

## 2. 宇宙農業の過去、現在

篠原正典(帝京科学大学 生命環境学部自然環境学科 准教授)  
 矢野幸子(JAXA 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 主任研究開発員)

### 2.1. 宇宙農業の歴史

1960年代に米国と旧ソビエト連邦が人工衛星や有人宇宙船を用いた宇宙開発を開始してから約60年が経過しようとしている。2018年の今、国際宇宙ステーション(International Space Station, ISS)は運用20周年を迎えた。そして人類は月近傍、月面、火星へと生存可能な領域を広げようとしている。有人宇宙活動を長期的・持続的にする技術の一つとして食料生産技術があり、環境制御・自動化・リサイクルがキーとなる。これらの技術を包含するのが閉鎖生態系生命維持システム Controlled Ecological Life Support System (CELSS)であり、生命維持システムに生物を利用するのが生物再生型生命維持システム Bioregenerative Life Support System(BLSS)である。

宇宙開発の初期段階から米国とロシア(旧ソ連を含む)は宇宙船内での植物栽培についても積極的に取り組んできた。宇宙環境を使った植物の研究は、重力感知メカニズムや光や重力への植物の反応を探る重力生理学的研究や植物と微生物の共生に着目する分野の他、農学的なアプローチで持続的な作物生産を目的とする宇宙農業的研究に分類され、これまで宇宙船内のスペースの制約から宇宙では比較的小さな栽培装置を用いて植物生理学的研究が主流であった。BLSSを目指した規模の大きな栽培研究は地上の実験施設で実施されてきた。地上での閉鎖生態系栽培施設研究は、ロシア、米国、欧州、日本、カナダがそれぞれ、もしくは協力しつつ研究を進められており、最近では中国も精力的に研究を進めている。BLSS研究の歴史をまとめたものを図に示す<sup>1)</sup>。

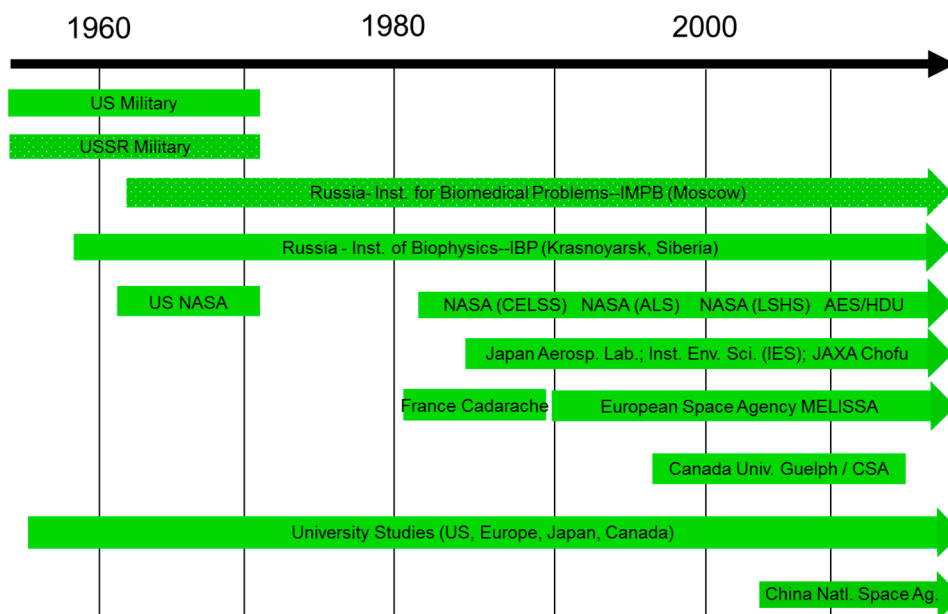


図 2.1 生物再生型生命維持システム (BLSS) 研究の歴史<sup>1)</sup>

### 2.2. 藻類の利用

1950年から1960年代の宇宙開発の超初期のライフサポート技術研究として、クロレラなどの藻類を使って酸素発生と炭酸ガス除去の研究が盛んに行われた。しかしマーキュリー計画やジェミニ計画に際しては、短期の宇宙滞在に対して光合成による空気再生システムの重量や電力等が割に合わず、採用されなかった。藻類の利用に関して長期滞在においては有用性の検討の余地はあるが、可食性や揮発性ガスの発生等、課題の解決の必要があることが分かっている<sup>2)</sup>。

## 2.3. 各国の宇宙農場

### 2.3.1. ロシア(旧ソ連を含む)

閉鎖環境でのライフサポート研究に関しての地上実験として、ロシア(旧ソビエト連邦)は 1950 年代からシベリアのクラシノヤルツク(Krasnoyarsk)に設置した BIOS という地上設備を用いて、閉鎖環境での生命維持を目的とした植物栽培研究を実施してきた(図 2.2)<sup>2)</sup>。BIOS ではコムギなどを用いてガス、栄養、水のリサイクルに関する研究が行われていた。15 年以上にわたり約 20m<sup>2</sup> の栽培面積のファイトトロンで食料生産と酸素供給に植物を利用する研究が実施され、藻類についても研究対象であった。しかし藻類の培養槽と植物栽培区をつないでいたため、トマトやジャガイモの成長が止まり、キュウリの開花もせず、葉は黄化し、ビートの葉にはアントシアニンの蓄積が見られたことから、藻類から植物栽培を阻害する有毒な揮発性のガス成分の発生が疑われるなど問題も明らかになった。このため 1970 年代末から 1980 年代の BIOS-3 プロジェクトにおいては植物の光合成産物の研究にフォーカスされた。その後も 2 つの BIOS-3 ファイトトロンで計 41 m<sup>2</sup> の栽培面積で定量的な栽培データを得ていた。人の尿を再生した水でコムギを育てる実験では培養水へのナトリウムの蓄積が見られることなど、水リサイクルにおけるナトリウム除去の必要性が明らかになった。

BIOS-3 の研究チームは大規模な閉鎖系生命維持システムとしての生物再生型技術開発を前提に地上実験を展開していたが、ロシア生物医学問題研究所(Institute for Biomedical Problems, IMBP) は独自の有人宇宙ステーションや後に ISS において実際の宇宙セットでの栽培実験を開始した。ロシアは最初の有人宇宙ステーションサリュート(Salyut) を 1971 年に打ち上げ、Oasis 植物栽培システムによって植物実験を実施した<sup>3)</sup>。ロシアは宇宙ステーションの改良と共に栽培装置の改良を重ね、次の有人宇宙ステーションミール(Mir) 内に植物栽培装置 SVET を設置した(図 2.3)。また ISS のロシアモジュール内に植物栽培装置 Lada(図 2.4)を設置するなど、継続的に宇宙用の栽培装置を開発・利用している。これまでにコムギ、オオムギ、ダイズ、ミズナなど様々な植物栽培が試みられ、水とガス環境のデータが取得されている。サリュートやミールでの実験当初は植物に成長阻害や結実障害が見られたが、最終的にはエチレンの蓄積によると結論され、栽培装置内外でのガス交換およびエチレン除去フィルターの必要性が示唆された。IMBP は宇宙ステーションでの研究を進めることで、火星への移動期間における微小重力環境での食料生産を目指している<sup>2)</sup>。



図 2.2 ロシア(旧ソビエト連邦)による BIOS-3<sup>2)</sup>



図 2.3 ロシア宇宙ステーションミールでの植物栽培 (提供 NASA)



図 2.4 ISS ロシアモジュールでの植物栽培 (提供 NASA)

### 2.3.2. 米国

#### (1)全般

米国航空宇宙局(NASA)が発足して間もない 1958 年、Biologistics Symposium がオハイオ州で開催され、人間にとって宇宙滞在時に必要な食料となる作物リストが作られた<sup>2)</sup>。そこでは低光量でも育ち、コンパクトサイズで高収量、尿リサイクル水で問題となる塩(ナトリウム)への耐性といったクライテリアが整理され、サツマイモ、レタス、ハクサイ、キャベツ、カブ、カリフラワーなど 13 種類の作物が選定された。1960 年代から 70 年代は宇宙プログラムには米軍も大きく関与しており、ライフサポートのための植物研究が行われていた。その後、数十年間の技術進展により、人工光による高光量出力が技術的に可能になり、垂直農法といった栽培空間デザインや、水耕栽培、高 CO<sub>2</sub> 栽培による光合成効率の増加の試みへと研究が進展していった<sup>4)</sup>。

NASA は 1980 年代に CELSS 研究に改めて取り組み、ワークショップを開くなどして作物栽培についての議論を進めていた。NASA では Kennedy Space Center (KSC)、Lyndon B. Johnson Space Center (JSC)、Ames Research Center (ARC)の 3 研究所で植物関連の研究が行われ、NASA は大学に対しても研究費を与え研究を進めた<sup>5)</sup>。その結果、CELSS で栽培すべき作物として、コムギ、イネ、ジャガイモ、サツマイモ、ダイズ、ピーナツ、レタス等が選ばれた。NASA と大学が分担して栽培方法、成長量の測定、ガス交換のデータを集める研究が行われた。KSC の他、パデュー大学、ユタ州立大学、ウィスコンシン大学、タスケギー大学などが実験を担当した(図 2.5)<sup>1)</sup>。1997 年に行われた Advanced Life Support Plant/ Food Production Meeting では、生命維持に必要な栄養学的な面、作物の収穫指数、調理のしやすさと閉鎖環境での栽培実績が評価され、23 種の作物が提案された<sup>6)</sup>。宇宙での LED 光源の利用や垂直・多段式農法は技術的イノベーションといえ、宇宙利用を目指した研究が地上の農業にも役立つ例となった。



図 2.5 NASA の過去の閉鎖生態系試験設備<sup>1)</sup>

- A) Ames Research Center Closed Chamber System B) Purdue University Minitrons  
 C) Johnson Space Center Variable Pressure Growth Chamber  
 D) Kennedy Space Center Biomass Production Chamber

## (2)NASA 生物再生型地上実験施設

ロシアの BIOS プロジェクトと同様に、NASA においても惑星での宇宙基地への応用を考慮した研究がされており、重力があることを前提として給排水等の環境制御をする研究が行われた。閉鎖生態系生命維持システム、特に植物栽培を伴う生物再生型研究には、それなりの規模が必要になるため、地上をベースとした研究が多くされてきた。NASA が資金提供して行った地上実験としては、1~4m<sup>2</sup>の栽培面積を持つ小規模のグロースチャンバーでの研究が多い。一方大規模な実験設備としては1988年から2000年にKSCで運用されていたBiomass Production Chamber (BPC)がよく知られている(図2.5D)。BPCは20m<sup>2</sup>の栽培面積を持ち、閉鎖空間で宇宙でのライフサポートを想定した植物栽培研究が行われた。BPCではNFT水耕栽培法を利用し、7.5m高のチャンバー内に4段の棚を設置している。ここでは86日間のコムギ栽培、105日間でジャガイモ栽培、90日間でダイズ栽培、28日間でレタス栽培、85日間でトマトの栽培、その他イネ、ラディッシュの栽培も行われた。炭酸ガス濃度による収量の変化に関するデータや、エチレンの蓄積のデータがとられた<sup>2)</sup>。

特に食料生産と居住を地上実験施設で同時に実施した事例として NASA では Lunar Mars Life Support Project(LMLSTP)がある。LMLSTPは1995年から1998年にNASA JSCで実施されたプロジェクトである<sup>7)</sup>。4段階の閉鎖実験により実施された。フェーズIでは15日間の1人を対象とした実験であったが、フェーズIIIでは91日間にわたる4人を対象とする実験となった。特にフェーズIIIでは空気・水については完全閉鎖系、食料・廃棄物処理については部分閉鎖系として実施された(表2.1)<sup>8)</sup>。

表 2.1 Lunar Mars Life Support Project (LMLSTP)<sup>8)</sup>

Test	Phase I	Phase II	Phase IIA	Phase III
Duration	15 days	30 days	60 days	91 days
Crew	1	4	4	4
Types of Systems	Biological (Wheat)	Physicochemical (Advanced)	Physicochemical (ISS Regenerative ECLSS)	Integrated Physicochemical & Biological (Advanced)
Full Closure	Air	Air & Water	Air & Water	Air & Water
Partial Closure				Food & Waste
Open Loop	Water, Food & Waste	Food & Waste	Food & Waste	

また NASA は、JSC に BIO-Plex (Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex) を建設した。BIO-Plex は 1 式が 80m<sup>2</sup> の大きな農業モジュール (Biomass Production System) を 2 式備えるものだったが<sup>9)</sup>が、2000 年代に計画が取りやめになった。NASA のコンスタレーション計画に資金集中することが取りやめの理由とされ、生物再生を伴う閉鎖型生命維持システムとしての本格的な実験は、予定資金不足を含む方針変更により構造物(図 2.6)<sup>10)</sup>だけが完成した時点で打ち切りになった。コンスタレーション計画自体も 2010 年にオバマ政権により中止となった。

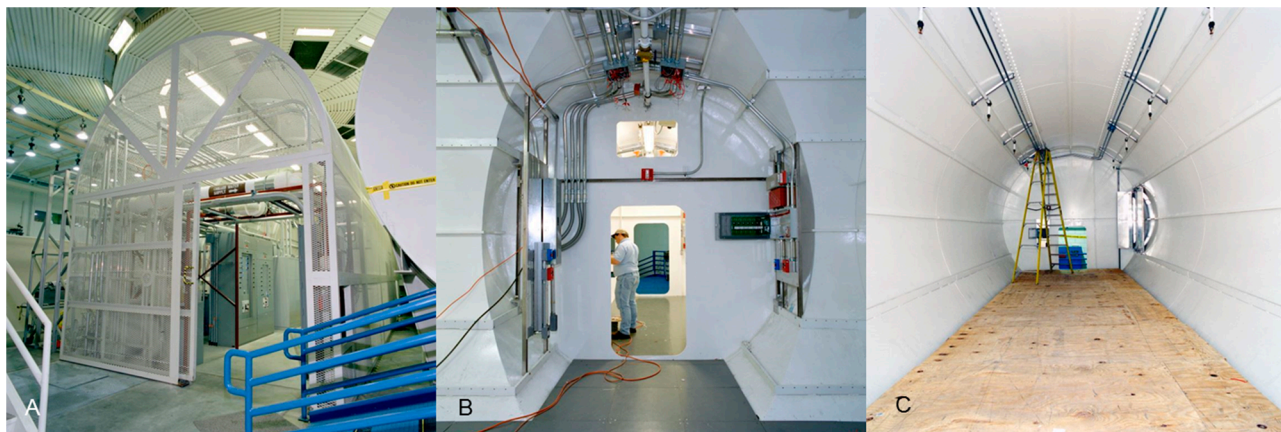


図 2.6 Bioregenerative Life Support Systems Test Complex (BIO-Plex)<sup>10)</sup>

NASA ジョンソン宇宙センターに建設の 4 人が 1 年間滞在できる大型有人設備として建設された。

A) View of exterior B) View of interior C) View of interior

**(3)宇宙実験**

NASA は重力が存在する惑星を前提とした CELSS 研究と同時に、微小重力環境でも機能可能な栽培要素技術開発も行ってきた。特に重力の影響を受けやすい給水システム、光環境による光合成効率に関する研究が多く行われており、給水システムとしては多孔質のチューブや膜を用いた給水方式に関して大学等に資金提供をしていた。それ等の成果が宇宙飛行士に新鮮野菜を提供するサラダマシンのシステムデザインとなった。実験規模では小サイズであるが、植物栽培装置アストロカルチャー(Astroculture, ASC) やアドバンストアストロカルチャー(Advanced Astroculture, ADVASC) が 1990 年代から 2000 年代に実際にスペースシャトルや ISS に搭載され栽培実験が行われた。その後、Plant Generic Bioprocessing Apparatus(PGBA)、Biomass Production System (BPS)、最近では Veggie (図 2.7) といった植物栽培装置が NASA や NASA が資金提供した企業により開発されたが、それらのほとんどは重力生物学的な研究に使われ、食料の供給としては小規模の実験であった。

宇宙装置による宇宙農業にフォーカスした実験の例として、ロシアと NASA が共同でコムギを宇宙ステーションミールの植物栽培装置 SVET 内で育てた実験<sup>11)</sup>、ジャガイモを ASC<sup>12)</sup>、コムギを BPS<sup>13)</sup>で育て光合成効率を測定した実験などの実績がある。ISS に 2014 年から搭載された Veggie は LED 光源と空気を攪拌するファン、クルーの操作による給水システムというシンプルな設計で、植物生理学実験にも利用される一方、栽培植物としてレタス等が栽培された。宇宙での栽培においても HACCP を意識した細菌検査等が行われ、栽培したサンプルは凍結して地上での検査を経て、栽培 2 回目となる 2015 年 8 月に栽培されたレタスを初めて公式に宇宙飛行士が食べるというイベントが行われた(図 2.7C)。その後、2016 年にヒャクニチソウ、2017 年にはトウキョウベカナの収穫が行われた。2018 年にはトマトの栽培が予定されている<sup>14)</sup>。さらに米国は Advanced Plant Habitat(APH)を 2017 年に ISS に打ち上げ、日本実験棟「きぼう」内に設置して最初の栽培実験を実施した(図 2.8)。



図 2.7 ISS NASA 栽培装置 Veggie (提供 NASA および Food Production for Space Exploration<sup>14)</sup>)

A) Veggie 外観(地上で撮影) B) ISS でレタスを収穫する Steve Swanson 飛行士(2014 年 6 月)

C) ISS で育てたレタスを口にする Kjell Lindgren 飛行士と Scott Kelly 飛行士と油井亀美也飛行士(2015 年 8 月)

D) ISS で開花したヒャクニチソウ(2016 年 2 月)



図 2.8 NASA 植物栽培装置 Advanced Plant Habitat (APH)

A) APH 内で生育するコムギ B) APH から取り出した Science Carrier とコムギ C) APH からコムギが生育した Science Carrier を取り出す金井宣茂飛行士 提供 NASA

### (3) NASA 以外の宇宙農場的地上実験設備 Biosphere2

Biosphere2 はアリゾナ州 Oracle に 1980 年から 1990 年代初期に建設されたプライベートスポンサーによる大型閉鎖環境施設である。2000m<sup>2</sup> の巨大な農業エリアには 2720m<sup>3</sup> の土壌が運び込まれ、8 人が 2 年間生活するための食料の 80% を賄う計画であった。幅広い種類の植物と動物が含まれる複雑系で、目標は宇宙を視野に入れた閉鎖環境での生命維持と生物学的な再生技術への挑戦だった。閉鎖実験は 1991 年から 1993 年までの 2 年間と、その後の 6 か月間、2 回にわたって行われたが、1 回目の 2 年間の試験も完全閉鎖環境は維持できず、16 か月目で酸素濃度が 14% になり開放を余儀なくされた。また炭酸ガス濃度の変動により昆虫や鳥が死ぬ現象も見られた<sup>15)</sup>。また食料不足に見舞われた。ガス環境の変動は日照不足と想定を超える土壌細菌の呼吸量が原因であったとされている<sup>16)</sup>。これらの他にクルー間、またクルー・運用スタッフ間での心理問題があったことも指摘されている。

### (4) 火星模擬実験施設 MDRS

Mars Desert Research Station(MDRS) はアメリカの非営利団体である火星協会がアメリカのユタ州に所有する火星模擬実験施設である。1 チーム約 6 名が 2~3 週間滞在し、火星での居住を模擬する実験を行っている。日本からは日本火星協会が 2014 年、2015 年に延べ 8 名を派遣した<sup>17)</sup>。GreenHab という食料生産および植物科学研究施設を設け、将来の火星有人ミッションに必要な食料の種類や量についての研究を実施している。最近では日本火星協会の村上祐資氏がユタ州と北極圏の両方に計 160 日滞在する長期滞在ミッションに参加している<sup>18)</sup>。

#### 2.3.3. 欧州

欧州宇宙機関(ESA)は Micro-Ecological Life Support System Alternative(MELiSSA)プロジェクトとして、物質循環も含めた生物学的環境維持研究プロジェクトを 1987 年から実施している。初期の MELiSSA プロジェクトは微生物を使った廃棄物処理や、シアノバクテリアをバイオマス生産に使うコンセプトであったが、現在は植物栽培を含むプロジェクトへと拡大している。MELiSSA ではリモートセンシングによる作物モニターも盛んで、コムギ、ビート、ダイズなどを閉鎖環境、水耕栽培での栽培状態に関するデータを取得している<sup>2)</sup>。

ESA は宇宙用の栽培装置 European Modular Cultivation System(EMCS)を開発し、2006 年から ISS に搭載し宇宙での植物研究に役立てている<sup>19)</sup>。また、有人探査時代の食料となる作物栽培研究を目指してドイツ宇宙機関(DLR)主導で EDEN ISS を開発・南極において運用中である(図 2.9)。EDEN ISS は宇宙利用のスピノフとしての意味もあり<sup>20)</sup>、極地の生鮮野菜供給のため多段栽培モジュールで、唯一宇宙利用を視野に入れている。EDEN ISS のコンテナは 2018 年に南極大陸に運ばれ、ドイツの南極基地 Neumayer-Station III から 400m の場所で運用され、現在栽培実験中である<sup>21)</sup>。



図 2.9 ESA EDEN ISS 植物栽培コンテナ

A)EDEN ISS のコンテナ内の栽培棚 B)EDENISS で生育したトマト C)キュウリ D)バジル E)ハツカダイコン F)ブレーメンの運用管制室 G)南極に設置された EDEN ISS 外観と、収穫した野菜を Neumayer Staion III に運ぶためそりに乗せられた運搬箱

出典：Facebook @spaceedeniss

### 2.3.4. 日本

#### (1) 日本の CELSS 研究

日本における宇宙農業の検討は、有人活動の目的地として火星を目指すもので、約 30 年前に宇宙科学研究所(ISAS)の山下雅道氏を中心に開始された。ISAS での活動と、「宇宙農業サロン」活動において、耐塩性の高い植物の栽培、低重力でのミツバチの飛行、カイコ等昆虫食を使ったメニューの検討などが行われている。

一方 CELSS 研究としては 1980 年代後半から航空宇宙技術研究所(NAL)において閉鎖型生態系生命維持システムにおける生物再生技術開発が実施されてきた。閉鎖型生態系実験施設(CEEF: Closed Ecology Experimental Facilities)は、植物栽培を伴う完全な閉鎖環境下で 2 名が 120 日間生活する施設として建設された<sup>22)</sup>。青森県六ヶ所村の環境科学技術研究所内に 1994～1999 年にかけて建設されたこの施設は、生態系内の放射性核種の動態をシミュレートする目的で作られたが、同研究所の新田慶治氏が NAL 時代よりあためてきた実験施設であり、高温高压下で分解を行う湿式酸化装置やサバチエ反応を利用し水素を媒介に CO<sub>2</sub> から C と O<sub>2</sub> を取り出すと再生装置など、有人宇宙開発につながる要素技術が組み込まれた先端的な ECLSS(環境制御を伴った生命維持システム)であった<sup>23)</sup>。廃棄物処理の一翼として小型のヤギ(シバヤギ)が導入されている(植物の非可食部を摂取し減量化や分解の促進に貢献)というユニークな点もあった。施設の完成と前後して、2000 年より居住候補者として 4 名の研究員が選抜を経て順次採用され、植物栽培、機器校正、安全衛生管理などのトレーニングを終え、2005 年に 1 週間の居住実験を 3 度、2006 年に 1 週間の居住実験を 6 度、そして、2007 年には 2 週間の居住実験を 3 度行ったのち 4 週間の居住実験を完遂し、閉鎖居住実験を成功裏に終えた。植物栽培は土壌を使わず全て水耕で行った。炭水化物としてイネを 60m<sup>2</sup>、タンパク質としてダイズ



を 30m<sup>2</sup>、脂質として落花生を 30m<sup>2</sup>、その他ビタミン・ミネラルを期待して野菜類 20 種類などに 30 m<sup>2</sup>といった耕作面積で栽培した<sup>22)24)</sup>。この実験は、自給率の高さ(居住者は最大 95%、ヤギは 100%)、実際に閉鎖系内でとれた作物の加工・摂食の実践に加え、菌叢の調査、居住者の心理状態のモニタリング、閉鎖居住ならではのトラブルシューティングの整理といった点で、ロシア(旧ソ連)や NASA が行ってきた実験と比較してもその成果が高く評価されるものであった<sup>24)</sup>。

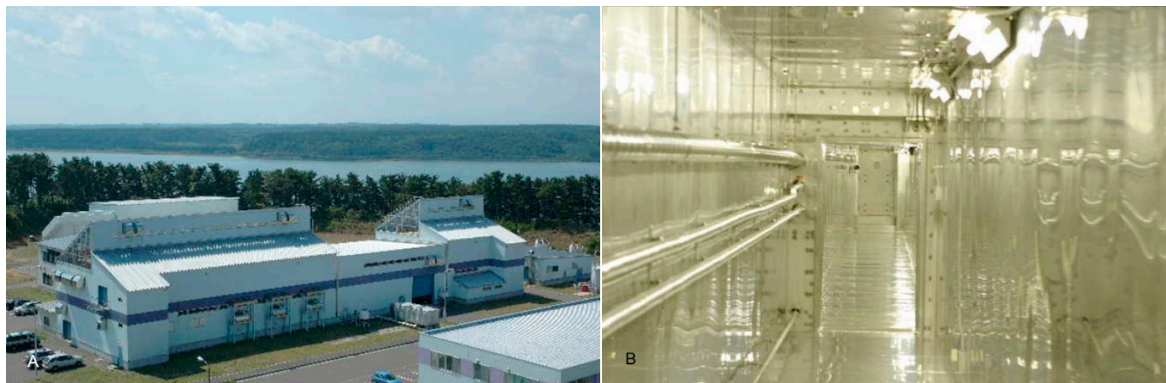


図 2.10 環境科学技術研究所(IES)内の閉鎖型生態系実験施設(CEEF)の外観および内部

A)CEEF、およびその支援設備は、一般的な建屋の内部に構築された。B)CEEF はコンクリートを一切使用せずステンレスとガラスで気密の高い閉鎖環境を構築し、土壌を用いず全ての作物栽培を水耕栽培で行った<sup>22)</sup>。



図 2.11 CEEF 内で栽培された作物<sup>22) 24)</sup>

A)シークエンシャルに栽培されているイネ B)ダイズ C)トマト D)キャベツ E)シークエンシャルに栽培されているシュンギク F)ニンジン G)野菜類栽培の様子

## (2) 宇宙実験

宇宙における数日から 10 日程度の暗所での植物の生育実験がスペースシャトルや国際宇宙ステーションで実施されてきた。それらの結果からは微小重力環境では重力屈性が見られないことに加え、植物の細胞壁の構成成分が変化し、根の水分屈性が現れやすくなるなどの特徴も見られた。Seed-to-Seed 実験についても、ロシア、米国、欧州、日本等、世界各国の実験結果を総合すると、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は可能であることが分かっている。日本も ISS 日本実験棟「きぼう」において細胞培養装置内の植物実験ユニット(PEU)を用いてシロイヌナズナの Seed-to-Seed 実験(Space Seed 実験、図 2.12)を成功させている<sup>25)</sup>。

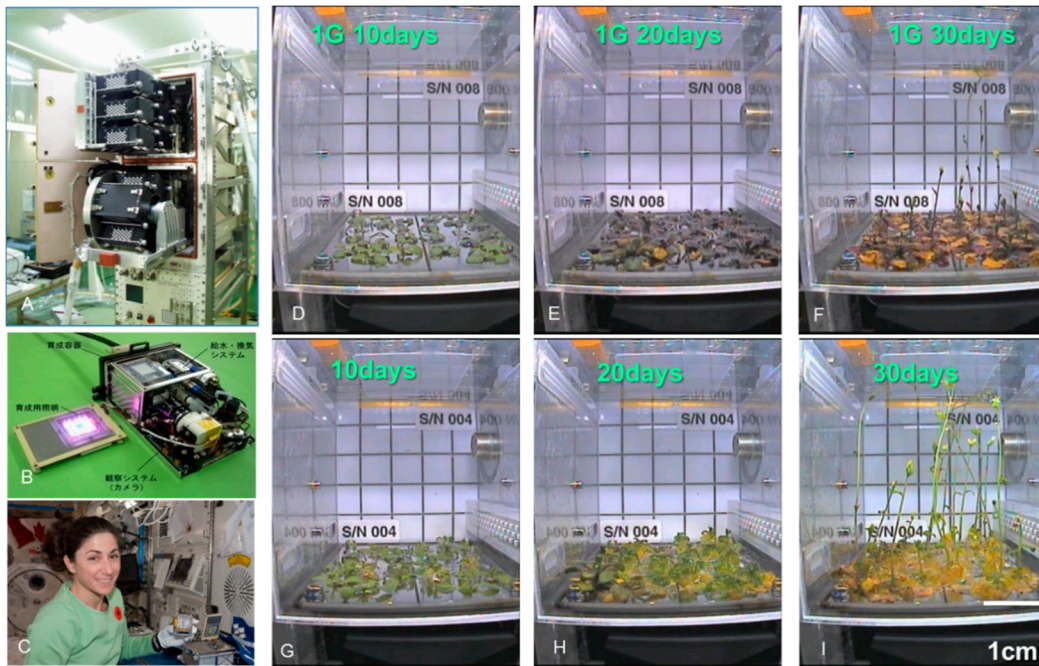


図 2.12 日本の ISS 植物栽培実験(Space Seed)

A)ISS 日本実験棟「きぼう」に設置されている細胞培養装置 B)細胞培養装置内で使用する植物実験ユニット C)シロイヌナズナ栽培実験を実施している NASA 宇宙飛行士 Nicole Stot D~F)細胞培養装置の人工重力部に設置した PEU 内のシロイヌナズナ G~I)細胞培養装置のマイクロ G 部に設置した PEU 内のシロイヌナズナ (JAXA 提供)

## (3) 地上実験

惑星表面では一定の重力が存在するため、微小重力特有の問題は解消されると考えられる。しかし月近傍のステーション(深宇宙ゲートウェイ<sup>26)</sup>)や火星を含む惑星までの移動中は微小重力環境となる。これまで日本で行われた宇宙植物栽培にフォーカスした地上研究では 1997 年から 3 年間で 5 大学(東北大学・東京大学・大阪府立大学・宇都宮大学・東海大学)の研究チームが「微小重力下における植物の生活環に関する研究とそのための微小重力場植物実験装置の開発」として植物栽培ボックスの設計、地上品製作、航空機実験を含む栽培実験を実施している。本研究により、宇宙での植物栽培を実現する要素技術の中でも重力の影響を受けにくい照明システム、空調システム、気流制御、養水分供給システムの供給システムの設計と検証が重要課題であることが整理された<sup>27)</sup>。

これらの実績を踏まえて宇宙探査イノベーションハブでの月面農場ワーキンググループ活動での技術要素抽出作業へと研究を進展させていると整理することができる。

## (4) 宇宙環境利用科学専門委員会

ISAS が主導している学術コミュニティ支援活動の一つに、宇宙環境利用科学専門委員会がある。本専門委員会では 2017 年度から、植物栽培研究をフロントローディング研究と位置づけ、支援を行っている。

### (5) 有人惑星探査における安定的な食料確保を目指した作物栽培の要素技術に関する研究

2015年、有人惑星探査における安定的な食料確保を目指した作物栽培の要素技術に関する研究を、有人惑星探査に必要な技術開発と位置づけ、JAXA 筑波宇宙センターでの研究を開始している。惑星基地での食料確保を目指した作物の栽培と、惑星への移動中の宇宙飛行士への生鮮野菜の提供、精神衛生面のサポートに資する植物の栽培を目標に研究を進めている。既存の植物工場技術を活かし、研究のノウハウを持つ大学等研究機関や産業界と連携する体制づくりを行っている。この活動は宇宙探査イノベーションハブの月面農場ワーキンググループ活動と同時進行で実施中であり、アドバイザリー委員会などの活動として月面農場ワーキンググループのメンバーが参画している。

#### 2.3.5. 中国

月宮1号(Lunar palace-1)は、中国北京の北京航空航天大学内に建設された160m<sup>2</sup>(500 m<sup>3</sup>)の4人用の閉鎖居住実験施設である。2013～2014年の105日間に及んだ閉鎖居住実験では、植物栽培モジュールを半分稼働させた状態(100 m<sup>2</sup> (300 m<sup>3</sup>))で3名の閉鎖居住実験を行い1.6人分の生産性を確認した。この実験時には、小麦を30 m<sup>2</sup>、タイガーナッツ(Chufa)を10 m<sup>2</sup>、ダイズを5.6 m<sup>2</sup>、その他に葉菜やイチゴなど8種に12.7 m<sup>2</sup>の耕作面積がそれぞれ割かれ栽培された。栽培棚は赤と青のLEDによる多段式のもの採用されていた。動物飼育も実施していることがユニークな点として挙げられ、非可食部の処理のために、また食用のために、ミールワームを飼育し、実際に実験生活中の摂食も実施されている(図 2.13)<sup>28)</sup>。2017～2018年には、370日にかけてシステムを連続稼働させ、4人一組の代謝量の異なる二つのチームが交互に110日、200日、60日という居住を行い、成功裏に実験を終わらせたと報道されている<sup>29)</sup>。学術報告の多くは北京大学の研究者によりなされ、2014年の105日実験に関しては、宇宙開発系、生態工学系、農業・植物生理系、菌叢系など、多方面で学術報告がなされている。これまでの報告では閉鎖循環は完成されておらず、特に廃棄物処理に関しての詳細は明らかされていないが、微生物による処理が想定されており、今回の370日実験の成果報告が待たれる。

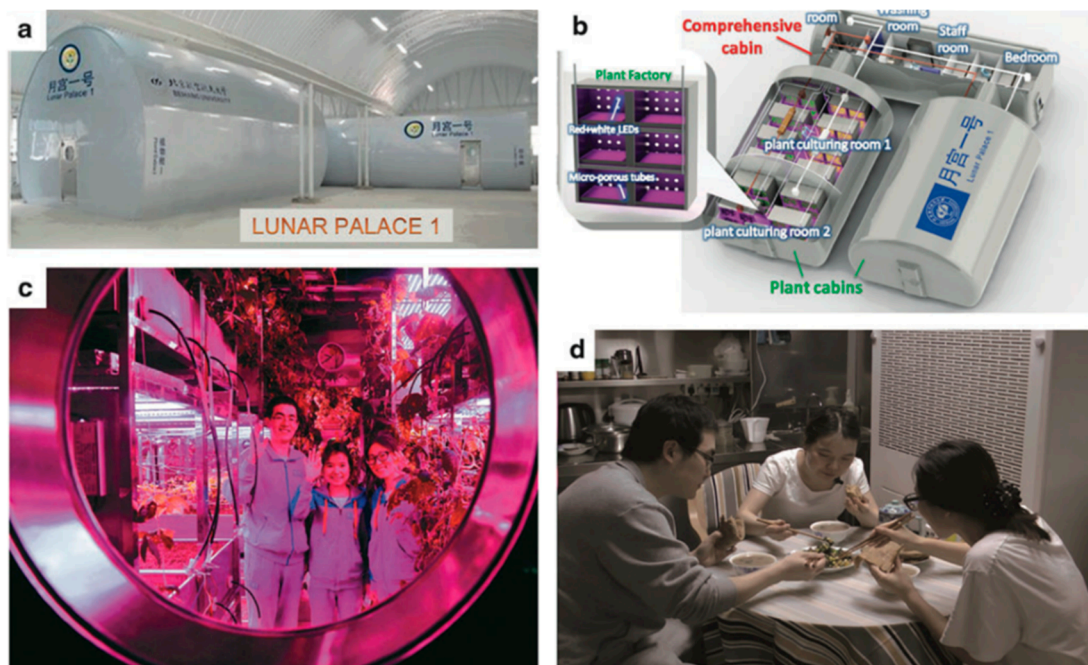


図 2.13 月宮1号<sup>28)</sup>

月宮1号 a)月宮の外観 b)月宮の内観イラスト c)105日実験時のクルー3名 d)同実験時の食事の様子

#### 2.3.6. その他

NASA はアリゾナ大学農学部と協力して、宇宙で農業を行うための膨張式グリーンハウスのプロトタイプを開発したことが2017年5月5日付けニュースになっている<sup>30)</sup>。またロシアから宇宙利用を前提とした6面栽培装置という全く新しい発想の装置の提案が報道された<sup>31)</sup>。

## 2.4. 低重力での植物生理

植物は周囲の環境刺激を受容し反応するしきりを獲得し、特に重力を利用しながら生活環を営んでいる<sup>33)</sup>。これまでの宇宙環境での植物の生育に関する研究からは、植物の細胞壁の構成成分が変化し、根の水分屈性が現れやすくなるなどの特徴が明らかになった。また生育環境を整えれば植物の生活環を完結させることは可能であることも分かっている<sup>27)</sup>。しかし、これまで微小重力と重力環境下での植物生理や栽培状態の変化が注目されており、栽培装置や遠心機の制約などから低重力下での長期栽培の実績は見当たらない。

宇宙における植物の世代交代に関しては、宇宙開発の初期には宇宙ステーションでの稔性種子の形成の形成に問題を生じていた。しかし、微小重力に影響される環境要因を制御することによって、宇宙環境でも植物は種子を形成することが分かった。ただし、宇宙で植物体の老化や種子の稔性・形状に異常が見られ、それらは植物種によって異なる可能性も指摘されている。

植物には水分屈性、光屈性、頂芽優勢、回旋転頭運動など、重力応答に影響を受ける種々の植物の成長現象が見出されている。中でも研究が進んでいるのは、重力に抗して体を構築する反応である抗重力反応であり、この反応の直接的な担い手は細胞壁である。植物は固定したエネルギーの90%以上を頑丈な細胞壁構築に使用しており、惑星上の低重力で抗重力反応の必要が少なくなると植物はその分のエネルギーを他への分配に回すようになるといわれている<sup>33)</sup>。月で作物を栽培する場合に、実際にどのような植物生理の現象が現れるか興味深い。

Kissら<sup>34)</sup>によると、高等植物のモデルとして植物研究に広く使われているシロイヌナズナを用いた光屈性に関する実験(TOROPI-2)結果から、赤色光と青色光に対する光屈性の閾値は0.1Gから0.3G付近にある。また藻類を用いた低重力実験では、重力方向に従っておもりの役割を果たす細胞内の平衡石(アミロプラスト)が0.1Gから0.2G程度で沈降している様子が報告されている。これらのことから、植物にとって月や火星の低重力は、微小重力環境よりもむしろ地上と同じ1Gに近い状況であると仮定することができる。

一方、低重力は、栽培装置や栽培環境に影響を及ぼす可能性がある。航空機放物飛行による短時間微小重力実験の結果からは、重力がないことで対流が消失し、植物と周辺環境との熱交換が抑制されることにより植物体の温度上昇が結実低下を招く可能性が示唆されている<sup>35)</sup>。また最近行われた、航空機放物飛行による短時間重力変動実験で重力条件を1G以下の部分重力的に変動させた実験によると、培地内の水分分布や栽培システムによる環境制御に低重力が少なからず影響している可能性が示唆された<sup>36)</sup>。低重力が栽培システムに与える影響については、部分的にも検証しておくことが好ましい。

## 2.5. 国際宇宙ステーションでの植物栽培実績

### (1)宇宙での栽培実験の目的

これまでに様々な植物がスペースシャトル・ISSで実験に供されている。植物は食料にもなるほか、光合成による炭酸固定と水分の吸収・蒸散により、閉鎖環境の環境制御面から、有人宇宙活動に有効であることから宇宙での生育を確認する目的、重力や光応答、根の屈性等に関しての多くの基礎実験、栽培実験がなされている<sup>37)</sup>。

### (2)ISS 実験での実績

シャトル時代に比べて、ISSでは長期間の連続栽培が可能になった。装置もNASA、ESA、JAXA、ロシアがそれぞれ開発しており、共同ミッションにも使われている。ISSではこれまでに約80テーマの植物実験が実施されているが、その約半数がモデル植物であるシロイヌナズナを使った実験である。このほか、コムギ、オオムギ、ダイズ、ミズナ、トマト、ハツカダイコン、エンドウマメがISSで栽培されている。パクチョイ、ケール、ワサビの栽培計画もある。トウモロコシ、キュウリ、イネ、レンズマメを使った実験例があるが、芽生えや根を解析するための実験で、暗所での発芽実験である。マメ科の植物ウマゴヤシ、イネ科のモデル植物ミナトカモジグサ、マツ科トウヒ属の樹木エゾマツアラカシ、イトヤナギ、ウルシ、アサガオを使った実験もされている。クロレラ、クラミドモナスといった藻類の培養実験も実施されている。根粒菌、枯草菌やブドウ球菌といった土壌や植物、衛生管理に関連の深い微生物を対象にした実験も行われている。

レタスについては2014年から2015年に複数回にわたりNASAの装置Veggieによって栽培された。1、2回目は凍結して地上回収され、分析と微生物検査ののち、2015年の栽培において軌道上での宇宙飛行士への提供、油井飛行士を含む3名の飛行士が試食した(図2.7)。

2017年に「きぼう」船内実験室のラック内にNASA開発のAPH(Advanced Plant Habitat)が搭載された。APHはこれまでの宇宙植物装置としては最大である0.2m<sup>2</sup>の栽培面積を持ち、2018年に初期検証としてシロイヌナズナとコムギが栽培された。コムギは結実の様子が公開されている(図2.8)。

#### **i) ジャガイモの栽培**

食料生産におけるジャガイモの有用性はNASAも認識しており、火星のレゴリスシュミラントでの栽培実験や、砂漠土を使った栽培実験が地上実験室で行われている。宇宙では、1995年のスペースシャトルミッションSTS-73においてジャガイモ(Seed Potato)の栽培実験が行われており、ミッドデッキロッカータイプの栽培装置Astrocultureで栽培した塊根を地上で分析している<sup>12)</sup>。塊根の成長やデンプンの粒子径などについて、地上対照群と違いはみられなかったと結論している<sup>38)</sup>。この実験ではフライトが2週間程度のため、地上において7週間育てた植物体を搭載している。種イモから発芽、収穫をした例はない。

#### **ii) イチゴの栽培**

イチゴについても宇宙栽培を目指した地上検討はNASA、ESA(EDEN ISS)等で試みられているが、宇宙での栽培実績はない。苗の輸送、栽培期間の長さ、受粉などに課題があると考えられる。

#### **iii) コムギ、オオムギ、ダイズの栽培**

コムギ、オオムギ、ダイズについてはNASAの宇宙栽培装置やロシアの栽培装置での実績が多くある。

#### **iv) トマトの栽培**

トマトはロシアモジュール設置の栽培装置Ladaでの栽培実験サンプル名として記載があるが、論文等記録がない。またVeggieを使い光質と肥料をテストするためトマトを育てる予定<sup>14)</sup>。実験前の種子の長期保存が課題とされ、花粉の宇宙飛行士への影響が考慮される。

#### **v) レタス、ミズナの栽培**

レタス、ミズナについてはNASAの装置やロシアの栽培装置での多数実績がある。

#### **vi) サツマイモの栽培**

サツマイモの栽培については見当たらない。宇宙での食料生産の対象として有用性は認識されている<sup>6)39)</sup>。

#### **vii) 教育ミッションでの栽培**

輸送量と実験スペースに制約のある宇宙実験の適用条件において、植物はサンプルである種子の保存が容易であり、多数のサンプルを輸送しやすいこと、給水による実験開始が可能のため、生物実験サンプルとして比較的コントロールしやすいこと、形態などから重力の影響が観察しやすいことなどの特徴から、栽培のデモンストレーション的な意味と児童・生徒・学生の教育効果を狙ったミッションにおいて数多く栽培されている。向井千秋飛行士は1994年、自身の初スペースシャトルフライトにカイワレダイコンを持ち込み、キャビン内で発芽させた。NASAのDonald Pettit飛行士は、特別な装置を使わず、ジップロックバックを用いてズッキーニを育て、開花・結実までの記録を写真と解説付きで公開している。また同様にヒマワリを育てた飛行士もいる。

JAXAが2013年に実施した「Space Seed for Asian Future2013」ではアズキの発芽実験がISSきぼうで実施された。またロシアの栽培装置Ladaを利用してエンドウマメやオオムギを使った教育ミッションが行われている。欧州宇宙機関(ESA)によっても教育用キットでルッコラを用いた実験が実施されている。

#### **viii) その他**

高麗ニンジン(Zhenshen, Ginseng)の培養細胞が2007年から2009年、ISSのロシアモジュールで培養されている。また2016年に中国の有人宇宙船の神舟-11とドッキングした宇宙実験室の天宮(Tiangong)-2での約30日間の有人実験期間中において、レタスが栽培された<sup>40)</sup>。

## 引用文献

- 1) M. Porterfield, NASA Bioregenerative Life Support: Past, Present & Future, ISLSWG Bioregenerative Life Support Workshop, Italy: <http://www.asi.it/en/node/32451>, 2015.
- 2) R. Wheeler, "Agriculture for Space: People and Places Paving the Way," *Open Agriculture* 2, 14-32, 2017.
- 3) P. Zabel, M. Bamsey, B. Schubert, M. Tajmar, "Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems," *Life Sciences in Space Research* 10, 1-16, 2016.
- 4) 後藤英司, "植物を中心とする閉鎖生態系生命維持システムの構築及び関連実験," 宇宙環境利用推進センター, 2003.
- 5) 後藤英司, "米国の CELSS における植物生産の研究," *生物環境調節* 33(2) 89-95, 1995.
- 6) R. Wheeler, "NASA TM 2009-214768 Roadmaps and Strategies for Crop Research for Bio regenerative Life Support System," 2009.
- 7) N. J. Packham, "The Lunar-Mars Life Support Test Project: the Crew Perspective," <https://lsda.jsc.nasa.gov/books/ground/1.3Crewmembers.pdf>.
- 8) D. J. Barta, The Lunar Mars Life Support Test Project, JSC-CN-36382, 2016.
- 9) D. J. Barta, J. M. Castillo, R. E. Fortson, "The Biomass Production System for the Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex: Preliminary Designs and Considerations," SAE Technical Paper 1999-01-2188, 1999.
- 10) NASA, BIO-Plex Facility in Building 29, <https://archive.org/details/JSC2001-00794>, 2001.
- 11) F. B. Salisbury, W. Campbell, J. G. Carman, G. E. Bingham, "Plant growth during the greenhouse II experiment on the Mir orbital station," *Adv. Space Res.* 31(1) 221-227, 2003.
- 12) M. E. Cook, J. G. Croxdale, "Ultrastructure of potato tubers formed in microgravity under controlled environmental conditions," *J. Exp. Bot.*, 54(390) 2157-2164, <https://doi.org/10.1093/jxb/erg218>, 2003.
- 13) W. G. Stutte, O. Monje, D. G. Goins, C. B. Tripathy, "Microgravity effects on thylakoid, single leaf, and whole canopy photosynthesis of dwarf wheat," *Planta* 223 46-56, <https://doi.org/10.1007/s00425-005-0066-2>, 2005.
- 14) G. Massa, Food Production for Space Exploration, KSC-E-DAA-TN38634, 2017.
- 15) Environment and Ecology, Biosphere 2, <http://environment-ecology.com/ecological-design/255-biosphere-2.html>, 2018.10.14 Access.
- 16) The University of Arizona, Biosphere 2 Where science lives, <http://biosphere2.org/>, 2018.10.18 Access.
- 17) 角地雅信, 宮嶋宏行, 安濃由紀, 村川恭介, "火星模擬実験の概観と有人火星探査の検討," *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 33(3) 330311, <http://doi.org/10.15011/ijmsa.33.330311>, 2016.
- 18) 村上祐資, YUSUKE MURAKAMI Official Website, <http://www.fieldnote.net/about/>, 2018.10.12 Access.
- 19) E. Brinckmann, ESA hardware for plant research on the International Space Station, *Adv. Space Res.*, 36(7) 1162-1166, 2005.
- 20) D. Schubert, D. Quantius, J. Hauslage, L. Glasgow, F. Schroder, M. Dorn, Advanced Greenhouse Modules for use within Planetary Habitats, 41st International Conference on Environmental Systems, AIAA2011-5166, 2011.
- 21) ESA EDEN Ground Demonstration of Plant Cultivation Technologies for Safe Food Production in Space, <http://eden-iss.net/>, 2018.10.14 Access.
- 22) M. Shinohara, O. Komatsubara, Y. Aibe, S. Nozoe, T. Shimamiya, Y. Tako, K. Nitta, "Air Circulation Confinement Experiments in the CEEF: Physiological Status in Econauts through Repeated Seven-day Habitations," *Soc. Automotive. Eng. Tech. Paper* 2006-01-2293, 2006.
- 23) K. Nitta, "The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynamics of radioactive isotopes," *Adv. Space Res.*, 27(9) 1505-1512, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00242-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00242-3), 2001.

- 24) 多胡靖弘, “閉鎖型生態系実験施設を用いた閉鎖居住実験—食料自給および物質 (空気・水・廃棄物) 循環、ならびにトラブルシューティング—,” 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック 48-66, 2015.
- 25) S. Yano, H. Kasahara, D. Masuda, F. Tanigaki, T. Shimazu, H. Suzuki, I. Karahara, K. Soga, T. Hoson, I. Tayama, Y. Tsuchiya, S. Kamisaka, “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(5) 780-788, 2013.
- 26) 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 ISS・国際宇宙探査小委員会 (第20回) 資料 20-1-1 H29.6.28, [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/071/shiryo/1387901.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/071/shiryo/1387901.htm), 2017.
- 27) 矢野幸子, 嶋津徹, “宇宙における植物栽培研究と求められる光技術,” *光学*, 46(1) 25-31, 2017.
- 28) C. Dong, Y. Fu, B. Xie, M. Wang, H. Liu, “Element Cycling and Energy and Responses in Ecosystem Simulations Conducted at the Chinese Lunar Palace-1,” *Astrobiology* 17(1) 78-86, 2017.
- 29) 「月宮」実験が終了 計 370 日間は世界最長 (China News Service 2018.5.19), <http://www.afpbb.com/articles/-/3175157>, 2018.10.17 Access.
- 30) NASA が火星での植物栽培に本気を出した。宇宙農業を念頭に置いた膨張式グリーンハウスを設計, <http://karapaia.com/archives/52238501.html>, 2017.5.5.
- 31) A. Sinitckaya, On the ISS will grow green in cylindrical beds, <https://iz.ru/737654/anastasiia-sinitckaia/na-mks-vyrastiat-zelen-v-tcilindricheskikh-griadkakh>, 2018.7.17.
- 32) 曾我康一, “重力による植物の生長調節—遠心過重力を用いた地上実験—,” *日本マイクロ重力応用学会誌* 21(1) 74-78, 2004.
- 33) 高橋秀幸, 日出間純, 北宅善昭, 保尊隆享, 唐原一郎, 矢野幸子, “宇宙環境を利用した植物科学の研究シナリオ,” *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 34(2) 340200, 2017.
- 34) J. Kiss, “Plant Biology in reduced gravity on the Moon and Mars,” *Plant Biology* 16, suppl.1, 12-17, 2014.
- 35) 北宅善昭, “宇宙での植物栽培における植物体の熱・ガス交換,” 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック 86-92, 2005.
- 36) 北宅善昭, “航空機放物飛行実験による微小重力下での植物栽培システム水循環,” 第 32 回宇宙環境利用シンポジウム, 2018.
- 37) International Space Station, Space Station Research Experiments, Biology and Biotechnology, *Plant Biology*, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/experimentsHardware.html#Biology-and-Biotechnology](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/experimentsHardware.html#Biology-and-Biotechnology), Access 2018.8.7.
- 38) J. Croxdale, M. Cook, T. W. Tibbitts, C. S. Brown, R. M. Wheeler, “Structure of potato tubers formed during spaceflight,” *J. Exp. Bot.*, 48(317) 2037-2043, 1997.
- 39) M. Perchonok, The Challenges of Developing a Food System for Mars Mission, JSC-CN-36608, 2016.
- 40) J. Haipeng, *Space Journal: Entry 7 -- Chinese farmers in space*, [http://www.xinhuanet.com/english/2016-11/13/c\\_135825974.htm](http://www.xinhuanet.com/english/2016-11/13/c_135825974.htm), 2016.11.13.