

高 CO₂ 環境下でのヒメツリガネゴケ茎葉体の成長に及ぼす過重力の影響

蒲池 浩之 (富山大), 竹内 瑠奈 (富山大・学), 唐原 一郎 (富山大),

半場 祐子 (京都工繊大), 日渡 祐二 (宮城大), 久米 篤 (九大), 藤田 知道 (北大)

Effects of hypergravity on the growth of *Physcomitrium patens* gametophores in high CO₂ conditions

Hiroyuki Kamachi^{*1}, Runa Takeuchi¹, Ichirou Karahara¹, Yuko T. Hanba², Yuji Hiwatashi³, Atsushi Kume⁴, Tomomichi Fujita⁵

^{*1}Faculty of Science, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, ²Kyoto Institute of Technology, ³Miyagi University, ⁴Kyushu University, ⁵Hokkaido University

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

Abstract: There is little data on how plant biomass production is affected in environments with different gravity conditions. Conducting space experiments in 2019, as the Space Moss Experiment, we found that microgravity had minimal impact on the biomass production of the *Physcomitrium patens* gametophores, contrary to expectations based on earlier experiments using hypergravity conditions. This unexpected outcome prompted a consideration of the carbon dioxide (CO₂) concentration within the International Space Station (ISS). Given that ISS has CO₂ levels about ten times higher than on Earth, and CO₂ concentration influences photosynthesis, it was hypothesized that the elevated CO₂ might have masked the effects of microgravity on the growth of gametophores. To validate this, experiments were conducted under both elevated CO₂ and 10 G conditions, revealing that even in high CO₂ environments, the influence of hypergravity (10 G) positively impacted the biomass production of the gametophores. While high CO₂ environments may have affected the moss growth on the ISS, it is also possible that the microgravity environment besides high CO₂ is still positively affecting the biomass production of gametophores due to some unknown factors.

Key words; Bryophyte, Carbon dioxide, Hypergravity, *Physcomitrium patens*, Space Moss

1. はじめに

植物が重力の異なる環境下でどのように生育するのかについては、今なお未解明な部分が多く残されている。特に成長量に関する知見は、宇宙農業や宇宙ステーション内における植物生産量に直結するにも関わらず、基礎的なデータはほとんどないのが現状である。その理由として、宇宙環境で植物を安定して長期間栽培することの難しさに加え、生育面積の制限のため十分なサンプル数を得ることの困難さが挙げられる。

我々は、コケ植物を利用すれば、上記の困難さを大部分克服できると考えている¹⁾。特にモデルコケ植物のヒメツリガネゴケ (*Physcomitrium patens*)²⁾ は、維管束植物の構造に似た茎葉体とよばれる茎と葉からなるシュート構造を持っており、また根に相当する仮根と呼ばれる地下組織を有している (図 1)。そこで我々は、コケ植物の成長量における微小重力の影響を明らかにするため、2019年に2回、宇宙実験 (スペースモス実験) を実施した。その結果、バイ

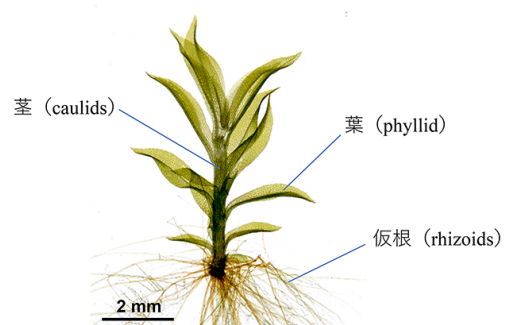


図 1 ヒメツリガネゴケの茎葉体

オマスおよび茎葉体数の増加の観点から、微小重力環境はヒメツリガネゴケの成長量にほとんど影響を与えない、ということが示された。しかしながら、この結果は我々にとって予想外のものであった。というのは、過重力栽培実験では、ヒメツリガネゴケの成長量は重力増加に応じて増加しており、微小重力環境では成長量が減少すると予想していたためである。

この予想外の結果を受けて、国際宇宙ステーション (ISS) 内の CO₂ 濃度の影響を考慮する必要性が出てきた。というのは、ISS 内の CO₂ 濃度は地上に比べて 10 倍ほど高くなっており、CO₂ 濃度は光合成反応の律速段階になっていることから、微小重力によるコケの成長量の違いが高 CO₂ 濃度によってマスクされてしまった可能性があるためである。そこで、過重力実験においても高 CO₂ 環境で実施し、過重力がヒメツリガネゴケの成長量を促進するのか否かを確認するための検証実験を行った。

2. 実験の概要

ヒメツリガネゴケの茎葉体断片を BCD 寒天培地に 16 本植え 10 日間前培養した後、大気 CO₂ 環境と高 CO₂ 環境で、それぞれ 1 G と 10 G 下においてさらに 25 日間培養した (図 2)。高 CO₂ 環境は、プラントボックス (BMS, BC-PB851) 内にシャーレを入れ、3,800 ppm CO₂ になるようにガスタイトシリンジで炭酸ガスを注入することで作り出した。しかしながら、プラントボックス内の CO₂ 濃度は 24 時間後には 1,400 ppm にまで低下していたため、1 日 1 回再注入することで高 CO₂ 環境を維持することにした。

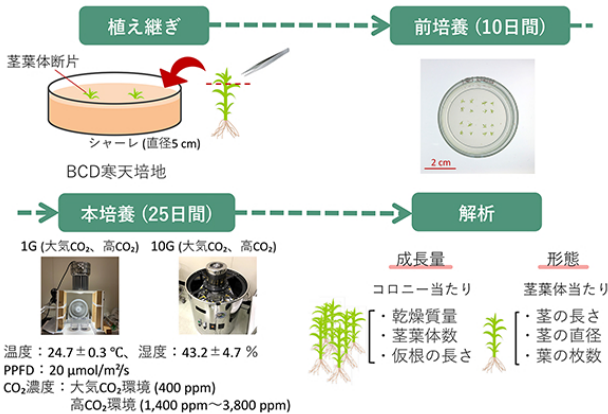


図 2 ヒメツリガネゴケの培養

培養終了後は、図 3 に示す手順で、コケの成長量として、寒天培地の 4 分の 1 区画におけるバイオマス (乾燥質量) と茎葉体数および仮根の長さ、茎葉体の形態解析として、茎の長さおよび直径と葉の枚数を計測した。

3. 結果

表 1 に、大気および高 CO₂ 環境下において、それぞれ 1 G と 10 G でヒメツリガネゴケ茎葉体を培養した時の各種解析結果を示す。まず大気 CO₂ 環境下では、茎葉体数において有意差は見られなかったものの、これまで報告してきたように乾燥質量、仮根長ともに 10 G で有意に増加しており、過重力による成長量の促進効果が確認できた。また茎葉体の形態においても、10 G で茎が太く短くなるが、葉の枚数に

有意差はなく、これまでの結果^{3),4)}の再現性を確認できた。

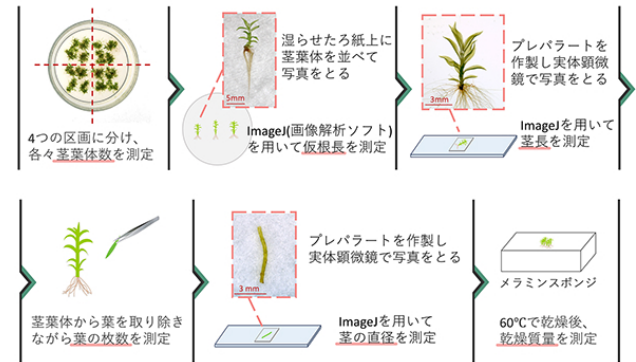


図 3 ヒメツリガネゴケ成長量と茎葉体形態の解析手順

表 1 大気および高 CO₂ 環境下でのヒメツリガネゴケの成長における過重力 (10 G) の影響

	大気CO ₂		高CO ₂	
	1 G	10 G	1 G	10 G
茎葉体数	45.8 ± 6.8 ^a	65.5 ± 8.1 ^a	70.5 ± 7.0 ^A	94.3 ± 10.6 ^A
乾燥質量 (mg)	2.3 ± 0.1 ^b	3.4 ± 0.1 ^a	4.6 ± 0.5 ^B	6.4 ± 0.4 ^A
仮根長 (mm)	5.1 ± 0.6 ^b	6.9 ± 0.3 ^a	8.3 ± 0.3 ^B	11.5 ± 0.6 ^A
茎長 (mm)	3.35 ± 0.19 ^a	2.73 ± 0.13 ^b	5.15 ± 0.23 ^A	2.62 ± 0.14 ^B
茎径 (mm)	0.233 ± 0.004 ^b	0.249 ± 0.004 ^a	0.252 ± 0.002 ^B	0.266 ± 0.004 ^A
葉の枚数	20.6 ± 0.7 ^a	21.2 ± 2.5 ^a	24.6 ± 0.8 ^A	21.0 ± 2.5 ^B

茎葉体数と乾燥質量は、最初に植えた 4 本の茎葉体由来するコロニーから得られた値を示す。統計処理はスチューデントの *t* 検定 ($p < 0.05$) を行い、大気 CO₂ と高 CO₂ 別に 1 G と 10 G について検定した。

一方、高 CO₂ 環境下においては、茎葉体の葉の枚数が 10 G で有意に少なくなるという結果を除いて、大気 CO₂ の場合と同様な傾向を示した。なお、葉の枚数は茎葉体頂端細胞の分裂回数を反映しており⁵⁾、高 CO₂ 環境下では 10 G で分裂活性が低下することを示唆している。また、高 CO₂ 環境下では、10 G で形成された茎葉体は 1 G に比べ顕著に茎長が低下していたが、茎を形成するための分裂活性も低下しているのかもしれない。

4. 考察と今後の展望

本研究において、高 CO₂ 環境では 1 G と同様に、過重力 (10 G) によるヒメツリガネゴケ茎葉体の成長促進効果を確認することができた。すなわち、10 G でも CO₂ 濃度が高いほどさらに成長が促進されており、重力の大きさと CO₂ 濃度はそれぞれ相加的に成長を促進するものと考えられた。したがって、高 CO₂ 環境で行われた微小重力実験においてコケの成長量が低下しなかったのは、高 CO₂ の影響によるものと考えられる。また高 CO₂ の影響に加えて、微小重力環境が何らかの要因を介してコケの成長にプラスに働いている可能性も考えられる。例えばその要因のひとつとして、重力ベクトルが検出できなくなるこ

との影響が考えられる。一般に、植物の重力ベクトルに対する感受性は高く、0.1 から 0.3 G 程度⁶⁾でも重力方向を感知することができるが、それ以下の G になった時に何らかの要因、例えば細胞内の物質流動が減少する可能性が考えられるが、このような細胞内の物質循環の変化が光合成活性にプラスに働き、成長が促進されるようなことが起こるのかもしれない。今後、こうした可能性をさらに検証するためには、パーシャル G での実験も必要になるだろう。

なお、今回の実験における高 CO₂ 条件は、最低でも 1,400 ppm 以上であり Rubisco 活性が飽和する CO₂ 濃度 (100 Pa)⁷⁾ を超えていると思われるが、実際の ISS 内の CO₂ 濃度に比べると低いため、実験条件を改良して、さらにデータを蓄積していくことも計画している。

5. 謝辞

本研究は、科研費 (JP21K19272、JP23K17399) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Kume, A., Kamachi, H., Onoda, Y., Hanba, Y.T., Hiwatashi, Y., Karahara, I., et al. How plants grow under gravity conditions besides 1 *g*: perspectives from hypergravity and space experiments that employ bryophytes as a model organism, *Plant Molecular Biology* 107:279-291 (2021).
- 2) Rensing, S.A., Goffinet, B., Meyberg, R., Wu, S.-Z., and Bezanilla, M. The moss *Physcomitrium (Physcomitrella) patens*: A model organism for non-seed plants, *The Plant Cell* 32:1361–1376 (2020).
- 3) 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).
- 4) Takemura, K., Watanabe, R., Kameishi, R., Sakaguchi, N., Kamachi, H., Kume, A., et al. Hypergravity of 10g changes plant growth, anatomy, chloroplast size, and photosynthesis in the moss *Physcomitrella patens*, *Microgravity Science and Technology* 29:467–473 (2017).
- 5) Kofuji, R., and Hasebe, M. Eight types of stem cells in the life cycle of the moss *Physcomitrella patens*, *Current Opinion in Plant Biology* 17:13–21 (2014).
- 6) Kiss, J.Z. Plant biology in reduced gravity on the Moon and Mars, *Plant Biology* 16:12–17 (2014).
- 7) Makino, A., and Mae, T. Photosynthesis and plant

growth at elevated levels of CO₂, *Plant and Cell Physiology* 40:999–1006 (1999).