

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

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

委託業務成果報告書

令和5年5月31日

国立大学法人京都大学

本報告書は、文部科学省の令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人京都大学が実施した令和4年度「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」の成果を取りまとめたものです。

目次

はじめに	4
① 木造人工衛星の開発	6
(A) 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システム	6
(1) アンテナシステム概要	6
(2) UHF (430MHz) アンテナシステムの基礎実験	6
(3) パッチアンテナの設計	10
(i) UHF430MHz パッチアンテナの設計	10
(ii) 周波数 2.45GHz パッチアンテナの設計	10
(iii) 周波数 2.45GHz パッチアンテナの製作と試験	13
(B) 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画の策定及び準備	14
(1) 地磁気測定システム	14
(2) 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画	16
(C) 木造人工衛星 2 号機 の概念設計	17
(1) 木造人工衛星 2 号機概要	18
(i) ミッション定義	18
(ii) 構造系	19
(iii) バスシステム系	21
(iv) ミッション系	23
② ExBAS の木材の解析	26
(A) ExBAS 木材試料の回収と保管	26
(1) ExBAS 実験概要	26
(2) ExBAS 試料マクロ分析結果	29
(i) 質量分析	29
(ii) 表面色測定	29
(iii) 表面色測定結果	32
(B) 木材の真空暴露実験	33
(1) 木材の真空暴露実験概要	33
(2) 木材の真空暴露実験結果	34
(i) 実験結果：相対ヤング率	34
(ii) 実験結果：相対寸法変化	36
③ 樹木育成実験系の確立	39
(A) 低圧下における樹木育成実験系の製作	39

(B) 低圧下における樹木育成実験環境の構築	41
(1) 湿度校正実験	41
(2) CO ₂ 校正実験	42
(C) 低圧下におけるポプラ育成実験	43
(1) 育成実験概要	43
(2) 育成実験結果	44
(i) 樹高の変化	44
(ii) クロロフィル蛍光	45
(iii) LMA (葉の乾燥重量/葉面積)	45
(iv) T/R 比	45
④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進	47
(A) 有人宇宙学講義	47
(1) 有人宇宙学講義概要	47
(2) 有人宇宙学演習	51
(B) 木造人工衛星設計会議	51
(1) 木造人工衛星設計会議概要	51
(2) 木造人工衛星設計会議内容	52
(i) 第 26 回設計会議：2022 年 10 月 11 日	52
(ii) 第 27 回設計会議：2022 年 11 月 5 日	53
(iii) 第 28 回設計会議：2022 年 12 月 6 日	53
(iv) 第 29 回設計会議：2023 年 1 月 10 日	54
(v) 第 30 回設計会議：2023 年 2 月 61 日	54
(vi) 第 31 回設計会議：2023 年 3 月 11 日	55
(C) 樹木育成ゼミ	55
(D) 第 1 回宇宙木材利用シンポジウム	56
(E) Spaceology Newsletter	57
(F) 学会・講演活動	58
(G) 広報活動（新聞記事）	59
総括	60
参考資料 1 パッチアンテナ設計書：星川龍希	62
参考資料 2 木造人工衛星 1 号機（LignoSat）の構造：仲村匡司	68
参考資料 3 宇宙空間での木材の物性評価：村田功二	71
参考資料 4-1 低圧下樹木育成実験用計測センサ制御プログラム	75

参考資料 4-2	低圧下樹木育成実験用真空度制御プログラム	81
参考資料 5-1	有人宇宙学講義シラバス	84
参考資料 5-2	有人宇宙学講義：2022/10/05：土井隆雄	86
参考資料 5-3	有人宇宙学講義：2022/11/16：村田功二	89
参考資料 6-1	EPS_2022 年 9 月活動報告書_20221011_v1.0:2022/10/11	95
参考資料 6-2	COMM_2022 年 10 月活動報告書_20221115_v1.0:2022/11/15	99
参考資料 6-3	STRUC_2022 年 11 月活動報告書_20221206_v1.0:2022/12/06	108
参考資料 6-4	EPS_2023 年 1 月活動報告書_20230207_v1.0:2023/01/10	113
参考資料 6-5	MISSION_2023 年 2 月活動報告書_20230207_v1.2:2023/02/07	119
参考資料 6-6	CDH_2022 年 3 月活動報告書_20230314_ver1.0:2023/03/14	127
参考資料 7	Arduino 講習会 #1：清田朋和	137
参考資料 8-1	第 1 回宇宙木材利用シンポジウムプログラム：2023 年 3 月 22 日	141
参考資料 8-2	第 1 回宇宙木材利用シンポジウム講演：曾束元喜	142
参考資料 8-3	第 1 回宇宙木材利用シンポジウム講演：細辻一	144
参考資料 8-4	第 1 回宇宙木材利用シンポジウム講演：池田武文	146
参考資料 8-5	第 1 回宇宙木材利用シンポジウム講演：遠藤早織里・大森香蓮	149
参考資料 8-6	第 1 回宇宙木材利用シンポジウム講演：中嶋一郎	151
参考資料 9-1	Spaceology Newsletter：2022 年 10 月号	155
参考資料 9-2	Spaceology Newsletter：2022 年 11 月号	158
参考資料 9-3	Spaceology Newsletter：2022 年 12 月号	163
参考資料 9-4	Spaceology Newsletter：2023 年 01 月号	167
参考資料 9-5	Spaceology Newsletter：2023 年 02 月号	171
参考資料 9-6	Spaceology Newsletter：2023 年 03 月号	176
参考資料 10-1	学会資料：2022/11/01：福王悠星他	180
参考資料 10-2	学会資料：2202/11/01：筒井涼輔他	182
参考資料 10-3	学会資料抜粋：2022/11/17：村田功二	184
参考資料 10-4	学会資料抜粋：2023/03/14：三本勇貴他	186
参考資料 10-5	学会資料抜粋：2023/03/14：村田功二他	188
参考資料 11-1	報道記事：ハウジングトリビューン 2022 年 11 月 25 日：宇宙での木材利用 の可能性の検証	190
参考資料 11-2	報道記事：毎日新聞 2023 年 1 月 13 日：過酷な宇宙に耐えられる？ 「木」で作る人工衛星の可能性	191
参考資料 11-3	報道記事：毎日新聞 2023 年 1 月 21 日：木造人工衛星	194
参考資料 11-4	報道記事：毎日新聞 2023 年 1 月 23 日：木造人工衛星 宇宙に挑む ...	195
参考資料 12	学会等発表実績	196

はじめに

本事業「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」の目的は、人類が宇宙に展開するための新しい材料・資源として、宇宙における木材利用の可能性を探求すると同時に、理に適った利用法を創出することである。本事業では、宇宙・木材のそれぞれの専門家が連携してチームを作り、宇宙空間で持続再生可能な資源として木材が利用できるのかという問いに対して、宇宙空間が木材の物性や微細構造に与える影響を調べることで、木材の宇宙空間での利用の可能性を探究する。本事業の活動は主に4つである。第1の活動として、現在開発中の木造人工衛星1号機の運用を行い、木造構体の特性を生かした2号機の開発に着手することによって、宇宙における木材の利用法を提唱する。第2に国際宇宙ステーション(ISS)において木材の宇宙環境曝露実験を実施し、宇宙環境、特に真空・原子状酸素・宇宙放射線が木材に与える影響を、物性及び細胞壁微細構造の変化という観点から調べ、木材利用の実現可能性を探求する。第3に宇宙での木材供給を目指して、低圧下における樹木の育成実験を実施する。この実験では、樹木の生長特性と大気圧力の関係を明らかにする。本データを基に低圧環境下での樹木育成法が開発されれば、低圧環境となることが予想される月面や火星での樹木の育成を可能とするための研究へと繋がる。第4に宇宙における木材利用についての研究を通じた教育啓蒙活動を行い、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。

令和4年度の業務計画及び業務結果を以下に示す。

【令和4年度業務計画】

① 木造人工衛星の開発

- a. 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システムの基礎実験を行う。
- b. 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画を策定するとともに、基礎実験実施に向けて当該計画に基づいた準備を行う。
- c. 木造人工衛星2号機について、アンテナシステムや構造系、電源系、通信系など人工衛星システム全体について検討し、概念設計を完了する。

② ExBASの木材の解析

- a. 国際宇宙ステーション船外曝露実験(ExBAS)の木材試料を回収し、宇宙空間における高真空・原子状酸素による木材物性のマクロ的变化を調べる。衝突する原子状酸素の速度の影響も評価する。
- b. 地上における木材の真空曝露実験を継続実施する。

③ 樹木育成実験系の確立

- a. ポプラ(Populus alba)を低圧環境で育成するための実験系を2式製作する。
- b. 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確立する。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

- a. 教育活動として定期的な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を開催する。
- b. 有人宇宙活動について学ぶことを目的とした専門教育プログラム「有人宇宙学」(講義)を2022年度後期に実施する。
- c. 啓蒙活動として宇宙木材利用シンポジウムを開催する。

【令和4年度業務結果】

① 木造人工衛星の開発

- a. 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システムの基礎実験を行った。
- b. 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画を策定するとともに、基礎実験実施に向けて当該計画に基づいた準備を行った。
- c. 木造人工衛星2号機について、アンテナシステムや構造系、電源系、通信系など人工衛星システム全体について検討し、概念設計を完了した。

② ExBASの木材の解析

- a. 国際宇宙ステーション船外暴露実験（ExBAS）の木材試料を2022年12月に回収し、宇宙空間における高真空・原子状酸素による木材物性のマクロ的变化を調べた。
- b. 地上における木材の真空暴露実験を2022年10月から2023年3月まで継続実施した。

③ 樹木育成実験系の確立

- a. ポプラ（*Populus alba*）を低圧環境で育成するための実験系を2式製作した。
- b. 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の試験を行った。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

- a. 教育活動として定期的な木造人工衛星の設計会議を6回及び樹木育成に関するセミナーを5回開催した。
- b. 有人宇宙活動について学ぶことを目的とした専門教育プログラム「有人宇宙学」（講義）を14回行い、樹木・木材利用に関連した演習を実施した。
- c. 啓蒙活動として宇宙木材利用シンポジウムを2023年3月22日に開催した。

本事業により人類が宇宙に展開するための新しい材料・資源として、宇宙における木材利用の可能性が明らかになり、宇宙における新しい木材の利用法及び宇宙におけるカーボンニュートラル事業創を創出することができる。

① 木造人工衛星の開発

(A) 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システム

(1) アンテナシステムの概要

木造人工衛星 2 号機は超小型衛星と呼ばれる 1 辺が 10 センチの立方体構造の 1U 又は 1U が 2 個繋がった構造の 2U を考えることにする。木造人工衛星の大きな特徴はその木造構体であり、木材は電波を透過するためアンテナ設置場所を衛星の外部だけでなく衛星内部にもできることである。超小型衛星に搭載される通信基板は、通常アマチュア無線周波数帯の超短波 (Very High Frequency: VHF) 或いは極超短波 (Ultra High Frequency: UHF) 帯を使っている。木造人工衛星 2 号機では最終的に構体内部に設置する事ができるアンテナ形式を決定することをめざすが、まず、木造人工衛星 1 号機 (LignoSat) で使用する予定の UHF 帯 (435MHz) の周波数を使って各種アンテナ試験を行うことにする。

LignoSat で使う UHF 帯 (435MHz) の波長は 70cm と長いため、アンテナはダイポールアンテナとなり円形に畳んでの収納となる。そのため衛星が宇宙空間に放出後にアンテナ展開が必要である。アンテナ展開が出来ない場合はその後の衛星運用が開始できないリスクが常にある。木造人工衛星 2 号機では宇宙空間に展開する必要のない内蔵型通信アンテナを作ること、人工衛星の運用信頼性を上げるために非常に意義があることになる。

(2) アンテナシステムの基礎実験

(i) UHF (430MHz) アンテナの基礎実験

九州工業大学の電波暗室を借用して UHF (430MHz) のダイポールアンテナエレメント長の、目的周波数での最適の長さの測定とアンテナの電波輻射パターン測定を実施した。

【アンテナ長決定試験】

A) 電波暗室で VNA (Vector Network Analyzer) と ANT 基板を同軸ケーブルで接続し S_{11} 値を計測する。

B) アンテナを少しずつ切断し S_{11} 値が LignoSat で使用する 435MHz 帯の目的周波数で最小値をとり且つ -10dB 以下になるようなアンテナ長をさがす。

図 1-1 に九州工業大が開発した BIRDS-3 衛星エンジニアリングモデル (EM 構体) での測定結果を示す (参考文献 1)。

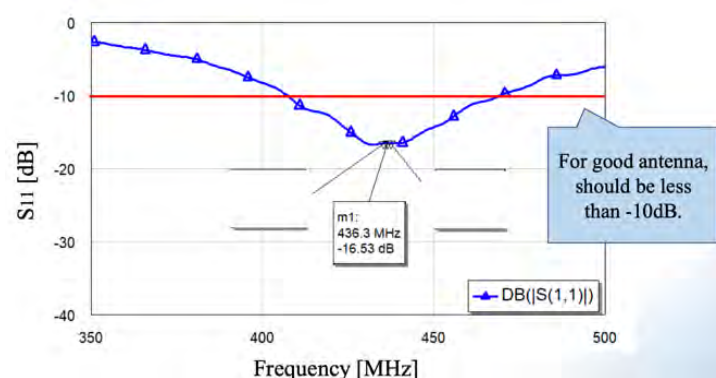


図 1-1 最適なアンテナ長での各周波数における S_{11} 値

S_{11} をはじめとした S パラメータは入射波・反射波・透過波の関係を表すものである。 S_{11} は入力される a_1 のうち透過せずに反射し b_1 として出力されてしまう割合を意味するので小さい方が良い (図 1-2)。

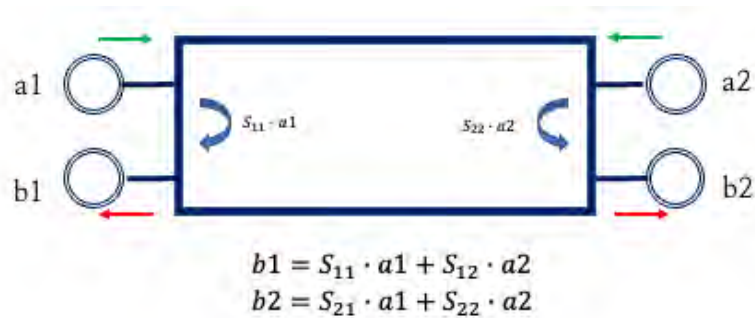


図 1-2 S パラメータの関係図

LignoSat 用 UHF 通信基板とダイポールアンテナ基板を使った実際の測定結果を図 1-3 に示す。図 1-3 の M1 の点が目的周波数である。S11 の最良点は M1 の少し低い周波数で有るが M1 の点の S11 の値は-30dB 以上となっており、基準値の-10dB を十分にうわまっているのでこのアンテナ長で十分よいことになる。決定したダイポールアンテナ長は 1 辺が 185 ミリであった。ダイポールアンテナは 2 辺からなり、その 2 辺間隔は 3 ミリであることから、ダイポールアンテナ長は 373 ミリと決定した。

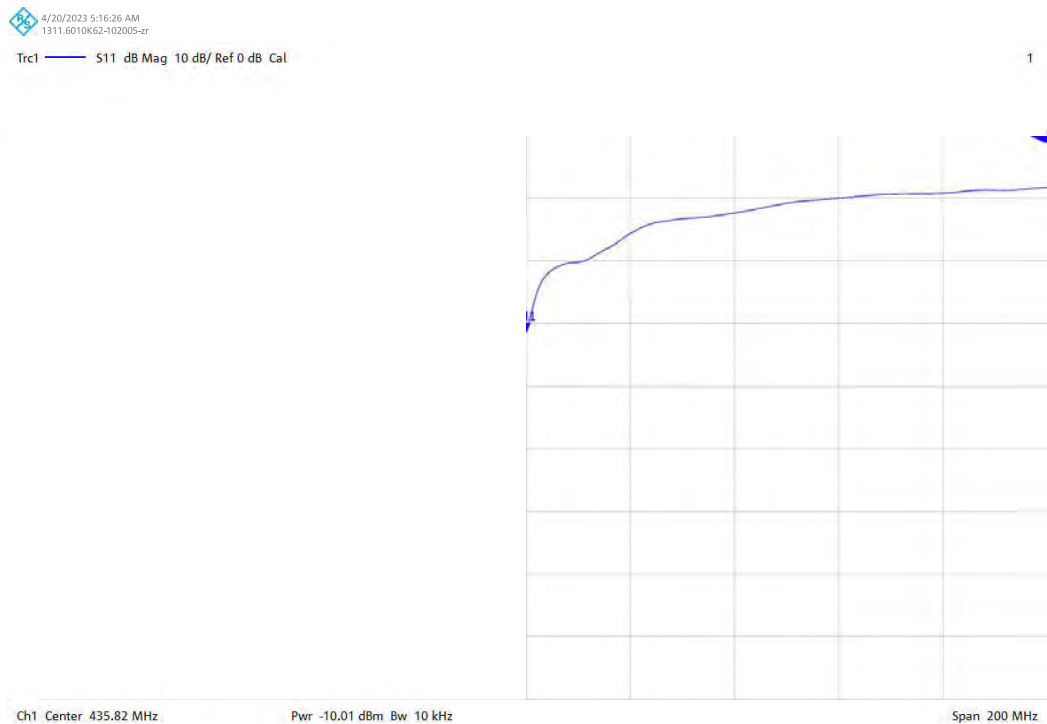


図 1-3 LignoSat ダイポールアンテナの S₁₁ 計測値

【アンテナ放射指向性試験】

A) アンテナ放射指向性試験では、図 1-4 のように衛星本体（回転台の上に置く）とダイポールアンテナを配置し、それぞれ同軸ケーブルで接続する。このとき求めたい衛星のアンテナの利得 G (ANT) の値は

$$G (ANT) = P (RX) - P (TX) + L1 + L2 + L (PATH) - G1$$

で表される。ここで P (TX) はシグナルジェネレータが出力する送信電力であり、P (RX) はスペクトラムアナライザでの受信電力である。L1 はシグナルジェネレータとダイポールアンテナ

ナ間の消費電力、L2 は衛星とスペクトラムアナライザ間の消費電力、L (PATH) はダイポールアンテナから衛星までの空間ロス、G1 はダイポールアンテナの利得である。P (RX) 以外は事前に求められる値であり

$$G(\text{ANT}) = P(\text{RX}) + (\text{定数})$$

となるので、衛星のアンテナの利得を求める事ができる。

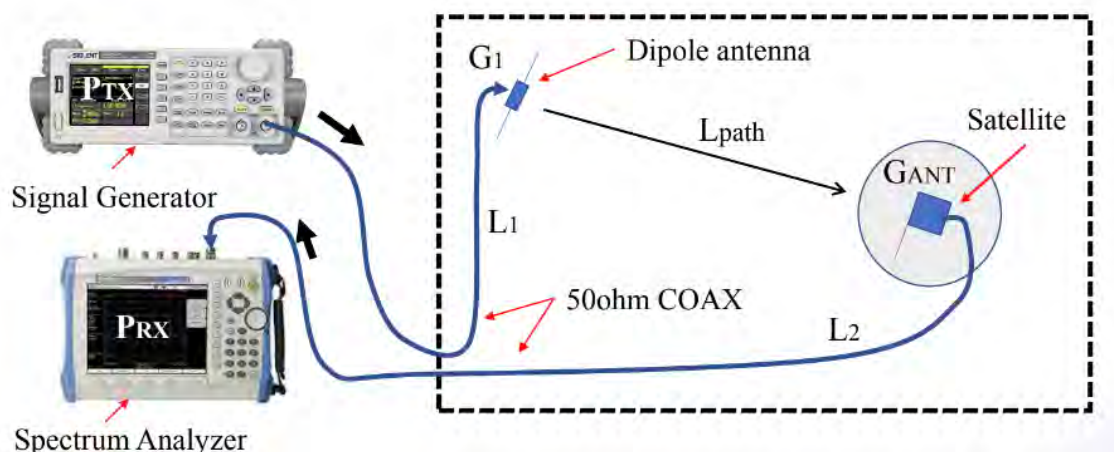


図 1-4 アンテナ放射指向性試験機器配置図

B) 測定方法

人工衛星のダイポールアンテナにシグナルジェネレータからの出力をいれ、回転台を 360 度回転させながら全方向の利得の大きさを標準ダイポールで測定する。衛星を置く面を変えて垂直方向、水平方向両方の放射指向パターンを測定する。水平面、垂直面をそれぞれ H-plane、E-plane と表記し、以下の図 1-5 のように座標軸と対応させる。

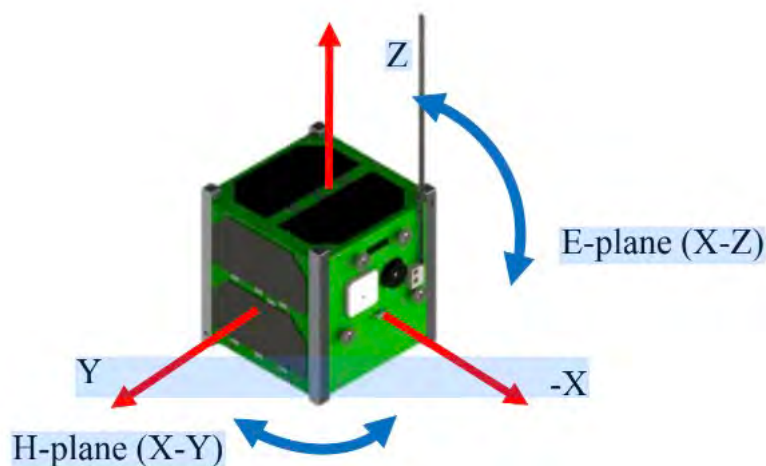


図 1-5 E-plane と H-plane

次に図 1-6 のように人工衛星を置き、赤矢印の方向に回転させる。

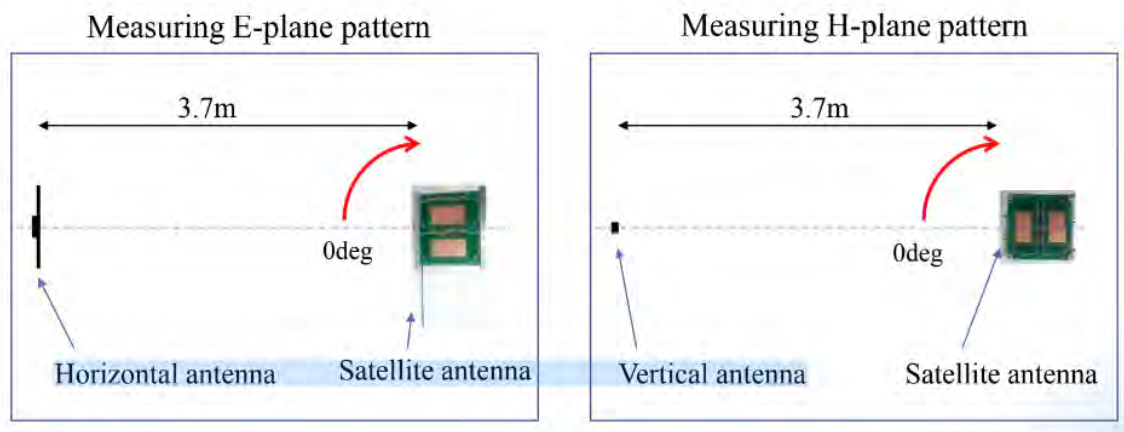


図 1-6 放射特性試験図

次に利得を確認する。ダイポールアンテナの放射パターンは以下の図 1-7 のような形が理想的とされている。よってこれに近い形が得られると十分にアンテナが機能していることがわかる。

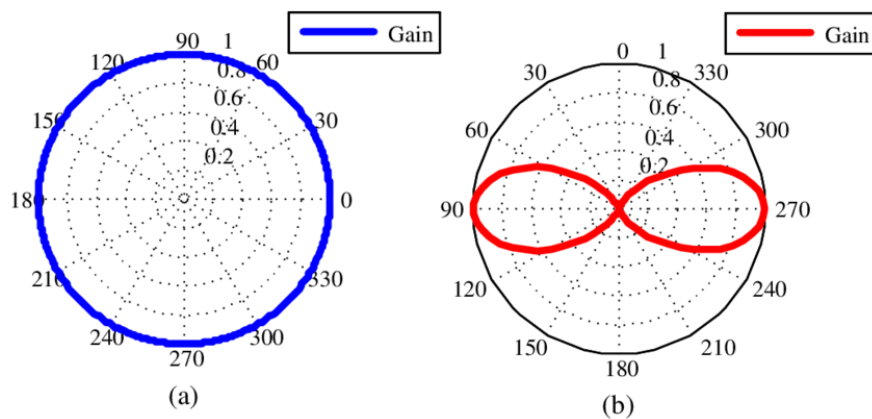


図 1-7 (a) H-plane (b) E-plane

LignoSat のダイポールアンテナの実測結果を図 1-8 に示す。実測のアンテナの輻射パターンは、H-plane では円形となり、E-plane では水平 8 の字型となりほぼ理想的な形とほぼ同じで有る事を確認出来た。

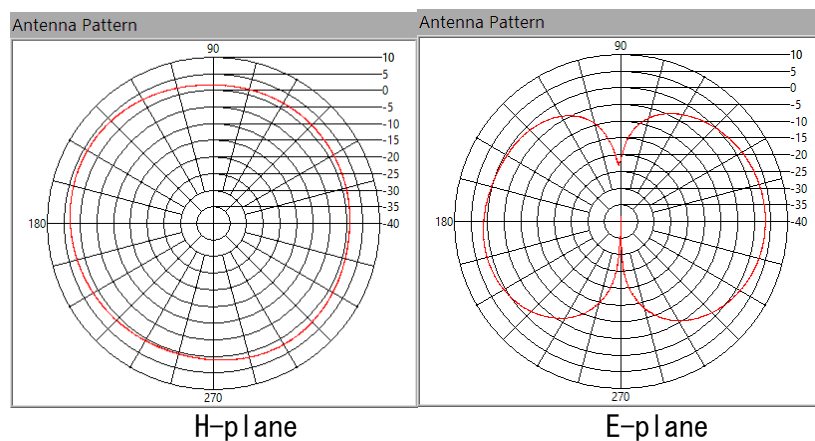


図 1-8 LignoSat 実測結果

(3) パッチアンテナの設計

(i) UHF430MHz パッチアンテナの設計

木造人工衛星 2 号機では、通信アンテナは木造構体中に内蔵することを計画している。LignoSat のようなダイポールアンテナでは全長が 373 ミリとなり、木造人工衛星 2 号機内部に内蔵することはできない。そのため展開機構がいらぬ正方形のパッチアンテナを検討することにする。正方形パッチアンテナのアンテナ面の一边を L 、中心から給電点までの距離を x 、用いる基板の誘電率は ε_r とし、共振周波数を f 、光速を c とすると、次の式が得られる。

$$f = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1)$$

式(1)は方形パッチアンテナで用いられる共振周波数を決める式である。式(1)を変形し、波長を $\lambda = c/f$ とする、正方形 1 辺の長さ L は次式で求めることができる。

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

UHF (430MHz) の波長 λ を代入すると、パッチの直径 L が 274mm、周囲の誘電体および裏面のグラウンドは 450mm 四方、給電点の位置は中心から 40mm になる (図 1-9)。このパッチアンテナでは 1 辺 10 センチの木造人工衛星 2 号機の木造構体内には搭載できないことが判明した。

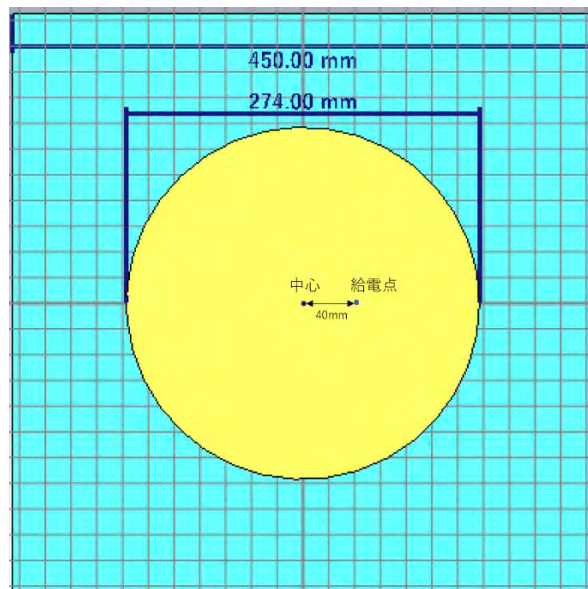


図 1-9 UHF430MHz のパッチアンテナ設計図

(ii) 周波数 2.45GHz パッチアンテナの設計

UHF 周波数帯のパッチアンテナでは木造人工衛星 2 号機に内蔵することができない。式(2)からわかるようにパッチアンテナの長さは電波波長の長さに比例することより、パッチアンテナを小型にするためにはより高い周波数帯の電波を使えば良いことがわかる。そのためアマチュア無線周波数帯のさらに高い周波数帯の 2.400-2.450GHz 帯の電波を使ってパッチアンテナを再設計することにした。

周波数 2.45GHz の設計計算結果から、パッチアンテナの半径が 23.2mm、給電点の位置は中心から 5.9mm のときが最も反射係数が良いことが判明した。周波数 2.45GHz のパッチアンテナ設計図を図 1-10 に示す。その結果、このアンテナは木造人工衛星 2 号機に搭載可能であることが判明した。

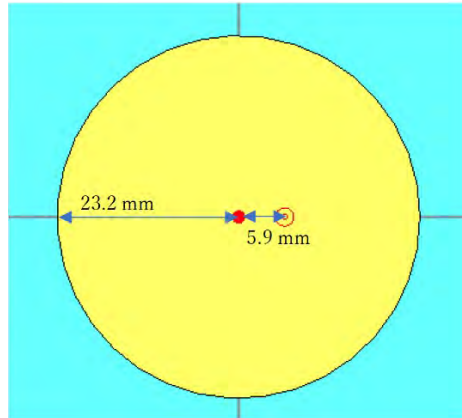


図 1-10 周波数 2.45GHz のパッチアンテナ設計図

周波数 2.45 GHz の波長は 122 mm であり、使用する基板の誘電率は $\epsilon_r = 2.16$ である。半径を R として式 (2) に $L = 2R$ を代入する。

$$2R = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

$$= 41.5 \text{ mm} \quad (4)$$

よって半径 $R = 20.8 \text{ mm}$ となる。よって半径が 20.8 mm 付近で 2.45 GHz が共振する。CST Studio Suite において電磁界シミュレーションを行い、パッチ半径および給電点の位置を調整した。その結果、パッチの半径が 23.2 mm、給電点の位置は中心から 5.9 mm のときが最も反射係数がよかった（図 1-11）。

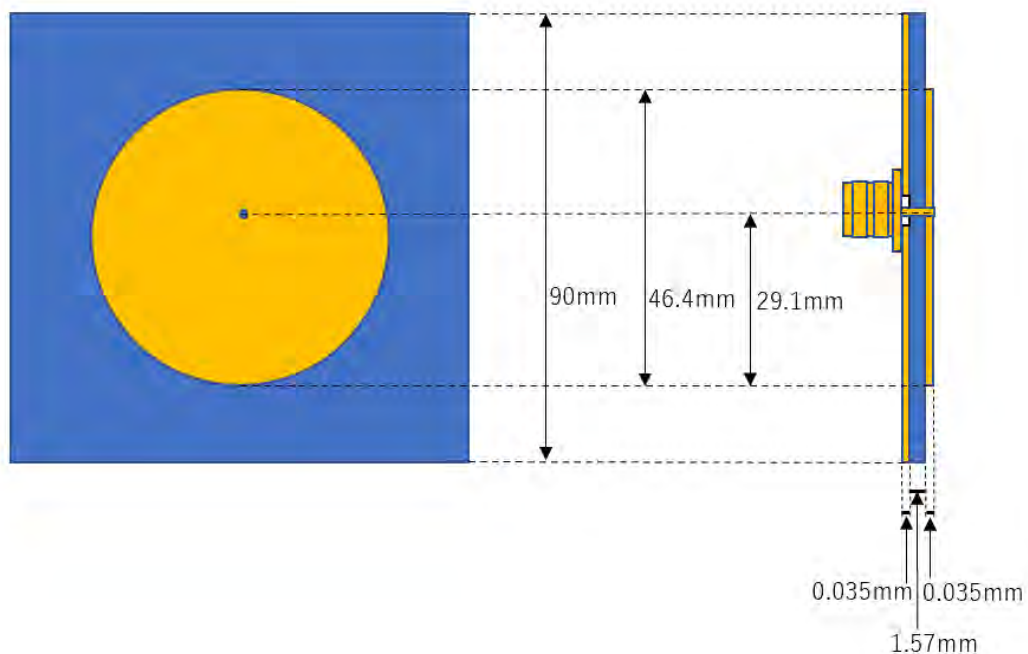


図 1-11 2.45GHz パッチアンテナの概形

S パラメータのシミュレーション結果を図 1-12 に示す。この図から 2.45GHz での反射係数の値は -30dB 程度で十分な性能を持っていることがわかる。

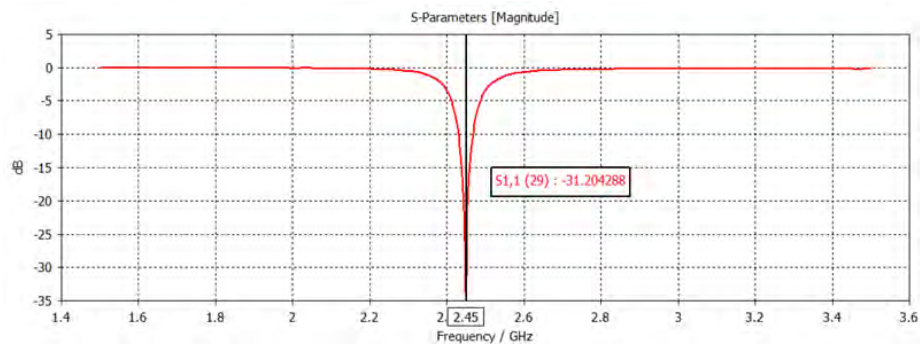


図 1-12 反射係数

次にスミスチャートのシミュレーション結果を図 13 に示す。図 1-13 を見ると円が実軸上 1 の点の周辺を通過しており、50Ωにおいて整合がとれていることがわかる。放射効率は 92% であり、実用上十分な性能を持っている。

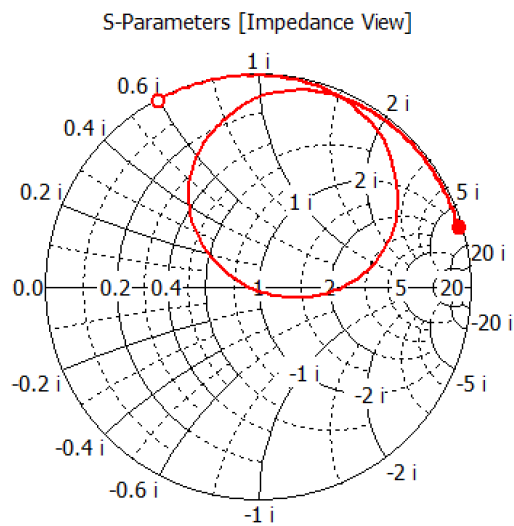


図 1-13 スミスチャート

アンテナパターンのシミュレーション結果を図 1-14-1・2 に以下に示す。

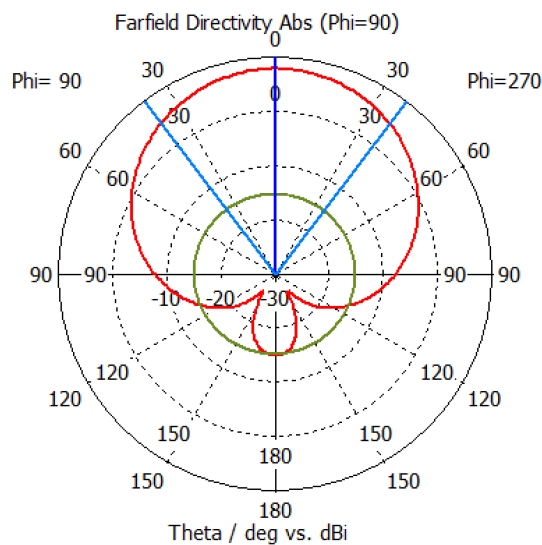


図 1-14-1 アンテナ放射パターンシミュレーション : H-Plane

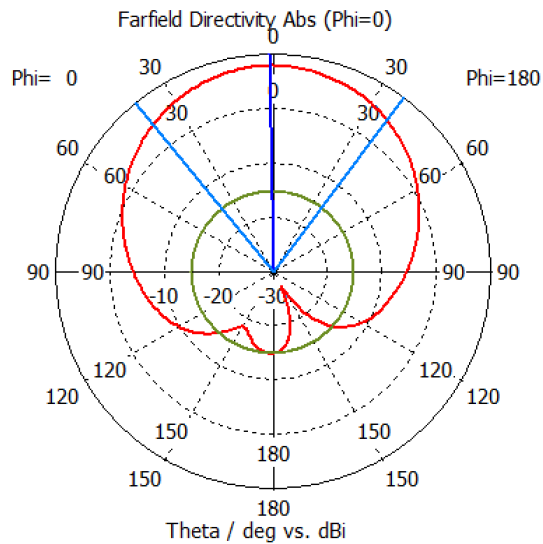


図 1-14-2 アンテナ放射パターンシミュレーション : E-Plane

(iii) 周波数 2.45GHz パッチアンテナの製作と試験

周波数 2.45GHz パッチアンテナの基本性能を確認するために、実際に 2.45GHz パッチアンテナの製作を行った (図 1-15)。

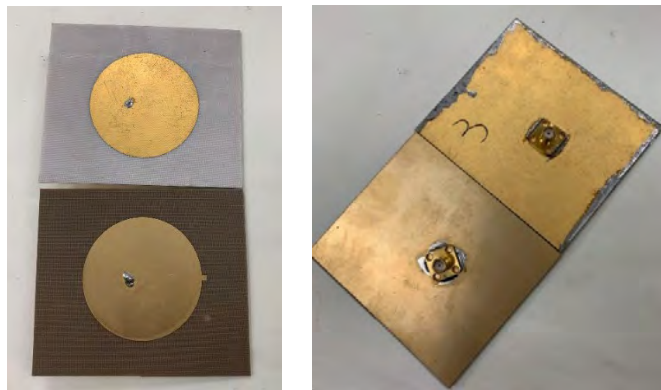


図 1-15 製作された 2.45GHz パッチアンテナ

このアンテナを使い電波暗室でアンテナ放射パターンを測定した結果を図 1-16 に示す。

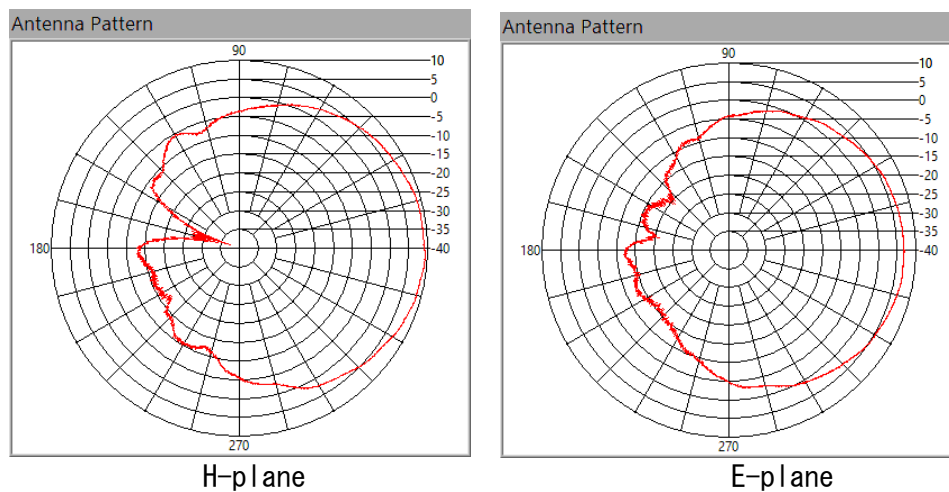


図 1-16 実測された 2.45GHz パッチアンテナの輻射パターン

輻射パターンは H-plane・E-plane とともにシミュレーション結果に近いものが得られた。今後は、実際に木造構体にパッチアンテナを内蔵した時にどのようなアンテナ特性を持つのか、詳しく調べる予定である。

(B) 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画と準備

(1) 地磁気測定システム

地磁気を使った姿勢制御システムを構築するためには、まず、人工衛星に搭載できる地磁気計測システムを作らなければならない。そのため、令和 4 年度には地磁気センサーの選別、電子基板への装着、及びヘルムホルツコイルを使った較正実験を実施した。

地磁気センサーとしては、すでにスペースフライト実績のある MEMSIC 社製 MMC5883MA を選別した。表 1 に MMC5883MA の性能を示す。

表 1-1 磁気センサーMMC5883MA

素子名	MMC5883MA
センサタイプ	ホール効果磁気センサ
測定範囲	$\pm 8\text{G}$
感度	0. 25mG
アライメント精度	$\pm 1^\circ$

MMC5883MA は LignoSat 用 Rear Access Board (RAB) に搭載された。RAB 基板の写真を図 1-17 に回路図を図 1-18 に示す。

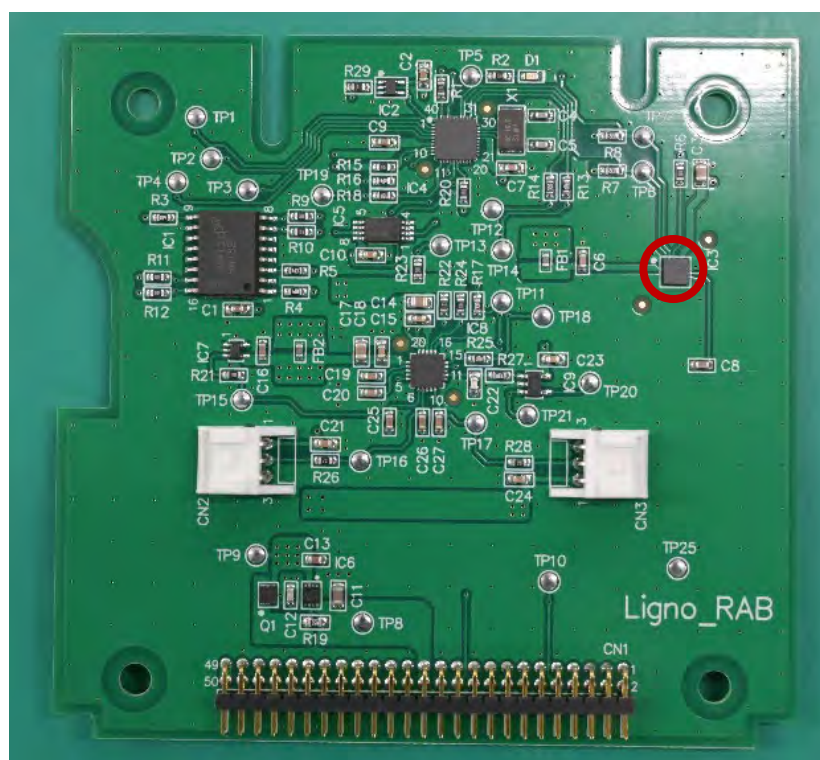


図 1-17 RAB 基板 MMC5883MA は赤の場所に位置している

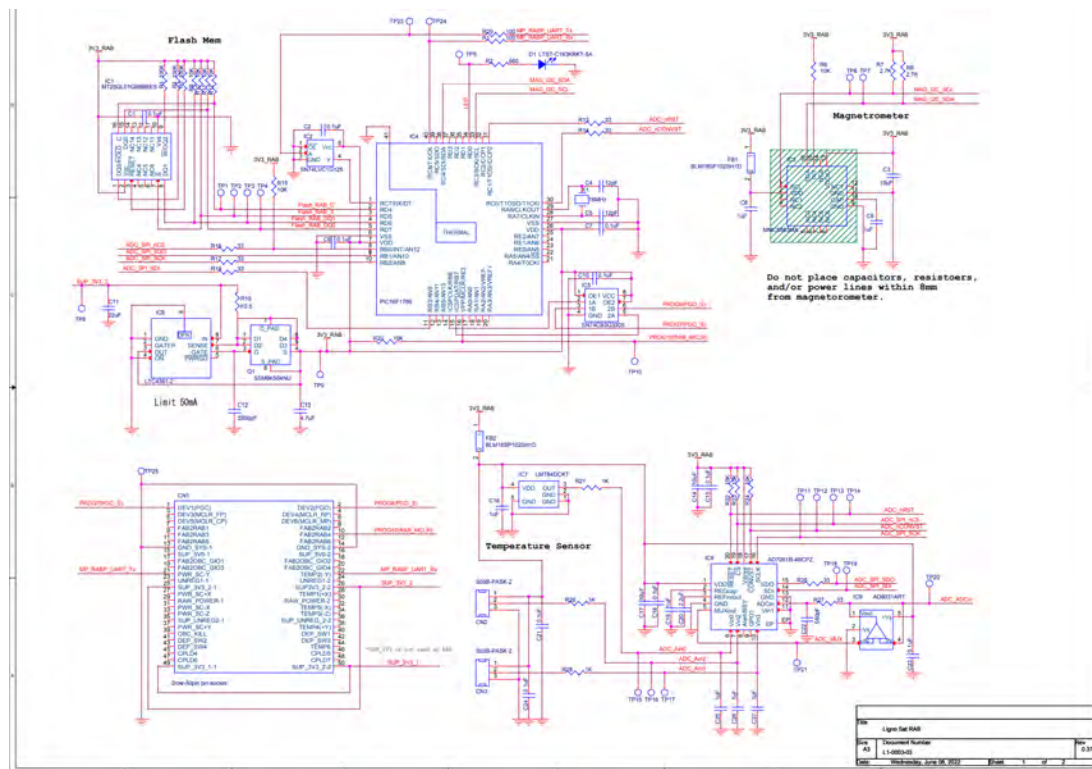


図 1-18 RAB 回路図

磁気センサの較正実験は、九州工業大学が保有しているアイチ・マイクロ・インテリジェント株式会社製地磁気キャンセラー/シミュレーターを使って実施した。地磁気キャンセラー/シミュレーターはヘルムホルツコイルを3軸組み合わせることにより、中心部に任意の磁場を発生させることができる。地磁気キャンセラー/シミュレーター中にRAB基板を設置して実験中の写真を図1-19に示す。

較正実験は、外部磁場を除いた状態で磁気センサに一定の磁場を与え続けて絶対値を補正する試験、特定方向に磁場の値を連続的に変化させながら測定値の連続性と線形性を確かめる試験、そして強度を固定し向きを円形に変化させて値の連続性を見る試験の3つを実施した。図1-20はY軸方向に、図1-21は磁気センサのX軸方向に $-600 \sim +600$ [mG]を掛けた場合、図1-22はXY平面上で $+200$ [mG]の磁場を回転させた場合の磁気センサの応答を示している。図1-20より地磁気センサの測定誤差は1%以内に収まっていることが確認された。

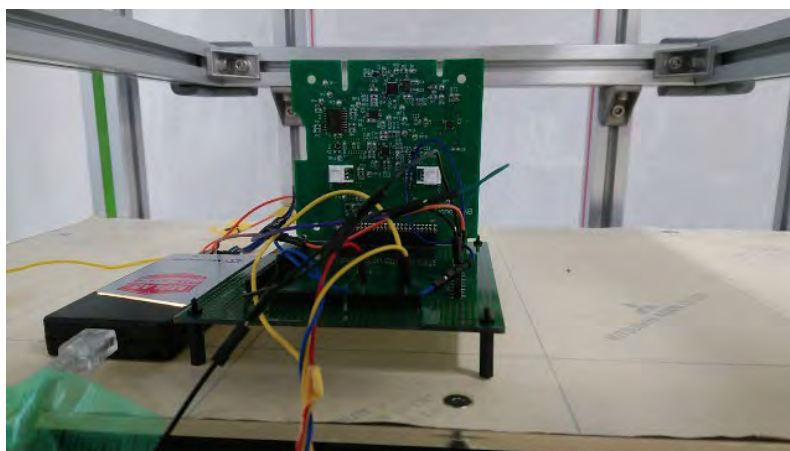


図 1-19 磁気センサ較正実験システム

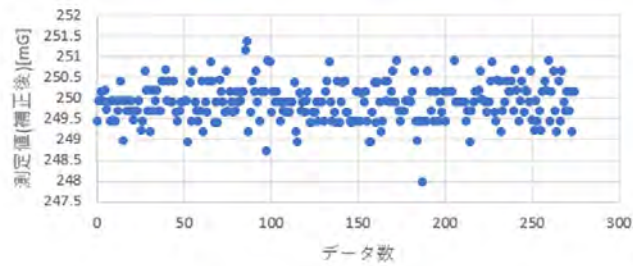


図 1-20 Y 軸方向に+250[mG]の磁場をかけた場合の磁気センサ応答

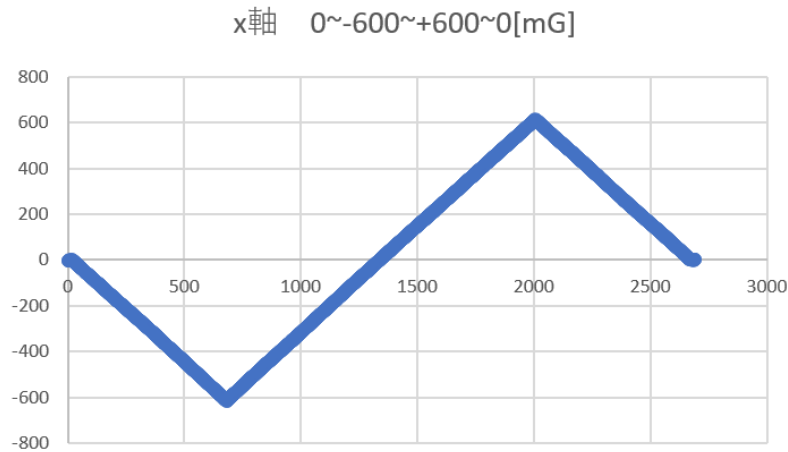


図 1-21 X 軸方向に-600~+600[mG]をかけた場合の磁気センサ応答

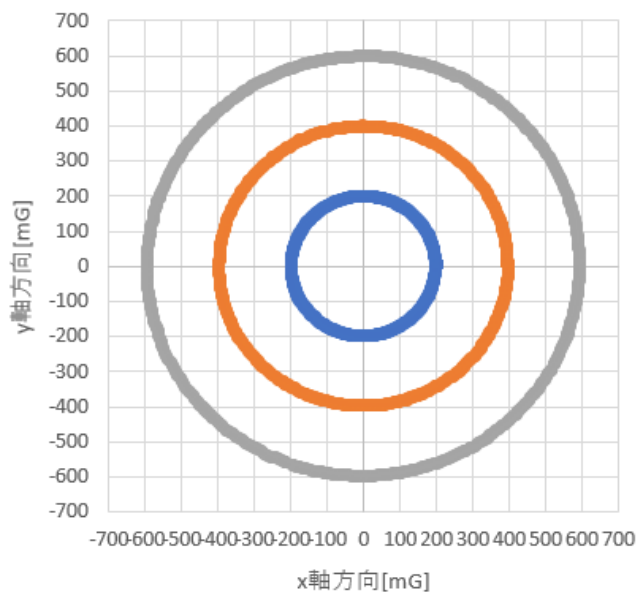


図 1-22 XY 平面上で磁場を回転させた場合の磁気センサ応答
青色 : +200[mG]、橙色 : +400[mG]、灰色 : +600[mG]

(2) 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画

地磁気を使った姿勢制御システムとして磁気トルカを使った制御システムを考える。木造人工衛星 2 号機の姿勢制御では、次の 2 通りの姿勢制御過程を考える必要がある：

- 1) 人工衛星放出時の回転を止める
- 2) 通信アンテナを地球の方向に向ける 3 軸姿勢制御を行う

令和5年度では、1) 人工衛星放出時の回転を止める機構を設計するために、磁気トルカを使った基礎実験を行う予定である。磁気トルカとしてすでに飛行実績のある CUBESPACE 社の CUBETORQUER GEN2 を使用する計画である。CUBETORQUER GEN2 CR0002 の性能を表 1-2 に示す。

表 1-2 CUBETORQUER GEN2 CR0002 特性表

特性項目	特性値
サイズ (HxWxL)	10.5x10.5x47 mm
質量	16.5 g
使用電圧	5 V
磁気モーメント (5V)	0.2 Am ²
線型性	>98%
電気抵抗	51.0 Ω
インダクタンス	0.26 H
時定数	5 ms

磁気トルカが発生する磁気モーメント M とトルク T の関係は次式で与えられる：

$$T = M \times B$$

地磁気の磁束密度 B には、ISS から放出される人工衛星の軌道高度である 400 km 上空を想定して推定された値 3.9×10^4 nT を用いることにする。これより磁気トルカ 1 基で発生できるトルクは、約 0.8×10^{-5} mN 程度である。人工衛星の回転運動エネルギーを消散させる制御法は Despin 制御法を用いる。実際の磁気トルカを使って次の実験・数値シミュレーション・設計を行う：

- 1) 磁気トルカから発生するトルクを測定する。
- 2) 木造人工衛星の回転運動を止めるための、1) で得られたトルクを持ちいて数値シミュレーションを行う。
- 3) 人工衛星の回転は 3 次元になるので、互いに直交する磁気トルカ 3 基を用いた姿勢制御系を設計する。

(C) 木造人工衛星 2 号機概念設計

1961 年のガガーリンによる人類初の有人宇宙飛行以来、有人宇宙活動は欧米諸国の主導で行われてきた。現在まで宇宙用に開発・使用されてきた材料は、金属・プラスチック（無機素材）であり、木材（有機素材）が使われることは無かった。将来的に人類が宇宙に永続的に展開することを考えると、人類が作り出すことのできる資源である樹木・木材を宇宙で利用することができれば、人類の宇宙への恒久的発展に必要な材料資源をどこから調達するかという課題を解決することが可能となる。石と金属の文化である西欧主導の宇宙開発に、日本は木の文化で大きな貢献することができるだろう。

木材の宇宙利用の可能性を証明するために、超小型木造人工衛星（木造キューブサット）の開発を行う。人工衛星の構体系（搭載機器を固定する骨組み）の部分を木造化することを想定している。従来の人工衛星の構造素材がアルミニウムであるのに対し、木造キューブサットではそれらを木造化するため、各種機器の固定方法や運用に関して大きく変更する必要がある。とりわけ、木造人工衛星においては、電磁場を遮蔽しないという木材の物理的性質から、各種通信アンテナ及び地磁気を利用した姿勢・軌道制御装置を本体に内蔵することができる。さらに木材の優れた断熱性により、特別な装置を用いなくても衛星内部の熱環境を一定に保持することができると期待される。

木造人工衛星は、また、地球環境にやさしい人工衛星でもある。現在、地球低軌道に打ち上げられている金属製人工衛星は、運用を終えると宇宙ゴミの発生源にならないように大気

圏に再突入させられる。この時、衛星は地表に落下する前に燃え尽きるように設計されるが、たとえ破片が残っても海洋へ落下させることが求められる。しかし、大気圏内で燃え尽きた人工衛星は微細なアルミナ粒子を発生させ、結果的に中層大気の汚染を引き起こす可能性があることが示唆されている。それに反し、木造人工衛星の主成分は炭素・水素・酸素を構成元素とする天然系高分子であり、燃焼時における生成物はおおよそ水と二酸化炭素のみである。また、長期的に宇宙空間に暴露されても紫外線により炭素・水素・酸素原子に分解されるだけである。これらのことから、人工衛星のような宇宙機を木材で製作することで、有害な微細粒子の発生を防ぎ、大気圏、海洋、宇宙空間の環境汚染を防止することにつながると期待される。

木造人工衛星 2 号機は、木造人工衛星 1 号機 (LignoSat) と同様に 1U 規格或いは 2U 規格とし、構体系バスシステムをほぼ全面的に木造化することを想定している。これまでの概念設計の結果から、こういった木造構体が宇宙環境下において人工衛星構体系として十分に機能しうることを確認している。木造人工衛星によって宇宙機構造部材としての木材の信頼性を実証することは、木材の宇宙材料としての利用法の提唱に繋がるだけでなく、木材産業の新たな活躍の場の創出に寄与し、ひいてはカーボンニュートラルな社会の実現に大きく貢献しうると期待される。

(1) 木造人工衛星 2 号機概要

(i) ミッション定義

木造人工衛星 2 号機は、宇宙における複合的環境が宇宙機構造材料としての木材に及ぼす影響を調査することを目的とした 2 機目の技術試験衛星である。宇宙空間における木材の物理特性の変化を継続的かつ *in situ* で捉えることで、工学的側面に基づいた木材の宇宙利用可能性を探究することをめざす。また、木造人工衛星の運用にあたっては、アマチュア無線周波数帯を衛星—地上局間の相互通信に利用するため、世界中のアマチュア無線家を対象とした独自のサービスを提供することもミッションの一部として掲げている。木造人工衛星 2 号機の主要なミッションは次の 7 つを考えることにする：

A) 軸歪み測定ゲージを用いて木造構体内部（木板内側）の歪みの継続的測定を行う。木材の宇宙環境における物性変化をリアルタイムで追跡する。

B) 誘電体センサを用いて、木造構体の誘電率の変化から木材の宇宙環境における物性変化をリアルタイムで追跡する。

C) 木材の表面観察を行い、原子状酸素や真空紫外線によって木材表面がどのように変化するのかを調べる。

D) 温度センサを用いた衛星構体内部における多点温度計測を行う。木造構体の内部温度を測定することで、宇宙空間における木材の断熱特性を評価するとともに、温度環境変化と木造構体の物性値（歪み・誘電率）の相関について検討する。

E) 地磁気センサ・磁気トルカを用いて地磁気を使った姿勢制御系の試験を行う。

F) 木造構体に内蔵できる通信アンテナを使用して、地上との通信を行う。

G) アマチュア無線周波数帯で、アマチュア地上局からパケットを受信・データ処理し、同一の周波数帯でアマチュア地上局のコールサインをモールス信号 (Continuous Wave: CW) により再送信する。単一周波数帯による双方向通信の実現をめざす。

それぞれのミッションの達成目標を以下に示す。

【ミニマムサクセス】

木造人工衛星 2 号機が地球低軌道に放出された後、地上局で木造人工衛星 2 号機からの CW 信号（ハウスキーピングデータ）を受信する。

【フルサクセス】

木造人工衛星 2 号機からの CW 信号及び FM パケット通信信号を 6 ヶ月間受信でき、木造人工

衛星 2 号機の内部温度や木造構体の宇宙での歪み・誘電率特性及び地磁気による姿勢制御が行われる。各国のアマチュア無線家との相互通信に成功する。

【エクストラサクセス】

6 ヶ月間以上に渡って木造人工衛星 2 号機からの CW 信号及び FM パケット通信信号を受信できると同時、アマチュア無線家との交信も継続的に行う。

(ii) 構造系

LignoSat の開発で培われた技術的知見を活かし、2U サイズの木造人工衛星 2 号機は次の LignoSat の構造的特徴を踏襲する。

A) 6 枚の板材で木造構体を構成する。その接合部に伝統的木組み加工を施し、構体の剛性を確保する。

B) アルミフレームで木造構体を挟み込み、木造構体に穴を開けたり接着したりすることなくレールを取り付ける。衛星にかかる外力は衛星を取り囲むアルミフレームが担う。

C) 構体内部に取り付けられた PCB を安置するために内部シャフトを設ける。シャフトの端部をアルミフレームに緊結し、木造構体に負担がかからないようにする。

図 1-23 に上記を盛り込んだ木造人工衛星 2 号機のイメージを示す。木造構体内部には平面型のパッチアンテナと磁気トルカが設置されている。+Y 面に LignoSat と同じダイポールアンテナが設置されているが、木造人工衛星 2 号機のメインの通信アンテナはこのダイポールアンテナである。パッチアンテナが木造構体内部で通信アンテナとしての機能を十分果たせるかどうかを確認することが、木造人工衛星 2 号機の重要なミッションとなる。

さて 2U サイズの木造人工衛星の開発にあたり、1U サイズの場合にはほとんど考える必要がなかった点を十分考慮し吟味しなければならないことが明らかになってきた。今後考えていかななくてはならない構造上の問題点について次に列記しておく。

1) 木取りの問題

LignoSat の木造構体に使用された板材は、ほぼ 100mm 角のまさ目板 (図 1-24A) 6 枚であった。樹種には、ホオノキやヤマザクラなどの小さい道管が散在し材質が比較的均質な散孔材が試されてきた。今回、2U サイズに構体を拡大する場合、少なくとも 4 面の板材は 2 倍の面積が必要となる。図 1-24 の木造人工衛星 2 号機のイメージでは、±X 面および±Y 面に半径方向寸法が 2 倍になったまさ目板 (図 1-24B) が使用されている。このようなまさ目板を手に入れるためには、半径 250mm (直径 500mm) 程度の原木が必要となる。ところがそのような大径の散孔材の入手は難しく、幅 200mm の散孔材のまさ目板の利用は困難が予想される。

2) 木組みの問題

そこで繊維方向を衛星の Z 方向に平行にして、繊維方向に長いまさ目板 (図 1-24C) を木取れば、LignoSat で使用した原木と同等径の原木から十分に板材を採材できる。ただし、この場合に問題になるのは、X 面と Y 面の接合部に留め形隠し蟻組接ぎを細工できるかどうかである。留め形隠し蟻組接ぎは木口面を見せないようにして 2 つの板材を直角に組む木組みの技法である。木造人工衛星 2 号機の X 面と Y 面に図 1-24C のようなまさ目板を使用した場合、その接合部は板目面となるが、ここに留め形隠し蟻組接ぎを適用できるかどうかを検討する。

3) 幅矧ぎの問題

LignoSat と同等寸法のまさ目板を使用し、留め形隠し蟻組接ぎを木口面を見せない木組みの技法として適用することを優先する場合、図 1-24D のように 2 枚のまさ目板を幅矧ぎして矧ぎ板を用意することが考えられる。ただし、この場合も接着剤を使用するのか、使用する場合、どの接着剤を使用するのか (宇宙での使用実績の有無を要確認)、実加工を行うのか、ちぎりを入れて補強するのか、などについて、入念に検討しなければならない。

4) 木材の変形問題

板材の寸法が2倍になったということは、木材の含水率変化に伴う寸法変化量も1Uサイズ
のときの2倍になる。このことが木造構体の寸法精度や、アルミフレームとの合わせ込みに
支障を来さないか、十分に確認しておく必要がある。

5) アルミフレームの変形問題

木造構体の+Y 面および-Y 面に嵌め込むアルミニウム製のフレームは、J-SS0D 内を滑るた
めのレールを兼ねており、Z 方向に軸力が負荷される。フレームの最薄部は1.5mm 厚である。
LignoSat の場合、レール部に所定の軸力を負荷しても問題ないことを確認しているが、木造
人工衛星2号機では最薄部の長さが2倍になるので、レール端に荷重がかかったときに(図1-
24 青色方矢印)最薄部が面外にたわむ可能性がある。図1-23 のイメージでは1U と1U の境目
付近にブリッジがかかっており、そのような変形を最小限に抑制できると考えられるが、実
際にどうなるかについて、検証する必要がある。

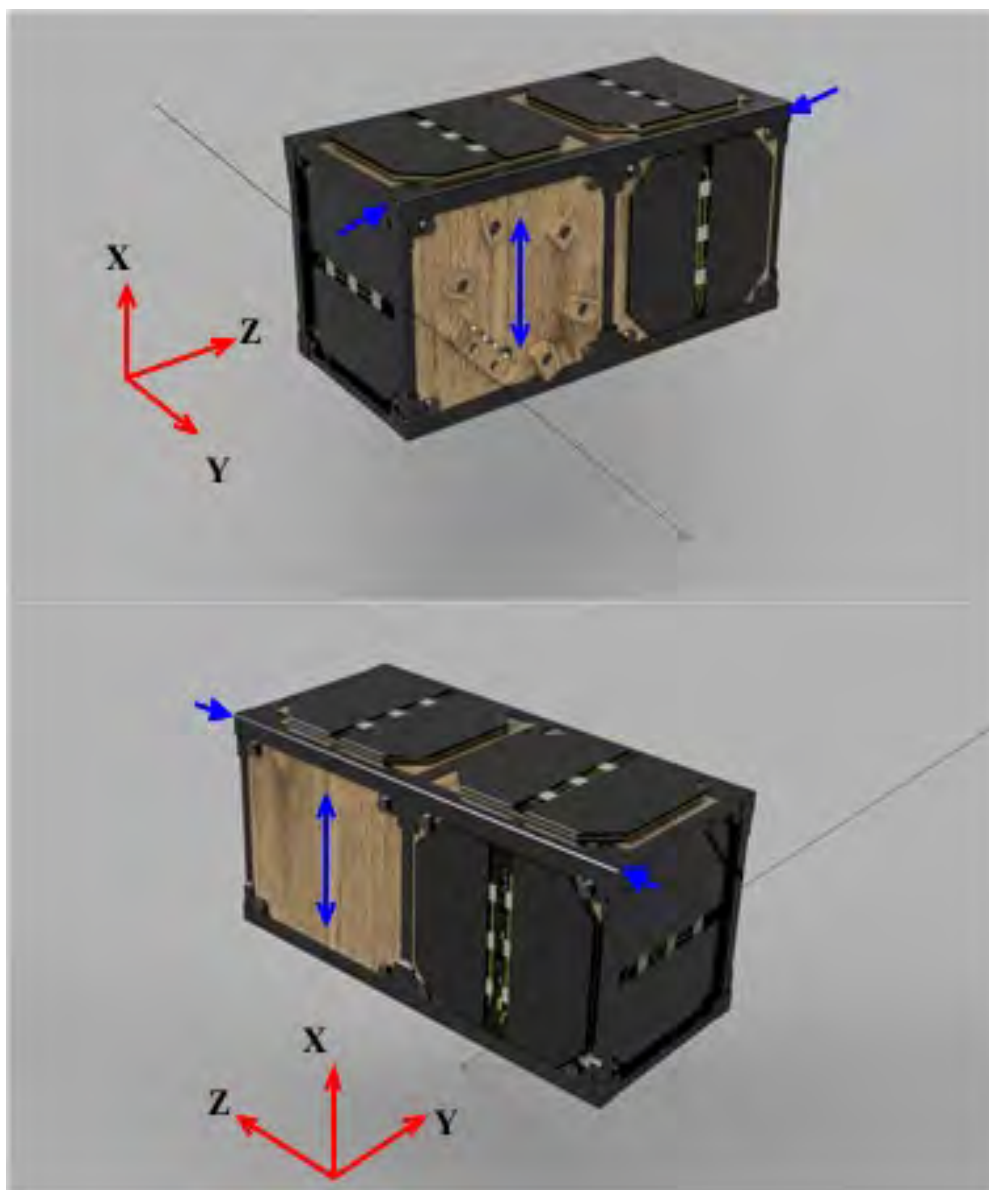


図 1-23 木造人工衛星 2 号機のイメージ (コンピュータグラフィックス)

図中の青色両矢印は木材の繊維方向を青色方矢印はアルミフレームに負荷される軸力を表す。

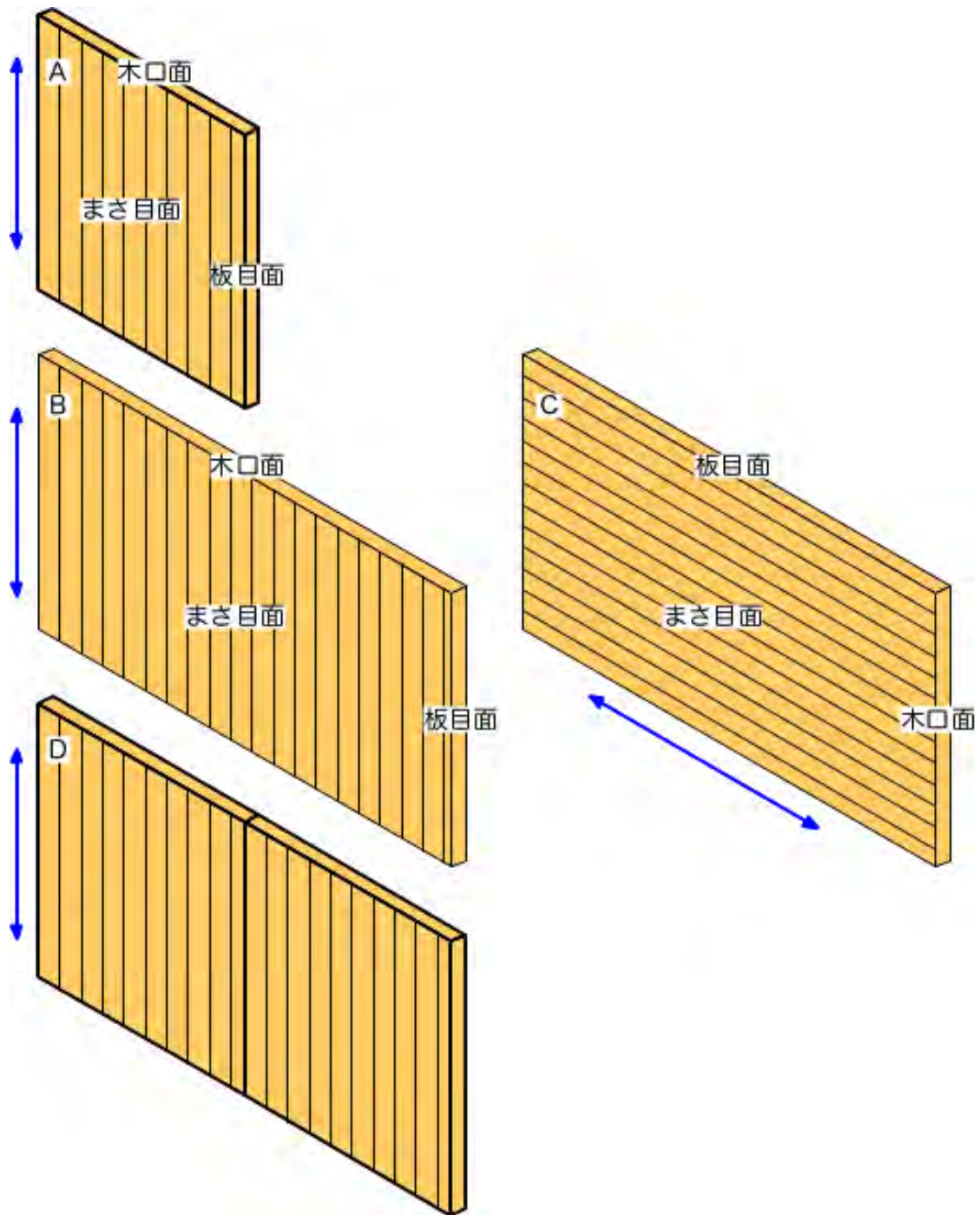


図 1-24 木造人工衛星 2 号機に使用する木材の木取り（青い両矢印は繊維方向）

A : LignoSat に使用されるまさ目板, B : 図 4 の木造人工衛星 2 号機のイメージに使用されているまさ目板, C : 繊維方向を Z 方向に平行にした場合のまさ目板, D : A のまさ目板 2 枚を幅矧ぎした場合

(iii) バスシステム系

【衛星ハードウェア設計】

衛星構体は、6 枚 (1U) 又は 12 枚 (2U) の木製壁組を組み木の技術で組み合わせて作製した木箱状の木造構体の周囲に、アルミフレームを取り付けた構造をしている。木造構体に用いている木組み工法は、「留形隠し蟻組接ぎ」と呼ばれる日本古来の伝統的技法であり、ネジや接着剤を使わずとも十分な剛性を確保することができる。木造人工衛星 2 号機の主要諸元

を表 1-3 に示す。また、木造人工衛星 2 号機（1U） 外観図を図 1-25 に、木造人工衛星 2 号機（2U） 6 面図を図 1-26 に掲載する。

表 1-3 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	1U (100 mm ×100 mm × 113.5 mm) 又は 2U (100 mm x100 mm x 227.0 mm)
質量	1.33 kg (1U) 又は 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 1400 (1U) 又は 約 2000 (2U) mW

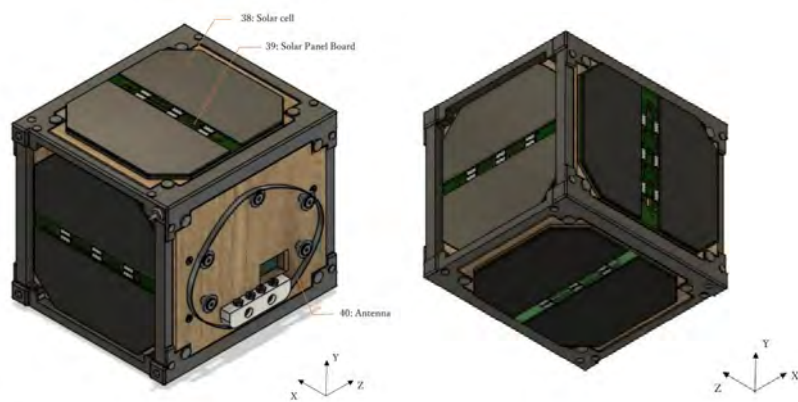


図 1-25 木造人工衛星 2 号機（1U） 外観図

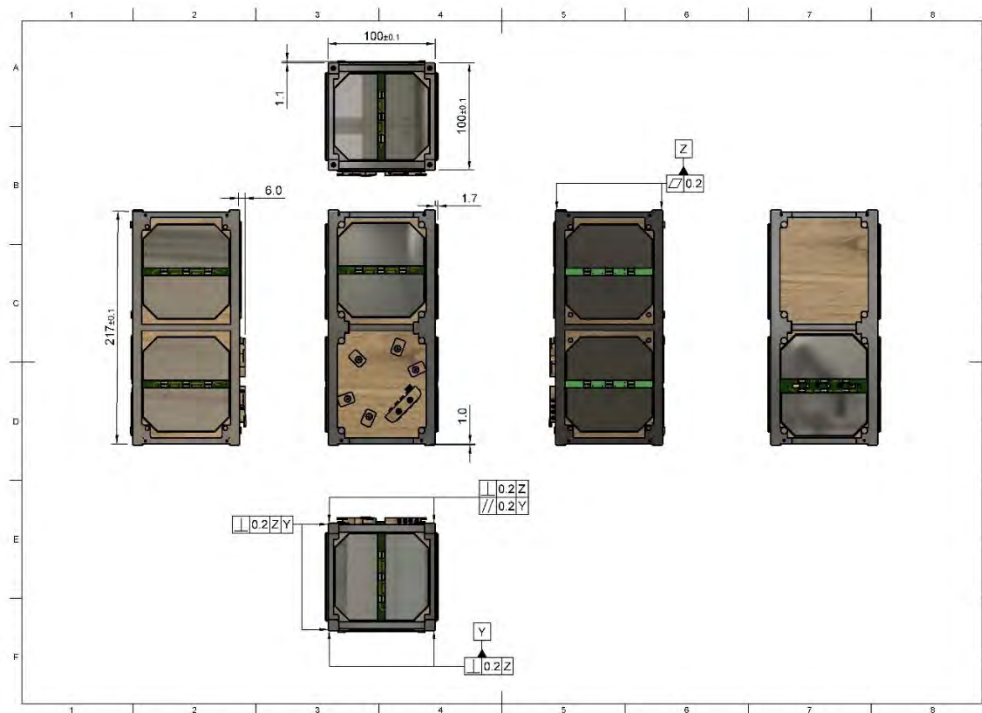


図 1-26 木造人工衛星 2 号機（2U） 6 面図

【衛星ソフトウェア設計】

Figure 1: Block diagram of the power and data bus architecture. The diagram illustrates the interconnections between various modules and the central power bus. Key components and connections include:

- UHF Dipole Antenna (430MHz Bands)** connected to the **UHF Transceiver (COM)**.
- COM** connected to the **Main PIC (PIC16F1789)** via **UART**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **Resist PIC (PIC16F1789)** via **UART**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **Mission PIC (PIC16F1789)** via **UART**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **RAB PIC (PIC16F1789)** via **UART**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **SMC (Strain Measurement Circuit)** via **SPI**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **ADC (AD7490)** via **SPI**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **FM (Flash Memory)** via **SPI**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **Temp_Battery** via **SPI**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **Power Circuit** via **SPI**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **EPS (Energy Power System)** via **UART**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **Magnetometer** via **I2C**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **ADC (AD7490)** via **SPI**.
- Main PIC (PIC16F1789)** connected to the **Temp_Strain (-X)** and **Temp_Strain (+Z)** via **SPI**.

The **Power Bus** is connected to the following components and signals:

- 3V3_1** (red dotted line)
- UNREG_1** (orange dotted line)
- UNREG_2** (orange dotted line)
- 3V3_1** (red dotted line)
- 3V3_2** (red dotted line)
- 5V0** (blue dotted line)
- 3V3_1** (red dotted line)
- 3V3_2** (red dotted line)
- 5V0** (blue dotted line)
- UNREG_2** (orange dotted line)
- 3V3_1** (red dotted line)
- UNREG_2** (orange dotted line)

Legend:

- ※ FM : Flash Memory
- ※ SMC : Strain Measurement Circuit

(iv) ミッション系

23

【木材の熱膨張率の評価】

LignoSat では、木造構体の変形を測定するためにひずみゲージを使用して、ひずみゲージ用のアンプを開発した。しかし、木造構体は複雑な構造になっており、太陽光パネルなどが貼り付けてあるために、正確な熱膨張率の測定は困難である。

木材試験体でひずみゲージを使った熱膨張率の測定を地上で行った。その結果、直交方向で 28ppm/K、繊維方向で 0.2ppm/K の値を得た（図 1-28）。木材試験体でも同様の測定システムを使用することにより熱膨張率の測定が可能であると考えられる。そして熱サイクルによる木材の劣化の評価が可能になると考える。

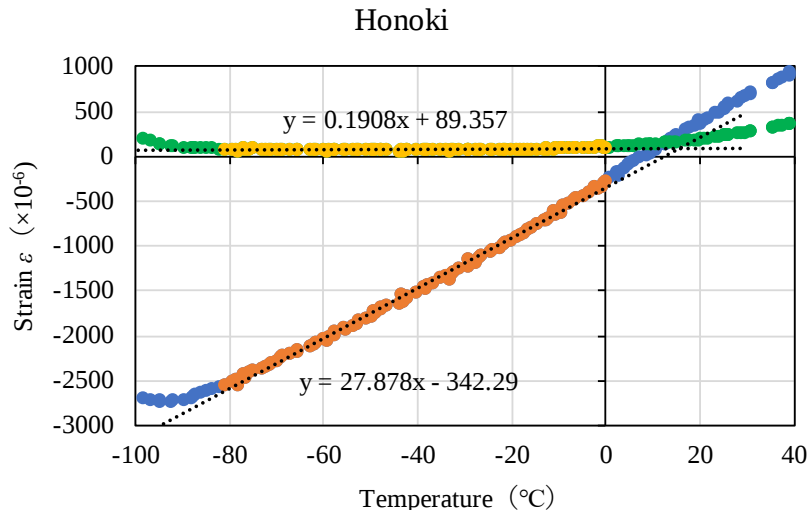


図 1-28 ひずみゲージを使ったホオノキ試験体の熱膨張ひずみ測定の結果（地上試験）

【木材の誘電緩和の測定】

熱サイクルや宇宙放射線による木材の劣化では、ヘミセルロースやリグニンから構成される非結晶領域（マトリクス）の変化による脆性化の可能性がある。マトリクスの構造は動的粘弾性試験 (Dynamic mechanical analysis, DMA) による損失正接 ($\tan \delta$) で評価することができる。Kelley et al (1987) の実験では α 緩和と β 緩和などが観察され、含水率の変化によって緩和温度も変化していた（図 3）。Roing et al (2017) は動的粘弾性試験 (DMA) と動的誘電率測定 (Dynamic dielectric spectroscopy, DDS) を比較した。DSS では $10^{-1} \sim 10^6$ Hz の周波数で複素誘電率 ε^* を測定した。

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{1}{i\omega \cdot C_0 Z^*(\omega)} = \varepsilon' - i\varepsilon''$$
$$\text{Loss tangent } (\tan \delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

ここで C_0 は真空中の静電容量（キャパシタンス）、 Z^* は複素インピーダンス、 ω は角周波数である。DDS の測定でも同様に非結晶領域（マトリクス）の評価が可能であった。

Suratsavadee et al (2020) は木材の静電容量を簡易的な装置で測定し、油ヤシの幹の含水率の評価を行った。同様に人工衛星搭載用の小型の測定装置を開発し、宇宙空間で in situ で静電容量と複素インピーダンスの測定を行って、非結晶領域（マトリクス）の変化の評価を試みる。LEO の小型人工衛星が飛行する -40°C から $+80^\circ\text{C}$ までの環境では損失正接 ($\tan \delta$) にピークがみられない可能性がある。しかし、損失正接分布のシフトが予想される。本ミッションで木材の静電容量を測定する装置を開発し、宇宙空間での木材の誘電緩和の測定を行う。

【木材の表面観察】

地上 400km の LE0 では、大気の 80%が反応性の高い原子状酸素（A0）であり、有機化合物は酸化によって揮発性ガスになり表層の消失が生じる（木本 他 2009）。木材でも同様に表層の消失が予想される。小型人工衛星に小型カメラを搭載して、材料の表面の劣化を in site で撮影して、表面の劣化のリアルタイム観察を試みる。木材の表面は数十 μm の細胞で構成されており、A0 による酸化で細胞の形状が変わることが予想される。

② ExBAS の木材の解析

(A) ExBAS 木材試料の回収と保管

(1) ExBAS 実験概要

宇宙木材プロジェクトでは 2023 年度以降に木造人工衛星の打ち上げを計画している。投入を計画している地球低軌道(LEO)は高真空、銀河宇宙線、太陽エネルギー粒子、真空紫外線や原子状酸素などの影響で材料が変成する可能性がある。そのような環境で木材がどのように変化するのかを知らべるため、国際宇宙ステーションで木材の宇宙曝露実験を実施した。宇宙曝露した木材試料は次の 3 種類である。図 2-1 に木材曝露試験体と木材試料の写真を示す。

試験体 : 56mm × 8.6mm × 5mm

樹 種 : ホオノキ、ヤマザクラ、ダケカンバ 各 2 体

その他 : A0 評価用ポリイミド樹脂シート



図 2-1 木材曝露試験体 ©京都大学 ©Space BD

2022 年 2 月 20 日に打ち上げられたシグナス補給船運用 17 号機(NG-17)で簡易材料曝露実験プラント(ExBAS: 図 2-2)は国際宇宙ステーション(ISS)まで運ばれた。木材試験体を搭載した ExBAS は中型曝露実験アダプタ(i-SEEP)に取り付けられ(図 2-3)、同年 3 月 4 日にロボットアームによって船外プラットフォームに運ばれて宇宙曝露試験が開始された(図 2-4)。

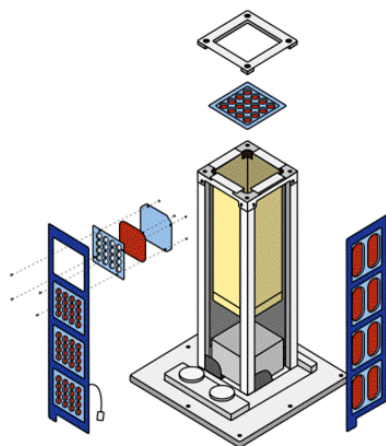


図 2-2 ExBAS の構造 ©Space BD



図 2-3 i-SEEP に取り付けられた ExBAS ©JAXA

宇宙曝露試験を実施するまでにいくつかの準備が必要だった。たとえば、高分子材料が真

空環境におかれるとガスが発生して再凝集する可能性がある。そこであらかじめベークアウト処理(105℃・24時間)を施した3種類のも材試験体のアウトガス試験を実施した。加熱温度125℃、真空度 7×10^{-3} Pa以下の環境で24時間保持したときの重量損失比(TML)と、25℃に保持した冷却板で測定した再凝集物質質量比(CVCM)を測定した。基準ではTML1.0%以下、CVCM0.1%とされるが、実験に供したサンプルではCVCMは0.1%を下回っていたが、TMLは5~6%だった。しかし、23℃・50%RHの環境で24時間保持して測定した再吸水量比(WVR)が約5%あり、TMLの大半は水であると推測されたため揮発成分は問題ないとされた。

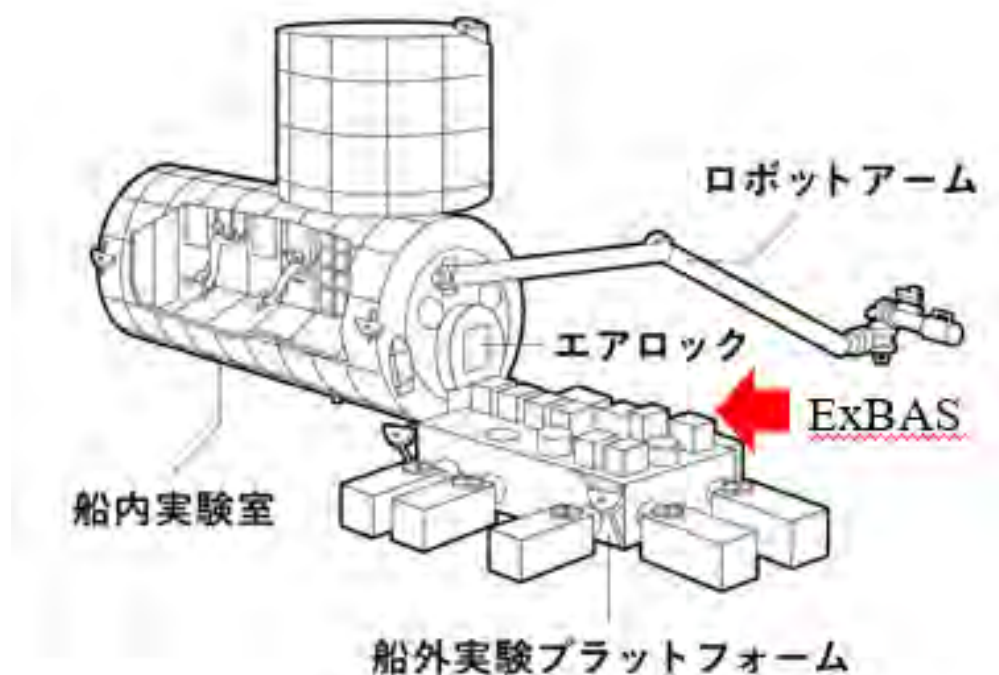


図 2-4 ISS きぼう・船外実験プラットフォーム ©SpaceBD

今回の宇宙曝露試験の最も重要な目的は木造人衛星に使用する木材樹種の選択である。密度の異なる3樹種(ホオノキ、ヤマザクラ、ダケカンバ)を選択し、それらの劣化の様子から樹種選択に必要な情報を得ようと考えている。LignoSatの投入を予定している低軌道(400km上空)の気圧は非常に低いが、大気の約8割は反応性の高い原子状酸素(AO)とされている。宇宙機は秒速8kmで飛行するため、有機材料がAOと衝突した場合は酸化によって揮発性の物質となり表層の消失が予想される。樹種による重量損失の違いからAOの影響を評価し、樹種選択に役立てたいと考えている。また、宇宙放射線による材料の劣化も予想される。これまで文献調査と地上でのガンマ線照射試験を実施してきた。文献によるとISSの船外では約440日間で0.4Gyの放射線量が測定された。コバルト60ガンマ線照射装置(京都大学)で木材のガンマ線照射試験実施した結果、100kGy未満では結晶構造や強度に有意な変化は観察されなかった。1年程度の地球低軌道での曝露では、木材への宇宙放射線の影響は軽微であると予想される。

木材宇宙曝露試験体(ExBAS)は2022年12月23日に若田光一宇宙飛行士によってISS船内に回収され(図2-5)、2023年1月11日にドラゴン補給船26号機(SpX-26)に搭載されてフロリダ半島沖に着水した。宇宙空間に暴露されていた総期間は293.2日間である。木材宇宙曝露試験体3月末にはJAXAから京都大学に引き渡され、現在、京都大学において窒素雰囲気(99.99%)のグローブボックスの中に保管されている(図2-6)。



図 2-5 ExBAS を取り外す若田宇宙飛行士 ©JAXA



図 2-6 京都大学グローブボックス内に保管されている木材宇宙曝露試験体

宇宙曝露された木材試験体では表面の細胞構造や結晶構造の変化、微量元素の放射化などが考えられる。結晶構造解析や化学的な分析などは岡山大学惑星物質研究所での実施を検討している。同研究所は「はやぶさ2」によって惑星リュウグウから地球に運ばれたサンプルが保管されており、宇宙曝露された物質のための解析装置があり、また豊富な経験がある。世界で初めて宇宙曝露された木材試験体の調査については同研究所のスタッフの助言を得ながら実施したいと考えている。図 2-7 に同研究所での宇宙曝露試験体の分析に使用する予定の二次イオン質量分析計の写真を示す。



図 2-7 岡山大学惑星物質研究所の二次イオン質量分析計（岡山大学）

(2) ExBAS 試料マクロ分析結果

(i) 質量分析

地球低軌道 (LEO) での曝露試験によする有機材料の表面劣化について、最も心配されるのが真空紫外線 (VUV) や原子状酸素 (AO) である。特に AO による浸食 (erosion) では重量減少が予想される。表は木材試験体の曝露前後重量変化を示す。含水率がそろっていないために直接的な樹種間の比較は難しい。ポリイミド樹脂で被覆した試験体の含水率を基準にして宇宙空間に曝露した試験体の全館重量を予測した試験体の乾燥重量の変化 (ΔW_0) を図に示す。各樹種ともに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 宇宙暴露試験体の質量変化

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	

(ii) 表面色測定

地球低軌道 (LEO) において約 9 ヶ月間におよぶ宇宙空間曝露を経た木材試料の表面は、曝露前に比べてどのように変化したのか。ここでは、非接触型の分光イメージング装置を用いて行われた、ExBAS の木材試料表面の分光測色について述べる。

【方法】

1) イメージング分光装置

本測定で使用したイメージング分光装置は一種のラインスキャナである。試料面を捉えるレンズとモノクロ CCD カメラの間の鏡筒には、試料面からの反射光を整流するスリットと、2

つのプリズムで回折格子を挟み込んだプリズム・グレーティング・プリズム（PGP、グリズムとも呼ばれる）が仕込まれており、この鏡筒こそが本装置の最も重要な分光器である（Specim社、ImSpector V8E、システム構築はJFEテクノリサーチ社）。

図 2-8 にイメージング分光装置の概略図を示す。木材試料はレンズの直下を一定速度で移動する。レンズが捉えた試料面の線状エリアからの反射光は、スリットを通過して平面光となり、これを PGP が分光して CCD センサ上に展開する。CCD センサの左右方向は線状エリアを構成する各点の位置に、上下方向は分光された光の波長（380～780nm の可視光域）に対応する。例えば、赤橙黄緑青藍紫の虹の帯が CCD センサ上に広がるのである。

CCD センサに展開された分光スペクトルは、その強度に応じてグレイレベルに変換され、分光画像としてシステムを制御するコンピュータのメモリに蓄積される。ステージを移動させながら線状エリアの取り込みを繰り返すことによって、図 2-9 のように x 方向が横方向の画素位置、y 方向が縦方向（スキャン方向）の画素位置（ラインナンバー）、z 方向が波長を表す分光データキューブが得られる。任意の画素(x・y)における分光強度値を取り出して分光反射率を求めることにより、画素(x・y)の三刺激値 XYZ を計算できる。さらにここから、L*a*b* 表色系などの任意の表色系で表された色彩値を、画素単位で得ることができる。以上がイメージング分光装置による非接触での分光測色の原理である。

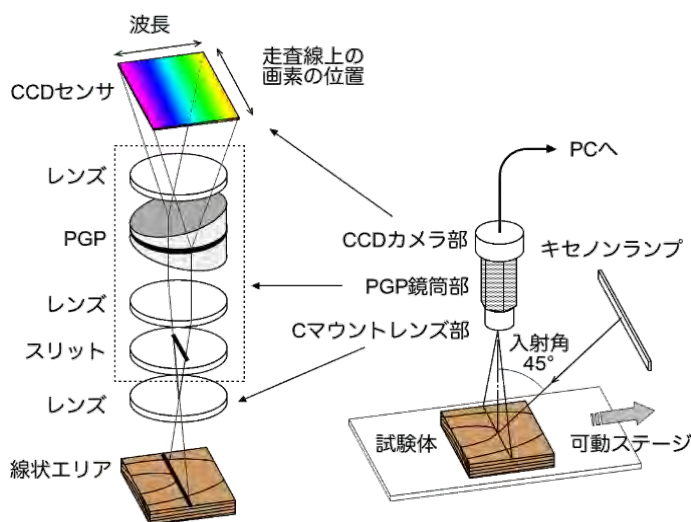


図 2-8 イメージング分光装置の概略図

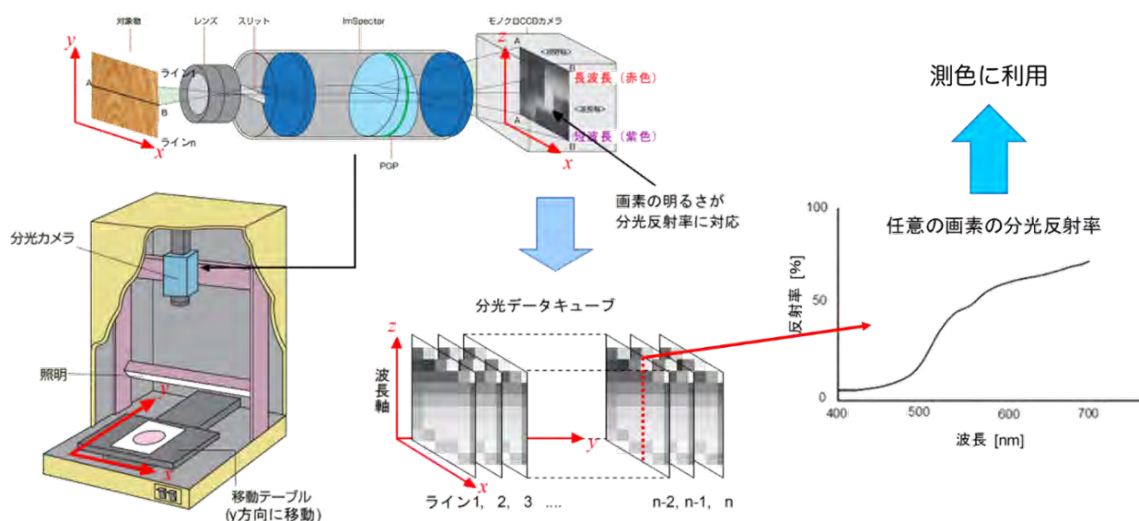


図 2-9 イメージング分光装置による分光反射率（スペクトル）の取得

2) ExBAS の木材試料とそのスキャン

ダケカンバ、ホオノキ、ヤマザクラの3樹種の木材試料は、特注のサンプルホルダに嵌められてExBASに固定された。ホルダに嵌め込まれていたのは、3樹種の無塗装のまさ目面、および、それらにカプトンシートを巻いたもの3本である。ホルダに保持されたこれら6サンプルを、まず宇宙曝露前にスキャンした。それから約10ヶ月後、宇宙から帰還した曝露後のサンプル、および、宇宙曝露とほぼ同期間、約0.1Paの真空中に曝露されていたサンプルを、ホルダに保持したままスキャンした。これら3種類のスキャン像を図2-10に示す。

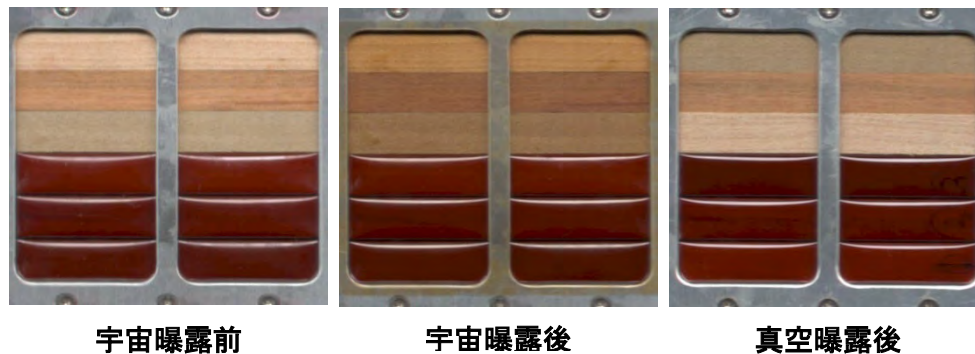


図 2-10 宇宙曝露前後および真空曝露後の木材試料の様子

今回の木材試料をイメージ分光装置でスキャンするにあたり、1画素あたりのサンプリング間隔を $77\mu\text{m}$ に設定し、波長 $380\sim 780\text{nm}$ の可視光域の分光強度を5nmステップで測定した。また、図2-9左下の黄色いスキャニングフードをビニルシートで包み、その天井部にHEPAフィルタを内蔵した換気扇を取り付け、フード内に清浄空気が送り込まれるようにした。

3) 測定範囲の設定

スキャン後の画像データに対して、図2-11に示すような測定範囲を設定し、各測定部の分光反射スペクトルおよび色彩値を求めた。木材試料の測定部の大きさは約 $23\text{mm}\times 6\text{mm}$ (300×80 画素)であった。なお、金属製ホルダの中央部は宇宙空間に直接曝露されたが、周囲はExBASに固定するための金具で覆われていたので、直接曝露されたわけではない。そこで、金属ホルダ中央部を「金属被覆無」、カプトン3①直下の金属ホルダ部を「金属被覆有」という測定部位に設定した。



図 2-11 宇宙暴露試験体の測色範囲

(iii) 表面色測定結果

1) 宇宙曝露前後での分光反射率の変化

宇宙曝露前（青実線）、宇宙曝露後（赤実線）、真空曝露後（黒破線）の分光反射率を、試料ごとに図 2-12～14 に示す。この図において、例えばダケカンバのスペクトルは、測定範囲①と②の平均となっている。

図 2-12 の木材試料の場合、短波長側ほど反射率が小さく、長波長側ほど反射率が高いが、これは YR 系（Yellow-Red 系、黄赤系）としばしば呼ばれる木材色の特徴を反映している。また、宇宙曝露後に特定の波長の反射率が小さくなったり大きくなったりすることはなく、宇宙曝露前のスペクトル（青実線）がそのまま下に平行移動する傾向にある。これは材面が全体的に暗くなったことに対応する。

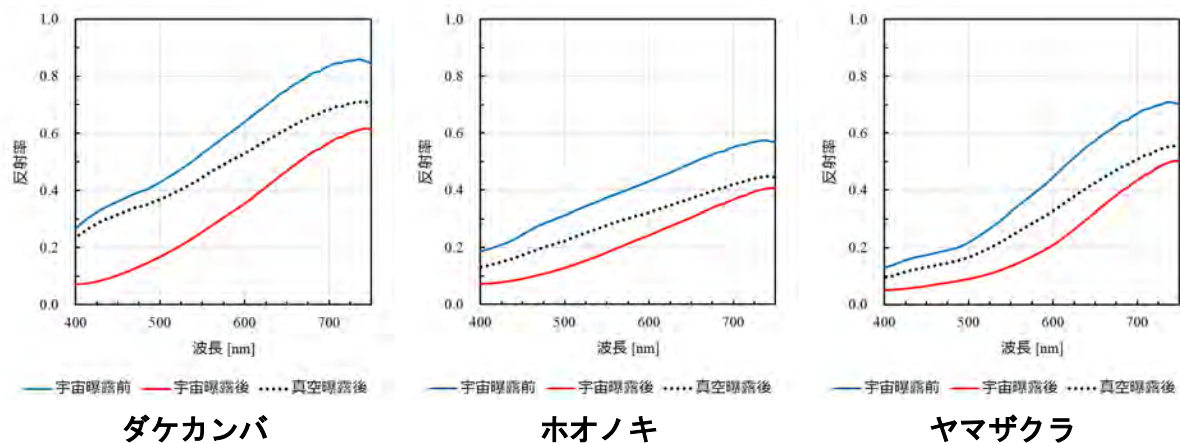


図 2-12 木材試料の分光反射スペクトル

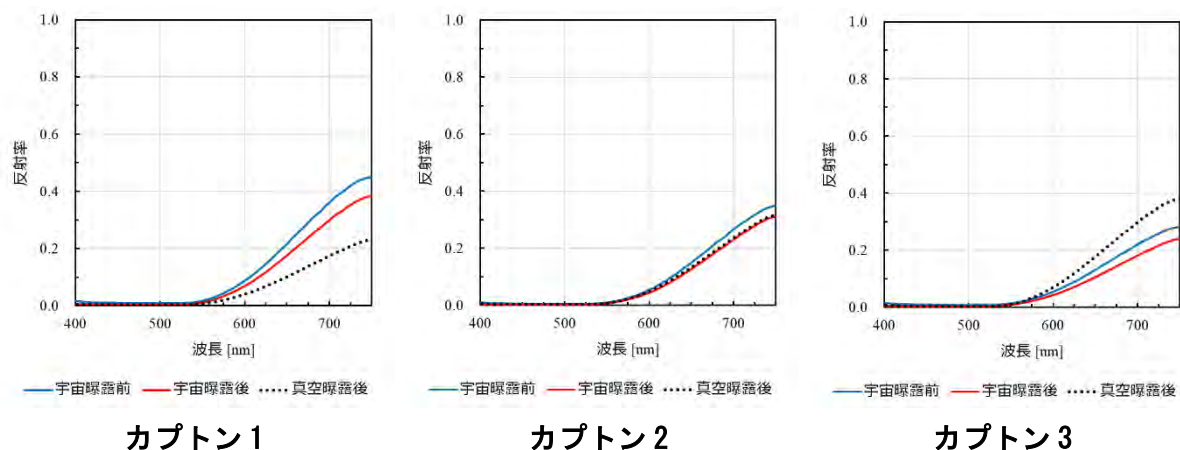
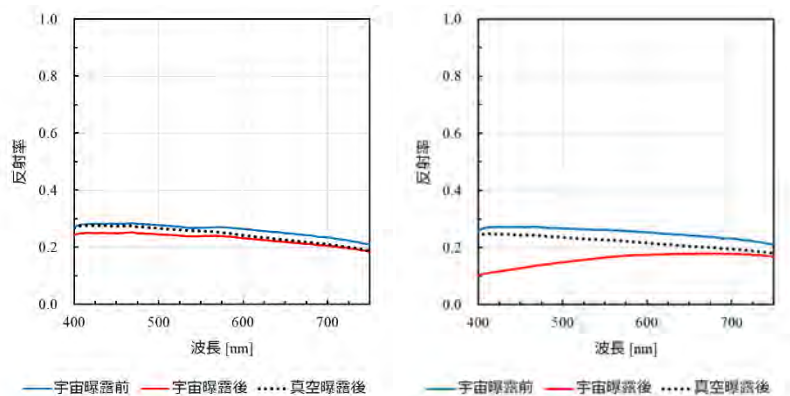


図 2-13 カプトンシートの分光反射スペクトル

カプトンシートはそれ自身が暗褐色であるため 550nm 以上の長波長側の反射が大きい(図 2-13)。また、シートに巻かれている木材の色の影響がシートを透かして現れているようである。宇宙曝露前後で比較すると、曝露後に曝露前よりもやや反射率が小さくなる傾向にある。

図 2-14 の「金属被覆有」は可視光域で均等に光を反射しており、宇宙曝露前後での変化は小さい。一方、被覆のないホルダ中央部の金属部分は、宇宙曝露前こそ被覆有部分とよく似たスペクトルを示すが、曝露後は 600nm 未満の短波長側の反射率が減っており、全体的に黄みがかかったことがわかる。



金属被覆有 金属被覆無
図 2-14 金属部分の分光反射スペクトル

2) 宇宙曝露前後での色彩値の変化

測定範囲に含まれる画素の分光反射率データから $L^*a^*b^*$ 表色値を求め、さらに各範囲の平均明度 L^* (明るさ)、平均彩度 C^* (濃さ)、色相角度 H° (色合い) を算出した。宇宙曝露前、宇宙曝露後、真空曝露後の L^* 、 C^* 、 H° の値を樹種別に示したのが図 2-15 である。なお、各色彩値は 2 つの測定範囲の平均値である。

いずれの樹種においても、宇宙曝露前後で明度が低下し (暗化)、また、ヤマザクラ以外は彩度が増大 (濃化) している。一方、宇宙曝露前後での色相角度の変化は小さい。

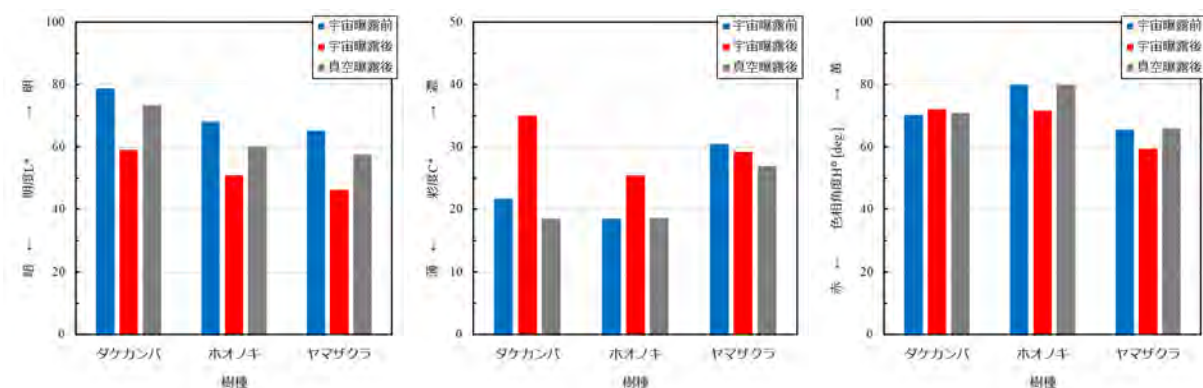


図 2-15 宇宙暴露試験体の色彩値の比較

(B) 木材の真空暴露実験

(1) 木材の真空暴露実験概要

2018 年 7 月より長期真空暴露実験を行っている。真空度は 1 Pa (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 2-16 に実験用チャンバ、図 2-17 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 2-16 真空チャンバ

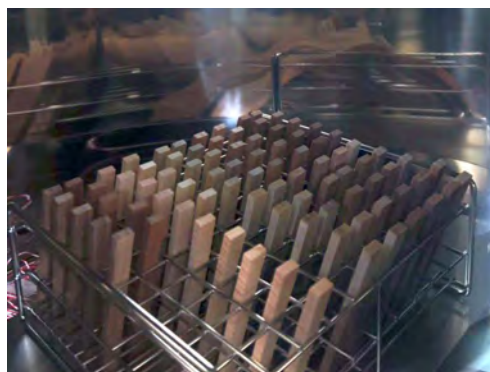


図 2-17 木材実験試料

(2) 木材の真空暴露実験結果

(i) 実験結果：相対ヤング率

図 2-18 に 25 ヲ月間真空暴露したホオノキ試料を、図 2-19 に 17 ヲ月間真空暴露したヤマザクラ試料を示す。ホオノキ・ヤマザクラのどの試料も変形はなく、表面もきれいなままであり、劣化の跡は見られない。相対ヤング率は、寸法変化は小さいと仮定し、真空暴露実験 1 ヲ月目の値で、規格化している。これは、試料内の含水率の曲げ剛性への影響を避けるためである。1 ヲ月間暴露した木材試料中の含水率はゼロと見なすことができる。図 2-20 に 25 ヲ月間真空暴露したホオノキの、図 2-21 に 17 ヲ月間真空暴露したヤマザクラの相対ヤング率の変化を示す。ホオノキ平行・直交試料の相対ヤング率は、真空暴露開始後約 12 ヲ月間は徐々に増加しているが、その後緩やかに減少する傾向を示している。25 ヲ月間の真空暴露を経験した後で、その上昇率は約 0~5%程度である。試料の相対ヤング率の標準偏差はほぼ一定である。17 ヲ月間真空暴露したヤマザクラ試料の相対ヤング率は、平行・直交試料とも増加傾向はみられず、ほぼ一定である。相対ヤング率の標準偏差は、ホオノキ試料と比較して約半分程度と小さい。



ホオノキ平行試料



ホオノキ直交試料

図 2-18 25 ヲ月間真空暴露したホオノキ試料



ヤマザクラ平行試料



ヤマザクラ直交試料

図 2-19 17 ヲ月間真空暴露したヤマザクラ試料

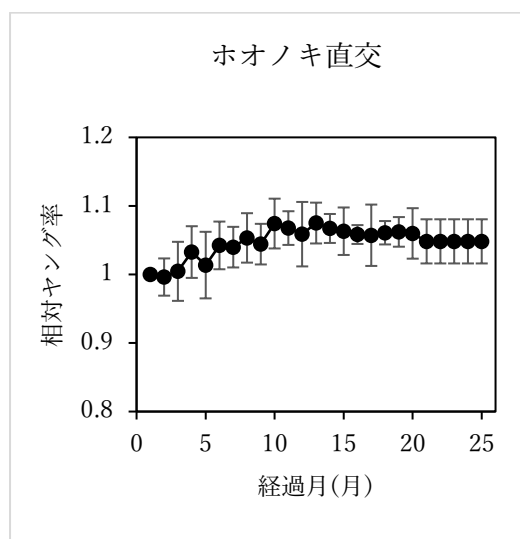
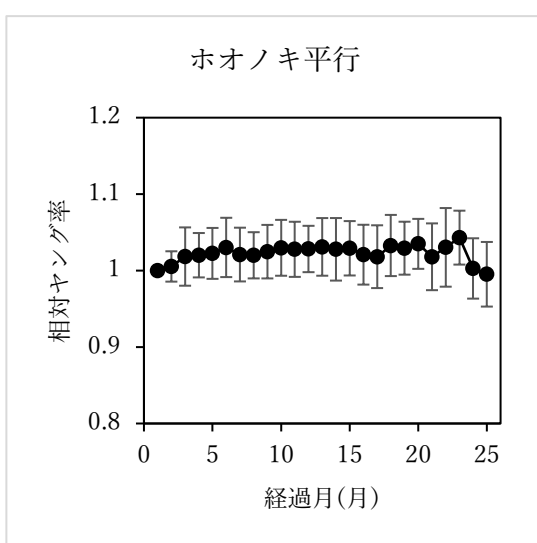


図 2-20 相対ヤング率の変化：ホオノキ（各試料数：17 ヲ月まで 10、それ以降は 5）

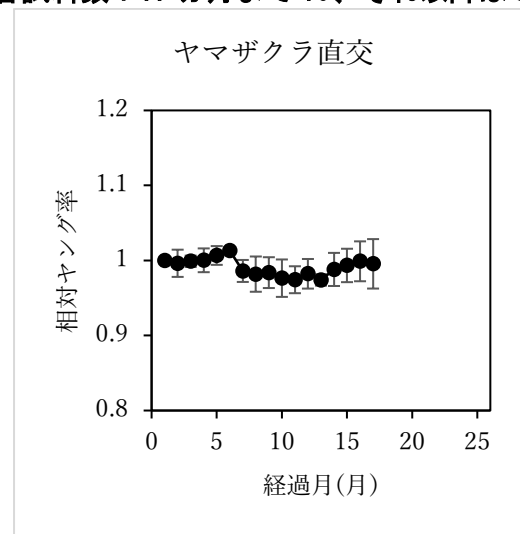
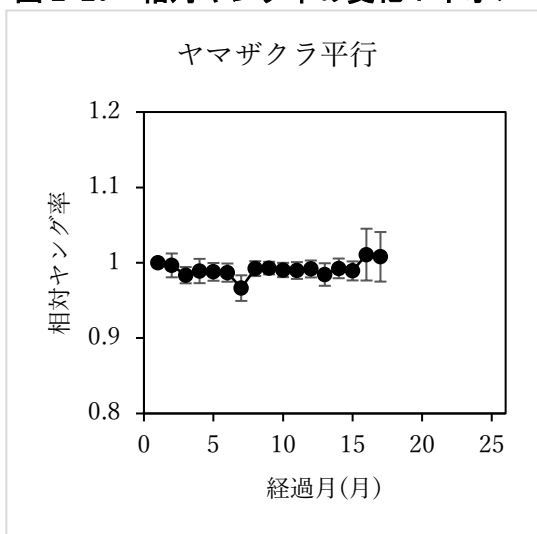


図 2-21 相対ヤング率の変化：ヤマザクラ（各試料数：5）

(ii) 実験結果：相対寸法変化

図 2-22 に平行試料の、図 2-23 に直交試料の真空暴露した場合の相対寸法変化を示す。各寸法は、乾燥処理を終了した時の寸法で規格化されている。図 2-22・23 とともにホオノキ、ヤマザクラ以外にキリ・カシ試料の寸法変化を含んでいる。ホオノキは 25 ヶ月間の真空暴露、その他の樹種は 17 ヶ月間の真空暴露である。

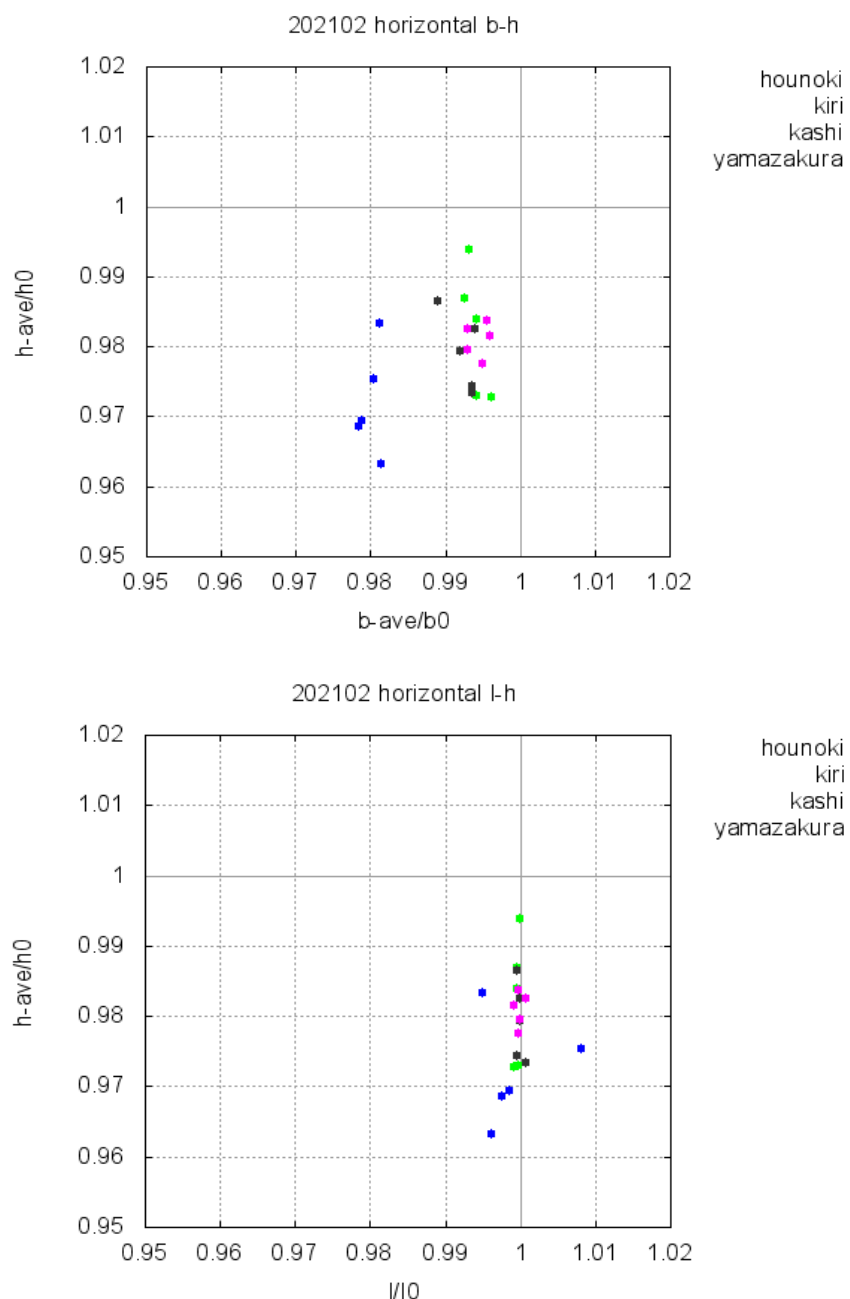


図 2-22 寸法変化：平行試料
l：試料長手方向長さ、b：幅、h：厚さ

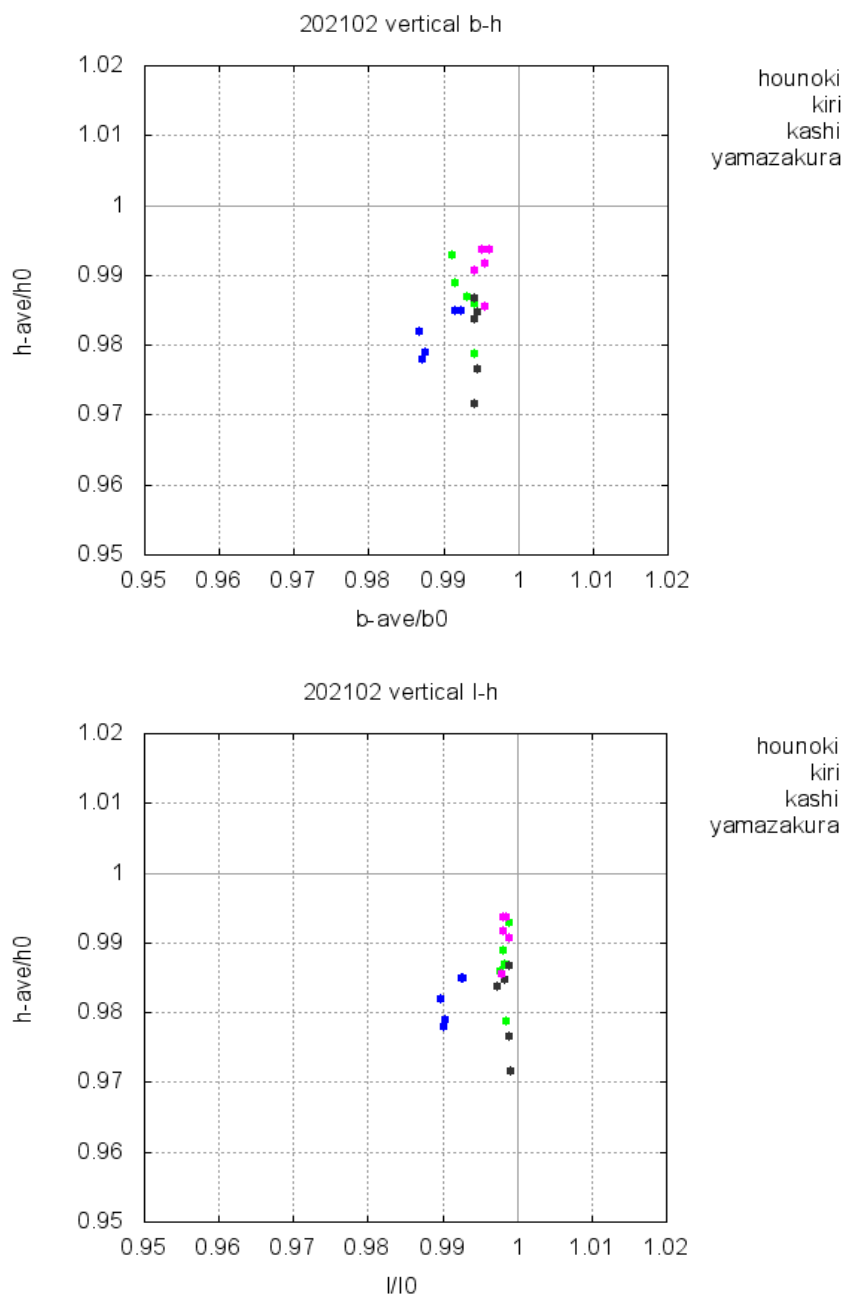


図 2-23 寸法変化：直交試料
l：試料長手方向長さ、b：幅、h：厚さ

真空暴露された木材試料は、時間経過と共に徐々に変化している。平行試料においては、どの木材も試料長手方向（繊維方向）の寸法変化は非常に小さい。特にヤマザクラはゼロに近い。繊維方向は即ちセルロース（ $C_6H_{10}O_5$ ）結晶方向であり、真空暴露しても木材は縮みにくいことが分かる。木目の放射線方向や接線方向はセルロース結晶方向と直交し、ヘミセルロース（多糖類の総称）やリグニン（生体高分子：分子式は不明）などの非結晶構造によって作られているため、より真空暴露の影響を受けて変化する。ホオノキ平行試料の幅方向に約－2%、厚さ方向は約－4%の変化が生じている。この場合もヤマザクラの変化は、幅方向に約－1%、厚さ方向に約－2%である。直交試料においては、ホオノキの幅方向は約－1.5%、厚さ方向は－2%の変化が生じている。ヤマザクラの幅及び厚さ方向の変化率はそれぞれ約－0.5%と－1.5%程度である。

ホオノキの比重は 0.48、ヤマザクラの比重は 0.60、キリの比重は 0.30、カシの比重は 0.87 程度である。真空暴露による木材の収縮の大きさは、キリの収縮率が小さいのを見ると、比重の大きさとは直接関係が無いようである。

③ 樹木育成実験系の確立

現在進行中の NASA によるアルテミス計画では、近い将来に火星での人類の居住が想定されている。私達は、火星で人類が様々な活動を継続するためには、樹木・木材が重要な素材として、人のメンタルヘルスにとって、そして新たな火星環境形成の主役として、欠かせないものになるであろう。

火星で木材を使用する場合、その木材はどこから調達するだろうか。全てを地球から輸送するとは不可能であることは容易に想像される。つまり木材の調達は、現地調達、地産地消が基本となる。火星は、大気圧が約 0.01 気圧、大気のほとんどが二酸化炭素 (CO_2)、気温は日較差が大きく平均気温は -63°C 、高レベルの宇宙放射線が降り注ぐなど地球の生物が生存するには大変きびしい環境である。火星への進出当初、このような環境下では外界から隔離され内部の環境が制御されたドーム様の構造物の中で地球の生物は暮らすことになるであろう。その際、ドーム様構造物内部の環境は地球環境と同じ環境とする必要はないであろう。

私達はこの視点から、特に 0.01 気圧という低い火星の大気圧に着目し、樹木はどの程度の低圧下において健全に生育できるのかを知るために、低圧下における樹木の育成研究を推進することにした。

(A) 低圧下における樹木育成実験系の製作

樹木を低圧下で育成することを目的に、図 3-1 の実験システムダイアグラムに示される低圧下樹木育成実験システムを構築した。これまで低圧育成実験では 2 つのチャンバーを使用し、ひとつが大気圧（コントロール）用、もう一つが低圧用であったが、今回新たに 2 つの低圧実験用チャンバを追加製作した。実験系は育成チャンバ、温度計、湿度計、 CO_2 センサ、給液タンク、LED 照明で構成し、低圧環境系ではこれらに加えてフリーズトラップ（湿度コントロール装置）、真空ポンプ、ピラニゲージ（真空計）、 CO_2 供給タンクを使用している。湿度、 CO_2 及び真空度は、マイクロコンピュータ（Arduino）を用いて制御した。育成チャンバは厚さ 1.5cm のアクリル製で、内部は直径 30cm、高さ 50cm である。蓋はアクリル製で厚さ 2cm である。LED 照明はタイマーで制御し、午前 6:00 から午後 8:00 までの 14 時間照射した。Photosynthetic photon flux density (PPFD) は $90 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ になるように調整している。養液はハイポネックス原液（株式会社ハイポネックスジャパン）を 2000 倍希釈したものを用い、手動で給液タンクから育成容器に供給した。大気圧下（コントロール）及び低圧下での育成環境条件は次の通りである。

【大気圧（コントロール）】

照明： $90 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ （14 時間）

温度： $20 \sim 25^\circ\text{C}$

湿度： $50 \pm 5\%$

CO_2 濃度： $500 \pm 50\text{ppm}$

気圧：1 気圧

【低圧環境】

照明： $90 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ （14 時間）

温度： $20 \sim 25^\circ\text{C}$

湿度： $50 \pm 5\%$ （1 気圧相当に値する蒸気密度）

CO_2 濃度： $500 \pm 50\text{ppm}$

気圧：1.0・0.75・0.50・0.25・0.1 気圧（ ± 0.02 気圧）

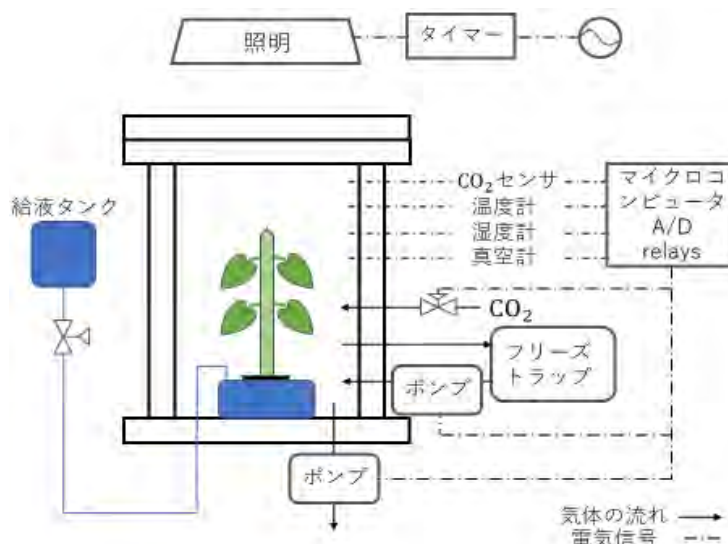


図 3-1 低圧下樹木育成実験システムダイアグラム
育成チャンバ：アクリル製 直径：30cm 高さ：50cm

樹木育成実験用樹木には、京都大学生存圏研究所で育成されているポプラ（*Populus Alba* L.）を使用する。ポプラ苗木は京都大学生存圏研究所馬場啓一氏より提供を受けている。

低圧下樹木育成実験では、約 10 センチの高さのポプラ苗木が低圧チャンバーの天井に到達するまでの約 3 週間を 1 実験サイクルとしている。CO₂ は光合成により苗に消費されるので、設定値（500ppm）よりも低くなると自動的に電磁バルブが開き、新しい CO₂ がボンベから供給されるようになっている。同様に苗に消費される水給液系も必須である。チャンバー内が低圧になるためにその低圧が給液タンクに及ばないようにする工夫が必要となる。マイクロコンピュータとして Arduino を使っている。Arduino は安価なマイコンであるが、各種計測センサー用のライブラリーが充実しており、プログラムも C 言語で作れるので扱いやすい。照明は LED ライトを使用し、昼 14 時間、夜 10 時間の昼夜サイクルを用いている。図 2 に令和 4 年度に新たに製作した低圧下樹木育成実験装置 2 基の写真を掲載する。

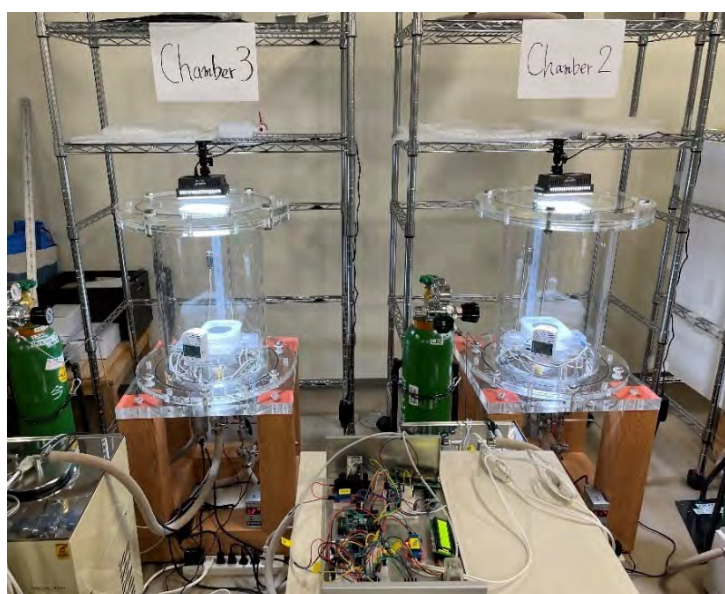


図 3-2 低圧下樹木育成実験装置
右：Chamber-2 左：Chamber-3

(B) 低圧下における樹木育成実験環境の構築

(1) 湿度校正実験

低圧下樹木育成実験システムでは、温湿度計測のために AOSONG 社製 DHT-22 を使っている（図 3-3）。この温湿度センサーは、低価格であるが温度は -40°C から $+80^{\circ}\text{C}$ まで $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の精度（公称値）で、湿度は 0% から 100% まで $\pm 2\%$ の精度（公称値）で測定可能である。測定方式は温度が半導体アナログ方式、湿度が静電容量式であり、得られた電圧を 8 ビットデータとしてデジタル化している。DHT-22 は、原理的に低圧下でも湿度の計測に使えるはずであるが、低圧下での使用は保証されていない。



図 3-3 温湿度センサー DHT-22 (AOSONG 社)

低圧下で DHT-22 が使えるのかどうか、また、その精度を求めるために校正実験が不可欠である。図 3-4 に DHT-22 の湿度の気圧校正実験の結果を示す。ここでは、1 気圧において相対湿度を 82% まであげ、その後徐々に気圧を下げて行っている。樹木育成チャンバ内の水分子数は気圧の低下に比例して減少していくので、ある気圧下での正確な相対湿度が計算できる。この校正実験中に気温は変化していない。この結果を見ると、DHT-22 の湿度はデータのバラツキはあるが、気圧が低下してもほぼ線型性を保っていることがわかる。

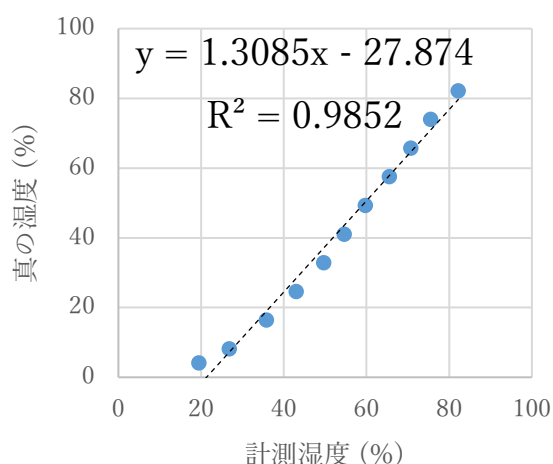


図 3-4 DHT22 湿度計測における気圧校正実験結果

気圧校正実験の結果から DHT-22 の湿度計測系は低圧下でも 0.3 気圧程度まで使用可能であることが分かった。現在の気圧校正の方法では、1 気圧下での湿度を 100% にしても、0.1 気圧では 10% 程度になる。これは、DHT-22 の湿度計測精度が $\pm 2\%$ であるため低圧での湿度の

校正精度が上がらないことを意味している。現在、0.3 気圧以下での正確な湿度測定の方法を検討中である。

(2) CO₂ 校正実験

現在、大気中に含まれる CO₂ は約 400ppm 程度である。樹木は、光合成により CO₂ と水からブドウ糖と水と酸素を作り出している：



もちろん、樹木は呼吸もしているので、酸素を吸い CO₂ を排出している。このため、樹木育成チャンバー内の CO₂ 濃度は常に変動している。さらに、昼間に光合成が活発になると樹木育成チャンバー内の CO₂ が足りなくなるために、新たに CO₂ を外部から供給する必要がある。

そのため CO₂ センサーは、樹木育成チャンバー内の CO₂ 濃度の測定ばかりでなく、CO₂ を外部から供給するための電磁弁の開閉信号を出す役割も担っている。現在、私たちが使っているのは、SenseAir 社製 K30 EQC である（図 3-5）。このセンサーは、低価格であるが 5000ppm まで ±30ppm の精度で CO₂ 濃度を測定可能である。測定方式は非分散型赤外線吸収法（NDIR）であり、大気中の CO₂ 分子により吸収される赤外線量から CO₂ 分子濃度を測定する。原理的に低圧下でも CO₂ 濃度の計測に使えるはずであるが、低圧下での使用は保証されていない。



図 3-5 CO₂ センサー K30 EQC (SenseAir 社)

低圧下で K30 EQC が使えるのかどうか、また、その精度を求めるために校正実験が不可欠である。図 3-6 に K30 EQC の校正実験の結果を示す。ここでは、校正実験は 2 回行われている。1 回目は大気圧下で約 1200ppm の CO₂ 濃度を定め、そこから 0.1 気圧ごとに気圧を下げ、CO₂ 濃度値を測る。2 回目は大気圧下で約 2000ppm の CO₂ 濃度を定め、そこから気圧を下げ、同様に CO₂ 濃度を測定している。この結果を見ると、K30 EQC はデータのバラツキはあるが、気圧が低下しても線型性を保っていることがわかる。

校正実験の結果から K30 EQC が低圧下でも 0.1 気圧程度まで使用可能であることが分かった。実際の樹木育成実験に使用してみると、0.3 気圧程度まで樹木の呼吸や光合成による周期的な CO₂ 濃度の変化を捉えることができていた。しかしながら、0.2 気圧以下になると、周期的な CO₂ 濃度変化を捉えることができなくなる。これは K30 EQC の測定限界なのかそれとも他の要因によるものなのか、現在、検討を行っているところである。

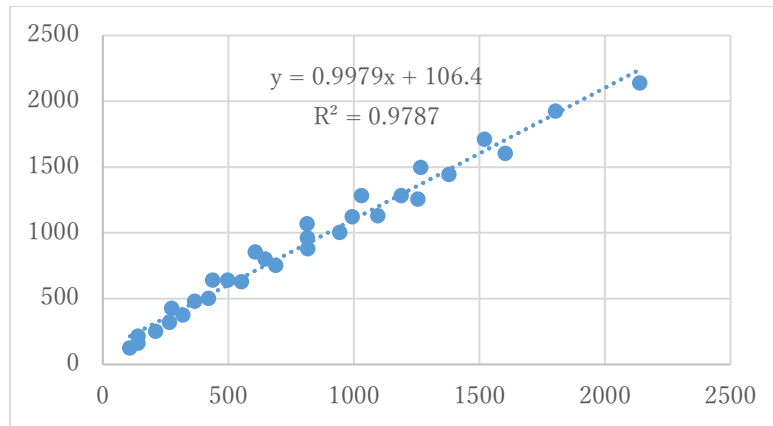


図 3-6 K30 EQC 較正実験 (単位 ppm)

(C) 低圧下におけるポプラ育成実験

(1) 育成実験概要

火星等地球外惑星環境において樹木を育成する場合、様々な環境の違いによる生産性や材形成への影響が考えられる。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、低圧下樹木育成実験装置の性能の確認及び樹木の生長と大気圧との関係を明らかにして圧力環境の異なる環境における樹木育成法の確立のための基礎データを得ることを目的として育成実験を行った。樹木育成チャンバの環境制御のために次の2つのArduinoプログラムを使用した：

1. sketch_temp_RH_SDcard_Time_CO2_v2.1 (参考資料5-1)：気温・湿度・CO₂濃度制御
2. Sketch_vacuum_control_v1.6 (参考資料5-2)：真空度制御

材料：ギンドロ (*Populus alba*) 挿し木苗

方法：

- 実験室の温度：23～25℃
- チャンバー内相対湿度：50 (±5) %
- チャンバー内CO₂ 濃度：500 (±50) ppm
- 気圧：大気圧及び0.3気圧

測定項目・成長解析：

- 樹(苗)高、地際直径、葉面積、各部の乾燥重量
- 葉の特性：葉数、葉面積、LMA (葉の乾燥重量/葉面積)
- 光合成活性：クロロフィル蛍光のパラメータFv/Fm (最大光量子収率)。
- LMA (葉の乾燥重量/葉面積：LMAは植物成長の主役であるの葉(光合成器官)の重要な特性であり、植物の生存戦略にとって重要な指標である。一般に水不足下で生育した植物ではこの値が大きくなる。
- クロロフィル蛍光：光合成反応は葉緑体を構成するチラコイドとストロマで起こる連続した二つの反応系からなり、それぞれをチラコイド反応(明反応)、ストロマ反応(暗反応)と呼ぶ。前者は光エネルギーを化学エネルギーに変換する電子伝達系で、ATPとNADPHが生成される。これらが後者のストロマで起こる同化反応へのエネルギー供給と還元作用として機能している。植物が健全であれば光化学系IIが吸収した光エネルギーのうち80～83%を化学エネルギーに変換(最大光量子収率、Fv/Fmは0.80～0.83)するが、植物が何らかのストレス(水不足、病気など)を受けると、この値が低下する。本実験ではこのパラメータを測定することで、低圧が植物の光合成にとってストレス要因か否かを検討した。
- T/R 比について：T/R 比は植物の地上部乾燥重量/地下部乾燥重量の比を表す。一般に植物

は水不足下で生育すると T/R 比は小さくなる（相対的に地下部が多くなる）。これは、葉で作った光合成産物を葉や幹などの地上部の成長よりも地下部の根の成長に多くを配分し、よりたくさんの水を吸収することを優先する乾燥に対する適応戦略と考えられる。

(2) 育成実験結果

対照区（1.0 気圧）と低圧区（0.3 気圧）それぞれポプラ（*Populus alba*）さし木苗 1 個体について 22 日間育成実験を行った。図 1 に実験中のポプラの生育状況を示す。ポプラ苗木は対照区・0.3 気圧区とも健康で実験終了時には、ほぼ育成チャンバの蓋付近に到達した。



対照区 (1気圧)

低圧区 (0.3気圧)

図3-7 低圧下樹木育成実験中のポプラ苗木

実験結果：対照区（1.0気圧）と低圧区（0.3気圧）それぞれポプラ（*Populus alba*）さし木苗 1 個体について 22 日間育成実験を行った。両区の間で成長量に違いは認められなかったが、複数の測定項目では興味深い結果が得られた。

(i) 樹高の変化

図3-8に樹高の変化を示す。回帰直線の傾きは成長速度を表す。この図から、対照区（1.0気圧）の傾きは0.2581、低圧区（0.3気圧）の傾きは0.2385とほぼ同等の値を示した。このことか

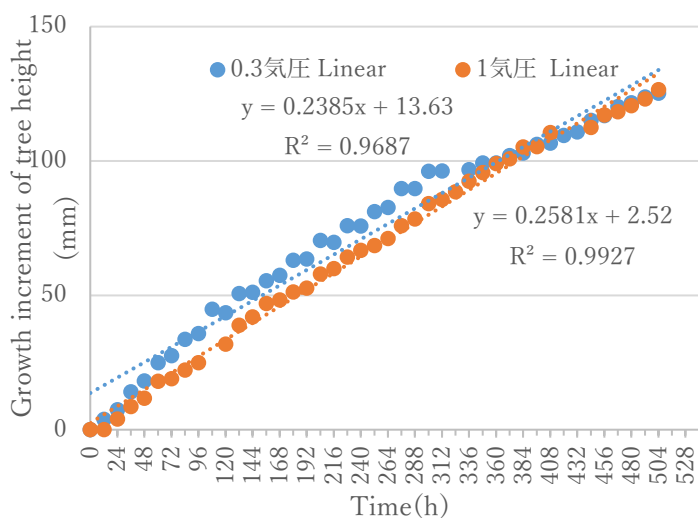


図3-8 樹高の変化

ら対照区（1.0気圧）と低圧区（0.3気圧）におけるポプラの樹高成長には差がなく、0.3気圧の低圧下でも1気圧の大気圧下と同様に伸長することがわかった。

(ii) クロロフィル蛍光

低圧・対照区ともFv / Fm は0.81前後で両区の間で差は認められなかったことから、0.3気圧の低圧はポプラの光合成にとってストレスではないと考えられる。

(iii) LMA（葉の乾燥重量/葉面積）

図3-9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。なお、横軸の葉序は右ほど新しい葉であることを示している。この関係が低圧区と対照区の違いがあるのかを検討するために共分散分析を行った結果、両区とも若い葉ほど有意にLMAが大きくなること、そして、対照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。これは、低圧区の葉の方が広がらず少し縮んでいるように見えることにも符合している。

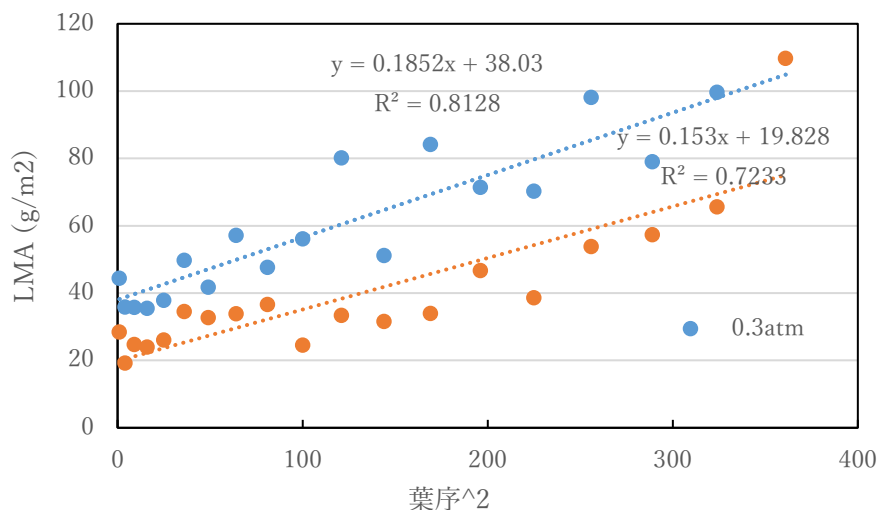


図3-9 LMA（葉の乾燥重量／葉面積）

(iv) T/R比

低圧・対照区で生育したポプラの樹体全体の乾燥重量に占める各部の乾燥重量の割合を図3-10に示す。この図からポプラ苗の地下部である主根と細根の割合は0.3気圧の低圧区の方が1気圧の対照区より大きいことがわかる。これを数値としてT/R比で示すと、低圧区が3.9、対照区が5.8であり、低圧区で根の占める割合が大きいことがわかった。さて、実験に供したポプラ苗はさし木苗である。上で計算したT/R比には地下部として主根を含めた。種子から育成した苗であれば主根も地下部に含めるが、さし木苗の場合、ここで主根とした部位は元々は枝であり、根として分化した組織ではない。そこでもう一つのT/R比、（葉＋葉柄＋木部＋師部＋主根）／（細根）を計算した。その結果、低圧区が7.3、対照区が16.1となり、低圧区の苗で根の占める割合が対照区に比べて格段に大きい、つまり光合成産物の多くを根を増やすことに使っていることがわかった。

0.3気圧下で育ったポプラのLMAとT/R比は乾燥等水不足下で生育する植物に見られる反応と類似していた。その理由として、水耕栽培で育成したポプラでも水不足の状態だったのか、あるいは低圧それ自体または低圧が他の環境要因を変化させることで、植物の形態形成に影響したことが考えられた。本実験装置ではチャンバー内の空気組成について、CO₂濃度は両区とも500ppmに調整しているが、それ以外のガスについては0.3気圧に下げたことで、1気圧の

空気組成に比べて30%の分圧に低下している。このことを考慮すると、低圧区におけるLMAとT/R比の変化が低酸素分圧に影響された可能性も排除できない。この点は今後の検討課題であらう。

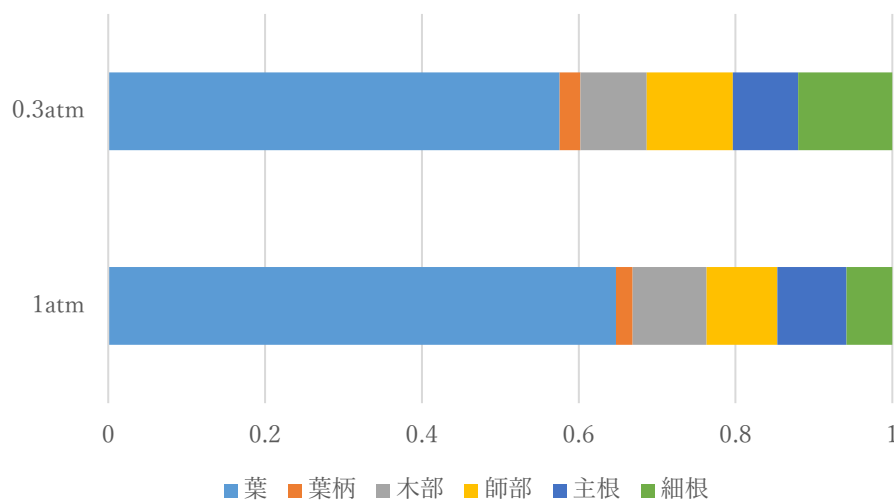


図 3-10 樹体各部の重量割合 (%)

今回の低圧樹木育成実験の結果より、現在の低圧樹木育成実験システムで大気圧から0.3気圧までの樹木育成実験の実施が十分可能であることが判明した。今後、より低圧下での樹木育成実験が可能になるように実験システムを改良していく予定である。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

(A) 有人宇宙学講義

(1) 有人宇宙学講義概要

「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。通常のリレー講義は 90 分間で行ったが、演習の内 3 回はリレー講義の実施日に行っており、講義 60 分間と演習 30 分間の組み合わせとした。令和 4 年度の「有人宇宙学」シラバスを参考資料 7-1 に掲載する。この「有人宇宙学」は大学院横断教育科目群の研究科開講（大学院総合生存学館）として実施しており、大学院生の履修者には単位を提供できる。専門教育プログラムで主対象とする学部生は、聴講という形で受講が可能となっている。令和 4 年度は 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。

講義「有人宇宙学」では、「宇宙を知る」「宇宙を生きる」「宇宙を考える」「宇宙を作る」の 4 つのテーマに基づいた 10 回のリレー講義および 3 回の演習そして最終回は修了式を実施した。講義一覧を表 4-1 に示し、それぞれの講義概要を以下にまとめる。

表 4-1 令和 4 年度「有人宇宙学」講義一覧

テーマ	講義日	講義名	担当講師
有人宇宙学	10月05日	有人宇宙学	土井隆雄、山敷庸亮 田口真奈
宇宙を知る	10月07日	宇宙環境工学	山敷庸亮
宇宙を知る	10月19日	宇宙探査工学	清水幸夫
宇宙を生きる	11月02日	宇宙医学	寺田昌弘
宇宙を生きる	11月09日	宇宙生命科学	保尊隆享
宇宙を生きる	11月16日	宇宙木材工学	村田功二
宇宙を考える	12月14日	宇宙法	青木節子
宇宙を考える	12月21日	宇宙人類学	岡田浩樹
宇宙を考える	01月04日	宇宙霊長類学	足立幾馬
宇宙を作る	01月11日	宇宙居住学	稲富裕光

[有人宇宙学]（参考資料 7-2）

世界の有人宇宙開発では、アメリカ合衆国はプロジェクト方式で有人宇宙活動を行っており、有人宇宙ミッションの数が多い期間と少ない期間が起きている。ロシアは国策として有人宇宙活動を行ってきたため、ほぼ毎年一定数の有人宇宙ミッションを行われてきた。中国も 2003 年より国策として有人宇宙活動を展開中であり独自に有人宇宙基地を 2022 年に完成した。日本の有人宇宙活動は 1985 年から 2008 年までを第一期とし、それまで日本が持っていなかった宇宙における科学技術の獲得をめざした。第二期は 2008 年から現在まで日本実験棟「きぼう」を中心に有人宇宙活動を実施してきた。有人宇宙学は、人類が宇宙に展開することを記述できる新しい学問として定義される。有人宇宙学の目的は、宇宙に持続可能な人間社会を作るための条件を探ることである。宇宙における社会規模を考えると、1992 年にイギリスの霊長類学者ロビン・ダンバーが提唱したダンバー数（150 人）が良い基準となりえて、円滑な社会が創造できるのではないかと予想される。

[宇宙環境工学]

自然資本が存在しない月や火星などへの惑星への閉鎖循環系移転を考えた時、地球の自然資本の核となる“コアバイオーム”を移転することが重要である。特に、海は地球の 7 割を占めており、生態系も海洋の方が陸域に比べ豊かであるため、海洋生態系を宇宙基地に構成

することは重要であろう。火星のテラフォーミングを考える際、最も重要となるのは水の確保であるが、火星は温度と大気圧が低すぎる。また、火星の大気は95%が二酸化炭素であるため、たとえ二酸化炭素の気圧を上げて海を形成したとしても、二酸化炭素が海に溶解込み、システムの循環が破綻することが考えられる。このため大気圧を上げるためには、地球のような窒素大気が必要である。さらに大気圧を増やすためには、火星の人工的な磁場の形成が有効であるとも考えられている。火星では年に1回程度の小惑星の衝突が観測されていることや、絶対的な水の量が少ないため水を確保できたとしても熱移動のために砂嵐が続くことが火星移住を実現するための解決すべき問題点として挙げることができる。

[宇宙探査工学]

有人宇宙学は宇宙という視座から地球または人類や生物の未来を考察する学問であると考えられ、宇宙の探求には自然科学分野と人文社会科学分野の両面が必要である。ミッションの成功のためには1. 安全管理 2. 信頼性の確保 3. 品質保証 以上3つの観点から宇宙開発を行うことが必要とされており、失敗からも新たなことを発見することが重要視されている。はやぶさの工学的目的は、1. 電気推進ロケットの実証 2. 星座表とカメラ画像を比較し、目的地の天体に自力航行を可能とさせる 3. 極低重力天体イトカワへのタッチダウン技術の確立 4. 地球突入時の高温に耐えるカプセル開発によるサンプルの地球への持ち帰ることであった。はやぶさ2のミッションでは、イトカワとは異なるタイプの小惑星リュウグウからサンプル採取を行い地球に持ち帰ることで、太陽系や地球、生命の起源を探る宇宙科学ミッションを目的とした宇宙科学衛星であった。はやぶさ2は今後2つの小惑星(2001 CC21と1998 KY26)との会合に向け現在太陽系を航行中である。

[宇宙生命科学]

生命現象は地球の枠を超えた普遍性を持つのかを考えることが宇宙生命科学である。その中でも食物や燃料としてのエネルギーや酸素の供給において人類は植物に依存しているため、宇宙植物科学は重要である。植物の特徴は独立栄養であること、固着生活を行うことであり、固着生活を行うことから、周辺環境に対する高い環境応答能力を有す。また、動けないことから柔軟な生殖と他の生物への共生関係を築いている。植物が応答する環境の中でも、重力は地球と宇宙で大きく異なり、地球では重力は大きさと方向が最も安定した環境要因である。このため、植物は、重力屈性により軸性という特徴的な形態を形成している。重力シグナルは根冠で受容されたのち、分裂帯を通して変換・伝達され、伸長帯で応答が起こる。重力方向の認識は、根冠中央部のコルメラ細胞においてデンプン体が重力方向に沈降することによって行われている。宇宙において植物は本来持っている性質に従った自発的形態形成を示すが、地上では重力によりその性質が隠れていると言える。宇宙実験により、真の微小重力環境においても水中と同様の現象が見られることが示され、伸長成長促進のメカニズムとしては、細胞壁の軟化と横向き微小管の増加によるセロロース配向の変化が指摘されている。また、宇宙では、有性生殖や老化が抑制されることが示唆されている。

[宇宙木材工学] (参考資料 7-3)

木材が宇宙環境において使用可能かを考察する際、考えるべき環境として温度環境や気圧環境が挙げられる。国際宇宙ステーション(ISS)の高度は熱圏の高度であるが、この高度では周辺環境は熱力学的温度は700℃程度であり、大気圧は 10^{-7} 気圧となる。まずはこのような環境に木材が耐えられるかを解析する必要がある。木材を地球外において使用する場合に利点となる特徴としては、比強度が強い、加工が簡易である、熱伝導率が低い、生産時に二酸化炭素を生み出しにくいなどの特徴が挙げられる。反対に、欠点となる特徴としては、異方性、寸法安定性が低い、個体差が大きいなどの特徴が挙げられる。木材は宇宙環境では真空であるため含水率は0%であり、燃えることも腐ることもないことが予想できるが、激しい温度変化と宇宙放射線については未知である。これまでの実験では、ホオノキを-150℃から150℃ま

での温度変化に曝露させたが、剛性は比較的安定していることが示されている。他の高分子材料であるエポキシやポリスチレンなどは、このような温度変化下では急激に物性が変化するため、木材の物性の安定性が見える。また、この安定性は強度に関しても同様である。熱膨張率は繊維直方向であればアルミニウムと同等であり、繊維平行方向であれば鉄とほぼ同等であることから、他の高分子材料に比べて木材は膨張率は低いことが見て取れる。宇宙環境では上述の環境に加え、原子状酸素の影響が顕著であり、銀河宇宙線も強い影響が予想されるが、 γ 線の 10kGy 程度では強度の低下は引き起こされないと考えられるが、重粒子などの他の線ではどのような影響が引き起こされるかはこれからの研究課題である。

【宇宙霊長類学】

比較認知科学とは、進化の中で認知機能がどのように形成されてきたのかを調べることを一つの目的としている。比較認知科学のヒト社会への応用として、ヒトの進化の中で時間軸とは大きく逸脱した環境変化の中で生じるころのゆがみを捉えることが挙げられる。宇宙進出がヒトの認知に与える影響や環境変化により生まれる認知のゆがみとは何かを解明することは比較認知科学に新たな知見をもたらすことが期待される。宇宙で継続的な居住・活動を行うためには、このような認知的ゆがみのなかでも、個人的変化である短期的変化と、世代を超える中で起こる変容である長期的変化の両方の側面から宇宙におけるころの有様を解明するべきであると考えられる。比較認知科学とはころに関する生物学的アプローチであり、ころとはかんがえ、判断や行動に影響を与える情報処理過程である。ことばの進化も比較認知科学の分野では重要な研究課題である。随意的呼吸制御や発声制御はことばを発するために非常に重要である。しかし、これらはヒト以外は持たず、ことばはヒト独自のものである。ことばによりヒトは言葉と代置性に優れ、ことばを通して生きる時空間軸の範囲を広げることが出来る。また、ことばにより表現型を獲得することで、ヒトは他個体へのフィードバックが可能である。

【宇宙医学】

宇宙医学とは、ヒトが宇宙に行ったらどのように体が反応するのかを研究する学問である。微小重力下における筋肉への影響としては、速筋繊維と遅筋繊維の入れ替えが起こる。速筋繊維は持久力に優れており、遅筋繊維は瞬発力に優れている。宇宙では抗重力筋の萎縮が顕著になるが、マウスの実験では、地上ではヒラメ筋へ 3 か月負荷を書けない場合はヒラメ筋の萎縮が見られたが、宇宙空間においては遅筋の速筋化が観察された。宇宙環境への骨への影響も研究対象となっている。宇宙においては骨からカルシウムの溶出が起これ、骨量減少と尿路結石のリスクが高まることに加え、骨量減少速度が約 10 倍になることが報告されている。これらの原因として、骨や骨格筋は分解と形成を繰り返しているが、無重力環境によりこの分解と形成のバランスが壊れるため引き起こされることが考えられている。心循環系や心循環器系への宇宙環境の影響としては、無重力により頭部に地上に比べて多くの血液が集まるために引き起こされる Moon face や Bird leg が有名であるが、他にも宇宙飛行士の心臓が球形に約 10%程大きくなることによる血液循環の非効率化が懸念されており、現在研究が行われている。また、体液シフトによる視力低下 (SANS) も現在研究されており、現在のところ、視力低下の原因は脳の位置の違いのために引き起こされる可能性が示されている。

【宇宙法】

国際宇宙法は国際法の一分野であるため国際法の特徴を持つ。国際法は法律の定立、適用、是正は国家が行うため、平等である国家間に成立する宇宙法は強制力が弱く、法と非法の区別が曖昧であることが特徴であるが、宇宙法においてはこの特徴が顕著である。宇宙法の成立を担っている宇宙空間平和利用委員会 (COPUOS) は 1957 年のソ連の衛星打ち上げ成功の翌年に暫定的な委員会が設置されたものを始まりとしており、1962 年以降はコンセンサス方式を採用している。拘束力をもつ正式な国際法は条約や慣習法だが、実質的法源である国連総

会決議などのソフトローも厳密には法ではないが実際には有用である。国際宇宙法としての天体の法的地位の解釈は今後問題となると予想されている。例えば公海は国際公域、深海的は人類の共同財産とされているが、天体については、宇宙条約にのみ加入する国にとっては国際公域、月協定に加入する国にとっては人類の共同財産という地位になる。天体活動に宇宙条約を適用する場合、宇宙条約内の宇宙空間の探査・利用の自由と宇宙の共通利益性のバランスが困難であり、特に第一条の「すべての国の利益のために」の解釈は先進国と途上国で分かれていたが、スペースベネフィット宣言によりこの解釈の差異は解消されている。また、第二条では宇宙所有権は国家による取得の対象とはならないことを決めている。ここでは個人の土地所有については明記されていないが、個人の土地の所有には国家が当該領域を編入すること必要となるが、国家の土地所有が禁止されていることから個人による占有を所有に転換することはできないと解釈できる。また、宇宙条約では土地所有については法解釈に頼るが、月協定には月の資源の国家、個人による所有の禁止は明記されている。天然資源の開発については月条約では詳細は規定はされていないが、国際レジームのルールによることが定められており、資源分配の条件として利益を公平に分配することが定められている。

【宇宙人類学】

宇宙研究における人類学の役割は、宇宙を通して現在の社会を見ることで、未来を構想することにある。人類学の一般的なアプローチ手法としてはフィールドワークが主な手法となるが、宇宙人類学は理論が主な手法となる。社会の形成には技術が必要であり、ゴリラやチンパンジーなどは森の環境内でしか住めないが、ヒトは環境に対して技術を使うことで適応することが可能である。この文化による環境への適応を始めてから、ヒトの生物学上の進化はストップしている。文化人類学的視点として、文化には人類全体の特徴である CULTURE と個別社会集団の中で形成されたローカルな文化である cultures の 2 種類が存在する。文化人類学は、cultures を通して CULTURE を考察することを目的としている。人類にとって重要と考えられる 3 つの転換点は：1. 環境を超えてヒトの生息域を広げた出アフリカ、2. 意図的な環境変化を可能とした農業革命、3. 抜本的な環境変化と爆発的な人工増加を引き起こした産業革命、である。宇宙進出は 4 つ目の転換点となり得るかが今後の宇宙開発における宇宙文化人類学にとっても重要な考察対象である。月面上に 1000 名が居住する村である Moon village を考える際は、“村” が示すイメージは culture により固定され月面上のコミュニティは地上のコミュニティの再現とすべきなのかの考察は、短期的・中期的・長期的適応によって変わると考えられる。

【宇宙居住学】

今後の有人宇宙探査としては、月近傍に数週間の滞在を実現し、次段階として月における水や燃料の確保の実証、その後に火星滞在を目指すシナリオが想定されている。月面環境は真空で起伏が激しく、太陽風に曝露されていることが特徴的であり、今後の月面開発には、これらの環境について様々な場所で精密に調べる必要がある。また、電磁場環境やレゴリスについてなどについてもインフラ整備のために詳細に調べる必要があると考えられる。月面における建築については、現在のところは月開発においても地上で発展させてきた土木技術を応用することを前提としているが、月面への応用に際しては、これらの技術の宇宙仕様化や設備の輸送コストなどを考慮した軽量化などが考案される必要があると考えられ、土木業界や宇宙開発業界には新たな挑戦となる。また、月面基地に関しては大きく分けて 2 種類の月面基地が現在考えられており、一つは月の縦孔を利用したような月環境を利用した月面基地、もう一つは人工環境を作り出し、居住を可能とする月面基地である。宇宙居住科学が月・火星に社会を作る研究テーマに取り組むには、なぜ社会を作るのか、その目的は科学探査やエンターテインメントなのか、これらの目的は経済的に回るのか、法的整備はどのようにすべきかなどを考える必要がある。

(2) 有人宇宙学演習

講義「有人宇宙学」における演習は、3つの班に分かれて班ごとに「150人の人間が暮らす小社会を月（1班）、火星（2班）と月・小惑星（3班）に建設するための基礎設計をせよ」という課題で実施した。演習方法としては、有人宇宙学における4つの研究課題（宇宙を知る、宇宙を生きる、宇宙を考える、宇宙を作る）に沿って進める。演習スケジュールを表4-2に示す。それぞれの研究課題では次の検討を要求した。

1. 宇宙を知る：各場所の環境を調べる
（重力、放射線、大気、水など）
2. 宇宙を生きる：1の環境に適する生態系は何か
（食料生産を如何に行うか。自給自足するための条件は何か）
3. 宇宙を考える：1、2の条件を満たすための小社会構造は何か
（どのようなルールが必要か。どのような社会基盤が必要か）
4. 宇宙を作る：1、2、3の条件を満たすための技術課題は何か
（現存する技術で対応可能か。新しい技術が必要か）

表4-2 令和3年度「有人宇宙学」演習スケジュール

講義日	演習/提出/発表	内容
10月05日	有人宇宙学開講、自己紹介	コンセプトマップ#1、班分けと各宇宙社会候補地の説明
10月26日	有人宇宙学演習 1	「宇宙を知る」についての進捗発表
12月07日	有人宇宙学演習 2	「宇宙を生きる」についての各班の進捗発表
1月18日	有人宇宙学演習 3・4	「宇宙を作る・考える」についての各班の進捗・成果発表
1月25日	有人宇宙学修了式	コンセプトマップ#2、アンケート調査
2月11日	シンポジウム発表日	各班による研究成果を一般向けに発表

「有人宇宙学」を受講する学生はまずそれぞれが選んだ小社会建設候補地ごとに3つの班に分かれ、4つの研究課題に沿って発表（有人宇宙学演習1～4）を行った。参考資料3-2・3に最終的に学生が設計した宇宙における小社会のポスターを掲載する。また、参加学生は各自が4つの研究課題をまとめた最終レポートを提出した。

(B) 木造人工衛星設計会議

(1) 木造人工衛星設計会議概要

宇宙木材研究室では、超小型人工衛星 LignoSat を開発しており、毎月の情報の交換及び問題の解決のために木造人工衛星設計会議を開催している。学生からなる5つの班が開発を担当し、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令和4年10月1日から令和5年3月31日までの半年間に表4に示すように6回の開催が行われた。なお、本設計会議は令和3年度より開催されており、本委託業務においてはその一部の設計会議として踏襲した。

表 4-3 木造人工衛星設計会議の開催

開催回	開催日	開催場所	参加人数 (含 Online)	主なトピックスなど
第 26 回 設計会議	令和 4 年 10 月 11 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	25	FM 用バッテリーの全セルで単セルあたり 1.1V 以上の電圧で、規定値を満たしていることが確認できた。
第 27 回 設計会議	令和 4 年 11 月 15 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	26	京都大学北部総合教育研究棟屋上に地上局を設置。
第 28 回 設計会議	令和 4 年 12 月 6 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	27	木造構体(v7 アルミフレーム)振動試験の詳細報告が行われ、JAXA 要求の固有振動数 60Hz を十分クリアする 300~500Hz 程度の高い固有振動数が得られた。
第 29 回 設計会議	令和 5 年 1 月 10 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	26	ミッション用ひずみゲージを貼った木片の真空暴露実を開始した。
第 30 回 設計会議	令和 5 年 2 月 6 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	24	木材接着材のせん断力試験を実施した。
第 31 回 設計会議	令和 5 年 3 月 14 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	15	九州工業大学での熱真空試験(高温-低温サイクル試験)を実施し、有意義な試験結果が得られた。API 申請が完了。

(2) 木造人工衛星設計会議内容

(i) 第 26 回設計会議：2022 年 10 月 11 日（参考資料 8-1：EPS_2022 年 9 月活動報告書_20221011_v1.0）

CDH 班

CDH 班からは、COM 基板単評価 FAB-OBC、相互評価の実施が報告された。また、BPB を再発注したことが報告された。COM 単板試験は UHF パケット通信試験ができず、原因究明中であることが報告された。FAB-OBC 相互評価試験は、COMPIC、MainPIC、ResetPIC、FABPIC などの UART 通信試験を実施し、それぞれの通信に成功したことが報告された。

COMM 班

COMM 班からは、国際周波数調整の準備のため、宇宙技術開発株式会社の支援を得ることが報告された。地上局 TNC 装置 (Terminal Node Controller) の納品があり、通信装置を接続して国際宇宙ステーションからの FM パケットの受信に成功した。COMM 単体基板評価試験を実施した。CW の通信は成功したが FM パケットの受信はできなかった。

EPS 班

EPS 版からは、バッテリー電圧の計測を行なった結果、FM 用バッテリーの全セルにおいて 1.1V 以上の電圧であることが確認できた。また、バッテリー充電時の電流値計測を実施し問題の無いことを確認した。

MISSION 班

RAB の回路設計が終了し、納品が行われた。

STRUC 班

EM の Ver. 7 用のアルミフレーム、Y シャフト、X シャフトの納品および組み立て確認を実施し、問題の無いことを確認した。アンテナ展開試験時の木材の反りの不具合の確認試験とし

て Ver. 6 の木造構体の 8 日間の真空暴露試験を実施した。試験結果は、少々の反りが確認された。

(ii) 第 27 回設計会議:2022 年 11 月 5 日 (参考資料 8-2 : COMM_2022 年 10 月活動報告書_20221115_v1.0)

CDH 班

FAB-OBC 間の通信試験ならびに RAB-OBC 間の通信試験を実施した。通信試験は UART 通信で収集される温度データ、電圧・電流データ、バッテリーヒーターの状態ステータスなどが正常に通信できていることが確認できた。しかしながら、OBC の UART-1 の通信ができていない問題も見つかり、課題の抽出に至った。PC-OBC 間の通信は正常であることが確認できた。なお、RAB-OBC 間の通信試験は正常に終了できた。

COMM 班

API 申請および無線局申請を開始した。並行して京都大学北部総合教育研究棟の屋上に地上局の整備を開始した。VHS および UHF アンテナを設置し、建屋内の運用管制室（準備中）の受信機で国外衛星 3 基の受信に成功した。

EPS 班

5 面の木材パネルに貼る太陽電池パネルの接着剤 (RTV) の接着手法の検討を開始。接着剤の真空脱泡処置訓練を実施した。すべてのバッテリーセルのフル充電後の電圧値の計測を実施し、全てのバッテリーセルが規定値の 3.6V 以上の電圧で有ることが確認できた。

MISSION 班

RAB の回路設計を完了し、CDH 班と共同で RAB 基板の相互評価を実施した。その結果、温度センサの読み取りに問題があることが判明し、プログラム修正が必要との課題が抽出された。

STRUC 班

Version7 アルミフレームを用いた木造構体の振動試験を九州工業大学の試験装置を借用し実施した。試験の結果、JAXA 要求の固有振動数を十分に満たすことが実証された。振動試験には木材としてホウノキ材とヤマザクラ材が用いられたが、ヤマザクラ材を使った試験では EM_BPB、EM_FAB、EM_OBC/EPS、EM_battery が搭載され+X 面には太陽光パネルを接着した木材が使用された。両木材の試験でも JAXA の打ち上げ要求 60Hz を十分に満たす 300~500Hz 程度の高い固有振動数が得られた。

(iii) 第 28 回設計会議 : 2022 年 12 月 6 日 (参考資料 8-3 : STRUC_2022 年 11 月活動報告書_20221206_v1.0)

CDH 班

COM 基板の試験を実施。九州工業大学での熱真空試験計画の準備を始める。ResetPIC による強制リセット動作状況を保存する機能を OBC と EPS の両基板に追加し動作確認を実施したが、所期の目的は達成できなかった。検討の結果、試験に使用していたケーブルの規格が異なっていたことが判明した。

COMM 班

人工衛星局（衛星局）と地球局（地上局）を新規開局する準備を始めた。京都大学北部総合教育研究棟の屋上の地上局アンテナを新しく VHF と UHF とともに円偏波八木アンテナに交換した。ローターによるアンテナ駆動の正常動作を確認するため、屋外監視カメラの設置を行った。

EPS 班

太陽電池パネルを接着した+X パネルの振動試験を実施し、接着に問題の無いことが確認された。（後日太陽電池セルの端面に塗布した接着剤が剥がれていたことが判明し、検討事項として抽出された。）

MISSION 班

RAB 基板の相互評価試験を実施した。RAB 基板に搭載されている温度センサーと地磁気センサーの通信試験であったが、温度センサーの通信は確立できていないことが判明し、原因調査

中であることが報告された。

STRUC 班

11 月に実施した九州工業大学での v7 アルミフレームと木材パネルを使った EM の振動試験の詳細な報告が行われた。

(iv) 第 29 回設計会議：2023 年 1 月 10 日（参考資料 8-4：EPS_2023 年 1 月活動報告書_20230207_v1.0）

CDH 班

FAB 基板、OBC 基板、COM 基板の評価は完了し、MISSION 基板の評価を継続中。MainPIC においてコード書き換えを MISSION データに合致するよう実施中。アンテナ基板への OBC/EPS 基板からの電力供給試験を実施し、アンテナ展開用ニクロム線への電力供給が確認できた。

COMM 班

最大電力密度（項目 5.5）の説明を追加した「LignoSat_AT 衛星実験計画書（京都大学）_v2.2」および「LignoSat_AT 国際調整値比較表 ver1.0」の 2 文書を提出した。

衛星 CAS-5A（435 MHz 帯、4800 bps、FM パケット）からの受信を試み、12 月 21 日に受信に成功。送受信を行うためのプログラム（Operation Main）開発を行い、コマンド送信、データ受信の機能を実装した。

EPS 班

木造パネル使用する接着材のせん断力試験用の供試体の作成を実施。供試体にはヤマザクラ木片とホウノキ木片の 2 種の木材を使用し、それぞれに RTV 接着剤の塗布を実施し、その後高真空暴露、高湿度暴露をそれぞれ 5 日間実施して来月のせん断力試験に用いる予定。

デプロイメント・スイッチの構体への取り付け準備を実施。

MISSION 班

RAB 基板に搭載されている温度センサーの通信不良を報告していたが、ADC を解することにより読み取りが可能になった。（ADC：Analog/Digital/Converter）

地磁気センサーの九州工業大学での試験用の試験手順書の作成を終えた。

STRUC 班

デプロイメント・スイッチの構体（アルミフレーム）への取り付けを試みたが絶縁のために装着したカプトンテープの厚みでデプロイメント・スイッチが圧迫されることが判明した。このことから構体の設計変更を実施する事になった。組み立て治具、運搬治具の設計・製造に着手した。JAXA 安全審査資料の作成に着手。組み立て手順書、有限要素法による解析結果、3D モデル図、one bolt missing 解析などが当面の資料作成目標。

（今回の代表資料：）

(v) 第 30 回設計会議：2023 年 2 月 6 日（参考資料 8-5：MISSION_2023 年 1 月活動報告書_20230207_v1.2）

CDH 班

九州工業大学で予定している熱真空試験の具体的な試験準備を実施。コネクタ・基板の準備、COMM 基板からのデータ取得方法の検討、デプロイメント・スイッチの信号取り扱い、外部電源供給方法、RS232C 通信の確立、プログラム信号供給方法の検討、真空タンクへのフィードスルーの設計、などを検討する。九州工業大学での試験まえに京都大学において真空試験を実施し、九州工業大学での予備試験として確実な試験実施を確保する。

COMM 班

アンテナ展開試験を実施した。

EPS 班

京都大学農学部棟材料試験室において木材接着材のせん断力試験を実施した。供試体はヤマザクラ材を 15 試験片、ホウノキ材を 15 試験片を用いた。試験の結果、せん断力は RTV 接着剤の接着練度によるところが大きいこと、多くの試験片で概ね 1kN のせん断力が確保されて

いるものの、700N というせん断力を示す試験片もあり今後の接着練度の向上が必要であることが判明した。

MISSION 班

地磁気センサーの校正試験を九州工業大学において実施した。試験の結果、センサの正常動作の確認と測定値の線形性が確認できた。歪みゲージの長期真空暴露試験を実施中である。

STRUC 班

前回報告したとおり、ディプロイメントスイッチに関する設計変更が必要となり検討中である。高真空曝露された木造構体の変形に関する試験に加え、木造構体の変形によるボルト締結の緩みを確認する試験を計画中。

(vi) 第 31 回設計会議：2023 年 3 月 14 日（参考資料 8-6：CDH_2022 年 2 月活動報告書_20230314_ver1.0)

CDH 班

京都大学研究 16 棟 206 室の真空チャンバーにおいて真空電気性能試験を実施した。様々な不具合が発生したがそれぞれ対処方法を考案し、九州工業大学で実施する熱真空試験への反映ができた。

九州工業大学での熱真空試験では高温ケース、低温ケースのサイクル熱真空試験を実施し、有意義な試験結果が得られた。

COMM 班

API 申請を行っていたが、3/2 に総務省内での周波数調整が完了したとの報告を受けた。今後、ITU に提出される予定。また、総務省内での周波数調整終了につき、無線局申請を開始した。地上局、衛星局それぞれの免許申請書、無線局事項書、工事設計書、添付書類の草案を完成させた。木造人工衛星 2 号機の開発準備としてパッチアンテナの調査を開始した。2.4GHz 帯の通信周波数であるが、木造衛星構体内部への収納が可能という特性を活かす設計を考慮中。

EPS 班

報告事項無し。

MISSION 班

地磁気センサーのデータを UART 経由で OBC に送信することによりデータの読み取り・取得が可能となった。ただ、衛星本体の全ての基板を装着すると地磁気センサーのデータが変化する現象があり、不具合として原因究明が必要なことが判明した。

温度センサーの動作確認を EM 構体を利用して計画中。

STRUC 班

デプロイメント・スイッチのアルミフレームへの装着のため、改にアルミ材のパーツを設計した。京都大学での真空試験後の衛星構体分解確認時にヤマザクラ材に「割れ」が生じていることを発見した。「割れ」が生じていた箇所は木造構体+X パネルの中央部であった。他の木造構体パネルには異常はなかった。今後、重大な不具合と識別されるため慎重な解析・考察を実施し、FM 設計に反映させる必要がある。

該当期間中合計 6 回の設計会議が開催され、エンジニアリング・モデルの設計を終え、組み立て、試験に進むことができた。試験結果を参考に EM での改良点が明らかになり、令和 5 年度からのフライトモデル (FM) の設計の指針が確立し、FM の製造に寄与することができた。令和 5 年度には、本設計会議で固まった設計をもとにフライトモデルの製造・試験を実施し、JAXA/NASA の安全審査を受審し、FM の JAXA への引き渡し、打ち上げ、運用を行う予定である。

(C) 樹木育成ゼミ

樹木育成学生チームの学生に対して、樹木に関する知識の向上を図るために以下の二つの活動を実施した。

- 樹木に関する幅広い知識を実物の観察を通して習得するために、2022 年12 月3 日に

京都府立植物園にて樹木実習を行った。内容は、ブナ科樹木の種子形成、年輪形成、日本と京都の植生分布、微生物による樹木遺体の分解など。参加者 13 名。（参考資料 9-1）

- 2022 年 10 月 8 日、10 月 18 日「ISS と「きぼう」で実施してきた植物生理研究」、参加者 6 名（参考資料 9-2）国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟「きぼう」で実施された植物研究について学習した。
- 2023 年 1 月 8 日「微小重力下における植物の生理」、参加者 7 名（参考資料 9-3）重力に対する植物の反応（重力屈性、根が下方に伸び、幹は上方に伸びる性質）の基礎を学び、宇宙における微小重力環境における植物の生理反応についての研究状況をゼミ形式で学習した。
- 2023 年 3 月 11、21 日「ポプラ育成実験について」、参加者 7 名（参考資料 9-4）

本課題で取組んでいる「低圧下でのポプラ育成実験」の背景ならびに先行研究（低圧下での植物育成のための実験装置とそれを用いた研究実績）の全体像を学習した。

(D) 第 1 回宇宙木材利用シンポジウム

2023 年 3 月 22 日(水)に第 1 回宇宙木材利用シンポジウムを京都大学で開催した。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が展開された。第 1 回宇宙木材利用シンポジウムのプログラムを参考資料 11-1 に掲載する。

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。セッション A では、京都大学で現在開発されている超小型木造人工衛星 LignoSat のミッション意義やその詳細な設計仕様について、開発を担当する本学学生チームによる紹介が行われた。本学学生チームのリーダーによる LignoSat により実現を目指す宇宙ミッションとその目的や、衛星開発体制など、本プロジェクトの概要について紹介がなされた（参考資料 11-2）。続いて LignoSat の 4 つのバスシステム：コマンド・データ処理系、通信系、電源系、構体系（参考資料 11-3 およびミッション系の開発をそれぞれ担う 5 つの学生班の代表者から、これまでの取り組みとフライトモデル完成までの今後の展望について発表され、活発な議論が行われた。セッション B では、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の簡易材料曝露実験ブラケット（Exposed Experiment Bracket Attached on i-SEEP: ExBAS）を用いた木材試料の宇宙環境曝露実験に関連する研究成果について報告が行われた。京都大学農学研究科の村田功二准教授により、ExBAS 実験の目的およびその経過報告がなされたほか、京都大学総合生存学館の山敷庸亮教授により、木材の宇宙放射線に対する耐性に関する最新の研究成果について紹介がなされた。さらに岡山大学惑星物質研究所の中村栄三教授により、小惑星リュウグウから採取された微粒子サンプルの初期総合解析にも利用された地球惑星物質総合解析システム（CASTEM）の木材物性解析への応用可能性について議論された（参考資料 11-4）。

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ました。セッション A では、京都府立大学生命環境科学研究科の池田武文教授により、火星をはじめとした地球外天体における樹木育成の実現にあたり、「低圧環境」の影響に着目した研究紹介がなされました（参考資料 11-5）。また、本学で現在進められている低圧下におけるポプラ育成実験に関して、実験を担当する学生チームの代表者らによる経過報告が行われ、本実験の参加メンバーらにより構築された低圧下樹木育成実験装置のシステム紹介やこれまでの実験の成果と今後の課題について活発に議論されました（参考資料 11-6）。セッション B では、本学生存圏研究所の馬場啓一助教および住友林業株式会社の海野大和氏により、擬似微小重力下における樹木の成長と形態形成に関して、1D および 3D のクリノスタットを用いた研究結果について報告がなされた。地球外天体における樹木育成に向けた技術的課題として、低圧環境およ

び微小重力環境の 2 つの環境要因にフォーカスし、様々な研究分野の専門家を交えた有意義な意見交換の場となった。

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(図 4-1)。セッション A では、住友林業株式会社の中嶋一郎氏により、脱炭素社会の実現に向けて住友林業が手掛ける研究開発の動向について紹介がなされた(参考資料 11-7)。また、ミサワホーム株式会社の秋元茂氏により、地上における未来志向の住宅や月面等の有人拠点への応用を目指した、南極での移動基地実証実験について成果報告が行われた。さらに、京都府立大学生命環境科学研究科の宮藤久士教授および国立研究開発法人森林研究・整備機構の山田竜彦氏により、バイオベース CFRP と真空対応型ケミカルリサイクル技術の開発成果について紹介された。セッション B では、本シンポジウムの総まとめとして、仲村匡司教授による司会のもとでセッション A の 3 名の講演者及び山敷教授によるパネルディスカッションが行われた。これからの宇宙木材産業の展望について活発に意見が交換された。本シンポジウム全体を通して、会場からは興味深い質問や意見などが数多く寄せられ、大変有意義なシンポジウムとなった。



図 4-1 第 1 回宇宙木材利用シンポジウム
第 3 部「宇宙木材利用の展望」パネルディスカッションの様子

(E) Spaceology NewsLetter

- 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

(F) 学会・講演活動

<第 66 回宇宙科学技術連合講演会>

- 超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計、福王悠星他、2022 年 11 月 1 日、熊本県熊本市開催（参考資料 13-1）
京都大学では宇宙における木材資源の利用可能性を解明することを目的に、超小型木造人工衛星「LignoSat」の設計・開発を進めてきた。木造人工衛星によって宇宙機構造部材としての木材の信頼性を実証することは、木材の宇宙材料としての利用法の提唱に繋がるだけでなく、木材産業の新たな活躍の場の創出に寄与し、ひいてはカーボンニュートラルな社会の実現に大きく貢献しうると期待される。超小型木造人工衛星「LignoSat」は、世界で初めて木造構体を持つ人工衛星である。木材の構造特性を評価数するために振動試験を実施し、固有振動数を求めると同時に人工衛星構体としての設計仕様を確立した。
- 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、筒井涼輔他、2022 年 11 月 1 日、熊本県熊本市開催（参考資料 13-2）
超小型木造人工衛星「LignoSat」は、宇宙の複合的な環境因子が木材に及ぼす物理化学的影響を調査することを目的としている。第 1 のミッションは、2 軸歪み測定ゲージや温度センサーを用いて木造構体内部（木板内側）の歪みや温度の継続的測定を行うことにより、宇宙環境の木材のミクロ的構造に与える影響を調べる。また、第 2 のミッションとして木材内部の地磁気を測定することにより、将来の木造人工衛星で磁気トルカによる姿勢制御が可能かどうかを検証する。さらにコンピューターに発生するシングルイベントアップセット（SEU）を測定することにより、木材の放射線耐性を評価する。
- 広葉樹の活用方法—楽器から宇宙利用まで、村田功二、2022 年 11 月 17 日、京都府京都市開催（参考資料 13-3）
これまで家具や内装、楽器などの原料は良質な輸入原料に依存してきた。しかし、この 20 年で広葉樹の輸入量は減少している。背景には過剰伐採による優良原木の枯渇や生物多様性保全を目的とした天然林保護がある。これらの樹種を使用してきた家具業界や楽器業界は対応に迫られることとなった。持続可能性に注目した新しい広葉樹材利用の試みを紹介する。講演者は日本国内でシラカバ・ダケカンバの材質に注目してエレキギターを製作した。NASA のアルテミス計画など有人宇宙飛行の計画が世界各国で進められている。人類の宇宙進出には、完全な循環型材料であり、人の親和性の高い木材の利用が重要だと考える。そこで宇宙空間での木材利用ために国際宇宙ステーションでの曝露試験を開始した。原子状酸素や宇宙放射線の影響を調べる予定である。
- 中性子線照射による木材の核反応のシミュレーション、三本勇貴他、2023 年 3 月 14 日、福岡県福岡市開催（参考資料 13-4）
宇宙空間で木材を活用することを目的として宇宙木材プロジェクト（LignoStella Project）を進めている。同プロジェクトでは、2023 年度中に木造人工衛星（LignoSat）の打ち上げを目指し、現在、木材の宇宙曝露試験を実施している。LignoSat の投入を検討している地球低軌道（LEO）は高真空（ 10^{-11} 気圧）などだけではなく、銀河宇宙線（GCR: Galactic Cosmic Ray）、太陽エネルギー粒子（SEP: Solar Energetic Particle）などの放射線がある。太陽フレアが発生すると SEP が増加し、大量の陽子が一次宇宙線として地球の大気と衝突して ^{14}C が生成する。木材は多くの酸素原子をもっており、中性子が木材中の酸素原子と衝突した場合は同様に ^{14}C の生成が考えられる。本研究ではコンピュータシミュレーションにより中性子が木材の構成元素に衝突した場合に生じる核反応を検討した。日本原子力研究開発機構が開発している放射線挙動計算コード PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code）

System) 3)を使用した。解析の例として線源から 18 MeV の中性子線を生成し、1000 万回のモンテカルロシミュレーションを行った。その結果わずかであるが ^{14}C (Proton 6, Neutron 8) の生成が確認できた。

- 広葉樹材試験体の地球低軌道への曝露試験、村田功二他、2023 年 3 月 14 日、福岡県福岡市開催 (参考資料 13-5)

人類との親和性の高い木材のさらなる可能性を考えて、将来、宇宙で木材を活用する基礎的な知見を得ることを目的として宇宙木材プロジェクト (LignoStella Project) では、「宇宙環境における樹木の育成に関する研究」や「宇宙環境における木材の物性に関する研究」などが進められている。同プロジェクトが木造人工衛星 (LignoSat) の投入を検討している地球低軌道 (LEO) には、そこが高真空 (10⁻¹¹ 気圧) なだけでなく、銀河宇宙線 (GCR: Galactic Cosmic Ray)、太陽エネルギー粒子 (SEP: Solar Energetic Particle)、真空紫外線 (VUV: Vacuum Ultra Violet radiation) や原子状酸素 (AO: Atomic Oxygen) などのさまざまな材料の劣化要因が存在する。人工衛星を木材で作るためには、LEO の環境で木材がどのように劣化するのかを確認する必要がある。そこで実際の宇宙空間での木材の曝露試験を開始した。当初 6 か月間の曝露の予定であったが、打ち上げの延期等で曝露期間は延長された。順調に進めば 9 か月の曝露となる。曝露後に回収し、地上に運ばれたあと解析を行う予定である。

(G) 広報活動 (新聞記事)

- ハウジングトリビューン 2022 年 11 月 25 日「宇宙での木材利用の可能性の検証」 (参考資料 11-1)
- 毎日新聞 2023 年 1 月 21 日「木造人工衛星」 (参考資料 11-2)
- 毎日新聞 2023 年 1 月 23 日「木造人工衛星宇宙に挑む」 (参考資料 11-3)
- 毎日新聞 2023 年 1 月 23 日「過酷な宇宙に耐えられる? 「木」で作る人工衛星の可能性」 (参考資料 11-4)

総括

本事業「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」では、計画通りの4項目を実践した：

① 木造人工衛星の開発

- a. 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システムの基礎実験を行う。
- b. 地磁気を使った姿勢制御システムの基礎実験計画を策定するとともに、基礎実験実施に向けて当該計画に基づいた準備を行う。
- c. 木造人工衛星2号機について、アンテナシステムや構造系、電源系、通信系など人工衛星システム全体について検討し、概念設計を完了する。

② ExBASの木材の解析

- a. 国際宇宙ステーション船外暴露実験（ExBAS）の木材試料を回収し、宇宙空間における高真空・原子状酸素による木材物性のマクロ的变化を調べる。衝突する原子状酸素の速度の影響も評価する。
- b. 地上における木材の真空暴露実験を継続実施する。

③ 樹木育成実験系の確立

- a. ポプラ（*Populus alba*）を低圧環境で育成するための実験系を2式製作する。
- b. 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確立する。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

- a. 教育活動として定期的な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を開催する。
- b. 有人宇宙活動について学ぶことを目的とした専門教育プログラム「有人宇宙学」（講義）を2022年度後期に実施する。
- c. 啓蒙活動として宇宙木材利用シンポジウムを開催する。

①では、パッチアンテナシステムの設計及び基礎実験より、木造人工衛星2号機構体内に設置可能な通信アンテナの提案を行った。今後、実際の木造構体内部に設置した場合のアンテナ特性を明らかにしていく予定である。また、地磁気を使った姿勢制御システムの構築のために地磁気センサの性能試験を行い、地磁気を使った制御系の構築に一步前進した。木造人工衛星2号機概念設計では、木造人工衛星1号機（LignoSat）に続いて木材の宇宙での特性をさらに調べるためのミッションを提案し、技術試験衛星として人工衛星構体を2Uにする方針を提案した。

②では、約9ヵ月間の宇宙暴露実験を完了した木材試験体を予定通り2023年3月に受領し、宇宙暴露実験前後の質量の変化を調べ、また、表面色分析を実施した。質量分析においては、木材試験体は想定していた原子状酸素により質量損失を起こしていなかったのは大きな驚きであり、今後の詳しいミクロ分析により原因を明らかにしていきたいと考えている。表面状態も真空紫外線による変色は認められるものの、非常にきれいな状態が保存されており、宇宙空間で木材は十分に使えるという認識を新たにしている。

③では、計画通りで低圧下樹木育成実験システムを2基から4基に増やし、効率良く低圧下での樹木育成実験を行う条件を整えることができた。湿度や二酸化炭素（CO₂）の較正実験を行うことにより、現在のシステムで0.3気圧まで十分な精度で低圧実験を行うことができる確証を得ることができた。実際に低圧区（0.3気圧）と対象区（大気圧）でのポプラの育成実験を実施し、低圧下でのポプラの育成特性のデータを取得することができた。令和5

年度は、実験数を増やすことにより低圧下での樹木育成特性をさらに精密に分析することとを可能にすると同時に、より低圧下での育成実験が可能になるように実験システムを整備していきたいと考えている。

④では、①から③までの研究活動を教育・啓蒙活動に発展させるための様々な活動を計画通り実施することができた。特に学生チームが主体的に実施した木造人工衛星設計会議や樹木育成実験・育成ゼミにより、30名以上の学生が直接本事業に関与することができたことは、特筆すべきことである。また、世界で初めての木材の宇宙利用に焦点を当てた第1回宇宙木材利用シンポジウムの開催は、大学研究者ばかりでなく企業からの参加者も多く、宇宙木材産業の構築に向けて大きな前進となったと思われる。

「宇宙材料としての木材利用の探究」は、木材という今まで宇宙で使われて来なかった新しい材料を提案し、また新しい産業を構築できる可能性を持つという点で、社会を大きく変容させていくポテンシャルを有するものである。また、木材の新しい利用法を推進するという点で、宇宙でのカーボンニュートラルを実現するための活動でもあり、大いに公益に資する活動と見なすこともできる。さらに、宇宙での木材利用という新しい可能性に引かれて、多くの若い人材を引き込むことのできる活動でもあり、これからの宇宙開発を担う若い人材育成にとっても非常に魅力的な事業であると結論できる。

参考資料 1
パッチアンテナ設計書
星川龍希

1. パッチアンテナの原理

正方形パッチアンテナのアンテナ面の一边を L 、中心から給電点までの距離を x 、用いる基板の誘電率は ε_r とし、共振周波数を f 、光速を c とする。

$$f = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1)$$

式(1)は方形パッチアンテナで用いられる共振周波数を決める式である。式(1)を変形し、波長を $\lambda = c/f$ とする。

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

式(2)を導くことができ、パッチアンテナの概形を定めることができる。

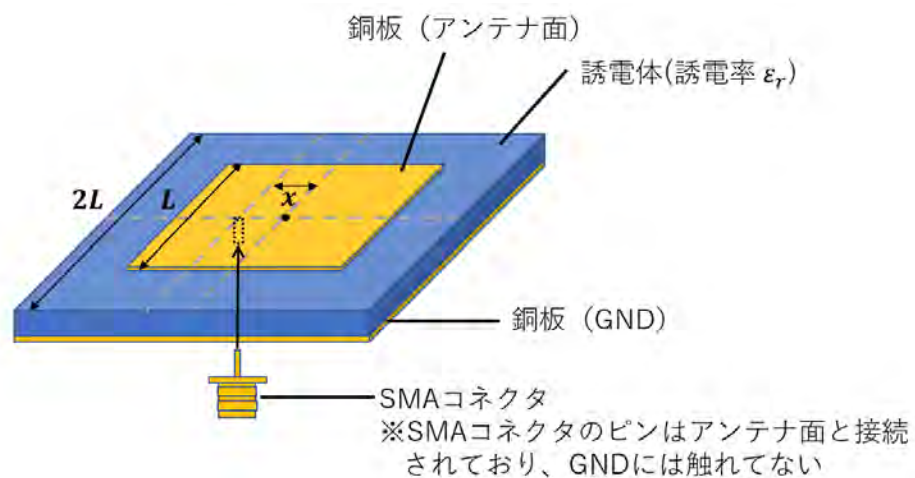


図1 方形パッチアンテナの原理

正確な円形パッチアンテナの半径はベッセル関数を用いて表すことができるが、式が煩雑になる。一般的に直径が式(2)で求まる L 周辺の値となるため、その周辺の値を用いてシミュレーションソフトで半径および給電点を定める。

2. 使用する基板

日本ピラー社 NPC-H220A 1.6mm を使用する。特徴として誘電体の誘電率は $\varepsilon_r = 2.16$ である。

3. シミュレーション

本研究では 2.45 GHz のアンテナを設計する。2.45 GHz の波長は 122 mm であり、使用する基板の誘電率は $\varepsilon_r = 2.16$ である。半径を R として式(2)に $L = 2R$ を代入する。

$$2R = \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

$$= 41.5 \text{ mm} \quad (4)$$

よって半径 $R = 20.8 \text{ mm}$ となる。よって半径が 20.8 mm 付近で 2.45 GHz が共振する。

以下 CST Studio Suite において電磁界シミュレーションを行い、パッチ半径および給電点の位置を調整した。その結果、パッチの半径が 23.2 mm、給電点の位置は中心から 5.9 mm のときに最も反射係数がよかった。

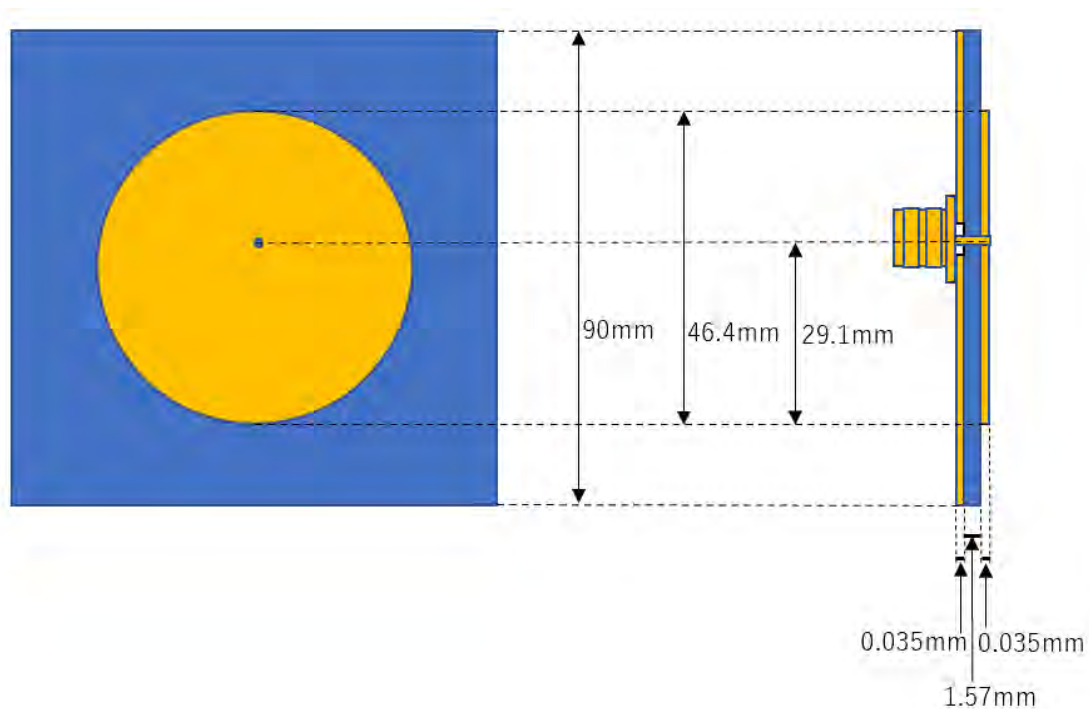


図2 パッチアンテナの概形

3.1. Sパラメータ

2.45 GHz での反射係数の値は—30 dB 程度で十分な特性である。

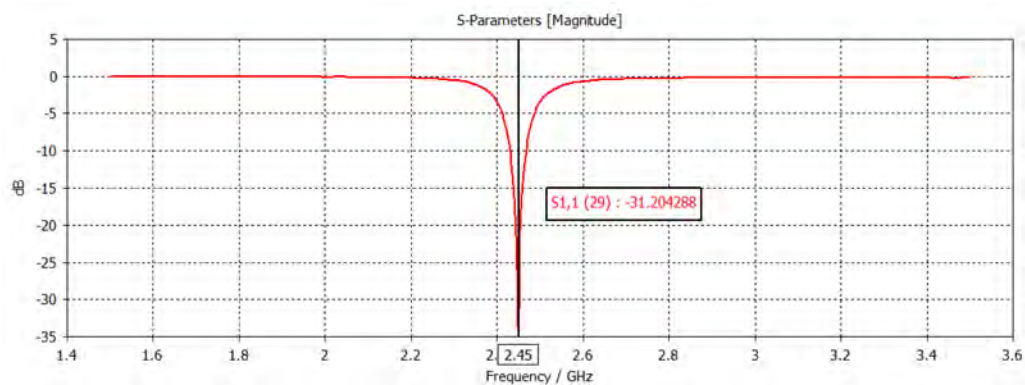


図3 反射係数

3.2. Smith chart

スミスチャートを見ると円が実軸上 1 の点の周辺を通過しており、50Ωにおいて整合がとれていることがわかる。

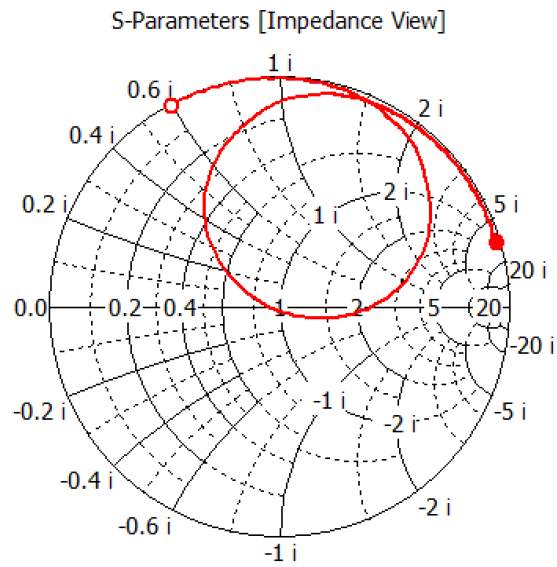


図4 スミスチャート

3.3. 放射効率 : 92%

3.4. アンテナパターン

アンテナパターンのシミュレーション結果を以下に示す。

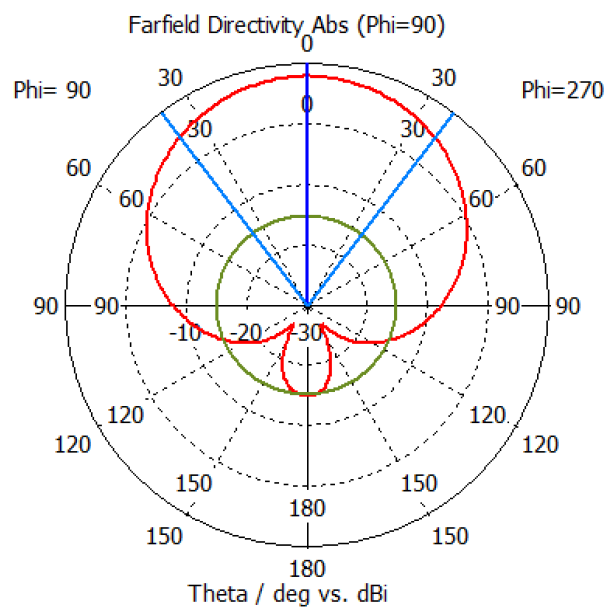


図5 シミュレーションでの H-Plane

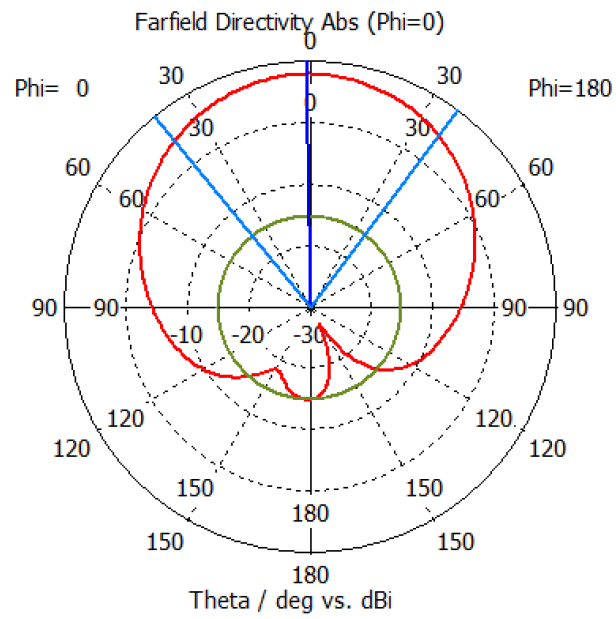


図 6 シミュレーションでの E-Plane

4. 作製したアンテナ

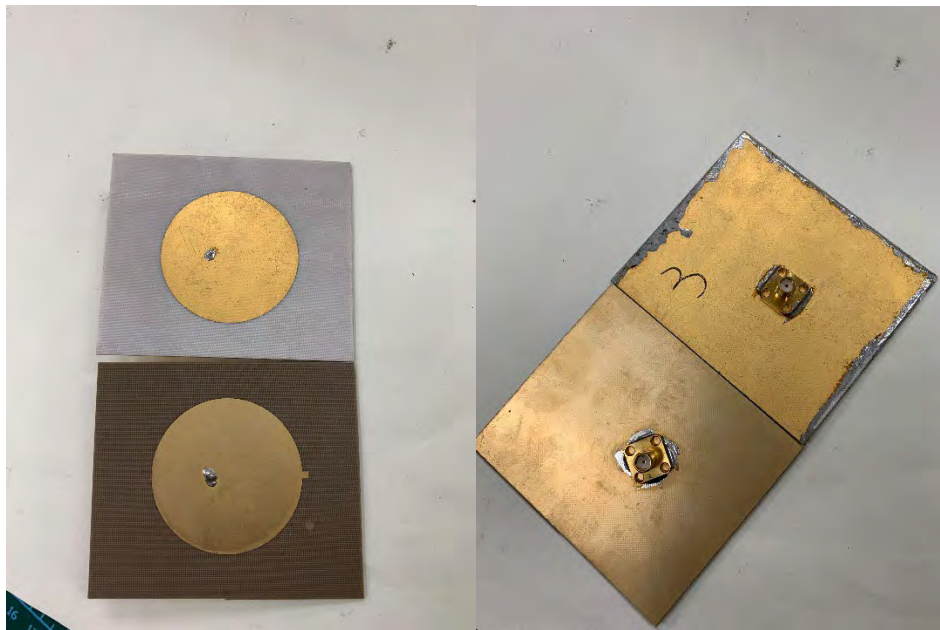


図 7 : 実際に使用するアンテナ

4.1 アンテナパターン

以下に H-Plane および E-Plane のパターン測定結果を示す。

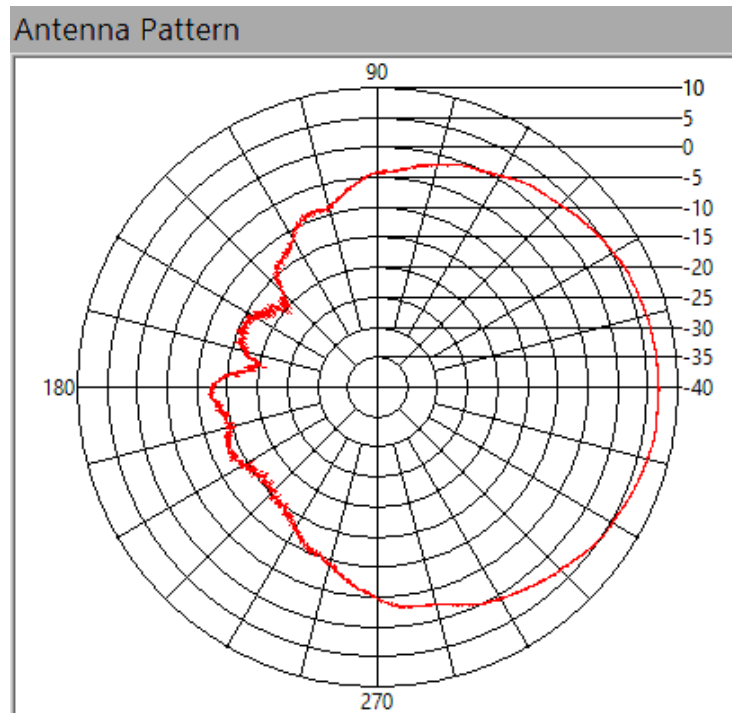


図 8 : H-Plane の測定結果

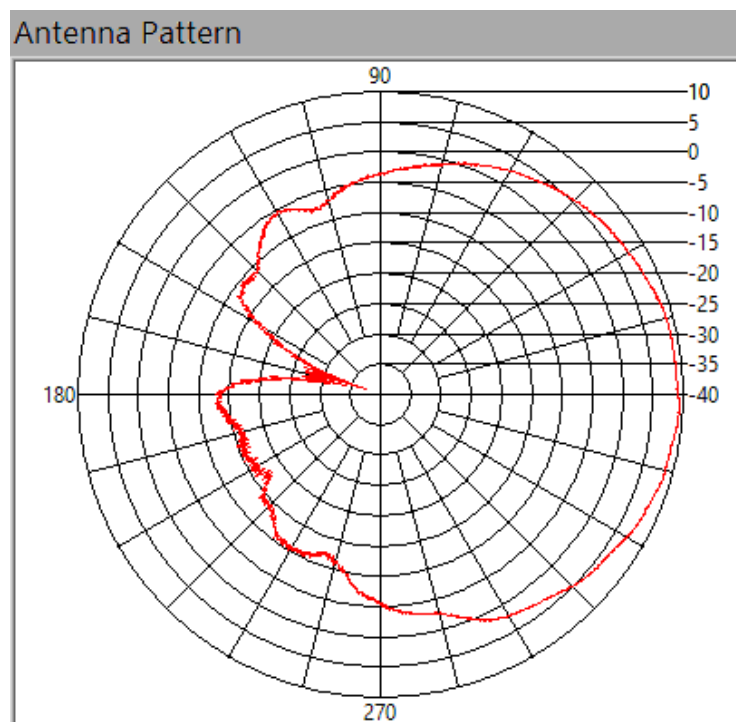


図 9 : E-Plane の測定結果

この測定結果はシミュレーション結果の図 5、図 6 と比べて 0 度の場所が左方向に 90 度回転しているのに注意が必要である。実験においてはシミュレーションと違い、アンテナ裏面に同軸ケーブルなど配線がある。そのため、特に裏面はシミュレーション結果と実験結果が完全には一致しない。しかしパッチアンテナの正面方向の特性はシミュレーション通りであり、裏面に関してもおおまかな特性は一致している。

5. まとめ

2. 45 GHz のパッチアンテナを設計し、アンテナパターンの測定を行った。後日、反射係数の測定を行う予定である。

参考文献

- 電子情報通信学会 『知識の森』 4 群－2 編－5 章
<http://www.ieice-hbkb.org/> (2023/04/16 取得)

参考資料 2
木造人工衛星 1 号機 (LignoSat) の構造
仲村匡司

LignoSat の開発は「100mm 角の“木箱”を宇宙に放出する」というシンプルなアイディアから始まった。超小型人工衛星規格 CubeSat の最小モジュールである 1U サイズを念頭に、木材で構成された衛星外殻の内部に種々のバス機器とミッション機器を収めることが、当初から想定されていたのである。

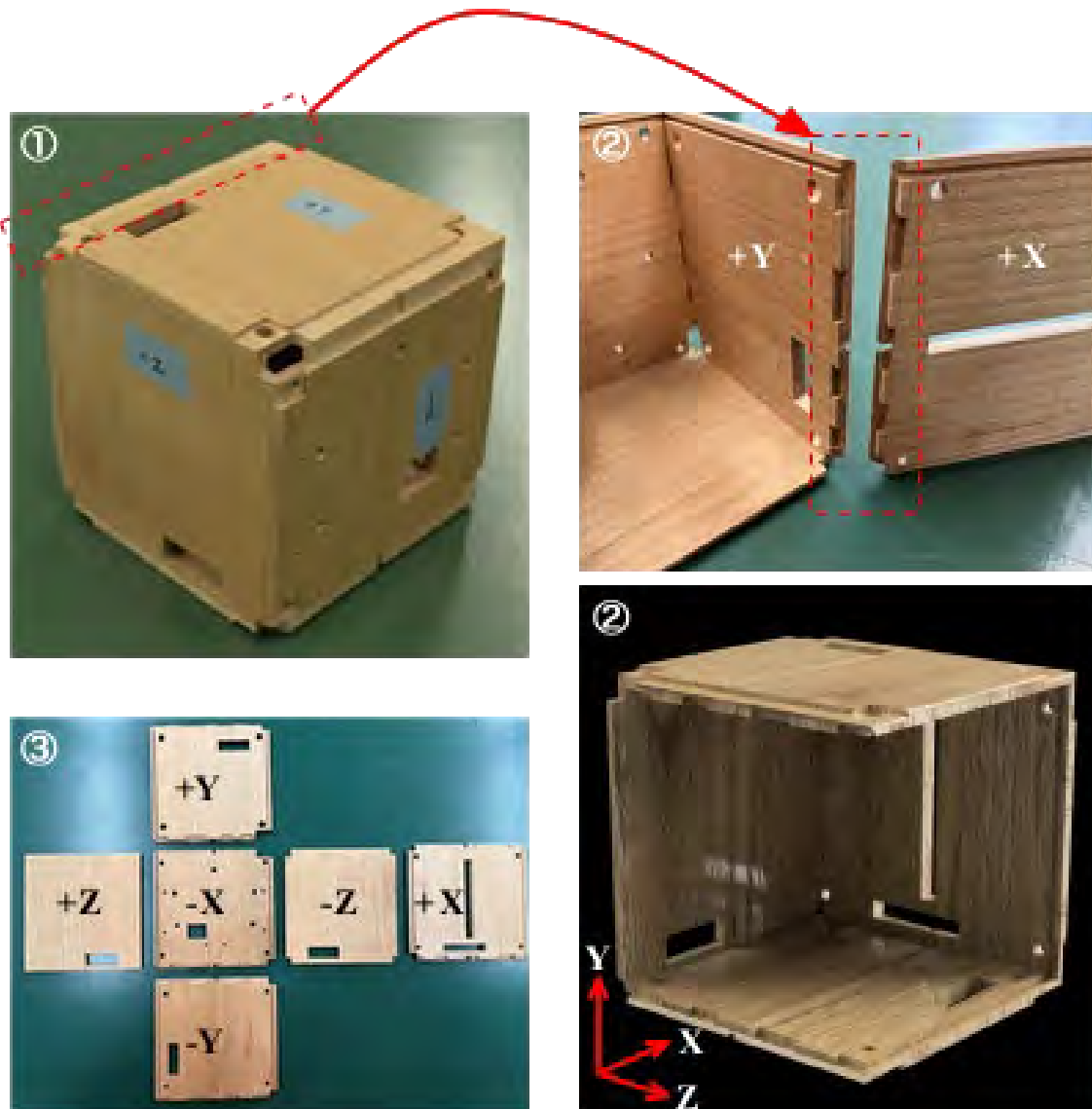


図 1 LignoSat の木造構体

① “木箱” 状態の木造構体, ② +X 面と +Y 面の接合部に施された「留形隠し蟻組接ぎ」,
③ 木造構体の展開図, ④ 木造構体の内側 (コンピュータグラフィックス)

1U サイズの衛星の開発を進める中で、国際宇宙ステーション (ISS) のきぼう日本実験棟から小型人工衛星放出機構 (J-SSOD) を使って CubeSat を放出するには、衛星の Z 方向の 4 辺にレールと呼ばれるアルミニウム製の角棒が配置されていなければならないこと、そして、このレールを含めて Z 面の外寸を 100mm 角に収めなければならないことなどが判明した。その

ため、木箱（木造構体）の外寸は Z 面 97mm 角，X 面と Y 面は 97mm(X, Y) × 100mm(Z) となった。また，九州工業大学が開発した BIRD 衛星のバスシステムを流用できるよう構体の容積を最大化するために，木造構体を構成する 6 枚の板材の最薄部は 4mm となり，極限に近い木工技術が求められるようになった。X 面と Y 面の接合には，「留形隠し蟻組接ぎ」という日本の伝統的木組み加工における最高難度の技法が用いられている。接着剤や締結金具を一切用いないこの木組みを採用したことにより，剛性に優れた木造構体を実現できただけでなく，組み立てと分解を何度でも繰り返すことが可能となった（図 1）。

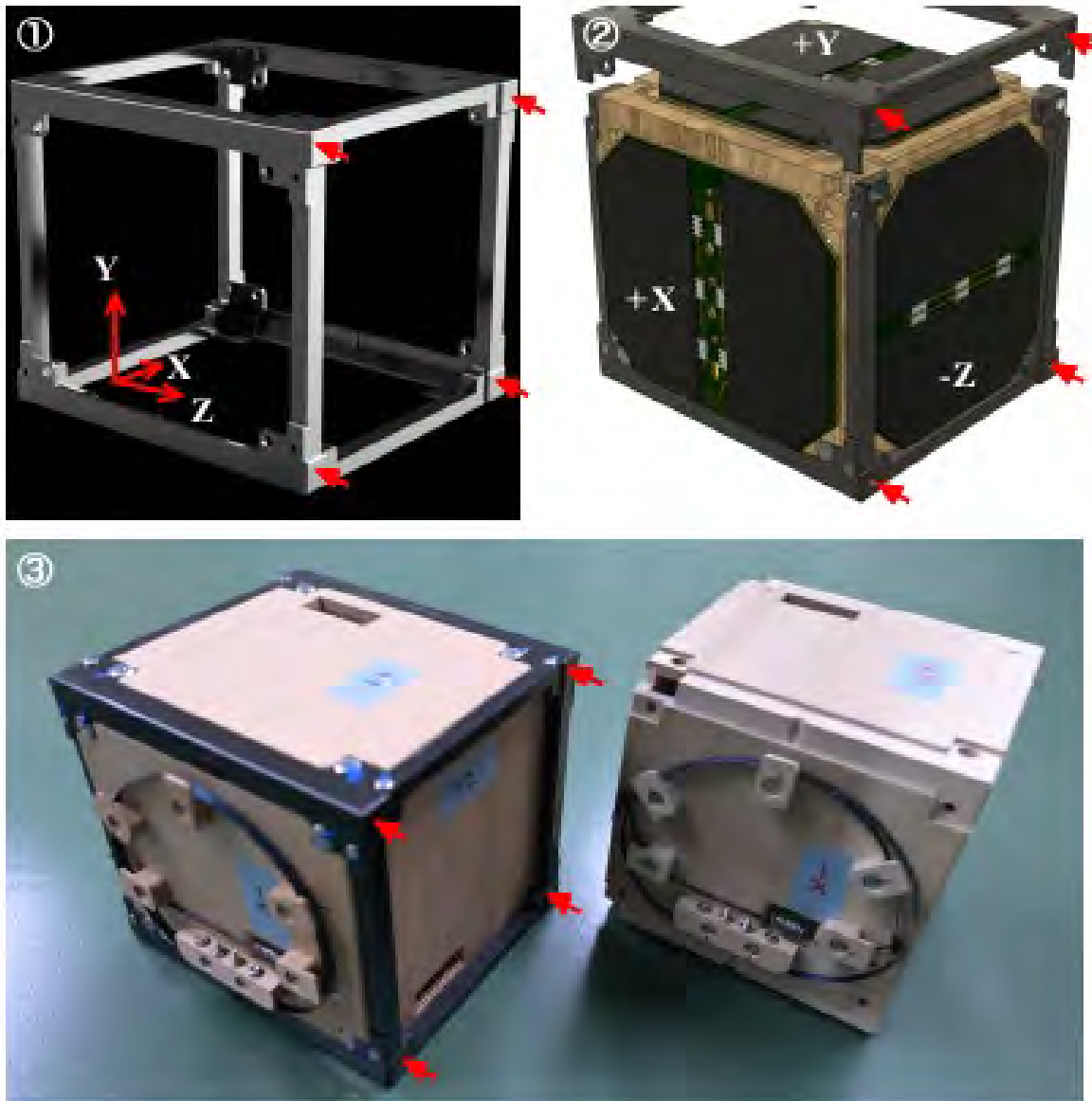


図 2 LignoSat のアルミフレーム

① “木箱” プロテクタの全体図（コンピュータグラフィックス）， ②+Y 面にアルミフレームを嵌めるところ（コンピュータグラフィックス）， ③木造構体をアルミフレームで挟み込む前（右側）と後（左側），手前の-X 面がアンテナ面で，「-X」のラベルの下部にアンテナ展開機構を配置。図中の赤矢印がレールの端面

アルミニウム製のレールについては、アルミニウム製の矩形フレームを木造構体の+Y 面および-Y 面にはめ込み、同じ材質の角棒でフレームの四隅を Y 方向につなぐ、つまり、木造構体を上下方向にアルミフレームで挟み込む構造を採用することで、木造構体に穴を開けたり接着したりすることなくレールを取り付けることが可能になった。これはいわば「木箱のプロテクタ」である（図 2）。プロテクタが木造構体を取り囲んだことにより、衛星に作用する外力をプロテクタが担うことになり、木造構体は耐力要素としての役目から解放された。また、木造構体内部の各種プリント電子基板 (PCB) を設置するためのシャフトも、木造構体を取り巻くプロテクタに固定できるようになった（図 3）。

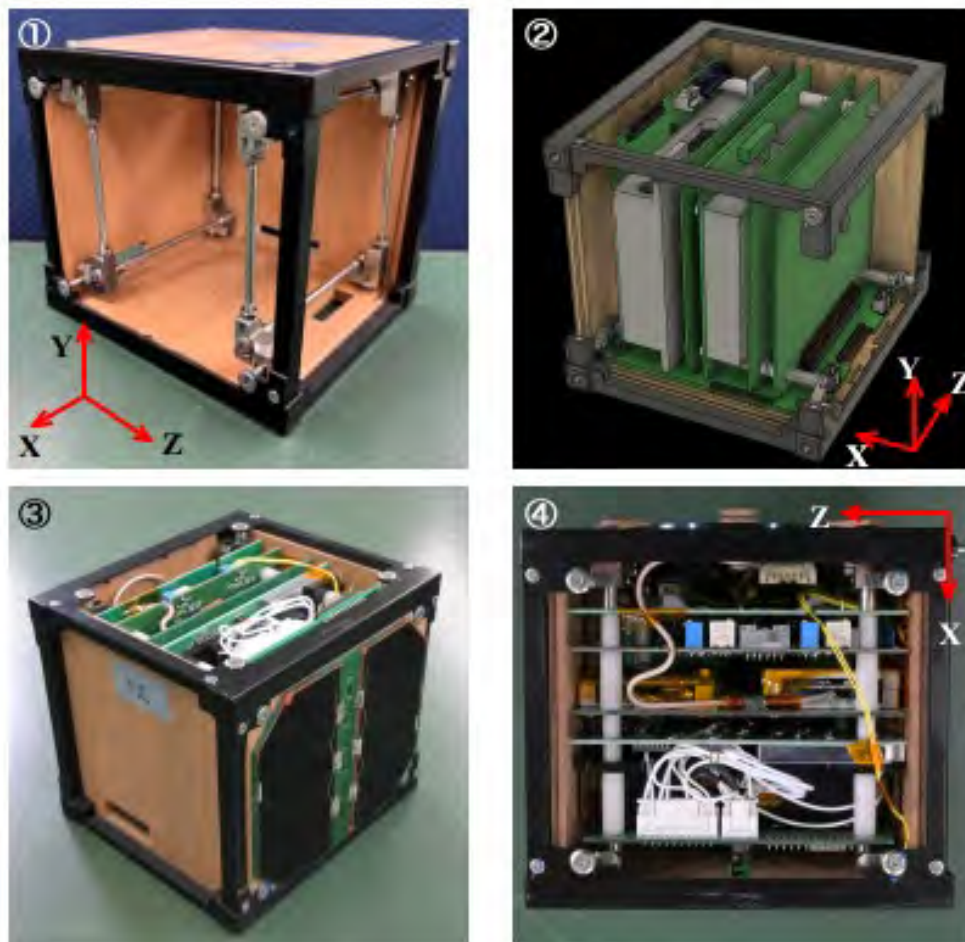


図 3 LignoSat の内部シャフト

①構体内部の X 方向（左右）および Y 方向（上下）に、基板類を安置するための 8 本のシャフトを設置、 ②シャフトの端部をプロテクタに固定（コンピュータグラフィックス）、 ③実際に組み付けた様子、 ④③を上（+Y 面）から見たところ

木箱の中に種々の電子機器を収める仕様は、他の 1U サイズの CubeSat に比べてどうしても容積的に不利である。そのため、(1) ミッション基板を増やしにくく、衛星に課すミッションが限定される、(2) 木材は電磁的に透明なので木造構体内部にアンテナを配置することが可能だが、そのためのスペースがない、(3) 姿勢制御のために磁気トルカ (Magnetic-Torquer) を搭載したくてもそのためのスペースがない、などが、LignoSat を運用していく上で大きな制約になると考えられる。また、衛星運用上の電力収支を考慮すると木造構体 6 面のうち 5 面をソーラーパネルで覆う必要がある。衛星の構造に直結するわけではないが、木材が露出するのが-X 面（アンテナ面）のみとなっていることはいささか寂しい。

参考資料 3
宇宙空間での木材の物性評価
村田功二

超小型人工衛星が投入される地上 400km 上空の地球低軌道 (LEO) では、激しい温度変化や真空紫外線 (VUV)・原子状酸素 (AO) による材料の劣化が想定される。例えば、一般に宇宙機の外表面は日照時には+120℃、日陰時には-120℃になる(森 他 2013)。CubeSat で想定される試験環境は-20℃から+80℃などがあり (Piattoni et al 2012)、LEO で実測された例としては-40℃から+20℃がある (Abdullah et al 2020)。このような熱サイクルに、1 日に約 16 サイクル、1 年で約 5,800 サイクルにさらされる過酷な条件である。このような条件で、木材の物性がどう変化するかを明確にする必要がある。

(1) 木材の熱膨張率の評価

LignoSat では、木造構体の変形を測定するためにひずみゲージを使用して、ひずみゲージ用のアンプを開発した。しかし、木造構体は複雑な構造になっており、太陽光パネルなどが貼り付けてあるために、正確な熱膨張率の測定は困難である。Abdullah et al (2020) は、LEO に打ち上げられた小型人工衛星にひずみゲージを貼り付けた複合材料 (CF/PEEK) の熱膨張率を測定するために図 1 のような構成を試みた。曲げ変形の中立軸にひずみゲージが配置されるように 2 枚の CF/PEEK 試験体で挟み込み、PCB 版に接着固定することなくボルトで固定した。これらの装置を使って、-20℃付近で約 1ppm/K、+20℃付近で 10ppm/K の熱膨張率を宇宙空間で測定することに成功した。

木材試験体でひずみゲージを使った熱膨張率の測定を地上で行った。その結果、直交方向で 28ppm/K、繊維方向で 0.2ppm/K の値を得た(図 2)。木材試験体でも同様の測定システムを使用することにより熱膨張率の測定が可能であると考えられる。そして熱サイクルによる木材の劣化の評価が可能になると考える。

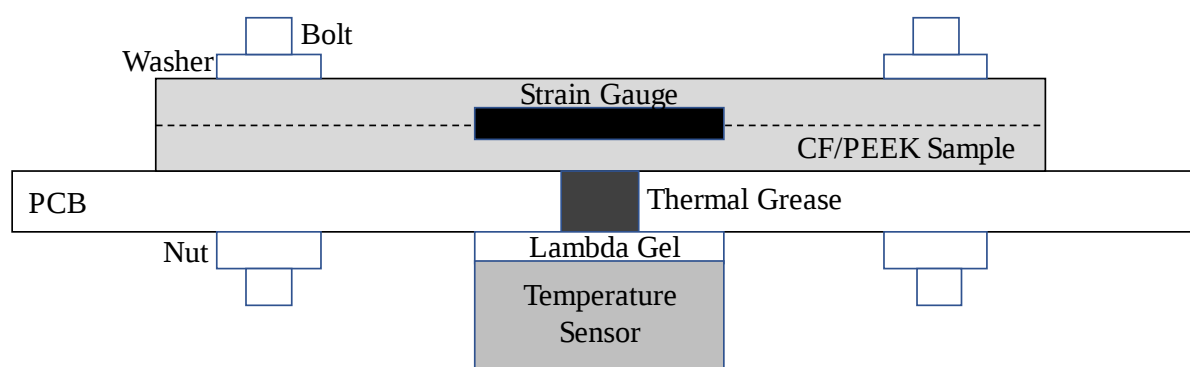


図 1 小型人工衛星「てんこう」でのひずみゲージを使用した CF/PEEK 試験体の熱膨張率測定構成 (Abdullah et al 2020)

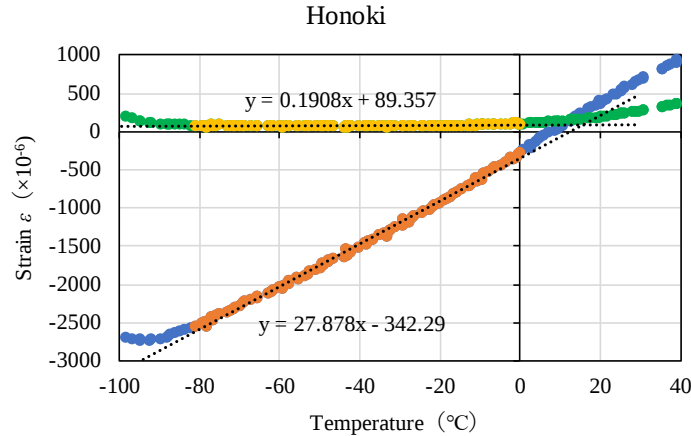


図2 ひずみゲージを使ったホオノキ試験体の熱膨張ひずみ測定の結果（地上試験）

(2) 木材の誘電緩和の測定

熱サイクルや宇宙放射線による木材の劣化では、ヘミセルロースやリグニンから構成される非結晶領域（マトリクス）の変化による脆性化の可能性がある。マトリクスの構造は動的粘弾性試験 (Dynamic mechanical analysis, DMA) による損失正接 ($\tan \delta$) で評価することができる。Kelley et al (1987) の実験では α 緩和と β 緩和などが観察され、含水率の変化によって緩和温度も変化していた (図3)。Roing et al (2017) は動的粘弾性試験 (DMA) と動的誘電率測定 (Dynamic dielectric spectroscopy, DDS) を比較した。DDS では $10^{-1} \sim 10^6$ Hz の周波数で複素誘電率 ε^* を測定した。

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{1}{i\omega \cdot C_0 Z^*(\omega)} = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

$$\text{Loss tangent } (\tan \delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

ここで C_0 は真空中の静電容量 (キャパシタンス)、 Z^* は複素インピーダンス、 ω は角周波数である。DDS の測定でも同様に非結晶領域 (マトリクス) の評価が可能であった。

Suratsavadee et al (2020) は木材の静電容量を簡易的な装置で測定し、油ヤシの幹の含水率の評価を行った。同様に人工衛星搭載用の小型の測定装置を開発し、宇宙空間で in situ で静電容量と複素インピーダンスの測定を行って、非結晶領域 (マトリクス) の変化の評価を試みる。LEO の小型人工衛星が飛行する -40°C から $+80^\circ\text{C}$ までの環境では損失正接 ($\tan \delta$) にピークがみられない可能性がある。しかし、損失正接分布のシフトが予想される。

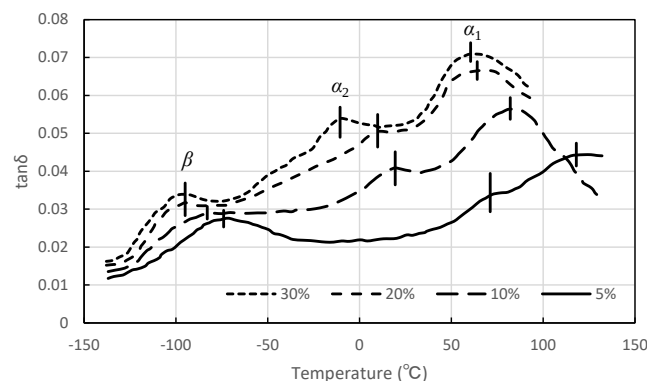


図3 動的粘弾性試験 (DMA) で測定した spruce の温度と損失正接 ($\tan \delta$) の関係 (Kelley et al 1987)

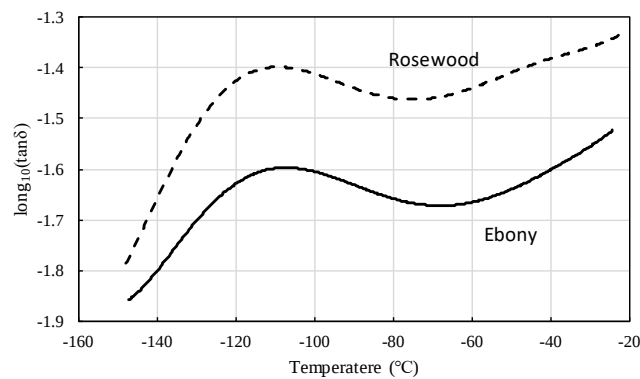


図4 動的粘弾性試験(DMA)(1Hz)で測定したと Ebony と Rosewood の温度と損失正接($\tan\delta$)の関係 (Roing et al 2017)

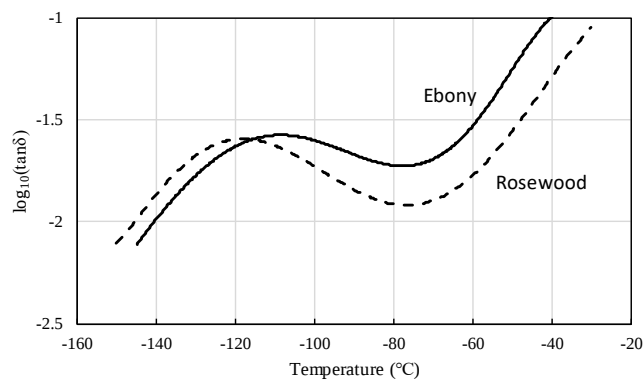


図5 誘電緩和試験(DDS)(1Hz)で測定したと Ebony と Rosewood の温度と損失正接 ($\tan\delta$)の関係 (Roing et al 2017)

(3) 木材の表面観察

地上 400km の LE0 では、大気の 80%が反応性の高い A0 であり、有機化合物は酸化によって揮発性ガスになり表層の消失が生じる(木本 他 2009)。木材でも同様に表層の消失が予想される。小型人工衛星に小型カメラを搭載して(図6)、材料の表面の劣化を in site で撮影して、表面の劣化のリアルタイム観察を試みる。木材の表面は数十 μm の細胞で構成されており、A0 による酸化で細胞の形状が変わることが予想される。



図6 小型カメラによる木材表面の撮影(左)と撮影された画像の例(右)

参考文献

- 森一之、宮崎英治 (2013) 高分子材料を中心とした宇宙用材料の耐宇宙環境性評価. 日本ゴム協会誌 12(86): 367-372.
- Piattoni J, Candini GP, Pezzi G, Santoni F, Piergentili F (2012) Plastic Cubesat: An innovative and low-cost way to perform applied space research and hands-on education. Act Astronautica 81: 419-429.
- Abdullah F, Okuyama K, Fajardo I, Urakami N (2020) In Situ Measurement of Carbon Fibre/Polyether Ether Ketone Thermal Expansion in Low Earth Orbit Aerospace 7:35. DOI:10.3390/aerospace7040035
- 木本雄吾, 宮崎英治, 石澤淳一郎, 島村宏之 (2009) 低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価. J. Vac. Soc. Jpn. 52(9): 475-483.
- Kelley SS, Timothy GR, Wolfgang GG (1987) Relaxation behaviour of the amorphous components of wood. J Mater Sci 22:617-624.
- Roig F, Ramanantsizehena G, Razafindramisa FL, Dantras E, Dandurand J, Hoyet H, Bernes A, Lacabanne C (2017) Dielectric and mechanical properties of various species of Madagascan woods. Wood Science and Technology, 251(6):1389-1404. DOI:10.1007/s00226-017-0936-3.
- Suratsavadee K, Korkua K, Sakphrom S (2020) Low-cost capacitive sensor for detecting palm-wood moisture content in real-time. Heliyon 6:e04555. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04555>

参考資料 4-1
低圧下樹木育成実験用計測センサ制御プログラム

```
//sketch_temp_RH_SDcard_Time_CO2_v2.1
//Humidity is set to 56% (saturation pressure) under 0.25 atm
//DHT22 + Relay 3 +Liquid Crystal I2C + SDcard + RTC3231
//CO2 K-30 using VOUT2
//CO2 pulse record

//v2.0 作成時ダウンロードしたもの
//kSeries http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN126-K3x-sensor-arduino-uart.zip
//DS3232RTC https://codeload.github.com/JChristensen/DS3232RTC/zip/master

#include <SoftwareSerial.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>
#include <SD.h>
#include <DS3232RTC.h>
#include <kSeries.h>

kSeries K_30(8,9); // Arduino PIN 8 Rx(to sensor's Tx), 9 Tx (to sensor's Rx)

const int chipSelect=4;
int jjj = 0;
int co2old = 0;
float co2sum = 0.0;
unsigned long num = 0;

const int PIN_DHT = 2;
DHT dht(PIN_DHT, DHT22);

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

int IN_PIN1 = 3; //Heater
int IN_PIN2 = 5; //Vacuum pump for air circulation
int IN_PIN3 = 6; //Freeze trap
int IN_PIN4 = 7; //Electric Valve for CO2

// Control Setting
// tset: Temperature   tdb: Temperature deadband
// hset: Humidity     hdb1: Pump deadband   hdb2: Freeze trap deadband
// co2set: CO2       co2db: CO2 deadband
const float tset = 24.0; //Temperature set (K)
const float hset = 50.0; //Humidity set (%)
const float co2set = 500.0; // CO2 set (ppm)
const float tdb = 0.5; //Temperature deadband
const float hdb1 = 5.0; //Humidity deadband for pump
const float hdb2 = 5.0; //Humidity deadband for freeze trap
const float co2db = 50.0; //CO2 deadband
//const int analogPin = A0; //Temperature/Humidity sensor input

// CO2 Control
const int dt = 2000; //Data sampling time (msec)
```

```

const int cn = 20; //CO2 data count number for averaging
const int ct = 150; //CO2 valve open time (msec)

void setup() {
// LCD 初期化
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  dht.begin();

  pinMode(2, INPUT);
  Serial.begin(9600);

  pinMode(IN_PIN1, OUTPUT);
  digitalWrite(IN_PIN1, LOW);
  pinMode(IN_PIN2, OUTPUT);
  digitalWrite(IN_PIN2, LOW);
  pinMode(IN_PIN3, OUTPUT);
  digitalWrite(IN_PIN3, LOW);
  pinMode(IN_PIN4, OUTPUT);
  digitalWrite(IN_PIN4, LOW);

// SD ドライブの初期化
  lcd.begin(16,2);lcd.clear();
  if(!SD.begin(chipSelect)){
    lcd.print("Card failed or ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("not present");
    delay(5000);
  }
  if(SD.begin(chipSelect)){
    lcd.print("Card ON");
    delay(5000);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("          ");
  }

// RTC 設定
  setTime(19, 42, 0, 22, 9, 2022);//時、分、秒、日、月、年の順で入力
  RTC.set(now());//書き込み

}

// cp: CO2 Pulse 0: Off 1: On
int cp = 0;

void loop() {
  num++;
  jjj++;
  if (jjj == cn + 1) {
    jjj = 1;
    co2sum = 0;
  }
}

```

```

else {
    }

// DHT22 から温度・湿度を読み取る
    float t = dht.readTemperature();
    float h = dht.readHumidity();

//CO2 読み取り
    int co2 = K_30.getCO2('p');

    if (co2 <= 0){
        co2 = co2old;
    }

    co2sum = co2sum + co2;

// 時間の表示 (LCD)
    tmElements_t tm;
    RTC.read(tm);

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("      ");
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(tm.Hour, DEC);//時を表示
    lcd.print(":");
    lcd.print(tm.Minute, DEC);//分を表示
    lcd.print(":");
    lcd.print(tm.Second, DEC);//秒を表示

// CO2 の表示
    lcd.setCursor(8, 0);
    lcd.print("CO2:");
    lcd.print("      ");
    lcd.setCursor(12, 0);
    lcd.print(co2);

// 温度・湿度の表示
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("T:");
    lcd.print(t);
    char degree_symbol = (char) 223;
    // String s = String degree_symbol + 'C';
    // led.print(s);
    lcd.setCursor(7, 1);
    lcd.print(",H:");
    lcd.print(h);

//時間の表示(シリアルモニタ)
    Serial.print("No");
    Serial.print(num);
    Serial.print(": ");
    Serial.print(tm.Year+1970,DEC);
    Serial.print("/");

```

```

Serial.print(tm.Month,DEC);
Serial.print("/");
Serial.print(tm.Day,DEC);
Serial.print(" ");
Serial.print(tm.Hour,DEC);
Serial.print(":");
Serial.print(tm.Minute,DEC);
Serial.print(":");
Serial.print(tm.Second,DEC);

```

//SD カードへの書き込み

```

File dataFile=SD.open("datalog.txt",FILE_WRITE);
if(dataFile) {
    dataFile.print("No.");
    dataFile.print(num);
    dataFile.print(" ");
    dataFile.print(tm.Year+1970,DEC);
    dataFile.print("/");
    dataFile.print(tm.Month,DEC);
    dataFile.print("/");
    dataFile.print(tm.Day,DEC);
    dataFile.print(" ");
    dataFile.print(tm.Hour,DEC);
    dataFile.print(":");
    dataFile.print(tm.Minute,DEC);
    dataFile.print(":");
    dataFile.print(tm.Second,DEC);
    dataFile.print(" Temp ");
    dataFile.print(t);
    dataFile.print(" Humid ");
    dataFile.print(h);
    dataFile.print(" CO2 ");
    dataFile.print(co2);
    dataFile.print(" CO2 Pulse ");
    dataFile.print(cp);
    dataFile.println(" ");
    dataFile.close();

    lcd.setCursor(15,1);
    lcd.print("R");
}

else {
    lcd.print("error");
}

```

// 温度・湿度制御

```

if (t >= tset + tdb){
    digitalWrite(IN_PIN1, LOW);
    Serial.print(" Temp: ");
    Serial.print(t);
    Serial.print(" OFF");
}
else if (t <= tset - tdb){

```

```

        digitalWrite(IN_PIN1, HIGH);
        Serial.print(" Temp: ");
        Serial.print(t);
        Serial.print(" ON");
    }
    else {
        Serial.print(" Temp: ");
        Serial.print(t);
    }
    if (h <= hset - hdb1){
        digitalWrite(IN_PIN2, LOW);
        Serial.print(" Humid: ");
        Serial.print(h);
        Serial.print(" OFF");
    }
    else if (h >= hset + hdb1){
        digitalWrite(IN_PIN2, HIGH);
        Serial.print(" Humid: ");
        Serial.print(h);
        Serial.print(" ON");
    }
    else {
        Serial.print(" Humid: ");
        Serial.print(h);
    }
}
if (h <= hset - hdb2){
    digitalWrite(IN_PIN3, LOW);
}
else if (h >= hset + hdb2){
    digitalWrite(IN_PIN3, HIGH);
}
else {
}

// CO2 制御
if (jjj == cn){
    co2 = co2sum/cn;
    if (co2 >= co2set){
        digitalWrite(IN_PIN4, LOW);
        cp = 0;
    }
    else if (co2 <= co2set - co2db){
        digitalWrite(IN_PIN4, HIGH);
        cp = 1;
        delay (ct);
        digitalWrite(IN_PIN4, LOW);
    }
}
else {
    cp = 0;
}
Serial.print(" CO2: ");
Serial.print(co2);
Serial.print(" ");

```

```
    Serial.print(jjj);  
    Serial.print(" CO2 Pulse: ");  
    Serial.print(cp);  
    Serial.println("");  
  
    co2old = co2;  
    delay (dt);  
  
}
```

参考資料 4-2
低圧下樹木育成実験用真空度制御プログラム

```
//sketch_vacuum_control_v1.6
#include <SoftwareSerial.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SD.h>
#include <DS3232RTC.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

const int chipSelect=4;//SD カード用

const int PIN_ANALOG_INPUT = 1;
const double Pressure = 1.0 * 101325;
unsigned long num = 0;

int ict = 0;
int P;
char Pout[5];

// 真空度制御

double fromPtoV(double P) {
    double V = P / 13332.24;
    //double V = P/Pressure * 3.74;
    return V;
}

double Pmax = Pressure * 0.320; // Pa max value
double Pmin = Pressure * 0.280; // Pa min value
double Vmax = fromPtoV( Pmax );
double Vmin = fromPtoV( Pmin );

void setup() {
// LCD 初期化
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.clear();

    Serial.begin(9600);
    pinMode(9, OUTPUT); //制御用

//SD ドライブの初期化
    lcd.print("Card ON");
    delay(5000);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("          ");

//RTC 設定
    setTime(14, 28, 0, 21, 03, 2023);//時、分、秒、日、月、年の順で入力
    RTC.set(now());//書き込み
}
```

```

void loop() {
  int Pin = analogRead( PIN_ANALOG_INPUT );
  double Vn = Pin * 2.0 * 5.0 / 1023.0;
  num += 1;

  // 電圧→真空度の変換式
  double Pn = Vn / 10.0 * 133322.4;

  if (Vn > Vmax ){
    digitalWrite(9, HIGH);
  }
  else if (Vn < Vmin ){
    digitalWrite(9, LOW);
  }

  //データ保存は 1000 ミリ秒ごとに行う
  if (ict == 20){
    //num += 1;
    int num0 = (num-1)/20;

    //時間の表示(LCD)
    tmElements_t tm;
    RTC.read(tm);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("      ");
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(tm.Hour, DEC);//時を表示
    lcd.print(":");
    lcd.print(tm.Minute, DEC);//分を表示
    lcd.print(":");
    lcd.print(tm.Second, DEC);//秒を表示

    //入力電圧の表示(LCD)
    lcd.setCursor(9,0);
    lcd.print("V:");
    lcd.print(Vn);

    //真空度の表示(LCD)
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("P:");
    float Pp = Pn / 101325;
    dtostrf(Pp,2,3,Pout);
    lcd.print(Pout);
    lcd.setCursor(8,1);
    lcd.print("atm");

    //真空度の表示(シリアルモニタ)
    Serial.print("No.");
    Serial.print(num0);
    Serial.print(": ");
    Serial.print(tm.Hour, DEC);//時を表示
    Serial.print(":");
    Serial.print(tm.Minute, DEC);//分を表示

```

```

Serial.print(":");
Serial.print(tm.Second, DEC); //秒を表示
Serial.print(" Vn: ");
Serial.print(Vn);
Serial.print(" P: ");
Serial.println(Pout);

//SD カードへの書き込み
File dataFile=SD.open("datalog.txt",FILE_WRITE);
if(dataFile) {
  dataFile.print("No.");
  dataFile.print(num0);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(tm.Year+1970,DEC);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print("/");
  dataFile.print(tm.Month,DEC);
  dataFile.print("/");
  dataFile.print(tm.Day,DEC);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(tm.Hour,DEC);
  dataFile.print(":");
  dataFile.print(tm.Minute,DEC);
  dataFile.print(":");
  dataFile.print(tm.Second,DEC);
  dataFile.print(" Vn ");
  dataFile.print(Vn);
  dataFile.print(" P ");
  dataFile.print(Pout);
  dataFile.close();

  lcd.setCursor(15,1);
  lcd.print("R");
}
//else {
//}
  ict = 0;
}

  ict += 1;
  delay(50);
}

```

参考資料 5-1
令和4年度有人宇宙学シラバス

科目ナンバリング										
G-GAIS00 63030 LB58 G-GAIS00 63030 LB70 G-GAIS00 63030 LB56										
授業科目名 ＜英訳＞	有人宇宙学 Human Spaceology: The Study of Human Space Activities				担当者所属・ 職名・氏名	総合生存学館 特定教授 土井 隆雄 総合生存学館 教授 山敷 庸亮 高等教育研究開発センター 准教授 田口 真奈 ヒト行動進化研究センター 准教授 足立 幾磨 総合生存学館 関係教員				
配当 学年	1-3年生	単位数	2	開講年度・ 開講期	2022・ 後期	曜時限	水5	授業 形態	講義	使用 言語
日本語及び英語										
[授業の概要・目的]										
有人宇宙活動を宇宙に恒久的に人類社会を創造する活動であると定義する時、人類が宇宙に展開するための新しい総合科学:人間-時間-宇宙を繋ぐ有人宇宙学が必要となる。有人宇宙学は、宇宙-時間(宇宙の進化)、時間-人間(生命の進化および文明の進化)、人間-宇宙(宇宙開発の進化)の4つの進化過程を司る学問である。それは、宇宙に人間社会を創ろうとする試みが、自然科学分野のみならず、人文社会科学分野にも幅広く関係していることによる。この講義では、人類が宇宙における持続可能な社会基盤を構築するために何が必要なのか、自然科学的・人文社会科学的に解説する。理工系ばかりでなく人文社会系学生が、宇宙における持続的社会的構築という命題の中に、自分の研究分野との接点を見つけ、自分の研究の新たな意義と新しい方向性を見出すことをめざす。										
[到達目標]										
人類の宇宙進出が地球文明にとって何を意味するかを理解し、人類が宇宙に持続可能な社会基盤を構築することが可能であるのかを、有人宇宙学、宇宙環境工学、宇宙探査工学、宇宙生命科学、宇宙生物学、宇宙医学、宇宙霊長類学、宇宙人類学、宇宙法、宇宙居住学など幅広い学問分野の融合から探求することを学ぶ。										
[授業計画と内容]										
【第1回】 10月 5日 有人宇宙学(土井・山敷・田口) 【第2回】 10月12日 宇宙環境工学(山敷) 【第3回】 10月19日 宇宙探査工学(清水) 【第4回】 10月26日 有人宇宙学演習1 【第5回】 11月 2日 宇宙医学(寺田) 【第6回】 11月 9日 宇宙生命科学(保尊) 【第7回】 11月16日 宇宙木材工学(村田) 【第8回】 11月30日 宇宙霊長類学(足立) 【第9回】 12月 7日 有人宇宙学演習2(土井・山敷) 【第10回】 12月14日 宇宙法(青木) 【第11回】 12月21日 宇宙人類学(岡田) 【第12回】 1月 4日 有人宇宙学演習3(土井・山敷) 【第13回】 1月11日 宇宙居住学(稲富) 【第14回】 1月18日 有人宇宙学演習4(土井・山敷・田口) 【第15回】 1月25日 フィードバック ※講師の都合により、講義日程が前後する可能性がある。										
----- 有人宇宙学(2)へ続く↓↓↓ -----										

有人宇宙学(2)
【履修要件】
宇宙総合学を履修していることが望ましい。学部学生も聴講可能である。
【成績評価の方法・観点】
講義への出席、3回の有人宇宙学演習において各講義要素の理解度と積極性・創造性及び最終レポートによって評価する。
【教科書】
使用しない
【参考書等】
(参考書) 授業中に紹介する
【授業外学修（予習・復習）等】
なし
（その他（オフィスアワー等））
なし ※オフィスアワーの詳細については、KULASISで確認してください。

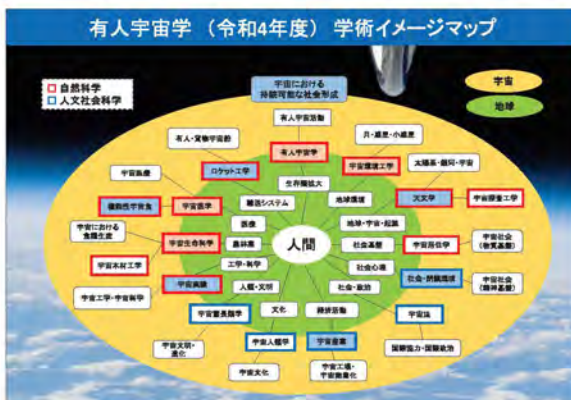
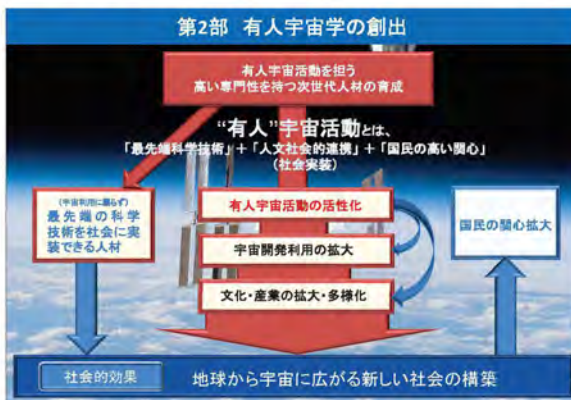
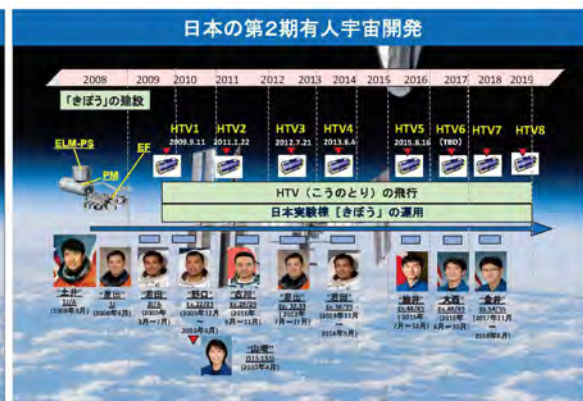
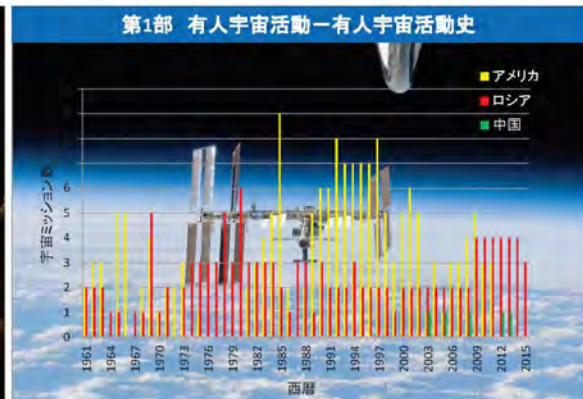
参考資料 5-2
 有人宇宙学 1 : 2022/10/05 : 土井隆雄

2022年度 有人宇宙学講義

有人宇宙学1
 2022年10月5日
 土井隆雄

1. 有人宇宙活動史
2. 有人宇宙学とは何か
3. 有人宇宙学学術マップ
4. ソーシャル・ハビタビリティとは何か
5. 有人宇宙学と関連SOGs

2006年5月11日午前2時28分(米国東部夏時間) NASAケネディ宇宙センターより
 スペースシャトル「エンタープライズ」号 打上げ



宇宙を生きる(ヒント)

ADD注: 宇宙を生きる
仮算(代算)

質問: ヒトが生きて何本の樹木が必要か?

- ・ヒトひとりに必要な酸素量: 500ℓ/day
https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=1519
- ・ヒトひとりが吐く二酸化炭素量: 500ℓ/day=982g/day=358kg/year
500/22.4x44=982g/day, 1気圧0℃ 1モルのガスの体積: 22.4ℓ
- ・杉1000本で1年間に8800kgの二酸化炭素を吸収する
http://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_rivou/ondanka/20141113_topics2_2.html
- ・杉1本で1年間に8800/1000=8.8kgの二酸化炭素を吸収する

↓

・ヒト1人当たり、358/8.8=40.7=40本の杉が必要である

・直径120メートルドーム(甲子園球場)に10m²に1本の杉を植える

⇒ 12,000 ÷ (40x10) = 30人が暮らせる!

地球外森林の構築

有人宇宙学 1 : 2022/11/16 : 村田功二

Human Spaceology: The Study of Human Space Activities
有人宇宙学

Space Wood Engineering(宇宙木材工学)

1. Needs of wood utilization(木材利用の必要性)
2. Utilization of wood in space(宇宙での木材利用)
3. Exposure test of wood in space(木材宇宙暴露試験)

Koji Murata, Associate Prof.
Div. of Forestry and Biomaterials Science, Graduate School of Agriculture,
農学研究科 森林科学専攻 准教授 村田功二

Needs of wood utilization in Space 木材利用の必要性



© NASA

NASA: "Artemis Program". <https://www.nasa.gov/artemisprogram>

Artemis Phase 1



© NASA

NASA: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america_to_the_moon_2024_09-16-2019.pdf

Artemis Phase 2



©NASA

NASA: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america_to_the_moon_2024_09-16-2019.pdf

Nov 5, 2022 (MEDIA ADVISORY M22-161)

NASA Sets Coverage for Artemis I Moon Mission Launch

NASA is targeting Monday, Nov. 14, for the launch of the Artemis I Moon mission during a 69-minute launch window that opens at 12:07 a.m. EST. The launch countdown will begin Saturday, Nov. 12, at 12:27 a.m.

Through Artemis missions, NASA will land the first woman and the first person of color on the Moon, paving the way for a long-term lunar exploration and serving as a steppingstone to send astronauts to Mars.



<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-sees-coverage-for-artemis-i-moon-mission-launch>

©NASA

Mars-500 project

A series of experiments simulating an interplanetary manned flight.
(Institute for Bio-Medical Problems of RAS under the aegis of Roscosmos and Russian Academy of Sciences)

14-day isolation (- Nov. 2007)
105-day isolation (- July 2009)
520-day isolation (- Nov. 2011)



http://mars500.imbu.ru/en/index_e.html

Mars-500 project

A series of experiments simulating an interplanetary manned flight.
(Institute for Bio-Medical Problems of RAS under the aegis of Roscosmos and Russian Academy of Sciences)

14-day isolation (- Nov. 2007)
105-day isolation (- July 2009)
520-day isolation (- Nov. 2011)



http://mars500.imbn.ru/en/index_e.html

2. Utilization of wood in space (宇宙での木材利用)

- ① Possibility of forestry in space.
(宇宙林業の可能性)
- ② Physical properties and problem for utilization of wood materials in space.
(宇宙空間での木材の物性と問題点)
- ③ Wooden artificial satellite
(木造人工衛星)

① Possibility of forestry in space (宇宙林業の可能性)

Is an Extraterrestrial Forest Possible?

Makoto NAGATOMO ISAS(retired)

If a forest can be grown in a pressurized balloon on the moon and Mars, it will make an efficient closed ecological system for human beings and produces wood that is an excellent material for their residence and various use though not used for the present space systems. The growth capability of trees under reduced atmospheric pressure and unknown water resource on the moon and Mars are the most fundamental issue to realize such a system.

地球外森林は可能ですか

長友信人 (宇宙科学研究所名誉教授)

宇宙利用シンポジウム, Space Utilization Research, 20, 136-139 (2004)

もし月や火星で加圧ドームの中で森を育てることができれば、人類にとって効率的な閉鎖生態系となり、住まいには優れた材料である木材を生産することができる。そして現在の宇宙システムでは使われていない様々な用途を生み出す。そのようなシステムを実現するための最も基本的な問題は、低い気圧での樹木成長の許容度や、月と火星の未知の水資源である。

Possibility of forestry in space

Is an Extraterrestrial Forest Possible?

Makoto NAGATOMO ISAS(retired)

Space Utilization Research, 20, 136-139 (2004)

Space log cabin in Moon

The log cabin is covered with a balloon.

Since air leaks, it should be collected when the pressure in the balloon reaches a certain level.

The pressure inside the balloon should be as low as possible, and the range of temperature should be controlled as wide as possible.



Image of log cabin covered with balloon

The crater in south pole on the moon is about 50K (-220 °C) on average.
月の南極にあるクレーターは平均温度約50K (-220 °C) という極低温

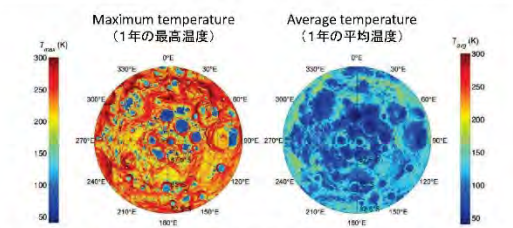


Fig. 8. Annual maximum (left) and annual average (right) balances surface temperatures as measured by Diviner, for the lunar south polar region 42.3-5.

Hayne PO, et al., Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements, Icarus, 255, 58-69, 2015.

Possibility of ice existence in the lunar south-pole craters by UV spectrum
UVスペクトルから月の南極のクレーターに氷の存在の可能性

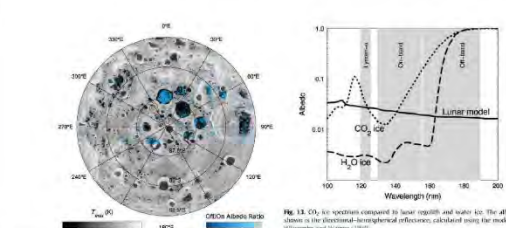
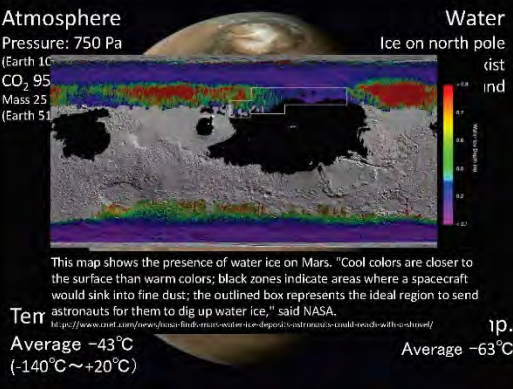


Fig. 13. UV spectra compared to lunar regolith and water ice. The albedo shown is the directional-hemispherical reflectance, calculated using the model of Wiscombe and Warren (1986).

Hayne PO, et al., Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements, Icarus, 255, 58-69, 2015.



This map shows the presence of water ice on Mars. "Cool colors are closer to the surface than warm colors; black zones indicate areas where a spacecraft would sink into fine dust; the outlined box represents the ideal region to send astronauts for them to dig up water ice," said NASA.

http://www.nasa.gov/news/content/160601main/mars-water-ice-deposit-conditions-160601main-01.html

1p.

Average -43°C (-140°C ~ +20°C)

Average -63°C

3. Utilization of wood in space

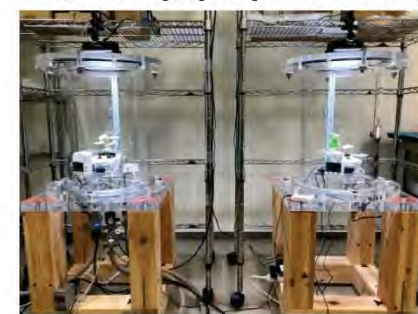
② Physical properties and problem for utilization of wood materials in space.



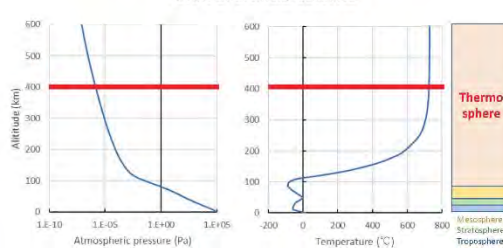
【Growth of tree in space】

Closed ecological life support systems (CELSS)

Partial pressure of O₂, CO₂ and H₂O at which trees can grow.



Orbit of artificial satellite



Low Earth orbit (LEO) : ~2,000km (ISS 400km)

Medium Earth Orbit (MEO) : 2,000 km ~ 36,000 km

Geostationary orbit (GEO) : 36,000 km

3. Utilization of wood in space

② Physical properties and problem for utilization of wood materials in space.

【Advantage of wood (on Earth)】

- Large strength per weight (specific strength)
- Easy to obtain and process
- Good thermal insulation on across grain
- Low CO₂ emissions during material production

【Disadvantage (on Earth)】

- Large anisotropy (weak on across grain)
- Dimensional stability with changes in moisture content
- Decay and inflammability
- Variation in mechanical properties

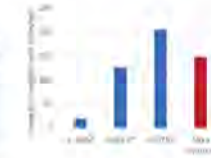
de Havilland Mosquito

The de Havilland DH.98 Mosquito is a British twin-engine, shoulder-winged, multirole combat aircraft, introduced during the Second World War. Unusual in that its frame was constructed mostly of wood, it was nicknamed the "Wooden Wonder", or "Mossie". In 1941, it was one of the fastest operational aircraft in the world. (Wikipedia)



Wood is superior to aluminum in specific strength (Strength-to-weight ratio).

	Density kg/m ³	Young's modulus GPa	Tensile strength MPa
Aluminium A1085P	2700	69	55
Duralumin A2017P	2800	69	355
Extra Super Duralumin A7075P	2800	72	573
Wood Silka Spruce	400	10.8	59.3



3. Utilization of wood in space

② Physical properties and problem for utilization of wood materials in space.

【Disadvantage (on Earth)】

- Large anisotropy (weak across to grain)
- Dimensional stability with changes in MC
- Decay and inflammability
- Variation in mechanical properties

【Outer space?】

Vacuum → high dimensional stability in 0% of MC

Vacuum → No decay and incombustibility without O₂

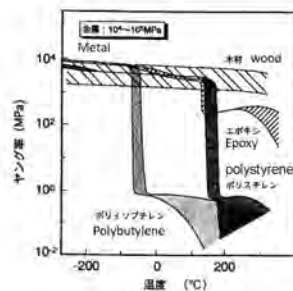
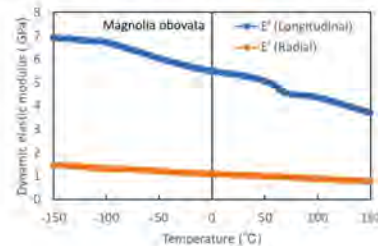
Wide range in temperature (-100 °C to 100 °C) → ?

Cosmic rays (proton, electron, high-energy particles) → ?

Temperature dependence of dynamic elastic modulus (E')

(Chinese poplar wood)

Mechanical property of wood is stable from -150° to +150°



Young's modulus is stable with respect to temperature, comparing to typical polymer materials.

Strength is stable from high to low in temperature (parallel to grain)

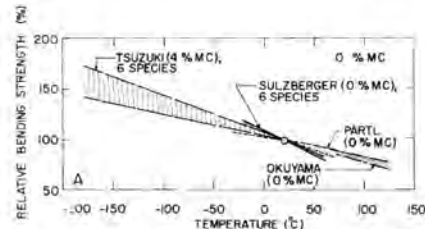


Fig. 7. Effect of temperature on bending strength of wood. BBS at 0% MC, A, B and 4% MC, R: 10% MC.

Gorman (1982) Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects. Wood and Fiber 14(2): 4-46

Low coefficient of thermal expansion

Wood

$$\alpha_L = 3.5 \times 10^{-6} / K$$

$$\alpha_R = 56 r_0 \times 10^{-6} / K \text{ (light wood)}$$

$$45 r_0 \times 10^{-6} / K \text{ (heavy wood)}$$

$$\alpha_T = 81 r_0 \times 10^{-6} / K \text{ (light wood)}$$

$$58 r_0 \times 10^{-6} / K \text{ (heavy wood)}$$

$$(r_0: \text{specific gravity } 0.1 < r_0 < 1.3)$$

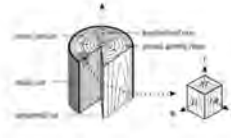
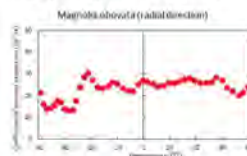
Steel: $\alpha = 11.7 \times 10^{-6} / K$

Aluminium: $\alpha = 23.8 \times 10^{-6} / K$

Glass: $\alpha = 9 \times 10^{-6} / K$

Epoxy: $\alpha = 62 \times 10^{-6} / K$

Carbon fiber: 0



木村工学(中戸)第二編(1985) 表B-11

プロセス・テクノロジー・ノート https://www.kobe.co.jp/contents/technology_note/basic/temperature/coefficient.htm

Vacuum

Atmospheric pressure

Surface on Earth: 1.013×10^5 Pa

400km (ISS): $10^{-4} - 10^{-5}$ Pa

Geostationary orbit: 10^{-8} Pa

Galactic space: 10^{-11} Pa

Accidents in high vacuum

- As volatile components evaporate, paints and adhesives become tattered
- Lubricant evaporates
- Friction between metals increases and metals elements do not slip

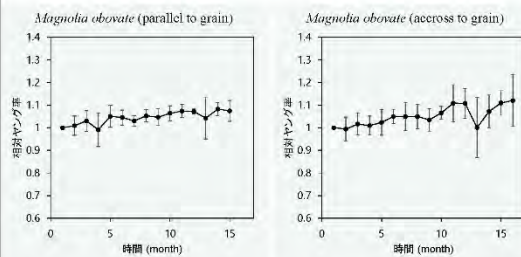
トランジスタ技術 2020年6月号, pp.63-64.

Vacuum exposure test of wood (July, 2018-)

Pressure: less than 0.1 Pa

Experimental:
Measuring weight and Young's modulus in bending test every month.

Bending test (ZTS-500N IMADA):
Span 80mm (Span/Depth=16)
Crosshead rate 5 mm/minute
Stress ratio: 20 % (non-destructive test)



Atomic Oxygen (AO)

Since the ISS orbits at a speed of about 8 km/s, the AO collides with a relative energy of about 5 eV.
When AO collides, an oxide layer is formed, and when the oxide material is a gas or easily to peel off, the surface gradually disappears.

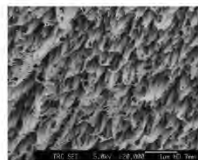


Fig. 3 SEM image of the flight retrieved sample.

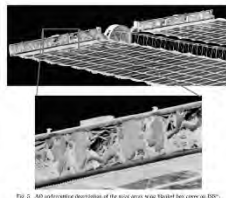


Fig. 2 Microstructural degradation of the AO erosion (wing stacked box view at 800x).

本誌著者 (2009) 低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価. J. Vac. Soc. Jpn., 52(5): 475-483

Specimen

Softwood (conifer tree)



スギ

Cryptomeria japonica (京都府産)

Hardwood (broadleaf tree)



センダン

Melia azedarach (京都府産)



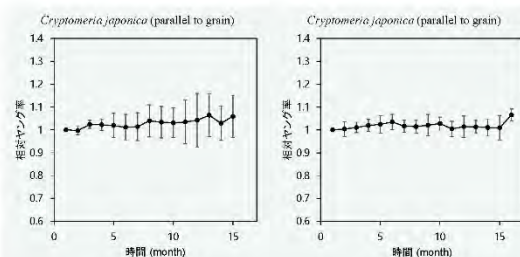
ヒノキ

Chamaecyparis obtuse (茨城県産)



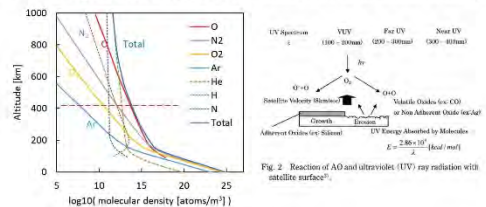
ホオノキ

Magnolia obovate (茨城県産)



Atomic Oxygen (AO)

At altitudes of 200 to 600 km from the ground, oxygen molecules are decomposed into atomic oxygen by ultraviolet rays, especially vacuum ultraviolet rays (VUV: 100 to 200 nm).
Atomic oxygen (AO) occupies 80% of the atmosphere at an altitude of 400 km.



本誌著者 (2009) 低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価. J. Vac. Soc. Jpn., 52(5): 475-483

Materials International Space Station Experiment (MISSE)

MISSE-2 PEACE Polymers experiment:

Space exposure tests of polymer samples in LEO were conducted by NASA (3.95 years, 2001/8/16 - 2005/7/30).

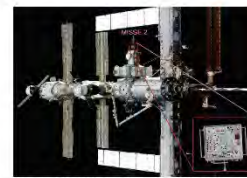


Figure 1—MISSE-2 PEACE Experiment Center Test 1 Testing the PEACE Polymers Experiment Effectively in the International Space Station from August 16, 2001 to July 30, 2005.

©NASA

Banks et al. (2009) Atomic Oxygen Erosion Yield Prediction for Spacecraft Polymers in Low Earth Orbit. NASA/TM-2009-215812.

MISSE 2 (Materials International Space Station Experiment 2)

40 kinds of polymers were subjected to exposure test,
And the erosion rate of the polymers was obtained.



©NASA

Banks et al. (2008) Atomic Oxygen Erosion Yield Prediction for Spacecraft Polymers in Low Earth Orbit, NASA/TM-2009-215812

Estimation of erosion in space exposure test of wood

Number of atomic oxygen (AO) collided in MISSE2 exposure test

$$8.43 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2 \text{ (3.95year)}$$

Expected maximum loss of wood during the operation period

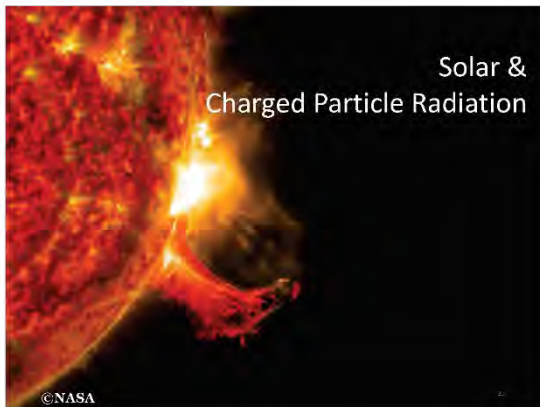
$$0.083 \text{ cm (density } 0.50 \text{ g/cm}^3\text{)}$$

(Supposition)

- (1) Wood consists of only glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)
- (2) All atomic oxygen collided to Carbon reacts completely
- (3) Operation period is a half year

The actual erosion is expected to be about 0.01 to 0.02 cm.

Banks et al. (2008) Atomic Oxygen Erosion Yield Prediction for Spacecraft Polymers in Low Earth Orbit, NASA/TM-2009-215812

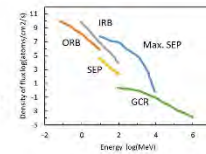


Solar & Charged Particle Radiation

©NASA

Cosmic Ray

- ① Galactic Cosmic Rays (GCR)
 - Proton 90%
 - α ray (Helium) 10%
 - Heavy Ion (C, Fe) 1%
- ② Solar Energetic Particles (SEP)
 - high-energy particles (proton, electron)
- ③ Radiation Belt Particle (RBP)
 - Inner Radiation Belt (IRB) (proton)
 - Outer Radiation Belt (ORB) (electron)



Energy spectrum of Cosmic ray (Fujitaka1998)

EXPOSE-R2 on ISS 2014/10/24 ~ 2016/1/11

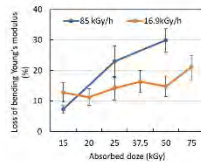
Cosmic Ray	Maximum ($\mu\text{Gy/day}$)	Total (Gy/442days)
GCR	77	0.0318
SEP	2,515	0.004
IRB(SAA)	844	0.351
ORB	2,962	0.123
Total		0.4098

Dachev et al. (2017) Space Weather 15: 1475-1489.

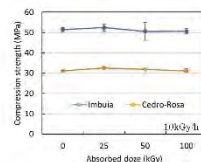
Effect of Gamma-ray (electromagnetic wave) Exposure experiment for wood specimen

S. Curling et al. (2008) Forest Product Journal 56(1/2):87-90

- Gamma-ray more than 10 kGy decrease strength a little.
- No data for effect of high energetic cosmic ray (particle).



Curling et al. (2008) より作成



Seeniano et al. (2011) より作成

LignoStella Project ③ wooden artificial satellite for sustainable space development (Kyoto university and Sumito Forestry Co., Ltd.) (2020/12/24 release)



Cubesat
1U: 100 × 100 × 113.5 mm
0.13 ~ 1.33 kg / 1Unit

Release from ISS (J-SSOD)
Orbit : 380 ~ 420km
Life in orbit: 100 ~ 250 days

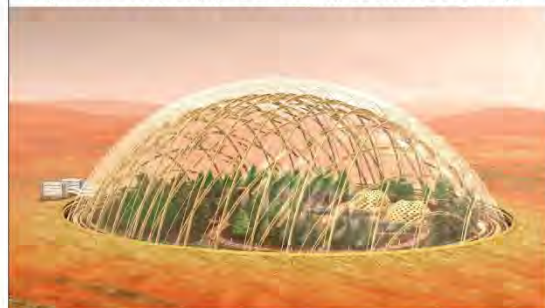
LignoStella Project

(2020/12/24 release)

Aims are to clarify the possibility of using wood, which is a renewable resource, in outer space, and to obtain basic knowledge on using wood in the future; Development of technology to utilize wood under extreme conditions, Encouragement to expand the utilization of wood on the earth.

- ① Study about tree plantation and wood utilization in outer space
- ② Study about stress-release of wood in extreme circumstance such as a space station
- ③ Study about wooden building structure and about atmosphere and soil in Moon and Mars
- ④ Development of wood artificial satellite

LignoStella Project (Kyoto University, Sumitomo Forestry)



Realization of space forests on Mars in future

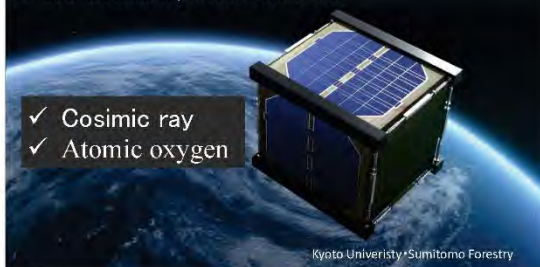
LignoStella Project (Kyoto University, Sumitomo Forestry)



Realization of space forests on Mars in future

③ Wooden artificial satellite (Lignosat)

- No pollution for Stratosphere
- Transparent for radio wave
- Durability in Low temperature / high temperature
- Low thermal expansion coefficient



- ✓ Cosmic ray
- ✓ Atomic oxygen

Kyoto University・Sumitomo Forestry

Feb. 20, 2022

Antares rocket launched at NASA's Wallops Flight Facility in Virginia, USA, and delivered our specimen to the ISS.



© NASA

3. Exposure test of wood in space (ExBas)

Checking specimen after exposure test

- ① Erosion of wood specimen by atomic oxygen
Estimation of erosion rate
Observation of surface using microscope
- ② Effect of cosmic ray
Strength / Chemical component
Crystallinity structure
- ③ Gamma radiation test in Laboratory

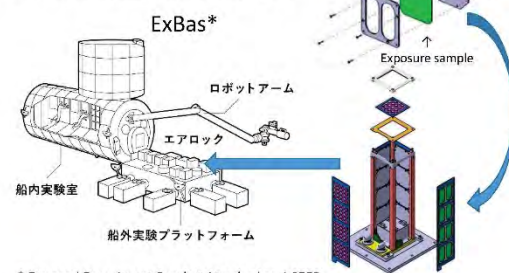
Growth of poplar tree under low pressure atmosphere



0.1~0.01 atm 60~80%RH

3. Exposure test of wood in space

International Space Station (ISS) "KIBO"



* Exposed Experiment Bracket Attached on I-SEEP

3. Exposure test of Wood in space (ExBas)

Specimen: 56mm × 8.6mm × 5mm

Species: *Magnolia obovate*, *Cerasus jamasakura*, *Betula ermanii*

Other: polyamide sheet for estimation of AO fluence



Northrop Grumman's Cygnus cargo craft(NG-17)

2022 Feb. 21 Cygnus cargo arrived at ISS
Mar. 4 Exposure test started
Dec. Exposure test is going to finish
2023 Mar. Specimen will return to us

3. Exposure test of wood in space (ExBas)

Expected achievement of exposure test

- ① The first space exposure test in the world
- ② Fundamental data for design of wood satellite
- ③ Elucidating mechanism of wood degradation
- ④ Development of new technology for control of degradation

参考資料 6-1
EPS_2022 年 9 月活動報告書_20221011_v1.0
2022/10/11

2022/10/11
発行者：宇宙木材研究室 EPS班

EPS_2022年9月活動報告書_20221011
設計会議 #26

LS-Eng-EPS-013
Ver. 1.0

宇宙木材研究室
EPS班

EPS班9月活動報告

10/11 福王悠星・佐野愛華・松野なな・池田紘輝・伏見宗太郎

1. 太陽光パネル用基板の設計

【9月の活動】

なし。

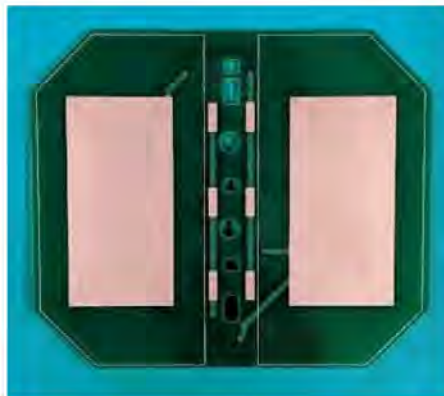


図1-1 +X面 外側



図1-2 +X面 内側

【今後の予定】

○11月に基板と太陽光パネルの接着を行うため、その準備を行う。

2. PCB+木造構体接着

【タスク進捗】

- 接着環境の構築

1. 接着環境の構築

- ・RTVを真空環境に晒すための装置を検索



図2-2 九工大の真空引き装置(引用:Solar Cells Attachment Procedure and its verification method)

- ・代替品を土井先生の方で準備していただく
- ・ただし予算の都合で、10月中旬以降に購入
→届くまでEMの作業は不可能。

【今後の予定】

10月末 接着環境の構築完了

11月 EM作成

3. セル関連

【9月の活動】

バッテリー電圧値測定

<9月> [FM, FM BackUpバッテリー電圧値 - Google スプレッドシート](#)

→全てのFMセル電圧値が1.1Vを上回っていた

はんだ付け済のEMバッテリーはFAB基板を用いた充放電デモンストレーション時に測定

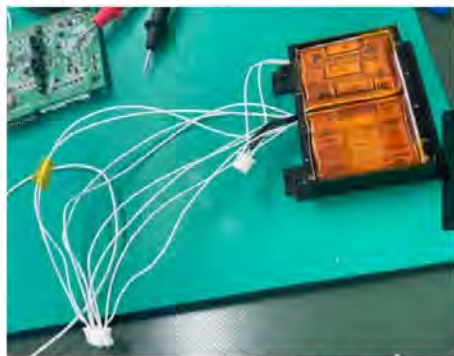


図3-1 バッテリー製作の様子

【今後の予定】

バッテリー管理

4. 基板評価

【9月の活動】

・FABについて学習(菊川→池田、佐野)

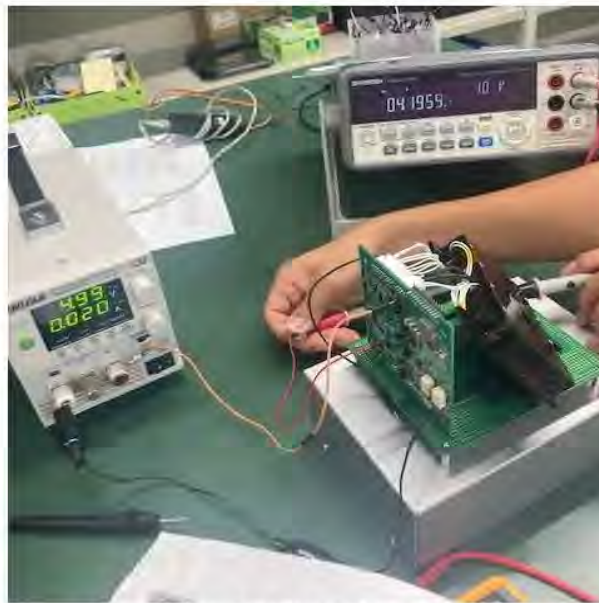


図4-1 実験の様子

・バッテリー充電時に流れ込む電流値(200-300mA)について
→スクリーニング試験時の電流(1A)を大きく下回っているので問題なし

【今後の予定】

・EMバッテリー充放電
・OBC/EPS PIC・RESET PICの概要理解

5. 実験計画

【10月】EM接着作業:真空ポンプ到着前→新メンバーを含めた練習
到着後→本番

【11月】接着後の発電試験
接着後の振動試験(時期についてSTRUCと要相談)

【12月】他面のPCB発注・接着(電波試験にて太陽光パネルが何面必要か要確認)

参考資料 6-2
COMM_2022 年 10 月活動報告書_20221115_v1.0
2022/11/15

2022/11/15
宇宙木材研究室 COMM 班

COMM_2022 年 11 月活動報告書_20221115
設計会議 #27

LS-Eng-COMM-014
Ver. 1.0

宇宙木材研究室
COMM 班

0. 目次

10月の活動報告

1. 周波数申請
2. 地上局整備
3. COMM 基板単評価
4. アンテナ展開試験
5. その他

11月の予定

10月の活動報告

1. 周波数申請 曾束、阿戸、野間

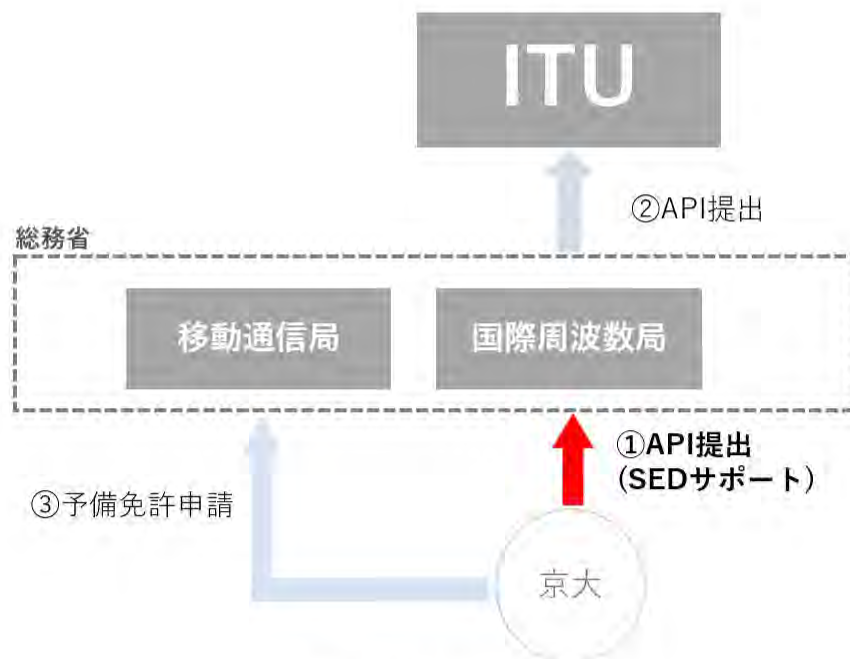


図 1. 予備免許までの流れ

API 作成

ITU 製ソフトウェアを用いて API 申請の申請書を作成した。

電力計算で不明点があり、SED に問い合わせたのち API 作成を行った。

エラー判定ソフトで、GIMS(アンテナパターン登録ソフト)との連携や値の入力のエラーが出たため再度 SED に問い合わせ、返答をいただいた。

今週に再度 SED に提出予定。



図 2.エラーメッセージ

無線局免許申請 石原、阿戸、野間

API 申請と並行して進める事とし、準備を開始した。

開局する無線局は LignoSat の運用に限定されるので、現在開局している J1.3ZLJ とは別に、新たに人工衛星局(LignoSat)と地球局(地上局)、を移動しない局として開局する。

近畿総合通信管理局、陸上 3 課(アマチュア局担当)に連絡し申請手順を確認した。

申請方法は総務省 Web ページの電子申請・届出システム Lite から行う。

<https://www.denpa.soumu.go.jp/public2/index.html>

実際は国際周波数調整の API が完了してからの申請であるが、時間的に余裕が無い為、陸上 3 課の了解を得て事前に申請資料を作成し内容を確認して頂ける事となった。

申請用に宇宙木材研究室のアカウント作成の申し込みをした。

今後

アカウントの登録が完了した後、申請書類の作成を始める、阿戸さん、野間さん担当

API 申請の完了後速やかに開局申請書を提出する。

2. 地上局整備

(1) 地上局アンテナ整備

(1) アンテナ工事準備等

12日にナガラ電子工業よりアンテナが納品された。



UHF のアンテナは組み立て済み、2 本
VHF は箱の中、1 本

設置工事は 16 日の水曜日、9 時より

COMM 班には監視カメラの設置とコネクタ類の半田付けをお願い予定。
506 号の無線機設置テーブルへの監視カメラの機器の設置のレイアウトを
検討する。

(2) 同軸コネクタ作成（石原先生、清田、野間）

石原先生のご指導の下、新しいアンテナと通信機（iCOM IC-9100）を接続するため、その他通信試験で使用するための同軸ケーブルコネクタを作成した（図参考）。



図：同軸コネクタ（左：作成前、右：作成後）

(2) 地上局機器

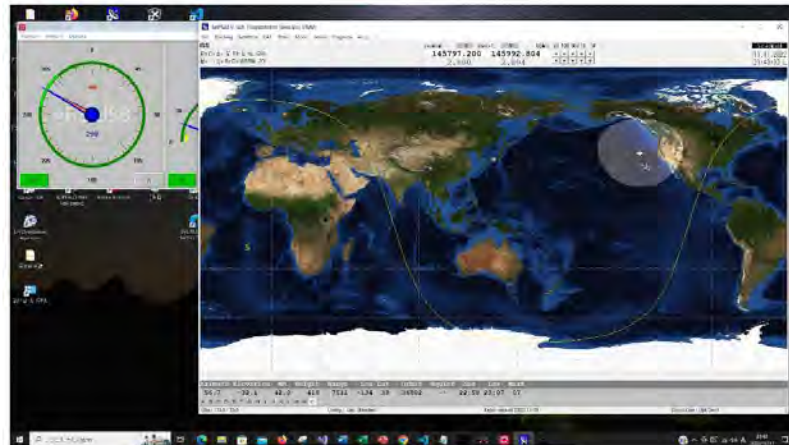
(1) TNC の設定調整（清田）

通信機（iCOM IC-9100）と PC の間に必要となる、TNC（ハードモデム）の設定調整を行った。九工大の中山様に九工大の設定を伺い、その設定に合わせている。この設定調整により、FM パケットを受信し、デコードまで出来るようになった（地上局運用関連の項目で詳しく述べる）。

(2) ローターと PC の接続（清田）

新しいロータータ(Yaesu G-5500)を PC から操作できるようにした。具体的には、PC 側に ARSVCOM と SatPC32 をインストールした。そして、ARSVCOM でロータータを認識させ、ARSVCOM を介して、衛星追尾ソフト SatPC32 とロータータと接続している。この方式は、バイオスフィア 2 と同様の方式である。この準備の際には、Arash Roshanineshat さん、Curt Laumann さんにご指導いただいた。

現段階で、SatPC32 を用いて、新しいロータータを衛星に合わせて自動追尾できる状態である（下図参考）。アンテナ工事が終わった後に、再度ロータータの調整を行う予定である。



図：ARSVCOM（左）と SatPC32（右）

(3) Tera Term の設定調整（清田）

現在、TNC のコマンドを打ち込み、表示を行っているソフトが Tera Term である。16 進数の表示が出来るような設定、ログファイルを自動で出力させる設定等を行った。

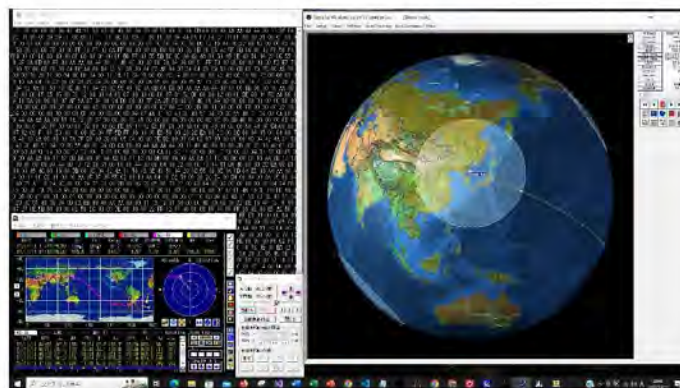
(3) 地上局運用関連

(1) 衛星からのダウンリンク受信（清田、野間）

地上局の整備が進んできたことから、様々な衛星からのダウンリンク受信を試みている。現在は、FM パケット（LignoSat とおなじ 4800 bps）の受信をメインで取り組んでいる。現在受信に成功している衛星は以下。

- CAS-4A
- CAS-4B
- TO-108

これらの衛星は全て、FM パケット 4800 bps で 145 MHz 帯である。実際の受信した際の様子は以下。（動画あり）

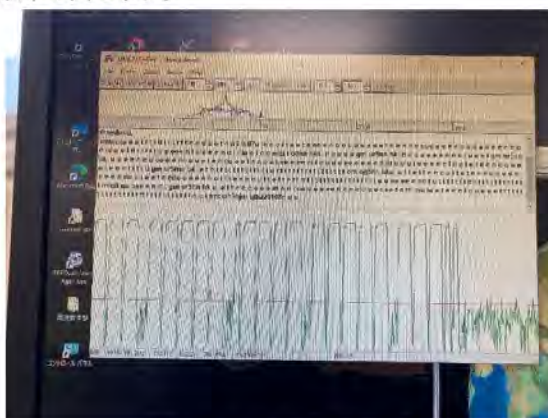


図：人工衛星から FM パケットを受信した様子（左上）

図のように、受信した FM パケットを 16 進数で表示することが出来ている。現在、周波数のドップラーシフト調整は手動で行っているが、今後は SatPC32 や C# による自作アプリによって自動調整できることを目指す。さらに、145MHz 帯よりもドップラーシフトが大きい 435MHz 帯の受信も引き続き試みる予定である。

(2) CwGet の試験的使用（清田、野間）

衛星から届く CW を自動で（ある程度）デコードするソフトがいくつか存在する。今回はそのうち、フリーで使用可能な CwGet を試験的に使用した。石原先生の自宅から CW を発信してもらい、それを京大の地上局で受信した。その結果を以下の図で示す。



図：CwGet 使用中の様子

図から分かるように、CW の波形がしっかりと捉えられていることが分か

る。しかし、デコードにはいくつか間違いがある。そのため、実際の衛星運用の際には、このようなデコードソフトを使用する場合でも人の耳で最終確認することは必須である。（九工大も最終的には人の耳でデコードしている。）

(3) 運用手順書作成（清田、野間）

今後、チームのメンバー全員が地上局を運用できるようにするために、地上局の運用手順書の作成を進めている。現在は、

- iCOM IC-9100 の使い方
- TNC の設定方法（送受信）
- 衛星追尾ソフトの使用方法
- CwGet の使い方
- その他（各衛星の周波数情報や、基板評価に使用する機器（スペクトルアナライザー等）の使い方）

をまとめている。今後も地上局の整備が進み次第、運用手順書を更新していく予定である。

(4) 地上局プログラム関連

(1) Operation Main 以外のアプリ開発（清田、阿戸）

今後必要になるソフト・システムや今後の課題の列挙を完了した。現在必要だと考えているソフトは以下。

- CW を 10 進数等に変換するソフト
CW が 16 進数などのデータとして送信され、それを人に耳で聞き、このソフトに打ち込むと、10 進数等の私たちの分かるデータとしての値を返す。CW の具体的な文法が決定される必要がある。
- FM パケットのエラーチェックプログラム
欠落、欠損のあったパケットを記録する。Fm パケットのデータ構造を決定する必要がある。
- TLE データ（衛星軌道要素データ）自動更新プログラム
衛星軌道要素を適宜更新するプログラム。

これらのシステムは直近で必要になるわけではないが、コマンドや衛星との通信方式・通信の際の文法が固まってきたら作成を行う。

3. アンテナ展開試験

11月中旬に展開試験を行うことを目標に準備を進めた。具体的にはアンテナ展開機構の取り付け台の作成。キャパシタのはんだ付け。-X 面 (ver7) とアンテナ基板 (EM) のボルト締結。

また計画書を提出したが土井先生のご指摘より、確認項目が不十分、不透明ということだったので現在、確認項目と確認方法を明確にした別途の資料を作成中。

4. その他

(1) パッチアンテナ関連 (清田)

現在、筑波大学「結」開発チームと連絡を取っている。11 月下旬から 12 月にかけて訪問・見学を行うことを検討している。筑波大学「結」開発チームは、すでに超小型アンテナを 1U CubeSat ITF-2 で実証済みである。

(2) アマチュア無線ミッション

アマチュア無線ミッションは以下のとおりである。

①

アマチュア無線家がメッセージを入れた FM パケットを LignoSat に送信すると LignoSat からコールサインを含んだメッセージが返ってくる。

②

その後、FM パケットに含まれたメッセージ&コールサインは FM パケットで京大地上局に送られ、LignoSat のホームページでそれらを公開する。

11 月の予定

1. 周波数申請
2. アンテナ工事 (11/16 を予定)
3. ローテーター整備
4. 地上局機器の調整 (SatPC32、TNC)
5. 地上局アプリ開発
6. COMM 基板単評価
7. アンテナ展開試験 (EM)
8. パッチアンテナ関連 (学習・筑波大学とのやり取り)

参考資料 6-3

STRUC_2022 年 11 月活動報告書_20221206_v1.0
2022/12/06

2022/12/06

発行者: 宇宙木材研究室 STRUC 班

STRUC_2022 年 11 月活動報告書_20221206

設計会議 #28

LS-Eng-STRUC-015

Ver. 1.0

宇宙木材研究室

STRUC 班

1, はじめに

これは 2022/12/06 の LignoSat チーム設計会議#28 に際して STRUC 班の 2022 年 11 月における作業内容, 進捗及び成果をまとめたものである。

2, 11 月の活動内容

2-1 Ver.7 木造構体を用いた振動試験の実施

11 月 21~22 日に九州工業大学、超小型衛星試験センターにて振動試験を実施した。試験に供した構体は Ver.7 アルミフレームを用いた Ver.7 ホオノキ及びヤマザクラ構体の 2 体であり、そのうちヤマザクラ構体には EM_BPFB、EM_FAB、EM_OBC/EPS、EM_battery を搭載し、+X 面には太陽光パネルを接着した。

いずれの試験においても JAXA の打ち上げ要求 60Hz を十分に満たす 300~500Hz 程度の高い固有振動数が得られた。また、Ver.6 木造構体を用いて行った今年 10 月の振動試験と比較してもその結果に大きな違いは無く、木造構体の高上げによって、その機能を失うことなく強度を増加させることができたと言える。



図 1 ヤマザクラ構体振動試験の様子



図2 Ver.7 木造構体

2-2 振動試験結果解析

10月に行った振動試験の解析が完了し、現在11月に行った振動試験の解析準備を進めている。10月の振動試験結果に見られたランダム加振前後のピークの変動については、構造に変化が見られなかった点及び継続して行った振動試験結果に問題が無かった点から、PODと衛星構体の収まり具合が内部で僅かに変化したためと結論した。また、2月に行った振動試験結果に比べ固有振動数が上昇したことはアルミフレームおよびY方向シャフトの設計変更による構造強化の結果と考えた。

5.2. Yamazakura-1

供試体②において、試験を通して木造構体、アルミフレーム、内部基板類及びアンテナ関連部品の破損は見られず、トルクマークのずれや外径寸法の大きな変化は確認されなかった。

←

表 11 Yamazakura-1 各モーダルサーベイ結果

モーダル試験	応答 PSD のピーク(測定値) [Hz]					
	Z		X		Y	
AT ランダム前	556.64	874.02	475.46	609.13	366.82	621.95
AT ランダム後	567.63	844.12	462.04	559.08	317.38	649.41 ^{*2}
差	+0.99	-29.9	-13.42	-50.0 ^{*1}	-49.44	+27.46
QT ランダム後	550.54	821.53	444.95	526.73	330.81	584.72
差	-17.09	+22.59	-17.09	-32.35	+13.43	-64.69
QT サインパースト後	559.08	841.67	440.06	534.67	335.08	576.78
差	+8.54	+20.14	-4.89	+7.94	+4.27	-7.94

^{*1}加振前後で±5%に収まっていないピーク振動数差を赤字で表示した。

^{*2}加振後一度供試体を取り出した後のモーダルサーベイの結果を示した。

図 3 振動試験解析

2-3 OBC/EPS ボード用シールドの納品

共創テクノ集団より、OBC/EPS ボードのノイズ対策用アルミ製シールドが納品された。STM 基板を用いてフィットチェックを行い、設計に問題の無いことを確認した。



図 5 納品されたシールド

3 今後の活動内容

3-1 振動試験

全部品の準備が完了次第、LignoSat_EM の振動試験を行う。その後各種環境試験へ進める。

3-2 構造解析

新メンバーを交え、one bolt missing の解析を含む、より厳密な解析を進める。解析精度検証を終え、その結果を報告書にまとめる。

3-3 木造構体に関する試験

高真空曝露された木造構体の変形に関する試験に加え、木造構体の変形によるボルト締結の緩みを確認する試験を進める。

3-4 振動試験結果解析

11 月に行った太陽光パネル接着を含めた振動試験の結果を解析する。

3-5 資料作成

組み立て手順書(Assembly Procedure)の作成及び部品の管理、重量・重心の計算を行う。

参考資料 6-4
EPS_2023 年 1 月活動報告書_20230207_v1.0
2023/01/10

2023/01/10
発行者：宇宙木材研究室 EPS班

EPS_2023年1月活動報告書_20230110
設計会議 #29

LS-Eng-EPS-016
Ver. 1.0

宇宙木材研究室
EPS班

0. チームメンバーの変更

2022年12月よりEPS班に、新たに工学部物理工学科1回生の鳥谷君が新たなメンバーとして活動している。

1. 太陽光パネルの設計

【12月の活動】

進捗無し。

【今後の予定】

○他面のパネルについて発注指示があれば発注を行う。。また、導通のチェックを行ったうえで接着を行う。

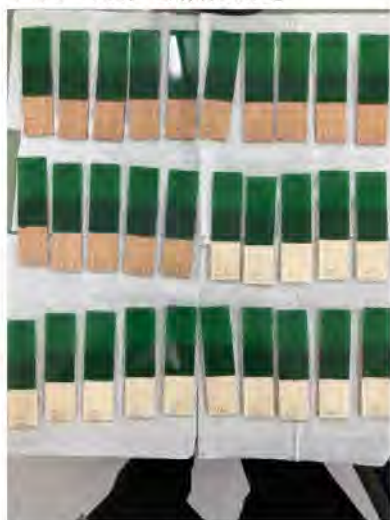
2. PCB+木造構体接着

【タスク進捗】

・せん断接着力試験の試験体作成

12月19日

[環境試験#3計画書v1.3](#)に従ってせん断接着力試験に用いる試験体（試験体数ヤマザクラ15、ホオノキ15）を作成した。



(図) 作成後の試験体

12月21日～26日

[環境試験#3計画書v1.3](#)に従って試験体の高真空曝露・高湿度曝露を5日間にかけて実施した。



(左)高真空曝露直前の試験体

(右)高湿度曝露中の試験体

【今後の予定】

1月11日 せん断接着力試験のせん断試験
鳥谷君にRTVの接着方法の指導

3. セル関連

【12月の活動】

①バッテリー修理

②バッテリー電圧値測定

<12月>[FM, FM BackUpバッテリー電圧値 - Google スプレッドシート](#)
→全てのFMセル電圧値が1.1V/EMバッテリーが3.6Vを上回っていた

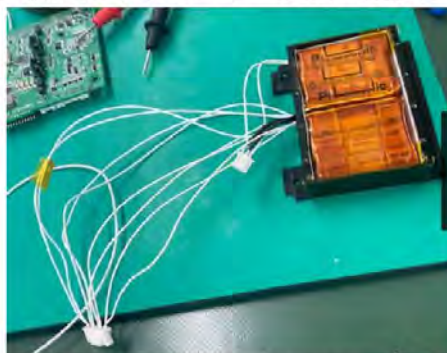


図3-1 バッテリー製作の様子

③バッテリー特性評価試験の準備

以前セルスクリーニングにて用いたセル1本の特性を評価する試験装置を作成した。



図3-2 セルスクリーニングの特性試験装置

これを、バッテリーの3直2列の状態についても同じように特性を把握するため、構成を変更している。

まだ完了していない為、1月も作業を継続する。

4. 基板評価

【12月の活動】

- ・時間がなくできず。

【今後の予定】

- ・OBC/EPS PIC・RESET PICの理解

5. パワーバジェット

【12月の活動】

- ・12月は進捗なし

【今後の予定】

- ・パワーバジェットの表を作成、必要なところは測定をする。

6. ディプロイメントスイッチの作成・スクリーニング

【12月の活動】

- ・デプロイメントスイッチのはんだ付け及びその特性を評価した。
- ・EM用に3つ作成。



図6-1 デプロイメントスイッチのはんだ付け作業

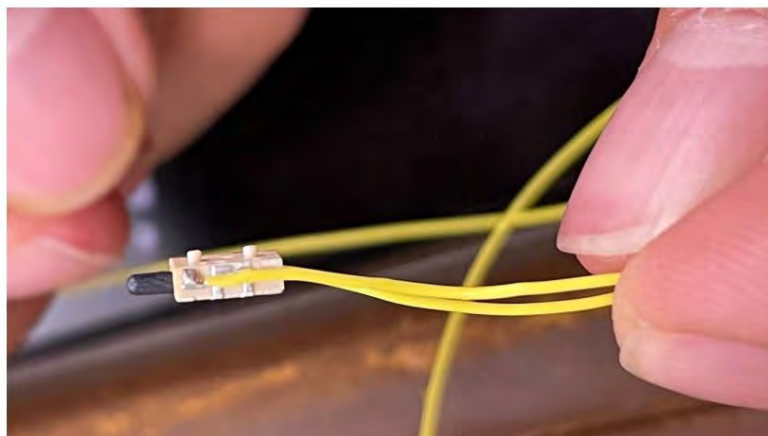


図6-2 デプロイメントスイッチ（はんだ付け後）

- ・スクリーニングも行った。
- ・押し込み距離

- ・押し返し力



図6-3 スクリーニング（押し返し力）

デブスイスクリーニング結果 - Google スプレッドシート

【今後の予定】

- ・EMバッテリー充放電
- ・OBC/EPS PIC・RESET PICの概要理解

7. その他、他班との確認点

- ・パワーバジェット検討開始__COM班Mission班の必要電力
__CDH班と他の必要基板の評価
- ・EM基板試験__CDHと実施
- ・帯電対策__他の超小型人工衛星で発生していないか調査
- ・安全審査資料準備
- ・せん断接着力評価試験の継続の有無__仲村先生と相談

《試験計画》

【1月】（+X面以外の他面のPCBを発注・接着）

- バッテリー特性試験
- パワーバジェットの現在の管理図を作成

【2月】EM接着作業

- 接着後の発電試験
- 接着後の振動試験（STRUCと合同で11/22に実施予定）

参考資料 6-5
MISSION_2023 年 2 月活動報告書_20230207_v1.2
2023/02/07

2023/02/07

発行者: 宇宙木材研究室 MISSION 班

MISSION_2023 年 2 月活動報告書_20230207

設計会議 #25

LS-ENG-MISSION-017

宇宙木材研究室

MISSION 班

日時	version	著者	備考
2023/02/07	1.0	大西大知	First Draft
2023/02/07	1.1	大西大知	2-1、2-2 追加
2023/02/07	1.2	筒井涼輔	

0.目次

- 1. はじめに
- 2. 活動内容
- 3. 活動報告
- 4. 2月の活動予定

1. はじめに

これは2023年2月7日の設計会議において、Mission班の1月中に行ったこと、2月中に行うことをまとめたものである。

2. 活動内容

- 2-1 RAB
- 2-2 Mission ボード単評価
- 2-3 地磁気センサ校正
- 2-4 ひずみゲージハーネス
- 2-5 温度センサ基板ハーネス
- 2-6 Mission ボード、RAB 通信フォーマット

3. 活動報告

前チャプターのタスクの進捗を報告する。

3.1 RAB

【達成】

進行中

【目的】

RAB の試験

【段階】

回路図作成(完了)

→立体配置

→相模通信(株)に仕様書提出(2月10日)(完了)

①→搭載素子の検討(完了)

→RAB の正式発注

②→技術的やりとり

木面への温度センサ搭載に対応させる変更を加えた ver2 の資料を提出(4月4日)

(①と②は同時進行で行われている。)

- 立体配置の決定(～5月20日)(完了)
- RAB 確認会議-1(土井先生、三木先生、椋本君)(5月24日)(完了)
- RAB 確認会議-2(菊川君)(6月5日)(完了)
- 設計 Fix 用資料作成(完了)
- 回路図、寸法制限 Fix(6月10日)(6月23日)(完了)
- ア트워크(立体配置)(完了)
- 発注(9月5日)(完了)
- 納入(9月末)(完了)
- 再発送(10月中旬)
- 到着(10月21日)
- RAB 単評価(10月後半)(11月)(完了 12/16)
- RAB 相互評価(10月後半)(完了)
- RAB PIC と Main PIC の通信(進行中 ～2/13)

[詳細]

RAB PIC から Main PIC に温度センサと地磁気データを送信するプログラムを作成している。まずは PC と RAB PIC の通信を確かめて、Main PIC との通信に移る。

3.2 Mission ボード地上試験、Ver2 仕様書作成

【達成】

進行中

【目的】

Mission ボードの地上試験

【段階】

九工大での熱真空試験に使うコードの準備 & OBC との事前通信試験の準備
Jcube と同じ試験の準備

【詳細】

九工大での熱真空試験の事前試験として、main PIC との通信試験を行う。

3.3 地磁気センサ

【達成】

進行中

【段階】

九工大の資料を読む (完了)

→手順書作成(10月中)

→ヘルムホルツコイル見学(10/18-19)

- ヘルムホルツコイル選定(10月末)
- 松岡研究室訪問(10月24日)
- 地磁気センサオーダー評価試験(11月25日)
- 試験手順書作成(完了)
- 地磁気センサ較正試験(九工大、1月17-18日)(完了)

【目的】

センサが正常に動作することは確認できたので、次の段階として測定値の線形性の評価を行う。磁場の強度や向きを緩やかに変化させ、得られた測定値が連続的に変化することを確認する。

【手順】

- ① 最初に、 x, y, z 方向それぞれの磁場の初期値を測定する
- ② x, y, z 方向それぞれに $\pm 250[\text{mG}]$ 、 $\pm 500[\text{mG}]$ の磁場をかけてデータを読み取る（測定間隔 1s、一回当たり 60 秒間磁場を固定する）
- ③ $-600[\text{mG}]$ から $+600[\text{mG}]$ まで、各軸に対して磁場を 1[s] につき $1[\text{mG}]$ 変化させて、変化が線形であるかを確認する。線形になっていない場合、プログラムに補正を加える。
- ④ ③と同様の手順を、1[s] につき $5[\text{mG}]$ ずつ変化させて再び行う。
- ⑤ $\pm 200[\text{mG}]$ 、 $\pm 400[\text{mG}]$ 、 $\pm 600[\text{mG}]$ それぞれについて、60 秒間磁場を与え、60 秒間磁場を与えない、という動作を行う。磁場を与えている間 1 秒間隔で計 60 点のデータを取り、その値の平均をとる。この平均値で絶対値の補正を行う。
- ⑥ (1) x 軸方向に $400[\text{mG}]$ の磁場をかける
 (2) 磁場を xy 平面内で反時計回りに 15 度ずつ回転させ、 $60[\text{s}]$ 間データを取る。
 xy 面内で 1 周するまでこれを続ける。
 (3) yz 平面、 zx 平面についても同様の手順を行う。
 以上(1)～(3)により、軸の補正を行う。
- ⑦ ± 200 、 ± 400 、 $\pm 600[\text{mG}]$ それぞれについて、 x, y, z 軸周りで磁場の強さを固定して向きを緩やかに回転させ、正しく測定できることを確認する。

【結果】

現段階ではまだ詳細な解析が済んでいないが、線形性と絶対値評価、円形の評価に関しては不連続な点や測定値と理論値の明らかな誤差は見受けられず、よい結果が得られたものと認識している。詳細な解析が終わり次第正式に報告する。

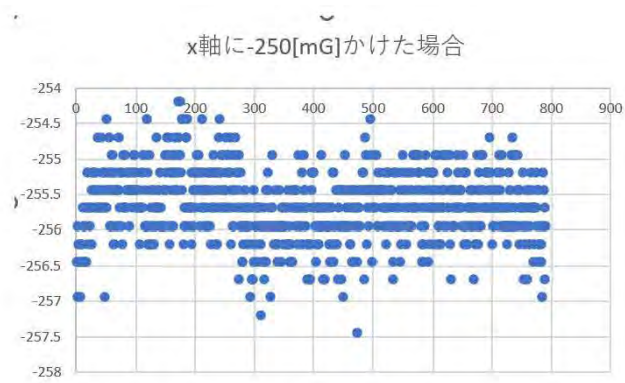


図 3.3-1 x 軸方向に-250[mG]かけたときのグラフ

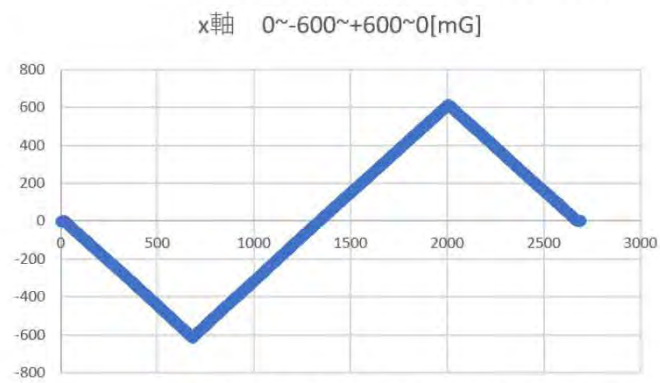


図 3.3-2 x 軸方向に-600~+600[mG]をかけたときのグラフ

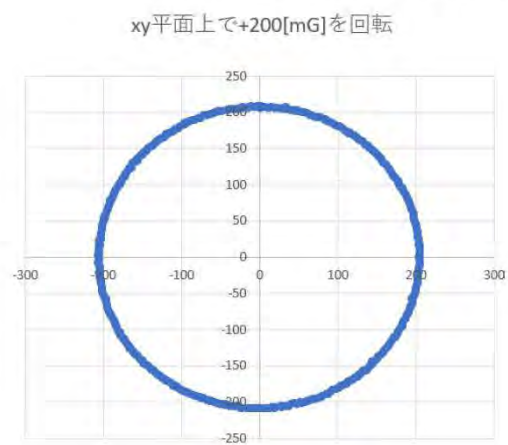


図 3.3-3 xy 平面上で+200[mG]の磁場を回転させたときのグラフ

3.4 ひずみゲージについて

【段階】

進行中

・ひずみゲージ長期高真空曝露試験

1月21日にひずみゲージ貼り付け試料を真空チャンバに投入

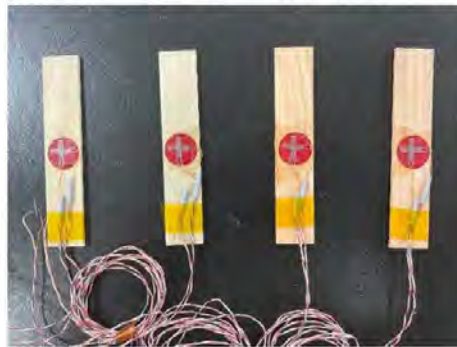


図 3.4-1 ひずみゲージ貼り付け試料



図 3.4-2 チャンバ内

・LignoSat 搭載ひずみゲージのハーネス

-X のひずみゲージのリード線の被膜をやすりで削り取り、 120Ω の抵抗値であることを確認

-Z 面に関してはコネクタの太さが合わず不安定であるため EM の試験ではリード線にカプトンテープを巻き、太さを確保したうえでコネクタ接続を行う。



図 3.4-3 抵抗値確認の様子

3.5 温度センサ基板ハーネス

【達成】

進行中

【段階】

ハーネス長決定(完了)

→ 2/10 に EPS から接着方法を教えてもらう

→ STM に温度センサ基板を貼り付け、実際にテスト

【目的】

安全審査の資料を作成する

【詳細】

RAB と温度センサ基板の接続にはハーネスを用いる。太さ、長さについて検討する。尚、ハーネスは緩る。

・太さについて

RAB 側のオスコネクタは PAP-03V-S、温度センサ基板側のオスコネクタは MOLEX5013300300 である。それぞれ、AWG28~24、AWG28~32 のハーネスに対応している。AWG28 のハーネスを使用する。

・長さについて

図 3.5-1 に RAB と温度センサ基板を接続するハーネスのイメージ図を示す。図 2.8 の①の領域が PAP-03V-S(RAB 側コネクタ)内部、③が MOLEX5013300300(温度センサ基板側コネクタ)内部、②がコネクタ外側の領域である。①は 8.0(mm)である。②は +Z 面で 13.3(mm)、-Z 面で 11.5(mm)である。③は 5.0(mm)である。①、②、③を足し合わせることでマージンを取らない場合のハーネス長とする。よってマージンを取らない場合、+Z 面のハーネス長が 26.3(mm)、-Z 面のハーネス長が 24.5(mm)となる。

マージンは現状 15(mm)程度を考えているが、実物を見て適切に調整する。

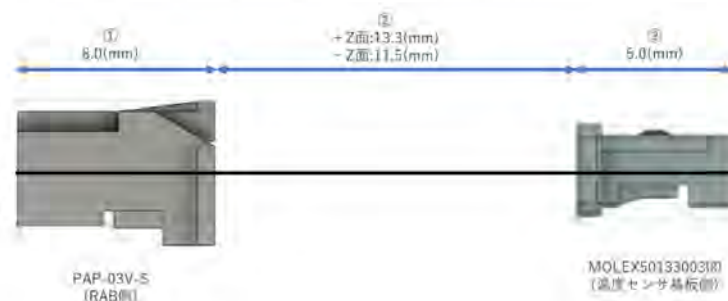


図 3.5-1 RAB と温度センサ基板を接続するハーネス

EPS 班から接着方法を教えていただく。接続試験の際は STRUC 班に協力していただく。

3.7 Mission ボード/RAB 通信フォーマット

【達成】

進行中

【段階】

Ver1 を決定し、CDH と共有(完了 12/26)

→CDH とデバッグ(～2月中旬)

【目的】

Mission ボード/RAB と OBC の通信フォーマット決定

【詳細】

1. RAB PIC と Main PIC の通信フォーマット

表 1 RAB_data の内容

要素	内容	補足
RAB_data[0]	地磁気センサH	地磁気センサの上位8bit
RAB_dara[1]	地磁気センサL	地磁気センサの下位8bit
RAB_dara[2]	温度センサ1 H	温度センサ1の上位8bit
RAB_dara[3]	温度センサ1 L	温度センサ1の下位8bit
RAB_dara[4]	温度センサ2 H	温度センサ2の上位8bit
RAB_dara[5]	温度センサ2 L	温度センサ2の下位8bit
RAB_dara[6]	温度センサ3 H	温度センサ3の上位8bit
RAB_dara[7]	温度センサ3 L	温度センサ3の下位8bit
RAB_dara[8]	測定の状態	測定頻度を各状態について決めておく

2. MISSION PIC と Main PIC の通信フォーマット

表 2 Mission_data の内容

要素	内容	補足
MISSION_data[0]	ひずみmXH_H	ひずみゲージ-X面のHorizontal方向上位8bit
MISSION_dara[1]	ひずみmXH_L	ひずみゲージ-X面のHorizontal方向下位8bit
MISSION_dara[2]	ひずみmXV_H	ひずみゲージ-X面のVertical方向上位8bit
MISSION_dara[3]	ひずみmXV_L	ひずみゲージ-X面のVertical方向下位8bit
MISSION_dara[4]	ひずみmZH_H	ひずみゲージ-Z面のHorizontal方向上位8bit
MISSION_dara[5]	ひずみmZH_L	ひずみゲージ-Z面のHorizontal方向下位8bit
MISSION_dara[6]	ひずみmZV_H	ひずみゲージ-Z面のVertical方向上位8bit
MISSION_dara[7]	ひずみmZV_L	ひずみゲージ-Z面のVertical方向下位8bit
MISSION_dara[8]	測定の状態	測定頻度を各状態について決めておく

それぞれの最初にデータの種別を表すヘッダーを付けくわえる。

4. 11月の活動予定

2-1 RAB

2-2 Mission ボード

2-3 地磁気センサ