

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)に乘せられて 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、日本が誇るさやぶさ 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、辻廣智子氏であった。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岩片



図3 二次イオン質量分析計

九工大出張 # 1 4

LignoSat MISSION 班

1月17日から18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。

(山本陽大 記)

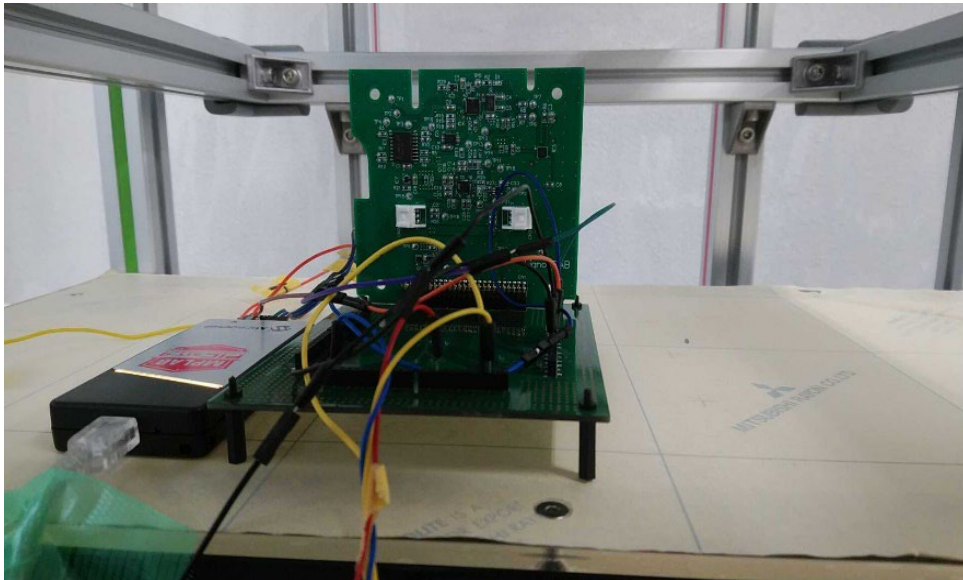


図1 試験環境

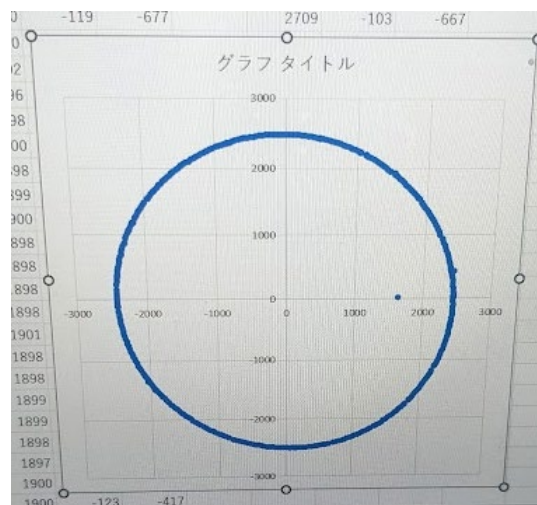


図2 試験結果

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、会場参加は登録順です。

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/1FAIpQLSd3Yk7CPst4KCCa4TU5i-wvGRcNy8moSnn8tl1bqfK4jW6Z7A/viewform>

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

（山敷庸亮 記）



Dialogue with NASA Administrator Bill Nelson

【Date】 11 February 2023 11:00 – 12:00

【Venue】 Symposium Hall (5F), International Science Innovation Building

Kyoto University

Only students are eligible to participate.

【Application form】 [[CLICK HERE](#)]

〈Program〉

11:00-11:20 Lecture by Senator Nelson

11:20-12:00 Question & Comments

Closing

Chaired by Professor Takao Doi, Astronaut

Translation made by Professor Yosuke A. Yamashiki
& Ms. Kiana Tomita

〈About Nelson Administrator〉

On May 3, 2021, Senator Bill Nelson was sworn in as the 14th Administrator of NASA, tasked with carrying out the Biden-Harris Administration's vision for NASA.

In 1986, Nelson participated in the 24th space shuttle flight, orbiting the earth 98 times in six days. Since his time in Congress, Nelson has spearheaded NASA's Earth Science program, introduced numerous bills to combat and mitigate the effects of climate change, and has been a vocal proponent of STEM career training and education programs.



SIC 有人宇宙学研究センター
Human Spaceology Center

Organizer : SIC Human Spaceology Center, GSAIS, Kyoto University
Co-organizer : Kyoto University Unit of Synergetic Studies for Space



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



2023年 京都大学宇宙総合学研究所 第16回シンポジウム

宇宙開発時代をどう生きぬくか ―大学の役割を問い直す

2.11(土) 13:00~17:00
特別講演：はやぶさ2が切り拓いた宇宙探査の新時代
講師：津田雄一（宇宙航空研究開発機構）
ポスター展示交流会「宇宙研究の広場 2023」

2.12(日) 10:00~17:00
講演セッション
1. 宇宙科学技術開発の現場
2. 有人宇宙開発における人への対応
3. 宇宙開発をめぐる法と政治と倫理
パネルディスカッション：宇宙開発と人材育成

◎登壇者
永松愛子（宇宙航空研究開発機構）
佐藤達彦（日本原子力研究開発機構）
高橋昭久（群馬大学）
青木節子（慶應義塾大学）
鈴木一人（東京大学）
中村正人（宇宙航空研究開発機構）
ほか

 **参加無料・事前申込が必要です**
ポスター発表と参加の申し込みはウェブから
<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/symp/16th/>

主催○京都大学宇宙総合学研究所
共催○京都大学大学院理学研究科附属天文学、京都大学大学院総合生存学館 SIC 有人宇宙研究センター
後援○京都府教育委員会、京都市教育委員会、宇宙航空研究開発機構
※シンポジウムは文部科学省宇宙航空科学技術政策委員会「機軸学を基盤とした宇宙人材育成プログラムの開発と実施」および「将来の有人宇宙活動を支える宇宙圏域人材育成プログラムの創出」による支援を受けて開催されます。



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。

（辻廣智子 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、CO₂ 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 CO₂ 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、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指しています。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。（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。

PCB overview

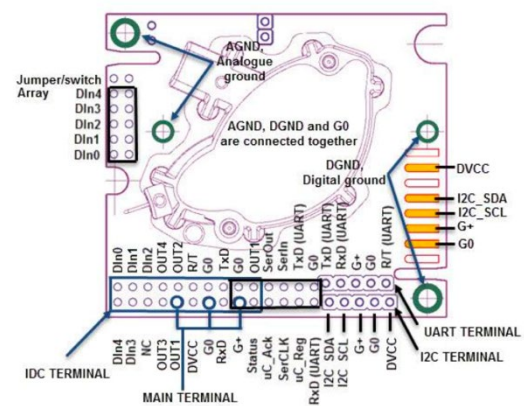


図 1: K30 センサーの PIN 配置
(K30 データシートより)

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」に繋がします。）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 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ください。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 と繋がれば 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。

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。

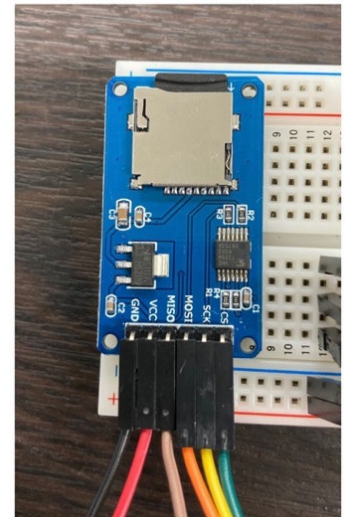


図 2：SD カードモジュール

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を確認できます。

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わりました。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 F M 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めます。

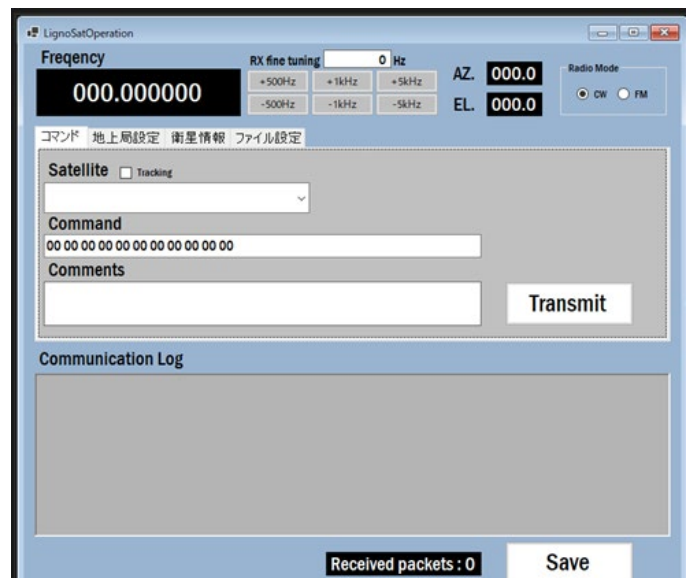


図 1.LignoSatOperation のソフトウェア図

●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、

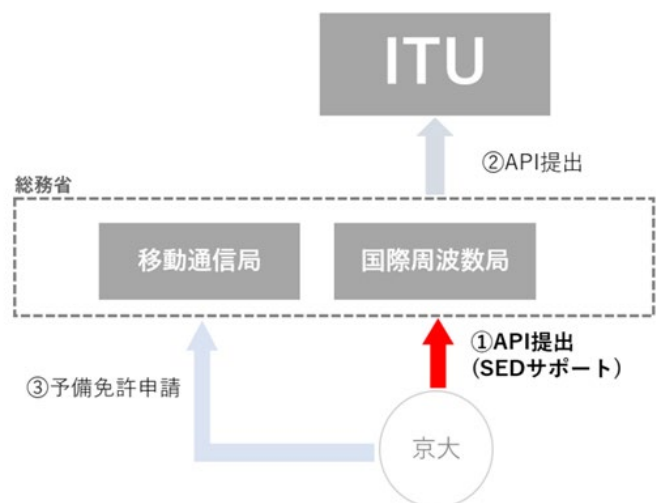


図 2.API 提出&予備免許申請の流れ

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。

(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，曾束元喜，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，豊西悟大，福王悠星，細辻一，松野なな，棕本暖，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継時的測定、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—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）のひずみの継続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。

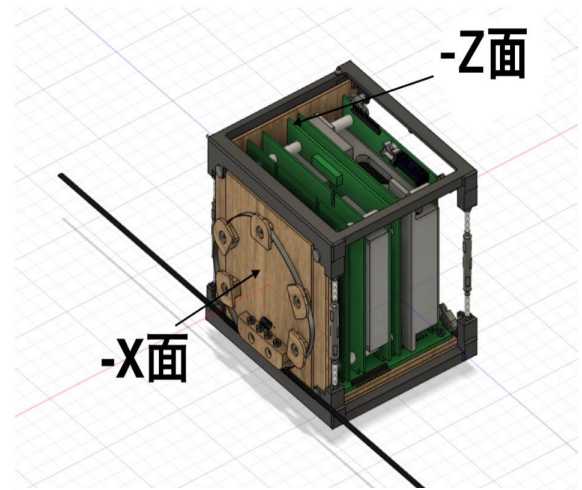


図 1 LignoSat におけるひずみ測定面。

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

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

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。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (2)$$

$\Delta l/l$ 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。

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

ただし、 ν は抵抗線のポアソン比であり、 $\Delta S/S = -2\nu\epsilon$ 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

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

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

$$\Delta e = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E = \frac{1}{4} K \epsilon E \quad (5)$$

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、アンプによる増圧回路を実装する。

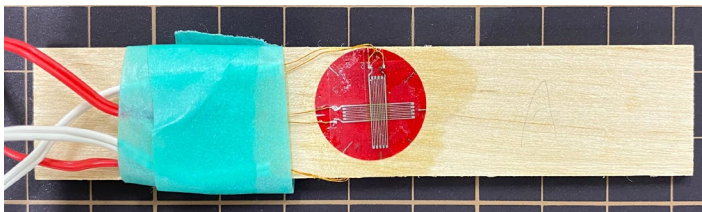


図 2 2 軸ひずみ測定ゲージ。

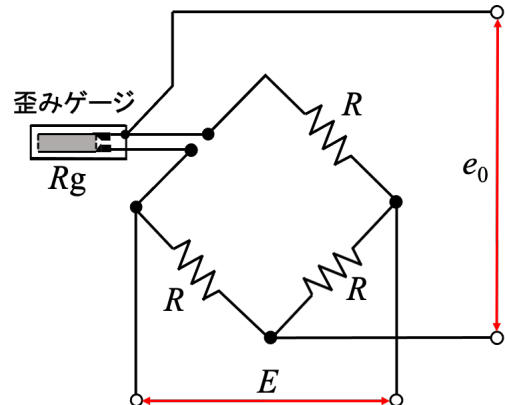


図 3 ホイートストンブリッジ回路。

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三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氣的に接続される。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

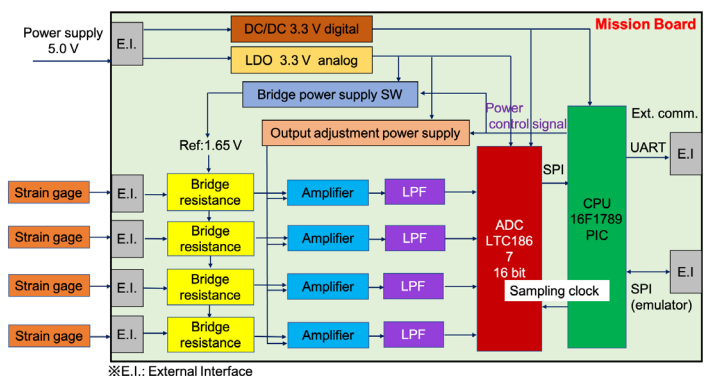


図 4 ミッションボードのシステムブロック図。

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。

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、木造構体に接着したセンサーと内部電子基板を電氣的に接続するには、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）。熱接触面が構体側、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氣的に接続する。

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

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

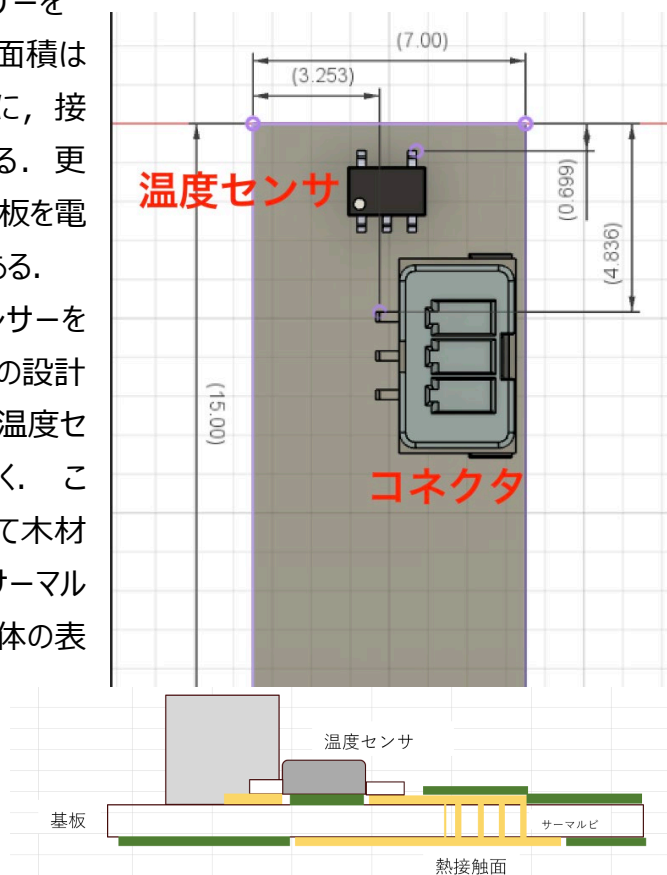


図 5 温度センサー基板。
(上) 表面、(下) 断面。

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し(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_{sat} 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、構体内部はバッテリーのみ、衛星表面は木板部・太陽電池パネル・アルミフレームにより構成されているとした。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。

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= Q_s + Q_a + Q_e - Q_{out} + Q_{sat1} \\ &= \alpha E_s n A + m(a\alpha E_s \cdot 3A + \varepsilon_e E_e \cdot 3A) \\ &\quad - 6\sigma\varepsilon A T_1^4 + \sigma S(T_2^4 - T_1^4) \end{aligned} \quad (6)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = Q_{sat2} = \sigma S(T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

ここで、 C_1 および C_2 はそれぞれ衛星表面および内部 表2 熱解析モデルに用いた各種パラメータ。

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 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$)、 ε 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 ($= \varepsilon$) 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。

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。日陰率は0.33と仮定した。なお、放出時の初期条件は常温 ($T_1 = T_2 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$) 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 とともに放出後3周目程度でほぼ定常状態に到達し、表面温度 T_1 の変動範囲はおよそ $-3 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、内部温度 T_2 についてはおよそ $9 \text{ }^\circ\text{C} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 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．

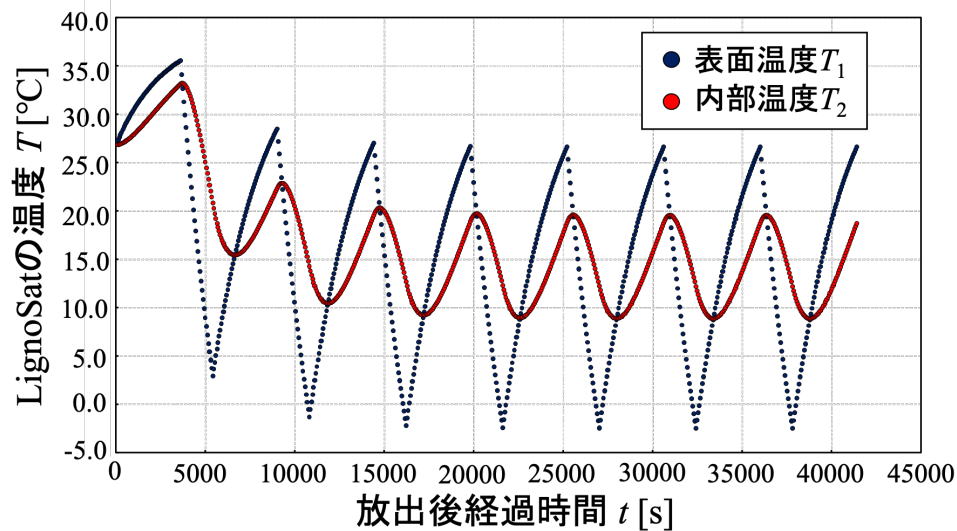


図 6 LignoSat の表面および内部温度の時間変化の計算結果．

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）．

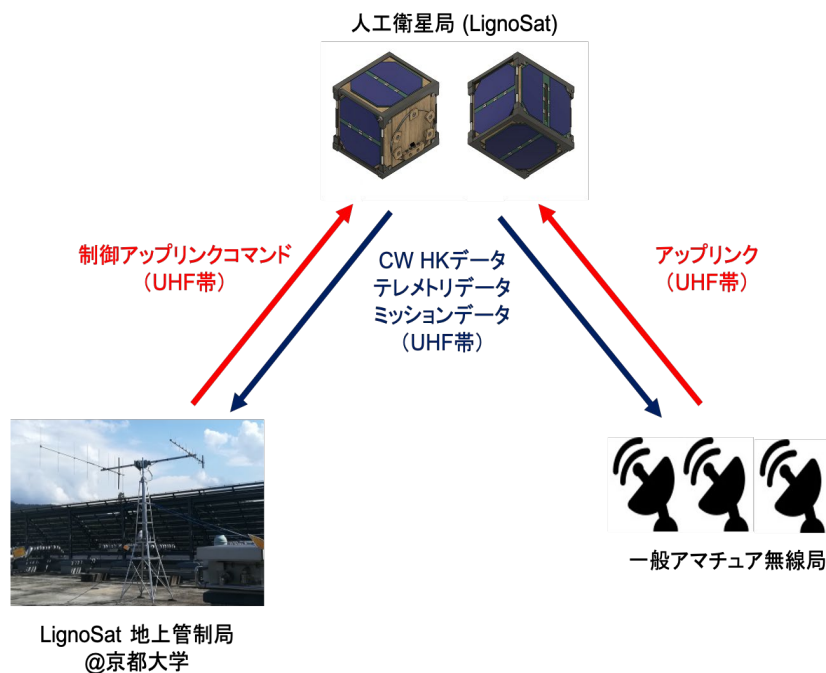


図 7 アマチュア無線ミッションの概要図．

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、一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。

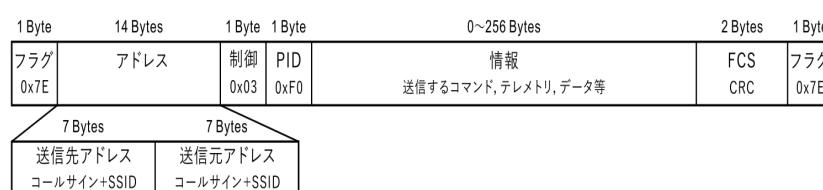


図 8 AX.25 フレームフォーマット。

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, 伊藤梓, 曾束元喜, 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) 曾束元喜, 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細胞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) 富村洋一, 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.

(筒井涼輔 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

編集人 : 宇宙木材研究室 三本勇貴、豊西悟大、山本陽大

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