

# SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2025年6月号 No.42

## 荒木慶一先生 就任のご紹介

この20年ほど、住宅や建築物の耐震性向上に利用できる新しい形状記憶合金の研究開発を進めてきました。この新しい形状記憶合金は、絶対零度近傍の極低温環境下でも駆動できるという極めて特殊な特性を持ちます。この特性を活かして、深宇宙などの極低温環境で利用できるアクチュエータを開発しようという試みが、2019年 JAXA イノベーションハブのチャレンジ研究として採択されました。これが宇宙学研究を始めたきっかけです。

その後、JAXA イノベーションハブの活動を通して、建築業界を中心に宇宙居住に携わる多くの研究者や技術者と知り合うことができました。そのネットワークを活かして、2021年から日本建築学会で宇宙居住に関する委員会の設置や運営に委員長として関わっています。この委員会では、我が国における宇宙居住の取り組みが米国や欧州の後塵を拝している現状を打開すべく、日本による宇宙居住や宇宙建築の取り組みの推進のための活動を行っています。

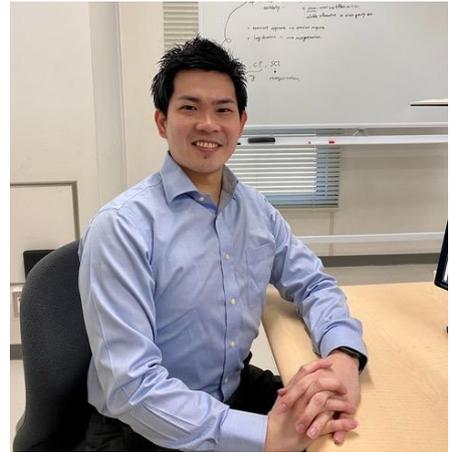
建築業界では、今後10～20年間で大きく発展すると期待される分野として宇宙居住・宇宙建築が注目されています。しかし、取り組むべき課題やその前提にも不明確な点が多く、宇宙居住・宇宙建築に取り組んでいる研究者や技術者の数も限られています。建築学や建築技術の専門家集団である建築学会の委員会活動に加えて、多様な関係者が活動する京都大学有人宇宙学研究センターに参加することで、今後の我が国の宇宙居住・宇宙建築に関する活動の推進に幅広く貢献していきたいと考えています。（荒木慶一 記）



## 萩生翔大先生 就任のご紹介

私はヒトの身体運動について研究しています。「運動」と聞くと、スポーツやエクササイズを思い浮かべる方も多いかもしれませんが、立つ・歩く・食べる・話す・呼吸するといった行為もすべて運動に含まれます。すなわち、私たちの日常生活のあらゆる営みは、運動によって成り立っているのです。これらの運動がどのように生み出され、制御されているのかを明らかにすることが、私の研究の中心的なテーマです。

私たちは、生まれた瞬間から思い通りの運動ができたわけではありません。長い年月をかけて、環境を理解し、適応することで、正確な運動を獲得してきました。その適応過程において、特に大きな影響を与えている環境要因が「重力」です。地球上では常に重力の影響を受けており、重力が身体運動を強く制約しています。したがって、ヒトの運動を理解するためには、「重力への適応」を避けて通ることはできません。こうした問題意識から、私は、地球と宇宙という異なる重力環境を行き来する宇宙飛行士を対象とした研究にも取り組んでいます。



宇宙の微小重力環境は、ヒトの運動機能にも大きな影響を及ぼします。帰還直後の宇宙飛行士が自力で立てず、歩くことも難しいという映像をよく見かけます。これまでの研究では、宇宙滞在中に運動を生み出す筋肉が著しく萎縮することが、その一因として知られてきました。地上では、重力に抗して体を支えるために、特定の筋肉が常に活動していますが、宇宙ではその必要がなくなるため、地上で貢献してきた筋肉が萎縮してしまうわけです。そのため、宇宙飛行士は宇宙滞在中にハードな筋力トレーニングを続け、筋肉の萎縮を防ごうとしますが、それでもなお問題の解決には至っていません。そもそも、運動は単一の筋肉によって成り立つものではなく、全身にある約 400 種類もの筋肉が協調的に働くことで生み出される、複雑な現象です。私たちの研究グループでは、この「筋肉の協調パターン」に注目し、宇宙滞在前後で比較をしました。その結果、複数の筋肉の活動パターン自体が宇宙滞在前後で大きく変化することが明らかになりました。これは、宇宙環境が、筋肉だけではなく、筋肉を制御する脳や神経系の働き方にも影響を与えていることを示しています。

こうした知見は、重力環境下での運動制御の理解のみならず、宇宙滞在において必要となるトレーニングやリハビリテーション方法を見直す上でも重要な示唆を与えてくれます。京都大学有人宇宙学研究センターに参加させていただき中で、地球上でも宇宙空間でも、ヒトが健やかに活動できる身体運動の仕組みづくりに貢献していきたいと考えています。（萩生翔大 記）

## 日本地球惑星科学連合 セッション開催報告

日本地球惑星科学連合（JpGU）にて、セッション「陸域海洋相互作用—惑星スケールの物質輸送」（山敷庸亮（京都大学）、升本幸夫（東京大学）、Behera Swadhin（JAMSTEC）、佐々木貴教（京都大学））が、2025年5月26日に幕張メッセ国際展示場にて開催されました。本セッションは大陸と海洋の相互作用に関する議論を促進するため、2009年から開催されている「陸域海洋相互作用」と題された一連の学術セッションであり、2022年からは異なる惑星環境への移住を目指す陸-海洋陸域生態系の重要な構成要素として、「コアバイオームコンプレックス」の概念に関しても議論が行われています。

本セッションは午前前半・午前後半の 2 回の口頭発表と午後に行われたポスター発表で構成されており、口頭発表が 11 件とポスター発表が 6 件行われました。

最初の講演として、SIC 特任教授である Vladimir Airapetian 氏（NASA ゴダード宇宙飛行センター）が「The Corona, Wind and Extreme Eruptive Events from Young Solar Analog, EK Dra: Observations, Models and Experiments」と題した招待講演を行いました。この講演では、太陽系外惑星とそのプレバリオシグネチャーを発見するために必要な条件に関して、最近の理論シミュレーションと実験から得られた示唆についての議論が行われました。

続いて、「Simulation of proto-Uranian disk formation by a giant impact: Equation of state and scheme of SPH method dependence」と題して、村嶋慶哉氏（京都大学）が、天王星系の形成モデルとして有力な仮説である Giant Impact 説の数値シミュレーションの状態方程式の違いによる影響についての発表を行いました。

続いての発表「日揮グローバルの月面関連事業～月面スマートコミュニティ LUMARNITY® (LUNAR SMART COMMUNITY®) の実現に向けて～JGC'S VISION FOR A LUNAR SOCIETY "LUMARNITY(LUNAR SMART COMMUNITY)」では、日揮グローバル株式会社の深浦希峰氏が、月面での持続可能な社会“LUMARNITY”の実現に向けて、JAXA や横河電機などと協力して進めているプロジェクトについての報告をされました。

次に、SIC 特任准教授の大野琢也氏（鹿島建設株式会社）により、月面人工重力施設の最新版「ルナグラス・ネオ」の紹介がありました。ルナグラス・ネオはアームを備えた新たな構造物となっており、従来のルナグラスおよびマーズグラスと比較して、居住可能な人口が増えていることが報告されました。

また、谷安要氏（京都大学）により、クールジュピターが原始惑星系円盤内を内側に軌道移動する過程で微惑星がハビタブルゾーンへ輸送されるシナリオに関して、N 体計算を用いた検証・解析についての発表が行われました。

午前前半の最後の発表では、市村 周一氏（京都大学）が「Issues of Relying on Resupply Missions from Earth and the Benefit of Laundry Systems for Sustainable Space Exploration」と題して、地球からの補給ミッションに頼ることの問題点と、持続可能な宇宙探査のためのランドリーシステムの利点についての発表を行いました。

午前後半の発表は、JAXA の桜井誠人氏による招待講演「月極域近傍の縦孔における水の存在の可能性と月面居住」から始まりました。この公演では、月極域に存在する縦孔および地下空洞に着目し、地下空洞内の永久日陰に気相成長による水氷および日照域との距離の調査についての報告が行われ、緯度と形状による水氷の損失率の違いが明らかとなり、地下空洞で水分子が安定存在する条件が判明したことが示されました。

続いて、京都大学防災研究所の山上路生教授が、宇治川オープンラボラトリーで行っている人工重力施設（ルナグラス・ナースグラス）を想定した相似模型実験の結果を報告しました。この実験

により、回転系における水の循環は、コリオリ力によって回転方向とは反対方向の循環が顕著となり静止場と様相が大きく異なることが示されました。

次に JAMSTEC の Swadhin Behera 氏が、「Antarctic sea ice link to malaria cases in South」と題して、新たに明らかになった南アフリカにおけるマラリア発生率と南半球の高緯度、特にウエッデル海における気候変動との間の関係について発表されました。

可児凌雅氏（京都大学）は「初期火星の海洋における渦拡散係数とその気候への影響の推定」についての発表を行いました。この研究では、Rhines スケールに基づく渦拡散率パラメタリゼーションを組み込んだ火星の海洋モデルのシミュレーションを行った結果、従来のパラメタリゼーションを用いたシミュレーションと比較して、明瞭な子午面輸送パターンが得られることが示されました。

本セッション最後の口頭発表は小塚昌弘氏（京都大学）により行われました。この発表では、選択された生物種・栄養の循環モデル、および選択された生物種の共培養による尿の硝酸塩への変換を実証する予備的な結果が示されました。また、シアノバクテリアを用いた酸素生成について、バクテリアを用いた閉鎖環境での実験結果も報告されました。

午後に行われたポスター発表では、清水海羽氏らによる「Isolated Culture and Evaluation of the Light Response Focusing on Polyp Morphological Changes of Corals for the Establishment of a Space Marine Ecosystem」、大森香蓮氏らによる「Evaluating the Effect of Gravitational Force Sensing on Visual Gravitational Motion Prediction」、森下至子氏らによる「バイオーム別自然環境がもたらす心理的影響の比較検証：Biosphere2 実験計画」、山敷庸亮氏による「他の惑星に地球の生態系は必要か？」、生田直也氏らによる「気候変動シナリオを組み合わせた気候変動が将来的に湖沼に与える全球的評価に向けた 1 次元多層水質評価モデルの作成」、佐藤碧氏らによる「月の縦穴 "Mare Tranquillitatis Hole" での宇宙開発拠点の整備に関する提案～自給自足を目指した月への移住計画～」といった発表がありました。

午前中前半と後半の口頭発表を通じて、様々な分野の参加者に恵まれ、非常に広い範囲の横断的な議論がありました。さらに、ポスターセッションにおいても異分野の多くの参加者で賑わい、宇宙・地球と海洋・陸水をつなぐ多様な議論が行われました。

また、本セッションとは別に、SIC 有人宇宙研究センターとしては、京都大学の地球惑星科学関連組織が共同で出展している京都大学地球惑星科学連合ブースにも参加しました。このブースにおいて、系外惑星データベース“ExoKyoto”やルナグラス・マーズグラスに関するデモムービーの紹介を行いました。さらに、毎夕方 17:15 から開催されたブースセミナーにおいて、5 月 27 日に山敷庸亮氏が “三つのコアコンセプトで挑む宇宙移住の壁”、大野琢也氏が “人工重力居住施設「ルナグラス・ネオ」”というタイトルで講演を行いました。（村嶋慶哉 記）

# 第3回宇宙木材利用シンポジウム特集③

## 「超小型木造人工衛星 LignoSat の全体システム」

京都大学 今川颯大

3月29日に開催された第3回宇宙木材シンポジウムにおいてCDH班から発表した内容をもとに、超小型木造人工衛星 LignoSat の衛星全体システムについて紹介する。

### 1. 全体プログラム

衛星が放出されたあとのプログラムの流れは図1のとおり。衛星が放出されるとデプロイメントスイッチによる絶縁が解かれ、first run mode に入る。衛星起動後30分が経過すると運用モードに入り、まずアンテナ展開を試行する。定常状態においては、木板のひずみなど各種データの測定と地上局との通信を並行して行う。また1日ごとに衛星を再起動する。

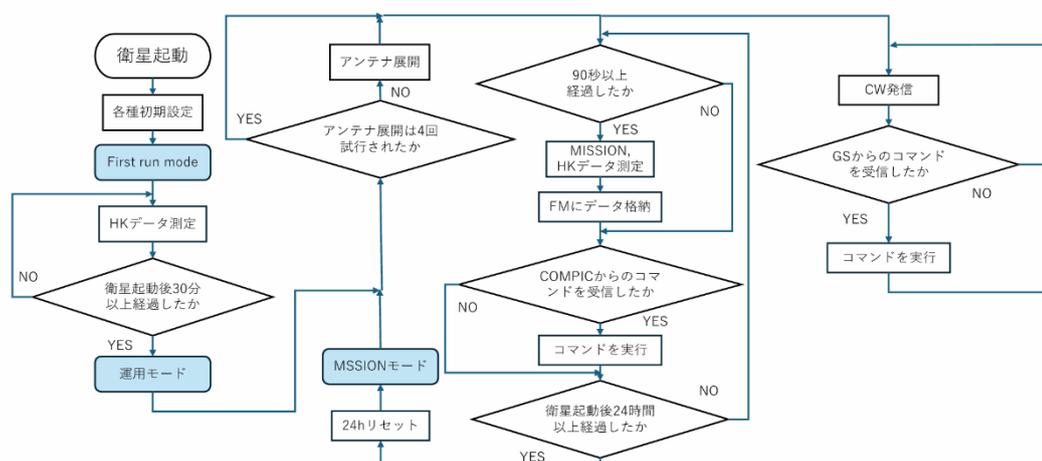


図1 衛星放出後のプログラム

### 2. 1号機振り返り

1号機は2024年12月9日にISSより放出されたのち、明確な信号を受信できないまま大気圏に突入した。そのため2号機の開発に向けてFTAを実施した。FTAで挙げられた不具合要因の候補のうち、特にCDH班に関わるソフトウェア上の不具合の可能性について紹介する。

LignoSatにはMAIN, COM, RESET, MISSION, RABの5つのPICが搭載されているが、そのうち信号を発信できない原因となりえるのはMAIN, COM, RESETの3つである。MAIN PICは衛星の起動後にアンテナを展開する部分に関わっている。EMでの試験やFMでのE2E試験の結果から、この部分に不具合があった可能性は低いと考えられる。COM PICは信号の発信を行う。プログラム上COM PICが起動すると必ず信号を発信するよう設計されていることに加え、EMでの試験やFMでのE2E試験、熱真空試験の結果からこの部分に不具合があった可能性は低いと

考えられる。RESET PIC には MAIN PIC の状態を監視する機能がある。この機能がエラーを起こし、その影響で衛星の再起動が行われなくなる場合があることが確認されている(図 2)。そのため

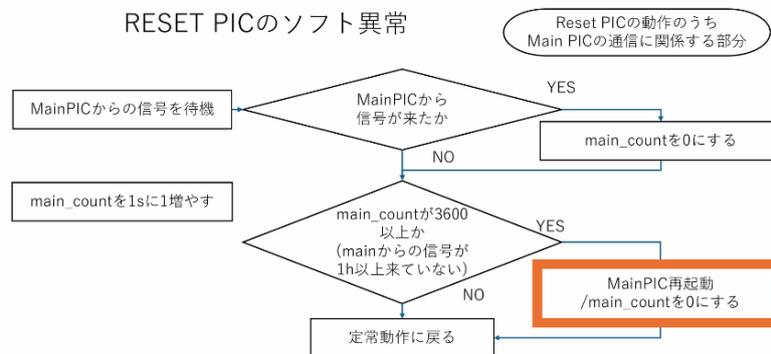


図 2 RESET PIC のソフト異常

RESET PIC のプログラムが不具合要因となった可能性がある。これを受けてエラーの原因を特定するための実験を行っている。

### 3. 2号機にむけて

2号機の開発にあたって、CDH 班では大別して 1号機での不具合の修正と 2号機での設計変更に伴う新機能の実装を行う。2号機での新機能については、新たに装備するパッチアンテナ関連のコードや姿勢制御に関するコードを開発予定である。

## 「低圧下におけるポプラの成長について」

### 京都大学 古川夏帆・出口颯馬・豊西悟大

#### 1. 樹木育成実験の概要

私たち樹木育成学生チームが行っている樹木育成実験の概要を説明いたします。図 1 は実験に用いている低圧下樹木育成実験装置 (LPTGEA) です。自作の円筒形のアクリルチャンバー 4 台の中に材料であるギンドロ (*Populus alba*) の挿し木苗を入れ、蓋をして密封状態にします。苗にはハイポネックス液をチャンバー外からパイプを通して供給しています。

チャンバー内の環境は以下のように調整しています。1 台は気圧を 1 気圧 (10<sup>5</sup> Pa)、他の 3 台は低圧 (0.75、0.5、0.3、0.2、0.1 気圧) に保ちます。低圧チャンバーには真空度計が設置されており、チャンバー外のポンプを使って減圧を維持しています。このチャンバーは室温がエアコンで 23°C から 25°C の間に保たれている実験室に設置されています。チャンバー内の相対湿度は 50% 前後、CO<sub>2</sub> 濃度は 500ppm 前後に制御しています。温湿度や CO<sub>2</sub> 濃度を計測するセンサは大気圧での使用が想定されており、低圧動作は保証されていないので、実験前に校正を実施して

0.2 気圧程度までは正しく動作することを確認しています。チャンバー内のポプラ苗にはチャンバー上から LED ランプで一定の強度の光を照射します。1 日 24 時間のうち、14 時間は光を照射し、10 時間は暗くしています。これらの実験環境の制御・記録にはマイクロコンピュータの Arduino を使っています。

実験中、定点カメラで 1 時間に 1 回苗を自動撮影することにより苗の生長を記録しています。この写真は実験後の樹高解析にも使用します。また、学生メンバーが 1 日 1 回苗の様子を観察し、樹高や葉数、苗の健康状態や実験環境を記録・報告しています。



図 1 低圧下樹木育成実験装置

## 2. 低圧下樹木育成実験における成長特性評価

育成実験前後のポプラ苗のバイオマス（乾燥重量）の変化量から成長量の増加割合を解析しました。低圧化での育成を終えたポプラを地上部（葉、幹）と地下部に分解してそれぞれの乾燥重量を測定しました。比較対象となる実験前の乾重は測定することができないため、実験に用いる苗とほぼ同じ大きさの苗について、樹高と茎の直径、および乾燥重量を測定し、樹高×直径×直径とバイオマス（乾燥重量）との回帰式を推定しました。この回帰式に

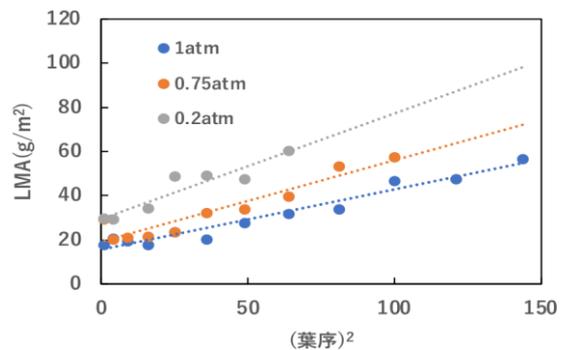


図 2 気圧ごとの葉序と LMA の関係

実験に使った苗の実験前の樹高と直径を代入し、実験前のバイオマスを推定しました。実験後の乾重  $DW_{post}$  に対する実験前の推定乾重  $DW_{pri}$  の比が低圧、常圧それぞれについて求められます。そして常圧における実験前後比に対する低圧における実験前後比の比、つまりは  $(DW_{post}/DW_{pri}, \text{低圧}) / (DW_{post}/DW_{pri}, 1 \text{ 気圧})$  を算出しました。この値が 1 に近いほど常圧との差異が少ないことを表しています。その結果、低圧環境においても常圧との間で有意な差は見られませんでした。

続いて植物の地上部（葉、木部、師部）と地下部（根）の乾燥重量の比率である「T/R 比」を比較しました。その結果、0.1 気圧までの低圧条件下で育てた樹木と、通常の 1 気圧で育てた樹木の間で、T/R 比に有意な差は見られませんでした。これは、低圧環境が地上部と地下部のバイオマス配分に大きな変化を与えないことを示唆しています。

次に、光合成を行う「同化部」（葉）と、植物体を支えたり養分を貯蔵したりする「非同化部」（木部、師部、根）の乾燥重量の比率である「同化部/非同化部比」を比較しました。この比率についても、低圧条件による有意な差は認められませんでした。つまり、低圧環境下でも、樹木は光合

成器官とその他の器官へのバイオマス配分を通常と変わらずに行うことが示唆されます。以上の結果から、0.1 気圧までの低圧環境下においては、樹木の成長量（乾重増加割合）や成長特性（T/R 比、同化部/非同化部比）は、1 気圧環境下と比べて大きな差がないことが明らかになりました。

一方で、葉の形態には変化が見られました。低圧下で展開した葉は、初期には単位面積あたりの葉の乾燥重量（LMA）が 1 気圧下よりも大きくなる傾向がありましたが、成熟するにつれてその差は小さくなりました（図 2）。このことから、ポプラは低圧環境下で常圧と比較して葉が厚く小型化しますが、成長と共にその差が小さくなることが分かりました。興味深いことに、これは草本植物が低圧下で葉を薄く大型化させるという先行研究とは逆の傾向がみられました。

今後はより低圧（0.05 気圧など）での実験を行うことで、新たな知見を獲得します。

## 研究紹介

### 超小型木造人工衛星の構造

京都大学理学部 木村拓人

○木村拓人、細辻一、野木朔太郎、中村拓海、三浦晴、内田こころ、高橋駿太、河島航、小泉壮平、星川龍希、阿戸豪、野間隆寛、桑原和暉、西見優輝、河野尚貴、鳥谷陽樹、加藤千晶、麻田景人、小林武司、山本陽大、大西大知、豊西悟大、伊藤駿治、水野愛理、長谷真暉、仲村匡司、村田功二、清水幸夫、石原正次、北川和男、辻廣智子、土井隆雄（京都大学）、刈谷健司、土屋守雄（住友林業）

Key Words: CubeSat, Structural Design, Wooden Structure, Structure Analysis

#### Abstract

Kyoto University has developed LignoSat, the world's first cube-satellite made of wood, to explore the potential applications of wood in space. The first wooden satellite, LignoSat (1U), is set to launch and begin operations in 2024. The second, larger wooden satellite (2U) is already in development. The primary feature of these satellites is their unique structural design, which allows us to use wood in the challenging conditions of space. This paper presents the structural design of LignoSat, such as the results of the strength verification tests, and discusses the future prospects of wooden satellites, with a focus on the operation of LignoSat and the design considerations for the second wooden satellite.

## 1. 目的および背景

京都大学では、これまで宇宙での木材利用の可能性を追求する宇宙木材プロジェクトに取り組んでおり、その一環として世界初の超小型木造人工衛星 LignoSat (1U) の開発を進めてきた<sup>1) 2) 3) 4) 5)</sup>。図 1 に LignoSat (1U) の写真を示す。2024 年 4 月までにフライトモデル (FM) の製作・各種試験を完了し、打ち上げ、ISS きぼう日本実験棟の小型衛星放出機構からの放出、および運用を予定している。また、これまでの LignoSat 開発ノウハウと運用データを生かし、木造人工衛星 2 号機 (2U) の開発も進めている。

宇宙空間での木材利用の利点としては以下のような点が挙げられる。まず、金属製の衛星の場合に大気圏突入時に生じるアルミナ粒子を発生させず、地球大気への悪影響を軽減させられる点である。そのほか、金属部材よりも軽量である点や、電磁波の透過性によりアンテナを構体内部に搭載可能である点が考えられる。これらの利点は、衛星ミッションの拡大に貢献する可能性を持っている。

木造人工衛星の最大の特徴はその構造体に木材を使用している点であり、打ち上げ環境や過酷な宇宙環境で木材の使用を可能にするために独自の構造設計および構造強度検証を行ってきた。本稿ではまず LignoSat の構造とこれまで行ってきた構造強度検証の結果について報告し、LignoSat の運用および木造人工衛星 2 号機設計を中心とした今後の木造人工衛星の展望について述べる。

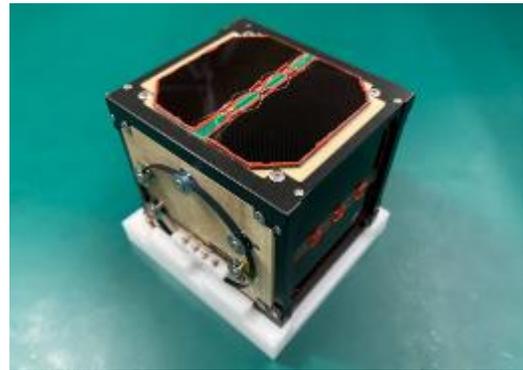


図 1 LignoSat FM (1U)

## 2. LignoSat の構造

LignoSat は大きさ 100mm×100mm×115mm (1U) , 重量 1.092kg の CubeSat であり、設計要求は JEM ペイロードアコモデーションハンドブック (以下、アコモデーションハンドブック) の 10cm 級衛星に対する設計要求に準じている<sup>6)</sup>。図 2 に本衛星の構造の概要を示す部品図を示す。本衛星では、内部基板類とそれを固定するシャフト類からなる内部構造、内部構造を取り囲む木造パネル、木造パネルおよび内部構造を固定する金属フレーム部からなる構造を有する。以下に各構造の詳細について記す。

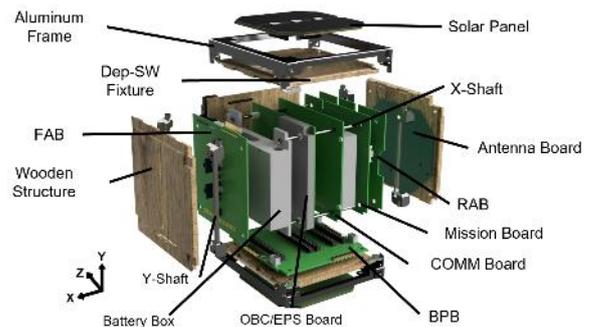


図 2 LignoSat の構造 (3DCAD)

### 2.1 内部構造

衛星内部には、+X 側から順に FAB, Battery, OBC/EPS Board, COMM Board, Mission Board, RAB の計 5 枚の基板 (FR4 素材) とバッテリーが搭載され、それらが-Y 側に位置する BPB に接続されている。これらの基板類は X 方向の四隅をシャフトが貫通しており、間に樹脂スペーサーが挟

まることによって位置が固定されている。これらの構造は九州工業大学 BIRDS プラットフォームを踏襲した構造となっている。X 方向に通る 4 本のシャフトは Y 方向に通る 4 本のシャフトによって固定され、この Y 方向シャフトは 2.3 項にて記述するアルミフレームと締結されることとなる。Y 方向シャフトは X 方向シャフトとアルミフレームの相対位置を固定する役割を持つと同時に、アルミフレームと木造パネルを挟み込み摩擦締結により木造パネルの位置を固定する役割を担っている。

## 2.2 木造構体

本衛星の木造構体は板厚 4mm と 5.5mm の木板合計 6 枚を組み合わせた木箱の構造をもち、内側に内部構造を格納する構造となっている。図 3 にフライトモデルの木造構体の写真を示す。フライトモデルには樹種としてホオノキを選定した。ホオノキの選定理由としては、他の樹種と比較した際に真空環境下において物理特性変化が少ないこと、軽量であること、加工が行いやすいことが挙げられる。また、



図 4 LignoSat の木造構体



図 3 木造パネル接合部  
「留形隠し蟻組接ぎ」

各木造パネルの接合部は「留形隠し蟻組接ぎ」と呼

ばれる伝統技法が採用されており、接着剤や木ネジを使用することなく木造構体の剛性を保つ設計となっている（図 4）。宇宙環境における低軌道衛星の温度サイクルは 100℃以上の増減が想定され、この激しい温度変化に伴い木材の寸法変化が生じると考えられる。さらに木材は異方性材料であり、寸法変化は繊維方向と繊維直交方向で異なる。また、宇宙環境では湿度変化は発生しないが、地上試験および打ち上げ・放出段階において衛星が晒される湿度環境の変化は大きく、木材の吸湿・放湿により寸法変化が生じると考えられる。接着剤や木ネジを使用する場合、これらの寸法変化により接合部に大きなずれ力が発生し、木造パネルに重大な亀裂、破壊を生じさせる可能性がある。本衛星の組接ぎ構造は地上・宇宙空間ともに安定した構造を維持すること、そして地上試験段階で繰り返し組立解体の実施を可能にするために非常に重要な構造となっている。

-X 面の木造パネルには UHF 通信用のダイポールアンテナが取り付けられている。アンテナ展開機構においても、各部品は木造パネルへボルトとナットによる摩擦締結により固定されており、木ネジ構造は有さない。-X 面を除く他 5 面には太陽光パネル（PCB+太陽光セル）が接着されている。木材と人工衛星用太陽光パネルの接着は世界初の取り組みであり、十分な接着力を得られる接着方法が確立されていない。本衛星では PCB と木材間の接着に RTV-S691 を使用し、さらに粘着力を高めることを目的

として下地処理剤であるプライマーを使用している。この接着方法によって、地上環境下の寸法変化を加味しても十分な接着力が確保されていることをせん断接着力試験にて確認してきた。

## 2.3 アルミフレーム

木造構造の外側には図 5 のようなアルミフレームが取り付けられ、各木造パネルを挟み込む形で 4 本の Y 方向シャフトとボルトにより締結される設計となっている。アルミフレームの役割は、木造構体に寸法変化が生じた場合でも超小型衛星放出機構のインターフェース要求を十分満たす寸法精度を維持すること、打ち上げ時にレール部にかかる外力を受けた際に木材に応力集中を発生させないことである。また、衛星の起動に関わるデプロイメントスイッチを格納するための固定部品を導入することによりデプロイメントスイッチが確実に作動する設計としている。

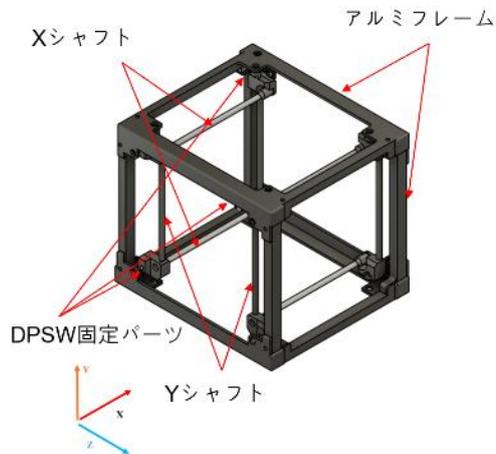


図 5 アルミフレーム (3DCAD)

図中にはシャフト類も含む。

## 3. 構造強度検証

### 3.1 真空木材曝露実験

宇宙空間での木材利用の可能性を調べるための基礎実験として、2018 年より $\sim 10^{-6}$ Pa の高真空環境下に 100mm×10mm×5mm の木材片を曝し、寸法と剛性の変化を測定する真空木材曝露実験を行ってきた。代表してホオノキの相対寸法変化を図 6、ヤング率の変化を図 7 に示す。相対寸法については、0.990~0.994 周辺で安定しており、真空環境下で木材がほとんど寸法変化を起こさないことが確認された。ヤング率については、繊維方向・繊維直交方向ともに増加傾向にあるが、大きな変化は見られず安定した結果となっている。この実験により、真空環境下において木材は安定な材料であることが確認された。

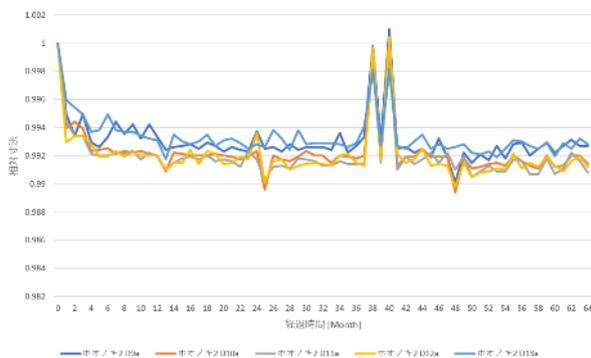


図 6 高真空環境下の寸法変化 (ホオノキ)

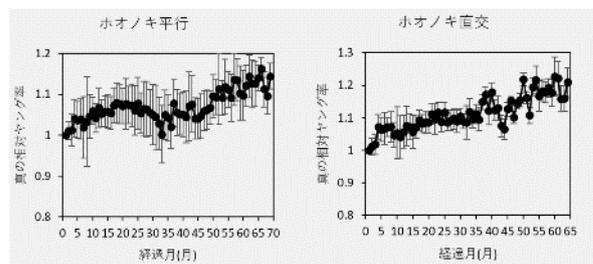


図 7 ホオノキの高真空環境下のヤング率変化

(左：繊維方向、右：繊維直交方向)

### 3.2 構造解析

本衛星では構造数学モデルの作成および構造解析には CAD ソフト Fusion360 (AutoDesk 社) を用いて実施した。

衛星の各軸に準静的加速度 9.0G を加え各構造における応力を計算した結果を図 8 に示す。木材パネルには、アルミフレームに比べほとんど応力が発生していないことが読み取れる。各部材における最大応力値の許容応力に対する安全余裕は 11.3 以上となっており、十分許容できる値となった。

次に、アコモデーションハンドブックに記載の強度要求を満たすことを確認するため、各レール端面に 46.6N の外力と各 3 軸に打ち上げ加速度 9G を加えた応力計算を実施した。表 1 に各軸方向に打ち上げ加速度を加えたときのアルミフレームおよび木造構体における安全余裕(MS)の最小値を示す。

いずれの加速度方向に対しても、MS は 3 以上となっており、アコモデーションハンドブック記載の強度要求として求められる 2 以上の MS を十分達成していることが確認された。

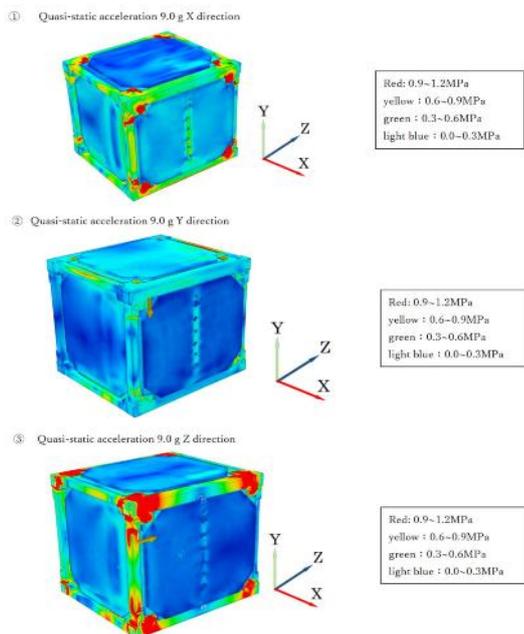


表 1 打ち上げ加速度とレール端外力を加えた下での最小 MS 値

加速度方向	アルミフレーム 最小 MS	木造構体 最小 MS
X 軸	3.70	32.0
Y 軸	3.14	3.43
Z 軸	3.44	18.4

図 8 打ち上げ加速度 9G 下での応力応答

### 3.3 振動試験

①最低次固有振動数が基準値より大きく十分な剛性をもつ設計であること、②衛星が打ち上げ振動環境に耐える設計であること、③組立時の人的ミスが発生していないこと、④打ち上げ振動により木材からコンタミネーションが発生しないことの 4 点を確認することを主目的として、本衛星では各設計段階において振動試験を実施してきた。それぞれの評価方法は①モーダルサーベイによる固有振動数で 30Hz 以上であること、②③振動試験前後のトルクマークのずれ、外観検査で異常がないこと、加振前後で固有振動数に変化がないこと、④外面パネルに取り付けた粉塵採取用紙上で振動試験後に木粉が確認されないこと、として試験を実施した。以下に 2024 年 4 月に九州工業大学超小型衛星試験センター振動試験設備にて実施されたフライトモデルの振動試験結果を報告する。なお、アコモデーションハンドブック 2.4.1 項 振動、加速度環境に準じたランダム AT 振動を加え、加振前後でモーダルサーベイを実施した。

図 9-11 に加振前後のモーダルサーベイの結果を示す。これらの図からわかるように本衛星の最低次固有振動数は X,Y 軸が 350Hz 前後、Z 軸が 830Hz 前後となっており、アコモデーションハンドブック記載の剛性要求 30Hz を大きく上回った結果となった。以上より評価項目①を本衛星が満たし、安定

して機械剛性が保たれていることが確認された。また、加振前後において波形に変化がないこと、外観検査で異常が見られなかったことから評価項目②③を本衛星が満たし、最終組み立てにおいて人的ミスが発生していないことが確認された。振動試験後に実施した粉塵採取用紙の光学検査において木粉と考えられるような繊維状の塵は確認されず、本衛星が評価項目④を満たし、打ち上げ振動環境下で木粉を生じさせないことが確認された。

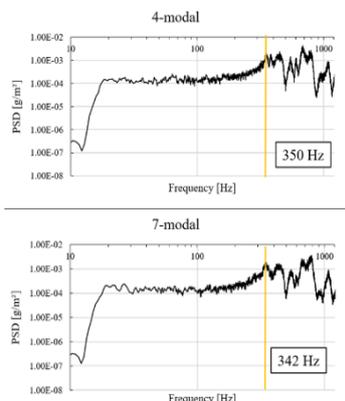


図9 振動試験結果 (X軸) ↓  
(上: 加振前、下: 加振後) ←

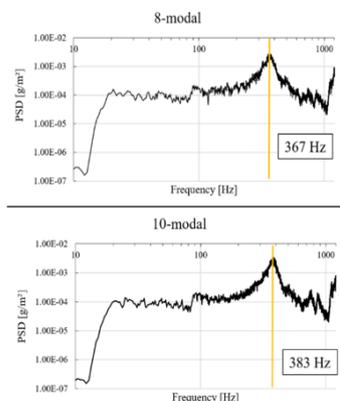


図10 振動試験結果 (Y軸) ↓  
(上: 加振前、下: 加振後) ←

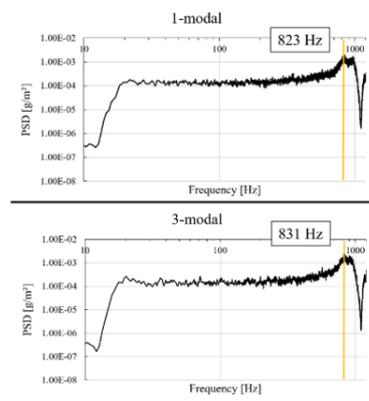


図11 振動試験結果 (Z軸) ↓  
(上: 加振前、下: 加振後) ←

#### 4. 今後の展望

以上に述べてきた構造強度検証および衛星インターフェース検査を経て LignoSat は 2024 年中の運用開始を予定している。運用中には 2 軸 3 線式ひずみゲージによる木造パネルの歪み測定と温度センサーによる内部温度測定、木造構体内部で地磁気測定の検証を実施することを予定している。これらのミッションは著しい温度変化、原子状酸素、宇宙放射線等が影響する宇宙環境において、衛星の構造に用いられた木材の物理特性の変化データを取得することができると期待している。

LignoSat の開発で得たノウハウと運用データは現在開発中の木造人工衛星 2 号機の構造設計

およびミッション設計に活用される。木造人工衛星 2 号機は図 12 に示すように 2U の大きさであり、現在は内部にパッチアンテナの搭載、地磁気を用いた姿勢制御を試みる計画である。2U の大きさを活かし、LignoSat では検証できなかった木材の宇宙空間での新しい活用法を探求することを目指している。今後も、木造人工衛星の開発運用を通じて、宇宙における木材の利用可能性を探求し、宇宙科学および木材業界の発展に貢献していきたいと考えている。

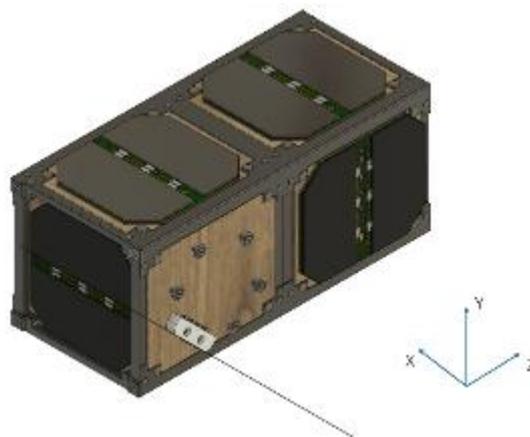


図9 木造人工衛星 2 号機 (3DCAD)

## 謝辞

木造人工衛星の構造設計および環境試験において指導・支援していただいた九州工業大学に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 曾束元喜, 三木健司, 仲村匡司, 村田功二, 臼井浩明, 稲谷芳文, 清水幸夫, 土井隆雄: 木造キューブサットの概念設計, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2019-4161, 2019.
- 2) 福王悠星, 他: 超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 1C15, 2022.
- 3) 筒井涼輔, 他: 超小型木造人工衛星「LignoSat」のミッション系開発の現状と展望, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 1C16, 2022.
- 4) 野木朔太郎, 他: 超小型木造人工衛星の熱応答, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 3J01, 2023.
- 5) 豊西悟大, 他: 超小型木造人工衛星「LignoSat」の歪み測定と地磁気測定ミッションの現状と展望, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 2C18, 2023.
- 6) 宇宙航空研究開発機構: JEM ペイロードアコモデーションハンドブック - Vol. 8 - 超小型衛星放出インターフェース管理仕様書, JX-ESPC-101132-E, 2023.

## 京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター

<https://space.innovationkyoto.org/>

〒606-8306 京都市左京区吉田中阿達町 1 京都大学東一条館 2 階 208 号

編集人: 宇宙木材研究室 三本勇貴、豊西悟大、山本陽大

Tel & Fax: 075-753-5129 Email: [spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp](mailto:spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp)

SIC 有人宇宙学研究センター Newsletter No.42

2025 年 6 月 1 日発行