

## 宇宙植物実験における栽培・実験システムの開発

北宅善昭（大阪府大）、東谷篤志（東北大）、唐原一郎（富山大）、高橋秀幸（東北大）、  
保尊隆享（大阪市大）、平井宏昭（大阪府大）、矢野幸子（JAXA）

### Development of the Experimental Plant Culture System for Clarifying Plant Responses to Space Environment

Yoshiaki Kitaya\*, Atsushi Higashitani, Ichiro Karahara, Hideyuki Takahashi,  
Takayuki Hoson, Hiroaki Hirai, Sachiko Yano

\* Osaka Prefecture University, Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531  
E-Mail: kitaya@envi.osakafu-u.ac.jp

Abstract: A fundamental study was conducted to develop the experimental system to investigate effects of space environment on vegetative and reproductive growth of plants in their life cycles over a long term. A closed plant culture facility in space has been designed. The plant must be grown under the precise environmental control system with monitoring environmental elements and physiological and morphological parameters of growing plants.

Key words: Environmental control, Microgravity, Plant culture system, Plant experiment in space

#### 1. はじめに

数世代にわたる植物の生活環と遺伝的変異に及ぼす宇宙環境の影響解明は、宇宙生物学に資する情報であると同時に、植物を中心とした生命維持システムや宇宙農場システムの構築に不可欠な生物学的情報として重要である。宇宙環境が植物の成長に及ぼす影響を植物の生活環を通して解明する実験を科学的に遂行するためには、長期間にわたる成長過程を健全に進行させる必要がある。そのためには、精密な環境管理の下で植物を育成し、全生育ステージにおけるガス・熱交換、乾物生産、形態形成などを個体あるいは組織レベルでモニタリングできる植物栽培・モニタリング装置が必要となる。ここでは、装置開発にあたっての環境制御や植物情報モニタリングの留意点について概説する。

#### 2. 環境モニタリング・制御

宇宙植物実験を科学的に成功裏に遂行するためには、精密な環境制御の下で植物を育成することが重要であり、以下の環境要素のモニタリング・制御は不可欠である。

**光環境：** 一般に植物は、呼吸により  $\text{CO}_2$  を放出し、照射下では光合成により  $\text{CO}_2$  を吸収する。光合成による  $\text{CO}_2$  吸収速度（総光合成速度）から呼吸による  $\text{CO}_2$  放出速度（呼吸速度）を差し引いた値、すなわち正味の  $\text{CO}_2$  吸収速度を純光合成速度と呼ぶ。純光合成速度は、成長速度と正の相関を持ち、光飽和点まで光強度の増加に伴い上昇する。制御可能な光環境要素として、光強度、光質および日長が挙げられる。いずれも成長に大きく影響する

が、光強度は主に植物の光合成および形態に影響し、光質は主に植物の形態に影響し、日長は主に休眠および花芽形成に影響する。

**温・湿度環境：** 植物体内での生化学反応や植物の生理機能活性に直接的に影響するのは、植物体温であり、一般に純光合成速度が最大となる葉温は、 $20\sim 30^\circ\text{C}$ の範囲にある。葉温は、葉で吸収される放射エネルギーの増加により上昇し、葉から外気へ輸送される顕熱エネルギーおよび潜熱エネルギーの増加により低下するので、これらのエネルギー収支に關与す環境要素（光強度、気温、湿度、気流速度など）の制御は重要である。

相対湿度と純光合成速度の關係は他の環境条件（光強度や気流速度など）によって変化するが、一般に相対湿度  $75\sim 85\%$ で純光合成速度は最大となる。相対湿度が  $90\%$ になると純光合成速度は低下するが、これは高相対湿度（低水蒸気飽差）下では、蒸散による水損失が抑制されるが、根圧は維持されたままであるため、葉内水分が過剰となり、その圧力で気孔開度が小さくなることが原因と考えられている。低相対湿度（高水蒸気飽差）下で一時的に蒸散が促進され、根の吸水速度が蒸散速度に追いつかなくなると、その後植物は水ストレスを受け、気孔が閉鎖され、光合成が抑制される。

**$\text{CO}_2$ 環境：** 一般に  $\text{CO}_2$  濃度の上昇により純光合成速度は増加するが、 $\text{CO}_2$  飽和点を超えると純光合成速度は増加しなくなる。植物の光合成に対する  $\text{CO}_2$  濃度の影響は、光強度や温度など、他の環境要素により大きく異なる。 $\text{CO}_2$  飽和点は、光強度の増加に伴い上昇する。 $\text{CO}_2$  補償点（純光合成速度がゼ

口となる時の CO<sub>2</sub> 濃度) は、光強度の増加に伴い低下する。CO<sub>2</sub> 濃度の上昇に伴い、純光合成速度に対する葉温の影響は著しくなり、純光合成速度を最大にする葉温は、高温側に移行する。低 CO<sub>2</sub> 濃度下では、葉温を高めて光合成反応に関与する酵素の活性を高めても、光合成の材料である CO<sub>2</sub> の量が制限因子となるので、純光合成速度増加に対する葉温上昇の効果は小さい。

**気流環境：** CO<sub>2</sub>、水蒸気などのガス状物質は、それら濃度の高い所から低い所に向かって拡散する。すなわち、CO<sub>2</sub> は大気から葉に（光合成）、水蒸気は葉から大気に（蒸散）に向かって拡散する。気流方向に平行に平板を置くと、平板上の気流速度は平板表面に近づくにつれて低下し、平板表面では気流速度 0 m s<sup>-1</sup> に近づく。表面付近において気流速度の低下する領域を一般に表面境界層と呼び、植物葉については葉面境界層と呼ぶ。葉面境界層は、大気と葉面の間での CO<sub>2</sub> や水蒸気の拡散に対して比較的大きな抵抗として働く。この層は気流速度の低下に伴い厚くなり、ガスの拡散に対する抵抗値は増大する。従って、純光合成・蒸散速度を高めて生育を促進するためには、風速を高めて群落内外のガス交換を促進すると同時に、葉面境界層を薄くして、植物葉と周辺大気とのガス交換を促進することが重要である。

**根圏水・ガス環境：** 根圏培地の含水率が低下すると、根の吸水速度が低下し、植物は水ストレスを受け、気孔が閉鎖して、光合成は抑制される。培地含水率が過剰になると培地の通気性が低下する。それに伴い根圏の O<sub>2</sub> 濃度が 10% 以下になると、純光合成速度の低下が著しくなる。培地通気性の低下により CO<sub>2</sub> 濃度が 1~2% に上昇する場合も、根の吸水が抑制され、植物体が水ストレスを受け、純光合成速度は低下する。

**宇宙特有の環境要素：** 宇宙で健全な植物を育成できる環境調節技術を確立するためには、地上での制御対象として重要な上述の環境要素に加えて、微小重力や低圧環境など宇宙特有の環境要素の影響や制御についても検討しなければならない。特に微小重力は、植物生理学的な直接影響に加えて、光合成、蒸散などのガス交換抑制を介して、光合成・蒸散抑制や、生殖器官の温度上昇による不稔など生殖成長の異常を引き起こすと考えられる。これらの成長抑制や生殖異常を防ぐためには、適正な気流環境制御が不可欠である。また地球上では、どのような植物栽培法でも給水システムには重力による水の落下現象が利用されている。しかし、微小重力あるいは小重力環境では、水の落下が制限されるため、植物根への給水には、圧力勾配あるいは毛管力を利用した給水制御が必要となる。

### 3. 植物モニタリング

上述の環境制御・モニタリングに加えて、植物の全生育ステージにおける栄養・生殖成長、形態形成、ガス交換などの情報を個体・組織のレベルで自動モニタリングできるシステムも必要となる。

そこで植物成長の指標として葉のガス・熱交換に着目し、そのモニタリング・制御について検討した。植物を健全に育成するためには、植物の水分状態のモニタリングと、適正な水収支の制御が重要である。一般に植物は、吸水抑制や過剰水分損失などで水ストレスを受けると、気孔閉鎖による蒸散速度低下により葉温が上昇する。蒸散速度低下は潜熱輸送速度低下を意味するので、葉の熱収支の変化から、気孔開度の変化を知ることができる。そこで葉の熱収支に基づいて、植物生葉および湿潤・乾燥模擬葉の表面温度から植物生葉の気孔開度を連続モニタリングできる手法について検討した。

植物生葉およびその近傍に置いた湿潤模擬葉、乾燥模擬葉の各表面温度は、葉の熱収支式 (1) を用いて、(2)~(4) 式で表される。

$$R - H - \lambda E = R - c_p g_{Ha} (T_L - T_a) - \lambda g_{vL} (e_s(T_L) - e_a) / p_a = 0 \quad (1)$$

$$T_L = T_a + \frac{R - \lambda g_{vL} \frac{e_s(T_L) - e_a}{p_a}}{c_p g_{Ha}} \quad (2)$$

$$T_W = T_a + \frac{R - \lambda g_{vW} \frac{e_s(T_W) - e_a}{p_a}}{c_p g_{Ha}} \quad (3)$$

$$T_D = T_a + \frac{R}{c_p g_{Ha}} \quad (4)$$

(2)~(4) 式より導かれる (5) 式の水蒸気コンダクタンスの比を RSC (Relative stomatal conductance) は、0 から 1 の範囲で変動し、値が大きいほど気孔開度は大きく、蒸散速度および純光合成速度は高い。

$$\frac{g_{vL}}{g_{vW}} = \frac{T_D - T_L}{T_D - T_W} \times \frac{e_s(T_W) - e_a}{e_s(T_L) - e_a} = RSC \quad (5)$$

E	水蒸気フラックス (mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
H	顕熱フラックス密度 (W m <sup>-2</sup> )
R	正味の吸収放射フラックス密度 (W m <sup>-2</sup> )
T <sub>a</sub>	気温 (°C)
T <sub>D</sub>	乾燥模擬葉の温度 (°C)
T <sub>L</sub>	生葉の温度 (°C)
T <sub>W</sub>	湿潤模擬葉の温度 (°C)
T <sub>x</sub>	露点 (°C)
c <sub>p</sub>	空気の定圧比熱 (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
e <sub>a</sub>	大気の水蒸気圧 (kPa)
e <sub>s</sub> (T)	温度Tにおける飽和水蒸気圧 (kPa)
g <sub>Ha</sub>	熱の境界層コンダクタンス (mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
g <sub>vL</sub>	生葉の水蒸気コンダクタンス (mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
g <sub>vW</sub>	湿潤模擬葉の水蒸気コンダクタンス (mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
p <sub>a</sub>	大気圧 (kPa)
λ	水の蒸発潜熱 (J mol <sup>-1</sup> )