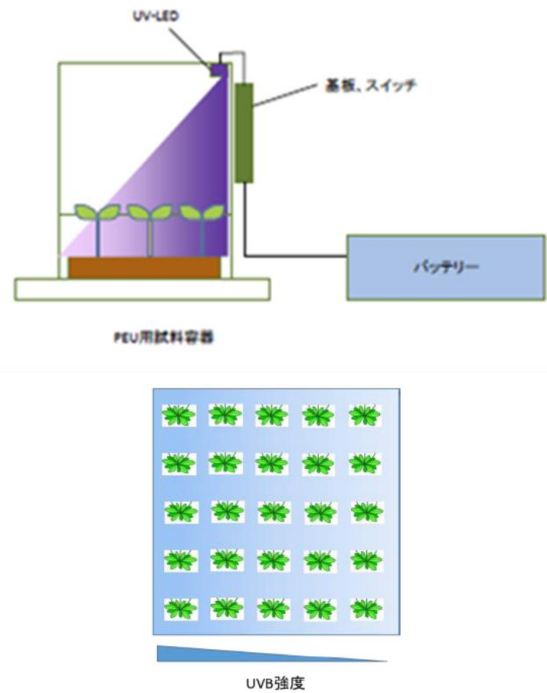


Fig.1 ISS内のPEUに搭載可能な、UVB-LED装着植物培養器の概略(上段)、UVB強度の分布のイメージ

栽培容器をベースに作製した(Fig. 2)。

本装置の作製において、改良のポイントは2点であった。まず第一点目は、UVB-LED光源の選択である。近年、LED光源の開発の進歩は著しく、様々な

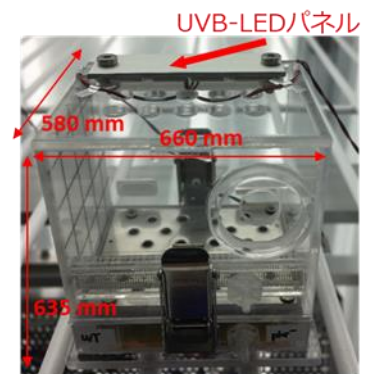


Fig. 2. 作製したUVB-LED装着植物培養器外観

UVB域にピーク波長を示し、かつ特徴を有するUVB-LEDが販売されている。そこで、種々のUVB-LEDを購入し、特徴を調べた結果、低電流から高電流の広い領域でも安定して照射が可能で、かつ高照度でのUVB光が照射可能であった、DOWAエレクトロニクス(株)製のピーク波長280 nmのDF8DU-0GD01を選択し、費用することにした。次に、第二のポイントはUVB-LEDを点灯することより、光源から放射される熱により、容器内の温度が上昇する可能性である。実際に、容器内部の上面にUVB-LED光源を2つ設置し、点灯したところ、わずか、点灯30分以内に、内部の温度は外気温18℃に対して33℃まで上昇した。そこで、容器内の温度

上昇を避けるために、容器の上部、側面に通気口を作り、容器外部と内部で空気の循環効率を上げた。また、容器上面の端に LED 光源が外側から入る穴をあけ、LED パネルを外側から設置した (Fig. 3A 参照)。この方法により熱が発生する LED 光源の根本 (基部) が容器外部に出て、基部からの熱が容器内に入ることを出来る限り妨げた。UVB 点灯時の様子は、Fig. 3B に示した。これらの改良により、内部の温度は、外部の温度とほぼ同一に保たれ、UVB-LED 光源の点灯による、容器内部の温度上昇を防ぐことに成功した。なお、内部の植物栽培場所の床面、面積、サイズなどは、変更していない。Fig. 3C には、UVB-LED 設置位置の真下で、 5 W/m^2 となるように電流を設定した際の容器床面における UVB 強度の分布を示した。なお、UVB 強度は、スペクトルラジオメーター (USR-45DA, Ushio Inc.) を用いて測定した。また、本培養器は、電流コントロールボックスを通して通電できるようにし、広い範囲での UVB 強度で照射実験ができるようにした。

3. 今後の展開

現在、開発した UVB-LED 装着植物培養器を用いて、シロイヌナズナ、ゼニゴケのモデル植物を培養し、UVB がシロイヌナズナ、ゼニゴケ等に分子、細胞、個体レベルでの変化に及ぼす影響に関して解析しており、これまでに得られた研究の再現性を得る UVB

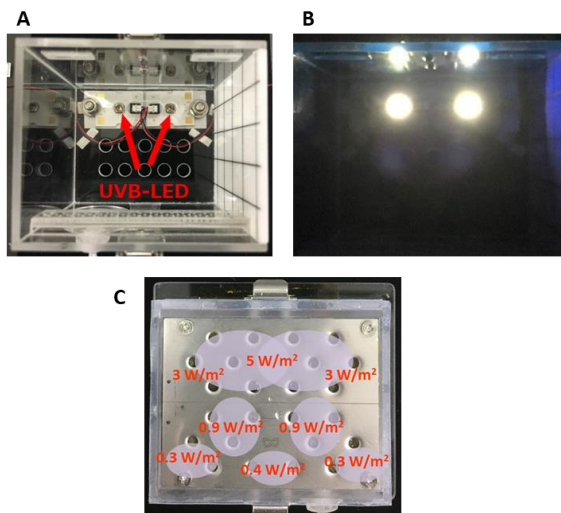


Fig. 3. 作製した UVB-LED 装着植物培養器内に設置した UVB-LED 光源の様子と床面における UVB 強度の分布

照射条件を検討している。また本装置は、3D クリノスタットにも搭載可能で、本培養器を使用して疑似微小重力が UVB による障害に及ぼす影響も解析できるように改良した。今後は、宇宙実験を視野に入れて、本装置を用いて「植物における宇宙微小重力と高紫外線の複合環境影響に関する研究」の、地上コントロールとしてのデータを積み上げる必要がある。

参考文献

- 1) Mashinsky, A., Ivanova, I., Derendyaeva, T.A., Nechitailo, G. and Salisbury, F. '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., Hole, P., Gillespie, L.S., Sychev, V.N., Berkovitch, Yu., Podolsky, I.G. and Levinskikh, M. Growing super-dwarf wheat on the Russian space station Mir. *ASGSB Bulletin* 9, 63. (1995).
- 3) Musgrave M.E. and Kuang A. Plant reproductive development during spaceflight. *Adv. Space Biol. Med.* 9: 1-23. (2003).
- 4) Hidema J, Kumagai T, and Sutherland BM. UV-sensitive Norin 1 rice contains defective cyclobutane pyrimidine dimer photolyase. *Plant Cell* 12: 1569-1578. (2000).
- 5) Hidema J, Taguchi T, Ono T, Teranishi M, Yamamoto T, and Kumagai T. Increase in CPD photolyase activity functions effectively for preventing ultraviolet-B-caused growth inhibition in rice plant. *Plant J.* 50: 70-79. (2007).
- 6) Takahashi S, Teranishi M, Izumi M, Takahashi M, Takahashi F, Hidema J. Transport of rice cyclobutane pyrimidine dimer (CPD) photolyase into mitochondria relies on a targeting sequence located in its C-terminal internal region. *Plant J.* 79: 951-963. (2007)
- 7) Takahashi M, Teranishi M, Ishida H, Kawasaki J, Takeuchi A, Yamaya T, Watanabe M, Makino A, and Hidema J. CPD photolyase repairs ultraviolet-B-induced CPDs in all DNA-containing organelles in rice. *Plant J.* 66: 433-442. (2011).
- 8) Izumi M, Ishida H, Nakamura S and Hidema J. Entire photodamaged chloroplasts are transported to the central vacuole by autophagy. *Plant Cell*, 29: 377-394. (2017).
- 9) Nakamura S, Hidema J, Sakamoto W, Ishida H, Izumi M. Selective elimination of membrane-damaged chloroplasts via Microautophagy. *Plant Physiology* 177: 1007-1026. (2018).