

衛星通信実習のためのアマチュア無線機搭載 モデルキューブサットの開発

A Development of a Model CubeSat with an Amateur Radio Transceiver for Learning of Satellite Communication

小西 健太郎**、徳光 政弘**、高田 拓***、浅井 文男****、若林 誠*****、北村 健太郎*****

Kentarou KONISHI, Masahiro TOKUMITSU, Taku TAKADA, Fumio ASAI,

Makoto WAKABAYASHI, Kentarou KITAMURA

概要

本研究では、学生の衛星通信実習に活用するため、衛星搭載用のアマチュア無線機を搭載したモデルキューブサットを開発した。提案モデルは、2U サイズの超小型人工衛星であるキューブサットを基本とし、オンボードコンピュータ、各種センサ、アマチュア無線機を搭載している。オンボードコンピュータの Raspberry Pi により無線機を制御できるようにプログラムを開発した。外部からの通信により、モデルキューブサットを制御することができ、カメラ撮影、パケット通信によるビーコン送信などが実行できる。提案モデルを用いることで、学生は実際の人工衛星通信を疑似体験できるため、今後、人工衛星通信に関する講座などでの活用が期待される。

1 はじめに

新技術実証や科学観測を行うために、超小型衛星の打ち上げと開発が大学、高専、高等学校、ベンチャー企業等で活発に行われている。大学では超小型衛星のキューブサットを中心に研究開発が行われている。キューブサットは1辺10cmの立方体サイズ(1Uサイズと呼ぶ)の衛星である。1Uの大きさを基本とし、衛星のミッションに応じて2U、3Uのように筐体の大きさを調整する。

超小型衛星の通信には主に144MHz帯・430MHz帯のアマチュア無線が使われている。地上局と衛星間の通信は、衛星への指令や観測データの取得のために重要である。超小型衛星は低い高度に配置されることが多く、地上と衛星が通信できる時間は概ね10分から15分程度である。また、アマチュア無線帯を使用する通信の場合は、通信速度は9600bpsが主流であり、通信可能時間

や通信速度等の制約が多い。衛星と地上局は限られた通信可能な時間の中で効率的にデータ取得や衛星管制を行う必要がある。

世界的に無線で通信するには免許による許可制になっており、日本では無線設備を操作するための資格である無線従事者免許証と、無線局を開設・運用するための無線局免許状が必要である。アマチュア無線においても、アマチュア無線技士の資格と無線局の免許状が必要であり、衛星開発を行っている大学や高専等において、無線通信を担う人材育成が求められている。

人工衛星を学習するための教材は、これまでに開発されており、例えば、安価な部品とマイコンボードを活用した教材としてキューブサットの地上モデル[1, 2]がある。この地上モデルは、1Uサイズよりやや大きい筐体にオンボードコンピュータ、各種センサ、カメラ等を組み込んでおり、衛星システムに必要な機能を実装している。他にも、CubeSat Simulator[3]やOPUSAT-KIT[4]などがあり、衛星開発を担う人材のために開発された。

本研究では、超小型衛星の通信系開発と、打ち上げ後の衛星管制を担う人材の育成を目的として、衛星通信の学習に特化したモデルキューブサットの開発を進めている。提案モデルは、先行研究[5]で開発されたモデ

* 原稿受理 令和2年1月10日

** 米子工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科

**** 米国アマチュア衛星通信協会 会員

***** 新居浜工業高等専門学校 電気情報工学科

***** 徳山工業高等専門学校 機械電気工学科

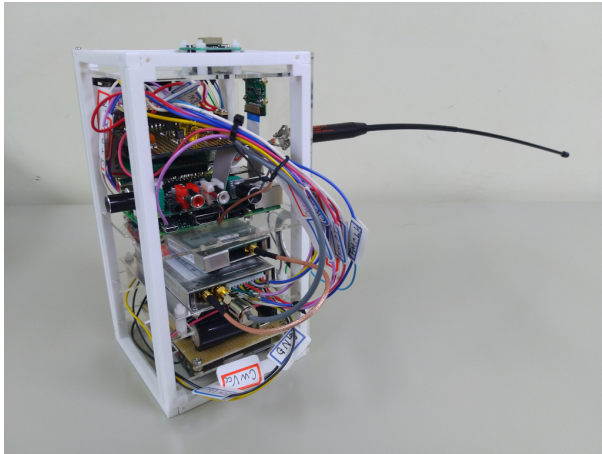


図1 開発したモデルキューブサットの外観図

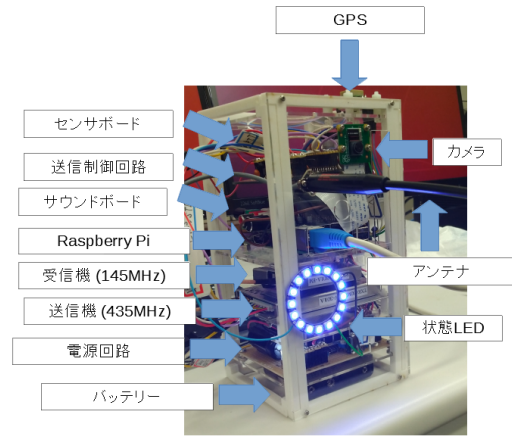


図2 開発したモデルキューブサットの部品構成

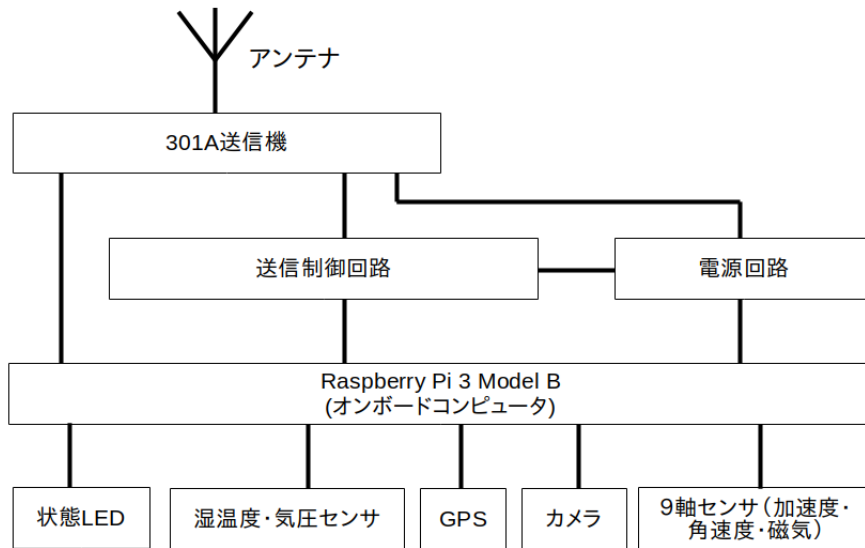


図3 衛星バスシステムの構成

ルキューブサットを基本にしており、さらに著者らが開発した先行モデル [6] の2つのオンボードコンピュータを統一した改良型モデルである。本研究では、モデルキューブサットに人工衛星搭載用の無線機を組み込み、無線機の周波数設定のためのプログラムと送信制御回路の開発を行った。本稿では、開発した衛星システムの概要と各種機能等を報告する。

2 モデルキューブサット

2.1 モデルキューブサットのシステム概要

先行研究では、通信系に ZigBee 対応の USB ドングルを搭載していた。提案モデルでは、衛星通信の学習を主眼に置いているため、人工衛星搭載用のアマチュア無線機を組み込む。

図1は開発したモデルキューブサットの外観図であ

る。サイズは2Uとし、汎用的な電子部品や既製品のボードを組み合わせることで、衛星モデルを構成できるようにした。ただし、搭載している機器を制御するために独自にいくつかのハードウェアを追加で実装した。提案モデルに搭載する人工衛星搭載用のアマチュア無線機では、無線機外部からオンボードコンピュータを使って周波数設定を制御する。また、無線機の送信オン・オフを制御するために、送信制御用の回路を作成した。以下の3つのプログラムや回路を独自に実装した。

- (1) 送信機・受信機のための周波数設定プログラム
- (2) CW送信機、FM送信機の送信制御用の回路
- (3) 降圧型電圧変換回路

図1に開発したモデルキューブサットの外観図、図2

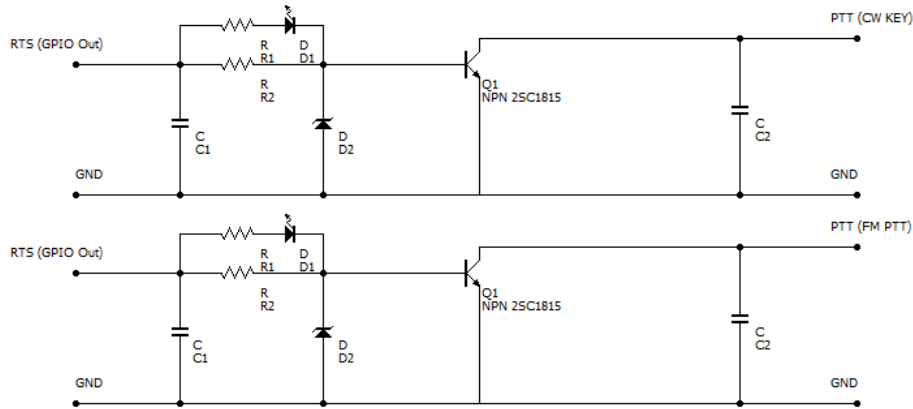


図 4 送信制御回路の回路図

表 1 送信制御回路の部品定数

| 部品記号 | 部品名称 | 定数や説明 |
|-------|-------------|--------------|
| R1、R2 | 抵抗 | 1 k Ω |
| C1、C2 | セラミックコンデンサ | 0.01 μ F |
| Q | NPN トランジスタ | 2SC1815 |
| D1 | LED | 汎用の LED |
| D2 | スイッチングダイオード | 1N4148 |

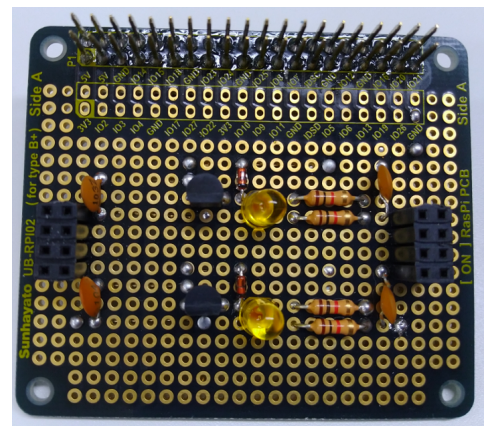


図 5 送信制御回路の実装例

に筐体内での搭載機器の位置と名称を示す。下段にバッテリーと電源回路、中段にアマチュア無線機、上段にオンボードコンピュータ、センサボード、サウンドボード、最上部には GPS を搭載した。

図 3 に衛星バスシステムの構成図を示す。オンボードコンピュータとして Raspberry Pi 3 Model B を採用した。オンボードコンピュータに各種センサや無線機、カメラ等が接続される。センサは、湿温度・気圧センサ (BME280)、9 軸センサ (MPU-9250) を I²C 方式で接続する。GPS (GYSFDMAXB) は UART 方式で通信する。センサや GPS で計測したデータは、衛星内部にログファイルとして記録すると共に、ビーコンとして送信することができる。

2.2 通信系システムの概要

提案モデルでは、衛星へのコマンド等のアップリンクに 144MHz 帯、衛星からのデータ取得等のダウンリンクに 430MHz 帯のアマチュア無線帯を使用する。搭載する無線機は、株式会社西無線研究所が開発した人工衛星搭載用の 301A 型無線機 [7] とした。301A 型無線機

は、送信機と受信機から構成される。送信機には CW 送信機と FM 送信機が内蔵され、FM 送信機は 430MHz 帯のアマチュア無線帯の送信回路を搭載し、1200bps の AFSK (Audio Frequency Shift-Keying) 形式の packets 通信に対応している。受信機は FM 受信機からなり、144MHz 帯の受信回路を搭載し、AFSK 形式の packets 通信に対応している。1200bps の通信速度は我々が日常的に使用しているスマートフォンやインターネットの通信に比べると遅い。しかし、アマチュア無線帯を使用した超小型衛星の通信で使われている一般的な通信速度である。

無線機の送信機能をオン・オフする制御回路に関しては、図 4 に回路図、表 1 に部品定数の一覧、図 5 に実装例を示す。今回使用する制御回路は、アマチュア無線で無線機の送信制御に使われている一般的な回路である。基板上的トランジスタのベース端子に送信オンの信号が入力されると、無線機から電波が発射される。CW と packets 通信の信号は無線機の信号入力端子から入力する。



図6 模擬地上局システムの構成例

表2 管制用コマンドの一覧と説明

| コマンド番号 | コマンドの説明 |
|--------|-------------------|
| 000 | CW ビーコン送信の有効化 |
| 001 | CW ビーコン送信の無効化 |
| 010 | FM ビーコン送信の有効化 |
| 011 | FM ビーコン送信の無効化 |
| 020 | 画像の撮影 |
| 021 | 画像を送送用データに変換 |
| 022 | 画像の送信 |
| 030 | 状態 LED を青色に点灯 |
| 031 | 状態 LED を赤色に点灯 |
| 032 | 状態 LED を緑色に点灯 |
| 090 | Raspberry Pi の再起動 |

JE4YMP>JE4YPB:010

図7 管制コマンドの実行例 (FM ビーコンの有効化)

パケット通信のための変調信号は、Raspberry Pi でソフトウェアの direwolf を用いて生成する。direwolf は 1200bps と 9600bps のパケット通信に対応している [8]。direwolf が生成したパケット通信の信号を 301A 型無線機の FM 変調端子に入力することで、パケット通信を実現する。

また、Raspberry Pi の音声出力端子では、出力された信号にノイズが含まれることが報告されている。そのため、提案モデルでは、Raspberry Pi 本体の音声出力端子を使わずに Audio Injector が販売する Stereo Raspberry Pi sound card [9] を使用した。このサウンドカードは、音声のデジタル入出力の規格である I²S に対応しており、音声出力とライン入力の両機能が実装され、パケット通信に必要な音声信号の入出力ができる。

2.3 模擬地上局と管制用コマンド

衛星モデルに外部からコマンドを送るため、模擬地上局システムを構成した (図 6)。システムは、144MHz 帯の電波を発射できるパケット通信対応のアマチュア無線機とコマンド送信用のコンピュータからなる。衛星モデルからの信号は 430MHz 帯対応のアマチュア無線機や受信機等で受信できる。一般的にアマチュア無線機でパケット通信を行う場合、送信のオン・オフを制御する必要がある。地上局システムでは、図 4 の回路を参考に送信制御回路を実装し、アンテナにダミーロードを接続するか、通常のアンテナを接続する。

モデルキューブサットには外部から管制コマンドを送

ることができる。表 2 のように定めた管制用コマンドは、パケット通信対応のソフトウェア (direwolf など) を用いてパケット通信の信号を生成し、アマチュア無線機に入力して送信する。現段階で実装している管制コマンドは、引数なしでコマンド番号のみを衛星モデルに送信する。図 7 は、管制コマンド番号 010 を受けた際の衛星モデルの実行例であり、FM のパケット通信によるビーコンをオンにする。

図 8 は伝送用カメラ画像の例を示したもので、管制コマンド番号 020 で撮影できる。無線送信は 1200bps の伝送速度のため、データ転送量を削減するためにモノクロ画像とし、画像の解像度を 320 × 240 とした。また、図 9 は管制コマンド番号 030 を実行して、状態 LED を青色に点灯させたものである。状態 LED は衛星モデルの状態を外部から視覚的に確認できるように設けた。状態 LED として、16 連フルカラー LED を用い、プログラムで指定した色に点灯させることができる。今回は管制コマンドにより状態 LED を 3 色点灯できるプログラムを実装した。

2.4 電源回路の概要

電源回路は株式会社秋月電子通商が販売している「大容量出力可変安定化電源キット」 [10] を使用した。このキットでは、必要な出力電圧より 3V 高い電圧を入力する必要がある。電源は公称電圧 1.2V の単 3 充電電池 8 本で構成し、9.6V の電源出力とした。Raspberry Pi、無線機 (送信機・受信機)、GPS、状態 LED は 5V の電源



図 8 伝送用カメラ画像の例

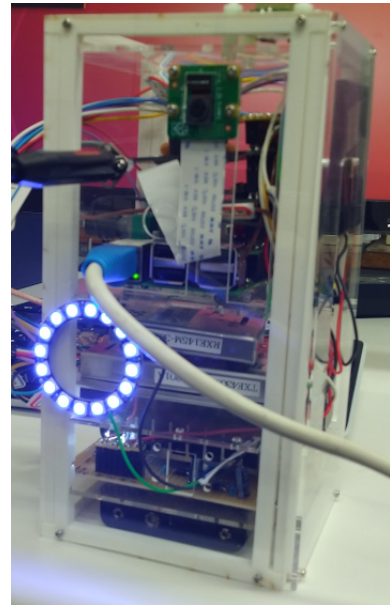


図 9 動作確認用の状態 LED

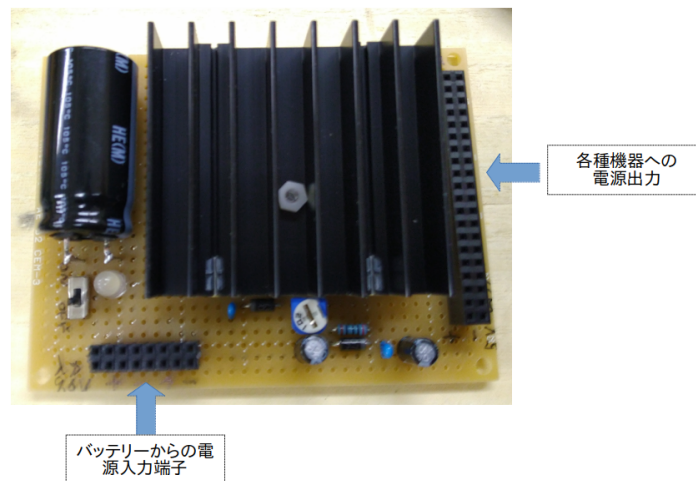


図 10 電源回路の実装例

を必要とする。電源電圧を降圧し、各種機器への入力電圧に変換する。図 10 に実装した回路を示す。電源キットには回路基板が付属しているが、モデルキューブサットに搭載するために回路を自作し、ユニバーサル基板に各種機器の電源端子を取り付けた。

3 今後の課題

開発したモデルキューブサットについて、今後の主な課題を以下に示す。

- (1) 学生による評価と問題点の考察、評価を踏まえたモデルの改良
- (2) 通信系や地上局システムの開発・運用を担う人材育

成への活用

現在、提案モデルの試作を終えた段階である。今後、実習用の教材として、学生に実際に評価してもらう。評価の場としては、高専スペース連携 [12] が開催する高専スペースキャンプ [13] を検討している。

高専スペース連携では、ロケットや人工衛星等の宇宙工学に関心が高い高専生を中心に参加者を募り、モデルロケットやモデルキューブサットの競技を合宿形式で実施している。高専スペースキャンプにおいて、提案モデルを実習教材に活用した衛星通信に関する講座 [11] を実施し、学生に評価してもらうことを検討している。また、高専スペースキャンプは高専生を対象にしたイベン

トであるが、教材自体は高専生以外にも活用したいと考えている。講座の実施に加えて、作成した資料をウェブ公開するなどの対応を検討する。

4 まとめ

本研究では、人工衛星の通信系機能を学習するためのアマチュア無線機搭載モデルキューブサットを開発した。提案モデルは、衛星搭載用アマチュア無線機をモデルキューブサットに搭載し、外部からアマチュア無線を使ってモデル衛星に命令(コマンド)を送って制御できる点が特長である。また、CW や FM モードでのビーコン送信に対応しており、モデル衛星で取得したデータを受信することで、モデル衛星の状況を監視できる。今後、衛星開発に興味のある学生や実際に携わっている学生に、本モデル衛星を評価してもらい、改良を進める。

謝辞

本研究の遂行にあたって高専スペース連携の研究者に助言や支援をいただきましたので、ここに感謝の意を表します。本研究は、JSPS 科研費 17K01169、総務省 平成 31 年度 戦略的情報通信研究開発推進事業(192208001)の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 上園波輝、笹岡由唯、中谷淳、土屋華奈、梶村好宏、北村健太郎、上田真也、高田拓：宇宙技術教育のための CubeSat 地上モデルの開発と活用実践：1．機体開発と製作講座、工学教育、67 巻、2 号、pp. 95-100、2019.
- [2] 中谷淳、高田拓、梶村好宏、北村健太郎、上田真也、土屋華奈、上園波輝、笹岡由唯、宇宙技術教育のための CubeSat 地上モデルの開発と活用実践：2．競技設計と実践、工学教育、67 巻、2 号、pp. 101-106、2019.
- [3] The AMSAT, AMSAT CubeSat Simulator, url: <https://github.com/alanbjohnston/CubeSatSim> (2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [4] The OPUSAT-KIT Project, OPUSAT-KIT, <http://www.ssrc.aero.osakafu-u.ac.jp/activity/opusat-kit-project/> (2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [5] 中谷淳、土屋華奈、坂本知也、加藤樹、梶村好宏、北村健太郎、上田真也、高田拓、宇宙技術教育のための 2U モデル CubeSat の開発と活用実践：1．ミッション系空間を確保した機体開発、工学教育、68 巻、2 号、pp.60-65、2020.
- [6] M. Tokumitsu, K. Konishi, T. Takada, F. Asai, and M. Wakabayashi, A Development of a Model CubeSat with an Amateur Radio Transceiver for Education on Satellite Communication, in the Proceedings of the 2020 International Conference on Artificial ALife and Robotics (ICAROB 2020), USB flash memory.
- [7] 株式会社西無線研究所、超小型人工衛星用無線機 2008 年 301A 型、<http://www.nishimusen.co.jp/eisei2008/eisei2008.html> (2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [8] WB2OSZ, direwolf, <https://github.com/wb2osz/direwolf> (2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [9] Audio Injector, Stereo Raspberry pi sound card, <http://www.audioinjector.net/rpi-hat> (2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [10] 秋月電子通商、大容量出力可変安定化電源キット LM338T 使用 放熱器付 最大 5A、<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-00096/> (2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [11] M. Tokumitsu, F. Asai, T. Takada, M. Wakabayashi, K. Kitamura, and K. Imai, A Report on Satellite Communication Lectures in the KOSEN Space Group, in the Proceedings in the 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2019-u-08, pp.1-9, 2019.
- [12] 高専スペース連携、<http://space.kochi-ct.jp/>、(2020 年 1 月 10 日閲覧).
- [13] M. Wakabayashi, T. Takada, K. Kitamura, J. Nakaya, Y. Kajimura, M. Tokumitsu, Y. Murakami, M. Shinohara, K. Imai, F. Asai, and K. Shimada, Report on the KOSEN Space Camp in 2017 and 2018: Mission CanSat to CubeSat Model, in the Proceedings in the 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2019-u-07, pp.1-5, 2019.