

植物の微小重力下における太陽光影響評価に向けた ISS 曝露部搭載型植物培養器 (Plant-BioCube Unit) の開発に関する進捗状況

日出間 純 (東北大・院・生命科学), 愿山 (岡本) 郁 (東北大・院・生命科学), 笠羽 康正 (東北大・院・理), 桑原 聡文 (東北大・院・工), 久米 篤 (九大・院・農), 永井 大樹 (東北大・流体研), 橋本 博文 (JAXA), 稲富 裕光 (JAXA)

Development of Plant-Bioatellite Cube-Unit (Plant-BioCube Unit) Mounted on Exposure Area at ISS Platform for Investigation of Plant Life Support Mechanisms in Space Environment

Jun Hidema*, Kaoru Yoshiyama (Okamoto), Yasumasa Kasaba, Yoshinori Kuwahara, Atsushi Kume, Hiroki Nagai, Hirofumi Hashimoto, Hiromitsu Inatomi

Tohoku Univ., Graduate School of Life Sciences, Sendai, Miyagi 980-8577

E-Mail: jun.hidema.e8@tohoku.ac.jp

Abstract: The space life science experiment is an important activity that will surely support the future space life and development of human and earth life activities including international space exploration. However, the prospects for 2024 and beyond, when the current method of using the International Space Station (ISS) will be terminated, has remained unclear, and people have developed much concern about that. Due to low-cost infrastructure in the post-ISS, Tohoku University has begun the project named "Development of an ultra-compact space life science experimental device (Biosatellite-Cube) for elucidating life support mechanisms in space". In this project, we are developing a 4-6U ultra-compact free flyer with a pressure section, one of the common infrastructure for space environment exposure experiments. It has already been adopted as one of Tohoku University's new programs "Frontier Research in Duo", and it is in progress to reach ground test verification with a prototype at the end of 2023.

Toward this practical application, we are currently planning an experiment "BioCube-ISS" to deploy and recover the atmospheric pressure module part (Max: 3U size) of this unit on the "Kibo" Exposed Facility of the ISS platform. In this research project, as a model case of this unit, we intend to develop a closed- and sunlight utilization-type plant culture device (Plant-BioCube Unit) with life support system. This project will be promoted by cross-disciplinary joint research of space life sciences, microsatellite development, and spaceborne observation equipment developed by specialized space engineers.

Key words; Space experiment, Post International space station, Biosatellite Cube (BioCube), Space plant culture unit,

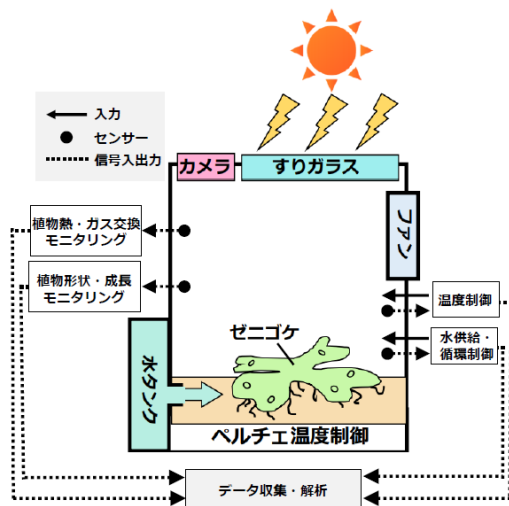
1. はじめに

人類の宇宙開発・利用は、国際宇宙ステーション (ISS) に代表される国際協力活動を経て、発展しつつある。その究極的目標は、宇宙惑星居住科学の確立であり、宇宙環境を利用した多様な理学・工学・生命科学の追求を進め、広範な科学・工学および人間・社会科学との連携で、宇宙での生命と人類の長期居住の確立を目指すものである。その中でも、宇宙生命科学研究は、国際探査を含む人類・生命活動の宇宙展開を目指すうえで、継続的发展が必要不可欠な分野である。しかし、目前には2つの問題がある。

(1) ISSの現利用方式が終了するとされる2024年度以降の現実的な展望が不明確である。「20-30年後の

活動」を語る上でこの点は関係者が共通に憂慮するところである。宇宙生命科学研究の舞台が月面や gateway に収斂される場合、ISS以上に高いハードルとなり、宇宙生命科学研究の機会・縮小につながりうる。「現実的な実験機会の確保」は、宇宙惑星居住科学の確立への階梯に欠かせない。

(2) ISSにおける「活動中の高等生命」を対象にした宇宙生命科学研究は、「ISS内の実験」に限定されている。過去に行われた曝露部実験では、活動中の高等生命は用いられておらず、乾燥微生物もしくは種子など活動休止状態を対象とするものに留まっている。ISS船内は宇宙飛行士の生存・活動が保障された環境であり、より厳しい宇宙環境への曝露研究には適用できない。「活動中の高等生命」に対するISS



船外生命科学実験の確立は、宇宙惑星居住科学の確立への階梯に欠かせない。

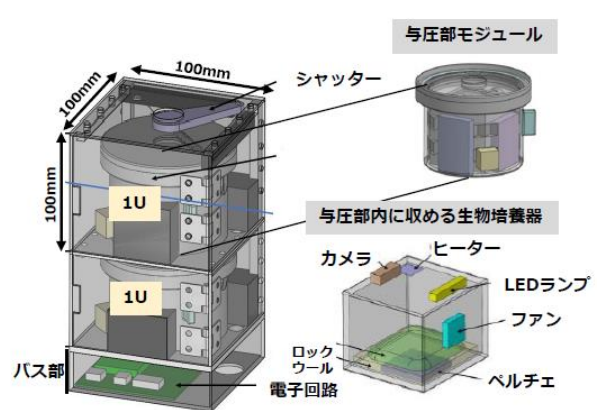
図 1 太陽光利用型閉鎖系植物培養装置 (Plant-BioCube Unit) 概要

しかしこれらの問題は、宇宙生命科学コミュニティ単体では解決できない。超小型衛星開発、衛星・探査機搭載機器開発等の知識・実績の蓄積を擁する工学・理学の研究者らとの強い連携による横断的学際コミュニティによる推進が必要不可欠である。

2. Plant-BioCube Unit の開発にあたっての課題

本研究で最終的な開発を目指す、「BioCube」は、「小型汎用 Unit」10 cm 角 (1U) の超小型人工衛星に搭載可能な標準サイズを採用した生命維持装置を装着したユニットである。小型化・標準化によって、大学規模でも開発を可能とし、また超小型衛星への搭載ペイロード化も容易となるため、宇宙実証・実験機会を飛躍的に増大させることが期待される。しかしながら、この 10 cm 角という非常に小さな BioCube 内に、生命維持が可能なシステムを全て組み込む必要がある (図 1: 植物培養装置概要)。以下に、技術的に最もハードルの高い課題を記す。

(1) 「生命の生存を保証する環境維持システム」が必要：地球上での生命は、環境との間で物質の交換を行う開放系システムで生育しているが、超小型衛星は閉鎖系システムとなる。したがって、陸上植物を活動状態で宇宙環境に曝露するためには、「気圧を大気圧で保持しつつ、水分等を含む適切な物質を付与できる閉鎖型システム (与圧部モジュール)」が必要となる。宇宙での生物曝露実験の間 (6 ヶ月を想定する)、その生存を保障する必要がある。ことさらに想定する超小型人工衛星の地球旋回軌道上の環境は、太陽光の入射量と日照・日陰条件が大きく変化し、BioCube 外部の温度 (熱環境) も 1 日の間にマイナス 60 度～プラス 70 度と激変する。このような環境においても、与圧部モジュール内は、生命の



生存を維持できる適切な温度環境の制御が必須とな

図 2 BioCube の構造設計概要 (左：全体構造、右上：与圧部モジュール、右下：生物培養器

る。

(2) 「生物のモニタリングと環境状況を把握するためのカメラ・センサーシステム」が必要：回収不能な超小型衛星では、試料観察に要するカメラ、さらに温度・湿度・気圧・二酸化炭素量を測定するためのセンサー類等も必須となるが、それらの機能が急激な温度・湿度変化、また結露等で妨害されると目的を達しない。さらにスペースが 1U に限定されているだけでなく、さらに限られた電力といった制約の中で、正常に機能する条件に保つためのシステムが必要となる。加えて与圧部モジュールは真空環境においても問題なく安全に機能する必要がある。

3. BioCube Unit の全体、与圧部モジュール、植物培養器の構造設計

(1) 全体構造 (図 2 参照)

アルミ製方形ボックスで、内側に「与圧モジュール」を収める。上面は、その中央に採光窓 (径 2 cmφ。人工石英。外側表面をすりガラス加工) を設け、内側にシャッターを付する。窓は、培養開始前 (培養液導入前) までシャッターで閉じて太陽光を遮蔽し、培養液導入後にシャッターを開けて太陽光を導入する。

(2) 与圧部モジュール

与圧部モジュールは、与圧部容器と生物培養器から構成される

<与圧部容器> 径 50 mm、高 66 mm の円筒容器で、O-ring で気密性を保持し、内部を約 1 気圧で保持する (図 2 参照)。装置の形状、材質の厚さ等は、応力解析、熱設計により決定するが、軽量であるが熱伝導性の低い PEEK を想定している。生物培養器は、この与圧モジュール内に固定され、外面パネルへ熱結合する。内部は 1 気圧とし、乾燥空気 (結露防止のため) を充填する。与圧モジュール壁と生物培養器と

の間には、培養液とポンプからなる「培養液供給システム」、高湿度域を避ける光学センサー群、およびハーネス群を配置する。

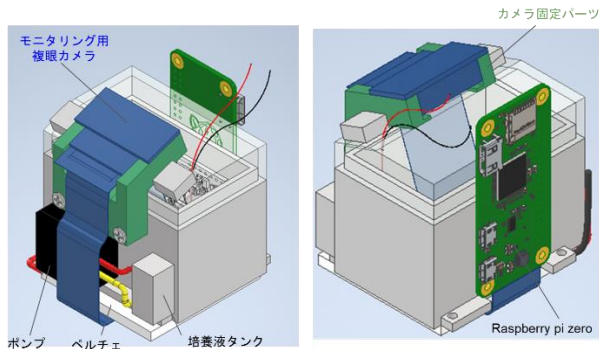


図3 太陽光利用型閉鎖系植物培養装置 (Plant-BioCube Unit) 構造設計

＜生物培養器＞40 mm 角の容器で熱伝導性を確保するため、側・底壁はアルミ素材を用い、積極的に放熱面である外部パネルに（与圧モジュールを介して）熱結合させる（図2, 3参照）。内部は約1気圧で与圧密閉する。上面は窓（合成石英板）として、太陽光を透過させ、またカメラ・分光センサーでモニター可能とする。側面には、内側に攪拌ファンを設けるとともに、温度/湿度/CO₂濃度センサー・気圧センサーを配する。底部にはロックウールを敷き、ここで植物を培養する。ロックウール部には側壁からパイプを通し、そこから培養実験開始時の培養液を供給する。なお、本計画では、進化の過程で初めて陸上に進出した基部陸上植物・コケ植物を利用することを想定して地上での予備解析を行っている。また、モジュール内に設置する各種センサー類、カメラ等に関しても、これまでの宇宙実験で使用されていたものはサイズの使用できないため、小型化し、閉鎖系で使用可能な装置の開発が必要である。

4. モニタリングシステムカメラ開発

衛星を用いた生物実験では、サンプルの回収が困難であるため、生物の生育状況をリアルタイムで観察できるモニタリングシステムが重要かつ必須の解析装置となる。しかし、これまでのISS内の生物実験に使用されているモニタリングシステム、カメラなどはサイズが大きく、利用することが出来ない。そこで、この培養器のサイズ内にも設置可能で、かつより正確な情報を得られる超小型の装置を開発する必要がある。本開発では、植物の育成状況を的確に把握するために、最低、植物体の撮影、および生育指標となる光合成活性（クロロフィル蛍光測定）、そして植物体の生育度合の指標として広くリモートセンシング等で利用されている Photochemical Reflection Index (PRI)が測定可能な超小型モニタリングカメラの開発が最低限必要であると考ええる。

5. おわりに

今後は現在作製中の試作機を用いて、(1) 実際に植物を培養し、気密環境下で植物体は何カ月生育可能であるか、(2) 各種センサー類の動作確認、モニタリングカメラからのデータ取得と解析、(3) 外界の温度変化 (-20～80℃) に対する培養機内の温度制御試験、(4) 想定される温度変化における各種センサー類の動作確認、ならびに植物のモニタリング試験、(5) 植物培養器と与圧モジュールに組み込み、真空試験を実施し、培養器の性能確認等を実施する必要がある。

なお、本開発にあたり多くの支援、サポートをいただきました、東北大学・社会にインパクトある研究「宇宙航空研究連携拠点」（拠点長・大林茂）メンバー、Duo プロジェクト支援メンバー、ならびに「スペースモス」メンバー、宇宙生命科学研究コミュニティメンバー、JAXA 関係者の皆様に感謝いたします。