

CubeSat 用 430 MHz 帯無線通信システムと衛星通信ソフトウェアの開発：Linux ベースの KOSEN-1 OBC への実装

村上 幸一* 大西 哲** 徳光 政弘*** 筒井 巽水**
今井 一雅**** 高田 拓*****

Development of a 430-MHz band wireless communication system and satellite communication software for CubeSat: Implementation for Linux-based KOSEN-1 OBC

Yukikazu MURAKAMI, Akira ONISHI, Masahiro TOKUMITSU, Tatsumi TSUTSUI,
Kazumasa IMAI and Taku TAKADA

Abstract

We developed a communication system that supports half-duplex communication in the 430MHz band for 2 U-type CubeSat, KOSEN-1. Currently, half-duplex communication in the 430MHz band is one of the powerful options when using an amateur radio band with CubeSat. This communication system consists of a satellite-mounted radio transceiver, a dedicated terminal node controller (TNC) board, and an onboard computer (OBC). The software that is responsible for communication between the satellite and ground stations operates on a highly versatile Linux OS. With respect to the communication method, CW, AFSK 1200bps, and GMSK 9600bps can be used for the downlink, and AFSK 1200bps can be used for the uplink. In a verification test, a series of uplink and downlink operations was confirmed in the case when the communication system equipment was connected. In future, we will confirm the operation results of the long-term communication of the KOSEN-1 satellite and continue to improve the system such that it will be easy to use for other satellite missions.

Keywords : KOSEN-1, CubeSat, Half-Duplex Communication, Linux-based OBC

1. まえがき

全国各地にある高等専門学校（高専）の有志教員で構成する「高専スペース連携」¹⁾では、2 U タイプ（20 cm×10 cm×10 cm）の超小型人工衛星（CubeSat）として、木星電波観測技術実証衛星「KOSEN-1」を開発した。この中で香川高専を主体とするグループは、KOSEN-1 に搭載する無線通信システムを担当した²⁾。

2003 年に初の CubeSat が打ち上げられて以来、大学や企業などを中心に多くの CubeSat が開発されてきた。

CubeSat では、その開発目標や開発体制との関係から、通信にはアマチュア無線帯を使用することが多い。一般に、地上局から衛星への送信となるアップリンクには 145 MHz 帯、衛星から地上局へのダウンリンクには 430 MHz 帯を利用することが多かった。しかし、145 MHz 帯の帯域は 200 kHz と狭く、小型のアマチュア衛星の増加などから、周波数の割り当てがひっ迫するとともに、他の通信への干渉などの問題が大きくなってきた。そこで、2013 年に国際アマチュア無線連合（IARU）は 145 MHz 帯のアップリンクを控えるように

*香川高等専門学校 電気情報工学科

**香川高等専門学校専攻科 創造工学専攻

***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 名誉教授

*****東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

提言を行い、以後、アップリンクに 145 MHz 帯の周波数割り当てが認められない事例が増えてきた³⁾。結果として、430 MHz 帯のアマチュア無線帯を利用する場合、アップリンクとダウンリンクともに、430 MHz 帯の周波数帯を使用することが現実的であり、アップリンクとダウンリンクに使用する周波数帯が近いため、実質的に半二重通信となる。

本研究では、CubeSat 用の通信系として、430 MHz 帯の半二重通信による通信システムおよび衛星-地上通信に必要なソフトウェアを開発した。本ソフトウェアは、汎用性の高いプログラム言語である Python でコーディングし、Linux ベースの OS を搭載する OBC (OnBoard Computer) 上で動作する。類似の OBC を採用する超小型衛星への移植が容易であり、波及効果が見込まれる。

2. 通信系システムの概要

KOSEN-1 は、JAXA の革新的衛星技術実証 2 号機のテーマ公募により採択され、2021 年 11 月 9 日にイプシロンロケット 5 号機により打ち上げられ、予定軌道に投入された。KOSEN-1 では、CubeSat における新しい宇宙技術実証の 1 つとして、「超小型 Linux マイコンボード Raspberry Pi Zero ベースの OBC の宇宙実証」を目的としている⁴⁾。図 1 に KOSEN-1 のシステム構成図を示す。6 つのサブシステムから構成されており、本通信システムに関するサブシステムは、主に通信系および OBC 系である。通信系システムの性能試験で利用したブレッドボードモデル (BBM) を図 2 に示す。

通信システムは、430 MHz 帯の超小型人工衛星用 FMCW 送受信機 (TXE430MFCW-302A-RU, 以下 302A-RU と表記)、衛星搭載用 TNC (Terminal Node Controller) 基板である CubeCom, OBC である Raspberry Pi CM1 (Compute Module) / CubePi board の 3 つの機器で構成される。

302A-RU 無線機は、西無線研究所が開発した衛星搭載用無線機である⁵⁾。多くの CubeSat で運用実績のある 301A 無線機の後継機種であり、送信機と受信機の一体型である。

CubeCom は衛星用 TNC であり、1 U タイプの CubeSat である Stars-A0 への搭載実績がある⁶⁾。アップリンク時には、地上局からのコマンドを受信・復調して OBC に伝え、ダウンリンク時には、OBC からのデータを AX.25 パケットに変換し 302A-RU 無線機に伝える。なお、CubeCom には 2 つの PIC マイコンを搭載しており、アップリンク通信とダウンリンク通信を独立して処理する。

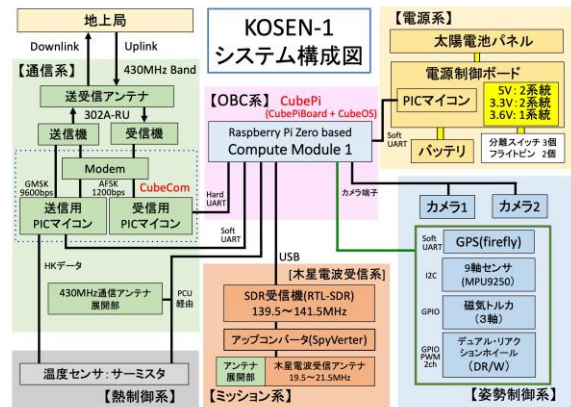


図 1 KOSEN-1 のシステム構成図

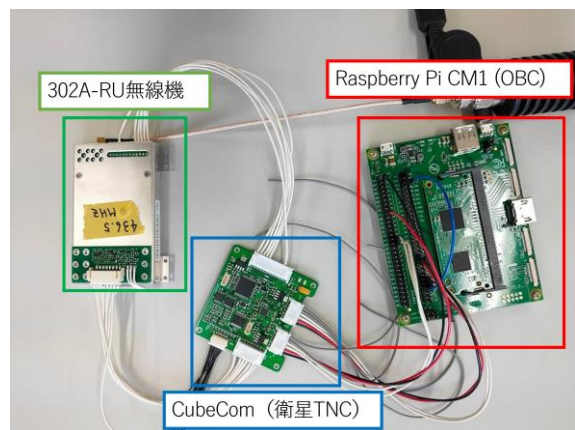


図 2 通信系システムの BBM

表 1 各通信方式のアップリンク・ダウンリンク対応表

通信方式	AFSK	GMSK	CW
伝送速度	1200 bps	9600 bps	18 wpm
アップリンク	コマンド送信		
ダウンリンク	HK データ	ミッションデータ	HK データ*

* 6パラメータのみ

Raspberry Pi CM1 は、システムへの組み込みが容易な SODIMM モジュール型の OBC であり、Raspberry Pi Model B+や Raspberry Pi Zero と同じ CPU (Broadcom BCM2835 SoC) を搭載している。衛星のフライトモデルでは、専用開発した CubePi ボードを用いるが、動作検証で用いるブレッドボードモデルでは、既製品の Raspberry Pi CM1 I/O ボードを利用する。CubePi ボードは、KOSEN-1 衛星に特化させており、9 軸センサ、宇宙用 GPS など、各種センサを基板実装しているが、CM1 I/O ボードとはソフトウェア完全互換である。OS には、Linux ベースの Raspberry Pi OS を実装した。

表 1 に、KOSEN-1 の通信システムにおける各通信方式のアップリンク、ダウンリンク対応表を示す。アップ

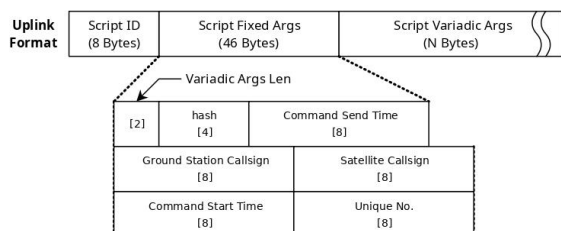


図3 KOSEN-1における管制コマンドの構成

リンクの通信方式では、低速で信頼性の高い1200 bpsのAFSK (Audio Frequency Shift Keying) を用いる。アップリンクでは、短い制御コマンドや応答情報を送信するため、伝送速度より信頼性を優先した。ダウンリンクの通信方式としては、3つの通信方式を利用する。CW (Continuous Wave) は、消費電力が小さいため、必要最低限のHK (House Keeping) データを定期的に送信する。AFSK は、HK データの送信に利用する。高速伝送が可能な9600 bpsのGMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying) により、ミッションデータを送信する。430 MHz 帯をアップリンクとダウンリンクの両方に利用するため、実質的に半二重通信での運用を行う。衛星側では、CW ビーコンを発信しない区間を24秒として、その間はAFSKの受信待ち受けとする。このとき、CubeComでパケット受信を検知するとOBCに送られ、コマンド実行後に、応答情報をAFSKで送信する。コマンド内容によって、更なるデータ伝送を開始する。1パス中に運用できる可視時間は短いため、伝送量が必要な運用をする場合は、日本上空に近い連続する2~3パスを利用した予約運用を行うのが現実的である。

KOSEN-1が提供しているアマチュア無線を利用したサービスについて述べる。木星電波観測用の6.6 mダイポールアンテナを用いて、地上からの21 MHz帯のモールス信号を受信し、送信元のコールサイン情報を衛星上で解読する。解読した情報は定期的にまとめて430 MHz帯のAFSKで地上へ送信する。CubeSatで、このように長いアンテナを展開することは稀であるため、貴重なアマチュア無線サービスになると考えている。なお、430 MHz帯のCWでは、衛星のコールサインや衛星名をHKデータと共に、ビーコンとして発信しており(詳細は、表3を参照)、アマチュア無線家に受信の機会を提供している。

3. 通信系のソフトウェアシステムの概要

本節では、衛星との通信時に必要となる通信系システムのソフトウェア面の説明について、アップリンク時とダウンリンク時に分けて述べる。

表2 管制コマンドのフィールド表

名称	説明
Script ID	実行するスクリプトファイルのID
Variadic Args Len	コマンドの変長引数 script-option-args の長さ
Hash	KOSEN-1 管制地上局の識別のためのハッシュ値 (コマンド内容から生成)
Command Send Time	地上局からのコマンド送信時刻
Ground Station Callsign	地上局 (コマンドの送信元) の識別符号 (コールサイン)
Satellite Callsign	衛星 (コマンドの送信先) の識別符号 (コールサイン)
Unique No.	コマンド単位で一意に割り当てられる値
Command Start Time	スクリプトの立ち上げ予定時刻
Script Variadic Args	スクリプトの実行に必要な情報

表3 CWのデータ形式

名称	説明
Downlink Command Send Time	ダウンリンク管制コマンドの送信時刻
Downlink Command Uniq. No.	ダウンリンク管制コマンドに一意に割り当てられる値
Sequence No.	チャンクの通し番号
Chunk Size	ヘッダ長を含むチャンクのバイト数

3.1. アップリンク時

アップリンクでは、管制コマンドを衛星に送信し、衛星で管制コマンドに応じた処理を実行する。衛星側では、CWによるダウンリンクを行っていない時間帯に、AFSK方式での受信を待機し、コールサインがKOSEN-1衛星の場合には、AX.25パケットを受信する。受信後はCubeComによってFCS (Frame Check Sequence) チェックが行われ、誤りがなければ、CubeComによりそのパケットからInfo部を取り出し、Info部の内容をOBCで処理する。図3にKOSEN-1における管制コマンドの構成を、表2に管制コマンドのフィールド表を示す。

3.2. ダウンリンク時

CWによるダウンリンクでは、定型文として固定メッセージとHKデータを3回に分けて送信する。CWのデータ形式を表3に示す。このCW定型文はOBCで一度設定すると、CubeComのEEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) に記憶され、OBCの再起動や動作停止によらず、OBCを介さずにCubeComから直接送信する。送信期間や電鍵速度などはOBCで設定する。OBCから割り込みが発生した場合には、OBCで指定したCW可変文を送信できる。

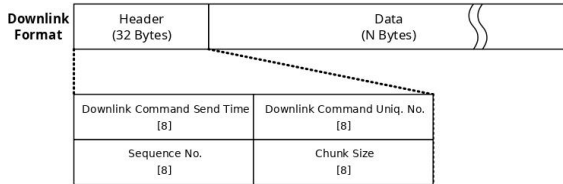


図4 AFSK/GMSK ダウンリンクの packets 構成

表4 AFSK/GMSK ダウンリンクのデータ形式

名称	説明
JRSXGJ KOSEN-1	32文字までのASCII文字列による固定メッセージ: コールサインおよび「KOSEN-1」の文字列
S1 RSSI BAT-T BAT-V BAT-I	信号1 (S1) として, 観測時間内の最大受信信号強度 (RSSI), バッテリ温度 (BAT-T), 電圧 (BAT-V), 電流 (BAT-I)
S2 LOAD-I SC-Z SC-Y SC-X	信号2 (S2) として, 負荷電流 (LOAD-I), XYZ面のソーラーパネルの電流値 (SC-Z, SC-Y, SC-X)

AFSK および GMSK によるダウンリンクは, 管制コマンドによる命令に基づいて行われ, OBC の割り込み制御によって送信を実行する. ミッションの場合, OBC の制御下で実行され, 実行結果はファイルに保存される. ダウンリンクするデータをファイル単位で指定し, AX.25 パケットで送信可能なチャンクと呼ばれる一まとまりに分割した後, チャンクごとにパケット通信する.

なお, 一部エスケープを必要とする文字列が存在するが, 原則としてバイナリファイルを送信可能である. ただし, AX.25 パケットは連続送信を行っても, 自身のパケットのシーケンス番号 (送信したデータの順序を示す値) を保存しない. そのため Info 部のヘッダ情報として格納する必要がある.

ダウンリンクの packets 構成は図4のようになり, 表4にヘッダ部の各フィールドの説明を記載した. 一般に, 衛星通信ではビット誤りが発生するため, 欠落した packets は再送要求を行う必要がある. 再送要求については, 実行するコマンドの Unique No. と, 欠落したダウンリンク packets の Sequence No. で指定する.

3.3. 汎用開発環境による多地点開発

KOSEN-1 のソフトウェアシステムを開発するにあたって, 6高専の20人以上の高専学生が関わった. 学生は, 工学系の電気系, 情報系, 機械系などの複数の学科に所属しており, 高校1年生から大学2年生に相当する. システム開発に必要な開発環境としては,

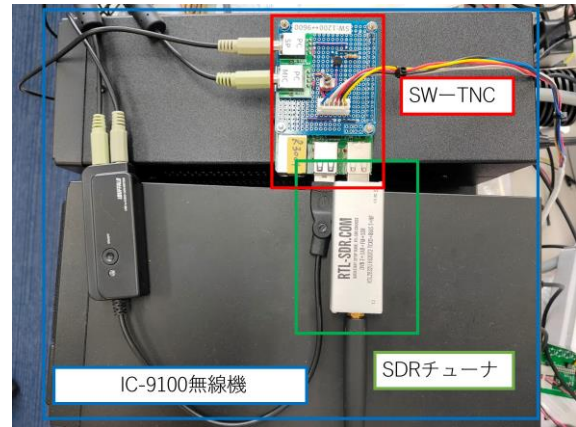


図5 地上局のシステム構成

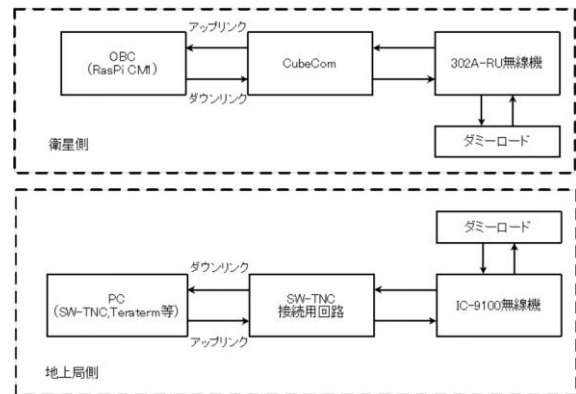


図6 性能試験での機器構成

```
GSCALL audio level = 19(9/9) [NONE] !!!!!
[0.2] GSCALL>TESTCS:00os000111E4A860AC8018MMMMMMMMNNNNNNNC6E75B4B000000/home/
pi/test.txt<0x0d>
TESTCS audio level = 32(9/9) [NONE] !!!!!
[0.3] TESTCS>RECEIV:00os0001,60AC8018C6E75B4B 0c9x0d>
TESTCS audio level = 31(9/9) [NONE] !!!!!
[0.3] TESTCS>RECEIV:06-sh-nw,60AC8018C6E75B4B 200 0x0d>
```

図7 コンソール出力画面 (衛星側から直接ダウンリンク実行した場合)

汎用的な OBC である Raspberry Pi CM1, Linux ベースの OS, ライブラリが多くユーザ数の多いプログラミング言語である Python が必要となる. 特に, 工学系の学生にとって, これらの環境のいくつかに関わった経験のある学生は多く, KOSEN-1 開発に関わる敷居を下げている. 気軽に部分的に開発に参加し始める学生がおり, コミュニティを大きくし, 全体としての開発効率を上げることにつながった.

4. 通信系システムの性能試験

通信系システムの性能試験として, AFSK/GMSK パケットによるデータ通信の可否を確認した. 性能試験で使用した衛星側の機器を図2に示したが, 地上局側の機器を図5に示す. 最初に, AFSK および GMSK のダウンリンクの動作確認のために, 図6に示す機器構成で, 衛星側の OBC にて AFSK および GMSK パケットを作成して送

```

receive msg
00os0001
['sudo', '/home/pi/comm-sys/nowstart.sh', '/home/pi/comm-sys/script/00os0001/00o
s0001.sh', '11', '60AC8018', 'MMMMMMMM', 'NNNNNNNN', 'C6E75BAB', '/home/pi/test.
txt']

```

図8 コンソール出力画面（アップリンクにより衛星側がパケット直接ダウンリンク実行した場合）

信した。地上局の IC-9100 無線機でパケット受信し、SW-TNC (Software-TNC) 接続用回路を使ってデータを取り出し、PC の TeraTerm で表示した。SW-TNC 接続用回路では、IC-9100 無線機からの音声パケット信号を音声信号に変換し、IC-9100 無線機の PTT (Push to Talk) を始動させる。

図7は、ダウンリンク時に衛星側で直接コマンド実行した場合のコンソール出力画面である。軌道上の衛通信時にはコンソール画面上でのデータ出力は行われないが、動作検証のために出力した。出力末尾のステータスコード「0」は、シェルスクリプトの正常終了を表す。ステータスコード「200」は、コマンドが即時実行されたか、実行時刻が指定時刻であったことを表す。図7ではステータスコードが「0」および「200」であり、衛星が即時実行による管制コマンドを受け付け、衛星内部でシェルスクリプトが正しく実行されたことを確認できる。

図8は、アップリンクで管制コマンドを受信した際のコンソール出力画面である。軌道上の衛星通信時にはコンソール画面上での表示は行われないが、動作検証のために出力した。コンソール出力では、「receive msg」を出力後に、受信したパケットの Info 部の情報を出力されており、管制コマンド「00os0001」が正しく受信された。以上の性能試験により、AFSK および GMSK のダウンリンクとアップリンクの正常動作を確認した。

5. まとめ

本稿では、2 U タイプの CubeSat (KOSEN-1 衛星) のために開発した通信系システムについて述べた。昨今の状況から、CubeSat でアマチュア無線帯を利用する場合、430 MHz 帯の半二重通信は有力な選択肢となっている。本システムは、430 MHz 帯の衛星搭載用無線機 302A-RU、専用の TNC 基板 CubeCom、OBC として Raspberry Pi CM1 ボードの組み合わせで構成し、衛星-地上局間の通信を担うソフトウェアは、汎用性の高い Linux OS 上で動作するように設計した。通信方式としては、ダウンリンクに CW, AFSK 1200 bps, GMSK 9600 bps を利用でき、アップリンクに AFSK 1200 bps を利用する。通信システム系の機器を接続した性能試

験では、アップリンクとダウンリンクの一連の動作が正常に機能することを確認した。他衛星で利用しやすいように、機器やソフトウェアなどは Python でコーディングするなど汎用性を高めており、KOSEN-1 の後継機となる KOSEN-2 での本通信系システムの採用が確定している。今後は、地上局設備を持つ複数高専での連携により⁷⁾、KOSEN-1 衛星の長期間の通信系運用実績を確認し、他のミッションから利用しやすい通信系システムとなるように改良を続ける。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)西無線研究所 西裕治氏、深井貫氏、小島誠氏、元奈良工業高等専門学校 浅井文男教授から貴重なご指導とご助言を賜りました。

本研究は、文部科学省の令和 2 年度宇宙航空科学技術推進委託費・宇宙航空人材育成プログラムによる支援を受けました。

参考文献

- 1) 今井一雅, “高専スペース連携プロジェクトについて”, 高専スペース連携, 2017.08.02, <http://space.kochi-ct.jp/> (2021.11.15)
- 2) 大西哲他, “単一周波数帯で駆動する CubeSat 用無線機の制御用ソフトウェアの開発と教材応用への検討”. 信学技報, 第 119 巻 LOIS2019-60, pp. 25-29, 2020.
- 3) IARU, Satellite frequency coordination in the two-metreband, https://www.iaru.org/wpcontent/uploads/2019/12/satellite_frequency_coordination_in_the_two.pdf (2021.11.15)
- 4) 今井一雅他, “高専連携技術実証衛星 KOSEN-1 について (3)”, 第 65 回宇宙科学技術連合大会, OS-16-4 3I15, 2021
- 5) 西裕治, “超小型人工衛星用 FMCW 送受信機”, 西無線研究所. 2021/10/1. <http://www.nishimusen.co.jp/eisei2016/eisei-302A-RU.htm> (2021.11.15)
- 6) 押森弘睦, 徳丸里歩, “静大衛星 2018 STARS-Me & Stars-A0”, UNISEC ワークショップ. 2018, http://unisec.jp/workshop/2018/files/26_shizuoka_univ_satellite.pdf (2021.11.15)

7) 徳光政弘他. “超小型衛星のためのアマチュア無線帯地上局のネットワーク活用に関する検討”, 宇宙科学情報解析論文誌, 第 10 号. pp. 139-151, 2021