

植物の重力宇宙生物学と宇宙園芸研究

高橋秀幸

重力宇宙生物学とは

植物の重力応答と宇宙実験

宇宙園芸研究 一宇宙における食料生産システムの構築に向けて一

重力宇宙生物学とは

重力宇宙生物学 (Gravitational and Space Biology) の目的は、無重力や宇宙放射線などの地球上にはない環境を利用した生物学によって新たな知見を見出し、それを人類の宇宙探検・生命圏拡大 (宇宙居住) に活用すると同時に、生態・食料・エネルギーなどの地球的課題の解決に資するために、宇宙環境利用も含めたアプローチで生命を理解することです。重力宇宙生物学に関する研究は、人類の宇宙進出とともにロシア・アメリカで始まっていますが、1980年代以降、スペースシャトルや国際宇宙ステーション (International Space Station; ISS) の開発・打ち上げとともに、精巧に高度化した実験装置の開発も相まって本格化したといえます。

NASA が主導する Gravitational and Space Biology プログラムの活動をベースに、1984年に創立された米国重力宇宙生物学会 (American Society for Gravitational and Space Biology) は、現在、生物学領域と物理学領域を融合して American Society for Gravitational and Space Research になっています。日本・ロシア・ヨーロッパ・中国・韓国など、世界各国でも、それぞれの宇宙活動の展開に連動するように類似の学術団体が設立されました。日本では、1987年に日本宇宙生物科学会が発足しました。宇宙医学や閉鎖生態系の研究領域でも、宇宙環境に関連した生物・生命現象を含めて、それぞれの学術活動が行われています。

ISS の日本実験棟「きぼう」には、細胞生物学実験装置 (Cell Biology Experiment Facility; CBEF) が搭載され、小型の植物栽培装置や小動物飼育装置であれば、CBEF に取り付け、環境を制御して実験を行うことができます。培養細胞や線虫や植物の芽生えを用いた実験はもちろん、メダカやゼブラフィッシュなどの水棲動物やシロイヌナズナなどの小型植物の実験装置も開発されて実験が行われています。近年は CBEF 用マウス飼育装置が開発され、宇宙医学研究が進められています。CBEF の特徴は、様々な生物を対象とした汎用型であることに加え、遠心機を備えていることです。それによって、微小重力から 2G までの環境を作ることができます。実施される研究課題は、今日の生命科学の進歩を反映していますが、日本の研究では、重力が筋萎縮・骨代謝・加齢・酸化ストレスにともなう生体変化や行動に及ぼす影響、宇宙放射線の生物影響、重力応答に関連した植物機能などの成果がとくに注目されています。日本の重力宇宙生物学の歴史と成果については、「日本宇宙生物科学会創立 30 周年記念シンポジウム」 (<http://www.jsbss.jp/special/?id=24288>) に詳しく紹介されていま

す。その中で、重力宇宙生物学研究の歩みだけでなく、それを土台にした将来の有人による深宇宙（地球からの距離が 200 万 km 以上の宇宙）探査や月・火星活動も展望されています。

昨今、ISS の運用延長が決まり、また、アルテミス計画における月周回軌道上の有人プラットフォーム、深宇宙探査ゲートウェイ建設に日本も参画することになりました。ISS を利用した生命科学研究は新たな局面を迎えることになり、月周回軌道上ゲートウェイは地球低軌道とは異なる低重力場と宇宙放射線・太陽光紫外線の環境を提供してくれます。深宇宙で健全に生きるために、地球で豊かに生活するために、重力宇宙生物学研究の第二幕が始まろうとしています。

植物の重力応答と宇宙実験

植物は固着性の生物として、一般的には芽生えたその場で一生を過ごします。そのため、自然界での光や水などの環境変動に頻繁に遭遇し、それが植物の生育を制限するという問題があります。しかし、植物は進化の過程で、そうした環境ストレスを回避・軽減するために様々なしくみを獲得しました。そのひとつが重力応答です。たとえば、種子が発芽すると、根は下側に、茎は上側に伸び、それぞれ養水分を根から、光・二酸化炭素を茎葉で取り込み、植物の光合成に依存した生命活動を可能にします。この重力に応答した伸長方向の制御は、重力屈性として知られています。植物では、重力屈性のほかにも、重力応答による成長制御や重力応答に影響される成長現象がみられ、それらを総称して重力形態形成と呼んでいます。

植物の重力応答は生存・生産性を大きく左右しますので、そのしくみを理解することは、生物学的にも農学的にも大変重要です。ただ、光や温度などに対する環境応答を研究する場合と違って、重力環境を人為的に変化させるような実験を行うことは容易ではありません。植物の重力応答を研究する方法として、植物体を傾ける、植物体を低速回転させて受容する重力の方向を連続的に変化させる、植物体を遠心機で回転させて 1G 以上の過重力を負荷する、異常な重力応答を示す突然変異体を解析する、などがあります。このような手段で研究して得られる重力応答のしくみや重力影響に関する仮説は、実際に無（微小）重力の条件で比較解析することによって検証できます。実験のための微小重力条件は、短時間（20 秒から数秒）であれば飛行機のパラボリック飛行や落下塔を利用して得ることができます。またロケットを使って高い高度から落下させれば分単位の微小重力条件を得ることができます。しかし、これらの実験では、より長い時間を必要とする植物の成長現象をみることは難しく、また、微小重力に加えて過重力の過程も含まれるために、実験結果の解釈が複雑になります。

そこで、スペースシャトルなどの再使用型宇宙船や ISS が重力宇宙生物学研究に利用されるようになり、宇宙実験が地球周回軌道上で実施されてきました。日本が実施した植物の宇宙実験とその成果は、「宇宙を感じる植物のしくみ」(<http://iss.jaxa.jp/kiboresults/plant/>) ならびに「植物科学最前線 宇宙から識る植物科学」(DOI: 10.24480/bsj-review.11a1.00173) で解説されています。これまでの植物の宇宙実験から、宇宙環境が植物機能を理解するための有

用なツールであることがわかります。また、これらの研究から、宇宙で植物を効率的に生産する上で重要な知見や技術基盤も見出されています。

宇宙園芸研究 一宇宙における食料生産システムの構築に向けて一

将来、人類が月・火星などの深宇宙で有人探査や居住することを目的に、閉鎖型制御生態系・物質循環システム・宇宙農業・植物工場に関連する研究も早くから行われてきました。中でも食料生産に関しては、NASAが地上に設置したBiomass Production Chamber や米国・ロシアが宇宙船内に搭載した Salad Machine が注目されました。それぞれの養水分供給システムと人工光のもとで、葉菜類・果菜類・根菜類・穀類が栽培・収穫されて、話題になりました。こうした研究や近年の植物工場研究の成果の上に、栽培装置も改良され、NASAは現在ISSで Veggie プロジェクト（野菜栽培実験）を繰り返し実施しています。実際に、宇宙飛行士がチンゲン菜やミニトマトなどを栽培・収穫して食べて、栄養を補うだけでなく、生産性や栄養価や心理的影響を評価しています。このように、葉菜類など、一部の野菜については宇宙空間でも栽培できますが、植物の成長制御と環境制御の面から、特殊環境下で生産性をどのように最大化するか、また、ガス・水・肥料や非食部のリサイクル・物質循環をどのようにするか、そして、システム全体の効率化をどのように図るかは、今後の大きな課題です。

イネやコムギなどの穀類や果菜類を収穫するためには、栄養成長期に加えて、花芽形成・開花・結実の生殖成長期を含めた栽培管理が必要です。初期の宇宙での Seed to Seed 実験では、栽培装置の環境制御が十分でなかったこともあり、種子形成や稔性の低下が報告されました。その後、シロイヌナズナだけでなく、コムギやオオムギでも微小重力下で種子を結実させ、宇宙で生活環を完結することに成功しています。しかし、それでも老化や種子形成に異常がみとめられることがあります。授粉様式も含めて、生殖成長の過程は植物種によって異なりますので、それぞれの植物で宇宙環境が生殖成長に及ぼす影響を解析する必要があります。さらに、植物の生殖過程は環境ストレスの影響を受けやすく、それが障害となって減収の原因にもなります。たとえば、イネ・ムギ類の低温・高温障害による不稔はよく知られています。宇宙の低重力環境では、ガス交換の抑制によって光合成が阻害されるだけでなく、植物体温が大きく上昇することも予想されています。これによる高温障害や光合成阻害を回避するためには、適切に送風を制御する必要があります。このように穀類などの場合でも、やはり食料生産システムとしての生産性の最大化と効率化は今後の課題になります。

これまで米国やロシアが実施した植物の宇宙実験では、細胞分裂・染色体・物質代謝など、植物の成長を制御する様々な要因に対する宇宙環境の影響が調べられています。とくに、DNA 損傷・染色体異常・突然変異は、宇宙における植物の栽培・継世代でも大きな問題になる可能性があります。そのため、低重力・宇宙放射線・紫外線の複合的な生物影響の研究も重要になります。宇宙における居住施設では、周囲が真空であるために、構造

的強度の保持および空気漏れ防止などの視点から、建物の中は減圧になると考えられています。それを前提に、減圧と低重力が植物の成長に及ぼす複合影響の研究も必要になります。

これまで日本は、芽生えや超小型植物を用いた宇宙実験を実施してきました。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、現在、将来的な有人深宇宙探査を念頭に、食用作物の宇宙実験が可能な栽培装置の開発とその制御システムの高度化を検討しています。こうした新たな植物実験装置が、宇宙における食料生産に必要な植物の成長制御や技術開発に関する研究に大きく貢献すると期待されます。ISS や月周回ゲートウェイに搭載する実験装置には様々な制約があり、植物栽培装置も実際に食料生産システムとして月面などに適用されるものとは違ってきます。しかし、多くの種類の作物・野菜について、宇宙環境への応答を解析することによって、新たな成長制御のしくみが発見され、それらの宇宙栽培や宇宙居住者の栄養管理のための重要なヒントが得られるでしょう。また、宇宙植物工場における環境制御や成長制御のための要素技術を研究開発し、ISS や月周回ゲートウェイを利用した宇宙実験で検証することは、宇宙食料生産システムとしての生産性と効率化のために重要になるでしょう。

現在は日本でも、JAXA 宇宙探査イノベーションハブや内閣府宇宙開発利用加速化戦略プログラム (スターダストプログラム) など、宇宙居住に向けたさまざまなアプローチが産官学の連携で行われるようになりました。学術的にも、2016 年に宇宙惑星居住科学連合が発足するなど、関連学協会の連携が強化されています。そうした中で、宇宙での暮らしも現実的なものとしてイメージできるようになりつつあります。1990 年代前半に米国アリゾナ州に建設されたバイオスフィア 2 や 1990 年代後半に六ヶ所村に建設された閉鎖型生態系実験施設 (Closed Ecological Experiment Facilities; CEEF) では、短期間ながら、水や酸素が循環する閉鎖系の中で居住者が植物を栽培し、自給自足の生活をしました。課題も多く残りましたが、こうした実証試験は、極限環境での生命維持に関する基礎研究とともに、現在の人類の宇宙への挑戦に有益な知見をもたらしています。その上で、今、ヨーロッパの EDEN ISS (<https://eden-iss.net/index.php/consortium/>) や MELISSA (https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Melissa) をはじめ、世界各国のプロジェクトが、人類の長期宇宙滞在・生活を目標に、植物生産システムを含む宇宙居住施設の建築を目指しています。宇宙における食料生産や栄養補給だけでなく、宇宙飛行士や宇宙居住者への心理的効果も含めて、そして地球社会の課題解決のために、宇宙園芸研究の果たす役割は大きいと考えられます。

参考文献

一般社団法人 日本宇宙生物科学会 創立30周年記念シンポジウム ―未来への飛翔―
(<http://www.jsbss.jp/special/?id=24288>).

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙を感じる植物のしくみ

(<http://iss.jaxa.jp/kiboresults/plant/>).

宮沢豊・曾我康一編 (2020) 宇宙から識る植物科学. 植物科学最前線11: 1-119 (DOI: 10.24480/bsj-review.11a1.00173).