

令和6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7年5月
国立大学法人京都大学

本報告書は、文部科学省の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6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.....	6
① 木造人工衛星の開発.....	7
(A)木造人工衛星 1 号機の安全審査・打上準備・運用の実施.....	7
(1)木造人工衛星 1 号機の安全審査.....	7
(i) 安全審査概要.....	7
(ii) 全審査 3 で対象となる文章(表 1-1 の緑色番号文書).....	7
(iii) JAXA 安全審査経緯.....	10
(2)木造人工衛星 1 号機の打上準備.....	10
(i) 木造人工衛星の安全審査を考慮した開発の歴史と特徴.....	10
(3)木造人工衛星 1 号機の JAXA への引渡し.....	12
(4)木造人工衛星 1 号機の打上げ.....	13
(5)木造人工衛星 1 号機の運用.....	13
(6)木造人工衛星 1 号機の軌道上不具合の発生とその原因究明.....	14
(B)木造人工衛星 2 号機のエンジニアリングモデルの製作.....	14
(1)木造人工衛星 2 号機の概要.....	14
(2)木造人工衛星 2 号機の構造系.....	15
(3)木造人工衛星 2 号機のエンジニアリングモデル.....	17
(4)木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデルの振動試験.....	18
(i) 試験目的.....	18
(ii) 試験形態.....	18
(iii) 試験実施日時、場所.....	19
(iv) 印加レベル.....	20
(v) 試験条件公差.....	21
(vi) 計測結果概要.....	21
(vii) 計測結果.....	22
(C)木造人工衛星の将来性とカーボンニュートラルにおける貢献.....	23

(1) 木造人工衛星による地球低軌道コンステレーションの構築	23
(2) 木造人工衛星のカーボンニュートラルにおける貢献	25
② ExBAS の木材の解析	27
(A) ExBAS 試料の分析	27
(1) ExBAS 実験概要	27
(2) ExBAS 試料のマイクロ分析結果	29
(3) 木材の中性子遮蔽性について	32
(i) 研究概要	32
(ii) 試験体と実験方法	32
(iii) 実験及びシミュレーション結果	33
(B) 木材の真空暴露実験	34
(1) 木材の真空暴露実験概要	34
(2) 木材の真空暴露実験結果	35
(i) 実験結果: 相対ヤング率	35
(ii) 実験結果: 相対寸法変化	36
(iii) CNF の真空暴露実験結果	39
(iii-1) 実験結果: 相対ヤング率	39
(iii-2) 実験結果: 相対寸法変化	40
③ 樹木育成実験の実施	42
(A) 樹木育成実験概要	42
(B) 樹木育成実験結果	43
(1) 成長	43
(2) 成長特性	45
(i) LMA (葉の乾燥重量/葉面積)	45
(ii) T/R 比と同化部/非同化部比 (図 3-5)	45
(iii) クロロフィル蛍光	46
(C) 実験結果まとめ	46
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) 有人宇宙学実習	47
(1) 有人宇宙学実習概要	47
(2) 有人宇宙学実習結果	48
(i) 閉鎖環境実習	48
(ii) 宇宙森林実習	50
(iii) 天体観測実習	51
(iv) 模擬微小重力実験	53
(v) 宇宙無線通信実験	56
(3) 有人宇宙学実習評価	57
(i) コンセプトマップの基本情報	57
(ii) コンセプトマップの構造変化	59
(iii) コンセプトマップの解析総論	59
(B) 有人宇宙学講義	59
(1) 有人宇宙学講義概要	59
(2) 有人宇宙学演習	65
(C) 木造人工衛星設計会議	66
(1) 木造人工衛星設計会議概要	66
(D) 樹木育成ゼミ	67
(E) 第 3 回宇宙木材利用シンポジウム	67
(F) Spaceology NewsLetter	68
(G) 学会・講演活動	69
(H) 広報活動(新聞記事)	70
総括	71
 参考資料 1 木造人工衛星 1 号機 LignoSat 運用実績表	73
参考資料 2 木造人工衛星 2 号機 EM 振動試験報告書	79
参考資料 3-1 sketch_temp_RH_SDcard_Time_CO2_v2.1 (気温・湿度・CO2 濃度制御)	100
参考資料 3-2 Sketch_vacuum_control_v1.6 (真空度制御)	108

参考資料 4	令和 6 年度有人宇宙学実習シラバス.....	112
参考資料 5-1	令和 6 年度有人宇宙学シラバス.....	114
参考資料 5-2	有人宇宙学講義:2024/10/02:土井隆雄.....	116
参考資料 5-3	有人宇宙学講義:2024/10/30:村田功二.....	119
参考資料 5-4	有人宇宙学演習ポスター:月班.....	128
参考資料 5-5	有人宇宙学演習ポスター:カリスト班.....	129
参考資料 6-1	第 3 回宇宙木材利用シンポジウムプログラム:2024 年 3 月 21 日.....	130
参考資料 6-2	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:今川颯太.....	131
参考資料 6-3	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:秋友悠希.....	132
参考資料 6-4	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:小山修平.....	133
参考資料 6-5	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:殿西覚弥.....	134
参考資料 6-6	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:大谷壮生.....	135
参考資料 6-7	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:村田功二.....	136
参考資料 6-8	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:山敷庸亮.....	137
参考資料 6-9	第 3 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋:中村栄三.....	138
参考資料 7-1	Spaceology Newsletter: 2024 年 04 月号.....	139
参考資料 7-2	Spaceology Newsletter: 2024 年 05 月号.....	144
参考資料 7-3	Spaceology Newsletter: 2024 年 06 月号.....	149
参考資料 7-4	Spaceology Newsletter: 2024 年 07 月号.....	153
参考資料 7-5	Spaceology Newsletter: 2024 年 08 月号.....	156
参考資料 7-6	Spaceology Newsletter: 2024 年 09 月号.....	160
参考資料 7-7	Spaceology Newsletter: 2024 年 10 月号.....	164
参考資料 7-8	Spaceology Newsletter: 2024 年 11 月号.....	167
参考資料 7-9	Spaceology Newsletter: 2024 年 12 月号.....	170
参考資料 7-10	Spaceology Newsletter: 2025 年 01 月号.....	173
参考資料 7-11	Spaceology Newsletter: 2025 年 02 月号.....	178
参考資料 7-12	Spaceology Newsletter: 2025 年 03 月号.....	182
参考資料 8-1	学会資料抜粋:2024/6/25:村田功二.....	186

参考資料 8-2	学会資料抜粋:2024/11/7:河島航他.....	187
参考資料 8-3	学会資料抜粋:2024/11/7:野間隆寛他.....	188
参考資料 8-4	学会資料抜粋:2024/11/7:鳥谷陽樹他.....	189
参考資料 8-5	学会資料抜粋:2024/11/7:木村拓人他.....	190
参考資料 8-6	学会資料抜粋:2024/11/7:辻廣智子他.....	191
参考資料 9-1	共同通信 2024 年 5 月 28 日: 世界初の木造人工衛星(LinoSat)完成、JAXA へ引き渡し宇宙での運用へ.....	192
参考資料 9-2	京都新聞 2024 年 5 月 29 日: 世界初 木造人工衛星が完成.....	194
参考資料 9-3	NHK 2024 年 10 月 30 日:みみより解説 世界初 木造人工衛星打ち上げへ.....	195
参考資料 9-4	AFP BB News 2024 年 11 月 5 日:京大、世界初の木造人工衛星「LignoSat」打ち上げ.....	196
参考資料 9-5	サイエンス 2024 年 11 月 8 日:京都大学が世界初の木造人工衛星の打ち上げに成功.....	197
参考資料 9-6	住友林業 2024 年 12 月 26 日:「ウッドデザイン賞 2024」奨励賞(審査委員長賞)を受賞～木造人工衛星 LignoSat／10 階建木造実大振動台実験プロジェクト～.....	198
参考資料 9-7	読売新聞 2024 年 12 月 10 日:「世界初の木造人工衛星」宇宙へ放出…地上と通信できず.....	199
参考資料 9-8	MBS NEWS 2024 年 12 月 21 日:『木造』の人工衛星が宇宙へ！京都大学などのチームが世界初の挑戦.....	200
参考資料 9-9	UchuBiz 2025 年 1 月 14 日: 日本生まれの世界初「木造衛星」を NASA が評価-「従来の衛星に代わる、より持続可能な選択肢」.....	201
参考資料 9-10	京都新聞 2025 年 2 月 25 日: 世界初の木造人工衛星を再び宇宙へ.....	203
参考資料 10	学会等発表実績.....	204

はじめに

本事業の目的は、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により、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。

4. 業務の方法

① 木造人工衛星の運用と開発

- a. 木造人工衛星1号機の安全審査を完了すると同時に打上げ・運用を行う。
- b. 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、エンジニアリングモデルを製作する。

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）の木材試料を使い、宇宙空間における高真空・原子状酸素による木材物性のミクロ的变化を継続して調べる。
- b. 地上における木材の真空曝露実験を継続実施する。

③ 樹木育成実験の実施

- a. ポプラ（*Populus alba*）を使用し低圧環境下での育成実験を実施し、育成データの定量化を行う。

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. 宇宙における樹木・木材利用について学ぶことを目的とした専門教育プログラム「有人宇宙学実習」と「有人宇宙学」（講義）を実施する。
- 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。

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) 木造人工衛星1号機の安全審査・打上準備・運用の実施

(1) 木造人工衛星1号機の安全審査

(i) 安全審査概要

京都大学の木造人工衛星1号機（LignoSat）は、JAXA の 2021 年 4 月より国内大学の技術力強化と、その技術力による国際貢献を通じて人材基盤の強化を図ることを目的として国内の大学と海外衛星開発機関向けに超小型衛星放出機会を提供する「J-CUBE」プログラムを活用し、令和 5 年 2 月 13 日に JAXA との間で締結された協定により京都大学初の人工衛星が打ち上げられることになった。

木造人工衛星 1 号機（LignoSat）の JAXA との安全審査 0/1/2を予定通り 2024 年 4 月 2 日に終了し、安全審査3を直ちに開始した。安全審査3は、製作を終えた人工衛星が JAXA/NASA の安全審査基準を満足していることを試験で実証し、検証が終了したことを確認する審査である。

JAXA の安全審査を受けようとする超小型人工衛星は、JAXA が定める「Doc list for [Sat_Name]_v2020-01」に記述される文書の提出により審査される。この「Doc list for [Sat_Name]_v2020-01」では全 28 文書の提出が求められており、JAXA 支援機関が提出する 3 文書を除き、人工衛星側が安全審査 0/1/2の審査と安全審査3の審査に向けて準備する。この文書は、外為法により衛星放出契約を JAXA と締結後に初めて相手方に開示できる文書であることから公知として開示することができないため新たに本報告のため相当表（表1-1）を作成し、安全審査3で対象となる文書について説明する。

(ii) 安全審査3で対象となる文章（表1-1の緑色番号文書）

No.13: 13_LS-FCE-02

人工衛星の構造に関わる構造破壊制御のフライトモデル（FM: Flight Model）に対する評価のためのチェックリスト。

No.14: 14_LS-SAR-02

安全評価報告書（SAR: Safety Assessment Report）は人工衛星のフライトモデルにおける全てのハザードおよびハザード原因の抽出、抽出されたハザードの制御方法の説明、検証方法の説明を記述した提出文書。

No.16: 16_LS-FREQ-01

人工衛星が RF 送受信器を搭載する場合、NASA・JSC の周波数管理者に申請するための提出文書。別途以下の文書を提出。

別添資料-1（Attachment-1）として「SC RFA - ADDITIONAL DATA REQUIREMENTS FOR CUBESATS AND OTHER SATELLITE SYSTEMS」を提出。

またその添付資料として「International Telecommunication Union Radio communication Bureau」への資料提出が求められる。

No.17-1: 17_LS-AP-01_Assembly Procedure

LignoSat フライトモデルの組み立て手順書の提出。

No.17-2: 17_LS-AP-01_Assembly Procedure Report

上記 No.17-1 の LignoSat フライトモデルの組み立て手順書での組み立て記録の提出。No.17-1 文書に上書きする。

表1-1 JAXA 安全審査要求文書の概要

文書番号	文書名	文書内容
1	01_LS-EP-01	バッテリーを中心として電源系の情報まとめ
2	02_LS-SR-01_Structure Analysis Report	人工衛星の構造解析
3	03_LS-MIUL	材料識別とその使用リスト
4	04_LS-HMST-01	危険材料の一覧リスト
5	05_LS-AD-01_Assembly_Drawing	人工衛星の組み立て図
6	6_LS-FRC-01_Franchise_Criteria_Sheet	NASA安全審査に関するフランチャイズ形式
7	07_LS-FCE-01_Structure Fracture Control Evaluation Form	構造破壊制御解析（フェーズ0/1/2）
8	08_LS-SAR-01_Safety Assessment Report	安全評価報告（フェーズ0/1/2）
9	09_LS-STD-01_Standard Hazard Report	標準的危険要素管理項目
10	10_LS-UNQ-01_Unique Hazard Report Structure	個別危険要素管理項目（構造）
11	11_LS-UNQ-02_Unique Hazard Report Battery	個別危険要素管理項目（バッテリー）
12	12_LS-UNQ-03_Collision to ISS	個別危険要素管理項目（展開物）
13	13_LS-FCE-02	構造破壊制御解析（フェーズ3）
14	14_LS-SAR-02	安全評価（フェーズ3）
15	15_LS-VTL-01_Safety Verification Tracking Log	安全項目追跡確認リスト
16	16_LS-FREQ-01	送受信周波数管理申請
17	17_LS-AP-01_Assembly Procedure	人工衛星組み立て手順書
18	18_LS-IVR-01_Interface Verification Record	インターフェース確認記録
19	19_LS-FCR-01_Fit Check Test Report	フィットチェック報告書
20	20_LS-IFTR-01_Inhibite_Function_Test_Report	インヒビット機能試験報告書
21	21_LS-AD&RFT-01_Deployment_and_RF_Test_Report	アンテナ展開並びに通信試験報告書
22	22_LS-SEIR-01_Sharp Edge Inspection Report	シャープエッジ点検報告書
23	23_LS-BVR-01_Battery Verification Test Report	バッテリー性能確認試験報告書
24	24_LS-VT-01_Vibration_Test_Report	振動試験報告書
25	25_LS-WTR-01_Wire Strength Test Report	アンテナ結束紐強度試験報告書

No.18: 18_LS-IVR-01_Interface Verification Record

LignoSat フライトモデルの諸元について記述した文書。別途以下の文書を提出。

別添資料-1（Attachment-1）として「LignoSat satellites size measurement results」の提出。

No.19: 19_LS-FCR-01_Fit Check Test Report

LignoSat フライトモデルを J-SSOD のフィットチェック治具による装着時の試験報告書。

No.20: 20_LS-IFTR-01_Inhibite_Function_Test_Report

LignoSat フライトモデルの電氣的な不具合要因を阻止する制御機能の確認試験報告書。

No.21: 21_LS-AD&RFT-01_Deployment_and_RF_Test_Report

LignoSat フライトモデルのアンテナ展開試験および通信試験報告書。

No.22: 22_LS-SEIR-01_Sharp Edge Inspection Report

LignoSat フライトモデルに鋭利な危険箇所がないことを示す報告書。

No.23: 23_LS-BVR-01_Battery Verification Test Report

LignoSat フライトモデルに供するバッテリーの性能評価試験報告書。

No.24: 24_LS-VT-01_Vibration Test Report

LignoSat フライトモデルの振動試験報告書。

No.25: 25_LS-WTR-01_Wire Strength Test Report

LignoSat フライトモデルのアンテナ収納のための結束紐の試験報告書。

安全審査3の補助文書 その 1

LignoSat フライトモデルのバッテリー周囲電気回路の配線長さについてバザード制御の製造説明文書 (Hazard Controls for wiring for FM)。

安全審査3の補助文書 その 2

LignoSat フライトモデルのアンテナ収納工程の手順書 (LS-Sys-Antenna Storage Procedure Manual for FM)。

安全審査3の補助文書 その 3

LignoSat で使うバッテリーヒーターの機能試験報告書
(LS-Sys-Battery-heater-functional_test_report)。

安全審査3の補助文書 その 4

LignoSat フライトモデルの熱真空試験報告書 (LS-Sys-FM-TVT-Rep)。

安全審査3の補助文書 その 5

LignoSat フライトモデルの振動試験における木材粉塵発生の有無についての試験報告書
(LS-FM-VT-02_(Attach) Particle Detection Report)。

安全審査3の補助文書 その 6

バッテリーを満充電したのち内部抵抗でバッテリー能力が打ち上げ後概ね 1 年間機能を維持できるか否かについての検証試験報告書。5 日間の試験データからバッテリーの電力供給能力を推定 (Self-Discharge Measurement of the Battery of LignoSat-FM (5 Days))。

安全審査3の補助文書 その 7

バッテリーを満充電したのち内部抵抗でバッテリー能力が打ち上げ後概ね 1 年間機能を維持できるか否かについての検証試験報告書。7 日間の試験データからバッテリーの電力供給能力を推定 (Self-Discharge Measurement of the Battery of LignoSat-FM (7 Days))。

(iii) JAXA 安全審査経緯 SFCB 指摘票

2024 年 4 月 19 日から全 10 件の指摘票を受領し、2024 年 4 月 24 日にすべての指摘票の回答に対し了承された。

全体コメントリストによる事前審査

2024 年 4 月 19 日付けのバッテリーヒーターに関する質問ならびに全 10 件のコメントを受領。令和 6 年第二四半期中に全コメントに対する回答に承認が得られた。

安全審査3は前述で示した文書の事前確認を実施し、その後 JAXA 安全審査・審査員による最終審査を受審し、最終確認3項目、①「Inspection to verify that the satellites are installed per the approved packing requirement.」、②「Confirm the battery voltage from the access port to verify the battery is fully charged before the satellite is installed in J-SSOD.」、③「Confirm put isolation Kapton tape on the FAB after remove RBF pins from the access port before the satellite is installed in J-SSOD.」を除き、木造人工衛星1号機が打ち上げ、ISS への収納・保管、ISS からの放出の全期間において安全を確保できていることが確認された。安全審査3の完了は上記最終確認三項目が確認できた 2024 年 5 月 14 日をもって完了日となる。この最終確認項目は前述の「15_LS-VTL-01_Safety Verification Tracking Log」提出文書で規定されている。

(2) 木造人工衛星 1 号機の打上準備

(i) 木造人工衛星の安全審査を考慮した開発の歴史と特徴

第 1 世代 (Version 1: 図 1-1): 全六面木造パネルで人工衛星の構造を製作。大きさは 100 x 100 x 100 mm。木質は「ホウノキ」と「ヤマザクラ」の 2 種を採用。板厚は 8 mm。(開発時期: 2018 年～2019 年)

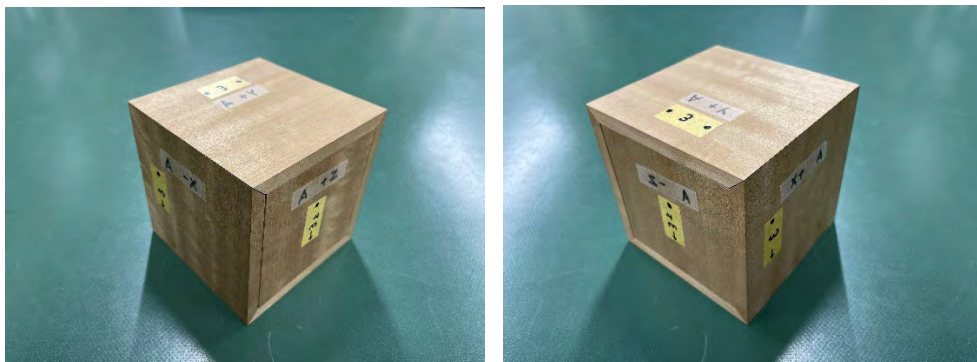


図 1-1 第 1 世代 (Version 1) の木造人工衛星モデル

第 2 世代 (Version 2: 図 1-2): 全六面木造パネルから構造補強として X・Y 軸方向に各 4 本のターンバックルを採用。人工衛星の構造を製作。板厚は 8 mm。(開発時期: 2019-2020 年)



図 1-2 第 2 世代 (Version 2) の木造人工衛星モデル

第3世代（Version 3: 図 1-3）: 全六面木造パネルから構造補強として Y 軸方向に4本のターンバックルを採用。人工衛星の構造を製作。板厚は 8 mm。（開発時期: 2020 年～2021 年）

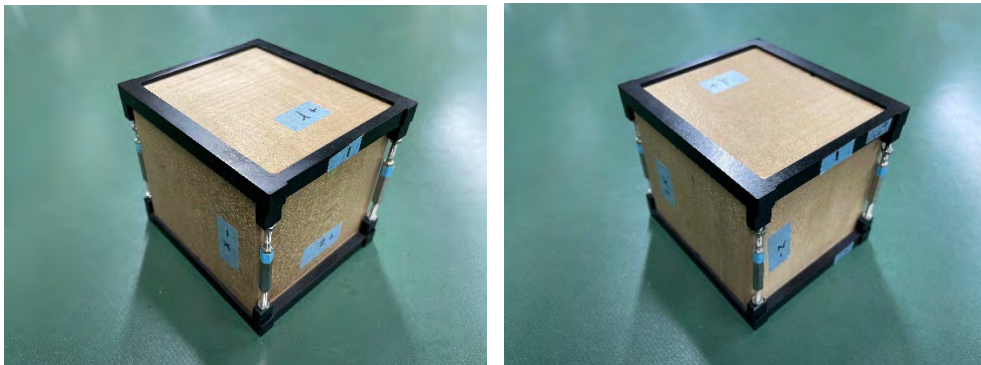


図 1-3 第3世代（Version 3）の木造人工衛星モデル

第4世代（Version 4）及び第5世代（Version 5）は、人工衛星構体内部に基板を入れるために設計図を作り直す試行錯誤が続いた。そのため、構造模型を作ることはなかった。

第6世代（Version 6: 図 1-6）: 全六面木造パネルで人工衛星の構造を製作。板厚は 4 mm に変更し、内部に電子基板を格納することを可能にした。（開発時期: 2021 年～2022 年）

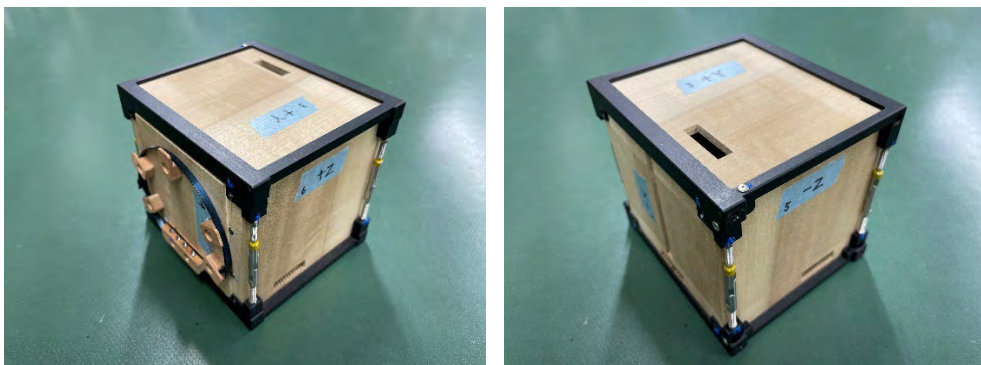


図 1-4 第6世代（Version 6）の木造人工衛星モデル

第7世代（Version 7: 図 1-7）: エンジニアリングモデル（EM: Engineering Model）。JAXA 安全審査3に適合したアルミフレームを持ち、全六面に板厚 4mm の「ホウノキ」材の木造パネル構造が採用されており、世界で最初の木造人工衛星のフライトモデルの基礎となるモデルの完成。（開発時期: 2022 年～2023 年）



図 1-5 第 7 世代 (Version 7) LignoSat Engineering Model

第 8 世代 (Version 8: 図 1-6): フライトモデル (FM: Flight Model)。JAXA 安全審査3に適合したアルミフレームを持ち、全六面に木造パネル構造が採用されており、世界で最初の木造人工衛星の完成。(開発時期: 2023 年～2024 年)

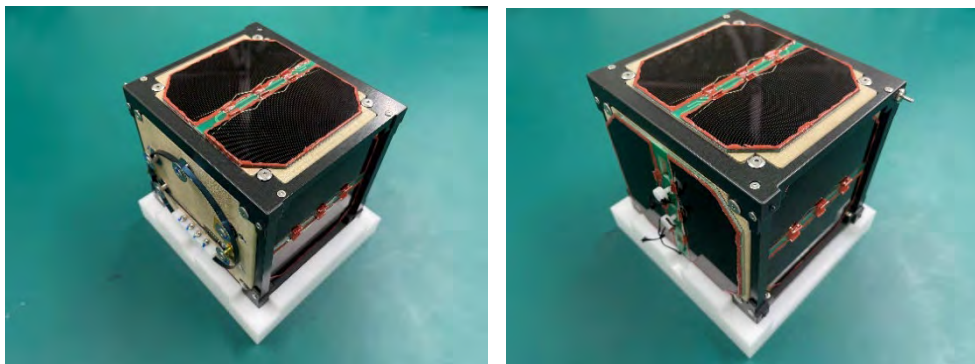


図 1-6 第 8 世代 (Version 8) LignoSat Flight Model

(3) 木造人工衛星1号機の JAXA への引き渡し

前述 (2)の安全審査3の項目でも示したが、安全審査 3 の最終確認は JAXA への引き渡しを終え、J-SSOD (JEM Small Satellite Orbital Deployer: 小型衛星放出機構) と呼ばれる装置に挿入し、最終確認三項目を完了したときが安全審査 3 の完了日になる。

JAXA への引き渡し前日には JAXA が指定した支援企業 (三井物産エアロスペース社) による X 線撮影のため成田空港保安施設内に於いて木造人工衛星 1 号機の X 線撮影を実施した。X 線撮影実施は 2024 年 6 月 4 日で、翌 6 月 5 日に JAXA 筑波宇宙センターにおいて木造人工衛星 1 号機の引き渡しが行われ、JAXA において次工程まで保管された。

2024 年 6 月 13 日に JAXA による最終工程である J-SSOD への挿入作業が行われ、京都大学担当学生が安全審査3の確認三項目を実施して引き渡しが完了した。

(4) 木造人工衛星1号機の打ち上げ

JAXA に引き渡された木造人工衛星 1 号機は J-SSOD に収納された形状で日本より米国 NASA ジョンソン宇宙センターに輸送され、JAXA の責に於いて打ち上げ輸送機に収納され、打ち上げられる。木造人工衛星1号機の打ち上げは 2024 年 11 月 5 日 (日本時間) に米国スペース X 社のドラゴン貨物船 31 号機 (SpX-31) で行われ、京都大学関係者と住友林業関係者が JAXA 筑波宇宙センターおよび京都大学で打ち上げを見守った。

(5) 木造人工衛星1号機の運用

木造人工衛星1号機はドラゴン貨物船 31 号機 (SpX-31) で ISS に輸送後、2024 年 12 月 9 日に ISS の「きぼう」日本実験棟より宇宙空間に放出され、予定では放出 30 分後にアンテナ展開がおこなれ、通信が確保される予定であった。木造人工衛星1号機の受信は京都大学上空でのみ実施されるため、最初の受信機会は放出の翌日 2024 年 12 月 6 日であった。

図 1-7 に ISS から放出された木造人工衛星 1 号機の映像を示す。3つの人工衛星が J-SSOD から放出され、J-SSOD に近い方から、千葉工業大学の「YOMOGI」、京都大学の木造人工衛星 1 号機「LignoSat」、関西大学等の「DENDEN」である。



図 1-7 ISS から放出された木造人工衛星 1 号機 (中央の衛星)

最初の受信機会の試みでは木造人工衛星 1 号機からの信号が確認できずにいた。その頃には JAXA 等から軌道六要素の情報入手が可能となり、上空を通過する木造人工衛星 1 号機からの受信、地上からのコマンド送信が試みられた。学生チームが行った運用実績表を参考資料 1 に示す。

残念ながら、2024 年 12 月 6 日から 2025 年 4 月 4 日まで 203 回の運用が試みられたが衛星との受信は成功せず、軌道上で何らかの原因で衛星電波が発信されなかったと結論された。2025 年 4 月 4 日には衛星高度の計測から前日に衛星は大気圏突入したものと推察される。図 1-8 に木造人工衛星 1 号機の放出日より大気圏突入日までの衛星高度と時間経過を示す。図中には高度 Perigee/Apogee と Eccentricity が表示されている。なお、横軸 0 日が放出日 2024 年 12 月 9 日である。

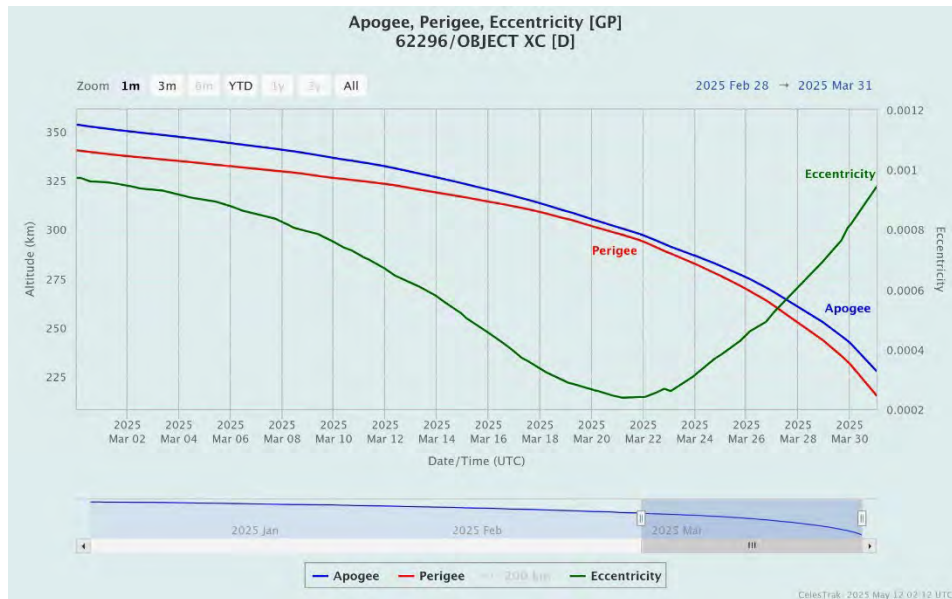


図 1-8 衛星高度の時間経過

(6) 木造人工衛星1号機の軌道上不具合の発生とその原因究明

前項 (5)で示したように木造人工衛星1号機はISSから放出後、衛星データの送信ができないという不具合が発生した。この軌道上不具合の原因究明のため、FTA (Fault Tree Analysis:不具合の木解析)を実施し、不具合要因を①安全確保のためのDepSW (Deployment Switch:展開スイッチ)のピンがスイッチ内部から放出しない事による、②ソフトウェアのご動作により衛星起動が行われない事による、の2件に絞られた。真の不具合原因の究明のためには、木造人工衛星1号機と同等の地上モデルを用いた試験が必須のため、令和7年度に試験を行う予定である。

(B) 木造人工衛星2号機エンジニアリングモデルの製作

(1) 木造人工衛星2号機の概要

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6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) 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。

C) 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。

D) 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。

E) 木造構体内で発生する宇宙線由来の Single Event Upset (SEU) を計測する。

F) 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。

(2) 木造人工衛星 2 号機の構造系

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) 10 枚の板材で木造構体を構成する。その接合部に伝統的な木組み加工を施し、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 1-9 に上記を盛り込んだ木造人工衛星 2 号機の外観図を示す。木造構体内部には平面型のパッチアンテナと地磁気姿勢制御装置が設置されている。-X1 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 号機の主通信アンテナはこのダイポールアンテナである。パッチアンテナは +X2 面（ソーラーパネルは貼られていない）の内側に設置される。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。

木造人工衛星 2 号機では、LignoSat と同様に、内部基板類とそれを固定するシャフト類からなる内部構造、内部構造を取り囲む木造パネル、木造パネルおよび内部構造を固定する金属フレーム部からなる構造を踏襲する予定である。各構造について、以下に詳細を記述する。

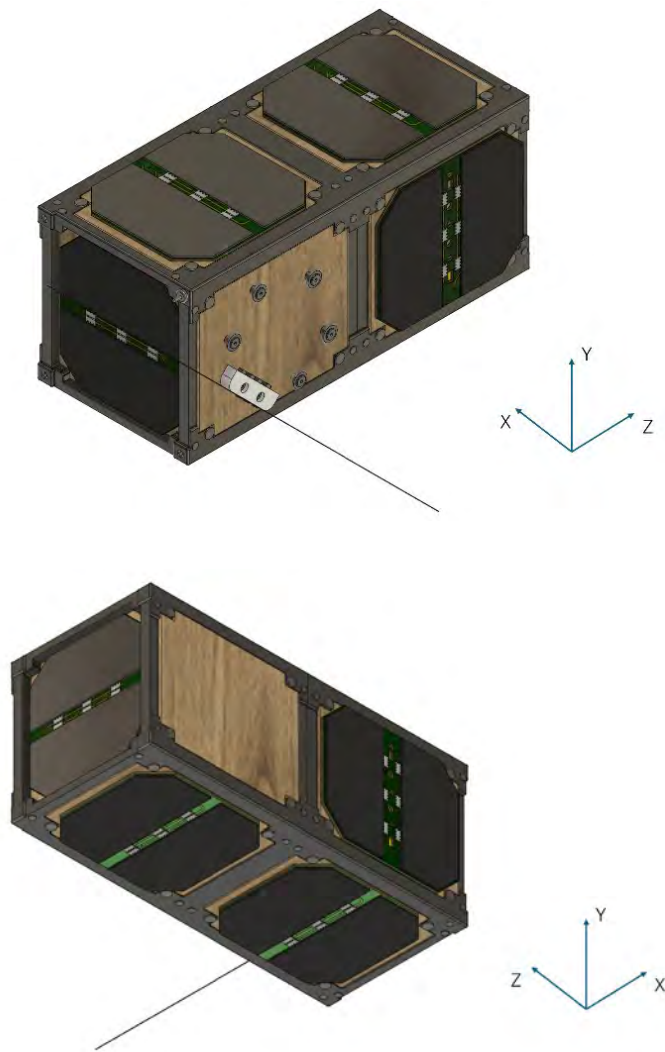


図 1-9 木造人工衛星 2 号機（コンピュータグラフィックス）

図 1-10 に木造人工衛星 2 号機の内部構造を示す。-Z1 側の 1U 部分は LignoSat と全く同様の構造となっており、+X1 側から順に FAB、Battery、OBC/EPS Board、COMM Board、Mission Board、RAB が搭載され、それらが-Y1 側に位置する BPB に刺さっている。これらの基板類は計 4 か所に X 方向シャフトが通っており、間にプラスチックスペーサーが挟まることによって位置が固定されている。4 本の X 方向シャフトはさらに Y 方向シャフト 4 本によって固定されており、この Y シャフトは後でアルミフレームと締結されることとなる。+Z2 側の 1U 部分は木造人工衛星から増えたミッションのため使用され、+X2 側にパッチアンテナを搭載予定である。そのほかに、パッチアンテナ用の COMM Board や、地磁気姿勢制御系等が搭載される予定である。

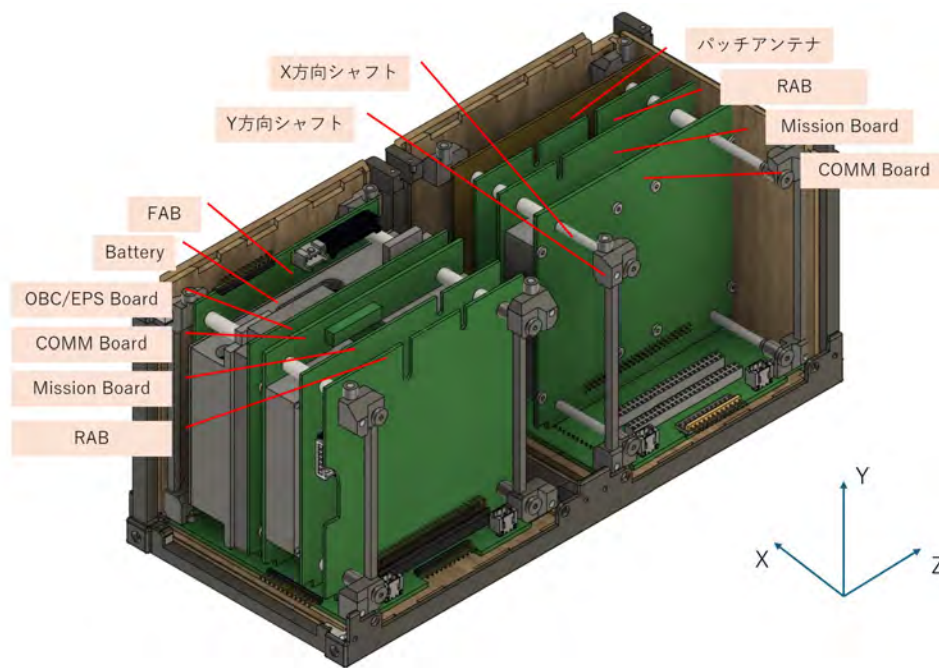


図 1-10 木造人工衛星 2 号機の内部構造

(3) 木造人工衛星 2 号機のエンジニアリングモデル

木造人工衛星 2 号機の基礎設計に元づいて、木造人工衛星 2 号機のエンジニアリングモデルを製作した (図 1-11)。今回製作した木造人工衛星 2 号機のエンジニアリングモデルは、構造的強度を確認するために振動試験を行うことを目的とした。但し、エンジニアリングモデル内部には、木造人工衛星 1 号機用に開発した電子基板を載せることにする。

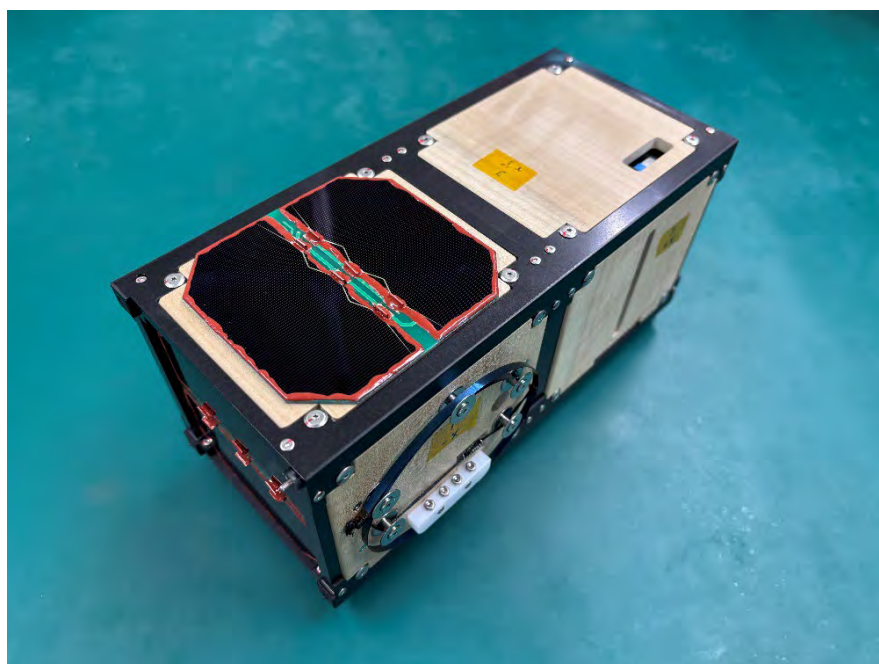


図 1-11 木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデル

(4) 木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデルの振動試験

(i) 試験目的

木造人工衛星 2 号機 EM における振動耐久性を確認・検討するため、HTV-X、Dragon2 及び Cygnus における打ち上げ時の振動環境以上の振動負荷を構体に加え、破損の有無、及び必要な剛性要求等安全審査での要求を満たしていることを確認することを目的とする。

(ii) 試験形態

加速度測定点を図 1-12 から図 1-13 及び図 1-14 に示す。

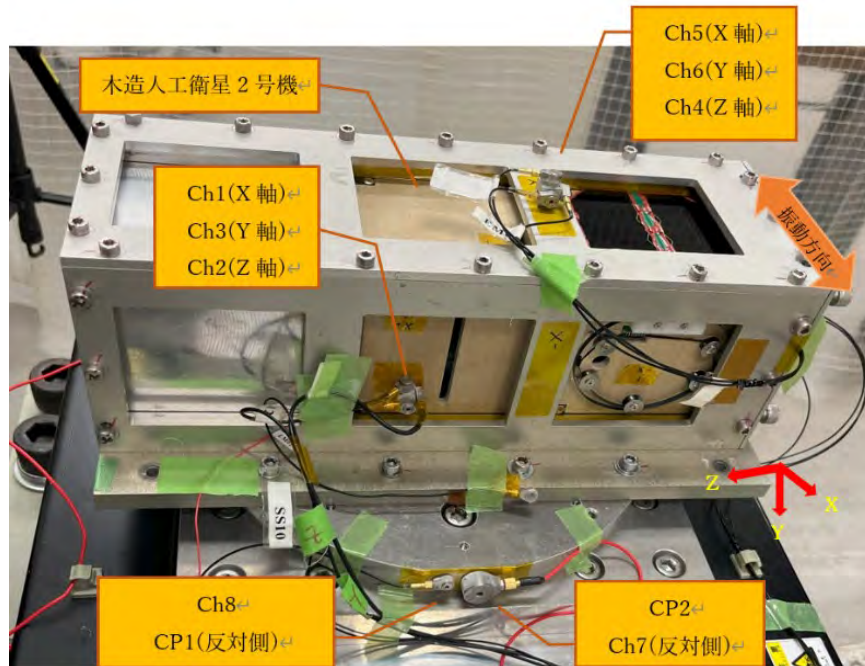


図 1-12 加速度測定点 (X 軸)

“Ch.○” はデータ取得のための加速度測定点であり、“Control point ○ (CPO)” は試験機の平均コントロールを取得するための加速度測定点である。

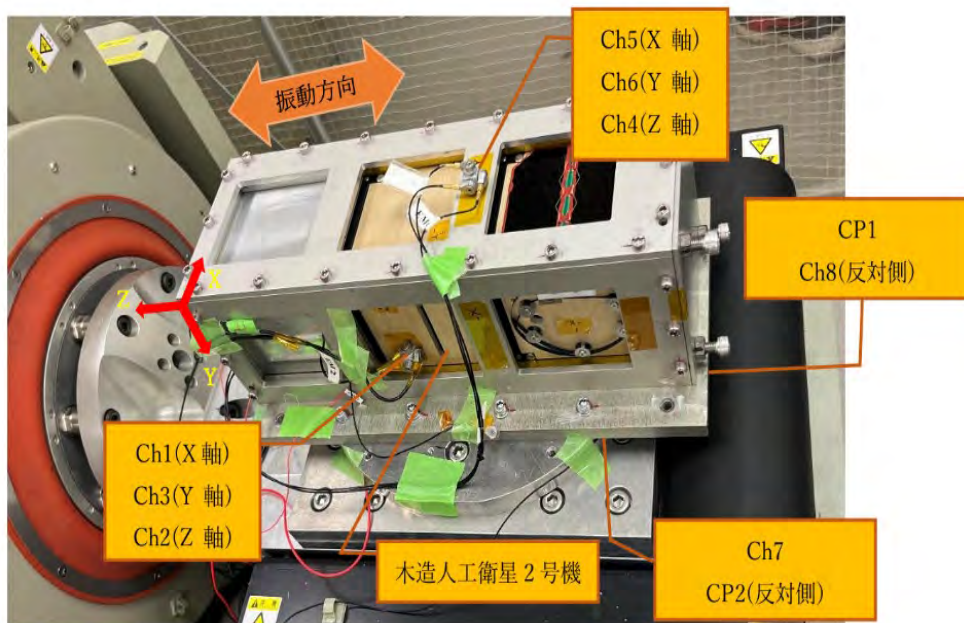


図 1-13 加速度測定点 (Y 軸)

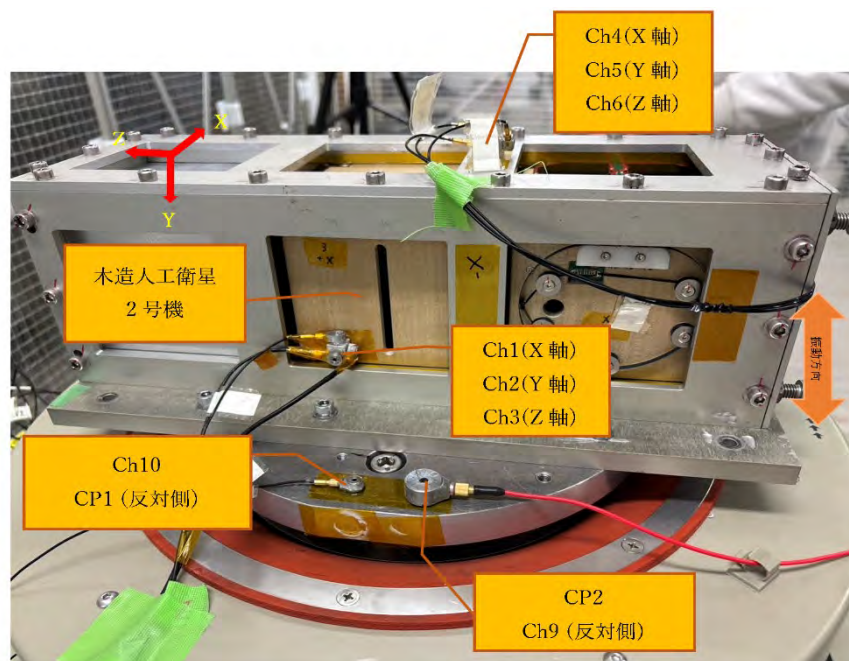


図 1-14 加速度測定点 (Z 軸)

(iii) 試験実施日時、場所

2025 年 3 月 17-18 日 九州工業大学超小型衛星試験センター 振動試験機

(iv) 印可レベル

HTV-X、Dragon2、Cygnus の3つすべてのロケット ICD の要求を満足する試験条件で試験を実施した。まず、モーダルサーベイの条件を表1-2 に示す。

表 1-2 モーダルサーベイ条件

方向	周波数 [Hz]	加速度 [Grms]	振動時間 [sec]
X,Y,Z	20~2000	0.5	60

次に本振動試験での加振レベルを表 1-3・4 に示す。

表 1-3 ランダム AT 加振レベル

周波数 [Hz]	PSD [G^2/Hz]
20	0.025
30	0.025
50	0.02
120	0.031
230	0.031
860	0.0055
1200	0.0055
2000	0.0025
Overall	4.273 Grms
加振時間	60 sec/軸

表 1-4 ランダム QT 加振レベル

周波数 [Hz]	PSD [G^2/Hz]
20	0.05
30	0.05
50	0.04
120	0.062
230	0.062
860	0.011
1200	0.011
2000	0.005
Overall	6.043 Grms
加振時間	120 sec/軸

サインバースト試験レベルを表 1-5 に示す。

表 1-5 サインバースト試験レベル

	周波数 [Hz]	加速度 [G]	波数
各軸	10~40	11.25	10 以上

(v) 試験条件公差

<ランダム加振>

- (a) 加速度 [Grms] : $\pm 1.5\text{dB}$
- (b) PSD [G^2/Hz] : $+3.0\text{dB} / -1.0\text{dB}$
- (c) 周波数 [Hz]: $\pm 2\%$ 以内あるいは 1 [Hz]
- (d) 加振時間 [sec]: $+10\% / -0\%$

(vi) 計測結果概要

振動試験後に供試体の外観検査を実施し、破壊・破損等の異常がないことを確認した。
また、ランダム AT 振動試験前後での各軸の波形を図 1-15・16・17 に示す。

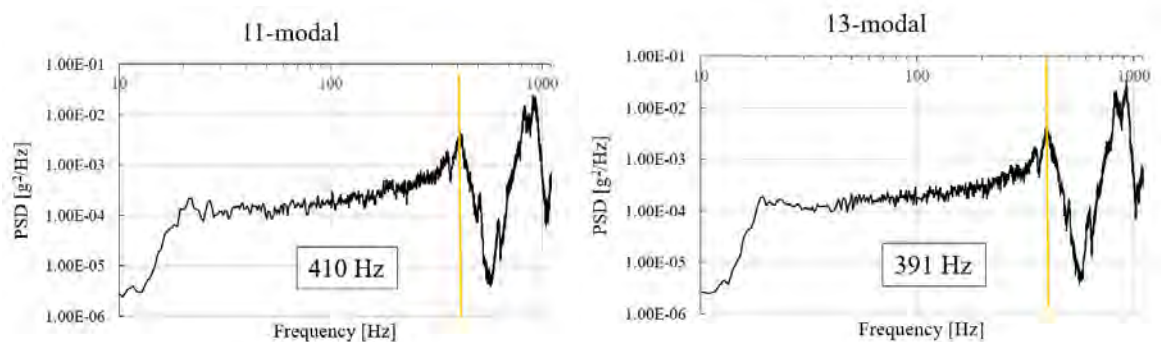


図 1-15 ランダム AT 振動前後の X 軸測定点 (Ch.1) におけるモーダルサーベイ時波形

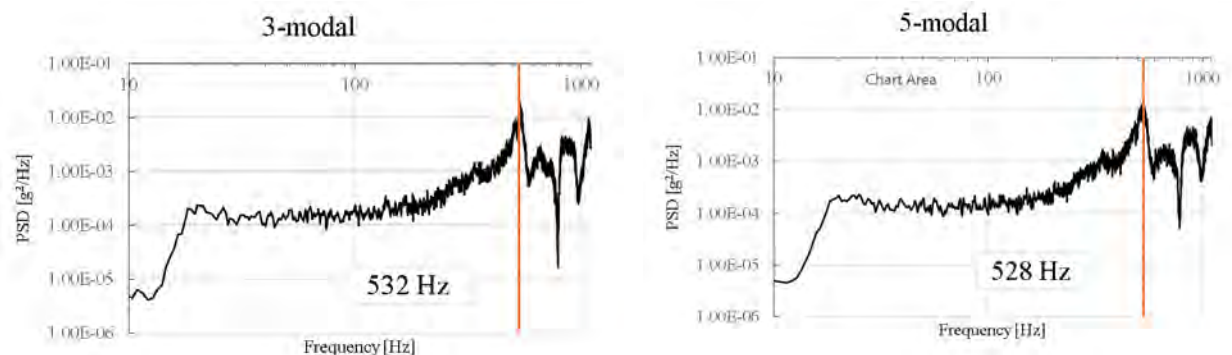


図 1-16 ランダム AT 振動前後の Y 軸測定点 (Ch.3) におけるモーダルサーベイ時波形

(左: 加振前, 右: 加振後)

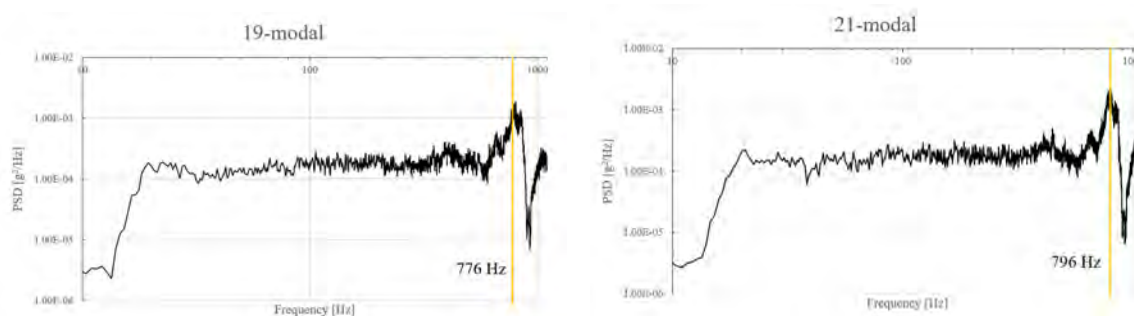


図 1-17 ランダム AT 振動前後の Z 軸測定点 (Ch.2) におけるモーダルサーベイ時波形

(左: 加振前, 右: 加振後)

また、実際の印可時間は 3 軸とも 60 秒であった。上に示した図より各測定点での最小固有振動数は JX-ESPC-101132-E で規定される要求値である 30 Hz を下回るものではなかったことが確認された。

(vii) 計測結果

試験前後で衛星に外観上の損害は見当たらず、主構造をなす全てのボルトに緩みは見られなかった。また、外見検査において太陽光パネルにヒビなどの損傷は生じていないことが確認された。アンテナ面においても、試験中にアンテナの展開は生じず、テグスやキノコ類、固定パーツにも損傷は生じなかった。ランダム AT 試験前後の固有振動数の変化を表 1-6 に、ランダム QT 試験前後の周波数の変化を表 1-7 に示す。

表 1-6 ランダム AT 前後での固有振動数の変化

		固有振動数 (Hz)	
衛星		a. 加振前	b. 加振後
木造人工衛星 2 号機	X	410	391
	Y	532	528
	Z	776	796

6

表 1-7 ランダム QT 前後での固有振動数の変化

		固有振動数 (Hz)	
衛星		a. 加振前	b. 加振後
木造人工衛星 2 号機	X	391	393
	Y	528	524
	Z	796	784

各軸の固有振動数は X 軸では約 400 Hz、Y 軸では約 530 Hz、Z 軸では約 790 Hz であり、そのすべてが 30 Hz よりも高くなった。これは JAXA による設計要求を満たしている。木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデルの振動試験より、木造人工衛星 2 号機の設計が問題ないことが確認された。木造人工衛星 2 号機の振動試験報告書を参考資料 2 に掲載する。

(C) 木造人工衛星の将来性とカーボンニュートラルにおける貢献

(1) 木造人工衛星による地球低軌道コンステレーションの構築

地球低軌道人工衛星コンステレーション構築のために、今後おびただしい数の小型通信衛星が地球低軌道に投入されることが予想される。これらの衛星は軌道空間に存在する希薄大気の抵抗によって徐々に高度を下げ、特に対策しなければ軌道投入から数年後に大気圏に再突入する定めにある。また、国連宇宙空間平和利用委員会のガイドラインには、地球低軌道を周回する人工衛星はその役目を終われば大気圏に再突入するように予め設計し、燃え尽きさせることが規定されている。実際、スペースデブリ対策の観点で FCC（米国連邦通信委員会）は衛星の軌道投入後 5 年を経過すると軌道から離脱させる「5 年ルール」を 2022 年に導入しているほか、2023 年には予定していた軌道離脱を十分にできなかったとして衛星通信事業者の DISH 社が FCC より罰金を課せられている。このようにスペースデブリ対策は宇宙産業全体のコンセンサスとして、喫緊の課題として認識されている。

しかしながら、増え行くスペースデブリ対策において、経済的・技術的に現実的な解決策は大気圏への再突入のみである。宇宙空間におけるスペースデブリの捕獲・回収に向けた新技術の開発と実証を行う企業（アストロスケール社）がみられるが、現時点では現実のデブリの捕獲は実証実験段階にとどまるのみならず、今後数万を超えてゆくデブリを広大な宇宙空間で一つひとつ丁寧に回収するコストは甚大であり現実的とは言えない。従って現実策としての再突入を進めてゆくほかないが、再突入を増やした際の地球環境・人類の活動への影響は明らかになっていない。

年間1万機以上の金属製衛星が地球大気圏に再突入するようになると、酸素と化合してできる酸化金属の微粒子が大気圏にばらまかれることになる。これらの酸化金属粒子は太陽光を反射させることにより、地球が太陽から受けるエネルギー量を減少させることになる。特に太陽エネルギーの減少は、人工衛星数が多い赤道上空で多くなる、そのため地球が太陽から受けるエネルギーバランスの乱れにより、重大な異常気象が発生するようになることが懸念される。また、中層圏を漂う酸化金属の微粒子がオゾン層の破壊の可能性も指摘されている。過去にはフロンガスのためにオゾン層の破壊が南極上空で起こったことが報告されたが、今回のオゾン層の破壊は地球全体で起こることが予想され、非常に重大な危機が発生する可能性がある。

木造人工衛星であれば、地球大気圏に再突入した時に酸素と反応して二酸化炭素と水蒸気を作るだけであり、地球大気を汚染することはない。また、その時にできる二酸化炭素は、あらかじめ木が育っていた時に大気から吸収した二酸化炭素であり、地球大気の二酸化炭素量を増やすということはない。

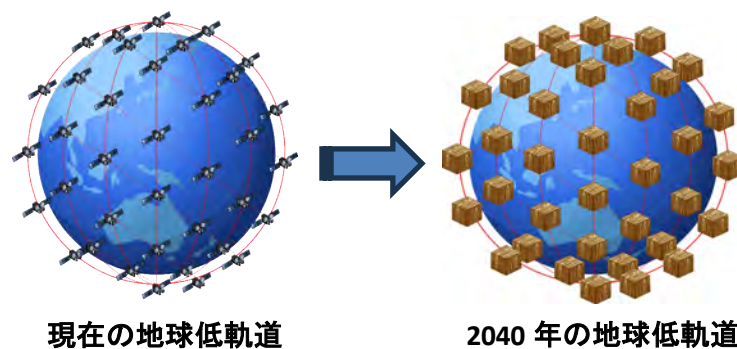


図 1-18 木造人工衛星コンステレーション

年間1万機以上の人工衛星が打ち上げられる時代において、大気圏再突入によって大気を汚染しない人工衛星を開発することは急務であり、木造人工衛星によるコンステレーションの開発は時代の要求に沿った開発であると言える（図 1-18）。また、人工衛星の急激な増加は地球低軌道を周回するインターネット衛星の増加によるところが大きい。インターネット衛星は地上局との通信によってインターネットサービスを提供する衛星であり、基本的に通信衛星であり、地上との交信のために通信用アンテナを人工衛星構体外部に持たなければならない。ところが木造人工衛星であれば、木材は電波を透過するので通信用アンテナを構体内部に持つことが可能になる。これはアンテナ展開機構を持つ必要が無くなることを意味しており、人工衛星の開発がより簡素化される。同時に木造構体の外部にアンテナを持たないことにより、地球極低軌道を周回することによって受ける大気抵抗も受けずらくなる利点がある。

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

(2) 木造人工衛星のカーボンニュートラルにおける貢献

本事業の研究開発成功時の波及効果・インパクトは、国が先導するカーボンニュートラル成長戦略やマテリアル革新力戦略が目標とするカーボンニュートラル、それ以上にカーボンネガティブな世界を実現できる大きな技術革新が実現できる。また、開発成功時には、CNF（カーボンナノファイバー）等の新素材の幅広い利用の目にみえる成果として人工衛星の非金属比率を大幅に増大することで先導的役割を果たす。また、その結果として上述したような地球環境、特に大気圏のアルミナ微粒子汚染防止も実現出来得る。CNF板材がもたらす世界全体の宇宙産業へのインパクトを次の表1-8に示す。

表1-8 CNF板材がもたらす宇宙産業市場成長の推移

項目	現状（2025年）	プロジェクト終了時	2030年頃	2040年頃	コスト比較または市場規模成長率（2040年/2025年）
CNF板材の木材人工衛星への提供可能寸法	W520 x D520 x t4	W520 x D520 x t10 （ハニカム化）	W1000 x D1200 x t10	W1200 x D2000 x t10	0.5（コスト比較）
CNF板材の市場規模	500万円	1,000万円	5億円	50億円	1,000倍（成長率）
世界の宇宙産業市場規模	9兆円	21兆円	30兆円	42兆円	約5倍 （1\$=¥150）
CNFを構造部材とする木材人工衛星の市場規模	—	—	1000機	>8,000機	—
解決すべき課題・必要な取り組み	宇宙用CNF板材の宇宙曝露試験などが未達成	宇宙環境、特に再突入時の熱負荷に対する物理定数が未入手	宇宙実績の蓄積	サプライチェーンの構築	—

また、2040 年に見込まれる CO2 削減効果は次の通り試算した。低軌道人工衛星の筐体材に CNF100% 板材を用いれば、現在のアルミニウムパネルと比較して 1 台当たりアルミニウムと CNF 板材の比重差分（アルミニウム比重:2.7、CNF 板材比重:1.5）に基づけば約 45%の軽量化が図れる。人工衛星が軽量化すれば打ち上げ時の負荷が減ることから、打ち上げ時に排出される CO2 の削減に寄与できる。一例として、低軌道用 27U サイズ（300x300x300 mm）人工衛星の筐体重量をアルミニウムと CNF で比較し、重量軽減による CO2 削減を試算した。

筐体に使用される4mm厚のアルミニウム板（総重量例:5.8kg）を同じ厚さのCNF板（総重量例:3.2kg）に置換したとすれば、それぞれの比重差に基づき9U人工衛星1台当たり2.6kgの軽量化となる。Falcon9の打ち上げ時のCO2排出量は337t/回とされており、ペイロードで除すると打ち上げ重量1kgあたりのCO2排出量は14.8kgとなる。

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

図 1-19 に、木造人工衛星開発による全体構想と宇宙開発に関わる世界情勢などを示す。本事業は国が先導するカーボンニュートラル成長戦略やマテリアル革新力戦略を踏まえ、CNF・改質リグニン等の新

素材の幅広い利用の先進的な技術開発の成果として、いわゆる木造人工衛星の開発を進める。その結果として地球環境、特に大気圏のアルミナ汚染防止も視野に入れた先導技術開発になる。

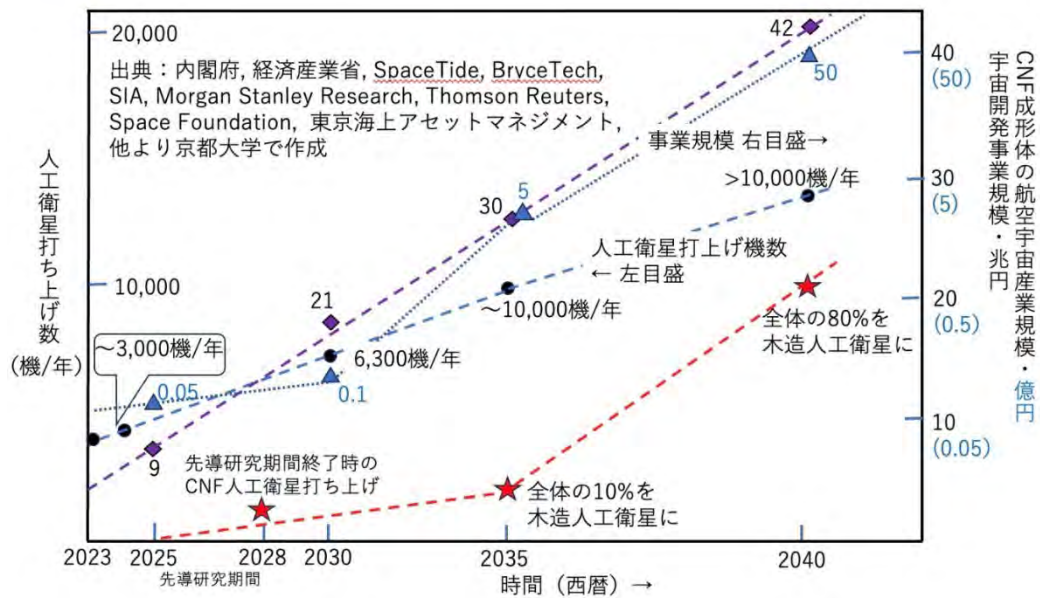


図 1-19 木造人工衛星の将来予想

② ExBAS の木材の解析

(A) ExBAS 試料の分析

(1) ExBAS 実験概要

宇宙木材プロジェクトでは 2024 年度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かを調べるため、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: AO 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ットフォーム (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)。

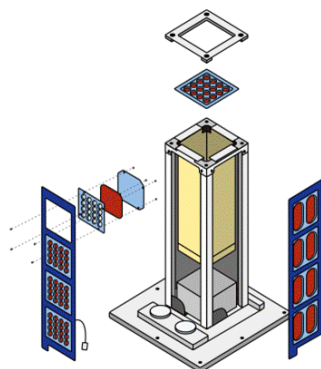


図 2-2 ExBAS の構造 ©Space BD



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。

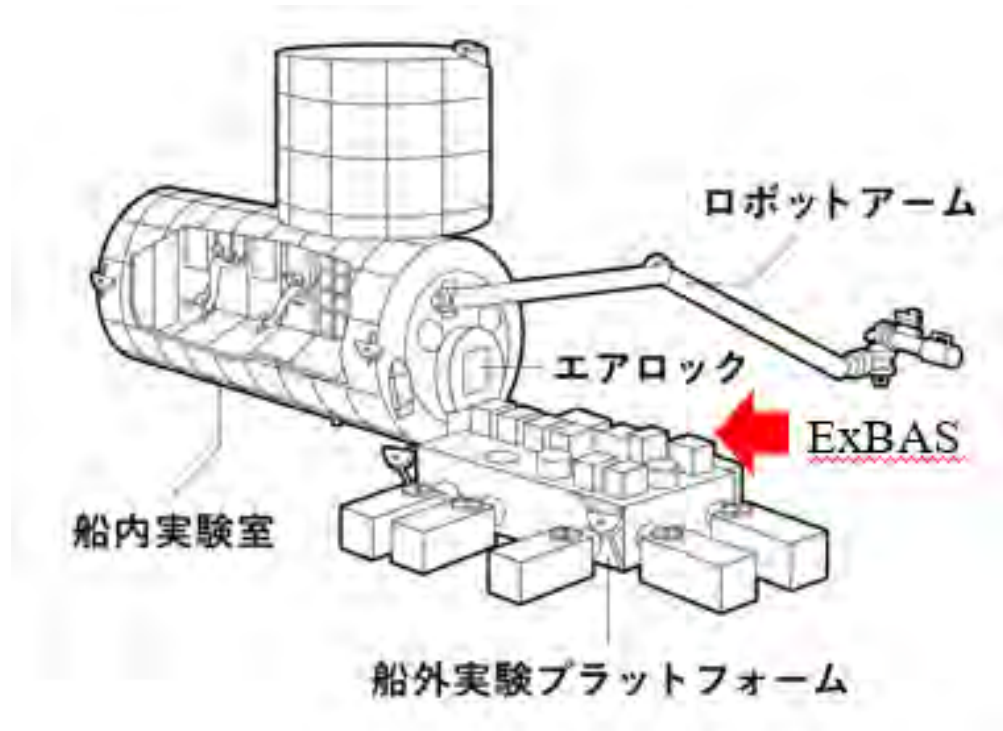


図 2-4 ISS きぼう・船外実験プラットフォーム ©SpaceBD

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を選択である。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た（図 2-6）。



図 2-5 ExBAS を取り外す若田宇宙飛行士 ©JAXA



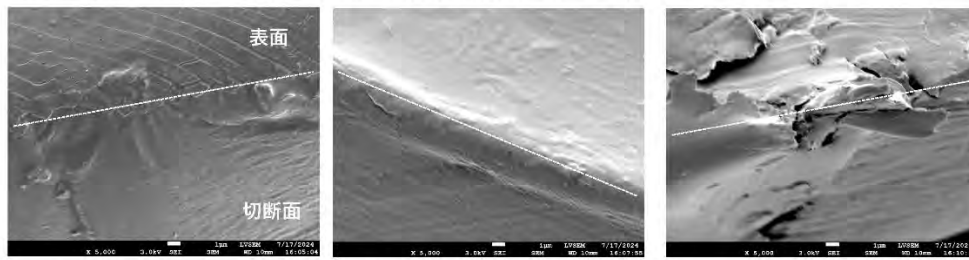
図 2-6 京都大学グローブボックス内に保管されている木材宇宙曝露試験体

宇宙曝露された木材試験体は、2023 年 5 月 19 日に京都大学から岡山大学惑星物質研究所に移送された。惑星物質研究所では、宇宙空間に暴露された木材試料のマイクロ分析が 2023 年 6 月以降に開始された。

(2) ExBAS 試料のマイクロ分析結果

ExBAS 試料のマイクロ分析は岡山大学惑星物質研究所で実施されている。図 2-7 は木材試料を包んでいたカプトンシート切断面の SEM 画像である。これを見ると、地球低軌道に多く存在する原子状酸素による剣山上の劣化が観察されない。このことは、今回の試料は、宇宙ステーションの進行方向に対して反対側の面に置かれていたために、原子状酸素の影響をほとんど受けていないと考えられる。

C：被覆カプトンシート（表面） Cb： 被覆カプトンシート（裏面）



原子状酸素による剣山状の劣化は観察されない

ポリイミド（カプトン）シート
宇宙曝露試験結果
剣山状

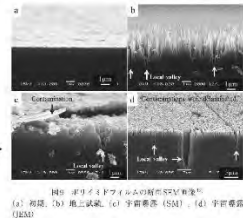


図 2-7 カプトンシート切断面の SEM 画像

図 2-8 は、宇宙曝露されたカプトンシート上に付着していた元素量を調べたものである。この測定により、今回の宇宙曝露試料は、主に P（リン）・Y（イットリウム）・Zn（亜鉛）・In（インジウム）・Sn（スズ）・Hf（ハフニウム）で汚染されていたことが分かる。これらの汚染物質の起源はまだ明らかになっていないが、一部は国際宇宙ステーションの電線ケーブル類の難燃被膜から来ていると疑われる。

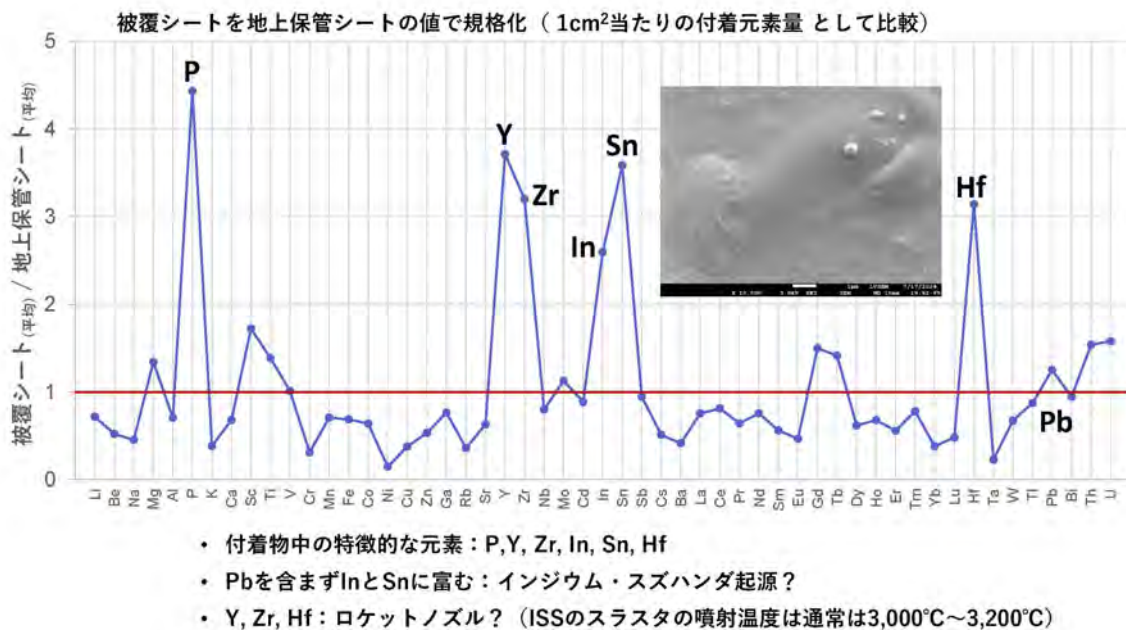


図 2-8 カプトンシート付着物の元素分析結果

木材試料の分析にはこれらの汚染物の影響を取り除く必要がある。そのために図 2-9 では、汚染物質の発生するスペクトルと木材試料の発生するスペクトルを比較し、汚染物質が発生しないスペクトルを求めた。この分

汚染物質および地上保管木材のFTIRスペクトル

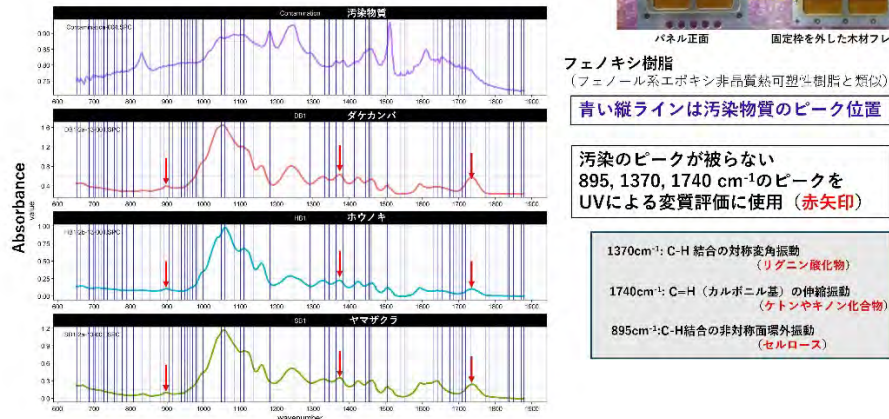


図 2-9 汚染物質および地上保管木材の FTIR スペクトル

析により、汚染のピークが被らない 895、1370、1740cm⁻¹ のピークを使えば良いことがわかった。

図 2-10 は真空紫外線 (UV) による木材の変成どの様に起こるかを調べるものである。3 種類の樹木: ダケカンバ、ヤマザクラ、ホウノキを表面から 5 ミクロンずつ切り取り、その組成の変化を調べた。この分析で使ったスペクトル比は、1370/895 及び 1740/895 である。各振動数がなにかから来ているかは図に詳しく書かれている。ダケカンバ、ヤマザクラは表面から 25 ミクロン程度まで急激に組成が変化するが、それより深い所では組成変化は少ない。これは紫外線が表面より 25 ミクロンより深い所まで到達していないことを意味している。この傾向に反し、ホウノキは深さ 75 ミクロンを超えて組成がゆっくりと変化している。これはホウノキでは紫外線がより深くまで到達していることを意味している。3 種類の木材に対して、紫外線の影響は深さ 0.1 ミリ程度までで、木材は紫外線の影響をごく表面しか受けないことが分かる。

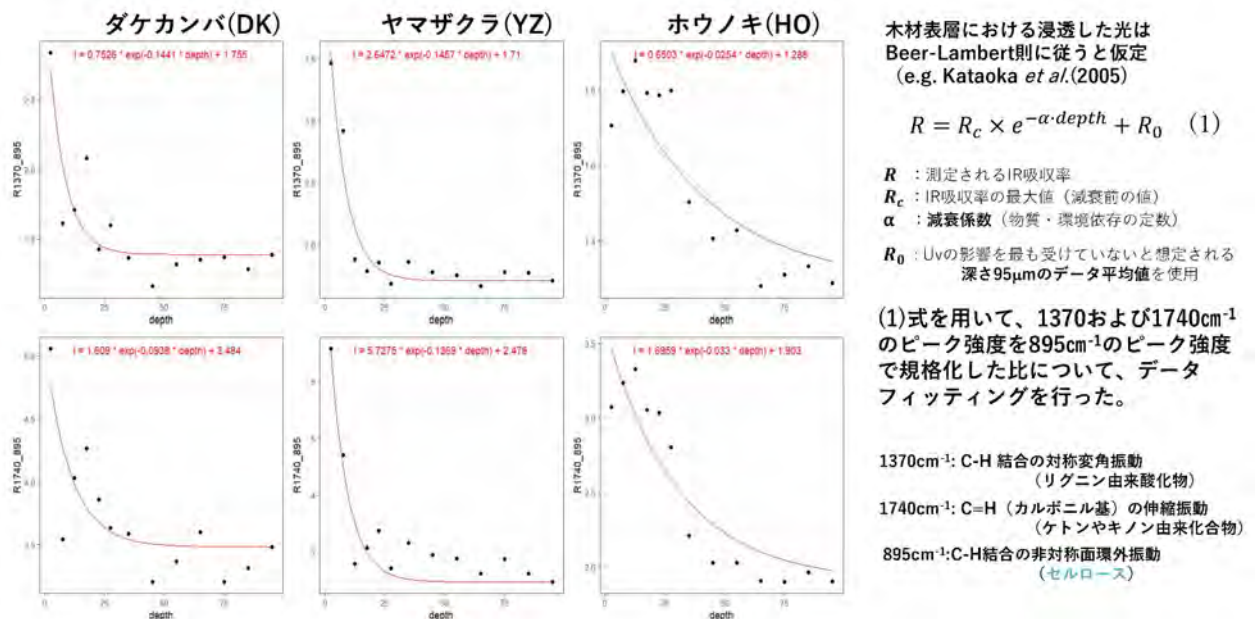


図 2-10 紫外線 (UV) 浸透に伴うスペクトルの変化

(3) 木材の中性子遮蔽性について

(i) 研究概要

宇宙放射線が宇宙機の壁や地球の大気に衝突したとき、二次放射線として中性子線が発生する。中性子線は電荷を持たないため、他の荷電粒子と比較して遮蔽が難しく、生物学的影響も大きい。中性子の遮蔽には、高エネルギー中性子を散乱断面積の大きい元素で減速し熱中性子とし、さらに吸収断面積の大きい元素で熱中性子を吸収することが重要である。

中性子遮蔽材としては、水素含有材料、特にコンクリートやポリエチレン樹脂が広く用いられている。しかし、コンクリートには金属元素が含まれており、放射化が懸念される。また、ポリエチレン樹脂は構造材としての強度が不十分である。木材には約 5%の水素原子が含まれており、金属元素含有量は極めて低く木材は伝統的に構造材料としても利用されてきた。そこで加速器実験および PHITS を用いたモンテカルロシミュレーションにより、木材の中性子遮蔽性能を検証した。

(ii) 試験体と実験方法

供試体は、(L) 90 × (R) 90 × (T) 90 mm³のスギ辺材ラミナおよび同サイズのコンクリートであった（図 2-11）。試験体は、SHI-ATEX 加速器駆動中性子源を用いて 1 時間および 2 時間照射された。金箔とカドミウムカバーを用いた放射化法によって中性子束を測定し、熱中性子および熱外中性子に対する遮蔽性能を求めた。さらに、GM 管サーベイメータ（TGS-136、日立アロカメディカル社、日本）を用いて木材の表面放射能を測定した。同一の形状、試料、線源を再現し、PHITS（ver. 3.34）を用いて放射線挙動をシミュレーションした（図 2-11 及び表 2-1）。



図 2-11 中性子照射試験体：①気乾スギ材（密度 290kg/m³）、②飽水状態のスギ試験体（密度 1090kg/m³）、③ホウ素系不燃木材（密度 670kg/m³）、④コンクリート（密度 2110kg/m³）

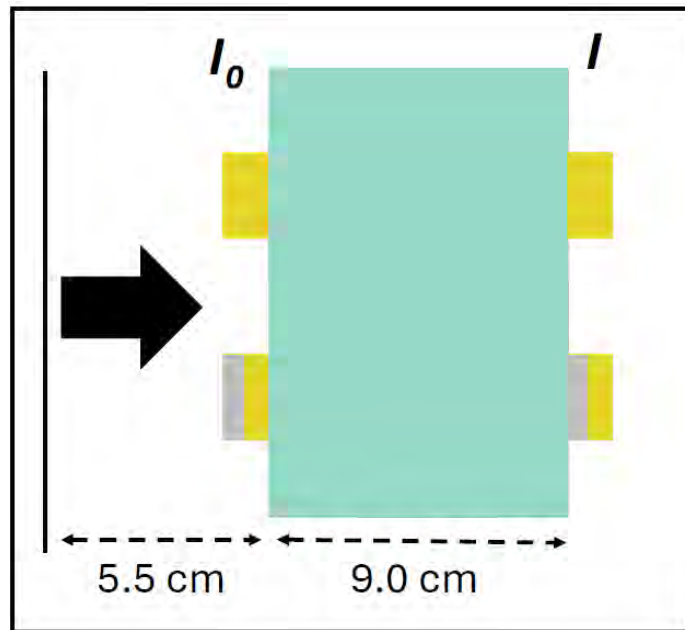


図 2-12 コンピュータシミュレーションモデル (PHITS)

表 2-1 コンピュータシミュレーションモデル元素組成 (試験体番号は図 2-11 参照)

Material	Weight percentage of elements [%]
(1)	O: 47, C: 46, H: 6.2 Else: K, Ca, Mg, N, P
(2)	O: 78, C: 12, H: 9.9 Else: K, Ca, Mg, N, P
(3)	O: 64, C: 20, B: 6.3, H: 6.3, Na: 2.6 Else: K, Ca, Mg, N, P
(4)	O: 52 Si: 42 Ca:4.7 Al: 0.49 Fe:0.47 Else: S, Mg, K, Na, Ti, P, Mn, Cl
Air	N: 76 O: 24 C: 0.013 H: 0.0010

(iii) 実験及びシミュレーション結果

木材の中性子遮蔽率 (試験片前後の中性子束の比) は、熱中性子 (<0.4 eV) では 91.3%、熱外中性子 (0.4 eV~18 MeV) では 60.6%でした。これは同寸法のコンクリート (それぞれ 92.5%と 71.6%) よりも劣っていた (図 2-13)。また、照射後の木材から放出されるガンマ線数は、背景レベルを超えなかった。シミュレーションでも同様の傾向が確認された (表 2-2)。

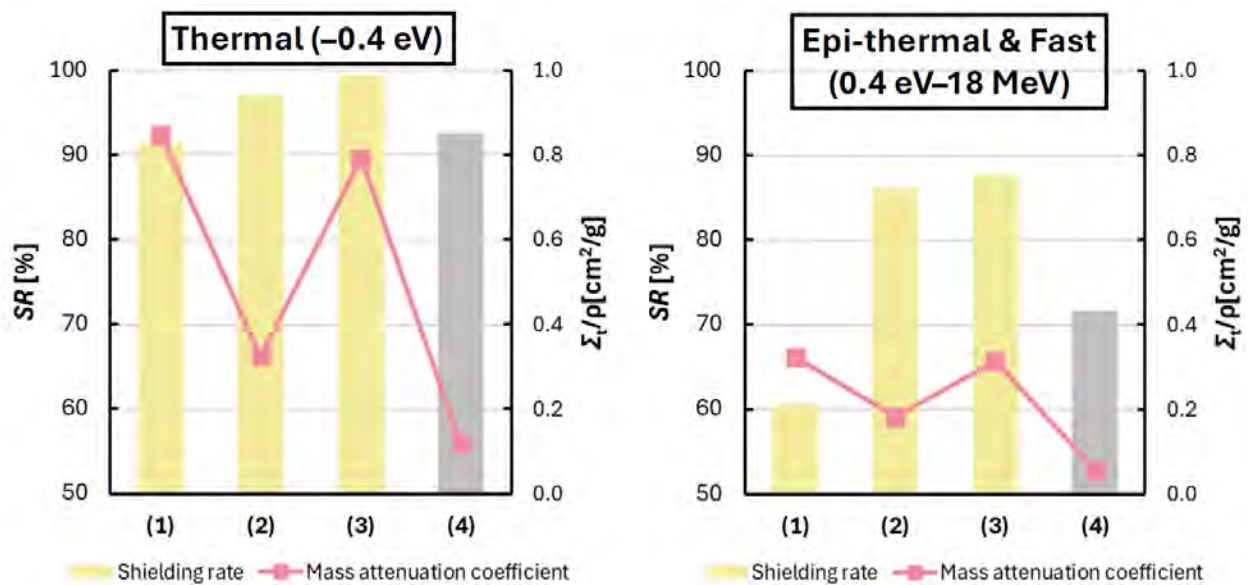


図 2-13 木材およびコンクリートの遮蔽率(SR)と質量減衰係数(Σ_t/ρ) 左:熱中性子、右:熱外中性子
(試験体番号は図 2-11 参照)

表 2-2 中性子による試験体の放射化(試験体番号は図 2-11 参照)

No.	(1)	(2)	(3)	(4)
Maximum counts [cts/min]	160	160	820	3700

(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1Pa (10^{-5} 気圧) 以下、木材試験体は、長さ 100 ミリ、幅 10 ミリ、厚み 5 ミリである。図 2-14 に実験用チャンバー、図 2-15 に真空チャンバー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 2-14 真空チャンバー

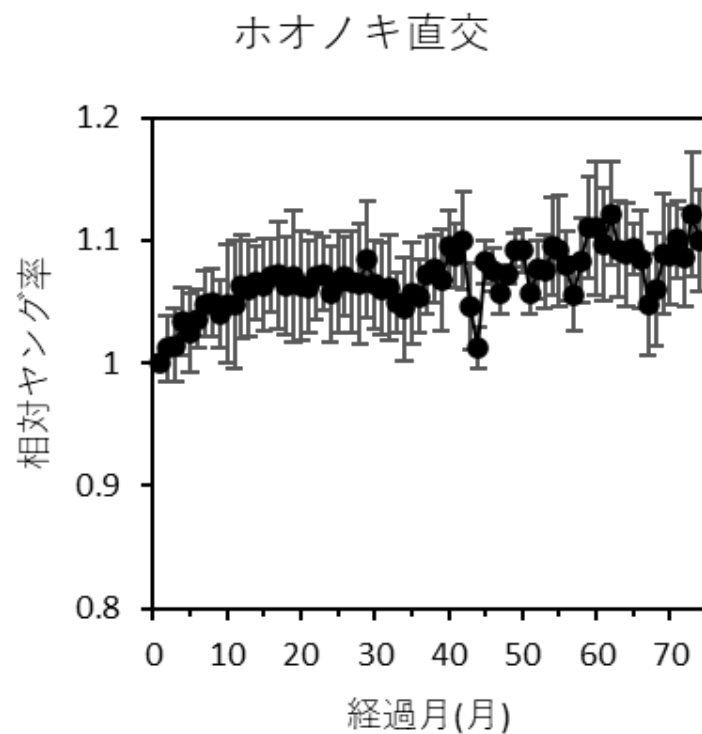


図 2-15 木材実験試料

(2) 木材の真空暴露実験結果

(i) 実験結果: 相対ヤング率

図 2-16 にホオノキ試料（平行試料は 79 ヶ月真空暴露後、直交試料は 74 ヶ月暴露後）の相対ヤング率の変化を示す。ホオノキ平行試料の相対ヤング率は、3 年程経過して時点で 1.0 まで戻るが、その後緩やかな上昇がみられる。67 ヶ月真空暴露した後では、実験開始時より 8~9%ほど上昇している。ホオノキ直交試料の相対ヤング率は、真空暴露開始後約 1 年半で 10%ほど上昇したが、その後はほぼ一定値で推移している。



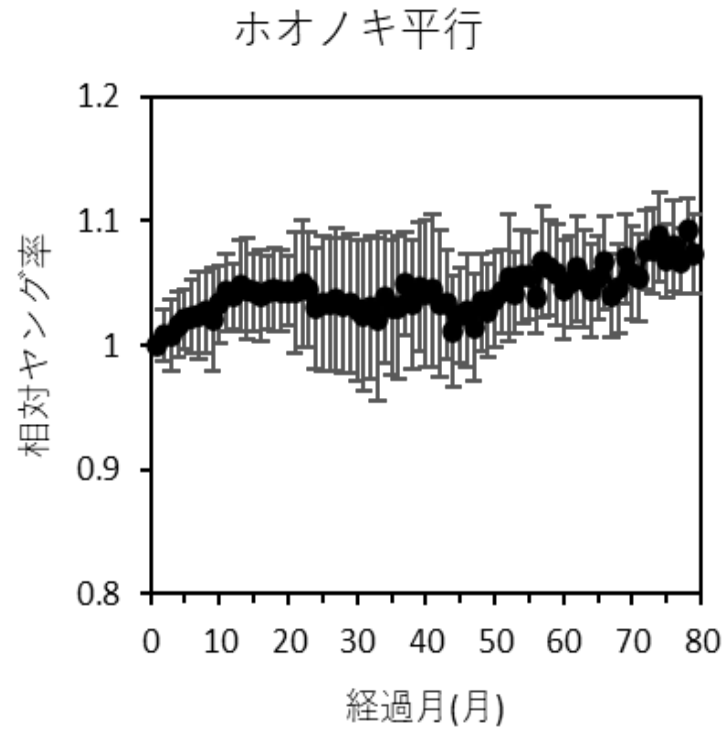


図 2-16 相対ヤング率の変化:ホオノキ（直交:74ヶ月後、平行:79ヶ月後）

(ii) 実験結果:相対寸法変化

図 2-17・18・19 に平行試料を真空暴露した場合の相対寸法変化（2024 年 3 月と 2025 年 3 月の比較）を示す。ホオノキ、ヤマザクラ以外に、平行試料ではキリ・カシ・ダケカンバ・カラマツ、直交試料ではさらにスギ・センダンの寸法変化を含んでいる。相対寸法変化は実験開始時における長さを 1 としたときの真空暴露後における長さの比で表す。なお、図における l , b , h は以下の凡例

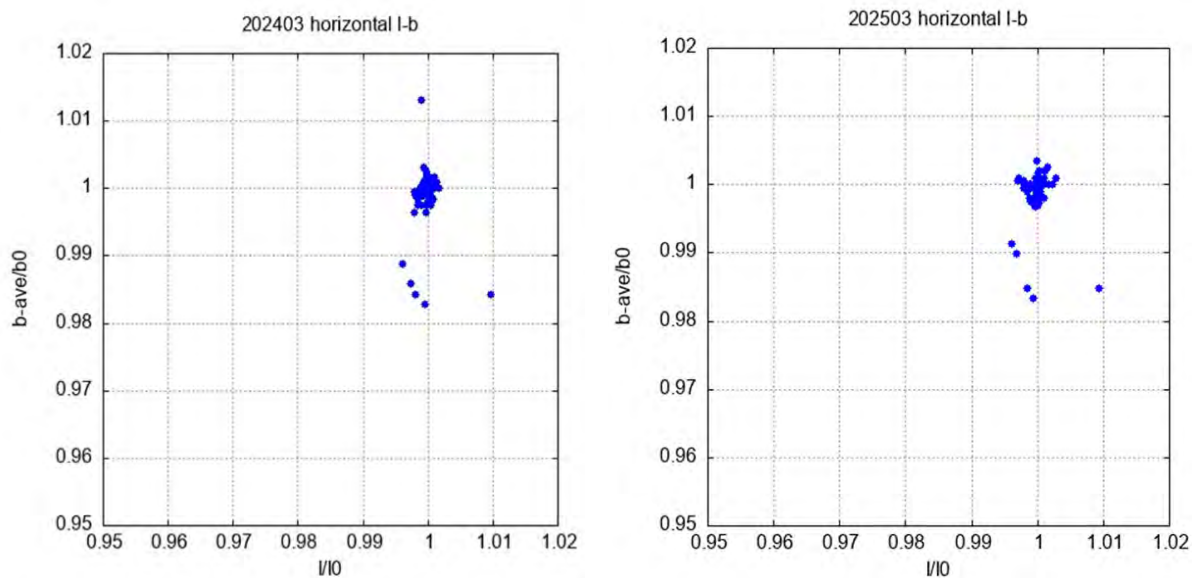


図 2-17 寸法変化:平行試料 (l - b)

にならう：l：試料長さ方向、b：幅、h：厚さ。長さ方向（試料繊維方向）の変化はどの樹種にも共通して非常に小さく、12ヶ月経過後もほとんど一定である。一方、幅方向では2%以下、厚さ方向では3%以下の範囲で収縮がみられ、樹種によって収縮率が異なる結果となっている。試料繊維方向はセルロース（ $C_6H_{10}O_5$ ）結晶方向であり、真空暴露しても木材は縮みにくいのに対し、木目の放射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形成されているため、より真空暴露の影響を受けて変化する。そのため、試料の幅方向と厚さ方向では真空暴露による一定の収縮がみられるが、これにより木材試料はより詰まった状態となり、剛性が高くなる。このことは（i）の相対ヤング率の上昇を裏付けている。

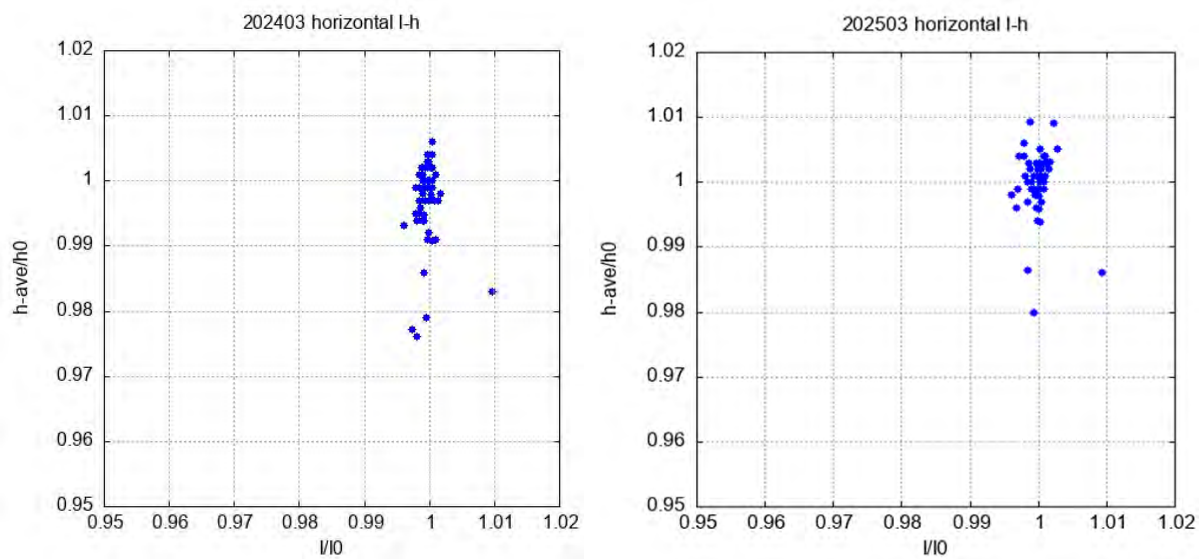


図 2-18 寸法変化: 平行試料 (l-h)

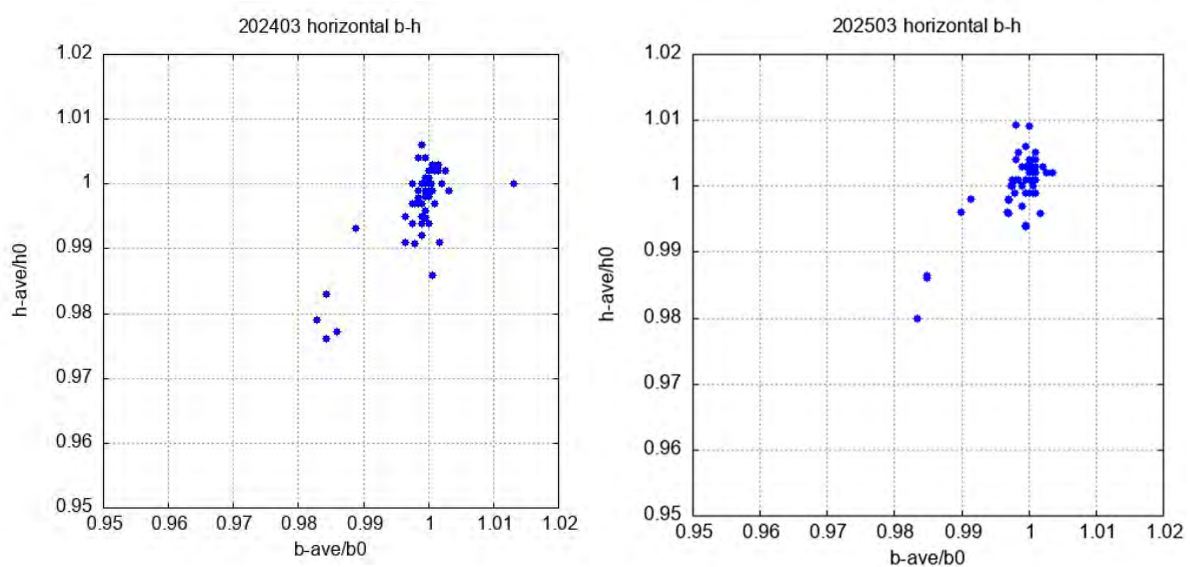


図 2-19 寸法変化: 平行試料 (b-h)

次に直交試料を真空暴露した場合の相対寸法変化（2024年3月と2025年3月の比較）を図2-20・21・22に示す。長さ方向は繊維直交方向にあたるため、平行試料に比べると収縮がみられるが、収縮率は大きいものでも1%程度である。直交試料における繊維方向にあたる幅方向も収縮率が小さく、収縮向の収縮率の範囲は2024年3月では2%であったのに対し、2025年3月は4%になっており、樹種間率は高々1%程度である。一方、繊維方向と直交する厚さ方向の収縮は大きい。直交試料厚さ方のばらつきも大きくなっている。

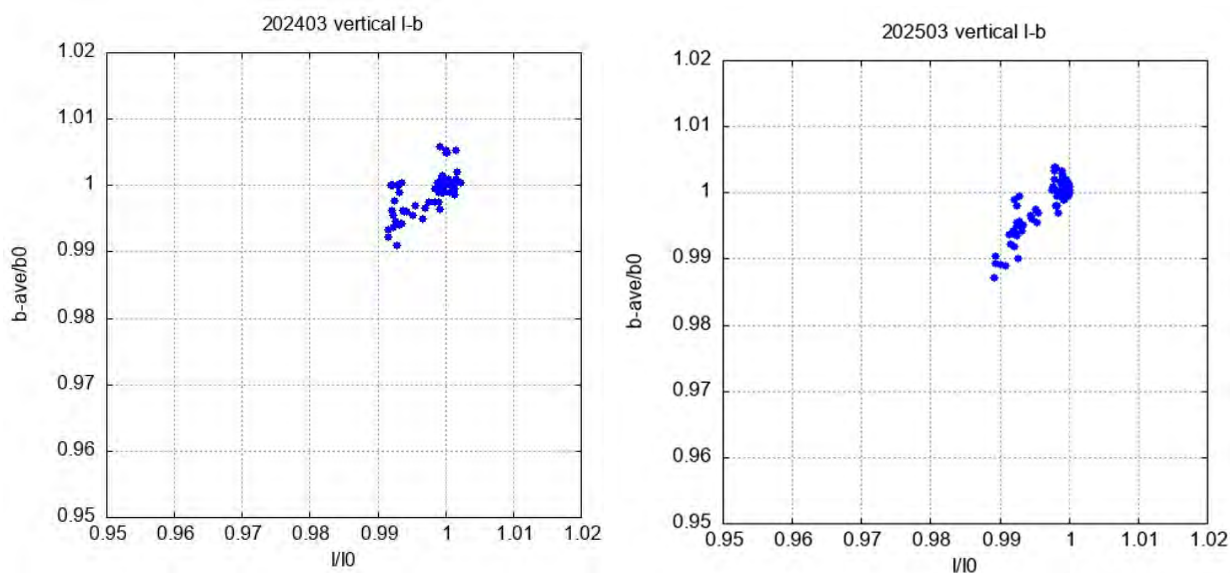


図 2-20 寸法変化:直交試料 (I-b)

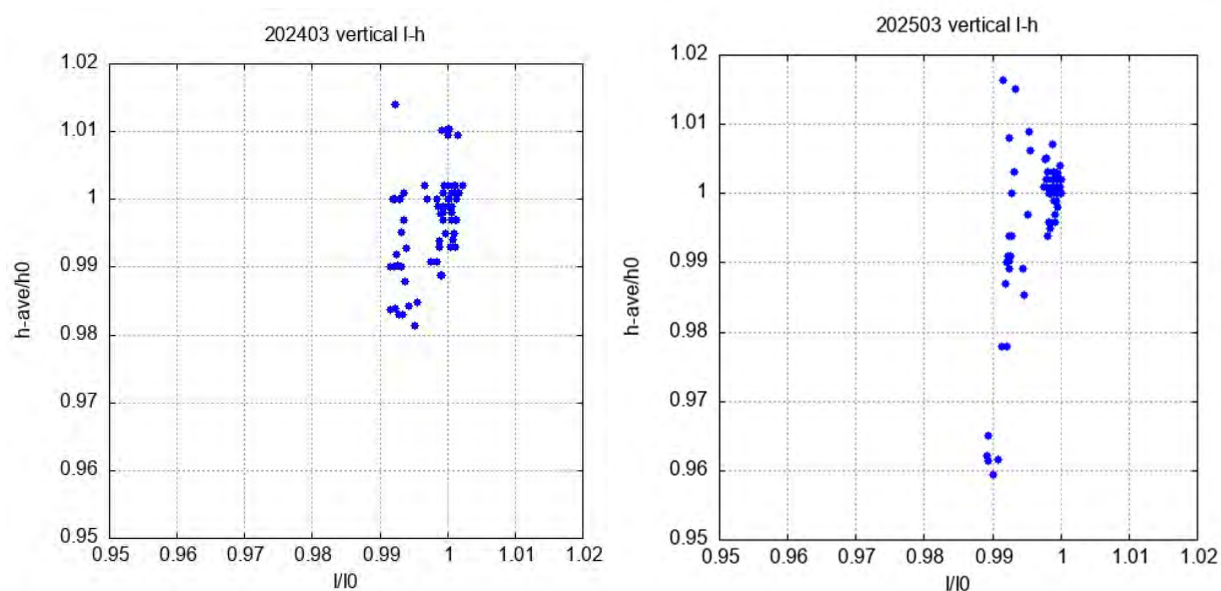


図 2-21 寸法変化:直交試料 (I-h)

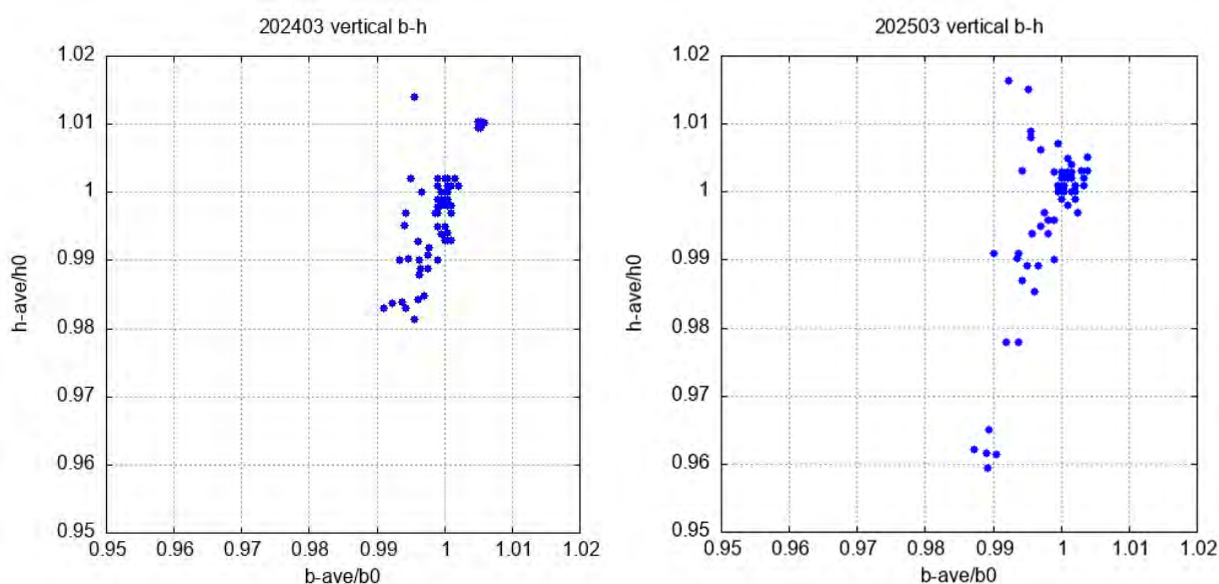


図 2-22 寸法変化:直交試料(b-h)

(iii) CNF の真空暴露実験結果

(iii-1) 実験結果:相対ヤング率

木材を宇宙で使おうとした時に問題になる要因のひとつは、木材が異方性材料であることである。即ち、木材繊維の平行と直交方向で曲げ強度が違うために、例えば木造人工衛星構体を設計することが非常に複雑化する。さらに通常の樹木の幹の直径は 30～40 センチメートル程度であり、大きな木板を取り出すことが難しい。そのような欠点を補うために、これまで開発されてきたセルロースナノファイバー（CNF）が宇宙で使えるかどうかの検証実験を 2023 年 10 月に開始した。CNF 試料の真空暴露実験を開始したのである。

図 2-23 に 16 ヶ月間真空暴露した CNF 試料の相対ヤング率の変化を示す。真空暴露実験前に 105℃で 24 時間乾燥させて試料をドライ試料（以降、「D 試料」と記述）、大気中で放置した試料をノーマル試料（以降、「N 試料」と記述）と呼ぶことにする。D 試料の相対ヤング率は実験 10 ヶ月目時点で 9%ほど減少していたが、その後は上昇傾向にあり、実験 16 ヶ月目現在は-3%にまで戻っている。N 試料では相対ヤング率が上昇を続けており、実験 16 ヶ月目時点で約 10%上昇している。これは D 試料に比べて含水率が高いために、試料の剛性変動も大きくなっていることが要因として考えられる。CNF 試料は 16 ヶ月間の真空暴露実験において安定した相対ヤング率を示すようになり、宇宙利用に供すると考えられる。

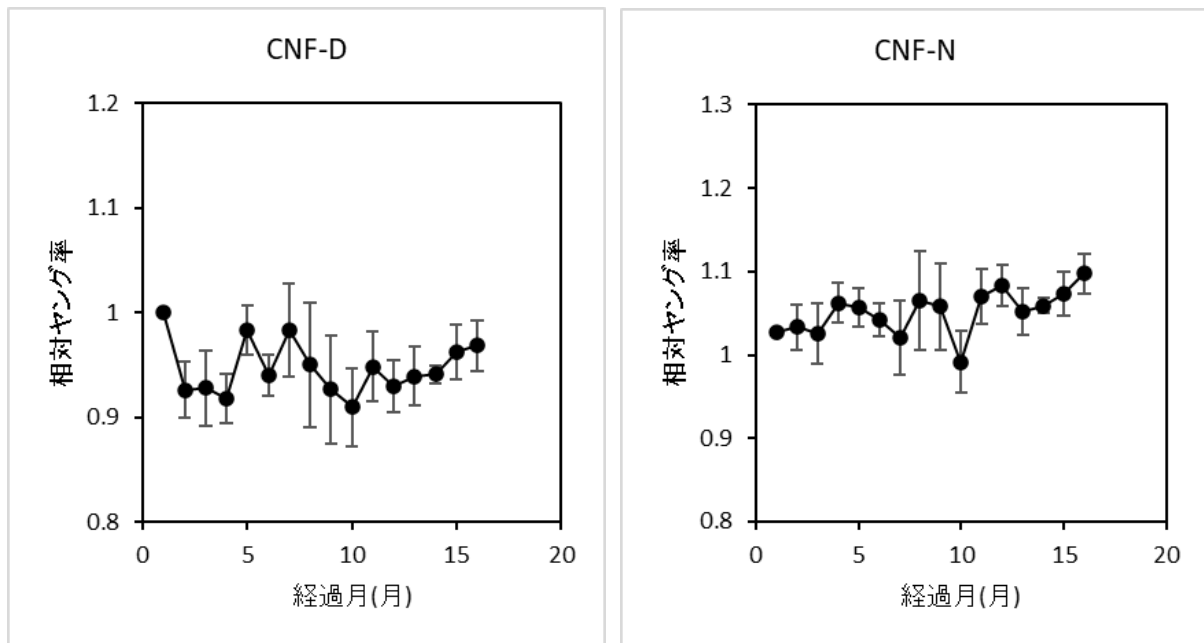
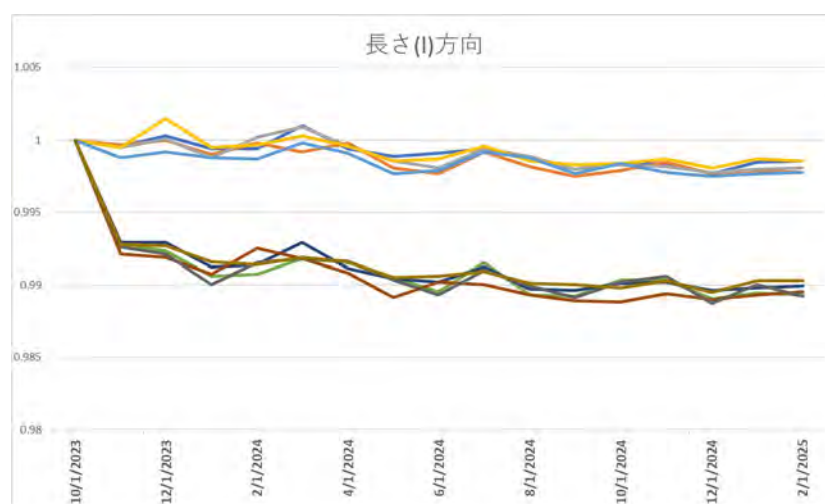


図 2-23 相対ヤング率の変化：CNF（16 ヶ月後）

（iii-2）実験結果：相対寸法変化

図 2-24 に CNF 試料を真空暴露した場合の相対寸法変化を示す。長さ方向、幅方向、厚さ方向いずれにおいても、D 試料と N 試料で結果が明らかに二分されている。D 試料に比べて含水率の高い N 試料では、より収縮が顕著である。N 試料の収縮率は、長さ方向では約 1%、幅方向では約 1～1.2%、厚さ方向では約 4～5%である。一方、D 試料では、ナノファイバーの繊維方向にあたる長さ方向での寸法変化がほとんどなく、幅方向と厚さ方向でも寸法変化率が 1%以下と安定して推移している。CNF の剛性や寸法は、ノーマル試料では真空暴露の影響を受けやすく変動が大きいが、ドライ試料では比較的安定している。



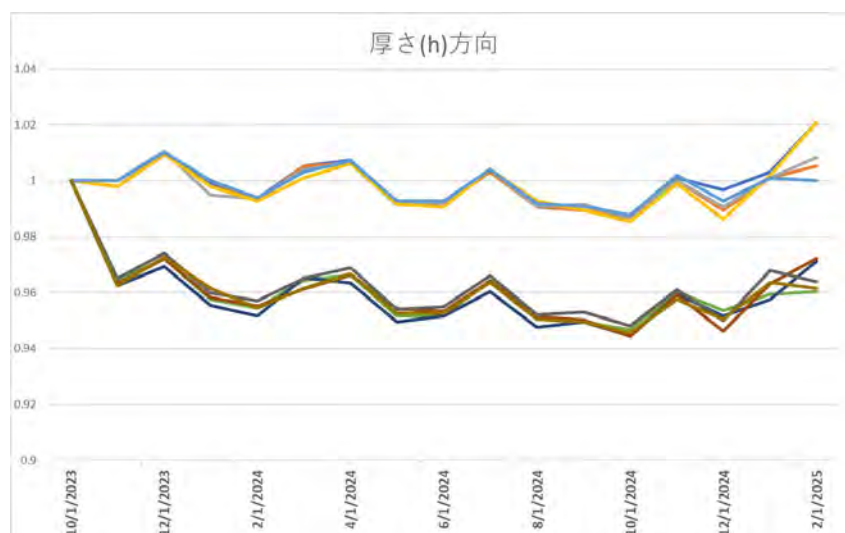
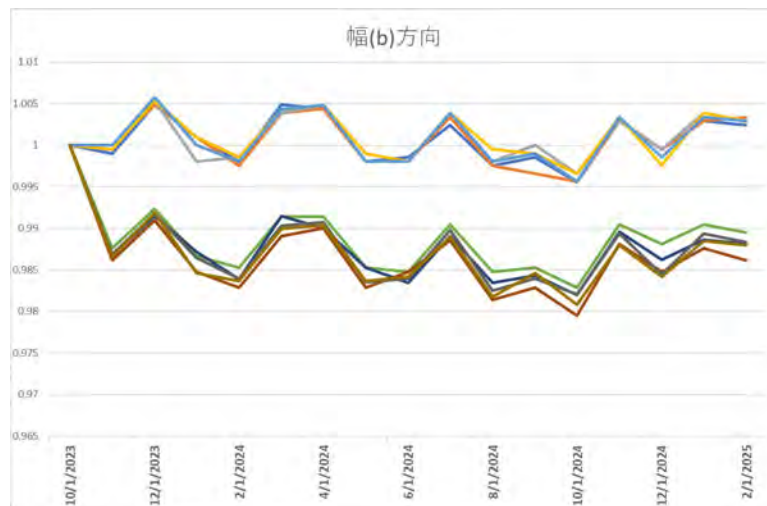


図 2-24 寸法変化 : CNF 試料
l : 試料長さ方向、b : 幅、h : 厚さ

今後も木材および CNF の真空暴露実験を継続し、さらに長期間のデータを取得していく予定である。また、芦生研究林のホオノキ試料および住友林業より提供いただいた合板試料を新たに加え、解析を行っていく。

③ 樹木育成実験の実施

(A) 樹木育成実験概要

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（Low Pressure Tree Growth Experiment Apparatus, LPTGEA）を用いて樹木の成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を確立するための基礎データを得ることを目的とし、ポプラの育成実験を行った。育成は密閉型の樹木育成チャンバーを用い、チャンバー内の大気圧、湿度、CO₂濃度を制御した。これら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3-1）：気温・湿度・CO₂濃度制御
2. Sketch_vacuum_control_v1.6（参考資料3-2）：真空度制御

材料：ギンドロ（*Populus alba*）のさし木苗を使用。供試苗はクローンである。本種は中央アジアを自生地とする落葉広葉樹、さし木による苗生産が容易である。

方法：

- 実験室の温度：23～25℃（チャンバー内の温度制御は行っていないが、エアコンで実験室の温度を一定に保つことで、チャンバー内温度もその値に連動して制御される）
- 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（1気圧）及び0.75, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1気圧

既存のチャンバー2台と新たに作成したチャンバー2台を加え、4台（図3-1）体制で実験を行った。

測定項目・成長解析：

- 樹（苗）高、地際直径、葉面積、各部（葉、幹の木部と師部、根）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評価した。
- T/R比について：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ている。
- 同化器官（葉）/非同化器官の比：葉とそれ以外の器官への配分比率を示す。この値が大きいことは、光合成を行う葉を増やすために光合成産物を優先して葉に配分していることを示す。

(B) 樹木育成実験結果

図3-1に実験中のポプラの生育状況を示す。図右より対照区（1.0気圧）と低圧区（0.75気圧、0.2気圧、0.1気圧）のチャンバーそれぞれにポプラ（*Populus alba*）さし木苗1個体を入れ、22日間前後育成した。



図3-1 低圧下樹木育成実験風景、チャンバー（LPTGEA）内にはポプラ苗木
右から対照区（1気圧）、低圧区（0.75気圧、0.2気圧、0.1気圧）

実験結果はポプラ苗の成長と成長特性の2つの項目について取りまとめた。

(1) 成長

成長量:それぞれのポプラ苗について実験開始前後の乾燥重量（バイオマス）の増加割合の評価を行う。
実験に供した苗の実験直前の乾燥重量の推定:実験に供する苗と同程度の大きさの苗の乾燥重量と樹高 $\times$ （地際直径）²との関係を図3-2に示した。この関係は1式として表すことができる。チャンバーに入れる前に実験に供する苗の樹高と地際直径を測定し、樹高 $\times$ （地際直径）²の値を1式のxに代入して乾燥重量yを求めた。

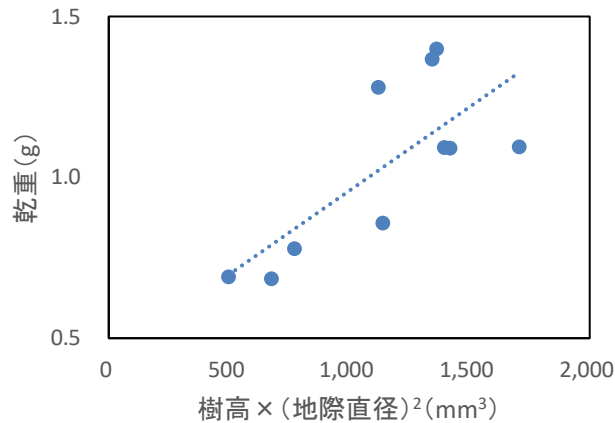


図3-2 実験前のポプラ苗の乾燥重量を推定する

$$y = 0.0005x + 0.4378, p=0.01424 \quad (1式)$$

yは苗の乾燥重量、xは樹高 × (地際直径)²

推定した実験直前のポプラ苗の乾燥重量に対する実験終了後の乾燥重量の増加割合を2式で求めた。実験終了後の乾燥重量は実測値である。この時、

$$\text{乾燥重量（バイオマス）増加割合} = \text{DWpost} / \text{DWpri} \quad (2式)$$

DWpri: 実験前の推定乾重

DWpost: 実験終了後の乾燥重量（実測値）

↓

1気圧と各低圧の乾燥重量増加割合を比較するために、それぞれの値の比をとり3式)、結果を図3-3に示した。この時、

$$(\text{DWpost} / \text{DWpri})_{\text{low atm}} / (\text{DWpost} / \text{DWpri})_{1 \text{ atm}} \quad (3式)$$

この値が1のとき、1気圧と低圧との間でバイオマ増加割合に差はないことを示している。

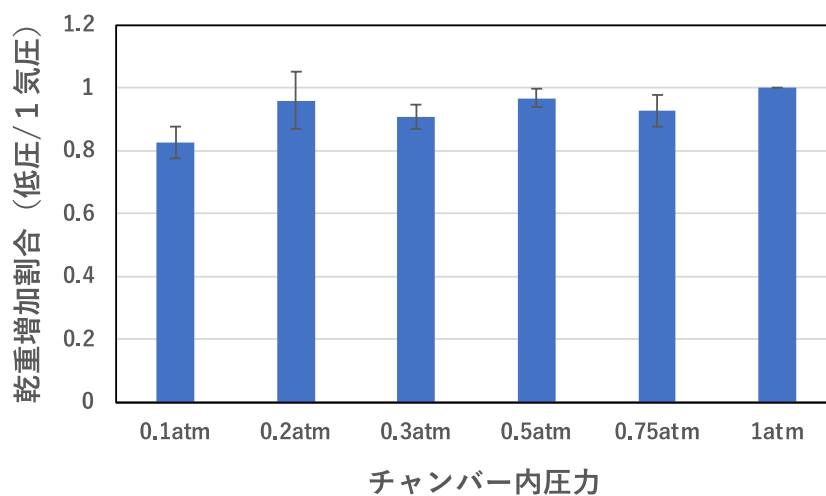


図3-3 1気圧と低圧におけるバイオマス増加割合の比較

今回の実験結果より、0.75気圧から0.1気圧の低圧下でのポプラの成長量と1気圧下のそれとの間には差は認められないようである。

(2) 成長特性

(i) LMA (葉の乾燥重量/葉面積)

図3-4にそれぞれの試験区（低圧区と対照区）の（ポプラの葉序）²とLMAの関係を示した。なお、横軸の葉序は右ほど新しい葉であることを示す。この関係が低圧区と対照区の間には違いがあるのかを検討するために共分散分析を行った。両区とも若い葉ほど有意にLMAが大きくなり、葉が成熟すると差が小さくなること、そして、1気圧区の葉より低圧区の葉の方がLMAは有意に大きいことがわかった。これは、展開直後の低圧区の葉が対照区の葉に比べて縮んでいる観察結果にも符合している。

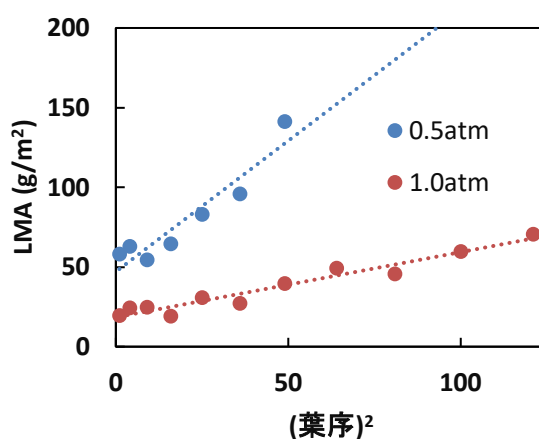


図3-4 LMA (葉の乾燥重量/葉面積)

(ii) T/R比と同化部/非同化部比 (図3-5)

1気圧と各低圧のT/R比ならびに同化部/非同化部比を比較するために、それぞれの値の比をとった（4-1・4-2式）。

$$T/R比_{low\ atm} / T/R比_{1\ atm} \quad (4-1)$$

$$同化部/非同化部比_{low\ atm} / 同化部/非同化部比_{1atm} \quad (4-2)$$

この値が1の場合、1気圧と低圧間でT/R比ならびに同化部/非同化部比に差がないことを示している。

T/R比

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

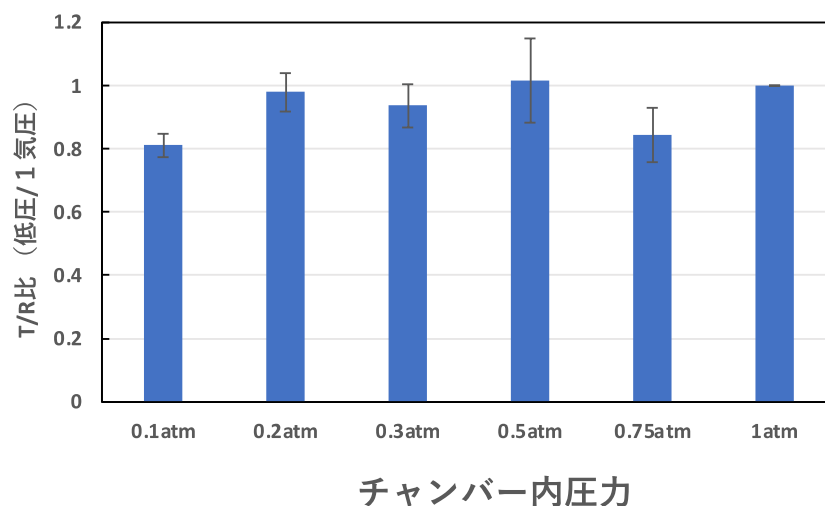


図3-5 1気圧と低圧におけるT/R比の比較

同化部/非同化部比 (図3-6)

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

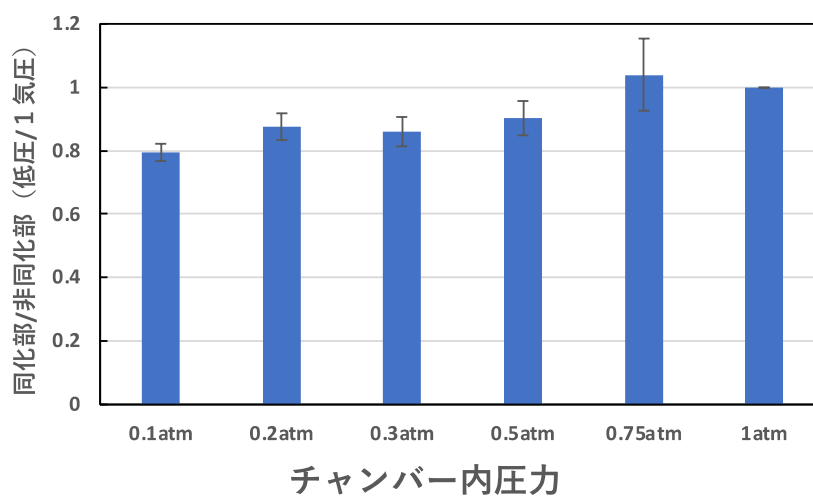


図3-6 1気圧と低圧における同化部/非同化部比の比較

(iii) クロロフィル蛍光

低圧区・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、実験範囲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。

(C) 実験結果まとめ

成長量(乾重増加割合)と成長特性 (TR比、同化器官/非同化器官)の結果から、低圧下(0.1気圧まで)と大気圧(1気圧)の間で同様の物質生産を行うことが期待された。

葉の形態:展開後、低圧下(0.1気圧まで)の葉のLMAは1気圧のそれより大きく、小型で厚い葉になることがわかった。成熟するにつれてLMAの差は縮まる。

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) 有人宇宙学実習

(1) 有人宇宙学実習概要

有人宇宙学実習は、有人宇宙ミッションを模擬した体験学習であり、【閉鎖環境実習】・【宇宙森林実習】・【天体観測実習】・【模擬微小重力実験】・【宇宙無線通信実験】の5つの課題を1週間かけて体験することによって、有人宇宙活動に関する包括的な視点と基礎知識を習得することを目的としている。本実習は、京都大学国際高等教育院が提供する「ILAS セミナー（少人数教育科目群）」として開講し、学部学生への単位を付与している。令和6年度の有人宇宙学実習のシラバスを参考資料4に示す。令和6年度の有人宇宙学実習は京都大学吉田キャンパスと京都大学フィールド科学教育センター（芦生研究林）にて実施した。参加学生は学部1-3回生からの計9名が選出された。学生は3名をひとつの班として1週間共同生活を行うことでチームワークが形成されていく過程を体験した。

実際の有人宇宙ミッションでは、宇宙空間という特殊な閉鎖環境で決められた時間内に数多くの様々な仕事をチームで作業することが要求される。そこで本実習では下記のような有人宇宙学実習用の特別な時間割（図4-1）で進められるように設定した。この時間割は、毎日2つ以上の複数の課題に取り組むこと、個々の課題が講義→実験→解析→考察によって段階的に知識を深めていくように作成されており、班内でのチームワークがなければ成功を収めることが難しい濃密なスケジュールとなっている。

有人宇宙学実習 2024/8/18-8/24

	8/18 (日)	8/19 (月)	8/20 (火)	8/21 (水)	8/22 (木)	8/23 (金)	8/24 (土)
8:30		集合・集合場所確認	心算検査	心算検査	心算検査	心算検査	心算検査
9:00	集合・自己紹介	開校式→移動（JR・バス） 8:58-9:43京大開校式 （京都府立総合資料館）	9:00-9:45 京大開校式（バス）	模擬微小重力実験1 （模擬飛行）	講義6 （有人宇宙活動/宇宙） 小林・益川記念室	模擬微小重力実験4 （観察）	実習成果のまとめ クルーノートブックの完成 心算・精神状態調査
10:00	講義1 （宇宙科学/宇宙） 北野総合教育研究棟506号室	（移動/京大開校式） （バス）	長江空の空を 京大開校式後、京大開校式後 （京大開校式）		模擬微小重力実験2 （観察）		
11:00		昼食					
12:00	昼食	講義（芦生研究林/京大開校式）	バスで移動 大カワラの大観望	講義	昼食	昼食	昼食
13:00	講義2 （地球観測衛星/観望） 北野総合教育研究棟506号室	京大開校式後（バス） 京大開校式後	昼食	講義4 （宇宙科学/宇宙） 小林・益川記念室		模擬微小重力実験3 （観察）	デモンストラ 心算・精神状態調査
14:00		京大開校式後（バス） 京大開校式後	京大開校式後（バス・JR） 14:00-15:30 京大開校式（バス） 15:49-16:34 京大開校式（JR）	講義5 （模擬飛行/宇宙） 小林・益川記念室			
15:00	講義3 （有人宇宙活動/宇宙） 北野総合教育研究棟506号室	京大開校式後（バス） 京大開校式後					
16:00		京大開校式後（バス） 京大開校式後					
17:00	自由時間	京大開校式後（バス） 京大開校式後	（バス）京大開校式後	自由時間		実習成果のまとめ クルーノートブックの作成	
18:00	夕食	夕食	夕食	夕食	夕食		
19:00	自由時間	自由時間	自由時間	自由時間	自由時間	自由時間	
20:00	自由時間	自由時間	自由時間	自由時間	自由時間	自由時間	
21:00	心算検査	心算検査	心算検査	心算検査	心算検査	心算検査	
21:30	解散	解散	解散	解散	解散	解散	

図4-1 令和6年度有人宇宙学実習時間割

実習を行うにあたって、令和6年度実習用クルーノートブックを作製し、学生に配布した。クルーノートブックとは、宇宙飛行士が有人宇宙ミッションで実際に使用されるもので、一般的なことの書かれている手順書には載っていない細かな注意事項や実験の記録、日記などを書き込むものである。宇宙飛行士は宇宙空間で生活をするため、仕事以外でも貴重な発見を常に発見し得る状況である。そのため、すぐにその発見を記録するために宇宙飛行士はクルーノートブックを肌身離さず持ち歩いている。本実習では、参加学生に対して宇宙飛行士が使用するものと同様のクルーノートブックを使用することを要求し、実習中のあらゆる記録をクルーノートブックに書きこまれた完成度で成績を評価するようにした。このクルーノートブックは、実習成績の評価後に学生に返却することで学習記録を振り返るポートフォリオとして機能するとともに、貴重な思い出ともなる。

今回の有人宇宙学実習では、5月11日、6月8日、7月6日、8月17日に事前オリエンテーションを計4回実施した。オリエンテーションの目的は、実際の実習前に各班員同士がお互いをよく知り合う機会を設け、

チームワーク形成を促進させることと、【閉鎖環境実習】・【模擬微小重力実験】・【宇宙無線通信実験】の課題遂行に必要な知識と経験を事前に習得してもらうことである。5月11日は、参加学生による自己紹介から始まり、有人宇宙学実習の概要の説明を行った。6月8日、7月6日、8月17日の3回のオリエンテーションでは、各班に対して上述の3つのハンズオン訓練を行った。また、7月6日では、並行して、池田武文先生の講義「樹木生理の基礎」と仲村匡司先生の講義「木材の基礎知識」を受講する。8月17日では、清水幸夫先生の講義「宇宙探査工学」と、土井隆雄先生の講義「系外惑星の観測」、「系外惑星の軌道解析」、「天体観測実習」を受講する。

実習期間中には、実習全体および各課題の講義を受講した後に実際に課題に関連する観測や実験を行い、観測・実験結果の解析・考察を通して、人間が宇宙に進出する意義を考えてもらう。講義は、全部で6つある。1日目の8月18日には、佐々木貴教先生の惑星における生命発生の条件を考える「生命を宿す惑星の条件」、篠原正典先生の閉鎖環境での実際の経験を語る「閉鎖居住実験の最新動向」、曾我康一先生の宇宙にまで展開した植物実験の歴史と発見をまとめた「植物の重力応答」が行われた。4日目の8月21日には、山敷庸亮先生の人類が宇宙で居住するために必要な条件を考えた「火星移住に必要なコアテクノロジー」、石原正次先生の人工衛星を用いた無線通信の原理を説明する「電波教室」と「衛星通信の世界へようこそ！」が行われた。5日目の8月22日には、土井隆雄先生の現在宇宙に展開する人類の活動の概要を伝える「有人宇宙活動」が行われた。

(2) 有人宇宙学実習結果

(i) 閉鎖環境実習

本実習では基本的に、実習指導者等を除く外部との社会的関係をできるだけ断ち、限られた施設で共同生活を行いながら、上述の講義受講・実験・観測・解析を3人1班で取り組むという日常とは異なる疑似的な閉鎖環境を用意した。全日程を合宿形式で行うことはできず、京都大学フィールド科学教育センターでの2日間以外はキャンパス内の日帰り実習となっており、閉鎖環境という意味では宇宙空間での閉鎖状況を模擬することはできていない。しかし、常に班単位で活動を行い、課題をこなすという過程は宇宙ミッションでのチームでの活動を模擬するものであり、個々人のストレス状況を把握することで、実習中での精神的な影響を観察することができる。また、各班の仕事の効率を観察することで、各班のチームワーク形成の過程に着目することができる。

生理的ストレスは、侵襲性の低さを考慮し、唾液中のアミラーゼ濃度をストレスの目安として採用し、唾液アミラーゼモニター（ニプロ社）を用いて起床時および就寝前に測定した。心理的ストレスは、表情の異なる20種類のイラストを用いた非言語的なフェイススケールによってその時点での気分状態を、また65の質問項目からなり、「怒り」、「混乱」、「活気」などの6つの下位尺度を評価できる Profile of Mood Status (POMS) の2つの方法を採用し、フェイススケールは起床時と就寝前、POMSは就寝前に行った。図4-2にアミラーゼとフェイススケールの測定結果を、図4-3にPOMSの測定結果を示す。事前オリエンテーション時のブリーフィングでは、生体試料採取、機器による採取試料の計測や各種心理データの記録法、さらにそれらのデータの表計算ソフトへの入力をハンズオン訓練で指導し、実習中は参加学生自らがそれらを行い、実習最終日のデブリーフィング時に得られた結果を皆で考察した。

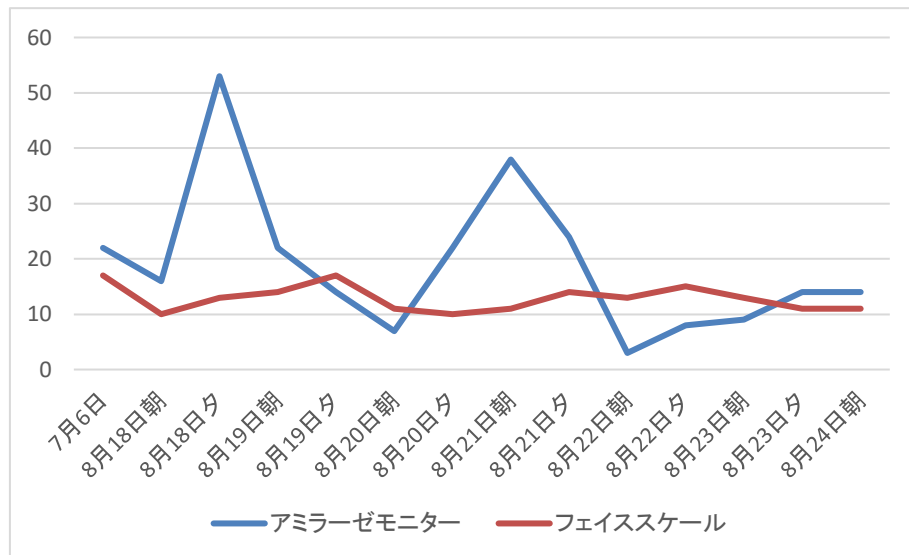


図 4-2 ある参加学生の唾液アミラーゼおよびフェイススケール値の変動

アミラーゼ値は高いほうが高ストレスであると考えられる。フェイススケール値は値が低いと心理ストレスが高いとされている。アミラーゼ値のベース値は個人差があり、個人間の値は比較できないため、計測期間中の変動傾向で変化を判断する。

生理ストレス（唾液アミラーゼ値）に関しては、実習の経過に伴ってアミラーゼ値が上昇下降する学生もいたが、常に一定に保つ学生もいた。参加学生全体として、朝にストレスが低く、夜にストレスが高くなる傾向が見られた。これは本実習が日帰りの活動だったので日中の活動に対して自宅で十分な休息をとれたことが要因であると考えられる。

POMS の結果も各学生間で変動が大きく異なる傾向が見られた。実習が進むごとに POMS の値が徐々に下がり、終盤に上がる傾向が見られたが、これはチームワークの進展によって実習課題の実施がより効率的に進んでいることを示唆している。また、実習終盤の疲労が読み取れる。

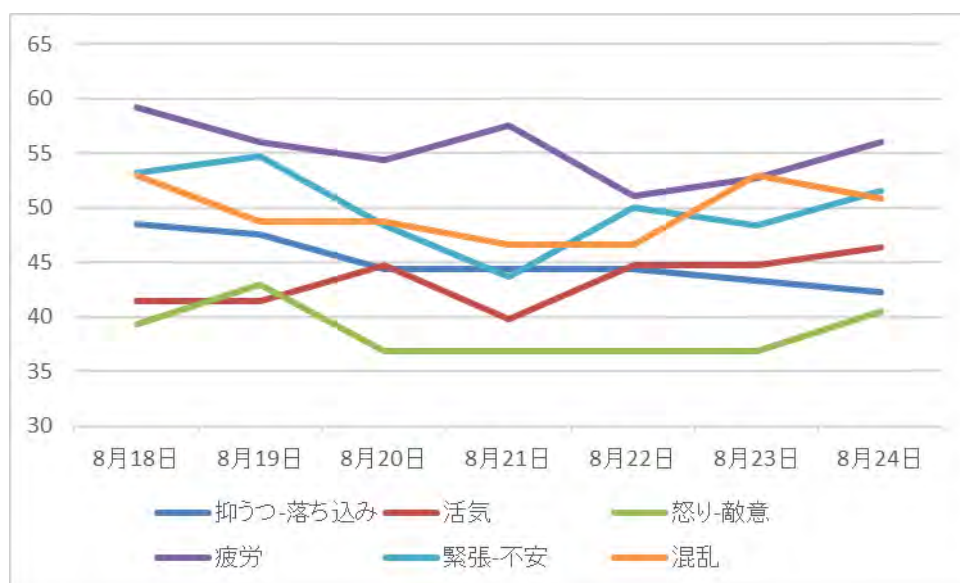


図 4-3 ある参加学生の POMS のスコアの変動

縦軸は POMS の T-Score (日本人平均 50) を示す。「活気 (Vig)」は値が低いと、それ以外の指標は値が高いとストレスが高いとされる。

全参加学生がこれらのデータを入力・確認し、実験を完遂した。計測値の変動（特に唾液アミラーゼ値）が自身の予測を裏切る結果であることに驚く様子が見られたことなど、自らの生理心理を解析する試みの難しさや面白さを体験できたものと考えられる。参加学生からは、これらのストレス計測の理論や実施頻度についての質問や意見も聞かれ、積極的に学ぼうとする姿勢が見られた。

(ii) 宇宙森林実習

令和5年度より有人宇宙学実習に新たな課題として宇宙森林実習を取り入れた。将来火星環境で居住することを想定すると、酸素を生み出すために木々を生やし、森林を形成することになると予想される。また、その森林は原生林の呈を成すと考えられる。そこで京都大学フィールド科学教育センター（芦生研究林）へ行き、実際に原生林を体感するという宇宙森林実習を行った。

宇宙森林実習によって学生は次の知識・技能を習得することができる。

- 森林の構造の理解
- 樹木の生長の測定方法
- その森林が固定している炭素量の測定方法とその原理
- 森林での生態系についての理解

宇宙森林実習は、京都大学フィールド科学教育センター（芦生研究林）にて実習2日目と3日目にかけてフィールドワークを行った。また、参加学生は樹木の炭素含有量を求める方法についての講義を受け、フィールドワークで実際に得たデータを用いてその森林の一定面積に固定されている炭素量の解析を行った。図4-4は京都大学フィールド科学教育センターにて参加学生が森林の構造について学び、森林が固定している炭素量を解析する方法についての講義を受ける様子である。樹木の幹の太さを測定することでその樹木の重量を概算でき、その樹木によって固定された炭素量を解析することができる。図4-5は参加学生が実際に樹木の幹の太さを測定する様子である。図4-6は、炭素蓄積量の解析結果である。年々増加傾向にあることが分かる。

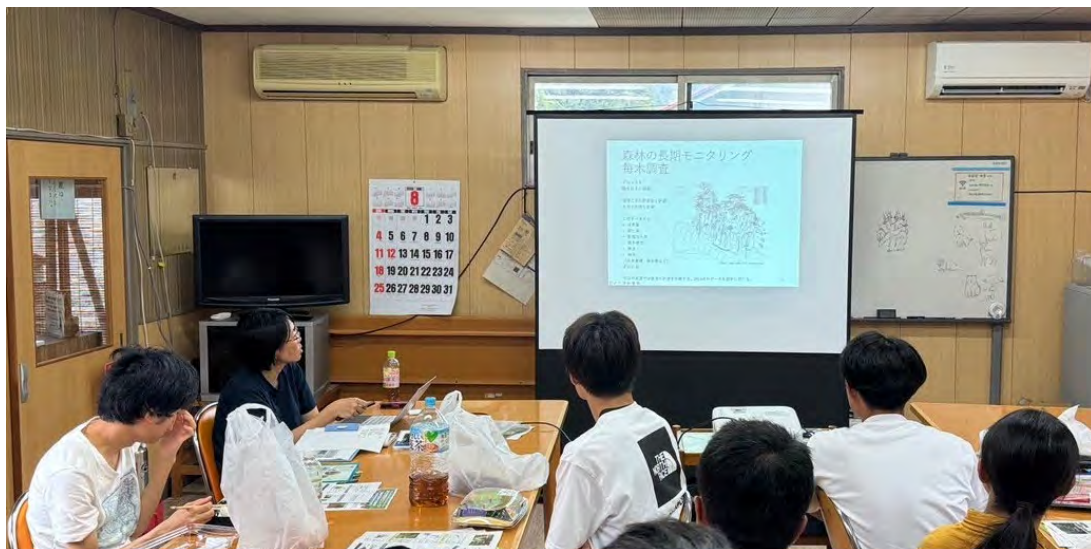


図4-4 京都大学フィールド科学教育センター芦生研究林での講義の様子



図 4-5 芦生研究林でのフィールドワークの様子

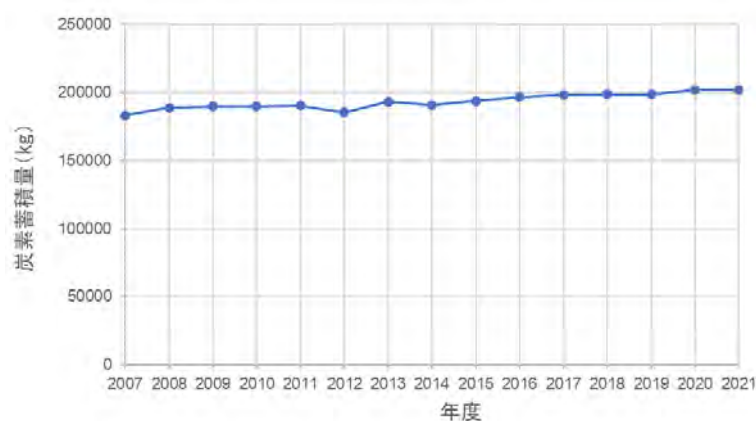


図 4-6 芦生研究林の森の炭素蓄積量の変化

(iii) 天体観測実習

天体観測実習では、実習場所の北部総合研究棟の屋上で反射望遠鏡を使った、土星と月面の観察と、系外惑星の測光データ解析を実施した。望遠鏡による観察は、8月23日の午後9時に実施した。系外惑星の観察は、8月23日の午後10時に実施した。トランジット法では、恒星の前面を惑星が横切る際に発生する減光現象（トランジット）を観測することで、惑星の大きさや軌道を調べることができる。トランジット法は、比較的小型の望遠鏡で観測可能であり、しかも京都市のような明るい市街地に近い場所でも軌道解析に必要な精度の良いデータを得ることができる。本実習では、花山天文台に設置された系外惑星観測システムによって過去に得られたトランジット法での観測記録を使用し、その惑星の軌道要素を計算し、惑星の表面温度を求めることを実習課題とした。表面温度を求めることはその惑星に居住可能かの推測を行うためである。

天体観測実習によって参加学生は次の知識・技能を習得することができる：

- 惑星系性理論の理解
- 惑星軌道の理解
- 惑星居住可能条件の理解

本実習では、各班の学生チームがこれまでに観測された基地の系外惑星天体の光度曲線を用い、軌道解析による惑星パラメータの導出を行った。各班ごとの解析天体は、第 1 班が QATAR-1b、第 2 班が HD189733b、第 3 班が HAT-P-36b である。それぞれの天体の光度曲線を図 4-7・8・9 に示す。

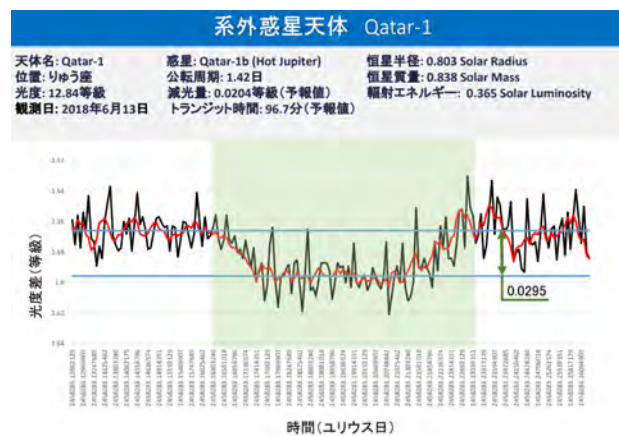


図 4-7 Qatar-1

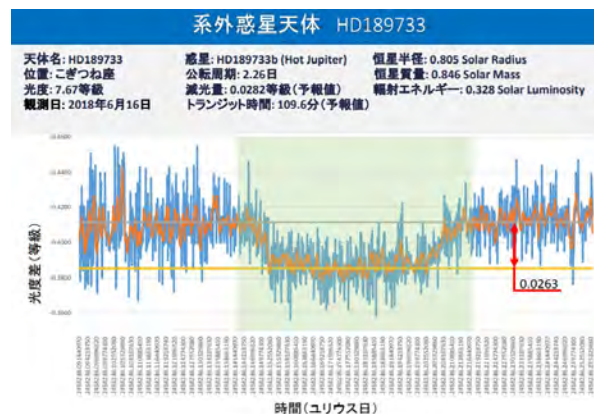


図 4-8 HD189733

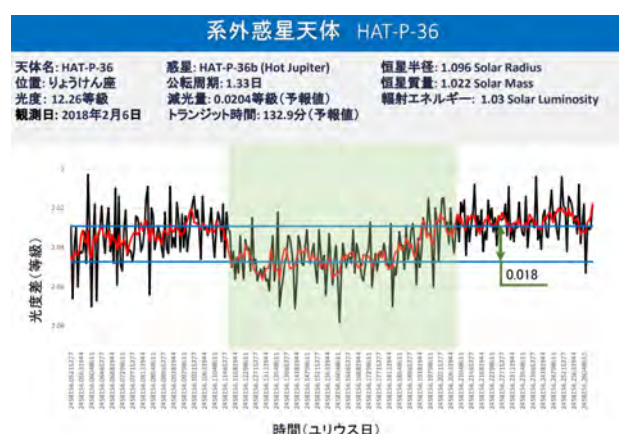


図 4-9 HAT-P-36

表 4-1・2・3 に各班の解析結果を示す。各班ともに解析のための複雑な計算をするのにかなりの苦労が見られたが、小型望遠鏡による観測結果にもかかわらず、太陽系外惑星の存在を確認することができた。

表 4-1 系外惑星解析結果 1 班 (QATAR-1b)

	単位	解析値	文献値*1
軌道半径	AU	0.0265	0.0233
公転周期	days	1.64	1.42
軌道傾斜角	Degrees	84.6	84.1
惑星半径	R _{jp} (木星半径)	1.33	1.14
惑星表面温度	K	1170	1418

*1 文献(1): Karen A. Collins, et al., Transit Timing Variation Measurements of WASP-12b and QATAR-1b: No Evidence of Additional Planets, The Astronomical Journal, Volume 153, Issue 2, article id. 78, 2/2017

表 4-2 系外惑星解析結果 2 班 (HD189733b)

	単位	解析値	文献値*2
軌道半径	AU	0.0317	0.0310
公転周期	days	2.25	2.22
軌道傾斜角	Degrees	85.3	85.8
惑星半径	R _{jp} (木星半径)	1.25	1.14
惑星表面温度	K	1042	1117

*2 文献(2): 野津翔太, 2016, 「有名な系外惑星, 系外惑星の紹介 HD 189733 b」, EXPKYOTO, (<https://www.exoplanetkyoto.org/2016/10/12/hd-189733-b/>).

表 4-3 系外惑星解析結果 3 班 (HAT-P-36b)

	単位	解析値	文献値*3
軌道半径	AU	0.0265	0.0238
公転周期	Days	1.56	1.33
軌道傾斜角	Degrees	84.5	86.6
惑星半径	R _{jp} (木星半径)	1.42	1.26
惑星表面温度	K	1520	1823

*3 文献(3): Bakos, G. A., et al., HAT-P-34b—HAT-P-37b: Four Transiting Planets More Massive Than Jupiter Orbiting Moderately Bright Stars, The Astronomical Journal, Volume 144, Issue 1, article id. 19, 7/2012.

(iv) 模擬微小重力実験

模擬微小重力実験では、3D (2 軸) クリノスタット実験システム(図 4-10)を使い、植物 (ガーデンクレス) の根の初期成長を観察することで、重力が植物の成長に及ぼす影響と、その重力感知機構の特性を調べることを実験課題に設定した。

3D (2 軸) クリノスタットは直行する 2 軸の回転軸を持ち、3 次元的に回転することによって試料に対する重力の方向を平均化させる模擬微小重力発生装置であり、生命科学系宇宙実験の地上予備実験に多用されている。なお、クリノスタット上の試料は受ける重力環境は方向が平均化されてゼロとなるだけであり、宇宙空間における完全な微小重力環境とは異なる。図 4-10 において、左側の装置が 3D (2 軸) クリノスタット、中央と右側の装置は地上対照実験装置である。この地上対照実験装置は手で任意の回転位置に試料を固定することができる。右側の装置では、根の初期生長期間に 90 度だけ回転させる。この回転で、根が重力方向に屈曲する様子を観察できる。



図 4-10 3D (2 軸)クリノスタット実験システム

ガーデンクレスは種を水に浸してから発芽までに約 20 時間程度かかるために、観察を行う前日に播種する必要がある。また、実際の観察は連続 6 時間以上かかるため、各班ともに独自の観察計画を立てて実験を行った。観察写真の画像解析により、植物の持つ重力感知機構の特性を明らかにした。また、重力に対応する成長差異を確認した後、根の先端部分を切断し、染色過程を得て顕微鏡を使用し植物の重力感知機構のスケッチを取るなどをして重力感知機構を直接観察した。

模擬微小重力実験によって参加学生は、次の知識・技能を習得することができる：

- クリノスタット操作技術
- 顕微鏡操作技術
- 模擬微小重力発生原理の理解
- 植物の重力対抗性に関する知識
- 植物の重力感知機構に関する知識

模擬微小重力実験は、有人宇宙学実習の中で最も長い時間を費やした項目である。種子（ガーデンクレス）の寒天培地への植え付けを前日に行い、観察は翌日午前中に始まり、約 6 時間かけて終了した。観察では、30 分おきに根の成長を写真に取りながら根の成長速度を測定し、グラフを作成した。その後、根の先端を切断し、顕微鏡を使用することでアミロプラスト（細胞内のデンプン体顆粒）の細胞内分布や形状を観察した。図 4-11 に、模擬微小重力下と地球重力下のガーデンクレスの根の成長曲線を示す。この班では、クリノスタットを用いた個体群が最も成長率がよく、90 度回転させた個体群が最も悪い結果となった。

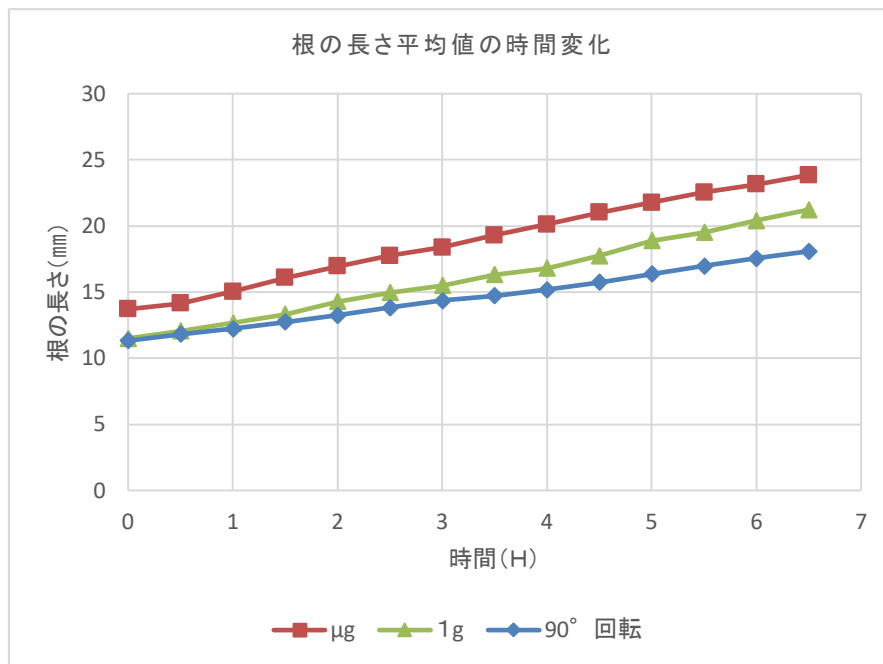


図 4-11 ガーデンクレスの根の成長
 Mg (クリノスタット) 成長率: 1.61 mm/h
 1g (コントロール) 成長率: 1.51 mm/h
 90° 成長率: 1.04 mm/h

図 4-12 は細胞内アミロプラストの分布を示す顕微鏡写真である。根の先端にある植物細胞内には、アミロプラストと呼ばれるデンプン体顆粒があり、これが重力方向に沈降することによって、植物の根は、重力方向を検知している。細胞内アミロプラストを観察するためには、根を先端から約 3 ミリメートルのところで切断し、ヨウ素液に浸す。これにより、ヨウ素デンプン反応が起こり、アミロプラストが紫色に着色される。模擬微小重力実験では、実際に地表重力下と模擬微小重力下において成長した根の先端細胞を顕微鏡観察することによって、定性的なアミロプラストの細胞内分布の違いを観察した。重力下では、層状に分布していた アミロプラストが、模擬微小重力下では、細胞内全体に分布することが観察された。

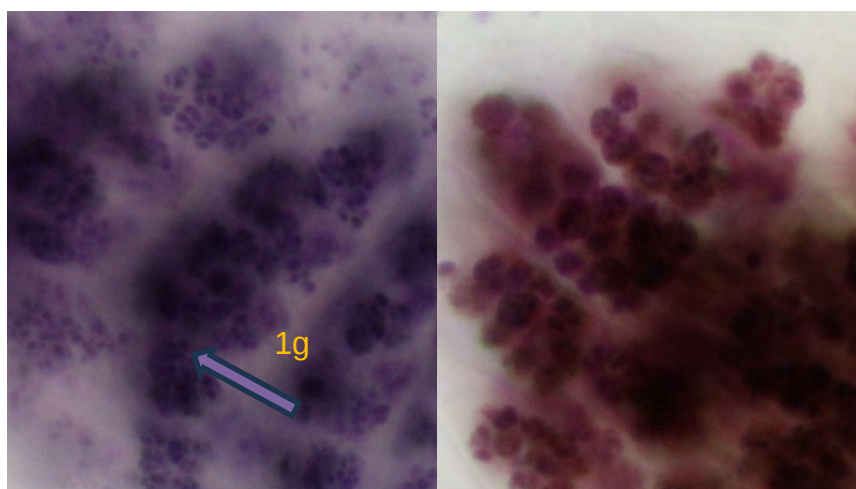


図 4-12 アミロプラストの細胞内分布写真 (総合倍率 1000 倍)
 左: 地球重力下 右: 模擬微小重力

(v) 宇宙無線通信実験

宇宙ミッションでは、地上との会話やデータのやり取りがすべて無線で行われる。また、将来月や火星での有人宇宙活動を想定すると、地球とは違い大気や電離層がないため、衛星を使用した通信が主流になることが予想される。そのため、本実習ではアマチュア無線衛星を使った宇宙無線通信実験を行った。

宇宙無線通信実験によって参加学生は次の知識・技能を習得することができる：

- 電波の原理の理解
- 八木アンテナの仕組みへの理解
- アマチュア無線通信への理解
- 衛星通信技術・技能

宇宙無線通信実験は、日本アマチュア衛星通信協会の支援を受けて実習 4 日目にアマチュア衛星通信に関する講義と電波教室を行った。電波教室では、電波の原理やその歴史からアンテナの特性まで可視化実験を行い、非常に分かりやすい説明がなされた。図 4-13 は、芦生研究林にて、参加学生が携帯型トランシーバーと八木アンテナを用いてアマチュア無線からの電波を受信しているところである。



図 4-13 アマチュア無線衛星から電波を受信する参加学生の様子

参加学生は、アマチュア無線衛星の軌道要素から地平線上に衛星が現れるプログラムを使用することで、衛星の飛んでいる方位角と仰角にアンテナを向け、衛星からの電波を受信することに成功した。また、受信した電波のコールサインからどの無線局からの電波なのかを調べる演習課題を行った(表 4-4)。

表4-4 受信した無線局

日時	8/20,11:49	8/21,11:00	8/22,13:59
衛星名	ISS (ZARYA)	ISS (ZARYA)	SAUDISAT 1C (SO-50)
コールサイン	BI6PPC (中国・安徽河南、湖北) JI1AAF (埼玉県桶川市) JE1CVL (埼玉県飯野)	BG3HZT (中国・河北、内蒙古、山西、天津) JH3BUM (京都府京都市右京区) BH7SWF (中国・広東、広西、海南湖南) BT7XWF (中国・広東、広西、海南湖南) JL3ZLJ (京都府京都市左京区)	BG6HXD (中国・安徽河南、湖北) JA6EGM (大分県宇佐市) BG2ELG (中国・黒龍江省、吉林遼寧)

	市)	JA6PL (福岡県北九州市八幡西区) JH1NHK (神奈川県相模原市南区) JK4DHT (山口県周南市) JA2NLT (静岡県静岡市葵区) JI1AAF (埼玉県桶川市)	JH1NHK (神奈川県相模原市南区) JA6EEG (大分県日田市) JA2NLT (静岡県静岡市葵区)
--	----	---	--

(3) 有人宇宙学実習の評価

令和6年度の有人宇宙学実習のコンセプトマップ解析結果をまとめる。参加学生人数（実習前後2回ともにコンセプトマップを作成した学生数）は、9名であった。

(i) コンセプトマップの基本情報

コンセプトマップについて、①ノード数、②リンクの数、③3つ以上のリンクをもつノードの数、④③のノードのリンク数合計の4項目に分け、平均値、標準偏差、増加率を比較した。表4-5にその結果をまとめる。また、それぞれの実験参加者と平均の変化を図4-14にまとめる。

表 4-5 実習におけるコンセプトマップの基本情報

		平均	標準偏差
① ノード数	前	30.56	10.01
	後	44.11	9.33
	増加率	13.56	-0.69
② リンク数	前	20.00	10.12
	後	35.89	14.04
	増加率	15.89	3.91
③ ノード数 (3リンク以上)	前	6.56	2.41
	後	10.11	2.33
	増加率	3.56	-0.08
④ ③のノードのリンク合計	前	25.44	11.27
	後	43.67	10.30
	増加率	18.22	-0.97

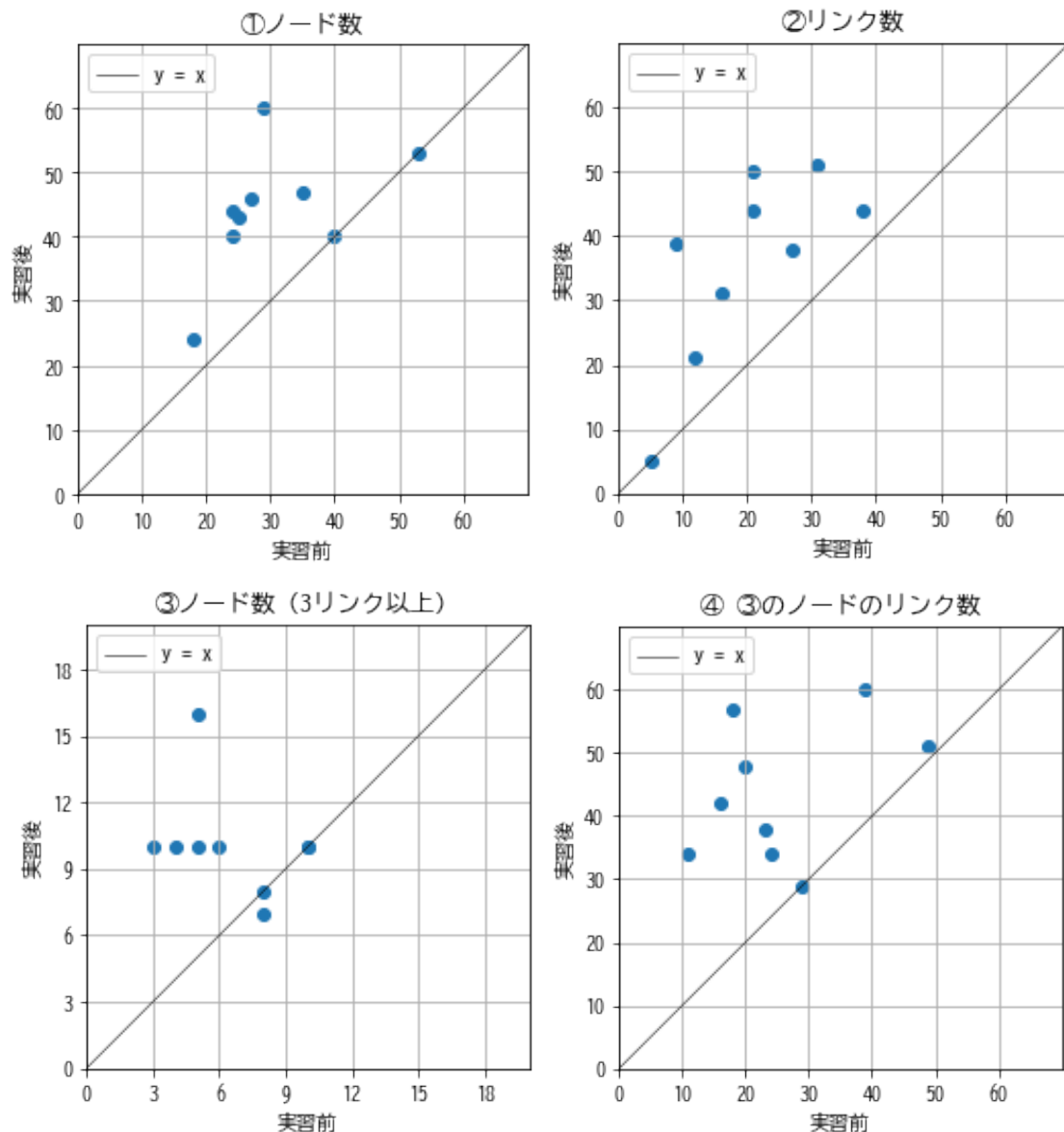


図 4-14 有人宇宙学実習におけるコンセプトマップの指数の変化

【実習前後のコンセプトマップの比較】

各項目において、平均値はすべてが増加している。標準偏差は②のみ少し増加し、ほかは少し減少傾向にある。これは、宇宙に関する知識が全参加者ともに一様に増加していると考えられる。多くの学生に見られた意見として、実習で学んだ内容から宇宙をとらえる視点が増えたというものがあった。例としては、実習前は自分の所属している分野からの視点のみだったものが、さまざまな分野から宇宙をとらえているといったものだった。以下に参加学生による分析（一部抜粋）を記す。

- 事前には書いてすらいなかった単語からリンクが何本も出ているのを見たことで、短い期間で宇宙についてより幅広く考えられるようになったと成長を感じた。
- ノードがより専門的な言葉になった。
- 知識量の増加・発想の拡大。
- 森林や無線通信など事前には考えつかなかった語がでた。
- 事前のものには抽象的な語が多いのに対し、事後のものには具体的な単語が多く登場した。
- 事後のものには実習（有人宇宙学実習）を通して学んだ単語も多く登場した。

- 「人類と宇宙」という観点からのノードが多くなっている。
- 事前では、物理学、宇宙物理学に関する言葉ばかりだったが、事後では、様々な分野の言葉が広がっている。
- 事前では語が少なく宇宙空間に関するものばかりだが、事後では「有人宇宙学」のノードから発展して、人間関係や森林、動物など、一見宇宙とは関係のないようなノードも含まれている。
- 事後の方が一つのノードに対してより深く掘り下げられるようになっている。
- 事前では、天体や宇宙のための技術について書かれたノードが多いのに対し、事後では、今回の実習に関連したノード、特に、森林や無線通信について書かれたノードが多くなっている。
- 事後では、より詳細な単語や、固有名詞が増えている。
- 事前のコンセプトマップは、自分の詳しいいくつかのジャンルに絞って書いていたのに対し、事後では、比較的幅広いジャンルについて書くことができていた。

(ii) コンセプトマップの構造変化

コンセプトマップの構造に注目した参加学生による分析シートをもとに各学生のコンセプトマップの構造変化に関する分析を行った。

学生の分析では、実習前にチェーン型だった人がスポーク型に、スポーク型だった人がネットワーク型に、チェーン型だった人がネットワーク型になっている。また、変化しなかった学生もいた。以下に参加学生による分析（一部抜粋）を記す。

- 最初に大きく4、5ほどの分野に分かれるが、分野を超えるリンクが多数となった。
- 1つとしかリンクしていない単語が少なくなっており、より入り組んだ構造になっている。
- 1つ1つのノードから、今までは思いつけなかった新しいノードをつなげることができるようになったが、大きな塊を作るノード間をつなげることはまだできていないように感じる。
- どちらもネットワーク型であり、構造はあまり変化しなかった。事前より、事後の方が離れたところにある単語同士がリンクでつながれる頻度が高かった。
- 事後ではネットワーク型になったことから、それぞれの概念についての知識が増え、全体的な繋がりを意識できているようになっているのと思う。
- 一つの概念の中に、様々な事柄が関与していることを意識している。
- 事後の方が、ひとつのワードに対してより多くのワードを連想して関連させることができるようになり、リンクが複雑に絡み合うようなネットワーク型に変化した。
- どちらもスポーク型が主となっているが、事前では、1つのノードに多くのリンクが集まっていたのに対し、事後では、樹形頭上の構造になっている。

(iii) コンセプトマップの解析総論

実習前後において、ノード・リンク共に平均値が増加しており、コンセプトマップも複雑なものとなっている。また、実習前と比べて実習後は宇宙を多角的な視点でとらえることができている。このことから実習を通して参加学生の有人宇宙学に対する理解が深まったことが見て取れる。また、抽象から具体の方向へノードが変化していることから、より宇宙への解像度が高まったと考えられる。このことからコンセプトマップの分析自体が自身の思考を整理し、理解するという点で役に立っていることが分かる。

(B) 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 6 年度の「有人宇宙学」シラバスを参考資料 5-1 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 6 年度は 11 名が受講、6 名の大学院生が合格し、聴講生を含めた 8 名が修了した。

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 4-6 に示し、それぞれの講義概要を以下にまとめる。

表 4-6 令和 5 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02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09日	宇宙環境工学	山敷庸亮
宇宙を知る	10月16日	宇宙探査工学	清水幸夫
宇宙を生きる	10月30日	宇宙生命科学	保尊隆享
宇宙を生きる	11月06日	宇宙木材工学	村田功二
宇宙を生きる	11月20日	宇宙霊長類学	足立幾馬
宇宙を生きる	12月04日	宇宙法	青木節子
宇宙を考える	12月11日	宇宙医学	寺田昌弘
宇宙を考える	12月25日	宇宙人類学	岡田浩樹
宇宙を作る	01月08日	宇宙居住学	稲富裕光
有人宇宙学修了式	01月22日		土井隆雄、山敷庸亮 田口真奈

[有人宇宙学]（参考資料 5-1）

アメリカはプロジェクト方式で有人宇宙活動を行ってきており、有人宇宙ミッションにピークが見られる。一方、ロシアは国策として有人宇宙活動を行っているため、毎年同程度の有人宇宙ミッションが行われるなど、一貫して投資・有人宇宙活動を行っている。中国は 2003 年ごろから独自に有人宇宙基地を開発し、国策として有人宇宙活動を展開中である。

日本の有人宇宙活動は 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宇宙科学技術獲得を目的とされた。第二期は 2008 年から現在まで「きぼう」を用いた有人宇宙活動とされている。若田宇宙飛行士からは長期滞在ミッションが始まっており、これらの有人宇宙活動は、科学、人文社会的連携、国民の関心が深く関与している。

宇宙は無重力の世界である。ユーリー・ガガーリンが人類として初めて宇宙に滞在した時に、彼は人間が宇宙で生きられるのか、知らなかった。人間は、宇宙で水を飲むことができるのか、食べることはできるのか、眠ることはできるのか、頭は働くのか、ガガーリンは何の答えもなく宇宙に行き、無事地球に戻り、人間が宇宙で生きられることを証明した。それから 60 年以上が過ぎ、私たちは、今、全ての質問に答えることができる。人間は、地上と同じように水を飲み、食べることはできる。おそらく地上よりもぐっすりと眠ることができる。頭の働きも問題ない。人間は宇宙で生きられるように作られているのだ。これは、地球から人間への素晴らしい贈り物である。

宇宙から地球を見るとその美しさに感動する。ヒマラヤの山々やガンジス川のデルタ、アラスカ上空を飛んでいた時に見たオーロラ、地球のどこを見ても美しく見飽きることはない。夜の地球は、街の明かりが広がり、人類の活動の跡がよく見える。

[宇宙環境工学]

火星への移住を考えた際、いくつかの問題が考えられる。第一に小惑星帯からの飛来物である。これらが飛来する確率は地球の 2.5 倍と試算されており、地球から観測できないものも含めるとその確率はさらに上がることが考えられる。さらに火星の薄い定大気では大気圏で飛来物が燃え尽きることがなく、威力が減少しないまま火星表面に激突し、この影響で年 1~2 回の地震が起こってしまう。第二に土壌である。生物が生きていくには塩基性の環境が重要であるが、火星は酸性土壌であり、水も凍っている。第三に火星には取り巻く磁場がないことである。磁場がないので表面に紫外線がそのまま飛んできて気化し、さらにはイオン化してしまう。これにより地表が乾くので砂嵐が起きやすい。加えて銀河宇宙線や太陽フレアの影響を強く受け、1日で地球の1年分の放射線を被ばくする。

こういった問題を前に、地球がどのような環境か、そしてどういった条件があれば地球外に移住できるかを考えなければならない。これを考えるうえで重要となる概念が 3 つのコア、つまりはコアバイオーム、コアテクノロジー、コアソサイエティである。これは生存に最低限必要な 3 つの条件である。地球ではこの要素のいくらかが少し欠けたくらいでは死者が多く出ることはないが、宇宙ではこのうちのどれか、特にコアテクノロジーがかけた時点で全員が亡くなるのだ。こうした三つの条件を用いて閉鎖循環系を作るうえで考えなければならないことは自然資本と生存基盤のどちらを優先するのかである。前者は、人類は単独では生きていけないという原則のもと、地球の資本をある程度持っていき多様性を維持することを重視しており、後者は人類が生きるのには自分たちの力で十分だという考えのもと、単一種のみ(人類)の生存に尽力している。非常に難しいこの問題は、確定的な答えはまだ出ていない。

[宇宙探査工学]

宇宙学は宇宙からの視座により地球または人類や生物の「未来」を考察する学問である。宇宙開発には自然科学だけでなく人文科学も必要である。JAXA 宇宙科学研究所の定義では宇宙科学とは宇宙理学と宇宙工学を統合したものと定義している。

JAXA 宇宙科学研究所では月や火星、さらにはそれより遠い天体への探査が進められている。月探査機「かぐや」の月探査、小惑星探査機「はやぶさ 2」の小惑星探査、火星圏探査機「MMX」等、近年は宇宙開発・探査に拍車がかかっている。

1970 年代以降 21 世紀まで月面着陸は行われなかったが、21 世紀には何度かの着陸が試みられている。その裏では多くの失敗もあり、近年では 2023 年日本の iSpace 社が初の民間企業としての着陸をあと一歩のところまで逃してしまった。今後は米国の民間企業や各国の宇宙機関などが月面着陸を目指す時代になるであろう。

近年月の極付近に水が検知された。NASA の計画するアルテミス計画ではこの極付近に着陸することが発表されている。最近の NASA の月周回衛星「LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)」のデータから月の極付近以外にも水が分布する可能性が示唆された。また、日本の月探査機「かぐや」は月面に縦穴を発見し、JAXA はその中で暮らす計画を提案している。ここではピンポイント着陸を実現させた SLIM の技術利用が考えられる。

火星では NASA のパーシビアランスという探査機が活躍している。これはかつて湖であったと考えられているクレーターに流れ込む河川の三角州を探査し、古代火星での生命痕跡の発見を試みている。そのほかにも JAXA の「MMX (Martian Moons eXploration)」という計画では火星の生命痕跡探索として火星の衛星からのサンプルリターンが考えられている。

[宇宙生命科学]

生命は地球に適応しているため、地球環境に大きく依存していることになる。宇宙生命科学はそうした生命が地球という枠を超えた普遍性を持つかどうかを検証する学問である。宇宙生命科学の中には多数の分野が含まれている。動物の重力生物学では微小重力下での生命現象の変化を調べる。細胞分化・増殖や生殖行動、発生についてはおおむね正常に働くが、ゾウリムシの増殖が増幅される、ドームの形成がされにくいなど細かな変化が見られる。放射線生物学では p53 遺伝子の発現増加によって遺伝子の修復能

力が増大することが分かっている。宇宙生物学は生命の起源を生物学、宇宙学の両側面から探る学問である。

人間は環境、エネルギー等、様々な面で植物に頼って生きている。独立栄養であるために固着生活をすする植物は外界の刺激に対して高い適応能力を有する。その例として重力屈性があげられる。植物は重力による刺激を根冠にあるデンプン体の沈み込みで受容し、その刺激を変換・伝達することで応答している。地球環境では、重力は方向、強度ともに安定した刺激であるため、変更すると地球環境では見られない変化が観察できる。こうした重力を変更する実験を宇宙環境に行くことなく実現するために、クリノスタットという器具が利用される。この器具は試料を三次元的に回転させることで重力の方向性を相殺させる。この器具を用いてトウモロコシの生え方を実験すると、茎は自発的に一定の方向に曲がり（自発的屈曲）、根はランダムに生えることが分かった。

宇宙空間では植物への間接的な影響も考えられる。重力がないので対流が起こらず温度が伝わりにくいことに加え、紫外線や放射線の影響で DNA が損傷を受ける。この影響は紫外線の方が大きい。宇宙での植物栽培には二つのアプローチがある。一つ目は生物科学的アプローチで、進化や多様性、生物間相互作用に基づいた考え方である。二つ目は農学的アプローチで、植物工学や作物学、栄養学、食品学に基づいた考え方である。

[宇宙木材工学]（参考資料 5-3）

日本では過剰伐採による森林の減少がいまだに騒がれている。しかし国の拡大造林計画や燃料革命・肥料革命によって今では森林は量的には回復傾向にある。しかしながら里山、人工林、自然林のすべてが質的に荒廃している。そのため森林資源の適切な活用・管理が必要だ。日本は高温多湿で樹木の生長に適しているので、木という資源を進んで用いるべきである。

植物は陸上に進出してから、水を体中に運ぶ維管束ができて以来、光を求めてより高くなっていった。その後アルカエオプテリスの登場以来、樹皮を持つ樹木が登場した。樹木はリグニンを持ち当時の微生物はリグニンを分解できなかったのがこの時代に現代の石炭の元が大量にできた。木材の最小構造であるマイクロフィブリルは鋼鉄の 10 倍の強度を持つ。また、細胞壁のヘリカルワインディング構造は炭素複合材料に類似しており非常に強固である。

木材は古くから材料として使われてきた。20 世紀初期までは戦闘機の機体は木製であった。木材の利点は重さの割に強度が強いこと、重さの割に変形しにくいこと、工作が簡単であること等があげられるが、欠点もある。方向や位置によって強度にむらがあること、寿命が金属に比べて短いこと等がある。こうした利点、欠点を鑑みて、世界初の木造人工衛星 LignoSat や NASA の宇宙でのコロニーの予想図にも木材が組み込まれている。

宇宙環境で考えられる木材への影響は主に 3 つある。1 つ目は高真空での影響である。水分を抜いた木材で真空中に暴露する実験を行うと、ヤング率は上がることが分かっている。2 つ目は温度環境の影響である。宇宙では温度が地球環境ほど安定しておらず、100 度ほどの幅がある。この幅を取って木材のヤング率を測るとヤング率は安定しており、木材が温度変化に強いことがわかる。3 つ目は劣化による影響である。劣化要因として考えられるものは真空紫外線、原子状酸素、宇宙放射線の 3 つが考えられるがどれも宇宙に木造人工衛星を飛ばすのには問題のない範囲の影響であることが分かった。

木材で人工衛星の特徴は、再生産可能である、加工が容易で電磁波を通す、大気圏再突入時にアルミナ粒子を飛ばさない、などがあげられる。こうした特徴によって衛星コンステレーションの実現、スペースデブリや成層圏でのエアロゾルの削減、宇宙での資源利用が可能となる。

[宇宙霊長類学]

比較認知科学とはほかの動物との比較の中で「ヒトらしさ」を追求する学問である。この中で化石には残らない認知の進化を知る。ここでの「ヒト」は生物学的な形質として人間をさしたものであり、文化的な側面をさした「人」とは異なる。こうしたヒトの形質に対して現代の変化はあまりにも早く、適応できていない部分も多くある。こうした変化は宇宙進出も例外ではなく、宇宙に行くうえでの「ヒトらしさ」を比較認知科学から

考える必要がある。ヒトにとっての宇宙進出は新しい環境への挑戦である。宇宙環境の体への影響は宇宙医学という形で進展してきたが、心の研究はいまだ少ない。こうした研究には二つの視点がある。つまり、短期での個人への影響と長期での遺伝的な影響である。

比較認知科学は心への科学的なアプローチである。ここでの心とは、Input に対して Output を生み出す際の知覚や記憶、認知を用いた営みである。心の活動は行動として観測される。人間は知覚する中で符号化して負荷を弱めている。また重力や光といった環境に対する認知のスタイルも確立されている。こうした認知のスタイルは進化の産物である。

人ならではの認知機能は社会生活がもたらしたものである。バロン＝コーエンは認知の過程をこう考えた。まず意図や視線を検出して、注意を共有するためのメカニズムが作動する。その後「心の理論」のためのメカニズムが作動する、というものだ。支援を感知する段階に関して、チンパンジーの強制選択型選好注視法を用いた実験から考察するとチンパンジーは見られていることに気が付くことがわかる。注意を共有するメカニズムに関しては、他者の視線を追従するかどうか調べると、人間は他種の視線を追うがチンパンジーは自種の視線のみ追うことが分かった。「心の理論」のメカニズムに関して、チンパンジーにサリー・アン課題を課すと失敗することから共感する力が弱いことがわかる。チンパンジーの赤ちゃんに対する視線追従の可能性を確認する実験では、視野内での追従は1歳前後で発達するのに対し、視野外の追従は2歳以降に発達することが分かった。視野外での追従は人間に比べてはるかに発達が遅い。これは単なる発達速度の差ではなく、チンパンジーの三項関係が欠如していることで説明される。言い換えればヒトは三項関係に伴った他社視点取得に秀でている。

[宇宙法]

国際法は条約と慣習法の二種類があるが、宇宙開発は比較的新しい営みであるため条約として整備されてきた。国連総会の中で宇宙に関連するのは第1および第4委員会である。第四委員会に関連する総会補助機関のCOPUOS（宇宙空間平和利用委員会）は1958年に暫定委員会の形で設置されたが、1959年に常設化された。この機関はコンセンサス方式をとっているために一国でも反対すれば可決されない。COPUOSのメンバー国は年々増加しており、現在は104か国である。コンセンサス方式から条約を作ることがほぼ不可能となっていることが宇宙法の特徴である。

宇宙はすべての国のために利用されるべきである、という宇宙条約の1条には二通りの解釈がある。先進国は、他国を妨害しなければ開発は自由と解釈し、途上国はすべての国が開発に参加すべきだと主張している。宇宙条約2条では天体は国家によって取得できないと書かれている。ここで二つの疑問が生まれる。一つ目に私人による取得は可能であるかということである。これは、国が権利を与えなければ取得という行為はできないために、私人による取得はできないと結論付けられている。二つ目に資源の取得の可能性についてである。宇宙条約では明確な記載がなく、月協定では賦存状態の資源については、国家にも私人にも明確に禁止されている。宇宙資源の所有権獲得についての問題は深海底の資源の所有のための手続を先例としてとらえることが有用である。

天体の軍事利用は禁じられているが、軍用機を平和転用した宇宙機は利用可能である。天体間の宇宙空間では大量破壊兵器配置のみが禁止されており、非侵略的な軍事利用は可能である。現在宇宙飛行士は強い保護を受けているが、一般人が宇宙に行くようになればこうした制度は維持することができないであろう。国家は、宇宙空間におけるすべての自国の活動の責任を負わなければならない、それは国家機関のみならず私人に対しても同様である。これは宇宙条約のみがもつ特色であり、通常は、国家は私人の活動に国際的責任を有することはない。宇宙活動が生じる損害に賠償責任を負うのは「打上げ国」という特別の種類の国である。「打上げ国」には打上げを行う国、打ち上げを委託する国、打ち上げられた領域国、打ち上げ施設の保有国の4種類に分けることができる。こうした打上げ国の中の1国が国内と国連に登録をすることで登録国が宇宙物体に管轄権を保有することができる。

[宇宙医学]

宇宙医学は極限環境医学の一分野であり、通常の臨床医学とは異なり、健康な人を対象としている。航空環境における身体的・心理的影響を研究する分野を航空医学といい、パイロットの数が多く、有人宇宙活動も早くから行われたアメリカではこの分野が長い歴史を持つ。

宇宙から帰還した人間の心循環系への影響は体液シフトと呼ばれる現象である。この現象は微小重力下に適応した血液が地球に帰還したことにより重力に引っ張られ、起立耐性が低下してしまう。この体液シフトにより心肥大や脳の変形等、様々な問題が引き起こされる。有人ミッションに伴ってかかる心的ストレスは隔離、社会、危険の3つに分けて研究されている。宇宙飛行士はこうしたストレスへの耐性や高い専門性を問われて選抜される。宇宙飛行士は軌道上滞在中に週一医師とテレビ電話をし、二週間に一回心理学や精神医学の専門家と面談を行う。こうしたストレスは第3・4半期が重要な期間であると考えられている。宇宙空間での影響に対策を講じるため、飛行前に打ち上げ1年前から体カトレーニングが開始される。さらに飛行中でも週6回2.5時間の頻度で運動を行っている。飛行後も地球の重力下での生活復帰を目指したリハビリが行われる。

これまで人間を含めた多くの生物に対して宇宙活動に関する実験が行われてきた。微小重力を疑似的に作る実験はパラボリックフライトや落下等実験があげられる。中でもベッドレスト実験では心循環系への微小重力環境の影響をうまくみられた。人間以外の実験も行われている。鶏の卵は、生まれてすぐのものを宇宙にもっていても孵化しなかったが、地球で生まれて少し置いたものは宇宙でも孵化した。これは微小重力下では胚が殻につかずに呼吸ができないことが原因である。アフリカツメガエルの胚も微小重力下では卵割に異常が生じ、生まれた子の目や頭の大きさが異なっていた。

今後国家ではなく企業の宇宙開発が活発化していく。火星移住計画や民間人の宇宙滞在が進行している。将来的には宇宙医学は宇宙飛行士だけのものではなく一般の方にも身近な医学にならなければならない。宇宙での長期滞在には様々な問題が考えられるが、中でも最も大きいものは宇宙放射線である。遺伝子を改変して体制をつける方法もあるが、倫理的観点から十分考慮する必要がある。

[宇宙人類学]

人類社会には3つの転換期があった。1度目は旧人類の「出アフリカ」であり、社会や文化の多様性が生まれた。二度目は農業革命であり、定住コミュニティや都市が生まれ、このころから「環境を変える」という考え方が生まれた。三度目は産業革命であり、様々な面から近代化が進んだ。

人間はチンパンジーと最も近縁な霊長類である。その中でも人間は言語や道具、火を用いる。学名である「ホモ・サピエンス」は「賢い人間」という意味であり、その特徴から様々な呼び方がある。なかでも「ホモ・モビリタス」は「動く人間」という意味であり、広い地域を動き回る人間の特徴を表す。このように意味もなく歩き回る性質はいまだ説明されていない。人間は文化を作ることによって分布域を大きく広げてきた。文化を宇宙まで広げ、宇宙に進出することは人類にどのような影響をもたらすのであろうか。環境に応じて文化的な適応を繰り返してきた人類は、コミュニケーション能力を大きく発達させてきた。一方で農業革命以前は小規模な集団を形成してきたが、農業革命より後、社会は多様化・複雑化してきた。ここで、人類学には二つの意味での「文化」があり「CULTURE」は人間全体の特徴としての文化であり、「culture」は個別の社会にあるローカルな文化である。

宇宙にコミュニティを作る場合、既存の生活空間をそのまま移植し、再現することは可能であろうか。「コミュニティ」には各国のイメージにずれがあり、再現することは難しい。150人での長期的な発展を考えると、コミュニティの独自の形態の形成を考えることが必要だ。コミュニティの形成を考えるにあたり、すべてに目的や意味を持たせる「目的主義」という考え方もあるが、設計外に対応できる余白を考えることも必要である。目的が無くなった後でもコミュニティを存続するためにもすべてを計画的に行うというのは難しい。

科学と技術は異なり、技術は目的ありきで発展していくものだ。近代以降環境を変える「技術」革新が起こった。天体全体の改変は不可能であるが、一部を変える技術も生まれてきた。

[宇宙居住学]

JAXA は月で SLIM のピンポイント着地や LUPEX の極地探査など、様々な探査が実施、計画している。米国は 2018 年に Gateway 計画を発表し、本格的に有人拠点を構築する計画が進んでいる。一方で火星への探査の計画も進んでおり、2026 年には MMX という計画で打ち上げが行われる予定である。

月はレゴリスと呼ばれる砂に覆われており、その厚さもさまざまである。また、月表面はプラズマの影響を受けており、そのうち 8 割は太陽風中、2 割は地球磁気圏内にあり、複雑な構成である。こうした環境での開発を考えるにあたって、従来の問題だけでなく、月面ならではの問題を考える必要がある。例えば、レゴリスは機器の隙間に付着しやすいので、メンテナンスでの問題が出てくる。また、開発を行う上での目標はその環境と現在の技術から逆算される。月は 1 年程度が被ばく量の限界であることなど、様々な制約が存在する。宇宙での生命維持や環境制御装置を作るうえで大事なことはコンパクト・高効率・故障しにくい、の 3 つであり、特に失敗が命の危機にかかわる宇宙環境では故障しにくいことが何より重要である。

植物栽培についての研究も進んでおり生産性が高く、ストレスに強い植物の改良が進んでいる。アポロの持ち帰ったレゴリスを使ってシロイヌナズナを育てる実験では十分な成長が見られた。また月土壤に似せた多孔質体でのコマツナの育成は、栄養を与えながらも成功している。月面に水は存在するといわれているが、あまりに希薄であれば利用することができない。模擬レゴリスを熔融塩電解することで水を使わず金属や酸素を取り出して、それらを原料にして太陽電池を作ることが出来るというデモンストレーションも発表されている。これは月資源のみを用いるという点で『月から火星へのインフラ整備』という目標に合致している。こうして入手した元素すべてを無駄にしないための利用法を考える必要がある。

建築をする上では、地球からの輸送コストがネックになっている。3D プリンティングは宇宙でしか機能しない新しい材料や部品の作成を実現する可能性があり、現在ムーンビレッジ構想ではこうした 3D プリンティング技術の利用が期待されている。月や火星では縦穴の利用も視野にあり、ここでは放射線の防護が可能である。月やその他の惑星での滞在を目指した国際的な動きは各国であり、そうした環境を模した施設が多く存在する。

(2) 有人宇宙学演習

講義「有人宇宙学」における演習は、2 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)と、カリスト(2 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 4-7 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 4-7 令和 5 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04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25日	有人宇宙学演習 1	「宇宙を知る」についての進捗発表
11月15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

12月20日	有人宇宙学演習 3	「宇宙を考える」についての各班の進捗発表
1月17日	有人宇宙学演習 4	「宇宙を作る」についての各班の進捗・成果発表
1月24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06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。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。

参考資料 5-4・5 に令和 5 年度宇宙ユニットシンポジウムに提出した月班、木星の第 4 衛星カリスト班の作った宇宙社会のポスターを示す。どの班も 150 人の人々が暮らす宇宙社会を非常にユニークな形で創り出した。

(C) 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、毎月的设计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 6 年 4 月 1 日から令和 7 年 3 月 31 日までの半年間に表 4-7 に示すように 11 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いる。

表 4-7 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 44 回 設計会議	令和 6 年 4 月 2 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	23	CDH: Lignosat 最終組立て前動作チェックを完了
第 45 回 設計会議	令和 6 年 5 月 7 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	23	COMM: 外国書簡の返答を全て相手方の主管庁に返送
第 46 回 設計会議	令和 6 年 6 月 11 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	37	EPS: DCDC コンバータ逆流防止機能チェック
第 47 回 設計会議	令和 6 年 7 月 9 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	32	MISSION: 磁気トルカ性能試験の実施
第 48 回 設計会議	令和 6 年 9 月 3 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	24	STRUC: 木造人工衛星 2 号機の開発フローチャートの作成
第 49 回 設計会議	令和 6 年 10 月 8 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	35	CDH: LignoSat 運用手順書の作成

第 50 回 設計会議	令和 6 年 11 月 12 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	32	COMM:SDR 受信機の試験運用 の実施
第 51 回 設計会議	令和 6 年 12 月 10 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	31	EPS:LignoSat 運用手順書の作 成
第 52 回 設計会議	令和 7 年 1 月 7 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	30	MISSION:QSL カードの作成
第 53 回 設計会議	令和 7 年 2 月 18 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	25	STRUC:木造 人工衛星 2 号機 の部品の発注
第 54 回 設計会議	令和 7 年 3 月 11 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	27	CDH: ResetPIC の機能試験を 実施

(D) 樹木育成ゼミ

樹木育成学生チームの学生に対して、樹木と森林に関する知識の向上を図るために以下活動を実施した。

- 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、2024年6月29日に京都府立植物園にて樹木実習を行った。内容は樹木の枝の成長パターン、年輪形成、日本と京都の植生分布、木材腐朽菌の進化とそれに関連する森林生態系における木材腐朽菌による樹木遺体の分解と物質循環など。参加者5名。
- 2024年7月1日と8月6日に、「植物生理生態学入門」と「光合成」について講義形式で学習した。樹木育成実験では上記の知識が求められる。
- 2024年10月17日に「SDG's」について講義形式で学習した。火星や月で人類が生活する際にそこで利用できる資源が乏しい。この学習では、まず地球で展開されている「SDG's」活動の原点が森林管理にあることを学んだ。そして、再生可能な生物資源である樹木そして森林育成が火星や月においても意義深いことを学んだ。

さらに実験データの解析を考察について検討会を実施した（2025年1月23日、2025年3月11日）。

(E) 第3宇宙木材利用シンポジウム

2025年3月26日(水)に第3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3回宇宙木材利用シンポジウムのプログラムを参考資料7-1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(参考資料7-2・3・4・5・6)。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(参考資料7-7)、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(参考資料7-8)。さらに岡山大学惑星

物質研究所の中村栄三教授により、地球惑星物質総合解析システム（CASTEM）を用いた木材物性解析の分析結果が発表された（参考資料 7-9）。

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。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、実験の成果と今後の課題について活発に議論された。セッション B では、住友林業の井上純大氏及び本学生存圏研究所の馬場啓一助教から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、3D のクリノスタットを用いて得られた 3 年間の研究結果について報告がなされた。

第 3 部「宇宙木材利用の展望」では、宇宙木材産業の展望に関して活発な議論が行われた（図 4-15）。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住友林業の中嶋一郎氏と苅谷健司氏、さらに中村栄三名誉教授、高部圭司名誉教授、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 4-15 第 3 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

(F) Spaceology NewsLetter

- 2024 年 4 月号: 村田功二（京都大学農学研究科）（参考資料 8-1）
宇宙暴露試験（ExBAS）と地上試験
- 2024 年 5 月号: 池田武文（京都府立大学生命環境科学研究科）（参考資料 8-2）
宇宙における樹木の育成
- 2024 年 6 月号: 加藤千晶（京都大学工学研究科）（参考資料 8-3）
超小型木造人工衛星「LignoSat」の電源系開発
- 2024 年 7 月号: 遠藤早緒里・三本勇樹（京都大学農学研究科）（参考資料 8-4）
低圧下におけるポプラの成長特性
- 2024 年 8 月号: 豊西悟大（京都大学農学部）（参考資料 8-5）
超小型木造人工衛星 LignoSat のミッション系開発
- 2024 年 9 月号: 三浦晴（京都大学工学部）（参考資料 8-6）
超小型木造人工衛星「LignoSat」の構造系開発
- 2024 年 10 月号: 豊西悟大（京都大学農学部）（参考資料 8-7）
LignoSat を搭載するロケット「SpX-31」について
- 2024 年 11 月号: 池田武文（京都府立大学生命環境科学研究科）（参考資料 8-8）
森林でパンデミック

- 2024 年 12 月号:河島航（京都大学工学部）（参考資料 8-9）
超小型木造人工衛星 LignoSat のプログラムについて
- 2025 年 1 月号: 池田武文（京都府立大学生命環境科学研究科）（参考資料 8-10）
フェノロジー（生物季節）
- 2025 年 2 月号:池田武文（京都府立大学生命環境科学研究科）（参考資料 8-11）
フェノロジー（生物季節）
- 2025 年 3 月号:間野隆寛（京都大学医学部）（参考資料 8-12）
超小型木造人工衛星 LignoSat の通信システムと木造筐体へのアンテナ内蔵の試み

(G) 学会・講演活動

＜第 91 回紙パルプ研究発表会＞

- 宇宙での木材利用-宇宙空間が木材に与える影響-、村田功二、2024 年 6 月 25 日、東京都文京区開催（参考資料 6-1）

蒸発した宇宙機の金属は、大気中で冷やされて凝集し、非常に小さな金属の粒子となり、成層圏を長期間漂っていると予測される。

NOAA（アメリカ海洋大気庁）の研究チームは、成層圏の硫酸エアロゾルに含まれる金属粒子の約 10% が大気圏で燃え尽きた宇宙機由来である可能性が高いことを明らかにした。成層圏や地表への影響はまだ不明であるが、今後数十年の間にロケットや人工衛星の打ち上げ数は増加する見込みであり、硫酸粒子に含まれる宇宙機由来の金属粒子の比率は、今後 50%にまで増加すると見られている。

＜第 68 回宇宙科学技術連合講演会＞

- 超小型木造人工衛星 LignoSat のプログラムについて、河島航他、2024 年 11 月 7 日、兵庫県姫路市開催（参考資料 6-2）

The Kyoto University has been designing and developing the “LignoSat” nano-satellite to explore the possibility of wood utilization in space. In this presentation, the current status of the mission data processing algorithm and flowchart will be reported. In addition, the functional tests of the flight model will be reported and discussed.

- 超小型木造人工衛星 LignoSat の通信システムと木造筐体へのアンテナ内蔵の試み、野間隆寛他、2024 年 11 月 7 日、兵庫県姫路市開催（参考資料 6-3）

Kyoto University is developing the world’s first wooden CubeSat, LignoSat, to explore the potential applications of wood in space. This paper presents an evaluation of its communication system, including anechoic chamber tests as well as a mission to communicate with amateur radio operators around the world. Furthermore, it discusses attempts to embed a patch antenna within the wooden structure for the wooden satellite #2. This attempt will contribute to creating an innovative system by eliminating vulnerabilities in antenna deployment mechanism enhancing the robustness of satellite operations.

- 超小型木造人工衛星「LignoSat」の電力システム、鳥谷陽樹他、2024 年 11 月 7 日、兵庫県姫路市開催（参考資料 6-4）

Kyoto University has developed the world’s first wooden satellite called “LignoSat”. This satellite uses wood for its external structure, and the physical properties of wood in space will be investigated. In the present paper, the electrical power system of LignoSat is presented. In particular, the adhesion method of solar panels unique to wooden satellites and the power budget are discussed.

- 超小型木造人工衛星の構造、木村拓人他、2024 年 11 月 7 日、兵庫県姫路市開催（参考資料 6-5）

Kyoto University has developed LignoSat, the world’s first cube-satellite made of wood, to explore the potential applications of wood in space. The first wooden satellite, LignoSat (1U), is set to launch and begin operations in 2024. The second, larger wooden satellite (2U) is already in development. The primary feature of these satellites is their unique structural design, which allows us to use wood in the challenging conditions of space. This paper presents the structural design of LignoSat, such as the

results of the strength verification tests, and discusses the future prospects of wooden satellites, with a focus on the operation of LignoSat and the design considerations for the second wooden satellite.

- **世界初の木造人工衛星 LignoSat の開発における教育活動、辻廣智子他、2024 年 11 月 7 日、兵庫県姫路市開催（参考資料 6-6）**

A student team at Kyoto University's Space Wood Laboratory developed the world's first wooden satellite, LignoSat. The team was divided into five teams: CDH, COMM, EPS, MISSION, and STRUC. They spent about four years developing the satellite. Each team consisted of five to six students, and they were responsible for the design, assembly, and ground testing of the satellite. Through their experience of developing the satellite, the students not only demonstrated their teamwork but also acquired perseverance and creativity.

- **宇宙木材工学、村田功二、2023 年 11 月 2 日、京都府京都市開催（参考資料 9-6）**

樹木は約4億年前に地球上に現れて大森林を形成した。大きな樹体を形成するためにセルロース結晶とリグニンの複合構造を獲得した。この構造により軽くて強い材料となり、かつては航空機の材料として利用された。この特徴は人工衛星にも適していると考えられたが、宇宙環境で木材にどのような変化が起こるか分からなかった。キューブサットが投入される地球低軌道(LEO)はほぼ真空であり、強い紫外線と原子酸素（AO）の影響がある。また強い宇宙放射線にもさらされる。そこで 2022 年に木材の宇宙曝露実験を実施した。その結果、予想以上に劣化は確認できず、宇宙で木材が利用できる可能性が確認された。

(H) 広報活動（新聞記事）

- **共同通信 2024 年 5 月 28 日：世界初の木造人工衛星(LignoSat)完成、JAXA へ引き渡し宇宙での運用へ（参考資料 9-1）**
- **京都新聞 2024 年 5 月 29 日：世界初 木造人工衛星が完成（参考資料 9-2）**
- **NHK 2024 年 10 月 30 日：みみより解説 世界初 木造人工衛星打ち上げへ（参考資料 9-3）**
- **AFP BB News 2024 年 11 月 5 日：京大、世界初の木造人工衛星「LignoSat」打ち上げ（参考資料 9-4）**
- **サイエンス 2024 年 11 月 8 日：京都大学が世界初の木造人工衛星の打ち上げに成功（参考資料 9-5）**
- **住友林業 2024 年 12 月 8 日：世界初の“木造”人工衛星と阪神・淡路大震災級に耐える木造建築が「ウッドデザイン賞 2024」奨励賞 ～木造人工衛星 LignoSat／10 階建木造実大振動台実験プロジェクト～（参考資料 9-6）**
- **読売新聞 2024 年 12 月 10 日：「世界初の木造人工衛星」宇宙へ放出…地上と通信 できず（参考資料 9-7）**
- **MBS NEWS 2024 年 12 月 21 日：『木造』の人工衛星が宇宙へ！京都大学などのチームが世界初の挑戦（参考資料 9-8）**
- **UchuBiz 2025 年 1 月 14 日：日本生まれの世界初「木造衛星」を NASA が評価-「従来の衛星に代わる、より持続可能な選択肢」（参考資料 9-9）**
- **京都新聞 2025 年 2 月 25 日：世界初の木造人工衛星を再び宇宙へ（参考資料 9-10）**

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、計画通り次の 4 項目を実践した：

① 木造人工衛星の運用と開発

- a. 木造人工衛星 1 号機の安全審査を完了すると同時に打上げ・運用を行う。
- b. 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、エンジニアリングモデルを製作する。

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）の木材試料を使い、宇宙空間における高真空・原子状酸素による木材物性のミクロ的変化を継続して調べる。
- b. 地上における木材の真空暴露実験を継続実施する。

③ 樹木育成実験の実施

- a. ポプラ（*Populus alba*）を使用し低圧環境下での育成実験を実施し、育成データの定量化を行う。

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. 宇宙における樹木・木材利用について学ぶことを目的とした専門教育プログラム「有人宇宙学実習」と「有人宇宙学」（講義）を実施する。
- 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、木造人工衛星 1 号機 LignoSat の安全審査を JAXA/NASA と実施完了した。世界で初めての木造人工衛星を JAXA に 2024 年 6 月に納入し、11 月に SpaceX 社の SpX-31 ロケットで国際宇宙ステーションに向けて打ち上げられた。LignoSat は 2024 年 12 月 9 日に宇宙空間に放出された。世界で初めての木造人工衛星の誕生である。以後 116 日間渡って LignoSat は地球を周回し、木造人工衛星が宇宙空間でも壊れずに存在できることを証明した。同時に木造人工衛星 2 号機エンジニアリングモデルを製作・組立てを行った。木造人工衛星 2 号機の振動試験を実施し、木造人工衛星 2 号機の構造的剛性を確認した。さらに、将来木造人工衛星による地球低軌道コンステレーションが 20240 年に実現すると仮定すると、アルミニウム製人工衛星と比較して木造人工衛星は軽量化することが可能になり、3,840t/年の炭酸ガスを削減できることを明らかにした。

②では、約 9 ヶ月間の宇宙暴露実験（ExBAS）を完了した木材試験体を岡山大学惑星物質研究所でミクロ分析を実施した。ExBAS 試料は表面が汚染物質で薄く覆われていたために、汚染物質が何であるかをまず特定し、汚染物質の影響が出ないスペクトルを使った分析を行った。木材試料の表面から 50 ミクロン単位で試料を切り取る方法を確認し、深さ方向に紫外線がどれだけ浸透するかを調べた。その結果紫外線は表面から 100 ミクロン程度までしか浸透しないことを明らかにした。現在、紫外線によって新しく作られた物質の特定を行っている。

③では、低圧下樹木育成実験システム 4 基使って、効率良く樹木育成実験を実施することができた。樹木の成長パラメータとして LMA（葉の乾燥重量/葉面積）や T/R 比（地上乾燥重量/地下乾燥重量）及び同化部/非同化部の比を生育環境圧力のパラメータで明示することが可能になった。雰囲気圧が 0.1 気圧までは、樹木の基本的成長特性は大気圧の時の成長特性と大きく変わらないことが明らかになった。

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。京都大学の履修科目として有人宇宙学実習と有人宇宙学講義を行った。さらに昨年に引き続き木材の宇宙利用に焦点を当てた第 3 回宇宙木材利用シンポジウムの開催は、宇宙木材産業の構築に向けて大きな前進となったと自負している。

「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
木造人工衛星 1 号機 LignoSat 運用実績表

日付	有効Rev回数	送信コマンド	運用時の 高度(1) (km)	運用時の 高度(2) (km)	特記事項
2024/12/9	0	N/A	N/A	N/A	ISSよりLignoSat放出成功 JAXAより軌道6要素通知
2024/12/10	7	No Command	N/A	N/A	
2024/12/11	7	No Command	N/A	N/A	
2024/12/12	7	No Command	N/A	N/A	
2024/12/13	7	Ant展開コマンド送信	N/A	N/A	
2024/12/14	7	No Command	N/A	N/A	
2024/12/15	7	No Command	421.3	421.1	衛星軌道高度記載開始
2024/12/16	7	No Command	420.2	419.1	和歌山大学アンテナ
2024/12/17	7	No Command	419.6	404	放出時NASA動画入手
2024/12/18	3	No Command	418.6	418.5	
2024/12/19	2	Ant展開コマンド各Revで10回 送信	417.9	402.6	
2024/12/20	2	Ant展開コマンド各Revで10回 送信	417.0	N/A	JAXAより放出時軌道要素 情報 (LVLH座標系) 入 手 衛星放出速度は 1.482 m/s OBJECT XDのTLEを使用
2024/12/21	2	Ant展開コマンド第2パスで8 回送信	416.0	401.7	
2024/12/22	3	Ant展開コマンド 第1パスで12回送信 第2パスで7回送信 第3パスで9回送信	415.2	400.1	
2024/12/23	1	Ant展開コマンド第1パスで10 回送信	414.1	N/A	関西大学山縣先生より LignoSatは1998-067XC と判明情報入手
2024/12/24	2	Ant展開コマンド 第1パスで8回送信 第2パスで10回送信	412.9	412.8	
2024/12/25	3	各パスでHK10パケット降ろ すコマンド送信	412.0	402.2	
2024/12/26	2	Ant展開コマンド 第1パスで11回送信 第2パスでHK10パケット降 ろすコマンド送信	410.7	396.5	
2024/12/27	2	第1パスでHK10パケット降 ろすコマンド 11回送信 第2パスでAnt展開コマンド9 回送信	409.2	N/A	

2024/12/28	3	Ant展開コマンド第1パスで 9回送信 第2パスで11回送信 第3パスで10回送信	408.5	N/A	
2024/12/29	1	第1パスでHK10パケット降 ろすコマンド 9回送信	393.6	N/A	シフトミスで3パス運用で きず
2024/12/30	2	Ant展開コマンド 第2パスで11回送信	393.0	N/A	
2024/12/31	0	運用無し	NA	N/A	運用なし
2025/1/1	0	運用無し	NA	NA	運用なし
2025/1/2	1	Ant展開コマンド 第1パスで9回送信	397.8	N/A	
2025/1/3	1	第1パスでHK10パケット降 ろすコマンド 9回送信	390.1	N/A	
2025/1/4	1	Ant展開コマンド 第1パスで9回送信	389.9	N/A	
2025/1/5	2	Ant展開コマンド 第1パスで11回送信 第2パスで7回送信	397.5	389.1	
2025/1/6	2	第1パスでHK10パケット降 ろすコマンド 7回送信 第2パスで9回送信	395.9	388.8	
2025/1/7	1	コマンド運用なし	388.6	388.2	高度記録のみ実施
2025/1/8	1	第1パスでHK10パケット降 ろすコマンド 10回送信	388.2	N/A	
2025/1/9	2	第1・第2パスでパケット降 ろすコマンド 10回と11回送信	392.6	N/A	第100運用報告 Nova for Windowsの画面 が一時フリーズ
2025/1/10	1	Ant展開コマンド第1パスで10 回送信	388.5	N/A	
2025/1/11	0	運用無し	NA	NA	
2025/1/12	0	運用無し	NA	NA	
2025/1/13	0	運用無し	NA	NA	
2025/1/14	1	第1パスでHK10パケット降 ろすコマンド 10回送信	387.8	N/A	
2025/1/15	1	Ant展開コマンド9回送信	388.3	388.1	
2025/1/16	1	HK10パケット降ろすコマン ド9回送信	388.9	N/A	軌道高度エクセルファイ ル展開
2025/1/17	1	Ant展開コマンド 3回送信	384.7	N/A	
2025/1/18	1	Ant展開コマンド 5回送信	388.4	N/A	
2025/1/19	1	Ant展開コマンド 5回送信	380.5	N/A	

2025/1/20	1	Ant展開コマンド 5回送信	387.9	387.7	
2025/1/21	1	Ant展開コマンド 5回送信	388.2	N/A	
2025/1/22	1	HK10バケット降ろすコマン ド4回送信	381.1	N/A	
2025/1/23	1	Ant展開コマンド 11回送信	387.8	N/A	
2025/1/24	1	Ant展開コマンド 10回送信	388.1	N/A	
2025/1/25	1	HK10バケット降ろすコマン ド11回送信	379.7	N/A	
2025/1/26	1	Ant展開コマンド 9回送信	386.9	N/A	
2025/1/27	1	HK10バケット降ろすコマン ド10回送信	378.5	N/A	
2025/1/28	1	Ant展開コマンド 9回送信	379.1	N/A	
2025/1/29	1	Ant展開コマンド 5回送信	388.6	N/A	
2025/1/30	1	Ant展開コマンド 9回送信	378.0	N/A	
2025/1/31	1	Ant展開コマンド 5回送信	386.0	N/A	
2025/2/1	0	運用無し	NA	NA	
2025/2/2	0	運用無し	NA	NA	
2025/2/3	0	運用無し	NA	NA	
2025/2/4	1	HK10バケット降ろすコマン ド10回送信	377.1	N/A	
2025/2/5	1	Ant展開コマンド 5回送信	383.5	N/A	
2025/2/6	1	HK10バケット降ろすコマン ド9回送信	383.3	N/A	
2025/2/7	1	Ant展開コマンド 11回送信	377.6	NA	
2025/2/8	1	HK10バケット降ろすコマン ド10回送信	380.7	NA	
2025/2/9	1	Ant展開コマンド 8回送信	376.6	NA	
2025/2/10	1	Ant展開コマンド 10回送信	377.8	N/A	
2025/2/11	0	運用無し	NA	N/A	
2025/2/12	1	Ant展開コマンド 10回送信	376.3	N/A	
2025/2/13	0	運用無し	NA	NA	
2025/2/14	1	Ant展開コマンド 5回送信	375.1	NA	
2025/2/15	1	Ant展開コマンド 4回送信	375.2	NA	

2025/2/16	1	HK10バケット降ろすコマンド7回送信	372.6	N/A	
2025/2/17	1	Ant展開コマンド10回送信	373.6	N/A	
2025/2/18	1	HK10バケット降ろすコマンド10回送信	371.2	N/A	
2025/2/19	1	Ant展開コマンド2回送信	371.1	NA	
2025/2/20	1	HK10バケット降ろすコマンド9回送信	368.9	NA	
2025/2/21	1	HK10バケット降ろすコマンド5回送信	367.6	NA	
2025/2/22	1	HK10バケット降ろすコマンド9回送信	365.7	N/A	
2025/2/23	0	Ant展開コマンド11回送信	365.7	N/A	
2025/2/24	1	Ant展開コマンド6回送信	363.6	N/A	
2025/2/25	1	HK10バケット降ろすコマンド7回送信	362.7	NA	
2025/2/26	1	HK10バケット降ろすコマンド8回送信	348.2	NA	千葉工大高度記録入手
2025/2/27	1	Ant展開コマンド9回送信	359.2	NA	
2025/2/28	1	HK10バケット降ろすコマンド10回送信	342.7	N/A	
2025/3/1	1	Ant展開コマンド9回送信	343.1	N/A	
2025/3/2	1	HK10バケット降ろすコマンド10回送信	340.5	N/A	
2025/3/3	1	Ant展開コマンド9回送信	338.4	NA	
2025/3/4	1	再起動コマンド5回	336.6	NA	
2025/3/5	1	HK10バケット降ろすコマンド9回送信	335.4	NA	
2025/3/6	1	Ant展開コマンド10回送信	334.0	N/A	
2025/3/7	1	Ant展開コマンド7回送信	331.7	N/A	
2025/3/8	2	HK10バケット降ろすコマンド10回送信 第2パスでAnt展開コマンド9回送信	331.0	329.2	
2025/3/9	1	HK10バケット降ろすコマンド10回送信	328.1	N/A	
2025/3/10	2	各パスでAnt展開コマンド7回送信	327.5	327.2	
2025/3/11	2	HK10バケット降ろすコマンド7回送信 第2パスでAnt展開コマンド7回送信	327.2	324.5	DENDEN衛星大気圏突入

2025/3/12	2	HK10バケット降ろすコマンド9回送信 第2パスでAnt展開コマンド10回送信	323.5	322.6	
2025/3/13	2	HK10バケット降ろすコマンド9回送信 第2パスでAnt展開コマンド9回送信	322.1	322.1	
2025/3/14	0	運用無し	NA	NA	
2025/3/15	0	運用無し	NA	NA	
2025/3/16	2	HK10バケット降ろすコマンド16回送信 第2パスでAnt展開コマンド18回送信	318.0	315.4	
2025/3/17	2	HK10バケット降ろすコマンド11回送信 第2パスでAnt展開コマンド10回送信	316.0	315.7	
2025/3/18	1	HK10バケット降ろすコマンド10回送信	310.2	N/A	
2025/3/19	1	Ant展開コマンド10回送信	308.3	N/A	
2025/3/20	1	HK10バケット降ろすコマンド10回送信	303.5	N/A	
2025/3/21	2	Ant展開コマンド9回送信 第2パスでHK10バケット降ろすコマンド8回送信	299.2	299.2	
2025/3/22	2	Ant展開コマンド8回送信 HK10バケット降ろすコマンド9回送信	296.7	296.5	
2025/3/23	1	Ant展開コマンド8回送信	290.3	N/A	
2025/3/24	2	HK10バケット降ろすコマンド6回送信 第2パスでAnt展開コマンド7回送信	288.6	285.2	
2025/3/25	1	Ant展開コマンド7回送信	280.8	N/A	
2025/3/26	2	HK10バケット降ろすコマンド7回送信 第2パスでAnt展開コマンド9回送信	274.7	274.7	
2025/3/27	2	各パスでHK10バケット降ろすコマンド9回送信	267.4	266.6	
2025/3/28	0	運用無し	NA	NA	
2025/3/29	2	Ant展開コマンド9回送信 第2パスでHK10バケット降ろすコマンド8回送信	248.7	245.8	
2025/3/30	2	各パスでAnt展開コマンド7回送信	241.6	235.8	
2025/3/31	2	各パスでAnt展開コマンド7回送信	223.2	214.8	

2025/4/1	1	HK10バケット降ろすコマンド7回送信	206.3	N/A	
2025/4/2	1	Ant展開コマンド7回送信	190.8	N/A	YOMOGI衛星大気圏突入
2025/4/3	2	HK10バケット降ろすコマンド 3回送信 第2パスでAnt展開コマンド 5回送信	175.5	171.5	
2025/4/4	1	HK10バケット降ろす コマンド10回送信	155.4	N/A	LignoSat大気圏突入

参考資料 2
木造人工衛星 2 号機 EM 振動試験報告書
2025 年 STRUC 班

1. 試験目的

この文書は 2025 年 3 月 17 日及び 18 日に行われた木造人工衛星 2 号機 EM の振動試験の内容およびその結果をまとめた報告書である。

2. 試験確認項目

本試験の確認項目は以下に示す通りである。

- (1) 主構造に破損が生じないこと
- (2) 衛星の固有振動数が 30Hz 以上であること
- (3) 加振の前後で衛星の固有振動数が変化しないこと
- (4) 衛星に機能不全が生じないこと
- (5) ソーラーパネルに破損が生じないこと
- (6) すべてのボルトにゆるみが生じないこと
- (7) 木造パネルに破壊やヒビが生じないこと

3.1.試験対象部品

本振動試験での対象部品を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 試験対象部品

	部品名	数量
1	木造人工衛星 2 号機	1
1-1	太陽光パネル	4
1-2	トルクマーク	55
1-3	アンテナ機構	1
1-4	木造パネル	10

3.2.加速度測定点

加速度測定点を図 3.2-1 から図 3.2-3 および表 3.2-1 に示す。“Ch.○” はデータ取得のための加速度測定点であり、“Control point ○ (CP○)” は試験機の平均コントロールを取得するための加速度測定点である。

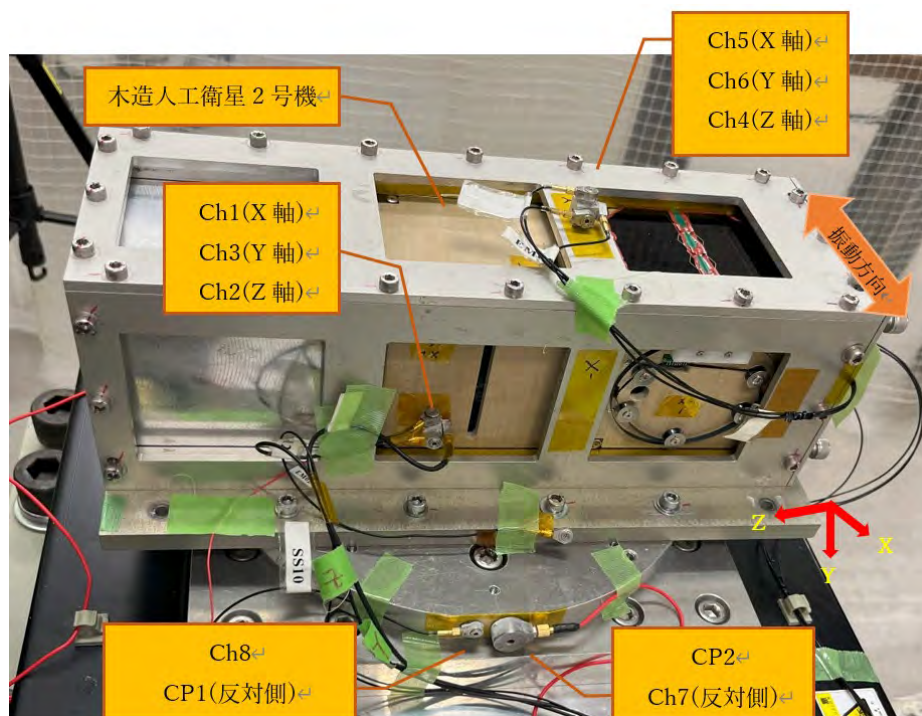


図 3.2-1 加速度測定点 (X 軸)

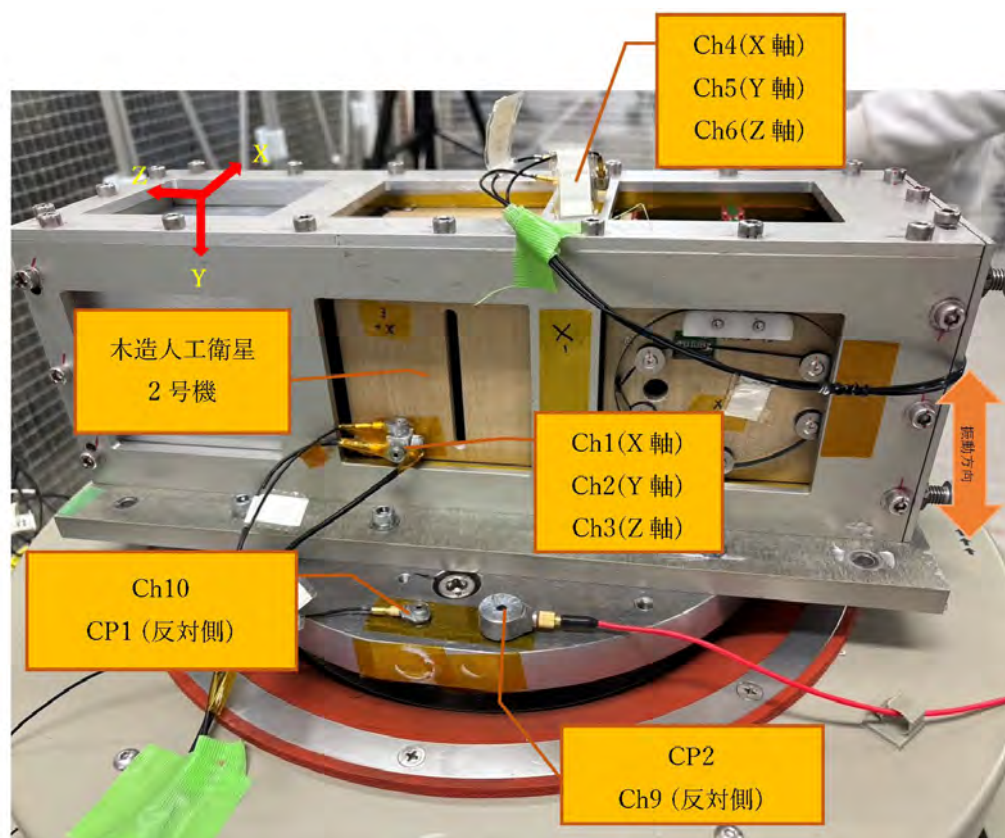


図 3.2-1 加速度測定点 (Y 軸)

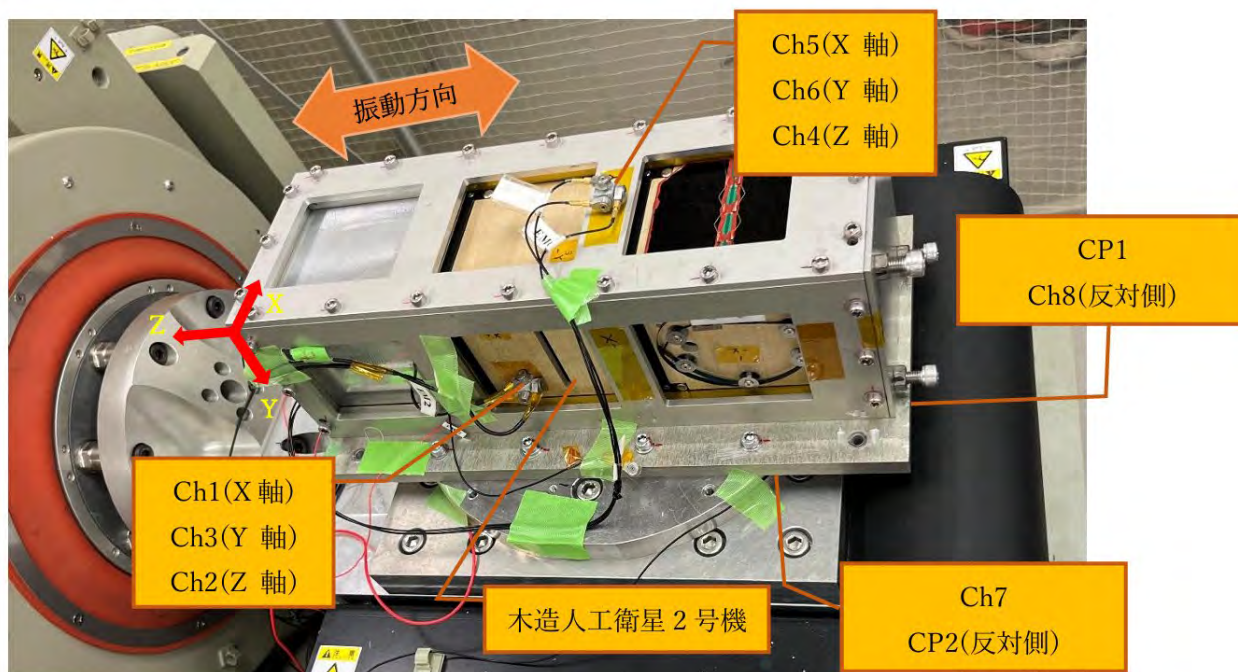


図 3.2-1 加速度測定点 (Z 軸)

表 3.2-1 加速度測定点

測定点	測定軸	加速度センサ	CH	Note
コントロール	1 軸	EM7	CP1	
	1 軸	EM8	CP2	
試験治具	1 軸	EM9	Ch.7	
	1 軸	SS10	Ch.8	
木造人工衛星	X	EM2	Ch.1	
	Y	EM3	Ch.3	
	Z	EM1	Ch.2	
Pod	X	EM4	Ch.5	
	Y	EM5	Ch.6	
	Z	EM6	Ch.4	

3.3. 試験内容

以下の試験を X,Y,Z の各軸それぞれについて行った。

- (1) モーダルサーベイ
- (2) ランダム AT/QT 試験
- (3) サインバースト QT 試験

3.4. 加振レベル

(1) Low level white noise vibration (Modal Survey)

モーダルサーベイの試験環境を表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 モーダルサーベイの試験環境

	周波数 [Hz]	加速度 [Grms]	時間 [sec]
各軸	20~2000	0.5	60

(2) ランダム加振

ランダム AT/QT 振動の試験レベルを表 3.4-2 及び 3.4-3 に示す。この試験レベルは HTV-X、Dragon2、Cygnus の打ち上げ時の環境を模したものである。

表 3.4-2 ランダム AT 加振レベル

周波数 [Hz]	PSD [G^2/Hz]
20	0.025
30	0.025
50	0.02
120	0.031
230	0.031
860	0.0055
1200	0.0055
2000	0.0025
Overall	4.273 Grms
加振時間	60 sec/軸

表 3.4-3 ランダム QT 加振レベル

周波数 [Hz]	PSD [G^2/Hz]
20	0.05
30	0.05
50	0.04
120	0.062
230	0.062
860	0.011
1200	0.011

2000	0.005
Overall	6.043 Grms
加振時間	120 sec/軸

(3) サインバースト

サインバーストの試験レベルを表 3.4-4 に示す。

表 3.4-4 サインバースト試験レベル

	周波数 [Hz]	加速度 [G]	波数
各軸	10~40	11.25	10 以上

(A) 試験条件公差

<ランダム加振>

(e) 加速度 [Grms] : $\pm 1.5\text{dB}$

(f) PSD [G^2/Hz] : $+3.0\text{dB} / -1.0\text{dB}$

(g) 周波数 [Hz] : $\pm 2\%$ 以内あるいは 1 [Hz]

(h) 加振時間 [sec] : $+10\% / -0\%$

(B) 試験過程

試験過程を表 3.6-1 に示す

表 3.6-1 試験過程

	試験内容
試験前	外観検査
Y 軸	試験準備
	モーダルサーベイ
	ランダム AT 加振
	モーダルサーベイ
	ランダム QT 加振
	モーダルサーベイ
	サインバースト
	モーダルサーベイ
X 軸	モーダルサーベイ

	試験内容
試験前	外観検査
	ランダム AT 加振
	モーダルサーベイ
	ランダム QT 加振
	モーダルサーベイ
	サインバースト
	モーダルサーベイ
Z 軸	モーダルサーベイ
	ランダム AT 加振
	モーダルサーベイ
	ランダム QT 加振
	モーダルサーベイ
	サインバースト
	モーダルサーベイ
	モーダルサーベイ
試験後	外観検査

4. 試験結果

試験日時：2025/03/17~18

試験場所：九州工業大学総合研究 1 号棟

4.1 外観検査

振動試験の前後において外観検査を行った。加振前後で衛星に損傷は見られず、太陽光パネルにヒビなども生じなかった。また、全てのボルトに緩みは生じず、試験中の不当なアンテナの展開は生じなかった。試験結果を表 4.1-1 および図 4.1-1 から図 4.1-14 に示す。

表 4.1-1 外観検査結果

	部品名	数量	結果
1	木造人工衛星 2 号機		
1-1	太陽光パネル	4	問題なし
1-2	トルクマーク	96	問題なし
1-3	アンテナ機構	1	問題なし
1-4	木造パネル	10	問題なし

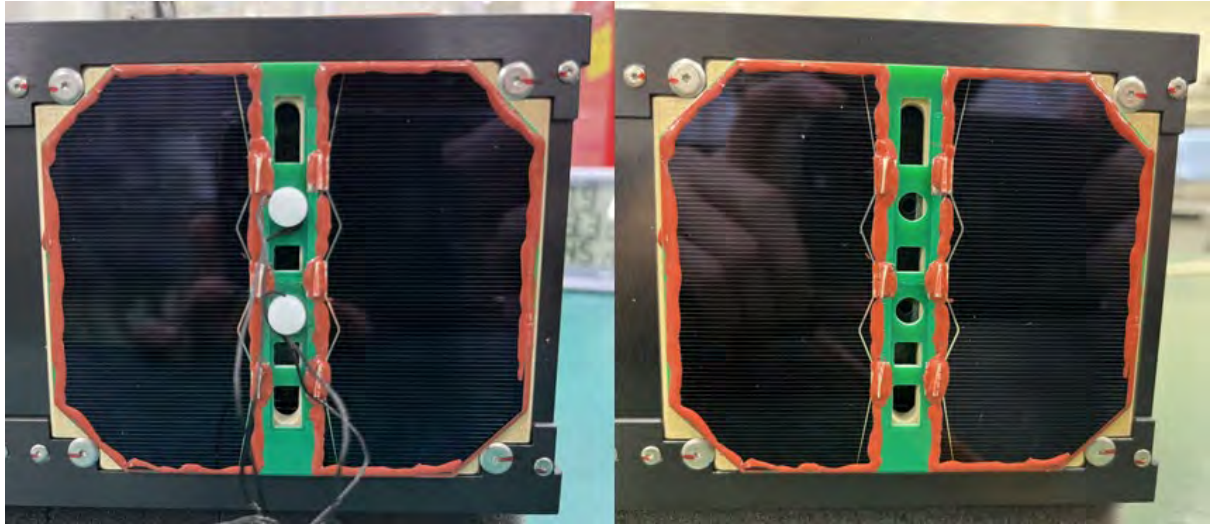


図 4.1-1 -Z 側+X 面 (左：試験前、右：試験後)

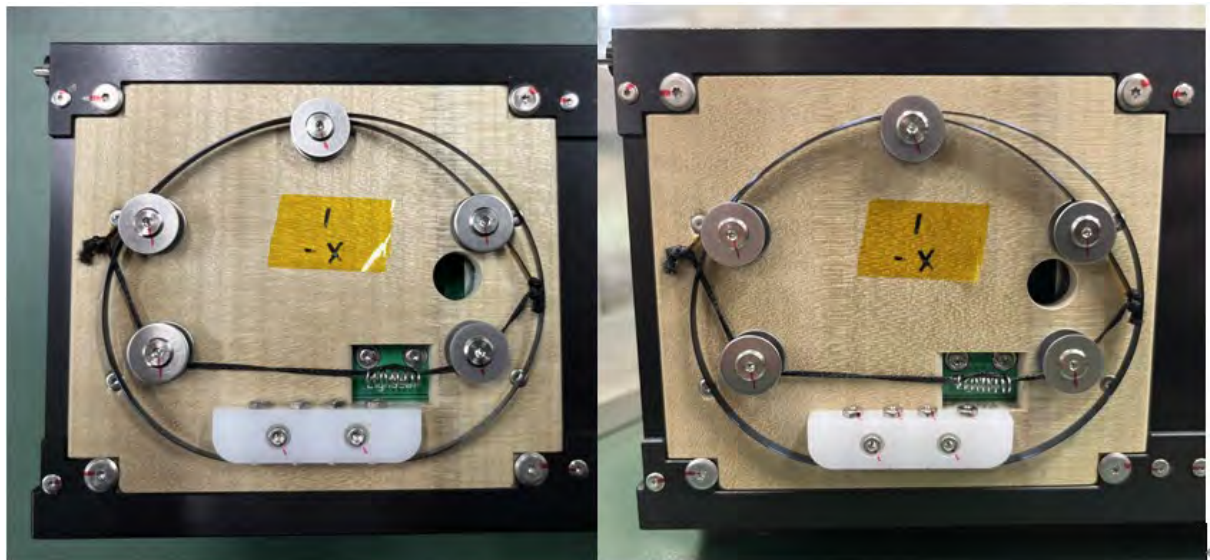


図 4.1-2 -Z 側-X 面 (左：試験前、右：試験後)

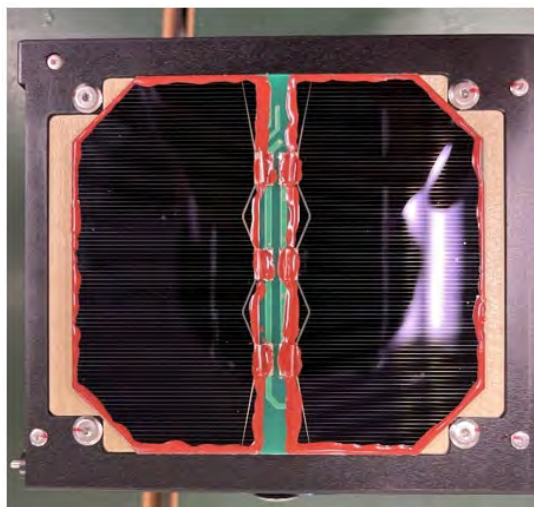


図 4.1-3 -Z 側+Y 面 (試験後)

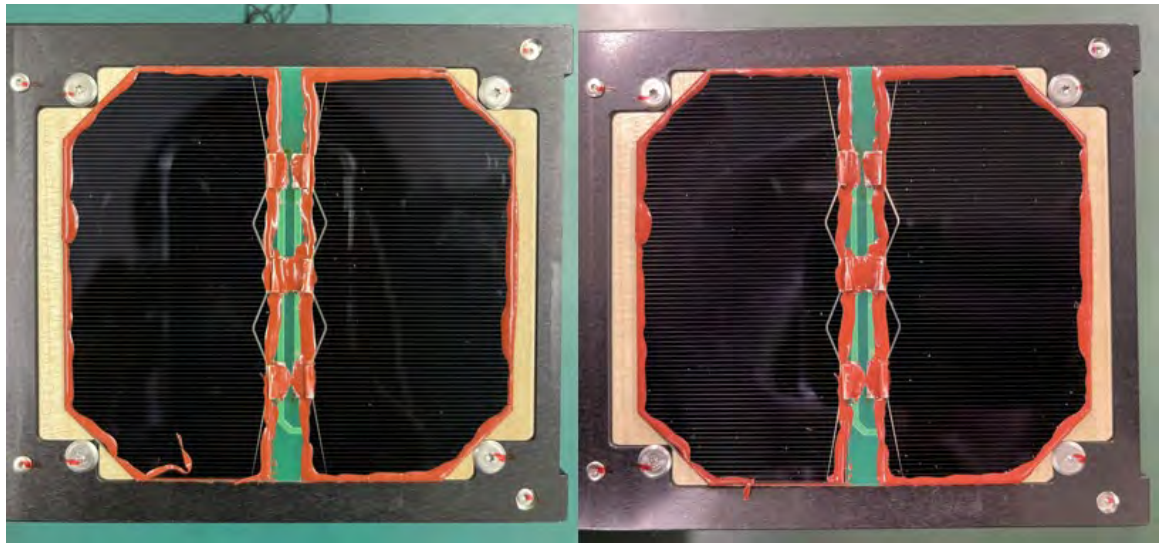


圖 4.1-4 -Z 側-Y 面 (左：試驗前、右：試驗後)

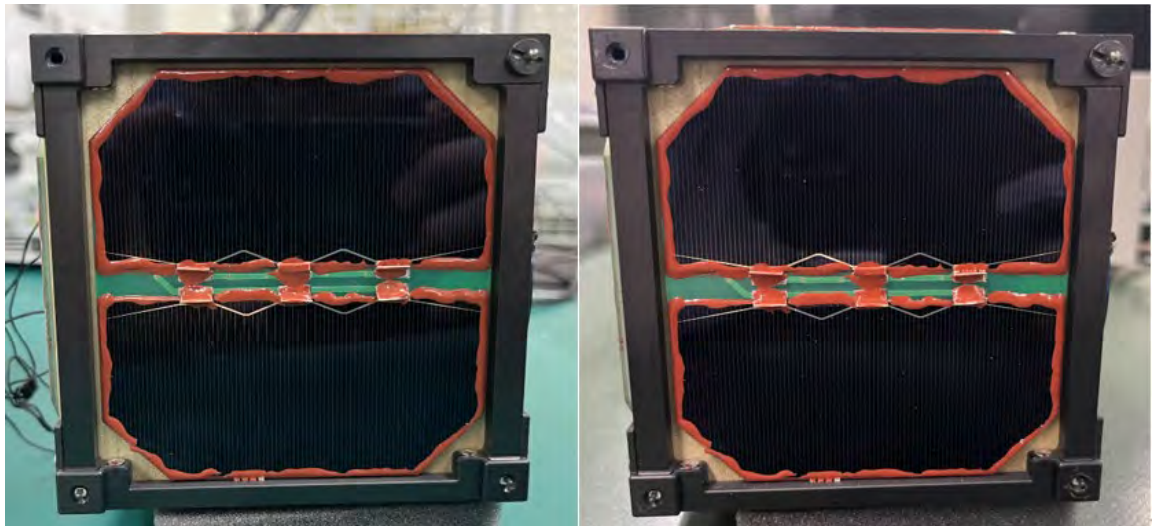


圖 4.1-5 -Z 側-Z 面 (左：試驗前、右：試驗後)

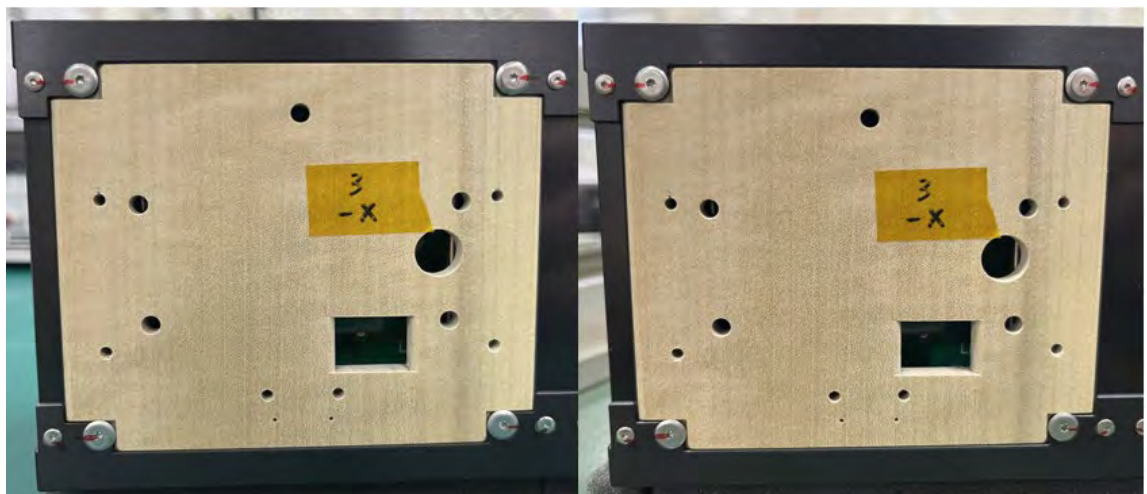


圖 4.1-6 +Z 側+X 面 (左：試驗前、右：試驗後)



圖 4.1-7 +Z 側-X 面 (左：試驗前、右：試驗後)

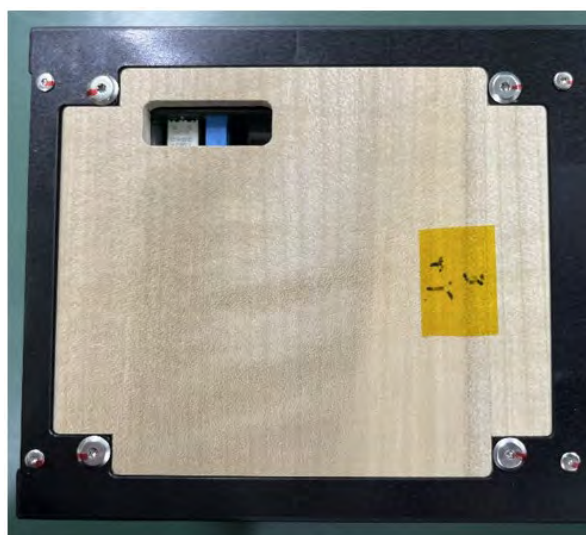


圖 4.1-8 +Z 側+Y 面 (試驗後)

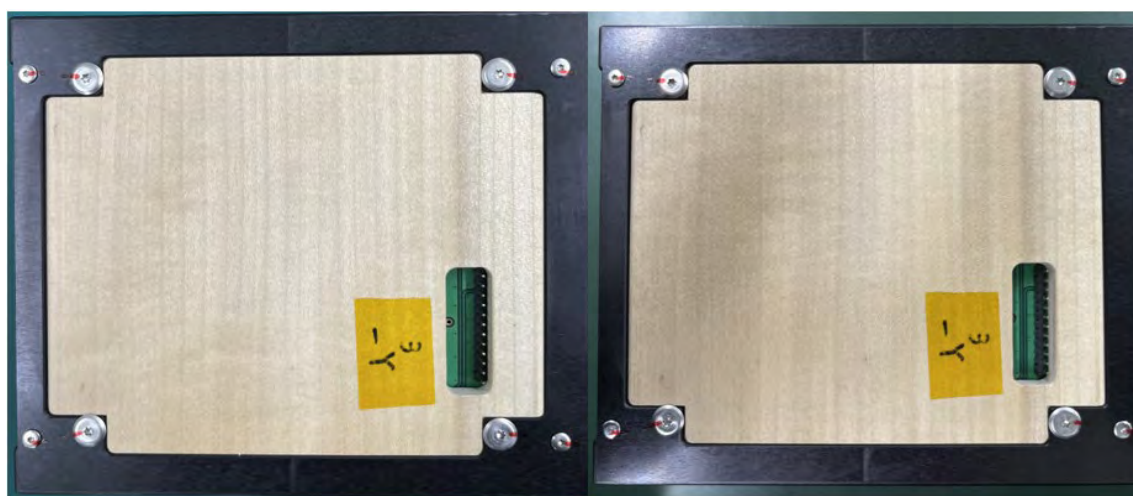


圖 4.1-9 +Z 側-Y 面 (左：試驗前、右：試驗後)



図 4.1-10 +Z 側+Z 面 (左：試験前、右：試験後)

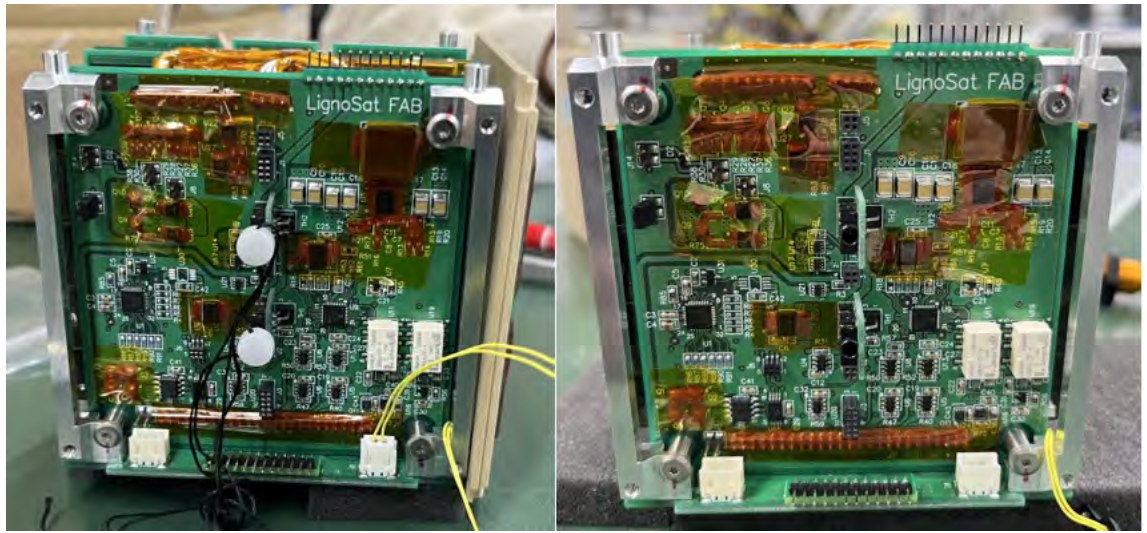


図 4.1-11 -Z 側 1U の+X 側 Y シャフト (左：試験前、右：試験後)

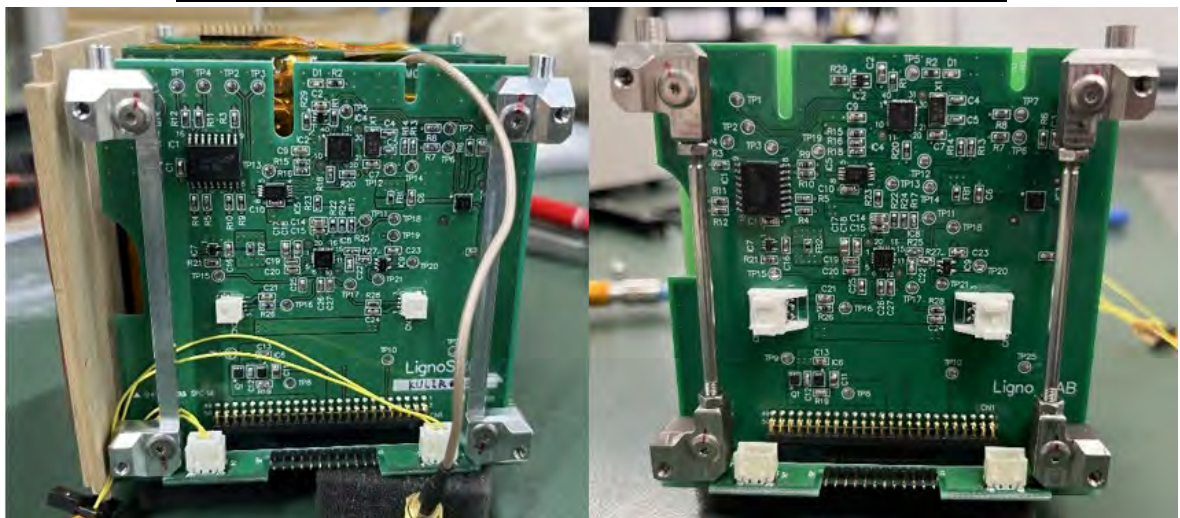


図 4.1-12 -Z 側 1U の-X 側 Y シャフト (左：試験前、右：試験後)

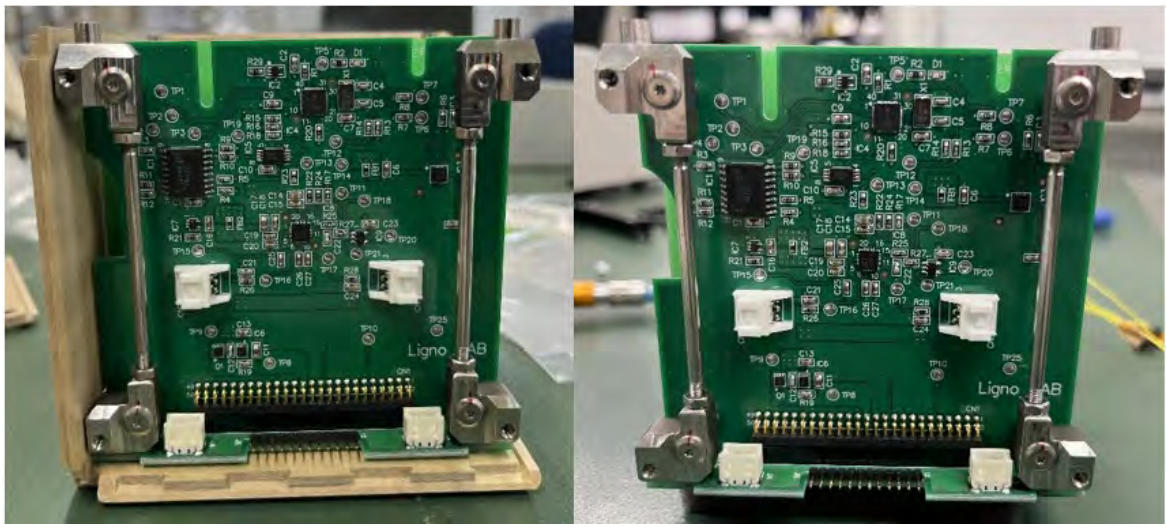


図 4.1-13 +Z 側 1U の+X 側 Y シャフト (左：試験前、右：試験後)

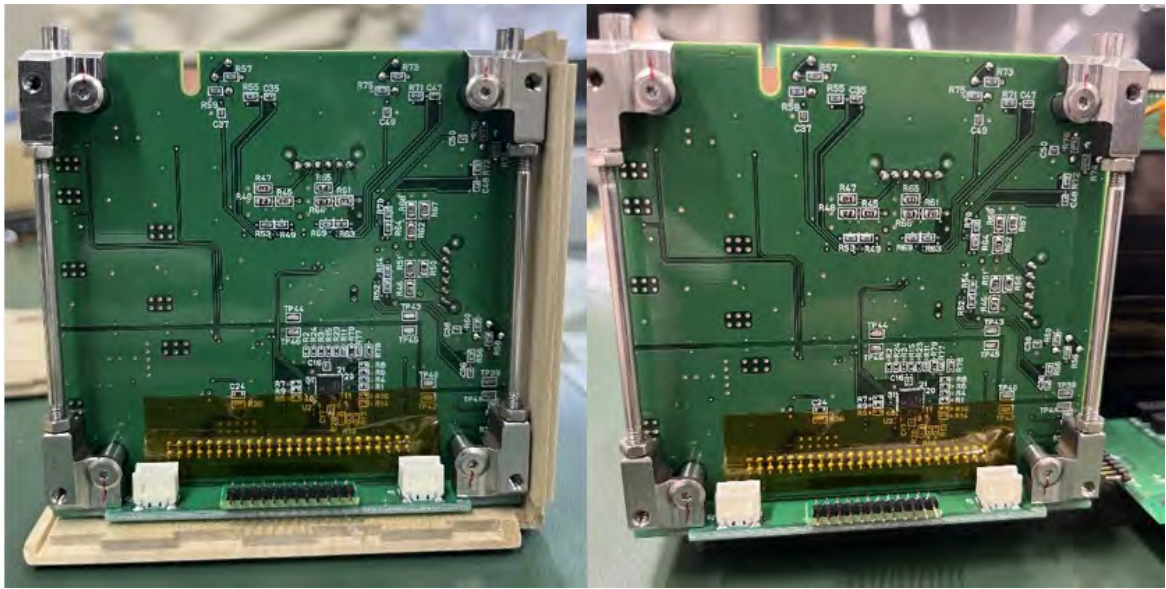


図 4.1-14 +Z 側 1U の-X 側 Y シャフト (左：試験前、右：試験後)

4.2 ランダム AT 試験

4.2.1 X 軸

図 4.2.1-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.2.1-2 に示す。ランダム加振の前後に行ったモーダルサーベイでは固有振動数はそれぞれ 410Hz、391Hz であり、ランダム振動試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

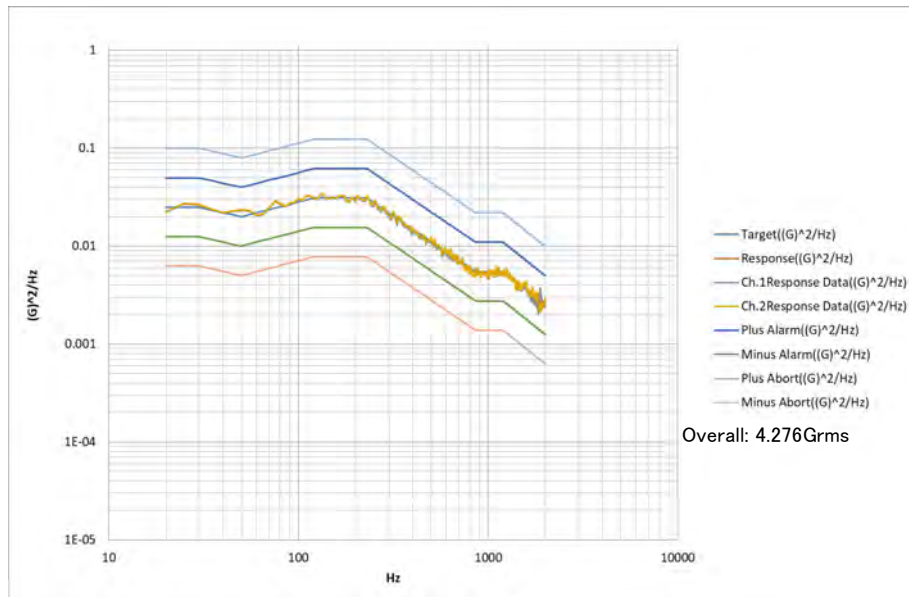


図 4.2.1-1 X軸 ランダム AT 加振 (コントロール)

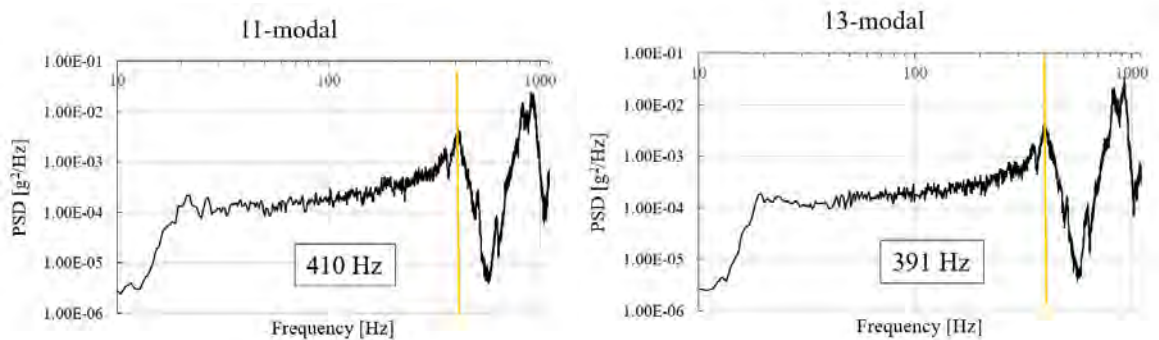


図 4.2.1-2 ランダム AT 振動前後の軸測定点 (Ch.1) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.2.2 Y 軸

図 4.2.2-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.2.2-2 に示す。ランダム加振の前後に行ったモーダルサーベイでは固有振動数はそれぞれ 532Hz、528Hz であり、ランダム振動試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

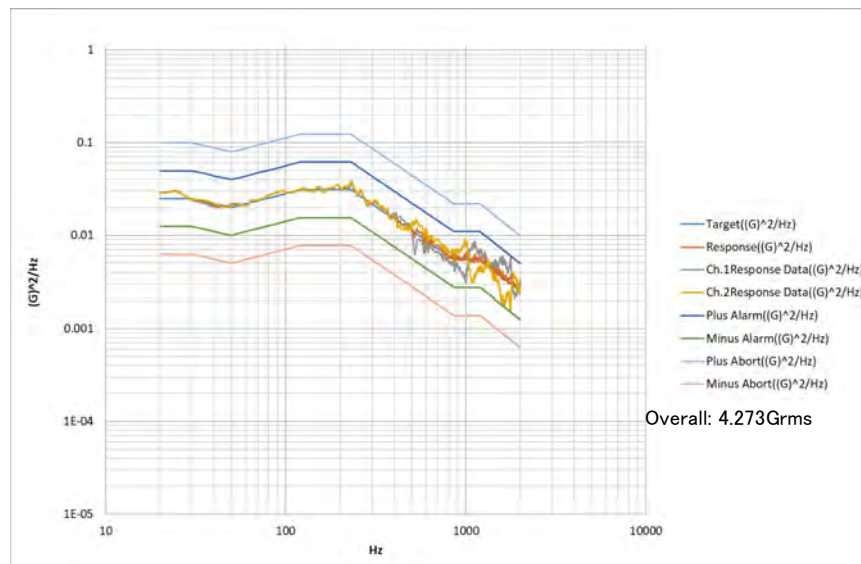


図 4.2.2-1 Y軸 ランダム AT 加振 (コントロール)

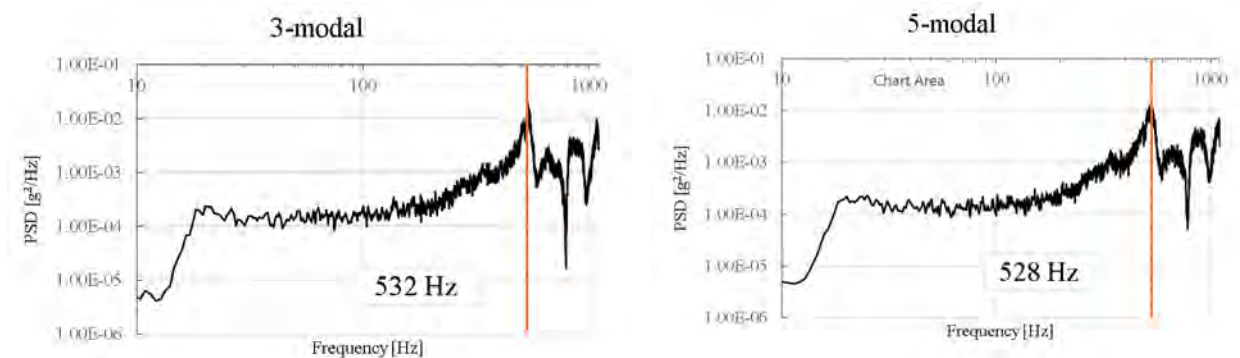


図 4.2.2-2 ランダム AT 振動前後の Y 軸測定点 (Ch.3) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.2.3 Z 軸

図 4.2.3-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.2.3-2 に示す。ランダム加振の前後に行ったモーダルサーベイでは固有振動数はそれぞれ 776Hz、796Hz であり、ランダム振動試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

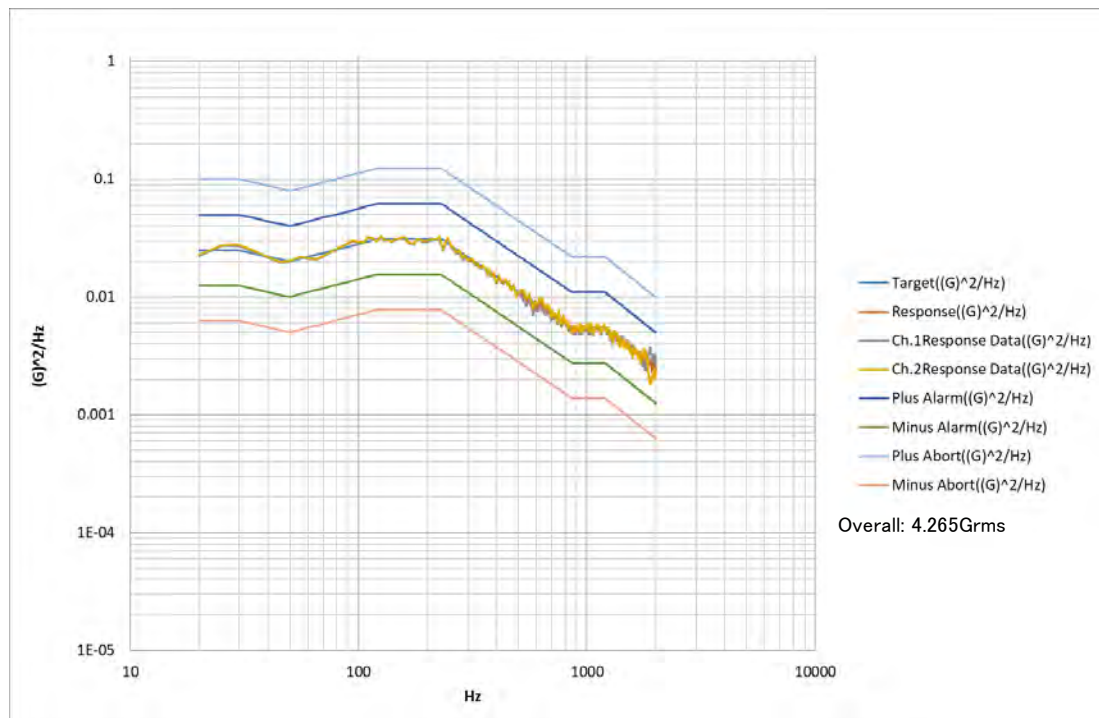


図 4.2.3-1 Z 軸 ランダム AT 加振 (コントロール)

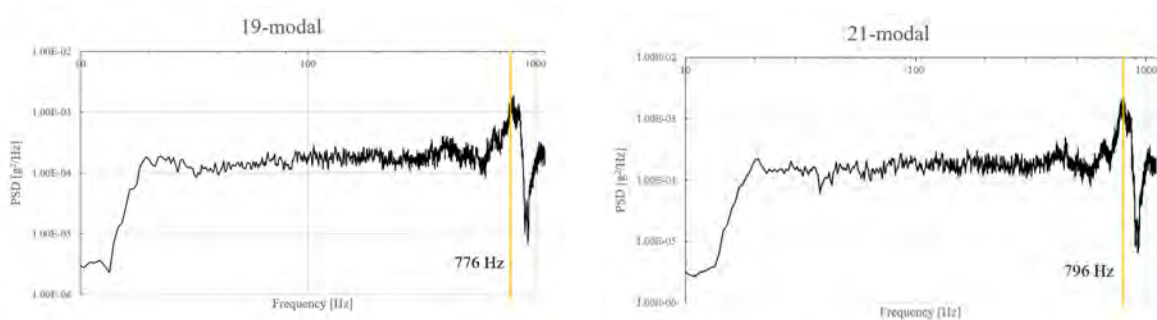


図 4.2.3-2 ランダム AT 振動前後の Z 軸測定点 (Ch.2) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.3 ランダム QT 試験

4.3.1 X 軸

図 4.3.1-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.3.1-2 に示す。ランダム加振の前後に行ったモーダルサーベイでは固有振動数はそれぞれ 391Hz、393Hz であり、ランダム振動試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

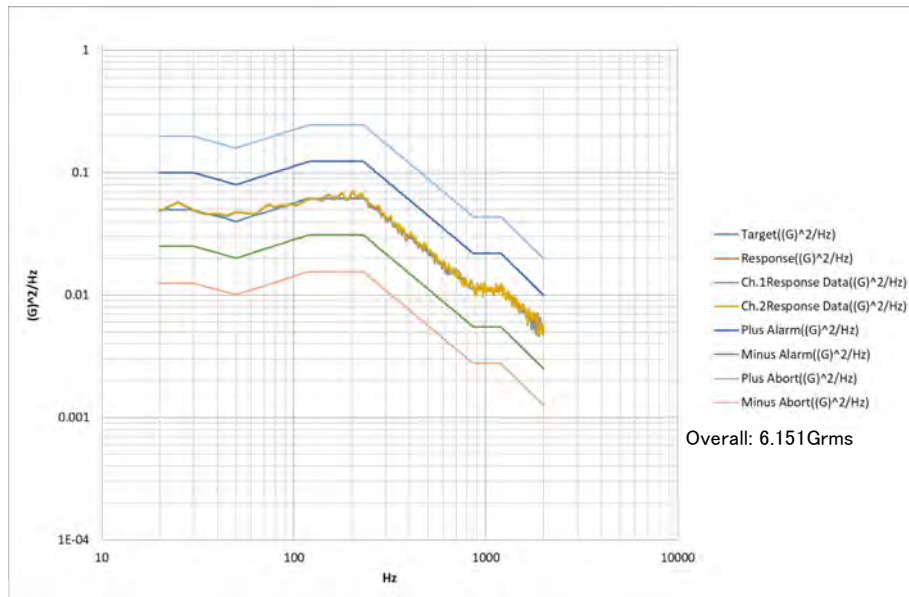


図 4.3.1-1 X軸 ランダム QT 加振 (コントロール)

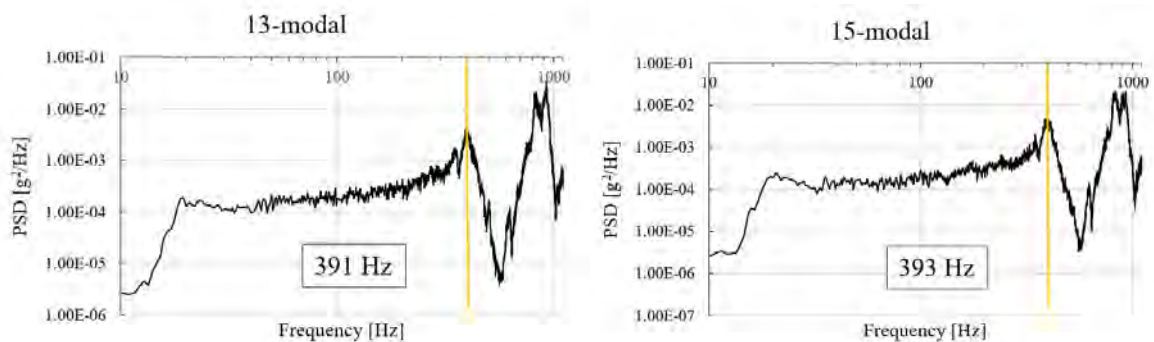


図 4.3.1-2 ランダム QT 振動前後の Z 軸測定点 (Ch.1) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.3.2 Y 軸

図 4.3.2-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.3.2-2 に示す。ランダム振動の前後に行ったモーダルサーベイでは共振周波数はそれぞれ 528Hz、524Hz であり、ランダム振動試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

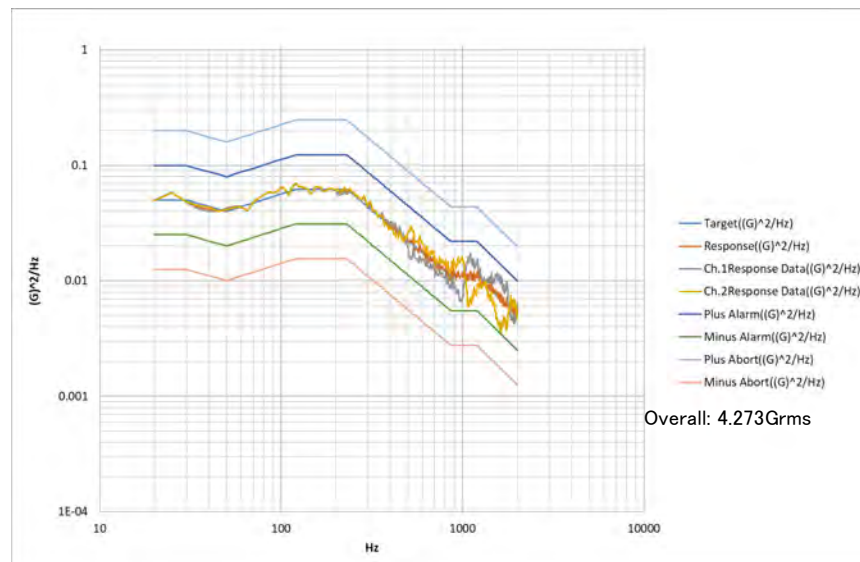


図 4.3.2-1 Y 軸 ランダム QT 加振 (コントロール)

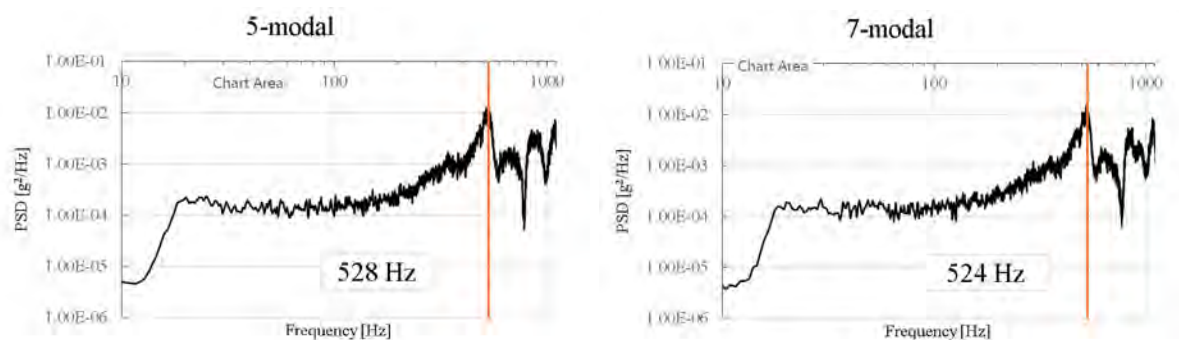


図 4.3.2-2 ランダム QT 振動前後の Y 軸測定点 (Ch.3) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.3.3 Z 軸

図 4.3.3-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.3.3-2 に示す。ランダム振動の前後に行ったモーダルサーベイでは共振周波数はそれぞれ 796Hz、784Hz であり、ランダム振動試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

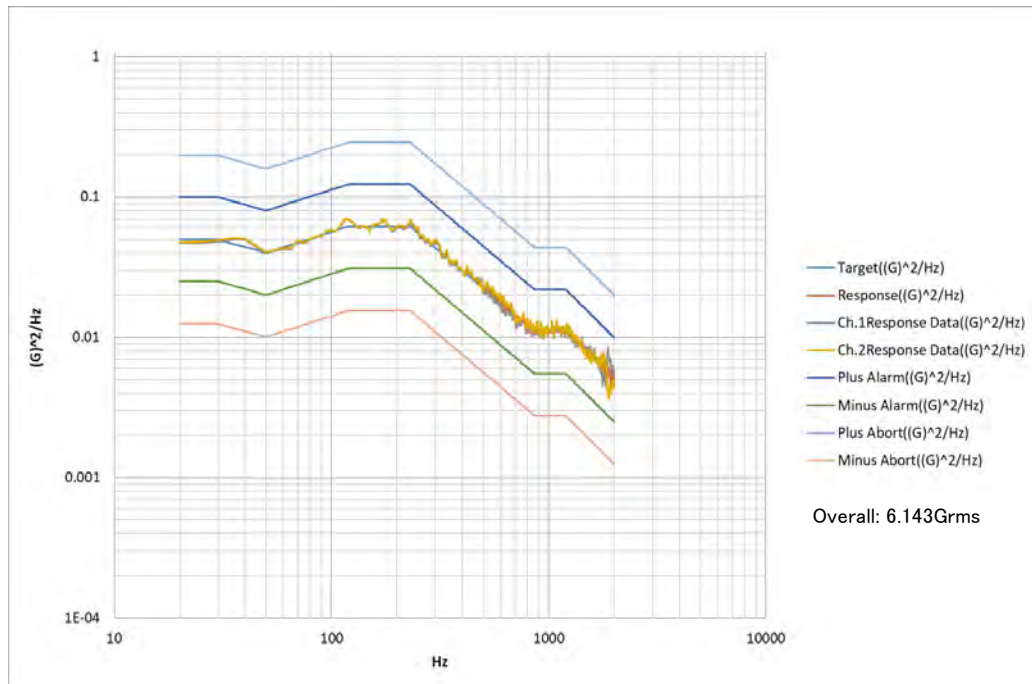


図 4.3.3-1 Z 軸 ランダム QT 振動 (コントロール)

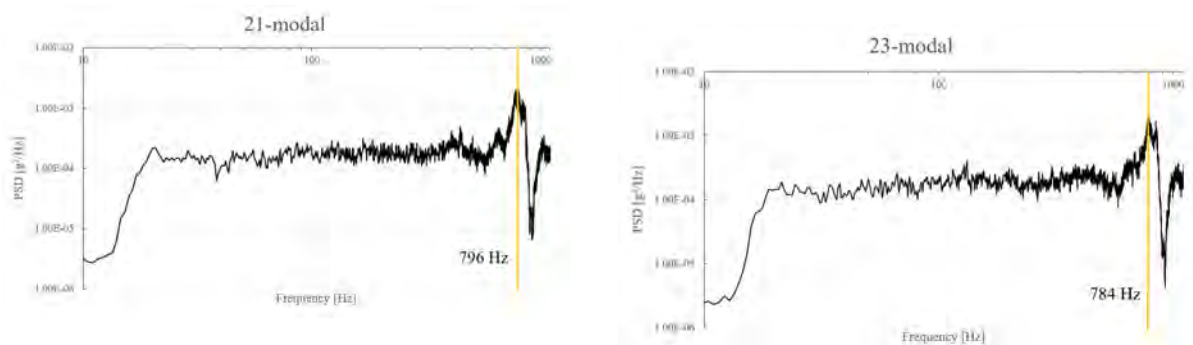


図 4.3.3-2 ランダム QT 振動前後の Z 軸測定点 (Ch.2) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.4 サインバースト試験

4.4.1 X 軸

図 4.4.1-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.4.2-2 に示す。サインバースト試験の前後に行ったモーダルサーベイにおいて固有振動数はそれぞれ 393Hz、399Hz であり、サインバースト試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

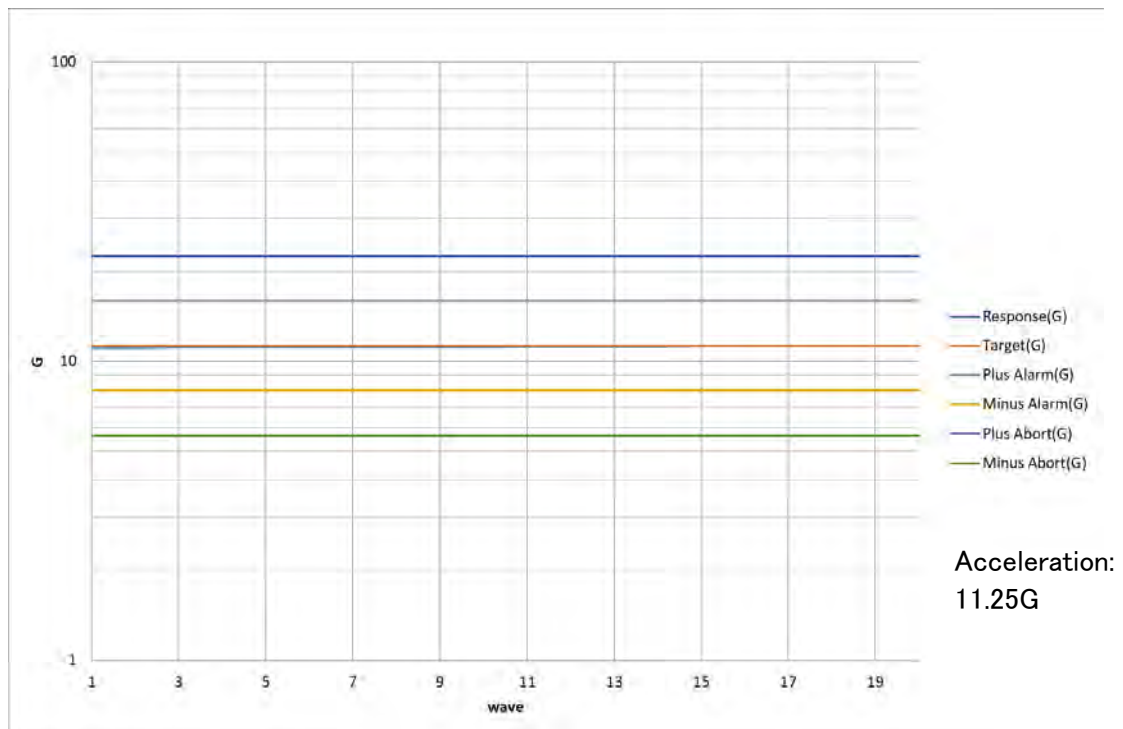


図 4.4.1-1 X 軸サインバースト試験 (コントロール)

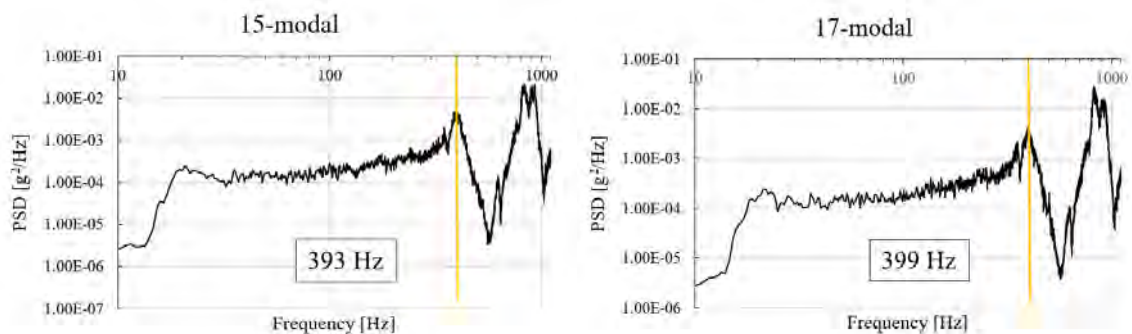


図 4.4.1-2 サインバースト試験前後の X 軸測定点 (Ch.1) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.4.2 Y 軸

図 4.4.2-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.4.2-2 に示す。サインバースト試験の前後に行ったモーダルサーベイにおいて固有振動数はそれぞれ 524Hz、518Hz であり、サインバースト試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

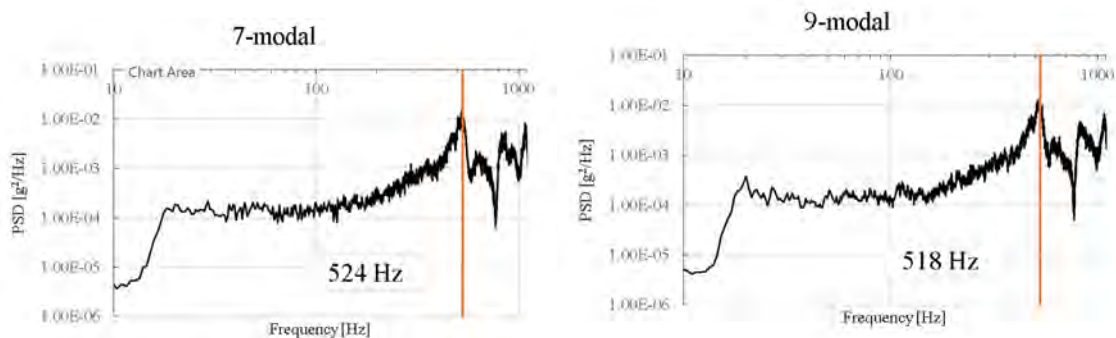
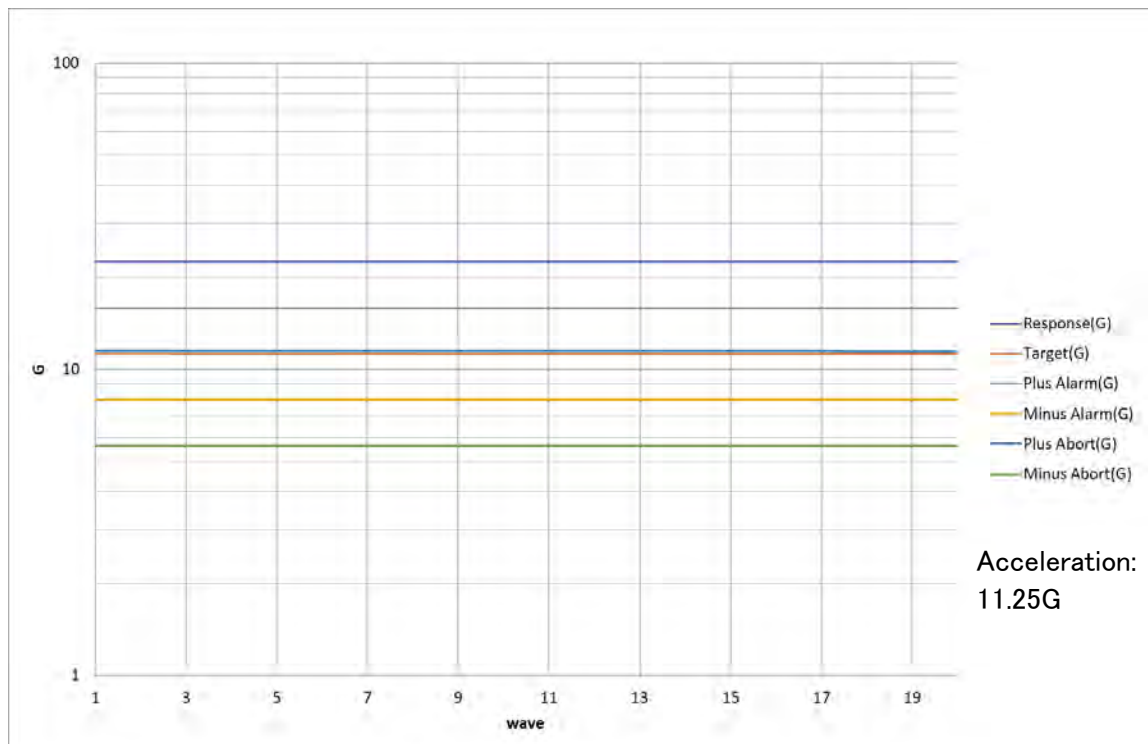


図 4.4.1-1 Y 軸サインバースト試験 (コントロール)

図 4.4.2-2 サインバースト試験前後の Y 軸測定点 (Ch.1) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

4.4.3 Z 軸

図 4.4.3-1 に示すように振動試験機により必要レベルの振動が与えられた。試験結果を図 4.4.3-2 に示す。サインバースト試験の前後に行ったモーダルサーベイにおいて固有振動数はそれぞれ 784Hz、790Hz であり、サインバースト試験の前後で最小固有振動数に大きな変化はなかった。これは 30Hz 以上であり、要求を満たしている。

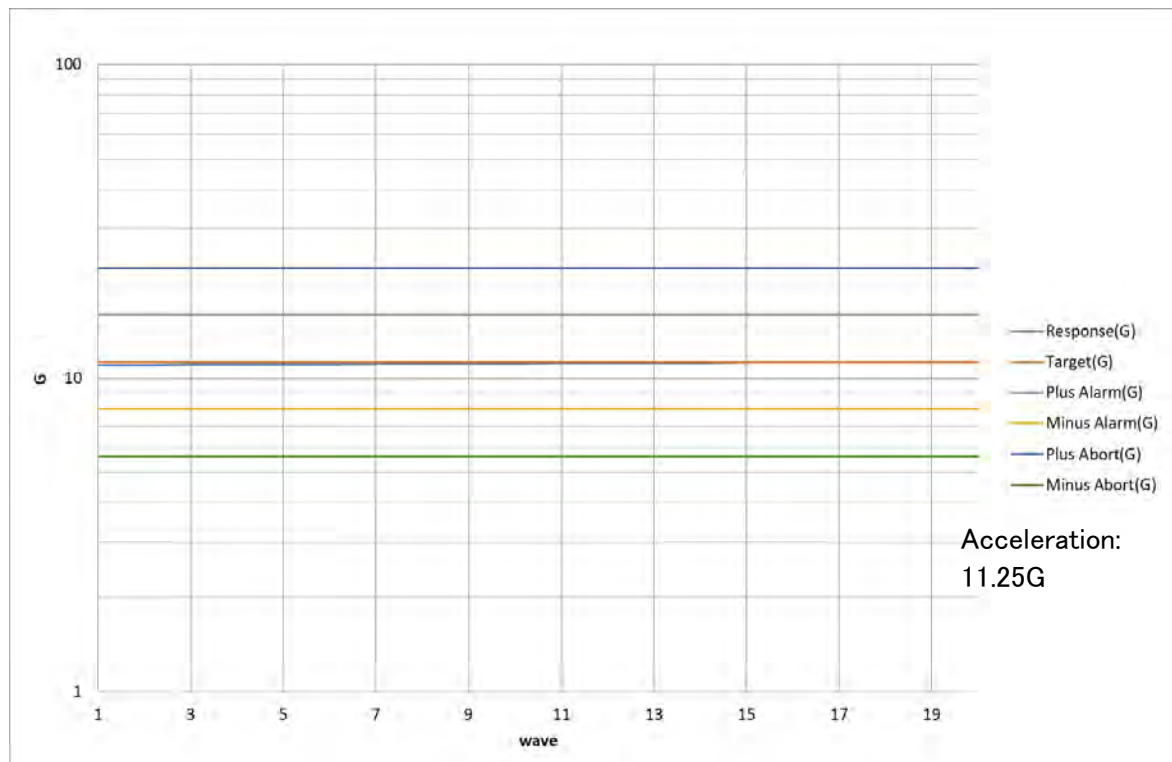


図 4.4.3-1 Z 軸サインバースト試験 (コントロール)

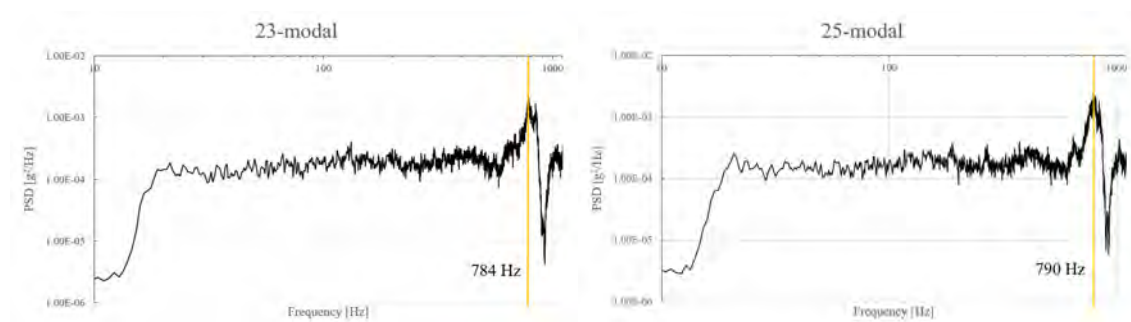


図 4.4.3-2 サインバースト試験前後の Z 軸測定点 (Ch.2) におけるモーダルサーベイ時波形
(左: 加振前, 右: 加振後)

5. 結論

表 5-1 から 5-5 に木造人工衛星 2 号機 EM の試験結果をまとめた。試験前後で衛星に外観上の損害は見当たらず、主構造をなす全てのボルトに緩みは見られなかった。また、外見検査において太陽光パネルにヒビなどの損傷は生じていないことが確認された。アンテナ面においても、試験中にアンテナの展開は生じず、テグスやキノコ類、固定パーツにも損傷は生じなかった。

各軸の固有振動数は X 軸では約 400 Hz、Y 軸では約 530 Hz、Z 軸では約 790 Hz であり、そのすべてが 30 Hz よりも高くなった。これは JAXA による要求を満たしている。

表 5-1 外観検査結果

	部品名	数量	結果
1	木造人工衛星 2 号機		
1-1	太陽光パネル	4	問題なし
1-2	トルクマーク	96	問題なし
1-3	アンテナ機構	1	問題なし
1-4	木造パネル	10	問題なし

表 5-2 検証事項結果

	検証事項	結果
1	木造人工衛星 2 号機	
1-1	主構造に破損が生じないこと	問題なし
1-2	衛星の固有振動数が 30Hz 以上であること	問題なし
1-3	加振の前後で衛星の固有振動数が変化しないこと	問題なし
1-4	衛星に機能不全が生じないこと	問題なし
1-5	ソーラーパネルに破損が生じないこと	問題なし
1-6	すべてのボルトにゆるみが生じないこと	問題なし
1-7	木造パネルに破壊やヒビが生じないこと	問題なし

表 5-3 ランダム AT 前後での固有振動数の変化

		固有振動数 (Hz)	
衛星		a. 加振前	b. 加振後
木造人工衛星 2 号機	X	410	391
	Y	532	528
	Z	776	796

表 5-4 ランダム QT 前後での固有振動数の変化

		固有振動数 (Hz)	
衛星		a. 加振前	b. 加振後
木造人工衛星 2 号機	X	391	393
	Y	528	524
	Z	796	784

表 5-5 サインバースト前後での固有振動数の変化

		固有振動数 (Hz)	
衛星		a. 加振前	b. 加振後
木造人工衛星 2 号機	X	393	399
	Y	524	518
	Z	784	790

参考資料 3-1

sketch_temp_RH_SDcard_Time_CO2_v2.1 (気温・湿度・CO2 濃度制御)

```
//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';
// lcd.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 3-2

Sketch_vacuum_control_v1.6 (真空度制御)

```
//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 4

令和6年度有人宇宙学実習シラバス

科目ナンバリング		U-LAS70 10001 SJ50					
授業科目名 <英訳>		ILASセミナー：有人宇宙学実習 ILAS Seminar :Exercise on 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	
群	少人数群	単位数	2単位	時間数	30時間	授業形態	ゼミ
開講年度・開講期	2024・前期集中	受講定員 (1回生定員)	5(5)人	配当学年	主として1回生	対象学生	全学向
曜時限	集中	教室				使用言語	日本語
キーワード	森林実習 / 天体観測実習 / 模擬微小重力実験 / 宇宙無線通信実験 / 閉鎖環境実習						
[授業の概要・目的]							
有人宇宙活動は高度な工学、理学のみならず、医学、倫理学、法学等、幅広い分野の有機的連携を必要とする総合科学であり、「有人宇宙学」は有人宇宙活動に関わる全ての分野を学問として大系的にまとめていく新しい学問である。実習では、集中講義形式を用いて、森林生態系を学ぶ森林実習、種々の天体を観測する天体観測実習、生命（植物）に対する重力の影響を観察する模擬微小重力実験、人工衛星を使った宇宙無線通信実験、宇宙滞在の特殊な環境について体験を通じて学ぶ閉鎖環境実習を行う。宇宙ミッションを模擬したスケジュールに沿って計7日間体験してもらい、分野横断型学習から有人宇宙活動に関する包括的な視点と基礎知識を身につける。							
[到達目標]							
森林実習では京都大学芦生研究林を訪問し森林の生態系を学び、宇宙での樹木・木材の利用を考える。天体観測実習では天体に関する正確な知識を獲得するとともに、自分の力で観測するための基礎的な技術を身につける。模擬微小重力実験では、重力に対する植物の応答を観察することで微小重力状態が生命に与える影響について好奇心と探究心を持てるようにする。宇宙無線通信実験では無線の原理を理解して人工衛星を使った通信技術を習得する。実験閉鎖環境実習では宇宙での生活環境について体験を通して理解し、人間が宇宙に展開する意義・問題点を考える。							
[授業計画と内容]							
オリエンテーション#1：2024年5月11日 合宿概要講義 オリエンテーション#2：2024年6月8日 合宿準備-ハンズオン訓練（体験訓練） オリエンテーション#3：2024年7月6日 合宿準備-ハンズオン訓練（体験訓練） オリエンテーション#4：2024年8月17日 合宿準備-ハンズオン訓練（体験訓練） オリエンテーション実施場所：北部総合教育研究棟506号室							
有人宇宙学実習：2024年8月18日-24日 実施場所：京都大学吉田キャンパス 8月18日・20日－24日 京都大学芦生研究林 8月19日－20日 実施内容：8月18日：実習開始、各種講義 8月19日－20日：森林実習/閉鎖環境実習 8月20日－24日：天体観測実習/模擬微小重力実験/宇宙無線通信実験/閉鎖環境実習） 8月24日：成果発表、実習終了							
1. 森林実習 森林生態系の講義を受けた後、芦生研究林を歩き実際の森林について学ぶ。芦生研究林で測定された樹木のデータを使い、森林の炭素貯蓄の能力を解析する。宇宙における樹木・木材の利用を考える。							
ILASセミナー：有人宇宙学実習(2)へ続く↓↓↓							

ILASセミナー：有人宇宙学実習(2)

2. 天体観測実習

天体の講義の後、星雲・星団・惑星の夜間観測を行う。夜間観測では、3人ずつのチームを作り、1チーム2-3時間の観測をする。全観測終了後、チームごとに観測結果を解析する。

3. 模擬微小重力実験

重力の生物に与える影響の講義の後、クリノスタット（模擬微小重力発生装置）を使い、植物の初期成長実験を行う。初期成長実験では、3人ずつのチームを作り、1チーム毎に1台のクリノスタットを使用する。初期成長実験終了後、チームごとに実験結果を解析する。

4. 宇宙無線通信実験

無線の原理及び人工衛星の軌道についての講義の後、実際に小型アンテナとトランシーバーを使って衛星からの電波を受信することを試みる。小型アンテナの向きや無線周波数を変化させることによって、電波強度がどのように変化するかを調べる。

5. 閉鎖環境実習

宇宙環境が人間に与える影響の講義の後、与えられたスケジュールに沿って各実習・実験を行う。時間経過に従って増大するストレスによって、仕事能率がどのように変化するかを体験する。また、チームワークを作る努力をするのと同時に、自分及びチームの行動を解析する。

【履修要件】

宇宙総合学の履修を推奨する。

【成績評価の方法・観点】

オリエンテーション#1・2・3・4及び森林実習、天体観測実習、模擬微小重力実験、宇宙無線通信実験、閉鎖環境実習に積極的に参加したかで各10点（計60点）、各実習をまとめたレポートで40点を与える。独自の知見・工夫が見られるものについては、高い点を与える。オリエンテーション#1・2・3・4及び全実習期間に参加できることが単位取得の条件となる。

【教科書】

授業中に指示する

【参考書等】

（参考書）

土井隆雄他『人類が生きる場所としての宇宙』（朝倉書店、2019）ISBN:978-4-254-15521-1
山敷庸亮編『有人宇宙学』（京都大学学術出版会）ISBN:978-4-8140-0494-2

【授業外学修（予習・復習）等】

実習前に参考資料を配布する。実習までに読んでおくこと。

【その他（オフィスアワー等）】

京都キャンパス及び芦生研究林で行われる7日間の実習である。

森林実習は芦生研究林で1泊2日で行う。

交通費・合宿費は自費である。

合宿中は、携帯電話の使用不可（緊急時を除く）。

学生教育研究災害傷害保険等の傷害保険へ加入すること。

採点報告日（8月中旬）以降に実施するため、成績報告が遅れる場合がある。

参考資料 5-1

令和 6 年度有人宇宙学シラバス

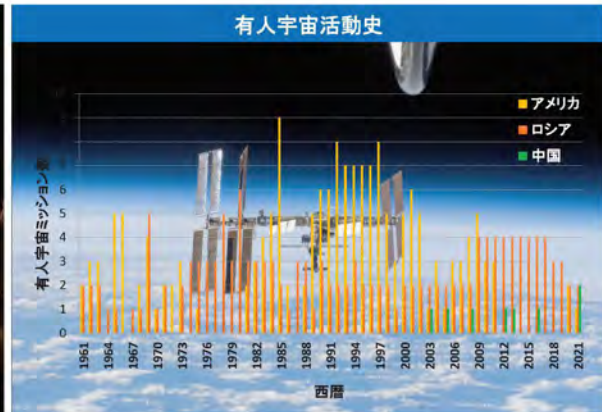
科目ナンバリング		G-LAS15 80002 LB70					
授業科目名 <英訳>	有人宇宙学 Human Spaceology: The Study of Human Space Activities			担当者所属 職名・氏名	総合生存学館 特定教授 土井 隆雄 総合生存学館 教授 山敷 庸亮 教育学研究科 准教授 田口 真奈 ヒト行動進化研究センター 准教授 足立 幾磨 総合生存学館 関係教員		
群	大学院横断教育科目群		分野(分類)	複合領域系		使用言語	日本語及び英語
旧群		単位数	2単位	週コマ数	1コマ	授業形態	講義（対面授業科目）
開講年度・ 開講期	2024・後期		曜時限	水5		配当学年	大学院生
						対象学生	全学向
（総合生存学館の学生は、全学共通科目として履修登録できません。所属部局で履修登録してください。）							
[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 2日 有人宇宙学（土井・山敷・田口） 【第2回】 10月 9日 宇宙環境工学（山敷） 【第3回】 10月16日 宇宙探査工学（清水） 【第4回】 10月23日 有人宇宙学演習1 【第5回】 10月30日 宇宙生命科学（保尊） 【第6回】 11月 6日 宇宙木材工学（村田） 【第7回】 11月13日 有人宇宙学演習2 【第8回】 11月20日 宇宙霊長類学（足立） 【第9回】 12月 4日 宇宙医学（寺田） 【第10回】 12月11日 宇宙法（青木） 【第11回】 12月18日 有人宇宙学演習3（土井・山敷） 【第12回】 12月25日 宇宙人類学（岡田） 【第13回】 1月 8日 宇宙居住学（稲富） 【第14回】 1月15日 有人宇宙学演習4（土井・山敷・田口） 【第15回】 1月22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)

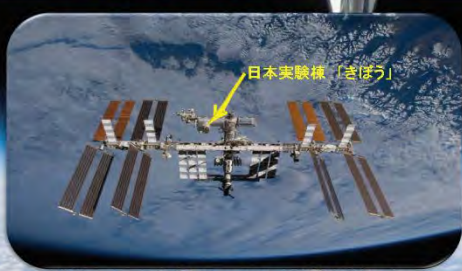
【履修要件】
学部学生も聴講可能である。
【成績評価の方法・観点】
講義への出席、4回の有人宇宙学演習において各講義要素の理解度と積極性・創造性及び最終レポートによって評価する。
【教科書】
使用しない
【参考書等】
(参考書) 授業中に紹介する
【授業外学修（予習・復習）等】
なし
【その他（オフィスアワー等）】
聴講希望の学生は、講義時間に直接講義室に来てください。 オフィスアワーの詳細については、KULASISで確認してください。

参考資料 5-2

有人宇宙学講義:2024/10/02:土井隆雄



国際宇宙ステーション（2011年完成）



日本実験棟「きぼう」

軌道	地上330~480km・軌道傾斜角52°
大きさ	110×74m ² (サッカーフィールド程度)
船内空間	935m ³ (ジャンボジェット機の約1.5倍)
質量	420ton
発電量	110kw (直流160Vで発電し120Vで配電)

日本の実験棟「きぼう」



船内保管庫
JEM ロボットアーム
船内実験室
日本の宇宙の象徴生
船外実験プラットフォーム

宇宙：無重力の世界



無重力の世界で生きる 1



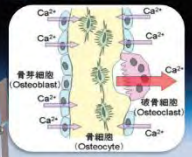
食べること
運動すること
遊ぶこと
寝ること

ライフサイエンス実験

細胞実験ラック



骨細胞培養実験

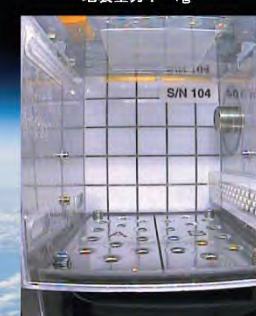


米発芽実験



シロイヌナズナ花茎の成長

地表重力下 1g



微小重力下 0g

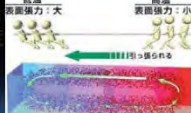


スライド提供: 大阪市立大学 保尊隆享

マランゴニ(表面張力)対流実験

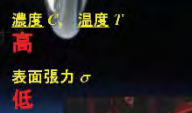
濃度 C , 温度 T 表面上の低

表面張力 σ 高



濃度 C , 温度 T 高

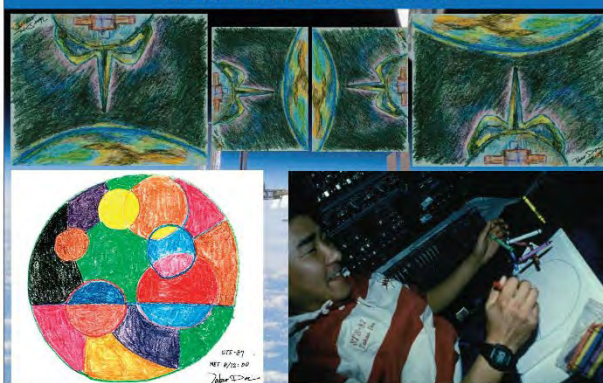
表面張力 σ 低

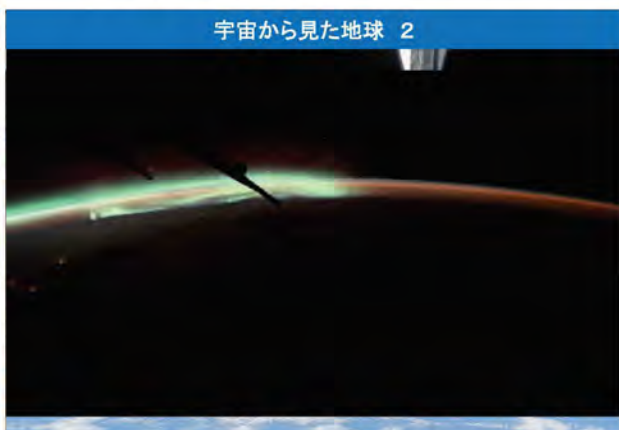
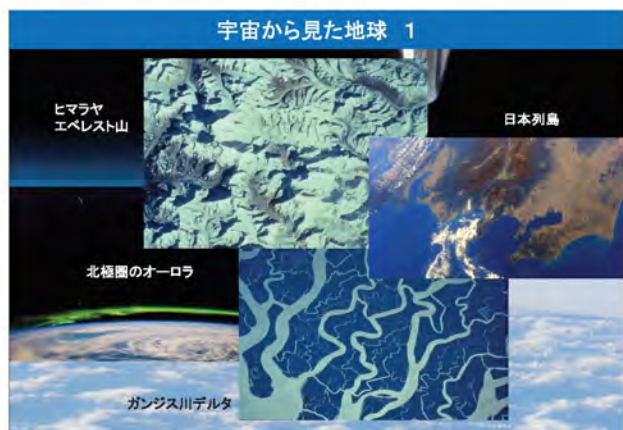




スライド提供: 公立諏訪東京理科大学 河村洋

宇宙絵画実験: クレヨンスケッチ





A02課：宇宙を生きる
提案（代案）

宇宙を生きる（ヒント）

質問：ヒトが生きるために何本の樹木が必要か？

- ・ヒトひとりに必要な酸素量：500ℓ/day
https://ispp.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.rinva.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！

参考資料 5-3

有人宇宙学講義:2024/10/30:村田功二

宇宙木材工学

【地球上での木材】
なぜ木材を使うのか（再生可能資源）
木材の強さの秘密（リグニン、飛行機）

【宇宙での木材】
宇宙における木材利用（資源）
温度環境（低温と高温、熱膨張率）
紫外線と原子状酸素（表面劣化）
宇宙放射線の影響（木材の劣化）

【木造人工衛星】
ISS日本実験棟きぼう簡易船外曝露試験（ExBAS）
木造人工衛星(LignoSat)

なぜ人間は木材を使うのか？



歌川広重: 日坂佐我ノ中山(東海道五十三次 1833)

太田猛彦『森林飽和』(2012)

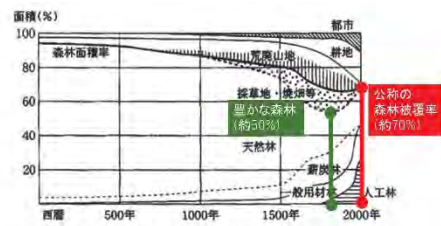
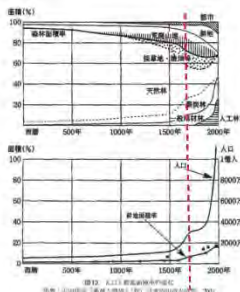


図11 森林利用及びその他の土地利用の変遷（依光 [1984] の図を基に作成）
出典：太田猛彦『山と森の1000年』創刊2000年1月号

- 公称の森林被覆率(採草地、焼畑等含む)は300年くらいは国土の3分の2
- 豊かな森林は国土の半分まで減少(荒廃山地10%、牧草地・焼畑10%)

太田猛彦(2008)森林の変遷と現代の森林「荒廃」、水利科学



7世紀
飛鳥・奈良地方で森林が衰退

11世紀
滋賀県田上山でマツが衰退

17世紀
全国ではげ山が広がる

1666年「諸国山川」
森林の乱開発により、土砂流出が活発になったことから、草木の根株の採掘を禁止、上流の山方の左右に木立無き所には苗木の植栽を奨励し土砂流出を防ぎ、土砂災害に遭いやすい場所の新田、および既存の田畑の耕作を禁じたもの。

人口の増加とともに森林荒廃

太田猛彦(2008)森林の変遷と現代の森林「荒廃」、水利科学

環境問題:日本の森林が荒廃している

弥生時代～明治期

建築材料:木材、紙、土

燃料:薪、炭

肥料:堆肥(草、葉)、ほしか(魚)

たたら製鉄、塩田、陶芸なども

太平洋戦争中

あらゆる生活資材(建材、燃料)、兵器(戦闘機)

戦後、高度経済成長期

建築資材、製紙原料(段ボール)

道路、宅地開発、工場用地開発

過剰伐採(やりすぎ)による森林の減少

→ 木の伐採は悪？

【森林は回復】・・・量的には回復

●拡大造林政策

戦争中の森林の荒廃と戦後の復興需要のため木材が不足した。

広葉樹が中心の天然林を伐採した跡地を針葉樹の人工林にした。(スギ・ヒノキ・カラマツ)



●燃料革命(エネルギー革命)・肥料革命(緑の革命)

里山の雑木林は家庭用燃料(薪・炭)や農業に必要な肥料・飼料の採取場所だった。

【エネルギー革命】

化石燃料や電気の利用

【緑の革命】

高収量品種の導入と化学肥料の大量投入で生産性が向上

【新たな森林の荒廃】・・・質的に荒廃

里山の荒廃(伝統的な利用・管理が消滅)

- コナラやクヌギが大木化、カシやシイに植生が移行
- 林縁にイバラ類やクズなどのツル性植物が密生
- アカマツ林の衰退と竹林の拡大
- 奥山化の進行(クマやサル出現)

人工林の荒廃(林業の衰退)

- 森林資源活用から地下資源利用への変換
- 安価な外国産材の流入

自然林の荒廃(生物多様性の消失)

- 獣害による下草や灌木の食害
- 大気汚染や登山者踏圧

～森林資源の活用と適切な管理が必要～

太田猛彦(2008)森林の変遷と現代の森林「荒廃」、水利科学

最古の陸上植物



最古の陸上植物 (早期植物・植物化石)

クックソニア (シルル紀・4億2500万年前)
葉と茎の区別がないコケに似た体。
当時、大気中の二酸化炭素濃度は現在の10倍以上あり、気温も高かった。



植物化石 (VAVS出展)

シダ植物の大森林



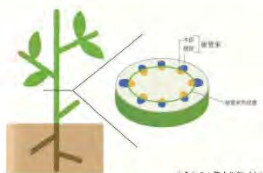
植物化石 (VAVS出展)
水を運ぶ維管束ができた
年輪はまだない

石炭紀 (3億5920万年前から2億9900万年前)
リンパク類、カラミテス類 (トクサの仲間) が生え、高さ40mに達するものもあった。
巨人な体は丈夫な樹皮と根で支えた。

もっと多くの光を受けたい
もっと胞子を遠くへ飛ばしたい



できるだけ背を高くしたい
重力が邪魔 (体の維持と水の吸い上げ)



最古の陸上植物 (早期植物・植物化石)

維管束

幹部：光合成産物を運ぶ
木部：水を運ぶ (リグニンが沈着して強い)

最初の樹木



最古の陸上植物 (早期植物・植物化石)



植物化石 (VAVS出展)

アルカエオプアリス (デボン紀中期・3億8千万年前)
シダ植物と針葉樹の中間 (革葉子植物)：幹は針葉樹に似ていて、葉の形がシダ、胞子が増える。
樹高は20mほどまで成長し、40~50年の寿命があった。

次の樹木の中で最初に現れたのはどれでしょう。

①スギ、ヒノキの仲間



②イチョウの仲間



③サクラの仲間



②イチョウの仲間

イチョウ類は約3億年前 (古生代) に現れ、ソテツ類とともに恐竜の時代に大繁栄して世界中に分布した。しだいに姿を消し、中生代にはマツやスギの針葉樹などにその地位を取って替わられた。
日本列島では100万年前に絶滅した。

中国に1種類だけ残っていて、生きた化石とされる。
日本で絶えられているイチョウは中国から伝来したものだとされる。



植物化石 (VAVS出展)

チューリヒ大学自然史博物館



Zurich University - Zoologisches Museum
2016/8/5

チューリヒ大学自然史博物館



Zurich University - Zoologisches Museum
2016/8/5

生きた化石・ジュラシックツリー

ウォレマイ・パイン

オーストラリアのウォレマイ国立公園で1994年に発見された。野生の木は100本にも満たない。

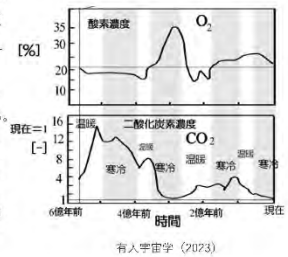
中生代(2億年前)から絶滅せず残った種と考えられていて、「生きた化石」と呼ばれている。



オーストラリアのウォレマイ国立公園で発見されたウォレマイ・パイン

木材と石炭紀

4億年前になるとシダ植物が陸上で出現する。このころの大気は二酸化炭素濃度が4000-5000ppmと現在の10倍ほど高かった。巨大なシダは、通常に光合成をおこない、大量の二酸化炭素が放出された。このため、二酸化炭素濃度は3億4000万年前には十分の一程度、即ち現在と同じレベルに下がった。気温も低下した。さらに大気中の酸素濃度も最大35%まで下がった。大きな大気組成の変化が引き起こされる。3億年前にはシダ植物に代わり裸子植物が繁茂する。現在みられるイチゴやマツも裸子植物である。裸子植物はリグニンを分泌させ、幹の強度を高めることに成功した。この時代には、リグニンを分解できる菌類が十分に進化しておらず、枯死しても分解されずに植物遺骸として土中に埋蔵していった。この植物遺骸が、現在見られる石炭である。2.5億年前に、リグニンを分解できる白色腐朽菌が特化し、有機物が分解されるようになり、二酸化炭素濃度も上昇していく。



有人宇宙学 (2023)

木材の強さの秘密



図1 繊維細胞の細胞壁のヘリカルワインディング構造 (模式図) 木のメカニズム (伝達 98)

セルロースマイクロフィブリルの理論上の強度 2~6 GPa (鋼鉄の約10倍) (渡森建之他, Biomacromolecules 2012)

カーボングラファイトの様な多層構造 (ヘリカルワインディング構造)



高い樹高は有利であり、樹体を支えるために強い樹幹ができた

- 維管束ができて水を上まで運べるようになった
- 木部はリグニンが沈着(木質化)し、強くなった。
- もっとも小さい構造(結晶構造)であるマイクロフィブリルは鋼鉄の約10倍の強度を持つ
- 細胞壁のヘリカルワインディング構造は、炭素複合材料の構造にも似ており非常に強い

第二次世界大戦中に作られた**木製飛行艇ヒューズH-4ハーキュリーズ**は2018年まで世界最大の飛行機であった。何が世界最大か？

- ① 重さ
- ② 搭乗可能人数
- ③ 翼の長さ(全幅)



3次元「紅の豚」

【正解】

③翼の長さ(全幅)
全幅(Wing span): 97.5m



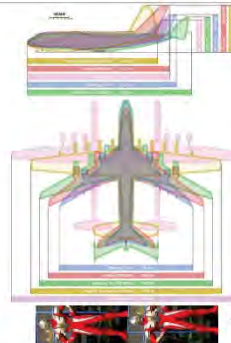
世界最大の飛行機「ストラトローンチ」が初飛行に成功



米ストラトローンチは4月13日(現地時間)、世界最大の飛行機「スカールド・コンゴジラ・ストラトローンチ」(あるいは「ロケット」)の初飛行に成功しました。

カリフォルニア州のモハベ空域にて条件を揃えたスカールド・コンゴジラ・ストラトローンチは、空軍からのロケットの発射を目的として開発されている飛行機です。翼長は117mとなり、6基のジェットエンジンを搭載しています。

SORAE: https://sorae.info/space/2019_04_14_sl.html



世界一重い飛行機
An-225 Mriya (600トン)
貨物搭載能力250トン以上



世界最大の旅客機
Airbus A380
853席(エーノミ、のみ)

ウルトラマシマックス
長さ: 48m

世界最大の飛行機（高さ24.2m）
ヒューズ H-4 ハーキュリーズ飛行機(Hughes H-4 Hercules)
通称：スプルーース・グース（トウヒ材のガチョウ）



現在：ロバート・グリーン航空博物館（オレゴン州）で展示（2001年より）

初飛行：1947年11月2日
高度：約21m
飛行距離：1mile(1600m)
設計値(マニュアル記載)：
巡航速度：382 km/h
航続距離：約 4,760 km
シャーマン戦車(80トン)1台
や戦隊員750名輸送可能

主材：Birch(カバ材)
全長：66.6m(218'-8")
全幅：97.5m(319'-11")

鉄道や船で金属がつかわれても
20世紀初めの飛行機は木製が主流だった



230形蒸気機関車(1902)
国産初の量産型



戦艦三笠(1900)英国製
日露戦争での旗艦



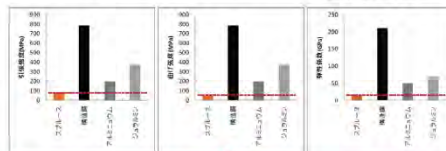
ソッピース キャンメル(1918)
英国：合板・布製・アルミ

飛行機の材料に必要なこと：

- ① 重さの割には強いこと（比強度）
- ② 重さの割には変形しにくいこと（比ヤング率）
- ③ 硬さはそれほど大事ではない
- ④ 工作が簡単であること

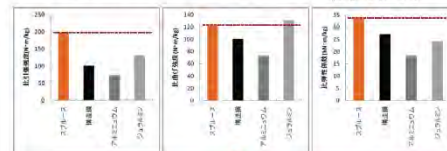
寺澤市太郎：『航空機と木材』 航空朝日、pp.58-61（1942）

ひっぱり強さ 曲げ強さ のびにくさ 曲がりにくさ



同じ大きさでの比較では、木材は金属になれない
寺澤市太郎：『航空機と木材』 航空朝日、pp.58-61（1942）

重さあたりのひっぱり強さ 重さあたりの曲げ強さ 重さあたりののびにくさ 重さあたりの曲がりにくさ



同じ重さでの比較では、木材は金属より良い

寺澤市太郎：『航空機と木材』 航空朝日、pp.58-61（1942）

デ・ハビランドモスクート（英国：デ・ハビランド社）
(de Havilland DH.98 Mosquito)



生産：1940～1950年
用途：爆撃機/戦闘機
主材：スプルース

モスクートIV型爆撃機
全幅：16.50m
全長：12.43m
エンジン：
ロールスロイス「マーリン」

木製にした理由

- 設計と原型生産を早くする
- 容易に入手できる材料
- 家具など木工分野の工場も動員できる（新しい労働力）おまけの効失
- 木製のためレーダーにみつかりにくい
- 表面を平滑にできるため空気抵抗では金属製より良い



航空朝日（昭和17年3月） 特集・木製飛行機

木製機と金属機の得失 航空研究所員・東大助教授 山本隆雄

- ・木材は加工容易であって価格が低廉な点は大きな特徴であるが、その反面、非常に大きな欠点を持っている。
- ・強度が同じ炭木でもその位置によって著しく異なる。さらに年輪に対する木材取りの方向で著しく異なり、繊維方向に対する角度でも強度は急激に変化する。
- ・木製機のようにおびえメントを受ける部材の許容応力は、桁の断面の形状によって相当変化する。その原因は圧縮強度が引張り強度に比して著しく低いことに起因する。
- ・金機機が寿命五千時間以上であるのに対し、木製機は僅かに半分の寿命を有するにすぎない。

宇宙木材プロジェクト（通称：LignoStella Project）
住友林業・京都大学の宇宙木材プロジェクト
2023年に世界初の木造人工衛星(LignoSat)打ち上げへ
(2020/7/24リリース)

Cubesat
1U:100×100×113.5 mm
1Uあたり：0.13～1.33 kg

JSSからの放出(J-SSOD)
軌道高度：380～420km
軌道寿命：100～250日程度



土井隆雄：宇宙における樹木・木材利用の探求
建築と社会（日本建築協会）101(1183)：30-32 (2020)

今、私たち人類は、地球から宇宙に進出できる技術を獲得した。

私たち人類が恒久的に宇宙で発展していくためには、宇宙に社会をつくらなければならない。

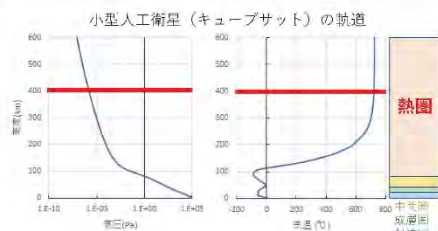
将来的に人類が宇宙に永続的に展開することを考えると、人類が作り出すことのできる資源である樹木・木材を宇宙で利用することができれば、人類の宇宙への発展に必要な材料資源をどこから調達するかという課題を解決することが可能となる。

NASA's future space colonies (1975)

ジェラルド・オニール教授が率いる研究グループが、従来の宇宙移民について10週間の研究が実施され、アーティストのRick GuidiceとDon Davisによって概念がイメージ化された。未来のスペースコロニーに多くの木々を見ることが出来る。



R.D. Johnson, G. Holbrow (1977) Space Settlements: A Design Study (1977) NASA SP-413



低軌道 (LEO)：～2,000km (国際宇宙ステーション 400km)
中軌道 (MEO)：2,000 km～36,000 km
静止軌道 (GEO)：36,000 km 前後

宇宙空間の環境が
木材の物性に与える影響
—低軌道(LEO)での木造人工衛星—

【内容】

① 高真空環境の影響

② 温度環境の影響

③ 宇宙空間での劣化要因の検討

高真空暴露による木材の物性変化

【試験体】

針葉樹：スギ(399 kg/m³)、ヒノキ(441 kg/m³)

広葉樹環孔材：ケヤキ(547 kg/m³)、センダン(549 kg/m³)

広葉樹散孔材：ブナ(683 kg/m³)、ホノノキ(505 kg/m³)

5mm(1)×10mm(R)×100mm(縦縦方向:L / 縦縦直交方向:R)

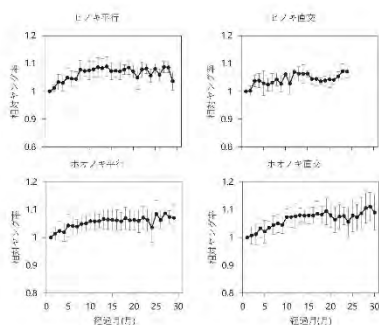


長期間の高真空暴露試験 (2018年7月～)

暴露環境：0.1Pa (高度100km相当)

実験方法：
乾燥後 (103°C×24時間) に真空暴露
1ヶ月ごとに重量と曲げヤング率を測定

曲げヤング率測定(ZTS-500N, IMADA)：
上げスパン 80mm(L/D=16)
クロスヘッド 毎分5mm
破壊荷重の20%まで負荷(非破壊)



地球低軌道(LEO)での人工衛星の温度環境

超小型人工衛星 (キューブサット) の要求性能

船外搬出時 (衛星放出機構)

-15 °C ～ +60 °C

JFMペイロードシミュレーションハンドブック Vol.8D (2020/5)

LEOを想定したキューブサットの環境試験

-20 °C ～ +80 °C

-20 °C ～ +60 °C (thermal shock test)

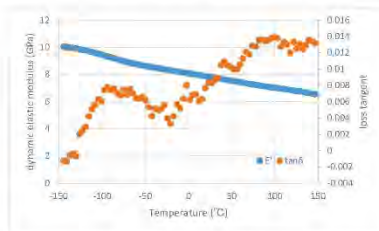
J. Piattoni (2012) Acta Astronautica 81: 419-429

低軌道衛星「てんこう」の測定データ(2018/11/9～2019/3/19)

-40 °C ～ +20 °C

E. Abdulla et al.(2020) Aerospace, 7(35); doi: 10.3390

-150°Cから+150°Cではヤング率は安定
(中国産ポプラ材・繊維方向)

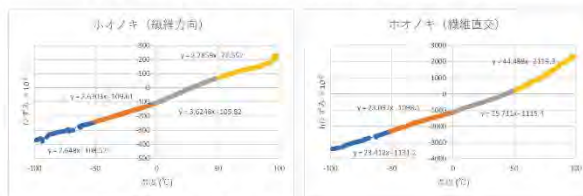


熱膨張係数

	密度 10 ³ kg/m ³	熱膨張係数(20°C) ×10 ⁻⁶ /K	条件
アルミニウム	2.70	30.2	20°C
チタン	4.506	8.6	20°C
ポリエチレン	0.97-0.97	100-200	20°C
アクリル(PMMA)	1.16-1.20	80	20°C
繊維方向 平接方向			
ペイマツ (<i>Pseudotsuga mucronata</i>)	0.46	6	24
イエローバーチ (<i>Betula alleghaniensis</i>)	0.58	9	26
レッドオーク (<i>Quercus rubra</i>)	0.62	9	26
レッドウッド (<i>Squiza sempervirens</i>)	0.42	6	21

経緯度 2020: 425-428
Kubler, L., Liang, L., Cheng, L.S. (1973) Wood Fiber Sci 5:259-257

ホオノキの熱膨張係数（線熱膨張）（未発表）

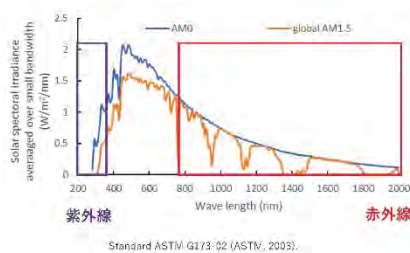


温度帯で若干変化があるが、
-100°Cから+50°Cでは
繊維方向で約3 ppm/K、繊維直交方向で24 ppm/Kであった。
(チタン 8.6 ppm/K、アルミニウム 30.2 ppm/K)

宇宙空間での劣化要因の検討

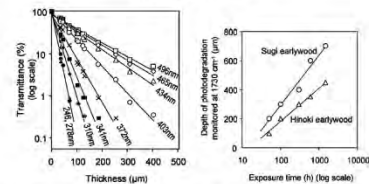
- ① 真空紫外線
- ② 原子状酸素
- ③ 宇宙放射線

大気圏外と地上の太陽光スペクトル分布



Standard ASTM G173-02 (ASTM, 2003).

紫外線の影響



- 引当材では紫外線(250-400nm)で厚さ75μm以下には浸透しない
- 劣化の深さは照射時間の対数関数とともに急激に減少する
- 雨水や砂塵による浸食作用を受けやすくなり、引当材では100年間で5-10mm、広葉樹材で2-3mm程度の厚さが失われる

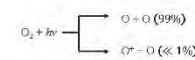
A 両端(2005)木材の劣化とその防食分析, 木材学雑誌94(2): 106-117

原子状酸素(Atomic Oxygen, AO)

地上から200kmから600kmの高度では紫外線、特に真空紫外線の影響を受けて酸素分子は原子状酸素に変化している

ISSのある400kmの高度では原子状酸素(AO)が大気の80%を占める

酸素分子が真空紫外線
(VUV: $\lambda = 100 \sim 200$ nm)
を吸収して光解離する



$$E = h\nu = hc/\lambda$$

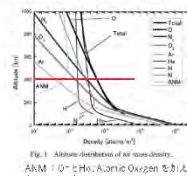
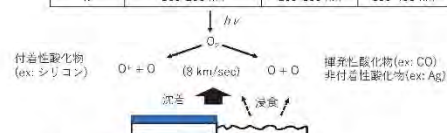


Fig. 1 Atomic distribution of air mass density, AMM: O₂ and H₂, Atomic Oxygen density, 大気密度

原子状酸素密度(400km高度)における宇宙飛行船への原子状酸素の衝突とその防食対策, Yac. Sci. (2005) 37(5): 375-383

原子状酸素(Atomic Oxygen, AO)

UV Spectrum	VUV	Far UV	Near UV
λ	100-200 nm	200-300 nm	300-400 nm



高度400kmのAO密度: 8×10^{13} atoms/m³

秒速8kmで動く宇宙機に衝突するAOフラックス

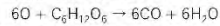
$$8.0 \times 10^7 \text{ atoms/cm}^3 \times 8.0 \times 10^3 \text{ cm/s} = 6.4 \times 10^{10} \text{ atoms/cm}^2/\text{s}$$

大気圏外宇宙空間(400km)における宇宙飛行船への原子状酸素の衝突とその防食対策, Yac. Sci. (2005) 37(5): 375-383

原子状酸素の影響

半年間に衝突するAOフラックス: 1.0×10^{21} atoms/cm²

AOが木材に衝突してガス化 (グルコースを仮定)



木材(密度: 500 kg/m³)の単位体積あたりの炭素原子数

$$0.5 \div 2 \div 12 \times 6.02 \times 10^{23} = 1.26 \times 10^{22}$$

atoms/cm³

半年間で消失する木材の深さ

$$\frac{1.0 \times 10^{21}}{1.26 \times 10^{22}} = 0.08 \text{ cm}$$

厚さ1cmの木材で小型人工衛星を作った場合
半年間で最大1割程度が厚さが減る可能性がある
(キュー・ブサットの製造運用期間 100~250日)

※本図は、衛星の軌道に接する宇宙、材料への放射線環境のモデル化に基づく推定値。J. Vac. Sci. Technol. 42(3): 475-483

宇宙放射線

- ① 銀河宇宙線(GCR)
 - 陽子 (プロトン) 90%
 - α線 (ヘリウム) 10%
 - 重粒子 (炭素イオンや鉄イオン) 1%弱
 - 電磁波 (X線やγ線)
- ② 太陽粒子線(SLP)
 - 電子スピン (陽子と電子)
- ③ 捕足粒子線
 - 木星 (陽子等) (JRP) 平均高度約 3,600km
 - 土星 (電子等) (ORB) 平均高度約 18,000km

ISS外部の放射線(EXPOSE-R2)

GCR	32 mGy
SLP	4 mGy
JRP	251 mGy
ORB	123 mGy
TOTAL	410 mGy

※γ線であれば1Gy=1Sv
Dachov et al (2017) Space Weather 15: 1475-1489

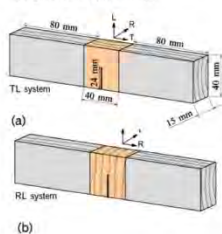


ガンマ線曝露による木材の強度低下 (未発表)

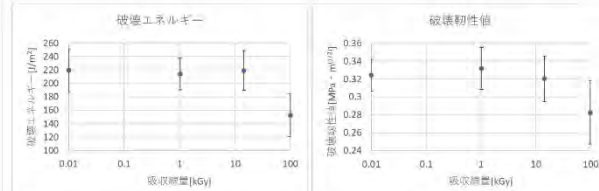


ニハルト60ガンマ線照射試験装置
(京都大学総合理工学研究所)

破壊力学試験(SEN3)



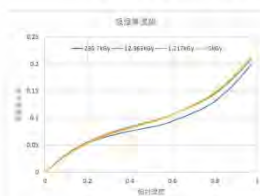
破壊力学試験 (未発表)



100kGyで破壊エネルギー・破壊靱性値の低下がみられた
→ 脆性化 (脆くなる) の可能性
(化学結合の変化・化学成分の熱分解)

ガンマ線曝露木材の吸湿等温線(hydrophilic isotherm) (未発表)

水分吸着から評価した木材の内部表面の状態



Hallwood and Horrobin 吸着理論

$$[\text{溶解水}] + [\text{乾燥木材}] = [\text{水和木材}]$$

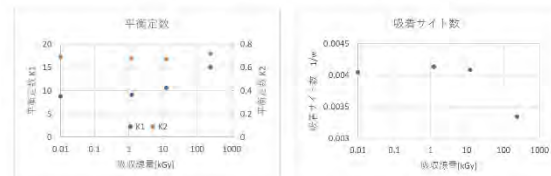
$$\text{平衡定数 } K_1$$

$$[\text{水蒸気}] = [\text{溶解水}]$$

$$\text{平衡定数 } K_2$$

$$\text{水和木材の吸着サイトの数 } \frac{1}{W}$$

水分吸着から評価した木材の内部表面の状態 (未発表)



平衡定数 K_1 が増加傾向 → 内部表面の状態が変化 (吸着しやすくなる)
吸着サイト数 $(1/W)$ が200kGyで減少 → 分解により吸湿成分の減少 (強度低下)

木材の宇宙曝露試験 ISS日本実験棟きぼう簡易船外曝露試験

止り初、10か月間の木材宇宙曝露試験を完了
→ 木材用架の拡大、木材人工衛星 (LignoSat) の打上げを目指して
「国際宇宙ステーション (ISS) での木材の宇宙曝露試験」で、約10ヶ月間の宇宙空間での木材試験体の
曝露試験が完了し、2023年1月に試験体は地球に帰還した。NASA、JAXAを経て3月、木材試験体を受領。外
観、質量等を点検する1次検査を実施した。木材の割れ、腐り、粉砕などはなく、温度変化が大きく強い
宇宙空間が及び交う環境の宇宙環境下で、試験体の劣化は極めて軽微で材料は安定しており、木材の劣れ
耐久性を確認した。2024年に打上げを計画している木材人工衛星 (LignoSat) 1号機に使用する機軸は、今
回の試験結果を踏まえてオノキを使用することを決定した。



ISS 船外実験棟「きぼう」から、JAXA/NASA
(共同)で開発された木材試験体の撮影。(2023年)



図4 京都大学と住友林業にて宇宙曝露試験体を受領
(7月17日・札幌にて)

検査結果

- ① 外観損傷
 - ・宇宙曝露後の試験体を目視とマイクロスコープにより、割れ、腐り、粉砕、表面摩耗などについて評価。
 - 結果: いずれの試験体においても、割れ、腐り、粉砕、表面摩耗などの劣化は全く認められな
- ② 質量変化
 - ・木材試験体の宇宙曝露前後での質量変化を測定。宇宙放射線や宇宙空間の原子状酸素(AO: Atomic Oxygen)が木材に付着することによる炭素の消失、化学変化や分解による質量変化の程度を検証。
 - 結果: 曝露試験体の質量を測定し、含水率の影響を補正した結果では、ほとんど減少してい
- ③ 3軸線の歪み
 - ・3軸線の歪みやマゼラ、穴ノキ、ダケカ
 - ンバそれぞれの劣化の歪を検証。
 - 結果: 3軸方向の劣化の歪は確認されなかった。



図3 宇宙曝露後木材試験体(木材/牛)拡大写真
左:宇宙曝露試験体 右:宇宙未曝露試験体

<https://csc.jp/information/news/7273/2023-05-17.html>
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news/news/2023-09-15-1>

木造人工衛星(LignoSat)



木造人工衛星(LignoSat)



- 再生産可能な資源（木材）で作られている
- 加工が容易で、電磁波を通す
- 大気圏再突入時にアルミナ粒子を発生させない

PNAS

RESEARCH ARTICLE | EARTH, ATMOSPHERIC, AND PLANETARY SCIENCES

OPEN ACCESS



Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles

Daniel M. Murphy^{1,2,3,4}, Mayal Abou Ghanem^{1,2,3,4}, Daniel J. Cziczo⁵, Karl D. Froese^{6,7}, Justin Jacques⁸, Michael J. Lawler^{9,10}, Christopher Maloney¹¹, John M. C. Plane¹², Martin N. Ross¹³, Gregory P. Schur¹⁴, and Xieoli Shen¹⁵

Edited by Mark Triemeris, University of California, San Diego, CA; received August 3, 2023; accepted September 7, 2023

概要

今後数十年間で低軌道衛星の数が大幅に増加すると予測され、2030 年までにおそらく 50,000 個の衛星が軌道に追加される予定である。使用済みのロケット本体や燃焼不全の衛星が大気圏に再突入すると、金属蒸気が生成され、それが凝結してエアロゾル粒子となり、成層圏に下降する。

...

直径 120 nm を超える成層圏の硫酸粒子の約 10% には、宇宙船再突入によって生じたアルミニウムやその他の元素が含まれている。今後数十年以内に地球低軌道衛星の数が増加する計画により、成層圏の硫酸粒子の最大半分に大気圏再突入によって生じた金属が含まれる可能性がある。このレベルの金属含有量が成層圏エアロゾルの特性に及ぼす影響は不明である。

まとめ

地球低軌道での超小型木造人工衛星の可能性を検討した

- 【真 空】真空環境で少なくとも 5 年は劣化しない
- 【温 度】急激な剛性の低下はなく、熱膨張係数は金属と同等
- 【原子状酸素】ISS 船外曝露試験では浸食は確認できず
- 【宇宙放射線】L E O 環境での放射線では劣化は少ない
- 【成層圏への影響】ロケットや人工衛星の影響は増えつつある