

コケ植物を用いた宇宙実験に向けて：ヒメツリガネゴケの過重力応答

久米 篤（九大・院・農），蒲池浩之（富山大・院・理工），半場祐子（京工繊大・院），竹村香里（京工繊大・院），唐原一郎（富山大・院・理工），長嶋寿江（東北大・生命科学），矢野幸子（JAXA），藤田知道（北大・理）

Toward microgravity experiments in moss: the response of hyper gravity environment of *Physcomitrella patens*

Atsushi Kume¹, Hiroyuki Kamachi², Yuko T Hanba³, Kaori Takemura³, Ichirou Karahara², Hisae Nagashima⁴, Sachiko Yano⁵, Tomomichi Fujita⁶

¹Faculty of Agriculture, Kyushu University, Ashoro, Hokkaido, 089-3705 Japan

²University of Toyama, ³Kyoto Inst Tech, ⁴Tohoku University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency, ⁶Hokkaido University

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

Abstract: Several space experiments have been performed to understand the effects of Earth's gravity on the life cycle of plants using Arabidopsis plants and other flowering plants. However, phylogenetically comparative methods must be applied to understand and generalize these results and the researches of representative plants from distinct group of land plants under microgravity conditions in space are needed. Nevertheless, chances of space experiments are very limited. Therefore, it is practically important to perform ground-based experiments, such as hypergravity experiments. In this study, we have designed a centrifuge equipped with lighting system, which supports long-term plant growth under hypergravity conditions, and examined effects of hypergravity on the development of both the gametophores and rhizoids of *Physcomitrella patens*. We found that the hypergravity treatments increased the growth rates of colonies. *Physcomitrella patens* responded to the slight change of gravity, even at 2.1 G, and seemed to recognize the magnitude of gravity and develop to keep the suitable mechanical stability for gravity.

Key words; Buckling safety factor, Hypergravity, International space station, Microgravity, Photosynthesis Plant, Space experiment, Stable isotope

1. はじめに

地球の生物にとって、重力は最も変動しにくい環境要因の1つである。さらに、陸上では浮力の直接的な影響は非常に小さいため、立体構造の構築においては、一定の重力環境を前提とした形態形成が行われている。たとえば、植物の形態形成では、シュートあるいは個体成長においてアロメトリー則の一定性が幅広く成立していることが知られており、支持組織では葉量に応じた一定の通導コンダクタンスが維持され、曲げモーメントに応じた一定の断面強度を維持されている。結果として、水通導と機械的強度の両方を満たすように、植物体全体で伸長成長と肥大成長が調節されている。このような関係は1G環境に特化しており、重力環境が変化すれば、地中からの給水システム、あるいは強度と曲げモーメントの関係は大きく変化してしまう。また、植物体に及ぼす対流や浮力の影響も重力と密接に関係していることが予想される。

植物の進化環境における地球の重力影響を評価することは、植物の陸上進出に必要な適応過程を理解する上で重要であると同時に、宇宙や地球以外の天

体上における異なった重力環境下における植物の成長を予測する上でも重要であると考えられる。そのためには、異なった重力環境下での栽培比較実験が効果的であると考えられたが、これまで適当な実験装置が無かった。

通常の植物培養装置においては、温度、湿度、光環境を調節することが可能であるが、重力を調節することはできない。遠心力を利用して重力の調節が可能であるものの、通常の遠心装置では連続的に光を照射することは考慮されていないため、植物を長期間栽培することは難しかった。3次元クリノスタットは、培養しながらゆっくり全方向に回転させることで重力ベクトルの積算がゼロとなるような擬似微小重力環境を作出するが、重力ベクトルの分散が目的の装置であり、重力の大きさを変化させることは想定されていない。

そこで、我々は低速回転型の遠心装置と光源を適切に組み合わせることによって、安定した遠心力を加えながら植物の上方（重力ベクトルの延長線上）から光を照射し、長期間植物を培養できる装置の試作を2005年から開始し、栽培実験を試みてきた。これは、

短時間の強い過重力刺激を与えることは目的とせず、光合成可能な光照射下で、1.1~10G 程度の比較的弱い過重力を長期間かけ続けることが、植物の成長過程にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的としている。

2. シロイヌナズナとヒメツリガネゴケ

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」においてシロイヌナズナを用いた「微小重力下における高等植物の生活環」(通称 Space Seed)が行われ、微小重力実験区(μG 区)、宇宙 1G 対照区、地上対照区における比較栽培実験がなされた。しかし、実験スペースが極めて限られた宇宙ステーションにおいては、シロイヌナズナの栽培に必要なスペースすら十分に確保できず、その後の解析にも様々な困難が生じた。そこで、我々は過重力反応や宇宙栽培実験を行うモデル植物として新たにヒメツリガネゴケ (*Physcomitrella patens* subsp. *patens*)を加えて実験を進め、様々な重力応答反応を評価する上で数多くの優れた特徴を持っていることを確認した。また、コケを加えて実験を行うことは系統間比較を行う上でも大きなメリットがあると考えられた。そこで、宇宙環境利用科学委員会ワーキンググループ(WG) スペース・モス(Space Moss)を立ち上げ、宇宙実験を視野に入れた研究活動を行っている。

3. 長期間の過重力環境がヒメツリガネゴケの成長に及ぼす影響

長期間のヒメツリガネゴケの過重力栽培を試み、地上部(茎葉体)と地下部(仮根)の組織成長に及ぼす影響を検証した。

ヒメツリガネゴケの茎葉体をBCD寒天培地の上に置き、3日後に過重力栽培装置に移し、その後26日間栽培した。過重力は2.1~10Gの条件に設定し、25°C、HID灯による白色光連続照射条件とした。対照として同じ室内で、同温度・光環境下で通常栽培(1G条件)を行った。期間終了後、1つの茎葉体から増殖したコロニーの生質量、個々の茎葉体の茎の長さ、幅、仮根の長さ、コロニーあたりの茎葉体の数を測定した。その結果、コロニーの生質量や茎葉体の数は、いずれの過重力環境でも対照よりも大きく、6.5Gで最大値を示した。また、茎の長さは3.6G以上の過重力環境でより短く太くなる傾向があった。さらに、過重力環境では、倒伏安全率も増大した。これらの結果は、2G程度の過重力環境下でも、かなり大きな形態変化が生じ、より機械的な安定性が増加するように地上部や地下部の形態が変化することが明らかになった。一方、個体レベルとコロニー(群落)レベルでは、過重力環境が物質生産過程に及ぼす影響が異なる可能性が示され、個体間相互作用の重要性が示唆された。

4. 過重力環境下におけるヒメツリガネゴケの光合成能力と形態変化

長期間のヒメツリガネゴケの過重力栽培を試み、茎葉体と仮根の成長評価を行うと同時に光合成特性や葉緑体の形態に及ぼす影響を検証した。

ヒメツリガネゴケの茎葉体をBCD寒天培地の上に置き、3日後に過重力栽培装置に移し、その後56日間栽培した。過重力は10Gに設定し、24°C、HID灯による白色光連続照射条件とした。対照として同じ室内で、同温度・光環境下で通常栽培(1G条件)を行った。期間終了後、茎葉体と仮根の生育状況を比較した結果、10G条件では対照と比較して、茎葉体の乾燥質量や伸張が小さくなり、仮根の発達が著しく促進されていることが明らかになった。また、10G条件ではコロニー当たりの茎葉体数および乾燥質量の増加量が2倍近く促進された。このような成長促進がどのような理由で生じるのかを確かめるために光合成特性を測定・比較したところ、10G条件では単位面積当たりの光合成速度が高く、炭素安定同位体の分析結果も10Gの方が植物体内のCO₂コンダクタンスが高いことを示唆した。細胞及び葉緑体形態について比較した結果、10G条件では茎葉体の表皮細胞が小さくなる一方で、葉緑体は大きくなっていった。これらの結果は、10G条件では、細胞が小さくなり葉緑体の長辺・短辺が大きくなった結果、細胞壁面に接する葉緑体の表面積が増大し、植物体内のCO₂コンダクタンスが増加し、結果として単位面積当たりの光合成速度が高まった可能性が考えられた。

5. 今後の展望

ヒメツリガネゴケが植物への重力影響を評価する上で非常に優れた実験系であることが明らかになった。また、これまで行われてきた10G以上の過重力環境は、長期栽培における影響を評価するには重力応答が飽和している可能性があり、6G以下の応答変化を検証する必要性が示唆された。特に、2G以下の環境における詳細な応答解析はこれからの課題である。このような状況で、宇宙環境における μG 実験、さらに0.5G程度のパーシャルG実験が、重力応答を理解する上で非常に重要であることが予想される。今後は遺伝子発現の変化も含めて、コケの重力応答機構の解明を進めていく予定である。