参考資料 6-6
CDH_2022 年 3 月活動報告書_20230314_ver1.0
2023/03/14

CDH_2023 年 3 月活動報告書・3 月予定

発行者: 宇宙木材研究室 CDH 班

CDH_2023 年 3 月活動報告書_20230314

設計会議 #31

LS-Eng-CDH-018

Ver.1.0

宇宙木材研究室

CDH 班

CDH_2023年3月活動報告書・3月予定

2022/03/14

菊川祐樹　椋本暖　岸広登　高橋駿太　野木朔太郎

1.　はじめに

これは2023年3月14日のLignoSatチーム月定例報告会において、CDH班が2月中に行ったこと、3月中に行うこと、各班員の担当等をまとめたものである。

2.　元々予定していた通り2月に行ったもの

2-1 EMVacuum Test

4-2 Thermal Vacuum Test

3.　追加で2月に行ったもの

3-1 Battery フル充電 Labview 作成

4.　3月の予定

4-1 EM 真空、熱真空試験報告

4-2 新規アンテナ基板発注

に沿って報告していく。

2. 元々予定していた 2 月に行ったこと

2-1 EM Vacuum Test

【進捗】

完了

【理由】

京大真空恒温槽試験実施の前段階として京大で実験する

【詳細】

岸、高橋、野木、菊川担当。九工大で衛星組み立て後に行う Thermal Vacuum Test の試験把握、日程などの調整を行う。

2023/3/5~3/7 に実施。試験日は菊川が主導の下、岸、高橋、清水先生、細辻、中村、阿戸、野間、星川、福王、伊藤、山本が試験の記録者として参加、実験を終えた。実験手順書などを清水先生主導のもと訂正し、記録用紙の下実験を進めた。図 1 は実験中の LignoSat の様子である。大気中の試験と真空中での試験の 2 種類を行い、無事記録完了した。詳しい解析は後日行う予定。

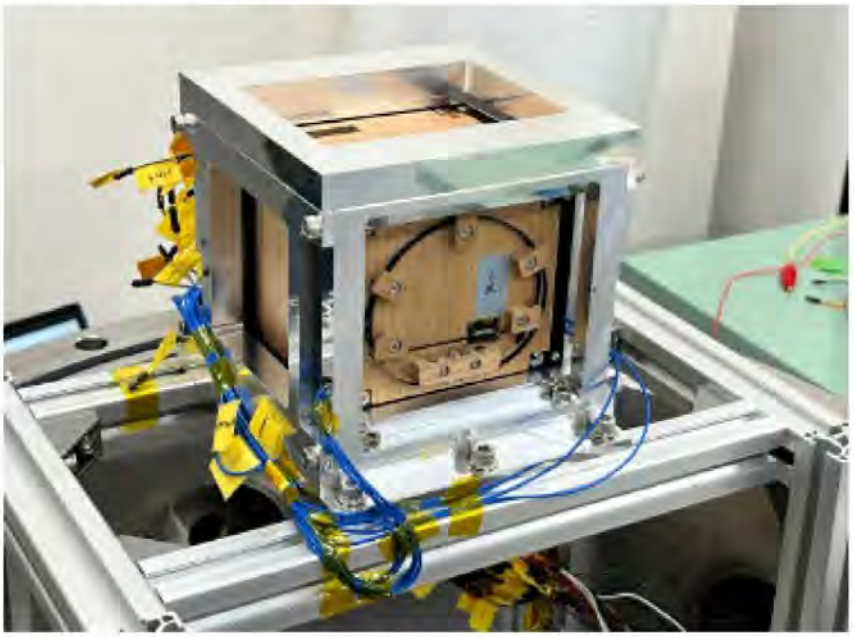


図 1　京大での EM 真空試験の LignoSat の様子

今回 EM 真空試験を行う際に、真空中にする時間があまりもかかるという事態が起こった。10e-2 で落ち着く空気の粗挽きの段階で図 2 にあるチェンバーと外部をつなぐコネクタ部分の締めが緩く、空位漏れを起こしていることが発覚した。きつく締めると無事気

圧は低下していった。

図 2　空気漏れが確認できたコネクタ

下図は衛生試験の大まかなブロック図である。

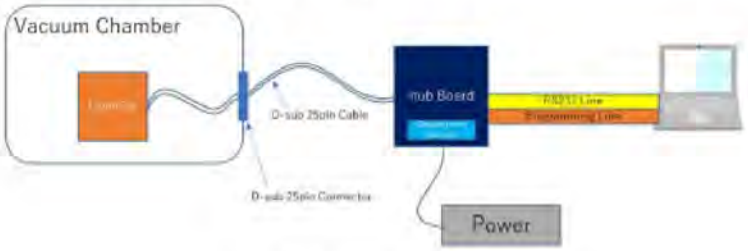


図 3　EM 真空試験の概要

2-2 Thermal Vacuum Test

【概要】

継続中

【詳細】

CDH が計画。2023/03/11~03/16 に試験。すべての班が試験実施に参加。九州工業大学の Pett Chamber をお借りし、低圧かつ-20℃-60℃までの温度変化に対し衛星が正常に動作することを確認する。衛星には実際の運用時と同じプログラムを実行させ、地上局との通信で衛星のデータをチェックする（図 4)。60～－15℃までを 3 サイクルし、衛星がきちんと動くかを HK データと MISSION データ、RAB データより試験する。真空試験の際と違い、

・RAB のコネクタ変更

・地磁気データの追加

・ひずみゲージの取得データ追加

などの改良がなされている。衛星の全体出力データは図 4 になり、これらの 16 進数データを変換して、グラフ化を試みる。

```
xxx90sec passedxxx

sending SYNC time to MBP
Time received from RESET
34:32:06.0001
FAILURED GETTING ACK From MBP
FAILURE sending time

CW ANS:aa,50,00,00,00,20,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,bb
GET FAB SENSOR DATA
03,86,03,7c,03,4c,03,30,05,23,03,ed,04,07,03,f6,03,cd,03,e7,03,fe,01,01,01,01,01,1c,7e,98,01,95,98,07,90,48,00,00,00,
00,00,00,
RESET DATA OBTAINED
37,32,06,00,01,94,07,01,01,07,
ADCS DATA not received
00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,
00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,
Collecting HK and Making CWFormat Done

HK data:
33,33,37,32,06,00,01,aa,aa,aa,03,86,03,7c,03,4c,03,30,03,cb,05,23,03,ed,04,07,03,f6,03,cd,03,e7,03,fe,01,01,01,01,01,
1c,7e,98,01,95,98,07,90,48,00,00,bb,bb,bb,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,
00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,00,
,07,01,01,07,00,44,44
CW:
9879484006

CW SAVED
SENSORS DATA SAVED ON FLASH

Storeing Address Data in Flash
AD COUNTER:0000010a
ADDRESS DATA STORE DONE:00043000
send data to RAB is 0x30
command "0x30" is sent!
data_from_RAB[0]=0x90
data_from_RAB[1]=0x05
data_from_RAB[2]=0x05
data_from_RAB[3]=0x05
data_from_RAB[4]=0x38
data_from_RAB[5]=0x05
data_from_RAB[6]=0x3b
data_from_RAB[7]=0xfe
data_from_RAB[8]=0x38
data_from_RAB[9]=0xff
data_from_RAB[10]=0x42
data_from_RAB[11]=0xf7
data_from_RAB[12]=0x8d
sending 119
receive address1
get address from mission
receive address2
get address from mission
ZHdata_H is 255!
ZHdata_L is 221!
receive address1
get address from mission
receive address2
get address from mission
ZVdata_H is 128!
```

図 4　出力される衛星データ

図 5 は九州工業大学での真空恒温槽に入る LignoSat の様子で熱電対を図 6 のように衛星に張り付け、

・各面の内部±x±y±z
・BatteryBOX 外部
・BPB
・MISSION 基板

の三か所に張り付けている。これらの熱電対で測った温度が九州工業大の PC で図 7 のように出力される。

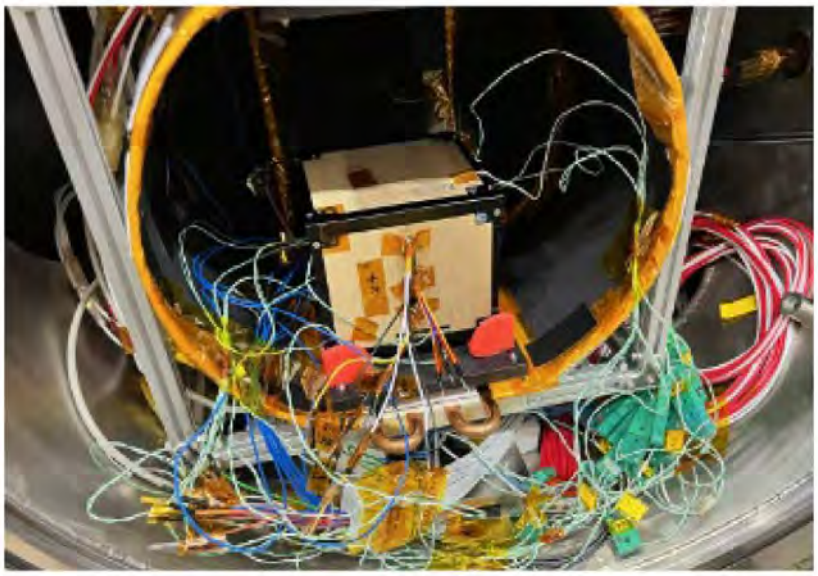


図 5　九工大のチェンバーに入る LignoSat の様子

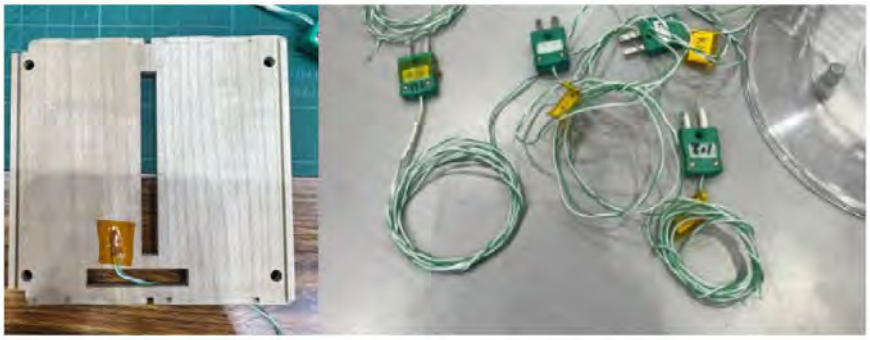


図 6　木造パネルに張り付けられた様子（左）と熱電対（右）

図7　出力される熱電対データ（60℃時）

図 8　出力される熱電対データ（-15℃時）

また九州工業大学の真空恒温槽に接続するための延長ケーブルが市販のものでは電圧降下が大きすぎて使えないという問題が発生したので、図 9 に示すような延長ケーブルを菊川が自作した。九州工業大で問題なく動作することを確認している。

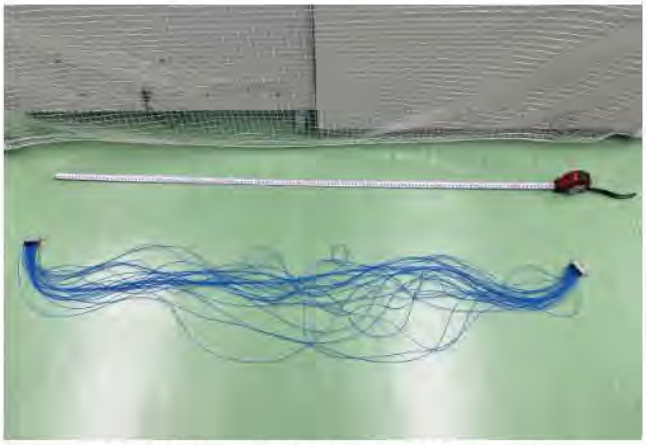


図 8　自作した Dsub25PIN1.5m 延長ケーブル

3、適宜追加で行ったこと

3-1 Battery フル充電 Labview 作成

【概要】

Battery を自動でフル充電する機構の設置

【詳細】

菊川が担当。EPS の福王と協力し、バッテリーを BatteryBOX に入った状態でフル充電するプログラムを作成した。

土井先生より衛生試験の前に Battery をフル充電した方がよいという指摘があったため、実施を決定。3/4 日の深夜と 3/11 日の深夜に Battery のフル充電を実施、両者とも 4.57V 付近まで充電完了し、各種試験に臨んだ。

15800.95	4.57742	0.9983	4381.691	27.41766	2023/3/4	5:49:18
15801.95	4.576764	0.9984	4382.408	27.39286	2023/3/4	5:49:19
15802.95	4.576435	0.9983	4382.246	27.37534	2023/3/4	5:49:20
15803.95	4.576435	0.9983	4382.524	27.38351	2023/3/4	5:49:21
15804.95	4.576764	0.9983	4382.802	27.39371	2023/3/4	5:49:22
15805.95	4.576435	0.9983	4383.079	27.37083	2023/3/4	5:49:23
15806.95	4.576764	0.9984	4383.795	27.33917	2023/3/4	5:49:24
15807.96	4.576107	0.9983	4383.634	27.3025	2023/3/4	5:49:25
15808.96	4.576764	0.9983	4383.911	27.33545	2023/3/4	5:49:26
15809.96	4.576764	0.9983	4384.189	27.31451	2023/3/4	5:49:27
15810.96	4.576764	0.9983	4384.466	27.33487	2023/3/4	5:49:28
15811.96	4.575779	0.9983	4384.744	27.30973	2023/3/4	5:49:29

図 9　バッテリーの充電ログの様子

4．3月の予定

4-1 Vacuum Test　Thermal Vacuum Test　報告書作成

【概要】

各試験で得られたHKデータや熱電対データのまとめ、報告

【詳細】

RABやMISSION基板からの出力はMISSION班に、バッテリーの電圧電流温度はEPS班に解析を頼む予定。熱電対による温度測定データの解析は、現状担当者不明の為CDHが執り行う。

4-2 新規アンテナ基板発注手伝い

【概要】

アンテナ基板の修正

【詳細】

菊川が担当。COMの桑原と確認し、12PINのPIN配当に問題が確認されたアンテナ基板を修正、相模通信に発注する。

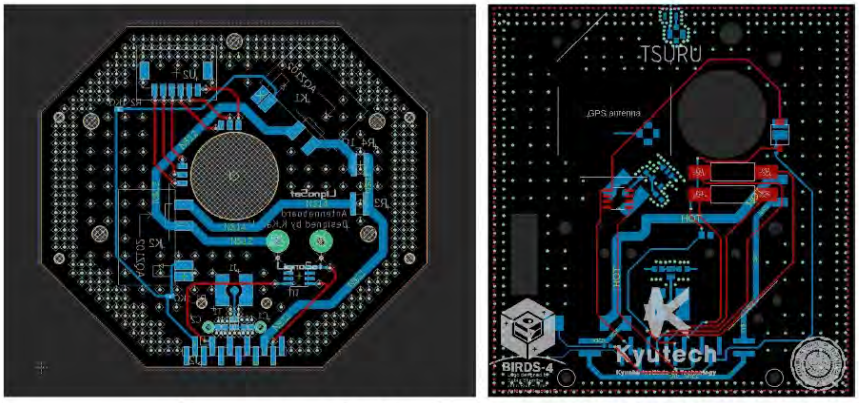


図10　アンテナ基板（右　LignoSat　　左　BIRDS）

参考資料 7
Arduino 講習会
清田朋和

1 はじめに

今回は CO_2 の計測と SD カードへの記録について学びましょう。

2 CO_2の計測（K30センサーについて）

ポプラ育成実験で非常に重要になるパラメーターが、CO2 濃度です。実験では、チャンバー内を約 500 ppm に制御することを目標としています。今回は、CO2 の測定方法について学びましょう。

実験時、Arduino による CO2 計測で使用しているセンサーは「K30」です。このデータシートも配布します。興味のある人はぜひ読んでみましょう。今回の講習では、すでに配線まで完了しているセンサーを使ってもらいますが、実際にはこのデータシートを確認して必要なピンと配線を半田づけする必要があります。データシートには他にも精度や使用可能温度など大切な情報が多く掲載されています。

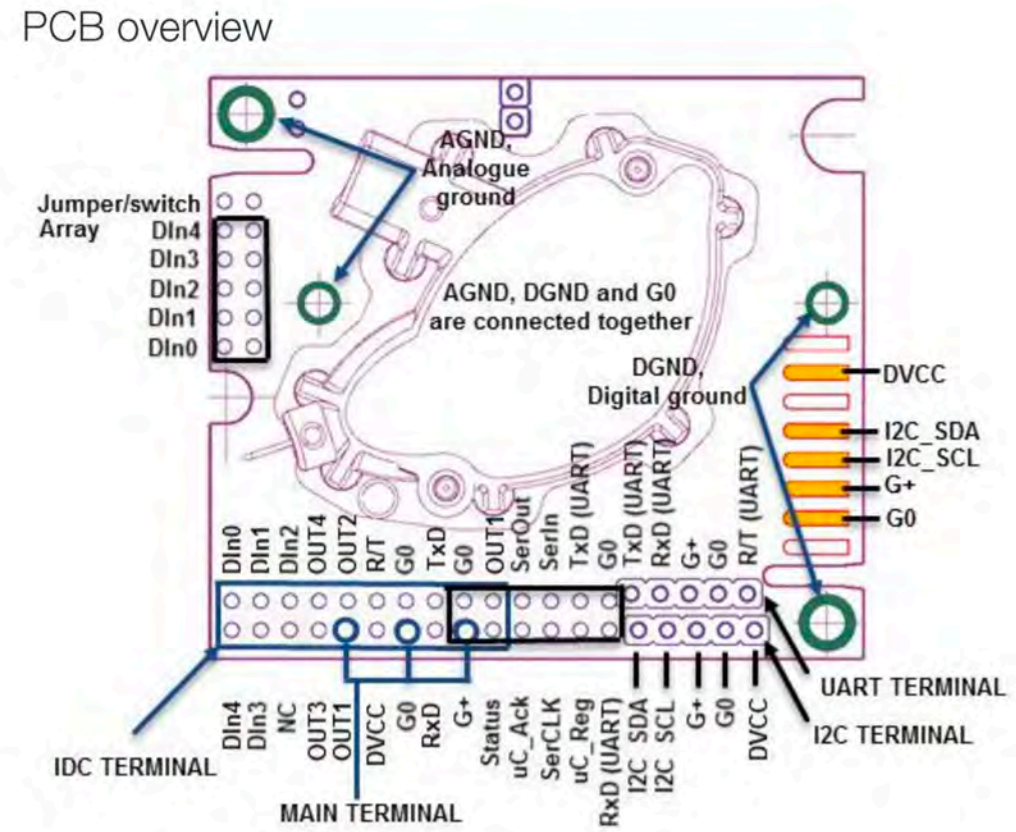


図 1. K30 センサーの PIN 配置（K30 データシートより）

「アナログ出力」と「UART 通信による出力」を行います。アナログ出力の場合には、「G0、G+、OUT2」UART 通信による出力の場合には、「G0、G+、RxD、TxD」の PIN が使われていることを確認しましょう。

3 CO2の計測（アナログ出力）

まずは、電圧値を利用して、濃度を測定する方法について紹介します。CO2 濃度のように連続デ

ータを取得する際によく利用されるのが、「出力の電圧値を、測定したい連続データに対応させる方法」です。電圧値を濃度に応じて変化させて出力し、それをプログラムで濃度値に戻すというやり方です。今回は「OUT2」から電圧値が出力されます。

プログラム作成にあたり、追加でライブラリをダウンロードする必要があります。まずは、以下の URL を開きましょう。自動で ZIP ファイルのダウンロードが始まります。

http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN126-K3x-sensor-arduino-uart.zip

次に、Arduino IDE に戻って、「スケッチ」内の「ライブラリをインクルード」、「ZIP 形式のライブラリをインストール」を選択します。あとは、ダウンロードしたところのフォルダーに移動して、先ほどダウンロードした ZIP ファイルを選択すれば OK です。

プログラムは、「sketch_3_1_LCD_RTC_DHT_K30_v1.0.ino」を用います。プログラムをダウンロードして見てみましょう。プログラムで大事な部分を紹介します。特に K30 センサーに関連する部分を確認しましょう。

```
const int analogPin = A0;
```

K30 センサーの電圧値を A0 pin で受け取るために変数を定義しています。

```
int ppmV = readPPMV();
```

プログラムの最後で定義した関数「readPPMV」を用いて CO2 濃度を取得します。関数の詳細は実際に読んでみましょう。（analogRead が使われていますね。）

それでは、アナログ出力の場合の配線を組んでみましょう。長い配線がついている K30 センサーを用います。これを見本のように取り付けましょう。（赤、黒の配線は今まで通り「5V」、「GND」に繋ぎ、青い配線を「A0」に繋ぎます。）これで、配線の準備は完了です。

最後に、プログラムをコンパイルして、書き込みましょう。すでに LCD の設定もされているプログラムですので、確かに CO2 濃度が時刻の横に出力されている様子が分かります。

4 CO2の計測（UART通信による出力）

K30 では、電圧値を読み取って CO2 濃度を記録するアナログ出力の他に、UART 通信を用いて濃度を出力する方法があります。これについても解説します。実験装置では UART 通信による出力を行なっています。

以前「SDA」や「SCL」pin が出てきたときに、「I2C 通信」という言葉を出しました。これはシリアル通信の一種ですが、UART 通信もシリアル通信の一種です。（詳しくは「非同期型シリアル通信」と呼ばれます。I2C 通信は「同期型シリアル通信」に分類されます。）

UART 通信では、「Rx」と「Tx」という信号ラインが使われます。それぞれデータ受信用、データ送信用のラインになっています。K30 側にも Arduino 側にも受信要信号ライン、送信用信号ラインが存在しています。そのため、実際に配線するときは、「Rx」と「Tx」、「Tx」と「Rx」を接続するようにしましょう。

それではプログラムのチェックです。「sketch_3_2_LCD_RTC_DHT_K30_v1.0.ino」をダウンロードして下さい。先ほどと同様に、K30 に関連する部分を中心に確認してみて下さい。重要な部分は以下です。

```
kSeries K_30(8,9);
```

これは kseries.h に含まれている関数の 1 つです。これで Arduino の 8 番 pin を Rx、9 番 pin を Tx とします。つまり、8 番 pin をセンサーの Tx、9 番 pin をセンサーの Rx と繋げば OK です。

```
int ppmV = K_30.getCO2('p');
```

これも kseries.h に含まれている関数の 1 つです。これで K30 センサーから、ppm を単位として CO2 濃度を取得します。配線はプログラムと比べながら自分で組んでみましょう。最後にコンパイルと書き込みをして正しく動作していることを確認すれば完了です。

5 SDカードへの記録

それでは最後に今まで準備してきた温湿度、時刻、CO2 濃度を SD カードに記録しましょう。育成実験では、SD カードにデータを記録し、実験終了後にそのデータを PC に移しています。SD カード用の配線は写真のようになります。

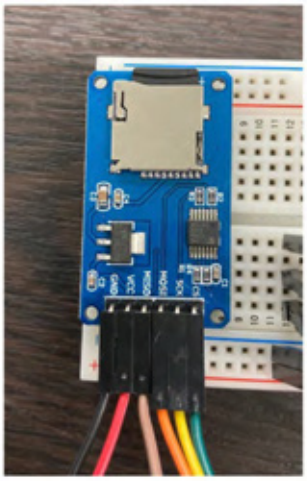


図 2. SD カードモジュールの pin 配置

今までと配線の名前が違いますが、これは「SPI 通信」という方式の際に必要なものです。（I2C 通信と同様に同期型シリアル通信の 1 つです。）それぞれ Arduino の何番 pin と接続するかが決まっていますので、ルールに従って配線をすれば大丈夫です。（SPI 通信の詳しい内容を知りたい人は調べましょう。）

SD カードに記録する際には、今までインクルードしてきたモジュールで十分です。プログラムは、「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v2.2.ino」（K30 アナログ出力用）または「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v3.2.ino」（K30 UART 通信用）を用いましょう。プログラムの大事なポイントを整理します。

```
#include <SD.h>
```

最初に SD カードを記録ためのヘッダーファイルをインクルードしています。

さらに、setup で SD カードが入っているかどうかで LCD の出力を変えています。これで SD カードが正しく挿入されているか、SD カード関連の配線が正しく組まれているかが確認できます。（講習の初回で扱った、if 文ですね。）

```
File dataFile=SD.open("datalog.txt",FILE_WRITE);
dataFile.print(" ");
```

SD カードへの書き込みはこの命令を用います。Serial.print と同じ要領です。分かりやすいですね。

実際にコンパイル、書き込みをしましょう。そして microSD に正しくデータが記録されていることを確認しましょう。

ここまでで計測関連の事項は一通り学び終えました。これまでの事項を全てまとめたプログラ

ムは：

「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v2.2.ino」（K30 アナログ出力用）
「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v3.2.ino」（K30 UART 通信用）

です。先ほど SD カードの章で用いたものです。自分でいろいろな工夫を加えたり、さらに分かりやすいプログラムを目指したりと、色々遊べると思います。

K30 センサーのライブラリに関する参考 URL：
http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN126-K3x-sensor-arduino-uart.pdf
http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN102-K30-Sensor-Arduino-I2C.pdf

参考資料 8-1
第 1 回宇宙木材利用シンポジウムプログラム
2023 年 3 月 22 日

第 1 回宇宙木材利用シンポジウムは、世界で初めて宇宙での木材利用と樹木の育成に焦点を当てたシンポジウムです。皆さんの参加をお待ちしています。

10:00-10:05 開会の辞 土井隆雄（京都大学）
10:05-12:00 第 1 部 宇宙における木材の利用 司会：村田功二（京都大学）
A. 木造人工衛星の開発
曽束元喜（京都大学）：超小型木造人工衛星 LignoSat の概要
岸広登（京都大学）：超小型木造人工衛星 LignoSat の衛星全体システム
桑原和暉（京都大学）：超小型木造人工衛星 LignoSat の通信システム
池田紘輝（京都大学）：超小型木造人工衛星 LignoSat の電力システム
伊藤駿冶（京都大学）：超小型木造人工衛星 LignoSat のミッション系開発の現状と展望
細辻一（京都大学）：超小型木造人工衛星 LignoSat の構造
B. 木材の宇宙曝露試験（ExBAS）実験速報
村田功二（京都大学）：木材の宇宙曝露試験(ExBAS)の目的と現状
山敷庸亮（京都大学）：宇宙放射線と木造人工衛星－木材の特性を考えて
中村栄三（岡山大学）：惑星物質総合解析システム(CASTEM)の応用：リュウグウから木材へ
12:00-13:30 昼食休憩
13:30-15:00 第 2 部 宇宙における樹木の育成 司会：池田武文（京都府立大学）
A. 低圧下における樹木の育成
池田武文（京都府立大学）：火星での樹木育成について
清田朋和・中村拓海（京都大学）：低圧下樹木育成実験装置について
遠藤早緒里（京都大学）・大森香蓮（同志社大学）：ポプラ育成実験について
B. 微小重力下における樹木の育成
馬場啓一（京都大学）：疑似微小重力下における樹木の成長と形態形成－1D クリノスタットを用いて
海野大和（住友林業）：疑似微小重力下における樹木の成長と形態形成－3D クリノスタットでの挑戦
15:00-15:30 休憩
15:30-17:30 第 3 部 宇宙木材利用の展望 司会：苅谷健司（住友林業）
A. 極限環境における木材利用
中嶋一郎（住友林業）：森と木の価値を最大限に活かす研究開発－社会の脱炭素化への貢献
秋元茂（ミサワホーム）：南極での移動ユニットの実証実験について
宮藤久士（京都府立大学）・山田竜彦（国立研究開発法人森林研究・整備機構）： 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
B. 宇宙木材産業の展望：パネルディスカッション 司会：仲村匡司（京都大学）
宮藤久士、中嶋一郎、秋元茂、山敷庸亮
17:30-17:35 閉会の辞：根本孝明（住友林業）

参加希望者は、次のメイルアドレスに「宇宙木材利用シンポジウム参加希望」と書いてお送りください：
spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

参考資料 8-2
第１回宇宙木材利用シンポジウム講演
曽束元喜

第1回宇宙木材利用シンポジウム

超小型木造人工衛星LignoSatの概要

2023/03/22

京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 M2

曽束元喜

LignoStella project

1

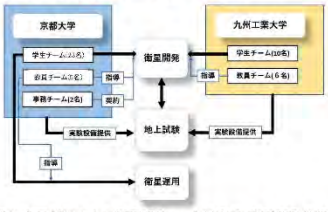
目次

1. 開発体制
2. 本プロジェクトの意義
3. ミッション詳細
4. 仕様
5. 地上局システム

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 2

1. 開発体制

代表機関: 京都大学大学院 総合生存学館
SIC有人宇宙学研究センター 宇宙木材研究室



京都大学は今回が初の人工衛星開発 → 人材育成・衛星開発技術力強化
九州工業大学は鳳龍2・4号、BIRDS-1・2・3・4など多数の衛星開発・打ち上げ・運用実績あり

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 3

1. 開発体制

衛星バスシステム
- ✔ 構体系 (Structure)
- ✔ コマンド・データ処理系 (Command & Data Handling: CDH)
- ✔ 電源系 (Electrical Power Subsystem: EPS)
- ✔ 通信系 (Communication)

開発学生チーム

✔ ミッション系 (Mission)

計5つの京大学生チームにより，設計開発を担当

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 4

2. 本プロジェクトの意義

宇宙空間における人類の持続可能社会の創造

植物の宇宙利用・宇宙環境耐性に関する研究

✔ 木材資材の長期宇宙利用可能性
- 長期真空暴露実験
- クリープ試験

K. Miki et al., SA6000127022 (2018).

社会基盤材料としての木材
- 木材加工法の技術的価値
- カーボンニュートラル社会実現への貢献（林野庁HPより） etc.

https://kiwa.co.jp/project/international-student/

長期的な持続可能社会の形成を目指す上で，木材は有用である

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 5

2. 本プロジェクトの意義

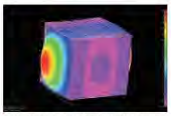
超小型（1U）木造人工衛星「LignoSat」

木材を宇宙で利用できることの技術実証が目的

構体系バスシステムをほぼ全面的に木造化
概念設計に基づき，実現可能性を検討
- ✔ 木造構体初号機の製作
- ✔ FEM解析による固有振動数解析

宇宙機構造部材としての木材の信頼性実証

宇宙材料としての木材利用法の提唱
木材産業の新たな活躍の場の創出



宇宙開発を通じたカーボンニュートラル実現へ

M. Sotsuka et al., JSASS-2019-4161 (2019).

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 6

3. ミッション詳細

1. 木造構体内部（木板内側）のひずみの経時的測定
2. 木造構体内部における多点温度計測
3. 木造構体内部における地磁気測定
4. 衛星内部のコンピュータに生じるSEUのカウント
5. 単一周波数帯（UHF帯）によるアマチュア無線通信サービス

➡ 宇宙における木材の物性変化を経時的かつ*in situ*で捉える

達成目標

ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
ISS放出後，地上でHKデータ（CW）受信	CW・パケット信号を6ヵ月間受信し，各ミッションデータ獲得 アマチュア無線家との交信成功	フルサクセス内容が6ヵ月間以上継続的に成功

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 7

4. 仕様

2023/03/22 Motoki SOTSUKA / Kyoto Univ. 8

ハードウェア設計

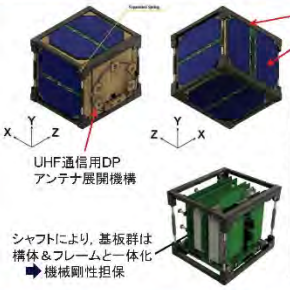
LignoStella project

木造構体

✔「留形隠し蟻組接ぎ」: ネジや接着剤を使わず十分な剛性を確保
✔ 構体各所に貫通孔を設け，衛星表面実装部品と内部電子基板との電気的インターフェースを確保

ハードウェア設計

LignoStella project



主要諸元

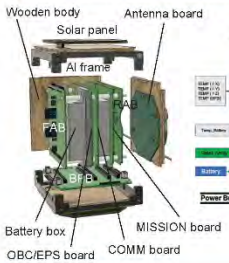
項目	内容
運用期間	6ヵ月以上
軌道	高度約400 kmのISS軌道
サイズ	1U*
質量	1.33 kg以下
バッテリー	Ni-MH（3S2P）
周波数	Uplink/Downlink: 435 MHz帯（UHF帯）
発電量	約1400 mW

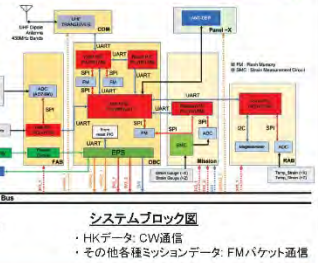
*100 mm × 100 mm × 113.5 mm

ソフトウェア設計

LignoStella project

BIRDSバスプラットフォーム（九州工業大学）を利用し，信頼性を向上





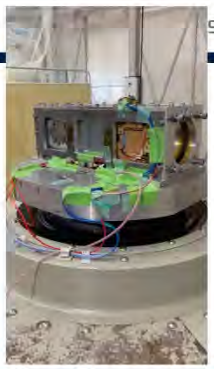
システムブロック図
・HKデータ: CW通信
・その他各種ミッションデータ: FMパケット通信

LignoStella project

ISSからの衛星放出

LignoStella project

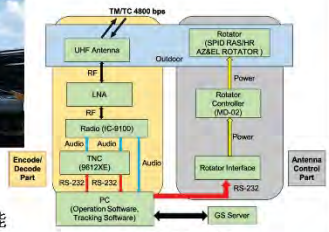
振動試験
@九州工業大学



5. 地上局システム

LignoStella project

UHF/VHF帯用アマチュア無線通信局@京都大学
（北緯35.03度，東経135.79度）



アマチュア衛星の
自動追尾・交信が可能

地上局システム系統図

LignoStella project

ご静聴ありがとうございました

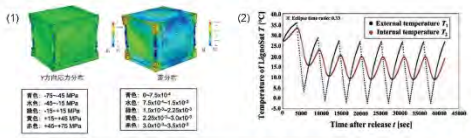
各種解析例

LignoStella project

(1) 構造解析(FEM)
木造構体の応力・歪み分布調査
➡アルミフレームに集中し，木造構体への影響は小さい

(2) 熱解析
熱平衡方程式により，宇宙空間での衛星表面＆内部温度変化を解析
➡温度変化は軌道投入後すぐに安定し，搭載機器の使用温度の定格範囲内に収まる

(3) その他各種解析
電力・通信解析などにより，問題なく運用可能であることを示した（詳細略）
軌道上寿命解析など，今後さらに検討予定



参考資料 8-3
第１回宇宙木材利用シンポジウム講演
細辻一

LignoStella project

第1回宇宙木材利用シンポジウム

超小型木造人工衛星 LignoSatの構造

京都大学
木造人工衛星開発学生チーム STRUC班
細辻一　遠藤早緒里　木村拓人　中村拓海

組み立ての様子

LignoStella project

構造紹介

EM(Engineering Model)

- 木造構体
- アルミフレーム
- 内部構造

LignoStella project

木造構体

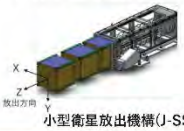
6枚の木板から成る木箱状構造

伝統技法
「留め型隠し蟻組接ぎ」

LignoStella project

アルミフレーム

放出用レールを兼ねた
アルミニウム製フレーム



小型衛星放出機構(J-SSOD)

LignoStella project

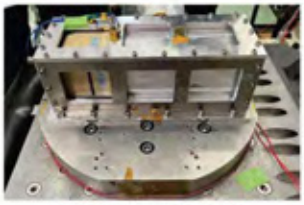
内部構造

各基板は二方向のシャフトを用いて木造構体、アルミフレームと固定される

LignoStella project

構造強度評価

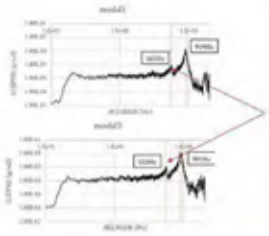
- 振動試験
- 構造解析



九州工業大学振動試験機

振動試験

打ち上げ時の振動に
対する耐久性の確認

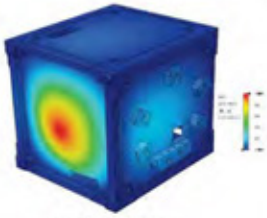


振動応答図

ランダム加振前後の
振動応答ピーク（固有振動数）
を確認する

要求条件（JAXA提示）

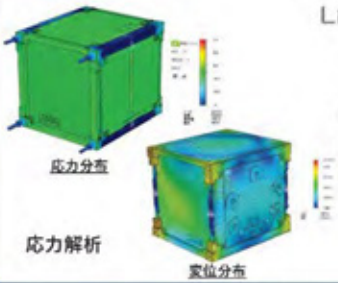
固有振動数60Hz以上



固有振動数解析

構造解析

有限要素法（FEM）
による応力、固有振
動数の計算

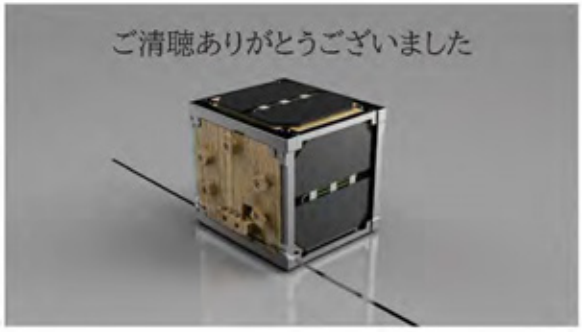


応力分布

変位分布

応力解析

外部荷重、ボルト締付力
による応力が材料の
規定値未満であることを
確認する



参考資料 8-4
第１回宇宙木材利用シンポジウム講演
池田武文

宇宙木材利用シンポジウム @京都大学
2023/03/22

第2部 宇宙における樹木の育成

宇宙における植物研究の現状

- 国際宇宙ステーション ISS等　宇宙船内での植物生理
  作物栽培
- 環境として　重力;宇宙船内の微小重力
  火星は約1/3G（月は約1/6G）
  気圧;火星は約6/1000気圧（月は極高真空）
- 月面農業　→　宇宙農場

ISS および「きぼう」日本実験棟で実施された植物生理研究

- 宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構および姿勢制御機構解明
  大阪府立大学　上田純一
- 植物の重力場依存的成長制御を担うオーキシン排出キャリア動態の解析
  東北大学　高橋秀幸
- 植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証
  東北大学　高橋秀幸
- 重力による茎の形態変化における表層微小管と微小管結合タンパク質の役割
  大阪市立大学　曽我康一
- 植物の抗重力反応機構–シグナル変換・伝達から応答まで
  大阪市立大学　保尊隆享
- 微小重力下における根の水分屈性とオーキシン制御遺伝子の発現
  東北大学　高橋秀幸

- 重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構
  大阪市立大学　吉村和泰
- 微小重力環境における高等植物の生活環
  富山大学　神坂盛一郎
- 微小重力環境下におけるシロイロナズナの支持組織形成に関わる遺伝子群の逆遺伝学的解析
  東北大学　西谷和彦
- 植物の抗重力反応における微小管–原形質膜–細胞壁連絡の役割
  大阪市立大学　保尊隆享
- 植物細胞の重力受容の形成とその分子機構の研究
  金沢工業大学　辰巳仁史
- 宇宙におけるコケ植物の環境応答と宇宙利用（スペース・モス）
  北海道大学　藤田知道

A. 低圧下における樹木の育成

池田武文（京都府立大学）：火星での樹木育成について
清田朋和・中村拓海（京都大学）：低圧下樹木育成実験装置について
遠藤早緒里（京都大学）・大森香蓮（同志社大学）：ポプラ育成実験について

B. 微小重力下における樹木の育成

馬場啓一（京都大学）：
　擬似微小重力下における樹木の成長と形態形成—1Dクリノスタットを用いて
海野大和（住友林業）：
　擬似微小重力下における樹木の成長と形態形成—3Dクリノスタットを用いて

宇宙木材利用シンポジウム @京都大学
2023/03/22
第2部 宇宙における樹木の育成

火星での樹木育成について

京都府立大学　池田　武文

火星での樹木育成研究の背景

火星での再生可能な資源生産 → 木材

火星での樹木育成（森林）
↑ ?
Terraforming

- 約0.01気圧
- 96% CO_2
- 平均気温－63℃（全球）
- 日較差 >100℃
- 約1/3G
- 高レベルの放射線

樹木を育てるため、地球と同じ環境をつくる必要があるのか？ → 樹木の生育条件を探る

JAXA 月面農場ワーキンググループ検討報告書　2019

https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=2797&item_no=1&page_id=13&block_id=21

植物工場のノウハウを発展させる

1）環境制御；光、水、大気等の制御、栽培植物に適した環境
現地調達、地球からの持ち込み最少化
電力：太陽光
光：LED
太陽光（可視光、赤色光を透過できる新素材、
紫外線や隕石からの防御）
大気：空気圧、分圧の調節
温度調節

2）無人化技術；栽培環境の維持、播種や収穫に至るまでの植物モニタリング、無人化・ロボット制御技術等

3）リサイクル；土壌改良、限られた資源の再利用（リサイクル）、非可食部や排泄物などのリサイクル

4）全体システム；システム全体の検討

宇宙農業の現状

- 宇宙船内のスペース　制約
  比較的小さな栽培装置を用いた植物生理学的研究が主流
- 有人宇宙活動を長期的・持続的にする技術の1つとして食料生産技術
  環境制御・自動化・リサイクルがキー　地産地消
- 実験施設
  閉鎖系生命維持システム（Controlled Ecological Life Support System, CELSS）
  生命維持システムに生物を利用する大規模な生物再生型生命維持システム
  （Biogenerative Life Support System, BLSS）
  トマト、ジャガイモ、コムギ、ダイズ、ピーナツ、レタス、キャベツ、サツマイモ、イネ、
  カリフラワー、ラディッシュなど

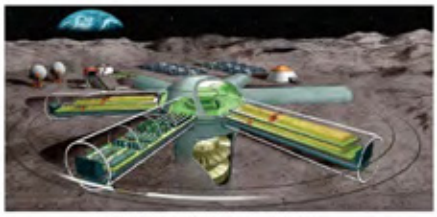
NASA の過去の閉鎖生態系試験設備1）
A) Ames Research Center Closed Chamber System B) Purdue University Minitrons
C) Johnson Space Center Variable Pressure Growth Chamber
D) Kennedy Space Center Biomass Production Chamber

Bioregenerative Life Support Systems Test Complex (BIO-Plex) 10)
NASA ジョンソン宇宙センターに建設の4 人が1 年間滞在できる大型有人設備として建設された。
A) View of exterior B) View of interior C) View of interior

NASA 植物栽培装置 Advanced Plant Habitat (APH) 「きぼう」内に設置
A) APH 内で生育するコムギ、B) APH から取り出したScience Carrier とコムギ
C) APH からコムギが生育したScience Carrier を取り出す金井宣茂飛行士 提供 NASA

環境科学技術研究所(IES)内の閉鎖型生態系実験施設(CEEF)の外観および内部

月面農場2



月面農場全体イメージ（100人規模）
モジュールを組み合わせる

おわりに

・モジュールを基本

人の活動モジュール内は1気圧

植物育成モジュール内は低圧
→ 外気圧との差をできるだけ小さく
構造負荷を小さく、リークを最小に
⇩
どの程度の低圧下で生育可能かを知る

・テラフォーミング
森林形成・林業 → 生態系の構築

火星での樹木育成研究の背景

火星での再生可能な資源生産 → 木材

火星での樹木育成（森林）

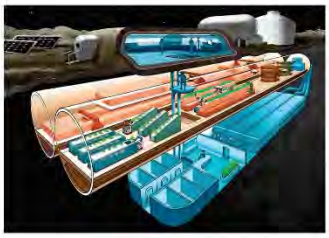
↑ ?

Terraforming

- 約0.01気圧
- 96% CO_2
- 平均気温－63℃（全球）
- 日較差 >100℃
- 約1/3G
- 高レベルの放射線

樹木を育てるため、地球と同じ環境をつくる必要があるのか？ → 樹木の生育条件を探る

月面農場1



月面農場全体イメージ（6人規模）

環境要因の受容と植物の反応

根における重力の感知

- アミロプラスト（デンプン粒を含む色素体）が重力方向へ移動、根冠のオーキシン排出輸送体も重力方向に移動
- 下側でオーキシン濃度が高くなり、下側の伸長が抑制され、下方に屈曲

植物の環境への応答

図3 植物における刺激の受容から反応まで

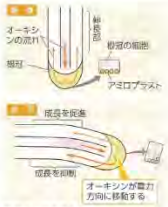


図17 根の重力屈性のしくみ

生物 教研出版より

低圧下での作物栽培（石神・後藤　植物環境工学、2008）

シロイヌナズナ：全圧12kPa（O_2 10kPa、CO_2 約0.05kPa、水蒸気分圧 約2kPa）下で花芽形成、開花
ホウレンソウ　：全圧25kPa（O_2 21kPa、CO_2 0.040kPa）下で1気圧と同等の成長
ダイズ　　：全圧32kPa（O_2 7kPa）下で子実生長
レタス　　：全圧70kPa（O_2 21kPa、CO_2 0.07kPa）下で発芽から正常に栽培

参考資料 8-5
第１回宇宙木材利用シンポジウム講演
遠藤早織里・大森香蓮

LignoStella project

宇宙木材利用シンポジウム @京都大学
2023/03/22
第2部 宇宙における樹木の育成

ポプラ育成実験について

京都大学 農学部
遠藤　早緒里

同志社大学 理工学部
大森　香蓮

1．低圧下での植物（作物）育成に関する研究のレビュー

2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
- 2-1.　材料と方法
- 2-2.　実験のフロー
- 2-3.　結果
- 2-4.　今後の展開

1．低圧下での植物（作物）育成に関する研究のレビュー

1. Daunicht,J.J. and Brinkjans,H.J. (1992) Gas exchange and growth of plants under reduced air pressure（減圧大気圧下における植物のガス交換と成長）. Adv. Space Res. 12:107-114

→トマトを1000hPa と400hPaで比較
400hPaで全乾重が若干減少、苗高３割減少
根乾重１割増加

2. Goto,E. ほか. (1995) Effect of reduced total air pressure on spinach growth（減圧がホウレンソウの成長に及ぼす影響）. J.Agri.Meteorol 51: 139-143

→処理後5日目まで低圧ほど成長速度は大きい。 10日間の成長速度は差なし。
（低圧下でCO_2ガス拡散係数が大きくなり一時的に光合成が促進）
LMA（葉乾重/葉面積）とT/R(top/root)は1/2気圧以下で大きい。
低い気圧下でCO_2施肥は有効

1．低圧下での植物（作物）育成に関する研究のレビュー

3. Goto,E. ほか. (1996) Measurement of net photosynthetic and transpiration of spinach and maize plant under hypobaric condition（低圧下におけるホウレンソウおよびトウモロコシの純光合成速度と蒸散速度の測定）J.Agri.Meteorol 51: 117-123

10、40、70、100 kPaで栽培
→低圧下で光合成速度は高い。トウモロコシで著しい。
低圧下でCO_2ガス拡散係数が大きく、葉面境界層抵抗と気孔抵抗が小さい

4. Tang,Y. ほか. (2010) Effects of long-term low atmospheric pressure on gas exchange and growth of lettuce（長期間低大気圧がレタスのガス交換と成長に及ぼす影響）. Adv. Space Res. 46: 751-760

→CELSS（controlled ecological life support system 人間の長期的な居住を可能とする人工生態系）における高等植物の栽培技術開発。
全圧40kPa, O_2分圧0.2kPaで35日間栽培、
種子の発芽、ガス交換、成長に悪影響なし。
葉面積と根の成長促進。総バイオマスに差なし

1．低圧下での植物（作物）育成に関する研究のレビュー

5. He,C. ほか. (2013) Hypobaria and hypoxia affects photochemical production, gas exchange, and growth of lettuce（低圧と低酸素はレタスの植物化学物質生産とガス交換、成長に影響する）. Photosynthetica 51:465-473

低酸素（6kPa pO_2 ≈常圧の29%）、低圧（25kPa≈常圧の25%）で育てた作物から
宇宙船クルーは抗酸化物質を摂取できるか？
→10日間の育成期間のうち後の3日間を低酸素、低圧下で苗はバイオマスを減少させずに抗酸化活性が高まり、
アントシアニン、総フェノール、カロテノイドの合成が促進

1．低圧下での植物（作物）育成に関する研究のレビュー

6. Tang,Y. ほか. (2015) The morphology, physiology and nutritional quality of lettuce grown under hypobaria and hypoxia（低圧と低酸素下で育てたレタスの形態学と生理学、栄養価）. Acta Astronautica 112: 29-36

・常圧で低酸素（6kPaまたは2kPa）は成長阻害、ミトコンドリアと葉緑体の構造破壊
低圧（30kPa）ではバイオマスに差なし、葉面積、根／茎比は増加。
低酸素下でミトコンドリアと葉緑体の構造を保護。
低圧（30kPa）、低酸素がレタスの成長を増加させないが、
ストレス耐性と栄養価を向上

1．低圧下での植物（作物）育成に関する研究のレビュー

先行研究のまとめ

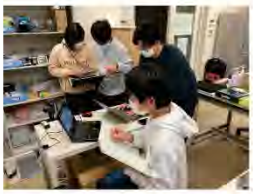
1－6；成長に関する研究
- 植物種によって反応は多様
- 低圧下で成長促進→CO_2ガスが拡散しやすくなった
- 成長促進は一時的で、成長変化なし
- 共通して見られる反応は根量の増加

5、6；成長以外の特性
- 抗酸化物質　→ 人の健康維持
- 植物のストレス耐性、栄養価の向上

2．ポプラさし木苗を用いた育成実験

低圧下で樹木は育つのか？

低圧区　　対照（１気圧）



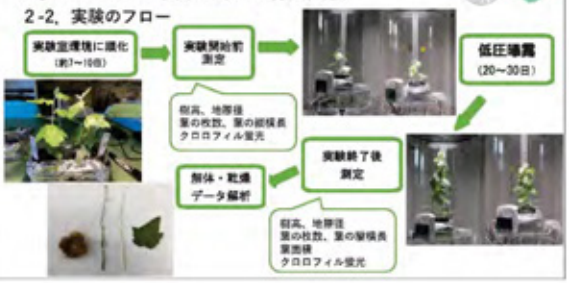
2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-1．材料と方法

低圧区　　対照（1気圧）

材料：ギンドロ（*Populus alba*）
挿し木苗

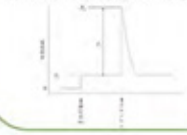
方法：
- 温度：23～25℃
- 湿度：50（±5）%，
- CO_2濃度：500（±50）ppm
- 0.75, 0.50, 0.30, 0.20, 0.10気圧
- PPFD：100 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
- 水耕栽培（ハイポネックス溶液）

2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-2．実験のフロー



2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-2．実験のフロー

- 光合成活性
  クロロフィル蛍光の最大量子収率
  $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$
  健康な葉では0.8～0.83
  （電子伝達系の光化学系Ⅱが吸収した光エネルギーの80～83%を光化学反応に利用）
  種々のストレスを受けるとこの値が低下



樹高、地際径
葉の枚数、葉の縦横長
葉面積
クロロフィル蛍光

2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-2．実験のフロー

2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-2．実験のフロー

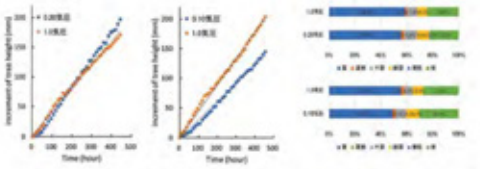
解体・乾燥
データ解析

- 地上部、地下部、葉に解体
- 乾燥重の測定

→・T/R（地上部乾重/地下部乾重）
・LMA（葉乾重/葉面積）
cf.水不足の個体ではT/Rが比小さく，LMA大きくなる

- 顕微鏡切片の作成と組織観察

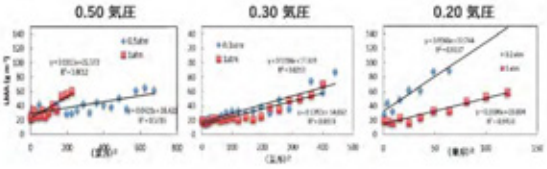
2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-3．実験結果



ポプラ苗伸長成長の経時変化
0.1気圧下でも成長可能，成長抑制

バイオマス量の割合（%）
低圧で根の割合が増加傾向

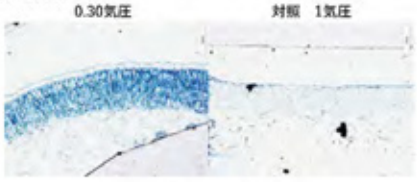
2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-3．実験結果



低圧がLMAにおよぼす影響

2．ポプラさし木苗を用いた育成実験
2-3．実験結果

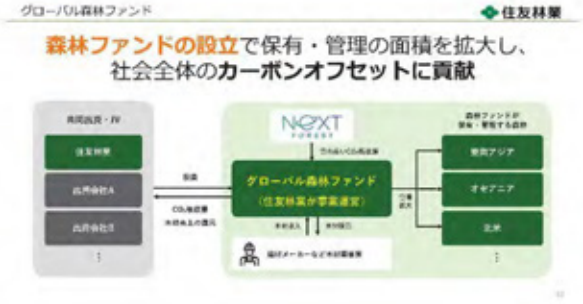
0.30気圧　　対照　1気圧

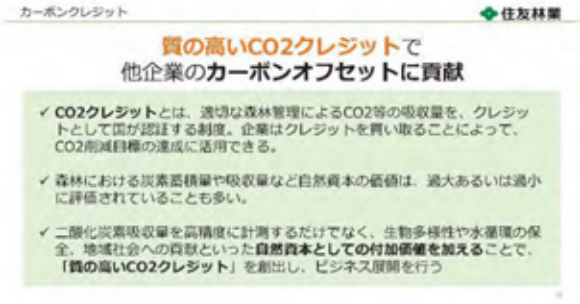


葉断面の顕微鏡写真

参考資料 8-6
第１回宇宙木材利用シンポジウム講演
中嶋一郎

NeXT FOREST｜世界の森林の管理・保全
住友林業
IHIとの協業で、宇宙から世界の森林を管理・保全
✓ 炭素貯蔵量の多い熱帯泥炭地などの管理は重要
✓ 他企業への森林経営コンサルティング事業も拡
泥炭地とは
枯れた動植物が土壌微生物による分解を受けずに、植物のかたまりとして堆積した土地のこと。
巨大な量の水と炭素を抱えている。
希少動植物が生息する生態系が広がる。
29 m
29 Km

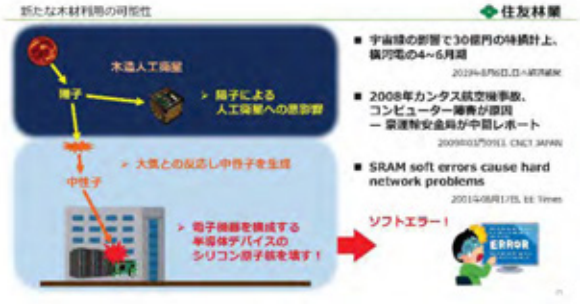

グローバル森林ファンド
住友林業
森林ファンドの設立で保有・管理の面積を拡大し、
社会全体のカーボンオフセットに貢献
NeXT FOREST
グローバル森林ファンド
（住友林業が事業運営）
東南アジア
オセアニア
北米


カーボンクレジット
住友林業
質の高いCO2クレジットで
他企業のカーボンオフセットに貢献
✓ CO2クレジットとは、適切な森林管理によるCO2等の吸収量を、クレジットとして国が認証する制度。企業はクレジットを買い取ることによって、CO2削減目標の達成に活用できる。
✓ 森林における炭素蓄積量や吸収量など自然資本の価値は、過大あるいは過小に評価されていることも多い。
✓ 二酸化炭素吸収量を高精度に計測するだけでなく、生物多様性や水循環の保全、地域社会への貢献といった自然資本としての付加価値を加えることで、「質の高いCO2クレジット」を創出し、ビジネス展開を行う

住友林業
木材
WOOD CYCLE
森林
建築
再エネ

木質材料
住友林業
丸太
製材
ラミナ
単板
ストランド
チップ
集成材・CLT
LVL・合板
PSL・LSL・OSB
ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ
MDF
木材繊維
パルプ
セルロース
グルコース

木材繊維強化プラスチック　ガラス繊維を木質材料に置換
住友林業
FRP（強化プラスチック）に用いられる
ガラス繊維を木材繊維に置き換える
✓ CO2排出量：29%削減
✓ 振動減衰性
✓ 軽量化
弊社独自の技術


新たな木材利用の可能性
住友林業
木造人工衛星
陽子
陽子による
人工衛星への悪影響
大気との反応し中性子を生成
中性子
電子機器を構成する
半導体デバイスの
シリコン原子核を壊す！
■ 宇宙線の影響で30億円の特損計上、横河電の4～6月期
■ 2008年カンタス航空機事故、コンピューター障害が原因 ― 豪運輸安全局が中間レポート
■ SRAM soft errors cause hard network problems
ソフトエラー！
ERROR

新たな木材利用の可能性
住友林業
✓ 同じ厚みのコンクリートと同等の遮蔽性能
✓ 重量は１／７

住友林業
建築
木材
Processing
Use
住友林業
WOOD CYCLE
森林
建築
Tree planting
Recycle
再エネ

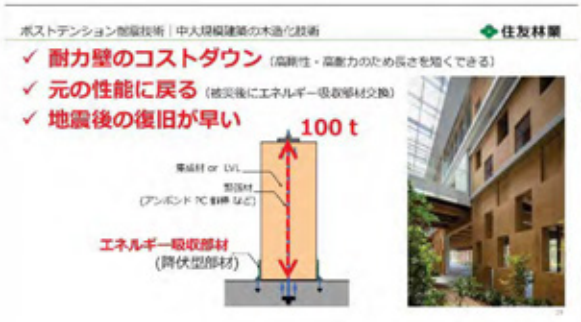
建築としてCO2を固定し続ける意義とビジネス展開
住友林業
ある用途・階数においては、木造がブレース構造かラーメン構造か等により、接合部の影響でＳ造よりも炭素排出量が上回る懸念もある。
構造設計と共に【接合部の仕様】がGHG排出量に大きく影響するのでこの開発がポイント。

国内における中大規模建築の木造・木質化の推進
住友林業
中大規模木造建築ブランド「with TREE」を立ち上げ、
知見
環境
健康
with TREE

海外における中大規模建築の木造・木質化の推進
住友林業

海外における中大規模建築の木造・木質化の推進　豪州での事例
住友林業

中大規模建築の木造化技術
住友林業
木造化した躯体
一般的な鉄骨造躯体
木質化した躯体
木造化
構造躯体を木造に置き換える
木質化
構造躯体は鉄骨造のまま、木材を付加する

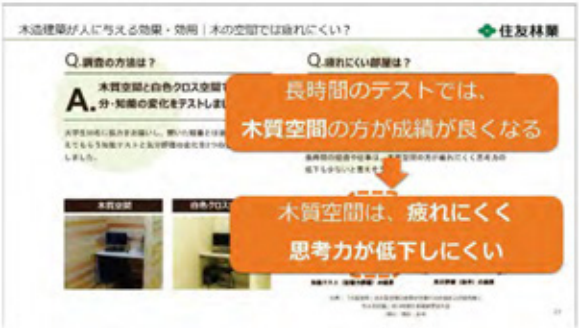

ポストテンション制震技術｜中大規模建築の木造化技術
住友林業
✓ 耐力壁のコストダウン（高剛性・高耐力のため長さを短くできる）
✓ 元の性能に戻る（被災後にエネルギー吸収部材交換）
✓ 地震後の復旧が早い
100 t
エネルギー吸収部材
(降伏型部材)

ポストテンション制震技術｜中大規模建築の木造化技術
住友林業
上智大学15号館
ポストテンション制震壁

ポストテンション制震技術｜中大規模建築の木造化技術
住友林業
本技術導入により壁長さを1/4 に、壁部躯体コストを約1/3 に
7200
ポストテンションの導入で
1800

ポストテンション制震技術｜中大規模建築の木造化技術
住友林業
世界初　10階建て木造ビルの実大振動台実験
中高層木造の振動台実験は、これまで世界で
7階建て相当の2例のみ（2×4、CLT）
ポストテンション
制震技術が導入
された耐力壁

木造建築が人に与える効果・効用
住友林業
メンタル面での効果
木と緑に関する
これまでの研究成果
フィジカル面での効果


木造建築が人に与える効果・効用｜木の空間では疲れにくい？
住友林業
Q.調査の方法は？
Q.疲れにくい部屋は？
A.
長時間のテストでは、
木質空間の方が成績が良くなる
木質空間は、疲れにくく
思考力が低下しにくい

木造建築が人に与える効果・効用
住友林業
可視化
⇒ エビデンスを活かしたバイオフィリックデザインの提案

社会全体での森林活用が進めば、
荒れた森林は適切に伐採・植林され、緑豊かな自然が広がる。
都市の木造建築が当たり前になり、街が森に変わる。
社会全体のウェルビーイングが向上する。
他企業と生活者の脱炭素に貢献するビジネスの先にあるのは
誰も見たことのない、ぬくもりのある経済。

住友林業
ご清聴ありがとうございました

参考資料 9-1
Spaceology Newsletter: 2022 年 10 月号

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2022 年 10 月号 No.10

9 月の活動報告

NanoAvionics 社 宇宙木材研究室を訪問

8 月 31 日、リトアニアに本社を置く NanoAvionics 社が宇宙木材研究室を訪問されました。NanoAvionics 社は、小型衛星に搭載する機器からソフトウェアまで総合的に開発を行っているほか、衛星ミッション運用や宇宙開発教育など衛星事業に関して幅広く提供している企業です。多くの飛行実績があり、NASA や ESA（欧州宇宙機関）でも採用されています。現在、木造人工衛星開発チームでは LignoSat の次号機となる 2U サイズの"LignoSat2"の概念設計に取り組んでおり、新たに姿勢制御用装置「磁気トルカ」を搭載する予定です。磁気トルカは衛星内に磁場を発生させ、地磁気との作用で衛星の向きを制御します。今回の訪問では企業内容や NanoAvionics 社製磁気トルカについて説明していただき、質疑応答を行いました。また当研究室の土井隆雄先生と衛星開発学生チームの阿戸豪（工学部 3 年）が、実際に今まで作成したモデルを用いながら木造人工衛星の特徴や開発状況、LignoSat2 の概要を説明しました。木造人工衛星開発チームは次号機 LignoSat2 の概念設計を 2023 年 3 月に完了する予定です。（阿戸豪 記）

LignoSat 紹介
木造人工衛星学生開発チーム
EPS 班

○木材と PCB 基板の接着

宇宙用の接着剤として用いられている「RTV G-690」が木材の接着に対して十分な接着力を持つかどうか検証しています。これまでに、接着方法検討試験、高真空環境試験などを行い、「小型人工衛星開発において十分な接着力をもつ」ことが明らかになりました。今後は、より詳細なデータ解析や比較検討を行っていきます。

また、木材と PCB 基板の接着練習も行っています。RTV の塗布量や PCB 基板の固定方法を検討してきました。検討内容に基づいて、9 月以降木造構体と太陽光パネル用 PCB 基板の接着を行う予定です。

図 1 せん断後の試験体

図 2 接着練習用の木材と PCB 基板

○バッテリーボックス

LignoSat のバッテリーは市販の充電式電池から構成されています。私たちの班では、バッテリーに使用する電池として性能の高いものを選定し、業者に溶接して頂き、バッテリーを作成しています。

現在、溶接された電池をバッテリーボックスに収納し、バッテリーが適切に動作するためのセンサやヒーターの取り付け、基板との接続などの作業を行っています。

図 3 バッテリーボックス作成の様子

低圧下樹木育成プロジェクト紹介
温度計測システム

今月は低圧下樹木育成実験システムにおける湿度計測システムについて説明しよう。現在、私たちが使っているのは、AOSONG 社製 DHT-22 である（図 1）。このセンサ は、低価格であるが温度は-40℃から＋80℃まで±0.5℃の精度（公称値）で、湿度は 0%から 100%まで±2%の精度（公称値）で測定可能である。測定方式は温度が半導体アナログ方式、湿度が静電容量式であり、得られた電圧を 8 ビットデータとしてデジタル化している。DHT-22 は、原理的に低圧下でも温度の計測に使えるはずであるが、低圧下での使用は保証されていない。

図 1 温湿度センサー DHT22

低圧下で DHT-22 が使えるのかどうか、また、その精度を求めるために較正実験が不可欠である。図 2 に DHT-22 の湿度の気圧較正実験の結果を示す。ここでは、1 気圧において相対湿度を 82%まであげ、その後徐々に気圧を下げて行っている。樹木育成チャンバ内の水分子数は気圧の低下に比例して減少していくので、ある気圧下での正確な相対湿度が計算できる。この較正実験中に気温は変化していない。この結果を見ると、DHT-22 の湿度 はデータのバラツキはあるが、気圧が低下してもほぼ線型性を保っていることが分かる。

気圧較正実験の結果から DHT-22 の湿度計測系は低圧下でも 0.3 気圧程度まで使用可能であることが分かった。現在の気圧較正の方法では、1 気圧下での湿度を 100%にしても、0.1 気圧では 10%程度になる。これは、DHT-22 の湿度計測精度が± 2 %であるため低圧での湿度の較正精度が上がらないことを意味している。現在、0.3 気圧以下での正確な湿度測定の方法を検討中である。

（土井隆雄 記）

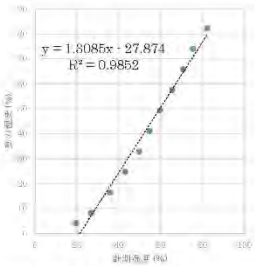


図 2 DHT22 湿度計測における気圧較正実験結果

10 月の活動紹介

DMG MORI presents 火星に住もう！Season2

【学ント】「火星に住もう！」は 10 月から Season2 に突入します。

大阪読売文化センター主催の市民講座「学ント」では、SIC 有人宇宙学研究センターの講師陣による人気講座「火星に住もう！」（DMG MORI presents）が 10 月より Season2 に突入します。

今シーズンには、宇宙飛行士の山崎直子特任准教授らが登場。人類の宇宙進出に向けた研究開発や課題について、最前線の専門家たちがレ 講座を行います。

計 6 回のテーマは、宇宙ビジネス、宇宙医学、宇宙法、宇宙人類学などと多岐にわたり、宇宙旅行に出掛けてみたい人、宇宙に関する仕事に興味がある人にも役立つ最新情報を解説します。

【受講料】1 回 1,000 円（見逃し配信付き）

【会場】読売京都ビル 4 階会議室（京都市中京区烏丸通六角下ル上親音町 630）

【日時】第 3 日曜（変則有り）13：00～14：30

10 月 30 日（日）第 1 部「宇宙から地球を知る」山崎直子・宇宙飛行士、
SIC 有人宇宙学研究センター 特任准教授（Zoom 出演）
第 2 部「地球を学んで宇宙に行こう」
山敷庸亮・京都大学大学院総合生存学館教授、中塚武（教室）

11 月 20 日（日）「宇宙ビジネス最前線」淺田正一郎・
Synspective 執行役員ビジネス開発部ゼネラルマネージャー

12 月 18 日（日）「人は宇宙環境でどうなるのか～宇宙医学研究の紹介～」
寺田昌弘・京都大学学際融合教育研究推進センター
宇宙総合学研究ユニット特定准教授

1 月 15 日（日）「天体での人間活動に適用される国際宇宙法を考える」
青木節子・慶応義塾大学大学院法務研究科教授

2 月 19 日（日）「人類学から見た人類の宇宙進出」
岡田浩樹・神戸大学大学院国際文化学研究科教授

3 月 19 日（日）「生命を育む天体の条件を探る」
佐々木晋教・京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室助教

備考 プログラムは変更になる可能性があります。ご了承ください

【詳細・お申し込み】
ホームページ https://www.oybc.co.jp/mananto をご覧ください
【お問い合わせ】
TEL 06-6361-3325（受付時間 平日 10：00～17：00）
【メール】
mananto@oybc.co.jp
【協賛】DMG MORI

2022 年度後期
有人宇宙学開講
対象：大学院生（履修）・学部生（聴講）

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

関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の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

【第1回】10月 5日 有人宇宙学（土井隆雄・山敷庸亮・田口真奈）
【第2回】10月12日 宇宙環境工学（山敷庸亮）
【第3回】10月19日 宇宙探査工学（清水幸夫）
【第4回】10月26日 有人宇宙学演習1
【第5回】11月9日 宇宙生命科学（保尊隆享）
【第6回】11月16日 宇宙木材工学（村田功二）
【第7回】11月30日 宇宙霊長類学（足立幾磨）
【第8回】12月 7日 宇宙医学（寺田昌弘）
【第9回】12月14日 宇宙法（青木節子）
【第10回】12月21日 宇宙人類学（岡田浩樹）
【第11回】1月 4日 有人宇宙学演習2/3（土井隆雄・山敷庸亮）
【第12回】1月11日 宇宙居住学（稲富裕光）
【第13回】1月18日 有人宇宙学演習4（土井隆雄・山敷庸亮・田口真奈）
【第14回】1月25日フィードバック
＊講師の都合により、講義日程が前後する可能性がある。

日時：毎水曜日5限
場所：東一条館2階201教室

（土井隆雄記）

2022年度後期
宇宙居住学開講
対象：大学院生（履修）・学部生（聴講）

SIC 有人宇宙学研究センターの教員が中心となって実施する大学院横断型科目「宇宙居住学」についてご案内いたします。本講義では、センター長の山敷庸亮教授をはじめ、大野 琢也 SIC 特任准教授、稲谷 芳文 SIC 特任教授、山崎 直子特任准教授、稲富 裕光 SIC 特任教授がそれぞれ担当を行います。

21 世紀後半に人類が月・火星への移住を現実のものとするという未来を想定し、それに必要な基幹技術と社会システム上の問題点を統合し、宇宙時代の基幹学問体系として確立することを目標としています。地球にあり宇宙への移転を見据えた生態系システムを「コアバイオーム複合体」とし、「生命維持」システムの維持に必要な技術体系を「コアテクノロジー」と名づけ、また、これらを備えた「循環型」の社会を「コアソサエティ」と名づけ、「宇宙社会」の実現を精査・検討します。

本宇宙居住学においては、月・火星での千人の社会の構築を目標とし、その上に「生命維持装置」を基盤とする「循環型社会」を構築するための技術を学び、人間が長期間健康的な生活を営むための「人工重力設備」などの基幹技術を駆使し、循環型都市「コアシティ」を提案し、これらを地球における都市の概念に還元し、地球・宇宙での循環型社会の構築に向けた、基礎的学力を身につけることが期待できます。

詳細は以下シラバスを参照してください。

https://ocw.kyoto-u.ac.jp/syllabus/?act=detail&syllabus_id=g_ja_1017&year=2022

大学院生向けの講義ですが、聴講を希望する学部生は、以下に連絡をとってください。

[illegible]

研究紹介
宇宙でヒトは殖え続けられるか

篠原正典　帝京科学大学生命環境学部教授
閉鎖居住経験者

この記事を書いていた9月20日、ワレリー・ポリャコフの訃報が流れた。えっ？誰？と思う方も多いかもしれない。人類史上、最も長く宇宙空間で暮らしたコスモノートである。1994～95年に実に437日間、ソユーズとミールの中でミッションを続け、心身ともに健康な状態で地上に戻り80歳で亡くなった。

地球生物圏から切り離された空間で、ヒトはどれだけ生きられるのか、そして、はたして殖え続けることができるのか。スペースXの創業者イーロン・マスクは、百年後に2万人規模の宇宙都市を火星に作る、と意気込むが、果たして可能なのであろうか。ポリャコフの生命は地球から100%の持ち出しで維持されたが、月へ火星へ、そしてさらなるディープスペースへヒトが進出するためには、閉鎖生態系生命維持シス

テム（Closed ecological life support system, CELSS）の構築という技術的問題と、実際に殖えれるのかという生物学的医学的な検討が必要である（実際には、「あなたは人類の宇宙進出のクルーになることを自ら選んだのですから、このクルー集団の出生率を2.0以上に維持すべく繁殖しなくてはいけないのですよ？えっ、嫌？個人の自由？えーっ、それではこのミッションは・・」という問題もまた、別途大きな問題として検討が必要だが）。

私自身は、青森県六ケ所村の旧（公財）環境科学技術研究所が完成させたCELSS・ミニ地球の居住者に選んで頂き、プロジェクトに参画中は毎年、自分が食べる植物を育てては閉鎖環境を構築し、その中に入って実際に"生きる"という非常に貴重な機会を繰り返し経験している。もう20～15年前のことになる（詳しくは多胡靖弘,2015を参照）。こうした実験は各国の軍や宇宙機関で60年以上前から現在まで繰り返し行われ、近年では中国も本格的に開発し始めていることをJAXAの矢野幸子研究員と共に月面農場WG検討報告書にまとめたが、CELSS構築という技術的問題は、これまでの積み重ねと近年の進展ぶりからみて、人類のディープスペース進出への障壁にはならないと考えている。また、ここでは詳しくは述べないが、放射線や微小重力が人体に与える生物学的医学的影響の問題も私としては障壁になるような課題だとは捉えていない。こちらに関しては異論が多いことだろうが。

このように楽観的な私であっても、まだ検討が足りておらず障壁になると思うことがある。地球生物圏外である宇宙においてヒトが殖えられるのか？という点である。本稿のタイトルであるこの問題に関して、今年度5月の地球惑星科学連合大会の場で、また、9月には土井先生が発展的に継続されている京都大学の有人宇宙学実習の場でも履修学生を前に話をする機会を頂いた。本稿はその論考を要約して紹介させて頂くものである。

まず、思い出してほしいのは、自分たちが造ったロケットと宇宙船で宇宙空間に飛び出し還ってこられるかという挑戦に臨んだ当時のソ連と米国が何をしたか、である。それぞれイヌを、チンパンジーを、ヒトに先んじて乗せたのだ。では、ヒトが宇宙で殖えることができるか？この検討も、先に動物に先例をみせてもらって、そのレッスンに倣ってヒトが・・ではないだろうか。ここで、月や火星で（ロボットのサポートなどで）ラットに殖えてもらう試みをすべきだ、といった動物実験的な方向に話を進めるつもりはない。私は、日高敏隆の薫陶を受けた動物行動学者でイルカ類を対象に研究を続けており、先達や同僚には霊長類学者も多く、加えてゾウ類にもたいへん強い関心をもっており、推定で70歳！近い高齢（おそらく世界最高齢）のオスのアジアゾウ「アヌーラ」を多摩動物園に詣でるのを何らの義務にもしている。こうした専門と興味から、これらヒトに近い長寿の社会性の動物が自然から切り離された疑似的な圏外環境で殖えているのかを振り返るのが、まず先に行うことではないだろうか、と主張したい。

私たちヒトは、自然界から切り離した人工環境下で、上手に生かし殖やし続けられている動物がいる。多くの家畜がそうであり、伴侶・愛玩動物では、イヌ、ネコ、ウマなどがそうである。彼らが哀れな生を送っていると思う人は少ないであろう（家畜や伴侶動物などの扱いに関して、数多くの危惧や批判があるのは承知しているが）。また、その数・量も、この地球上の野生哺乳類全体の実に15倍！になるほどである。尚、ヒトは野生哺乳類全体の約10倍である。家畜化に成功し育種改良されたイヌ・ネコのような食肉目でなく、野生の食肉目であっても、野生下で暮らすより飼育環境下において健康に長く生かすことに成功しているとの報告もある（Morgane 他 ,2016）。しかし、よりヒトに近い動物、大型類人猿、また、ヒトと同じように長寿で閉経を持つシャチやゾウではどうであろうか？

大型類人猿に関しては、京都大学からも多くの研究者が参画する「アフリカ・アジアに生きる大型類人猿を支援する集い（SAGA）」においても「飼育下の大型類人猿の「生活の質（ＱＯＬ）」を向上させる」ことを三つの目標の一つに掲げるなど、その飼育環境をよりエンリッチし、野生から補充しなくとも飼育で殖やして維持しようという試みが続く。しかし成功しているとはいえず、オランウータン、ゴリラ類、チンパンジー類、その全てがいま飼育下で個体数を減らしたり高齢化が進み、存亡が危惧される状態にある（落合-大平ら,2006など）。

シャチに関しても同様に殖やすことはできていない。シャチの飼育先進国であった米国では人工授精で出産を続けてきたが、多くの個体が若くして死に続けてきた。精子の最大の提供個体であったオスの「Tilikum」も2016年に35歳で死亡し（一説では野生のシャチでは80歳まで生きる個体もいるとされる）、彼の孫にあたる「Kyara」が米国で最後に生まれたシャチとなったが、2016年に1歳で死んでいる。米国の動物園水族館業界では「幸せに飼っていることも、殖やしてあげることもできない」との判断でシャチの飼育を終えている（現在飼っている個体のみ飼育を続け、サクリファイス（！）を増やさないために繁殖の試みも実施しない）。国内のシャチも現在は7頭にまで減っており、唯一のオス「アース」は他のメスが全て近親者であり繁殖が難しく、国境越えての人工授精の試みが検討されている。

ゾウも例外ではない。国内の動物園でもその数が減り続け、日本動物園水族館協会によると、アジアゾウは1987年には45園に83頭いたものが2016年には34園79頭に、アフリカゾウは1984年には22園84頭いたものが2016年には17園36頭に減っている。先のMorgane他(2016)の報告では、データがあるメスに関してだけの検討だが、世界的にも飼育個体は野生に比べ寿命が短いことが報じられている。しかし、アジアでは使役でゾウを数千年前から使い続けているではないか？との反論もありそうだが、あれは健全な野生集団があってこそ成り立っている。ゾウたちはかつても今もヒトの手の中で殖えることはできないのだが、メスが繁殖のために野生で暮らす仲間のもとに戻され（戻り）、妊娠したり子供を連れて再び戻って（戻されて）くる、というスタイルで飼育集団が維持されている。

なぜ、ヒトはこうした大型で長寿の社会性の野生動物を人工飼育環境下でより長く生かしたり殖やしていくことができないのであろうか・・、明確に答えられる研究者や飼育関係者はいないであろう。生物学者、飼育関係者、動物愛護関係者ではなく、「ヒトが宇宙で殖えるための基礎研究」として宇宙機関が本腰をあげ、膨大な予算と研究者を充てれば・・果たして・・

これまで有言実行で成功を収めてきたイーロン・マスク、最後に改めて彼の「2万人規模の宇宙都市を火星に作る」計画を見直したい。実はこの計画のベースには、頓挫したMars One計画のような行ったきりではなく、百人規模の宇宙船が地球＝火星間を往還し続けることが前提になっている。地球から孤立した集団として火星で殖えるのではなく、交流を保ちながらヒトの生存圏を火星にも広めていくというデザインになっている。アジアで数千年前から続けられたゾウの使役個体群に似ていなくもない。これなら実現可能であろうか・・さて・・、このような情報収集と論考はまだ始めたばかりであり、同様の関心を持つ研究者や関係者と情報交換し議論をして掘り下げていくことができれば幸いである。

参考文献

ワレリー・V・ポリャコフ（1999）『地球を離れた2年間』WAVE出版
Space X. Mars & Beyond. https://www.spacex.com/human-spaceflight/mars/

月面農場WG検討報告書第1版 JAXA-SP-19-001 (JAXAレポジトリー)
多胡靖弘 (2015) "閉鎖型生態系実験施設を用いた閉鎖居住実験—食料自給および物質（空気・水・廃棄物）循環，ならびにトラブルシューティング—，" 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック，48-66，アドスリー社
SAGA HP. https://saga-jp.weebly.com/saga/
落合・大平 知美他 (2006) 日本国内の大型類人猿の飼育の過去と現在 霊長類研究 22 (2), 123-136
Morgane 他 (2016) Comparative analyses of longevity and senescence reveal variable survival benefits of living in zoos across mammals. Scientific Reports 6, 3636
Mars One HP. https://www.mars-one.com/

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター
https://space.innovationkyoto.org/
〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室
編集人：水流人工衛星製作チーム 柴山祐樹 関村誠輔
Tel&Fax: 075-753-5129 Email: spaceweld@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp
SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter No.10
2022 年 10 月 1 日発行

参考資料 9-2
Spaceology Newsletter: 2022 年 11 月号

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter2022 年 11 月号 No.11

10 月の活動

日本花粉学会奨励賞受賞
三木健司（京都大学宇宙木材研究室）

宇宙木材研究室に所属する三木健司特定助教が日本花粉学会奨励賞を受賞いたしました。以下選考委員のコメントです（一部抜粋・編集）。

三木健司氏はこれまで、主に粒子物理を用いて花粉等の生物粒子の動態や捕集手法の研究を行い、花粉に関しては特に、環境省の花粉観測システム「はなこさん」の運用を通じ全国に設置された自動花粉観測装置(KH-3000-01)の観測手法の改良理論を構築した。同氏はまた、スギ花粉の飛散中心点の北上速度を解析する新たな理論を提案した。この理論は、地球気候システムの変動と花粉飛散動態の関係解明に向けて、国レベルの花粉飛散動態の長期的経年変化を解析するための礎になることが期待される。日本花粉学会は、花粉学の新たな分野に積極的に挑戦し、着実に成果を挙げてきた同氏を高く評価し、奨励賞を授与して今後の研究の発展を期待するものである。

国連パネルディスカッション参加報告
三木健司（京都大学宇宙木材研究室）
曽束元喜（京都大学工学研究科修士課程 2 回生）

三木健司特定助教と曽束元喜工学研究科修士課程学生が国連宇宙部主催のパネル"Greening space systems engineering"に参加しました。パネルは 2022 年 9 月 14 日 日本時間 21:50 - 23:00 にオンラインで行われました。当日の流れは、各参加組織が 15 分程度の short introduction を行い、その後パネルディスカッションを 45 分ほど行いました。京都大学の short introduction では、三木が LignoStella に関する概要と目的、チーム構成の説明を行った後、曽束が LignoSat の概要を紹介し、再度三木が概要のまとめと今後の展望について説明を行いました。その後、三木はパネルディスカッションに登壇し、持続可能な宇宙開発についての意見交換を行いました。当日は、およそ 1000 人の視聴者が全世界から参加しました。参加組織と講演内容の要約は以下の通りです。

・MIT: Danielle Wood

（講演内容：宇宙探査に利用可能な環境にやさしい燃料の研究（微生物が新たなエンジンになり得るか？など）

・ESA: Sara Morales Serrano

(講演内容：宇宙ミッションの Life time cycle が及ぼす環境影響について)

・Aerospace Corporation: Martin Ross

(講演内容：オゾン層に対するロケット燃料の環境影響について理解することと宇宙産業と大気科学の連携の重要性について)

・Kyoto University: Kenji Miki, Motoki Sotsuka

(講演内容：木材人工衛星の研究と教育への利用について)

・UK Space Agency: Joanne Wheeler, Stephen Plant

（当日はエリザベス女王の死去を受けて欠席のため自粛）

芦生研究林森林研修報告
野間隆寛（京都大学医学部人間環境学科 2 回生）

10 月 8 日から 9 日にかけて学生 6 名、教員 2 名が芦生研究林での森林研修に参加しました。火星への移住やカーボンニュートラルの実現を見据え、一年で一人あたりが排出する二酸化炭素を吸収するために必要な森林面積を推定するのが主な目的です。

1 日目は、炭素蓄積量の推定で重要な胸高直径の計測実習およびリターートラップの見学を行いました。胸高直径は地上から 1.3m の高さにおける樹木の直径であり樹種に応じた相対成長式に代入することで樹木の生体重量を推定することが可能です。樹木の地上から 1.3m 部分は成長するにつれ高さが変わることはなく直径のみが太くなる性質があり、1ha にも及ぶモニタリングスポットでは毎年、毎木調査で胸高直径のデータを取り樹木の成長などを記録しています。実際の胸高直径の変化量は僅かなため今回はより変化の大きい外周を測ることで間接的に計測しました。さらに、落ちた葉や花などのリターフォールを回収するリタートラップが 1ha に 25 個設置されており回収したサンプルを乾燥・計測することで枯損量を推測できるようになっていました。

2 日目は、鹿の食害対策として設置された柵と大カツラを見学しました。道中、座学では到底想像できない多様性が広がっており研究員や技術職員の方から国境や植生、保全活動などの説明を受けることで生態系内の緻密な関係性が浮かび上がってきました。学生からの素朴な質問にも丁寧に対応していただきました。林内では木造人工衛星 LignoSat の機体で利用が検討されているホオノキとヤマザクラも観察でき一同、芦生林から宇宙での木材利用に思いを馳せる時間を過ごしました。

解析では胸高直径から幹・枝の肥大成長量を、リターフォールの総量から葉・繁殖器官枯損量を求め、これら二つの合計である地上部 NPP(Net Primary Production:純一次生産量)を算出したのち 0.5 を乗じることで蓄積された炭素量を推定します。

今回用いた相対成長式は以下の通りです。（石原先生の資料より引用）

幹乾燥重量 W_S

・落葉広葉樹（DB: Deciduous broadleaf tree）

$$\ln(W_S) = -1.87 + 1.44 \times \ln(D) + 0.49 \times (\ln(D))^2 - 0.77 \times (\ln(D))^3$$

・常緑広葉樹(EB: Evergreen broadleaf tree)

$$\ln(W_S) = -2.05 + 1.01 \times \ln(D) + 0.31 \times (\ln(D))^2 - 0.05 \times (\ln(D))^3$$

・常緑針葉樹(EC: Evergreen conifer tree)

$$\ln(W_S) = -2.06 + 1.33 \times \ln(D) + 0.49 \times (\ln(D))^2 - 0.77 \times (\ln(D))^3$$

枝乾燥量 W_B

落葉広葉樹（DB: Deciduous broadleaf tree）

$$\ln(W_B) = -4.13 + 2.50 \times \ln(D)$$

・常緑広葉樹(EB: Evergreen broadleaf tree)

$$\ln(W_B) = -4.00 + 2.40 \times \ln(D)$$

・常緑針葉樹(EC: Evergreen conifer tree)

$$\ln(W_B) = -4.20 + 2.28 \times \ln(D)$$

上記の式に胸高直径 D を代入し $\ln W_S$ および $\ln W_B$ を求めたのち

$$W = CF \times \exp(\ln W)$$

と変換することで W_S と W_B の値を得ることができます。ここで CF（Correction Factor）は対数を変換する際のバイアス補正であり W_S、W_B における CF はそれぞれ 1.04 と 1.27 です。

また、$(t+1)$ 年における肥大成長量 ΔW_{t+1} は

$$\Delta W_{t+1} = W_{t+1} - W_t$$

と計算できるので今回用いる 2020 年におけるリターフォールのデータにあわせ 2020 年の肥大成長量を算出しました。葉・繁殖器官枯損量に関しては、25 地点のデータの合計量を求めたのちリタートラップ一つあ

たりの口の面積が 0.5m² であることをふまえ 1ha あたりの枯損量に換算しました。

以上より、幹・枝の肥大成長量および葉・繁殖器官枯損量を求められたことになります。我々人類は一人当たり年間 2.7t の二酸化炭素を排出しているため、計算の結果一人当たり約 0.2ha の森林が必要という結果になりました。しかし今回の解析では簡便のため土壌の炭素蓄積量を無視しているので値が過大になっているのに注意が必要です。

実習を通して、各々のプロジェクトの位置付け・重要性が改めて明確になったので今回の学びを大いに今後の活動に活かしていく所存です。最後に、解析方法のご指導をいただきました石原先生をはじめ研究林の皆様に感謝いたします。

学ント DMG MORI presents 火星に住もう!
season 2 開講のお知らせ

「学ント」DMG MORI presents 火星に住もう Season 2 が始まりました。

人類の宇宙進出に向けた研究開発や課題について、SIC 有人宇宙学研究センター教員を中心に最前線の専門家たちがリレー講座する学ント DMG MORI presents 火星に住もう！ Season 2 が、10 月 30 日午後 1 時から、読売京都ビル（京都市中京区）で開かれました。

Season2 の 1 回目は、宇宙飛行士の山崎直子氏(特任准教授)と山敷庸亮センター長が登壇し、山崎氏は「宇宙から地球をみよう」、山敷氏は「地球を学んで宇宙にいこう」をテーマにそれぞれ講演。宇宙飛行士からみた地球と、地球における森林・海洋の重要性と宇宙に移住する際の困難さについて話されました。両氏のトークセッションの後は聴講者から多数の質問が寄せられ、「宇宙を学ぶことで地球環境の大切さを知った」「宇宙探査の技術開発、研究において日本は世界をリードして欲しい」など、宇宙開発への期待の声が上がりました。熱気に包まれた会場は、1 時間半で終了しました。

なお、講座内容はオンデマンドで来年 3 月末まで視聴できます。

2 回目以降は以下のとおり。

▽11 月 20 日「宇宙ビジネス最前線」浅田正一郎・Synspective 経営企画室、CEO 補佐▽12 月 18 日「人は宇宙環境でどうなるのか～宇宙医学研究の紹介～」寺田昌弘・京都大学学際融合教育研究推進センター、宇宙総合学研究ユニット特定准教授▽来年 1 月 15 日「天体での人間活動に適用される国際宇宙法を考える」青木節子・慶応義塾大学大学院法務研究科教授▽2 月 19 日「人類学から見た人類の宇宙進出」岡田浩樹・神戸大学大学院国際文化学研究科教授▽3 月 19 日「生命を宿す天体の条件を探る」佐々木貴教・京都大学大学院理学研究科、宇宙物理学教室助教。いずれ

も第 3 日曜午後 1 時から、読売京都ビルで教室講座。1 週間後に同様にオンデマンド配信予定です。
申し込み・問い合わせは学ントホームページから【学ント】DMG MORI presents 火星に住もう！Season2 | 大阪よみうり文化センター (oybc.co.jp)（山敷庸亮 記）

LignoSat 紹介
木造人工衛星学生開発チーム
CDH 班

11 月号の木造人工衛星開発チーム紹介は CDH 班がお送りいたします。現在行っていることといたしましては、基板同士の相互評価と BPB 基板の発注、新入生の勉強会の大きく 3 つです。

・基板同士の相互評価

衛星運用の前に衛星が正しく動作しているかを確認する必要がありますが、そのさらに前に基板同士がきちんと通信できているかを確認する必要があります。現在は温度と電圧情報を管理する FAB 基板と衛星の情報を統括する OBC 基板、FAB 基板と衛星の動力源の Battery、OBC 基板と通信システムを管理する COM 基板の相互評価を主に行っております。図 1 は衛星の全体図で各基板の接続がわかると思います。将来的には図にあるすべての基板の通信評価を行う必要があります。まだ届いていない基板もあるため、11 月は相互評価と全体評価を並行して行う予定です。

図 2 は実際に FAB と Battery を相互評価しているときの様子で、宇宙空間での動作を再現して図 3 の様な計測データを PC 上に表示させ、理論値との誤差や精度を確認しています。細かいデータ出力は衛星全体が組み終わったのちに行います。FAB—Battery 相互評価はバッテリーの温度データ、電圧データ、バッテリーヒーターの稼働を行っております。FAB-OBC 相互評価では衛星全体の温度電圧データを集計、スイッチ類の確認、OBC-COM 相互評価では衛星からのデータ送受信、地上局からのデータ送受信を見る予定です。

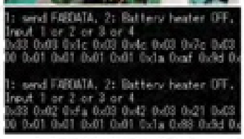


図 1,2,3 全体図と相互評価の様子

・BPB の発注

図 1 にあるように衛星の各基板の接続を行う BPB 基板は現在電気的接続を見直してもらうために、基板作成会社とやり取りを行い、基板のデータをすべて整理いたしました。そこでの電気的変更をまとめ今後の基板製作に役立つ知見を蓄積しております。

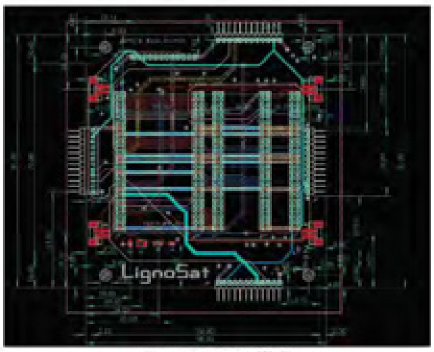


図 4 LignoSatBPB の配線図

・新入生の勉強会

現在 CDH 班は新メンバー3 人を入れた 5 人体制で行っております。CDH 班はその仕事上、衛星ソフトウェア、基板作成、全体把握、通信、電力制御と衛星の基本システムについてすべてを把握しておく必要があります。そういった基礎知識を新メンバーに実際の基板評価を通して手で覚えてもらい、週 1 の会議で新メンバー担当の知識共有を図っております。11 月からは新メンバーが担当する分野も出てくるため、今まで以上に連携体制を深めてまいります。（菊川尚樹 記）

図 5 基板評価を行う新メンバーの様子

低圧下樹木育成プロジェクト紹介
Arduino 講習会＃1
清田朋和（京都大学理学部 3 回生）

樹木育成プロジェクトの清田朋和が計測システムで必要となる Arduino の基本的な知識から LED の点滅といった回路の動作をまとめた講習会を行った。以下にその際の講義資料を添付する。

1. はじめに

この講習会では、基本的な Arduino の仕組みを習得し、ポプラ育成装置がどのように動いているかを学びます。分からないことがたくさん出てくると思いますが、一緒に学んでいきましょう。

2. Arduino IDE のインストール：https//www.wrduino.cc/en/software

Arduino にプログラムを書き込むためのメモ帳をインストールしましょう。

図 1 Arduino IDE インストール画面と Arduino IDE 画面

上記のサイトから Arduino IDE のインストールを行います。Window か Mac かで注意してください。インストールが終わったら開いてみます。図 1 の画面が確認できれば大丈夫です。今後は Arduino IDE にプログラムを書き込んで Arduino を制御します。Desktop やタスクバーに登録しておくと良いでしょう。

3. 基板上の LED チカチカ

最初にプログラム例を用います。

ファイル → スケッチ例 → 01.Basic → Blink

以下にプログラム例の内容を記します(自分で確認してみてください)。

```
/*
  Blink

  Turns an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.
```

```
  Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the UNO, MEGA and ZERO
  it is attached to digital pin 13, on MKR1000 on pin 6. LED_BUILTIN is set to
  the correct LED pin independent of which board is used.
  If you want to know what pin the on-board LED is connected to on your Arduino
  model, check the Technical Specs of your board at:
  https://www.arduino.cc/en/Main/Products

  modified 8 May 2014
  by Scott Fitzgerald
  modified 2 Sep 2016
  by Arturo Guadalupi
  modified 8 Sep 2016
  by Colby Newman

  This example code is in the public domain.

  https://www.arduino.cc/en/Tutorial/BuiltInExamples/Blink
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);  // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);                      // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);   // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);                      // wait for a second
}
```

/*と*/に挟まれている所や//以降の 1 行は「コメントアウト」といってプログラムの説明に使われます。他人に読んでも理解されるように工夫して使っていくのが良いでしょう。よって上記のプログラムの内容は以下が本質です。

```
void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  delay(1000);
}
```


関数「void setup」内では Arduino 内で使う pin の指定を行います。「pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);」で使う pin を LED_BUILTIN に指定することで電流を流せます。例えば、図 4 に示す 13 番 pin から電流を出力したい場合は LED_BUILTIN を 13 番に書き換えれば良いです。

図 2　Arduino の pin

例えば図 2 に示す 13 番 pin から電流を出力したい場合は LED BUILTIN を 13 に書きかえれば良いです。関数「void loop」内では Arduino で繰り返し行う処理を書き込みます。「digitalWrite(LED BUILTIN, HIGH);」は HIGH=5(若しくは 3.3)[V] と LOW=0[V] の出力をするものです。「delay(1000);」は直前に書き込んだ動作を 1000[ms] 続けるということです。この動作が Arduino と電源が接続されている限り続きます。

ここまで説明をしたところで基板の LED をチカチカさせます。以下の手順で進んでください。

手順 1.「command(control) + N」を押し、以下のプログラムを書き込みます。

```
void setup() {
  pinMode(13, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(1000);
}
```

プログラムを保存したい人は「command(control) + S」で保存先とフォルダ名を自分で決めて保存します。

手順 2. 図 3 のように Arduino と PC をケーブルで繋げます。PC 側の端子は USB です。Macbook の場合は、USB 変換コネクター等を使用してください。PC と Arduino が接続できた時は、Arduino の ON というところが黄色いライトで光るはずです。Arduino の電源は PC から供給されます。

手順 3. 図 1 の「ツール」の「シリアルポート」で「Arduino」を　選択します。

手順 4. 図 1 の左上にあるチェックマークをクリックします。これを以下「コンパイル」と呼び，プログラムに

不備が無いかをチェックしています。エラーが出た場合、下の「標準出力」にエラー内容が表示されるのでそれを頼りに検索して解決しましょう (これが今日 1 番大事な点ですね)。

図 3 Arduino と PC の接続

手順 5. 図 2 の左上のチェックマークの横の矢印マークをクリックします。これを以下「書き込む」と言います。「シリアルポート」が正しく選択されていない場合は標準出力にエラーが出るので，要チェックです。

手順 6. うまく書き込めれば基板上の LED がチカチカするはずです！

※プログラミング全般で共通することですが、プログラムは全て半角英数字で書き込みましょう。全角のスペース・全角の英数字が混じってしまうとエラーが出ます。また、このエラーを見つけるのもなかなか大変です。(但しコメントアウトの中は全角文字が入っても大丈夫なことが多いです。)

4. LED ピカ

ここまでくれば要領を掴めたようなものです。次に pin から出力を行いましょう。一旦 Arduinno を PC から抜きます。Arduino・抵抗・オスオスのジャンプワイヤー・ブレッドボードを使って配線していきましょう。

図 4 に示したように配線しましょう。何が起きているかイメージできますか。Arduino の「5V」からは電源供給があれば常に 5[V] 流れています。「GND」はグラウンド・接地です。必ず電圧をかけたものにはグラウンドするようにしましょう。これは電圧を安定させるためです。ブレッドボードの「+」に 5[V]、「-」に GND を繋ぎましょう。

図 4 LED ピカの配線

ブレッドボードのオレンジ色の付いている所は導通している (電流が流れる) 箇所です (画像になって途中で締めている箇所もありますが)。これを考慮に入れて配線していきましょう。

図 4 の配線を見てみると、

5[V] → 抵抗(5[kΩ]) → LED → GND

になるように配線されているはずです。必ず注意する点として LED の前に必ず抵抗をはさみましょう。LED に電流が流れ過ぎて最悪 LED が壊れます。正しく配線ができたらプログラムは何も書き込まず，PC と Arduino を接続しましょう。LED が点いたままになるはずです。(付かない場合に、配線を見直したり、LED の向きを直してみたりしましょう。)

ここで気になることがあるとしたら抵抗の大きさでしょうか。LED にどれくらいの電流が流れるか等を考慮し

て抵抗の大きさを決めるべきです。こういうことがシビアになってくる場合もあるので注意しましょう。自分の持っている抵抗の大きさが分からなくなっても大丈夫です。抵抗に色のついた線が 5 本入っていると思います。これで抵抗の大きさが分かります。ググりましょう 。

5. LED チカチカ

「基板上の LED チカチカ」と「LED ピカ」を合わせればやっとこさ電子工作の入門と言われる「LED チカチカ」が行えます。図 5 に配線の様子を示したのですが，見えにくいですね。「LED ピカ」で行なった配線で Arduino 本体の「5V」pin に差していた物を「13」番 pin に差し替えれば終わりです。すでに「基板上の LED チカチカ」でプログラムを書き込んでいるので動作すると思います。

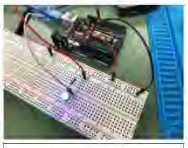


図 5 LED チカの配線

6. ボタン

入門も終えたところで、ボタンによる LED の制御をしてみましょう。LED は今まで通り抵抗を通して「13」番 pin から出力を得られるようにしましょう。(ブラ育成講座ではボタンは使用していませんが、先ほどよりも少し複雑な配線を実際に組んでみて、プログラムを読む練習をしましょう。) 「Open」や「Closed」と描かれているところがスイッチになります。各図上の方の「Vcc」は「5V」だと思ってください。下は「GND」を意味しています。横に向かって出ている「Vcc」が外部への出力電圧と思ってください。今回は「2」番 pin に接続します。ここでプログラム例を用います (基盤上の LED チカチカで例の所在に示しているので画像は割愛しますね)。

ファイル　→　スケッチ例　→　02. Digital　→　Button

このプログラムは、自分で読んでみましょう。わからないところあれば聞いてくださいね。ポイントですが、「2」番 pin は「buttonpin」としています。これを「loop」関数内では digitalRead していますね。digitalRead は「HIGH」か「LOW」もしくは「1」か「0」の状態しか読み取れないようになっています。このとき「5V」が「0V」の状態になります。勘の良い方はわかったかも知れませんがボタンを押したか押していないかで「HIGH」か「LOW」かになるということです。例えば図 9 の「Pull-up 方式」で配線してみたとしましょう。すると、「Open」の時 (ボタンを押していない時) は抵抗をはさんで「2」番 pin に 5[V] が流れることになります。するとプログラムを見れば分かりますが「HIGH」の状態になり (if 文のところですね)、LED が点くことになります。

そして、「closed」の時 (ボタンを押している時) は 5[V]は「GND」に　直接ですので「2」番 pin には何も流れません。0[V] です。よって先ほどの要領から「LOW」の状態になり (if 文の else)、LED が消えるはずです。ここで疑問に思うことがあるはずです (思って欲しいです)。

ーボタンを 5[V] や「GND」の間に配線する理由はあるのか。

ー抵抗を挟む理由があるのか。

ひとつずつ見ていきましょう。

ボタンに 5[V]や「GND」をしっかりと配線する理由は簡単で、「電圧不定」の状態にならないようにするためです。これに今後センサー類で値を読み取る時にもポイントになります。ボタンも所詮はセンサーということですね。つまり今、センサー類の入門に入っているということです。

抵抗をはさむものはボタンを押した時にショートしないようにするためです。5[V] が急に「GND」に繋がるのは危険です。これも今後電子工作をする際に気にするべきことです。ということで、お待たせしました。配線例を図 6 に示します。ボタンの向きに気をつけてください。ツメが同じ向きに出ている方が機械的に断絶されています。

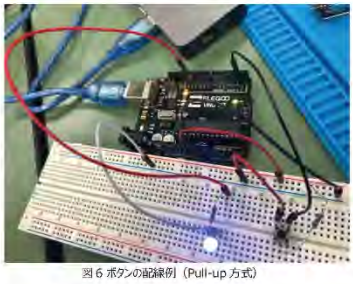


図 6 ボタンの配線例（Pull-up 方式）

7. プログラムで大事な構文（if文・for文）

ポプラ育成装置を動かしているプログラムを後々読解することになりますが、その際に大事になる文法はそれほど多くありません。ここでは、if 文と for 文を紹介します。ポプラ育成装置のプログラムでは基本となっている構文で、それ以外は Display への表示など決まった表現ばかりです。

if 文は、実行するプログラムを条件に応じて変える場合に活躍します。例えばポプラ育成実験の場合であれば、「CO2 濃度がある値よりも低下したら、CO2 ボンベの電磁弁を開ける」、「CO2 濃度がある値よりも大きければ、何もしない」という具合です。それでは、具体的な文法を確認しておきましょう。Arduino はほぼ C 言語と同じ文法で動かすことが可能です。

```
if (条件式){
    条件式を満たしているときにArduinoが実行すること
  }
  else{
    条件式を満たしていないときにArduinoが実行すること
  }
```


else は省略することも可能です。また、else のあとには、さらに if 文を重ねて

```
if (条件式1){
    条件式1を満たしているときにArduinoが実行すること
  }
  else if (条件式2){
    条件式2を満たしているときにArduinoが実行すること
  }else if(条件式3){
    条件式3を満たしているときにArduinoが実行すること
  }
```

などとすることも可能です。但しここで 1 つ注意です。if 文を重ねる時に、より多くの場合を含む条件から書くようにしましょう。先に狭い条件の if 文を書いてしまうと、その時点で if 文に合致しないものははじかれてしまうのです。for 文は、何かの動作を回数を決めて実行する際に用いられます。さっそく構文をチェックしておきましょう。

```
for(初期条件;条件式;変化式){
  Arduinoが実行する文
  }
```

これだけでは少し分かりづらいので、さらに具体的な例を見て確認しましょう。

```
for(j = 1; j < pn + 1; j = j + 1){
      digitalWrite(IN_PIN4, HIGH);
      delay (ct);
      digitalWrite(IN_PIN4, LOW);

//dysplay CO2Pulse
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("Pulse");

//dysplay Pulse number
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("Number:");
      lcd.setCursor(8, 1);
      lcd.print( j );

  delay (dt);
  }
```

このプログラムは、CO2 噴射量測定用プログラムの抜粋です。(pn や ct はひとまず定数だと思ってください。) まず j という変数を用意し、j を 1 と置きます。そして、j が条件式 j < pn + 1 を満たしていたら、for 文の中身を実行します。そして、for 文の 一番下まで来たら、j = j + 1 をします。そして、再度 j < pn + 1 を満たしていたら for 文の中身を実行の繰り返しです。例えば、pn = 10 だった場合、この for 文の中身は 10 回実行されて終了ということになりますね。これらの構文はプログラムを自分で書く際には必ずと言っていいほど必要になってきます。足非覚えて帰りましょう！

研修紹介
LignoSat 管制の地上局の準備活動紹介

石原正次
京都大学宇宙木材研究室

宇宙木材研究室の非常勤研究員、石原正次です。

有人宇宙学実習とSCB2(Space Camp at Biosphere 2)のプログラムで電波教室と宇宙無線通信の講義を担当しています。現在進んでいる LignoSat プロジェクトでは 2021 年から COMM チームのサポートをしています。2020 年に、私が趣味で活動しているアマチュア衛星通信愛好家の団体で、NPO 法人 日本アマチュア衛星通信協会(JAMSAT,Japan Amateur Satellite Assosiation)に、田島先生から、アマチュア衛星通信について問い合わせて頂いたのがきっかけでお手伝いさせて頂くことになりました。

現在はインターネット環境が整いスマートフォンがあれば何処にいてもデーターのやり取りができる事が当たり前になっていますが、一方で電波のお世話になっていると言うことを認識されていない方が多いと思われる事から、電波教室を通じて皆さんに電波のことをもっと身近に感じてもらい、また、アマチュア無線を通じて電波を使いこなす体験をして無線技術に親しんで頂きたいと思っています。

アマチュア無線の紹介

近年アマチュア無線離れが進んでいて若い世代のアマチュア無線人口は少なくなっています。

携帯電話が普及する前 1990 年頃はアマチュア無線をやる人の人口はピークで 130 万人程度まで増えていましたが近年は 39 万人程度になっています。1980-90 年頃は中学、高校、大学にアマチュア無線クラブが沢山ありましたが、現在にはほぼ有りません。京都大学にもアマチュア無線クラブ、JA3YDS がありましたが現在は活動休止しているようです。

プロの通信は 100%つながって当たり前なので実際に電波を使っているという意識を持つ事なく利用しています。ただし、時々携帯電話、スマートフォンを使っていて圏外になることで悩まされますが、この時に電波を使っているという意識を持たれることも有るでしょうか。

プロの通信に対してアマチュア無線は電波伝搬の状態が、約 11 年周期の太陽活動変化、電離層の季節変化や日変化、対流圏の状態の変化、などの様々な要素によって影響を受けるため、偶然のつながりを楽しむ通信です。また、地震などの災害時には、商用電源(AC 100V/200V など)が喪失すると早ければ数時間、長くて 2 、3 日で携帯電話基地局のバックアップ用のバッテリーが使えなくなり連絡手段が途絶えます、しかし自分で電源(車のバッテリーなど)さえ確保できればアマチュア無線を使っての通信は引き続き可能です。この事から、アマチュア無線は最後の通信手段とも言われています。過去には、阪神淡路大震災、東北地震などの災害の際に非常通信を行い社会貢献されました。

LignoSat 運用の支援

地球局のアンテナ設備と衛星の管制運用の為の無線局整備の紹介

低軌道衛星は約 400Km から 1000Km の高度を約 90 分で地球を周回しています、京都大学からの衛星の可視時間は、地平線から上がってきて(AOS)から、反対側の地平線に沈んで(LOS)見えなくなるのに、10 分程度しかなく、衛星は高速で移動するため常時衛星の方向にアンテナを向け続ける必要があります。このためのアンテナは北部教育研究棟の屋上に設置しています。

北部教育研究棟屋上に設置されたアンテナ

内訳は、144MHz(VHF)/430MHz(UHF)アンテナと水平回転/仰角(上下)回転用のローテーター(モーター)を設置し、低軌道衛星の方向追尾が PC コントロールの自動で出来る様になっています。

LignoSat のコントロールのための地球局の機器の詳細

地球局運用の無線設備は北部教育研究棟の 506 号室に設置されています。

LignoSat の管制(コントロール)は、地球局のコマンドの送信(Uplink)とミッションデーターの受信(Downlink)のための送受信機(ICOM 社製 IC-9100、IC-9700)と、屋上に設置された、アンテナの向きを調整し飛んでくる衛星を自動追尾するためのソフトウエアを動かす Windows10 PC です。アンテナコントロール用のソフトウエアは SATPC32/CALSAT32 で(予備)で PC とローテーターコントローラーを繋ぐインターフェースを介してアンテナの方向を自動コントロールし、衛星の見え始め(AOS:衛星が地平

線から上がって来る)から見え終わり(LOS:衛星が地平線に沈む)までアンテナの方向を衛星に向け続けます。LignoSat の運用にはアンテナのグレードアップが必要で現在準備を進めています。

地球局構成図

今回は、アマチュア無線の紹介と LignoSat 管制用の地球局を簡単に紹介させて頂きました。これからも進展具合を順次紹介させて頂きたいと思います。

用語資料

AOS:Acquisition of signal 衛星が地平線から上がって来る

LOS:Loss of signal 衛星が地平線に沈む

アマチュア衛星用語小辞典参照 JAMSAT HP

https://www.jamsat.or.jp/features/glossary/index.html

ソフトウエアについて

SATPC32 AMSAT-NA 配布 有料

https://www.amsat.org/product/satpc32-by-electronic-download/

CALSAT32 JR1HUO フリーソフト、真田氏作成

http://jr1huo.my.coocan.jp/jr1huo_calsat32/index.html

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター

https://space.innovationkyoto.org/

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部総合研究 :6 号館 208 号室

編集人：木造人工衛星製作チーム 菊川祐樹 笥井清輝

Tel&Fax: 075-753-5129 Email: spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter No.11

2022 年 11 月 1 日発行

参考資料 9-3
Spaceology Newsletter: 2022 年 12 月号

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2022 年 12 月号 No.12

11 月の活動

第 6 回 Moon Village Association 国際シンポジウム参加報告

山敷庸介　記

第 6 回 Moon Village Association(MVA)国際シンポジウム(6th Global Moon Village Association Workshop & Symposium) が 2022 年 11 月 6 日-8 日にアメリカ・ロサンゼルスにて開催され、MVA 委員で SIC 有人宇宙学研究センター特任教授(JAXA)の稲谷芳文氏および、センター長の山敷教授が参加しました。山敷教授は、「Three essential "Core" Concept for Space Exploration - Core Biome, Core Technology and Core Society 」の基調講演 (Three essential "Core" Concept for Space Exploration - Core Biome, Core Technology and Core Society) において SIC 有人宇宙学研究センターで進めている宇宙開発の概念を広く参加者に伝えました。同時に、VR を用いた宇宙居住体験では多くの参加者から高い評価を得ました。

また、来年開催予定の第 7 回 MVA 国際シンポジウム (7th Global Moon Village Workshop & Symposium) について、三カ国から開催提案があった中で、最終的に日本での開催提案（岡山・鳥取開催）が正式に採択され、オーガナイザーである山敷・掘谷両氏が、次期開催地としての招聘報告をしました。第 7 回シンポジウムは、2023 年 11 月に岡山（倉敷）と鳥取にて開催される予定で、来月早々に準備会合が行われますが、月惑星における宇宙社会を構築するための様々な議論が活発に行われる予定です。なお、2019 年 12 月に実施された第 3 回 MVA 国際シンポジウムは、土井隆雄特定教授らを中心に東京理科大学と京都大学にて開催され、京都会場では 200 名を超える参加がありました。

1

以下 2023 年に開催される第七回しシンポジウムの資料となります。（山敷庸介　記）

2

木造人工衛星 LignoSat
九州工業大学研修振動試験報告

木造人工衛星 LignoSat 設計チームから、打ち上げに向けて 10 月、11 月に実施した振動試験についてご紹介します。人工衛星では、打ち上げの際にロケットの振動によって共振を起こすことがないよう、前もってロケットの振動を模した振動発生装置によって試験を行います。共振が発生すると構体の破損や外部への悪影響が考えられるため、振動試験によって構造強度を確認することは非常に重要です。

振動試験は、衛星を宇宙での放出用ポッドに搭載し、ポッドを治具に固定することで行います。振動レベルは外部の試験設備によって調整可能であり、LignoSat では JAXA の打ち上げ要求に基づいて設定された振動条件エンベロープを使用します。

表 1 ランダム加振試験における加振条件

PSD (AT レベル)		PSD (QT レベル)	
周波数 [Hz]	PSD 値 [g^2/Hz]	周波数 [Hz]	PSD 値 [g^2/Hz]
20	0.025	20	0.05
30	0.025	30	0.05
40	0.015	40	0.03
120	0.031	120	0.062
230	0.031	230	0.062
860	0.0055	860	0.011
1200	0.0055	1200	0.011
2000	0.0025	2000	0.005
オーバーオール加速度 [G_{rms}]		オーバーオール加速度 [G_{rms}]	
4.294		6.07	
振動時間 [s]		振動時間 [s]	
60		120	

振動試験では、衛星構体や衛星の放出に使用するポッドに接着された加速度センサからそれぞれの振動周波数における振動レベルを算出します。それによって得られた波形から衛星の固有振動数(最低次)を推定し、打ち上げの基準をクリアしていることを確認します。

3

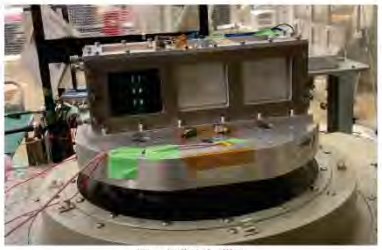


図 1 振動試験の様子

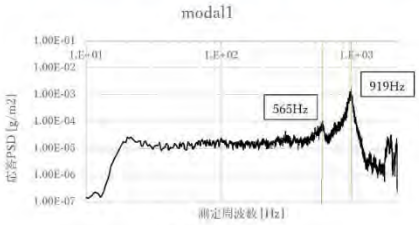


図 2 振動試験結果例
（この結果からは、最低次固有振動数が 565Hz と推定できる）

振動試験は主に固有振動数を判別するためのモーダルサーベイ、打ち上げの振動を再現するランダム加振、正弦波の振動を加えるサインバースト試験に分けることができます。ランダム加振は要求レベルである AT レベルとその 2 倍の振動をかける QT レベルに分けられ、ランダム加振及びサインバースト試験の前後でモーダルサーベイを行います。

4

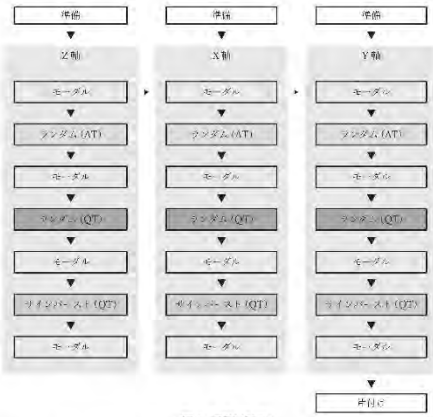


図 3 振動試験フロー

（細辺 一 記）

第 66 回宇宙科学技術連合講演会 参加報告

京都大学タイタン小社会研究会

11 月 1 日~4 日に第 66 回宇宙科学技術連合講演会が熊本県熊本城ホールで開催された。宇宙科学技術連合講演会は日本最大の宇宙分野の講演会であり、あらゆる分野の宇宙に関する研究に携わる産官学の研究者や技術者が一堂に集い、様々な議論や意見交換が行われている。数年ぶりの対面開催であり、大勢の人で賑わっていた。

京都大学タイタン小社会研究会では、11 月 3 日に土星の第 6 衛星タイタンにおける小社会の設計について研究成果の発表を行った。今回の発表では、これまでに検討してきたダンパー数を基にした 150 人規模のタイタン小社会の設計とタイタンの運行周期に則した暦の考察に関して発表をした。複数の質問を受け、これから研究を進めるにあたり大変参考になった。また、朝早くの発表にも関わらず聴衆も多く、タイタン研究に対する関心の高さが感じられた。

今回の講演会では、金井宣茂宇宙飛行士の特別講演や、探査機等の部品となる工業製品・JAXA が計画している火星衛星探査計画 MMX についての発表など、普段聞く機会のない様々な話を聞くことができ、勉強になると共にとても刺激となった。

今回の発表を踏まえて、今後はタイタンにおける暦の研究をさらに発展させ、人類が宇宙において恒常的に居住する文化圏においてどのような暦が構築されうるかについて、より深く考察を進めていきたい。

（松岡勇樹 記）

LignoSat 紹介

木造人工衛星学生開発チーム

STRUC 班

今回は LignoSat チーム Structure 班の活動をご紹介します。今回は、Structure 班が人工衛星製作において担当する役割の一つである、実際の組み立てについてご紹介します。

○使用する部品

使用する部品は主に 3 種類に分けることができます。一つ目は、衛星の内部に配置される様々な電子基板です。電子基板は人工衛星に様々な機能を持たせ、ミッションの成功に欠かせない最も重要な部品です。二つ目は、木造人工衛星 LignoSat にとって必要不可欠な木造構体及び主構造を担うアルミフレームです。これらは衛星の構造体としての役割を持ち、Structure 班は主にこれを担当します。

三つめは、アンテナやシャフト、ねじといった、補助的に衛星を完成させる部品です。これらは電子基板や構造体に比べると重要でないように思えますが、衛星の打ち上げ、運用には欠かすことのできない大事な部品です。

図 1 LignoSat の構体を担う木造構体 (左) とアルミフレーム (右)

○組み立てについて

LignoSat の組み立ては、最初に電子基板とシャフト一つに組み、そこに木造構体を取り付けて最後にアルミフレームを取り付けます。電子基板は壊れやすいので、繊細に作業を行う必要があります。また、埃などの混入を避けるため、実際に打ち上げるフライトモデルを組み立てる際は清潔に保たれたクリーンルームを使用する必要があります。

使用するねじはステンレス製で、直径約 3mm のものと約 2mm のものを用います。それぞれのねじには締め付け時にかける力の大きさが決まっており、これを規定トルクと呼びます。衛星のねじはすべて規定トルクで管理され、精確な組み立てが行われます。（細辺 一 記）

低圧下樹木育成プロジェクト紹介

Arduino 講習会＃2

1. はじめに

今回は、温度・湿度センサーの取り扱いと時間等のモニター表示を扱います。今回からボンラ育成実験で実際に使われているような内容に入ります。

2. 温湿度センサー

ボタンを用いた LED 点滅の際に、ボタンをセンサーの一種と言いましたが、ボタンは「HIGH」、「LOW」しかないセンサーです。グラデーションのある電圧 (0-5[V] の間とか) を読み取りたい場合はどうしましょう。ここで出てくるのが analogRead です。今回の温湿度センサーに関してはライブラリが存在しているのでそれ

を利用しましょう：http://www.shangtian.tokyo/entry/2017/04/09/212730

このHPに手順が書いてあるのでこのページを参考にすれば出来ますが、補足等していきます。

まず使うセンサーは「DHT22」です。（参考 HP は「DHT 11」のもので、この辺りの修正が必要です。）図 1 を見てください。左から 5[V]、温湿度の電圧による値出力「OUT」、「GND」です。5[V] や「GND」は Arduino 上のどこでも良いです。「OUT」は 2 番 pin で受け取るようにしましょう。配線の細かい部分は見本も参考にして下さい。

図 1：DHT22 センサー

プログラムは、「sketch_2_1_DHT_v1.0.ino」を用いてみましょう。（プログラムの意味も理解しましょう。）まずはプログラムをダウンロードします。

次に順を追って、プログラムの説明をしていきましょう。最初の include がポイントです。この DHT.h という「ヘッダーファイル」は初期の状態では使えません。よって、ライブラリーをインクルードする必要があります。今回は Adafruit_Sensor をインストールしましょう。次の github から ZIP 形式でインポートできます：https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor

ZIP 形式でインポートしたら、Arduino の方に戻り、「スケッチ」内の「ライブラリをインクルード」、「ZIP 形式のライブラリをインストール」を選択します。あとは、ダウンロードしたところのフォルダーに移動して、先ほどダウンロードした ZIP ファイルを選択すればOK です。

図 2：Adafruit_Sensor の github 画面

次に、DHT ライブラリのインポートです。「ツール」内の「ライブラリを管理」をクリックし、検索で「DHT」と打ちましょう。「DHT sensor library by adafruit」のインストールをクリックすれば完了です。

図 3: DHT sensor library

プログラムの説明に戻りましょう。DHT.h によって面倒な analogRead は全てやってくれます。（こんな感じで、C 言語なら #include 、Python なら import というように、ヘッダーファイルやモジュールをインポ

ートすることで、便利な機能をすぐに使えるようになります。

上から重要な部分を説明していきます。まずは、「const int PIN_DHT = 2;」ですね。これは、「const」が、プログラム中では書き換えることができない定数、「int」が整数型という意味です。つまり、「PIN_DHT」という変数に、整数 2 を格納するという意味ですね。

その後の、DHT 関連のコマンドは、DHT を使うなら必ず必要になる命令です。おまじないだと思って大丈夫です。「pinMode(PIN_DHT, INPUT);」に先ほど定義した「PIN_DHT」（つまり 2 番 pin）を入力モードにします。この 2 番 pin から温湿度データを取り入れるということになります。そのあと目立つところがあるとすれば、「Serial」でしょう。これは「ツール」内にある「シリアルモニター」と「シリアルプロッタ」に出力するための文法です。「9600」は単位として bit/sec を取ります。Arduino と PC 間のケーブルの通信速度だと思って下さい。「print」は改行なし出力、「println」は改行あり出力です。「""」がついているときは文字型の変数、付いていないときは数値型の変数と思って下さい。それではいよいよコンパイルと書き込みを行いましょう。終了したら、「ツール」の「シリアルモニタ」をクリックして下さい。温湿度が表示されます。センサーを触ったりして様子を見ましょう。温湿度が「nan」と表示される場合は、配線を見直したりしてみて下さい。それでもダメな場合は呼んでください。

次に、「シリアルモニタ」を消して「ツール」の「シリアルプロッタ」をクリックして下さい。温湿度がグラフで表示されます。

図 4：シリアルプロッタの図

課題 1　delay();内の数字を短くしてみましょう。限界があると思います。物理的限界を感じてみましょう。
課題 2　任意の温度や湿度を超えたり下がったりしたらLED が点くように作ってみましょう

（清田浩和　記）

研修紹介

超小型人工衛星「LignoSat」の基礎設計

京都大学有人宇宙学研究センター宇宙木材研究室

1. 目的および背景

昨今，人類の宇宙進出を目指すにあたって，地球外における持続可能な社会の形成に向けた技術開発や議論が盛んにおこなわれている．とりわけ，宇宙空間での持続的な衣・食・住の実現に向けて，植物の宇宙利用，宇宙環境耐性に関する研究が頻繁に行われてきた．京都大学大学院総合生存学館では，木材資材の宇宙利用可能性に着目し，持続可能な宇宙開発資源としての木材の有用性を検証することを目的とした基礎的研究を進めてきた [1,2]．これまで，例えば様々な樹種の木材に対し長期真空暴露試験を実施し，真空環境下においても木材の基礎物性に変化が生じないことを報告している [1]．

古来より，森林資源は地球環境の保全や自然災害の防止といった役割だけでなく，建築物や乗り物などを構成する社会基盤材料として人類の文明社会を支えてきた．とりわけ日本における木材利用においては，強度的・意匠的にも優れている木組みの技法が伝統的に受け継がれ，現代でもその技術的価値が評価されている．また，2020 年に林野庁は「カーボンニュートラルに伴うグリーン戦略」を公表し，製造時のエネルギー消費が少ない木材の利用拡大が，2050 年目標である農林水産業における化石燃料の CO_2 排出量をゼロにする施策の基軸であるとしている．このように長期的な持続可能社会の形成を目指す上で，木材の利便性・実用性は近年ますます注目されていると言える．

我々の研究チームは，宇宙における木材資源の利用可能性を更に調査することを目的に，超小型木造人工衛星「LignoSat」の設計・開発を進めてきた [2]．LignoSat は 1U 規格の CubeSat であり，構体系バスシステムをほぼ全面的に木造化することを想定している．これまでの概念設計の結果から，こういった木造構体が宇宙環境下において人工衛星構体系として十分に機能しうることを確認している．木造人工衛星によって宇宙機構造部材としての木材の信頼性を実証することは，木材の宇宙材料としての利用法の深耕に繋がるだけでなく，木材産業の新たな活躍の場の創出に寄与し，ひいてはカーボンニュートラルな社会の実現に大きく貢献しうると期待される．さらに，木材の主成分は炭素・水素・酸素を主要な構成元素とする天然系高分子であるため，木造構体系は大気圏再突入時に十分な燃焼反応を起こし，有害な微細粒子の生成を抑制できると我々は考えている．すなわち，成層圏・海洋・宇宙空間などの環境への負荷を低減できることが期待されるとともに，宇宙開発に伴う自然環境への悪影響を問題視される端緒となりえる点において，本プロジェクトは大きな意義をもつ．本稿では，我々の研究チームがこれまで行ってきた LignoSat 開発における基礎設計仕様について紹介するとともに，開発に伴う各種関連試験の実施結果および今後の展望について報告する．

2. ミッション定義

LignoSat 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経時的かつ *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深究することを目指す．また，LignoSat の運用にあたっては，アマチュア無線周波数帯（UHF 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．LignoSat の主要なミッションは次の 4 つに大別される．

(1) 2 軸歪み測定ゲージを用いて木造構体内部（木板内側）の歪みの経時的測定を行う．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．

(2) 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．

(3) 地磁気センサを用いた衛星構体内部における地磁気測定を行う．木材が磁場を透過することを実証することにより，木造構体内部への磁気トルカなどの姿勢制御コンポーネントの実装可能性を検討する．

(4) アマチュア無線ベース（UHF 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目指す．

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

LignoSat が国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）より放出され，地上局で LignoSat 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

LignoSat からの CW 信号及び FM パケット通信信号を 6 ヵ月間受信でき，LignoSat の内部温度や木造構体の宇宙での歪み特性及び木造構体内部の地磁気特性の知見を得る．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 ヵ月間以上に渡って LignoSat 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に，アマチュア無線家との交信も継続的に行う．

なお，各ミッションの詳細については本講演会の別発表にて扱うため，本稿では割愛する．

3. 衛星および地上局システムの開発

3.1 衛星ハードウェア設計

衛星構体は，6 枚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（図 1）．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．

表 1　LignoSat の主要諸元．

項目	内容
運用期間	6 か月以上
軌道	高度約 400 km の ISS 軌道（ISS からの放出）
サイズ	1U (100 mm×100 mm×113.5 mm)
質量	1.33 kg 以下
バッテリー	Ni-MH (3S2P)
周波数	Uplink/Downlink: 435 MHz 帯（UHF 帯）
発電量	約 1400 mW

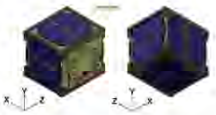


図 1　LignoSat 外観．

ISS の超小型衛星放出インターフェースの寸法要 [3] に適合するため，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た．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ボルトのトルク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，トルク管理のみによって公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．-X 面には UHF 帯通信用ダイポールアンテナ展開機構が実装されており，ISS 放出から数十秒後に軌道上にて展開する．太陽電池パネルはプリント基板を介して他の 5 面に各面 2 枚ず

つ，計 10 枚貼付されており，姿勢制御なしで衛星運用に必要な電力量を確保する．アクセスボードは+X 面に投画されている（表 1）．なお，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気的インターフェースを確保している．

3.2 衛星ソフトウェア設計

LignoSat のバスシステムには，九州工業大学により開発され，実績のある BIRDS[4]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ことに努めている（図 2･3）．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 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．

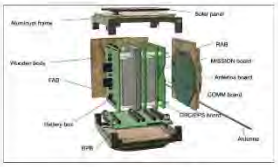


図 2 LignoSat 内観

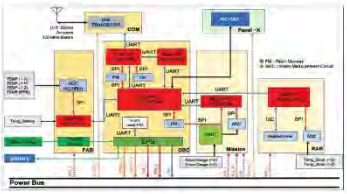


図 3 システムブロック図

3.3 地上局システムの開発

人工衛星との通信用地上局として，2020 年春に京都大学敷地内に UHF/VHF 帯通信対応のアマチュア無線通信局を開局した（北緯 35.03 度，東経 135.79 度）．本設備により，アマチュア衛星の自動追尾・交信が可能となっている（図 4）．今後は地上局ハードウェアの整備を随時行うとともに，管制用ソフトウェアの開発・実装に着手し，衛星運用に必要となる各種機能の準備・テストを行う計画である．

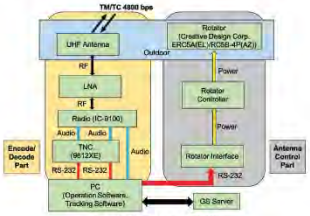


図 4 地上局システム系統図

4. 現在の開発状況および今後の展望

各バスシステムの開発状況および今後の開発展望について紹介する．

4.1 コマンド&データ処理系

九州工業大学の BIRDS バスプラットフォームに準拠し，LignoSat 搭載用の各種電子基板の基礎設計を完了した．図 2,3 中に示すバックプレーンボード（BPB: Back Plane Board），フロントアクセスボード（Front Access Board: FAB），OBC/EPS ボードそれぞれについて，電気的・物理的接続を評価し，通信信号が問題なくやりとりされることを確認済みである．今後は，各基板間の信号のやりとりを外部からモニタリングできるような相互通信評価試験系を構築し，EM 搭載用ソフトウェアの開発に着手する計画である．

4.2 通信系

LignoSat では，アンテナエレメントを衛星表面に巻きつけ固定している釣り糸を加熱して焼き切ることにより，宇宙空間にてアンテナを展開可能である（図 5）．このような機構は，九州工業大学の BIRDS 衛星をはじめとした多くの CubeSat にて既に利用実績のある展開手法である．本展開機構の構築に必要な部品のほとんどを我々は木造化しているため，展開に際して十分な保持強度があるかを検証するために地上展開試験を複数回行い，その信頼性を確認してきた．今後は，電波暗室にて EM を用いた電波発射地上試験を行い，使用するアンテナの最適化設計および衛星における信号ノイ

ズの確認試験等を行う．更に，交信時のロスをできる限り低減可能な地上局ハードウェアの構築および管制用ソフトウェアの実装に取り組む予定である．

図 5 UHF 帯用アンテナ展開機構

4.3 電源系

バッテリーとなる Ni-MH 電池の充放電特性を解析するためのシステムを構築し（図 6），高真空暴露試験や振動試験をはじめとした各種環境試験後においても安定した電気特性を保持可能な電池を選定した．選定した電池は，EM やフライトモデル（Flight Model: FM）用バッテリーとして採用する．今後は，EM を用いて各電子基板における消費電力を見積もり，軌道上での発電量及び衛星運用に伴う消費電力量の収支に問題がないことを確認していく予定である．

図 6 電池充放電特性解析システム

4.4 構体系

ISS の超小型衛星放出インターフェースの規格に基づき，木造構体およびアルミフレームの最適な形状を検討し，EM の構体系の詳細な設計を進めている．今後は，EM 完成後改めて振動試験（QT レベル）を実施し，その構造設計に問題がないことを検証する．

おわりに

本稿では，超小型木造人工衛星 LignoSat のミッション定義や基礎設計事項および関連する各種試験結果，そして現在の開発状況について紹介した．宇宙機構造材料としての木材の利用は世界初の画期的な取り組みであるほか，京都大学において人工衛星を包括的に開発することは本学初の試みとなっており非常に意義のある挑戦であると考えている．また，京都大学では，宇宙環境に晒された木材の基礎物性や細胞壁微細構造がどのように変化するのかを直接検証するため，宇宙航空研

究開発機構（JAXA）の簡易材料暴露実験ブラケット（Exposed Experiment Bracket Attached on i-SEEP: ExBAS）を用いた木材試料の宇宙環境暴露実験を進めている．これらのプロジェクトが木材の宇宙材料としての利用法の模索に繋がり，宇宙木材産業を実現させる契機となることを我々は期待している．

謝辞

BIRDS バスプラットフォームについて指導して頂いた九州工業大学に感謝いたします．

参考文献

1) 三木健司，村田功二，清水幸夫，櫛谷芳文，土井隆雄：宇宙における木材資源の実用性に関する基礎的研究，第 34 回宇宙構造・材料シンポジウム；講演集録，SA6000137022，2018．
2) 曽束元喜，二木健司，仲村匡司，村田功二，臼井浩明，櫛谷芳文，清水幸夫，土井隆雄：木造キューブサットの概念設計，第 63 回宇宙科学技術連合講演会，JSASS-2019-4161，2019．
3) "JEM Payload Accommodation Handbook-Vol.8" https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/jx-espc_8d_en.pdf
4) Taiwo Raphael Tejumola, BIRDS Project Members, BIRDS Partners, George Maeda, Sangkyun Kim, Hirokazu Masui, Mengu Cho: Overview of Joint Global Multi-Nation Birds Satellite Project, 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan, 2017.

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター
https://space.innovationkyoto.org/
〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室
編集人：木造人工衛星製作チーム 菊川裕樹 筒井亮輔
Tel&Fax: 075-753-5129 Email: spaceworld@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp
SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter No.12
2022 年 12 月 1 日発行

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2023 年 1 月号 No.13

宇宙木材研究室の活動 2023 年を迎えて

土井隆雄

2020 年に京都大学大学院総合生存学館に SIC 有人宇宙学研究センターが設立された。その中のひとつの研究室が宇宙木材研究室である。宇宙木材研究室は宇宙で木材を利用する可能性を探究するのが目的であり、大きく分けて 3 つの活動をしている。

一つめは、住友林業株式会社と共同で世界初の木造人工衛星：LignoSat1 号機（図 1）を開発していることだ。木造人工衛星は木が宇宙で使えることを実証することをめざしている。木を宇宙で使うというと奇異に思われる方が多いと思うが、実は木は宇宙で使うのに非常に適していることがわかってきた。木は現在の人工衛星構体の材料に多用されているアルミニウムよりも比強度（単位重量当たりの強度）が大きく、また[illegible]性が小さい。工作も比較的容易で安価でもある。一番大きな利点は、宇宙には雨も木を食べる昆虫も腐らす細菌もいないため、非常に長持ちすることだ。また、低軌道を周る人工衛星は運用が終わると宇宙ゴミを出さないために地球大気圏に再突入するように作られているが、アルミニウムは大気中の酸素と結合して酸化アルミニウム（アルミナ）の微粒子になり、長期間大気圏を漂う。即ち、アルミニウム製の人工衛星は大気汚染をしているのだ。木造人工衛星は大気中の酸素と反応して水蒸気と二酸化炭素に戻るだけで、地球環境に優しい衛星でもある。私たちは木造人工衛星 1 号機を 2023 年度中に打ち上げることをめざしている。

図 1 LignoSat1 号機構体

- 1 -

二つめは、低圧下での樹木の育成実験だ。月や火星で木材を使うために、地球から木材を運ぶのでは運賃が膨大になってしまう。もし、月や火星で樹木を育てることができれば現地生産が実現できる。そのために私たちは、火星環境（0.01 気圧、二酸化炭素大気）で樹木を育成するための育成法の研究を行っている。現在までの予備実験では、樹木としてポプラを用い 0.2 気圧の低圧環境下でポプラの育成に成功している。0.2 気圧というと地表 12,000 メートルの高度に相当している。日本の森林限界は標高 2500 メートル程度であると言われている。森林限界は標高が高くなるにつれて低気圧になるから起こるのではなく、気温の低下により光合成ができなくなることに起因していることがわかる。2023 年度は火星環境での育成をめざして、さらに低圧での樹木育成実験を行う予定である。

三つめは、将来の宇宙開発を推進していく若い人材の育成である。上に述べた二つの研究開発は、宇宙木材研究室の所属する学生チームによって進められている。学生チームが主体的に研究計画を立てて実験研究を進めて行けるように教職員が全面的にバックアップしている。さらに宇宙木材研究室では、前期に学部生を対象とした短期有人宇宙ミッションを模擬した ILAS ゼミナー：有人宇宙学実習を実施し、後期には大学院生を対象とした有人宇宙学講義を行っている。有人宇宙学講義は 150 人が暮らす小社会を宇宙に設計せよという課題も実施され、考案された宇宙社会のポスターは宇宙ユニットシンポジウムで発表される。また、2023 年 3 月には日本で初めての宇宙木材利用シンポジウムを京大で開催する予定である。（土井隆雄 記）

12 月の活動

学ント「火星に住もう」 Season 2 講演

SIC 有人宇宙学研究センターとよみうりカルチャーOSAKA（大阪よみうり文化センター）は、月 1 回、京都市内の読売京都ビルで来場&オンデマンド配信による学ント「火星に住もう！ Season 2」を開講している。人類の宇宙進出に向けた研究開発や課題について、SIC 所属講師らが最前線に立つ人気講座で、11 月は Synspective 経営企画室 CEO 補佐の[illegible]氏が、ベンチャーを含め日本の宇宙開発企業の多さを挙げ、衛星の小型化やビッグデータと AI 活用の具体例を紹介。現在、40 兆円の宇宙市場は 20 年後、100 兆円に急成長する見込みであると会場を驚かせた。12 月は宇宙総合学研究ユニット特定准教授の[illegible]氏が、宇宙医学の観点から宇宙環境と地上で人体への影響、反応の違いを紹介。無重力で筋力低下が問題視される中、既に半年間も筋肉量維持をしていない実例を挙げ、研究を進めるうえで参考になるのではないかと話した。

講座は 3 月まで続く。1 月 15 日「天体での人類活動に適用される国際宇宙法を考える」青木節子・慶応大学大学院法務研究科教授、2 月 19 日「人類学から見た人類の宇宙進出」[illegible]・神戸大学大学院国際文化学研究科教授、3 月 19 日「生命を宿す天体の条件を探る」[illegible]・京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室助教。いずれも日曜午後 1 時～2 時 30 分。申し込みは、よみうりカルチャーOSAKA の HP よみうりカルチャーOSAKA|オンライン講座 学ント
(https://www.ync.ne.jp/osaka/manabo/kouza/202210-18010017.htm)
（[illegible] 記）

- 2 -

京都府立植物園見学会 2022 年 12 月 3 日（土）

2022 年 12 月 3 日（土）、宇宙木材研究室の有志が集まり京都府立植物園を見学した。見学会を主催したのは京都府立大学名誉教授の[illegible]先生である。[illegible]先生は宇宙木材研究室の低圧下での樹木育成実験を指導されている。京都府立植物園は、1924 年に開園された日本で一番古い公立植物園である。広さは 24 ヘクタールに及び園内に 12,000 種の植物・樹木が生育している。樹木のことを学びたいならば、一度は訪れたい場所である。

今回の見学会には、宇宙木材研究室の学生・教職員・家族の総勢 13 人が参加した。天候は快晴で見事な青空が広がり、植物園内は紅葉している樹木であふれ、素晴らしい時間を過ごすことができた。私が今回習ったのは、京都市内に見られる代表的なモミジには 3 種類あること：イロハモミジ、ヤマモミジ、オオモミジだ。クロマツの針葉はやわらかいこと、そして宇宙ザクラがあることだ。

[illegible]先生から今の石炭を掘りつくしてしまうと地球では新しい石炭はもう取れないということも聞いて驚いた。石炭は今から 3 億から 3 億数千万年前に栄えた樹木が分解されないで地中に堆積して作られたと考えられている。その当時はまだ樹木を分解する微生物が現れていなかったのだ。しかし、現在ではすでに樹木を分解する微生物が存在するために、樹木が分解されずに地中に堆積することはないのである。（土井隆雄 記）

2022 年 12 月 3 日 京都府立植物園にて（撮影：[illegible]）

- 3 -

COM 班筑波大学訪問

LignoSat COM 班

LignoSat の COM 班の[illegible]と[illegible]の 2 人が、12 月 11 日に LignoSat2 号機に使用する予定のパッチアンテナの仕様確認と今後の展望の為に、すでに筑波大学の「結」プロジェクト内で使用されている超小型アンテナの説明や施設見学を行った。現在開発中の LignoSat は 1U であるが、2 号機では 2U（図 1）になり、アンテナもパッチアンテナへ変更される予定である。

図 1 LignoSat2 号機のイメージ図

訪問先では「結」プロジェクトチーム代表の[illegible]を中心に結プロジェクトの皆様が対応してくださった。主に結プロジェクトの紹介から、超小型アンテナで使用しているシミュレーターや実装までの解説など 20 以上の質問に丁寧に回答してくださった。その後は結プロジェクトで超小型アンテナの性能を評価する際に使用した実験設備を見学し、実際のアンテナ運用で用いたプログラムやアンテナ設計で使用したプログラムの共有をしていただいた。これらのデータを基に今後は 2 号機のアンテナ取付位置から全体のシステムへの適用、変更点のまとめなどを行っていく。2 号機の打ち上げは 2026 年春になる予定である。（[illegible] 記）

木造人工衛星 LignoSat アドニクスとの COM 基板試験報告

木造人工衛星 LignoSat 設計チームから、打ち上げに向けて 12 月に実施した COM 基板試験についてご紹介します。LignoSat では宇宙空間にいる人工衛星と地上局との通信を行う COM 基板があるのですが、こちらが正常に動作していない可能性があるということで、製造会社の株式会社アドニクスの小島氏をお迎えして、COM 基板及び地上局設備の動作確認を行いました。具体的な不具合は、基板を動作させる際に理論値よりも大きな電工電流出力になってしまっていたことです。

小島氏が持ってきてくださった試験用の基板を使用して出力電波を確認したところ、正常な波形が得

- 4 -

られました。具体的には通信系には CW 通信とパケット通信の 2 つがあり、衛星の基本的なデータを CW通信で、衛星内の詳細のデータがパケット通信で行われます。その中でもパケット通信が成功していなかったのですが、図 1 に示されるように実測波形と理論波形がほとんど一致する結果を得ることができました。以前九州工業大学へ検証した際は動作不調でしたので、現在原因を調査中です。

図 1 実測波形（左図）と理論波形（右図）

さらに地上局の確認も行ってくださり、基板から送信された電波を地上局でデータとして変換する機構の確認をしたところ、地上局部分の不調が確認できました（図 2）。製造会社の方が来ることによって多くの問題が解決した非常に有意義な時間でした。今後は基板を使用した全体評価のフェーズに入っていく予定ですので、今まで以上に動作確認を慎重に行いたいと思います。（菊川祐樹 記）

図 2 計測の様子

低圧下樹木育成プロジェクト紹介

Arduino 講習会＃3

先月紹介した Arduino 講習会#2 の後半パートです。第 2 回後半では時間計測と LCD への出力について学びます。

時間計測

Arduino で温度、湿度、CO_2 濃度以外に時刻も出力しておきたい場合があります。そのような場合は、時間を Arduino で取得して記録する必要があります。この際では、時間をどのように計測するかを学びましょう。ポプラ育成実験では、RTC（リアルタイムクロック）を用いて時間を測定しています。必要になるのはこのようなものです。

図 1：RTC

図 2：Arduino KIT の RTC

それでは、この機器の使い方に移りましょう。参考にしているのは以下の HP です。

https://101010.fun/iot/arduino-real-time-clock.html

まず、以下のように配線を組んでください。「SCL」、「SDA」にシリアル通信の一種「I2C（アイスクエアドシー）通信」で使用される PIN です。

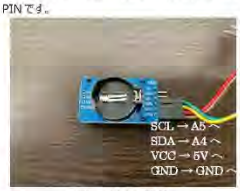


図 3：RTC の配線

時間計測についてもライブラリがあるので有効く使わせて頂きましょう。次のようにダウンロードして下さい。

スケッチ → ライブラリをインクルード → ライブラリを管理 → 「DS3232RTC」で検索 → インストール（install all を選択）

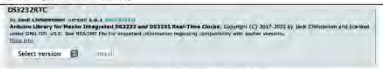


図 4：DS3232RTC のライブラリ

これで準備は完了です。それでは、実際に RTC を使っていきましょう。プログラム

「sketch_2_2_DHT_RTC_v1.0.ino」をダウンロードして見てみましょう。HP にあるプログラムとは少し変更があります。DS3232RTC.h の仕様が半年前あたりに更新されたようで、今ネットに出回っているプログラムではエラーが出る場合があります。（この資料を作っている私もその沼にハマりました。）ホームページのプログラムからは、最初の方を変更しています。

ここでこのプログラムのポイントをいくつかチェックします。最初の「setTime」で現在の時刻をセットします。記入する順番は、**「時、分、秒、日、月、年」**です。注意ポイントですね。ポプラ育成実験では、実験開始の日時や Arduino の不調を直して実験装置を再開させた日時を書き込むことになります。

loop の中身に移りましょう。時刻を取得する最初の 2 行はおまじないだと思って良いです。そしてその後の、「Serial.print」で年月日、時刻をシリアルモニターに出力しています。そして、1000ms 毎にこのループを繰り返しています。

それでは、このプログラムをコンパイルして書き込みましょう。そして、シリアルモニターを開くと、図のように、時刻（と湿度湿度）が 1 秒ごとに出力されると思います。ポプラ育成実験では、時刻を LCD と SD カードに書き込んでいますが、やり方はほぼ同じです。（LCD はトの章、SD カードは次回扱います。）

図 5：シリアルモニターの様子

・LCD（Liquid Crystal Display）

まずは、LCD（液晶ディスプレイのこと）に時刻を出力しましょう。LCD への出力はそれほど難しくありません。ライブラリがあるので活用します。

スケッチ → ライブラリをインクルード → ライブラリを管理 → 「LiquidCrystal I2C」で検索 → インストール

図 6：LiquidCystal I2C

まずは回路を組んでいきましょう。

（今まで作成してきた、温湿度センサー等の配線にそのままに）SCL は A5 へ、SDA に A4 へ、VCC は 5V へ、GND は GND へ接続しましょう。**先ほどの RTC などと配線の色を合わせるとわかりやすいですね。**

配線は見本も参考にしてなるべく綺麗に作成してみましょう。ポイントは、センサーと LCD で共通して使用する「A4」や「A5」をブレッドボード上に移してしまい、そこにセンサー類の配線を配置する点です。配線の細かい

図 7：LCD の配線

部分は完成例を参考にしましょう。

参考プログラムは「sketch_2_3_LCD_RTC_v1.0.ino」です。このプログラムは、時刻だけを出力する本当にシンプルなものです。ダウンロードして見てみましょう。

プログラムの説明です。

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); ポプラ育成装置でも全く同じ仕様になっています。つまり、16 列 2 行の LCD を用いているということです。0x27 に通信の時に必要なアドレスだと思って下さい。基本的には、どの LCD も 0x27 です。

lcd.setCursor(0, 0); LCD の 0 列 0 行目にカーソルを持ってくるということです。縦形代数の行列とは行と列の言い方が逆です。（縦形代数では 1 行 1 列といいますが、Arduino は 0 列 0 行と言いますし、行数列数は、0 から始まります。）実際に書き込みをしてみて、時刻が正しく表示されることを確かめて下さい。シリアルモニタも開いて同じ値が出力されていることを確かめるのもいいでしょう。

課題 1 プログラムの lcd.setCursor(0, 0);を変えてみて、どこに何が出力されるのか確認しましょう。また、年月日まで出力されるプログラムにしましょう。

課題 2（重要） 時刻だけでなく、湿温度も LCD に出力してみましょう。（かなりポプラ育成装置の LCD 表示に近づいてきました！）

課題 3（余裕のある人向け） 好きな出力を楽しみましょう。スイッチで出力を切り替えたりするのも良いでしょう。

※課題 2 の解答例：「sketch_2_4_LCD_RTC_DHT_v1.0.ino」

今まで作成してきたプログラムを合わせていけば作成可能です。配線は今までの講習で完成しているはずですね。（ぜひプログラムも自分で作成してみましょう！今までのプログラムをコピー&ペーストで繋ぎ合わせるだけで大丈夫ですが、自分でプログラムを書いてみると、エラーが出てくるものです…）

LignoSat 紹介

木造人工衛星学生開発チーム

MISSION 班

今回は LignoSat の MISSION 班の活動をご紹介します。今回は、MISSION 班が行っている、LignoSat のミッションの一つである、ひずみ測定を行う内部電子基板の Mission ボードの地上試験の概要についてご紹介します。Mission ボードの地上試験は、①外型の確認、②導通試験、③測定精度の試験、④宇宙環境試験、の大きく 4 つの項目からなります。

①の外型の確認に関しては、LignoSat の規定の外径に合うか、他の基板や配線との問題、重量などを確認いたしました。次に②の導通試験では、断線していないか、各種出力ができるか、などを確認いたしました。③の測定精度の試験では、ひずみ測定の精度を確認いたしました。測定データの線形性や時間、温度依存性などを調査し、この基板によるデータの信憑性の担保を行うとともに、次の基板への改善点を考えました。最後に④の宇宙環境試験では、熱サイクルや、振動試験、真空試験や、他基板のノイズなどを調べます。

図 1 Missionボード地上試験の様子

研究紹介

山敷庸亮 京都大学大学院総合生存学館 教授

SIC 有人宇宙学研究センター長

皆さんは宇宙に進出するにあたって、何が障壁になると考えますか？我々が考えている二大障害が、低重力と宇宙放射線被ばくです。さて、その宇宙放射線被ばくはどのように予測、計測できると思われますか？まず宇宙に出ると、地上では全く問題にならない銀河宇宙線（GCR）による被ばくが大きな問題になります。火星表面では1日あたり 188-225 μGy[1]と測定され、コンスタントに降り注ぐ定常値が非常に大きな負荷になります。月面においては、1日あたりおおよそ 300μGy 以上[2]という観測結果が示されています。GCR は太陽活動とは負の相関関係があると言われており、太陽活動期には弱くなるとされています。この恒常的な GCR による被ばくから適切に守るのが宇宙における被ばく低減の第一歩ではありますが、これとは別に、太陽活動期には太陽面での爆発現象が発生した際、コロナ質量放出（CME）に伴う太陽高エネルギー粒子（SEP）が地球月、あるいは火星を直撃すると、これらよりもはるかに恐ろしい被ばくがもたらされます。この SEP に伴うそれぞれの惑星での被ばく量と、その発生確率をおおよそ予測し、さらに言えば、実際にこれらが発生した際の経路と予想到達時間などを適切に予測し、その回避措置を行うことが宇宙開発においては非常に重要であると考えられます。

我々のグループ[3]では3年前より、航空機被ばくに本モデルを適用し、合計7つの代表的な空路と、2000年以降に発生した SEP に伴う地上レベル上昇イベント（GLE）による四次元放射線空間データを用いて、一回の飛行で 1mSv に、またある1時間の間に 80 μSv に達する確率をそれぞれ計算しました。それによると、被ばく線量低減対策が必要となる太陽フレアの発生頻度は、積算線量（1mSv）は 47 年に1度、また、最大線量率（80uSv/h）は 17 年に1度と試算されました。

また同時に、太陽での発生確率の推定をもとに、他の恒星でもフレアの発生確率を推定することができれば、その恒星を周回するハビタブル惑星の想定被ばく量が推定できると考えました。その成果が 2019 年に発表された論文（Yamashiki et al. 2019 ApJ）[4]です。この論文においては、それぞれの特徴的なハビタブル惑星における、1年に1回発生する規模のスーパーフレアに伴う被ばく量を推定しました。

さて、これらの恒星においては、太陽よりもはるかに激しいスーパーフレアが発生することが考えられます。現在までに太陽系で観測された最も硬い（すなわち、高エネルギーの陽子の割合が多い）GLE イベントは、1956 年に発生した GLE5、あるいは 1989 年に発生した GLE42 & 43 と言われています。しかしながら、現在の太陽から観測されたスペクトルが、今後発生しうるフレアをすべて代表しているとは言えません。なぜなら、さらに強いスーパーフレアが発生すると、プラズマがさらに加速され、現在までに観測されたスペクトルでは考えられないほどの高いエネルギーをもった陽子が到達する可能性があるのです。このスペクトルについては、今まで全く未知の世界でしたが、2022 年に NASA/GSFC の Vladimir Airapetian（SIC 特任教授）らのグループが、G 型星の仮想的なより活動性の高い状態での様々なスペクトルを計算しました（Hu et al. 2022 Sci. Adv.）[5]。このスペクトルを用いての太陽系外惑星の被ばく量の再評価を行なっています。同時に、これらの恒星から放出される極紫外線（XUV）によって、これらの惑星の大気に早い時代から剥ぎ取られた可能性もあり、これらの総合評価を考えると、ハビタブル惑星としては、かなり致命的な影響を受ける惑星も存在する結果が出ています。本研究紹介においては、その中の結果の一部を示すこととします。計算に用いた新たなフルエンス[5]は GeV オーダー以上のエネルギー等の割合が高く、惑星大気の透過率が従来のものに比べて高いのが特徴です。具体的には大気放逸レートの顕著な系外惑星に焦点を当て、フレア発生頻度1年に一度のフレアと、その黒点面積や表面温度から推定される最大のフレアエネルギーから適用可能と判定される恒星高エネルギー粒子の想定フルエンスを入力として過去研究［4］によるモンテカルロ計算コード PHITS を用いて、3つの異なる大気（N_2+O_2, CO_2, H_2）の場合の大気シャワーを計算し高度毎の被ばく量の推定を行なってみました。特に今回、G 型星、K 型星、M 型星それぞれをホスト星とし、[4]でも評価を試みた太陽系外惑星（Kepler-1634b, Kepler-283c および Proxima Centauri b）を対象とした再計算を試みました。本研究による計算結果において特に特徴的な磁場 0、地球型大気（N_2+O_2）、一年に一度発生するスーパーフレアを想定した被ばく評価について図1に結果を示します。

対象とする系外惑星は、やや活動的な G 型星である Kepler-1634（スペクトル型:G7, 表面温度:5637K, 半径:0.82 太陽半径, 自転周期 19.8 日、年フレア 1.65 x 10^{33} erg）を周回する Kepler-1634 b（半径 3.19 地球半径, 質量:7.76 地球質量, 軌道長半径:0.99AU）、Kepler でフレアが観測された K 型星である Kepler-283（スペクトル型:K5, 表面温度:4,141K, 半径:0.64 太陽半径, 自転周期 18.2 日、年フレア 4.93 x 10^{32} erg）を周回する Kepler-283 c（半径 1.82 地球半径, 質量:4.59 地球質量, 軌道長半径:0.34AU）、やや活動的な M 型星である Proxima Centauri（スペクトル型:M5.5V, 表面温度:3,050K, 半径:0.14 太陽半径, 自転周期 82.6 日、年フレア 9.7 x 10^{32} erg）を周回する Proxima Centauri b（半径 1.07 地球半径, 質量:1.27 地球質量, 軌道長半径:0.0485AU）、そして7つの地球サイズの惑星を有する TRAPPIST-1（スペクトル型:M8, 表面温度:2,560K, 半径:0.12 太陽半径, 自転周期 3.3 日、年フレア 2.72 x 10^{32}

erg）の中で最もハビタブルであると考えられる TRAPPIST-1 e（半径 0.918 地球半径, 質量:0.636 地球質量, 軌道長半径:0.0282AU）、そして比較のおとないとされている Ross-128（スペクトル型:M4, 表面温度:3,192K, 半径:0.17 太陽半径, 自転周期 123 日、年フレア 1.36 x 10^{32} erg）を周回する Ross-128 b（半径 1.0979 地球半径, 質量:1.3989 地球質量, 軌道長半径:0.0496AU）を対象とし、比較のため地球と火星の値を示しました（ただし、地球は磁場を地球磁場とし、火星は磁場 0 とした）。また、大気組成はすべての系外惑星で地球型（N2+O2）大気と仮定し、磁場無しの条件で計算大気深度はちょうど 1 気圧分まで計算を行ない、それぞれ（地球における）地上 80km 相当、50km 相当、火星大気圧相当、系外惑星大気圧（背大気圧 1/10 気圧）相当、地表最低大気圧相当、地表大気圧相当の線量を示しました。

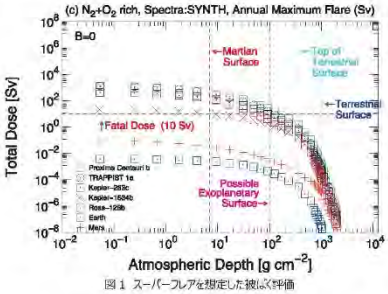


図 1 スーパーフレアを想定した被ばく評価

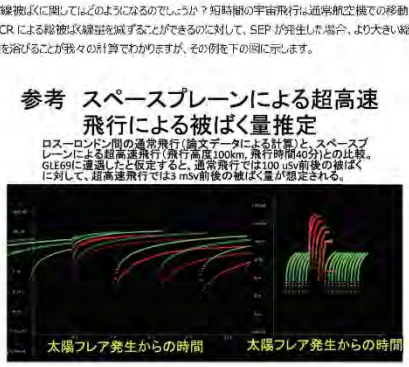
Proxima Centauri b においては、1/10 気圧では 25 Sv の被ばくが見られることが示唆された。TRAPPIST-1 e においては、大気散逸が非常に激しいという結果も見られるとともに、1/10 気圧では 16 Sv という大きな値が示された。対して Ross-128 b においては、1/10 気圧では 466 mSv 、地球と同じ大気圧があればほとんど影響がないことも示されている。

同時に、これらの恒星から放出される極紫外線（XUV）によって、TRAPPIST-1e や Proxima Centauri b などの惑星の大気は早い時代から剥ぎ取られた可能性もあり、これらの総合値を考えると、ハビタブル惑星としては、かなり致命的な影響を受ける惑星も存在する結果が出ています。また、一つのメッセージとして、地球は、火星よりも太陽に近くにあるわけですが、磁場と大気圧のおかげでずいぶん宇宙線被ばくから守られているということです。地球の大気圧相当を Terrestrial Surface、火星の大気圧相当を Martian Surface としましたが、火星だと仮に同じ太陽高エネルギー粒子

(SEP)を受けたとしても、大気圧が低いこととダイポール磁場がないことにより宇宙線被ばくの影響が大きいことが示唆されます。

また、航空機被ばく評価において、Fujita et al. 2021[3]での結論は、現在までに観測されたイベントを中心にして議論を行なってきたわけですが、さらに強いスペクトルを持つスーパーフレアによる被ばくを考えると、もっと大きな被ばくに晒される可能性がゼロではないのです。このような SEP による被ばくは、宇宙での活動、特に船外活動 EVA に大きなリスクを生じさせます。月面上においては、基地から外に出ての活動時にこれらが到達すると致命的な結果になるのではないかと考えられます。

また、例えば、成層圏を超えて地球上の他都市との間を非常に短時間で飛ぶスペースプレーン構想は、宇宙線被ばくに関してはどのようになるのでしょうか？短時間の宇宙飛行は通常航空機での移動に比べて GCR による総被ばく線量を減ずることができるのに対して、SEP が発生した場合、より大きい総被ばく線量を浴びることが我々の計算でわかりますが、その例を下の図に示します。



これらのリスクを鑑みて、我々が行なっているのは（1)月・火星での実際の被ばく量の計算（2)月面上の構造物に対する想定スペクトルに対する被ばく量評価と（3)万が一の際の避難経路のシミュレーションです。(2)においては、様々な材料を用いての被ばく回避策を検討しておりますが、特に水や有機物の利用によって新たな活路が見出せる可能性が示唆されています。なお、本研究は、SIC 特任教授の佐藤達彦氏(JAEA)や、SIC 連携研究員の関大吉氏(九州大学助教)や、[6]に近くメンバーの協力を得て実施しております。

1) Zeitlin, C., Hassler, D.M., Ehresmann, B. et al. (2019). Measurements of radiation quality factor on Mars with the Mars Science Laboratory Radiation Assessment Detector, *Life Sciences in Space Research*, 22 (89-97)

2) Shenyi Zhang et al. (2020) First measurements of the radiation dose on the lunar surface, *Science Advances*, 6 : eaaz1334

3) Mae Fujita, Tatsuhiko Sato, Susumu Saito, Yosuke A. Yamashiki (2021). Probabilistic Risk Assessment of Solar Particle Events Considering the Cost of Countermeasures to Reduce the Aviation Radiation Dose. *Scientific Reports*, 11, 17091

4) Yosuke A. Yamashiki et al. (2019). Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability, *The Astrophysical Journal*, volume 881.

5) Junxiang Hu, Vladimir Airapetian et al. (2022). Extreme energetic particle events by superflare-associated CMEs from solar-like stars, *Science Advances*, 8, 9743

6) 山敷庸亮, (京都大学),Vladimir Airapetian (NASA/GSFC), 佐藤隆彦 (JAEA), 野津湧太 (University of Colorado/東工大), 前原裕之, 行方宏介 (国立天文台), 野津翔太 (理化学研究所), 佐々木晶哉, 佐藤徹哉, 木村公洋, 笠水宏香, 高木風香, 坂東日菜, 野上大作, 柴田一成 (京都大学), 他 ExoKyoto 開発チーム, 恒星高エネルギー粒子のフルエンスを考慮したハビタブルゾーンの再評価, 日本天文学会 2021 秋季大会 P329a (口頭発表)

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター

https://space.innovationkyoto.org/

〒606-8501 京都府左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室

構築人：未来人工衛星製作チーム 菊川崇樹 関井琢輔

Tel&Fax: 075-753-5129 Email: spaceinstitute@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

SIC 有人宇宙学研究センター Newsletter No.12

2023 年 1 月 1 日発行

参考資料 9-5
Spaceology Newsletter: 2023 年 2 月号

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2023 年 2 月号 No.14

岡山大学惑星物質研究所の訪問
―宇宙曝露木材試験体の解析と連携協定―

宇宙木材プロジェクトでは、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）に木材試験体を搭載し、3 月 4 日より宇宙曝露試験を開始した。試験体は約 10 か月間の曝露期間を経て同年 12 月 23 日に若田宇宙飛行士によって回収された。本年 1 月 9 日に ISS を離脱した Cargo dragon(Spx26)に乗せられて 1 月 11 日に回収カプセルが地上に到着した。来年度は曝露された木材試験体の解析に取り掛かる。

宇宙から試料が回収された事例として、日本が誇るはやぶさ 2 による小惑星リュウグウからのサンプルリターンがある。宇宙曝露木材試験体の解析を始めるに先立って、小惑星リュウグウ試料の取り扱いを学ぶため、鳥取県三朝町にある岡山大学惑星物質研究所を訪問した（図 1）。参加者は土井隆雄教授、山敷庸亮教授、村田功二准教授、辻隣留子氏であった。同研究所の始まりは戦前にまでさかのぼり、戦後は新制岡山大学の温泉研究所として医療と地球科学を組み合わせた研究所として発展した。地球科学分野は 1985 年に地球内部研究センターとして独立し、その後の変遷を経て 2016 年に惑星物質研究所となった。地球内部の物質進化から太陽系や生命の起源へ迫る研究へと展開している。現在、16 粒のリュウグウ試料が複数の最新解析機器を用いて総合的に解析され保管されており（図 2）、今後の専門性の高い個別分析や国際公募分析のための物質科学的カタログとして情報公開されている。（図 3）。

同研究所の中村栄三特任教授に研究所の設備を案内していただいた。そして中村教授をはじめとするスタッフの方々からアドバイスをいただき、曝露木材試験体のカタログ作りから始まる解析手順の検討に入った。また解析にあたり、京都大学総合生存学館と岡山大学惑星物質研究所の連携協定締結に向けた議論が進められた。2 月上旬には JAXA に届くであろう ExBAS 試験体の受け入れの準備を始める。（村田功二 記）

図 1 惑星物質研究所玄関

図 2 小惑星リュウグウの破片

図 3 二次イオン質量分析計

九工大出張＃１４
LignoSat MISSION 班

1 月 1 7 日から 1 8 日にかけて、LignoSat 学生チーム MISSION 班は九州工業大学において磁気測定試験を行った。LignoSat には磁気センサーが取り付けられており、これは 2 号機において地磁気を利用した姿勢制御を行うために使用される予定で、1 号機においては宇宙空間で木造衛星内のセンサーが正確に磁気を測定できるかを確認するために使用される。今回の試験では、磁気センサー単体について磁場の変化に対し測定値が線形に変化するかを確認し、実際の磁場に対する測定値の誤差から較正を行った。磁気測定の試験には任意の直線磁場を発生することのできるヘルムホルツコイルという装置を使用した。当日はトラブルなく順調に進行し、予定していた時間内にすべての試験を終了した。結果は良好であり、磁気センサーが EM 基板上で正常に作動していることを確認した。今後は、他の基盤の発する磁気の影響を調査するために、完全に組み立てられた状態で磁気測定を行い、それを基に実際の打ち上げられる環境において正確な測定が行えるようプログラムを修正していく予定である。（山本隆大 記）

図 1 試験風景

図 2 試験結果

2月のイベント
ビル・ネルソン NASA 長官と京都の大学生との交流会

ビル・ネルソン NASA 長官が 2023 年 2 月 11 日京都大学を初訪問されます。それを記念して、SIC 有人宇宙学研究センター主催、宇宙総合学研究ユニット共催で、学生との交流会を開催いたします。京都大学と NASA は、2019 年に NASA の Jim Green チーフサイエンティストを招いた講演会を開催しており、のちに紹介する NASA/GSFC の Vladimir Airapetian 氏が SIC 特任教授として就任されております。また、有人宇宙学研究センターの土井隆雄特定教授と、山崎直子特任准教授が NASA ジョンソン宇宙センターから宇宙飛行士としてスペースシャトルや ISS 滞在ミッションを行なっており、今後有人宇宙に関する連携を強化する予定です。

日時 2023 年 2 月 11 日 11:00-12:00
参加可能な人 京都在住（もしくは周辺）の学生*
 *中学生・高校生・大学生・大学院生
 *簡単な通訳は行いますが、英会話が可能な人
 *コロナ感染状況やその他の状況によって、開催方法の変更または中止させていただく可能性もありますので、あらかじめご了承ください。
 *人数制限がありますので、会場参加は登録制です。
会場：国際科学イノベーション棟 5 階 シンポジウムホール
https://www.saci.kyoto-u.ac.jp/innovation/facility/
https://www.saci.kyoto-u.ac.jp/access/

プログラム
11:00-11:20 ビル・ネルソン長官の講演
11:20-12:00 質疑応答
司会 土井隆雄 特定教授（宇宙飛行士）
通訳 山敷庸亮 教授 （SIC 有人宇宙学研究センター長）
 ＆冨田キアナ 氏（大学院総合生存学館博士課程 ケンブリッジ大学修士）

申し込み 以下のリンクから申し込みください。
https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSd7Yk7CPst4KCCa4TUSi-wvGRcNy8mo5nn8E1bqfK4jW6Z7A/viewform

https://space.innovationkyoto.org/2023/01/24/dialogue-with-nasa-administrator/

（山敷庸亮 記）

2 月のイベント

第 16 回宇宙ユニットシンポジウムのお知らせ

テーマ：宇宙開発時代をどう生きぬくか ―大学の役割を問い直す

アルテミス１号が打ち上げられ、有人月探査「アルテミス」計画がいよいよ本格的に始まりました。一方、民間による宇宙開発も加速し、宇宙開発に伴う諸問題の検討に従事する人材の育成が急務の課題となってきております。そのため大学の果たすべき役割は大きいといえます。宇宙ユニットでは、現在進行している宇宙開発の新たな局面について、市民と研究教育者の対話を通じて交流を深め、宇宙関連分野を活性化することを目的にシンポジウムを開催します。

一般参加申し込み（対面参加のみ）　**応募〆切：2023 年 2 月 2 日（木）**
https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/symp/16th/

日時：2023 年 2 月 11 日(土)･12 日(日)
場所：国際科学イノベーション棟 5 階（京都大学吉田キャンパス）

※ポスター展示交流会につきましては、新型コロナウイルス感染防止の観点から、施設規則によりポスター発表者以外はご入場いただけません。
（辻薗智子　記）

低圧下樹木育成プロジェクト紹介

Arduino 講習会＃４

1　はじめに

前回までで、温湿度の測定、温湿度・時刻のモニター表示まで学びました。今回は、CO_2 の計測と SD カードへの記録について学びましょう。（講座も残り半分です。頑張りましょう。）

2　CO_2 の計測（K30 センサーについて）

ポプラ育成実験で重要になるパラメーターが、CO_2 濃度です。実験では、チャンバー内を約 500 ppm に制御することを目標としています。CO_2 の測定方法について学びましょう。

実験時、Arduino による CO_2 計測で使用しているセンサーは「K30」です。（1 つ 1 万円を超える高いセンサーです。）このデータシートも配布します。興味のある人はぜひ読んでみましょう。今回の講習では、すでに配線まで完了しているセンサーを使ってもらいますが、実際にはこのデータシートを確認して必要なピンと配線を半田づけする必要があります。データシートには他にも精度や使用可能温度など大切な情報が多く掲載されています。

今回は、「アナログ出力」と「UART 通信による出力」を行います。（詳細はこのあと説明します。）アナログ出力の場合には、「G0、G+、OUT2」 UART 通信による出力の場合には、「G0、G+、RxD、TxD」の PIN が使われていることを確認しましょう。

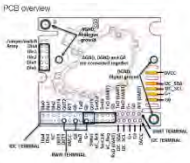


図 1: K30 センサーの PIN 配置
（K30 データシートより）

3　CO_2 の計測（アナログ出力）

まずは、電圧値を利用して、濃度を測定する方法について紹介します。CO_2 濃度のように連続データを取得する際によく利用されるのが、「出力の電圧値を、測定したい連続データに対応させる方法」です。電圧値を濃度に応じて変化させて出力し、それをプログラムで濃度値に戻すというやり方です。今回は「OUT2」から電圧値が出力されます。

プログラム作成にあたり、追加でライブラリをダウンロードする必要があります。まずは、以下の URL を開きましょう。自動で ZIP ファイルのダウンロードが始まります。

http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN126-K3x-sensor-arduino-uart.zip

次に、Arduino IDE に戻って、「スケッチ」内の「ライブラリをインクルード」、「ZIP 形式のライブラリをインストール」を選択します。あとは、ダウンロードしたところのフォルダーに移動して、先ほどダウンロードした ZIP ファイルを選択すれば OK です。

プログラムは、「sketch_3_1_LCD_RTC_DHT_K30_v1.0.ino」を用います。プログラムをダウンロードして見てみましょう。プログラムで大事な部分を紹介します。特に K30 センサーに関連する部分を

確認しましょう。

const int analogPin = A0;
K30 センサーの電圧値を A0 pin で受け取るために変数を定義しています。
int ppmV = readPPMV();
プログラムの最後で定義した関数「readPPMV」を用いて CO_2 濃度を取得します。関数の詳細は実際に読んでみましょう。（analogRead が使われていますね。）

それでは、アナログ出力の場合の配線を組んでみましょう。長い配線がついている K30 センサーを用います。これを見本のように取り付けましょう。（赤、黒の配線は今まで通り「5V」、「GND」に繋ぎ、青い配線を「A0」に繋ぎます。）これで配線の準備は完了です。

課題１　プログラムを確認しながら、K30 と Arduino の接続を完成させましょう。

最後に、プログラムをコンパイルして、書き込みましょう。すでに LCD の設定もされているプログラムですので、確かに CO_2 濃度が時刻の横に出力されている様子が分かります。

4　CO_2 の計測（UART 通信による出力）

K30 では、電圧値を読み取って CO_2 濃度を記録するアナログ出力の他に、UART 通信を用いて濃度を出力する方法があります。これについても解説します。実験装置では UART 通信による出力を行なっています。

以前「SDA」や「SCL」pin が出てきたときに、「I2C 通信」という言葉を出しました。これはシリアル通信の一種ですが、UART 通信もシリアル通信の一種です。（詳しくは「非同期型シリアル通信」と呼ばれます。I2C 通信は「同期型シリアル通信」に分類されます。）

UART 通信では、「Rx」と「Tx」という信号ラインが使われます。それぞれデータ受信用、データ送信用のラインになっています。K30 側にも Arduino 側にも受信要信号ライン、送信用信号ラインが存在しています。そのため、実際に配線するときは、「Rx」と「Tx」、「Tx」と「Rx」を接続するようにしましょう。

それではプログラムのチャックです。「sketch_3_2_LCD_RTC_DHT_K30_v1.0.ino」をダウンロードして下さい。先ほどと同様に、K30 に関連する部分を中心に確認してみて下さい。重要な部分は以下です。

kSeries K_30(8,9);
これは kseries.h に含まれている関数の 1 つです。これで Arduino の 8 番 pin を Rx、9 番 pin を Tx とします。つまり、8 番 pin をセンサーの Tx、9 番 pin をセンサーの Rx と繋げば OK です。
int ppmV = K_30.getCO2('p');
これも kseries.h に含まれている関数の 1 つです。これで K30 センサーから、ppm を単位として CO_2 濃度を取得します。

配線はプログラムと比べながら自分で組んでみましょう。最後にコンパイルと書き込みをして正しく動作していることを確認すれば完了です。

5　SD カードへの記録

それでは、最後に今まで準備してきた温湿度、時刻、CO_2 濃度を SD カードに記録しましょう。育成実験では、SD カードにデータを記録し、実験終了後にそのデータを PC に移しています。SD カード用の配線は写真のようになります。

図 2：SD カードモジュール

今までと配線の名前が違いますが、これは「SPI 通信」という方式の際に必要なものです。（I2C 通信と同様に同期型シリアル通信の 1 つです。）それぞれ Arduino の何番 pin と接続するかが決まっていますので、ルールに従って配線をすれば大丈夫です。SPI 通信の詳しい内容を知りたい人は調べましょう。

SD カードに記録する際には、今までインクルードしてきたモジュールで十分です。プログラムは、「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v2.2.ino」（K30 アナログ出力用）または「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v3.2.ino」（K30 UART 通信用）を用いましょう。プログラムの大事なポイントを整理します。

#include <SD.h>

最初に SD カードを記録ためのヘッダーファイルをインクルードしています。

void setup の中について

setup で SD カードが入っているかどうかで LCD の出力を変えています。これで SD カードが正しく挿入されているか、SD カード関連の配線が正しく組まれているかが確認できます。

File dataFile=SD.open("datalog.txt",FILE_WRITE);

dataFile.print(" ");

SD カードへの書き込みはこの命令を用います。Serial.print と同じ要領です、分かりやすいですね。

実際にコンパイル、書き込みをしましょう。そして microSD に正しくデータが記録されていることを確認しましょう。

6　計測のまとめ

これで計測関連の事項は学び終えました。これまでの事項をまとめたプログラムは以下です：

「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v2.2.ino」（K30 アナログ出力用）

「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_v3.2.ino」（K30 UART 通信用）

K30 センサーのライブラリに関する参考 URL：

http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN126-K3x-sensor-arduino-uart.pdf

http://www.co2meters.com/Documentation/AppNotes/AN102-K30-Sensor-Arduino-I2C.pdf

（清田朋和　記）

LignoSat 紹介
木造人工衛星学生開発チーム
COMM 班

今回は LignoSat の通信系を開発している COMM チームの活動報告です。

COMM チームでは、衛星内の通信系ソフトウェア開発、衛星のアンテナ展開機構、地上局ソフトウェア、地上局アンテナ及び制御機構、そして周波数申請を担当しています。今回は地上局ソフトウェア開発と周波数申請についてご紹介します。

●地上局ソフトウェア開発

地上局は「地上局からコマンドを送信」し、「衛星からデータを受信する」という 2 つの重要な役割を担います。地上局からのデータは PC→モデム→無線機→アンテナという流れで送信されます。受信はこの逆の流れになります。PC では各機器との接続、データのデコード、送受信だけではなく、衛星の追尾、ドップラーシフト、受信データ漏れから再度コマンドを生成など必要な機能が多岐に渡ります。そのため独自のソフトウェア開発が必要になります。現在、C＃を用いてアプリケーション開発に取り組んでおり、各周辺機器との接続およびコマンドのデコード及び送受信の機能を実装しました。またモデムもＦＭパケット送信用の専用通信プロトコルに調整しています。今後も引き続きアプリケーションの開発に取り組みます。

図 1.LignoSatOperation のソフトウェア図

●周波数申請

IARU(国際アマチュア無線連合)への周波数申請が完了し、現在は ITU(国際連合の無線に関わる専門機関)へ事前公表資料 API の提出に向けて、取り組んでいます。API には地上局・衛星の通信電力や周波数帯域に関わるデータを計算し記入する必要があります。IARU に提出したデータとのずれがないように、指定されたソフトウェアを使って複雑な API を作成することは骨の折れる作業でした。現在は宇宙技術開発株式会社のサポートのもと、API を総務省に提出完了し、今後省内での審査を経て ITU に提出されます。また API 申請と併せて、人工衛星局と地球局の 2 つの無線局の免許申請が必要です。無線局免許の申請先は総務省近畿総合通信管理局で、現在申請書の作成を開始しています。

図 2.API 提出＆予備免許申請の流れ

（阿戸豪　記）

研究紹介
1C16　超小型木造人工衛星「LignoSat」のミッション系開発の現状と展望

○筒井涼輔，曽束元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川裕樹，清田朋和，桑原和暉，佐野愛華，豊西信大，福王悠星，細辻一，松野なな，椋本暖，山敷庸亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次（京都大学），苅谷健司，土屋守雄（住友林業），土井隆雄（京都大学）

1.　目的および背景

地球上における持続可能な社会の形成に向けた取り組みや，地球温暖化対策に関連する科学技術の開発は，人類が挑むべき最も重要な研究テーマの一つである．そんな中，昨今の人類の宇宙進出の活性化に伴い宇宙における持続可能な人間社会の創造を目指した研究活動がますます注目されている．とりわけ，宇宙空間での持続的な衣・食・住の実現に向け，植物の宇宙利用，宇宙環境耐性に関する研究が頻繁に行われてきており，我々の研究チームは木材資源の宇宙利用可能性に着目した探究活動を進めている[1~4]．

我々は，産業分野における木材の利用拡大に向けた取り組みが，カーボンニュートラルな社会の実現や，ひいては地球温暖化の防止に繋がる重要な視点であると考えている．木材を工業製品として利用することで，木材中の炭素を長期間にわたって貯蔵することができる．また，木材は金属などの他の資材に比べ加工に要するエネルギーが少なく，製造・加工時に排出する二酸化炭素量を抑制できる．更に，木材のエネルギー利用は，大気中の二酸化炭素濃度に影響を与えないカーボンニュートラルな特性を持ち，化石燃料の使用抑制に寄与する．こういった木材資源の有用性にフォーカスし，木材の利用環境を宇宙へと拡張させることで，持続可能社会の実現に貢献しうる新たな産業（宇宙木材産業）の創出に繋がると期待される．加えて，これまでの宇宙開発事業に利用されてきた人工素材（金属・プラスチックなど）にはない木材特有の材料特性[5~7]は，新たな宇宙用材料としての実用性に大きく寄与すると考えられる．

我々は宇宙における木材利用の可能性を探究するとともに，宇宙の複合的な環境因子が木材に及ぼす物理化学的影響を調査することを目的とした，超小型木造人工衛星「LignoSat」開発プロジェクトを推進している[3]．メインミッションとして，（1）人工衛星の木造構体内部のひずみの経時的測定，および（2）構体内部の多点温度計測，そして（3）宇宙放射線による木造人工衛星内部のコンピュータに生じる Single-Event Upset (SEU) の回数のカウントを行うことで，宇宙空間における

木材の基礎物性データの収集・解析，および宇宙機構造材料としての木材資材の耐久性評価を目指す．本ミッションは，新たな宇宙用材料としての木材の実用性を模索する上で非常に重要な意義を持つものである．さらに，LignoSat の運用にあたっては，アマチュア無線周波数帯を衛星ー地上局間通信に利用するため，（4）全世界のアマチュア無線家を対象とした独自の双方向通信サービスを提供するミッション（アマチュア無線ミッション）を展開する．本稿では，LignoSat メインミッションシステムの設計仕様の詳細およびアマチュア無線ミッションの概要について紹介するとともに，ミッション系開発に関する今後の展望について報告する．

2.　ひずみ測定ミッションの原理とシステム設計

LignoSat では，2 軸ひずみ測定ゲージを用いた木造構体内部（木板内側）のひずみの経時的測定をメインミッションとして行い，宇宙環境における木材の物性変化を追跡する．図 1 に示すように，–X 面および –Z 面内側のひずみ測定をそれぞれ 2 軸ずつ，計 2 軸 2 面の 4 チャンネル分行う．1 分間あたり 1 回程度の高頻度かつ長期的なひずみ測定により，宇宙における木造構体の微小変形を *in situ* で捉えることを目指している．このような変形過程の解析結果を地上試験による結果と比較することで，木造構体の変形を誘発する宇宙環境因子を特定することができると期待される．

図 1　LignoSat におけるひずみ測定面．

2.1　ひずみ測定の原理

金属の抵抗値は長さ l に比例し，断面積 S に反比例する．抵抗率を ρ とすると，その抵抗値 R は

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{1}$$

と表せる．ひずみゲージ（東京測器株式会社，東京）は，薄い電気絶縁物からなるベースの上に格子状の金属抵抗線を形成し，引出し線を取り付けた構造をしている（図 2）．木材表面にこのひずみゲージを貼付し，木材の微小変形に伴う金属抵抗線の変形により生じる抵抗値変化を捉えることで，ひずみを測定する．なお，この抵抗値変化は非常に微小であるため，図 3 に示すホイートストンブリッジ回路（以降，ブリッジ回路と表記する）を使用し，ひずみ ε に比例する出力電圧 Δe をモニタリングすることで正確なひずみ測定を行う．

金属抵抗線の抵抗率 ρ，長さ l，断面積 S がそれぞれ微小量 $\Delta\rho$，Δl，ΔS だけ変化した時，抵抗値の変化率 $\Delta R/R$ は以下のように表される．

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \tag{2}$$

$\Delta l/l$ を歪み ε と定義すると，ゲージ率 K（歪みに対する抵抗変化率）は次のように表される．

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon} \tag{3}$$

ただし，νは抵抗線のポアソン比であり，$\Delta S/S = -2\nu\varepsilon$なる関係を用いた．ブリッジ回路が平衡状態（$R_1R_3 = R_2R_4$）にあれば，出力電圧 Δe は

$$\Delta e = \frac{a}{(1+a)^2}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right),\ a = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \tag{4}$$

と表される．$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$とし，$R_g$をひずみゲージの抵抗値とすれば，$\Delta R_1 = \Delta R$，$\Delta R_3 = \Delta R_2 = \Delta R_4 = 0$ なる関係が得られる．よって，式(4)は

$$\Delta e = \frac{1}{4}\frac{\Delta R}{R}E = \frac{1}{4}K\varepsilon E \tag{5}$$

と書き表され，ひずみεに比例する出力電圧Δe が得られることがわかる．なお，この出力電圧も小さいため，アンプによる増幅回路を実装する．

図 2 2軸ひずみ測定ゲージ．

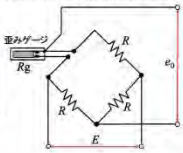


図 3 ホイートストンブリッジ回路．

2.2 ひずみ測定ミッションのシステム設計

一般に1ゲージ二線式結線法では，リード線が長い場合や細いリード線を使用する場合，リード線の抵抗値が変動する．リード線の心線には抵抗温度係数の大きい銅線を使用するため，リード線の抵抗値そのものは小さくても抵抗変化分は無視できない熱出力となることが知られている．このリード線の抵抗変化によるノイズを排除するため，LignoSat におけるひずみ測定ミッションでは二線式結線法を使用する．

上記のひずみ測定系を制御する内部電子基板（ミッションボード）のブロック図を図 4 に示す．外部電源入力値（5 V）を DC/DC コンバータおよび LDO（Low Drop Out）レギュレータによりそれぞれ 3.3 V デジタル値と 3.3 V アナログ値に整流する．この二つの装置には過電流保護装置が実装されている．-X 面および-Z 面内側に貼付されたひずみゲージからコネクタを介してミッションボードにハーネスが接続され，ブリッジ回路へと電気的に接続される．ブリッジ回路にブリッジ電源スイッチを介して 3.3 V アナログ電圧が入力された後，信号はアンプによる昇圧を受け A/D コンバータへ入力される．なお，ブリッジ電源スイッチおよび出力調整電源は，ミッションボード内の PIC マイコンによる ON/OFF 制御信号によってコントロールされる．A/D コンバータから PIC マイコンに

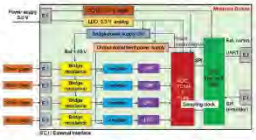


図 4 ミッションボードのシステムブロック図．

SPI 通信で測定データを送信するとともに，PIC マイコンから A/D コンバータにセレクト制御信号をアナログ入力で送信する．PIC マイコンは OBC（On Board Computer）と UART 通信により，またフラッシュメモリと SPI 通信により信号のやりとりを行う．

3. LignoSat の熱設計

3.1 構体内部における温度計測ミッション

LignoSat が行うもう一つのメインミッションとして，温度センサーを用いた衛星構体内部における多点温度計測を検討している．LignoSat の内部温度の空間分布を表 1 に示すような 11 個の温度センサーにより計測し，軌道上におけるその時間的変化をリアルタイムで追跡する．

表 1 温度センサーの内訳．

設置場所	個数
太陽電池パネル用基板（5 面）	5
アンテナ展開機構内側	1
Ni-MH バッテリー近傍	1
Back Plane Board (BPB) 表面実装	1
Rear Access Board (RAB) 表面実装	1
木造構体内側（-X 面および-Z 面）	2
合計	11

一般に材料の抵抗率は温度に依存することから，軌道上における金属抵抗線の抵抗率変化を考慮に入れたひずみ計測系の設計が重要である．即ち，ひずみ測定の対象となる-X 面および-Z 面における木造構体の表面温度を計測することが不可欠である．木材の表面温度を測定するにあたり，温度センサーを木材に接着させる必要があるが，センサーの表面積は小さく十分な接着力を確保することが難しい上に，接着剤による温度計測精度の低下が懸念される．更に，木造構体に接続したセンサーと内部電子基板を電気的に接続するには，計装上の工夫が必要である．

これらの課題を解決すべく，我々は温度センサーを搭載した小型電子基板（温度センサー基板）の設計を進めている（図 5）．熱変触面が構体側，温度センサーとコネクタが搭載された面が衛星内側を向く．このような基板を宇宙用の絶縁性接着剤を用いて木材表面に接着する．温度センサーと木造構体はサーマルビアを介して物理的に接続することで，木造構体の表面温度を測定する．また，温度センサー基板上のコネクタからハーネスを伸ばすことで，温度センサーと内部基板を電気的に接続する．

図 5 温度センサー基板．
（上）表面，（下）断面．

3.2 数値シミュレーションによる簡易熱解析

温度センサーによる構体内部温度計測ミッションに先立ち，宇宙空間―人工衛星間における熱の入出力を

数値モデル化することで軌道上における衛星各部の温度を予測するとともに，各種電子機器が動作温度範囲を逸脱しないかを事前に調査することは重要である．本研究では，宇宙空間における衛星の熱のやりとりとして，（1）太陽光による熱入力 Q_s，（2）地球からの太陽光のはね返り（アルベド）による熱入力 Q_a，（3）地球赤外放射による熱入力 Q_e，（4）衛星から宇宙空間への熱輻射 Q_{out}，（5）衛星内部における輻射熱交換 Q_{int} の 5 つのみを考慮した簡易な熱解析モデルを構築し[8]，熱方程式を 4 次の Runge-Kutta 法により数値積分して解くことで，LignoSat 表面温度 T_1 および構体内部温度 T_2 の予測を行なった．ただし，（5）衛星内部における輻射熱交換においては，衛星の熱が比較的一様と考えられる部分を一纏めにし，構体内部にバッテリーのみ，衛星表面には木板部・太陽電池パネル・アルミフレームにより構成されていることた．なお，衛星表面および内部は熱伝導的にほぼ隔離されているため，熱伝導によるエネルギーのやり取りはないと仮定した．

温度 T_1，T_2 それぞれについて熱方程式は以下のように表される．

$$\begin{aligned} C_1\frac{dT_1}{dt} &= Q_s + Q_a + Q_e - Q_{out1} + Q_{int1} \\ &= \alpha E_s nA + m(\alpha a E_s \cdot 3A + \varepsilon_E E_s \cdot 3A) \\ &\quad -\delta\sigma\varepsilon A T_1^4 + \sigma S(T_2^4 - T_1^4) \end{aligned} \tag{6}$$

$$C_2\frac{dT_2}{dt} = Q_{int2} - \sigma S(T_1^4 - T_2^4) \tag{7}$$

ここで，C_1 および C_2 にそれぞれ衛星表面および内部の熱容量，αは衛星表面の太陽光吸収率，E_s は太陽定数（1370 W/m^2），nは衛星の入射面積係数，A は衛星パネル 1 枚あたりの面積，m は衛星から地球を見た時の立体角係数，a はアルベド係数（0.33），ε_Eは衛星表面の赤外線吸収率，E_e は地球の放射エネルギー密度（240 W/m^2），σ は Stefan-Boltzmann 定数（5.67×10^{-8} W/(m^2·K^4)），δは衛星表面の熱放射率，Sはバッテリー表面積である．αおよびε_E（= ε）は，衛星表面における木板部・太陽電池パネル・アルミフレームの表面積の比によって決まる．表 2に，LignoSat の熱構造モデル（Structural Thermal Model: STM）の寸法などを参考にして求めた，今回の数値計算で用いた各パラメータの値を示す．

表 2 熱解析モデルに用いた各種パラメータ．

パラメータ	記号	値
衛星表面の熱容量	C_1	791 J/K
衛星内部の熱容量	C_2	36.8 J/K
衛星表面の太陽光吸収率	α	0.84
入射面積係数	n	1.4
パネル 1 枚あたりの面積	A	0.00861 m^2
立体角係数	m	0.66
衛星表面の赤外線吸収率	ε_E	0.86
衛星表面の熱放射率	ε	0.86
バッテリー表面積	S	0.004 m^2

本計算では，初期時刻 $t = 0$ を国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）からの放出時刻として，軌道上における日照時と日陰時の異なる時間区分毎に方程式(7)，(8)を連立して解くことで，温度 T_1，T_2 の時間変化を求めた．日陰率に 0.33 と仮定した．なお，放出時の初期条件は常温（$T_1 = T_2 = 27$ ℃）であるが，時間区分毎の初期条件は，前時間区分の最終状態の温度を用いた．計算の結果，T_1，T_2 ともに放出後 3 周回程度では定常状態に到達し，表面温度 T_1 の変動範囲はおよそ-3～27 ℃であり，内部温度 T_2 についてはおよそ 9 ℃～20 ℃で

あった（図 6）．本計算結果から，軌道上における衛星の温度は各電子機器の使用可能温度の定格範囲内に収まることが予想された．

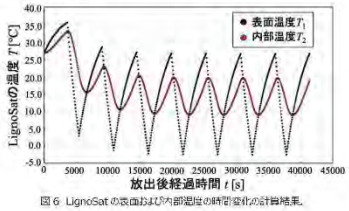


図 6 LignoSat の表面および内部温度の時間変化の計算結果．

3. アマチュア無線ミッション概要

LignoSat では上記のミッション以外に，全世界のアマチュア無線家を対象とした双方向通信サービスを提供するミッション（アマチュア無線ミッション）を展開予定である．我々は全世界のアマチュア無線家に対し LignoSat へ UHF 帯 FM パケットアップリンク信号を送信する機会を提供する計画である．LignoSat はアップリンクされたパケットデータから各無線局のコールサインを抽出し，何らかの追記メッセージとともに UHF 帯 CW ダウンリンクにより応答する．このような FM パケットアップリンクと CW ダウンリンクを用いた単一周波数帯（UHF 帯）による相互通信の試みは世界初であり，アマチュア衛星を介した相互交信機会の更なる展開への寄与が可能となる（図 7）．

図 7 アマチュア無線ミッションの概要図．

図 8 に，FM パケットアップリンク通信で使用する AX.25 プロトコルのデータ構造を示す．このデータ中の送信元アドレス（コールサイン+SSID により構成）からアップリンクされたアマチュア無線局のコールサインを抽出する．また同時に，アップリンク情報から送信者による任意のメッセージを取り出す．その後，CW ダウンリンクによりこれらを送り返すことで交信成立と定義し，交信が成功した方には交信証を発行する予定である．同時に複数局からのアップリンクを受信した場合は，1 対 1 で受信確認のダウンリンクを行うのは非効率的であるため，複数局のコールサインをまとめてダウンリンクする．このように CW のみでダウンリンクを行い，CW を用いた交信に挑戦する機会を提供することで，アマチュア無線における CW の更なる普及に貢献することを目指す．なお，アップリンクされたメッセージは，　旦衛星内のストレージにて保存し，後ほどまとめて FM パケット通信により回収後，本プロジェクトが管理する WEB ページにて公開する予定である．

図 8　AX.25 フレームフォーマット．

5. おわりに

本稿では，LignoSat のメインミッションである構体内部のひずみおよび温度測定に関する設計仕様について紹介するとともに，簡易な熱解析モデルを用いた衛星温度の予測結果について報告した．また，LignoSat を介したアマチュア無線家との双方向通信ミッションの概要を述べた．ひずみ測定ミッションでは μV オーダーの計測が不可欠となるため，今後はノイズ対策の回路を実装するなどといった改良を施すことで，測定精度の更なる向上を目指す計画である．また，温度センサー基板を用いた木材表面の温度測定法についても計測精度の検証が必要である．

参考文献

1) 三木健司, 村田功二, 清水幸夫, 稲谷芳文, 土井隆雄: 宇宙における木材資源の実用性に関する基礎的研究, 第 34 回宇宙構造・材料シンポジウム；講演集録, SA6000137022.

2) 三木健司，土井隆雄，村田功二，仲村匡司，平田和也，増田凱斗，伊藤祥，曽束元喜，清水幸夫，稲谷芳文，臼井浩明：宇宙における木材資源の実用性に関する基礎的研究，第 37 回日本木材加工技術協会年次大会，2018 年 9 月.

3) 曽束元喜，三木健司，仲村匡司，村田功二，臼井浩明，稲谷芳文，清水幸夫，土井隆雄：木造キューブサットの概念設計，第 63 回宇宙科学技術連合講演会，JSASS-2019-4161, 2019.

4) 平田和也，村田功二，仲村匡司，三木健司，土井隆雄：宇宙空間での木材利用を想定した組織壁微細構造と含水率の関係，第 70 回日本木材学会大会，C17-P1-02，2021.

5) 藤村洋一，鈴木岩雄：炭素繊維をコアにもつ MDF の製造，木材学会誌，Vol.33, No.8, p.645-649 (1987).

6) 長澤長八郎，熊谷八百三：Ni めっき木片を用いた木質系電磁波シールド材，木材学会誌，Vol.35, No.12, p.1092-1099 (1989).

7) 阿部房子：木材および木質材料の熱的性質に関する研究（第 4 報）；木材の熱膨張について，木材学会誌，Vol.19, No.2, p.69-74 (1973).

8) 大西晃ほか，宇宙機の熱設計，名古屋大学出版会，2014.

（岡井涼輔　記）

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター

https://space.innovationkyoto.org/

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室

施設長：宇宙木材研究室　三木健司，岩田悠人，山本崚大

Tel: 075-753-5129　Email: spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

SIC 有人宇宙学研究センター　NewsLetter No.14

2023 年 2 月 1 日発行

参考資料 9-6
Spaceology Newsletter: 2023 年 3 月号

SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter 2023 年 3 月号 No.15

第 16 回宇宙ユニットシンポジウム開催報告

2023 年 2 月 11 日（土）、12 日（日）に第 16 回宇宙ユニットシンポジウム「宇宙開発時代をどう生きぬくか―大学の役割を問い直す」が吉田キャンパス本部構内イノベーション棟で開催され、有人宇宙学研究センターも共催として参加しました。11 日午前中に行われた NASA ネルソン長官の講演会に続いて、午後からはポスター展示交流会が開催され、高校生、大学生、研究者、社会人から 39 件のポスターを出展していただき、会場では 100 名を超える参加者が活発な意見交換を行いました。特に優れたポスターには最優秀賞・優秀賞（高校生以下の部・一般の部）・宇宙ユニット長賞が授与されました。また、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の津田雄一教授の特別講演も行われ、小惑星探査機「はやぶさ 2」の小惑星サンプルリターンミッションについて、科学的意義、工学的な挑戦、リュウグウに関する最新の科学成果について紹介していただきました。

12 日は、3 つの講演セッションとパネルディスカッションが行われました。講演セッション 1 では「宇宙科学技術開発の現場」と題し、尾崎直哉先生から「宇宙工学分野における若手研究者の日常と夢」、永松愛子先生から「有人宇宙探査に向けた宇宙放射線環境の把握――国際協力の現場から」という演題で、宇宙科学技術開発に携わる専門家の開発現場について、研究や開発に関しての日々直面する困難な問題なども含めて紹介していただきました。

続いての講演セッション 2 では「有人宇宙開発における人への対応」というテーマで、当センター長の総合生存学館教授山敷庸亮先生の進行で、群馬大学の高橋昭久先生からは「宇宙での放射線と重力変化の複合影響」、日本原子力研究開発機構の佐藤達彦先生からは「宇宙飛行士を宇宙線被ばくから適切に護る―有人火星探査の被ばくリスクはどのくらい？」という演題で、宇宙環境に滞在する宇宙飛行士や宇宙旅行者の身体に生じる影響について講演していただき、地上と異なる特殊な環境での身体影響にどの様に対策していく必要があるのかを議論していただきました。

最後のセッション 3 では、宇宙開発をめぐる国際的な法と政治の状況について、慶應大学の吉木節子先生からは「地球・月圏構築時代の国際宇宙法の現状と課題」、東京大学の鈴木一人先生からは

「宇宙開発の国際政治」と題して講演していただき、国際社会が直面しつつある新たな法的・政治的課題に関する現状と将来のあるべき展開について、倫理的問題にも目を向けつつ議論していただきました。

最後にシンポジウムの総まとめとして各セッションから 1 名ずつ講演者が参加して、パネルディスカッションが行われました。大学が担う人材育成のあり方について意見交換が行われました。会場からは学生からの質問や意見なども数多く寄せられ、大変有意義なシンポジウムとなりました。（辻廣智子 記）

第 16 回宇宙ユニットシンポジウム ビル・ネルソン NASA 長官による講演

2月11日にSIC有人宇宙学研究センター主催で、NASAのビル・ネルソン長官が直接来校して講演されるというイベントがあり、150人余りの学生が集い、講演を拝聴する機会に恵まれました。ネルソン長官は弁護士や、宇宙飛行士、アメリカ上院・下院議員、第１４代NASA長官といった経歴をお持ちであり、非常に広い視野で物事を考えていらっしゃるという印象を受けました。

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡を使用した赤外線による深宇宙の観測により非常に広い範囲を詳細に観測できるようになったため、宇宙において生命存在を確認できる直前である可能性が高く、人類は宇宙開発の新時代に立っていると考えることができるという話をしていただきました。それに加えて現在月に人を着陸させるアルテミス計画の実現に向けて各国が協力して研究を行っており、さらにその先の火星をも視野に入れているということもわかりました。宇宙開発においても女性の社会進出や国際的な協力の意識が高まってきており、NASA幹部の女性比率が高いことからもこのことが実感できました。

講演の後には質疑応答の時間も設けてくださり、非常に多くの質問が飛び交って、非常に学びの多い時間となりました。これからの宇宙開発を担っていくのは若い世代であり、歴史の大きな転換点に立っているということを理解することができました。

なお、本講演は、SIC有人宇宙学研究センターの土井隆雄特定教授へのネルソン長官の友情と、NASAと京大との長期にわたる関係により実現したと聞いております。詳しい講演の内容については、センター長の山敷教授らが通訳として以下のページにまとめていただいております。

https://space.innovationkyoto.org/2023/03/02/senatornelsonlecturekyoto/

（豊西信大 記）

アメリカ大学訪問

SIC有人宇宙学研究センターが所属する京都大学大学院総合生存学館では、世界の著名大学との部局間協定を有しています。今回、大学院生を過去に派遣した、また派遣する予定のあるアメリカの大学三校を訪問しました。

アリゾナ大学

Space Camp at Biosphere 2 (SCB2)を過去 4 回開催した、アリゾナ大学の Biosphere 2 を訪問しました。5 年前に SCB2 のきっかけとなった協定を延長するのが目的です。私にとっては実に 4 年ぶりの訪問でしたが（昨年の第 4 回 SCB2 では私は屋久島・種子島担当）、2019 年の研修の際に

比べて（1）熱帯雨林の樹木数が増えていたこと（2）オーシャンバイオームでのサンゴの育成が始まっていたこと（3）サバナの植物が増えていたこと が驚きでした。またコロナも落ち着き非常に多くの一般客が見学しています。

*写真上段左から Lunar and Planetary Laboratory (Michelle Coe, Manager, Arizona/NASA Space Grant Program)、Biosphere 2 サバナ、Biosphere 2 Ocean バイオーム、下段左から SAM の水耕栽培モジュール、SAM の外観(Kai Staats Project Coordinator)、そして、Biosphere 2 の外観

今回、今年夏からオペレーションが開始される予定である SAM (Space Analogue for the Moon and Mars) の運用前の最後の仕上げを見ることができました。SAM は、月面での実際の生活を想定し、加圧環境にて集団生活を実施し、植物の育成や、実際の宇宙での生活を想定したシャワーやトイレも含めた水のリサイクルを実現するシステムです。巨大な Biosphere2 と比較すると、ちょうど ISS のきぼうモジュールほどのサイズですが、実際の宇宙船での生活を想定するには非常に良いモジュールです。我々は現在、次期のアリゾナでのスペースキャンプをどのように実施するかについて検討を進めています。

カリフォルニア大学マーセッド校

最も新しいカリフォルニア大学として、2005 年にマーセッドに開学された学校ですが、5 年後には 5 万人の学生が在学する大学になるとのことで、今大きくキャンパスが拡張しており、私が 2018 年に訪れた時と比較しても別格に大きくなっていました。私が訪問したのは環境科学専攻ですが、この大学では NASA と共同でドローンや人工衛星を使った広範囲な水圏モニタリング技術開発を実施しています。今回、こちらのキャンパスとの総合協定が新たに始まります。

写真、Professor Joshua Viers と、ドローンを用いたセンシングキット、UC Merced のキャンパス

スタンフォード大学ホップキンズ海洋研究所

ホプキンズ海洋研究所のパーバラ・ブロック教授は、世界で初めて大型の海洋生物に GPS タグをつけて、マグロやサメの海流にのった地球規模の回遊について研究を行なっています。人工衛星を用いて大型海洋動物の地球規模の移動を見ているのです。また、総合生存学館から過去に大学院生を受け入れていただいています。コロナ禍の直前の 2019 年 12 月からの訪問でしたが、それぞれすごい勢いで発達している印象です。我々も負けずに頑張らなければ、と思った次第です。（山敷庸亮 記）

写真、Hopkins Marine Station, Tuna Center, Professor Barbara Block

第 1 回宇宙木材利用シンポジウムの開催

第 1 回宇宙木材利用シンポジウムが 2023 年 3 月 22 日（水）に京都大学小林・益川ホールで開催されます。世界で初めて宇宙での木材利用と樹木の育成に焦点を当てたシンポジウムです。

10:00-10:05 開会の辞

10:05-12:00 第 1 部　宇宙における木材の利用

木造人工衛星・ExBAS 実験速報

13:30-15:00 第 2 部　宇宙における（植物・）樹木の育成

低圧下での植物・樹木の育成・微小重力下における植物・樹木の育成

15:30-17:30 第 3 部　宇宙木材利用の展望

極限環境における木材利用・宇宙木材産業の展望：パネルディスカッション

17:30-17:35 閉会の辞

参加希望者は、次のメイルアドレスに「宇宙木材利用シンポジウム参加希望」と書いてお送りください：spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp （土井隆雄 記）

大学コンソーシアム京都 京カレッジ リカレント教育プログラムの紹介

大学コンソーシアム京都主催の京カレッジ リカレント教育プログラムに SIC 有人宇宙学研究センターに関係する講師が登壇します。特別講演及び講座は「現代の教養講座 宇宙移住に向けた最先端研究と企業技術」をテーマに、最新の研究成果を紹介します。申し込み先は、大学コンソーシアム京都 https://www.consortium.or.jp/project/sg/recurrent です。（山敷庸亮 記）

特別講演「土井隆雄宇宙飛行士に聞く『有人宇宙活動』」

回	日時	講座タイトル
1	4月22日(土)	土井隆雄宇宙飛行士に聞く「有人宇宙活動」 土井 隆雄 宇宙飛行士・京都大学大学院総合生存学館（思修館） 特定教授

「現代の教養講座『宇宙移住に向けた最先端研究と企業技術』」前半プログラム

回	日時	講座タイトル
1	6月1日(木)	宇宙移住のための「コアバイオームコンセプト」 山敷 庸亮 京都大学 大学院総合生存学館教授（SIC 有人宇宙学研究センター長）
2	6月15日(木)	恒久的な宇宙居住に向けた人工重力施設研究 大野 琢也 鹿島建設 関西支店建築設計部副部長 兼 技術研究所上席研究員
3	6月29日(木)	ムーンビレッジ・月に社会を作ることを考える 稲谷 芳文 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 名誉教授
4	7月13日(木)	宇宙移住に関する国際宇宙法 青木 節子 慶應義塾大学大学院法務研究科 教授
5	7月27日(木)	宇宙環境での人への影響－将来の宇宙移住を目指して－ 寺田 昌弘 京都大学 宇宙総合学研究ユニット 特定准教授

「現代の教養講座『宇宙移住に向けた最先端研究と企業技術』」後半プログラム

回	日時	講座タイトル
1	10月5日(木)	宇宙移住のための「コアテクノロジー」 山敷 庸亮 京都大学 大学院総合生存学館教授（SIC 有人宇宙学研究センター長）
2	10月19日(木)	宇宙で地球外生命体の存在を探る 佐々木 貴教 京都大学大学院 理学研究科宇宙物理学教室 助教
3	11月2日(木)	宇宙木材工学 村田 功二 京都大学大学院 農学研究科森林科学専攻 准教授
4	11月16日(木)	将来の長期的月面探査に資する研究およびその地上における社会実装 稲富 裕光 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙科学研究所 教授
5	11月30日(木)	宇宙における水産養殖の研究と地上の先端技術 遠藤 雅人 東京海洋大学学術研究院 海洋生物資源学部門 准教授

- 5 -

- 6 -

学ント[火星に住もう] Session 2 & Session 3

SIC 有人宇宙学研究センターとよみうりカルチャーOSAKA は、月1回、京都市内で来場&オンデマンドの講座、学ント「DMG MORI presents 火星に住もう！」を開講している。

SIC 所属講師がリレー式で最新の宇宙研究を紹介する人気シリーズで、2月は神戸大学大学院理学研究科宇宙物理学教室の岡田浩樹教授が登壇。「人類学から見た人類の宇宙進出」をテーマに、①宇宙研究と（文化）人類学 ②宇宙への進出は人類の第4の転換期なのか？ ③宇宙（火星）にコミュニティ（社会）を作る ④人類社会・文化の多様性と可能性について解説。

宇宙というレンズを通して宇宙の進出だけを考えるのではなく、今の我々の世界を考えることが重要。また、今、私どもが当たり前と思っているのは１９世紀から２０世紀に創られた近代に創られている。

宇宙進出するには、宇宙ステーションの多文化状況、言語と非言語コミュニケーション、宇宙空間における文化の創造など様々な問題があると話す。

次回3月19日は「DMG MORI presents 火星に住もう！ Season2」の最終回となり、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室の佐々木貴教助教が「生命を宿す天体の条件を探る」について解説する。

参加希望は、学ント https://www.ync.ne.jp/osaka/mananto から申し込む。

また、4月からは、鹿島建設 presents として、火星に住もう！ Season3 が開講する。初回の16日には京都大学大学院総合生存学館特定教授で宇宙飛行士の土井隆雄先生が登壇する。

申し込みは3月11日から。（山敷庸亮 記）

- 7 -

LignoSat 紹介
木造人工衛星学生開発チーム
EPS 班

○ディプロイメントスイッチの検査

LignoSat が ISS から放出される際に、衛星の起動を行うスイッチがディプロイメントスイッチです。そのため、このスイッチが働くことは衛星の運用において最も最初の関門となります。しかしこのスイッチは他の衛星を傷つけないため、また、宇宙空間における反力などの影響で衛星が逆に ISS に衝突するなどが無いように、そのスイッチの反力（スイッチが元の状態に戻ろうとする力）やストローク（スイッチが ON するまでの距離）の基準が厳しく設定されています。そのため、EPS 班ではその基準を満たしたスイッチを用いることができるようスクリーニング試験を行い、配線を行なっています。

図1 ディプロイメントスイッチ

図2 配線のはんだ付けの様子

○太陽光発電試験

LignoSat の電力は全6面の内5面に貼られている太陽光パネルからの発電でまかなっています。そのため、EPS 班ではいままでパネルの基板の開発や筐体にパネルを接着するための接着力試験を行なってきました。そしてその発電力についても試験を行い、公称とされている電力量が発電できるか、九州工業大学にある太陽光シミュレータという装置を用いて実際に発電試験を行いました。

非常に良い結果が得られ、想定通りの電力量が確保できそうであることが判明したため、今後はその発電量を上回ることが無いよう消費電力を制御するための電力収支表の作成や運用モードについてのプログラミング開発を行っていく予定です。（福士悠聖 記）

図3 バッテリーボックス作成の様子

8

低圧下樹木育成プロジェクト紹介
Arduino 講習会＃5

1　はじめに

最終回です。最後に制御系について簡単に扱います。実験装置（真空ポンプ・フリーズトラップ・CO_2 ボンベ）の制御はリレーを用いて行なっています。実験装置を実際に扱う前に、リレー・制御の仕組みを学びましょう。

2　リレーをマスターしよう

実験装置を実際に見てみると、リレーが多くついていることが分かります。

図 1: 実験装置の様子

図 2: 実験装置で用いられる中型リレー

実験装置を見ると、2 種類のリレーがついていることが分かります。今回の講習でも用いる青いリレーは小型リレー（小電力用）、下の写真で示されているリレーが中型リレーです。中型リレーはより大きい電力を消費する装置（真空チャンバー、フリーズトラップ）の制御で用います。小型リレーの ON / OFF は小型リレーを用いています。

リレーの具体的な役割について説明していきます。まずは、リレーで行いたい動作を考えましょう。例えば：

- CO_2 濃度が450 ppmを下回ったら、CO_2ボンベの電磁弁を開ける
- 湿度が65 %を上回ったら、フリーズトラップを起動 / 湿度が45 %を下回ったら、フリーズトラップを停止

などです。この動作を行うとき、皆さんはきっとスイッチが欲しいと思いますね。スイッチで ON / OFF 切り替えたいところです。ここでスイッチの役割をするのがリレーです。下のリレーの写真をみて下さい。

図 3: リレーの様子

見慣れた「VCC」と「GND」はいつも通り、5V と GND に繋ぎます。そして、「IN」は Arduino から「HIGH」、「LOW」の信号が流れてくるように配線します。「HIGH」の時、リレーが ON、「LOW」の時、リレーは OFF になっている状態です。

次に「NO」「COM」「NC」に注目しましょう。それぞれ「Normal Open」、「Common」、「Normal Close」の略です。「NO」はリレーが OFF のときには Open、つまり普段は絶縁している端子、「NC」はリレーが OFF のときには Close、つまり普段は導通している端子を表しています。回路にこのリレーを組み

込むことで、リレーの ON / OFF で回路に電流が流れるか、流れないかが決まるわけです。具体的な使いかたとしては、「COM」を電圧が高い側、「NO」または「NC」を電圧が低い側に挟み込むことになります。

次に「sketch_Record_SDcard_Time_Temp_CO2_Relay_v4.2.ino」をダウンロードしてみましょう。このプログラムでは、前回までのプログラムに加えて、リレー制御まで組み込まれたプログラムになっています。（この講座の完成形プログラムです。）リレーを使う際に注意すべき文を紹介します。

int IN_PIN1 = 7; //Electric Valve for CO2

どの Arduino の pin とリレーの IN を繋げるか指定する必要があります。このプログラムでは、「IN_PIN1」という変数を定義して 7 番 pin を指定している訳です。

const float co2set = 620.0; // CO2 set (ppm)

リレーの ON / OFF を区別する際に、for 文を用いています。その際の基準値を「co2set」という変数で定義しています。

pinMode(IN_PIN1, OUTPUT);

digitalWrite(IN_PIN1, LOW);

ここは DHT22 センサーの際に出てきましたね。pin を入力用か出力用かを指定します。

課題 1　このプログラムがうまく動いた場合、どのような動きをするか考えましょう。

それでは、配線を組みます。今回は、CO_2 濃度に応じて LED の点灯・点滅を制御してみましょう。LED の配線は、1 回目の講習会で扱いました。思い出しましょう。ブレッドボードの空いているところに LED 用の回路を作りましょう。完成すれば、LED が常時点灯している状態だと思います。

次に、リレーを使っていきましょう。リレーの配線に少し頭を使います。注意として、今の Arduino Kit で配布しているリレーは「NO」と「COM」から配線を出しています。（この下に見本例の解説を掲載していますが、まずは考えてみてください。）

課題 2　リレーの配線を組んでみましょう。実際にうまく動くかどうかは、先ほどのプログラムを書き込んでみれば分かります。

見本例の解説です。まず、皆さんは、LED の回路の間にリレーを挟もうとしたと思います。確かに考え方は合っていますが、Arduino のブレッドボードの特徴から、LED と同じラインにリレーを挟み込んでも上手くいきません。というのも、同じラインには常に電流が流れているので、間にリレーを挟んで ON / OFF させたとしても、電流はブレッドボードのライン上で流れ続けてしまうからです。これではリレーが機能しません。

そこで、ブレッドボードのラインをもう一つ使うことを考えます。リレーの ON / OFF が反映されるようにラインを使うのです。つまり、見本例のように LED のプラス側を別のラインに移してあげて、そこにリレーを挟み込みます。すると、リレーが ON の時に、LED のプラス側だけが存在するラインに電流が流れ、LED のマイナス側に電流が流れ、GND まで繋がります。リレーが OFF のときには、LED のプラス側のラインに電流は流れないので、LED は消灯します。これで完成です。

課題 3（余裕のある人向け）

実験装置の CO_2 ボンベは 100 msec 電磁弁を開いた（今で言うと LED がついている状態）だけでもかなりの CO_2 を放出します。つまり、皆さんの今のプログラムで LED がつき続ける状況（電磁弁が空き続ける状況）は、実験装置では好ましくありません。そこで、20 秒に 1 回だけ、CO_2 濃度を基準

値と比較して LED の ON / OFF が切り替わるプログラムを作ってみましょう。さらに今の場合は、LED が ON になる場合でも 1 sec だけ LED が ON になるようにしてみましょう。

（かなり、実験装置のプログラムに近づきます。）

（ヒント 1）初期値 0 の変数を定義し、1 sec ごとに 1 ずつ増えるようにしてみましょう。その変数が 20 に達したら、LED の ON / OFF 判定を行い、変数の値を 0 に戻すようにしてみましょう。

（ヒント 2）LED の点灯時間を制御するには「delay();」をうまく使いましょう。

課題 4（余裕のある人向け）

CO_2 の値を眺めていると、値がぶらつく場合があると思います。これに対処する方法として、直近 20 秒の CO_2 濃度平均値を取って、その値を現在の CO_2 濃度として採用するプログラムを作成してみましょう。プログラムに 20 秒間の平均 CO_2 濃度を求める文を追加して、その値を CO_2 濃度とします。

（ヒント 1）for ループの知識が必要でしょう。

（ヒント 2）いくつか自分で変数を定義する必要があるでしょう。

（ヒント 3）配列の知識があるとさらに楽かもしれません。

最終課題（すごく余裕のある人向け）

オリジナルの Arduino を使った回路を作りましょう。今までのセンサー系だけでなく、モーターなども使うとさらに面白いと思います。研究室にある本も参考にしましょう。

3　参考文献

今回の講習内容も必ずどこかの本や HP に乗っています。おすすめは、208 号室にある「Arduino をはじめよう（第 3 版）」（Massimo Banzi, Michael Shiloh 著、船田巧 訳、オライリー・ジャパン発行）です。サンプルプログラムや活用例も多く記載されていて面白いと思います。興味のある人は読んでみて下さい。ネットにも色々な解説記事があるので、調べてみるのも良いと思います。（酒田開和　記）

研究紹介
有人宇宙活動における持続可能な循環型システム構築に向けた課題
市村周一 京都大学大学院総合生存学館 博士課程 2 年

昨今、SDGs/Sustainable Development Goals（持続可能な開発目標）や ESG 投資/Environment（環境）、Social（社会）、Governance（ガバナンス）に代表されるように持続可能な社会の実現に向けた検討と取り組みに注目が集まっています。背景にあるのは、人類の活動に起因する気候変動・環境汚染・生物多様性喪失など自然環境への影響や、グローバルサプライチューンにおける違法労働に代表される人権侵害など人間社会への影響が挙げられ、その対策を講じるためには各国や組織単位で取り組むのではなく、世界中の人々が地球を一つのエコシステムとして俯瞰し、地球人として共創していくことが求められています。

この地球の縮図とも言えるのが 2000 年から現在に至るまで長期に渡り人類が滞在している国際宇宙ステーションです。国際宇宙ステーションは、日米欧やロシアを含む 15 カ国が参画し、常時 3-10 人

が 3-6 ヶ月間交代で生活している地球外で唯一の場所となっています。しかし、この国際宇宙ステーションを舞台とした現在の有人宇宙活動は、持続可能な世界を実現する循環型社会/経済（サーキュラーエコノミー）とはなっておらず、むしろ時代に逆行して直線型社会/経済（リニアエコノミー）を加速させている状態です。例えば、国際宇宙ステーションでは宇宙環境利用の最大化および宇宙飛行士の生活を維持するために年間約 10 回程度物資が地球から補給されていますが、その内補給物資自体は約 30 トンであるのに対して輸送に必要となるロケットや補給船の合計は約 5,400 トンにもなります。つまり、再利用されている水や米国 Space X 社の Falcon9 ロケットの第一段エンジン以外の 96~99%は打ち上げ過程や国際宇宙ステーションで使用された後、大気圏再突入で燃やされるなどして廃棄されているのが現状です（図 1）。

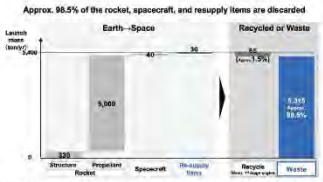


図 1　有人宇宙活動と補給時に使用および リサイクル・廃棄される重量（トン/年）

循環型社会を実現できていない ISS では、さまざまな弊害が発生しています。単純に空気・水・食料といった生命維持に必要な物資（Life Support System Elements）が不足するリスクもあれば、廃棄物溢れ臭い、衣服や衛生用品など QoL（Quality of Life）アイテムの不足なども挙げられます（図 2）。私は、国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟や宇宙ステーション補給機「こうのとり」（HTV）の運用管制業務などに 10 年以上従事し、この現状を目の当たりにしました。

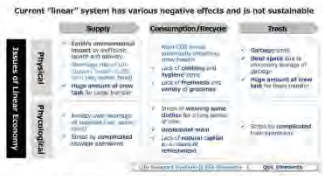


図 2　ISS における循環型社会ではないことによる弊害

持続可能な社会を実現するためには、生命維持システム（Life Support System：LSS）が文字通り不可欠です。空気や水のリサイクル、食料の生産などがその例で、酸素や水のリサイクル率を向上させたり、宇宙船内での食料生産システムをどのように開発するかなど、さまざまな研究が行われています[2,3]。これらの研究により、空気と水は 90%以上のリサイクル率を達成しており、さらにリサイクル率の向上が期待されています。電力も太陽光発電と二次電池の活用により十分賄えている状態です（図 3）。

図 3　工学的サイクル率および地球より定期的に補給している物資

しかし、持続可能な有人宇宙探査を実現するためには、QoL（Quality of Life）、特に心身の健康に影響を与える要素について考慮する必要がある一方、当該要素についてどのような物資がどのくらい補給されているかという点について整理はされていません。加えて、本来は LSS のリサイクル率の向上だけでなく、リサイクルシステム自体の維持に必要な消耗品やスペアパーツの種類と量も含めて検討していくことが重要ですが、リサイクル率の向上が主眼となっているのが現状です。

そこで、私はこれまでの有人宇宙開発の最前線での経験や知見も活用し、現在社会人ドクターとして京都大学大学院総合生存学館の博士課程で山敷先生ご指導の下、対象を LSS だけではなく QoL までスコープを広げてリサイクルと補給の状況を分析しています（図 4）。QoL については、衣服、衛生、健康といった要素に着目しています。衣服は、宇宙船内で社会生活を営むため、そして怪我や船内環境からクルーを守るために重要です。衛生用品は、タオル、おしぼり、歯ブラシなど、健康な生活を維持するために必要なものです。ヘルスケア用品は、フィットネス機器や医療キットで、怪我や病気の予防および回復のために必要な要素です。また、リサイクルシステムについても当該システムを維持するために必要な消耗品やスペアパーツなどのアイテムの種類と量を定量化することに着目しました。

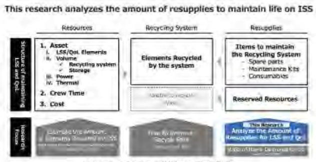


図 4　LSS と QoL 維持に係る構造

分析には、ISS に供給される物資の履歴データの割合を調査した結果[4]に加え、当該期間に滞在した平均宇宙飛行士数および ISS へ供給された物資の総重量を組み合わせることで各物資の宇宙飛行士一人当たりかつ一日当たりの質量を算出しました。なお、宇宙飛行士一人当たりかつ一日当たりに必要となる酸素・水・食料・衣服などの質量は NASA 文書[5,6]で定められており、その数値と実際に供給されている物資の質量を比較することで必要値に対して十分な量が供給されているか確認することができます。結果の詳細は割愛しますが、例えば空気については、宇宙飛行士によって生成される二酸化炭素から回収できなかった空気の質量や微量ながら ISS の外に漏れ出ている空気の質量などを ISS に設置してある酸素生成装置や地上からの予備ガスタンクで十分補っていることがわかりました。一方、ISS に補給される質量のうち、予備ガスタンクは 22%しか占めておらず残りの 78%は、空気システムを維持するための予備品や消耗品であることがわかりました（図 5）。つまり、仮に酸素をすべてリサイクルして予約ガスタンクの再供給が不要になったとしても、リサイクルシステムを運用・維持するための予備品や消耗品を再供給し続ける必要があるのです。

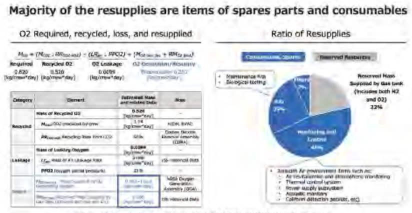


図 5　空気（酸素）のリサイクル状況および供給物資の内訳

水についても、再供給される質量の 75.8%が水タンクで、残りの 24.2%がトイレのハードウェアと排泄物の格納容器など予備品や消耗品でした。QoL 要素である衣料品、衛生用品、ヘルスケア用品はすべて地球から再供給されていますが、衣服については同じ下着を数日間着続けないといけなかったり、汗をたくさん吸った状態から乾かした運動着も再度着ないといけないことによる不快感があったりなど実態があり[7]、そもそも QoL の観点で十分な量が供給されているのかという論点もあります。衛生用品の 6 割近くはタオルや布巾であることを考えると、今後の研究で例えば 3D プリント技術を用いた衣類やタオル類のリサイクルシステムの開発によって、供給する物資の量を大きく低減し、QoL も改善できる可能性があります。ヘルスケア用品も約 5 割が運動機器のスペア部品であることから、LSS も含めて消耗品の供給が不要なリサイクルシステムの検討やスペアパーツなどを軌道上製造技術で生産するなどの検討・開発を進めることで真の循環型・リサイクルシステムの実現に近づけると言えるのかもしれません。

【著者】
市村周一｜京都大学大学院総合生存学館 博士課程
東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学修了。JAXA 宇宙科学研究所で月面構造物に係る研究や筑波宇宙センターで国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟 JAXA フライトディレクタ等に従事。コンサルファームで、さまざまな業界の事業開発や事業・技術戦略策定支援を経て KDDI に入社。現在、宇宙事業・技術戦略策定および関連する企画を担当。

[1] Uncrewed spaceflights to the International Space Station, Wikipedia, 閲覧日 2021-12-18, https://en.wikipedia.org/wiki/Uncrewed_spaceflights_to_the_International_Space_Station
[2] Bagdigian, R.M., Cloud, Dale, Status of the International Space Station Regenerative ECLSS Water Recovery and Oxygen Generation Systems
[3] Ridley, A.H., et al, International Space Station as a Testbed for Exploration Environmental Control and Life Support Systems – 2022 Status, 51st International Conference on Environmental Systems ICES-2022-310 10-14 July 2022
[4] Levri, J.A, et al, September 2003, Advanced Life Support Equivalent System Mass Guidelines Document, NASA/TM-2003-212278
[5] National Aeronautics and Space Administration, June 5, 2014, HUMAN INTEGRATION DESIGN HANDBOOK (HIDH), NASA/SP-2010-3407/REV1
[6] Anderson, M.S, et al, January 2018, Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA/TP-2015–218570/REV1
[7] "宇宙暮らし" はそう遠くない！？宇宙と地上の暮らしを考える「THINK SPACE LIFE」ワークショップに潜入。, Hanako.tokyo,閲覧日 2022-1-3.

京都大学 SIC 有人宇宙学研究センター
https://space.innovationkyoto.org/
〒606-8501 京都市左京区吉田本町 吉田キャンパス本部構内 総合研究 16 号館 208 号室
編集人：宇宙木材研究室 三木勇貴、豊西信人、山本陽人
Tel＆Fax: 075-753-5129 Email: spacewood@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp
SIC 有人宇宙学研究センター NewsLetter No.15
2023 年 3 月 1 日発行

参考資料 10-1
学会資料：2022/11/01：福王悠星他
超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計

宇宙科学技術連合講演会2022 1C15

超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計

2022/11/01 @熊本

○福王悠星，曽束元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川祐樹，清田朋和，桑原和暉，佐野愛華，筒井涼輔，豊西悟大，細辻一，松野なな，椋本暖，山敷鳳亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次（京都大学），苅谷健司，土屋守雄（住友林業），土井隆雄（京都大学）

LignoStella project

1

目次

LignoStella project

1. 目的及び背景
2. ミッション定義
3. 衛星および地上局システムの開発
4. 熱構造モデル（STM）の振動試験結果
5. せん断接着力試験による接着強度評価
6. 現在の開発状況
7. まとめと今後の展望

目的および背景

LignoStella project

宇宙空間における人類の持続可能社会の創造

植物の宇宙利用・宇宙環境耐性に関する研究

✔ 木材資材の長期宇宙利用可能性
- 長期真空暴露実験
- クリープ試験

K. Miki et al., SAE00C137022 (2018)

社会基盤材料としての木材
- 木材加工法の技術的価値
- カーボンニュートラル社会実現への貢献（林野庁HPより） etc.

https://kkao.co.jp/project/national-stadium/

長期的な持続可能社会の形成を目指す上で，木材は有用である

目的および背景

LignoStella project

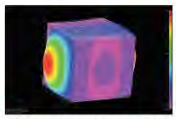
超小型（1U）木造人工衛星「LignoSat」

構体系バスシステムをほぼ全面的に木造化
概念設計に基づき，実現可能性を検討
✔ 木造構体初号機の製作
✔ FEM解析による固有振動数解析

宇宙機構造部材としての木材の信頼性実証

宇宙材料としての木材利用法の提唱
木材産業の新たな活躍の場の創出

宇宙開発を通じたカーボンニュートラル実現へ



M. Sotsuka et al., JSASS-2019-4161 (2019)

ミッション定義

LignoStella project

1. 木造構体内部（木板内側）のひずみの経時的測定
2. 木造構体内部における多点温度計測
3. 木造構体内部における地磁気測定
4. 衛星内部のコンピュータに生じるSEUのカウント
5. 単一周波数帯（UHF帯）によるアマチュア無線通信サービス

➡ 宇宙における木材の物性変化を経時的かつ*in situ*で捉える

達成目標

ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
ISS放出後，地上でHKデータ（CW）受信	CW・パケット信号を6ヵ月間受信し，各ミッションデータ獲得 アマチュア無線家との交信成功	フルサクセス内容が6ヵ月間以上継続的に成功

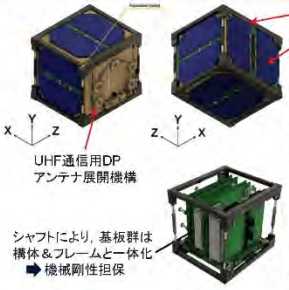
ハードウェア設計

LignoStella project

木造構体
✔「留形隠し蟻組接ぎ」：ネジや接着剤を使わず十分な剛性を確保
✔ 構体各所に貫通孔を設け，衛星表面実装部品と内部電子基板との電気的インターフェースを確保

ハードウェア設計

LignoStella project



主要諸元

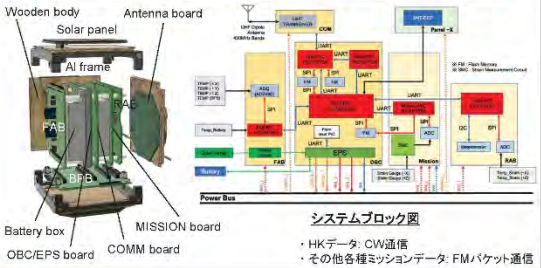
項目	内容
運用期間	6ヵ月以上
軌道	高度約400 kmのISS軌道
サイズ	1U*
質量	1.33 kg以下
バッテリー	Ni-MH（3S2P）
周波数	Uplink/Downlink: 435 MHz帯（UHF帯）
発電量	約1400 mW

*100 mm×100 mm×113.5 mm

ソフトウェア設計

LignoStella project

BIRDSバスプラットフォーム（九州工業大学）を利用し，信頼性を向上



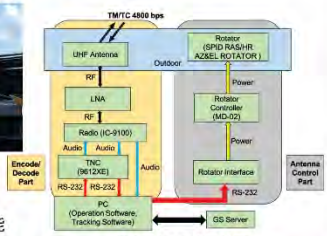
システムブロック図
- HKデータ：CW通信
- その他各種ミッションデータ：FMパケット通信

地上局システム

LignoStella project

UHF/VHF帯用アマチュア無線通信局@京都大学
（北緯35.03度，東経135.79度）

アマチュア衛星の
自動追尾・交信が可能



地上局システム系統図

STM振動試験

LignoStella project

目的

- ISS放出のための剛性要求を満たすか調査
- 打ち上げの振動による構造損傷の有無を確認

STM（ヤマザクラ製）

@九州工業大学
超小型衛星試験センター

ランダム加振（AT・QT）＆サインバースト（QT）加振前後における構体の最低次固有振動数の変化をモーダルサーベイにより解析

加振条件（上段）モーダルサーベイ，
（中段）ランダム加振，（下段）サインバースト

周波数 [Hz]	加速度 [G_{rms}]	振動時間 [min]
20～2000	0.5	1

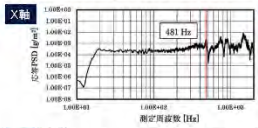
	ATレベル	QTレベル
周波数 [Hz]	PSD値 [g^2/Hz]	
20	0.02	0.04
50	0.02	0.04
120	0.031	0.062
230	0.031	0.062
1000	0.0045	0.009
2000	0.0013	0.0026
オーバーオール加速度 [G_{rms}]	4.08	5.77
振動時間 [s]	60	120

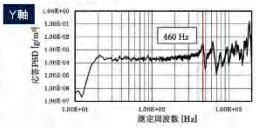
周波数 [Hz]	QTレベル	
	波数	加速度 [G]
10～40	10以上	11.25

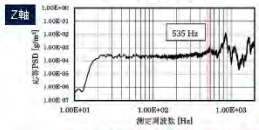
STM振動試験

LignoStella project

加振前における各軸方向に対するモーダルサーベイ結果







- ✔ 最低次固有振動数は，いずれもISS放出のための剛性要求（≥ 60 Hz）を満たす
- ✔ 全ての軸について，ランダム/サインバースト加振前後の応答PSD波形にほぼ変化なし
- ✔ 試験全体を通して部品の破損見られず

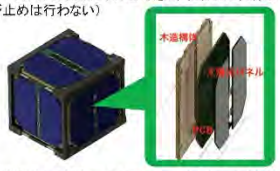
打ち上げおよび放出時の搭載要求条件を十分に満足可能

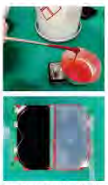
せん断接着力試験

LignoStella project

木造構体表面への太陽電池パネルの搭載

- ✔ PCBを介し内部との電気的接続を確保
- ✔ PCBと木板は，絶縁性シリコンゴム系宇宙用接着剤「WACKER RTV-S 691」で接着
  （太陽電池パネルとの電気的干渉を考慮し，絶縁性を担保するため，ネジ止めは行わない）





cf.) RTV-S 691による
太陽光パネル接着

せん断接着力試験によりPCB—木材間の接着強度を評価

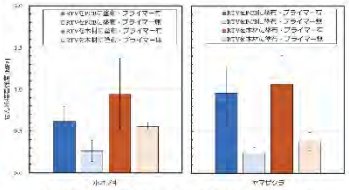
接着強度評価結果

LignoStella project

- RTV-S 691（片面塗布）を木材 or PCBのどちらに塗布するか
- 接着性を向上させる下地処理剤（プライマー: WACKER PRIMER G790）の有無

これらの観点に基づき，PCB—木材間の接着強度を計測

（上）サンプル，（下）引張試験機



- ✔ どの樹種においても，プライマーを用いた方が有意に強度が向上
- ✔ 塗布面の差異は強度に大きな影響を与えない

EM開発に向けた取り組み

LignoStella project

【構体系】
ISS放出規格に基づく，EM用
木造構体・アルミフレームの設計

【コマンド&データ処理系】
各種電子基板の基礎設計
電気的/物理的接続の確認

【通信系】
アンテナ展開
機構の信頼性
評価

【電源系】
充放電特性解析
に基づく，EM/FM
用バッテリー選定

まとめと今後の展望

LignoStella project

超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計事項，各種試験結果および現在の開発状況について紹介した
2023年冬頃の打ち上げを目指し，EM/FMの開発・試験を進める

その他の取り組み

- ✔ JAXAの簡易材料曝露実験ブラケット（ExBAS）を用いた木材試料の宇宙環境曝露実験

宇宙での木材の基礎物性・細胞壁
微細構造の変化を直接検証

↓

LignoSat開発に知見を応用

ExBAS用木材試験体

参考資料 10-2
学会資料：2022/11/01：筒井涼輔他
超小型木造人工衛星「LinoSat」のミッション系開発の現状と展望

宇宙科学技術連合講演会2022 1C16

超小型木造人工衛星「LignoSat」のミッション系開発の現状と展望

2022/11/01 @熊本

○筒井涼輔，管東元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川祐樹，清田朋和，桑原和暉，佐野愛華，豊西悟大，福王悠星，細辻一，松野なな，横本暖，山敷庸亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次（京都大学），苅谷健司，土屋守雄（住友林業），土井隆雄（京都大学）

LignoStella project

1

目的および背景

LignoStella project

京都大学では「木材の宇宙利用」の研究
ex.) 低圧下の樹木育成実験

木材は，再生可能な資源であるとともに，カーボンニュートラルな特徴がある．

木材資源の宇宙利用
→宇宙木材産業の創出，持続可能な社会へ

2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 2

目的および背景

LignoStella project

超小型木造人工衛星「LignoSat」

宇宙での木材利用の可能性の探究
＋
宇宙環境因子の木材への影響を調査

メインミッション

1. 木造構体内部のひずみの経時的測定
2. 木造構体内部の多点温度計測
3. 地磁気の測定
4. 人工衛星内部のSingle-Event Upsetのカウント
5. 独自の双方向アマチュア無線通信サービス

宇宙での木材の基礎物性データ収集

アマチュア無線ミッション

2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 3

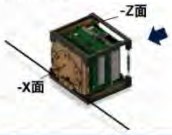
ひずみ測定ミッション

LignoStella project

1. 木造構体内部のひずみの経時的測定

木造構体内部にひずみゲージを貼付し，1分あたり1回の高頻度測定を1年間行う

・宇宙での木材の熱膨張率の推定
・地上試験と比較し，木材構体の微小変形を誘発する宇宙環境因子の特定



-X, -Z面内側1箇所ずつに2軸ひずみゲージを貼り付ける

2軸ひずみゲージ（東京測器株式会社製）

2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 4

地上試験概要

LignoStella project

接着試験 ＋ ひずみ測定による熱膨張率推定 ＋ 基板の単評価試験 ＋ 基板の相互評価試験（他基板との相互通信）

ひずみゲージと木板の接着力試験

温度変化によるひずみを，ひずみゲージで検出できるか，ひずみ測定から熱膨張率が推定できるのかを確認する

ミッションボード単体の試験
1. 物理的，構造面の試験
2. 基板の電気的試験
3. ひずみ測定の精度の試験
例：アクリル板を用いた精度検証

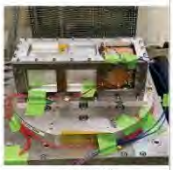
2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 5

接着試験

LignoStella project

熱サイクル環境

高真空環境



振動環境

目視により，ひずみゲージが木板から剥離していないことを確認した．

2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 6

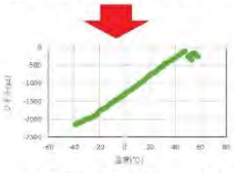
熱膨張率の推定1

LignoStella project

温度変化による木材の微小変形をひずみゲージで検出可能か検証するために実験を行った：

- ホオノキの木片にひずみゲージを貼付し，温度制御チェンバーに設置した
- 宇宙環境を想定し，+2 ℃/minで−40 ℃～60 ℃まで変化させた．

温度とひずみは線型関係にある！



温度と繊維直交方向ひずみの関係

恒温実験槽

2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 7

熱膨張率の推定2

LignoStella project

温度とひずみの関係から導出された熱膨張率

−40~−25℃は1.3-2.0×10^{-5}/K，それ以降は2.0-3.0×10^{-5}/K．平均では1.95×10^{-5}/K．

ホオノキと組織構造がもっとも近いYellow-poplarを参照
繊維直交方向の熱膨張率の値が文献値と近い

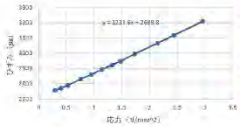
宇宙空間でひずみゲージを使った熱膨張率の推定は可能

2022/11/01 Ryosuke TSUTSUI / Kyoto Univ. 8

ひずみゲージの精度検証

LignoStella project

- 木材とヤング率が近く，等方性材料で均質であるアクリル板にひずみゲージを貼付
- デジタルフォースゲージ(下写真)で任意の荷重をかけ，
  応力(σ)=ひずみ(ε)×ヤング率(E)
  の線形性を満たすか確認



曲げフォースゲージによるひずみ測定

構体内部の温度計測

LignoStella project

2. 木造構体内部の多点温度計測

木材の熱膨張率を測定するために，ひずみ測定面において，木造構体表面温度を計測

＋

11点の温度計測により，衛星内部の温度分布とその時間変化をモニタリング

温度センサ設置場所	個数
太陽電池パネル用基板(5面)	5
アンテナ展開機構内側	1
Ni-MHバッテリー近傍	1
Back Plane Board (BPB) 表面実装	1
Rear Access Board (RAB) 表面実装	1
木造構体内側(−X面および−Z面)	2
合計	11

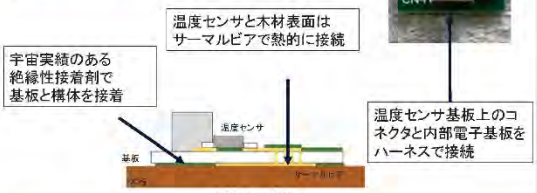
温度センサLMT84

温度センサ基板

LignoStella project

温度センサを搭載した小型電子基板(温度センサ基板)の設計

➡木材表面温度を計測



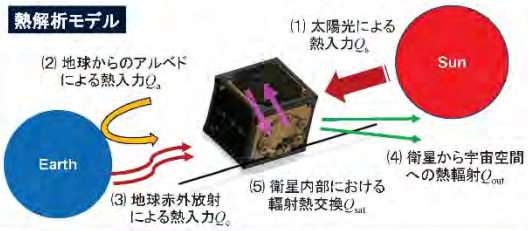
温度センサ基板

数値シミュレーションによる熱解析

LignoStella project

衛星各部の温度を事前に予測
各種電子機器の動作温度範囲内に収まるか確認

熱解析モデル



数値シミュレーションによる熱解析

LignoStella project

衛星表面温度T_1，内部温度T_2に関する熱方程式

$$C_1\frac{dT_1}{dt} = Q_s + Q_a + Q_e - Q_{out} + Q_{sat1}$$
$$= \alpha E_s nA + m(a\alpha E_s \cdot 3A + \varepsilon_e E_e \cdot 3A) - 6\sigma\varepsilon A T_1^4 + \sigma S(T_2^4 - T_1^4)$$
$$C_2\frac{dT_2}{dt} = Q_{sat2} = \sigma S(T_1^4 - T_2^4)$$

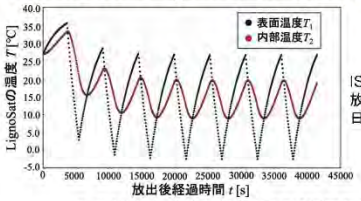
熱解析に用いた各種パラメータ

パラメータ	記号	値
衛星表面の熱容量	C_1	791 J/K
衛星内部の熱容量	C_2	36.8 J/K
衛星表面の太陽光吸収率	α	0.84
人射面積係数	n	1.4
パネル1枚あたりの面積	A	0.00861 m²
立体角係数	m	0.86
衛星表面の赤外線吸収率	ε_e	0.86
衛星表面の熱放射率	ε	0.86
バッテリー表面積	S	0.004 m²
太陽定数	E_s	1370 W/m²
アルベド係数	a	0.33
地球の放射エネルギー密度	E_e	240 W/m²
Stefan-Boltzmann定数	σ	5.67 × 10⁻⁸ W/(m²K⁴)

熱解析結果

LignoStella project

熱方程式を4次のRunge-Kutta法により数値積分



ISSからの放出時刻: $t = 0$
放出時の初期温度: 27 ℃
日陰率: 0.33

T_1,T_2ともに放出後3周目程度でほぼ定常状態に到達
T_1: −3~27 ℃ T_2: 9~20 ℃
各種電子機器の使用可能温度の定格範囲内に収まる

まとめ

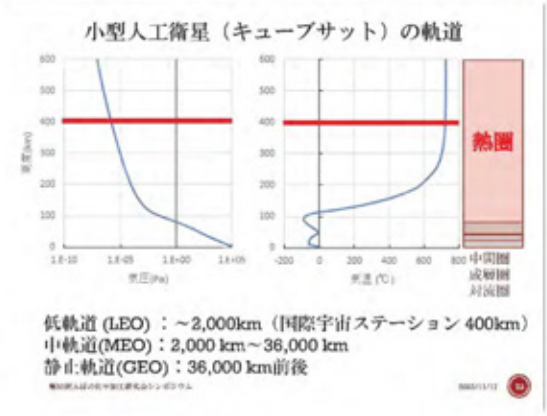
LignoStella project

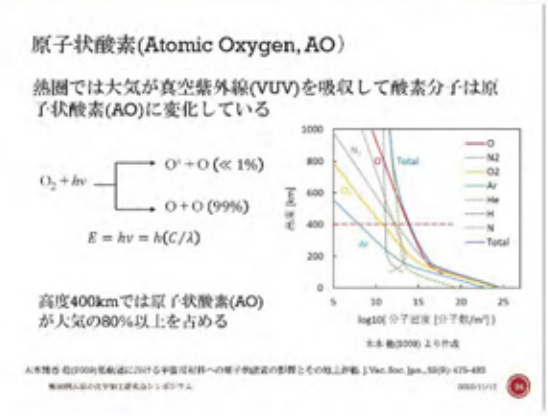
木造人工衛星「LignoSat」のミッションのうち，2つのミッションについてその概要や設計仕様を紹介した．

1. 木造構体内部のひずみの経時的測定
2. 木造構体内部の多点温度計測

- 宇宙での木材の熱膨張率の推定により，宇宙環境因子の木材への物理化学的影響を明らかにすることが目的である．
- ミッションの実現の可否を確認する実験や数値解析例を紹介した．

参考資料 10-3
学会資料抜粋：2022/11/17：村田功二
広葉樹の活用方法ー楽器から宇宙利用まで





原子状酸素による材料表層の消失

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

酸素分子がVUVを吸収して光解離する　$h\nu$

O_2 → $O^+ + O$　(8 km/sec)　$O + O$

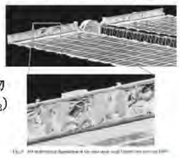
原子状酸素が衝突した材料表面でできた酸化物が気体の場合には徐々に材料表面の消失が進行する

揮発性酸化物 (ex: CO, CO_2)

浸食

木本 他 (2009) より作成

1年間宇宙空間に曝露されたISSの太陽電池アレイブランケットカバー（木本 他 2009）



木本雄吾 他(2009)低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価. J. Vac. Soc. Jpn., 52(9): 475-483

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　25

国際宇宙ステーション材料曝露実験
(Materials International Space Station Experiment, MISSE)

MISSE-2 PEACE Polymers experiment:
LEO環境に3.95年間(2001.8.16～2005.7.30)設置した宇宙暴露試験がNASAによって実施された。40種類のポリマーが曝露試験に供され、AOによって生じるポリマー表面の浸食率が得られた。

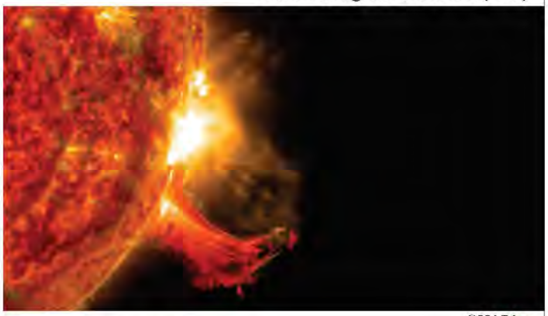
©NASA

©NASA

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

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　26

Galactic Cosmic Rays (GCR)
Solar Energetic Particles (SEP)



©NASA

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　27

宇宙放射線

①銀河宇宙線(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線やガンマ線）

②太陽粒子線(SEP)
- 高エネルギー粒子（陽子と電子）

③補足粒子線（Radiation Belt）
- 内帯（陽子帯）(IRB)
- 外帯（電子帯）(ORB)　（理科年表2020）

惑星間空間における電離放射線の発生源

ヴァンアレン放射線帯

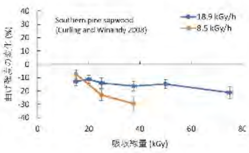
ＩＳＳの外部プラットフォーム(EXPOSE-R2)　2014/10/24 ～ 2016/1/11

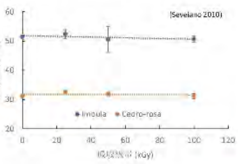
線源	最大 (μGy/day)	合計 (Gy/442days)
GCR	77	0.0318
SEP	2,515	0.004
IRB	844	0.251
ORB	2,962	0.123
Total		0.4098

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　Dachev et al (2017) Space Weather 15: 1475-1489.　2022/11/17　28

ガンマ線（電磁波）の影響
木材のガンマ線照射実験

- ●木材の強度を低下させるには少なくとも10kGy以上のガンマ線照射が必要
- ●高エネルギー粒子(陽子や重粒子)などの木材への影響は不明





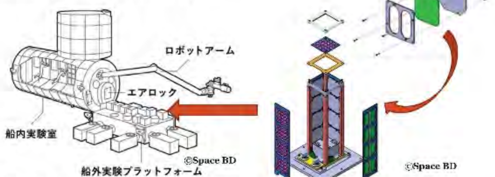
Curling and Winandy (2008) より作成　Seveiano (2010) より作成

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　29

宇宙商社®Space BD
「スペースデリバリー」プロジェクト

国内の研究機関・民間企業など10組が参加

国際宇宙ステーション(ISS)「きぼう」
日本実験棟・船外曝露プラットフォーム
ExBAS* (簡易船外曝露実験装置)



* i-SEEP搭載型簡易材料曝露実験ブラケット
(Exposed Experiment Bracket Attached on i-SEEP)

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　30

宇宙商社®Space BD
「スペースデリバリー」プロジェクト

2022年2月20日　アンタレスロケットによって打上げ（NASA ワロップス飛行施設, VA, USA）

©NASA

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　31

宇宙商社®Space BD
「スペースデリバリー」プロジェクト

2022年
2月21日　シグナス補給線17号機がISSに到着
3月 4日　船外曝露開始（12月回収予定）

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

試験体：56mm×8, 6mm×5mm
樹種：ホオノキ、ヤマザクラ、ダケカンバ　各２体
その他：AO評価用ポリイミド樹脂シート

第80回木材の化学加工研究会シンポジウム　2022/11/17　32

参考資料 10-4
学会資料抜粋：2023/03/14：三本勇貴他
中性子線照射による木材の核反応のシミュレーション

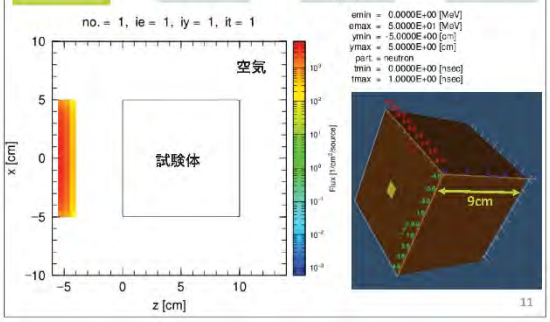
【実験】放射線挙動解析コード PHITS

モンテカルロ法により、個々の放射線挙動を乱数を用いて確率的に再現し、その平均的な挙動を推定

9

【実験】中性子線照射シミュレーション

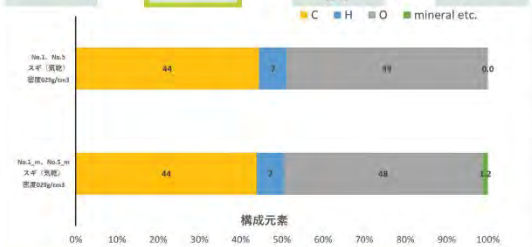
モデルの作成 ▶▶ 材料の組成 ▶▶ 線源のエネルギー分布 ▶▶ ^{14}C量の算出



11

【実験】中性子線照射シミュレーション

モデルの作成 ▶▶ 材料の組成 ▶▶ 線源のエネルギー分布 ▶▶ ^{14}C量の算出



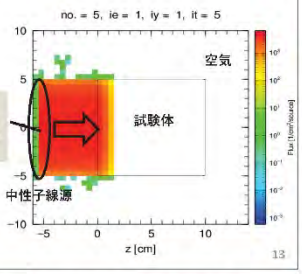
・全乾スギ組成（関野ら, 2011）に含水率12%を加え組成の推定
・CHOのみと微量元素考慮（N, P, Mg, K, Ca）（L Augusto et al., 2008）を作成

12

【実験】中性子線照射シミュレーション

モデルの作成 ▶▶ 材料の組成 ▶▶ 線源のエネルギー分布 ▶▶ ^{14}C量の算出

実験装置の中性子分布を想定し、
1.0×10^{9}〜20 MeVの範囲で分布のある中性子線源を設定

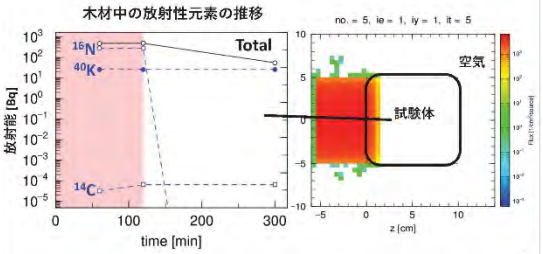


13

【実験】中性子線照射シミュレーション

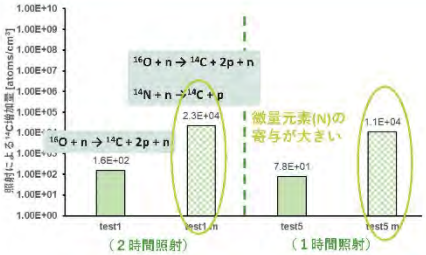
モデルの作成 ▶▶ 材料の組成 ▶▶ 線源のエネルギー分布 ▶▶ ^{14}C量の算出

木材中の放射性元素の推移



14

【結果】中性子線照射試験における^{14}C生成シミュレーション



$$\frac{\text{照射により増加する}^{14}\text{C}}{\text{天然存在比相当量の}^{14}\text{C}} = \frac{2.3\times10^{4}}{6.4\times10^{9}} = 3.6\times10^{-6}$$

天然存在比相当量の^{14}Cに比べて極めて少ない

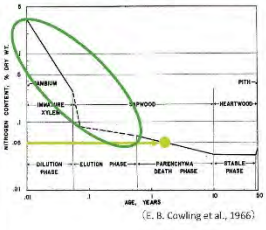
15

【考察】木材内での^{14}Cの生成

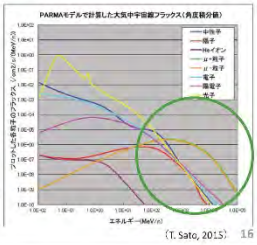
実験でもシミュレーションでも十分な^{14}C量の増加は見られなかった ➡ 木材内での^{14}C生成の実証が不十分

・実験サンプルではN含有率が0.05%
→樹種、材の部位によって、さらに高い

・地上における中性子線のデータ
→高エネルギー中性子の存在



（E. B. Cowling et al., 1966）



（T. Sato, 2015）

16

【結言】木材内での^{14}Cの生成

目的
・木材に中性子線を照射することで木材内で^{14}Cが生成する可能性を探る

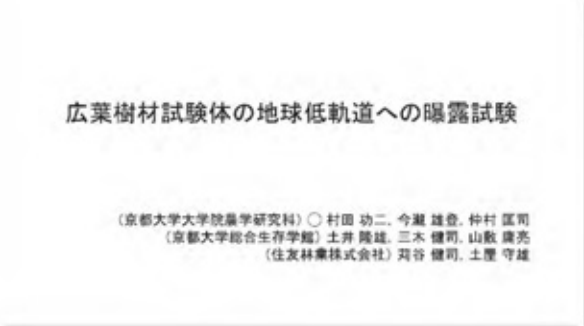
結果
・中性子線照射試験では、^{14}Cの増加が確認できなかった
・照射試験のシミュレーションでは、^{14}Cは十分に増加しないことが予測された
・木材内での^{14}C生成にはOではなく微量なNが大きく寄与すると予測された

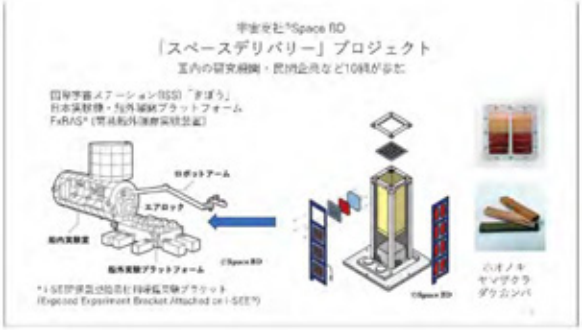
考察
・木材内での^{14}C生成の実証がまだ十分ではない

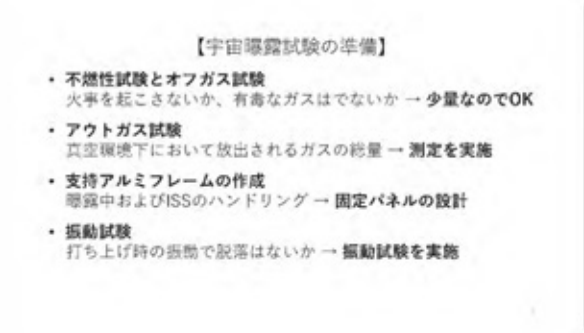
今後
・N含有量の高いサンプルの利用、中性子線源の変更により検討を重ねる

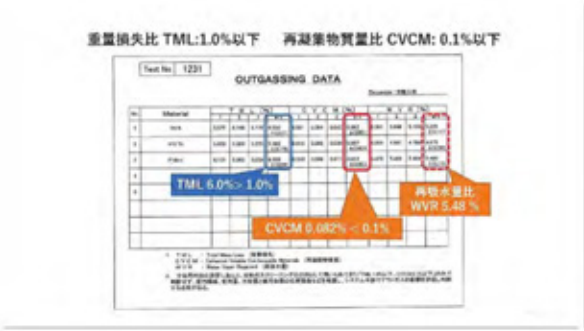
17

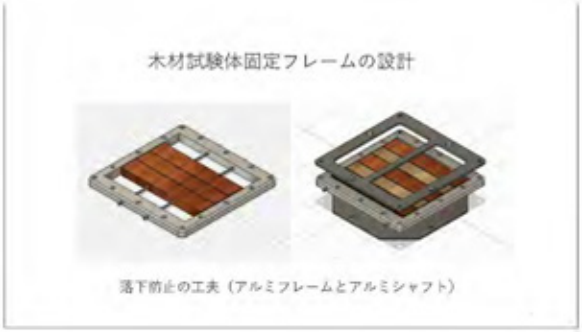
参考資料 10-5
学会資料抜粋：2023/03/14：村田功二他
広葉樹材試験体の地球低軌道への曝露試験

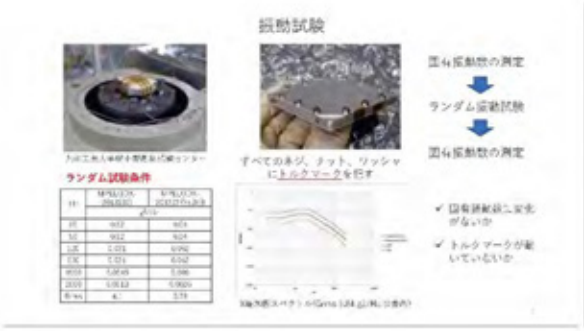












2022年2月20日

アンタレスロケットによって打上げ

（NASA ワロップス飛行施設, VA, USA）

木材の宇宙曝露試験

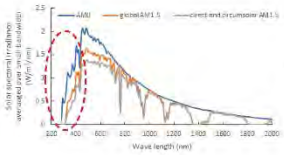
2022年2月21日：シグナス補給船17号機がISSに到着
3月 4日：船外曝露開始
12月23日：船内に回収（曝露期間294日）
2023年1月11日：ドラゴン補給船26号機（SpX-26）がフロリダ半島沖へ着水
3月27日：ＪＡＸＡから引き渡し

試験体：56mm×8.6mm×5mm
樹 種：ホオノキ、ヤマザクラ、ダケカンバ
その他：AO評価用ポリイミド樹脂シート

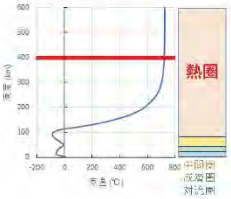
試験体の回収作業（若田光一宇宙飛行士）

ISSから分離したドラゴン補給船搭載用26号機（SpX-26）

地球低軌道は大気は高温だが、気圧は極めて低い（10^{-11}気圧）



太陽光の標準的なスペクトル(AM0：地球の大気の外、AM1：赤道の海洋上、global AM1：太陽高度48°の地表面)。(ASTM G-173-03 (International standard ISO 9845-1, 1992)

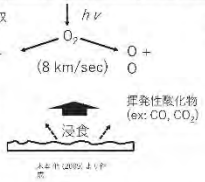


地上には届かないエネルギーの大きい紫外線が吸収されて地球低軌道では700℃になっている。

原子状酸素による材料表層の消失

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

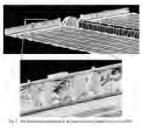
酸素分子がVUVを吸収して光解離する



原子状酸素が飛来した材料表面でできた酸化物が気体の場合には徐々に材料表面の消失が進行する

揮発性酸化物
(ex: CO, CO_2)

1年間宇宙空間に曝露されたISSの太陽電池アレイブランケットカバー（大森 他 2009）



宇宙放射線

①銀河宇宙線(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線やガンマ線）

②太陽粒子線(SEP)
- 高エネルギー粒子（陽子と電子）

③捕足粒子線（Radiation Belt Particles）
- 内帯（陽子帯）(IRB)
- 外帯（電子帯）(ORB)

ISSの外部プラットフォーム(EXPOSE-R2) 2014/10/24～2016/1/11

線源	最大（μGy/day）	合計(Gy/442days)
GCR	77	0.0318
SEP	2,515	0.004
IRB	844	0.251
ORB	2,962	0.173
Total		0.4098

Dachev et al. (2017) Space Weather, 15, 1475–1488.

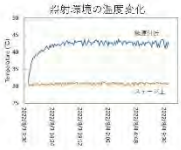
ガンマ線照射試験

試験体：ホオノキ(*Magnolia obovata*)
含水率：気乾(20℃・60%RH) 湿潤（20℃・97%RH）
各条件につき 3体 0.6 mm(T) ×10 mm(R) × 100 mm(L)
照射環境：ステージ上 31℃、線源近く 43℃

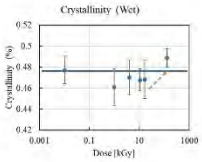
ポリエチレンフィルムでラッピング

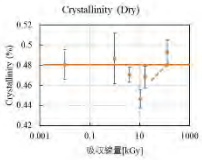
京都大学複合原子力科学研究所
コバルト60 ガンマ線照射装置

照射環境の温度変化



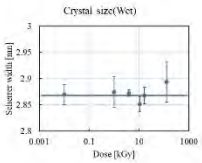
ガンマ線照射による結晶化度の変化

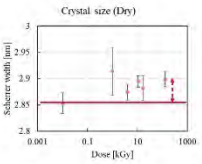




128kgの吸収線量で増加しているように見えるが
Control試験体との統計的有意差はない(P>5%)
試験体数を増やすと有意差が検出できる可能性あり

ガンマ線照射による結晶幅（Sherrer 幅）の変化





128kgの吸収線量で湿潤、気乾ともの増加しているように見えるが
Controlに対して統計的有意差が検出できたのは気乾のみ(P>5%)

参考資料 11-1
ハウジングトリビューン 2022 年 11 月 25 日
宇宙での木材利用の可能性の検証

CLOSE UP

京都大学／住友林業

宇宙での木材利用の可能性を検証

文科省の委託費に採択

京都大学と住友林業の「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」が、文部科学省の「宇宙航空科学技術推進委託費」に採択された。宇宙での木材利用の可能性を検証し、人類の持続的な発展と脱炭素に寄与する方針だ。

京都大学と住友林業は、「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」を文部科学省の調査研究委託事業である「令和4年度宇宙航空科学技術推進委託費　宇宙航空脱炭素等技術創出プログラム」に申請し、9月に採択された。同事業としての研究期間は2022年10月～2025年3月までで、期間内における総事業費は4000万円が見込まれている。

「宇宙航空科学技術推進委託費」とは、宇宙航空開発利用の新たな可能性を開拓する取り組みを推進するため、国が予算を支給する資金制度で、2009年度に創設された。

今回採択された「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」は、京都大学と住友林業が2020年5月から共同研究を進める「宇宙木材プロジェクト（LignoStellaProject）」に端を発する。

同プロジェクトは「宇宙における樹木育成・木材利用に関する基礎的研究」に両者が共同で取り組む研究契約を締結したことでスタートしたもので、宇宙での木材利用の可能性を検証することで、人類の持続的な発展と脱炭素への貢献を目指している。

京都大学と住友林業が共同研究に至った背景には、両者の理念の一致がある。

住友林業は国内でもトップクラスの木材関連企業であり、木の総合研究所である筑波研究所を持つなど、木を使用した科学技術や木材利用の新しい構想などについて研究を行っているほか、国内外で植林事業にも注力している。木材研究と樹木育成に関しては充分なノウハウを持ち、宇宙利用など過酷な環境下での木材利用に関心が高かった。京都大学はこうした木材研究、樹木育成に関する住友林業のノウハウが宇宙でも生かせるのではないかと考え、共同研究が始まった。

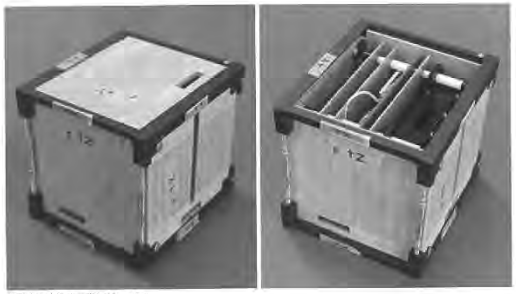
木材を宇宙で利用する意義は大きい。将来的に人類の生活拠点が宇宙にまで広がった際には社会インフラの整備が必要になるが、それを地球から輸送するのはコスト面などの問題から現実的ではない。そのため、現地調達できる資材として木材に着目した。京都大学大学院総合生存学館の土井隆雄特定教授は「木は再生可能資源のため、宇宙で利用できれば資源調達の解決手段になる」と話す。

また、「宇宙での生活には恒久的なシステムの確立が必要になる。そのために木は重要な要素になると考えており、地球のような人と森が共生する居住環境をできる限り宇宙に再現したい。地球文明が宇宙に広がっていくような『宇宙文明』の実現を目指していく」（土井教授）とも話す。

木造人工衛星の打ち上げへ
木材物性・育成の課題解決手段を模索

「宇宙木材プロジェクト」では、2023年に世界初の木造人工衛星（LignoSat）を打ち上げることを大きな目標として掲げる。

木造人工衛星の特徴は、そのコンパクトさだ。木材は電磁波や地磁気を透過する性質を持つため、従来外部に取り付けていたアンテナや姿勢制御装置を衛星内部に設置でき、衛星自体のサイズを縮小できる可能性がある。


開発中の木造人工衛星LignoSat

また、アルミニウムの金属衛星は運用終了後、大気圏に突入すると燃焼による酸化でアルミナ粒子という大気汚染物質を放出するが、木造衛星は大気圏で燃え尽きるため、地球大気への負担も少ない。

さらに、金属衛星と比較して容易に製造ができ、脱炭素に貢献することもポイントだ。金属衛星は製造時に特別な工作機械を用い、その過程で二酸化炭素を排出していたが、木造衛星はノコギリと鉋があれば構造体を作ることができるといい、製造過程での二酸化炭素を大幅に削減できる。

なお、木造人工衛星（LignoSat）の構造体には今後、住友林業の社有林から切り出した木材を使用することも計画しているという。

「昨今はあらゆる業界で脱炭素の風潮が加速しているが、木造人工衛星は宇宙開発分野におけるカーボンニュートラルの第一歩になると考えている。また、木材を使用したことで宇宙を身近に感じられるきっかけにもなる」（土井教授）。

一方、宇宙での木材利用にあたって、宇宙環境下での木材物性の調査や樹木の育成研究なども行っているが、課題も多く残されているという。

木材物性の課題は含水率。宇宙は湿度が0％のため、寸法変化で木材が壊れる可能性があるためだ。また、木材は異方性材料のため、繊維方向以外への力に弱く、使う向きも重要になる。

ただ、それ以外の物性に関しては現在のところ問題はなく、むしろメリットが大きい。木材は鉄製材料と比べて重量が軽いほか、熱伝導も小さいためマイナス100度から摂氏100度程度まで耐えることができ、断熱効果にも期待ができる。さらに、これまでの研究により、4、5年程度の真空状態では物性が変わらないことも立証済みであり、雨や虫の心配もないことから、地球上よりも長持ちする可能性すら秘めているという。

一方、育成面では地球上との環境の違いが大きく起因する。例えば、火星の大気圧は0・01気圧しかなく、その大気のほとんどは二酸化炭素で構成されている。また、月に至っては大気圧がほとんど存在していない。このような環境下で本当に植物が育つのかが研究テーマだが、現在のところ、火星の大気圧の約10倍の0・1気圧程度までは成長することを確認している。当面の目標は火星の大気で樹木の育成を行うことだという。

さらに、今回の研究を通して、過酷な条件下で木材を利用する技術も開発し、地球上での木材利用の可能性も広げたい考えだ。宇宙空間でも利用可能な木材技術が開発できれば、それを応用した耐久木材の生産や加工技術の向上につながる。

地球から宇宙へ、そして再び地球へと技術のフィードバックを図ることで、新しい木材利用の可能性を見出していきたいとしている。

参考資料 11-2
毎日新聞　2023 年 1 月 13 日
過酷な宇宙に耐えられる？「木」で作る人工衛星の可能性

過酷な宇宙に耐えられる？「木」で作る人工衛星の可能性

重水友里香　環境・科学　速報　科学・テクノロジー　環境　宇宙

毎日新聞　2023/1/13 12:00（最終更新 1/13 12:00）　有料記事　1666文字

開発中の木造人工衛星「リグノサット」＝京都大提供

宇宙に木造の人工衛星を送り込む。そんな野心的なプロジェクトに京都大と住友林業の研究チームが挑んでいる。木は燃えたり腐ったりして、過酷な環境に耐えられるようなイメージは乏しい。宇宙で木材が活躍する日は来るのだろうか。

実験はヤマザクラなど3種類

国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」で2022年12月、若田光一宇宙飛行士がロボットアームを操作し、船外に設置されていた小さなパネルを回収した。パネルに取り付けられていたのは、耐久性に優れ繊細な細工もしやすいヤマザクラとダケカンバ、軽くて軟らかいホオノキの木片。この3種類が人工衛星本体の素材候補だ。

木造人工衛星の素材候補を並べたパネル。宇宙空間での劣化の程度を調べるため、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外に設置された＝村田功二・京都大准教授提供

宇宙空間に木片をさらしていた期間は約10カ月。オンラインで回収の様子を見守ったチームの村田功二・京都大准教授（木材工学）は「劣化してばらばらになることなく、無事回収できてよかった」と胸をなで下ろした。今後、木片がどう変化したかを詳細に調べるという。

宇宙空間には宇宙線など材料を劣化させるさまざまな要因がある。地球周辺の軌道を周回する人工衛星の表面は、日が当たる場所では120度の高温、陰に入ると氷点下150度という低温にさらされる。このため人工衛星の材料は通常、耐久性に優れるジュラルミンなどアルミニウム合金が使われる。

金属ではなく、木材を使うことにどんなメリットがあるのか。

大気圏で「燃え尽きる」強み

人工衛星は通常、役目を終えると大気圏に突入して燃えるが、燃えた後のアルミニウムが微粒子になって大気中にとどまり、大気汚染の原因になると指摘されている。材料が木材なら燃え尽きてしまうので、微粒子が残る心配がない。また木材は電磁波や地磁気を通すため、アンテナなどを内蔵したまま運用できる。木の種類によっては軽量化も期待できる。

チームが開発を目指す人工衛星は1辺約10センチ、板の厚さ1センチ以下の小さな「木箱」だ。中に電子基板や測定機器を詰め込み、総重量は約1・2キロになる。

船外活動中に撮影された国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」＝2018年3月29日、宇宙航空研究開発機構（JAXA）提供

ロケットでISSに届けた後にきぼうから宇宙空間に放出する予定で、他の人工衛星と同様に、打ち上げ時の振動などに耐えられなければならない。そこで強い力が加わっても板がはがれないよう、板の端に施した台形の凹凸を組み合わせて接合する「蟻組（ありぐ）み接ぎ」という手法を採用し、熟練の職人が担う。チームは、英語で木を意味する「リグノ」と「サテライト（人工衛星）」を組み合わせ、「リグノサット」と名付けた。

「アルミニウムに対抗できる」

宇宙のような過酷な環境に木材は耐えられるのだろうか。

村田さんは「私たちが木の欠点だと思っていることが宇宙ではほぼ起こらなくなる。木材はきちんと扱えば、アルミニウムと対抗できる材料になるはずだ」と自信を見せる。

木材の強度の高さは第二次世界大戦中、資源が不足した際に各国で注目された。アルミニウムや鉄の不足を受け、英国では木造戦闘機「デ・ハビランド・モスキート」が前線に投入され、日本でも開発が検討されたという。

村田さんによると、真空の宇宙では木は燃えたり腐ったりすることがない。地球上では、大気中の水分などによって曲がったり反ったりするが、宇宙では含水率の変化がないため、こうしたことも起こらない。

木造人工衛星「リグノサット」を開発している村田功二・京都大准教授＝本人提供

しかも、大幅な温度変化でも急激な物性の変化がなく、熱による膨張の割合もアルミニウムと同じ程度なのだという。木材には個体差があり、部位によって強度のばらつきなどもあるが、小さなサイズの衛星では制御できる範囲とみる。

来年度中の打ち上げ目指す

国際月探査「アルテミス計画」の最初のミッションが22年に実施されるなど、宇宙開発競争は加速している。チームが見据えるのは「宇宙で木を育て、現地で材料として使う未来」で、リグノサットをその最初の一歩と位置づける。

火星を想定した樹木栽培のイメージ図＝京都大提供

23年度内にリグノサットを打ち上げるのが目下の目標。チームは地上の実験室でも宇宙線の一種ガンマ線を木材に照射して構造の変化を調べたり、耐熱性を確認したりする試験などを重ねている。【垂水友里香】

毎日新聞のニュースサイトに掲載の記事・写真・図表など無断転載を禁止します。著作権は毎日新聞社またはその情報提供者に属します。
画像データは（株）フォーカスシステムズの電子透かし「acuagraphy」により著作権情報を確認できるようになっています。

Copyright THE MAINICHI NEWSPAPERS. All rights reserved.

参考資料 11-3
毎日新聞　2023 年 1 月 21 日
木造人工衛星

新　聞　【新聞定価1ヵ月4,300円(本体価格3,982円+消費税318円)】1部売り(消費税込み)朝刊150円　夕刊50円　(第3種郵便物認可)

木造人工衛星

宇宙に木造の人工衛星を送り込む。そんな野心的なプロジェクトに京都大と住友林業の研究チームが挑んでいる。木は燃えたり腐ったりして、過酷な環境に耐えられるようなイメージは乏しい。宇宙で木材が活躍する日は来るのだろうか。

京大×住友林業 挑戦中

10カ月実験 劣化調査

国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」で2022年12月、若田光一宇宙飛行士(59)がロボットアームを操作し、船外に設置されていた小さなパネルを回収した。パネルに取り付けられていたのは、耐久性に優れ繊細な細工もしやすいヤマザクラとダケカンバ、軽くて軟らかいホオノキの木片。この3種類が人工衛星本体の素材候補だ。

宇宙空間に木片をさらしていた期間は約10カ月。オンラインで回収の様子を見守ったチームの村田功二・京都大准教授（木材工学）は「劣化してばらばらになることなく、無事回収できてよかった」と胸をなで下ろした。今後、木片がどう変化したかを詳細に調べるという。

宇宙空間には宇宙線など材料を劣化させるさまざまな要因がある。地球周辺の軌道を周回する人工衛星の表面は、日が当たる場所では120度の高温、陰に入ると氷点下150度という低温にさらされる。このため人工衛星の材料は通常、耐久性に優れるジュラルミンなどアルミニウム合金が使われる。

金属ではなく、木材を使うことにどんなメリットがあるのか。

人工衛星は通常、役目を終えると大気圏に突入して燃えるが、燃えた後のアルミニウムが微粒子になって大気中にとどまり、大気汚染の原因になると指摘されている。材料が木材なら燃えつきてしまうので、微粒子が残る心配がない。また木材は電磁波や地磁気を通すため、アンテナなどを内蔵したまま運用できる。木の種類によっては軽量化も期待できる。

チームが開発を目指す人工衛星は一辺約10センチ、板の厚さ1センチ以下の小さな「木箱」だ。中に電子基板や測定機器を詰め込み、総重量は約1・2キロになる。

ロケットでISSに届けた後にきぼうから宇宙空間に放出する予定で、他の人工衛星と同様に、打ち上げ時の振動などに耐えられなければならない。そこで強い力が加わっても板がはがれないよう、板の端に施した台形の凹凸を組み合わせて接合する「鳩組み接ぎ」という手法を採用し、熟練の職人が担う。チームは、英語で木を意味する「リグノ」と「サテライト（人工衛星）」を組み合わせ、「リグノサット」と名付けた。

腐らず、曲がらず

宇宙のような過酷な環境に木材は耐えられるのだろうか。

村田さんは「私たちが木の欠点だと思っていることが宇宙ではほぼ起きることなくなる。木材はきちんと扱えば、アルミニウムと対抗できる材料になるはずだ」と自信を見せる。

木材の強度の高さは第二次世界大戦中、資源が不足した際に各国で注目された。アルミニウムや鉄の不足を補け、英国では木造戦闘機「デ・ハビランド・モスキート」が前線に投入され、日本でも開発が検討されたという。

村田さんによると、真空の宇宙では木は燃えたり腐ったりすることがない。地球上では、大気中の水分などによって曲がったり反ったりするが、宇宙では含水率の変化がないため、こうしたことも起きてこない。

しかも、大幅な温度変化でも急激な物性の変化がなく、熱による膨張の例合もアルミニウムと同じ程度なのだという。木材には個体差があり、部位によって強度のばらつきなどもあるが、小さなサイズの衛星では制御できる範囲とみる。

国際月探査「アルテミス計画」の最初のミッションが22年に実施されるなど、宇宙開発競争は加速している。チームが見据えるのは「宇宙で木を育て、現地で材料として使う未来」で、リグノサットをその最初の一歩と位置づける。

23年度内にリグノサットを打ち上げるのが目下の目標。チームは地上の実験室でも宇宙線の一種ガンマ線を木材に照射して構造の変化を調べたり、耐熱性を確認したりする試験などを重ねている。【華水友里香】

村田功二・京都大准教授＝本人提供

木造人工衛星の素材候補を並べたパネル。宇宙空間での劣化の程度を調べるため、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船外に設置された＝村田さん提供

地上で弱点 真空で克服

❶開発中の木造人工衛星「リグノサット」❷❸宇宙を想定した強度実験のイメージ＝いずれも京都大提供

参考資料 11-4
毎日新聞　2023 年 1 月 23 日
木造人工衛星 宇宙に挑む

毎　日　新　聞　　第52894号 【明治5年創刊】明治28年3月8日 第3種郵便物認可 ©毎日新聞社2023（日刊）

木造人工衛星 宇宙に挑む

来年度打ち上げへ 耐久性テスト

京大と住友林業

宇宙に木造の人工衛星を送り込む。そんな野心的なプロジェクトに京都大と住友林業の研究チームが挑んでいる。木は燃えたり腐ったりして、過酷な環境に耐えられるようなイメージは乏しい。宇宙で木材が活躍する日は来るのだろうか。

国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」で2022年12月、若田光一宇宙飛行士がロボットアームを操作し、船外に設置されていた小さなパネルを回収した。パネルに取り付けられていたのは、耐久性に優れ繊細な細工もしやすいヤマザクラとタケカンバ、軽くて軟らかいホオノキの木片。この3種類が人工衛星本体の素材候補だ。

宇宙空間に木片をさらしていた期間は約10カ月。オンラインで回収の様子を見守ったチームの村田功二・京都大准教授（木材工学）は「劣化してばらばらになることなく、無事回収できてよかった」と胸をなで下ろした。今後、木片がどう変化したかを詳細に調べるという。

❹開発中の木造人工衛星「リグノサット」＝京都大提供❺船外活動中に撮影された国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」＝2018年3月29日（宇宙航空研究開発機構提供）

大気汚染せず

宇宙空間には宇宙線など材料を劣化させるさまざまな要因がある。地球周辺の軌道を周回する人工衛星の表面は、日が当たる場所では120度の高温、陰に入ると氷点下150度という低温にさらされる。このため人工衛星の材料は通常、耐久性に優れるジュラルミンなどアルミニウム合金が使われる。

金属ではなく、木材を使うことにどんなメリットがあるのか。

人工衛星は通常、役目を終えると大気圏に突入して燃えるが、燃えた後のアルミニウムが微粒子になって大気中にとどまり、大気汚染の原因になると指摘されている。材料が木材なら燃え尽きてしまうので、微粒子が残る心配がない。また木材は電磁波や地磁気を通すため、アンテナなどを内蔵したまま運用できる。木の種類によっては軽量化も期待できる。

アルミ並みの材料

宇宙のような過酷な環境に木材は耐えられるのだろうか。

村田さんは「私たちが木の欠点だと思っていることが、宇宙ではほぼ起こらなくなる。木材はきちんと扱えば、アルミニウムと対抗できる材料になるはずだ」と自信を見せる。

木材の強度の高さは第二次世界大戦中、資源が不足した際に各国で注目された。アルミニウムや鉄の不足を受け、英国では木造戦闘機「デ・ハビランド・モスキート」が前線に投入され、日本でも開発が検討されたという。

村田さんによると、真空の宇宙では木は燃えたり腐ったりすることがない。地球上では、大気中の水分などによって曲がったり反ったりするが、宇宙では含水率の変化がないため、こうしたことも起こらない。

しかも、大幅な温度変化でも急激な物性の変化がなく、熱による膨張の割合もアルミニウムと同じ程度なのだという。木材には個体差があり、部位によって強度のばらつきなどもあるが、小さなサイズの衛星では制御できる範囲とみる。

国際月探査「アルテミス計画」の最初のミッションが22年に実施されるなど、宇宙開発競争は加速している。チームが見据えるのは「宇宙で木を育て、現地で材料として使う未来」で、リグノサットをその最初の一歩と位置づける。

23年度内にリグノサットを打ち上げるのが目下の目標。チームは地上の実験室でも宇宙線の一種ガンマ線を木材に照射して構造の変化を調べたり、耐熱性を確認したりする試験などを重ねている。【亜水友里香】

村田功二
京都大准教授

MAINICHI
新毎聞日
夕刊
1月23日（月）
2023年（令和5年）
発行所：東京都千代田区一ツ橋1-1-1
〒100-6051 電話(03)3212-0321
毎日新聞東京本社

創業 昭和21年
ビフテキ家
あづま
（ぐるなび）http://r.gnavi.co.jp/g905500/
新宿店：新宿区新宿3-6-12 TEL.03-3351-0188
銀座店：中央区銀座6-7-6 TEL.03-3571-0392

近事片々　2023.1.23

週末深夜の火災。30人が1人暮らしする神戸市の集合住宅で。亡くなった4人全員が高齢者という現実に心痛む。

◇

コロナの「5類移行」に賛成46%、反対41%。本社世論調査。60代以上には抵抗感。

◇

春節で国民が大移動する中国。ゼロコロナ政策転換で感染拡大の懸念。早くも1週間で死者1・2万人超の発表。

◇

「満員御礼」垂れ幕下がり盛況沸った大相撲。貴景勝関、1大関の意地見せて優勝。

◇

バラスポーツ発展への貢献は大きく。車いすテニスの国枝選手が引退表明。世界ランク1位のままコートに別れ。

きょうの紙面から
特集ワイド
内館牧子さんが語る「老害」 2
アートの扉
狩野探信「かわいいもの」 3
洋菓子のW杯 日本が優勝 6
大雪で立ち往生 備えは？ 7

毎日数独 SUDOKU 第4431回・初級

2			6					3
		1		4		7		
	5				1		9	

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「有人宇宙活動のための総合科学研究教育プログラムの開発と実践」
機関名　国立大学法人京都大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）		発表者氏名	発表した場所（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計	口頭発表	福王悠星，曽束元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川裕樹，清田朋和，桑原和輝，佐野愛華，筒井涼輔，畳西悟大，細辻一，松野なな，椋本暖，山敷庸亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次，苅谷 健司，土屋守雄，土井隆雄	第66回宇宙科学技術連合講演会	2022年11月1日	国内
超小型木造人工衛星「LignoSat」のミッション系開発の現状と展望	口頭発表	筒井涼輔，曽束元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川裕樹，清田朋和，桑原和輝，佐野愛華，畳西悟大，福王悠星，細辻一，松野なな，椋本暖，山敷庸亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次，苅谷健司，土屋守雄，土井隆雄	第66回宇宙科学技術連合講演会	2022年11月1日	国内
広葉樹の活用方法－楽器から宇宙利用まで	口頭発表	村田功二	第50回木材の化学加工研究会シンポジウム	2022年11月17日	国内
中性子線照射による木材の核反応のシミュレーション	口頭発表	三本勇貴，村田功二，仲村匡司，山敷庸亮，土井隆雄，三木健司，苅谷健司，土屋守雄	第73回日本木材学会大会	2023年3月14日	国内
広葉樹材試験体の地球低軌道への曝露試験	口頭発表	村田功二，今瀬雄登，仲村匡司，土井隆雄，三木健司，山敷庸亮，苅谷健司，土屋守雄	第73回日本木材学会大会	2023年3月14日	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
超小型木造人工衛星「LignoSat」の基礎設計	福王悠星，曽束元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川裕樹，清田朋和，桑原和輝，佐野愛華，筒井涼輔，畳西悟大，細辻一，松野なな，椋本暖，山敷庸亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次，苅谷 健司，土屋守雄，土井隆雄	第66回宇宙科学技術連合講演会	2022年11月1日	国内
超小型木造人工衛星「LignoSat」のミッション系開発の現状と展望	筒井涼輔，曽束元喜，阿戸豪，遠藤早緒里，大西大知，菊川裕樹，清田朋和，桑原和輝，佐野愛華，畳西悟大，福王悠星，細辻一，松野なな，椋本暖，山敷庸亮，仲村匡司，村田功二，三木健司，石原正次，苅谷健司，土屋守雄，土井隆雄	第66回宇宙科学技術連合講演会	2022年11月1日	国内

（注1）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。
（注2）本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。