# 植物科学と宇宙実験ーシャトル実験, ISS 実験, 有人宇宙探査ー

# 矢野 幸子

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)有人宇宙技術部門 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

# Plant science and space experiments: Shuttle experiments, ISS experiments, and manned space exploration

#### Sachiko Yano

Human Space Flight Technology Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505 Japan

Key words: Chemical fixation, Experiment hardware, International space station (ISS), ISS experiment operation, Plant cultivation, Space exploration

DOI: 10.24480/bsj-review.11a10.00182

# 1. はじめに

日本は1990年代にシャトルミッションに参加して以来,有人宇宙開発の重要な一翼を担ってきた。1992年,毛利衛宇宙飛行士がスペースシャトルに搭乗して7日間の科学実験を行い,1994年には向井千秋宇宙飛行士がイモリとメダカを対象とした生物実験を行い,成功を収めた。動物を使った実験がクローズアップされる中,1998年にはスペースシャトルSTS-95を利用して植物の芽生えを用いた生育実験が実施され,その後の国際宇宙ステーション(International Space Station, ISS)実験の基礎となる大きな成果を上げた。本稿では,日本の宇宙植物研究に用いた機材の開発,実験運用を概要し,将来展望を解説する。

# 2. 日本の植物実験と有人宇宙探査

1998年、スペースシャトルミッションSTS-95ではシロイヌナズナ、イネ、エンドウ、トウモロコシ、キュウリ等の種子を微小重力環境で発芽させ、地上に持ち帰り分析する植物生育実験が実施された(嶋津 & 相澤 1999)が、これらの研究目的は植物の芽生えへの重力の影響をみるもので、種子を乾燥もしくは冷蔵状態で打ち上げ、インキュベーター等を使わず、シャトル内のキャビンにおいて生育させた。これらの実験は光の影響を排除するため暗条件でシャトルフライトの制約上数日間の実験であったが、多くの知見が得られ、ISSでの実験の基礎となった。

スペースシャトル実験で得られた結果をもとに、ISS「きぼう」日本実験棟においても多くの植物実験が行われてきた(表1)。ISSにおいては長期間実験できる特徴を生かし、生物が重力を感知するメカニズムの解明、植物ホルモンの動態、形態形成等に関する実験が行われ、

得られたデータは論文発表され、成果報告書も公開されている(http://iss.jaxa.jp/kiboresults/plant/#theme)。

特に、2009年9月に「きぼう」で2か月にわたって行われたシロイヌナズナの栽培実験(Space Seed実験)では、日本が世界で初めて、宇宙環境において人工重力条件と比較しながら微小重力下での植物のSeed-to-Seed実験を成功させた。この実験ではJAXAが独自に開発した細胞培養装置(Cell Biology Experiment Facility, CBEF)と植物実験ユニット(Plant Experiment Unit, PEU)という自動栽培装置を用い、栽培容器内で、シロイヌナズナの発芽、開花、結実という生活環を完結させた。この植物実験ユニットは「きぼう」での後続の植物実験にも利用されている。また宇宙での実験終了時に使う化学固定キットなどの付属品の開発や保存用の冷凍冷蔵庫、リアルタイムイメージング解析を可能にする位相差蛍光顕微鏡システムも後に打ち上げられ、植物細胞の観察に利用されている。

表 1. ISS で実施された日本の植物宇宙実験

テーマ略称	テーマ名	所属 代表研究者	宇宙実験期間	使用装置	化学固定法, 回収法
Resist Wall	植物の抗重力反応における微小管-原形質膜- 細胞壁連絡の役割 「きぼう」利用開始前実施(ESA実験装置利用)	大阪市立大学 保尊隆享	2008年3月~6月	EMCS/PCC	KFT
Cell Wall	微小重力環境下におけるシロイヌイズナの支持組 織形成に関わる遺伝子群の逆遺伝学的解析 「きぼう」利用開始前実施(ESA実験装置利用)	東北大学西谷和彦	2008年3月~6月	EMCS/PCC	KFT
Space Seed	微小重力環境における高等植物の生活環	富山大学 神阪盛一郎	2009年9月~11月, 2010年4月回収	CBEF/PEU	KFT, 冷凍, 冷蔵
Ferulate	重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の 制御機構	大阪市立大学 若林和幸	2010年6月, 2010年11月回収	CBEF/ MEU	冷凍
Hydro Tropi	微小重力下における根の水分屈性とオーキシン 制御遺伝子の発現	東北大学 髙橋秀幸	2010年10月	CBEF/ V-MEU	KFT
CsPINs	植物の重力依存的成長制御を担うオーキシン 排出キャリア動態の解析	東北大学 髙橋秀幸	2011年4月~ 2014年5月	CBEF/ V-MEU	KFT/CFB
Resist Tubule	植物の抗重力反応機構ーシグナル変換・伝達から 応答まで	大阪市立大学 保尊隆享	2012年10月~ 2014年8月	CBEF/PEU, V-MEU, CB顕微鏡	CFB
Aniso Tubule	重力による茎の形態変化における表層微小管と 微小管結合タンパク質の役割		2013年11月~ 2015年4月	CBEF, 蛍光顕微鏡	なし
Plant Gravity Sensing	, 植物細胞の重力受容の形成とその分子機構の研究	金沢工業大学 辰巳仁史	2014年10月~ 2016年5月	CBEF/PEU	CFB, CFA
Plant Rotation	植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の 検証	東北大学 髙橋秀幸	2015年2月~8月	CBEF/PEU	なし
Auxin Transport	宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構 および姿勢制御機構の解明	大阪府立大学 上田純一	2016年5月~ 2017年3月	CBEF/V-ME, MEU	CFB, 冷凍
Space Moss	宇宙におけるコケ植物の環境応答と宇宙利用	北海道大学 藤田知道	2019年7月~ 2020年1月	CBEF/PEU, 蛍光顕微鏡	, , , , ,

EMCS: European Modular Cultivation System, PCC: Plant Cultivation Chamber, CBEF: 細胞培養装置, CB: クリーンベンチ, PEU: 植物実験ユニット, MEU: 計測ユニット, V-MEU: カメラ付き計測ユニット, CFB: 化学固定バッグ, CFA: 化学固定器具, KFT: KSC Fixation Tube(化学固定チューブ)

宇宙での実験操作を行う宇宙飛行士の訓練,実験を確実に遂行するための準備と軌道上実験運用のノウハウは,植物実験のみならず,細胞培養や線虫,タンパク質の結晶化実験など,多くの宇宙実験の実現性の向上に大きく貢献している。

現在,これまでに得られた成果をもとに将来の有人宇宙探査に必要な食料生産に役立つ要素技術開発を検討している。宇宙での植物科学は新発見を導き、宇宙での研究を実現するための実験装置開発の要求のもとになったといえる。さらには人類の宇宙進出を支える食料生産の基礎となるデータがとられている。植物科学は地球での生命を支える基礎となるだけでなく、宇宙開発にも大きく貢献している。

# 3. 機材の開発

# 3-1. 細胞培養装置

植物実験に限らず、細胞培養などの科学実験を行う場合には温度、湿度などの環境条件を整えることが必要である。そのためにインキュベーターが使われる。細胞培養装置は宇宙用に開発されたインキュベーターであり、特徴としては1g対照実験用の遠心機を備えている。植物実験はもとより細胞実験等にも幅広く使われる共通実験装置である(矢野 2010a, Yano et al. 2012)。きぼう内で使用される装置を図1に示す。











図1. きぼうの船内の植物実験に使用される実験装置

A クリーンベンチ(CB), B 細胞培養装置(CBEF), C 細胞培養装置(ドアオープン状態), C1 微小重力区, C2 人工重力区(遠心機), D 植物実験ユニット(PEU), E 計測ユニット(MEU), F カメラ付き計測ユニット(V-MEU)。

本来,重力の影響を調べる実験は,重力のみが異なる条件で実施することが必要である。 試料は軌道上に到着する前に地上輸送,打ち上げ時の振動などすでに通常の実験室環境とは異なる環境を経験している。打上振動の影響は大きく,宇宙での対照実験の必要性が示唆されている。従って,宇宙実験室における1g 対照群を可能にする遠心機の役割が重要である。スペースシャトル時代も、BIORACKやNIZEMIといった遠心機を備えた培養装置が搭載されていたが,実験期間は2週間程度が限界であった。ISSではこれまでのスペースシャトル実験ではたやすく得られなかった軌道上での長期間の人工重力条件を使い,重力の有無による細胞レベル,遺伝子レベルでの変化を見ることができるようになったことに大きな意味がある。共通実験装置として利用されてきたクリーンベンチ(Clean Bench, CB,図1A)には位相差蛍光顕微鏡が設置されており,植物実験にも使用された。

# 3-2. 植物実験ユニット

2009年のSpace Seed実験では、世界で初めて人工重力条件と比較しながら微小重力下での植物栽培のSeed-to-Seed実験を成功させた(神阪 2010, Yano et al. 2013)。この実験では細胞培養装置(CBEF,図1B,C)と植物実験ユニット(PEU,図1D)を用いてシロイヌナズナを2か月にわたって栽培した。使用したPEUは照明、給水システム、換気システム、観察用カメラを装備しており、宇宙飛行士により「きぼう」内のCBEFにPEUを設置したあとは筑波宇宙センターから運転ファイルを転送することにより、栽培実験の開始、停止、実験条件の変更、記録を行うことができるものである。栽培容器は地上部高さ50 mm、容積120 mlと小型ではあるものの、シロイヌナズナの発芽、開花、結実という植物の生活環を完結させることができた。いわば宇宙用の小さな植物工場の開発に成功したといえる。照明については生育用にはピーク波長660 nmの赤色LED、470 nmの青色LEDの混合光を用い、合計光量子東密度は110~190 μmolm²sec¹であり、観察用には白色チップタイプLEDを用いた。PEUでは赤青交互に配列された生育用LED照明と試料部が近接して配置されたことによるLED光の空間的な分布の不均一や、容器中央部と周縁部の光量分布の偏りが懸念されたため、光分布を均一化するため試料部上部に光拡散板を搭載し、また側面や底面に光の反射と均一化を可能とする金属反射板を設けて解決を図った(矢野ら 2008)。

# 3-3. 試料保存技術の開発

#### 3-3-1. 化学固定技術

宇宙での試薬の保管や使用法についても検討が必要であった。地上では生育した植物体は速やかに解析に供する。また試薬浸漬を行う場合,使用する試薬も調製後速やかに使用する。一方,宇宙では生育した植物を宇宙で詳細に解析するのは通常困難である。植物体を培地と分離した後,化学固定もしくは冷凍,冷蔵などの保存手段をとったうえで地上に帰還させ,詳細な解析を行うことになる。使う試薬は地上で調製してから植物を処理するまでに保管しておくことが求められ,保管期間は数日から数週間となる。宇宙での二次処理,三次処理は困難であるため,薬剤に浸したまま帰還させ,地上実験室まで返送してから作業の続きをすることになる(矢野 2010b)。

ISSにおいてRNAlaterやパラフォルムアルデヒド液のような生物試料を保存する薬剤を使う場合、安全性に考慮が必要である。微小重力環境下において漏れたり飛び散ったりして宇宙飛行士に危害を加えないよう適切に封入しつつ使用しなければならない。1998年のSTS-95ミッションにおける植物生育実験時や2010年までのISSでの初期実験は、米国航空宇宙局(NASA)が開発したKFT(Kennedy Space Center Fixation Tube)を用いて試薬浸漬操作を行っていた。KFTは三重封入構造に試料を保持しながら化学固定液の試料への浸漬操作を可能にするプラスチック製チューブである。ところがJAXA実験においてこのKFTが正常に機能しなかったことがあり、2011年からはJAXAにおいても試料保存技術開発の一環で、化学固定を目的とする機材の開発が行われた。CFB(Chemical Fixation Bag(化学固定バッグ))は「きぼう」で植物体をRNAlaterのような薬剤で処理するためにJAXAが開発した器具である(Soga et al. 2015)。CFBは外、中、内の3重のバッグで構成されている。外と中バッグはジッパーシールの袋で、内バッグはクリップで封入される。試料を内バッグに収納し、内バッグのクリップと中バッグ、外バッグのジッパーを閉じた後、薬剤の入ったパウチの封入を破ることによって試料の浸漬処理を行う(図2)。2日~4日程度冷蔵(2~4°C)で浸漬した後、長期保存のためには-80°Cで凍結して保存する。

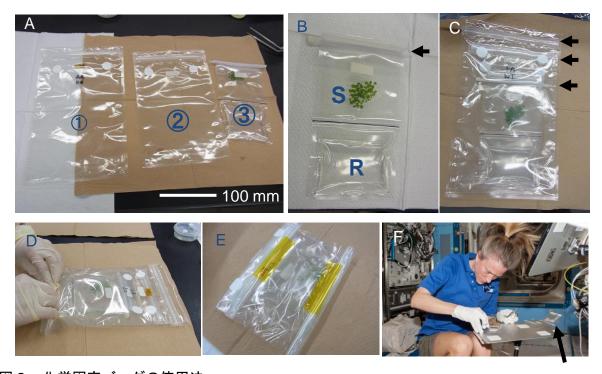


図2. 化学固定バッグの使用法

A Chemical Fixation Bag (CFB) ①外バッグ ②中バッグ ③内バッグ,B 内バッグの様子。クリップ (矢印) によって封入が保たれる。S:植物体を入れる区画,R: RNAlater の入ったパウチ,C 内バッグと中バッグが外バッグに収納されている。矢印はジッパーとクリップでの封入部分。D バッグを端から巻いていき,パウチの封入を破る。E コンパクト収納するためバッグの両端をテープで止める。F Karen Nyberg 飛行士が Resist Tubule 実験の際に「きぼう」日本実験室内でシロイヌナズナを処理している。矢印は内バッグに入った RNAlater パウチ。図は、Soga *et al.* 2015 より転載。



図 3. 化学固定器具(CFA) 175 mm (L) x 75 mm (W) x 40 mm

ISSにおいて、RNAlaterは毒性レベル1 (THL1)に識別される試薬であり、二重封入の要求に対し、CFBは二重封入を満足することができる。なお、「きぼう」モジュールが何らかの原因により減圧された際にも封入状態を保持する必要がある。CFBはJAXA安全審査会の承認を得ており、2013年11月のResist Tubule実験で最初に使用された。CFBはその後、他の植物実験にも多数採用されている(表 1)。

さらに高い毒性レベルを持つ薬剤に対しては、もう一重の封入レベルが求められる。JAXAはパラフォルムアルデヒド液(4%)のような毒性レベルが高い薬剤に対して、三重の封入をすることができるCFA(Chemical Fixation Apparatus(化学固定器具))を開発し(図3)、Plant Gravity Sensing実験に使用した。CFAは植物サンプルだけでなく、線虫培養液の化学固定にも利用された。

## 3-3-2. 冷凍冷蔵庫

宇宙で試料を冷蔵・冷凍保存するためには、欧州宇宙機関(ESA)によって開発されたISS用 冷凍冷蔵庫MELFI (Minus Eighty Laboratory Freezer for ISS) が使われる。温度は個別に設定可能であるが、通常、冷蔵区画は2°C、冷凍区画は-95°Cに保持されている。また地上と宇宙との往還にはNASAが開発した-95°Cに設定可能なアクティブ冷凍庫GLACERや2~4°Cを保持できるパッシブ冷蔵箱Double Cold Bagの使用が可能である。

試料保管技術開発のうち、冷凍冷蔵手段拡張の一環でJAXAでも独自に冷凍冷蔵庫を開発した。「きぼう」搭載用ポータブル冷凍・冷蔵庫FROST (Freezer-Refrigerator of Stirling Cycle) である (図4)。 FROST は生命科学実験や物理・材料実験、タンパク質結晶化実験のサンプルを保存することを目的として開発され、2013年に「きぼう」に搭載された。内部は330 mm x 150 mm x 250 mmの寸法の収納スペースがあり、室温から-65℃までの設定が可能である。通常、冷蔵庫として4℃の設定で使用されている。

2017年には、冷凍モード(-80°C)から常温モード(20°C)の設定が可能なFROST2がISS「きぼう」日本実験棟に設置され、稼働している。FROST2は内部寸法が331 mm x 282 mm x 193 mm でFROSTより多少広めである。FROST2もFROSTと同様、実験要求に合わせて任意の温度設定が可能であり、2019年現在、20°C設定でタンパク質結晶成長実験に使用されている。



図4.「きぼう」に設置された FROST

# 3-4. 観察システムの開発

#### 3-4-1. 位相差蛍光顕微鏡の開発と利用

微小重力環境で成長したサンプルを化学固定して地球に持ち帰れば、詳細に解析することができる。一方、化学固定による変化や保存の影響が否めない。宇宙で成長した植物の細胞内動態をリアルタイムライブイメージングすることの科学的意義は大きい。そのため、JAXAは保存技術の開発と並行して観察システムの開発も進めてきた。「きぼう」日本実験棟には共通実験装置の一つとして内部で生物試料操作を可能とする、グローブボックスの役割も果たすCBが設置されていた(図1A)。CBの内部には、Nikon製の位相差蛍光顕微鏡が備えつけられており、これと高感度カメラを組み合わせてシロイヌナズナの胚軸細胞の表層微小管を蛍光観察した(Resist Tubule実験)。2013年には、蛍光顕微鏡(DMI6000B, Leica Microsystems をISS用に一部改修)を、「こうのとり」HTV3号機で打ち上げて「きぼう」に設置した(図5)。この蛍光顕微鏡は当初メダカの胚の観察に使用された後、2013年11月から10回にわたってAniso Tubule実験に使われた。2014年から2016年には培養細胞の観察に、2019年7月にはSpace Moss実験にも使われている。さらに、きぼう利用戦略(JAXA 2017)では「きぼう」の技術の質・量・多様性の大幅向上を掲げており、新たな実験プラットフォームとしての利用基盤の拡大の一環として「ライフサイエンス実験用ライブイメージングシステム(COSMIC)」と呼ばれる共焦点顕微鏡に関して、2020年からの運用を目指して準備を進めている(JAXA 2018)。



図 5. 蛍光顕微鏡 (DMI6000B, Leica Microsystems を宇宙用に一部改修)

## 4. 実験運用

# 4-1. 運用準備

## 4-1-1. 実験要求の設定と適合性確認試験

宇宙実験のテーマ選定の際、科学評価、技術評価を経て候補テーマが選定される。宇宙実 験では、射場への輸送、ISSへの輸送、実験開始までの保存、実験終了後の保存など通常の実 験室での実験条件とは異なる要素が存在するため,提案時には明確になっていないパラメー タがある事が多い。このような明確になっていないパラメータに関して, 実施予定時期の「き ぼう」の状況を考慮して設定していく。具体的には使用する機材,解析に必要なサンプル数, サンプルの種類,温度・湿度,培地・水の量,実験期間などの各値を明確化していく。植物の 場合これらに加えて生育光量、観察タイミング、給水量、化学固定液の種類、濃度、保存期間 などを決める。決定のためには実際に地上にて実験しておくことが必要になる場合が多い。 また、決定したパラメータを用いて、実験が成立するか実際のサンプルを用いて確認する作 業も必要である。実験パラメータを決め、確認する作業を適合性確認試験と呼ぶ。宇宙実験 の成立性は機材のフライト品もしくはフライト相当品を使って試験する。この作業はJAXA、 研究者、機器開発メーカの共同作業である。「きぼう」利用初期には開発中の機材を使用して 試験を実施していたため、条件検討や確認に長期間かかることが多かった。現在では、表1 や図1に示すように開発済みで宇宙での使用実績のある機材を用いることが多くなっており、 JAXAには多数の実験のノウハウが蓄積されているので、適合性確認試験に係る期間は短縮の 傾向にある。しかし、実験条件は目的やサンプルによっても異なるため、安易に前例を踏襲 するだけではなく、実サンプルを用いたフライト前の地上試験を実施することを推奨してい る。

## 4-1-2. 利用計画調整

ISSはNASAやESAなど国際パートナー (International Partner, IP) と利用計画を調整しながら国際的に運営されている。利用計画はインクリメントと呼ばれる期間の単位で行う。ISSは1998年11月に基本機能モジュール (FGB,ロシア語で日の出を表す"ザーリャ"という愛称で呼ばれる)が打ち上げられ、2000年10月からは有人滞在が開始された。この有人滞在の開始を区切りとして約半年ごとに番号をつけて「インクリメント」とよび、利用の計画を立案していた。2009年のインクリメント19からは有人輸送機ソユーズの往還に合わせて2つのインクリメントの期間が約半年になるように区切り、利用計画を立案している。例えば2019年3月から10月の期間はインクリメント59/60と呼ばれ、この期間に特に注目すべきJAXAの活動をタイトルに示し、実施方針を公開している (http://iss.jaxa.jp/kiboexp/plan/inc5960/)。約半年のインクリメント中にJAXAだけで約30実験が実施されている。これらの実験の優先順位をつけ、計画・実行していく。

## 4-1-3. 手順書作成

宇宙では研究者の代わりに宇宙飛行士が実験操作を行う。宇宙飛行士は実験操作に慣れた研究者とは限らない上、宇宙での操作には重力がないことを考慮しなければならない。宇宙利用を前提とした機材を設計することはもちろんのこと、わかりやすい手順書を作成することが重要になる。飛行士が訓練のため来日するチャンスは限られ、一実験に関してほぼ一度きりのチャンスしかない。そのため、宇宙飛行士に実験訓練によってテーマ固有の実験操作を習熟させることは期待できない。また訓練してから宇宙滞在までに半年から一年以上の期間がある事も多い。よって、宇宙でいざ実験する際に見る手順書が重要になる。手順書の記載に従えば間違いなく操作できるような手順としておくことが実験成功のカギである。

ISS実験の手順はラップトップコンピュータやタブレット端末上に表示される。手順書は専用のソフトで書かれるため、専門の技術者が作成する。この技術者は宇宙用装置を地上から操作するオペレーターでもある。JAXAの実験要求担当(ユーザーインテグレーション担当という)は、研究者から出された手順の源泉として実験要求を手順書作成担当に伝え、完成した手順書を見て実験目的が損なわれていないこと、操作時の注意事項、実験パラメータが正しく書かれているかを確認する。新規で作成した場合には、机上で読み合わせをするだけではなく、実際に手順に従い機材を操作してみる試験的な確認のステップをいれることが推奨される。

#### 4-1-4. 宇宙飛行士の訓練

シャトル時代には、宇宙飛行士の訓練は米国テキサス州ヒューストンのジョンソン宇宙センターで行われていた。宇宙実験の提案者とJAXA実験要求担当者(ユーザーインテグレーション担当)が直接宇宙飛行士の実験訓練も担当したが、「きぼう」日本の実験装置を使用する現在は、宇宙飛行士の訓練は訓練設備のある筑波宇宙センターで、装置ごとに養成された訓練インストラクターが行う。そのため、研究者と担当者は宇宙飛行士の訓練に要求を出す。訓練に必要な実験サンプルや機材の提供、スケジュール調整などが必要になる。

## 4-2. 射場作業

2011年にスペースシャトルが引退した後、ISSに試料を輸送する手段は日本の宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)、米国民間企業のドラゴン補給船(SpX)とシグナス補給船、ロシアのソユーズ宇宙船とプログレス補給船となった。それぞれ打上射場と打ち上げからISS 到着にかかる時間が異なるため、サンプルの寿命と打上貨物の搭載状況(混み具合)により打ち上げ機を決定する。

植物の試料は「こうのとり」とドラゴン補給船を使って打ち上げられることが多い。「こうのとり」は種子島宇宙センターから、ドラゴン補給船は米国フロリダ州ケープカナベラルから打ち上げられる。生物実験ではできるだけ早く試料を宇宙に運んで実験したいという要求があるので、射場近くの設備で最終サンプル準備を行うことになる。植物種子は保存が可能なため日本の筑波宇宙センターで栽培容器に種子を固定して輸送するが、射場で輸送機への引渡し前に輸送による種子の外れなどがないかを確認して輸送機側に引き渡す。一方、長期間の保存ができない化学固定液の調製は射場で行う場合が多い。

# 4-3. 軌道上実験運用

射場において引き渡した試料は輸送機に積み込まれてISSに届けられるが、実験開始の時期はタイムライン(飛行士の作業を含むISS全体の時間割)の調整によって決められる。4-1-2項で述べたインクリメントにおける利用計画の中で実験の優先順位がつけられ、実施時期の調整も半年のインクリメント単位で行われる。日割りのタイムラインがでるのは実施の3週間前である。サンプルの寿命の制約により優先順位調整がされたうえで、宇宙での時間割が作成され実行上のコンフリクトなどを排除すべく国際調整が行われ、実施に至る。この調整は実験の実施日まで続く。優先度はきぼう利用戦略に基づいて、インクリメントペアの単位でインクリメントマネジャがリードの元、JAXA有人宇宙技術部きぼう利用センター、有人宇宙技術センターにより調整される。

シャトル時代にはジョンソン宇宙センターで行っていた実験の運用は、「きぼう」での実験は筑波宇宙センターでモニターしたり、操作指示を出したりすることが可能となった。植物実験の場合、給水や昇温によって実験を開始することが多い。宇宙に送った種子や芽生えを保持した試料容器を、宇宙飛行士が装置に組み込み、装置へのコマンド送信によって実験開始する。その後は装置に付属したカメラによって定期的に画像を確認し、温度・湿度をモニターする。栽培終了時には収穫して化学固定、冷蔵、冷凍庫への移設を行う。これらの宇宙飛行士の操作時に地上から助言が必要な場合、研究者が操作に立ち合い必要に応じて運用管制官経由で宇宙飛行士に対して指示を出す。

## 4-4. サンプルの回収

実験が終了して保存されたサンプルを、回収する。2019年現在、ISSからの復路輸送はソユーズ宇宙船とドラゴン補給船に限られ、ロシアの場合は個別契約が必要であるため、特別な事情がなければ回収容量が比較的多い、ドラゴン補給船を利用することになる。ドラゴン補給船は米国の東海岸近くの大西洋に着水するが、近い将来には着水場所の変更も検討されて

いる。サンプルはテキサス州ヒューストンのジョンソン宇宙センターに温度が保たれて運ばれる。回収サンプルの日本への返送はJAXA/NASA担当者間の技術調整の結果,NASAの冷蔵冷凍担当者に梱包作業をしてもらい、日本に返送することができるようになった。返送されたサンプルは筑波宇宙センターを経由して各研究者の実験室に返送される。

# 4-5. 解析, 成果報告

サンプルが回収され、研究室に返送されてから約1年をめどに、実験の成果報告が求められる。解析結果の論文発表は先になることがあるが、JAXAは早期の成果報告を求める。「きぼう」の利用成果を示す必要があるからである。

シャトルを利用した植物生育実験の結果から、微小重力環境では重力屈性が見られないことに加えて植物の芽生えの形態の変化、細胞壁の構成成分の変化(Wakabayashi et al. 2015)、根の水分屈性が現れやすくなるなどの特徴がみられた(Takahashi et al. 1999)。日本がISSで実施したSeed-to-Seed実験の結果と、NASA、ロシア、ESAが実施した結果を総合すると、宇宙でも生育環境を整えることができれば植物の生活環を完結させることが可能であるといえそうだ。一方でSpace Seed実験の結果からはチャンバーごとの生育にばらつきがあり、宇宙で得られた種子数は少なく、次世代の発芽率も地上群と比較して低下していた(Karahara et al. 2012)。

植物の生殖成長を実験的に検証するためには生活環が短いシロイヌナズナを用いても1~2 か月かかり、これは宇宙実験としては比較的長い期間となる。また成長の段階ごとに環境の影響が大きく変化することに加えて、ISSでの実験機会は限られており、実験条件も装置ごとに異なるため、宇宙で多くの植物実験が行われている割に実験結果は再現性に欠けている。今後大型作物栽培装置が開発されれば、十分なN数を設定し、複数回繰り返し実験による再現性を確認することが求められる。

#### 5. 将来有人探査時代の効率的な食料生産に向けて

ISSは地球から隔離された空間で、空気水の一部を再生して運用されているが、食料は全て地球からの輸送に頼っている。今後、長期の有人宇宙探査を実現するためには、数年間の補給がない状況を想定しなくてはならない。つまり、追加輸送に頼ることなく、初期入植時に持ち込んだ資源と現地の資源を用いて空気、水、食料を生産し、物質循環による再生利用をしながら活動していくため、宇宙での自給自足とリサイクルシステムの確立が必要になる。

筆者が2015年に提案し、JAXA有人宇宙部門で現在5年目を迎えた食料生産技術開発プロジェクトは、最終的には火星基地において持続可能な宇宙活動を実現することを目指すものである。これまでの物理化学的処理を主要要素とした閉鎖系生命維持システムに、植物栽培による食料生産、微生物を利用した物質循環プロセスを加えることによる閉鎖生態系システムを構築することを目指す。この活動と並行するようにJAXA宇宙探査イノベーションハブ(宇宙探査ハブ)が発足し、2017年からは月面農場ワーキンググループ(月面農場WG)活動に筆者も委員として参加している。月面農場WGでは最先端の植物工場技術を宇宙用にも発展させ、月面で持続的に活動するための農場システムを検討する調査研究を行い、2019年春に検討報告書を公開した(JAXA 2019)。

同時に、日本の有人宇宙探査方針としても月近傍の宇宙ステーション計画が現実味を増し てきている。月近傍の宇宙ステーション計画は月近傍拠点(深宇宙ゲートウェイ)と呼ばれ, 文部科学省国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会資料(ISS・国際宇宙探査小委員会 2017) に示されている。2019年3月には、ISS参加機関である米国航空宇宙局(NASA),カナダ 宇宙庁(CSA), 欧州宇宙機関(ESA), ロシア(ROSCOSMOS), 文部科学省の代表からなる, 国 際宇宙ステーション多数者間調整会合 (International Space Station Multilateral Coordination Board: ISS MCB) が開催され、有人月面探査のなかで深宇宙ゲートウェイが重要な役割を担う ことが確認された (http://www.jaxa.jp/press/2019/03/20190312b j.html)。このようにISSからより 遠くへ有人探査計画が具体化していくという過渡期に我々は生きている。長期宇宙探査時代 の食料をめぐっての研究開発活動は、国際的には現在の宇宙食の保存性や種類を拡大するこ とを目的として、食生活に彩を添える生鮮野菜の栽培に関する研究が進んでいる。JAXAでは 保存食や生鮮野菜栽培の研究だけでなく、炭水化物・タンパク質・脂質をバランスよく採れ るよう, イネ, サツマイモ, ジャガイモ, ダイズなどの炭水化物やタンパク質, 脂質を豊富に 含む植物の栽培を検討していく。食料生産に関しての研究としては、2018年度にISSでの候補 実験テーマとして大阪府立大学北宅善昭教授の提案テーマ「食糧作物成長の重力応答解析と 宇宙植物工場への応用」が選ばれ (http://iss.jaxa.jp/kiboexp/participation/application/documents /fs2018/life kitaya.pdf), サツマイモの栽培に関する「きぼう」での実験に向けた適合性確認作 業が進められている。

また、植物も含む応用的な分野としてJAXAの新事業推進部のSpace Food X (https://www.spacefood-x.com/)では、3Dフードプリンターや微細藻類や培養肉を使った効率的なタンパク質生産など、最新のバイオ技術の利用も視野に入れて活動している。食料を作るだけでなく、再生利用する廃棄物処理をセットとした閉鎖生態系の構築を目指した各要素技術も必要であるため、今後JAXAでの研究活動を重点化する可能性がある。

# 6. おわりに

月の重力は0.17g, 火星は0.83g であるので, 重力環境の違いによって植物がどのように応答を変えるか, 微小重力環境において遠心分離機を用いて低重力環境を作出し, 実際のデータを得ることが好ましい。きぼう設置当初から共通実験装置として利用されてきたクリーンベンチは, 2019年その役割を終え, こうのとり8号機とともに大気圏突入により廃棄された。クリーンベンチのエリアには細胞培養装置2号機が設置される。細胞培養装置2号機には1号機より大型の遠心機を設置することが可能であるため, 植物装置の搭載も可能である。ただし, 大型植物栽培装置を設置することには開発要素が存在する。今後大型装置の開発が実現するよう, 宇宙探査時代に向けた食料生産研究の意義を主張するとともに, これまでの研究成果・蓄積した実験運用ノウハウに基づき, 科学的意義が高い宇宙植物実験の実現を目指して実験計画を検討していきたい。

# 謝辞

本稿で紹介した活動については宇宙実験の提案者,共同研究者,およびJAXA有人宇宙技術部門の多大な協力のもと,日本宇宙フォーラム,有人宇宙システム株式会社,株式会社エイ・イー・エスとともに実施した。執筆にあたっては,笠原春夫主任研究開発員,株式会社エイ・イー・エス鎌田源司シニアエンジニアをはじめとする方々に多くのサポートをいただいた。この場をお借りして感謝の意を表する。

# 引用文献

- ISS・国際宇宙探査小委員会(第20回) 2017. 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会. 資料20-1-1.
- JAXA 2017. きぼう利用戦略 第2版
- JAXA 2018.「きぼう」船内実験室利用ハンドブック. 78-79. http://iss.jaxa.jp/kibouser/library/item/pm\_handbook.pdf.
- JAXA 2019. 月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版.
- 神阪盛一郎, 唐原一郎, 笠原宏一, 山田晃弘, 矢野幸子, 谷垣文章, 笠原春夫, 桝田大輔, 嶋津徹, 福井啓二, 西谷和彦, 保尊隆享 2010. 国際宇宙ステーションでのSpace Seed実験. 生物工学会誌. 88: 288-291.
- Karahara, I., Suto, T., Yashiro, U., Yamaguchi, T., Tamaoki, D., Yano, S., Tanigaki, F., Shimazu, T., Kasahara, H., Kasahara, H., Soga, K., Hoson, T., & Kamisaka, S. 2012. Life cycle of Arabidopsis thaliana under microgravity condition in the International Space Station Kibo module. *Proc. of the 39th COSPAR Scientific Assembly*.
- 嶋津徹, 相澤幸子 1999. STS-95における宇宙実験(植物・細胞). 宇宙生物科学 13:25-32.
- Soga, K., Yano, S., Matsumoto, S., & Hoson, T., 2015. Hypergravity experiments to evaluate gravity resistance mechanisms in plants. In Plant Gravitropism: Methods and Protocols (Ed. Blancaflor EB). *Methods Mol. Biol.* 1309: 307-319.
- Takahashi, T., Mizuno, H., Kamada, M., Fujii, N., Higashitani, A., Kamigaichi, S., Aizawa, S., Mukai, C., Shimazu, T., Fukui, K., & Yamashita, M. 1999. A spaceflight experiment for the study of gravimorphogenesis and hydrotropism in cucumber seedlings. *J. Plant Res.* 112: 497-505.
- Wakabayashi, K., Soga, K., Hoson, T., Kotake, T., Yamazaki, T., Higashibata, A., Ishioka, N., Shimazu, T., Fukui, K., Osada, I., Kasahara, H., & Kamada, M. 2015. Suppression of hydroxycinnamate network formation in cell walls of rice shoots. *PLoS One* 10: e0137992.
- Yano, S., Kasahara, H., Masuda, D., Tanigaki, F., Shimazu, T., Suzuki, H., Karahara, I., Soga, K., Hoson, T., Tayama, I., Tsuchiya, Y., & Kamisaka, S. 2013. Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station. Adv. Space Res. 51: 780-788.
- Yano, S., Masuda, D., Kasahara, H., Omori, K., Higashibata, A., Asashima, M., Ohnishi, T., Yatagai, F., Kamisaka, S., Furusawa, T., Higashitani A, Majima, H.J., Nikawa, T., Wakabayashi, K., Takahashi, H., Suzuki, H., Shimazu, T., Fukui, K., Hattori, A., Tanigaki, F., Shirakawa, M., Nakamura, T., Yoshimura, Y., Suzuki, N., & Ishioka, N. 2012. Excellent thermal control ability of Cell Biology Experiment Facility (CBEF) for ground based experiments and experiments onboard the Kibo Japanese experiment module of International Space Station. *Biol. Sci. Space* 26: 12-20.

矢野幸子 2010a.「きぼう」での生命科学実験(その1). 日本航空宇宙学会誌 58: 105-110. 矢野幸子 2010b.「きぼう」での生命科学実験(その2). 日本航空宇宙学会誌 58: 192-197. 矢野幸子, 田山一郎, 永瀬睦 2008. 第5章宇宙ステーション植物生育実験装置とLED照明ユニット, アグリフォトニクス, シーエムシー出版, 東京, 259-266.