

植物成長の重力影響実験において考慮すべき栽培環境について

久米 篤（九大・院・農），蒲池浩之（富山大・院・理工），唐原一郎（富山大・院・理工），半場祐子（京工繊大・院），藤田知道（北大・院・理）

Some considerations on the plant growth environment for variable gravity experiments.

Atsushi Kume¹, Hiroyuki Kamachi², Ichirou Karahara², Yuko T Hanba³, Tomomichi Fujita⁴

¹Faculty of Agriculture, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka, 812-8591 Japan

²University of Toyama, ³Kyoto Inst Tech, ⁴Hokkaido University

E-Mail: akume@agr.kyushu-u.ac.jp

Abstract: For a long term plant cultivation experiments, dynamic maintenance of gas-exchange process accompanying photosynthesis is one of the important matters in plant cultivation within a closed-chamber system. The transport of gaseous molecules into and out of the leaf is largely driven by buoyancy, and both the force of gravity and the amount of supplied energy are main determinants. The height and volume of plant tissue culture vessels may affect the internal gas circulation. The infrared components of the light source may affect the generation of convection within the vessels. During hyper-gravity treatment induced by centrifugation, the surface conductance of the vessels tends to increase and this may cause the increase in the gas concentration in the vessels. Gravity also affects gravitropism and cytoplasmic streaming through the differences in the buoyancy of cell organelle. Careful consideration for the light source and the design of plant tissue culture vessels is crucial for hyper-gravity experiments.

Key words; Gas exchange, Gravity experiment, International space station, Plant cultivation

1. 地球大気の大循環

閉鎖環境内の栽培環境において考慮すべき重要な事項の1つに、光合成に伴う水蒸気やCO₂、O₂などのガス交換過程の動的な維持があげられる。光合成は、大気中に含まれる低濃度の気体状CO₂をRuBPカルボキシラーゼ/オキシゲナーゼによって炭水化物に固定する生化学的過程であるが、その一方で1molのCO₂は通常の大気中では約56000lの体積に含まれる気体量に相当し、高倍率の体積濃縮過程でもある。さらに、CO₂やO₂の細胞内外への拡散過程では濡れた細胞表面を介したガス交換が不可欠である。その結果、光合成や呼吸の過程では細胞表面からの水蒸気の蒸発が生じ、光合成に伴う蒸散過程では、吸収したCO₂分子の数百倍のH₂O分子が放出される。これらの光合成に伴って吸収・放出される大量の気体分子は、地球環境では対流によって大規模に輸送され、植物群落上空の数百～数千mの高さまでの交換過程によって、植物周辺の気体濃度が維持されている。

2. 浮力と対流

対流やそれに伴う乱流の発生は、基本的に気体の外部からのエネルギー（熱）供給とそれに伴う密度変化によって生じる浮力に依存する。そのため、地球表面では日射量の多い日中に大規模な対流が発生し、夜間にはほぼ静止状態となる。一方、浮力の発生は重力の強さにも依存するため、同じエネルギー

量が供給された場合でも、無重力であれば浮力は生じず、そのため対流も発生しない（図1）。重力が強くなると、それに伴って対流強度は強くなり、それに伴う乱流の発生も増加し、ガス拡散が活発化する。そのため、表面コンダクタンスが増加し、植物体表面からの気体交換が促進される。対流は閉鎖された植物栽培容器の中でも生じ、この場合、照明の強度や、容器の形状（内部高さ、容積など）、温度調節方法などにも大きな影響を受ける¹⁾。

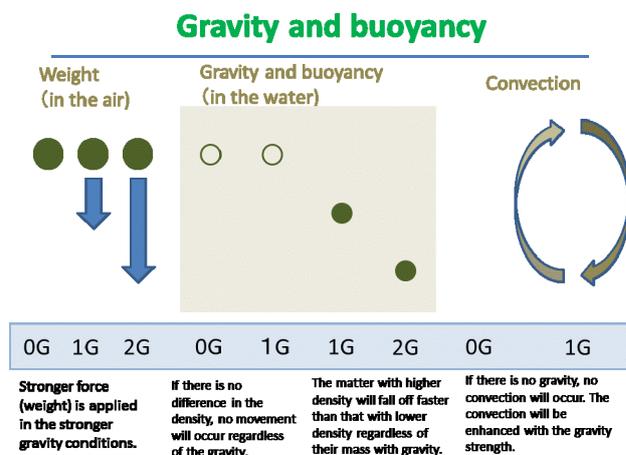


図1 重力と浮力の関係。重力による物質の移動（落下）は、対象物質の質量や密度そのものではなく、周囲との密度差が駆動力となる。

3. 光合成への直接影響

このような対流過程に重力が与える影響の大きさは、パラボリックフライト実験によって明確に示されており、メタルハライドランプを使用して飽和光強度を与えた場合には、1.0 G から 0.01 G に移行すると熱・ガスコンダクタンスが大幅に減少し、結果として光合成速度が 2 割近く低下することが観察されている²⁾。一方、2.0 G に移行すると対流が促進されコンダクタンスが増加し、光合成速度も上昇する。このような浮力によるガス交換効率の変動影響は、ファンによって強制対流を生じさせることでほぼ解消できることが示されているが³⁾、惑星レベルの重力が異なった対流環境を考慮する場合には、重要な外部環境として考慮すべき事項となる。

4. 原形質流動への影響

一方、重力に伴う浮力の発生は、細胞内器官の密度差によって生じる様々な現象にも大きな影響を与える。たとえば、高等植物の重力屈性は、周囲の細胞質と比較して密度の高いデンプン粒の沈降が関わっているが、その沈降速度は重力に依存する。また、原形質流動によって葉緑体やミトコンドリアなどが細胞内移動する場合には、重力変化は浮力を通じて直接・間接的に影響する。たとえば、車軸藻の節間細胞における原形質流動は、下り（重力方向）の方が上りに比べて 10% ほど流動速度が高くなることが報告されている⁴⁾。

このように、植物の重量影響実験においては、少なくとも細胞内外のガス交換過程の浮力影響と、細胞内の細胞小器官の移動に対する浮力影響を分けて考慮する必要がある。これらの影響は独立して生じるため、個別の影響解析を行う場合には、栽培条件を事前によく検討しておく必要がある。

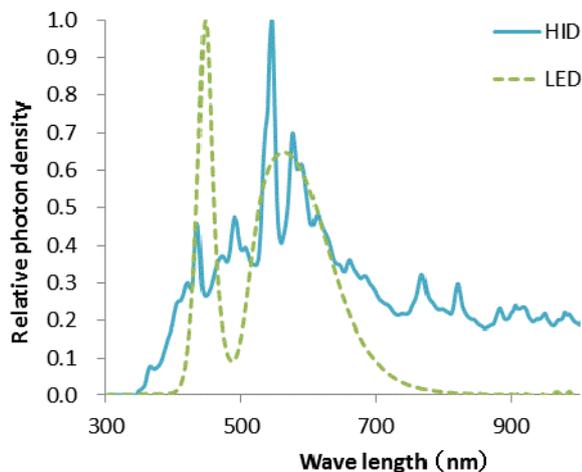


図2 ある栽培装置に使われていた白色 LED 光源と高輝度 HID 光源の放射スペクトルの測定例 (EKO MS-720 による測定)。700nm 以上の放射成分が大きく異なる。

5. 光源のスペクトル

日射エネルギーの約半分は、光合成には利用されない波長 700nm 以上の光子による赤外放射であるが、物体表面に吸収されて熱に変わると、接触する気体を膨張させ浮力が増加し、対流の駆動源となる。そのため、図 2 に示すような白色 LED や蛍光灯などの赤外放射をほとんど含まない光源と、メタルハライドランプ (HID) などの日射スペクトルに近い光源では、対流強度の違いによって、得られる結果に違いが出る可能性がある。たとえば同じ光合成有効放射強度であっても、(白色) LED とメタルハライドランプでは、後者の方が葉表面周囲の対流が促進され、光合成速度が高まる可能性がある。Kitaya et al. (2006) の結果も、飽和光強度以上の放射エネルギーが葉周辺の対流を促進し、最大光合成速度の重力依存性を高めている可能性を示唆している。

6. 栽培ポットの通気

シロイヌナズナやヒメツリガネゴケなどの小型植物の栽培実験を行う場合、プラスチック製の半密閉栽培ポットを利用することが多いが、通気口の形状やコンダクタンスによっては、そのポットの置かれた重力環境自体が容器内外の気体交換量に影響を与えて、容器内部の CO₂ 濃度や湿度環境に影響を与える可能性がある。また、遠心機を利用した過重力栽培実験ではロータに取り付けられた容器の回転に伴う容器外にあたる風速影響も加わるため、回転速度の増大に伴って容器内外間のガス交換量が増大し、容器内ガス濃度に影響が出る可能性がある。遠心装置を利用した光合成過程を伴う過重力栽培実験では、このようなアーティファクトになり得る環境変化を考慮した慎重な実験機器設計と実験計画が重要となるだろう。

参考文献

- 1) Kitaya et al.; Visualization and analysis of air currents in plant tissue culture vessels, *Environ control Biol.*, 35, 139-141 (1996).
- 2) Kitaya et al.; Heat and gas exchanges between plants and atmosphere under microgravity conditions, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1077, 244-255 (2006).
- 3) Wolff et al.; Plant mineral nutrition, gas exchange and photosynthesis in space; A review, *Adv. Space Res.*, 51, 465-475 (2013).
- 4) Wayne et al.; Gravity-dependent polarity of cytoplasmic streaming in *Nitellopsis*, *Protoplasma*, 155, 43-57 (1990).