

## 宇宙環境に対する植物反応解明のための実験系構築—植物生殖器官の温度の実態およびその制御

北宅善昭 高橋秀幸 山下 雅道 後藤英司 齋藤高弘 谷晃 土屋広司  
多胡靖宏 田山一郎 神阪盛一郎 保尊隆享 東谷篤志 高沖宗夫 矢野  
幸子 鎌田源司

Establishment of the Experimental System for Clarifying Plant Responses to Space Environment – Thermal Situation and Control in plant reproductive organs

*Yoshiaki Kitaya, Hideyuki Takahashi, Masamichi Yamashita, Eiji Goto, Takahiro Saito, Akira Tani, Hiroshi Tsuchiya, Yasuhiro Tako, Ichiro Tayama, Seiichiro Kamisaka, Takayuki Hoson, Atsushi Higashitani, Muneo Takaoki, Sachiko Yano*

E-Mail: kitaya@envi.osakafu-u.ac.jp

**Abstract:** Fundamental studies have been initiated to develop the experimental system to investigate the effects of space environment on vegetative and reproductive growth of plants in their life cycles. In this study, thermal situation of plant reproductive organs as affected by illumination and air movement was accessed on the earth. Thermal images of reproductive organs of rice and strawberry were captured using infrared thermography at air temperatures of 10-11°C. Temperatures of petals, stigmata and anthers of strawberry increased by 24, 22 and 14°C, respectively, after lighting at an irradiance of 40 W m<sup>-2</sup> under incandescent lamps. Temperatures of reproductive organs and leaves of strawberry were significantly higher than those of rice. The temperatures in petals, stigmata, anthers and leaves of strawberry decreased by 12.8, 11.9, 13.1 and 14.1°C, respectively, when the air velocity increased from 0.1 to 1.0 m s<sup>-1</sup>. Air movement was essential to reduce the temperatures of plant reproductive organs in closed plant growth facilities.

*Key words;* Plant reproductive organs, Rice, Space experiment, Strawberry

### はじめに

宇宙環境が数世代にわたる植物の生活環と遺伝的変異に及ぼす影響の解明は、宇宙生物科学に資する重要な情報を得ると同時に、長期の有人宇宙活動を支援するための、植物を中心とした生命維持システムや宇宙農場の構築 (Yamashita et al., 2006) に不可欠な生物科学的情報を得るために重要である。そこで長期間にわたる宇宙での植物実験を科学的に遂行するための実験系を構築することを目指して、ワーキンググループを組織した。

ワーキンググループの主な目的は、以下の2項目を開発および確立することである。

(1) 宇宙環境が植物の生活環を通じた栄養成長過程に及ぼす影響を解明する宇宙実験のために、精密な環境制御の下で植物を育成し、全生育ステージにおけるガス交換、乾物生産、形態形成などを個体・組

織のレベルでモニタリングする植物栽培・モニタリング装置を開発する。

(2) 宇宙環境が植物の生殖成長と遺伝的変異に及ぼす影響を解明する宇宙実験のために、環境ストレスが誘導する生殖成長不全の分子マーカーなどを用いて、植物の生殖成長過程を遺伝子発現のレベルでモニタリングする実験系を確立する。

ここでは、環境ストレスに敏感な生殖器官に注目し、植物の生殖に対する宇宙環境の影響を明らかにするための実験に用いる植物栽培装置を開発するための基礎知見を得るために、植物の生殖器官の温度に及ぼす放射および気流環境の影響について地上実験で検討した。

### 材料および方法

実験は、風洞型グローブチャンバー内で行った (図 1)。赤外線サーモグラフィ

(TH9100、NEC 三栄(株))を用いて、図2に示すイネ (*Oryza sativa* subsp. *japonica*)とイチゴ(*Fragaria*×*Ananassa* Duchesne)の穎、花弁、オシベの葯、メシベの柱頭および葉の熱画像を取得した。植物は温室内において、2-3 カ月間ポット栽培したものを供試した。

照明の光源には、白熱灯(RPF-150W、松下電器(株))を用いた。光源は植物生殖器官の上方 0.3 mに設置した。植物体周辺の気温は10-11°C、相対湿度は70-73%、放射照射量は約 40 W m<sup>-2</sup>であった。おもな実験での気流速度は0.1 m s<sup>-1</sup>とし、植物器官の温度に及ぼす気流速度の影響を調べる実験では、風洞のファンの回転数を変化させることによって、気流速度を変化させた。気流速度の測定には、風速計(6071、日本カノマックス(株))を用いた。

### 結果および考察

光照射下におけるイチゴの花弁、オシベの葯、メシベの柱頭および葉の表面温度は、気温より高くなった(図4)。光照射開始から4分後のイチゴのオシベ葯およびメシベ柱頭の温度は花弁の温度より低かった。光源に直面している花弁の温度が、最大となった。

照明が無い場合のイチゴの花弁、メシベ柱頭、オシベ葯および葉の表面温度は、気温より0.5°C低くなった(図5)。白熱灯下、放射照射量 40 W m<sup>-2</sup> (光合成有効光子束密度 200 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>に相当)において、照射開始から4分後に各器官の温度は最高となった。とくに花弁の温度上昇が著しく、メシベ柱頭、オシベ葯の順に温度は低くなった。光照射開始後のイチゴの花弁、メシベ柱頭およびオシベ葯の温度上昇の時定数は28、73、および72秒であった。閉鎖型チャンバー内の光照射下で行う植物実験において、生殖器官の温度は光照射後に急速に上昇し、植物の生殖システムが異常を引き起こす高温まで容易に達することに留意する必要がある。

図6は、イチゴおよびイネの生殖器官および葉の温度に及ぼす気流速度の影響を示す。イチゴの生殖器官および葉の温度は、イネのそれらより高くなった。気流速度の増加に伴って、各器官の温度は低下した。気流速度が0.1 m s<sup>-1</sup>から1.0 m s<sup>-1</sup>に

増加すると、イチゴの花弁、メシベ柱頭、オシベの葯および葉の温度は、それぞれ12.8、11.9、13.1、および14.1°C低下し、イネの穎、メシベ柱頭、オシベの葯および葉の温度は、それぞれ4.6、4.8、4.9、および9.3°C低下した。

気流調節は、とくに高密度の植物が栽培されている閉鎖型チャンバー内において、植物と周辺空気の間でのガス交換を促進して、植物の成長を促進するために重要である(Kitaya et al., 2000)。本研究の結果、生殖器官および葉の過剰な温度上昇を防ぐためには、気流調節が不可欠であることが確認された。

これまでの宇宙実験では、コムギやシロイヌナズナの稔性種子の形成率が著しく低いことが確認されている(Merkies and Laurinavichyus, 1983; Mashinsky et al., 1994; Salisbury et al., 1995)。微小重力下で熱対流が生じない場合の植物葉温の上昇が報告されている(Kitaya et al., 2001, 2003, 2006)。したがって微小重力下での閉鎖型チャンバー内の光照射下における植物生殖器官の温度上昇は、さらに顕著になると予想される。このことは、微小重力下の宇宙実験において、生殖器官の温度上昇が、不稔などの生殖異常を引き起こす可能性を示唆している。

以上のことから、宇宙植物実験用の植物育成装置内において、植物生殖器官の温度上昇を防止するためには、植物周辺において強制的に空気を流動させ、植物体表面での熱・ガス交換を促進させる必要がある。そのためには、植物育成装置内の気流環境を制御できる技術の確立が不可欠である。

謝辞：本研究の一部は、JAXA および JSF による「宇宙環境利用に関する公募地上研究」の一環で行われた。

### 引用文献

- Kitaya, Y., Kawai M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. and M. Kiyota. The effect of gravity on surface temperature and net photosynthetic rate of plant leaves. *Adv. Space Res.* **28**, 659-664, 2001.
- Kitaya, Y., Kawai M., Tsuruyama, J.,

- Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. and M. Kiyota. The effects of gravity on surface temperatures of plant leaves. *Plant Cell Environ.* **26**: 497-503, 2003.
- Kitaya, Y., Kawai M., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T., Shibuya, T. and Kiyota, M. Heat and gas exchanges between plants and atmosphere under microgravity conditions. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **1077**, 244-255, 2006.
- Kitaya, Y., Tsuruyama J., Kawai M., Shibuya T. and Kiyota M. Effects of air current on transpiration and net photosynthetic rates of plants in a closed plant production system. In: *Transplant Production in the 21<sup>st</sup> Century* (eds C. Kubota & C. Chun), pp. 83-90. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.
- Mashinsky, A.L., Ivanova I., Derendyaeva T., Nechitailo G.S. & Salisbury F.B. From seed-to-seed experiment with wheat plants under space-flight conditions. *Adv. Space Res.* **14**, 13-19, 1994.
- Merkies, A.I. and Laurinavichyus R.S. Complete cycle of individual development of *Arabidopsis Thaliana* Haynh plants at Salyut orbital station. *Doklady AN SSSR* **271**, 509-512, 1983.
- Salisbury, F.B., Bingham G.E., Campbell W.F., Carman J.G., Bubenheim D.L., Yendler B. and Jahns G. Growing super-dwarf wheat in Svet on Mir. *Life Support and Biosphere Science*, **2**, 31-39, 1955.
- Yamashita, M., Ishikawa, Y., Kitaya, Y., Goto, E., Arai, M., Hashimoto, H., Tomita-Yokotani, K., Hirafuji, M., Omori, K., Shiraishi, A., Tani, A., Toki, K., Yokota, H. and Fujita, O. An Overview of challenges in modeling heat and mass transfer for living on Mars. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **1077**, 232-243, 2006.

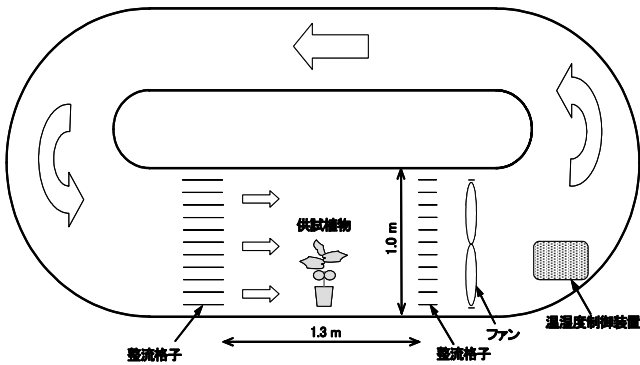


図1. 実験に用いた風洞型チャンバーの概要

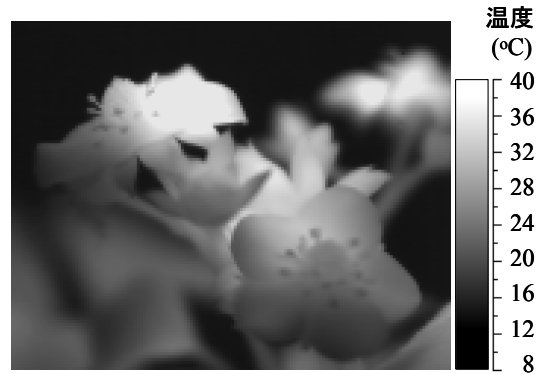


図4. 光照射4分後のイチゴ各器官の表面温度  
光源: 白熱灯、放射照射量:  $40 \text{ W m}^{-2}$ 、気温:  $11^\circ\text{C}$ 、  
相対湿度: 73%、気流速度:  $0.1 \text{ m s}^{-1}$

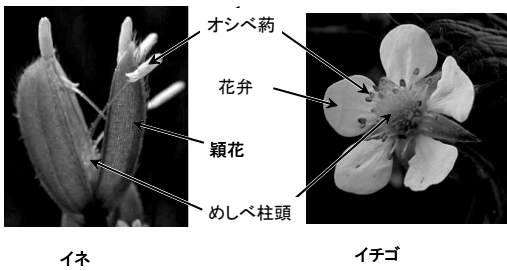


図2. 実験に用いたイネおよびイチゴの生殖器官

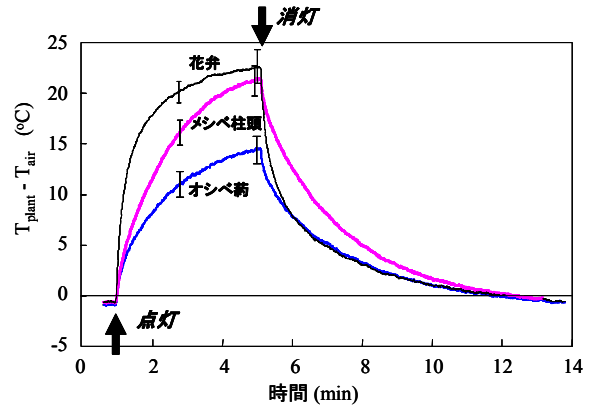


図5. 点灯後および消灯後のイチゴ各器官の表面温度 ( $T_{\text{plant}}$ ) と気温 ( $T_{\text{air}}$ ) との差の推移  
光源: 白熱灯、放射照射量:  $40 \text{ W m}^{-2}$ 、気温:  $11^\circ\text{C}$ 、  
相対湿度: 73%、気流速度:  $0.1 \text{ m s}^{-1}$

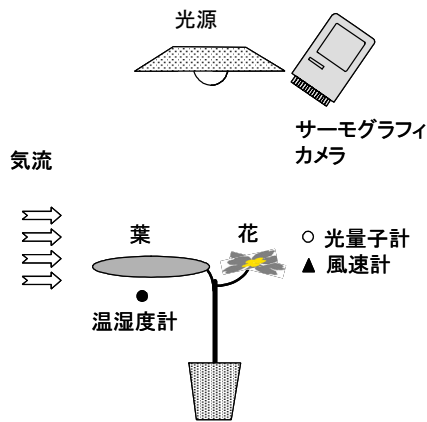


図3. 植物の各器官の熱画像を取得するための実験システムの概要

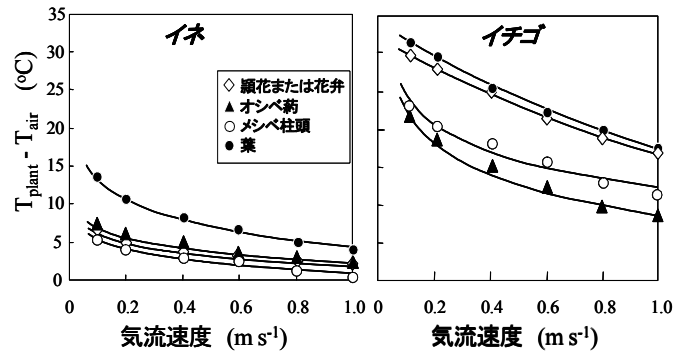


図6. 点灯後および消灯後のイネおよびイチゴ各器官の表面温度 ( $T_{\text{plant}}$ ) と気温 ( $T_{\text{air}}$ ) との差の推移  
光源: 白熱灯、放射照射量:  $40 \text{ W m}^{-2}$ 、気温:  $10^\circ\text{C}$ 、相対湿度: 75%