

「宇宙木材産業の創出をめざした宇宙材料としての木材利用の探究」の成果の概要について

| | | | | | | | | |
|------|--------|-----------|------|--------------------------|------|-----------------|-------|-------|
| 実施体制 | 主管実施機関 | 京都大学 | 実施期間 | 令和4年度～ 令和6年度 (3年間) | 実施規模 | 予算総額（契約額） 40百万円 | | |
| | 研究代表者名 | 特定教授 土井隆雄 | | | | 1年目 | 2年目 | 3年目 |
| | 共同参画機関 | (株)住友林業 | | | | 15百万円 | 12百万円 | 12百万円 |

背景・目的・アウトプット

林野庁は2050年にCO2排出量を実質ゼロにするための取り組みとして、木材資源の利用拡大を推し進めている。そこで本課題では、宇宙材料としての木材資源の利用拡大によって、新しい宇宙木材産業を創出し、カーボンニュートラルな社会の構築をめざす（図1）。そのための取り組みとして、① 木材を構体とする木造人工衛星の開発と運用を行い、木材の宇宙材料としての利用法を提唱すると同時に、② 宇宙空間に曝露した木材微細構造の変化を解明することによって、宇宙における木材利用の実現可能性を探究する。さらに、宇宙での木材供給をめざして、③ 月面・火星基地などの低圧環境における樹木育成を念頭に置いた環境制御技術の開発による樹木育成実験を実施する。本課題の実践は大学生・大学院生が主体的に行うことにより、④ 宇宙における木材利用についての教育啓蒙活動が実践され、カーボンニュートラル事業に取り組む人材の育成を果たす。

本課題では、世界初の木造人工衛星を開発・運用し、宇宙で木材を使うことができることを実証した。

成果展開の状況・期待される波及効果（アウトカム）

本課題では、木造人工衛星1号機LignoSatを開発し、宇宙空間に放出・運用を行った（図2）。世界初の木造人工衛星の誕生である。その成果を基に木造人工衛星2号機エンジニアリングモデルの開発を行った。木造人工衛星2号機は木造構体内にパッチアンテナシステムを持ち、木造人工衛星による低軌道防災衛星ネットワークにつながる成果である。さらに国際宇宙ステーション日本実験棟に約10ヵ月間木材試験体を暴露し、宇宙空間の真空、放射線、原子状酸素が木材に与える影響を分析した。その結果、木材は宇宙空間でも劣化せず長期間存在できる可能性があることを明らかにした。月や火星における樹木・木材の利用をめざして、低圧下における樹木育成実験装置を開発し、0.1気圧までの樹木育成実験を行い、樹木が0.1気圧下まで生育できることを明らかにした。木造人工衛星開発のために毎月の設計会議を行うと同時に樹木育成セミナーを開催した。さらに宇宙木材利用シンポジウムを開催することによって、木材の宇宙利用のための啓蒙・教育活動を展開した。本課題により、木材の宇宙利用の道が開かれ、将来的に宇宙木材産業の誕生が期待されると同時に、樹木の新しい宇宙での利用法を世界に提案できた。

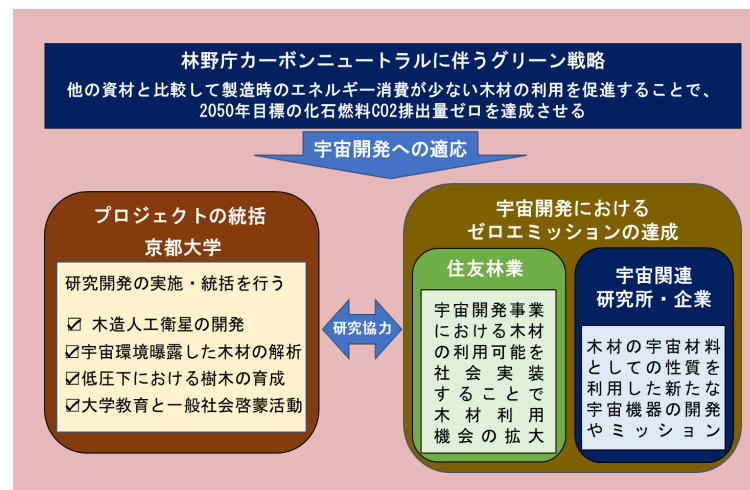


図1 宇宙木材プロジェクトの戦略



図2 世界初の木造人工衛星LignoSatの誕生

事業全体概要

背景

林野庁は2050年にCO2排出量を実質ゼロにするための取り組みとして、木材資源の利用拡大を推し進めている。本課題では宇宙における木材利用を提案し宇宙木材産業の構築をめざす。同時に宇宙産業における脱炭素活動を推進する。

目的 -本委託費を使用して世の中の何を変えるか-

宇宙において木材利用を推進し、宇宙木材産業を構築する。そのために木造人工衛星を開発・運用し、木造人工衛星の実用化を提案する。

目的に対する指標

木造人工衛星を開発し、宇宙空間に打上げ運用を行う。木造人工衛星の実用化に向かう。

目標 -目的のために何をするか-

木材の宇宙暴露試験を行い、宇宙の木材に与える物理化学的影響を科学的に調査する。

目的に対する指標

宇宙空間に暴露された木材試験体の真空、放射線、原子状酸素、紫外線に対する反応を調査する。

目標 -目的のために何をするか-

月・火星での樹木育成方法の確立をめざして、低圧下における樹木育成実験を実施する。

目標に対する指標

樹木はどのくらい低圧下まで生育可能であるかを調べ、月・火星における樹木育成方法を議論する。

実施項目 -目標のために何をするか-

宇宙における樹木・木材利用のための教育・啓蒙活動を行う。

事業内でのアウトプット

木造人工衛星を開発できる学生チーム及び低圧下での樹木育成実験を行う学生チームを作る。

① 「木造人工衛星の開発と運用」

実施内容・成果 ① 木造人工衛星の開発と運用

① 木造人工衛星の開発と運用

1-1. 木造人工衛星1号機 LignoSatの開発と運用

木造人工衛星1号機 LignoSatを開発し、フライトモデルを2024年4月に完成した(図3)。国際宇宙ステーション日本実験棟の小型衛星放出機構(J-SSOD)からの放出を選択する。その結果、大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC)のJ-CUBEプログラムに応募・選考された。JAXA/NASAとの安全審査を2023年度から開始し、2024年6月に完了し、LignoSatをJAXAに納入する。JAXA/NASAに取って初めての木造人工衛星であり、どのように審査をするべきかを含めて議論を行った。2024年11月5日にケネディ宇宙センターよりスペースX社のファルコン9ロケットによって打ち上げられた。LignoSatは、12月9日、国際宇宙ステーション日本実験棟J-SSODから宇宙空間に放出された。世界で初めての木造人工衛星が誕生である。LignoSatは地球軌道を周回し、2025年4月4日に地球大気圏に再突入した。LignoSatは宇宙で木造人工衛星が壊れずに存在できることを証明したが、地上との通信をすることができなかった。



図3 木造人工衛星LignoSatフライトモデル

1-2.電波を透過する木材の特性を生かして木造構体内部に設置できるアンテナの基礎実験の実施

木材は電磁波に対して透明であることから、木造人工衛星内部に通信用アンテナを内蔵することが可能である。人工衛星内部にアンテナを内蔵することによって、アンテナ展開機構がなくなり、人工衛星の信頼性が増す。さらに木造人工衛星の実用化として、地球低軌道を周回する防災衛星ネットワークを作ること計画している。そのため衛星外部にアンテナが無いことは、空気抵抗を減らし長期間低軌道に存在できる可能性が高くなる。

木造人工衛星2号機内部に設置できるアンテナを設計し(図4)、九州工業大学小型衛星試験センターの電波暗室を使って、その特性を調べた。周波数は2.4025GHzである。パッチアンテナと木板は密着させない方が通信性能は高く、木板とパッチアンテナの間隔が5-10ミリ程度の時が通信性能が最も良く、木板パネルが無い場合と比較しても、ほとんど通信性能の劣化が無いことが確認された。

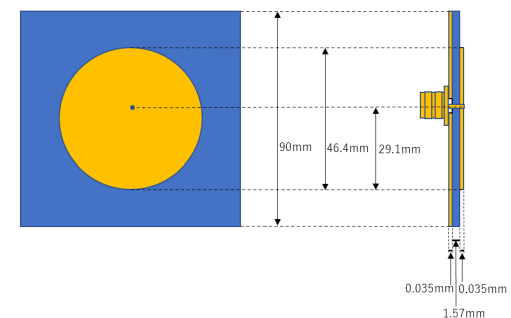


図4 パッチアンテナ

1-3.木造人工衛星2号機(2U) エンジニアリングモデルの開発

地球低軌道を周回する防災衛星ネットワークを作るために、木造人工衛星2号機(2U)の開発を行った(図5)。防災衛星は通信衛星であるので、パッチアンテナを内部に持つことのできる木造人工衛星は非常に適している。木造人工衛星2号機のエンジニアリングモデルを製作し、九州工業大学超小型衛星試験センターで振動試験を実施した。振動試験ではモーダルサーベイ試験、ランダムAT/QT加振、サインバースト試験を各X・Y・Z軸方向にかけて実施した。振動試験の結果、供試体の外観検査を実施し、破壊・破損等の異常がないことを確認した。また、各軸の固有振動数は、X軸では約400 Hz、Y軸では約530 Hz、Z軸では約790 Hzであり、そのすべてが30Hzよりも高くなった。これはJAXAによる小型衛星の設計要求を満たしている。木造人工衛星2号機エンジニアリングモデルの振動試験により、木造人工衛星2号機の設計に問題ないことが確認された。

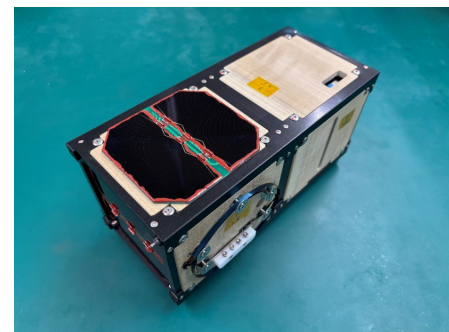


図5 木造人工衛星2号機エンジニアリングモデル 3

① 「木造人工衛星の実用化：地球低軌道を周回する衛星ネットワーク」

実施内容・成果 ① 木造人工衛星の開発と運用

1-4. 木造人工衛星のカーボンニュートラルにおける貢献

2040年に見込まれるCO2削減効果を試算した。木造構体として、現在開発中のセルロースナノファイバー（CNF）を使うことを仮定した。低軌道人工衛星の筐体材にCNF材を用いれば、現在のアルミニウムパネルと比較して1台当たりアルミニウムとCNF板材の比重差分（アルミニウム比重：2.7、CNF板材比重：1.5）に基づけば約45%の軽量化が図れる。人工衛星が軽量化すれば打ち上げ時の負荷が減ることから、打ち上げ時に排出されるCO2の削減に寄与できる。

低軌道用27Uサイズ（300 x 300 x 300mm³）人工衛星の筐体重量をアルミニウムとCNFで比較し、重量軽減によるCO2削減を試算した。筐体に使用される4mm厚のアルミニウム板（総重量例：5.8kg）を同じ厚さのCNF板（総重量例：3.2kg）に置換したとすれば、それぞれの比重差に基づき27U人工衛星1台当たり2.6kgの軽量化となる。Falcon9の打ち上げ時のCO2排出量は337t/回とされており、ペイロードで除すと打ち上げ重量1kgあたりのCO2排出量は14.8kgとなる。低軌道人工衛星の打ち上げ個数をもとに、CNF筐体の人工衛星による打ち上げ時のCO2削減効果は、2035年の10,000機/年では384t/年、2040年の100,000機では3,840t/年と試算した（図6）。

年間1万機以上の人工衛星が打ち上げられる時代において、大気圏再突入によって大気を汚染しない人工衛星を開発することは急務であり、木造人工衛星によるコンステレーションの製作は時代の要求に沿った開発である（図7）。人工衛星の急激な増加は地球低軌道を周回するインターネット衛星の増加によるところが大きい。インターネット衛星は基本的に通信衛星であり、地上との交信のために通信用アンテナを人工衛星構体外部に持たなければならない。ところが木造人工衛星であれば、木材は電波を透過するので通信用アンテナを構体内部に持つことが可能になる。これはアンテナ展開機構を持つ必要がなくなることを意味し、同時に木造構体の外部にアンテナを持たないことにより、地球極低軌道を周回することによって受ける大気抵抗も受けずらくなる利点がある。

木造人工衛星は地球極低軌道を周回する防災・インターネット衛星ネットワークを創出するために最も適した人工衛星であると考えられる。木造人工衛星は、まだ、日本でしか開発・打ち上げが行われたことしかなく、地球極低軌道を周回する木造人工衛星ネットワークは、世界のどこにも存在していない。木造人工衛星の開発は、新規性及び革新性で非常に優れている。同時に木造人工衛星に内蔵するパッチアンテナの技術も世界的にどこの国でも開発は行われていない。そのため、木造人工衛星用パッチアンテナの開発に成功すれば、日本は宇宙開発競争において世界をリードすることが可能になる。

| |
|---|
| 超小型人工衛星 27U (30cmX30cmX30cm) |
| アルミニウム (比重2.7) 構体重量 (4mm厚) : 5.832kg |
| CNF (比重1.5) 構体重量 (4mm厚) : 3.24kg |
| 打ち上げロケットFalcon 9の二酸化炭素排出量: 14.8kg/衛星1kg |
| アルミニウム衛星をCNF衛星に変更した時の二酸化炭素減少量: 38.4kg |
| 年間1万機の衛星打ち上げによる二酸化炭素減少量: 384トン/年 |
| 年間10万機の衛星打ち上げによる二酸化炭素減少量: 3,840トン/年 |

図6 木造人工衛星（27U）のアルミナ放出量の推定

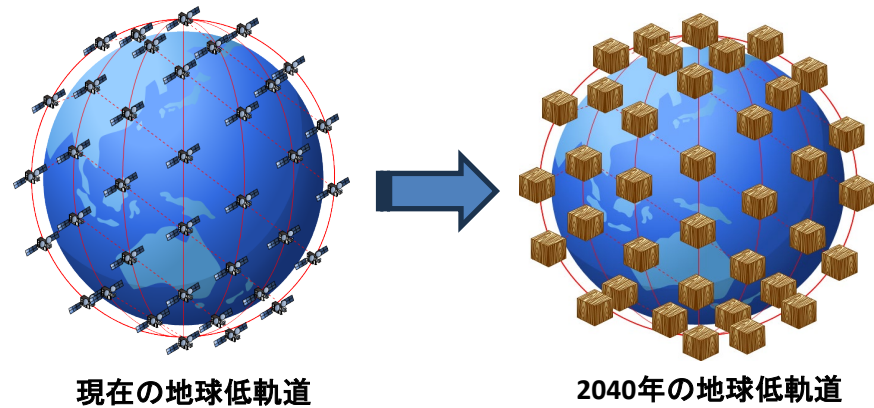


図7 木造人工衛星コンステレーション

② 「ExBAS木材の解析」

実施内容・成果 ② ExBAS木材の解析

② ExBAS木材の解析

宇宙空間に暴露された木材の物理化学的な変化を調べるために、国際宇宙ステーション（ISS）に木材試料を暴露し、それらの試料のマクロ的・ミクロ的分析を行った。図8に宇宙暴露した木材試験体と地上真空暴露した木材試験体を示す。木材試験体は、ホオノキ、ヤマザクラ、ダケカンバの3種類であり、各試験体の寸法は、56mm x 8.6mm x 5mmであり、各2本ずつ選別された。木材試験体の3本はポリイミド樹脂シートに巻かれている。木材試験体は、簡易材料暴露実験ブラケット（Exposed Experiment Bracket Attached on i-SEEP: ExBAS）に取付けられ、国際宇宙ステーションに運ばれた。2022年3月より12月まで約10ヵ月間日本実験棟「きぼう」船外実験プラットフォームにて宇宙空間暴露された。アルミニウム製ホルダーの表面と試験体表面には汚染物質が付着していた。

宇宙空間に暴露される前の木材試験体と暴露後の木材試験体の重量を比較した結果、宇宙に暴露された木材試験体の重量変化はごくわずかで、樹種間の違いはなかった。

宇宙空間に暴露された木材試験体と地上で真空暴露された木材試験体の比較写真を図9に示す。これより、宇宙空間暴露された試験体は地上真空暴露された試験体と外観はほとんど変化していないと結論できる。

木材表面の赤外分光光度計（FTIR）の測定結果から炭素と酸素の二重結合（C=O）と炭素の二重結合（C=C）の関係を示したのが図10である。この図を使うと、前述した汚染物質は左上部に追いやられ、木材試料の反応から汚染物質の影響を取り除くことができる。木材試料はカプトンシートで覆われていたものをCoveredとして示され、宇宙空間に裸で暴露された試料がExposedとして示されている。Covered試料はExposed試料に比べてC=O/C=C比がそれほど大きく広がっておらず、宇宙空間の影響をそれほど受けていないと考えられる。木材ではC=Cは主にリグニンに含まれ、C-Hはセルロースに含まれる。C=CとC-Hは宇宙空間の環境ではほとんど変化していないが、C=Oが宇宙空間では多量に生成されたことがわかる。このC=Oの生産が原子状酸素によるものであると考えられる。即ち木材内部で作られたC=Oが木材内部に留まっているために木材の劣化が進まなかったと思われる。

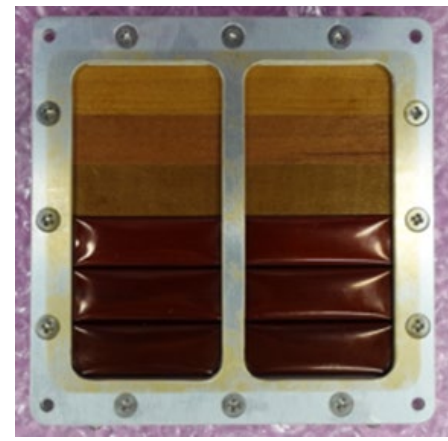


図8 木材曝露試験体（宇宙暴露）

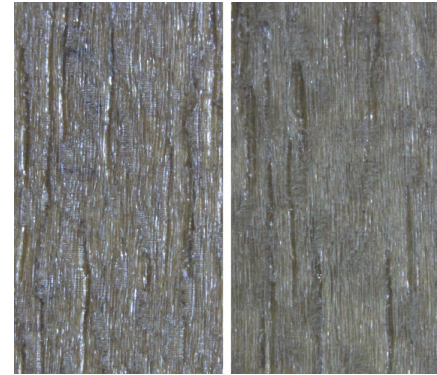
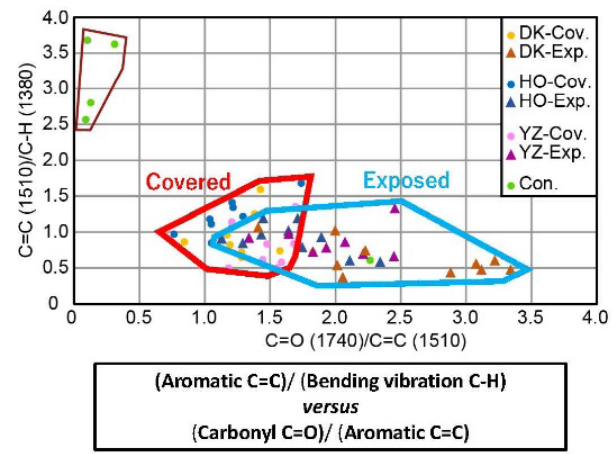


図9 木材曝露試験体ホオノキ表面
左：宇宙暴露 右：地上真空暴露



(Aromatic C=C) / (Bending vibration C-H)
versus
(Carbonyl C=O) / (Aromatic C=C)

- Aromatic C=C is mostly found in lignin and the C-H plotted is mostly from cellulose and not effected by irradiation.
- The C=O is from a quinoid compound formed on photo irradiation of lignin.
- This plot shows that the majority of contamination responses plot in the top left region of the graph.
- The contamination should only effect the exposed samples as the others were covered or not sent to the ISS.
- Therefore, contamination may push the exposed data points towards the top left.

図10 宇宙暴露した木材試料のC=OとC=Cの関係

③ 「低圧下における樹木育成実験」

実施内容・成果 ③ 低圧下における樹木育成実験

③ 低圧下における樹木育成実験

既存の低圧下樹木育成実験装置（Low Pressure Tree Growth Experiment Apparatus, LPTGEA）2台に加えて、新たに実験装置2台を製作した。合計4基の樹木育成育成実験装置を使った実験中の写真を図11に掲載する。低圧下における樹木育成実験にはポプラの挿し木苗（クローン苗）を用いた。実験結果はポプラ苗の成長と成長特性の2つの項目について取りまとめた。本研究では樹木の生育に影響を与える様々な環境要因のうち大気圧に着目し、圧力環境の異なる環境における樹木育成法を確立するための基礎データを得ることを目的とした。

成長量 (図12)

それぞれのポプラ苗について実験開始前後の乾燥重量（バイオマス）の増加割合の評価を行った。0.75気圧から0.1気圧の低圧下でのポプラの成長量と1気圧下のそれとの間には差は認められないようである（図12）。

T/R比（地上部乾燥重量／地下部乾燥重量）（図13）と同化部/非同化部比（葉乾燥重量／茎・根乾燥重量）（図14） 0.75気圧から0.1気圧の低圧下でのポプラのT/R比と同化部/非同化部比と1気圧下のそれとの間には差は認められないようであった。



図11 低圧下樹木育成実験風景

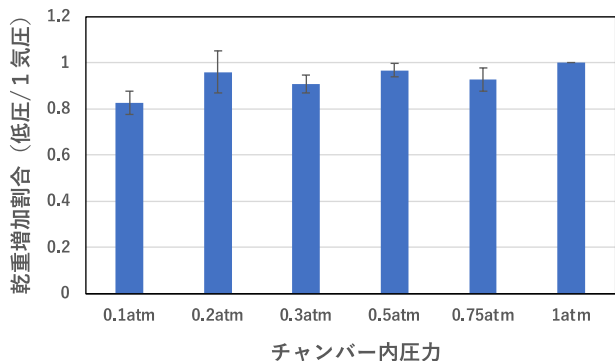


図12 1気圧と低圧におけるバイオマス増加割合の比較

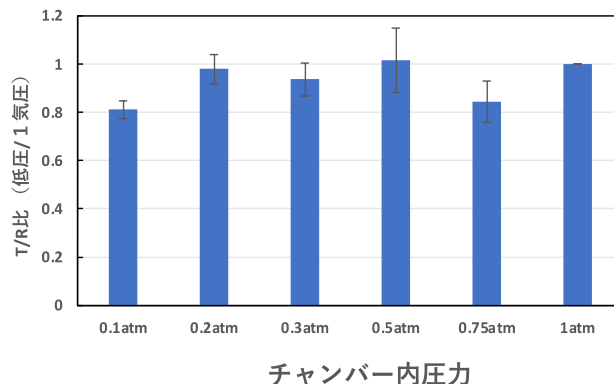


図13 1気圧と低圧におけるT/R比の比較

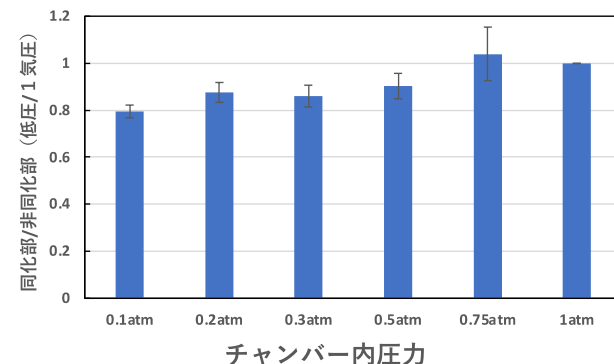


図14 1気圧と低圧における同化部/非同化部比の比較

④ 「宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進」

実施内容・成果 ④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

4-1. 専門教育プログラム「有人宇宙学実習」と「有人宇宙学」(講義)の実施

有人宇宙学実習は、有人宇宙ミッションを模擬した体験学習であり、【閉鎖環境実習】・【宇宙森林実習】・【天体観測実習】・【模擬微小重力実験】・【宇宙無線通信実験】の5つの課題を1週間かけて体験することによって、有人宇宙活動に関する包括的な視点と基礎知識を習得することを目的としている。特に本実習では、京都大学芦生研究林にて【宇宙森林実習】を行い、森林の構造の理解、樹木の生長の測定方法、森林が固定している炭素量の測定方法とその原理、森林での生態系についての理解、を習得することをめざした(図15)。

「有人宇宙学」(講義)は、有人宇宙活動の実践的知識を与えると同時に、最先端の研究や技術情報を提供することによって、学生が個々の専門分野を選択することに直接役立てられる専門的知識を獲得することを目的としている。「有人宇宙学」講義は令和4年から6年にかけて3回実施された。令和4年度では10名が受講、2名の大学院生が合格し、聴講生を含めた9名が修了した。令和5年度では20名が受講、12名の大学院生が合格し、聴講生を含めた14名が修了した。令和6年度は11名が受講、6名の大学院生が合格し、聴講生を含めた8名が修了した。



図15 有人宇宙学実習 芦生研究林にて

4-2. 教育活動として木造人工衛星の設計会議及び樹木育成に関するセミナーの開催

木造人工衛星の開発における情報交換及び問題解決を目的として、令和4年度は12回、令和5年度は12回、令和6年度は11回の木造人工衛星設計会議を開催した。学生からなる5つの班が木造人工衛星の開発を担当し、毎月の設計会議で担当システムの説明を行った。木造人工衛星設計会議は、毎回約30名ほどの参加者があった。LignoSatの開発及び木造人工衛星2号機の開発が順調に進んだのは、木造人工衛星設計会議のおかげであると考えている。

樹木育成チームは樹木育成実験への参加学生に対して、樹木に関する知識の向上を図るために樹木育成セミナーを、令和4年度は4回、令和5年度は4回、令和6年度は3回実施した。また、樹木育成実験データの解析と考察について、令和5年度は4回、令和6年度は2回のセミナーを実施した。

4-3. 宇宙木材利用シンポジウムの開催及びニュースレターの発行

宇宙木材利用シンポジウムは、木材の宇宙利用を推進するための教育啓蒙活動として、令和4年より開催されて来た。宇宙木材利用シンポジウムは、日本で初めて宇宙での木材利用や樹木の育成及び宇宙木材産業の確立に焦点を当てた3部構成からなるシンポジウムであり、各大学の研究者や学生、企業関係者らにより宇宙における木材の利用可能性について幅広く議論を展開することを目的としている。図16に2025年3月に開かれた第3回宇宙木材利用シンポジウムプログラムを載せる。

さらに京都大学における活動を一般社会に知ってもらうためにSpaceology Newsletter(有人宇宙学ニュースレター)を毎月発行した。

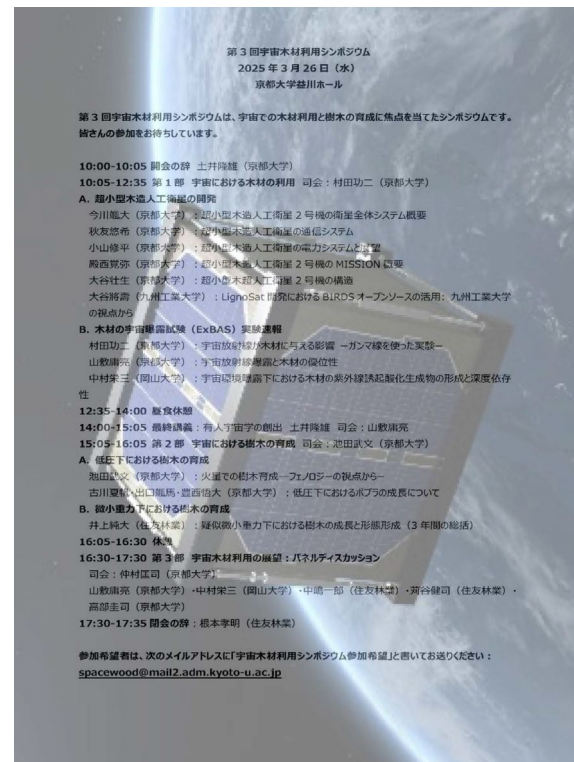


図16 第3回宇宙木材利用シンポジウムプログラム

本課題の「必要性」「有効性」「効率性」

実施内容・成果 本課題の「必要性」「有効性」「効率性」

「必要性」

【科学的・技術的意義】（独創性、革新性、先導性）

本課題では世界で初めて木造人工衛星LignoSatを開発し、宇宙空間に放出し運用を行った。木造人工衛星を開発するために、真空の木材に与える影響、放射線の木材に与える影響、さらに原子状酸素が木材に与える影響を調べ、木材が宇宙空間に壊れずに存在できることを証明した。さらにJAXA/NASAとの2年間に及ぶ安全審査の過程で木材を人工衛星構体にするための種々の問題を解決し、JAXA/NASAの安全審査を無事通過した。

【社会的・経済的意義】（産業・経済活動の活性化・高度化、国際競争力の向上、社会的価値（安全・安心で心豊かな社会等）の創出）

現在、地球軌道を周回している衛星は金属製（アルミニウム製）衛星である。これらの衛星は運用が終わると宇宙ゴミにならないようにするために地球大気圏に再突入される。その時、金属製衛星は酸素と燃焼して酸化金属（酸化アルミニウム）の微粒子を大気中に放出する。これらの酸化金属微粒子は、地球の受ける太陽エネルギーを減少させ、オゾン層を破壊する可能性がある。木造人工衛星は地球大気圏に再突入した時に酸素と反応して二酸化炭素と水蒸気を作るだけであり、大気圏を汚染することはない。また、その時にできる二酸化炭素は、あらかじめ木が育っていた時に大気から吸収した二酸化炭素である。

「有効性」

【新しい知の創出】

本課題は、宇宙で木材が使えることを証明するために木造人工衛星の開発・運用及び低圧下での樹木育成実験を実施した。木造人工衛星の開発は世界で初めての試みであり、そのために行った木材の真空暴露実験や木材の宇宙暴露実験、さらに低圧下での樹木育成実験の成果は、人類の科学にとって新たな発見であり、新しい知の創出である。また、木材が宇宙で使うことができるという事実は、人類により宇宙開発に新たな資源としての木材を提案するものであり、これからの宇宙開発を大きく変えて行く可能性を秘めている。

【人材の養成】

本課題は、学生チームが主体となって実施した課題である。木造人工衛星学生チームは、令和4年度は学生25名、令和5年度は34名、令和6年度は37名が所属し、延べ96名の学生が参加した。樹木育成学生チームは、令和4年度は13名、令和5年度は19名、令和6年度は15名、延べ47名の学生が参加した。本課題全体では、参加学生数はのべ143名に上る。特に木造人工衛星チームには、世界初の木造人工衛星打上げへの貢献が認められ、令和6年度の京都大学総長賞が授与された。学生チームの卒業生の進路を調べた表1を掲載する。本課題に参加した卒業生は、この経験を通して自分の進路を明確にすることができ、希望通りの未来へ自分の人生を進めて行く力を身に付けることができた。

「効率性」

【計画・実施体制の妥当性】

本課題は、学生チームの活動を主体に展開することにより、費用的に非常に効率的に実践できたと考えられる。また、木造人工衛星の開発においては、すでに超小型人工衛星の開発・運用に経験のある九州工業大学と連携することにより、九州工業大学の衛星試験設備を安価に使うことができたばかりでなく、彼らの開発した衛星システムを利用することができ、短期間で木造人工衛星の開発ができた。また、今回は国際宇宙ステーションからの放出を選択したことで、JAXA及びNASAとの安全審査を実施することができ、超小型人工衛星を開発する上で貴重な指摘を受けることができた。さらに、大学宇宙工学コンソーシアム（UNISEC）のJ-CUBEプログラムに応募・選考されたことにより、人工衛星打上価格を非常に安く抑えることができたことも特筆される。

表1 卒業生の進路

| 年度 | 進路 | 種別 | 人数 |
|----|----|------|----|
| R4 | 進学 | 京都大学 | 6 |
| | | 他大学 | 0 |
| | 就職 | 企業 | 1 |
| | | 官公庁 | 0 |
| R5 | 進学 | 京都大学 | 10 |
| | | 他大学 | 6 |
| | 就職 | 企業 | 0 |
| | | 官公庁 | 1 |
| R6 | 進学 | 京都大学 | 10 |
| | | 他大学 | 1 |
| | 就職 | 企業 | 3 |
| | | 官公庁 | 0 |

その他の成果

| これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等) | 特許出願 | 査読付き 投稿論文 | その他 研究発表 | 実用化事業 | プレスリリー ス・取材対応 | 展示会出展 |
|-----------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------|------------------|--------------|
| | 国内：1 国際：1 | 国内：2 国際：0 | 国内：44 国際：0 | 国内：0 国際：0 | 国内：24 国際：0 | 国内：1 国際：0 |
| 受賞・表彰リスト | | | 令和6年度京都大学総長賞（木造人工衛星学生チームに対して） | | | |

成果展開の状況・期待される波及効果(事業の目的に関するアウトカム)

世界初の木造人工衛星LignoSatを開発し、NASA/JAXAの安全審査を通過し、宇宙空間に打上げ、運用を行った。その成果を受けて、木造人工衛星2号機の開発を行った。木造人工衛星2号機は内部に通信用パッチアンテナを持ち、木材パネルを通して地上との通信実験を行う。将来的には木造人工衛星による地球低軌道防災衛星ネットワークを実用化したいと考えている。木造人工衛星は地球大気圏再突入時に水と二酸化炭素になるだけであり、大気圏を汚染しない。実用化に向けて、令和8年度に木造人工衛星の実用化を行う会社を起業する準備を進めている。また、大型木造人工衛星（125U以上）の開発のために、住友林業や利昌工業と木材合板やCNFの宇宙利用の可能性を調べる共同研究を実施している。

低圧下における樹木育成実験により、霧囲気圧0.1気圧までの樹木育成に成功した。霧囲気圧0.1気圧までは、樹木は基本的に大気圧下での成長特性を維持できることが判明した。今後は月や火星における樹木の育成をめざして、さらに低圧下での樹木育成法の開発をめざす予定である。将来的には火星にドーム状の建造物（木製）を作り、そこで森林を育てたいと考えている（図17）。火星に森林を作ることができれば、その木々を伐採することによって火星社会の住居やオフィス等の建造物を建てるのが可能になる。宇宙で木を使おうとする宇宙木材産業が構築される。

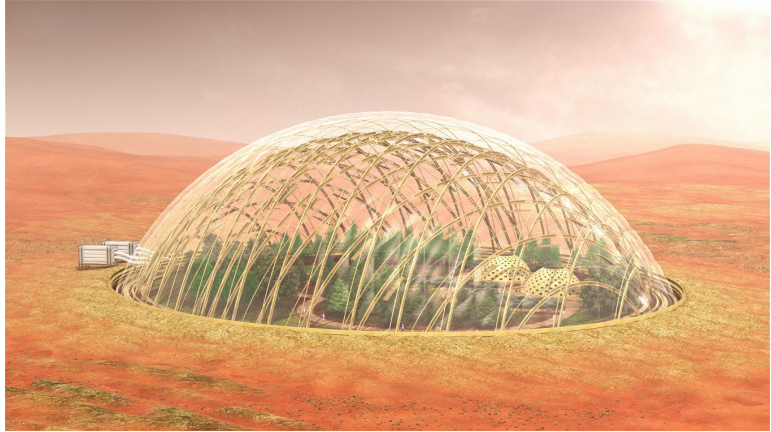


図17 火星の森林用ドーム

今後の研究開発計画

木造人工衛星1号機を開発し宇宙空間に打上げ4ヵ月間運用した。残念ながら地上との交信ができなかった。通信ができなかった原因を明らかにするためにFault Tree Analysis (FTA) を行った。その結果として、1. 電源系の異常、2. デプロイメントスイッチの動作異常、2. フライトソフトウェアの動作異常 の3つの可能性があることが明らかになった。そのため、これら原因をさらに解明し、解決法を見出すことによって、LignoSat-1Rを開発し2027年度に打上・運用を行いたいと計画している。さらに木造人工衛星2号機の簡易型姿勢制御系を開発し、2028年度の打上げを予定している。これらの成果を受けて、2030年度以降に木造人工衛星の実用化をめざして、3軸姿勢制御可能な3号機を開発・運用したいと考えている。

低圧下での樹木育成実験システムをさらに改良し、霧囲気圧0.01気圧下での樹木育成法を開発したいと考えている。霧囲気圧0.01気圧下での樹木育成ができれば、火星での樹木育成が可能になると考えている。

事後評価票

令和7年3月末時点

| | |
|-----------------|-------------------------------|
| 1. プログラム名 | 宇宙航空脱炭素技術等創出プログラム |
| 2. 課題名 | 宇宙木材産業の創出をめざした宇宙材料としての木材利用の探究 |
| 3. 主管実施機関・研究代表者 | 国立大学法人京都大学・土井隆雄 |
| 4. 共同参画機関 | 住友林業株式会社 |
| 5. 事業期間 | 令和4年度～令和6年度 |
| 6. 総経費 | 40百万円 |

7. 自己点検結果

(1) 課題の達成状況

「所期の目標に対する達成度」

◆ 所期の目標

林野庁は2050年にCO2排出量を実質ゼロにするための取り組みとして、木材資源の利用拡大を推進している。そこで本課題では、宇宙材料としての木材資源の利用拡大によって、新しい宇宙木材産業を創出し、カーボンニュートラルな社会の構築をめざす(図1-1)。そのための取り組みとして、①木材を構体とする木造人工衛星の開発と運用を行い、木材の宇宙材料としての利用法を提唱すると同時に、②宇宙空間に曝露した木材の微細構造の変化を解明することによって、宇宙における木材利用の実現可能性を探究する。さらに、宇宙での木材供給をめざして、③月面・火星基地などの低圧環境における樹木育成を念頭に置いた環境制御技術の開発による樹木育成実験を実施する。本課題の実践は大学生・大学院生が主体的に行うことにより、④宇宙における木材利用についての教育啓蒙活動が実践され、カーボンニュートラル事業に取り組む人材の育成を果たす。

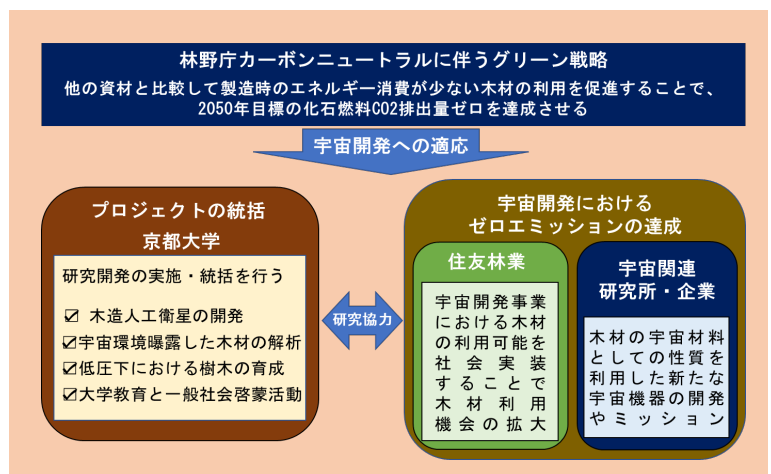


図 1-1 宇宙材料としての木材の利用性の探究

◆ 業務計画に対する達成度

本課題は以下のとおり、初期の目標を十分に達成した。

① 木造人工衛星の開発

1-1. 木造人工衛星1号機の開発・運用

木造人工衛星1号機（LignoSat）の安全審査II/IIIをJAXA/NASAと2023-2024にかけて実施した。LignoSatフライトモデルを2024年4月に完成させ（図1-2）、2024年6月にJAXAに納入した（図1-3）。

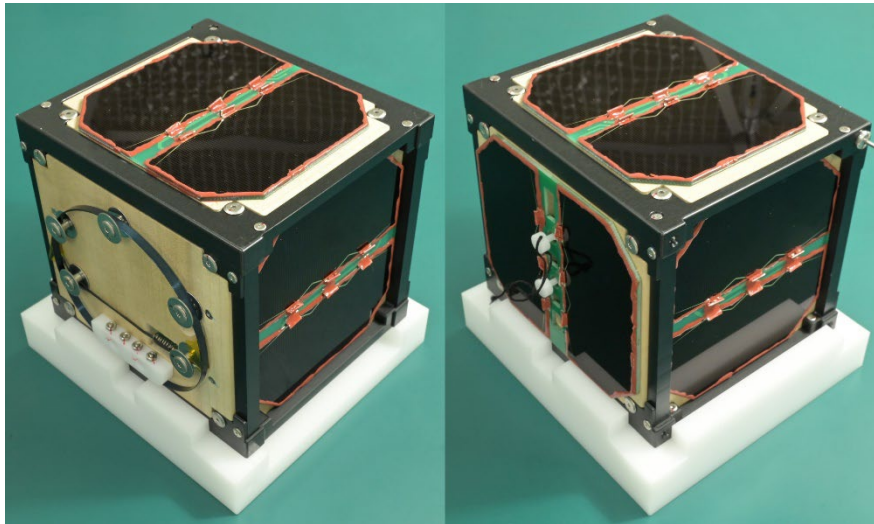


図1-2 LignoSatフライトモデル



図1-3 LignoSat納入証明書

LignoSatは2024年11月5日にアメリカフロリダ州のケネディ宇宙センターよりスペースX社ファルコン9ロケットで打ち上げられ、国際宇宙ステーション（ISS）に運ばれた。2024年12月9日に日本実験棟「きぼう」の小型衛星放出機構（J-SSOD）により宇宙空間に放出された（図1-4）。こうしてLignoSatは世界で初めての木造人工衛星になった。

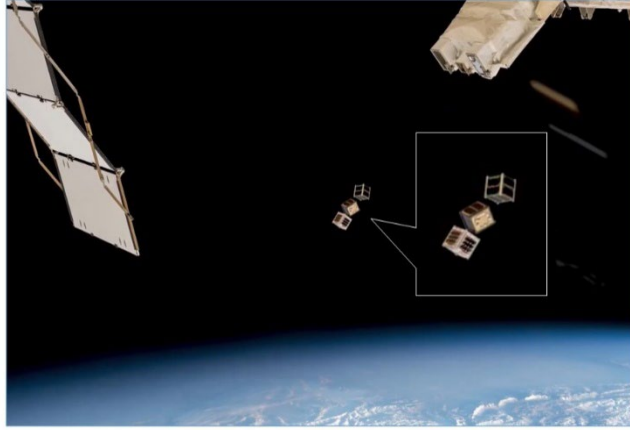


図1-4 LignoSatの宇宙空間への放出
LignoSatは放出された3基の衛星の中央の衛星である。

LignoSatは、2025年4月4日に地球大気圏に再突入するまで地球軌道を周回した。図1-5に北アメリカ航空宇宙防衛司令部（NORAD）が公表したLignoSatの近地点・遠地点・離心率の変化を示す。

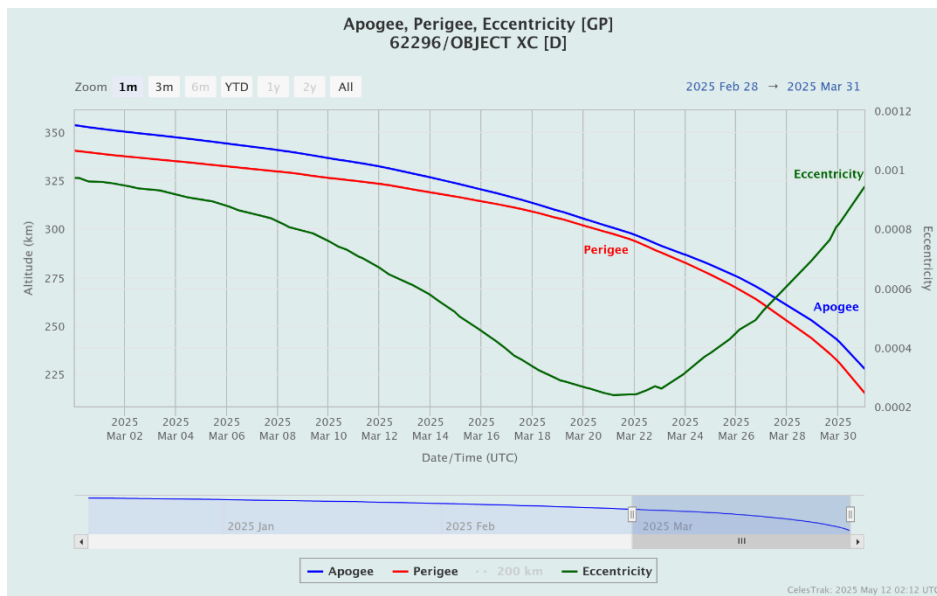


図1-5 LignoSat近地点・遠地点・離心率の変化

LignoSatは、木造人工衛星が壊れずに宇宙空間に存在できることを証明したが、地上との通信はできなかった。

1-2. 電波を透過する木材の特性を生かして木造構体内部に設置できるアンテナ・姿勢制御システムの基礎実験の実施

木造人工衛星は木板パネルが構造体を形成していることから、地上との通信用アンテナを構造体の内部に持つことが可能になることが予想される。これは木材が電磁波に対して透明であるからである。人工衛星内部に通信用アンテナを持つことにより、構造体の外側にアンテナを展開する機構が不要になり、信頼性が増加する。また、構造体の外側形状に出っ張りが無くなり、大気抵抗を受けづらくなり、地球低軌

道でも大きな空気抵抗を受けなくなる利点がある。木造人工衛星の実用化として、地球低軌道を周回する防災衛星ネットワークを作る計画である。そのため、木造構体内部に設置できるパッチアンテナシステムを開発し（図1-6）、通信実験を実施した。

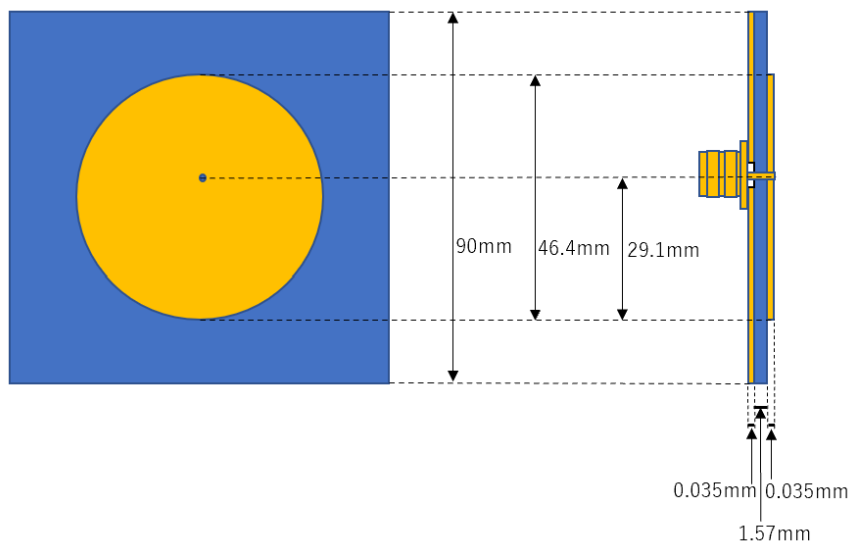


図1-6 パッチアンテナ

パッチアンテナ通信試験は、九州工業大学超小型衛星試験センターにある電波暗室を用いて行われた（図1-7）。計測する周波数は、2.4025 GHzである。この周波数はアマチュア無線周波数帯にあり、また、パッチアンテナが木造構体内部に設置できるように選別された。

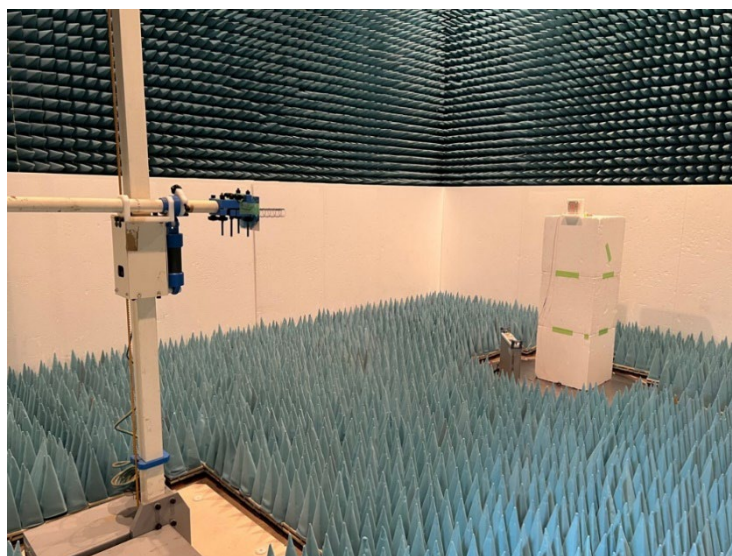


図1-7 アンテナパターン計測時の電波暗室内の様子

通信試験の結果を図1-8に示す。パッチアンテナは指向性があり、パッチアンテナを使用するためには簡易的な姿勢制御系が必要であることが判明した。また、パッチアンテナと木板は密着させない方が通信性能は高く、木板（厚さ4.5ミリ）とパッチアンテナの間隔が5 - 10ミリ程度の時が通信性能が最も良く、木板パネルが無い場合と比較しても、ほとんど通信性能の劣化が無いことが確認された。

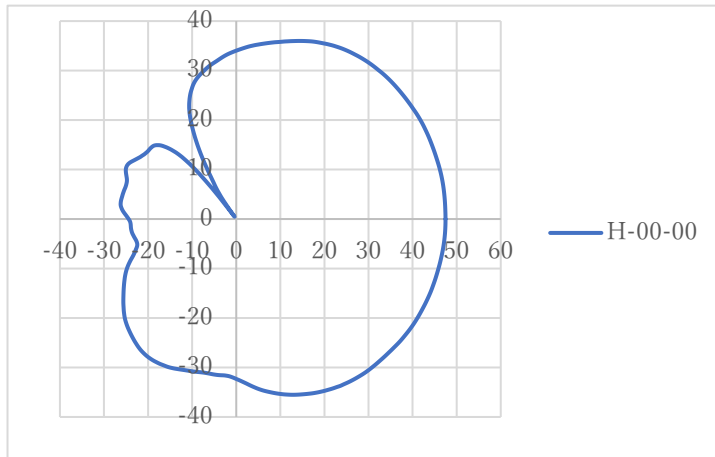


図1-8-1 パッチアンテナパターン 木板無し

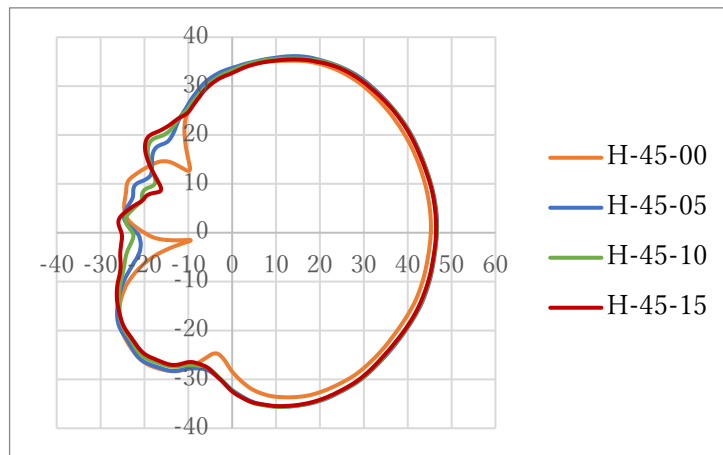


図1-8-2 パッチアンテナパターン 木板4.5ミリ

1-3. 木造人工衛星2号機の基礎設計の完了

地球低軌道を周回する防災衛星ネットワークを作るために、木造人工衛星2号機の開発を行った。防災衛星は通信衛星であるので、パッチアンテナを内部に持つことのできる木造人工衛星は地球低軌道を周回させることができる。地球低軌道を周回することによって、地上と携帯電話を使って通信が可能になるので、防災衛星として非常に適していると考えられる。木造人工衛星2号機(2U)の基礎設計を完了した(図1-9)。木造人工衛星2号機の主要諸元を表1-1に示す。パッチアンテナを衛星内部に設置する。木造人工衛星2号機は、2Uのサイズを持ち、質量は2.66kg以下と規定されている。木造人工衛星2号機の1U空間にはLignoSatとほぼ同じ電子基板を載せる計画である。もう一つの1U空間には、パッチアンテナと簡易的な地磁気を利用した姿勢制御システムを載せる。外側10面のうち8面にはソーラーパネルを貼り付け、太陽光発電量を増やす。外側一面にはLignoSatで載せたUHF帯のダイポールアンテナを搭載し、通常のミッションデータの交信を行う。もう一面の木板パネルの内側にはパッチアンテナを装着する。パッチアンテナを使った送受信試験は木造人工衛星2号機が日本上空を通る時に実施する。

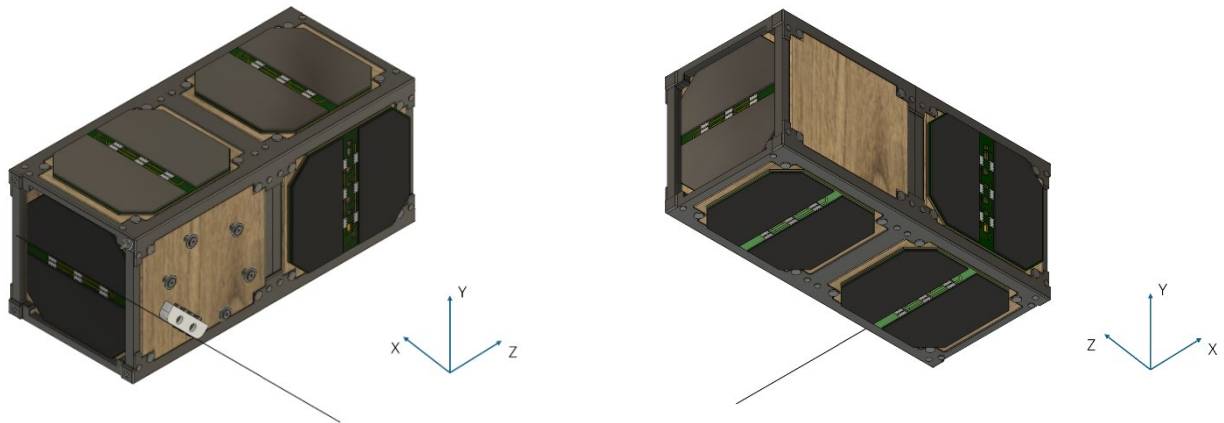


図 1-9 木造人工衛星 2 号機 (コンピュータグラフィックス)

表 1-1 木造人工衛星 2 号機の主要諸元.

| 項目 | 内容 |
|-------|--------------------------------|
| 運用期間 | 6 か月以上 |
| 軌道 | 高度約 400-500 km |
| サイズ | 2U (100 mm x100 mm x 227.0 mm) |
| 質量 | 2.66 kg (2U) 以下 |
| バッテリー | Ni-MH (1U: 3S2P 又は 2U: 3S4P) |
| 周波数 | UHF 又は 2.4GHz 帯 |
| 発電量 | 約 2000 (2U) mW |

基礎設計を基にして木造人工衛星2号機のエンジニアリングモデルを製作した (図1-10)。

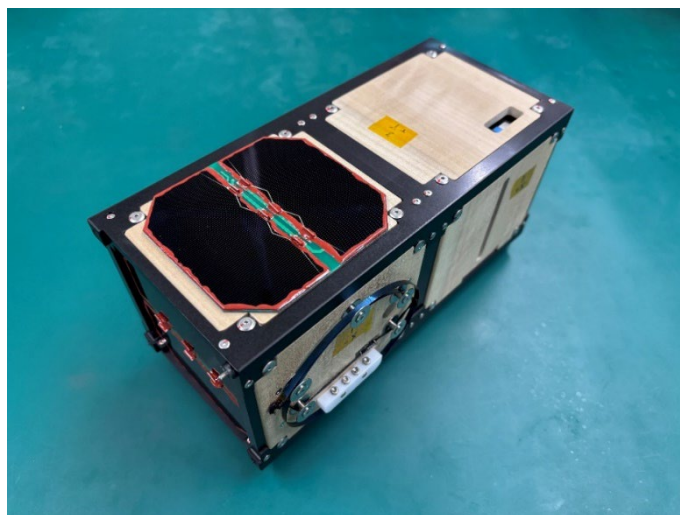


図 1-10 木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデル (EM)

木造人工衛星 2 号機 EM を使って九州工業大学超小型衛星試験センターで振動試験を実施した。図 1-11 に振動試験装置に設置した木造人工衛星 2 号機の写真を載せる。振動試験ではモーダルサーベイ試験、ランダム AT/QT 加振、サインバースト試験を各 X・Y・Z 軸方向にかけて実施した。振動

試験の結果、供試体の外観検査を実施し、破壊・破損等の異常がないことを確認した。また、各軸の固有振動数は、X軸では約400 Hz、Y軸では約530 Hz、Z軸では約790 Hzであり、そのすべて

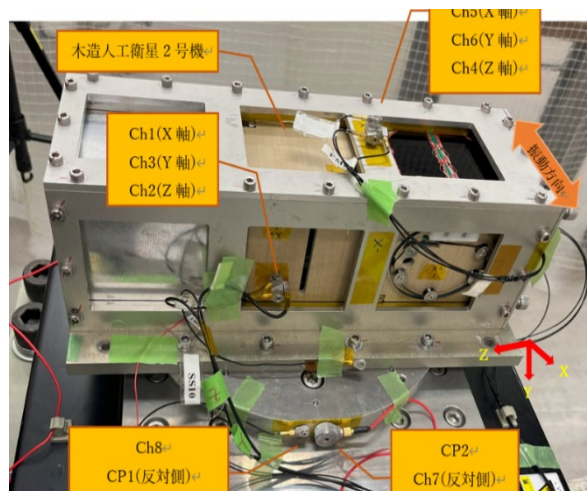


図 1-11 木造人工衛星 2 号機の振動試験

が 30Hz よりも高くなった。これは JAXA による設計要求を満たしている。木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデルの振動試験により、木造人工衛星 2 号機の設計に問題ないことが確認された。

1-4. 木造人工衛星のカーボンニュートラルにおける貢献

2040年に見込まれるCO2削減効果を試算した。木造構体として、現在開発中のセルロースナノファイバー（CNF）を使うことを仮定した。セルロースナノファイバーは、植物・樹木のセルロース結晶繊維（パルプ）をナノサイズまで解繊したものであり、これらを一様に混合させた後に固めた物がCNF材である。ほぼ等方性に近い性質を持つ。低軌道人工衛星の筐体材にCNF材を用いれば、現在のアルミニウムパネルと比較して1台当たりアルミニウムとCNF板材の比重差分（アルミニウム比重：2.7、CNF板材比重：1.5）に基づけば約45%の軽量化が図れる。人工衛星が軽量化すれば打ち上げ時の負荷が減ることから、打ち上げ時に排出されるCO2の削減に寄与できる。一例として、低軌道用27Uサイズ（300x x 300 x 300mm）人工衛星の筐体重量をアルミニウムとCNFで比較し、重量軽減によるCO2削減を試算した。筐体に使用される4mm厚のアルミニウム板（総重量例：5.9kg）を同じ厚さのCNF板（総重量例：3.3kg）に置換したとすれば、それぞれの比重差に基づき9U人工衛星1台当たり2.6kgの軽量化となる。Falcon9の打ち上げ時のCO2排出量は337t/回とされており、ペイロードで除すると打ち上げ重量1kgあたりのCO2排出量は14.8kgとなる。

低軌道人工衛星の打ち上げ個数をもとに、CNF筐体の人工衛星による打ち上げ時のCO2削減効果は、2035年の10,000機/年では、384t/年、2040年の100,000機では3,840t/年と試算した。しかし、前述されているように打ち上げ個数の増加に伴い、100,000機を打ち上げた場合、590t/年のアルミニウムが大気圏にアルミナとして大量放出されることになり、すでに予測されている気候変動に与える影響は計り知れなくなってくる。地球規模の気候変動に伴い日照量や降雨の変化で植物の生存体系にも影響を与えることは容易に予測され、特にCO2を吸収・固定している植物の活動が変化してしまうことでCO2の固定能も著しく変わると考えられる。このことからアルミナを放出しないCNFの人工衛星への利用は、地球規模のCO2濃度に間接的な影響を大きく低減できると期待できる。

② ExBASの木材の解析

2-1. 宇宙空間における高真空・原子状酸素による木材物性の物理的变化

宇宙空間に暴露された木材の物理化学的な変化を調べるために、国際宇宙ステーション（ISS）に木材試料を暴露し、それらの試料のマクロ的・ミクロ的分析を行った。図2-1に木材暴露試験体を示す。木材試験体は、ホオノキ、ヤマザクラ、ダケカンバの3種類であり、各試験体の寸法は、56mm x 8.6mm x 5mmであり、各2本ずつ選別された。木材試験体の3本はポリイミド樹脂シートに巻かれている。これは、ポリイミド樹脂シートに巻かれた木材試験体への原子状酸素による影響をなくすためである。



図 2-1 木材暴露試験体

木材試験体は、簡易材料暴露実験ブラケット（Exposed Experiment Bracket Attached on i-SEEP: ExBAS）に取付けられ、国際宇宙ステーションに運ばれた。2022年3月より12月まで約10ヵ月間日本実験棟「きぼう」船外実験プラットフォームにて宇宙空間暴露された。宇宙空間暴露された木材試験体は2023年1月に地球に帰還した、同年3月に京都大学に引き渡された（図2-2）。

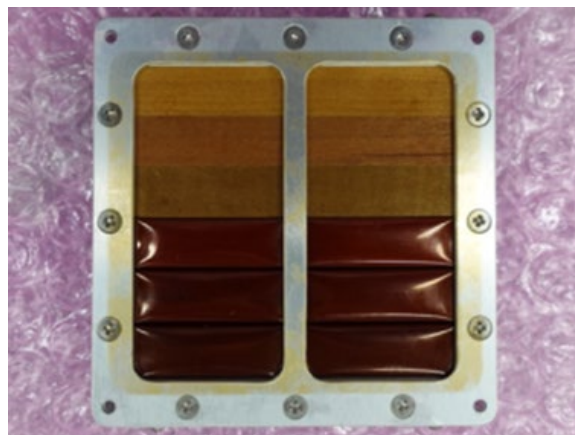


図 2-2 曝露後の木材試験体

宇宙暴露試験体及び地上保管試験体の重量を調べた結果を表2-1に示す。 ΔW_0 は宇宙空間に暴露した試験体の全乾重量を予測した試験体の宇宙暴露前と後の乾燥重量変化を示している。宇宙空間に暴露された木材試験体の重量変化はごくわずかで、樹種間の違いはほぼないと言える。

表 2-1 宇宙曝露試験体の重量変化

| 樹種 | 曝露場所 | 状態 | 気乾重量 | | 乾燥重量 | | 曝露後重量 | | ΔW_0 (g) |
|-------|-------|------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|---------------------|
| | | | W (g) | MC (%) | W (g) | MC (%) | W (g) | MC (%) | |
| ホオノキ | ExBAS | 被覆 | 1.1367 | 12.2 | 1.0135 | 0.0 | 1.053 | 3.9 | |
| | | 宇宙曝露 | 1.0360 | 11.4 | 0.9301 | 0.0 | 0.964 | 3.6 | -0.002 |
| | 地上 | 被覆 | 1.1330 | 11.5 | 1.0159 | 0.0 | 1.051 | 3.5 | |
| | | 真空曝露 | 1.0496 | 11.4 | 0.942 | 0.0 | 0.976 | 3.6 | |
| ヤマザクラ | ExBAS | 被覆 | 1.4530 | 11.0 | 1.3092 | 0.0 | 1.353 | 3.3 | |
| | | 宇宙曝露 | 1.3977 | 10.9 | 1.2601 | 0.0 | 1.303 | 3.4 | 0.001 |
| | 地上 | 被覆 | 1.4615 | 10.9 | 1.3177 | 0.0 | 1.357 | 3.0 | |
| | | 真空曝露 | 1.4301 | 11.1 | 1.2877 | 0.0 | 1.330 | 3.3 | |
| ダケカンバ | ExBAS | 被覆 | 1.8879 | 11.0 | 1.7011 | 0.0 | 1.764 | 3.7 | |
| | | 宇宙曝露 | 1.8669 | 11.0 | 1.6822 | 0.0 | 1.745 | 3.7 | 0.001 |
| | 地上 | 被覆 | 1.8650 | 9.6 | 1.7015 | 0.0 | 1.757 | 3.3 | |
| | | 真空曝露 | 1.8633 | 10.9 | 1.6804 | 0.0 | 1.741 | 3.6 | |

宇宙空間に曝露された木材試験体と地上で真空曝露された木材試験体の比較写真を図 2-3 に示す。これより、宇宙空間曝露された試験体は地上真空曝露された試験体と外観はほとんど変化していないと結論できる。

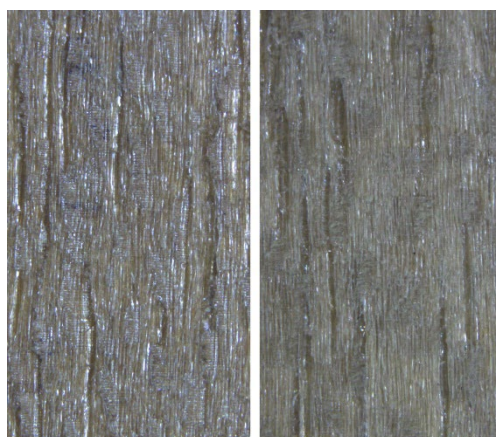


図2-3 ExBASホオノキ試験体 左側：宇宙空間曝露 右側：地上真空曝露

今回の宇宙曝露実験ではアルミ製ホルダー表面に汚染物質が付着していた。木材表面も汚染物が付着しているので、まず、この汚染物質の影響を取り除く必要があった。汚染された領域はやや黄色がかっており、その組成に若干の変動があった。汚染物質は、Polydimethylsiloxane (PDRMS) シリコンの一種ではないかと疑っている。

木材表面の赤外分光光度計 (FTIR) から炭素と酸素の 2 重結合 (C=O) と炭素の二重結合 (C=C) の関係を示したのが図 2-4 である。この図を使うと、前述した汚染物質は左上部に追いやられ、木材試料の反応から汚染物質の影響を取り除くことができる。木材試料はカプトンシートで覆われていたものを Covered として示され、宇宙空間に裸で曝露された試料が Exposed として示されている。

Covered 試料は Exposed 試料に比べて C=O/C=C 比がそれほど大きく広がっておらず、宇宙空間の影響をそれほど受けていないと考えられる。木材では C=C は主にリグニンに含まれ、C-H はセルロースに含まれる。C=C と C-H は宇宙空間の環境ではほとんど変化していないが、C=O が宇宙空間では多量に生成されたことがわかる。この C=O の生産が原子状酸素によるものであると考えられる。即ち木材内部で作られた C=O が木材内部に留まっているために木材の劣化が進まなかったと思われる。これは木材を宇宙空間でも劣化なく使えるという大きな発見である。

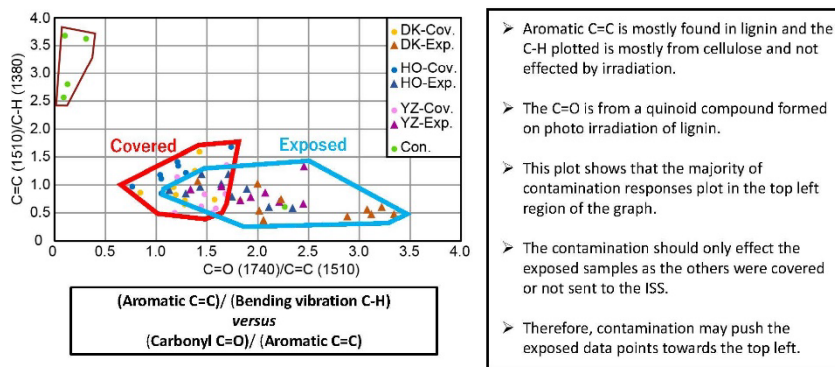


図 2-4 宇宙暴露した木材試料の C=O と C=C の関係

図 2-5 は真空紫外線 (UV) による木材の変成がどの様に起こるかを調べたものである。3 種類の樹木：ダケカンバ、ヤマザクラ、ホオノキを表面から 5 ミクロンずつ切り取り、その組成の変化を調べた。この分析で使ったスペクトル比は、1370/895 及び 1740/895 である。各振動数がなにから来ているかは図に詳しく書かれている。ダケカンバ、ヤマザクラは表面から 25 ミクロン程度まで急激に組成が変化するが、それより深い所では組成変化は少ない。これは紫外線が表面より 25 ミクロンより深い所まで到達していないことを意味している。この傾向に反し、ホオノキは深さ 75 ミクロンを超えて組成がゆっくりと変化している。これはホオノキでは紫外線がより深くまで到達していることを意味している。3 種類の木材に対して、紫外線の影響は深さ 0.1 ミリ程度までで、木材は紫外線の影響をごく表面しか受けないことが分かる。

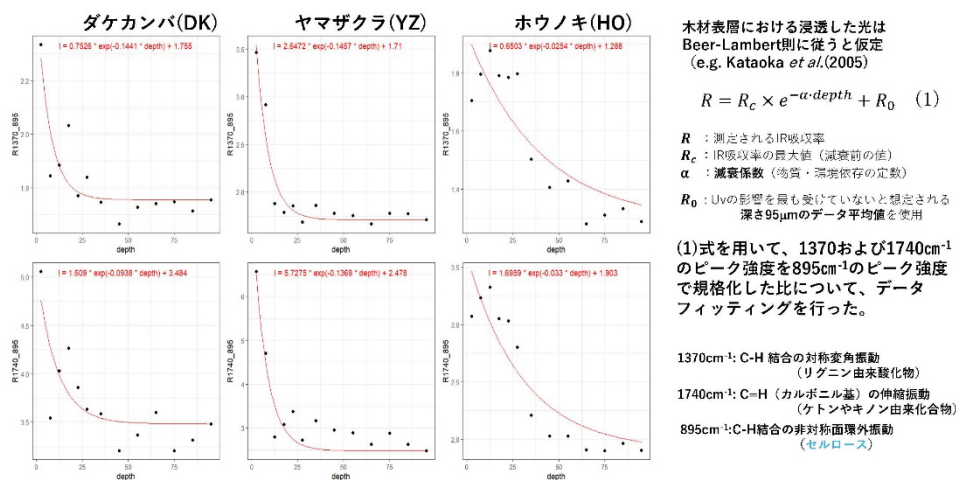


図2-5 紫外線 (UV) 浸透に伴うスペクトルの変化

2-2. 地上における木材の真空暴露実験を継続実施

2018年7月より木材の長期真空暴露実験を行っている。真空度は1Pa（ 10^{-5} 気圧）以下、木材試験体は、長さ100ミリ、幅10ミリ、厚み5ミリである。図2-6に実験用チャンバ、図2-7に真空チャンバ内に置かれた木材実験試料を示す。実験室温度は $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度に保たれている。実験方法は以下の通りである：

- 1) 105°C 、24時間で乾燥後に真空暴露実験を開始する。
- 2) 1ヶ月毎に大気圧に開放して、形状・重量変化と曲げ剛性を測定する。
- 3) 曲げ剛性の測定はイマダ製電動計測スタンドとフォースゲージZTS-20Nを使用し、破壊荷重の10%（非破壊）まで負荷して、変位と荷重の傾きからヤング率を計算する。

木材試料は、繊維（木目）が試料長手方向に平行（「平行」と記述する）な物と直交（「直交」と記述する）する物の2種類を使用する。



図 2-6 真空チャンバ



図 2-7 木材実験試料

図2-8にホオノキ試料（平行試料は79ヶ月真空暴露後、直交試料は74ヶ月暴露後）の相対ヤング率の変化を示す。ホオノキ平行試料の相対ヤング率は、3年程経過して時点で1.0まで戻るが、その後緩やかな上昇がみられる。67ヶ月真空暴露した後では、実験開始時より8~9%ほど上昇している。ホオノキ直交試料の相対ヤング率は、真空暴露開始後約1年半で10%ほど上昇したが、その後はほぼ一定値で推移している。

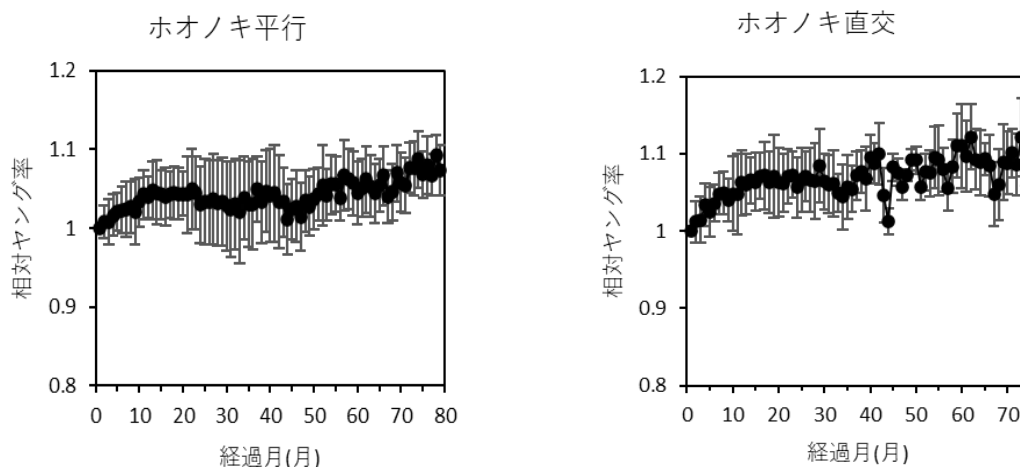


図 2-8 相対ヤング率の変化：ホオノキ（平行：79ヶ月後、直交：74ヶ月後）

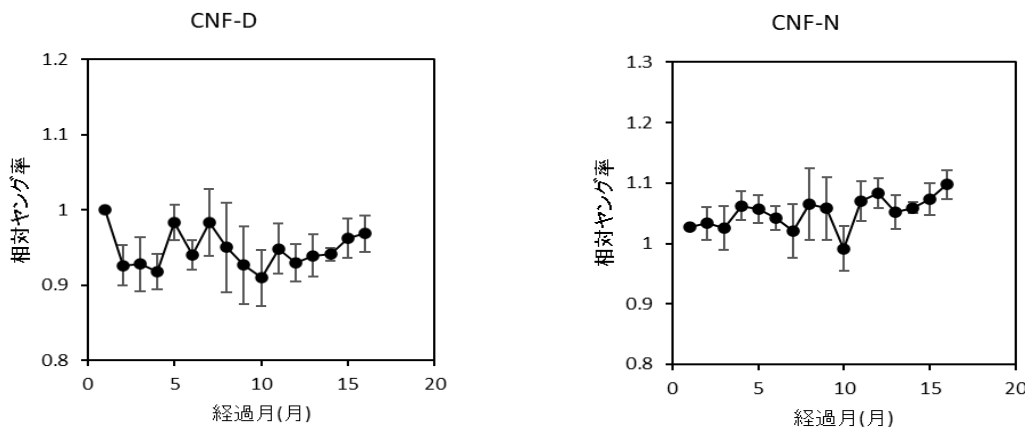


図 2-9 相対ヤング率の変化：CNF（平行・直交：16 ヶ月後）

CNF-D は真空暴露前に 105°C24 時間の乾燥を行う。CNF-N は真空暴露前に何も行ってない。

図 2-9 に新しく CNF 材の真空暴露実験結果をのせる。CNF 材は将来大型の木造人工衛星の木造構体の製作に使うことを計画している。CNF 材は、D 試料及び N 試料とも 16 カ月間の相対ヤング率の変化は 10%以内に収まり、宇宙空間でも使うことができることが判明した。

③ 樹木育成実験系の確立と実験実施

3-1. 樹木育成実験環境（光強度、CO₂ 濃度、湿度）を精度良く制御するための制御システムを完成

既存の低圧下樹木育成実験装置（Low Pressure Tree Growth Experiment Apparatus, LPTGEA）2 台に加えて、新たに 2 台を製作した。樹木育成チャンバのシステムダイアグラムを図 3-1 に示す。チャンバ内の気圧は真空ポンプにより 1 気圧から 0.1 気圧まで自由に設定することができる。また、光合成により消費された二酸化炭素（CO₂）は、二酸化炭素濃度センサーによってつねにモニターされ、規定値より濃度が下がると外部の二酸化炭素ボンベからチャンバ内に供給される。湿度は、湿度センサーによってモニターされ、規定値よりも上回った場合はフリーズトラップ+真空ポンプシステムが稼働し、空気中から余分の水分を取り去る。4 基の樹木育成育成チャンバを使った実験中の写真を図 3-2 に掲載する。合計 4 台の実験装置で、低圧下における樹木の育成実験を実施した。

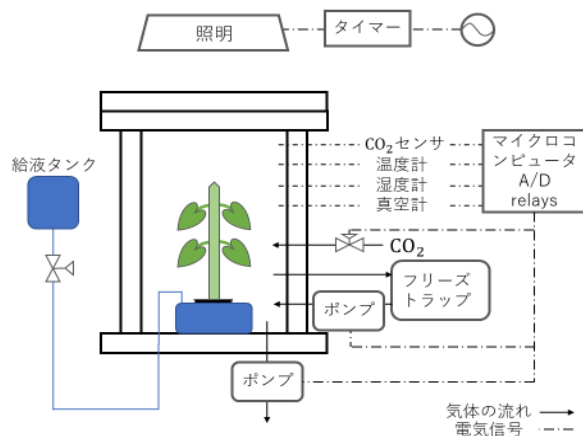


図 3-1 低圧下樹木育成実験システムダイアグラム



図3-2 低圧下樹木育成実験風景

樹木育生チャンバ（LPTGEA）内にはポプラ苗木、右から対照区（1気圧）、
低圧区（0.75気圧、0.2気圧、0.1気圧）

3-2. ポプラ（*Populus alba*）を使用し低圧環境下での育成実験を実施

低圧下における樹木育成実験にはポプラの挿し木苗（クローン苗）を用いた。実験結果はポプラ苗の成長と成長特性の2つの項目について取りまとめた。

3-2-1. 成長

成長量

それぞれのポプラ苗について実験開始前後の乾燥重量（バイオマス）の増加割合の評価を行った。0.75気圧から0.1気圧の低圧下でのポプラの成長量と1気圧下のそれとの間には差は認められないようである（図3-3）。

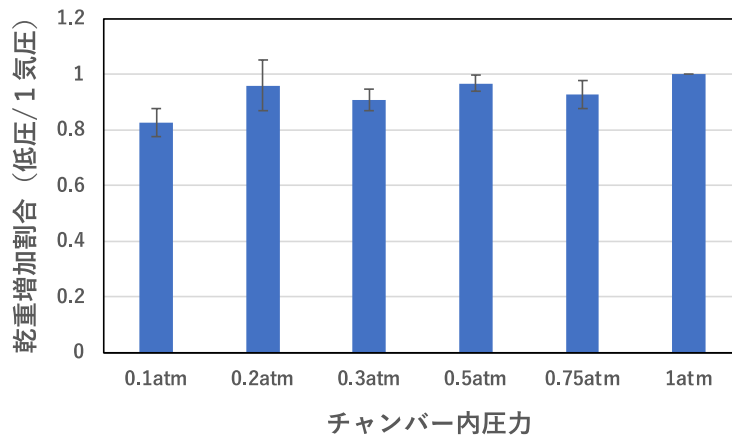


図3-3 1気圧と低圧におけるバイオマス増加割合の比較

3-2-2. 成長特性

LMA (葉の乾燥重量/葉面積)

図3-4にそれぞれの試験区（低圧区と対照区）の（ポプラの葉序）²とLMAの関係を示した。両区とも若い葉ほど有意にLMAが大きくなり、葉が成熟すると差が小さくなること、そして、1気圧区の葉より低圧区の葉の方がLMAは有意に大きいことがわかった。

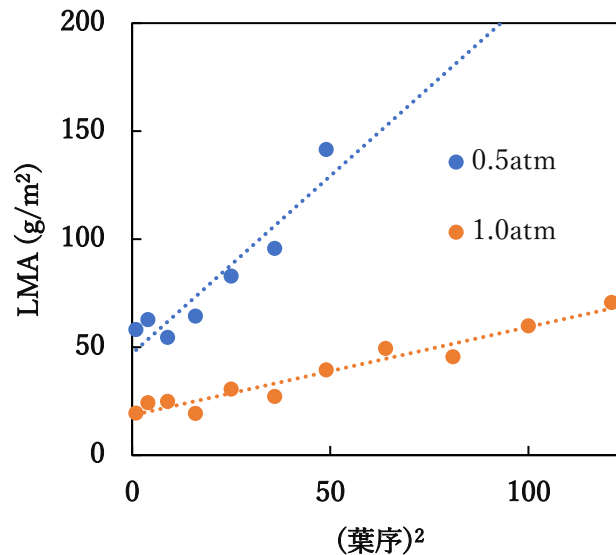


図3-4 LMA (葉の乾燥重量/葉面積)

T/R比 (地上部乾燥重量/地下部乾燥重量) (図3-5) と同化部/非同化部比 (葉乾燥重量/茎・根乾燥重量) (図3-6)

0.75気圧から0.1気圧の低圧下でのポプラのT/R比と同化部/非同化部比と1気圧下のそれとの間には差は認められないようであった。

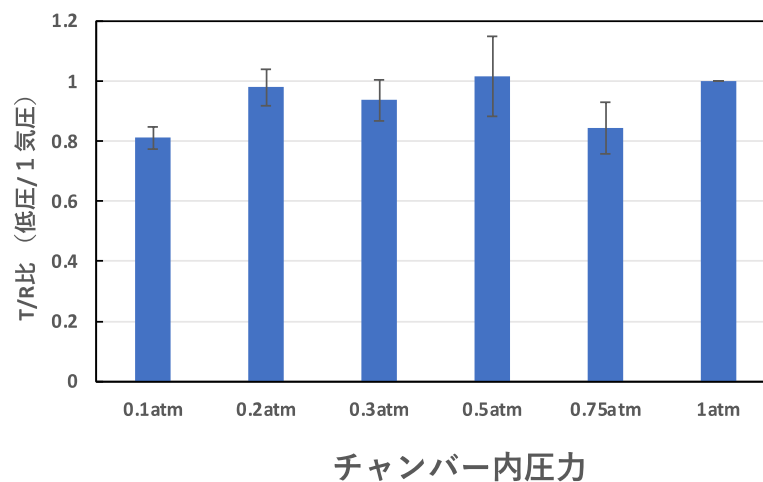


図3-5 1気圧と低圧におけるT/R比の比較

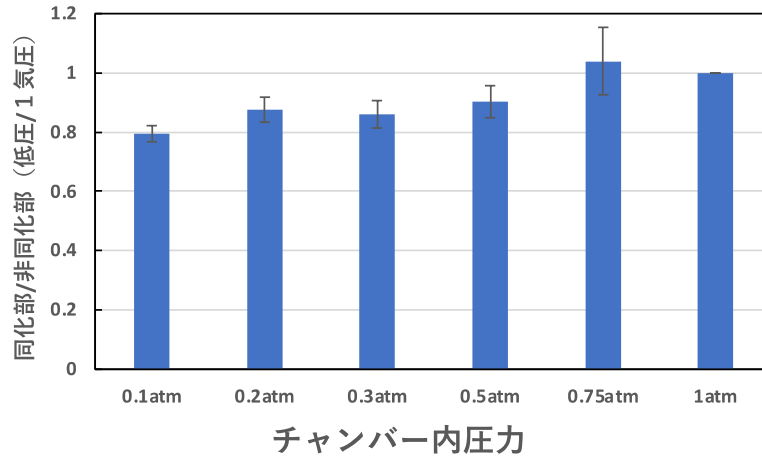


図3-6 1気圧と低圧における同化部/非同化部比の比較

実験結果まとめ

成長量（乾重増加割合）と成長特性（TR比、同化器官/非同化器官）の結果から、低圧下（0.1気圧まで）と大気圧（1気圧）の間で同様の物質生産を行うことが期待される。葉の形態：展開後、低圧下（0.1気圧まで）の葉のLMAは1気圧のそれより大きく、小型で厚い葉になることがわかった。成熟するにつれてLMAの差は縮まることが明らかにされた。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

4-1. 専門教育プログラム「有人宇宙学実習」と「有人宇宙学」（講義）の実施

4-1-1. 有人宇宙学実習

有人宇宙学実習は、有人宇宙ミッションを模擬した体験学習であり、【閉鎖環境実習】・【宇宙森林実習】・【天体観測実習】・【模擬微小重力実験】・【宇宙無線通信実験】の5つの課題を1週間かけて体験することによって、有人宇宙活動に関する包括的な視点と基礎知識を習得することを目的としている。特に本実習では、京都大学芦生研究林にて【宇宙森林実習】を行い、森林の構造の理解、樹木の生長の測定方法、森林が固定している炭素量の測定方法とその原理、森林での生態系についての理解、を習得することをめざした（図4-1）。学生は【宇宙森林実習】に参加することにより、宇宙での森林形成に関して知見を得ることができる。有人宇宙学実習は、令和5年度及び6年度に実施し、各年度9名の学生が参加した。



図4-1 有人宇宙学実習 芦生研究林にて

4-1-2. 有人宇宙学（講義）

「有人宇宙学」講義は、有人宇宙活動の実践的知識を与えると同時に、最先端の研究や技術情報を提供することによって、学生が個々の専門分野を選択することに直接役立てられる専門的知識を獲得することを目的としている。「有人宇宙学」講義は、10回のリレー講義と4回の演習の組み合わせとなっており、演習があることでより実践的に取り組む内容となっている。特に今回の「有人宇宙学」講義では、[宇宙木材工学]があり、木材の専門家により宇宙空間で木材を使うことの意義が語られている。

「有人宇宙学」講義は令和4年から6年にかけて3回実施された。令和4年度では10名が受講、2名の大学院生が合格し、聴講生を含めた9名が修了した。令和5年度では20名が受講、12名の大学院生が合格し、聴講生を含めた14名が修了した。令和6年度は11名が受講、6名の大学院生が合格し、聴講生を含めた8名が修了した。

4-2. 教育活動として木造人工衛星の設計会議及び樹木育成に関するセミナーの開催

木造人工衛星の開発における情報交換及び問題解決を目的として、令和4年度は12回、令和5年度は12回、令和6年度は11回の木造人工衛星設計会議を開催した。学生からなる5つの班が木造人工衛星の開発を担当し、毎月の設計会議で担当システムの説明を行う。木造人工衛星設計会議参加者は、学生チーム各班、宇宙木材研究室教職員、農学研究科教員、住友林業研究員である。

学生班は次の通りである：

Command & Data Handling: CDH 班：全体システムの管理とソフトウェア開発

Communication: COMM 班：衛星及び地上通信システムの管理とソフトウェア開発

Electric Power System: EPS 班：衛星電力システムの管理

Mission: MISSION 班：ひずみ測定、温度測定、地磁気測定システムの開発

Structure: STRUC 班：衛星構体の設計と組立て

木造人工衛星設計会議は、毎回約30名ほどの参加者があった。LignoSatの開発及び木造人工衛星2号機の開発が順調に進んだのは、木造人工衛星設計会議のおかげであると考えている。

樹木育成チームは樹木育成実験への参加学生に対して、樹木に関する知識の向上を図るために樹木育成セミナーを、令和4年度は4回、令和5年度は4回、令和6年度は3回実施した。また、樹木育成実験データの解析と考察について、令和5年度は4回、令和6年度は2回のセミナーを実施した。

4-3. 宇宙木材利用シンポジウムの開催及びニュースレターの発行

宇宙木材利用シンポジウムは、木材の宇宙利用を推進するための教育啓蒙活動として、令和4年より開催されて来た。宇宙木材利用シンポジウムは、日本で初めて宇宙での木材利用や樹木の育成及び宇宙木材産業の確立に焦点を当てた3部構成からなるシンポジウムであり、各大学の研究者や学生、企業関係者らにより宇宙における木材の利用可能性について幅広く議論を展開することを目的としている。

第1回宇宙木材利用シンポジウムは2023年3月11日に京都大学で開催された。第1部「宇宙における木材の利用」では、セッションA：木造人工衛星の開発」およびセッションB：木材の宇宙曝露試験（ExBAS）実験速報の2つのテーマに関して講演が行われた。第2部「宇宙における樹木の育成」では、「A. 低圧下における樹木の育成」および「B. 微小重力下における樹木の育成」の2つの

テーマに関して講演が行われた。第3部「宇宙木材利用の展望」では、セッションA：極限環境における木材利用およびセッションB：宇宙木材産業の展望 - パネルディスカッションの2つのテーマに関して議論が行われた。第2回宇宙木材利用シンポジウムは2024年3月21日に、第3回宇宙木材利用シンポジウムは2025年3月26日に開催された。

本課題では、さらに京都大学における活動を一般社会に知ってもらうために Spaceology Newsletter（有人宇宙学ニュースレター）を毎月発行した：

令和4年度：

- 2022年10月号：篠原正典（帝京科学大学生命環境学部）
宇宙でヒトは殖え続けられるか
- 2022年11月号：石原正次（宇宙木材研究室）
LignoSat 管制の地上局の準備活動紹介
- 2022年12月号：宇宙木材研究室
超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計
- 2023年1月号：山敷庸亮（京都大学総合生存学館）
宇宙放射線による被ばく
- 2023年2月号：宇宙木材研究室
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
- 2023年3月号：市村周一（京都大学総合生存学館）
有人宇宙活動における持続可能な循環型システム構築にくけた課題

令和5年度：

- 2023年4月号：池田武文（京都府立大学生命環境科学研究科）
宇宙における樹木の育成
- 2023年5月号：伊藤駿治（京都大学理学部）
LignoSat のミッション系開発の現状と展望
- 2023年6月号：村田功二（京都大学農学研究科）
木材の宇宙暴露試験の経過報告
- 2023年7月号：岸広登（京都大学理学部）・遠藤早織里
ISTSでの熱真空試験の報告・ISTS久留米に関して
- 2023年8月号：山敷庸亮（京都大学総合生存学館）
有人宇宙学—宇宙移住のための3つのコアコンセプト 内容紹介第一回 3つのコアコンセプトとは？
- 2023年9月号：池田隆文・遠藤早織里（京都大学宇宙木材研究室）
低圧下樹木育成プロジェクト 水分生理（植物と水との関係について）
- 2023年10月号：池田隆文・清田朋和（京都大学宇宙木材研究室）
低圧下樹木育成プロジェクト 水分生理（植物と水との関係について）2 樹木体内の水の上昇
- 2023年11月号：池田隆文・三本勇貴（京都大学宇宙木材研究室）
低圧下樹木育成プロジェクト 水分生理（植物と水との関係について）3 樹木体内における水

上昇の失敗

- 2023年12月号：土井隆雄（京都大学総合生存学館）
有人宇宙学—宇宙移住のための3つのコアコンセプト 内容紹介第二回 有人宇宙学
- 2024年1月号：鳥谷陽樹（京都大学工学部）
LignoSat EPS 班研究紹介
- 2024年2月号：桜井誠人（宇宙航空研究開発機構）
有人宇宙学 Chapter 3「空気再生・水再生・廃棄物処理」
- 2024年3月号：豊西悟大（京都大学農学部）
超小型木造人工衛星「LignoSat」のひずみ測定と地磁気測定 ミッションの現状と展望

令和6年度：

- 2024年4月号：村田功二（京都大学農学研究科）
宇宙暴露試験（ExBAS）と地上試験
- 2024年5月号：池田武文（京都府立大学生命環境科学研究科）
宇宙における樹木の育成
- 2024年6月号：加藤千晶（京都大学工学研究科）
超小型木造人工衛星「LignoSat」の電源系開発
- 2024年7月号：遠藤早緒里・三本勇樹（京都大学農学研究科）
低圧下におけるポプラの成長特性
- 2024年8月号：豊西悟大（京都大学農学部）
超小型木造人工衛星 LignoSat のミッション系開発
- 2024年9月号：三浦晴（京都大学工学部）
超小型木造人工衛星「LignoSat」の構造系開発
- 2024年10月号：豊西悟大（京都大学農学部）
LignoSat を搭載するロケット「SpX-31」について
- 2024年11月号：池田隆文（京都府立大学生命環境科学研究科）
森林でパンデミック
- 2024年12月号：河島航（京都大学工学部）
超小型木造人工衛星 LignoSat のプログラムについて
- 2025年1月号：池田隆文（京都府立大学生命環境科学研究科）
フェノロジー（生物季節）
- 2025年2月号：池田隆文（京都府立大学生命環境科学研究科）
フェノロジー（生物季節）
- 2025年3月号：間野隆寛（京都大学医学部）
超小型木造人工衛星 LignoSat の通信システムと木造筐体へのアンテナ内蔵の試み

「必要性」

本課題は以下の観点から、十分な必要性が認められる。

【科学的・技術的意義】（独創性、革新性、先導性）

本課題では世界で初めて木造人工衛星 LignoSat を開発し、宇宙空間に放出し運用を行った。木造人工衛星を開発するために、真空の木材に与える影響、放射線の木材に与える影響、さらに原子状酸素が木材に与える影響を調べ、木材が宇宙空間に壊れずに存在できることを証明した。さらに JAXA/NASA との 2 年間に及ぶ安全審査の過程で木材を人工衛星構体にするための種々の問題を解決し、JAXA/NASA の安全審査を無事通過した。LignoSat は国際宇宙ステーションから宇宙空間に放出され、世界で初めての木造人工衛星を誕生させた。これは、独創性、革新性、先導性において特筆すべき成果である。木造人工衛星の製作は金属衛星に比較して二酸化炭素の排出量を減少させるため、宇宙航空脱炭素技術等創出プログラムにふさわしい技術開発である。

【社会的・経済的意義】（産業・経済活動の活性化・高度化、国際競争力の向上、社会的価値（安全・安心で心豊かな社会等）の創出）

木造人工衛星は、さらに将来には地球低軌道を周回する人工衛星の主流になることが期待される。現在、地球軌道を周回している衛星は金属製（アルミニウム製）衛星である。これらの衛星は運用が終わると宇宙ゴミにならないようにするために地球大気圏に再突入される。その時、金属製衛星は酸素と燃焼して酸化金属（酸化アルミニウム）の微粒子を大気に放出する。年間の人工衛星打上げ数が現在の 1000 基程度であれば、酸化金属粒子による大気汚染は問題にならない。しかし、最近のインターネット衛星の出現により、年間打上げ数が 1 万機から 10 万機になる未来が実現する。年間 1 万機以上の金属製衛星が地球大気圏に再突入するようになると、酸化金属の微粒子が大気圏にばらまかれることになる。これらの酸化金属粒子は太陽光を反射させることにより、地球が太陽から受けるエネルギー量を減少させることになる。特に太陽エネルギーの減少は、人工衛星数が多い赤道上空で多くなる、そのため地球が太陽から受けるエネルギーバランスの乱れにより、重大な異常気象が発生するようになることが懸念される。また、中層圏を漂う酸化金属の微粒子はオゾン層を破壊する可能性も指摘されている。過去にはフロンガスのためにオゾン層の破壊が南極上空で起こったことが報告されたが、今回のオゾン層の破壊は地球全体で起こることが予想され、非常に重大な危機が発生する可能性がある。木造人工衛星であれば、地球大気圏に再突入した時に酸素と反応して二酸化炭素と水蒸気を作るだけであり、地球大気を汚染することはない。また、その時にできる二酸化炭素は、あらかじめ木が育っていた時に大気から吸収した二酸化炭素であり、地球大気中の二酸化炭素量を増やすということはない。

以上の観点から、木造人工衛星は地球極低軌道を周回するインターネット衛星や防災衛星ネットワークを創出するために適した人工衛星であると考えられる。木造人工衛星は、まだ、日本でしか開発・打上げが行われておらず、地球極低軌道を周回する木造人工衛星ネットワークは、世界のどこにも存在していない。木造人工衛星の開発は、さらに木材産業に宇宙開発に参入できる新しい道を切り開き、日本の森林資源の再活性化など産業・経済活動の活性化をもたらすことが期待される。さらに日本が木造人工衛星を開発することにより、国際競争力を向上させるばかりでなく、地球環境を汚さないという安全で心豊かな社会の創出に寄与する。

「有効性」

本課題は以下の観点から、十分な有効性が認められる。

【新しい知の創出】

本課題は、宇宙で木材が使えることを証明するために木造人工衛星の開発・運用及び低圧下での樹木

育成実験を実施した。木造人工衛星の開発は世界で初めての試みであり、そのために行った木材の真空暴露実験や木材の宇宙暴露実験、さらに低圧下での樹木育成実験の成果は、人類の科学にとって新たな発見であり、新しい知の創出である。また、木材が宇宙で使うことができるという事実は、人類により宇宙開発に新たな資源としての木材を提案するものであり、これからの宇宙開発を大きく変えて行く可能性を秘めている。

【人材の養成】

本課題は、学生チームが主体となって実施した課題である。木造人工衛星チームは、令和4年度は学生25名、令和5年度は34名、令和6年度は37名が所属し、延べ96名の学生が参加した。樹木育成チームは、令和4年度は13名、令和5年度は19名、令和6年度は15名、延べ47名の学生が参加した。本課題全体では、参加学生数はのべ143名に上る。特に木造人工衛星チームには、世界初の木造人工衛星打上げへの貢献が認められ、令和6年度の京都大学総長賞が授与された。これらの学生は、世界で初めての木造人工衛星の開発や低圧下での樹木育成実験に係わることによって、新しい知識を得たばかりでなく、大学や企業の研修者と一緒に仕事をすることによって、素晴らしい経験を獲得したと言える。学生チームの卒業生の進路を調べた表5-1を掲載する。本課題に参加した卒業生は、この経験を通して自分の進路を明確にすることができ、希望通りの未来へ自分の人生を進めて行く力を身に付けることができた。

表 5-1 卒業生の進路

| 年度 | 進路 | 種別 | 人数 |
|----|----|------|----|
| R4 | 進学 | 京都大学 | 6 |
| | | 他大学 | 0 |
| | 就職 | 企業 | 1 |
| | | 官公庁 | 0 |
| R5 | 進学 | 京都大学 | 10 |
| | | 他大学 | 6 |
| | 就職 | 企業 | 0 |
| | | 官公庁 | 1 |
| R6 | 進学 | 京都大学 | 10 |
| | | 他大学 | 1 |
| | 就職 | 企業 | 3 |
| | | 官公庁 | 0 |

「効率性」

本課題は以下の観点から、十分な効率性が認められる。

【計画・実施体制の妥当性】

本課題は、学生チームの活動を主体に展開することにより、費用的に非常に効率的に実践できたと考え

られる。また、木造人工衛星の開発においては、すでに超小型人工衛星の開発・運用に経験のある九州工業大学と連携することにより、九州工業大学の衛星試験設備を安価に使うことができたばかりでなく、彼らの開発した衛星システムを利用することができ、短期間で木造人工衛星の開発ができたと考える。また、今回は国際宇宙ステーションからの放出を選択したことで、JAXA 及び NASA との安全審査を実施することができ、超小型人工衛星を開発する上で貴重な指摘を受けることができた。また、大学宇宙工学コンソーシアム (UNISEC) の J-CUBE プログラムに応募・選考されたことにより、人工衛星打上価格が非常に安く抑えることができたことも特筆される。

また、木造人工衛星の開発では、アマチュア無線の衛星通信を専門とする教員及び宇宙探査船の安全審査の経験を持つ教員が参加されたこと、樹木育成実験の実施では樹木生理の専門家である教員の参加があり、学生指導が的確に行われたことも、今回の計画・実施体制が妥当であったことの証明である。

ExBAS の木材の解析では、岡山大学惑星物質研究所と共同研究契約を結んだ。そのため惑星物質研究所の分析機器を使って宇宙暴露された木材の分析を行うことが可能になった。

(2) 成果

「アウトプット」

① 木造人工衛星の開発

木造人工衛星 1 号機 LignoSat フライトモデルを完成した。LignoSat は計画通り宇宙空間に放出された。世界ではじめて木造人工衛星を誕生させた。LignoSat は約 4 カ月間地球周軌道を周回し、木造人工衛星が壊れずに宇宙に存在できることを証明した。木材は電磁波に対して透明であることから、通信用アンテナを木造構体内に設置するためにパッチアンテナを設計・製作し、木板パネルを通して通信実験を実施した。パッチアンテナは、木板パネルを通して電波の減衰なく通信ができることを明らかにした。パッチアンテナを内部に設置できる木造人工衛星 2 号機 (2 U) エンジニアリングモデル (EM) を設計・製作した。木造人工衛星 2 号機 EM の振動試験を実施し、木造人工衛星 2 号機の設計が正しいことを確認した。木造人工衛星を開発している組織は、日本では京都大学だけである。世界ではフィンランドのアルト大学が木造人工衛星 WISA Woodsat を開発している。WISA Woodsat は京都大学での木造人工衛星開発のニュースを聞いて、フィンランドの合板会社 UPM Plywood が開始した木造人工衛星開発プロジェクトである。2021 年の打上げをめざしていたが、通信用周波数を獲得することができず、打上げは延期された。現在の予定では 2026 年の打上げと聞いている。LignoSat の開発・運用及び木造人工衛星 2 号機の開発は論文として学会誌等に発表している：

1. Hiroto KISHI, et al., Development of Wooden Cubesat - LignoSat, Journal of Evolving Space Activities Vol.2, Article No. 218, 2024.
2. 河島航, et al., 3N06 超小型木造人工衛星 LignoSat のプログラムについて, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2024.
3. 野間隆寛, et al., 3N07 超小型木造人工衛星 LignoSat の通信システムと木造筐体へのアンテナ内蔵の試み, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2024.
4. 鳥谷陽樹, et al., 3N08 超小型木造人工衛星 LignoSat の電力システム, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2024.
5. 木村拓人, et al., 3N05 超小型木造人工衛星の構造, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2024.
6. 辻廣智子, et al., 3F16 世界初の木造人工衛星 LignoSat n お開発における教育活動, 第 68 回宇宙

科学技術連合講演会, 2024.

7. Saori ENDO, et al., The Utilization of Wood for a CubeSat Structure, 34th International Symposium on Space Technology and Science, June, 2023, Kurume Japan.

② ExBAS の木材の解析

国際宇宙ステーション日本実験棟船外実験プラットフォームで 2022 年 3 月から 12 月まで木材試験体を約 10 ヶ月間暴露し、そのマクロ的・ミクロ的分析を実施した。回収した木材試験体をマクロ的に調べて見ると、外観は全く変わっておらず重量変化もほとんど無かった。暴露試験前は、私たちは過去の NASA が行った宇宙暴露試験結果から、原子状酸素によって木材表面は 1 年間で約 1 ミリ程度削られてしまうだろうと予想していたが、それは全く外れた。そのため何故木材は原子状酸素に浸食されなかったかを調べるためにミクロ分析を岡山大学惑星物質研究所にて行った。その結果、原子状酸素は木材中の炭素原子と二重結合して木材内に取り込まれたことを見出した。この現象をさらに解明するために、再び木材試験体の宇宙暴露実験を行いたいと考えている。ExBAS 木材解析の論文は学会誌に発表されている：

1. Koji MURATA, et al., Space exposure test of hardwood specimens in the International Space Station, Journal of Wood Science, 2024.

③ 樹木育成実験系の確立と実験実施

2022 年度に計画通り低圧下での樹木育成実験装置 2 基を製作し、2023 年度より低圧下での樹木育成実験を 4 基体制で実施した。1 回の実験で 1.5 月から 2 ヶ月かかるため、実験装置の数が 2 倍に増えることにより十分な数の樹木育成データが低圧環境実験で揃うようになり、統計処理を行うことが可能になった。そのおかげで、1.0 気圧から 0.1 気圧までの樹木育成の特性が明らかになった。これらの実験結果は世界で初めての成果である。LMA (葉の乾燥重量/葉面積) は、低圧区と対照区では両区とも若い葉ほど有意に大きくなり、葉が成熟すると差が小さくなること、そして、1 気圧区の葉より低圧区の葉の方が LMA は有意に大きいことがわかった。T/R 比 (地上部乾燥重量/地下部乾燥重量) と 同化部/非同化部比 (葉乾燥重量/茎・根乾燥重量) は、0.75 気圧から 0.1 気圧の低圧下でのポプラの T/R 比 と 同化部/非同化部比 と 1 気圧下のそれとの間には差は認められない。実験結果をまとめると、成長量 (乾重増加割合) と成長特性 (TR 比、同化器官/非同化器官) の結果から、低圧下 (0.1 気圧まで) と大気圧 (1 気圧) の間で同様の物質生産を行うことが期待される。葉の形態的特徴として、展開後、低圧下 (0.1 気圧まで) の葉の LMA は 1 気圧のそれより大きく、小型で厚い葉になることがわかった。成熟するにつれて LMA の差は縮まることが明らかにされた。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動を計画通り実践した。専門教育プログラムである「有人宇宙学実習」と「有人宇宙学」講義を実践した。特に「有人宇宙学実習」では、京都大学芦生研究林において「宇宙森林実習」を行い、「有人宇宙学」講義では、新しく「宇宙木材工学」を導入し、宇宙での森林形成や木材利用の意義が議論された。木造人工衛星の開発及び低圧下での樹木育成実験は、学生チームによって実施された。学生チームとの情報交換と問題解決のためにほぼ毎月 1 回の設計会議を実践した。また、新しく樹木育成実験に参加する学生のために、樹木育成セミナーと樹木育成実験データの解析のために、年 2 回のセミナーを実施した。宇宙木材利用の一般の人々への教育啓蒙活動として、毎年 1 回、宇宙木材利用シンポジウムを開催すると同

時にニュースレターを毎月発行し、日々の活動を社会に広める活動を行った。

「短期アウトカム」 (令和7年10月末時点)

① 木造人工衛星の開発

木造人工衛星1号機 LignoSat を開発し、宇宙に打ち上げることができた。木造人工衛星は宇宙でも壊れずに存在できることを証明したことは、今後の木造人工衛星開発に向けた大きな成果である。また、JAXA/NASA との安全審査 II/III を通過できたことは、木造人工衛星が JAXA/NASA の通常の安全審査を通ることができることを証明したことになり、今後の木造人工衛星開発にとって大きな一歩となった。

② ExBAS の木材の解析

宇宙空間に暴露された木材試験体が原子状酸素や紫外線や放射線の影響受けなかったことは、今後の木造人工衛星開発において、大きな利点となる。今後は、さらに多くの樹種を使って木造人工衛星を作りたいと考えている。

③ 樹木育成実験系の確立と実験実施

低下での樹木育成実験装置2基を製作し、計4基での低圧下での樹木育成実験を実施した。1.0気圧から0.1気圧までの十分な数の実験データの解析により、低圧下での樹木の生育特性が明らかになった。基本的に樹木は0.1気圧まで1気圧時の生育と大きな違いが無いことが明らかになった。私たちの実験目標は火星(大気圧:0.007気圧)での樹木育成方法を見つけるのが目的なので、今後、さらに低圧下での育成実験を行いたいと考えている。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

宇宙での木材利用に関して木造人工衛星1号機 LignoSat の開発及び宇宙空間への放出ができたことは、非常に大きな成果となった。学会での発表でも非常に注目を浴びることになった。

(3) 今後の展望(長期アウトカム)

本課題では、木造人工衛星1号機 LignoSat を開発し、宇宙空間に打ち上げた。これにより世界初の木造人工衛星を誕生させた。LignoSat は地上との通信はできなかったが、木造人工衛星が宇宙空間に壊れずに存在できることを証明した。また、国際宇宙ステーションで宇宙に約10ヵ月間暴露された木材試験体の分析により、木材が宇宙でほとんど変化しないことが明らかになった。これらの結果を受けて、現在、私たちは木造人工衛星の実用化を行おうと計画している。私たちは木造人工衛星を使って地球低軌道を周回する防災衛星ネットワークを作りたいと考えている。木造人工衛星は運用が終わって地球大気圏に再突入しても地球大気圏を汚さない利点を持っている。また木材は電磁波に対して透明であるので、通信用アンテナを木造構体内部に持つことができる、これは人工衛星の空気抵抗を小さくすることに役立ち、地球低軌道をより長期間回ることのできる木造人工衛星を作ることが可能になる。地球低軌道を周回する木造人工衛星の数は数千体になることが予想される。その製作のために私たちは、京都大学発ベンチャー企業を来年に設立する準備を進めている。

本課題では、低圧下での樹木育成実験も行っている。将来、人類は地球から宇宙に広がる社会を構築し

ていくことが予想される。即ち、月や火星に多くの人々が暮らす時代がやって来るだろう。その時、彼らの住む家はどうやって作るのだろうか。地球上で行ったことが繰り返されると考えれば、当然、月や火星で樹木が生え、木材が利用されなければならない。そのような未来をめざして、私たちは樹木を月や火星で育成する方法を今から見つけたいと考えている。人類が月や火星で樹木を育成する方法を見つけることができれば、人類がさらに遠くの宇宙に進出した時に、どのように家を造る資材を調達するのかという問題を解決することができる。即ち、樹木の種をまき、森を作れば良いのである。人類が宇宙で樹木を育成する方法を見つけることができれば、人類は永遠に宇宙に進出することが可能になる。

8. 評価点

A

評価を以下の5段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

本事業は、宇宙材料としての木材利用の探究を目的に、木造人工衛星の開発・打ち上げ、木材の宇宙暴露試験、低圧下における樹木育成実験を世界で初めて実施した独自性のある取り組みである。

従来の人工衛星と比較して二酸化炭素の排出量を減少させることが可能な木造人工衛星を世界で初めて開発・運用した。これは、木材衛星の実用化の成功と宇宙における樹木育成の道を拓いた、新規性と獨創性を持った取り組みであり、日本発で世界にインパクトを与えることができる可能性があると考えられる。

多岐にわたる計画内容は全体として予定通り実施され、通信不能など一部未達はあったが、全体としてしっかり成果が生み出されていると思われる。アウトカムについても、脱炭素技術の創出という目的に対して、高い成果を生み出している。宇宙における木材利用の可能性を世界に先駆けて実証するとともに、今後の人類の宇宙開発の進め方に新たな方向性を示した点が高く評価される。人材目標の観点からみても、木造人工衛星開発チーム（延べ96名）と樹木育成学生チーム（延べ47名）の合計143名の学生が主体的にプロジェクトに参加し、木造人工衛星学生チームは、その貢献が認められ京都大学総長賞を受賞するという成果が創出されている。また、後継衛星の打ち上げ計画や、大型木造人工衛星開発に向けた民間共同研究の実施など、一定の短期アウトカムは創出されている。発想、革新性において優れている。

しかしながら、本来の目的である木材利用を推進し、宇宙木材産業を構築するにどれだけ貢献できる成果が得られたかについては、提案されている目標指標が「実施」、「調査」、「議論」、「チーム作り」というやることを定性的に述べただけであり、設定指標と成果の関係がまとめて示されていないため、定量的目標に基づき達成できているかは十分確認できない。

技術的にも、木造人工衛星の通信ができず失敗に終わっており、その原因も確定までには至っていないこと、宇宙暴露実験についても木材表面の撮像調査で劣化がないと言えるか定量性のある結果が示されていないこと、低圧環境下での樹木生育実験の意義・価値が明確でないことなど、今後につながる成果が

出たとは言い難い点が多々ある。LignoSat は 1U サイズなので木材の利用が可能だったのだろうと思うので、木材が適用できる衛星規模を把握すること、また、規模が大きい衛星への適用方法などの検討が重要と考える。なお、大目的として掲げたカーボンニュートラル貢献について、世界の CO2 排出量は 370 億トンで、年間 1 万機時の削減で 384 トンは、効果として微細であると思われるが、ヒアリングで今後の衛星の大型化も考えているとの回答もあり、そこに期待したい。本プログラムにおいてはあくまで「開発すること」に注力されており、どのように社会実装していくのかその手段についてはほぼ言及されていない。国内発表は多いが国際的な学会発表がない点、企業との連携の成果が示されていない点が不十分である。組織/資金/人的体制の継続性に関する具体的な提示が無く、実現性に課題が残されているが、ヒアリングでは会社設立等の計画も示され今後期待したい。

また、人材育成についても本事業だけでなく京都大学の他の事業との混同やチーム員の卒業先も一般的であるなど本事業の成果が不明確な点が残る。卒業生進路に関しては進学が中心であり、社会への貢献に向けて企業や官公庁就職に繋がって欲しかった。

以上により、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- 今後の大きな展開につながる 2 号機の打ち上げが実現すること。
- 成果の定量的/客観的評価の提示、卒業生の社会進路拡充、会社設立等の組織/資金/人的体制の継続と連携体制の形成に至るロードマップの具体化と実践、機体大型化によるカーボンニュートラル効果の拡充などを解決するべく、継続してプログラムの社会適用に取り組んで、より充実したアウトカム成果の創出につなげること。
- 木造人工衛星 1 号機は地上との通信が出来ず当初目標を達成できなかったのは残念であったが、2 号機では実施した FTA を踏まえて計画が成功すること。
- 木造衛星について世界に広がり、将来的には宇宙基地の自律的な建造につながること。
- 有効性を強調できる木材が適用できる衛星規模の検討や、規模の大きい衛星への適用方法のガイドラインを検討すること。
- 新規宇宙産業を支える人材育成の観点から、参加する学生が「チームワークやキャリア意識の向上」といった非認知能力を実践を通じて獲得できるだけでなく、そうした能力を意識的かつ定量的に測定・育成するための教育プログラムを組み込むこと。
- Starlink や LE0 の衛星が軌道上衛星のほとんどを占めつつある未来において、木造人工衛星をどのように衛星業界のスタンダードにしていくのか、そのビジョンや計画を持って活動を継続すること。