

「きぼう」での「Space Seed」実験

宇宙航空研究開発機構 矢野幸子、富山大学大学院理工学研究部 神阪盛一郎

Space Seed Experiment in KIBO

Sachiko Aizawa-Yano¹, Seiichiro Kamisaka²

¹Space Utilization Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Tsukuba Space Center, Tsukuba-City Ibaraki, 305-8505 Japan

²Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, Gofuku, Toyama, 930-8555 Japan
E-Mail: yano.sachiko@jaxa.jp, kamisaka@sci.u-toyama.ac.jp

Abstract: The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) recently carried out plant growth experiment using the Plant Experiment Unit (PEU) installed in the Cell Biology Experiment Facility (CBEF) onboard KIBO. This experiment named Space Seed was designed to investigate the effect of microgravity on plant growth, especially seed to seed life cycle. Space shuttle STS-128 (17A) carrying eight PEU's was launched to the International Space Station (ISS) on August 28, 2009. The experiment was started on September 10 and terminated on November 11, 2009. PEU and CBEF environment control system worked successfully as planned. In Kibo, *Arabidopsis* seeds germinated, and bolting and flowering were observed in the PEU's. In the end of March, 2010, *Arabidopsis* plants harvested in Kibo will be recovered to Earth by the space shuttle mission STS-131(19A) and analyzed for their biological characteristics such as seed fertility, cell wall properties, and gene expression.

Key words; *Arabidopsis*, seed to seed, plant life cycle, plant growth and physiology under microgravity, cell wall, gravity resistance, environment control, life sciences, International Space Station

はじめに

1992年(平成4年)に宇宙実験共通実験装置の機能検証のためのテーマが募集され、208件の応募中、1993年(平成5年)に材料・流体・ライフサイエンステーマ合わせて50テーマが選定された。うちライフサイエンステーマは15テーマであった。Space Seedはこの中の一テーマであり、募集から17年を経て2009年(平成21年)に宇宙実験が実現した。ダウンリンクされた画像から、軌道上の実験装置内で植物は発芽、開花、莢を形成したことが確認された。

1, 実験概要

植物は根を地下に伸ばして水分と栄養分を吸収し、茎を地上に伸ばして葉で光合成を行っている。動物でいうところの骨や筋肉の役割を持つ、細胞壁を丈夫にすることによって、自分の重みで茎が倒れないようにしている。また植物は、日照の変化や風などさまざまな環境に取り囲まれている中で、

上へ成長するための情報として地上では変化のない重力を選んだ。つまり、成長の方向を決めるために重力を利用している。では、重力のない宇宙で植物はどう成長するのだろうか。

この問題に答えるために、「きぼう」での植物の生育実験「微小重力環境における高等植物の生活環」(代表研究者: 富山大学 神阪盛一郎)を計画し、実施した。この実験では、細胞培養装置(CBEF、Cell Biology Experiment Facility)(図1)と植物実験ユニット(PEU、Plant Experiment Unit)(図2)を用いて、植物の生活環、すなわち発芽・葉や茎の成長・受精・胚発生・種子形成に対する重力の影響を形態変化とその背景にある遺伝子の働きの変化に注目して調べる。この実験はSpace Seedという愛称で呼ばれる。

2, 実験の特徴

この実験に使うシロイヌナズナは、種子が発芽し、次の世代の種子がとれるまでに約60日間と、

そのライフサイクルが植物の中では短いことが特徴である。また、高等植物の中で最も早い2000年に全ゲノムが解読され、ライフサイクルに対する重力の影響を遺伝子レベルで解析することが可能になった。それでも、植物のライフサイクルのように60日ほどかかる実験は、2週間程度の飛行期間しかないスペースシャトルでは行うことができなかった。また、微小重力区に加えて人工重力区(1G)を同時に対照実験として実施し植物の種子を採る実験は成功すれば世界初となる。長期滞在が可能な国際宇宙ステーションならではの実験である。この実験によって、将来宇宙で植物生産を行うために必要な基礎情報が得られることを期待している。

さらに、植物の細胞壁に関する実験をするための変異体も使用している。重力のない環境で細胞壁構築に関わる遺伝子の働きがライフサイクルの各段階でどのように変化するかを宇宙で育てた植物を化学固定して冷蔵または冷凍状態で地球に持ち帰って調べる予定である。

3, 実験装置

この実験に用いられる装置のうち、CBEFは2008年3月に土井隆雄宇宙飛行士の乗ったスペースシャトルで国際宇宙ステーションに運ばれた共通実験装置である。微小重力実験区と人工重力区を備え、庫内の温度湿度を一定に保つことのできるインキュベータで、微小重力条件下での対照実験ができるターンテーブルを持つことが特徴である。

もうひとつの装置であるPEUは、本実験のための実験試料(乾燥種子)が播種される植物栽培容器、生育用LED照明、給水システム、換気システム、観察システムを備えており、CBEFに接続して使用された。PEUは2009年8月打ち上げのスペースシャトルで宇宙ステーションに届けられた。打ち上げ後、約2ヶ月にわたり植物の成長実験を行った。

4, 軌道上実験準備と実験(2009年)の方法

これまで2004年(平成16年)から2009年(平成21年)まで、細胞培養装置グランドモデルやインキュベータの中で植物実験ユニットを用いて、合計15回シロイヌナズナの栽培性確認試験を実施した。収穫種子の数、発芽率などのデータをもとに、給水の方法や湿度の制御に関して装置の仕様や運用方法について改良を重ねた。

2009年、つくばと富山とでフライト実験前最後の適合性確認試験を行った。同時にフライト実験準備として以下のように作業を実施した。

4月7-9日 PEUへの種子播種(TKSC)

4月19-25日 PEU輸送、NASA引渡し(KSC)

8月21-26日 KFT(KSC Fixation Tube)の準備、NASA引渡し(KSC)

5, 軌道上実験の方法

軌道上実験は次のように実施した。

8月21日 Experiment Laptop Terminal (ELT) セットアップ(軌道上)

8月28日(現地) STS128 (Discovery, 17A) 打上

9月10日 実験開始(PEU 8式給水開始)

9月13日 発芽確認

10月13日 1回目の収穫(給水開始から33日目)

11月11日 2回目の収穫(給水開始から62日目)

2010年3月 STS131(19A)にて試料回収予定である。

地上対照実験は軌道上実験開始の4日後から富山大学にて実施した。

PEU内部機器の制御は付属の実験用ELTによって行った。Dome Geneと基本的な制御設計は同じだが、PEU制御専用のコントロールソフトウェアを地上から転送してインストールして使用した。すでに軌道上にあるELTに対してPEU制御ソフトウェアをインストールするため、地上からのファイル転送とクルー操作にて8月21日に栽培実験開始に先立ってセットアップを実施した。

種子を播種した容器を地上でセットしておいたPEU 8式をNicole Stott飛行士がCBEFに取り付け、9/10にELTにて運転をスタート、微小重力と人工重力(1G)でシロイヌナズナを栽培した。10/13(33日目)にPEU 4式を取り外して収穫し、残りPEU 4式は翌日に水をクルー操作にて追加補給(図3)

して継続培養、11/11（62日目）に収穫し、実験を終了した。収穫時には短期試料・長期試料ともに薬剤処理（計4種類）し、凍結/冷蔵して現在軌道上の冷凍冷蔵庫に保管中である。

化学固定試料以外も、短期試料容器下部は冷凍で回収して根の形態を、長期試料容器は莢・種子を含む植物体を冷蔵で保存し、軌道上で形成した種子の発芽率を地上回収後に調べる。

PEU で生育した植物試料は、NASA で開発された KFT（KSC Fixation Tube）という化学固定器具を用いて試薬浸漬操作を行った。KFT は三重シール構造内に試料を保持して、試料の浸漬操作を可能にするプラスチック製チューブであり、試料部は 10mm φ × 50mmL 程度である。

使用した薬剤は、RNA Later、0.4%ホルムアルデヒド、5%ホルマリン 5% 酢酸 50%エタノール、0.5% グルタルアルデヒド 2%パラホルムアルデヒドである。

6. 軌道上実験とデータ解析結果

CBEF 内の PEU で 62 日間、生育容器内の環境制御を行った。

PEU 内部機器の制御は付属の実験用ラップトップ（ELT、Experiment Laptop Terminal）によって行った。照明は連続光を照射し、給水は植物の成長により蒸散量が変わるため、赤外線検知方式で水がある量以下になると給水するようフィードバック運転を行った。

地上実験の結果、湿度が上がりすぎると受粉や結実に影響することが想定されたため、換気ポンプで PEU 栽培容器内の換気を行うとともに、CBEF 内へ除湿剤を設置した。容器近傍温度を微調整するためにヒーターが組み込まれている。このように植物の生育に必要な環境条件を整えるための内部機器は運転プログラムにより制御されており、運転ファイルで換気ポンプの運転タイミング、ヒーターを ON/OFF 制御した。クルーが実験開始操作をした後は自律運転となり、容器内の温湿度データ、給水/換気ポンプ・ヒーターのステータス等のログを収集した。実験中は 1 日 2 回ログファイ

ルをダウンリンクして、装置の動作状況を確認した。成長のフェーズに応じて適切な条件を記載した運転ファイルを地上から送り、書き換えた。植物の成長の様子は内部カメラで撮影し、その画像は 1 日 1 回、共通実験装置の画像取得処理装置（Image Processing Unit, IPU）を経由して地上にダウンリンクした。

容器内部の温度はシロイヌナズナの生育に関して地上実験で確認した目標値である 23.3~23.7°C の間で良好に制御できた。ただし実験後半に CBEF ターンテーブルの不良により電源供給が停止したユニットに関しては、温度がこの範囲をわずかに下まわることがあった。

給水は初期給水 20ml が正常に行われ、毎日のポンプ動作回数は地上実験と比べて大きな差がない範囲内であった。PEU 換気ポンプの個体差と思われる差により、最終的な累積給水量として約 30ml の差がでる個体があったが、その分換気ポンプが長時間動作して排気していたため、植物体に対して過剰な給水が行われたとは考えられない。一つの PEU では実験途中、水分センサー面への根の侵入と思われる検知異常が発生したが、運転ファイルを書き換えることにより定期給水モードで制御したため、給水量には影響しなかった。

湿度制御は給水および換気、除湿剤により行ったが、前半から地上実験での結果以上に湿度上昇が進んだ。短期収穫の 33 日目までは目標とする 70%~80%に制御（平均 75%）できたが、後半は湿度が下降しなくなり、高いもので 80%を超えた。CBEF 内部の湿度も後期で 70%となった。地上実験では低く維持されていた。湿度のコントロールとしては、給水量と換気ポンプの動作、除湿剤の能力が大きく影響しているため、除湿剤が原因である可能性が示唆される。

地上にダウンリンクされた画像からは、10月13日（給水3日後）に発芽が確認された。ポルティンクによる花茎の伸長は、個体差があるものの、軌道上のマイクロ G 群が、1G 対照実験群、地上実験群よりも若干早い傾向が認められた。本葉の成長の様子が、地上と軌道上 1G 対照群とでは同じようにみられたのに対し、マイクロ G 群では光源に

向かって葉を広げるような形態がみられた。葉の色もマイクロG群の緑が薄いのにに対して1G群では地上対照実験と同様に濃い緑である点が異なっていた。

画像の観察は実験の後半にターンテーブルの不調により1G群の日々の画像が得られず、62日目の宇宙飛行士のデジタルカメラによる撮影を追加した。

軌道上実験スペースの制約からPEUの生育容器は地上上部が約50mm立方で非常に小さな空間であるが、この空間でもシロイヌナズナが発芽から開花、結実までする様子が地上実験で観察された。軌道上実験でもダウンリンクされた画像から、莢が確認できた。軌道上実験の試料の地上回収は2010年3月末の予定である。サンプルが帰還してから確認になるが、軌道上での種子形成が期待される。

7. 不具合等

Space Seedは2ヶ月間のCBEFを用いた実験であった。実験後半でCBEFの不調により、PEUへの供給電源が遮断される不具合が発生した。ただしこの間1Gターンテーブルは停止していないが1G群のPEU内の環境制御（生育用照明、換気ポンプ・ヒーター・給水ポンプ）が一時停止した。環境制御が中断した累積時間は合計で28時間程度である。

2ヶ月以上の連続運転実験という実験の特性のため、タイムライン調整に難航した。約9週間の実験は宇宙ステーションならではの実験であるSpace Seed実施までに数々の困難な調整を行ったからこそ実施が実現した実験である。結果的に装置が動作し、植物の生育が確認できた。また、宇宙実験準備には、多くの人がかかわった。ライフサイエンス実験は装置による環境制御、特に軌道上1G対照実験が重要であり、さらに軌道上操作が比較的複雑なものが多い。Space Seedではトラブルもあったがうまく対処できた例として将来のライフサイエンス実験の参考となる実験ともいえるだろう。



Figure 1 Plant Experiment Unit inside CBEF (Upper is micro gravity compartment, Lower is 1-G turn table)



Figure 2 Plant Experiment Unit (Cover is removed)



Figure 3 Water refill to Plant Experiment Unit (34days after experiment start)