

宇宙環境に対する植物反応解析のための模擬太陽光人工光源ユニットの開発

日出間 純 (東北大・院・生命科学), 北宅 善昭 (大阪府大・院・生命環境科学), 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 variable gravity and simulated solar UV light 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 mainly 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. Space experiments with healthy plants in a whole growth stage 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 including flower, fruit and seed formation. 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 radiation, UV radiation, microgravity, plant, space plant science

1. はじめに

地球上の全ての生物は、1G 環境に適応して進化し、紫外線～赤外線を含む太陽光の恩恵にあずかり、生命を維持することが出来ている。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。人類が宇宙での長期活動を可能にするためには、全ての生物の生命の源ともいえる酸素供給(CO₂ 同化)、食料生産、さらには空気や水の浄化機能は必須であり、植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基盤研究は必要不可欠でかつ急務な課題である。しかし、地球とは異なり、微小重力、高放射線環境という特殊な宇宙環境で植物を栽培するためには、まず「1G 環境に適応・進化してきた現在の陸上植物が、はたして重力のない、または異なる(1/6G、1/3G など)宇宙環境で正常に生きることが出来るのか？」を明らかにすることが必須である。これまでに日本(SPACE SEED 研究代表: 神坂盛一郎)、ロシア、アメリカの研究グループが ISS を利用した長期植物栽培実験を実施し、多くの有益かつ興味深い知見を提供してきた。しかしながら、宇宙環境での植物ライフサイクルを理解するには、さらなる宇宙実験を含めた研究の継続が必要である。また、今日の科学技術の進展は目覚ましく、10 年前では困難とされたいた実験が今では ISS においても可能な時代になった。

今後、宇宙生命科学研究領域、そして宇宙植物科学研究領域において最も優先すべき課題は、これまで短

期間の宇宙生命科学研究により見出された様々な貴重な宇宙環境での植物ライフサイクルの可能性を実証することである。そのためには、ISS 内で長期間健全な植物を育成可能な栽培装置・環境を提供することが不可欠である。

2. 太陽光を模擬した人工光源ユニットの開発

これまで ISS 内での植物栽培研究では、低照度の白色光や青・赤色を用いた可視光の光源ユニットを使用してきた。植物が行う光合成は主に青・赤色光を利用して行うため、これらを含む白色光光源でも植物を栽培することは可能である。事実、植物工場などでは青と赤の LED のみを利用して栽培している。

しかし、青と赤色のみの光で生産までを可能とするいわゆる“正常”な植物を栽培ができるのは葉物を中心とした植物のみであり、全ての植物には応用できない。その主な要因としては、生育する環境において発芽から開花、種子形成までの過程でより最適な光合成や正常な光形態形成などを行うために、可視光のみならず、遠赤色光、さらには紫外光の量を感じて種々の遺伝子発現を制御し(光シグナル伝達)、茎の太さ、草丈、葉のサイズ・厚さ、屈性といった形態形成、発芽・開花制御、オルガネラの細胞内位置などを決めていくからである。また、近年の研究から、人間にとって有益な植物体内機能性有機物などは、紫外線を感じて誘導・生成されるものが多

いことも分かってきている。さらには、赤色光センサーであるフィトクロムや、紫外線 UVB を感知するセンサーである UVR8 (UVB 光受容体) は、単に光形態形成や UVB 防御のための物質の発現誘導に関わるだけでなく、高温ストレスなどの環境ストレスによる形態異常を抑制するためのセンサーとしても機能していることが報告されている。このように、植物は単に光合成をするためだけに太陽光を利用しているのではなく、地上に降り注がれる光の紫外域から遠赤色域に至る各波長の光量を環境情報として感知し、最適な光合成、正常な光形態形成を行えるように遺伝子発現を制御して、生命活動を営んでいる。そこで、「真の宇宙環境での植物ライフサイクル」を理解するためには、可視光のみの光源ではなく、植物が生きるために利用している紫外域 (約 280 nm) から遠赤色光域 (780 nm 程度) の光を含む、太陽光を模擬した光源ユニットを用いた研究が必要不可欠である。また単に太陽光スペクトルを模擬するだけでなく、従来 ISS に搭載されている光源ユニットから照射される光強度は低く、栽培できる植物種が制限される。そこで、太陽光スペクトルを模擬するだけでなく、従来の光強度の 3 倍以上 ($1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) が照射可能な光源ユニットを作製する必要がある。このような紫外～遠赤色光を含む太陽光模擬人口光源の開発は、本宇宙実験のみならず、植物工場などでの植物育成装置への応用や植物科学研究分野の発展にも大きく寄与することが十分に期待されるが、現時点では開発例がない。そこで現在我々は、従来の植物培養の光源ユニットよりも光強度を高め、かつ光の波長域 (紫外光、可視光、遠赤色光) の調光が可能な太陽光模擬光源ユニットの開発を実施している。本項では、現在千代田化工建設株式会社と共同で開発した太陽光模擬光源ユニットに関して紹介する。

本太陽光模擬光源ユニット (Fig. 1) は、太陽光模擬白色 LED、365 nm UVA-LED、300 nm UVB-LED、280 nm UVB-LED の 4 種の LED から構成され、照射



Fig. 1 太陽光模擬光源ユニット
縦横 10 cm 四方の中に、4 種の LED 光源を埋め込み、照射面での各種 LED から放射される光は均一になるように設計されている

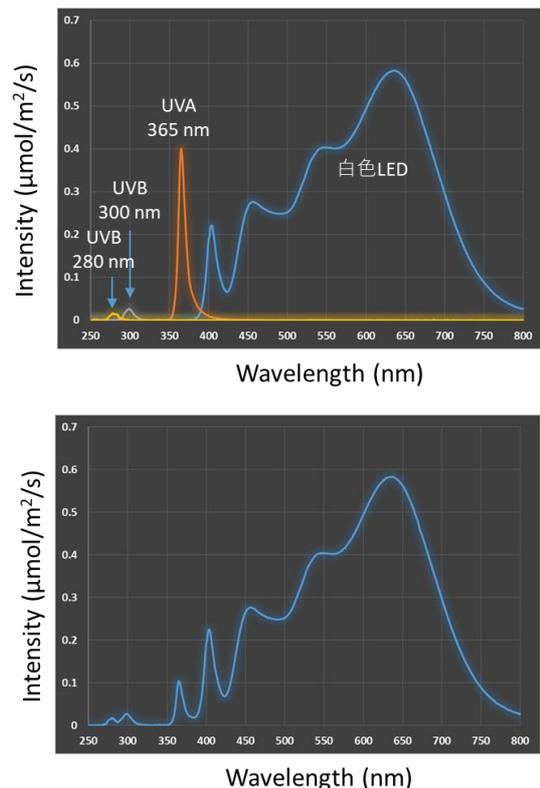


Fig. 2 太陽光模擬光源ユニットに使用されている 4 種の LED 光源の特性
(上段) 太陽光模擬白色 LED、365 nm UVA-LED、300 nm UVB-LED、280 nm UVB-LED の波長特性
(下段) 4 種の LED 光源を同時に照射した際の波長分布の一例

面積は光源から 15 cm の距離で、 100 cm^2 を想定して作製されている。各 LED の強度は最大で、白色 LED で $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、300 nm、および 280 nm UVB-LED 光源は、 $2 \text{ W}/\text{m}^2$ 、365 nm UVA-LED 光源は $20 \text{ W}/\text{m}^2$ 照射可能である。Fig. 2 には、使用した 4 種の LED のスペクトル特性 (Fig. 2 上段)、ならびに 4 種の LED を同時に照射した際のスペクトル分布の一例を示した (Fig. 2 下段)。なお、各 LED 強度は独立に制御が可能で各波長での植物影響を解析することが可能である。

次に、模擬微小重力環境が植物の紫外線影響を解析するために、作製した本太陽光模擬光源ユニットを 3D クリノスタットに搭載し、本光源ユニットから光を照射しながら、植物栽培が可能な装置を作製した (Fig. 3)。現在、これまでに我々が 1G 環境下で見出した UVB 抵抗性に関わる因子である、CPD 光回復酵素といった DNA 修復酵素、オートファジーに関わる因子を欠損、あるいは過剰に発現させた植物を材料に模擬微小重力環境が、植物の UVB 抵抗性に及ぼす影響解析を実施している。さらには今後、変異誘発が可視化できる組換え体植物、細胞内のオ

ルガネラの動態が可視化できる組換え体植物を本装置に搭載し、長期間栽培することで、微小重力環境が植物の紫外線影響に及ぼす影響を解析することで、微小重力+紫外線の複合環境が植物の生育に及ぼす影響を分子、細胞、個体レベルで解析していきたいと考えている。



Fig. 3 太陽光模擬光源ユニット搭載3Dクリノスタット
光源ユニットから光を照射しながら、植物栽培が可能である。