

# 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) エンジニアリングモデル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-Biosatellite Cube-Unit (Plant-BioCube Unit) Mounted on Exposure Area at ISS Platform for Investigation of Plant Life Support Mechanisms in Space Environment 2021

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 2030 and beyond, when the operation of the International Space Station (ISS) will end in 2030, 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. The purpose of 2021 research is to create an engineering model for monitoring system, biological incubator, and pressurization unit based on the results of analysis using the prototypes manufactured so far.

**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の運用が2030年で終了することが決定され、2030年以降の現実的な宇宙実験実施の展望が不明確

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。そこで我々は、新たな実験場として、生命維持機能を装備した宇宙環境曝露実験ユニットとなる生物衛星（Biosatellite Cube: BioCube）を開発することを目指す。BioCube の開発は、宇宙生命科学コミュニティに加え、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ため、東北大に形成された「宇宙航空研究連携拠点」を中心に実施する。

## 2. Plant-BioCube Unit

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。

### (1) Plant-BioCube Unit 内では、コケ植物を栽培

コケ植物は、進化の過程で水中から初めて陸上に進出した生物で、温度・乾燥・紫外線等の環境変動に対して他の植物とより抵抗性が高いことが知られる。また、コケ植物は比較的小型植物であることから、1U サイズの BioCube 内に搭載する生物培養器（おおよそ 5 cm x 5 cm x 5cm サイズ）で長期間培養可能な植物の候補と考えられる。そこで、2020 年度に設計した植物培養器を 3D プリンターで作製し、コケの栽培実験を実施した（図 1 参照）。この容器内の床面に種々のコケ植物を植え、宇宙空間での衛星軌道から想定される -80℃～60℃ の範囲で、1 時間から最長 7 日間の温度処理を行い、コケ植物の温度に対する抵抗性を調べ、宇宙実験に使用するコケ植物の選抜を行った。その結果、ミズゴケは高温、低温に対する抵抗性が他のコケ植物に比べて大変高いことが分かった。そこで、これまで栽培は、床面にロックウールを敷き、ロックウール上に選抜したコケの無性芽、葉状体をアラビアゴムで包埋し、打ち上げることを想定していたが、ミズゴケの生育の特性上、ロックウールの代わりに、床面には、乾燥させたミズゴケを敷き詰め、ミズゴケの上面、または内部に、高温、低温に対して比較抵抗性を有したギンゴケの無性芽、ホソバオキナゴケ・ムチゴケ・ハイゴケの葉状体をアラビアゴムで包埋し、宇宙へ輸送し、宇宙実験に供することを想定し、現在更なる栽培試験を実施している。

### (2) 植物生育評価のための 4 眼カメラを用いたモニタリ

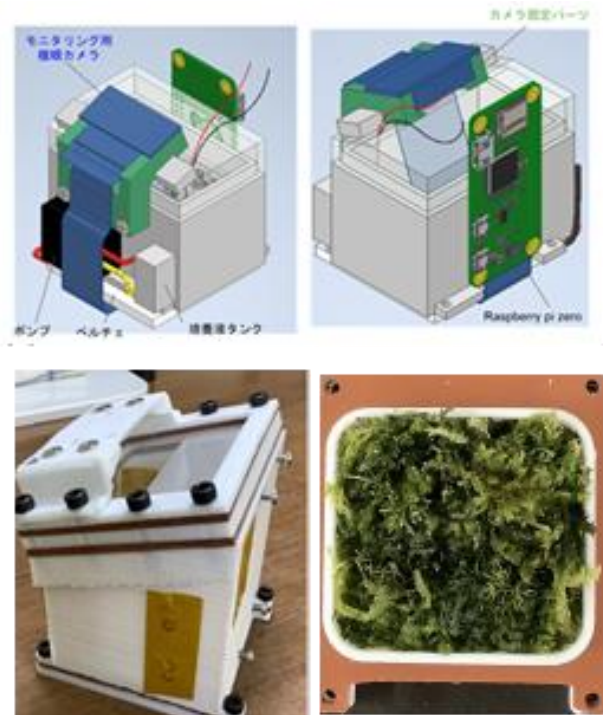


図 1 2020 年度に設計した植物培養容器の構造 (CAD 図: 上段 2 枚)、および CAD 図を基に 3D プリンターで作製した培養容器 (下段左) とその内部で生育させたコケ植物の様子 (下段右)。

### ングシステム

モニタリングカメラとして、アサヒ電子研究所より市販させている PiTOMBO4 眼カメラを利用することを想定し、検討実験を実施している（図 2 参照）。モニタリングカメラ、および植物育成のための白色 LED、および植物生育評価のために照射する青色 LED、850 nm 遠赤外 LED は、図 1 左上に示すように、培養器の上面端に搭載する予定で、植物体に対して斜め上方より LED を照射し、カメラで撮影する設計となっている。

そこでまず、青色光照射による植物体からのクロロフィル蛍光（光合成活性測定の指標）の検出方法として、最も均一に床面の植物体へ青色光を照射するための、青色光 LED の植物体への照射角度と強度の決定を行った。その結果、LED は床面に対して 45° の角度で設置し、電圧 2.9V、0.12A (0.35W) の条件での照射が、もっともカメラでクロロフィル蛍光を均一に検出できると判断した。そこで、この設定・設置条件で、カメラにより検出される赤色光域の輝度（クロロフィル蛍光）j が、実際に PAM 法によって測定される光合成活性 (Fv/Fm) とどの程度反映された輝度値であるかを評価するために、紫外線等により植物体にあらかじめ障害を誘導し、Fv/Fm 値が低下した植物葉と、同じ葉をカメラで撮影し撮影画像から得られる赤色光域輝度値との間の相関を調査した。その結果、撮影した画像の raw data を取得し、そのデータから色彩補正を行った画像からクロロフィル蛍光の赤色光の輝度値を測定した値と Fv/Fm との間の相関を調べると、高い相

関係が(相関係数 0.65)得られることが分かった。したがって、これらの結果から、超小型カメラを利用した本システムを使用することで、光合成活性を評価できると判断した。しかし、本方法のみによる評価に依存せず、可視・近赤外域反射率を用いた植生指数等のモニタリングシステムも本システムに導入し、植物の生育状況を、よりの確に把握するシステムの開発を進める必要があると考えている。



図2 4眼カメラ PiTOMBO の概要

### 3. BioCube 与圧部モジュール

2020 年度において検討し、構造設計し、作製した BioCube 与圧部モジュールの試作 1 号機(図 3 参照)を用いて、真空中でのリーク試験を実施した。その結果、1 週間で 1000 hPa から 983hPa と約 1% のリークが認められ、1 年間に換算すると、50%以内のリークを抑える目標を達成する容器の開発に成功した。したがって、構造的には問題ないことを確認したが、与圧容器内での培養容器の設置方法や、ハーネス・コネクタ類の配置などから、与圧ユニットの構造を見直す必要が生じ、構造に修正を加えた。主な変更点は、熱構造解析の結果などから、現在 1 ユニット内に 1 つの培養容器を組み込む予定であったが、与圧ユニットを 2U として、2U 与圧ユニット内に 2 つの培養容器を組み込むことにした。

### 5. 今後の予定

現在作製中の圧力容器ユニット、電子制御ユニット、および生物培養容器が完成次第、組み立て、作動試験、リーク試験、熱真空試験、植物栽培試験、振動試験等を順次行い、性能を検証する必要がある。そしてそれらの結果を基に、エンジニアリングモデルとして評価を行う。また、修正箇所が生じることも想定されるが、速やかに修正を行い、フライトモデル作製の準備を行う。

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。

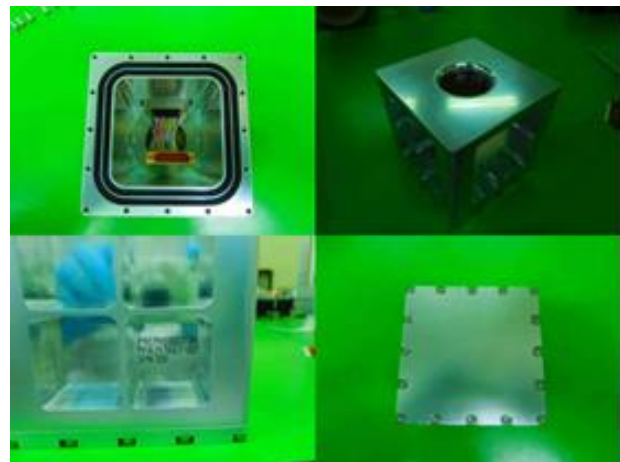


図3 2020 年度に作製した与圧部モジュール試作 1号機の外観