

令和5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6年5月31日

国立大学法人京都大学

本報告書は、文部科学省の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5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 号機の安全審査及び打上準備の実施.....	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) 安全審査 0 / 1 / 2 で対象となる文書（表 1-1 の黄色番号文書）	8
(iii) 安全審査 3 で対象となる文章（表 1-1 の緑色番号文書）	10
(iv) NASA 安全審査担当者との意見交換会.....	12
(v) JAXA 安全審査経緯.....	12
(2) 木造人工衛星 1 号機の打上準備	13
(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	13
(ii) FM 熱真空試験.....	16
(iii) FM 振動試験.....	18
(B) 木造構体内部に設置できるパッチアンテナ・姿勢制御システム	21
(1) パッチアンテナ	21
(i) 試験 1：アンテナパターン計測試験	21
(ii) 試験 2：S パラメータ計測試験	24
(iii) 考察.....	24
(2) 地磁気を使った姿勢制御システム	26
(i) 磁気トルカ試験	26
(ii) 木造人工衛星 2 号機の姿勢制御システムに関する考察	27
(C) 木造人工衛星 2 号機の基礎設計	28
(1) 木造人工衛星 2 号機の概要.....	28
(2) 木造人工衛星 2 号機の構造系	28
(i) 木造構体	30
(ii) 金属フレーム	31
(3) 木造人工衛星 2 号機のバスシステム系	31
(4) 木造人工衛星 2 号機のミッション系	34
② ExBAS の木材の解析	36
(A) ExBAS 木材試料のミクロ分析	36
(1) ExBAS 実験概要.....	36

(2) ExBAS 試料ミクロ分析結果	38
(B) 木材の真空暴露実験	42
(1) 木材の真空暴露実験概要	42
(2) 木材の真空暴露実験結果	42
(i) 実験結果：相対ヤング率	42
(ii) 実験結果：相対寸法変化	44
(iii) CNF の真空暴露実験結果	47
③ 樹木育成実験の実施	50
(A) 低圧下における樹木育成実験環境	50
(B) 低圧下における樹木育成実験	51
(1) 育成実験概要	51
(2) 育成実験結果	52
(i) 樹高の変化	53
(ii) 成長特性	55
(iii) クロロフィル蛍光	56
(C) 育成実験まとめ	56
④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進	57
(A) 有人宇宙学実習	57
(1) 有人宇宙学実習概要	57
(2) 有人宇宙学実習結果	58
(i) 閉鎖環境実習	58
(ii) 宇宙森林実習	60
(iii) 天体観測実習	61
(iv) 模擬微小重力実験	62
(v) 宇宙無線通信実験	64
(3) 有人宇宙学実習評価	66
(i) コンセプトマップの基本情報	66
(ii) コンセプトマップの構造変化	66
(iii) コンセプトマップの解析総論	68
(B) 有人宇宙学講義	68
(1) 有人宇宙学講義概要	68
(2) 有人宇宙学演習	75
(C) 木造人工衛星設計会議	76
(1) 木造人工衛星設計会議概要	76

(2) 木造人工衛星設計会議内容	76
(i) 第 32 回設計会議：2023 年 4 月 4 日	76
(ii) 第 33 回設計会議：2023 年 5 月 9 日	77
(iii) 第 34 回設計会議：2023 年 6 月 6 日	77
(iv) 第 35 回設計会議：2023 年 7 月 4 日	78
(v) 第 36 回設計会議：2023 年 8 月 8 日	78
(vi) 第 37 回設計会議：2023 年 9 月 5 日	79
(vii) 第 38 回設計会議：2023 年 10 月 3 日	80
(viii) 第 39 回設計会議：2023 年 11 月 7 日	80
(ix) 第 40 回設計会議：2023 年 12 月 5 日	81
(x) 第 41 回設計会議：2024 年 1 月 9 日	81
(xi) 第 42 回設計会議：2024 年 2 月 13 日	81
(xii) 第 43 回設計会議：2024 年 3 月 12 日	82
(C) 樹木育成ゼミ	83
(D) 第 2 回宇宙木材利用シンポジウム	83
(E) Spaceology NewsLetter	84
(F) 学会・講演活動	85
(G) 広報活動（新聞記事）	87
総括	88
参考資料 1	パッチアンテナ試験 1:アンテナパターン計測試験結果
参考資料 2	パッチアンテナ試験 2: S パラメータ計測試験結果
参考資料 3	木造人工衛星 2 号機地磁気を使った姿勢制御システムに関する考察：伊藤駿治
参考資料 4	真空木材暴露実験解析結果：真のヤング率：三浦晴
参考資料 5-1	令和 5 年度有人宇宙学実習シラバス
参考資料 5-2	令和 5 年度有人宇宙学シラバス
参考資料 5-3	有人宇宙学講義：2023/10/04:土井隆雄
参考資料 5-4	有人宇宙学講義：2023/11/08:村田功二
参考資料 5-5	有人宇宙学演習ポスター：月班
参考資料 5-6	有人宇宙学演習ポスター：火星班
参考資料 5-7	有人宇宙学演習ポスター：小惑星 Psyche 班
参考資料 5-8	有人宇宙学演習ポスター：ガニメデ班
参考資料 6-1	CDH_2023 年 4 月活動報告書：2023/04/04

参考資料 6-2	COMM_2023 年 5 月活動報告書 : 2023/05/09	145
参考資料 6-3	EPS_2023 年 6 月活動報告書 : 2023/06/06	151
参考資料 6-4	MISSION_2023 年 7 月活動報告書 : 2023/07/04	156
参考資料 6-5	STRUC_2023 年 8 月活動報告書 : 2023/08/08	160
参考資料 6-6	CDH_2023 年 9 月活動報告書 : 2023/09/05	168
参考資料 6-7	COMM_2023 年 10 月活動報告書 : 2023/10/03	175
参考資料 6-8	EPS_2023 年 11 月活動報告書 : 2023/11/07	180
参考資料 6-9	MISSION_2023 年 12 月活動報告書 : 2023/12/05	185
参考資料 6-10	STRUC_2024 年 1 月活動報告書 : 2024/01/09	189
参考資料 6-11	CDH_2024 年 2 月活動報告書 : 2024/02/13	193
参考資料 6-12	COMM_2024 年 3 月活動報告書 : 2024/03/12	197
参考資料 7-1	第 2 回宇宙木材利用シンポジウムプログラム : 2024 年 3 月 21 日	206
参考資料 7-2	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 河島航	207
参考資料 7-3	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 小泉壮平	208
参考資料 7-4	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 加藤千晶	209
参考資料 7-5	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 豊西悟大	210
参考資料 7-6	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 三浦晴	211
参考資料 7-7	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 村田功二	212
参考資料 7-8	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 山敷庸亮	213
参考資料 7-9	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム講演抜粋 : 中村栄三	214
参考資料 8-1	Spaceology Newsletter: 2023 年 04 月号	215
参考資料 8-2	Spaceology Newsletter: 2023 年 05 月号	218
参考資料 8-3	Spaceology Newsletter: 2023 年 06 月号	221
参考資料 8-4	Spaceology Newsletter: 2023 年 07 月号	225
参考資料 8-5	Spaceology Newsletter: 2023 年 08 月号	228
参考資料 8-6	Spaceology Newsletter: 2023 年 09 月号	232
参考資料 8-7	Spaceology Newsletter: 2023 年 10 月号	237
参考資料 8-8	Spaceology Newsletter: 2023 年 11 月号	241
参考資料 8-9	Spaceology Newsletter: 2023 年 12 月号	245
参考資料 8-10	Spaceology Newsletter: 2024 年 01 月号	248
参考資料 8-11	Spaceology Newsletter: 2024 年 02 月号	254
参考資料 8-12	Spaceology Newsletter: 2024 年 03 月号	258
参考資料 9-1	学会資料抜粋 : 2023/06/01:岸広登他.....	264
参考資料 9-2	学会資料抜粋 : 2203/06/01:遠藤早緒里他.....	265

参考資料 9-3	学会資料抜粋：2024/07/09：仲村匡司.....	266
参考資料 9-4	学会資料抜粋：2023/10/18：豊西悟大他.....	267
参考資料 9-5	学会資料抜粋：2023/10/19：野木朔太郎.....	268
参考資料 9-6	学会資料抜粋：2023/11/02：村田功二.....	269
参考資料 9-7	学会資料抜粋：2024/02/19：村田功二他.....	270
参考資料 9-8	学会資料抜粋：2024/03/13：村田功二他.....	271
参考資料 9-9	学会資料抜粋：2024/03/19：村田功二.....	272
参考資料 10-1	京都新聞 2023 年 5 月 24 日：木造の人工衛星宇宙へ.....	273
参考資料 10-2	京都新聞 2023 年 6 月 29 日日本人の忘れもの 未来を拓く京都の集い 知 恵会議有人宇宙開発で広がる活動領域	274
参考資料 10-3	読売新聞 2023 年 6 月 11 日：世界初の木造人工衛星、燃え尽きる際に金 属粒子の少ないメリット…伝統工法で くぎ・接着剤不要	275
参考資料 10-4	NHK 2023 年 8 月 1 日：世界初！ 木造人工衛星に挑戦.....	276
参考資料 10-5	朝日新聞 2023 年 9 月 4 日：凄腕しごとにな 木の効能を調べた実験人も 犬も心地よく宇宙でも活躍.....	277
参考資料 10-6	日経新聞 2024 年 2 月 24 日：火星に森を造る 土井宇宙飛行士の挑戦	278
参考資料 11	学会等発表実績.....	279

はじめに

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

令和 5 年度の業務計画及び業務結果を以下に示す。

【令和5年度業務計画】

- ① 木造人工衛星の開発
 - a. 木造人工衛星1号機の安全審査を実施すると同時に打上げ準備を行う。
 - b. 電波を透過する木材の特性を生かして木造構体内部に設置できるアンテナ・姿勢制御システムの基礎実験を行う。
 - c. 木造人工衛星2号機について、アンテナシステムや構造系、電源系、通信系など人工衛星システム全体について検討し、基礎設計を完了する。
- ② ExBASの木材の解析
 - a. 国際宇宙ステーション船外暴露実験（ExBAS）の木材試料を使い、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. 樹木育成実験環境（光強度、CO₂濃度、湿度）を精度良く制御するための制御システムを完成する。
 - b. ポプラ（*Populus alba*）を使用し特定の環境に制御されたチャンバーにおいて低圧環境下で気圧を変化させながら育成実験を実施し、幹、根、葉の成長量の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 号機の安全審査及び打上準備の実施

(1) 木造人工衛星 1 号機の安全審査

(i) 安全審査概要

JAXA の人工衛星では無人宇宙機・有人宇宙機であることを問わず、その宇宙機が地上安全、打ち上げ安全、軌道上安全を満たしているかどうかを安全確保の観点から安全審査が実施される。JAXA の安全審査は安全審査 0、安全審査 1、安全審査 2、安全審査 3 と 4 段階に分かれている。それぞれの安全審査対象は次の様に分類される。

安全審査 0：安全審査 0 は、木造人工衛星 1 号機がどのような人工衛星であることを説明し、事前にハザード識別結果の確認、適用すべき安全要求の識別結果の確認を行うもので、不安全なものが存在するかどうかの認識について JAXA 安全審査関係者に説明するための審査会である。提出文書の一つは JAXA の書式である「00_Satellite Information Input Form」に必要事項を記入する。

安全審査 1：安全審査 1 は、木造人工衛星 1 号機の基本設計においてハザードおよびハザード原因の識別結果の確認、ハザード制御方法の妥当性の評価、検証方法の確立の妥当性の評価を審査する。

安全審査 2：安全審査 2 は、木造人工衛星 1 号機の詳細設計においてハザードおよびハザード原因の識別結果の確認、ハザード制御方法の妥当性の評価、検証方法の確立の妥当性を評価し、人工衛星の製造工程が審査される。

安全審査 3：安全審査 3 は、製造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。

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。

この協定により打ち上げられる人工衛星には有人宇宙機の安全を確保することが求められることになった。すなわち、人工衛星の地上取り扱いに関わる安全、打ち上げロケットに関わる安全、ISS での安全が確保されることが求められることになる。

LignoSat 衛星は超小型人工衛星に分類されているため、大きく 2 つの安全審査 0/1/2 と安全審査 3 の 2 回に分けて実施されることになる。

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 A-1-1) を作成し、それぞれについて説明する。

表 1-1 では、各文書の名称と簡単な概要を示している。各文書の目的については A-1-2 項に記述する。

安全審査を受審する前には JAXA との安全に関わる最初の Kick-off 会議において人工衛星の特徴や構造、ミッションなどについて記述した文書を発行した。この文書の目的は、対象となる人工衛星にどのような安全を脅かす要素を内在するかを事前に JAXA と人工衛星側で認識を共有するためである。

表 1-1 提出した 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_Safty 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

(ii) 安全審査 0 / 1 / 2 で対象となる文書（表 1-1 の黄色番号文書）

No. 01 : 01_LS-EP-01

Battery Description HR Attachment の副題のついた文書で、衛星の電源系に関わる情報を示す文書。主に人工衛星で搭載するバッテリーに関わる記述を行う。

No. 02_LS-SR-01_Structure Analysis Report

ISS の「きぼう」日本実験棟（以下 JEM : Japanese Experiment Module）に搭載されている小型人工衛星放出装置（以下 J-SSOD : JEM Small Satellites Orbital Deployer ）から放出しようとする人工衛星の構造解析 (Structure Analysis) と破壊制御 (Fracture Control) について記述を行う。

No. 03 : 03_LS-MIUL

材料識別及び使用リスト（以下 MIUL : Material Identification Usage List）を提出することで材料合意書（以下 MUA : Material Usage Agreement）を得るための文書。

No. 04 : 04_LS-HMST-01

危険材料一覧リスト（以下 HMST : Hazardous Material Summary Table）は、人工衛星を構成する材料の内、危険因子である材料の一覧表を提示し、もしそれらを使用する場合にはどの様に安全化を図るかをまとめて示す文書。

No. 05 : 05_LS-AD-01_Assembly_Drawing

人工衛星の設計図面を CAD（Computer Aided Design）などを利用して全部品について詳細に提示する。

No. 06 : 06_LS-FRC-01_Franchise_Criteria_Sheet

JAXA の支援する人工衛星についてそのシステムと運用が NASA の安全審査の受審を必要とするか否か、NASA から JAXA にその審査権限が与えられる範疇かどうかを判断するために提出する文書。

No. 07 : 07_LS-FCE-01（Structure Fracture Control Evaluation Form）

人工衛星の構造に関わる構造破壊制御の評価のためのチェックリスト。

No. 08 : 08_LS-SAR-01_Safety Assessment Report

安全評価報告書（以下 SAR : Safety Assessment Report）は人工衛星の全てのハザードおよびハザード原因の抽出と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する文書。

No. 09 : 09_LS-STD-01_Standard Hazard Report

あらかじめ JAXA がハザードとしている危険要素のうち、標準的な可燃性材料、危険物・毒物などの材料、鋭利な形状を持つ部位などのハザードの制御、検証について記述する文書（Standard Hazard Report）。別途関連して下記の 2 資料を提出した。

別添資料-1（Attachment-1）として人工衛星の電源回路からの漏れ電流評価文書「Leakage current evaluation of power supply circuits」を提出。

別添資料-2（Attachment-2）として電磁障害（EMI : Electro-Magnetic Interference）による予期せぬ人工衛星電源の活性化評価文書「Unexpected electrical power generation by EMI」を提出。

No. 10 : 10_LS-UNQ-01_Unique Hazard Report Structure

予め JAXA がハザードとして取り上げている危険要素のうち、構造に関わるハザードの制御、検証について記述する文書。

No. 11 : 11_LS-UNQ-02_Unique Hazard Report Battery

予め JAXA がハザードとして取り上げている危険要素のうち、バッテリーを主たる危険要素とした電源系に関わるハザードの制御、検証について記述する文書。

No. 12 : 12_LS-UNQ-03_Collision to ISS

予め JAXA がハザードとして取り上げている危険要素のうち、予期せぬアンテナ展開などによる ISS への衝突などを危険要素としたハザードの制御、検証について記述する文書。

No. 15 : 15_LS-VTL-01_Safety Verification Tracking Log

人工衛星のフライトモデルの検証において安全審査 3 までに確認できない項目を人工衛星引き渡しまでに確認するためのリスト。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 1

人工衛星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設計説明文書 (Hazard Controls for wiring EM) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 2

LignoSat 技術実証モデル (以下 EM : Engineering Model) 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-SAFE-Wooden Panel No Particle Detection Report) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 3

LignoSat の Battery Heater の検査報告書 (Battery Heater Inspection) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 4

LignoSat の Battery Heater の検修報告書 (Battery Heater Inspection) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 5

LignoSat の Battery Heater の試験報告書 (Battery Heater Test Report) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 6

LignoSat の Battery Heater の熱解析報告書 (Battery Heater Thermal Analysis Report) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 7

LignoSat EM の熱真空試験の試験報告書 (LS-Sys-EM-TVT-Rep) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 8

LignoSat の打ち上げに先立ち 2022 年 3 月に打ち上げられ 2022 年 12 月の間 ISS 日本きぼう実験棟暴露部 JEM 暴露部で実施した三種類の木質材料「ホウノキ」「ヤマザクラ」「ダケカンバ」の半年間の真空曝露試験 (以下 ExBAS : The Exposed Experiment Bracket Attached on i-SEEP) 報告書 (LS-SAFE-ExBAS Report) 。

安全審査 0 / 1 / 2 の補助文書 その 9

LignoSat EM のアンテナ収納工程の手順書。

(iii) 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。

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気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

LignoSa 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))。

(iv) NASA 安全審査担当者との意見交換会

(iv-1) NASA 安全審査ボード (NASA Safety Board メンバー) 説明会の事前準備会

開催日：2023/12/20

参加者：京都大学 LignoSat プロジェクトチーム、JAXA SFCB メンバー、JAXA 安全審査委託企業 (MBA、JAMSS)

議論の内容：木造人工衛星の構造に関わる安全評価の考え方を下記2件の資料を用いて NASA/JAXA の安全審査ボードの範疇の確認 (フランチャイズレベル) を行うこと。

結論：JAXA の安全審査パネルによる安全評価が認められた。(フランチャイズ1)

資料文書：1. LignosatVerificationPlan_1225b
2. LignoSat_Structural_Information_v5.6

(iv-2) NASA 安全審査ボードとの説明会

開催日：2024/1/25

参加者：NASA Safety Board メンバー、京都大学 LignoSat プロジェクトチーム、JAXA SFCB メンバー、JAXA 安全審査委託企業 (MBA、JAMSS)

議論の内容：木造人工衛星の構造に関わる安全評価の考え方。

結論：JAXA の安全審査パネルによる安全評価が認められた。(フランチャイズ1)

資料文書：1. LignoSatVerificationPlan_1225
2. LignoSat_Structural_Information_v5.6

(v) JAXA 安全審査経緯

事前調査として三井物産エアロスペース社による NASA 安全審査受信のための事前調査を依頼し、その調査報告書が2019年3月31日に京都大学に納入された。以下に JAXA との安全審査経緯を示す。

(v-1) JAXA 安全審査担当部署との事前打ち合わせ会議

京都大学の LignoSat の ISS から放出する方向性が打ち出されたことから、JAXA 安全担当部署との事前打ち合わせ会議が 2022 年 11 月 16 日に設定され、LignoSat 衛星の概要説明が行われた。

(v-2) 安全審査 Kickoff 会議の開催

京都大学の LignoSat の ISS から放出する方針が決まったことから JAXA 安全審査を受審することになり、2023 年 1 月 11 日に京都大学と JAXA 安全審査委員、JAXA 安全審査支援企業（MBA 社、JAMSS 社）の Kickoff 会議が開催された。京都大学側から LignoSat についてパワーポイント資料を用いて説明が行われ、審査の対象となる項目の質疑応答が行われた。

(v-3) 安全審査 0/1/2 の文書作成作業（MBA 社・JAMSS 社との調整）

1) SFCB 指摘票

2024 年 2 月 2 日から全 24 件の指摘票を受領し、2024 年 3 月 26 日までにすべての指摘票の回答に対し了承された。

2) 全体コメントリストによる事前審査

2023 年 8 月 29 日付けの全 47 件のコメントを受領し、2024 年 3 月 22 日にすべてのコメントの回答に対し了承された。

(v-4) 週間進捗報告会

京都大学 LignoSat チームと JAXA 安全審査支援チーム（MBA、JAMSS）JAXA きぼう利用センターとの安全審査提出文書の進捗報告会が 2023 年 6 月 27 日から毎週 1 回の頻度で開催された。報告会は基本的に毎週火曜日の午前中の開催。令和 6 年度も同じ頻度で開催予定。

(v-5) JAXA 安全審査 0/1/2

JAXA 安全審査会が 2024 年 4 月 2 日に開催される予定であり、LignoSat 衛星の安全審査 0/1/2 の承認が得られれば、フェーズ 3 の工程に進むことになる。

(v-6) 安全審査 3 の文書作成作業（MBA 社・JAMSS 社との調整）

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る予定。

(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）

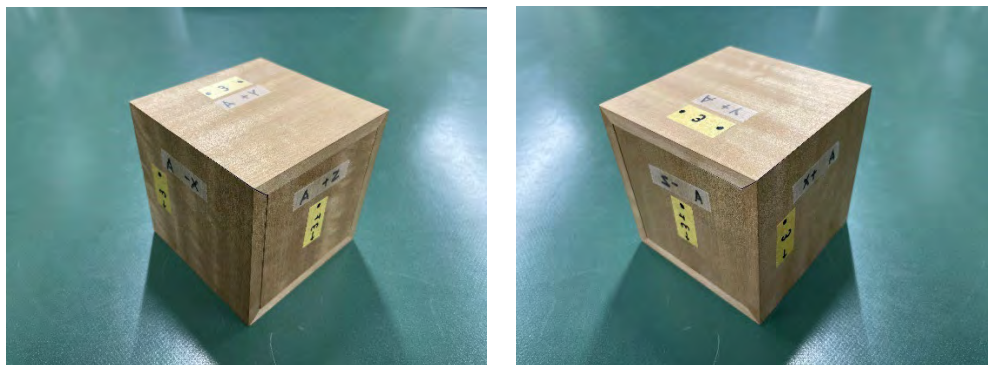


図 1-1 第 1 世代 (Version 1) の木造人工衛星モデル

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)

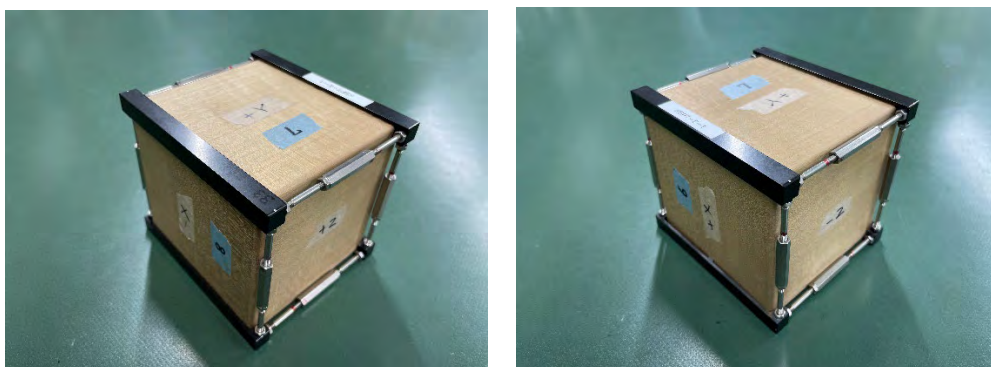


図 1 - 2 第 2 世代 (Version 2) の木造人工衛星モデル

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)

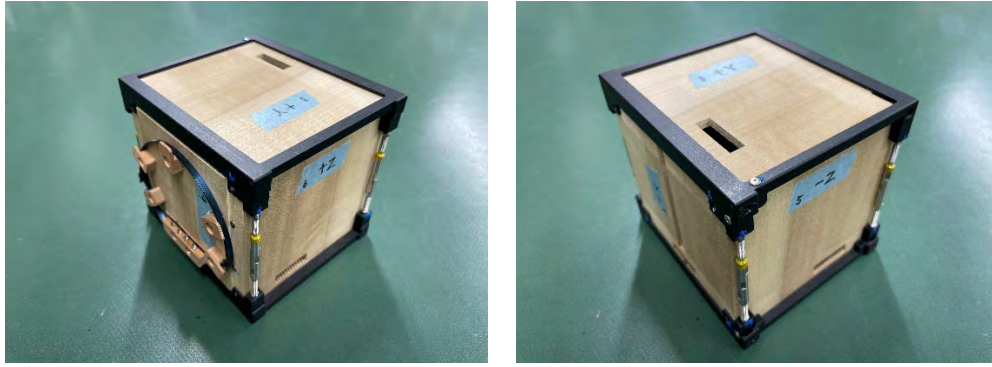


図 1-4 第 6 世代 (Version 6) の木造人工衛星モデル

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)

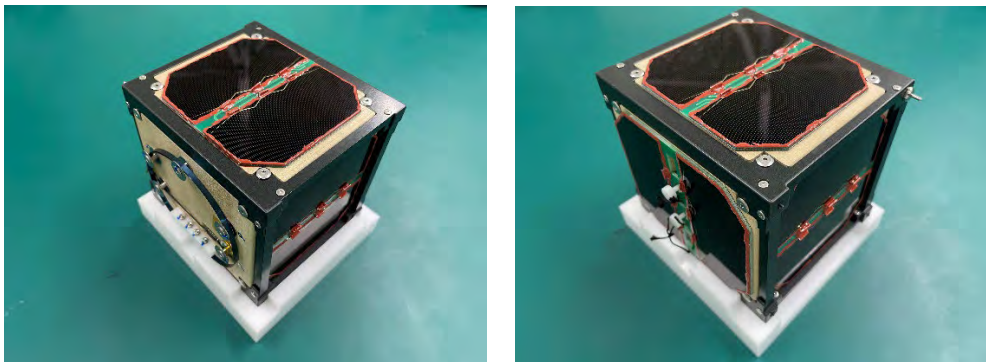


図 1-6 第 8 世代 (Version 8) LignoSat Flight Model

(ii) FM 熱真空試験

FM 熱真空試験は、LignoSat-FM が真空かつ ISS の環境温度下にあっても運用可能な状態を維持できることを確認し、JAXA 安全審査において、J-SSOD から放出するための要件を満たしていることを示すものである。

(ii-1) 試験方法

試験場所：九州工業大学超小型衛星試験センター

試験設備：Pett 熱真空チャンバー（図 1-7）

真空度： 3×10^{-2} Pa 以下 1×10^{-1} Pa 以下の高真空環境で、宇宙環境を模擬する。

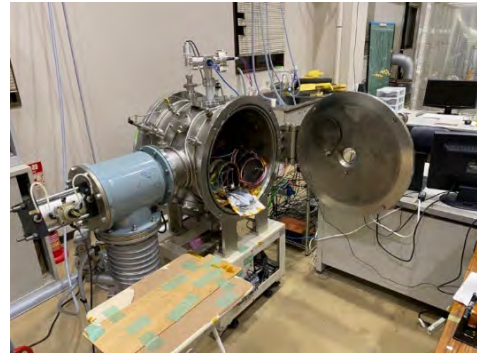


図 1-7 Pett 熱真空チャンバー

温度範囲：-15℃～60℃（温度プロファイルは図 1-8 を参照）

温度範囲は、ISS 放出衛星の要件が記された、JAXA アコモデーションハンドブックの温度要件に依る。チャンバー温度は、図 1-8 の様に、低温（-15℃）区間と高温（60℃区間）を設け、それぞれ区間の長さを軌道 1 周にかかる 1 時間半以上取ることで、軌道上の環境を模した熱負荷を与えた。また、試験中の温度測定については、温度参照点（+Y 面外側：+Yex、-Y 面内側：-Yex）、衛星外面パネル内側（+X、-X、+Y、-Y、+Z、-Z）、バッテリー（Bat）、衛星内部基板（Back Plane Board: BPB、Mission Board: MSN）に熱電対を貼付し、温度を測定した

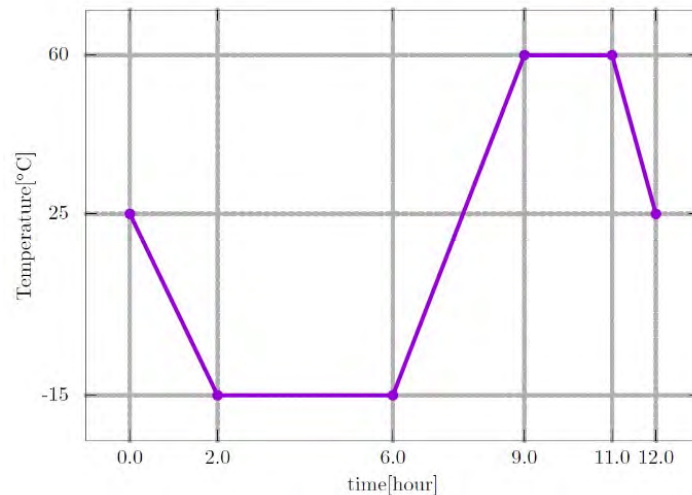


図 1-8 温度プロファイル

(ii-2) 試験結果

試験は 2024 年 3 月 6 日 11 時 30 分から 3 月 7 日 3 時までの日程で実施した。

図 1-9 に試験中に計測した温度を時刻に対してプロットした結果を示す。

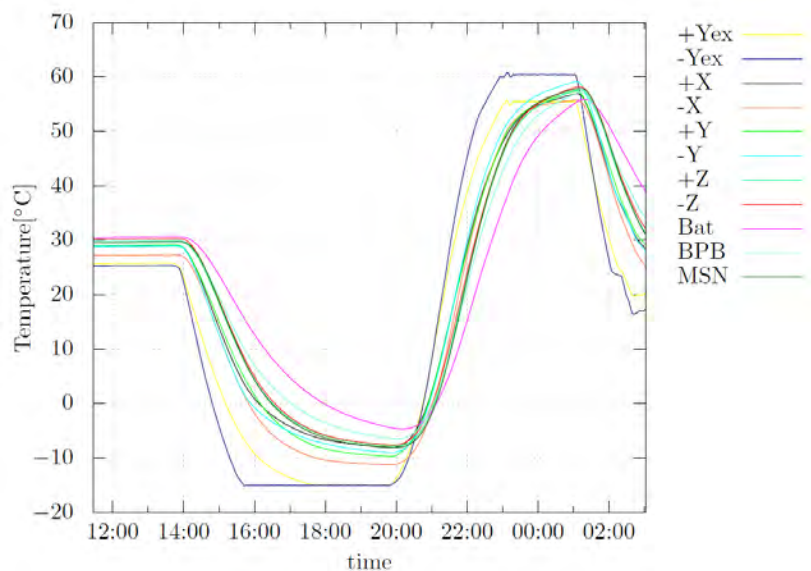


図 1-9 熱電対で計測した温度変化

LignoSat のサブシステムの中で、動作温度範囲がもっとも狭い($-15^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$)、バッテリー(ピンク色の線)の温度変化が $-15^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ の範囲に収まっており、LignoSat-FM は宇宙空間においても問題なく動作できることがわかった。試験後、すべて分解を行い、外観検査を実施した。木製の外面パネルを含め、割れ等の異常は見られなかった(図 1-10)。

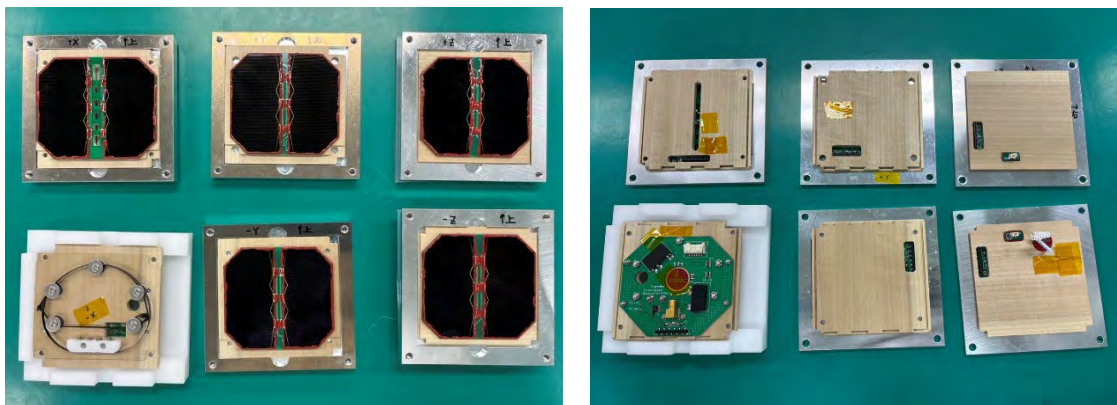


図 1-10 LignoSat-FM 外観検査時の写真

また、熱真空試験の実施前、実施中に OBC (On-Board Computer)からのデータをリアルモニター(ラップトップ PC)で確認し、OBC の機能と Battery 電圧に異常がないことをチェックする機能試験を実施した。衛星は熱真空試験により動作不良等の悪影響を受けなかった(図 1-11・12)。

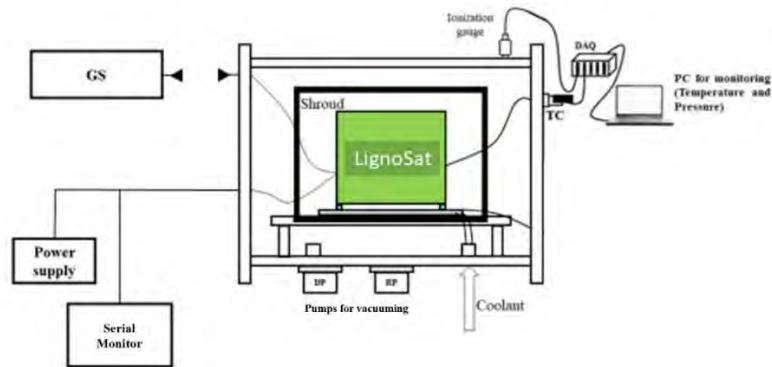


図1-11 機能試験コンフィギュレーション



図 1-12 機能試験の様子

(iii) FM 振動試験

(iii-1) 試験目的

LignoSat-FM はロケットにより ISS に搬送されるが、その際打ち上げケースに収納される。本試験はその打ち上げケースを模した治具に LignoSat を入れた後に、ロケットの打ち上げ環境を模した振動を与えその応答を見ることで、LignoSat が打ち上げ環境に耐える構造を有していることを検証することを目的としている。

(iii-2) 試験形態

治具上に当該試験の供試体である FM を搭載し各種試験を実施した（図 1-13）。

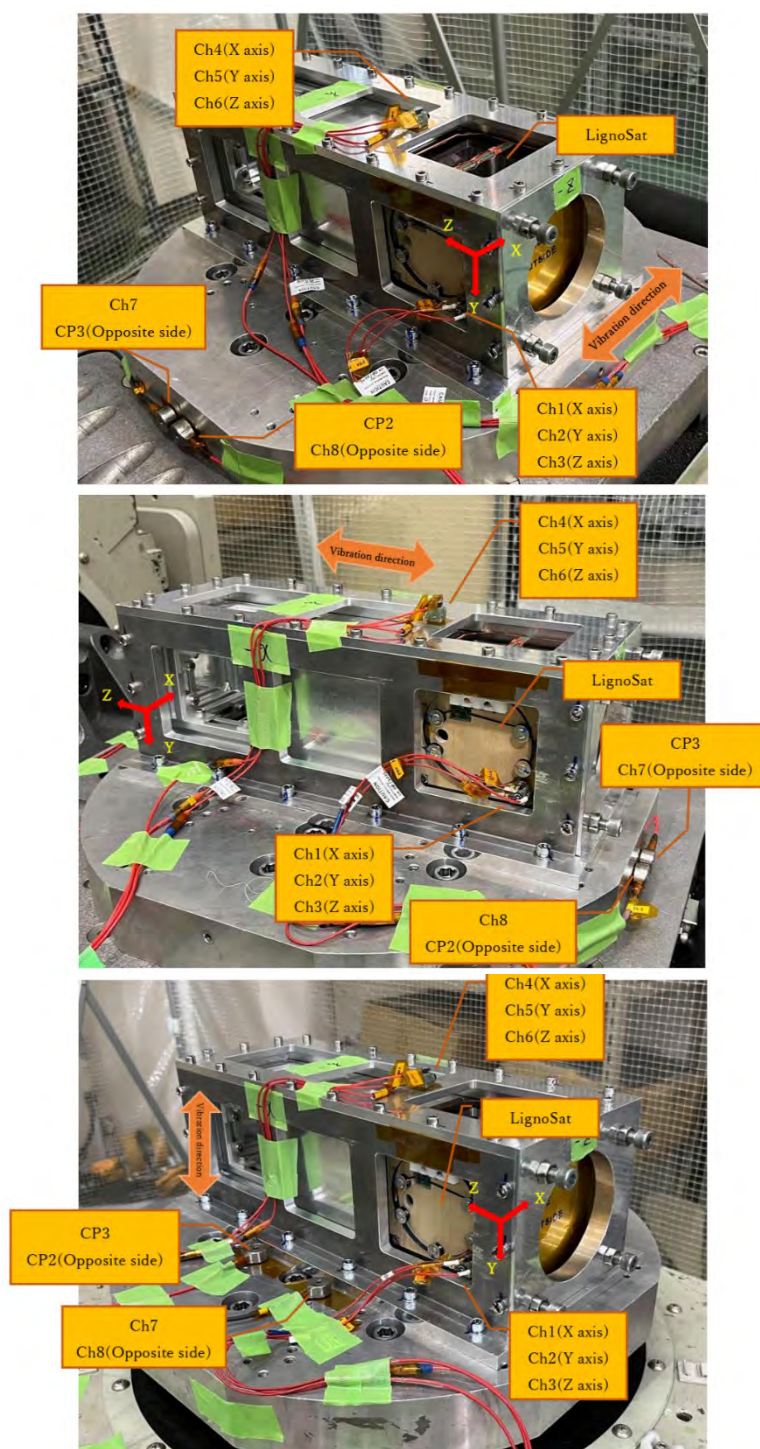


図 1-13 振動試験の様子(上から順に X 軸、Y 軸、Z 軸)

(iii-3) 試験実施日時、場所

2024 年 4 月 2 日 九州工業大学超小型衛星試験センター 振動試験機

(iii-4) 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、モジュールサーベイの条件を以下に示す。

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示す。

表 1-3 ランダム AT 加振での加振レベル

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
オーバーオール 加速度	4.273 Grms
印可時間	各軸 60 秒
加振方向	X, Y, Z の 3 軸

また、ランダム AT 加振の試験条件公差は以下に示すとおりである。

- 全体実効値レベル：±1.5 dB
- パワースペクトル密度：+3 dB/-1 dB
- 振動周波数：±2 %又は 1 Hz の大きい方
- 負荷時間：+10 %/-0 %

(iii-5) 計測

標定となる搭載機器取り付け部位・構体パネルの代表点に、加速度センサを取り付けた。加速度センサ取り付け位置を図 1-14 に示す。



図 1-14 加速度測定点

(iii-6) 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、振動試験前後での各軸の波形を図 1-15-1・2・3 に示す。

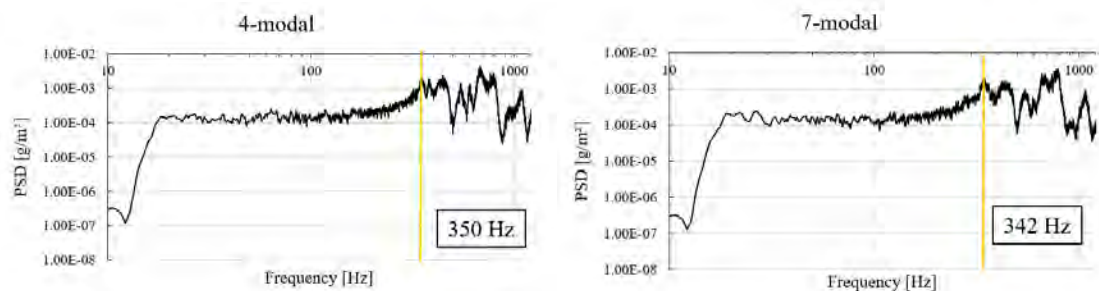


図 1-15-1 X 軸方向ランダム加振前後でのモーダルサーベイ時の波形
(左：ランダム加振前、右：ランダム加振後)

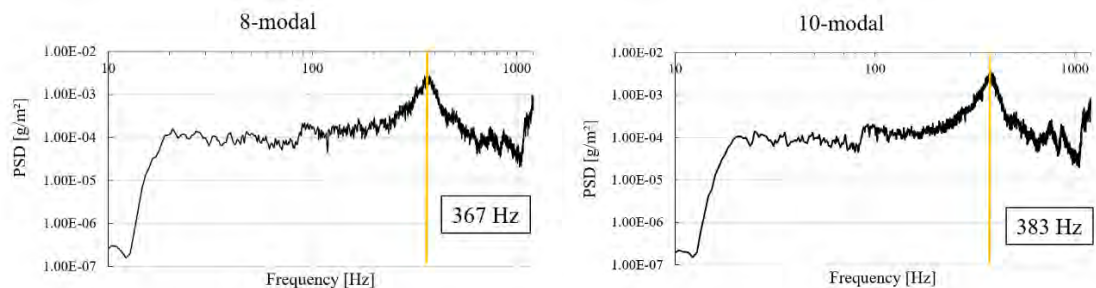


図 1-15-2 Y 軸方向ランダム加振前後でのモーダルサーベイ時の波形
(上：ランダム加振前、下：ランダム加振後)

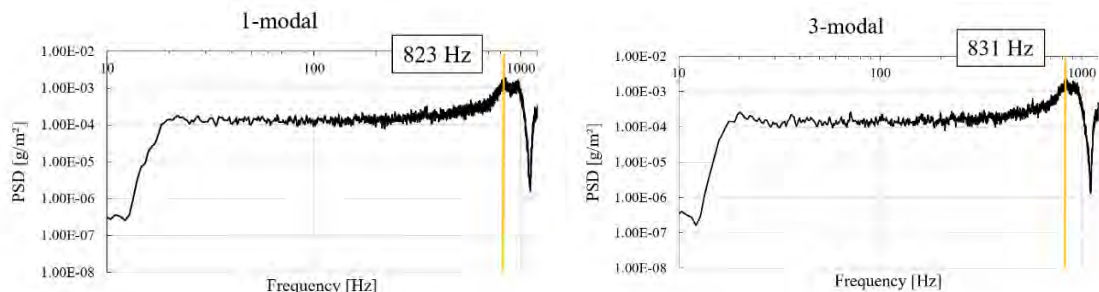


図 1-15-3 Z 軸方向ランダム加振前後でのモーダルサーベイ時の波形
(上：ランダム加振前、下：ランダム加振後)

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。

(B) 木造構体内部に設置できるアンテナ・姿勢制御システム

(1) パッチアンテナ

木造人工衛星 2 号機の内部にパッチアンテナを組み込むにあたり、木板による影響を明らかにする必要がある。今回は木板の厚み及びパッチアンテナとの距離を変えながらアンテナパターンと S パラメータを測定することにより、木造構体内部におけるパッチアンテナの性能を明らかにすることを目的とする。パッチアンテナは京都大学で設計製作された物であり、令和 4 年度委託業務成果報告書参考資料 1 に詳述されている。

(i) 試験 1：アンテナパターン計測試験

[計測準備]

今回のパッチアンテナ計測試験は、九州工業大学超小型衛星試験センターにある電波暗室を使用して行われた。計測に使用するケーブルを全て繋ぎ、そのケーブルをスペクトルアナライザとシグナルジェネレーターに接続し、計測する周波数 2.4025 GHz におけるケーブルロスを選定した。床面に電波吸収体を敷いた六面電波暗室内のターンテーブル上に発布スチロールのブロックを積み上げ、その上に治具に取り付けたパッチアンテナを設置した。この際、パッチアンテナがターンテーブルの中心上に来るように設置した。また、電波暗室に備え付けられているアンテナ設置台に電波受信用のヘリカルアンテナをパッチアンテナと向かい合うように設置した。なお、パッチアンテナが右旋であるため、このヘリカルアンテナも右旋のものをを使用した。このようにして設置した2つのアンテナ間の距離と床からの高さを測定した。ヘリカルアンテナをスペクトルアナライザに接続し、パッチアンテナをシグナルジェネレーターに接続した。本試験の構成は図 1-16 のような構成である。また、図 1-17 に実際の電波暗室内の様子を示す。

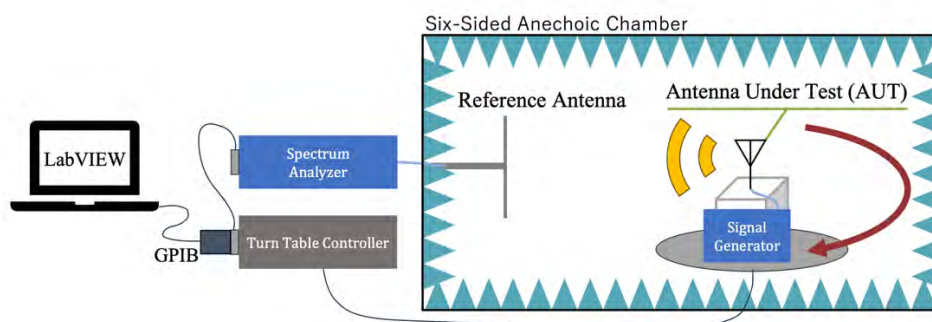


図 1-16 試験の構成図
(九工大「自動アンテナパターン測定ソフトの使い方」参照)

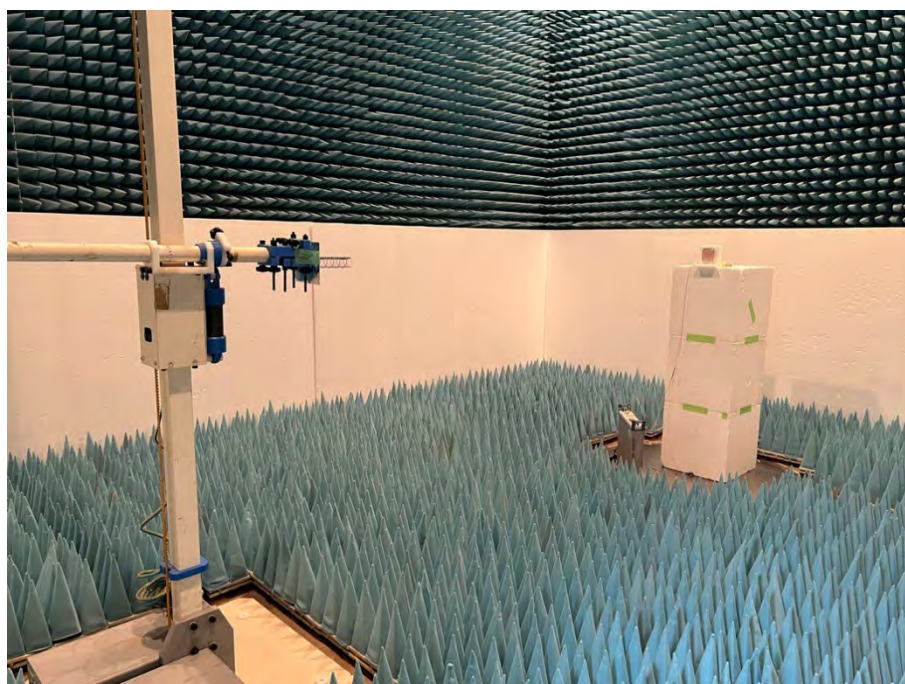


図 1-17 アンテナパターン計測時の電波暗室内の様子

アンテナパターン試験で計測した値と既知の情報をアンテナパターン計測ソフトウェアに
入力し、計測準備が完了した。実際に上記の値を入力した画面の写真が図 1-18 である。

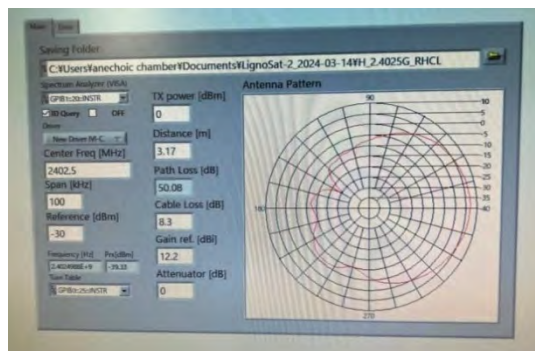


図 1-18 アンテナパターン測定ソフトウェア入力済画面

【計測方法】

上記のように設置した状態で計測ソフトウェアを用いて測定を開始する。パッチアンテナ
1（図 1-19）が設置されているターンテーブルが回転し、計測は自動で行われた。パッチア
ンテナは長方形の形をしており、縦向きに設置する場合（H-plane）と横向きに設置する場
合（E-plane）それぞれにおいて計測を行なった。木板なしと木板ありの状態で計測を行な
った。木板を設置する際、木板の厚さ 4 種類（3.5, 4.5, 5.5, 6.5 mm）とパッチアンテ
ナ・木板の間隔 4 種類（0, 5, 10, 15 mm）の組み合わせの 16 通りで測定を行なった。合計
34 通りの場合のアンテナパターンを計測した。

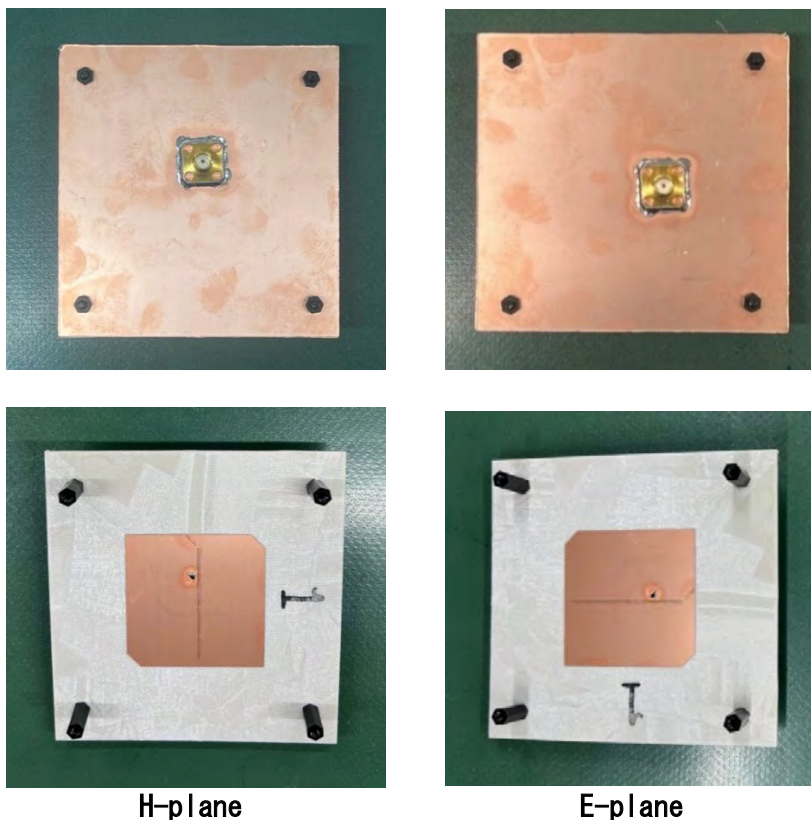


図 1-19 パッチアンテナの向き（表裏各 2 種類）【計測結果】
計測結果を参考資料 1 に掲載する。

(ii) 試験 2 : S パラメータ計測試験

[計測準備]

床面に電波吸収体を敷いた六面電波暗室内に発布スチロールのブロックを積み上げ、その上に治具に取り付けたパッチアンテナを設置した。キャリブレーションを行なった VNA (ベクトルネットワークアナライザ) とパッチアンテナを同軸ケーブルで繋いだ。図 1-20 にパッチアンテナを設置した様子を示す。



図 1-20 S11 値計測時の様子

[計測方法]

VNA の画面に設定した周波数帯における S11 値のグラフが表示されるため、その値を観測・保存した。人体は計測結果に大きな影響を与えるため、計測時はしゃがみ込んで計測を行なった。なお、本計測はパッチアンテナ 1・パッチアンテナ 2 それぞれで行なった。木板を設置する際、木板の厚さ 4 種類 (3.5, 4.5, 5.5, 6.5 mm) とパッチアンテナ・木板の間隔 4 種類 (0, 5, 10, 15 mm) の組み合わせの 16 通りで測定を行なった。つまり以上の組み合わせを考えて、合計 34 通りの場合の S11 値を計測した。

[計測結果]

計測結果を参考資料 2 に掲載する。

(iii) 考察

以上に示した試験結果からパッチアンテナの性能について考察する。

● 指向性

パッチアンテナのアンテナパターンより、パッチアンテナの指向性が認められた。パッチアンテナが電波を発する方向とその反対方向では、電波の強度に 2 倍ほどの差が見られた。このことから、2 号機での姿勢制御は通信精度に大きく影響すると考えられる。

● アンテナパターンの凹みに関して (各図の左上方向)

計測したアンテナパターンでは図の左上方向のパターンが凹んでいる。この原因としては、下の写真のようにこの方向に SMA ケーブルが配置されており、この SMA ケーブルの存在が作用しているということが考えられた。SMA ケーブルがパッチアンテナから出された電波を吸収していると考えられる。

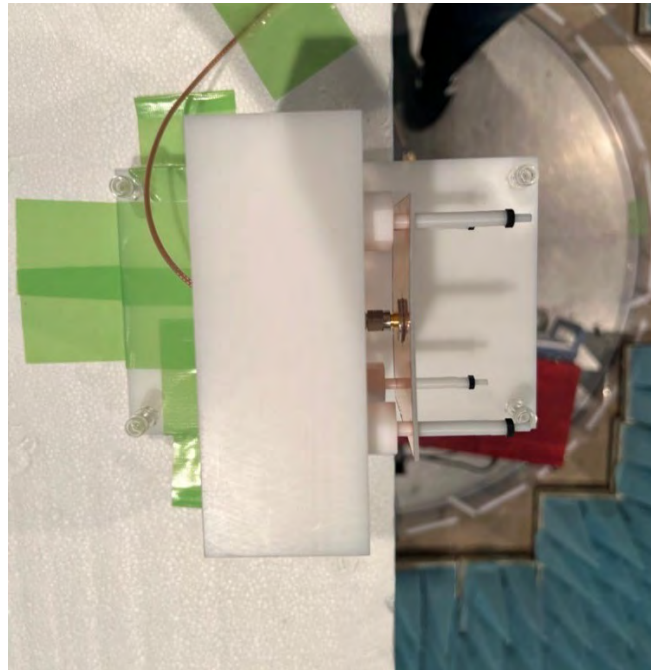


図 1-21 アンテナパターン計測時の SMA ケーブルの様子

- パッチアンテナと木板の間隔の作用

全ての木板の厚さに対するアンテナパターンの計測結果において、間隔が 0 mm、つまりパッチアンテナと木板が密着している時のみアンテナパターンの半径が小さくなっていることがわかった。ここから、パッチアンテナを木板と密着させない方が通信精度の向上を図ることができると考えられる。

- 木板の厚さの作用

パッチアンテナを縦向きに設置した際のアンテナパターンの計測結果において、特に間隔が 0, 5, 15 mm の際に厚さ 3.5 mm のパターンのみ半径が大きくなっていることがわかった。パッチアンテナを横向きに設置した際には、このような違いは見られなかった。ここから、木板の厚さは薄い方が通信精度の若干の向上を図ることができると考えられる。しかし、木板を薄くすると強度が低下するデメリットもあるため、あらゆる観点から検討する必要があると思われる。

- S11 値の評価

パッチアンテナ 1, 2 共に、周波数 2.4025 GHz における S11 値は木板とパッチアンテナの間隔が 5, 10 mm の時が特に小さく、通信性が優れていることがわかった。また、間隔が 0 mm の時のみ、S11 値が最小になる周波数が際立って小さくなっていることも分かった。ここから、パッチアンテナを木板と密着させない方が通信精度の向上を図ることができると考えられる。しかし、木板なしでの計測結果において、パッチアンテナ 1, 2 共に 2.424 GHz あたりで S11 値が最小値を取っている。パッチアンテナは 2.4025 GHz で設計されているため、このズレも検討内容に踏まえる必要がある。

- パッチアンテナ 1, 2 の比較

パッチアンテナ 1, 2 の S11 値の計測結果を比較すると、大きな違いは見られなかったため、パッチアンテナ 1, 2 の性能は同等と考えられる。

(2) 地磁気を使った姿勢制御システム

(i) 磁気トルカ試験

木造人工衛星 2 号機では磁気トルカを用いた沿磁気姿勢制御を行う。姿勢制御システムを構築するため、令和 5 年度には磁気トルカの選別、及び性能確認試験を実施した。磁気トルカとしてすでに飛行実績のある CUBESPACE 社の CUBETORQUER GEN2 を使用する計画である。CUBETORQUER GEN2 CRO010 の性能を表 1-1 に示す。

表 1-4 CUBETORQUER GEN2 CRO010 特性表

特性項目	特性値
サイズ (HxWxL)	10.5x10.5x92 mm
質量	45 g
使用電圧	5 V
磁気モーメント (5V)	1.20 Am ²
線型性	>98%
電気抵抗	36.5 Ω
インダクタンス	0.31 H
時定数	8.4 ms

試験に用いた磁気センサーMMC5893MA に Arduino Uno を接続し、計測を行った。試験は測定環境中の周辺磁場測定、磁気トルカに電圧をかけない状態での磁場測定、磁気トルカに 5V をかけての磁場測定の順に行った。磁気トルカとセンサー間の距離を磁気トルカの長方向 0～11cm、短方向 0～6cm で変化させ、磁気トルカの発生する磁場を測定した。試験時の写真を図 1-22-1・2 に示す。

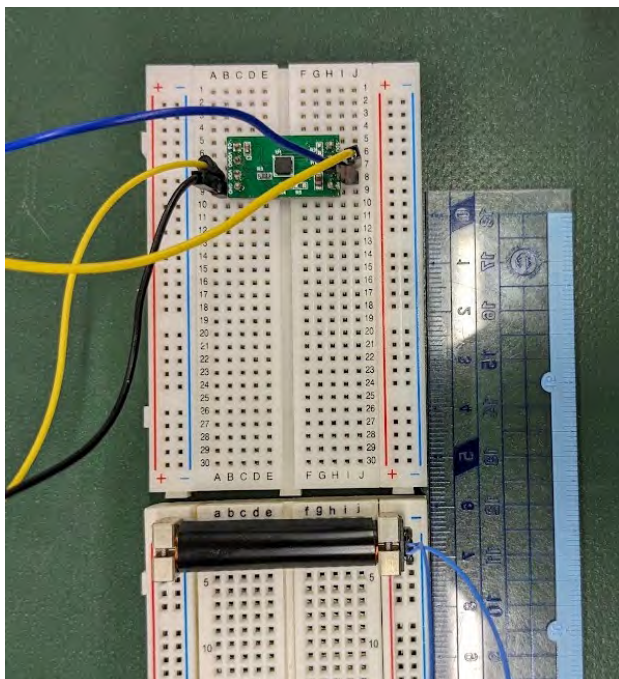


図 1-22-1 磁気トルカの短方向測定

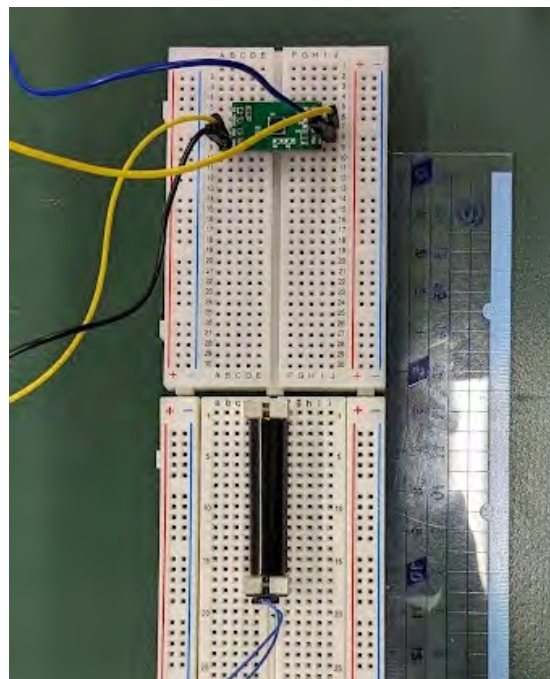


図 1-22-2 磁気トルカの長方向測定

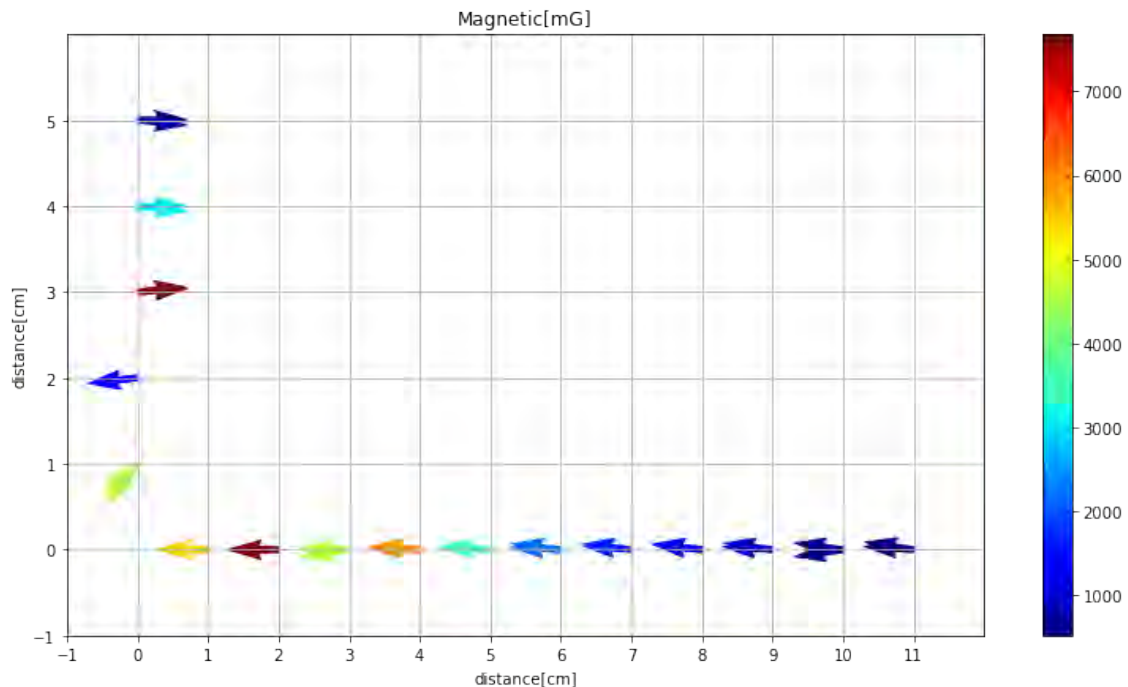


図 1-23 磁気トルカが発生させる磁気モーメント

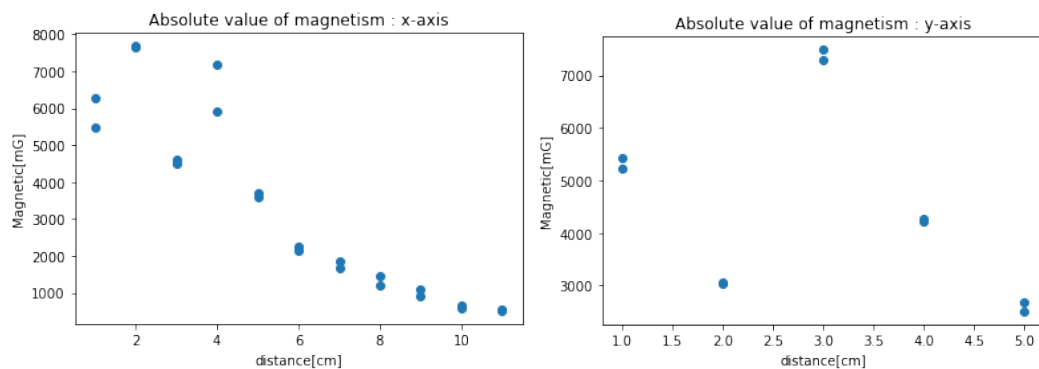


図 1-24 磁気モーメントの大きさ（左：長方向、右：短方向）

試験結果を図 1-23 に示す。磁気トルカ周りに発生する磁場を観測することができた。図 1-24 に示される通り、磁気センサの測定範囲の 8G 以下での測定において、磁場が磁気トルカから離れるにつれて減少すること、磁気トルカの近傍において磁場の方向が変化する領域が確認できた。磁気トルカが発生する磁気モーメント M とトルク T の関係は次式で与えられる：

$$T = M \times B$$

地磁気の磁束密度 B には、ISS から放出される人工衛星の軌道高度である 400 km 上空を想定して推定された値 3.9×10^4 nT を用いることにする。これと得られたデータより、磁気トルカ 1 基で発生できるトルクは、約 4.8×10^{-5} mN 程度である。

(ii) 木造人工衛星 2 号機の姿勢制御システムに関する考察

木造人工衛星 2 号機は指向性の高いパッチアンテナを使用する予定のため、アンテナを地球に向けるために姿勢制御をする必要がある。最も簡単な姿勢制御法は地磁気を使ったシステムである。永久磁石又は電磁石を衛星内に積むことによって、地磁気との間で角モーメントを発生し、衛星の姿勢を制御する。地磁気を使った姿勢制御法に関する理論的考察を参考資料 3 に掲載する。

現在の計画では、京都上空の地磁気の伏角が約 50 度であり、その方向にパッチアンテナの通信強度が最大となる通信軸を向けるのことを考えている。この方法が最も簡単な地磁気を使った最も簡単な姿勢制御法となる。パッチアンテナの指向性が約 30 度あるために、京都上空での通信時間は約 5 分となりパッチアンテナの性能を評価するために十分なデータが得られると考えられる。

この姿勢制御法を採用すると、磁気トルカをパッチアンテナの通信軸と平行に取付けるだけで済み、磁気トルカ 3 本を 3 軸方向に取付ける必要がなくなる。代わりに制御軸回りの回転と章動が残るので、この章動を取り去るために磁気ダンパーが必要になる。

(C) 木造人工衛星 2 号機基礎設計

(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 1-25 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。

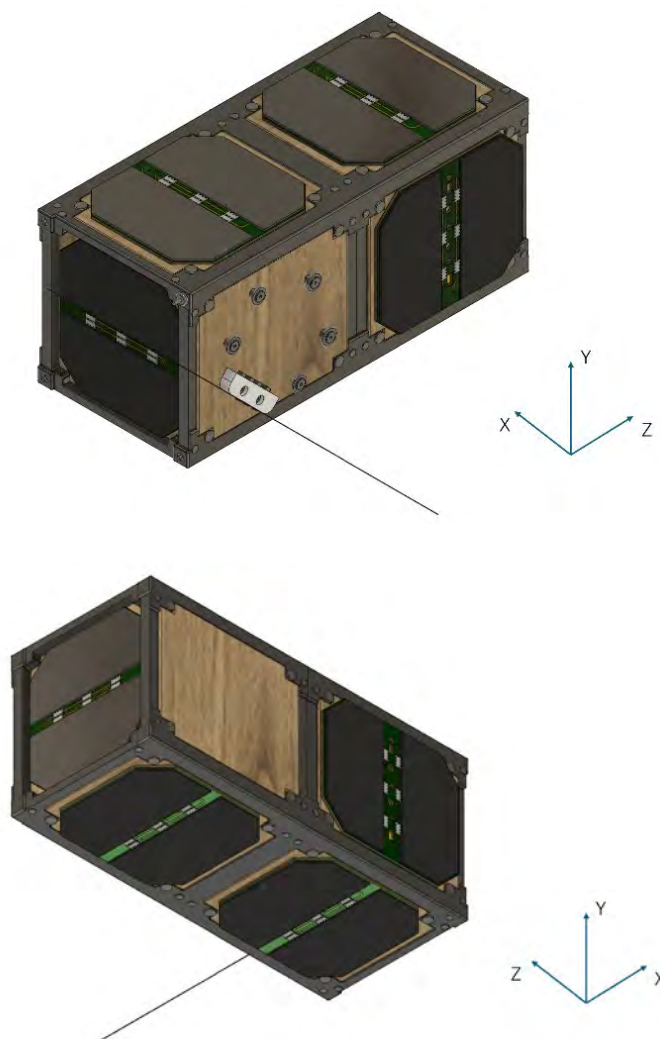


図 1-25 木造人工衛星 2 号機（コンピュータグラフィックス）

図 1-26 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。

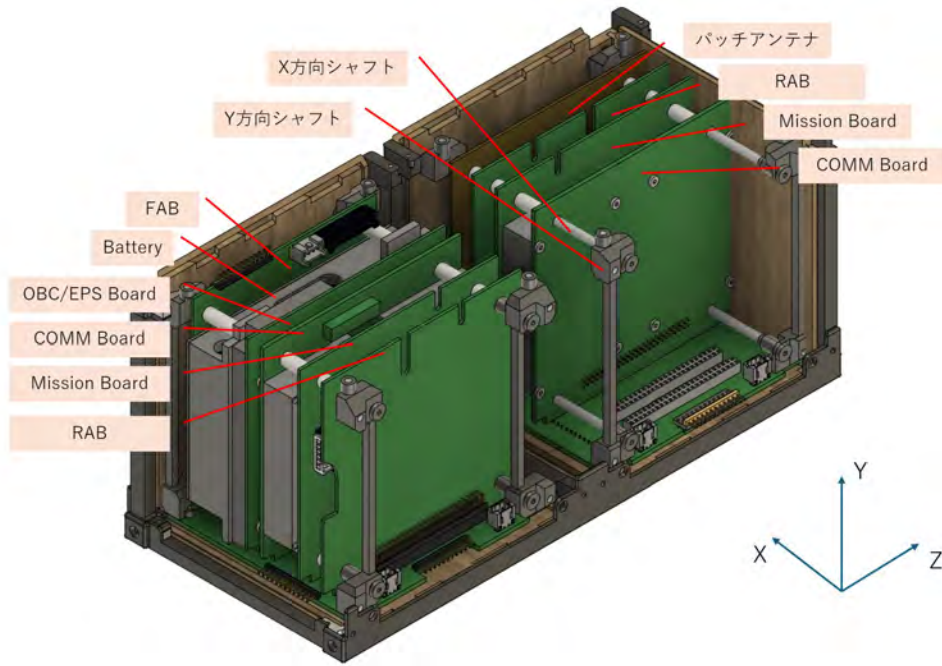


図 1-26 木造人工衛星 2 号機の内部構造

(i) 木造構体

図 1-27 に木造人工衛星 2 号機のアルミフレームに取り付けられた木造構体のイメージ（太陽光セルを除いたもの）を示す。 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 面には、各面 2 枚、 $\pm Z$ 方向には 1 面の径 10 枚の木造パネルにより構成され、その接合部に伝統的な木組み加工を施し、構体の剛性が確保されている。また、ダイポールアンテナが搭載される面とパッチアンテナが位置する面の 2 面を除いた計 8 面には太陽光セルが接着される。

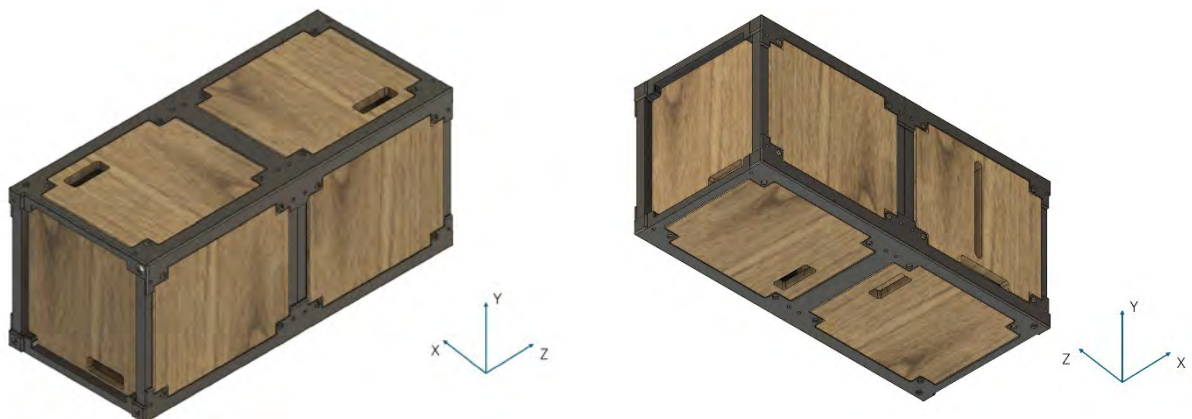


図 1-27 木造人工衛星 2 号機の木造構体（太陽光セルを除く）

(ii) 金属フレーム

図 1-28 に木造人工衛星 2 号機の金属部（主構造）のイメージを示す。木造構体を取り囲むように組み立ての最終段階で取り付けられるアルミフレームは衛星の外力を受け、衛星全体の剛性を担う。また、衛星の内部構造の一部である Y 方向シャフトはアルミフレームとボルトによって締結され、同時に挟み込まれた木造パネル類が摩擦締結により固定される。この際、木造構造にはボルト類は使用しておらず、負担のかからない構造となっている。

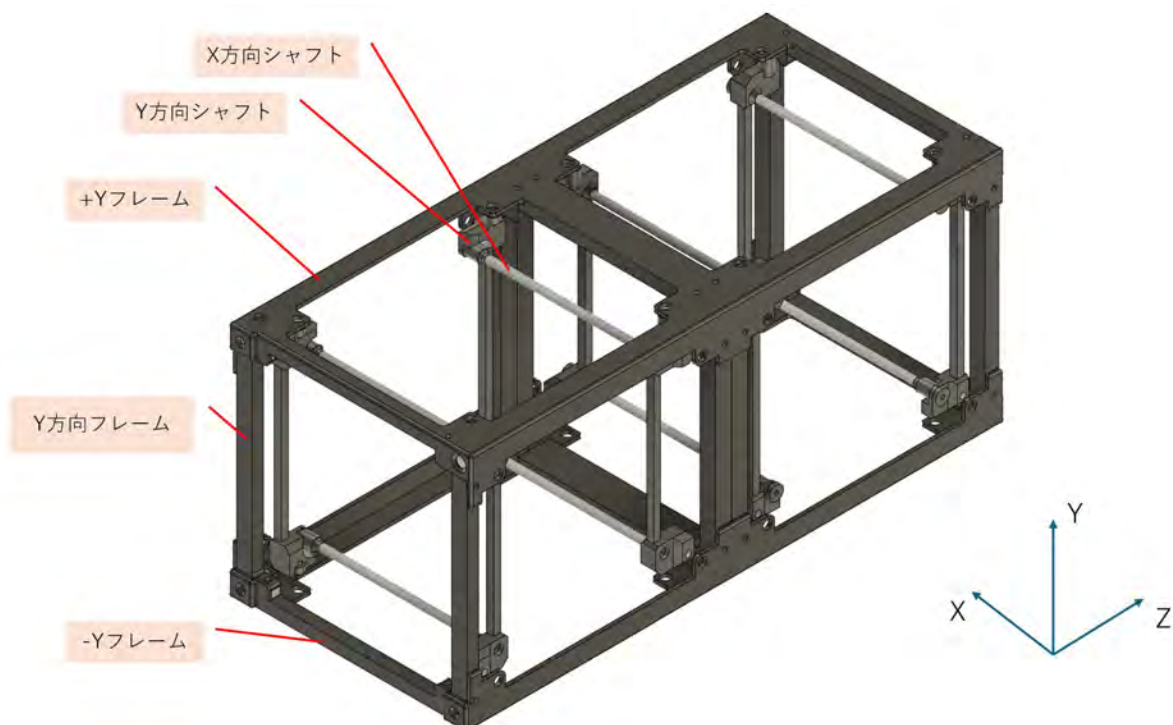


図 1-28 木造人工衛星 2 号機の金属部（主構造）

(3) 木造人工衛星 2 号機のバスシステム系

衛星構体は 10 枚（2U）の木製壁組を組み木の技術で組み合わせて作製した木箱状の木造構体の周囲に、アルミフレームを取り付けた構造をしている。木造構体に用いている木組み工法は、「留形隠し蟻組接ぎ」と呼ばれる日本古来の伝統的技法であり、ネジや接着剤を使わずとも十分な剛性を確保することができる。木造人工衛星 2 号機の主要諸元を表 1-5 に示す。木造人工衛星 2 号機（2U）6 面図を図 1-29 に掲載する。

表 1-5 木造人工衛星 2 号機の主要諸元.

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

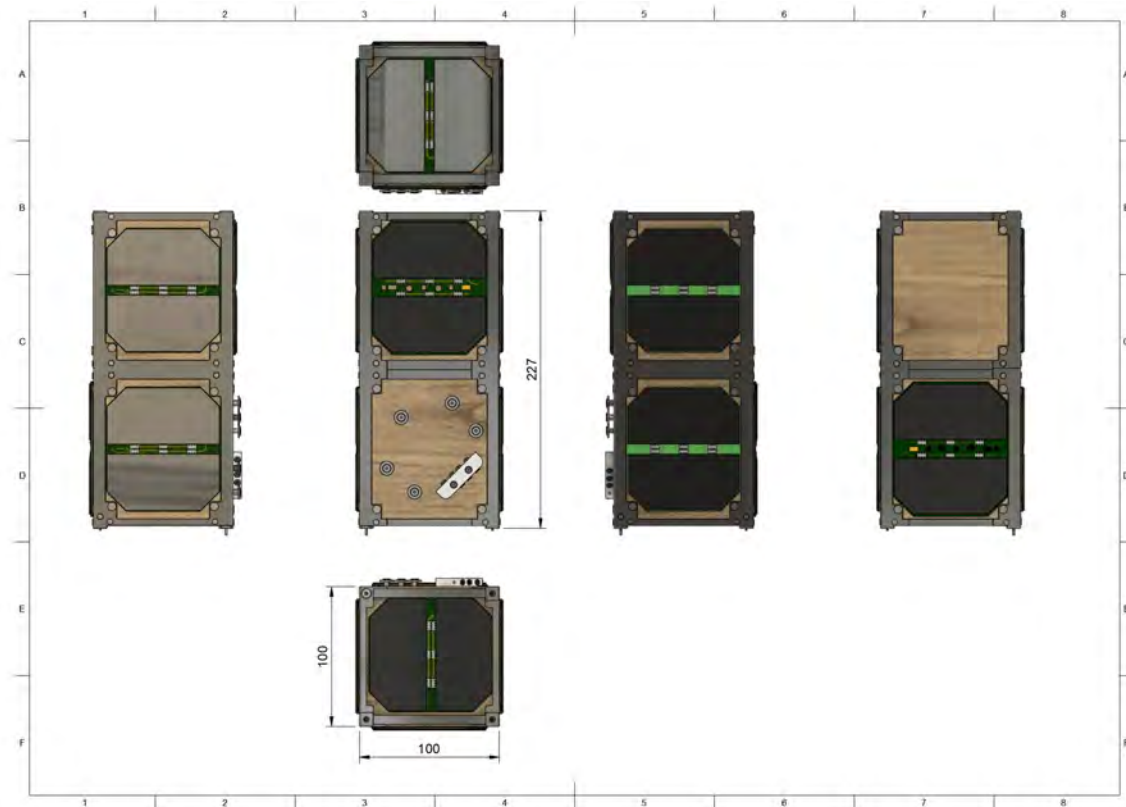


図 1-29 木造人工衛星 2 号機 (2U) 6 面図

木造人工衛星 2 号機は、超小型衛星放出機構を使用するため木造構体外部にアルミフレームを両側から取り付け、構体を締め付ける方式を採用している。木材とアルミフレームを互いにネジ留めしたり接着したりすると、両者の熱膨張率の差異や含水率変化による木材の膨潤収縮などにより、接合部にずれ力が作用することが懸念される。これを回避するため、アルミフレームを木造構体に固着せず、フレーム間を連結する構体内部のシャフトに掛かる引張応力のみを調節することで、木造構体の締め付け力を調整できるようになっている。これにより、含水率変化に起因する木造構体そのものの寸法変化の影響を排除し、交差範囲内で筐体寸法精度要求を満足させることが可能となる。太陽電池パネルはプリント基板を介して他の 8 面 (2U) に各面 2 枚ずつ計 16 枚 (2U) 貼付されており、衛星運用に必要な電力量を確保する。木造構体の各所に適切な形状の貫通孔を設けることで、衛星表面実装部品と内部電子基板との電氣的インターフェースを確保する。

木造人工衛星 2 号機のバスシステムには、木造人工衛星 1 号機で開発されたバスプラットフォームを利用することで信頼性を高める (図 1-30)。地上局からのコマンドに基づき各センサーによって獲得された測定データは、複数の PIC マイクロコントローラーによるデータ処理を介して収集・保存され、UHF 又は 2.45GHz 帯通信を用いて地上局へと伝達される。なお、バッテリー電圧や温度などの基礎データ (ハウスキーピングデータ) は CW 通信により、その他の各種ミッションデータは FM パケット通信によりダウンリンクを行う。

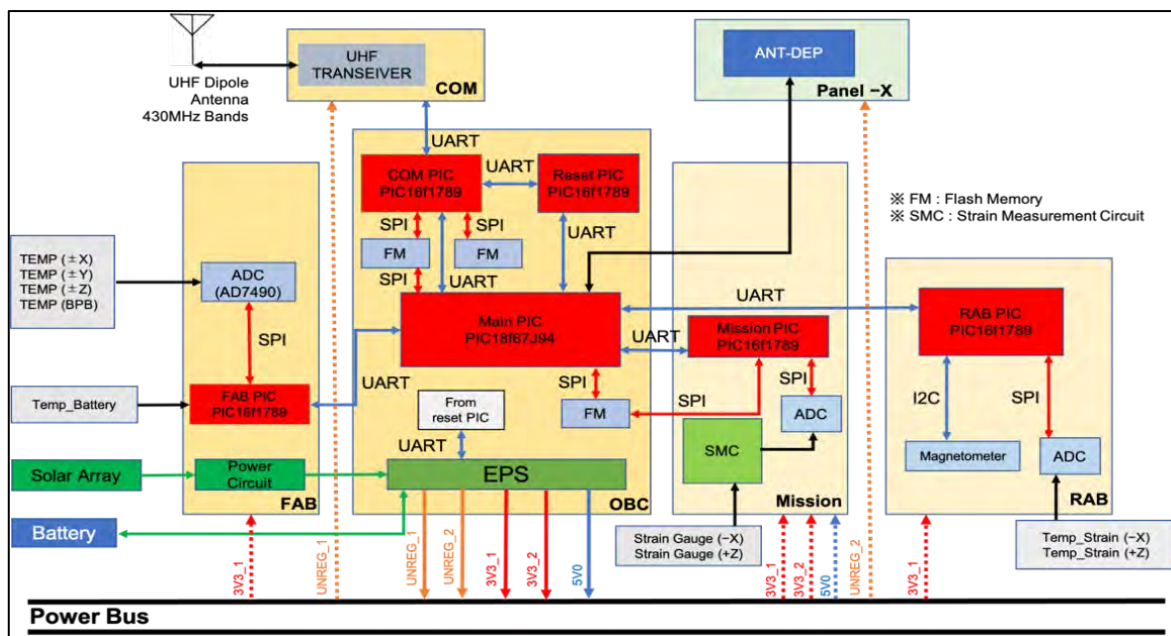


図 1-30 木造人工衛星システムブロック図

太陽電池パネルはプリント基板を介して他の 7 面に各面 2 枚ずつ計 14 枚貼付されており、衛星運用に必要な電力量を確保する(図 1-31)。現在の設計では、太陽電池パネルは木造人工衛星 2 号機の定常運用に十分な電力を提供できる。また、夜間運用のために乾電池を増やす必要はないと考えている。従って木造人工衛星 2 号機に搭載するバッテリーは木造人工衛星 1 号機 (LignoSat) と同様に、3 直 2 列のニッケル水素電池を組み合わせたものを使用する。太陽電池パネルは、木造構体の各所に適切な形状の貫通孔を設けることで、衛星表面実装部品と内部電子基板との電氣的インターフェースを確保する。

表 1-6 木造人工衛星 2 号機電力収支計算表

		COMM CW周期							
		90秒周期							
要素	OBC-EPS and FAB	COM UHF (RX)	COM UHF (TX-CW)	COM UHF (TX-Telemetry)	(アンテナ展開) Burner Circuit	MSN	RAB	姿勢制御	状態ごとの消費電力 (mWh)
最大消費電力 (mW)	395	197	482	3280	10920	59	42	500	
1周あたりの割り当て時間 (h)(理想)	1.53	1	0.5	0.0408	0.00833	1.53	1.53	1.53	
1周当たりの最大消費電力 (mWh)	604.35	197	241	133.824	90.9636	90.27	64.26	765	
Default mode	on	on	on	off	off	on	on	on	
emergency mode (MSN, RAB OFF)	on	on	on	off	off	off	off	off	1961.88
Command uplink and Beacon	on	on	on	on	off	on	on	on	1042.35
アンテナ展開(30 mins)	on	off	off	off	on	off	off	off	2095.704
									695.3136
		</							

木造人工衛星 2 号機の回路図は木造人工衛星 1 号機（LignoSat）のものに改良を加えたものとなる（図 1-31）。

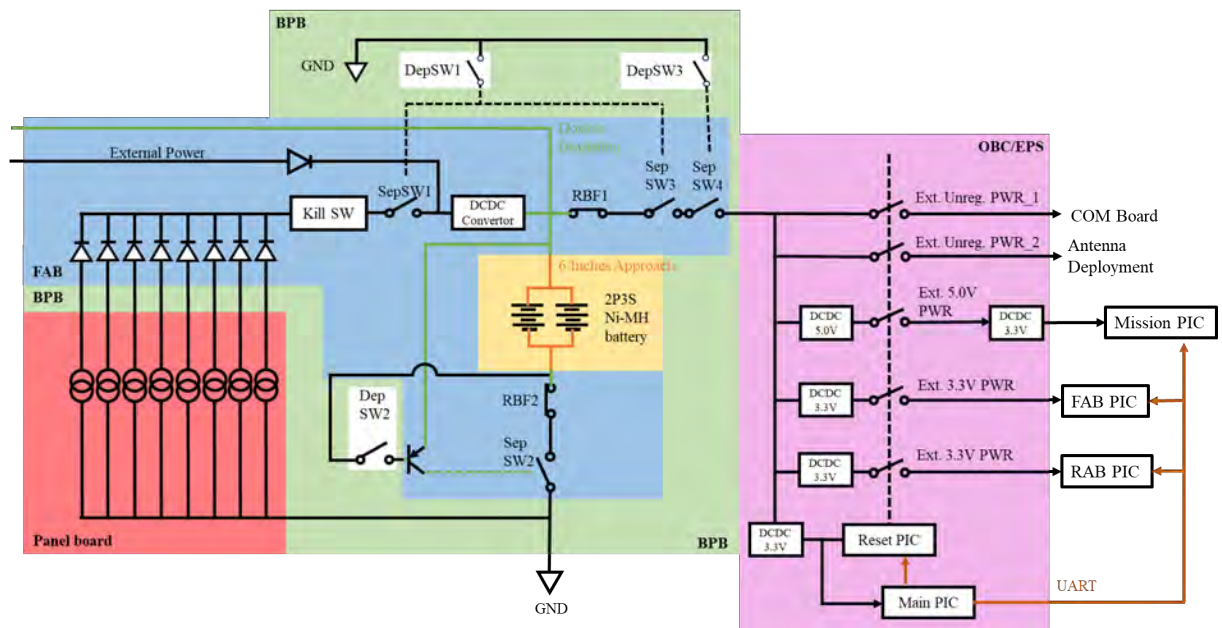


図 1-31 木造人工衛星 2 号機回路図

(4) 木造人工衛星 2 号機のミッション系

木造人工衛星 2 号機では、木造人工衛星 1 号機（LignoSat）で行われる宇宙での木材の物性変化をより詳細に調べることが目的とする。木造人工衛星 2 号機が投入される地上 400km 上空の地球低軌道（LEO）では、激しい温度変化や真空紫外線（VUV）・原子状酸素（AO）による材料の劣化が想定される。例えば、一般に宇宙機の外表面は日照時には+120℃、日陰時には-120℃になる。CubeSat で想定される試験環境は-20℃から+80℃などがあり、LEO で実測された例としては-40℃から+20℃がある。このような熱サイクルに、1 日に約 16 サイクル、1 年で約 5,800 サイクルにさらされる過酷な条件である。このような条件で木材の物性がどう変化するかを明確にする必要がある。次に木造人工衛星 2 号機でのミッションの概要を述べる。

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：特にミッションでは、新しい木材材料としてセルローズナノファイバー（CNF）試料の宇宙空間での物性変化も調べる予定である。CNF は通常の木材試料と異なり等方性材料であり、大型人工衛星（1 辺の長さが数メートルに及ぶ）の構造体の製作も可能である。

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）の相関について検討する：木造人工衛星 1 号機に続いて人工衛星内部の温度環境を詳細に調べる。

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：木造人工衛星内部に設置した地磁気センサ・磁気トルカを使うことによって、人工衛星の姿勢制御の可能性を探究する。

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：木造構体内部に

設置された 2.4GHz 帯のパッチアンテナを使って地上との交信試験を行う。宇宙での展開機構を持たない通信アンテナの性能を評価する。

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。**LignoSat** よりも長期間、より大きなメモリサイズを使用して計測することにより、木造構体の宇宙線防御の可能性を調べる。

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：木造人工衛星 1 号機で実施したアマチュア地上局との双方向通信の可能性をさらに探究する。

② ExBAS の木材の解析

(A) ExBAS 木材試料のミクロ的分析

(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のかを調べるため、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 : A0 評価用ポリイミド樹脂シート



図 2-1 木材曝露試験体 ©京都大学 ©Space BD

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

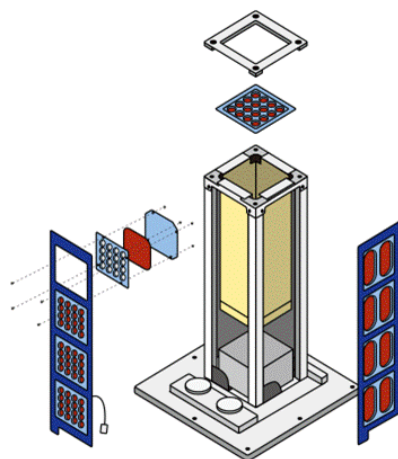


図 2-2 ExBAS の構造 ©Space BD



図 2-3 i-SEEP に取り付けられた ExBAS ©JAXA

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

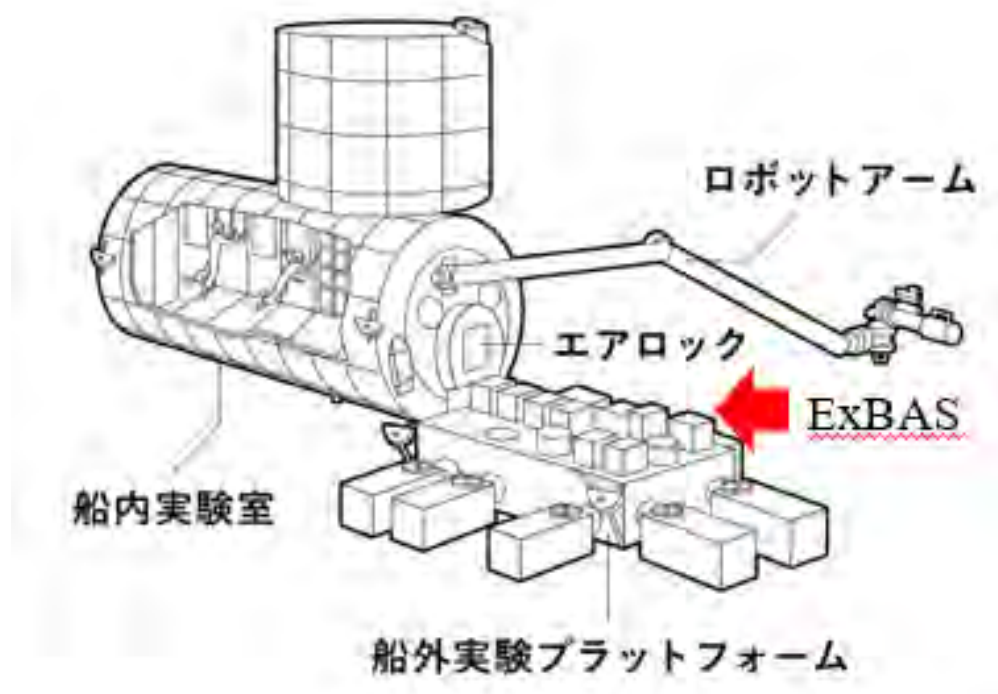


図 2-4 ISS きぼう・船外実験プラットフォーム ©SpaceBD

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

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

(2) ExBAS 試料マイクロ分析結果

岡山大学惑星物質研究所に移送された ExBAS 試料の外見を図 2-7 に示す。宇宙空間に暴露された木材試料はどれも表面が赤褐色に変色している。これは光（真空紫外線）酸化反応によるリグニンの分解と色素有機化合物の生成を示唆している。また、中央のアルミフレームに隠されていた部分は変色が少ないことが分かる。

試料外見

Size:56mm x 8.6mm x 5.0mm

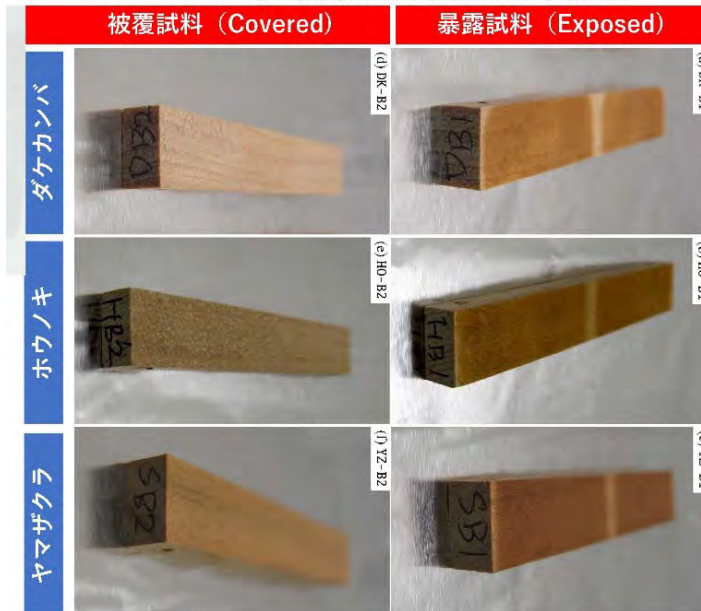


図 2-7 ExBAS 試料外観

図 2-8 に木材試料の化学組成を示す。宇宙曝露実験に用いた木材試料 3 種（ダケカンバ、ホウノキ、ヤマザクラ）のうち、予察的にダケカンバの宇宙曝露体とポリイミドフィルムで包まれた非曝露体、並びにコントロール体について、30-70mg の木材を酸素プラズマで灰化後、55 元素を誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）を用いてバルク化学分析を実施した。さらに比較のために、ホウノキのコントロール体も同様に分析した。

Comparison of Representative Bulk Chemical Compositions of Woods Analyzed by ICP-MS

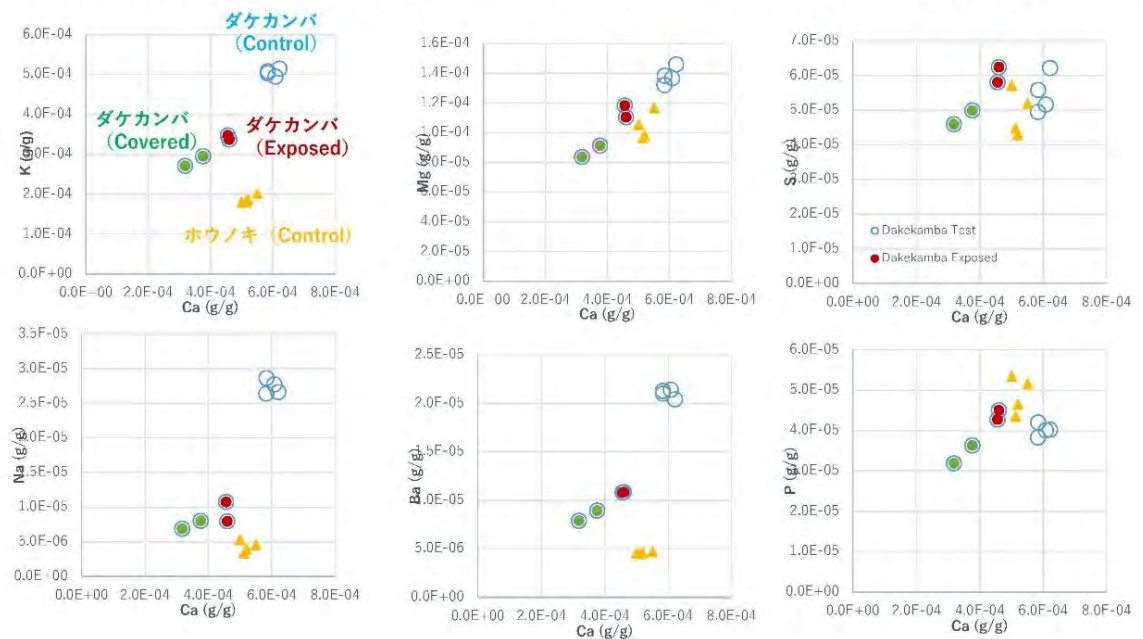


図 2-8 ICP-MS を使って測定した木材試料の化学組成

図 2-8 は、結果の一部として Ca 濃度に対する K、Mg、S、Na、Ba、P 濃度を示す。各試料における分析の再現性は比較的良好であるように見えるが、試料ごとの変動は明らかに再現性を超えている。このことは、木材内の微量元素存在度の不均質性を示していると推測される。したがって、極微量金属元素を用いて宇宙曝露による木材への影響を定量的に評価することは困難である。一方で、木材の成長過程や育った環境（土壌など）の変化のトレーサーとしての活用可能性を示唆していると考えられる。

木材はリグニン、セルロース、ヘミセルロースの 3 つのポリマーから構成されている。それぞれのポリマーは異なる官能基で構成されているために赤外分光光度計（FTIR）を使うと異なる反応を示す。それぞれの振動は赤外線スペクトルの特定の部分で励起され、吸収された光の量として記録される。従って、木材のように複雑な物質の FTIR スペクトルは、吸収された光を表すピークとして存在する多くの振動モードが含まれることになる。図 2-9 に宇宙曝露前後の木材試料の代表的な FTIR スペクトルを示す。

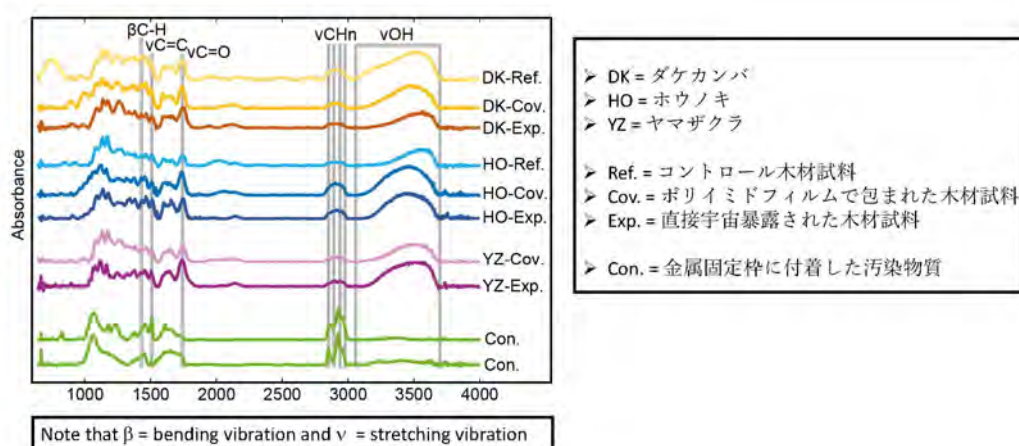


図 2-9 木材の FTIR スペクトル

今回の宇宙曝露実験ではアルミ製ホルダー表面に汚染物質が付着していた。木材表面も汚染物が付着しているので、まず、この汚染物質の影響を取り除く必要があった。アルミ製ホルダーの汚染物質の FTIR スペクトルを図 2-10 に示す。

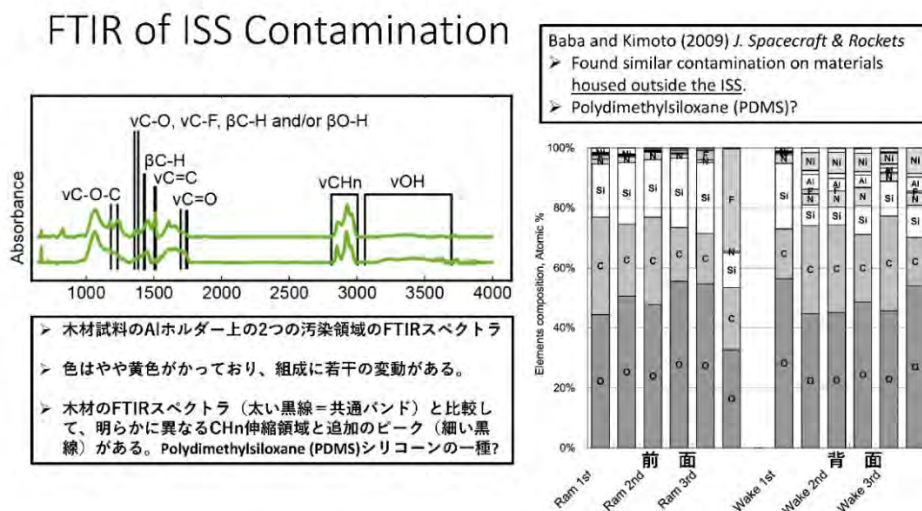


図 2-10 アルミ製ホルダー表面に付着した汚染物質の FTIR スペクトル

汚染された領域はやや黄色がかっており、その組成に若干の変動があった。木材の FTIR スペクトルと比較すると、明らかに異ならう CHn 伸縮領域と追加のピーク（細い黒線）がある。汚染物質は、Polydimethylsiloxane (PDRMS) シリコン一種ではないかと疑っている。

木材表面の FTIR から炭素と酸素の 2 重結合 (C=O) と炭素の二重結合 (C=C) の関係を示したのが図 2-11 である。この図を使うと、前述した汚染物質は左上部に追いやられ、木材試料の反応から汚染物質の影響を取り除くことができる。木材試料はカプトンシートで覆われていたものを Covered として示され、宇宙空間に裸で暴露された試料が Exposed として示されている。Covered 試料は Exposed 試料に比べて C=O/C=C 比がそれほど大きく広がっておらず、宇宙空間の影響をそれほど受けていないと考えられる。木材では C=C は主にリグニンに含まれ、C-H はセルロースに含まれる。C=C と C-H は宇宙空間の環境ではほとんど変化していないが、C=O が宇宙空間では多量に生成されたことがわかる。

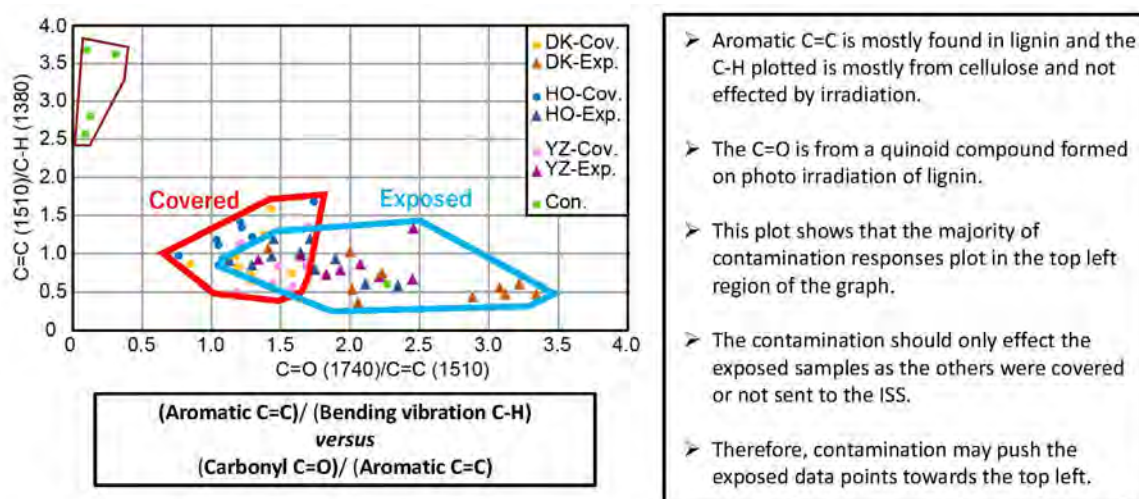


図 2-11 宇宙暴露した木材試料の C=O と C=C の関係

図 2-12 は、図 2-11 の木材試料部分の FTIR スペクトルを拡大して示したものである。ダケカンバ (DK)、ホオノキ (HO)、ヤマザクラ (YZ) 試料の Covered と Exposed を比べると、確かに宇宙空間で暴露されたことによって、C=O がどの試料においても増大していることが分かる。これは高度 400 キロメートルで最も分子数の多い原子状酸素が木材と衝突することによって生成されたと考えることができる。

宇宙暴露実験前の私たちの予想では、木材試料と衝突した原子状酸素は木材試料中の炭素と結びついて一酸化炭素或いは二酸化炭素に変わり木材試料から蒸発して行くだらうと考えていた。それによって木材試料は 1 年間の宇宙暴露で表面が約 1 ミリ削られるだろうと予想した。今回の ExBAS 実験ではその考えが間違っていたことが明らかになった、木材試料、特にリグニンに含まれる炭素は原子状酸素との衝突によって Carbonyl 基 C=O に変わるだけであり、木材試料から失われていくことは無かった。これは昨年度の委託業務成果報告書の中で記した表面の様子が宇宙暴露試験前後でほとんど変化していないことと合致している。

今回の宇宙暴露木材試料のミクロ分析はまだ初歩の分析であり、何故、原子状酸素との衝突によって木材試料では一酸化炭素或いは二酸化炭素が生成されるのではなく、Carbonyl 基 C=O が増加したのかは明らかになっていない。また、真空紫外線による詳細な影響もこれからの分析による。今後さらにミクロ分析を続けて行く予定であり、木材の宇宙暴露による影響を完全に明らかにしたいと考えている。

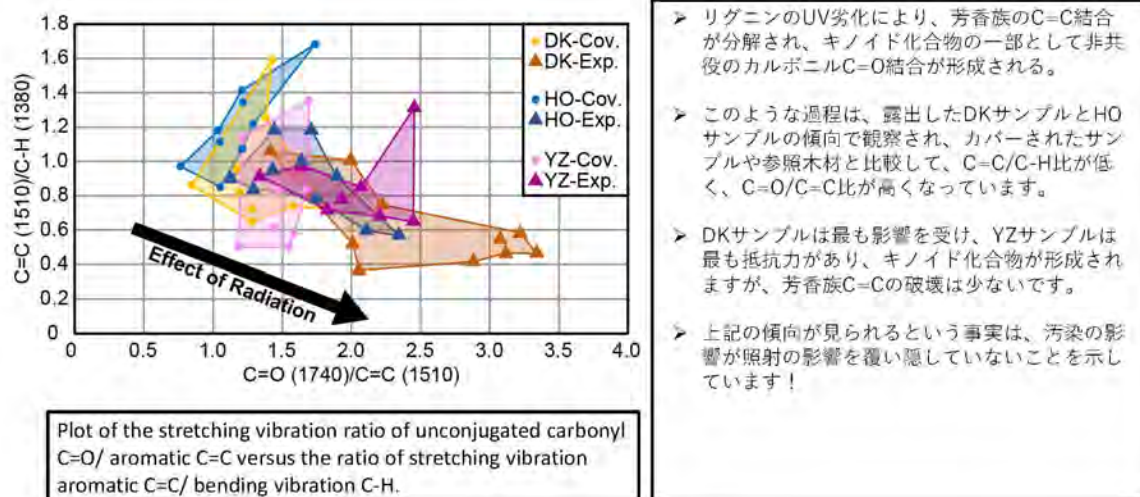


図 2-12 宇宙暴露した木材試料の C=O と C=C の関係

(B) 木材の真空暴露実験

(1) 木材の真空暴露実験概要

2018 年 7 月より長期真空暴露実験を行っている。真空度は 1 Pa (10^{-5} 気圧) 以下、木材試験体は、長さ 100 ミリ、幅 10 ミリ、厚み 5 ミリである。図 2-13 に実験用チャンバ、図 2-14 に真空チャンバ内に置かれた木材実験試料を示す。実験室温度は $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度に保たれている。実験方法は以下の通りである：

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

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



図 2-13 真空チャンバ

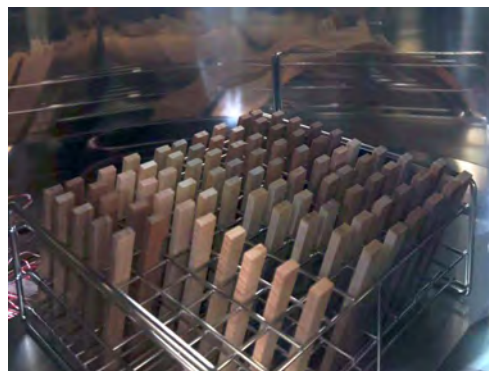


図 2-14 木材実験試料

(2) 木材の真空暴露実験結果

(i) 実験結果：相対ヤング率

図 2-15 にホオノキ試料（平行試料は 67 ヶ月真空暴露後、直交試料は 62 ヶ月暴露後）の、図 2-16 にヤマザクラ試料（54 ヶ月真空暴露後）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 まで戻るがそのごゆっくりと上昇している。67 ヶ月真空暴露した後では、実験開始時より 7~8%ほど上昇している。ホオノキ直交試料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。

54 ヶ月間真空暴露したヤマザクラ試料の相対ヤング率は、より短い周期での小さな増減を繰り返してゆっくりと増大している。平行・直交試料とも 54 カ月間の真空暴露後に相対ヤング率約 3~4%の上昇が起こっている。

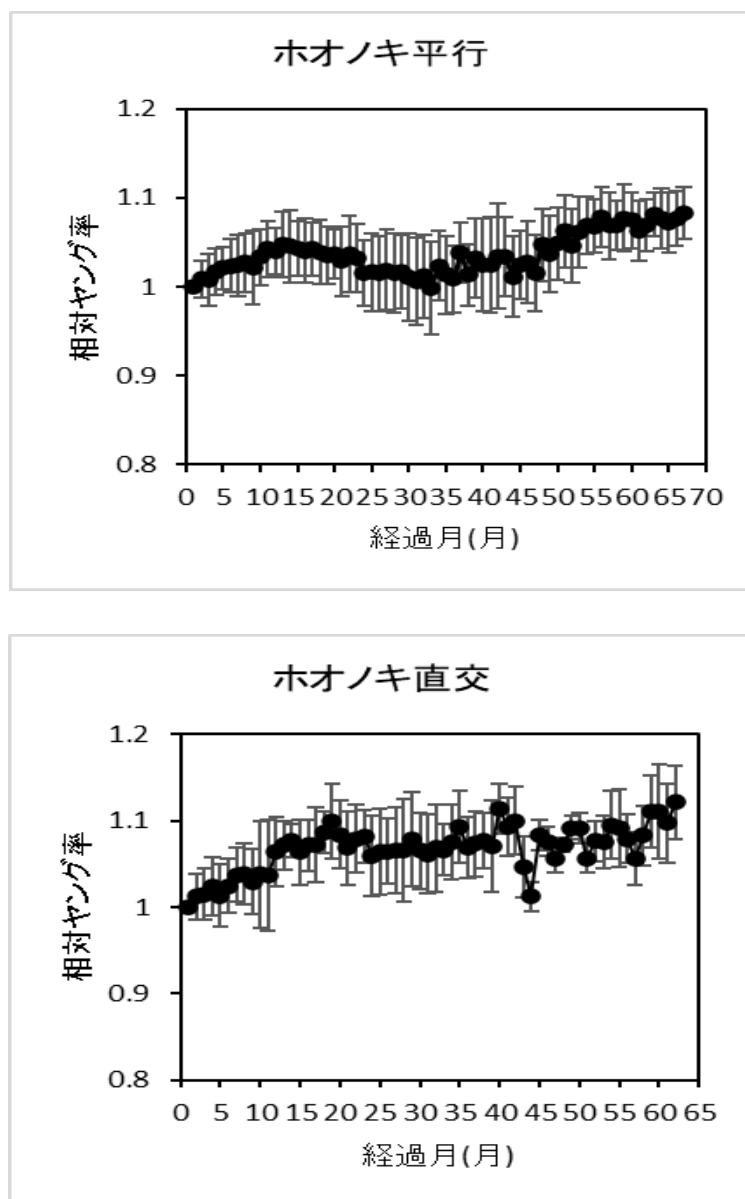


図 2-15 相対ヤング率の変化：ホオノキ（平行：67 ヶ月後、直交：62 ヶ月後）

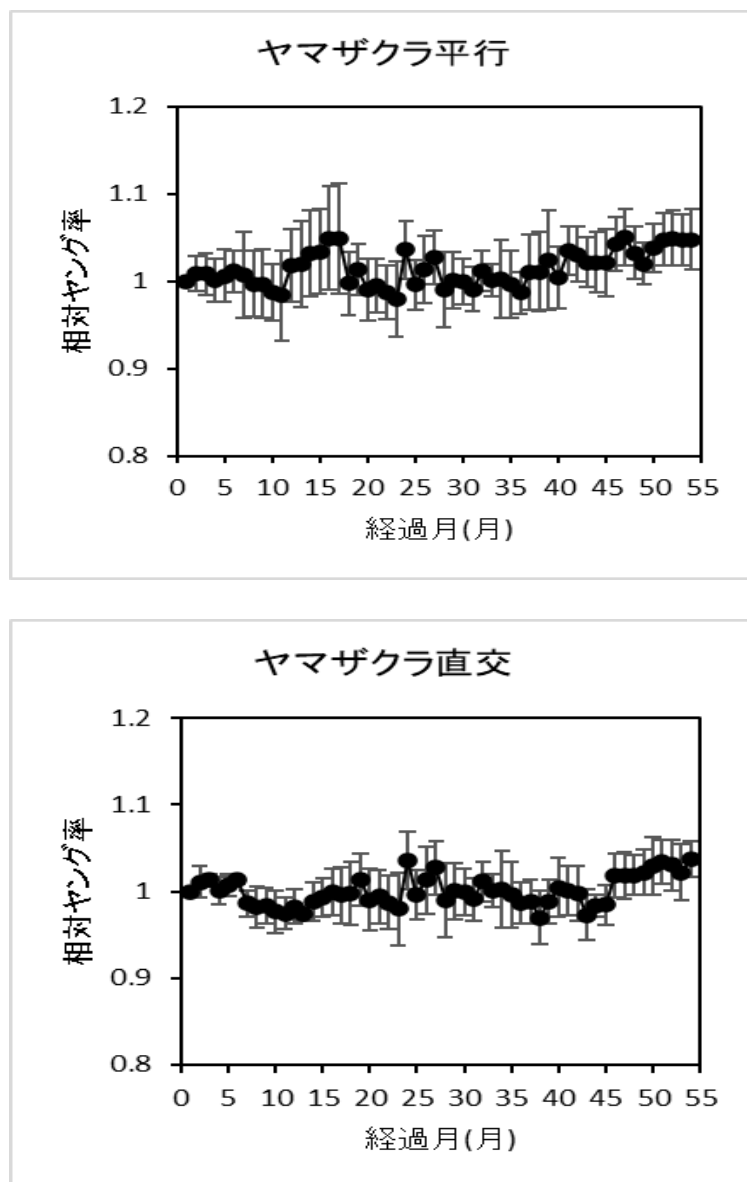


図 2-16 相対ヤング率の変化：ヤマザクラ（54 ヶ月後）

(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（2023 年 4 月と 2024 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作られているため、より真空暴露の影響を受けて変化する。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。

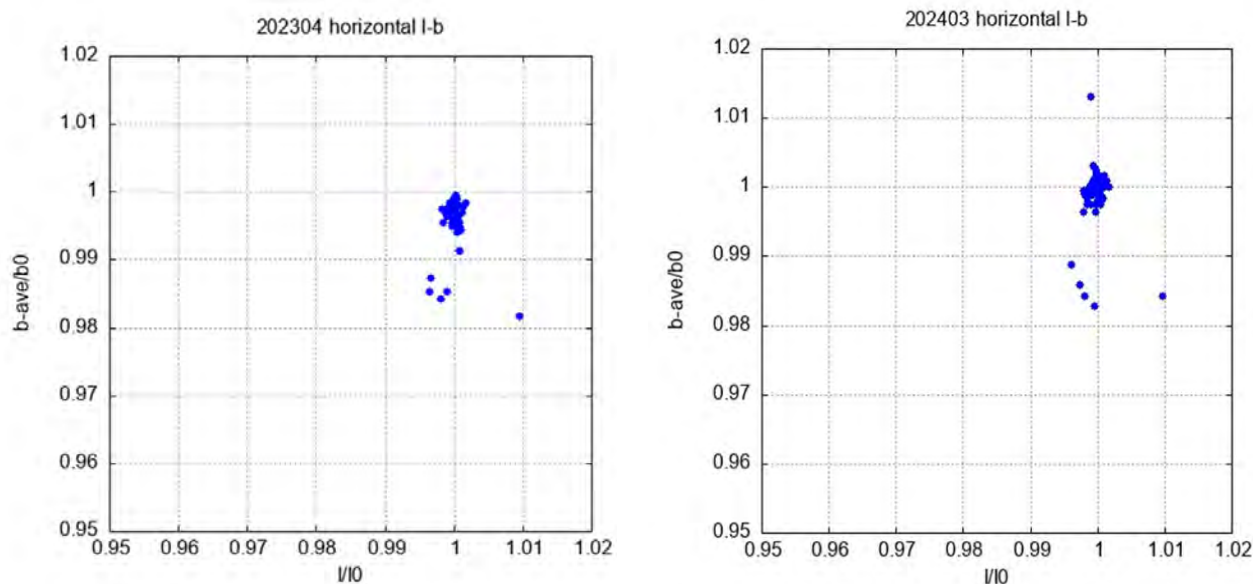


図 2-17 寸法変化：平行試料（I-b）

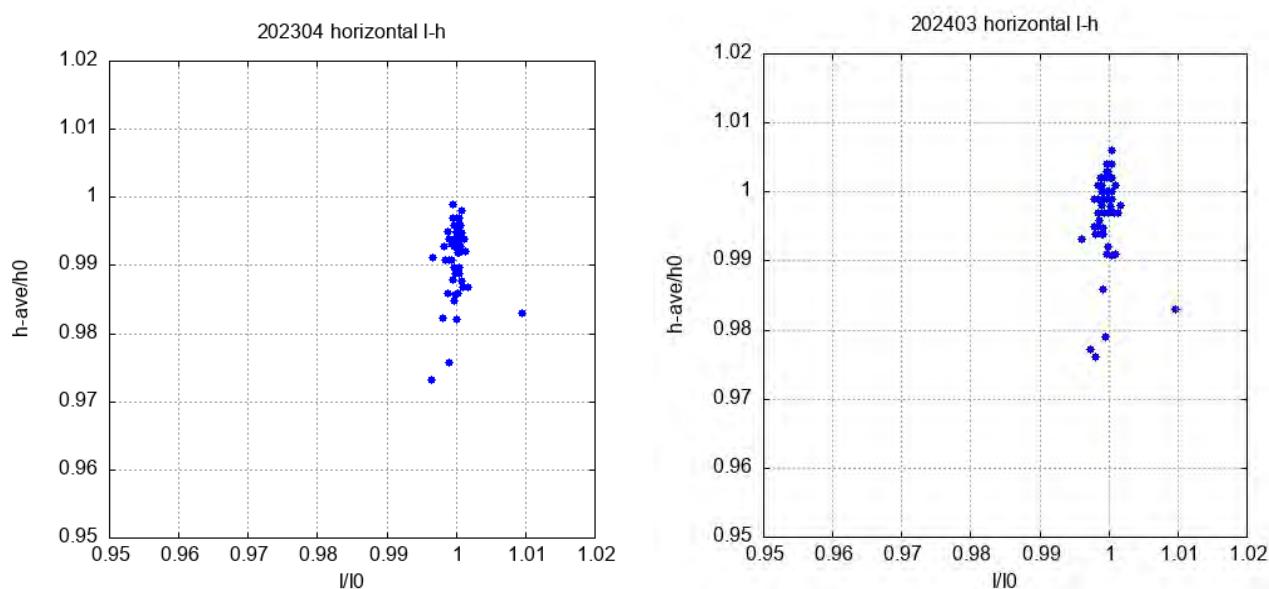


図 2-18 寸法変化：平行試料（I-h）

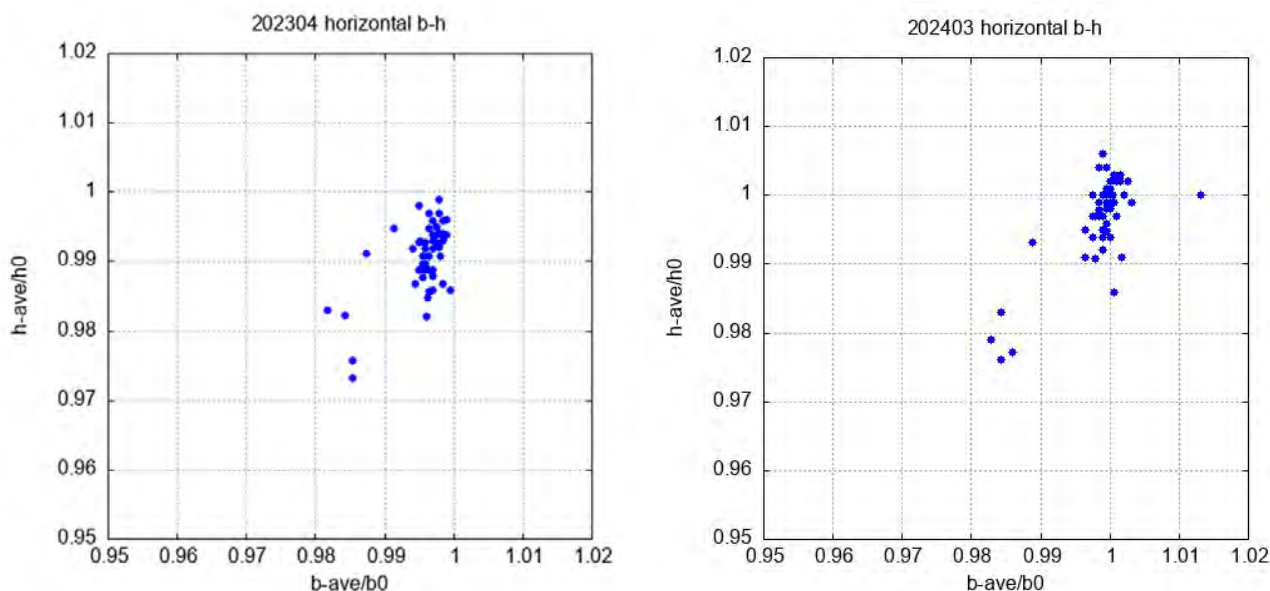


図 2-19 寸法変化：平行試料 (b-h)

次に直交試料を真空暴露した場合の相対寸法変化（2023 年 4 月と 2024 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 1% 以下である。直交試料における繊維方向にあたる幅方向では収縮率が小さく、収縮率は 1% 以下である。一方、繊維方向と直交する厚さ方向では 2~3% ほどの収縮がみられ、こちらも樹種によって収縮率にばらつきがある

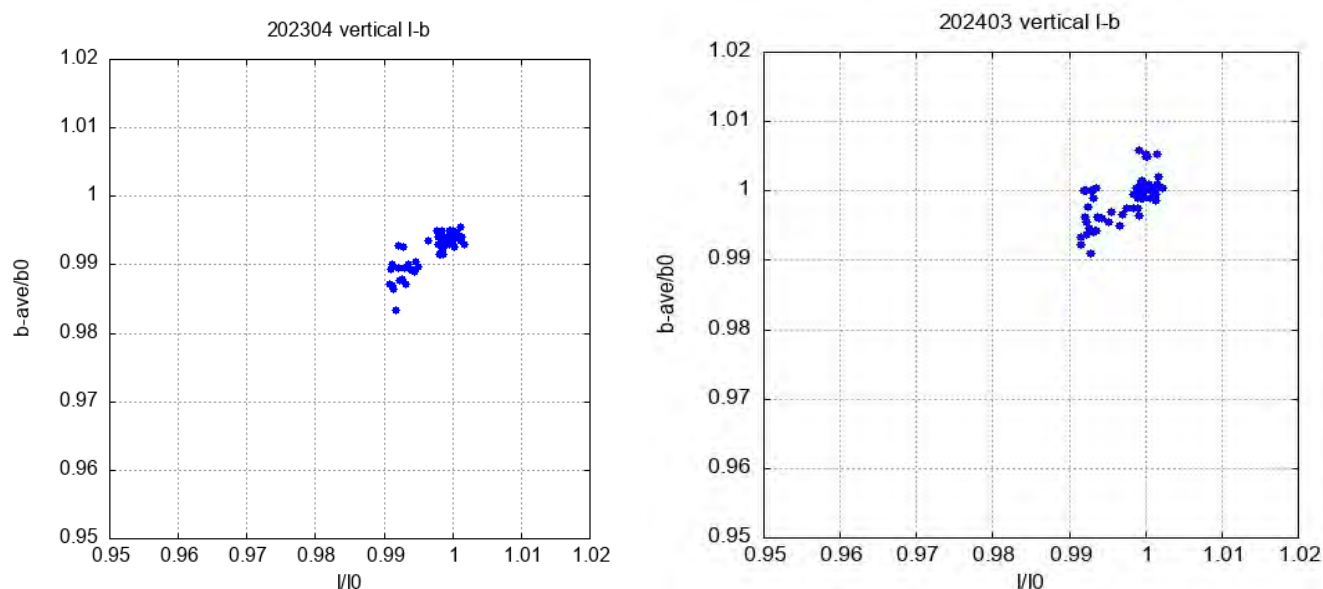


図 2-20 寸法変化：直交試料 (l-b)

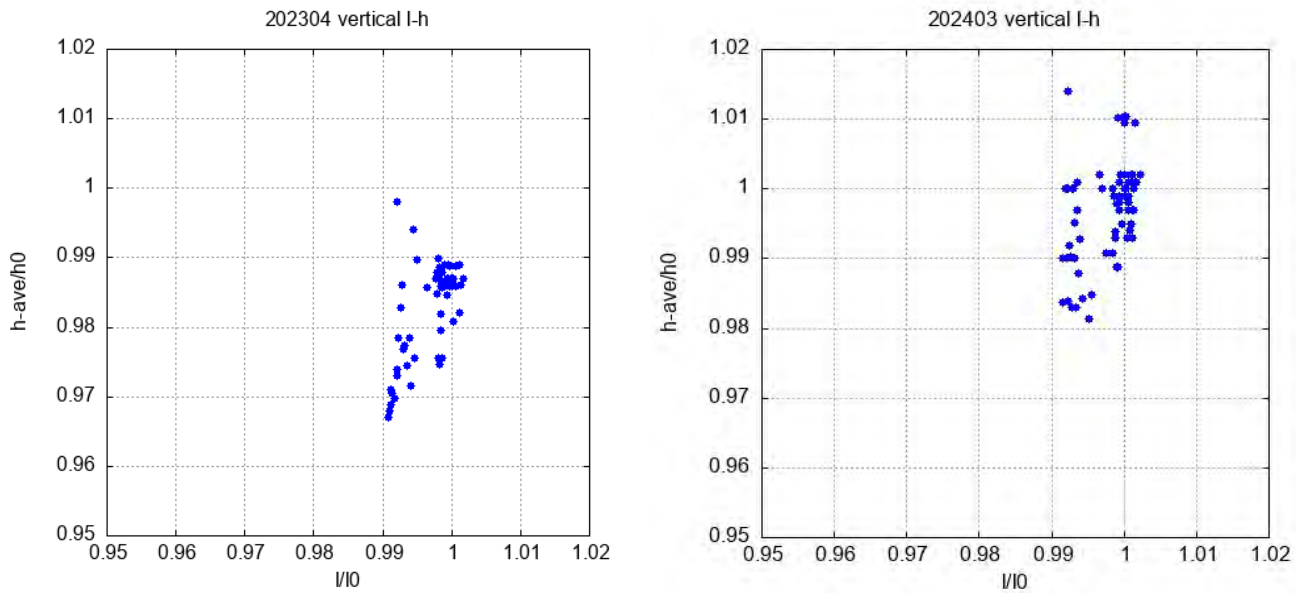


図 2-21 寸法変化：直交試料（l-h）

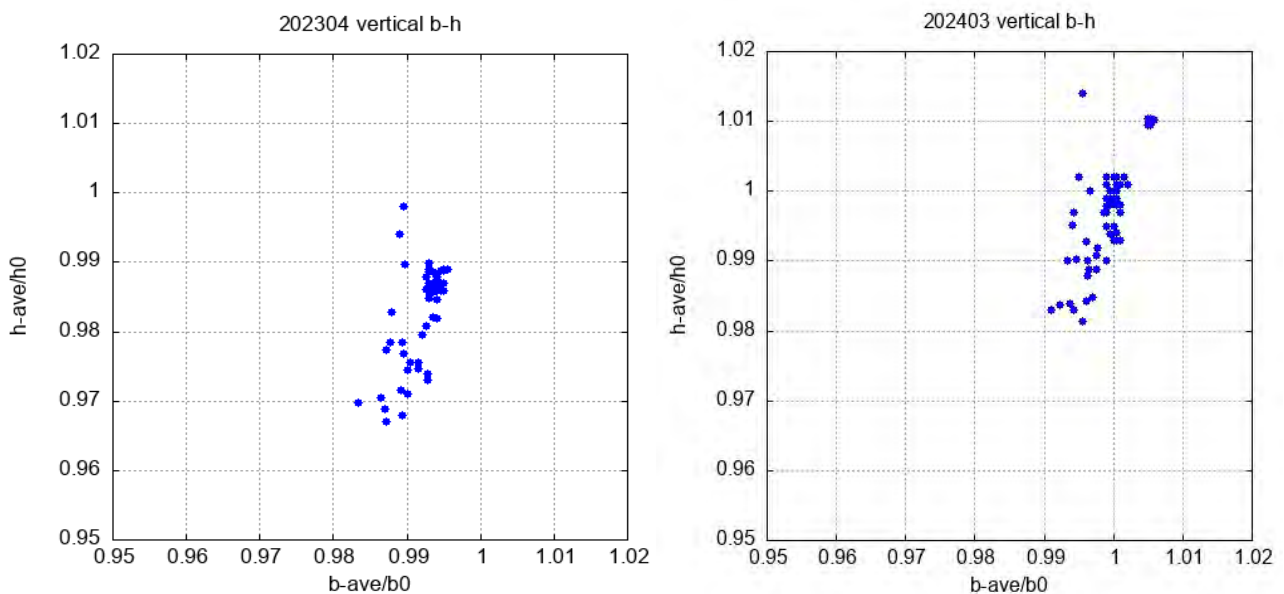


図 2-22 寸法変化：直交試料（b-h）

(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 6 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 試料は相対ヤング率の

上昇がみられるが 1 前後で安定している時期も観察される。**N** 試料では相対ヤング率が真空暴露開始後 1 ヶ月間で約 20%上昇しているが、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。

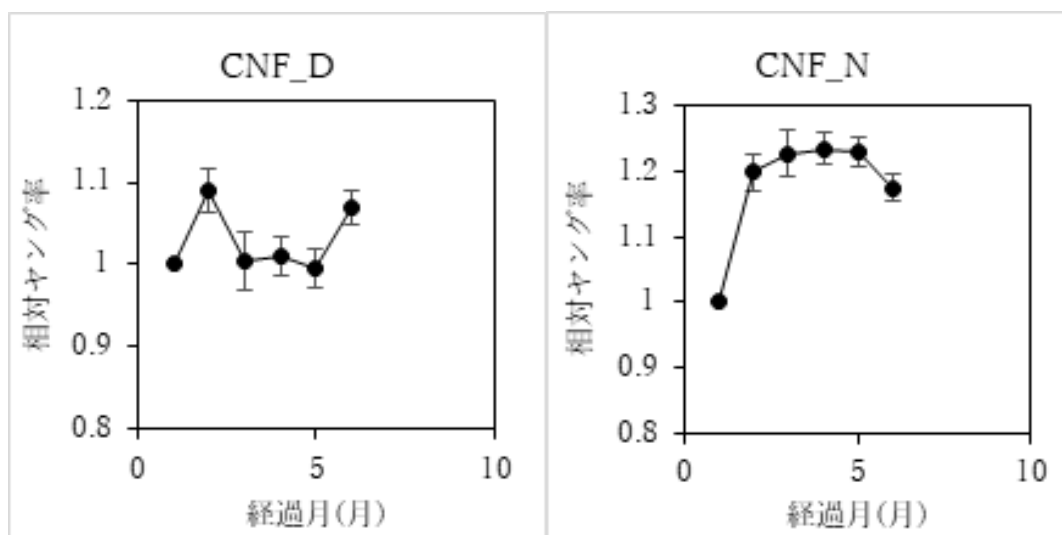
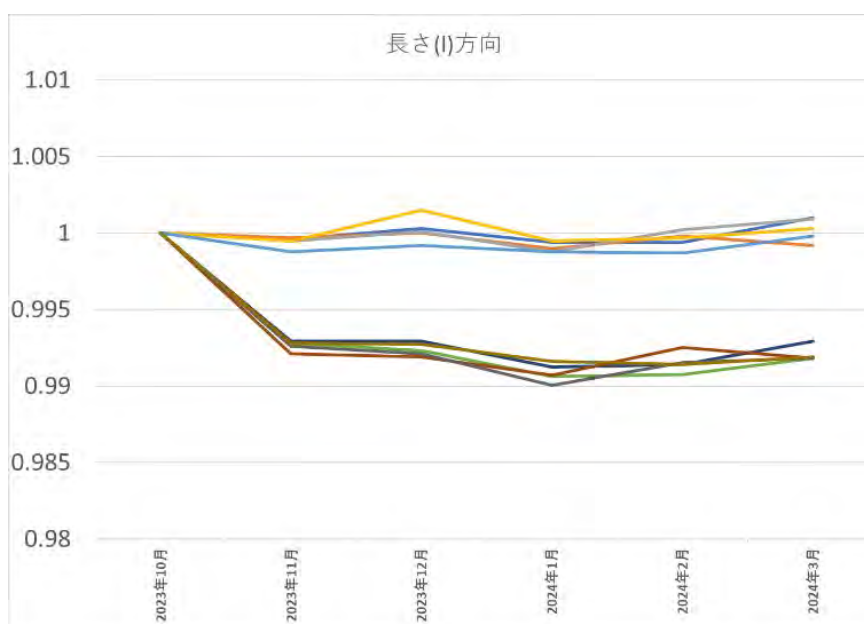


図 2-23 相対ヤング率の変化：CNF（6 ヶ月後）

(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 1%以下、幅方向では約 1～1.5%、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。

現在のところ、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、ドライ試料では比較的安定している。



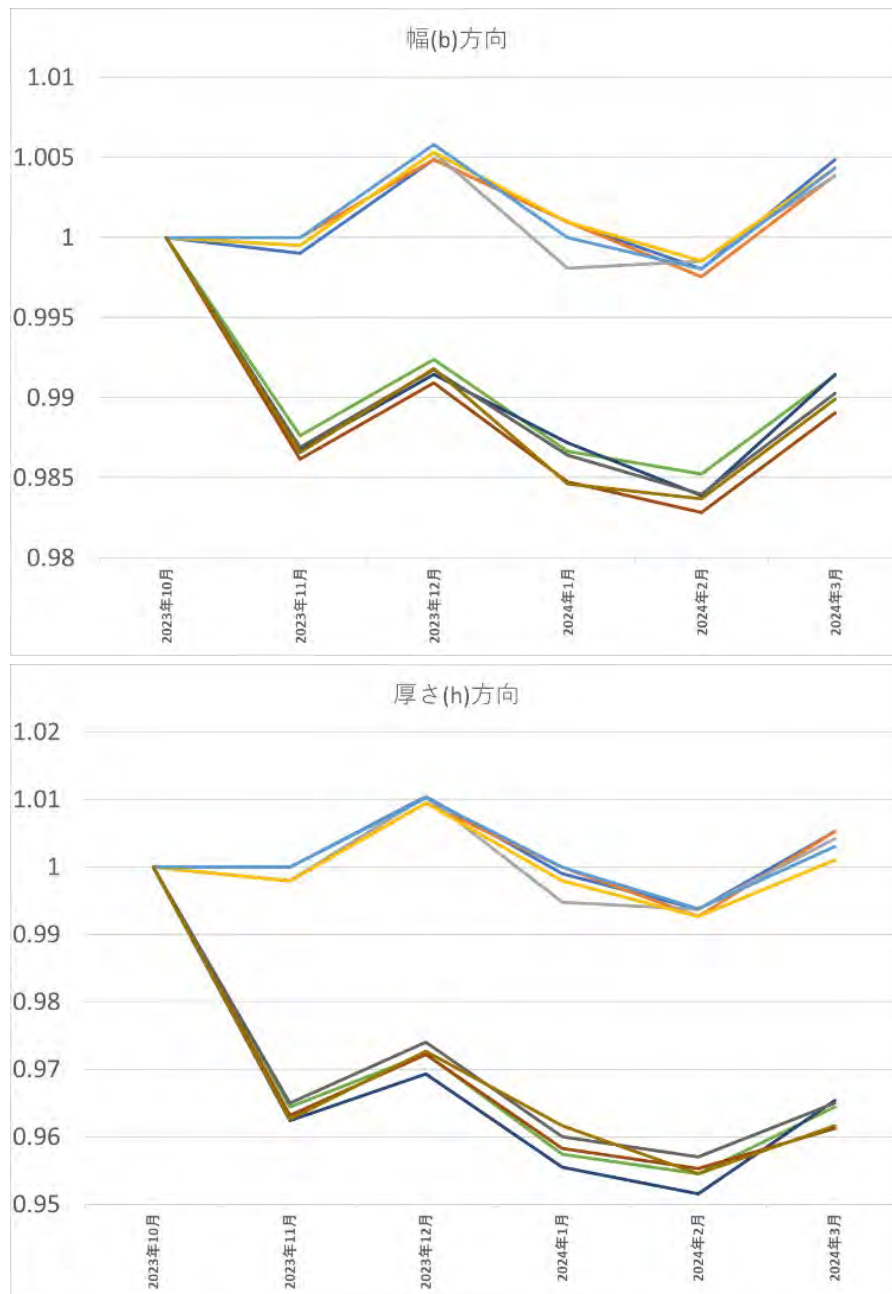


図 2-24 寸法変化 : CNF 試料
l : 試料長さ方向、b : 幅、h : 厚さ

今後さらに長期間の真空暴露実験を行い、CNF が宇宙で使えるかどうかを検証していく予定である。

③ 樹木育成実験の実施

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

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

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

(A) 低圧下における樹木育成実験環境

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

【大気圧（コントロール）】

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

温度： $20 \sim 25^\circ\text{C}$

湿度： $50 \pm 5\%$

CO_2 濃度： $500 \pm 50\text{ppm}$

気圧：1 気圧

【低圧環境】

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

温度： $20 \sim 25^\circ\text{C}$

湿度： $50 \pm 5\%$ （1 気圧相当に値する蒸気密度）

CO_2 濃度： $500 \pm 50\text{ppm}$

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

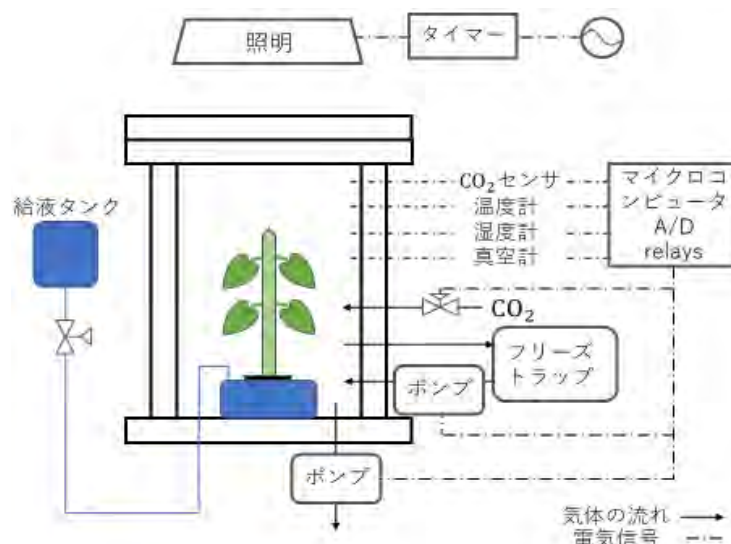


図 3-1 低圧下樹木育成実験システムダイアグラム
育成チャンバ：アクリル製 直径：30cm 高さ：50cm

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

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



図 3-2 4 基の低圧下樹木育成実験装置

(B) 低圧下における樹木育成実験

(1) 育成実験概要

火星等地球外惑星環境において樹木を育成する場合、様々な環境の違いによる生産性や材形成への影響が考えられる。本研究では樹木の生育に影響を与える様々な環境要因のうち大気圧に着目し、低圧下樹木育成実験装置（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て育成実験を行った。樹木育成チャンバの環境制御のために次の2つのArduinoプログラムを使用した：

1. sketch_temp_RH_SDcard_Time_CO2_v2.1：気温・湿度・CO₂濃度制御
2. Sketch_vacuum_control_v1.6：真空度制御

材料：ギンドロ (*Populus alba*) 挿し木苗

方法：

- 実験室の温度：23～25℃
- チャンバー内相対湿度：50 (±5) %
- チャンバー内CO₂濃度：500 (±50) ppm
- 気圧：大気圧（1気圧）及び0.75, 0.5, 0.3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）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葉（光合成器官）の重要な特性であり、植物の生存戦略にとって重要な指標である。一般に水不足下で生育した植物ではこの値が大きくなる。
- クロロフィル蛍光：光合成反応は葉緑体を構成するチラコイドとストロマで起こる連続した二つの反応系からなり、それぞれをチラコイド反応（明反応）、ストロマ反応（暗反応）と呼ぶ。前者は光エネルギーを化学エネルギーに変換する電子伝達系で、ATPとNADPHが生成される。これらが後者のストロマで起こる同化反応へのエネルギー供給と還元作用として機能している。植物が健全であれば光化学系IIが吸収した光エネルギーのうち80～83%を化学エネルギーに変換（最大光量子収率、Fv / Fmは0.80～0.83）するが、植物が何らかのストレス（水不足、病気など）を受けると、この値が低下する。本実験ではこのパラメータを測定することで、低圧が植物の光合成にとってストレス要因か否かを検討した。
- T/R比について：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：光合成産物が葉とそれ以外の器官への配分比率を示す。この比率から光合成を行う葉へ同化産物を優先して配分しているかがわかる。

(2) 育成実験結果

図3-3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、0.5気圧、0.3気圧）のチャンバーにそれぞれポプラ（*Populus alba*）さし木苗1個体を入れ、22日間前後育成実験を行った。



図3-3 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、0.5気圧、0.3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。

(i) 樹高の変化

樹高成長：日々の樹高成長の変化を図3-4に示した。回帰直線の傾きは成長速度を表す。この図から、対照区（1.0気圧）の傾きは0.3177、低圧区（0.75気圧）の傾きは0.4503と低圧区の方が大きかった。この結果は、低圧区（0.75気圧）は対照区（1.0気圧）より伸長速度が速いことを示す。しかし、すべての実験で同様の結果は得られなかったことから、下記に示す成長量（バイオマス）の増加割合を比較した。

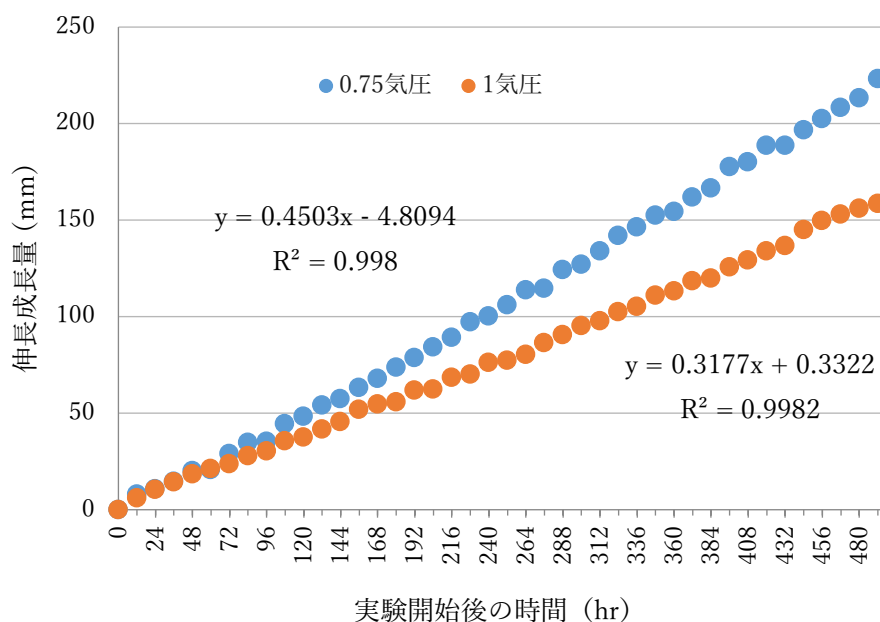


図3-4 樹高の変化

(i-1) 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）の増加割合以下のように評価した。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×（地際直径）²との関係を図3-5に示した。この関係は1式として表すことができる。この式のxに樹高×（地際直径）²の値を代入して乾燥重量yを推定した。

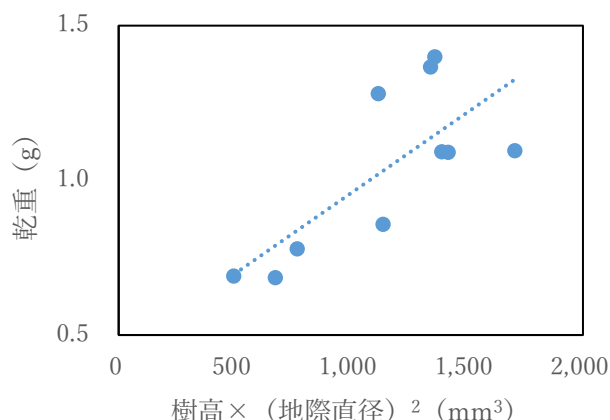


図3-5 実験前のポプラ苗の乾燥重量の推定

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

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。

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

DW_{pri}は実験前の推定乾重

DW_{post}は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取ると、

$$(DW_{\text{post}} / DW_{\text{pri}})_{\text{low atm}} / (DW_{\text{post}} / DW_{\text{pri}})_{1 \text{ atm}} \quad (3式)$$

各気圧の時に（3式）を図示したのが図3-6である。この値が1の時は、1気圧と低圧との間でバイオマス増加割合に差はないことを示している。

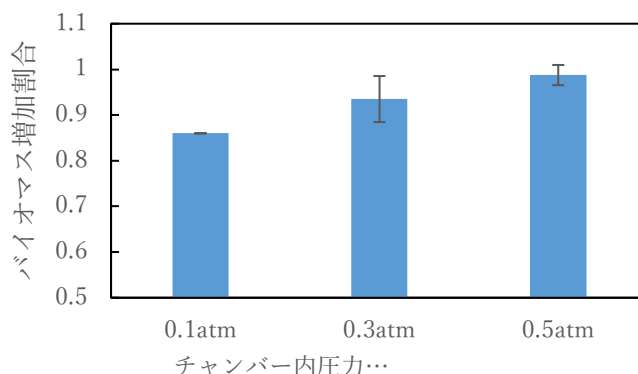


図3-6 1気圧と低圧におけるバイオマス増加割合の比較

図3-6より低圧になるに従ってバイオマス増加割合が若干低下する傾向が見られた。

(ii) 成長特性

(ii-1) LMA (葉の乾燥重量/葉面積)

図3-7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、対照区の葉より低圧区の葉の方がLMAは有意に大きいことがわかった。これは、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。

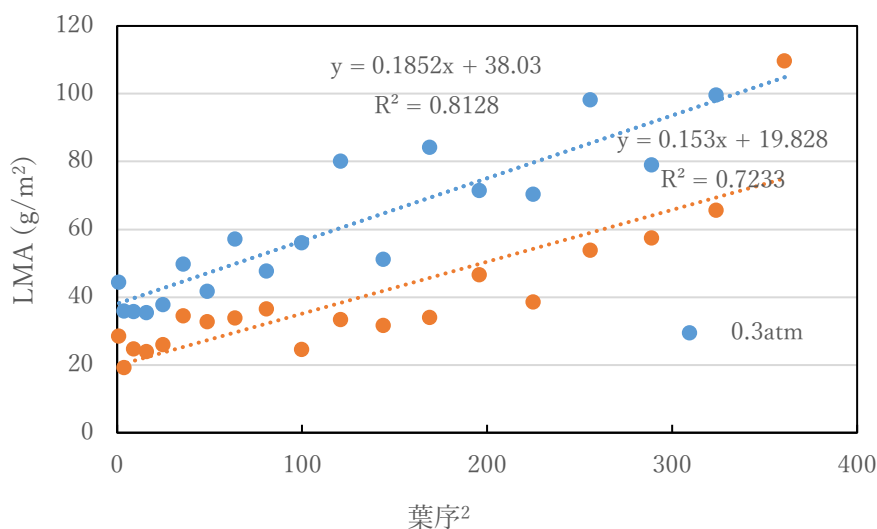


図3-7 LMA (葉の乾燥重量/葉面積)

(ii-2) T/R比と同化部/非同化部比

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。

$T/R_{\text{比}_{\text{low atm}}} / T/R_{\text{比}_{1 \text{ atm}}}$ ならびに $\text{同化部/非同化部比}_{\text{low atm}} / \text{同化部/非同化部比}_{1 \text{ atm}}$ (4式)

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 (図3-8)

0.5気圧以外の低圧区の苗でT/R比は1以下であることから、低圧下で育ったポプラ苗は光合成による同化産物を根に多くの配分している傾向が見られた。

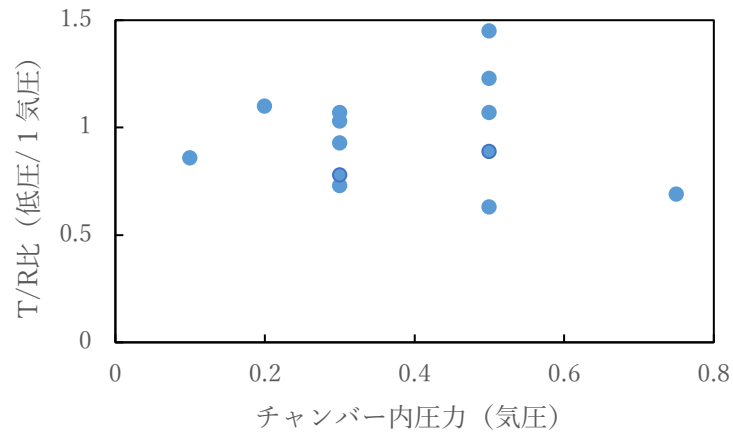


図3-8 1気圧と低圧におけるT/R比の比較

同化部/非同化部比 (図3-9)

ほとんどの低圧区の苗で同化部/非同化部比は1以下であることから、低圧下で育ったポプラ苗では光合成による同化産物を葉に多くの配分している傾向が見られた。

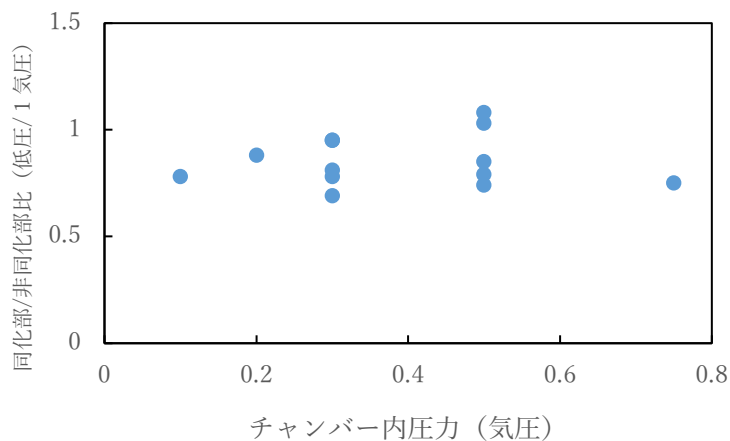


図3-9 1気圧と低圧における同化部/非同化部比の比較

(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。

(3) 育成実験まとめ

低圧下で生育したポプラ苗は定圧（1気圧）下で生育した苗に比べて成長と成長特性に違いがあることが観察された。現時点ではデータ数が不足しているためさらに実験を追加し、今年度の研究結果を検証したいと考えている。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

(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5年度の有人宇宙学実習のシラバスを参考資料1に示す。令和5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回生を主体としてさらに学部2~4回生の計7名が選出された。学生は2~3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 2023/8/19-8/25

	8/19 (土)	8/20 (日)	8/21 (月)	8/22 (火)	8/23 (水)	8/24 (木)	8/25 (金)
8:30		8:45 集合@京都駅	心理検査	心理検査	心理検査	心理検査	心理検査
9:00	集合・自己紹介	園部駅へ移動(JR・バス) 8:58-9:43京都-園部 (JR嵯峨野線)	9:00-9:45 長治谷へ移動(バス)	模擬微小重力実験1 (機軸付け)	講義6 (宇宙科学/佐々木) 小林・益川記念室	模擬微小重力実験4 (観望)	実習成果のまとめ クルーノートブックの作成 小林・益川記念室
10:00	講義1 (有人宇宙学実習/土井) 小林・益川記念室	10:00-11:30 園部-芦生(バス)	長治谷での実習 集水域全体の観望準備へ 長治谷へ(徒歩)		模擬微小重力実験2 (観望)		
11:00	昼食	昼食	バスで移動 大カツラの木見学	昼食	昼食	昼食	昼食
12:00		講義(芦生研究林長 石原先生)					
13:00	講義2 (閉鎖環境実習/棟原) 小林・益川記念室	芦上生態系プロ調査体験 徒歩で移動	昼食	講義4 (宇宙科学/山崎) 小林・益川記念室		天体観測実習 (動植物/)	デブリーフィング 小林・益川記念室
14:00		芦上生態系プロ調査体験 徒歩で移動	京都駅へ移動(バス・JR)		模擬微小重力実験3 (観望)		
15:00	講義3 (微小重力実験/難波) 小林・益川記念室	芦上から登り口に戻る(徒歩)	14:00-15:30 芦生-園部(バス)	講義5 (無線通信/石原) 小林・益川記念室			
16:00		下山・事務所着(バス)	15:37-16:06 園部-京都(JR)			実習成果のまとめ クルーノートブックの作成	解散
17:00	自由時間	解析方法の解説(石原先生)	16:15 京都駅着	自由時間			
18:00	夕食	夕食	夕食	夕食	夕食		
19:00	宿題リタリセッション 小林・益川記念室	データ解析	データ解析	天体観測実習・宇宙無線通信実 験・ディスカッション	天体観測実習・宇宙無線通信実 験・ディスカッション	打上交流会	
20:00							
21:00	心理検査	心理検査	心理検査	心理検査	心理検査	心理検査	
21:30	解散	解散	解散	解散	解散	解散	

図4-1 令和5年度有人宇宙学実習時間割

実習を行うにあたって、令和5年度実習用クルーノートブックを作成し、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なし得る状況である。そのため、その発見をすぐに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記したクルーノートブックの完成度で成績を評価するようにした。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13日、6月10日、7月8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 15 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 10 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。

参加学生には、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、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」、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」、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」、人類が宇宙で居住するために必要な条件を考えた「惑星環境学」、人工衛星を用いた無線通信の原理を説明する「電波教室」・「衛星通信の世界へようこそ!」、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」から成り立っている。

(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 2~3 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。唾液アミラーゼとフェイススケール結果を図 4-2 に示す。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☆にアミラーゼとフェイススケールの測定結果を示す。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。

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。

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。

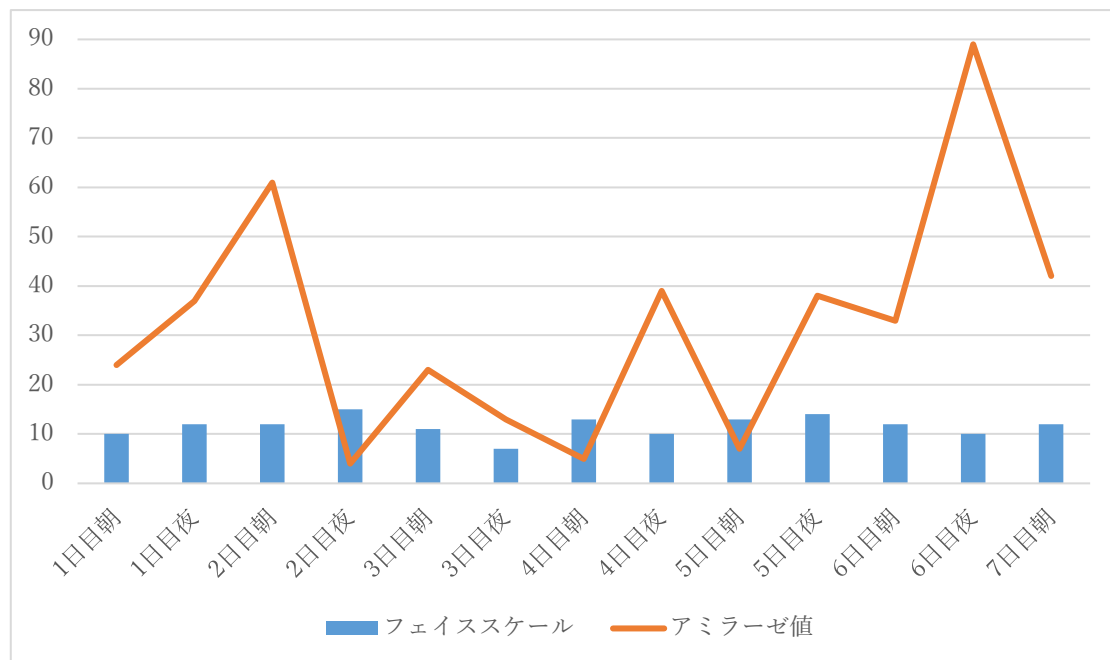


図 4-2 ある参加学生の唾液アミラーゼおよびフェイススケール値の変動

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（図 4-3）。実習が進むごとに POMS の値が徐々に下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。本実習課題の中で最もチームワークが求められるのは 5 日目の模擬微小重力実験（観察）であるが、その前後で大きなストレスの増加がみられず、また各班が時間内にすべての課題を完了したことから、各班がチームワークを形成できたことを示唆している。

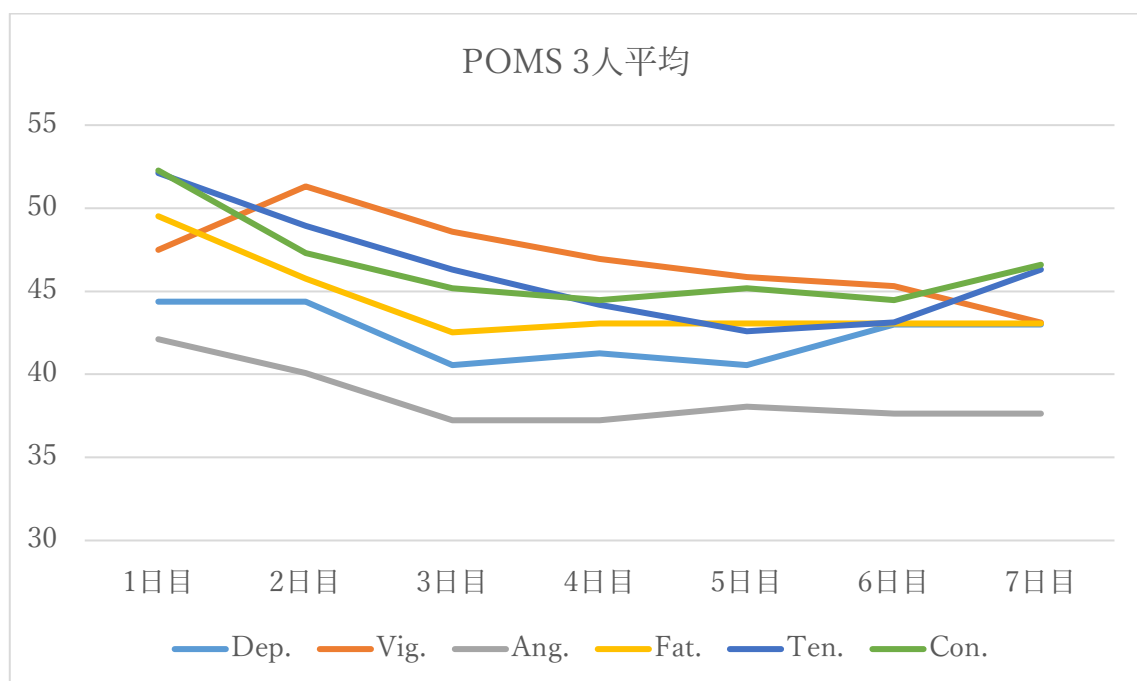


図 4-3 ある班の学生たちの POMS 結果

縦軸が POMS の T-Score (日本人平均 50)、横軸が実験開始からの時間経過を示す。「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、積極的に学ぶ姿勢が見られた。

(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。そこで今回の有人宇宙学実習では、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4-4 京都大学フィールド科学教育センターでの講義の様子



図 4-5 芦生研究林でのフィールドワークの様子

(iii) 天体観測実習

天体観測実習では、系外惑星の測光データ解析を実施した。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。各班毎の解析天体は、第1班が X0-5b、第2班が HAT-P-36b、第3班が Qatar-1b である。また、系外惑星軌道要素、惑星直径および惑星表面温度の解析法はオリエンテーションで解説を行った。

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 (X0-5b)

	単位	解析値	文献値 ^{*1}
軌道半径	AU	0.0360	0.0488
公転周期	days	2.45	4.19
軌道傾斜角	Degrees	89.5	86.7
惑星半径	R _{Jp} (木星半径)	1.04	1.11
惑星表面温度	K	1290	1221

^{*1}Pal A., et al., Independent Confirmation and Refined Parameters of the Hot Jupiter X0-5b, The Astrophysical Journal, 700: 783-790, 2009 July 20.

表 4-2 系外惑星解析結果 2 班 (HAT-P-36b)

	単位	解析値	文献値 ^{*2}
軌道半径	AU	0.0238	0.0238
公転周期	days	1.33	1.33
軌道傾斜角	Degrees	89.1	86.6
惑星半径	R _{jp} (木星半径)	1.41	1.26
惑星表面温度	K	1601	1823

^{*2}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.

表 4-3 系外惑星解析結果 3 班 (Qatar-1b)

	単位	解析値	文献値 ^{*3}
軌道半径	AU	0.0254	0.0238
公転周期	Days	1.24	1.42
軌道傾斜角	Degrees	83.3	84.1
惑星半径	R _{jp} (木星半径)	1.31	1.14
惑星表面温度	K	1190	1418

^{*3}Collins, Karen A., et al., Transit Timing Variation Measurements of WASP-12b and Qatar-1b: No Evidence of Additional Planets, The Astrophysical Journal, 153: 78 (a4pp), 2017 February.

(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 4-6) 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 5-1 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。

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



図 4-6 3D (2 軸) クリノスタット実験システム

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。さらに根の先端を切断し、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 4-7・8 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。模擬微小重力下と地球重力下の根を比較すると、模擬微小重力下でも重力下でも成長速度はほとんど変わらなかった。

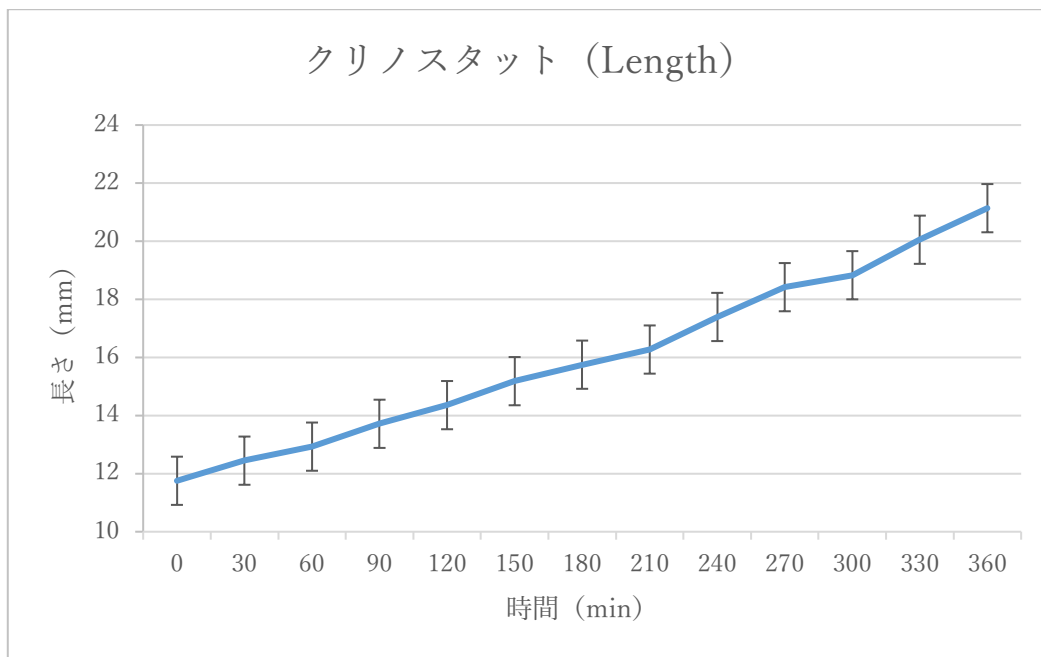


図 4-7 ガーデンクレスの根の成長（クリノスタット） 成長率：0.026mm/min

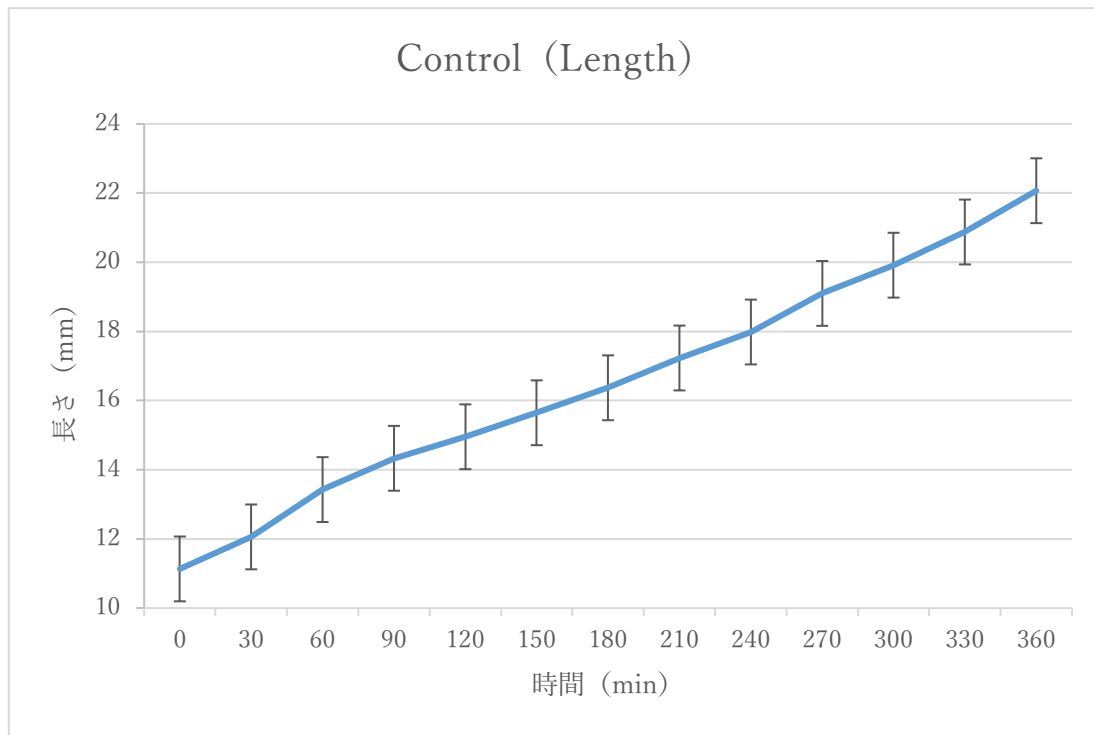


図 4-8 ガーデングレスの根の成長（コントロール） 成長率：0.030mm/min

図 4-9 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。

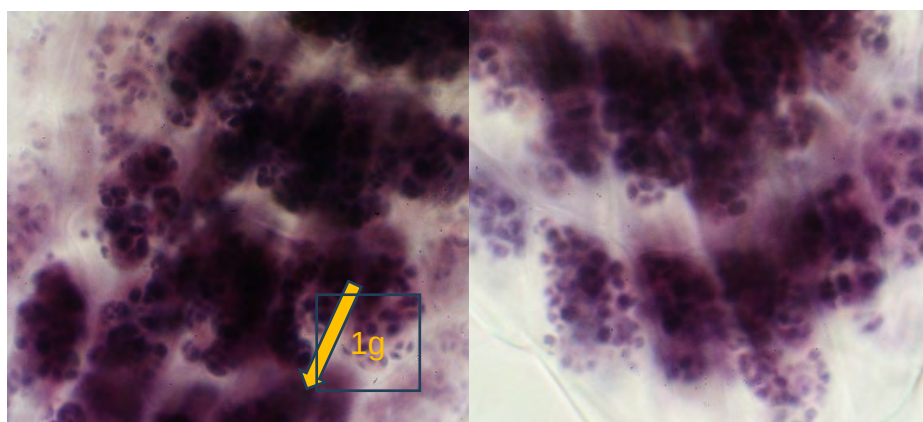


図 4-9 アミロプラストの細胞内分布写真（総合倍率 1000 倍）
左：地球重力下 右；模擬微小重力

(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、日本アマチュア無線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。図 4-10 は日本アマチュア無線通信協会の石原正次氏による電波教室の写真である。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 4-11 は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 4-10 電波教室の様子



図 4-11 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。

(3) 有人宇宙学実習の評価

令和 5 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、8(7)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 4-4 にその結果をまとめる。

表 4-4 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	25.83	10.73
	後	56.50	26.31
	増加率	2.19	2.45
② リンク数	前	24.67	13.68
	後	52.50	33.24
	増加率	2.13	2.43
③ ノード数 (3 リンク以上)	前	12.67	12.87
	後	24.83	9.17
	増加率	1.96	0.71
④ ③のノードのリンク合計	前	29.17	8.25
	後	64.67	18.50
	増加率	2.22	2.24

各項目において、平均値はすべてが倍近くになっている。標準偏差は③を除き、すべて倍以上となっている。

【実習前後の散布図】

①～④について X 軸を実習前、Y 軸を実習後として散布図 4-12 を作成した。全ての参加学生において、実習後の方が増加していることがわかる。

【実習前後のコンセプトマップの比較】

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。

- 実習後のコンセプトマップには植物関連のことや人文学的な内容が増えたが、これは宇宙が自分の身の回りも含めて様々なかかわりを持つものだを知ることができた証拠であると思う。
- 1 つのノードからより多くのノードが生まれるようになった。また、ノード同士に新たなリンクを見出すこともできた。

- 矢印(リンク)が複雑になり、たくさんの方角へのびるようになった。
- ノードの数に大きな変化はなかったが、自身の中でのノード1つ1つへの理解度やノード同士のリンクへの納得度は格段に上がったように感じる。
- 実習前はノードがなかなか出てこなかったが、実習後はペンを止める間もないぐらいノードをたくさん出すことができた。

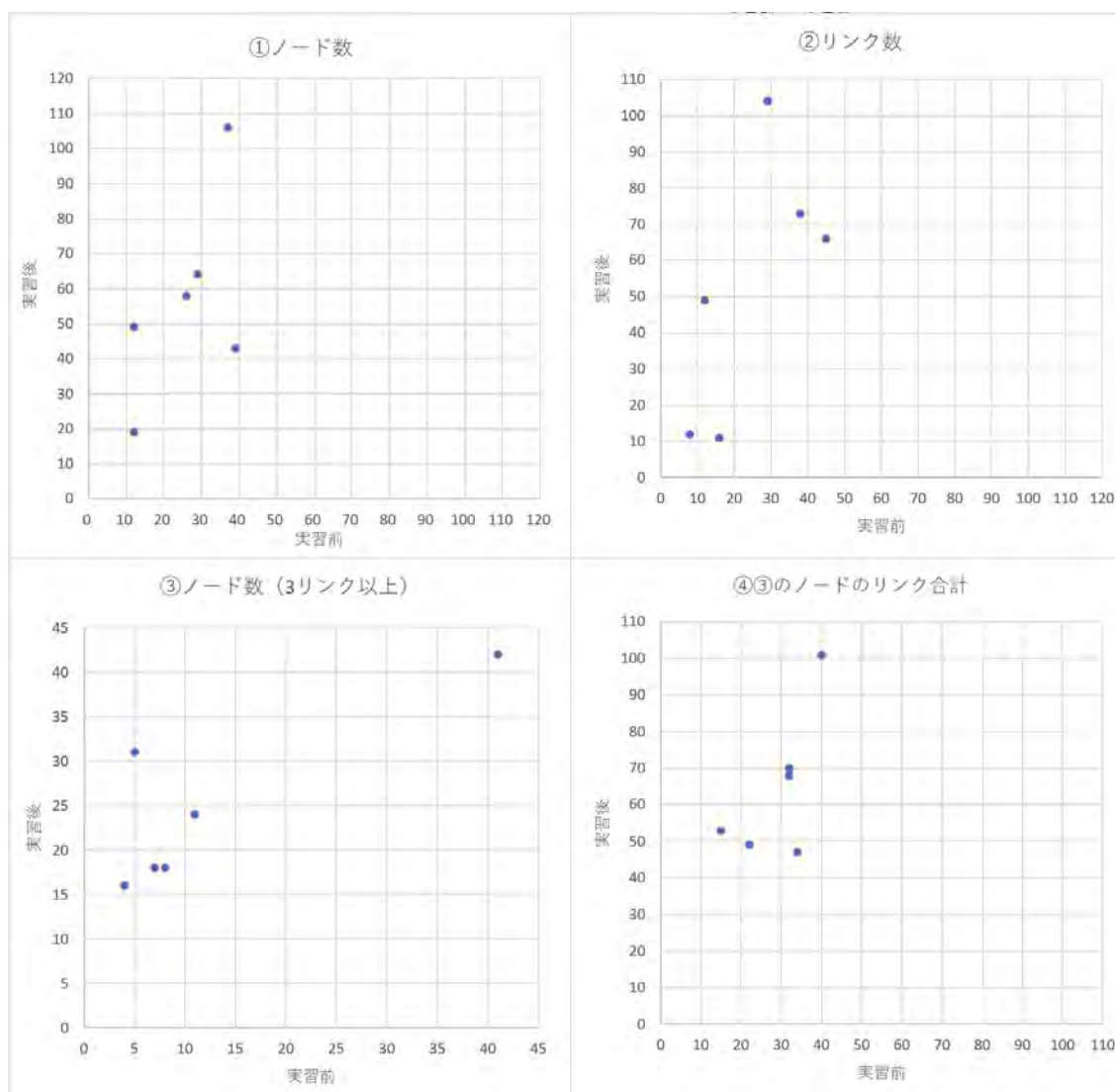


図 4-12 有人宇宙学実習におけるコンセプトマップ散布図

(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ネットワーク型になっており、逆にネットワーク型だった人がチェーン型となった。後者について、以下の参加学生による分析に見られるように、思いつくノードの数が増えすぎて、リンクを考える余裕がなくなっていたからであるようだ。以下に参加学生による分析（一部抜粋）を記す。

- ノードの数が圧倒的に多くなり、リンク後を考えている余裕がなくなったからだと考えられる。
- 実習前は、宇宙全体への知識が欠如しており、体系化も不十分だったために単語から

連想ゲームのように考えてしまい、チェーン型となった。実習後は学んだことを体系的にアウトプットできるようになったためネットワーク型となった。

- 実習前は1つ1つのノードに表面的なリンクしか見えていなかったが、実習を通して宇宙をめぐる様々な問題、関係、目標を知ることができ、リンクを深く理解できるようになったので、ネットワークが構築されていった。

(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、コンセプトマップの分析を通じて、自身がこの実習で何を学んだか、宇宙というテーマに対する理解度について言及する学生が多く見られた。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4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4年度は10名が受講、2名の大学院生が合格し、聴講生を含めた9名が修了した。

講義「有人宇宙学」では、「宇宙を知る」「宇宙を生きる」「宇宙を考える」「宇宙を作る」の4つのテーマに基づいた10回のリレー講義および3回の演習そして最終回は修了式を実施した。講義一覧を表4-5に示し、それぞれの講義概要を以下にまとめる。

表 4-5 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04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11日	宇宙環境工学	山敷庸亮
宇宙を知る	10月18日	宇宙探査工学	清水幸夫
宇宙を生きる	11月01日	宇宙生命科学	保尊隆享
宇宙を生きる	11月08日	宇宙木材工学	村田功二
宇宙を生きる	11月29日	宇宙霊長類学	足立幾馬
宇宙を生きる	12月06日	宇宙医学	寺田昌弘
宇宙を考える	12月13日	宇宙法	青木節子
宇宙を考える	12月27日	宇宙人類学	岡田浩樹
宇宙を作る	01月10日	宇宙居住学	稲富裕光
有人宇宙学修了式	01月24日		土井隆雄、山敷庸亮 田口真奈

[有人宇宙学] (参考資料 5-2)

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。若田さんからは長期滞在ミッションが始めており、これらの有人宇宙活動は、科学、人文社会的連携、国民の関心に関係するものである。

宇宙で社会を作るときにどのようにこれまでの学問をどのように活かせばよいかを考える取り組みを”有人宇宙学”と呼ぶことにする。霊長類学の研究によると、ヒトが自然界を生き延びることが出来た大きな要因の一つとして、集団を形成し、小社会の中で生きる生き物であったことが考えられる。宇宙進出はこれまで人類が経験してきた環境の変化の一つと捉えることができる。このため、今後宇宙において恒常的な社会を作ることこそ人間が宇宙進出するために重要だと思われ、”有人宇宙学”ではこの持続的な社会を作るために必要であるものは何かを考える。宇宙において持続的な社会を形成する足掛かりとして、宇宙における社会規模を考える。この社会の規模の目安としては、ダンバー数が良い基準となり得る。1992 年、ダンバーは脳髓の大きさと霊長類の関係が比例関係にあることを見出し、この法則から考えると人間の社会の大きさは 150 人程度の規模であると考えられ、これをダンバー数とした。宇宙における社会の規模も、このダンバー数を元にとすると円滑な社会が創造できるのではないかと予想される。また、ソーシャルはビタビリティという概念とローマクラブによる成長の限界や SDGs の考え方との関連性も示された。

[宇宙環境工学]

最も重要な社会基盤は食糧・水資源・エネルギーの 3 つである。これらの 3 つの生存基盤の確立は社会の構成にとって必要であり、これは宇宙における社会形成にとっても同様である。これらの要素の中でも、空気と食糧、そして水が最重要である。水は生活用水と飲料水に分けられるが、生活の基軸に主に必要となるのは生活用水と考えられる。その理由は、飲料水は現段階でも国際宇宙ステーションにおいてはリサイクルされているが、生活用水はリサイクル不可であり、国際宇宙ステーションにおいて衣服は使い捨てである。

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

1. 要職を含めた食糧サイクル
2. 熱輸送を含めた気候安定システム

以上 2 点において重要であると考えられる。

火星における移住を考えた際、問題点がいくつか考えられる。例えば火星のテラフォーミングを考えた際、最も重要となるのは水の確保であるが、火星は温度と大気圧が低すぎる。水の 3 重点は 600 Pa であるが、火星の大気は 700 Pa であるため、液体の水が存在できる温度域が小さく、およそ 0℃-2℃程度でしか液体で存在することが出来ない。また、火星の大気は 95%が二酸化炭素であるため、たとえ二酸化炭素の気圧を上げて海を形成したとしても、二酸化炭素が海に溶解込み、システムの循環が破綻することが考えられる。このため大気圧を上げるためには、地球のような窒素大気が必要である。また、大気圧を増やすためには、火星の人工的な磁場の形成が有効であるとも考えられている。磁場を増やして太陽風から火星を守ることで、大気のイオン化を防ぎ、宇宙空間に放出される大気量を 1/10 程度に抑えることが可能であると考えられており、磁場の人工的な形成は磁場の存在しない惑星への移住にとって重要である。

また、重力が再現できない、大気の散逸が止められない、必要な元素の絶対量が足りないなどのテラフォーミングの課題に対応するため、地球環境を模擬した閉鎖的施設を建設するテラウィンドウを構想している。

[宇宙探査工学]

宇宙学は宇宙から地球または人類や生物の「未来」を考察する学問である。宇宙の探求には自然科学分野と人文社会科学分野の両面が必要である。JAXA はその中でも、宇宙科学は宇宙を自然科学の対象としてとらえる宇宙理学とロケットや人工衛星・探査機のシステムや技術的要素を研究対象とする宇宙工学を統合したものであると定義している。

宇宙機のサブシステム設計の工学的要素は主に構造系・熱制御系・電源系・通信系・データ処理系などがあり、ソフトウェア的要素とハードウェア的要素に分けられる。

JAXA 宇宙科学研究所では地球・月・火星他を対象に様々な宇宙探査が進められており、2023 年 9 月 7 日には H-IIA ロケットによる X 線分光撮像衛星 XRISM と小型月着陸実証機 SLIM の同時打ち上げがあり、SLIM は来年年明けごろに月に到着する予定である。また、SLIM の太陽光パネルや姿勢制御装置の配置は、他の着陸機などに比べ独特である。

アポロ計画などに代表されるように人類は月着陸を繰り返し成功させてきたが、70 年代以降 21 世紀まで月着陸は行われてこなかった。21 世紀に入り中国やインドが月着陸を達成しているが、イスラエル・日本などの失敗例も存在する。未だ月着陸を成功させた国は四ヶ国しか存在せず、非常に難しい技術であるということがわかるだろう。日本は SLIM によって第五ヶ国目となることを目指している。

NASA においては有人月面開発計画アルテミス計画に従って開発が進められている。アルテミス 3 での着陸候補地が発表されているほか、SLS ロケットの開発が進められている。民間では日本の iSpace が月面開発計画を公表しているほか、アメリカ SpaceX 社は火星開発計画を打ち立てている。

小惑星探査に目を移すと、はやぶさ 2 の第 2 回タッチダウンによって小惑星リュウグウ内部に液体の水が確認された。また、北海道大学の研究によると、リュウグウのサンプルにウラシル・ナイアシンが発見され、原始地球上での生命発生が地球外物質によるものではないかという説を強く支持するものとなっている。そのはやぶさ 2 は現在慣性飛行を続けており、1998 KY 26 へのランデブーなどの拡張ミッションを行なっている。一方、アメリカの小惑星探査機オシリスレックスは 9/24 に地球にカプセルを帰還させ、解析が進められている。カプセル上部にサンプルがはみ出ているなど、はやぶさと比べると多くのサンプルが回収されているようだ。

[宇宙生命科学]

宇宙における持続可能な社会基盤の構築を目指す有人宇宙学において、宇宙生物学は「宇宙を生きる」の一分野として生命維持システムの構築に貢献することを目指す。

宇宙空間は微小重力や高真空、複合宇宙放射線など、地上の環境とは異なる特徴を持つ。地球以外で生命の存在は確認されておらず、生命は地球環境に適応・進化してきたこともあり、生命の基本原理は地球環境に依存しているということが出来るだろう。そこで、生命現象は地球の枠を超えた普遍性を持つのだろうかという問いが生まれる。この問いに答えることが、重力生物学や放射線生物学など宇宙生命科学の目的である。動物の重力生物学^とでは幾つかの事実がわかっており、細胞増殖・分化は概ね正常、生殖や行動は可能である。発生も概ね正常であるが、発生初期や筋肉系では異常が見られる。

本講義では、植物の重力応答に注目する。植物の特徴として、独立栄養であることが挙げられる。唯一の生産者であり、地球環境の維持に資する。今後宇宙へ進出するにあたり、そのような植物の宇宙空間における振る舞いを理解することは重要だろう。また、植物は固着生活をしており、高い環境応答や適応能力を持ち、柔軟な生殖を行うという特徴もある。

宇宙空間と地球上で大きく異なる特徴として重力が挙げられる。地球上ではその大きさと

向きが安定しているが、宇宙空間では必ずしもそうではない。植物が重力屈性を行うメカニズムとして、受容・変換・伝達、応答に分けることができる。植物の根の構造は伸長帯、分裂帯、根冠に分けることができ、根冠の部分に重力応答と関連する機能がある。

クリノスタットと呼ばれる重力の方向性を相殺する装置を用いて植物の発生を調べると、シュートは自発的屈曲、根はランダム方向への成長を示すことが明らかにされた。実際の宇宙空間での実験を行うと同様の結果を得た。このことから、宇宙において植物は本来持っている性質に従った自発的形態形成を示すことがわかった。他にも、宇宙空間では花茎の伸長成長が促進されるということも宇宙実験によって示された。その原因としては、微小重力環境では細胞壁が軟化し、横向きの微小管が増加することが挙げられ、抗重力反応過程に変化が生じたものとして理解できる。これらの特性が地球以外の惑星などの異なる重力環境下でどのように現れるかについては引き続き研究を行う必要がある。

宇宙で植物栽培を行うことを考えると、高収量の栄養生殖をする植物と有性生殖の作物の組み合わせや、環境適応能力・ストレス耐性などの点にも注意する必要がある。加えて、果樹などの多年生作物の活用も考えていく必要があるだろう。

〔宇宙木材工学〕（参考資料 5-3）

人類は古くから木材を利用してきた。日本でも建築材料や生活資材のために木材は使用されている。しかし、人口増加や戦後の宅地・工場用地開発のための過剰な森林伐採によって、豊かな森林は国土の半分となるまで減少した。その後、拡大造林政策や燃料・肥料革命によって量的には回復してきているが、里山・人工林・自然林ともに質的には荒廃したままである。持続的な利用・管理が進まないことによって植生の変化や奥山化が起こっており、生物多様性も失われている。本年クマによる人身被害が過去最多を更新したことも、森林環境の変化と無関係ではない。ただし、必ずしも奥山の餌不足のみがクマの生態変化に直結しているわけではなく、長期的な個体数推移や行動圏の変遷を含めた包括的な評価を行う必要があり、単純に人口給餌を行うことだけでは問題が解決しないだろう。森林資源の活用と適切な管理が必要である。また、日本は高温多湿で樹木の成長に適した環境であり、地下資源と比べると蓄積量の回復が早く、適切な管理のもとでは木材を再生可能資源として利用していくことができよう。

木材は材料として非常に強い。4 億 2500 万年前のシルル紀にクックソニアと呼ばれる最古の陸上植物が発生してから、植物はより多くの胞子を遠くまで飛ばすため、そしてより多くの光を受けるため維管束という構造を作り上げ背を伸ばしてきた。3 億年前に繁茂した裸子植物はリグニンを発達させ、さらに強度の高い幹を手に入れた。樹木の最も小さい構造であるミクロフィブリルは理論上、鋼鉄の 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カーボングラファイトのような多層構造を成しており、こちらも非常に強い構造となっている。第二次世界大戦中には全幅 97.5m のカバ材で作られた木製飛行艇が制作され、1947 年には高度 21m、飛行距離 1mile を達成した。鉄道や船で金属が使われ始めても 20 世紀初めの飛行機には木材が利用されていた。同じ大きさでは木材よりも金属の方が高強度であるが、同じ重さでは木材の方が高強度であり、飛行機の方法としては有効であった。さらには、木製のためレーダーに見つかりにくいという利点も存在する。ただし、その耐久性や均一性、等方性には欠点もある。

住友林業・京都大学では宇宙木材プロジェクトが行われており、2023 年に世界初の本造人工衛星（LignoSat）の打ち上げが計画されている。宇宙空間は地球上と比べ、気圧・温度・放射線環境などに違いがある。地上での高真空暴露試験やきぼう簡易船外暴露試験等によって木材の反応を調べたところ、真空環境で少なくとも 5 年は劣化しないこと、温度変化によって急激な変化は見られないこと、今回の実験の範囲では原子状酸素による侵食は確認されず、宇宙放射線による劣化が少ないことが明らかとなった。金属製のロケットや衛星に対して、木材を用いることで再突入時におけるエアロゾル発生という悪影響を避けることもでき、本造人工衛星の活用が待たれる。

[宇宙霊長類学]

ヒトの進化はチンパンジーとの共通祖先から分離後樹上生活から離れ、サバンナに広がり、水辺適応するなど常に環境への適応と拡散を繰り返して行われてきたといえる。比較認知科学とは、このような進化の中で認知機能がどのように形成されてきたのかを調べることを一つの目的としている。この研究手法として、認知機能は化石として残らないため、現生種の比較により認知の進化を再構築することを主な研究手法としている。比較認知科学のヒト社会への応用として、ヒトの進化の中で時間軸とは大きく逸脱した環境変化の中で生じるころのゆがみを捉えることが挙げられ、例えば産業革命以降の人口の増大により引き起こされた社会への影響は、宇宙進出がヒトのころに与える影響のアナロジーになることが予想されている。特に、宇宙環境が人体に与える影響はこれまでも研究されてきているが、宇宙進出が認知に与える影響はほとんど研究されておらず、宇宙進出がヒトの認知に与える影響や環境変化により生まれる認知のゆがみとは何かを解明することは比較認知科学に新たな知見をもたらすことが期待される。宇宙で継続的な居住・活動を行うためには、このような認知的ゆがみのなかでも、個人的変化である短期的変化と、世代を超える中で起こる変容である長期的変化の両方の側面から宇宙におけるころの有様を解明するべきであると考えられる。

比較認知科学とはころに関する生物学的アプローチであり、ころとはかんがえ、判断や行動に影響を与える情報処理過程である。かんがえとは、input である刺激と output である反応の裏側にある、知覚、認知、記憶の認知情報処理プロセスであるが、直接観察することはできない。知覚や認知は感覚器・脳によって情報の処理・抽出が行われるものであるが、情報の処理や抽出は環境に応じて自然とチューニングするように形成されている。特に認知は重力にとって方向が一義的に定義されることが空間認知としてはわかりやすい例である。このため、異なる環境下ではどのような認知スタイルとなるのかを分析・比較することで環境と知覚・認知の相互作用を分析することは、比較認知科学の主な手法となる。

ことばの進化も比較認知科学の分野では重要な研究課題である。随意的呼吸制御や発声制御はことばを発するために非常に重要である。しかし、これらはヒト以外は持たず、ことばはヒト独自のものである。ことばによりヒトは言葉と代置性に優れ、ことばを通して生きる時空間軸の範囲を広げることが出来る。また、ことばにより表現型を獲得することで、ヒトは他個体へのフィードバックが可能である。

[宇宙医学]

宇宙医学とは、宇宙空間における人体の生理的変化やその対処を研究する学問であり、宇宙飛行士の健康管理や宇宙環境を利用した医学研究を目的とする。JAXA には①宇宙環境利用センター、②ISS 科学プロジェクト室、③宇宙医学生物学研究室という三つの生命科学研究と関連する組織がある。①、②は ISS やきぼうの利用促進に関わる組織であり、③は宇宙飛行士の健康管理技術の開発に関わる組織であり、J-SBRO とも呼ばれる。生理的対策・放射線被曝管理・宇宙船内環境・精神心理支援・軌道上医療をターゲットとし、ISS の環境を主な研究対象としながら月、火星までをも視野に入れている。

宇宙環境での人への影響には様々なものがある。例えば、微小重力下における筋肉への影響としては、速筋繊維と遅筋繊維の入れ替えが起こる。速筋繊維は持久力に優れており、遅筋繊維は瞬発力に優れている。宇宙では抗重力筋の萎縮が顕著になるが、マウスの実験では、地上ではヒラメ筋へ 3 か月負荷を書けない場合はヒラメ筋の萎縮が見られたが、宇宙空間においては遅筋の速筋化が観察された。他にも、骨量減少と尿路結石のリスクが高まることに加え、骨量減少速度が約 10 倍になることが報告されている。これらの原因として、骨や骨格筋は分解と形成を繰り返しているが、無重力環境によりこの分解と形成のバランスが壊れるため引き起こされると考えられている。心循環系や心循環器系への宇宙環境の影響としては、無重力により頭部に地上に比べて多くの血液が集まるために引き起こされる Moon face や Bird leg や宇宙飛行士の心臓が球形に約 10%程大きくなることによる血液循環の非効率化が

懸念されている。また、体液シフトによる視力低下(SANS)も現在研究されており、現在のところ、視力低下の原因は脳の位置の違いのために引き起こされる可能性が示されている。精神・心理への影響も宇宙医学の対象となっており、隔離環境・対人関係・危険な環境に身を置くことが精神にどのような反応が起こるのか研究や対処法の検討が行われている。現在、宇宙飛行士は週一回フライトサーजनとの面談や二週間に一度のカウンセリングを受けているが、宇宙ではストレスコーピングが限られており、適切な精神心理対策が求められる。

これらの課題に対して地上における模擬実験で様々な知見が蓄積されている。Hi-SEAS や HERA、MINI-EARTH などの閉鎖実験やベッドレスト実験、パラボリックフライト実験などのヒトを対象とした実験などである。

現在の宇宙医学の限界としては、実験機会の少なさや地上の模擬宇宙実験の正確性への疑問、長期的な宇宙影響の調査方法の欠如が挙げられる。また、放射線耐性のための遺伝操作など、宇宙環境が及ぼす人体への影響の解決策が倫理的な問題点を持つこともあり十分な検討が必要である。

[宇宙法]

国際宇宙法は国際法の一分野であるため国際法の特徴を持つ。国際法は法律の定立、適用、是正は国家が行うため、平等である国家間に成立する宇宙法は強制力が弱く、法と非法の区別が曖昧であることが特徴であるが、宇宙法においてはこの特徴が顕著である。宇宙法の成立を担っている宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)は 1957 年のソ連の衛星打ち上げ成功の翌年に暫定的な委員会が設置されたものを始まりとしており、1962 年以降はコンセンサス方式を採用している。拘束力をもつ正式な国際法は条約や慣習法だが、実質的法源である国連総会決議などのソフトローも厳密には法ではないが実際には有用である。ソフトローが多く含まれる理由としては、宇宙法はコンセンサス方式を採用していること、自律的アクターが少数であること、ソフトローを国内法に取り込むことにより国内法として拘束力を付与することが可能であること、南北問題のための政治的妥協原則が影響していることなどが関係していると考えられる。

地上の領域の法的地位は明確である(例えば公海は国際公域、深海的は人類の共同財産とされている)が、国際宇宙法としての天体の法的地位には必ずしも明確ではない。宇宙条約にのみ加入する国にとっては国際公域、月協定に加入する国にとっては人類の共同財産という地位になり、後者においては、自由競争による経済開発が禁止される。国際法上、執行管轄権の順位は安定しており、領域管轄権が最も強く、次に準領域管轄権、最も弱いのが属人的管轄権となる。天体においてもこのルールが適用されると考えるのが現在のところ自然であり、天体の領有権が否定されるため、基地や構造物の管轄権を行使する国の国内法が適用されることが予想される。

天体活動に宇宙条約を適用する場合、宇宙条約内の宇宙空間の探査・利用の自由と宇宙の共通利益性のバランスが困難であり、特に第一条の「すべての国の利益のために」の解釈は先進国と途上国で分かれていたが、スペースベネフィット宣言によりこの解釈の差異は解消されている。また、第2条では国家による宇宙の土地取得の禁止が規定されている。私人の土地所有は、法解釈で禁止となる。他方、月協定では、月を人類の共同財産と規定し、国家、個人による土地および賦存する資源の所有権の禁止が明記されており、開発が技術的に可能となったときに設定する国際レジームのルールに基づいて、資源が途上国の利益を留意しつつ公平に分配される。月協定の当事国が少ないため、現段階では宇宙資源を所有するための手続ルールは不明瞭であり、2021 年以降、国連 COPUOS が中心となって国際枠組みに向けたソフトロー作成を開始したところである。

[宇宙人類学]

Moon Village Project 人文社会部門には直近の月コミュニティの社会・文化をどのように設計するかという短期的な課題と、人類が宇宙に生活基盤を構築する際にどのような方向性

があるのかという課題に取り組むことが期待されている。人文諸科学には価値創造型の学問であり、これらの課題に取り組むにあたって効果的であるといえよう。

文化人類学とは、人類の社会・文化に関する経験科学、実証主義的アプローチであり、宇宙を対象とした研究においては、「想像の対象」である「宇宙と人類の未来」について現実の社会文化的状況の具体例から検討する。Space Anthropology に関する研究は近年盛り上がりを見せており、複数の書籍が出版されている。

一般に、宇宙進出は大航海時代に捉えられるが、大航海時代があくまでフロンティアの欧米化を進めていたのに対して、宇宙進出では地球上の状況を再現するだけにとどまらない可能性もあり、必ずしも類似しているとは言えない。これまでの人類社会における転換期を考えると、出アフリカによりコミュニケーションの発達と多様化が引き起り、農業革命により社会が多様化し、社会形成につながっている。その後産業革命によって抜本的な環境変化が起き、多様であった文化や社会が標準化・システム化された。宇宙進出は 4 つ目の転換点となり得るかが今後の宇宙開発における宇宙文化人類学にとっても重要な考察対象である。

Moon Village Project では月面上に 1000 名の村を建設することを構想しており、文化に対しては二つの次元の区分を置いている。生物学的適応を含む総合的、長期的適応の形式としての人類文化「**CULTURE**」と当面の環境に適応するための地域的、短期的適応としての local な文化「**Culture**」である。月面社会を構想するにあたっては「かくありたい」という理念と現実的にとらなければならない実態の乖離に直面し、それらのギャップを埋める技術的問題を考えていかなければならない。また、地球上と完全に異なる **Community** を宇宙空間に想像することの是非を問わなければならない。例えば NASA が 1970 年代に創出した宇宙基地のイメージはアメリカの中流家庭のニュータウンのイメージに固定されている。家族携帯などコミュニティのあり方に関する考察は、短期的・中期的・長期的適応によって変わると考えられる。また、生活空間として完結することを目指しており経済的、社会的な自律性なども検討している。その際に機能的アプローチか演繹的アプローチのどちらを取るかも考えなければならない。それらの考慮にあたっては、数万年を経て多様化した人類社会・文化の「財産」の蓄積が地上の「近代社会」の再現を超えた宇宙での生活への想像力の基盤となるだろう。

【宇宙居住学】

1960 年代のアポロ計画から、これまで様々な月面探査が行われてきた。当初冷たく未分化な原始天体であるとの仮説が立てられたがその後の探査によってマグマオーシャン説が裏付けられている。未だ地殻・マントルなどの化学成層の把握などの課題が残されており、広範囲の着陸探査・サンプルリターンが必要とされている。また、有人探査は月資源に対する期待の高まりと共に多くの国で計画が進められている。日本における月面探査としては小型月着陸実証機 **SLIM** の打ち上げなどが既に行われている、今後も月極域探査ミッション **LUPEX** や中型ランダ、有人と圧ローバーの開発・打ち上げが目指されている。さらに、アメリカは他国との共同のもと月の周回軌道に有人拠点を構築する **Gateway** 計画を打ち出している。また、火星においても様々な探査計画が立ち上がっている。日本は 2026 年度に火星衛星からのサンプルリターンを目指す **MMX** の打ち上げを計画している。さらなる発展のため、企業・研究機関、大学の参画や各国との連携が求められる。

月面は太陽風に曝露されたレゴリスに覆われていることが特徴的であり、今後の月面開発には、これらの環境について様々な場所で精密に調べる必要がある。特に月における建築物を建設や資源開発を実施するには、不確実性の高いレゴリスを扱う必要がある。月表面のレゴリスの厚みは「高地」と「海」で異なり、資源へのアクセスにはこのレゴリス表面に穴を掘ることが必要である。月表面の掘削技術は、これまで 1-2m 程度のドリル技術が成熟してきており、これまで 3m の地下までしか掘削経験を持たないが、今後の月や火星における資源開発では 10m クラスの掘削技術が必要となる。

15 年後には有人月面探査、25 年後には火星に人が滞在するような世界を実現することが目

指されている。他天体での居住には衣食住エネルギーなどの見当が必要である。生命維持・環境抑制制御や植物栽培に関する研究が進められている。また、レゴリスを利用した建築物の3Dプリンティング製造プロセスなども現在考案されている。国際的な動きとしては、これまで月・惑星での滞在を目指したプロジェクトは点在するが、これらは主に少人数が短期間滞在することが主な目的であった。このため、恒久的な社会形成を目指すには、今後さらなる検討が必要である。

今後宇宙居住科学が月・火星に社会を作る研究テーマに取り組むには、なぜ社会を作るのか、その目的は科学探査やエンターテインメントなのか、これらの目的は経済的に回るのか、法的整備はどのようにするべきかなども考える必要がある。国内における宇宙居住を考える有志団体の活動例としては、ムーンビレッジ勉強会などがあり、宇宙居住に関する議論の具体化や課題の抽出を目指している。

(2) 有人宇宙学演習

講義「有人宇宙学」における演習は、4つの班に分かれて班ごとに「150人の人間が暮らす小社会を月（1班）、火星（2班）、ガニメデ（3班）、小惑星（4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4-6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 4-6 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・6・7 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、火星班、小惑星 Psyche 班、木星の衛星ガニメデ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。

(B) 木造人工衛星設計会議

(1) 木造人工衛星設計会議概要

宇宙木材研究室では、超小型人工衛星 LignoSat を開発しており、毎月の情報の交換及び問題の解決のために木造人工衛星設計会議を開催している。学生からなる 5 つの班が開発を担当し、毎月の設計会議で担当システムの説明を行う。木造人工衛星設計会議参加者は、学生チーム各班、宇宙木材研究室教職員、農学研究科教員である。

学生班は次の通りである：

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

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

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

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

Structure: STRUC 班：衛星構体の設計と組立て

木造人工衛星設計会議は令和 5 年 4 月 1 日から令和 6 年 3 月 31 日までの半年間に表 4-7 に示すように 12 回の開催が行われた。なお、本設計会議は令和 3 年度より開催されており、本委託業務においてはその一部の設計会議として踏襲した。

表 4-7 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 32 回 設計会議	令和 5 年 4 月 4 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	22	CDH: 2023 年 3 月に実施した TVT の温度・気圧データの解析
第 33 回 設計会議	令和 5 年 5 月 9 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	25	COMM: 電波暗室を用いてアン テナ長決定試験の実施
第 34 回 設計会議	令和 4 年 6 月 6 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	40	EPS: バッテリー特性試験装置 の製作
第 35 回 設計会議	令和 5 年 7 月 4 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	36	MISSION: 磁気シールドを用い た磁気センサ試験の実施
第 36 回 設計会議	令和 5 年 8 月 8 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	26	STRUC: FM 木造構体とアルミフ レームのフィットチェック
第 37 回 設計会議	令和 5 年 9 月 5 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	32	CDH: FM-E2E 試験のための 24 時間予備試験の実施
第 38 回 設計会議	令和 5 年 10 月 3 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	30	COMM: 近畿総合通信局より予 備許が発行される
第 39 回 設計会議	令和 5 年 11 月 7 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	27	EPS: FM 構体±Z 面への太陽光 セルの接着
第 40 回 設計会議	令和 5 年 12 月 5 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	28	MISSION: Mission Board-X 面 側歪ゲージの性能試験の実施
第 41 回 設計会議	令和 6 年 1 月 9 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	26	STRUC: JAXA 安全審査 0/1/2 の資料の作成
第 42 回 設計会議	令和 6 年 2 月 13 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	22	CDH: FM-E2E 試験のための予備 試験を実施
第 43 回 設計会議	令和 6 年 3 月 12 日	京都大学研究 16 棟 208 号室	19	COMM: 電波暗室を用いて FM ア ンテナ長試験の再実施

(2) 木造人工衛星設計会議内容

(i) 第 32 回設計会議：2023 年 4 月 4 日（参考資料 6-1）

CDH 班

EM TVTにおいてデータ処理が正常になされていることを確認した。温度データと気圧データについて精査し、問題なかった。また、COMM 系統の評価試験を行い、地上局から衛星に HK データをダウンリンクするコマンドを送信し、地上局で正しくデコードすることに成功した。

COMM 班

3 月 2 日付で省内周波数調整が終了された旨が通達された。九州工業大学大谷様に来校いただき地上局のハードは正常であることを確認していただいた。一方で地上局ソフトウェアではアップリンクコマンドに CRC を付与できる仕様になっていなかったため当該部分を修正し地上局-基板間の通信に成功した。FM の COMM 基板が納入されたため絶縁のためカプトンテープ処理を行った。

EPS 班

バッテリー電圧値測定を行い、全ての FM セル電圧値が 1.1V を上回っていることを確認した。Birds のデータを基にパワーバジェットの表を作成し、5 月に各項目の消費電力を測定してモードを検討することが決定した。EM+X 面の太陽光パネルの接着にずれが生じていたため、接着方法を改良し新たな構体を用いて太陽光パネルを接着を実施した。

MISSION 班

3 月に TVT を終え、温度データ、歪データの解析を開始した。温度データは正常に取得できているが、歪データにはノイズが乗っているため、較正を行う。また、基板の切り欠きや、コネクタの形状等、FM に向けての設計変更点を何点か確認した。

RAB の回路設計が終了し、納品が行われた。

STRUC 班

FM アルミフレームのデプロイメントスイッチ固定用パーツの設計および図面の作成中であることが報告された。また、九工大で実施された EM 熱真空試験において構造に割れ等の異常がなかったことが報告された。安全審査に向けた資料作成が進められていることが報告された。

(ii) 第 33 回設計会議:2023 年 5 月 9 日 (参考資料 6-2)

CDH 班

引き続き EM TVT のデータ解析を行い、MSN 系データにも問題がないことを確認した。また、COMM 班の電波暗室試験を補助し問題なく完了した。さらに、新入生用の基板作成・ソースコード学習教材を作成した。

COMM 班

近畿総合通信局の拝郷さまに無線局新規開設に係る申請書類のドラフトチェックを依頼した。EM 電波暗室試験を九州工業大学で行いアンテナ長を 185 mm に決定した。アンテナパターンおよび通信感度も BIRDS 衛星と同様の結果となり EM が正常に動作していることを確認した。

EPS 班

パワーバジェットの表を作成し、各項目の消費電力の測定を実施した。全ての項目の消費電力を測定後モードを検討することが報告された。+X 面の PCB 基板を発注し、納品後すぐに検査を行い接着作業を実施すると報告された。

MISSION 班

RAB FM の仕様書を策定した。具体的には RAB のハーネス用切り欠き位置の変更、コネクタ形状の基板側、センサ側での統一である。また、TVT での磁気データ解析を行い、地磁気のオーダー通りの結果が得られたが、他基板の影響が見られたため、較正試験を検討中である。

STRUC 班

FM アルミフレームおよび木造構体、FM 各種部品の設計図作成・発注が行われたことが報告された。また、先月に引き続き安全審査資料の作成・修正を実施した。新メンバーに真空木材実験の解析法の引継ぎ、プログラム開発を実施した。

(iii) 第 34 回設計会議 : 2023 年 6 月 6 日 (参考資料 6-3)

CDH 班

BPB-FM および FAB-FM 基板を発注した。また、アマチュアミッションコードを作成し、700 人分のデータを保存しそれ以上は人数のカウントのみ行うこととした。さらに MAINPIC のメモリのアドレス管理を行い、MSN の通信プロトコル変更にもなってプログラムを変更した。

COMM 班

国際周波数調整 API/A が 4 月 4 日付で完了している旨が通達された。室温環境下においてバッテリー10%の状態で開催試験を行い正常にアンテナが展開されることを確認した。FM のアンテナを固縛するためのテグスを錘を用いて伸長させる作業を開始した。

EPS 班

+X 面の太陽光パネルの接着を行い、発電試験を行った結果問題がないことを確認した。FM 用のデプロイメントスイッチを作成し、後日 FM 用と Backup 用を選定する予定であると報告された。パワーバジェットの全項目の消費電力の測定が終了し、モード検討を行った。

MISSION 班

温度データと歪データは取得時刻を同一にしなければ熱膨張率の解析に不相当であるため、プログラムを改良し同時にデータを取得するようにした。また、歪ゲージの較正試験を行い、温度が予定していた-40℃までは下がりきらなかったというトラブルがあったが、常温以上の範囲では正確なデータが取れることを確認した。

STRUC 班

FM-X シャフト、Y シャフト、スペーサー等各種部品の発注作業が進んでいる旨が報告された。5 月下旬に実施した EM ホオノキを使用した振動試験において異常がなかったことが報告された。FM 組立に向けて治具作成を進めている旨が報告された。また、6 月上旬に+X 面に割れが生じていることが報告された。この割れは振動試験前から見られ、FM では割れが生じない設計に変更している旨が報告された。

(iv) 第 35 回設計会議：2023 年 7 月 4 日（参考資料 6-4）

CDH 班

SEU ミッションコードを作成し、ビット反転を 1 秒ごとに監視し、発生時刻とアドレスを記録することとした。また、コマンド定義を行い、コマンドがどの PIC で処理されるのかをリスト化した。また、MSN データ・HK データの仕様を確定した。

COMM 班

近畿総合通信局に新規無線局開設に係る資料を提出した。地上局ソフトウェアにログの自動保存機能を追加した。

EPS 班

デプロイメントスイッチのスクリーニングを行い 7 本を選定した。FM 用太陽光セルの接着練習を行い、接着剤の塗布面積の調整を行った。FM バッテリーの温度センサーおよびバッテリーヒーターを作成した。

MISSION 班

Mission Board EM のスペア基板の電氣的試験を行い、正常に動作することを確認した。また、磁気シールドを用いた磁気センサ試験で、衛星による磁気オフセットは一定値であることを確認した。更にプログラムの改定を行い、通信容量の制約から、ミッションデータは 90 秒おきに測定し、その 4/5 を送信することとした。

STRUC 班

FM 各種部品が順調に納品が進んでいる旨が報告された。6 月下旬に実施した EM 振動試験において衛星から木粉の発生が見られなかった旨が報告された。同時に振動試験の安全審査資料の作成、他資料の修正が進められた。FM アルミフレームにおいて、木造構体が上手く嵌らず、修正が必要であることが報告された。

(v) 第 36 回設計会議：2023 年 8 月 8 日（参考資料 6-5）

CDH 班

SEU ミッションコードの試験を開始したが、この試験中に SEU は発生しなかった。また、COMM 班のアンテナ展開試験に同行し、RESETPIC と MAINPIC の通信に係る不具合に関して確認・調整を行った。さらに、MSN データの CW ダウンリンク機能を実装し FM ダウンリンクが不調の場合にも温度・ひずみデータをダウンリンクできるようにした。

COMM 班

衛星開発を鑑みた特例として、近畿総合通信局より先行してコールサインが付与された。国際周波数調整に関する外国書簡の返信作業を行った。地上局ソフトウェアに衛星自動追尾機能とドップラーシフト補正機能を追加した。九州工業大学で低温下低バッテリー容量展開試験を行い-30 度かつバッテリー10%の状態でも正常に展開することを確認した。FM 用アンテナボードが納入された。地上局で ISS のダウンリンク電波を受信し動作が正常であることを確認した。

EPS 班

CDR 後にパワーバジェットの各項目の消費電力の再測定を行い、実際の発電量の検討を行った。新たに FM 用のデプロイメントスイッチの作成およびスクリーニングを行い、追加で 6 本を選定した。また±Y 面と Z 面の太陽光セルの接着を行った。

MISSION 班

CDR に向けた資料作成を行い、ミッションブロック図、データ取得フロー、試験解析結果の解説を作成した。FM 発注に向け、センサ接続用コネクタのピンアサインやハーネス長の決定を行った。

STRUC 班

FM 木造構体の修正を実施し、問題なく木造構体がアルミフレームにはまったことが報告された。また、真空木材実験解析の自動化が進んだものの以前の解析結果と大きく変化していることが報告された。FM シャフト類、デプロイメントスイッチ（固定パーツ含む）が問題なく機能していることが確認された。フィットチェックケースを用いたフィットチェックに EM、FM とともにクリアしていることが確認された。

(vi) 第 37 回設計会議：2023 年 9 月 5 日（参考資料 6-6）

CDH 班

E2E 試験に先立って 24h 試験を行った。RESETPIC の応答・24h リセット機能ともに正常であることが確認された。また、CW および FM を発信する総通試験用プログラムを作成した。さらに、FAB アクセスポートとの接続用に FAB インターフェースボードの発注を行った。

COMM 班

EM 電波暗室試験の結果を踏まえてリンクバジェットを再設計した。アンテナボードと-X 面における SMA ケーブル用の穴の位置が一致していないことが発覚しアンテナボードの再設計を行った。

EPS 班

LignoSat のパワーバジェットを確定させ、この表を基に CW の周期についての検討を行った。FM 太陽光セルの接着の際に、従来の方法よりも接着剤の塗布面積を大きくし、接着剤がはみ出さないように圧着に使用するおもりを 10kg から 1kg に変更することが決定した。

MISSION 班

2号機に向け、新型の磁気センサを使用した機能試験や姿勢制御系検討会を実施した。また、CDR を開催し、センサ較正試験にて追加試験が必要と判断したため、試験準備を行った。

STRUC 班

CDR において質問された振動試験加振条件の確認、LignoSat に含まれる金属量の計算が実施された旨が報告された。FM-X 面のアンテナ固定部品において、ボルトの長さ不足、アンテナ基板の穴のずれ等の不具合が発生し、修正対応が必要である旨が報告された。

(vii) 第 38 回設計会議：2023 年 10 月 3 日（参考資料 6-7）

CDH 班

パワーバジェットの要求にしたがって RAB・MSN 基板の電源を ON/OFF するコマンドを作成した。また、-30℃アンテナ展開試験を行い、低温状況下でアンテナ展開に失敗する原因を究明した。

COMM 班

近畿総合通信局より予備免許が発行された。総通試験にむけて地上局および衛星局のスプリアスをはじめとした事前測定を行い正常であることを確認した。地上局ソフトウェアに誤り訂正符号の機能を追加した。

EPS 班

FM バッテリーのリード線の制作、および EM バッテリーの温度センサの断線の修理を行った。また CW 周期に 110s を採用し PowerBudget を確定させた。FM 太陽光セル接着において、接着剤の塗布面積を増やす新しい接着方法を採用することが決定した。

MISSION 班

RAB FM が納品され、基本的な動作試験を実施した。基板は正常に稼働し、センサ類が納品され次第それらとの相互試験を実施する。また、磁気シールドに衛星全体を格納し、全機能を稼働させての磁気センサ試験を行った。このデータを基にデータのオフセット量を決定する。

STRUC 班

9 月に判明した-X 面の諸不具合に対し、修正・発注により解決された旨が報告された。FM 構体と EM 内部基板を用いたフィットチェックにおいて、FAB と木造パネルが接触し、上手く組みあがらず、木造部の修正が必要である旨が報告された。FM 組立用治具の設計図作成・発注が進められた。

(viii) 第 39 回設計会議：2023 年 11 月 7 日（参考資料 6-8）

CDH 班

RAB・MSN 基板の電源を同時に ON/OFF できるようにコマンドを改良した。また、MAINPIC プログラムのうち LignoSat には不要な部分を削除し、整理した。さらに、SEU ミッションプログラムを RAB に移植、アマチュアアップリンクに関するセキュリティコード・受信拒否、CW 発信休止などのプログラム追加・改良を行った。

COMM 班

APIb を受領した。MAYA 衛星を用いた受信訓練を学生メンバー全体で行った。JAMSAT ニュースレターに LignoSat の開発状況に関する記事を寄稿した。10 月 7 日の古典の日におこなわれた JAMSAT PR イベントに参加しアマチュアミッションの広報を行った。

EPS 班

接着方法の変更に伴い、構体 2 の±Z 面の接着を行った。またせん断接着力試験を行った結果、圧着に用いるおもりの重さによる接着強度の変化は見られず、FM に使用する 2.5kg のおもりで十分な接着強度が得られることを確認した。

MISSION 班

衛星運用開始後に使用するデータ解析ソフトを作成した。衛星は本体の稼働情報などの各種データを 16 進数で送信するが、そこからミッションデータを抽出し、熱膨張率や磁気値を自動的に解析するソフトを作成することで、運用者を問わず、迅速な解析を行えるようになる。

STRUC 班

修正後の FM アンテナ固定パーツに新たに修正が必要であることが発覚し、再修正を行った旨が報告された。FM 組立に向けて、安全審査 Ph3 でも提出が必要となる衛星組立手順の確立および手順書の作成が進められた。

(ix) 第 40 回設計会議：2023 年 12 月 5 日（参考資料 6-9）

CDH 班

24h 全体試験を行った。RESETPIC と MAINPIC の通信を確実にするための対策を講じた。バッテリーヒーターの時間制御プログラムを作成し、指定した時間の経過後自動でバッテリーヒーターの電源が OFF になるコマンドを作成した。さらに、不具合が起こっていた地上局との通信を試験し、正常な動作を確認した。

COMM 班

COMM に関する安全審査資料の作成を行った。はじめて地上局と全基板が組み上がった状態の EM 間で通信が行えることを確認した。日本ピラー工業に 2 号機用パッチアンテナに必要な基板を発注した。

EPS 班

FM 用と Backup 用のデプロイメントスイッチのストロークが JAXA の基準を満たしていることを確認した。また FM の太陽光セル接着を全て完了し、真空試験を行った結果接着剤から気泡の発生は確認されず、宇宙空間でも問題なく使用できることを確認した。

MISSION 班

Mission Board の-X 面側歪ゲージの性能確認試験を行った。今回は温度変化が予定通りに行われ、データが正常に取得できることを確認した。また、二号機の姿勢制御用に使用する磁気トルカの性能試験を開始した。

STRUC 班

アルミフレームのアルマイト処理が終了し、すべての部品が無事導通していることが確認された。NASA 安全審査のため、FM での重力荷重を加えた応力解析を新たに実施し、報告書にまとめた。-X 面のアンテナ固定部品の木造部沈み込み防止のための修正が実施された。FM 組立用治具が納品され、問題なく機能することが確認された。

(x) 第 41 回設計会議：2024 年 1 月 9 日（参考資料 6-10）

CDH 班

EM E2E 試験を行った。おもに SEU データに関していくつかの問題点が発見されたが、適宜修正して解決した。また、EM 30 分タイマー試験を実施し、問題なく動作することを確認した。さらに、コマンドリストを作成した。

COMM 班

近畿総合無線通信局に無線局の落成届を提出し総通試験の日程調整を開始した。FM アンテナ長決定試験を行ったが EM を用いた試験の再現性が取れなかった。MAYA 衛星の TLE を自動取得し高度推移をモニタリングすることで LignoSat の軌道と比較検討できるようにした。

EPS 班

FM バッテリーの充放電試験を行い問題がないことを確認した。接着が完了した全ての面の太陽光セルの発電試験を実施し、問題なく発電できていることを確認した。

MISSION 班

FM 木造構体に温度センサ、歪ゲージを接着した。温度センサは真空試験を行い、正常に接着されていることを確認した。歪ゲージはアンテナ基板に接続し、はんだ付けまで完了している。

STRUC 班

-X 面に使用するボルトの変更があり、FM-X 面が完全体で組みあがった旨が報告された。安全審査 Ph012 の修正および Ph3 に向けた資料作成が進められている旨が報告された。

(xi) 第 42 回設計会議：2024 年 2 月 13 日（参考資料 6-11）

CDH 班

EM E2E 試験が完了し基本的な動作に問題がないことを確認した。また、ここでの改善点を踏まえて FM E2E 試験手順書を作成した。TVT の試験計画書の作成も開始した。さらに、FM 相互

評価試験を行い、各基板に問題がないことを確認した。

COMM 班

ダイポールアンテナと並行に設計されているアルミフレームが通信に影響されるのではないかという指摘があった。アンテナアナライザを用いてアルミフレームを装着した場合としない場合で SWR を比較したところ通信には影響は及ぼさないと判断した。京都大学で 2 号機向けのパッチアンテナを試作した。

EPS 班

追加で Backup 用のデプロイメントスイッチの作成を行った。構体が組み上がらないという問題を受け、-Z 面のみ再度接着および発電試験等の試験で問題がないことを確認した。バッテリー自己放電試験を行った結果、JAXA の安全審査基準を満たさないことが判明したが、試験時間が経つほど放電率が低下することが確認され、再度試験時間を長くして行うことを決定した。

MISSION 班

FM 用センサ接続コネクタが納品され、選定、機能試験を行った。センサと基板は正常に接続され、データが受信できることを確認した。また、貼り付けを行った温度センサが基板と接触する問題が発生したため、位置を変更して再度貼り付けを行った。組み立ては無事に行われ、また接着も正常であった。

STRUC 班

安全審査 Ph012 の SFCB 指摘票の回答および資料修正の対応が行われた。2 月上旬の FM 組立において、-Z 面の温度センサーが RAB と接触し組みあがらない問題、デプロイメントスイッチのケーブル長が一部不足しており、組みあがらない問題が発覚した。これらの修正対応を実施し、FM 各種試験の計画が変更された旨が報告された。

(xii) 第 43 回設計会議：2024 年 3 月 5 日（参考資料 6-12）

CDH 班

FM E2E を実施した。24h リセットが動作しなかったため OBC/EPS Board の単評価を実施したところ不具合がみられた。これを交換して試験を実施したところ 24h リセット機能を含め問題なく動作した。また、TVT を実施した。真空環境下で衛星が問題なく稼働することを確認した。

COMM 班

受領しているすべての外国書簡に対する返答を完了した。地上局ソフトウェアにパケットロスに関する機能を追加し、必要なすべての機能を実装し終えた。FM アンテナ長決定試験の 2 回目を行い 185 mm に決定した。

EPS 班

Backup 用のデプロイメントスイッチが納品された。太陽光セルの縁の一部剥がれていた RTV を再度ポッティングし保護した。バッテリー自己放電試験を再度試験期間を長くして行った結果、JAXA の安全審査基準を満たす放電率が確認された。

MISSION 班

温度センサと同じ面に接着されていた歪ゲージの再接着を行った。こちらは正常に接着され、真空試験も完了した。以上で FM 製作に関する MISSION 班の担当範囲は全て終了したこととなる。

STRUC 班

安全審査 Ph012 の SFCB 指摘票の回答を実施し、終了見込みであることが報告された。2 月に発覚した FM の各問題に対し修正対応を行い、無事 FM 完全組立が終了した旨が報告された。また、3 月の FM 熱真空試験において木造パネルに大きな反りが生じたものの、その後の経過観測で元の状態に戻っていった旨が報告された。DCDC/ダイオードの機能確認のため行われた EM 振動試験が問題なく実施された旨が報告された。

該当期間中合計 12 回の設計会議が開催され、フライトモデルの製作を終え、組み立て、試験に進むことができた。試験結果をまとめて JAXA との安全審査を実施している。令和 6 年度には、JAXA /NASA の安全審査を完了し、FM の JAXA への引き渡し、打ち上げ、運用を行う予定である。

(C) 樹木育成ゼミ

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

- 樹木に関する幅広い知識を実物の観察を通して習得するために、2023年11月19日に京都府立植物園にて樹木実習を行った。内容は秋の葉の変色（紅葉・黄葉）メカニズム、年輪形成、日本と京都の植生分布、微生物による樹木遺体の分解など。参加者13名。
- 2023年4月26日と5月16日「LMAについて」について書かれた総説を用いて講義形式で学習した。LMAは本研究でも重要な解析項目となっている。
- 2023年6月22日、28日、7月20日の3回に渡りそれぞれ「植物生理生態学入門」、「光合成」、「水分生理」について講義形式で学習した。
- 2023年9月11日、9月26日、10月9日、10月23日にそれぞれ「減圧がハウレンソウの成長に及ぼす影響」、「低圧がレタスのガス交換と成長に及ぼす影響」、「低圧と低酸素がレタスの形態と生理に及ぼす影響」、「レタスの成長とガス交換に及ぼす低圧と低酸素効果の区分」についての研究状況をゼミ形式で学習した。

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（2023 年 8 月 30 日、2024 年 1 月 24 日、2 月 13 日、3 月 12 日）。

(D) 第 2 回宇宙木材利用シンポジウム

2024 年 3 月 21 日(水)に第 2 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 2 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当 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准教授により、ExBAS 実験の目的およびその経過報告がなされたほか（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初期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

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、本実験の参加メンバーらにより構築された低圧下樹木育成実験装置での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、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、1D および 3D のクリノスタットを用いた研究結果について報告がなされた。地球外天体における樹木育成に向けた技術的課題として、低圧環境および微小重力環境の 2 つの環境要因にフォーカスし、様々な研究分野の専門家を交えた有意義な意見交換の場となった。

第 3 部「宇宙木材利用の展望」では、セッション A：極限環境における木材利用およびセッション B：宇宙木材産業の展望 - パネルディスカッションの 2 つのテーマに関して議論が行われた（図 4-13）。セッション A では、住友林業株式会社の中嶋一郎氏により、脱炭素社会の実現に向けて住友林業が手掛ける研究開発の動向について紹介がなされた。また、京都府立大学生命環境科学研究科の宮藤久士教授によりバイオベース CFRP と真空対応型ケミカルリサイクル技術の開発成果について紹介された。セッション B では、本シンポジウムの総まとめとして、仲村匡司教授による司会のもとでセッション A の 2 名の講演者及び中村栄三名誉教授、高部圭司名誉教授、山敷庸亮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 4-13 第 2 回宇宙木材利用シンポジウム
第 3 部「宇宙木材利用の展望」パネルディスカッションの様子

(E) Spaceology NewsLetter

- 2023 年 4 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 8-1）
宇宙における樹木の育成
- 2023 年 5 月号：伊藤駿治（京都大学理学部）（参考資料 8-2）
LignoSat のミッション系開発の現状と展望
- 2023 年 6 月号：村田功二（京都大学農学研究科）（参考資料 8-3）
木材の宇宙暴露試験の経過報告
- 2023 年 7 月号：岸広登（京都大学理学部）・遠藤早織里（参考資料 8-4）
ISTS での熱真空試験の報告・ISTS 久留米に関して
- 2023 年 8 月号：山敷庸亮（京都大学総合生存学館）（参考資料 8-5）
有人宇宙学—宇宙移住のための 3 つのコアコンセプト 内容紹介第一回 3 つのコアコ

ンセプトとは？

- 2023 年 9 月号：池田隆文・遠藤早織里（京都大学宇宙木材研究室）（参考資料 8-6）
低圧下樹木育成プロジェクト 水分生理（植物と水との関係について）
- 2023 年 10 月号：池田隆文・清田朋和（京都大学宇宙木材研究室）（参考資料 8-7）
低圧下樹木育成プロジェクト 水分生理（植物と水との関係について）2 樹木体内の水の上昇
- 2023 年 11 月号：池田隆文・三本勇貴（京都大学宇宙木材研究室）（参考資料 8-8）
低圧下樹木育成プロジェクト 水分生理（植物と水との関係について）3 樹木体内における水上昇の失敗
- 2023 年 12 月号：土井隆雄（京都大学総合生存学館）（参考資料 8-9）
有人宇宙学—宇宙移住のための 3 つのコアコンセプト 内容紹介第二回 有人宇宙学
- 2024 年 1 月号：鳥谷陽樹（京都大学工学部）（参考資料 8-10）
LignoSat EPS 班研究紹介
- 2024 年 2 月号：桜井誠人（宇宙航空研究開発機構）（参考資料 8-11）
有人宇宙学 Chapter 3「空気再生・水再生・廃棄物処理」
- 2024 年 3 月号：豊西悟大（京都大学農学部）（参考資料 8-12）
超小型木造人工衛星「LignoSat」のひずみ測定と地磁気測定 ミッションの現状と展望

(F) 学会・講演活動

<34th International Symposium on Space Technology and Science>

- Development of a Wooden CubeSat-LignoSat、岸広登他、2023 年 6 月 6 日、福岡県久留米市開催（参考資料 9-1）

We are now developing “LignoSat,” a 1U-sized wooden satellite to investigate the possibility of using wood in space. Demonstrating the reliability of wood as a spacecraft’s structural material may lead to the creation of a new “Space Wood Industry” in the future. The main missions of LignoSat are to investigate the effects of the space environment on the micro-structure of wood. The characteristics of LignoSat were investigated by using a vacuum thermal test, the results of which show that LignoSat has a thermal stability inside the wooden structure to perform nominal operations.

- The Utilization of Wood for a CubeSat Structure、遠藤早織里他、2023 年 6 月 8 日、福岡県久留米市開催（参考資料 9-2）

A student team at Kyoto University is currently developing LignoSat, the world's first wooden cube satellite, which has a wooden structural outer component. Proving the hypothesis that wood is a suitable material for spacecraft is our main motivation. A wooden box as the main body of LignoSat shown in Fig.1 is assembled with six wooden plates using the Japanese traditional wooden joinery method. The wooden box is surrounded by a metal frame as shown in Fig.2. The aluminum frames are connected with the stainless-steel shafts enabling enough pressure around the wooden box to be tightly assembled. The vibration test showed the natural frequency of LignoSat to be around 450 Hz which satisfied the requirement regulated by JAXA, suggesting that the maximum stress occurred on the metal frame and was within the tolerable range of the structure. Solar cells are glued to Printed Circuit Boards (PCBs), and the PCBs are glued to the surface of the wood with a space-rated adhesive. An adhesion test conducted indicated that primer should be applied for enough adhesion.

- たかが木材、されど木材 ～どうなる？木造人工衛星～、仲村匡司、2023 年 7 月 9 日、京都府京都市開催（参考資料 9-3）

京都大学「SIC 有人宇宙学研究センター」と「よみうりカルチャー-OSAKA」の連携講座「火星に住もう！ Season3」第 4 回において、「たかが木材、されど木材～どうなる？木造人工衛星～」という演題で講演を行った。木造人工衛星 LignoSat の開発が始まった経緯、人工衛星の木の木造構体を実現する超絶技巧、木造人工衛星のメリットなどについて、わかりやすく説明した。

＜第 67 回宇宙科学技術連合講演会＞

- 超小型木造人工衛星「LinoSat」のひずみ測定と地磁気測定ミッションの現状と展望、豊西悟大他、2023 年 10 月 18 日、富山県富山市開催（参考資料 9-4）

Kyoto University is developing the 1U-sized “LinoSat,” the world's first wooden satellite, whose external structure is composed of wood. The primary mission is to continuously measure the physico-chemical properties of wood exposed to a space environment by measuring the temperature and the strain of the wooden panels, the geomagnetic field, and the Single-Event Upset taking place inside the wooden structure. Several ground-tests conducted to achieve the mission objectives as well as their results for the wooden satellite development are presented.

- 超小型木造人工衛星の熱応答、野木朔太郎他、2023 年 10 月 19 日、富山県富山市開催（参考資料 9-5）

Human Spaceology Center at Kyoto University is developing the first wooden satellite called “LignoSat” to prove that wood can be used in space. LignoSat with its wooden box structure is expected to show a different thermal response to temperature changes from those of other satellites in space. In the present paper, the results of the thermal simulation and thermal vacuum test are presented. The characteristics of the thermal response of the wooden structure will be discussed, focusing especially on the speed of temperature changes and thermal insulation properties.

- 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。

- 国産広葉樹の活用ー新たなる可能性ー、村田功二、2024 年 2 月 19 日、大阪府大阪市（参考資料 9-7）

広葉樹の輸入量がこの 20 年で約 3 分の 1 に減少している。原因は世界的な優良木材資源の枯渇と天然林保護による流通量の減少である。国内の広葉樹資源はこの 50 年間はあまり利用されなかったもので量的にはかなりの蓄積量があるが質的には十分なものとは言えない。しかし、これまで未利用だった樹種や、新しい用途開発で国内の広葉樹林業を活性化するので、日本の里山の保全や地域経済の活性化に貢献できると考える。優良天然資源が必要とされる用途には楽器がある。そこで国内の未利用資源であるシラカバで代替ができないか検討した。また、硬式野球のバットにはかつては北海道のアオダモが使用されたが現在は枯渇した。それに替わる樹種として、未利用だったダケカンバに利用を検討した。最後にこれまで木材が利用されなかった用途に宇宙開発がある。宇宙でも木材の利用の可能性を検討した。

- 広葉樹材試験体の地球低軌道への曝露試験、村田功二他、2024 年 3 月 13 日、京都府京都市開催（参考資料 9-8）

将来、宇宙空間で木材を活用することを目的として「宇宙環境における樹木の育成に関する研究」や「宇宙環境における木材の物性に関する研究」などに取り組む宇宙木材プロジェクト（LignoStella Project）を進めている。宇宙空間は大気が存在しないため真空状態であり、そうした環境では木材は低含水率状態になることが見込まれる。本研究では、宇宙環境における建築材料としての木材の活用を見据えて、飽和塩水溶液による低湿度条件下で木材の曲げクリープを測定して拡張指数関数（KWW）の導入して拡張指数パラメータ β と特性

緩和時間 τ' による解析を検討した。検討の結果 β については調湿条件の違いによる有意な変化は見られなかったが、 $\ln \tau'$ については有意な変化がみられた。

- **宇宙木材工学—宇宙で木材を利用するために、村田功二他、2023年3月19日、京都府宇治市開催（参考資料 9-9）**

木材が宇宙で利用可能かを検討するために、2022年に宇宙曝露試験を実施した。約10か月の宇宙曝露の結果、紫外線や原子上酸素、宇宙放射線の影響はおもったより小さく目立った劣化は確認できなかった。宇宙空間での木材の劣化の原因として紫外線や原子上酸素、宇宙放射線や温度変化があげられる。放射線の影響としてガンマ線照射試験を地上で行った。その結果、地球低軌道(LEO)で1年間に被ばくするようでは木材は全く劣化せず、その1000倍の1kGyの照射量でわずかに劣化が確認できた。温度変化に関しては熱膨張係数がアルミニウムと同等であるが、木造人工衛星のミッションである木材の変形量評価で知見が得られる可能性がある。

(G) 広報活動（新聞記事）

- **京都新聞 2023年5月24日：木造の人工衛星宇宙へ（参考資料 10-1）**
- **京都新聞 2023年6月29日日本人の忘れもの 未来を拓く京都の集い 知恵会議有人宇宙開発で広がる活動領域（参考資料 10-2）**
- **読売新聞 2023年6月11日：世界初の木造人工衛星、燃え尽きる際に金属粒子の少ないメリット…伝統工法で くぎ・接着剤不要（参考資料 10-3）**
- **NHK 2023年8月1日：世界初！ 木造人工衛星に挑戦（参考資料 10-4）**
- **朝日新聞 2023年9月4日：凄腕しごとにん 木の効能を調べた実験人も犬も心地よく宇宙でも活躍（参考資料 10-5）**
- **日経新聞 2024年2月24日：火星に森を造る 土井宇宙飛行士の挑戦（参考資料 10-6）**

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 木造人工衛星の開発

- a. 木造人工衛星1号機の安全審査を実施すると同時に打上げ準備を行った。
- b. 電波を透過する木材の特性を生かして木造構体内部に設置できるアンテナ・姿勢制御システムの基礎実験を行った。
- c. 木造人工衛星2号機について、アンテナシステムや構造系、電源系、通信系など人工衛星システム全体について検討し、基礎設計を完了した。

② ExBASの木材の解析

- a. 国際宇宙ステーション船外暴露実験（ExBAS）の木材試料を使い、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調べた。
- b. 地上における木材の真空暴露実験を実施した。

③ 樹木育成実験系の確立

- a. 樹木育成実験環境（光強度、CO₂濃度、湿度）を精度良く制御するための制御システムを完成した。
- b. ポプラ（*Populus alba*）を使用し特定の環境に制御されたチャンバーにおいて低圧環境下で気圧を変化させながら育成実験を実施し、幹、根、葉の成長量の育成データの定量化を行った。

④ 宇宙における木材利用に関する教育啓蒙活動の推進

- a. 教育活動として定期的な木造人工衛星の設計会議を12回及び樹木育成に関するセミナーを14回開催した。
- b. 有人宇宙活動について学ぶことを目的とした専門教育プログラム「有人宇宙学実習」を前期に、また「有人宇宙学」（講義）15回を後期に実施した。
- c. 啓蒙活動として第2回宇宙木材利用シンポジウムを令和6年3月21日に開催した。

①では、木造人工衛星1号機 LignoSat の安全審査を JAXA と行ってきた。世界で初めての木造人工衛星であるために木造構造について直接 NASA の審査も受けなければならなかった。その甲斐があつて安全審査 O/I/II は 2024 年 3 月までにほぼ終了することができた。木造人工衛星2号機構体内に通信アンテナを設置するための基礎実験を九州工業大学の電波暗室を使って行った。木造構体は電波を通過させることを確認し、木造構体内部に設置するアンテナ特性を明らかにすることができた。また、地磁気を使った姿勢制御システムの構築のために磁気トルカの性能試験を行い、地磁気を使った制御系の構築が可能であることを理論的に検証した。木造人工衛星2号機の基礎設計を行い、木造人工衛星1号機（LignoSat）に続く技術試験衛星として人工衛星構体を 2U にする方針を確認した。

②では、約9ヵ月間の宇宙暴露実験を完了した木材試験体を岡山大学惑星物質研究所で初期ミクロ分析を実施した。この結果より宇宙空間の原子状酸素は木材中のリグニンに含まれる炭素を Carbonyl 基 C=O に変えるだけで、木材表面を劣化させるのではないことが明らかになった。これは昨年度の委託業務成果報告書の中で記した表面の様子が宇宙暴露試験前後でほとんど変化していないことと合致している。

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タで明示することが可能

になった。さらに実験データを集めることによって、低圧下での樹木の生育特性を明らかにできると考えている。

④では、①から③までの研究活動を教育・啓蒙活動に発展させるための様々な活動を計画通り実施することができた。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2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

パッチアンテナ試験 1: アンテナパターン計測試験結果

パッチアンテナ試験 1: アンテナパターン計測試験結果である 34 通りのデータの区別を以下の表記で行なった：

表記：「（縦向き or 横向き）－（木板の厚さ）－（パッチアンテナ・木版の間隔）」

例えば、パッチアンテナを縦向きに設置し、厚さ 3.5 mm の木板を用い、木板とパッチアンテナの間隔を 5 mm に設置した時、「H-35-05」と表記した。

計測したデータは以下の 2 種類の形式で入手した。

- アンテナパターンを表すグラフ（png ファイル）
- 1° 毎の dB 数の表（csv ファイル）

アンテナパターンのグラフ例を図 1 に示す。

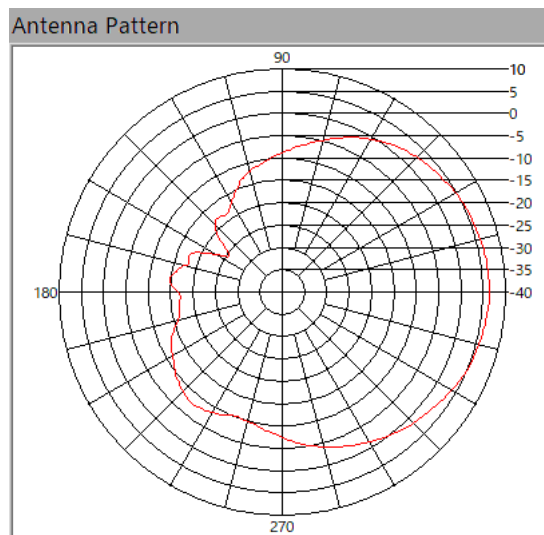


図 1 E-35-00 の計測結果（png グラフ）

アンテナパターンのグラフでは各データの比較が難しいため、1° 毎の dB 数の表（csv ファイル）を Excel で解析し、アンテナパターンのグラフを作成し直した。そのようにして作成したグラフを分類別に重ね合わせたデータを図 2 から図 19 に示す。なお、本来グラフの中心が -40 dBi であり図 6 のように中心からの距離が測定値であるが、Excel で作成したグラフは中心が 0 という数値になっている。表示されている値から 40 を引いた値が 1 のデータと一致する。

パッチアンテナ縦向き (H-plane)

- 木板なし

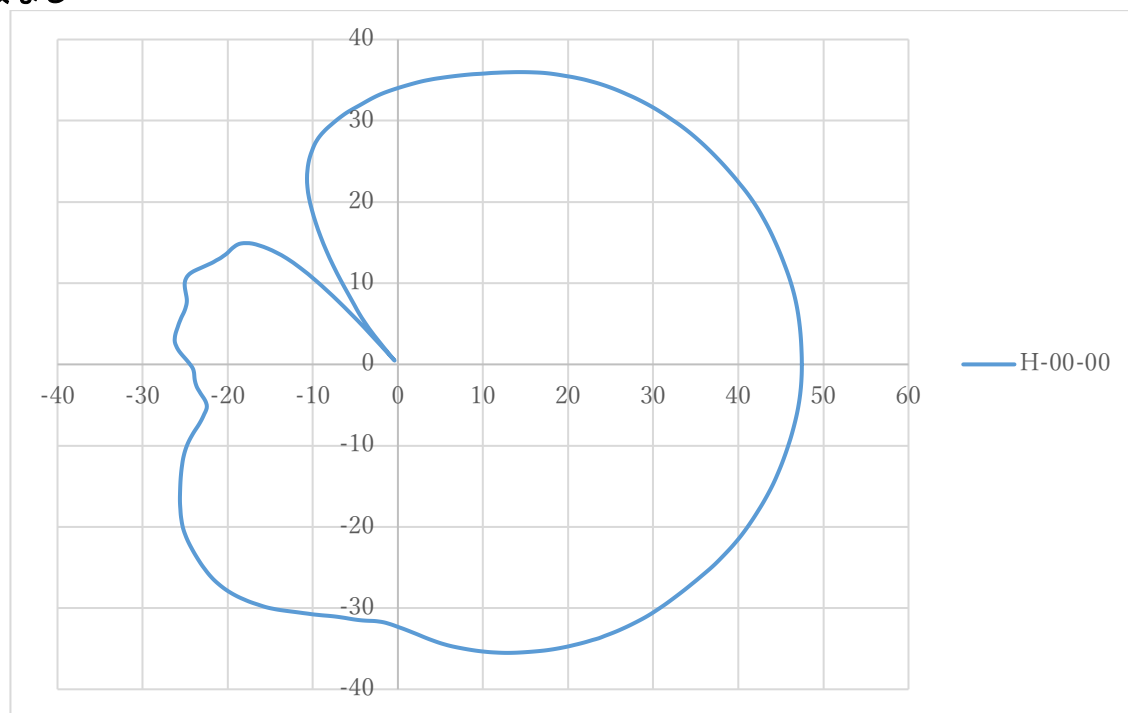


図2 H-00-00のアンテナパターン

- 木板 3.5 mm

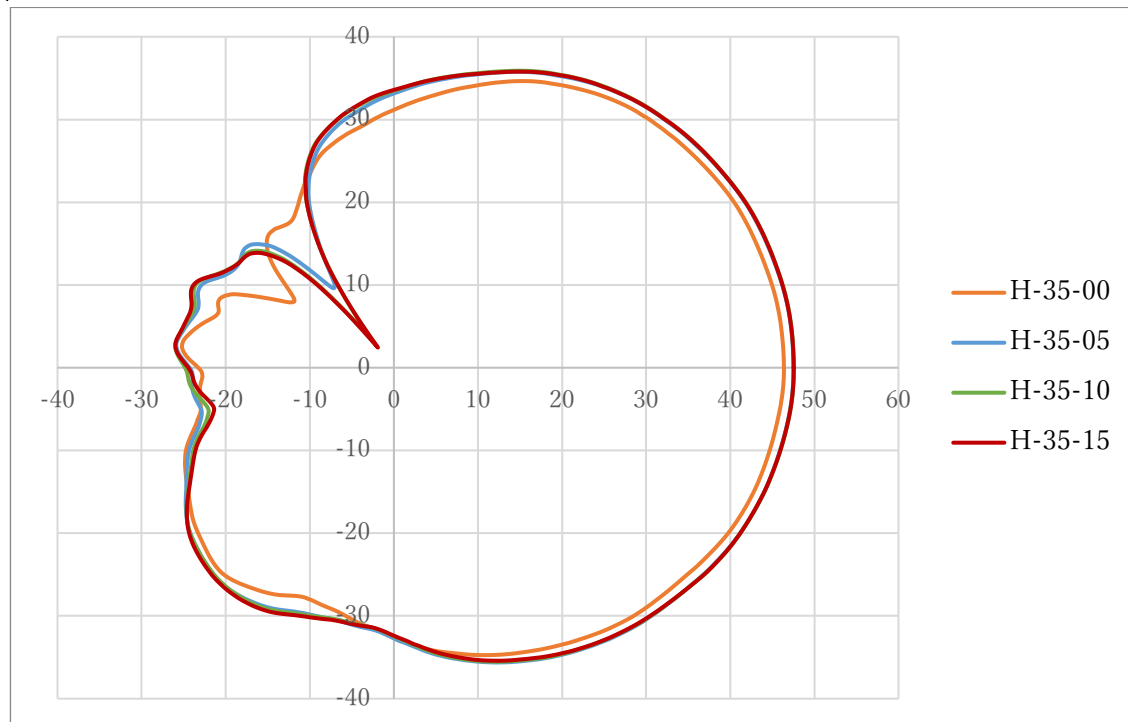


図3 H-35-00/05/10/15のアンテナパターン

- 木板 4.5 mm

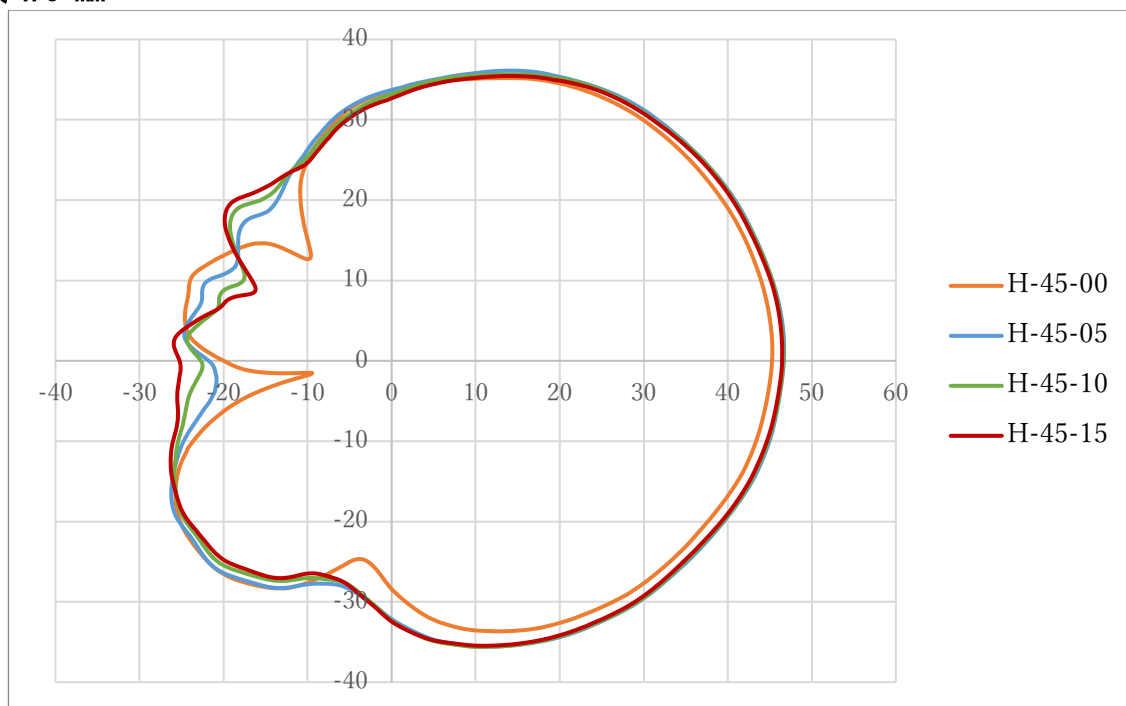


図 4 H-45-00/05/10/15 のアンテナパターン

- 木板 5.5 mm

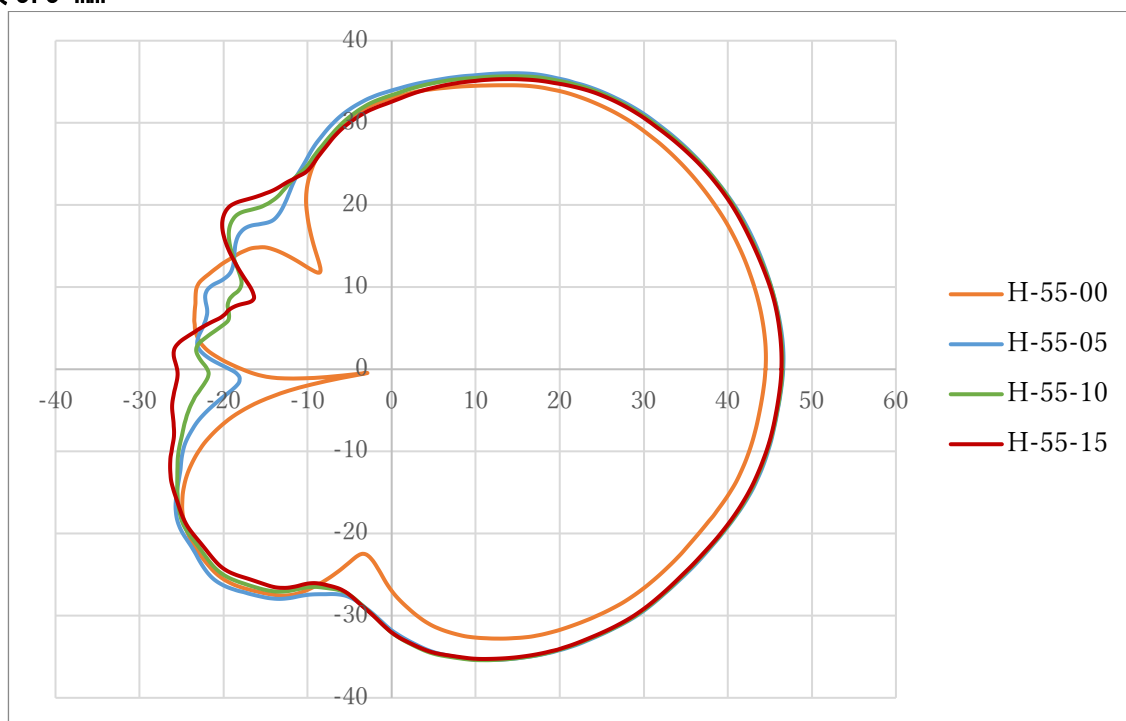


図 5 H-55-00/05/10/15 のアンテナパターン

- 木板 6.5 mm

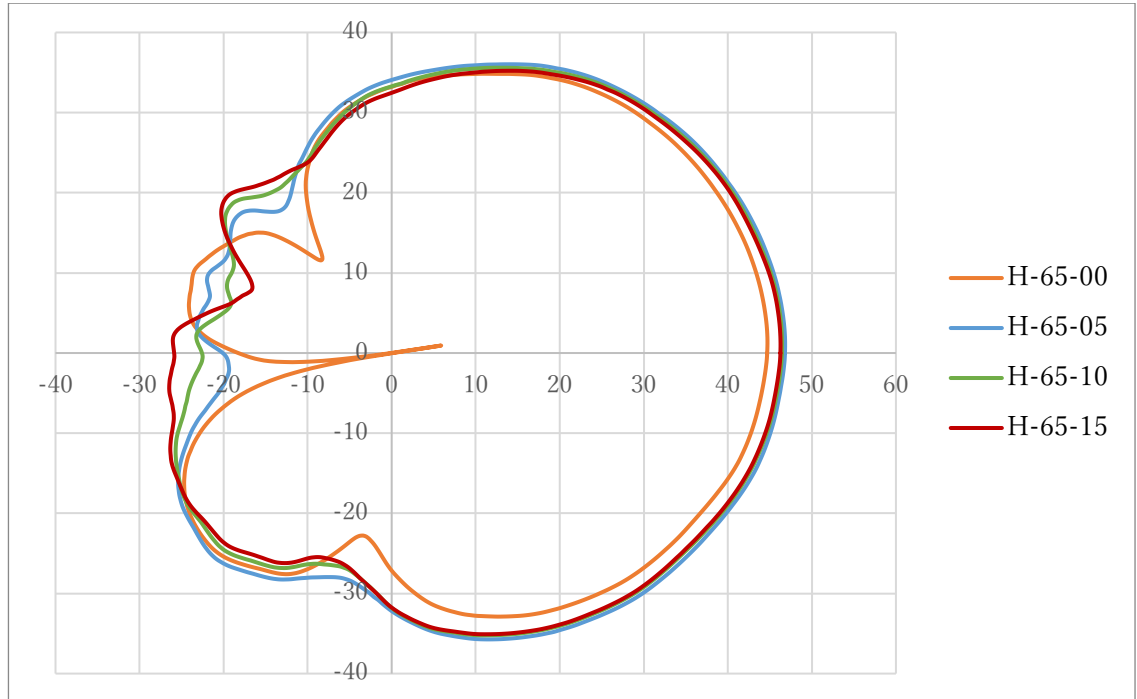


図 6 H-65-00/05/10/15 のアンテナパターン

パッチアンテナと木板の間隔ごとにグラフを重ねた結果を以下に示す。

- 間隔 0 mm

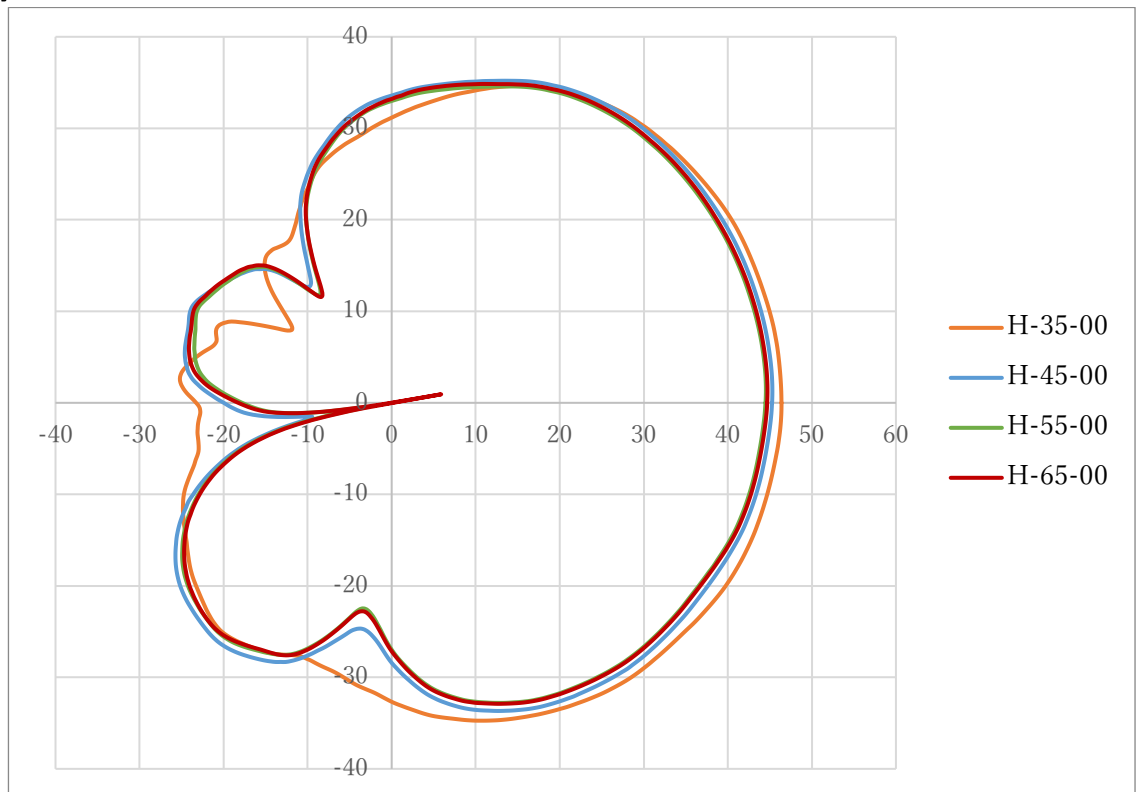


図 7 H-35/45/55/65-00 のアンテナパターン

● 間隔 5 mm

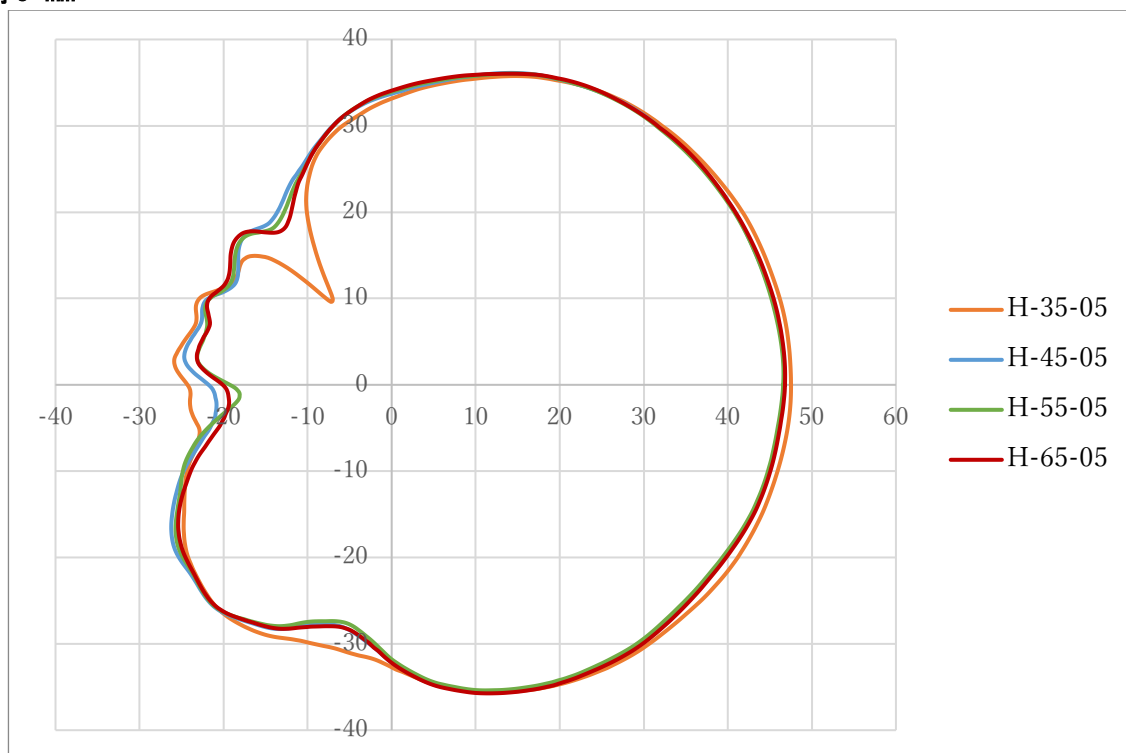


図 8 H-35/45/55/65-05 のアンテナパターン

● 間隔 10 mm

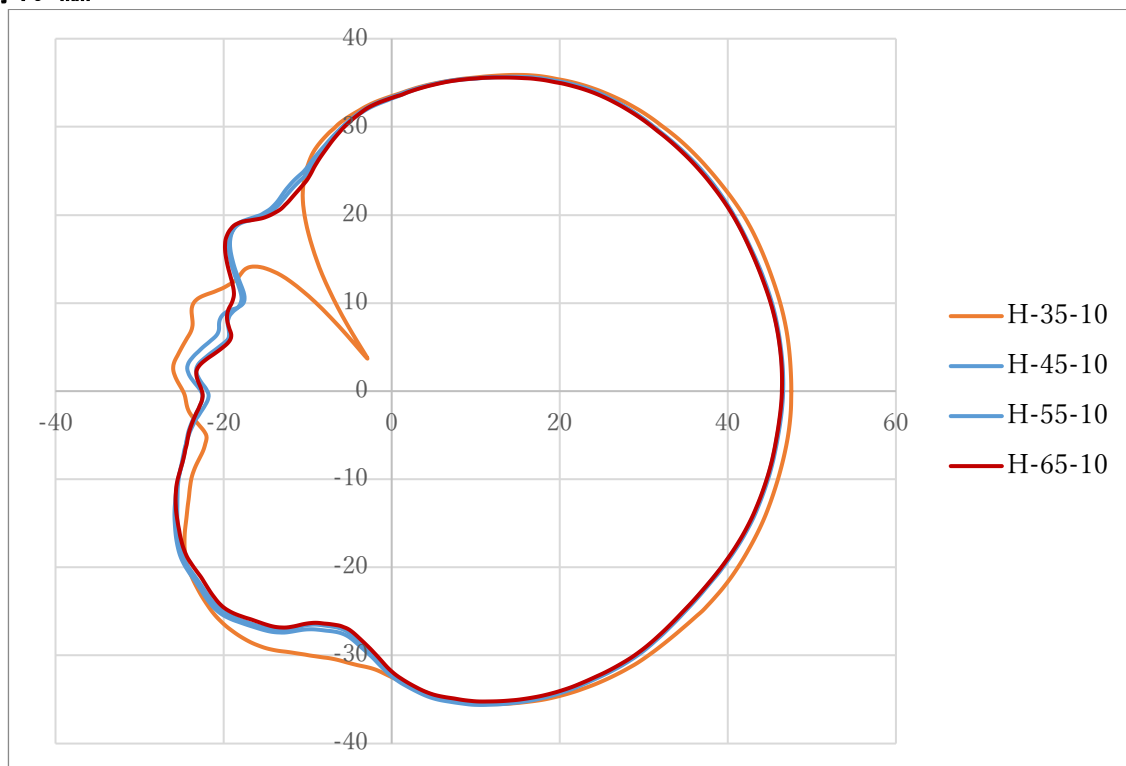


図 9 H-35/45/55/65-10 のアンテナパターン

- 間隔 15 mm

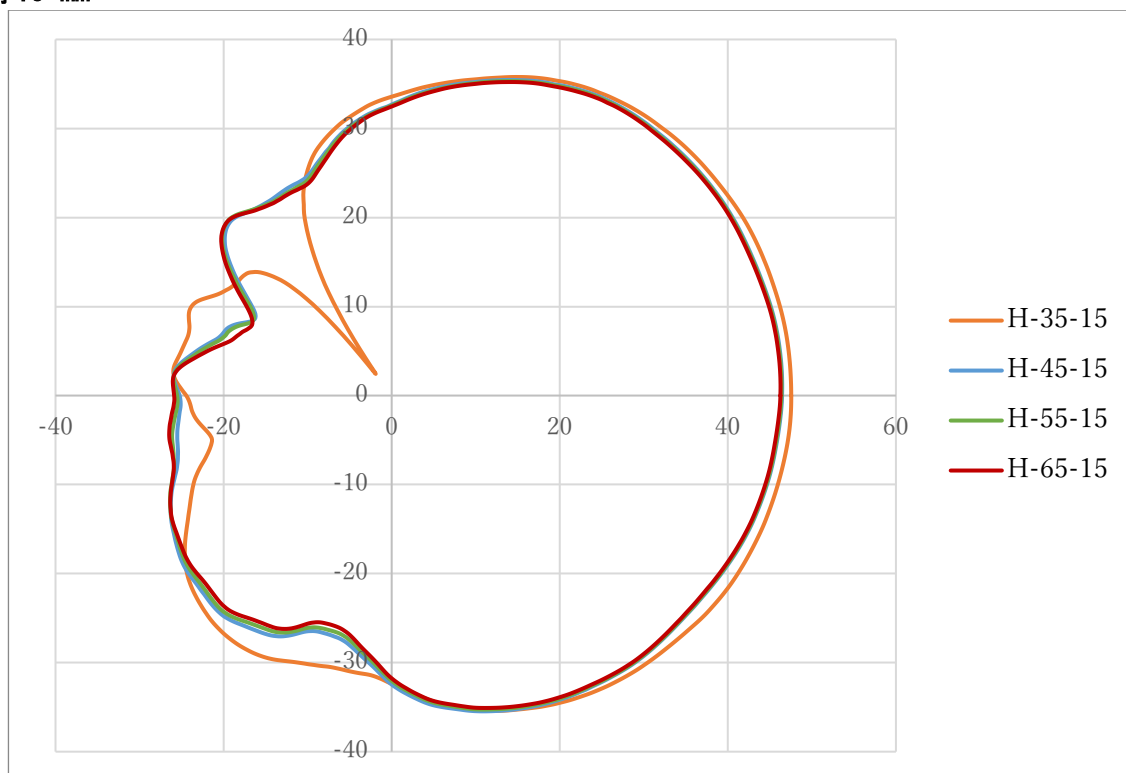


図 10 H-35/45/55/65-15 のアンテナパターン

パッチアンテナ横向き (E-plane)

- 木板なし

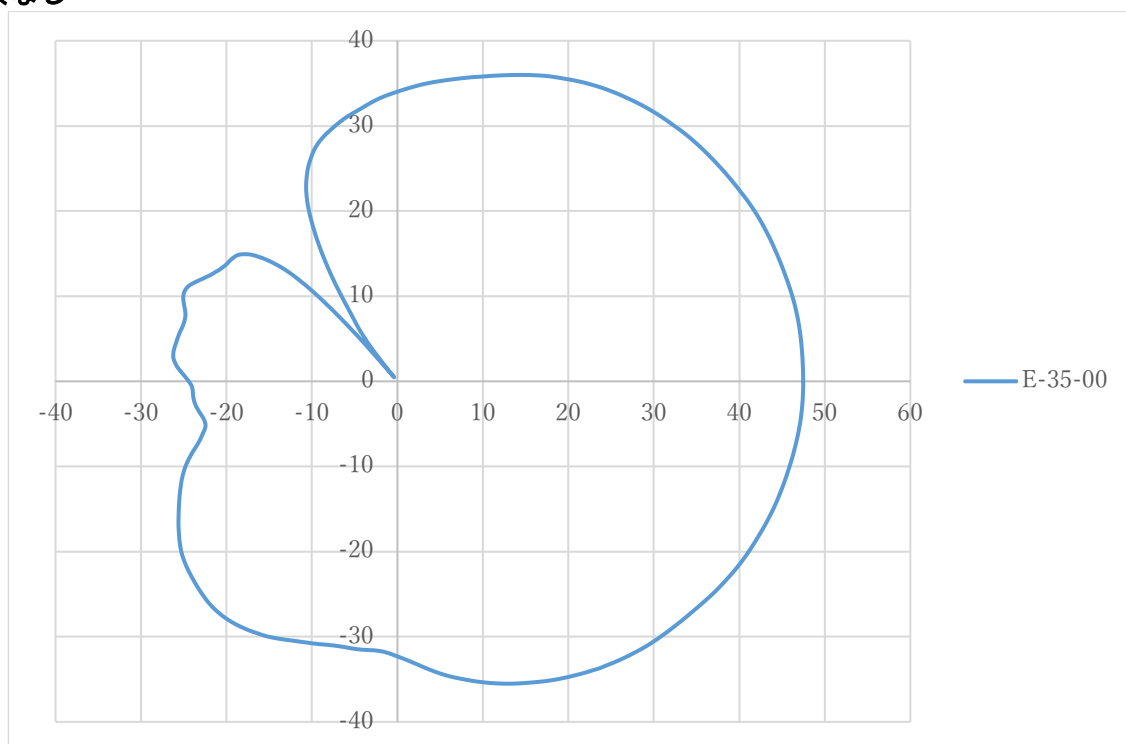


図 11 E-35-00 のアンテナパターン

- 木板 3.5 mm

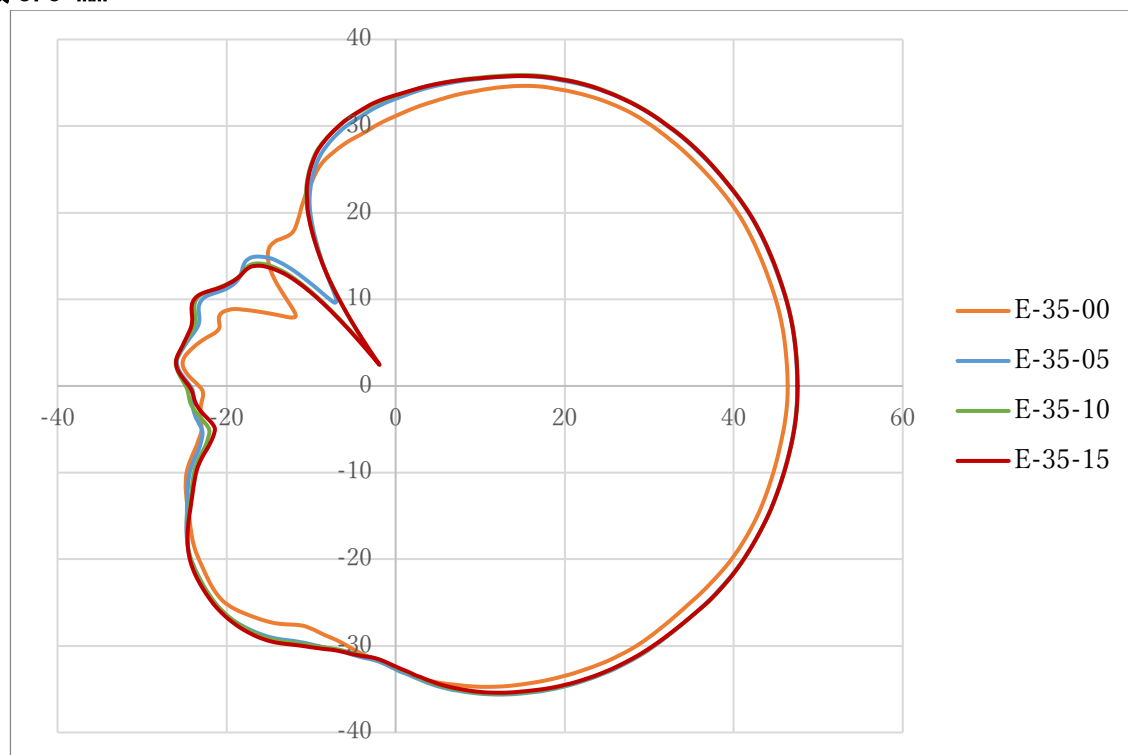


図 12 E-35-00/05/10/15 のアンテナパターン

- 木板 4.5 mm

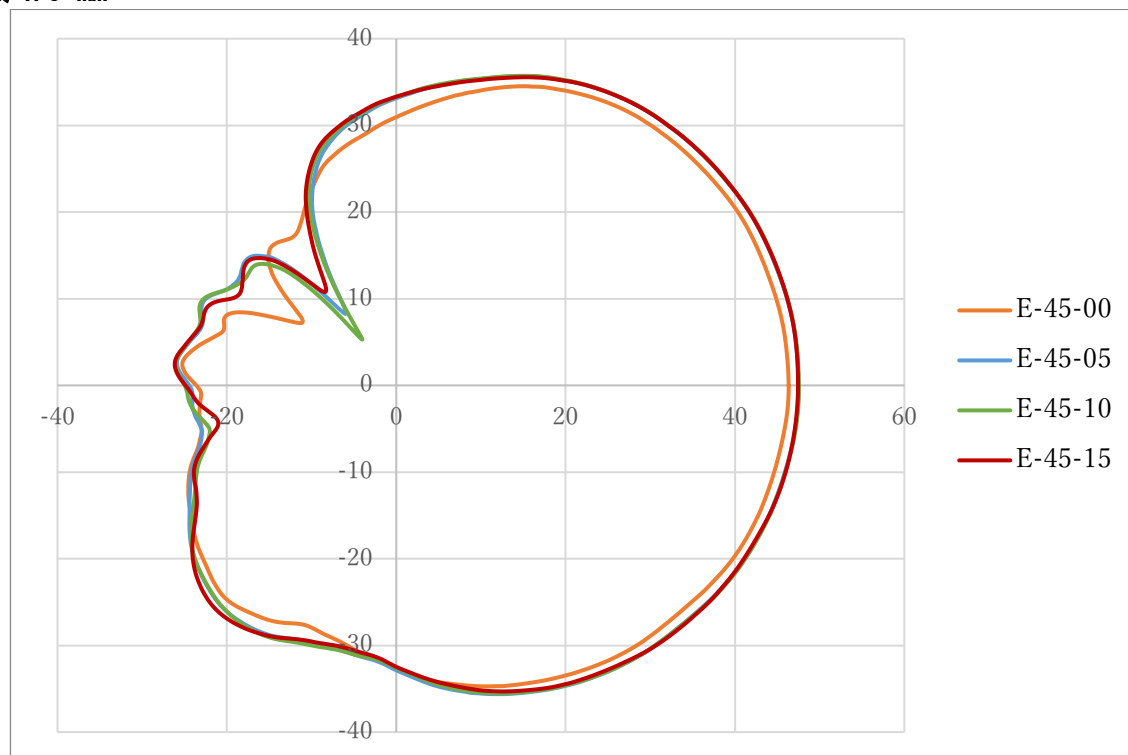


図 13 E-45-00/05/10/15 のアンテナパターン

- 木板 5.5 mm

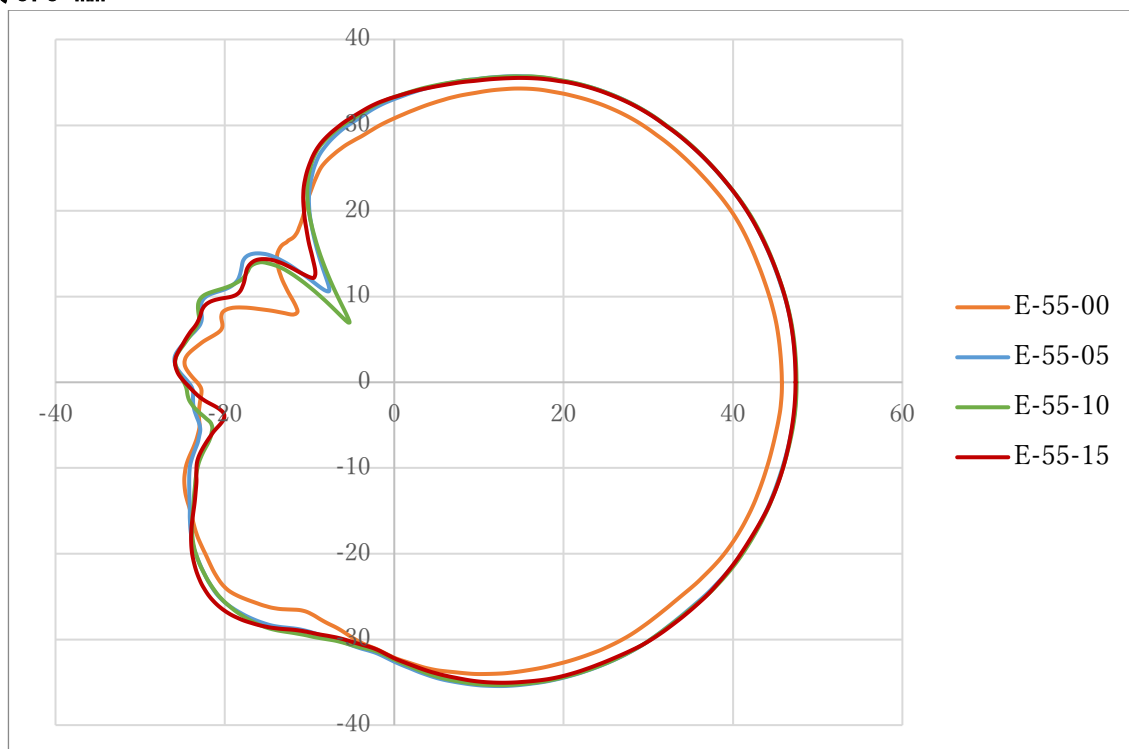


図 14 E-55-00/05/10/15 のアンテナパターン

- 木板 6.5 mm

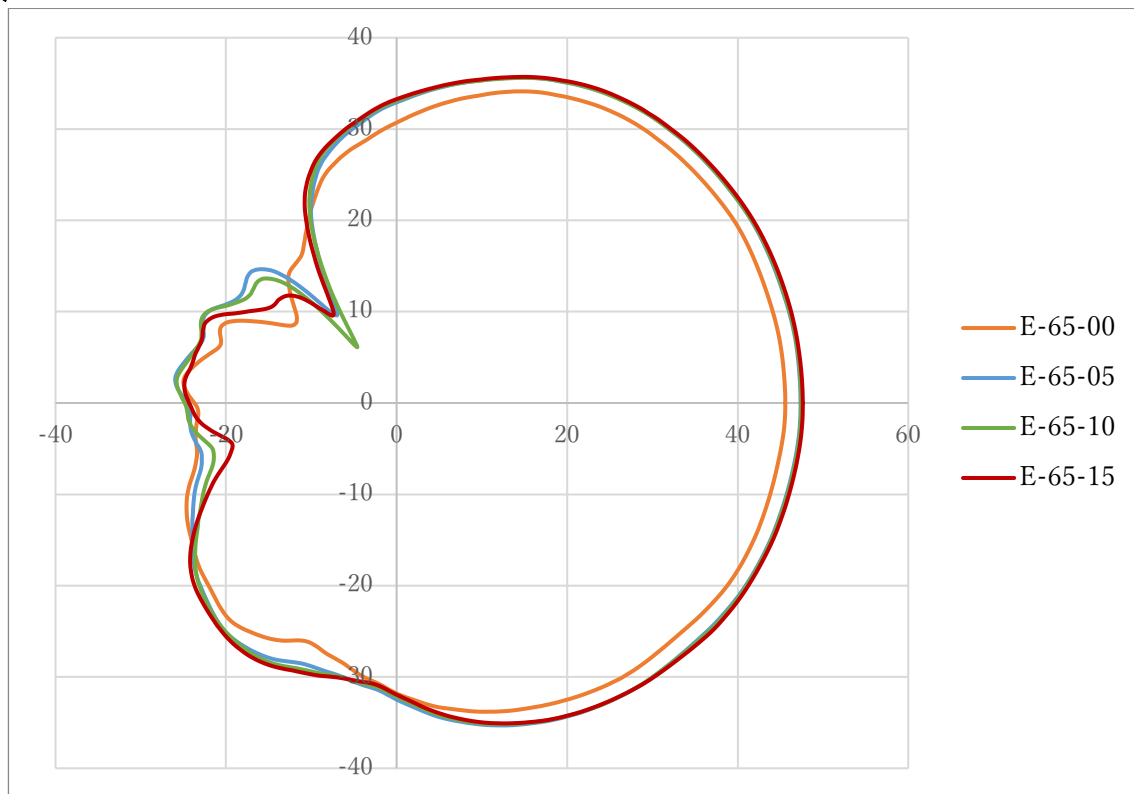


図 15 E-65-00/05/10/15 のアンテナパターン

次にパッチアンテナと木板の間隔ごとにグラフを重ねた結果を示す。

- 間隔 0 mm

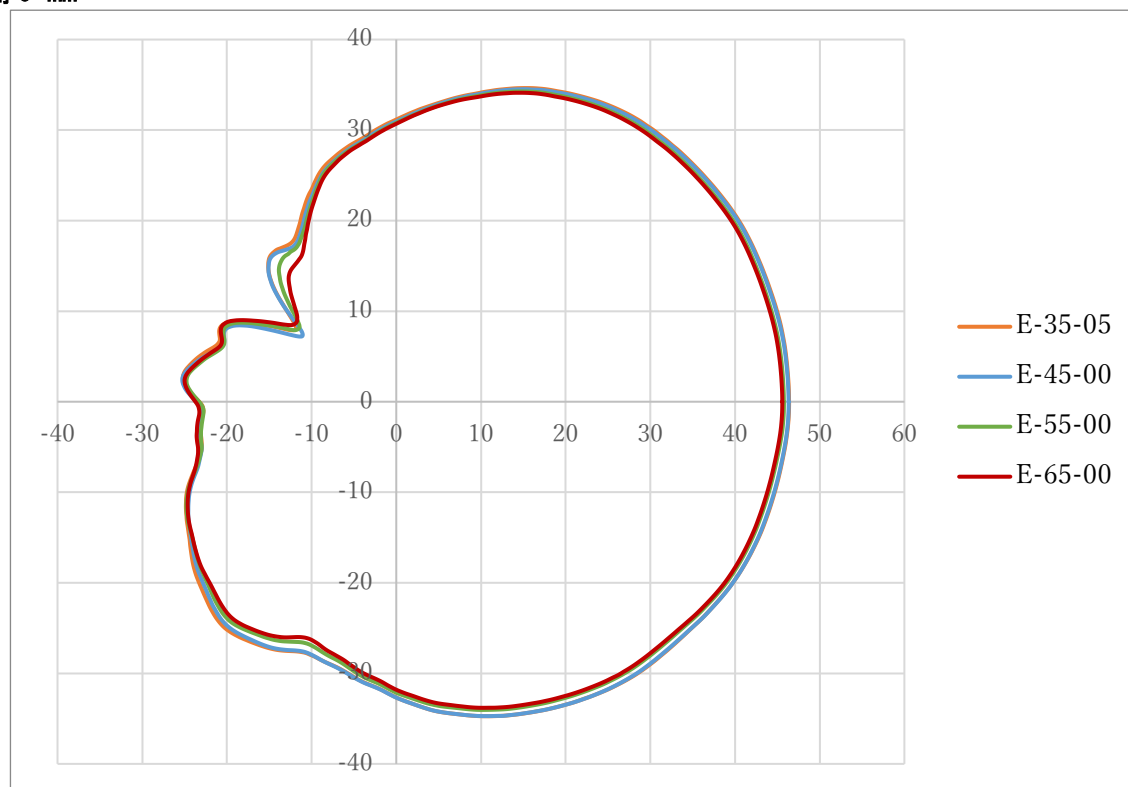


図 16 E-35/45/55/65-00 のアンテナパターン

- 間隔 5 mm

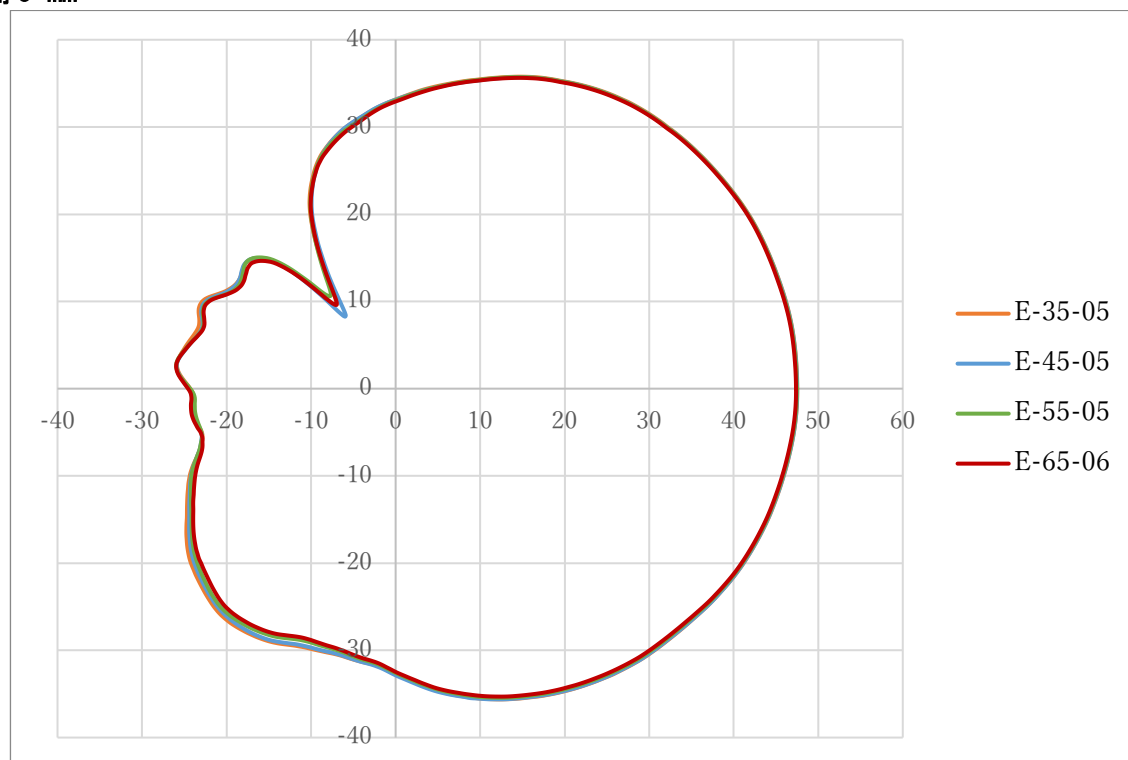


図 17 E-35/45/55/65-05 のアンテナパターン

間隔 10 mm

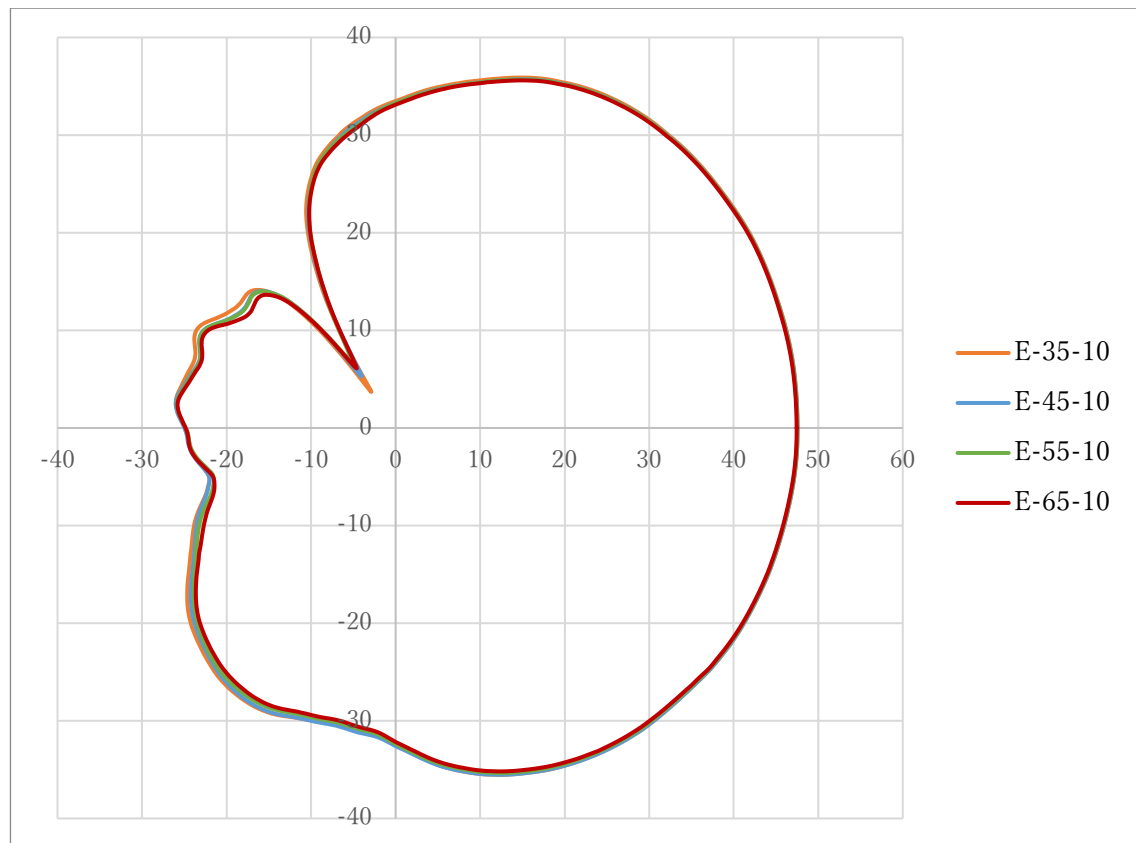


図 18 E-35/45/55/65-10 のアンテナパターン

● 間隔 15 mm

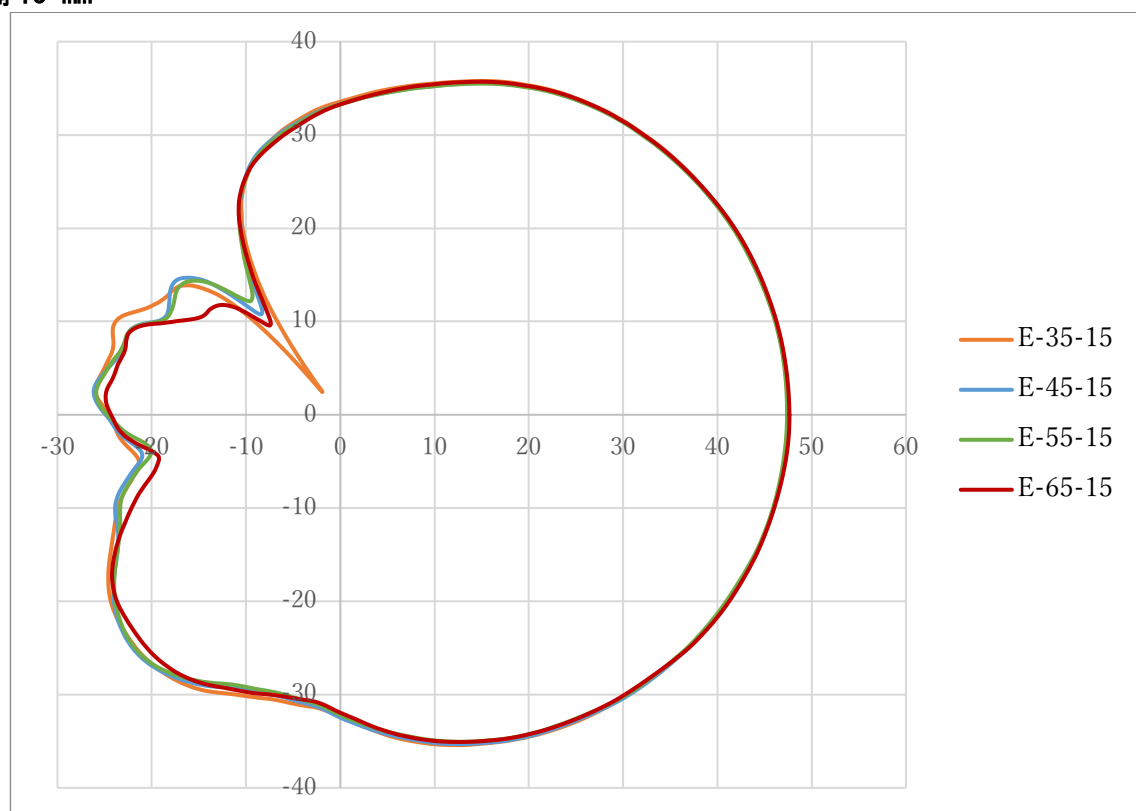


図 19 E-35/45/55/65-15 のアンテナパターン

参考資料 2

パッチアンテナ試験 2: S パラメータ計測試験結果

パッチアンテナ試験 2: S パラメータ計測試験結果 34 通りのデータの区別を以下の表記で行なった:

表記: 「(パッチアンテナ番号) - (木板の厚さ) - (パッチアンテナ・木板の間隔)」
例えば、パッチアンテナ 1 を設置し、厚さ 3.5 mm の木板を用い、木板とパッチアンテナの間隔を 5 mm に設置した時、「01-35-05」と表記した。

また、計測したデータは以下の 2 種類の形式で入手した。

- 各周波数における S11 値を表すグラフ
- 0.240 MHz 毎の dB 数の表 (s1p ファイル)

各周波数における S11 値を表すグラフは図 1 のようになる。



図 1 01-35-05 の計測結果

このグラフでは各データの比較が難しいと考えられたため、0.240 MHz 毎の dB 数データを Excel で解析し、S11 値を示すグラフを作成した。なお、Excel 内にデータを変換する際に、データの変化がよく見られた 2.280000 ~ 2.520000 GHz の範囲のみを変換した。そのようにして作成したグラフを分類別に重ね合わせたデータを図 2 から図 11 に示す。

パッチアンテナ 1

● 木板なし

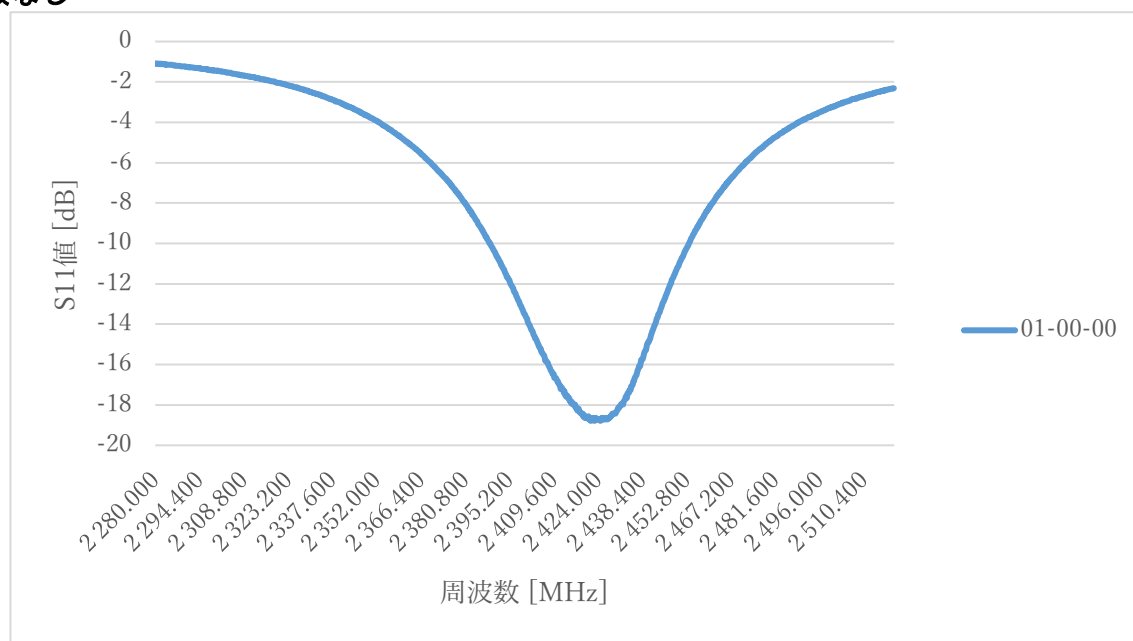


図2 01-00-00のS11値
周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -14.33 dB

● 木板 3.5 mm

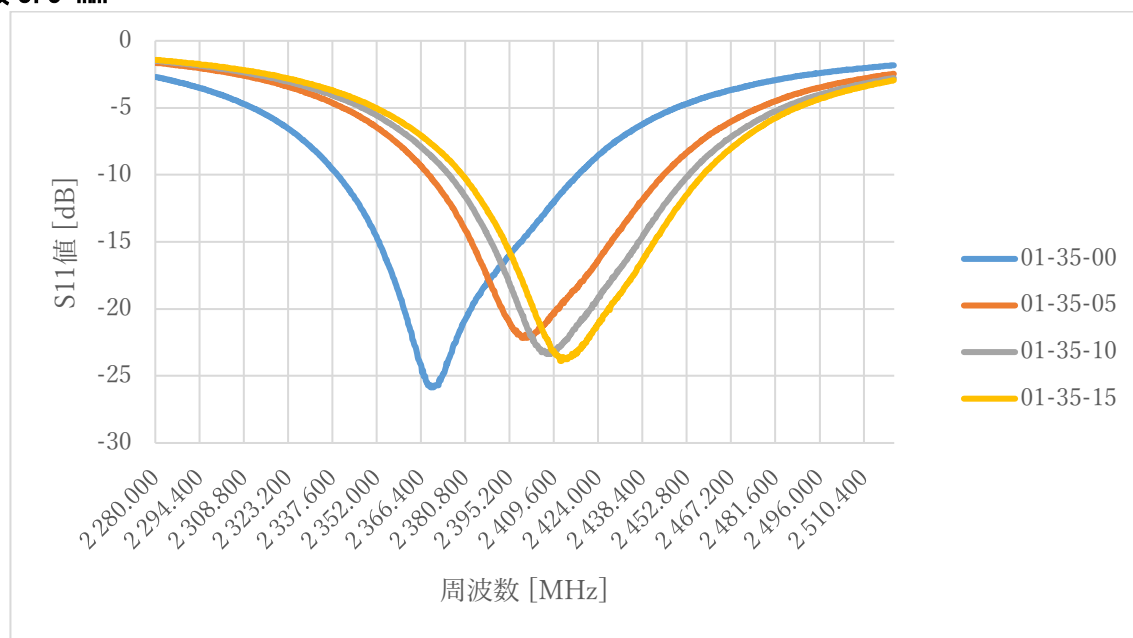


図3 01-35-00/05/10/15のS11値
周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -13.95 dB/-22.00 dB/-22.27 dB/-19.99 dB

● 木板 4.5 mm

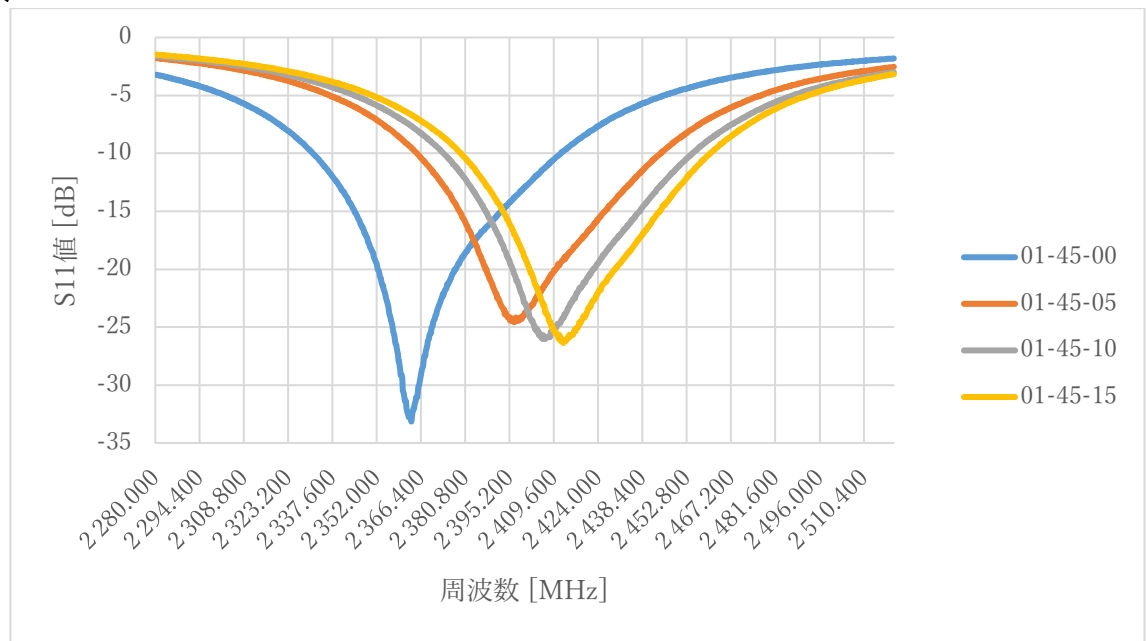


図4 01-45-0/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -12.37 dB/-23.04 dB/-25.34 dB/-20.69 dB

● 木板 5.5 mm

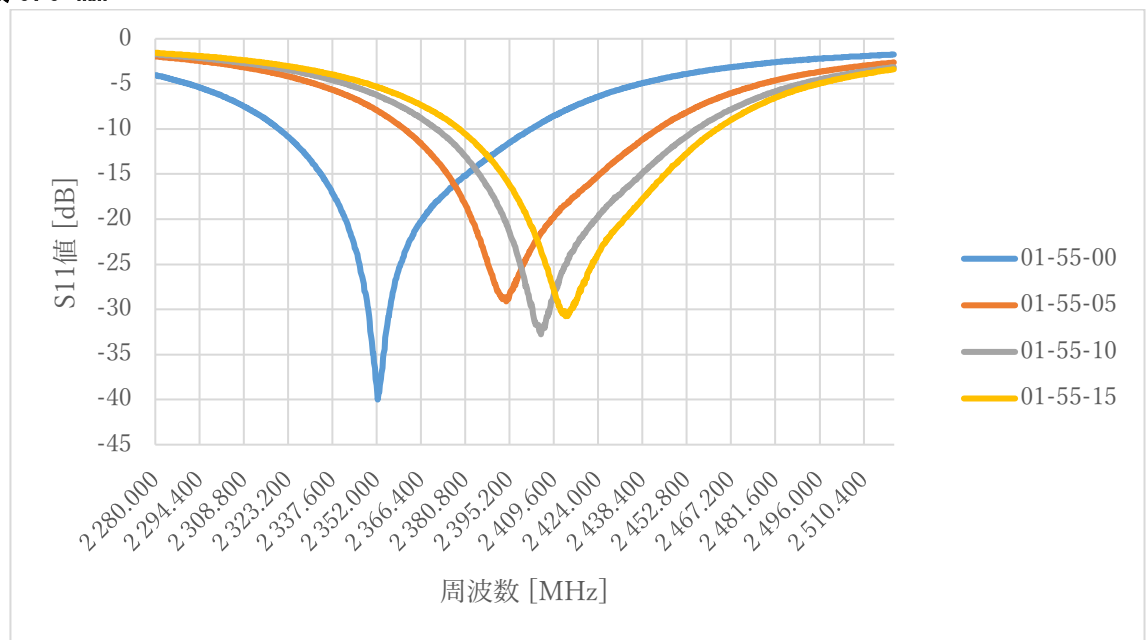


図5 01-55-00/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -9.96 dB/-23.07 dB/-30.83 dB/-21.10 dB

- 木板 6.5 mm

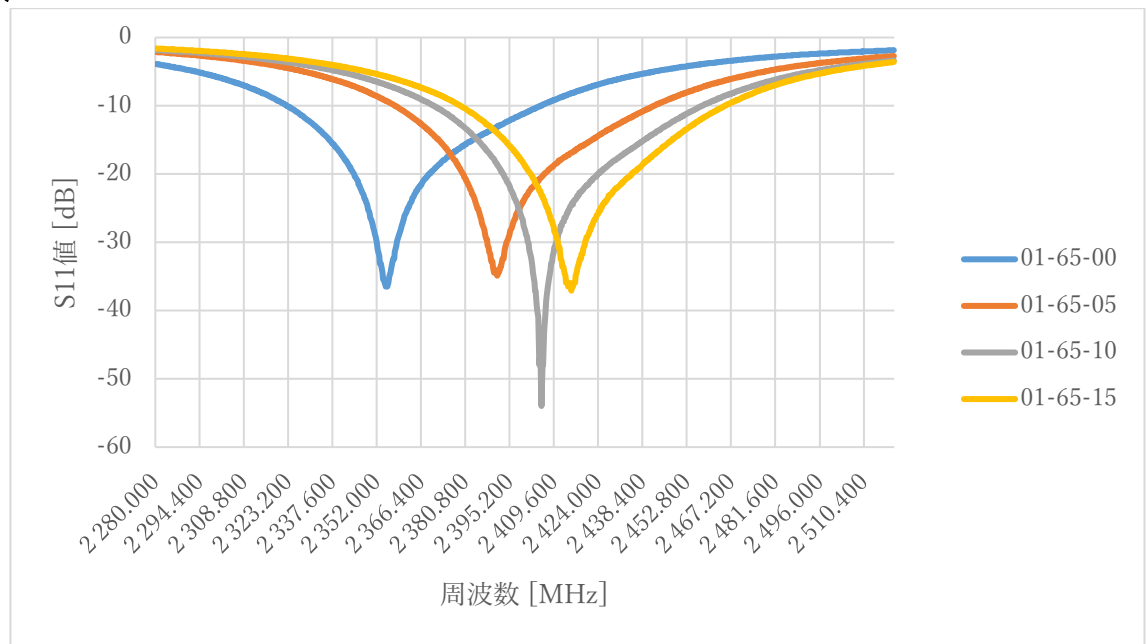


図 6 01-65-00/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -10.58 dB/-21.88 dB/-31.17 dB/-20.68 dB

パッチアンテナ 2

- 木板なし

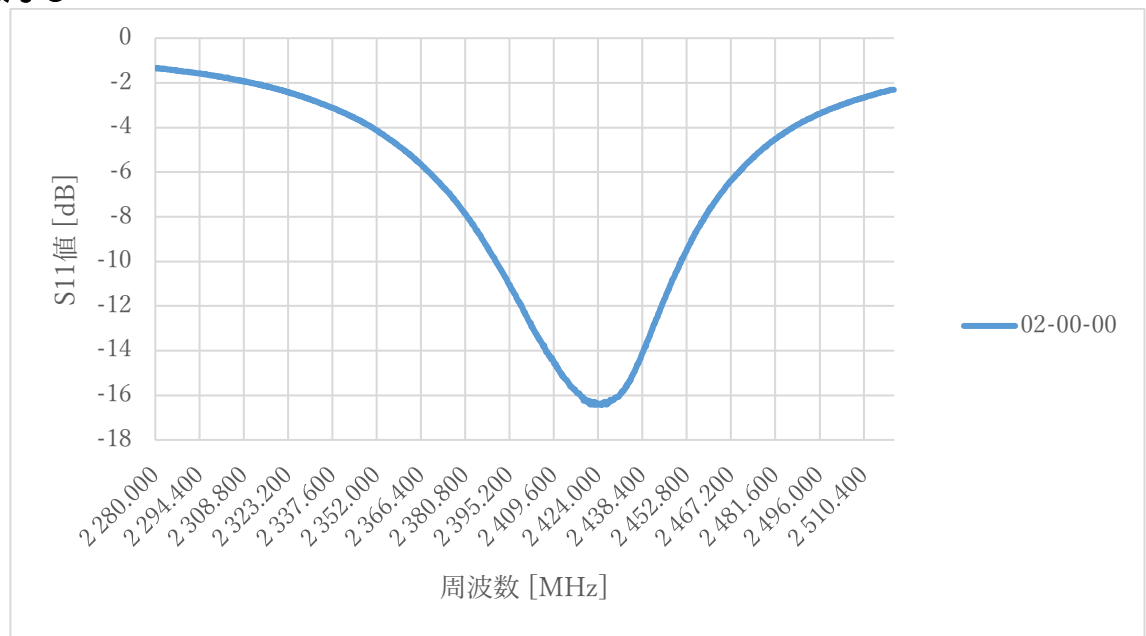


図 7 02-00-00 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -12.99 dB

● 木板 3.5 mm

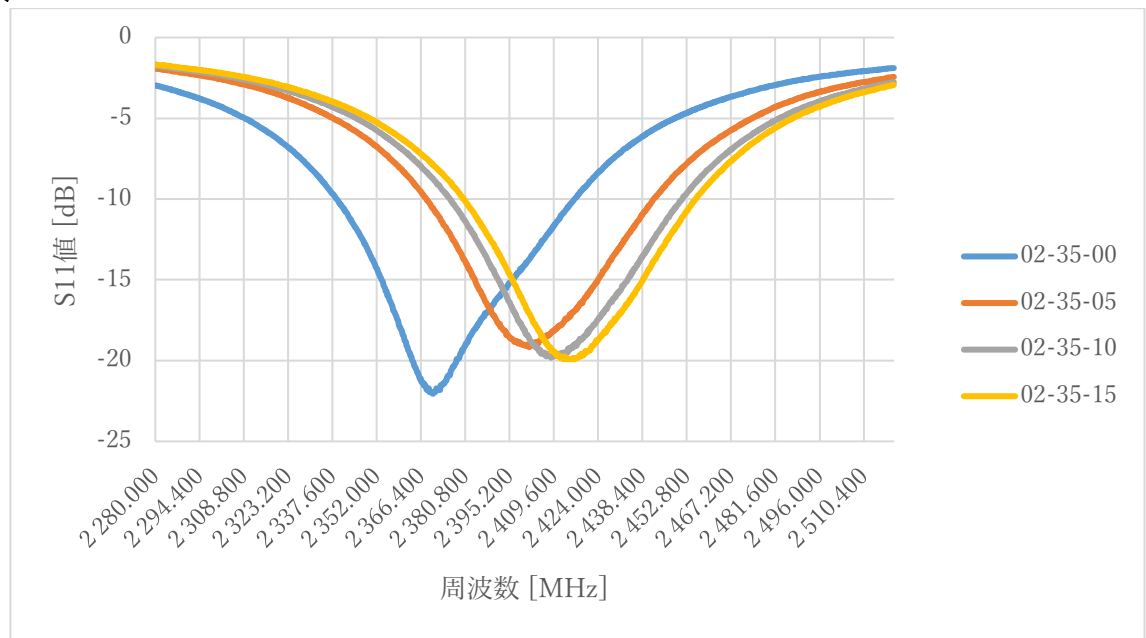


図 8 02-35-00/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値: -13.43 dB/-19.18 dB/-19.13 dB/-17.59 dB

● 木板 4.5 mm

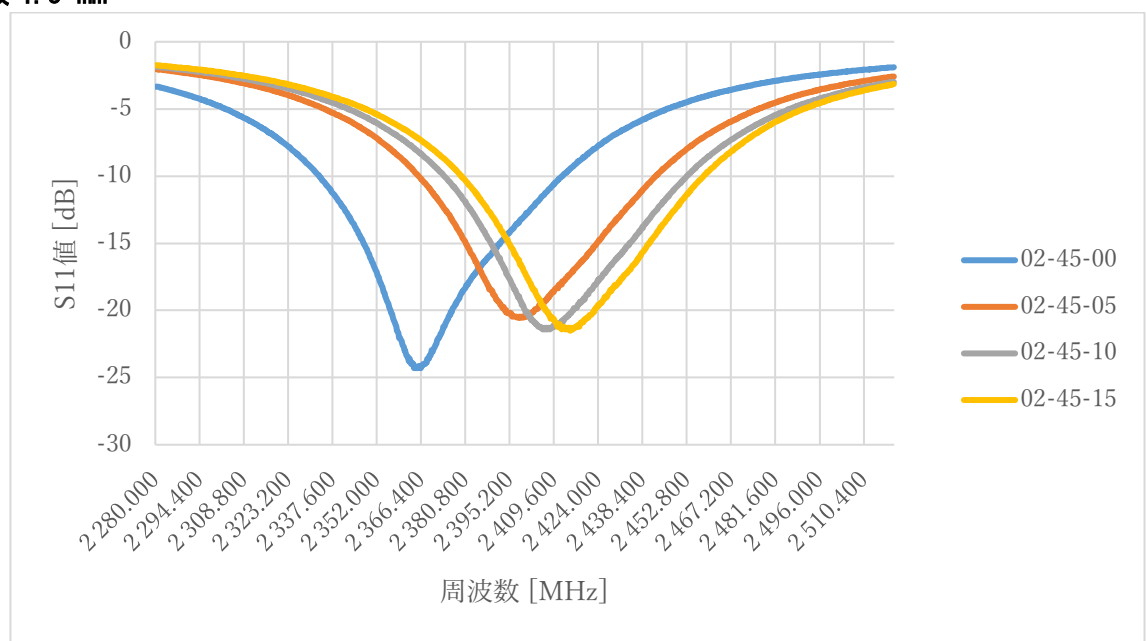


図 9 02-45-00/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値: -12.33 dB/-20.24 dB/-20.93 dB/-18.49 dB

● 木板 5.5 mm

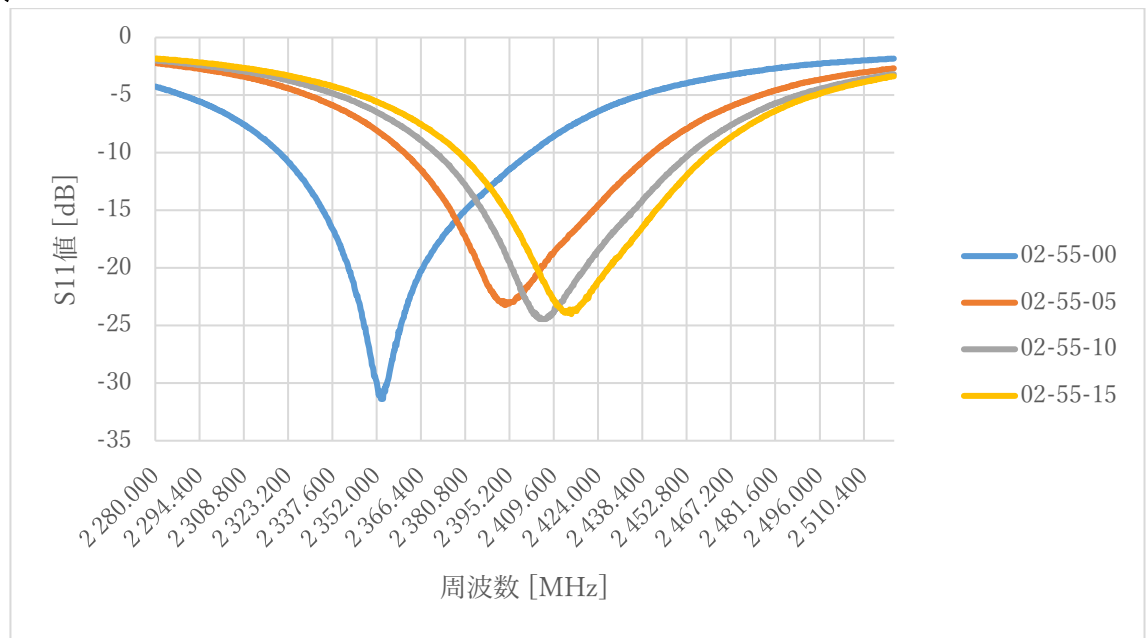


図 10 02-55-00/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -9.91 dB/-21.10 dB/-24.13 dB/-19.44 dB

● 木板 6.5 mm

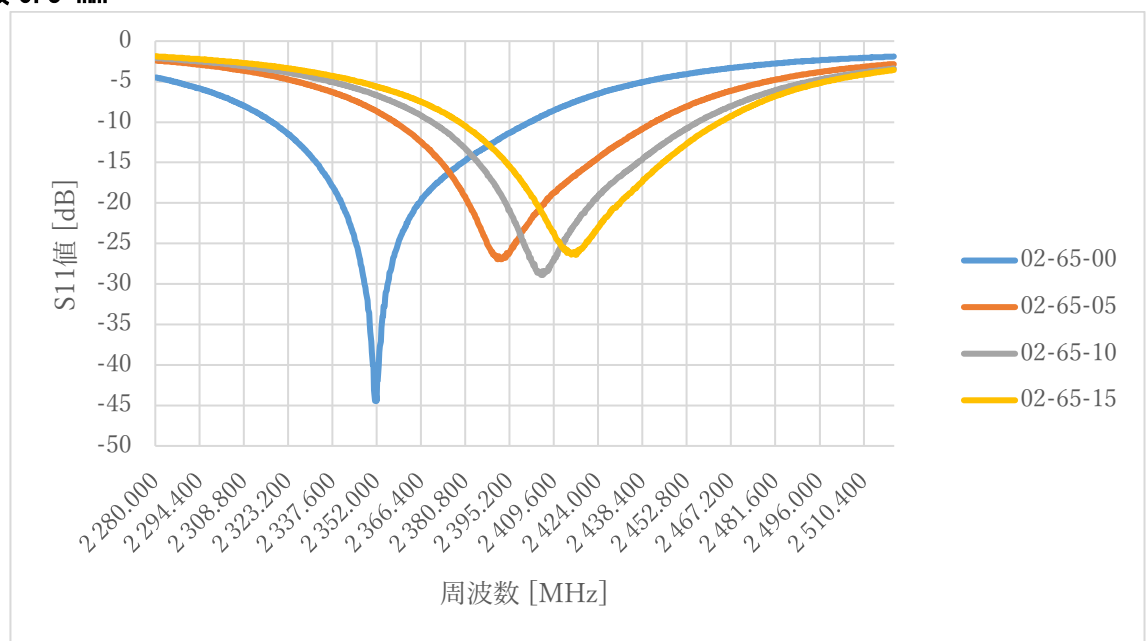


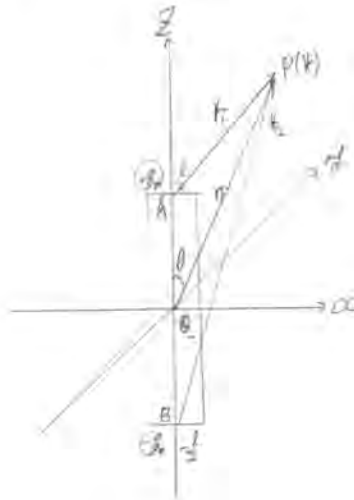
図 11 02-65-00/05/10/15 の S11 値

周波数 2.4025 GHz における S11 値 : -9.87 dB/-21.80 dB/-28.03 dB/-19.28 dB

参考資料 3
木造人工衛星 2 号機地磁気を使った姿勢制御システムに関する考察
京都大学理学部
伊藤駿治

1 ソレノイドコイルに生じる磁気モーメントおよび磁荷の導出

1.1 磁気双極子が作る磁場



上図のように、A に $+q_m$ 、B に $-q_m$ の磁荷が距離 l だけ離れて存在するような磁気双極子を考える。磁気双極子の中心に原点を置く。点 $P(\mathbf{r})$ におけるポテンシャル $U(\mathbf{r})$ は、

$$U(\mathbf{r}) = \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 $r = |\mathbf{r}|$ のように表記する。 $r \gg l$ とすれば、

$$\frac{1}{r_1} = \left(r^2 + \frac{l^2}{4} - rl \cos \theta \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{r} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{l}{r} \cos \theta - \frac{1}{8} \frac{l^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

同様に、

$$\frac{1}{r_2} \approx \frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{l}{r} \cos \theta - \frac{1}{8} \frac{l^2}{r^2} \right) \quad (4)$$

であるから、(3)、(4) 式を (1) 式に代入して

$$U(\mathbf{r}) = \frac{q_m}{4\pi\mu_0} \times \frac{l}{r^2} \cos \theta \quad (5)$$

$$= \frac{q_m l \cos \theta}{4\pi\mu_0 r^2} \quad (6)$$

と書ける。ここで、 $m = q_m l$ は磁気双極子モーメントである。ベクトル形で書けば $\mathbf{m} = q_m \mathbf{l}$ であり、(6) 式は

$$U(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\mu_0 r^3} \quad (7)$$

と書くことが出来る。

従って、この点に磁気双極子が作る磁場 $H(\mathbf{r})$ は、

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{d}{dr} \left(\frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}}{r^3} \right) \quad (8)$$

$$= -\frac{1}{4\pi\mu_0} \left(\frac{\mathbf{m}}{r^3} - \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} \right) \quad (9)$$

ここで、

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ q_m l \end{pmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix}$$

を代入すれば、磁気双極子の上方の高さ z における磁場は、

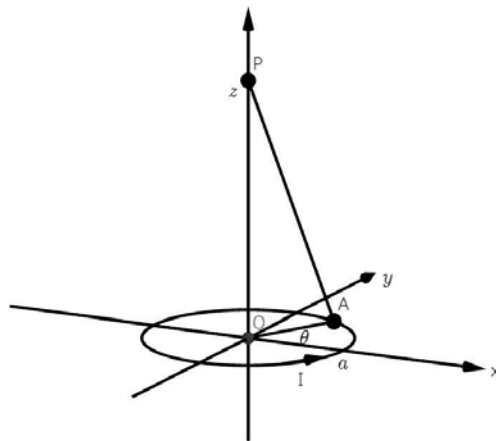
$$H(z) = -\frac{1}{4\pi\mu_0} \left(\frac{q_m l}{z^3} - \frac{3q_m l z^2}{z^5} \right) \quad (10)$$

$$= \frac{q_m l}{2\pi\mu_0 z^3} \quad (11)$$

と求められる。

1.2 円形電流による磁場

次に、以下の図2のような、半径 a の円形電流 i がその中心軸上の点に及ぼす磁場について考える。



ビオサバールの法則

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{i d\mathbf{r}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (12)$$

において、

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z \end{pmatrix} \quad \mathbf{r}' = \begin{pmatrix} a \cos \theta \\ a \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

とすれば、この点における磁場は

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{i \begin{pmatrix} -a \sin \theta \\ a \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} d\theta \times \begin{pmatrix} -a \cos \theta \\ -a \sin \theta \\ z \end{pmatrix}}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

$$= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{i \begin{pmatrix} za \cos \theta \\ za \sin \theta \\ a^2 \end{pmatrix} d\theta}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

$$= \frac{ia^2}{2(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \mathbf{E}_z \quad (15)$$

と計算することが出来る。ここで、 $a \ll z$ を仮定すれば、 z 方向における磁場は

$$H(z) = \frac{ia^2}{2z^3} \quad (16)$$

と書ける。

1.3 ソレノイドコイルに生じる磁気双極子モーメント

以上の二つの結果を比較することで、円形電流が作る磁気モーメントを導出することが出来る。 $(0, 0, z)$ における磁場が等しくなることから、

$$\frac{m}{2\pi\mu_0 z^3} = \frac{ia^2}{2z^3} \quad (17)$$

より磁気モーメントは $m = \mu_0 i \pi a^2$ と求められる。

今回考えるソレノイドコイルは、大きさ i の円形電流をコイルの巻き数 nl の分だけ重ね合わせたものと捉えられるから、単位長さ当たり巻き数 n で長さ l のソレノイドコイルに電流を流してできる磁気モーメントは

$$m = \mu_0 n l i \pi a^2 \quad (18)$$

と導出することが出来る。また、 $m = q_m l$ とも書けるから、ソレノイドコイルに誘導される磁荷は

$$q_m = \mu_0 n i \pi a^2 \quad (19)$$

と求められる。また、コイルに鉄心が入っているなどの影響により透磁率が変化している場合は、真空の透磁率 μ_0 の代わりに物質固有の透磁率 μ を用いて

$$m = \mu n l i \pi a^2 \quad (20)$$

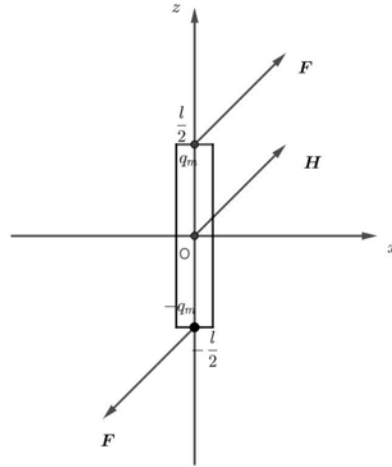
$$q_m = \mu n i \pi a^2 \quad (21)$$

とそれぞれ書ける。

2 磁場中に置いたコイルに生じるトルク

2.1 コイルに生じるトルクの導出

方位磁石を見れば明らかなように、磁気双極子を特定の磁場中に置くと、相互作用によって磁気双極子にトルクが発生する。ここでは電流を流して磁荷が生じたソレノイドコイルに生じるトルクについて計算する。



トルクを N として、磁荷 $\pm q_m$ がそれぞれ $r = \pm \frac{l}{2}$ に生じるとき、外部磁場 H_{out} によって磁荷 q_m には $F = q_m H_{out}$ が生じるから、上図より

$$N = \sum_i r_i \times F_i \quad (22)$$

$$= \frac{l}{2} \times q_m H + \left(-\frac{l}{2}\right) \times (-q_m) H \quad (23)$$

$$= l \times q_m H \quad (24)$$

$$= q_m l \times H \quad (25)$$

$$= m \times H \quad (26)$$

と導ける。

2.2 トルクによって生じる回転

以上のトルクによって磁気双極子は、磁気モーメントと外部磁場の双方に平行な面内で回転することになる。上の図に示したような場合では磁気モーメントと外部磁場に平行な面は紙面に当たり、磁気トルクは紙面内を時計回りに回転する、ということになる。つまりこれは、3軸の磁気トルカにそれぞれ生じた磁気モーメントを3つの成分として持つ磁気モーメントベクトルが外部磁場方向と同じ方向を向くように回転が生じる、

と解釈することが出来る。

今回は三軸にそれぞれソレノイドコイルを配置するから、 x, y, z 各軸方向に平行な向きに置いたコイルに流れる電流 (各軸方向のモーメントを生成する円形電流) をそれぞれ i_x, i_y, i_z と置いて 3 成分まとめて $\mathbf{i}$ と書くことにすると、

$$\mathbf{m} = \mu n l \pi a^2 \mathbf{i} \quad (27)$$

と書けて、

$$\mathbf{N} = \mu n l \pi a^2 \mathbf{i} \times \mathbf{H} \quad (28)$$

と書きかえられる。つまりこの式を見れば、例えば x 軸方向に回転を生み出そうとした場合、 y 方向と z 方向の電流の値の両方をうまく設定する必要があることが分かる。

3 トルクによって生じる角速度の導出

剛体の回転運動の運動方程式は、

$$I \frac{d\omega}{dt} = \mathbf{N} \quad (29)$$

である。ここで I は回転軸周りの慣性モーメント、 ω は回転軸周りの角速度である。3 軸各方向に配置した磁気トルカの中心が回転軸に一致すると、各軸周りの慣性モーメント I_x, I_y, I_z をまとめて I と書き、また各軸周りの角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ をまとめて ω と書くことにすると、今回の運動方程式は

$$I \frac{d\omega}{dt} = \mathbf{m} \times \mathbf{H} \quad (30)$$

と書ける。例えば、 x 方向に関してみると、

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \frac{\mu n l \pi a^2}{I_x} (i_y H_z - i_z H_y) \quad (31)$$

となる。

4 慣性モーメントの計算

4.1 簡単な場合

ここでは、衛星全体の慣性モーメントについて考える。簡単のため、衛星の質量を M とし、質量分布が一樣であるとする。衛星の重心が原点に一致するように座標を取り、 x, y, z 方向の辺の長さをそれぞれ a, b, c とし、各軸方向の回転軸が重心を通り x, y, z 各軸と一致することを仮定する。

このとき密度 $\rho = \frac{M}{abc}$ であるから、 x 軸周りのモーメント I_x は、

$$I_x = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} dx \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} dy \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} dz \rho (y^2 + z^2) \quad (32)$$

$$= \frac{M}{abc} a \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} dy \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} dz (y^2 + z^2) \quad (33)$$

$$= \frac{M}{bc} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} dy \left[y^2 z + \frac{1}{3} z^3 \right]_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \quad (34)$$

$$= \frac{M}{bc} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} dy \left(cy^2 + \frac{1}{12} c^3 \right) \quad (35)$$

$$= \frac{M}{b} \left[\frac{1}{3} y^3 + \frac{1}{12} c^2 y \right]_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \quad (36)$$

$$= \frac{M}{b} \left(\frac{1}{12} b^3 + \frac{1}{12} bc^2 \right) \quad (37)$$

$$= \frac{1}{12} M (b^2 + c^2) \quad (38)$$

と求められる。また、 y, z 軸周りについても同様にすれば、

$$I_y = \frac{1}{12} M (c^2 + a^2) \quad (39)$$

$$I_z = \frac{1}{12} M (a^2 + b^2) \quad (40)$$

と書くことが出来る。

4.2 回転軸が傾いている場合

3章で求めたような角速度の導出方法が正しいのか、不勉強ながらよくわかっていない。このほかの角速度の導出の方針としては、以下のように考えられる。

外部磁場と磁気モーメントベクトルの双方と垂直な軸を回転軸にとることになると、衛星の x, y, z 軸に対して回転軸が傾くことになり、結果慣性モーメントが前述の値から変化する。この場合、衛星固定の座標軸に対して回転軸がどれだけの角度ずれているかを考えて慣性モーメントテンソルを導出する必要があるが、設定がかなり複雑になり、計算はまだ済んでいない。

5 今後の課題・懸念点など

以上の計算を踏まえて、磁気トルカによる姿勢制御の課題や懸念点、考えられる方針を挙げる。

5.1 地磁気データへの影響の大きさ

今回、磁気トルカに電流を流して地磁気より大きな磁場を発生させることになるため、搭載している地磁気センサへの影響が大きくなることが想定される。先日の山本君たちによる基礎実験結果では、地磁気のおよそ10倍程度の磁場を発生させることになるとのことである。すると、磁気トルカによる影響が大きく、地磁気測定の正確性が担保できなくなる可能性がある。また、対応策として磁気トルカのみによって生成される磁場

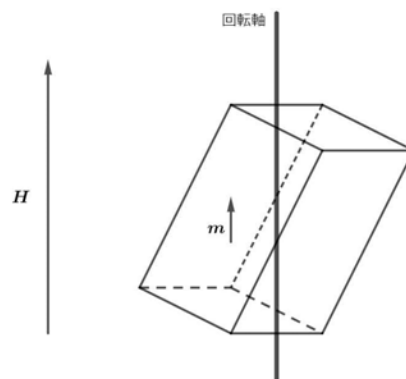
を測定してオフセットとすることが考えられるが、磁気トルカは電磁石であり、コイルに残った残留磁場や、磁場の変化によって生じる電磁誘導などの影響が発生する可能性が考えられ、正確なオフセットを得られるかは不透明である。

5.2 基本式の煩雑さ

今回考えた、磁場が定常であり衛星が回転運動のみする、回転軸が衛星の各軸方向と平行で回転軸が重心を通る、という最も理想的な場合であっても、回転が生じることによって磁気双極子モーメントと外部磁場とのなす角が刻々と変化するため、解析的に解くことは不可能である。そのうえ、実際は磁場が定常ではなく並進運動なども絡んでくるため、シミュレーションもかなり複雑になることが予想される。従って、磁気トルカのみで姿勢を決定することは困難といわざるを得ない。

5.3 回転が完全に止められない可能性

先ほど 2.2 章で述べたように、3 軸の磁気トルカそれぞれに電流を流して発生した磁気モーメントは、それら 3 つの値を成分として持つ磁気モーメントベクトルとして解釈でき (つまり合成ベクトルの向きに 1 つの磁石を設置した状況と同じと考えることが出来る)、このベクトルが磁場方向と平行になるような回転が生じると考えられる。この時、良く知られている方位磁石の例と照らし合わせてみれば、定常磁場を仮定して十分に長い時間一定の電流を流し続ければ (すなわち一定の磁気モーメントを発生させ続ければ)、磁気モーメントと磁場が平行な向きを向いて回転が収束すると考えられる。しかし、このとき磁場と平行な軸周りの回転は依然として残るのではないだろうか。



この回転を消そうと思ってトルカに流す電流値を変えると、新たに別の方向に磁場が誘導されてしまいこの軸周り以外にも回転が生じてしまう。そもそも、磁気モーメントと外部磁場との相互作用によって固定できるのは 2 軸のみであり、剛体の回転を止めるには 3 つの自由度を固定しなければならないため、自由度が一つ不足している。

仮に、地上面と地磁気の方が垂直であれば、磁気モーメントと外部磁場が垂直になったとき、衛星のうち一つの面が地表に向くことになり、外部磁場方向と平行な軸周りの回転が残っていたとしてもアンテナが地表面を向き続ける。しかし、上図の場合を考えると、上図の底面にアンテナを設置したとすれば、衛星の回転に伴いアンテナ面の向きが変化するため、京大上空でアンテナを地表面に向け続けることは不可能なのではないかと考えられる。このことについての対策を早急に考える必要があるだろう。

5.4 衛星の制御

以上の議論は、衛星にどのような方向の磁場がかかっていて、またその時点で衛星がどのような回転をしているのが分かるということが出発点になる。しかし、実際に回転運動以外に並進運動もしている状態の衛星で、回転方向や現在位置を正確に把握することは不可能に近い。従って、京大上空での理想的な衛星の向きを先に定め、それに向かってある程度時間をかけて制御するという方針が良いのではないと思われる。具体的には、特定方向の定常な磁場を衛星に発生させ、しばらくその状態を保つことによって方位磁針のように発生させた磁気モーメントと外部磁場が平行になるのを待ち、そののちに磁気モーメントを変化させて指定の向きへ衛星を向ける、ということだ。おそらくこれが最も労力の少ない方法であろうと思われるが、これを行っても5.3で述べたような磁気モーメント周りの回転成分の問題が残る。

参考資料 4
真空木材暴露実験解析結果：真のヤング率
三浦晴

2024/3/31

真の相対ヤング率

三浦晴
宇宙木材研究室

I. 計算方法

II. 結果

計算方法 ヤング率

◆ヤング率 E [N/mm^2]
 x で積分

$$E = \frac{Px}{4bh^3y}(-4x^2 + 3L^2)$$
 $x = \frac{L}{2}$ を代入

$$E = \frac{PL^3}{4bh^3y}$$

破断荷重の 10[%]
 $P[N]$

図 移動距離と応力

◆図より歪みと応力に線形性がある
 $P = \frac{dP}{dy}y$ より、 $E = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{dP}{dy}$

今回は長期真空暴露の試験体のみ

計算方法 ヤング率修正係数

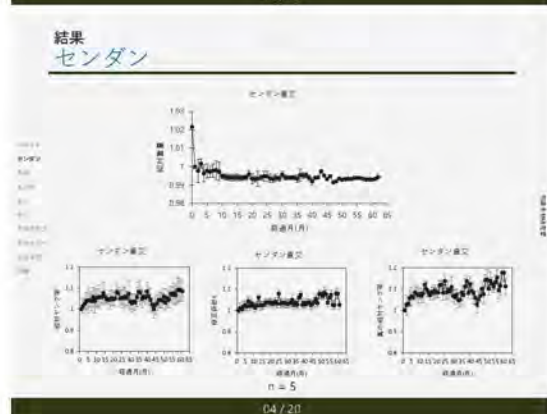
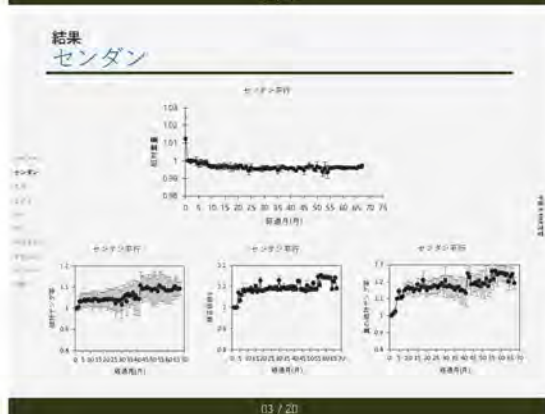
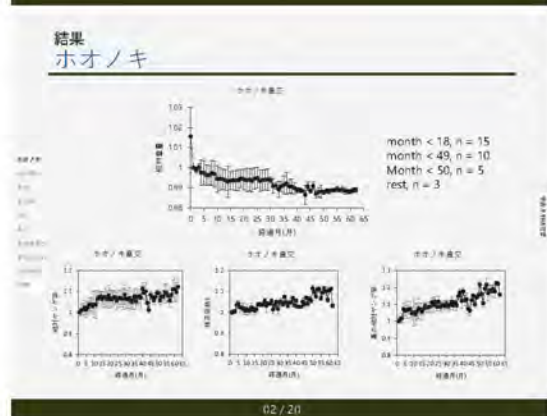
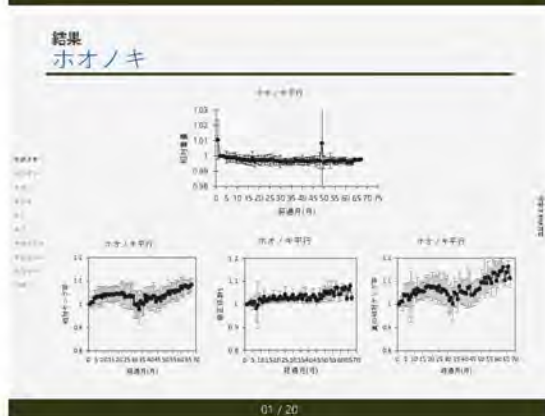
◆ヤング率 E [N/mm^2]

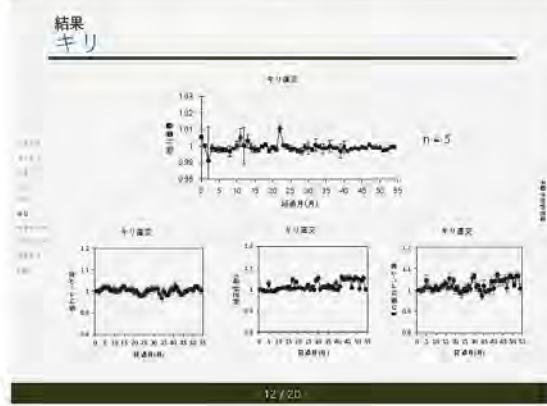
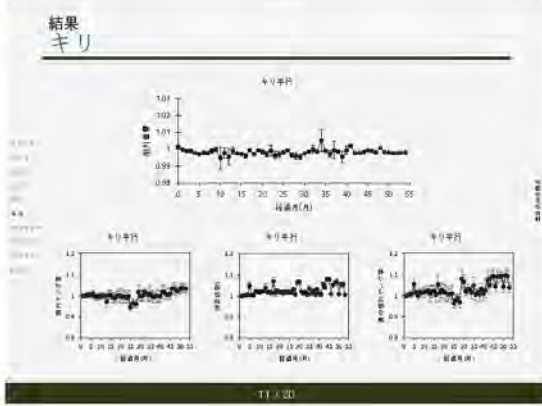
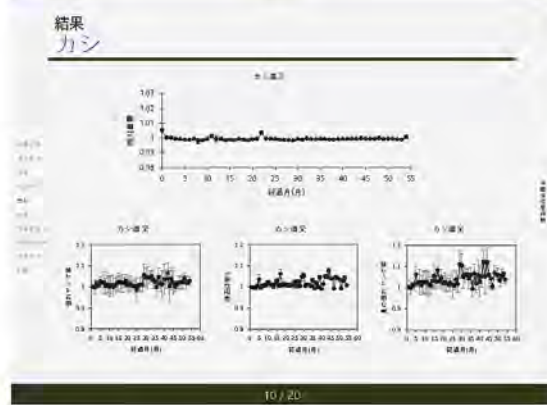
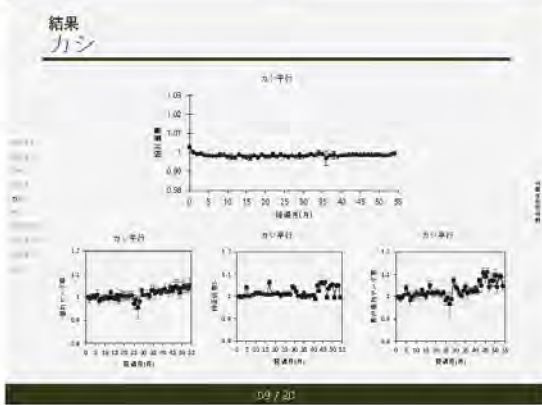
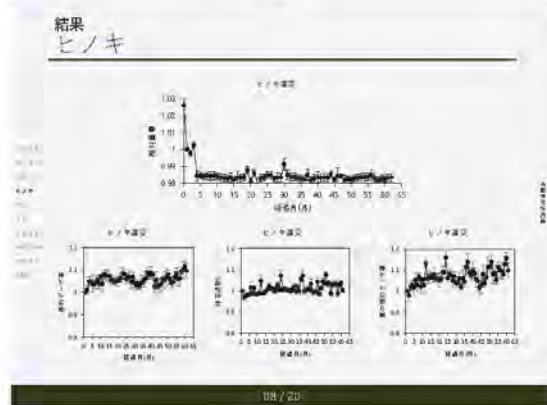
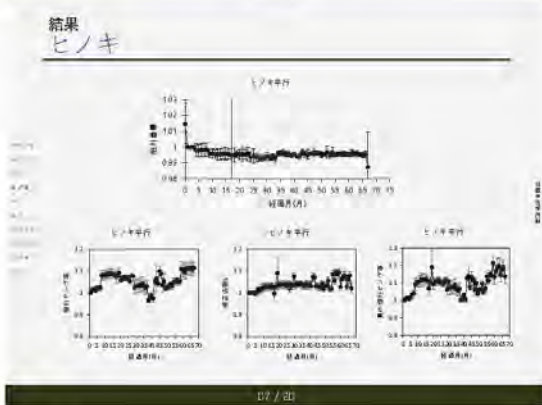
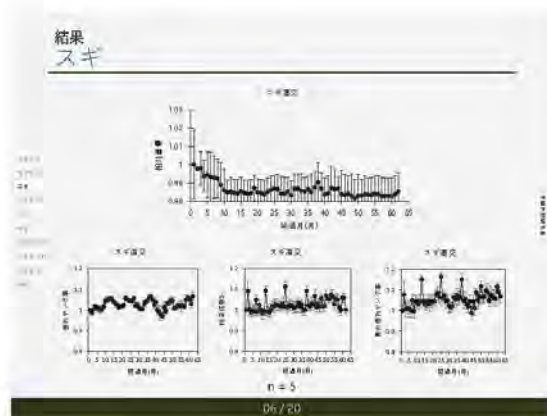
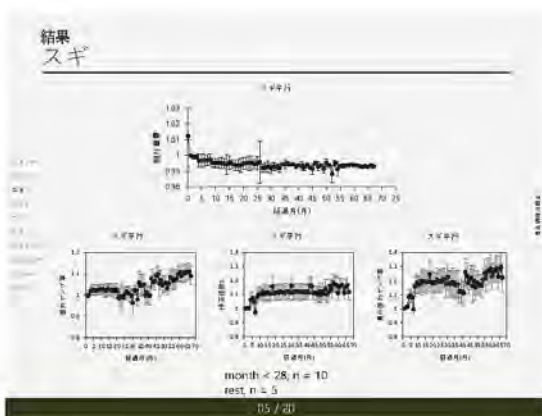
$$E = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{dP}{dy} \propto \frac{L^2}{bh^3}$$

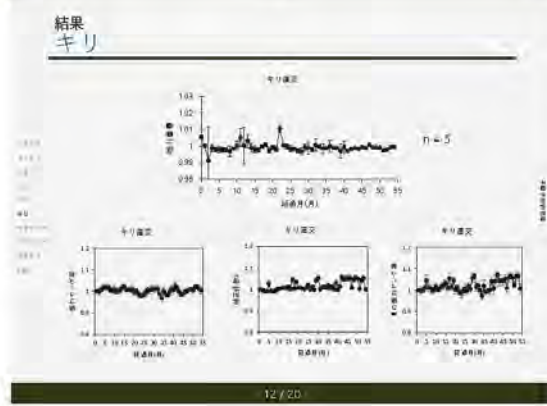
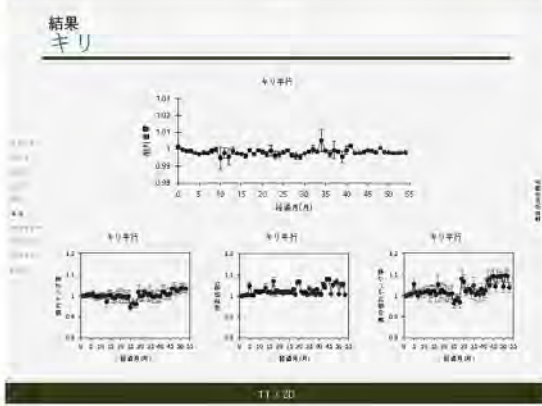
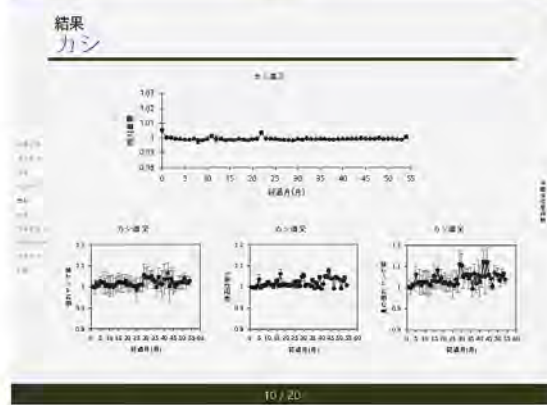
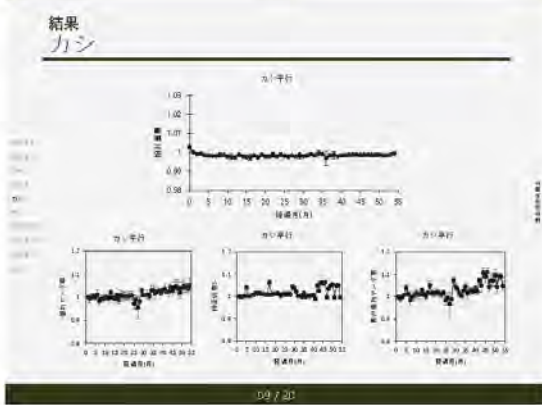
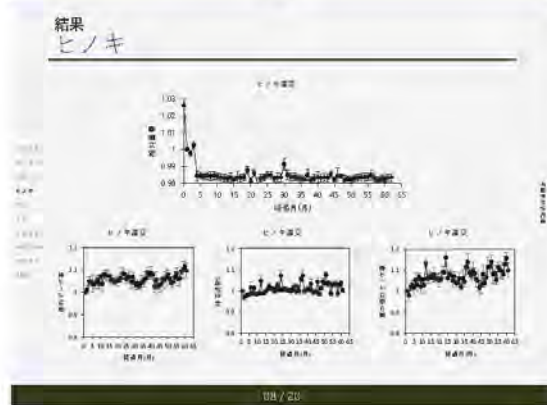
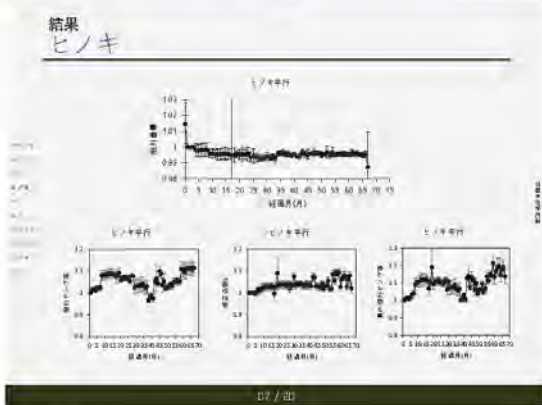
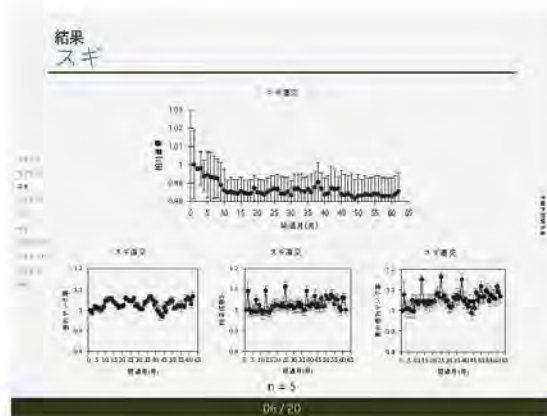
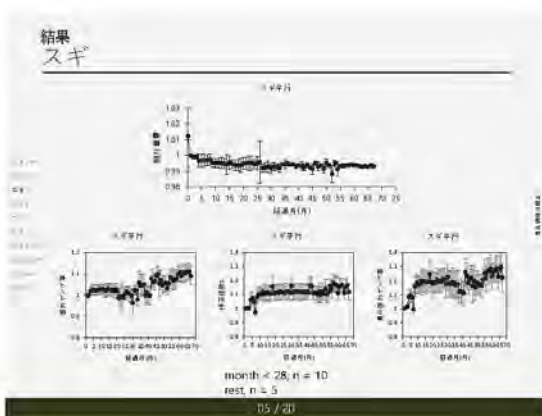
◆これまで求めてきた相対ヤング率 $E' = \frac{\frac{L^2}{4bh^3} \frac{dP}{dy}}{\frac{L^2}{4b_0h_0^3} \left(\frac{dP}{dy}\right)_0} = \frac{\frac{dP}{dy}}{\left(\frac{dP}{dy}\right)_0}$

◆ E' は木片の形状変化を考慮していない
 → 真の相対ヤング率を求めるための修正係数 S
 $E = SE'$

$$S = \frac{\frac{L^2}{bh^3}}{\frac{L^2}{b_0h_0^3}} = \frac{b_0h_0^3}{bh^3}$$







参考資料 5-1
令和5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	2023・ 前期集中	受講定員 (1回生定員)	9(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 前期集中	教室	総合教育研究棟506号室(北部構内)			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#1：2023年5月13日 合宿概要講義 オリエンテーション#2：2023年6月10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#3：2023年7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#4：2023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：2023年8月19日-25日 実施場所：京都大学吉田キャンパス 8月19日・22日ー25日 京都大学芦生研究林 8月20日ー21日 実施内容：8月19日：実習開始、各種講義 8月20日ー21日：森林実習/閉鎖環境実習 8月22日ー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25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							
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)

る。

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）

[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6泊7日の合宿実習である。

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 5-2
令和5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
開講年度・開講期	2023・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4日 有人宇宙学（土井・山敷・田口） 【第2回】 10月11日 宇宙環境工学（山敷） 【第3回】 10月18日 宇宙探査工学（清水） 【第4回】 10月25日 有人宇宙学演習1 【第5回】 11月1日 宇宙生命科学（保尊） 【第6回】 11月8日 宇宙木材工学（村田） 【第7回】 11月15日 有人宇宙学演習2 【第8回】 11月29日 宇宙霊長類学（足立） 【第9回】 12月6日 宇宙医学（寺田） 【第10回】 12月13日 宇宙法（青木） 【第11回】 12月20日 有人宇宙学演習3（土井・山敷） 【第12回】 12月27日 宇宙人類学（岡田） 【第13回】 1月10日 宇宙居住学（稲富） 【第14回】 1月17日 有人宇宙学演習4（土井・山敷・田口） 【第15回】 1月24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。

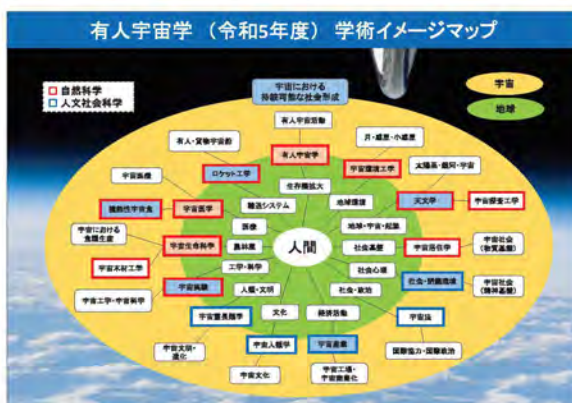
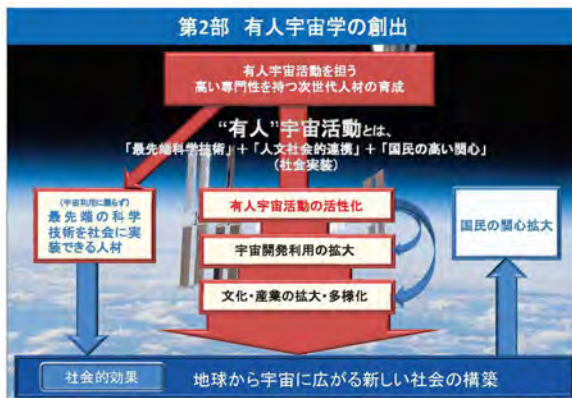
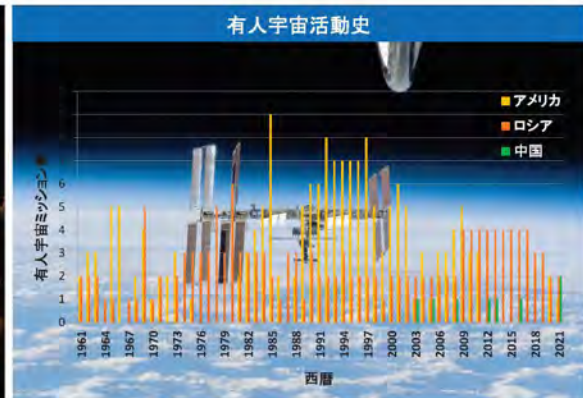
参考資料 5-3
 有人宇宙学講義：2023/10/04：土井隆雄

2023年度 有人宇宙学講義

有人宇宙学 1
 2023年10月4日
 土井隆雄

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

2008年5月11日午後2時28分(米国東部夏時間) NASAケネディ宇宙センターよりスペースシャトル・エンタープライズ 打上げ





宇宙を生きて (ヒント)

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

↓

- ・ヒト1人当たり、358/8.8=40.7=40本の杉が必要である
- ・直径120メートルドーム(甲子園球場)に10m²に1本の杉を植える
⇒ 12,000 ÷ (40x10) = 30人が暮らせる!

地球外森林の構築

参考資料 5-4

有人宇宙学講義：2023/11/8：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（低温と高圧、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日本実験棟さぼろ簡易船外曝露試験（ExBAS）
木造人工衛星（LignoSat）

なぜ人間は木材を使うのか？



歌川広重：日坂佐夜ノ中山（東海道五十三次 1833）

太田延彦『森林飽和』(2012)

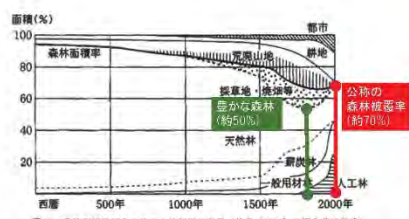
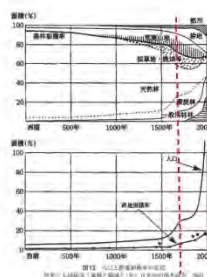


図11 森林利用及びその他の土地利用の変遷（佐光（1984）の図を基に作成）
出典：太田延彦『山と森の1000年』河川2000年1月号

- 公称の森林被覆率（牧草地、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%）

太田延彦(2008)森林の衰退と現代の森林「荒廃」、水利科学



7世紀
飛鳥・奈良地方で森林が衰退

11世紀
遊覧原田上山でマツが衰退

17世紀
全面ではげ山が広がる

1666年「諸国山川図」
森林の乱開墾により、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じ、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

太田延彦(2008)森林の衰退と現代の森林「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）



（佐光（1984）の図を基に作成）

● 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（持続的な利用・管理が消失）

- コナラやクスギが大木化、カシやシイに植生が移行
- 林縁にイバラ類やクス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～

太田延彦(2008)森林の衰退と現代の森林「荒廃」、水利科学

読売新聞オンライン

クマの人身被害が過去最多180人、死者5人、秋田・岩手で死者全体の6割近く

環境省は1日、全国の中で最も人身被害が今年4〜10月で180人（読売新聞）によると発表した。これまで最も多かった2020年度の158人上回り、過去最多を更新。10月だけで71人の被害に達した。202111月以降も秋田に被害が集中して人身被害に占める割合が高かった。環境省は報告している。

人身被害は秋田県が最も多く15人、岩手県が14人、長野県が10人、山梨県が9人、岐阜県が8人、静岡県が7人、愛知県が6人、三重県が5人、滋賀県が4人、京都府が3人、兵庫県が2人、奈良県が1人、和歌山県が1人、徳島県が1人、香川県が1人、高松市が1人、愛媛県が1人、高知県が1人、福岡県が1人、佐賀県が1人、大分県が1人、熊本県が1人、鹿児島県が1人、沖縄県が1人、計180人、死者5人、秋田・岩手で死者全体の6割近く

クマによる死傷者数
環境省の資料を基に作成。
2023年度は10月末時点

年度	死傷者数(人)
2008	50
2009	60
2010	150
2011	80
2012	70
2013	100
2014	60
2015	120
2016	100
2017	110
2018	100
2019	150
2020	158
2021	160
2022	170
2023	180

中野動物園山岳エコ・ミュージアム

山岳のツキノワグマ 16 ～「熊山エサ不届説」の噂～

2020年9月23日

さて、ツキノワグマが人里に現れると、一般には「熊山にエサが足りないからクマが量に出てくる」とか「人間が熊山を開発行為でめっちゃしたから、クマが住処を失って山から出てくる」という説明がなされます。しかし、毎週末遊んでいる熊山の定点観察やツキノワグマのフンの内容物検査から見ると、こうした解説は「不十分であり、また時に間違っているのでは？」と考えることがあります。

熊山の熊山エサ不届説の量にクマの大量出沒の理由のひとつではありませんが、その他にもツキノワグマの市部山岳の背景には、「長期的な飼育の推移」や「行動圏の拡大（特に旧都農林の成長に伴う熊山のエサ不届＝熊山のツキノワグマの存在）」など、（研究はされていても）一般にはあまり説明されていない要素が多数あるのです。

「旧都農林のクマの食性調査や熊山エサ不届の調査など、エサ資源の大半や影響の移行が不十分だった」「人工給餌の開始点（人里への誘引等）が移転されたりと、逆に「人里にエサ不届れ」を助長したクマをまじまじと見よう」など「素直な熊山エサ不届説（熊山・人身被害の発生）をまじまじと見よう」。こうした熊山エサ不届説には功利的な面があるように思います。

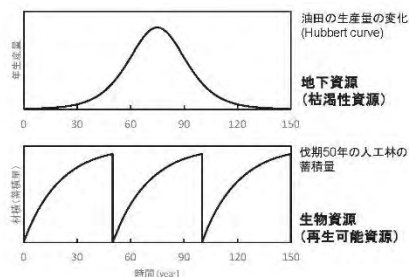
<https://www.eco-museum.jp/2020/09/4834.html>



日本は高温多湿で樹木の成長には適した環境である



昔蘭風土記、喜望峯茶屋の材料をまかなう茶場として、1,500年前から1777年まで、人の手を入れながら守りつづけてきた自然・文化資源である。 https://sato.sogen-net.jp/?page_id=3241



木材の強さのメカニズム

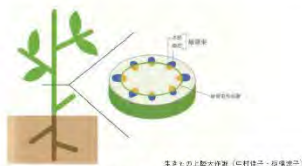
最古の陸上植物



シダ植物の大森林



もっと多くの光を受けたい
もっと胚子を運くへ飛ばしたい



できるだけ背を高くしたい
重力が問題（体の維持と水の吸い上げ）

最初の樹木



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（石炭紀）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、貴重な化石とされる。
日本で植えられているイチョウは中国から伝えたものだといわれる。



チューリヒ大学自然史博物館



チューリヒ大学自然史博物館



生きた化石・ジュラシックツリー

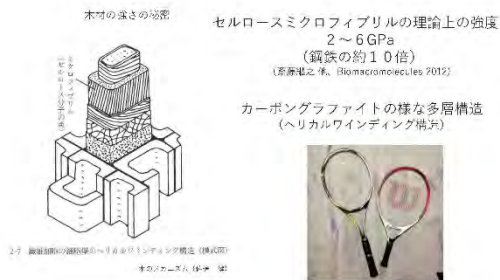
ウォレマイ・パイン

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。



オーストラリア国立公園(オーストラリア)



木材と石炭紀

4億年前ごろになるとシダ植物が地上で出現する。

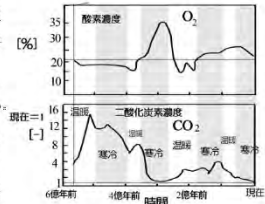
このころの空気は二酸化炭素濃度が4000-5000ppmと現在の10倍ほど高かった。巨大なシダは、森林に育ちが盛んだった。大量の二酸化炭素が放出された。このため、二酸化炭素濃度は3億年前には十分の一程度、即ち現在と同じレベルに下がり、気温も低下した。

さらに大気中の酸素濃度も最大35%まで上昇し、大きな動物の進化が促される。

3億年前にはシダ植物に代わり裸子植物が繁栄する。現在みられるイチナワやマツも裸子植物である。

裸子植物はリグニンを産生させ、幹の強度を高めることに成功した。この時代には、リグニンを分泌できる菌類が十分に存在してゐた。植物は、土壌に分解されて、土壌に分解された植物遺骸として土壌に堆積していった。この植物遺骸が、現在見られる石炭である。

2.5億年前に、リグニンを分泌できる菌類が出現し、菌類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)

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)



映画「紅の宴」

【正解】

③翼の長さ(全幅)
全幅(Wing span): 97.5m



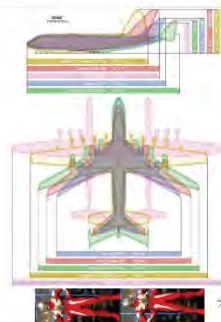
世界最大の飛行機「ストラトローンチ」が初飛行に成功



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「スタード・コンボジャ・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飛行を成功し、スタード・コンボジャ・ストラトローンチは、空中で4つのロケットの役割を担い、飛行機として開発されている飛行機です。重量は117tとなり、6名のジェットエンジンも搭載しています。

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



世界最大の飛行機
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(ムコノミーのみ)

ウルマンマンマックス
身長: 4.8m

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：スプルス・グース（トウヒ材のガチョウ）



初飛行：1947年11月2日
 高度：約21m
 飛行距離：1mile(1600m)
 設計：ニューアル 記載：
 巡航速度：362 km/h
 航続距離：約 4,760 km
 シャーマン戦車(80トン)1台
 や乗員750名輸送可能
 主材：Birch(カバ材)
 全長：66.8m(218'8")
 全幅：97.5m(318'11")

現在：エバーグリーン航空博物館（オレゴン州）で展示（2001年より）

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型蒸気機関車(1902)
 国産初の蒸気型



戦艦三笠(1900)英米製
 日露戦争での旗艦

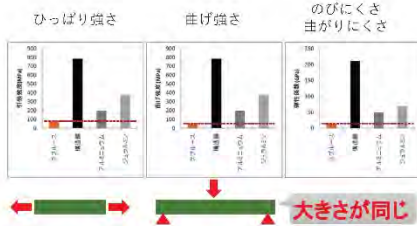


ソビエツ キヤメル(1916)
 英国・合板・布製・アルミ

飛行機の材料に必要なこと：

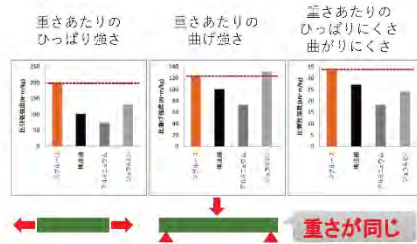
- ① 重さの割には強いこと（比強度）
- ② 重さの割には変形しにくいこと（比ヤング率）
- ③ 硬さはそれほど大事ではない
- ④ 工作が簡単であること

寺澤幸太郎：『航空機と木材』 航空朝日、pp.58-61（1942）



同じ大きさでの比較では、木材は金属にかなわない

寺澤幸太郎：『航空機と木材』 航空朝日、pp.58-61（1942）



同じ重さでの比較では、木材は金属より良い

寺澤幸太郎：『航空機と木材』 航空朝日、pp.58-61（1942）

デ・ハビランド モスキート（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：スプルス
 モスキート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）
- おまけの効果
- 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・本大助教授 山本峰雄

- ・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、非均質に入き欠点を持っている。
- ・強度が同じ樹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、経路方向に対する角度でも強度は急激に変化する。
- ・木製機のように非均質を受ける部材の許容力は、桁の断面の形状によって相当化する。その断面は圧縮強度が引張り強度に比して著しく低いことに起る。
- ・金属機が寿命五千時間以上であるのに、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
 （2020/12/24リリース）

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

ISSからの放出(ISSOD)
 軌道高度：380～470km
 軌道周期：約 100～250 分程度

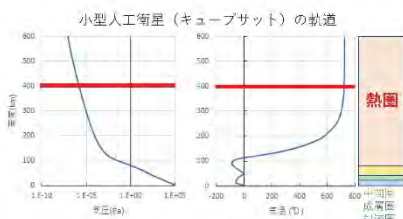


土井隆雄：宇宙における樹木・木材利用の探求 建築と社会（日本建築協会）101(1183)：30-32 (2020)

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。

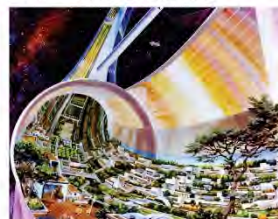
将来的に人類が宇宙に永続的に展開することを考えると、人類が作り出すことのできる資源である樹木・木材を宇宙で利用することができれば、人類の宇宙への発展に必要な材料資源をどこから調達するかという課題を解決することが可能となる。



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

NASA's future space colonies (1975)

ジェラード・ド・オニールが率いる研究グループが、将来の宇宙移民について10段階の研究が実施された。アーチストのRockwellとDan 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植えることができる。



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

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)、ホオノキ(505 kg/m³)
5mm(L)×10mm(R)×100mm(軸方向L/繊維直交方向R)

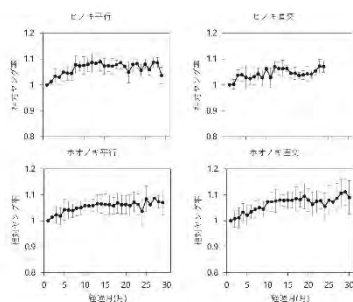


長期間の高真空暴露試験 (2018年7月～)

暴露環境：0.1Pa (高度100km相当)

試験方法：
野曝後(105°C×24時間)に真空暴露
1ヶ月ごとに重量と水分含量等を測定

掛けヤング率測定(JTS-500K, IMADA)：
白ゴスパン 80mm(LD-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

JEMペイロードマウントモデ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)

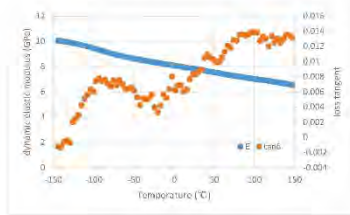
J. Piattoni (2017) Acta Astronautica 81: 419-429

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)

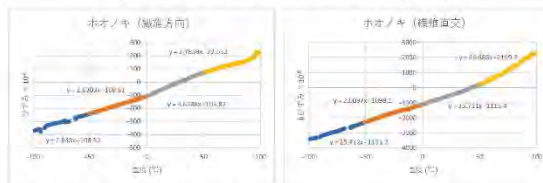


熱膨張係数

	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	8.5	20°C
ポリエチレン	0.92-0.97	100-200	20°C
アクリル(PMMA)	1.16-1.20	80	20°C
繊維方向 半径方向			
ベイツ (Pseudotsuga mucronata)	0.46	6	24
イエローバーチ (Betula alba/papyrifera)	0.58	9	26
レッドオーク (Quercus rubra)	0.62	9	26
レッドウッド (Sequoia sempervirens)	0.42	6	21

紀伊半島2002: 426-428
Kubota T., Liang Y., Chung LS (1973) Wood Fiber Sci 5:255-267

ホオノキの熱膨張係数（線熱膨張）（未発表）

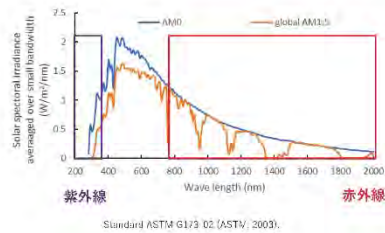


温度帯で若干変化があるが、
-100°Cから+50°Cでは
繊維方向で約3 ppm/K、繊維直交方向で24 ppm/Kであった。
(チタン 8.6 ppm/K、アルミニウム 30.2 ppm/K)

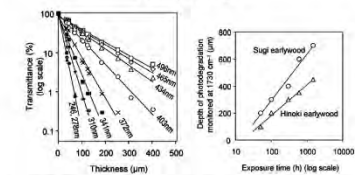
宇宙空間での劣化要因の検討

- 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



紫外線の影響



- 針葉樹では紫外線(250-400nm)で厚さ15μm以下には透達しない
- 劣化の深さは劣化時間とほぼ比例して減少する
- 雨や影による浸透作用を受けやすくなり、針葉樹では100年間で5-10mm、広葉樹材で2-3mm程度の厚さが失われる

片桐雄(2005)木材の劣化と保存技術, 日本学術会議24(6): 155-17

原子状酸素(Atomic Oxygen, AO)

地上から200kmから600kmの高度では紫外線、特に真空中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)が人気の80%を占める

酸素分子が真空中紫外線
(VUV: λ = 100~200 nm)
を吸収して分解する

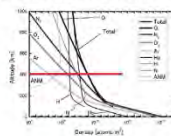
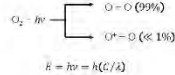
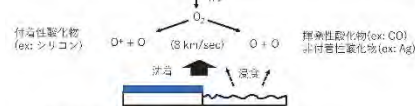


Fig. 1 Altitude distribution of atomic oxygen density. ANM: O⁺ and H⁺ Atomic Oxygenを測定したイメージ

大気圏外 (p0000) 高度帯における原子状酸素密度の分布と特性 (J. Vac. Sci. Technol. 21(2): 475-483)

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



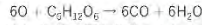
高度400kmのAO密度: $8 \times 10^{13} \text{ atoms/m}^3$
秒速8kmで動く宇宙機に衝突するAOフラックス
 $8.0 \times 10^7 \text{ atoms/cm}^2 \times 8.0 \times 10^3 \text{ cm/s} = 6.4 \times 10^{11} \text{ atoms/cm}^2/\text{s}$

4.本誌巻末(2009)表紙裏: 宇宙空間材料の劣化と保護の技術とその進歩 (J. Vac. Sci. Technol. 22(5): 415-458)

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^{23} 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

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

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

(※ノープラットの想定運用期間 100~250日)

参考文献: 後述(参考文献)に示す。また、国際標準化機構(ISO)の規格(ISO 15926-1:2016)に示す。ISO 15926-1:2016

宇宙放射線

- ①惑内宇宙線(GCR)
 - 陽子 (水素イオン) 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)
 - 「高エネルギー粒子」(陽子と電子)
- ③地球放射線
 - 力電 (陽子線) (IRB) 平均高度約 3,600km
 - 外電 (電子線) (ORB) 平均高度約 18,000km

ISS外部の放射線(FXROS-B)

(447days, 2014/8/24~2016/1/11)

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

※γ線であれば 1Gy=15Sv

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

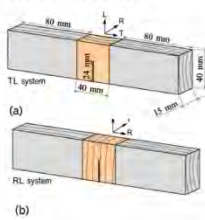


ガンマ線曝露による木材の強度低下 (未発表)

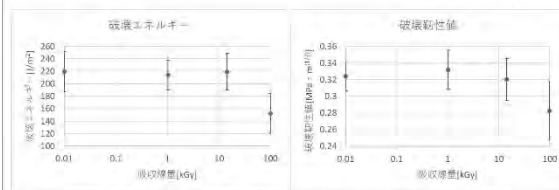


コバルト60ガンマ線照射試験装置 (京都大学複素科学の最先端研究)

破壊力学試験(SENB)



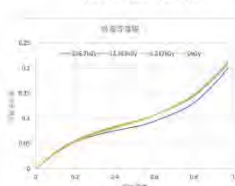
破壊力学試験 (未発表)



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

[溶解水] + [乾湿木材] = [水和木材]

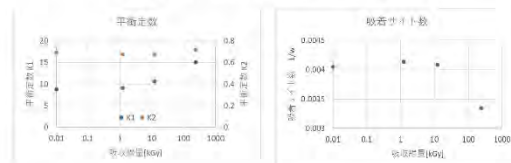
平衡定数 K_1

[水蒸気] ⇌ [溶解水]

平衡定数 K_2

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

世界初、10か月間の木材宇宙曝露実験を完了
~木材用途の拡大、木造人工衛星(IgnosSat)の打上げを目標として~
「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か月間の宇宙空間での木材試験体の曝露実験が完了し、2023年1月に試験体を地球に帰還した。NASA、JAXAを経て3月、木材試験体を運送。外装、包装等を対応する1次容器を完成した。木材の乾燥、張り、剥がれなどはなく、温度変化が大きく、木材が張り、宇宙空間で受ける温度の宇宙曝露下で、試験体の劣化は極めて低く、木材は安定しており、木材の優れた耐久性を証明した。2024年に打上げを計画している木造人工衛星 (IgnosSat) 1号機に使用する電機は、今回の実験結果を踏まえ小規模な試験を行うことを決定した。



図1 IgnosSatの宇宙飛行プラットフォーム (© JAXA, NASA, IgnosSat) 宇宙飛行プラットフォーム(宇宙飛行プラットフォーム)



図2 京都大学とNASA共同で宇宙曝露試験体を開発 (フリーフォーム)

実験結果

船外曝露

・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、張り、剥がれ、吸着現象などについて評価。
評価：いずれの試験体においても、割れ、張り、剥がれ、吸着現象などの劣化は全く認められないことを確認。

吸着現象

・木材試験体の宇宙曝露前後での質量変化を測定。質量変化率や宇宙空間の酸素状態(AO: Atomic Oxygen)が木材に与える影響の測定、化学変化や分解による質量変化の推定を可能。

結果：試験試験体の質量を測定し、含水率の影響を修正した結果では、ほとんど減少していないことを確認。

③ 3種類の木材のマサカ、ヒノキ、ダケカンパノそれぞれの変化の量を測定。

結果：3種類の木材の変化の量は確認されなかった。

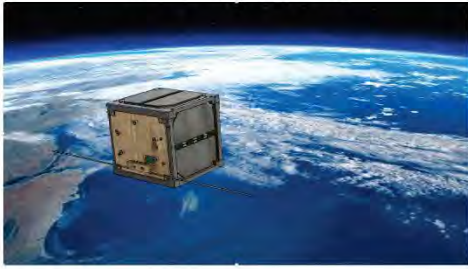


図3 宇宙曝露後木材試験体(木ノキ)拡大写真

左:宇宙曝露試験体 右:宇宙未曝露試験体

https://www.jaxa.jp/press/2023/03/03-01.html
https://www.jaxa.jp/press/2023/03/03-01.html

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}, Maya Abou-Ghannem^{1,2,3,4}, Daniel J. Catto^{1,2,3,4}, Karl D. Freyer^{1,2,3,4}, Justin Jacques^{1,2,3,4}, Michael J. Lawler^{1,2,3,4}, Christopher Maloney^{1,2,3,4}, John M. C. Plane^{1,2,3,4}, Martin M. Rios^{1,2,3,4}, Gregory P. Schill^{1,2,3,4}, and David Sherr^{1,2,3,4}

Edited by Mark Thomers, 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機能不全の衛星が大気圏に再突入すると、金属蒸気が発生され、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

㉒ 地球を見上げるMTH港（月班）

地球からの移住者たちによる火星文化の構築

小椋淳平¹, 池田弥央¹, 山本真優¹, 山本可成¹, 山敷庸亮²

1: 京都大学大学院生 2: 京都大学総合生存学館

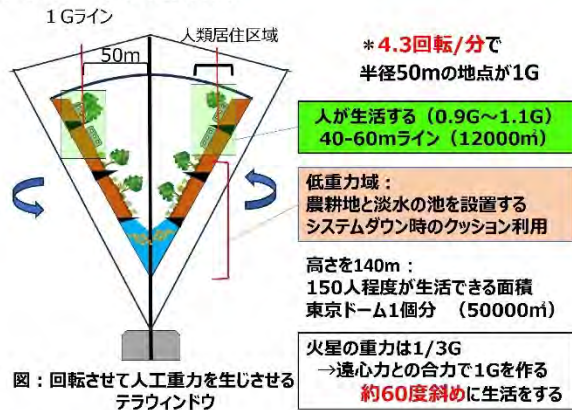
【テラウィンドウの理由】

従来、火星への植民を考えるうえで、火星全体を地球に近い環境に作り変えるテラフォーミング（惑星地球化）が議論されていた。しかし、以下の理由で、テラフォーミングが現実的でないために、地球環境の一部だけを火星に構築する**テラウィンドウ**にフォーカスをあてることにした。

極冠の水	極冠のドライアイスも溶解しても、 H₂OやCO₂の絶対量が足りない。
大気圧UP 温暖化	極冠の水が溶けても大気圧は0.014気圧程度。 CO ₂ は水に溶解するために、大気圧が急激に減少。 磁場がなく、かつ低重力の環境では、 大気は宇宙へ散逸が懸念される。
植物の育成 O ₂ の生成	レゴリスには硫酸塩、過塩素酸塩など多く、強酸性の土壌 であり植物が生育できない。 惑星の熱移動による砂嵐への懸念で、 火星の土壌で直接栽培することは困難である。

火星全体のテラフォーミングは現実的ではない

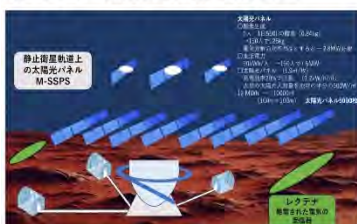
【テラウィンドウの外観/内観】



【人口重力施設外の農地】



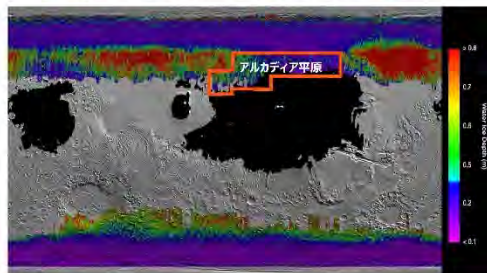
【エネルギー源としての太陽光発電】



【場所の選定】

生存基盤である「空気」「水」「安全性」「食糧」「エネルギー」を確保することが、火星社会を構築するうえで必要不可欠である。特に、酸素生成や食糧生産をするためには、「水」へのアクセスが近いことが最重要である。加えて、テラウィンドウを建設するうえで、傾斜やクレーターが少ない場所が好ましい。

上記条件に当てはまるのが、アルカディア平原である。



【火星入化】

対外関係：

- 「月その他の天体を含む宇宙空間は、主権の主張、使用若しくは占拠又はその他のいかなる手段によっても国家による取得の対象にはならない」とする宇宙条約を遵守する。

→初期は国際連合自身が施政権者となる信託統治を想定。ある程度発展した時点で「火星国」として独立。

→地球の一国家としての扱いのため、主権国平等の原則を適用。

→国際連合に加盟し、経済/社会/持続可能な開発の支援を、発展途上国として受け入れ続ける。

社会経済関係：

- 地球人による**宇宙開拓/宇宙観光のHUB空港的な役割**を果たす。
- 火星人は、宇宙船の燃料補給や修理、観光案内を担う。
- 地球の枯渇する資源採掘や、生命誕生の起源のための研究最前線を担う

火星入への分化と文化：

- 地球と異なる環境で生殖を続けると、世代を経る中で、**独自の進化**を遂げて、地球人とは異なる「種」に分化する可能性が考えられる。

→外見/身体機能の分化：

放射線に接する時間が圧倒的に長いので、放射線曝露に適応した**黒い皮膚**を有したり、低重力の環境から、**三半規管の発達・頭部の膨張**

→心の分化：認知機能の変化や独自の言語の獲得

外見の変化や、常に危険と隣り合わせの環境で生活するため、現在の地球人とは**違った価値観、生命倫理、宗教観**が形成・定着する可能性がある。

小規模コミュニティ&宇宙空間でのバーバルコミュニケーションの難しさに伴い、ノンバーバルコミュニケーション優勢の独自の言語を確立すると考えられる。

【結語】

「人類が火星にむかう」とことは、科学的知識の拡大、技術革新の推進、人類の生存圏の拡大、経済的・社会的発展という一般にいわれる目的以外にも、**人文科学的にも大変インパクトのある事業**であると考え

参考資料 5-7 有人宇宙学演習ポスター：小惑星 Psyche 班



第17回宇宙ユニットシンポジウム，京都大学，2024/2/6

小惑星Psycheにおける金属製錬と居住

福井開¹，和田茜²，外田悠生²，中井尚一³

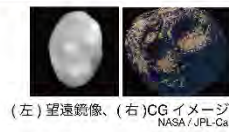
1 京大院工，2 京都府立大，3 京大院医 E-mail: fukui kai 78w@st.kyoto-u.ac.jp



基本情報

■小惑星 Psyche

直径約 252 km、小惑星帯に位置する
太陽系最大の M 型小惑星
金属からなる小惑星
2023 年 10 月、Psyche へ向かう探査機サイケが打ち上げ
2029 年頃に到着、観測予定
埋蔵貴金属量から、「1000 京ドルの星」とも
(京：兆の次の単位，1 兆の 1 万倍)



宇宙資源の供給源として注目

■宇宙資源利用

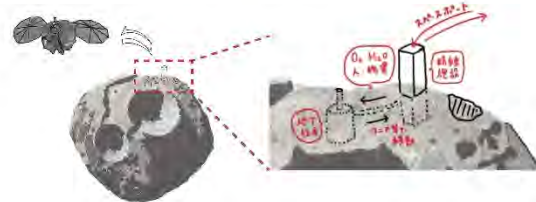
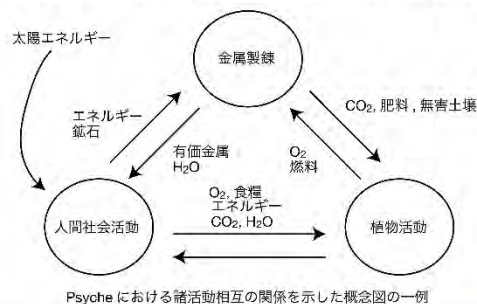
近年、月・火星のレゴリス（表土）や、極冠の水（氷）の利用が注目
背景：宇宙資源の現地調達・利用が宇宙開発にとって不可欠
e.g. 輸送コストの問題、地球資源の有限性 ...
将来、人類の宇宙活動が惑星間に展開する際、金属資源の獲得は重要

■有人小惑星鉱業

巨大な無人機で、小惑星ごと飲み込む採鉱・製錬方式も提案されているが
Psyche サイズには適用できない。また、有人小惑星鉱業の方法は未確立であるので
小惑星 Psyche における金属製錬と居住の在り方について検討した

コアコンセプト、全体像

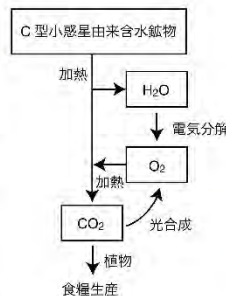
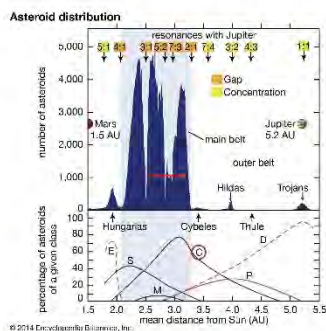
Psyche における社会を持続可能なものとするためには、
金属製錬プロセスを資源・エネルギーの循環に位置付ける必要がある



Psyche には大気が無く、微小重力であり、温度変化も激しい
気体の密閉、宇宙放射線の遮蔽、温度変化の緩和ができる地下への居住が得策
Psyche の密度の低さから存在が示唆されている、地下空洞を活用
地上と地下を繋ぐスペースポートは、外部への移動と、採鉱基地の役割を担う
スペースポート地下に製錬、発電、水生成、空気生成、食糧生産の設備を設置
居住区とスペースポートを結ぶパイプラインと移動手段を敷設

検討 ■水 (H₂O) の確保

M 型小惑星には水が存在しない可能性が高いため、Psyche 外部から水を得る必要がある。
Psyche は小惑星帯に位置するため、周囲に多数の C 型小惑星がある。C 型小惑星の含水鉱物は、有力な水の調達先の一つである。



■人口構成

南極観測隊の越冬隊を参考に、Psyche に暮らす 150 人の社会を構想した。
以下に、労働人口 115 人の内訳を示す。

役職 (大分類)	役職 (小分類)	人数(名)
Psyche 社会管理職	リーダー	1
	立法・行政・司法担当	5
	農業・機外モニタリング担当	5
社会維持事業 (Psyche 移住の目的)	採鉱担当	15
	採鉱・発電担当	25
	輸送事業担当	5
	Psyche 環境保全担当	5
	機外保全担当	5
生活維持事業	通信事業担当	5
	土木・建築担当	5
	医療・応急担当	4
	食料・調理担当	15
	教育担当	5
	文書担当	15

■採鉱・金属製錬

Psyche の表面は、金属とケイ酸塩の混合物
金属の構成は、

鉄隕石：Fe ~90%，Ni 5~10%，1% 以下の Co, P, S
硫化鉱物：トロイライト (FeS)，ペントラングライト ([(Fe, Ni)₉S₈])
CH/CB 炭素質コンドライト：含 Fe-Ni

鉄・ニッケルの硫化鉱物を製錬する必要

地上の鉄鋼・ニッケル製錬

鉄鋼製錬 ... ほぼ酸化鉄 (Fe₂O₃) の製錬、乾式製錬
硫化鉱・磁硫鉱の製錬実績は存在 e.g. 柘原鉱山 (91 年閉山)
ニッケル製錬 ... 硫化鉱が主、HPAL 法などで酸化鉱も製錬可能、湿式製錬
鉄の硫化鉱の製錬法を確立し、乾式と湿式を組み合わせた製錬

■居住区

居住区は、共有空間と個人の住居の二層構造となっている。
床材に磁性材料を使用し、電磁石を備える靴を履くことで擬似的な人工重力とする。そのため、成員はバッテリーを身に付けて生活する。



謝辞

本研究は、京都大学令和五年度後期大学院横断教育科目「有人宇宙学」における成果をまとめたものである。
京都大学大学院総合生命学館（思修館）SIC 有人宇宙学研究センターの土井隆雄特任教授、山敷康亮教授の
両名には助言を通じて多大な助言を頂きましたことを感謝申し上げます。

太陽系最大の氷の衛星ガニメデへの 人類の移住に向けた検討

小塚昌弘¹⁾、永田智季²⁾、松尾絢海³⁾、藤田真歩³⁾、麻田景人⁴⁾、軸屋心結⁵⁾

1)京都大学大学院・総合生存学館、2)京都大学大学院・工学研究科、3)京都大学大学院・農学研究科、
 4)京都大学・工学部物理工学科、5)京都大学・工学部工業化学科

●基礎情報

ガニメデ Ganymede：木星の第三衛星であり、
 太陽系内の衛星の中で、大きさ、質量ともに最大

表1：ガニメデの基本情報

赤道半径	2631.2(km) (地球の0.413倍)
質量	1.48E+23(kg) (地球の0.0247倍)
密度	1.936(g/cm ³)
太陽からの平均距離 (AU)	5.203(AU)
自転周期	7日3時間42.6分 (公転と同期)
表面重力	1.42 m/s ² (0.1449 G)
アルベド	0.43
表面気温	最低70K 最高152K 平均110K



図1：カッシーニ探査機撮影による木星とガニメデ
 (https://www.jbrites.com/alien-life-scientists-discover-evidence-flowing-water-mars-836961)



図2：ニューホライズンズ撮影
 (https://moonstation.jp/es/pex_world/New_Horizons/gallery.html)

●環境と資源

- ・薄い酸素が大気として存在
- ・地球より寒く、日中の表面温度は90 - 160 K
- ・外側から氷の外殻（推定厚さ150km）、液体の海（推定厚さ100km）、
- ・金属の核からなると考えられる
- ・地球の海よりも水量が多い可能性
- ・塩化ナトリウム、塩化アンモニウム等の塩類、有機化合物、二酸化炭素（固体）、プロパン（固体）等が表面に存在



図3：ガニメデの内部構造
 Sotin, Tobie 2004

●磁場

- ・太陽系で唯一磁場を持つ衛星
- ・ガニメデの赤道で719 nT（地球の約60分の1）
- ・ガニメデの軌道における木星の磁場強度は120 nT
- ・両磁極における固有磁場の強度は1,440 nT（地球の約30分の1）

⇒宇宙放射線の影響を軽減できる可能性

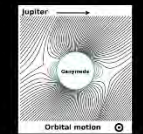


図4：ガニメデ自身と周辺の磁場
 http://www.igpp.ucla.edu/people/jmk/welso/Publications/98IE00227.pdf

●ガニメデ社会の目的と構成

- ・人類生存に最も必要な水と、人体に有害な放射線を防ぐ磁場のあるガニメデで、宇宙環境での人類の居住と進化の研究を行う。

- ・長期居住を行い、世代を重ねた人類がどのように進化するかを研究。

・社会の人口：150人

- ・宇宙居住と進化の研究者：21人
- ・長期居住に必要な活動：129人
- ・L（生命維持活動）：27人
- ・L（居住環境維持活動）：75人
- ・L（社会維持活動）：27人

●生命維持（医療）

<医療従事者>：30人

- ・医師、看護師、検査技師：各3人

遠隔医療は行わず、対面医療が基本



図7：遠隔診断システム
 https://iss.jaxa.jp/med/research/telemedicine/

医療機器で健康を管理。地球からも健康状態を管理し病気の早期発見による健康維持を行う。検査技師による医療機器の管理が重要。

●社会維持

<村長およびガニメデ議会>：3人

- ・村長1人・議員2人
- ・基本的には全会一致の精神で方針決め
- ・村長はガニメデでの祭事を司る（精神的支柱）
- ・村長は短周期で改選・役職から独立（独裁防止）

<警察（治安維持活動）>：3人

- ・小社会維持のための国連憲章などに則った最低限の治安維持

<教育者>：1人

- ・主に幼少〜小学校教育

<子ども>：20人

- ・宝、次世代を担う人々
- ・地球の環境に合わせた教育も行う

●宇宙環境での人類の居住と進化の研究案！

- ・ガニメデにおける生物の進化の研究
- ・ガニメデ環境（低重力）特有の医学・生物学研究
- ・ガニメデ環境（地形、地質）、環境の研究
- ・ガニメデの内部構造の調査/研究
- ・ガニメデ資源利用研究
- ・ガニメデの水（氷）を利用した海洋生態系の構築研究
- ・ガニメデの海を利用した海洋生態系の構築研究
- ・ガニメデ環境（低重力下）での農学、植物学研究
- ・水を用いた燃料研究（水素、酸素）
- ・地球外における少人数社会の維持に関する研究

●ガニメデのどこに、どんな基地を作る？

- ・極域：人体への影響がある重イオンが降り注ぐ可能性あり
- ・裏面：木星のプラズマの相互作用の影響を受ける（影響は不明）
- ・表面：木星のプラズマによる影響は無い

⇒磁場や木星プラズマの観点から表面（木星に向いている面）

極域を避けるため、緯度は赤道から±30°をターゲット



図6：ガニメデ基地イメージ図

●生命維持（農業・養殖業・食事）

<農業・養殖業従事者>：15人

- ・稲作・畑作・水棲生物、昆虫養殖
- ・栽培、養殖計画に基づき環境制御を行う
- ・作業はできるだけ自動化
- ・栽培計画・管理、機械のメンテナンス、自動化出来ない作業に携わる

<調理師>：3人

- ・基本的に食事は調理師がガニメデの住人150人全員分を準備する（食・食・食をイメージ）



図8：栄養価比較
 https://www.nhk.jp/p/kokusaishoudou/ts/8M689W8RVX/blog/bl/pk/p9E0Xy/bp/pfbq8qzLM

●ガニメデ暦を作ろう！

- ・木星の公転は地球の4,333日（およそ12年）
 →これをガニメデの1年（12モク（木））と定める
- ・自転・公転ともに7日3時間42.6分
 →これをガニメデの1シユウカンと定める
- ・1モク：グレゴリオ暦でいうところの1年
 1モクは353ニチ、地球と同じく4モクに一度閏年として354ニチ
 12モク（=1年）で約0.38ニチずれる
- ・12カゲツで1モクとし、1/3/5/8/12カゲツは30ニチ、
 2/4/6/7/9/10/11カゲツは29ニチとする

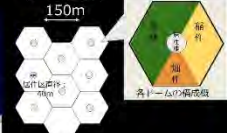
表2：ガニメデ暦とグレゴリオ暦の比較

	1日（1ニチ）	1週間（1シユウカン）	1月（1ツキ）	1年（12モク）	1年
地球	24時間	7日	28, 30, 31日	12月	12月
ガニメデ	24時間31.8分	7日3時間42.6分	29, 30ニチ	12ツキ	12年



図5：ガニメデの地質図
 Collins, G.C. et al. 2013
 https://pubs.usgs.gov/sim/3237/

ドーム直径：150m



- ・森林：60000m²
- ・稲作：40000m²
- ・畑作：20000m²

基地の建設方法



●居住環境維持

<発電所技術者>：30人

- ・発電設備の維持管理を担う

<設備維持技術者>：30人

- ・酸素、温度、湿度、気圧等の維持管理を担う
- ・各ドームに少人数を配置するなどのリスク分散する

<生産者/リサイクル業者>：15人

- ・資源不足が予想され、持続可能な社会の構築には植物を利用した生活用品の作製やリサイクル、物質循環が重要

●食糧調達！～栽培に向けて～

・ガニメデ表面は氷に覆われ、土壌がない

→水耕栽培

・水棲生物の養殖（動物性タンパク質）

畜産は飼料を考えると効率が悪い

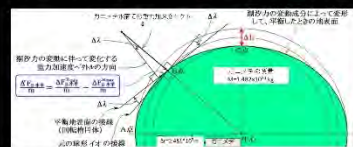
→水耕栽培と組合せたアクアポニックス



図9：アクアポニックスのシステム
 https://aquaponics.co.jp/about-aquaponics/

●潮汐力の利用！

条件：ガニメデと木星のみの系を考え、ガニメデが木星の周りを楕円軌道を描きながら公転するとする



よって、 $\Delta h = 4.932m$
 ※地球と月の場合は0.5m

→木星によって発生するガニメデの水面での潮汐力により、仮に水でおおわれていないと仮定すると、一回の公転で水位は約5m変動する。

→ガニメデの海を利用した潮汐力発電の可能性