

## 木星電波ビーム観測衛星「JBeam」

高知工業高等専門学校 電気情報工学科

スフツォードル・ラグワドルジ 中山 雄晟 藤田 龍之介

竹崎 翔 片岡 翔太郎 西森 和重 中平 凱斗

群馬工業高等専門学校 専攻科・生産システム工学専攻 / 機械工学科

安藤 瑞基 / エリック・タン・カイ・チアング

指導教員 今井 一雅 (高知高専) 平社 信人 (群馬高専)

### 1. ミッションの背景・目的

木星電波は、1955 年に発見されて以来、未だにその放射機構の詳細が解明されていない。木星電波は地球上でも簡単に観測できる程、極めて強力で、大きなエネルギーが木星磁気圏で発生し、そのエネルギーが電波放射エネルギーに変換されていることがわかっている。この木星電波放射においては、効率の良いエネルギー変換機構が働いていると考えられており、木星電波放射機構を解明することは、将来の地球のエネルギー問題の解決につながる物理的な問題を解く鍵につながっていくと考えられる。

我々は、この木星電波放射機構を解明するために重要となる木星電波のビーム構造を調べるために、木星電波観測用の超小型衛星を打ち上げ、宇宙空間と地上の 2 点間で同時観測を行い相関

解析による遅延時間の測定を行うことを本プロジェクトの目的とする。

### 2. ミッションの概要

木星電波観測用超小型衛星 (図 1, CubeSat の 2U サイズ) を、国際宇宙ステーション (ISS) より放出する。その後、木星電波受信アンテナとアップリンク・ダウンリンク用アンテナを展開する。そして、搭載した GPS モジュールの正秒パルスを用いて、受信した木星電波のアナログ信号を A/D コンバータによりデジタル信号へ変換し、Onboard Computer の Linux マイコンボードである Raspberry Pi のプログラムによってデータを地上局へ送信する。最終的に、地上での同時観測データとの相関解析より、木星電波のビーム構造についての重要な情報を得ることをミッションの目的とする。

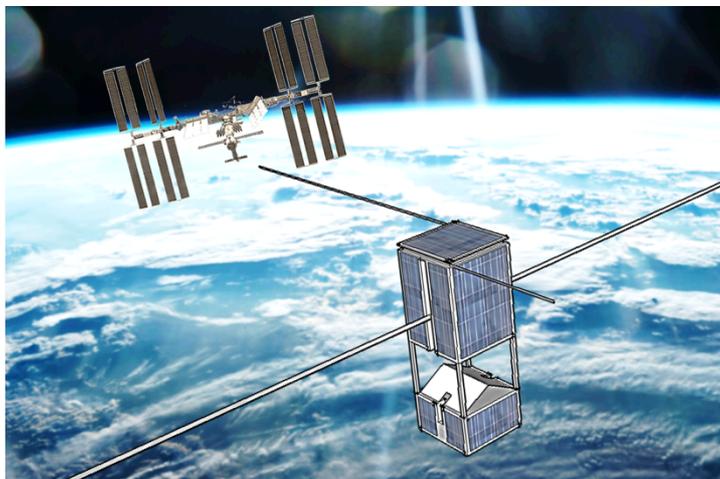


図 1 木星電波観測衛星「JBeam」のイメージ (背景画像 : (C)NASA)

### 3. ミッションの設計

#### 3.1 木星電波について

木星電波の短時間特性である S バーストのビーム構造は、図 2 (a) のように木星の磁力線に対してある角度を持ち、非常に幅の狭いものであると推定されている。この衛星と地上との木星電波 S バーストの同時観測により得られた波形データの相関解析により遅延時間の測定が可能となる。木星電波の S バーストのビームが、木星の回転と一緒に回っているとすると、8000km の基線長で 70ms 程度の時間差があることが計算で求められるので、その時間差の測定を行うことにより、木星電波の S バーストのビームが、図 2 (b) のように木星の磁場構造と一緒に回転して、地球をスイープしているものであるかを検証することが可能である。また、木星電波の S バースト自身が図 2 (c) のようにフラッシングによるものである場合には、この時間差は 0 となるので、どちらのビーム特性になっているのかを、本システムによる観測で明らかにすることができる。この結果は、木星電波放射機構を解明する上で非常に重要な情報となる。

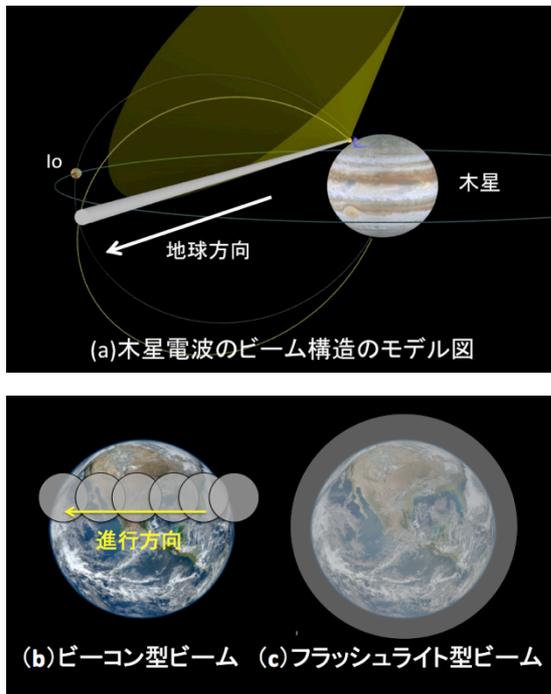


図 2 木星電波のビーム構造のモデル

#### 3.2 遅延時間の計算方法

木星電波のビーム構造の研究のための観測は、主に地上の観測点で行われており、地上の 2 地点間で木星電波の同時観測を行って、木星電波の短時間の変動である S バースト波形の相関解析から遅延時間が測定されている。しかしながら、遅延時間測定の精度をあげるためには、東西方向の 2 地点間の距離（基線長）を長くする必要があるが、地上の観測点では基線長に限界がある。そこで、この限界を打破するために、衛星と地上の 2 カ所で同時観測を行うことにより、従来にない基線長を確保した観測を行うことができ、測定精度の向上が期待される。

図 3 は、地上の本ミッションで考えられる地上-衛星間での遅延時間の計算の例である。地球-木星間の距離を  $L$ 、木星の自転周期を  $T$ 、同時観測する 2 地点間の距離を  $D$  とすると、木星電波のビームが木星の自転により移動する角度  $\theta$  と木星電波の遅延時間は以下のように表され、観測する 2 地点間の距離を 8000km とすると、遅延時間は 70ms となる。

$$T = 9h55m27s \quad L = 7.5 \times 10^{11}[m]$$

$$D = 8.0 \times 10^6 [m]$$

$$\theta = \frac{D}{\pi L} \quad \Delta T = \frac{\theta}{2\pi} T$$

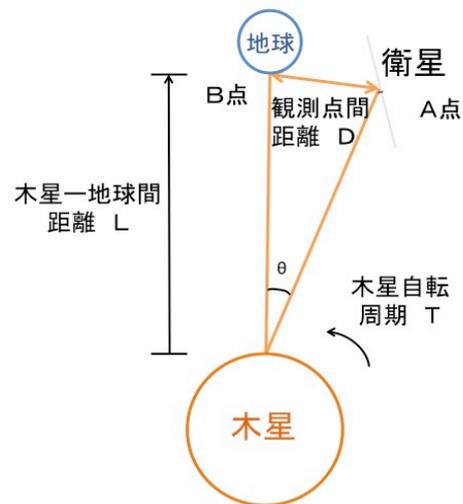


図 3 木星電波のビームの遅延時間

### 3.3 衛星本体の性能の検討

本ミッションの遂行のため我々は、国際宇宙ステーション (ISS) からの放出が容易な 2U サイズの衛星を検討した。

図 4 に示すのは衛星本体の全体図である。(a) は各ユニットの衛星内での配置図を示しており、(b) はミッション時における衛星の展開後の様子である。重量の 1/2 を占めるバッテリーを衛星下部に配置することで後述の重力傾斜トルクとしての機能を持たせている。

図 5 に衛星「JBeam」システムのブロック図を示す。まず、木星から来た電波を木星電波観測用アンテナで受信し、木星電波受信機の出力を、A/D コンバータでデジタル化し、Raspberry Pi Zero のファイルシステム内に保存する。保存されたデータは地上局に 435MHz 帯の送信機により 9600bps で送られる。

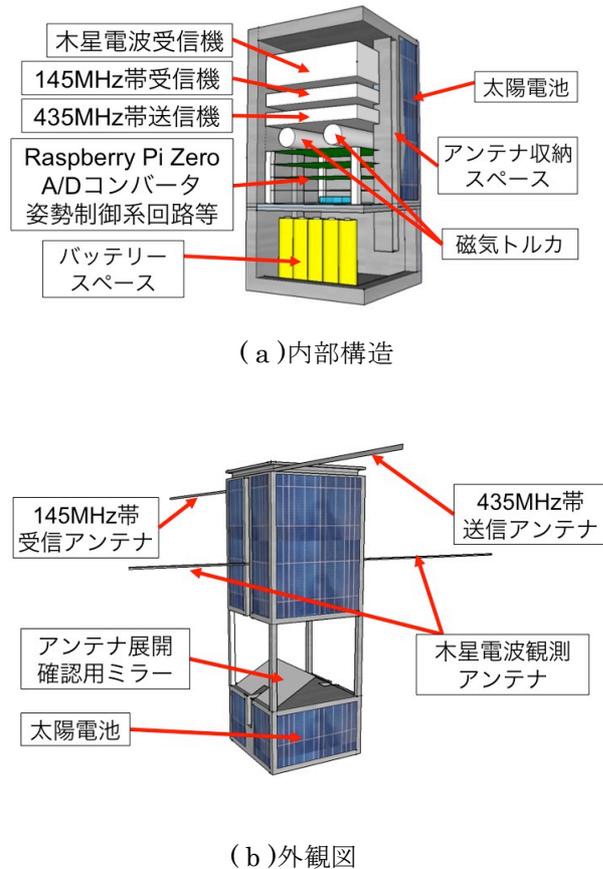


図 4 衛星の内部構造と外観図

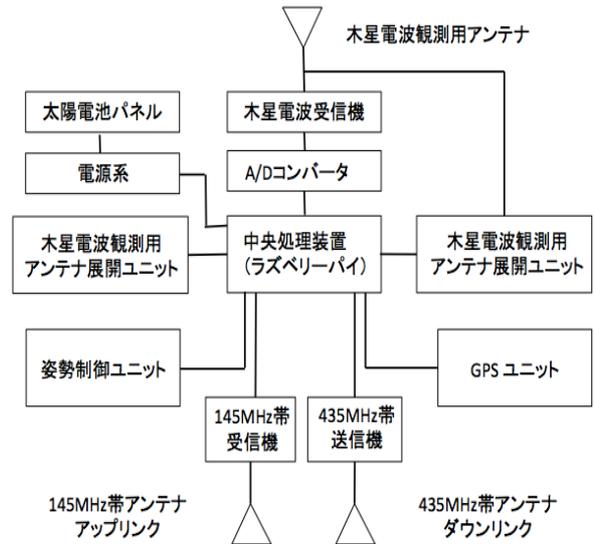


図 5 衛星「JBeam」システムのブロック図

表 1 衛星の性能目標

サイズ	W100×D100×H200 [mm] (2U)	
質量	衛星全体	2440g
	衛星内訳	電源：1200g
		通信・データ処理系：100g
		太陽光パネル：450g
		構造系：390g
	ミッション系：300g	
軌道	約 400km (ISS からの放出軌道)	
姿勢制御	重力傾斜, 磁気トルカ	
主要ミッション機器	太陽光パネル, 姿勢制御系 (3 軸磁気センサー他), GPS, 通信アンテナ系, 通信送受信機, データ処理系, 木星電波受信機, 木星電波受信アンテナ	

### 3.4 電源系について

消費電力の総量は 2W 弱であるが、通信ユニットの電力を確保するために瞬間的に、さらに 4W が必要になる。そのため、衛星「JBeam」の下部を、単三型リチウムイオンバッテリーを 23

個積むことによって 69Ah の電源容量を確保している。

太陽光パネルにより得られる電力を、電池充電コントローラ IC を通して安全にリチウムイオン電池に充電する。また、同時にバッテリーから各ユニットに電源を供給する。

表 2 各ユニットの消費電力

対象となるユニット	消費電力[W]
Raspberry Pi Zero	0.4
周辺回路	0.5
木星電波観測用受信機	0.6
地球との通信ユニット	4

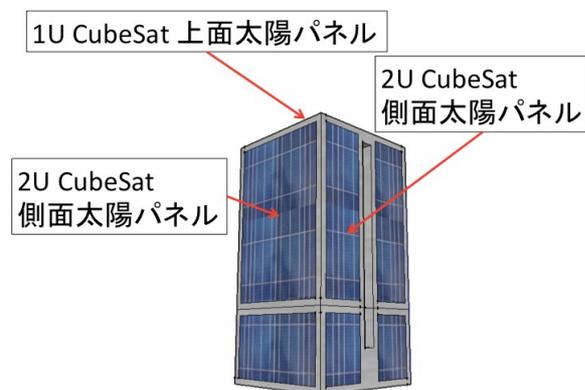


図 6 太陽パネルの配置

図 6 は本衛星の外観図である。4つの側面にそれぞれ $-27^{\circ}\text{C}$ (宇宙の平均温度)で 4.6W 発電できる CubeSat 用太陽光パネル、上面には 2.3W 発電できる 1U CubeSat 上面太陽パネルを取り付ける。これにより、太陽が当たっている時には全体として、約 6W の電力を発生することができる。

### 3.5 処理系に利用する Raspberry Pi Zero

衛星「JBeam」の処理系に Raspberry Pi Zero の搭載を検討した。Raspberry Pi Zero は教育を目的とした。Linux 搭載の超小型マイコンボードである。価格の \$5 は低価格でありながらも、木星電波信号のデジタル処理を行うスペックを十分に備えている。また、積載量に限りがある 2U というサイズでは非常に有利だと考えられる。

図 7 に Raspberry Pi Zero、Pi2、Pi3 の消費電力を比較したグラフを示す。最もサイズが小さく、消費電力が少ない Raspberry Pi Zero は本ミッションに適していると考えられる。

表 3 三種類の Raspberry Pi の比較

	電圧 [V]	電流 [mA]	電力 [W]
Raspberry Pi Zero	5.00	80	0.40
Raspberry Pi 2		248	1.24
Raspberry Pi 3		300	1.50

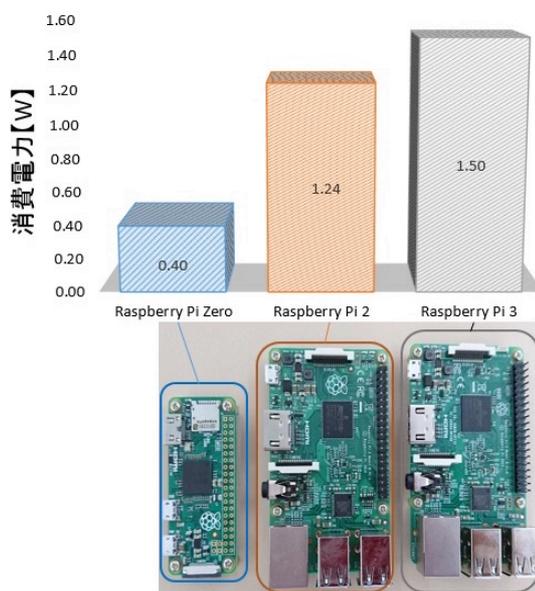


図 7 三種類の Raspberry Pi の比較

### 3.6 木星電波観測システム

【スーパーヘテロダイン方式の木星電波受信機】

本ミッションにはラジオやテレビの受信機で性能の高い方法として使われているスーパーヘテロダイン方式を利用した受信機を搭載する。スーパーヘテロダイン方式では、到来電波はアンテナで受けて、高周波増幅器(RF)で増幅した後、ミキサと呼ばれる混合器(MIX)に送られると同時に、局部発振器(LO)からの発生信号が加えられる。それにより、混合器の出力からは中間周波数と呼ばれる受信周波数より低い一定の周波数に変換されたものが出され、この信号を中間周波増幅器(IF)で増幅し検波(DET)し、Raspberry Pi

で制御される A/D コンバータでデジタル化する。

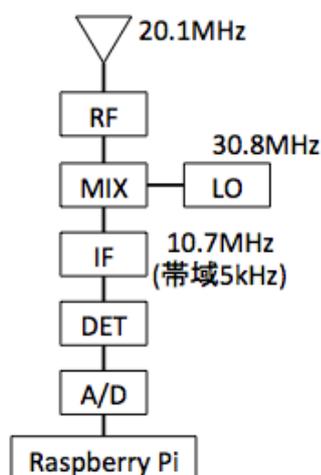


図 8 木星電波受信機のブロック図

#### 【データ取得および保存方法】

木星電波の S パーストは、数十ミリ秒以下の時間構造を持っているので、図 9 のように GPS 時刻の 1 分おきの正秒をスタートとして、10kHz のサンプリング周波数で 1 分間を 1 つの区切りとして木星電波データを測定・保存する。A/D コンバータの分解能が 10bit で 15 秒間、木星電波を観測し、その後の 45 秒間の間に保存などを行うので、1 分間の木星電波のデータの容量は、300kbyte である。地上との衛星の間の通信は、9600bps の回線を確認し、5 分でダウンロードをすることができる。小型衛星の周回軌道で地上から観測できる時間を 10 分とすると、1 回の周回で 2 分間相当の木星電波データの取得が可能である。地上でも木星電波観測を行うので、同時観測できた可能性の高い 2 分間相当のデータを選んで、地上局に送信するようにスケジューリングを行う。

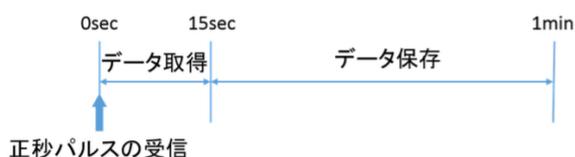


図 9 木星電波データ収集に要する時間

### 3.7 姿勢制御システム

本ミッションで使用する衛星の大きさが W100

×D100×H200[mm]の 2U の超小型衛星であることから、電力消費、艙装スペースの点で、アクティブな姿勢制御装置を搭載することは困難である。そこで、本衛星に対しパッシブな制御系として重力傾斜トルクと磁気トルカを用いることを検討する。従来の重力傾斜トルクは、地球方向にマストを伸ばしトルクを得るが、本ミッションで取り扱う重力傾斜トルクは、衛星の質量を偏心させ、偏心させた部分を移動させることで重力傾斜トルクを得る方法を提案する。図 10 に示す衛星のモデルに対し、重力傾斜トルクの定式化を実施する。定式化された重力傾斜トルクとして次式を得る。

$$T_g = -\frac{3\mu m_A m_B (l + \Delta l) \sin \theta \cos \theta}{r_0^3 (m_A + m_B)} \quad (1)$$

ここで、 $\mu [m^4/s^2]$  は引力定数、 $m_A [kg]$  と  $m_B [kg]$  はそれぞれ A と B の質量、 $l [m]$  は AB 間の長さ、 $\Delta l [m]$  は衛星の展開長さ、 $r_0 [m]$  は地球中心からの軌道半径、 $\theta [deg]$  は衛星の傾きである。また、図 10 より、A と B の移動速度差に伴うトルク  $T_v [Nm]$  として次式を得る。

$$T_v = \frac{\mu m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (l + \Delta l) \left( \frac{1}{r_B^2} - \frac{1}{r_A^2} \right) \cos \theta \quad (2)$$

ここで、 $r_A$ 、 $r_B$  は、次式として示される。

$$r_A = \sqrt{r_0^2 + \left\{ \frac{m_B}{(m_A + m_B)} (l + \Delta l) \right\} + 2r_0 \frac{m_B}{(m_A + m_B)} (l + \Delta l) \cos \theta}$$

$$r_B = \sqrt{r_0^2 + \left\{ \frac{m_A}{(m_A + m_B)} (l + \Delta l) \right\} - 2r_0 \frac{m_A}{(m_A + m_B)} (l + \Delta l) \cos \theta}$$

衛星の地球中心に対する傾斜角として次式が得られる。

$$\frac{3 \sin \theta}{r_0^3} - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_B^2} - \frac{1}{r_A^2} \right) = 0 \quad (3)$$

式 (3) より、衛星の傾斜角  $\theta [deg]$  と展開長さ  $\Delta l [m]$  の関係を得ることができる (図 11)。図 11 より、展開長さ  $\Delta l$  の増加に伴い、傾斜角  $\theta$  が増加しており  $\Delta l$  の操作により傾斜角  $\theta$  を制御可能であることがわかる。

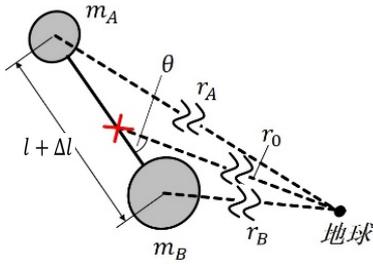


図 10 衛星のモデル

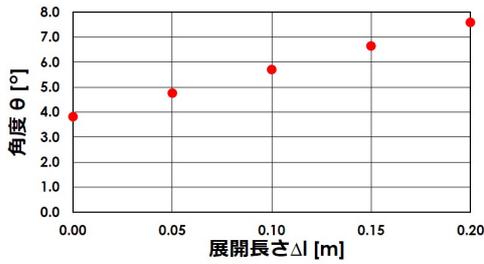


図 11 衛星の傾斜角と展開長さ

### 3.8 アンテナの展開機構

図 12 に衛星のアンテナ展開時の様子を示す。アンテナは衛星内に蛇腹状に折りたたまれて収納されており、微小な電流を流すことで展開を始める方式を考えた。

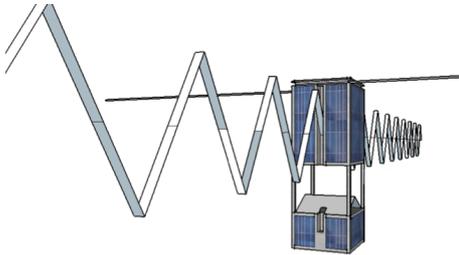


図 12 アンテナ展開中の様子

前述のように、本ミッションは、20MHz の木星電波を観測するため、1 本 3.6m のダイポールアンテナを展開する必要がある。しかし、2 U の超小型衛星ではモータを用いた展開機構を搭載することは困難である。そこで、本ミッションでは、バイオメタル・ファイバ (BMF) を用いたアンテナ展開機構を提唱する。バイオメタル・ファイバは、Ti-Ni 系の形状記憶合金の繊維を束ねた糸状の形態であり、電圧をかけると伸縮する性質を持っている。今回用いる BMF の物性値を表 4 に示す。図 13 に、アンテナのリンクヒンジ部に BMF を張った図を示す。この際、電圧をかけ

ることにより BMF に発生する収縮によりアンテナを展開することができる。アンテナ展開に必要な縮み量  $\Delta l$  は、ヒンジの軸の半径  $r$  とアンテナの板厚  $t$  によって決定され、必要な縮み量  $\Delta l$  として次式を得る。

$$\Delta l = 2t + \pi r$$

本衛星では板厚  $t=0.5$  mm、ヒンジ軸半径  $r=1.0$  mm とするため、11 cm の BMF を使用することで展開可能となる。

表 4 BMF の物性値

实用発生力 [kgf]	144
实用運動ひずみ [%]	4
標準駆動電圧 [V/m]	20.7
標準抵抗値 [ $\Omega$ /m]	61

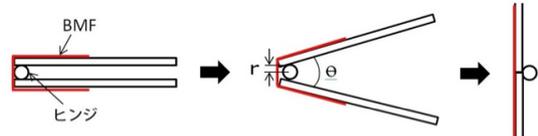


図 13 アンテナ展開機構

次に、BMF を用いたアンテナ展開機構の展開実験を実施する。アンテナ展開機構の試作機を図 14 に示し、アンテナ展開実験結果を図 15 に示す。実験結果として、電圧印加時を  $t=0$  としたときの、アンテナの展開角度履歴を示す。この結果、BMF を用いたアンテナ展開に対し、概ね良好な機能を有していることがわかる。よって、BMF を使用したアンテナ展開機構が有効であり、今後の詳細設計に向けて指針を得ることができた。

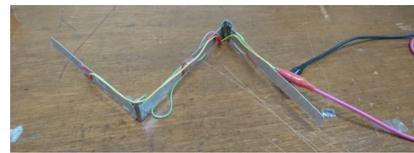


図 14 アンテナ展開機構試作機

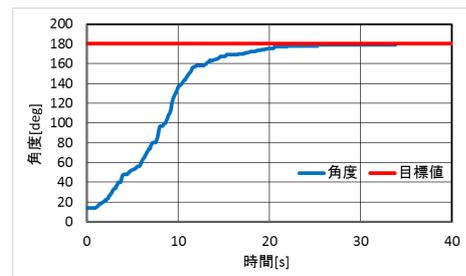


図 15 展開角度の実験データ (角度履歴)

### 3.9 衛星の自撮りカメラ機能

衛星 JBeam では木星電波受信用のアンテナが完全に展開したかを確認するために、Raspberry Pi Camera Module を用いて衛星を自撮りする。この際、図 16 のように三角形のミラーにより片端 3.6m のアンテナの両方を一度に撮影する。

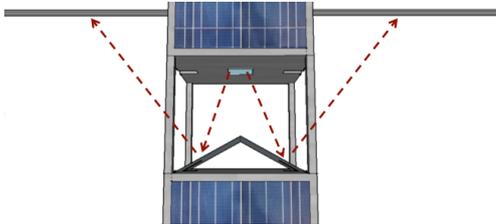


図 16 自撮りカメラ機能の構造

図 17 では上部が衛星本体、下部が「3.7 姿勢制御システム」で述べたバッテリーの入った箱となっている。図 17 に、この機構の展開前、図 18 に、この機構の展開後のイメージ図を示す。

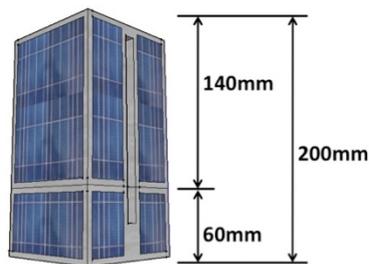


図 17 展開前

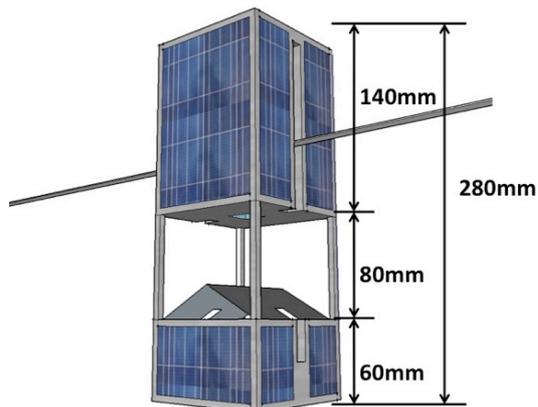


図 18 展開後

展開前の状態ではミラーは平面状になっている。展開後の状態ではミラーは高さ 20mm の差角形のミラーとなり、全長 7.2m のアンテナを一枚の写真に収めることが出来る。撮影された写真は地上で画像処理を施し確認する。

### 4.まとめ

本ミッションは、従来地上での観測が中心の木星電波の観測を、Onboard Computer(OBC)として Raspberry Pi Zero を使ったローコストかつ超小型の衛星観測システムで、宇宙空間での木星電波観測をより容易に実現するものである。そして、木星電波の遅延時間を測定し木星電波の特性を解析するという地上でしか行われていなかった観測を、この超小型衛星によりさらに発展させることが可能となり、木星電波放射機構を解明する上で非常に重要な情報を得ることができると考えている。また、本ミッションで考えているアンテナを展開するための蛇腹機構やアンテナ展開時の自撮りカメラ機能などは初の試みとなり、新しい超小型衛星のモデルとして波及効果が期待できる。

木星電波研究の最終的なゴールとなる木星電波の放射機構の解明は、将来の地球のエネルギー問題を解決できる糸口を見つけることにつながる可能性もあり、その場合の社会的効果は極めて高いと考えられ、本ミッションの貢献は大きいと考えている。

### 5.参考資料・参考ウェブサイト

- [1]今井一雅: 木星から地球に届く謎の電波を探る, 電波技術協会報 FORN 285 ,pp.30-33 2012.
- [2]M.Imai et al.: Beaming Structures of Jupiter's decametric common S-burst observed from LWA1, NDA, and URAN2 Radio Telescopes, Astrophysical Journal, 2016. (in Press)
- [3]宮崎康行: 人工衛星を作る, オーム社, 2011.
- [4] CubeSatShop <http://www.cubesatshop.com>
- [5] CubeSat Kit <http://www.cubesatkit.com>
- [6] Raspberry Pi Zero Version 1.3 <https://www.adafruit.com/products/2885>