

## 過重力がヒメツリガネゴケの成長と光合成に与える影響

半場 祐子（京都工繊大）、竹村 香里（京都工繊大）、阪口 直哉（京都工繊大）、渡辺 璃那（京都工繊大）、久米 篤（九州大）、唐原 一郎（富山大）、藤田 知道（北大）、蒲池 浩之（富山大）

### Effect of hypergravity on growth and photosynthesis of *Physcomitrella patens*

Yuko T. Hanba<sup>1)</sup>, Kaori Takemura<sup>1)</sup>, Naoya Sakaguchi<sup>1)</sup>, Rina Watanabe<sup>1)</sup>, Atsushi Kume<sup>2)</sup>,  
Ichirou Karahara<sup>3)</sup>, Tomomichi Fujita<sup>4)</sup>, Hiroyuki Kamachi<sup>3)</sup>  
<sup>1)</sup>Kyoto Institute of Technology, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585  
<sup>2)</sup> Kyushu University <sup>3)</sup> University of Toyama <sup>4)</sup> Hokkaido University  
E-Mail: hanba@kit.ac.jp

Abstract: Mosses are suitable for artificial ecosystem in space, because they have compact plant size and easy-to-grow, with high adaptation to severe environments such as in Antarctica with high UV levels. However, little is known for responses of mosses in space. We focused on the effects of gravity on mosses, and used the model plant, *Physcomitrella patens*. We investigated effects of hypergravity on growth and photosynthesis of *P. patens*. Plant density and plant dry mass were significantly increased under hypergravity (10 G) compared to those under 1 G. Cell wall thickness of *P. patens* was not affected by hypergravity, which contrasts with that obtained for higher plants. On the other hand, numbers and sizes of chloroplasts of the leaves of *P. patens* were significantly increased under 10 G. Photosynthesis rate and internal CO<sub>2</sub> conductance of *P. patens* were enhanced under hypergravity. These results concerning photosynthesis are new findings for the plant response to gravity, providing valuable information for plant adaptation to gravity in the land plant history, and for the construction of plant growth system in space.

**Key words;** photosynthesis, CO<sub>2</sub> conductance, moss, chloroplast, space experiment

#### 1. はじめに

人間が宇宙ステーションや月・火星などの地球外天体に長期滞在する際には、食料生産、空気や水の浄化、物質リサイクルなどの閉鎖生態系生命維持システムが必要である。植物は、人間が呼吸により排出した二酸化炭素を光合成によって消費し、同時に人間が呼吸に利用する酸素を供給する。したがって、宇宙に長期滞在する環境において食料生産機能とガス処理機能を持つ植物栽培システムの構築は重要であると考えられている (Wolff et al., 2014)。コケ植物は南極など地球の陸上の極限環境によく適応した植物であり、小型で大量培養が容易であるため、宇宙ステーションなどごく限られた空間での栽培に有利な植物である (藤田ら 2014)。また、原始的な陸上植物であるコケにおいて地球の重力影響を評価することは、植物の進化の過程で陸上進出に必要であった適応過程を理解する上でも重要である (久米ら 2014)。これまでの研究により、高等植物についてはさまざまな重力応答が報告されている。植物体を支持する重要な構造である細胞壁の変化はその代表的なものである。微重力環境下では、2次細胞壁のリグニン形成に関与する酵素活性の低下とリグニン含量の低下が報告されている

(Cowles et al., 1984)。また過重力環境下(300 G)では、シロイヌナズナの花茎のリグニンの沈着が促進され (Karahara et al., 2009)、後生木部の2次細胞壁が厚くなることが確認されている。しかし、コケにおける重力応答についてはほとんど明らかになっていない。

私たちの研究グループ「スペース・モス」ではコケ植物の特徴に注目し、モデル植物でもあるヒメツリガネゴケを用い、重力による光合成機能等の変化を明らかにし、さらにそれらを裏打ちする遺伝子ネットワークの動態の研究をすすめている (藤田ら 2014)。コケの重力応答を研究するためには、宇宙ステーションを利用した微小重力実験だけでなく、地上において異なる重力環境下で栽培比較実験を行なうことが効果的である。しかし、これまで長期にわたって重力を変化させて植物を栽培できるような適当な実験装置はなかった。

そこで久米と唐原は低速回転型の遠心装置と光源を組み合わせた過重力栽培装置を開発した (図1)。本稿では、この栽培装置を使って地上で行なった過重力実験により、重力の変化がヒメツリガネゴケの成長や光合成機能にどのような変化をもたらしたのかを報告する。

## 2. 実験材料と方法

過重力がヒメツリガネゴケの成長や形態に与える影響を調べるため、富山大学に設置された過重力栽培装置(Fig. 1, MK-1, 日本環境計測)を用いて8週間の栽培実験を行なった。このときの重力は10Gとした。室内温度は24℃、光源はメタルハイドランプ(HID)、光強度は19~31  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。直径4cmのガラスシャーレ8つに、1シャーレ当たりヒメツリガネゴケ茎葉体12個体を寒天0.8%のBCD培地(青木 & 杉田, 2008)で栽培した。1Gのヒメツリガネゴケは、実験台上で栽培した。栽培終了後、植物体の長さや質量、密度の計測を行なった。また一部の個体について樹脂に固定包埋を行い、切片を作製して細胞や葉緑体のサイズを測定した。

過重力がヒメツリガネゴケの光合成に与える影響を調べるためには、コケを大量に栽培する必要がある。そのため、より大容量のコケが栽培できる過重力栽培装置(MK-3, 松倉)を用いて8週間の栽培実験を行なった。このときの重力も10Gとした。光源は白色LED、光強度は99~105  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とし、直径7.5cmのプラスチック植物栽培容器を用いて栽培した。栽培終了後のヒメツリガネゴケを京都工芸繊維大学に移し、研究室内に構築された光合成測定装置を用いて1シャーレあたりの光合成速度と二酸化炭素コンダクタンスを測定した。

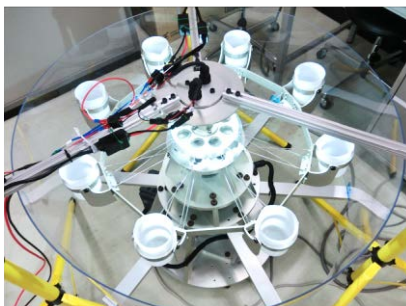


Fig. 1 過重力栽培装置(MK-1)

### 3. 10Gにおけるヒメツリガネゴケの成長応答

10Gで栽培したヒメツリガネゴケは、1個体あたりでみると地上部の質量はやや減少したものの、仮根の質量が大きく増加していた(Fig. 2)。1シャーレあたりでみると個体密度が大幅に増加しており、同時に地上部、仮根ともに乾燥質量が増加していた。特に、仮根の質量増加は著しかった。このことから、10Gによってヒメツリガネゴケの成長は促進され、その効果は特に仮根で著しかったと考えられる。

### 3. 10Gにおけるヒメツリガネゴケの細胞サイズと細

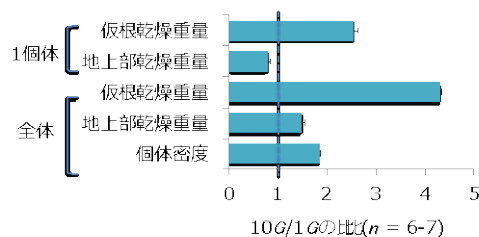
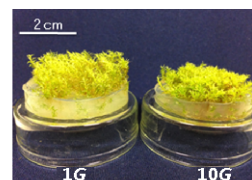


Fig. 2 10Gにおけるヒメツリガネゴケの成長反応  
胞壁の厚さの変化

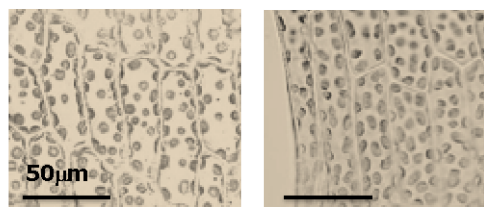
10Gで栽培したヒメツリガネゴケについて、茎の縦断面の切片を観察したところ、表皮細胞の長さが短くなっていた(Table 1)。また、葉について、中肋から6細胞分の長さを計測したところ、10Gの方が有意に短くなっていた。一方、茎の横断面について、細胞のサイズと数には変化はなかった。また、茎の細胞壁の厚さにも変化はみられなかった。

### 4. 10Gにおけるヒメツリガネゴケの葉緑体の数と

Table 1 ヒメツリガネゴケの茎の表皮細胞長(縦断面)、葉の細胞長、茎の細胞直径(横断面)、茎の横断面の細胞数、および茎の細胞壁の厚さ

	1G	10G
表皮細胞長( $\mu\text{m}$ )	200(8)	157(7)*
葉の細胞長( $\mu\text{m}$ )	164(6)	137(6)*
細胞直径( $\mu\text{m}$ )	230(14)	238(12)
細胞数	96(5)	97(5)
細胞壁の厚さ( $\mu\text{m}$ )	0.12(0.01)	0.13(0.01)

\*はt検定により $P < 0.05$ で有意差があることを示す。  
平均値(標準誤差),  $n=7 \sim 21$



1G

10G

Fig. 3 ヒメツリガネゴケの葉の葉緑体

### サイズ

ヒメツリガネゴケの葉に存在する葉緑体の数は、10Gにおいて有意に増加した(Fig. 3, t検定,  $p < 0.05$ )。また、1つの葉緑体の厚さと幅については、10Gで有意に増大していた(t検定,  $p < 0.05$ )。

## 5. 10 Gにおけるヒメツリガネゴケの光合成速度

過重力栽培によってヒメツリガネゴケには細胞の構造変化が生じる可能性があり、そのことが光合成機能に影響を与える可能性がある。そこで、栽培実験終了後のヒメツリガネゴケについて光合成測定を行なった。その結果、10 Gで栽培したヒメツリガネゴケについて、乾燥質量あたりの光合成速度と二酸化炭素コンダクタンスがともに増加していた(t検定、 $p<0.05$ )。

## 6. 10 Gにおけるヒメツリガネゴケの成長と光合成速度を変化させたメカニズム

高等植物であるシロイヌナズナなどを用いた実験から、過重力では伸長成長の抑制が生じると予想された。しかしヒメツリガネゴケでは、1個体あたりでみたときに10 Gで地上部の成長は抑制されていたが、仮根の成長は著しく促進されていた。また、10 Gで個体数の顕著な増加がみられたことは、ヒメツリガネゴケで得られた新規な知見である。さらに、ヒメツリガネゴケでは、シロイヌナズナで報告されているような細胞壁の厚さの増加がみられなかったことも新しい知見である。これらの変化にはオーキシンなど何らかの植物ホルモンの影響が考えられるため、現在これを確かめるための実験を行なっている。

これまで行なわれてきた植物の重力応答に関する研究では、光合成機能はほとんど着目されていなかった。今回の過重力実験では、光合成機能を担うオルガネラである葉緑体の詳細な観察を行なった結果、10 Gにおいて葉緑体の数とサイズがともに増大するという新規な知見を得た。このような変化にも何らかの植物ホルモンの影響が考えられるが、詳細は不明である。

10 Gで栽培したヒメツリガネゴケでは、植物体内の二酸化炭素コンダクタンスが増加し、光合成速度が増加した。当初我々は、過重力によって細胞壁が厚くなることにより二酸化炭素コンダクタンスが減少し、光合成速度が減少すると予想していたため、予想外な結果であった。ヒメツリガネゴケでは10 Gにおいて細胞壁の厚さに変化はみられなかったことから、細胞壁による二酸化炭素拡散の制限には過重力による影響はなかったと考えられる。一方、10 Gにおいて葉緑体のサイズと数が増加したことは、植物体内部において二酸化炭素拡散が生じやすくなることを意味する。すなわち、過重力においては、葉緑体の形態や数に生じた変化が主な要因となって、二酸化炭素コンダクタンスと光合成速度が増加したのではないかと考えられる。10 Gにおいて光合成速度が増加したことは、ヒメツリガネゴケの成長促進

に影響を与えた可能性がある。

## 7. まとめ

地上において長期に栽培を行なうことができる過重力栽培装置を用いてヒメツリガネゴケを10 Gで8週間栽培した結果、細胞壁の厚さや葉緑体の数、葉緑体のサイズおよび光合成速度について、これまで高等植物では見いだされていなかった新規な知見を得ることができた。今回得られた知見を基礎に、植物の光合成や成長の重力応答メカニズムを解明するためには、過重力実験に加えて微小重力実験が不可欠である。現在われわれのグループは国際宇宙ステーション「きぼう」での宇宙実験をめざしており、平成27年度「きぼう」利用フィジビリティスタディ(FS)に採択されている。今後は高等植物で得られた結果と比較検証しつつ、他グループとの連携も視野にいれ、準備をすすめていく予定である。

## 参考文献

- 1) Cowles, J. R., Scheld, H. W., Lemay, R., & Peterson, C. (1984). Growth and lignification in seedlings exposed to eight days of microgravity. *Annals of Botany*, 54, 33–48.
- 2) Karahara, I., D.Tamaoki, T.Nishiuchi, L.Schreiber, & S.Kamisaka. (2009). Effects of altered gravity conditions on lignin and secondary wall formation in herbaceous dicots and woody plants. *Biological Sciences in Space*, 23, 177–182
- 3) Wolff, S. a., Coelho, L. H., Karoliussen, I., & Jost, A. K. (2014). Effects of the extraterrestrial environment on plants: recommendations for future space experiments for the MELiSSA higher plant compartment. *Life*, 189–204. doi:10.3390/life4020189
- 4) 久米篤, 蒲池浩之, 半場祐子, 竹村香里, 唐原一郎, 長嶋寿江, 矢野幸子, 藤田知道. 宇宙環境利用シンポジウム 第29回: 平成26年度 (2014) 19-20 <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/549484>
- 5) 青木 撰之, 杉田 護. (2008). ヒメツリガネゴケ. 光合成研究法, 67, 31– 33. 北海道大学低温科学研究所
- 6) 藤田知道, 蒲池浩之, 唐原一郎, 久米篤, 坂田洋一, 高林厚史, 田中歩, 長嶋寿江, 西山智明, 橋本博文, 長谷部光泰, 半場祐子, 日渡祐二, 松田修, 本村泰三, 矢野幸子. 宇宙環境利用シンポジウム 第29回: 平成26年度(2014) 21-22 <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/549482>