

植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証

小林 啓恵* (東北大), 金 慧正 (東北大), 藤井 伸治 (東北大), 宮沢 豊 (山形大), 富田 優太 (東北大), 矢野 幸子 (JAXA), 山崎 千秋 (JSF), 嶋津 徹 (JAXA, JSF), 笠原 春夫 (JAMSS), 鎌田 源司 (AES), 伏島 康男 (JSF), 高橋 秀幸 (東北大)

Plant circumnutation and its dependence on the gravity response

Akie Kobayashi*, Hye-jeong Kim, Nobuharu Fujii, Yutaka Miyazawa, Yuta Tomita, Sachiko Yano, Chiaki Yamazaki, Toru Shimazu, Haruo Kasahara, Motoshi Kamada, Yasuo Fusesjima, Hideyuki Takahashi

*Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

E-Mail: koba@ige.tohoku.ac.jp

Abstract: All organisms including plants have evolved and lived under Earth gravity conditions since their birth. We therefore observe various biological phenomena that are influenced or governed by the gravity. For example, plants use gravitational force to determine their growth orientation; this response is called gravitropism. On the other hand, plants show circumnutation, a helical growth movement, too, during their elongation growth. Mechanistic aspect of circumnutation is unknown, but it has been debated whether this growth movement requires graviresponse or not. Previously, we showed that shoots of *weeping* morning glory are impaired in not only gravitropic response but also circumnutational movement. The *weeping* phenotype was found to occur due to a mutation of gene that is necessary for the differentiation of gravisensing cells, endodermis. These results suggest that circumnutation is related with gravitropic response. We also found that gravitropic response and circumnutation are closely related with circumnutation in rice seedlings. In spaceflight experiments, therefore, we attempted to verify the hypothesis that gravitropism is required for full circumnutational movements in plants, using microgravity environment on KIBO module of ISS. We grew morning glory and rice plants under both μ G and 1G conditions on orbit and monitored their nutational movements. We are currently analyzing the image data taken during the experiments to answer the question as to whether circumnutation depends on graviresponse or not. Furthermore, the results to be obtained will provide us with a clue to develop new technologies for growing plants in space.

Key words; Space experiment, Circumnutation, Morning glory, Rice, Gravitropism

1. 背景

地球上の生物は、1G 環境下で誕生・進化し、生活しているため、絶えず重力の影響を受けている。植物においても、例えば、茎葉や根などの器官が成長方向を決定するのに重力を利用しており、これは重力屈性と呼ばれる。近年、植物では重力応答によって制御される、重力屈性以外の成長運動も注目されているが、その一つが、古くから知られる回旋転頭運動である。回旋転頭運動は、植物の茎や根などの器官が首（先端部）を振り、回旋しながら伸長する現象である。この回旋転頭運動はほとんどの植物の伸長器官にみられ、生存戦略の一環として重要な形質であると考えられ、Darwin 親子の研究 (1881)¹⁾ によって明らかにされた。以来、回旋転頭運動の様相や重力応答との関係に関する研究が行われたが、そのメカニズムの詳細は未だ不明である。例えば、回旋転頭運動には周期があり、1 回転するのに要する時間は、アサガオの茎で約 160-300 分、シロイヌナズ

ナの花茎で約 90 分、トウモロコシの根で約 80-120 分であることが報告されている^{2,3)}。さらに、植物ホルモンであるオーキシンの輸送阻害剤 1-N-naphthylphthalamic acid をアサガオ芽生えやシロイヌナズナの茎頂に処理すると回旋転頭運動の動きが小さくなったことから、オーキシンは回旋転頭運動に必要であることが示されている^{2,4)}。

回旋転頭運動と重力応答との関連性については、スペースシャトルのスペースラブの微小重力下でヒマワリの胚軸の回旋転頭運動が地上のものに比べて小さくなったことや、国際宇宙ステーション (ISS) でシロイヌナズナを生育して観察した結果では、回旋転頭運動が人工重力下に比べて微小重力下で小さくなったことから、回旋転頭運動に重力は必須ではないものの重要な因子であることが示された^{5,6)}。近年われわれは、アサガオの蔓巻性を失った系統 *weeping* で、重力屈性の低下に加えて、回旋転頭運動の異常を見出した²⁾。そして、その原因は、茎におい

て重力感受に必要な内皮細胞の分化に必要な遺伝子 *SCARECROW* (*PnSCR*) に 3 塩基の欠損があり、それがアミノ酸 1 つを欠損したタンパク質をコードしていたことによることがわかった⁷⁾。同じ機能のタンパク質をコードする遺伝子に変異を持つシロイヌナズナの突然変異体 *scr* を使った相補試験において、アサガオ野生型由来の *PnSCR*^{WT} が導入された形質転換体では回旋転頭運動と重力屈性が回復し、蔓巻性を失った重力応答異常突然変異体 *weeping* 由来の *PnSCR*^{we} では回復しなかったことから、この *SCARECROW* 遺伝子の役割が確認された⁷⁾。また、イネの重力応答異常突然変異体 *lazy1* が、野生型のような回旋転頭運動を示さないことも見出されている(未発表)。これらの結果は、回旋転頭運動に重力応答が重要な役割を果たすことを示すものと考えられた。しかしながら、重力応答と回旋転頭運動の因果関係については論争が続いている。

そこで、われわれは、回旋転頭運動における重力応答依存性を検証するために、ISS を利用した微小重力下および人工重力下で、宇宙実験 Plant Rotation を実施した。

2. 実験概要

供試材料等を載せたスペース X 社商用補給機 5 号機ドラゴン (SpaceX-5) は、2015 年 1 月 10 日に打ち上げられた。そして、アサガオの宇宙実験 (RUN1、RUN2) は 2015 年 2 月に、イネの宇宙実験 (RUN3、RUN4) は 2015 年 7-8 月に実施された。供試材料は、アサガオの野生型 Violet と重力応答異常突然変異体 *weeping*、イネの野生型 Kamenoo と重力応答異常突然変異体 *lazy1* を用いた。アサガオでは胚軸、イネでは幼葉鞘の回旋転頭運動を観察した。アサガオは発芽孔の背側にあたる表皮を削った種子を、イネは糊つきのままの種子を、ロックウールに播種した。アサガオは野生型 3 粒、突然変異体 3 粒を 1 つのチャンパー (Plant Rotation Chamber; PRC) に、イネは各々 6 粒ずつを 1 つの PRC に播種した。観察はチャンパーの正面から行ったが、イネにおいては幼葉鞘の先端を上方からも観察できるように、内側に 45° で鏡を設置した。種子が播種された PRC を、軌道上で給水後、CCD カメラがついた植物培養装置 (Plant Experiment Unit) にセットし、それを「きぼう」日本実験棟にある細胞生物学実験装置 (Cell Biology Experiment Facility) にいれて、 μG または 1G の暗所で培養した。先端の回旋転頭運動の動きは、明所で 15 分おきに、アサガオで約 5 日間、イネで約 7 日間撮影した。また、アサガオの実験のみ、重力環境を、 μG から 1G (RUN1)、または 1G から μG (RUN2) に変化させた。画像は実験中に、適宜ダウンリンクし、静止画を取得し、その静止画を元に個々の回旋転頭運動を解析し、野生型と突然変異体、微小重力下と人工重力下の違いを比較した。

3. 結果と展望

本実験で用いた撮影条件は、撮影機器の安定に必要な最低限の時間で設定したため、稀に動画撮影ができず、静止画を取得できない時間もあった。しかし、最終的に RUN1 と RUN2 で 453-505 枚、RUN3 と RUN4 で 654-703 枚の静止画像を取得することができた。これらの静止画像から、再度動画を作製したところ、RUN1 と RUN2 のアサガオについては、明確な胚軸の回旋転頭を観察することができなかった。一方、イネの幼葉鞘については、撮影時の光による伸長阻害が生じたものの、野生型 Kamenoo と重力応答異常突然変異体 *lazy1* とともに回旋転頭運動が観察された。ただし、観察された回旋転頭運動の大きさや時間に、系統間で差がみられた。現在、地上対照実験とともに詳細な解析を進めている。

これらの解析に加え、重力応答を分離して回旋転頭運動を解析することで、その分子機構の解明につながるものと期待される。そして、回旋転頭運動の分子機構を解明することは、将来の宇宙植物工場に適用できる新たな植物生産・管理技術の開発につながるものである。

参考文献

- 1) Darwin, C. and Darwin, F.; *The Power of Movement in Plants*, John Murray, London (1881)
- 2) Hatakeda, Y., Kamada, M., Goto, N., Fukaki, H., Tasaka, M., Suge, H. and Takahashi, H.; Gravitropic response plays an important role in the nutational movements of the shoots of *Pharbitis nil* and *Arabidopsis thaliana*, *Physiol. Plant.* 118: 464-473 (2003)
- 3) Barlow, P.W., Parker, J.S. and Brain, P.; Oscillations of axial plant organs, *Adv. Space Res.* 14: 149-158 (1994)
- 4) Someya, N., Ninuma, K., Yamagushi, I. and Hamamoto, H.; Circumnutation in plants, *Regul. Plant Growth Dev.* 40(1): 83-89 (2005)
- 5) Brown, A.H. and Chapman, D.K.; Circumnutation observed without a significant gravitational force in spaceflight, *Science* 225: 230-232 (1984)
- 6) Johnsson, A., Solheim, B.G.B. and Iversen, T.H.; Gravity amplifies and microgravity decreases circumnutations in *Arabidopsis thaliana* stems: results from a space experiment, *New Phytol.* 182: 621-629 (2009)
- 7) Kitazawa, D., Hatakeda, Y., Kamada, M., Fujii, N., Miyazawa, Y., Hoshino, A., Iida, S., Fukaki, H., Morita, M.T., Tasaka, M. Suge, H. and Takahashi, H.; Shoot circumnutation and winding movements require gravisensing cells, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 102: 18742-18747 (2005)