

# 国際宇宙ステーションを利用した微小重力環境下での太陽放射線植物影響に関する研究

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）

## Study of effects of solar radiation on plant under microgravity condition at ISS platform

*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: Ultraviolet (UV) radiation including sunlight induces to DNA damage such as the formation of pyrimidine dimers, as UV radiation has high energy. Such DNA damage, when unrepaired, can contribute to mutagenesis. Therefore, UV radiation has been a ubiquitous influence on the cause of biological evolution on Earth. As a results, now, many kinds of living organisms containing human beings are flourishing on the ground. Today, astronauts are able to stay for a long term (0.5–1 year) on the International Space Station (ISS). There are future manned missions planned to explore or inhabit the Moon and Mars. To accomplish this task, however, numerous issues due to unique space environment need to be worked out. In particular, it is necessary to understand gravitational and space radiation effects on organisms at molecular, cellular and individual levels. In addition, it is necessary to understand not only the transient, short-term (one generation) effects but also long-term (next, next-next generation, evolutionary rate) effects on organisms under space environment. In this symposium, we present recent studies of effects of UVB radiation on plant under microgravity condition using 3D clinostat.

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

### 1. はじめに

太陽から降り注がれる紫外線 (ultraviolet radiation: UV) は、生物が有する DNA に様々な傷 (損傷) を誘発する。全ての生物は、このような DNA 損傷を修復する機構を有しているが、修復できなかった DNA 損傷は変異誘発のみならず細胞死も誘導する。したがって、今日地球上に存在する生物の多様性、そして進化は、UV によって誘発された DNA 損傷による変異が原因と考えられている。今日、人類は宇宙という微小重力かつ特殊な宇宙放射線環境へと活動の場を広げつつある。しかしながら、宇宙環境は、言うまでもなく、地上と比較して低波長でよりエネルギーの高い UV のみならず、様々な宇宙放射線が降り注ぐため、地上以上により重篤な DNA 損傷が誘発され、変異誘発も加速されることが容易に推察される。したがって、人類が宇宙での長期活動、さらには長期居住を可能にするためには、微小重力環境、宇宙放射線環境、そしてそれらの複合作用が生物 (動植物) に及ぼす影響を分子、細胞、個体レベルで的確に把握する必要がある。

### 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。

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。

UVB 照射された葉内の細胞、オルガネラの動態を経時的に観察したところ、①UVB 照射により障害を受けたと考えられる葉緑体(葉緑体が膨張し、形態が変化)が、選択的に液胞内に輸送されている、②ミトコンドリアの断片化がみられ、その後細胞死が誘導されるなどの現象を見出した。これら一連の現象から、我々は UVB 障害応答に、細胞内分解系の 1 つで、タンパク質・オルガネラをリソソームや液胞に輸送して除去する、オートファジーが関与しているのではないかと考え、シロイヌナズナのオートファジー欠損変異体(*atg5*, *atg7*)を用いて更なる解析を行った。その結果、*atg5*, *atg7* 変異体では、障害葉緑体の液胞への輸送が確認できないこと、ミトコンドリアの断片化が野生株と比較して進行すること、そして、オートファジー欠損変異体は、CPD 光回復酵素を欠損した変異体(*phr*)と同様に著しい UVB 感受性を示し、PHR とオートファジーを共に欠損させた二重変異体(*phr x atg5*)は更なる UVB 感受性を示すことを見出した 7) (図 1: Izumi et al. *Plant Cell*, 2017, in press)。さらに、太陽光の下で栽培したシロイヌナズナの細胞内の様子を観察すると、液胞内に変形した葉緑体が運ばれていることが確認できる。このことは、現在の太陽光の下で生きる植物においても、紫外線を含む太陽光によって障害を受けた葉緑体がオートファジーによって除去されていると考えられる。いずれにしてもこれらの結果は、植物における UVB 抵抗性には DNA 損傷(CPD)の修復に加え、オートファジー機能が重要な役割を演じていることを示している。

### 4. 3D クリノスタットを利用した疑似微小重力下における紫外線影響

これまでに得られてきた研究結果を基に、特に UVB によって誘発される CPD を修復する CPD 光回復酵素による修復、およびオートファジーにおける UVB 障害オルガネラの除去に着目し、微小重力下での UVB 感受性評価を 3D クリノスタットを利用して解析している。

これらの結果に関しては、次年度の成果報告会で報告したいと考えている。



図 2. 3D クリノスタットを利用した疑似微小重力環境下における紫外線影響評価試験

### 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).

- 7) Izumi M, Ishida H, Nakamura S and Hidema J. Autophagy for degradation of photodamaged chloroplasts. *Plant Cell* (2017) in press.