

IIII 宇宙惑星居住科学連合の目指すもの IIII
(解説)

宇宙環境を利用した植物科学の研究シナリオ

高橋 秀幸¹・日出間 純¹・北宅 善昭²・保尊 隆享³・
唐原 一郎⁴・矢野 幸子⁵

A Research Scenario of Space-Utilizing Plant Science

Hideyuki TAKAHASHI, Jun HIDEIMA, Yoshiaki KITAYA, Takayuki HOSON,
Ichirou KARAHARA and Sachiko YANO

Abstract

Green plants produce carbohydrate as an energy for all organisms by photosynthesis. It is therefore considered that plant cultivation is necessary for life support not only on Earth but also in space. To inhabit the space for a long duration, human needs to be closed in the life support system in which plants provide them with foods and a stress-relief circumstance. During evolution, on the other hand, plants developed various strategies to survive terrestrial environment on Earth because of their sessile nature. Plant responses to gravity and lights are examples of such strategy to avoid or mitigate stressful environment they come across. Now, space environment is available for biological studies to understand how plants respond to gravity and how plants are influenced by microgravity and/or space radiation. We extend such studies to understand the effects of space environment on plant growth and development in the seed-to-seed or the generation-to-generation experiments. To explore the deeper space or inhabit planets such as the moon or Mars, we next need to establish a sustainable recycling-oriented life support system with plant cultivation and environmental control facilities. Here, we show our research scenario of the space-utilizing plant science to achieve such objective, which is important to efficiently cultivate plants and develop the life support system in space. We believe our approach, in cooperation with various communities of the related fields, enables us to further reveal the biological systems required for not only colonizing to space but also conserving or improving the living Earth.

Keyword(s): Gravitational and Space Biology, Human Planetary Habitation in Space, International Space Station (ISS), Life-Support System, Plants, Plant Cultivation Unit

Received 7 April 2017, Accepted 14 April 2017, Published 30 April 2017

1. はじめに

地球上の生物は、食物連鎖および物質循環によって支えられ、また、進化の過程で生存するための様々な戦略を獲得した。なかでも緑色植物は光合成を営むことを特徴とし、一次生産者としてすべての生命のエネルギー源を生産する。したがって、自然界における生命維持には植物の存在が不可欠であり、その効率的な生産性を担う植物機能が重要になる。

生物は限られた環境条件で生存できるが、その環境は絶えず変化し、しばしば不適環境にさらされる。植物は固着性であるが故に、動物と違って移動して不適環境を回避できない。しかし、植物はそれらの環境変化に対応して環境ストレスを回避・軽減するための様々なしくみを持っている。例えば、植物が光合成を効率的に行うためには、葉が光を、根が水を獲得するための姿勢の制御が必要で、そのために茎葉が上側に伸長し、根が下側に伸長する。これは重力を自らの位置情報として利用する能力で、重力屈性と呼ばれ

1. 東北大学大学院生命科学研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1
Graduate School of Life Sciences, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan.
2. 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科, 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1
Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan.
3. 大阪市立大学大学院理学研究科, 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138
Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
4. 富山大学大学院理工学研究部, 〒930-8555 富山市五福 3190
Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan.
5. 宇宙航空研究開発機構, 〒305-8505 つくば市千現 2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba 305-8505, Japan.
(E-mail: hideyuki@ige.tohoku.ac.jp)

る。また、重力の存在下では、自らの体を支える抗重力反応が、さらに、乾燥、高低温、光障害などによる環境ストレスを軽減するしくみが発達している。そこで宇宙環境（スペースシャトルや宇宙ステーションなど）を利用したこれまでの植物科学研究では、宇宙特有の環境、すなわち、微小重力や宇宙放射線によって影響される植物の成長が解析されてきた。^{1,2)} その結果、植物の重力応答や宇宙放射線影響に関するわれわれの理解が深まり、植物科学における宇宙環境利用の有用性が示されているが、そのアプローチは端緒についたばかりで、宇宙環境で植物を育成する上での課題も明らかになってきた。^{1,2)}

一方、1960年代に実現した有人宇宙飛行から半世紀以上が経過して、その間に行われた人類の宇宙活動は、われわれの文明がもたらす結果の一つとして、地球外天体や深宇宙への探検・居住を視野に入れた近未来の社会創成に向けた知見と技術を見出している。²⁾ 実際に、人類が月や火星で生活する姿が描かれ、それを可能にするための様々なプロジェクトが実施されている。それは多くの学術領域がかかわる宇宙惑星居住科学として集約され、わが国でも活動がはじまっている。³⁾ その中で、地球とは異なる環境での生命維持と生命のあり方は大きな課題で、とりわけ生命維持システムで中心的な役割を果たす植物に対する宇宙環境の影響を理解し、そこで必要な成長制御と環境制御に関する技術を開発・構築することが重要になっている。

本稿では、以上のような背景と経緯を念頭に、今後の宇宙環境を利用した植物科学の研究シナリオを考えてみたい。

2. 植物の重力感知・応答機構の解明

植物の生産性は、植物体を構成する個々の細胞、組織、器官の成長と形態形成によって決定される。地球上では、これらの過程は重力の支配下にあり、重力形態形成（重力屈性など）と抗重力反応に基づいて制御されている。宇宙環境の特徴である微小重力環境では、重力形態形成および抗重力反応の制御機構が大きく変化する。^{4,5)} 重力形態形成の制御から解放された植物は、自発的形態形成などの特徴的で新たな形づくりを行い、抗重力反応の必要がなくなった植物は、その分のエネルギーを他への分配に回すようになる。^{5,6)} その結果、宇宙では、植物は地球上では見られない新しい生き方を獲得するものと予想される。

重力形態形成と抗重力反応のしくみには、そのための重力感知機構を含めてまだ明らかでない点が多い。重力形態形成ではオーキシンなどの植物ホルモンの動態が重要な意味を持っている。⁷⁾ また、抗重力反応の直接的な担い手は細胞壁であり、植物はしばしば、自身で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する。^{5,8)} さら

に、水分屈性、光屈性、頂芽優勢、回旋転頭運動など、重力応答に影響される種々の植物の成長現象が見出されている。²⁾ 今後の植物の宇宙実験では、これらの現象の成分を抽出し、それらの役割からそれぞれの制御機構を解明する必要がある。

重力形態形成と抗重力反応の制御にかかわる植物ホルモン、細胞壁、そしてそれらの機能を支える様々な成分は、重力以外の環境要因に対する反応や遺伝的プログラムにも深く関わっており、重力反応の解明により、植物機能全般に対して重要な知見がもたらされる。とくに、重力形態形成および抗重力反応における重力感知機構と重力シグナル伝達機構の解明は、植物科学にブレークスルーをもたらすもので、これまでのわが国における当該分野の研究は、宇宙実験の成果も含めて世界をリードしている。さらに、重力形態形成と抗重力反応の制御機構を明らかにすることによって、宇宙のみならず、地球上での効率的な植物生産の実現に大きく貢献することが期待できる。

尚、重力形態形成と抗重力反応過程の一部に関しては、微小重力環境における植物の成長を模擬するクリノスタット装置や過重力装置、突然変異体を用いた地上実験で解析できる。しかし、その結果に基づく予測が宇宙の微小重力環境で起こる保証はなく、また、それら地上実験で得られる仮説を検証することが重要で、そのために宇宙実験が不可欠である。

3. 植物の宇宙放射線・太陽光線影響の解明

46億年の歴史をもつこの地球において、今、われわれ人間を含むすべての生物の生存を可能にしているのは、シアノバクテリア（ラン藻）がおおよそ35億年前に出現したことと起因すると考えられている。シアノバクテリアは、言うまでもなく太陽光エネルギー（主に可視光域400-700 nm）を利用して、地球を覆っていた二酸化炭素から酸素と有機物を作り出し（光合成反応）、さらにこの反応により発生した酸素から成層圏オゾン層が形成されるに至り、今日生物が生存できる環境の土台を創出した。すなわち、シアノバクテリアの出現は、地球大気の組成を激変させ、この地球上での生命の進化を方向づけることになった。その後、生物は進化を続け、水中から陸上へと進出することになった。初めて陸上に進出した生物が、基部陸上植物・ゼニゴケに近い種であり、それが今日地球上に存在するすべての陸上植物へと進化し、前述の通り、植物の光合成反応により、今日の地球大気組成は維持されると同時に、動物の食料源となるに至った。このように、地球上のすべての生物は、太陽光の恩恵にあずかり、生命を維持することができている。しかしながら、太陽光の恩恵にあずかる生物は、常に太陽

光に含まれる紫外線の脅威にもさらされている。紫外線、とくに地表に到達する最も短波長の紫外線 UVB (280-320 nm) は、遺伝情報の源である DNA に損傷を誘発するエネルギーを有しており、太陽光を浴びるすべての生物で、長時間太陽光にさらされる細胞内の DNA 上に損傷が誘発される。⁹⁾ このような紫外線による DNA 損傷（主にピリミジン 2 量体）は、変異、癌化を誘発する。⁹⁾ しかし、すべての生物は紫外線によって誘発される DNA 損傷を修復する機構を兼ね備えており、DNA 損傷を修復する機構を欠失した生物は、生存が極めて困難となる。⁹⁾ このことから、地球上の生物にとって、如何に紫外線 UVB が生命維持に脅威であるかが容易に理解できる。一方、この紫外線誘発 DNA 損傷による変異の蓄積は、生命誕生から動物、植物に至る生物進化、そして生物多様性にも関わり、“紫外線は進化の原動力である”とも考えられている。

宇宙環境は、進化の原動力である紫外線や紫外線よりもエネルギーの高い放射線（宇宙放射線）が、地上よりもはるかに高いレベルで降り注がれている環境である。地上においては、これまでの解析から、高紫外線に対して、植物の DNA 修復酵素（光回復酵素）、障害を受けたオルガネラを除去するオートファジー機能が重要な耐性因子であることが明らかになった。¹⁰⁻¹²⁾ しかし、これらが微小重力環境でどのように機能するのか、また、複合的な紫外線や放射線が降り注ぐ宇宙環境でどこまで耐えることができるのか、といった植物の潜在的な機能、限界等は一切不明である。また、特殊な宇宙放射線環境での世代を超えた長期的な植物育成は、変異誘発率を上昇させ、われわれが想

像する以上に大きな速度で生物多様性のバランスを崩す可能性も指摘されている。今後、宇宙環境での世代を超えた植物育成法を確立するためには、ことさら宇宙環境でも、微小重力環境、そして高紫外線、高可視光環境を含む特殊な宇宙放射線環境、さらにはそれらの複合作用が植物に及ぼす影響を分子、細胞、個体レベルで的確に把握する必要がある。

ISS「きぼう」の船外曝露部はオゾン層で太陽光が遮られることがないので、原始地球上で生命の誕生と進化の舞台となった「オゾン層形成前の原始地球光環境」、さらに、近年危惧されている「オゾン層破壊後の未来地球光環境」のモデル実験場になると考えられる。このようなファシリティを利用した宇宙曝露部利用研究は、宇宙環境での植物生産研究のみならず、生命の進化の初期過程や生命が生き長らえるにはどの遺伝子の獲得が必要であったのかを明らかにする上で、また、地球の環境問題を解決するためにも大きな意義をもつものと考えられる。太陽放射光に各種生命体を曝すことによって、生命体がオゾン層形成後に陸上進出したか否かを想定することができるであろう。さらに、地球のオゾン層破壊後のそれぞれの生命体の生育限度を知ることでもできるであろう。そのためには、培養装置に各種フィルターを装着した曝露装置を開発・利用し、植物を太陽紫外線、宇宙放射線に曝露し、植物がどのような応答を示すのか、例えば、生存率、DNA 損傷生成率、突然変異誘発率、修復能、増殖率、形態・分化異常発生率、遺伝子・タンパク質発現変化、生体成分（タンパク質を含む）の細胞内動態などに対する影響を解明する必要がある。

植物の利用

食料としての植物繁殖の安全性・健全性の基礎生物学的な検証および宇宙飛行士の健康管理に役立つ精神心理支援分野での「ストレス/疲労のモニターと対策」に植物を利用する。

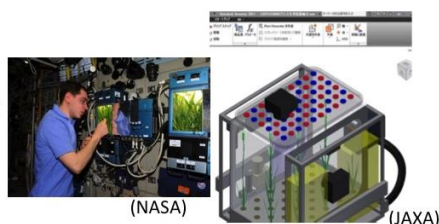
植物のシロイヌナズナの生活環境を国際宇宙ステーションで完結させることに成功し、植物生産を次の段階へ進める時期に来ている。

①宇宙長期有人飛行に必要な食料の供給のために使うための基礎となる研究をする。

②無機質な狭い閉鎖環境で長期作業する宇宙飛行士の精神ケアも重要な課題として位置づけられている。

つまり植物栽培実験は、食料生産と宇宙飛行士のケアの2つの重要課題を解決するため重要と言える

将来的には、宇宙で新鮮野菜を供給するための植物栽培装置を改修、食料となる植物の栽培を行い宇宙飛行士に提供する。最小限の栽培管理を宇宙飛行士が行う。アンケート等でストレス疲労をモニターし評価解析するなど。



- 宇宙環境下での植物生産への貢献
- 閉鎖環境でのストレス対策への貢献
- 地球上での植物生産の効率化
- 地上でのストレス対策への貢献

Fig. 1 Utilization of plants for food supply and mental care for astronauts in space: Biological verification of safety and sound plant production, establishment of technologies for the recycling-oriented closed ecological system, and improvement of astronaut mental health.

その上で、宇宙における植物進化や宇宙居住（生命維持）システムに適した植物種の開発、植物育成法を考えることが重要である。

4. 植物の生活環・継世代に及ぼす宇宙環境の影響

植物は、唯一の生産者として、食料供給や環境維持・浄化を担っている。現在人類が直面している地球規模の環境変動や人口増加を乗り越えるためには、植物の複雑な生理機能のしくみを解明し、効率的な植物生産を実現しなければならない。地球から遠く離れた宇宙空間において人類が長期滞在・居住する際には、植物の存在はさらに重要になる（Fig. 1）。宇宙空間で植物を生産する場合、上述した微小重力環境、宇宙放射線環境といった問題に加え、栽培環境は狭い閉鎖空間、さらには貧弱なリソース下であることなども想定される。したがって、このような制約的な環境で植物を効率的に生産するためには、植物の重力感知・応答機構並びに植物の生活環に関する宇宙生命科学研究から得られる知見を基盤として、その活用法を見出し、植物生理学・生理生態学を基礎とした確固たる科学的・技術的基盤を確立する必要がある（Fig. 2）。宇宙環境で種子を発芽させて、その植物体を成長させ、種子を形成させる生活環にかかわる実験をSeed to Seed 実験と呼び、コムギ、オオムギ、シロイヌナズナなどの植物で実施されている。初期的には稔性種子の形成に問題を生じていたが、微小重力に影響される環境要因の制御によって、宇宙環境でも植

物は種子を形成することがわかった。^{13,14)}しかし、宇宙環境で植物体の老化や種子の稔性・形状に異常がみられ、また、それらは植物種によって異なる可能性が指摘されており、今後の詳細な解析が望まれる。^{13,14)}

宇宙環境が数世代にわたる植物の生活環と遺伝的変異に及ぼす影響の解明は、宇宙生物学、ひいては地上での重力、低線量放射線、低線量紫外線などの影響に隠された植物本来の機能を明らかにするための植物生理・生理生態学に資する情報を得るために重要である。また宇宙における継世代研究は、将来の宇宙開発において、人間が長期にわたって宇宙輸送船、宇宙ステーション、あるいは月や火星の基地などに滞在する場合に必要となる、閉鎖生態系生命維持システムや宇宙農場の構築に不可欠な生物科学的情報を得るために重要である。そこで長期宇宙植物実験を科学的に遂行する実験系構築を目的として、栄養成長および生殖成長に及ぼす宇宙環境の影響を解明するために、精密環境制御下で植物を育成し、ガス交換、乾物生産、形態形成などを個体・組織レベルで計測する植物栽培・モニタリング技術、および重力、放射線、紫外線、温度、水分といった環境ストレスが誘導する生殖成長不全の分子マーカーなどを用いて、生殖成長異常、遺伝的変異などを遺伝子発現レベルで計測するモニタリング技術の開発が行われている。また、大型研究計画「国際宇宙ステーションにおける宇宙生命科学研究計画」（日本学術会議マスタープラン 2011, 2014, 2017, 文部科学省ロードマップ 2012, 2014）の準備として、食料自給を目指した長期の植物栽培

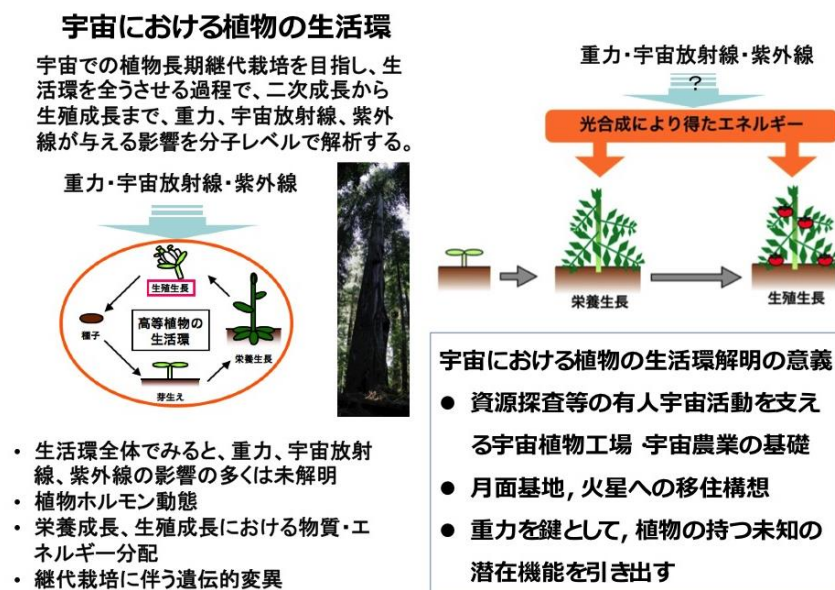


Fig. 2 Studies on the molecular mechanisms for plant responses to space environment and their application to plant cultivation in space: Gravitational and radiation effects on plant growth and development throughout the life cycle and multiple generation.

実験、および数世代にわたり宇宙環境が植物に及ぼす生理生態学的な影響を解明する実験のための大型装置を検討している (Fig. 3)。その大型植物育成装置を用いて、植物種の比較も含めて、宇宙環境、とくに微小重力環境における植物の栄養成長・生殖成長の調節機構について、植物ホルモン動態、細胞壁代謝、光合成、物質循環等に注目して解明するとともに、微小重力環境での植物成長の基礎となる重力形態形成および抗重力反応の制御機構を解明する必要がある。また、地上実験から短期間の宇宙実験、さらには、宇宙での長期にわたる植物栽培へとステップを踏みながら、植物の生活環を通じた成長過程に及ぼす宇宙環境の影響を評価するためには、植物成長に及ぼす水、光（放射線・紫外線を含む）、温度、二酸化炭素、酸素、湿度、気流などの環境要素の影響の解明、とくに宇宙の微小重力下で必要となる環境制御技術や、植物生育の指標となる可視画像、反射・吸収スペクトル、熱・ガス交換などの植物情報モニタリング技術を開発することが重要である。このような栽培装置で育成した健全な植物体を用いることによって、植物の姿勢制御、生殖成長などの生理生態に及ぼす宇宙環境の影響を科学的に検討し、地上環境下では解明

できない植物の持つ本質的な機能を解明する必要がある。このような宇宙環境を利用した植物生産研究は、地上での農業・食料生産にも貢献する可能性が多大である。

日本の植物科学研究者の質は世界的にも非常に高く、多くの実績をあげている。そのような科学的知見の蓄積と研究能力を宇宙植物科学に注ぎ込み、閉鎖生態系植物栽培システムの宇宙での実用化研究と並行して、植物生理学・生理生態学における、さらなる高水準の科学的成果を得て、世界に先駆けてその発信を行うことが、日本の戦略として重要である。これに関連して宇宙実験 Space Seed が ISS で実施され、とくに重力環境が生殖成長に及ぼす影響が解析された。^{13,14)} また、微小重力が植物体温やガス交換に及ぼす影響が航空機実験によって解析されている。¹⁵⁾ これまでに ISS や航空機実験などで蓄積された植物の成長調節、姿勢制御などの生理生態学的知見、および閉鎖生態系内での植物栽培、物質循環に関する植物生理生態学的・システム工学的知見を基に、当該研究分野・領域内、さらには周辺領域も含む分野横断型研究として、物質循環型閉鎖生態系植物栽培システムを開発する必要がある。¹⁶⁾

大型研究計画「国際宇宙ステーションにおける宇宙生命科学的研究計画」

- ・大型研究計画マスタープラン2011
(日本学術会議)
- ・大型プロジェクト ロードマップ2012
(文部科学省)
- ・大型研究計画マスタープラン2014
(日本学術会議)
- ・大型研究計画マスタープラン2017
(日本学術会議)

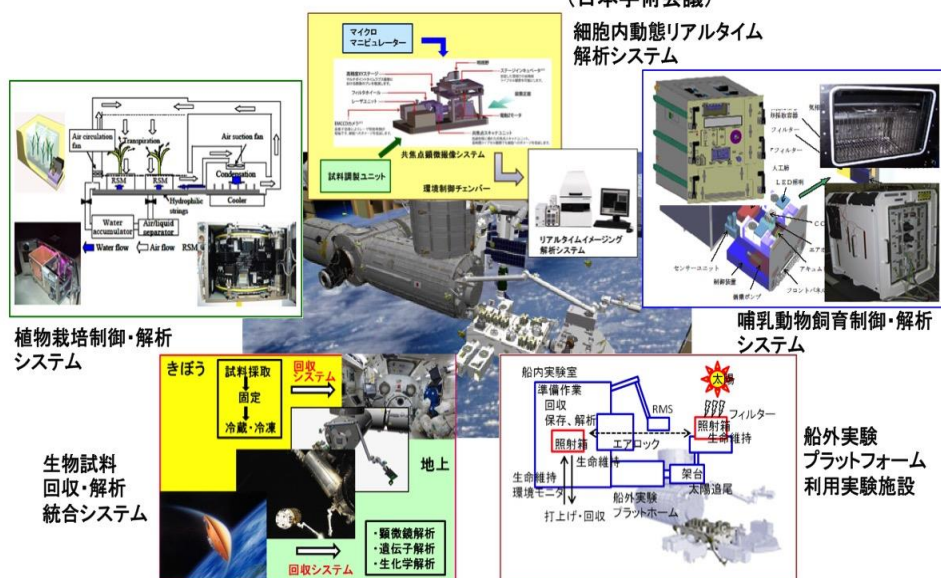


Fig. 3 A large-scaled research project with the advanced biological experiment facilities on ISS. This plan was proposed by JSBSS and approved as the Science Council of Japan (SCJ) Master Plan and the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) Roadmap.

5. 宇宙植物工場の開発研究

わが国では、かつて、当該分野を先取りした形で、植物を主要な構成要素とする閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）が構想され、実際に閉鎖生態系実験施設（CEEF）が青森県六ヶ所村に建設され、活発に研究された時期があった。最終的にヒト2名、ヤギ2頭が植物（イネやダイズなど）とともに CEEF 閉鎖系で 1-4 週間生活し、多くの有用なデータが取得された。¹⁶⁾ しかし、実験施設の老朽化や予算的な制約もあり、最近はやや下火となっている。一方、海外では、とくに欧米とロシアが中心になって、基礎的な科学研究と平行して、閉鎖生態系の実用化をめざした研究も継続的になされている。米国では、フロリダ州のケネディ宇宙センターに NASA バイオマスプロダクションチャンパー（BPC）が設置され、宇宙船内での植物栽培を想定して、コムギ、ジャガイモ、レタス、ダイズ、トマト、イネ、ハツカダイコンなどが水耕栽培、人工光のもとで育成された。^{17,18)} その後、アドバンスドアストロカルチャー（ADVASC）やバイオマスプロダクションシステム（BPS）などの宇宙用植物栽培装置を開発して、スペースシャトルや国際宇宙ステーション内で植物栽培実験を試みている^{19,20)}。ロシアは、国際宇宙ステーション以外の独自の宇宙船でも多くの植物実験を行っており、それらの成果の上に BIOS-3 というプロジェクトで、自立型の閉

鎖系生命維持システムの構築を目標にしている。²¹⁾ ヨーロッパでも ESA や DLR が中心になり、類似した目的で、MELiSSA プロジェクトや EDEN プロジェクトが進められている。^{22,23)} また、関連する国際会議 COSPAR2012, 2014 での発表状況をみると、欧米やロシアに加えて、中国からの発表件数の増加、発表内容の実用化に向けた強い姿勢が見られ、様々な状況を勘案すると、中国がいち早く閉鎖生態系植物栽培システムを宇宙で実用化する可能性が考えられる。日本では、本領域に関連して、科学研究費や JAXA 宇宙環境利用科学委員会研究チーム「宇宙環境に対する植物反応解明のための実験系構築」、「宇宙における植物の生活環」、ならびに「国際宇宙ステーションにおける宇宙生命科学計画」において検討・推進されており、これまでのわが国の実績を基盤に、引き続き日本主導の宇宙植物科学をさらに発展させるべきである（Fig. 4）。本領域研究は、基礎研究だけでなく栽培装置開発にも携わり、宇宙植物工場の実現のための基礎データを集積するとともに、環境制御やリモートセンシングによる全自動植物工場のモデルを提示することにもなる。わが国の植物工場に関する基礎研究と応用研究は世界を牽引しており、その強みを宇宙生命科学としての展開にも活かすことができる。その場合、宇宙居住の実現に向けては、上述のプロジェクトをはじめとする海外の研究グループとの国際協力が不可欠で、そのための具体的な体制を構築することが重要になる。

宇宙居住の基盤：制御生態系生命維持システムと植物生産

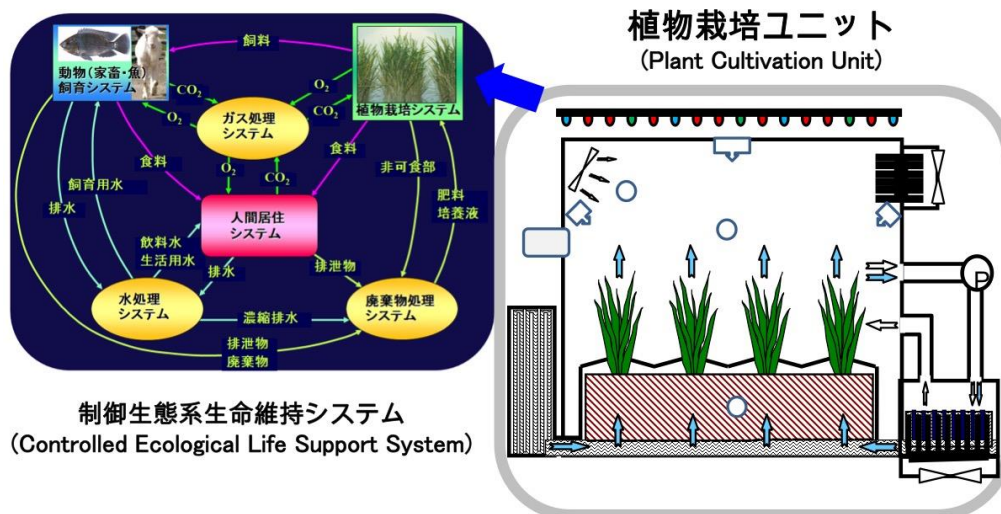


Fig. 4 Plant cultivation unit for the controlled (closed) ecological life-support system.

6. 宇宙惑星居住科学に向けた植物研究のロードマップ

月や火星の環境で植物を育成することは、そうした極限環境に生命を維持する要素として必須である。また、植物は食料や酸素・水の生産・供給源としてだけでなく、人の健康や生活資源の確保のためにも重要である。惑星を人為的に人が住めるように改造することはテラフォーミングとして知られるが、そのために解決すべき課題は温度、水、ガス、重力、放射線、気圧など広範囲に及ぶ。地球の原始地球に類似するところが多いと考えられるが、惑星の地球化というよりは、まずは、閉鎖空間での物質循環系を利用した生命維持システムを作る必要がある。ただし、それは小規模のものであっても地球に類似した持続性を有する制御生態系である必要がある。その実現に向けて、日本宇宙生物科学会植物研究グループは、次のようなロードマップを想定して研究を推進・計画している。

第1期（2015～2020）

- ・新規大型植物栽培装置の開発と ISS・きぼう実験棟への設置
- ・同植物栽培装置を用いた重力形態形成ならびに抗重力反応過程の変化の解析
- ・同植物栽培装置を用いた生活環の全過程における宇宙環境の植物生理生態学的影響の解明
- ・植物への重力（微小重力・1/3, 1/6G 重力環境）と宇宙放射線複合影響の解明

第2期（2021～2025）

- ・物質循環を組み込んだ閉鎖生態系植物栽培システムの構築および宇宙環境での実証
- ・植物の栄養成長、生殖成長、重力形態形成、抗重力反応、ならびに放射線耐性を改変した植物の宇宙での栽培実験とその育種
- ・宇宙環境における植物生産の効率化を図るための新技術の開発研究
- ・生物実験人工衛星の開発と打ち上げ

第3期（2026～2030）

- ・月面基地さらには火星探査における長期有人活動を支援するための閉鎖生態系生命維持システムの構築
- ・そのための各要素技術の開発、検証、最適化
- ・月周回軌道への生物実験人工衛星の投入

第4期以降（2031～）

- ・月居住生命維持システムの開発
- ・有人火星探査と火星居住生命維持システムの開発

7. おわりに

生物は、地球上で環境との関連において進化を遂げてきた。その過程で生物の陸上進出を可能にし、その結果として現在の地球生態系が存在する。生物は、宇宙環境を生活の場として世代を継代した場合、どのように進化して、どこまで適応できるのだろうか。宇宙環境を利用した植物科学は、新たな生物学的知見を見出し、人類の宇宙活動の範囲を広げ、それが翻って地球問題を解決するだけでなく、そうした未来の生物社会を開拓するパイオニアとしても重要になるであろう。生物機能を理解し、それに対する宇宙環境の影響を明らかにする研究から、宇宙に人間が居住するためのシステムの開発研究への道筋も、植物科学だけでは勿論達成できない。それぞれの関連する学術領域の発展と学際的アプローチで、国民と各界からの理解を得る必要がある。そのためには、実際に宇宙に居住する人間の生命・健康の維持は勿論、微生物利用など、居住システムを循環持続型生態系ととらえたときに必要な宇宙生物科学の基盤の上に、農学系や医学系だけでなく、工学系、化学系、物理系、そして人文社会科学系などとも連携することが重要である。

参考文献

- 1) 宇宙を感じる植物のしくみ
<http://iss.jaxa.jp/kiboresults/plant/> (19 Apr. 2017)
- 2) 日本宇宙生物科学会創立 30 周年記念シンポジウム「宇宙生物科学」
<http://www.jsbss.jp/special/index.asp?id=24288> (19 Apr. 2017)
- 3) 宇宙惑星居住科学連合
<http://www.jasma.info/SUHPHS/soshiki.html> (19 Apr. 2017)
- 4) H. Takahashi, M. Kamada, Y. Yamazaki, N. Fujii, A. Higashitani, S. Aizawa, I. Yoshizaki, S. Kamigaichi, C. Mukai, T. Shimazu and K. Fukui: *Planta*, **210** (2000) 515.
- 5) 保尊隆享, 曾我康一, 若林和幸: *生物工学*, **88** (2010) 292.
- 6) K. Miyamoto, T. Hoshino, R. Hitotsubashi, M. Yamashita and J. Ueda: *Adv. Space Res.*, **36** (2005) 1263.
- 7) C. Yamazaki, N. Fujii, Y. Miyazawa, M. Kamada, H. Kasahara, I. Osada, T. Shimazu, Y. Fusejima, A. Higashibata, T. Yamazaki, N. Ishioka and H. Takahashi: *npj Microgravity*, **2** (2016) 16030.
- 8) T. Hoson, K. Soga, K. Wakabayashi, T. Hashimoto, I. Karahara, S. Yano, F. Tanigaki, T. Shimazu, H. Kasahara, D. Masuda and S. Kamisaka: *Plant Biol.*, **16(S1)** (2014) 91.
- 9) 日出間純: 「高等植物の太陽紫外線防御・耐性機構」, 太陽紫外線防御研究委員会, 学術報告, (2017). 印刷中
- 10) J. Hidema and T. Kumagai: *Plant Cell*, **12** (2000) 1569.
- 11) J. Hidema, T. Taguchi, T. Ono, M. Teranishi, K. Yamamoto and T. Kumagai: *Plant J.*, **50** (2007) 70.
- 12) M. Izumi, H. Ishida, S. Nakamura and J. Hidema: *Plant Cell*, **29** (2017) 377.
- 13) 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, 榊田大輔, 嶋津徹, 福井啓二, 西谷一彦, 保尊隆享: *生物工学*, **88(6)** (2010) 288.
- 14) 唐原一郎, 新谷 悠, 玉置大介, 神阪盛一郎: *Space Utiliz. Res.*, **26** (2010) 173.
- 15) Y. Kitaya, M. Kawai, J. Tsuruyama, H. Takahashi, A. Tani, E. Goto, T. Saito and M. Kiyota: *Plant Cell Environ.*,

- 26 (2003) 497.
- 16) 大政謙次, 竹内俊郎, 木部勢至朗, 北宅善昭, 船田良 監修 :
「閉鎖生態系・生態工学ハンドブック」, 生態工学会出版企
画委員会, (株)アドスリー, (2015).
- 17) H. Suge (ed.): Plants in Space, IGE, Tohoku University,
(1996).
- 18) R.M. Wheeler, C.L. Mackowiak, G.W. Stutte, J.C. Sager,
N.C. Yorio, L.M. Ruffe, R.E. Fortson, T.W. Dreschel, W.M.
Knott, K.A. Corey: Adv. Space Res., **18(4-5)** (1996) 215.
- 19) https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/185.html (19 Apr. 2017)
- 20) https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/20.html (19 Apr. 2017)
- 21) <http://www.biosmhars.eu/expe/bios-3> (19 Apr. 2017)
- 22) http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Melissa/Targets_Scientific_domains (19 Apr. 2017)
- 23) <http://eden-iss.net> (19 Apr. 2017)