

# 船外実験プラットフォーム（曝露部）実験施設利用を視野に入れた、太陽放射光の植物影響研究

日出間 純（東北大），中村 咲耶（東北大），泉 正範（東北大），寺西 美佳（東北大），  
高橋 昭久（群馬大）

## Research of biological effect on plants by solar radiation, UVB and high intensity of visible radiation

Jun Hidema\*, Sakuya Nakamura, Masanori Izumi, Mika Teranishi, Akihisa Takahashi

\*Grad. Sch. Life Sci., Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577

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

Abstract: The environment in space which is exposed to solar radiation (space radiation and solar ultraviolet [UV] radiation) is greatly different from the environment on Earth, and this has large effects on the survival of living organisms. However, the solar radiation environment in space cannot be recreated on Earth. The Exposed Facility (EF) of Kibo on the International Space Station has attracted much attention as (1) a laboratory for the space and solar radiation environment that is encountered during extravehicular activities. Since it provides an environment where sunlight is not blocked by the ozone layer, it has also attracted attention as (2) a laboratory for modeling the primordial Earth light environment before the ozone layer formed, (3) a laboratory for modeling the future Earth light environment after destruction of the ozone layer, and there has been great anticipation of advanced analysis in research into the biological effects of solar radiation by using the EF. Extravehicular exposure experiments have previously been conducted using dried biological specimens as samples. However, experiments in space that expose active organisms are essential for investigating the biological effects of solar radiation.

Not only UVB radiation but also high intensity of visible radiation can damage growth and development of plants. We previously demonstrated that CPD photolyase, which is one of UVB-induced DNA damage repair enzyme, is a crucial factor for determining the sensitivity of rice (*Oryza sativa*) to UVB radiation, and increasing CPD photolyase activity can significantly alleviate UVB-caused growth inhibition in rice plants. Thus, CPD photolyase is an essential protein for plants grown in sunlight, including UVB radiation. Recently, we revealed that vacuolar transport of entire chloroplasts, termed chlorophagy, was activated by the exposure of high visible light (HL) or UVB in *Arabidopsis*, and abnormal chloroplasts induced by HL-damage, which exhibits swollen shape, are selectively eliminated via chlorophagy process. Therefore, chlorophagy is essential for the removal of photo-damaged chloroplasts induced by HL or UVB exposure. In addition, we found that autophagy defective *atg* mutants show hypersensitivity to UVB radiation. These results suggest that the functions of not only UVB-induced DNA damage repair but also autophagy are essential for plants grown in space environment. We hope that plant space/solar radiation research will be performed using the EF.

*Key words*; Solar radiation, UVB, high intensity of visible radiation, DNA repair, autophagy, plant, Exposed facility

### 1. はじめに

オゾン層の減少は予測できても、地上での人工光源を用いて実験をする限り、地球のオゾン層破壊後またはオゾ

ン層形成前の異なった線質・線量の複合の放射線環境による生物影響について確かめることができない。このジレンマについて、我々は、オゾン層で太陽光が遮られる

ことのない宇宙空間こそが、原始地球上生命の誕生と進化の舞台となった「オゾン層形成前の原始地球光環境」、さらに、近年危惧されている「オゾン層破壊後の未来地球光環境」のモデル実験場と考え、宇宙ステーション「きぼう」の曝露部を利用することで解決することができると考える。

また、近い将来、人類は宇宙に進出し、長期滞在、船外活動の機会は必ず増えるであろう。人類が安全に宇宙に進出し活動するためには、地上では再現できない、複合放射線(生物学的効果の高い重粒子線も含めて、線種・線質も異なる放射線)による細胞内分子レベルでの影響過程の解明し、真の放射線のリスクを統合的に正しく評価して、放射線障害から免れる防護方法の開発は必須かつ緊要である。

国際宇宙ステーション「きぼう」船外実験プラットフォームは①船外活動時の宇宙放射線環境の実験場として注目されている。また、オゾン層で太陽光が遮られない環境であるため、②オゾン層形成前の原始地球光環境のモデル実験場、③オゾン層破壊後の未来地球光環境のモデル実験場としても注目されており、曝露部利用による太陽放射光生物影響研究の高度化解析が大いに期待されている。船外曝露実験は、これまでも乾燥した生物試料を材料に実施されている。しかし、太陽放射光の生物影響を調査するためには、活動状態の生物に曝露する宇宙実験が必要不可欠である。そこで我々は、日本主導のもと、世界初の生命維持制御を可能にした船外曝露照射装置を開発し、本装置を利用して、活動状態を維持した微生物、昆虫、小型植物等や、化学物質への曝露実験、高精度解析を実施するプロジェクトを提案している。

## 2. 紫外線 UVB が植物の生育に及ぼす影響、ならびに耐性機構

これまでに我々は、「高等植物の UVB 耐性機構」に関してイネを主たる材料に一連の研究を行い、①圃場での紫外線野外環境試験では、UVB 量の増加はイネの減収や玄米の小粒化のみならず、玄米タンパク質組成まで影響を及ぼす 1)(Hidema et al. J. Radiation Res. 2005)、②イネの UVB 感受性は品種間で大きく異なる 2,3)(Hidema et al. Plant Physiol. 1997, Teranishi et al. Plant Cell Physiol. 2004)、③この品種間の UVB 感受性差異は、CPD 光回復酵素遺伝子の自然突然変異(1 または 2 つのアミノ酸)による酵素活性の違い起因していること 4,5)(Hidema et al. Plant Cell 2000, Plant J. 2005)、さらに④ UVB によるイネの生育障害の主要因は CPD であり、CPD 光回復酵素の活性を増加させることで、イネは UVB 抵抗性を獲得できること 6)(Hidema et al. Plant J. 2007) などを実証してきた(図 1)。

またさらに、双子葉モデル植物であるシロイヌナズナ、基部陸上植物であるゼニゴケなども材料に、UVB が

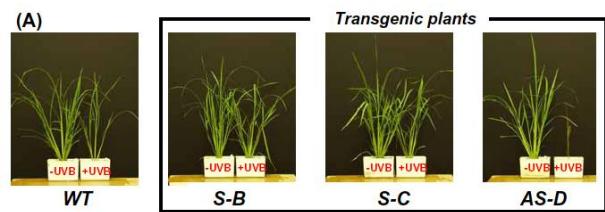


図 1. CPD 光回復酵素活性を増加(S-B, S-C)、または抑制した(AS-D)形質転換体イネを UVB 付加条件下で 30 日間生育させた後の植物体の写真(A)と地上部新鮮重の変化。親株(WT)と比較して AS-D 系統は著しい生育阻害を受けるが、活性を増加させた S-B と S-C 系統は明らかに分けつ数が増加し、生育が軽減された。

種々の植物生育に及ぼす影響を調査した結果、イネ同様に、UVB 量の増加は、シロイヌナズナ、ゼニゴケの生育を阻害した。しかし、生育障害の程度は植物種により大きく異なり、イネ、シロイヌナズナ、ゼニゴケの中では、ゼニゴケが最も UVB に抵抗性を示し、シロイヌナズナが感受性を示した。一方、シロイヌナズナ、ゼニゴケに各々の遺伝子にコードされている CPD 光回復酵素の遺伝子を過剰発現させ、CPD 光回復酵素の活性を増加させた組換え体植物は、どれも野生型と比較して、UVB による生育障害は軽減された。したがって、UVB が増加した環境において、UVB によって誘発される CPD 光回復酵素は UVB による生育障害の主要因であり、CPD 光回復酵素の活性を増加させることで、植物は UVB 抵抗性を獲得できる。

## 3. 太陽放射光による障害葉緑体を分解するオートファジー

葉緑体は、光合成により植物の成長に必要なエネルギーを生産するが、同時に過剰な太陽放射光エネルギーによる障害と、それに起因する光合成機能の低下に常にさらされている。宇宙空間での植物栽培では、より重度の光障害が発生することも想定される。光障害で壊れた葉緑体を適切に除去することは、光合成機能を維持する上で重要であると考えられる。我々は、細胞内分解系であるオートファジーを紹介して葉緑体が丸ごと液胞へ輸送される「クロロファジー」が、光障害時(UVB、強光処理時)に活性化することを見出した。そこで、その機能と誘導様式に関する新たな知見を得るため、強光照射後の葉緑体の形態とクロロファジーの発生頻度、細胞内動態の経時観察を行った。まず、シロイヌナズナ野生系統に強光処理(2,000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )を行うと、膨らんだ形態を示す異常な葉緑体が多数生じることが見出された。処理 1 日後にはクロロファジーが誘導され、異常葉緑体の数は著しく減少した。オートファジー機能欠損変異体では、クロロファジーは誘導されず、異常葉緑体の減少は抑制された。よって、強光障害

により形態異常を示す葉緑体が生じ、それらがクロロファジーによって選択的に除去されるという、新たな現象を見出した。さらに我々は、オートファジー欠損シロイヌナズナ変異体 (*atg5*, *atg7*) の UVB に対する感受性を調べたところ、 $1.5 \text{ W m}^{-2}$ 、2 時間の照射により、野生型シロイヌナズナと比較して、明らかな UVB 感受性を示した。また、この感受性の程度は、CPD 光回復酵素シロイヌナズナ欠損体 (*uvr2-1*) とほぼ同程度であった。以上の結果から、オートファジーの機能は、CPD 光回復酵素による UVB 誘発 DNA 損傷を修復する機能と同様に、UVB 存在下、さらには強光条件下においても、光障害を克服し、耐性を獲得する上で、大変重要であることが分かった。

今後は、このような機能が、微小重力下でも同様に機能するのか？またどの程度の UVB、また強光条件に対して、光障害に対する耐性獲得に有効であるのか？すなわち線量率効果曲線を測定することで、宇宙空間における植物生育影響を調査する必要があるであろう。

#### 参考文献

- 1) Hidema J, Zhang W-H, Yamamoto M, Sato T and Kumagai T. Changes in grain size and grain storage protein of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated UV-B radiation under outdoor conditions. *Journal of Radiation Research*. 46: 143-149 (2005).
- 2) Hidema J, Kumagai T, Sutherland JC and Sutherland BM. Ultraviolet B-sensitive rice cultivar different in cyclobutyl pyrimidine dimer repair. *Plant Physiology* 113: 39-44 (1997).
- 3) Teranishi M, Iwamatsu Y, Hidema J and Kumagai T. Ultraviolet-B sensitivities in Japanese lowland rice cultivars: cyclobutane pyrimidine dimer photolyase activities and gene mutation. *Plant & Cell Physiology* 45: 1848-1856 (2004).
- 4) Hidema J, Kumagai T and Sutherland BM. UV-sensitive Norin 1 rice contains defective cyclobutane pyrimidine dimer photolyase. *The Plant Cell* 12: 1569-1578 (2000).
- 5) Hidema J, Teranishi M, Iwamatsu Y, Hirouchi T, Ueda T, Sato T, Burr B, Sutherland BM, Yamamoto K and Kumagai T. Spontaneously occurring mutations in the cyclobutane pyrimidine dimer photolyase gene cause different sensitivities to ultraviolet-B in rice. *The Plant Journal* 43: 57-67 (2005).
- 6) Hidema J, Taguchi T, Ono T, Teranishi M, Yamamoto K and Kumagai T. Increase in CPD

photolyase activity functions effectively for preventing ultraviolet-B-caused growth inhibition in rice plant. *The Plant Journal* 50: 70-79 (2007).