

国際宇宙ステーションで生育したヒメツリガネゴケ茎葉体の機械的特性

蒲池 浩之 (富山大), 小野田 雄介 (京大), 新濱 梨奈 (富山大・院), 浅野 加杜己 (富山大・学), 森 耀久 (富山大・院), 佐々木 智哉 (富山大・学), 唐原 一郎 (富山大), 久米 篤 (九大), 半場 祐子 (京都工繊大), 笠原 春夫 (JAMSS), 鎌田 源司 (AES), 嶋津 徹 (JSF), 鈴木 智美 (JAXA), 矢野 幸子 (JAXA), 藤田 知道 (北大)

Mechanical Properties of the Moss *Physcomitrium patens* Gametophores Grown in the International Space Station

Hiroyuki Kamachi*¹, Yusuke Onoda², Rina Shinhama¹, Kazuki Asano¹, Akihisa Mori¹, Tomoya Sasaki¹, Ichirou Karahara¹, Atsushi Kume³, Yuko T. Hanba⁴, Haruo Kasahara⁵, Motoshi Kamada⁶, Toru Shimazu⁷, Tomomi Suzuki⁸, Sachiko Yano⁸, Tomomichi Fujita⁹

*¹Faculty of Science, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, ²Kyoto University, ³Kyushu University, ⁴Kyoto Institute of Technology, ⁵Japan Manned Space Systems Corporation, ⁶Advanced Engineering Services, ⁷Japan Space Forum, ⁸Japan Aerospace Exploration Agency, ⁹Hokkaido University

E-Mail: kamachi@sci.u-toyama.ac.jp

Abstract: Land plants grow with maintaining their mechanical structure sufficiently strong against the gravitational force. Such gravity response is called gravity resistance, in which morphology and cell wall rigidity are controlled in response to the gravitational force. However, little is known about the gravity resistance of bryophytes – the earliest extant clade of land plants which lack vascular tissue. In this work, we investigated whether the mechanical properties of the moss *Physcomitrium (Physcomitrella) patens* gametophore were controlled by the gravitational force, through both the space- and hypergravity experiments. For the space experiment, the gametophores were grown for 25 days in the International Space Station at microgravity (μg) and at artificial 1 g in space conditions (s1 g). A control on the ground (g1 g) was also prepared. For the hypergravity experiment, the gametophores were grown with a centrifugal cultivation system at 10 g (10 g) and 1 g as a control (1 g). The stems of the gametophores became thinner and longer in μg than in s1 g, and thicker and shorter in 10 g than in 1 g, indicating that bryophytes show gravity resistance in a similar manner to vascular plants do. The mechanical properties of the fresh gametophore samples were examined by a three-point bending test. We found that flexural rigidity of the stem, which defined as the resistance for a bending moment, neither changed significantly in the μg - nor 10 g-treatments. It seems that the *P. patens* gametophores have a homeostatic system to maintain the flexural rigidity more or less constant and largely independent from the gravitational force.

Key words; Bending test, Bryophyte, Gravity resistance, Hypergravity, Mechanical properties, Microgravity, *Physcomitrium patens*

1. はじめに

陸上植物は、重力に対して形態や細胞壁の物性を調節しながら成長することにより、適度な機械的強度を保っている。例えば、植物を様々な重力環境下で生育させると、重力の増加に伴い茎が太く短くなり、細胞壁伸展性が低下する(細胞壁が硬くなる)ことが知られている。植物のこのような重力応答は、抗重力反応と呼ばれ、主に草本の維管束植物を材料にして研究されてきた^{1),2)}。一方、陸上植物において木質化した細胞を持たないコケ植物は、重力の変化に対しどのように反応するのだろうか。コケ植物の抗重力

反応を明らかにすることは、陸上植物の重力応答機構の進化についての知見を得るだけでなく、人類の宇宙進出に欠かせないコケ植物³⁾が、地球とは異なる惑星環境においてどのように成長するのかを推測するのに役立つ。

我々はこれまで、維管束植物の茎と葉によく似た形態をもつヒメツリガネゴケ (*Physcomitrium (Physcomitrella) patens*) の茎葉体 (Fig. 1) を用いて、地上での過重力栽培実験を行ってきた^{4),5)}。本研究では、「宇宙におけるコケ植物の環境応答と宇宙利用 (Space Moss)」のプロジェクトとして、2019年の7

月と12月に行われた2回の宇宙栽培実験および過重力実験で得られた成果の一部を報告する。

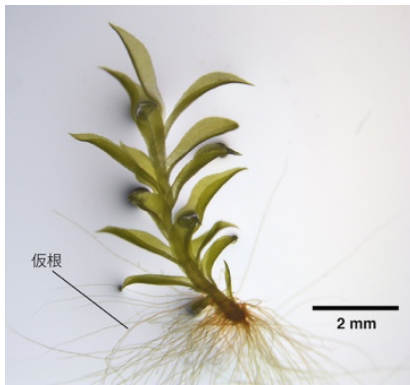


Fig. 1 ヒメツリガネゴケの茎葉体

2. 実験の概要

国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟「きぼう」に設置されている細胞培養装置 (CBEF) ⁶⁾ を用いて、照射下、25 日間、寒天培地上でヒメツリガネゴケ茎葉体を培養した。CBEF にはターンテーブルが備わっているため、微小重力条件 (μg) に加えて、1g 条件 (sl g: 宇宙 1g 対照区) での培養も行った。また地上では、宇宙実験と同じタイムスケジュールで培養を行った (gl g: 地上対照区)。一方、過重力栽培実験では、遠心栽培装置 ⁷⁾ を用いて 10 g 条件下で茎葉体を培養した。

本研究では、茎葉体の機械的特性を生きた状態で調べることを目的としており、地上へのサンプル回収の際には、茎葉体への物理的ダメージを最小限に抑える必要があった。そこで、培養後の培地を ISS 内で宇宙飛行士に切り出してもらい、水で満たしたサンプルチューブに入れて、地上へと回収した (Fig. 2)。

寒天から取り出した茎葉体は、カミソリあるいはマイクロ剪刀で葉を丁寧に切り落とした後、3点曲げ試験機 (SHIMADZU, EZ-Test EZ-LX) によって茎の機械的特性を調べた ⁵⁾。

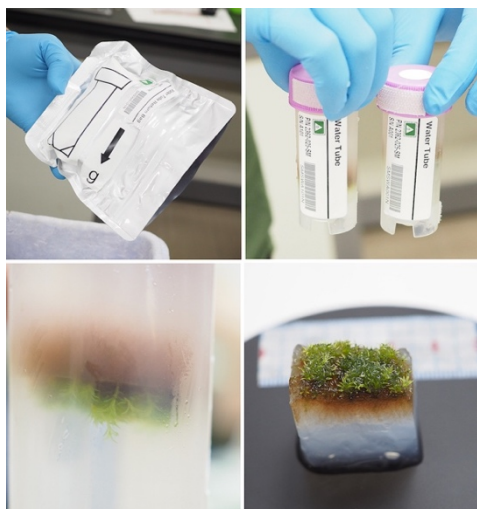


Fig. 2 機械強度測定用試料のサンプル回収の様子

3. ISS でのヒメツリガネゴケの成長の様子

専用の培養容器に作られた無機の BCD 寒天培地 (H 2.5 cm x W 5.4 cm x D 4.4 cm) に容器当たり 48 本の茎葉体断片が地上で植えられ、ISS へと打ち上げられた (SpX-18, SpX-19)。CBEF への装着後、25-26 日間連続光照射下で培養され、いずれの実験区においてもコケは順調に生育しており、外観からは μg と sl g に大きな違いは見られなかった。このようにヒメツリガネゴケの茎葉体は、微小重力環境においても CBEF 中では長期間安定して生育できることが確認された。

4. 茎葉体の形態

重力が茎葉体の形態にどのように影響するのかを調べた。茎の径と長さについては、 μg では 1g と比べて細く長くなっており、重力が 10 g まで大きくなるにつれて、太く短い茎が形成されることがわかった。このような重力の効果は、維管束植物の場合と同様であり ^{1), 2)}、陸上植物に共通した抗重力反応であることがわかった。一方、仮根については、1g と 10g を比べると 10 g の方で有意に長くなっていったが ⁴⁾、宇宙実験においては、有意な差は見られなかった。仮根の成長は、過重力環境でのみ影響が現れるものと思われる。しかしながら、宇宙実験は ISS の高 CO_2 (~4,000 ppm) 環境下で行われており、今後、過重力実験においても高 CO_2 の影響を検討する必要がある。

5. 茎葉体の機械的特性

本研究では、茎葉体の茎の機械的特性が重力によってどのように影響を受けるのか、生のサンプルを用いて、曲げ試験による検証を試みた。この試験では、茎の弾性係数と曲げ剛性を測定することができ、生きた状態での茎の実質的な強度を知ることができる。

茎の弾性係数は、 μg 、sl g、gl g において、有意な差は見られなかったものの、 μg で若干大きくなる傾向が見られた。一方、1g と 10g では、10g で生育した茎の方が有意に小さくなっていった。この結果は、より大きな重力環境下で生育したヒメツリガネゴケの茎は、より変形しやすい (柔らかい) 材質になったことを示している。予想では、重力は茎の材質を硬くする方向に作用すると考えていたので、この結果は意外であった。維管束植物では、重力は茎の細胞壁を硬くする方向に作用することが知られている ^{1), 2)}。今後、茎の弾性係数が重力により低下する理由について、その仕組みを明らかにする必要がある。

曲げ剛性は、弾性係数と断面二次モーメントの積で表すことができ、その値は茎の断面形状を考慮した茎の変形のしにくさを表す。すなわち、曲げ剛性は、実質的な茎の曲げに対する強度を反映している。測定の結果、曲げ剛性の値はどの実験区においても有意差はなく、生育した重力環境によらず一定の値を

示した。茎を円柱状と考えると、断面二次モーメントは茎直径の4乗に比例するため、茎がより太く成長する大きな重力環境下では、断面二次モーメントはより大きな値をとる。したがって、重力は断面二次モーメントを大きくするが、茎の材質を柔らかくするため、曲げ剛性は重力環境に依存せず一定の値を示したものと思われる。

以上の結果から、ヒメツリガネゴケの茎葉体は、重力の増加に伴って断面形状を変化させることにより茎の強度を増加させているが、茎の材質は逆に柔らかくなるため、結果として茎の曲げに対する強度は一定に保たれることがわかった。維管束植物では、茎の材質も重力に依存して硬くなると考えられるため⁸⁾、この点において、コケ植物の抗重力反応とは異なっているように思われる。

コケ植物に比べて維管束植物の個体当たりの質量はかなり大きい。したがって維管束植物では、成長に伴う上からの荷重の増加に応じて、茎や幹の強度を的確に調節する必要がある。一方、コケ植物では、成長による荷重の変化はそれほど成長に影響を与えるとは考えられず、維管束植物とは異なり、むしろ茎の強度を一定に保つような「ホメオスタシス」が働いているのかもしれない。

参考文献

- 1) Hoson, T. and Soga, K. New aspects of gravity responses in plant cells, *International Review of Cytology*, 229:209–244 (2003).
- 2) Soga, K. Resistance of plants to gravitational force, *Journal of Plant Research*, 126:589–596 (2013).
- 3) 久米篤, 他; コケ植物を用いた宇宙実験: スペース・モスの活動報告, *宇宙環境利用シンポジウム (第34回)*, SA6000145014, G-06 (2019).
- 4) Takemura, K., Kamachi, H., Kume, A., Fujita, T., Karahara, I. and Hanba, Y.T. A hypergravity environment increases chloroplast size, photosynthesis, and plant growth in the moss *Physcomitrella patens*, *Journal of Plant Research*, 130:181-192 (2017).
- 5) 藤田知道, 久米篤, 蒲池浩之, 小野田雄介, 半場祐子, 日渡祐二, 唐原一郎; 1g とは異なる重力環境で植物はどのように育つのだろうか -コケ植物を用いた宇宙実験 (スペース・モス) から期待できること-, *植物科学最前線 (BSJ-Review)*, 11:60-74 (2020).
- 6) Yano, S., Kasahara, H., Masuda, D., Tanigaki, F., Shimazu, T., Suzuki, H., Karahara, I., Soga, K., Hoson, T., Tayama, I., Tsuchiya, Y. and Kamisaka, S. Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station, *Advances in Space Research*, 51: 780-788 (2013).
- 7) Mori, A., Kamachi, H., Karahara, I., Kume, A., Hanba, Y.T., Takemura, K. and Fujita, T. Comparisons of the effects of vibration of two centrifugal systems on the growth and morphological parameters of the moss *Physcomitrella patens*, *Biological Sciences in Space*, 31:9-13 (2017).
- 8) Soga, K., Club, B., Kurita, A., Yano, S., Ichikawa, T., Kamada, M. and Takaoki, M. Growth and morphogenesis of Azuki bean seedlings in space during SSAF2013 program, *Biological Sciences in Space*, 28:6-11 (2014).